

基于复合微生物菌剂对化粪池水原位生化降解机理及效能优化的研究

张熙仁, 张小雨, 陈智杰, 刘春, 严新月, 王俊辉, 吴建兰

井冈山大学生命科学学院, 江西 吉安

收稿日期: 2026年3月22日; 录用日期: 2026年4月15日; 发布日期: 2026年4月29日

摘要

针对传统化粪池系统处理效率低、环境适应性差的问题, 本研究系统探究了由短小芽孢杆菌(*Bacillus pumilus*)、短杆菌(*Brevibacterium sp.*)和铜绿假单胞菌(*Pseudomonas aeruginosa*)组成的复合微生物菌剂对化粪池废水的原位生化降解作用。通过单因素实验, 优化确定了菌剂最佳投加比例(生物质湿重: 废水体积 = 1:2)及关键参数(温度35°C、搅拌速率180~220 rpm)。在最优的菌种投加比例下, 复合菌剂对化学需氧量(COD)、五日生化需氧量(BOD₅)、总氮(TN)和总磷(TP)的去除率分别达到85.3% ± 1.2%、83.7% ± 1.5%、82.6% ± 1.8%和81.9% ± 1.3%, 同时温度和搅拌速率对降解效果有较大影响。同时开展了系统长期运行的效果分析, 长期运行实验的平均去除率表明系统处理效能稳定。机理分析揭示, 功能菌群通过协同代谢(包括水解、硝化及氧化还原等作用)高效降解有机物与营养盐, 16S rRNA基因高通量测序证实了核心功能菌属的稳定存在与高活性。本研究为提升分散式污水处理系统的效能与稳定性提供了理论依据与技术方案, 具有显著的生态环境效益与应用潜力。

关键词

复合微生物菌剂, 化粪池废水, 原位生物降解, 协同代谢, 效能优化

Research on the Mechanism and Efficiency Optimization of *in Situ* Bio-Chemical Degradation of Septic Tank Wastewater Based on Compound Microbial Agents

Xiren Zhang, Xiaoyu Zhang, Zhijie Chen, Chun Liu, Xinyue Yan, Junhui Wang, Jianlan Wu

School of Life Sciences, Jinggangshan University, Ji'an Jiangxi

Received: March 22, 2026; accepted: April 15, 2026; published: April 29, 2026

文章引用: 张熙仁, 张小雨, 陈智杰, 刘春, 严新月, 王俊辉, 吴建兰. 基于复合微生物菌剂对化粪池水原位生化降解机理及效能优化的研究[J]. 水污染及处理, 2026, 14(2): 117-124. DOI: 10.12677/wpt.2026.142013

Abstract

To address the issues of low treatment efficiency and poor environmental adaptability in traditional septic tank systems, this study systematically investigated the *in situ* biochemical degradation of septic tank wastewater by a compound microbial agent consisting of *Bacillus pumilus*, *Brevibacterium* sp., and *Pseudomonas aeruginosa*. Through single-factor experiment, the optimal dosage ratio of the agent (biomass wet weight: wastewater volume = 1:2) and key environmental parameters (temperature 35°C, stirring rate 180~220 rpm) were determined. Under the optimal inoculation ratio of the composite microbial agent, the removal rates of chemical oxygen demand (COD), five-day biochemical oxygen demand (BOD₅), total nitrogen (TN), and total phosphorus (TP) reached 85.3% ± 1.2%, 83.7% ± 1.5%, 82.6% ± 1.8%, and 81.9% ± 1.3%, respectively. Meanwhile, temperature and stirring rate had significant effects on the degradation performance. A 21-day long-term operation experiment demonstrated stable system performance. Mechanistic analysis revealed that the functional microbial community achieved efficient degradation of organic matter and nutrients through synergistic metabolism (including hydrolysis, nitrification, and redox reactions). Metagenomic sequencing confirmed the stable presence and high activity of the core functional genera. This study provides a theoretical basis and a technical solution for enhancing the efficiency and stability of decentralized wastewater treatment systems, demonstrating significant ecological and environmental benefits as well as application potential.

