



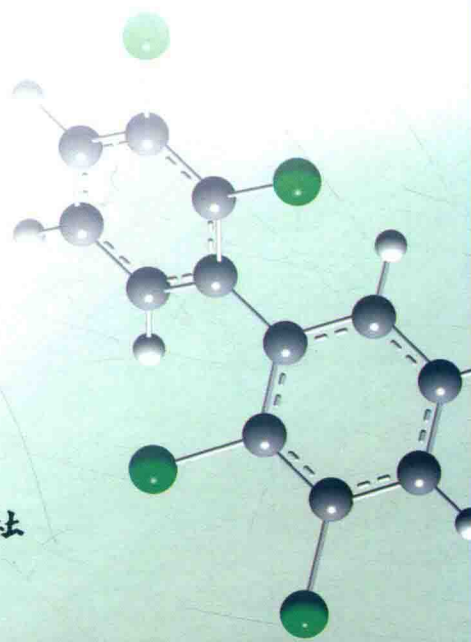
“十三五”国家重点出版物出版规划项目

持久性有机污染物

POPs 研究系列专著

手性污染物的环境化学 与毒理学

刘维屏 赵美蓉 牛丽丽 唐梦龄/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

手性污染物的环境化学 与毒理学

刘维屏 赵美蓉 牛丽丽 唐梦龄/著



科学出版社

北京

内 容 简 介

手性污染物的对映选择性是环境科学与环境毒理学的研究热点之一。本书在回顾手性科学研究历史的基础上,系统地介绍了近年来手性污染物在环境化学与毒理学方面的研究进展,并就这类化合物环境安全研究的发展趋势及前景进行了论述。本书主要内容为手性污染物对映体分离、分析、表征与稳定性的研究;手性污染物环境归趋、微生物降解、生物富集与放大、生物转化的对映体差异研究;手性污染物毒性效应的对映选择性及其分子机制研究。

本书可供从事环境科学、环境毒理与健康、农业环境化学、环境保护与管理等领域研究的科研和管理人员参考,亦可作为高等院校和科研院所相关专业研究生、高年级本科生的教学参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

手性污染物的环境化学与毒理学/刘维屏等著. —北京:科学出版社, 2018.11

(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 978-7-03-059213-2

I. ①手… II. ①刘… III. ①有机污染物-环境化学-研究 ②有机污染物-毒理学-研究 IV. ①X5

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第241942号

责任编辑:朱丽 杨新改/ 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11月第一版 开本:720×1000 1/16

2018年11月第一次印刷 印张:19 3/4

字数:373 000

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

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 月於北京

前 言

手性化合物是一类分子结构中含有手性中心（又称不对称中心）的有机化合物。其分子中的碳、磷或氮等原子与 4 个不同的基团（或原子、电子对）相连或分子结构由于立体因素而引起不对称。含有手性中心的有机污染物称为手性污染物（chiral contaminants）。目前，许多环境中检出的持久性有机污染物、农用化学品、药物与个人护理品等都含有手性结构，而这些手性污染物对生态安全和人类健康造成了潜在威胁。大部分手性污染物以外消旋体（racemate，对映体比为 1 : 1）的形式使用并排放到环境中。但手性污染物进入环境，经历的一系列环境过程（尤其是生物过程）存在着严格的对映匹配原则，使得手性污染物在环境行为、毒性效应等方面具有了对映选择性。关于手性科学的研究可以追溯到 200 年前，但手性污染物环境化学与毒理学的对映选择性研究历史却只有几十年。长期以来，在评估手性污染物环境安全时，往往把它们视为单一化合物进行看待，这可能导致高估或者低估这类化合物的生态风险和健康安全。而且，绝大部分的环境法规也将其当成单一化合物进行管理。随着手性污染物进入环境的数量逐年递增，以及环境科学向更微观方向深入和发展，在化合物的结构特异性层面上评价手性污染物生态安全与健康风险对于精准评估此类化合物的环境风险并揭示其毒性效应及机制具有重要的意义。

