

王金鑫, 姜秀艳. 更严格排放标准下某产业园废水处理厂提标改造项目设计实例[J]. 净水技术, 2025, 44(12): 171–180.

WANG J X, JIANG X Y. Design case of a WWTP upgrading and reconstruction project under stricter discharge standard in an industrial park[J]. Water Purification Technology, 2025, 44(12): 171–180.

更严格排放标准下某产业园废水处理厂提标改造项目设计实例

王金鑫^{1,*}, 姜秀艳²

(1. 中国市政工程中南设计研究总院有限公司, 湖北武汉 430010; 2. 青岛市市政工程设计研究院有限责任公司, 山东青岛 266000)

摘要 【目的】江苏某机械电子园区污水处理厂处理能力不足, 进水水质复杂, 可生化性较差, 出水水质不达标。通过扩建和提标改造, 采用“调节池+高效沉淀+水解酸化+巴顿甫生化池+磁混凝沉淀+臭氧催化氧化+精密过滤+组合人工湿地”的处理工艺, 保障出水达到高排放标准, 其中化学需氧量(COD)、五日生化需氧量(BOD₅)、氨氮、总磷(TP)等主要出水指标需执行《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)中的Ⅳ类标准。【方法】本文通过小试验证了主要处理工艺的可行性, 结果显示: 磁混凝沉淀可降低悬浮物(SS)质量浓度至10 mg/L以下, 并为臭氧催化氧化创造有利条件; 当臭氧投加比为1.0:1.8时, “磁混凝沉淀+臭氧催化氧化”组合工艺对COD总去除率可达65%~73%, 其中磁混凝沉淀贡献率为8%~11%, 臭氧催化氧化贡献率为57%~62%。本文介绍了该工程的主要设计参数、特点及处理效果等。【结果】连续2年的运行数据证实, 处理工艺对该园区工业污水具有较强的适应性, 尤其在难降解有机物处理方面, 臭氧催化氧化单元对COD质量浓度<100 mg/L的进水去除率稳定在55%以上, 人工湿地对COD、TN、TP的生态去除率分别达31.2%、41.6%、66.7%。【结论】通过物化-生化-生态协同增效机制, 突破了传统工业污水厂处理瓶颈, 为高标准排放要求下的工业园区污水治理提供了“高效处理+生态缓冲”的创新模式, 兼具技术先进性与经济可行性, 具有显著的环境效益和行业推广价值。

关键词 机械电子废水 水解酸化 磁混凝沉淀 臭氧催化氧化 组合人工湿地

中图分类号: TU992 **文献标志码:** B **文章编号:** 1009-0177(2025)12-0171-10

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2025.12.020

Design Case of a WWTP Upgrading and Reconstruction Project under Stricter Discharge Standard in an Industrial Park

WANG Jinxin^{1,*}, JIANG Xiuyan²

(1. Central & Southern China Municipal Engineering Design and Research Institute Co., Ltd., Wuhan 430010, China;

2. China Qingdao Municipal Engineering Design and Research Institute Co., Ltd., Qingdao 266000, China)

Abstract [Objective] A wastewater treatment plant (WWTP) in a mechanical and electronics industrial park in Jiangsu Province faced challenges including insufficient treatment capacity, complex influent composition with poor biodegradability, and non-compliant effluent quality. Through expansion and upgrading, the treatment process of "regulation tank + high-efficiency sedimentation + hydrolytic acidification + Bardenpho system + magnetic coagulation sedimentation + ozone catalytic oxidation + precision filtration + combined constructed wetlands" is implemented to achieve stricter discharge standard. The main indices of effluent quality including chemical oxygen demand (COD), 5-day biochemical oxygen demand (BOD₅), ammonia nitrogen, and total phosphorus (TP) are required to meet class IV standard of the *Environmental Quality Standards for Surface Water* (GB 3838—2002). [Methods] Pilot tests verifies the feasibility of the main process: magnetic coagulation sedimentation reduced suspended solid (SS) mass concentration to 10 mg/L while creating favorable conditions for subsequent ozone catalytic oxidation. At an ozone dosing ratio of 1.0:1.8, the

[收稿日期] 2025-01-07

[通信作者] 王金鑫(1988—), 男, 高级工程师, 主要从事市政污水和工业废水治理研究设计等工作, E-mail: 771565459@qq.com。

integrated system achieves 65%–73% total COD removal, with magnetic coagulation contributing 8%–11% and ozone oxidation 57%–62%. Key design parameters and operational characteristics are detailed. [**Results**] Two-year operational data demonstrates strong adaptability to complex industrial wastewater, particularly in refractory organic treatment. The ozone catalytic oxidation unit maintained stable COD removal >55% for influent COD <100 mg/L. Constructed wetlands provides ecological removal rates of COD is 31.2%, TN is 41.6%, and 66.7% TP. [**Conclusion**] The physicochemical-biochemical-ecological synergy mechanism overcomes traditional industrial wastewater treatment limitations. The innovative "high-efficiency treatment + ecological buffering" model offers technical advancement and economic viability for industrial park wastewater management under stringent discharge requirements, demonstrating significant environmental benefits and industry-wide promotion potential.

Keywords mechatronic wastewater hydrolytic acidification magnetic coagulation and sedimentation catalytic ozonation combined constructed wetland

更严格排放标准一般是指在一级 A 排放标准基础上,对有机物、氮、磷、悬浮物(SS)等提出更高的要求,其中如天津 A 标准、山东 A 标准、浙江新建污水处理厂排放标准、湖南一级标准等^[1]。近年来,较多的城市污水处理厂进行提标改造,执行高排放标准,如山东省要求新建城市污水处理厂必须执行更高排放标准。相对于城市污水处理厂,国内工业废水处理厂因其进水水质复杂、难处理的特点,大部分执行一级 A 排放标准或者更低标准。但对于生态环境敏感的受纳水体,一级 A 标准远无法满足其生态需求。本文以江苏某机械电子产业园废水厂为例,探究更严格排放标准下污水厂“高效处理+生态缓冲”的技术模式,以期同类工业废水处理厂提标提供参考价值。

