

“十三五”国家重点出版物出版规划项目

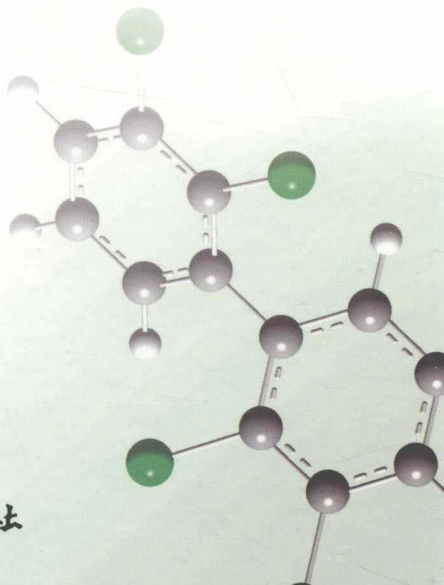
国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

持久性有机污染物

POPs 研究系列专著

持久性有机污染物的 样品前处理方法与技术

蔡亚岐 刘稷燕 周庆祥 杨瑞强 等/著



科学出版社

“九五”国家重点出版物出版规划项目

国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

持久性有机污染物

POPs 研究系列专著

持久性有机污染物的 样品前处理方法与技术

蔡亚岐 刘稷燕 周庆祥 杨瑞强 等/著

科学出版社

北京

内 容 简 介

持久性有机污染物(POPs)环境样品具有含量极低和基体异常复杂的特点,其样品前处理效果在很大程度上决定分析方法的灵敏度、准确度和分析速度,对其分析的质量控制具有至关重要的意义。

本书在简单介绍索氏萃取、微波辅助萃取、液液萃取、超声萃取及分散固相萃取等 POPs 的常规样品萃取方法的基础上,对国际上近年来在 POPs 分析中发挥越来越重要作用的一些新技术,如固相萃取、固相/液相微萃取、加速溶剂萃取、超临界流体萃取等给予重点介绍,并在最后对绝大多数 POPs 分析中必不可少的样品净化技术进行了讨论。本书的内容和素材密切结合包括一些新型污染物在内的 POPs 研究的国际前沿,力求协调内容的普及性和学术性,并适当兼顾原理、技术、方法和应用示例。

本书可供环境监测、环境化学、污染控制、环境管理领域的研究人员和技术人员参考,也可作为高等院校环境科学、环境分析、生态毒理和环境健康、分析化学及相关专业本科生、研究生的学习参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

持久性有机污染物的样品前处理方法与技术 / 蔡亚岐等著. —北京: 科学出版社, 2019.3

(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 978-7-03-060641-9

I. ①持… II. ①蔡… III. ①持久性-有机污染物-前处理-研究 IV. ①X5
中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第036891号

责任编辑: 朱 丽 孙 曼 / 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

*

2019年3月第一版 开本: 720×1000 1/16

2019年3月第一次印刷 印张: 23 3/4

字数: 455 000

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

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 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

样品前处理对于分析结果的准确性和质量控制具有至关重要的意义,也在很大程度上决定分析方法的灵敏度和分析速度。近年来,科学技术的飞速发展使得分析仪器在检测水平、分析速度、自动化水平等方面有了很大提高,但与此对应的样品前处理技术的发展相对滞后,因此样品前处理已经成为整个分析过程的瓶颈。环境样品的高度复杂基体和其中大多数 POPs 的极低含量水平,进一步增加了 POPs 样品前处理的难度,因此 POPs 的样品前处理已经成为 POPs 环境样品分析成败的关键,也在一定程度上制约着 POPs 的环境科学研究。鉴于目前关于 POPs 环境样品前处理的专门资料较少且分散,以及学界的需求,本书首先简单介绍索氏萃取、微波辅助萃取、液液萃取、超声萃取及分散固相萃取等 POPs 的常规样品萃取方法,然后重点介绍国际上近年来在 POPs 分析中发挥越来越重要作用的一些新技术,如固相萃取、固相/液相微萃取、加速溶剂萃取、超临界流体萃取等,并对绝大多数 POPs 分析中必不可少的样品净化技术进行讨论,以期对从事环境样品方法研究、分析检测和其他相关研究人员有所裨益。

本书共 6 章。第 1 章介绍 POPs 环境样品常规萃取方法,由王璞副研究员撰写。第 2 章和第 3 章分别是超临界流体萃取技术和加速溶剂萃取技术在 POPs 分析中的应用,重点介绍固体环境样品中 POPs 的萃取技术,由周庆祥教授撰写。第 4 章专门介绍可以在液体样品中 POPs 萃取富集和 POPs 提取液净化方面发挥重要作用的固相萃取技术,由张小乐副教授和蔡亚岐研究员撰写。第 5 章介绍利于少量样品中 POPs 快速分析的固相微萃取和液相微萃取等微萃取技术,由刘稷燕研究员、张青博士、王雪梅教授、刘艳伟和侯兴旺撰写。鉴于 POPs 环境样品基体的高度复杂性,绝大多数样品通过如上介绍的方法经萃取富集后,萃取液中仍然存在许多干扰后续仪器测定的共萃取成分,对其进行适当的净化常常必不可少,因此在本书的第 6 章由杨瑞强副研究员对 POPs 环境样品的净化技术进行了介绍。