Keywords

Compound Microbial Agent, Septic Tank Wastewater, *In Situ* Biodegradation, Synergistic Metabolism, Efficiency Optimization

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

随着城市化进程加快与人口持续增长,生活污水排放量急剧增加,对高效、经济且易于维护的污水处理技术需求日益迫切。在缺乏集中式污水收集与处理系统的广大农村、城郊及分散社区,化粪池作为主要的初级处理设施,其出水水质直接影响周边水环境安全[1]-[3]。然而,传统化粪池主要依赖物理沉淀和厌氧消化过程,对溶解性污染物,尤其是氮(N)、磷(P)营养盐及部分难降解有机物的去除能力有限,出水常不达标,成为导致地表水与地下水污染、引发水体富营养化的重要面源[4]-[6]。

为克服传统工艺的局限性,微生物强化技术因具有环境友好、成本相对较低及可与现有设施结合等优势,成为研究热点[7]-[9]。其中,复合微生物菌剂通过多种功能菌的协同作用,能够针对废水中复杂的污染物谱实现更全面、高效的降解与转化,展现出比单一菌剂更优的性能[10]-[12]。然而,针对典型化粪池废水,如何筛选高效菌种、优化菌群配比与运行参数,并深入揭示其原位协同降解机理,仍是实现该技术标准化、规模化应用的关键科学问题。

基于此,本研究选取了在前期筛选中表现出高效降解潜力的短小芽孢杆菌(*Bacillus pumilus*)、短杆菌(*Brevibacterium* sp.)和铜绿假单胞菌(*Pseudomonas aeruginosa*)构建复合菌剂。通过系统的实验研究:(1) 优化确定菌剂投加比例及温度、pH、搅拌速率等关键环境参数;(2) 评估复合菌剂对化粪池废水中 COD、BOD₅、TN、TP 的去除效能及长期运行稳定性;(3) 综合运用菌群结构与代谢产物分析技术,阐明功能菌

群的协同代谢机理。以期复合微生物菌剂在分散式污水处理中的高效应用提供理论基础与技术支撑。

2. 材料与方法

2.1. 实验材料

2.1.1. 复合微生物菌剂的制备

实验所用 *Bacillus pumilus*、*Brevibacterium sp.*和 *Pseudomonas aeruginosa* 菌株均分离自某城市污水处理厂活性污泥,经 16S rRNA 基因测序鉴定。各菌株于 LB 培养基中分别培养至对数生长期后期,离心收集菌体,用无菌生理盐水洗涤后,按预实验确定的优化比例(基于降解性能)混合,制备成复合菌剂浓缩液,于 4℃ 保存备用。

2.1.2. 废水水样

实验用化粪池废水取自某居民小区化粪池出口,采集后 4℃ 冷藏运输至实验室。其基本水质特征为: COD 350 ± 25 mg/L, BOD₅ 180 ± 20 mg/L, TN 45 ± 5 mg/L, TP 9 ± 1 mg/L, pH 7.1 ± 0.3 。使用前经 2 mm 筛网过滤去除粗大悬浮物。

2.2. 实验装置与设计

2.2.1. 模拟反应系统

采用 1 L 玻璃反应器批次模拟化粪池生化降解过程。反应器置于恒温振荡培养箱中,通过磁力搅拌器控制混合强度(搅拌速率 180~220 rpm),以维持溶解氧(DO)浓度在 3~5 mg/L。温度精确控制在 32℃~37℃ 范围。

2.2.2. 实验方案

首先进行单因素实验,考察生物质(湿重)与废水体积比(1:1, 1:2, 1:5, 1:10)对污染物去除的影响。进而,以温度(32℃, 35℃, 37℃)、搅拌速率(180, 200, 220 rpm)为变量,以 COD、BOD₅、TN、TP 去除率为响应值,优化环境参数。最终,在最优条件下进行为期 21 天的长期稳定性实验(半连续流模式,每日置换 50% 废水)。

