

DOI:10.7524/j.issn.0254-6108.2013.07.003

## 我国新兴污染物环境风险评价与控制研究进展\*

王斌<sup>1,2</sup> 邓述波<sup>1,2</sup> 黄俊<sup>1,2</sup> 余刚<sup>1,2\*\*</sup>

(1. 清华大学环境学院,环境模拟与污染控制国家重点联合实验室,持久性有机污染物研究中心,北京,100084;

2. 清华大学-威立雅先进环境技术联合研究中心,北京,100084)

**摘要** 目前环境化学研究热点逐渐从传统污染物转向新兴污染物,如持久性有机污染物(POPs)、环境内分泌干扰物(EDCs)、药品和个人护理品(PPCPs)等。环境中痕量新兴污染物往往会造成较高的危害和风险,日益引起广泛关注。应对新兴污染物环境问题,首先要了解其环境风险,然后进行风险控制和防范。我国新兴污染物的研究正在逐渐兴起。近年来,研究人员在我国新兴污染物环境风险评价和控制方面积极开展工作,本文综述我国这方面的研究进展,以期为进一步开展其风险防范研究提供参考。

**关键词** 新兴污染物,环境风险,持久性有机污染物,药物和个人护理品。

目前美国化学文摘登记的化学品数量已经达到七千多万种,而且近年来以每年数百万至千余万种的增速在不断增加。这些化学品通过各种途径进入环境,随着环境分析技术的发展,人们不断发现这些进入环境中的部分化学品具有新兴污染物的特征。新兴污染物是指在环境中新发现的,或者虽然早前已经认识但是新近引起关注,且对人体健康及生态环境具有风险的污染物,包括持久性有机污染物(POPs)、环境内分泌干扰物(EDCs)、药品和个人护理品(PPCPs)等<sup>[1]</sup>,大多数新兴污染物未受法规规范。环境中新兴污染物不断出现给有机污染化学的发展带来新的机遇和强劲的推动力,例如:全氟辛烷磺酸(PFOS)、多溴联苯醚(PBDEs)等非氯取代的新 POPs 被增列入斯德哥尔摩公约,为 POPs 研究和污染控制带来了新的挑战。EDCs 和 PPCPs 等新兴污染物成为新的国际研究热点。

我国十二五环境保护的总体思路是“削减总量、改善质量、防范风险”,围绕这一思路,我国制定了“十二五”期间传统污染物总量削减目标。化学耗氧量(COD)、生化耗氧量(BOD)等传统有机污染物指标的总量控制在一定程度上促进了我国有机污染治理,但是对 COD、BOD 贡献微小的痕量新兴污染物往往会造成较高的危害。发达国家环境保护经历了从 COD、BOD 控制到新兴污染物风险防控的历程,而我国新兴污染物的研究正在逐渐兴起,很多问题亟待解决,首先要了解其环境风险,才能进行风险控制和防范。近年来,研究人员在我国新兴污染物风险评价和控制方面积极开展工作,本文综述了我国这方面近年来的研究进展,以期为进一步开展其风险防范研究提供参考。

### 1 新兴污染物清单研究

清单调查是从宏观层次了解新兴污染物现状和潜在暴露风险的手段,涉及新兴污染物的生产、使用和排放的调查。新兴污染物的清单调查有助于优先新兴污染物的筛选,新兴污染物生态风险评价中暴露模型估算,以及环境管理和控制措施的制定和实施。

#### 1.1 POPs 清单调查

为了履行斯德哥尔摩公约,我国学者开发或应用了一系列方法来开展 POPs 清单调查,目前已经完成了杀虫剂类 POPs<sup>[2-4]</sup>、多氯联苯(PCBs)<sup>[5]</sup>、非故意产生的 POPs(UP-POPs)<sup>[6-7]</sup>等第一批 POPs 类的排放清单研究。对于新 POPs,如硫丹<sup>[8-9]</sup>和 PFOS<sup>[10]</sup>,我国也开展了相应的清单研究。这些清单有助于我国 POPs 的总体污染评估以及环境风险评价和控制<sup>[11-12]</sup>,进而促进我国履约工作。

2013年2月19日收稿。

\* 国家高技术研究发展计划项目(2013AA06A305)资助。

\*\* 通讯联系人, Tel:010-62787137; E-mail: yg-den@tsinghua.edu.cn

## 1.2 PPCPs 清单调查

我国是世界上最大的药物生产国,拥有全球最大的药品市场;随着社会经济的发展,我国各类 PPCPs 生产和使用量也迅速增加. PPCPs 产品并非单一化合物,往往成分复杂,这造成了 PPCPs 清单调查的困难. 因此应重点开展有效成分和具有较高环境潜在危害的化学成分的调查.

