

徐健, 鲍任兵, 雷培树, 等. 低 C/N 比的多因子调控强化 Bardenpho 工艺脱氮策略[J]. 净水技术, 2025, 44(11): 117–125.

XU J, BAO R B, LEI P S, et al. Solutions of enhanced Bardenpho process for denitrification by multi factor regulation under low C/N ratios[J]. Water Purification Technology, 2025, 44(11): 117–125.

低 C/N 比的多因子调控强化 Bardenpho 工艺脱氮策略

徐 健^{1,*}, 鲍任兵¹, 雷培树¹, 邹 磊¹, 刘 赛², 万年红¹

(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. 中信清水入江<武汉>投资建设有限公司, 湖北武汉 430200)

摘 要 【目的】针对污水处理厂在提标改造过程中面临的进水碳源不足和氮磷浓度偏高的技术难题, 本文旨在通过在厂区搭建一套采用 Bardenpho 工艺的中试装置, 对关键运行参数进行优化, 以提高脱氮效率并兼顾化学需氧量(COD)和总磷(TP)的去除效果。通过调整碳源投加位置、投加量、混合液回流比以及多点进水分配比例等参数, 系统研究了不同工况下的脱氮除磷效果。【方法】试验分为 3 个阶段: 第一阶段, Bardenpho 工艺最佳碳源投加点研究; 第二阶段, 碳源投加量与内回流比参数组合研究; 第三阶段, 多点进水优化污染物去除性能研究。并基于 3 个阶段的研究结果, 本文提出 Bardenpho 工艺强化脱氮策略。【结果】Bardenpho 工艺最佳碳源投加点为后置缺氧区, 在该处投加碳源更有利于系统脱氮效率的提升, 同时还能兼顾 COD 和 TP 的去除效果。当碳源投加量为 38.63 mg/L, 内回流比为 300% 时, 兼顾了脱氮除磷的效果和运行成本, 其出水总氮(TN)质量浓度为 8.15 mg/L, 出水 TP 质量浓度为 0.3 mg/L, 运行成本为 0.293 元/m³。投加碳源能有效降低出水 TN, 但同时有可能导致出水 COD 超标, 使得脱氮成本过高。增加内回流比可获得更好的脱氮效果, 当内回流比超过 400% 后, 将导致回流设施能耗较高, 且回流液溶解氧升高, 不利于脱氮反应。当进水碳氮比(C/N)为 3~4 时, 可通过多点进水的方式在不投加外碳源的情况下有效提高脱氮除磷。当进水分配比例为预缺氧区: 缺氧区: 后置缺氧区=6:3:1 时, 可以确保 TN 质量浓度<11 mg/L, TP 质量浓度<0.5 mg/L。【结论】本文通过中试装置的运行参数优化, 能够有效提高碳源利用率, 实现高效脱氮和除磷, 同时保证了较低的脱氮成本。结果对于指导污水处理厂的实际运行和提标改造具有重要的实际意义。

关键词 Bardenpho 工艺 碳源投加点 多点进水 脱氮成本 混合液回流比

中图分类号: TU992 文献标志码: A 文章编号: 1009-0177(2025)11-0117-09

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2025.11.013

Solutions of Enhanced Bardenpho Process for Denitrification by Multi Factor Regulation under Low C/N Ratios

XU Jian^{1,*}, BAO Renbing¹, LEI Peishu¹, ZOU Lei¹, LIU Sai², WAN Nianhong¹

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

2. CITIC Qingshui River <Wuhan> Investment and Construction Co., Ltd., Wuhan 430200, China)

Abstract [Objective] In response to the technical challenges faced by wastewater treatment plants during the upgrading and renovation process, such as insufficient carbon sources and high nitrogen and phosphorus concentrations in the influent, this paper aims to optimize key operating parameters by building a pilot plant using the Bardenpho process in the plant area, in order to improve denitrification efficiency while considering the removal effects of chemical oxygen demand (COD) and total phosphorus (TP). The denitrification and phosphorus removal effects under different operating conditions are systematically studied by adjusting parameters such as carbon source feeding position, feeding amount, mixed liquid reflux ratio, and multi-point influent distribution ratio. [Methods] The experiment was divided into three stages: The first stage was to study the optimal carbon source injection point for Bardenpho process; In the second stage, researched on the combination of carbon source dosage and internal reflux ratio parameters; In the third stage, researched on optimizing pollutant removal performance through multi-point influent. And based on the research result

[收稿日期] 2024-03-21

[基金项目] 湖北省建设科技计划项目(KY-S-S-2023-003)

[通信作者] 徐健(1993—), 男, 工程师, 主要从事水处理科研及设计等工作, E-mail: 584127062@qq.com.

of the three stages, it proposed an enhanced denitrification strategy for the Bardenpho process. [Results] The optimal carbon source injection point for the Bardenpho process was in the post anoxic zone, where the addition of carbon source was more conducive to improving the denitrification efficiency of the system, while also achieving the removal effects of COD and TP. When the carbon source dosage was 38.63 mg/L and the internal reflux ratio was 300%, it balanced the effect of nitrogen and phosphorus removal and operating costs. The effluent total nitrogen (TN) was 8.15 mg/L, the effluent TP was 0.3 mg/L, and the operating cost was 0.293 yuan. Adding carbon sources could effectively reduce TN in effluent, but at the same time, it may lead to excessive COD in effluent, resulting in high denitrification costs. Increasing internal reflux ratio could achieve better denitrification effect. When the internal reflux ratio exceeded 400%, it will result in higher energy consumption of the reflux facility and an increase in dissolved oxygen in the reflux solution, which was not conducive to denitrification reaction. When the influent C/N ratio was 3–4, nitrogen and phosphorus removal could be effectively improved through multi-point influent without adding external carbon sources. When the ratio of pre anoxic zone : anoxic zone : post anoxic zone = 6 : 3 : 1, it could ensure $TN < 11$ mg/L and $TP < 0.5$ mg/L. [Conclusion] This paper optimizes the operating parameters of the pilot plant to effectively improve carbon source utilization, achieves efficient denitrification and phosphorus removal, and ensure lower denitrification costs. The research results have important practical significance for guiding the actual operation and upgrading of sewage treatment plants.

