

曹莹,张亚辉,闫振广,等. 典型全氟化合物 PFOS/PFOA 的生态风险及控制对策[J]. 环境工程技术学报,2017,7(1):96-101.

CAO Y, ZHANG Y H, YAN Z G, et al. Ecological risks and control measures of typical perfluorinated compounds PFOS/PFOA [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2017, 7(1):96-101.

典型全氟化合物 PFOS/PFOA 的生态风险及控制对策

曹莹¹,张亚辉^{1*},闫振广¹,王一喆¹,朱岩²,刘征涛¹

1. 环境基准与风险评估国家重点实验室,中国环境科学研究院,北京 100012
2. 桂林理工大学环境科学与工程学院,广西 桂林 541004

摘要 环境中最常见的 2 种全氟化合物(PFCs)污染物为全氟辛烷磺酸(PFOS)和全氟辛烷羧酸(PFOA)。综述了国内外推荐的有关的 PFOS/PFOA 环境安全阈值,结合我国部分流域及典型区域 PFOS/PFOA 的污染现状,分析了现阶段我国 PFCs 生态风险管理面临的问题,提出了制订我国 PFOS/PFOA 环境质量基准/标准,加强典型区域 2 种 PFCs 的生态风险评估,增强其物质替代品的监控、生态毒性监管,以及替代品的风险防控等方面的建议。

关键词 全氟辛烷磺酸(PFOS);全氟辛烷羧酸(PFOA);生态风险;对策

中图分类号:X826 **文章编号**:1674-991X(2017)01-0096-06 **doi**:10.3969/j.issn.1674-991X.2017.01.014

Ecological risks and control measures of typical perfluorinated compounds PFOS/PFOA

CAO Ying¹, ZHANG Yahui¹, YAN Zhenguang¹, WANG Yizhe¹, ZHU Yan², LIU Zhengtao¹

1. State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China
2. College of environmental Science and Engineering, Guilin University of TechnoLogY, Guilin 541004, China

Abstract The two most common PFCs pollutants found in nature were perfluorooctane sulfonate (PFOS) and perfluorooctane acid (PFOA). The recommendations of environmental safety thresholds of PFOS and PFOA were reviewed at home and abroad. Based on the pollution status of PFOS and PFOA in some basins and typical areas in China, the problems of the ecological risk management of PFCs in China were analyzed. Some suggestions were proposed, including formulating the PFOS and PFOA environmental quality criteria/standards, strengthening the ecological risk assessment of typical regional PFCs, and enhancing the material substitutes monitoring, ecological toxicity supervision and substitutes risk prevention and control, etc.

Key words PFOS; PFOA; ecological risk; control measures

全氟化合物(perfluorinated compounds, PFCs)广泛应用于诸多工业生产和生活用品中,具有持久性、生物蓄积性、远距离迁移等特性,是长期存在并累积于环境中的一类新型污染物^[1]。多项环境调查研究显示,PFCs 中最主要的检出物为全氟辛烷磺酸〔perfluorooctane sulfonate, PFOS, CF₃(CF₂)₇SO₃H〕和全氟辛烷羧酸〔perfluorooctanoic acid, PFOA, CF₃(CF₂)₆COOH〕,其广泛存在于我国环境介质及生物体和人体中^[2-6],被认为是引起全球环境污染的新型化学污染物。2009 年 5 月,在日内瓦召开的第四届公约缔约方大会上,全氟辛烷磺酸及其盐类和全氟辛烷磺酰氟被正式列入持久性有机污染物名

收稿日期:2016-05-17

基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07501003);国家自然科学基金项目(21407139);科技基础性工作专项(2014FY120600)

作者简介:曹莹(1983—),女,工程师,硕士,主要从事环境风险评估研究,caoyingyeah@sina.com

* 责任作者:张亚辉(1979—),女,副研究员,博士,主要从事污染物的生态毒理及毒性评估与预测研究,zhangyahui@craes.org.cn

单附件 B 中加以限制^[7]。欧盟指令也指出: PFOA 被怀疑与 PFOS 有大致相似的危害性, 现仍在对其危险分析试验、替代品的实效性、限制措施进行评估, 极有可能在未来被限制^[8]。多种高分子 PFCs 聚合物的一部分和在环境中的最终转化产物为 PFOS 及其盐类和 PFOA。

