

环巢湖九联圩多塘湿地尾水组合处理工艺及净化效果研究

李振鑫^{1*}, 林圻壅², 杨长明^{2#}

¹安徽省水利水电勘测设计研究总院股份有限公司, 安徽 合肥

²同济大学环境科学与工程学院, 上海

收稿日期: 2025年12月2日; 录用日期: 2026年1月15日; 发布日期: 2026年2月11日

摘要

在“引江济淮”工程的指导下, 为削减入巢湖氮磷污染负荷, 本文设计由鱼塘改造成的前端稳定塘 + 曝气塘 + 好氧塘 + 厌氧塘 + 沉水植物塘 + 表流湿地的多塘湿地尾水处理工艺形成九联圩多塘湿地尾水生态净化系统, 利用该系统对主要包含合肥经济开发区污水处理厂尾水的丙子河河水进行净化。运行一段时间后, 总体上来说, 湿地进水COD_{Cr}、硝态氮、氨氮、总氮和总磷的浓度削减分别达14.3%、42.4%、70.1%、46.3%、35.7%, 总量削减分别达157.68 t·a⁻¹、280.67 t·a⁻¹、31.38 t·a⁻¹、354.78 t·a⁻¹和7.88 t·a⁻¹, 但出水叶绿素a相比进水增长了75.0%。对九联圩多塘湿地内各处理单元分别于正常工况和非正常工况(暴雨)下对尾水的处理效果进行分析, 发现曝气塘、好氧塘和表流湿地对尾水的综合处理效果最好, 沉水植物塘的暴雨抗冲击负荷能力最差。以上研究结果将为后续多塘湿地尾水处理技术提供一定的参考。

关键词

多塘湿地, 污水处理厂尾水, 鱼塘, 氮磷污染, 净化, 效果评价

Study on the Integrated Treatment Process and Purification Effect of Effluent from WWTP by the Jiulianwei Multi-Ponds Wetland of Around Chaohu Lake

Zhenxin Li^{1*}, Qiyong Lin², Changming Yang^{2#}

¹Anhui Survey & Design Institute of Water Resources & Hydropower Co., Ltd., Hefei Anhui

²College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 李振鑫, 林圻壅, 杨长明. 环巢湖九联圩多塘湿地尾水组合处理工艺及净化效果研究[J]. 世界生态学, 2026, 15(1): 54-65. DOI: 10.12677/ije.2026.151006

Received: December 2, 2025; accepted: January 15, 2026; published: February 11, 2026

Abstract

Under the guidance of the “Yangtze River to Huaihe River Diversion” project and in order to reduce the nitrogen and phosphorus pollution load into Chaohu Lake, this article designs a multi pond wetland tailwater treatment process that transforms fish ponds into front-end stabilization ponds, aeration ponds, aerobic ponds, anaerobic ponds, submerged plant ponds, and surface flow wetlands to form a Jiulianwei multi pond wetland tailwater ecological purification system. This system is used to purify the water of the Bingzi River, which mainly includes the tailwater from the sewage treatment plant in Hefei Economic Development Zone. After running for a period of time, overall, the concentrations of COD_{Cr} , BOD_5 , nitrate nitrogen, ammonia nitrogen, total nitrogen, and total phosphorus in the influent were reduced by 14.3%, 12.5%, 42.4%, 70.1%, 46.3%, and 35.7%, respectively, with a total reduction of $157.68 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ 、 $47.30 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ 、 $280.67 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ 、 $31.38 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ 、 $354.78 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ and $7.88 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$, but the chlorophyll a in the effluent increased by 75.0% compared to the influent. An analysis was conducted on the treatment effects of each treatment unit in the Jiulianwei multi-ponds wetland on tailwater under normal and abnormal conditions. It was found that aeration ponds, aerobic ponds, and surface flow wetlands had the best comprehensive treatment effects on tailwater, while submerged plant ponds had the worst resistance to impact loads. The above research results will provide some reference for us to transform fish ponds into multi pond wetlands in the future.

Keywords

Multi-Ponds Wetland, Wastewater Treatment Plant Effluent, Fish Pond, Nitrogen and Phosphorus Pollution, Purification, Effect Evaluation

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

引江济淮工程是国务院要求加快推进的全国 172 项重大水工程之一。安徽省在《引江济淮工程项目建议书》中提出：要针对性地采取治污、避污、截污、导污、控污等综合防治措施。治污措施主要包括城镇污水处理厂尾水导流工程，派河沿线截污导流工程是水质保护工程中体量最大、线路最长、实施最困难的子项。根据《合肥市派河沿线污水处理厂尾水截污导流工程》，为保护派河输水段水质符合Ⅲ类地表水要求，需对直排入派河的污水处理厂尾水采取截污导流措施，故需将原直排入派河的合肥经开区污水处理厂尾水采用管道导排入丙子河并最终排入巢湖以置换派河环境容量。研究发现，污水处理厂尾水水量大，总氮、总磷含量较高，碳氮比低，可生化性差，被视为河流与湖库富营养化和生态毒性等问题产生的原因之一[1]。考虑到巢湖对水质要求较高，不可将污水处理厂尾水直排入巢湖，故需采取深度处理措施。

当前对污水处理厂尾水进行深度处理的办法有生物膜法、物理化学法和人工湿地法等方法。生物膜法主要依靠微生物膜的代谢功能对尾水中的污染物进行处理，比较容易受到 pH 值、水温等环境因素的影响，抗冲击负荷能力弱；物理化学法处理效果比较稳定，但成本相对较高。相比于以上两种方法，人工湿地法虽然占地面积较大，但抗冲击负荷能力较强，且成本不高、能耗低，运行简便，对氮和磷的去

