



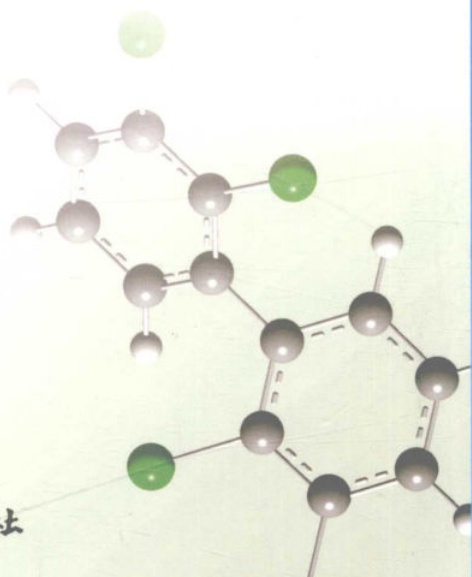
“十三五”国家重点出版物出版规划项目

持久性有机污染物  
POPs 研究系列专著

# 持久性有机污染物的 地球化学

张 干 李 军 田崇国 等/著

 科学出版社



(X-1623.01)

责任编辑:朱丽 杨新改

封面设计:黄华斌

---

《持久性有机污染物(POPs)研究系列专著》系统总结了我国近20年来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,本系列丛书将系统地对POPs的分析方法、演变趋势、转化规律、生物富集/放大、毒性效应、健康风险、控制技术以及典型地区的POPs研究等主题进行详尽总结论述。

---



科学出版社互联网入口

科学出版社化学分社

电话:(010)64033722

E-mail:zhuli@mail.sciencep.com

销售分类建议:环境化学

www.sciencep.com

ISBN 978-7-03-062494-9



9 787030 624949 >

定价:180.00元



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

# 持久性有机污染物的 地球化学

张 干 李 军 田崇国 等/著

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

持久性有机污染物(POPs)的污染问题是人类社会共同面对的全球性环境问题。POPs 成因多样、来源广泛,可在地表各圈层间分配交换,并通过大气、水流、迁徙生物等移动介质发生长距离迁移,已触及地表系统的每个角落。本书由总论、研究实例两部分组成,尝试以地球化学的视角,观察和分析典型 POPs 的环境地球化学性质、成因来源、赋存机理、时空分布、大气迁移、区域源-汇过程、大气-地表交换及其在河口海岸带的归趋,力图呈现 POPs 在地表各圈层及其间的活跃动态。本书还对人类活动和气候变化情景下 POPs 生物地球化学效应进行分析,简要介绍 POPs 地球化学研究的方法手段。

本书有助于加深读者从区域与全球尺度对 POPs 环境命运的理解,并可供从事 POPs 区域环境过程与污染控制研究的读者参考。

审图号:GS(2019)4066号

图书在版编目(CIP)数据

---

持久性有机污染物的地球化学 / 张干等著. —北京:科学出版社, 2019.10  
(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 978-7-03-062494-9

I. ①持… II. ①张… III. ①持久性-有机污染物-地球化学-研究  
IV. ①X5

---

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第213799号

责任编辑:朱丽 杨新政 / 责任校对:杜子昂

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>

北京九天鸿程印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2019年10月第一版 开本:720×1000 1/16

2019年10月第一次印刷 印张:26

字数:520 000

定价:180.00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 麦碧娴 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

## 从 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  $\text{SO}_2$ 、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 的相关研究是解决我国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 生态风险评估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 收录期刊发表论文章数、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,自树一帜。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。



2017 年 1 月于北京

# 前 言

持久性有机污染物 (POPs) 污染问题是人类社会面对的长期环境问题, 危害生态系统和人体健康。具有 POPs 特性的有机化学物质数量众多, 被列入《关于持久性有机污染物的斯德哥尔摩公约》的 POPs 名单的物质在持续增多; 非故意生产排放的 POPs 来源复杂, 控制难度大、成本高; 固体废弃物 (如电子垃圾) 的粗放式处理可向环境中高强度排放 POPs; POPs 在环境中、生物体内可发生复杂的化学转化和毒性变化, 能形成更为复杂的二次污染物; 因全球变化、人类活动扰动, 环境中的 POPs 可能发生二次排放。POPs 在地表系统各圈层介质中广泛分布, 即使在偏远极地、海斗深渊, 亦已有 POPs 的存在。POPs 可借食物链发生富集放大, 通过多种暴露途径进入生命机体, 危害人体健康和自然生态系统。由于 POPs 在环境中难以降解并具有生物累积性, 其对生命健康的危害, 甚至可体现在百年尺度上。

