



联合国

Distr.: General
21 November 2006



环境规划署

Chinese
Original: English

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
第二次会议
2006年11月6-10日，日内瓦

持久性有机污染物审查委员会第二次会议工作报告

增编

商用五溴二苯醚风险简介

持久性有机污染物审查委员会在其第二次会议上通过了以 UNEP/POPS/POPRC.2/7 号文件所载草案为基础编制的商用五溴二苯醚风险简介。下文即经修正的风险简介案文。案文未经正式编辑。

五溴二苯醚

风险简介

持久性有机污染物审查委员会
在其第二次会议上通过

2006 年 11 月

目 录

执行摘要.....	5
1. 导言.....	7
1.1 该拟议物质的化学特性.....	7
1.2 审查委员会就附件 D 中的资料得出的结论.....	7
1.3 资料来源.....	7
1.4 其他国际公约项下化学品的现状.....	7
1.4.1 《东北大西洋海洋环境保护公约》.....	7
1.4.2 联合国欧洲经济委员会《远程越境空气污染公约》.....	8
1.4.3 《鹿特丹公约》.....	8
1.4.4 其他相关的国际论坛.....	8
2. 与风险简介有关的概要信息.....	9
2.1 来源.....	9
2.1.1 生产和使用.....	9
2.1.2 未来全球溴化阻燃剂的需求量.....	11
2.1.3 生产过程中向环境的释放.....	12
2.1.4 产品使用期间向环境的释放.....	13
2.1.5 含有商用五溴二苯醚的废物的扩散.....	14
2.2 环境归宿.....	15
2.2.1 持久性.....	15
2.2.2 生物累积性.....	16
2.2.3 远距离环境迁移.....	20
2.3 暴露.....	24
2.3.1 浓度水平.....	24
2.3.2 趋势.....	27
2.3.3 生物利用率.....	29
2.3.4 人类暴露.....	29
2.3.5 脱溴作用.....	32
2.4 对引起关注的终点进行的危害评估.....	33
2.4.1 生态毒性.....	33
2.4.2 对哺乳动物的影响.....	34
2.4.3 对人类的毒性.....	36

3. 信息综述.....	37
3.1 概要.....	37
4. 结论.....	37
参考文献.....	38

执行摘要

本风险简介介绍各国开展的有关五溴二苯醚的一系列大量研究并概述这些研究的成果。本文所报告的各项新的研究结果支持持久性有机污染物审查委员会于2005年得出的结论，即五溴二苯醚的各项特征符合《斯德哥尔摩公约》附件 D 中的甄选标准。

商用五溴二苯醚（C-PentaBDE）指的是各种溴化二苯醚同源物的混合物，其主要成分是2,2',4,4'-四溴二苯醚（BDE-47，化学文摘社编号40088-47-9）和2,2',4,4',5-五溴二苯醚（BDE-99，化学文摘社编号32534-81-9），如果重以量计算，与混合物中的其他成分相比，五溴二苯醚的浓度最高。

商用五溴二苯醚混合物被用作各类消费品中的一种阻燃添加剂。该商用混合物中包含了各种溴化二苯醚——分子中含有三至七个溴元素，不过，大多数含有四至五个溴元素。在全世界不同地区，各种五溴二苯醚商用混合物中多溴二苯醚同源物的比例各异。

五溴二苯醚是在此类商品和含有五溴二苯醚的产品的制造过程中、使用过程中以及被当作废物遗弃之后释放到环境中去的。虽然世界各国已经淘汰了或者正在淘汰商用五溴二苯醚的生产，但是，在未来几年里，仍会使用各种含有此类物质的产品，这样一来，这类物质会继续向环境中释放。这些产品会在变成废物时结束其寿命，但这时也有继续释放的可能。

在北美和西欧，它的主要来源是家庭和公共家具使用的聚氨酯泡沫塑料中所含的五溴二苯醚。这方面的用途现已基本上被淘汰。至于其他用途，如纺织、电器和电子产品、建筑材料、汽车、火车和飞机制造、包装、钻井油液和橡胶制品等，由于资料有限，目前很难就其重要程度得出结论。虽然报道了一些典型实例，但世界上许多地区都缺乏有关这种物质使用情况的详细信息。

释放到空气中的，主要是产品使用过程中、通过五溴二苯醚的挥发以及携带五溴二苯醚的灰尘排放出来的。在再循环和拆卸活动如拆卸汽车、建筑物和建筑的过程中，也会排放五溴二苯醚。电子废物回收厂和破碎工厂里会出现排放现象。在焚烧含有商用五溴二苯醚的物品的过程中，可能会生成溴化二苯并对二噁英和呋喃等有潜在毒性的产物。

五溴二苯醚被释放到空气、水域和土壤中，但大部分以土壤为归宿。它在各个环境组成部分的分布比例为：土壤 >>> 水 > 空气。若干项使用沉积岩心进行的研究表明，五溴二苯醚在海洋沉积物中具有高度持久性，历时30年之后仍会继续存在。环境中的五溴二苯醚大多附着在颗粒表面；只有少量是以气态或溶于水中的方式迁移，但这种长期的迁移过程可能会造成五溴二苯醚在环境中广泛扩散，尤其是进入北极地区。空气和生物区的几项监测研究都证明北极环境中存在这种物质。

由于五溴二苯醚在空气中具有高度持久性，它主要是通过大气进行远距离迁移，这点和许许多多极具挥发性、持久性和易在生物体内积累的物质一样。模拟和环境研究表明，这种迁移是通过朝向两极地区的一系列沉降/挥发的跳跃过程实现的，但是据了解，微粒迁移也很重要。这种物质也很有可能通过水流和移栖动物实现远距离迁移。

一些研究表明，土壤和沉积物中的五溴二苯醚可以被生物摄取，由此进入食物链；它在各种食物网中的生物体内累积并产生生物放大作用，最终在食物网顶层的捕食动物体内达到高浓度。

五溴二苯醚在全球环境中广泛扩散。现已在联合国所有地区发现人体内不同程度地存在商用五溴二苯醚成分。大多数趋势分析表明，1970年代初至1990年代中末期，五溴二苯醚在环境和人体内的浓度迅速增长，并于1990年代末期在某些地区达到峰值，不过，在其他地区仍有增无减。北美和北极的浓度仍在继续上升。许多脆弱的生态系统和物种受到影响，其中包括一些濒危物种。有些濒危物种体内这种化学物质的浓度之高已经达到了令人担忧的程度。毒理学研究证明了五溴二苯醚的生殖毒性、神经发育毒性及对水生生物和哺乳动物体内的甲状腺激素的影响。这对于包括哺乳动物在内的野生动物产生的潜在毒害作用是显而易见的。

人类有可能通过食物、使用相关产品以及呼吸室内空气和粉尘而受这种化学物质的危害。五溴二苯醚可通过母亲转移给胎儿和哺乳期婴儿。加拿大的一项“风险商数评估”结果表明，五溴二苯醚在食物链顶层物种体内自然蓄积的风险最高。目前还缺乏有关人体短期和长期接触该物质会产生何种影响的资料，不过可以预料，易受伤害的群体可能是孕妇、胎儿和婴儿。总的来说，北美洲人体内该物质的含量相对要高很多。大约5%的普通人口的暴露程度都极高。这一点，以及五溴二苯醚同源物在人体内的较长半衰期估计值，提醒我们关注其对人类健康的长期影响。

根据本风险简介提供的信息，由于五溴二苯醚（鉴于其成分的特性）能够进行远距离环境迁移，并被证实在许多非人类物种体内具有毒性，该物质很有可能对人类健康和环境造成严重不利影响，因此有必要采取全球行动。

1. 引言

《斯德哥尔摩公约》是一项旨在保护人类和环境免受持久性有机污染物（POPs）侵害的全球条约，迄今已有十二种持久性有机污染物被列入《公约》项下。持久性有机污染物是可在环境中长期保持完好无损、在地域上广泛分布、在生物体内不断累积、并能危害人类和环境的化学品。作为《斯德哥尔摩公约》的缔约国，挪威于2005年1月提出一项提案，建议将五溴二苯醚列入《斯德哥尔摩公约》附件A；审查委员会一致认为，商业产品“五溴二苯醚”（“PentaBDE”）——实为下文所述的一种混合物——符合《公约》附件D的甄选标准。

1.1 该拟议物质的化学特性

商用五溴二苯醚（C-PentaBDE）指的是各种溴化二苯醚同源物的混合物，其主要成分是2,2',4,4'-四溴二苯醚（BDE-47，化学文摘社编号40088-47-9）和2,2',4,4',5-五溴二苯醚（BDE-99，化学文摘社编号32534-81-9），如果重以量计算，与混合物中的其他成分相比，五溴二苯醚的浓度最高。

五溴二苯醚的编号方法与多氯联苯（PCBs）使用的编号方法是一样的（Ballschmiter等人，1993年）。

全称术语多溴二苯醚（polybromodiphenyl ether）的缩略词是PBDE，它涵盖了所有溴化二苯醚同族元素。溴化二苯醚有时缩略为BDE。

1.2 审查委员会就附件D中的资料得出的结论

委员会在2005年11月于日内瓦举行的第一次会议上评价了附件D所载的信息（UNEP/POPS/POPRC.1/10），并得出结论认为，商用五溴二苯醚符合甄选标准（POPRC-1/3号决定）。

1.3 资料来源

本风险简介的编写，参考了附件E中所载的各国和非政府组织提供的资料；各国环境保护机构网站提供的国家报告；挪威各研究机构、溴化工产业、监测和评价空气污染物远程传输的欧洲合作方案（EMEP）以及北极监测与评估方案（AMAP）提供的资料和信息。

有十一个国家提供了资料（澳大利亚、巴西、加拿大、日本、挪威、墨西哥、波兰、黎巴嫩共和国、西班牙、瑞士和美利坚合众国）。其中七个国家提供了有关该物质的生产和使用的信息。仅有一个国家提供了关于该物质释放情况的信息；另一个国家报告说它没有关于释放情况的数据。所有国家（除一国之外）全都提供了监测信息。提交资料的国家没有提供任何有关储存的信息，只有几个国家提供了贸易信息。有两位观察员提供了关于世界自然基金会（WWF）和国际消除持久性有机污染物网络（IPEN）的信息。

1.4 其他国际公约项下化学品的现状

1.4.1 《东北大西洋海洋环境保护公约》

《东北大西洋海洋环境保护公约》（简称《奥斯陆-巴黎公约》）正在指导有关东北大西洋环境保护的国际合作。《奥斯陆-巴黎公约》于1992年在巴黎签署，并于1998年3月25日生效。奥斯巴委员会由17个缔约国政府和代表欧洲共同体的欧洲委员会的代表组成。1998

年，奥斯巴委员会将多溴二苯醚列入其“优先行动化学品清单”。瑞典于2001年审查了奥斯巴委员会的一份关于多溴二苯醚的背景文件。没有打算在2008年以前再次对该文件进行充分审查。第四次北海会议决定在2020年以前逐步停止使用溴化阻燃剂。

1.4.2 联合国欧洲经济委员会《远程越境空气污染公约》

联合国欧洲经济委员会（欧洲经委会）致力于促进其55个成员国的可持续经济增长。欧洲经委会《远程越境空气污染公约》是由34国政府和欧洲共同体于1979年在日内瓦签署的。根据该公约，缔约各方应努力限制并尽可能逐步减少和防止空气污染，包括远程越境空气污染。该公约于1983年生效，现已扩充到包括八项特别议定书。目前该公约共有50个缔约国。1998年6月24日在奥胡斯（丹麦）通过了《持久性有机污染物议定书》。该议定书着重列出了一份根据议定的风险标准选定的、须全面予以禁止并在稍后阶段予以消除或限制使用的16种物质清单。挪威于2004年提议将商用五溴二苯醚列为受该公约管制的一种新的持久性有机污染物。2005年12月，该公约执行机构认为该提案符合其第1998/2号决定所确定的持久性有机污染物甄选标准。他们请欧洲经委会持久性有机污染物问题工作组继续审查并进一步研究管理战略。

1.4.3 《鹿特丹公约》

《鹿特丹公约》是一项旨在促进缔约各方在某些危险化学品的国际贸易方面承担义务和进行合作的多边环境协定。此项文书规定进口国有权就其拟进口的化学品做出知情决定并排除其不能安全管理的化学品。

《关于在国际贸易中对某些危险化学品和农药采用事先知情同意程序的鹿特丹公约》案文是于1998年9月10日在鹿特丹举行的外交会议上通过的。该公约于2004年2月24日生效，从此对缔约各方具有法律约束力。目前该公约共有102个缔约国。欧盟于2003年通知《鹿特丹公约》将五溴二苯醚列为受管制物质。该物质须经该公约的两个缔约方发出禁用通知，方可被列为受管制物质。

1.4.4 其他相关的国际论坛

北极理事会是一个高级别政府间论坛，它为北极地区各国政府和人民提供了一个处理共同关注的问题和所面临的挑战的机制。成员国有加拿大、丹麦（包括格林兰和法罗群岛）、芬兰、冰岛、挪威、俄罗斯、瑞典和美利坚合众国。代表诸多北极土著社区的六个国际组织享有北极理事会永久参与者的地位。

在北极理事会的赞助下，正在对北极污染情况实施重要的监测与评估（北极监测与评估方案，简称AMAP）。此项工作无论对于确定污染风险及其对北极生态系统的影响来说，还是对于评估《关于持久性有机污染物的斯德哥尔摩公约》等国际协定在控制污染方面的效能来说，都具有重大意义。北极监测与评估方案表明，五溴二苯醚是北极地区的重要污染物之一。

2004年秋，北极理事会通过了一个新的关于减少溴化阻燃剂的北极项目。该项目将由挪威负责管理。

2. 与风险简介有关的概要信息

2.1 来源

2.1.1 生产和使用

根据最近在“溴科学与环境论坛”（BSEF）上提供的关于商用五溴二苯醚市场需求总量的信息，估计自1970年以来，商用五溴二苯醚的累计使用量为 100 000公吨（吨）。这一时期的最后几年，其市场需求总量有所下降，例如，从1999年的8,500吨降至2001年的7,500吨（溴科学与环境论坛，2001年）。

表2.1 商用五溴二苯醚的估计量：按各地区市场需求总量分列（单位：公吨）
（溴科学与环境论坛，2001年）

	美洲	欧洲	亚洲	世界其他地区	共计
1999年	8,290	210	-	-	8,500
2001年	7,100	150	150	100	7,500

有必要结合全球对各类多溴化阻燃剂需求的背景来看上述消费数字：这类需求大大超过了对商用五溴二苯醚的需求。于是，这些年来多溴二苯醚的世界总需求量便出现了如下变化：204,325吨（1999年），203,740吨（2001年），237,727吨（2002年），和223,482吨（2003年）（溴科学与环境论坛，2006年）。

生产商用五溴二苯醚的国家和地区有以色列、日本、美国和欧盟（Peltola等人，2001年和van der Goon等人，2005年）。自2001年以来，有几个国家采取了管控或自愿逐步淘汰商用五溴二苯醚的行动。

原先的欧盟国家（15个）于1997年停止了商用五溴二苯醚的生产（欧洲联盟，2000年）。在1990年代后半期，欧盟（15个）国家对该物质的使用量逐渐下降，2000年估计为300公吨（仅用于生产聚氨酯）（欧洲联盟，2000年）。2004年开始在欧盟（25个）国家禁止使用五溴二苯醚。自2006年7月1日起停止了该物质在电器和电子设备中的使用。

在美利坚合众国，美国环境保护局于2006年6月发布了一项重大的、关于使用从化学反应中得出的四溴至八溴二苯醚及其任何混合物的新规则，这项规则要求当事人在为任何用途而开始生产或进口这类物质之前通知环保局。加利福尼亚州将从2008年开始禁止使用商用五溴二苯醚。美国唯一的五溴二苯醚制造商已经自愿停止了生产，但使用可能还要持续一段时间，直到库存用光为止。在中国，虽然直到1999年才刚刚取得一项生产多溴二苯醚混合物专利（该混合物与传统的五溴混合物有所不同），但该国正在逐步淘汰此种化学物质。中国其余的五溴二苯醚生产量估计不超过年产100公吨，且预计到2007年将停止生产，届时该物质将被纳入国家禁止之列。

以色列的主要溴生产商以色列化学品和工业品集团（前称为“死海溴集团”）在其网页上发表了一则公开声明，称它们的产品不含五溴二苯醚。这表明该生产商与欧盟的禁令保持一致，而欧盟地区是该公司生产的阻燃剂的一个重要市场。

现在日本已经停止了该物质的生产。1990年，商用五溴二苯醚被自愿撤出日本市场（Kajiwara等人，2004年）。东中国海周边的一些发展中国家有可能成为向海洋环境释放五溴二苯醚的“热点地区”（Ueno等人，2004年）。亚洲发展中国家的沿海地区有许多计算机、电视机和家用电器的工业生产厂家（Ueno等人，2004年）。有迹象表明，亚洲地区在制造电器和电子新产品方面正在逐步淘汰商用五溴二苯醚，然而这种物质在这些产品中的使用始终是次要的，它主要用于生产聚氨酯泡沫体。这方面的使用程度还不太清楚。一直以来，发达国家把用过的废弃电器产品出口到亚洲发展中国家，比如中国、印度和巴基斯坦。这种废料被再循环以便回收贵金属（Ueno等人，2004年），长此以往，此种贸易就可能成为五溴二苯醚的一个释放源。亚太及南半球地区的发展中国家至今尚未采取相关的限制措施。

在循环利用泡沫产品的过程中，在释放“储存的”五溴二苯醚的同时，也释放了泡沫塑料在使用寿命期内同样含有的氯氟碳化合物（CFC）及其他损耗臭氧层的物质。

加拿大2000年对其“国内物质清单”中某些物质进行的工业调查结果表明，加拿大当年没有生产多溴二苯醚，但是进口了大约1,300吨的商用五溴二苯醚（用于掺入成品）（加拿大环境部，2003年）。根据报告的数量，在进口的多溴二苯醚中，商用五溴二苯醚的进口量最大，其次是十溴二苯醚商业产品。2000年还进口了非常少量的八溴二苯醚。报告的数量不包括以成品进口的数量。2004年，据建议将五溴二苯醚增列入加拿大拟“实质上消灭”的物质清单。

在美国，唯一的生产商于2004年自愿停止了商用五溴二苯醚的生产。仅在2001年，全世界就生产了约 70,000 公吨的多溴二苯醚，其中将近一半用于在美国和加拿大销售的产品中。在美国淘汰该物质以前，全球生产的商用五溴二苯醚配方产品绝大多数（>97%）在北美洲使用。据美国2004年底的统计数据，美国年产超过21亿磅的弹性聚氨酯泡沫，约有7.5%包含了商用五溴二苯醚配方成分（华盛顿州，2005年）。

2004年，澳大利亚《国家工业化学品通报和评估方案》（NICNAS）建议所有进口商在2005年底以前停止进口五溴二苯醚，到2005年中期，这项建议已得到主要进口商的再次确认。

商用五溴二苯醚正在用于或曾经用于下述几方面（Alace等人，2003年；丹麦环保署，1999年；欧洲联盟，2000年；Prevedouros等人，2004年b；瑞士环境署，2002年；Birnbaum和Staskel，2004年）：

- 电器和电子设备（简称EE设备）——计算机、家用电子产品、办公设备、家用电器和其他载有印刷电路板的器件、塑料外壳和内装塑料部件，比如装有硬质聚氨酯高弹体仪器外壳的小型运行组件。
- 交通运输——汽车、火车、飞机和轮船使用的纺织和塑料内装饰材料及电器组件。
- 建筑材料——泡沫填充料、绝缘板、泡沫保温材料、管材、壁板和地板、塑料复膜、合成树脂等。
- 家具——装饰家具、家具罩、床垫、柔性泡沫制品等。
- 纺织品——窗帘、地毯、地毯下面泡沫垫层、帐篷、防水帆布、工作服和防护服等。

