

净水技术前沿与热点综述

陈飞勇, 孙星宇, 刘汝鹏, 等. BBR 污水处理工艺研究现状及其应用进展[J]. 净水技术, 2025, 44(11): 1-11, 97.

CHEN F Y, SUN X Y, LIU R P, et al. Research status and application progress of BBR wastewater treatment process[J]. 净水技术, 2025, 44(11): 1-11, 97.

BBR 污水处理工艺研究现状及其应用进展

陈飞勇¹, 孙星宇^{1,2}, 刘汝鹏¹, 孙翠珍², 李恺凝^{1,2}, 耿淑英^{1,*}

(1. 山东建筑大学资源与环境创新研究院, 山东济南 250101; 2. 山东建筑大学市政与环境工程学院, 山东济南 250101)

摘要 【目的】随着污水处理排放标准的日益严格,传统厌氧-缺氧-好氧(AAO)工艺在处理效率、占地面积及低温适应性等方面面临挑战。文章旨在系统阐述以芽孢杆菌为优势菌的芽孢杆菌生物反应器(*Bacillus* bioreactor, BBR)污水处理工艺的研究现状、核心优势、应用进展及存在问题,评估其作为提标改造技术的潜力与应用前景。【方法】通过文献综述与案例分析相结合的方法,详细梳理 BBR 工艺的核心组成及其作用机制,深入分析该工艺高效去除化学需氧量(COD)、脱氮、除磷的原理,对比其与传统工艺在污染物去除效率、占地面积、能耗、碳氮比适应性等方面的差异,总结国内外在曝气池溶解氧(DO)浓度优化、低温运行性能、典型药物与抗生素耐药基因去除、生物转盘挂膜方式及生物膜形成影响因素等方面的研究进展,并考察其在城市污水、畜牧业污水和工业废水处理中的实际应用案例。【结果】BBR 工艺具有显著优势:高效去除多种污染物、除臭性能强、占地面积小、所需供气量少、系统碳氮比要求低,且在低温环境下能稳定运行,对部分药物具有良好去除效果,实际应用案例证实,其提标改造效果显著,出水水质提升。然而,该工艺也面临着一些挑战。【结论】BBR 工艺是一种高效节能、适应性强的创新型污水处理技术,在处理严格排放标准、低碳氮比污水及在低温环境条件下优势突出,在城市、畜牧业及特定工业废水处理中应用前景广阔。未来需通过技术创新降成本、探索工艺耦合扩规模、深化新污染物去除研究、应用智能化管理以克服挑战,推动更广泛应用。

关键词 芽孢杆菌生物反应器(BBR) 芽孢杆菌 低温运行 低碳氮比 生物转盘

中图分类号: TU992 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-0177(2025)11-0001-12

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2025.11.001

Research Status and Application Progress of BBR Wastewater Treatment Process

CHEN Feiyong¹, SUN Xingyu^{1,2}, LIU Rupeng¹, SUN Cuizhen², LI Kaining^{1,2}, GENG Shuying^{1,*}

(1. Institute of Resource and Environmental Innovation, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China;

2. School of Municipal and Environmental Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China)

Abstract [Objective] With the increasingly strict standards for sewage treatment and discharge, the conventional anaerobic-anoxic-oxic(AAO) process is facing challenges in terms of treatment efficiency, land occupation and low-temperature adaptability. This paper aims to systematically expound the research status, core advantages, application progress and existing problems of the *Bacillus* bioreactor (BBR) wastewater treatment process with *Bacillus* as the dominant bacteria, and evaluate its potential and application prospects as an upgrading and transformation technology. [Methods] By combining the method of literature review and case analysis, the core components and action mechanisms of the BBR process are sorted out in detail. The principles of the efficient removal of

[收稿日期] 2024-10-29

[基金项目] 国家自然科学基金青年科学基金项目(52400218);山东省高端人才项目支持计划(0031504);山东省自然科学基金青年科学基金项目(ZR2023QD063)

[作者简介] 陈飞勇(1963—),男,教授,主要从事水源地管理与环境保护工程研究工作,E-mail:ctokyo@hotmail.com。

[通信作者] 耿淑英,女,博士研究生,主要从事水土环境污染修复、环境微生物、环境功能菌剂材料研发等方面的研究工作,E-mail:gengshuying22@sdjzu.edu.cn。

chemical oxygen demand(COD), nitrogen and phosphorus by this process are deeply analyzed. The differences between it and the traditional process in terms of pollutant removal efficiency, land occupation, energy consumption and adaptability of carbon-nitrogen ratio are compared. The research progress at home and abroad in the optimization of dissolved oxygen(DO) concentration in aeration tanks, low-temperature operation performance, removal of typical drug and antibiotic resistance genes, biofilm formation method on biological rotating discs and influencing factors of biofilm formation, and investigating its practical application cases in the treatment of urban sewage, livestock wastewater and industrial wastewater are summarized. [Results] BBR process has significant advantages; it can efficiently remove multiple pollutants, has strong deodorization performance, occupies a small area, requires less air supply, has a low carbon-nitrogen ratio requirement for the system, and can operate stably in low-temperature environments. It also has a good removal effect on some drugs. Practical application cases have confirmed that its upgrading and transformation effects are significant, and the effluent quality has improved. However, this process also faces some challenges. [Conclusion] The BBR process is an innovative wastewater treatment technology that is highly efficient, energy-saving and highly adaptable. It has outstanding advantages in treating wastewater with strict standards, low carbon-nitrogen ratio and low-temperature environments, and has broad application prospects in urban, livestock and specific industrial wastewater treatment. In the future, challenges need to be overcome through technological innovation to reduce costs, exploration of process coupling to expand scale, deepening research on the removal of new pollutants, and application of intelligent management to promote wider application.

Keywords *Bacillus* bioreactor (BBR) *Bacillus* low-temperature operation low carbon-nitrogen ratio biological rotating disc

随着社会的发展,人们的环境保护意识日益提升,政府正在不断加大对于污染物排放的严格规定^[1]。同时,随着生活水平的提升和工业化进程的加快,污水中不仅含有传统的生活污水成分,还夹杂了大量工业生产过程中产生的化学污染物,导致城市污水处理的难度剧增^[2]。为确保出水符合更高的排放标准,对污水处理厂进行提标改造势在必行^[3]。传统污水处理厂大多采用厌氧-缺氧-好氧(AAO)工艺处理污水,该工艺虽然成熟,但是在实际生产运行中,硝化菌、反硝化菌和聚磷菌可能会因有机负荷、污泥龄以及碳源需求的不同而产生冲突和竞争等现象^[4]。为了克服这些问题,近年来,污水处理厂采用以芽孢杆菌为优势菌的芽孢杆菌生物反应器(*Bacillus* bioreactor, BBR)污水处理工艺进行提标改造,并取得了可观的环境和经济效益^[5]。本文将介绍 BBR 工艺研究现状及其应用进展,提出一些可供参考的内容。

1 BBR 工艺概述

1.1 BBR 工艺简介及其流程

BBR 工艺是一种生物反应器技术,它采用芽孢杆菌作为优势菌种,将其与生物转盘技术相结合,以活性污泥法和回转生物接触法为基础,通过不断改良和发展,最终形成了一种高效的有机污水处理系统^[6]。该工艺融合了附着型与悬浮型生物处理的双重优势,通过集成多种生化处理策略,包括缺氧、兼氧及好氧环境的灵活运用,以及精心筛选并应用

的高效复合菌种,实现了对各种浓度有机废水的有效处理^[7]。BBR 工艺主要由混合调节池、BBR 装置、曝气池及沉淀池组成。其中,BBR 装置是 BBR 工艺的核心技术所在,由以芽孢杆菌为优势菌种的生物集团、立体网状生物接触设备和营养液构成^[8]。

