

马昱新,陈启斌,王朝旭,等.技术标准视角下我国污水处理厂尾水人工湿地设计分析[J].环境工程技术学报,2023,13(4):1287-1294.

MA Y X, CHEN Q B, WANG C X, et al. Design analysis of constructed wetlands for treatment of terminal effluent of wastewater treatment plants from technical standard perspective[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2023, 13(4): 1287-1294.

技术标准视角下我国污水处理厂尾水人工湿地设计分析

马昱新¹, 陈启斌¹, 王朝旭¹, 李作臣², 李伟强², 申志鹏², 崔建国^{1*}

1. 太原理工大学环境科学与工程学院

2. 中电建市政建设集团北方国际工程有限公司

摘要 人工湿地已逐渐应用于我国污水处理厂提标改造和尾水资源化利用工程实践中,并成为一项备受关注的技术。为指导和规范国内各地区污水处理厂尾水人工湿地工程的设计和建设,国家和地方相关职能部门及专业协会发布实施了多部尾水人工湿地技术标准。在全面梳理国内外尾水人工湿地工程应用现状和当前指导尾水人工湿地设计、建设的相关技术标准实施情况的基础上,对不同层面尾水人工湿地技术标准从工艺选型、设计参数等方面进行对比分析。依据尾水人工湿地碳水平调控策略的可行性、经济性并结合实际工程应用可达性的综合分析,确定湿地结构优化、工艺改进、耦合工艺是优化尾水人工湿地工程设计和强化其脱氮效能的较好策略和途径。为保障人工湿地工程安全和正常运营,建议人工湿地工程设计时应依据当地的水文条件,进行湿地的总水量平衡计算。未来应构建基于基质和水生植物选择、工程运营监测等方面的基础数据库,加强技术标准在尾水人工湿地全生命周期中的指导作用。

关键词 人工湿地; 污水处理厂尾水; 技术标准; 深度处理

中图分类号: X703 **文章编号:** 1674-991X(2023)04-1287-08 **doi:** 10.12153/j.issn.1674-991X.20220937

Design analysis of constructed wetlands for treatment of terminal effluent of wastewater treatment plants from technical standard perspective

MA Yuxin¹, CHEN Qibin¹, WANG Chaoxu¹, LI Zuochen², LI Weiqiang², SHEN Zhipeng², CUI Jianguo^{1*}

1. College of Environmental Science and Engineering, Taiyuan University of Technology

2. Stecol Corporation North International Engineering Co., Ltd.

Abstract The constructed wetlands (CWs) technology has been gradually applied to the upgrading and reconstruction of wastewater treatment plants (WWTPs) and the utilization of terminal effluent of WWTPs in China, and has become an important technical research field. Some national and local responsible departments and professional associations have promulgated and implemented several technical standards, which are used to guide and standardize the design and construction of CWs for treatment of terminal effluent of WWTPs. The application status of CWs projects for treatment of terminal effluent of WWTPs at home and abroad and the implementation of relevant technical standards guiding the design and construction of CWs were summarized, and the process selection and structure design parameters in the technical standards of CWs at different levels were compared and analyzed. By comparing the feasibility and economy of the carbon level control strategies of CWs and the accessibility of the actual project applications, it was found that the wetland structure optimization, process improvement and coupling process were the better strategies and pathways to optimize the design of CWs projects and enhance their nitrogen removal efficiency. Meanwhile, in order to ensure the safety and normal operation of CWs projects, it was suggested that the total water balance of wetlands should be calculated under the local hydrological conditions during the design of CWs projects. It was necessary to build a basic database based on substrates and aquatic plant selection, engineering operation monitoring and other aspects to strengthen the guiding role of technical standards in the whole life cycle of CWs.

Key words constructed wetlands (CWs); terminal effluent of WWTPs; technical standards; advanced treatment

收稿日期: 2022-09-23

基金项目: 山西省自然科学基金项目(201901D111066); 校企合作项目(北方低温地区再生水水质强化净化复合人工湿地构建关键技术研究)

作者简介: 马昱新(1998—), 男, 硕士研究生, 主要从事水污染控制与水质安全保障研究, 2410614315@qq.com

* 责任作者: 崔建国(1965—), 男, 教授, 主要从事城市水系统理论与技术研究, cuijianguo@tyut.edu.cn

人工湿地技术起源于 20 世纪 70 年代, 后来逐渐发展成为污水生态处理的重要手段之一。该技术利用植物、基质、微生物的协同作用, 通过吸附、沉淀、过滤、离子交换、植物吸收和微生物降解等多种途径来去除污水中的有机物、氮和磷等^[1]。人工湿地技术具有水质净化效果好、投资费用和处理成本低、运行管理简便且环境景观效果好等优势, 将其应用于污水处理厂尾水的深度净化领域, 既能解决受纳水体水质污染问题, 也能在一定程度上缓解河道生态基流缺失、水动力不足的状况^[2-3]。