- 包装——以聚氨酯泡沫为基质的各种包装材料。

自1999年以来，商用五溴二苯醚普遍被用于生产聚氨酯泡沫，约占其用途的 95-98%（Hale等人，2002年），这种泡沫约有10%到18%的配方成分是商用五溴二苯醚。聚氨酯泡沫主要用于家具制造业、家庭装修装潢以及汽车与航空业。其他用途包括仪器外壳中的硬质聚氨酯弹性体，电器和电子器材中的环氧树脂和酚醛树脂，以及各种建筑材料。近年来，这些器材趋向于采用溴化程度更高的十溴二苯醚。在纺织品、油彩、漆料、橡胶制品（比如输送带、涂料和地板等）、以及钻井油液中也掺入了少量的五溴二苯醚。按重量，其成分约占 5-30%。直到1990年代初，五溴二苯醚曾被用于印刷电路板中，在亚洲通常用于FR2 迭层板（酚醛树脂）。这种 FR2 迭层板用于家用电器（电视机、收音机、录像机等）、车载电子设备、白色家用电器（比如洗衣机、厨房器具等）。1990年代初期，在欧盟有 60% 的商用五溴二苯醚用于纺织品处理，但现在这种用途已被禁止。

在对欧洲经济委员会地区进行的国家物质流量分析中已发现商用五溴二苯醚被用作纺织品中的一种添加阻燃剂（丹麦环保署，1999年）。家具纺织品制造商声明，在2003年报告的挪威物质流量分析中这种纺织品含有 0.45% 的五溴二苯醚。关于可燃性的严格规定适用于公共部门、运输部门和商业部门中使用的纺织品，但是有关家庭使用的规则不够协调一致。

根据从制溴工业获得的信息，早在一、二十年前在石油钻井和采矿中就停止使用商用五溴二苯醚作为液压机液体（作为一种混合物成分）。

澳大利亚报告了在制造电冰箱及包装用的聚氨酯泡沫和供应航空市场的环氧树脂配方产品，以及用作浇注剂、层压剂和粘合剂等方面使用五溴二苯醚的情况。美国报告了在飞机制造业使用商用五溴二苯醚的情况。较新型的飞机已经不再使用商用五溴二苯醚，因此乘客不会接触到这种物质，但军用飞机仍然使用商用五溴二苯醚。

2.1.2 未来全球溴化阻燃剂的需求量

根据一家市场分析咨询公司的预测，全球阻燃剂的需求量将以 4.4% 的年增长率持续增长，预计到2009年将达到210万公吨，价值约为 43 亿美元。拉动这方面增长的主要因素是亚洲（尤其是中国）、拉丁美洲和东欧发展中国家的经济增长。预计大多数阻燃剂的生产都会强劲增长。从全球来讲，需求量最大的将是溴化合物，这主要是由于中国经济的强劲增长。电器和电子设备方面的使用量将增长最快。价值较高的产品将进一步取代对环境较为不利的化合物，尤其在西欧；而在中国，氯化物将开始被溴基和磷基阻燃剂及其他类型的阻燃剂所取代（Fredonia Group，2005年）。

电器和电子产业在经历了2001年的严重衰退之后将继续复苏。该领域对阻燃剂的需求增长将是最强劲的。随着电子电路变得越来越小，配置更加密集的电子装置将在空前高的温度下运行，这就势必增加阻燃剂的使用量。建筑市场将是全球增长第二快的产业，但在中国，排名第二的将是汽车制造业，其次是纺织业，这两个产业都在该国迅速发展。塑料将在一系列广泛产品中继续取代金属和玻璃等其他材料，以降低成本和重量，同时改进产品设计并使生产更具灵活性。塑料的应用已在诸如运输、建材和电子等领域得到推广并不断增长。许多应用领域都要求塑料产品必须具有阻燃性能，因此预计，阻燃剂的总产量将有大约 75% 用于塑料生产（Fredonia Group，2005年）。

关于环境的限制性规定各地区不同。在西欧和日本，其次是北美洲，这种规定特别限制氯化物的增长。西欧对某些溴化阻燃剂的禁令估计不会充分推广到其他地区，但是它将推动世界市场销售的电器和电子设备中替代品的开发。2005年在亚洲、欧洲和美国有数十家公

司宣布，它们已经或正在开发不含商用五溴二苯醚的电器和电子设备。在亚洲，已有 51% 的电子制造商在制造符合欧盟关于五溴二苯醚禁令的产品，另有 42% 的制造商可望在 2006 年 7 月 1 日以前生产出符合该禁令的产品。一些电子公司的官员和产业顾问预计，鉴于难以使产品流分离，因此可以较有把握地估计，在世界市场上销售的大多数电子设备都能在 2005 年以前达到该禁令的要求（《国际环境报道者》，2006 年）。

2.1.3 生产过程中向环境的释放

五溴二苯醚是在其制造过程中、各种相关产品的制造和使用过程中以及在这些产品被当作废物遗弃之后被释放到环境中的。除了力争实现不造成释放的生产过程之外，还有必要考虑产品在使用过程中以及在被废弃以后释放造成的后果。五溴二苯醚大多是作为扩散污染物在含有商用五溴二苯醚的物品使用寿命期内或之后释放的，也有的是作为终端产品废物管理链的小规模定点污染源释放的。

五溴二苯醚是通过在弗瑞德-克来福特粉状铁催化剂中添加溴元素，使二苯醚溴化合成产生的。五溴二苯醚的生产者报告称，五溴二苯醚从这种生产过程进入环境的主要路径，是过滤后的废物和被抛弃的材料，它们都是以填埋的方式进行处理。废洗涤液通过废水的排放也可能造成五溴二苯醚的释放（Peltola 等人，2001 年）。

根据欧盟对五溴二苯醚的风险评估，假定该物质在聚氨酯生产过程中的扩散是在发泡过程之前，在处理添加剂的时候（向水中排放）和在固化过程中（向空气中扩散）发生的。在泡沫生产的固化阶段可能发生向空气中的释放，在此期间，泡沫在高温下维持多个小时，固化时间长短取决于产品块体的大小。在这一阶段向空气中的扩散量估计为：每投入 1 吨五溴二苯醚，就有 1 公斤的释放量，但是假定在生产车间挥发的五溴二苯醚有一部分凝结成液体，并最终进入废水。欧盟的风险评估结论是：在聚氨酯泡沫生产过程中，每使用 1 吨商用五溴二苯醚，其释放到废水中的数量为 0.6 公斤，扩散到空气中的数量为 0.5 公斤。

表 2.2 2000 年全球聚氨酯泡沫产量、聚氨酯泡沫生产过程中商用五溴二苯醚的使用量、以及估计的相关释放量（泡沫中五溴二苯醚的含量为 10-18%）

聚氨酯泡沫产量	五溴二苯醚的使用量	释放到废水中的五溴二苯醚数量	在生产过程中扩散到空气中的五溴二苯醚数量
150,000 吨/年	15,000-27,000 吨/年	9,000-16,200 公斤/年	7,500-13,500 公斤/年

五溴二苯醚的一个重要释放源与生产聚合物泡沫过程中使用诸如商用五溴二苯醚等液态阻燃添加剂有关联。在混合工序，估计约有 0.01%（即 100 克/吨）的原材料随废水释放。如前所述，在固化阶段的挥发作用也有可能造成该物质的释放，因为泡沫温度连续几小时保持在摄氏 160 度。Wong 等人（2001 年）考察 BDE-47、BDE-99 和 BDE-153 的大气分解特性，并预言四溴和五溴同源物在温度较高的空气中会变成气体。因此，尽管多溴二苯醚的蒸汽压力测量值较低，说明其在常温空气中的挥发性不大，但在泡沫固化阶段达到的高温下就有可能发生释放（欧洲共同体，2001 年）。欧洲共同体的研究（2001 年）估计五溴二苯醚的总释放率约为 0.11%，其中有一半左右进入空气，另一半进入废水。

2.1.4 产品使用期间向环境的释放

商用五溴二苯醚仅用作一种与主体聚合物进行物理混合的添加剂，因此可以在固态基体内迁移，并且在物品的寿命期内从其表面挥发（欧盟，2000年）。在欧盟风险评估中假定的十年使用寿命期内，存在于物品中的五溴二苯醚估计每年大约有3.9%通过挥发作用被释放，不过每一种同源物都有其独特的迁移和挥发度系数。根据表 2.2 给出的数量并按照3.9%的损失率计算，可以估计每年约有 585-1,053 吨的五溴二苯醚以这种方式进入环境。

Wilford等人（2003年）进行了各种控制箱实验，让空气流经商用五溴二苯醚处理的、含有12%多溴二苯醚（w/w）的泡沫产品样品。他们发现了从聚氨酯泡沫中挥发的不同检测浓度的多溴二苯醚。从实验箱内释放的多溴二苯醚总平均浓度为 500 毫微克/立方米/克泡沫。对于BDE-47、BDE-99 和 BDE-100（溴元素数量分别为 4个、5个 和 5 个），测定的损失率分别为 360、85 和 30 毫微克/立方米/克泡沫。取样过程中的平均温度范围是30-34°C。

有些研究针对五溴二苯醚被用于家具、地毯和器具等家用物品中，因此对室内空气中含有五溴二苯醚的灰尘进行了检测（Shoeib等人，2004年，Wilford等人，2005年）。美国的研究人员（Stapleton等人，2005年）报告了2004年在首都华盛顿大都会区和南卡罗来纳州查尔斯顿进行家庭检测的结果。在十六个家庭室内的灰尘中检测出的多溴二苯醚含量范围从 780 毫微克/克（干质量）到 30,100 毫微克/克（干质量）不等。主要同源物是与商用五溴二苯醚和十溴二苯醚有关的同源物。据估计，婴幼儿（1-4岁）每日摄取多溴二苯醚120-6,000 毫微克。还对五个家庭的衣服干燥器棉绒进行了化验分析，结果表明其多溴二苯醚含量为 480-3,080 毫微克/克（干质量）。该物质的暴露水平高于在欧洲观测到的水平，对此，研究人员将其归因于商用五溴二苯醚市场大多是在美国这样一个事实。

上一段提供的信息突出说明，虽然五溴二苯醚可以从含有该物质的产品中挥发，并且可以在产品的整个寿命周期以及再循环利用期间和最终被处置以后不断挥发，但是这种化学品向环境中扩散的一个主要路径是以吸收它的微粒或它所吸附的微粒的形式传播的。当阻燃剂从产品散发出去的时候，有可能吸附到微粒物质上，而这些微粒可能附着在器物表面或室内环境的其他物体表面，或者在房间通风的时候扩散到室外环境。在拆卸设备的工业环境中人们可能暴露于此种物质的程度要高得多（丹麦环保署，1999年）。在产品寿命末期的处置或再循环作业过程中（比如拆卸、粉碎或其他废物处理方式、运输和储存），也可能由于风化、磨损、浸滤和挥发作用而发生此种化学品的释放。欧盟地区每年从聚氨酯产品寿命周期的释放量按不同的环境组成部分分布如下：75%进入土壤，0.1%进入空气，24.9%进入地面水（欧盟，2000年）。

在用于汽车底漆、天花板材、线圈涂层、织物涂层以及电缆、电线和鞋底涂层的各种材料中掺入商用五溴二苯醚，也可能导致向环境的缓慢释放。在欧盟的风险评估中，将产品寿命期内这种物质的释放因子判断为 2-10%，磨损率较高的使用，比如汽车底漆和鞋底涂层，其释放因子也较高。此外还把处置作业过程中的释放率设定为 2%。将这些释放全部考虑在内，欧盟地区该物质的损失量估计为：每年进入土壤15.86 吨；进入地面水5.26 吨；进入空气0.021 吨。现有文献中没有可与上述估计数相比较的实际计量数据。

Hale等人（2002年）的研究结果说明，经阻燃剂处理的聚氨酯泡沫，如果直接暴露在阳光和典型的弗吉尼亚夏季条件（温度在30-35°C，湿度在80%以上）下，就会逐渐变脆，并且不出四星期就出现分解迹象。作者们假设，如此产生的低密度泡沫微粒很容易被风暴潮或气流带走。这种降解过程可能提供了另一个暴露途径，那就是由生物体吸入或摄入泡沫微粒及所附的五溴二苯醚。

2.1.5 含有商用五溴二苯醚的废物的扩散

商用五溴二苯醚的生产过程，含有商用五溴二苯醚的材料的制造过程，以及含有五溴二苯醚的产品的寿命期末管理过程等，都可能产生废物。

据商用五溴二苯醚生产商称，在生产方面的主要释放源来自过滤废物和弃料，但其数量小到可以忽略不计。一般情况下采取填埋的方式处理废物（欧洲联盟，2000年），不过应指出的是，五溴二苯醚含量超过 0.25% 的废物归类为“危险废物”。

经过固化和冷却之后，聚氨酯泡沫块体一般需要切割成规定的尺寸；不过对于某些用途来说，泡沫是按照所需的尺寸注模生产的，因此不必切割。有些阻燃剂损耗在切割工序产生的零碎泡沫中。这些泡沫碎屑通常回收用于制作地毯的弹性垫层，这种应用在美国尤为普遍。有意思的是，欧盟为此每年向美国出口大约40,000吨泡沫下脚料（欧盟，2000年）。在其他用途方面，泡沫碎料经粉碎可用作多种用途填充料，比如用于制作汽车座椅或在平板泡沫生产中用作直馏多羟基化合物的添加物。某些泡沫碎屑也有可能被填埋处理，甚或焚化处理。

在印刷电路板的生产过程中，迭层板的相当一部分要被切割掉而成为固体废物。不过，大多数国家现已停止了商用五溴二苯醚在这方面的应用。关于商用五溴二苯醚在其他方面的使用，比如在电器和电子设备方面的使用，所产生的废物的资料很有限。虽然此类器材当中有一部分为了回收金属的目的而被回收利用，但是有不少被送进废物焚化炉一烧了之，而这也往往是此种废物流量中非金属部分的一个归宿。欧盟规定，自2006年12月起，在此类废物回收和再循环之前，必须将含有溴化阻燃剂的塑料制品分拣出来。

废旧汽车——其固体或泡沫组件通常含有商用五溴二苯醚——在室外存放，然后运到破碎工厂拆卸。一些国家在这方面做出了限制性规定，要求将含有五溴二苯醚之类物质的组件作为危险废物处理。在建材、纺织品和家具的生产过程中产生的废物以填埋或焚化方式处理。这种做法对易于拆卸的小型组件来说很容易办到，是大多数含有阻燃剂的材料比较难以分离，所以这些材料的最终结局是成为从破碎机出来的废物，通常被填埋处理。

含有五溴二苯醚的聚合泡沫微粒在填埋场内的移动可能提供了一个将溴化材料转移到污染物浸出液或地下水的途径。目前还不能评估这种过程的重要性。不过，鉴于此种物质的物理化学特性，据认为不大可能从填埋场渗出大量含有五溴二苯醚的液体，因为它在水中的可溶性低，辛醇-水分配系数高，并且对土壤的吸附性很强（欧盟，2000年）。挪威的甄选研究发现了在填埋场渗出液方面值得关注的五溴二苯醚浓度水平（Fjeld等人，2003年；Fjeld等人，2004年；Fjeld等人，2005年）。欧盟地区每年处置的和送去填埋或焚化处理的五溴二苯醚总量估计约为 1,036 吨（欧盟，2000年）。

荷兰的一个研究项目对监测和评价空气污染物远程传输的欧洲合作方案（EMEP）所涉地区的五溴二苯醚释放量进行了评估，其各种来源之间的分布情况为：工业焚烧和处理，0.33 吨/年；溶液和产品使用，9.45 吨/年；废物焚化，0.05 吨/年（van der Gon等人，2005年）。

在市政废物焚化炉的温度下，几乎所有阻燃剂都会被摧毁，但根据其他有机成分的经验，可能有微量成分从焚化炉释放出来（丹麦环保署，1999年）。关于对市政固体废物焚化炉焚化情况的研究，在设施附近的空气中检测到上述背景以气态和颗粒形式存在的不同浓度水平的五溴二苯醚（Agrell等人，2004年；Law，2005年；ter Schure等人，2004年；b）。在焚烧含有商用五溴二苯醚的物品的过程中，可能会生成溴化二苯并-对-二噁英和二苯并呋

喃之类有潜在毒性的产物（丹麦环保署，1999年；Ebert和Bahadir，2003年；Weber和Kuch，2003年；Birnbaum和Staskel，2004年），而且，这些产物可能会被释放到环境中。

对电器废料堆中拆卸的FR2电路板进行化验分析的结果表明，所使用的多溴二苯醚当中有35%是五溴二苯醚；为进行估计，假定老式电器中的FR2迭层板有25%是用商用五溴二苯醚处理过的（瑞士环境署，2002年）。Prevedouros等人（2004年）根据文献资料的数据对1970年至2000年间欧洲地区五溴二苯醚的生产、消费和大气排放量进行了估计。研究结果显示，2000-2005年在欧洲废弃的电器和电子产品中五溴二苯醚的流量范围在每年17-60公吨的水平上。然而，瑞士在一个现代化再循环工厂对此流量进行的一项实验研究得出的估计数高于文献研究得出的估计数。这或许意味着，文献资料低估了这些产品的多溴二苯醚含量，而该研究也承认，很少有公司会提供进行准确估计所需的全部信息（瑞士环境署，2002年）。这项研究报告了五溴二苯醚、八溴二苯醚和十溴二苯醚以及四溴双酚A（TBBPA）的寿命周期流量分析结果。废弃的电器和电子设备是排在汽车破碎残渣和建材废料之前的最大来源。在1980年生产的汽车塑料制品中，五溴二苯醚的含量为0.089克/公斤（不包括电器和电子组件中的含量），而1998年生产的汽车塑料制品中，五溴二苯醚的含量为0.044克/公斤。在该阶段初期，几乎所有不饱和聚氨酯树脂都经过溴化阻燃剂的处理，主要采用十溴二苯醚和四溴双酚A，但是也用五溴二苯醚。在1980年生产的轨道车辆中，五溴二苯醚的使用量甚至更大，其含量高达50克/公斤树脂。

设备中的五溴二苯醚平均含量估计为34毫克/公斤，其中塑料部分的含量最高，为125毫克/公斤（Morf等人，2005年）。在安装有排气过滤装置的工厂发现，在收集废气的部分五溴二苯醚的含量很高（Morf等人，2005年）。另一方面，在没有像上述现代化设施那样安装有效控制空气污染装置的设施中，可能会有大量携带五溴二苯醚的灰尘流量被释放到环境中去。Wang等人（2005年）提供了一个这方面的案例，作者在中国广东贵屿的一个露天电子废物处理与再循环设施附近的土壤和沉积物中检测到五溴二苯醚含量。

瑞士的研究表明，1990年生产的聚氨酯泡沫有5%用于建筑业，其商用五溴二苯醚含量为220克/公斤。用作建材的热塑性塑料板约有10-20%经过溴化阻燃剂处理，按重量其比例为1.3-5%（丹麦环保署），不过，没有关于商用五溴二苯醚含量的信息。有些聚氯乙烯板材也经过商用五溴二苯醚处理，一般含量为49克/公斤。可以假设五溴二苯醚是在进行拆毁活动期间释放的，但是没有关于这种释放程度的信息。

2.2 环境归宿

2.2.1 持久性

关于在不同的环境组成部分中多溴二苯醚半衰期的估计值，现有文献中的资料非常稀少。表2.3归纳了在文献中找到的半衰期估计值。

表2.3 采用Syracus公司的EPIWIN方案估计的五溴二苯醚（BDE-99）在不同环境组成部分中的半衰期

环境组成部分	半衰期估计值（天）	参考文献
土壤	150	Palm, 2001年, Palm等人, 2002年
需氧沉积物	600	Palm, 2001年, Palm等人, 2002年

环境组成部分	半衰期估计值 (天)	参考文献
水	150	Palm, 2001年, Palm等人, 2002年
空气	19	Palm等人, 2002年
	11	Vulykh等人, 2004年

在以该方案得出的半衰期估计数（现称作“EPI 序列”）为依据的时候，需谨慎从事（见<http://www.epa.gov/opptintr/exposure/docs/episuite.htm>）。所设想的EPI序列的用途仅在于进行化学品甄选，而不适用于考虑有关物质的全球控制。鉴于这个问题令人关注，新的研究也有可能发表有关半衰期的数据，但是现有数据所提供的情况似乎不大可能有大的改变。将来也有可能对多溴二苯醚降解产品的性质做出阐释，从而促使考虑它们的毒性。

