

doi: 10.11835/j.issn.1000-582X.2021.268

MBR 工艺强化脱氮除磷处理滇池农业面源污水的 调控方法及实际应用

吴 思, 马志龙, 杨占强, 丁文川, 郑良秋, 王涛涛, 曾晓岚

(重庆大学 a. 三峡库区生态环境教育部重点实验室; b. 低碳绿色建筑国际联合研究中心, 重庆 400045)

摘要: 为保证滇池环湖截污体系已建混合水质净化厂 MBR 工艺实现出水氮磷稳定达标, 通过现场搭建中试规模的系统, 研究了外加碳源(乙酸钠)和除磷剂(聚合氯化铝)投加量对实际污水中氮磷强化去除的关系, 提出了针对滇池农业面源污水常年进水水质质量浓度、碳氮比以及碳磷比均较低, TN 和 TP 质量浓度波动大的特点, 可灵活采用外加碳源(乙酸钠)和辅助化学除磷(PAC)的双调控方法或辅助化学除磷的单调控方法, 在能够使出水中氮磷达标稳定的前提下, 节约运行成本。同时, 以中试研究参数为基准, 有效地提高了洛龙河混合水质净化厂的实际运行调控效率, 缩短了整个系统优化调整时间, 并最终实现净化厂各项出水水质参数稳定达标, 特别是 TP 质量浓度稳定低于 0.3 mg/L 的地方标准要求, 预计滇池现有的两座 MBR 工艺处理厂每年 TP 的减排量可达 65.3 t。

关键词: 农业面源污染; MBR 工艺; 强化脱氮除磷; 混合水质净化厂; 调控

中图分类号: X52; X71

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2023)01-068-008

Regulating method and practical application of MBR process intensified denitrification and dephosphorization treatment of agricultural non-point source sewage in Dianchi Lake

WU Si, MA Zhilong, YANG Zhanqiang, DING Wenchuan, ZHENG Liangqiu,
WANG Taotao, ZENG Xiaolan

(a. Key Laboratory of Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment, Ministry of Education;

b. Low Carbon Green Building International Joint Research Center, Chongqing University,

Chongqing 400045, P. R. China)

Abstract: In the intersecting system around Dianchi Lake, a mixed water purification plant was built with MBR process. To ensure that the nitrogen and phosphorus concentration of the MBR effluent met the discharge standard stably, a pilot-scale system was built on site to explore the effects of supplementary carbon source (sodium acetate) and phosphorus removal agent (polyaluminum chloride) dosage on the enhanced removal of nitrogen and phosphorus in actual sewage, respectively. Due to perennial low

收稿日期: 2021-09-06 **网络出版日期:** 2021-12-16

基金项目: 水体污染控制与治理科技重大专项资助项目(2012ZX07102-001-004)。

Supported by the Major Science and Technology Project of Water Pollution Control and Treatment (2012ZX07102-001-004).

作者简介: 吴思(1996—), 男, 重庆大学硕士研究生, 主要从事废水处理理论与技术方向研究。

通信作者: 曾晓岚, 女, 博士, 副教授, (E-mail)wendyzeng@cqu.edu.cn。

concentration of influent water quality, low carbon-nitrogen ratio and carbon-phosphorus ratio of the agricultural non-point source sewage of Dianchi Lake, as well as large fluctuation of the TN and TP concentrations, the flexible use of the dual control method of external carbon source (sodium acetate) and auxiliary chemical phosphorus removal (polyaluminum chloride) or the single control method of auxiliary chemical phosphorus removal was proposed, which could save operating costs with the precondition that the nitrogen and phosphorus in the effluent could be up-to-standard discharged stably. At the same time, based on the pilot study parameters, the actual operation and regulation efficiency of the Luolong River Purification Plant was effectively improved, the optimization and adjustment time of the entire system was shortened, and the stability of effluent water quality reaching the discharge requirement in the purification plant was finally achieved. Especially the TP concentration was stably lower than the local standard requirement of 0.3 mg/L. It was estimated that the two purification plants with MBR process around Dianchi Lake could reduce TP emission up to 65.3 t per year.