POPs 一经排放进入地表环境, 即开始其地球化学旅程。典型 POPs 的持久性、挥发性、亲脂性, 使其可在地表系统水、土、气、生各圈层间发生分配交换, 随大气、水流、迁徙生物等移动介质发生长距离迁移, 在森林、极地、湖泊、海洋、河口等生态系统中展现各具特色的生物地球化学过程。见微知著, 一些 POPs 甚或可作为大气环流、洋流和人类活动对自然环境影响的示踪剂。

本书尝试以地球化学的视角, 观察、分析典型 POPs 在地表系统中的环境命运, 力图呈现 POPs 在地表各圈层、圈层间以及典型生态系统中的活跃动态, 以丰富环境地球化学学科的内容。全书共七章。第 1 章为总论, 简述 POPs 的概念、内涵和环境地球化学性质, 系统梳理 POPs 的成因和源排放、地表环境介质中的赋存与环境行为、大气-地表交换、全球和区域归趋等的环境地球化学过程, 并介绍 POPs 地球化学研究的若干方法和手段。其中, 还提出 POPs 的四种成因类型, 指出 POPs 的排放源区正从发达国家向低纬度带发展中国家发生转移, 提出我国陆表 POPs 的源-汇过程框架, 探讨人类活动、气候变化情景下 POPs 的生物地球化学效应。第 2 章是大气 POPs 观测实例, 介绍作者在亚洲和我国国家尺度上利用 POPs 大气被动采样技术进行观测的方法和结果。第 3 章是区域 POPs 环境归趋的数值模拟研究实例, 介绍运用逸度模型、大气传输模型对我国和亚洲区域尺度下典型 POPs 的源-汇过程及其驱动机制。第 4 章是关于森林生态系统中 POPs 的分布和归趋研究实例, 展示我国背景森林土壤中 POPs 的空间分布, 以同位素标记多氯联苯 (PCBs) 结合凋落物分解现场实验探查 PCBs 在海南尖峰岭热带森林

生态系统中的环境命运, 对比解剖森林过滤作用和冷凝富集作用对贡嘎山山地森林土壤中 POPs 富集的相对贡献, 考察海南岛不同年龄典型人工林和天然林对 POPs 富集能力的差异及其演化规律。第 5 章是典型 POPs 在热带玛珥湖、我国东部边缘海、赤道印度洋的水-气界面交换和水柱过程研究实例。第 6 章以广东东江流域为例, 介绍多氯萘 (PCNs)、氯化石蜡 (CPs) 在大气-土壤界面的交换和沉降机制。第 7 章则以滴滴涕 (DDT)、六六六 (HCH) 为例, 研究典型 POPs 在我国长江口和东海海岸带不同环境介质中的分布, 及其界面交换通量、沉积埋藏历史与通量等生物地球化学循环。

本书内容是作者团队集体多年研究的成果的总结, 并由相关研究人员分工执笔写作。其中, 第 1 章由张干、赵时真执笔, 第 2 章由李军、李琦路执笔, 第 3 章由田崇国、徐玥执笔, 第 4 章由郑芊、刘昕执笔, 第 5 章由李军、黄玉妹、林田执笔, 第 6 章由王琰执笔, 第 7 章由林田、赵祯执笔。唐建辉、钟广财、金彪、蒋昊余、王少锐参加了书稿的讨论工作, 对本书亦有贡献。衷心感谢北京大学陶澍院士、中国地质大学(武汉)祁士华教授、复旦大学郭志刚教授、中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所吴艳宏研究员和邴海健博士、哈尔滨工业大学李一凡教授、英国兰开斯特(Lancaster)大学 Kevin Jones 教授、英国自然历史博物馆高级科学家 Baruch Spiro 博士、挪威水研究所(NIVA)高级科学家 Luca Nizzetto 博士、香港理工大学李向东教授等参与有关合作研究。

