

我国尾水型人工湿地发展现状

魏俊¹, 赵梦飞¹, 刘伟荣¹, 孔令为², 周笑天¹, 郑亨¹

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

摘要: 污水厂尾水水质的提升在水环境质量改善中起到日益重要的作用,而人工湿地具有运行费用低、景观效果好等优点,在尾水水质的提升中具有良好的应用前景。尾水型人工湿地可分为塘-表、塘-床、(塘)-床-表、强化预处理型四种常见类型,分析了各种类型工艺的特点,并介绍了实际工程案例。同时,提出了应因地制宜地采用人工湿地工艺类型,从全生命周期的角度考虑湿地的建设和运营,并加强人工湿地建成后的效果评估,以最大化地发挥人工湿地的综合效益。

关键词: 污水处理厂; 尾水; 提标改造; 人工湿地

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2019)02-0029-05

Development Status of Constructed Wetland (CWs) for Treatment of Terminal Effluent of Wastewater Treatment Plants (WWTPs) in China

WEI Jun¹, ZHAO Meng-fei¹, LIU Wei-rong¹, KONG Ling-wei², ZHOU Xiao-tian¹,
ZHENG Heng¹

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

Abstract: Improvement of wastewater treatment plant terminal effluent quality has played more and more important roles in the protection of surface water quality. Constructed wetlands (CWs) with advantages such as low cost and good effect could be widely applied in treatment of terminal effluent of WWTPs. According to the classification of the treatment methods, CWs for treatment of terminal effluent were divided into four types including stabilization pond-surface flow wetland, stabilization pond-subsurface flow wetland, (stabilization pond)-subsurface flow wetland-surface flow wetland, and intensive pretreatment. The characteristics of various types of CWs were analyzed, and practical cases were introduced. In addition, some suggestions were concluded as follows: the CWs types should be adopted according to local conditions; the construction and operation of wetland should be considered in view of the whole life cycle; and the effect evaluation of constructed wetland should be strengthened. As a result, the comprehensive benefits could be maximized in the application of CWs.

Key words: WWTP; terminal effluent; upgrading and reconstruction; constructed wetlands

1 尾水概述

1.1 定义及特点

尾水尚无明确定义,可指农田退水、水坝或水力发电厂出水,采矿等工业企业产生的水等,在此所指

为污水厂处理后排放的水,具有以下两大特点:

① 无法满足《地表水环境质量标准》。尾水具有排放量大且集中的特点,多数尾水水质执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—

2002),达标后往往排入地表水体,而地表水水质执行《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)。如果将两套标准的指标进行比较,《城镇污水处理厂污染物排放标准》中最严格的一级A排放标准劣于《地表水环境质量标准》中的地表V类水质标准,用通俗的话来讲就是,达标排放的尾水仍是劣V类水。

② 不能稳定达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》。由于我国一直以来重厂轻网,导致雨污管网分流不彻底、管道病害等问题的出现,加上城市管理水平不高等原因,我国城镇污水处理厂进水往往具有有机负荷较低、SS/BOD₅比值高、BOD₅/TN比值低等特点,很大程度上限制了生化反应特别是反硝化过程的进行,从而对出水水质造成不利影响。此外,在经济发达省份,城镇污水处理厂进水中工业废水的比例较高,以浙江省为例,工业废水水量的占比平均达30%以上,使得污水厂进水BOD₅/COD低、可生化性差,工业废水中的油脂等物质会影响生化处理效果和感官效果,难生物降解且具有生物毒性的物质(如重金属)容易穿透整个污水处理流程,导致尾水水质不能稳定达标。

1.2 处理工艺

从尾水稳定达标排放和地表水环境质量改善两方面来看,污水处理厂提标改造工作势在必行,需要对尾水进行进一步处理,尤其在河湖水质敏感、河道生态基流严重不足的区域,对尾水实施提标已成为改善水环境质量、保障水生态系统功能的重要举措。

污水厂的提标改造可分为两大类^[1-2]:①原位提升。即对原主体工艺进行改造、革新,如改良运营、优化参数、添加药剂、强化生化处理,还包括对附属工艺的改造,如污泥处置、隔音、除臭等;以及对电气、自控设备等进行升级。②异位新增。即在原主体工艺后串联新增处理设施,包括以物理化学法(如混凝沉淀、高级氧化、过滤等)为核心,以生物法(如生物接触氧化法、曝气生物滤池等)为核心,以膜分离技术(如超滤、纳滤、反渗透等)为核心和以人工湿地系统(如垂直流、表面流等)为核心的处理工艺。其中,以人工湿地系统为核心的工艺具有处理效果较好、基建投资及运行费用低、运行维护简单、景观性强等优点,得到了日益广泛的应用。