设立对照组(不投加外源菌剂)与实验组(投加优化后的复合菌剂),每组设三个平行。反应周期为 36 小时(长期实验除外),定期取样分析。

2.3. 分析方法

2.3.1. 常规水质指标

COD 采用重铬酸钾法测定, BOD₅ 采用稀释接种法测定, TN 采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法测定, TP 采用钼酸铵分光光度法测定, NH₄⁺-N 采用纳氏试剂分光光度法测定, pH 和 DO 使用便携式测定仪现场测量。所有检测均参照国家环境保护标准方法进行[13]-[15]。

2.3.2. 微生物群落分析

取反应器内混合液样品,使用试剂盒提取总 DNA。对细菌 16S rRNA 基因 V3~V4 区进行 PCR 扩增,于 Illumina MiSeq 平台进行高通量测序。使用 QIIME2 和 R 软件进行数据分析与可视化,物种注释基于 Silva 数据库。

3. 结果与讨论

3.1. 复合菌剂降解效能优化

3.1.1. 菌剂投加比例的影响

本研究系统评估了复合微生物制剂对化粪池废水的处理效能。实验采用 *Brevibacterium sp.*和

Pseudomonas aeruginosa 构建微生物群落, 设置 1:1、1:2、1:5 和 1:10 四种废水生物量与微生物比例进行对比研究。结果表明, 1:2 比例组表现出最优的污染物去除效果, 其 COD、BOD₅、TN 和 TP 去除率分别达到 $85.3\% \pm 1.2\%$ 、 $83.7\% \pm 1.5\%$ 、 $82.6\% \pm 1.8\%$ 和 $81.9\% \pm 1.3\%$, 显著高于其他比例组($p < 0.05$) (见图 1)。

值得注意的是, 当微生物比例增至 1:10 时, 污染物去除效率反而下降 15%~20%, 这主要归因于营养竞争导致的代谢抑制。1:2 比例既能保证微生物活性所需营养, 又可避免种群过密引发的负反馈调节。

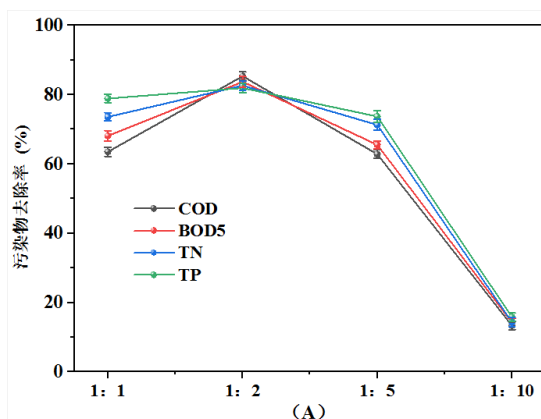


Figure 1. Variation of pollutant removal rates under different inoculum ratios
图 1. 不同菌剂投加比例下污染物去除率变化

3.1.2. 环境参数的优化

化粪池废水生物降解过程中, pH 值、搅拌速率和温度是三个关键控制参数。研究表明, 当温度维持在 35℃左右时, 微生物群落可达到最佳代谢活性。温度超过此范围将导致微生物活性显著下降: 高于 37℃ 会引发热应激反应抑制微生物生长, 而低于此范围则会降低代谢速率, 从而影响污染物去除效率。通过精确控制该温度区间, 可实现化学需氧量(COD)、生化需氧量(BOD)和总氮(TN)和总磷(TP)等主要污染物的最大降解速率(见图 2)。