Keywords Bardenpho process carbon source dosing point multi-point influent cost of denitrification mixed liquid reflux ratio

随着“双碳”目标和多地高排放标准的逐步实施,通过优化升级传统的污水处理工艺,促进减污降碳协同增效,是当今的发展命题。常规的厌氧-缺氧-好氧(AAO)工艺脱氮能力受限于其混合液回流比,难以满足现阶段各地施行的更高出水标准的要求^[1]。Bardenpho 工艺由于其优越的脱氮除磷效率,近年来被广泛应用于各种污水厂升级改造工

程^[2]。Bardenpho 工艺多采用“厌氧-缺氧-好氧-缺氧-好氧”的组合形式,即通过在原 AAO 工艺后端增加后置脱氮单元,能够在传统 AAO 工艺总氮(TN)去除的基础上进一步强化整个系统的脱氮能力^[3-4]。随着污水厂对 TN 排放标准的提高,Bardenpho 工艺逐渐显现其优势。

然而 Bardenpho 工艺的应用也受许多因素制约,其较高的脱氮效率离不开充足的碳源供给^[3],尤其对于低碳氮比(C/N)的城市生活污水,充足的碳源是高效反硝化脱氮和厌氧释磷的重要保障。目前,许多城市污水处理厂存在进水碳源不足的问题^[5],为了提高脱氮效率,通常采用投加外碳源或采用多点进水的方式^[6]。在实际应用中,为了降低回流污泥溶解氧对厌氧区的影响,部分工艺会在厌氧区之前增加预缺氧区。这使得 Bardenpho 工艺存在多个缺氧区,因此,有必要寻找最佳碳源投加点,以便提高脱氮效率^[7]。当进水碳源较少,存在出水 TN 超标风险时,也可采取多点进水,向缺氧区提供内碳源,进而达到节约碳源的目的,而各进水点之间的进水分分配比例同样

会对 Bardenpho 工艺去除污染物有所影响^[8]。对 Bardenpho 工艺碳源投加点位、投加量、混合液回流比、多点进水分分配比例进行研究,可为 Bardenpho 工艺在实际工程中的应用提供有效的建议,对稳定污水厂的出水水质,提高管理效果,节约运行成本都有重要的意义^[9]。

1 材料与方法

1.1 试验装置

为对 Bardenpho 工艺碳源投加点位置、投加量、混合液回流比、多点进水分分配比例等进行研究,在某污水处理厂搭建一套中试试验装置进行连续性进水研究。试验进水水质如表 1 所示。

表 1 试验进水水质

Tab. 1 Test Influent Quality

指标	数值
悬浮物(SS)/(mg·L ⁻¹)	97~147
化学需氧量(COD)/(mg·L ⁻¹)	187~211
五日生化需氧量(BOD ₅)/(mg·L ⁻¹)	71~77
TN/(mg·L ⁻¹)	31~34
氨氮/(mg·L ⁻¹)	13~17
总磷(TP)/(mg·L ⁻¹)	2~3

如图 1 所示,中试装置进水取自污水厂厂区沉砂池出水,经生物池处理后,进入二沉池沉淀后排出。本中试装置处理规模为 0.15 m³/h,水力停留时间共 19.4 h。生物池共 6 个区域,污水依次通过预缺氧区、厌氧区、缺氧区、好氧区、后置缺氧区、后置好

氧区至二沉池。各区水力停留时间分别为 1.2、1.2、3.5、9.9、2.4、1.2 h。进水点预留 3 个,各自设在预缺氧区、缺氧区、后置缺氧区,通过进水可分别控制流量大小。好氧区至缺氧区设变频水泵,可控制混合液回流比从 200%~400% 进行调整。二沉池至预缺氧区的污泥回流比为 100%,二沉池的污泥

排放量为 100 L/d(污泥龄为 7 d)。本装置采用的总气水比为 4:1,在试验过程中控制好氧区溶解氧质量浓度为 2.0 mg/L 左右,后置好氧区溶解氧质量浓度为 2.0 mg/L 左右,控制预缺氧区、缺氧区、后置缺氧区的溶解氧质量浓度<0.5 mg/L,控制厌氧区的溶解氧质量浓度<0.2 mg/L。

