

浙江省城镇污水处理厂尾水人工湿地深度提标研究

孔令为¹, 邵卫伟¹, 梅荣武¹, 王晓敏¹, 谭映宇¹, 蒋涛¹,
魏俊², 黄冠中¹

(1. 浙江省环境保护科学设计研究院, 浙江 杭州 310007; 2. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 311122)

摘要: 基于浙江省污水处理厂主要技术工艺现状及常用提标技术,调研了几个主要污水处理厂尾水人工湿地技术深度处理运行效果及投资情况,分析了人工湿地的影响因素,并从技术规范等角度探讨了人工湿地深度提标的可行性。结果表明,人工湿地深度处理尾水后的出水水质基本可以满足地表水Ⅳ类水标准,但人工湿地占地面积大、投资大,应用时需根据提标要求进行深入论证,综合考虑尾水水质、占地面积及场地、投资和运行管理成本、季节等影响因素,同时结合当地技术、经济、水环境等情况。

关键词: 污水处理厂; 尾水处理; 人工湿地; 深度提标

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2019)02-0039-05

Study on Constructed Wetland for Advanced Treatment of Terminal Effluent of Wastewater Treatment Plant in Zhejiang Province

KONG Ling-wei¹, SHAO Wei-wei¹, MEI Rong-wu¹, WANG Xiao-min¹, TAN Ying-yu¹,
JIANG Tao¹, WEI Jun², HUANG Guan-zhong¹

(1. Environmental Science Research and Design Institute of Zhejiang Province, Hangzhou 310007, China;
2. PowerChina Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou 311122, China)

Abstract: Based on the main technical and technological status of the municipal wastewater treatment plants (WWTPs) in Zhejiang Province, operation performance and investment of some constructed wetlands for advanced treatment of the WWTPs terminal effluent were investigated in this study. The factors affecting the advanced treatment performance of constructed wetland were analyzed. And then, the feasibility of terminal effluent advanced treatment by constructed wetlands was discussed in terms of technical standards. The survey results showed that the effluent of the constructed wetland could meet the standard of the class IV of surface water. Due to the disadvantages of large area occupation and high investment, it was necessary to make a thorough demonstration as application of constructed wetland. The influencing factors such as the terminal effluent quality of WWTPs, the site and area occupied, the investment cost, operation and management cost, and the seasons alteration should be considered comprehensively, and the local technology, economy and water environment status should be

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07206-002); 浙江省自然科学基金资助项目(LY18E080005); 浙江省科技厅院所专项(2018F10031); 浙江省科技厅重点研发计划项目(2018C03006, 2019C03110)

taken into account as well.

Key words: municipal wastewater treatment plant; treatment of terminal effluent; constructed wetland; advanced treatment

浙江省于2013年提出“五水共治”、“治污先行”等重要决策并取得了明显成效,2016年浙江省221个地表水省控监测断面中,劣Ⅴ类水质断面占比由2013年的12.20%降至2.70%,并提出于2017年底全省彻底消灭劣Ⅴ类水断面。然而从具体技术指标看,即使城镇污水处理厂全部执行一级A排放标准,排出的水质依然为劣Ⅴ类水质,如果没有更高的污水排放标准,则难以实现消灭劣Ⅴ类水体的目标。同时污水处理厂一级A出水标准中氮磷含量依然偏高,如果直接补充河道、湖泊、城市景观用水时,会产生水体富营养化的风险。因此,后续在达到一级A标准的基础上,城镇污水处理厂需要进行提标处理。

1 浙江省城镇污水处理厂提标现状研究

目前,浙江省已建成各类规模城镇污水处理厂296座,污水处理能力达到 $1\,224.55 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。浙江省城镇污水处理厂排放的污水量约占全省总污水量的60%,是浙江省水体污染物减排与水环境质量改善的重点。

《浙江省水污染防治行动计划》要求在2017年底前,所有城镇污水处理厂出水水质执行一级A标准,而截至2016年底数据显示,在已建成的城镇污水处理厂中,出水水质执行一级A标准的有243座,占总数的82%。浙江省城镇污水处理厂的主要处理工艺为 A^2/O 、SBR、CAST、氧化沟等,2016年污水厂处理工艺选择情况见图1。