感激江桂斌院士邀请撰写本书。

感谢科学出版社朱丽女士悉心策划《持久性有机污染物(POPs)研究系列专著》丛书。感谢朱丽、杨新改两位女士的耐心修改和精心编辑。书中凡所错漏, 但由作者负责。

著者

2019年9月

# 目 录

丛书序

前言

第 1 章 POPs 的环境地球化学	1
1.1 引言	1
1.2 POPs 的环境地球化学性质	3
1.2.1 POPs 的化学组成和结构特点	3
1.2.2 POPs 的环境持久性	4
1.2.3 POPs 的疏水性/亲脂性	5
1.2.4 POPs 的挥发性	5
1.2.5 POPs 的环境地球化学空间	6
1.3 POPs 的产生和排放	7
1.3.1 POPs 的产生与成因类型	7
1.3.2 POPs 的排放	8
1.3.3 POPs 的使用和排放清单	9
1.3.4 POPs 全球排放源区的转移	10
1.4 POPs 在地表环境介质中的赋存和界面行为	10
1.4.1 地质吸附剂与 POPs 的吸附-解吸	10
1.4.2 土壤中 POPs 的植物吸收	12
1.4.3 大气中 POPs 的气-粒分配	13
1.4.4 水体中 POPs 的赋存与界面交换	13
1.4.5 海洋环境中的 POPs	14
1.4.6 冰冻圈环境中的 POPs	16
1.5 POPs 的局地扩散和长距离迁移	17
1.5.1 POPs 的强源排放对局地环境的影响范围与卤效应	17
1.5.2 POPs 的长距离迁移	17
1.6 POPs 的大气-地表交换	20
1.6.1 POPs 的大气-水体交换与水柱作用过程	20
1.6.2 POPs 的大气-土壤交换	22

1.6.3	POPs 的大气-植物交换与森林过滤作用	23
1.7	POPs 的全球和区域归趋	24
1.7.1	POPs 的全球蒸馏-冷凝假设	24
1.7.2	POPs 大气迁移的差异清除假设	25
1.7.3	我国陆表 POPs 的源-汇过程和机制	25
1.8	人类活动、气候变化下的 POPs 生物地球化学效应	26
1.8.1	电子垃圾与固体废弃物的跨境转移	26
1.8.2	全球气候变化下环境中 POPs 的二次排放	27
1.8.3	土地利用变化对 POPs 的影响	28
1.8.4	生物质燃烧与 POPs 生成和二次排放	29
1.9	POPs 的区域暴露与健康风险	30
1.9.1	POPs 的区域暴露途径与风险	30
1.9.2	人体内暴露与体内转化机理	32
1.9.3	人体内暴露生物标志物	32
1.10	POPs 地球化学过程研究的若干方法和手段	33
1.10.1	区域 POPs 采样与观测技术	33
1.10.2	POPs 的地球化学示踪	37
1.10.3	POPs 区域环境过程的数值模拟	40
	参考文献	41
<b>第 2 章</b>	<b>亚洲大气 POPs 被动采样研究</b>	<b>59</b>
2.1	被动采样技术	59
2.1.1	大气被动采样的原理	60
2.1.2	被动采样的装置类型	61
2.2	亚洲大气 POPs 被动观测	65
2.2.1	我国 37 座城市和 3 个背景点大气 OCPs 研究	65
2.2.2	中日韩三国大气中 PBDEs、PCNs 和 SCCPs 的对比研究	73
2.2.3	南亚海岸带大气中 OCPs 和 PBDEs 研究	89
2.2.4	中日印三国大气中挥发性全氟化合物的对比研究	93
2.2.5	巴基斯坦和印度大气中 PCNs 和 SCCPs 的对比研究	104
2.3	被动采样技术展望	116
	参考文献	118

第 3 章 亚洲区域 $\alpha$ -HCH 的源汇关系和驱动机制 .....	127
3.1 引言 .....	127
3.2 模拟物质的选取 .....	128
3.3 源汇解析技术 .....	129
3.3.1 ChnGPERM——多介质 IV 级逸度模型 .....	130
3.3.2 CanMETOP——大气传输模型 .....	131
3.4 中国区域尺度 $\alpha$ -HCH 的源汇响应关系及其成因 .....	132
3.4.1 模拟与研究区域介绍 .....	132
3.4.2 $\alpha$ -HCH 使用情况分析 .....	133
3.4.3 $\alpha$ -HCH 进入研究区域的过程识别 .....	135
3.4.4 我国 $\alpha$ -HCH 土壤残留负荷历史时空变化特征 .....	139
3.4.5 $\alpha$ -HCH 土壤残留的源汇空间分布识别 .....	142
3.4.6 不同源区 $\alpha$ -HCH 使用对土壤残留的贡献 .....	144
3.4.7 大气传输影响 $\alpha$ -HCH 源汇关系的主要时段 .....	148
3.4.8 东亚夏季风影响 $\alpha$ -HCH 源汇响应关系的成因分析 .....	150
3.5 亚洲区域尺度 $\alpha$ -HCH 的源汇关系及其驱动机制 .....	159
3.5.1 $\alpha$ -HCH 的使用情况 .....	159
3.5.2 亚洲地区 $\alpha$ -HCH 土壤浓度和汇区分布 .....	159
3.5.3 季风控制下的汇区建立 .....	161
3.5.4 东亚和南亚季风的影响 .....	165
参考文献 .....	167
第 4 章 我国山地森林土壤中 POPs 的分布与归趋 .....	171
4.1 持久性有机污染物在森林土壤中的空间分布及控制因素研究 .....	171
4.1.1 样品的采集、分析与处理 .....	172
4.1.2 样品分析 .....	173
4.1.3 阻燃剂在全国森林土壤中的研究 .....	176
4.1.4 多氯联苯在全国森林土壤中的研究 .....	185
4.2 持久性有机污染物在热带雨林中环境行为的模拟研究 .....	195
4.2.1 采样前期工作 .....	197
4.2.2 多氯联苯在环境中运动过程的计算方法 .....	202
4.2.3 $^{13}\text{C}$ -PCBs 在热带雨林各环境介质中的含量 .....	205
4.2.4 降解量的估算 .....	210