Keywords: agricultural non-point source pollution; the MBR process; enhanced nitrogen and phosphorus removal; mixed water purification plant; regulation

有关研究表明,面源污染是影响河流、水库及湖泊等水体持续污染的重要因素^[1-4],其中又以农村农业面源污染贡献率最大^[5,6]。《滇池流域水环境保护治理“十四五”规划》中对滇池入湖污染物组分和比例的分析表明,2019年进入滇池的 COD_{Cr}、TN 和 TP 负荷中农村农业面源污染排放的百分比依次为 5.6%、16.0%和 34.2%^[7],因而控制农村农业面源污染是滇池富营养化治理的重点。控制流域面源污染常采用污染源控制、过程阻断及末端处理等方法^[7],基于后两者建成的环湖截污治污体系已运用于滇池面源污染防控。该体系利用农灌沟渠收集农业面源污水(包括旱季耕地径流、雨季初期雨水及农村生活污水),通过末端的高效截留并将高质量浓度部分截留进入环湖截污干渠,再经截污干渠输送至末端混合水质净化厂处理,达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级标准的 A 标准(简称 I A 标准,且 TP 执行昆明市地方排放标准 ≤ 0.3 mg/L)后排放。目前共有 3 座混合水质净化厂采用 MBR 工艺,由于 MBR 工艺一般用于处理污染物质量浓度较高的污水,如城市生活污水及工业废水等^[9,10],而环湖截污体系截留的农业面源污水质量浓度较低,如位于滇池东岸的洛龙河混合水质净化厂(设计规模 5 万 m³/d)具有常年进水水质质量浓度、碳氮比以及碳磷比均较低的特点,TP 成为了该厂出水达标的难点;另一方面,旱季进水 TN 质量浓度会超过 30 mg/L,两者都会导致现有的 MBR 工艺不能良好稳定运行,净化厂出水无法达到 I A 标准,影响了环湖截污治污体系综合效能的充分发挥。为此,本研究依托洛龙河混合水质净化厂,分别针对进水 TN 质量浓度相对较高且常规运行出水氮磷均不能达标,以及进水 TN 质量浓度较低且出水总磷不能达标的 2 种情况,探讨了 MBR 工艺脱氮除磷技术的强化方案,并结合现场中试实验对 MBR 工艺参数进一步优化调控,以实现该厂稳定达标运行。

1 洛龙河净化厂及中试系统 MBR 工艺调控

1.1 MBR 工艺流程

洛龙河混合水质净化厂将 4 组 MBR 池作为其主体,每组设计规模为 12 500 m³/d,目前运行 2 组,包含缺氧池、厌氧池、好氧池及膜池等单元,其处理流程为:需处理的污水首先流入缺氧池中,与来自好氧池回流的硝化液充分混合,发生反硝化脱氮作用;随后流至厌氧池,释放磷;再进入好氧池,进行硝化作用与好氧吸磷;最终利用膜池处理污水以达到泥水分离的效果。MBR 处理工艺内置 2 个回流:1)好氧池内的硝化液回流至缺氧池;2)通过膜池分离后的污泥回流至好氧池前端。中试装置主要参照洛龙河混合水质净化厂工艺进行设计,并在该厂内完成搭建。装置总尺寸为 7.4 m×3.2 m×2.5 m(L×W×H),有效容积为 38.07 m³,设计日处理水量为 100 m³。图 1 为中试系统处理工艺的流程,其膜组件是利用 PVDF 材料制造的中空纤维膜(杭州凯滤膜有限公司),总计 20 片。