最近, Gouin 等<sup>[13]</sup>发表了我国市场中 2500 种个人护理品 (PCPs) 中 254 种有效化学成分排放估算的研究, 此研究根据我国市场相关 PCPs 产品销售量和产品中有效成分的特征百分比含量, 估算了其中 114 种有效化学成分的年排放量, 大约在 0.027 吨至 29.2 万吨之间; 基于这 114 种物质的平均估算排放值, Gouin 等<sup>[13]</sup>假设其它 140 种有效成分的年排放量为 1000 吨. 显然, Gouin 等估算的我国 PCP 有效成分排放量非常粗略, 有待于进行进一步精确研究.

## 2 新兴污染物优先性筛选

新兴污染物种类繁多, 面对众多新兴污染物, 无论在科学研究还是控制管理上, 都要有所侧重, 因此需要筛选优先研究和控制的新兴污染物. 优先性筛选涉及到新兴污染物性质、毒性和环境暴露状况. 在清单调查和实验研究数据基础上, 建立数据库, 开发可靠的特性、毒性估算方法和暴露估算模型, 借助计算机辅助工具软件, 建立可靠的方法来筛选优先研究、控制和管理的新型污染物.

### 2.1 POPs 优先性筛选

狭义的受控 POPs 化合物通常首先由斯德哥尔摩公约缔约国提交增列申请, 然后 POPs 审查委员会进行评估审查并向缔约国大会推荐, 最后由缔约国大会进行讨论, 批准后才列入 POPs 名单, 按公约要求进行控制. 目前, 除了第一批 12 种类 POPs 物质, 2009 年、2011 年和 2013 年分三批新增选了 11 种受控 POPs; 我国学者也作为 POPs 审查委员会委员在 POPs 筛选中做出了积极贡献. 目前, 短链氯代石蜡 (SCCPs)、六溴环十二烷 (HBCD)、氯化萘、六氯丁二烯和五氯芬作为候选受控 POPs 正在接受审查.

广义的 POPs 筛选则是根据化合物的性质进行筛选, 只要符合 POPs 特性就可以筛选为广义 POPs 物质. 黄俊等<sup>[14]</sup>按照斯德哥尔摩公约中 POPs 的确定标准, 借鉴荷兰建设规划和环境部开发的持久生物富集性有毒化学物质 (PBTs) 筛选流程, 利用计算机辅助工具对《中国现有化学物质名录》中收录的所有两万多种化学物质进行了初步筛选, 得到 111 种 POPs 嫌疑物质.

受控 POPs 的筛选导致我国在履约中处于较被动的局面, 一些发达国家不再生产而我国仍在生产的化合物列入 POPs 公约 (如目前只有我国仍然在大量生产的 PFOS), 无疑将增大我国的履约压力, 对我国相关产业及其替代品开发有很大影响. 因此我国需要加强 POPs 筛选相关研究.

### 2.2 PPCPs 优先性筛选

王朋华等<sup>[15]</sup>以药物在水环境中的含量、持久性和毒性为依据, 建立了水环境中优先控制药物的筛选体系, 对上海市水环境中 7 类药物进行了筛选, 得到其中 24 种药物可以作为上海市水环境中的优先控制药物, 为水环境中药物生态风险评价及其污染控制提供依据. Sui 等<sup>[16]</sup>根据 PPCPs 的使用、污水处理厂去除状况以及它们的生态效应, 对我国优先控制的药物进行了筛选, 得到 17 种需要优先控制的药物, 其中, 红霉素、双氯芬酸和布洛芬具有最高的优先性. 因为我国大量使用各种抗生素, 在优先性药物中, 抗生素所占比例最高. Gouin 等<sup>[13]</sup>基于 RAIDAR 模型进行了我国 PCPs 优先性排序研究, 发现污水厂处理效率和生物转化会对筛选结果有很大影响, 研究表明绝大多数 PCPs 的风险非常低; 但是此筛选研究有很大的不足, 排放估算过于粗略且毒性终点的估算也有很大的不确定性, 造成优先性排序结果不可靠. 由于 PPCPs 优先性筛选不像受控 POPs 筛选那样有严格的审查程序, 导致了不同研究可能得到不同的结果. 根据目前的研究, 对于我国优先性 PPCPs 还没有形成公认的结论.

### 2.3 EDCs 优先性筛选

环境内分泌干扰物广泛存在于环境中, 能通过干扰激素功能, 引起个体或人群可逆或不可逆生物效应, 其种类繁多, 包括工业化学品、农药、天然雌激素和药物等. 内分泌干扰物的筛选和识别是其有效控制的前提, 美国环保署、日本环境省和世界自然基金会分别列出了 74、65 和 82 种内分泌干扰嫌疑物名单<sup>[17]</sup>. 隋倩等<sup>[17]</sup>基于我国城市污水处理厂二级处理出水中内分泌干扰物的浓度, 分别在出水最大浓度的极端情景和出水中位浓度的一般情景下, 计算了 32 种内分泌干扰物的雌二醇当量浓度, 在极端情景

和一般情形下,分别有 9 种和 5 种物质具有内分泌干扰性. 此研究建议我国城市污水处理厂应当优先控制炔雌醇、雌酮、壬基酚和双酚 A 这 4 种内分泌干扰物.

