

DOI: 10.7524/AJE.1673-5897.20120428001

袁剑刚, 郑晶, 陈森林, 等. 中国电子废物处理处置典型地区污染调查及环境、生态和健康风险研究进展[J]. 生态毒理学报, 2013, 8(4): 473-486

Yuan J G, Zheng J, Chen S L, et al. Advances in the Research on Pollution Investigations and Environmental, Ecological and Health Risks from

E-Waste Recycling Activities in China [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2013, 8(4): 473-486 (in Chinese)

中国电子废物处理处置典型地区污染调查及环境、生态和健康风险研究进展

袁剑刚¹, 郑晶¹, 陈森林¹, 李晶¹, 李涵¹, 肖迪¹, 余晓华², 罗勇³, 严骁¹, 杨中艺^{1,*}, 罗孝俊⁴, 麦碧娴⁴

1 中山大学生命科学学院, 广州 510275

2 仲恺农业技术工程学院, 广州 510225

3 广东省林业调查规划院, 广州 510520

4 中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510640

摘要: 电子废物含有大量的金属、塑料和阻燃剂等物质, 如果处理不当, 电子废物将向环境排放种类繁多的有毒有害物质, 从而产生严重的环境污染问题。近年来, 国内外学者对电子废物处理所致的生态环境问题给予了相当的关注, 已经开展了不少相关研究, 这些研究主要集中在我国的几个电子废物处理处置典型地区。本文对近 5 年来的相关研究成果进行了系统综述, 内容及电子废物处理处置过程中产生的主要环境污染物, 电子废物处理处置活动所致的土壤、水体和大气的重金属和持久性有机污染物污染以及电子废物处理处置活动对动植物和人体的污染风险等, 并提出将来关于电子废物研究中需要关注的问题。

关键词: 电子废物; 重金属; 持久性有机污染物; 环境污染

文章编号: 1673-5897(2013)4-473-14 中图分类号: X171.5 文献标识码: A

Advances in the Researches on Investigations of Pollution and Environmental, Ecological and Health Risks from E-Waste Recycling Activities in China

Yuan Jiangang¹, Zheng Jing¹, Chen Senlin¹, Li Jing¹, Li Han¹, Xiao Di¹, Yu Xiaohua², Luo Yong³, Yan Xiao¹, Yang Zhongyi^{1,*}, Luo Xiaojun⁴, Mai Bixian⁴

1. School of Life Sciences, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China

2. Zhongkai University of Agriculture and Engineering, Guangzhou 510225, China

3. Guangdong Forestry Survey and Planning Institute, Guangzhou 510520, China

4. Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Science, Guangzhou 510640, China

Received 28 April 2012 accepted 18 July 2012

Abstract: Electronic wastes contain a lot of toxic metals, plastics and fire retardants, inadequate E-waste recycling activities may bring serious environmental pollutions. Scholars in recent years have paid great at-

收稿日期: 2012-04-28 录用日期: 2012-07-18

基金项目: 国家自然科学基金(30370270); 广东省科技计划项目(2006B36701005, 2009B030802006); 有机地球化学国家重点实验室开放基金(OGL-200907)

作者简介: 袁剑刚(1967-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为环境生物学、恢复生态学和绿地生态学, E-mail: yuanjg@mail.sysu.edu.cn

* 通讯作者(Corresponding author), E-mail: adsyzy@mail.sysu.edu.cn

tention to the environmental problems caused by e-waste disposal. The studies were mainly in the several important E-waste recycling areas in China. In this paper, surveys and researches on environmental pollutions caused by e-waste recycling activities published in recent 5 years are reviewed. The researches related to the main released pollutants, as well as the negative impacts on soil, water, air, living organisms and exposures to human bodies caused by heavy metals and POPs from e-waste recycling activities.

Keywords: e-waste; heavy metals; POPs; environmental pollution

20 世纪 80 年代以来,随着信息技术的快速发展,电子(器)产品更新换代的速度越来越快,电子废物的数量越来越多。据估计,全世界每年产生的电子废弃物达 2 000~5 000 万 t 之多,其质量已占城市废弃物总量的 2%~5%^[1]。Kahhat 等^[2]认为,全球电子废物正以每年 3%~5% 的速度增长,继化工、冶金、造纸等行业产生的有毒有害污染物之后,电子废物已经成为迅速增长的新一类环境有毒有害物质。

中国是电子产品的生产、消费大国。近年来,国家电保有量的年增长率约为 10%,废弃电子产品量也以基本相同的速度增长。2007 年,中国仅电视机、洗衣机、冰箱、空调、电脑等 5 类家电的保有量便有近 14 亿台,加上手机、打印机等其他家用电器则达 25 亿台(部),年报废量 9 200 万台(部),已成为全球仅次于美国的第二大电子废物产生国,并且仍在以高于全球的平均增速增长^[3]。虽然电子废物作为资源浑身是宝,其回收利用可以在很大程度上缓解资源和环境压力,产生巨大的社会经济和生态效益。但是,电子废物中含有大量的有毒有害成分,如果缺乏科学合理的处置方法,极易对生态系统产生深远而严重的影响。目前,电子废物处理处置的环境问题已经引起了社会的高度关注,已有包括本课题组在内的多个研究团队开展电子废物处理处置典型地区污染调查以及环境风险研究工作。本文主要对 2008 年以来已取得的主要研究成果进行回顾和归纳,并讨论了该领域未来的研究发展方向。

1 电子废物的潜在有毒有害物质

电子废物的成分主要有 Pb、Cu、Zn、Hg、Cr、Ni、Cd 等几十种金属,聚氯乙烯(PVC)、聚乙烯(PE)、丙烯腈-丁二烯-苯乙烯聚合物(ABS)、聚苯乙烯(PS)、聚丙烯(PP)、聚乙烯对苯二甲酸酯(PET)、聚碳酸酯(PC)、尼龙和聚酰胺(PA)、人造橡胶等多种塑料,以及溴化阻燃剂(BFRs)、调色剂等^[4]。2008 年以前国内对电子废物典型污染区调查的毒害污染物对象主要有多溴联苯醚(PBDEs)、多氯联苯(PCBs)和多环芳烃(PAHs)等有机污染物以及

Cu、Pb、Zn、Ni、Cd、Cr 等有毒重金属^[1,5-8]。近年来,除了上述典型污染物外,人们的视角扩展到其他更多的具有环境和健康风险的污染物,尤其是新型的持久性有机污染物(POPs)。这些污染物包括:得克隆(DP)、六溴环十二烷(HBCDs)、酞酸酯污染物(PAEs)和多氯代二苯并二噁英 P 呋喃(PCDD/PFs)等。

2 电子废物环境介质污染风险调查和研究进展

广东汕头贵屿、清远龙塘石角和浙江台州是 3 个非常重要的电子废物集中处理处置中心,在世界范围内颇负盛名,目前的相关研究基本集中在这 3 个地区。不少学者相继报道了贵屿地区^[9-14]、龙塘及石角地区^[5-8,15-16]、台州地区^[17-20]电子废物处理处置活动对当地环境介质(土、水、气)所造成的严重污染,之后又不断有上述地区环境介质污染的新的调查报告发表。这些研究结果进一步证明了电子废物处理处置地区所面临的严重环境污染问题。表 1 和表 2 分别汇总了典型地区环境介质中重金属和多卤代联苯类污染物浓度污染情况的主要研究结果。

2.1 水体污染风险

Guo 等^[21]的调查显示,沿练江从贵屿到入海口,河水重金属含量呈降低趋势,其中贵屿段表层水中的 Cu 含量是对照组的 2.4~131 倍, Ni、Cd、Pb、Hg 和 As 含量也显著高于对照组;水中重金属浓度雨季高于旱季;练江贵屿段沉积物中 Cu 的含量是对照组的 3.2~429 倍, Ni、Hg、Pb、Cd 和 As 含量也显著高于对照。贵屿附近河流底泥中, Cd、Cr、Cu、Pb 和 Zn 含量分别为 52.9~67.1 mg·kg⁻¹、309~359 mg·kg⁻¹、79.2~1 485 mg·kg⁻¹、391~449 mg·kg⁻¹ 和 37.5~111 mg·kg⁻¹,其中 Cd 和 Cu 污染相当严重^[22]。

除了重金属污染,电子废物处理处置活动还可能导致严重的 POPs 污染。吴江平等^[23]调查发现,龙塘石角地区水体沉积物中总 PCBs 含量达到 24.5~38.6 μg·g⁻¹,污染情况非常令人担忧。

2.2 大气污染风险

李英明等^[20]在台州的研究表明,电子废物集中处理区大气中 ΣPCDD/Fs、ΣPCBs 和 ΣPBDEs 的浓

表 1 电子废物处理处置典型地区环境介质中重金属浓度范围

Table 1 Contents of heavy metals in environmental media in the e-wastes recycling sites