近年来, 多部污水处理厂尾水人工湿地技术标准陆续发布和实施, 在指导和规范工程的设计、建设等方面发挥了积极的作用; 一大批尾水人工湿地工程也相继建成并投入使用, 极大地推动了污水处理厂尾水人工湿地领域的技术研究和工程实践。但需要指出的是, 只有基于高质量的规范化工程设计和可持续的运营管理与维护, 才能实现尾水人工湿地工程优良的水质净化效果和长久稳定的运行, 保障人工湿地良好的环境景观效应, 而这些都依赖于相关技术标准的编制质量及其良好的规范和指导作用。目前, 对污水处理厂尾水人工湿地相关技术标准的对比分析鲜见报道。为此, 收集并梳理了国家、省(区、市)及专业协会等不同层面上关于污水处理厂尾水人工湿地的技术标准(规范、规程、导则和指南), 针对不同技术标准中关于污水处理厂尾水人工湿地工程的总体设计进行比较分析, 探讨标准条文的适用性和合理性, 并提出工程优化设计建议, 以期为国内污水处理厂尾水人工湿地工程的规范设计和建设提供建议。

1 国内外尾水人工湿地应用现状

人工湿地技术因其集水质净化、景观营造于一身的独特优势, 在包括污水处理厂尾水在内的低污染水的深度处理领域得到了大量的推广和应用, 并成为重要的发展方向之一^[4]。国外较早开始使用人工湿地技术进行尾水深度处理, 如 1994 年荷兰在特赛尔岛建造了处理规模为 6 万 m³/d 的人工湿地, 对污水处理厂的二级出水进行深度处理; 2001 年, 意大利佛罗伦萨采用 4 座不同类型的人工湿地进行尾水的三级处理^[5]。我国较早将人工湿地用于污水处理厂尾水深度处理的工程为浙江省舟山市的朱家尖污水处理厂人工湿地工程, 该工程于 2007 年 9 月建成并完成调试, 系统对尾水的处理效果良好^[6]。截至 2019 年上半年, 我国处理污水处理厂尾水的人工湿地工程案例数量已达到 94 个, 占人工湿地工程总数

量的 12%^[7]。笔者通过文献检索、网站搜索和媒体报道等途径, 统计发现从 2019 年 6 月—2022 年 10 月, 我国已建、在建和拟建的尾水人工湿地工程数量新增 61 个。

尾水人工湿地处理单元常见的有强化预处理单元、表面流湿地、潜流湿地和稳定塘 4 种, 除强化预处理单元外, 其余工艺单元可进行组合, 形成多种工艺流程。在尾水人工湿地工程设计时, 在前期充分调研的基础上, 依据尾水处理量、水质特征、当地的气候条件、地形地貌特点、水质提标升级或资源化利用等要求, 因地制宜地确定工艺设计方案。国内各地大量的工程实践(表 1)表明, 人工湿地能够将尾水水质由 GB 18918—2002《城镇污水处理厂污染物排放标准》的一级 B 及以上提升至 GB 3838—2002《地表水环境质量标准》的 V 类及以上。其中, 2014 年建成的浙江省临安污水处理一厂的高效复合人工湿地系统对尾水有着良好的净化效果, 该人工湿地系统对尾水中的氨氮(NH₃-N)、硝态氮(NO₃⁻-N)、总氮(TN)的年平均去除率分别为 84.3%、33.1%、39.5%, 对总磷(TP)和 COD 的去除率分别为 77.8% 和 46.0%^[8], 出水水质(COD 为 23.80 mg/L、NH₃-N 为 0.19 mg/L、TN 为 9.14 mg/L、TP 为 0.44 mg/L)优于 GB 18918—2002 一级 A 排放标准^[9]。在此基础上, 2018 年建成的临安污水处理二厂尾水人工湿地处理系统包含接触氧化系统、鱼草乔(木)生态平衡系统、高效自净水生态系统、生态滤地系统和景观生态塘。该人工湿地出水 COD、TP、TN 浓度可降低 20%, 色、嗅等感官指标满足 GB/T 18921—2002《城市污水再生利用 景观环境用水水质》中的观赏性景观环境用水水质标准, NH₃-N、粪大肠菌群数等指标达到或优于 GB 3838—2002 III 类水质要求^[10]。

2 尾水人工湿地设计

2.1 国内外尾水人工湿地技术标准

20 世纪 90 年代, 为使人工湿地的建设与维护管理更加规范, 美国各州共同编制了适用于美国的 EPA 843-B-00-003《处理型人工湿地指导原则: 提供水质和野生动物栖息地》, 主要规定了人工湿地的场址选择、设计、施工、操作、维护和监测指导原则等内容^[11]。在此基础上, 美国国家环境保护局(US EPA)开发了北美湿地水质处理数据库, 减少重复劳动并改良传统设计方法, 对人工湿地的设计、建设、运行、维护、管理等起到了很好的规范和指导作用。2006 年 3 月, 德国发布了第一部人工湿地标准 DWA-A 262《城市污水生物净化用土壤过滤器污水

表 1 国内污水处理厂尾水人工湿地典型工程案例^[4,10]

Table 1 Basic information of typical domestic project cases of CWs for terminal effluent of WWTPs

工程名称	设计规模/(m ³ /d)	设计进水水质	设计出水水质	工艺流程
浙江临安污水处理一厂尾水人工湿地	6×10 ⁴	一级B标准	一级A 标准	潜流人工湿地+表流人工湿地
浙江临安污水处理二厂尾水人工湿地	8×10 ⁴	一级A标准	地表水Ⅲ类标准	接触氧化系统+鱼草乔(木)生态平衡系统+高效自净水生生态系统+生态滤地系统+景观生态塘
深圳龙华污水处理厂一期尾水人工湿地	2×10 ⁴	一级A 标准	地表水Ⅲ类标准	生态氧化池+生态砾石床+垂直流人工湿地
浙江慈溪市域污水处理一期工程尾水人工湿地(北部)	10×10 ⁴	一级B标准	一级A 标准	植物碎石床+表流湿地+生态塘+强化生物滤床
深圳茅洲河燕川湿地	1.4×10 ⁴	一级B标准	地表水Ⅳ类标准	生态氧化池+高效沉淀池+垂直流湿地+表流湿地
浙江东阳污水处理厂尾水人工湿地	6×10 ⁴	一级A 标准	地表水Ⅴ类标准	潜流人工湿地+表流人工湿地