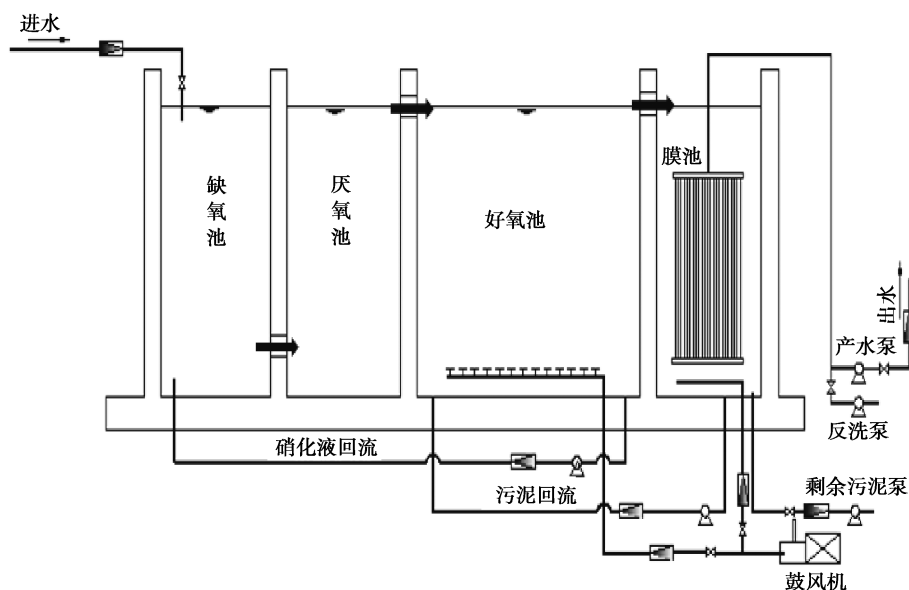


图 1 MBR 中试系统工艺流程图

Fig. 1 Process flow chart of MBR pilot system

1.2 MBR 工艺进水水质

中试试验期间进水(取自洛龙河混合水质净化厂细格栅出水)平均水质与该厂 MBR 工艺年均进水水质如表 1 所示,两者相差不大,故中试研究成果可用于指导净化厂实际的生产运营。

表 1 洛龙河混合水质净化厂及中试系统进水水质

Table 1 The influent water quality of the mixed water purification plant and MBR pilot system

MBR 工艺系统	$\rho_{\text{COD}_{\text{Cr}}}/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\rho_{\text{TN}}/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\rho_{\text{TP}}/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\rho_{\text{NH}_3-\text{N}}/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$
中试装置	46.5~111.2	13.2~25.3	0.80~2.10	11.7~20.8
混合水质净化厂	78.0~206.0	14.4~30.1	0.92~4.61	9.2~24.8

1.3 MBR 工艺运行参数

在中试规模下,对影响 MBR 工艺处理效果的各种运行参数进行研究,得到 MBR 工艺系统基本运行参数,并将该参数用于进一步指导生产规模的洛龙河混合水质净化厂实际运行和优化。最终在研究期间中试系统和洛龙河水质净化厂采用的运行参数如表 2 所示。

表 2 洛龙河混合水质净化厂及中试系统 MBR 工艺运行参数

Table 2 The operating parameters of the mixed water purification plant and MBR pilot system

MBR 工艺系统	硝化液回流比/%	污泥回流比/%	$\rho_{\text{MLSS}}/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	好氧池溶解氧/ $(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$
MBR 中试系统	150	200	4 000~5 000	1~2
混合水质净化厂	200~300	200~300	6 000~7 000	2

1.4 强化脱氮除磷试验研究

中试系统于 2015 年 10 月开始,主要针对以下两种进水水质进行试验:1)在进水 TN 质量浓度相对较高,现有 MBR 工艺出水氮磷均不能达标的情况下,于 MBR 工艺进水处投加外碳源,研究外碳源的投加量对去除污水内 TN、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、COD 与 TP 等污染物效果的影响;2)在进水 TN 质量浓度较低,现有 MBR 工艺出水仅 TP 不能稳定达标的情况下,于 MBR 处理工艺膜池处投加聚合氯化铝(PAC),研究 PAC 投加量对系统

