



## 关于持久性有机污染物的 斯德哥尔摩公约

---

持久性有机污染物审查委员会  
第十次会议  
2014年10月27-30日，罗马

### 持久性有机污染物审查委员会第十次会议工作报告

#### 增编

#### 关于十溴二苯醚（商用混合物，商用十溴二苯醚）的风险简介

在其第十次会议上，持久性有机污染物审查委员会在载于秘书处说明（UNEP/POPS/POPRC.10/3）的草案基础上，在其第 POPRC-10/2 号决定中通过了关于十溴二苯醚（商用混合物，商用十溴二苯醚）的风险简介。经过修订的上述风险简介案文载于本增编附件，未经正式编辑。

附件

**十溴二苯醚  
(商用混合物)  
风险管理评估**

十溴二苯醚特设工作组撰写  
持久性有机污染物审查委员会

2014年10月

目录	
执行摘要	4
一. 引言	6
1.1 拟议物质的化学特性	6
1.2 审查委员会关于附件 D 信息的结论	8
1.3 数据来源	8
1.4 该化学品在其他国际公约和论坛的现状	8
二. 与风险简介有关的摘要信息	9
2.1 来源	9
2.1.1 生产、贸易和库存	9
2.1.2 用途	10
2.1.3 向环境释放	10
2.2 环境归宿	13
2.2.1 持久性	13
2.2.2 降解和脱溴	14
2.2.3 生物利用度和组织分配情况	16
2.2.4 生物累积性	17
2.2.5 远距离环境迁移潜力	20
2.3 接触	22
2.3.1 环境浓度水平和趋势	22
2.3.2 人类接触	24
2.4 对关切截至点的危害评估	26
2.4.1 对水生生物的毒性	27
2.4.2 土壤生物和植物中的毒性	29
2.4.3 在鸟类中的毒性	29
2.4.4 在陆生哺乳动物中的毒性	30
2.4.5 人体毒性	32
2.4.6 混合毒性与多重压力的综合影响	33
三. 信息综述	35
四. 结论	38
参考文献	39

## 执行摘要

1. 商用十溴二苯醚（c-decaBDE）是一种多溴二苯醚（PBDE）制剂，由十溴二苯醚（BDE-209）加少量九溴二苯醚和八溴二苯醚构成。十多年来，商用十溴二苯醚一直在接受关于其潜在健康和环境影响的调查，一些国家和地区严格限制商用十溴二苯醚，并对其采取自愿风险管理行动。
2. 商用十溴二苯醚消费在 2000 年代初期达到顶峰，目前仍然在全世界使用。十溴二苯醚被用作添加型阻燃剂，并具有多种用途，包括塑料/聚合物/复合材料、纺织品、粘合剂、密封剂、涂料和油墨。含塑料组分的商用十溴二苯醚被用于制作电脑和电视的外壳、电线和电缆以及管道和地毯。商用十溴二苯醚被用在商用纺织品中，主要用于公共建筑和运输，并在室内家具纺织品中使用。在其生命周期的所有阶段，商用十溴二苯醚都会排放到环境中，但据推算其在使用寿命期间和报废阶段的排放量最高。来自工业点源的排放量也很大。在使用商用十溴二苯醚生产纺织品和电子产品时，会由于物料的直接排放或生产和处置过程中的排放导致环境排放和越境空气污染。
3. BDE-209 不易溶于水（ $<0.124$  微克/升， $24^{\circ}\text{C}$ ），在环境中可强烈吸附于有机物，易于分散于沉积物和土壤。该物质的持久性非常强，据报告其在这些媒介中的环境半衰期通常超过 180 天。
4. BDE-209 很普遍，是全球环境中最常见的多溴二苯醚之一。在环境和生物群检测到 BDE-209 时通常也会检测到其他多溴二苯醚。监测数据显示，BDE-209 在沉积物和土壤中的浓度很高，但也见于世界各地的生物群，有报告称其在一些物种中的水平很高。在城市地区，该物质在污水排放口和电子废物循环再造工厂附近区域的水平一般最高。在空气中，BDE-209 与颗粒物结合，致使其不能实现光解降解，而且可以远距离传输。据估计，其在大气中的半衰期为 94 天，但实际可超过 200 天。在来自偏远地区的环境和生物群样品中也检测到 BDE-209，它也是在北极空气和沉积样品中发现的主要多溴二苯醚之一。2002-2005 年，BDE-209 在北极空气和一些北极生物中的时间趋势数据呈上升水平，但目前可能正趋于稳定。
5. 由于 BDE-209 的尺寸大，制约了其通过被动扩散穿过细胞膜的能力，导致其生物利用率有限。不过，生物监测数据表明，BDE-209 具有生物可利用性，并且已被人类和其他生物摄入。已经在各种不同生物体和包括人类血清、脐带血、胎盘、胎儿、母乳和哺乳期奶牛的牛奶在内的生物样品中发现 BDE-209。报告的一些物种中的 BDE-209 水平接近报告的不良效应浓度。在啮齿动物和鸟类中，显示少量 BDE-209 穿过血-脑屏障进入大脑。也有证据显示 BDE-209 从鱼类和鸟类的成体转移进入卵，并且可以通过胎盘有效进入哺乳动物的胚胎。对于人类而言，目前掌握的 BDE-209 估计摄入量也指出粉尘接触的重要性，特别是对幼龄儿童。报告在幼儿和儿童体内发现了比成人更高水平的多溴二苯醚和 BDE-209。通过饮食摄入水生生物似乎是最重要的暴露途径。
6. 一些证据表明，BDE-209 具有生物蓄积性，至少对一些物种而言是如此。可用生物累积数据含糊不清，这在很大程度上反映出物种和组织在摄取、代谢、消除和暴露方面的差异以及在衡量 BDE-209 方面的挑战。
7. BDE-209 在环境基质和生物群中脱溴后成为更持久、毒性更强和更具生物累积性的多溴二苯醚，其中包括已被列入《斯德哥尔摩公约》的持久性有机污染物溴二苯醚，这已引起多项评估的关注。多溴二苯醚的若干同系物并非为任何商业混合物的组成部分，主要在生物群中发现，但也存在于环境中，它们被认为是 BDE-209 脱溴的证据。由于商用十溴二苯醚及过去释放的商用五溴二苯醚和八溴二苯醚的脱溴，导致生物体经常暴露在大量的多溴二苯醚中。

8. BDE-209 毒性研究提供的证据证明，其有可能对一些物种具有生殖健康和产出方面的不利影响以及发育和神经毒性作用。BDE-209 和/或其降解产物也可能干扰内分泌，影响甲状腺激素的动态平衡。基于共同行动模式（未充分确定）和常见不良结果，人们担心 BDE-209 和其他多溴二苯醚可能会以叠加或协同的方式发挥作用，在达到环境相关浓度的情况下在人类和野生动物中诱导发育神经毒性。受控实验室研究得出的导致鸟类死亡率上升和影响青蛙发育的可见效应浓度引起了人们对自然环境浓度中可能出现的负面影响的关注。
9. BDE-209 极为持久，而且生物可以同时暴露于多种多溴二苯醚，再加上 BDE-209 和/或其降解产物等内分泌干扰物即使在环境浓度低的情况下也能引起不良反应，这些都增加了产生长期不利影响的可能性。
10. 根据现有证据，可以得出结论认为，由于主要成分为 BDE-209 的商用十溴二苯醚能够远距离环境迁移，因此其有可能导致显著不利于人体健康和环境的影响，因此有必要采取全球行动。

## 1. 引言

11. 2013年5月13日，作为《斯德哥尔摩公约》缔约国，挪威提交了一份提案，其中建议将十溴二苯醚（商用混合物，商用十溴二苯醚）列入《公约》的附件A、B和/或C。该提案（UNEP/POPS/POPRC.9/2）依照《公约》第8条提交，2013年10月的持久性有机污染物审查委员会第九次会议审查了该提案。

12. 在本文件中，缩略语 c-decaBDE 被用于指称技术用途或商业用途的十溴二苯醚产品。十溴二苯醚（BDE-209）系指完全溴化的单一多溴二苯醚，在其他地方有时也指十溴二苯醚。

### 1.1 拟议物质的化学特性

13. 根据《公约》的附件E，本风险简介涉及商用十溴二苯醚及其降解产物。商用十溴二苯醚是一种商用的多溴二苯醚制剂，它广泛用作纺织品和塑料中的添加型阻燃剂，此外还用作涂料和油墨中的胶黏剂（欧洲化学品管理局，2013年b）。商用十溴二苯醚主要由同系物BDE-209（≥97%）构成，此外还包含少量的其他多溴二苯醚同系物，例如九溴联苯醚（0.3%-3%）和八溴二苯醚（0%-0.04%）。Chen（2007年a）报告称，来自中国的两种商用十溴二苯醚产品的八溴二苯醚和九溴二苯醚含量范围在8.2%至10.4%之间，这表明某些商用混合物的杂质含量较高。十溴二苯醚历来的含量范围在77.4%-98%之间，有报告称其中还包含少量的同系物，也即九溴二苯醚（0.3%-21.8%）和八溴二苯醚（0%-0.85%）（欧洲化学品管理局，2012年a；美国环保局，2008年；RPA，2014年）。出现的所有三、四、五、六和七溴二苯醚的浓度通常低于0.0039%w/w（欧洲中央银行，2002年；欧洲化学品管理局，2012年a）。微量的其他化合物也可能作为杂质出现，这些化合物被认为是羟基溴联苯。此外，有报告称在一些商用十溴二苯醚产品中存在多溴代二苯并二噁英和多溴二苯并呋喃（PBDD/Fs）杂质（Ren，2011年）。

14. 据现有资料显示，目前可从全球几个生产商和供应商那里获得商用十溴二苯醚（Ren，2013年a；RPA，2014年），且目前使用不同的商品名上市销售（表1）。

15. 下文图1及表1和2列示了商用十溴二苯醚的主要成分BDE-209的化学数据（欧洲化学品管理局，2012年a）。如同其他多溴二苯醚一样，BDE-209与多氯联苯的结构相似。对于商用十溴二苯醚中微量存在的八溴和九溴二苯醚，其相关化学数据随同风险简介佐证文件的补充资料一起提供（UNEP/POPS/POPRC.10/INF5）。商用十溴二苯醚降解产物的相关信息载于第2.2.2节和UNEP/POPS/POPRC.10/INF5。

图1. 结构式

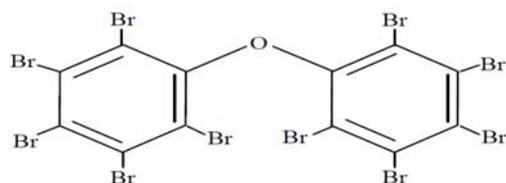


表1. 商用十溴二苯醚及其主要成分BDE-209的化学特性

化学文摘社编号：	1163-19-5 <sup>1</sup>
化学文摘社名称：	苯，1, 1'-氧代双[2, 3, 4, 5, 6-五溴-]

国际理论化学和应用化学联合会名称:	2, 3, 4, 5, 6-五溴-1 (2, 3, 4, 5, 6-五溴苯基) 苯
欧洲委员会编号:	214-604-9
欧洲委员会名称:	十溴二苯基醚
分子式	C <sub>12</sub> Br <sub>10</sub> O
分子量:	959.2 克/摩尔
别名:	decabromodiphenyl ether , decabromodiphenyl oxide , bis ( pentabromophenyl ) oxide , decabromodiphenyl oxide , decabromo phenoxybenzene , benzene 1, 1' oxybis-, decabromo derivative , decaBDE, DBDPE <sup>2</sup> , DBBE, DBBO, DBDPO
商品名:	DE-83R, DE-83, Bromkal 82-ODE, Bromkal 70-5, Saytex 102 E, FR1210, Flamecut 110R. FR-300-BA (1970 年代生产, 目前已不再在市场上出售 (加拿大环境部, 2010 年) )。

<sup>1</sup> 以前曾使用的化学文摘社编号包括 109945-70-2、145538-74-5 和 1201677-32-8。目前这些编号已正式删除, 但一些供应商和制造商可能仍在实际使用。

<sup>2</sup> DBDPE 也是十溴二苯乙烷 (化学文摘社编号: 84852-53-9) 的缩写。

表 2. 商用十溴二苯醚及其主要成分 BDE-209 的相关理化特性综述

属性	数值	参考资料
温度为 20°C，气压为 101.3 千帕时的物理状态	白色或类白色微细晶状粉末	欧洲中央银行（2002 年）
熔点/冰点	300-310°C	死海溴化物集团（1993 年），转引自欧洲中央银行（2002 年）
沸点	温度高于 320°C 时分解	死海溴化物集团（1993 年），转引自欧洲中央银行（2002 年）
蒸汽压	21°C 时为 $4.63 \times 10^{-6}$ 帕	Wildlife International 有限公司（1997 年），转引自欧洲中央银行（2002 年）
水溶性	25°C 时低于 0.1 微克/升（圆柱层析法）	Stenzel 和 Markley（1997 年），转引自欧洲中央银行（2002 年）
辛醇-水分配系数（对数值）	6.27（利用产生柱法测量） 9.97（利用高效液相色谱法估计）	MacGregor 和 Nixon，1997 年；Watanabe 和 Tatsukawa，1990 年，转引自欧洲中央银行（2002 年）
辛醇-空气分配系数（对数值）	13.1	Kelly（2007 年）

## 1.2 审查委员会关于附件 D 信息的结论

16. 持久性有机污染物审查委员会审查了挪威提出的关于将商用十溴二苯醚列入《关于持久性有机污染物的斯德哥尔摩公约》的提案，并审查了各成员和观察员在委员会第九次会议上提供的补充科学资料，委员会得出结论认为十溴二苯醚符合附件 D 所述筛选标准（持久性有机污染物审查委员会第 9/4 号决定）。

## 1.3 数据来源

17. 风险简介并未详尽审查所有可用数据，只介绍了与《公约》附件 E 和附件 D 所载标准有关的最关键的研究和证据。风险简介的核心是商用十溴二苯醚的主要成分 BDE-209 及其降解产物，特别是经由非生物和生物降解形成的低溴多溴二苯醚（见第 2.2.2 节所述）。由于多溴二苯醚的若干低溴降解产物被广泛认为是具有持久性、生物累积性和毒性/高持久性、高生物累积性的 PBT/vPvB 物质和/或持久性有机污染物，因此人们认为没有必要重新评估这些化合物的性质（持久性有机污染物审查委员会，2006 年；持久性有机污染物审查委员会，2007 年；欧洲化学品管理局，2013 年 a, b，加拿大环境部，2010 年，表 3.2-3.4；UNEP/POPS/POPRC.10/INF5）。不过，第 2.4.6 节讨论了 BDE-209 与其他多溴二苯醚的混合物的潜在毒性。

18. 编写风险简介时使用了挪威 2013 年提交的附件 D 信息及缔约方和包括非政府组织和工业界在内的其他利益攸关方提交的附件 E 信息。以下缔约方和观察员根据附件 E 规定的程序提交了资料：阿根廷、奥地利、保加利亚、加拿大、中国、克罗地亚、丹麦、德国、日本、墨西哥、摩洛哥、尼泊尔、荷兰、

新西兰、塞尔维亚、瑞典、美国、溴科学与环境论坛（BSEF）、国际消除持久性有机污染物网络（IPEN）和因纽特人北极圈理事会。《公约》的网站（www.pops.int）上登出了所有提交的附件 E 资料。

19. 评估了从国际研究所科学网和 PubMed 等科学数据库获得的最新科学文献以及“灰色”文献，例如政府报告、风险和危害评估、行业概况介绍等。为了尽可能最好地概述现有的数据/文献（其中涵盖了 984 份报告和同行审议科学出版物（Kortenkamp, 2014 年），重点强调要对可获得的现有风险评估和报告进行摘录，并更详细地描述新文献。

20. 欧盟、加拿大、联合王国和美国以前都曾对商用十溴二苯醚及其主要成分 BDE-209 进行评估并出版了评估结果（欧洲中央银行，2002 年，2004 年；欧洲化学品管理局，2012 年 a；加拿大环境部，2006 年，2010 年；联合王国环境署，2009 年；美国环保局，2008 年）。该化学品在其他国际公约和论坛的现状

21. 十多年来，商用十溴二苯醚一直在接受关于其潜在健康和环境影响的审议。一些国家和地区以及一些主要的电子公司已经采取措施严格限制使用商用十溴二苯醚（情况概述见：UNEP/POPS/POPRC.9/2；Ren, 2011 年）。

22. 1992 年，OSPAR 行动计划将商用十溴二苯醚和其他溴化阻燃剂（BFRs）列为优先事项，1998 年，BDE-209 和其他多溴二苯醚被列入“优先行动化学品”清单和 OSPAR 的联合评估和监测方案。OSPAR 推动了欧盟的商用十溴二苯醚风险降低策略和电子废弃物立法。

23. 1995 年，经合组织成员国同意监测一些溴化阻燃剂全球制造商（其中一些是商用十溴二苯醚制造商）作出的自愿性行业承诺（VIC），以开展一些风险管理行动。美国、欧洲和日本实施了自愿性行业承诺。欧洲此后不再生产且美国继续淘汰商用十溴二苯醚（见下文第 2.1.1 章）。日本正在履行自愿性行业承诺。与此同时，经合组织在成员国对含溴化阻燃剂的产品废物管理做法开展了调查。《含溴化阻燃剂产品焚烧报告》记录了这次调查的结果（经合组织，1998 年）。在经合组织的环境、健康和方案下编写了小岛屿发展中国家 BDE-209 初步评估简介（SIAP），该评估简介由 SIAM 16 通过，后于 2003 年获得经合组织联席会议核可。关于商用十溴二苯醚和其他四种溴化阻燃剂的灾害/风险信息表已于 2005 年、2008 年和 2009 年更新（经合组织，2014 年）。包括 BDE-209 在内的多溴二苯醚作为引起关切的化学品被列入世卫组织/环境署《2012 年内分泌干扰物科学研究现状》报告（世卫组织/环境署，2013 年）。在欧盟，由于具有高持久性和高度生物累积性，而且被大量广泛使用，商用十溴二苯醚已根据欧盟《化学品注册、评价、授权和限制条例》（第 1907/2006 号条例）列入高度关注物质候选清单，以便获得授权。

## 2. 与风险简介有关的摘要信息

### 2.1 来源

#### 2.1.1 生产、贸易和库存

24. 全球商用十溴二苯醚消费在 2000 年早期达到峰值（Earnshaw, 2013 年）。不过，由于监管限制有限，商用十溴二苯醚仍在全世界使用（表 2.1-2.3, UNEP/POPS/POPRC.10/INF5）。过去的生产数据显示，全世界生产的所有多溴二苯醚中约有 75% 为商用十溴二苯醚（RPA, 2014 年）。商用十溴二苯醚在 1970-2005 年期间的总产量在 110 万-125 万吨之间，与多氯联苯的产量规模相似（持久性有机污染物审查委员会，2010 年 c；Breivik, 2002 年）。就全球而言，各国和各大陆之间对商用十溴二苯醚的总需求量大相径庭（表 2.2 和 2.3, UNEP/POPS/POPRC.10/INF5）。

25. 目前商用十溴二苯醚的总生产规模仍是未知，而且现在仅能获取某些国家的审查、贸易和库存数据。关于在混合物（化学制剂，还包括树脂、聚合物和

其他基材)和物品(无论是半成品材料、材料或部件或者成品)中进口的商用十溴二苯醚的吨数,几乎没有相关信息。全球各个地区都有溴化阻燃剂生产设施(例如,保护信天翁和海燕协定,2007年;RPA,2014年;附件E,IPEN)。目前尚不清楚其中有多少设施在生产商用十溴二苯醚。在主要的溴化阻燃剂生产国中,已知中国和印度在生产和出口商用十溴二苯醚(Xiang,2007年;Chen,2007年b;Xia,2005年;Zou,2007年;附件E,IPEN和中国)。日本也生产商用十溴二苯醚,但主要在国内消费(附件E,日本)。欧盟和加拿大不再生产而美国继续淘汰商用十溴二苯醚(欧洲中央银行,2002年;欧洲化学品管理局,2012年a,b;加拿大环境部,2008年;美国环保局,2012年)。

26. 目前,中国是最大的商用十溴二苯醚制造商和供应商,每年的产量约为21000吨(Ni,2013年)。中国约有20家公司声称供应商用十溴二苯醚(附件E,IPEN)。日本每年制造约600公吨商用十溴二苯醚(附件E,日本),目前日本有两家制造商(附件E,IPEN)。2002年,日本的商用十溴二苯醚需求量为2200吨/年,库存量约为60000吨(Sakai,2006年)。2013年,假定不出口,日本的商用十溴二苯醚总消费量为1600吨,再加上1000吨的进口量。印度有六家制造商和/或供应商(附件E,IPEN),但总产量不明。在欧洲,商用十溴二苯醚已于1999年退出生产,但仍大量进口(欧洲中央银行,2002年;欧洲化学品管理局,2012年a,c;RPA,2014年(出版中))。在美国,主要生产商和进口商都承诺到2013年底结束所有用途。2012年,该国包括国内生产和进口在内的年产量为8215吨/年。加拿大于2008年禁止制造八溴-、九溴-和十溴二苯醚,三个主要制造商都承诺到2013年自愿淘汰所有对加拿大的出口(加拿大环境部,2008年、2013年)。

27. 除了纯净商用十溴二苯醚库存之外,技术领域经过处理的物品中也存在大量的商用十溴二苯醚库存(英国环境署,2009年;Sakai,2006年)。

### 2.1.2 用途

28. 商用十溴二苯醚是一种通用的添加型阻燃剂,通过与原料物理结合来抑制原料燃烧和降低火焰蔓延速度。它可与各种不同的材料兼容。其应用领域包括塑料/聚合物/复合材料、纺织品、粘合剂、密封剂、涂料和油墨(例如,欧洲化学品管理局2012年c,2013年a;2014年RPA(出版中);Sakai,2006年;表2.4,UNEP/POPS/POPRC.10/INF5)。

29. 塑料/聚合物最终用途包括电脑和电视机的外壳、电线电缆、管道和地毯(BSEF,2013年;美国环保局,2014年;表2.5,UNEP/POPS/POPRC.10/INF5)。商用十溴二苯醚通常在塑料/聚合物中使用,按重量计其负载量为10%-15%,但据报告称在某些情况下其负载量高达20%(欧洲化学品管理局,2012年c)。日本的一项研究称,旧电视塑料部件的溴含量中约98%为商用十溴二苯醚(Tasaki,2004年)。在再生塑料制成品,包括食品接触材料中同样发现了BDE-209(Samsonek和Puype,2013年)。

30. 在纺织行业,商用十溴二苯醚可用于处理多种合成、混纺纤维和天然纤维(欧洲化学品管理局,2013年a)。主要的最终用途是装饰品、百叶窗、窗帘、床垫纺织品、帐篷(例如军用帐篷和纺织品,以及商用大帐篷、帐篷和帆布)和交通运输(例如,汽车、铁路客运机车车辆和飞机的内饰面料)。最常用的方法是在纺织品背面涂刷阻燃剂涂层。用量范围通常在7.5%-20%之间。也可使用填充工艺和印刷工艺应用阻燃处理(欧洲化学品管理局2012年a,c)。

31. 来自欧洲公众咨询的信息显示,在航空领域,民用和国防应用的胶黏剂中使用了商用十溴二苯醚(欧洲化学品管理局,2012年d)。挪威当局还查明,在能源部门,石油钻井平台工作人员消防制服反光胶带的粘合层中也使用了商用十溴二苯醚(CPAN,2012年a)。该反光胶带中的商用十溴二苯醚含量范围

为 1%-5%（按反射材料的重量计算）。其他用途包括在建筑领域和油墨中使用的涂料（RPA，2014 年（出版中））。

32. 根据 VECAP 的数据，在欧洲的商用十溴二苯醚销售量中，纺织品和塑料分别占 52%和 48%（VECAP，2012 年）。在日本，商用十溴二苯醚有 60%用于车辆座椅，19%用于建筑材料，15%用于纺织品。剩余的 6%用于其他目的。在瑞士，商用十溴二苯醚的消费情况如下：电子电气（EE）产品占 45%；进口汽车占 30%；建筑材料占 25%（Buser，2007 年 b）。在美国，商用十溴二苯醚的消费情况（不包括进口物品中的含量）细分如下：汽车和运输占 26%，建筑占 26%，纺织品占 26%，电器及电子设备（EEE）占 13%，其他占 9%（Levchick，2010 年）。

### 2.1.3 向环境释放

33. 作为添加型阻燃剂，商用十溴二苯醚不能在化学上与使用它的产品或原料结合。因此，商用十溴二苯醚有可能“泄露”到周围环境中。商用十溴二苯醚可在其生命周期的任何阶段释放到环境中，例如在工业/专业场所的生产、配制和其他一线和二线使用期间以及物品使用期间、废物处置期间和回收作业期间（欧洲化学品管理局，2012 年 c；Ren，2014 年；Gao，2013 年；VECAP，2010 年 a，b；2014 年）。监控数据证实商用十溴二苯醚经由这些途径释放和分布（见第 2.3.1-2.3.4 节），并且这种情况有可能长期出现。

34. 商用十溴二苯醚是一种通用的添加型阻燃剂，许多工业和专业场所都会向周边环境释放该物质（例如，VECAP，2012 年、2014 年；Li，2013 年；Gao，2011 年；Odabasi，2009 年）。仅在欧盟就有超过 100 处二线使用场所（混料机/配料机、主计量器、注塑成形机和修整机）（欧洲化学品管理局，2012 年 a）。从全球来看，还有其他点源（附件 E，IPEN）也在排放商用十溴二苯醚，包括该物质的生产地点以及其他工业源，例如二线用户、回收设施和钢铁生产厂及其他冶金设施（例如，Odabasi，2009 年；Wang，2010 年 d；Lin，2012 年；Ren，2014 年；Gao，2011 年；Tang，2014 年）。在工业设施附近已经测得升高的 BDE-209 浓度水平（例如，Zhang，2013 年 d；Wang，2011 年 d），但 VECAP 的估计值却显示了相反的情况（VECAP，2010 年 a，b；2012 年；2014 年），工业点源可能向周围环境释放了大量 BDE-209（ACAP，2007 年）。例如，在 2003 年，美国的商用十溴二苯醚生产仅向大气就释放了 31 吨该物质（ACAP，2007 年）。

35. 在商用十溴二苯醚的使用周期和产品处置期间排放了大量该物质。在欧盟的近期评估报告中，欧盟认为，使用周期是主要排放源，然后是物品生产和废物阶段（RPA，2014 年）。英国环境署先前的一份评估报告指出，主要排放源为垃圾填埋场和焚烧场，其次是废水排放和物品使用期间向空气排放。物品中的聚合物和纺织品以及废物是主要来源（英国环境署，2009 年）。其他国家也报告了类似的调查结果（欧洲化学品管理局，2012 年 c；ACAP，2007 年；Sakai，2006 年；OSPAR，2009 年）。此外，回收行为也是向环境释放的 BDE-209 的重要来源之一（Yu，2008 年；Gao，2011 年；Tang，2014 年和其中的参考文献）。

36. 受控的产品测试显示，合成和硫化橡胶制品仅排放少量或不排放 BDE-209（Kemmlin，2003 年）。不过，纺织品和电视外壳会向周围环境排放 BDE-209（Kemmlin，2006 年；Kajiwara，2013 年 a）。在办公室、飞机机舱等室内环境中，如果有多个含商用十溴二苯醚的产品，BDE-209 的释放水平更高（Björklund，2012 年；Allen，2013 年）。据报告称，在房屋灰尘和室内空气，最常见的多溴二苯醚同系物就是 BDE-209（例如，Harrad，2010 年；Fredriksen，2009 年 a；Besis 和 Samara，2012 年；Fromme，2009 年；Coakley，2013 年；欧洲食品安全局，2011 年）。室内环境中的 BDE-209 同样也是城市户外空气 BDE-209 污染（Björklund，2012 年；Cousins，2014 年）和人体暴露于危害物质的重要来源（见第 2.3.4 节）。根据对污泥中的 BDE-209 含

量的测量，估计欧洲技术领域的 BDE-209 排放量为每年  $16\pm 8.6$  吨，也即每年每人  $41\pm 22$  毫克或每年使用欧洲 0.2% 的商用十溴二苯醚 (Ricklund, 2008 年)。因此，使用商用十溴二苯醚生产纺织品和电子产品会导致向环境排放 BDE-209 和其他多溴二苯醚，无论是在生产期间排放或经由物品直接排放或在处置阶段排放 (RPA, 2014 年 (出版中); VECAP, 2010 年)，从而促成了向环境的排放和跨境空气污染。物理磨损、破碎和风化以及光解、提高温度和热应力都是促成产品释放商用十溴二苯醚和低溴多溴二苯醚的因素 (Earnshaw, 2013 年; Chen, 2013 年; Kajiwara, 2008 年, 2013 年 a, b)。

37. 污水处理不能消除多溴二苯醚 (Danon-Schaffer, 2007 年; Kim, 2013 年 b)，通过处理被污染室内灰尘冲洗水、含多溴二苯醚产品垃圾填埋场渗滤液、含多溴二苯醚原料工业处理场所排放的污水，各种产品在使用期间排放的大量商用十溴二苯醚作为废物留存在污水处理厂，并最终留在污泥中 (Kim, 2013 年 a, b)。因此，有报告称在污水处理厂出水口附近的沉积物和污泥 (biosoil) 中发现高浓度水平 BDE-209，而把污泥作为农业肥料添加到土壤中是 BDE-209 向土壤排放的重要途径 (Sellström, 2005 年; de Wit, 2005 年)。

38. 一些国家提供了估算排放量 (例如，欧洲中央银行, 2002 年; Morf, 2003 年, 2007 年, 2008 年; Palm, 2002 年; Sakai, 2006 年, 转引自 Earnshaw, 2013 年; Buser, 2007 年 a)。比对获得的欧洲估算量可以发现，不同环境分区的 BDE-209 预测环境排放量，特别是对空气的排放量，存在很大差异 (三个数量级, Earnshaw, 2013 年)。这些差异可能反映了各国在生产、使用和废物处理方面的具体差别，以及在估计排放量方面的不确定性/差异性。总体的建议是应当根据环境监测数据估算排放量。

39. 关于时间趋势，Earnshaw 使用动态物质流分析模型和现有的消费数据计算得出的 1970-2020 年估计排放量 (2013 年) 表明，欧洲的 BDE-209 大气排放量自 1970 年代以来一直稳定增长，并于 2004 年达到 10 吨/年的峰值。对土壤和水圈的排放量较低，但自 1970 年代以来也以类似的趋势增长，并于 2000 年代晚期达到峰值，此后开始下降。对土壤的排放于 2000 年达到 4 吨/年的峰值，而对水圈的排放则于 2010 年代达到 3.5 吨/年的峰值。瑞士的最大排放量估计在 1990 年代出现 (Buser, 2007 年 b; Morf, 2007 年)。根据美国环保局的《有毒物质排放清单公共数据发布》(ACAP, 2007 年)，2003 年向大气排放了 31 吨 BDE-209，2011 年该排放量下降至 3.1 吨 (<http://www.epa.gov/tri/>)。

40. 第 2.3.1 节提供了更多关于潜在排放源和排放至环境中的商用十溴二苯醚浓度水平的信息。一般而言，正如经测量的环境浓度水平所显示的那样，工业区和城市地区对环境的排放高于排放源较少的农村和农业区 (见第 2.3.1 节)。偏远地区例如北极的环境排放量通常最低。

## 2.2 环境归宿

41. 欧盟、加拿大和联合王国公布的各种报告都对 BDE-209 的环境归宿进行了评估（欧洲中央银行，2002 年，2004 年；欧洲化学品管理局，2012 年 a；加拿大环境部，2006 年，2010 年；英国环境署，2009 年）。逸度模型显示，环境中的大多数 BDE-209 (> 96%) 分散在沉积物和土壤中（加拿大环境部，2010 年；欧洲化学品管理局，2013 年 a）。预计只有不到 3.4% 的 BDE-209 与大量空气或自由水相位有关。由于其固有特性，即有机碳-水分配系数 (K<sub>oc</sub>) 在 150 900 to 149 000 000 升/千克之间，因此公认 BDE-209 能强烈吸附于悬浮颗粒、污水污泥、沉积物和土壤中的有机物（欧洲化学品管理局，2013 年 a）。鉴于 BDE-209 不易溶于水，而且具有强烈的微粒亲和性，其在土壤中的流动性可能不高（欧洲化学品管理局，2013 年 a）。因此，BDE-209 通过土壤侵蚀和径流转移到其他环境分区将取决于微粒的有界运输。在这种环境中，BDE-209 具有持久性，并且在土壤和沉积物中发现了高浓度的 BDE-209。

42. 在北极的雪和冰中也发现了多溴二苯醚的主要同系物 BDE-209（Hermanson, 2010 年；Meyer, 2012 年），这表明检测到的低纬度通风水平有助于偏远地区的远距离输送和污染。在生物群中也发现了 BDE-209，如果通过食物链与其他多溴二苯醚发生生物累积和生物放大作用，BDE-209 的浓度水平有时会很高（见第 2.2.4、第 2.3.1 和第 2.3.2 节）。正如在第 2.2.2 和第 2.4.6 节中进一步讨论的那样，BDE-209 在环境基质和生物群脱溴后成为低溴多溴二苯醚，由于其代谢物是具有持久性、生物累积性和毒性以及高持久性和高毒性的持久性污染物，其对商用十溴二苯醚施加给环境的风险有重大影响。

### 2.2.1 持久性

43. 光降解和生物降解是 BDE-209 在环境中转变的主要机制（加拿大环境部，2006 年，2010 年）。由于 BDE-209 缺少易溶于水的官能基而且水溶性极低（25 °C 时小于 0.1 微克/升）（Stenzel 和 Markley, 1997 年），该物质不可能在环境中的相关降解过程中水解（欧洲化学品管理局，2012 年 a）。不过，光降解可能会促使 BDE-209 在空气和表土中降解（见第 2.2.2 节）。此外，在空气分区，BDE-209 将几乎全部吸附于空气微粒。由于 BDE-209 分子受到空气微粒的保护，不能通过光分解在空气中大量降解（见第 2.2.2 节）。

44. 多项研究都显示 BDE-209 在土壤、沉积物和空气中有高持久性，而且这种持久性似乎取决于缓慢的降解过程和对光线的暴露程度（欧洲化学品管理局 2012 年 a；加拿大环境部，2010 年）。BDE-209 能结合的微粒类型或许也能影响降解率。例如，对各种固体基质的光降解情况的研究显示，吸附于蒙脱石或高岭石的 BDE-209 的半衰期分别为 36 天和 44 天，而如果吸附于有机碳含量丰富的沉积物，其降解速度要慢得多 ( $t_{1/2} = 150$  天)（Ahn, 2006 年）。在沙子中的半衰期仅为 35-37 小时，而在沉积物和土壤中的半衰期估计分别为 100 小时和 200 小时（Söderström, 2004 年；Tysklind, 2001 年，转引自欧洲化学品管理局，2012 年 a）。在自然水域中，如果出现其他有机物质，例如腐殖质，则可以通过吸收光线或者通过与 BDE-209 分子发生疏水作用而限制光降解作用（Leal, 2013 年）。与此类似，已经证明用紫外线照射涂有腐殖酸的沙粒可降低 BDE-209 的降解率（Hua, 2003 年）。此外，溶解有机物的性质、悬浮颗粒的数量、BDE-209 对固体表面的吸附性以及深度都很重要（Leal, 2013 年）。增加对老化土壤或沉积物基质的吸附也能促成自然环境下更长的环境半衰期（欧洲化学品管理局，2013 年 a）。

45. 在某些条件下（例如深海沉积物），光衰减和基质遮光会影响对阳光的整体暴露情况和降解的可能性，在这些条件下 BDE-209 似乎具有高持久性（欧洲化学品管理局，2012 年 a 和其中的参考文献）。BDE-209 的不易于溶于水，导致更难以估计其在水中的半衰期，而且这一估计值高度依赖于实验条件。不过，在改为使用溶剂并考虑到自然光条件后，最近提出了从几个小时至 660 天的水中环境半衰期范围（Kuivikko, 2007 年；Leal, 2013 年）。Tokarz 报告了