处理厂的尺寸、建设和运行原则》^[12],并于 2017 年完成了该标准的修订(DWA-A 262E)^[13],为污水生物处理人工湿地设计、建设和运维提供了依据。目前,在人工湿地深度净化污水处理厂尾水领域,尚未检索到国外已发布的技术标准。

2009—2021 年,我国住房和城乡建设部、原环境保护部、生态环境部分别发布了人工湿地相关技术标准,包括 RISN-TG006-2009《人工湿地污水处理技术导则》^[14]、HJ 2005—2010《人工湿地污水处理工程技术规范》^[15]、CJJ/T 54—2017《污水自然处理工程技术规程》^[16]和《人工湿地水质净化技术指南》^[17],用于规范和指导国内人工湿地工程的设计与建设。近年来,在省级层面,江苏省、云南省、上海市等 10 多个省(区、市)已出台人工湿地地方技术标准。上述技术标准的发布和实施极大地推动了人工湿地技术在我国各地的工程应用实践。随着人工湿地技术在污水处理厂尾水深度处理领域的拓展和广泛应用,不同层级的污水处理厂尾水人工湿地相关技术标准亦陆续发布。目前,国内已发布实施的污水处理厂尾水人工湿地相关技术标准共有 6 部(表 2)。从表 2 可知,近年来污水处理厂尾水人工湿地相关技术标准的级别从地方标准逐渐提升至国家标准,且标准

的适用范围有所扩大,除了污水处理厂尾水以外,还涉及到微污染河水、农田退水以及小规模城镇或农村生活污水。

2.2 尾水人工湿地工艺选型

开展人工湿地处理系统总体设计时,应首先进行工艺选型。湿地具体工艺的选择应该在综合考虑接纳水体的水质要求、污水处理厂尾水的水质特点或处理难点的基础上,对各项指标进行分析、研判,再依据技术标准的设计原则,针对性选择具体的工艺流程。

针对尾水处理需去除的主要目标污染物类型,《污水处理厂尾水人工湿地深度净化技术指南》(T/CSES 30—2021,简称《TCSSES 指南》)指出了适宜的人工湿地工艺类型,并指出可以根据尾水水质特征进行工艺的集成与组合(图 1)。DB63/T 1350—2015《河湟谷地人工湿地污水处理技术规范》(简称《青海省规范》)指出,对于人工湿地的组合形式的选择,主要是根据处理水量来确定。单一式和单联式人工湿地的处理量宜小于 500 m³/d;当水量大于 1 000 m³/d 时,宜采用多级串联或并联式人工湿地;水量大于 2 000 m³/d 时,就应采用综合式人工湿地,即由多个复合流潜流人工湿地单元以并联方式组合

表 2 国内已发布实施的污水处理厂尾水人工湿地技术标准情况

Table 2 China's current published technical standards of CWs for terminal effluent of WWTPs

标准类型	标准名称	发布部门	发布年份	适用范围
技术指南/ 导则	《人工湿地水质净化技术指南》 (简称《生态环境部指南》)	生态环境部	2021	达标排放的污水处理厂出水、微污染河水、农田退水及类似性质的低污染水
	《安徽省污水处理厂尾水湿地处理 技术导则(试行)》	安徽省住房和城乡建设厅	2015	安徽省省内排入封闭水体的污水处理厂尾水
技术规范/ 规程	T/CSES 30—2021《污水处理厂尾水人工湿地 深度净化技术指南》(简称《TCSSES指南》)	中国环境科学学会	2021	NH ₃ -N、TN、TP浓度和COD等达到GB 18918—2002一级B标准的污水处理厂尾水
	DB63/T 1350—2015《河湟谷地人工湿地污水 处理技术规范》(简称《青海省规范》)	原青海省质量技术监督局、 原青海省环境保护厅	2015	青海境内河湟谷地区城镇污水处理厂尾水、经过适当预处理的分散型或集中式生活污水、或其他性质类似的低浓度污/废水
	DB41/T 1947—2020《污水处理厂尾水人工湿 地工程技术规范》(简称《河南省规范》)	河南省生态环境厅、 河南省市场监督管理局	2020	水质符合GB 18918—2002 和地方标准的城镇 污水处理厂尾水
	CJJ/T 54—2017《污水自然处理工程技术规程》 (简称《CJJ规程》)	住房和城乡建设部	2017	规模小于或等于10万m ³ /d的城镇污水处理厂出 水、受有机污染的地表水

构成潜流人工湿地单元组,并由多组潜流人工湿地单元组以并联方式组成潜流人工湿地系统。在具体的工程实践中,复合流人工湿地的工艺组成主要包括塘(氧化塘)、床(水平或垂直潜流人工湿地)、表(表流人工湿地)等。按照工艺组成及类型分类,尾水人工湿地可以分为强化预处理组合工艺、塘—床组合工艺、塘—表组合工艺以及(塘)床—表组合工艺 4 种常用的工艺处理系统^[4]。