笔者通过简述国内外 PFOS/PFOA 推荐的环境安全阈值, 利用我国学者推导的环境介质(淡水、沉积物和土壤)中的预测无效应浓度(predicted no effect concentration, PNEC), 结合我国部分流域和典型区域 PFOS/PFOA 的污染现状, 分析了现阶段我国 PFOS/PFOA 生态风险评估面临的问题, 提出了 PFOS/PFOA 的生态风险控制对策, 旨在为提高我国 PFOS/PFOA 的风险评估与风险管理水平提供科学基础。

1 PFOS/PFOA 推荐的环境安全阈值

在生态风险评估中, PNEC 评估是环境基准/标准制订的直接依据, 其推算方法是欧盟化学物质风险评价技术指导文件(TGD)中的评估系数法, 欧盟直接将 PNEC 值用于水生态基准的制订。

1.1 PFOS

2004 年英国环境保护署采用巴西尼康虾(*Mysidopsis bahia*) 35 d 的无可见效应浓度(NOEC), 获得 PFOS 的 PNEC_水 为 25 μg/L, 用平衡

分配法计算 PNEC_{沉积物} 为 67 mg/kg; 采用莴苣 21 d 的 NOEC (< 3.91 mg/L), 获得 PNEC_{土壤} 为小于 39 μg/kg^[9]。2010 年 3M 公司采用黑头呆鱼(*Pimephales promelas*) 42 d 的 NOEC (0.3 mg/L) 获得 PNEC_水 为 30 μg/L^[10]。日本环境部利用 NOEC 最低值(贝类)得到 PNEC_水 为 23 μg/L^[11]。但国外推荐的 PFOS 的 PNEC 值, 对我国的本土生物可能产生“欠保护”或“过保护”影响, 不利于我国 PFOS 的环境风险评估; 且国外推导的 PNEC_水 对我国的昆虫(如摇蚊幼虫 36 d 的 NOEC < 0.002 3 mg/L^[12] 和心斑绿螳 120 d 的 NOEC = 0.01 mg/L^[10]) 以及鱼类(如日本青鳉 14 d 的 NOEC < 0.01 mg/L^[13]) 无保护性(表 1)。张亚辉等^[14] 采用 PFOS 对本土生物物种的生态毒性数据, 选择心斑绿螳 120 d 的 NOEC (0.01 mg/L), 得到 PNEC_水 为 1 μg/L, 同时通过平衡分配法计算得到 PNEC_{沉积物} 为 2.7 mg/kg(湿质量)。土壤环境中采用广泛存在的土壤跳虫(*F. candida*) 28 d 的 NOEC (0.05 mg/kg) 推导得到 PNEC_{土壤} 为 1 μg/kg。对比国内外环境介质中的 PNEC, 我国的 PNEC_水 能够保护本土淡水生物。PNEC_{沉积物} 通过平衡分配法来计算, 由于国内外推导的 PNEC_水 的不同造成 PNEC_{沉积物} 的不同。我国 PNEC_{土壤} 在推导过程中未对毒性数据进行标准化处理, 可能导致数值偏低。

表 1 国内外 PFOS/PFOA 的 PNEC 比较
Table 1 PFOS/PFOA comparison of PNEC value in China and abroad

化合物	中国			外国		
	淡水/(mg/L)	沉积物/(mg/kg)	土壤/(mg/kg)	淡水/(mg/L)	沉积物/(mg/kg)	土壤/(mg/kg)
PFOS	0.001 ^[14]	2.7 ^[14]	0.001 ^[14]	0.025 ^[9] , 0.03 ^[10]	67 ^[9]	< 0.039 ^[9]
PFOA	0.57 ^[15]	2.06 ^[15]	0.19 ^[15]	0.57 ^[16] , 1.25 ^[17]	—	0.16 ^[16]

1.2 PFOA

荷兰某家咨询机构^[16]发表的有关 PFOA 及其盐类的风险评估报告中, 考虑了微宇宙研究的穗状狐尾藻(*Myriophyllum spicatum*) 35 d 的 EC₁₀ 为 5.7 mg/L, 得到 PNEC_水 为 0.57 mg/L; 土壤环境中以蚯蚓幼体繁殖为毒性终点的 NOEC 为 16 mg/kg(湿质量), 得到 PNEC_{土壤} 为 0.16 mg/kg。挪威污染控制局^[18]在 2008 年发表的有关全氟化合物对土壤和生活在土壤中生物风险评估报告中, 同样推导出 PNEC_{土壤} 为 0.16 mg/kg。Colombo 等^[17]采用近头状伪蹄形藻(*Pseudokirchneriella subcapitata*) 72 h 的