研究区域	介 质	浓度范围	文献
贵 屿	水 体	Cu: 0.023~1.270; Pb: 0.006~0.061; Ni: nd~1.380; Cd: 0.0006~0.0107; Hg: nd~0.240×10 ⁻³ ; As: nd~0.026	[21]
	底 泥	Cu: 73.0~9 962; Pb: 29.0~274; Ni: 24.0~3 059; Cd: 0.451~2.38; Hg: 0.331~0.980; As: 6.38~19.6	
贵 屿	土 壤	Cd: 54.1~57.1; Cr: 278~320; Cu: 93.5~116; Pb: 382~415; Zn: 46.2~68.1	[22]
	底 泥	Cd: 52.9~67.1; Cr: 309~359; Cu: 79.2~1 485; Pb: 391~449; Zn: 37.5~111	
清远龙塘	表 土	Zn: 84~10 982; Cu: 996~28 095; Pb: 315~5 680; Cd: 2.6~216	[5]
清远石角	表 土	Zn: 243~6 640; Cu: 560~13 290; Pb: 134.9~4 502; Cd: 2.4~152	

注:水体介质中的浓度范围单位为 mg·L⁻¹,底泥、土壤和表土中浓度含量单位为 mg·kg⁻¹。

表 2 电子废物处理处置典型地区环境介质中持久性有机污染物的浓度范围

Table 2 POPs contents in environmental media in the e-wastes recycling sites

研究区域	介 质	污染物浓度范围	文献
龙石地区	沉积物	PCBs;24.5~38.6 μg·g ⁻¹	[23]
龙石地区	大 气	PCDD/Fs;49.06~255.40 pg·m ⁻³	[24]
龙石地区	路 尘	PBDEs;191~9 156 ng·g ⁻¹	[25]
	农田土壤	PBDEs;2.9~207 ng·g ⁻¹	
贵 屿	拆解车间灰尘	PBDEs;(14 800±5 130) ng·g ⁻¹	[10]
	附近道路灰尘	PBDEs;(24 900±31 600) ng·g ⁻¹	
龙石地区	土 壤	BDE209;87.6~20 436.8 ng·g ⁻¹ ; PBDEs(不含 BDE209);66.6~82 967.1 ng·g ⁻¹ ;	[15]
		PCBs;99.6~4 983.8 ng·g ⁻¹	
清远、贵屿	土 壤	DP;nd~47.4 ng·g ⁻¹	[15]
清 远	土 壤	HBCDs;0.22~0.79 ng·g ⁻¹	[26]
		HBCDs;0.31~9.99 ng·g ⁻¹	
浙江台州	大 气	PCDD/Fs;2.91~50.6 pg·m ⁻³	[20]
		PCBs;4.23~11.35 ng·m ⁻³	
浙江台州	大 气	PBDEs(不含 BDE-209);135.1~262.0 pg·m ⁻³ (夏季); 161.5~678.5 pg·m ⁻³ (冬季)	[27]
		BDE-209;137.7~304.0 pg·m ⁻³ (夏季); 730.7~2 087.3 pg·m ⁻³ (冬季)	
浙江台州	土 壤	PCBs;nd~152.8 μg·kg ⁻¹	[28]
浙江台州	处置场地土壤	PBDEs;5.50×10 ⁻⁴ ~2.33×10 ⁻¹ mg·kg ⁻¹	[29]
		PBDEs(含 BDE209);3.32×10 ⁻² ~2.19 mg·kg ⁻¹	
	周边土壤	PBDEs;9.8×10 ⁻⁴ ~4.01×10 ⁻¹ mg·g ⁻¹ PBDEs(含 BDE209);1.62×10 ⁻² ~3.46 mg·kg ⁻¹	
浙江台州	土 壤	PAEs;9.11~50.58 mg·kg ⁻¹	[30]

注:PCBs、PCDD/PFs、PBDEs、BDE209、DP、HBCDs 和 PAEs 分别代表多氯联苯、多氯代二苯并二恶英 P 呋喃、多溴联苯醚、十溴联苯醚、得克隆、六溴环十二烷和酞酸酯污染物。

度分别为 $2.91 \sim 50.6 \text{ pg} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 $4.23 \sim 11.35 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $92 \sim 3\,086 \text{ pg} \cdot \text{m}^{-3}$, 均显著高于对照区; PCDD/Fs 主要分布在大气中的颗粒物相, PCBs 则主要分布于气相。Han 等^[27] 的调查也证明台州电子废物处理处置区的大气有较严重的 POPs 污染, 区内大气中 13 种 PBDEs 的总浓度在夏天为 $506 \text{ pg} \cdot \text{m}^{-3}$, 冬天为 $1\,662 \text{ pg} \cdot \text{m}^{-3}$, 均约为对照区的 7 倍。余莉萍等^[24] 在龙塘石角地区的研究表明, 电子废物焚烧区大气样品中 PCDD/Fs 的含量达到了 $127.37 \text{ pg} \cdot \text{m}^{-3}$, 是 9 km 外样区的 6 倍。除 POPs 污染, 典型电子废物拆解区大气总悬浮颗粒物(TSP)中还存在比较严重的重金属如 Zn、Cu、Cd、Sn 和 Pb 等的污染^[31]。

2.3 土壤污染风险

在电子废物处理处置活动的环境影响研究中, 土壤是研究最多的一类环境介质。调查显示, 清远龙塘石角地区拆解作坊附近道路表面灰尘和农田土壤中的 PBDEs 含量范围分达 $191 \sim 9\,156 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $2.9 \sim 207 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ ^[25]; 贵屿拆解车间和附近道路表面灰尘的总 PBDEs 含量更是高达 $14\,800$ 和 $24\,900 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ ^[10]。张雪莲等^[28] 在浙江台州的调查发现, 电子废物处理处置区土壤的 PCBs 污染以点源污染为主, PCBs 检出率 65.8%, 检出范围在未检出 $\sim 152.8 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间, 平均含量为 $19.9 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。余晓华^[15] 在清远龙塘石角地区的土壤中检出了 18 种 BDE 单体, BDE 209 和 Σ PBDEs (不含 BDE209) 含量分别为 $87.6 \sim 20\,436.8 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $66.6 \sim 82\,967 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$, 非 PBDE 商业品主要成分的低溴代醚 BDE28、BDE66、BDE85 和 BDE138 在污染严重的土样所占比例较高, 推断可能是光解或土壤微生物降解所致; PCBs 污染方面, 所有样点中共有 83 种 PCB 单体被检出, 污染最严重样点的总含量高达 $136\,333.1 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$, 其他样地则为 $99.6 \sim 4\,983.8 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$, 远高于以往报道的调查结果; 2 个农田土壤样点的 PCBs 总含量分别为 $3\,859.4$ 和 $3\,194.7 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$, 表明 PCBs 向农田生态系统的迁移十分严重; 各土样中, PCBs 含量与土壤重金属、PBDEs、土壤总有机碳和全氮的含量间均存在极显著正相关, 说明电子废物处理处置过程中重金属、PBDEs 与 PCBs 的释放是同步的。

近年来, 对土壤介质中某些新型有机污染物的调查也取得了一些进展。调查发现, 清远、贵屿两电子废物集中处置区表层土壤的 HBCDs 含量分别为 $0.22 \sim 0.79 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $0.31 \sim 9.99 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ ^[26]; 电子废物回收站土壤中 DP 水平有着非常巨大的差别, 高

者 DP 含量达 $47.4 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$, 低者则低于检出限, 电子废物处理处置区表层土壤的 DP 水平则在 $0.0336 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ 至 $4.65 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ 之间, 远较对照区水平为高^[32]; 距台州某电子废物拆解区 100 和 1 000 m 处表土中, 6 种 PAEs 化合物的总含量(Σ PAEs) 为 $9.11 \sim 50.58 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $2.63 \sim 17.55 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 对照区表土则为未检出 $\sim 7.15 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 可见电子废物拆解区土壤受到了严重的 PAEs 污染, 邻苯二甲酸二(2-乙基己基)酯(DEHP)和邻苯二甲酸二丁酯(DBP)是电子废物拆解区土壤主要的 PAEs 污染物^[30]。

调查发现, 电子废物集中处理处置区土壤有很高的重金属污染风险。余晓华^[15] 在清远龙塘石角地区设置的样区中, 重金属污染最严重的土壤样品的 Cd、Pb、Cu、Zn、Ni 和 Cr 含量分别高达 338 、 $24\,011$ 、 $50\,073$ 、 $21\,224$ 、 $2\,642$ 和 $139 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 其他污染区的重金属含量也达到了对照区的数倍至数十倍。林文杰等^[22] 对贵屿电子废物处理场附近的农田土壤进行了调查, 发现 Cd、Cr、Cu、Pb 和 Zn 的含量分别是 $54.1 \sim 57.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $278 \sim 320 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $93.5 \sim 116 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $382 \sim 415 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $46.2 \sim 68.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 其中 Cd 污染相当严重。郭莹莹等^[33] 分析了我国南方某典型电子废物酸浴提取贵金属场地周围农田的土壤剖面, 发现周围土壤酸化现象严重, 随着距酸浴源距离的增大以及土层深度的增加, 酸化程度逐渐减弱; 调查区土壤 Cu 和 Ni 污染严重; 与酸污染相似, 土壤中的重金属污染随离酸浴源距离的增大以及土层深度的增加而逐渐减弱; 酸浴污染土壤中重金属的活性态比例显著增高。