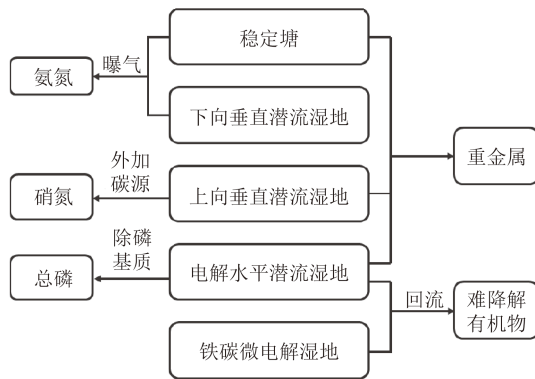


图 1 尾水人工湿地目标污染物的推荐工艺

Fig.1 Recommended process for target pollutants in CWs for terminal effluent of WWTPs

人工湿地污水处理技术本质上属生物膜法范畴,微生物在去除污染物的过程中发挥着主体作用。为了进一步强化尾水人工湿地的生物脱氮除磷效率,工艺选型时应创造有利于强化微生物脱氮作用的厌氧/缺氧微环境,因此各种组合或复合流处理系统应运而生。但人工湿地组合处理系统的选取和组合形式大多依据设计人员的经验,且其处理效能波动也较大,在缺乏长期的实际监测数据条件下,如何保证尾水人工湿地组合处理系统的去除效率持久稳定也是工艺选型及设计中的一个难题^[18]。

人工湿地水动力学和水质模型的研究有利于工程设计和实践,但现状研究构建的多为灰箱模型^[18],对于人工湿地的组成内容和工艺过程做了较多的假设和简化,从而增加了模型工艺和运行参数的不确

定性与不规范性。而在实际的人工湿地工程中,因水质条件复杂、影响因素众多,导致模型误差增大,准确度下降。因此,如何提高模型预测精确度,有利于准确把握设计水质和处理规模,从而指导工艺选型和优化设计内容,将是未来重要的研究方向。

需指出的是,相较传统的污水处理工艺,人工湿地占地面积往往较大,但其具有独特的景观营造所必需的水面和植物两大元素,在人工湿地系统工艺选型和集成设计的基础上再由景观设计师进行专业打造,可以创造出集水质净化、景观营造、科普教育、娱乐休闲等功能于一体的“绿色基础设施”。

2.3 尾水人工湿地设计参数

2.3.1 水力停留时间与表面负荷

《人工湿地水质净化技术指南》(简称《生态环境部指南》)根据各省(区、市)1月、7月的平均气温,并辅助考虑每年日平均气温 $\leq 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 与 $\geq 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的天数,将全国分为严寒地区(Ⅰ区)、寒冷地区(Ⅱ区)、夏热冬冷地区(Ⅲ区)、夏热冬暖地区(Ⅳ区)、温和地区(Ⅴ区)共 5 个区。其中,河南省大部(除安阳市、鹤壁市、濮阳市外)处于气候分区中的Ⅲ区,青海河湟谷地区属于Ⅱ区。为了解地方规范与《生态环境部指南》中相应气候分区(河南省大部、青海河湟地区)对尾水人工湿地设计参数取值的异同,分别将 DB41/T 1947—2020《污水处理厂尾水人工湿地工程技术规范》(简称《河南省规范》)与《生态环境部指南》的Ⅲ区、《青海省规范》与《生态环境部指南》中的Ⅱ区进行比较分析(表 3、表 4)。

由表 3、表 4 可知,对于同一地区来说,地方规范与《生态环境部指南》给出的尾水人工湿地工程的各项设计参数的取值存在较大差异。《生态环境部指南》推荐的水力表面负荷的取值范围较《河南省规范》更为宽泛,并给出了目标污染物(COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TN、TP)表面负荷的建议取值;《河南省规范》只给出 BOD_5 表面负荷的取值,如表面流、水平潜流和垂

表 3 《河南省规范》与《生态环境部指南》设计参数建议值比较

Table 3 Recommended values for design parameters in Henan Specification and Guideline of Ministry of Ecology and Environment

技术标准	湿地类型	长宽比	水力停留时间/d	水力表面负荷/ [$\text{m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{d})$]	污染物表面负荷/[$\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$]			
					BOD_5 或COD	$\text{NH}_3\text{-N}$	TN	TP
《河南省规范》	表面流	3:1~5:1	5~8	≤ 0.07	$\leq 4(\text{BOD}_5)$			
	水平潜流	$< 3:1$	2~4	$\leq 0.3\sim 0.5$	$\leq 30(\text{BOD}_5)$			
	垂直潜流	$< 3:1$	1.5~3	$\leq 0.4\sim 0.6$	$\leq 30(\text{BOD}_5)$			
《生态环境部指南》Ⅲ区	表面流	$> 3:1$	2~10	0.03~0.20	0.8~6.0(COD)	0.04~0.50	0.08~1.00	0.01~0.10
	水平潜流	$< 3:1$	1~3	0.3~1.0	3~12(COD)	1.5~3.0	1.2~6.0	0.04~0.20
	垂直潜流	1:1~3:1	0.8~2.5	0.4~1.2	5~15(COD)	2~4	1.5~8.0	0.06~0.25