NOEC (> 12.5 mg/L) 得出 PFOA 的 PNEC_水 为 1.25 mg/L。我国学者^[15]同样采用穗状狐尾藻 35 d 的 EC₁₀ (5.7 mg/L) 推导出 PNEC_水 为 0.57 mg/L; 采用平衡分配法计算 PNEC_{沉积物} 为 2.06 mg/kg; 以蚯蚓 28 d 幼体繁殖率为终点的 NOEC 为 16 mg/kg; 将土壤数据转化为标准土壤数据, 得到 PNEC_{土壤} 为 0.19 mg/kg。

2 PFOS/PFOA 的环境生态风险评估

Jin 等^[19]调查了我国不同区域环境和自来水样品中的 PFOS/PFOA, 得出: 偏远地区水中 PFOS/

PFOA 平均浓度(最大浓度)分别为 0.4(2.4)和 0.1(1.3) ng/L;而在市区分别为 4.0(14.1)和 3.9(30.8) ng/L。Yang 等^[20-21]系统调查了浑河和长江的 PFOS/PFOA 的污染状况。浑河中,PFOS 浓度的中位数为 4.9 ng/L,而 PFOA 低于定量限(0.1 ng/L);长江呈中度污染,PFOS/PFOA 平均浓度分别为 4.2 和 5.4 ng/L,存在的生态风险较小;太湖水体中 PFOA 的风险商小于 1,因此太湖水体中的 PFOA 短期内对水生生物几乎没有风险,概率法的评价也显示太湖水体中的 PFOA 短期内对水生生物几乎没有风险。氟化学工业园附近水和土壤中的 PFOA 在短期内对水生生物风险也很低^[22-23],但与太湖的结果相比,该氟工业园区的生产活动已在某种程度上对附近的水体产生了影响。

英国环境保护署^[8]预测了靠近 PFOS 污染源的背景地区(偏远地区)和下游河流水体中 PFOS 的浓度,污染源包括镀铬、摄影、航空、消防泡沫生产、光刻、织物、纸张处理和涂料工业等(高度污染区域),利用基于 7 个场景下代表 PFOS 有关化合物降解的欧盟物质评估系统(EUSES),计算出由消防泡沫生产导致污染的河流中水生生物的风险商是 4,所有背景地区的比值均低于 0.004;同时该机构也利用 PNEC 评估了高营养级中生物的二次毒性,结果表明,包括背景区域和高污染区域在内的所有区域中淡水食物链的风险商都超过 10。英国环境保护署得出的结论是需要对 PFOS 的二次毒性给予更大的关注。OSPAR 委员会^[24]推导的风险评估,尤其是对海洋生物,以类似的方式得出了类似的结论。加拿大环境部门利用环境中暴露水平(EEV)和无效应水平比例(ENEV)评估风险,通过北极地区顶级捕食者(南哈森北极熊)肝脏中的最大暴露浓度(3 770 $\mu\text{g/kg}$)和 ENEV(408 $\mu\text{g/kg}$)得到风险商为 9.2,得出 PFOS 的最大潜在危险存在于较高营养级的哺乳动物中。

国外的研究结果说明,PFOS 在水环境背景区域的风险较小,但是需要考虑 PFOS 通过食物链生物富集对较高营养级动物产生的风险。Rostkowski 等^[25]考虑到生物蓄积效应,建议水中 PFOS 的 PNEC 为 50 ng/L。但水体中超过该值的并不少见,如有关欧盟河流大区调查报告显示 90% 欧盟河流的 PFOS 浓度都在 73 ng/L 以下,其平均浓度在 39 ng/L。尽管现有的信息有限,PFOA 所带来的生态风险(高暴露在特殊情况除外)是最小的,因为 PFOA 的 PNEC 要比 PFOS 的高出 1 个数量级,并且 PFOA