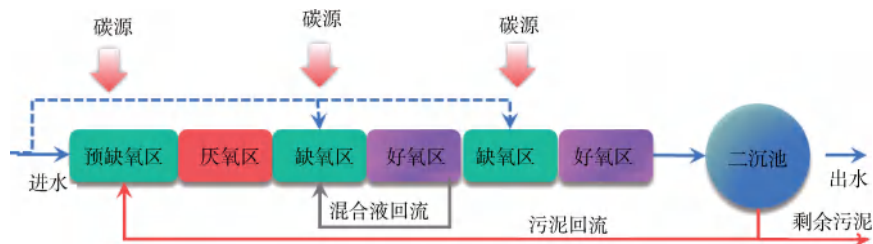


图 1 Bardenpho 工艺流程

Fig. 1 Process Flow of Bardenpho

1.2 研究方法

(1) Bardenpho 工艺最佳碳源投加点研究

为探求 Bardenpho 工艺最佳碳源投加点,本研究分别在预缺氧区(K 组)、缺氧区(M 组)、后置缺

氧区(N 组)投加碳源,并设置不加碳源的对照组,每组至少运行 3 周,每组取出水稳定后一周的水样进行检测(图 2)。

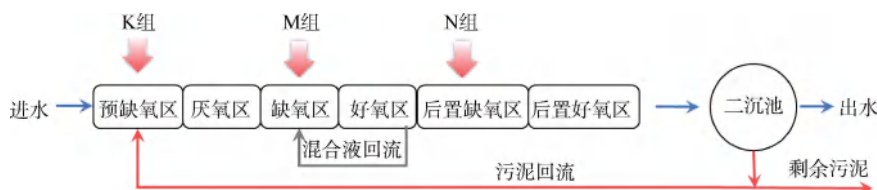


图 2 碳源投加点示意图

Fig. 2 Schematic Diagram of Carbon Source Dosing Points

(2) 碳源投加量与内回流比最佳的工况组合研究

在已找到最佳碳源投加点的基础上,设置多组碳源投加量与内回流比的工况组合,以探究最佳的工况组合。设置由 3 种不同投加量和 3 种不同内回流比组合出的 9 种运行工况,其工况编号如表 2 所示。其中,根据进水的平均 TN 浓度,计算出以出水 TN 质量浓度 ≤ 15 mg/L 为目标的理论碳源投加量(N_1),为 25.75 mg/L(以 COD 计),计算出以出水 TN 质量浓度 ≤ 8 mg/L 为目标的理论碳源投加量(N_3)为 51.50 mg/L,并以二者的算术平均值为碳源投加量(N_2)为 38.63 mg/L。本研究中投加碳源为商品三水乙酸钠(58.5%)。每组工况稳定运行一周,每日取样检测,并取每周的平均进出水水质检测值作为对比。

(3) 多点进水优化污染物去除性能研究

长期投加碳源将造成污水处理厂运行成本的大

表 2 不同运行参数组合工况编号
Tab. 2 Combined Working Condition Number of Different Operation Parameters

内回流比	N_1 工况编号	N_2 工况编号	N_3 工况编号
200%	N1-200	N2-200	N3-200
300%	N1-300	N2-300	N3-300
400%	N1-400	N2-400	N3-400

幅增加。为了增加低浓度进水下的脱氮效果,可采用多点进水方式,向缺氧区或后置缺氧分配一定流量的进水,加大进水碳源的有效利用,减少外碳源的投加。为研究不同进水分分配比下污染物的去除性能,进行了 3 组对比试验。进水分 3 路,分别从预缺氧区、缺氧区、后置缺氧区进入生物池,3 组均不额外投加碳源,污泥回流比采用 100%,混合液回流比采用 200%。3 组的流量分配比如下。

分配方式 1:预缺氧区:缺氧区:后置缺氧区=7:2:1。分配方式 2:预缺氧区:缺氧区:后置缺

氧区=6:3:1。分配方式3:预缺氧区:缺氧区:后置缺氧区=5:4:1。

1.3 检测指标及分析方法

中试装置稳定运行后,每日进行进出水水质监测。检测指标包括 COD、BOD₅、氨氮、TN、TP、硝酸盐氮、亚硝酸盐氮、pH、溶解氧、氧化还原电位、混合液悬浮固体/混合液挥发性悬浮固体 (MLSS/MLVSS) 等,测试方法参照《水和废水监测分析方法》(第四版)。

2 结果与分析

2.1 Bardenpho 工艺最佳碳源投加点研究

如图3所示,不同碳源投加点试验组及对照组在连续稳定运行7 d内出水COD浓度的差异,各组进水COD质量浓度为170~192 mg/L。总体上各工况组合出水COD均小于30 mg/L。由表3可知,COD的去除率差异较小,均在88%以上。如图3所示,不加碳源的对照组出水COD能够低至15 mg/L,去除率达到为91.7%,明显高于碳源投加组。将碳源投加至预缺氧区的K组,出水COD与对照组较为接近,略高于对照组。这可能是投加的碳源被后续的缺氧区反硝化反应所利用,并且好氧区的微生物同样会消耗碳源,导致K组出水COD较对照组变化不大。M组及N组的出水COD均高于K组和对照组,最高的出水COD为N组,其第3 d出水COD质量浓度达到26 mg/L。这表明碳源略微过量,未反应充分而被出水带出,导致出水COD浓度升高。M组平均出水COD质量浓度较N组低3 mg/L,这是由于M组的碳源历经缺氧区-好氧区-后置缺氧区-后置好氧区,其中第一个好氧区的停留时间为8.5 h,占总停留时间的44.5%,碳源经历较长的停留时间被好氧区微生物大量消耗所致。

如图4所示,不同碳源投加点试验组及对照组在连续稳定运行7 d内出水TN浓度及TN去除率的差异。不加碳源的对照组和将碳源投加至预缺氧区的K组,其出水的TN质量浓度均在15 mg/L以上,对照组第1 d和第2 d的出水TN质量浓度甚至达到19 mg/L以上,其平均TN去除率仅为45.6%,没有达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)中一级A排放标准对出水TN(≤ 15 mg/L)的要求。一般认为对于活性污泥系统需满足C/N>3,才能满足反硝化细菌利用碳源去除

