

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.16.010

# 双碳目标下城镇污水处理厂的绿色市政理念应用实践

宋瑞平<sup>1</sup>, 陶如钧<sup>2</sup>, 李智行<sup>2</sup>, 周文明<sup>2</sup>, 赵立佳<sup>2</sup>

(1. 中国农业大学 资源与环境学院, 北京 100193; 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:** 仙居县污水处理厂二期工程是台州市“五水共治”重点工程,采用“预处理+二级生化处理+深度处理+人工湿地+消毒处理”多级污水处理组合工艺,出水水质可达到《台州市城镇污水处理厂出水指标及标准限值表(试行)》要求的准IV类水质标准。在能源回收与节能降耗方面,通过充分利用污水处理构筑物上部空间实施光伏发电技术实现厂内16%的电量自给,相应减少16%的外源CO<sub>2</sub>;利用人工湿地技术实现出水水质由一级A标准提升至准IV类标准的深度净化,所需电费和维护费在总运行成本中占比仅15%。而且人工湿地还是海绵城市建设的一部分,结合周边海绵厂建设可实现对降雨的有效消纳和循环利用。此外,该工程通过全面推行BIM技术及数字化应用实现了数字孪生、智慧管理,确保设计内容高效实施。该工程充分展示了双碳目标下绿色市政理念在城镇污水处理厂中的成功应用与实践。

**关键词:** 绿色市政设计理念; 人工湿地; 光伏发电

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2022)16-0061-05

## Application of Green Municipal Concept in Municipal Wastewater Treatment Plant to Reach Carbon Peak and Neutrality Goals

SONG Rui-ping<sup>1</sup>, TAO Ru-jun<sup>2</sup>, LI Zhi-xing<sup>2</sup>, ZHOU Wen-ming<sup>2</sup>, ZHAO Li-jia<sup>2</sup>

(1. College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China; 2. PowerChina Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou 311122, China)

**Abstract:** Xianju wastewater treatment plant phase II project is the key project of “five water co-treatment” in Taizhou City. The multi-stage combined process consists of pretreatment, two-stage biochemical treatment, advanced treatment, constructed wetland and disinfection. The effluent quality meets the quasi class IV limit specified in *Effluent Indicators and Standard Limits of Taizhou Urban Sewage Treatment Plant (Trial)*. In terms of energy recovery, energy saving and consumption reduction, 16% self-sufficiency of electricity in the plant was achieved and 16% exogenous CO<sub>2</sub> was correspondingly reduced by fully utilizing the upper space of sewage treatment structures to implement photovoltaic power generation technology. The constructed wetland realized the deep purification of effluent quality from the first class A standard to quasi class IV standard, and the electricity and maintenance cost only accounted for 15% of the total operating cost. In addition, constructed wetlands were also a part of sponge city construction, which effectively accepted and recycled rainfall combined with the construction of

通信作者: 李智行 E-mail: lizhixing@zju.edu.cn

surrounding sponge factories. The project realized digital twinning and intelligent management through the comprehensive implementation of BIM and digitalization technology to ensure the efficient implementation of the design scheme. This project fully demonstrated the successful application and practice of green municipal concept in municipal wastewater treatment plant under carbon peak and neutrality goals.

**Key words:** green municipal design concept; constructed wetland; photovoltaic power generation

纵观污水处理发展历程,技术与观念的变革对于改善水环境、推动行业发展具有重大意义。实现碳达峰、碳中和就是现今社会最为广泛而深刻的经济社会系统性变革。污水处理属于能源密集型行业,单位产值能耗高且主要排放甲烷、氧化亚氮等非二氧化碳温室气体,深度减排难度大<sup>[1]</sup>。因此,我国污水处理行业应当以实现碳中和目标为契机,开发绿色低碳和可持续新型工艺,达到减污与降碳协同增效的目的。仙居县污水处理厂二期工程即为浙江省污水处理绿色低碳运行的典型案例。