BBR 工艺常规处理流程如图 1 所示。原水经过格栅与沉砂池后,进入混合调节池,并与从污泥池回流的污泥及从曝气池回流的循环液按照一定比例混合,形成均匀的混合液。该混合液流转至 BBR 装置内,经历转盘生化反应阶段后,可去除部分的化学需氧量(COD)、生化需氧量(BOD)及氨氮。随后,混合液进入曝气池中进行完全混合模式的曝气生化处理,以提升有机物的降解效果。处理后的混合液进入沉淀池静置沉淀实现泥水高效分离,上清液再经过消毒等深度处理,确保各项指标符合排放标准

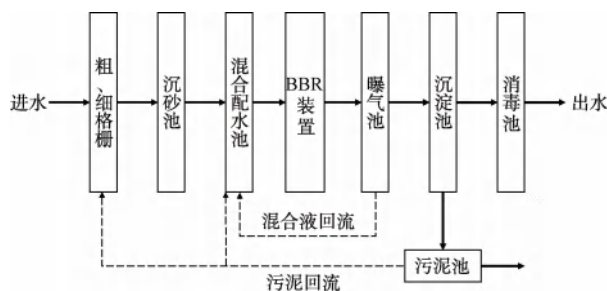


图 1 BBR 工艺常规处理流程^[8]

Fig. 1 Flow Conventional Treatment of BBR Process^[8]

后排放。沉淀池中的部分污泥回流至混合槽,以保持系统的稳定性和处理效率。污泥池中剩余的污泥通过污泥脱水车间的脱水处理形成泥饼,可外运进行资源再利用^[8]。

1.2 BBR 工艺的主要组成部分及功能

1.2.1 芽孢杆菌

芽孢杆菌是一种多样的菌种组合,其中涵盖了诸如巨大芽孢杆菌、枯草芽孢杆菌、解淀粉芽孢杆菌以及苏云金芽孢杆菌等多种不同的菌属^[9]。芽孢杆菌是一类具备好氧或兼性厌氧特性的革兰氏阳性细菌,它们属于化能异养型微生物,能产生具有抵抗力的芽孢,以应对各种不利的环境^[10]。其生存条件较为宽泛,营养需求相对简单,使得它们生长速度快且分布广^[11]。

在污水处理中,芽孢杆菌在发育繁殖过程中能摄取污水中有机物、氮、磷等物质,从而达到处理污水的效果。除此之外,某些芽孢杆菌对于含药物的废水也具有一定的去除作用^[12]。

当外部环境变得不适宜时,芽孢杆菌为了生存会转变为内生孢子,并进入休眠状态以应对恶劣条件。而当外部环境恢复适宜时,这些内生孢子便会重新发芽、迅速成长并繁殖^[10]。当芽孢杆菌处于孢子状态时,它们会分泌胶性物质,这些物质能够相互交织,将周围的悬浮物紧密地缠绕在一起,形成大型的絮体,这些絮体在沉淀池中能够达到固液分离的效果^[13]。

1.2.2 立体网状生物接触设备

立体网状生物接触设备的主要材质是特殊纤维聚偏二氯乙烯(PVDC),该装置具有多种功能,包括激活芽孢杆菌、维护菌群的稳定和促进它们的繁衍。微生物能够渗透并定居于立体网状结构的深处,这种设计巧妙地防止了回转体表面生物层因外部环境变化而脱落,确保了生物膜的稳定性与持续性。该新型的载体具有超过 95% 的孔隙,微生物附着率是常规载体如聚乙烯(PE)、聚氯乙烯(PVC)、聚丙烯(PP)的 900 倍,膜片质量轻,密度只有 0.05~0.06 g/cm³。将它的 40% 放入水中,并且以 2.5~5.0 r/min 的速度运行^[7]。由于膜片具备出色的阻气性、阻湿性、低渗透性和耐候性,回转体展现出了卓越的耐腐蚀特性,使用寿命可达 20 年以上^[13]。

1.2.3 营养液

营养液,即 Sun-α 水溶液,源自多种精选水果的

萃取精华,这种高级酵母液成分展现出抗酸化特性。这种高效成分能够显著抑制废水及污泥环境中腐败菌与杂菌的滋生,为处理过程提供了额外的保障^[7]。此外,该溶液还能激发芽孢杆菌生成芽孢,并促进一系列酶促反应的顺利进行。这种黏液在高碳源、长泥龄的转盘环境中更易附着,增强了菌群的凝聚力。同时,由芽孢产生的黏稠物质不仅有助于提升除磷效率,还蕴含着消毒能力,对水中大肠杆菌、丝状菌及病毒等有害微生物展现出有效的抑制作用^[14]。

1.2.4 曝气池

曝气池紧接着 BBR 装置,其中有芽孢杆菌、硝化菌、反硝化菌及聚磷菌等生物体,可以通过调节池内溶解氧(DO)的浓度来实现生物脱氮、除磷和降解有机物的目的^[7]。芽孢杆菌在 DO 质量浓度为 0.1~1.0 mg/L 时活性最高,能高效摄取有机物、氮、磷等。因此,曝气池中的 DO 质量浓度不宜过高,一般也控制在 0.1~1.0 mg/L,这不仅有利于芽孢杆菌的生长繁殖,也有助于节省曝气池的曝气量,从而减少运行的费用^[9]。

1.3 BBR 工艺特点及原理

BBR 工艺具有高效去除 COD、高效脱氮除磷、除臭性能强、占地面积小、所需供气量小、系统碳氮比要求低等众多特点,使其能够成为许多污水处理厂在进行提标改造时所采用的工艺。

1.3.1 高效去除 COD

BBR 工艺对于 COD 的去除率可达到 85%~91%,其原理是芽孢杆菌具有强大的代谢活性,能够利用污水中的有机物作为营养源,通过氧化、分解等生物化学过程,将有机物转化为无害的物质,从而达到去除污水中有机物的目的。值得注意的是,在芽孢杆菌的增殖过程中,它们能够合成并释放一系列具有特定生物活性的酶,其中包括过氧化酶与超氧化物歧化酶,在超氧化物歧化酶的催化作用下会将活性氧转化为过氧化氢,进而在过氧化氢酶的分解作用下转化为 H₂O 和 O₂(图 2)。这一过程不仅有效减轻了超氧阴离子自由基对生物体的潜在威胁,还通过生成的 H₂O 和 O₂ 促进了生物体的正常生理功能^[7]。

