



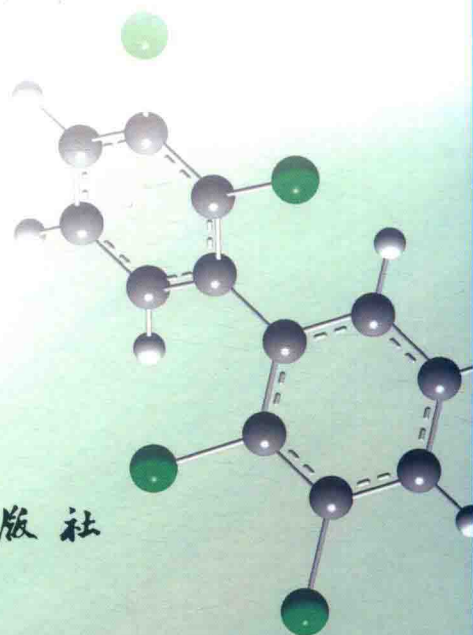
“十三五”国家重点出版物出版规划项目

持久性有机污染物

POPs 研究系列专著

极地与高山地区持久性有机污染物的赋存与环境行为

李英明 张 蓬 王 璞 傅建捷 张庆华/著



科学出版社



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

“十三五”国家重点出版物出版规划项目

持久性有机污染物

POPs 研究系列专著

极地与高山地区持久性有机 污染物的赋存与环境行为

李英明 张蓬 王璞 傅建捷 张庆华/著

科学出版社

北京

内 容 简 介

持久性有机污染物(POPs)引起的环境污染及健康问题近年来受到人们普遍关注。地球的南极、北极以及世界“第三极”青藏高原地区远离人类聚集区,是世界上最洁净的几个地区。但是极地之远、珠峰之高并不能阻挡 POPs 的迁移传输,在大气长距离传输等作用下,POPs 最终能够到达极地与高山地区,并对当地较脆弱的生态系统产生潜在危害。本书系统地介绍了典型 POPs 在南北极及青藏高原地区的污染现状、分布规律和生物富集等方面的最新研究进展。

本书可为环境科学、环境分析与监测、环境管理及相关领域的科研和技术人员提供参考,也可作为相关学科高年级本科生及研究生的学习参考书。

图书在版编目(CIP)数据

极地与高山地区持久性有机污染物的赋存与环境行为 / 李英明等著. —北京: 科学出版社, 2018.12

(持久性有机污染物(POPs)研究系列专著)

“十三五”国家重点出版物出版规划项目 国家出版基金项目

ISBN 978-7-03-060075-2

I. ①极… II. ①李… III. ①极地—持久性—有机污染物—污染物分析 ②青藏高原—持久性—有机污染物—污染物分析 IV. ①X132

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第290942号

责任编辑: 朱 丽 宁 倩 / 责任校对: 韩 杨

责任印制: 肖 兴 / 封面设计: 黄华斌

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京通州皇家印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018年12月第 一 版 开本: 720 × 1000 1/16

2018年12月第一次印刷 印张: 18 插页: 2

字数: 360 000

定价: 138.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

《持久性有机污染物（POPs）研究系列专著》

丛书编委会

主 编 江桂斌

编 委（按姓氏汉语拼音排序）

蔡亚岐 陈景文 李英明 刘维屏

刘咸德 麦碧嫻 全 燮 阮 挺

王亚韡 吴永宁 尹大强 余 刚

张爱茜 张 干 张庆华 郑明辉

周炳升 周群芳 朱利中

丛 书 序

持久性有机污染物 (persistent organic pollutants, POPs) 是指在环境中难降解 (滞留时间长)、高脂溶性 (水溶性很低), 可以在食物链中累积放大, 能够通过蒸发-冷凝、大气和水等的输送而影响到区域和全球环境的一类半挥发性且毒性极大的污染物。POPs 所引起的污染问题是影响全球与人类健康的重大环境问题, 其科学研究的难度与深度, 以及污染的严重性、复杂性和长期性远远超过常规污染物。POPs 的分析方法、环境行为、生态风险、毒理与健康效应、控制与削减技术的研究是最近 20 年来环境科学领域持续关注的一个最重要的热点问题。

