

“十三五”国家重点出版物出版规划项目

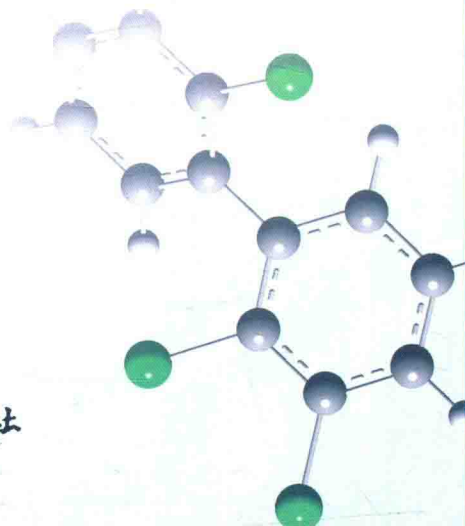
持久性有机污染物

**POPs** 研究系列专著

# 新型持久性有机污染物的生物富集

罗孝俊 麦碧娴/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

# 新型持久性有机污染物的生物富集

罗孝俊 麦碧娴/著



科学出版社

北京

## 内 容 简 介

环境中的新型持久性有机污染物是最近 20 年来环境科学领域持续关注的一个重要热点问题。生物可富集性是持久性有机污染物的重要特性。了解这些新型持久性有机污染物的生物富集特征是当前研究的一个重要领域。本书首先简明扼要地概括及总结了有机污染物生物富集的相关概念、原理、方法、研究历史与现状。基于室内暴露实验和野外实际监测的数据,讨论了新型持久性有机污染物多溴联苯醚(PBDEs)、六溴环十二烷(HBCDs)、得克隆(DP)及短链氯化石蜡(SCCPs)在生物中的富集、代谢及食物链传递特点。着重探讨了这些新型持久性有机污染物在水生、陆生生物中的差异性富集及机理。同时也介绍了卤代持久性有机污染物在电子垃圾回收区不同植物中的叶片和根系吸收过程及机理。

本书可以作为高等院校环境科学、环境工程等专业的教学参考书,也可供从事环境生物学、污染物环境监测、化学品控制与管理的研究人员和技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

新型持久性有机污染物的生物富集/罗孝俊, 麦碧娴著. —北京: 科学出版社, 2017.9

(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

ISBN 978-7-03-054596-1

I. ①新… II. ①罗… ②麦… III. ①持久性-有机污染物-生物富集-研究 IV. ①X171

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 236974 号

责任编辑: 朱 丽 杨新改 / 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

\*

2017 年 9 月第 一 版 开本: 720×1000 1/16

2017 年 9 月第一次印刷 印张: 22 1/4

字数: 420 000

定价: 128.00 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蚱蜢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联苯醚(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,“行百里路者半九十”,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) 是指能持久存在于环境中通过生物食物链 (网) 累积对野外生物及人类健康造成有害影响的化学物质。与常规污染物不同, POPs 在自然环境中滞留时间长, 极难降解, 毒性极强, 能导致全球性的传播; 被生物体摄入后不易分解, 并沿着食物链浓缩放大, 对人类和动物危害巨大。很多 POPs 不仅具有致癌、致畸、致突变性, 而且还具有内分泌干扰作用。POPs 对人类的影响会持续几代, 对人类生存繁衍和可持续发展构成重大威胁。