手性污染物环境安全研究是基础和应用研究的结合，涉及环境监测、环境风险、安全高效新农药创制、农产品质量安全、公共卫生等多个领域，需要分析化学、环境化学、化学生物学、化学毒理学和计算化学等多学科协同开展工作。近几十年来，科学技术发展日新月异，新方法和新技术不断推陈出新，手性科学研究整体面貌也发生了巨大的变化。国内外研究人员先后建立了多种手性污染物分离、分析及构型表征等的研究方法，获得了近百种手性污染物对映体纯的标样，为手性污染物对映选择性环境行为和毒理学研究提供了强大的技术支撑。同时，科学家在不同的研究模型上完成了多种类型手性污染物生物效应对映差异及其分子机制的研究。

为了更好地适应我国环境科学与环境健康研究发展的需求，及时总结国内外有关手性污染物环境安全研究的新成就，本书在回顾手性科学研究历史的基础上，系统地介绍了近年来手性污染物在环境化学与毒理学方面的研究进展。本书力求“全而不流于滥”，兼顾系统性、完整性，同时着重突出研究前沿性。希望本书可为从事环境科学、环境毒理与健康、农业环境化学、环境保护与管理等领域的科研及管理人员提供参考。

本书共 8 章。在章节安排上以手性基本概念—环境行为—生态毒理效应为主线，各章之间既相互关联，又可以独立成篇，以便于读者跳跃式阅读。第 1 章概述手性科学研究的历史及环境中手性污染物研究；第 2 章介绍手性污染物对映体分离、分析技术和绝对构型表征及稳定性的研究；第 3~6 章主要介绍手性污染物的环境行为，包括环境残留与归趋、生物富集与放大、微生物降解、生物转化等内容，说明手性污染物的环境行为存在对映选择性；第 7、8 章介绍手性污染物对不同生物体毒性效应的对映体差异，并在此基础上对典型手性污染物的毒性对映体差异相关分子机制进行了论述。

本书第 1 章由刘维屏、赵美蓉撰写；第 2 章由刘维屏、赵璐撰写；第 3、5 章由牛丽丽、刘维屏撰写；第 4 章由刘维屏、徐晨烨、唐梦龄撰写；第 6 章由唐梦龄、赵美蓉撰写；第 7、8 章由赵美蓉、季晨阳、宋琴撰写，全书由刘维屏和赵美蓉完成统稿。在撰写过程中，浙江大学环境健康研究所、浙江工业大学环境科学研究中心的师生给予了大力支持和帮助，科学出版社朱丽编辑为本书出版做了很多耐心细致的工作，在此一并表示衷心的感谢。本书撰写过程中参考了大量文献，在此对文献作者及出版机构一并致谢。

本书是在作者及其研究团队多年来承担的各类国家自然科学基金项目〔国家杰出青年科学基金项目（20225721）、重点项目（20837002）、国际（地区）合作与交流项目（21320102007）、国家重大科研仪器研制项目（21427815）及系列面上项目（21677130、304404205、30771255、40973077、21177112）〕以及国家重点研发计划（2016YFD0200202）、国家重点基础研究发展计划〔“973”计划（2009CB421603）〕、国家高技术研究发展计划〔“863”计划（2013AA065202）〕项目的研究成果基础上撰写而成，感谢国家自然科学基金委员会、科技部等部门对手性污染物环境安全研究的大力支持！

我国手性污染物造成的环境安全问题较严重，迫切需要在对映体层面上深入了解这类化合物的环境行为及安全。正如《木兰诗》中所描述的“雄兔脚扑朔，雌兔眼迷离；双兔傍地走，安能辨我是雄雌”，手性污染物具有相同的原子组成、高度相似的理化性质和独特的立体结构选择性特点，这决定了其环境安全研究的复杂性和高难度。加之作者水平有限，时间仓促，书中不足和疏漏之处在所难免，殷切期望广大读者批评指正。