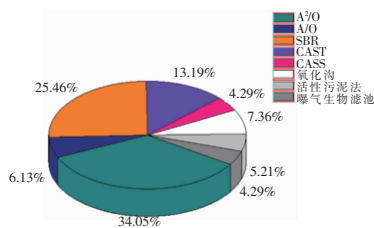


图1 2016年浙江省城镇污水处理厂处理工艺选择情况
Fig.1 Selection of process for urban sewage treatment plants of Zhejiang Province (2016)

而现阶段针对不同工艺和运行状况的城镇污水处理厂提标的主要技术有Fenton催化氧化、碳源投加、短程硝化反硝化、厌氧氨氧化、同步硝化反硝化

技术、反硝化除磷技术、好氧颗粒污泥、膜生物反应器、反硝化滤池、人工湿地等^[1-6]。

由于浙江省内水环境质量要求日趋严格,各地基于自身现状条件对污水处理厂的排放限值提出了更高标准的要求,目前已制定相应标准的有金华、台州、衢州等地。为了提高治污绩效,金华市在市区污水处理厂实行严于国家标准、低于地表水Ⅲ类水标准的污水处理厂排放“金华标准”,要求氨氮排放浓度 $\leq 1 \text{ mg/L}$ 、总磷 $\leq 0.35 \text{ mg/L}$ 。“衢州标准”与“淳安标准”明确了出水水质除总氮外,其他污水排放指标基本达到地表水Ⅳ类标准;而台州市路桥污水处理厂“准Ⅳ类”提标工程是基于一级A提标的基础上的再次提标,率先在浙江省实现出水达到准Ⅳ类标准。

2 污水处理厂尾水人工湿地技术提标研究

与常规尾水提标工艺相比,人工湿地由于具有污水净化和景观营造的双重作用,且建造运行成本较低、维护管理相对简便^[7],在城镇污水处理厂尾水深度处理中受到了较为广泛的关注,比较适宜作为城镇污水处理厂尾水深度处理的技术^[8-9],将出水标准由《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级B或一级A标准提升至《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)的Ⅴ类及以上标准,消灭劣Ⅴ类水体。

2.1 浙江省应用案例调研

目前,城镇污水处理厂尾水人工湿地提标处理在浙江省已经有了应用,主要集中在金华、杭州、嘉兴等地区。比较典型的有浦江第一、第二和第四污水处理厂,义乌、东阳、临安城市污水处理厂以及海宁尖山污水处理厂。

2015年所调研县(市)城镇污水处理厂尾水深度处理人工湿地工程的综合分析见表1。从表1可知,采用人工湿地技术对城镇污水处理厂尾水进行深度处理的项目中,临安城镇污水处理厂出水标准由《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级B提升至一级A,其他均为从《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级A至地表水Ⅴ类标准。

表 1 所调研县(市)污水处理厂深度处理综合情况

Tab. 1 Comprehensive status of advanced treatment of sewage treatment plant in county (city)

项 目	生活污水 比重/%	深度处理目标	处理水量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	湿地面积 / hm^2	占地 面积比	湿地建设 投资/万元	工艺
临安污水处理厂	80	一级 B 至一级 A	60 000	14.3	1.68	13 000	传统潜流 + 表流
浦江第一污水厂	70	一级 A 至地表 V 类	40 000 ^a	9.7	0.85	1 211	生物膜 + 湿地
浦江第四污水厂	80	一级 A 至地表 V 类	35 000	5.7	0.88	1 100	生物膜 + 湿地
义乌污水处理厂	70	义乌地标至优于 V 类 ^b	40 000	5.3	1.22	1 537	生物膜 + 湿地
东阳污水处理厂	86	一级 A 至地表 V 类	60 000	10.0	0.53	12 000	传统潜流 + 表流
注: ^a 指浦江第一污水厂人工湿地单元实际处理水量为 80 000 m^3/d ; ^b 指义乌湿地设计进水为地方标准,出水执行“氨氮维持地表Ⅲ类水,总磷提升至地表Ⅳ类水,其他指标除总氮外提升至地表 V 类水”。占地面积比为污水厂面积与湿地面积的比值。							

所调研案例中,仅有临安污水处理厂的人工湿地处理系统已经长时间运行,其他县市均处于调试及试运行阶段。根据各地市测试数据(部分污水厂没有测定 TN 指标),所调研城镇污水处理厂尾水人工湿地深度处理效果良好(见表 2)。

表 2 所调研县市水质数据自行检测结果汇总

Tab. 2 Summary of water quality data of each county and city investigated $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