2 人工湿地的应用及发展

狭义上的人工湿地,根据《人工湿地污水处理工程技术规范》(HJ 2005—2010)中的定义,主要指

用人工筑成水池或沟槽,底面铺设防渗漏隔水层,填充一定深度的基质层,种植水生植物,利用基质、植物、微生物的物理、化学、生物三重协同作用使污水得到净化的系统。建造于1903年英国约克郡 Earby 的人工湿地被认为是世界上第一个用于污水处理的人工湿地系统,迄今已有百年历史。至此开始,全球的科研工作者和工程技术人员开展了大量的人工湿地研究和实际工程应用。与西方国家相比,我国对人工湿地系统的研究与应用起步较晚,人工湿地在我国的发展以2004年为界主要可以分为研究及探索应用阶段和快速发展阶段^[3-4]。据不完全统计,1990年—2015年间我国建成的人工湿地共有791个,其中有541个人工湿地已明确建设年限,由此统计出我国人工湿地年变化情况(见图1)^[4]。

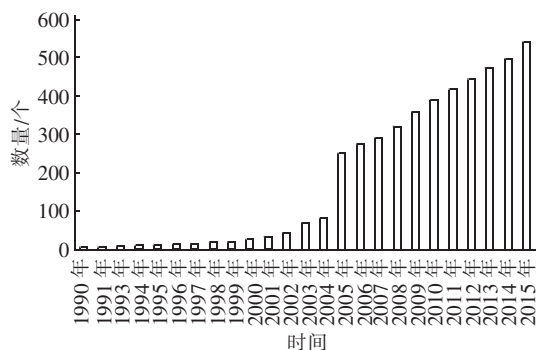


图1 我国人工湿地发展情况

Fig. 1 Development of constructed wetlands in China

① 研究及探索应用阶段(1987年—2004年),1987年我国第一个人工湿地污水处理系统建成,该系统为占地6 hm²、处理规模达1 400 m³/d的芦苇床湿地工程,标志着我国应用人工湿地进行污水处理的开始;1990年,以我国第一座实用型人工湿地处理系统——深圳白泥坑湿地建成为标志,人工湿地建设进入实际应用阶段。

② 快速发展阶段(2004年—至今),复合垂直流人工湿地系统在武汉市汉阳—蔡甸区三角湖的成功应用标志着我国人工湿地技术发展进入了新阶段^[3]。该阶段人工湿地得到了快速发展,2009年住建部颁布了《人工湿地污水处理技术导则》(RISN—TG 006—2009),2010年环保部颁布《人工湿地污水处理工程技术规范》(HJ 2005—2010)等。

3 尾水人工湿地的应用及发展

3.1 应用类型

经过30余年的发展,人工湿地系统在我国得到

广泛应用,应用领域包括处理生活污水和工业废水、控制农业面源污染以及改善饮用水源水质等方面,其中尾水深度处理已成为重要的发展方向之一。

3.2 工艺流派

尾水人工湿地处理单元主要有强化预处理单元、稳定塘、潜流湿地、表流湿地四种。除强化预处理单元外,其他三种工艺单元习惯上简称为塘、床、表,将这几种工艺单元进行组合,可形成四种常用的工艺流程。

① 塘-表组合工艺

该工艺主要以塘系统和表流湿地作为工艺单元,稳定塘常采用植物氧化塘,塘深形成兼氧环境,通过种植浮水、浮叶植物或设置浮床种植挺水植物等形式,同时起到助凝沉淀、吸收氮磷等作用。由于氧化塘、表流湿地总体属于低效率、低负荷的处理单元,故一般占地面积较大。同时,由于没有强化预处理单元和潜流湿地单元,易于根据场地基底、水深、水生植物的变化,划分不同功能区,创造不同的生境,形成良好的自然生态景观环境。作为塘-表组合工艺的特殊类型,也有将各单元池体修建成钢筋混凝土形式,以强化其污染物去除效果,可将其归类为强化型塘-表工艺。

② 塘-床组合工艺

该工艺以塘系统和潜流湿地为工艺单元,其核心是潜流湿地,在实际工程中,按照水体流态和进出水方式,常采用的有单级垂直流、多级垂直流、垂直流-水平流串联组合、水平流-垂直流串联组合、下向流-上向流串联组合的垂直流、垂直流与水平流耦合的复合流、潮汐流等。相比塘-表系统,塘-床工艺处理负荷高、占地面积小、处理效果好,但也存在工程造价高、景观效果较弱、床体易堵塞等问题。