近代工业污染催生了环境科学的发展。1962 年, *Silent Spring* 的出版, 引起学术界对滴滴涕 (DDT) 等造成的野生生物发育损伤的高度关注, POPs 研究随之成为全球关注的热点领域。1996 年, *Our Stolen Future* 的出版, 再次引发国际学术界对 POPs 类环境内分泌干扰物的环境健康影响的关注, 开启了环境保护研究的新历程。事实上, 国际上环境保护经历了从常规大气污染物 (如 SO_2 、粉尘等)、水体常规污染物 [如化学需氧量 (COD)、生化需氧量 (BOD) 等] 治理和重金属污染控制发展到痕量持久性有机污染物削减的循序渐进过程。针对全球范围内 POPs 污染日趋严重的现实, 世界许多国家和国际环境保护组织启动了若干重大研究计划, 涉及 POPs 的分析方法、生态毒理、健康危害、环境风险理论和先进控制技术。研究重点包括: ① POPs 污染源解析、长距离迁移传输机制及模型研究; ② POPs 的毒性机制及健康效应评价; ③ POPs 的迁移、转化机理以及多介质复合污染机制研究; ④ POPs 的污染削减技术以及高风险区域修复技术; ⑤ 新型污染物的检测方法、环境行为及毒性机制研究。

20 世纪国际上发生过一系列由于 POPs 污染而引发的环境灾难事件 (如意大利 Seveso 化学污染事件、美国拉布卡纳尔镇污染事件、日本和中国台湾米糠油事件等), 这些事件给我们敲响了 POPs 影响环境安全与健康的警钟。1999 年, 比利时鸡饲料二噁英类污染波及全球, 造成 14 亿欧元的直接损失, 导致该国政局不稳。

国际范围内针对 POPs 的研究, 主要包括经典 POPs (如二噁英、多氯联苯、含氯杀虫剂等) 的分析方法、环境行为及风险评估等研究。如美国 1991~2001 年的二噁英类化合物风险再评估项目, 欧盟、美国环境保护署 (EPA) 和日本环境厅先后启动了环境内分泌干扰物筛选计划。20 世纪 90 年代提出的蒸馏理论和蚂蚱跳效应较好地解释了工业发达地区 POPs 通过水、土壤和大气之间的界面交换而长距离迁移到南北极等极地地区的现象, 而之后提出的山区冷捕集效应则更

加系统地解释了高山地区随着海拔的增加其环境介质中 POPs 浓度不断增加的迁移机理,从而为 POPs 的全球传输提供了重要的依据和科学支持。

2001 年 5 月,全球 100 多个国家和地区的政府组织共同签署了《关于持久性有机污染物的斯德哥尔摩公约》(简称《斯德哥尔摩公约》)。目前已有包括我国在内的 179 个国家和地区加入了该公约。从缔约方的数量上不仅能看出公约的国际影响力,也能看出世界各国对 POPs 污染问题的重视程度,同时也标志着在世界范围内对 POPs 污染控制的行动从被动应对到主动防御的转变。

进入 21 世纪之后,随着《斯德哥尔摩公约》进一步致力于关注和讨论其他同样具 POPs 性质和环境生物行为的有机污染物的管理和控制工作,除了经典 POPs,对于一些新型 POPs 的分析方法、环境行为及界面迁移、生物富集及放大,生态风险及环境健康也越来越成为环境科学研究的热点。这些新型 POPs 的共有特点包括:目前为正在大量生产使用的化合物、环境存量较高、生态风险和健康风险的数据积累尚不能满足风险管理等。其中两类典型的化合物是以多溴二苯醚为代表的溴系阻燃剂和以全氟辛基磺酸盐(PFOS)为代表的全氟化合物,对于它们的研究论文在过去 15 年呈现指数增长趋势。如有关 PFOS 的研究在 Web of Science 上搜索结果为从 2000 年的 8 篇增加到 2013 年的 323 篇。随着这些新增 POPs 的生产和使用逐步被禁止或限制使用,其替代品的风险评估、管理和控制也越来越受到环境科学研究的关注。而对于传统的生态风险标准的进一步扩展,使得大量的商业有机化学品的安全评估体系需要重新调整。如传统的以鱼类为生物指示物的研究认为污染物在生物体中的富集能力主要受控于化合物的脂-水分配,而最近的研究证明某些低正辛醇-水分配系数、高正辛醇-空气分配系数的污染物(如 HCHs)在一些食物链特别是在陆生生物链中也表现出很高的生物放大效应,这就向如何修订污染物的生态风险标准提出了新的挑战。