没有富集就没有伤害。POPs 排放进入环境后会通过各种途径进入到生物及人体。只有在达到一定的浓度阈值或持续长期暴露才会导致负面效应的发生。在这个过程中, 生物富集起到了至关重要的作用。通过生物富集作用, 环境中微量存在的 POPs 会在高等级生物及人体中浓度达到足够产生明显毒害性的程度。与传统的 POPs 如有机氯农药、多氯联苯及二噁英类化合物相比, 以卤代阻燃剂为代表的新型或疑似持久性有机化合物具有分子量更大、亲脂性更高以及分子体积大等特点, 如十溴联苯醚、十溴二苯乙烷和得克隆等辛醇/水分配系数都在 10 左右, 是超强的疏水性物质。尽管不少生物监测结果揭示出这些化合物广泛存在生物体内, 但对于这些强疏水性有机化合物是否具有生物可富集性仍存有争议。与此同时, 这些新型卤代持久性有机物一般都具有众多的同系物或者立体/手性异构体, 在生物体内会存在各种同系物或立体/手性异构体的选择性富集。有机污染物生物富集研究的最新进展表明, 水生、陆生生态系统生物在污染物的富集上存在明显的差异, 一些具有较低辛醇/水分配系数, 但同时具有较高辛醇/空气分配系数的化合物能在陆生生物中富集和放大, 但不能在水生生物中放大。新型污染物强的疏水性限制了其在水生生物体内的富集, 但它们是否在陆生生物中产生富集? 强的疏水性质是否会影响它们在植物中的富集行为? 所有这些问题都迫切需要我们开展更多有关这些新型持久性有机污染物的生物富集行为的研究, 一方面丰富有机污染物生物富集的理论知识; 另一方面为相应的管理部门提供重要的科学支撑。

从 2003 年起, 在连续三期持久性有机污染领域国家重点基础研究发展计划项目 (以下简称 “973” POPs 项目), 国家自然科学基金委员会重大、重点、国家杰出青年科学基金及面上项目, 中国科学院, 广东省自然科学基金委员会重点项目的资助下, 我们以新型卤代持久性有机污染物多溴联苯醚 (PBDEs)、六溴环十二烷 (HBCDs)、得克隆 (DP) 和短链氯化石蜡 (SCCPs) 为目标化合物, 以珠江三角洲

为核心研究区域,通过室内暴露及野外生物监测相结合的方法,研究了这些新型污染物在以鱼为核心及以鸟为核心的水生、陆生生物中的吸收、组织分布、生物转化及食物链传递行为,重点关注了这些污染物在水生、陆生生物上的差异性生物富集行为。同时,对卤代持久性有机污染物在植物中的叶面吸收与根系吸收也进行了初步研究。取得的创新性的认识有:有机污染物的植物/大气分配系数与化合物辛醇/空气分配系数之间并不是简单的线性关系,而是表现出由植物吸收污染物机制变化所控制的多段性;在高污染情况下,土壤根系吸收有机污染物的贡献不可忽视;生物代谢的差异性是造成多溴联苯醚生物差异性富集的重要机制,多溴联苯醚和得克隆在水生、陆生生物上的生物富集存在明显差异性;异构化反应是 HBCDs 立体异构体组成发生变化的重要原因;短链氯化石蜡在高污染水生食物链上为食物链稀释而非放大。同时,我们也利用单体稳定碳同位素技术对多溴联苯醚的生物转化进行了示踪。本书即是上述研究成果的一个综合集成。

本书由 9 章组成,分别是持久性有机污染物的生物富集概论;生物富集的基本理论与方法;典型卤代持久性有机污染物在电子垃圾回收区植物中的富集;多溴联苯醚生物富集及转化的室内模拟研究;多溴联苯醚在水生生物中的富集与食物链传递;多溴联苯醚在水生、陆生鸟类中的富集及食物链传递;六溴环十二烷的生物富集与放大;得克隆的生物富集与放大;短链氯化石蜡在电子垃圾回收区水生与陆生生物中的富集。前两章主要从概念、原理、方法、研究历史与现状等方面较全面地介绍了有关生物富集的基本理论和方法,以期使读者对生物富集的研究内容、研究方法有一个较全面的了解。后面各个章节针对具体某一类化合物,先简要介绍相关化合物的基础信息,包括化学结构、性质、生产及使用情况;然后具体介绍了相关室内暴露、野外环境监测的实验数据和结果;特别注重了污染物在水生、陆生生态系统中的差异性富集与食物链传递行为。污染物的植物富集单独以一章来阐述,也是先介绍基本原理,然后从叶面吸收和根系吸收两个方面介绍了作者课题组的最新成果。总之,本书将以较系统、完整的学科体系和最新的研究成果来编织。