1.3.2 高效脱氮

在传统的 AAO 工艺中污水的脱氮是先在好氧

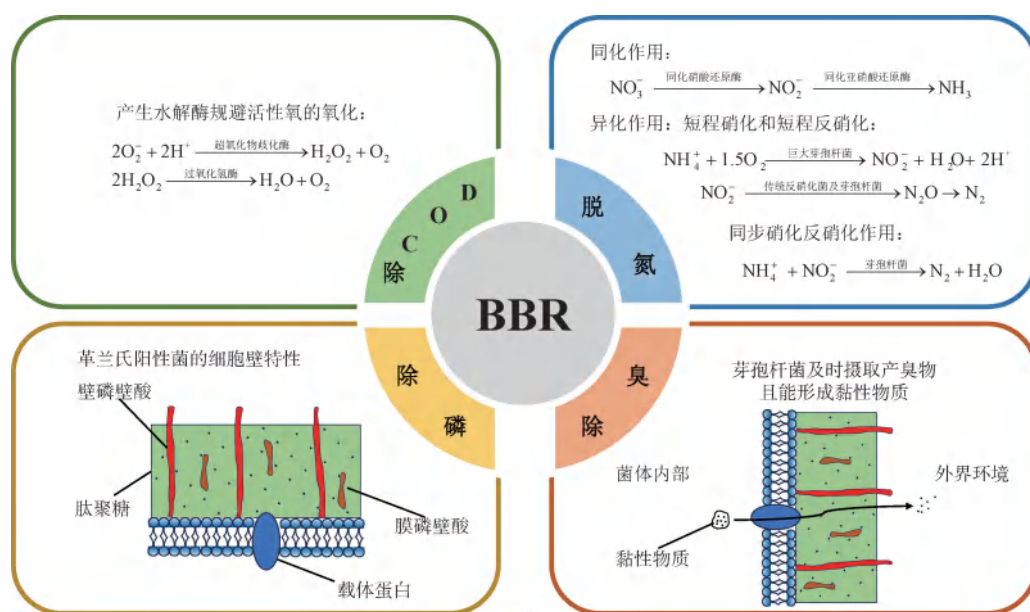


图2 BBR 工艺原理

Fig. 2 Schematic of BBR Process

池中进行硝化过程,将污水中的氮元素氧化为 NO_3^- ,后回流至缺氧池中进行反硝化过程,将 NO_3^- 还原为氮气,并被释放到大气环境,从而实现氮元素的去除^[15],这种工艺对于氮的去除率可达到 60% ~ 75%,而 BBR 工艺的去除率可高达 80% ~ 95%^[16]。BBR 工艺的高效脱氮是其在运行中 3 种作用同步进行的结果,即 BBR 装置中的同步硝化反硝化作用、芽孢杆菌的同化作用和异化作用。

同步硝化反硝化作用,是指在同一反应器内实现硝化过程与反硝化过程,这种技术不仅提高了氮元素的去除效率,而且节省了设备建设的成本。该技术的理论依据是在一个反应器内由于 DO 的浓度不同,既产生了利于进行硝化反应的环境,又产生了利于进行反硝化反应的环境,从而达到直接污水脱氮的效果^[17]。BBR 装置就有这样的优势,它的转盘约有 40% 的部分沉浸于水中,并以 2.5 ~ 5.0 r/min 的低速旋转,在空气与水体之间交替转动,从而在设备的内部划分出 2 个生态区域:水面之上的好氧区与水面之下的缺氧区。此外,BBR 装置上的生物膜具有一定的厚度,在生物膜的外层多分布着好氧的微生物,而在生物膜的内层则多分布着厌氧的微生物,在膜内外分别构建了好氧与缺氧的环境,这相当于在装置内部构建了双重厌氧-好氧(AO)系统。由于 BBR 装置的生物附着率很高,即使在较短的污

水停留时间内,也能促进微生物在这两级 AO 系统中同步完成硝化与反硝化过程,提升了生物脱氮的效率与效果^[8]。

芽孢杆菌的同化作用,是指芽孢杆菌吸收摄取氮元素用以自身储存利用的过程,在芽孢杆菌细胞内,被摄取吸收的 NO_3^- 在硝酸还原酶的作用下被还原为 NO_2^- ,再由亚硝酸还原酶还原成 NH_3 ,之后被芽孢杆菌吸收并转化为自身所需的营养物质,从而支持其生长与代谢活动^[8]。

芽孢杆菌的异化作用,是指芽孢杆菌的呼吸作用,具体表现为在 BBR 工艺的曝气池中,在芽孢杆菌和传统反硝化菌的作用下会发生短程硝化、短程反硝化过程以及传统反硝化过程^[8]。短程硝化反硝化过程是指 NH_4^+ 先氧化为 NO_2^- ,由 NO_2^- 直接还原生成氮气,从而实现氮元素的去除。该过程由于没有生成 NO_3^- 这一步骤,因此能显著缩短反应时间,提高脱氮效率。BBR 技术可实现短程硝化、短程反硝化与传统反硝化的高效结合:当水温超过 12 °C 时,芽孢杆菌协同其他微生物发挥作用,实现高效的脱氮;反之,若水温低于 12 °C,芽孢杆菌将会发挥主导作用,从而达到更佳的脱氮效果,达到了 BBR 工艺在较低温度时也具有较好除氮的效果。

1.3.3 高效除磷

在传统的生物除磷作用中,聚磷菌在厌氧条件

下会释放其细胞体内的聚合磷酸盐,而在好氧条件下又能过量从水中吸收含磷物质,并将其转化为细胞体内的聚合磷酸盐,从而形成富含磷的生物污泥,通过沉淀从系统中排出这种富磷污泥,达到从废水中除磷的效果^[18],但当聚磷菌进入内源呼吸阶段时,其生理活动会发生转变,导致先前吸收的磷元素被重新释放回环境中,这一现象会削弱污水处理系统中的除磷效果,使得水质净化能力受到一定影响^[19]。

芽孢杆菌属于革兰氏阳性菌,其细胞壁主要由肽聚糖与磷壁酸 2 种成分组成,磷壁酸的存在使芽孢杆菌能够有效地积聚大量的磷元素。磷元素对于芽孢杆菌来说至关重要,是确保其生存与繁衍的必要元素^[8]。在传统的活性污泥系统中,占据主导地位的细菌大多为革兰氏阴性菌。这类细菌的细胞壁主要由肽聚糖、一定量的脂质和蛋白质组成,与革兰氏阳性菌不同,并不包含磷壁酸这一成分。因此,在进行其生物合成与代谢活动时,革兰氏阴性菌通常不会显著地利用或储存磷元素。这一特性使得它们在磷元素的循环和利用上,与芽孢杆菌存在显著差异^[8]。鉴于此,芽孢杆菌相较于常规的活性污泥中的菌类,展现出更为卓越的磷吸收能力,这一特性显著降低了在处理过程中对外加除磷剂的依赖,实现了更为经济高效的磷去除效果。

1.3.4 除臭性能强

污水中的臭味来源于多种有害物质,其中包括铵盐、硫化氢、甲硫醇、甲基硫醚、氨、胺类等^[20],这些物质在经过氧化作用后,会产生有毒的、具有刺激的气体。污水处理厂通常会采用化学药剂、配置通风设备、采用活性炭等方法去除臭气,不但增加了运营成本,而且除臭效果很难进一步提升^[21]。而 BBR 工艺通过其独特的处理流程,在污水处理的初始阶段便实现了高效的异味控制,从而省去了后续增设专业除臭设备的必要,实现了从源头上解决污水臭气问题的目标,即在污水中的氮、硫等成分被氧化前,芽孢杆菌就将氨、铵盐、硫化氢等物质摄取。此外,芽孢杆菌还会产生具有吸附性的黏性物质,能够吸收和去除硫醇、胺等异味物质,使得 BBR 工艺的除臭效果优异^[8]。

1.3.5 占地面积小

在传统的活性污泥工艺中,需要大量的空间来进行曝气,而在 BBR 工艺中,污水在通过 BBR 装置

之后其 BOD 含量已大幅度下降,且曝气池中 DO 处于低浓度的条件下即可运行,因此,不需要大量的空间来进行曝气^[7]。此外,BBR 工艺不需要额外配备除臭设施,BBR 工艺的占地面积比传统活性污泥工艺节省 30% 以上^[8]。

1.3.6 所需供气量少

在传统的活性污泥工艺中,曝气池中的 DO 质量浓度一般维持在 $2 \sim 4 \text{ mg/L}$ ^[22],而芽孢杆菌只需在 $0.1 \sim 1.0 \text{ mg/L}$ 的 DO 质量浓度下即可维持较强的生物活性。因此,BBR 工艺可降低曝气量,节省运营成本^[9]。