### 3 新兴污染物环境分析

环境分析是新兴污染物暴露风险研究的直接手段. 新兴污染物与传统污染物相比,一般浓度较低,分析难度大,分析技术往往是新兴污染物研究的瓶颈问题,只有解决了环境分析方法,才能开展进一步的研究.

#### 3.1 POPs 环境分析

近年来,我国科研人员在 POPs 环境样品前处理技术和仪器分析方面开展了大量卓有成效的研究工作. 在采样技术上,大气和水体样品被动式采样技术得到大力发展<sup>[18]</sup>,在一些应用中弥补了主动采样技术的不足. 在样品前处理方面,传统萃取技术,如液-液萃取、索氏提取,正迅速被固相萃取、压力溶剂萃取和微波辅助萃取等技术取代. 研究人员引进或开发了一些新型萃取技术,如中空纤维支载体液膜萃取、基于碳纳米管的新型固相微萃取 (SPME) 技术等. 近年来,我国二噁英类化合物的分析能力显著加强,目前我国已经建立了 30 多家配备高分辨率气相色谱/高分辨率质谱 (HRGC/HRMS) 的二噁英实验室,同时也发展了二噁英的生物检测方法,包括酶活力诱导法、酶免疫法、芳烃受体法以及生物芯片法等<sup>[19-23]</sup>,新近获得立项的环保公益性课题“超高灵敏二噁英类生物检测方法的开发与应用”将重点构建具有自主知识产权的二噁英生物检测细胞. 新 POPs 的问题日益显现对分析技术不断提出新的挑战,我国相当多的研究机构已经具备了 PBDEs、得克隆、PFOS/PFOA 等新兴受控 POPs 物质或广义 POPs 物质的分析能力,但新型阻燃剂、短链氯化石蜡等物质的分析能力有待加强<sup>[24]</sup>. 基于这些分析方法,我国相关科研人员积极开展了 POPs 环境存在以及生物和人体暴露状况的研究<sup>[25-26]</sup>,特别是经济技术较发达的沿海或近海地区开展了较多的研究.

#### 3.2 PPCPs 环境分析

目前环境中检测出的受关注 PPCPs 物质已达数百种,还有更多的 PPCPs 物质尚未引起足够重视或者尚未建立可靠的环境分析方法. 随着分析技术的发展,越来越多的 PPCPs 引起关注. 环境分析是获得 PPCPs 来源和环境暴露的直接手段,PPCPs 类别繁多,结构复杂且差异大,水体中 PPCPs 分析方法大多采用 SPE 萃取净化, HPLC、LC/MS/MS 或 GC/MS 定性/定量分析.

PPCPs 研究的目标物质通常有很大差异,我国环境中 PPCPs 的研究刚刚起步,研究的目标物质相对较少,多种类 PPCPs 的同时检测依然是难点. 我国只有一些以研究为目的开展的不系统的分析结果,PPCPs 环境存在数据比较匮乏,水体中 PPCPs 存在水平的研究主要集中于沿海或近海较发达地区,如京津冀地区<sup>[27-29]</sup>、长江三角洲<sup>[30-32]</sup>、珠江三角洲<sup>[33-34]</sup>、福建九龙江<sup>[35]</sup>等,而中部和西部地区 PPCPs 环境存在数据鲜有报道.

根据目前的研究尚不能对环境中 PPCPs 污染和暴露状况进行系统的分析,需加强 PPCPs 的环境存在状况研究. 在分析技术上加强前处理和仪器分析的研究,去除基质干扰,实现多种类型的 PPCPs 的有效分离和同时检测. 目前我国 PPCPs 的研究,大多集中于污水厂各处理单元的转化规律的研究,对出水和污泥最终进入自然环境中的迁移转化研究相对不足,而自然环境暴露与 PPCPs 环境风险更直接相关,因此需关注自然环境中 PPCPs 负荷、迁移转化和暴露. 开展合作研究,建立 PPCPs 监测和评估网络,可以解决目前零星分散的独立研究造成的数据系统性和可比性不足的问题,从而为 PPCPs 区域环境风险评价提供更好的支持.

### 4 新兴污染物风险评价

#### 4.1 POPs 环境风险评价

在国家 973 项目子课题“POPs 生态风险评价模式和预警方法体系”的支持下,研究人员首次提出并建立了 3 个等级的区域生态风险评价综合模式,通过各子模型的耦合集成建立一套基于多介质环境模型和食物网累积模型的多营养级生物组成的生态系统的概率风险评价模式(图 1)<sup>[36]</sup>. 在模式中,建立了基于食物网模型的生态系统中多各营养级生物体内暴露估算方法,并发展了基于食物网模型的生态

风险评价方法,揭示各营养层生物富集和生物放大对生态风险的贡献<sup>[37]</sup>;并且以淮河、海河、渤海湾等重点水体环境为例,进行了应用评价<sup>[38-39]</sup>.生态风险评价模式的建立及其应用将有助于我国 POPs 的风险管理与控制,保障生态环境安全.

