

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.04.005

城镇污水厂排水回用于集中供热管网补充水工程应用

刘小雷¹, 肖丽婷¹, 郝明星²

(1. 长春工程学院 水利与环境工程学院, 吉林 长春 130012; 2. 长春市热力 <集团> 有限责任公司, 吉林 长春 130051)

摘要: 通过调研城市供热经营企业生产需求和类比国内既有相关工程实例,认为满足《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级 A 标准的城镇污水处理厂排水经处理后可作为同时满足《工业循环冷却水处理设计规范》(GB/T 50050—2017)、《城市污水再生利用 工业用水水质》(GB/T 19923—2005)和《采暖空调系统水质》(GB/T 29044—2012)的城市集中供热管网补充水回用,但水处理工程的选址与规模应与城市集中供热管网建设的具体规划相契合。城市供热经营企业尚需搭建 24 项水质指标的全面监测技术平台;研发水处理成本与直接购买工业用自来水相比能够形成明显价格优势的新工艺;采用经济适用的缓蚀阻垢杀生剂配方以降低集中供热管网维护费;因地制宜地开展全生命周期经济评价以权衡管材基建费用与缓蚀阻垢杀生剂运营费用的取舍,以谋求我国严寒地区和寒冷地区的冬季供热真正实现节能减排。

关键词: 城市集中供热管网; 补充水; 城镇污水处理厂排水回用; 循环冷却水

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2021)04-0020-06

Engineering Application of Municipal Wastewater Treatment Plants Effluent Reused for Supplementary Water of District Heating Network

LIU Xiao-lei¹, XIAO Li-ting¹, HAO Ming-xing²

(1. School of Water Conservancy & Environment Engineering, Changchun Institute of Technology, Changchun 130012, China; 2. Changchun Municipal Heating Group Co. Ltd., Changchun 130051, China)

Abstract: Demand for supplementary water from district heating (DH) management enterprises and relevant domestic engineering cases were investigated, and thus it was suggested that the treated drainage of municipal wastewater treatment plant (WWTP), which was satisfied with the first class A criteria of GB 18918 - 2002, and which met the norms of GB/T 50050 - 2017, GB/T 19923 - 2005 and GB/T 29044 - 2012 simultaneously, could be reused as the supplementary water of DH network. The locations and dimensions of the water treatment projects should correspond to construction programme of the DH network. In order to truly implement energy saving & emission reduction for heating supply in freezing and cold regions in China, DH management enterprises still need monitoring setups for the 24 water quality indices, a new water reuse technology of which processing cost is much lower than the price

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51308066); 国家留学基金委 2018 年国外合作项目 - 国际清洁能源拔尖创新人才培养项目(201802180082); 吉林省教育厅科学研究项目(JJKH20210681KJ); 城市水资源与水环境国家重点实验室 2020 年度开放基金资助项目(HC202021)

通信作者: 刘小雷 E-mail: sh_lxl@ccit.edu.cn

of tap water for industry use, an application of suitable scale, corrosion and microorganism inhibitors reducing the maintenance expense of the DH network, and a launch of the total life cycle economic assessment for trading off the capital expenditure of pipes against the operating expenses of inhibitors, suiting to the local conditions.

Key words: urban district heating network; supplementary water; reuse of drainage of municipal wastewater treatment plant; recirculating cooling water

我国严寒地区和寒冷地区冬季供暖期长,城市供热的运营、维护与管理素来是政府民生工作的重点。城市集中供热目前主要包括热电联产和区域锅炉房供热两种方式,其中热电联产所占比例并不高,例如长春市城区(含九台区)热电联产比例仅为42.2%。鉴于国家清洁能源发展战略,热电联产是最为绿色低碳和经济可靠的节能供热方式,可减少区域锅炉或小锅炉烟气及颗粒物排放,有效治理雾霾并防治大气污染。始于调研城市供热经营企业对集中供热管网补充水的需求,从而对集中供热管网补充水水质指标限值进行探讨,并类比国内已有的相关工程实例,探讨城镇污水处理厂排水回用于集中供热管网补充水的可能性,以为供热经营企业解决实际工程问题提供数据与理论支持。