最长的环境半衰期（2008 年），通过开展历时 3.5 年的实验室微观实验，在 22°C 的黑暗条件下发现 BDE-209 在沉积物中的半衰期范围为 6-50 年，平均值约为 14 年。Tokarz 发现的长半衰期是以现场监测为基础的。Kohler（2008 年）研究了瑞士市区一个小湖中的沉积物中 BDE-209 的浓度和时间趋势。BDE-209 最早出现在与 1970 年代中期相对应的沉积层，且浓度水平稳步上升，约每 9 年增加一倍，2001 年达到 7.4 纳克/克干重。在这项涵盖约 30 年时间的研究中没有证据表明与沉积物相关的长期转变过程。

46. 对淤泥和土壤的研究提供了关于 BDE-209 的持久性的进一步证据。根据 Liu（2011 年 a）的观测，在土壤样品中掺入 BDE-209 之后 180 天，BDE-209 在黑暗条件下没有发生降解。在对覆盖污泥的土地的另一项研究中，假设指数衰减，则推算好氧和厌氧条件下的主要半衰期都小于 360 天（Nyholm, 2010 年, 2011 年, 转引自欧洲化学品管理局, 2012 年 a）。在受控实验室实验中，37°C 的黑暗厌氧条件下使用掺入 BDE-209 的消化污泥，经过 238 天的温育时间之后，BDE-209 的浓度仅减少 30%（Gerecke, 2005 年）。实地研究进一步证实了这些结果。Eljarrat（2008 年）检验了多溴二苯醚在淤泥中的归宿，这些淤泥来自 5 个市污水处理厂，并在六个淤泥施用点和一个参照点被施用在农用表土上。据称即便在一处长达四年未施用淤泥的检验点，BDE-209 在其土壤中的浓度仍然很高（71.7 纳克/克干重），这说明 BDE-209 在土壤中具有持久性。同样，Sellström（2005 年）在以往曾施用淤泥的农业土壤中检测多溴二苯醚含量，发现即便已多年未施用淤泥，其多溴二苯醚含量仍在 0.015-22 000 纳克/克干重的范围内。在一处未施用淤泥 20 年的农场检测到最高浓度水平的多溴二苯醚。

### 2.2.2 降解和脱溴

47. 尽管 BDE-209 在沉积物、土壤和空气中持久存在，而且环境半衰期很长，但有相当多的证据表明 BDE-209 在非生物环境和生物群会脱溴成为低溴多溴二苯醚（欧洲化学品管理局，2012 年 a, c; 2013 年 a, b; 英国环境署，2009 年; 加拿大环境部，2010 年; 持久性有机污染物审查委员会，2010 年 c, 2013 年 a; NCP 2013 年）。观察到的脱溴产物检测范围从单溴至九溴二苯醚不等，其中还包括列持久性有机污染物例如四溴至七溴二苯醚及溴苯酚，以及确认具有持久性、生物累积性、毒性/高持久性、高生物累积性的物质例如溴化二恶英、呋喃（PBDD/ PBDF）和六溴苯（Cristiansson, 2009 年; 英国环境署，2009 年; 欧洲化学品管理局，2012 年 a, c; 加拿大环境部，2010 年; 见 UNEP/POPS/POPRC.10/INF5 的表 3.1 至 3.4）。最近的一些报道和已公布的研究尤为关切 BDE-209 在生物群的生物转化（ACHS, 2010 年; 欧洲化学品管理局，2012 年 a, c; 欧洲食品安全局，2011 年年; 加拿大环境部，2010 年; 持久性有机污染物审查委员会，2010 年 a, b, c; Ross, 2009 年; McKinney, 2011 年 a）。

48. 非生物降解研究已经显示了九溴至三溴二苯醚的形成过程（于欧洲化学品管理局审查，2012 年 c）。受控实验室研究运用自然光开展的研究为土壤、沉积物、大气和其他基质中出现光溴化现象提供了最明确的证据。虽然一些研究尚未确定降解产物的身份（Örn, 1997 年; Palm, 2003 年; Gerecke, 2006 年），但其他研究提供了很好的证据证明在实验室条件下，刚刚掺入标本的沉积物、土壤和沙子暴露在光线下会形成七溴和六溴二苯醚同系物（Sellström, 1998a; Tysklind, 2001 年; Söderström, 2003 年, 2004 年; 欧洲化学品管理局，2013 年 a; Jafvert 和 Hua, 2001 年 a; Eriksson, 2004 年）。Ahn（2006 年）发现，BDE-209 脱溴后吸附于矿物质是一个逐步的反应过程，暴露在阳光下 14 天后会形成九溴，然后形成八溴和七溴二苯醚同系物，但随着曝光时间增加，会随之形成六溴至三溴二苯醚。大量的研究（虽然不一定是在代表性的环境条件下开展的）都显示出微生物可以影响 BDE-209 在土壤和沉积物中的降解，因为它们能够将十溴、九溴和八溴二苯醚转化为至少七溴和六溴二苯醚

(Robrock, 2008 年; Lee 和 He, 2010 年; Deng, 2011 年; Qiu, 2012 年)。还研究了在非生物物质, 如灰尘、塑料和纺织品中的 BDE-209 暴露于光线后的光降解和脱溴情况, 并确认其降解产物为六溴至九溴二苯醚 (Stapleton 和 Dodder, 2008 年; Kajiwara, 2008 年, 2013 年 a, b)。此外, 加工(回收)、塑料生产、光解、准备食物(烹饪鱼)和垃圾处理过程中, BDE-209 也可以形成其他降解产物, 如 PBDD/ PBDF 以及五溴苯和六溴苯 (Vetter, 2012 年; Kajiwara, 2008 年, 2013 年 a, b; Hamm, 2001 年; Ebert 和 Bahadir, 2003 年; Weber 和 Kuch, 2003 年; 持久性有机污染物审查委员会, 2010 年 b; Thoma 和 Hutzinger, 1987 年; Christiansson, 2009 年)。形成降解产物强烈地依赖于温度和阻燃剂纯度等条件。

49. 监控数据为 BDE-209 在不同环境条件下的降解提供了支持证据 (欧洲化学品管理局, 2012 年 c; Hermanson, 2010 年; Xiao, 2012 年)。调查结果证明在 30 年里湖泊沉积物中形成了少量九溴和八溴二苯醚 (Orihel, 2014 年, 出版中; 亦可参照欧洲化学品管理局, 2012 年 c)。少数研究证明了 BDE-209 在淤泥 (Stiborova, 2008 年; Gerecke, 2006 年; 欧洲化学品管理局, 2012 年 c) 和沉降物 (Arinaitwe, 2014 年) 中的降解情况 (主要是九溴和八溴二苯醚)。还观察了商用制剂在污泥中的同系物比率 (Knoth, 2007 年)。尽管过去报告称污水处理过程中的脱溴作用最少 (Kim, 2013 年 a; Zennegg, 2013 年), 但研究结果支持一个论点, 即 BDE-209 在污泥中可发生脱卤作用, 转变为低溴同系物 (Hale, 2012 年)。在土壤中, 植物会协助 BDE-209 脱溴 (Du, 2013 年; Huang, 2010 年 a, 2013 年; Lu, 2013 年; Wang, 2011 年 a, 2014 年)。低溴多溴二苯醚在植物组织中的分布模式不同于其在掺有 BDE-209 的土壤中的分布模式, 这表明 BDE-209 不仅可以在土壤中脱溴, 还会在植物的体内进一步脱溴 (Du, 2013 年; Wang, 2011 年 a, 2014 年)。UNEP/POPS/POPRC.10/INF5 的表 3.3 和 3.4 列出了 BDE-209 在非生物基质中的降解产物概览。

50. 研究还显示包括鸟类、鱼类和啮齿类动物在内的高等脊椎动物中也存在脱溴现象 (欧洲化学品管理局, 2012 年 a, c; 英国环境署, 2009 年; 加拿大环境部, 2010 年; 持久性有机污染物审查委员会, 2013 年 a)。虽然大多数脊椎动物似乎能够将 BDE-209 降解为低溴多溴二苯醚, 但不同物种给 BDE-209 脱溴的能力可能不同, 某些物种能更迅速、更大程度地出现脱溴作用 (McKinney, 2011 年 a)。不过, 新陈代谢的数量受到所吸收数量和代谢能力的限制。

51. 对鱼类的几项实验室实验和实地研究表明, 在食用或接触水之后, 或者在注射 BDE-209 之后, 会出现 BDE-209 脱溴现象 (Kierkegaard, 1999 年; Stapleton, 2004 年, 2006 年; Kuo, 2010 年; Munschy, 2011 年; Vigano, 2011 年; Noyes, 2011 年, 2013 年; Zeng, 2012 年; Wan, 2013 年; Feng, 2010 年, 2012 年; Luo, 2013 年; Bhavsar, 2008 年; Orihel, 2014 年, 出版中或者正在欧洲化学品管理局审查, 2012 年 c)。在范围从单溴至八溴二苯醚的低溴多溴二苯醚中已检测到多个明显的降解产物。在几项研究中, 检测到不存在于任何技术用途多溴二苯醚产品的同系物 (BDE-49, BDE-126, BDE-179, BDE-188, BDE-202), 有报告称它们证明 BDE-209 发生了生物转化 (Munschy, 2011 年; Wan, 2013 年; Vigano, 2011 年)。BDE209 及其降解产物的浓度在不同鱼类物种中各有不同, 鱼类物种之间在生物累积能力和代谢上的差异也许可以解释这种现象 (Stapleton, 2006 年; Luo, 2013 年; Roberts, 2011 年)。还有报告称形成了羟基和甲基二苯醚降解产物 (Feng, 2010 年, 2012 年; Zeng, 2012 年)。

52. 多项研究也揭示了 BDE-209 在鸟类或鸟蛋中的脱溴情况 (Chen 和 Hale 审查, 2010 年; Van den Steen, 2007 年; Letcher, 2014 年; Holden, 2009 年; Munoz-Arnanz, 2011 年; Mo, 2012 年; Crosse, 2012 年)。基于在摄取和消除期间测得的血药浓度, 让美洲红隼通过饮食暴露于 BDE-209, 据估算, BDE-

209 的半衰期为 14 天 (Letcher, 2014 年)。此外, 还观测到从九溴至七溴二苯醚的脱溴产物。如同在鱼类中观测到的现象一样, 在鸟蛋中检测到 BDE-209 以及未在商用十溴二苯醚中出现的不明身份同系物, 这被视为是脱溴的证据 (Park, 2009 年; Holden, 2009 年; Mo, 2012 年)。此外, 九溴二苯醚/BDE-209 同系物在鸟蛋和捕食鱼类中的比率高出在商用混合物中观测到的比率, 这表明 BDE-209 在鸟类/鸟蛋中发生了脱溴 (Holden, 2009 年; Mo, 2013 年)。同系物在鸟蛋中的分布情况与已经报告的在海洋生物群和水生生物群中的分布情况极为不同, 分布在后者中的主要是低溴同系物 (四溴和五溴二苯醚)。这些同系物分布方面的差异可能是由于与低溴同系物相比, BDE-209 的生物利用度较低, 而且其在海洋生物群和水生生物群中发生了脱溴和耗减 (McKinney, 2011 年 a; Huwe, 2008 年)。在暴露于 BDE-209 之后, 蚯蚓体内出现大量 BDE-209, 这也表明 BDE-209 在陆地环境中发生生物转化 (Sellström, 2005 年; Klosterhaus 和 Baker, 2010 年)。UNEP/POPS/POPRC.10/INF5 的表 3.1 和 3.2 载有生物群中的降解产物概览。

53. 哺乳动物数据表明, 脱溴 (九溴至七溴二苯醚) 是 BDE-209 实现生物转化的第一步, 随后羟化为苯酚和儿茶酚 (Riu, 2008 年; Wang, 2010 年 a; Huwe, 2007 年), 并且在摄入后, 脱溴现象要么经由肠道细菌代谢在肠道出现, 要么经由细胞色素 P450 酶在首过代谢之后在肠壁出现 (Mörck, 2003 年; Sandholm, 2003 年)。

54. 低溴同系物的毒性是众所周知的, 因而 BDE-209 脱溴为低溴同系物会导致商用十溴二苯醚出现毒性 (Kodavanti, 2011 年)。有报告称 BDE-209 的环境降解和/或生物转化显示其降解/转化为持久性有机污染物溴化二苯醚 (BDE-47, 99, 153, 154 和 183) (Wan, 2013 年; Letcher, 2014 年; She, 2013 年; Zhang, 2014 年; Munschy, 2011 年; Stapleton, 2004 年; Feng, 2010 年; Luo, 2013 年; Lu, 2013 年; Huang, 2013 年; 见 UNEP/POPS/POPRC.10/INF5, 表 3.1-3.4)。由于生物体在其生命周期中持续暴露于分布广泛且具有高持久性的 BDE-209 复杂混合物、低溴溴化二苯醚和 BDE-209 的其他降解产物 (欧洲化学品管理局, 2012 年), 增加了受其负面影响的可能性 (Ross, 2009 年; McKinney, 2011 年 a; Kortenkamp, 2014 年)。He 的一项研究 (2011 年) 显示, 长期的慢性接触低剂量的 BDE-209 不仅影响 F0 的生长和繁殖, 同时也会引发 F1 后代神经行为的改变。研究者观察到 BDE-209 具有生物累积性, 而且能生物转化为低浓度的同系物九溴至六溴二苯醚, 并提出存在混合毒性风险。因此, 同时摄取 BDE-209 与其代谢物会导致更强的生物累积性和毒性, 有可能因风险结合导致对生物产生显著的不利影响 (见第 2.4.6 节)。Noyes (2011 年) 和 Chen (2012 年 a) 也报告了类似的结果。

### 2.2.3 生物利用度和组织分配情况

55. BDE-209 的生物利用度低, 原因在于其高分子量影响了其被动扩散透过生物膜的能力 (Frouin, 2013 年; Mizukawa, 2009 年), 而且其对颗粒物的亲和力强, 例如沉积物和土壤 (Tian 和 Zhu, 2011 年, 还可见第 2.2.1 节)。尽管如此, 正如世界各地的监测数据 (见 UNEP / POPS/ POPRC.10/ INF5 第 2.3 节及表 5.1 和表 5.2) 和现有的实验室研究所证实的那样, 在各种组织、物种、食物网和顶级掠食者中都检测到 BDE-209, 而且有时测量到极高浓度水平的 BDE-209。

56. 如第 1.1 节所述, BDE-209 在水中的溶解度低, 而且报告称其通过水介质直接接触的生物利用度也十分有限 (Ciparis 和 Hale, 2005 年; Klosterhaus 和 Baker, 2010 年)。不过, 一些证据表明青鳉在直接通过水接触 BDE-209 后显示出生物利用度 (Luo, 2013 年)。由于能与颗粒结合, BDE-209 被视为能通过食物和摄入灰尘、沉积物、土壤或沙子等颗粒来实现生物利用 (欧洲化学品管理局, 2012 年 c)。评估了鱼类通过食物摄入 BDE-209 的情况 (Kierkegaard, 1999 年; Stapleton, 2004 年, 2006 年), 评估显示摄入范围在

0.02%和 3.2%之间，这取决于接受评估的物种以及估算总摄入量时是否考虑了 BDE-209 的脱溴产物。许多显示鸟类摄入 BDE-209 的研究都提供了关于 BDE-209 在陆生生物中的生物利用度的证据 (Letcher, 2014 年; Sagerup, 2009 年; Chen 和 Hale 于 2010 年审查), 关于其他野生生物物种和人类的摄入情况的生物监测数据也提供了相关佐证 (第 2.3 节)。在大鼠中, 有报告称口服吸收范围为 1%-26%, 吸入吸收量估计可忽略 (El Dareer, 1987 年; Mörk, 2003 年; Sandholm, 2003 年; Riu, 2008 年), 体外实验皮肤吸收量小于 20% (Hughes, 2001 年)。此外, 使用人体胃肠道模型的体外评估表明, 在接触室内灰尘样本后, BDE-209 具有生物可给性 (14%) (Abdallah, 2012 年)。在大鼠和奶牛中, 大多数处理后的 BDE-209 作为原始化合物在粪便中回收 (Kierkegaard, 2007 年; Huwe, 2008 年; Riu, 2008 年; Biesemeier, 2010 年)。

57. 研究表明, BDE-209 优先整合到血液丰富的组织如肌肉、肝、肠、鳃 (鱼类), 随后进入脂肪组织 (例如 Shaw, 2012 年; Wan, 2013 年; 欧洲食物安全局 2011 年; 欧洲中央银行, 2002 年, 2004 年)。BDE-209 能与蛋白质结合, 因此能封存在血液丰富的组织中 (Hakk, 2002 年; Mörck, 2003 年)。在中国鲟鱼中, 脂质并没有在 BDE-209 的分布方面起到重要的作用 (Wan, 2013 年)。检测到 BDE-209 在肝、鳃、肠和肝脏等参与吸收、摄入和代谢的器官中的浓度相对较高, 浓度最高的是肝脏, 其次是鳃。此外, BDE-209 在组织和血液之间的估计分配系数高于低溴多溴二苯醚, 这表明从血液到组织的低分区比例会导致 BDE-209 的生物累积性高, 尤其是在吸收器官 (Wan, 2013 年)。由于鲟鱼在长江迁移期间几乎停止进食, 因此可以假设其处于净化期。关于海豹的生物累积研究也观测到类似的模式 (Shaw, 2012 年)。据 Shao (2008 年) 报告称, 肝脏中的多溴二苯醚 (三溴至八溴二苯醚) 平均求和浓度类似于普通密封脂中的多溴二苯醚 (单溴至六溴二苯醚) 平均求和浓度。相比之下, BDE-209 在肝脏中的浓度最高五倍于脂质, 这与观测到的 BDE-209 在生物群中向灌流组织例如肝脏迁移的结果相符。在大鼠中, 根据器官鲜重, 最高的浓度出现在肾上腺、肾脏、心脏、肝脏和卵巢 (欧洲食物安全局 2011 年; Seyer, 2010 年; Riu, 2008 年)。对于使用天然污染的青贮饲料饲喂的奶牛, BDE-209 是饲料、器官、脂肪组织和粪便中占主导地位的同系物, 但牛奶不属于此类 (Kierkegaard, 2007 年)。在美国红隼的食物接触中, 以湿重为基础, 观察到净化期结束时脂肪中的浓度水平高于肝脏 (Letcher, 2014 年)。

58. 人类数据表明, BDE-209 吸收和分布于脂肪、血液、脐带血、胎盘、胎儿和母乳中 (Frederiksen, 2009 年 a; Zhao, 2013 年; UNEP/POPS/POPRC.10/INF5, 表 4.1)。有报告称 BDE-209 从鱼、蛙、鸟、鼠和驯鹿的母体转移到卵和幼体 (Vorkamp, 2005 年; Lindberg, 2004 年; Johansson, 2009 年; Garcia-Reyero, 2014 年; Nyholm, 2008 年; Rui, 2008 年; Biesemeier, 2010 年; Cai, 2011 年; Holma-Suutari, 2014 年; Liu, 2011 年 c)。

#### 2.2.4 生物累积性

59. 过去曾假设 BDE-209 在生物群中的生物累积性不高, 这主要归因于 BDE-209 的分子较大、极端疏水而且生物利用度低 (Hale, 2003 年)。不过, 生物累积性低也可能是由于低摄取和/或 BDE-209 通过排泄和脱溴导致消除或代谢能力强等因素造成的 (Hale, 2003 年; Arnot, 2010 年)。此外, 不同的生物累积结果也可能是由于难以测量 BDE-209 (Ross, 2009 年; de Boer 和 Wells, 2006 年; Covaci, 2003 年; Kortenkamp, 2014 年) 和/或 BDE-209 脱溴成为低溴多溴二苯醚造成的。如加拿大环境部所述 (2010 年), 一项完整的物质生物累积潜力评估应当既考虑亲本物质也考虑及其代谢产物的生物累积潜力。环境监测研究显示, 在世界各地多个物种和人类中都发现存在 BDE-209, 并提供了关于生物累积性的相关佐证 (见第 2.3.1 节和 UNEP/POPS/POPRC.10/INF, 表 5.2)。文献中报告的 BDE-209 辛醇-水分配系数 (log Kow 值) 值是高度可变

的，范围从 6.27 到 12.11 不等，这取决于所使用的测量或估算方法（CMABFRIP，1997 年；Dinn，2012 年；加拿大环境部，2010 年；Kelly，2007 年；Tian，2012 年；美国环保局，2010 年；Watanabe 和 Tatsukawa，1990 年）。虽然 log Kow 值大于 5 的复合物被视为具有生物累积性，但 log Kow 值大于 7.5 的化学品（例如 BDE-209）被认为生物累积性不强，因为预计膳食吸收潜力会下降（Arnot 和 Gobas，2003 年）。不过，食物网研究显示，BDE-209 在水生和陆生物种中都会生物累积（BMF>1）（Yu，2011 年，2013 年；Wu，2009 年 a；EC，2010 年及其中的参考文献）。

60. 由于分子尺寸大而且水溶性低，BDE-209 在鱼类中的生物集聚值估计小于 5 000，且无明显的水吸收（欧洲化学品管理局，2012 年 a；加拿大环境局，2010 年）。不过，生物集聚值不被认为能很好地描述 BDE-209 等强疏水性物质的生物累积能力。生物集聚值体现了水生生物通过呼吸道和皮肤表面从周围的水环境进行化学吸收的过程，但未考虑膳食因素（Arnot 和 Gobas，2006 年）。根据修订后的经合组织生物累积研究指导方针，随着疏水性增加，水接触试验可能变得越来越困难。因此，对于强疏水性物质（log Kow 值大于 5 并且水溶性低于 0.01-0.1 毫克 / 升），推荐进行膳食测试（经合组织，305，2012 年）。

61. 陆地生物的 log Kow 值与生物集聚值不能很好地预测 log KOA 值大于等于 6 和 log Kow 值大于 2 的化学品的生物放大作用（Kelly，2007 年，2009 年），而且已经证明 log KOW 值小于 5 且生物集聚值小于 5 000 的陆地食物链化学品具有生物放大作用。如前所述，膳食是水生和陆生食物链中接触 BDE-209 的最重要途径（Shaw，2009 年；Kelly，2007 年）。有人解释称，与沉积物相关的生物和滤食动物（贻贝、动物园浮游生物、甲壳类动物、扁平鱼类、底栖无脊椎动物和水生蠕虫）体内的 BDE-209 累积水平是因为摄入了含 BDE-209 的颗粒物，不是生物累积的证据，不过，摄入颗粒物被认为是水生食物网中的高营养级别生物接触 BDE-209 的途径（Shaw，2009 年和其中的参考文献）。BDE-209 具有很高的辛醇-空气分配系数（KOA），因此在陆地生态系统中强烈吸附于大气颗粒物（也即气溶胶），并且会通过干湿沉降作用沉积到陆地植被和土壤中（Christensen，2005 年；加拿大环境局，2010 年；Mizukawa，2013 年；Yu，2011 年）。这为摄取土壤或植物作为食物的陆生生物提供了接触 BDE-209 的途径。因此，当考虑 BDE-209 的生物累积行为时，据信计算和测量生物积聚值、生物放大系数（BMFs）和营养放大系数（TMFs）能比计算或测量生物集聚值提供更多相关信息（Shaw，2009 年；Kelly，2007 年；Powell，2013 年）。

62. 生物积聚值体现了经各种途径接触后化学品在生物体内的生物累积程度，这些接触途径包括饮食和环境来源。从历史上看，能用于估算 BDE-209 的生物积蓄值的数据有限，原因在于对 BDE-209 的浓度进行了估算的大量研究没有将这些估算数值与环境浓度水平相比较。这样一来，以前的评估仅发现与 BDE-209 是否具有生物累积性有关的模棱两可的证据（欧洲化学品管理局，2012 年 a，c；加拿大环境部，2010 年；美国环保局，2010 年）。这段时间以来开展了更多的研究，测量了先前评估中使用的捕获生物和来自其他地区的生物体的 BDE-209 生物积聚值。特别是在 Frouin 的一份研究报告（2013 年）中，根据脂质重量，logBAF 值比水生无脊椎动物高 6%，从而超过 logBAFs 大于 3.7，对应的生物积聚值大于 5 000（He，2012 年；加拿大环境部，2010 年），从而符合附件 D 中关于生物累积性的标准（生物积聚值大于 5 000）。在上述研究中，对水生生物摄取的 BDE-209 进行了测量，并将测量值与水中的 BDE-209 浓度进行了比对，估算得出了 logBAFs。

63. 实地研究数据提供的生物放大系数和营养放大系数显示，BDE-209 能在几种水生生物和陆生生物体内和食物网中生物放大（生物放大系数>1，营养放大系数>1；详见 UNEP/POPS/POPRC.10/INF5 的表 3.5）科学文献中报告的陆生

生物和食物网生物放大系数的范围在 1-7 之间 (Yu, 2011 年; Wu, 2009 年 a), 该范围是通过建模估算得出的 (Kelly, 2007 年)。一项跨越了多个营养级的陆生食物网研究报告称生物放大系数的范围在 1.4-4.7 之间 (Yu, 2011 年, 2013 年)。另一项关于青蛙 (同时受水生和陆生环境影响) 的实地研究侧重于从昆虫至青蛙的生物放大作用, 其中发现根据性别不同, 生物放大系数的范围为 0.8-13.0 (Wu, 2009 年 a)。在水生生物中, 生物放大系数的范围在 0.02 和 34 之间, 而海豹的脂质和血液中的生物放大系数的范围分别为 0.03-0.06 和 8.3-20.8 (Thomas, 2005 年, 见加拿大环境部 2010 年的报告)。其他研究报告称海豹的生物放大系数的范围在 0.2 和 2.2 之间 (Jenssen, 2007 年), 海洋生物群为 1.5 (Baron, 2013 年), 虹鳟鱼为 1.28 (Stapleton, 2006 年, 见加拿大环境部 2010 年的报告)。此外, Law 开展的一项水生食物网研究称生物放大系数在 0.1 和 34 之间 (2006 年)。多项其他水生生物研究报告了以下生物放大系数范围: 1.2 至 5.1 之间 (Mo, 2012 年); 0.67 至 1.3 之间 (Shaw, 2009 年); 0.4 至 1.3 之间 (Poma, 2014 年); 4.8 至 12.7 之间, 但在食物网方面还有一些不确定性 (Tomy, 2009 年); 0.02 和 5 之间 (Burreau, 2004 年, 2006 年, 加拿大环境部已于 2010 年审查)。报告了以下水生食物网的营养放大系数: 3.6 (Law, 2006 年); 0.26 (Wu, 2009 年 b); 0.78 (Yu, 2012 年, 加拿大环境部已于 2010 年审查) 和 0.3 (Tomy, 2008 年)。大多数报告的 BDE-209 生物放大系数和营养放大系数是使用肌肉组织 (鱼类、哺乳动物和鸟类)、全身 (双壳贝类、浮游生物和鱼类) 或脂肪组织 (鱼类和哺乳动物) 计算得出的。报告的生物放大系数和营养放大系数方面的差异可能是因为使用的物种不同而且受到生物体整体条件、膳食、接触情况、分析时使用的身体组织、代谢、性别和食物网结构等因素的影响而造成的。

64. 在一些几项研究中观测到营养稀释 (TMF<1) 现象, 这可能是由于 BDE-209 通过食物链产生生物转化造成的, 因为已有 BDE-209 生物转化产物中观察到营养放大现象 (TMF>1) 的报告 (Wu, 2009 年 b; Poma, 2014 年), 另外, 已有报告称所有可商用的多溴二苯醚配方中均未出现 BDE-202 等已知生物转化产物的 BMFs (Yu, 2011 年; Mo, 2012 年; Poma, 2014 年)。因此, 在一些研究报告中, 所观察到的是 BDE-202 等降解产物的生物转化, 而不是 BDE-209 自身的生物累积现象。

65. 生物群-沉积物累积系数 (BSAF) 体现了生物与沉积物之间的污染物稳态浓度比, 有利于进一步了解生物累积和生物放大潜力。一些研究计算了 BDE-209 的沉积物 BSAF 值, 结果表明其生物放大潜力不大 (Klosterhaus 和 Baker, 2010 年; He, 2012 年; La Guardia, 2012 年; Sellström, 2005 年; Tian 和 Zhu, 2011 年; Xiang, 2007 年, 欧洲委员会已于 2010 年审查)。但一些研究显示了较高的沉积物 BSAF 值, 数值大于 3, 表明某些贝类具有生物累积潜力 (deBruyn, 2009 年; Wang, 2009 年)。在 deBruyn (2009 年) 开展的一项研究中, BDE-209 浓度要么较低 (BSAF≤ 1.48), 要么低于大多数样品的定量限 (有一个参考点不在其列, 计算该处的沉积物 BSAF 值为 3.53) (deBruyn, 2009 年)。不过, 最近一项关于 BDE-209 在土壤无脊椎动物食物网中的 BSAF 值的研究指出, 在对土地施用污泥之后, BSAF 值的范围为 0.07 至 10.5。不过, 在同一项研究中, 生物放大系数的范围为 0.07 至 4.0, 关于  $\Delta\delta N$  的同位素分析还有一些不确定性, 研究者进一步得出结论认为, 在确定土壤无脊椎动物栖息污泥施用点的多溴二苯醚累积程度时, 土壤接触可能比营养状况更为重要 (Gaylor, 2014 年) (详见 UNEP/POPS/POPRC.10/INF5, 表 3.5)。由于 BDE-209 在各物种中的代谢情况各有不同、一些实地研究得出了极高的沉积物浓度水平以及难以得到沉积物活生物体的干净无沉积物样本, 这些事实导致更加难以对 BDE-209 的 BSAF 值作出解释 (欧洲化学品管理局 2012 年 c; La Guardia, 2012 年)。

66. 一些研究观察到, 与水生生物的情况相比, BDE-209 在陆生生物中有较高的生物放大潜力或增强的累积潜力 (Christensen, 2005 年; Chen 和 Hale, 2010

年 b; Jaspers, 2006 年; Kelly, 2007 年; Voorspoels, 2006 年 a)。鉴于 BDE-209 的物理化学特性以及 Kelly 界定的陆生生物与水生生物之间的毒代动力学差别, 这一点是可以预计得到的(2007 年)。根据 Kelly (2007 年) 的计算, 计算的 BDE-209 在陆地食肉动物和人类中的生物放大系数(生物放大系数=8) 高于海洋哺乳动物(生物放大系数=3), 并且 BDE-209 在陆地草食动物和水生生物中的生物放大系数值最低(生物放大系数值=1)。这项研究得出结论认为, BDE-209 等疏水性很强的化学品在呼吸空气的动物中的生物放大系数高于在水中呼吸的动物, 这是由于呼吸淘汰慢于排尿淘汰, 这反映出这种化合物的  $K_{oa}$  值和  $K_{ow}$  值都很高。与此相反的是, 其他研究显示一些硬骨鱼的 BDE-209 吸收率很低, 这可能会导致与陆生物种相比, BDE-209 在水生生物中的累积潜力较低, 而代谢(或脱溴)和消除程度较高(Mörck, 2003 年; Stapleton, 2004 年; Kierkegaard, 1999 年)。可用数据还显示, 还有更多变量会对 BDE-209 的生物累积性产生影响。例如, BDE-209 强烈吸附于淤泥和土壤, 具有极高的持久性, 是在全球环境非生物区检测到的最主要的占主导地位的多溴二苯醚之一(见第 2.3.1 节)。这种无处不在的非生物污染有时浓度极高, 因此尽管 BDE-209 的分子尺寸大(MW=959)且  $\log K_{ow}$  值高, 但仍有可能致使其进入食物网并在生物群达到稳定状态(Stapleton, 2004 年)。

67. BDE-209 (或其他多溴二苯醚) 在植物和食草动物中的生物累积情况尚难获悉。在中国南部电子废物回收站附近的小型食草动物食物链(稻田土、水稻和福寿螺)中检测到 BDE-209。从水稻稻株至福寿螺, BDE-209 的生物放大系数的范围在 1.2 和 6.3 之间, 这明显表明 BDE-209 可以在植物/食草动物食物网中发生生物累积(She, 2013 年)。另一方面, 最近的实验室实验也观察到福寿螺通过饮食接触 BDE-209 后体内出现了生物累积现象(报告的生物积聚值 <1) (Koch, 2014 年)。因此从这两项研究中不能明确得出关于福寿螺体内生物累积现象的结论。许多报告的生物群 BDE-209 浓度是根据脂质标准化基础得出的。尽管这是一种在报告生物累积性物质的浓度水平时常见的做法, 但回想起来, 对于这些不明显区分于脂质的物质, 这种办法也许并非是最好的办法(经合组织, 2012 年), BDE-209 的情况或许也是如此(见第 2.2.3 节)。依据是在肌肉或脂肪组织和/或正常化脂质中发现的 BDE-209 浓度水平, 有研究显示 BDE-209 在鱼类和哺乳动物中缺少生物放大性。正如第 2.2.3 节所讨论的那样, 有证据显示 BDE-209 首先退出血液丰富的组织, 例如肝、肠、肌肉和鳃, 所以之前的一些研究弄错了针对目标, 低估了 BDE-209 的生物累积性和生物放大潜力(Stapleton, 2004 年; Voorspoels, 2006 年 a; Wan, 2013 年)。近期在同位素生态学方面取得的实验进展表明, 采用固定的  $\Delta^{15}N$  值是不恰当的, 缩小  $\Delta^{15}N$  值的比例更有实际意义(Hussey, 2014 年)。因此, 营养级校正带来了额外的不确定性, 特别是对于完整的食物链来说。

68. 在摄入生物体之后, BDE-209 脱溴成为低溴且生物累积性更强的多溴二苯醚(见第 2.2.2 节), 这增加了对使用和释放 BDE-209 的关切, 因为一些多溴二苯醚已经被列入《斯德哥尔摩公约》的附件 A, 或者已被欧盟列为高持久性、高生物累积性和具有持久性、生物累积性和毒性的物质(持久性有机污染物审查委员会, 2006 年, 2007 年; 欧洲化学品管理局, 2012 年 a; 加拿大环境部, 2010 年)。一直在观察 BDE-209 的生物富集性和生物累积性, 平行开展关于其毒性作用和脱溴为低溴多溴二苯醚现象的研究(Garcia-Reyero, 2014 年; Noyes, 2011 年, 2013 年; Kuo, 2010 年)。此外, 实地研究中出现的低溴多溴二苯醚可能是由于 BDE-209 脱溴和直接接触五溴二苯醚或八溴二苯醚造成的。

### 2.2.5 远距离环境迁移潜力

69. 在北极和南极的各种环境分区, 包括空气、沉积物、雪、冰、土壤和生物群中都发现了 BDE-209 和其他低溴多溴二苯醚(UNEP/POPS/POPRC.10/INF, 表 5.1 和 5.2)。

70. 一些研究报告称, BDE-209 是北极空气中占主导地位多溴二苯醚或主要的多溴二苯醚之一 (Wang, 2005 年; Su, 2007 年; Hermanson, 2010 年; Hung, 2010 年; Möller, 2011 年 b; Meyer, 2012 年; NEA, 2014 年; Salamova, 2014 年)。BDE-209 在北极空气中的浓度以及各项研究都显示, 北极冰层 (Hermanson, 2010) 和雪层 (Meyer, 2012 年) 中存有大量 BDE-209, 并强调 BDE-209 有可能远距离环境迁移到偏远地区。例如, 一项研究评估了来自挪威北极地区冰核样本的共计 19 种溴化阻燃剂, 发现 BDE-209 是从空气沉积到北极冰层中的第二大溴化阻燃剂。发现 BDE-209 在 1995-2005 年期间的沉积速率为 320 皮克/厘米/年 (Hermanson, 2010 年), 仅次于六溴环十二烷, 远高于其他多溴二苯醚。在南极空气和沉积物样本中也发现了 BDE-209, 这进一步证明了这种复合物的远距离迁移能力 (Dickhut, 2012 年)。

