

DOI: 10. 19853/j. zgjsps. 1000-4602. 2024. 05. 018

长江流域稻田湿地设计及运行效果

乐文彩¹, 张 玉², 刘 青¹, 鲁 潇², 刘月强¹

(1. 中国电建集团江西省电力建设有限公司, 江西 南昌 330000; 2. 江西省生态环境科学研究与规划院, 江西 南昌 330000)

摘 要: 为探究长江流域稻田湿地的设计要点及运行效果,以环巢湖面积约190 hm²的某稻田湿地为研究对象,开展了为期一年的运行监测。结果表明,稻田湿地对NH₄⁺-N、TN、TP和COD的年削减量分别为60.96、101.50、5.44和692.30 t,月均去除率分别为39.36%~77.25%、46.93%~73.74%、45.61%~72.44%、24.83%~43.15%,出水水质均满足《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)Ⅳ类标准,其中7月—9月出水水质能达到Ⅲ类标准,生态环境明显改善,生物多样性逐渐丰富。稻田湿地的净化效果随季节、运行水位和水稻种植生长情况而变化,在4月旋耕期和10月水稻收割期,稻田湿地以低水位运行,水质净化效果较差;在5月—9月水稻生长期,稻田湿地以中、高水位运行,随着温度升高,水质净化效果逐渐提高并稳定于年度最佳;11月—3月稻田湿地以中、高水位运行,水质净化效果较为稳定。

关键词: 稻田湿地; 长江流域; 净化效果; 水位设计; 生态修复

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2024)05-0111-05

Design of Paddy Wetland and Its Operation Performance in the Yangtze River Basin

LE Wen-cai¹, ZHANG Yu², LIU Qing¹, LU Xiao², LIU Yue-qiang¹

(1. PowerChina Jiangxi Electric Power Construction Co. Ltd., Nanchang 330000, China;

2. Jiangxi Academy of Eco-Environmental Sciences and Planning, Nanchang 330000, China)

Abstract: This paper monitored a paddy wetland with an area of about 190 hm² around Chao Lake for one year to explore the key design points and comprehensive operation performance of paddy wetland in the Yangtze River basin. The paddy wetland demonstrated the annual reduction of 60.96 t, 101.50 t, 5.44 t and 692.30 t, and the average monthly removal rates of 39.36%–77.25%, 46.93%–73.74%, 45.61%–72.44% and 24.83%–43.15% for NH₄⁺-N, TN, TP and COD, respectively. The effluent quality met the class Ⅳ limits specified in *Environmental Quality Standards for Surface Water* (GB 3838–2002), and the effluent quality from July to September reached the class Ⅲ surface water standard, indicating that the ecological environment was significantly improved, and the biodiversity was gradually enriched. The purification performance of the paddy wetland varied with the season, water level and rice planting and growth. During the rotary tillage period in April and the rice harvesting period in October, the paddy wetland ran at low water level, and the water purification performance was poor. During the rice growth period from May to September, the paddy wetland ran at medium and high water levels, and the water

purification performance gradually improved and reached the best with the increase of temperature. From November to March, the paddy wetland ran at medium and high water levels, and the water purification performance was relatively stable.

Key words: paddy wetland; Yangtze River basin; purification performance; water level design; ecological remediation

水稻是一种重要的水体富营养化污染修复作物,我国水稻种植面积达 $3 \times 10^7 \text{ hm}^2$,占耕地面积的22.2%。20世纪90年代以来,国内外有关稻田湿地的研究多集中于农地保护和农业发展,而今越来越多的学者采用水稻对不同类型富营养化水体的生态修复进行探索,均显示其具有显著的修复能力^[1-5],然而研究目前多处于试验示范阶段。相较于常规人工湿地,稻田湿地直接利用现有稻田资源,建设成本低、工艺简单、运行便捷,在长江流域生态修复中具有巨大的应用潜力^[6-7]。稻田湿地构建形式单一,影响因素复杂,需遵循水稻生长特性和生产基本规律,笔者以长江中下游某稻田湿地为研究对象,重点探讨稻田湿地的设计要点及运行效果,旨在为稻田湿地的推广应用提供技术参考。

1 稻田湿地设计要点

1.1 功能设计

巢湖被列为国家“三河三湖”治理重点,环巢湖湿地是长江中下游重要的生态湿地。随环巢湖地区城镇化和工业化程度的不断提高,直入巢湖的穿城河道南淝河水质长期为地表水劣V类,严重影响巢湖整体水环境质量,湿地生态系统破碎、生物多样性衰退,治理需求迫切^[8]。