项 目	COD	$\text{NH}_3 - \text{N}$	TN	TP	出水满足水质标准
临安污水厂	23.80	0.19	9.14	0.44	优于城镇污水厂一级 A 标准
浦江一厂	13.00	0.23	—	0.16	优于地表水Ⅲ类标准
浦江四厂	18.89	0.25	—	0.53	优于城镇污水厂一级 B 标准
义乌污水厂	21.22	0.26	0.96	0.05	优于地表水Ⅳ类标准
东阳污水厂	23.00	0.40	—	0.21	优于地表水Ⅳ类标准

2.2 应用制约因素研究

2.2.1 温度的影响

一般来说,人工湿地对 COD 有较高的去除率(80%~90%),COD 的去除率与各种微生物数量有明显的相关性;人工湿地的脱氮主要靠微生物的硝化、反硝化作用来实现;人工湿地系统对磷的去除途径主要是基质对磷的吸附沉淀作用,植物吸收对有机磷的去除效率影响不大。但值得注意的是,温度对人工湿地处理效率的影响比较显著。Wallace 等^[10]提出在亚寒带地区冬季进行适当的隔离设计,不同覆盖物对系统处理性能有很大影响。但目前的研究均为实验室短期试验,并不能保证整个冬季的长期运行。因此,采用人工湿地技术,需要考虑季相变非植物生长季节系统处理效率降低的问题。

2.2.2 基质堵塞的影响

长期运行的人工湿地会受到有机物积累、悬浮颗粒物沉积、淤堵层在水流作用下的机械压缩以及细小颗粒物随水迁移等作用导致基质的堵塞,严重影响系统的稳定运行。堵塞物质在湿地表层和上层大量累积,不仅对湿地水力停留时间有极大的影响,还会导致湿地出现表面流、短流等问题,从而影响湿地对污水的处理效果,导致出水水质恶化^[11]。人工湿地的堵塞是一个复杂的过程,为了深入探讨堵塞的机理,有必要对其进行分类研究。前人考虑了生物膜堵塞和有机颗粒堵塞,并将其分开进行了对比研究,但实际情况更加复杂。除此之外,还存在无机颗粒的堵塞,以及这些堵塞相互作用的情况,目前还缺乏对这些问题的详细研究。

2.2.3 运行维护管理的影响

虽然与传统的污水处理技术和工艺相比,人工湿地的运行管理更简单,但不能因此忽视运行管理的重要性。人工湿地存在堵塞、基质表面板结、低温运行效率低、布水不均匀、植物病虫害以及植物需定期收割等问题^[11],如果不进行科学的运行管理,会使人工湿地系统功能得不到发挥,容易造成污染物去除效率降低、使用寿命减少等问题,使得建成的人工湿地最终荒废,大大缩短工程使用年限。

3 污水处理厂尾水深度提标可行性研究

3.1 污水处理厂尾水人工湿地处理提标效果

对于人工湿地技术的去除率没有准确定论,这与人工湿地类型、结构及尺寸设计、植物选取、处理的水质和水量等多种因素有关。因此,对于城镇污水处理厂尾水人工湿地技术的去除率,并没有统一的标准,只能通过研究人员的经验数据以及相似工程案例类比分析。

《人工湿地污水处理工程技术规范》(HJ 2005—2010)中对人工湿地技术污染物去除率从综合的角度进行了宽泛的界定。其中,潜流式人工湿地,尤其是垂直流人工湿地具有更好的水质净化效果。不同类型人工湿地将城镇污水处理厂尾水从一级 A 提升至地表水环境质量标准的情况(采用表流

式+潜流式组合方式,取下限值)如表3所示。通过对比可知,城镇污水处理厂尾水采用人工湿地处理技术提标,如果湿地类型或不同类型的组合选择适当,而且面积设置比较合理,则深度处理后的出水水质理论上基本可以满足地表水Ⅳ类标准(不考虑总氮指标)。

表3 城镇污水处理厂尾水人工湿地深度处理提标预期效果

Tab.3 Expected results of the constructed wetland advanced treatment of the terminal effluent of urban sewage treatment plant

mg · L⁻¹

项 目	尾水	出水			出水标准		
	一级 A	表流式	潜流式 1	潜流式 2	V 类	准Ⅳ类	Ⅳ类
COD	50	25	11.25	4.50	40	30	30
NH ₃ -N	5(8)	4(6.40)	2.40(3.84)	1.20(1.92)	2.0	1.5(2.5)	1.5
TP	0.50	0.33	0.10	0.04	0.4	0.3	0.3
BOD ₅	10	3.60	1.98	0.99	10	6	6