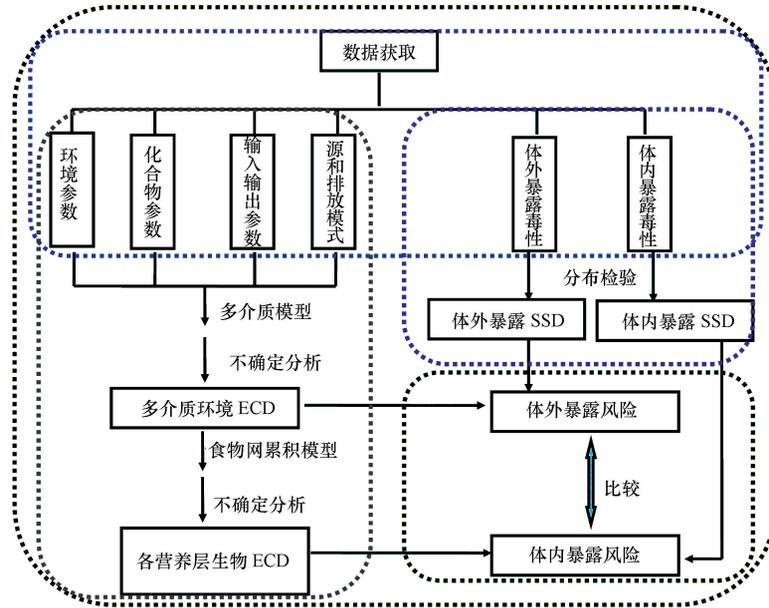


图 1 POPs 生态风险评价模式 (ECD: 暴露浓度分布; SSD: 物种敏感性分布)<sup>[36]</sup>

Fig. 1 Ecological risk assessment model of POPs

(ECD: exposure concentration distribution; SSD: species sensitivity distribution)

#### 4.2 PPCPs 环境风险评价

目前我国 PPCPs 环境风险研究尚处于起步阶段,迫切需要建立适合我国国情的 PPCPs 环境风险评价模式,对我国 PPCPs 环境风险现状进行评估. PPCPs 环境风险评价多采用雌二醇当量、风险商等方法.如 Zhao 等<sup>[40-41]</sup>运用简单的风险商法对我国珠江河流中 PPCPs 进行了风险评价, Wang 等<sup>[42]</sup>运用风险商法对我国黄河、海河和辽河中 PPCPs 进行了风险评价.这些筛选级的评价表明了在我国部分水体中,一些 PPCPs 造成了相对较高的环境风险,如双氯芬酸、三氯生、布洛芬等.

但是目前 PPCPs 研究中欠缺基于人体健康和生态环境安全的公认评价基准,不同研究可能采取不同的风险评价基准,导致风险评价结果的不确定性.生态风险评价结果依赖预测无效应浓度 (PNEC) 的计算方法、采用的物种毒性数据测试所包括的物种类别、以及是否包括敏感物种和本土相关物种毒性数据等因素<sup>[39]</sup>.因此,在开展 PPCPs 毒理学实验研究的同时,综合运用多种模型手段,如定量结构活性相关 (QSAR)、种间相关估算 (ICE) 等毒性外推方法获得更多代表性物种毒性数据,建立稳健的物种敏感性分布模型,获取可靠的 PNEC<sup>[43]</sup>.借助 PPCPs 环境监测分析的同时,应发展或运用可靠的模型 (如 PhATE 模型、EUSES 模型等) 进行环境暴露预测和评价,加强 PPCPs 人体暴露和生物累积的研究,建立基于人体健康和生态环境安全的 PPCPs 风险评价基准.

目前风险评价大多数是针对单个 PPCPs,而 PPCPs 种类繁多,在实际环境中,多种 PPCPs 往往共同存在,生态系统中的生物暴露于多种 PPCPs 的混合体系中,很多低浓度 PPCPs 单独作用往往不能造成危害效应,但是 PPCPs 混合物的联合作用可能造成风险<sup>[44]</sup>. PPCPs 分析研究目前主要集中在 PPCPs 母体化合物的分析,而对于其代谢和降解产物的分析研究很少,降解产物本身或与母体物质共同作用可能产生更高的毒性效应,造成更大的环境风险. PPCPs 环境风险一般是由于长期低浓度暴露造成的,长期暴露过程中,无论是物质还是暴露浓度都存在很大变异性和不确定性,因此需要进行长期连续的环境监测,采用非稳态模型进行暴露模拟,并进行风险的不确定性分析.