作为一个开放式的公约,任何一个缔约方都可以向公约秘书处提交意在将某一化合物纳入公约受控的草案。相应的是,2013 年 5 月在瑞士日内瓦举行的缔约方大会第六次会议之后,已在原先的包括二噁英等在内的 12 类经典 POPs 基础上,新增 13 种包括多溴二苯醚、全氟辛基磺酸盐等新型 POPs 成为公约受控名单。目前正在进行公约审查的候选物质包括短链氯化石蜡(SCCPs)、多氯萘(PCNs)、六氯丁二烯(HCBD)及五氯苯酚(PCP)等化合物,而这些新型有机污染物在我国均有一定规模的生产和使用。

中国作为经济快速增长的发展中国家,目前正面临比工业发达国家更加复杂的环境问题。在前两类污染物尚未完全得到有效控制的同时,POPs 污染控制已成为我国迫切需要解决的重大环境问题。作为化工产品大国,我国新型 POPs 所引起的环境污染和健康风险问题比其他国家更为严重,也可能存在国外不受关注但在我国环境介质中广泛存在的新型污染物。对于这部分化合物所开展的研究工

作不但能够为相应的化学品管理提供科学依据,同时也可为我国履行《斯德哥尔摩公约》提供重要的数据支持。另外,随着经济快速发展所产生的污染所致健康问题在我国的集中显现,新型 POPs 污染的毒性与健康危害机制已成为近年来相关研究的热点问题。

随着 2004 年 5 月《斯德哥尔摩公约》正式生效,我国在国家层面上启动了对 POPs 污染源的研究,加强了 POPs 研究的监测能力建设,建立了几十个高水平专业实验室。科研机构、环境监测部门和卫生部门都先后开展了环境和食品中 POPs 的监测和控制措施研究。特别是最近几年,在新型 POPs 的分析方法学、环境行为、生态毒理与环境风险,以及新污染物发现等方面进行了卓有成效的研究,并获得了显著的研究成果。如在电子垃圾拆解地,积累了大量有关多溴二苯醚(PBDEs)、二噁英、溴代二噁英等 POPs 的环境转化、生物富集/放大、生态风险、人体赋存、母婴传递乃至人体健康影响等重要数据,为相应的管理部门提供了重要的科学支撑。我国科学家开辟了发现新 POPs 的研究方向,并连续在环境中发现了系列新型有机污染物。这些新 POPs 的发现标志着我国 POPs 研究已由全面跟踪国外提出的目标物,向发现并主动引领新 POPs 研究方向发展。在机理研究方面,率先在珠穆朗玛峰、南极和北极地区“三极”建立了长期采样观测系统,开展了 POPs 长距离迁移机制的深入研究。通过大量实验数据证明了 POPs 的冷捕集效应,在新的源汇关系方面也有所发现,为优化 POPs 远距离迁移模型及认识 POPs 的环境归宿做出了贡献。在污染物控制方面,系统地摸清了二噁英类污染物的排放源,获得了我国二噁英类排放因子,相关成果被联合国环境规划署《全球二噁英类污染源识别与定量技术导则》引用,以六种语言形式全球发布,为全球范围内评估二噁英类污染来源提供了重要技术参数。以上有关 POPs 的相关研究是我国解决国家环境安全问题的重大需求、履行国际公约的重要基础和我国在国际贸易中取得有利地位的重要保证。

我国 POPs 研究凝聚了一代代科学家的努力。1982 年,中国科学院生态环境研究中心发表了我国二噁英研究的第一篇中文论文。1995 年,中国科学院武汉水生生物研究所建成了我国第一个装备高分辨色谱/质谱仪的标准二噁英分析实验室。进入 21 世纪,我国 POPs 研究得到快速发展。在能力建设方面,目前已经建成数十个符合国际标准的高水平二噁英实验室。中国科学院生态环境研究中心的二噁英实验室被联合国环境规划署命名为“Pilot Laboratory”。

2001 年,我国环境内分泌干扰物研究的第一个“863”项目“环境内分泌干扰物的筛选与监控技术”正式立项启动。随后经过 10 年 4 期“863”项目的连续资助,形成了活体与离体筛选技术相结合,体外和体内测试结果相互印证的分析内分泌干扰物研究方法体系,建立了有中国特色的环境内分泌污染物的筛选与研究规范。