关于生物降解作用，据 BIOWIN方案预测，四溴二苯醚、五溴二苯醚和六溴二苯醚均属于“难对付的”化学品。采用EPIWIN方案，五溴二苯醚在需氧沉积物中的半衰期估计为600天；在土壤中的半衰期为150天；在水中是150天（Palm, 2001年）。在经合组织使用五溴二苯醚进行的一次 301B 快速生物降解试验中，在29天之内没有发生任何降解（比如释放出二氧化碳）的迹象，这就印证了该物质的高度持久性（Schaefer和Haberlein, 1997年）。

Schaefer和Flaggs（2001年）对沉积物中一种贴了¹⁴C-标签和未贴标签的BDE-47（一种四溴二苯醚）混合物进行了为期32周的厌氧降解研究。研究表明，捕获到的¹⁴CO₂和¹⁴CH₄总放射性低于1%，这说明基本上没有发生矿化作用。总的来说，该项研究发现，降解水平在统计学上没有什么意义；不过，采用放射检测法的高效液体色谱（HPLC）分析方法显示，在历时32周的样本中的确形成了某些产物。对42个样本进行了分析，在其中的26个样本中发现了1-2个峰值。现正在继续鉴别这些产物。看来，BDE-47 很有可能在厌氧条件下极其缓慢地降解。

有几项使用沉积岩心进行的研究表明，1970年代初沉入欧洲海洋沉积物中的五溴二苯醚同源物至今依然大量存在，这说明该物质在沉积物中的高度持久性（Covaci等人, 2002年 a; Nylund等人, 1992年; Zegers等人, 2000年; Zegers等人, 2003年）。欧洲此种化学品的生产和使用始于1970年代初，近年来逐渐减少。这一趋势反映在沉积岩心剖面上：1970年代初以前没有发生这种物质的沉积；此后沉积量逐渐增加；近年来则趋于稳定。新近的一些研究报告（Zegers等人, 2003年）发表了对来自挪威、荷兰和德国的沉积岩心的研究结果。用归一化方法计算总有机碳含量，多溴二苯醚的浓度范围为10-20微克/克总碳量。

2.2.2 生物累积性

2.2.2.1 关于本地食物网中的生物累积和生物放大作用的研究

有些研究侧重于探索五溴二苯醚的潜在生物累积和生物放大作用。这些研究表明，随着水生食物网和北极食物网营养水平的升高，生物群中五溴二苯醚的浓度也在提高。计算得出的生物浓缩因子（BCFs）、生物累积因子（BAFs）和生物放大因子（BMFs）显示了五溴二苯醚的潜在生物累积和生物放大作用。表2.4 归纳了文献中计算的相关数值。在这些研究中，五溴二苯醚的辛醇/水分配系数（log K_{ow}）为 6.5 – 7.4。下文介绍了最近的一些研究结果。

表2.4 有关水生食物网和北极食物网环境研究的文献中计算得出的一种五溴二苯醚（BDE-99）的生物累积因子（BAFs）和生物放大因子（BMFs）。这些数据均是采用平均脂重浓度计算的，但Sørmo等人2006年进行的研究除外，括号中的生物放大因子数值是按照平均全身浓度计算的。

变量	生物名称	地区	数值	参考文献
生物累积因子	贻贝	瑞典梅拉伦湖	1.8	Lithner等人，2003年
生物放大因子	海雀蛋/鲱鱼	波罗的海	17	Sellström, 1996年
	灰海豹/鲱鱼	波罗的海	4.3	Sellström, 1996年
	鲑鱼/西鲱	波罗的海	10	Burreau 等人, 1999年
	鲑鱼/西鲱	波罗的海	5.9	Burreau 等人, 2000年
	大西洋鲑/幼鲱	北大西洋海	3.8	Burreau 等人, 2000年
	网采浮游生物/底栖生物	加拿大安大略湖	7.1	Alaee等人, 2002年
	底栖生物/饲料鱼	加拿大安大略湖	0.8	Alaee等人, 2002年
	<i>T. libellula</i> /桡足类甲壳动物	斯瓦尔巴群岛, 挪威北极	0.65 (1.3)	Sørmo 等人, 2006年
	<i>G.wilkitzkii</i> /桡足类甲壳动物	斯瓦尔巴群岛, 挪威北极	47.6 (19.0)	Sørmo 等人, 2006年
	北极普鳕/桡足类甲壳动物	斯瓦尔巴群岛, 挪威北极	2.1 (1.6)	Sørmo 等人, 2006年
	北极普鳕/ <i>T. inermis</i>	斯瓦尔巴群岛, 挪威北极	1.9 (1.2)	Sørmo 等人, 2006年
	北极普鳕/ <i>T. libellula</i>	斯瓦尔巴群岛, 挪威北极	3.4 (1.3)	Sørmo 等人, 2006年
	北极普鳕/ <i>G.wilkitzkii</i>	斯瓦尔巴群岛, 挪威北极	0.04 (0.1)	Sørmo 等人, 2006年
	环斑海豹/ <i>T. inermis</i>	斯瓦尔巴群岛, 挪威北极	26.8 (54.5)	Sørmo 等人, 2006年
环斑海豹/ <i>T. libellula</i>	斯瓦尔巴群岛, 挪威北极	43.1 (60.0)	Sørmo 等人, 2006年	

变量	生物名称	地区	数值	参考文献
	环斑海豹/ <i>G.wilkitzkii</i>	斯瓦尔巴群岛， 挪威北极	0.6 (3.9)	Sørmo 等人，2006年
	环斑海豹/北极熊	斯瓦尔巴群岛， 挪威北极	13.7 (56.6)	Sørmo 等人，2006年
	北极熊/环斑海豹	斯瓦尔巴群岛， 挪威北极	0.3 (0.29)	Sørmo 等人，2006年
	北极熊/环斑海豹	加拿大北极	3.4	Muir等人，2006年
	北极熊/环斑海豹	加拿大北极	11	Muir等人，2006年
	北极熊/环斑海豹	加拿大北极	8.0	Muir等人，2006年
	北极熊/环斑海豹	格陵兰	1.0	Muir等人，2006年
	北极熊/环斑海豹	斯瓦尔巴群岛， 挪威北极	5.9	Muir等人，2006年

在瑞典斯德哥尔摩市内和市郊进行的一次较大规模的研究中，包括了对斑马贻贝 (*Dreissena polymorpha*) 体内的多溴二苯醚进行的分析 (Lithner等人，2003年)。贻贝是在一个背景场地采集的，然后用箩筐迁移到梅拉伦湖、Saltsjön湖和另外几个小湖的其他下游场地。来自梅拉伦湖的淡水流过斯德哥尔摩市区，然后经由Saltsjön湖注入半咸水的波罗的海。测定了五种多溴二苯醚同源物 (BDE-47、BDE-99、BDE-100、BDE-153和BDE-154)。同源物模型系以 BDE-47 和 BDE-99 (分别为四溴和五溴) 为主，并且同商用五溴二苯醚很相似。所研究的这些不同化合物的生物累积因子是采用1998-1999年在Riddarfjärden湖和Saltsjön湖的相同场地沉积物中收集的悬浮颗粒物 (SPM) 数据估计的 (Broman等人，2001年)。假设悬浮颗粒物中多溴二苯醚浓度反映了水中的浓度。采用贻贝体内脂重浓度和悬浮颗粒物中的有机碳浓度来计算生物累积因子。

与其他化合物 (如多氯联苯、滴滴涕、六氯代苯等) 相比，溴化二苯醚的生物累积因子最高，范围介于 1 到 2 之间。五溴二苯醚的生物累积因子为1.8 (相当于贻贝体内的浓度/悬浮颗粒物的浓度)。

安大略湖水生食物网中BDE-47和BDE-99的浓度随着营养水平的提高而升高 (Alaee等人，2002年)。在这项研究中，测定了1993年采集的浮游生物、糠虾、Diporeia、大肚鲱、胡瓜鱼、杜父鱼和湖鳟等体内多溴二苯醚的浓度。还对安大略湖水生食物网进行了多溴二苯醚营养动力学调查。安大略湖水生食物网系由三个层次组成。顶层的湖鳟 (*Salvelinus namaycush*) 是安大略湖的一种捕食鱼类，以包括大肚鲱 (*Alosa pseudoharengus*)、彩虹胡瓜鱼 (*Osmerus mordax*) 和粘糊杜父鱼 (*Cottus cognatus*) 等在内的饲料鱼类为食；而这些饲料鱼类是以糠虾和 Diporeia 为食；后者则以浮游生物和网采浮游生物取样的浮游动物为食。按照食物链中由低向高的次序，上述物质的浓度逐级升高。在这一趋势中，从底栖生物到饲料鱼类的 BDE-99 生物放大作用属于例外情况，这一段食物链的生物放大因子为 0.8。这表明BDE-99发生了分解。实际上，浮游生物、糠虾和 Diporeia 体内多溴二苯醚的分布情

况与商用五溴二苯醚相似，这表明，BDE-99 在无脊椎动物体内发生了生物累积，并开始被饲料鱼类新陈代谢。

下面第 2.3.5 节将讨论涉及还原脱溴的关于新陈代谢的进一步研究。

Whittle等人（2004年）于2001年和2002年对安大略湖和密执安湖鱼类群落中的多溴二苯醚浓度进行了调查，并评价了当地水生食物网[网采浮游生物/糠虾/Diporeia → 饲料鱼类（大肚鲱/胡瓜鱼/杜父鱼）→ 湖鳟]的生物放大作用。他们对总共四十一一种多溴二苯醚同源物的分析表明，BDE-47、99和100 在每个营养层次都明显存在。从饲料鱼类到湖鳟的多溴二苯醚总含量生物放大因子（BMFs），其范围在密执安湖为 3.71 至 21.01；在安大略湖为 3.48 至 15.35。在安大略湖，从浮游生物到大肚鱼的生物放大因子为 22.34。

最近，一项关于北极食物链的研究显示了同Alaee的研究相类似的结果（Sørmo等人，2006年）。该项研究对由四种无脊椎动物、北极普鳕（*Boreogadus saida*）、环斑海豹（*Pusa hispida*）和北极熊（*Ursus maritimus*）组成的北极海洋食物链中的各种多溴二苯醚浓度进行了调查。调查结果发现，含量最丰富的是多溴二苯醚 BDE-47 和 BDE-99，甚至在营养水平最低的浮游动物体内也发现了可以检测到的浓度。所调查的多溴二苯醚大多随着食物链营养水平的升高而产生生物放大作用。在最高营养层有一个值得注意的例外情况，就是北极熊，在其体内仅发现来自其主要捕食的环斑海豹的BDE-153的浓度有所增加。这说明北极熊似乎能够新陈代谢并生物降解大部分多溴二苯醚。作者认为，在不同物种当中多溴二苯醚归宿的这种差异可能与北极熊体内较强的氧化解毒能力有关。浮游动物、北极普鳕和环斑海豹体内对多溴二苯醚的吸收率和脱溴率可能对生物累积率有更重要的影响。在从远洋浮游动物到北极普鳕这段生物链中没有显现 BDE-99 的生物放大作用，这大概是由于这些鱼类的肠道或组织对 BDE-99 有新陈代谢能力的缘故。还是在远洋浮游动物当中，在从桡足类哲水蚤到*T. libellula*的这段食物链中的浓度也没有增高。生物放大因子（BMFs）是采用多溴二苯醚脂重浓度（LWCs）和全身浓度（WBCs）进行评估的。全身浓度给出最切合实际的生物放大因子，因为从脂重浓度推算出来的生物放大因子似乎很不准确，这是由于所调查物种身体组织的脂含量差别很大。该项研究表明，在北极甚至较低的营养层次（无脊椎动物和鱼类），五溴二苯醚也达到了可计量的浓度，并且在北极熊食物链中产生生物放大作用。

在1999年至2002年间在加拿大北极、东格陵兰和斯瓦尔巴群岛分种群中采集的成年和接近成年雌性北极熊脂肪组织样本中测出了多溴二苯醚（PBDEs），并且在1994年至2002年在西北阿拉斯加采集的雄性和雌性北极熊样本中测出了多溴二苯醚（Muir等人，2006年）。只有四种同源物（BDE-47、BDE-99、BDE-100和BDE-153）在所有样本中均被发现。BDE-47 是主要的多溴二苯醚同源物，它占到 Σ PBDEs的65%到82%。对于个别多溴二苯醚或 Σ PBDE来说，寿命期并不是一个重要的协变量。总的来说，在取自加拿大北极地区的样本中发现 BDE-99、BDE-100 和 BDE-153 的比率高于在斯瓦尔巴群岛或阿拉斯加白令海-楚科奇海域采集的样本。在从环斑海豹到北极熊这段食物链中发现所有这四种主要多溴二苯醚同源物都有生物放大效应。尽管观测点之间距离遥远，但北极熊-海豹之间的生物放大因子相对比较一致。例外情况是东格陵兰BDE-99、BDE-100和BDE-153的生物放大因子低于所有其他观测点。这可能意味着在以北极熊为最高层次的海洋食物网中多溴二苯醚在转移上存在着差异，或者与食物网的差异有关。注意到物种之间在多溴二苯醚生物累积和生物转移方面存在着差异，这可能导致以鱼类为食的哺乳动物及其捕食者体内多溴二苯醚同源物型式的差异。

对三种不同食物链——其中两个在波罗的海，一个在大西洋——中的三溴二苯醚至十溴二苯醚的生物放大作用进行了研究（Law，2005年）。三溴二苯醚至七溴二苯醚的所有同源物都有生物放大作用，但是五溴二苯醚的生物放大作用最大。

Matscheko等人（2002年）调查研究了2000年春、秋两季从瑞典土壤中收集的蚯蚓中七种多溴二苯醚、八种多氯联苯（PCBs）以及多氯二苯并-对-二噁英和二苯并呋喃（PCDD/Fs）的累积作用。所选择的取样场地都是施用污水污泥的农田，而有一块农田被河水淹没，已知其沉积物中含有目标物质。参照场地是农村和城市的土壤，除了背景之外没有已知的目标物质来源。从所有农田场地采集了蚯蚓样本（主要有 *Lumbricus terrestris*、*Lumbricus spp.*、*Aporrectodea caliginosa*、*A. rosea* 和 *Allolobophora chlorrotic*），让它们饿上24小时以清除其消化道的内存物，然后化验分析其体内目标物质的含量。计算了生物群-土壤蓄积因子（BSAFs），即蚯蚓脂类中目标物质的含量与土壤有机物中目标物质的含量之比。BDE-47、BDE-66、BDE-99和BDE-100的生物群-土壤蓄积因子范围从1到10不等。这个蓄积因子的范围与业已测定的多氯联苯的生物群-土壤蓄积因子差不多，但是高于多氯二苯并-对-二噁英和二苯并呋喃的蓄积因子。在一块农田测得了大于10的生物群-土壤蓄积因子，在那里，计算得出的BDE-99、BDE-47和BDE-100的蓄积因子分别为11、18和34。有关BDE-153、BDE-154和BDE-183的数据未予采用，因为在蚯蚓腔内测得的目标物质浓度高得不能接受。

2.2.2.2 监测结果显示生物累积作用

一系列广泛的研究揭示了五溴二苯醚在顶层捕食动物体内的浓度之高令人担忧。某种化合物在捕食动物体内的高浓度通常表明其有可能在食物链的顶层捕食动物体内产生生物累积作用。

有几项研究（Jaspers等人，2004年；Herzke等人，2005年；Lindberg等人，2004年；D'Silva等人，2004年；Law等人，2005年；Sinkkonen等人，2004年；Sellström等人，2003年）表明，五溴二苯醚已广泛扩散到欧洲的一些顶层猛禽体内，比如游隼（*Falco peregrine*）、灰背隼（*Falco columbarius*）、苍鹰（*Accipiter gentiles*）、金雕（*Aquila chrysaetos*）和鵟（*Buteo buteo*）。在白尾海雕、游隼、鸮和金雕等顶层猛禽卵中检测到高浓度的这种物质（Herzke等人，2005年；Lindberg等人，2004年）。在欧洲港湾鼠海豚（*Phocoena phocoena*）体内也检测到高浓度（Thron等人，2004年和Covaci等人，2002年）。

在北极的顶层猛禽和哺乳动物体内检测到高浓度的五溴二苯醚（Verrault等人，2005年；Verrault等人，2004年；Norström等人，2002年；Herzke等人，2003年；Vorkamp等人，2004年a和b；Wolkers等人，2004年；Thron等人，2004年；Thomas等人，2005年；Ikonomou等人，2002年），在北极的顶层猛禽和哺乳动物体内检测到高浓度的五溴二苯醚，比如：灰翅鸥（*Larus hyperboreus*）、北极熊（*Ursus maritimus*）、环斑海豹（*Phoca hispida*）和白鲸（*Delphinapterus leucas*）。

2.2.3 远距离环境迁移

2.2.3.1 关于迁移和分布的环境研究

有几种因素显示了五溴二苯醚在环境中的远距离越境迁移。它在空气中有很强的持久性，半衰期为11-19天（Palm等人，2002年；Vulykh等人，2004年）。各种监测研究检测到它在欧洲大气中广泛存在（ter Shure等人，2004年；Lee等人，2004年；Jaward等人，2004年；Harrad和Hunter，2004年；Harrad等人，2004年），并在北极地区广泛存在（北极监测与评估方案，2002年和北极监测与评估方案，2005年；Peltola等人，2001年）。

Strandberg等人（2001年）于1997-1999年间在北美五大湖地区进行了空气取样并提供了研究报告。在四个地点采集的所有样本中都检测到多溴二苯醚，主要是BDE-47和BDE-99，而且在时段上没有什么差异。多溴二苯醚的浓度范围从苏必利尔湖附近的5微微克/立方米到芝加哥的约52微微克/立方米不等。在 $20\pm 3^{\circ}\text{C}$ 的取样温度下，大约有80%的四溴同源物以气态存在，但是70%的六溴同源物与颗粒物物质相关联。

关于太平洋远北海域的研究成果涵盖了2003年7月至9月在北纬 37° - 80°N 从渤海到北极地区采集的颗粒物（Xin-Ming Wang等人，2005年）。主要同源物是BDE-47、BDE-99、BDE-100（全都存在于商业五溴混合物产品）和BDE-209，其浓度从中纬度向高纬度递减，据作者称，这大概是由于多溴二苯醚在远距离迁移过程中发生稀释、沉降和分解的缘故所致。多溴二苯醚的总体浓度范围介于2.25-198.9微微克/立方米之间，平均浓度为58.3微微克/立方米。据认为，多溴二苯醚源于北美大陆，它们在那里凝结成北极“冷凝管”。

任何有关五溴二苯醚向环境中扩散的评估都着重阐述远距离迁移，尤其是朝向北极地区的迁移，但是也有越来越多的资料涉及到此种物质及相关同源物在区域范围内的迁移。2000年春季草木出芽前在南部安大略省进行的空气取样显示出多溴二苯醚的浓度范围为88-1,250微微克/立方米，以较轻的同源物（DBE-17、-28和-47）为主（Gouin等人，2002年）。后来浓度降至10-20微微克/立方米，研究者将这一变化归因于：首先是冬季积雪的蒸发增加了空气稀释作用；其次是生长的树叶可能产生的吸附作用。在安大略省进行的其他研究（Harner等人，2002年）发现空气中多溴二苯醚的总浓度为3.4 - 46微微克/立方米。在后来的研究工作中，Butt等人（2004年）在南部安大略省检测了室内外窗户上有机薄膜中的多溴二苯醚含量。虽然薄膜中的多溴二苯醚大多来自十溴混合物中的BDE-209为主，但是源自商用五溴二苯醚的同源物含量也不低。采用倒退计算法计算出室外空气的多溴二苯醚浓度为4.8微微克/立方米，而室内空气浓度为42.1微微克/立方米。