## 5 新兴污染物风险控制

对于不同的新兴污染物,需要通过不同的途径来进行风险管理和控制:如全面禁止和淘汰、替代品开发、处理处置、以及风险防范.目前我国在 POPs 风险控制方面取得了较大进展,但是 PPCPs 风险控制还基本停留在实验室技术研究阶段,迫切需要开展工程技术应用研究,以达到其风险控制.

### 5.1 淘汰有机氯农药

公约中的受控 POPs 大多数是有机氯农药.作为农业大国,我国曾经是有机氯农药的主要生产国和消费国.2009 年 4 月,环保部等国家部委联合发布《关于禁止生产、流通、使用和进出口滴滴涕、氯丹、灭蚁灵及六氯苯的公告》,自 2009 年 5 月 17 日起,禁止在我国境内生产、流通、使用和进出口滴滴涕、氯丹、灭蚁灵和六氯苯,至此,我国已经全面淘汰了首批 9 种杀虫剂类 POPs.但是目前新列入 POPs 名单的硫丹仍然在我国大量生产和使用<sup>[45]</sup>.

### 5.2 POPs 替代品开发

我国明确提出将引进和开发 POPs 替代品或替代技术,推进产业化作为我国履行斯德哥尔摩公约的优先性选择和行动目标之一.近年来,我国重点开展了杀虫剂类、溴代阻燃剂和全氟化合物替代品研究,启动了国家 863 重点项目“典型优控持久性有机污染物替代产品和替代技术”.我国已初步具备杀虫剂类 POPs 替代品的生产能力,但目前替代品成本较高且产品性能尚不能满足替代要求,需要加强自主开发能力,集中力量研发高效低毒、环境友好、经济合理的替代品和替代技术.为履行公约,淘汰 PBDEs,我国正在加紧研制新型阻燃剂,上述 863 项目的子课题“十溴联苯醚阻燃剂替代品开发”的目标就是开发能取代十溴联苯醚的含磷高聚物阻燃剂,并建成示范工厂.

淘汰 PFOS/PFOSE 的关键在于寻找到合适的替代品或替代技术,为此环境保护部与世界银行合作,启动了“中国削减和消除 PFOS/PFOSE 战略研究项目”,旨在弄清我国 PFOS/PFOSE 的生产应用清单、评估可能的替代技术、识别机构能力和政策法规方面的改进需求,从而为 PFOS/PFOSE 淘汰削减战略的制订打下基础.目前,我国科研人员以短链全氟丁基为基础合成了可用于生产水成膜泡沫灭火剂(AFFF)的氟表面活性剂,可用于 AFFF 生产过程中 PFOS 的替代<sup>[46]</sup>.

### 5.3 POPs 处理处置和减排

早在 1995 年,沈阳环境科学研究院就建立了国内第一个处置高浓度 PCBs 废物的焚烧中试装置,目前该装置全面达到国家相关技术标准、许可证规定和试烧计划要求的各项性能指标,可以安全高效地焚烧处置 PCBs 废物.2010 年,日处理 70—100 吨 PCBs 污染土壤的热脱附处理设备于浙江杭州市安置到位,目前,该设备已投入运行,用于 PCBs 废物的无害化处理.

针对 POPs 等污染物造成的污染场地问题,在科技部 863 计划重点项目“典型工业污染场地土壤修复关键技术研究及综合示范”的支持下,我国科研人员开展了挥发性有机污染场地土壤气提修复技术与设备研制,有机氯农药污染土壤多功能强化洗脱和序批式复合催化反应器小试设备研制,PCBs 热脱附修复和原位生物修复技术与设备研制等,为成套设备研发打下基础. POPs 及受其污染的土壤的非焚烧处置技术(如机械化学技术)也日益受到我国研究者的关注,相关研究取得了一定的进展<sup>[47-48]</sup>.

国际上非常重视二噁英等 UP-POPs 减排技术的研发,联合国环境规划署组织专家编制了《二噁英减排最佳可行技术/最佳环境实践(BAT/BEP)技术导则》<sup>[49]</sup>.然而,现有技术主要是来自发达国家的实践,一方面这些技术系统较为复杂,投资和运行费用普遍较高;另一方面这些技术是否适合我国国情还缺乏深入分析和实证研究.我国正加紧研究二噁英排放特征、机理和控制技术,并且在钢铁、造纸、焚烧等行业的多个企业成功进行了技术示范.目前,迫切需要推广一批符合国情、经济性较高、接近国际先进水平,以支撑 UP-POPs 减排.我国二噁英减排任重道远,需要积极借鉴发达国家、地区的成功经验,加大工作力度,大力实施《国家实施计划》,明确二噁英减排目标,完善法律、标准、政策体系,推进重点地区重点行业减排,加强二噁英减排的技术支撑,提高二噁英检测能力,推广应用 BAT/BEP;并且通过严格的监督机制,保证减排目标、法律法规、政策和各种技术措施的落实.