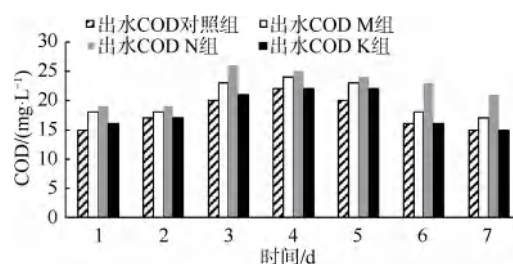


图3 不同碳源投加点试验组出水COD浓度差异

Fig. 3 Differences of COD Concentrations in Effluent of Experimental Groups with Different Carbon Source Dosing Points

表3 不同碳源投加点试验组COD去除率

Tab. 3 COD Removal Rates of Experimental Groups with Different Carbon Source Dosing Points

时间/d	对照组	M组	N组	K组
1	91.2%	89.4%	88.8%	90.6%
2	90.6%	90.0%	89.4%	90.6%
3	89.5%	87.9%	86.3%	88.9%
4	88.5%	87.4%	86.9%	88.5%
5	89.6%	88.0%	87.5%	88.5%
6	90.6%	89.5%	86.5%	90.6%
7	91.7%	90.6%	88.3%	91.7%

TN的需要。经检测,本研究中进水的BOD₅/TN为2.0~2.5,这说明进水碳源不足,影响了反硝化效率,导致出水TN不能达标。但是投加碳源至预缺氧区的K组依然未能实现较好的脱氮效果,其原因是预缺氧区的停留时间仅为1.2 h,而反硝化细菌的世代时间一般较长,并且该区域未设置内回流,无法提供充足的硝酸盐和反硝化细菌,因此,预缺氧区的反硝化作用有限。预缺氧区设置的目的是削弱回流污泥对厌氧区溶解氧的干扰,将碳源投加至预缺氧区并不能明显提高系统去除TN的能力。投加碳源至缺氧区和后置缺氧区的M组和N组则明显出水TN更低,均能保证出水TN质量浓度低于15 mg/L,其中出水TN最低的为N组,其出水TN最低质量浓度为9.12 mg/L,平均出水TN质量浓度为9.96 mg/L,平均TN去除率为69.4%。M组去除TN的效果弱于N组,其出水TN最低质量浓度为13.18 mg/L,平均出水TN质量浓度为13.81 mg/L,平均TN去除率为57.4%,这可能因为碳源被投加至缺氧区后又进入停留时间为8.5 h的好氧区,碳源被好氧区微生物所消耗,而进入后置缺氧区所剩的碳源不多,导致

提升后置缺氧区脱氮能力有限。当碳源投加至后置缺氧区时,能有效增强后置缺氧区的脱氮能力,碳源不会被好氧区所消耗。因此,碳源投加至后置缺氧区对于提高整体脱氮能力更合适。

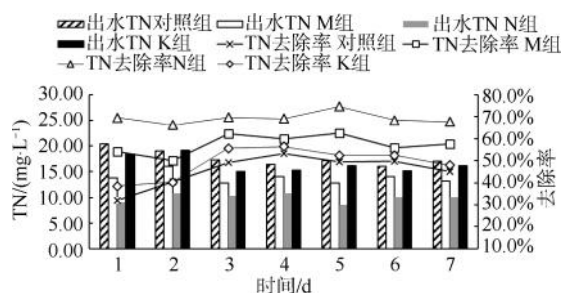


图4 不同碳源投加点试验组出水 TN 浓度及 TN 去除率差异

Fig. 4 Differences of TN Concentrations and TN Removal Rates in Effluent from Experimental Groups with Different Carbon Source Dosing Points

图5为不同工况下碳源投加点试验组及对照组在连续稳定运行7 d内出水 TP 浓度的差异。整体而言,各组对 TP 均有良好的去除效果,各组别7 d 进水 TP 质量浓度为 2.0~3.5 mg/L,出水 TP 质量浓度为 0.3~0.8 mg/L。出水 TP 最好的去除效果为将碳源投加至预缺氧区的 K 组,其平均出水 TP 质量浓度为 0.41 mg/L,最低可达 0.32 mg/L,TP 去除率最高为 84.4%。这可能是聚磷菌以异养菌为主,而预缺氧区停留时间较短(1.2 h),碳源经由预缺氧区进入厌氧区,促进了生化池内聚磷菌的生长繁殖,为好氧吸磷提供了更好的反应条件。

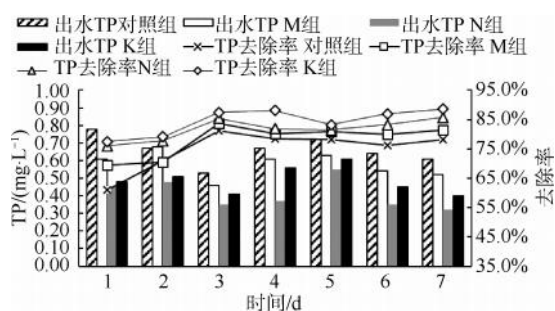


图5 不同碳源投加点试验组出水 TP 及 TP 去除率差异

Fig. 5 Differences of TP Concentrations and TP Removal Rates in Effluent from Experimental Groups with Different Carbon Source Dosing Points

综合以上,对各试验组别 COD、TN、TP 的对比分析,平均出水 COD 质量浓度:对照组 \approx K 组<M 组<N 组<30 mg/L。平均出水 TN 质量浓度:N 组 \leq

10 mg/L<M 组<15 mg/L<K 组<对照组。平均出水 TP 质量浓度:K 组 \approx N 组<0.5 mg/L<M 组<对照组<1 mg/L。从脱氮除磷的效果看,碳源投加点为后置缺氧区 N 组能保证较低的出水 TN,并且能够兼顾 COD 和 TP 的去除效果。因此,经试验的验证,本研究中 Bardenpho 工艺最佳碳源投加点为后置缺氧区。