表 4 《青海省规范》和《生态环境部指南》的设计参数建议值

Table 4 Recommended values for design parameters in *Qinghai Specification and Guideline of Ministry of Ecology and Environment*

技术标准	湿地类型	长宽比	水力停留 时间/d	水力表面负荷/ [m ³ /(m ² ·d)]	污染物表面负荷/[g/(m ² ·d)]			
					COD	NH ₃ -N	TN	TP
《青海省规范》	表面流	3:1~5:1	4~10	0.05~0.15, 宜取 0.05~0.10	2~6	0.5~3.0	0.5~1.5	0.05~0.10
	复合潜流	1:1~3:1	2~4	0.2~0.5, 宜取 0.3	10~60	2~8	1.5~5.0	0.2~0.5
《生态环境部指南》Ⅱ区	表面流	>3:1	2~12	0.02~0.20	0.5~5.0	0.02~0.30	0.05~0.50	0.008~0.050
	水平潜流	<3:1	1~4	0.2~1.0	2~12	1~2	0.8~6.0	0.03~0.10
	垂直潜流	1:1~3:1	0.8~2.5	0.4~1.2	3~15	1.5~4.0	1.2~8.0	0.05~0.12

直潜流人工湿地的 BOD₅ 表面负荷取值分别为 ≤4、≤30、≤30 g/(m²·d)。从污水处理厂尾水人工湿地工程设计和实际应用来看,采用 COD 表面负荷更为简便。

《青海省规范》中的表面流人工湿地的污染物表面负荷较《生态环境部指南》偏大,且二者的取值下限基本上相差 1 个数量级;而其复合流人工湿地的污染物表面负荷是《生态环境部指南》中的水平流、潜流人工湿地的数倍,前者 COD 表面负荷为 10~60 g/(m²·d),而后者水平潜流人工湿地是 2~12 g/(m²·d)。这是由于复合流人工湿地是由多级潜流人工湿地单元组合而成,污染物去除能力较单独的水平流或垂直流人工湿地要强,则污染物表面负荷的设计取值可以适当高一些。复合流人工湿地的水力表面负荷可高达 0.67 m³/(m²·d),较我国大多数尾水人工湿地提升了 30%,同时缩小了湿地占地面积^[19]。

由上述技术标准中尾水人工湿地设计参数选取的对比分析可知,虽然《生态环境部指南》首次以地区最低月温度为重要指标对全国进行气候分区,并按气候分区给出了人工湿地主要类型的设计参数推荐值,但参数取值范围仍较为宽泛。当所属气候区对应的不同标准给出的设计参数不一致或范围太过宽泛时,为了满足出水水质要求,应按照每一种设计参数的最低负荷进行计算,然后取设计面积最大的设计参数较为安全可靠。当实际工程占地、施工等条件不能满足所对应的设计参数时,在预算满足的情况下应考虑采用高负荷的复合式人工湿地,同时减少低负荷表流人工湿地的设计面积。

20 世纪 90 年代,US EPA 通过建立《北美水质处理湿地数据库》并发布《市政污水处理型人工湿地工艺设计手册》,规范了人工湿地工程的设计、施工和运营等工作,但上述湿地数据库和设计手册中的参数大多基于国外实际人工湿地工程项目的长期监测结果。对于我国而言,还未建立全国统一的人工湿地基础数据库,亦尚未有一套由科研、设计和施工单位共同参与下编制完成的人工湿地设计手册用来

规范和指导尾水人工湿地工程设计。同时,还需加强相关技术研究的针对性,从而使科研成果为尾水人工湿地的工艺设计提供全面、系统、因地制宜的技术参数和设计指标,不断提高设计水平和质量,推动人工湿地技术在污水处理厂尾水深度处理领域的推广应用。

2.3.2 设计面积

尾水人工湿地的工艺选型确定后,一般依据相关技术标准选取适宜的工艺设计参数,采用表面负荷法完成人工湿地有效面积和几何结构尺寸的设计、计算。人工湿地设计面积的表面负荷法计算公式如下:

$$A = Q(C_0 - C_1) / N \tag{1}$$

$$A = Q / N_q \tag{2}$$

式中: A 为人工湿地面积, m²; Q 为人工湿地设计水量, m³/d; C_0 为人工湿地进水污染物浓度, mg/L; C_1 为人工湿地出水污染物浓度, mg/L; N 为污染物表面负荷, g/(m²·d); N_q 为水力表面负荷, L/(m²·d)。

《生态环境部指南》规定,人工湿地的表面积可根据 COD、NH₃-N、TN 和 TP 等主要污染物削减负荷和水力表面负荷计算,并取上述计算结果的最大值,同时应满足水力停留时间要求。《TCSES 指南》则规定,尾水人工湿地设计面积应按 TN、TP、COD 和重金属等进水负荷与去除率确定,应取其设计计算结果中的最大值,同时应满足水力表面负荷的要求。

尾水人工湿地包括潜流人工湿地、表面流人工湿地和复合流人工湿地等类型。相关研究结果表明,尾水属于微污染物浓度污水,针对微污染物浓度的水质,潜流人工湿地的设计面积主要取决于水力表面负荷^[20]。依据《生态环境部指南》并参考 GB 18918—2002 及 GB 3838—2002,用污染物表面负荷和水力表面负荷分别进行表面流尾水人工湿地最小设计面积的计算。其情况设定为:进水水质指标为 GB 18918—2002 一级 B 标准限值,出水水质指标为 GB 3838—2002 的 V 类水标准限值,湿地进水流量

