

污水处理与回用

王刚, 李魁晓, 时玉龙, 等. 初沉池泥位变化对生物除磷影响规律[J]. 净水技术, 2022, 41(9):67-71,116.

WANG G, LI K X, SHI Y L, et al. Effect law of sludge depths variation in primary sedimentation tank on biological phosphorus removal [J]. Water Purification Technology, 2022, 41(9):67-71,116.



扫我试试?

初沉池泥位变化对生物除磷影响规律

王 刚^{1,2}, 李魁晓^{1,2,*}, 时玉龙^{1,2}, 吴 月³, 许 骐^{1,2}, 张达飞⁴, 蒋奇海⁴

(1. 北京城市排水集团有限责任公司, 北京 100022; 2. 北京市污水资源化工程技术研究中心, 北京 100124; 3. 北京市科学技术研究院资源环境研究所, 北京 100098; 4. 北京北排水环境发展有限公司, 北京 100124)

摘 要 针对城镇污水处理厂进水碳源不足, 导致生物除磷效果难以稳定维持的问题, 通过实验室小试与现场生产性试验相结合, 分析了初沉池不同泥位条件下初沉、剩余混合污泥厌氧发酵产挥发性脂肪酸(VFAs)对生物除磷效果的影响。结果表明, 当初沉池泥位由 1.0 m 增加到 2.5 m 时, 初沉池出水 VFAs 质量浓度由 17.8 mg/L 提高到 44.0 mg/L。后续改良 AAO 工艺厌氧段释磷量、好氧段吸磷量较低泥位分别增加了 3.26、3.29 mg/L。初沉池 2.5 m 高泥位条件下, 曝气池出水溶解态总磷(STP)质量浓度降为 0.06 mg/L, 仅为初沉池 1.0 m 低泥位时的 1/2。对磷组分分析发现可溶性活性磷酸盐(SRP)去除率得到明显提升。研究可以为污水处理厂利用内碳源开发提高生物除磷效果提供技术支撑。

关键词 生物除磷 初沉池泥位 内碳源 挥发性脂肪酸 磷组分

中图分类号: TU992.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-0177(2022)09-0067-06

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2022.09.009

Effect Law of Sludge Depths Variation in Primary Sedimentation Tank on Biological Phosphorus Removal

WANG Gang^{1,2}, LI Kuixiao^{1,2,*}, SHI Yulong^{1,2}, WU Yue³, XU Qi^{1,2}, ZHANG Dafei⁴, JIANG Qihai⁴

(1. Beijing Drainage Group Co., Ltd., Beijing 100022, China;

2. Beijing Municipal Sewage Resource Engineering Technology Research Center, Beijing 100124, China;

3. Institute of Resources and Environment, Beijing Academy of Science and Technology, Beijing 100098, China;

4. Beijing Drainage Water Environment Development Co., Ltd., Beijing 100124, China)

Abstract The effective biological phosphorus removal is difficult to maintain due to the shortage of influent carbon source in wastewater treatment plant (WWTP). In this study, both the bench- and full-scale testing were conducted to evaluate the production of volatile fatty acids (VFAs) during the anaerobic digestion of primary and surplus sludge in primary sedimentation tank under different sludge depths. The results demonstrated that, with the sludge depth of primary sedimentation tank increased from 1.0 m to 2.5 m, the VFAs contents in its effluent was enhanced from 17.8 mg/L to 44.0 mg/L. Accordingly, phosphorus release and uptake in the anaerobic zone and aerobic zone of AAO process were increased by 3.26 mg/L and 3.29 mg/L, respectively. At a high sludge depth of 2.5 m, the soluble total phosphorus (STP) content in the effluent of the aerobic zone was significantly reduced to 0.06 mg/L, which was only half of that at a low sludge depth of 1.0 m. Phosphorus fractions analysis indicated that the removal rate of

[收稿日期] 2021-09-23

[基金项目] 北京市科学技术研究院市级财政项目(PXM2021_178203_000001_00437109_FCG)

[作者简介] 王刚(1992—),男,硕士,工程师,研究方向为污水脱氮除磷及其资源化,E-mail:13051251977@163.com。

[通信作者] 李魁晓(1978—),男,博士,正高级工程师,研究方向为城市污水再生利用安全保障,E-mail:kuixiao_li@163.com。

soluble reactive phosphorus (SRP) was improved simultaneously. This study provides new insights into the internal carbon sources development for enhanced biological phosphorus removal in conventional WWTP.