2003 年,我国 POPs 领域第一个“973”项目“持久性有机污染物的环境安全、演变趋势与控制原理”启动实施。该项目集中了我国 POPs 领域研究的优势队伍,围绕 POPs 在多介质环境的界面过程动力学、复合生态毒理效应和焚烧等处理过程中 POPs 的形成与削减原理三个关键科学问题,从复杂介质中超痕量 POPs 的检测和表征方法学;我国典型区域 POPs 污染特征、演变历史及趋势;典型 POPs 的排放模式和运移规律;典型 POPs 的界面过程、多介质环境行为;POPs 污染物的复合生态毒理效应;POPs 的削减与控制原理以及 POPs 生态风险评价模式和预警方法体系七个方面开展了富有成效的研究。该项目以我国 POPs 污染的演变趋势为主,基本摸清了我国 POPs 特别是二噁英排放的行业分布与污染现状,为我国履行《斯德哥尔摩公约》做出了突出贡献。2009 年,POPs 项目得到延续资助,研究内容发展到以 POPs 的界面过程和毒性健康效应的微观机理为主要目标。2014 年,项目再次得到延续,研究内容立足前沿,与时俱进,发展到了新型持久性有机污染物。这 3 期“973”项目的立项和圆满完成,大大推动了我国 POPs 研究为国家目标服务的能力,培养了大批优秀人才,提高了学科的凝聚力,扩大了我国 POPs 研究的国际影响力。

2008 年开始的“十一五”国家科技支撑计划重点项目“持久性有机污染物控制与削减的关键技术与对策”,针对我国持久性有机物污染物控制关键技术的科学问题,以识别我国 POPs 环境污染现状的背景水平及制订优先控制 POPs 国家名录,我国人群 POPs 暴露水平及环境与健康效应评价技术,POPs 污染控制新技术与新材料开发,焚烧、冶金、造纸过程二噁英类减排技术,POPs 污染场地修复,废弃 POPs 的无害化处理,适合中国国情的 POPs 控制战略研究为主要内容,在废弃物焚烧和冶金过程烟气减排二噁英类、微生物或植物修复 POPs 污染场地、废弃 POPs 降解的科研与实践方面,立足自主创新和集成创新。项目从整体上提升了我国 POPs 控制的技术水平。

目前我国 POPs 研究在国际 SCI 收录期刊发表论文的数量、质量和引用率均进入国际第一方阵前列,部分工作在开辟新的研究方向、引领国际研究方面发挥了重要作用。2002 年以来,我国 POPs 相关领域的研究多次获得国家自然科学奖励。2013 年,中国科学院生态环境研究中心 POPs 研究团队荣获“中国科学院杰出科技成就奖”。

我国 POPs 研究开展了积极的全方位的国际合作,一批中青年科学家开始在国际学术界崭露头角。2009 年 8 月,第 29 届国际二噁英大会首次在中国举行,来自世界上 44 个国家和地区的近 1100 名代表参加了大会。国际二噁英大会自 1980 年召开以来,至今已连续举办了 38 届,是国际上有关持久性有机污染物(POPs)研究领域影响最大的学术会议,会议所交流的论文反映了当时国际 POPs 相关领域的最新进展,也体现了国际社会在控制 POPs 方面的技术与政策走向。第 29 届

国际二噁英大会在我国的成功召开,对提高我国持久性有机污染物研究水平、加速国际化进程、推进国际合作和培养优秀人才等方面起到了积极作用。近年来,我国科学家多次应邀在国际二噁英大会上作大会报告和大会总结报告,一些高水平研究工作产生了重要的学术影响。与此同时,我国科学家自己发起的 POPs 研究的国内外学术会议也产生了重要影响。2004 年开始的“International Symposium on Persistent Toxic Substances”系列国际会议至今已连续举行 14 届,近几届分别在美国、加拿大、中国香港、德国、日本等国家和地区召开,产生了重要学术影响。每年 5 月 17~18 日定期举行的“持久性有机污染物论坛”已经连续 12 届,在促进我国 POPs 领域学术交流、促进官产学研结合方面做出了重要贡献。