## 1 项目概况

### 1.1 水量与水质

仙居县污水处理厂二期工程位于仙居县杨府工业集聚区,设计规模  $11.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ , 占地  $14.7 \text{ hm}^2$ , 旨在保护永安溪流域水环境。本项目是台州市“五水共治”重点工程,服务范围包括仙居县中心城区、经济开发区、白塔工业园区、下各镇以及官路镇等。进水中 70% 为生活污水,30% 为工业废水,设计进水水质根据污水水质预测和污水厂一期 90% 频率实测进水水质,并参照“经济合理、适当富余”的设计原则最终确定;出水排至北侧内河永安溪,出水水质执行《台州市城镇污水处理厂出水指标及标准限值表(试行)》的准 IV 类水质标准(见表 1)。

表 1 设计进、出水水质

Tab.1 Design influent and effluent quality  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

| 项 目                 | BOD <sub>5</sub> | COD | SS  | TN      | NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N | TP  |
|---------------------|------------------|-----|-----|---------|---------------------------------|-----|
| 生活污水水质              | 160              | 300 | 180 | 40      | 30                              | 3   |
| 工业废水水质              | 300              | 500 | 200 | 40      | 30                              | 4   |
| 二期进水综合污水水质预测        | 202              | 360 | 186 | 40      | 30                              | 3.3 |
| 一期现状 90% 频率实测进水水质统计 | 125              | 365 | 117 |         | 34.7                            | 3   |
| 二期设计进水水质            | 140              | 380 | 180 | 40      | 35                              | 3.5 |
| 二期设计出水水质            | 6                | 30  | 5   | 12 (15) | 1.5 (2.5)                       | 0.3 |

### 1.2 工艺流程与参数

仙居县污水处理厂二期工程来水可生化性较好,但存在一定的水质风险,考虑其出水水质要求较高,采用“预处理+二级生化处理+深度处理+人工湿地+消毒处理”多级污水处理工艺(见图 1)。

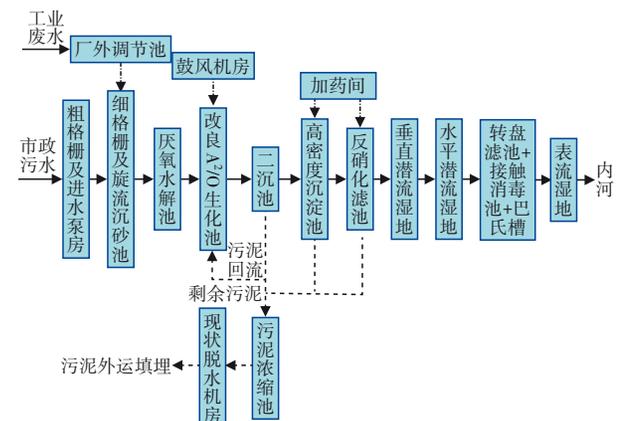


图 1 污水处理工艺流程

Fig.1 Flow chart of wastewater treatment process

#### ① 预处理单元

污水靠重力自流至污水厂,经格栅拦截漂浮物后,用离心泵提升至旋流沉砂池,进而去除污水中粒径  $> 0.2 \text{ mm}$  的无机颗粒及漂浮物。旋流沉砂池设计平均流量  $1667 \text{ m}^3/\text{h}$ ,设计最大流量  $2350 \text{ m}^3/\text{h}$ 。沉砂池出水导入厌氧水解池,改善污水可生化性能。厌氧水解池内置环流系统,水力停留时间  $6.21 \text{ h}$ 。

#### ② 二级生化处理单元

本工程进水污染物浓度不高,但脱氮除磷要求较高,因此在工艺选择上以强化脱氮除磷为主。综合考虑投资、运行及管理等因素,本工程二级生化处理单元采用改良 A<sup>2</sup>O 生化池+二沉池的组合形式,工艺流程见图 2<sup>[2-3]</sup>。改良 A<sup>2</sup>O 生化池总水力停留时间  $18 \text{ h}$ ,其中预缺氧池、厌氧池、缺氧池及好氧池 HRT 分别为  $0.5$ 、 $1.5$ 、 $6$  及  $10 \text{ h}$ ;污泥龄(以 MLVSS 计)  $10 \sim 20 \text{ d}$ ,内、外回流比分别为  $100\% \sim 300\%$  和