Keywords biological phosphorus removal sludge depth in primary sedimentation tank internal carbon source volatile fatty acids (VFAs) phosphorus fraction

磷作为水体富营养化的主要限制因子备受水环境治理行业的关注^[1],2020年12月,生态环境部发布《湖泊营养物基准—中东部湖区(总磷、总氮、叶绿素a)》(2020年版),其中规定TP标准为0.029 mg/L。与此同时,我国重点流域、区域的城镇污水处理厂TP排放标准进一步提高。例如,北京市《城镇污水处理厂水污染物排放标准》(DB 11/890—2012)A标准要求TP<0.2 mg/L,雄安新区《大清河流域水污染物排放标准》(DB 13/2795—2018)要求出水TP<0.2 mg/L,昆明市《城镇污水处理厂主要水污染物排放限值》(DB 5301/T 43—2020)A标准要求TP<0.05 mg/L。日趋严格的TP排放标准对我国城镇污水处理厂除磷效能提出了更高的要求。

生物除磷具有污泥产量少、运行成本低、易于磷回收等优点^[2-3]。但生物除磷的稳定性较差,对碳源的依赖性较强^[4-5],生物脱氮与除磷过程对碳源的竞争会进一步加剧体系的碳源不足问题^[6-8],而外加碳源又会导致运行成本升高,所以目前大部分污水处理厂仍以化学除磷为主。此外,为保障出水磷稳定达标,除磷药剂一般是过量投加,导致药剂成本升高,且过量的金属盐药剂会增加出水及污泥中的金属离子含量,对后续受纳水环境的生态安全具有较大影响。所以污水处理厂应该发挥生物除磷潜力,减少药剂使用量,而其中一个重要手段就是污水处理厂内碳源开发。国内外研究学者对污泥水解酸

化产挥发性脂肪酸(volatile fatty acids, VFAs)促进生物除磷作用开展了诸多相关研究^[9-12]。在具有初沉池的污水处理厂中,60%的颗粒态有机物可通过沉淀去除。这些颗粒态有机物加上初沉池中的脂肪、蛋白质等构成了大量的有机碳源,如果将这些慢速降解有机碳源的一部分转化为快速降解碳源再投加到污水中,可使生物除磷效率显著提高。因此,有些污水处理厂设立初沉污泥发酵池,利用发酵池上清液补充原水中VFAs含量,在没有污泥发酵池的条件下也可以在初沉池中维持一定的污泥层厚度,通过这部分污泥层发酵产生VFAs,补充生物除磷所需的碳源。本研究聚焦于初沉池泥位调控与生物除磷的关系,通过实验室小试与现场生产性试验相结合,分析了初沉池不同泥位条件下初沉、剩余混合污泥厌氧发酵产VFAs对生物除磷效果的影响,以期为污水处理厂通过内碳源开发稳定生物除磷效果提供数据支撑。

1 工程概况及试验方法

1.1 工程概况

本研究所选污水处理厂进水为城市生活污水,处理能力为100万m³/d,分为4个平行系列,每个系列处理能力为25万m³/d,均为改良AAO工艺,以其中两个系列为研究对象,主要是一系列和四系列。工艺流程如图1所示,采用两点进水,其中10%的原水进入预缺氧池并与回流污泥混合,去除污泥回流液中的硝酸盐氮和溶解氧,外回流比为100%。

