

我国重点流域城市污泥有机污染物含量与溯源研究

张 辰, 王 磊, 谭学军, 王逸贤, 王磊磊
(上海市市政工程设计研究总院<集团>有限公司, 上海 200092)

摘 要: 调研了我国重点流域 58 座典型污水处理厂污泥的有机污染物含量,并分析了有机污染物的可能来源。结果表明,污泥中不同有机污染物指标按照含量平均值排序依次为矿物油>可吸附有机卤化物>挥发酚>总氰化物>多环芳烃>苯并(a)芘>多氯联苯,其中矿物油、多环芳烃、可吸附有机卤化物、挥发酚含量超过各项泥质标准限值的频率均高于 5%,尤其是矿物油含量超过农用 A 级泥质标准的频率达到了 36%;总氰化物和苯并(a)芘超标频率相对较低;多氯联苯的检出率较低,且检出含量均不超过 0.2 mg/kg,满足泥质标准的要求。污泥中有机污染物主要来自石油化工、机械加工、造纸、纺织、电镀、焦化、化工等行业排放的工业废水。

关键词: 重点流域; 市政污泥; 有机污染物; 工业废水; 污水处理厂

中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2018)24-0037-06

Study on the Content and Source of Municipal Sludge Organic Pollutants in Key Watershed of China

ZHANG Chen, WANG Lei, TAN Xue-jun, WANG Yi-xian, WANG Lei-lei
(Shanghai Municipal Engineering Design Institute <Group> Co. Ltd., Shanghai 200092, China)

Abstract: Organic pollutants contents in the sludge from 58 typical wastewater treatment plants in major watershed of China were investigated. And the possible sources of the organic pollutants were analyzed. The results indicated that the order of the average concentrations of organic pollutants exhibited as: mineral oil > adsorbable organic halide (AOX) > volatile phenols > total cyanides > poly-aromatic hydrocarbons (PAHs) > Benzo (a) pyrene (BaP) > polychlorinated biphenyls (PCBs). The mineral oil, PAHs, AOX and volatile phenols concentrations exceeded the limit set by each sludge standard by over 5% respectively, especially the extent of mineral oil concentration exceeding the standard limit of agricultural grade A reached as high as 36%. The extent of total cyanides and BaP exceeding the standard limits were relatively low. The detection rate of PCBs was low and the concentrations detected in all the sludge samples were less than 0.2 mg/kg, which could meet the standard requirements of sludge. The organic pollutants in sludge mainly came from industrial wastewater discharged from petrochemical industry, machine processing, paper making, textile, electroplating, coking and chemical industry.

Key words: major watershed; municipal sludge; organic pollutants; industrial wastewater; wastewater treatment plant

随着我国污水处理设施建设的快速发展,伴随 产生的污泥量日益增加,2016 年我国城镇污泥产量

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07403002); 上海市科技人才计划项目(17XD1422200)

已达到 $4\,300 \times 10^4 \text{ t}$ (以污泥含水率 80% 计)^[1], 污泥处理处置所面临的问题越来越严峻。泥质是制约污泥资源化利用和安全处置的主要因素, 长期以来国内外对于城市污泥中重金属含量、分布以及环境风险的研究较多^[2~4], 而对于有机污染物分布状况的研究较少。虽然我国系列泥质标准明确规定了污泥中矿物油、挥发酚、总氰化物、苯并(a)芘、多氯联苯、多环芳烃等有机污染物的限值, 但是受制于检测能力和重视程度, 鲜有污泥的产生、消纳或者监管单位对有机污染物含量进行监测, 导致标准难以有效执行。

石油化工、炼焦、造纸、化工、农药、沥青加工等行业的废水是城市污水中有机污染物的重要来源。污水处理的不同阶段对有机污染物的作用不同, 一般在一级处理过程中主要通过吸附作用去除有机污染物, 在二级处理过程中则通过生物降解作用去除。而低水溶性的矿物油、多环芳烃等有机污染物在辛醇/水之间的分配系数很大, 易被污泥吸附, 难被生物降解, 导致污水中的有机污染物高度富集于污泥中^[5]。污水处理厂服务范围内的工业企业类型、清洁生产水平、废水预处理工艺、排水体制等存在差异, 污泥中有机污染物成分和含量也会有所不同。本研究调研了我国重点流域典型城镇污水处理厂污泥中有机污染物的含量特征, 并分析了其潜在来源, 以期为污泥的资源化利用提供参考。