1 供热企业对集中供热管网补充水的需求

城市集中供热管网内循环水及补充水处理,属于工业循环冷却水处理范畴。大多数循环冷却水通常含有悬浮固体、有机化合物、微生物、溶解盐类,这些物质浓度往往随着系统水温及浓缩倍数的增加而增大,并伴随着矿物沉淀(结垢)、腐蚀、生物沉积(黏液和污泥)和微生物增长与累积,导致金属表面腐蚀恶化、热交换效率降低、微生物诱导腐蚀、臭味等并发环境污染,致使循环冷却水系统运行维护费用增加^[1]。因此,水质不达标的补充水进入城市集中供热管网必然有造成生产事故的风险,而对供热经营企业而言,毕竟对集中供热管网内循环水及补充水的水质采取实时监控管理等风险防范策略,远比弥补生产事故的损失要划算得多。

与一般的工业循环冷却水系统相比,城市集中供热系统具有管网规模大、换热节点多、输送距离远和补充水量大等特点。以吉林省长春市为例,最新的《长春市城市供热管理条例》自2018年10月1日起施行,长春市城区(含九台区)在网供热面积达到 $2.55 \times 10^8 \text{ m}^2$,供热期自当年10月20日零时至次年4月6日24时,约169 d,城市集中供热管网补充水

量约 $8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。截至目前,长春市热力集团有限责任公司的各分公司均购买6.8元/ m^3 的工业用自来水作为补充水。可见,供热经营企业亟需解决如下问题:①健全集中供热管网内循环水及补充水的水质评价标准,并搭建各项水质指标监测技术平台;②降低补充水的制水成本费用;③减少由管网内循环水及补充水水质所引起的结垢、腐蚀和微生物滋生等状况而导致的管网维护与更新等运营费用。

2 城镇污水处理厂排水回用的可能性

目前涉及到循环冷却水系统或集中供暖系统补充水水质的国家标准共有3个,即《工业循环冷却水处理设计规范》(GB/T 50050—2017)、《城市污水再生利用 工业用水水质》(GB/T 19923—2005)和《采暖空调系统水质》(GB/T 29044—2012),具体指标如表1所示。

在24项水质指标中,3个国标均有要求的水质指标共有4项,即浊度、pH值、铁和 Cl^- ,其中GB/T 29044—2012更是在不同的水温和管材工况条件下对pH值和 Cl^- 划分了更加详细的限值。管材对集中供热管网实际运营过程中是否须使用缓蚀阻垢杀生剂具有举足轻重的影响。笔者实地考察发现,城市人口约12万人的瑞典Västerås市,由于热电联产区域供热生产经营企业Mälarenergi公司装配了采用测漏点预埋线技术的不锈钢管材,在生产过程中除将管内水染成绿色以便检查漏点外,从未向集中供热管网中添加任何具有缓蚀、阻垢与杀生作用的化学药剂,而仅需将管内水pH值控制在9.4左右,便可在供水温度为70℃、回水温度为50℃的工况下维持管网长期稳定工作。相比之下,美国则与我国一样,供热经营企业须针对所用管材及补充水水质特点,依据实验室静态与动态实验获得经济适用的缓蚀阻垢杀生剂配方,再投入生产使用^[2]。显然,管材基建费用与缓蚀阻垢杀生剂运营费用的权衡取舍,仍需供热经营企业因地制宜地进行全生命周期经济评价。

表1 不同的补充水水质标准对比

Tab. 1 Comparison of supplementary water quality indices with different standards