1.3.7 系统碳氮比要求低

现有的污水处理厂目前 COD 的去除效果整体上问题不大,但会普遍出现碳源不足的情况,碳源不足会导致很多的生化反应不能有效进行,导致脱氮除磷的效果下降。当前普遍采用的方法是向污水处理系统中补充碳源^[23],常见形式包括醋酸、醋酸钠、甲醇等化学物质的投加^[24]。然而,这些方法的应用场景相对局限,主要适用于那些进水碳源浓度严重不足,以及无法达到总氮(TN)排放标准的特定情况,并且也增加了污水处理的总体运营成本。

而 BBR 工艺中,污水在通过 BBR 装置后,其中的污染物已大幅度减少,再进入曝气池中,减少了需氧量。另外,在脱氮过程中会发生短程硝化反硝化反应,使得反硝化所需碳源减少,因此,BBR 工艺适用于低碳氮比的污水处理,最低运行条件为 $\text{BOD}/\text{TN} = 2.5$ ^[8]。

1.4 与其他污水处理工艺的比较

BBR 工艺与其他几种常见的污水处理主流工艺的比较如表 1 所示。综合比较可知,BBR 工艺在污水处理领域展现出了较好的性能,其污染物去除效率高于其他主流污水处理技术。这种工艺的优势在于其广泛的适应性,能够应对不同浓度的污水,无论是高浓度还是低浓度,均能实现有效的净化处理。同时,BBR 工艺在操作管理上表现出简便性,设备的可靠性高,维护工作轻松,使得它在实际应用中更加便捷和可靠^[25]。此外,该工艺的高效性不仅体现在其出色的处理效果上,还表现在它能够显著节约能源消耗,从而降低整体的运行成本,确保了长期稳定的处理效果。综上所述,BBR 工艺以其众多优势,成为了污水处理行业中的一项重要技术选择。

2 BBR 工艺研究现状

BBR 工艺由日本引进。国内外学者们分别在 BBR 工艺生物转盘挂膜方式、生物膜形成影响因

素、曝气池 DO 浓度、BBR 工艺环境温度以及处理典型药物与去除抗生素耐药基因方面开展了大量研究与应用。

表 1 污水处理工艺比较^[16, 26-28]

Tab. 1 Comparison of Wastewater Treatment Processes^[16, 26-28]

项目	BBR 工艺	普通活性污泥工艺	AAO 工艺
使用菌种	芽孢杆菌	好氧菌	厌氧菌、好氧菌和硝化菌类
对污染物的去除率	BOD>96%	BOD>90%	BOD>90%
	TN:80%~95%	TN:20%~30%	TN:60%~75%
	总磷(TP):75%~90%	TP:10%~20%	TP:50%~70%
脱氮原理	氨氮或铵态氮被芽孢杆菌吸收并利用,转换成细胞物质	细菌只吸收需要的氮,并以硝酸盐的形式排放	通过曝气及硝化反应转换为硝酸盐和亚硝酸盐,在厌氧条件下通过反硝化转化为氮气脱除
除磷原理	当 DO 质量浓度为 0.5 mg/L 时,芽孢杆菌可以吸收最多的磷,此时除磷效果最好	细菌仅吸收其生长和代谢所必需的磷量,而剩余的磷则会被排放至环境	在厌氧条件下释放磷,在好氧条件下过多地摄取磷,通过剩余污泥的排放而达到除磷的效果

2.1 曝气池 DO 浓度

BBR 工艺具有曝气量小的优势,但国内很少有人研究如何分配曝气量使处理效果最佳。柴建中^[16]设计了一组针对市政污水的动态试验,共设置了 4 组曝气池,这些曝气池并行排列,容积相同;并设计了 3 种曝气量策略,分别是曝气池的曝气量依次递增、曝气池的曝气量依次递减和曝气池的曝气量先增后减,以探究不同控制曝气量的策略对污水处理效果的影响。结果发现,与 DO 浓度单纯递减或先增后减的调控方式相比,当采用 DO 浓度递增的方式来控制曝气池时,BBR 工艺对于 COD 和 TN 的去除效果最好,其最大去除效能均突破 94% 的界限,平均去除效率也稳定在 88% 以上的高水平。这项研究^[16]结果表明,BBR 工艺在处理市政污水时,通过调整曝气池的 DO 浓度,可以达到最优的处理效果。这种方法不仅能有效去除污水中的各种污染物,而且操作简单,成本低廉,因此,具有很大的实用价值。

2.2 BBR 工艺环境温度

传统生物转盘技术由于使用温度的限制,很难在寒冷地区使用,而 BBR 工艺相对于传统的生物转盘工艺具有适用温度广的特点。柴建中等^[29]以海晏城镇污水处理厂为例开展研究,揭示了在低温条件下 BBR 工艺处理污水的独特优势。该厂运用了 BBR 工艺,通过深入分析其现场运行数据,发现芽孢杆菌在污泥高浓度化方面表现出色,且不影响泥水分离的效果,适用于低温污水处理。研究^[29]中指出了其独特的运行特点:尽管停留时间较短且 DO

水平偏低,该工艺在低温条件下仍能展现出优异的脱氮性能,这一表现显著区别于传统脱氮方法;还发现 BBR 工艺在低温脱氮时,还可以增加污泥龄,而且不会影响 BBR 系统的正常运行。这项研究对于理解和改进污水处理工艺有着重要意义,特别是在寒冷地区,由于温度低,传统的污水处理工艺无法有效运作。BBR 工艺的出现,无疑为这些寒冷地区的污水处理提供了新的可能。

2.3 BBR 工艺去除典型药物

随着现代医疗技术水平的提高,现今的污水中典型药物的污染不断加重。陈嘉诚^[30]关注了各类制药化合物(pharmaceutical compounds, PhCs)在哈尔滨城市污水处理厂 BBR 工艺中的赋存特征,研究发现,BBR 工艺在处理不同类型的 PhCs 时,展现出了明显的去除率差异。具体而言,对于磺胺二甲基嘧啶,BBR 工艺表现出了卓越的去除能力,其去除率可高达 87%。然而,在抗生素类物质的去除上,虽然 BBR 工艺整体表现较优,但对于胃酸抗凝剂和特定心血管药物(如部分种类)的去除效果却不尽如人意,相较于传统工艺并未见显著提升。在工艺流程中,沉砂池环节对于氧氟沙星、磺胺类及部分心血管药物(如氨氯地平、洛沙坦、缬沙坦)的去除起到了一定作用。同时,BBR 装置与曝气池的组合也参与了这些心血管药物的部分去除过程。总体而言,BBR 工艺在去除特定类型 PhCs 方面表现突出,但在处理范围上仍存在一定的局限性和优化空间。这项研究的结果提供了关于 BBR 工艺在处理含有 PhCs 的污水时的效能的深入理

解,也为未来改进和优化污水处理工艺提供了理论基础。

2.4 BBR 工艺去除抗生素耐药基因

相关研究发现,BBR 工艺不仅能去除典型药物,还能去除抗生素耐药基因。Weng 等^[31]对宁波市北仑区盐东污水处理厂生物处理池进水和出水中耐药细菌的丰度以及耐药基因 *tet32* 和 *defA1* 深入的研究发现,2017 年及 2018 年的进水和出水中均含有高水平的抗生素耐药基因,而 2019 年新增 BBR 处理工艺后,则没有检测到抗生素耐药基因。值得注意的是,这一过程并没有显著改变出水中的细菌群落结构。这项研究的结果表明,BBR 工艺作为一种有效的新方法,能从污水中有效去除抗生素耐药基因。研究^[31]还指出,芽孢杆菌能产生各种抗菌剂,能够有效遏制抗生素耐药菌的生长。这项研究的发现不仅揭示了抗生素耐药基因在污水处理过程中的存在,同时也提供了一种新的处理方法,即通过 BBR 工艺来减少抗生素耐药基因的存在,从而降低其对环境 and 人体健康的潜在威胁。