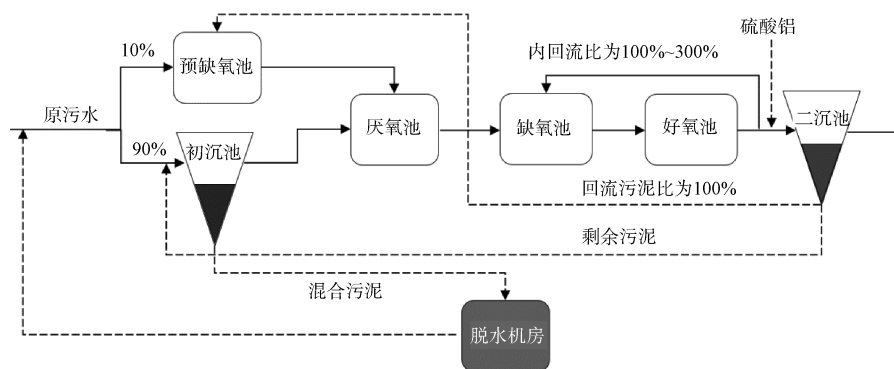


图1 某城镇污水处理厂改良AAO工艺流程

Fig. 1 Process Flow of the Modified AAO Process in an Urban WWTP

剩余 90% 的原水经初沉池进入厌氧池, 并与预缺氧池出水在厌氧池内混合, 进行厌氧释磷。内回流比为 100%~300%, 剩余污泥回流到初沉池同初沉污

泥进行混合发酵后排入泥区。此外, 在曝气池出水渠投加硫酸铝进行化学除磷。进水水质指标与初沉池相关运行参数如表 1 所示。

表 1 进水水质指标与初沉池运行参数

Tab. 1 Water Quality Indices of Influent and Operation Parameters of Primary Sedimentation Tank

指标	COD _{Cr} /(mg·L ⁻¹)	BOD ₅ /(mg·L ⁻¹)	TP /(mg·L ⁻¹)	TN /(mg·L ⁻¹)	氨氮 /(mg·L ⁻¹)	初沉污泥停留 时间(SRT)/d	初沉池有效 水深/m
数值	200~400	100~200	3~6	40~55	30~40	3~5	3.5

1.2 试验方法

在不同泥位条件下对初沉池、曝气池和二沉池进行沿程取样(水厂通过排泥控制初沉池泥位), 取样点位包括初沉池进水口、厌氧池进出水口、缺氧池进水口、好氧池进出水口和二沉池出水口, 试验周期为 6 个月, 每周进行 1 次取样检测, 取样次数不低于 20 次, 取样点位为同一系列、同一位置。试验过程中需要检测 TP、溶解态 TP(soluble total phosphorus, STP)、可溶性活性磷酸盐(soluble reactive phosphorus, SRP)、颗粒态 TP(particulate total phosphorus, PTP) 和溶解态非活性磷(soluble non-reactive phosphorus, SNRP), 且这 5 种磷的数量关系为 TP=STP+PTP、STP=SRP+SNRP。其中, TP 的检测使用钼酸铵分光光度法, 水样首先用过硫酸钾高温消解, 然后分别加入抗坏血酸和钼酸铵进行显色反应, 最后检测吸光度, 并通过除磷曲线换算成磷浓度, 具体操作过程可参考《水和废水监测分析方法》(第 4 版)^[13]; STP 的检测首先将水样通过 0.45 μm 滤膜过滤, 之后的操作过程同 TP; PTP 由 TP 与 STP 的差值得出; SRP 的检测过程与 STP 相似, 但不需要进行高温消解, 其他过程一致; SNRP 由 STP 和 SRP 的差值得出。水质指标除磷外仍需检测溶解态化学需氧量(soluble chemical oxygen demand, SCOD) 和 VFAs; 使用 WTW 便携式仪表(Multi 3630) 监测 DO、ORP 和 pH 的变化。

2 结果与讨论

2.1 初沉池泥位变化对微生物厌氧释磷的影响

在进行现场生产性试验之前, 首先进行不同初沉池泥位条件下初沉出水对微生物厌氧释磷的影响实验室小试试验。选取 2 组初沉池进行取样, 泥位为 2.5 m 时 VFAs 产量为 43.38 mg/L, SCOD_{Cr} 质量