本研究中的稻田湿地位于合肥市肥东县,南淝河入巢湖口以东区域,总面积约 190 hm^2 ,功能定位为南淝河旁路湿地净化系统,是集水质净化、湿地修复、生物多样性保护、蓄滞洪等多功能于一体的长江流域重要生态稻田湿地。

1.2 工艺设计

稻田湿地工艺流程为沉淀塘→进水渠道→稻田湿地→出水渠道,水力停留时间为2 d,主要种植水稻、荷花及其他水生植物,种植面积分别为 147.6 、 33.8 和 7.4 hm^2 ,并搭配种植5%的金鱼藻和5%的菹草。其中,水稻种植占比高达78.18%,品种选择普通单节高秆水稻,较普通水稻高15~30 cm,可提高湿地的运行水位和库容,提升净化能力。

1.3 水量、水质设计

稻田湿地的设计年处理水量为 $1.0 \times 10^8 \text{ m}^3$,根据温度可将稻田湿地分为低温(月平均气温 $< 5^\circ\text{C}$)、中温($5^\circ\text{C} \leq \text{月平均气温} \leq 15^\circ\text{C}$)和适温(月平均气温 $> 15^\circ\text{C}$)3种运行工况,日平均处理水量分别不得低于 3.84×10^4 、 7.68×10^4 和 $19.52 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。汛期,当南淝河上游由于降雨造成来水量明显增大时,湿地系统满负荷运行,未处理水量沿原河道下泄。

稻田湿地的主要水质净化指标为 NH_4^+-N 和TP,出水需满足《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)Ⅳ类标准。设计进水 NH_4^+-N 为 6.00 mg/L 、TP为 0.50 mg/L ,出水 $\text{NH}_4^+-\text{N} \leq 4.00 \text{ mg/L}$ 、TP $\leq 0.40 \text{ mg/L}$ 。当来水水质严重超标时,为维护湿地生态系统健康,将停止进水。

1.4 运行水位设计

稻田湿地的运行水位设计主要考虑水稻的需水规律和来水的水质变化规律。水稻种植一季,生长期为5月—10月,需根据水稻的生长规律合理控制水位。根据南淝河水质分析,其污染物浓度呈现春高、夏低、秋冬平缓的趋势。因此,在不影响水稻正常生长的前提下,为提高稻田湿地的水质净化功能,运行水位设计见图1。其中,4月上旬为旋耕期,4月中下旬为育苗期,5月上旬为插秧期,5月中旬至6月上旬为幼苗期,6月中下旬为分蘖期,7月为拔穗期,8月为抽穗期,9月为成熟期,10月为收割期。

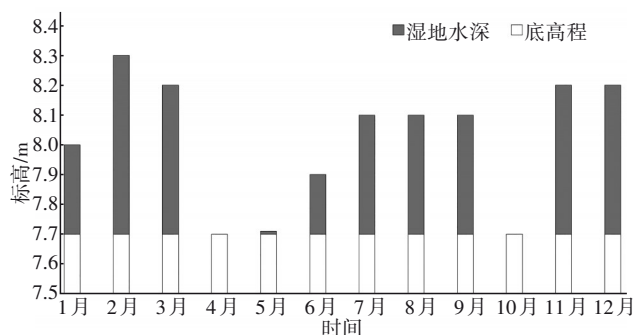


图1 稻田湿地内水位调控

Fig.1 Water level regulation in paddy wetland

2 稻田湿地运行效果分析

2.1 水温、pH、DO变化

稻田湿地的月均水温为6.62~32.20℃,平均值为19.79℃;月均DO浓度为6.71~12.23 mg/L,平均值为8.66 mg/L;湿地水温和DO随季节变化趋势明显,夏季水温偏高、DO低,冬季水温低、DO高。月均pH为6.91~7.75,平均值为7.31,略偏碱性。

2.2 综合净化效果

稻田湿地是由土壤、微生物和水稻构成的复合生态系统,通过水稻生长吸收利用、土壤吸附以及微生物降解作用净化污染水体,当水稻被收割后,其体内吸收的部分污染物也得到彻底转移去除^[9-11]。稻田湿地对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN、TP和COD的月均去除率分别为39.36%~77.25%、46.93%~73.74%、45.61%~72.44%、24.83%~43.15%,2022年的年处理水量约为 $0.6\times 10^8\text{ m}^3$,稻田湿地年削减 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN、TP、COD分别为60.96、101.50、5.44、692.30 t。稻田湿地整体运行效果良好,出水水质均满足GB 3838—2002的Ⅳ类标准,其中,7月—9月的污染物净化效果较好,出水水质均能达到Ⅲ类标准。