除效果好[2]。同时,采用人工湿地对城镇污水厂尾水进行处理,不仅能有效降低城镇污水厂尾水对水环境的损害,能对湿地出水进行回收利用或将其充当补充水源补充河湖生态用水以节约水资源,还能利用人工湿地提高环境生物多样性,从而实现“三水”的系统治理[3]。因此,在选择污水处理厂尾水深度处理工艺时,若占地面积不为工艺选择的主要限制性因素,则人工湿地法为首选工艺。

人工湿地发展自 20 世纪 50 年代,随后于 1974 年完整的人工湿地在德国建成[4]。1990 年,我国人工湿地系统正式进入应用阶段[5]。如今,人工湿地已被广泛运用于处理城市污水、农村污水、污水处理厂尾水、水产养殖尾水等,能够通过物理、化学和生物的单或综合作用有效降低污水中的化学需氧量(COD)、生化需氧量(BOD₅)、硝态氮、氨氮、总氮(TN)、总磷(TP)、悬浮物(SS)等污染物。

人工湿地按湿地水位和基质之间的相对高度可被分为表面流人工湿地[6]、水平潜流人工湿地[7]和垂直潜流人工湿地[8],其中水平潜流人工湿地和垂直潜流人工湿地合称潜流人工湿地[9]。不同人工湿地组合后所形成的人工湿地可被称为复合人工湿地[10]-[13],人工湿地(包括复合人工湿地)与其他污水处理工艺组合后所形成的人工湿地可被称为组合工艺人工湿地[14] [15],而多塘湿地为组合人工湿地中的一种。与单一的基础类型人工湿地相比,组合人工湿地和复合人工湿地的污水处理性能往往更好。不同于面积小、生物多样性低的普通人工湿地,多塘湿地拥有多个互相串联或并联的池塘单元可进行组合或复合,且总占地面积较大,具有水深较大、储水能力强、抗冲击负荷能力高等特点,更接近自然湿地,能为湿地对尾水中水质指标的净化效果和生物多样性状况的评估提供大量的信息[16]。

通过对人工湿地中植物、基质和微生物的研究,不仅有助于提高人工湿地对低污染水中污染物的去除能力,还能有效降低人工湿地占地面积,降低成本。植物是人工湿地的重要组成部分之一,在其生长过程中能利用其根系从湿地中吸收大量氮磷用以自身生长发育,同时能维持湿地系统的稳定性,为能净化水体中污染物的微生物和水生生物提供优良的生长环境,部分植物还具有一定的经济价值。Calheiros 等[17]利用生活污水对 14 种湿地植物进行了筛选,结果表明,菖蒲、薏米、风车草除磷效果最好,除氮效果最好的是菖蒲、象草。基质为人工湿地中另一重要组成部分,能为大型植物和微生物生物膜的生长提供支撑。不仅如此,基质还能通过吸收、吸附等方式去除等方式去除污染物。廖梦运等[18]研究发现基质对磷的吸附作用是湿地除磷的重要途径之一,稳定的进水氨氮浓度有助于湿地对氨氮的处理。在人工湿地中,微生物途径为低污染水氮去除的最主要途径[19]。

然而,在当前国内外研究之中,与使用占地面积较大的多塘湿地对污水处理厂尾水进行处理的相关研究较少。构建多塘湿地生态净化系统,不仅有助于地区生态环境状况的改善,还能利用多塘湿地处理污水处理厂尾水方面以及如何构建一个组成复杂、结构稳定、生态功能健全的近自然的湿地系统这一世界性的难题提供新的案例和思考。本文以九联圩多塘湿地为例,介绍了多塘湿地工艺在城市污水处理厂尾水处理中的应用,分析了各塘在尾水处理过程中发挥的作用,为未来多塘湿地建设提供参考。

2. 材料与方法

2.1. 总体工艺设计

本项目调查区域为丙子河河流湿地和九联圩多塘湿地,总体位于环巢湖地区西北部。

综合考虑派河环境容量置换、污水处理厂尾水深度处理和九联圩湿地改造的需求,设计利用圩区内河道、库塘、湖滩等湿地资源,构建九联圩多塘湿地尾水生态净化系统,将丙子河水通过进水涵闸导排至九联圩多塘湿地净化后,再排入巢湖,最终做到置换派河水环境容量的同时,提高入巢湖水体水质,减少入湖氮磷污染负荷。工艺流程如图 1,设计参数如表 1。

污水处理厂尾水处理湿地工艺的选择不能单考虑湿地对污染物的处理效果,应综合考虑湿地污染物

净化能力、湿地生态恢复效果、湿地工艺建设成本等多方面指标[20]。相比于潜流湿地，表流湿地除氮效果较差，但不需要建造构筑物，与自然湿地更相似，且建设成本低、维护方便，故先将九联圩多塘湿地总体设计为表流湿地并观察湿地污染物净化效果。基础类型人工湿地优缺点见表 2。

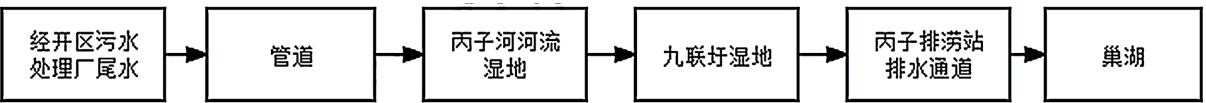


Figure 1. Process flow diagram of the multi-ponds wetland wastewater treatment system in Jiulianwei
图 1. 九联圩多塘湿地尾水处理工艺流程

Table 1. Design parameters of the multi-ponds wetland in Jiulianwei
表 1. 九联圩多塘湿地设计参数表

湿地类型		湿地面积/(hm ²)		处理水量 (m ³ ·s ⁻¹)	NH ₃ -N 削减量/(t·a ⁻¹) 需置换派河环境容量	COD _{Cr} 削减量/(t·a ⁻¹) 需置换派河环境容量
		分项面积	总面积			
表面流人工 湿地	河流湿地	67	160	5	84	583
	九联圩湿地	93.0				

Table 2. Comparison of different types of constructed wetlands and their advantages and disadvantages
表 2. 人工湿地类型及优缺点比较