Jaward等人（2004年a）于2002年对在22个欧洲国家的远程/农村/城市不同地点使用半渗透膜装置（SPMDs）采集的总共71个被动取样空气样本中的八种溴化二苯醚（BDE-28、BDE-47、BDE-49、BDE-75、BDE-99、BDE-100、BDE-153和BDE-154）进行了为期六周的研究。在从大约50%的样本中检测出溴化二苯醚，而根据被动取样器数据估计的空气中 ΣBDE 相应浓度范围为0.5到250微微克/立方米。浓度最高的地区是英国，该国有生产多溴二苯醚的历史，而且由于国内有严格的防火规定，一向是多溴二苯醚配方的主要使用者。英国显然是向欧洲大气输送溴化二苯醚的主要区域来源；相比之下，来自西面（越过大西洋）到达欧洲的大气中溴化二苯醚的含量则很低。另有一些高浓度值是在取自欧洲大陆一些城市——比如雅典、比尔特霍芬（荷兰）、日内瓦、米兰和塞维利亚——的样本中检测到的。在偏远/背景场地尤其是在冰岛、爱尔兰、挪威和瑞典，检测不到这类物质或其浓度值非常低，东欧的数值一般也很低。计算出的BDE-47和BDE-99值相当于 ΣBDE 的75%，这与他们在Bromkal 70-5DE商用五溴二苯醚中所占的比例差不多。

在美国，2002-2003年期间在从中西部到墨西哥湾的五个地点（分为城市、半城市、农村和偏远观测点）使用大容量取样器每12天对气态和颗粒多溴二苯醚浓度进行一次检测（Hoh和Hites，2005年）。在芝加哥观测点，多溴二苯醚的总平均浓度为 100 ± 35 微微克/立方米，比其他观测点高出约3-6倍，并大大高于1997-1999年的测量值（Strandberg等人，2001年）。芝加哥观测点的五溴二苯醚平均浓度为31微微克/立方米，约为其他观测点测量值的2-4倍。

逸度模型结果表明，大部分多溴二苯醚将分别吸附于土壤和沉积物中的有机碳，而它们的持久性将受到这些介质降解速率的影响（尽管对此还不是很了解）。只有一小部分多溴二

苯醚存在于空气和水中。如果是这样的话，据认为这些化合物进行远距离大气迁移（LRAT）的可能性有限（Prevedouros等人，2004年a；Gouin和Harner，2003年）。这与五溴二苯醚对碳的亲合性、较低的水溶性（1.0微克/升）和较低的蒸汽压（ 7.6×10^{-6} 帕）有关。然而，Gouin和Harner（2003年）认为，由于其物理化学特性，多溴二苯醚可能随季节和昼夜温度的变化而发生活跃的地面-空气交换。结果，这可能导致多溴二苯醚通过一系列沉降/挥发过程——即所谓的“蚱蜢”效应——进行远距离大气迁移。有关环境资料印证了这一假设。Lee等人（2004年）于2001年和2000年分别在英格兰的两个农村/半农村观测点和爱尔兰西海岸的一个边远观测点检测到溴化二苯醚的大气浓度。在爱尔兰的Mace Head， Σ BDE浓度为0.22到5.0微微克/立方米，平均浓度为2.6微微克/立方米，并且主要受平流控制。在Hazelrigg（英格兰西北部）， Σ BDE浓度为2.8到37微微克/立方米，平均浓度为12微微克/立方米；而在齐尔顿（英格兰西南部）， Σ BDE浓度为3.4到33微微克/立方米，平均浓度为11微微克/立方米。一般来说，同源物的分布情况类似于商用五溴二苯醚的分布情况。在英格兰的两个观测点，夏季多溴二苯醚的浓度受到温度的强烈影响，这说明陆地/空气交换过程在决定大气浓度方面起着重要作用。

在边远/农村林地（既有针叶林又有落叶林）取样点和草地取样点沿着一个横贯英国和挪威的断面采集的土壤样本中测出了不同浓度的多溴二苯醚（Hassanin等人，2004年）。 Σ BDE的浓度范围是65到12,000毫微克/公斤（干重）。土壤中的平均同源物模式系以溴化二苯醚的同源物BDE-47、BDE-99、BDE-100、BDE-153和BDE-154为主，基本涵盖了商业五溴二苯醚的主要成分。据解释，这说明这些同源物在与商业产品一起被处理时从材料来源地向空气和土壤的转移方面具有普遍类似的功效；无论在大气迁移过程中还是在土壤中，这些同源物基本上都没有发生降解。有迹象表明各种溴化二苯醚同源物发生横向分离，其中BDE-47和较轻的同源物向北方迁移的相对量逐渐增多（距离来源地愈来愈远），而BDE-99和较重同源物的比率越来越小。溴化二苯醚同源物的浓度相对于土壤有机物百分比曲线图表明，不同的同源物有不同的斜率。据一般观察，同源物越轻（比如BDE-47），斜率越陡，这说明它们经历了某种空气-地面交换（即所谓“跳跃”）过程；而较重的同源物（比如BDE-153），其斜率则接近于零，表明它们在沉降后较有效地保留在土壤之中。日本的一项研究发现季节变化对多溴二苯醚分离为气态和颗粒状态所起的作用。在冬季采集的样本中多溴二苯醚颗粒部分的比率高于夏季采集的样本（Hayakawa等人，2004年）。鉴于五溴二苯醚的挥发性低，溶解性低，而对碳化合物的亲合性高，估计它主要是通过吸附于颗粒表面的方式在环境中迁移的。一些环境研究揭示了多溴二苯醚在空气中附于颗粒表面迁移并发生湿式沉降的情况（ter Schure等人，2004年a；ter Schure和Larsson，2002年）。进一步的迁移取决于颗粒归宿。沉降到陆地以后的归宿取决于风蚀程度，而风蚀程度随季节而变。沉降入海以后的归宿取决于海洋学过程，比如海水分层和表层海流的流动状况。

Ter Schure等人（2004年a）于2001年秋季的10周之内，在Baltic Proper的哥得兰沙岛上采集了大量空气和大气沉降样本。之所以选择这里作为取样场地，是因为该岛位于波罗的海中心位置，并且这里没有定点污染源。测定了十种多溴二苯醚同源物（BDE-17、BDE-28、BDE-47、BDE-85、BDE-99、BDE-100、BDE-153、BDE-154、BDE-183和BDE-209）。中位数的 Σ BDE浓度（ Σ BDE是每次研究中测定的同源物浓度的总数）为8.6微微克/立方米，而溴化二苯醚主要与颗粒物有关。通过与大气中的多氯联苯浓度进行比较显示，由于波罗的海海域大气中的多氯联苯含量一直在减少，所以经由大气沉降带给Baltic Proper一带的溴化二苯醚含量现已超过多氯联苯含量的将近40倍。

2000年从瑞典南部两周内的降水中测出了溴化二苯醚（ter Schure和Larsson，2002年）。在取样过程中将与颗粒有关的和呈“溶解”状态的溴化二苯醚分离开，发现 Σ BDE的

65 ± 18%与颗粒有关。雨水中 Σ BDE（九种同源物）的容积加权平均浓度为209微微克/公升，总沉降率为2 ± 1毫微克 Σ BDE/平方米/日。总沉降量中上述两种状态的同源物分布均以BDE-209为主；其次是BDE-47、BDE-99和BDE-183，它们代表了来自所有三种商业多溴二苯醚配方产品的输入量。作者发现，在有少量降水期间，与颗粒有关的溴化二苯醚被有效地迁移了，可见颗粒清除作用是溴化二苯醚湿式沉降的一个重要机制。

EMEP（监测和评价空气污染物远程传输的欧洲合作方案）对五溴二苯醚的远距离跨境大气迁移和持久性（LRTP）进行了模型评估。据认为，远距离跨境大气迁移和持久性的数值受到各种环境过程的强烈影响，比如降解、沉降、气态/颗粒分离、以及气态与其下方表面的交换等。据发现，BDE-47和BDE-99这两种同源物从大气中清除的主要过程是沉降到陆地和海中：BDE-47的78%降落到陆地，15%降落到海中；BDE-99的77%降落到陆地，21%降落到海中。只有7%的BDE-47和2%的BDE-99被降解。计算得出的BDE-47在空气中的半衰期为7天；BDE-99在空气中的半衰期为11天。研究结果显示出BDE-47在北极、欧洲、地中海和北非的空间分布。BDE-99迁移的距离较远，扩散到北极、大西洋、亚洲和非洲。计算了这两种同源物的迁移距离（TD）。BDE-47的迁移距离为2,300公里；BDE-99的迁移距离为2,800公里（监测和评价空气污染物远程传输的欧洲合作方案，2004年）。

Wania和Dugani（2003年）使用多种模型——诸如TaPL3-2.10、ELPOS-1.1.1、Chemrange-2和Globo-POP-1.1——研究了多溴二苯醚远距离迁移的可能性和各种相关的物理化学特性，比如在水中的溶解性、蒸汽压力、辛醇-水分配系数之对数值 $\log K_{ow}$ 、 $\log K_{oa}$ 、 $\log K_{aw}$ 以及估计在各种介质中的半衰期。他们发现，所有模型的计算结果都差不多，其中四溴二苯醚进行大气迁移的可能性最大，而十溴二苯醚的可能性最小。研究者估计了各种同源物的典型迁移距离（CTD）：四溴同源物，1,113至2,483公里；五溴同源物，608至1,349公里；六溴同源物，525至854公里；十溴同源物，480至735公里。典型迁移距离的定义是：直至空气团所携带的化学品的1/e（约为63%）通过降解或沉降过程被清除时，该气团所迁移的距离（Gouin和Mackay，2002年）。

欧盟风险评估（欧盟，2000年）的结论是：释放的主要部分最终进入土壤。据估计，五溴二苯醚可能主要通过悬浮固体物碎片内的水分沥滤或通过风蚀作用从土壤中转移。土壤中的一小部分五溴二苯醚可能被挥发，尤其在温暖季节，因此可以认为这是除了文献中所述的蒸汽挥发和平流迁移以外似乎可能的一种替代迁移机制。虽然五溴二苯醚的水溶性很低，但是已在湖泊和海洋中检测到该物质，并且它可以在溶解和颗粒状态下被水带到别处（Peltola等人，2001年）。该物质在移栖鸟类和洄游鱼类体内的存在表明它有可能随动物的迁徙而被迁移，但似乎主要还是通过大气迁移。

2.2.3.2. 边远地区的浓度

在北极大气中、生物群中和环境中检测到的浓度，有力地说明五溴二苯醚具有远距离迁移的可能性（Verreault等人，2005年；Verreault等人，2004年；Norström等人，2002年；Herzke等人，2003年；Vorkamp等人，2004年a和b；Wolkers等人，2004年；Thron等人，2004年；Thomas等人，2004年；Ikomomou等人，2002年；Christensen等人，2002年；de Wit等人，2004年；北极监测与评估方案，2002年；北极监测与评估方案，2005年）。

有几项研究显示欧洲的边远地区也存在五溴二苯醚（Vives等人，2004年；Hassanin等人，2004年和Zenegg等人，2003年）。认为在边远地区检测出不同浓度的该物质，说明它经过远距离迁移。

在加拿大和俄罗斯北极上空检测到五溴二苯醚（作为溴化二苯醚总体）的浓度高达 28 微微克/立方米（Alaee 等人，2002 年）。Strandberg 等人（2001 年）报告了 1997-1999 年间五大湖地区空气中多溴二苯醚（BDE-47、BDE-99、BDE-100、BDE-153、BDE-154、BDE-190 和 BDE-209）的总浓度。从四个观测点采集的四个样本的平均浓度范围介于 1997 年苏必利尔湖附近的 4.4 微微克/立方米到 1998 年芝加哥附近的 77 微微克/立方米之间。各个取样地点的多溴二苯醚总平均浓度范围（1997 年、1998 年和 1999 年）介于 5.5 微微克/立方米到 52 微微克/立方米之间。四溴和五溴同源物大约占该项研究中多溴二苯醚总量的 90%。在 $20\pm 3^{\circ}\text{C}$ 温度下，大约有 80% 的四溴同源物和 55-65% 的五溴同源物呈气相状态；而大约 70% 的六溴同源物则与颗粒状态有关联。

有一项规模较大的研究是对欧洲十一个高山湖泊（海拔 566 米至 2,485 米）的鲑鱼（三个品种）体内的溴化二苯醚进行检测（Vives 等人，2004 年）。之所以选择这些湖，是因为它们远离局部污染发源地，并且认定这些湖泊中溴化二苯醚的唯一来源是大气迁移和沉降的结果。（在业经测定的 39 种同源物中）鉴定的主要同源物是 BDE-47 和 BDE-99，其次是 BDE-100、BDE-153、BDE-154 和 BDE-28，在分析的所有样本中都发现有这些同源物。在苏格兰洛赫纳加山区发现，鱼肉和肝脏中的 ΣBDE 最高浓度分别为 1.2 和 11 微克/公斤（湿重）（177 和 366 微克/公斤（脂重））。没有观察到这些化合物浓度与海拔、纬度或温度之间的相关联系，但作者推断，这些溴化二苯醚的环境分布尚未达到一种稳定状态。

2.3 暴露

2.3.1 浓度水平

五溴二苯醚已在全球环境中广泛扩散。有大量监测数据表明已在海洋和陆地鸟类、海洋和陆地哺乳动物、沉积物、土壤、海产品和鱼类体内发现了五溴二苯醚。Ueno 等人（2004 年）对全球鲑鱼（*Katsuwonus pelamis*）体内五溴二苯醚的研究表明，该物质已在世界各地的近海水域广泛扩散。表 2.5 概括了五溴二苯醚在全世界不同地区的浓度水平。

边远地区环境和生物区系的污染可能对易受伤害的物种和生态系统构成威胁。在北极的顶层猛禽和捕食性哺乳动物体内检测到的五溴二苯醚和其他令人关切的污染物已经达到很高的程度（Verreault 等人，2005 年；Verreault 等人，2004 年；Norström 等人，2002 年；Herzke 等人，2003 年；Vorkamp 等人，2004 年 a 和 b；Wolkers 等人，2004 年；Thron 等人，2004 年；Thomas 等人，2004 年；Ikonomou 等人，2002 年），这说明北极食物网受到了严重影响。Wolkers 等人（2004 年）在北极白鲸（*Delphinapterus leucas*）体内检测到不同浓度的五溴二苯醚。白鲸是受《移栖物种公约》（亦称《波恩公约》）保护的一个物种。在幼鲸、成年雄鲸和成年雌鲸体内测得的 ΣBDE 浓度（22 种同源物的几何平均数）分别为 234 微克/公斤、161 微克/公斤和 29 微克/公斤。

实际上，在好几个物种体内都检测到高浓度的五溴二苯醚，其中包括一些受《波恩公约》保护的种群。有几项研究（Jaspers 等人，2004 年；Herzke 等人，2005 年；Lindberg 等人，2004 年；D`Silva 等人，2004 年；Law 等人，2005 年；Sinkkonen 等人，2004 年；Sellström 等人，2003 年；Kannan 等人，2005 年；Ramu 等人，2005 年和 Wolkers 等人，2004 年）表明，五溴二苯醚现已广泛扩散到游隼（*Falco peregrine*）、灰背隼（*Falco columbarius*）、苍鹰（*Accipiter gentiles*）、金雕（*Aquila chrysaetos*）、鵟（*Buteo buteo*）、白鲸（*Delphinapterus leucas*）、伊洛瓦底海豚（*Orcaella brevirostris*）和印度太平洋驼背豚（*Sousa chinensis*）——所有这些动物都受《波恩公约》的保护。在瑞典游隼的蛋中也检测

到高浓度的多溴二苯醚（Lindberg等人，2004年）， Σ BDE浓度甚至高达 39,000 微克/公斤⁻¹（脂重），其中一些浓度实为迄今在野生动物体内发现的最高值。

北海和波罗的海的港湾鼠海豚（*Phocoena phocoena*）受到《波恩公约》的保护。一些研究人员已在这些种群体内检测到高浓度的五溴二苯醚（Thron等人，2004年和Covaci等人，2002年）。在Thron等人（2004年）的研究中，一些身体条件较差（脂肪较薄）的鼠海豚体内的浓度比其他个体的浓度要高得多。只有雌性鼠海豚显示出体内浓度随年龄增长而递减的趋势，从而排除了五溴二苯醚经由母海豚转移给后代的可能性。

港湾鼠海豚连同游隼和灰背隼也都被列入了《欧洲野生动物和自然生境保护公约》（亦称《伯尔尼公约》）的“严格保护（濒危）物种清单”。在《伯尔尼公约》濒危物种清单上列名的还有白尾海雕。在此种鸟类的个体和蛋中都检测到令人担忧的浓度（Herzke等人，2005年）。白鲸和伊洛瓦底海豚被列入“保护（易受伤害）种群清单”。在另一个濒危物种——白喙豚（*Lagenorhynchus albirostris*）体内也发现了高浓度。该公约的缔约各方承诺采取适当措施，确保濒危及易受伤害的物种及其生境得到保护。

表2.5 世界各地的五溴二苯醚（BDE-99）浓度水平（LW=脂重，DW=干重）。

国家/地区	生物/环境组成部分	五溴二苯醚浓度水平	参考文献	备注
欧洲	大气 气态	10-120 微微克/立方米	Jaward 等人，2004年	22个国家
日本	大气 颗粒 气态	0.05-0.9 微微克/立方米 0.05-19 微微克/立方米	Hayakawa 等人，2004年	测量于 夏季
瑞典	沉积物	<0.7-51.4 毫微克/公斤干重	Palm 等人，2002年	定点污染源附近 河流
英国	土壤	78 - 3,200 微微克/克干重	Hassanin 等人，2004年	
西欧	沉积物	<0.2-6.9 毫微克/克干重	Palm 等人，2002年	河口水域
日本大阪	沉积物	9-28 毫微克/克干重	Palm 等人，2002年	
北太平洋	鲑鱼	0.18-2.1 毫微克/克脂重	Ueno 等人，2005年	
日本	鲑鱼	1.1-1.7 毫微克/克脂重	Ueno 等人，2005年	近海水域
东中国海	鲑鱼	2.4-4.7 毫微克/克脂重	Ueno 等人，2005年	
菲律宾	鲑鱼	2.1 毫微克/克脂重	Ueno 等人，2005年	近海水域

国家/地区	生物/环境组成部分	五溴二苯醚浓度水平	参考文献	备注
巴西	鲣鱼	1.9 毫微克/克脂重	Ueno 等人, 2005 年	近海水域
加拿大	大西洋霜鳕	77 毫微克/克脂重	Law 等人, 2003 年	
印度齐利卡湖	伊洛瓦底海豚	0.12-0.78 毫微克/克脂重	Kannan 等人, 2005 年	濒危物种
中国香港	印度太平洋驼背豚	33.6-720 毫微克/克脂重	Ramu 等人, 2005 年	沿岸水域 Σ PBDEs 的 12%
英国	白喙豚	1,480 毫微克/克脂重	Law 等人, 2003 年	濒危物种
中国香港	无鳍鼠海豚	27.6-117.6 毫微克/克脂重	Ramu 等人, 2005 年	沿岸水域 Σ PBDEs 的 12%
日本	北方海熊	2.64-4.56 毫微克/克脂重	Kajiwara 等人, 2004 年	太平洋沿岸 Σ PBDEs 的 12%
斯瓦尔巴群岛, 挪威北极	北极熊	0.7-4.7 毫微克/克脂重	Gabrielsen 等人, 2004 年	
加拿大北极	北极熊	1.04-11.3 毫微克/克脂重	Muir 等人, 2006 年	
熊岛, 挪威北极	Glacous 鸥	0-7.9 毫微克/克脂重	Herzke 等人, 2003 年	
挪威	白尾海雕	6-184 毫微克/克脂重	Herzke 等人, 2005 年	在濒危物种蛋中发现
瑞典	游隼	110-9,200 毫微克/克脂重	Lindberg 等人, 2004 年	濒危物种
澳大利亚	瓜头鲸	4.8 毫微克/克脂重	Law 等人, 2003 年	
加拿大	白鲸	108 毫微克/克脂重	Law 等人, 2003 年	易受伤害物种
荷兰	贻贝	0.3-11 毫微克/克脂重	Law 等人, 2003 年	海水+淡水

国家/地区	生物/环境组成部分	五溴二苯醚浓度水平	参考文献	备注
			年	
瑞典	青蛙	5.6 毫微克/克脂重	De Wit 等人， 2004 年	
加拿大	浮游动物	0.46 毫微克/克脂重	Law 等人，2003 年	