3.2 人工湿地处理水量与人工湿地面积关系

对人工湿地处理水量与湿地面积进行单因素方差分析,可知随着湿地处理水量的增加,湿地面积也基本呈曲线增长($R^2=0.5527$)。不过线性拟合数据由于样本量过少,不特别具有代表性,仅能解释目前样本容量下两者间的大概关系与相关趋势。污水深度处理提标若采用人工湿地工艺,按纯生活污水厂及工业废水占比为0~50%的污水处理厂提标需求计,需新增的土地约为 $2.7\text{ hm}^2/10^4\text{ m}^3$ 水,而目前浙江省的大部分城镇污水处理厂在建设时未考虑深度提标的土地预留,深度处理水质提标如采用人工湿地技术,土地局限性明显。

3.3 人工湿地处理水量与人工湿地投资关系

我国已建成的部分人工湿地工程(处理各种废水)占地指标约在 $2\sim 30\text{ m}^2/(\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1})$ 之间^[12],而调研中浙江省的人工湿地占地指标偏小,为 $1.3\sim 4.0\text{ m}^2/(\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1})$ 。有资料显示,采用人工湿地技术(以潜流式人工湿地为例)将城镇污水处理厂尾水水质从《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级 A 标准提升到地表水 V 类~Ⅲ类标准,所需占地面积为 $1.0\sim 5.0\text{ m}^2/(\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1})$,如城镇污水处理厂尾水要达到或接近地表水环境质量标准的Ⅳ类水体,所需占地指标估算为 $3.0\text{ m}^2/(\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1})$ 。一般来说,同种工艺参数前提下(如水力负荷),处理水量的增加会导致占地面积的增大,面积的增大又会造成投资的增加。根据所调研的案例数据分析可知,随着人工湿地处理水量的增加,人工湿地的投资呈曲线增长,即人工湿地投资

与进水量的变化呈正相关关系($R^2=0.9927$)。理论上采用人工湿地处理技术可以达到地表水Ⅳ类标准(TN 除外),但投资巨大,应根据提标需求进行深入论证。

4 结语

① 采用人工湿地处理达到一级 A 出水标准的城镇污水处理厂尾水,如果湿地类型或不同种类的湿地组合选择适当,同时面积设置合理,深度处理后的出水基本可以达到地表水Ⅳ类水标准。

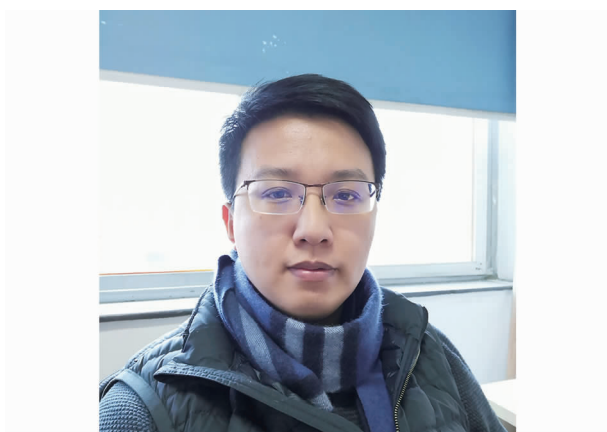
② 城镇污水处理厂尾水人工湿地深度处理提标工程应该综合考虑尾水处理达标与否、占地面积及场地选择是否合理、投资及运行管理成本、季节影响等多种因素,应因地制宜,针对性地组织专家进行可研及后续设计论证。

③ 建议不要盲目跟“高标准”风,一定要结合当地技术、经济、水环境等综合考虑,既要推进提标改造项目,又要做到钱花在刀刃上;鼓励一些工业废水占比小、处于环境敏感区域上游、具备用地条件的城镇污水处理厂开展尾水人工湿地技术处理。

参考文献:

- [1] 刘金星,冯成军,蒋岚岚. 济源市城市污水处理厂一期提标改造工程设计[J]. 中国给水排水,2015,31(20):46-49.
- Liu Jinxing, Feng Chengjun, Jiang Lanlan. Upgrading design of first-phase project of Jiyeuan City Sewage Treatment Plant[J]. China Water & Wastewater,2015,31(20):46-49(in Chinese).