湿地类型	水流方式	优点	缺点
垂直潜流人工湿地	基质内垂直流动	净化废水效果相对较好，不易受气候 变化影响，占地面积小	管理复杂，操控不便
水平潜流人工湿地	基质内水平流动	净化废水效果相对较好，不易受气候 变化影响，占地面积小	管理复杂，投资较高
表面流人工湿地	表面漫流	运行维护方便，建设成本低，对悬 浮物拦截效果好	除氮效果差，受季节变化影响大， 易堵塞，占地面积大

2.2. 九联圩多塘湿地组合工艺设计

九联圩多塘湿地为本研究的重点区域，现为 2814 鱼塘区，位于丙子河和派河入巢湖河口之间，总面积约 2310 亩。地势较低，地面高程在 8.0 m 左右，坑塘底高程在 6.0 m 左右。

九联圩多塘湿地以中间排涝沟为界，被划分为 3 个并联的净化单元，分区净化污水处理厂尾水。其中前端稳定塘面积约 18.5 hm²，湿地单元一(表面流湿地一)面积约 14.5 hm²，湿地单元二(表面流湿地二)约 23 hm²，湿地单元三区位于排涝沟西侧，包含曝气塘、好氧塘、厌氧塘、沉水植物塘和表面流湿地三，面积约 37 hm²。其分区及水流方向如图 2。

考虑到九联圩多塘湿地进水主要为含氮较高的经开区污水处理厂尾水，对经开区污水处理厂尾水氮成分表(见表 3)进行分析。分析结果为经开区污水处理厂尾水中主要成分为有机氮、硝酸氮和氨氮，故将九联圩多塘湿地分成前端稳定塘、湿地单元一、湿地单元二和湿地单元三区(见图 2)。前端稳定塘用作尾水预处理单元，具有来水稳定的优点。湿地单元三区为尾水净化示范区，其中曝气塘采用微纳米曝气技术，主要目的为代谢分解有机物，并使有机氮氨化；好氧塘主要进行硝化反应，将氨氮氧化；厌氧塘进行反硝化，通过投放藻类增加碳源，提高污水中的 C/N 以改善反硝化细菌的营养条件，使硝态氮在缺氧条件下被还原为 N₂；沉水植物塘中利用植物对污水进一步净化，设计进水流量为 2.0 m³·s⁻¹。湿地示范区各块鱼塘之间通过直接开埂、设置涵管或堰坝以保持连通，根据不同水深种植不同类型的挺水植物。湿

地单元一区和湿地单元二区设计进水流量为 $3.0 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ，作用为与湿地单元三区的污水净化效果相对照。
图 2 中蓝色线段代表排涝干沟，长约 1.8 km，沟口宽 10 m 左右，干沟底高程 4.6~5.8 m，为九联圩多塘湿地中唯一未清理过底泥的区域。

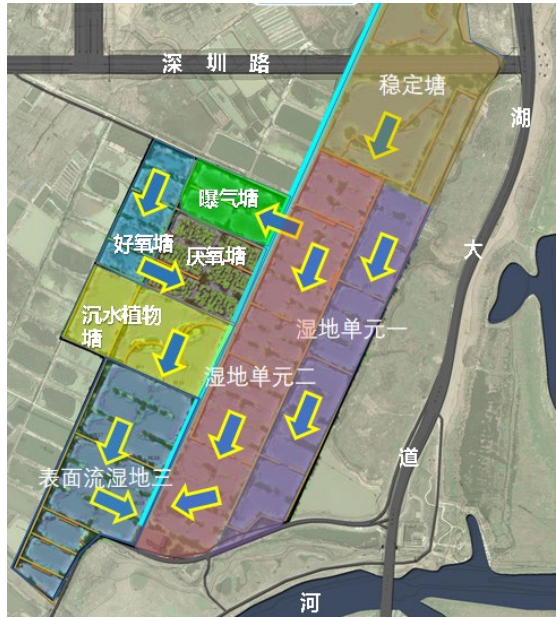


Figure 2. Zoning and water flow direction of the Jiulianwei multi-ponds wetland
图 2. 九联圩多塘湿地分区及水流方向

2.3. 采样点布设

将丙子河和九联圩多塘湿地作为尾水处理系统，于 2024 年 3 月(非暴雨期、平水期)进行了第一次采样，在 2024 年 5 月(暴雨期、丰水期)进行了第二次采样。通过以上指标采集方法进行实验。根据检测结果，对九联圩多塘湿地生态净化系统对尾水净化效果进行评估。
丙子河湿地和九联圩多塘湿地采样点布设情况分别如图 3 所示。