2.4 环境介质污染研究的主要发展趋势

有关环境介质污染调查的研究所占比重有所下降。2005—2008 年期间在中国期刊网数据库中 12 篇论文涉及电子废物污染地区环境介质的污染调查, 是同期所有关于中国电子废物环境问题的研究论文总数的 37.5%; 在美国科学信息研究所(ISI)科学引文索引数据库中则有 10 篇论文涉及电子废物污染区的环境介质污染调查, 占同期该数据库收录电子废物相关研究论文总数的 62.5%。到 2009—2011 年期间, 关于环境介质污染的研究论文所占比重在中国期刊网和科学引文索引数据库分别下降到 25.9% 和 48.4%, 较多的研究者开始转为关注生态和健康风险问题。

2005—2008 年期间的污染物对象主要集中在重金属以及 PBDEs、PCBs、PAHs 和 PCDD/Fs 等

有机污染物上,近年来有部分研究将关注的对象扩展到 DP、HBCDs、PAEs 等有机污染物,并且证明了电子废物处理处置区域的环境介质中这些化合物的含量远高于对照区域,进一步展现了电子废物处理处置活动能够导致复合型和复杂性污染。

关于环境介质污染的研究深度有待加强,诸如污染产生的时间、污染物之间的关系、污染物的迁移以及主要的汇、污染物在环境中的变化及其与环境

因素的相互作用等问题涉及不多。

关于电子废物污染场地的修复研究极为缺乏。

3 电子废物生态风险调查和研究新进展

电子废物处理处置活动的生态风险调查对象主要集中在野生动物、野生植物和土壤微生物上。表 3、表 4 列出了近年来对于典型地区生物体中主要污染物浓度范围的部分重要调查结果。

表 3 电子废物处理处置典型地区野生动植物体中主要污染物的浓度范围

Table 3 Contents of main pollutants in some wildlives from the e-wastes recycling sites

研究区域	生物	样品材料	浓度范围	文献
台州	谷蔬类	可食部分	Cr: 0.08~10.56 mg·kg ⁻¹ ;	[34]
			Cd: 0.02~0.76 mg·kg ⁻¹ ;	
			Pb: 0.05~1.51mg·kg ⁻¹	
	香樟(<i>Cinnamomum camphora</i>)	叶片	PBDEs: 0.46~399.93 ng·g ⁻¹	[35]
	鲫鱼(<i>Carassius aumtus</i>)	肌肉	PCBs: 691 μg·kg ⁻¹	[17]
	鲫鱼(<i>Carassius aumtus</i>)	可食部分	PCDD/Fs: 7.23~62.38 pg·g ⁻¹ ;	[36]
贵屿	鸡蛋	可食部分	PCBs: 9 297.71~39 996.92 pg·g ⁻¹	
			PCDD/Fs: 2.47~87.00 pg·g ⁻¹ ;	
	罗非鱼(<i>Oreochromis niloticus</i>)	肌肉	PCBs: 1 284.48~7 241.30 pg·g ⁻¹	
			ΣPBDEs: (115 ± 54.9) ng·g ⁻¹	[37]
龙塘	鳙鱼(<i>Aristichthys nobilis</i>)	肌肉	ΣPBDEs: (1 088 ± 132) ng·g ⁻¹	
	青蛙(<i>Rana limnocharis</i>)	肝部	ΣPBDEs: (2 687 ± 1 274) ng·g ⁻¹	[38]
		肌肉	ΣPBDEs: 0.63~11.6 ng·g ⁻¹	
		肝脏	ΣPBDEs: 4.57~56.2 ng·g ⁻¹	
龙石地区	鸟	肌肉	ΣPBDEs: 10.7~125 ng·g ⁻¹	[39]
			TBBPA: 28~173 ng·g ⁻¹ ;	
	水禽	肌肉	HBCDs: nd~1 995 ng·g ⁻¹	[40]
			PCB: 960~1 400 000 ng·g ⁻¹ ;	
龙石地区	家禽	鸡胸	PBDEs: 37~2 200 ng·g ⁻¹	[41]
		鸡肝	PBBs: 1~2 800 ng·g ⁻¹ ;	
		鸭胸	DBDPE: 4~800 ng·g ⁻¹	
		鸭肝	PBDEs: 5.7~4 381 ng·g ⁻¹	

注: PCBs、PCDD/PFs、PBDEs、HBCDs、PBBs、DBDPE 和 TBBPA 分别代表多氯联苯、多氯代二苯并二恶英 P 呋喃、多溴联苯醚、六溴环十二烷、多溴联苯、十溴二苯乙烷和四溴双酚 A。

表 4 电子废物处理处置典型地区食物链中主要污染物的浓度范围

Table 4 Main POPs contents in the food chains in the e-wastes recycling sites

研究区域	食物链组成	污染物浓度范围(以湿质量计)/(ng·g ⁻¹)	文献
龙塘	水蛇	PBDEs: 480~1 072; PCBs: 7 067~25 958	[42]
	乌鳢(<i>Ophicephalus argus</i>)	PBDEs: 372~714; PCBs: 4 664~16 244	
	鲢鱼(<i>Cirrhina molitorella</i>)	PBDEs: 305~830; PCBs: 6 983~19 588	
	鲫鱼(<i>Carassius aumtus</i>)	PBDEs: 46.6~853; PCBs: 1 963~18 174	
	草虾(<i>Penaeus monodon</i>)	PBDEs: 131~363; PCBs: 2 204~4 734	
	田螺(<i>Cipangopaludina</i>) <i>cathayensis</i>	PBDEs: 48.4~115; PCBs: 20.2~293	
贵屿	田螺(<i>Cipangopaludina cathayensis</i>)	HBCDs: 123~333	[43]
	鲫鱼(<i>Carassius aumtus</i>)	HBCDs: 199~728	
	泥鳅(<i>Oriental weather fish</i>)	HBCDs: 934~3 529	

注: PCBs、PBDEs 和 HBCDs 分别代表多氯联苯、多溴联苯醚和六溴环十二烷。

3.1 对野生动物的影响

20 世纪 90 年代,储少岗和徐晓白^[17]对电子废物污染区内野生动物进行了调查,发现台州电子废物拆解区河道内鲫鱼(*Carassius aumtus*)肌肉中 PCBs 含量为 $691 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,比对照样品高出 1~4 个数量级。Luo 等^[36]在流经贵屿地区 2 条主要河流南阳河和练江中采集到 6 条鳙鱼(*Aristichthys nobilis*)和 18 条罗非鱼(*Oreochromis niloticus*),发现罗非鱼混合肌肉样品中 ΣPBDEs 的含量为 $115 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$,鳙鱼肝部和腹部肌肉 ΣPBDEs 含量则高达 2 687 和 $1\,088 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$;而采自香港某地作为对照的罗非鱼肌肉中的 ΣPBDEs 含量仅为 $4.1 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$,差别达 2~4 个数量级。Luo 等^[44]的另一研究发现,贵屿南阳河中 5 种主要淡水鱼体内 ΣPBDEs 含量呈草鱼(*Ctenopharyngodon idellus*) < 鲢鱼(*Cirrhina molitorella*) < 鲫鱼 < 鲤鱼(*Cyprinus carpio*)的规律;贵屿鱼体样品中 ΣPBDEs 含量明显高于比利时弗兰德斯 Des Plaines 河鲤鱼($18 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$)及美国维吉尼亚州 Hyco 河鲤鱼($11.4 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$)样品中的含量。电子废物污染对区内动物的影响研究在 2008 年以后明显增加,目前的污染物研究主要集中在 PBDEs、PCBs 和 HBCDs。Wu 等^[42]对清远龙塘地区野生水生动物中 PBDEs 和 PCBs 含量以及生物累积程度的调查结果表明, ΣPBDEs 中位浓度的顺序为水蛇($1\,091 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$) > 鳊鱼($830 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$) > 乌鳢(*Ophicephalus argus*)($490 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$) > 鲫鱼($316 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$) > 草虾(*Penaeus monodon*)($254 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$) > 田螺(*Cipangopaludina cathayensis*)($67.5 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$),高出华南地区鱼肉中 ΣPBDE 含量 2 个数量级^[45]; ΣPCBs 浓度在不同物种的分布与 ΣPBDE 相似,为水蛇($16\,512 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$) > 鳊鱼($12\,390 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$) > 鲫鱼($8\,338 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$) > 乌鳢($7\,052 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$) > 草虾($3\,503 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$) > 田螺($62.8 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$),研究显示食物链中高级别物种(水蛇、乌鳢)和腐食性物种(鳊鱼)会富集更多的 PBDEs 和 PCBs;其中鳊鱼体内 ΣPBDEs 和 ΣPCBs 含量为对照区(距电子垃圾拆解区 5 km 处水库)的 164 倍和 59 倍。调查显示,电子废物集中处理区内田螺、青蛙(*Rana nigromaculata*)和泥鳅(*Oriental weatherfish*)样品内可以检测到高水平的 PBDEs 含量,区内野外环境中青蛙、泥鳅等动物数量明显减少^[46],机体中 PBDEs 含量高^[47]。Wu 等^[37]发现,处理区内青蛙肌肉、肝脏和卵子的 PBDEs 水平分别是 $0.63\sim 11.6 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 、 $4.57\sim 56$ 、