浓度为 204 mg/L, SRT 为 5 d, 泥位为 1.0 m 时 VFAs 产量为 8.65 mg/L, SCOD_{Cr} 质量浓度为 87 mg/L, SRT 为 3 d。预缺氧池出水 SCOD_{Cr} 质量浓度为 49 mg/L。每组初沉池各取出水 500 mL 与预缺氧池泥水混合物按 1:1 混合均匀, 观察释磷效果。使用六联搅拌器进行试验, 充分混匀搅拌, 转速为 500 r/min, DO 质量浓度控制在 0.2 mg/L 以下, 全程监测 DO 和 ORP 变化, 试验时间为 50 min, 每 25 min 取样测 SCOD_{Cr}、STP 和 VFAs。结果如图 2 所示。

随着试验的进行, 磷含量呈升高趋势, VFAs 呈下降趋势(微生物利用碳源), 1.0 m 泥位下混合液未检测出 VFAs, 主要是因为初始 VFAs 含量较低, 混合过程中已被完全消耗, SCOD_{Cr} 质量浓度下降 8.5 mg/L, 厌氧释磷量为 0.88 mg/L; 2.5 m 泥位条件下厌氧释磷效果明显, 释磷量为 2.40 mg/L, SCOD_{Cr} 质量浓度下降 16.0 mg/L。两者释磷速率也有明显差别, 2.5 m 泥位条件下的释磷速率约是 1.0 m 泥位下的 2.7 倍。试验证明, 提高初沉池泥位会促进初沉污泥的水解酸化, 加速 VFAs 的释放, 促进了厌氧池生物释磷, 此外, 试验从 25 min 以后, 释磷程度减弱, 趋于稳定。所以该污水处理厂厌氧池水力停留时间(HRT)为 0.5 h 的设计较为合理。

2.2 初沉池泥位变化对沿程磷含量的影响

通过实验室小试试验证明了提高初沉池泥位可以促进厌氧释磷, 提高生物除磷效果, 但释磷情况可能受实际工况影响较大, 需要进行现场生产性取样分析。取一系列和四系列初沉池、曝气池和二沉池水样进行水质检测, 每周取样 1 次, 连续 6 个月, 分析不同初沉池泥位条件下各工艺段磷含量、SCOD_{Cr} 和 VFAs 的变化。其中一系列初沉池泥位稳定维持在 1.0 m 左右, SRT 为 3 d, 出水 VFAs 质量浓度为 17.8 mg/L, 四系列初沉池泥位维持在 2.5 m 左右,

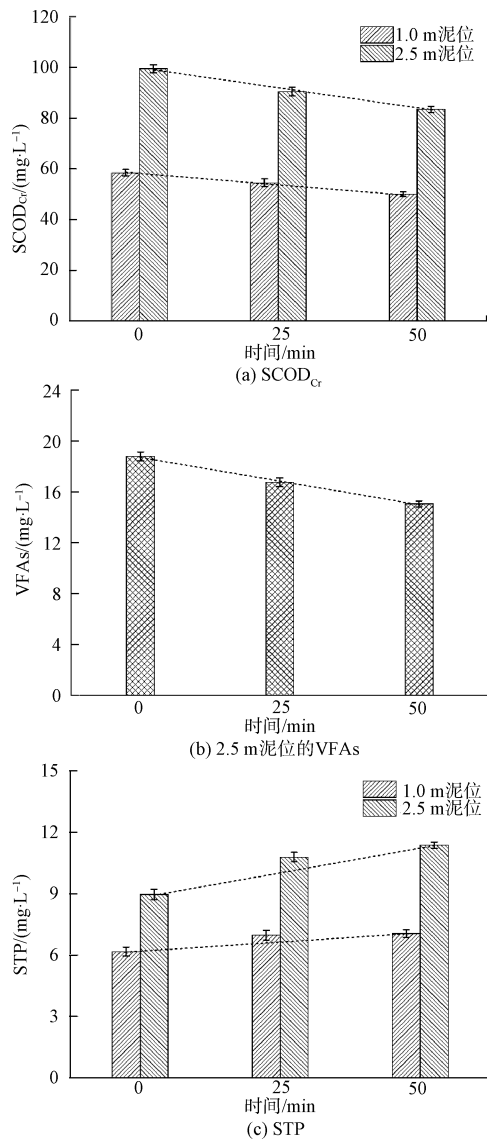


图2 初沉池不同泥位条件下 SCOD_{Cr}、VFAs 含量与厌氧释磷

Fig. 2 SCOD_{Cr}, VFAs Content and Anaerobic Phosphorus Release under Different Sludge Depths in Primary Sedimentation Tank