除磷效果的影响。自 2016 年 4 月开始,根据中试参数选用适当的方案对净化厂进行强化脱氮除磷调控,通过出水水质的反馈对运行参数进行优化,直至出水稳定达标。

2 结果与讨论

2.1 中试 MBR 系统外加碳源强化处理

外加碳源是显著提高低 C/N 污水 TN、TP 去除率的常用调控方法^[11-13],其主要包括传统碳源(如乙酸钠等可溶性低分子有机物、糖类)及新型碳源(如天然纤维素、有机工业废水等)等^[14]。乙酸钠因具有运输成本低、环保、适应性强、2 倍于葡萄糖或白砂糖的高反应速率^[15]以及除磷效果较葡萄糖、乙醇、淀粉等更佳^[16, 17]的优点,常常作为污水处理厂的外加碳源。通过隔膜泵向进水管中投加乙酸钠,投加量分别为 0, 30, 60 mg/L,考察了外加碳源投加量对 MBR 工艺去除 TN、NH₃-N、COD_{cr}和 TP 效果的影响。从图 2(a)可看出,随乙酸钠投加量的增加,中试处理系统对 TN 的去除率逐渐升高。在未加乙酸钠的情况下,系统中的 C/N 比约是 3.2,出水中 TN 大概为 15 mg/L, TN 的平均去除率为 28.04%;在乙酸钠的投加量为 60 mg/L 的情况下, TN 平均去除率达到了 62.89%,提高了约 33%,出水中 TN 大约为 7 mg/L。TN 去除率与乙酸钠投加量的相关性较好,据此以乙酸钠投加量为 60 mg/L 时 TN 的出水质量浓度计算,当进水 TN 质量浓度低于 40.42 mg/L 时可实现出水 TN 质量浓度达到 I A 标准。不过在中试试验期间,进水 TN 质量浓度总体在 15.5~20.5 mg/L 内波动,处于较低水平,不投加外碳源时出水 TN 质量浓度已达到 I A 标准。