$2 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $10.7\sim 125 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ (以鲜质量计);青蛙体内绝大部分 PBDE 同系物都对肌肉组织表现出较高的亲和力, PBDE 以 BDEs99、BDEs153、BDEs183、BDEs209 和 BDEs47 为主,这些 PBDEs 同系物通过物理和化学作用影响着转运蛋白的亲和力,从而对青蛙的母性遗传产生影响;相对而言,雄性青蛙具有较强的 PBDEs 代谢能力。Zhang 等^[43]对电子废物污染区内水生动物的 HBCDs 积累进行了研究,发现田螺中 HBCDs 的浓度为 $186 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ (以鲜质量计),鲫鱼中的 HBCDs 浓度则达到了田螺体内的将近 10 倍之多。

目前关于电子废物污染对鸟类影响的调查仍比较少见。Luo 等^[38]分析了华南地区某电子废物处理区内 5 种水鸟肌肉中的 PCBs 和 PBDEs 浓度,发现其值分别高达 $960\sim 1\,400\,000 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ (以单位脂质质量计)和 $37\sim 2\,200 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ (以单位脂质质量计),显示电子废物处理活动产生的 POPs 污染通过食物链的富集达到了相当惊人的程度。He 等^[39]对华南地区某著名电子废物处理处置区中鸟类的四溴双酚 A(TBBPA)和 HBCD 含量进行了分析,发现水鸟体内的 HBCD 以 α -HBCD 为主,陆地摄食鸟类则以 γ -HBCD 为主要形式,定居在沼泽地区的鸟类的这 2 种异构体则没有明显差异,说明食物来源在决定 HBCD 的异构体含量方面起重要作用。

3.2 对野生植物的影响

Zhao 等^[35]发现,电子废物处理区及邻近区域香樟(*Cinnamomum camphora*)叶片中 ΣPBDEs 的浓度为 $0.46\sim 399.93 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$,香樟叶片中 PBDEs 含量随处理区中心距离有很好的线性回归性。Huang 等^[48]在电子废物处理区内的植物组织中检测到 18 种 PBDEs 同系物,低溴化 PBDEs 的比例在植物根部显著高于土壤中的比例。本课题组对电子废物污染区植物组织内的 POPs 和重金属含量进行了比较系统的研究^[15,49],发现植物体内有 15 种 PBDEs 单体,其中类芦(*Neyraudia reynaudiana*) 8 种,铁芒箕(*Dicranopteris dichotoma*) 13 种;植物体内 PBDEs 含量与土壤中的含量成正比; ΣPBDEs 、BDE209 和 PBDEs 含量在类芦分别为 0.45 、 4.56 和 $5.01 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$,铁芒箕分别为 8.31 、 11.15 和 $19.45 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 。罗勇^[49]还发现污染区内尾叶桉(*Eucalyptus urophylla*)、类芦、南洋楹(*Albizia falcataria*)、铁芒箕体内的重金属含量显著高于对照区。其中,桉树地下部 Zn、Cu、Pb、Cd 含量达 25.60 、 338.00 、 17.82 和 0.16

$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,分别是对照区的3.1倍、59.2倍、1.5倍和2.3倍;类芦根部上述元素在污染区的平均含量分别为57.35、267.86、44.45和 $1.45\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,分别是对照区的3.9倍、15.2倍、2.0倍和6.9倍。

3.3 对土壤微生物的影响

目前关于电子废物污染对土壤微生物影响的研究还很少,但已有研究表明其影响同样不容忽视。本课题组在清远龙塘石角地区电子废物集中处理区的研究^[15]发现,土壤细菌数量在对照区为 6.59×10^7 ,严重污染土壤则只有 1.72×10^5 ,相差2个数量级;土壤放线菌数量在对照区为 1.22×10^5 ,严重污染土壤则只有 2.54×10^2 ,相差3个数量级;土壤真菌数量在对照区为 7.36×10^3 ,严重污染土则为 1.06×10^3 ,相差6倍,提示真菌对电子废物污染有较强的耐受能力,而放线菌的耐性最低;进一步分析表明,土壤细菌数量与土壤Pb、Cu、Zn、Cd、Ni含量以及PCBs、BDE209和PBDEs含量呈极显著或显著负相关;土壤放线菌数量与土壤Pb、Cu、Zn含量呈显著负相关;土壤微生物N熵和微生物C熵与土壤Cu、BDE209含量呈显著线性负相关;电子废物集中处理区严重的重金属和PBDEs、PCBs污染导致土壤呼吸增强,土壤基础呼吸与重金属Cd、Pb、Zn、Cu、Cr、Ni、Mn含量以及PBDEs、PCBs含量都存在极显著或显著线性正相关,表明基础呼吸可指示复合污染程度;DT-PA-Pb、DT-PA-Cu含量显著地降低了土壤酸性磷酸酶活性。

基于BIOLOG法碳源代谢的土壤微生物功能多样性研究结果表明,部分污染严重的土壤样点中微生物功能多样性并未显著低于对照样点,而一些污染程度并非最严重的样点的功能多样性指数却显著低于对照样点,说明污染严重区的土壤微生物功能发生了明显分化,导致多样性增加;据此推测严重污染样点中能够耐受重金属和POPs毒性的微生物类群有较大增加,从而避免了微生物群落功能多样性的下降^[15]。Zhang等^[50]对贵屿电子废物处理区表层土壤中POPs含量与驻存微生物类群组成的研究也得出了基本相同的结果。余晓华从电子废物污染环境筛选出77个具有单一重金属耐性的菌株以及20株具有重金属复合毒性耐受能力的菌株,并在上述菌株中进一步筛选出4个可降解Aro-clor1254的菌株,这些菌株在POPs-重金属复合污染土壤修复中显示出良好的应用前景^[15]。

4 电子废物健康风险调查和研究新进展

4.1 对污染区农作物和畜禽鱼的影响

Xing等^[51]对贵屿居民的调查结果发现,电子垃圾拆解职业暴露人群组和对照组总的PCBs暴露量(包括呼吸暴露和食物暴露)分别为 $2\ 163$ 和 $654\text{ ng}\cdot\text{d}^{-1}$,其中通过呼吸暴露途径的PCBs量占总量的87.8%和59.6%。他们分析认为,对于生活在电子废物污染地区的居民来说,呼吸以及皮肤暴露等途径要远大于食物暴露途径。但是,空气是流体,随时随刻都有很大的交换量,只要提高技术水平以及改善生产环境,通过呼吸暴露途径造成的健康风险就比较容易得到有效控制。而土壤、水体沉积物等环境介质的移动性极小,长期积累遗留在电子废物处理处置区土壤和水体沉积物(甚至地下水)中的各种污染物对当地和流域人群造成的健康风险必定是长期存在的。

本课题组对龙塘石角地区电子废物污染区几种常见农作物的重金属和PBDEs含量进行了分析,发现上海青(*Brassica campestris*)被检测出来的PBDEs单体有BDE47和BDE183两种,稻谷(*Oryza sativa*)中有BDE183、BDE203、BDE207、BDE208和BDE209五种,油麦菜(*Lactuca sativa*)最多,达12种;油麦菜的PBDEs含量也最高,达到 $25.64\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$;其次是稻谷,含量为 $2.08\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$;上海青PBDEs含量最低,为 $0.05\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$,主要是BDE47和BDE183,分别为 0.02 和 $0.03\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ ^[49]。

周翠等^[84]的研究表明,电子废物处理区内农作物受到了比较严重的重金属污染,农作物可食部分Cr、Cd和Pb的含量范围分别为 $0.08\sim 10.56\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $0.02\sim 0.76\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $0.05\sim 1.51\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,65.22%的受试农作物的可食部分样本受到了重金属污染,其中中度和重度污染分别达到13.04%和30.43%。

Luo等^[40]对清远龙塘石角地区鸡、鸭等家禽体内PBDEs含量的调查结果显示,鸡肉和鸡肝脏中PBDEs浓度分别为 $5.7\sim 4\ 381\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ (以单位脂质质量计)和 $1.5\sim 7\ 897\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ (以单位脂质质量计)。在所分析的33只鸡中,有7只鸡的鸡肉和肝脏的PBDEs浓度都超过了 $100\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ (以单位脂质质量计),这7只鸡全部来自电子垃圾拆解作坊附近;鸭肉和鸭肝脏部位PBDEs含量分别为 $2.4\sim 51\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ (以单位脂质质量计)和 $1.9\sim 134\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ (以单位脂质质量计),显著低于鸡体内相应部位的含量;进一步的计算结果表明,当地居民通过食用鸡和鸭,日摄入PBDEs量为 $7.8\sim 3\ 582\text{ ng}$,中间值为 67.8 ng ,比先前报道的广东地区通过食用13种普通鱼类途径摄入PBDEs量^[51]高出了10倍。电子废物