作 者

2018 年 5 月

目 录

丛书序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 自然界中的手性现象	3
1.1.1 生命系统: 对称有机体中的不对称模块	3
1.1.2 微生物、动植物的不对称性	4
1.2 Pasteur 关于手性分子的研究及成果	11
1.2.1 Pasteur 的光学论断	12
1.2.2 Pasteur 手性研究发现的化学-物理背景	13
1.2.3 Pasteur 时代的分子结构理论和立体选择性手性合成	18
1.2.4 生物分子同手性发展的偶然性、必要性及与手性领域的关系	21
1.2.5 手性(均)同一及其不守恒性	23
1.3 环境中的手性污染物	25
1.3.1 手性持久性有机污染物	26
1.3.2 手性农药	27
1.3.3 手性新型有机污染物	28
1.3.4 手性药物与个人护理用品	28
1.4 手性污染物环境安全研究发展趋势	29
1.4.1 手性污染物对映体的分离、分析技术	30
1.4.2 手性污染物对映体标品的制备	30
1.4.3 甄别手性农药高效安全构型	31
1.4.4 建立手性污染物环境限值标准和环境基准	31
1.4.5 新型手性化合物环境安全性研究	31
参考文献	32
第 2 章 手性污染物对映体的分离、分析与表征	35
2.1 手性污染物对映体的分离	36

2.1.1	物理分离	36
2.1.2	化学分离	37
2.1.3	生物分离	38
2.1.4	色谱分离	38
2.2	手性污染物对映体的定量分析	50
2.2.1	光谱法	50
2.2.2	质谱法	51
2.2.3	其他方法	51
2.3	手性污染物对映体的构型表征	52
2.3.1	有机合成法	53
2.3.2	X 射线单晶衍射	54
2.3.3	核磁共振法	54
2.3.4	光谱法	56
2.4	手性污染物对映体的构型稳定性	66
2.4.1	非生物条件	67
2.4.2	生物条件	70
	参考文献	71
第 3 章	手性污染物环境残留与归趋的对映选择性	78
3.1	手性污染物在土壤中残留和归趋的对映选择性	79
3.1.1	土壤中有有机氯农药残留和归趋的对映选择性	79
3.1.2	土壤中手性工业化学品残留和归趋的对映选择性	85
3.1.3	影响土壤中手性污染物对映选择性残留和归趋的因素	86
3.2	手性污染物在大气中残留和迁移的对映选择性	89
3.2.1	大气中手性农药残留和迁移的对映选择性	89
3.2.2	大气中手性工业化学品残留和迁移的对映选择性	93
3.2.3	影响大气中手性污染物对映选择性环境残留和归趋的因素	94
3.3	手性污染物在水体中残留和归趋的对映选择性	95
3.3.1	水体中手性农药残留和归趋的对映选择性	95
3.3.2	水体中手性药物残留和归趋的对映选择性	97
3.3.3	影响水体中手性污染物对映选择性环境残留和归趋的因素	99
3.4	手性污染物在沉积物中残留和归趋的对映选择性	100

3.4.1 沉积物中手性农药残留和迁移的对映选择性	100
3.4.2 沉积物中手性工业化学品残留和迁移的对映选择性	102
3.5 手性污染物在界面交换过程的对映选择性	104
3.5.1 手性污染物在土壤-大气界面的对映选择性环境行为	105
3.5.2 手性污染物在水体-大气界面的对映选择性环境行为	108
参考文献	111
第4章 手性污染物生物富集与放大对映选择性	119
4.1 手性污染物生物积累研究内容和方法	119
4.1.1 生物积累研究概述	119
4.1.2 手性污染物的生物积累	119
4.1.3 手性污染物生物积累研究方法	120
4.2 手性污染物对映体差异富集过程与机制	123
4.2.1 对映选择性富集模式	123
4.2.2 对映选择性富集机制	125
4.3 手性污染物的水生生物富集与放大	126
4.3.1 浮游类	126
4.3.2 贝类	127
4.3.3 鱼类	128
4.3.4 水生食物网研究	129
4.4 手性污染物陆生生物富集与放大	131
4.4.1 鸟、禽类	131
4.4.2 蚯蚓、昆虫、大型蚤	132
4.4.3 哺乳动物	133
4.5 手性污染物的植物富集	134
4.5.1 蔬菜对手性污染物的富集	134
4.5.2 树皮对手性污染物的富集	136
4.6 手性污染物的人体富集	137
参考文献	139
第5章 微生物降解手性污染物的对映选择性	143
5.1 手性污染物的对映选择性降解机理及动力学研究方法	143
5.2 手性除草剂在土壤微生物降解过程中的对映选择性	145