2.4. 水质指标的选取和测定方法

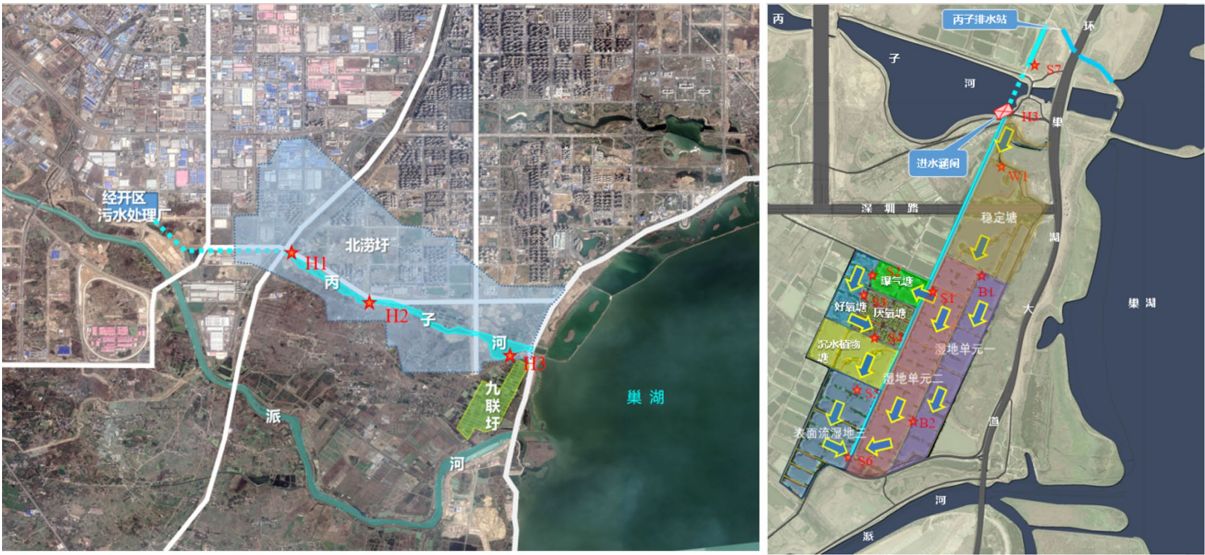
水质指标是用来评估水体质量和污染程度的量化参数和特征。本研究基于国内湖库富营养化严重的现状，确定污染物指标由化学需氧量、生化需氧量、硝态氮、氨氮、总氮、总磷和叶绿素 a 等 7 个指标组成。各指标的测定方法如表 3 所示。

3. 结果与讨论

3.1. 九联圩多塘湿地污水处理总效果及分析

表 4 为九联圩多塘湿地对丙子河来水(经开区尾水、沿河北涝圩污水厂尾水以及河水)总体净化效果。相比非暴雨期，暴雨期湿地进水水质明显变差，推测可能是地表径流带来面源污染所致。以正常工况计算，九联圩多塘湿地削减 COD_{Cr} 、 BOD_5 、硝态氮、氨氮、总氮和总磷的总量分别达 $157.68 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ 、 $47.30 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ 、 $280.67 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ 、 $31.38 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ 、 $354.78 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $7.88 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ (以进水流量 $5.0 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 计)，没有满足派河环境容量置换要求。

非暴雨期时，针对污水中 COD_{Cr} 和 BOD_5 ，九联圩多塘湿地发挥了一定的处理效果；出水中叶绿素 a



注：H1 经开区污水厂尾水入丙子河口(上游)、H2 丙子河中游、H3 丙子河下游和九联圩湿地进水涵闸。H3 丙子河下游和九联圩湿地进水涵闸、W1 九联圩多塘湿地稳定塘进水口、S1 左边湿地单元三进水口、S2 曝气塘和好氧塘交界、S3 好氧塘和厌氧塘交界、S4 厌氧塘和沉水植物塘交界、S5 沉水植物塘出水口、S6 多塘湿地总出水口、S7 九联圩多塘湿地出水过丙子河倒虹吸出水口、B1 湿地单元一进水口、B2 湿地单元一和湿地单元二交界。

Figure 3. Sampling point layout in the Bingzi River and Jiulianwei multi-ponds wetland.

图 3. 丙子河与九联圩多塘湿地采样点布设

Table 3. Water quality indicator data collection methods

表 3. 水质指标数据采集方法

序号	指标	数据采集方法
1	化学需氧量(COD _{Cr})	《水质化学需氧量的测定重铬酸盐法》(HJ 828-2017)
2	硝态氮(NO ₃ ⁻ -N)	《水质硝酸盐氮的测定紫外分光光度法(试行)》(HJ/T 346-2007)
3	氨氮(NH ₄ ⁺ -N)	《水质氨氮的测定纳氏试剂分光光度法》(HJ 535-2009)
4	总氮(TN)	《水质总氮的测定碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法》(HJ 636-2012)
5	总磷(TP)	《水质总磷的测定钼酸铵分光光度法》(GB 11893-89)
6	叶绿素 a	《水质叶绿素 a 的测定分光光度法》(HJ 897-2017)

含量大幅高于进水，富营养化程度增加；出水中硝酸盐氮、氨氮、总氮和总磷浓度较进水均有较大降低。出水中 COD_{Cr}、BOD₅ 和氨氮均满足《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002) I 类水水质指标标准；硝态氮满足《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002)中集中式生活饮用水地表水源地补充项目标准限值；总磷满足《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002)IV 类水水质指标标准；总氮未满足《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002)中 V 类水总氮指标标准；叶绿素 a 满足我国湖泊(水库)富营养化评价方法和分级技术规定中轻富营养标准。进出水 B/C 比没有明显变化。

暴雨期时，针对污水中 COD_{Cr} 和叶绿素 a，九联圩多塘湿地发挥了一定的处理效果；出水中 BOD₅、硝酸盐氮、氨氮、总氮和总磷浓度较进水均有较大降低。出水中 COD_{Cr} 和 BOD₅ 均满足《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002) I 类水水质指标标准；氨氮满足《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002) II 类水水质指标标准；硝态氮满足《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002)中集中式生活饮用水地表水源地补充

项目标准限值；总磷满足《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002) V 类水水质指标标准；总氮未满足《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002)中 V 类水总氮指标标准。叶绿素 a 满足我国湖泊(水库)富营养化评价方法和分级技术规定中轻富营养标准。出水 BOD_5/COD_{Cr} (B/C 比)较进水大幅下降。

可见不论是正常工况还是非正常工况，九联圩多塘湿地对污水的净化效果都比较好，且抗冲击负荷能力强，但仍未能将污水中的总氮、总磷进行有效的控制。需对九联圩多塘湿地各单元污染物处理效果进行分析，并完善九联圩多塘湿地生态净化系统，进一步增强各单元的单或综合净水能力。

Table 4. Overall wastewater treatment effectiveness of Jiulianwei multi-ponds wetland