2.5 生物转盘的挂膜方式

生物膜主要由水、微生物及其分泌的胞外聚合物(EPS)等黏性物质组成,微生物的附着生长叫作挂膜^[32]。挂膜过程至关重要,这不仅是生物转盘启动的第一步,也对生物转盘的后续运行有深远影响。自然挂膜法是生物转盘常见的挂膜方式,但挂膜时间长的缺点一直得不到很好的解决。何海燕等^[33]对比研究自然挂膜法和流量递增法 2 种挂膜方法,以探究更好的生物转盘挂膜方法;在实施自然挂膜过程中维持了一个恒定的进水流量,以确保挂膜过程的稳定性与连续性;在针对流量递增挂膜的方法中,采取了逐步增加进水流量的策略,具体而言,从 6 L/min 的初始流量开始,每隔 2 d 增加 1 L/min 的流量,直至挂膜完成。试验^[33]结果表明,流量递增法有着更好的挂膜效果:相较于自然挂膜法所需的 24 d,流量递增法仅需 15 d 即可完成。此外,在微生物量方面,采用流量递增法进行挂膜所培育的生物膜中,微生物的数量更为丰富。流量递增挂膜法巧妙地利用了微生物生长的自然规律,通过初期较低的有机物含量起步,为微生物的生长提供了适宜的启动条件。随着进水流量的逐步增加,这一过程与微生物的生长需求保持同步,确保了微生物始终处于促进其快速生长的最佳环境中,因此,其生长速

率显著快于自然挂膜方式。相比之下,自然挂膜法因生物膜附着不稳定而脱落,需要更长时间来完成挂膜。这项研究提供了一种新的挂膜方法,从而可以缩短生物转盘的启动时间,大大提高了生物转盘的处理效率。

2.6 生物膜形成的影响因素

生物膜的形成受 pH、水力参数、DO 浓度等多方面因素影响。宋涛等^[34]认为反应器内的 pH 是生物膜形成过程中的一个关键环境因素,其最佳范围通常被认定为中性至微碱性,即 pH 值为 6.0~8.5。当 pH 值低于 6.0 时,基质上附着的微生物活性会受到明显抑制,可能导致微生物群落结构失衡,对生物膜的形成产生不可逆的负面影响。相反,若 pH 值超过 8.5,部分微生物可能因环境不适而从载体上脱落,从而阻碍生物膜的稳定形成。除了 pH,水力参数也是影响生物膜形成的重要因素。在市政污水处理系统中,若初始阶段污水流速过高,可能会冲刷掉尚未牢固附着的微生物,从而延缓或阻碍生物膜的初步形成。然而,一旦“初生生物膜”成功建立,适度的高流速水流反而能够促进营养物质的输送与 O₂ 的交换,有利于生物膜的进一步生长与成熟。因此,合理控制水力参数,是优化生物膜形成过程、提升污水处理效率的重要手段。刘晃等^[35]认为 DO 浓度对反硝化反应至关重要。进水中较低的 DO 浓度有利于反硝化反应进行,因为 O₂ 会与硝酸盐竞争,降低反应速率。控制进水 DO 质量浓度至关重要,一般要保持在 15 mg/L 以下才能实现良好的反硝化效果,特别是对于生物膜系统而言。这一点在设计和操作生物膜系统时需要特别关注,以确保系统能够高效运行。

3 BBR 工艺应用案例

3.1 在城市污水处理中的应用

城市污水作为城市日常运营中自然产生的废液集合,主要包括了各类废水与污水。若这些污水未经过恰当的净化处理而直接释放到自然环境中,将会对自然生态系统造成直接的负面影响^[36]。城市污水的颜色一般为灰褐色,水温一般在 15~25 ℃,其中含有大量有机化合物,合成有机物质也在增加^[37]。在一些城市污水处理厂的提标改造工程中,BBR 工艺被认为是一种理想的选择。例如,沧州市运东污水处理厂在进行提标改造时,因这种工艺进

一步提升了城市污水处理能力^[38]。沧州市运东污水处理厂的总体规划设计能力为处理污水量 10.0 万 m^3/d 。该污水厂面临冬季严寒的挑战,进水水温显著下降,且硝化细菌受温度波动影响较大,进而影响了冬季氨氮的有效去除。为积极响应沧州市委、市政府推出的《沧州市劣 V 类水体治理专项行动方案》,运东污水处理厂面临着提升出水水质的紧迫任务,必须达到更为严苛的水质标准,以助力改善区

域水环境质量。在此背景下,经过比选,该厂选择了 BBR 工艺作为改良工艺,在原有的设备基础上改造了厌氧池和缺氧池,新增了 BBR 限氧曝气池。该厂的改造既符合了相关政策的要求,又有利于提高污水处理效率,实现了经济效益和环保效益的双重提升。改造后的工艺流程如图 3 所示,其中 BBR 池与 BBR 限氧曝气池为改造构筑物,其余为原有构筑物。

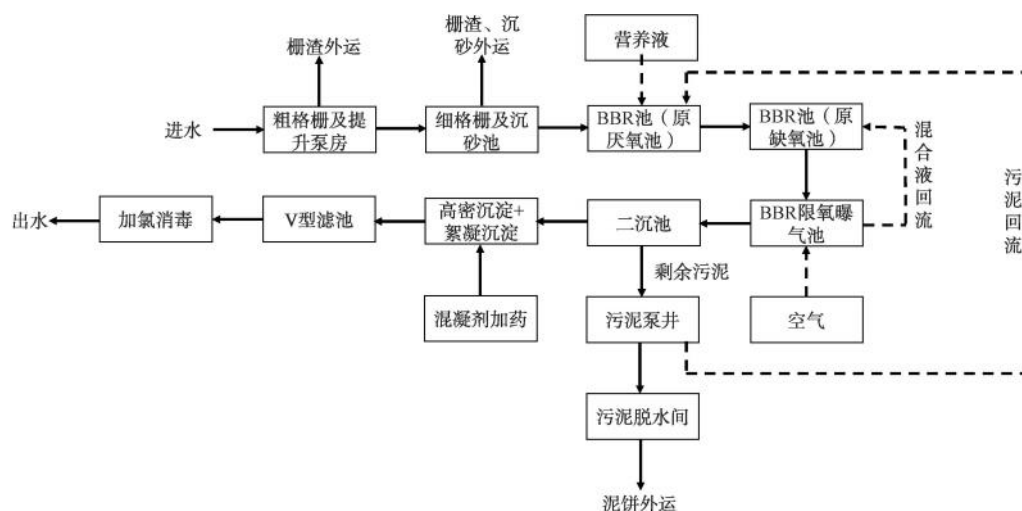


图3 沧州市运东污水处理厂改造后的工艺流程^[38]

Fig. 3 Process Flow of Yundong WWTW after Reconstruction in Cangzhou City^[38]

3.2 在畜牧业污水处理中的应用

畜牧业污水中有大量的污染成分,且污染负荷较高,常含有碳氢化合物、氮、磷等有机物质,若将此类污水不加处理直接排放到江河湖泊中,将会促使水体发生富营养化过程,使得藻类快速大量繁殖,导致水华现象的产生,这不仅会影响水体中其他生物的生存,而且会使水体产生恶臭^[39]。位于日本秋田县的某畜产中心,其猪舍全部采用灌浆坑式粪尿混合,粪尿量为 100 m^3/d ^[40]。该畜产中心将混合尿渍的污水曝气后,用喷雾机向杂木林喷洒,但由于喷洒到空中后又落到地面上,造成恶臭和土壤污染。由于附近居民的强烈要求,以及环境三法的实施,该畜产中心改用 BBR 工艺处理猪舍排出的污水。进行的工程包括全面改建已有曝气槽、变更管线等。完成的处理整体流程:原水槽→螺旋压板或屏幕→调节槽→初始沉淀槽→BBR 装置→曝气槽→第一沉淀槽→接触曝气槽→第二沉淀槽→处理水槽→中继槽→出水。改造后的畜产中心的出水低于标准值,可直接排放,也可用处理水养殖鱼类。该畜产