1 项目概况

江苏省某机械电子产业园以汽车电子产业、家用电子产业、基础材料与元器件产业、通用专用设备以及机械零部件制造生产为主。园区现状有 1 座工业废水处理厂,处理规模为 5 000 m³/d,原设计进出水水质如表 1 所示,采用“初沉池+水解酸化池+缺氧-好氧(AO)生化池+二沉池+芬顿氧化+消毒”处理工艺,排水执行江苏省地方标准《化学工业主要水污染物排放标准》(DB32/939—2006)中的一级标准,尾水排入淮河入海水道。近年来,园区发展迅速,一批企业计划入驻机电产业园,导致园区废水处理量激增。现状废水厂尾水排放至淮河入海水道,江苏省淮安市对入海水道的环保要求日益提高,水质目标为Ⅲ~Ⅳ类,但近年来水道水质变差趋势明显,部分水质指标超标严重。现有废水处理厂处理规模、出水水质已远不能满足废水处理和环境保护需求,亟需进行扩建提标。

表 1 原设计进出水水质

Tab. 1 Original Design of Influent and Effluent Quality

指标	进水/(mg·L ⁻¹)	出水/(mg·L ⁻¹)
五日生化需氧量(BOD ₅)	350	20
化学需氧量(COD)	500	80
SS	400	70
总磷(TP)	8	0.5
氨氮	45	15

2 设计进出水水质及工艺流程

2.1 设计进出水水质

该废水厂提标扩建总规模为 2×10⁴ m³/d,收纳的废水包含机械加工废水、电子元器件生产废水等,各类污水水质水量不同且较为复杂。园区各企业采用一企一管的形式将废水输送至园区废水厂,接管标准执行《电镀污染物排放标准》(GB 21900—2008)表 2 标准,pH、COD、SS、氨氮等执行《污水排入城市下水道水质标准》(GB/T 31962—2015)。现状进水部分指标未达到原设计进水水质标准,但考虑到新纳企业进水水质存在不确定性,保持原设计进水水质标准不变。

为保障淮河入海水道水质,根据环保要求,该工程要求出水 COD、BOD₅、氨氮、TP 等主要指标执行《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)Ⅳ类水标准,总氮(TN)执行 10(12) mg/L 标准,其余指标执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)中的一级 A 排放标准。设计进出水水质如表 2 所示。

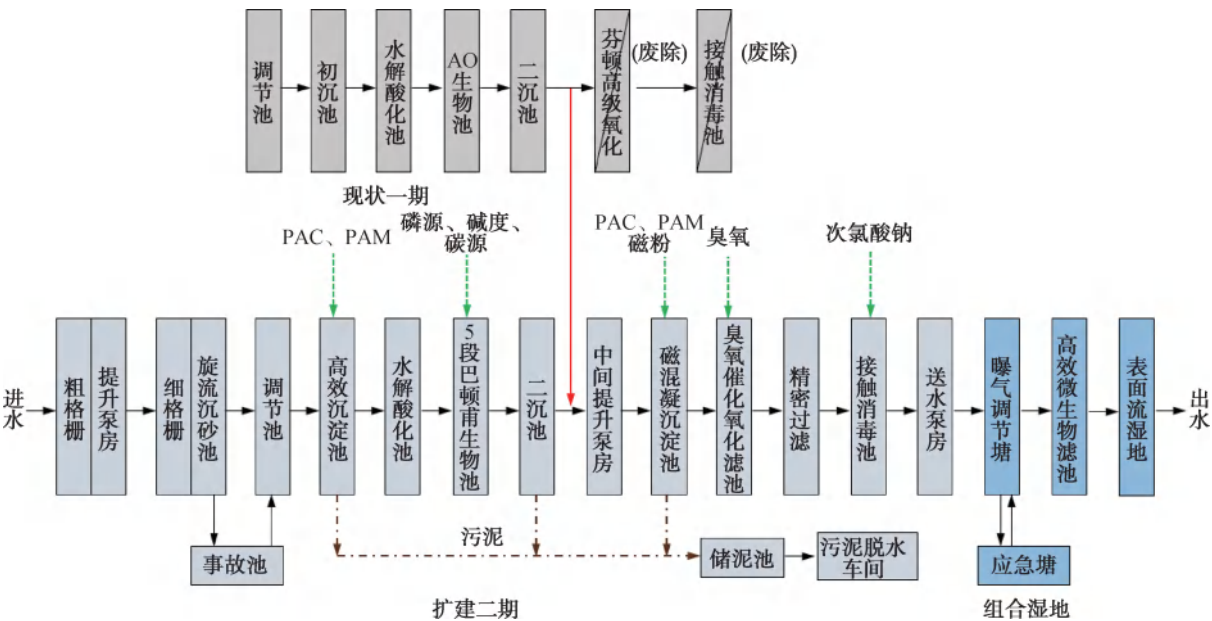
2.2 设计工艺流程分析

设计工艺流程如图 1 所示。一期现状芬顿氧化工艺药耗高,产泥量较大,处理效果较差,COD 去除率仅为 20%~30%,废除该工艺段,二沉池出水直接

表 2 设计进出水水质
Tab. 2 Design of Influent and Effluent Quality

项目名称	现状 95%保障率进水水质/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	现状最高进水水质/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	设计进水水质/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	设计出水水质/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)
BOD ₅	152	280	350	6
COD	425	511	500	30
SS	340	435	400	6
TP	4.5	7.8	8	0.3
氨氮	40	50	45	1.5
TN	58	72	70	10(12)

注:括号内数值为水温 $\leq 12\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的控制指标,括号外数值为水温 $>12\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的控制指标。



注:PAC—聚合氯化铝;PAM—聚丙烯酰胺。

图 1 工艺流程
Fig. 1 Process Flow

进入二期深度处理工艺,与二期进水同步处理后,进入组合人工湿地工艺,达标后排放。

项目进水水质复杂,且大部分污水进入园区污水厂前已在各企业内部进行了预处理,污水中大部分易降解的有机物已被去除,剩余大部分有机物为难降解物质。为充分提高污水的二级生化处理效果,需强化一级处理,提高废水可生化性,在设置调节池均衡进水水质水量的同时,设置高效沉淀池和水解酸化池。高效沉淀池能够有效降低部分未经预处理污水的SS浓度,同步去除部分COD,减轻二级生化的处理负荷。水解酸化池将难降解有机物分解成易降解有机物,将大分子有机物降解成小分子有机物,有效提高废水的可生化性,改善后续生化处理