本书由罗孝俊、麦碧娴策划、统稿,是作者课题组十余年的主要研究成果总结,这些成果是集体的智慧,是大家共同努力的结果。书中的内容包含了余梅、张秀蓝、吴江平、张荧、田密、余乐洵、何明靖、孙毓鑫、曾艳红、孙闰霞博士论文及阮伟硕士论文的部分工作以及课题组合作伙伴杨中艺、戴家银、彭永宏、邹发生、郑晶、李妍、严骁、张芸等的有关研究成果。在编写过程中也得到了陈社军、吴江平及上述已毕业博士生的支持与帮助。本书的研究工作是在三期“973”POPs 项目(2003CB415003, 2009CB4216604 和 2015CB453102)及国家自然科学基金委员会众多项目、中国科学院、广东省自然科学基金的资助下完成的。后续的写作工作还得到了国家自然科学基金委面上课题(41673100)和国家出版基金项目(2016R-045)

的资助。作者衷心感谢持久性有机污染物（POPs）研究系列专著主编江桂斌院士在我们科研工作及本书撰写过程中给予的指导、鼓励和支持。感谢科学出版社朱丽编辑耐心、细致的编校工作。向所有参与相关研究工作的老师、学生表示感谢，同时也向关心、支持我们完成相关工作的单位同事、领导表示衷心的感谢，正是所有这些人的辛勤工作才使本书最终得以出版。

由于作者水平有限，书中疏漏和错误之处在所难免，恳请读者批评指正。

著 者

2017年5月

# 目 录

丛书序

前言

|                                                     |    |
|-----------------------------------------------------|----|
| 第 1 章 持久性有机污染物的生物富集概论 .....                         | 1  |
| 本章导读 .....                                          | 1  |
| 1.1 生物富集及相关术语 .....                                 | 3  |
| 1.2 生物富集的研究内容 .....                                 | 5  |
| 1.3 生物富集的评判指标与基准值 .....                             | 7  |
| 1.4 生物富集研究历史与现状 .....                               | 11 |
| 参考文献 .....                                          | 14 |
| 第 2 章 生物富集的基本理论与方法 .....                            | 18 |
| 本章导读 .....                                          | 18 |
| 2.1 生物富集的生理过程 .....                                 | 18 |
| 2.1.1 吸收与排泄 .....                                   | 18 |
| 2.1.2 组织分布 .....                                    | 21 |
| 2.1.3 生物代谢 .....                                    | 22 |
| 2.2 生物富集的相关原理及实验测定方法 .....                          | 24 |
| 2.2.1 生物浓缩机理与实验测定方法 .....                           | 24 |
| 2.2.2 生物放大机理与实验测定方法 .....                           | 28 |
| 2.3 生物富集模型 .....                                    | 33 |
| 2.3.1 生物富集的经验模型 .....                               | 33 |
| 2.3.2 生物富集的机理模型 .....                               | 36 |
| 参考文献 .....                                          | 41 |
| 第 3 章 典型卤代持久性有机污染物在电子垃圾回收区植物中的富集 .....              | 45 |
| 本章导读 .....                                          | 45 |
| 3.1 植物富集的相关机理 .....                                 | 46 |
| 3.1.1 植物叶面吸收机制 .....                                | 47 |
| 3.1.2 植物根系吸收机制 .....                                | 49 |
| 3.2 广东清远电子垃圾回收区两种植物对大气中典型卤代持久性有机污<br>染物的富集及机制 ..... | 51 |