1 研究方法

1.1 调研范围

本研究调研范围覆盖太湖、巢湖、海河、辽河、滇池和三峡库区及上游等 6 大流域, 包括上海、常州、嘉兴、太仓、无锡、合肥、天津、唐山、赤峰、昆明、重庆等 11 座城市的 58 座城镇污水处理厂, 总设计污水处理能力为 $983 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 实际污水处理能力为 $853 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

调研范围内污水厂分布情况见表 1。

表 3 污泥有机污染物含量统计分析

Tab. 3 Statistical analysis of organic pollutants in sludge

项 目	矿物油	挥发酚	总氰化物	多环芳烃	苯并(a)芘	多氯联苯	可吸附有机卤化物
检出频率/%	100	100	81	52	27	18	52
最小值/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	2	0.02	0	0	0	0	0
最大值/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	14 300	68.00	14.27	11.90	4.12	0.14	1 025
中值/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	301	4.42	0.41	0.50	0	0	4
平均值/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	1 090	10.54	3.11	2.49	0.67	0.34	145
平均值标准差/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	2 535	17.15	10.54	7.16	3.58	2.36	235

表 1 调研范围内污水处理厂分布

Tab. 1 Distribution of sewage treatment plants in the research scope

流域	城市	污水处理厂数量/座
太湖及周边	上海、无锡、常州、太仓、嘉兴	26
海河	天津、唐山	7
滇池	昆明	7
巢湖	合肥	10
三峡库区及上游	重庆	2
辽河	赤峰	6

1.2 取样与检测方法

本研究于 2014 年 6 月—2015 年 6 月对调研范围内污水处理厂产生污泥进行了现场取样, 取样点位于各厂污泥脱水机房出泥口, 取样次数为 1~3 次 (若进水中工业废水比例较高, 则在不同时间多次取样, 检测数据取平均值), 样品质量不小于 1 kg, 所有污泥样品均送往中国计量认证 (CMA) 的第三方实验室检测, 检测项目和检测方法见表 2。

表 2 检测项目与检测方法

Tab. 2 Test items and test methods

项 目	检测方法	方法来源
矿物油	红外分光光度法	CJ/T 221—2005
挥发酚	蒸馏后 4-氨基安替比林分光光度法	CJ/T 221—2005
总氰化物	蒸馏后吡啶-巴比妥酸分光光度法	CJ/T 221—2005
苯并(a)芘	气相色谱法	CJ/T 309—2009
多氯联苯	气相色谱法	GB 13015—91
多环芳烃	液相色谱法	CJ/T 147—2001
可吸附有机卤化物	微库仑法	GB/T 15959—1995

2 有机污染物含量调研

2.1 含量特征

调研范围内污水处理厂污泥有机污染物含量统计分析结果见表 3。

由表 3 可知,矿物油在所有污泥样品中均有检出,总氰化物、多环芳烃、可吸附有机卤化物的检出频率均超过了 50%,苯并(a)芘和多氯联苯的检出频率相对较低。不同种类有机污染物在污泥中的含量存在显著差异,按照平均值大小排序依次为:矿物油>可吸附有机卤化物>挥发酚>总氰化物>多环芳烃>苯并(a)芘>多氯联苯。其中,各项指标的中值均远小于平均值,表明不同来源污泥有机污染物含量差异较大,平均值受小部分较大数据的影响显著。

2.2 累积频次分布

① 矿物油

调研结果表明,矿物油含量平均值为 1 090 mg/kg,80% 置信区间内含量为 38~2 340 mg/kg,平均值为 479 mg/kg。矿物油含量>500 mg/kg 的污泥样本比例为 36%,含量>3 000 mg/kg 的污泥样本比例为 9%。

② 挥发酚

调研结果表明,挥发酚含量平均值为 10.54 mg/kg,其中 80% 置信区间内含量为 0.07~22.80 mg/kg,平均值为 6.36 mg/kg。污水厂泥质及土地改良、制砖、混合填埋用泥质要求挥发酚<40 mg/kg,调研范围内挥发酚含量超标的污泥样品数量占总样本数的比例为 5%。