表 4. 九联圩多塘湿地污水处理总效果

检测指标	单位	第一次采样(非暴雨期)			第二次采样(暴雨期)		
		进水	出水	去除率/(%)	进水	出水	去除率/(%)
COD_{Cr}	$mg \cdot L^{-1}$	7	6	14.3	18	11	38.9
硝态氮	$mg \cdot L^{-1}$	4.2	2.42	42.4	6.01	1.78	70.4
氨氮	$mg \cdot L^{-1}$	0.284	0.085	70.1	0.612	0.198	67.6
总氮	$mg \cdot L^{-1}$	4.86	2.61	46.3	7.33	2.21	69.8
总磷	$mg \cdot L^{-1}$	0.14	0.09	35.7	0.49	0.18	63.3
叶绿素 a	$\mu g \cdot L^{-1}$	8	14	-75.0	12	11	8.3

3.2. 不同湿地单元污水指标变化情况及分析

本课题组除了对九联圩多塘湿地系统总进水和出水水质进行分析外，还对多塘湿地系统不同功能单元的进出水水质进行了分析，以评价不同功能单元对尾水净化效果的贡献。

3.2.1. 不同单元对 COD_{Cr} 去除效果

由图 4 从左往右看，观察第一次采样结果，根据 H1~H3，丙子河中 COD_{Cr} 浓度整体呈现降低的趋势，最终去除率为 30.0%；根据 W1~S7，在进入九联圩多塘湿地稳定塘后，污水中 COD_{Cr} 浓度按水流方向整体呈现降低的变化趋势，在稳定塘、曝气塘、好氧塘、厌氧塘、沉水植物塘、表流湿地三和排涝干沟对 COD_{Cr} 的去除率分别为 16.7%、0.0%、-160.0%、38.5%、-62.5%、0.0%、53.8%；对比 B1 和 B2，污水

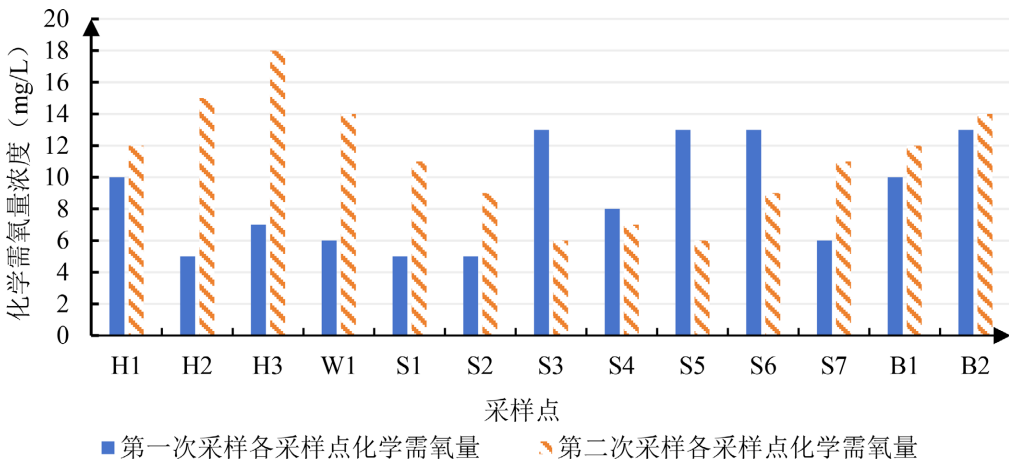


Figure 4. Chemical oxygen demand (COD_{Cr}) concentrations at each sampling point

图 4. 各采样点化学需氧量(COD_{Cr})浓度

中 COD_{Cr} 浓度经表面流湿地一和表面流湿地二处理后去除率为-30.0%。

观察第二次采样结果,根据 H1~H3,丙子河中 COD_{Cr} 浓度按水流方向不断增高,最终去除率为-50.0%;根据 W1~S7,在进入九联圩多塘湿地稳定塘后,污水中 COD_{Cr} 浓度按水流方向整体呈现降低的变化趋势,在稳定塘、曝气塘、好氧塘、厌氧塘、沉水植物塘、表流湿地三和排涝干沟对 COD_{Cr} 的去除率分别为 21.4%、18.2%、33.3%、-16.7%、14.3%、-50.0%和-22.2%;对比 B1 和 B2,污水中 COD_{Cr} 浓度经表面流湿地一和表面流湿地二处理后去除率为-16.7%。

结果分析表明,正常工况下,厌氧塘对 COD_{Cr} 的去除效果较好,好氧塘的处理效果最差;非正常工况下,好氧塘对 COD_{Cr} 的去除效果较好,表流湿地三的处理效果最差。

3.2.2. 硝态氮

由图 5 从左往右看,观察第一次采样结果,根据 H1~H3,丙子河中硝态氮浓度整体呈现降低的趋势,最终降幅为 4.5%;根据 W1~S7,在进入九联圩多塘湿地稳定塘后,污水中硝态氮浓度按水流方向整体呈现降低的变化趋势,在稳定塘、曝气塘、好氧塘、厌氧塘、沉水植物塘、表流湿地三和排涝干沟对硝态氮的去除率分别为 6.1%、18.7%、5.8%、6.6%、19.5%、0.0%、-24.7%;对比 B1 和 B2,污水中硝态氮浓度经表面流湿地一和表面流湿地二处理后降低了 57.0%。

观察第二次采样结果,根据 H1~H3,丙子河中硝态氮浓度按水流方向不断增高,最终增加了 17.2%;根据 W1~S7,在进入九联圩多塘湿地稳定塘后,污水中硝态氮浓度按水流方向整体呈现降低的变化趋势,在稳定塘、曝气塘、好氧塘、厌氧塘、沉水植物塘、表流湿地三和排涝干沟对硝态氮的去除率分别为 31.9%、3.5%、51.7%、33.7%、-22.6%、-6.6%、-9.9%;对比 B1 和 B2,污水中硝态氮浓度经表面流湿地一和表面流湿地二处理后降低了 62.6%。