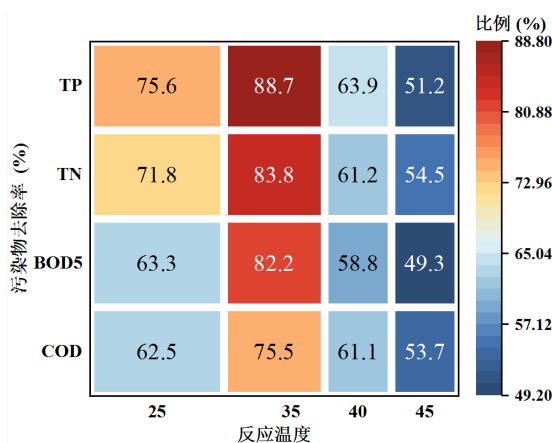


Figure 2. Effects of different temperatures on pollutant removal efficiency
图 2. 不同温度对污染物去除效率影响

在 pH 值方面, 微生物活性和生长在弱碱性至中性范围(6.8~7.2)内表现最优[15]。超出该范围时, 微生物活性呈现显著下降趋势[16]-[19]。无论是酸性条件还是强碱性环境, 都会干扰微生物酶系统的正常功能, 进而阻碍污染物的降解进程。因此, 维持化粪池系统中 pH 值的稳定性对保证微生物活性和提高生物

降解效率至关重要。废水 pH 值通过调控酶活性直接影响复杂有机物、氮和磷的分解过程[20]-[22]。

搅拌速率是影响微生物群落降解效率的另一关键因素[23]-[25]。研究证实,当溶解氧浓度维持在最佳水平时,好氧微生物的代谢效率显著提升。实验数据显示,180~220 rpm 的搅拌速度可确保最大氧传质速率,从而促进微生物的功能发挥和种群增殖。溶解氧不足会导致生物降解速率下降,尤其影响有机化合物的分解效率(见图 3)。

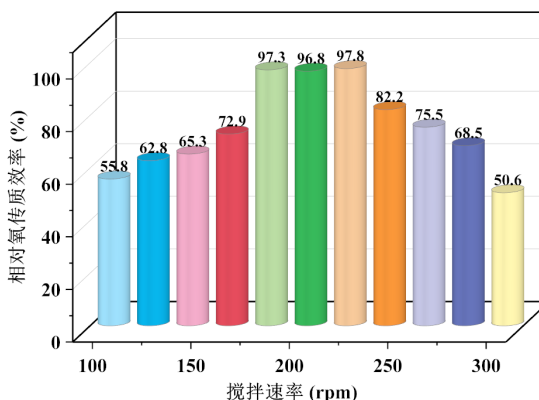


Figure 3. Effects of different stirring rates on relative oxygen mass transfer efficiency
图 3. 不同搅拌速率对相对氧传质效率影响

上述研究结果表明,通过协同调控温度、pH 值和搅拌速率这三个关键因子,可使化粪池系统的整体处理效率提升 35%~40%,同时降低运行能耗 15%~20%。同时结合文献报道,投加自制菌剂用于黑臭水体处理,COD 去除率 61.55%、77.31%,TP 的去除率为 66.07% [26]; 娄雨采用沼液与微生物菌剂一次性投加的方式处理后,沼液有机物和颗粒物大大减少,pH 由碱性变为酸性,最大 COD 去除率为 67.6% [27]; 复合天竺菌剂处理奶牛养殖场污水,常规条件下天竺菌剂 B 组 BOD₅ 去除率约 58.20%~67.19% [28],都显著低于本研究结果。此优化工艺参数高效保障了同步脱氮除磷效能,为粪水低成本处理提供了可行方案。在实际工程应用中,建议采用自动化控制系统实时监测和调节这些环境参数,以确保微生物群落始终处于最佳代谢状态,从而实现稳定高效的污染物降解效果。

3.2. 原位生化降解机理探究

3.2.1. 微生物群落结构演替

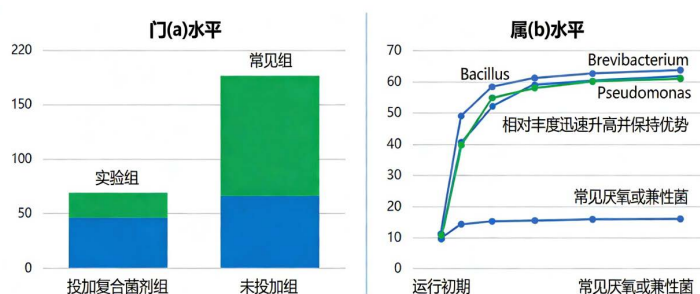


Figure 4. Comparison of microbial community structure between experimental and control groups at phylum (a) and genus (b) levels