### 5.4 PPCPs 环境风险防范

由于缺乏 PPCPs 排放控制标准和环境质量标准,也没有相关法律和国际公约的制约,目前我国 PPCPs 的控制技术基本处于实验室阶段,缺乏实际应用. PPCPs 控制方法主要包括高级氧化法、活性炭

吸附法以及膜工艺法等。PPCPs 在我国城市污水处理厂污水和污泥中普遍存在,目前的处理工艺不能有效去除 PPCPs<sup>[50]</sup>;实验室模拟的臭氧氧化工艺虽然能有效去除大多数 PPCPs,但臭氧氧化过程中产生大量的不能彻底氧化的低分子量有机物,可能导致毒性效应升高或者不能显著降低<sup>[51-52]</sup>。

针对高风险的优先性 PPCPs,需要加强环境管理和控制技术开发。应在清单调查和优先性筛选的基础上,结合我国 PPCPs 生产和使用特点,开展城市污水和自然水体中典型 PPCPs 的分布调查和迁移转化规律研究,加强 PPCPs 生态毒性效应分析,特别是对本土物种的危害效应,评估典型 PPCPs 的风险状况,识别高风险 PPCPs 母体或其降解产物,判断其引起环境风险的主要环节和途径,进而指导开发新型的控制技术。传统的处理工艺不能有效去除污水中的 PPCPs,需要弄清 PPCPs 在处理过程中的转化机理,改进污水处理技术和工艺,在提高 PPCPs 降解率的同时,避免在污水处理过程中生成危害性更高的降解产物进入环境。加强风险源识别,实施严格的生命周期管理,最大限度地降低各种途径的排放。对环境危害性特别高的 PPCPs,可以开展替代药物研究。另外,要积极开展宣传,改善民众习惯,对过期、过剩和变质 PPCPs 进行集中收集处理,降低 PPCPs 进入环境的可能性。

## 6 小结

目前常规污染物的环境管理与防治技术日趋成熟,而新兴污染物的问题日益显现。我国新兴污染物的风险评价和控制研究刚刚起步,任重道远,迫切需要加强研究,建立完善的化学品环境风险评价技术,评估新兴污染物的潜在环境风险;加强基于人体健康、生态环境安全的新兴污染物环境基准研究;加强风险控制和管理技术研究,为新兴污染物环境安全保障提供支持,为国家履约提供决策支持。“新兴污染物风险评价与控制技术”教育部创新团队将围绕此方向开展进一步研究,构建新兴污染物的风险评价与控制技术体系,建立完善风险评价方法学,识别重点风险源,研发符合我国国情的新兴污染物风险控制技术,为我国新兴污染物风险管理提供决策支持。

## 参 考 文 献

- [1] Richardson S D. Water analysis; emerging contaminants and current issues [J]. *Anal Chem*, 2009 (12): 46-55
- [2] 韩文亚, 黄俊, 余刚, 等. 我国持久性有机污染物类废弃杀虫剂库存的清单调查方法学研究 [J]. *农业环境科学学报*, 2007, 26 (5): 1615-1618
- [3] 赵丽娟. 中国氯丹和滴滴涕使用清单研究[D]. 北京: 北京大学硕士学位论文, 2005
- [4] GEF. China—Demonstration of alternatives to chlordane and mirex in termite control project [R]. Washington: Global Environment Facility (GEF), 2006
- [5] Shi W, Yu G, Huang J, et al. Inventory methodology and occurrence of PCBs wastes in Zhejiang Province of China [J]. *Organohalogen Comp*, 2005, 67: 1066-1069
- [6] 郑明辉, 孙阳昭, 刘文彬. 中国二噁英类持久性有机污染物排放清单研究 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2008
- [7] 杨淑伟, 黄俊, 余刚. 中国主要排放源的非故意产生六氯苯和多氯联苯大气排放清单探讨 [J]. *环境污染与防治*, 2010, 32 (7): 82-85
- [8] Lim T C, Wang B, Huang J, et al. Emissions inventory for PFOS in China—Review of past methodologies and suggestions [J]. *The Scientific World Journal*, 2011, 11: 1963-1980
- [9] Jia H L, Li Y F, Wang D G, et al. Endosulfan in China 1-Gridded usage inventories [J]. *Environ Sci Pollut Res*, 2009, 16(3): 295-301
- [10] Jia H L, Sun Y Q, Li Y F, et al. Endosulfan in China 2-Emissions and residues [J]. *Environ Sci Pollut Res*, 2009, 16(3): 302-311
- [11] Wang B, Iino F, Yu G, et al. HRGC/HRMS analysis of mirex in soil of Liyang and preliminary assessment of mirex pollution in China [J]. *Chemosphere*, 2010, 79(3): 299-304
- [12] 王斌. 持久性有机污染物生态风险评估模式及其应用[D]. 北京: 清华大学博士学位论文, 2008
- [13] Gouin T, van Egmond R, Price O R, et al. Prioritising chemicals used in personal care products in China for environmental risk assessment: application of the RAIDAR model [J]. *Environ Pollut*, 2012, 165: 208-214
- [14] 黄俊, 余刚, 张彭义. 中国持久性有机污染物嫌疑物质的计算机辅助筛选研究 [J]. *环境污染与防治*, 2003, 25(1): 16-19
- [15] 王朋华, 袁涛, 李荣, 等. 水环境中优先控制药物筛选体系的建立与应用 [J]. *中国环境监测*, 2008, 24 (4): 7-12
- [16] Sui Q, Wang B, Zhao W T, et al. Identification of priority pharmaceuticals in the water environment of China [J]. *Chemosphere*, 2012, 89(3): 280-286
- [17] 隋倩, 黄俊, 余刚. 中国城市污水处理厂内内分泌干扰物控制优先性分析 [J]. *环境科学*, 2009, 30 (2): 384-390
- [18] Wang B, Yu G, Zhang T T, et al. CALUX bioassay of dioxin-like compounds in sediments from the Haihe River, China [J]. *Soil Sed*