4.2.5	环境因素对 $^{13}\text{C}$ -PCBs 在热带雨林地区运动过程的影响	212
4.2.6	总结	213
4.3	森林过滤效应和冷凝富集效应的对比研究	213
4.3.1	实验材料和方法	215
4.3.2	结果与讨论	221
4.3.3	结论	230
4.4	天然林和人工林富集 POPs 的比较分析	231
4.4.1	实验和方法	232
4.4.2	结果与讨论	234
4.4.3	结论	241
	参考文献	242
<b>第 5 章</b>	<b>POPs 的水-气界面交换与水柱过程</b>	<b>248</b>
5.1	引言	248
5.2	湖光岩玛珥湖 POPs 的水柱过程研究	250
5.2.1	样品采集与分析	251
5.2.2	湖光岩玛珥湖低层大气中 OCPs 的含量	255
5.2.3	湖光岩玛珥湖表层水体中 OCPs 的含量	257
5.2.4	OCPs 在湖光岩玛珥湖的水-气界面交换	259
5.2.5	湖光岩玛珥湖水体中 OCPs 的大气沉降	261
5.2.6	湖光岩玛珥湖水体中 OCPs 的沉积过程	263
5.2.7	降解作用对水体中 OCPs 迁移的影响	265
5.3	中国边缘海有机氯农药的水-气界面交换研究	266
5.3.1	样品采集和分析	267
5.3.2	中国边缘海大气中 OCPs 的含量和空间分布	270
5.3.3	中国边缘海水体中 OCPs 的含量和空间分布	272
5.3.4	中国边缘海 OCPs 的可能来源	273
5.3.5	中国边缘海 OCPs 的水-气界面交换过程	273
5.4	赤道印度洋 OCPs 和 PCBs 的水-气界面交换研究	274
5.4.1	样品采集与分析	275
5.4.2	大气中 OCPs 和 PCBs 的浓度和空间分布	279
5.4.3	水相中 OCPs 和 PCBs 的浓度和空间分布	284
5.4.4	OCPs 和 PCBs 的水-气界面交换过程	286

5.4.5	手性化合物的对映体特征	288
5.4.6	长距离迁移与水体挥发作用	290
5.5	水-气界面交换过程对开放海域大气中 PBDEs 浓度昼夜变化的影响	291
5.5.1	样品采集与分析	291
5.5.2	大气中 PBDEs 的含量与组成特征	294
5.5.3	大气中 PBDEs 的空间分布与可能来源	296
5.5.4	水-气界面交换对大气中 PBDEs 浓度昼夜变化的影响	297
	参考文献	298
<b>第 6 章</b>	<b>POPs 的土壤-大气界面沉降与交换过程</b>	<b>305</b>
6.1	POPs 土壤-大气迁移的研究意义与方法	305
6.1.1	POPs 土壤-大气迁移的研究意义	305
6.1.2	POPs 土壤-大气迁移的研究方法	307
6.2	研究区域与目标化合物简介	315
6.2.1	东江流域简介	315
6.2.2	目标化合物	316
6.2.3	样品采集简介	324
6.3	东江流域大气与土壤中的 PCNs 与 CPs	326
6.3.1	大气中的 PCNs 与 CPs	326
6.3.2	土壤中的 PCNs 和 CPs	333
6.4	东江流域 PCNs 和 CPs 的大气沉降与土-气交换	339
6.4.1	大气沉降中的 PCNs 和 CPs	339
6.4.2	低氯 PCNs 的土-气交换	349
6.5	POPs 土壤-大气交换的研究展望	355
	参考文献	356
<b>第 7 章</b>	<b>长江口及东海近岸 POPs 地球化学过程与归趋</b>	<b>365</b>
7.1	引言	365
7.2	大气和降雨中 DDT 和 HCH 污染特征	366
7.2.1	采样点概述	366
7.2.2	样品采集和分析	367
7.2.3	大气中 DDT 和 HCH 的浓度水平和季节变化	368
7.2.4	大气中 DDT 和 HCH 气-粒分配	372