|       |                                                  |     |
|-------|--------------------------------------------------|-----|
| 3.2.1 | 样品采集、处理及分析 .....                                 | 52  |
| 3.2.2 | 大气中的卤代持久性有机污染物及季节变化 .....                        | 54  |
| 3.2.3 | 卤代持久性有机污染物在大气中的气粒分配 .....                        | 58  |
| 3.2.4 | 植物中的卤代持久性有机污染物浓度、组成与季节变化 .....                   | 58  |
| 3.2.5 | 植物中卤代持久性有机污染物与大气中卤代持久性有机污染物<br>及气象条件间关系 .....    | 62  |
| 3.2.6 | 植物叶面从大气中吸收 PBDEs 及 PCBs 的机制 .....                | 66  |
| 3.2.7 | 植物/大气分配系数与化合物辛醇/空气分配系数的关系 .....                  | 71  |
| 3.3   | 电子垃圾污染土壤中典型卤代持久性有机污染物在水稻中的富集<br>与传递 .....        | 74  |
| 3.3.1 | 实验方案设计 .....                                     | 75  |
| 3.3.2 | 样品处理与分析 .....                                    | 76  |
| 3.3.3 | 电子垃圾污染土壤对植物生长发育过程中形态及生理参数的<br>影响 .....           | 78  |
| 3.3.4 | 种植前后土壤中卤代持久性有机污染物的变化 .....                       | 81  |
| 3.3.5 | 水稻组织中卤代持久性有机污染物的浓度及污染物组成 .....                   | 83  |
| 3.3.6 | 卤代持久性有机污染物从土壤到水稻根部的累积 (土壤-根部<br>富集因子, RCF) ..... | 85  |
| 3.3.7 | 卤代持久性有机污染物从根到茎及从茎到叶的传递 .....                     | 86  |
|       | 参考文献 .....                                       | 89  |
| 第 4 章 | 多溴联苯醚生物富集及转化的室内模拟研究 .....                        | 96  |
|       | 本章导读 .....                                       | 96  |
| 4.1   | 食物暴露条件下 PBDEs 在鲤鱼中的富集、代谢及转化的稳定碳同位<br>素示踪 .....   | 99  |
| 4.1.1 | 三种 PBDEs 工业品的鲤鱼暴露实验 .....                        | 99  |
| 4.1.2 | PBDEs 的提取与定量分析 .....                             | 100 |
| 4.1.3 | 鱼体中 PBDEs 单体稳定碳同位素分析 .....                       | 102 |
| 4.1.4 | 质量保证与质量控制 .....                                  | 103 |
| 4.1.5 | PBDEs 在鲤鱼肠道中的吸收与转化 .....                         | 104 |
| 4.1.6 | PBDEs 在鲤鱼体内的单体组成模式及其脱溴代谢 .....                   | 107 |
| 4.1.7 | 鲤鱼血清中 MeO-BDEs 和 OH-BDEs .....                   | 110 |
| 4.1.8 | 单体稳定碳同位素示踪 PBDEs 单体在鲤鱼中的脱溴代谢 .....               | 113 |
| 4.2   | 室内暴露条件下 PBDEs 在水生食物链上的富集、传递及代谢特征 .....           | 115 |
| 4.2.1 | TBDE-71X 工业品水生食物链暴露实验及样品分析 .....                 | 115 |