(Q) 设为 $1\,000\text{ m}^3/\text{d}$ 。依据《生态环境部指南》中的 5 个气候分区的设计参数的取值上限, 计算得到表面流尾水人工湿地最小设计面积, 结果如图 2 所示。处理污水处理厂尾水的表面流人工湿地最小设计面积主要取决于 $\text{NH}_3\text{-N}$ 或 TN 污染物表面负荷, 在 I 区和 II 区最为明显。因此, 表面流人工湿地通过强化脱氮措施来减小湿地占地面积和工程投资十分重要, 但 I 区和 II 区使用这 2 个参数计算的湿地面积相差较大, 这可能与不同地区的尾水水质有关。且随着不同气候分区气温的降低, 湿地面积显著增大, 可见在北方地区, 气温成为影响湿地设计面积的重要因素, 通过采取保温措施不仅可维持尾水人工湿地的处理效果, 也可以缩小工程设计占地面积。

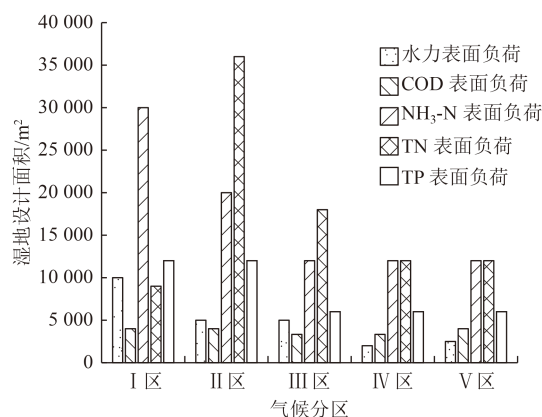


图 2 5 个气候分区下基于不同参数的表面流尾水人工湿地设计面积

Fig.2 Design area of surface flow constructed wetland for terminal effluent of WWTPs in five climate zones based on different parameters

尾水人工湿地在计算和确定设计面积时, 应基于湿地工程选址位置的的特殊性, 结合处理工艺选型, 综合考量工程选址情况、场地地形地貌、总体布置形式等因素, 因地制宜地构建组合式、复合型处理系统, 必要时进行镶嵌式或立体式布置, 以减小湿地占地面积。

3 尾水人工湿地优化设计建议

3.1 强化脱氮

随着生态文明建设的持续推进以及水资源、水生态和水环境的统筹利用与保护, 我国水生态环境得到了较大程度的改善, 但水体中的氮素污染仍是威胁地表水环境安全的重要问题之一^[21]。人工湿地对包括污水处理厂尾水在内的低污染水的深度处理效果良好, 建设和运行成本较低。然而, 污水处理厂尾水具有可生化性差、碳氮比(C/N)低、 TN 浓度高

(以硝酸盐为主)等水质特征^[1], 限制了人工湿地的反硝化作用, 导致人工湿地的脱氮效能较低, 威胁到受纳水体水安全, 不利于尾水的资源化利用^[22]。

现有的尾水人工湿地技术标准相关条文中列出了提高和强化尾水人工湿地的脱氮效能的技术方法和措施。《河南省规范》指出, 当出水水质考虑 TN 指标时, 可填充缓释碳源填料或自养反硝化填料。《TCSES 指南》则指出, 当尾水中碳源缺乏和冬季脱氮微生物活性低导致人工湿地脱氮效率下降时, 可适当补充湿地植物厌氧发酵液或其他碳源。湿地植物厌氧发酵液 C:N:P 宜为 $200\sim300:5:1$, 添加湿地植物厌氧发酵液后使尾水中 C/N 达到 $3\sim5:1$ 为宜。但上述强化尾水人工湿地脱氮的技术措施对工程实践的指导性不强, 需进一步加强相关技术研究和大力推动科技成果的转化, 建设示范应用工程, 完善和修订技术标准, 提高技术标准的指导性。

基于微生物硝化反硝化脱氮作用被认为是人工湿地去除污水处理厂尾水中氮素的主要机制^[23], 研究人员在功能型填料筛选、构建强化型人工湿地和调控湿地碳水平等方面开展了大量的研究^[24]。已有研究表明, 通过将来水的 C/N 调控至合适值或引入铁、硫源改变微生物群落结构, 强化人工湿地微生物反硝化过程, 是提高尾水人工湿地脱氮效率的关键^[25]。

从尾水人工湿地碳水平调控策略的可行性、经济性并结合实际工程应用的可达性综合分析, 湿地结构优化(折板式人工湿地)、工艺改进(分段进水、出水回流)、耦合工艺(自养脱氮工艺与人工湿地的耦合)为优化尾水人工湿地工程设计和强化其脱氮效能的较好策略与途径(表 5)。

3.2 水量平衡校核

由于人类活动的影响, 全球气候变暖趋势明显, 导致极端天气出现的频率大增, 近些年国内各地降水的量级和频次超出以往^[26]。同时, 尾水人工湿地往往建设在城镇污水处理厂排水口的下游, 地势较低, 易受到洪水的威胁。因此, 进行人工湿地工程设计时首要任务是掌握当地的水文条件, 开展湿地的总水量平衡计算, 即在降水时间较长的情况下, 计算整个汇水范围内流入人工湿地的水量, 并将其纳入设计流量内。