处理处置区内鸡肉、鸡蛋样品中 PBDEs 的浓度显著高于对照区^[52-53]。宋杨等^[41]通过调查也发现,电子废物处理区内鸡蛋和鲫鱼中 PCDD/Fs 含量分别为 $28.78 \text{ pg} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $14.11 \text{ pg} \cdot \text{g}^{-1}$, 远高于对照区的 $12.33 \text{ pg} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $1.11 \text{ pg} \cdot \text{g}^{-1}$; 所有 PCB 单体均可在鸡蛋和鲫鱼样品中被检出, 其中浓度较高的单体为 PCB-138、PCB-153、PCB-118, 共占 PCBs 总量的 50% 以上。

关于同样经常进入人类食物链的各种常见食用鱼类的调查结果已在 3.1 节进行介绍, 这里不再赘述。总体上, 对于电子废物污染区内鱼类的污染调查结果较为丰富, 但对农作物和养殖畜禽的污染调查仍然比较缺乏, 需要今后加大关于更多涉及食品安全的农产品的调查力度, 并结合健康风险评价以及使用严谨的流行病学研究方法开展进一步研究。

4.2 对人体健康的影响

4.2.1 人体污染水平

有关电子废物处理处置活动对人体污染水平的调查大多集中在贵屿地区。在人体重金属污染方面, Huo 等^[54]对贵屿所辖 4 个以电子废物拆解为主要产业的村庄中 165 名 1~6 岁儿童血铅含量 (BLLs) 进行了研究, 并以 61 名与贵屿相邻、生活方式类似但没有电子垃圾拆解作业 (以纺织工业为主) 的陈店镇的同龄儿童为对照组。结果表明, 贵屿镇儿童的血铅水平显著高于陈店镇; 贵屿镇儿童中 BLLs 大于 $10 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的占 81.8%, 其中电子废物回收活动十分密集的贵屿镇北林村和渡头村儿童 BLLs 超过 $10 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的比例分别为 88.8% 和 100%, 而对照的陈店镇为 37.7%, 我国儿童 BLLs 超过 $10 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的则为 33.8%^[55]。一项针对贵屿镇新生婴儿脐带血铬水平的研究^[14]表明, 2006 年贵屿镇婴儿脐带血铬浓度的几何均值为 $306.20 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, 中位数为 $93.89 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, 2007 年几何均值和中位数分别为 $99.90 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $70.60 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, 而血铬在人体血液中的正常值仅为 $0 \sim 0.2 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, 表明贵屿婴儿脐带血铬浓度达到了十分惊人的地步。Zheng 等^[56]也对贵屿镇电子废物处理处置区儿童的血铅和血镉水平进行了调查, 发现 70.8% 儿童的血铅含量高于 $10 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, 20.1% 儿童的血镉含量高于 $2 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, 均远高于对照区儿童; 随着年龄的增长, 贵屿镇电子废物污染区儿童的血铅、血镉含量有明显的增长趋势。杨辉等^[57]对贵屿镇幼儿园 3~8 岁儿童的研究也有基本相同的结论, 他们的进一步调查发现, 儿童血铅、血镉水平的升高与儿童住所周围是否存在电子废物处理场地呈正相关。2004—2007 年

间的一项研究发现, 贵屿电子废物处理处置区婴儿脐带血镉含量和胎盘镉含量分别为 3.61 和 0.17 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$, 均极显著高于对照组^[58]。

Zheng 等^[59]对清远龙塘石角地区电子废物污染暴露人群头发中的重金属含量进行了分析, 发现 Zn、Pb、Cu、Cd、Ni 是含量最高的 5 种重金属, 均显著高于对照区水平; 重金属含量遵循 $\text{Zn} > \text{Pb} > \text{Cu} > \text{Cd} > \text{Ni}$ 的顺序, Pb、Cu、Cd 3 种重金属之间有很高的相关性; 儿童更易受到重金属污染的伤害。Wang 等^[60]的研究结果显示, 电子废物拆解从业人员尿中的 Cd 水平显著高于对照组, 并与从业时间呈正相关。

在人体有机污染物含量水平方面, Qu 等^[61]对贵屿镇电子废物拆解工人血浆中的 PBDEs 浓度进行了调查, 调查对象包括拆解工人, 距离贵屿 50 km 以内的近海农耕区以种植业为主要经济来源的农民和生活在广州的无 PBDEs 职业暴露风险的居民。结果显示, 电子废物拆解工人血浆中 PBDEs 含量特别是高溴同系物显著高于其他 2 组, 大多为其他 2 组的 11~20 倍。Bi 等^[62]对贵屿镇 26 位居民血样中 PCBs、PBDEs、OCPs 的含量做了调查, 位于贵屿镇东部 50 公里处以渔业为主要经济来源的濠江区 21 位居民为对照, 发现贵屿组样品中的 ΣPBDE 浓度比濠江组高 3 倍, 而 DDT 浓度恰好相反; 两地的 PCBs 浓度差异并不明显; 贵屿组样品中的 PBDEs 占有机卤代物总量的 46%, 而濠江组仅为 8.7%。Ren 等^[63]研究表明, 贵屿镇居民血清样品中的 DP 平均浓度为 $42.6 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ ($7.8 \sim 465 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$), 显著高于对照居民居民的 $13.7 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ ($0.93 \sim 50.5 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$)。

调查发现, 龙塘石角地区电子废物拆解从业人员头发中的 DP 含量为 $0.02 \sim 58.32 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$, 该区粉尘中的 DP 含量为 $2.78 \sim 4197 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$, DP 在粉尘和头发中浓度和丰度的相似度和相关性都表明粉尘的吸收是 DP 暴露的重要途径^[64]。对上述人群头发中 BFRs 含量的调查结果表明, 从业人员头发中的 BFRs 含量显著高于对照人群; PBDEs 和 DBDPE 是头发样品中 2 种主要的 BFRs^[65]。

Zhao 等^[66]对台州地区电子废物处理区癌症病人组织样本中的 PBBs、PBDEs 和 PCBs 水平进行了分析, 发现绝大部分标本中都有 PBDE47, 含量为 $64.2 \sim 113.9 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ (以单位脂质质量计), 在 PHAHs 的 3 个亚族中, PCB 的浓度最高; 推断一些癌症的发生与组织内高水平的 PBBs、PBDEs 和 PCBs 有关。

4.2.2 电子废物污染区和职业暴露人群机体损伤

研究表明, 贵屿镇 3~6 岁儿童的智力与其血铅

水平有显著的相关性,当地儿童的智力发育在一定程度上受到了铅污染的伤害,贵屿周边地区的儿童可能也受到了相应影响^[67]。研究还发现,贵屿镇受调查的儿童平均身高显著低于对照的陈店镇儿童,影响儿童血镉、血铅浓度的因子主要包括儿童的父母是否参与电子垃圾拆解相关活动、是否居住在贵屿以及在道路两旁活动的时间等^[55]。一项针对贵屿镇和对照地区新生儿脐带血进行的单细胞凝胶电泳试验表明,两地之间的受损比率和彗星尾巴长度有显著差别,说明贵屿镇环境已经对当地新生婴儿的健康造成了一定的损伤^[14]。刘强等^[68]关于天津市近郊某电子废物集中处理区居民的细胞遗传学研究表明,暴露组居民染色体总畸变率和微核率分别为5.50%和1.699%,均显著高于对照组居民;暴露组女性的染色体畸变率、微核率和DNA损伤水平均明显高于男性;他们推断,源于电子废物处理处置活动的污染物是潜在的遗传诱变剂,能够造成受感人群的细胞遗传学损伤。李克秋等^[69]的研究也得到了基本相同的结果。居颖等^[70-71]发现电子废物处理环境暴露对当地居民血清中甲状腺激素和性激素水平有影响,暴露组血清中游离四碘甲状腺原氨酸水平低于对照组,促甲状腺激素水平高于对照组;男性居民中,暴露组血清中性激素和睾酮均低于对照组;女性居民中,暴露组血清中孕酮水平高于对照组;由此推测电子废物处理处置活动排放污染物的环境暴露可能对产妇及新生儿甲状腺激素水平及受体表达有重要影响,电子废物拆解职业暴露史是促甲状腺激素水平升高的危险因素。对贵屿电子废物拆解区新生儿脐带血淋巴细胞DNA损伤状况的研究发现,暴露组脐带血淋巴细胞DNA较对照组损伤严重,尾长、彗尾DNA百分含量及尾矩均显著高于对照组^[72]。调查显示,电子废物处理区居民脊椎病、痛风、甲亢、肝功能不良及骨质疏松症患病率明显偏高,这种偏高与机体中PBDEs含量密切相关^[47],且伴随有特异性细胞免疫功能减弱、淋巴细胞凋亡水平偏高等现象^[73]。可见,电子废物处理处置活动不当已经对当地居民的健康构成了潜在的危害。