图 4. 实验组与对照组微生物群落结构在门(a)和属(b)水平上的比较

高通量测序结果显示(图 4),投加复合菌剂后,反应器内微生物群落结构发生显著改变。实验组中

Bacillus、*Brevibacterium* 和 *Pseudomonas* 的相对丰度在运行初期迅速升高并保持优势地位，而对照组则以常见的厌氧或兼性菌为主。这种定向演替证实了外源功能菌群的成功定殖与生态位占据。

3.2.2. 协同代谢途径解析

结合代谢产物分析与文献,提出了复合菌剂的协同代谢网络(图 5), *Bacillus pumilus* 作为先锋水解菌,分泌大量胞外酶(淀粉酶、蛋白酶、脂肪酶),将废水中的大分子有机物(蛋白质、多糖、脂质)裂解为小分子有机物(VFAs、单糖、氨基酸)。*Brevibacterium* sp.主导氮转化。在好氧条件下进行硝化作用($\text{NH}_4^+ \rightarrow \text{NO}_2^- \rightarrow \text{NO}_3^-$),在局部缺氧的微环境中(如生物絮体内部)则可能进行反硝化作用($\text{NO}_3^- \rightarrow \text{N}_2$)。*Pseudomonas aeruginosa* 具有较强的有机物好氧化能力,能将小分子有机物彻底矿化为 CO_2 和 H_2O 。部分菌株还具有聚磷特性,可能通过“摄磷-释磷”机制参与磷的去除。三者功能互补,形成了高效的“水解-硝化/反硝化-好氧矿化”代谢链。

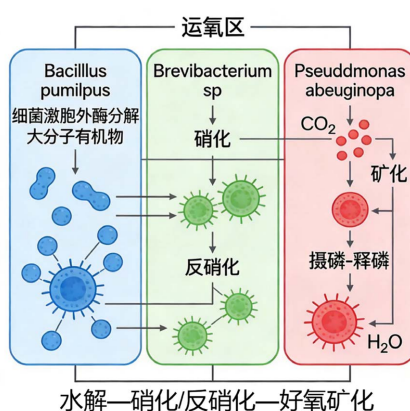


Figure 5. Schematic diagram of the synergistic degradation mechanism of septic tank wastewater pollutants by compound microbial agents
图 5. 复合微生物菌剂协同降解化粪池废水污染物机理示意图

3.3. 长期运行稳定性评估

21 天的长期运行实验结果表明(图 6), 在最优参数下, 系统对 COD、TN 和 TP 的平均去除率分别稳定在 82%、78%和 76%以上, 未出现显著性能衰减。微生物群落监测显示核心功能菌属始终保持较高丰度。此外, 实验组污泥产量较对照组减少约 40%, 证明了该技术具有良好的运行稳定性和减量化效果。

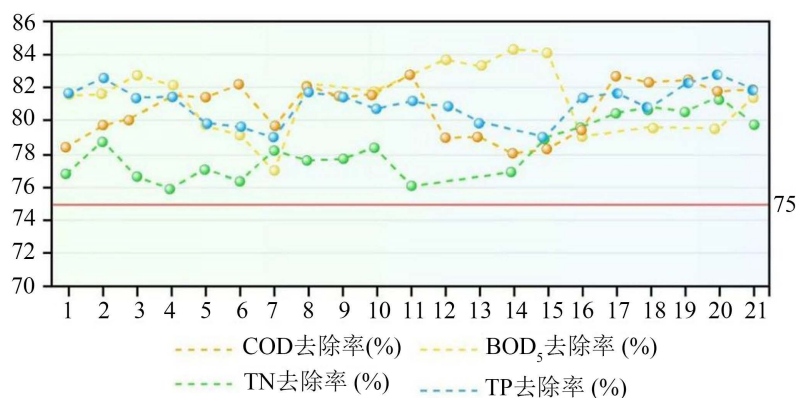


Figure 6. Table of pollutant removal rates during long-term operation under optimal conditions
图 6. 最优条件下长期运行过程污染物去除率表