2.3 进、出水水质变化

图2为2022年湿地的进、出水污染物浓度变化。

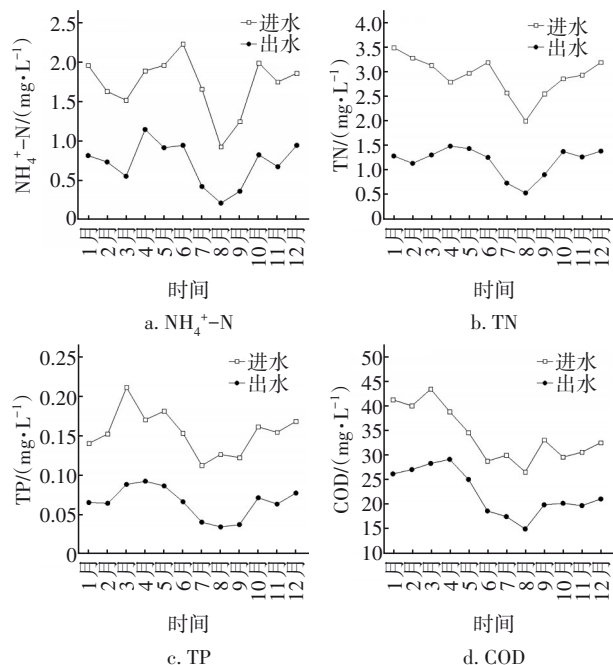


图2 进、出水污染物浓度变化

Fig.2 Change in the concentration of pollutants in influent and effluent

由图2可知,进水污染物浓度整体呈现春高、夏

低、秋冬平缓的趋势,出水各污染物浓度随季节、运行水位变化和水稻种植生长情况呈现一定规律,主要从水稻种植期(4月—10月)和非水稻种植期(11月—3月)进行分析。

2.3.1 水稻种植期

4月—6月为旋耕期和水稻育苗、插秧、幼苗、分蘖期,稻田湿地以低或中水位运行,出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN、TP、COD的月均浓度分别为0.91~1.14、1.24~1.47、0.067~0.093和18.73~29.11 mg/L。4月水稻种植前稻田湿地需旋耕,破坏了原有稳定的湿地土壤状态,使土壤吸附的污染物释放至水体,导致出水中各污染物浓度迅速升高。5月—6月,稻田湿地的生态环境逐渐恢复稳定,随着水稻的生长、分蘖以及其他挺水植物和沉水植物的萌发生长,需要吸收和利用大量的氮、磷同化为自身的结构组成物质,进而加速对污染水体中氮、磷和有机物的吸收,出水中各污染物浓度呈逐渐降低趋势^[12-13]。

7月—9月为水稻拔穗、抽穗、成熟期,稻田湿地保持高水位运行。随着水稻的持续生长及成熟,对氮、磷的吸收利用不断增强,与此同时,在稻田湿地高水位运行的淹没条件下,水稻根部同时存在根际好氧、兼氧和厌氧区域,且随着温度的持续升高,微生物活性不断提高,代谢速率加快,进而增强了稻田湿地对各污染物的净化效率^[14-15],出水中各污染物浓度达到年度最低并整体趋于稳定, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN、TP、COD的月均浓度分别为0.21~0.42、0.52~0.89、0.035~0.041、15.10~19.96 mg/L。此外,稻田湿地高水位运行能控制杂草生长,促进深水区沉水植物生长并降低浅水区丝状藻和蓝藻的生物量,利于鱼类栖息及繁衍。

10月为水稻收割期,稻田湿地以低水位运行,不仅便于水稻收割,且有利于菹草等沉水植物的冬季生长及水绵、青苔防控。出水各污染物浓度明显升高, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN、TP、COD的月均浓度分别为0.82、1.36、0.072、20.27 mg/L。其原因一是稻田湿地的低水位运行降低了湿地的物理净化能力;二是部分水生植物枯萎腐烂于水体后,其本身所含的氮、磷等物质会部分释放到水体中,使出水中各污染物浓度有一定幅度升高,因此在运行维护过程中需严格控制水稻及其他植物的收割管理^[16]。