结果分析表明,正常工况下,除了排涝干沟,各单元对硝态氮均有一定的处理效果;非正常工况下,好氧塘对硝态氮的去除效果最好,沉水植物塘对硝态氮的去除效果最差。

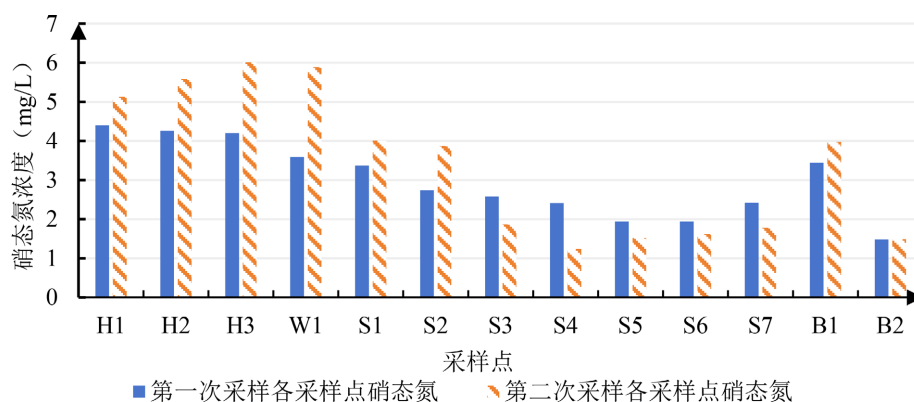


Figure 5. Nitrate nitrogen concentration at each sampling point

图 5. 各采样点硝态氮浓度

3.2.3. 不同单元对氨氮去除效果

由图 6 从左往右看,先观察第一次采样结果,根据 H1~H3,丙子河中氨氮浓度按水流方向先增高后降低,整体呈现增高的变化趋势,最终增加了 38.0%;根据 W1~S7,在进入九联圩湿地稳定塘后,污水中氨氮浓度按水流方向先增高后降低,整体呈现增高的变化趋势,在稳定塘、好氧塘、厌氧塘中增幅分别为 230.0%、4.5%、5.8%,在厌氧塘、沉水植物塘、表流湿地三和排涝干沟中得到了一定的处理,去除率分别为 6.3%、62.3%、22.5%和 15.0%;对比 B1 和 B2,发现污水中氨氮浓度经表面流湿地一和表面流

湿地二处理后反而上升了 38.8%，这与余俊霞[13]等的结论不符。

观察第二次采样结果，根据 H1~H3，丙子河中氨氮浓度按水流方向不断增高，最终增加了 114.7%；根据 W1~S7，在进入九联圩湿地稳定塘后，污水中氨氮浓度按水流方向整体呈现降低的变化趋势，在厌氧塘和沉水植物塘中增幅分别为 10.9%和 75.0%，在稳定塘、曝气塘、好氧塘、表流湿地三、排涝干沟中降幅分别为 11.4%、72.1%、14.4%、6.1%和 8.8%；对比 B1 和 B2，污水中氨氮浓度经表面流湿地一和表面流湿地二处理后降低了 29.9%。

结果分析表明，正常工况下沉水植物塘对氨氮的处理效果较好，稳定塘的处理效果最差；非正常工况下，曝气塘对氨氮的处理效果最好，表流湿地次之，沉水植物塘的处理效果最差。可见沉水植物塘对氨氮的抗冲击负荷能力较弱。

3.2.4. 总氮

由图 7 从左往右看，观察第一次采样结果，根据 H1~H3，丙子河中总氮浓度整体呈现降低的趋势，最终降幅为 3.8%；根据 W1~S7，在进入九联圩多塘湿地稳定塘后，污水中总氮浓度按水流方向逐渐降低，

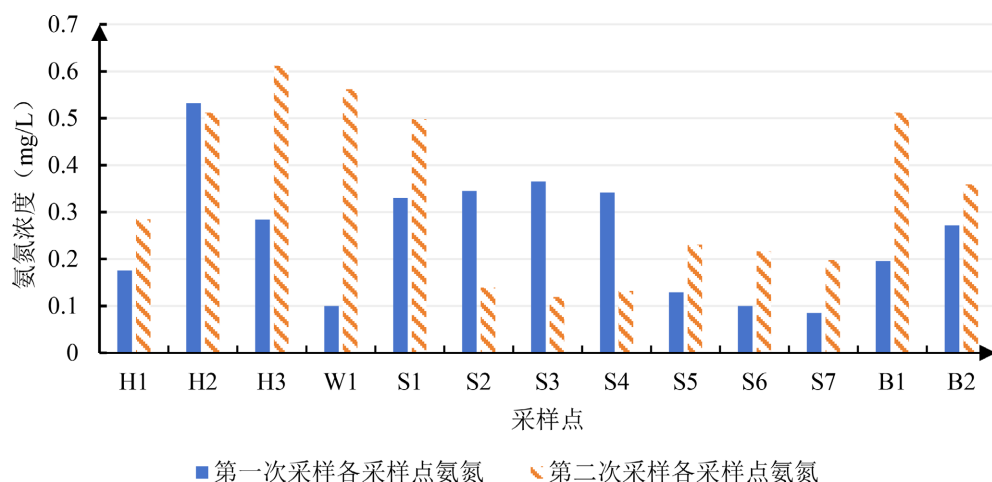


Figure 6. Ammonia nitrogen concentration at each sampling point.