本书涉及的相关研究内容得到了科技部、国家自然科学基金委员会和中国科学院基金项目的支持;书中的许多谱图资料来自环境化学与生态毒理学国家重点实验室等单位的相关一线科研人员的科研实践;本书的出版也得到了国家出版基金项目的资助;在本书的撰写过程中,江桂斌院士自始至终给予了指导、鼓励和关怀;科学出版社朱丽编辑提供了耐心细致的帮助;另外,史亚利和牛红云在书稿修改编排和前期资料准备中提供了许多帮助。在此一并表示衷心感谢!

本书在内容上力图做到将日常分析和 POPs 研究国际前沿结合, 协调普及性和学术性, 兼顾原理、技术、方法和应用示例。为此, 所有撰写者竭尽全力, 以不负广大读者的厚望。但由于作者水平有限, 书中不足之处在所难免, 恳请专家读者指正。

作 者

2018 年 10 月

目 录

丛书序

前言

第 1 章 POPs 环境样品常规萃取方法介绍	1
1.1 概述	1
1.2 索氏萃取法	2
1.3 微波辅助萃取法	4
1.4 液液萃取法	6
1.5 超声萃取法	8
1.6 分散固相萃取法	9
参考文献	11
第 2 章 超临界流体萃取技术在 POPs 分析中的应用	14
2.1 概述	14
2.1.1 超临界流体萃取技术的发展	14
2.1.2 超临界流体	17
2.2 超临界流体萃取过程	21
2.2.1 超临界流体萃取系统	21
2.2.2 操作模式	22
2.3 超临界流体萃取技术的影响因素	22
2.3.1 流体种类的影响	22
2.3.2 温度和压力的影响	23
2.3.3 萃取时间的影响	23
2.3.4 超临界流体的流速和样品粒径的影响	24
2.3.5 溶解度的影响	24
2.3.6 基质的影响	25
2.3.7 萃取流体及分析物的极性影响	25
2.3.8 水的影响	25
2.4 超临界流体萃取的理论模型	26

2.5	提高超临界流体萃取效率的方法	28
2.5.1	添加改性剂	29
2.5.2	衍生反应	30
2.6	超临界流体萃取的收集技术	31
2.6.1	溶剂收集	32
2.6.2	固相收集	33
2.6.3	液固联用收集	34
2.7	超临界流体萃取技术在农药分析中的应用	34
2.8	超临界流体萃取技术在酚类物质分析中的应用	38
2.9	超临界流体萃取技术在多环芳烃分析中的应用	39
2.10	超临界流体萃取技术在多氯联苯分析中的应用	41
2.11	超临界流体萃取技术在二噁英分析中的应用	42
2.12	超临界流体萃取技术在多溴二苯醚分析中的应用	45
2.13	超临界流体萃取在全氟化合物分析中的应用	47
2.14	超临界流体萃取技术应用实例	49
2.14.1	土壤样品中多环芳烃的萃取分离检测	49
2.14.2	水果样品中二苯胺的萃取分离检测	53
2.14.3	土壤样品中烷基酚的萃取分离检测	55
2.14.4	沉积物中全氟羧酸的检测	57
	参考文献	60
第3章	加速溶剂萃取技术在 POPs 分析中的应用	74
3.1	概述	75
3.2	加速溶剂萃取的原理	78
3.3	加速溶剂萃取的影响因素	79
3.3.1	温度	79
3.3.2	压力	82
3.3.3	溶剂	83
3.3.4	改性剂及添加剂	85
3.3.5	样品颗粒粒径	89
3.3.6	静态循环次数	89
3.3.7	萃取时间	90
3.3.8	固相吸附剂	90

