

文章编号:1671-6833(2020)05-0072-04

剩余污泥驯化过程中的除磷性能

彭赵旭, 韩 微, 娄天宇, 姜 昆, 李 磊

(郑州大学 水利科学与工程学院, 河南 郑州 450001)

摘要: 为了探究闲置剩余污泥活性恢复过程中除磷性能的变化, 采用厌氧-好氧交替运行的序批式间歇反应器(SBR)进行驯化, 考察了比释(吸)磷量、比释(吸)磷速率、污泥浓度、吸释比(好氧吸磷量与厌氧释磷量的比值)等指标的变化。结果发现: 在污泥龄控制为12.5 d的情况下, 比释磷量与比吸磷量的恢复进程保持同步, 其相关系数为0.927。除磷性能在活性污泥更新了16.7%时开始复苏, 更新了45.8%后迅速提高, 此时吸释比稳定在1.5~2, 活性污泥更新58.3%时除磷性能基本完全恢复。厌氧段释磷期间pH的下降值可以间接指示吸磷表现, 厌氧段pH在硝酸盐膝后的降低值与释磷量间的相关系数为0.675, 而氧化还原电位(ORP)无论在厌氧还是好氧过程均无法指示除磷性能的变化。结构稳定的活性污泥是生物除磷性能恢复的前提, 驯化过程中污泥浓度趋于稳定时除磷性能开始显著改善。

关键词: 闲置污泥; 活性恢复; 释磷量; 吸磷量; 除磷性能

中图分类号: X703.1

文献标志码: A

doi: 10.13705/j.issn.1671-6833.2020.05.010

0 引言

活性污泥法是目前污水处理的常用方法, 具有处理效果好、适应性广、操作灵活等优点^[1]。但是运行中会产生大量剩余污泥^[2], 有时由于缺少外运场所或设备检修只能闲置在厂内^[3], 当新厂调试或设备重启时, 这些剩余污泥是否能做接种污泥取决于闲置时间、接种用途、处理水质等因素。目前有关闲置污泥活性恢复的研究主要集中在除碳和脱氮方面。王新华等^[4]驯化闲置了2个月的好氧硝化颗粒污泥, 异养菌活性在1 d内恢复至原水平的86%, 5 d后即可完全恢复。路青等^[5]探究接种污泥源对厌氧氨氧化启动的影响, 发现采用好氧污泥、厌氧颗粒污泥和厌氧消化污泥作为种泥, 在SBR中驯化61、70、85 d后, 总氮去除率分别为76%、82%、80%。生物除磷是活性污泥法的主要功能, 闲置期间由于长期厌氧环境破坏了聚磷菌的代谢路径, 因此难以满足生物除磷的要求。这些剩余污泥是否能用作生物除磷工艺的接种污泥, 目前还鲜见报道。本文利用SBR反应器详细考察闲置污泥活性恢复过程中除磷性能的变化, 以期对闲置污泥再利用提供借鉴。

1 材料与方法

1.1 用水水质及污泥来源

实验采用人工模拟废水, 分别采用 $\text{CH}_3\text{COONa}\cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 、 NH_4Cl 和 KH_2PO_4 作为碳氮磷的来源, 投加375 mg/L的 NaHCO_3 溶液补充碱度, 投加40 mg/L的 $\text{CaCl}_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 、80 mg/L MgSO_4 溶液和0.3 mL/L的营养液提供微生物生长需要的各种矿质元素^[6]。模拟废水的COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 质量浓度分别为330 mg/L、45 mg/L和4.3 mg/L。实验污泥取自郑州市某污水处理厂的好氧池(AAO工艺), 取回后在塑料水桶里露天放置15 d。污泥沉降到水桶底部, 其外观逐渐由黄褐色变为灰黑色, 上清液清澈。