的条件^[2]。生物处理段采用5段巴顿甫生化处理工艺,脱氮除磷效率较优,耐冲击负荷能力强,性能稳定。深度处理采用磁混凝沉淀与臭氧催化氧化处理工艺,与传统臭氧氧化技术相比,臭氧催化氧化技术是以提高臭氧利用效率、增强臭氧氧化能力为目的的高级氧化技术^[3],其氧化能力强,不产生污泥,运行费用相对较低。

2.3 小试验证

为验证深度处理工艺的处理效果,取现状一期二沉池出水水样进行磁混凝沉淀和臭氧催化氧化组合试验小试。臭氧催化剂采用多孔无机材料负载型催化剂,相对于传统催化剂,多孔无机材料负载型催化剂中金属粒子以固溶体的形式烧结于多孔无机材

料表面,溶出率低且抗磨性能好,使用寿命可以达到10年,根据以往的应用案例,COD去除率可以达到40%以上^[4-5]。

2.3.1 小试参数

磁混凝沉淀工艺,投加 PAC 100 mg/L、PAM 1 mg/L,混凝反应时间为 2 min,磁混反应时间为 2 min,絮凝时间为 4 min,沉淀时间为 20 min。

臭氧催化氧化工艺,臭氧投加比例按 COD 去除 60 mg/L 进行计量,反应时间为 1 h,催化剂均采用多孔无机材料负载型催化剂。

2.3.2 臭氧不同投加比例下组合试验结果

对比试验共设置 2 组,1#组水样直接采用现状二沉池出水进行臭氧催化氧化试验,2#组水样经磁混凝沉淀后进行臭氧催化氧化试验。2 组均设 6 个样品对应 6 种臭氧投加比例,分别为 1.0 : 1.0、1.0 : 1.2、1.0 : 1.5、1.0 : 1.8、1.0 : 2.0、1.0 : 2.5。经检测,二沉池出水水样 COD 质量浓度为 105 mg/L,SS 质量浓度为 20 mg/L,经磁混凝沉淀

后,COD 质量浓度降低至 94 mg/L,SS 质量浓度降低至 8 mg/L。试验结果如表 3 和图 2 所示。

表 3 臭氧不同投加比例下试验数据

Tab. 3 Experimental Data of Different Ozone Dosing Ratios

组号	臭氧投加比例	出水 COD/(mg·L ⁻¹)	COD 去除率
1#	1.0 : 1.0	83	20.95%
	1.0 : 1.2	77	26.67%
	1.0 : 1.5	67	36.19%
	1.0 : 1.8	60	42.86%
	1.0 : 2.0	59	43.81%
	1.0 : 2.5	58	44.76%
2#	1.0 : 1.0	60	36.17%
	1.0 : 1.2	52	44.68%
	1.0 : 1.5	40	57.45%
	1.0 : 1.8	36	61.70%
	1.0 : 2.0	36	61.70%
	1.0 : 2.5	35	62.77%

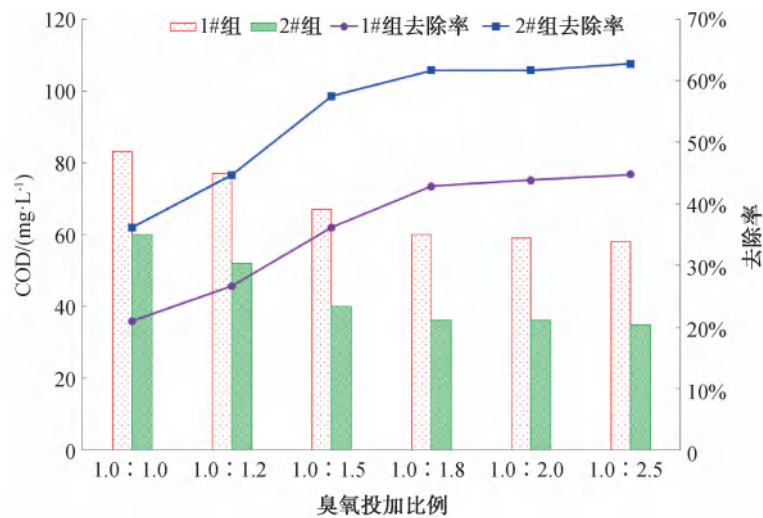


图 2 臭氧不同投加比例下试验数据

Fig. 2 Experimental Data of Different Ozone Dosing Ratios

由上述试验数据可知:(1)磁混凝沉淀能够有效降低 SS,出水 SS 可以保障达到 10 mg/L 以下,同时对 COD 具有一定的去除效果,去除率为 10% 左右;(2)臭氧投加量与 COD 去除率正相关,试验数据表明,随着臭氧投加比的增加,臭氧催化氧化工艺对 COD 的去除率逐步提高,但当臭氧投加比提升至 1.0 : 1.8 以上后,COD 去除率增加变缓,效果趋于稳定;(3)在同等臭氧投加比例下,2#试验组出水 COD 相对于 1#组明显降低,可以表明磁

混凝沉淀池降低 SS 后,能够有效提高臭氧催化氧化对 COD 的去除率。由表 3 和图 2 的试验结果可知,经磁混凝沉淀后,臭氧催化氧化对 COD 的去除效率提高 15%~20%。