本丛书《持久性有机污染物(POPs)研究系列专著》的编撰,集聚了我国 POPs 研究优秀科学家群体的智慧,系统总结了 20 多年来我国 POPs 研究的历史进程,从理论到实践全面记载了我国 POPs 研究的发展足迹。根据研究方向的不同,本丛书将系统地对 POPs 的分析方法、演变趋势、转化规律、生物累积/放大、毒性效应、健康风险、控制技术以及典型区域 POPs 研究等工作加以总结和理论概括,可供广大科技人员、大专院校的研究生和环境管理人员学习参考,也期待它能在 POPs 环保宣教、科学普及、推动相关学科发展方面发挥积极作用。

我国的 POPs 研究方兴未艾,人才辈出,影响国际,自树其帜。然而,“行百里者半九十”,未来事业任重道远,对于科学问题的认识总是在研究的不断深入和不断学习中提高。学术的发展是永无止境的,人们对 POPs 造成的环境问题科学规律的认识也是不断发展和提高的。受作者学术和认知水平限制,本丛书可能存在不同形式的缺憾、疏漏甚至学术观点的偏颇,敬请读者批评指正。本丛书若能对读者了解并把握 POPs 研究的热点和前沿领域起到抛砖引玉作用,激发广大读者的研究兴趣,或讨论或争论其学术精髓,都是作者深感欣慰和至为期盼之处。



2015 年 1 月于北京

前 言

持久性有机物污染物(persistent organic pollutants, POPs)所引起的环境污染与健康问题是近年来环境科学的研究热点和重点。这类污染物具有致畸、致癌、致突变的“三致”效应,同时在环境中具有环境持久性以及生物蓄积性等特点。由于 POPs 具有半挥发性质,在环境大气、海洋洋流、生物体等的传输作用下, POPs 能够远距离迁移,成为全球性的环境污染物。因此 POPs 污染的严重性和复杂性远超过常规污染物。

人们对环境中 POPs 危害性的关注可以追溯到 20 世纪 60 年代出版的《寂静的春天》一书。该书首次系统阐述了 DDT 等有机氯农药的大量使用对环境和人体健康造成的严重危害。自此以后, POPs 的生产和使用产生的环境污染问题越来越受到人们的重视。2001 年 5 月,包括中国在内的 100 多个国家和地区的政府组织共同签署了《关于持久性有机污染物的斯德哥尔摩公约》。该公约是人类社会旨在消除 POPs 危害最重要的一项国际环境公约。

地球的南极、北极以及世界“第三极”青藏高原地区远离人类聚集区及工业污染源,是目前世界上最为洁净的地区。但是极地之远、珠峰之高并不能阻挡 POPs 的迁移传输,在大气长距离传输以及“全球蒸馏效应”等的作用下, POPs 最终能够到达极地与高山地区,对当地较脆弱的生态系统产生潜在危害。由于极地与高山地区的特殊性,针对极地与高山地区 POPs 的研究一直是环境科学的研究热点。本书较系统地介绍了有机氯农药(OCPs)、多氯联苯(PCBs)等“传统” POPs 以及多溴二苯醚(PBDEs)、得克隆(DPs)、新型有机阻燃剂、全氟化合物(PFCs)、短链氯化石蜡(SCCPs)等新型 POPs 在南北极及青藏高原地区的污染现状、分布规律和生物富集等方面的研究进展。相关研究内容可以为环境科学、环境分析与监测、环境管理和其他领域有关科研及管理人员提供参考。

本书共分为 7 章。第 1 章概述了典型 POPs 的物理化学性质及工业生产使用情况,重点介绍了极地与高山地区 POPs 的主要来源、传输途径及我国南北极科学考察的历史和极地 POPs 研究的重要意义。第 2 章阐述了雪龙船南极和北极航线 OCPs 的调查结果,比较了 OCPs 的年际变化,详述了南极中山站、长城站以及北极黄河站站基附近地区不同环境介质中 OCPs 的残留状况、组成特征及变化趋势。第 3 章阐述了南北极多环境介质中 PCBs 的赋存、分布特征及在食物链中的生物富集、生物放大效应。第 4 章概述了典型有机阻燃剂包括多溴二苯醚、六