SRT 为 5 d,出水 VFAs 质量浓度为 44.0 mg/L。结果如图 3 所示。

在初沉池进水中 STP 质量浓度为 4.4 mg/L、VFAs 质量浓度为 13.0 mg/L 的前提下,四系列在厌氧段释放了 3.95 mg/L 的磷,一系列释放了 0.69 mg/L 的磷,差异较大(3.26 mg/L),说明提高初沉池泥位在厌氧段确实促进了磷的释放;对比好氧池进出水 STP 的差异,四系列较一系列多吸收了 3.29 mg/L 的磷,说明提高初沉池泥位为好氧段促进了磷

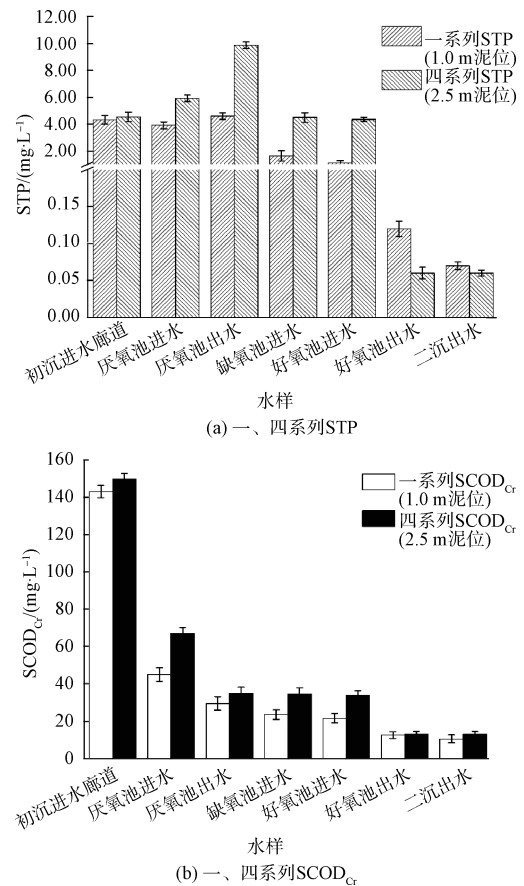


图3 各工艺段磷含量和 SCOD_{Cr} 的变化

Fig. 3 Variation of Phosphorus Content and SCOD_{Cr} in Each Process

的吸收。最终通过厌氧-好氧交替作用实现磷的高效去除,四系列好氧池出水 STP 质量浓度为 0.06 mg/L,仅为一系列的 1/2,去除率提高了 50%,可达到 99%。此外,通过 SCOD_{Cr} 的变化也可以说明提高初沉池泥位确实促进了碳源释放,初沉池泥位为 2.5 m 条件下,厌氧池进水 SCOD_{Cr} 质量浓度较 1.0 m 泥位时提高了近 20 mg/L。

2.3 初沉池泥位变化对活性磷去除的影响

通过现场生产性取样分析证明了提高初沉池泥位可以促进 VFAs 的释放,提高生物除磷效果,但对何种磷的去除贡献最大则需要进一步分析。取一、四系列初沉池进水和二沉池出水进行磷组分的检测,包括 TP、STP、PTP、SRP 和 SNRP,结果如图 4 和图 5 所示。

一系列中,在初沉池泥位为 1.0 m 的条件下,TP 质量浓度降低了 4.34 mg/L,去除率约为 98%,其中 SRP 的去除量最高(3.59 mg/L),其次为 SNRP