项 目	《城镇污水处理厂 污染物排放标准》 (GB 18918—2002)	《城市污水再生利用 工业用水水质》 (GB/T 19923—2005)	《工业循环冷却水 处理设计规范》 (GB/T 50050—2017)	《采暖空调系统水质》 (GB/T 29044—2012)		
	一级 A 标准	再生水用作敞开式循 环冷却水系统补充水	再生水直接作为间冷 开式系统补充水	采用不同材质 散热器的集中 供暖系统	补充水	
COD/(mg·L ⁻¹)	≤50	≤60	≤60			
BOD ₅ /(mg·L ⁻¹)	≤10	≤10	≤10			
色度/倍	≤30	≤30				
溶解性总固体(TDS)/ (mg·L ⁻¹)		≤1 000	≤1 000			
浊度/NTU		≤5	≤5	≤3		
悬浮物(SS)/ (mg·L ⁻¹)	≤10		10			
pH 值	6.0~9.0	6.5~8.5	6.0~9.0	钢	7.0~12.0	
				铜	8.0~10.0	
				铝	6.5~8.5	
电导率(25℃)/ (μS·cm ⁻¹)				≤600		
总碱度/(mg·L ⁻¹)		≤350	≤200			
总硬度/(mg·L ⁻¹)		≤450				
钙硬度(以 CaCO ₃ 计)/(mg·L ⁻¹)			≤250	≤80		
铁/(mg·L ⁻¹)		≤0.3	≤0.5	≤0.3		
锰/(mg·L ⁻¹)		≤0.1	≤0.2			
Cl ⁻ /(mg·L ⁻¹)		≤250	≤250	钢	≤250	
				304 不锈钢	≤80℃	≤80
					>80℃	≤40
				316 不锈钢		≤250
				铜		≤100
			铝		≤30	
余氯/(mg·L ⁻¹)		≥0.05(加氯消毒 时管末梢值)				
游离氯/(mg·L ⁻¹)			末端 0.1~0.2			
硫酸盐/(mg·L ⁻¹)		≤250				
硅酸(以 SiO ₂ 计)/ (mg·L ⁻¹)		≤50				
总磷(以 P 计)/ (mg·L ⁻¹)	≤0.5	≤1	≤1			
氨氮/(mg·L ⁻¹)	水温 > 12℃	≤5	≤5(铜合金换热器时, ≤1)			
	水温 ≤ 12℃	≤8				
石油类/(mg·L ⁻¹)	≤1	≤1	≤5			
阴离子表面活性 剂/(mg·L ⁻¹)	≤0.5	≤0.5				
粪大肠菌群数/ (个·L ⁻¹)	≤1 000	≤2 000				
细菌总数/(个·mL ⁻¹)			<1 000			

GB/T 50050—2017 和 GB/T 19923—2005 共同限定的水质指标包括 COD、BOD₅、TDS、总碱度、锰、总磷和石油类。钙硬度则是 GB/T 50050—2017 和 GB/T 29044—2012 共同限定的水质指标。GB/T 19923—2005 单独要求的水质指标有色度、总硬度、余氯、硫酸盐、硅酸、阴离子表面活性剂和粪大肠菌群数;GB/T 50050—2017 单独要求的水质指标有 SS、游离氯、氨氮和细菌总数;GB/T 29044—2012 单独要求的水质指标有电导率。当然,城市集中供热管网补充水水质最好能同时满足 GB/T 50050—2017、GB/T 19923—2005 和 GB/T 29044—2012 的要求。

可见,作为昂贵的工业用自来水之替代物,城镇污水处理厂排水无疑是供热经营企业的最为节能减排的选择,但必须开发使用制水成本具有明显价格优势的补充水处理技术及工艺,才能真正缓解供热经营企业的燃眉之急。

在瑞典等北欧国家,将热泵设施置于城镇污水处理厂内,并利用城镇污水处理厂排水的含热量提供城市冷、热和电联产,使生活污水的热能得到充分利用,已得到较为普遍的实际工程应用与推广^[3-4]。在我国,相关研究大多集中于城市排水系统低品位热能的利用方式等理论层面,而尚未见城镇污水处理厂排水回用于城市集中供热管网补充水的实际工程应用,特别是相关水质安全等方面的文献报道。

对于已达到 GB 18918—2002 水污染物一级 A 排放标准的城镇污水处理厂排水而言,其 COD、总磷和粪大肠菌群数等 3 项水质指标均远低于同时满足 GB/T 50050—2017、GB/T 19923—2005 和 GB/T 29044—2012 要求的集中供热管网补充水水质指标限值;而 BOD₅、色度、SS、石油类和阴离子表面活性剂等 5 项水质指标亦完全满足要求;除控制 pH 值在 8.0~8.5 以外,仅需去除 80% 的氨氮(铜合金换热器时)即可。

但值得注意的是,仍需追加检测 TDS、浊度、电导率、总碱度、总硬度、钙硬度、铁、锰、Cl⁻、余氯、游离氯、硫酸盐、硅酸和细菌总数等 14 项水质指标,并能同时满足 GB/T 50050—2017、GB/T 19923—2005 和 GB/T 29044—2012 的要求,方可补入集中供热管网。可见,若能开发使用制水成本具有明显价格优势的处理技术及工艺,作为工业用自来水的替代物,