2.2 碳源投加量与内回流比参数组合研究

根据上述研究,最佳碳源投加点为后置缺氧区,因此,在本小节的研究中,将碳源投加至后置缺氧区,设置不同的内回流比和碳源投加量寻求最佳的运行工况。

图6为不同内回流比与碳源投加量试验组别下水 COD 浓度及 COD 去除率的差异。将投加量相同的3个试验组别视为一组,整体对比 N₁ 组、N₂ 组、N₃ 组可以明显看出,随着碳源投加量的增加出水 COD 也随之增加。N₁ 组3个试验组别出水 COD 质量浓度为 16.67~20.20 mg/L, COD 去除率为 89.35%~91.28%;N₂ 组3个试验组别出水 COD 质量浓度为 24.40~29.28 mg/L, COD 去除率为 79.26%~82.11%;N₃ 组3个试验组别出水 COD 质量浓度为 50.75~58.20 mg/L, COD 去除率为 70.06%~74.17%。投加量为 N₃ 的3个试验组(N3-200、N3-300、N3-400)的出水 COD 均超过《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)中一级 A 对 COD 的限值(≤ 50 mg/L)。此外,对比同一投加量的试验组可知,随着内回流比的增加,出水 COD 整体呈下降趋势, COD 的去除率随之上升,这是因为增加内回流比相当于增加了碳源在系统中的循环时间,使得碳源可以被充分消耗。

图7为不同内回流比与碳源投加量试验组别下水 TN 浓度及 TN 去除率的差异。随着投加量的增加,出水 TN 浓度逐渐降低, TN 的去除率逐渐升高。N₁-300、N₂-300、N₃-300 的出水 TN 质量浓度分别为 11.09、8.15、6.33 mg/L,其 TN 的去除率分别为 64.23%、76.03%、79.58%。这是因为充足的碳源供给有利于生物脱氮反应的进行。N₁ 组3个试验组的出水 TN 质量浓度为 11.09~13.14 mg/L, N₂ 组3个试验组的出水 TN 质量浓度为 8.15~9.89 mg/L, N₃ 组3个试验组的出水 TN 质量浓度为 6.33~7.94 mg/L。试验结果表明, N₁ 组的投加量(25.75 mg/L)可以保证出水 TN 质量浓度低于 15

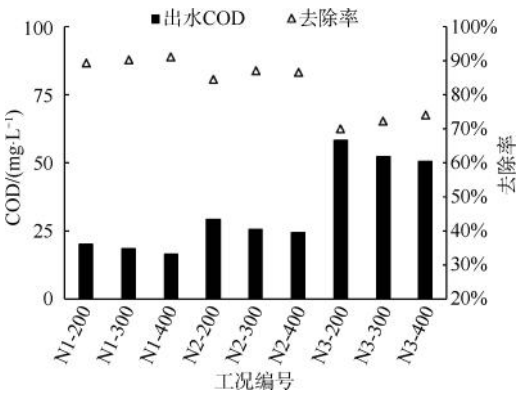


图 6 不同工况组合下水 COD 及 COD 去除率差异
Fig. 6 Differences of Effluent COD and COD Removal Rates under Different Operation Conditions

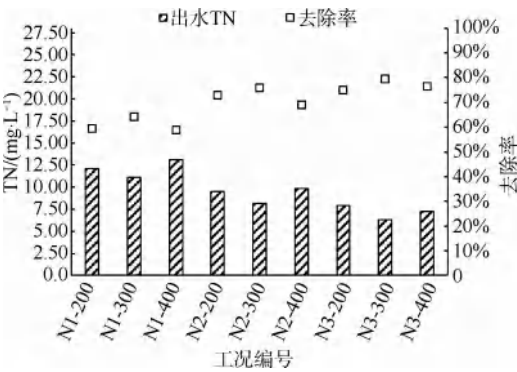


图 7 不同工况组合下水 TN 及 TN 去除率差异
Fig. 7 Differences of Effluent TN and TN Removal Rates under Different Operation Conditions

mg/L,满足一级 A 排放标准中对出水 TN 的要求, N_2 组的投加量 (38.63 mg/L)、 N_3 组的投加量 (51.50 mg/L) 分别可保证出水 TN 低于 10、8 mg/L。对比同一投加量下,不同内回流比的试验组,如

$N2-200$ 、 $N2-300$ 、 $N2-400$,可以发现,当内回流比从 200%增长到 300%时,TN 的去除率从 72.89%增加到 76.03%,当内回流比继续增加到 400%时,TN 的去除率反而从 76.03%下降到 69.09%,这是因为反硝化反应不仅需要充足的碳源,而且也需要充足的硝酸盐,内回流比的增加使得缺氧区的硝酸盐也增加了,但内回流比一味地增加,则会将好氧区的溶解氧带入缺氧区,使得缺氧区的溶解氧浓度升高,会导致好氧细菌与反硝化细菌争夺碳源,不利于反硝化反应的进行。