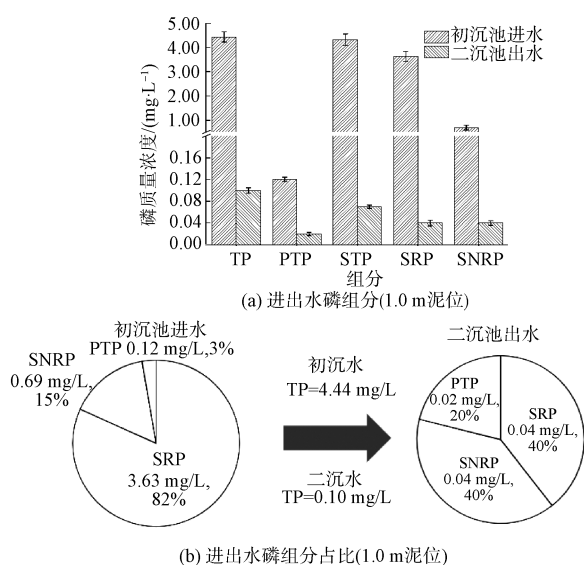


图4 一系列二级工艺段进出水磷组分变化

Fig. 4 Variation of Phosphorus Fractions in Influent and Effluent of Series I Secondary Treatment Process

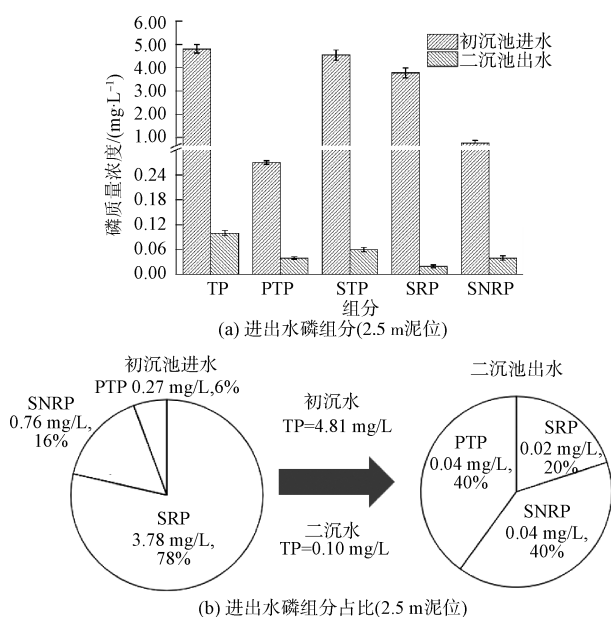


图5 四系列二级工艺段进出水磷组分变化

Fig. 5 Variation of Phosphorus Fractions in Influent and Effluent of Series IV Secondary Treatment Process

(0.65 mg/L) 和 PTP(0.10 mg/L);四系列中,在初沉池泥位为 2.5 m 的条件下,TP 质量浓度降低了 4.71 mg/L,去除率约为 98%,同样是 SRP 的去除量最高(3.76 mg/L),其次为 SNRP(0.72 mg/L) 和 PTP(0.23 mg/L)。通过比较初沉池进水和二沉池出水的磷组分变化,发现提高初沉池泥位后系统内

磷的组成发生了改变,其中四系列二沉池出水 SRP 较一系列占比减少了 20%,PTP 占比增加了 20%,SNRP 无明显变化。说明提高初沉池泥位释放的 VFAs 主要是促进系统内 SRP 的去除,PTP 的增加则可以通过膜过滤等工艺实现近乎 100% 的去除,但 SNRP 的处理较为困难,因为跟腐殖质相关的 SNRP 生物可用性较低,化学除磷也无明显效果,说明 SNRP 是影响出水 TP 进一步下降的主要限制因素,后续工艺可考虑吸附除磷。

3 结论

(1) 提高初沉池泥位可促进厌氧释磷,2.5 m 泥位条件下厌氧释磷量为 2.40 mg/L,1.0 m 泥位条件下厌氧释磷量为 0.88 mg/L,且释磷速率也有明显差别,前者的释磷速率是后者的 2.7 倍。

(2) 现场生产性取样分析证实了初沉池高泥位下混合污泥水解酸化可以促进生物除磷效果,初沉池泥位为 2.5 m 时,四系列厌氧段较一系列释磷量增加了 3.26 mg/L,后续好氧段吸磷量同步提升了 3.29 mg/L,出水 STP 质量浓度可降至 0.06 mg/L,STP 去除率可达 99%。