在环境中的水平与 PFOS 相当。在我国,PFOS/PFOA 在水环境中的生态风险较小,但需要关注典型区域(如氟工业园区)的生态风险。同时张亚辉等^[26]对 PFOS 在太湖水生食物链中 9 种鱼和白鹭产生的次生毒性风险进行评价,9 种鱼的风险商均未超过 0.5,捕食鸟类白鹭的风险商(0.52)最高,说明 PFOS 对太湖水生食物链的次生毒性风险较小。

3 PFOS/PFOA 的生态风险控制对策

3.1 我国 PFOS/PFOA 生态风险管理面临的问题

(1)缺乏针对全氟化合物的环境质量基准/标准体系。国外针对 PFOS/PFOA 的生态毒理研究已经积累了很多数据^[27-29],发达国家环境管理部门针对 PFOS/PFOA 已经提出了不同环境介质推荐的安全阈值或标准限值^[30-33],为流域的生态风险提供了科学标准。我国虽已经开展部分相关本土生物物种 PFOS/PFOA 的生态毒性研究^[34-38],尤其是水中 PFOS/PFOA 的数据已经积累了很多,然而,对沉积物和土壤环境中 PFOS/PFOA 的研究数据积累还远不够,仍在采用国外 PFOS/PFOA 的物理化学数据或物种的生态毒性数据来推导我国环境介质安全阈值,提出我国 PFOS/PFOA 的环境质量基准/标准值,但该值是否能保护我国本土物种(尤其是本土敏感物种及敏感生物群落)尚存在疑问。

(2)缺乏 PFOS/PFOA 在典型区域的环境生态风险评估。目前,我国大部分地区包括长三角和珠三角流域经济发达地区的 PFOS/PFOA 浓度处于世界较低水平,对我国生态环境尚不构成威胁。但随着发达国家对 PFOS/PFOA 管控措施的加强,一些发达国家不再生产 PFOS/PFOA,而把生产线转移到了中国,2003 年 3M 公司在美国退出生产的时候,中国却在扩大生产。中国 PFOS 的产量 2004 年小于 50 t,2006 年大于 200 t,其中 100 t 用于出口^[39];2010 年我国全氟类化合物产量约 550 t,其中 PFOS 的钾盐约 100 t^[40-41]。随着 PFOS/PFOA 生产量的增大可能会给我国生态环境带来更大的风险,但我国对 PFOS/PFOA 在典型区域中的生产、排放、使用、库存和污染场地尚未有系统的调查,给典型区域中 PFOS/PFOA 不同使用和/或暴露途径中的环境暴露量(如预测环境浓度)的准确评估带来很大的困难。

(3)缺乏对全氟化合物替代品的生态毒性研究。由于 PFOS/PFOA 会给生态环境和人体健康带来极大危害,许多国家和组织已相继出台了各项法规和禁令限制其生产和使用^[42-44],并在加强监管的

同时,大力推进替代品的研究和开发,而对新型 PFOS/PFOA 替代品的环境安全评价也已刻不容缓。目前,PFOS/PFOA 的替代品成本较高,且产品性能尚不能满足替代要求,替代品的环境安全尚待进一步评估。国内一些学者对 4 种 PFOS 替代品〔包括 50% 的全氟丁基有机铵盐阳离子表面活性剂、用调聚法合成的织物三防整理剂(含固率 23.7%)、用电解氟化法合成的 C₄ 及 C₆ 织物三防整理剂〕对我国本土水生生物(黑斑蛙胚胎、蝌蚪)和土壤生物(蜜蜂、家蚕、中华白羽鹌鹑、土壤跳虫)的生态毒性进行了初步研究^[34-36,45],结果表明:4 种 PFOS 替代品对生物种的急性毒性都表现为低毒或无明显毒性;但是对于慢性毒性,织物三防整理剂对中华白羽鹌鹑的生殖毒性表现为胚胎死亡率及未受精率升高,对土壤跳虫的慢性毒性也大于 PFOS。因此,针对 PFOS/PFOA 替代品的环境安全评估,需要获得替代品对环境生物的慢性毒性数据。

3.2 全氟化合物的生态风险控制对策

全氟化合物的排放是生态环境污染的首要原因。由于一些国家将 PFOS/PFOA 生产和产品转向我国,导致面临污染转移的压力。针对目前我国典型全氟化合物的污染现状,结合我国环境中 PFOS/PFOA 的生态风险评估,提出了我国典型全氟化合物的管理控制对策。