2.3.3 臭氧相同投加比例下磁混凝沉淀和臭氧催化氧化组合试验结果

按照臭氧投加比为 1.0 : 1.8,取现状一期二沉池出水水样连续开展一周小试试验,试验结果如图 3 所示。

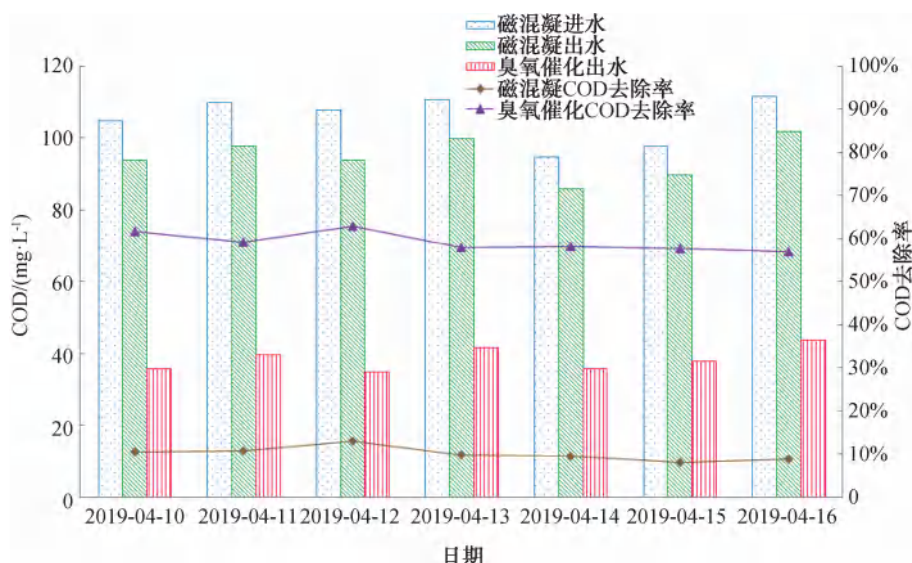


图3 臭氧相同投加比例下试验数据

Fig. 3 Experimental Data of Same Ozone Dosing Ratio

试验结果表明,磁混凝沉淀与臭氧催化氧化组合工艺对本项目污水处理具有较高的适用性,对有机物去除效率较为稳定,COD总去除率达到65%~76%,其中磁混凝沉淀对于COD去除率在8%~11%,臭氧催化氧化对于COD去除率在57%~62%。

综合小试试验结果,确定采用磁混凝沉淀与臭氧催化氧化工艺作为本项目深度处理工艺,臭氧投加比设计值为1.0:1.8,正常运行过程中可根据实际情况进行调整。

3 主要构筑物和建筑物设计参数

3.1 调节池

调节池主要作用为均衡污水水质水量,与进水巴氏计量槽合建。设计规模为1.5万 m^3/d ,总尺寸为长(B) \times 宽(L) \times 高(H)=44.3 m \times 30.3 m \times 8.4 m,停留时间为12 h。设潜水提升泵3台,单泵流量(Q)=350 m^3/h , H =3.5~7.0 m,功率(N)=11 kW。设推流器4台,叶轮直径(D)=1.8 m,转速(r)=57 r/min , N =3.1 kW。

3.2 水解酸化池

水解酸化工艺可提高 BOD_5/COD (B/C),降低后续生化处理单元的负荷,水力停留时间是其处理效果的重要影响因素。对于复杂水质的工业废水,在水解酸化池停留时间达到12 h以上才能起到较好的水解酸化效果^[6-7]。水解酸化池采用升流式,上升流速为0.84 m/h ,设计总尺寸 $B\times L\times H$ =

40.5 m \times 28.5 m \times 8.7 m,水力停留时间为12.5 h,共设6组,每组包括布水系统、内回流系统、排泥系统。布水系统采用可调节脉冲布水器,设计脉冲周期为120 s,其中充水时间为105 s,放水时间为15 s。内回流系统含有6台变频离心式潜污泵, Q =125 m^3/h , H =5 m, N =2.2 kW。

3.3 生物反应池

生物反应池采用5段巴顿甫工艺,具有良好脱氮除磷效果。共设置1座生物反应池,分2格,末端与污泥泵房合建。混合液回流比最大为300%,污泥回流比最大为100%,平均时水量下总水力停留时间为24.0 h,有效水深为6.5 m。厌氧区水力停留时间为1.5 h,安装6台潜水搅拌机;前缺氧区水力停留时间为6.0 h,安装2台潜水推流器;单格前好氧区水力停留时间为13.0 h,后缺氧区水力停留时间为2 h,安装2台潜水搅拌机;后好氧区水力停留时间为1 h。生化池可以实现多点进水,根据实际进出水水质调节各段进水水量,有效利用原水中碳源,减少药剂投加量,降低运行成本。

3.4 磁混凝沉淀池

磁混凝沉淀池在磁粉的协助下发生混凝沉淀反应,进一步去除SS的同时进行化学除磷,能够有效地降低水体浑浊度,促进臭氧的氧化效果。磁混凝沉淀池设计规模为2.0万 m^3/d ,分2格,混凝反应时间为2 min,磁混反应时间为2 min,絮凝时间为4 min,沉淀区表面负荷为9.6 $\text{m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$,平面尺

寸 $B \times L = 18.0 \text{ m} \times 16.2 \text{ m}$, 池深为 7.6 m 。采用中心传动浓缩刮泥机, $D = 7.5 \text{ m}$, 线速度为 2.5 m/s , $N = 1.5 \text{ kW}$ 。单格采用 1 台混凝搅拌器, $D = 1.1 \text{ m}$, $r = 70 \text{ r/min}$, $N = 2.2 \text{ kW}$; 1 台加载搅拌器, $D = 1.25 \text{ m}$, $r = 67 \text{ r/min}$, $N = 3.0 \text{ kW}$; 1 台絮凝搅拌器, $D = 1.85 \text{ m}$, $r = 36 \text{ r/min}$, $N = 4.0 \text{ kW}$ 。每格污泥回流采用 3 台螺旋离心泵, 2 用 1 备, $Q = 25 \text{ m}^3/\text{h}$, $H = 10 \text{ m}$, $N = 4.0 \text{ kW}$, 螺旋离心泵具有极强的防堵塞性能, 能够有效降低堵塞检修频率。设置 2 台磁分离机, $Q = 10 \text{ m}^3/\text{h}$, $N = 1.5 \text{ kW}$ 。

3.5 臭氧催化氧化滤池

臭氧催化氧化滤池设计规模为 $2.0 \text{ 万 m}^3/\text{d}$, 平面尺寸 $B \times L = 26.4 \text{ m} \times 22.1 \text{ m}$, 共计设置 10 格, 可独立运行。滤池内填充多孔无机材料负载型催化剂 (载体为活性氧化铝), 堆重为 $620 \sim 720 \text{ kg/m}^3$, 抗压强为 $0.4 \sim 15.0 \text{ kN}$, 滤料厚度为 2.5 m , 滤池中间设置廊道, 安置管道及空压反冲洗系统设备。反冲洗水洗强度为 $3 \sim 4 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 反冲洗时间为 $3 \sim 5 \text{ min}$; 反冲洗气洗强度为 $20 \sim 30 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 反冲洗时间为 $2 \sim 3 \text{ min}$, 10 d 反冲洗一次。