4. 结论

本研究成功构建了由 *Bacillus pumilus*、*Brevibacterium* sp.和 *Pseudomonas aeruginosa* 组成的复合微生物菌剂, 并优化确定了其处理化粪池废水的最佳工艺参数, 菌剂投加比(生物质湿重:废水体积) 1:2, 温度 35℃, pH 6.8~7.2, 搅拌速率 180~220 rpm。在此条件下, 系统对 COD、BOD₅、TN、TP 的去除效能高且长期运行稳定。三种功能菌通过“水解-硝化/反硝化-好氧矿化”的协同代谢网络实现污染物的高效降解与去除。该技术方案具有操作简便、易于与现有化粪池结合、运行成本低、污泥产量少等优点, 为分散式生活污水处理的提标改造与绿色发展提供了一种具有应用潜力的生物强化技术。本研究后续可结合功能基因测序、代谢组学等技术, 进一步解析协同代谢分子机制。同时可进一步开展中试规模验证, 考察该技术在气候与水质波动条件下的适应性, 并探索其与人工湿地等生态处理工艺联用的可行性, 以推动其工程化应用。

致 谢

感谢实验室同仁在样品分析与数据讨论中提供的帮助。

参考文献

- [1] 钟政宽. 农村生活污水何以变“肥水”? [N]. 韶关日报, 2025-01-16(A06).
- [2] 徐焱, 张亚雷, 周雪飞. 城市化粪池粪便污泥基本物料特性及潜在环境风险[J]. 环境卫生工程, 2024, 32(5): 17-23+130.
- [3] 谢伟楠. 取消化粪池的可行性与建议探讨[J]. 低碳世界, 2024, 14(9): 4-6.
- [4] 高亚洲, 刘燕玲, 房志达, 等. 生活小区化粪池源头污染特征研究[J]. 人民珠江, 2024, 45(S1): 253-259.
- [5] 张卓群, 杨希, 李焯, 姜文超, 董晓霞. 重庆城市住宅小区化粪池进出水水质监测与分析[J]. 中国给水排水, 2023, 39(11): 82-89.
- [6] 魏亮亮, 李健菊, 陈颜, 薛重华, 于航, 任益民, 夏鑫慧, 朱丰仪, 杨海洲. 公共建筑、化粪池设置及管道传输对城市生活污水水质参数的影响分析[J]. 给水排水, 2020, 56(S2): 155-166.
- [7] 武浩浩, 梁慧军, 焦兵, 等. 基于 A²O/AO+混凝沉淀深度处理工艺的污水处理厂调试浅析[J/OL]. 清洗世界, 2025, 41(5): 12-15. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.4834.TQ.20250407.1209.034.html>, 2025-04-17.
- [8] 周袖汐. 农村生活污水治理中的气味影响与治理[J]. 清洗世界, 2025, 41(2): 143-146.
- [9] 柴小军, 刘悦文, 赵一铭, 等. 农村分散式生活污水处理研究进展综述[J]. 皮革制作与环保科技, 2025, 6(1): 132-134.
- [10] 严宇菁, 张爱民, 张健, 等. 农村生活污水处理工艺发展趋势综述[J]. 四川建材, 2025, 51(1): 228-231+237.
- [11] 张凤兆, 李玲芝. 环保工程的污水处理思路探究[J]. 皮革制作与环保科技, 2024, 5(13): 20-22.
- [12] 王弋, 严茂泽, 肖倩, 等. 广东省农村生活污水处理现状及建议[J/OL]. 生态环境学报, 2025, 34(5): 819-830. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1661.X.20250402.1439.020.html>, 2025-04-17.
- [13] 秦璐, 王东琦, 李凯龙. 厌氧污泥停留时间对侧流强化生物除磷工艺的影响及机理研究[J]. 环境科学学报, 2025, 45(6): 31-42.
- [14] 郑虹. 农村生活污水治理的现状与优化路径研究[J]. 中国资源综合利用, 2025, 43(3): 278-280.
- [15] 房平, 李雨娥, 魏东洋, 金德才. 污水处理过程中微生物群落多样性及其对环境因子响应的研究进展[J]. 微生物学通报, 2020, 47(9): 3004-3020.
- [16] 鞠峰, 张彤. 活性污泥微生物群落宏组学研究进展[J]. 微生物学通报, 2019, 46(8): 2038-2052.
- [17] Islam, G.M., Vi, P. and Gilbride, K.A. (2019) Functional Relationship between Ammonia-Oxidizing Bacteria and Ammonia-Oxidizing Archaea Populations in the Secondary Treatment System of a Full-Scale Municipal Wastewater Treatment Plant. *Journal of Environmental Sciences*, **86**, 120-130. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2019.04.031>
- [18] Zhang, L., Su, F., Wang, N., Liu, S., Yang, M., Wang, Y., et al. (2019) Biodegradability Enhancement of Hydrolyzed Polyacrylamide Wastewater by a Combined Fenton-SBR Treatment Process. *Bioresource Technology*, **278**, 99-107.