表 4 为仅计算碳源投加成本和水泵电耗成本的运行成本分析。本研究中碳源采用商品三水乙酸钠 (58.5%),市场价按 2 400 元/t 计算,电费按工业用电 0.7 元/(kW·h)计算。投加量为 N_1 (25.75 mg/L) 的 3 个试验组,碳源成本为 0.161 元/ m^3 ,其出水 TN 质量浓度为 11.09 ~ 13.14 mg/L;投加量为 N_2 (38.63 mg/L) 的 3 个试验组,碳源投加成本为 0.242 元/ m^3 ,其出水 TN 质量浓度为 8.15 ~ 9.89 mg/L;投加量为 N_3 (51.50 mg/L) 的 3 个试验组,碳源投加成本为 0.322 元/ m^3 ,其出水 TN 质量浓度为 6.33 ~ 7.94 mg/L。这表明增加碳源的投加量能够有效降低出水 TN,但同时碳源的投加成本也会显著上升,药耗成本占总脱氮成本的 70% ~ 80%。内回流比的增加通过开启水泵的台数来实现,当内回流比从 200%增加到 400%时,水泵电耗成本从 0.043 元/ m^3 增加到 0.067 元/ m^3 ,内回流比的增加能够一定程度地提高脱氮的效率,比增加碳源投加量的方式更节约成本。

表 4 不同工况组合下脱氮成本
Tab. 4 Denitrification Costs under Different Operation Conditions

工况编号	内回流比	出水 TN/(mg·L ⁻¹)	碳源成本/(元·m ⁻³)	水泵电耗成本/(元·m ⁻³)	运行成本/(元·m ⁻³)	药耗占比
N1-200	200%	11.09~13.14	0.161	0.043	0.204	78.92%
N1-300	300%			0.052	0.213	75.59%
N1-400	400%			0.061	0.222	72.52%
N2-200	200%	8.15~9.89	0.242	0.044	0.286	84.62%
N2-300	300%			0.051	0.293	82.59%
N2-400	400%			0.063	0.305	79.34%
N3-200	200%	6.33~7.94	0.322	0.047	0.369	87.26%
N3-300	300%			0.057	0.379	84.96%
N3-400	400%			0.067	0.389	82.78%

综合以上分析, N3-200、N3-300、N3-400 这 3 个试验组别虽然能够获得较好的 TN 去除效果, 但其碳源投加成本达到了 $0.322 \text{ 元}/\text{m}^3$, 成本较高。并且碳源的投加量过高容易导致出水 COD 超标。N1-200、N1-300、N1-400 这 3 个试验组可以基本满足出水水质达到一级 A 排放标准的要求, 其药耗和水泵电耗约为 $0.2 \text{ 元}/\text{m}^3$ 。随着环保要求的不断提高, 许多地方已不再仅满足于出水达到一级 A 排放标准, 部分地区要求出水 COD 质量浓度 $\leq 30 \text{ mg/L}$, 出水 TN 质量浓度 $\leq 10 \text{ mg/L}$ 。N2-200、N2-300、N2-400 这 3 个试验组均可满足这一要求, 在这 3 组中, N2-200 的出水 TN 质量浓度为 9.49 mg/L , 内回流比再增加 100% 的 N2-300 的出水 TN 质量浓度为 8.15 mg/L , 但当内回流比继续增加 100% 的 N2-400 试验组的出水 TN 又上升到 9.89 mg/L 。这是因为内回流比的增加可以提供足够的硝酸盐, 但如果内

回流比过高则容易将好氧区的溶解氧带到缺氧区, 反而影响反硝化反应并且也会同时增加水泵的电耗。因此, 综合来看, N2-300 的试验组为最优的碳源投加量与内回流比工况的组合。

2.3 多点进水优化污染物去除性能

当进水 C/N 为 3~4 时, 可不投加碳源, 通过多点进水的方式提高碳源利用率, 提高运行效能, 在多点进水试验下, 将污泥质量浓度由 3000 mg/L 左右提升至 4000 mg/L 左右, 采用 200% 混合液回流比; 同时为了尽量减少碳源的无效氧化, 将前段好氧区溶解氧控制在 $1.5 \sim 2.0 \text{ mg/L}$, 后置好氧区溶解氧控制在 $2.0 \sim 2.5 \text{ mg/L}$ 。如图 8 所示, 在采用多点进水分配模式下, 活性污泥的微生物镜检中发现指示性微生物钟虫和轮虫, 这表明在不投加碳源的情况下, 采用多点进水分配的方式也能得到良好的运行效果。

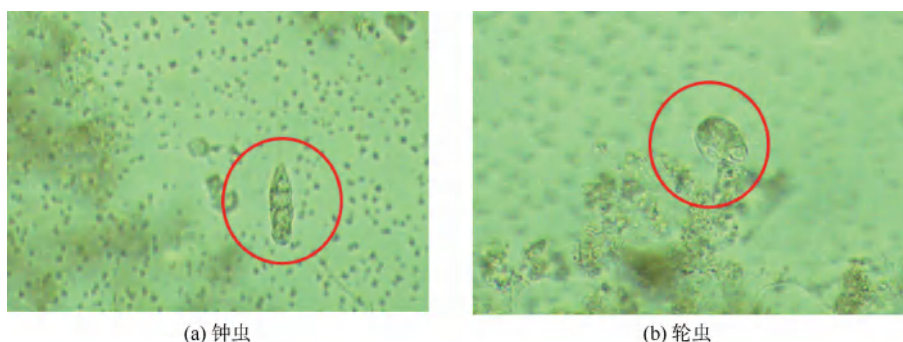


图 8 活性污泥微生物镜检

Fig. 8 Microbial Microscopy Examination of Activated Sludge

如图 9 所示, 当进水分配比例从 7 : 2 : 1 变为 6 : 3 : 1 时, 出水 TN 有明显的下降。当进水分配比例为 7 : 2 : 1 时, 出水 TN 质量浓度为 $12.17 \sim 13.32 \text{ mg/L}$, 平均出水 TN 质量浓度为 12.65 mg/L ; 当进水分配比例为 6 : 3 : 1 时, 出水 TN 质量浓度为 $9.55 \sim 10.83 \text{ mg/L}$, 平均出水 TN 质量浓度为 10.68 mg/L 。缺氧区进水分配比增加 10%, 使得平均出水 TN 质量浓度减少了 1.97 mg/L 。分析其原因是预缺氧区的停留时间较短, 反硝化作用有限, 当缺氧区的进水分配增加后, 可以更加有效地利用进水中的有机物, 为反硝化反应提供碳源, 提供电子供体。当缺氧区的进水比例进一步增加, 也即流量分配变为 5 : 4 : 1 时, 出水 TN 仍有小幅的下降, 其平均出水 TN 质量浓度为 9.23 mg/L 。