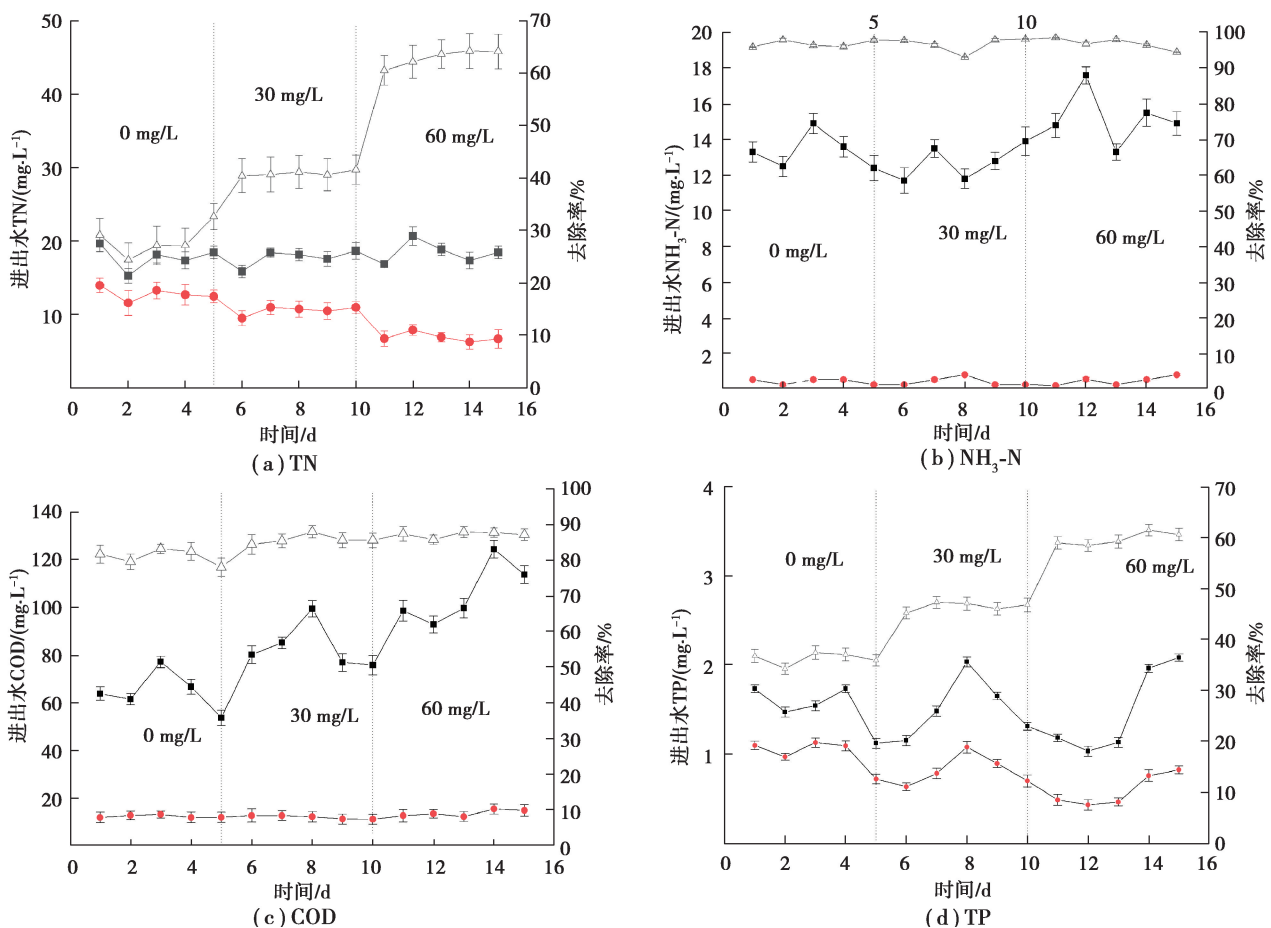


图 2 碳源投加对污染物去除效果影响

Fig. 2 Removal rate of pollutants with different dosing of carbon source

从图 2(b)可以看出,无论是否投加乙酸钠,中试处理系统去除 NH₃-N 的效率均在 96% 以上,其出水的质量浓度远低于 I A 标准,基本不受外加碳源的影响。由于 MBR 系统好氧池中污泥质量浓度高于常规工艺,存在大量的硝化菌,对 NH₃-N 具有较高去除能力,而且系统前端缺氧池和厌氧池中的反硝化细菌及除磷

菌会迅速消耗额外增加的碳源,导致好氧池中有机物增加量不大,因此好氧池中硝化菌仍然能够获得充分的溶解氧以保持较高活性,对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 氧化效果好^[18]。检测系统出水的 COD_{cr} (图 2(c))确实也发现,乙酸钠投加量的增加对系统出水 COD_{cr} 质量浓度没有显著影响,基本维持在 14 mg/L 左右,远低于 I A 标准。在中试期间,实际进水中 TP 质量浓度波动较大,从图 2(d)可以看出,不同乙酸钠投加量下出水 TP 质量浓度变化趋势与进水质量浓度相似,虽然乙酸钠投加量增加后可以提高 TP 去除率,但即使投加量达到 60 mg/L,出水 TP 质量浓度平均值为 0.63 mg/L,仍不能达标排放。有研究表明,单独的生物脱氮除磷工艺在进水 BOD_5 质量浓度 150 mg/L 以下时,出水 TP 质量浓度常常无法达到 I A 标准要求^[19],而本试验期间进水 BOD_5 平均质量浓度约为 17.7 mg/L。并且,本研究的 MBR 系统采用缺氧池前置工艺,在缺氧池内存在的反硝化菌首先消耗了大量碳源,进入厌氧池的碳源减少,厌氧段聚磷菌的释磷效果降低。因此要达到昆明市地方排放标准 $\rho_{\text{TP}} \leq 0.3 \text{ mg/L}$ 的要求,采用增加碳源投加量的方法提高生物除磷效果,从技术上可行,但不具备经济性。

2.2 中试 MBR 系统外加除磷剂强化处理

针对上述进水碳源不足导致出水 TP 不能稳定达标的情况,采用在膜池单独投加 PAC 辅助化学除磷,投加量分别为 0, 10, 20 mg/L, 考察 PAC 投加量对 MBR 工艺去除 TP 效果的影响。由图 3 可知,随着 PAC 投加量的上升,中试系统对 TP 的去除作用增强。在 PAC 投加量是 20 mg/L 的情况下,系统实际进出水的 TP 质量浓度均值分别是 1.17 mg/L 和 0.36 mg/L,此时其对 TP 的去除率达 69.62%。利用 PAC 化学除磷是絮体沉淀吸附、配位沉淀、络合物吸附、网捕和吸附架桥等综合作用的结果,理论上随着 PAC 投加量增大,沉淀生成量也会随之增大,MBR 系统对 TP 的去除效果也越好。分析数据发现,在 0~20 mg/L 的 PAC 投加量下,TP 去除率随投加量呈线性上升关系,因此在实际运行中可以根据进水 TP 质量浓度调控 PAC 投加量。