5 研究展望

5.1 电子废物回收从业人员污染物暴露及健康风险亟待开展深入调查和研究

电子废物回收活动具有区域性聚集特征,从业人员分布于特定的区域,应该比较容易获得职业暴露人群的调查结果。但由于此类活动往往已经成为

当地的支柱产业以及从业人员赖以生存的就业行业,受到当地政府和群众的保护,因而不易获得从业人员的人体组织样品,难以进行系统、严谨的流行病学调查和研究。因此,建议通过政府立项的方式,排除各种干扰,尽快开展电子废物回收行业职业暴露人群的调查,包括污染物暴露水平、代谢途径、对机体的影响、遗传毒性等等,并尽快采取措施降低健康风险,避免形成区域性环境健康事件。

5.2 电子废物源污染物的区域影响研究

现有对电子废物污染的研究均集中在当地的环境介质、生态系统和人体健康的影响方面。但在这些典型地区产生和积聚的污染物必定会通过各种动力要素在更大的空间范围内迁移扩散,从而威胁区域或流域环境安全。例如,流经清远龙塘、石角镇的大燕河沉积物中,已经发现了非常典型的电子废物源污染物的聚积及向下游迁移的证据^[8],大燕河汇入珠江三大支流之一的北江,而北江下游分布着珠江三角洲地区7个集中式饮用水源保护区,但目前对于电子废物源污染物对北江水质和沉积物的影响却尚未经过调查。因此,建议对电子废物典型污染区积聚的污染源的迁移扩散进行调查研究,包括引起迁移扩散的主要动力要素、扩散途径、水平和范围、不同扩散空间范围内汇的特征、时间尺度上污染物的迁移特征、对饮用水源保护区的影响等等。

5.3 电子废物污染环境的修复技术研究和示范

多项调查都已经证明电子废物回收活动在典型区域造成的污染十分严重,且污染是多方面、复合型的,从环境介质、生态系统到食物链,从重金属到持久性有机污染物,不仅影响当地的生态安全和身体健康,而且还成为一个巨大的污染源,随时威胁着区域和流域的环境安全。当地政府处于对投资环境的考虑,往往不希望将事实公诸于众,加之受污染环境的修复费时费力,还需要大量的资金,因此,迄今绝大多数受电子废物污染的地区尚未开展受污染环境修复的工作。目前对于受污染环境修复技术的研究已经产出了大量的成果,可以通过系统集成整合成为电子废物污染环境修复技术体系,并开展技术示范,在示范成功的基础上进行推广应用。对于现有修复技术受限于电子废物源污染物的固有特性(例如严重的重金属-POPs复合污染)等问题,则需要通过进一步的科学研究加以解决。总之,受电子废物污染环境的修复必定是长期的、耗费资金的工作,但从保障当地、区域和流域环境安全的角度考虑,这是

不得不为的工作,是对过去非科学发展的必不可少的补偿。如果继续掩耳盗铃,甚至企图掩盖既有的污染真相,在受污染区发展不相适应的项目(如房地产项目),所产生的严重后果将可能是难以估量的,美国胡克化学公司一手导演的“拉夫运河(Love Canal)”事件^[74]的教训当以为戒。

通讯作者简介:杨中艺(1959—),男,中山大学生命科学院教授,主要研究方向为应用生态学。

参考文献:

- [1] 彭平安,盛国英,傅家谟. 电子垃圾的污染问题[J]. 化学进展, 2009, 21(2-3): 550—557
Peng P A, Sheng G Y, Fu J M. The pollution by electronic and electric wastes [J]. Progress in Chemistry, 2009, 21(2-3): 550—557 (in Chinese)
- [2] Kahhat R, Kim J, Xu M, et al. Exploring e-waste management systems in the United States [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2008, 52(7): 955—964
- [3] 郑骥. 中国电子废物再生产业发展现状分析[J]. 新材料产业, 2010(12): 22—26
- [4] Matthew J R, Michele R, Jane C A. E-waste: An opportunity [J]. Materials Today, 2004, 7(1): 40—45
- [5] 罗勇,余晓华,杨中艺,等. 电子废物不当处置的重金属污染及其环境风险评价 I. 电子废物焚烧迹地的重金属污染[J]. 生态毒理学报, 2008, 3(1): 34—41
Luo Y, Yu X H, Yang Z Y, et al. Studies on heavy metal contamination by improper handling of e-waste and its environmental risk evaluation I. Heavy metal contamination in e-waste open burning sites [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2008, 3(1): 34—41 (in Chinese)
- [6] 罗勇,罗孝俊,杨中艺,等. 电子废物不当处置的重金属污染及其环境风险评价 II. 分布于人居环境(村镇)内的电子废物拆解作坊及其附近农田的土壤重金属污染[J]. 生态毒理学报, 2008, 3(2): 123—129
Luo Y, Luo X J, Yang Z Y, et al. Studies on heavy metal contamination by improper handling of e-waste and its environmental risk evaluation II. Heavy metal contamination in surface soils on e-waste disassembling workshops within villages and the adjacent agricultural soils [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2008, 3(2): 123—129 (in Chinese)
- [7] 罗勇,罗孝俊,杨中艺,等. 电子废物不当处置的重金属污染及其环境风险评价 III. 电子废物酸解、焚烧活动对小流域地表水和井水的金属污染[J]. 生态毒理学报, 2008, 3(3): 231—236
Luo Y, Luo X J, Yang Z Y, et al. Studies on heavy metal contamination by improper handling of e-waste and its environmental risk evaluation III. Heavy metal contamination of surface waters and well water by e-waste acid treatment and open burning activities [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2008, 3(3): 231—236 (in Chinese)
- [8] 罗勇,罗孝俊,杨中艺,等. 电子废物不当处置的重金属污染及其环境风险评价 IV. 电子废物不当回收地区流域水体沉积物的重金属污染[J]. 生态毒理学报, 2008, 3(4): 343—349
Luo Y, Luo X J, Yang Z Y, et al. Studies on heavy metal contamination by improper handling of e-waste and its environmental risk evaluation IV. Heavy metal contamination of sediments in a small scale valley impacted by e-waste treating activities [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2008, 3(4): 343—349 (in Chinese)
- [9] Puckett J, Byster L, Westervelt S, et al. Exporting Harm: The High-Tech Trashing of Asia [R/OL]. Seattle: The Basel Action Network (BAN) and Silicon Valley Toxics Coalition (SVTC), 2002
- [10] Leung A, Cai Z W, Wong M H. Environmental contamination from electronic waste recycling at Guiyu, Southeast China [J]. Journal of Material Cycles and Waste Management, 2006, 8(1): 21—33
- [11] Wong M H, Wu S C, Deng W J, et al. Export of toxic chemicals—A review of the case of uncontrolled electronic-waste recycling [J]. Environmental Pollution, 2007, 149(2): 131—140
- [12] Deng W J, Louie P K K, Liu W K, et al. Atmospheric levels and cytotoxicity of PAHs and heavy metals in TSP and PM_{2.5} at an electronic waste recycling site in Southeast China [J]. Atmospheric Environment, 2006, 40(36): 6945—6955
- [13] Wong C S C, Duzgoren-Aydin N S, Aydin A, et al. Evidence of excessive releases of metals from primitive e-waste processing in Guiyu, China [J]. Environmental Pollution, 2007, 148(1): 62—72
- [14] Li Y, Xu X, Liu J, et al. The hazard of chromium exposure to neonates in Guiyu of China [J]. Science of the Total Environment, 2008, 403(1-3): 99—104
- [15] 余晓华. 电子废物不当处置环境污染风险研究[D]. 广州: 中山大学, 2010: 35—87
Yu X H. A study on the environmental risks from improper handling of e-waste [D]. Guangzhou: Sun Yat-sen University, 2010: 35—87 (in Chinese)
- [16] Wu J P, Luo X J, Zhang Y, et al. Bioaccumulation of polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) and polychlorinated biphenyls (PCBs) in wild aquatic species