(3) 改变初沉池泥位后,二沉池出水磷组分也随之发生变化,SRP 占比减少了 20%,而 PTP 占比增加了 20%,SNRP 无明显变化,说明 SNRP 是决定出水 TP 含量的主要因素,将影响后续极限低磷浓度的可达性。

参考文献

- [1] JARVIE H P, SMITH D R, NORTON L R, et al. Phosphorus and nitrogen limitation and impairment of headwater streams relative to rivers in Great Britain: A national perspective on eutrophication[J]. Science of the Total Environment, 2018, 621 (15): 849-862. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.11.128.
- [2] LIU R, HAO X, CHEN Q, et al. Research advances of *Tetrasphaera* in enhanced biological phosphorus removal: A review [J]. Water Research, 2019, 166: 115003. DOI: 10.1016/j.watres.2019.115003.
- [3] SWITZENBAUM M. The beginning of biological phosphorus removal[J]. Water Environment Research, 2019, 91(4): 364-364.
- [4] 冉治霖, 姚强, 姜丙玉. 碳源浓度对强化生物除磷工艺中微生物菌群的影响[J]. 化学工程师, 2019, 33(9): 1-8.
- [5] WANG D, TOOKER N B, SRINIVASAN V, et al. Side-stream enhanced biological phosphorus removal (S2EBPR) process

(下转第 116 页)