|       |                                       |     |
|-------|---------------------------------------|-----|
| 4.2.2 | PBDEs 在两捕食性鱼中的组织分配                    | 117 |
| 4.2.3 | PBDEs 在三种鱼中的脱溴代谢与食物链迁移                | 120 |
| 4.2.4 | 捕食性鱼体中 MeO-BDEs 和 OH-BDEs             | 123 |
| 4.2.5 | 单体稳定碳同位素示踪 PBDEs 单体在食物链传递过程中的<br>脱溴代谢 | 124 |
| 4.3   | PBDEs 的体外肝微粒体代谢研究                     | 126 |
| 4.3.1 | PBDEs 在两种鱼体外肝微粒体代谢及脱溴代谢的结构-活性<br>关系   | 126 |
| 4.3.2 | PBDEs 在鸡和猫肝微粒体中的代谢研究                  | 134 |
|       | 参考文献                                  | 140 |
| 第 5 章 | 多溴联苯醚在水生生物中的富集与食物链传递                  | 145 |
|       | 本章导读                                  | 145 |
| 5.1   | 东江三角洲流域水体中 PBDEs 的生物富集特征              | 146 |
| 5.1.1 | 样品采集与分析                               | 146 |
| 5.1.2 | 沉积物和水体中的多溴联苯醚                         | 148 |
| 5.1.3 | 生物体内 PBDEs 的含量及组成                     | 150 |
| 5.1.4 | 生物富集因子和生物-沉积物富集因子                     | 151 |
| 5.2   | 电子垃圾回收区水生生物中 PBDEs 的生物富集与放大           | 155 |
| 5.2.1 | 样品采集与分析                               | 155 |
| 5.2.2 | 生物样品的营养级别及食物网构成                       | 156 |
| 5.2.3 | PBDEs 在水生生物中的污染特征                     | 158 |
| 5.2.4 | PBDEs 在两条水生食物链上的传递与放大                 | 160 |
| 5.3   | PBDEs 在珠江口鱼类中的生物富集与食物链放大              | 162 |
| 5.3.1 | 采样与样品分析                               | 162 |
| 5.3.2 | 食物网结构                                 | 164 |
| 5.3.3 | 珠江口生物中 PBDEs 的污染特征                    | 164 |
| 5.3.4 | PBDEs 的富集与放大                          | 168 |
|       | 参考文献                                  | 171 |
| 第 6 章 | 多溴联苯醚在水生、陆生鸟类中的富集与食物链传递               | 176 |
|       | 本章导读                                  | 176 |
| 6.1   | 电子垃圾回收区水鸟中 PBDEs 的污染特征                | 177 |
| 6.1.1 | 样品采集与分析                               | 177 |
| 6.1.2 | 鸟类中 PBDEs 的含量及同系物组成特征                 | 179 |
| 6.1.3 | PBDEs 在鸟中的组织分布                        | 182 |

|       |                                |     |
|-------|--------------------------------|-----|
| 6.1.4 | 鸟肌肉中 PBDEs 的浓度与营养级之间的关系        | 185 |
| 6.2   | PBDEs 在珠三角地区雀鸟中的富集特征           | 188 |
| 6.2.1 | 样品采集与分析                        | 188 |
| 6.2.2 | 雀形目鸟类中碳和氮同位素比值                 | 189 |
| 6.2.3 | PBDEs 在雀形目鸟类中的区域分布             | 189 |
| 6.2.4 | PBDEs 同系物组成特征                  | 191 |
| 6.2.5 | PBDEs 浓度与鸟类营养级之间的关系            | 195 |
| 6.3   | 北京城区猛禽中 PBDEs 的污染特征及食物链放大      | 196 |
| 6.3.1 | 样品采集、食性观测及样品的分析                | 196 |
| 6.3.2 | 食性观察结果及食物网构成                   | 199 |
| 6.3.3 | 生物及环境样品中 PBDEs 的浓度及同系物组成特征     | 203 |
| 6.3.4 | PBDEs 的生物放大系数                  | 205 |
| 6.3.5 | PBDEs 的生物放大及其影响因素              | 208 |
|       | 参考文献                           | 210 |
| 第 7 章 | 六溴环十二烷的生物富集与放大                 | 217 |
|       | 本章导读                           | 217 |
| 7.1   | 室内模拟 HBCDs 在水生食物链上的异构体选择性富集与传递 | 220 |
| 7.1.1 | 实验设计与样品分析                      | 220 |
| 7.1.2 | HBCDs 在背景与控制鱼样中的含量及组成          | 223 |
| 7.1.3 | HBCDs 在地图鱼肠道中的吸收与净化            | 225 |
| 7.1.4 | 鱼体内 HBCDs 立体异构体的组成             | 229 |
| 7.1.5 | HBCDs 手性异构体组成变化特征              | 231 |
| 7.1.6 | HBCDs 异构体在四间鱼与地图鱼中的代谢产物        | 233 |
| 7.2   | HBCDs 在水生食物链上的富集与食物链放大         | 235 |
| 7.2.1 | 样品采集与分析                        | 235 |
| 7.2.2 | HBCDs 的浓度及与生物营养级的关系            | 236 |
| 7.2.3 | HBCDs 的异构体组成特征与手性分数            | 237 |
| 7.3   | HBCDs 在鸟类中的富集与生物放大             | 239 |
| 7.3.1 | 样品采集与分析                        | 240 |
| 7.3.2 | 鸟类肌肉组织的稳定碳、氮同位素组成特征            | 241 |
| 7.3.3 | 鸟类肌肉组织中 HBCDs 的浓度及非对映异构体组成特征   | 241 |
| 7.3.4 | HBCDs 的手性异构体组成特征               | 246 |
| 7.3.5 | HBCDs 在鸟体内中的生物放大               | 247 |
|       | 参考文献                           | 249 |