2.3.2 趋势

大多数趋势分析都表明，自1970年代初以来，环境中和人体内的多溴二苯醚浓度在增长，大约在1990年代中期达到高峰，此后在欧洲趋于稳定和持平（Covaci等人，2002年；Fångström 等人，2005年；Thomsen 等人，2005年和Knudsen等人，2005年），但在北极地区仍在持续增长（Vorkamp等人，2005年；北极监测与评估方案，2002年和北极监测与评估方案，2005年）。据各种研究报告，五溴二苯醚的浓缩趋势与 Σ PBDEs的浓缩趋势相同。这种增长趋势在北美洲、大气、土壤、沉积物以及野生动物中也都有发现，但由于资料不足，还不能对其在人类中的浓缩趋势做出评论。

在亚太地区，对日本太平洋沿岸的北方海熊进行的研究显示，1972年至1994年间这种动物体内多溴二苯醚的浓度大约增长了 150 倍，尔后至1998年又降低了 50%（Kajiwara等人，2004年）。据估计，多溴二苯醚浓度的降低是由于日本在1990年自愿淘汰了商用五溴二苯醚的缘故。资料显示，BDE-99 的浓度水平与 Σ PBDEs属于同一模式。

Norstrom等人（2002年）通过分析多年收集的银鸥样本（采样年份为：1981年、1983年、1987年、1989年、1990年、1992年、1993年、1996年、1998年、1999年和2000年），确定了1981-2000年间多溴二苯醚浓度的时间增长趋势。在密执安湖、休伦湖和安大略湖取样点，四溴和五溴二苯醚（即 BDE-47、BDE-99 和 BDE-100）的浓度在二十年内增长了 71-112 倍（在安大略湖，从4.7微克/公斤（湿重）增至400.5微克/公斤（湿重）；在密执安湖，从 8.3微克/公斤（湿重）增至927.3微克/公斤（湿重）；在休伦湖，从 7.6 微克/公斤（湿重）增至 541.5 微克/公斤（湿重））。研究发现，上述三地的增长率均可用指数函数表示（ $r^2 = 0.903 - 0.964$ ， $p < 0.00001$ ）。

Wakeford等人（2002年）先后于1983年、1987年、1991年、1996年、1998年和2000年在不列颠哥伦比亚省南部采集了大蓝鹭鸟蛋样本，结果发现，从1983年到1996年间，多溴二苯醚总浓度（四溴、五溴和六溴同源物总计）从 1.31 微克/公斤（湿重）增长到 287 微克/公斤（湿重），但其后略微降至2000年的 193 微克/公斤（湿重）。他们还先后于1975年、1987年、1993年和1998年在加拿大北部对厚嘴海鸭蛋进行了取样，并观察到这些蛋中的多溴二苯醚浓度（四溴、五溴和六溴同源物总计）有逐渐增高的趋势：从1975年的0.43-0.89微克/公斤（湿重）增长到1998年的 1.83-3.06 微克/公斤（湿重）。

已在各种各样的海洋哺乳动物体内检测到多溴二苯醚。Alaee等人（1999年）报告了取自加拿大北极某些海洋哺乳动物脂肪内的多溴二苯醚（二溴至六溴二苯醚）平均浓度：雌性环斑海豹（*Phoca hispida*），25.8 微克/公斤脂；雄性环斑海豹，50.0 微克/公斤脂；雌性白鲸（*Delphinapterus leucus*），81.2 微克/公斤脂；雄性白鲸，160 微克/公斤脂。四溴二苯醚中的 BDE-47 是这些动物体内的主要同源物，其次是五溴二苯醚 BDE-99。Ikonomou等人

(2000年, 2000年b) 报告了取自加拿大西部沿岸和西北部领土生物群样本中的多溴二苯醚浓度。在温哥华地区的港湾鼠海豚脂肪内发现了多溴二苯醚总残留物的最高浓度——2,269微克/公斤脂。其中一种同源物BDE-47的浓度为1,200微克/公斤, 占该样本中多溴二苯醚总浓度的二分之一略强。Ikonomou等人(2002年a) 通过测量1981-2000年间北极雄性环斑海豹脂肪内的多溴二苯醚浓度, 分析了这种浓度在北极海洋哺乳动物中的时间趋势。按指数比例, 总平均浓度从1981年的0.572微克/公斤脂增长到2000年的4.622微克/公斤脂, 增长了八倍多。他们判断五溴和六溴二苯醚的增长率差不多(加倍时间分别为4.7年和4.3年), 比四溴二苯醚的增长率要高, 四溴二苯醚的加倍时间是8.6年。环斑海豹的五溴二苯醚浓度也是以BDE-47为主, 其次是BDE-99和BDE-100。

1989年至1998年间在圣弗朗西斯科湾收集的港湾海豹脂肪样本中也有证据表明, 生物组织中多溴二苯醚的浓度明显增高(She等人, 2002年)。多溴二苯醚的总浓度(即BDE-47、99、100、153和154浓度之和)在短短十来年间就从88微克/公斤脂增长到8,325微克/公斤脂。Stern和Ikonomou(2000年)在1982-1997年间考察了东南巴芬湾白鲸脂肪中的多溴二苯醚浓度, 发现多溴二苯醚(三至六溴同源物)的总浓度大幅增高: 1982年的多溴二苯醚总平均浓度约为2微克/公斤脂, 1997年达到了约15微克/公斤脂的最高值。BDE-47是主要的同源物, 1997年其平均浓度为10微克/公斤脂。在1997年至1999年从圣劳伦斯河口提取的白鲸脂肪样本中, 多溴二苯醚总残留物(未提供个别同源物的浓度)为: 成年雄鲸, 466(±230)微克/公斤脂肪(湿重); 成年雌鲸, 655(±457)微克/公斤脂肪(湿重)。这些数值比1988-1990年间采样的白鲸体内的浓度高出约二十倍(Lebeuf等人, 2001年)。

Prevedouros等人(2004年)提供了使用“欧洲变种(EVn) BETR 多介质环境归宿模型”对五溴二苯醚工业品进行模拟实验的结果。为预测未来大气的浓度趋势, 该模型在1970-2010年期间在全动态模式下使用。据预测, 大气浓度会在1997年前后达到一个峰值, 然后趋减, 出现一个为期4.8年的总体“消失”半衰期。该模型的稳定状态模拟数据总的来说与对BDE-47和BDE-99的实测数据相吻合。不过, 上面提供的北美经验数据表明, 浓度继续增高起码持续到2000年, 因此, 虽然该模拟结果与某些欧洲数据相吻合, 但与北美的数据相去甚远。

对取自西欧不同地点、标明三个不同日期的沉积岩心所含的14种溴化二苯醚同源物进行了分析(Zegers等人, 2003年)。分别取自德拉门峡湾(挪威)、西瓦登海(荷兰)和Woserin湖(德国)的岩心样本显示出自开始生产多溴二苯醚配方产品以来不同时期的溴化二苯醚分布模式。在其中发现了三种商业配方产品中的两种。五溴混合物配方产品显然从1970年代初就存在。这与此种配方产品的工业生产资料相吻合。在采自荷兰和德国的沉积岩心中, 与商用五溴二苯醚相关联的溴化二苯醚同源物浓度在最近(1995年和1997年)的沉积层中趋于持平, 而在采自德拉门峡湾的岩心中, 直到1999年这些同源物的浓度还在增长。在这三种岩心的较老(亦较深)层次的沉积物中均未发现溴化二苯醚同源物, 就跟出自英国Kimmeridge的1亿年至1.5亿年的粘土沉积层岩心那样, 这表明, 这些溴化二苯醚同源物并不是自然生成的。

在日本, 1980年至1995年关于人体内多氯联苯和多溴二苯醚浓度水平的数据表明, 后者的浓度水平曾在二十年内大幅度上升, 不过地区之间有较大差别。在血清中检测出的主要同源物是BDE-47和BDE-99。多溴二苯醚的总浓度水平大多增长了一倍以上, 有一个地区竟然增长了二十倍之多; 1995年的浓度水平降至0.6 - 41.4毫微克/克脂(Koizumi等人, 2006年)。

2.3.3 生物利用率

关于生物利用率的各项环境研究分别检测了土壤有机物（Matscheko等人，2002年）、沉积物寄居生物（Magnusson等人，2003年）和水生生物（Lithner等人，2003年；Voorspoels等人，2003年；Marsch等人，2004年；Kierkegaard等人，2004年和Sinkkonen等人，2004年）对五溴二苯醚的摄取量，从而提供了有关五溴二苯醚进入食物网的证据。此后还检测到该化合物的生物累积和生物放大作用，见上文第2.2.2节。

针对BDE-47、BDE-66、BDE-99、BDE-100、BDE-153、BDE-154和BDE-183分析了多溴二苯醚以各种方式进入土壤中的情况（Matscheko等人，2002年），并对从各种土壤取场地采集的蚯蚓样本进行了分析。在所有土壤样本中，溴化二苯醚同源物分布均以BDE-47和BDE-99为主。取自这些场地的蚯蚓体内这些化合物的累积情况与土壤中的浓度和蚯蚓体内浓度之间有直接关系。溴化二苯醚同源物BDE-47、BDE-99和BDE-100的“生物群-土壤蓄积因子”（BSAFs）大约为5（有机物/脂）。于是，生活在被污染土壤中的蚯蚓便起到累积组织中溴化二苯醚浓度的作用，由于蚯蚓代表了许多陆地生物的食物链基础，这就形成了一个溴化二苯醚在较高营养层生物体内累积的路径。

斯海尔德河口西部受到各种可疑多溴二苯醚污染源的威胁，比如附近有个溴化阻燃剂制造厂，有安特卫普港，上游还有纺织工业。对该河口生物群各种样本中多溴二苯醚的浓度——其中包括蟹、虾、海星、底栖鱼类（如鳎、鰕虎鱼、拟庸鳎和鲷等）以及鳕鱼（如条鳕和牙鳕）中的浓度——与该河口以外比利时北海地区样本中的同类浓度作了比较（Voorspoels等人，2003年）。总共测定了八种溴化二苯醚同源物（BDE-28、BDE-47、BDE-99、BDE-100、BDE-153、BDE-154、BDE-183和BDE-209）。从河口样本中观测到的浓度比在比利时北海水域采集的样本高达30倍，且朝着安特卫普港的方向递增。在北海水域，无脊椎底栖动物和鰕虎鱼体内的浓度范围在0.02到1.5微克/公斤（湿重）之间，鱼肉中的浓度从0.06到0.94微克/公斤（湿重）不等，鱼肝中的浓度从0.84到128微克/公斤（湿重）不等。而在河口水域，样本体内相对应的浓度则分别为：0.2到30微克/公斤（湿重）；0.08到6.9微克/公斤（湿重）；15到984微克/公斤（湿重）。据发现，BDE-99/BDE-100之比在很大程度上取决于地点和物种，这大概与生物新陈代谢的功能差异有关联。在虾类当中，该比值（4:1）与在Bromkal配方产品中及在河口沉积物中观察到的比值非常相近，并且在取自北海与该河口的虾类之间也很相似，这意味着这些同源物很容易被生物所摄取，而且虾类缺乏对这两种同源物的新陈代谢能力。按照脂重，在取自北海的样本体内，BDE-47的浓度范围介于3到108微克/公斤脂重之间；而在河口样本中，该浓度范围介于8到1,550微克/公斤脂重之间。在所有样本中含量最丰富的同源物是BDE-47，约占BDE总浓度的43%到75%。

Thomas等人（2004年）对捕获的三只幼灰海豹进行了一项关于溴化二苯醚摄入/排出平衡的实验研究。对这小海豹用鲱鱼喂养了六个月，在此阶段的后三个月内进行研究。采用GC-ECNIMS法进行溴化二苯醚分析。据观察，所研究的所有多溴二苯醚同源物（BDE-28、BDE-47、BDE-49、BDE-99、BDE-100、BDE-153、BDE-154和BDE-209）的吸收率都很高（89% - 99%）。

2.3.4 人类暴露

本节提及的所有研究、评估和评论都表明，人类暴露的主要途径是饮食，此外还有在室内和工作场所暴露于含有此类物质的家具及电子设备之类的产品所污染空气中的灰尘。对于人类来说，鱼类和农产品是含有五溴二苯醚的主要食物来源，此外还有喂养婴儿的母乳。来自被污染地区的高脂肪鱼类是一重要来源（Sjödin等人，2003年）。已在各种食物中

(VKM, 2005年; Burniston 等人, 2003年和Bocio等人, 2003年) 以及室内灰尘中 (Shoeib 等人, 2004年和Wilford等人, 2005年)。Schecter等人 (2004年)、Schecter等人 (2006年) 和Huwe等人 (2005年) 的诸项研究报告了美国食品中的五溴二苯醚含量。在欧盟和美国进行的几项危害性评估较深入地考察了人类暴露问题 (VCCEP, 2003年; COT, 2004年; VKM, 2005年)。得出的结论是, 有关危害或暴露的现有资料还不足以充分描述相关的风险特征。

普通人口中, 约有5%的个体的暴露程度都极高 (Thomsen 等人, 2005年b)。这一点, 以及五溴二苯醚同源物在人体内的半衰期估计值, 提醒我们关注其对人类健康的长期影响。这些同源物在人体内的半衰期估计为1,040天 (BDE-99) 和573天 (BDE-100) (Geyer 等人, 2004年)。

如果家具、地毯或家用器具含有商用五溴二苯醚的话, 家庭室内灰尘便有可能是一重要污染源。这个问题已在第 2.1.1节讨论过。目前还不清楚哪种来源的危害最大, 而且生活方式和饮食习惯的不同也可能造成这方面很大的差异。

有几项研究在污水污泥中检测到不同程度的五溴二苯醚污染水平 (Matscheko 等人, 2002年; Fabrellas 等人, 2004年; Motche和Tanner, 2004年; Sjödin 等人, 2003年; Hale, 2002年)。据认为, 污水污泥是多溴二苯醚的一种主要吸附物。在农田里施用污水污泥是食品中检测到五溴二苯醚污染水平的原因之一。这也可以解释在实验研究中从蔬菜和根茎作物中检测到这类污染的缘故。受污染鱼类和根茎作物可能成为鸡、猪等家禽家畜的污染源, 并成为人类营养肉食品中多溴二苯醚的来源。

加拿大的一项全球研究表明, 在世界各国人口的母乳中普遍含有五溴二苯醚 (Ryan, 2004年)。来自美国、加拿大、墨西哥、日本、欧盟地区、北极地区和斯堪的纳维亚地区的数据显示人类血清和母乳中程度不等的五溴二苯醚含量。Hites (2004年) 利用截至2003年中期发表的数据进行的一项超级分析表明, 美国人体血清和母乳中的五溴二苯醚水平 (~35毫微克/克脂重) 要比欧洲人高得多 (~ 2 毫微克/克脂重), 而且平均每隔 4-6 年翻一番。检测到的主要同源物是 BDE-47 和 BDE-99。总的来说, 北美洲人体内该物质的含量相对要高很多。普通人口中, 约5% 的人的暴露程度都极高。这一点, 以及五溴二苯醚同源物在人体内的半衰期估计值, 提醒我们关注其对人类健康的长期影响 (Thomsen 等人, 2005年 b)。

从瑞典女性的母乳中以及德国人和挪威人的血液中观察到1980年代到2000年代人体内五溴二苯醚浓度的增长情况 (Sjödin 等人, 2003年)。最近, 瑞典的一项研究 (Fängström 等人, 2005年) 评估了斯德哥尔摩地区母乳中各种多溴二苯醚 (PBDEs) 的时间趋势。收集的样本涵盖1980年至2004年阶段, 重点放在后十年的样本上。1990年代中期BDE-47、BDE-99 和BDE-100的浓度达到峰值, 目前明显呈下降趋势。不过, 现在的浓度依然比1980年的水平高得多。

最近挪威开展了一项研究, 目的在于完成和扩展先前进行的关于挪威人混合血清样本中多溴二苯醚时间趋势的研究 (Thomsen 等人, 2005年a), 并对1977年至2004年总人口中的多溴二苯醚人体负荷量做出总的评估。这次研究发现, 混合血清样本中七种多溴二苯醚 (BDE-28、BDE-47、BDE-99、BDE-100、BDE-153、BDE-154和BDE-183) 总浓度水平的的时间趋势与这些研究人员在前次研究中测定的浓度水平非常接近。总的来说, 在几乎相同的时期, 母乳中这些物质的浓度似乎或多或少低于血清中的浓度, 但是据观察总体趋势是一样的。这就证明, 这些地区的多溴二苯醚人体负荷量在1977年至1997年前后曾一度迅速增长,

但现在似乎趋于稳定，甚至有所下降。这一趋势与瑞典女性母乳中观测到的趋势是吻合的，它能够说明欧洲的情况，但北美洲的情况未必如此。曾经发现，从四岁以下幼儿的混合血清中检测到的多溴二苯醚浓度差不多相当于从成人混合血清检测到的浓度的两倍。这一发现在挪威的研究中得到证实。不过，2002年对5岁到14岁儿童的检测结果表明，其多溴二苯醚的含量水平高于成年人的平均水平。

当代欧洲和亚洲人体内多溴二苯醚的浓缩程度显然差不多，所有国家的人的脂肪中这类物质浓度的中位值都较低，差异相对较小。而北美的情况则完全不同，个别研究所得出的中位值范围为20-50毫微克/克脂重（Ryan，2004年）。然而，存在前面报告的关于生物群的区域差异的同时，2000年从生活在圣弗朗西斯科湾地区的妇女胸部脂肪组织中检测到的多溴二苯醚浓度，几乎比报告的从瑞典妇女母乳中检测的水平高出两个数量级（Sjödin等人，2003年）。Johnson-Restrepo等人（2005年）最近发表了关于对纽约地区人类脂肪组织中多溴二苯醚浓度水平的研究结果。这项涉及不同年龄和不同种族的40名男性和12名女性的研究显示，他们脂肪中多溴二苯醚的浓度差异非常大，平均值大大高于中位数。其中位数浓度分别是：BDE-47，29.3毫微克/克脂；BDE-99，10.3毫微克/克脂；BDE-100，12.0毫微克/克脂。

在一次对墨西哥妇女的血浆和乳液样本进行多溴二苯醚初步筛查中检测到的浓度水平比欧洲迄今报告的多溴二苯醚浓度水平高出许多（López等人，2004年）。在墨西哥城市妇女血浆中，各种多溴二苯醚（BDE-209除外）平均浓度约为20毫微克/克脂重。可是，墨西哥农村妇女的这种浓度水平却与瑞典农村妇女的差不多（仅对墨西哥城的妇女进行了BDE-209检测）。

Ryan（2004年）在一项对加拿大一般人口的研究中发现，在多溴二苯醚的浓度水平方面存在很大的个体差异。数值差距大于三个数量级，有少量数值显示出高得多的水平。Ryan（2004年）的研究还发现，加拿大北极地区人口体内的浓度水平呈上升趋势，对法罗群岛人乳检测的数值也显示了同样的趋势（Fångström等人，2004年）。

澳大利亚的两项研究表明，澳大利亚人血清和母乳中多溴二苯醚的浓度水平比欧洲人的高，但是比北美人体内的水平低（Harden等人，2004年和2005年）。

表2.6 关于世界各地人体内五溴二苯醚（BDE-99）平均浓度水平的数据（毫微克/克脂重）

数据	国家/地区	浓度水平	参考文献	年份	备注
血液	荷兰	0.8	Weiss 等人，2004年	不详	
血液	挪威	1.0	Thomsen 等人，2004年	1999年	
血液	墨西哥	2.0	López 等人，2004年	2003年	城市人口
血液	澳大利亚	2.3	Harden 等人，2004年	2003年	
母乳	德国	0.2	Harden 等人，2004年	2000年	
母乳	瑞典	0.3	Fångström 等人，2005年	2003年	城市人口

数据	国家/地区	浓度水平	参考文献	年份	备注
母乳	墨西哥	0.6	López 等人, 2004年	2003年	农村人口
母乳	瑞典	0.5	López 等人, 2004年	2003年	农村人口
母乳	英国	0.9	Harden 等人, 2004年	?	中位数
母乳	法罗群岛	1.0	Fångström 等人, 2004年	1999年	农村人口
母乳	澳大利亚	1.9	Harden 等人, 2005年	2002/2003年	
母乳	加拿大	4	Ryan 等人, 2002年	2002年	农村人口
母乳	美国	28	Päpke 等人, 2001年	2000年	城市人口