城镇污水处理厂排水无疑是供热经营企业最为节能减排的选择。

3 国内已有的相关工程实例类比

热电联产的城市集中供热方式诚然是大势所趋,但短期内在我国严寒地区和寒冷地区各地兴建很多热电厂也不现实,因而,造价低、建设周期短、供热范围灵活且分期规划建设容易的区域锅炉房就显示出鲜明优势。再者,建设适当数量的区域锅炉房作为大型热电厂集中供热区域内的调峰锅炉,也有益于最大限度地发挥热电厂的经济效益。显然,城镇污水处理厂排水回用于集中供热管网补充水建设项目的工程选址与处理规模,也应与城市整体规划相契合。

目前国内已有部分城镇污水处理厂出水回用作循环冷却水系统补充水,具体工程实例详见表 2^[5-12],相对于城镇污水处理厂排水回用于城市集中供热管网补充水的工程应用具有一定类比价值和借鉴作用。

表 2 中所列工程实例,最多仅监测了 17 项水质指标,且原水水质也并未完全达到 GB 18918—2002 水污染物一级 A 排放标准,故并不能认为其出水水质已达同时满足 GB/T 50050—2017、GB/T 19923—2005 和 GB/T 29044—2012 的集中供热管网补充水要求。但表 2 所列工程实例的水处理技术多采用“混凝→澄清或沉淀→过滤(→超滤→纳滤或反渗透→消毒)”工艺,尚有一定价格优势。当处理规模较大且流程相对简易时,与所在地非居民用水价格相比,处理成本甚至节省 90% 以上^[10]。

显然,将满足 GB 18918—2002 一级 A 排放标准的城镇污水处理厂排水,处理成同时满足 GB/T 50050—2017、GB/T 19923—2005 和 GB/T 29044—2012 标准要求的集中供热管网补充水,必然以“超滤→纳滤或反渗透”的“双膜”工艺为技术主体,但其制水成本较工业用自来水能否形成明显的价格优势,仍与“双膜”处理工艺的基建费用与运营成本息息相关。

由表 2 可以看出,污水处理厂的二级生化出水经过“混凝→过滤→超滤→反渗透”工艺处理^[6],或污水处理厂深度处理后出水再经“杀菌→过滤→超滤→纳滤”工艺处理^[11],用作循环冷却水系统的补充水,处理成本均比所在地非居民用水价格节省 40% 以上。

表2 城镇污水处理厂出水回用循环冷却水系统补充水的工程实例

Tab.2 Engineering cases for the drainage of municipal wastewater treatment plant reused to the supplementary water of recirculating cooling water systems