2.3.2 非水稻种植期

11月—3月为非水稻种植期,月均水温为6.62~

16.98℃,低温环境对稻田湿地的净化效果影响较大,该时期湿地中仅少量菹草等沉水植物生长,为提升湿地的沉淀、过滤、吸附等物理净化能力,稻田湿地需保持中、高水位运行,以提高其在低温冬季的水质净化效果,同时提高土壤肥力,还能防止冰冻层对水生植物根茎的影响,利于鱼类栖息^[17]。该阶段出水中各污染物浓度相较于夏季略有升高但较为稳定, NH_4^+-N 、TN、TP、COD的月均浓度分别为0.55~0.94、1.12~1.37、0.064~0.089、19.80~28.29 mg/L。

2.4 效益分析

一般处理河水、湖水、尾水、农业退水等无需预处理设备的湿地投资和运行费用分别低于1260和0.20元/ m^3 ^[18]。稻田湿地于2021年完成建设和试运行,总投资为4.13元/ m^3 ,在水平流湿地建设成本的合理区间,运行费用为394万元/a,2022年的实际运行成本为0.066元/ m^3 ,包括人工费、稻田湿地植物维护费、设施检修维护费、运行电费、检测费和管理费等,较一般水平流湿地略低。

稻田湿地2022年的水稻总产量为99.07t,收割时剩余10%供鸟类觅食,稻谷作为饲料以单价0.80元/kg进行销售,收益7.93万元,秸秆用于生物质发电,实现了稻田湿地水稻的资源化利用。2022年观测到鸟类12目34科64种,调查到植物34科67属74种,植被总体覆盖率达79.51%,改变了本土物种生存空间狭窄的境况,湿地生物多样性逐渐丰富,形成了区域独特的稻田湿地自然风光,促进了长江流域稻田湿地及生态环境的保护和修复。

3 结论

① 稻田湿地总面积约190 hm^2 ,是集水质净化、湿地修复、生物多样性保护、蓄滞洪等多功能于一体的长江流域重要生态稻田湿地。2022年处理水量约为 $0.6\times 10^8\text{m}^3$, NH_4^+-N 、TN、TP和COD年削减量分别为60.96、101.50、5.44和692.30t,月均去除率分别为39.36%~77.25%、46.93%~73.74%、45.61%~72.44%、24.83%~43.15%,出水水质均满足GB3838—2002的Ⅳ类标准,其中7月—9月出水水质能达到Ⅲ类标准,整体运行效果良好。

② 稻田湿地的水位设计在保障湿地功能的基础上需考虑水稻生长特性和种植规律,出水中各污染物浓度随季节、运行水位变化以及水稻种植生

长情况呈一定规律。稻田湿地在4月旋耕期和10月水稻收割期以低水位运行,水质净化效果较差;在5月—9月水稻生长期以中、高水位运行,随着水稻的生长,湿地水质净化效果逐渐提升并稳定于年度最佳;11月—3月保持中、高水位运行,湿地水质净化效果较为稳定。

③ 稻田湿地2022年的实际运行成本为0.066元/ m^3 ,水稻总产量为99.07t,稻谷作为饲料销售,秸秆用于生物质发电,实现了水稻的资源化利用。周边区域生态环境明显改善,湿地生物多样性逐渐丰富,调查到鸟类64种、植物74种,植被总体覆盖率达79.51%,形成了区域独特的稻田湿地自然风光,促进了长江流域稻田湿地及生态环境的保护和修复。

参考文献:

- [1] WANG C, ZHENG S S, WANG P F, *et al.* Effects of vegetations on the removal of contaminants in aquatic environments: a review[J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2014, 26(4): 497-511.
- [2] 薛利红,杨林章.太湖流域稻田湿地对低污染水中氮磷的净化效果[J]. *环境科学研究*, 2015, 28(1): 117-124.
XUE Lihong, YANG Linzhang. Purification of water with low concentrations of N and P in paddy wetlands in Taihu Lake region [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2015, 28(1): 117-124 (in Chinese).
- [3] 华桂芬.稻田湿地系统对面源污染物的消纳性能研究[D].杭州:浙江大学,2017.
HUA Guifen. Function of Paddy Field Wetland to Absorb Non-point Source Pollutants [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017 (in Chinese).
- [4] 李松.稻田湿地处理农村生活污水脱氮除磷及其径流试验研究[D].杭州:浙江大学,2009.
LI Song. Study on Nitrogen and Phosphorus Removal of Rural Domestic Wastewater and Its Runoff in the Paddy Wetlands [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2009 (in Chinese).
- [5] 陶玲,彭格格,陈思媛,等.稻田湿地循环利用池塘养殖尾水效果[J]. *水生生物学报*, 2022, 46(10): 1466-1474.
TAO Ling, PENG Gege, CHEN Siyuan, *et al.* Effect of recycling fishpond wastewater in paddy wetland [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2022, 46(10): 1466-1474