50%~100%。此外,好氧区采用微孔曝气器充氧,供气量  $127.5 \text{ m}^3/\text{min}$ ,气水比 9.2:1。二沉池采用国内外大中型污水处理厂常用的周边进水周边出水辐流式沉淀池,  $\text{HRT}=3.3 \text{ h}$ 。

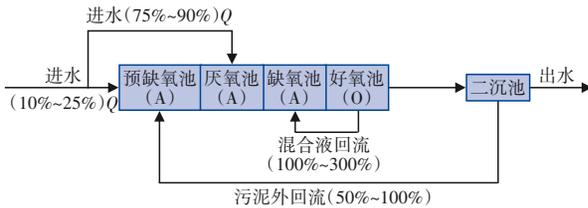


图2 改良A<sup>2</sup>/O工艺流程

Fig.2 Flow chart of improved A<sup>2</sup>/O process

### ③ 深度处理工艺

深度处理工艺采用“混凝沉淀+过滤”的组合形式。采用高密度沉淀池进一步去除污水中的污染物,混合反应区  $\text{HRT}=6.09\sim 4.69 \text{ min}$ 。采用反硝化滤池对高密度沉淀池出水进行过滤,进一步去除污水中的SS和TN,  $\text{HRT}=0.52 \text{ h}$ 。

### ④ 污泥浓缩

污泥浓缩至含水率为97%后进入已建成的污泥机械脱水系统,经带式浓缩脱水一体机脱水后进一步送至改性污泥储池,经加药改性后,进入厢式隔膜压滤机脱水至60%后填埋。

## 2 绿色设施及数字化技术

### 2.1 光伏发电技术

仙居县在浙江省属于太阳能资源较丰富区域,根据《太阳能资源评估方法》(QX/T 89—2008),属我国第三类太阳能资源丰富区域,太阳能资源在全国划分中属于可利用区域,水平面年太阳总辐射量为  $1312 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2$ ,有利于建设太阳能发电站。

本项目利用污水处理构筑物上部空间,包括进水泵房和沉砂池主体部分、调节池、改良A<sup>2</sup>/O生化池中的厌氧区和缺氧区、污泥泵房、二次提升泵房等区域,在其顶部混凝土盖板上设置光伏发电板,并采用“分块发电、集中并网、自发自用、余电上网”的模式进行分布式光伏发电<sup>[4]</sup>,建成后的光伏发电系统总安装容量约  $1.25 \text{ MW}_\text{p}$ (见图3)。

根据构筑物面积小但分布相对集中的特点,光伏发电单元由  $270 \text{ W}_\text{p}$  多晶硅光伏组件- $30 \text{ kW}$  型组串逆变器-交流汇流箱组成。其中,每24块光伏组件串联为一个支路,6个支路接入一台出口电压为  $0.4 \text{ kV}$  的组串逆变器,并在逆变成交流后汇流至交

流汇流箱。基于经济、安全及功能考虑,之后在低压并网模式下,将装机发电功率分为  $498 \text{ kW}_\text{p}$  和  $500 \text{ kW}_\text{p}$  两个部分,分别接入两台变压器的低压侧母线,设置两个低压并网节点,并网电压为  $0.4 \text{ kV}$ 。



a. 平面布置

b. 实景

图3 利用污水处理构筑物上部空间安装光伏发电系统

Fig.3 Photovoltaic power generation system installed in the upper space of sewage treatment structures