(1)制订我国 PFOS/PFOA 在不同环境介质中环境质量基准/标准,加强 PFOS/PFOA 环境管理体系建设。制订我国 PFOS/PFOA 的环境质量基准/标准是对 2 种污染物进行环境风险评估和控制的重要依据,也是对 PFOS/PFOA 进行长效管理的重要措施之一。加强 PFOS/PFOA 对我国本土物种尤其是典型环境中敏感物种的生态毒性研究,科学制订我国 PFOS/PFOA 的环境质量基准、标准值,为准确评估我国环境介质中 PFOS/PFOA 的生态风险提供评价基础。

(2)加强我国典型环境尤其是氟化工园区中 PFOS/PFOA 物质的生态风险评估。开展我国对 PFOS/PFOA 在典型环境中生产、排放、使用、库存和污染场地的全面调查工作,进行管理登记和跟踪,摸清 PFOS/PFOA 的污染范围、强度、来源及排放情况,探明 PFOS/PFOA 在我国尤其是典型流域范围内各类介质中的残留分布、污染物水平,对 PFOS/PFOA 在环境多介质中的迁移转化行为、化学循环机制等进行系统研究,为典型环境中 PFOS/PFOA 不同使用途径的环境暴露量(如预测环境浓度)的准确评估

提供科学数据。同时,加强各学术团体的合作交流和数据共享,推动信息数据的公开化和系统化,增强 PFOS/PFOA 物质数据的可靠性、可比性,为准确评估我国环境中 PFOS/PFOA 物质的生态风险提供数据。在掌握区域不同环境介质中全氟化合物污染水平和分布特点的基础上,明确对不同区域、不同环境介质试行不同监管力度的分级管理,尤其是针对典型氟工业园区的环境管理:如明确典型区域,集中在土壤和环境生物等重点环境介质的污染控制上,建立针对 PFOS/PFOA 的预测、预报机制和评价监控体系,及时发现和处理因 PFOS/PFOA 出现的重大环境风险问题;对重污染点位污染土壤进行生态修复,或防止耕作种植,变更土地利用类型;在 PFOS/PFOA 工业园区和电子垃圾集中拆解区,要逐渐加大对 POPs 排放企业的环境管理力度,大力推行清洁生产,淘汰落后工艺和产品,积极研发和推广替代品、替代技术和低污染物排放技术。

(3)加强 PFOS/PFOA 替代品的监控、生态毒性监管,以及替代品的环境风险防控。开发出经济合理、全过程无污染的替代品是解决 PFOS/PFOA 污染的关键,只有新的替代品问世,才能减少 PFOS/PFOA 污染产品的生产,因此需要集中力量研发高效低毒、环境友好的 PFOS/PFOA 的替代品。同时对 PFOS/PFOA 替代品在各种环境介质中进行生态毒性测试,尤其是对我国本土敏感生物的长期慢性毒性数据的获取,是对 PFOS/PFOA 替代品的环境安全性进行科学准确评估的有效方法。另外,加强替代品的全生命周期监控措施或监控体系的建立,对替代品的生产、销售、使用、排放及废物处理过程的暴露风险及环境风险进行评估,确保 PFOS/PFOA 替代品环境风险控制的全过程管理。

4 结论

目前我国 PFOS/PFOA 在水环境中的生态风险较小,但需要关注典型区域(如氟工业园区)的生态风险。鉴于我国面临的缺乏典型区域 PFOS/PFOA 环境生态风险评估,缺乏针对 PFOS/PFOA 的环境质量基准/标准体系,缺乏对 PFOS/PFOA 替代品的生态毒性研究等问题,提出需加强 PFOS/PFOA 的生态风险评估、环境质量基准/标准的建设、PFOS/PFOA 替代品的研究与监控等环境管理控制对策。