③ 总氰化物

调研结果表明,总氰化物含量平均值为 3.11 mg/kg,其中 29% 的污水厂污泥中总氰化物未被检出。污水厂泥质及土地改良、制砖、混合填埋用泥质要求总氰化物<10 mg/kg,调研范围内仅有个别污水厂污泥总氰化物含量超标,占总样本数的比例为 2%。

④ 多环芳烃

调研范围内 52% 的污水厂污泥中多环芳烃被检出,多环芳烃含量为 0~11.90 mg/kg,平均为 2.49 mg/kg。污泥中多环芳烃含量>5 mg/kg 的样本比例为 11%,含量>6 mg/kg 的样本比例为 9%。

⑤ 苯并(a)芘

调研范围内 27% 的污水厂污泥中苯并(a)芘有检出,苯并(a)芘含量为 0~4.12 mg/kg,平均值为 0.67 mg/kg。农用、园林绿化、林地用泥质标准要求污泥中苯并(a)芘含量<3 mg/kg,调研范围内仅有个别污水厂污泥苯并(a)芘含量超标,占比为 2%。

⑥ 多氯联苯

调研范围内 18% 的污水厂污泥中检出了多氯联苯,其含量为 0~0.14 mg/kg。土地改良用泥质标准要求污泥中多氯联苯含量<0.2 mg/kg,调研范围内所有污水处理厂污泥多氯联苯含量均能满足标准要求。

⑦ 可吸附有机卤化物

调研范围内 52% 的污水处理厂污泥中检出了可吸附有机卤化物,其含量为 0~1 025 mg/kg,平均值为 145 mg/kg。土地改良、园林绿化用泥质标准要求污泥中可吸附卤化物含量<500 mg/kg,调研范围内污水处理厂污泥可吸附有机卤化物含量超过标准要求的比例为 8%。

2.3 超标风险

调研结果表明,矿物油、多环芳烃、可吸附有机卤化物、挥发酚含量超过各项泥质标准限值的频率均高于 5%,尤其是矿物油含量超过农用 A 级泥质标准的频率达到了 36%。矿物油易使有机体包盖或窒息,被摄入则易与有机体内脂肪或其他组织结合,破坏新陈代谢和正常功能;多环芳烃具有致畸性、致癌性和致突变性,在环境中难降解易累积,可通过食物链进入人体^[6];可吸附有机卤化物水溶性低、脂溶性高,能够在生物体内聚集,部分有机卤化物已经被证实具有潜在致癌和致突变性^[7];挥发酚属高毒物质,长期饮用被酚污染的水可引起头晕、出疹、瘙痒、贫血及各种神经系统症状。污泥中上述污染物的超标频次较高,在土地利用等处置过程中需对其环境与人体健康风险进行评估。总氰化物和苯并(a)芘超标频率相对较低,仅有个别样本存在超标现象;多氯联苯的检出率较低,且检出含量均不超过 0.2 mg/kg,满足土地改良用泥质标准的要求。

值得注意的是,在厌氧消化、好氧堆肥等污泥稳定化过程中,部分有机污染物可能发生降解作用。徐为中等^[8]研究发现厌氧消化可明显降低污泥中多环芳烃的含量;花莉^[9]研究发现经过 50 d 的堆肥处理,污泥中 16 种美国国家环保总局(USEPA)优先控制多环芳烃的含量降低了 79%,其中菲、二苯并(a)蒽和芘的去除率分别达到了 93%、83% 和 30%;梁晶等^[10]研究发现,多环芳烃化合物环数越少则降解效果越好。