- from an electronic waste recycling site in South China [J]. *Environment International*, 2008, 34(8): 1109—1113
- [17] 储少岗, 徐晓白. 多氯联苯在典型污染环境中的分布及其环境行为[J]. *环境科学学报*, 1995, 15(4): 423—431
- Chu S G, Xu X B. Transport and distribution of polychlorinated biphenyls in a polluted area [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1995, 15(4): 423—431 (in Chinese)
- [18] Zhao G, Xu Y, Han G, et al. Biotransfer of persistent organic pollutants from a large site in China used for the disassembly of electronic and electrical waste [J]. *Environmental Geochemistry & Health*, 2006, 28(4): 341—351
- [19] 王世纪, 简中华, 罗杰. 浙江省台州市路桥区土壤重金属污染特征及防治对策[J]. *地球与环境*, 2006, 34(1): 35—43
- Wang S J, Jian Z H, Luo J. Characteristics of and countermeasures controlling heavy metal pollution of soils in Luqiao, Taizhou [J]. *Earth and Environment*, 2006, 34(1): 35—43 (in Chinese)
- [20] 李英明, 江桂斌, 王亚, 等. 电子垃圾拆解地大气中二恶英、多氯联苯、多溴联苯醚的污染水平及相分配规律[J]. *科学通报*, 2008, 53(2): 165—171
- [21] Guo Y, Huang C J, Zhang H, et al. Heavy metal contamination from electronic waste recycling at Guiyu, Southeastern China [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2009, 38(4): 1617—1626
- [22] 林文杰, 吴荣华, 郑泽纯, 等. 贵屿电子垃圾处理对河流底泥及土壤重金属污染[J]. *生态环境学报*, 2011, 20(1): 160—163
- Lin W J, Wu R H, Zheng Z C, et al. Heavy metals in sediments and soils contaminated by e-waste recycling in Guiyu [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2011, 20(1): 160—163 (in Chinese)
- [23] 吴江平, 管运涛, 张荧, 等. 广东电子垃圾污染区水体底层鱼类对 PCBs 的富集效应[J]. *中国环境科学*, 2011, 31(4): 637—641
- Wu J P, Guan Y T, Zhang Y, et al. Bioaccumulation potentials of polychlorinated biphenyls in bottom fishes from an e-waste recycling site in South China [J]. *China Environmental Science*, 2011, 31(4): 637—641 (in Chinese)
- [24] 余莉萍, 李会茹, 孟祥周, 等. 电子垃圾焚烧排放的二恶英对周围大气环境的影响[J]. *环境污染与防治*, 2008, 30(2): 8—11
- Yu L P, Li H R, Meng X Z, et al. Effect of PCDD/Fs from e-waste combustion on the ambient atmospheric environment [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2008, 30(2): 8—11 (in Chinese)
- [25] Luo Y, Luo X J, Lin Z, et al. Polybrominated diphenyl ethers in road and farmland soils from an e-waste recycling region in Southern China: Concentrations, source profiles, and potential dispersion and deposition [J]. *Science of the Total Environment*, 2009, 407(3): 1105—1113
- [26] Gao S T, Wang J Z, Yu Z Q, et al. Hexabromocyclododecanes in surface soils from e-waste recycling areas and industrial areas in South China: Concentrations, diastereoisomer- and enantiomer-specific profiles [J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, 45(6): 2093—2099
- [27] Han W L, Feng, J L, Gu Z P, et al. Polybrominated diphenyl ethers in the atmosphere of Taizhou, a major e-waste dismantling area in China [J]. *Bulletin of Environmental Contamination*, 2009, 83(6): 783—788
- [28] 张雪莲, 骆永明, 滕应, 等. 长江三角洲某电子垃圾拆解区土壤中多氯联苯的残留特征[J]. *土壤*, 2009, 41(4): 588—593
- Zhang X L, Luo Y M, Teng Y, et al. Residue characters of PCBs in soils of typical polluted areas in Yangtze River Delta Region [J]. *Soils*, 2009, 41(4): 588—593 (in Chinese)
- [29] 陈涛, 周纯, 牟义军, 等. 典型电子废物集中处置场地及周边土壤中多溴联苯醚的污染特征[J]. *生态与农村环境学报*, 2011, 27(3): 20—24
- Chen T, Zhou C, Mou Y J, et al. PBDEs pollution of soils in a typical e-waste disposal site and its surrounding area [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2011, 27(3): 20—24 (in Chinese)
- [30] 张中华, 金士威, 段晶明, 等. 台州电子废物拆解地区表层土壤中酞酸酯的污染水平[J]. *武汉工程大学学报*, 2010, 32(7): 28—31
- Zhang Z H, Jin S W, Duan J M, et al. Phthalates levels in soil samples from the e-waste disassembly sites [J]. *Journal of Wuhan Institute of Technology*, 2010, 32(7): 28—31 (in Chinese)
- [31] 陈多宏, 高博, 毕新慧, 等. 典型电子垃圾拆解区大气颗粒物中元素污染的季节变化特征[J]. *环境监测管理*, 2010, 22(4): 19—22
- Chen D H, Gao B, Bi X H, et al. Seasonal variation characteristics of metallic element in TSP of a typical e-waste dismantling region [J]. *The Administration and Technique of Environmental Monitoring*, 2010, 22(4): 19—22 (in Chinese)
- [32] Yu Z Q, Lu S Y, Gao S T, et al. Levels and isomer profiles of dechlorane plus in the surface soils from e-waste recycling areas [J]. *Environmental Pollution*, 2011, 158(9): 2920—2925

- [33] 郭莹莹, 黄泽春, 王琪, 等. 电子废物酸浴处置区附近农田土壤重金属污染特征[J]. 环境科学研究, 2011, 24(5): 580—586
- Guo Y Y, Huang Z C, Wang Q, et al. Pollution characteristics of heavy metals in agricultural soils near an e-waste acid washing treatment site [J]. Research of Environmental Sciences, 2011, 24(5): 580—586 (in Chinese)
- [34] 周翠, 杨祥田, 何贤彪, 等. 电子垃圾拆解区农作物可食部重金属污染评价[J]. 浙江农业学报, 2011, 23(4): 798—801
- Zhou C, Yang X T, He X B, et al. Heavy metals pollution assessment of edible parts of crops grown around e-waste disassembling areas [J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2011, 23(4): 798—801 (in Chinese)
- [35] Zhao Y X, Qin X F, Li Y, et al. Diffusion of PBDE from an e-waste recycling area to the surrounding regions in Southeast China [J]. Chemosphere, 2009, 76(11): 1470—1476
- [36] 宋杨, 吴南翔, 韩见龙, 等. 某电子垃圾拆解地鲫鱼和鸡蛋中二恶英和多氯联苯的污染状况研究[J]. 环境与健康杂志, 2011, 28(4): 328—331
- Song Y, Wu N X, Han J L, et al. Pollution of polychlorinated dibenzo-p-dioxins/furans and polychlorinated biphenyls in chicken eggs and crucian from an e-waste recycling site in China [J]. Journal of Environment and Health, 2011, 28(4): 328—331 (in Chinese)
- [37] Luo Q, Cai Z W, Wong M H. Polybrominated diphenyl ethers in fish and sediment from river polluted by electronic waste [J]. Science of the Total Environment, 2007, 383(1-3): 115—127
- [38] Wu J P, Luo X J, Zhang Y, et al. Residues of polybrominated diphenyl ethers in frogs from a contaminated site [J]. Environmental Science & Technology, 2009, 43(14): 5212—5217
- [39] He M J, Luo X J, Yu L H, et al. Tetrabromobisphenol A and hexabromocyclododecane in birds from an e-waste region [J]. Environmental Science & Technology, 2010, 44(15): 5748—5754
- [40] Luo X J, Zhang X L, Liu J, et al. Persistent halogenated compounds in waterbirds from an e-waste recycling region [J]. Environmental Science & Technology, 2009, 43(2): 306—311
- [41] Luo X J, Liu J, Luo Y, et al. PBDEs in free-range domestic fowl from an e-waste recycling site in South China [J]. Environment International, 2009, 35(2): 253—258
- [42] Wu J P, Luo X J, Zhang Y, et al. Bioaccumulation of PBDEs and PCBs in wild aquatic species from an e-waste recycling site [J]. Environment International, 2008, 34(8): 1109—1113
- [43] Zhang X L, Yang F X, Luo C H, et al. Bioaccumulative characteristics of hexabromocyclododecanes in freshwater species from an electronic waste recycling area in China [J]. Chemosphere, 2009, 76(11): 1572—1578
- [44] Luo Q, Wong M, Cai Z. Determination of polybrominated diphenyl ethers in freshwater fishes from a river polluted by e-wastes [J]. Talanta, 2007, 72(5): 1644—1649
- [45] Meng X Z, Zeng E Y, Yu L P, et al. Persistent halogenated hydrocarbons in consumer fish of China: Regional and global implications for human exposure [J]. Environmental Science & Technology, 2007, 41(6): 1821—1827
- [46] 梁淑轩, 赵茜, 杨中军. 电子垃圾污染地区生物样品中痕量多溴二苯醚的检测[J]. 河北大学学报: 自然科学版, 2009, 29(5): 511—517
- Liang S X, Zhao Q, Yang Z J. Quantification of trace polybrominated diphenyl ether in biota samples from an electronic waste recycling area [J]. Journal of Hebei University: Natural Science Edition, 2009, 29(5): 511—517 (in Chinese)
- [47] 王福彦, 梁勇, 陈征燕, 等. 电子废物中持久性有机污染物对健康影响的调查[J]. 中国热带医学, 2010, 10(3): 391—392
- Wang F Y, Liang Y, Chen Z Y, et al. Impact of organic electronic waste on the health of human and organisms [J]. China Tropical Medicine, 2010, 10(3): 391—392 (in Chinese)
- [48] Huang H L, Zhang S Z, Christie P. Plant uptake and dissipation of PBDEs in the soils of electronic waste recycling sites [J]. Environmental Pollution, 2011, 159(1): 238—243
- [49] 罗勇. 电子废物不当处置环境中多溴联苯醚和重金属污染研究[D]. 广州: 中山大学, 2007: 40—99
- Luo Y. Effect of hazardous e-waste recycling operations on environmental polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) and heavy metals contamination [D]. Guangzhou: Sun Yat-sen University, 2007: 40—99 (in Chinese)
- [50] Zhang W, Wang H, Zhang R, et al. Bacterial communities in PAH contaminated soils at an electronic-waste processing center in China [J]. Ecotoxicology, 2010, 19(1): 96—104
- [51] Xing G H, Chan J K Y, Leung A O W, et al. Environmental impact and human exposure to PCBs in Guiyu, an e-waste recycling site in China [J]. Environment International, 2009, 35(1): 76—82
- [52] 刘娟, 罗孝俊, 陈社军, 等. 电子垃圾回收地散养家