- (in Chinese).
- [6] HAMA T, AOKI T, OSUGA K, *et al.* Reducing the phosphorus effluent load from a paddy-field district through cyclic irrigation [J]. *Ecological Engineering*, 2013, 54: 107–115.
- [7] XIONG Y J, PENG S Z, LUO Y F, *et al.* A paddy eco-ditch and wetland system to reduce non-point source pollution from rice-based production system while maintaining water use efficiency [J]. *Environmental Science Pollution Research*, 2015, 22(6): 4406–4417.
- [8] 杨棠武, 康晓光, 陈浩, 等. 合肥市肥东县十八联圩湿地修复规划[J]. *湿地科学与管理*, 2020, 16(4): 16–19.
- YANG Tangwu, KANG Xiaoguang, CHEN Hao, *et al.* Shibalianwei wetland restoration planning in Feidong County, Hefei City [J]. *Wetland Science & Management*, 2020, 16(4): 16–19 (in Chinese).
- [9] LI X, LI Y Y, LV D Q, *et al.* Nitrogen and phosphorus removal performance and bacterial communities in a multi-stage surface flow constructed wetland treating rural domestic sewage [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 709(2): 136235.
- [10] 隗岚琳, 刘东升, 廖雪珂, 等. 垂直潜流人工湿地低温净化效果及其与微生物作用关系[J]. *环境科学学报*, 2021, 41(10): 4039–4048.
- KUI Lanlin, LIU Dongsheng, LIAO Xueke, *et al.* Low temperature purification performance and the microbial activity in the vertical subsurface flow constructed wetland [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021, 41(10): 4039–4048 (in Chinese).
- [11] JEONG K, MATTES N, CATAUSAN S, *et al.* Genetic diversity for mycorrhizal symbiosis and phosphate transporters in rice [J]. *Journal of Integrative Plant Biology*, 2015, 57(11): 969–979.
- [12] BEURA K, PRADHAN A K, GHOSH G K, *et al.* Root architecture, yield and phosphorus uptake by rice: response to rock phosphate enriched compost and microbial inoculants [J]. *International Research Journal of Pure and Applied Chemistry*, 2020, 21(19): 33–39.
- [13] 包晓哲, 马玉颖, 邹积祥, 等. 稻田生态系统中丛枝菌根真菌的研究进展[J]. *微生物学通报*, 2023, 50(1): 392–412.
- BAO Xiaozhe, MA Yuying, ZOU Jixiang, *et al.* paddy fields [J]. *Microbiology China*, 2023, 50(1): 392–412 (in Chinese).
- [14] 桂松, 侯君霞, 王逸超, 等. 菌剂强化耕作型稻田湿地净化重污染村庄河水效能研究[J]. *湖北农业科学*, 2022, 61(1): 61–66.
- GUI Song, HOU Junxia, WANG Yichao, *et al.* Bio-ecological coupling purification of cultivated wetland study on the characteristics of heavily polluted village water [J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2022, 61(1): 61–66 (in Chinese).
- [15] 何文寿, 李生秀, 李辉桃. 水稻对铵态氮和硝态氮吸收特性的研究[J]. *中国水稻科学*, 1998, 12(4): 249–252.
- HE Wenshou, LI Shengxiu, LI Huitao. Characteristics of ammonium and nitrate uptake in rice [J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 1998, 12(4): 249–252 (in Chinese).
- [16] 陈小弯, 田华川, 常军军, 等. 杞麓湖中河河口表流湿地净化河道污染水的效果及其微生物群落特征[J]. *生态环境学报*, 2022, 31(9): 1865–1875.
- CHEN Xiaowan, TIAN Huachuan, CHANG Junjun, *et al.* Purification efficiency for polluted river water and microbial community characteristics of a surface-flow wetland located at Zhonghe River estuary near Qilu Lake [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2022, 31(9): 1865–1875 (in Chinese).
- [17] YU B, LIU C L, WANG S Y, *et al.* Applying constructed wetland-microbial electrochemical system to enhance NH_4^+ removal at low temperature [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 724: 138017.
- [18] 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: 乐文彩(1993–), 女, 湖北荆门人, 硕士, 工程师, 主要研究方向为水生态修复技术。

E-mail: lewc_ep@163.com

收稿日期: 2023-06-15

修回日期: 2023-08-27

(编辑: 沈靖怡)