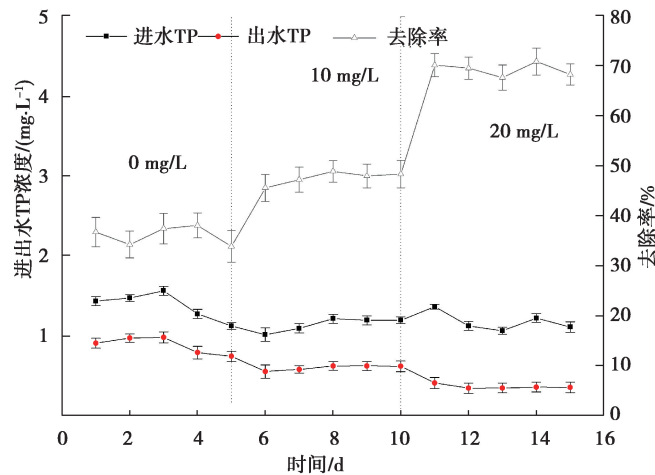


图 3 外加 PAC 对 TP 去除的影响

Fig. 3 Removal rate of TP with different dosing of PAC

2.3 混合水质净化厂实际运行调控效果及优化

根据上述中试研究结果,提出了洛龙河混合水质净化厂 MBR 工艺强化脱氮除磷的 2 种方案。方案 1: 当进水 TN 质量浓度较高,出水氮磷均不能达标时,采用外加乙酸钠以及 PAC 的双调控方法,以外加乙酸钠和 PAC 投加量分别为 60 mg/L 和 20 mg/L 为基准对净化厂实际运行进行调试;方案 2: 当进水 TN 质量浓度较低,出水总磷不能达标时,则采用投加 PAC 的单调控方法。由于调控运行期间实际进水 TN 质量浓度低(14.8~31.6 mg/L),不进行强化脱氮除磷时出水除 TP 外其他指标均可达标,故采用方案 2 进行除磷调控。根据该厂实际处理水量为 2.0~2.5 万 m^3/d ,按中试确定的 20 mg/L 计算出膜池中 PAC 投加量为 0.5 t/d,并结合净化厂实际运行工况及出水 TP 质量浓度小于 0.3 mg/L 的提标要求,逐渐提高 PAC 投加量,最终确定投加量应在 1.0~1.5 t/d 的范围内,投药成本约为 0.3~0.45 元/ m^3 。在 2016 年 4 月 18 日至 2016 年 5 月 12 日运行中,TP 平均去除率提高到 84.84%,出水基本达标,但仍存在 TP 质量浓度波动较大(0.26~0.71 mg/L),其中 2 d 出水不能达标的问题。

经对整个调控流程的考察,分析导致上述问题的原因可能是:1)投加 PAC 的螺杆泵(额定流量:0.06~

0.3 m³/h)橡胶衬套性能因 PAC 呈酸性易腐蚀而受到影响;2)通过计算,PAC 的投加流量约为 0.028 m³/h,低于螺杆泵的额定流量,效率降低。为提高 PAC 投加量,稳定出水 TP 质量浓度,提出将该螺杆泵换为流量调节范围较广、耐腐蚀性强的隔膜泵。PAC 投加泵更换后,自当月 23 日起出水 TP 质量浓度可稳定达标。由图 4 可知,在 2016 年 5 月~12 月期间,净化厂的 TP 出水质量浓度均值是 0.28 mg/L,去除率的平均值达 83%,这一结果表明即使进水 TP 质量浓度具有较大波动,采用强化措施后的 MBR 工艺仍然能够使出水的 TP 质量浓度稳定地满足昆明市地方排放标准要求。其后在 2017 年 1~7 月间的第三方检测机构检测结果显示,采用调控优化后参数运行,洛龙河混合水质净化厂整体出水水质稳定达到 I A 标准,如表 3 所示。