虽然缺乏与环境相关的数据, 但职业研究的结果证实了人体摄入多溴二苯醚的途径。在瑞典, 对从事电子设备再循环的人员 (Sjødin 等人, 1999年) 和计算机维修和维护人员 (Jacobsson 等人, 2002年) 以及对附近的土壤和沉积物 (Wang 等人, 2005年) 进行了多溴二苯醚的职业暴露鉴定。在制造商用五溴二苯醚或含有商用五溴二苯醚的聚氨酯泡沫及电子设备的工业中, 工人也可能暴露于这种物质。有大量文献论述了关于这类暴露情况。

2.3.5 脱溴作用

多溴二苯醚的环境归宿问题正在引起愈来愈多的关注。在 Stapleton 等人 (2004年) 报告的实验研究中, 用掺有特定溴化二苯醚同源物的食物喂养鲤鱼 62 天, 然后检查其组织和排泄物。鲤鱼消化道中至少有 $9.5 \pm 0.8\%$ 的 BDE-99 被还原脱溴为 BDE-47 (少了一个溴元素) 并在鲤鱼组织内被吸收。同样地, 有 17% 的七溴同源物 BDE-183 被还原脱溴为六溴同源物。作者指出, 多溴二苯醚的机体负荷量不仅可以反映对污染物的直接摄入量, 而且可以反映溴化程度较高的同源物的脱溴作用。He 等人 (2006年) 报告了实验研究中观测到具有高度选择性的还原微生物的脱溴作用。在 *Sulfurospirillum multivorans* 培养基中添加了十溴二苯醚之后, 便产生了七溴和八溴二苯醚, 但在类似的生物系统中八溴二苯醚未受攻击。在一种替代生物 *Dehalococcoides* sp. 的培养基中, 十溴二苯醚没有遭到攻击, 可是有一种八溴二苯醚混合物发生了很大改变, 产生了一种由七溴二苯醚至二溴二苯醚——其中包括五溴二苯醚 BDE-99——合成的混合物。作者提醒注意环境中溴化程度较高的同源物有可能转化成为溴元素较少但毒性更大的同源物。需要进行进一步研究, 特别是环境监测研究, 把重点放在主要来源可能是脱溴作用的同源物上, 以澄清脱溴在决定环境中多溴二苯醚最终混合物方面的作用。

在几种暴露于特定溴化二苯醚同源物中的物种的代谢物中检测并鉴定出了羟基溴化二苯醚 (OH-BDEs), 但在海绵和海鞘类动物的自然产物中也发现了这种物质 (Marsch 等人, 2004年)。此外还报告了海绵和绿藻的自然产物中生成甲氧基溴化二苯醚 (MeO-BDEs)。似乎可以认为这些物质起源于自然, 亦可认为是由人类活动引起的, 或两者兼而有之。采用新的综合标准, 在波罗的海的鲑鱼 (*Salmo salar*) 血液中鉴定了九种羟基溴化二苯醚和六种

甲氧基溴化二苯醚（Marsch等人，2004年）。所有这些经过鉴定的羟基和甲氧基溴化二苯醚都被四个或五个溴原子所取代，而其中的五种还有一个氯取代基。有十四种溴化二苯醚的甲氧基组或羟基组在二苯醚键的邻位被取代了。有几种化合物的结构证实了相关物质起源于自然而不是起源于人类活动。但至少有一种羟基溴化二苯醚（4'-OH-BDE-49）可能是BDE-47的某种羟基代谢产物。Meerts等人（2001年）报告了某些羟基多溴二苯醚的雌激素活度。

有关多溴二苯醚新陈代谢作用的其他一些研究已在第 2.2.2.1 节做了概述。

2.4 对引起关注的终点进行的危害评估

迄今掌握的证据表明，商用五溴二苯醚的主要同源物BDE-47和BDE-99有可能比多溴二苯醚的其他同源物更具毒性和生物累积性。虽然对多溴二苯醚的毒理学还不是完全了解，但是已有一些关于五溴二苯醚的研究说明了它的生殖毒性、神经发育毒性和对甲状腺激素的影响。多溴二苯醚的神经毒性效应与现已观察到的多氯联苯的毒效差不多。关于多溴二苯醚对儿童的危害，一般来讲是一个深奥但可以测量的发育问题。据认为，多溴二苯醚扰乱内分泌系统，但是这方面的研究成果还十分贫乏（Siddiqi等人，2003年）。

虽然要对儿童的状况做出充分的风险评估，可能还需要依照国际公认的指导原则开展进一步的研究，但现在已经掌握了足够的资料来拟订这份风险简介。

我们承认，以上这些结论在一定程度上系依据对各种评论的审查，而不是重新分析原始数据，但是总的来说，所审查的各项研究都是采取国际公认的实验方法进行的。在一些报告的结果和后来的分析之间并不存在重大分歧，譬如《美国儿童化学药品自愿评价方案》（VCCEP）（2005年）就是一例。

2.4.1 生态毒性

最近的研究表明，BDE-47可能会抑制浮游藻类（*Skeletonema costatum*）菌落的生长并降低浮游动物大型蚤的繁殖产量（Källqvist等人，2006年）。

Timme-Laragy等人（2006年）的最近一篇论文揭示了低浓度的这种物质对鱼类生长的不良影响。然而，本报告中受影响的终点（行为学习）并不总被接受为风险评估终点。而其他可接受的终点——如生长或生存——却没有受到影响。

加拿大能够把每一种同源物的各种已知的或潜在的暴露数据同已知的或潜在的不良影响结合起来，对其进行风险商数分析。这种分险商数可用最简单的等式表述如下：

$$\text{风险商数} = \frac{\text{暴露参考值}}{\text{毒性参考值}}$$

在突出强调最糟糕的情况时，习惯上采用较为保守的数据。

据估计，暴露局限于各种排放源，包括接受城市排污的地区（野生动物捕食者），以及聚合物处理设施的下游（底栖生物）。重要毒性数据使用了100-1,000倍的调整系数，为的是从实验室到实地环境的外推以及敏感性方面的种内和种间差异，这样做也是因为混合物都具有生物累积性和持久性。

若风险商数 >1, 即表明大概或可能会发生不良影响; 而如果风险商数 <1, 则意味着对生物没有危险。列于表 2.7 的这项加拿大研究成果, 部分依据加拿大的经验数据, 部分依据来自瑞典和美国的代用数据。

表2.7 五溴二苯醚的风险商数 (加拿大环境部, 2006年, 加拿大野生动物署表8)

商业产品	水层生物	底栖生物	土壤生物	野生动物捕食者
商用五溴二苯醚	4×10^{-3}	45.2	0.13-0.26	149

这些数值反映了五溴二苯醚的生物累积作用, 此种作用导致食物链中较高层次的生物面临较大的风险。

2.4.2 对哺乳动物的影响

Darnerud (2003年) 在一篇关于溴化阻燃剂毒性效应的评论文章中归纳了一系列基本文献并得出结论认为, 在实验生物模型中, 暴露于多溴二苯醚会产生不良影响, 并且依产品类型和施用剂量的不同而观察到不同的影响。一般来说, 商用五溴二苯醚以较小的剂量即可产生影响。五溴二苯醚主要对幼体的神经行为发育和甲状腺激素产生影响, 尽管对后者的影响不那么敏感 (两种剂量分别为0.6到0.8毫克/公斤体重和6到10毫克/公斤体重) (Darnerud, 2003年)。请注意, 表 2.8 报告的某些剂量水平比这低。Birnbaum和Staskal (2004年) 的研究提供了最近的一些的信息, 特别是有关北美的信息。

1998年和1999年收集了一些刚断奶的灰海豹 (*Halichoerus grypus*) 的脂肪活组织标本和血样 (Hall等人, 2003年)。对总共五十四只刚断奶的幼海豹和五十五只一岁的小海豹 (其中有十三只是断奶后再捕获的) 进行了研究。在这些幼海豹和小海豹的脂肪中, Σ BDE (总共14种同源物) 的中间浓度分别为 0.17 微克/公斤脂重和 0.46 微克/公斤脂重。研究表明, 在考虑到各种混淆不清的变量后, 在一岁灰海豹的血液中, 甲状腺的污染水平与脂肪中的 Σ BDE 浓度明显呈正相关。虽然这种关联本身并不足以证明某种因果关系, 但与如下假说是吻合的, 即: 这些化合物可能会引起灰海豹幼崽的内分泌混乱。

Darnerud (2003年) 在其评论中认为, 在现有的各种研究中, 五溴二苯醚的关键影响似乎是具有神经发育毒害性和在剂量较大的情况下改变甲状腺平衡。关于对老鼠的神经毒害问题, 还不能界定明确的机理, 但是讨论了五溴二苯醚在扰乱甲状腺激素和神经系统直接信号传输方面的不良影响。譬如, 多溴二苯醚能够导致培养基中的小脑颗粒细胞坏死 (Reistad等人, 2002年; Reistad 和 Mariussen, 2005年)。根据观测到的对早期发育阶段神经行为的最敏感影响, 五溴二苯醚的最低可见有害作用水平 (LOAEL) 值可确定为0.6–0.8毫克/公斤体重 (Darnerud, 2003年), 不过确定最低可见有害作用水平值并不是审查委员会的责任, 构建该数值需要寻求帮助以获取更广泛的数据。

挪威食品安全委员会的一项危害评估 (VKM, 2005年) 报告了BDE-99或商用五溴二苯醚的如下毒性效应: 神经毒性; 对神经行为发育的影响; 对甲状腺激素系统的影响以及导致干酪和肝脏组织发生病理病变。

表2.8 经食道摄入BDE-99同源物或商用五溴二苯醚配方制品之后未观察到有害作用剂量（NOEL）和观察到有害作用的最低剂量（LOEL）概览。黑体数值为检测到的最低 LOEL值或NOEL值。*

五溴二苯醚	持续时间	剂量	未观察到有害作用剂量 毫克/公斤/日	观察到有害作用的最低剂量 毫克/公斤/日	最终结果	物种	参考文献
BDE-99	单剂量	0.8 或 12.0 毫克/公斤	未规定	0.8	神经毒性行为，肌肉活动程度和学习	鼠	Eriksson 等人，2001年
BDE-99	单剂量	0.6、6或30 毫克/公斤	未规定	0.6	发育和神经毒性行为——活动度不足	鼠	Branchi 等人，2002年
BDE-99	单剂量	0.4、0.8、4.0、8.0或16 毫克/公斤	0.4	0.8	发育和神经毒性行为	鼠	Viberg等人，2004年；Sand 等人，2004年
BDE-99	单剂量	0.06 和 0.3 毫克/公斤（怀孕雌鼠）	未规定	0.06	发育和神经毒性行为（活度增加）	鼠，F1代	Kuriyama 等人，2005年
BDE-99	单剂量	0.06 和 0.3 毫克/公斤（怀孕雌鼠）	0.06	0.3	睾丸缩小，精子减少	鼠，F1代	Kuriyama 等人，2005年
五溴混合物 DE-71	30天	0.01、0.05、0.1、0.5或1.0 毫克/公斤/日	1	未规定	成长，食物摄取、血液学、组织病理学、临床化学	鼠	大湖化学公司，1985年
五溴混合物 DE-71	30天	0.3、30或 60 毫克/公斤/日	3	30	肝脏重量，发育期，繁殖能力，肝酶，T ₄ 减少	雄鼠	Stoker 等人，2004年
五溴混合物 DE-71	30天	0.3、30或 60 毫克/公斤/日	未规定	3	T ₄ -减少	雌鼠	Stoker 等人，2004年
五溴混合物 DE-71	35天	0.1、10或 30 毫克/公斤/日	1	10	T ₄ -减少 肝酶	怀孕鼠	Zhou 等人，2002年；Zhou 等人，2001年
五溴混合物 DE-71	90天	0-0.44 毫克/公斤/日	未规定	0.44	肝酶	鼠	Carlson，1980年
五溴混合物 DE-71	90天	0.2、10或100 毫克/公斤/日	0-2	2-10	肝细胞肥大，干酪样增生	鼠	大湖化学公司，1984年

* 大多数研究都符合经合组织的检测指导原则；而未按指导原则进行的研究，据评估其研究质量也不低。

当雄性Wistar鼠在接近青春期时摄入名为DE-71的多溴二苯醚混合物（以质量计溴占71%，并含有BDE-47、BDE-99、BDE-100、BDE-153和BDE-154）时，就会产生延缓发育和抑制依赖雄激素组织生长的后果。这些影响说明，DE-71要么会引起类固醇激素的新陈代谢，要么会作为雄激素受体（AR）对抗剂而起作用（Stoker等人，2005年）。

Talsness等人（2005年）评价了BDE-99与环境有关的浓度（低剂量）对母鼠生殖系统的影响。在F1鼠的卵巢中观察到因线粒体形态的改变而发生的超结构改变。没有发现卵泡计数方面有什么统计学意义的重要变化。对两只不同的母鼠（F1）的后代（F2）观测到了外形和骨骼异常，其中，这些母鼠在早期发育阶段的暴露量为300微克BDE-99/公斤体重。暴露于BDE-99导致显然已长到成年的F1代雌鼠生殖系统的改变。

雄性鼠在出生前接受单一低剂量水平的BDE-99，就足以扰乱其出生后的神经行为发育并对其生殖系统产生永久性的危害（Kuriyama等人，2005年）。这项研究还评估了BDE-99对幼鼠基本的肌肉活动程度和成年雄鼠的生殖健康产生的影响。在发育期接受低剂量的BDE-99，造成幼鼠在两个时间点上（出生后第36天和第71天）均呈活动亢进状态，并且精液和精子计数减少，从而永久性地损害精子的发生。在这项研究中采用的60微克/公斤体重和300微克/公斤体重的剂量与人的暴露水平有关，分别比报告的人类乳房脂肪组织中的最高浓度高出大约6倍和29倍。这是迄今报告的多溴二苯醚在啮齿动物体内产生毒性效应的最低剂量，并且支持这样的假设，即应鼓励进行低剂量研究，以查明环境中持久性污染物的危害。Viberg等人（2004年）的研究表明，如果新生儿接触到BDE-99，就可能产生神经发育毒性作用，比如自发行为的改变（活动亢进），这些影响与剂量反应有关，并随着年龄增长而日趋严重。已经在两种性别的C57/B1老鼠身上观察到此类变化。分别观察了两个月、五个月和八个月大的老鼠的自发行为（运动、用后腿站起和总的活力）。

2.4.3 对人类的毒性

欧盟和美国已经提出了几项危害评估报告。据认为，由于缺乏对五溴二苯醚毒性的充分了解，尚不足以根据这些评估报告的结论来评估该物质对人类的危险（COT，2004年；VKM，2005年和VCCEP，2003年）。目前还不清楚在实验室动物身上检测的影响对人类毒理学的重要意义。至今对五溴二苯醚在实验动物和人体内的生化机理、半衰期和新陈代谢作用仍缺乏足够的了解（VKM，2005年）。

挪威食品安全委员会在危害评估中得出的结论是，人类通过饮食和母乳摄取这类物质的程度远比在实验哺乳动物体内检测的未观察到有毒作用剂量（NOEL）低得多（VKM，2005年）。据信，长期摄入低剂量的五溴二苯醚可能对健康产生不良影响，因为五溴二苯醚会在人体内累积。由于还不知道五溴二苯醚在人体内的半衰期有多长，所以至今对该物质的长期暴露后果尚无定论。即便在美国也是如此，虽然那里的暴露水平可能相当于欧洲观测结果的10-20倍，但有关该化学品的药物动力学、毒理学、暴露水平及其他关键数据仍然十分匮乏。

然而，比较容易受到伤害的群体可能是孕妇、胎儿和婴儿，因为这种化学品影响甲状腺激素平衡和胎儿中枢神经系统的发育。在怀孕期间保持甲状腺激素平衡是生理学的一大挑战。甲状腺激素的减少特别容易对胎儿和婴儿造成伤害（VKM，2005年）。由于五溴二苯醚是一种亲脂的物质并可在乳汁中累积，所以通过哺乳，婴儿有摄入这种物质的危险（VKM，2005年）。

3. 信息综述

3.1 概要

五溴二苯醚符合附件D的所有甄选标准，下文的表3.2（为了完备的目的）详尽归纳了这些标准。

由于缺乏生产控制，在人类、其他物种和环境检测到的五溴二苯醚浓度水平曾一度剧增，这一增长趋势不但在生产使用的周边地域观测到，而且在遥远的取样场地也观测到了。在美国，直到最近还在大量使用商用五溴二苯醚，并且依旧将聚氨酯泡沫等此类材料划归消费品，这种物质已在人体组织中积累。

土壤或沉积物中的五溴二苯醚已经进入食物链，并在包括人类在内的顶层捕食者的脂肪组织中生物累积。

一些令人关切的毒理学研究表明，组织层次低的动物在神经发育方面受到了影响，而这些动物与在人口中检测到的浓度有关联。目前正在密切关注这种机体负荷问题。

加拿大环境部（2006年）最近发表的关于多溴二苯醚对环境影响的评估，考虑到各项关键性研究成果和一系列相关证据，得出结论认为，这些进入环境的商用物质已经或可能对环境或其生物多样性产生近期或远期有害影响。

4. 结论

商用五溴二苯醚是一种起源于人类的合成混合物，没有已知的自然产地。因此，我们可以得出结论，即环境中存在的全氟辛烷磺烷基化合物（PFOS）成分是人类活动的结果。北极地区、远离生产和释放地的地区之类的地方存在五溴二苯醚，一定是远距离迁移造成的。五溴二苯醚在环境中的降解速度很慢，它会在哺乳动物和食鱼鸟体内生物累积并发生生物放大作用。

逐步淘汰商用五溴二苯醚生产和使用已促成了当前使用量的减少，不过许多正在使用的材料如电子设备中的聚氨酯泡沫和塑料中都含有五溴二苯醚，它们正在被缓慢地释放到环境中。这类材料的寿命结束时，特别是被回收和再利用期间，释放会加速。

虽然在欧洲，五溴二苯醚在人体血液和母乳以及其他周边物种中的浓度正在逐渐降低，但是，北美洲和北极地区的五溴二苯醚浓度却在继续升高。

根据本风险简介提供的信息，由于商用五溴二苯醚（鉴于其成分的特性）能够进行远距离环境迁移，并被证实在许多非人类物种体内具有毒性，该物质很有可能对人类健康和环境造成严重不利影响，因此有必要采取全球行动。