为减小初始投资、降低运行成本,光伏组件采用固定倾角安装方式,两排光伏组件方阵的南北中心间距为  $1.3 \text{ m}$ ,光伏组件最低点距屋面  $0.4 \text{ m}$ ,并朝向正南  $24^\circ$  倾斜。光伏组件固定支架为厂家定型预制、人工现场拼装的钢支架,并采用置于屋顶的独立混凝土基础抵抗风负荷引起的上拔力。结合光伏组件排列方式,光伏支架采用纵向横梁、横向檩条布置方案,由立柱、横梁及斜撑组成。在支架横梁之间,按照光伏组件的安装宽度布置檩条并固定于支架横梁上,用于直接承受光伏组件质量。光伏组件与檩条采用螺栓连接,并配加双面垫圈。

该光伏发电系统投产运行后,年平均上网电量约  $96\times 10^4 \text{ kW}\cdot\text{h}$ ,每年可节约电费约  $62.4 \text{ 万元}$ ,每年减排温室效应气体  $\text{CO}_2$  约  $781.4 \text{ t}$ 、 $\text{SO}_x$  和  $\text{NO}_x$  分别约  $5.95$  和  $2.02 \text{ t}$ 。

### 2.2 人工湿地技术

湿地公园位于污水厂北侧,东西长  $370\sim 450 \text{ m}$ ,南北长  $230\sim 350 \text{ m}$ ,合围面积约  $11 \text{ hm}^2$ ,是同时具备净化、景观、调蓄功能的大型湿地公园(见图4)。



图4 人工湿地公园俯视图

Fig.4 Top view of constructed wetland

根据人工湿地进、出水水质分析,本工程最终采用“垂直潜流人工湿地+水平潜流人工湿地+表流人工湿地”组合工艺进行尾水处理。为兼顾其生态公园属性,布局上首先利用公园内车行道路以及结合景观水系建设的表流湿地对潜流湿地进行一级分隔以满足景观要求,潜流湿地整体结构上呈不规则布置;其后在潜流湿地每个区块内采用隔断进行较为规则的二级分隔以兼顾工艺均匀配水需求,单格面积控制在800~1 500 m<sup>2</sup>,具体如图5所示。

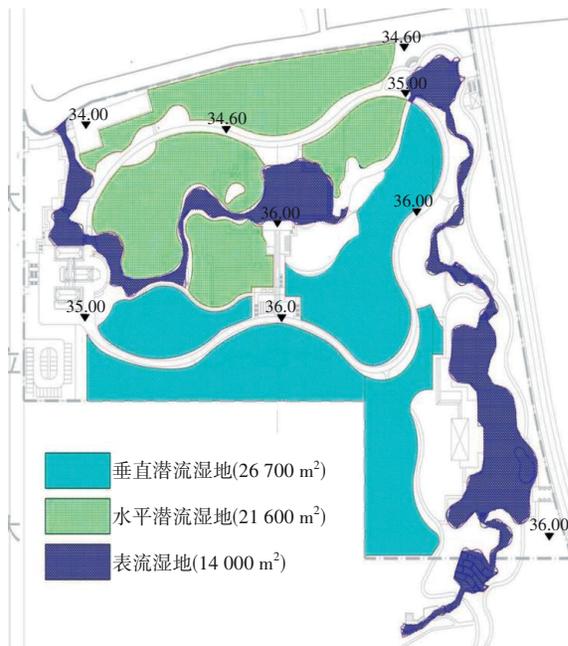


图5 三种人工湿地净化区域范围

Fig.5 Purification area of three types of constructed wetlands

污水厂区出水通过提升泵进入垂直流湿地公园的配水主管,并通过电动调节阀控制轮流进入6个垂直流湿地单元。垂直流湿地底部设置空气流通管,进水由上部间歇流入,每块湿地按进水10 min、停水50 min的配水频率控制;当其中一块湿地需要轮歇“落干”时,单个垂直流湿地按进水12 min、停水48 min频率控制。控制阀采用6套DN700手、电两用蝶阀,安装于阀门井内,由PLC控制。垂直流湿地可有效去除COD与氨氮,出水由底部连续排出,并通过收集主管进入水平潜流湿地配水渠,通过配水渠对数量众多的水平潜流湿地单元进行均匀配水。水平潜流湿地可有效去除COD、TN,运行方式为一侧进水、一侧出水,其中,20%出水作为表流湿地景观水的补水,80%出水经转盘滤池过滤、