如图 10 所示, 从出水 TP 的情况来看, 其变化

趋势与 TN 的变化趋势相反, 随着缺氧区进水比例的提高, 出水 TP 不断上升。进水分配比例为 7 : 2 : 1、6 : 3 : 1、5 : 4 : 1 时, 其平均出水 TP 质量浓度为 0.33 、 0.40 、 0.55 mg/L 。这是随着预缺氧区的进水流量减少, 导致其后进入厌氧区的碳源也随之减少, 使得聚磷菌未在厌氧区充分释磷, 从而影响聚磷菌在好氧池吸磷。可见, 当进水分配比例为 6 : 3 : 1 时, 可以确保 TN 质量浓度 $< 11 \text{ mg/L}$, TP 质量浓度 $< 0.5 \text{ mg/L}$, 兼顾脱氮和除磷的效果。

2.4 Bardenpho 工艺强化脱氮策略

图 11 为基于本研究试验结果总结出的 Bardenpho 工艺强化脱氮策略图。当污水厂的进水为低 C/N 时, 若进水 C/N 为 3~4, 可以尝试不加碳源采用多点进水的方式, 推荐预缺氧区 : 缺氧区 : 后置缺氧区的进水分配比例为 7 : 2 : 1; 若脱氮效

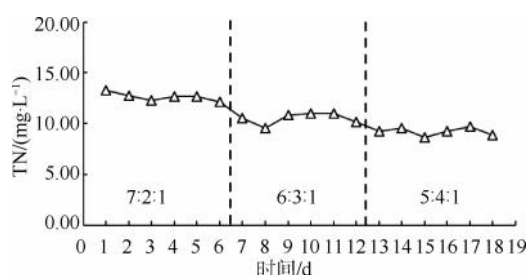


图 9 不同进水分配比例下出水 TN 浓度

Fig. 9 TN Concentration in Effluent under Different Influent Distribution Ratios

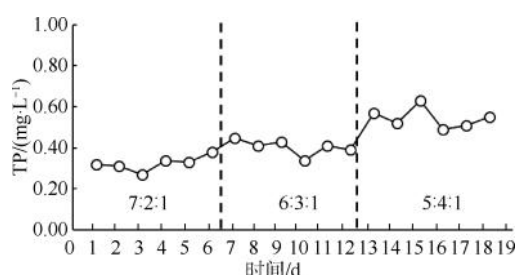


图 10 不同进水分配比例下出水 TP 浓度

Fig. 10 TP Concentration in Effluent under Different Influent Distribution Ratios

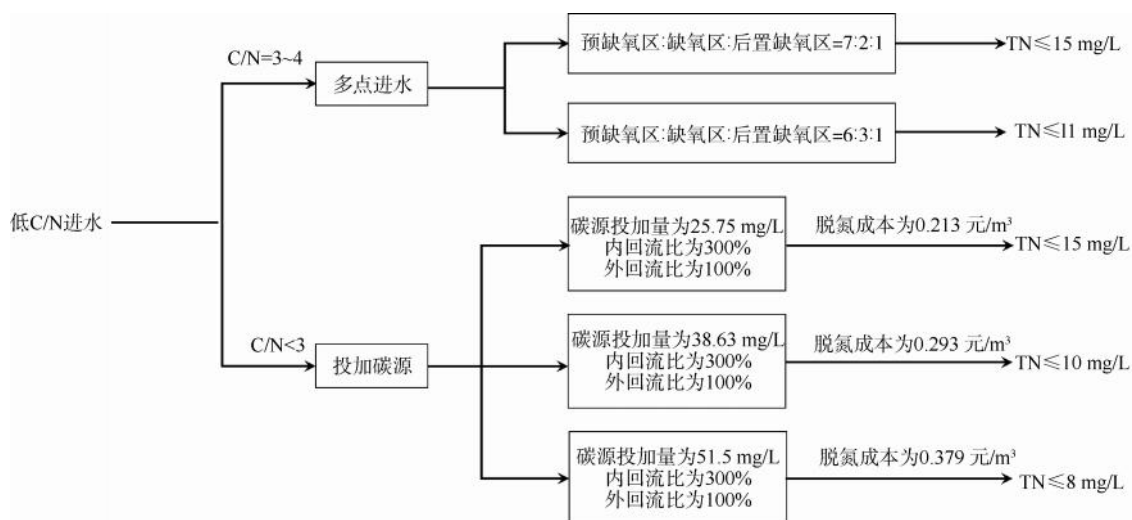


图 11 Bardenpho 工艺强化脱氮策略图

Fig. 11 Strategy Chart of Bardenpho Process Enhanced Denitrification

果不佳,可继续增加缺氧区的进水比例到 6:3:1,但应注意不宜将预缺氧区的进水比例调得过低,否则可能会出现 TP 超标的风险;如若进水 C/N<3,可选择投加碳源的方式,推荐碳源投加量为后置缺氧区,外回流比采用 100%,内回流比采用 300%。本研究采用的碳源为乙酸钠,碳源投加量越多脱氮效果越好,但过量的碳源投加也可能导致出水 COD 超标,同时带来脱氮成本过高。本研究中,碳源投加量为 25.75 mg/L 时,脱氮成本为 0.213 元/m³,出水 TN 质量浓度可达 15 mg/L 以下;碳源投加量为 38.63 mg/L 时,脱氮成本为 0.293 元/m³,出水 TN 质量浓度可达 11 mg/L 以下;碳源投加量为 51.5 mg/L 时,脱氮成本为 0.379 元/m³,出水 TN 质量浓度可达 8 mg/L 以下。污水厂在实际运行时,可根据所能承受的脱氮成本及脱氮目标,合理参考本研究成果的碳源投加量。