参考文献

- [1] 郭睿,蔡亚岐,江桂斌,等.全氟辛烷磺酰基化合物(PFOS)的

- 污染现状与研究趋势[J]. 化学进展, 2006, 18(6): 808-813.
- GUO R, CAI Y Q, JIANG G B, et al. Current research of perfluorooctane sulfonate [J]. Progress in Chemistry, 2006, 18(6): 808-813.
- [2] 潘媛媛, 史亚利, 王杰明, 等. 北京市污水处理厂中全氟化化合物的污染水平[J]. 中国科学: 化学, 2011, 41(6): 1095.
- [3] 金一和, 刘晓, 秦红梅, 等. 我国部分地区自来水和不同水体中的 PFOS 污染[J]. 中国环境科学, 2004, 24(2): 166-169.
- JIN Y H, LIU X, QIN H M, et al. The status quo of perfluorooctane sulfonate (PFOS) pollution in tap water and different waters in partial areas of China [J]. China Environmental Science, 2004, 24(2): 166-169.
- [4] 吴澄, 李子卉, 程金平, 等. 水体及人体中全氟辛烷磺酸基化合物的污染及其影响因素[J]. 环境与健康杂志, 2009, 26(2): 180-182.
- WU C, LI Z H, CHENG J P, et al. Research progress on water perfluorooctanesulfonate pollution, human body burden and influencing factors [J]. Journal Environmental Health, 2009, 26(2): 180-182.
- [5] 杨永亮, 路国慧, 杨伟贤, 等. 沈阳地区水环境和生物样品中全氟化化合物的污染分布特征[J]. 环境科学学报, 2010, 30(10): 2097-2107.
- YANG Y L, LU G H, YANG W X, et al. Levels and distribution of perfluorinated compounds in water and biological samples from the Shenyang area, China [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2010, 30(10): 2097-2107.
- [6] SO M K, YAMASHITA N, TANIYASU S, et al. Health risks in infants associated with exposure to perfluorinated compounds in human breast milk from Zhoushan, China [J]. Environmental Science & Technology, 2006, 40(9): 2924-2929.
- [7] 王亚韩, 江桂斌. 斯德哥尔摩公约新增持久性有机污染物的一些研究进展[J]. 中国科学: 化学, 2010, 40(2): 99-123.
- [8] 陈荣圻. PFOS 和 PFOA 替代品取向新进展[J]. 印染助剂, 2012, 29(12): 1-10.
- CHEN R Q. Development and trend of substitutes to PFOS and PFOA [J]. Textile Auxiliaries, 2012, 29(12): 1-10.
- [9] BROOKE D, FOOTITT A, NWAOGU T A, et al. Environmental risk evaluation report: perfluorooctane sulphonate (PFOS) [R]. London: UK Environment Agency, 2004.
- [10] THOMAS G, MARIE B, NICHOLAS G, et al. Technical review and reassessment of the UK environmental risk evaluation report for perfluorooctanesulfonate (PFOS) [R]. Minnesota: 3M Company, 2010.
- [11] ZUSHI Y, HOGARH J N, MASUNAGA S. Progress and perspective of perfluorinated compound risk assessment and management in various countries and institutes [J]. Clean Technologies and Environmental Policy, 2012, 14(1): 9-20.
- [12] BOTS J, BRUYN L D, SNIJKERS T, et al. Exposure to perfluorooctane sulfonic acid (PFOS) adversely affects the life-cycle of the damselfly *Enallagma cyathigerum* [J]. Environmental Pollution, 2010, 158(3): 901-905.