溴环十二烷、得克隆、新型溴代阻燃剂、有机磷阻燃剂等新型 POPs 的物理化学性质及工业生产使用情况。集中阐述了新型卤代阻燃剂、有机磷阻燃剂等新型 POPs 在南北极地区大气、土壤、植被以及动物体内的污染特征及分布规律。第 5 章阐述了羟基和甲氧基多溴二苯醚的分析方法, 其在环境中的来源、毒性、赋存水平及在极地环境介质中的污染特征与分布规律。第 6 章阐述了全氟化合物和短链氯化石蜡在南北极多环境介质中的赋存、污染特征、生物富集效应及变化趋势, 并对污染来源及传输途径进行了解析。第 7 章阐述了近年来青藏高原典型环境介质中 POPs 的浓度水平和空间分布特征, 介绍了湖芯沉积物和冰芯在污染物时间变化趋势方面的应用, 从大气-地表分配过程、高山冷凝效应和森林过滤效应等方面重点归纳了青藏高原 POPs 的大气传输过程和环境归趋行为。

本书第 1 章由李英明、张蓬、王璞、傅建捷撰写, 第 2 章由张蓬撰写, 第 3 章由李英明、张庆华撰写, 第 4 章由王璞撰写, 第 5 章由孙慧中撰写, 第 6 章由傅建捷撰写, 第 7 章由杨瑞强撰写。全书由李英明完成统稿。科学出版社朱丽等编辑对本书进行了耐心细致的编校工作, 在此表示衷心的感谢。本书撰写过程中参考了大量的国内外相关文献, 在此对文献作者及出版机构一并致谢。

本书涉及的若干研究内容是在国家海洋局极地科学考察项目、科技部“973”计划项目(2015CB453101)和国家自然科学基金委员会众多基金项目的资助下完成的。后续的写作工作还得到了国家自然科学基金面上项目(21477155)和国家出版基金项目(2016R-045)的资助。在此表示感谢!

由于作者水平有限, 书中的缺点和不足之处在所难免, 敬请读者批评指正。

作 者

2018 年 3 月

目 录

丛书序

前言

第 1 章	极地与高山地区持久性有机污染物研究背景	1
1.1	典型 POPs 的物理化学性质及使用状况	3
1.1.1	六六六	3
1.1.2	滴滴涕	3
1.1.3	艾氏剂	4
1.1.4	狄氏剂	5
1.1.5	异狄氏剂	5
1.1.6	氯丹	5
1.1.7	七氯	6
1.1.8	硫丹	6
1.1.9	多氯联苯	8
1.1.10	多溴二苯醚	9
1.1.11	全氟及多氯类化合物	10
1.1.12	短链氯化石蜡	13
1.2	极地与高山地区环境特征	16
1.3	极地与高山 POPs 来源途径	18
1.3.1	大气传输与沉降	19
1.3.2	洋流输入和极地河流输入	20
1.3.3	海冰融化	21
1.3.4	生物迁移	22
1.3.5	长距离传输模型与分布	23
1.4	我国极地科学考察的简要历史回顾	26
1.5	极地 POPs 研究的重要意义	27
	参考文献	27
第 2 章	极地有机氯农药的赋存及环境行为	33
2.1	环境介质中 OCPs 的分析技术	33
2.1.1	萃取	34
2.1.2	样品净化	39
2.1.3	仪器分析方法	41

2.2 南极地区有机氯农药的赋存与环境行为	42
2.2.1 南极自然地理概况	42
2.2.2 南大洋航线大气 OCPs	44
2.2.3 菲尔德斯半岛长城站附近区域环境介质中 OCPs	47
2.3 北极地区环境中 OCPs 的残留状况	76
2.3.1 “雪龙船”航线环境介质中 OCPs	76
2.3.2 新奥尔松地区的 OCPs 的赋存状态	91
2.4 小结	94
参考文献	95
第3章 极地多氯联苯的赋存与环境行为	103
3.1 样品采集及分析技术	104
3.1.1 样品采集	105
3.1.2 样品萃取	105
3.1.3 样品净化	106
3.1.4 仪器检测	107
3.2 极地大气 PCBs 的浓度水平与污染特征	107
3.2.1 南极大气 PCBs	108
3.2.2 北极大气 PCBs	111
3.3 极地土壤及植物 PCBs 的浓度水平与污染特征	112
3.4 北极海洋环境中 PCBs 的赋存水平	113
3.4.1 海水	113
3.4.2 沉积物	115
3.4.3 海洋生物	115
3.5 南极海洋环境中 PCBs 的赋存水平	118
3.5.1 海水	118
3.5.2 沉积物	119
3.5.3 海洋生物	119
3.6 PCBs 在极地海洋食物链(网)的富集效应	122
3.7 小结	124
参考文献	125
第4章 极地有机阻燃剂的赋存与环境行为	131
4.1 概述	131
4.1.1 多溴二苯醚	132
4.1.2 六溴环十二烷	132
4.1.3 得克隆	134
4.1.4 新型溴代阻燃剂	136