- Contam, 2009, 18(4): 397-411
- [19] 刘征侃, 杨利民, 王秋泉. 大气持久性有机污染物分析研究进展[J]. 环境化学, 2011, 30(1): 272-280
- [20] Zhang T T, Yu G, Wang B, et al. Bioanalytical characterization of dioxin-like activity in sewage sludge from Beijing, China [J]. Chemosphere, 2009, 75(5): 649-653
- [21] Chen H Y, Zhuang H S. Real-time immuno-PCR assay for detecting PCBs in soil samples [J]. Anal Bioanal Chem, 2009, 394(4): 1205-1211
- [22] Shen C F, Chen Y X, Huang S B, et al. Dioxin-like compounds in agricultural soils near e-waste recycling sites from Taizhou area, China: Chemical and bioanalytical characterization [J]. Environ Int, 2009, 35(1): 50-55
- [23] Rong Z Y, Li K, Yin H W. Pilot study of the polychlorinated dibenzo-*p*-dioxins and dibenzofurans level in agricultural soil in Shanghai, China [J]. Environ Monit Assess, 2010, 171(1/4): 493-500
- [24] Wang B, Iino F, Yu G, et al. The pollution status of emerging persistent organic pollutants in China [J]. Environ Engin Sci, 2010, 27: 215-225
- [25] 李敬光, 赵云峰, 吴永宁. 我国持久性有机污染物人体负荷研究进展[J]. 环境化学, 2011, 30(1): 5-19
- [26] 万斌, 郭良宏. 多溴联苯醚的环境毒理学研究进展[J]. 环境化学, 2011, 30(1): 143-152
- [27] Luo Y, Xu L, Rysz M, et al. Occurrence and transport of tetracycline, sulfonamide, quinolone, and macrolide antibiotics in the Haihe River Basin, China [J]. Environ Sci Technol, 2011, 45: 1827-1833
- [28] Zou S C, Xu W H, Zhang R J, et al. Occurrence and distribution of antibiotics in coastal water of the Bohai Bay, China: Impacts of river discharge and aquaculture activities [J]. Environ Pollut, 2011, 159: 2913-2920
- [29] Zhou H D, Wu C Y, Huang X, et al. Occurrence of selected pharmaceuticals and caffeine in sewage treatment plants and receiving rivers in Beijing, China [J]. Water Environ Res, 2010, 82: 2239-2248
- [30] Yang Y, Fu J, Peng H, et al. Occurrence and phase distribution of selected pharmaceuticals in the Yangtze Estuary and its coastal zone [J]. J Hazard Mater, 2011, 190: 588-596
- [31] Jiang L, Hu X L, Yin D Q, et al. Occurrence, distribution and seasonal variation of antibiotics in the Huangpu River, Shanghai, China [J]. Chemosphere, 2011, 82: 822-828
- [32] Wei R C, Ge F, Huang S Y, et al. Occurrence of veterinary antibiotics in animal wastewater and surface water around farms in Jiangsu Province, China [J]. Chemosphere, 2011, 82: 1408-1414
- [33] Peng X Z, Zhang K, Tang C M, et al. Distribution pattern, behavior, and fate of antibacterials in urban aquatic environments in South China [J]. J Environ Monit, 2011, 13: 446-454
- [34] Yang J F, Ying G G, Zhao J L, et al. Spatial and seasonal distribution of selected antibiotics in surface waters of the Pearl Rivers, China [J]. J Environ Sci Health B, 2011, 46: 272-280
- [35] Zhang D D, Lin L F, Luo Z X, et al. Occurrence of selected antibiotics in Jiulongjiang River in various seasons, South China [J]. J Environ Monit, 2011, 13: 1953-1960
- [36] Wang B, Huang J, Deng S B, et al. Addressing the environmental risk of persistent organic pollutants in China [J]. Front Environ Sci Engin, 2012, 6: 2-16
- [37] Wang B, Yu G, Huang J, et al. Probabilistic ecological Risk Assessment of DDTs in the Bohai Bay based on a Food Web Bioaccumulation Model [J]. Sci Total Environ, 2011, 409: 495-502
- [38] Wang B, Yu G, Huang J, et al. Probabilistic ecological risk assessment of OCPs, PCBs and DLCs in the Haihe River, China [J]. The Scientific World Journal, 2010, 10: 1307-1317
- [39] Wang B, Yu G, Huang J, et al. Tiered aquatic ecological risk assessment of organochlorine pesticides and their mixture in Jiangsu reach of Huaihe River, China [J]. Environ Monit Assess, 2009, 157: 29-42
- [40] Zhao J L, Ying G G, Liu Y S, et al. Occurrence and a screening-level risk assessment of human pharmaceuticals in the Pearl River system, South China [J]. Environ Toxicol Chem, 2010, 29: 1377-1384
- [41] Zhao J L, Ying G G, Liu Y S, et al. Occurrence and risks of triclosan and triclocarban in the Pearl River system, South China: From source to the receiving environment [J]. J Hazard Mater, 2010, 179: 215-222
- [42] Wang L, Ying G G, Zhao J L, et al. Occurrence and risk assessment of acidic pharmaceuticals in the Yellow River, Hai River and Liao River of north China [J]. Sci Total Environ, 2010, 408: 3139-3147
- [43] Wang B, Yu G, Huang J, et al. Development of species sensitivity distributions and estimation of HC<sub>5</sub> of organochlorine pesticides with five statistical approaches [J]. Ecotoxicology, 2008, 17: 716-724
- [44] Backhaus T, Scholze M, Grimme L H. The single substance and mixture toxicity of quinolones to the bioluminescent bacterium *Vibrio fischeri* [J]. Aquat Toxicol, 2000, 49: 49-61
- [45] Wang B, Huang J, Lu Y, et al. The pollution and ecological risk of endosulfan in soil of Huai'an City, China [J]. Environ Monit Assess, 2012, 184(12): 7093-7101
- [46] 陈蔚勤, 邢航, 肖进新. 用于水成膜泡沫灭火剂的 PFOS 替代品的研究 [C]. 第六届持久性有机污染物全国学术研讨会论文集, 北京, 2011: 188-189