图 6. 各采样点氨氮浓度

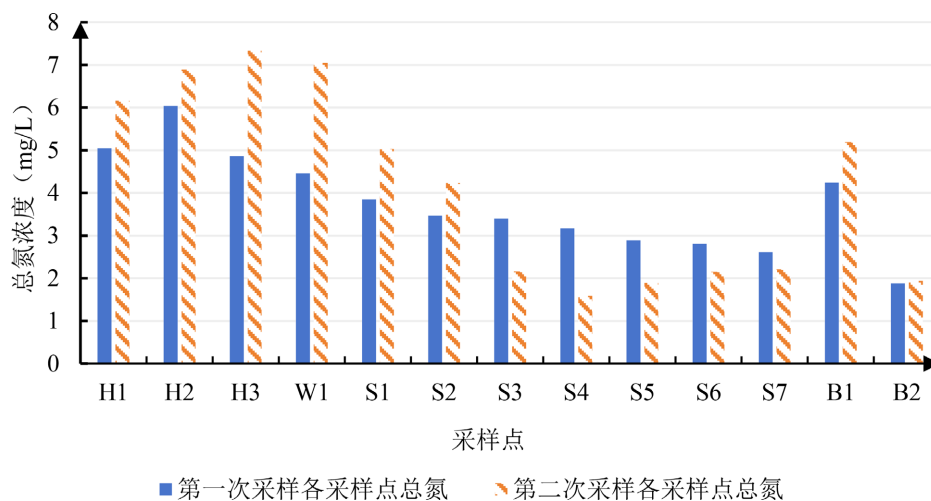


Figure 7. Total nitrogen concentration at each sampling point

图 7. 各采样点总氮浓度

在稳定塘、曝气塘、好氧塘、厌氧塘、沉水植物塘、表流湿地三和排涝干沟对总氮的去除率分别为 13.7%、9.9%、2.0%、6.8%、8.8%、2.8%、7.1%；对比 B1 和 B2，污水中总氮浓度经表面流湿地一和表面流湿地二处理后降低了 55.7%。

观察第二次采样结果，根据 H1~H3，丙子河中总氮浓度按水流方向不断增高，最终增加了 19.0%；根据 W1~S7，在进入九联圩多塘湿地稳定塘后，污水中总氮浓度按水流方向整体呈现降低的变化趋势，在稳定塘、曝气塘、好氧塘、厌氧塘、沉水植物塘、表流湿地三和排涝干沟对总氮的去除率分别为 28.7%、15.9%、48.9%、26.4%、-18.9%、-13.8%、-2.8%；对比 B1 和 B2，污水中总氮浓度经表面流湿地一和表面流湿地二处理后降低了 62.6%。

结果分析表明，正常工况下，各单元均对总氮有一定的处理效果，其中表流湿地一和表流湿地二的处理效果最好；非正常工况下，表流湿地一和表流湿地二的表现依旧最好，而沉水植物塘表现效果较差，再次证明沉水植物塘抗冲击负荷能力较差。

3.2.5. 总磷

由图 8 从左往右看，观察第一次采样结果，根据 H1~H3，丙子河中总磷浓度逐渐上升，最终增幅为 55.6%；根据 W1~B2，在污水进入九联圩多塘湿地稳定塘后，仅好氧塘对总磷有一定的去除效果，去除率达 35.7%，其他湿地单元对总磷并无明显处理效果。

观察第二次采样结果，根据 H1~H3，丙子河中总磷浓度按水流方向不断增高，最终增加了 69.0%；根据 W1~S7，在进入九联圩多塘湿地稳定塘后，污水中总磷浓度按水流方向先降低后上升，整体呈现降低的变化趋势，在稳定塘、曝气塘、好氧塘、厌氧塘、沉水植物塘、表流湿地三和排涝干沟对总磷的去除率分别为 38.5%、41.7%、35.7%、-11.1%、-60.0%、6.3%、-20.0%；对比 B1 和 B2，污水中总磷浓度经表面流湿地一和表面流湿地二处理后降低了 24.0%。

结果分析表明，正常工况下，好氧塘对总磷的处理效果最好；非正常工况下，稳定塘、曝气塘、好氧塘对总磷的处理效果较好，沉水植物塘的处理效果最差。

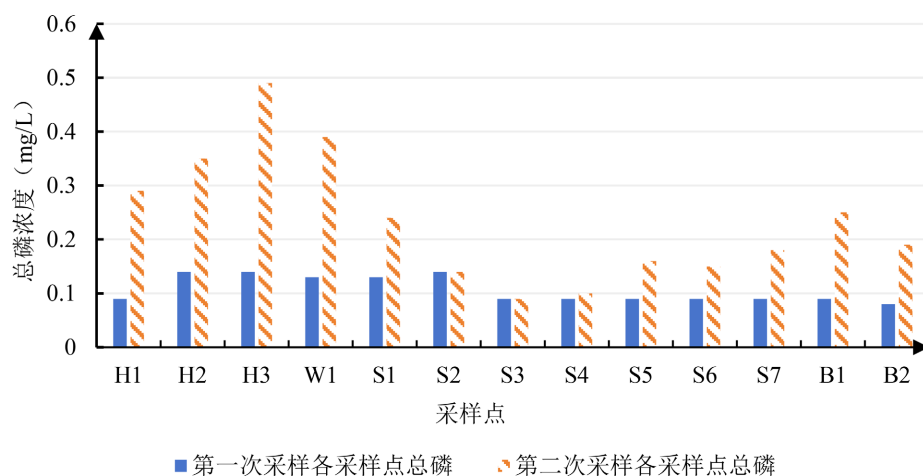


Figure 8. Total phosphorus concentration at each sampling point

图 8. 各采样点总磷浓度

3.3. 各处理单元处理效果分析与总结

正常工况下，稳定塘对 COD_{Cr} 有一定处理效果，对硝态氮的处理效果相对较好；曝气塘对总氮的处理效果相对尚可；好氧塘对总磷的处理效果相对较好；厌氧塘对氨氮、硝态氮、总氮有一定处理效果，

对 COD_{Cr} 处理效果相对较好；沉水植物塘对总氮和硝态氮有一定的处理效果，对氨氮、叶绿素 a 的处理效果较好；表流湿地三对氨氮有一定的处理效果；湿地单元一和湿地单元二对总磷有一定的处理效果，对总氮和硝态氮的处理效果较好；排涝干沟对氨氮和总氮有一定的处理效果，对 COD_{C} 的处理效果较好。非正常工况下，稳定塘、曝气塘和好氧塘表现最好，沉水植物塘表现最差。