|                                             |     |
|---------------------------------------------|-----|
| 第 8 章 得克隆的生物富集与放大 .....                     | 254 |
| 本章导读 .....                                  | 254 |
| 8.1 DP 生物富集的室内暴露研究 .....                    | 256 |
| 8.1.1 DP 及其脱氯产物通过饮食暴露在鲤鱼体中的富集、清除和组织分配 ..... | 257 |
| 8.1.2 DP 及其脱氯产物在 SD 大鼠和鹌鹑中的立体选择性富集 .....    | 266 |
| 8.2 DP 生物富集的野外调查 .....                      | 275 |
| 8.2.1 DP 在清远电子垃圾污染池塘水生生物中的富集及食物链传递 .....    | 275 |
| 8.2.2 DP 在清远电子垃圾区水鸟和广东雀鸟中的富集及食物链传递 .....    | 278 |
| 8.2.3 贵屿电子垃圾区两个站点鸡蛋和鹅蛋中的 DP 富集特征 .....      | 283 |
| 8.3 DP 在电子垃圾回收区人群中的暴露与富集 .....              | 286 |
| 8.3.1 室内灰尘样品、人头发和血清样品的采集 .....              | 287 |
| 8.3.2 样品的处理与仪器分析 .....                      | 288 |
| 8.3.3 DP 在人群头发和室内灰尘中浓度及组成 .....             | 289 |
| 8.3.4 头发和灰尘中 DP 的相关性 .....                  | 292 |
| 8.3.5 人体血清中 DP 的浓度及组成特征 .....               | 294 |
| 8.3.6 血清中 DP 浓度及组成的性别差异 .....               | 296 |
| 参考文献 .....                                  | 298 |
| 第 9 章 短链氯化石蜡在电子垃圾回收区水生与陆生生物中的富集 .....       | 301 |
| 本章导读 .....                                  | 301 |
| 9.1 氯化石蜡简介 .....                            | 301 |
| 9.2 SCCPs 在电子垃圾污染池塘水生生物中的富集 .....           | 304 |
| 9.2.1 样品的采集与前处理 .....                       | 304 |
| 9.2.2 CPs 的仪器分析 .....                       | 306 |
| 9.2.3 生物样品中的稳定碳、氮同位素组成特征 .....              | 306 |
| 9.2.4 SCCPs 的浓度与组成 .....                    | 308 |
| 9.2.5 SCCPs 的生物富集因子与生物-沉积物富集因子 .....        | 310 |
| 9.2.6 SCCPs 在两种鱼体内的组织分布特征 .....             | 312 |
| 9.2.7 SCCPs 的食物链迁移 .....                    | 315 |
| 9.3 SCCPs 在电子垃圾回收区陆生雀鸟中的富集 .....            | 318 |
| 9.3.1 样品的采集、前处理与仪器分析 .....                  | 318 |
| 9.3.2 鸟体内 SCCPs 浓度及影响浓度的因素 .....            | 319 |
| 9.3.3 SCCPs 的组成特征 .....                     | 324 |
| 参考文献 .....                                  | 326 |