- [13] JI K, KIM Y, OH S, et al. Toxicity of perfluorooctane sulfonic acid and perfluorooctanoic acid on freshwater macroinvertebrates (*Daphnia magna* and *Moina macrocopa*) and fish (*Oryzias latipes*) [J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 2008, 27(10): 2159-2168.
- [14] 张亚辉, 曹莹, 周腾耀, 等. 我国环境中 PFOS 的预测无效应浓度[J]. 中国环境科学, 2013, 33(9): 1392-1398.
- ZHANG Y H, CAO Y, ZHOU T Y, et al. Predicted non-effect concentrations for PFOS of environment in China [J]. China Environmental Science, 2013, 33(9): 1392-1398.
- [15] 曹莹, 周腾耀, 刘秀华, 等. 我国环境中 PFOA 的预测无效应浓度推导[J]. 环境化学, 2013, 32(7): 1180-1187.
- CAO Y, ZHOU T Y, LIU X H, et al. Predicted non-effect concentrations of perfluorooctanoic acid (PFOA) in the environment of China [J]. Environmental Chemistry, 2013, 32(7): 1180-1187.
- [16] van der PUTTE I, MURIN M, van VELTHOVEN M, et al. Analysis of the risks arising from the industrial use of perfluorooctanoic acid (PFOA) and ammonium perfluorooctanoate (APFO) and from their use in consumer articles [R]. Delft: RPS Advies, 2010.
- [17] COLOMBO I, WOLF W D, THOMPSON R S, et al. Acute and chronic aquatic toxicity of ammonium perfluorooctanoate (APFO) to freshwater organisms [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2008, 71(3): 749-756.
- [18] Norwegian Pollution Control Authority. Screening of polyfluorinated organic compounds at four fire training facilities in Norway [R]. Oslo: Norwegian Pollution Control Authority, 2008.
- [19] JIN Y H, LIU W, SATO I, et al. PFOS and PFOA in environmental and tap water in China [J]. Chemosphere, 2009, 77(5): 605-611.
- [20] YANG L P, ZHU L Y, LIU Z T, et al. Occurrence and partition of perfluorinated compounds in water and sediment from Liao River and Taihu Lake, China [J]. Chemosphere, 2011, 83(6): 806-814.
- [21] ZHAO L X, ZHU L Y, YANG L P, et al. Distribution and desorption of perfluorinated compounds in fractionated sediments [J]. Chemosphere, 2012, 88(11): 1390-1397.
- [22] SHAN G Q, WEI M C, LIU Z T, et al. Concentration profiles and spatial distribution of perfluoroalkyl substances in an industrial center with condensed fluorochemical facilities [J]. Science of the Total Environment, 2014, 490: 351-359.
- [23] 魏明翠, 钟文珏, 赵丽霞. 南方某氟化学工业园周围环境中全氟化化合物的分布研究[J]. 环境科学学报, 2013, 33(7): 1989-1995.
- WEI M C, ZHONG W J, ZHAO L X. Distribution and profile of perfluorinated compounds in the environment around a fluorine chemistry industrial park in South China [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2013, 33(7): 1989-1995.
- [24] OSPAR Commission. Perfluorooctane sulphonate (PFOS): hazardous substances series [R]. [2016-04-13]. http://www.ospar.org/documents/dbase/publications/P00269_BD%20on%20PFOS%20_2006%20version_.pdf. 2006.