③ (塘)-床-表组合工艺

该工艺主要以塘系统、潜流湿地和表流湿地作为工艺单元,其中,稳定塘单元根据项目具体情况可以选择设置或不设置,不设置时尾水直接进入潜流湿地单元。相比塘-床工艺,其主要特点保持一致,只是在后端增加了表流湿地单元,更有利于形成局部景观水体或场地水轴,增强工程的景观效果。

④ 强化预处理组合工艺

该工艺主要是在塘、床、表等生态单元前端,采用人工强化单元,对尾水水质水量带来的冲击负荷进行削减,以减小后续生态单元的处理负荷,如采用

接触氧化法、混凝沉淀法等。该工艺主要通过预处理单元去除污染负荷,因此适用于对湿地景观要求较高的项目,或有多种进水水源混合的项目,如进水中尾水或河道水等,以应对进水水质水量波动。

3.3 案例分析

3.3.1 塘-表组合工艺案例

洪泽污水厂尾水人工湿地分为南线和北线两个工程,其中南线工程占地 108 hm²,设计处理规模为 4 × 10⁴ m³/d,北线工程占地 152 hm²,设计处理规模为 6 × 10⁴ m³/d。设计进水水质为一级 B 标准,设计出水水质中 COD 达到地表水Ⅲ类标准,BOD₅ 和 TP 达到地表水 V 类标准,NH₃-N 和 TN 达到一级 A 标准。出水回用于周边农业灌溉、河道生态环境补水、城市杂用水、林地浇灌用水等,多余部分排入淮河入海水道。其主要工艺流程见图 2。

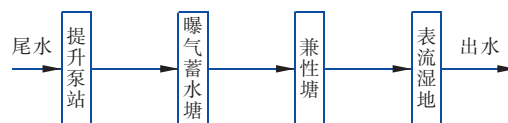


图2 洪泽污水厂尾水湿地工艺流程

Fig. 2 Flow chart of constructed wetland terminal effluent treatment process of Hongze WWTP

该湿地工艺可以归为“塘-表”工艺,各工艺单元结合景观打造成仿自然型,主要设计参数如下:①曝气蓄水塘。占地面积为 22.4 hm²,水深为 4 m,其中南、北两线工程面积分别为 10.4、12 hm²,水力停留时间分别为 8、10 d。②兼性塘。占地面积为 17.5 hm²,水深为 4.5 m,水力停留时间均为 8 d,其中南、北两线工程面积分别为 7、10.5 hm²。③表流湿地。占地面积为 83.6 hm²,其中南、北两线工程面积分别为 44.3、39.3 hm²,水力负荷分别为 0.27 和 0.14 m³/(m² · d)。

该工程总投资为 3 932 万元,单位水量工程投资为 393 元/(m³ · d⁻¹),单位面积工程投资为 15 元/m²,项目运行费用为 0.05 元/m³(以 2010 年经济发展水平计)。

3.3.2 强化处理型塘-表工艺案例

临安污水处理厂尾水人工湿地占地为 13.7 hm²,设计处理规模为 6 × 10⁴ m³/d。设计进水水质为一级 B 标准,出水水质达到地表水Ⅲ类水质标准,出水排入青山湖。该湿地系统的流程可以归为“塘-表”工艺,各工艺单元为钢筋混凝土结构,属

于强化型塘-表工艺。其工艺流程见图3。

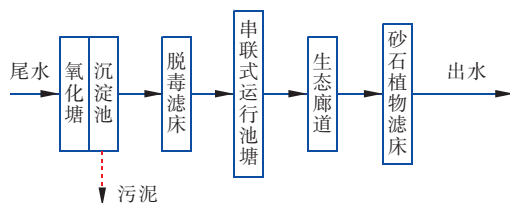


图3 临安污水处理厂尾水人工湿地工艺流程

Fig.3 Flow chart of constructed wetland terminal effluent treatment process of Lin'an WWTP