- 禽(鸡)中多溴联苯醚(PBDEs)的浓度与分布模式[J]. 现代农业科技, 2009(24): 293—295
- Liu J, Luo X J, Chen S J, et al. Concentration and distribution pattern of polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) in scatter fed chickens from electronic waste recycling site [J]. Anhui Agriculture, 2009(24): 293—295 (in Chinese)
- [53] Qin X F, Qin Z F, Li Y, et al. Polybrominated diphenyl ethers in chicken tissues and eggs from an e-electronic waste recycling area in Southeast China [J]. Journal of Environmental Sciences, 2011, 23(1): 133—138
- [54] Huo X, Peng L, Xu X, et al. Elevated blood lead levels of children in Guiyu, an e-waste recycling town in China [J]. Environmental Health Perspectives, 2007, 115(7): 1113—1117
- [55] Wang S, Zhang J. Blood lead levels in children, China [J]. Environmental Research, 2006, 101(3): 412—418
- [56] Zheng L K, Wu K S, Li Y, et al. Blood lead and cadmium levels and relevant factors among children from an e-waste recycling town [J]. Environmental Research, 2009, 108(1): 15—20
- [57] 杨辉, 徐锡金, 刘伟, 等. 电子垃圾拆解区儿童血铅、血镉水平及相关影响因素的研究[J]. 汕头大学医学院学报, 2011, 24(1): 30—31
- Yang H, Xu X J, Liu W, et al. Blood lead and cadmium levels and related risk factors among children in an electronic recycling area [J]. Journal of Shantou University Medical College, 2011, 24(1): 30—31 (in Chinese)
- [58] Li Y, Huo X, Liu J X, et al. Assessment of cadmium exposure for neonates in Guiyu, an electronic waste pollution site of China [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2011, 177(1-4): 343—351
- [59] Zheng J, Luo X J, Yuan J G, et al. Levels and sources of brominated flame retardants in human hair from urban, e-waste, and rural areas [J]. Environmental Pollution, 2011, 159(12): 3706—3713
- [60] Wang H M, Han M, Yang S W, et al. Urinary heavy metal levels and relevant factors among people exposed to e-waste dismantling [J]. Environmental International, 2011, 37(1): 80—85
- [61] Qu W, Bi X, Sheng G, et al. Exposure to polybrominated diphenyl ethers among workers at an e-waste dismantling region in Guangdong, China [J]. Environmental International, 2007, 33(8): 1029—1034
- [62] Bi X, Thomas G O, Jones K C, et al. Exposure of e-electronics dismantling workers to polybrominated diphenyl ethers, polychlorinated biphenyls, and organochlorine pesticides in South China [J]. Environmental Science & Technology, 2007, 41(16): 5647—5653
- [63] Ren G F, Yu Z Q, Ma S T, et al. Determination of dechlorane plus in serum from electronics dismantling workers in South China [J]. Environmental Science & Technology, 2009, 43(24): 9453—9457
- [64] Zheng J, Wang J, Luo X J, et al. Dechlorane plus in human hair from an e-waste recycling area: Comparison with dust [J]. Environmental Science & Technology, 2010, 44(24): 9298—9303
- [65] Zheng J, Luo X J, Yuan J G, et al. Heavy metals in hair of residents in an e-waste recycling area, South China: Contents and assessment of bodily state [J]. Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 2011, 61(4): 696—703
- [66] Zhao G F, Wang Z J, Zhou H D, et al. Burdens of PBBs, PBDEs, and PCBs in tissues of the cancer patients in the e-waste disassembly sites in Zhejiang, China [J]. Science of the Total Environment, 2009, 407(17): 4831—4837
- [67] 韩岱, 霍霞, 郑良楷, 等. 电子废物拆解区儿童的血铅和智力情况调查[J]. 汕头大学医学院学报, 2007, 20(3): 170—175
- Han D, Huo X, Zheng L K, et al. Investigation on blood lead and intelligence levels of children in e-waste recycling area [J]. Journal of Shantou University Medical College, 2007, 20(3): 170—175 (in Chinese)
- [68] 刘强, 李克秋, 苗绪红, 等. 电子废物回收处理污染对人类的遗传毒性[J]. 中国工业医学杂志, 2008, 21(2): 67—71
- Liu Q, Li K Q, Miao H X, et al. Genotoxic study of the pollutants from recycling waste electronic products [J]. Chinese Journal of Industrial Medicine, 2008, 21(2): 67—71 (in Chinese)
- [69] 李克秋, 李光, 苗绪红, 等. 电子垃圾处理区域人群遗传损伤的研究[J]. 环境与健康杂志, 2008, 25(2): 124—126
- Li K Q, Li G, Miao X H, et al. Research of genetic damage of people exposed to electronic waste [J]. Journal of Environment and Health, 2008, 25(2): 124—126 (in Chinese)
- [70] 居颖, 陈兰, 苏萍, 等. 电子垃圾拆解区居民血清中甲状腺激素和性激素水平研究[J]. 环境与健康杂志, 2008, 25(6): 499—502
- Ju Y, Chen L, Su P, et al. Study on the levels of thyroid hormones and sexual hormones in serum of the residents in an e-waste dismantling region [J]. Journal of Environment and Health, 2008, 25(6): 499—502 (in Chinese)
- [71] 居颖, 徐国建, 陈兰, 等. 电子垃圾污染对产妇及新

- 生儿甲状腺激素水平及受体表达的影响[J]. 卫生研究, 2008, 37(5): 536—539
- Ju Y, Xu J G, Chen L, et al. Effects of the electronic waste pollution on the levels of thyroid hormone and its receptor expression in the parturient woman and the newborn [J]. Journal of Hygiene Research, 2008, 37(5): 536—539 (in Chinese)
- [72] 王远萍, 霍霞, 肖琼娜, 等. 电子垃圾拆解区新生儿脐带血淋巴细胞 DNA 损伤及其相关因素分析[J]. 汕头大学医学院学报, 2011, 24(1): 20—22
- Wang Y P, Huo X, Xiao Q N, et al. Analysis of DNA damage of umbilical cord blood lymphocytes and related factors in neonates from an e-waste recycling area [J]. Journal of Shantou University Medical College, 2011, 24(1): 20—22 (in Chinese)
- [73] 程清, 李克秋, 李光. 某电子废弃物拆解区居民外周血淋巴细胞亚群调查[J]. 环境与健康杂志, 2010, 27(2): 149—150
- [74] Phillips A S, Hung Y T, Bosela P A. Love Canal tragedy [J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2007, 21(4): 313—319

如何描述化学暴露以预测对水生环境的生态影响

2013 年 7 月 11 日 来源:环境科学和技术

对淡水系统中的化学混合物的一项研究显示,可能通过仅考虑毒性最强的化合物来估计总毒性。

由位于德国兰道市(Landau)的环境科学研究所的 Ralf Schafer 领导的一个研究小组使用一系列度量分析了从欧洲和澳大利亚的 100 多条河流中采集的样品中的生物群和有机化学物质的监测数据。

它们对这些数据应用了一套不同的暴露度量。这些数据使用毒性单位(TU)来评估对有机毒物的暴露。比如,他们为基准系列大型大蚤计算了毒性单位(TU),并为目前可获得其毒性数据的最敏感生物体计算了毒性单位(敏感 TU)。对于所有暴露度量,他们还计算了 TU 和 TU_{max} 之和,该数字指示混合物中毒性最强的成分的最低估计毒性,并"忽略"了所有其他化合物的潜在影响。

《如何描述化学暴露以预测对水生环境的生态影响》将在《环境科学和技术》(Environmental Science and Technology)学报上发表。

引自《化学品安全信息周报》2013 年第 29 期总第 241 期(中国检验检疫科学研究院化学品安全研究所编译)
[http://www.chinachemicals.org.cn/reported_detail.aspx?contentid=257&ClassID=229\(2013-07-25\)](http://www.chinachemicals.org.cn/reported_detail.aspx?contentid=257&ClassID=229(2013-07-25))