接触消毒池次氯酸钠消毒处理后,通过配水渠重力自流进入25个表流湿地单元,表流湿地通过收集主管排入内河永安溪。

调蓄方面,人工湿地即是一套完整的海绵设施,对降水、地表径流都有较好的吸收能力和循环利用能力。本工程中湿地总高度为1.2 m,其中有效滤层高度为1.0 m,超高为0.2 m;湿地采用砖混HDPE防渗复合结构,侧墙采用钢筋混凝土、砖混、石砌等结构,底部设置100 mm厚细砂保护层,防渗结构采用二布一膜形式,防渗膜厚度为1.5 mm,土工布厚度为1.0 mm。此外,湿地公园内的配套设施也充分展示了海绵化技术手段。绿地采用下沉式绿地与植草沟相结合的形式,园内整体绿化率为43%。车行道路和广场铺装均采用透水铺装,而道路路缘石则采用过水路缘石(透水路缘石)。这不仅可在最大限度上对场地降雨进行就地消纳和循环利用,而且在一定程度上还有助于消纳周边降雨。

### 2.3 BIM技术及数字化应用

该工程是我国在污水处理厂工程中全面推行三维数字化设计的典型项目,通过在三维数字化协同设计、三维抽图、对外协作设计、设计交底及指导施工中全面实施BIM技术及数字化应用,显著提高了工程设计能力、工程建设质量和调度运行管理水平。基于BIM技术及数字化应用,该项目在设计阶段可实现BIM协同设计建模、碰撞检查、方案优化、自动提取工程量及三维出图等;在施工阶段则通过建立工程数字化平台系统,实现三维BIM模型的Web端轻量化发布及工程设计、施工、设备相关资料文档的在线管理功能,实时动态更新项目建设过程中产生的数据信息,实现工程资料的数字化移交以及基于BIM模型和数字化技术的全生命周期管理,实现数字孪生、智慧管理,进而有效解决传统二维设计中存在的问题,确保工程设计方案高效实施。

### 3 运行效果

2021年上半年污水厂二期平均处理水量为 $4.47 \times 10^4$  m<sup>3</sup>/d,进、出水水质见表2。可见,各项出水水质指标均稳定达到《台州市城镇污水处理厂出水指标及标准限值表(试行)》要求的准IV类水标准。

表2 实际进、出水水质

Tab.2 Actual influent and effluent quality  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 

| 项目 | BOD <sub>5</sub> | COD    | SS     | TN    | NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N | TP   |
|----|------------------|--------|--------|-------|---------------------------------|------|
| 进水 | 76.29            | 261.31 | 141.73 | 63.74 | 18.49                           | 3.63 |
| 出水 | 3.89             | 27.43  | 3.02   | 11.66 | 0.86                            | 0.22 |

#### 4 技术经济分析

本项目工程总投资33 823.85万元,其中工程费用27 506.31万元,其他费用4 687.58万元(其中建设用地费2 160.00万元),基本预备费965.82万元,建设期贷款利息664.14万元。

污水处理厂年运行成本为1 076.33万元,单位运行成本为0.66元/ $\text{m}^3$ ,仅为同类型污水厂单位运行成本的27%<sup>[5]</sup>,其中,电费0.20元/ $\text{m}^3$ 、药剂费(包括醋酸钠、PAC、PAM、次氯酸钠等)0.20元/ $\text{m}^3$ 、污泥处置费0.11元/ $\text{m}^3$ 、湿地维护费0.09元/ $\text{m}^3$ 、人工费0.06元/ $\text{m}^3$ 。