各单元主要设计参数如下：①稳定塘兼沉淀池。占地面积为 0.6 hm^2 ，水力停留时间为 2 h ，分两组并联，每组又分两个池串联运行，前池为氧化塘，塘中固定生物膜填料，上覆浮动湿地，强化接种氮循环微生物，微曝气；后池为漂浮植物兼沉淀池。②脱毒滤床。占地面积为 0.15 hm^2 ，水力停留时间为 1 h ，通过不同类型的植物来吸收污水中的重金属、氮磷营养盐以及有机物。③串联式多级运行池塘。占地面积为 3 hm^2 ，水力停留时间为 12 h ，通过布置生态浮床来强化污染物的去除。④迴转式多级串联生态廊道。占地面积约为 9 hm^2 ，水力停留时间为 18 h ，塘中种植大量大型挺水植物，结构与表面流人工湿地类似。⑤砂石植物滤床。占地面积约为 0.6 hm^2 ，分四组并联运行，每组双池串联，水力停留时间为 2 h ，主要滤除出水中带入的植物碎屑，并通过微生物作用将其分解。

该工程总投资为 1.3 亿元 ，单位水量工程投资为 $2167 \text{ 元}/(\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1})$ ，单位面积工程投资为 $949 \text{ 元}/\text{m}^2$ ，项目运行费用 $<0.1 \text{ 元}/\text{m}^3$ （以2008年经济发展水平计）。

3.3.3 塘-床组合工艺案例

深圳龙华污水厂尾水人工湿地占地为 4.3 hm^2 ，设计处理规模为 $2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。设计进水水质为一级A标准，出水水质达到地表水Ⅲ类水质标准，出水排入观澜河。其主要工艺流程如图4所示。

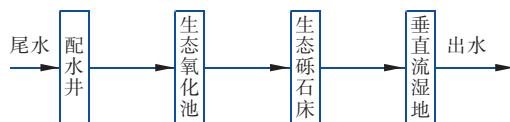


图4 龙华污水厂尾水湿地工艺流程

Fig.4 Flow chart of constructed wetland terminal effluent treatment process of Longhua WWTP

各单元主要设计参数如下：①生态氧化池。总容积为 2820 m^3 ，有效容积为 1680 m^3 ，水力停留时间为 2.0 h ，曝气气水比为 $3:1$ 。②生态砾石床。有效容积为 1500 m^3 ，有效深度为 2.5 m ，水力停留时间为 1.8 h ，采用活性钙填料和特殊填料，上层覆盖通气性土壤，种植草皮。③垂直流湿地。分为10个独立单元，总占地面积为 3.1 hm^2 ，水力负荷为 $0.64 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。

该工程总投资为 3935 万元 ，单位水量工程投资为 $1968 \text{ 元}/(\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1})$ ，单位面积工程投资为 $915 \text{ 元}/\text{m}^2$ ，项目运行费用为 $0.2 \text{ 元}/\text{m}^3$ （以2007年经济发展水平计）。该项目通过委托第三方运营，已稳定运行超过10年，处理效果良好。

3.3.4 （塘）-床-表组合工艺案例

慈溪市域污水处理一期工程尾水人工湿地分为东部和北部两个工程，占地面积分别为 10.2 、 18.5 hm^2 ，设计处理水量分别为 5×10^4 、 $10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。设计进水水质为一级B标准，出水水质达到一级A标准。其主要工艺流程如图5所示。

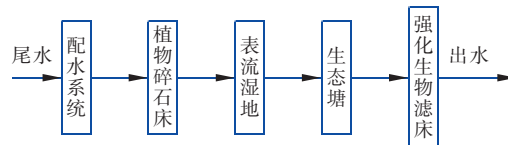


图5 慈溪市域污水处理一期工程尾水湿地工艺流程

Fig.5 Flow chart of constructed wetland terminal effluent treatment process of Cixi WWTP

以北部湿地工程为例，各单元主要设计参数如下：①多级植物碎石床。分为12组，每组6座，共设72座，总占地面积为 6 hm^2 ，水力负荷为 $1.65 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ，碎石粒径为 $25 \sim 30 \text{ mm}$ 。②表流湿地。共12座，总占地面积为 4.6 hm^2 ，水力负荷为 $2.17 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。③生态塘。共12座，总占地面积为 2.4 hm^2 ，有效容积为 35280 m^3 ，水力负荷为 $4.25 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。④强化生物滤床。分为12组，每组4座，共48座，总占地面积为 3.2 hm^2 ，水力负荷为 $3.16 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ，碎石粒径为 $15 \sim 20 \text{ mm}$ 。

该工程总投资为 4463 万元 ，单位水量工程投资为 $298 \text{ 元}/(\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1})$ ，单位面积工程投资为 $156 \text{ 元}/\text{m}^2$ ，项目运行费用为 $0.01 \text{ 元}/\text{m}^3$ （以2004年经济发展水平计）。