中心采用 BBR 工艺处理猪舍排出的污水,既解决了环保问题,又保护了周围环境,是一个很好的实践案例。

3.3 在工业废水处理中的应用

工业废水污染负荷高,污染物种类多,成分复杂,这些特点导致了工业废水处理目标的多样化^[41],因此,处理不同的工业废水所用的处理工艺也大相径庭。特定行业排放的废水,其污染质量浓度可高达每升数万毫克,显著超过常规水平,对环境构成严峻威胁。BBR 工艺不仅能处理城市生活污水,而且还能处理特定的工业废水。位于日本的三菱制纸株式会社八户工厂的纸浆类废水量约为 17 700 m^3/d ^[42]。原有的处理系统为表面曝气方式,原水水质为 BOD 质量浓度为 700 mg/L 、COD 质量浓度为 1 000 mg/L ,经活性污泥处理后到 COD 为 300 mg/L 左右,再经过深度处理后排放到海洋。即使是活性污泥处理水,COD 质量浓度也在 300 mg/L 左右,三级处理需要花费大量成本。另外,现在的设施须将曝气槽的污泥质量浓度控制在 7 000 mg/L

左右。因此,如果抽出剩余污泥的时机出现错误,混合液悬浮固体(MLSS)浓度的急剧变化导致曝气槽的负荷显著变化,导致处理水质的恶化。经过制纸厂的比选,日本工厂决定在曝气池前加装 BBR 装置。在运行一段时间后,工厂的臭气减少,曝气池出水的 COD 质量浓度明显下降,降至 190 mg/L 左右,为纸厂解决了之前存在的问题。

4 BBR 工艺存在的问题与挑战

4.1 需要定期投加营养液

营养液作为 BBR 工艺的重要组成部分,能有效培养污水中的芽孢杆菌,为了维持芽孢杆菌在 BBR 装置中的优势菌地位,需要每日投加营养液,每吨水投加营养液成本为 0.03 元,当处理厂规模较大时,将会增加运营成本^[38]。营养液的运输与储存也会产生费用,使污水处理厂在营养液方面会投入较多的成本。

4.2 前期投入高

BBR 装置的造价较高^[34],往往高于 AAO 工艺中的曝气池造价,但从长期来看,BBR 工艺会带来更好的经济效益,这是因为 BBR 工艺可以提高污水处理的效果,且运营操作方便简单,从而减少后期的运营和维护成本。

4.3 处理规模小

我国污水处理厂按照处理规模一般划分为 5 类:一类污水处理厂,50 万~100 万 m³/d;二类污水处理厂,20 万~50 万 m³/d;三类污水处理厂,10 万~20 万 m³/d;四类污水处理厂,5 万~10 万 m³/d;五类污水处理厂,1 万~5 万 m³/d。从经济角度来看,BBR 工艺能够经济而高效地处理 10 万 m³/d 规模的污水,但在处理较大规模的污水时会产生较高的费用,这也是超大规模污水处理厂不选用 BBR 工艺作为主要处理污水工艺的原因。

4.4 一定程度上污染大气

污水中有挥发性的有机物,例如硫化氢、胺类、甲硫、醚等恶臭气体。由于 BBR 生物转盘系统中缺乏专门的通风设备,其供氧主要依赖于盘面上的生物膜与大气自然接触,这一过程伴随着污水中挥发性物质的释放,进而引发环境污染问题。为了缓解这一状况,采取从氧化槽底部进水的方式被视为一种改进措施,相较于从表面进水,它能减少挥发性物质的直接暴露与散失,但在实际效果上,仍不能完全

消除挥发物质造成的污染,因此,需要持续探索和优化处理策略。

4.5 污泥产生量大

虽然污泥产量增加是多种污水处理工艺的共性问题,但在 BBR 工艺中,因其生物反应器内微生物浓度显著高于传统工艺,污泥产量问题尤为突出,进而增加后续污泥处置的负担,提高运营成本。

5 未来发展趋势与展望

5.1 BBR 工艺的发展趋势

随着科技的不断发展,BBR 工艺可引入更多的自动化和智能化元素,从而提高处理效率,降低人工操作的复杂度和成本。出水标准的提升对于污水处理厂的处理效果提出了更高的运营管理要求,污水处理正在朝着生产智能化、工艺装备化、设备集成化、监测数据和管理信息的智慧化等方向发展^[43]。随着社会对环保问题的关注度日益提高,对污水处理的需求也在持续增长。因此,未来 BBR 工艺的发展趋势会更加注重满足市场的需求,提供更高效、更环保的污水处理解决方案。

5.2 BBR 工艺的未来展望

尽管 BBR 工艺已经取得了显著的成就,但仍有很大发展潜力。未来,BBR 工艺有望在以下几个方面有所突破。①技术创新方面,通过技术创新,提高 BBR 工艺的处理效率和稳定性,使其在处理复杂污水时表现得更为出色。②投资成本方面,通过技术革新,降低设备资金的投入,减少水厂的运行费用。③处理规模方面,通过技术升级或其他污水处理技术的耦合,扩大污水处理的规模,以满足更大污水处理量。④政策扶持方面,政府可能会出台更多的政策,鼓励和支持 BBR 工艺的研发和应用,从而推动其发展。

6 结论

BBR 工艺作为一种前沿且创新型的污水处理技术,展现出其独特的优势,拥有对水质适应性强、处理效果更好、运行成本更低及无臭味等特点。此外,BBR 工艺还对低碳氮比的污水、新污染物等拥有较好的处理效果,在低温环境下也能稳定运行等优良特性。目前,该工艺已经在处理城市生活污水、畜牧业污水和工业废水中成功应用,但仍存在一定的挑战需要突破,以使 BBR 工艺在污水处理领域能够拥有更加广阔的应用空间。