调研范围内污水处理厂污泥各项有机污染物指标超标频率汇总结果见表 4。

表 4 有机污染物指标超标频率分析

Tab. 4 The frequency that organic pollutants contents exceed standard

泥质标准		矿物油		挥发酚		总氰化物		苯并(a)芘		多氯联苯		多环芳烃		可吸附有机卤化物	
		标准限值/(mg·kg ⁻¹)	超标频率/%	标准限值/(mg·kg ⁻¹)	超标频率/%	标准限值/(mg·kg ⁻¹)	超标频率/%	标准限值/(mg·kg ⁻¹)	超标频率/%	标准限值/(mg·kg ⁻¹)	超标频率/%	标准限值/(mg·kg ⁻¹)	超标频率/%	标准限值/(mg·kg ⁻¹)	超标频率/%
污水厂泥质: GB 24188—2009		<3 000	9	<40	5	<10	2	—	—	—	—	—	—	—	—
农用: CJ/T 309—2009	A 级	<500	36	—	—	—	—	<2	4	—	—	<5	11	—	—
	B 级	<3 000	9	—	—	—	—	<3	2	—	—	<6	9	—	—
土地改良: GB/T 24600—2009	酸性土壤	3 000	9	40	5	10	2	—	—	0.2	0	—	—	500	8
	中碱性土壤	3 000	9	40	5	10	2	—	—	0.2	0	—	—	500	8
园林绿化: GB/T 23486—2009	酸性土壤	<3 000	9	—	—	—	—	<3	2	—	—	—	—	<500	8
	中碱性土壤	<3 000	9	—	—	—	—	<3	2	—	—	—	—	<500	8
林地: CJ/T 362—2011		<3 000	9	—	—	—	—	<3	2	—	—	<6	9	—	—
混合填埋: GB/T 23485—2009		<3 000	9	<40	5	<10	2	—	—	—	—	—	—	—	—
制砖: GB/T 25031—2010		<3 000	9	<40	5	<10	2	—	—	—	—	—	—	—	—
注: “—”表示标准中无相应指标的限值要求。															

3 有机污染物溯源分析

3.1 有机污染物来源

与重金属相比,工业废水中有机污染物的处理较为困难,且环保监测与监管相对较弱,工业企业很少针对有机污染物进行预处理。在污水处理过程中,有机污染物通过吸附或沉淀转移到了污泥中,其含量与污水厂服务范围内工业企业的废水排放密切相关。结合实际调研与文献结果^[11]对含有机污染物废水的主要来源行业进行分析,结果见表 5。

表 5 含有机污染物废水的主要来源

Tab. 5 Main sources of wastewater that containing organic pollutants

有机污染物	主要来源行业
矿物油	石油化工、机械加工、洗涤剂合成等
挥发酚	煤气洗涤、焦化、合成氨、造纸、木材防腐、化工等
氰化物	电镀、采矿、焦化、制革、煤气、有机玻璃、农药等
多环芳烃	炼油、煤气、煤焦油加工、沥青加工等
苯并(a)芘	焦化、炼油、沥青、塑料等
多氯联苯	机械加工、变压器生产等
可吸附有机卤化物	造纸、石油精炼、化工、皮革、纺织及塑料加工等

矿物油主要成分为饱和环烷烃和链烷烃的混合物,主要来源是原油的开采、加工、运输和炼制过程,以及其在机械设备的润滑和液压传动系统、洗涤剂和农药乳化剂合成中的应用等。

挥发酚是指沸点在 230 ℃ 以下的酚类,主要污染源为煤气洗涤、焦化、合成氨、造纸、木材防腐和化工行业的工业废水。

氰化物在电镀、采矿、煤气、焦化、制革、有机玻璃以及农药等的工业生产过程中被广泛应用,含氰废水的来源包括电镀废水、选矿废水、焦炉和高炉的煤气洗涤冷却水以及化工厂废水等。

多环芳烃为含有两个以上苯环的碳氢化合物,主要来源于煤和石油的燃烧,以及炼油厂、煤气厂、煤焦油加工厂和沥青加工厂等所排出的废气和废水,废气中的多环芳烃通过大气沉降和雨水冲刷也会进入污水系统。花莉^[9]对浙江省污水厂污泥中多环芳烃来源特征进行分析发现,大多数污泥中多环芳烃的来源为石油及其产品燃烧。

苯并(a)芘是一种五环多环芳香烃类,为有机物在 300 ~ 600 ℃ 下不完全燃烧的产物,主要存在于煤焦油、炭黑、煤、石油等燃烧产生的烟气,以及汽车(尤其是柴油发动机机动车)尾气中,气相中的苯并(a)芘会随着降雨进入水体,焦化、炼油、沥青、塑料

等行业工业废水中也可能含有苯并(a)芘。

多氯联苯是联苯苯环上的氢原子为氯所取代而形成的一类氯化物,在工业上用作热载体、绝缘油和润滑油等,机械加工、变压器生产所产生的废水中可能含有多氯联苯。

可吸附有机卤化物包括有机氯化物、有机溴化物和有机碘化物,工业生产中有有机卤化物被用作农药、消毒剂、有机溶剂、药物和阻燃剂等,在造纸、石油精炼、化工、皮革、纺织及塑料加工等生产过程中也会产生含卤有机副产物^[7],例如造纸行业氯漂工