3.3.5 强化预处理组合工艺案例

深圳茅洲河燕川湿地占地 5.5 hm^2 ，设计处理

规模为 $1.4 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。设计进水水质为一级 B 标准,出水水质达到Ⅳ类水质标准,出水排入茅洲河。其主要工艺流程如图 6 所示。

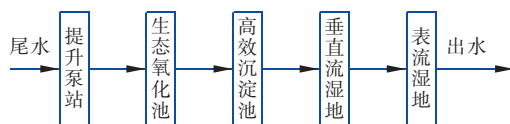


图 6 深圳茅洲河燕川湿地工艺流程

Fig. 6 Flow chart of Yanchuan constructed wetland terminal effluent treatment process in Shenzhen Maozhou River basin

各单元设计参数如下:①生态氧化池。总容积为 $1\,360 \text{ m}^3$,有效容积为 $1\,190 \text{ m}^3$,水力停留时间为 2 h。②高效沉淀池。分为反应区和沉淀区,容积分别为 146.6 和 762 m^3 ,设置 3 台隔膜泵(2 用 1 备)回流污泥,以增强混凝效果。③垂直流湿地。分为 16 个独立单元,总占地面积为 1.77 hm^2 ,水力负荷为 $0.79 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$,水力停留时间为 0.74 d,填料层厚度为 1.3 m,主要采用砂石填料。④表流湿地。占地面积为 1.6 hm^2 ,水深为 0.5 m,底坡为 0.1%。

该工程总投资为 8 889 万元,单位水量工程投资为 6 349 元/ $(\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1})$,单位面积工程投资为 1 616 元/ m^2 ,项目运行费用为 0.62 元/ m^3 (以 2017 年经济发展水平计)。

4 结语

① 水处理型人工湿地在我国的应用日益广泛,如何将人工湿地设计为仿自然型,最大化地发挥人工湿地的景观、生态效果,是尾水型人工湿地设计和实践过程中需要重点考虑的问题。

② 在用地紧张或气候寒冷的地区,可采用强化型塘-表工艺、强化预处理型工艺、以潜流湿地床为主的工艺,但其投资往往较高。在用地比较宽松、景观要求高的地区,可采用以塘、表单元为主的工艺,以最大化湿地的自然生态效果。

③ 由于人工湿地处于自然开敞的环境,因此,一方面需要对已建湿地的处理效果进行评估,总结经验,以指导后续人工湿地的设计和实践;另一方面,为在统一的衡量基准上进行数据的横向对比和分析,应建立耦合各种自然工况条件的定量化评估模型。

④ 随着新型投融资建设模式如 EPC、PPP 等在水环境治理项目中的应用,如何统筹考虑人工湿

地的设计、建设、运营,最大化其全生命周期的综合效益,是值得认真总结和思考的问题。同时,建议采用第三方托管等形式,确保人工湿地的长期稳定运行,充分发挥工程效益。

参考文献:

- [1] 刘亦凡,陈涛,李军. 中国城镇污水处理厂提标改造工艺及运行案例[J]. 中国给水排水,2016,32(16):36-41.
Liu Yifan, Chen Tao, Li Jun. Process analysis of upgrading and reconstruction of municipal wastewater treatment plants in China [J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(16):36-41 (in Chinese).
- [2] 郑兴灿. 城镇污水处理技术升级的挑战与机遇[J]. 给水排水,2015,41(7):1-7.
Zheng Xingcan. Opportunity and challenge in the municipal sewerage treatment technology upgrading [J]. Water & Wastewater Engineering, 2015, 41(7):1-7 (in Chinese).
- [3] Zhang T, Xu D, He F, et al. Application of constructed wetland for water pollution control in China during 1990 - 2010 [J]. Ecol Eng, 2012, 47:189-197.
- [4] 李小艳,丁爱中,郑蕾,等. 1990 - 2015 年人工湿地在我国污水治理中的应用分析[J]. 环境工程,2018,36(4):11-17,5.
Li Xiaoyan, Ding Aizhong, Zheng Lei, et al. Application of constructed wetlands for water pollution treatment in China during 1990 - 2015 [J]. Environmental Engineering, 2018, 36(4):11-17,5 (in Chinese).



作者简介:魏俊(1982-),男,江西萍乡人,硕士,高级工程师,主要研究方向为水环境治理。

E-mail:wei_j@ecidi.com

收稿日期:2018-06-27