- [2] 陶亚强,李军,Chang Cheinchi. Blue Plains 污水处理厂提标改造——后置反硝化、污泥热水解和深层隧道[J]. 净水技术,2016,35(1):11-15.
Tao Yaqiang, Li Jun, Chang Cheinchi. Upgrading reconstruction of Blue Planins Wastewater Treatment Plant—Post-denitrification, sludge thermal hydrolysis and deep tunnels[J]. Water Purification Technology, 2016, 35(1):11-15 (in Chinese).
- [3] 陈涛,李军,陈潜,等. 余杭污水处理厂提标改造—强化二级处理、深度过滤[J]. 净水技术,2016,35(2):11-15.
Chen Tao, Li Jun, Chen Qian, *et al.* Upgrading reconstruction of Yuhang wastewater treatment plant—Enhanced secondary treatment, advanced filtration[J]. Water Purification Technology, 2016, 35(2):11-15 (in Chinese).
- [4] 钱静,高守有. 高标准污水处理厂提标改造工程的设计与调试运行[J]. 中国给水排水,2016,32(8):29-32.
Qian Jing, Gao Shouyou. Design, commissioning and operation of high-standard upgrading and reconstruction project of wastewater treatment plant[J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(8):29-32 (in Chinese).
- [5] 周慧. 合肥市朱砖井污水处理厂提标改造试验研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2012.
Zhou Hui. Experiment Research on the Upgrade of Zhuzhuanjing Wastewater Treatment Plant in Hefei[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2012 (in Chinese).
- [6] 马龙强,陈涛,李军. 东阳市污水处理厂提标改造——强化物化处理、后置反硝化生化处理、建造人工湿地[J]. 净水技术,2016(3):11-15,30.
Ma Longqiang, Chen Tao, Li Jun. Upgrading and reconstruction of Dongyang wastewater plant—Enhanced physicochemical treatment, post-denitrification biological aerated filter, constructed wetlands [J]. Water Purification Technology, 2016 (3): 11-15, 30 (in Chinese).
- [7] 陆松柳,胡洪营. 人工湿地的反硝化能力研究[J]. 中国给水排水,2008,24(7):63-65.
Lu Songliu, Hu Hongying. Study on denitrification capacity of constructed wetlands [J]. China Water & Wastewater, 2008, 24(7):63-65 (in Chinese).
- [8] 杨立君. 垂直流人工湿地用于城市污水处理厂尾水深度处理[J]. 中国给水排水,2009,25(18):41-43.
Yang Lijun. Application of vertical flow constructed wetland to advanced treatment of tailwater from municipal wastewater treatment plant[J]. China Water & Wastewater, 2009, 25(18):41-43 (in Chinese).
- [9] 廖波,林武. 强化型垂直流人工湿地用于污水处理厂尾水深度处理[J]. 中国给水排水,2013,29(16):74-77.
Liao Bo, Lin Wu. Application of enhanced vertical flow constructed wetland to advanced treatment of effluent from wastewater treatment plant[J]. China Water & Wastewater, 2013, 29(16):74-77 (in Chinese).
- [10] Wallace J, Champagne P, Hall G. Multivariate statistical analysis of water chemistry conditions in three wastewater stabilization ponds with algae blooms and pH fluctuations [J]. Water Res, 2016, 96:155-165.
- [11] 朱洁,陈洪斌. 人工湿地堵塞问题的探讨[J]. 中国给水排水,2009,25(6):24-28,33.
Zhu Jie, Chen Hongbin. Discussion on constructed wetlands clogging [J]. China Water & Wastewater, 2009, 25(6):24-28, 33 (in Chinese).
- [12] 李向阳,胡辉,罗宪庆. 人工湿地处理污水的占地指标比较及运用[J]. 平顶山工学院学报,2007,16(1):23-26.
Li Xiangyang, Hu Hui, Luo Xianqing. Comparison and application of land requisition index using artificial wetland for sewage treatment [J]. Journal of Pingdingshan Institute of Technology, 2007, 16(1):23-26 (in Chinese).



作者简介:孔令为(1984-),男,河南商丘人,博士,高级工程师,研究方向为水处理技术、生态修复、环保新材料研发等。

E-mail:lw.kong@163.com

收稿日期:2018-07-20