本工程运行成本大幅降低主要可归因于一些开源与节流措施:开源方面,光伏发电技术年发电量为 $96\times 10^4\text{ kW}\cdot\text{h}$ ,可实现厂内16%的电量自给,年用电量由 $586.71\times 10^4\text{ kW}\cdot\text{h}$ 降至 $490.71\times 10^4\text{ kW}\cdot\text{h}$ ,污水处理电耗0.30 $\text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$ ,低于国内平均水平(0.50 $\text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$ )并接近国内先进水平(0.20 $\text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$ );而在节流方面,人工湿地可将出水水质由一级A标准提高至准IV类标准,所需运行成本仅为湿地维护费0.09元/ $\text{m}^3$ 、电费0.01元/ $\text{m}^3$ ,在总运行成本中占比仅为15%。

#### 5 结语

仙居县污水处理厂二期工程实践表明,采用“预处理+二级生化处理+深度处理+人工湿地+消毒处理”的多级污水处理组合工艺建设城镇污水处理厂,出水水质能够稳定达到准IV类水标准。通过开源与节流措施,污水厂运行成本可大幅降低。

该工程是双碳目标下绿色市政理念在城镇污水处理厂中的一次成功应用与实践,但其也存在投资费用高的问题,建成后需长期有效运行才能实现经济与环境效益的双赢。上述问题需在项目初期做好远期规划,以避免建成后无法长期运行造成的投资浪费。

#### 参考文献:

- [1] 许俊仪,顾佰和. 水务行业如何应对碳中和带来的机遇与挑战?[EB/OL]. (2021-05-20) [2021-06-18]. [https://www.cenews.com.cn/opinion/plxl/202105/t20210520\\_975821.html](https://www.cenews.com.cn/opinion/plxl/202105/t20210520_975821.html).  
XU Junyi, GU Baihe. How does the water industry deal with the opportunities and challenges brought by carbon neutralization? [EB/OL]. (2021-05-20) [2021-06-18]. [https://www.cenews.com.cn/opinion/plxl/202105/t20210520\\_975821.html](https://www.cenews.com.cn/opinion/plxl/202105/t20210520_975821.html) (in Chinese).
- [2] 周文明,何钦雅,黄荣敏,等. 污水厂扩建及提标多段强化脱氮改良A<sup>2</sup>/O工艺工程实例[J]. 水处理技术, 2019, 45(12): 133-136.  
ZHOU Wenming, HE Qinya, HUANG Rongmin, et al. A WWTP expansion and upgrading example with improved A<sup>2</sup>/O process by multi-stage enhanced denitrification [J]. Technology of Water Treatment, 2019, 45(12): 133-136 (in Chinese).
- [3] 李智行. 新型生物脱氮工艺启动及运行性能研究[D]. 大连:大连海洋大学,2016.  
LI Zhixing. Start-up and Operation Performance of Novel Biological Nitrogen Removal Processes [D]. Dalian: Dalian Ocean University, 2016 (in Chinese).
- [4] GARCIA A Q, NISHIUMI N, SAITO A, et al. Economic, environmental and energetic analysis of a distributed generation system composed by waste gasification and photovoltaic panels [J]. Energies, 2021, 14(13): 3889.
- [5] 励梁栋,朱强. 深床反硝化滤池+外压式超滤在城镇污水处理厂地表准IV类出水标准的应用实践研究[J]. 环境科学与管理, 2018, 43(10): 118-122.  
LI Liangdong, ZHU Qiang. Application of deep-bed denitrification bio-filter and external pressure ultrafiltration in surface quasi IV effluent sewage treatment [J]. Environmental Science and Management, 2018, 43(10): 118-122 (in Chinese).

作者简介:宋瑞平(1977- ),女,河北衡水人,博士,讲师,主要从事水处理技术研究。

E-mail: rpsong423@126.com

收稿日期:2021-08-18

修回日期:2021-10-04

(编辑:孔红春)