参考文献

- C.Agrell、A.F.H. ter Schure、J.Sveder、A.Bokenstrand、P.Larsson 和 B.N Zegers, 2004, 《固体垃圾焚烧厂中的多溴二苯醚》, 《第一章: 空气浓度》, 《大气环境》, 第 38 期: 5139—3148。
- M.Alae、M.J.Luross、Whittle、M.D.和 D.B. Sergeant, 2002, 《安大略湖中上层食物网中多溴联苯醚的生物积累》, 《有机卤化合物》, 第 57 期: 427—430。
- M Alae、P. Arias、A.Sjödin 和 Å.Bergman, 2003, 《商用含溴阻燃剂及其在不同国家和地区的运用、运用模式和可能的放热方式概览》, 《国际环境》, 第 29 期: 683—689。
- 北极监测与评估规划署评估 2002: 《北极的持久性有机污染物》, 北极监测和评估规划署, 奥斯陆, 2004。
- 北极监测与评估规划署 2005, 《概况介绍: 北极的含溴阻燃剂》<http://www.amap.no>。
- K.Ballschmiter、A.Mennel和J.Buyten, 1993, 《作为毛细管气相色谱法中的非极地固定相的长链烷基聚硅氧烷》, Fresenius' J, 《分析化学》, 第346期: 396—402。
- L.Birnbaum、D.F Staskal和J.J Diliberto, 2003, 《多溴代二苯并二恶英(PBDDs)和多溴代二苯并呋喃(PBDFs)对健康的影响》, 《国际环境》, 第29期: 855—860。
- L.Birnbaum、D.F And Staskal, 2004, 《含溴阻燃剂惹人忧?》, 《环境卫生展望》, 第112期: 9—17。
- A.Bocio、J.M Llobet、J.L Domingo、J.Corbella、A.Teixidó和C.Casas, 2003。
- J. Agric, 《食品中的多溴代二苯醚(PBDEs): 通过饮食造成的人体接触》, 《食品化学》, 第51期: 3191—3195, (文章) DOI: 10.1021/jf0340916。
- Branchi, I、Alleva, E和 Costa, L.G., 2002, 《围产期接触多溴代二苯醚对老鼠神经行为发展的影响》, 《神经毒理学》, 第 23 期: 375—84。
- D.Broman、L Balk、Y.Zebühr和K.Warman, 2001, . Miljöövervakning i Stockholmskommun Saltsjön och Mälaren . KEMI Slutrapport: Provtagningsåren 96/97, 97/98 och 98/99. Laboratoriet för akvatisk ekotoxikologi, ITM, Stockholms universitet samt Miljölaboratoriet i Nyköping.
- “溴科学与环境论坛”, 2001, 《主要含溴阻燃剂量估计: 2001 年按地区划分的总市场需求量》, 2003 年 1 月 21 日, 见 www.bsef.com。
- “溴科学与环境论坛”, 2006, 2006 年 7 月由“溴科学与环境论坛”提供的资料。2004 年和 2005 年的数字即将提供。
- D.A Burniston、R.K Symons、M., Croft、M.Trout 和 W Korth, 2003, 《澳大利亚猪脂肪中多溴代二苯醚的测定》, 《有机卤化合物》, 第 60—65 期(Dioxin 二恶英 2003), 波士顿, 马萨诸塞。
- S.Burreau、D Broman 和 Y.Zebühr, 1999, 《用氮稳定同位素测定鱼类中多溴代二苯醚的生物富集量》, 《有机卤化合物》, 第 40 期: 363—366。

- S.Burreau、Y Zebühr、 R.Ishaq 和 D.Broman, 2000, 《波罗的海和北大西洋食物链中多溴代二苯醚的生物富集量之比较》, 《有机卤化合物》, 第 47 期: 253—255。
- S.Burreau、Y.Zebühr、 D.Broman 和 R.Ishaq, 2004, 《波罗的海 pike (*Esox lucius*)、perch (*Perca fluviatilis*)和 roach (*Rutilus rutilus*)中多氯联苯(PCBs)和多溴代二苯醚(PBDEs)生物富集量研究》, 《光化层》, 第 55 期: 1043—1052。
- C.M Butt、M.L Diamond、J.Truong、M.G Ikonomou和A.ter Schure, 2004, 《根据室内室外有机薄雾中的多溴代二苯醚含量测定安大略湖南部多溴代二苯醚的空间分布》, 《环境科学与技术学会志》, 第38期: 724—731。
- G.P Carlson, 1980, 《老鼠体内的溴代二苯醚化学代谢物诱导》, 《毒理学通讯》, 第6期: 207—12。
- J.H Christensen、M.Glasius、M Pécseli、J. Platz 和 G.Pritzl, 2002, 《格陵兰南部海洋鱼类和紫贻贝中的多溴代二苯醚》, 《光化层》, 第 47 期, 631—638。
- 化学品检查协会, 2000, 《S512 化合物的生物富集》, 化学品检查协会化学品生物测试中心, 东京。在《二苯醚、五溴衍生物的风险评估》中有引述, 欧洲共同体委员会, 2000。
- 食品、化妆品及环境中化学品毒性委员会(COT), 《COT 关于 Skerne-Tees 河流系统中鱼类所含含溴阻燃剂的声明》, 2004, <http://www.food.gov.k/multimedia/pdfs/bfrstatement.pdf>。
- A.Covaci、A.Gheorghe、E Steen Redeker、R.Blust 和 P.Schepens, 2002a, 《斯凯尔特河湾(比利时)沉积岩心中有机氯和有机溴污染物的分布》, 《有机卤化合物》, 第 57 期: 239—242。
- A Covaci、Van de Vijver、K、 W DeCoen、Das、 K、 J.M Bouquegneau、R.Blust 和 P.Schepens, 2002b, 《比利时北部海岸搁浅的鼠海豚(*Phocoena phocoena*)肝脏内的有机卤污染物测定》, 《海洋污染通报》, 第 44 期: 1157—1165。
- Danish, 美国环境保护署, 1999, 《含溴阻燃剂: 物质流分析和替代物评估》。
- P.O.Darnerud, 2003, 《含溴阻燃剂对人体和野生动物的毒素效应》, 《国际环境》, 第 29 期: 841—853。
- P.O Darnerud、M.Aune、S.Atuma、W Becker、R.Bjerselius、S.Cnattingius 和 A.Glynn, 2002, 《1996-2001 年瑞典乌普萨拉母乳中多溴代二苯醚含量的时间趋势》, 《有机卤化合物》, 第 58 期: 233—236。
- C.de Wit、M. Alae和D.Muir, 2004, 《北极的含溴阻燃剂——空间和时间趋势概览》, 《有机卤化合物》, 第66期: 3764—3769。
- K.D'Silva、H.Thompson、A. Fernandes和M.Duff, 2004, 《联合王国苍鹭脂肪组织和卵中的多溴代二苯醚摘要》, 德国联邦风险评估所, 2004。
- J. Ebert和M.Bahadir, 2003, 《在热应力下, 阻燃塑性材料中多溴代二苯并二恶英/多溴代二苯并呋喃的形成》, 《国际环境》, 第29期: 711—716。

空气污染物长距离输送监测与评价合作方案，2004，《新物质：多溴代二苯醚长距离越界大气输送和持久性潜能模式评估》，《空气污染物长距离输送监测与评价合作计划对审查〈持久性有机污染物长程越界空气污染协议议定书〉筹备工作的贡献》，《情况说明》，2004年10月。

加拿大环境科学部，2006，《多溴代二苯醚生态筛选评估报告》，2006年1月。

P.Eriksson、E.Jakobsson和A.Fredriksson，2001，《含溴阻燃剂：我们环境中的新一代发展性神经毒物？》，《环境卫生展望》，第109期：903—8。

欧洲联盟，2000，《二苯醚和五溴衍生物(五溴联苯)风险评估》，美国化学文摘社(CAS)登记号：32534-81-9，化合物目录数据库登记号：251-084-2，2000年8月最后报告2000，欧洲共同体委员报告员：联合王国。

B.Fabrellas、D.Larrazabal、M.A.Martinez、E.Eljarrat和D.Barceló，2004，《西班牙污水污泥中的多溴代二苯醚存在：十溴二苯醚的重要贡献》，《有机卤化物》，第66期：3755—3760。

B.Fängström、A.Strid、I.Athanassiadis、P.Grandjean、P.Wiehe和Å.Bergman，2004，《法罗群岛上母乳中多溴代二苯醚的回顾性研究》，第三次国际含溴阻燃剂研讨会，德国联邦风险评估所，2004。

B.Fängström、A.Strid和Å.Bergman，2005，. Rapport til Naturvårdsverket för projektet ”Analys av polybromerade difenyletrar (PBDE) och hexabromcyklododekan (HBCDD) i human mjölk från Stockholm – en tidstrend studie. (Dnr 721-2653-05Mm) Stockholm 2005-11-23.

E.Fjeld、M.Mariussen、M.Strand-Andersen、M.Hjerpset和M.Schlabach，2003。

Bioakkumulering og fordeling av polybromerte difenyletere i norske innsjøer. NFRs program for forurensninger: kilder, spredning, effekter og tiltak (ProFO). Foredrag, forskerseminar 15. okt. 2003, Olavsgård hotell.

Fjeld, E., Schlabach, M., Berge, J.A., Eggen, T., Snilsberg, P., Källberg, G., Rognerud, S., Enge, E.K., Borgen, A. and Gundersen, H. 2004. Kartlegging av utvalgte nye organiske miljøgifter – bromerte flammehemmere, klorerte parafiner, bisfenol A og triclosan (特定新有机污染物的筛选——含溴阻燃剂、氯化烷烃、双酚A和三氯生)，NIVA-报告4809—2004，奥斯陆。(SFT: TA-2006)，106 sider。

Fjeld, E. et al. 2005，《2004年特定新有机污染物的筛选——含溴阻燃剂、全氟烷基化物质、2-叔丁氨基-4-环丙氨基-6-甲硫基-s-三嗪、达有龙、BHT 抗氧化剂和大克螨》，NIVA-报告5011—2005，奥斯陆，第97页。

Fredonia 集团，2005，《2009年前特质塑性添加剂》，研究# 1961，可在www.fredonia.ecnext.com(2006年7月)进行有偿查阅。

G.W.Gabrielsen、L.B.Knudsen、J.Verreault、K.Push、D.C.Muir和J.Letcher，2004，卤化的；《斯瓦尔巴特岛北极熊(*Ursus maritimus*)血液和脂肪组织中的卤化污染物和代谢物》，SFT—报告，915/2004。www.sft.no。

- H.Geyer、J.、K.W Schramm、 P.O Darnerud、M.Aune、 B Henkelmann、 D Lenoir、 P. Schmid 和 T.A McDonald, 2004, 《含溴阻燃剂 TBBPA、HBCD 半衰期终端切除和降低人体内五溴二苯醚含量》, 《有机卤化合物》, 第 66 期: 3820—3825。
- T.Gouin、G.O.Thomas、I.Cousins、J. Barber、D.Mackay 和 K.C.ones, 2002, 《大气表面多溴代二苯醚和多氯联苯的交换》, 《环境科学与技术学会志》, 第 36 期: 1426—1434。
- T.Gouin 和 T.Harner, 2003, 《多溴代二苯醚环境命运模式》, 《国际环境》第 29 期: 717—724。
- 大湖化学公司(1984), 《对老鼠为期90天的五溴二苯基氧化物(DE-71)饮食研究》, 最后报告, 1984, 报告编号: 项目编号WIL-12011, WIL研究实验室。.
- R.C Hale、Guardia La、M.J、 E.P.Harvey和M Mainor, 2002, 《聚氨酯泡沫塑料作为含溴二苯醚对美国环境的可能作用》, 《光化层》, 第46期: 729—735。
- A.J Hall、O.I.Kalantzi 和 G.O Thomas, 2003, 《灰海豹出生第一年体内的多溴代二苯醚——它们是甲状腺激素干扰化合物么?》, 《环境污染》, 第 126 期: 29—37。
- F.A Harden、L.M.L Toms、J.J Ryan和J. F Mueller, 2004, 《从31至45岁年龄段的澳大利亚人抽取的混合血清中多溴代二苯醚含量的测定》, 第三届含溴阻燃剂国际研讨会, 2004年6月6至9日, 加拿大多伦多: 59—62。
- F.Harden、J Müller和L.Toms, 2005, 《澳大利亚人乳中的有机氯农药(OCPs)和多溴代二苯醚含量》, 澳大利亚和新西兰环境保护和遗产理事会: http://www.ephc.gov.au/pdf/EPHC/OCP_PBDE_human_milk_jan%202005.pdf。
- T.Harner、M. Ikonou、M.Shoeib、G.Stern 和 M.Diamond, 2002, 《城乡试样地带多溴代二苯醚被动大气采样结果》, 第四届环境中含溴阻燃剂年度研讨会, 6月17至18日, 加拿大内水中心, 伯林顿,安大略, 51—54。
- S Harrad 和 S.Hunter, 2004, 《城乡试样地带多溴代二苯醚被动大气采样中大气中多溴代二苯醚含量的空间变化》, 《有机卤化物》, 第 66 期: 3786—3792。
- S.Harrad、R. Wijesekara、S Hunter、C Halliwell 和 R Baker, 2004, 《英国人体饮食和吸入接触多溴代二苯醚初步评估》, 《环境科学与技术学会志》, 第 38 期: 2345—2350。
- A Hassanin、K. Breivik、S.N Meijer、E Steinnes、G.O.Thomas 和 K.C Jones, 2004, 《欧洲土壤中的多溴代二苯醚: 含量以及控制其分布的因素》, 《环境科学与技术学会志》, 第 38 期: 738—745。
- K Hayakawa、H Takatsuki、I Watanabe 和 S.Sakai, 2004, 《大气中的多溴代二苯醚、多溴代二苯并二恶英(PBDD/Fs)和一溴多氯二联苯呋喃(MoBPXDD/Fs)和在日本东京的沉积》, 《光化层》, 第 57 期: 343—356。
- He、J.、K.R Robrock 和 L.Alvarez-Cohen, 2006, 《多溴代二苯醚的还原微生物的脱溴作用》, 《环境科学与技术学会志》, 第 40 期: 4429—4434。

D.Herzke、G.W Gabrielsen、A Evenset 和 I.C.Burkow, 2003, 《斯瓦尔巴群岛和 Bjørnøya (熊岛) 北极鸥(*Ularus hyperboreus*)体内的多氯萜烯、多溴代二苯醚和其他卤化有机污染物》, 《环境污染》, 第 121 期: 293—300。

D.Herzke、U Berger、R Kallenborn、T.Nygård 和 W.Vetter, 2005, 《挪威掠食性鸟卵中含溴阻燃剂和其他有机溴》, 《光化层》, 第 61 期: 441—449。

R.A Hites, 2004, 《环境和人体内的多溴代二苯醚: 对富集的综合分析》, 《环境科学与技术学会志》, 第 38 期: 945—956。

E.Hoh 和 R.A Hites, 2005, 《美国东部和中部大气中的含溴阻燃剂》, 《环境科学与技术学会志》, 第 39 期: 7794—7802。

J.K.Huwe 和 G.L Larsen, 2005, 《U.DS.肉类市场菜篮子中的多氯二恶英、呋喃和联苯多溴代二苯醚, 以及食物摄入估计》, 《环境科学与技术学会志》, 第 39 期: 5606—5611。

M.G Ikonou、S. Raine 和 R.F Adisson, 2002, 《1981 年至 2000 年在加拿大北极地区含溴阻燃剂多溴代二苯醚的指数增长》, 《环境科学与技术学会志》, 第 36 期: 1886—1892。

《国际环境报道者》: 2006, 有偿使用资料——见www.bna.com。

K.Jakobsson、K.Thuresson、L.Rylander、A Sjödin、L.Hagnar 和 A.Bergman, 2002, 《计算机技术人员当中对多溴代二苯醚和四溴双酚的接触》, 《光化层》, 第 46 期: 709—716。

V.Jaspers、A.Covaci、J.Maervoet、T Dauwe、P.Schepens 和 M, 2004, . Brominated flame retardants in Belgian 《比利时小鸮(*Athene noctua*)卵中的含溴阻燃剂》, 《有机卤化合物》, 第 66 期: 3856—3860。

F.M.Jaward、N.J Farrar、T.Harner、A.J. Sweetman 和 Jones, K.C, 2004, 《欧洲多篱联苯、多溴代二苯醚和有机氯杀虫剂被动大气取样》, 《环境科学与技术学会志》, 第 38 期: 34—41。

B.Johnson-Restrepo、K Kannan、D.P.Rapaport 和 B.D.Rodan, 2005, 《纽约人脂肪组织中的多溴代二苯醚和多氯联苯》, 《环境科学与技术学会志》, 第 39 期: 5177—5182。

N Kajiwara、D.Ueno、A Takahashi、N.Baba 和 S. Tanabe, 2004, 《日本太平洋海岸北方海狗档案样本中的多溴代二苯醚和有机氯, 1972-1998》, 《环境科学与技术学会志》, 第 38 期: 3804—3809。

K Kannan、K Ramu、N Kajiwara、R.K Sinha 和 S.Tanabe, 2005, 《印度伊洛瓦底河豚中的有机氯杀虫剂、多氯联苯和多溴代二苯醚》, 《环境污染与毒理学档案》, 第 49 期: 415—420。

T.Källqvist、M Grung 和 K-E Tollefsen, 《2,4,2',4'-四溴联苯(BDE-47)对海藻 *Skeletonema costatum* 肋骨条藻和甲壳动物 *Daphnia magna* 大型溞的长期毒性》, 《环境毒理与化学》, (已接受发表)。

A Kierkegaard、A Bignert、U Sellström、M Olsson、L Asplund、B Jansson 和 C.A de Wit, 2004a, 《瑞典水域中狗鱼体内的多溴代二苯醚和它们的甲氧基化衍生物及其时间趋势, 1967-2000》, 《环境污染》, 第 130 期: 187—198。

- L. B Knudsen、G. W Gabrielse、J.Verreault、 R.Barrett、J.U.Skåre、A.Polder 和 E. Lie, 2005, 《北部挪威和斯瓦尔巴群岛四种海鸟卵中含溴阻燃剂、cyclododeca-1,5,9-triene 和汞含量》, SFT—报告, 942/2005。
- A.Koizumi、T Yoshinaga、K Harada、 K.Inoue、A Morikawa、 J.Muroi、S Inoue、B Eslami、S Fujii、Y Fujimine、N Hachiya、S. Koda、 Y Kusaka、 K.Murata、N Nakatsuka、K.Omae、 N Saito、S.Shimbo、K.Takenaka、 T Takeshita、 H Todoriki、Y Wada、 T. Watanabe 和 M.Ikeda, 2006, 《利用日本 1980 年代早期和 1990 年代中期档案样本评估人类接触多氯联苯和多溴二苯醚》, 《环境资源》, 已接受发表。2004 年 12 月, 在 2006 年 6 月 www.elsevier.com/locate/envres 上可以查阅时仍处于“发行”阶段。
- Kuriyama, S.N.、Talsness C.E、Grote K.和Chahoud I, 2005, 《小剂量多溴代二苯醚-99 的发展性接触: 对雄性生育力和老鼠后代神经行为的影响》, 《环境卫生展望》, 第 113(2)期: 149—54。
- R. J Law、 M Alae、 C.R Allchin、J.P.Boon、 M Lebeuf、 P Lepom 和 G.A.Stern, 2003, 《野生生物中多溴代二苯醚和含溴阻燃剂的含量和趋势》, 《国际环境》, 第 29 期: 757—770。
- R.J.Law、C.R Allchin、J.de Boer、 A Covaci、 D.Herzke、 P Lepom、 S Morris、 J. Tronczynski 和 C.A de Wit, 2005, 《欧洲和格陵兰环境中含溴阻燃剂的含量和趋势》, 《化学层》, 第 64 期: 187—208。
- Lee、R.G.M.、 G.O Thomas 和 K.C Jones, 2004, 《西欧大气中多溴代二苯醚的含量》, 《环境科学与技术学会志》, 第 38 期: 699—706。
- P.Lindberg、U.Sellström、L.Hägberg 和 C.A de Wit, 2004, 《在瑞典游隼(*Falco peregrinus*)繁殖区的卵中发现更高的多溴代二苯醚和六溴环十二烷阻燃剂》, 《环境科学与技术学会志》, 第 38 期: 93—96。
- G.Lithner、K.Holm 和 C.Ekström, 2003, .Metaller och organiska miljögifter i vattenlevande organismer och deras miljö i Stockholm 2001. ITM Rapport 报告 108, 87 pp.,斯德哥尔摩大学应用环境研究所(ITM), 斯德哥尔摩, 瑞典, ISBN 91-631-3758-5 (瑞典语)。
- D López、M Athanasiadou,和 I. Athanassiadis, 2004, 《对墨西哥妇女的血液和乳汁中多溴代二苯醚和六溴环十二烷含量的初步研究》, 第三届含溴阻燃剂国际研讨会, 德国联邦风险评估所, 2004。
- K.Magnusson、S.Agrenius 和 R.Ekelund, 2003, 《软底沉积物和大型动物物种中四溴联苯及其代谢物的分布》, Mar. Ecol. Prog. Ser, 第 255 期: 155—170。
- G Marsch、M Athanasiadou、Å Bergman 和 L Asplund, 2004, 《波罗的海三文鳟(*Salmo salar*)血液中羟基化和甲氧基化多溴代二苯醚的确定》, 《环境科学与技术学会志》, 第 38 期: 10—18。
- N.Matcheko、M.Tysklind、C.de Wit、S.Bergek、R.Andersson 和 U.Sellström, 2002, 《污水污泥在可耕地中的应用—土壤中多溴代二苯醚、多氯二苯并-p-二恶英、二苯夫喃和联苯的富集, 以及它们在蚯蚓中的富集》, 《环境毒理与化学》, 第 21 期: 2515-2525。