71. 北极环境中沉积的 BDE-209 能被生活在该环境中的生物利用, 因此广泛分布于北极食物网中 (de Wit, 2006 年和 2010 年; 加拿大环境部, 2010 年; NCP, 2013 年)。被 BDE-209 污染的北极生物群样本包括: 植被、食肉鸟类、海鸟和海鸟蛋、海鱼和淡水鱼、各种端足类动物、浮游动物、虾和蛤以及陆地和海洋哺乳动物 (de Wit, 2006 年和 2010 年; Letcher, 2010 年; Tomy, 2008 年)。通常北极生物群同时接触 BDE-209 和多种其他多溴二苯醚和持久性有机污染物 (de Wit, 2006 年, 2010 年; Letcher, 2010 年)。生物监测数据显示, BDE-209 在一些北极物种的多溴二苯醚总身体负载中占很大比例, 在碎屑食性摄食冰下端足类动物的多溴二苯醚总身体负载中所占比例超过 50% (Sørmo, 2006 年), 在红鱼中占 60%, 在北极鳕鱼中占 75% (Tomy, 2008 年)。BDE-209 也是从挪威偏远地点取来的苔藓样本中的主要同系物 (Mariussen, 2008 年)。

72. 在亚洲青藏高原偏远地区的的空气中也发现了 BDE-209 (Xiao, 2012 年; Xu, 2011 年)。斯洛伐克塔特拉山的积雪样本显示出极高的 BDE-209 浓度水平 (Arellano, 2011 年)。对公海船舶的系统监测也证明从北极、大西洋、印度洋和太平洋取得的空气样本中有大量 BDE-209 (Möller, 2012 年; Möller, 2011 年 a, b; Lohmann, 2013 年)。海洋和大气过程都会促进 BDE-209 的环境迁移 (Su, 2007 年; Möller, 2011 年 a, b; Breivik, 2006 年)。BDE-209 的蒸气压极低, 因此不太可能因挥发作用而显著地促进其远距离环境迁移, 大气长距离迁移似乎是由附着 BDE-209 的颗粒的大气流动性控制的 (Breivik, 2006 年; Wania 和 Dugani, 2003 年)。只要不因湿沉降而去除, 微小颗粒 (直径约为几微米) 可能会在空气中停留数小时或数天 (Wilford, 2008 年; Meyer, 2012 年)。此外, 颗粒物可保护 BDE-209 分子免于光解, 将其在空气中的寿命延长至超过 200 天 (Breivik, 2006 年; Raff 和 Hites, 2007 年, 转引自 de Wit, 2010 年)。在北极地区, 空气中颗粒物在北极雾霾季节的沉积速度较高 (Su, 2007 年; 北极监测和评估方案, 2009 年)。在亚洲热带地区, 包括 BDE-209 在内的与气体和/或颗粒物有关的多溴二苯醚远距离环境迁移受到季风的推动 (Xu, 2011 年)。

73. 基于 BDE-209 的羟基自由基反应, 按照使用锡拉库扎研究公司的 AOP 程序从化学结构得出的计算结果, 假设羟基自由基浓度为  $5 \times 10^5$  molecule  $\text{cm}^{-3}$  且反应速率为  $1.7 \times 10^{-13}$   $\text{cm}^3$  molecule $^{-1}$  s $^{-1}$ , 估算得出 BDE-209 的大气半衰期为 94 天 (ECB, 2002 年)。其他应用, 如 EPISuite4.1 (AOPwin 模块) 和 PBTPProfiler 估算出不同的反应速率 ( $3.37 \times 10^{-14}$   $\text{cm}^3$  molecule $^{-1}$  s $^{-1}$ ), 分别预测出更长的半衰期 317 天 (12 h 天,  $1.5 \times 10^6$  OH radicals  $\text{cm}^{-3}$ ) 和 470 天 (24 h 天,  $5 \times 10^5$  molecules  $\text{cm}^{-3}$ )。

74. 尽管可能出现本地释放源 (Hale, 2008 年; Danon-Schaeffer, 2007 年; Li, 2012 年 c), 来自偏远地区的现有数据总体上表明在那些地区检测到的 BDE-209 是远距离环境迁移带来的。

## 2.3 接触

### 2.3.1 环境浓度水平和趋势

75. BDE-209 广泛地分散在全球环境中，存在于世界各地的生物和非生物基质中。多项审查报告中都有关于环境层面的概述（de Wit 2006 年，2010 年；加拿大环境部，2010 年；Letcher，2010 年；Law，2014 年），UNEP/POPS/POPRC.10/INF5 的表 5.1 和表 5.2 中也有相关介绍。在大多数环境基质中，BDE-209 与其他多溴二苯醚共存，而且是检测到的主要的多溴二苯醚或主要的多溴二苯醚之一。

76. 在城市、农村和偏远地区（UNEP/POPS/POPRC.10/INF5，表 5.1）以及沉淀物（Ma，2013 年；Robson，2013 年；Arinaitwe，2014 年和其中的参考文献）中都检测到 BDE-209。在城市和农村环境中检测到的浓度水平在 4.1-和 60 皮克 m<sup>-3</sup> 之间（Syed 于 2013 年审查），而在北极空气中的浓度水平范围在不可检测至 41 皮克 m<sup>-3</sup> 之间（de Wit 于 2010 年审查）。有报告称北极以外的背景位置的浓度水平范围在不可检测至 29 皮克 m<sup>-3</sup> 之间，即高于在北极检测到的浓度水平，但低于在城市和农村环境中检测到的浓度水平（Xiao，2012 年；Möller，2011 年 a, b, 2012 年）。不过，Lohman（2013 年）最新报告称，在热带大西洋空气中，颗粒相和气体相的 BDE-209 的浓度分别高达 43.89 和 260 皮克 m<sup>-3</sup>。根据这些测量值，Lohman（2013 年）计算得出每年从空气中沉降至大西洋的 BDE-209 总量约为 27.5 吨，其中气体相的 BDE-209 为 20 吨，颗粒相的 BDE-209 为 7.5 吨。研究结果表明，BDE-209 的空气浓度水平和在全球海洋中的沉积量可能会比以前所认为的高。如上所述，无论是在北极和热带地区，BDE-209 的空中迁移都会受到季节性天气现象的影响（Xu，2011 年；Su，2007 年；北极监测和评估方案，2009 年）。气团后向轨迹分析表明，BDE-209 的主要潜在来源区广泛分布在亚洲热带地区的工业化和城市化地区（Xu，2011 年）。

77. 目前大多数报告土壤 BDE-20 浓度水平的数据都来自受影响地区。已报告的全球污染地区土壤浓度水平范围在不可检测至 8600 皮克 g<sup>-1</sup> 干重之间，甚至可能更高（Wang 已审查，2010 年 b）。在加拿大北极区垃圾填埋场的土壤中检测到 BDE-209（Danon-Schaeffer，2007 年；Li，2012 年 c），但堆填区以外的土壤中的多溴二苯醚浓度水平与在北极其他地方的背景位置的土壤中测得的浓度水平相似（de Wit，2006 年，2010 年），这表明目前从这些来源向北极环境排放的 BDE-209 和其他多溴二苯醚并不多。与偏远地点相比，城市和农村地区的 BDE-209 浓度水平明显更高。特别是，在中国的回收厂、倾倒地和工业用地等电子废物堆放点的土壤中，BDE-209 的浓度水平极高（Wang，2011 年 b，Wang 已经审查，2010 年 b；Gao，2011 年；Li，2012 年 a）。据报告称，来自几个国家的淤泥中含有 BDE-209，如果将淤泥施用于土壤上，BDE-209 将转移进入土壤和生物群（de Wit，2005 年；NEA，2012 年；NERI，2003 年；附件 E，丹麦；，Ricklund，2008 年 a, b；Earnshaw，2013 年）。如 Sellström（2005 年）和 de Wit（2005 年）所述，作为肥料施用淤泥之后，施用地点的 BDE-209 浓度水平比参考地点高出 100-1000 倍。在这项研究中，BDE-209 是在土壤和蚯蚓体内占主导地位的同系物，而且据报告称，蚯蚓体内的浓度水平高于土壤（Sellström，2005 年）。

78. 有报告称在全球范围内，BDE-209 在沉积物中的浓度水平范围在不可检测至 16 000 纳克/克干重之间，比土壤中的浓度水平略高（见 Wang，2010 年 b；Eljarrat，2007 年；Sellström，1998 年 b；POPRC/ INF，表 5.1）。高浓度沉积物通常位于工业区附近（Wang，2010 年 b；Eljarrat，2004 年，2005 年，2007 年；Sellström，1998 年 b）。与在土壤中的发现类似，BDE-209 是报告在沉积物中发现的主要同系物，在某些研究中几乎占测得的多溴二苯醚总量的 100%（Wang，2010 年 b；Eljarrat，2005 年；Marvin，2013 年）。BDE-209 在偏远地区的土壤和沉积物中的浓度水平低（de Wit，2006 年，2010 年；CPAN，2010

年, 2012 年 b; Boitsov 和 Klungsøyr, 2013 年; SFT, 2008 年 a, b), 但发现在一些受到地方污染的地点, 例如填埋场以及废水排污口, 其浓度水平上升了 (Hale 2008 年; Danon-Schaeffer, 2007 年; Li, 2012 年 c)。BDE-209 在这些沉积物中增加一倍所需时间在 5.3 至 8.4 年之间 (Chen, 2007 年 b; Kwan, 2014 年; Zhu 和 Hites, 2005 年; Zegers, 2003 年; UNEP/POPS/POPRC.10/INF5, 表 5.1)。

79. 在全球各个陆生和水生物种中都发现了 BDE-209 (de Wit, 2006 年, 2010 年; Letcher, 2010 年; 加拿大环境部, 2010 年; Chen 和 Hale, 2010 年; NCP, 2013 年; UNEP/POPS/POPRC.10/INF5, 表 5.2)。测量对象包括植物、海鸟如绒鸭、海鸬、蓝鸬和鲑鱼鸬、各种猛禽、鱼类和海洋无脊椎动物、海洋甲壳类动物、昆虫和青蛙以及海洋和陆地哺乳动物。在成体的各种组织以及卵生动物的蛋中都发现了 BDE-209。

80. 在北极, 报告的生物群浓度水平的范围在不可检测至 250 纳克/克脂重之间 (UNEP/POPS/POPRC.10/INF5, 表 5.2)。实地测量数据的实验室效应外推表明, 加拿大北极地区的鱼类健康很有可能受到当前十溴二苯醚曝露水平的不利影响 (Noyes, 2013 年; Tomy, 2008 年、2009 年)。华南鱼类也是如此, 在那里, 十溴二苯醚浓度超过了已经观测到的水平 (Noyes, 2013 年; Mo, 2012 年)。在受光合作用影响更大的地区, 有报告称该浓度水平达到 12000 纳克/克脂重及以上。陆生环境中经常出现高浓度水平的 BDE-209, 这可能体现了 BDE-209 的低挥发性及其对灰尘和土壤中的有机物质的高亲和力 (Chen 和 Hale, 2010 年; Chen, 2012 年 d)。特别是, 对鸟类和鸟蛋中的 BDE-209 浓度水平开展了大量研究, 有些情况下报告称该浓度水平极高。中国红隼的体内含有极高浓度水平的 BDE-209, 其肌肉和肝脏中的浓度水平分别为 2150 和 2870 纳克/克脂重 (Chen, 2007 年 a)。一个样本的肌肉浓度和肝脏浓度分别达到 6220 纳克/克脂重和 12 200 纳克/克脂重, 属于已经报告的野生动物最高 BDE-209 浓度水平之列 (Chen, 2007 年 a), 而且高于其他地方报告的浓度水平 (Bustnes, 2007 年; Fliedner, 2012 年; Johansson, 2011 年; Sørmo, 2011 年; Vorspoels, 2006 年 b; Gentes, 2012 年; Chabot-Giguère, 2013 年; Mo, 2013 年; Chen, 2010 年 a; Chen 和 Hale, 2010 年)。还有报告称在中国的翠鸟、欧亚麻雀和红隼 (Chen, 2007 年 a; Yu, 2011 年; Mo, 2012 年) 以及瑞典的游隼中发现高浓度水平的 BDE-209 (Johansson, 2011 年)。还在北极多个鸟类品种中检测到 BDE-209 (de Wit, 2006 年, 2010 年)。BDE-209 在比利时城市和农村地区的红狐肝脏中的浓度水平高达 760 纳克/克脂重, 通常占多溴二苯醚总负载量的 70 % (Voorpoels, 2006a)。在英国欧亚水獭体内也发现了高浓度的十溴二苯醚, 其肝脏中十溴二苯醚浓度高达 6800 纳克/克脂重 (Pountney, 2014 年)。

81. 目前关于 BDE-209 的浓度水平在环境中随时间变化的数据有限。有少数研究报告了北极的生物群中的时间趋势, 发现加拿大北极地区空气中的 BDE-209 浓度水平在 2002-2005 年期间呈上升趋势 (Su, 2007 年; Hung, 2010 年), 而 2007-2009 年期间没有观察到同样的现象 (NCP, 2013 年)。报告称在 2002-2005 年期间, 浓度倍增的时间在 3.5-6.2 年之间 (Su, 2007 年; Hung, 2010 年)。在 2007-2013 年期间, 没有在挪威的北极观察点 (也即齐柏林和安岛天文台) 观察到 BDE-209 在空气中的时间趋势 (NEA, 2014 年)。相反, 每年都会出现浓度波动。与此相反的是, 有报告称南极冰层的 BDE-209 浓度水平在 2001-2007 年期间保持稳定不变。(Dickhut, 2012 年)。在农村和城市的空气和降水中, BDE-209 的浓度水平受到扩散作用和点源的影响, 其模式更为复杂, 显示要么没有显著变化 (Ma, 2013 年), 要么随着时间增加 (Arinaitwe, 2014 年) 或下降 (Robson, 2013 年)。值得注意的是, 大多数关于空气或降水的研究都没有报告明确的时间或空间趋势。尽管 BDE-209 可以通过附着于空气中的颗粒物稳定下来 (de Wit, 2010 年), 但由于 BDE-209 光解/脱溴成为低溴多溴二苯醚, 可能导致观察不到任何时间趋势 (Wang, 2005 年; Xiao, 2012

年；还可参见 Meyer, 2012 年；Robson, 2013 年；Arinaitwe, 2014 年）。关于地理趋势，大多数研究报告的都是偶发监测数据，这通常会阻碍对空气监测数据进行地理比对。

82. 报告指出 BDE-209 在沉积物中的浓度和时间趋势。在从瑞士偏远湖泊取来的沉积物芯中，BDE-209 的浓度水平在 1990 年代至 2001 年稳步上升，倍增时间约为 9 年（Kohler, 2008 年）。取自城市/污染地区的沉积物芯显示，BDE-209 的倍增时间在 5.3 至 8.4 年之间（Chen, 2007 年 b；Kwan, 2014 年；Zhu 和 Hites, 2005 年；Zegers, 2003 年；UNEP/POPS/POPRC.10/INF5, 表 5.1）。根据对中国南部的一项研究，BDE-209 开始在中国的沉积物中增加的时间似乎比北美和欧洲晚 10-20 年，这可能体现了 BDE-209 的历史生产和使用模式在这些大陆的差异（Chen, 2007 年 b）。在取自北美洲纬度样带沿线的安大略湖、魁北克和纽约州北部的老沉积物芯中，通常仅在最近的沉积物中检测到 BDE-209，并且发现沉降通量沿纬度线呈指数下降（Breivik, 2006 年）。

83. 在观察到 BDE-209 在北极空气中的浓度水平上升的同时，Vorkamp（2005 年）发现，在 1986 年至 2003 年从格陵兰岛西南部采集的游隼蛋中，BDE-209 的浓度时间趋势呈上升趋势。这项研究中测得的浓度范围在 3.8 至 250 纳克/克脂重之间，中间值为 11 纳克/克脂重。在 1974 年至 2007 年从瑞典采集的游隼蛋中也观察到 BDE-209 浓度从小于 4 纳克/克脂重上升到 190 纳克/克脂重（Johansson, 2011 年）。发现英国游隼蛋中的 BDE-209 浓度从 1975 年至 1995 年一直在上升，之后从 1995 年至 2001 年呈下降趋势（Leslie, 2011 年）。还有报告称，在来自美国北部劳伦森湖的银鸥蛋中，BDE-209 的浓度随时间上升（Gauthier, 2008 年）。1982 年至 2006 年以来，BDE-209 的倍增时间从 2.1 至 3 年不等。相比之下，有报告称德国沿海的银鸥蛋中的 BDE-209 浓度一直保持稳定（Flidner, 2012 年）。在同一项研究中，1973 年至 2001 年期间，没有在雀鹰的肌肉组织中观察到 BDE-209 浓度的显著时间趋势，但后来几年发现了一些浓度较高的样本。在挪威，观察了 BDE-209 浓度在苔藓中的地理趋势（Mariussen, 2008 年）。在从南到北的样带中，观察到苔藓中的 BDE-209 浓度在下降，这表明 BDE-209 源自挪威南部的来源地，并通过大气过程向北极迁移且沿途沉降，从而造成所观察到的下降趋势的地理渐变情况。BDE-209 在挪威苔藓中的浓度水平也逐渐上升，这可能反映了其空气浓度水平的类似变化（SFT, 2002 年；Mariussen, 2008 年；CPAN, 2012 年 b）。

### 2.3.2 人类接触

84. 灰尘、室内空气和食物（程度较小），被视为是人类接触多溴二苯醚的最重要来源和途径（美国环保局，2010 年）。在这项评估中，家用消费品被确认为室内灰尘所含多溴二苯醚的主要来源。与此相对的是，加拿大的一项评估确认食物和灰尘是成人接触该物质的主要来源（HCA, 2012 年）。在德国、瑞典和英国，在室内空气中观察到的 BDE-209 浓度范围在 <LOQ 至 651 皮克/m<sup>3</sup> 之间（Harrad, 2010 年），灰尘中的浓度范围则为 63 至 10 000 纳克/克（Fromme, 2009 年）。BDE-209 在灰尘中的浓度远超过检测到的低溴多溴二苯醚的浓度总和（Frederiksen, 2009 年 a；EFSA, 2011 年；Besis 和 Samara, 2012 年）。BDE-209 在北美室内灰尘中的浓度与欧洲的该浓度进行了比对（<500-2000 纳克/克）（Fromme, 2009 年）。此外，根据 Besis 和 Samara 的审查，乘坐的汽车和航空器可能是接触多溴二苯醚的重大来源（2012 年）。在汽车灰尘中，BDE-209 的浓度水平中位数约比室内灰尘中的该浓度高出 20 倍，但该浓度水平在不同研究中大相径庭。这与德国最近的一项研究相符，该研究发现汽车、住房和办公室灰尘样本中的 BDE-209 浓度中位数分别为 940、45 和 120 纳克/克（Brommer, 2012 年）。住房灰尘中的 BDE-209 与母乳中的 BDE-209 有关，这表明 BDE-209 在室内环境中的浓度水平对哺乳期儿童接触该物质有影响（Coakley, 2013 年）。

85. BDE-209 广泛存在于食物，根据 Frederiksen 的审查（2009a），据报告其浓度范围在~2 至>50 000 皮克/克之间。通常在鱼类和贝壳类测得高浓度的低溴多溴二苯醚，同时在沙拉和乳制品中也发现 BDE-209，但这也可能是食品包装造成的。（Schechter, 2011 年；欧洲食品安全局 2011 年；Riviere, 2014 年）。与来自食物的摄取相比，饮用水和户外空气造成的 BDE-209 间接接触很低，通常被认为可以忽略。

86. 内照射剂量，例如使用人类生物监测评估得出的内照射剂量，反映了随着时间的推移来自各种来源和途径的接触量总和。在丹麦和西班牙开展的研究中，在胎盘样本中测得的 BDE-209 浓度范围在 0.05 to 8.4 纳克/克之间，其中位数为分别为 1.14 和 1.0 纳克/克脂重（Frederiksen, 2009 年 b; Gomara, 2007 年）。这两项研究都报告称，BDE-209 将是占主导地位的多溴二苯醚，约占多溴二苯醚总量的 50%。中国最近的几项研究中也观察到类似的同系物模式，发现产前胎盘浓度范围在 1.33 to 8.84 纳克/克脂重之间（中位数为 2.64 纳克/克脂重）（Zhao, 2013 年）。关于脐带血的生物监测研究显示，BDE-209 的中位数浓度范围在<1.2 至 27.1 纳克/克脂重之间（UNEP/POPS/POPRC.10/INF5, 表 4.1）。BDE-209 通常在多溴二苯醚总量中占最大比例。母乳中存在 BDE-209 仍然是婴儿早期接触 BDE-209 的原因。Frederiksen（2009 年 a）广泛审查了直至 2007 年公布的所有研究，审查显示报告的 BDE-209 浓度范围在 0.1 至 2.9 纳克/克脂重之间。最新研究报告了类似的浓度中位数（UNEP/POPS/POPRC.10/INF5, 表 4.1），但不同地理区域内部和彼此之间的 BDE-209 最大浓度值差距巨大。在职业接触情况不明的成人人口的血清和血浆中，显示 BDE-209 浓度水平在 1 至 18.5 纳克/克脂重之间（Frederiksen, 2009 年 a）。最新研究显示了类似浓度水平（UNEP/POPS/POPRC.10/INF5, 4.1），但中国兰州（以前为卤化阻燃剂的生产区）报告了极高的浓度水平（平均值为 220 纳克/克脂重）（He, 2013 年）。瑞典的一项研究从生活在乌普萨拉、在 1996 至 2010 年期间首次生育的母亲身上提取血清样本，检测了 BDE-209 的浓度（Lignell, 2011 年）。36 份血池的平均值为 1.3 纳克/克脂重，没有观察到明显的时间趋势。这与 1987 年、1994 年-1995 年和 1999 年在法罗岛采集的母乳样本中发现的缺少时间趋势的情况一致（Fängström, 2005 年 a）。综上所述，生物监测数据显示，世界各地都出现广泛和持续接触 BDE-209 的情况，并确认了胎儿接触和成人吸收的情况。

87. 关于职业接触的研究大多数来自斯堪的纳维亚和亚洲，这两地的高职业接触人群例如电子拆解工已成为主要关注对象。在瑞典有报告指出，电子拆解工和计算机技工血液中的 BDE-209 浓度中间值分别为 4.8 和 1.53 纳克/克脂重（Sjödén, 1999 年；Jakobsson, 2002 年），而在橡胶工人中，这一数值为 35 纳克/克脂重（Thuresson, 2005 年）。中国广泛存在在简陋条件下回收和拆解电子废物的情况，这日益引起关注。Guiyu 的 BDE-209 浓度中间值比之前报告的职业接触该物质的瑞典人口高出 50-200 倍（Bi, 2007 年）。Qu 的研究中报告了观察到的人类血清 BDE-209 最高浓度值（2007 年），即 3, 436 纳克/克脂重，比在普通人口中观察到的浓度值高出 3 000 倍。与此相反的是，一项最新的研究（Yang, 2013 年）并未发现电子废物回收点附近的居民与对照群体之间有显著不同。

88. 估计欧洲消费者的 BDE-209 膳食摄入平均值在每天 0.35（最低下限（LB））<sup>1</sup> 至 2.82 纳克/千克体重之间（最高上限（UB））（欧洲食品安全局 2011 年）。如果每 70 千克体重每日摄入 50 毫克灰尘，EFSA 估计成人的接触量为每天 0.045 至 7 纳克/千克体重。Lorber（2008）审查了美国的多溴二苯醚接触情况，审查显示就 BDE-209 而言，食入 104.8 纳克/天的土壤/灰尘是占

<sup>1</sup> 下限：数值<LOD/Q 即为 0 浓度值。上限：数值<LOD/Q 即为 LOQ/Q-浓度值。

最大比例的接触情况，其次为通过皮肤接触土壤/灰尘（25.2 纳克/天）。总接触量约为 147.9 纳克/天，其中食物和饮用水接触分别约为 16.3 和 0.09 纳克/天。如果体重为 70 千克，总接触量为每天 2.11 纳克/千克体重，EFSA 使用了该数值。加拿大卫生部估计加拿大成人的 BDE-209 每日摄入总量上限为 9.3 纳克/千克体重（20-59 年）（HCA，2012 年）。食物和室内灰尘是主要的接触来源，分别占总摄入量的 51%和 45%。

89. 最近，使用在欧洲、中国/台湾、加纳和印度测得的母乳中的 BDE-209 浓度水平估计了 3 个月及以下的母乳喂养婴儿的平均日摄入量。估计的摄入量十分相似，范围在 1.0（最低下限）至 13.8（最高上限）纳克/千克体重/天之间（Kortenkamp，2013 年）。加拿大卫生部（HCA，2012 年）估计 6 个月以下的母乳喂养婴儿的摄入总量将达到每天 50-187 纳克/千克体重，其中来自灰尘的摄入量为每天 40 纳克/千克体重。新西兰的一项研究估计 3 至 6 个月的婴儿的摄入量为 11.7 纳克/千克体重/天，而 6 至 12 个月的婴儿的摄入量估计 8.2 纳克/千克体重/天（Coakley，2013 年）。1 至 2 岁的儿童的 BDE-209 摄入量估计最高，达到 13.2 纳克/千克体重/天，这可能反映了该群体的最高灰尘摄入比率（60 毫克/天）。在这项研究中，测得来自灰尘和母乳的十溴二苯醚和其他多溴二苯醚的日摄入量低于美国环保局的参考剂量值（7 g/千克体重/天，美国环保局，2008 年）。

90. 有若干项研究显示，幼童和幼儿体内的多溴二苯醚浓度水平高于成人（Frederiksen，2009 年 a），观察到 BDE-209 的情况也是如此（Fischer，2006 年；Lunder，2010 年；Sahlström，2014 年）。对于幼儿，这是因为其行为导致其从屋内灰尘中吸收了大量多溴二苯醚。假定每日摄入 100 毫克的灰尘，估计 1-3 岁欧洲儿童的接触量范围在每天 0.53 到 83 纳克/千克体重之间，这一数值高于相应计算得出的膳食摄入量中间值（2.59 和 6.4 纳克/千克体重）（欧洲食品安全局，2011 年）。加拿大卫生部估计 0.5 至 4 岁年龄组的 BDE-209 日摄入量为 89 纳克/千克体重，其中来自膳食和灰尘的摄入量分别为 24 和 64 纳克/克千克体重。已查明儿童玩具，特别是硬塑料玩具，是儿童接触商用十溴二苯醚的潜在来源（Chen，2009 年）。这一接触值是根据对 0.5-4 岁年龄组的加拿大儿童的 BDE-209 口服摄入量建模得出的（加拿大卫生部，2012 年）。上限估计值为每天 120 纳克/千克体重，是该年龄组的土壤接触估计值的两倍。瑞典的一项关于母亲或幼儿组的同系物-同系物相互关系的研究显示，膳食是母亲接触四溴至九溴二苯醚的重要途径（Sahlström，2014 年）。对于婴儿而言，母乳喂养是接触四溴至六溴二苯醚的主要途径，灰尘是幼儿接触八溴至十溴二苯醚的最重要途径。尽管存在一些地理差异，目前所有 BDE-209 估计摄入量都指出灰尘接触的重要性，特别是对幼童而言。

## 2.4 对关切截至点的危害评估

91. 欧盟、联合王国、加拿大和美国开展的国家性和区域性评估了减少商用十溴二苯醚/BDE-209 对野生动物和人类的负面影响的可能性（例如，ECB，2002 年，2004 年，2007 年；英国环境署，2009 年；欧洲化学品管理局，2012 年 a；加拿大卫生部，2006 年，2012 年；美国环保局，2008 年；欧洲食品安全局，2011 年）。此外，BDE-209 和其他多溴二苯醚的毒性已经成为多篇科学论文和审查的主题（参见，例如 Dingemans，2011 年；Chen 和 Hale，2010 年；Costa 和 Giordano，2011 年；Kortenkamp，2014 年）。文献报告了对土壤中的生物、植物、鸟类、鱼类、青蛙、大鼠、小鼠和人类的毒性作用。已报告的 BDE-209 效应包括生物化学层面和细胞层面的变化，直至可能更加直接地影响更高层面的生物组织包括生存、成长、行为、免疫功能、生殖、发育、神经系统和内分泌调节作用。BDE-209 毒性的主要目标似乎是脊椎动物、肝脏、甲状腺激素轴和神经系统（审查结果，见 Costa 和 Giordano，2011 年）。在野生动物和人类中，早期发育阶段似乎比成人更易于受 BDE-209 接触的影响。此外，多溴二苯醚脱溴为毒性更高的多溴二苯醚已引起多项评估的关注（英国环境署，2009

年；欧洲化学品管理局 2012 年 a, c；加拿大环境部，2010 年；Kortenkamp, 2014 年）。一些研究要么报告无效应，要么仅仅报告高剂量的效应，而其他研究指出 BDE-209 可能在低剂量和/或环境相关浓度中产生负面效应。

#### 2.4.1 对水生生物的毒性

92. 商用十溴二苯醚及其主要成分 BDE-209 的水溶性有限，早期危害评估指出水生生物不太可能在浓度低于水溶性的情况下出现急性或慢性毒性作用（例如，ECB, 2002 年，2004 年，2007 年；英国环境署，2009 年）。不过，根据记录了对重要生物学截至点（包括生殖、发育、神经系统、内分泌系统、生长和适应性）影响的新研究，欧盟最近有关 BDE-209 的评估也对水生生物受到的负面影响提出了关切（欧洲化学品管理局，2012 年 a）。

93. 水生毒性研究揭示了对水生生物的多种作用，主要是对鱼类和两栖动物的作用。研究显示，通过影响 TH 系统，包括九溴二苯醚和 BDE-209 在内的多溴二苯醚有可能影响两栖动物的发育和变态。（Schriks, 2006 年，2007 年；Balch, 2006 年；Qin, 2010 年）。根据目前的研究，BDE-209 和 BDE-206（商用十溴二苯醚中出现的同系物之一，也可能是 BDE-209 的降解产物）可延迟非洲爪蛙蝌蚪变态。在 Shricks（2006 年）的研究中，观察到离体尾部在接触 BDE-206 之后，尾尖衰退情况显著减少。在最新关于商用十溴二苯醚（DE-83R, 包括 98.5% w/w 的 BDE-209）的体内研究中，报告称非洲爪蛙蝌蚪的变态受到了影响，前肢出现的时间被推迟（Qin, 2010 年）。在前肢延迟出现的同时，出现了甲状腺组织学变化，尾组织中的甲状腺受体的表达减少。根据这项研究，指出导致非洲爪蛙蝌蚪变态延迟的水生无抑制浓度约为 0.001 毫克/升（1 微克/升）。（欧洲化学品管理局，2012 年 a）。研究还表明，在发声系统发育雄激素敏感关键期以及身体各组织利用雄激素发声的成体期，在流过接触 0 ppb、0.1 ppb、10 ppb 和 100 ppb 剂量 12 周之后，非洲爪蛙的喉部运动神经元受到影响，改变了其发声系统的解剖结构和功能（Ganser, 2009 年）。在这项研究中，BDE-209 也能减少呼叫数量和平均呼叫幅度，从而抑制雄性典型发声，而这是交配行为的一个重要方面。数据显示，通过阻断正常发声系统所必需的雄激素，BDE-209 会改变解剖结构和功能。考虑到野生青蛙在蛙卵阶段就已经接触 BDE-209 而且该物质可从青蛙的大脑转移到睾丸，这些研究发现可能会引起关注（Liu, 2011 年 c；Wu, 2009 年 a）。

94. 在鱼类中，在环境相关浓度中对黑头呆鱼开展的受控饲养研究显示，BDE-209 要么单独干扰黑头呆鱼成鱼和幼鱼的 TH 系统，要么与其脱溴产物一同起作用（Noyes, 2011 年，2013 年）。在后一项研究中，成鱼在膳食接触低剂量 BDE-209（每天 3 纳克/克体重）28 天之后，显示与控制组相比，流通总甲状腺素（TT4）和 3,5,3'碘甲状腺原氨酸（TT3）分别下降 53% 和 46%（Noyes, 2013 年）。在接触高剂量 BDE-209（300 纳克/克体重）之后，鱼类的 TT4 和 TT3 水平分别减低至 62% 和 59%。无论是接触高剂量还是低剂量，14 天的净化期之后，鱼类的 TH 水平仍然受到抑制。与受控制组相比，这两个剂量还会使脑脱碘酶（T4-ORD）的活性减少 65%。同样，Chen（2012 年 a）的研究表明，BDE-209 会对 T3 和 T4 的浓度产生影响，从而有可能导致斑马鱼在生命早期受到负面影响。Li（2011 年）观察到稀有鮡鲫幼体和成体在水中接触 0.01-10 微克/升剂量的 BDE-209 达 21 天之后，TH 相关基因的表达发生变化。与这些发现相反的是，Thienpont（2011 年）和 Garcia-Reyero（2014 年）报告称，鱼胚胎在接触 BDE-209 之后其甲状腺功能未受到明显影响。不过，应该指出的是，Thienpont（2011 年）在将 48 小时受精胚胎暴露在 960 微克/升的 BDE-209 中 3 天之后，发现所采用的实验，也即 T4 免疫荧光定量中断测试，不适合用于检测可间接破坏甲状腺功能的化学污染物例如 BDE-209 的影响。Garcia-Reyero（2014 年）推测，这些研究未说明对 TH-系统的影响，这可能是由于接触时间较短和/或使用的剂量低于 Noyes（2011 年）和 Chen（2012 年 a）使用的剂量。Morgado（2007 年）对若干多溴二苯醚在鱼类中潜在的 TH 中断效应进行了

体外研究，结果为阴性。在这项研究中，没 BDE-209 或 BDE-206 都没有显示出对鲟鱼转甲状腺素（TTR）（一种血液中的 TH 结合蛋白）的任何结合作用。该结果表明，BDE-209 可能不会干扰 TH 与 TTR 结合。

95. 在鱼类接触 BDE-209 之后，都观察到其他慢性和急性效应。在上述 2013 年以来的膳食研究中，Noyes 观察到百分比累计死亡率显著上升，同时体细胞指数的下降。Chen（2012 年 a）观察到斑马鱼幼体在水中接触 1.92 毫克/升的 BDE-209 达 14 天之后，其体重和存活率显著下降。在任何测试的较低接触剂量下，都未观察到显著变化（0, 0.08, 0.38 毫克/升）。

96. 基于对喂食 BDE-209-加标饮食（受控，0.1、1 和 2 微克/克饮食）的湖白鲑幼体的耳石增加宽度的测量（~5 月龄），有迹象显示，处于在沉积物中发现的 BDE-209 环境相关浓度中时，BDE-209 可能会影响鱼类的生长速度（Kuo, 2010 年；de Wit, 2002 年）。

97. He（2011 年）记载了在对斑马鱼小剂量慢性毒性研究中发现的对整体健康、生殖参数和行为以及运动神经和骨骼肌发育的影响。He（2011 年）报告的若干影响为跨代影响，也即在接触后的亲本的后代中观察到这些影响，而且研究者称，这可能是 BDE-209 在怀孕的母体中转移造成的。在雄鱼中，即使是最低接触剂量（0.001  $\mu\text{M}$  or 0.96 微克/升），精子质量指标也受到明显影响。

98. BDE-209 的潜在生殖毒性也在稀有鮡鲫中体现（Li, 2011 年）。在这项研究中，当稀有鮡鲫成体经水暴露在 1 微克/升的 BDE-209 中时，精母细胞减少，精子被抑制。在接触 0.1-10 微克/升的 BDE-209 后，稀有鮡鲫的幼体和成体中都观察到 TH 表达和精子发生相关基因的变化。在浓度为 10 微克/升时，观察到对雌性成体身长和成熟指数的加成影响，但在任何测试浓度下均未在卵巢发现显著的组织学变化。此外，未观察到雄性幼体和成体的身长或死亡率的变化。

99. 在上述研究中（Garcia-Reyero 2014 年），BDE-209 影响神经通路的表达，改变了斑马鱼幼体的行为，但对 TH 功能或运动神经元和神经丘发育无明显影响。在这项研究中，斑马鱼暴露于浓度为 12.5 毫克/千克 的 BDE-209 加标沉积物。8 天后，测得的暴露幼体中的浓度和溶剂对照浓度分别为 69.6 $\pm$ 9.8 纳克/克湿重 和 6.7 $\pm$ 0.5 纳克/克湿重。