- 工艺研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2020.
- [2] 康压群. 煤化工过程中化学污染废水处理技术研究[J]. 化工设计通讯, 2021, 47(4): 146-147.
- [3] 张颖. 煤化工废水处理关键问题解析及技术发展趋势[J]. 石河子科技, 2021(3): 18-19.
- [4] 齐亚兵, 张思敬, 杨清翠. 煤化工高含盐废水处理技术研究进展[J]. 应用化工, 2021, 50(8): 2303-2308.
- [5] 郑彭生. 煤化工废水厌氧生物处理技术研究进展[J]. 水处理技术, 2021, 47(6): 24-27, 33.
- [6] 刘华锋, 魏利军, 刘金刚, 等. 芬顿氧化+生化工艺处理精细化工废水工程实例[J]. 环境与发展, 2020, 32(12): 60-61.
- [7] 赵阁阁, 孙婧, 张运波, 等. 高级氧化技术处理印染废水的研究进展[J]. 应用化工, 2021, 50(9): 2550-2554, 2558.
- [8] 隆岗, 陈敏, 徐兆鹏, 等. 山东某金矿废水脱氰降 COD 的试验研究[J]. 有色冶金节能, 2021, 37(4): 54-57.
- [9] 刘汝鹏, 张震, 宋依辉, 等. 基于臭氧的复合工艺处理医药废水研究进展[J]. 工业水处理, 2022, 42(5): 41-49.
- [10] 郜子兴, 杨文玲. 臭氧催化氧化技术在废水处理中的研究进展[J]. 应用化工, 2017, 46(12): 2455-2459.
- [11] 卢家磊, 董奕岑, 徐成龙, 等. TiO_2 光催化氧化脱盐电池系统去除海水中 PAHs 效果研究[J]. 应用化工, 2021, 50(1): 78-82.
- [12] 杨凌肖, 王琼, 刘治君, 等. 光催化氧化去除水源水低浓度有机物的应用研究进展[J]. 化工进展, 2017, 36(s1): 469-475.
- [13] 吴贤格, 黎达明, 何承股, 等. 光催化降解高浓度 COD_{Cr} 有机废水处理方法研究[J]. 广州化工, 2017, 45(12): 62-64.
- [14] 王姣, 刘思相, 孙黎明. 河北某化工园区污水深度处理工艺设计[J]. 水处理技术, 2021, 47(3): 137-140.
- [15] 袁维波, 刘燕萍, 李华杰, 等. 铁碳微电解-芬顿-絮凝沉淀处理化工废水的试验[J]. 净水技术, 2021, 40(9): 123-127, 151.
- [16] 张平涛. 垃圾渗滤液脱色深度处理技术研究[J]. 辽宁化工, 2021, 50(8): 1153-1155.
- [17] 陈坤, 杨德敏, 袁建梅. 芬顿氧化/混凝/气浮/厌氧好氧组合工艺处理抗生素类制药废水[J]. 水处理技术, 2021, 47(9): 136-139.
- [18] 李品君, 孟冠华, 刘宝河, 等. Fenton 试剂+活性炭吸附处理焦化废水的试验研究[J]. 安徽工业大学学报(自科版), 2011, 28(2): 152-157.
- [19] 肖羽堂, 吴晓慧, 王冠平, 等. 垃圾渗滤液高级氧化及其组合工艺深度处理研究进展[J]. 水处理技术, 2020, 46(2): 8-12.
- [20] 徐衍超, 张际平, 苑芯茹, 等. 氯酚类污染物处理方法研究现状[J]. 中国资源综合利用, 2019, 37(6): 107-109.
- [21] 郭威, 袁放, 张佳, 等. 高盐强酸性地下水中复合苯系污染物原位芬顿氧化实验研究[J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(2): 182-189.
- [22] 王忠华. Fenton 体系降解含聚污水提效机制与方法研究[D]. 大庆: 东北石油大学, 2019.
- [23] 叶鼎. 芬顿流化床工艺的工程应用[J]. 中国设备工程, 2019(8): 123-124.
- [24] 曹辉, 王洋江, 周松. 芬顿流化床工艺与芬顿三相催化氧化工艺对综合性化工废水生化后深度处理去除 COD_{Cr} 效果的对比研究[J]. 科技风, 2015(13): 13-14.
- [25] 何亚萍. 芬顿法处理染料废水的废催化剂循环利用研究[D]. 武汉: 武汉工程大学, 2019.
- [26] 崔红梅, 周静, 郭丽娜, 等. Fenton 法预处理 ABS 废水的试验研究[J]. 工业用水与废水, 2018, 49(3): 31-34.
- [27] 卢毅明, 李坤, 徐祖武. 芬顿高级氧化技术深度处理青霉素制药废水的工程案例探讨[J]. 四川环境, 2021, 40(3): 45-49.
- [28] 周传庭, 唐建国, 王寅. 改良 AAO+MBBR 为主体的污水厂工艺设计及运行[J]. 中国给水排水, 2021, 37(6): 76-80.
- [29] 胡香, 张辉, 许光远, 等. 反硝化深床滤池深度脱氮效果研究[J]. 中国给水排水, 2017, 33(21): 13-17, 24.

(上接第 71 页)

- improves system performance—A full-scale comparative study[J]. Water Research, 2019, 167(10): 115109. DOI: 10.1016/j.watres.2019.115109.
- [6] 王磊. 城市污水的生物脱氮除磷工艺[J]. 化工设计通讯, 2018, 44(12): 225-225.
- [7] 王琼, 庞雪玲, 史彦伟, 等. 改良 A^2/O 工艺处理生活污水的脱氮除磷效果[J]. 中国给水排水, 2018, 34(23): 100-104.
- [8] 邓健贵. 污水处理系统中的脱氮除磷工艺流程[J]. 环境与发展, 2019, 31(5): 79-81.
- [9] 刘智晓. 生物除磷理论与实践新突破——从主流 EBPR 到侧流 EBPR[J]. 中国给水排水, 2018, 34(24): 19-25.
- [10] ARAVINTHAN V, MINO T, TAKIZAWA S, et al. Sludge hydrolysate as a carbon source for denitrification[J]. Water Science & Technology, 2001, 43(1): 191-199.
- [11] 吕鑑, 赵永志, 王佳伟, 等. 初沉泥水解酸化对 A^2/O 工艺强化除磷影响[J]. 北京工业大学学报, 2008, 34(9): 981-985.
- [12] 美国水环境联合会, 陈秀荣, 徐宏勇, 等. 城镇污水处理厂运行管理手册[M]. 6 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012: 286.
- [13] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 4 版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 836.