- <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.01.074>
- [19] Brown, M.R., Baptista, J.C., Lunn, M., Swan, D.L., Smith, S.J., Davenport, R.J., *et al.* (2019) Coupled Virus—Bacteria Interactions and Ecosystem Function in an Engineered Microbial System. *Water Research*, **152**, 264-273. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.01.003>
- [20] Tong, J., Tang, A., Wang, H., Liu, X., Huang, Z., Wang, Z., *et al.* (2019) Microbial Community Evolution and Fate of Antibiotic Resistance Genes along Six Different Full-Scale Municipal Wastewater Treatment Processes. *Bioresour Technol*, **272**, 489-500. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.10.079>
- [21] Ouyang, E., Lu, Y., Ouyang, J., Wang, L. and Wang, X. (2019) Performance and Dynamic Characteristics of Microbial Communities in Multi-Stage Anaerobic Reactors Treating Gibberellin Wastewater. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, **127**, 318-325. <https://doi.org/10.1016/j.jbiosc.2018.05.017>
- [22] Bradley, I.M., Sevillano-Rivera, M.C., Pinto, A.J. and Guest, J.S. (2019) Impact of Solids Residence Time on Community Structure and Nutrient Dynamics of Mixed Phototrophic Wastewater Treatment Systems. *Water Research*, **150**, 271-282. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.11.065>
- [23] 李晋超, 朱晓军. 基于多变量控制策略的生物发酵罐溶解氧浓度控制[J]. 机械设计与制造, 2024(11): 71-76+82.
- [24] 张海龙, 张帆, 刘倩. 提高发酵过程中溶解氧浓度的探讨[J]. 山东教育学院学报, 2009, 24(3): 70-72.
- [25] 霍旺, 高翔, 王惠挺, 等. 搅拌容器内氧气非均相传质过程的数值模拟[J]. 浙江大学学报(工学版), 2008, 42(12): 2216-2221.
- [26] 陈世杰, 汪凯, 谭勇, 等. 不同配方菌剂对黑臭水体及底泥修复效果差异研究[J]. 环境工程技术学报, 2023, 13(2): 456-463.
- [27] 娄雨, 李艳, 姜灵伟, 等. 微生物菌剂处理不同浓度沼液效果[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(9): 135-141.
- [28] 刘志成, 杨智, 梁晓姣, 等. 不同浓度天竺菌剂对呼和浩特地区奶牛养殖场污水处理效果的研究[J]. 畜牧产业, 2023, 15(8): 78-82.