100. 除上文所报告的其他效应之外，BDE-209 也显示可诱导金鱼肝脏的氧化应激。单次腹腔注射 10 毫克/千克之后 7-30 天，观察到谷胱甘肽水平和抗氧化酶（谷胱甘肽过氧化物酶，超氧化物和过氧化氢酶）的活性降低（Feng, 2013 年 a, b）。

101. 在上述若干鱼类研究中，有报告称 BDE-209 脱溴为低溴多溴二苯醚（Noyes, 2011 年, 2013 年；Chen, 2012 年 c；Kuo, 2010 年；He, 2011 年），因此除 BDE-209 之外的其他多溴二苯醚同系物也有可能促成这些研究中报告的效应。有报告称，脱溴产物包括九溴、八溴、七溴、六溴和五溴二苯醚。

102. 综上所述，有报告称，经水接触的水生最低无抑制浓度似乎低于 0.001 毫克/升（1 微克/升），并观察到两栖动物延迟变态。根据 Noyes（2013 年）称，3 纳克/克体重/天 或 0.41 纳克/克湿重食物的 BDE-209 最低观测效应水平可以导致对鱼类的 TH 破坏性影响和鱼类死亡。总体来说，水生毒性数据表明，BDE-209 可以对关键的端点，例如生存、成长、健康、生殖、发育、体维护、甲状腺激素平衡和神经功能产生不良影响。此外，这些数据增加了对 BDE-209 的生物累积性潜力和在环境中的生物脱溴的关注，因为这些情况表明 BDE-209 的累积可导致哺乳动物、鱼类和两栖类在脆弱生命阶段受到不利影响（Chen, 2012 年 a；He, 2011 年；Noyes, 2011 年）。在一些实验中使用的浓度水平相当于污染较为严重地区的浓度水平（Zhang, 2010 年 a；Wang, 2011 年 b）。

## 2.4.2 土壤生物和植物中的毒性

103. 目前已有关于土壤微生物、植物和蚯蚓的毒性数据。大多数已公布的数据是新数据，没有在任何之前的风险评估和评价中审查（例如，欧洲化学品管理局 2012 年 a；英国环境署，2009 年；加拿大环境部，2006 年）。基于植物毒性研究（Porch 和 Krueger, 2001 年）以及两项为期 28 天和 56 天的蚯蚓毒性研究，欧洲中央银行（2002 年）报告称，在浓度达到 5 349 毫克/千克干重时没有观察到植物毒性效应，可以推导出对蚯蚓的最低无效应浓度 $\geq$ 4 910。基于这些结果，并使用土壤评估系数 50 PNEC，估计得出的值为 98 毫克/千克干重和 87 毫克/千克湿重。

104. Xie（2011 年）观察到，在 BDE-209 达到 0.01-10 毫克/千克 浓度水平时，蚯蚓中的羟自由基水平显著增长，但该浓度水平未超出已报告的土壤环境浓度水平的范围（Syed, 2013 年）。该效应与对蛋白质和脂质的氧化性损伤以及抗氧化能力降低的情形同时出现。在这项研究中，在低至 0.01 毫克/千克的浓度水平上观察到氧化应激和氧化脂质损失（Xie, 2011 年）。在同一研究者开展的最新急性研究中，调查了在接触 0.1-100 毫克/千克的 BDE-209 达 48 小时和 28 天之后对行为、生存、生长和繁殖参数的影响。在 1 000 毫克/千克的 BDE-209 浓度水平下，茧孵出幼体的数量显著下降，回避反应没有明确改变，除此以外没有报告其他效应，表明蚯蚓成体对土壤中的 BDE-209 的容忍度高，但对蚯蚓胚胎或幼体存在潜在毒性（Xie, 2013 年 b）。

105. Xie（2013 年 a）观察到，当黑麦草幼苗接触 100 毫克/千克浓度水平的 BDE-209 之后，根系生长被抑制 35%，叶绿素 b 和叶片类胡萝卜素含量降低 30%。未观察到其他可见毒性迹象，但自 1 毫克/千克浓度水平开始，接触 BDE-209 会引起氧化应激和损伤，改变一些抗氧化酶的活性，降低非酶抗氧化能力。在 BDE-209 浓度水平最高达 1 000 毫克 /千克加标土壤中，Sverdrup（2006 年）没有观察到对硝化菌、红三叶草出苗或土壤无脊椎动物的生存和繁殖的影响，并推测没有出现毒性可能是 BDE-209 的低水溶性造成的。

106. 总之，BDE-209 似乎对植物和土壤有机物不具有急性毒性，而且通常在高剂量时才观察到不良反应（欧洲中央银行，2002 年；Sverdrup, 2006 年；Xie, 2013 a, b）。不过，新数据表明，在比以往低的剂量下（0.01-1 毫克/千克），有时也会出现 BDE-209 的致毒效应（Zhu, 2010 年；Liu, 2011 年 a；Zhang, 2012 年，2013 年 c；Xie, 2011 年，2013 年 a）。

## 2.4.3 在鸟类中的毒性

107. 如 Chen 和 Hale（2010 年）强调的那样，有报告称野生动物中最高的 BDE-209 浓度出现在鸟类中，有可能导致出现不良反应的风险（欧洲化学品管理局，2012 年 a，另见 UNEP/POPS/POPRC.10/INF5，表 5.2）。不过，目前只有数量有限的研究审查了接触 BDE-209 对鸟类产生的负面影响。

108. 在一项关于在污水处理厂筑巢的燕子的研究中，发现卵的大小与 BDE-209 浓度水平之间存在正相关关系，但没有发现与生殖参数的显著相关性（Gilchrist, 2014 年）。没有报告 BDE-209 的浓度。

109. Sifleet（2009 年）观察到在经由卵黄囊给圈养鸡的胚胎单剂注射 80 微克/egg 剂量的 BDE-209 并接触 20 天之后，死亡率高达 98%。这项研究报告的半数致死剂量为 44 微克/蛋（740 微克/千克湿重）。欧盟的一项评估显示，在野生鸟类的蛋中发现的 BDE-209 浓度通常比 Sifleet（2009 年）报告的致死浓度低 2-10 倍（欧洲化学品管理局，2012 年 a）。已报告的鸟蛋中的浓度范围通常为 1-100 微克/千克湿重，但最高为 420 微克/千克（欧洲化学品管理局，2012 年 a）。尽管存在重大研究局限，但欧盟的风险评估表明，野生鸟类的接触浓度与观察到的效应浓度之间的差距并不大，尤其是考虑到 Sifleet（2009 年）并没有将潜在的亚致死效应考虑在内，并且在孵化和剩余蛋黄解吸之后有可能吸收更多 BDE-209，从而进一步增加接触量。

110. 观察到欧洲棕鸟经硅胶假体接触 BDE-209 后体重减少 (van den Steen, 2007 年)。

111. 有报告称, 鸟类可将 BDE-209 代谢为低溴多溴二苯醚, 包括一些持久性有机污染物-二苯醚 (BDE-183) (Letcher, 2014 年), 而且接触低溴多溴二苯醚与免疫调节改变、发育毒性、生育行为改变、生育能力下降和繁殖成功率改变有关 (情况概览见 Chen 和 Hale, 2010 年; Glichrist, 2014 年; 持久性有机污染物审查委员会, 2007 年)。在一项关于接触 DE-71 (一种商用五溴二苯醚的混合物) 的捕获美洲红隼的研究中, 在卵内环境相关浓度下, 发现 BDE-209 低浓度水平 (<2.5 %) 与雄性红隼在求偶期和育雏期的飞行行为增加有关。(Marteinsson, 2010 年)。没有报告在这项研究中测得的 BDE-209 浓度。这些结果表明, BDE-209 像其他多溴二苯醚一样, 可能会影响鸟类的行为, 这与对实验室啮齿动物的研究结果一致, 其中一些研究报告称 BDE-209 引起自发行为改变。关于对啮齿类动物行为影响的全面讨论, 请参阅下文第 2.4.4 节。

#### 2.4.4 在陆生哺乳动物中的毒性

112. 主要在啮齿动物中调查商用十溴二苯醚对陆生哺乳动物的毒性。虽然已报告的效应中包括生殖毒性, 但数据却特别指向神经发育毒性和对 TH-系统的影响。此外, 现有的科学证据表明, BDE-209 可单独与其他多溴二苯醚共同对陆地哺乳动物和人类产生发育神经毒性 (Dingemans, 2011 年; Messer, 2010 年; Kicinski, 2012 年; Costa 和 Giordano, 2011 年; 加拿大卫生部, 2006 年, 2012 年; Gascon, 2012 年; Chao, 2011 年; Kortenkamp, 2014 年)。

113. 发育神经毒性是已报告的多个多溴二苯醚的关键端点 (Blanco, 2013 年; Branchi, 2002 年; Eriksson, 2001 年; Kuriyama, 2005 年; Rice, 2007 年, 2009 年; Suvorov, 2009 年; Viberg, 2003 年, 2004 年, 2007 年; Xing, 2009 年; Zhang, 2013 年 a; UNEP/POPS/POPRC.10/INF5, 表 6.1)。建议的几种发育神经毒性机制包括甲状腺内稳态受损、神经细胞和干细胞的直接中毒以及干扰神经传导系统 (Costa, 2014 年)。一些研究也报告了 BDE-209 的发育神经毒性 (Johansson, 2008 年; Viberg, 2003 年, 2007 年; Rice, 2007 年, 2009 年; Fujimoto, 2011 年; Heredia, 2012 年; Chen, 2014 年; Reverte, 2013 年, 2014 年; Buratovic, 2014 年; Mariani, 2014 年), 但其他研究未报告此种毒性 (Biesemeier, 2011 年)。Mariani (2014 年) 报告称, BDE-209 对老鼠的神经发育影响达到了严重影响孕妇的剂量水平。Neurobehaviora, 最近也报告了 BDE-209 在啮齿动物幼体发育或成年期间对神经行为的影响 (Buratovic, 2014 年; Heredia, 2012 年; Chen, 2014 年; Reverte, 2013 年, 2014 年)。例如, 转基因小鼠在出生后接触 BDE-209, 观察到其空间学习和记忆受到持久的影响, 并发现野生小鼠的焦虑程度下降, 完成空间记忆任务时学习延迟 (Reverte, 2013 年; Heredia, 2012 年)。在另一项研究中, 产后每天口服单剂 BDE-209 达 10 天, 也观察到造成携带两个载脂蛋白 E 变体也即 apoE2 和 E3 的小鼠的情感学习和 TH-水平受长期影响 (Reverte, 2014 年)。此外, Chen (2014 年) 报告称, 大鼠在产前接触 BDE-209 以剂量依赖方式妨碍学习习得, 并且体外数据表明, 这种阻碍大鼠学习习得的情形可能与对大脑神经的影响有关。

114. 绝大多数关于 BDE-209 的发育研究都采用了口服给药, 但仅有少数研究是根据经合组织第 426 号准则“发育神经毒性研究”设计的 (经合组织, 2007 年)。Viberg (2003 年, 2007 年) 和 Johansson (2008 年) 观察到, 在“大脑井喷式增长”期对大鼠和小鼠单剂给药 BDE-209, 导致其行为、习惯和记忆持续和持久性改变。其他研究人员 (例如 Hardy, 2008 年, 2009 年; Goodman, 2009 年; William 和 DeSesso, 2010 年) 提到了以往各项研究的局限性, 不用鼠仔作为统计评价依据时尤其如此。尽管如此, 但美国环保局在推导 BDE-209 的口服参考剂量时还是采用了 Eriksson 和 Viberg 的研究 (见美国环保局 2008 年的审查)。Rice (2007 年) 开展的一项研究并未显示小鼠的运动活动随着时间

的推移受到持续的抑制，不过随访研究显示，在小鼠 16 个月时进行的测试表明存在长期持续的神经行为缺陷（Rice, 2009 年）。与 Viberg（2003 年, 2007 年）和 Johansson（2008 年）的发现类似，随着年龄增长，接触 BDE-209 对行为的影响愈加严重。若干出版物提供了更多关于 BDE-209 影响神经发育的证据，指出多溴二苯醚会影响大鼠和小鼠大脑的胆碱能系统，导致认知（学习和记忆）受到干扰（Fischer, 2008 年 a; Viberg, 2003 年, 2007 年; Liang, 2010 年; Buratovic, 2014 年）。进一步的支持证据表明，BDE-209 是一种哺乳动物神经毒物，Fujimoto（2011 年）指出，接触 BDE-209 会导致左右大脑半球之间区域（胼胝体面积）的神经连接减少，给大鼠造成不可逆的脑白质少突胶质细胞发育不良。这种作用伴随甲状腺功能减退症同时出现。与此相对的是，Biesemeier（2011 年）对接触了 BDE-209 的 2、4 和 6 月龄大鼠的运动活动和行为进行了评估，但报告称在任何剂量水平都没有出现临床症状，或任何神经行为改变，或对惊吓反应或学习行为的影响。不过，后来 Shibutani（2011 年）对 Biesemeier 的研究进行了严格评估，指出其忽略了甲状腺相关效应、神经细胞迁移病理参数、少突胶质细胞的发育以及关于脑半球高度显著下降及桥脑和皮层垂直厚度减少的讨论。加拿大卫生部（2012 年）的报告也讨论了 Biesemeier 的研究，该报告中提出的 LOAEL 值和 NOAEL 值低于原始报告中提出的值。

115. 与 Chen（2014 年）的研究结果一致的是，其他研究也显示 BDE-209 会对神经细胞产生直接毒性作用（Dingemans 已于 2011 年审查；UNEP/POPS/POPRC.10/INF5, 表 6.2）并产生干扰神经信号、神经发育和诱导氧化应激和细胞凋亡效应（Chen, 2010 年 b; Huang, 2010 年 b; Al-Mousa 和 Michelangeli, 2012 年; Hendriks, 2012 年; Liang, 2010 年; Xing, 2010 年），可能导致神经毒性并通过影响长时程协同作用来干扰学习和记忆，如 Viberg（2008 年）、Xing（2009 年）和 Mariani（2014 年）的研究所。进一步显示 BDE-209 可导致改变基因表达和细胞内蛋白质水平，干扰突触和细胞分化（Pacyniak, 2007 年; Viberg, 2008 年, 2009 年; Zhang, 2010 年 b; Song, 2013 年; Mariani, 2014 年）。

116. 除神经毒性作用之外，现有的数据还指出 BDE-209 和低溴多溴二苯醚是潜在的内分泌干扰物。多溴二苯醚在结构上类似于 THs，如前所述，会对 TH 系统产生影响（TH: T4 和 T3），除具有上述各种作用之外，由于 BDE-209 和多溴二苯醚的潜在神经毒性机制，对神经细胞有直接毒性作用（Ahmed, 2008 年; Gilbert, 2012 年; Dingemans, 2011 年）。体外（Hamers, 2006 年; Ibhazehiebo, 2011 年; Ren, 2013 年 b）和体内研究对 BDE-209 给药后对 TH/TSH 的影响（UNEP/POPS/POPRC.10/INF5, 表 6.3）进行了评估，显示 BDE-209 和其他多溴二苯醚干扰了 TH 系统，但关于 BDE-209 或商用十溴二苯醚混合物的评估结果与观察到的作用并不一致。例如，虽然大多数动物研究都报告称在大量接触 BDE-209 之后，T3 水平下降（Lee, 2010 年 b; Chi, 2011 年; Fujimoto, 2011 年），但也有报告称 T3 水平未发生改变（Wang, 2010 年 a; Zhou, 2001 年），或者报告称 T3 水平上升了（Van der Ven, 2008 年; Wang, 2011 年 c）。关于 T4，有的动物研究报告称在高剂量的情况下，T4 水平下降（Rice, 2007 年; Kim, 2009 年; Chi, 2011 年; Fujimoto, 2011 年），有的却报告称没有变化（Tseng, 2008 年; Van der Ven, 2008 年; Wang, 2010 年 a, 2011 年 c; Lee, 2010 年 b; Zhou, 2001 年）。在 TSH 方面，有两项动物研究涉及 BDE-209（Kim, 2009 年; Lee, 2010 年 b），这两项研究都报告称在接触最高剂量 BDE-209 之后，TSH 水平上升，但报告称在按照 0.3-300 毫克/千克/天的剂量对成年大鼠给药商用十溴二苯醚混合物 DE-83R 四天之后，没有出现任何作用。重复膳食给药 BDE-209（高剂量）会诱发雄性小鼠甲状腺滤泡细胞增生，但雌性小鼠或任何性别的大鼠中都没有出现这种现象（NTP, 1986 年）。在报告称大鼠和小鼠的 TH/TSH 水平显著改变的研究中，通常的给药剂量要高于人类接触量。不过，关于啮齿类动物后代的研究表明，低剂量的 BDE-209 可对发育中的甲状腺器官产生不利影响。（Kim, 2009 年; Lee, 2010 年

b; Fujimoto, 2011 年)。最近的世卫组织/环境署报告 (2013 年) 认为, 在低环境浓度水平下, 内分泌干扰物可能会导致不利影响, 可能会表现出非单调剂量-反应, 接触时机或许比接触浓度更重要。因此, 已报告的 TH/THS 作用相互不一致的情况可能是因为, 或者至少有一部分原因在于这些研究中使用的实验条件不相同。

117. 研究表明, 在母本的子宫接触高剂量 BDE-209 之后, 可能产生生殖毒性, 导致发育异常, 例如肛门-生殖器距离减少和睾丸组织病理变化、精子头部畸形和精子染色质 DNA 损伤 (Tseng, 2006 年, 2013 年; van der Ven, 2008 年)。还有报告称, 在低剂量下产后接触 1-5 天之后, 睾丸发育受到影响 (Miyaso, 2012 年)。已报告的低剂量效应 (0.025 毫克/千克, 皮下) 包括睾丸重量和精子计数降低、细长精子细胞和睾丸支持细胞的数量减少, 以及蛋白质表达改变和磷酸化状态。此外不可能完全排除对男性 (van der Ven, 2008 年) 和女性 (Hamers, 2006 年; Gregoraszcuk, 2008 年) 生殖系统的性激素调节。相比之下, 在自妊娠开始就接触 BDE-209 的 Sprague-Dawley 怀孕雌性大鼠中, 0-19 天后未观察到生殖毒性 (Hardy, 2002 年)。同样, Ernest (2012 年) 报告称, 三种商用二苯醚的混合物 (52.1% 的 DE-71, 0.4% 的 DE-79 和 44.2% 的商用 BDE-209) 影响了肝脏和甲状腺生理学, 但没有影响接触后的雄性大鼠的生殖参数。不过, 在雌性小鼠的肾上腺中, 观察到脱氢表雄酮合成法的活性下降, 这说明 CYP17 酶的活性降低, 并且对类固醇激素的生产有潜在影响 (van der Ven, 2008 年)。此外, BDE-209 可在体外抑制雌激素磺基转移酶 (Hamers, 2006 年), 这可能牵连体内的内源性雌激素在 (本地) 增加。在另一项体外研究中, Gregoraszcuk (2008 年) 发现接触 BDE-209 会导致豪猪卵巢细胞中的睾酮、孕激素、雌二酮分泌增加, 这一发现表明, BDE-209 可通过干扰排卵诱发窦状卵泡的早产黄体化。

118. 有报告称大鼠接触 BDE-209 之后出现氧化应激和葡萄糖体内平衡受损情况。观察到大鼠在接触 BDE-209 (剂量为 0.05 毫克/千克) 8 周之后, 出现剂量相关空腹高血糖症 (Zhang, 2013 年 e)。通过减少氧化应激标志物谷胱甘肽和超氧化物歧化酶, 观察到血浆中的胰岛素水平降低, 而肿瘤坏死因子 (TNF- $\alpha$ ) 水平增加。观察到剂量依赖性的形态变化, 例如胰岛细胞之间的模糊边界 (Zhang, 2013 年 e)。Van der Ven (2008 年) 也在雄性大鼠 28 天暴露研究中对胰岛进行了观察, 未发现各暴露组之间存在差异。与已经报告的对类固醇和 TH 系统的作用类似, 观察到对葡萄糖稳态/胰岛素水平有影响, 表明 BDE-209 有可能干扰内分泌。

119. 一些研究报告了 BDE-209 的免疫毒性作用 (Teshima, 2008 年; Watanabe, 2008 年, 2010 年; Zeng, 2014 年), 但不认为免疫毒性是普通多溴二苯醚的关键毒性端点。大多数最新研究显示, BDE-209 是一种免疫毒物, 观察到小鼠长期接触 BDE-209 之后, 定性和定量的 CD8 T 细胞应答都有所减少 (Zeng, 2014 年)。与这些研究相反的是, van der Ven (2008 年) 报告称对大鼠 T 细胞没有免疫毒性作用。

120. 有意见认为在接触 BDE-209 或其他多溴二苯醚之后不会出现基因突变 (Anderson, 1990 年; EFSA, 2011 年; HCA, 2012 年; JETOC, 2000 年; Kirkland, 2005 年; NTP, 1986 年), 但最近的研究表明, BDE-209 可以通过在体外诱导氧化应激引起 DNA 损伤 (Ji, 2011 年; Tseng, 2011 年)。能证明 BDE-209 对实验动物 (欧洲食品安全局, 2011 年; 加拿大卫生部, 2012 年) 有致癌性的证据有限。根据 NTP 的报告 (1986 年), 有一些证据证明, 在高剂量水平时, 大鼠肝脏腺瘤增加, 小鼠肝腺瘤和癌增加, 但这可能与行动辅助模式有关 (欧洲食品安全局, 2011 年)。

#### 2.4.5 人体毒性

121. 多项研究评估了 BDE-209 和其他多溴二苯醚对人体的风险。主要重点是评估神经发育毒性风险, 它通常被认为是对哺乳动物的最关键作用。

122. 如第 2.3.4 节所述, 观察到人类在发育早期就已经发生接触, 也即通过胎盘转移在子宫内接触和通过母乳在产后接触 (例如, Gómara, 2007 年; Kawashiro, 2008 年; Wu, 2010 年; Miller, 2012 年; Mannetje, 2013 年; Coakley, 2013 年), 这佐证了认为在哺乳动物模式中观察到的神经发育毒性也可能影响人类的观点。流行病学数据进一步证明了对影响人类健康的风险。尽管被测试者人数有限, 但研究显示初乳中的 BDE-209 浓度水平与 12-18 个月儿童较低的智力发育分数有关联 (Gascon, 2012 年), 而且人类在出生前或出生后接触 BDE-209 会延迟认知, 并可能会影响神经系统的发育 (Chao, 2011 年)。此外, 一些流行病学研究认为接触多溴二苯醚可能导致人体神经发育毒性 (Harley, 2011 年; Hoffman, 2012 年; Herbstman, 2008 年; Chevrier, 2010 年, 2011 年; Gascon, 2011 年; Roze, 2009 年; Eskenazi, 2013 年; Schreiber, 2010 年)。一些人类研究也观察到 TH/TSH 水平与接触 BDE-209 或其他高溴同系物例如 BDE $\geq$ 183 有关联 (Huang, 2014 年; Zota, 2011 年; Wang, 2010 年 c; 见 UNEP/POPS/POPRC.10/INF5, 表 6.4)。

123. 对 BDE-209 的风险定性以及危害和剂量反应评估表明, 美国和加拿大每日摄取的 BDE-209 不太可能导致婴儿神经发育毒性 (加拿大卫生部, 2012 年; 美国环保局, 2008 年; 2010 年)。欧洲食物安全局也认为, 母乳喂养的婴儿当前的 BDE-209 膳食接触或摄入不会在欧盟引起健康问题 (欧洲食物安全局, 2011 年)。在欧洲食物安全局调查的四种多溴二苯醚 (BDE-47, BDE-99, BDE-153 和 BDE-209) 中, 仅确认当前膳食接触 BDE-99 有可能产生健康问题 (欧洲食物安全局, 2011 年)。最近一项基于 0-5 岁儿童经口服、皮肤和吸入方式接触多溴二苯醚的风险评估显示, 对限制在汽车座椅中的婴儿没有不良健康影响风险 (Fowles 和 Margott, 2013 年)。不过, 这些评估没有考虑到多种多溴二苯醚可协同作用, 从而诱导产生体外数据所示的累加或协同效应, 也没有考虑到有可能存在多个接触来源 (例如, Pellacani, 2012 年; Tagliaferri, 2010 年; Llabjani, 2010 年; Karpeta 和 Gregoraszczyk, 2010 年; Hallgren 和 Darnerud, 2002 年; He, 2009 年)。

#### 2.4.6 混合毒性与多重压力的综合影响

124. 在环境中, 除有毒化合物的固有性能之外, 还有许多因素会影响对该化合物的接触和响应以及产生不良效应的可能性。这些因素包括环境温度、盐度和酸碱值、微生物的生理状态、毒代动力学过程、食物网和营养结构以及环保运输、分配和转移机制及沉积 (情况概览见 Letcher, 2010 年; Schiedek, 2007 年; 北极监测和评估方案, 2011 年; 持久性有机污染物审查委员会, 2013 年 b)。气候变化对生态系统的的影响也可能对其中几个因素产生作用, 危险化学品可对生物体适应气候变化和忍受其物理环境的能力产生影响 (北极监测和评估方案, 2003 年; 持久性有机污染物审查委员会, 2013 年 b; 环境署/北极监测和评估方案, 2011 年; NCP, 2013 年)。此外, 野生动物和人类通常不仅会接触 BDE-209, 而且会暴露于多种多溴二苯醚的复杂混合物和其他持久性有机污染物 (de Wit, 2006 年, 2010 年; Kortenkamp, 2014 年; 欧洲食物安全局, 2011 年; NCP, 2013 年)。因此, 在考虑对人类和野生动物产生不利影响的可能性时, 需要把所有这些因素都考虑在内, 并有可能要提供额外的关注理由。

125. 虽然 BDE-209 与其他多溴二苯醚的混合物的毒性在很大程度上还没有被实验研究, 但观察到 BDE-47 与 BDE-99 结合后可在神经元细胞中诱导协同细胞毒性作用 (Tagliaferri, 2010 年)。此外, 在人体血液中检测到的多溴二苯醚同系物 (BDE-47, -99, -100 和 -209) 混合物的浓度水平会对卵泡的激素分泌产生不可逆的影响 (Karpeta, 2010 年)。这项研究的结果表明, 多溴二苯醚的综合影响可能比单个同系物的影响之和大得多。其他持久性有机污染物的存在也可能影响多溴二苯醚的毒性。在一项关于多氯联苯与多溴二苯醚的二元混合物的体外研究中 (BDE-47, -153, -183 或 209), Ljabljani (2010 年) 发现 PCB-126 和多溴二苯醚可能会互相抑制, 而 PCB-153 与多溴二苯醚联合则可能加剧

所观察到的生化改变。多溴二苯醚被认为是潜在的内分泌干扰物，可在低浓度下发生相加作用（环境署/ 世界卫生组织，2013 年）。

126. Kortenkamp (2014 年) 介绍了更多关于多溴二苯醚之间可能的混合毒性的迹象，基于使用危害指数办法得出的浓度加和，他评估了 BDE-209 与其他多溴二苯醚之间对人类和野生动物发生联合作用的可能性和类别。虽然共同行动模式尚未充分确立，但常见不良后果已经确定。这项研究发现，可以预计 BDE-209 能与其他多溴二苯醚一起对人类和野生动物产生合并神经发育毒性（Kortenkamp, 2014 年）。对于人类，这项研究表明，考虑到合并接触多溴二苯醚的情况，所有年龄组特别是儿童都超过了容许合并接触量。尽管研究者指出必须开展进一步研究，但混合风险评估仍然表明，合并接触 BDE-209 和其他多溴二苯醚可能会带来显著的健康问题，尤其是对 6 个月至 3 岁的幼小儿童，在所有年龄组中，该年龄组的多溴二苯醚接触风险最高。这项研究还表明，包括北极顶级捕食者北极熊在内的野生动物有合并接触多溴二苯醚的风险。相对于其他的多溴二苯醚而言，发现 BDE-209 未显著促成野生动物的整体风险。总的来说，这项研究表明，如果仅考虑 BDE-209 而不考虑合作接触其他多溴二苯醚，会导致低估风险。Villanger (2011 年 a, b, 2013 年) 也提出类似的问题，他指出有机卤素污染物的混合物，包括一些多溴二苯醚 (BDE-28, -47, -99, -100 和 -153) 在内，可能会影响北极海洋哺乳动物的甲状腺动态平衡。虽然这些研究没有评估 BDE-209 的影响，并且仅仅报告了相关性，但与 Kortenkamp (2014 年) 的研究结果一样，这项研究也提出了类似的关切，也即由于行动模式类似，多溴二苯醚可能会一致行动，从而诱发不良毒性作用，对北极海洋顶级捕食者和其他野生动物构成威胁。

127. 目前的研究还表明，鸟类因合并接触不同的多溴二苯醚和其他环境污染物而面临风险。在一项实地考察中，Plourde (2013 年) 在肝脏中观察到六溴、七溴、八溴二苯醚和 BDE-209 的同系物 (BDE-154, -183, -201 和 -209)，并观察到在蒙特利尔城市化地区繁殖的雄性环嘴鸥的血浆中，BDE-209 与跗骨小梁和皮质骨矿物质密度负相关。这一发现表明，已报告的这些鸟类中的多溴二苯醚浓度水平（也即，肝：BDE-209 2.74-283 纳克/克湿重和  $\Sigma$ PBDE 26.2-680 纳克/克湿重；血浆：BDE-209 0.70-19.1 纳克/克湿重 和  $\Sigma$ PBDE 3.55-89.2 纳克/克湿重）可对鸟类的骨组织结构和代谢产生负面影响。另一项研究则假定几种有机氯农药、多氯联苯及包括 BDE-209 和若干九溴二苯醚在内的多溴二苯醚的合并影响已经促成 2003-2005 年北极鸥的虚弱个体在巴伦支的海熊岛的繁殖季节死亡 (Sagerup, 2009 年)。不过，只在肝脏和大脑检测到浓度非常低的 BDE-209（浓度分别为 <MDL-2.6 和 <MDL-0.01 微克/克脂肪）以及其他多溴二苯醚、持久性有机污染物和汞。Plourde (2013 年) 开展的一项研究显示，骨组织受到了影响，因此值得注意的是，有报告称在中国城市地区常见的红隼体内，BDE-209 在肝脏中的平均浓度值为  $2870 \pm 1040$  纳克/克 (Chen, 2007 年 a)，还有报告称在挪威偏远地区海尔格伦的家雀体内，该浓度范围在 4.46 至 1710 纳克/克脂重之间 (Ciesielski, 2008 年)。不过，这些研究都采用纳克/克脂重为单位报告 BDE-209 的浓度，因此不能直接与 Plourde (2013 年) 的研究成果相比对，后者采用纳克/克湿重为单位报告 BDE-209 的浓度。

128. 更多的关注涉及到多重应激影响，也即有毒化学物质与其他因素之间可能的综合影响。碘缺乏症，一种世界范围内的常见病 (Walker 于 2007 年审查)，可以增加对甲状腺干扰物质比如 BDE-209 的不利影响的敏感性 (见 Dingemans, 2011 年)。其次，接触甲状腺干扰物，包括 BDE-209 和多溴二苯醚等，也可能影响脊椎动物适当应对气候变化对其所处环境的影响的能力 (Hooper, 2013 年；持久性有机污染物审查委员会, 2013 年 b)。第三，气候变化和高温可能会增加 BDE-209 的降解和远距离环境传输 (持久性有机污染物审查委员会, 2013 年 b；政府间气候变化专门委员会, 2007 年；NCP, 2013 年；Xu, 2011 年；Christensen, 2014 年)。

### 3. 信息综述

129. 许多国家仍然生产和使用作为阻燃剂的商用十溴二苯醚。BDE-209 是商用十溴二苯醚的主要成分，在全球环境中无处不在，也存在于生物群中。监测数据证明环境中的排放来自广泛的来源以及远距离环境迁移。

130. BDE-209 在土壤和沉积物中具有高持久性，多项研究都证明了这一点。有报告称该物质在土壤和沉积物中的半衰期极长，根据环境条件的不同，其范围在>180 天至 50 年之间。

131. 尽管 BDE-209 在土壤、沉积物和空气中具有持久性，但已知其能够在环境和生物群中降解成为低溴多溴二苯醚。脱溴问题是多项评估报告的主要关注问题，因为已知一些因此形成的低溴多溴二苯醚具有更强的生物累积性、毒性和持久性，与未脱溴的 BDE-209 相比，更有可能进行远距离环境传输。一些因此形成的多溴二苯醚已被列为持久性有机污染物。研究显示，在生物群和环境基质中都会出现脱溴情况。一些不属于商用十溴二苯醚组成成分的多溴二苯醚同系物已经被确认，并被视为是发生脱溴作用的证据。商用十溴二苯醚和 BDE-209 也是高毒性 PBDD/PBDF 和六溴苯的来源。PBDD/PBDF 是在商用十溴二苯醚中发现的杂质成分，可能是在紫外线照射、工业生产、废物处理和回收操作期间无意中形成的。

132. 海洋和大气过程都会促成 BDE-209 远距离环境传输，但据信空气颗粒物传输是主要的传输机制。估计在空气中的大气半衰期为 94 天，但这一期间可以超过 200 天。在北极和其他偏远地区，在包括空气、沉积物、雪层、冰层和生物群等各种环境分区中都发现了 BDE-209。

133. 释放进入环境的 BDE-209 具有生物可利用性，能被生物包括人类摄入。BDE-209 广泛分布于全球环境中，在一些物种中的负载量很高。中国常见红隼体内的 BDE-209 浓度水平属于曾经报告的野生动物最高浓度水平之列，并且观察到格陵兰岛、北美洲和瑞典的游隼的 BDE-209 浓度水平日益升高。时间趋势表明，自 2002-2005 年起，北极大气中的 BDE-209 浓度日渐上升，倍增时间范围在 3.5-6.2 年之间。2009-2013 年期间，没有观察到 BDE-209 在空气中的时间趋势。

134. BDE-209 可以从母本转移至后代，在早期发育阶段就会接触该物质。有报告称在鱼类、两栖类、鸟类和驯鹿中出现了从母体向卵和后代转移的情况。对于人类，在早期发育阶段就能通过经胎盘转移在子宫接触 BDE-209 或经母乳在产后接触 BDE-209。除报告称，由于灰尘接触量较高，婴幼儿体内的 BDE-209 和其他多溴二苯醚负载量高于成人。曾经有报告称电气应用工厂的电子拆解工、电脑技工、注塑工以及生产和回收设施附近的居民体内的 BDE-209 浓度水平很高。

135. 现有的生物积累数据模棱两可，这在很大程度上体现了不同物种在吸收、代谢和消除方面的差异，反映了在分析测量 BDE-209 方面的挑战。估计 BDE-209 在鱼类中的生物集聚值<5 000，并且由于其分子尺寸大且不易溶于水，预计其不会明显吸收水 (<0.1 微克/升，24 °C)。不过，在水生和陆生食物网中，最重要的 BDE-209 接触途径是经由饮食接触，在考虑 BDE-209 的生物累积性行为时，据信通过计算 BAFs、BMFs 和 TMFs 值能比通过计算或测量生物集聚值提供更多相关信息。尽管一些研究并未显示 BDE-209 具有生物累积性，而且也观察到营养稀释作用 (TMF<1)，但报告称很多水生和陆生生物 (BAFs>5 000、BMFs>1 和 TMF>1) 中出现了生物累积现象。

136. 有证据显示 BDE-209 能对鱼类、蚯蚓、小鼠和大鼠的生殖健康和产出造成不良影响，还会对两栖类、啮齿类和人类产生发育毒性和神经毒性作用。对于青蛙、哺乳动物、鱼类和鸟类等生物，已经报告的 BDE-209 不良作用接近于或属于已报告的环境浓度水平的范围。哺乳动物和北极鱼类体内测定身体负担浓度水平高于或在实验室发现的低剂量效应范围之内，比如，对鱼类和哺乳动

物的神经发育影响以及对处在脆弱生命阶段的鱼类的繁殖影响。脱溴作用导致生物更多地合并接触多溴二苯醚的复杂混合物，包括已经被列为持久性有机污染物的 BDEs。基于已经确定的常见不良后果，令人担忧 BDE-209 与多溴二苯醚相结合可能在环境相关浓度导致人类和野生动物神经发育毒性。