厌氧塘中 COD_{Cr} 降低可能是因为反硝化细菌进行反硝化时利用了水体中的碳源等。各处 COD_{Cr} 浓度的增加可能是岸上有机体、土壤中腐殖质进入水体或钓鱼者投食等所导致，但水体的可生化性因此增加，为后续的反硝化反应提供了碳源。

由以上结果可以发现，多塘湿地进水进水中氮多以硝态氮的形式存在，可见硝态氮是影响总氮去除的关键因素，这与余俊霞[13]文中所提一致，且总氮的去除是由各单元协同实现的。

总的来说，综合考虑各单元对各污染物的处理效果以及主要污染物，判断曝气塘、好氧塘、湿地单元一和湿地单元二的处理效果较好。

4. 结论与展望

4.1. 结论

稳定塘 + 曝气塘 + 好氧塘 + 沉水植物塘 + 表流湿地的多塘湿地对城市污水处理厂尾水的处理效果一般，削减 COD_{Cr} 、 BOD_5 、硝态氮、氨氮、总氮和总磷的总量分别达 $157.68 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ 、 $47.30 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ 、 $280.67 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ 、 $31.38 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ 、 $354.78 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $7.88 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ (以进水流量 $5.0 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 计)，没有满足派河环境容量置换要求。其中稳定塘、曝气塘和表流湿地的污染物去除能力表现较好，沉水植物塘抗冲击负荷能力较差。

4.2. 展望

(1) 本研究在水质指标方面主要专注于传统污染指标，没有考虑新污染物，故在后续可补上对新污染物的检测以及湿地各单元对新污染物处理效果的分析。

(2) 关于多塘湿地生态净化系统，未来应当结合如高通量测序等技术，深入研究湿地污染物去除机理，为多塘湿地尾水净化系统净化效果的进一步提升提供更多理论依据。

参考文献

- [1] 杨艳红, 卢金忠, 谭丽琼, 等. 基于仿自然人工湿地的低污染水体碳氮协同调控优化措施研究[J]. 环境科学学报, 2023, 43(8): 153-164.
- [2] 兰培. 城市污水厂尾水深度处理技术研究[J]. 皮革制作与环保科技, 2023, 4(4): 155-156.
- [3] 闫春浩, 陈启斌, 王朝旭, 等. 城镇污水处理厂尾水人工湿地研究现状及展望[J]. 应用化工, 2023, 52(11): 3175-3178.
- [4] 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.
- [5] 宋昀达, 张丽丽, 苏本生, 等. 好氧颗粒污泥处理低碳氮比实际生活污水的运行效能[J]. 环境工程学报, 2020, 14(11): 2999-3006.
- [6] 史芑莱, 高升, 刘媛. 表面流湿地对低污染水处理的实际运用及效果评价[J]. 云南水力发电, 2022, 38(12): 25-27.
- [7] 白雪原, 姜海波, 阳涛, 等. 不同水力负荷条件下水平潜流人工湿地处理城镇污水处理厂尾水的效率及微生物特征研究[J]. 环境生态学, 2022, 4(9): 108-114.
- [8] 岳琛, 欧欢, 张雪婷, 等. 垂直潜流人工湿地对水产养殖尾水中抗生素和氮磷的去除及其影响因素[J]. 环境工程学报, 2023, 17(4): 1243-1251.
- [9] Li, Y., He, J., Li, Y., Sun, Z., Du, H., Wang, D., et al. (2023) Abundance, Characteristics, and Removal of Microplastics in the Cihu Lake-Wetland Microcosm System. *Water Science & Technology*, **88**, 278-287. <https://doi.org/10.2166/wst.2023.202>
- [10] Park, J.B.K., Craggs, R.J. and Tanner, C.C. (2018) Eco-Friendly and Low-Cost Enhanced Pond and Wetland (EPW)

System for the Treatment of Secondary Wastewater Effluent. *Ecological Engineering*, **120**, 170-179.
<https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.05.029>

- [11] 潘成荣, 陈建, 彭书传, 等. 复合型人工湿地对污水厂尾水的深度处理效果[J]. 中国给水排水, 2022, 38(13): 111-116.
- [12] 廖振奇, 韦科陆. 两级垂直流人工湿地处理农村生活污水的应用[J]. 轻工科技, 2024, 40(2): 133-136.
- [13] 余俊霞, 陈双荣, 刘凌言, 等. 复合人工湿地系统对低污染水总氮的净化效果及其微生物群落结构特征[J]. 环境工程, 2022, 40(1): 13-20.
- [14] 何凡, 许超, 刘军, 等. 三级稳定塘 + 人工湿地组合工艺在城镇污水处理厂尾水深度处理中的应用[J]. 中国资源综合利用, 2023, 41(11): 173-178.
- [15] 张傲醒, 黄锦楼, 姜姗, 等. 预曝气 + 垂直潜流人工湿地处理农村生活污水工程应用[J]. 环境工程学报, 2024, 18(3): 747-757.
- [16] 李丹, 郑丙辉, 储昭升, 等. 多塘湿地对降雨径流的截留特点[J]. 环境科学研究, 2022, 35(7): 1605-1614.
- [17] Calheiros, C.S.C., Rangel, A.O.S.S. and Castro, P.M.L. (2007) Constructed Wetland Systems Vegetated with Different Plants Applied to the Treatment of Tannery Wastewater. *Water Research*, **41**, 1790-1798.
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2007.01.012>
- [18] 廖梦运, 许俊, 方遥, 等. 人工湿地深度处理城市污水厂尾水的应用实例[J]. 节能, 2024, 43(1): 98-100.
- [19] 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.
- [20] 李丹, 郑丙辉, 储昭升, 等. 洱海流域多塘湿地工程综合评价[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2021(4): 8-16.