处理规模/ ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	处理成本/ ($\text{元} \cdot \text{m}^{-3}$)	所在地非居 民用水价格/ ($\text{元} \cdot \text{m}^{-3}$)	出水用途	水质指标	处理工艺	出水所 达标准
20 000	—	4.5	山西漳山发电 有限责任公司 循环冷却水和 锅炉补给水	pH、SS、COD、BOD ₅ 、 总磷、氨氮、浊度、游 离余氯	长治市污水处理厂出水→原水池→机 械搅拌澄清池(投加石灰乳、助凝剂、 絮凝剂)→投加 H ₂ SO ₄ 和 ClO ₂ →变孔 隙滤池→清水池	—
3 600	1.46(节省 41.6%)	2.5	工业生产、循环 冷却水系统补 充水和绿化用 水	pH、SS、COD、BOD ₅ 、 总磷、氨氮、浊度、总 硬度、Fe、电导率、粪 大肠杆菌总数、石油 类	污水处理厂二级生化出水→原水池→ 水泵(投加助凝剂、絮凝剂及消毒剂) →多介质过滤器→活性炭过滤器→超 滤→保安过滤器→增压泵(投加阻垢 剂及还原剂)→反渗透	—
26 000	2.9(节省 63.2%)	7.87	石家庄良村热 电有限公司循 环冷却水系统 补充水	pH、SS、COD、BOD ₅ 、 总磷、氨氮、总碱度、 Cl ⁻ 、硫酸盐、浊度、 总硬度、Mg ²⁺ 、Ca ²⁺ 、 游离余氯、Fe、电导 率、粪大肠杆菌总数	污水厂来水→原水池→提升泵(投加 絮凝剂、助凝剂)→机械加速澄清池 (投加石灰乳)→压力混合器(投加 H ₂ SO ₄ 和 ClO ₂)→砂滤池→清水池	—
13 700	1.6(节省 76.5%)	6.8	大唐长春第二 热电有限责任 公司循环冷却 水系统补充水	pH、SS、COD、BOD ₅ 、 总磷、氨氮、总碱度、 Cl ⁻ 、硫酸盐、SiO ₂ 、 石油类	长春市北郊污水处理厂出水→原水池 →管道混合器(投加石灰乳和混凝剂) →机械加速澄清池(投加絮凝剂)→气 水分离器→管道混合器(投加 H ₂ SO ₄ 和 ClO ₂)→双室过滤器→净水池(投 加 ClO ₂)	—
11 520	—	—	某热电厂辅机 循环水补水和 锅炉给水系统 补充水	pH、SS、COD、BOD ₅ 、 总磷、氨氮、总碱度、 Cl ⁻ 、硫酸盐、浊度、 TDS、总硬度、Mg ²⁺ 、 Ca ²⁺ 、游离余氯、 Mn ²⁺	污水处理厂出水→中水调节池→投加 ClO ₂ 和絮凝剂→絮凝池→盘式过滤器 →浸没式超滤→清水箱	—
60 000	0.23(节省 92.3%)	3.0	浙江浙能长兴 发电有限公司 电厂循环冷却 塔补水	pH、SS、COD、BOD ₅ 、 总磷、氨氮、总碱度、 Cl ⁻ 、硫酸盐、TDS、总 硬度、电导率	长兴兴长污水处理厂排放口一级 B 标 准出水→曝气生物流化池→中间水池 →泵(投加混凝药剂)→平流式沉淀池 →投加杀菌剂、缓蚀剂→冷却塔补水 系统	GB/T 19923— 2005
15 000	2.24(节省 40.6%)	3.77	青岛博源热电、 明月热电、海西 热电等热电厂 循环冷却水	pH、SS、COD、BOD ₅ 、 总磷、氨氮、TDS、 Cl ⁻ 、浊度	深度处理后的污水处理厂出水→原水 池→提升泵→次氯酸钠杀菌→自清洗 过滤器→超滤→超滤产水池→低压进 水泵→保安过滤器→高压泵→纳滤产 水主机→纳滤产水池	《地表水环 境质量标 准》(GB 3838— 2002) II 类
62 400 ~ 72 000	—	6.97	内蒙古华电包 头发电有限公 司锅炉补给水 + 循环水补充水	COD、BOD ₅ 、氨氮、总 碱度、总硬度、浊度	包头市南郊污水处理厂再生水 + 包 头钢铁公司综合废水处理站处理水→调 节水池→提升水泵→曝气生物滤池→ 中间水池→中间水泵→澄清池(投加 助凝剂、絮凝剂、石灰乳)→V 型滤池 →清水池	GB/T 19923— 2005

4 结语

满足 GB 18918—2002 水污染物一级 A 排放标准的城镇污水处理厂排水经处理后可作为同时满足 GB/T 50050—2017、GB/T 19923—2005 和 GB/T 29044—2012 要求的集中供热管网补充水回用,但

水处理工程的选址与规模应与城市整体规划相契合。供热经营企业仍需搭建 24 项水质指标的全面监测技术平台;研发水处理成本与直接购买工业用更具优势的新工艺;采用经济适用的缓蚀阻垢杀菌剂配方,并开展全生命周期经济评价,权衡管材基建

费用与管网运营费用的取舍,以谋求我国严寒地区和寒冷地区的冬季供热的绿色发展,真正实现国家清洁能源发展战略。

参考文献:

- [1] 刘小雷,李佳璇,张文华,等. 间冷开式循环冷却水系统阻垢缓蚀杀菌剂应用现状[J]. 应用化工,2017,46(5):967-971.
LIU Xiaolei, LI Jiaxuan, ZHANG Wenhua, *et al.* Application status of scale, corrosion and microorganism inhibitor in indirect open recirculating cooling water system[J]. Applied Chemical Industry, 2017, 46(5): 967-971(in Chinese).
- [2] 刘小雷,李佳璇,张文华,等. 国内间冷开式循环冷却水系统阻垢缓蚀剂工程应用进展[J]. 水处理技术, 2017,43(5):22-25.
LIU Xiaolei, LI Jiaxuan, ZHANG Wenhua, *et al.* Domestic engineering application progress of scale and corrosion inhibitor in indirect open recirculating cooling water system[J]. Technology of Water Treatment, 2017, 43(5):22-25(in Chinese).
- [3] WERNER S. International review of district heating and cooling[J]. Energy, 2017,137:617-631.
- [4] SERNHED K,LYGNERUD K,WERNER S. Synthesis of recent Swedish district heating research[J]. Energy, 2018,151:126-132.
- [5] 景杰,李恒帅,李勇. 中水深度处理技术在火电厂的应用探讨[J]. 山西电力,2016(1):63-65.
JING Jie, LI Hengshuai, LI Yong. Application of advanced effluent treatment technology in thermal power plants[J]. Shanxi Electric Power, 2016(1):63-65(in Chinese).
- [6] 邹勇斌,李浩,龚维辉,等. 超滤-反渗透应用于中水回用工程的设计与运行[J]. 环境工程, 2014,32:37-38.
ZOU Yongbin, LI Hao, GONG Weihui, *et al.* Design and operation of reclaimed water project by ultrafiltration and reverse-osmosis[J]. Environmental Engineering, 2014, 32:37-38(in Chinese).
- [7] 高昕,李宾,墨庆峰. 中水回用技术在火力发电厂的应用[C]//中国动力工程学会环保技术与装备专业委员会. 2014 火电厂污染物净化与节能技术研讨会论文集. 上海:中国动力工程学会环保技术与装备专业委员会,2014:258-262.
GAO Xin, LI Bin, MO Qingfeng. Application of water reuse technology in the thermal power plant [C] // Environmental Protection Technology and Equipment Professional Committee of Chinese Society of Power Engineering. Proceedings of Workshop on Pollution Removal and Energy Saving Technique in the Thermal Power Plant in 2014. Shanghai: Environmental Protection Technology and Equipment Professional Committee of Chinese Society of Power Engineering, 2014:258-262(in Chinese).
- [8] 田凤英,刘海侠,杨冬华. 中水深度处理在火力发电厂的应用[J]. 吉林电力,2012,40(5):53-54.
TIAN Fengying, LIU Haixia, YANG Donghua. Application of advanced treatment for reclaimed water in fossil power plants [J]. Jilin Electric Power, 2012, 40(5):53-54(in Chinese).
- [9] 高燕宁,何彩燕,王平. 浸没式超滤在电厂中水深度处理系统中的设计及运行[J]. 电站辅机,2012,33(2):44-47.
GAO Yanning, HE Caiyan, WANG Ping. Design and operation of immersed UF membrane in advanced treatment system of intermediate water in power plant [J]. Power Station Auxiliary Equipment, 2012, 33(2): 44-47(in Chinese).
- [10] 顾月平,程材. ABFT 工艺应用于热电厂中水回用工程[J]. 能源环境保护,2013,27(5):46-48.
GU Yueping, CHENG Cai. Application of ABFT process in the thermal power plant in the water reuse project [J]. Energy Environmental Protection, 2013, 27(5): 46-48(in Chinese).
- [11] 刘骁智,隋春晓. 青岛豆金河中水回用作为热电厂循环冷却水[J]. 中国给水排水,2018,34(16):81-84.
LIU Xiaozhi, SUI Chunxiao. Reuse of Doujinhe reclaimed wastewater as cooling water of thermal power plant in Qingdao[J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(16):81-84(in Chinese).
- [12] 刘江,刘涛. 全中水循环再利用技术应用分析[J]. 内蒙古电力技术,2013,31(3):105-108.
LIU Jiang, LIU Tao. Reuse technology of reclaimed water and its application [J]. Inner Mongolia Electric Power, 2013, 31(3):105-108(in Chinese).

作者简介:刘小雷(1978-),女,吉林长春人,博士,教授,研究方向为水污染控制工程。

E-mail:sh_lxl@ccit.edu.cn

收稿日期:2019-04-05

修回日期:2019-09-13

(编辑:丁彩娟)