137. 内分泌扰乱化学物质可在低环境浓度水平下产生不利影响，因此引起人们的日益关注，而且接触这种化学物质的时机比接触程度更为关键（环境署/世卫组织，2013 年）。目前的毒性数据显示，与其他多溴二苯醚类似，BDE-209 也可作为内分泌干扰物，可干扰鱼类、两栖类、大鼠、小鼠和人类的 TH 稳态，还可能干扰类固醇激素的动态平衡。这一事实，再加上脱溴、合并接触 BDE-209 与其他有类似作用的多溴二苯醚（其中一些被列为持久性有机污染物）以及 BDE-209 在土壤和沉积物中的高持久性，共同增加了出现慢性长期不良影响的可能性。

表 3. 商用十溴二苯醚主要成分 BDE-209 的持久性有机污染特性

标准	是否符合标准 (是/否)	备注
持久性	是	<p>陈旧沉积物芯表明在近 30 年的期间没有出现退化 (Kohler, 2008 年)。</p> <p>报告称 22°C 时黑暗条件下沉积物半衰期在 6 至 50 年之间，平均值约为 14 年 (Tokarz, 2008 年)。</p> <p>在经污泥处理的土地中，在好氧和厌氧条件下，降解半衰期大于 360 天 (Nyholm, 2010 年, 2011 年, 转引自欧洲化学品管理局, 2012 年 a)。</p> <p>在加标 BDE-209 的土壤样本中，商用十溴二苯醚在 180 天后未降解 (Liu, 2011 年 a)。</p> <p>在一些生物中观察到浓度暂时上升，这支持了对 BDE-209 作为持久性物质的构想 (例如, Vorkamp, 2005 年)。</p> <p>脱溴为具有 PBT/vPvB 和 POP 特性的低溴多溴二苯醚 (欧洲化学品管理局, 2012 年 a; 持久性有机污染物审查委员会, 2013 年 a)。</p>
生物累积性	是	<p>在顶级捕食者中发现高浓度水平 (Shaw, 2008 年, 2009 年, 2012 年; Voorspoles, 2006 年 a; Jenssen, 2007 年; Sørmø, 2006 年; Verreault, 2005 年; Pountney, 2014 年)。</p> <p>Log K<sub>ow</sub> 范围在 6.27 至 12.11 之间 (CMABFRIP, 1997 年; Dinn, 2012 年; 加拿大环境部, 2010 年; Kelly, 2007 年; Tian, 2012 年; 美国环保局, 2010 年; Watanabe 和 Tatsukawa, 1990 年)。</p> <p>在水生生物中 BAF&gt;5000 且 BMFs&gt;1。</p> <p>Baron, 2013 年; Law, 2006 年; Jenssen, 2007 年; Mo, 2012 年; Shaw, 2009 年; Tomy, 2009 年; Frouin, 2013 年)。</p> <p>在陆生生物中 BMFs &gt;1 (Yu, 2011 年、2013 年; She, 2013 年; Wu, 2009 年 a)。</p> <p>在北极水生生物中, TMFs&gt; 1 (Law, 2006 年)。</p> <p>脱溴为具有 PBT/vPvB 和 POP 特性的低溴多溴二苯醚，已知</p>

		<p>具有生物累积性（欧洲化学品管理局，2012年a；持久性有机污染物审查委员会，2013年a）。</p> <p>低剂量和/或环境相关浓度下在鸟类、鱼类和青蛙中观察到毒性作用（欧洲化学品管理局，2012年a；Plourde，2013年；Kuo，2010年；Qin，2010年；Wu，2009年a；Liu，2011年c）。</p>
远距离环境迁移潜力		<p>广泛存在于北极的环境和生物群中（de Wit，2006年，2010年；加拿大环境部，2010年；NCP，2013年）。</p> <p>对挪威苔藓的BDE-209浓度水平的监测数据显示该浓度从南至北下降（Mariussen，2008年）。</p> <p>附着于空中微小颗粒物时，只要不被湿沉降作用去除，BDE-209能在空中停留数小时或数天（Wilford，2008年；Meyer，2012年）。</p> <p>在空气中的半衰期估计为94天，但该期间也可能超过200天（Breivik，2006年；Raff和Hites，2007年）。</p> <p>十溴二苯醚脱溴成为具有PBT/vPvB和POP特性的低溴多溴二苯醚，已知可远距离环境传输（欧洲化学品管理局，2012年a；持久性有机污染物审查委员会，2013年a）。</p>
不良反应	是	<p>BDE-209在水生生物、哺乳动物和鸟类中具有生殖、发育、内分泌和神经毒性作用。也报告了对生长、生存和死亡率的影响。主要数据包括：</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 在低于1微克/升的短期最低无抑制浓度下，可延迟蝌蚪变态（Qin，2010年，见欧洲化学品管理局2012年a）。</li> <li>▪ 在28 d-LOEL of ~3 纳克/克或0.41 纳克/克湿重食物的剂量下，BDE-209对黑头呆鱼的TH有破坏性影响，并影响其死亡率（Noyes，2013年）。</li> <li>▪ 单卵注射BDE-209，20天后鸡胚的死亡率高达98%（LD<sub>50</sub>为44微克/蛋或740微克/千克湿重，Sifleet，2009年，见欧洲化学品管理局，2012年a）。</li> <li>▪ 对啮齿类动物具有神经发育毒性（例如，Johansson，2008年；Viberg，2003年，2007年；Rice，2009年；Fujimoto，2011年；Heredia，2012年；Reverte，2013年，2014年；Buratovic，2014年）。曝露于十溴二苯醚的流行病学证据表明会影响人类的认知发展（Gascon，2012年；Chao，2011年）。</li> <li>▪ 一些研究表明，在BDE-209浓度达到或接近环境相关浓度水平时可能会在鱼类、蛙类、鸟类和哺乳动物中出现不良反应（Kuo，2010年；Wu，2009年a；Liu，2011年c；Qin，2010年；Noyes，2013年；Sifleet，2009年；欧洲化学品管理局，2012年a；Pountney，2014年；Tomy 2008年、2009年）。</li> <li>▪ 已知脱溴为具有PBT/vPvB和POP特性的低溴多溴二苯醚会产生显著的不利影响（欧洲化学品管理局，2012年a；持久性有机污染物审查委员会，2013年a；POPRC6和POPRC7）。</li> </ul>

		<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ BDE-209与其他多溴二苯醚在环境相关浓度下的结合效应给人类和野生动物造成潜在风险（例如，Kortenkamp, 2014年；Plourde, 2013年）。</li> <li>▪ 因内分泌紊乱导致在敏感的发育期有潜在的低剂量效应风险（环境署/世卫组织, 2012年；Johansson, 2008年；Viberg, 2003年、2007年；Rice, 2009年；Fujimoto, 2011年；Heredia, 2012年；Reverte, 2013年、2014年；Buratovic, 2014年；Noyes, 2013年）。</li> </ul>
--	--	---

#### 4. 结论

138. 商用十溴二苯醚是一种人工合成物质，不会自然出现，在全世界的许多应用中被用作阻燃剂。所有地区都继续向环境释放商用十溴二苯醚。BDE-209 是商用十溴二苯醚的主要成分，在环境中具有持久性，在若干鱼类、鸟类和哺乳动物物种以及食物链中具有生物累积性和生物放大性。有证据表明该物质对包括生殖、生存、神经系统和内分泌系统在内的关键端点有不良影响。商用十溴二苯醚也可降解为低溴的多溴二苯醚，已知这些降解产物具有持久性、生物累积性和毒性/高持久性和高生物累积性及持久性有机污染物的特性。低溴的同系物促成产生 BDE-209 毒性。由于脱溴且环境中历来会存储商用五溴二苯醚和商用八溴二苯醚同系物，生物会在环境中接触多溴二苯醚的复杂混合物，其合并后的风险要高于 BDE-209 。在来源地和偏远地区的一些生物物种（包括在鸟类、哺乳类等较高营养级的物种）中测得的 BDE-209 浓度水平接近于已报告的影响浓度，表明 BDE-209 与其他多溴二苯醚会共同对人类健康和环境造成显著影响。因此，由于远距离环境迁移导致以 BDE-209 为主要成分的商用十溴二苯醚有可能对人类健康和环境造成显著的不利影响，所以有必要采取全球行动。

## 参考文献

- Abdallah MA, Tilston E, Harrad S, Collins C (2012). In vitro assessment of the bioaccessibility of brominated flame retardants in indoor dust using a colon extended model of the human gastrointestinal tract. *J Environ Monit.* 14(12):3276-83.
- ACAP, Arctic Contaminants Action Programme (2007). Final Report of Phase I of the ACAP Project on Brominated Flame Retardants (BFRs) Phase I: Inventory of sources and identification of BFR alternatives and management strategies. AMAP Report 2007:6, SFT Report TA-2440/2008.
- ACHS, Advisory Committee on Hazardous Substances 2010. ACHS opinion on decabrominated diphenyl ether (decaBDE). Final Version (23rd September 2010). Department for Environment, Food and Rural Affairs, United Kingdom, p.1-63.
- Ahn MY, Filley TR, Jafvert CT, Nies L, Hua I, Bezares-Cruz J (2006). Photodegradation of decabromodiphenyl ether adsorbed onto clay minerals, metal oxides, and sediment. *Environ Sci Technol.* 40(1):215-20.
- Ahmed, O. M., A. W. El-Gareib, A. M. El-Bakry, S. M. Abd El-Tawab and R. G. Ahmed (2008). "Thyroid hormones states and brain development interactions." *Int J Dev Neurosci* 26(2): 147-209.
- Allan, I., Aas, W., Langford, K., Christensen, G., Green, N. W., Breivik, K., Bæk, K., and Ranneklev, S. (2012). Passive air and water sampling at Andøya, Bjørnøya og Jan Mayen. Klima og forurensningsdirektoratet (Klif).  
[http://www.miljodirektoratet.no/no/Publikasjoner/Statlig\\_miljoovervakning/Overvaking\\_av\\_miljogifter\\_og\\_beregning\\_av\\_tilforsler\\_til\\_norske\\_kyst\\_og\\_havomrader\\_Tilforselsprogrammet/Rapporter/TilforseIsprogrammet\\_2011\\_Passive\\_air\\_and\\_water\\_sampling\\_at\\_Andoya\\_Bjornoya\\_and\\_Jan\\_Mayen/](http://www.miljodirektoratet.no/no/Publikasjoner/Statlig_miljoovervakning/Overvaking_av_miljogifter_og_beregning_av_tilforsler_til_norske_kyst_og_havomrader_Tilforselsprogrammet/Rapporter/TilforseIsprogrammet_2011_Passive_air_and_water_sampling_at_Andoya_Bjornoya_and_Jan_Mayen/)
- Allen JG, Sumner AL, Nishioka MG, Vallarino J, Turner DJ, Saltman HK, Spengler JD (2013). Air concentrations of PBDEs on in-flight airplanes and assessment of flight crew inhalation exposure. *J Expo Sci Environ Epidemiol.* 23(4):337-42.
- Al-Mousa, F. and F. Michelangeli (2012). "Some commonly used brominated flame retardants cause Ca<sup>2+</sup>-ATPase inhibition, beta-amyloid peptide release and apoptosis in SH-SY5Y neuronal cells." *PLoS one* 7: e33059.
- AMAP. Arctic Monitoring and Assessment Programme (2009). Arctic Pollution 2009, Oslo. 83 pp.
- Anderson, B. E., E. Zeiger, M. D. Shelby, M. A. Resnick, D. K. Gulati, J. L. Ivett and K. S. Loveday (1990). Chromosome aberration and sister chromatid exchange test results with 42 chemicals." *Environmental and molecular mutagenesis* 16 Suppl 1: 55-137.
- Arinaitwe K, Muir DCG, Kiremire BT, Fellin P, Li H, Teixeira C (2014). Polybrominated diphenyl ethers and alternative flame retardants in air and precipitation samples from the northern Lake Victoria region, East Africa. *Environ Sci Technol.* 48: 1458-16-44.
- Arellano L, Fernández P, Tatosova J, Stuchlik E, Grimalt JO (2011). Long-range transported atmospheric pollutants in snowpacks accumulated at different altitudes in the Tatra Mountains (Slovakia). *Environ Sci Technol.* 45(21): 9268-75.
- Arnot JA, MacKay D, Parkerton TF, Zaleski RT, Warren CS (2010). Multimedia modeling of human exposure to chemical substances; The roles of food web biomagnification and biotransformation. *Environmental Toxicology and Chemistry*, Vol. 29, No. 1, pp. 45–55
- Arnot JA, Gobas F (2006). A review of bioconcentration factor (BCF) and bioaccumulation factor (BAF) assessments for organic chemicals in aquatic organisms. *Environ Rev* 14(4):257-297.
- Arnot JA, Gobas F (2003). A generic QSAR for assessing the bioaccumulation potential of organic chemicals in aquatic food webs. *Qsar Comb Sci* 22(3):337-345.
- Balch, G. C., L. A. Velez-Espino (2006). "Inhibition of metamorphosis in tadpoles of *Xenopus laevis* exposed to polybrominated diphenyl ethers (PBDEs)." *Chemosphere* 64(2): 328-338.
- Baron E, Rudolph I, Chiang G, Barra R, Eljarrat E, Barcelo D (2013). Occurrence and behavior of natural and anthropogenic (emerging and historical) halogenated compounds in marine biota from the Coast of Concepcion (Chile). *Sci Total Environ* 461:258-264.
- Besis A, Samara C (2012). Polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) in the indoor and outdoor environments - A review on occurrence and human exposure. *Environ Pollut* 169:217-229.
- Bhavsar SP, Gandhi N, Gewurtz SB, Tomy GT (2008). Fate of PBDEs in juvenile lake trout estimated using a dynamic multichemical fish model. *Environ Sci Technol* 42:3724–31.

- Bi XH, Thomas GO, Jones KC, Qu WY, Sheng GY, Martin FL, (2007). Exposure of electronics dismantling workers to polybrominated diphenyl ethers, polychlorinated biphenyls, and organochlorine pesticides in South China. *Environ Sci Technol* 41(16):5647-5653.
- Biesemeier, J. a., M. J. Beck, H. Silberberg, N. R. Myers, J. M. Ariano, A. Radovsky, L. Freshwater, D. W. Sved, S. Jacobi, D. G. Stump, M. L. Hardy and T. Stedeford (2011). "An oral developmental neurotoxicity study of decabromodiphenyl ether (DecaBDE) in rats." *Birth defects research. Part B, Developmental and reproductive toxicology* 92: 17-35.
- Biesemeier, J. A., M. J. Beck, H. Silberberg, N. R. Myers, J. M. Ariano, E. S. Bodle, D. W. Sved, S. Jacobi, D. G. Stump, M. Hardy and T. Stedeford (2010). "Effects of dose, administration route, and/or vehicle on decabromodiphenyl ether concentrations in plasma of maternal, fetal, and neonatal rats and in milk of maternal rats." *Drug Metabolism and Disposition* 38: 1648-1654.
- Björklund, J. A., K. Thuresson, (2012). "Indoor Air Is a Significant Source of Tri-decabrominated Diphenyl Ethers to Outdoor Air via Ventilation Systems." *Environmental Science & Technology* 46(11): 5876-5884.
- Blanco, J., M. Mulero, L. Heredia, A. Pujol, J. L. Domingo and D. J. Sánchez (2013). "Perinatal exposure to BDE-99 causes learning disorders and decreases serum thyroid hormone levels and BDNF gene expression in hippocampus in rat offspring." *Toxicology* 308: 122-128.
- Boitsov, S. and Klungsøyr, J. (2013). Undersøkelser av organiske miljøgifter i sedimenter fra MAREANO-området 2011. Bergen Havforskningsinstituttet. p. 1-40.  
[http://www.imr.no/filarkiv/2013/04/rapport\\_1\\_13.pdf/nb-no](http://www.imr.no/filarkiv/2013/04/rapport_1_13.pdf/nb-no)
- Borgå K, Kidd KA, Muir DC, Berglund O, Conder JM, Gobas FA, Kucklick J, Malm O, Powell DE (2012). Trophic magnification factors: considerations of ecology, ecosystems, and study design. *Integr Environ Assess Manag.* 8(1): 64-84.
- Branchi, I., E. Alleva and L. G. Costa (2002). "Effects of perinatal exposure to a polybrominated diphenyl ether (PBDE 99) on mouse neurobehavioural development." *Neurotoxicology* 23: 375-384
- Breivik K, Wania F, Muir DC, Alaee M, Backus S (2006). Pacepavicius G. Empirical and modeling evidence of the long-range atmospheric transport of decabromodiphenyl ether. *Environ Sci Technol.* 40(15):4612-8.
- Breivik K, Sweetman A, Pacyna J, Jones K (2002). Towards a global historical emission inventory for selected PCB congeners – a mass balance approach: 1. Global production and consumption. *Sci Total Environ* 290:181-198
- BSEF, Bromine Science and Environmental Forum (2013). About decabromo diphenyl ether (decaBDE), <http://www.bsef.com/our-substances/deca-bde/about-deca-bde> (accessed in April 2013)
- BSEF, Bromine Science and Environmental Forum (2012). Brominated flame retardant: decabromodiphenyl ether fact sheet. 2012; 2010.
- Brommer S, Harrad S, van den Eede N, Covaci A (2012). Concentrations of organophosphate esters and brominated flame retardants in German indoor dust samples. *J Environ Monit*;14:2482-2487.
- Burreau S, Zebühr Y, Broman D, Ishaq R. (2006). Biomagnification of PBDEs and PCBs in food webs from the Baltic Sea and northern Atlantic Ocean. *Sci Total Environ* 366:659-672.
- Burreau S, Zebühr Y, Broman D, Ishaq R. (2004). Biomagnification of polychlorinated biphenyls (PCBs) and polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) studied in pike (*Esox lucius*), perch (*perca fluviatilis*) and roach (*Rutilus rutilus*) from the Baltic Sea. *Chemosphere* 55:1043-1052.
- Buratovic S, Viberg H, Fredriksson A, Eriksson P. (2014). Developmental exposure to the polybrominated diphenyl ether PBDE 209: Neurobehavioural and neuroprotein analysis in adult male and female mice. *Environ Toxicol Pharmacol.* 38, 570-85.
- Buser AM, Morf LS, Taverna R, Bader HP, Scheidegger R (2007a). Temporal behaviour of the anthropogenic metabolism of selected brominated flame retardants: Emissions to the environment. BFR 2007, 4th International Workshop on Brominated Flame Retardants, Amsterdam, The Netherlands, 24-27 April, 2007.
- Buser AM, Morf LS, Taverna R, Bader HP, Scheidegger R (2007b). Comparison of BDE-209 concentrations modelled in a dynamic substance flow analysis for Switzerland and field data B. *Organohalogen Compounds*, 69, 2748-2751.

- Byun GH, Moon HB, Choi JH, Hwang J, Kang CK. (2013). Biomagnification of persistent chlorinated and brominated contaminants in food web components of the Yellow Sea. *Mar Pollut Bull* 73(1):210-219.
- Cai, Y., W. Zhang, J. Hu, G. Sheng, D. Chen and J. Fu (2011). "Characterization of maternal transfer of decabromodiphenyl ether (BDE-209) administered to pregnant Sprague-Dawley rats." *Reprod Toxicol* 31: 106-110.
- Chabot-Giguere, B., R. J. Letcher, and J. Verreault. (2013). In vitro biotransformation of decabromodiphenyl ether (BDE-209) and Dechlorane Plus flame retardants: a case study of ring-billed gull breeding in a pollution hotspot in the St. Lawrence River, Canada. *Environ Int* 55:101-108.
- Chao, H.-R., T.-C. Tsou, H.-L. Huang and G.-P. Chang-Chien (2011). Levels of breast milk PBDEs from southern Taiwan and their potential impact on neurodevelopment. *Pediatric research* 70: 596-600.
- Chao HR, Shy CG, Wang SL, Chen SCC, Koh TW, Chen FA et al (2010). Impact of non-occupational exposure to polybrominated diphenyl ethers on menstruation characteristics of reproductive-age females. *Environ Int*;36:728–735.
- Chen YH, Li ZH, Tan Y, Zhang CF, Chen JS, He F, Yu YH, Chen DJ (2014). Prenatal exposure to decabrominated diphenyl ether impairs learning ability by altering neural stem cell viability, apoptosis, and differentiation in rat hippocampus. *Hum Exp Toxicol* Feb 24 [Epub ahead of print] PubMed PMID: 24567298 .
- Chen J, Chen LL, Liu DY, Zhang GS (2013a). Polybrominated Diphenyl Ethers Contamination in Marine Organisms of Yantai Coast, Northern Yellow Sea of China. *B Environ Contam Tox* 90(6):679-683.
- Chen D, Martin P, Burgess NM, Champoux L, Elliott JE, Forsyth DJ, (2013b). European Starlings (*Sturnus vulgaris*) Suggest That Landfills Are an Important Source of Bioaccumulative Flame Retardants to Canadian Terrestrial Ecosystems. *Environ Sci Technol* 47(21):12238-12247.
- Chen Q, Yu LQ, Yang LH, Zhou BS (2012a). Bioconcentration and metabolism of decabromodiphenyl ether (BDE-209) result in thyroid endocrine disruption in zebrafish larvae. *Aquat Toxicol* 110(141-148).
- Chen D, Letcher RJ, Martin P (2012b). Flame retardants in eggs of American kestrels and European starlings from southern Lake Ontario region (North America). *J Environ Monitor* 14(11):2870-2876.
- Chen D, Letcher RJ, Burgess NM, Champoux L, Elliott JE, Hebert CE, Martin P, Wayland M, Chip Weseloh DV, Wilson L (2012d). Flame retardants in eggs of four gull species (*Laridae*) from breeding sites spanning Atlantic to Pacific Canada. *Environ Pollut.* 168: 1-9.
- Chen, D. and Hale, R. C (2010). A global review of polybrominated diphenyl ether flame retardant contamination in birds. *Environment International*, 36, 800–811.
- Chen D, Hale RC, Watts BD, La Guardia MJ, Harvey E, Mojica EK (2010a). Species-specific accumulation of polybrominated diphenyl ether flame retardants in birds of prey from the Chesapeake Bay region, USA. *Environ Pollut* 158(5):1883-1889.
- Chen, J., C. Liufu, W. Sun, X. Sun and D. Chen (2010b). Assessment of the neurotoxic mechanisms of decabrominated diphenyl ether (PBDE-209) in primary cultured neonatal rat hippocampal neurons includes alterations in second messenger signaling and oxidative stress. *Toxicology Letters* 192: 431-439.
- Chen S, Ma YJ, Wang J, Chen D, Luo XJ, Mai BX (2009). Brominated flame retardants in children's toys: Concentration, composition, and children's exposure and risk assessment. *Environ Sci Technol*; 43:4200–4206.
- Chen D, La Guardia MJ, Harvey E, Amaral M, Wohlfort K, Hale RC (2008). Polybrominated Diphenyl Ethers in Peregrine Falcon (*Falco peregrinus*) Eggs from the Northeastern US. *Environ Sci Technol* 42(20):7594-7600.
- Chen D, Mai B, Song J, Sun Q, Luo Y, Luo X, ( 2007a). Polybrominated Diphenyl Ethers in Birds of Prey from Northern China. *Environ Sci Technol* 41(6):1828-1833.
- Chen SJ, Luo XJ, Lin Z, Luo Y, Li KC, Peng XZ, Mai BX, Ran Y, Zeng EY (2007b). Time trends of polybrominated diphenyl ethers in sediment cores from the Pearl River Estuary, South China. *Environ Sci Technol* 41(16): 5595-5600.
- Chevrier, J., K. G. Harley, A. Bradman, A. Sjödin and B. Eskenazi (2011). "Prenatal exposure to polybrominated

- diphenyl ether flame retardants and neonatal thyroid-stimulating hormone levels in the CHAMACOS study." *American journal of epidemiology* 174: 1166-1174.
- Chevrier, J., K. G. Harley, A. Bradman, M. Gharbi, A. Sjödin and B. Eskenazi (2010). "Polybrominated diphenyl ether (PBDE) flame retardants and thyroid hormone during pregnancy." *Environmental health perspectives* 118: 1444-1449.
- Chi, Y., H. Xia, M. Su, P. Song, X. Qi, Y. Cui, Y. Cao, T. Chen, Y. Qiu, A. Zhao, X. Ma, X. Zheng and W. Jia (2011). "Metabonomic phenotyping reveals an embryotoxicity of deca-brominated diphenyl ether in mice." *Chemical research in toxicology* 24: 1976-1983.
- Christiansson A, Eriksson J, Teelechiel D, Bergman A. (2009). Identification and quantification of products formed via photolysis of decabromodiphenyl ether. *Environ Sci Pollut Res Int* 16(3):312-21.
- Christensen JH, et al. (2014) Climate phenomena and their relevance for future regional climate change. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, eds Stocker TF, et al. (Cambridge University Press, Cambridge, UK)
- Christensen JR, Macduffee M, Macdonald RW, Whitticar M, Ross PS (2005). Persistent organic pollutants in British Columbia grizzly bears: Consequence of divergent diets. *Environ Sci Technol* 39(18):6952-6960.
- Christensen JH, Groth BS, Vikelsøe J., Vorkamp K. Polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) in sewage sludge and wastewater. NERI Technical Report No. 481, (2003). 28 pp. (Annex E submission by Denmark).
- Ciesielski T, Jenssen BM, Pedersen HC, Bæk K, Skaare JU, Ringsby TH (2008). Decabrominated diphenyl ether in ptarmigans and sparrows in Norway. *Organohalogen Compounds*, 70;001181-001184.
- Ciparis S and Hale, R.C., (2005). Bioavailability of polybrominated diphenyl ether flame retardants in biosolids and spiked sediment to the aquatic oligochaete, *lumbriculus variegatus* *Environ. Tox. Chem.*, 24 (4): 916–925.
- CPAN, Climate and Pollution Agency, Norway (2012a). Forbidden brominated flame retardand in work wear. Information and update from the Climate and Pollution Agency TA-2971/2012 (in Norwegian only). <http://www.miljodirektoratet.no/old/klif/publikasjoner/2971/ta2971.pdf>
- CPAN, Climate and Pollution Agency, Norway (2012b). Tilførselsprogrammet 2011. Overvåking av tilførsler og miljøtilstand i Norskehavet. p. 1-227. [http://www.miljodirektoratet.no/no/Publikasjoner/Statlig\\_miljoovervakning/Overvaking\\_av\\_miljogifter\\_og\\_beregning\\_av\\_tilforsler\\_til\\_norske\\_kyst\\_og\\_havomrader\\_Tilforselsprogrammet/Rapporter/TilforseIsprogrammet\\_2011\\_Overvaking\\_av\\_tilforsler\\_og\\_miljotilstand\\_i\\_Norskehavet/](http://www.miljodirektoratet.no/no/Publikasjoner/Statlig_miljoovervakning/Overvaking_av_miljogifter_og_beregning_av_tilforsler_til_norske_kyst_og_havomrader_Tilforselsprogrammet/Rapporter/TilforseIsprogrammet_2011_Overvaking_av_tilforsler_og_miljotilstand_i_Norskehavet/) Authors: Green, Normann W., Heldal, H. E., Måge, Amund, Aas, Wenche, Gafvert, T., Schrum, C., Boitsov, S., Breivik Knut, Iosjpe, M., Yakushev, E., Skogen, M., Høgåsen, T., Eckhardt, S., Christiansen, A. B., Daae, K. L., Durand, D., Ledang, A. B., and Jaccard, P. F.
- CPAN, Climate and Pollution Agency, Norway (2010). Overvåking av tilførsler og miljøtilstand i Barentshavet og Lofotenområdet. Oslo Klima- og forurensningsdirektoratet (Klif). p. 1-246. [http://www.miljodirektoratet.no/no/Publikasjoner/Statlig\\_miljoovervakning/Overvaking\\_av\\_miljogifter\\_og\\_beregning\\_av\\_tilforsler\\_til\\_norske\\_kyst\\_og\\_havomrader\\_Tilforselsprogrammet/Rapporter/TilforseIsprogrammet\\_2009\\_Overvaking\\_av\\_tilforsler\\_og/](http://www.miljodirektoratet.no/no/Publikasjoner/Statlig_miljoovervakning/Overvaking_av_miljogifter_og_beregning_av_tilforsler_til_norske_kyst_og_havomrader_Tilforselsprogrammet/Rapporter/TilforseIsprogrammet_2009_Overvaking_av_tilforsler_og/) Authors: Green, Norman W., Molvær, J., Kaste, Ø., Schrum, C., Yakushev, E., Sørensen, K., Allan, I., Høgåsen, T., Christiansen, A. B., Heldal, H. E., Klungsoyr, Jarle, Boitsov, Stepa, Børsheim, K. Y., Måge, Amund, Julshamn, Kaare, Aas, Wenche, Braathen, Ole-Anders, Breivik, Knut, Eckhardt, S., Rudjord, A. L., Iosjpe, M., and Brungot, A. L. 2010. Tilførselsprogrammet 2009.
- CMABFRIP, Chemical Manufacturers Association Brominated Flame Retardant Industry Panel (1997). Decabromodiphenyl oxide (DBDPO): determination of n-octanol/water partition coefficient. Chemical Manufacturers Association Brominated Flame Retardant Panel. Wildlife International Ltd. Project Number 439C-101.
- Coakley JD, Harrad SJ, Goosey E, Ali N, Dirtu AC, Van den Eede N, Covaci A, Douwes J, Mannetje A' (2013). Concentrations of polybrominated diphenyl ethers in matched samples of indoor dust and breast milk in New Zealand. *Environ Int.*;59:255-61.
- Costa LG, Giordano G (2011). Is decabromodiphenyl ether (BDE-209) a developmental neurotoxicant? *Neurotoxicology*; 32:9–24.

- Costa LG, de Laat R, Tagliaferri S, Pellacani C (2014). A mechanistic view of polybrominated diphenyl ether (PBDE) developmental neurotoxicity. *Toxicol Lett*. Oct 15;230(2):282-94.
- Cousins AP, Holmgren T, Remberger M.(2014) Emissions of two phthalate esters and BDE 209 to indoor air and their impact on urban air quality. *Sci Total Environ*. 470-471:527-35.
- Covaci, A.; Voorspoels, S.; de Boer, J (2003). Determination of brominated flame retardants, with emphasis on polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) in environmental and human samples: A review. *Environ. Int.*, 29, 735–756
- Crosse, JD, Shore RF, Wadsworth RA, Jones KC, and Pereira MGR. (2012). Long-term trends in PBDEs in sparrowhawk (*Accipiter nisus*) eggs indicate sustained contamination of UK terrestrial ecosystems. *Environ Sci. Technol*. 46:13504-13511.
- Danon-Schaffer MN, Gorgy T, Li L, Grace JR. Determination of PBDEs in Canadian North landfill leachate and soils. Final Report – September 2007. Vancouver, BC, Canada: Environmental Damages Fund, Environment Canada, University of British Columbia; 2007. 139 pp.
- de Boer, J.; Wells, D. E (2006). Pitfalls in the analysis of brominated flame retardants in environmental, human and food samples, including results of three international interlaboratory studies. *Trends Anal. Chem.*, 25, 364–372.
- De Bruyn AMH, Meloche LM, Lowe CJ (2009). Patterns of Bioaccumulation of Polybrominated Diphenyl Ether and Polychlorinated Biphenyl Congeners in Marine Mussels. *Environmental Science & Technology* 43(10):3700-3704.
- Deng, D., J. Guo, G. Sun, X. Chen, M. Qiu, and M. Xu. 2011. Aerobic debromination of deca-BDE: Isolation and characterization of an indigenous isolate from a PBDE contaminated sediment. *International Biodeterioration & Biodegradation* 65:465-469.
- De Wit CA, Herzke D, Vorkamp K. (2010). Brominated flame retardants in the Arctic environment — trends and new candidates. *Sci Total Environ* 408(15):2885-2918.
- De Wit, C. A., M. Alae (2006). "Levels and trends of brominated flame retardants in the Arctic." *Chemosphere* 64(2): 209-233.
- de Wit CA (2002) An overview of brominated flame retardants in the environment. *Chemosphere* 46:583–624
- De Wit C, Ulla Sellström U, Nadja Lundgren N, Mats Tysklind M (2005). Higher brominated diphenyl ethers in earthworms and reference and sewage-sludge amended soils. *Organohalogen Compounds - Volume 67*
- Dickhut RM, Cincinelli A, Cochran M, Kylin H (2012). Aerosol-mediated transport and deposition of brominated diphenyl ethers to Antarctica. *Environ Sci Technol*. 46(6):3135-40.
- Dingemans, M. M., M. van den Berg, et. al. (2011). "Neurotoxicity of brominated flame retardants: (in) direct effects of parent and hydroxylated polybrominated diphenyl ethers on the (developing) nervous system." *Environ Health Perspect* 119(7): 900-907.
- Dinn PM, Johannessen SC, Ross PS, Macdonald RW, Whiticar MJ, Lowe CJ, van Roodselaar A (2012). PBDE and PCB accumulation in benthos near marine wastewater outfalls: The role of sediment organic carbon. *Environ Pollut* 171: 241-248.
- Du W, Ji R, Sun Y, et. al. (2013). Fate and Ecological Effects of Decabromodiphenyl Ether in a Field Lysimeter. *Environmental Science & Technology* 47:9167-9174.
- Earnshaw, M. R., K. C. Jones, (2013). Estimating European historical production, consumption and atmospheric emissions of decabromodiphenyl ether. *Sci Total Environ* 447: 133-142.
- ECA, Environment Canada (2013). Risk Management of DecaBDE: Commitment to Voluntary Phase-Out Exports to Canada. <http://www.ec.gc.ca/toxiques-toxics/default.asp?lang=En&n=F64D6E3B-1&xml=F64D6E3B-0328-4C11-A9E4-790D053E42A1>
- ECA, Environment Canada (2011). Environmental Monitoring and Surveillance in Support of the Chemicals Management Plan. PBDEs in the Canadian Environment. Fact sheet.p. 1-10.
- ECA, Environment Canada (2010). Ecological State of the Science Report on Decabromodiphenyl Ether (decaBDE). Bioaccumulation and Transformation. Available at: [http://www.ec.gc.ca/lcpe-cepa/documents/substances/decabde/ess\\_report\\_decabde-eng.pdf](http://www.ec.gc.ca/lcpe-cepa/documents/substances/decabde/ess_report_decabde-eng.pdf)
- ECA, Environment Canada (2008). The Polybrominated Diphenyl Ethers Regulations (SOR/2008-218) under the Canadian Environmental Protection Act, 1999.