参考文献

- [1] 李浩. 城市污水排放标准与治理技术研究[J]. 皮革制作与环保科技, 2024, 5(3): 123-125.
LI H. Research on urban sewage discharge standards and treatment technologies [J]. Leather Manufacture and Environmental Technology, 2024, 5(3): 123-125.
- [2] 郭晶晶, 徐国. 工业污水处理厂环境管理现状与污染防治对策研究[J]. 中国轮胎资源综合利用, 2025(2): 106-108.
GUO J J, XU G. Research on the current situation of environmental management and pollution prevention and control countermeasures of industrial sewage treatment plants[J]. China Tire Resources Recycling, 2025(2): 106-108.
- [3] 马耀宗, 武海霞, 孟庆宇, 等. 更严格排放标准下我国城市污水处理厂提标改造进展[J]. 净水技术, 2023, 42(11): 37-48, 126.
MA Y Z, WU H X, MENG Q Y, et al. Progress of upgrading and reconstruction for urban WWTPs under stricter discharge standards at home[J]. Water Purification Technology, 2023, 42(11): 37-48, 126.
- [4] 李卓洋. 面向现状 AAO 工艺污水厂深度脱氮改造的 AOA 工艺优化研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2024.
LI Z Y. Optimization of AOA process for upgradation of existing AAO wastewater treatment plant for advanced nitrogen removal [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2024.
- [5] 杨天. 多段多级 AO+BBR 组合工艺在污水处理厂中的应用分析[J]. 建设科技, 2025(7): 91-93.
YANG T. Application analysis of step-feed multistage AO+BBR combined process in wastewater treatment plant[J]. Construction Science and Technology, 2025(7): 91-93.
- [6] 陈家伟, 蒋启华, 陶光辉, 等. BBR 工艺处理南方低碳氮比生活污水研究[J]. 给水排水, 2024, 50(s1): 73-78, 83.
CHEN J W, JIANG Q H, TAO G H, et al. Experimental study on the treatment of domestic wastewater with low carbon nitrogen ratio in southern China by BBR proces[J]. Water & Wastewater Engineering, 2024, 50(s1): 73-78, 83.
- [7] 侯继燕, 聂楠. BBR 工艺在污水处理工程中的应用[J]. 给水排水, 2020, 56(s1): 412-417.
HOU J Y, NIE N. Application of BBR process using in wastewater treatment plant [J]. Water & Wastewater Engineering, 2020, 56(s1): 412-417.
- [8] 陈茂荣. BBR 工艺原理及特点简析[J]. 山西化工, 2022, 42(9): 163-165.
CHEN M R. Brief analysis of BBR process principle and characteristics[J]. Shanxi Chemical Industry, 2022, 42(9): 163-165.
- [9] 戴仲怡, 谢益佳, 张国强, 等. 以芽孢杆菌为优势菌的 BBR 技术用于市政污水处理[J]. 中国给水排水, 2023, 39(18): 67-70.
DAI Z Y, XIE Y J, ZHANG G Q, et al. Application of BBR technology with *Bacillus* as dominant bacteria in municipal wastewater treatment[J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(18): 67-70.
- [10] 吴根福. 芽孢与芽胞[J]. 微生物学杂志, 2016, 36(1): 76-79.
WU G F. The Chinese translation of endospore[J]. Journal of Microbiology, 2016, 36(1): 76-79.
- [11] 徐靖, 牛邦彦, 张亚南, 等. 芽孢杆菌属 *Bacillus* 分类学研究进展[J]. 中国土壤与肥料, 2022(12): 225-237.
XU J, NIU B Y, ZHANG Y N, et al. Advances in taxonomy of genus *Bacillus*[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2022(12): 225-237.
- [12] AL-GHEETHI A A S, ISMAIL N. Biodegradation of pharmaceutical wastes in treated sewage effluents by *Bacillus subtilis* 1556WTNC [J]. Environmental Processes, 2014, 1(4): 459-481.
- [13] 侯继燕, 贾韬. BBR 工艺在岷沱江流域污水处理厂提标改造的应用案例[J]. 给水排水, 2021, 47(s2): 105-107.
HOU J Y, J T. Application case of BBR process in upgrading and upgrading of wastewater treatment plant in Mintuo River basin [J]. Water & Wastewater Engineering, 2021, 47(s2): 105-107.
- [14] 屈平平. 芽孢杆菌制剂对毛皮动物源大肠杆菌的体外抑制作用[J]. 饲料研究, 2020, 43(9): 82-85.
QU P P. In vitro inhibitory effect of *Bacillus* preparations on *Escherichia coli* of fur animal origin[J]. Feed Research, 2020, 43(9): 82-85.
- [15] 卢旺. 低碳氮比进水 AAO 工艺污水处理厂高效脱氮除磷运行的中试研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2022.
LU W. Pilot study on high-efficiency nitrogen and phosphorus removal in AAO process sewage treatment plant with low carbon nitrogen ratio[D]. Chongqing: Chongqing University, 2022.
- [16] 柴建中. BBR 生化系统曝气池组 DO 浓度优化设计[J]. 中国给水排水, 2016, 32(13): 106-108.
CHAI J Z. Optimization of DO in aeration tank of BBR biochemical system[J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(13): 106-108.
- [17] 谭渝霏. 同步硝化反硝化水处理系统工艺优化调控和脱氮机制研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2024.
TAN Y F. Process optimization and nitrogen removal mechanism of simultaneous nitrification and denitrification in water treatment system[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2024.
- [18] 狄依超. 侧流磷回收 A²O 工艺的除磷性能和功能菌群特征[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2024.
DI Y C. Phosphorus removal performance and functional microbial community characteristics of A²O process for side flow phosphorus recovery [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2024.

- [19] 李培, 潘杨, 张同祺. A²O 工艺问题分析与改进措施[J]. 广东化工, 2010, 37(8): 283-284.
LI P, PAN Y, ZHANG T Q. Problems analysis and corrective measures in AAO craft [J]. Guangdong Chemical Industry, 2010, 37(8): 283-284.
- [20] 陶珺. 干式化学滤料在污水处理厂臭气深度治理的应用[J]. 净水技术, 2023, 42(s2): 60-64.
TAO J. Application of dry chemical filter media in deep odor treatment in WWTP[J]. Water Purification Technology, 2023, 42(s2): 60-64.
- [21] 杨隆辉. 污水处理与固废处理行业中的臭气治理技术要点研究[J]. 皮革制作与环保科技, 2025, 6(2): 23-24, 27.
YANG L H. Research on the key points of odor treatment technology in sewage treatment and solid waste treatment industry [J]. Leather Manufacture and Environmental Technology, 2025, 6(2): 23-24, 27.
- [22] 王大晓. 活性污泥法污水处理中溶解氧浓度和硝态氮去除的控制[D]. 上海: 上海交通大学, 2012.
WANG D X. Control for the dissolved oxygen and nitrate nitrogen removal system in the wastewater treatment [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2012.
- [23] 曾小龙. 市政污水处理厂碳源投加技术节能优化分析[J]. 皮革制作与环保科技, 2023, 4(21): 101-103.
ZENG X L. Energy-saving optimization analysis of carbon source dosing technology in municipal sewage treatment plant [J]. Leather Manufacture and Environmental Technology, 2023, 4(21): 101-103.
- [24] 朱苏鹏, 郭海娟, 马放, 等. 东北地区某城镇污水处理厂碳源投加策略分析[J]. 环境保护科学, 2024, 50(3): 82-88.
ZHU S P, GUO H J, MA F, et al. Strategy analysis of carbon source addition in a municipal sewage treatment plant in northeast China [J]. Environmental Protection Science, 2024, 50(3): 82-88.
- [25] 马昆. JS-BC 污水处理工艺研究进展[J]. 建筑与预算, 2015(10): 32-34.
MA K. Research progress of JS-BC wastewater treatment process [J]. Architecture and Budget, 2015(10): 32-34.
- [26] 王特. 海绵铁投加量及碳源浓度对普通活性污泥厌氧氨氧化脱氮影响研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2022.
WANG T. Study on the effect of sponge iron dosage and carbon source concentration on anaerobic ammonium oxidation denitrification of common activated sludge [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2022.
- [27] 张麒麟, 杜昊, 王新平. 改良 AAO-MBBR 工艺在污水处理厂原位提标改造中的应用[J]. 净水技术, 2025, 44(1): 163-169.
ZHANG Q L, DU H, WANG X P. Application case of modified AAO-MBBR processes in in-situ upgrading and reconstruction of WWTP [J]. Water Purification Technology, 2025, 44(1): 163-169.
- [28] 田海成, 杨红红, 焦文海, 等. 低碳源污水深度脱氮除磷工艺的经济性分析及优化策略[J]. 净水技术, 2024, 43(7): 56-62, 110.
TIAN H C, YANG H H, JIAO W H, et al. Economic analysis and optimization strategy of advanced denitrification and dephosphorization for low carbon source wastewater treatment [J]. Water Purification Technology, 2024, 43(7): 56-62, 110.
- [29] 柴建中, 梅华. BBR 系统低温脱氮简析[J]. 青海环境, 2016, 26(1): 38-43.
CHAI J Z, MEI H. Analysis of low temperature nitrogen removal in BBR system [J]. Journal of Qinghai Environment, 2016, 26(1): 38-43.
- [30] 陈嘉诚. 典型药物在 BBR 工艺中的赋存特征和去除效果研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2022.
CHEN J C. Study on the occurrence characteristics and removal effect of typical pharmaceuticals in BBR process [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2022.
- [31] WENG Z F, HE Y Q, LI G X, et al. Investigation of antibiotic-resistant bacterial communities and antibiotic-resistant genes in wastewater treatment plants; Removal of antibiotic-resistant genes by the BBR process [J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2021, 108(2): 1-8.
- [32] ALOTAIBI G F. Factors influencing bacterial biofilm formation and development [J]. American Journal of Biomedical Science & Research, 2021, 12(6): 617-626.
- [33] 何海燕, 杨立群, 涂军桥, 等. 新型生物转盘两种挂膜方式的比较研究[J]. 广东化工, 2017, 44(12): 107-108, 110.
HE H Y, YANG L Q, TU J Q, et al. Comparative study on the two kinds of biofilm formation methods in the new type rotating biological contactor [J]. Guangdong Chemical Industry, 2017, 44(12): 107-108, 110.
- [34] 宋涛, 兰玲, 贺亚. 生物膜法在市政污水处理中的应用[J]. 工程技术研究, 2023, 8(7): 182-184.
SONG T, LAN L, HE Y. The application of biomembrane process in municipal water treatment [J]. Engineering and Technological Research, 2023, 8(7): 182-184.
- [35] 刘晃, 管崇武, 倪琦, 等. 生物膜法 SBR (BSBR) 在循环养殖水处理中影响因素分析[J]. 南方水产, 2008(4): 55-59.
LIU H, GUAN C W, NI Q, et al. Analysis of factors of water treatment with biofilm sequence batch reactor in recirculating aquaculture systems [J]. South China Fisheries Science, 2008(4): 55-59.
- [36] 莫晓媛, 邢立焕, 夏芸. 城市污水处理工艺探究[J]. 环境与发展, 2020, 32(9): 82-83.
MO X Y, XING L H, XIA Y. Study on urban sewage treatment process [J]. Environment and Development, 2020, 32(9): 82-83.