艺会产生大量可吸附有机卤化物,纺织染整行业的染色工序是可吸附有机卤化物的主要来源^[11]。

3.2 超标原因分析

本研究发现污泥中超标频次或超标倍数较高的有机污染物主要为矿物油、可吸附有机卤化物、多环芳烃、挥发酚、总氰化物,存在污泥中有机污染物含量超标现象的污水处理厂,其进水中均含有一定比例的工业废水。

对工业废水的类型以及潜在的污染源进行了分析,结果见表 6。

表 6 污泥中污染物潜在来源分析

Tab. 6 Analysis on the potential sources of pollutants in sludge

项 目	超标污染物	进水工业废水类型	潜在污染源分析
无锡 A 污水厂	矿物油	电池生产	服务区域有电池生产企业,矿物油可能来自电池生产废油
无锡 B 污水厂	矿物油、可吸附有机卤化物	机械加工、医疗	①机械加工废水中可能含有矿物油; ②医院废水投加含氯消毒剂等可能产生可吸附有机卤化物
无锡 C、D 污水厂	矿物油	机械加工	服务区域有汽车配件生产企业,机械加工废水中可能含有矿物油
嘉兴 A 污水厂	矿物油、挥发酚	印染、电镀、冶金、农药、机械加工、化工	①服务范围内工业企业超过 2 000 家,进水中工业废水比例约 50%; ②机械加工设备润滑系统、液压传动系统等使用矿物油; ③农药生产和化工废水中可能含有挥发酚类
合肥 A、B 污水厂	可吸附有机卤化物	造纸、塑料配件加工	造纸厂和塑料配件厂含有漂白工艺,氯漂白过程中可能产生可吸附有机卤化物
唐山 A 污水厂	总氰化物、多环芳烃	焦化、机械加工、制药、涂料、造纸	氰化物、多环芳烃可能来自焦化废水

由表 6 可知,污泥中矿物油含量超标的污水处理厂,其进水中所含工业废水类型涉及机械加工、电池生产等,矿物油在机械设备润滑和液压传动系统中的应用可能是主要来源;污泥中有机卤化物含量超标的污水处理厂,其进水中所含工业废水类型涉及造纸、医疗废水,有机卤化物可能产生于纸漂白及氯消毒环节;污泥中挥发酚含量超标的污水处理厂,进水中所含工业废水包括农药、化工废水等,挥发酚的可能来源是酚类原料在农药和化工生产中的广泛使用。唐山某污水处理厂污泥中总氰化物和多环芳烃含量超标,其进水中所含有的焦化废水可能是潜在的污染源。

4 结论

① 不同种类有机污染物在污泥中的含量存在显著差异,按照平均值排序依次为:矿物油>可吸附有机卤化物>挥发酚>总氰化物>多环芳烃>苯并(a)芘>多氯联苯。矿物油、多环芳烃、可吸附有机卤化物、挥发酚含量超过各项泥质标准限值的频率

均高于 5%,尤其是矿物油含量超过农用 A 级泥质标准的频率达到了 36%。总氰化物和苯并(a)芘超标频率相对较低,仅有个别样本存在超标现象;多氯联苯的检出率较低,且检出含量均不超过 0.2 mg/kg,满足泥质标准的要求。

② 污泥中有机污染物主要来源于石油化工、机械加工、造纸、纺织、电镀、焦化、化工等行业排放的工业废水。调研范围内污泥中的超标污染物矿物油的潜在污染源为其在机械设备润滑和液压传动系统中的应用,有机卤化物的潜在污染源为造纸漂白及氯消毒环节产生的副产物,挥发酚的潜在来源为酚类原料在农药和化工生产中的使用,总氰化物和多环芳烃的潜在污染源是焦化废水。

参考文献:

[1] 张辰,王逸贤,谭学军,等. 城镇污水处理厂污泥处理稳定标准研究[J]. 给水排水,2017,43(9):137-140.
Zhang Chen,Wang Yixian,Tan Xuejun,et al. Introduc-