- ECA, Environment Canada (2006). Canadian Environmental Protection Act, 1999. Ecological Screening Assessment Report on polybrominated diphenyl ethers (PBDEs).
- ECA, Environment Canada. (2003). Polybrominated Diphenyl Ether (PBDE) Brominated Flame Retardant (BFR) Report of Section 71 (CEPA, 1999) Notice with Respect to Certain Substances on the Domestic Substances List (DSL).
- Ebert, J. and M. Bahadir (2003). "Formation of PBDD/F from flame-retarded plastic materials under thermal stress." *Environment International* 29(6): 711-716.
- European Commission (2007). Update of the risk assessment of bis(pentabromophenyl) ether. Final Draft of October 2007. European Chemicals Bureau.
- ECB, European Chemicals Bureau (2004). Update of the Risk assessment of bis(pentabromophenyl) ether (decabromodiphenyl ether) CAS Number. 1163-19-5, EINECS Number. 214-604-9, Final Environmental Draft of May 2004, 294 pp.
- ECB, European Chemicals Bureau (2002). European Union Risk Assessment Report: Bis(pentabromophenyl) ether. 1st priority list, Volume 17, Luxemburg: European Communities.
- ECHA, European Chemicals Agency, (2013a). Draft background document for Bis(pentabromophenyl)ether (decabromodiphenyl ether; decaBDE). Document developed in the context of ECHA's fifth Recommendation for the inclusion of substances in Annex XIV. 24 June 2013
- ECHA, European Chemicals Agency (2013b). ECHA dissemination portal. [Online] Available at: <http://echa.europa.eu/web/guest/information-on-chemicals/registered-substances> [Accessed 12 November 2013].
- ECHA European Chemicals Agency (2012a). Support Document Bis(pentabromophenyl) ether [decabromodiphenyl ether] (Member State Committee, 29 November 2012).
- ECHA, European Chemicals Agency (2012b). Agreement of the member state committee On the identification of bis(pentabromophenyl) ether [decabromodiphenyl ether], (Member State Committee, 29 November 2012).
- ECHA, European Chemicals Agency (2012c). Annex XV dossier. Proposal for Identification of a PBT/vPvB Substance. Bis(pentabromophenyl)ether (decabromodiphenyl ether; decaBDE). July 2012-final. Submitted by the United Kingdom, August 2012.  
[http://echa.europa.eu/documents/10162/13638/SVHC\\_AXVREP\\_pub\\_EC\\_214\\_604\\_9\\_decabromodiphenylether\\_en.pdf](http://echa.europa.eu/documents/10162/13638/SVHC_AXVREP_pub_EC_214_604_9_decabromodiphenylether_en.pdf)
- ECHA (2012d) – “Responses to comments” documents. Document compiled by UK from the commenting period 03/09/2012 - 18/10/2012 on the proposal to identify the substance Bis(pentabromophenyl)ether [decabromodiphenyl ether; decaBDE] as a Substance of Very High Concern. [http://echa.europa.eu/identification-of-svhc/-/substance/2403/search/+/del/20/col/ADOPTIONDATEMSCA\\_A/type/desc/pre/2/view](http://echa.europa.eu/identification-of-svhc/-/substance/2403/search/+/del/20/col/ADOPTIONDATEMSCA_A/type/desc/pre/2/view)
- EFSA, European Food Safety Authority Panel(2011). European Food Safety Authority Panel on Contaminants in the Food Chain (CONTAM). Scientific Opinion on Polybrominated Diphenyl Ethers (PBDEs) in Food. *EFSA Journal*, 9 (5), 2156. doi.10.2903/j.efsa.2011.2156. Available online: <http://www.efsa.europa.eu/en/efsajournal/doc/2156.pdf>
- El Dareer, S. M., J. R. Kalin, K. F. Tillery and D. L. Hill (1987). Disposition of decabromobiphenyl ether in rats dosed intravenously or by feeding. *Journal of Toxicology and Environmental Health*. 22: 405-415.
- Eljarrat E, Marsh G, Labandeira A, Barcelo D, (2008). Effect of sewage sludges contaminated with polybrominated diphenylethers on agricultural soils. *Chemosphere* 71: 1079–1086
- Eljarrat E, Labandeira A, Marsh G, Raldua D, Barcelo´ D (2007). Decabrominated diphenyl ether in river fish and sediment samples collected downstream an industrial park. *Chemosphere* 69: 1278–1286
- Eljarrat, E., de la Cal, A., Lazzazabal, D., Fabrellas, B., Fernandez-Alba, A. R., Borrull, F., Marce, R. M. and Barcelo, D. (2005). “Occurrence of polybrominated diphenyl ethers, polychlorinated dibenzo-p-dioxins, dibenzofurans and biphenyls in coastal sediments from Spain.” *Environmental Pollution*, 136, 493-501.
- Eljarrat, E., de la Cal, A., Raldua, D., Duran, C. and Barcelo, D. (2004). “Occurrence and bioavailability of polybrominated diphenyl ethers and hexabromocyclododecane in sediment and fish from the Cinca River, a Tributary of the Ebro River (Spain).” *Environmental Science and Technology*, 38, 2603-2608.

- Eriksson J, Green N, Marsh G, Bergman A (2004). Photochemical decomposition of 15 polybrominated diphenyl ether congeners in methanol/water. *Environ Sci Technol*.38(11):3119-25
- Eriksson, P., E. Jakobsson and A. Fredriksson (2001). Brominated flame retardants: A novel class of developmental neurotoxicants in our environment? *Environmental Health Perspectives*. 109: 903-908.
- Ernest, S. R., M. G. Wade, C. Lalancette, Y. Q. Ma, R. G. Berger, B. Robaire and B. F. Hales (2012). "Effects of chronic exposure to an environmentally relevant mixture of brominated flame retardants on the reproductive and thyroid system in adult male rats." *Toxicol Sci* 127(2): 496-507.
- Eskenazi, B., J. Chevrier, S. A. Rauch, K. Kogut, K. G. Harley, C. Johnson, C. Trujillo, A. Sjödin and A. Bradman (2013). "In utero and childhood polybrominated diphenyl ether (PBDE) exposures and neurodevelopment in the CHAMACOS study." *Environmental health perspectives* 121: 257-262.
- Feng M, Li Y, Qu R, Wang L, Wang Z (2013a). Oxidative stress biomarkers in freshwater fish *Carassius auratus* exposed to decabromodiphenyl ether and ethane, or their mixture. *Ecotoxicology*; 22(7):1101–10. <http://dx.doi.org/10.1007/s10646-013-1097-2>.
- Feng M, Qu R, Wang C, Wang L, Wang Z (2013b). Comparative antioxidant status in freshwater fish *Carassius auratus* exposed to six current-use brominated flame retardants: a combined experimental and theoretical study. *Aquat Toxicol*; 140–141: 314–23.
- Feng C, Xu Y, Zhao G, Zha J, Wu F, Wang Z. (2012). Relationship between BDE 209 metabolites and thyroid hormone levels in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Aquatic Toxicology* 122–123:28-35.
- Feng C, Xu Y, He Y, Luo Q, Zha J, Wang Z (2010). Debrominated and methoxylated polybrominated diphenyl ether metabolites in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) after exposure to decabromodiphenyl ether. *J Environ Sci (China)*. 22(9):1425-34.
- Fischer, C., A. Fredriksson and P. Eriksson (2008a). "Coexposure of neonatal mice to a flame retardant PBDE 99 (2,2',4,4',5-pentabromodiphenyl ether) and methyl mercury enhances developmental neurotoxic defects." *Toxicological sciences : an official journal of the Society of Toxicology* 101: 275-285.
- Fischer, C., A. Fredriksson and P. Eriksson (2008b). "Neonatal co-exposure to low doses of an ortho-PCB (PCB 153) and methyl mercury exacerbate defective developmental neurobehavior in mice." *Toxicology* 244: 157-165.
- Fischer D, Hooper K, Athanasiadou M, Athanassiadis I, Bergman A. (2006). Children show highest levels of polybrominated diphenyl ethers in a California family of four: A case study. *Environ Health Perspect* 114(10):1581-1584.
- Fliedner A, Heinz Rüdell, Heinrich Jüring, Josef Müller, Frank Neugebauer and Christa Schröter-Kermani (2012). Levels and trends of industrial chemicals (PCBs, PFCs, PBDEs) in archived herring gull eggs from German coastal regions. *Environmental Sciences Europe*, 24:7
- Fowles, J. and D. Morgott (2013). Infant/toddler health risks from exposure to polybrominated diphenyl ethers (pbdes) in car seats and automotive upholstery. Christchurch, New Zealand, Institute of Environmental Science and Research, Ltd. Report FW13051: 78pp
- Frederiksen M, Vorkamp K, Thomsen M, Knudsen LE (2009a). Human internal and external exposure to PBDEs - a review of levels and sources. *Int J Hyg Environ Health*; 212:109-134.
- Frederiksen M, Thomsen M, Vorkamp K, Knudsen LE (2009b). Patterns and concentration levels of polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) in placental tissue of women in Denmark. *Chemosphere*;76:1464–1469.
- Fromme H, Korner W, Shahin N, Wanner A, Albrecht M, Boehmer S, Parlar H, Mayer R, Liebl B and Bolte G (2009). Human exposure to polybrominated diphenyl ethers (PBDE), as evidenced by data from a duplicate diet study, indoor air, house dust, and biomonitoring in Germany. *Environ Int*; 35:1125-1135.
- Frouin H, Dangerfield N, Macdonald RW, Galbraith M, Crewe N, Shaw P, (2013). Partitioning and bioaccumulation of PCBs and PBDEs in marine plankton from the Strait of Georgia, British Columbia, Canada. *Prog Oceanogr* 115(SI):65-75.
- Fujimoto, H., G. H. Woo, K. Inoue, M. Takahashi, M. Hirose, A. Nishikawa and M. Shibutani (2011). "Impaired oligodendroglial development by decabromodiphenyl ether in rat offspring after maternal exposure from mid-gestation through lactation." *Reprod Toxicol* 31(1): 86-94.
- Fängström B, Hovander L, Bignert A, Athanassiadis I, Linderholm L, Grandjean P, Weihe P, Bergman A (2005a). Concentrations of polybrominated diphenyl ethers, polychlorinated biphenyls, and

polychlorobiphenyls in serum from pregnant Faroese women and their children 7 years later. *Environ Sci Technol.*;39:9457-9463.

Fängstrom B, Athanasiadou M, Athanassiadis I, Bignert A, Grandjean P, Weihe P, (2005b). Polybrominated diphenyl ethers and traditional organochlorine pollutants in fulmars (*Fulmarus glacialis*) from the Faroe Islands. *Chemosphere*; 60:836-43.

Ganser, Lisa Rania, "Anatomy and Function of the African Clawed Frog Vocal System is Altered by the Brominated Flame Retardant, PBDE-209" (2009). Open Access Dissertations. Paper 245. [http://scholarlyrepository.miami.edu/oa\\_dissertations](http://scholarlyrepository.miami.edu/oa_dissertations)

Gao S, Hong J, Yu Z, Wang J, Yang G, Sheng G, Fu J (2011). Polybrominated diphenyl ethers in surface soils from e-waste recycling areas and industrial areas in South China: concentration levels, congener profile, and inventory. *Environ Toxicol Chem.* 30(12):2688-96

Gao F, Luo XJ, Yang ZF, Wang XM, Mai BX. (2009). Brominated Flame Retardants, Polychlorinated Biphenyls, and Organochlorine Pesticides in Bird Eggs from the Yellow River Delta, North China. *Environ Sci Technol* 43(18):6956-6962.

Garcia-Reyero N , Escalon BL, Prats E, Stanley JK, Thienpont B, Melby NL, Barón E, Eljarrat E, Barceló D, Jordi Mestres e, Patrick J. Babin, Perkins E J, Raldúa D (2014). "Effects of BDE-209 contaminated sediments on zebrafish development and potential implications to human health." *Environ Int* 5: 216-223.

Gascon, M., M. Fort, D. Martinez, A. E. Carsin, J. Forns, J. O. Grimalt, L. Santa Marina, N. Lertxundi, J. Sunyer and M. Vrijheid (2012). "Polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) in breast milk and neuropsychological development in infants." *Environ Health Perspect* 120(12): 1760-1765.

Gascon, M., M. Vrijheid, D. Martinez, J. Forns, J. O. Grimalt, M. Torrent and J. Sunyer (2011). "Effects of pre and postnatal exposure to low levels of polybromodiphenyl ethers on neurodevelopment and thyroid hormone levels at 4 years of age." *Environ Int* 37: 605-611.

Gauthier LT, Hebert CE, Weseloh DVC, Letcher RJ. (2008). Dramatic changes in the temporal trends of polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) in herring gull eggs from the Laurentian Great Lakes: 1982-2006. *Environ Sci Technol* 42(5):1524-1530.

Gaylor MO, Mears GL, Harvey E, La Guardia MJ, Hale RC (2014). Polybrominated diphenyl ether accumulation in an agricultural soil ecosystem receiving wastewater sludge amendments. *Environ Sci Technol.* 48(12):7034-43.

Gentes ML, Robert J. Letcher RJ, Caron-Beaudoin E, Jonathan Verreault J (2012). Novel Flame Retardants in Urban-Feeding Ring-Billed Gulls from the St. Lawrence River, Canada. *Environ. Sci. Technol.*, 46, 9735-9744

Gerecke AC, Giger W, Hartmann PC, Heeb NV, Kohler H-P E, Schmid P, Zennegg M, Kohler M (2006). Anaerobic degradation of brominated flame retardants in sewage sludge. *Chemosphere*, 64, 311-317.

Gerecke AC, Hartmann PC, Heeb NV, Kohler H-P E , Giger W, Schmid P, Zennegg M, Kohler M (2005). Anaerobic degradation of decabromodiphenyl ether. *Environmental Science and Technology*, 39, 1078-1083.

Gilbert, M. E., J. Rovet, Z. Chen and N. Koibuchi (2012). "Developmental thyroid hormone disruption: prevalence, environmental contaminants and neurodevelopmental consequences." *Neurotoxicology* 33: 842-852.

Gilchrist TT, Letcher RJ, Thomas P, Fernie KJ (2014). Polybrominated diphenyl ethers and multiple stressors influence the reproduction of free-ranging tree swallows (*Tachycineta bicolor*) nesting at wastewater treatment plants. *Sci Total Environ.* 472:63-71.

Gómara B, Herrero L, Pacepavicius G, Ohta S, Alaee M, González MJ (2011). Occurrence of co-planar polybrominated/chlorinated biphenyls (PXBs), polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) and polychlorinated biphenyls (PCBs) in breast milk of women from Spain. *Chemosphere*;83:799-805.

Gómara, B., L. Herrero, J. J. Ramos, J. R. Mateo, M. A. Fernández, J. F. García and M. J. González (2007). Distribution of polybrominated diphenyl ethers in human umbilical cord serum, paternal serum, maternal serum, placentas, and breast milk from Madrid population, Spain. *Environmental Science and Technology* 41: 6961-6968.

Goodman, J. E. (2009). "Neurodevelopmental effects of decabromodiphenyl ether (BDE-209) and implications for the reference dose." *Regul Toxicol Pharmacol* 54(1): 91-104. Goutte A, Chevreuil M,

- Alliot F, Chastel O, Cherel Y, Eléaume M, 2013. Persistent organic pollutants in benthic and pelagic organisms off Adélie Land, Antarctica. *Mar Pollut Bull* 77(1–2):82-89.
- Gregoraszczyk EŁ, Rak A, Kawalec K, Ropstad E (2008). Steroid secretion following exposure of ovarian follicular cells to single congeners and defined mixture of polybrominated dibenzoethers (PBDEs), p,p'-DDT and its metabolite p,p'-DDE. *Toxicol Lett* 178(2): 103-9. doi: 10.1016/j.toxlet.2008.02.011.
- Hakk, H., Larsen G, Bergman Å, Örn U (2002). "Binding of brominated diphenyl ethers to male rat carrier proteins." *Xenobiotica* 32(12): 1079-1091.
- Hale, R. C., M. J. La Guardia, E. Harvey, D. Chen, T. M. Mainor, D. R. Luellen, and L. S. Hundal. (2012). Polybrominated Diphenyl Ethers in U.S. Sewage Sludges and Biosolids: Temporal and Geographical Trends and Uptake by Corn Following Land Application. *Environmental Science & Technology* 46:2055-2063.
- Hale RC, Kim SL (2008). "Antarctic research bases: local sources of polybrominated diphenyl ether (PBDE) flame retardants." *Environ Sci Technol* 42(5): 1452-1457.
- Hale RC, Alace M, Manchester-Neesvig JB, Stapleton HM, Ikonomou MG (2003). Polybrominated diphenyl ether flame retardants in the North American environment. *Environ. Int.* 29: 771–779.
- Hallgren, S. and P. O. Darnerud (2002). "Polybrominated diphenyl ethers (PBDEs), polychlorinated biphenyls (PCBs) and chlorinated paraffins (CPs) in rats-testing interactions and mechanisms for thyroid hormone effects." *Toxicology* 177: 227-243.
- Hamers, T., J. H. Kamstra, E. Sonneveld, A. J. Murk, M. H. a. Kester, P. L. Andersson, J. Legler and A. Brouwer (2006). "In vitro profiling of the endocrine-disrupting potency of brominated flame retardants." *Toxicological sciences : an official journal of the Society of Toxicology* 92: 157-173.
- Hamm S, Strickeling M, Ranken PF, Rothenbacher KP (2001). Determination of polybrominated diphenyl ethers and PBDD/Fs during the recycling of high impact polystyrene containing decabromodiphenyl ether and antimony oxide. *Chemosphere* 44(6):1353-60
- Hardy, M. L., M. Banasik and T. Stedeford (2009). "Toxicology and human health assessment of decabromodiphenyl ether BDE-209 human health assessment " *Critical Reviews in Toxicology* 39: 1-44.
- Hardy, M. and T. Stedeford (2008). "Developmental neurotoxicity: when research succeeds through inappropriate statistics." *Neurotoxicology* 29(3): 476.
- Hardy, M. L., R. Schroeder, J. Biesemeier and O. Manor (2002). "Prenatal oral (gavage) developmental toxicity study of decabromodiphenyl oxide in rats." *Int J Toxicol* 21(2): 83-91.
- Harley, K. G., J. Chevrier, R. Aguilar Schall, A. Sjödin, A. Bradman and B. Eskenazi (2011). "Association of prenatal exposure to polybrominated diphenyl ethers and infant birth weight." *American journal of epidemiology* 174: 885-892.
- Harrad S, de Wit CA, Abdallah MA, Bergh C, Bjorklund JA, Covaci A, et al (2010). Indoor contamination with hexabromocyclododecanes, polybrominated diphenyl ethers, and perfluoroalkyl compounds: an important exposure pathway for people? *Environ Sci Technol* 44:3221-3231.
- He S, Li M, Jin J, Wang Y, Bu Y, Xu M et al (2013). Concentrations and trends of halogenated flame retardants in the pooled serum of residents of Laizhou bay, China. *Environ Toxicol Chem* 32:1242-1247.
- He MJ, Luo XJ, Chen MY, Sun YX, Chen SJ, Mai BX. (2012). Bioaccumulation of polybrominated diphenyl ethers and decabromodiphenyl ethane in fish from a river system in a highly industrialized area, South China. *Sci Total Environ* 419: 109-115.
- He J, Yang D, (2011). Chronic zebrafish low dose decabrominated diphenyl ether (BDE-209) exposure affected parental gonad development and locomotion in F1 offspring. *Ecotoxicology* 20(8): 1813-1822.
- He P, Wang AG, Xia T, Gao P, Niu Q, Guo LJ, Xu BY, Chen XM (2009). "Mechanism of the neurotoxic effect of PBDE-47 and interaction of PBDE-47 and PCB153 in enhancing toxicity in SH-SY5Y cells." *Neurotoxicology* 30: 10-15.
- Hendriks HS, van Kleef RG, Westerink RH (2012). Modulation of human  $\alpha 4\beta 2$  nicotinic acetylcholine receptors by brominated and halogen-free flame retardants as a measure for in vitro neurotoxicity. *Toxicol Lett.* 213(2):266-74.
- HCA, Health Canada. Human (2012). Health - State of the science report on decabromodiphenyl ether (decaBDE). Ottawa, Canada.

- HCA, Health Canada (2006). State of the Science Report for a Screening Health Assessment Polybrominated Diphenyl Ethers (PBDEs)[Tetra-, Penta-, Hexa-, Hepta-, Octa-, Nona- and Deca-Congeners][CAS Nos. 40088-47-9, 32534-81-9, 36483-60-0, 68928-80-3, 32536-52-0, 63936-56-1, 1163-19-5]. 39.
- Herbstman, J. B., A. Sjödin, B. J. Apelberg, F. R. Witter, R. U. Haiden, D. G. Patterson Jr., S. R. Panny, L. L. Needham and L. R. Goldman (2008). Birth delivery mode modifies the associations between prenatal polychlorinated biphenyl (PCB) and polybrominated diphenyl ether (PBDE) and neonatal thyroid hormone levels. *Environmental Health Perspectives*. 116: 1376-1382.
- Heredia, L., M. Torrente, M. T. Colomina and J. L. Domingo (2012). "Behavioral effects of oral subacute exposure to BDE-209 in young adult mice: a preliminary study." *Food and chemical toxicology : an international journal published for the British Industrial Biological Research Association* 50: 707-712.
- Hermanson, M. H., E. Isaksson, (2010). "Deposition history of brominated flame retardant compounds in an ice core from Holtedahlfonna, Svalbard, Norway." *Environ Sci Technol* 44(19): 7405-7410.
- Hoffman, K., M. Adgent, B. D. Goldman, A. Sjödin and J. L. Daniels (2012). "Lactational Exposure to Polybrominated Diphenyl Ethers and Its Relation to Social and Emotional Development among Toddlers." 1438: 1438-1442.
- Holden A, Park JS, Chu V, Kim M, Choi G, Shi Y, Chin, T, Chun C, Linthicum J, Walton BJ, Hooper K, (2009). Unusual hepta- and octa-brominated diphenyl ethers and nona-brominated diphenyl ether profile in California, USA, peregrine falcons (*Falco peregrinus*): More evidence for brominated diphenyl ether-209 debromination. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 28 (9), 1906-11.
- Holma-Suutari, P. Ruokojärvi, S. Laaksonen, H. Kiviranta, M. Nieminen, M. Viluksela, A (2014). Hallikainen. Persistent organic pollutant levels in semi-domesticated reindeer (*Rangifer tarandus tarandus* L.), feed, lichen, blood, milk, placenta, foetus and calf. *Science of the Total Environment* 476-477: 125-135
- Hong SK, Sohn KH, Kim IY, Lee JK, Ju JH, Kim JH, Lim CH, Han BS, Jung HC, Lee JY, Park KL (2010). Polybrominated Diphenyl Ethers Orally Administration to Mice Were Transferred to Offspring during Gestation and Lactation with Disruptions on the Immune System. *Immune Netw*. 2010 10(2):64-74.
- Hooper MJ, Ankley GT, Cristol DA, Maryoung LA, Noyes PD, Pinkerton KE. Interactions between chemical and climate stressors: a role for mechanistic toxicology in assessing climate change risks. *Environ Toxicol Chem*. 2013 Jan (1):32-48.
- Hu XZ, Xu Y, Hu DC, Hui Y, Yang FX. (2007). Apoptosis induction on human hepatoma cells Hep G2 of decabrominated diphenyl ether (PBDE-209). *Toxicol Lett* 171:19-28.
- Hua, I., Kang, N., Jafvert, C.T. and Fabrega-Duque, J.R., (2003). Heterogeneous photochemical reactions of decabromodiphenyl ether. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 22 (4), 798-804.
- Huang, F., S. Wen, J. Li, Y. Zhong, Y. Zhao and Y. Wu (2014). "The human body burden of polybrominated diphenyl ethers and their relationships with thyroid hormones in the general population in Northern China." *The Science of the total environment* 466-467: 609-615.
- Huang, H., Zhang, S., Wang, S. & Lv, J., (2013). In vitro biotransformation of PBDEs by root crude enzyme extracts: Potential role of nitrate reductase (NaR) and glutathione S-transferase (GST) in their debromination. *Chemosphere*, 90(6), pp.1885-1892.
- Huang, H., S. Zhang, P. Christie, S. Wang, and M. Xie. (2010a). Behavior of decabromodiphenyl ether (BDE-209) in the soil-plant system: uptake, translocation, and metabolism in plants and dissipation in soil. *Environmental Science & Technology* 44:663.
- Huang SC, Giordano G, Costa LG (2010b). "Comparative cytotoxicity and intracellular accumulation of five polybrominated diphenyl ether congeners in mouse cerebellar granule neurons." *Toxicological sciences : an official journal of the Society of Toxicology* 114: 124-132.
- Hughes, M. F., B. C. Edwards, C. T. Mitchell and B. Bhooshan (2001). "In vitro dermal absorption of flame retardant chemicals." *Food and chemical toxicology : an international journal published for the British Industrial Biological Research Association* 39: 1263-1270.
- Hung H, Kallenborn R, Breivik K, Su Y, Brorström-Lundén E, Olafsdottir K, Thorlacius JM, Leppänen S, Bossi R, Skov H, Manø S, Patton GW, Stern G, Sverko E, Fellin P (2010). Atmospheric monitoring

- of organic pollutants in the Arctic under the Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP): 1993-2006. *Sci Total Environ.* 408(15): 2854-73.
- Hussey NE, Macneil MA, McMeans BC, Olin JA, Dudley SF, Cliff G, Wintner SP, Fennessy ST, Fisk AT. Rescaling the trophic structure of marine food webs. *Ecol Lett.* 2014 Feb;17(2):239-50. doi: 10.1111/ele.12226.
- Huwe JK, Hakk H, Smith DJ, Diliberto JJ, Richardson V, Stapleton HM, Birnbaum LS (2008). Comparative absorption and bioaccumulation of polybrominated diphenyl ethers following ingestion via dust and oil in male rats. *Environ Sci Technol.* 42(7):2694-700.
- Huwe, J. K. and D. J. Smith. 2007. Accumulation, whole-body depletion, and debromination of decabromodiphenyl ether in male sprague-dawley rats following dietary exposure. *Environmental Science & Technology* 41:2371-2377.
- Ibhazehiebo, K., T. Iwasaki, J. Kimura-Kuroda, W. Miyazaki, N. Shimokawa and N. Koibuchi (2011). "Disruption of thyroid hormone receptor-mediated transcription and thyroid hormone-induced Purkinje cell dendrite arborization by polybrominated diphenyl ethers." *Environmental health perspectives* 119: 168-175.
- IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change (2007). IPCC Fourth Assessment Report (AR4): Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp. Available at: <http://www.ipcc.ch/ipccreports/assessments-reports.htm>. ISO, 2005. Soil quality-avoidance test for testing the quality of soils and toxicity of chemicals-test with earthworms (*Eisenia andrei*). International Organization for Standardization, Geneva.
- Jafvert C, Hua I. (2001a). Photochemical Reactions of Decabromodiphenyl Oxide and 2,2',4,4'-Tetrabromodiphenyl Oxide. Final Report. School of Civil Engineering, Purdue University, West Lafayette, Indiana, U.S.A
- Jafvert, C. and Hua, I., 2001b. Letter to Wendy Sherman, American Chemical Council Brominated Flame Retardant Industry Panel, 20 October 2001.
- Jakobsson K, Fang J, Athanasiadou M, Rignell-Hydbom A, Bergman Å (2012). Polybrominated diphenyl ethers in maternal serum, umbilical cord serum, colostrum and mature breast milk. Insights from a pilot study and the literature. *Environ Int* 47:121-130.
- Jakobsson, K., Thuresson, K., Höglund, P., Sjödin, A., & Hagmar, L. (2003). A summary of exposures to polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) in Swedish workers, and determination of half-lives of PBDEs. 61, 17-20.
- Jakobsson K, Thuresson K, Rylander L, Sjödin A, Hagmar L, Bergman Å, (2002). Exposure to polybrominated diphenyl ethers and tetrabromobisphenol A among computer technicians. *Chemosphere* 46:709-716.
- Jaspers VLB, Covaci A, Voorspoels S, Dauwe T, Eens M, Schepens P (2006). Brominated flame retardants and organochlorine pollutants in aquatic and terrestrial predatory birds of Belgium. Levels, patterns, tissue distribution and condition factors. *Environ Pollut* 139:340-52.
- Jenssen BM, Sørmo E, Bæk K, Bytingsvik J, Gaustad H, Ruus A, Skaare JU (2007). Brominated flame retardants in north-east Atlantic marine ecosystems. *Environmental Health Perspectives* vol 115, Sup 1.
- JETOC (2000). Mutagenicity Test Data Of Existing Chemical Substances Based On The Toxicity Investigation Of The Industrial Safety And Health Law; (Suppl. 2), Japan Chemical Industry Ecology-Toxicology & Information Center.
- Ji, K., K. Choi, J. P. Giesy, J. Musarrat and S. Takeda (2011). "Genotoxicity of several polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) and hydroxylated PBDEs, and their mechanisms of toxicity." *Environmental science & technology* 45: 5003-5008.
- Johansson A-K, Sellström U, Lindberg P, Bignert A, de Wit C (2011). Temporal trends of polybrominated diphenyl ethers and hexabromocyclododecane in Swedish Peregrine Falcon (*Falco peregrinus peregrinus*) eggs. *Environment International* 37: 678-686.
- Johansson AK, Sellström U, Lindberg P, Bignert A, de Wit C (2009). Polybrominated diphenyl ethers congener patterns, hexabromocyclododecane, and brominated biphenyl 153 in eggs of peregrine falcons (*Falco peregrinus*) breeding in Sweden. *Environmental Toxicology and Chemistry*, Vol. 28, No. 1, pp. 9-17.

- Johansson, N., H. Viberg, a. Fredriksson and P. Eriksson (2008). "Neonatal exposure to deca-brominated diphenyl ether (PBDE 209) causes dose-response changes in spontaneous behaviour and cholinergic susceptibility in adult mice." *Neurotoxicology* 29: 911-919.
- Kajiwara, N., J. Desborough, S. Harrad, and H. Takigami. (2013a). Photolysis of brominated flame retardants in textiles exposed to natural sunlight *ENVIRONMENTAL SCIENCE-PROCESSES & IMPACT* 15:653-660.
- Kajiwara N, Takigami H (2013b). Emission behavior of hexabromocyclododecanes and polybrominated diphenyl ethers from flame-retardant-treated textiles. *Environ Sci Process Impacts*.15(10):1957-63.
- Kajiwara, N., Y. Noma, and H. Takigami. (2008). Photolysis studies of technical decabromodiphenyl ether (DecaBDE) and ethane (DeBDethane) in plastics under natural sunlight. *Environmental Science & Technology* 42:4404-4409.
- Kagaku Kogyo Nenkan, Flame Retardants, Kagaku Kogyo Nippo, Tokyo, Japan, (2001), pp. 367–369.
- Karpeta, A. and E. Gregoraszczyk (2010). "Mixture of dominant PBDE congeners (BDE-47, -99, -100 and -209) at levels noted in human blood dramatically enhances progesterone secretion by ovarian follicles." *Endocrine regulations* 44: 49-55.
- Kawashiro, Y., H. Fukata, M. Omori-Inoue, K. Kubonoya, T. Jotaki, H. Takigami, S.-i. Sakai and C. Mori (2008). "Perinatal exposure to brominated flame retardants and polychlorinated biphenyls in Japan." *Endocrine journal* 55: 1071-1084.
- Kelly, B. C., M. G. Ikonou, (2009). "Perfluoroalkyl contaminants in an Arctic marine food web: trophic magnification and wildlife exposure." *Environ Sci Technol* 43(11): 4037-4043.
- Kelly BC, Ikonou MG, Blair JD, Morin AE, Gobas F. (2007). Food web-specific biomagnification of persistent organic pollutants. *Science* 317(5835):236-239.
- KemI (1994). Risk Assessment of Polybrominated Diphenyl Ethers, Solna: The Swedish National Chemicals Inspectorate.
- Kemmlin (2006). Emission test chamber study: Specific emission rates of PBDE from selected materials under various conditions. *DIOXIN 2006*, Oslo, Norway, August 21-24, 2006.
- Kemmlin, (2003). "Emission of Flame Retardants from Consumer Products and Building Materials", Federal Environment Agency publication
- Kicinski, M., M. K. Viaene, E. Den Hond, G. Schoeters, A. Covaci, A. C. Dirtu, V. Nelen, L. Bruckers, K. Croes, I. Sioen, W. Baeyens, N. Van Larebeke and T. S. Nawrot (2012). "Neurobehavioral function and low-level exposure to brominated flame retardants in adolescents: a cross-sectional study." *Environ Health* 11: 86.
- Kim M, Guerra P, Theocharides M, Barclay K, Smyth SA, Alae M (2013a). Polybrominated diphenyl ethers in sewage sludge and treated biosolids: effect factors and mass balance. *Water Res*. Nov 1;47(17):6496-505.
- Kim, M., et al. (2013b). "Parameters affecting the occurrence and removal of polybrominated diphenyl ethers in twenty Canadian wastewater treatment plants." *Water Res* 47(7): 2213-2221.
- Kim, TH., Lee YJ, Lee E, Kim MS, Kwack S J, Kim KB, Chung KK, Kang TS, Han SY, Lee J, Lee BM and Kim HS (2009). "Effects of gestational exposure to decabromodiphenyl ether on reproductive parameters, thyroid hormone levels, and neuronal development in Sprague-Dawley rats offspring." *J Toxicol Environ Health A* 72(21-22): 1296-1303.
- Kierkegaard, A., L. Asplund, (2007). "Fate of higher brominated PBDEs in lactating cows." *Environ Sci Technol* 41(2): 417-423.
- Kierkegaard A, Balk L, Tjarnlund U, De Wit CA, Jansson, B. (1999). Dietary uptake and biological effects of decabromodiphenyl ether in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Environ. Sci. Technol*. 1999, 33 (10), 1612–1617.
- Kirkland, D., M. Aardema, L. Henderson and L. Müller (2005). "Evaluation of the ability of a battery of three in vitro genotoxicity tests to discriminate rodent carcinogens and non-carcinogens I. Sensitivity, specificity and relative predictivity." *Mutation research* 584: 1-256.
- Klif, Klima- og forurensningsdirektoratet (2011). Tilførselsprogrammet 2011. Overvåking av tilførsler og miljøtilstand i Norskehavet. Oslo TA-2935/ 2011. Oslo. p. 1-227.  
[http://www.miljodirektoratet.no/no/Publikasjoner/Statlig\\_miljoovervakning/Overvaking\\_av\\_miljogifter\\_og\\_beregning\\_av\\_tilforsler\\_til\\_norske\\_kyst\\_og\\_havomrader\\_Tilforselsprogrammet/Rapporter/TilforseIsprogrammet\\_2011\\_Overvaking\\_av\\_tilforsler\\_og\\_miljotilstand\\_i\\_Norskehavet/](http://www.miljodirektoratet.no/no/Publikasjoner/Statlig_miljoovervakning/Overvaking_av_miljogifter_og_beregning_av_tilforsler_til_norske_kyst_og_havomrader_Tilforselsprogrammet/Rapporter/TilforseIsprogrammet_2011_Overvaking_av_tilforsler_og_miljotilstand_i_Norskehavet/)