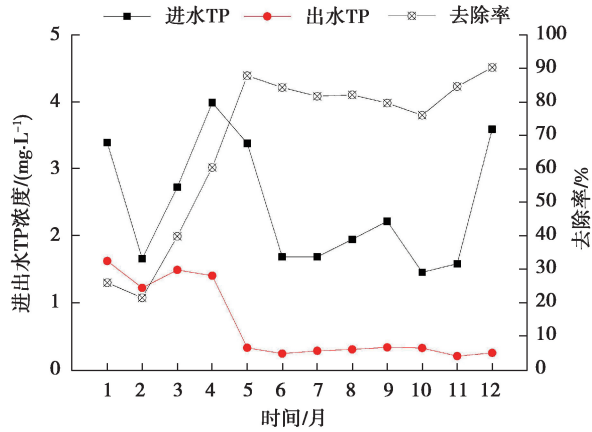


图 4 2016 年混合水质净化厂进出水 TP 月平均质量浓度

Fig. 4 Monthly average data of TP of mixed water purification plant in 2016

表 3 第三方监测进出水水质

Table 3 The influent and effluent quality monitored by the third party

分 类	$\rho_{\text{COD}_{\text{Cr}}}$	ρ_{BOD_5}	ρ_{TN}	ρ_{TP}	$\rho_{\text{NH}_3\text{-N}}$	ρ_{SS}
进水范围	23~120	4.9~63.9	13.0~42.9	0.36~3.19	3.6~32.5	25~115
平均值	62	26.0	23.5	2.04	18.9	54
出水范围	10~44	0.5~19.5	5.8~12.8	0.04~0.38	0.08~3.60	4~9
平均值	25	2.3	10.9	0.25	0.97	6

根据混合水质净化厂实际运行调控后的第三方监测水质数据,由式(1)可以计算相应 TP 污染负荷削减增量。

$$\Delta M = (C_0 - C_1) \times Q \times T \times 10^{-6}, \tag{1}$$

式中: ΔM 为 TP 削减增量,t; C_0 表示进水平均 TP 质量浓度(第三方监测的数据是 2.04 mg/L); C_1 表示出水平均 TP 质量浓度(第三方监测数据为 0.25 mg/L); Q 为混合水质净化厂日处理量(取实际运行数据 2.5 万 m³/d); T 为混合水质净化厂的年运行时间,取 365 d,则该厂目前每年排入滇池 TP 削减量约增加 16.3 t。推广到滇池东岸相同处理工艺、相同处理水量的另一座待运行混合水质净化厂,则以两厂达到总设计处理水量为 10 万 m³/d 计,预计每年削减排入滇池 TP 的量约为 65.3 t。

3 结 论

1)在实际生产中,当出水 TP 要求在 0.3 mg/L 以下时,采用投加外碳源强化生物除磷仍不能保证其稳定达标,而采用辅助化学除磷是可行方法,且注意选择合适的加药泵,如采用流量调节范围较广、耐腐蚀性强的隔膜泵。

2)针对农业面源污水常年进水水质质量浓度、碳氮比以及碳磷比均较低,TN 和 TP 质量浓度波动大的特点,可灵活采用外加碳源(乙酸钠)和辅助化学除磷(PAC)的双调控方法或辅助化学除磷的单调控方法,在出水氮磷稳定达标得到保障的前提下,使运行成本降低。

3)在生产中采用 MBR 工艺强化脱氮除磷的中试研究参数为基准,能有效地指导净化厂的实际运行调控,使整个优化过程时间缩短,并实现出水稳定达标。

参考文献:

- [1] 王思如,杨大文,孙金华,等.我国农业面源污染现状与特征分析[J].水资源保护,2021,37(4):140-147,172.
Wang S R, Yang D W, Sun J H, et al. Analysis on status and characteristics of agricultural non point source pollution in China[J]. Water Resources Protection, 2021, 37(4): 140-147,172.(in Chinese)
- [2] 杜鹃,王乐宜,周皓媛,等.农业面源污染时空分布及污染源解析:以安徽怀远县为例[J].中国农业大学学报,2021,26(2):139-149.
Du J, Wang L Y, Zhou H Y, et al. Spatial-temporal distribution of agricultural non-point source pollution: a case study of Huaiyuan, Anhui[J]. Journal of China Agricultural University, 2021, 26(2): 139-149. (in Chinese)
- [3] 许泉立,王庆,洪亮,等.滇池流域不透水表面动态模拟及其非点源污染风险评价[J].水土保持研究,2021,28(4):186-192.
Xu Q L, Wang Q, Hong L, et al. Dynamic simulation of impervious surface expansion and its risk assessment on non-point source pollution in Dianchi Lake Basin[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020, 28(4): 186-192. (in Chinese)
- [4] Zhang T, Yang Y H, Ni J P, et al. Construction of an integrated technology system for control agricultural non-point source pollution in the Three Gorges Reservoir Areas[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2020, 295: 106919.
- [5] 李裕元,李希,孟岑,等.我国农村水体面源污染问题解析与综合防控技术及实施路径[J].农业现代化研究,2021,42(2):185-197.
Li Y Y, Li X, Meng C, et al. Analysis of agricultural non-point source pollution issue in waters and technical strategy of comprehensive prevention and control in rural area of China[J]. Research of Agricultural Modernization, 2021, 42(2): 185-197.(in Chinese)
- [6] Zhong S Q, Chen F X, Xie D T, et al. A three-dimensional and multi-source integrated technology system for controlling rural non-point source pollution in the Three Gorges Reservoir Area, China[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 272: 122579.
- [7] 昆明市滇池管理局,昆明市生态环境科学研究院.滇池流域水环境保护治理“十四五”规划(2021—2025年)[EB/OL].(2020-10-13)[2021-01-20].<http://dgj.km.gov.cn/c/2020-10-13/3688376.shtml>.
Dianchi Lake Administration Bureau of Kunming, Kunming Institute of Eco-Environmental Sciences. The 14th five-year plan of dianchi lake watershed water environment protection and control(2021-2025)[EB/OL].(2020-10-13)[2021-01-20].<http://dgj.km.gov.cn/c/2020-10-13/3688376.shtml>. (in Chinese)
- [8] 王一格,王海燕,郑永林,等.农业面源污染研究方法与控制技术研究进展[J].中国农业资源与区划,2021,42(1):25-33.
Wang Y G, Wang H Y, Zheng Y L, et al. Advances in research methods and control technologies of agricultural non-point source pollution: a review[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2021, 42(1): 25-33. (in Chinese)