- tion of stabilization standard on sludge treatment in urban wastewater treatment plant [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2017, 43(9): 137–140 (in Chinese).
- [2] 姚金玲, 王海燕, 于云江, 等. 城市污水处理厂污泥重金属污染状况及特征[J]. *环境科学研究*, 2010, 23(6): 696–702.
- Yao Jinling, Wang Haiyan, Yu Yunjiang, *et al.* Pollution status and characteristics of heavy metals in sewage sludge from municipal wastewater treatment plants [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2010, 23(6): 696–702 (in Chinese).
- [3] 郑翔翔, 崔春红, 周立祥, 等. 江苏省城市污水处理厂污泥重金属含量与形态研究[J]. *农业环境科学学报*, 2007, 26(5): 1982–1987.
- Zheng Xiangxiang, Cui Chunhong, Zhou Lixiang, *et al.* Concentrations and chemical fractions of heavy metals in sewage sludge of Jiangsu Province [J]. *Journal of Agro–Environment Science*, 2007, 26(5): 1982–1987 (in Chinese).
- [4] 杨军, 郭广慧, 陈同斌, 等. 中国城市污泥的重金属含量及其变化趋势[J]. *中国给水排水*, 2009, 25(13): 122–124.
- Yang Jun, Guo Guanghui, Chen Tongbin, *et al.* Concentrations and variation of heavy metals in municipal sludge of China [J]. *China Water & Wastewater*, 2009, 25(13): 122–124 (in Chinese).
- [5] 张雪英, 周立祥, 崔春红, 等. 江苏省城市污泥中多环芳烃的含量及其主要影响因素分析[J]. *环境科学*, 2008, 29(8): 2271–2276.
- Zhang Xueying, Zhou Lixiang, Cui Chunhong, *et al.* Content and its major influencing factors of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in municipal sewage sludge of Jiangsu Province [J]. *Chinese Journal of Environmental Science*, 2008, 29(8): 2271–2276 (in Chinese).
- [6] 余杰, 鱼红霞, 苑文颖. 城市污泥土地利用多环芳烃 (PAHs) 生态风险评估研究[J]. *环境科学与管理*, 2014, 39(4): 173–176, 190.
- Yu Jie, Yu Hongxia, Yuan Wenying. Ecological risk assessment of applying (PAHs) in sewage sludge land [J]. *Environmental Science and Management*, 2014, 39(4): 173–176, 190 (in Chinese).
- [7] 邢耀宇, 王建平, 吕铁梅, 等. 纺织品中的可吸附有机卤化物及其检测方法的研究进展[J]. *纺织导报*, 2014, (3): 86–88, 90.
- Xing Yaoyu, Wang Jianping, Lv Tiemei, *et al.* AOX in textiles and the advancement in test methods [J]. *China Textile Leader*, 2014, (3): 86–88, 90 (in Chinese).
- [8] 徐为中, 周俊, 王婷, 等. 厌氧消化对城市污泥中多环芳烃 (PAHs) 降解及分配的影响研究[J]. *环境工程*, 2016, 34(4): 110–115.
- Xu Weizhong, Zhou Jun, Wang Ting, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons degradation and their distribution in anaerobic digestion of sewage sludge [J]. *Environmental Engineering*, 2016, 34(4): 110–115 (in Chinese).
- [9] 花莉. 城市污泥堆肥资源化过程与污染物控制机理研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2008.
- Hua Li. Research on Mechanism of Sludge Reclamation and Pollution Control [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008 (in Chinese).
- [10] 梁晶, 彭喜玲, 方海兰, 等. 污泥堆腐过程中多环芳烃 (PAHs) 的降解[J]. *环境科学与技术*, 2011, 34(1): 114–116.
- Liang Jing, Peng Xiling, Fang Hailan, *et al.* Degradation of polycyclic aromatic hydrocarbons during composting of sewage sludge [J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, 34(1): 114–116 (in Chinese).
- [11] 赖柏民, 沈东升, 汪美贞. 浙江省纺织染整企业废水中可吸附有机卤化物调查研究[J]. *环境污染与防治*, 2016, 38(2): 50–53.
- Lai Baimin, Shen Dongsheng, Wang Meizhen. Investigation of absorbable organic halogens in the dyeing and finishing textile industry in Zhejiang Province [J]. *Environmental Pollution and Control*, 2016, 38(2): 50–53 (in Chinese).



作者简介: 张辰 (1964–), 男, 江苏吴县人, 本科, 高级工程师 (教授级), 上海市政总院总工程师, 从事给排水工程研究和设计工作。

E-mail: wanglei5@smedi.com

收稿日期: 2018–05–30