5.2.1	苯氧羧酸类除草剂	145
5.2.2	酰胺类除草剂	149
5.2.3	芳氧苯氧羧酸类除草剂	151
5.2.4	咪唑啉酮类除草剂	153
5.2.5	其他除草剂	154
5.3	手性杀虫剂在土壤微生物降解过程中的对映选择性	155
5.3.1	有机磷杀虫剂	155
5.3.2	拟除虫菊酯类杀虫剂	157
5.3.3	新烟碱类杀虫剂	159
5.3.4	其他	160
5.4	手性杀菌剂在土壤微生物降解过程中的对映选择性	160
5.4.1	三唑类杀菌剂	160
5.4.2	其他杀菌剂	163
5.5	其他手性污染物在土壤微生物降解过程中的对映选择性	164
5.6	手性污染物在水体微生物降解过程中的对映选择性	166
5.6.1	除草剂	166
5.6.2	杀虫剂	167
5.6.3	杀菌剂	167
5.7	影响手性污染物在环境微生物降解过程中对映选择性的关键因素	168
5.7.1	土壤	168
5.7.2	水体	170
	参考文献	171
第 6 章	手性污染物生物转化的对映选择性	177
6.1	手性污染物生物转化	177
6.1.1	生物转化和代谢的基本概念	177
6.1.2	手性污染物的生物转化和代谢	179
6.2	典型手性污染物的生物转化	180
6.2.1	动物体内典型手性污染物的生物转化	180
6.2.2	植物体内典型手性污染物的生物转化	185
6.3	手性污染物的生物转化和代谢机制	189
6.3.1	CYP 酶	191

6.3.2 脂肪酶	193
参考文献	195
第7章 手性污染物毒性的对映选择性	199
7.1 手性持久性有机污染物	200
7.1.1 多氯联苯	200
7.1.2 多环芳烃	201
7.2 手性农药	202
7.2.1 手性杀虫剂	202
7.2.2 手性除草剂	216
7.2.3 手性杀菌剂	220
7.2.4 其他因素对手性农药的对映体毒性的影响	224
7.3 手性新型有机污染物	226
7.4 手性药物与个人护理用品	227
参考文献	227
第8章 手性污染物对映选择性毒性分子机制	233
8.1 细胞毒性	234
8.1.1 细胞毒性研究简介及意义	234
8.1.2 常用模型及方法	234
8.1.3 细胞毒性机制研究	237
8.2 卵巢毒性	243
8.2.1 卵巢毒性研究简介及意义	243
8.2.2 常用模型及方法	244
8.2.3 卵巢毒性机制研究	245
8.3 胎盘毒性	248
8.3.1 胎盘毒性研究简介及意义	249
8.3.2 常用模型及方法	249
8.3.3 胎盘毒性机制研究	250
8.4 发育毒性	253
8.4.1 发育毒性研究简介及意义	253
8.4.2 常用模型及方法	254
8.4.3 发育毒性机制研究	255

8.5 促癌作用机制	260
8.5.1 促癌作用研究简介及意义	260
8.5.2 常用模型及方法	260
8.5.3 促癌作用机制研究	261
8.6 植物毒性	263
8.6.1 植物毒性研究简介及意义	263
8.6.2 常用模型及方法	263
8.6.3 植物毒性机制研究	264
8.7 代谢表型的影响	269
8.7.1 代谢表型研究简介及意义	270
8.7.2 常用模型及方法	270
8.7.3 代谢表型影响研究	271
参考文献	273
附录 缩略语(英汉对照)	291
索引	295