设置空压机 2 台, 1 用 1 备, $Q = 5.0 \text{ m}^3/\text{min}$, $P = 0.7 \text{ MPa}$, $N = 34.5 \text{ kW}$, 同时配置冷干机和过滤器系统, 设置 2 个 10 m^3 的空气储罐满足反冲洗气需求。池顶设置臭氧尾气破坏器 2 台, 1 用 1 备, 破坏能力为 70 kg/h , $N = 22.55 \text{ kW}$ 。

臭氧发生间设置 3 台臭氧发生器, 单台规格为 35 kg/h , 2 用 1 备, 臭氧最大投加比例为 $1.0 : 1.8$, 冷却水采用消毒前尾水。夏季时, 由于工业废水自身水温以及气温影响, 尾水温度经常高于 $35 \text{ }^\circ\text{C}$, 为保障臭氧发生器稳定运行, 臭氧发生间内配套 2 套冷水机, 制冷量为 317.8 kW , $N = 63.7 \text{ kW}$, 可将冷却水温度降至 $30 \text{ }^\circ\text{C}$ 以下。

3.6 精密过滤器

精密过滤车间设计规模为 $2.0 \text{ 万 m}^3/\text{d}$, 平面尺寸 $B \times L = 16.9 \text{ m} \times 11.85 \text{ m}$, 设置精密过滤器 2 台, 单台转鼓 $D = 1.3 \text{ m}$, 滤网孔径为 $15 \sim 20 \text{ }\mu\text{m}$, 滤速为 $10 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。配套反冲洗水泵 2 台, 功率为 4.0 kW , 流量为 $8 \text{ m}^3/\text{h}$, 扬程为 70 m 。

3.7 加药间

加药间建筑面积为 300 m^2 , 设置聚合氯化铁 (PFC)、PAM、乙酸钠、次氯酸钠 4 套药剂投加系统,

根据污水厂现状的运行数据, 污水厂部分时段进水存在碱度和磷不足的情况, 进水 TP 部分时段在 1 mg/L 以下, 为保障生物反应池的稳定运行, 预设磷酸氢二钠溶液和碳酸氢钠溶液投加系统, 分别投加于生物池厌氧区 and 好氧区, 必要时补充生化系统所需的磷和碱度。PFC 投药质量分数为 40% , 主要投加于高效沉淀池和磁混凝沉淀池, 投加量分别为 50 mg/L 和 30 mg/L 。PAM 投药质量分数为 2% , 主要投加于高效沉淀池和磁混凝沉淀池, 投加量均为 1 mg/L 。乙酸钠投药质量分数为 25% , 主要投加于生物池缺氧区, 二期最大投加量为 462 mg/L 。次氯酸钠有效氯质量分数为 10% , 有效氯投加质量浓度为 10 mg/L 。

3.8 污泥脱水车间

污泥进行浓缩、脱水至含水率 60% 及以下后外运处置。设计总干污泥量为 3970 kg DS/d , 污泥脱水车间设置叠螺浓缩机 2 台, 1 用 1 备, 处理能力为 $360 \sim 600 \text{ kg DS/h}$, $N = 1.5 \text{ kW}$; 配置叠螺浓缩机的进料螺杆泵 2 台, 1 用 1 备, $Q = 15 \sim 52 \text{ m}^3/\text{h}$, $P = 0.3 \text{ MPa}$, $N = 7.5 \text{ kW}$ 。设置污泥调理池 2 座, 交替运行, 调理池有效容积为 27 m^3 。设置超高压弹性压榨机 2 台, 1 用 1 备, 压滤面积为 100 m^2 , $N = 30.97 \text{ kW}$ 。配置高低压进料螺杆泵 4 台, 2 用 2 备, 高压螺杆泵 $Q = 1 \sim 13 \text{ m}^3/\text{h}$, $P = 1.2 \text{ MPa}$, $N = 5.5 \text{ kW}$, 低压螺杆泵 $Q = 13 \sim 36 \text{ m}^3/\text{h}$, $P = 0.3 \text{ MPa}$, $N = 5.5 \text{ kW}$ 。

3.9 曝气调节塘

曝气调节塘可增加尾水中溶解氧, 降解部分有机污染物, 将部分大分子有机物转变为小分子有机物, 增加尾水可生化性。曝气调节塘水力停留时间为 23.5 h , 总有效面积为 7035 m^2 , 设计最大水深为 3.5 m , 蓄水容积为 19597 m^3 。布置 4 台太阳能曝气设备, 通过活水复氧提升尾水中的溶解氧含量, 复氧设备平均复氧量为 30 kg/d , 溶解氧质量浓度为 $2 \sim 5 \text{ mg/L}$ 。

3.10 高效微生物滤池

高效微生物滤池技术采用多种新型合成多孔生物载体填料, 比表面积大, 接触均匀, 传质速度快, 滤池内微生物含量大, 对难降解有机物、色度、异味有较好的处理效果, 能够有效降低 COD 和氨氮。高效微生物滤池产生污泥量极小且无需反洗, 所产生的少量污泥可在后续进行定期清淤, 清淤周期在 $1 \sim 2 \text{ 年}$ 。高效微生物滤池包括布水区、滤床区和出水

区,其中滤床区设置 3 个处理区,各处理区填充多孔网泡微生物载体,多孔载体能够固定高效微生物。

设计 2 个池组,含 72 个处理单元,单个处理单元尺寸 $L \times B \times H = 6 \text{ m} \times 6 \text{ m} \times 4 \text{ m}$,填料层高度为 2 m,保护层高度为 0.8 m,有效水深为 3.5 m,池体占地面积为 $3\,799.4 \text{ m}^2$,有效容积为 $9\,072 \text{ m}^3$,水力停留时间为 10.89 h。设置多孔网泡生物载体 $5\,184 \text{ m}^3$,高效微生物制剂 B_1 型微生物制剂 $1\,000 \text{ kg}$, N_1 型微生物制剂 600 kg 。

3.11 高效表面流湿地

表面流湿地接近自然湿地,生物多样性高,植被类型与形态多样,对于工业尾水 COD 和氨氮的去除

率为 10%~20%,TN 和 TP 的去除率可以达到 50% 以上^[8-10]。高效表面流湿地设计水深为 0.8 m,水力停留时间为 30 h,有效面积为 $31\,930 \text{ m}^2$,表面负荷为 $0.66 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。湿地内设置多道导流墙,延长水流长度,防止局部形成短流,沟内铺设沸石、碎石等吸附能力强的介质填料,垄上种植挺水植物,强化植物摄取和根系微生物同化,确保出水达标。