3.4 加速溶剂萃取在多环芳烃分析中的应用	94
3.5 加速溶剂萃取在多氯联苯检测中的应用	96
3.6 加速溶剂萃取在二噁英类污染物分析中的应用	102
3.7 加速溶剂萃取在酚类污染物分析中的应用	106
3.8 加速溶剂萃取在农药分析中的应用	108
3.9 加速溶剂萃取在多溴二苯醚分析中的应用	111
3.10 加速溶剂萃取应用实例	116
3.10.1 粮谷中 475 种农药及相关化学品残留量测定	116
3.10.2 固体废物中有机物的提取	119
3.10.3 用加速溶剂萃取技术萃取环境样品中的多环芳烃	121
3.10.4 用加速溶剂萃取技术萃取环境样品中的多氯联苯	123
3.10.5 用加速溶剂萃取技术萃取有机磷农药	125
3.10.6 用加速溶剂萃取技术选择性萃取鱼肉中的多氯联苯	126
参考文献	129
第 4 章 固相萃取技术在 POPs 分析中的应用	143
4.1 固相萃取技术简介	144
4.1.1 固相萃取的原理	144
4.1.2 固相萃取的特点	144
4.1.3 固相萃取的装置	145
4.2 固相萃取的作用模式	148
4.2.1 反相固相萃取	149
4.2.2 正相固相萃取	150
4.2.3 离子交换固相萃取	151
4.2.4 次级相互作用和混合作用模式固相萃取	152
4.2.5 分子印迹固相萃取	154
4.2.6 限进介质固相萃取	156
4.3 固相萃取的步骤	157
4.3.1 固相萃取吸附剂的活化处理	157
4.3.2 加样或吸附	159
4.3.3 洗去干扰杂质	160
4.3.4 分析物的洗脱和收集	161
4.4 固相萃取吸附剂及其在 POPs 分析中的应用	161

4.4.1	固相萃取吸附剂的要求	162
4.4.2	键合硅胶类吸附剂	163
4.4.3	有机聚合物型吸附剂	166
4.4.4	碳基吸附剂	170
4.4.5	无机金属氧化物固相萃取吸附剂	174
4.4.6	纳米金属固相萃取吸附剂	175
4.5	其他新型固相萃取技术在 POPs 分析中的应用	176
4.5.1	磁性固相萃取及其在 POPs 分析中的应用	176
4.5.2	固相萃取的自动化技术及其在 POPs 分析中的应用	183
4.6	应用于 POPs 分析的固相萃取技术的展望	186
	参考文献	187
第 5 章	微萃取技术在 POPs 研究中的应用	201
5.1	概述	201
5.2	固相微萃取技术	203
5.2.1	概况	203
5.2.2	纤维 SPME 商品化装置	203
5.2.3	纤维 SPME 理论	208
5.2.4	影响萃取效率的因素	210
5.2.5	管内 SPME	213
5.2.6	SPME 技术在 POPs 研究中的应用	214
5.2.7	SPME 技术的优势与不足	221
5.3	搅拌棒吸附萃取技术	222
5.3.1	概况	222
5.3.2	SBSE 理论	223
5.3.3	SBSE 的操作过程	224
5.3.4	影响 SBSE 萃取的因素	229
5.3.5	SBSE 新型涂层及搅拌棒的设计	233
5.3.6	SBSE 技术在 POPs 分析中的应用	236
5.3.7	展望	236
5.4	微固相萃取技术	238
5.4.1	概况	238
5.4.2	微固相萃取理论	239

5.4.3 微固相萃取的影响因素	239
5.4.4 微固相萃取的研究现状	241
5.4.5 微固相萃取技术在 POPs 分析中的应用	244
5.4.6 展望	244
5.5 液相微萃取技术	245
5.5.1 概况	245
5.5.2 单滴微萃取及其在 POPs 研究中的应用	245
5.5.3 中空纤维液相微萃取及其在 POPs 分析中的应用	252
5.5.4 分散液液微萃取及其在 POPs 分析中的应用	253
5.5.5 悬浮固化分散液相微萃取及其在 POPs 分析中的应用	254
5.5.6 直接悬浮液滴微萃取及其在 POPs 分析中的应用	255
5.5.7 展望	256
参考文献	256
第 6 章 POPs 环境样品净化技术	275
6.1 概述	275
6.2 层析柱色谱法	276
6.2.1 吸附剂的种类	276
6.2.2 吸附剂的活化与去活	277
6.2.3 层析柱尺寸	281
6.2.4 装柱方法	281
6.2.5 洗脱	281
6.2.6 除硫	282
6.2.7 与 POPs 净化有关的美国 EPA 方法	282
6.2.8 层析柱色谱法在 POPs 环境样品净化中的应用	283
6.3 固相萃取法	284
6.3.1 固相萃取净化的原理和特点	284
6.3.2 固相萃取净化的步骤	285
6.3.3 固相萃取净化的吸附剂	285
6.3.4 固相萃取法在 POPs 环境样品净化中的应用	286
6.4 凝胶渗透色谱法	286
6.4.1 凝胶渗透色谱的原理	286
6.4.2 凝胶的种类和应用	287

6.4.3 凝胶渗透色谱柱和凝胶渗透色谱仪	288
6.4.4 凝胶渗透色谱在 POPs 样品净化中的应用	289
6.5 浓硫酸净化法	290
6.5.1 浓硫酸净化的原理和特点	290
6.5.2 浓硫酸净化 POPs 环境样品的应用	290
6.6 自动化样品净化系统	291
参考文献	293
附录	297
缩略语 (英汉对照)	357
索引	360