4.1.5 有机磷阻燃剂	137
4.2 环境样品中有机阻燃剂的分析方法	139
4.2.1 多溴二苯醚	139
4.2.2 六溴环十二烷	142
4.2.3 得克隆	142
4.2.4 新型溴代阻燃剂	143
4.2.5 有机磷阻燃剂	144
4.3 南极地区有机阻燃剂的赋存与环境行为	146
4.3.1 南极大气和水体	146
4.3.2 南极土壤及植被	149
4.3.3 南极动物	152
4.4 北极地区有机阻燃剂的赋存与环境行为	155
4.4.1 北极大气	155
4.4.2 北极水体	158
4.4.3 北极土壤及植被	160
4.4.4 北极动物	162
4.5 小结	165
参考文献	165
第5章 极地羟基和甲氧基多溴二苯醚的赋存与环境行为	174
5.1 概述	174
5.1.1 来源研究	174
5.1.2 毒性研究	177
5.1.3 浓度水平	177
5.2 分析方法	181
5.2.1 前处理方法概述	181
5.2.2 仪器分析方法概述	182
5.2.3 极地样品分析方法	185
5.3 极地环境中的赋存和环境行为	188
5.3.1 OH-PBDEs 的赋存水平	188
5.3.2 MeO-PBDEs 的赋存水平	191
5.3.3 生物富集特征	193
5.4 小结	194
参考文献	194
第6章 极地全氟化合物及短链氯化石蜡的赋存与环境行为	200
6.1 PFASs 背景介绍	201
6.2 PFASs 分析方法	202

6.2.1	离子型全氟化合物(ionic PFASs)前处理方法	202
6.2.2	中性全氟化合物(neutral PFASs)前处理方法	203
6.2.3	仪器分析方法	203
6.3	南北极环境中 PFASs 的赋存	204
6.3.1	南极	204
6.3.2	北极	206
6.4	极地 PFASs 源解析	209
6.5	PFASs 在极地的环境行为及变化趋势	212
6.6	极地环境中 SCCPs 的赋存及环境行为	215
	参考文献	218
第 7 章	青藏高原 POPs 的环境行为	227
7.1	高山/高海拔区域 POPs 研究概况	227
7.1.1	概述	227
7.1.2	青藏高原 POPs 研究概况	228
7.2	青藏高原典型环境介质 POPs 浓度与分布	229
7.2.1	大气	229
7.2.2	土壤	231
7.2.3	植被	234
7.2.4	水生生物	239
7.2.5	水体/冰雪	242
7.2.6	沉积物	243
7.3	青藏高原 POPs 沉降行为	248
7.3.1	大气-地表分配	248
7.3.2	高山冷凝效应	249
7.3.3	森林过滤效应	252
	参考文献	256
附录	缩略语(英汉对照)	267
索引		271
彩图		

第 1 章 极地与高山地区持久性有机污染物研究背景

本章导读

- 持久性有机污染物的环境特征，以及不同时期《斯德哥尔摩公约》对于持久性有机污染物名单的规定与更新
- 有机氯农药、多氯联苯、多溴二苯醚、全氟化合物、短链氯化石蜡等典型持久性有机污染物的物理化学性质及工业生产使用情况
- 南北极及世界“第三极”青藏高原地区的环境特征，我国极地科学考察的历史及极地持久性有机污染物研究的重要意义
- 持久性有机污染物到达极地与高山的主要来源及传输途径