4 运行效果及成本分析

4.1 运行效果分析

工程运行后,各工艺段污染物去除效果基本达到设计值,以 2023 年 10 月 15 日进出水水质为例,如图 4 所示。

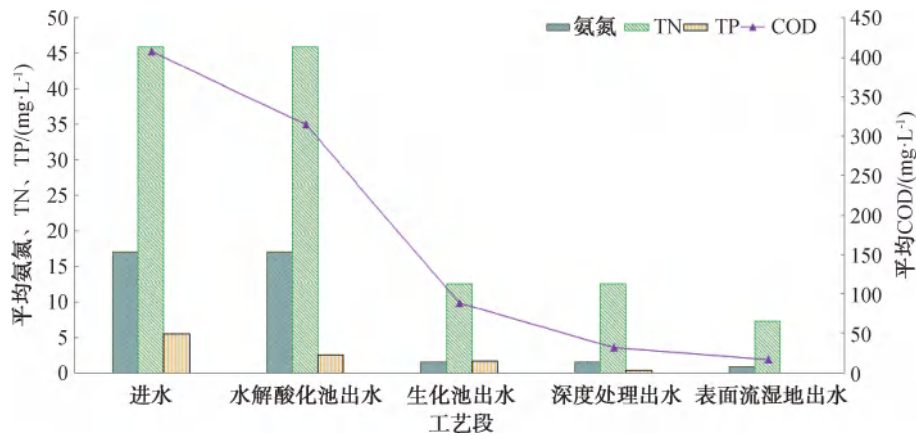


图 4 各工艺段运行效果

Fig. 4 Operation Effect of Each Process Section

由图 4 可知,高效沉淀池和水解酸化池能够有效地去除 COD,去除率可以达到 20% 以上,经检测,水解酸化池提高 B/C 15%~25%,提升效果较为明显。臭氧催化氧化工艺对于本项目难降解 COD 具有较强的去除率,其进水 COD 质量浓度为 88 mg/L ,出水质量浓度为 32 mg/L ,去除率达到 64%。组合湿地对 COD

和氨氮的去除率分别为 31.2% 和 40%,对 TN 和 TP 的去除率分别为 41.6% 和 66.7%。

工程建成后,已稳定运行 2 年多,人工湿地最终出水水质稳定达到高排放标准,夏季时大部分指标可达到Ⅲ类水标准,具体指标如表 4 及图 5~图 8 所示。

表 4 平均进出水水质
Tab. 4 Average Influent and Effluent Qualities

月份	平均进水水质/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)				污水厂平均出水水质/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)				湿地平均出水水质/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)			
	COD	氨氮	TN	TP	COD	氨氮	TN	TP	COD	氨氮	TN	TP
2023-07	446	17	29	3.5	24	1.0	8	0.22	18	0.4	5.6	0.10
2023-08	427	18	28	3.8	28	1.1	11	0.25	17	0.5	4.5	0.08
2023-09	468	22	33	3.5	30	1.2	10	0.31	20	0.7	6.0	0.15
2023-10	401	17	35	4.9	35	1.3	12	0.3	21	0.6	7.1	0.16
2023-11	356	17	32	3.7	39	1.2	12	0.28	24	0.6	7.5	0.13
2023-12	417	16	30	2.9	36	1.5	13	0.35	26	0.8	6.9	0.18

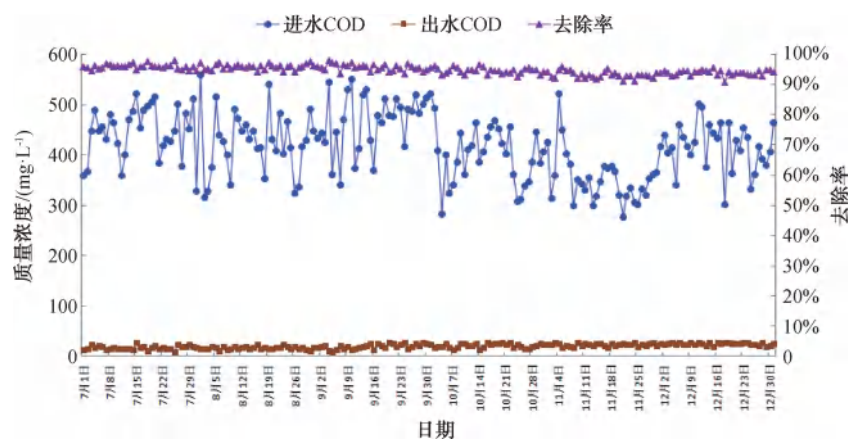


图5 进出水 COD 浓度及去除率

Fig. 5 Concentration and Removal Rates of COD in Influent and Effluent

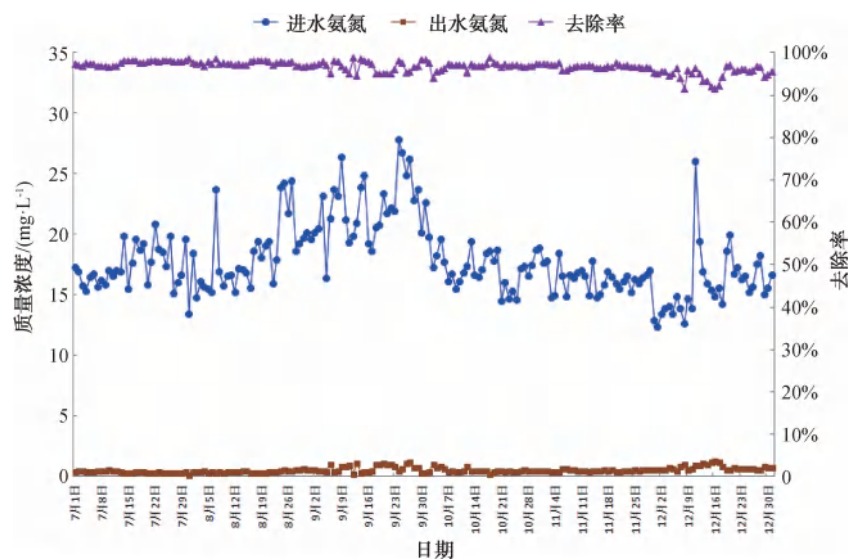


图6 进出水氨氮浓度及去除率

Fig. 6 Concentration and Removal Rates of Ammonia Nitrogen in Influent and Effluent