Meerts, I.A.、Letcher, R.J.、Hoving, S.、Marsh, G.、Bergman, A.、Lemmen, J.G.、van der Burg, B.和Brouwer, A, 2001, 《多溴代二苯醚、羟基化多溴代二苯醚和多溴联苯 A 化合物的体外雌激素》, 《环境卫生展望》, 第 109(4)期: 399—407。

W Moche 和 G.Thanner, 2004, 《奥地利污水处理厂的污水和污泥中的多溴代二苯醚含量》, 第三届含溴阻燃剂国际研讨会会议记录, 德国联邦风险评估所, 2004, 加拿大多伦多, 2004年6月6至9日, 167—170。

L.S Morf、J.Tremp、Y.Huber、M.Stengele和 M Zenegg, 2005, 《废弃电气和电子设备中的含溴阻燃剂: 回收工厂里的物质流》, 《环境科学与技术学会志》, 第 39 期: 8691—8699。

D.C.G Muir、S.,Backus、A.E Derocher、R.Dietz、T.J.Evans、G.W Gabrielsen、J.Nagy、R.J Norström、C.Sonne、I Stirling、M.K Taylor 和 R. J.Letcher, 2006, 《阿拉斯加、加拿大北极地区、格陵兰东部和斯瓦尔巴群岛北极熊(Ursus maritimus)体内的含溴阻燃剂含量》, 《环境科学与技术学会志》, 第 40 期: 449—455。

R.J Norström、M.Simon、J Moisey、B.Wakeford 和 D.V.C Weseloh, 2002, 《波罗的海海鸟卵中含溴二苯醚和羟基化多溴代二苯醚的地理分布 (2000) 和时间趋势 (1981-2000) 》, 《环境科学与技术学会志》, 第 37 期: 5496-5501。

K.Nylund、L Asplund、B Jansson、P Jonsson、K Litzén和U.Sellström, 1992, 《对沉积物和污水污泥中一些多卤有机污染物的分析》, 《光化层》, 第24期: 1721—1730。

O.Päpke、Å Bergman、P.Fürst、G.D Meironyté、和 T. Herrmann, 2001, 《美国人乳中多溴代二苯醚的确定——三个实验室结果的比较》, 《有机卤化合物》, 第 52 期: 197—200。

A.Palm, 2001, 《多溴代二苯醚在斯德哥尔摩中心的环境命运——运用多媒体逃逸模式进行评估》, 科学硕士论文, 优密欧大学。

A.Palm、I.T.Cousins、D. Mackay、M.Tysklind、C. Metcalf 和 M.Alaee, 2002, 《日益引人关注的化学品的环境命运评估: 多溴代二苯醚的一个案例研究》, 《环境污染》, 第 117 期: 195—213。

J.Peltola 和 L.Yla-Mononen, 2001, 《作为全球持久性有机污染物的五溴二苯醚》, TemaNord 2001, 第 579 卷。哥本哈根: 北欧部长理事会; ISBN 92-893-0690-4: 78。

K.Prevedouros、K.C.Jones 和 A.J.Sweetman, 2004a, 《欧洲范围内多溴代二苯醚产品中五溴二苯醚的富集和分布模式》, 《环境科学与技术学会志》, 第 38 期: 5993—6001。//

K.Prevedouros、K.C.Jones 和 A.J.Sweetman, 2004b. 《1970 至 2000 年之间欧洲五溴二苯醚的生产、消费和大气排放估计》, 《环境科学与技术学会志》, 第 38 期: 3224—3231。

K.Ramu、N. Kajiwara、S.Tanabe、P.K.S.Lam 和 T.A.Jefferson, 2005, 《香港水域小型鲸目动物体内的多溴代二苯醚 (PBDEs) 和有机氯: 含量、概况和分布》, 《海洋污染通报》, 第 51 期: 669—676。

- T.Reistad、 E. Mariussen 和 F. Fonnum, 2002, 《多溴阻燃剂对细胞死亡和小脑细胞急剧自由成形的影响》, 《有机卤化合物》, 第 57 期: 391—394。
- [Reistad, T.](#) 和 [Mariussen, E.](#), 2005, 《含溴阻燃剂五溴二苯醚(DE-71)的商用混合剂导致人体体外嗜中性粒白细胞呼吸突然中断》, 《毒理科学》, 第 87 期: 57—65。
- J.J.Ryan、 B. Patry、 P.Mills 和 G.Beaudoin, 2002, 《加拿大人乳中含溴代二苯醚的最近趋势》, 《有机卤化合物》, 第 58 期: 173—176。
- J.J. Ryan, 2004, 《人乳中的多溴代二苯醚(PBDEs); 全世界范围内的事件》, 第三届含溴阻燃剂国际研讨会会议记录, 德国联邦风险评估所, 2004, 多伦多。
- S.Sand、 D.von Rosen、 P. Eriksson、 A.Fredriksson、 H.Viberg、 K.Victorin和A.F. Filipsson, 2004, 《从刚接触2,2',4,4',5-五溴二苯醚的老鼠的自发行行为得出的剂量反映模式和基准计算》, 《毒理科学》, 第81期: 491-501。
- A.Schechter、 O. Pöpke、 K-C.Tung、 D. Staskal, and 和 L. Birnbaum, 2004, 《美国食物多溴代二苯醚污染》, 《环境科学与技术学会志》, 第 38 期: 5306—5311。
- A.Schechter、 O. Pöpke、 T.R.Harris、 K-C.Tung、 A.Musumba、 J.Olson 和 L.Birnbaum, 2006, 《扩大了的市场篮子中的多溴代二苯醚含量美国食品调查, 以及按年龄和性别计算的估计多溴代二苯醚摄入量》, 《环境卫生展望》, Doi: 10.1289/ehp.9121 (正式出版前在线阅读, 2006年7月13日)。
- A.F.H.ter Schure 和 P. Larsson, 2002, 《瑞典南部(Skåne, Lund)降水中的多溴代二苯醚》, 《大气环境》, 第 36 期: 4015—4022。
- A.F.H.ter Schure、 P.Larsson、 C.Agrell 和 J.P. Boon, 2004a, 《多溴代二苯醚和多氯联苯朝波罗的海的大气运输》, 《环境科学与技术学会志》, 第 38 期: 1282—1287。
- A.F.H.ter Schure、 C.Agrell、 A.Bokenstrand、 J.Sveder、 P.Larsson 和 B.N.Zegers, 2004b, 《固体垃圾焚烧厂里的多溴代二苯醚》, 《第二章: 大气沉积物》, 《大气环境》, 第 38 期: 5149—5155。
- U. Sellström, 1996, 《瑞典环境中的多溴代二苯醚》, 开业论文, 斯德哥尔摩大学应用研究所。
- U.Sellström、 A.Bignert、 A. Kierkegaard、 L.Hägberg、 C.A.de Wit、 M. Olsson 和 B.Jansson, 2003, 《波罗的海夜鹭卵中的四溴代二苯醚和五溴代二苯醚以及六溴环十二烷的时间趋势》, 《环境科学与技术学会志》, 第 37 期: 5496—5501。
- M.Shoeib、 T. Harner、 M.Ikonomou 和 K.Kannan, 2004, 《室内室外全氟辛烷磺酸基化合物和溴代二苯醚的富集和两相分配》, 《环境科学与技术学会志》, 第 38 期: 1313—1320。
- Siddiqi, M.A.、 Laessig, R.H和Reed, K.D, 2003, 《多溴代二苯醚(PBDEs): 新污染物——旧疾病》, Clin Med Res, 第 1(4)期: 281—90。
- S.Sinkkonen、 A.-L. Rantalainen、 J. Paasivirta 和 M.Lahtiperä, 2004, 《波罗的海、大西洋和北极环境中鱼类和海夜鹭体内甲氧基溴化二苯醚》, 《光化层》, 第 56 期: 767—775。

A.Sjödin、D.G.Patterson 和 Å. Bergman, 2003, 《人类接触含溴阻燃剂回顾——特别是多溴代二苯醚》, 《国际环境》, 第 29 期: 829—839。

A.Sjödin、L. Hagmar、E. Klasson-Wehler、K. Kronholm-Diab、E.Jakobsson 和 A. Bergman, 1999, 《阻燃剂接触: 瑞典工人血液中的多溴代二苯醚》, 《环境卫生展望》, 第 107 期: 643—648。

H.M.Stapleton、R.J. Letcher 和 J.E. Baker, 2004, 《国际鲤鱼地域 (*Cyprinus carpio*) 中的脱溴二苯醚同类 BDE 99 和 BDE 183》, 《环境科学与技术学会志》, 第 38 期: 1054—1061。

H.M.Stapleton、N.G.Dodder、J.H.Offenberg、M.M.Schantz 和 S.A. Wise, 2005, 《住宅内灰尘和衣服干燥剂中的多溴代二苯醚》, 《环境科学与技术学会志》, 第 39 期: 925—931。

Stoker, T.E.、Laws, S.C.、Crofton, K.M.、Hedge, J.M.、Ferrell, J.M 和 Cooper, R.L, 2004, 《在 EDSP 男女青春期议定书中对 DE-71, 一种商用多溴代二苯醚混合剂的评估》, 《毒理学科学》, 第 78(1)期: 144—55。

Stoker, T.E.、Cooper, R.L.、Lambright, C.S.、Wilson, V.S.、Furr, J和Gray, L.E, 2005, 《DE-71, 一种商用多溴代二苯醚混合剂在生物体内和体外反男性荷尔蒙的效果》, 《Toxicol. Appl. Pharmacol》, 第 207(1)期: 78—88。

B.Strandberg、N.G. Dodder、I. Basu 和 R.A.Hites, 2001, 《大湖地区大气中多溴代二苯醚和其他有机卤化合物的富集和空间变化》, 《环境科学与技术学会志》, 第 35 期: 1078—1083。

瑞士环境署, 2002, 《对环境有害的物质: 特选的多溴阻燃剂, 多溴代二苯醚和 TBBPA ——物质流分析》, 《环境系列》第 338 号。

E.G.Sørmo、M.P.Salmer、B.M. Jenssen、H.Hop、K. Bæk、K.M. Kovacs、C.Lydersen、S.

Falk-Pettersen、G.W. Gabrielsen、E. Lie 和 J.U. Skaare, 2006, 《在挪威斯瓦尔巴特群岛上的北极熊食物链含溴阻燃剂的生物富集》, 已被接受在《环境毒理与化学》上发表。

Talsness, C.E.、Shakibaei, M.、Kuriyama, S.N.、Grande, S.W.、Sterner-Kock, A.、Schnitker, P.、de Souza, C.、Grote, K.和 Chahoud, I., 2005, 《in utero 和哺乳期低剂量接触多溴阻燃剂之后老鼠卵巢中的超结构变化》, 《毒理学通讯》, 第 157(3)期: 189—202。

G.O.Thomas、S.E.W. Moss、L.Asplund 和 A.J.Hall, 2005, 《灰海豹(*Halichoerus grypus*)对十溴二苯醚和其他有机卤化学品的吸收》, 《环境污染》第 133 期: 581—6。

C.Thomsen、M. Frøshaug、G.Becher、H.E Kvalem、H. Knutsen、J. Alexander、C.Bergsten 和 H.M.Meltzer, 2004, 《鱼类和游戏不同消费者血清中的多溴代二苯醚》, 第三次含溴阻燃剂国际研讨会会议记录, 德国联邦风险评估所, 2004。

C.Thomsen、V.Liane、M. Frøshaug 和 G. Becher, 2005a, 《挪威人体样本内含溴阻燃剂含量三十年》, 《有机卤化合物》, 第 67 期: 658—661。

C.Thomsen、M. Frøshaug、S.L. Broadwell、G.Beche 和 M. Eggesbø, 2005b, 《挪威人乳研究中人乳中含溴阻燃剂含量》, 《有机卤化合物》, 第 67 期: 509—512。

- K.U.Thron、 R. Bruhn 和 M.S. McLachlan, 2004, 《年龄、性别、身体条件和地区对欧洲水域海豚体内多溴代二苯醚和八氯苝烯含量的影响》, 《耐火环境通报》, 第 13 期, 146—155。
- A.R.Timme-Laragy、 E.D. Levin 和 R.T. Di Giulio, 2006, 《在毒鱼 (*Fundulus heteroclitus*) 体内胚胎接触多溴代二苯醚混合剂的发展性和行为影响》, 《光化层》, 第 62 期, 1097—1104。
- Ueno D.、 Tanaka N.、 Subramanian H.、 A. G. Lam、 P.K.S.、 Zheng、 Muchitar G.J.、 Razak M.、 Prudente H.、 Chung M.、 K.和 S. Tanabe, 2004, 《以飞鱼鲑鱼为生物指标对多溴代二苯醚进行全球污染监测》, 《环境科学与技术学会志》第 38 期: 2312-2316。
- D Van der Goon、 M.van het Bolscher、 A.J.H. Visschedijk 和 P.Y.J.Zandveld, 2005, 《对〈UNECE持久性有机污染物议定书〉的效力和可能的附加措施的成本的研究。第一阶段: 由于执行〈持久性有机污染物议定书〉而减少排放的估计》, TNO-报告, 2005/194。
- 美国自愿儿童化学评价方案, 2003, 《2003 年美国自愿儿童化学评价方案。第一级, 儿童接触为大湖化学公司准备的商用五溴二苯醚所存在的潜在健康风险评估》。
- 美国自愿儿童化学评价方案, 2005, 美国自愿儿童化学评价方案(VCCEP), 第一级风险评估概要: 2005 年 8 月 25 日文件。2006 年 7 月可在 <http://www.epa.gov/chemrtk/vccep/pubs/finalpenoct.pdf> 查阅。
- J.Verreault、 G.W.Gabrielsen、 R.I. Letcher、 D.C.G.Muir 和 S. Chu, 2004, 《新的和已确定的有机卤污染物及其在熊岛上海鸥的血浆和卵中的代谢物》, 全氟辛酸钠—报告: 914/2004。
- J.Verreault、 G.W.Gabrielsen、 S.Chu、 D.C.G Muir、 M.Andersen、 A.Hamaed 和 R.I.Letcher, 2005, 《在海鸥和北极熊这两种挪威北极头等食肉动物体内的阻燃剂和羟基化和甲氧基化多溴代二苯醚》, 《环境科学与技术学会志》, 第 39 期: 6021—6028。
- Viberg, H.、 Fredriksson, A 和 Eriksson, P, 2002, 《新生儿接触含溴阻燃剂 2,2',4,4',5-多氯联苯醚导致成年老鼠类胆碱传输系统易感性的改变》, 《毒理科学》, 第 67 期: 104—7。
- Viberg, H.、 Fredriksson, A. 和 Eriksson, P, 2004, 《对多溴代二苯醚给老鼠的发展性神经毒性影响中的品种和/或性别差异的调查》, 《毒理科学》, 第 81 期: 344—53。
- VKM 2005, Vitenskapskomiteen for mattrygghet (挪威食品安全科学委员会) Utalelse fra faggruppen for forurensninger, naturlige toksiner og medisinerester i matkjeden. Risikovurdering av PBDE. 04/504.
- I.Vives、 J.O.Grimalt、 S. Lacorte、 M.Guillamón、 D.Barceló 和 B.O. Rosseland, 2004, 《欧洲高山和格陵兰地区湖泊中鱼类体内的多溴二苯醚阻燃剂》, 《环境科学与技术学会志》, 第 38 期: 2338—2344。
- S.Voorspoels、 A. Covaci 和 P. Schepens, 2003, 《比利时北部海和西部斯凯尔特河河口海洋物种体内的多溴代二苯醚: 含量、情况和分布》, 《环境科学与技术学会志》, 第 37 期: 4348—4357。

- K.Vorkamp、J.H.Christensen、M. Glasius 和 F.R. Riget , 2004a, 《格陵兰岛上黑色海鸥 (*Cephus grylle*)体内的持久性卤化合物——含量、化合模式和空间趋势》, 《海洋污染通报》第 48 期: 111—121。
- K.Vorkamp、J.H. Christensen 和 F.R. Riget, 2004b, 《格陵兰岛东部海洋环境生物区的多溴代二苯醚和有机卤化合物》, *Sci. Total Environ*, 第 331 期: 143—155。
- K.Vorkamp、M.Thomsen、K. Falk、H. Leslie、S. Møller 和 P.B. Sørensen, 2005, 《格陵兰岛南部游隼 (*Falco peregrinus*) 卵中含溴阻燃剂的时间发展 (1986-2003)》, 《环境科学与技术学会志》, 第 39 期: 8199—8206。
- N.Vulykh、S.Dutchak、E. Mantseva 和 V. Shatalov, 2004, 《空气污染物长距离输送监测与评价合作计划对审查〈持久性有机污染物长程越界空气污染协议议定书〉筹备工作的贡献。新物质: 多溴代二苯醚长距离越界大气输送和持久性潜能模式评估》, 空气污染物长距离输送监测与评价合作方案 MSC-E 情况说明, 2004 年 10 月, 东部气象综合中心。
- D.Wang、Z.Cai、G. Jiang、A. Leung、M.H. Wong 和 W.K. Wong, 2005, 《一家电子垃圾回收厂的土壤和沉积物中多溴代二苯醚确定》, 《光化层》, 第 60 期: 810—816。
- 华盛顿州多溴代二苯醚(PBDE) 化学行动计划: 最终计划草案, 2005 年 12 月 1 日。
- R.Weber 和 B. Kuch, 2003, 《BFRs 和热力条件在含溴和溴化-氯化 dibenzodioxins 和 dibenzofurans 形成过程中的作用》, 《国际环境》, 第 29 期: 699—710。
- J.Weiss、L.Meijer、P. Sauer、L. Lindeholm、I. Athanasiadis 和 Å. Bergman, 2004, 《荷兰母亲和婴儿血液中多溴代二苯醚和六溴环十二烷含量》, 第三届含溴阻燃剂国际研讨会会议记录, 德国联邦风险评估所, 2004。
- B.H.Wilford、M. Shoeib、T. Harner、J. Zhu 和 K.C. Jones, 2005, 《加拿大渥太华室内灰尘中的多溴代二苯醚: 对来源和接触的意义》, 《环境科学与技术学会志》, 第 39(18)期: 7027—7035。
- H.Wolkers、B.van Bavel、A.E. Derocher、Ø. Wiig、K.M.Kovacs、C. Lydersen 和 G. Lindström, 2004, 《多溴代二苯醚在两大北极食物链中的同种富集和食物链转移》, 《环境科学与技术学会志》, 第 38 期: 1667—1674。
- Wang Xin-Ming、Ding, X.、Mai, B-X、Xie, Z-Q、Xiang, C-H.、Sun, L-G.、Sheng, G-Y、Fu, J-M 和 Zeng, E.Y, 2005, 《在从波罗的海向北极的一次调查探险中所收集的空气传播微粒中的多溴代二苯醚》, 《环境科学与技术学会志》, 第 39 期: 7803—7809。
- B.N.Zegers、W.E. Lewis 和 J.P. Boon, 2000, 《一些多溴代二苯醚含溴阻燃剂在陈旧的沉积岩心中的含量》, 《有机卤化合物》, 第 47 期: 229—232。
- B.N.Zegers、W.A. Lewis、K. Booij、R.H. Smittenberg、W. Boer、J. de Boer 和 J.P. Boon, 2003, 《西欧沉积岩心中多溴代二苯醚含溴阻燃剂的含量》, 《环境科学与技术学会志》, 第 37 期: 3803—3807。

M.Zennegg、M. Kohler、A.C. Gerecke 和 P. Schmid, 2003, 《在瑞士湖泊白色的鱼和养殖的虹鳟体内的多溴代二苯醚含量》, 《光化层》, 第 51 期: 545—553。

T.Zhou、D.G. Ross、M.J. DeVito和K.M. Crofton, 2001, 《短期体内接触多溴代二苯醚对刚断奶老鼠甲状腺激素和肝酶活动的影响》, 《毒理科学》, 第61期: 76—82。

Zhou, T、Taylor, M.M、De Vito, M.J和 Crofton, K.M, 2002, 《发展性接触多溴代二苯醚会导致甲状腺激素紊乱》, 《毒理科学》, 第66期: 105—116。