- Klif, Klima- og forurensningsdirektoratet (2010). Tilførselsprogrammet 2009. Overvåking av tilførsler og miljøtilstand i Barentshavet og Lofotenområdet. TA-2660/ 2010. Oslo p. 1-246.  
[http://www.miljodirektoratet.no/no/Publikasjoner/Statlig\\_miljoovervakning/Overvaking\\_av\\_miljogifter\\_og\\_beregning\\_av\\_tilforsler\\_til\\_norske\\_kyst\\_og\\_havomrader\\_Tilforselsprogrammet/Rapporter/Tilforse lsprogrammet\\_2009\\_Overvaking\\_av\\_tilforsler\\_og/](http://www.miljodirektoratet.no/no/Publikasjoner/Statlig_miljoovervakning/Overvaking_av_miljogifter_og_beregning_av_tilforsler_til_norske_kyst_og_havomrader_Tilforselsprogrammet/Rapporter/Tilforse lsprogrammet_2009_Overvaking_av_tilforsler_og/)
- Klosterhaus, S. L. and J. E. Baker (2010). "Bioavailability of decabromodiphenyl ether to the marine polychaete *Nereis virens*." *Environ Toxicol Chem* 29(4): 860-868.
- Knoth W, Winfried Mann W, Meyer R, Nebhuth J (2007). Polybrominated diphenyl ether in sewage sludge in Germany. *Chemosphere* 67: 1831-1837
- Koch E & J C Altamirano & A Covaci & N B Lana & N F Ciocco (2014). Should apple snail *Pomacea canaliculata* (Caenogastropoda, Ampullariidae) be used as bioindicator for BDE-209? *Environ Sci Pollut Res* 21:761-765
- Kodavanti, P.R.S., Szabo, D.T., Stoker, T.E., and Fenton, S.E. (2011). Brominated flame retardants. In: *Reproductive and Developmental Toxicology*, ed by Ramesh C. Gupta, Elsevier Inc., pp523-541.
- Kohler, M., M. Zennegg, (2008). "Temporal trends, congener patterns, and sources of octa-, nona-, and decabromodiphenyl ethers (PBDE) and hexabromocyclododecanes (HBCD) in Swiss lake sediments." *Environ Sci Technol* 42(17): 6378-6384.
- Kortenkamp, A., O. Martin, R. Evans, M. Faust and T. Backhaus (2014). Risk of combination effects between decabromodiphenyl ether and other polybrominated diphenyl ethers, Norwegian Environmental Protection Agency, Oslo, Norway.: 152pp. Available at:  
<http://www.miljodirektoratet.no/no/Publikasjoner/2014/Juli-2014/Risk-of-Combination-Effects-Between-Decabromodiphenyl-Ether-and-Other-Polybrominated-Diphenyl-Ethers/>
- Kuivikko M, Kotiaho T, Hartonen K, Tanskanen A, Vahatalo AV (2007). Modeled direct photolytic decomposition of Polybrominated diphenyl ethers in the Baltic sea and the Atlantic ocean. *Environ. Sci. Technol.* 41 (20), 7016-7021.
- Kuo YM, Sepulveda MS (2010). Bioaccumulation and biotransformation of decabromodiphenyl ether and effects on daily growth in juvenile lake whitefish (*Coregonus clupeaformis*). *Ecotoxicology* 19(4). 751-760
- Kuriyama, S. N., C. E. Talsness, K. Grote and I. Chahoud (2005). "Developmental exposure to low dose PBDE 99: effects on male fertility and neurobehavior in rat offspring." *Environmental health perspectives* 113: 149-154.
- Kwan C, Hideshige Takada, Ruchaya Boonyatumanond, Yoshihisa Kato, Kaoruko Mizukawa, Maki Ito, Le Quang Dung, Mohamad Pauzi Zakaria, Evangeline C. Santiago (2014). Historical occurrences of polybrominated diphenyl ethers and polychlorinated biphenyls in Manila Bay, Philippines, and in the upper Gulf of Thailand. *Science of the Total Environment* 470-471: 427-437
- Kwan C, & Hideshige Takada & Kaoruko Mizukawa & Maiko Torii & Tatsuya Koike & Rei Yamashita & Rinawati & Mahua Saha & Evangeline C (2013). Santiago. PBDEs in leachates from municipal solid waste dumping sites in tropical Asian countries: phase distribution and debromination. *Environ Sci Pollut Res* 20:4188-4204
- La Guardia MJ, Hale RC, Harvey E, Mainor TM, Ciparis S. (2012). In Situ Accumulation of HBCD, PBDEs, and Several Alternative Flame-Retardants in the Bivalve (*Corbicula fluminea*) and Gastropod (*Elimia proxima*). *Environ Sci Technol* 46(11):5798-5805.
- Law RJ, Covaci A, Harrad S, Herzke D, Abdallah MA, Fernie K, Toms LM, Takigami H (2014). Levels and trends of PBDEs and HBCDs in the global environment: status at the end of 2012. *Environ Int.* 65:147-58.
- Law K, Halldorson T, Danell R, Stern G, Gewurtz S, Alae M, (2006). Bioaccumulation and trophic transfer of some brominated flame retardants in a Lake Winnipeg (Canada) food web. *Environ Toxicol Chem* 25(8):2177-2186.
- Leal, J.F., Esteves, V.I. and Santos, E.B.H. (2013) BDE-209: Kinetic Studies and Effect of Humic Substances on Photodegradation in Water. *Environmental Science & Technology*, 47, 14010-14017
- Lee LK, He J (2010a). Reductive debromination of polybrominated diphenyl ethers by anaerobic bacteria from soils and sediments. *Applied and Environmental Microbiology*, 76(3), 794-802.
- Lee ETHK, Jae Seok Choi, Patra Nabanata, Na Young Kim, Mee Young Ahn, Ki Kyung Jung, Il Hyun Kang, Tae Sung Kim, Seung Jun Kwack, Kui Lea Park, Seung Hee Kim, Tae Seok Kang, Jaewon Lee, Byung Mu Lee and Hyung Sik Kim (2010b). "Evaluation of liver and thyroid toxicity in Sprague-

- Dawley rats after exposure to polybrominated diphenyl ether BDE-209." *The Journal of Toxicological Sciences* 35(4): 535-545.
- Leslie, H. A., et al. (2011). "Decabromodiphenylether and hexabromocyclododecane in wild birds from the United Kingdom, Sweden and The Netherlands: Screening and time trends." *Chemosphere* 82(1): 88-95.
- Letcher, R. J., S. C. Martenson, (2014). "Dietary exposure of American kestrels (*Falco sparverius*) to decabromodiphenyl ether (BDE-209) flame retardant: Uptake, distribution, debromination and cytochrome P450 enzyme induction." *Environ Int* 63: 182-190.
- Letcher, R. J., J. O. Bustnes (2010). "Exposure and effects assessment of persistent organohalogen contaminants in arctic wildlife and fish." *Sci Total Environ* 408(15): 2995-3043.
- Li Y, Duan YP, Huang F, Yang J, Xiang N, Meng XZ, Chen L (2013). Polybrominated diphenyl ethers in e-waste: Level and transfer in a typical e-waste recycling site in Shanghai, Eastern China. *Waste Manag.* S0956-053X(13)00409-1
- Li Y, Lin T, Chen Y, Hu L, Guo Z, Zhang G (2012a). Polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) in sediments of the coastal East China Sea: occurrence, distribution and mass inventory. *Environ Pollut.* 171:155-61.
- Li ZH, Liu XY, Wang N, Chen JS, Chen YH, Huang JT (2012b). Effects of Decabrominated Diphenyl Ether (PBDE-209) in Regulation of Growth and Apoptosis of Breast, Ovarian, and Cervical Cancer Cells. *Environ Health Perspect* 120(4):541-546.
- Li, B., et al. (2012c). "Occurrence of PFCs and PBDEs in Landfill Leachates from Across Canada." *Water, Air, & Soil Pollution* 223(6): 3365-3372.
- Li W, Zhu L (2011). "Effects of decabromodiphenyl ether (BDE-209) on mRNA transcription of thyroid hormone pathway and spermatogenesis associated genes in Chinese rare minnow (*Gobiocypris rarus*)." *Environ Toxicol.*
- Li QZ, Yan CZ, Luo ZX, Zhang X. (2010). Occurrence and levels of polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) in recent sediments and marine organisms from Xiamen offshore areas, China. *Mar Pollut Bull* 60(3):464-469.
- Li, Y.F., Bidleman, T.F., (2003). Correlation between global emission of  $\alpha$ -hexachlorocyclohexane and its concentrations in the Arctic air. *Journal of Environmental Informatics* 1, 52-57.
- Liang, S.-X. X., H.-X. X. Gao, Y.-Y. Y. Zhao, X.-M. M. Ma and H.-W. W. Sun (2010). "Effects of repeated exposure to decabrominated diphenyl ether (BDE-209) on mice nervous system and its self repair." *Environmental toxicology and pharmacology* 29: 297-301.
- Lignell S, Aune M, Isaksson M, Redeby J, Darnerud PO, Glynn A (2011). BDE-209 in blood serum from first-time mothers in Uppsala – temporal trend 1996-2010. National Food Agency, Uppsala, Sweden,
- Lin, Y.-M., et al. (2012). "Emissions of Polybrominated Diphenyl Ethers during the Thermal Treatment for Electric Arc Furnace Fly Ash." *Aerosol and Air Quality Research* 12: 237-250.
- Lindberg, P., Sellstrom, U., Haggberg, L. and De Wit, C. A., (2004). Higher brominated PBDEs and hexabromocyclododecane found in eggs of peregrine falcon (*Falco peregrinus*) breeding in Sweden. *Environmental Science & Technology*, 38(1), 93-96.
- Liu X, Zhan H, (2012). The PBDE-209 exposure during pregnancy and lactation impairs immune function in rats. *Mediators Inflamm* 692467(10). 15.
- Liu L, Zhu W, (2011a). Effect of decabromodiphenyl ether (BDE 209) and dibromodiphenyl ether (BDE 15) on soil microbial activity and bacterial community composition. *J Hazard Mater* 186(1). 883-890.
- Liu Y, Li J, Zhao Y, Wen S, Huang F, Wu Y. (2011b). Polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) and indicator polychlorinated biphenyls (PCBs) in marine fish from four areas of China. *Chemosphere* 83(2):168-174.
- Liu PY, Du GD, Zhao YX, Mu YS, Zhang AQ, Qin ZF, Zhang XY, Yan SS, Li Y, Wei RG, Qin XF, Yang YJ (2011c). Bioaccumulation, maternal transfer and elimination of polybrominated diphenyl ethers in wild frogs. *Chemosphere.* 2011;84(7):972-8.

- Llabjani, V., J. Trevisan, K. C. Jones, R. F. Shore and F. L. Martin (2010). "Binary mixture effects by PBDE congeners (47, 153, 183, or 209) and PCB congeners (126 or 153) in MCF-7 cells: biochemical alterations assessed by IR spectroscopy and multivariate analysis." *Environmental science & technology* 44: 3992-3998.
- Lohmann, R., J. Klanova (2013). "Concentrations, Fluxes, and Residence Time of PBDEs Across the Tropical Atlantic Ocean." *Environ Sci Technol* 27: 27.
- Lorber M (2008). Exposure of Americans to polybrominated diphenyl ethers. *J Exp Sci Environ Epidemiol* 18:2-19.
- Lu, M., Zhang, Z.-Z., Su, X.-L., Xu, Y.-X., Wu, X.-J. & Zhang, M., 2013. Effect of copper on in vivo fate of BDE-209 in pumpkin. *Journal of hazardous materials*, 262, pp.311–7.
- Lunder S, Hovander L, Athanassiadis I, Bergman A. (2010). Significantly Higher Polybrominated Diphenyl Ether Levels in Young US Children than in Their Mothers. *Environ Sci Technol* 44(13):5256-5262.
- Luo Q, Zha JM, Wang ZJ, Wong MH, Cai ZW. (2013). Bioaccumulation and debromination of BDE-209 in Japanese medaka (*Oryzias Latipes*) when continuously exposed to environmental relevant concentrations. *J Environ Sci Heal A* 48(11):1349-1355.
- Ma Y, Salamova A, Venier M, Hites RA (2013). Has the Phase-Out of PBDEs Affected Their Atmospheric Levels? Trends of PBDEs and Their Replacements in the Great Lakes Atmosphere. *Environmental Science & Technology* 47 (20), 11457-11464
- MacGregor JA and Nixon WB (1997). Decabromodiphenyl oxide (DBDPO): Determination of n-octanol/water partition coefficient. *Wildlife International Ltd*, 1997.
- Mannetje A, Coakley J, Bridgen P, Brooks C, Harrad S, Smith AH, Pearce N, Douwes J (2013). Current concentrations, temporal trends and determinants of persistent organic pollutants in breast milk of New Zealand women. *Sci Total Environ* 458-460:399-407.
- Mansouri K, Consonni V, Durjava MK, Kolar B, Oberg T, Todeschini R. (2012). Assessing bioaccumulation of polybrominated diphenyl ethers for aquatic species by QSAR modeling. *Chemosphere* 89(4):433-444.
- Mariani A, Fanelli R, Re Depaolini A, De Paola M. (2014) Decabrominated diphenyl ether and methylmercury impair fetal nervous system development in mice at documented human exposure levels. *Dev Neurobiol*. 2014 Jul 9. doi: 10.1002/dneu.22208.
- Mariussen E, Steinnes E, Breivik K, Nygaard T, Schlabach M, Kalas JA (2008). Spatial patterns of polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) in mosses, herbivores and a carnivore from the Norwegian terrestrial biota. *Sci Total Environ* 404:162–70.
- Marteinson SC, Bird DM, Shutt JL, Letcher RJ, Ritchie IJ, Fernie K (2010). Multi-generational effects of polybrominated diphenylethers exposure: Embryonic exposure of male American kestrels (*Falco sparverius*) to DE-71 alters reproductive success and behaviors. *Environ Toxicol Chem* 28:1740–7.
- Marvin C, Jasmine Waltho, Julia Jia, Debbie Burniston (2013). Spatial distributions and temporal trends in polybrominated diphenyl ethers in Detroit River suspended sediments. *Chemosphere* 91: 778–783
- McKinney, M. A., Dietz, R., Sonne, C., de Guise, S., Skirnisson, K., Karlsson, K., Steingrimsson, E., & Letcher, R. J. (2011a). Comparative Hepatic Microsomal Biotransformation of Selected PBDEs, Including Decabromodiphenyl Ether, and Decabromodiphenyl Ethane Flame Retardants in Arctic Marine-Feeding Mammals, *Environmental Toxicology and Chemistry*, vol. 30, no. 7, pp. 1506-1514.
- Messer A (2010). Mini-review: polybrominated diphenyl ether (PBDE) flame retardants as potential autism risk factors. *Physiol Behav*. 100(3):245-9.
- Meyer, T., D. C. Muir, (2012). "Deposition of brominated flame retardants to the Devon Ice Cap, Nunavut, Canada." *Environ Sci Technol* 46(2): 826-833.
- Miyaso, H., et al. (2012). "Postnatal exposure to low-dose decabromodiphenyl ether adversely affects mouse testes by increasing tyrosine phosphorylation level of cortactin." *J Toxicol Sci* 37(5): 987-999.
- Miller, M. F., S. M. Chernyak, S. E. Domino, S. a. Batterman and R. Loch-Caruso (2012). "Concentrations and speciation of polybrominated diphenyl ethers in human amniotic fluid." *The Science of the total environment* 417-418: 294-298.
- Mizukawa H, Nomiyama K, Nakatsu S, Yachimori S, Hayashi T, Tashiro Y, (2013). Species-specific differences in the accumulation features of organohalogen contaminants and their metabolites in the blood of Japanese terrestrial mammals. *Environ Pollut* 174(28-37).

- Mizukawa K, Takada H, Takeuchi I, Ikemoto T, Omori K, Tsuchiya K. (2009). Bioconcentration and biomagnification of polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) through lower-trophic-level coastal marine food web. *Marine Pollution Bulletin* 58(8):1217-1224.
- Mo L, Wu JP, Luo XJ, Li KL, Peng Y, Feng AH, (2013). Using the kingfisher (*Alcedo atthis*) as a bioindicator of PCBs and PBDEs in the dinghushan biosphere reserve, China. *Environ Toxicol Chem* 32(7):1655-1662.
- Mo L, Wu JP, Luo XJ, Zou FS, Mai BX. (2012). Bioaccumulation of polybrominated diphenyl ethers, decabromodiphenyl ethane, and 1,2-bis(2,4,6-tribromophenoxy) ethane flame retardants in kingfishers (*Alcedo atthis*) from an electronic waste-recycling site in South China. *Environ Toxicol Chem*. 31(9):2153-8.
- Morf LS, Buser AM, Taverna R, Bader H-P, Scheidegger R (2008). Dynamic substance flow analysis as a valuable risk evaluation tool a case study for brominated flame retardants as an example of potential endocrine disrupters. *CHIMIA Int J Chem*62:424–31.
- Morf, LS, Buser AM, Taverna R, Bader HP, Scheidegger R. (2007). Efficient measures in waste management as a key factor to reduce emissions of BFRs: Case study results for DecaBDE in Switzerland and global implications. *Organohalogen Compounds*, 69, 916-919.
- Morf L, Smutny R, Taverna R, Daxbeck H. Selected polybrominated flame retardants, PBDEs and TBBPA—substance flow analysis. Berne: Swiss Agency for the Environment, Forests and Landscape; 2003.
- Morgado I, Hamers T, Van der Ven L, Power DM (2007). Disruption of thyroid hormone binding to sea bream recombinant transthyretin by ioxinyl and polybrominated diphenyl ethers. *Chemosphere*. 69(1): 155-63
- Muñoz-Arnanz J, Sáez M, Aguirre JI, Hiraldo F, Baos R, Pácepavicius G, (2011). Predominance of BDE-209 and other higher brominated diphenyl ethers in eggs of white stork (*Ciconia ciconia*) colonies from Spain. *Environ Int* 37(3):572-576.
- Munsch C, K. Héas-Moisan, C. Tixier, N. Olivier, O. Gastineau, N. Le Bayon, V. Buchet (2011). Dietary exposure of juvenile common sole (*Solea solea* L.) to polybrominated diphenyl ethers (PBDEs): Part 1. Bioaccumulation and elimination kinetics of individual congeners and their debrominated metabolites. *Environmental Pollution* 159: 229-237
- Möller, A., Z. Y. Xie, (2012). "Occurrence and air-seawater exchange of brominated flame retardants and Dechlorane Plus in the North Sea." *Atmospheric Environment* 46: 346-353.
- Möller, A., Z. Xie, (2011a). "Polybrominated diphenyl ethers vs alternate brominated flame retardants and Dechloranes from East Asia to the Arctic." *Environ Sci Technol* 45(16): 6793-6799.
- Möller, A., Z. Xie, (2011b). "Polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) and alternative brominated flame retardants in air and seawater of the European Arctic." *Environ Pollut* 159(6): 1577-1583.
- Mörck, A., H. Hakk, U. Örn, E. K. Wehler, A. Morck, U. Orn and E. Klasson Wehler (2003). "Decabromodiphenyl Ether In The Rat : Absorption , Distribution , Metabolism , And Excretion." *Drug metabolism and disposition: the biological fate of chemicals* 31:7: 900-907.
- NCP, Northern Contaminants Program 2013. Canadian Arctic Contaminants Assessment Report On Persistent Organic Pollutants – 2013.
- NERI Technical Report No. 481 2003. Polybrominated Diphenyl Ethers (PBDEs) in Sewage Sludge and Wastewater
- Method Development and Validation. National Environmental Research Institute Ministry of the Environment. Denmark. p-1-34.
- Ni K, Lu Y(2013). "Polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) in China: Policies and recommendations for sound management of plastics from electronic wastes." *J Environ Manage* 115(0): 114-123.
- Norway 2013. Proposal to list decabromodiphenyl ether (commercial mixture, c-decaBDE) in Annexes A, B and/or C to the Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants. UNEP/POPS/POPRC.9/2
- NEA, Norwegian Environment Agency (2014). Monitoring of environmental contaminants in air and precipitation, annual report 2013. Report M-202/2014. p. 1-70. Authors: Nizzetto PB, Aas W, Krogseth IS.
- Noyes PD, Lema SC, Macaulay LJ, Douglas NK, Stapleton HM. (2013). Low Level Exposure to the Flame Retardant BDE-209 Reduces Thyroid Hormone Levels and Disrupts Thyroid Signaling in Fathead Minnows. *Environ Sci Technol* 47(17):10012-10021.

- Noyes PD, Hinton DE (2011). Accumulation and debromination of decabromodiphenyl ether (BDE-209) in juvenile fathead minnows (*Pimephala promelas*) induces thyroid disruption and liver alterations. *Toxicol Sci* 122(2). 265-274.
- NTP (1986). Toxicology and carcinogenesis studies of decabromodiphenyl oxide (CAS no. 1163-19-5) in F344/N and B 6c3F1 mice (fed studies). National Toxicology Program, National Institute of Environmental Health and Safety. Available on-line at: [ntp.niehs.nih.gov/ntp/htdocs/lt\\_rpts/tr309.pdf](http://ntp.niehs.nih.gov/ntp/htdocs/lt_rpts/tr309.pdf). NTP:National Toxicology Program. NTP TR 309.
- Nyholm JR (2011). Email from Jenny Nyholm to Stephen Dungey, Environment Agency, 21 August 2011.
- Nyholm JR, Lundberg C and Andersson PL (2010). Biodegradation kinetics of selected brominated flame retardants in aerobic and anaerobic soil. *Environmental Pollution*, 158 (6), 2235-2240.
- Nyholm JR, Norman A, Norrgren L, Haglund P, Andersson PL (2008). Maternal transfer of brominated flame retardants in zebrafish (*Danio rerio*). *Chemosphere*.73(2):203-8.
- Odabasi M, Bayram A, Elbir T, Seyfioglu R, Dumanoglu Y, Bozlaker A, Demircioglu H, Altioek H, Yatkin S, Cetin B. Electric arc furnaces for steel-making: hot spots for persistent organic pollutants. *Environ Sci Technol*. 2009 Jul 15;43(14):5205-11.
- OECD, Organisation for Economic Co-operation and Development (2014): Risk management of installations and chemicals. Brominated Flame Retardants. <http://www.oecd.org/env/ehs/risk-management/brominatedflameretardants.htm> (Accessed; 27.02.2014).
- OECD, Organisation for Economic Co-operation and Development (2012). OECD Guidelines for testing of chemicals; Bioaccumulation in Fish: Aqueous and Dietary Exposure. 305 Adopted: 2 October 2012.
- OECD, Organisation for Economic Co-operation and Development (2008). Brominated Flame Retardants (BFRs). Hazard/Risk Information Sheets, October 2008. <http://www.oecd.org/dataoecd/3/6/42073463.pdf>
- OECD, Organisation for Economic Co-operation and Development (2007). OECD Guideline For The Testing Of Chemicals. Developmental Neurotoxicity Study. 426.
- OECD, Organisation for Economic Co-operation and Development (1998). Waste Management Policy Group 1998. Report on incineration of products containing brominated flame retardants. p. 1-11
- Orihel DM., Bisbicos T, Dupuis AP., Paterson MJ., and Muir DCG. (2014). Debromination of the flame retardant decabromodiphenyl ether in lake sediments. Paper submitted to Environmental Science and Technology.
- Orihel D, Bisbicos T, Dupuis A, Paterson M, Tomy G, and Muir D. (2011) Debromination of 13C-labelled Decabromodiphenyl Ether in Lake Sediments. Poster. ATW.
- OSPAR, The Convention for the Protection of the marine Environment of the North-East Atlantic (2009). OSPAR Background Document on certain brominated flame retardants – Polybrominated Diphenylethers, Polybrominated Biphenyls, Hexabromo Cyclododecane, Update 2009. Hazardous Substances Series. OSPAR Commission.
- Pacyniak, E. K., X. Cheng, M. L. Cunningham, K. Crofton, C. D. Klaassen and G. L. Guo (2007). "The flame retardants, polybrominated diphenyl ethers, are pregnane X receptor activators." *Toxicological sciences* : an official journal of the Society of Toxicology 97: 94-102.
- Palm W-U, Kopetzky R, Sossinka W, Kruger H-U, Lin Q, Barcellos da Rosa ST, Zetzsch C. 2003. Environmental photochemistry of decabromodiphenyl ethers in organic solvents and adsorbed on particles in air and in aqueous suspension (including a feasibility study on OH reactivities in an aerosol smog chamber facility). Report for the Bromine Science and Environmental Forum [cited in United Kingdom 2004].
- Palm A, Cousins IT, Mackay D, Tysklind M, Metcalfe C, Alaee M (2002). Assessing the environmental fate of chemicals of emerging concern: a case study of the polybrominated diphenyl ethers. *Environ Pollut* 117:195–213.
- Park JS, Holden A, Chu V, Kim M, Rhee A, Patel P, (2009). Time-Trends and Congener Profiles of PBDEs and PCBs in California Peregrine Falcons (*Falco peregrinus*). *Environ Sci Technol* 43(23):8744-8751.
- Pellacani, C., S. Tagliaferri, A. Caglieri, M. Goldoni, G. Giordano, A. Mutti and L. G. Costa (2012). "Synergistic interactions between PBDEs and PCBs in human neuroblastoma cells." *Environ Toxicol*.

- Plourde, S. P., R. Moreau, (2013). "Is the bone tissue of ring-billed gulls breeding in a pollution hotspot in the St. Lawrence River, Canada, impacted by halogenated flame retardant exposure?" *Chemosphere* 93(10): 2333-2340.
- Poma G., Pietro Volta, Claudio Roscioli. (2014) Novel brominated flameand fish from LakeBettinetti c, Licia GuzzellaConcentrations and trophic interactions ofretardants, HBCD, and PBDEs in zooplanktMaggiore (Northern Italy). *Science of the Total Environment* 481 (2014) 401–408.
- Pountney Angela a, Amy L. Filby a, Gareth O. Thomas b, Vic R. Simpson c, Elizabeth A. Chadwick d, Jamie R. Stevens a, Charles R. Tyler. High liver content of polybrominated dip(Lutra lutra) from England and Walesenyl ether (PBDE) in otters. *Chemosphere* 118 (2014) 81–86.
- POPRC, Persistent Organic Review Committee (2013a). Debromination of decabromodiphenyl ether (BDE-209) in the environment; Stockholm Convention Persistent Organic Pollutants Review Committee, Ninth Meeting, Rome 14-18 October, 2013. UNEP/POPS/POPRC.9/INF/19.
- POPRC, Persistent Organic Review Committee (2013b), Revised draft guidance on how to assess the possible impact of climate change on the work of the Persistent Organic Pollutants Review Committee. UNEP/POPS/POPRC.9/INF/15.
- POPRC, Persistent Organic Review Committee (2010a). Work programmes on new persistent organic pollutants as adopted by the Conference of the Parties. Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants: Persistent Organic Pollutants Review Committee, Sixth Meeting, Geneva 11-15 October, 2010. UNEP/POPS/POPRC.6/2/Rev.1. United Nations Environment Programme.
- POPRC, Persistent Organic Review Committee (2010b) Supporting Document for Technical review of the implications of recycling commercial penta and octabromodiphenyl ethers. Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants: Persistent Organic Pollutants Review Committee, Sixth Meeting, Geneva 11-15 October, 2010. (UNEP/POPS/POPRC.6/INF/6).
- POPRC Persistent Organic Review Committee (2010c) Debromination of brominated flame retardants. Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants: Persistent Organic Pollutants Review Committee, Sixth Meeting, Geneva 11-15 October, 2010.(UNEP/POPS/POPRC.6/INF/20/Rev.1).
- POPRC, Persistent Organic Review Committee (2006). Risk profile on commercial pentabromodiphenyl ether. UNEP/POPS/POPRC.2/17/Add.1
- POPRC, Persistent Organic Review Committee 2007. Risk profile on commercial octabromodiphenyl ether. UNEP/POPS/POPRC.3/20/Add.6
- Porch JR and Krueger HO (2001). Decabromodiphenyl oxide (DBDPO): a toxicity test to determine the effects of the substance on seedling emergence of six species of plants. Wildlife International Ltd Project Number: 439-101. Wildlife International Ltd, Maryland, United States.
- Powell DE, Sesten RM, Woodburn KE, Gerhards R. (2013). Trophic magnification factors (TMF). Interrelationship with other measures used to interpret bioaccumulation in aquatic environments. Scientific advancements in bioaccumulation assessment. Helsinki Workshop, 11 mars 2013.
- Qiu, M., X. Chen, D. Deng, J. Guo, G. Sun, B. Mai, and M. Xu. (2012). Effects of electron donors on anaerobic microbial debromination of polybrominated diphenyl ethers (PBDEs). *Biodegradation* 23:351-361.
- Qin, X., X. Xia, (2010). Thyroid disruption by technical decabromodiphenyl ether (DE-83R) at low concentrations in *Xenopus laevis*. *J Environ Sci* 22(5): 744-751.
- Qu WY, Bi XH, Sheng GY, Lu SY, Fu H, Yuan J, (2007). Exposure to polybrominated diphenyl ethers among workers at an electronic waste dismantling region in Guangdong, China. *Environ Int* 33(8):1029-1034.
- Raff JD, Hites RA (2007). Deposition versus photochemical removal of PBDEs from Lake Superior air. *Environ Sci Technol*41:6725–31.
- Ren, G., Z. Wang, Z. Yu, Y. Wang, S. Ma, M. Wu, G. Sheng, and J. Fu. (2013a). Primary investigation on contamination pattern of legacy and emerging halogenated organic pollutions in freshwater fish from Liaohe River, Northeast China. *Environmental Pollution* 172:94-99.
- Ren, X. M., L. H. Guo, Y. Gao, B. T. Zhang and B. Wan (2013b). "Hydroxylated polybrominated diphenyl ethers exhibit different activities on thyroid hormone receptors depending on their degree of bromination." *Toxicol Appl Pharmacol* 268(3): 256-263.

- Ren Z, Xiao X, Chen D, Bi X, Huang B, Liu M, Hu J, Peng P, Sheng G, Fu J. (2014). Halogenated organic pollutants in particulate matters emitted during recycling of waste printed circuit boards in a typical e-waste workshop of Southern China. *Chemosphere*. 2014;94:143-150.
- Ren, M., P. a. Peng, (2011). "PBDD/F impurities in some commercial deca-BDE." *Environmental Pollution* 159(5): 1375-1380.
- Reverte, I., et al. (2014). "Thyroid hormones and fear learning but not anxiety are affected in adult apoE transgenic mice exposed postnatally to decabromodiphenyl ether (BDE-209)." *Physiol Behav* 133C: 81-91.
- Reverte, I., A. B. Klein, J. L. Domingo and M. T. Colomina (2013). "Long term effects of murine postnatal exposure to decabromodiphenyl ether (BDE-209) on learning and memory are dependent upon APOE polymorphism and age." *Neurotoxicol Teratol* 40C: 17-27.
- Rice, D. C., W. D. Thompson, E. A. Reeve, K. D. Onos, M. Assadollahzadeh and V. P. Markowski (2009). "Behavioral changes in aging but not young mice after neonatal exposure to the polybrominated flame retardant decaBDE." *Environ Health Perspect* 117(12): 1903-1911.
- Rice, D. C., E. a. Reeve, A. Herlihy, R. T. Zoeller, W. D. Thompson and V. P. Markowski (2007). "Developmental delays and locomotor activity in the C57BL6/J mouse following neonatal exposure to the fully-brominated PBDE, decabromodiphenyl ether." *Neurotoxicol Teratol* 29: 511-520.
- Ricklund N, Kierkegaard A, McLachlan MS, Wahlberg C (2008a). Mass balance of decabromodiphenyl ethane and decabromodiphenyl ether in a WWTP. *Chemosphere* 74: 389-394
- Ricklund, N., A. Kierkegaard, (2008b). "An international survey of decabromodiphenyl ethane (deBDethane) and decabromodiphenyl ether (decaBDE) in sewage sludge samples." *Chemosphere* 73(11): 1799-1804.
- Riu, A., J.-p. Cravedi, L. Debrauwer, A. Garcia, C. Canlet, I. Jouanin and D. Zalko (2008). "Disposition and metabolic profiling of [14C]-decabromodiphenyl ether in pregnant Wistar rats." *Environment international* 34: 318-329.
- Rivière G, Sirot V, Tard A, Jean J, Marchand P, Veyrand B, Le Bizec B, Leblanc JC (2014). Food risk assessment for perfluoroalkyl acids and brominated flame retardants in the French population: Results from the second French total diet study. *Sci Total Environ*. Feb 12. pii: S0048-9697(14)00133-8. doi: 10.1016/j.scitotenv.2014.01.104
- Roberts SC, Noyes PD, Gallagher EP, Stapleton HM (2011). Species-specific differences and structure-activity relationships in the debromination of PBDE congeners in three fish species. *Environ Sci Technol*. ;45(5):1999-2005.
- Robrock KR, Korytár P, Alvarez-Cohen L(2008). Pathways for the anaerobic microbial debromination of polybrominated diphenyl ethers. *Environ Sci Technol*. 42(8):2845-52.
- Robson, M., et al. (2013). "Wet deposition of brominated flame retardants to the Great Lakes basin--status and trends." *Environ Pollut* 182: 299-306
- Ross PS 2009. Large and growing environmental reservoirs of Deca-BDE present an emerging health risk for fish and marine mammals. *Marine Pollution Bulletin* 58:7-10.
- Roze, E., L. Meijer, A. Bakker, K. N. J. A. Van Braeckel, P. J. J. Sauer and A. F. Bos (2009). "Prenatal exposure to organohalogenes, including brominated flame retardants, influences motor, cognitive, and behavioral performance at school age." *Environmental health perspectives* 117: 1953-1958.
- RPA, Risk&Policy Analysts .Georgalas B, Sanchez A, Zarogiannis P (2014). Multiple Framework Contract with Re-opening of competition for Scientific Services for ECHA. Reference: ECHA/2011/01 Service Request SR 14:Support to an Annex XV Dossier on Bis-(pentabromophenyl) ether (DecaBDE) (manuscript in press).
- Sagerup, K., L. B. Helgason, (2009). "Persistent organic pollutants and mercury in dead and dying glaucous gulls (*Larus hyperboreus*) at Bjornoya (Svalbard)." *Sci Total Environ* 407(23): 6009-6016.
- Sandholm, A., B.-M. Emanuelsson and E. K. Wehler (2003). "Bioavailability and half-life of decabromodiphenyl ether (BDE-209) in rat." *Xenobiotica; the fate of foreign compounds in biological systems* 33: 1149-1158.
- Samsonek J, Puype F (2013). Occurrence of brominated flame retardants in black thermo cups and selected kitchen utensils purchased on the European market. *Food Addit Contam Part A Chem Anal Control Expo Risk Assess* 30:1976-86. doi: 10.1080/19440049.2013.829246

- Sakai S-i, Hirai Y, Aizawa H, Ota S, Muroishi Y (2006). Emission inventory of deca-brominated diphenyl ether (DBDE) in Japan. *J. Mater. Cycles Waste Manage.* 8:56–62.
- Salamova A, Hermanson MH, Hites RA (2014). Organophosphate and halogenated flame retardants in atmospheric particles from a European arctic site. *Environ Sci Technol.* 48(11):6133-40.
- Schechter A, Smith S, Colacino J, Malik N, Opel M, Paepke O, Birnbaum L (2011). Contamination of U.S. butter with polybrominated diphenyl ethers from wrapping paper. *Environ Health Perspect.* 119(2):151-4.
- Schiedek D, Sundelin B, Readman JW, Macdonald RW (2007). Interactions between climate change and contaminants. *Mar Pollut Bull.* 54(12):1845-56.
- Schlabach, M., Mariussen, E., Borgen, A., Dye, C., Enge, E.-K., Steinnes, E., Green, N., Mohn, H., (2002). Kartlegging av bromerte flammehemmere og klorerte parafiner. Norsk institutt for luftforskning (NILU), Kjeller, Norway, Rapport 62/2002, p. 71 (in Norwegian). Available from: [http://www.nilu.no/index.cfm?ac=publications&folder\\_id=4309&publication\\_id=3221&view=rep](http://www.nilu.no/index.cfm?ac=publications&folder_id=4309&publication_id=3221&view=rep)
- Schriks, M., J. M. Roessig, (2007). "Thyroid hormone receptor isoform selectivity of thyroid hormone disrupting compounds quantified with an in vitro reporter gene assay." *Environ Toxicol Pharmacol* 23(3): 302-307.
- Schriks M, Zvinavashe E, Furlow JD, Murk AJ (2006). Disruption of thyroid hormone-mediated *Xenopus laevis* tadpole tail tip regression by hexabromocyclododecane (HBCD) and 2,2',3,3',4,4',5,5',6-nona brominated diphenyl ether (BDE206). *Chemosphere* 65(10):1904-8.
- Schreiber, T., K. Gassmann, C. Götz, U. Hübenthal, M. Moors, G. Krause, H. F. Merk, N.-H. Nguyen, T. S. Scanlan, J. Abel, C. R. Rose and E. Fritsche (2010). "Polybrominated diphenyl ethers induce developmental neurotoxicity in a human in vitro model: evidence for endocrine disruption." *Environmental health perspectives* 118: 572-578.
- Sahlström LM, Sellström U, de Wit CA, Lignell S, Darnerud PO (2014). Brominated Flame Retardants in Matched Serum Samples from Swedish First-Time Mothers and Their Toddlers. *Environ Sci Technol.* Jun 19. [Epub ahead of print] PubMed PMID: 24927135.
- Sellström, U., G. Söderström, C. De Wit, and M. Tysklind. (1998a). Photolytic debromination of decabromodiphenyl ether (DeBDE). *Organohalogen Compounds* 35:447-450.
- Sellström U, Kierkegaard A, de Wit C, and Jansson B (1998b). Polybrominated diphenyl ethers and hexabromocyclododecane in sediment and fish from a Swedish river. *Environ. Toxicol. Chem.*, 17, 1065-1072.
- Sellstrom U, C. De Wit, N. Lundgren, and M. Tysklind (2005). Effect of Sewage-Sludge Application on Concentrations of Higher-Brominated Diphenyl Ethers in Soils and Earthworms. *Environ. Sci. Technol.*, 39: 9064-9070
- Seyer A, Riu A, Debrauwer L, Bourgès-Abella N, Brunelle A, Laprèvote O, Zalko D (2010). Time-of-flight secondary ion mass spectrometry imaging demonstrates the specific localization of deca-bromo-diphenyl-ether residues in the ovaries and adrenal glands of exposed rats. *J Am Soc Mass Spectrom.* 11:1836-45.
- SFT, Norwegian Pollution Control Authority (2008a). Mapping selected organic contaminants in the Barents Sea 2007. Report 1021/2008. Oslo, Norway. p.1-137. Available at: [http://www.miljodirektoratet.no/no/Publikasjoner/Statlig\\_miljoovervakning/Kartlegging\\_av\\_nye\\_miljogifter/Rapporter/Mapping\\_selected\\_organic\\_contaminants\\_in\\_the\\_Barents\\_Sea\\_2007/Authors: Bakke T, Boiisov S, Green N, Brevik EM.](http://www.miljodirektoratet.no/no/Publikasjoner/Statlig_miljoovervakning/Kartlegging_av_nye_miljogifter/Rapporter/Mapping_selected_organic_contaminants_in_the_Barents_Sea_2007/Authors: Bakke T, Boiisov S, Green N, Brevik EM.)
- SFT, Norwegian Pollution Control Authority (2008b). National Lake Survey 2004–2006, Part III. AMAP. Status of metals and environmental pollutants in lakes and fish from the Norwegian part of the AMAP region. Report TA-2363/2008. p.1-170 pp. <http://www.sft.no/publikasjoner/2363/ta2363.pdf>.
- SFT, Norwegian Pollution Control Authority (2004). New and established organohalogen contaminants and their metabolites in plasma and eggs of glaucous gulls from Bear Island. TA-2057/2004. Oslo, Norway, p. 1-26. Available from: <http://www.miljodirektoratet.no/old/klif/publikasjoner/overvakning/2057/ta2057.pdf>
- SFT, Norwegian Pollution Control Authority (2004). (2004). Kartlegging av utvalgte nye organiske miljøgifter – bromerte flammehemmere, klorerte parafiner, bisfenol A og triclosan. SFT rapport TA-2006/2004 (Niva rapport nr. 4809-2004), 117p. Available from: [http://www.nilu.no/index.cfm?ac=publications &folder\\_id=4309&publication\\_id=5203&view=rep](http://www.nilu.no/index.cfm?ac=publications &folder_id=4309&publication_id=5203&view=rep) .