持久性有机污染物(persistent organic pollutants, POPs)，是指一类具有高毒性、在环境中难降解、具有长距离传输特性和生物蓄积性的化合物(UNEP, 2017)。由于 POPs 具有半挥发性，在环境大气、洋流、生物体等的传输作用下，POPs 能够远距离迁移，成为全球性的污染物。目前在遥远的南极、北极和世界“第三极”青藏高原地区的多种环境介质中都有 POPs 的检出。POPs 对生态环境和人体健康都会造成严重危害，近些年来成为环境科学的研究热点。

对环境中 POPs 危害性的关注可以追溯到 20 世纪 60 年代出版的《寂静的春天》(*Silent Spring*)一书。该书首次系统阐述了 DDT 等有机氯农药的大量使用对环境和人体健康造成的严重危害。自此以后，POPs 的生产和使用产生的环境危害问题越来越受到人们的重视。2001 年 5 月，包括中国在内的 100 多个国家和地区的政府组织共同签署了《关于持久性有机污染物的斯德哥尔摩公约》(简称《斯德哥尔摩公约》)。该公约是国际政府间组织鉴于 POPs 可能对自然环境和人类社会产生的严重影响，以削减和限制特定 POPs 的生产和使用为目的的一项国际环境公约。

《斯德哥尔摩公约》中规定了首批 12 种 POPs 名单，这些 POPs 又被称为“肮脏的一打”(dirty dozen)，具体包括 8 种有机氯杀虫剂(艾氏剂、狄氏剂、异狄氏剂、滴滴涕、氯丹、灭蚁灵、毒杀芬、七氯)、2 种工业化学品(六氯苯、多氯联苯)和人类生产生活中无意排放的多氯代二苯并二噁英和多氯代二苯并呋喃。2009 年 5 月，在瑞士日内瓦举行的《斯德哥尔摩公约》第四次缔约方会议将 α -六氯环己烷、 β -六

氯环己烷、十氯酮(开篷)、六溴联苯、林丹、五氯苯、全氟辛基磺酸及其盐类和全氟辛基磺酰氟、商用五溴二苯醚和商用八溴二苯醚共 9 种化学物质新增列入《斯德哥尔摩公约》附件 A、B 或 C 的受控范围。2011 年 5 月, 硫丹被新增列入《斯德哥尔摩公约》附件 A。2013 年, 六溴环十二烷被新增列入《斯德哥尔摩公约》附件 A。2015 年 5 月, 六氯丁二烯、五氯酚及其盐/酯、多氯萘被新增列入《斯德哥尔摩公约》附件 A 和 C。2017 年 5 月, 短链氯化石蜡、十溴二苯醚被新增列入《斯德哥尔摩公约》附件 A(表 1-1)。

表 1-1 列入《斯德哥尔摩公约》的持久性有机污染物名单

列入公约时间	中文名称	英文名称
2001 年	滴滴涕	DDTs
	艾氏剂	aldrin
	狄氏剂	dieldrin
	异狄氏剂	endrin
	氯丹	chlordane
	灭蚁灵	mirex
	毒杀芬	toxaphene
	七氯	heptachlor
	六氯苯	hexachlorobenzene (HCB)
	多氯联苯	polychlorinated biphenyls (PCBs)
2009 年	多氯代二苯并二噁英和多氯代二苯并呋喃	polychlorinated dibenzo- <i>p</i> -dioxins (PCDDs) and dibenzofurans (PCDFs)
	α -六氯环己烷	α -hexachlorocyclohexane (α -HCH)
	β -六氯环己烷	β -hexachlorocyclohexane (β -HCH)
	十氯酮(开篷)	chlordecone
	六溴联苯	hexabromobiphenyl
	林丹	lindane
	五氯苯	pentachlorobenzene
	全氟辛基磺酸及其盐类和全氟辛基磺酰氟	perfluorooctane sulfonic acid, its salts and perfluorooctane sulfonyl fluoride
	商用五溴二苯醚	commercial pentabromodiphenyl ether
	商用八溴二苯醚	commercial octabromodiphenyl ether
2011 年	硫丹	endosulfan
2013 年	六溴环十二烷	hexabromocyclododecane (HBCD)
2015 年	六氯丁二烯	hexachlorobutadiene
	五氯酚及其盐/酯	pentachlorophenol, its salts and esters
	多氯萘	polychlorinated naphthalenes (PCNs)
2017 年	十溴二苯醚	decabromodiphenyl ether
	短链氯化石蜡	short-chain chlorinated paraffins (SCCPs)