人工湿地的水文条件是维持湿地结构功能、物种组成以及开发成功湿地项目的重要因素。现有尾水人工湿地技术标准中涉及到水文要素影响的内容较少。由于降水量时空分布严重不均, 导致我国不同地区间降水量的差异较大。在确定尾水人工湿地

表 5 尾水人工湿地碳水平调控策略^[23,25]

Table 5 Regulation strategy of carbon level in CWs for terminal effluent of WWTPs

碳水平调控策略	调控类型	主要手段	特征	工程适宜性评价
直接碳调控	外加碳源	低分子有机物、污水、废水和剩余污泥、天然有机物及高分子缓释碳等	投加量难以控制,易造成二次污染和成本过于高昂	一般
	植物根系碳源	种植根系碳含量较高的植物	容易受温度和光照等因素的影响,碳调控能力不稳定	一般
间接碳调控	工艺改进	分段进水	实现碳源合理分配,提高反硝化效率	较好
	结构优化	折板式构型	提高湿地内部水力效率,防止短流	较好
	工艺耦合	自养型脱氮工艺	对碳源没有要求,适合低碳氮比污水	较好
		微生物燃料电池	产能低、内阻大,运行参数不合理	较差

工程规模和选择处理工艺时,现有技术标准对于降水量等水文要素的影响没有给予足够的考虑,仅依据进、出水水质与水量进行相关设计计算。同时,设计时也应考虑地下水渗透水量、管路系统漏损等因素。根据 US EPA 发布的《市政污水人工湿地处理设计手册》并结合国内工程实践,提出尾水人工湿地水量校核公式:

$$S = Q + R + I - L - ET \tag{3}$$

式中: S 为湿地真实水量, m^3 ; Q 为湿地设计进水量, m^3 ; R 为湿地降水量(径流量与湿地表面降水量), m^3 ; I 为地下水渗入水量, m^3 ; L 为湿地系统漏损与渗出水, m^3 ; ET 为湿地表面蒸发与植物蒸腾水量, m^3 。

雨季来临时,人工湿地表面的水量以及上游来水量突增,会使湿地去除污染物的效果受到较大影响,同时还会对基质上的生物膜造成冲刷,使雨季过后污染物的去除效果受到不利影响。另外,在我国北方干旱少雨地区,较少的降水可能给一些以循环补水为水源的人工湿地工程长期的稳定运行带来困难,还可能影响到人工湿地植物的正常生长。因此,可考虑将市政水源接入尾水人工湿地以备用,干旱期可以及时地给植物进行浇灌。

4 结语

随着国内各地污水处理厂提标改造和水生态环境保护工作力度的不断加大,污水处理厂尾水人工湿地的工程化应用越来越广泛。不同层面已出台的污水处理厂尾水人工湿地技术标准的发布实施,有助于指导和规范我国尾水人工湿地技术的实际应用,但在某些方面仍存在一定的不足。例如,对不同地域污水处理厂尾水的水质特征关注较少,预处理单元和人工湿地组合单元的设计缺乏针对性;在多级人工湿地单元之间的衔接方式和处理构筑物景观造型的打造等方面的设计内容缺失。随着尾水人工湿地技术在我国快速发展,已有大量工程实践可供参考,早期发布的技术标准可以根据实际工程建

设及运维数据和区域水生态环境保护的新要求进行调整优化。建议构建基于基质和水生植物选择、工程运营监测等方面的基础数据库,加强技术标准在尾水人工湿地全生命周期中的指导作用。采用建筑信息模型(BIM)、人工智能(AI)、大数据、机器学习、数字孪生、智慧工厂等新理念和新技术,提高包括尾水人工湿地在内的处理型湿地工程全生命周期设计、施工、运营等工作质量,促进人工湿地绿色生态技术蓬勃发展。

参考文献

[1] ZHANG G Z, MA K, ZHANG Z X, et al. Waste brick as constructed wetland fillers to treat the tail water of sewage treatment plant[J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2020, 104(2): 273-281.

[2] 王明铭, 魏俊, 黄荣敏, 等. 潜流人工湿地填料及其去除污染物机理研究进展[J]. 环境工程技术学报, 2021, 11(4): 769-776.

WANG M M, WEI J, HUANG R M, et al. Research progress of subsurface flow constructed wetland filler and its pollutant removal mechanism[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2021, 11(4): 769-776.

[3] JI M D, HU Z, HOU C L, et al. New insights for enhancing the performance of constructed wetlands at low temperatures[J]. Bioresource Technology, 2020, 301: 122722.

[4] 魏俊, 赵梦飞, 刘伟荣, 等. 我国尾水型人工湿地发展现状[J]. 中国给水排水, 2019, 35(2): 29-33.

WEI J, ZHAO M F, LIU W R, et al. Development status of constructed wetland (CWs) for treatment of terminal effluent of wastewater treatment plants (WWTPs) in China[J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(2): 29-33.

[5] CONTE G, MARTINUZZI N, GIOVANNELLI L, et al. Constructed wetlands for wastewater treatment in central Italy[J]. Water Science and Technology: a Journal of the International Association on Water Pollution Research, 2001, 44(11/12): 339-343.

[6] 余杰, 田宁宁, 钱靖华, 等. 人工湿地在回用水中的应用及应考虑的问题[J]. 中国建设信息(水工业市场), 2009(10): 44-48.