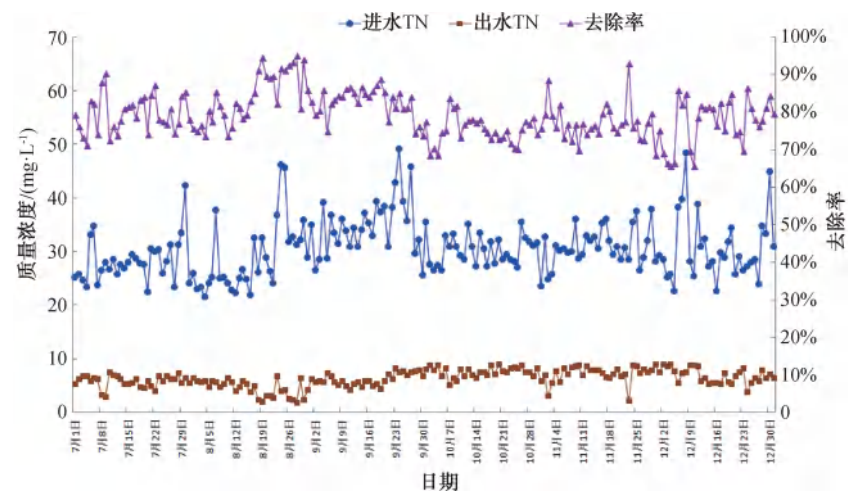


图7 进出水 TN 浓度及去除率

Fig. 7 Mass Concentration and Removal Rates of TN in Influent and Effluent

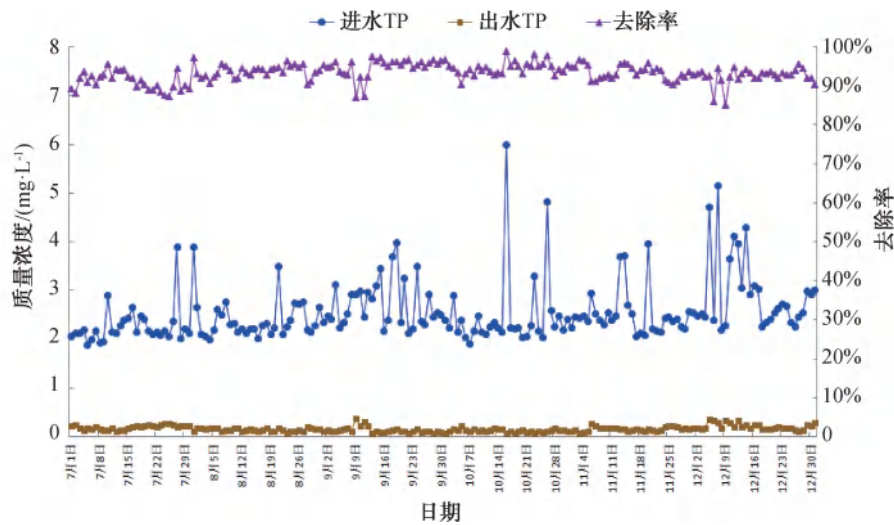


图 8 进出水 TP 浓度及去除率

Fig. 8 Mass Concentration and Removal Rates of TP in Influent and Effluent

4.2 运行成本分析

本项目废水处理厂扩建占地面积约为 46.5 亩 (1 亩 $\approx 666.67 \text{ m}^2$), 组合人工湿地占地面积约为 106 亩, 总投资为 24 670 万元。综合运行成本为 2.609 元/m^3 , 其中药剂成本为 0.713 元/m^3 , 电费为 0.704 元/m^3 , 人工费为 0.244 元/m^3 。运行成本如表 5 所示。

表 5 运行成本数据
Tab. 5 Data of Operation Costs

项目	运行费用/ (元· m^{-3})	备注
动力费	0.704	电耗平均为 $1 \text{ kW}\cdot\text{h/m}^3$, 电价按 $0.7 \text{ 元}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 计
药剂费	0.713	主要药剂有 PFC、PAC、乙酸钠、石灰、PAM、次氯酸钠、磷酸氢二钠和碳酸氢钠等
人工费	0.244	污水厂定员 25 人, 包含管理费
植物维护及水质监测费	0.154	包含植物收割、维护费用
污泥外运费	0.121	污泥运距按 50 km 计
修理维护费用	0.674	—

5 结语

(1) 采用“调节池+高效沉淀+水解酸化+5 段巴顿甫生化+磁混凝沉淀+臭氧催化氧化+精密过滤+组合人工湿地”工艺处理机械电子产业园区废水, 出水能够稳定达到更高排放标准, 对于淮入海水道水质的改善起到了重要作用, 对促进园区的可持续发展具有深远意义。

(2) 本项目稳定运行后, 污水处理厂和组合人工湿地综合运行成本为 2.61 元/m^3 。

(3) 臭氧催化氧化工艺对于本项目污水具有较强的适用性, 进水 COD 质量浓度低于 100 mg/L 时, 去除率可以稳定达到 55% 以上。

(4) 工业园区污水处理厂与组合人工湿地联用, 物化-生化-生态协同增效机制具有较优的经济效益和环境效益, 在用地允许的情况下可进行组合推广, 实现化工园区绿色发展的创新模式。

参考文献

[1] 付乐, 罗国豹. 城镇污水处理厂高排放标准处理工艺案例分析[J]. 净水技术, 2023, 42(3): 174-180, 197.
FU L, LUO G B. Case analysis of stricter discharge standard treatment technology for urban WWTP[J]. Water Purification Technology, 2023, 42(3): 174-180, 197.

[2] 宋鹏飞, 张峰, 李晓钰, 等. 水解酸化预处理工艺在工业废水处理中的应用[J]. 广东化工, 2023, 50(14): 129-131.
SONG P F, ZHANG F, LI X Y, et al. Application of hydrolysis acidification pretreatment process in industrial wastewater treatment[J]. Guangdong Chemical Industry, 2023, 50(14): 129-131.