1.2 研究方法

SBR反应器由有机玻璃制成, 上部为圆柱形, 下部为圆台体, 高700 mm, 直径200 mm, 总有效容积12 L, 每周排水8 L。以曝气砂头作为微孔曝气器, 由转子流量计调节曝气量。pH、DO、氧化还原电位(ORP)探头置于反应器内, 温度用加热棒控制在 $(21\pm 1)^\circ\text{C}$ 。SBR采用厌氧/好氧方式运行, 每周8 h, 包括瞬时进水、厌氧搅拌(0.5 h)、好氧曝

收稿日期: 2020-03-25; 修订日期: 2020-06-15

基金项目: 河南省高等学校重点科研项目(20B560018); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2015ZX07204-002)

作者简介: 彭赵旭(1983—), 男, 黑龙江哈尔滨人, 郑州大学副教授, 博士, 主要从事污水脱氮除磷新技术研究, E-mail: pengzhaoxu1983@163.com。

气(2 h)、滗水沉淀(0.5 h)、排水闲置(1 h)、闲置待机(4 h)。好氧末期排放 100 mL 泥水混合液控制污泥停留时间(SRT) 12.5 d, SRT 由式(1)计算。闲置污泥用蒸馏水清洗3次后投加模拟废水进行驯化,初始污泥质量浓度 MLSS 为 3.032 g/L,实验一共进行 135 个周期。

$$SRT = \frac{V}{v} \cdot \frac{t}{24}, \quad (1)$$

式中: v 为每周期排放泥水混合液体积,本实验 $v = 100$ mL; V 为反应器总有效容积,本实验 $V = 12$ L; t 为每周期的实际反应时间,本实验 $t = 2.5$ h。

1.3 检测分析项目

水样经过孔径 0.45 μm 滤纸过滤后迅速放到 4 $^{\circ}\text{C}$ 冰箱内保存,并在 3 h 内测定。 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的浓度采用钼酸铵分光光度法,MLSS 采用重量法^[7];DO、pH 和 ORP 用 WTW 340i 溶解氧仪在线检测;污泥絮体结构用 OL YPUSBX51 显微镜观察;相关系数使用 SPSS 分析软件得出。比释磷量和比吸磷量分别按照式(2)和式(3)进行计算,比释(吸)磷速率按照式(4)计算:

$$K_{\text{释}} = \frac{(C_2 - C_1) \times V}{MLSS \times V}; \quad (2)$$

$$K_{\text{吸}} = \frac{(C_4 - C_3) \times V}{MLSS \times V}; \quad (3)$$

$$U_{\text{释(吸)}} = \frac{K_{\text{释(吸)}}}{T}, \quad (4)$$

式中: $K_{\text{释}}$ 为比释磷量,mg/g; $K_{\text{吸}}$ 为比吸磷量,mg/g; C_1 为厌氧初混合液磷浓度,mg/L; C_2 为厌氧末混合液磷质量浓度,mg/L; C_3 为好氧初混合液磷质量浓度,mg/L; C_4 为好氧末混合液磷质量浓度,mg/L; V 为混合液体积,L; $MLSS$ 为混合液污泥质量浓度,g/L; $U_{\text{释(吸)}}$ 为比释(吸)磷速率,mg/(g·min); T 为释磷(吸磷)时间,min。

2 结果与讨论

2.1 恢复过程的除磷表现

2.1.1 比释(吸)磷量

长期闲置污泥除磷能力接近消失,驯化初期比释磷量稳定在零左右,直到第 20 周期才出现微量释磷(此时活性污泥更新了 16.67%),第 55 周期后开始迅速上升(活性污泥更新了 45.8%),第 70 周期后稳定维持在高水平(活性污泥更新了 58.3%),最后比释磷量达到 8.00 mg/g,如图 1 所示。比吸磷量与比释磷量变化规律一致,相关系数达到 0.927,由此可见,释磷能力和吸磷能力