- Authors: Fjeld E, Schlabach M, Berge JA, Eggen T, Snilsberg P, Källberg G, Rognerud S, Enge EK, Borgen A and Gundersen H,
- Shaw SD, Berger ML, Weijs L, Covaci A. (2012). Tissue-specific accumulation of polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) including Deca-BDE and hexabromocyclododecanes (HBCDs) in harbor seals from the northwest Atlantic. *Environ Int* 44(1-6).
- Shaw SD, Berger ML, (2009). Bioaccumulation of polybrominated diphenyl ethers and hexabromocyclododecane in the northwest Atlantic marine food web. *Sci Total Environ* 407(10): 3323-3329.
- Shaw SD, Brenner D, Berger ML, Fang F, Hong CS, Addink R, Hilker D (2008). Bioaccumulation of polybrominated diphenyl ethers in harbor seals from the northwest Atlantic. *Chemosphere* 73(11):1773-80.
- She Y-Z, Wu J-P, Zhang Y, Peng Y, Mo L, Luo X-J (2013). Bioaccumulation of polybrominated diphenyl ethers and several alternative halogenated flame retardants in a small herbivorous food chain. *Environ Pollut* 174(0):164-170.
- Shibutani, M., H. Fujimoto, G.-H. Woo, K. Inoue, M. Takahashi and A. Nishikawa (2011). "Reply to Comment on "Impaired oligodendroglial development by decabromodiphenyl ether in rat offspring after maternal exposure from mid-gestation through lactation" [Reprod. Toxicol. 31(1) (2011) 86–94]." *Reproductive Toxicology* 32: 375-378.
- Shi S & Yeru Huang & Li Zhou & Wenlong Yang & Liang Dong & Lifei Zhang & Xiulan Zhang (2013a). A preliminary investigation of BDE-209, OCPs, and PAHs in urban road dust from Yangtze River Delta, China. *Environ Monit Assess* 185:4887–4896
- Shi Z, Jiao Y, Hu Y, Sun Z, Zhou X, Feng J et al (2013b). Levels of tetrabromobisphenol A, Hexabromocyclododecanes and polybrominated diphenyl ethers in human milk from the general population in Beijing, China. *Sci Tot Environ* 452–453:10–18.
- Sifleet SD. (2009). Toxicology of Decabromodiphenyl Ether in Avian Embryos: Disposition of the Flame Retardant BDE-209 in Yolk-injected Chicken Embryos (*Gallus gallus*). Thesis presented to the Faculty of the School of Marine Science, The College of William and Mary in Virginia, USA.
- Sjödin A, Hagmar L, Klasson-Wehler E, Kronholm-Diab K, Jakobsson E and Bergman A (1999). Flame retardant exposure: polybrominated diphenyl ethers in blood from Swedish workers. *Environmental Health Perspectives*, 107,8, 643-648.
- Song, J., Z.-H. Li, Y.-T. He, C.-X. Liu, B. Sun, C.-F. Zhang, J. Zeng, P.-L. Du, H.-L. Zhang, Y.-H. Yu and D.-J. Chen (2013). "Decabrominated diphenyl ether (BDE-209) and/or BDE-47 exposure alters protein expression in purified neural stem/progenitor cells determined by proteomics analysis." *International journal of developmental neuroscience : the official journal of the International Society for Developmental Neuroscience* 33C: 8-14.
- Solaris Chemtech 2008. <http://www.solarischemtech.com/products-flame.asp?links=flame>
- Stapleton, H. M. and N. G. Dodder. (2008). Photodegradation of decabromodiphenyl ether in house dust by natural sunlight. *Environmental Toxicology and Chemistry* 27:306-312.
- Stapleton HM, Brazil B, Holbrook RD, Mitchelmore CL, Benedict R, Konstantinov A, Potter D. (2006). *In vivo* and *in vitro* debromination of decabromodiphenyl ether (BDE 209) by juvenile rainbow trout and common carp. *Environ Sci Technol* 40:4653-4658.
- Stapleton HM, Alae M, Letcher RJ, Baker JE. (2004). Debromination of the flame retardant decabromodiphenyl ether by juvenile carp (*Cyprinus carpio*) following dietary exposure. *Environ Sci Technol* 38(1):112-119.
- Stenzel JI and Markley BJ (1997). Decabromodiphenyl oxide (DBDPO): Determination of the Water Solubility. *Wildlife International Ltd.*, 1997.
- Stiborova, H., Zlamalikova, J., Pulkrabova, J., Hradkova, P., Napravnikova, M., Hajšlova, J., Mackova, M. and Demnerova, K., (2008). Aerobic and anaerobic degradation of polybrominated diphenyl ethers in sewage sludge. *Organohalogen Compounds*, 70, 197- 200.
- Su, Y., Hung, H., Sverko, E., Fellin, P., Li, H (2007). Multi-year measurements of polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) in the Arctic atmosphere. *Atmos. Environ.*, 41, 8725–8735.
- Suvorov, A., Girard, S., Lachapelle, S., Abdelouahab, N., Sebire, G., and Takser, L. (2009). "Perinatal exposure to low-dose BDE-47, an emergent environmental contaminant, causes hyperactivity in rat offspring." *Neonatology* 95: 203-209.

- Sverdrup LE, Hartnik T, Mariussen E, Jensen J (2006). Toxicity of three halogenated flame retardants to nitrifying bacteria, red clover (*Trifolium pratense*), and a soil invertebrate (*Enchytraeus crypticus*). *Chemosphere* 64(1):96-103.
- Syed JH, Malik RN, Li J, Wang Y, Xu Y, Zhang G, Jones KC (2013). Levels, profile and distribution of Decachloran Plus (DP) and Polybrominated Diphenyl Ethers (PBDEs) in the environment of Pakistan. *Chemosphere* 93(8):1646-53.
- Söderström, G., Sellström, U., De Wit, C.A., Tysklind, M., (2004). Photolytic debromination of decabromodiphenyl ether (BDE-209). *Environmental Science & Technology* 38, 127–132.
- Söderström G (2003). On the combustion and photolytic degradation products of some brominated flame retardants. Department of Chemistry, Environmental Chemistry, University of Umea, Sweden.
- Sørmo G, Lie E, Ruus A, Gaustad H, Skaare JU, Jenssen BM (2011). Trophic level determines levels of brominated flame-retardants in coastal herring gulls. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 74: 2091-2098
- Sørmo EG, Salmer MP, Jenssen BM, Hop H, Baek K, Kovacs KM, et al (2006). Biomagnification of polybrominated diphenyl ether and hexabromocyclododecane flame retardants in the polar bear food chain in Svalbard, Norway. *Environ Toxicol Chem* 25: 2502–11.
- Tagliaferri, S., A. Caglieri, M. Goldoni, S. Pinelli, R. Alinovi, D. Poli, C. Pellacani, G. Giordano, A. Mutti and L. G. Costa (2010). "Low concentrations of the brominated flame retardants BDE-47 and BDE-99 induce synergistic oxidative stress-mediated neurotoxicity in human neuroblastoma cells." *Toxicology in vitro : an international journal published in association with BIBRA* 24: 116-122.
- Tang, Z., et al. (2014). "Polybrominated Diphenyl Ethers in Soils, Sediments, and Human Hair in a Plastic Waste Recycling Area: A Neglected Heavily Polluted Area." *Environmental Science & Technology* 48(3): 1508-1516.
- Tasaki, T., T. Takasuga, (2004). "Substance flow analysis of brominated flame retardants and related compounds in waste TV sets in Japan." *Waste Manag* 24(6): 571-580.
- Teshima, R., R. R. Nakamura, A. Hachisuka, J.-i. Sawada and M. Shibutani (2008). "Effects of Exposure to Decabromodiphenyl Ether on the Development of the Immune System in Rats." *Journal of Health Science* 54: 382-389.
- Thienpont, B., A. Tingaud-Sequeira, (2011). "Zebrafish *Eleutheroembryos* Provide a Suitable Vertebrate Model for Screening Chemicals that Impair Thyroid Hormone Synthesis." *Environmental Science & Technology* 45(17): 7525-7532.
- Thomas, G. O., Moss, S. E. W., Asplund, L. and Hall, A. J., (2005). Absorption of decabromodiphenyl ether and other organohalogen chemicals by grey seals (*Halichoerus grypus*). *Environmental Pollution*, 133, 581-586.
- Thoma H, Hutzinger O, 1987. Pyrolysis and GC/MS-analysis of brominated flame 602 retardants in on-line operation. *Chemosphere* 16, 1353–1360.
- Thuresson K, Bergman Å, Jakobsson K. (2005) Occupational exposure to commercial decabromodiphenyl ether in workers manufacturing or handling flame-retarded rubber. *Environ Sci Technol*. 39:1980-1986.
- Tian SY, Zhu LY, Bian JN, Fang SH. (2012). Bioaccumulation and Metabolism of Polybrominated Diphenyl Ethers in Carp (*Cyprinus carpio*) in a Water/Sediment Microcosm: Important Role of Particulate Matter Exposure. *Environ Sci Technol* 46(5):2951-2958.
- Tian SY, Zhu LY. (2011). Bioaccumulation kinetics of sediment-associated DE-83 in benthic invertebrates (*Nereis succinea*, polychaete). *Chemosphere* 84(1):160-165.
- Tian SY, Zhu LY, Liu M. (2010). Bioaccumulation and distribution of polybrominated diphenyl ethers in marine species from Bohai, Bay, China. *Environ Toxicol Chem* 29(10):2278-2285.
- Tokarz III JA, Ahn M-Y, Leng J, Filley T.R., Nies L, (2008). Reductive debromination of polybrominated diphenyl ethers in anaerobic sediment and a biomimetic system. *Environmental Science and Technology*, 42 (4), 1157-1164.
- Tomy GT, Pleskach K, Ferguson SH, Hare J, Stern G, MacInnis G, Marvin CH, Loseto L. (2009). Trophodynamics of some PFCs and BFRs in a western Canadian Arctic marine food web. *Environ Sci Technol* 43:4076-4081.

Tomy GT, Pleskach K, Oswald T, Halldorson T, Helm PA, MacInnis G, et al (2008b). Enantioselective bioaccumulation of hexabromocyclododecane and congener specific accumulation of brominated diphenyl ethers in an eastern Canadian Arctic marine food web. *Environ Sci Technol* 42:3634–9.

Tosoh Japan 2013. <http://www.tosoh.com/our-products/organic-chemicals/flame-retardants>

Tseng, L. H., P. C. Hsu, C. W. Lee, S. S. Tsai, M. H. Pan and M. H. Li (2013). "Developmental exposure to decabrominated diphenyl ether (BDE-209): effects on sperm oxidative stress and chromatin DNA damage in mouse offspring." *Environ Toxicol* 28(7): 380-389.

Tseng, L. (2011). Developmental Exposure to Decabrominated Diphenyl Ether ( BDE-209 ): Effects on Sperm Oxidative Stress and Chromatin DNA Damage in Mouse Offspring. *Environmental Toxicology*, (May), pp.380–389.

Tseng, L.-H. H., M.-H. H. Li, S.-S. S. Tsai, C.-W. W. Lee, M.-H. H. Pan, W.-J. J. Yao and P.-C. C. Hsu (2008). "Developmental exposure to decabromodiphenyl ether (PBDE 209): effects on thyroid hormone and hepatic enzyme activity in male mouse offspring." *Chemosphere* 70: 640-647.

Tseng, L. H., C. W. Lee, (2006). Postnatal exposure of the male mouse to 2,2',3,3',4,4',5,5',6,6' decabrominated diphenyl ether decreased epididymal sperm functions without alterations in DNA content and histology in testis. *Toxicology* 224(1-2). 33-43.

Tysklind M, Sellström U, Söderström G and de Wit C (2001). Abiotic transformation of polybrominated diphenyl ethers (PBDEs): Photolytic debromination of decabromo diphenyl ether. The Second International Workshop on Brominated Flame Retardants, BFR 2001, May 14-16, Stockholm

Ungherese G, Cincinelli A, Martellini T, Ugolini A. (2012). PBDEs in the supralittoral environment: The sandhopper *Talitrus saltator* (Montagu) as biomonitor? *Chemosphere* 86(3):223-227

UK EA, United Kingdom Environment Agency (2009). Environmental risk evaluation report. Decabromodiphenyl ether (CAS no. 1163-19-5). Authors Brooke, D.N., Burns, J., Crookes, M.J. and Dungey, S.M Report to the. 290 pp.

US EPA, U.S. Environmental Protection Agency (2014). An Alternatives Assessment for the Flame Retardant Decabromodiphenyl Ether (DecaBDE) Executive Summary. Final Report. January 2014. Final Report January 2014. p. 1-901. US EPA, U.S. Environmental Protection Agency (2012). DecaBDE Phase-out Initiative <http://www.epa.gov/oppt/existingchemicals/pubs/actionplans/deccadbe.html>. Accessed in January 2014.

US EPA, U.S. Environmental Protection Agency (2010). An Exposure Assessment of Polybrominated Diphenyl Ethers. National Center for Environmental Assessment, U.S. Environmental Protection Agency, Washington DC; EPA/600/R-08/086F. Available from the National Technical Information Service, Springfield, VA and on-line at: <http://www.epa.gov/ncea>.

US EPA, U.S. Environmental Protection Agency (2008). Toxicological Review Of Decabromodiphenyl Ether (BDE-209) (CAS No. 1163-19-5). In Support of Summary Information on the Integrated Risk Information System (IRIS). pp. 126. U.S. Environmental Protection Agency (EPA National Center for Environmental Assessment, Washington, DC; EPA/600/R-08/086F. Available from the National Technical Information Service, Springfield).

Van den Steen E, Covaci A, Jaspers VLB, Dauwe T, Voorspoels S, Eens M, (2007). Accumulation, tissue-specific distribution and debromination of decabromodiphenyl ether (BDE 209) in European starlings (*Sturnus vulgaris*). *Environ Pollut* 148(2):648-653.

Van der Ven LTM, van de Kuil T, Leonards PEG, Slob W, Cantón RF, Germer S, et al., (2008). "A 28-day oral dose toxicity study in Wistar rats enhanced to detect endocrine effects of decabromodiphenyl ether (decaBDE)." *Toxicology letters* 179: 6-14.

VECAP, The Voluntary Emissions Control Action Programme (2014). Sound results from a proactive industry. European annual progress report 2013.

VECAP, The Voluntary Emissions Control Action Programme (2012). Maintaining Momentum - European Annual Progress Report 2012, Brussels: VECAP.

VECAP, The Voluntary Emissions Control Action Programme (2010a). The Voluntary Emissions Control Action Programme. Annual progress report 2010a.

VECAP, The Voluntary Emissions Control Action Programme (2010b). Benchmarking for success. North American annual progress report 2010.

- Verreault J, Gabrielsen GW, Chu S, Muir DC, Andersen M, Hamaed A, Letcher RJ. (2005). Flame retardants and methoxylated and hydroxylated polybrominated diphenyl ethers in two Norwegian Arctic top predators: glaucous gulls and polar bears. *Environ Sci Technol.* 15;39(16):6021-8.
- Vetter W, Bendig P, Blumenstein M, Hägele F (2012). Cooking processes with food; The heating of the flame retardant BDE-209 in fish generated toxic polybrominated dibenzofurans. *Organohalogen Compounds* 74, 620-623 (2012)
- Viberg H. (2009). Neonatal ontogeny and neurotoxic effect of decabrominated diphenyl ether (PBDE 209) on levels of synaptophysin and tau. *Int J Dev Neurosci.* 27, 423-9.
- Viberg, H., W. Mundy and P. Eriksson (2008). "Neonatal exposure to decabrominated diphenyl ether (PBDE 209) results in changes in BDNF, CaMKII and GAP-43, biochemical substrates of neuronal survival, growth, and synaptogenesis." *Neurotoxicology* 29: 152-159.
- Viberg, H., A. Fredriksson and P. Eriksson (2007). "Changes in spontaneous behaviour and altered response to nicotine in the adult rat, after neonatal exposure to the brominated flame retardant, decabrominated diphenyl ether (PBDE 209)." *Neurotoxicology* 28(1): 136-142.
- Viberg, H., A. Fredriksson and P. Eriksson (2004). "Investigations of strain and/or gender differences in developmental neurotoxic effects of polybrominated diphenyl ethers in mice." *Toxicological sciences : an official journal of the Society of Toxicology* 81: 344-353.
- Viberg, H., A. Fredriksson, E. Jakobsson, U. Orn and P. Eriksson (2003). "Neurobehavioral derangements in adult mice receiving decabrominated diphenyl ether (PBDE 209) during a defined period of neonatal brain development." *Toxicol Sci* 76(1): 112-120.
- Vigano L, Roscioli C, Guzzella L. (2011). Decabromodiphenyl ether (BDE-209) enters the food web of the River Po and is metabolically debrominated in resident cyprinid fishes. *Sci Total Environ* 409(23):4966-4972.
- Villanger, G. D., K. M. Gabrielsen, (2013). "Effects of complex organohalogen contaminant mixtures on thyroid homeostasis in hooded seal (*Cystophora cristata*) mother-pup pairs." *Chemosphere* 92(7): 828-842.
- Villanger GD, Jenssen BM (2011a). "Exposure to mixtures of organohalogen contaminants and associative interactions with thyroid hormones in East Greenland polar bears (*Ursus maritimus*)." *Environment International* 37(4): 694-708.
- Villanger, G. D., C. Lydersen, (2011b). "Disruptive effects of persistent organohalogen contaminants on thyroid function in white whales (*Delphinapterus leucas*) from Svalbard." *Sci Total Environ* 409(13): 2511-2524.
- Voorspoels S, Covaci A, Lepom P, Escutenaire S, Schepens P. (2006a). Remarkable findings concerning PBDEs in the terrestrial top-predator red fox (*Vulpes vulpes*). *Environ Sci Technol* 40(9):2937-2943.
- Voorspoels S, Covaci A, Lepom P, Jaspers VLB, Schepens P. (2006b). Levels and distribution of polybrominated diphenyl ethers in various tissues of birds of prey. *Environ Pollut* 144(1):218-227.
- Vorkamp K, Thomsen M, Falk K, lie H, Møller S, Sørensen PB. (2005). Temporal development of brominated flame retardants in peregrine falcon (*Falco peregrinus*) eggs from South Greenland (1986-2003). *Environ Sci Technol* 39:8199-8206
- Walker SP, Wachs TD, Gardner JM, Lozoff B, Wasserman GA, Pollitt E, Carter JA (2007); International Child Development Steering Group. Child development: risk factors for adverse outcomes in developing countries. *Lancet.* 369 (9556): 145-57.
- Wan Y, Zhang K, Dong ZM, Hu JY. (2013). Distribution is a Major Factor Affecting Bioaccumulation of Decabrominated Diphenyl Ether: Chinese Sturgeon (*Acipenser sinensis*) as an Example. *Environ Sci Technol* 47(5): 2279-2286.
- Wang S, Zhang S., Huang, H., Niu, Z. & Han, W., 2014. Characterization of polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) and hydroxylated and methoxylated PBDEs in soils and plants from an e-waste area, China. *Environmental Pollution*, 184, pp.405-413.
- Wang S, Zhang S, Huang H, Christie P (2011a). Behaviour of decabromodiphenyl ether (BDE-209) in soil. Effects of rhizosphere and mycorrhizal colonization of ryegrass roots. *Environmental Pollution*, 159, 749-753.
- Wang Y, Luo C, Li J, Yin H, Li X, Zhang G (2011b). Characterization of PBDEs in soils and vegetations near an e-waste recycling site in South China. *Environ Pollut.* Oct;159(10):2443-8

- Wang F, Wang J, Hu G, Luo X, Mai B, Dail J. (2011c). Tissue distribution and associated toxicological effects of decabrominated diphenyl ether in subchronically exposed male rats. *International Scholarly Research Network ISRN Toxicology*, Volume 2011, Article ID 989251, 8 pages.
- Wang, J., et al. (2011d). "Polybrominated diphenyl ethers in water, sediment, soil, and biological samples from different industrial areas in Zhejiang, China." *J Hazard Mater* 197: 211-219.
- Wang F, Wang J, Dai J, Hu G, Wang J, Luo X & Mai B (2010a). Comparative Tissue Distribution, Biotransformation and Associated Biological Effects by Decabromodiphenyl Ethane and Decabrominated Diphenyl Ether in Male Rats after a 90-Day Oral Exposure Study. *Environ. Sci. Technol.* 44: 5655–5660.
- Wang Bin, Fukuya Iino, Gang Yu, Jun Huang, and Masatoshi Morita (2010b). The Pollution Status of Emerging Persistent Organic Pollutants in China. *ENVIRONMENTAL ENGINEERING SCIENCE* Volume 27, Number 3,
- Wang, H., Y. Zhang, Q. Liu, F. Wang, J. Nie and Y. Qian (2010c). "Examining the relationship between brominated flame retardants (BFR) exposure and changes of thyroid hormone levels around e-waste dismantling sites." *International journal of hygiene and environmental health* 213: 369-380.
- Wang, L.-C., et al. (2010d). "Characterizing the Emissions of Polybrominated Diphenyl Ethers (PBDEs) and Polybrominated Dibenzop-dioxins and Dibenzofurans (PBDD/Fs) from Metallurgical Processes." *Environmental Science & Technology* 44(4): 1240-1246.
- Wang Z, Ma X, Lin Z, Na G, Yao Z. (2009). Congener specific distributions of polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) in sediment and mussel (*Mytilus edulis*) of the Bo Sea, China. *Chemosphere* 74(7):896-901.
- Wang, X. M., X. Ding. (2005). Polybrominated diphenyl ethers in airborne particulates collected during a research expedition from the Bohai Sea to the Arctic. *Environmental Science & Technology* 39(20): 7803-7809.
- Wania F, Dugani CB (2003). Assessing the long-range transport potential of polybrominated diphenyl ethers: a comparison of four multimedia models. *Environ Toxicol Chem.* 22(6):1252-61
- Watanabe, W., T. Shimizu, R. Sawamura, A. Hino and K. Konno (2010). "Functional Disorder of Primary Immunity Responding to Respiratory Syncytial Virus Infection in Offspring Mice Exposed to a Flame Retardant, Decabrominated Diphenyl Ether, Perinatally." *J Med Virol.* 82(6):1075-82. doi: 10.1002/jmv.21770.
- Watanabe, W., T. Shimizu, A. Hino and M. Kurokawa (2008). "Effects of decabrominated diphenyl ether (DBDE) on developmental immunotoxicity in offspring mice." *Environmental toxicology and pharmacology* 26: 315-319.
- Watanabe I, Tatsukawa R. (1990). Anthropogenic brominated aromatics in the Japanese environment. In: *Proceedings of Workshop on Brominated Aromatic Flame Retardants*, Skokloster, Sweden, 24-26 October 1989. Swedish National Chemicals Inspectorate, KEMI, Solna, Sweden, 1990, p. 63-71
- Weber R and Kuch B (2003) Relevance of BFRs and thermal conditions on the formation pathways of brominated and brominated-chlorinated dibenzodioxins and dibenzofurans. *Environment International*, 29:699-710
- WHO/UNEP, World Health Organization and the United Nations Environment Programme (2013). *State of the Science of Endocrine Disrupting Chemicals-2012. An assessment of the state of the science of endocrine disruptors prepared by a group of experts for the United Nations Environment Programme and World Health Organization.* p1- 296. Eds: Bergman Å, Heindel JJ, Jobling S, Kidd KA and Zoeller T. IOMC (Inter-organizational program for the sound management of chemicals). Available at: <http://www.who.int/ceh/publications/endocrine/en/>
- Wilford BH, Thomas GO, Jones KC, Davison B, Hurst DK (2008). Decabromodiphenyl ether (deca-BDE) commercial mixture components, and other PBDEs, in airborne particles at a UK site. *Environ Int.* 34(3):412-9.
- Williams, A. L. and J. M. DeSesso (2010). "The potential of selected brominated flame retardants to affect neurological development." *J Toxicol Environ Health B Crit Rev* 13(5): 411-448.
- Wu, K., X. Xu, J. Liu, Y. Guo, Y. Li and X. Huo (2010). Polybrominated diphenyl ethers in umbilical cord blood and relevant factors in neonates from Guiyu, China. *Environmental science & technology* 44: 813-819.

- Wu J, Luo X, Zhang Y, Chen S, Mai B, Guan Y, Yang, Z (2009a). Residues of polybrominated diphenyl ethers in Frogs (*Rana limnocharis*) from a contaminated site, South China. Tissue distribution, biomagnification, and maternal transfer. *Environ. Sci. Technol.* 2009, 43, 5212–5217.
- Wu JP, Luo XJ, (2009b). Biomagnification of polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) and polychlorinated biphenyls in a highly contaminated freshwater food web from South China. *Environmental Pollution* 157(3). 904-909.
- Xia J, Wang L. & Luo H (2005). Present status and developing tendency of flame retardant. *Applied Chemical Industry*, Volume 34, pp. 1-4.
- Xiao, H., L. Shen (2012). Atmospheric concentrations of halogenated flame retardants at two remote locations: the Canadian High Arctic and the Tibetan Plateau. *Environ Pollut* 161: 154-161.
- Xiang CH, Luo XJ, Chen SJ, Yu M, Mai BX, Zeng EY. (2007). Polybrominated diphenyl ethers in biota and sediments of the Pearl River Estuary, South China. *Environmental Toxicology and Chemistry* 26(4):616-62
- Xie X, Qian Y, Xue Y, He H, Wei D. (2013a). Plant uptake and phytotoxicity of decabromodiphenyl ether (BDE-209) in ryegrass (*Lolium perenne* L). *Environ Sci Process Impacts.* 15(10):1904-12. doi: 10.1039/c3em00252g.
- Xie, X., Y. Qian, (2013b). "Effects of decabromodiphenyl ether (BDE-209) on the avoidance response, survival, growth and reproduction of earthworms (*Eisenia fetida*)." *Ecotoxicol Environ Saf* 8(12): 00462-00469.
- Xie X, Wu Y, (2011). Hydroxyl radical generation and oxidative stress in earthworms (*Eisenia fetida*) exposed to decabromodiphenyl ether (BDE-209). *Ecotoxicology* 20(5). 993-999.
- Xing, T. R., W. Yong, L. Chen, M. L. Tang, M. Wang, J. T. Chen and D. Y. Ruan (2010). Effects of decabrominated diphenyl ether (PBDE 209) on voltage-gated sodium channels in primary cultured rat hippocampal neurons. *Environ Toxicol* 25(4): 400-408.
- Xing, T., L. Chen, Y. Tao, M. Wang, J. Chen and D.-Y. Y. Ruan (2009). "Effects of decabrominated diphenyl ether (PBDE 209) exposure at different developmental periods on synaptic plasticity in the dentate gyrus of adult rats *In vivo*." *Toxicological sciences : an official journal of the Society of Toxicology* 110: 401-410.
- Xu Y, Zhang G, Li J, Liu X, Li X. (2011) Atmospheric polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) and Pb isotopes at a remote site in Southwestern China: Implications for monsoon-associated transport. *Science of total environment* Vol 409, 2011, Pages 4564-4571
- Yu L, Luo X, Zheng X, Zeng Y, Chen D, Wu J, (2013). Occurrence and biomagnification of organohalogen pollutants in two terrestrial predatory food chains. *Chemosphere* 93(3):506-511.
- Yu Y, Zhang S, Huang N, Li J, Pang Y, Zhang X, Yu Z, Xu Z. (2012). Polybrominated diphenyl ethers and polychlorinated biphenyls in freshwater fish from Taihu Lake, China. Their levels and the factors that influence biomagnification. *Environ Tox Chem*, 31(3):542-
- Yu L-H, Luo X-J, Wu J-P, Liu L-Y, Song J, Sun Q-H, (2011). Biomagnification of Higher Brominated PBDE Congeners in an Urban Terrestrial Food Web in North China Based on Field Observation of Prey Deliveries. *Environ Sci Technol* 45(12): 5125-5131.
- Yu X, Zennegg M, Engwall M, Rotander A, Larsson M, Ming Hung W, Weber R (2008) E-waste recycling heavily contaminates a Chinese city with chlorinated, brominated and mixed halogenated dioxins. *Organohalogen Compounds* 70:813-816
- Yang Q, Qiu X, Li R, Liu S, Li K, Wang F (2013). Exposure to typical persistent organic pollutants from an electronic waste recycling site in Northern China. *Chemosphere* 91:205–211.
- Zegers BN, Lewis WE, Booij K, Smittenberg RH, Boer W, de Boer J, Boon JP (2003). Levels of polybrominated diphenyl ether flame retardants in sediment cores from Western Europe. *Environ Sci Technol.* Sep 1;37(17):3803-7.
- Zeng W, Wang Y, Liu Z, Khanniche A, Hu Q, Feng Y, Ye W, Yang J, Wang S, Zhou L, Shen H, Wang Y (2014). Long-term exposure to decabrominated diphenyl ether impairs CD8 T-cell function in adult mice. *Cell Mol Immunol.* Apr 7. doi: 10.1038/cmi.2014.16.
- Zeng Y-H, Luo X-J, Chen Y, Yu Y, Chen Y, and Mai B-X (2012). Gastrointestinal absorption, metabolic debromination, and hydroxylation of three commercial polybrominated diphenyl ether mixtures by common carp *Environ Tox and Chem*, 31, (4): 731–738.

- Zennegg M, Munoz M, Schmid P, Gerecke AC (2013). Temporal trends of persistent organic pollutants in digested sewage sludge (1993-2012). *Environ Int.* 60:202-8.
- Zhang, W., Chen, L., Liu, K., Lin, K., Chen, Y. & Yan, Z., 2014. Bioaccumulation of decabromodiphenyl ether (BDE209) in earthworms in the presence of lead (Pb). *Chemosphere.* 106:57-64.
- Zhang, H., X. Li, J. Nie and Q. Niu (2013a). "Lactation exposure to BDE-153 damages learning and memory, disrupts spontaneous behavior and induces hippocampus neuron death in adult rats." *Brain Res* 1517: 44-56.
- Zhang BZ, Li HZ, Wei YL, You J. (2013b). Bioaccumulation kinetics of polybrominated diphenyl ethers and decabromodiphenyl ethane from field-collected sediment in the Oligochaete, *Lumbricus variegatus*. *Environmental Toxicology and Chemistry* 32(12):2711-2718.
- Zhang, W., L. Chen, (2013c). Lead accumulations and toxic effects in earthworms (*Eisenia fetida*) in the presence of decabromodiphenyl ether." *Environmental Science and Pollution Research*: 1-7.
- Zhang, Y., et al. (2013d). "Polybrominated diphenyl ethers in soil from three typical industrial areas in Beijing, China." *J Environ Sci (China)* 25(12): 2443-2450.
- Zhang Z, Sun ZZ, Xiao X, Zhou S, Wang XC, Gu J, Qiu LL, Zhang XH, Xu Q, Zhen B, Wang X, Wang SL (2013e). Mechanism of BDE209-induced impaired glucose homeostasis based on gene microarray analysis of adult rat liver. *Arch Toxicol.* 87(8):1557-67. doi: 10.1007/s00204-013-1059-8.
- Zhang, W., (2012). "The combined effect of decabromodiphenyl ether (BDE-209) and copper (Cu) on soil enzyme activities and microbial community structure." *Environ Toxicol Pharmacol* 34(2): 358-369.
- Zhang W, Cai Y, Sheng G, Chen D, Fu J. (2011 a). Tissue distribution of decabrominated diphenyl ether (BDE-209) and its metabolites in sucking rat pups after prenatal and/or postnatal exposure. *Toxicology.* 28;283(1).49-54.
- Zhang X, Ruan X, Yan M, Zhao Y, Wei W, Qin Z (2011b). Polybrominated diphenyl ether (PBDE) in blood from children (age 9–12) in Taizhou, China. *J Environ Sci.* 23:1199–1204.
- Zhang BZ, Ni HG, Guan YF, Zeng EY. (2010a). Occurrence, bioaccumulation and potential sources of polybrominated diphenyl ethers in typical freshwater cultured fish ponds of South China. *Environ Pollut* 158(5):1876-1882.
- Zhang, C., X. Liu and D. Chen (2010b). "Role of brominated diphenyl ether-209 in the differentiation of neural stem cells in vitro." *International journal of developmental neuroscience : the official journal of the International Society for Developmental Neuroscience* 28: 497-502.
- Zhao Y, Xianli R, Li Y, Yan M, Qin Z (2013). Polybrominated Diphenyl Ethers (PBDEs) in Aborted Human Fetuses and Placental Transfer during the First Trimester of Pregnancy. *Environ Sci Technol* 47:5939–5946.
- Zhou, T., Ross, D.G., DeVito, M. J. & Crofton, K. M. (2001). Effects of short-term in vivo exposure to polybrominated diphenyl ethers on thyroid hormones and hepatic enzyme activities in weanling rats. *Toxicol. Sci.*, 61, 76-82.
- Zhu W, Liu L, (2010). Effect of decabromodiphenyl ether (BDE 209) on soil microbial activity and bacterial community composition. *World Journal of Microbiology and Biotechnology* 26(10). 1891-1899.
- Zhu LY, Hites RA (2005). Brominated flame retardants in sediment cores from Lakes Michigan and Erie. *Environ Sci Technol.* 39(10):3488-94. (Erratum in: *Environ Sci Technol.* 2005 39(15):5904).
- Zota, A. R., J. S. Park, Y. Wang, M. Petreas, R. T. Zoeller and T. J. Woodruff (2011). "Polybrominated diphenyl ethers, hydroxylated polybrominated diphenyl ethers, and measures of thyroid function in second trimester pregnant women in California." *Environ Sci Technol* 45(18): 7896-7905.
- Zou, M., Ran, Y. & Gong, J., 2007. Polybrominated diphenyl ethers on watershed soils of the Pearl river delta, China, occurrence, inventory, and fate. *Environmental Science and Technology*, Volume 41, pp. 8262-8267.
- Örn U. (1997). Synthesis of polybrominated diphenyl ethers and metabolism of 2,2',4,4'-tetrabromo[14C]diphenyl ether. Licentiate Thesis, Department of Environmental Chemistry, Stockholm University.