- [47] Zhang W, Huang J, Yu G, et al. Mechanochemical destruction of dechlorane plus with calcium oxide [J]. *Chemosphere*, 2010, 81: 345-350
- [48] Yu Y F, Huang J, Zhang W, et al. Mechanochemical destruction of mirex co-ground with iron and quartz in a planetary ball mill [J]. *Chemosphere*, 2012, 90 (5): 1729-1735
- [49] UNEP. Guidelines on best available techniques and provisional guidance on best environmental practices relevant to Article 5 and Annex C of the Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants [R]. Geneva, Switzerland, 2007
- [50] Sui Q, Huang J, Deng S B, et al. Occurrence and removal of pharmaceuticals, caffeine and DEET in wastewater treatment plants of Beijing, China [J]. *Water Res*, 2010, 44 (2): 417-426
- [51] Liu C, Nanaboina V, Korshin G. Spectroscopic study of the degradation of antibiotics and the generation of representative EfOM oxidation products in ozonated wastewater [J]. *Chemosphere*, 2012, 86 (8): 774-782
- [52] Kuang J M, Huang J, Wang B, et al. Ozonation of trimethoprim in aqueous solution: Identification of reaction products and their toxicity [J]. *Water Res*, 2013, 47 (8): 2863-2872

## Environmental risk assessment and control of emerging contaminants in China

WANG Bin<sup>1,2</sup>    DENG Shubo<sup>1,2</sup>    HUANG Jun<sup>1,2</sup>    YU Gang<sup>1,2\*</sup>

(1. POPs Research Center, State Key Joint Laboratory of Environmental Simulation and Pollution Control, School of Environment, Tsinghua University, Beijing, 100084, China; 2 Tsinghua-Veolia Joint Research Center for Advanced Environmental Technology, Tsinghua University, Beijing, 100084, China)

### ABSTRACT

Currently the hottest issues of environmental chemistry study have moved from traditional pollutants to emerging contaminants, such as persistent organic pollutants (POPs), endocrine disrupting chemicals (EDCs), pharmaceutical and personal care products (PPCPs). The emerging contaminants can cause relatively high hazard and risk although their environmental levels are usually very low. Increasing attention has been paid to emerging contaminants all around the world. To address the environmental problem of emerging contaminants, their environmental risks should firstly be evaluated, and then risk control and management can be performed accordingly. Recently the study of emerging contaminants in China is gradually on the rise. A certain amount of studies have been conducted in China to address the environmental risk of emerging contaminants and their risk control. This paper reviews the research progress on the environmental risk assessment and control of emerging contaminants in China in recent years, which will provide references for further risk precaution and control.

**Keywords:** emerging contaminants, environmental risk, persistent organic pollutants, pharmaceutical and personal care products.