- [9] Deowan S A, Galiano F, Hoinkis J, et al. Novel low-fouling membrane bioreactor (MBR) for industrial wastewater treatment[J]. *Journal of Membrane Science*, 2016, 510: 524-532.
- [10] Vergine P, Salerno C, Berardi G, et al. Self-Forming dynamic membrane bioReactors (SFD MBR) for municipal wastewater treatment; Relevance of solids retention time and biological process stability[J]. *Separation and Purification Technology*, 2021, 255: 117735.
- [11] He Y, Wang Y H, Song X S. High-effective denitrification of low C/N wastewater by combined constructed wetland and biofilm-electrode reactor (CW-BER)[J]. *Bioresource Technology*, 2016, 203: 245-251.
- [12] Peng P C, Huang H, Ren H Q. Effect of adding low-concentration of rhamnolipid on reactor performances and microbial community evolution in MBBRs for low C/N ratio and antibiotic wastewater treatment[J]. *Bioresource Technology*, 2018, 256: 557-561.
- [13] Zhou X, Wang X Z, Zhang H, et al. Enhanced nitrogen removal of low C/N domestic wastewater using abiochar-amended aerated vertical flow constructed wetland[J]. *Bioresource Technology*, 2017, 241: 269-275.
- [14] 熊子康, 郑怀礼, 尚娟芳, 等. 污水反硝化脱氮工艺中外加碳源研究进展[J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2021, 43(2): 168-181.
- Xiong Z K, Zheng H L, Shang J F, et al. State-of-the art review of adding extra carbon sources to denitrification of wastewater treatment[J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2021, 43(2): 168-181.(in Chinese)
- [15] 孙永利, 许光明, 游佳, 等. 城镇污水处理厂外加商业碳源的选择[J]. *中国给水排水*, 2010, 26(19): 84-86.
- Sun Y L, Xu G M, You J, et al. Selection of external carbon source for municipal wastewater treatment plant[J]. *China Water & Wastewater*, 2010, 26(19): 84-86.(in Chinese)
- [16] Chu L B, Wang J L. Denitrification of groundwater using PHBV blends in packed bed reactors and the microbial diversity[J]. *Chemosphere*, 2016, 155: 463-470.
- [17] Xu Z S, Dai X H, Chai X L. Effect of different carbon sources on denitrification performance, microbial community structure and denitrification genes[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 634: 195-204.
- [18] Fan X Y, Li H Q, Yang P, et al. Effect of C/N ratio and aeration rate on performance of internal cycle MBR with synthetic wastewater[J]. *Desalination and Water Treatment*, 2015, 54(3): 573-580.
- [19] Hu X, Xie L, Shim H, et al. Biological nutrient removal in a full scale anoxic/anaerobic/aerobic/pre-anoxic-MBR plant for low C/N ratio municipal wastewater treatment[J]. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2014, 22(4): 447-454.

(编辑 郑 洁)