YU J, TIAN N N, QIAN J H, et al. Application of constructed

- wetland in reuse water and problems to be considered[J]. Information of China Construction (Water-Industry Market), 2009(10): 44-48.
- [7] 魏俊, 韩万玉, 杜运领, 等. 尾水人工湿地设计与实践[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2019.
- [8] 张长宽. 冬季保温和组合填料提高复合生态湿地去除尾水氮磷效应的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
- [9] 孔令为, 邵卫伟, 梅荣武, 等. 浙江省城镇污水处理厂尾水人工湿地深度提标研究[J]. 中国给水排水, 2019, 35(2): 39-43.
- KONG L W, SHAO W W, MEI R W, et al. Study on constructed wetland for advanced treatment of terminal effluent of wastewater treatment plant in Zhejiang Province[J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(2): 39-43.
- [10] 华莹珺. 污水处理型湿地景观营造研究: 以杭州横溪湿地公园为例[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2019.
- [11] US EPA. Guiding principles for constructed treatment wetlands: providing for water quality and wildlife habitat[R]. Washington DC: US EPA, 2000.
- [12] DWA 2006 principles for dimensioning, construction and operation of wastewater treatment plants with soil filters for biological cleaning of municipal wastewater[R]. Hennef: German Association for Water, Wastewater and Waste (DWA), 2006.
- [13] DWA 2017b Standard DWA-A 262E: principles for dimensioning, construction and operation of wastewater treatment plants with planted and unplanted filters for treatment of domestic and municipal wastewater[S]. Hennef: German Association for Water, Wastewater and Waste (DWA), 2017.
- [14] 住房和城乡建设部标准定额研究所. 人工湿地污水处理技术导则: RISN-TG 006—2009[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
- [15] 环境保护部. 人工湿地污水处理工程技术规范: HJ 2005—2010[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2011.
- [16] 住房和城乡建设部. 污水自然处理工程技术规程: CJJ/T 54—2017[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
- [17] 卢少勇, 万正芬, 康兴生, 等. 《人工湿地水质净化技术指南》编制思路与体系[J]. 环境工程技术学报, 2021, 11(5): 829-836.
- LU S Y, WAN Z F, KANG X S, et al. Idea and system of compiling *Technical Guidelines for Water Purification by Constructed Wetlands*[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2021, 11(5): 829-836.
- [18] 成水平, 王月圆, 吴娟. 人工湿地研究现状与展望[J]. 湖泊科学, 2019, 31(6): 1489-1498.
- CHENG S P, WANG Y Y, WU J. Advances and prospect in the studies on constructed wetlands[J]. Journal of Lake Sciences, 2019, 31(6): 1489-1498.
- [19] 黄峻楠, 李青, 张琼华, 等. 高负荷复合式人工湿地对污水处理厂尾水低温期的净化效果[J]. 环境工程学报, 2021, 15(11): 3561-3571.
- HUANG J N, LI Q, ZHANG Q H, et al. Performance of a high loading hybrid constructed wetland on wastewater treatment plant effluent purification in low temperature period[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2021, 15(11): 3561-3571.
- [20] 张翔, 李子富, 周晓琴, 等. 我国人工湿地标准中潜流湿地设计分析[J]. 中国给水排水, 2020, 36(18): 24-31.
- ZHANG X, LI Z F, ZHOU X Q, et al. Design analysis of subsurface flow wetland in constructed wetland standards in China[J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(18): 24-31.
- [21] YU C Q, HUANG X, CHEN H, et al. Managing nitrogen to restore water quality in China[J]. Nature, 2019, 567(7749): 516-520.
- [22] 刘勇超, 陈启斌, 王朝旭, 等. 外加碳源对生物炭基潜流人工湿地净化污水处理厂尾水效能的影响[J]. 环境工程技术学报, 2023, 13(4): 1295-1303.
- LIU Y C, CHEN Q B, WANG C X, et al. Effect of external carbon addition on pollutants removal from the tail water of a sewage treatment plant by biochar-based subsurface flow constructed wetland[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2023, 13(4): 1295-1303.
- [23] 王宇娜, 国晓春, 卢少勇, 等. 人工湿地对低污染水中氮去除的研究进展: 效果、机制和影响因素[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38(5): 722-734.
- WANG Y N, GUO X C, LU S Y, et al. Review of nitrogen removal in low-polluted water by constructed wetlands: performance, mechanism, and influencing factors[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2021, 38(5): 722-734.
- [24] 肖其亮, 熊丽萍, 彭华, 等. 不同基质组合对氮磷吸附能力的研究[J]. 环境科学研究, 2022, 35(5): 1277-1287.
- XIAO Q L, XIONG L P, PENG H, et al. Nitrogen and phosphorus adsorption capacity of different substrate combinations[J]. Research of Environmental Sciences, 2022, 35(5): 1277-1287.
- [25] 张馨文, 冯成业, 张文智, 等. 人工湿地碳调控研究进展[J]. 湿地科学, 2022, 20(3): 413-420.
- ZHANG X W, FENG C Y, ZHANG W Z, et al. A review on control of carbon in constructed wetlands[J]. Wetland Science, 2022, 20(3): 413-420.
- [26] 李超超, 程晓陶, 申若竹, 等. 城市化背景下洪涝灾害新特点及其形成机理[J]. 灾害学, 2019, 34(2): 57-62.
- LI C C, CHENG X T, SHEN R Z, et al. New characteristics and formation mechanism of flood and waterlogging disasters in the context of rapid urbanization[J]. Journal of Catastrophology, 2019, 34(2): 57-62. ◇