3 结论

(1) Bardenpho 工艺最佳碳源投加量为后置缺氧区,在该处投加碳源更有利于系统脱氮效率的提升,同时还能兼顾 COD 和 TP 的去除效果。

(2) 当碳源投加量为 38.63 mg/L,内回流比为 300%时,兼顾了脱氮除磷的效果和运行成本,其出水 TN 质量浓度为 8.15 mg/L,运行成本为 0.293 元/m³。

(3) 碳源投加过多,能有效降低出水 TN,但同时有可能导致出水 COD 超标,脱氮成本过高。增加内回流可获得更好的脱氮效果,当内回流超过 400%后,将导致回流设施能耗较高,且回流液溶解氧升高,不利于脱氮反应。

(4) 当进水 C/N 为 3~4 时,可通过多点进水的方式在不投加外碳源的情况下有效提高脱氮除磷。当进水分配比例为预缺氧区:缺氧区:后置缺氧

区=6:3:1时,可以确保 TN 质量浓度<11 mg/L, TP 质量浓度<0.5 mg/L。

参考文献

- [1] 杨平,周家中. 基于 MBBR 的 AAO 和 Bardenpho 工艺改造效果对比[J]. 中国给水排水, 2021, 37(7): 11-19.
YANG P, ZHOU J Z. Comparison of AAO and Bardenpho processes transformation effect based on MBBR [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(7): 11-19.
- [2] 王延萍. Bardenpho 工艺与多级 AO 工艺对比分析[J]. 天津建设科技, 2019, 29(6): 41-43.
WANG Y P. Comparative analysis of Bardenpho process and multi-level AO process [J]. Tianjin Construction Science and Technology, 2019, 29(6): 41-43.
- [3] 朱泽龙,王琴. 改良型 Bardenpho 工艺处理生活污水的效果分析[J]. 煤炭与化工, 2016, 39(12): 143-147.
ZHU Z L, WANG Q. Performance analysis of modified Bardenpho process for treatment of municipal wastewater [J]. Coal and Chemical Industry, 2016, 39(12): 143-147.
- [4] 姚伟涛,肖社明,张永祥. 改良 Bardenpho 工艺处理低 BOD₅/TN 混合污水工程设计[J]. 中国给水排水, 2018, 34(14): 67-70.
YAO W T, XIAO S M, ZHANG Y X. Project design of modified Bardenpho process for treatment of low BOD₅/TN mixed wastewater [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(14): 67-70.
- [5] 周子鹏. 低碳源污水同步脱氮除磷工艺应用研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2009.
- ZHOU Z P. Research on the application of simultaneous nitrogen and phosphorus removal process for low carbon source sewage [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2009.
- [6] 张义悦,韦伟,朱曙光. 低碳源城市污水脱氮处理方法研究进展[J]. 安徽建筑大学学报, 2021, 29(4): 58-63.
ZHANG Y Y, WEI W, ZHU S G. Research progress on denitrification of low carbon source municipal wastewater [J]. Journal of Anhui Jianzhu University, 2021, 29(4): 58-63.
- [7] 崔洪升,刘世德. 强化脱氮 Bardenpho 工艺碳源投加位置及内回流比的确定[J]. 中国给水排水, 2015, 31(12): 22-24.
CUI H S, LIU S D. Determination of carbon source addition position and internal reflux ratio in Bardenpho process for enhanced denitrification [J]. China Water & Wastewater, 2015, 31(12): 22-24.
- [8] 王敏,张智,陈杰云,等. 不同流量分配比对多级 A/O 工艺去除有机物及脱氮的影响[J]. 环境工程学报, 2013, 7(4): 1430-1434.
WANG M, ZHANG Z, CHEN J Y, et al. Influence of different influent flow distribution ratios on biological nitrogen and carbon removal by multi-stages A/O process [J]. Journal of Environmental Engineering, 2013, 7(4): 1430-1434.
- [9] 鲍任兵,高廷杨,宫玲,等. 污水生物脱氮除磷工艺优化技术综述[J]. 净水技术, 2021, 40(9): 14-20.
BAO R B, GAO T Y, GONG L, et al. Review of process optimization of biological denitrification and phosphorus removal in wastewater treatment [J]. Water Purification Technology, 2021, 40(9): 14-20.

(上接第 52 页)

- [39] ZHANG Y, WANG F, XIA W, et al. Anaerobic methane oxidation sustains soil organic carbon accumulation [J]. Applied Soil Ecology, 2021, 167: 104021. DOI: 10.1016/j.apsoil.2021.104021.
- [40] NA Q, DOUGLAS S, EVGENIA B, et al. Labile carbon retention compensates for CO₂ released by priming in forest soils [J]. Global Change Biology, 2014, 20(6): 1943-1954.
- [41] DARREL G J, AMITAVA C. Soil metabolic pulses: Water, substrate, and biological regulation. [J]. Ecology, 2012, 93(5): 959-966.