(下转第 97 页)

于 AAO、氧化沟及其衍生工艺; K_d 对 F/M 和 SRT 敏感。

(4)对于碳源污泥过多型污水处理厂,可通过来水管理、运行调控和脱水强化实现污泥减质和减容,运行过程的调控既削减碳源需求,又减少了污泥产生;对因受工艺本身限制导致内源呼吸不足的污水处理厂,可额外设置处理单元强化污泥内源呼吸,以此实现污泥的减质。

参考文献

- [1] 戴晓虎,侯立安,章林伟,等.我国城镇污泥安全处置与资源化研究[J].中国工程科学,2022,24(5):145-153.
DAI X H, HOU L A, ZHANG L W, et al. Safe disposal and resource recovery of urban sewage sludge in China [J]. Strategic Study of CAE, 2022, 24(5): 145-153.
- [2] 戴晓虎,张辰,章林伟,等.碳中和背景下污泥处理处置与资源化发展方向思考[J].给水排水,2021,47(3):1-5.
DAI X H, ZHANG C, ZHANG L W, et al. Thoughts on the development direction of sludge treatment and resource recovery under the background of carbon neutrality [J]. Water & Wastewater Engineering, 2021, 47(3): 1-5.
- [3] 李紫瑛,臧淑一,杨浩.污泥源头化减量技术[J].化学工程与装备,2021(7):267-269.
LI Z Y, ZANG S Y, YANG H. Source reduction technology for sludge [J]. Chemical Engineering & Equipment, 2021(7): 267-269.
- [4] FANG F, HU H L, QIN M M, et al. Effects of metabolic

uncouplers on excess sludge reduction and microbial products of activated sludge[J]. Bioresource Technology, 2015, 185: 1-6.
DOI: 10.1016/j.biortech.2015.02.054.

- [5] TIAN Y, ZHANG J, WU D, et al. Distribution variation of a metabolic uncoupler, 2,6-dichlorophenol (2,6-DCP) in long-term sludge culture and their effects on sludge reduction and biological inhibition[J]. Water Research, 2013, 47(1): 279-288.
- [6] ZHANG X Q, ZENG H Y, WANG Q, et al. Sludge predation by aquatic worms: Physicochemical characteristics of sewage sludge and implications for dewaterability [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 258: 120612. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.120612.
- [7] 中华人民共和国住房和城乡建设部,国家市场监督管理总局.室外排水设计标准:GB 50014—2021[S].北京:中国计划出版社,2021.
Ministry of Housing and Urban Rural Development of the People's Republic of China, State Administration for Market Regulation. Standard for design of outdoor wastewater engineering: GB 50014—2021 [S]. Beijing: China Planning Press, 2021.
- [8] LI J Z, DU Z X, LIU J Y, et al. Analysis of factors influencing the energy efficiency in Chinese wastewater treatment plants through machine learning and SHapley Additive exPlanations [J]. Science of the Total Environment, 2024, 920: 171033. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.171033.
- [9] FRIEDRICH M, TAKÁCS I. A new interpretation of endogenous respiration profiles for the evaluation of the endogenous decay rate of heterotrophic biomass in activated sludge [J]. Water Research, 2013, 47(15): 5639-5646.

(上接第 11 页)

- [37] 蒋春丰,王慧.城市污水特性分析及处理技术现状[J].环境与发展,2019,31(3):57-58.
JIANG C F, WANG H. Current status of urban sewage analysis and treatment technology [J]. Environment and Development, 2019, 31(3): 57-58.
- [38] 杨磊.城市污水处理厂提标改造工艺要点解析——以沧州市运东污水处理厂为例[J].智能建筑与智慧城市,2023(1):112-114.
YANG L. Analysis on the key points of upgrading and renovation process of urban sewage treatment plants ——Taking Cangzhou Yundong sewage treatment plant as an example [J]. Intelligent Building & Smart City, 2023(1): 112-114.
- [39] 张媛媛,司倩倩,王述柏.我国规模化养殖场污水处理现状[J].山东畜牧兽医,2015,36(1):61-65.
ZHANG Y Y, SI Q Q, WANG S B. Sewage treatment status of large-scale aquaculture in China [J]. Shandong Journal of Animal Science and Veterinary Medicine, 2015, 36(1): 61-65.

- [40] AKIRA I. JK-BC system as a highly advanced wastewater treatment system-actual case of denitrification (wastewater from animal husbandry) [J]. Japan Tappi Journal, 2004, 58(4): 493-499.
- [41] 王洪才,王庭鹏,李强.工业废水污染治理途径与技术发展需求[J].中国高科技,2021(22):139,149.
WANG H C, WANG T P, LI Q. Industrial wastewater pollution treatment ways and technical development needs [J]. China High and New Technology, 2021(22): 139,149.
- [42] AKIRA I, TOORU S. JK-BC system as a highly advanced waste water treatment system-waste water treatment test with bacilli at paper mills [J]. Japan Tappi Journal, 2005, 59(11): 1673-1679.
- [43] 武思谨. BBR 工艺耦合 BIM 技术在污水厂改造工程中的应用[J].科技创新与应用,2023(13):190-196.
WU S J. Application of BBR process coupled BIM technology in sewage plant renovation project [J]. Technology Innovation and Application, 2023(13): 190-196.