[3] 朱明新, 苑斯文, 刘家扬, 等. 非均相臭氧催化氧化技术处理有机废水研究进展[J]. 化学试剂, 2024, 46(3): 1-7.
ZHU M X, YUAN S W, LIU J Y, et al. Research progress on treatment of organic wastewater using heterogeneous ozone catalytic oxidation technology[J]. Chemical Reagents, 2024, 46(3): 1-7.

[4] 栗文明, 白永刚, 周军, 等. 臭氧催化氧化应用于工业园区污水处理厂深度处理工艺的选择及设计[J]. 给水排水,

- 2019, 45(5): 90-93.
- LI W M, BAI Y G, ZHOU J, et al. Selection and design of catalytic ozonation in wastewater advanced treatment of industrial park[J]. Water & Wastewater Engineering, 2019, 45(5): 90-93.
- [5] 赵红兵, 余琴芳, 许江军, 等. 臭氧高级氧化对某工业园区污水处理厂生化出水处理试验[J]. 净水技术, 2022, 41(6): 96-102.
- ZHAO H B, YU Q F, XU J J, et al. Experiment of ozone advanced oxidation process for biochemical effluent treatment of a WWTP in an industrial park[J]. Water Purification Technology, 2022, 41(6): 96-102.
- [6] 戴红, 王飞, 秦川, 等. 青神县工业开发区污水处理厂设计与调试运行[J]. 工业水处理, 2023, 43(2): 172-177.
- DAI H, WANG F, QIN C, et al. Design and commissioning operation of WWTP in industrial development zone of Qingshen[J]. Industrial Water Treatment, 2023, 43(2): 172-177.
- [7] 周华, 夏海波, 张和英. 水解酸化-MBR-臭氧工艺在印染废水处理中的应用[J]. 给水排水, 2021, 57(9): 81-84.
- ZHOU H, XIA H B, ZHANG H Y. Treatment of dyeing wastewater by combination of hydrolysis acidification-MBR-O₃[J]. Water & Wastewater Engineering, 2021, 57(9): 81-84.
- [8] 尚文. 潜流湿地与表面流湿地处理工业尾水的工程实践与对比研究[J]. 给水排水, 2023, 59(s1): 238-244.
- SHANG W. Engineering practice and comparative study of subsurface flow wetland and surface flow wetland in treating industrial WWTP tailwater [J]. Water & Wastewater Engineering, 2023, 49(s1): 238-244.
- [9] 陈功. 组合表面流湿地处理化工区污水厂尾水的工艺设计[J]. 工业水处理, 2022, 42(5): 169-175.
- CHEN G. Process design of combined surface flow wetland to treat tail water from wastewater treatment plant in chemical industry park[J]. Industrial Water Treatment, 2022, 42(5): 169-175.
- [10] 曹明利, 崔康平, 许为义, 等. 人工快渗/复合人工湿地工艺处理园区污水厂尾水[J]. 中国给水排水, 2012, 28(19): 12-14.
- CAO M L, CUI K P, XU W Y, et al. Constructed rapid infiltration/hybrid constructed wetland for advanced treatment of tail water from chemical wastewater treatment plant[J]. China Water & Wastewater, 2012, 28(19): 12-14.

(上接第 145 页)

- [12] 苑博. 两种沉水植物与铜锈环棱螺及其组合对水体净化的效果[D]. 保定: 河北大学, 2020.
- YUAN B. Effect of two species of submerged plants and *Bellamya aeruginosa* and their combination on water purification [D]. Baoding: Hebei University, 2020.
- [13] GAO H L, QIAN X, WU H, et al. Combined effects of submerged macrophytes and aquatic animals on the restoration of a eutrophic water body-A case Study of Gonghu Bay, Lake Taihu [J]. Ecological Engineering, 2017, 102: 15-23. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2017.01.013.
- [14] THOMAS J D. Mutualistic interactions in freshwater modular systems with molluscan components [J]. Advances in Ecological Research, 1990, 20: 125-178. DOI: 10.1016/S0065-2504(08)60054-9.
- [15] ALI M M, MAGEED A A, HEIKAL M. Importance of aquatic macrophyte for invertebrate diversity in large subtropical reservoir [J]. Limnologia, 2007, 37(2): 155-169.
- [16] PRATHER C M, PELINI S L, LAWS A, et al. Invertebrates, ecosystem services and climate change [J]. Biological Reviews, 2013, 88(2): 327-348.
- [17] VANNI M J. Nutrient cycling by animals in freshwater ecosystems [J]. Annual Review of Ecology and Systematics, 2002, 33(1): 341-370.
- [18] CANUEL E A, SPIVAK A C, WATERSON E J, et al. Biodiversity and food web structure influence short-term accumulation of sediment organic matter in an experimental sea-aquatic plant system [J]. Limnology and Oceanography, 2007, 52(2): 590-602.
- [19] CHAO C X, WANG L G, LI Y, et al. Response of sediment and water microbial communities to submerged vegetations restoration in a shallow eutrophic lake [J]. Science of the Total Environment, 2021, 801: 149701. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.149701.
- [20] YEON T S, TAN S Y, LI Z, et al. Ecological interaction between submerged macrophytes and zoobenthos [J]. Journal of Earth Sciences & Environmental Studies, 2017, 2(2): 173-182.
- [21] SETUBAL R B, RICCARDI. Long-term effects of fish biomanipulation and macrophyte management on zooplankton functional diversity and production in a temperate shallow lake limnology [J]. Limnology, 2020, 21(3): 305-317.
- [22] 李萍. 滤食性贝类、沉水植物及其共存对水体富营养化的影响[D]. 广州: 暨南大学, 2016.
- LI P. Effects of filter-feeding mussel, submerged macrophyte and their coexistence on eutrophication [D]. Guangzhou: Jinan University, 2016.
- [23] 李欢, 吴蔚, 罗芳丽, 等. 4种挺水植物、4种沉水植物及其组合群落去除模拟富营养化水体中总氮和总磷的作用比较[J]. 湿地科学, 2016, 14(2): 163-172.
- LI H, WU W, LUO F L, et al. The comparison of removal effect of total nitrogen and total phosphorus in simulated eutrophic water among 4 kinds of emergent plants, 4 kinds of submerged plants and their mixed communities [J]. Wetland Science, 2016, 14(2): 163-172.