- [25] ROSTKOWSKI P, YAMASHITA N, SO I M K, et al. Perfluorinated compounds in streams of the Shihwa industrial zone and Lake Shihwa, South Korea[J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2006, 25(9): 2374-2380.
- [26] 张亚辉, 曹莹, 覃璐玫, 等. PFOS 对太湖水体中典型鱼和食鱼鸟的次生毒性风险[J]. *环境科学学报*, 2014, 34(10): 2718-2723.
- ZHANG Y H, CAO Y, QIN L M, et al. Secondary poisoning risk of PFOS for typical fish and fish-eating bird in Taihu Lake[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, 34(10): 2718-2723.
- [27] US EPA. Revised draft hazard assessment of perfluorooctanoic acid and its salts [R]. Washington DC: US Environmental Protection Agency. Office of Pollution Prevention and Toxics Risk Assessment Division, 2002.
- [28] US EPA. Draft risk assessment of the potential human health effects associated with exposure to perfluorooctanoic acid and its salts[R]. Washington DC: US Environmental Protection Agency. Office of Pollution Prevention and Toxics Risk Assessment Division, 2005.
- [29] GIESY J P, NAILE J E, KHIM J S, et al. Aquatic toxicology of perfluorinated chemicals [J]. *Reviews of Environmental Contamination & Toxicology*, 2010, 202: 1-52.
- [30] HOKE R A, BOUCHELLE L D, FERRELL B D, et al. Comparative acute freshwater hazard assessment and preliminary PNEC development for eight fluorinated acids[J]. *Chemosphere*, 2012, 87(7): 725-733.
- [31] JEFFREY B. Surface water quality criterion for perfluorooctanoic acid[R]. Minnesota: Minnesota Pollution Control Agency, 2007.
- [32] Environment Canada, Health Canada. Screening assessment report: perfluorooctanoic acid, its salts, and its precursors [R]. Ottawa: Environment Canada, Health Canada, 2012.
- [33] CCME. Canadian environmental quality guidelines [R]. Winnipeg: Canadian Council of Ministers of the Environment, 1999.
- [34] 任东凯, 苏红巧, 刘芃岩, 等. 全氟烷基磺酸盐 (PFOS) 及其替代品对两栖类胚胎的发育毒性[J]. *生态毒理学报*, 2012, 7(5): 561-564.
- REN D K, SU H Q, LIU P Y, et al. Developmental toxicity of perfluorooctane sulfonate (PFOS) and its substitutes to amphibian embryos[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2012, 7(5): 561-564.
- [35] 王贺威, 马胜伟, 张喆, 等. 全氟辛烷磺酸盐 (PFOS) 胁迫对翡翠贻贝抗氧化酶的影响[J]. *生态毒理学报*, 2012, 7(5): 508-516.
- WANG H W, MA S W, ZHANG Z, et al. Effects of perfluorooctane sulfonate (PFOS) exposure on antioxidant enzymes of *Perna viridis* [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2012, 7(5): 508-516.
- [36] 苏红巧, 任东凯, 曹闪, 等. 全氟辛烷磺酸盐 (PFOS) 及替代品对两栖类蝌蚪的急性毒性[J]. *生态毒理学报*, 2012, 7(5): 521-524.
- SU H Q, REN D K, CAO S, et al. Acute toxicity of perfluorooctane sulfonate (PFOS) and its substitutes to *Amphibian tadpoles* [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2012, 7(5): 521-524.
- [37] 徐冬梅, 李婵丹, 王艳花. 全氟辛酸 (PFOA) 对蚯蚓的毒性作用[J]. *生态毒理学报*, 2012, 7(5): 532-536.
- XU D M, LI C D, WANG Y H. Toxicity of perfluorooctanoic acid to earthworms (*Eisenia foetida*) [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2012, 7(5): 532-536.
- [38] 徐冬梅, 文岳中, 李立, 等. PFOS 对蚯蚓急性毒性和回避行为的影响[J]. *应用生态学报*, 2011, 22(1): 215-220.
- XU D M, WEN Y Z, LI L, et al. Effects of perfluorooctane sulfonate on acute lethality and avoidance behavior of earthworm [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(1): 215-220.
- [39] 林加华, 祝凌燕. 全氟辛酸的污染状况及环境行为研究进展[J]. *应用生态学报*, 2008, 19(5): 1149-1157.
- LIN J H, ZHU L Y. Pollution trend and environmental behavior of perfluorooctanoic acid: a review [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(5): 1149-1157.
- [40] 杨莉莉, 金芬, 李敏洁, 等. 食品和食品包装材料中全氟化合物 (PFCS) 的研究进展[J]. *食品工业科技*, 2014, 35(8): 367-372.
- YANG L L, JIN F, LI M J, et al. Research progress in advance of perfluorochemicals in food [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2014, 35(8): 367-372.
- [41] 梅胜放. 我国 PFOS/PFOA 的生产, 应用以及国内外标准现状[J]. *有机氟工业*, 2008(1): 21-25.
- [42] UNECE. Overview of existing information on PFOS production, use, emissions and pathways to the environment and cost/benefits with alternatives/substitutes [EB/OL]. (2006-01-25). <http://www.unece.org/fileadmin/DAM/env/lrtap/TaskForce/popsxg/2006/Overview%20of%20existing%20information%20on%20PFOS%20emissions%20and%20pat.pdf>.
- [43] US EPA. Perfluoroalkyl sulfonates, significant new use rule, final and supplemental proposed rule; Federal register 67 [EB/OL]. (2002-03-11). <http://www.epa.gov/fedrgstr/epa-tox/2002/march/day-11/t5747.Pdf>.
- [44] UNEP. 2010/15 PFOA stewardship program: overview and update [EB/OL]. (2009-02-12). <http://www.unep.org/chemicalsandwaste/Portals/9/CiP/InformalWorkshop2009/WorkshopMgmtChemicals/PFOA%20Stewardship%20Program.pdf>.
- [45] 张轩, 张偲, 王光鹏, 等. 全氟辛烷磺酸盐 (PFOS) 对土壤跳虫的生态毒性[J]. *生态毒理学报*, 2012, 7(5): 525-529.
- ZHANG X, ZHANG C, WANG G P, et al. Ecotoxicity of perfluorooctane sulfonate (PFOS) to springtails in soils [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2012, 7(5): 525-529. ○