的恢复过程是同步的^[8]。

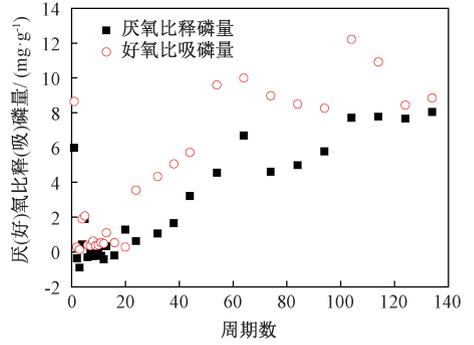


图 1 比释(吸)磷量变化

Figure 1 Variety of specific phosphorus release (uptake) amount

2.1.2 比释(吸)磷速率变化

比释磷速率和比吸磷速率分别从初期的 0.012 2 mg/(g·min) 和 0.046 7 mg/(g·min) 上升至末期的 0.268 mg/(g·min) 和 0.073 7 mg/(g·min),两者相关系数为 0.917。由于聚磷菌及反硝化聚磷菌大部分在活性污泥内层,其代谢所需的小分子有机酸等物质需要通过扩散作用传递进来^[9]。在闲置期间,活性污泥内部传质通道遭受部分破坏^[10],因此聚磷菌活性恢复较慢,导致初期几乎没有释磷能力。驯化 20 个周期后,随着污泥传质性能好转,比释磷量和比释磷速率逐渐升高,与此对应的好氧比吸磷量、比吸磷速率也随之上升。

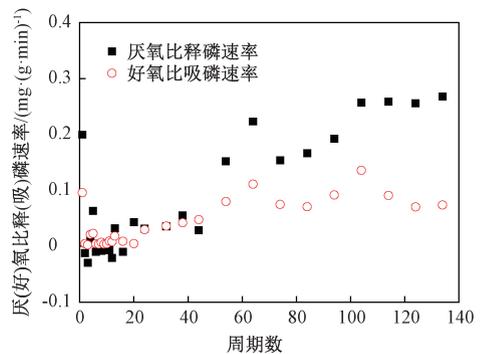


图 2 比释(吸)磷速率变化

Figure 2 Variety of specific phosphorus release (uptake) rate

2.2 污泥恢复过程 MLSS 的变化

在长期缺少外来营养物质的情况下,内源呼吸造成污泥部分解体,导致 MLSS 在初始 10 个周期内从 3.032 g/L 骤降到 1.153 g/L^[11]。结合除磷性能的变化,发现 MLSS 稳定与除磷性能改善在时间上同步,这说明结构稳定的活性污泥是生物除磷的前提。需要指出的是,MLSS 越低,有机

负荷越大,由于聚磷菌是异养菌^[12],因此 *MLSS* 越低越有助于强化生物除磷。在本实验条件下,当 *MLSS* 稳定在 1 g/L 左右时非常有利于聚磷菌生长^[13],从第 20 周期 *MLSS* 趋于稳定开始,到第 50 周期活性污泥更新了 45.8%,期间除磷性能迅速恢复,从第 50 周期开始直到实验结束,系统除磷一直保持良好的。

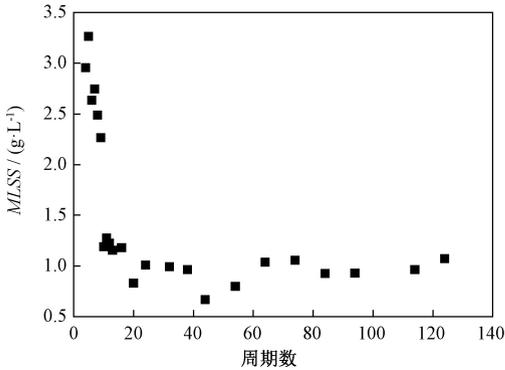


图3 污泥恢复过程 *MLSS* 的变化

Figure 3 Changes in *MLSS* during sludge recovery

2.3 典型周期磷酸盐、pH 和 *ORP* 的变化

传统理论认为,聚磷菌在厌氧条件下将细胞中聚磷水解为 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$,并从中获得能量,同时吸收水中的挥发性脂肪酸合成贮能物质聚- β -羟基丁酸(PHB)^[13]。以上过程会产生酸碱物质,进而影响溶液的 pH 值。同时厌氧好氧状态下物质转化会发生氧化还原反应进而影响溶液的 *ORP*。通过考察每周期 pH、*ORP* 等参数变化,有助于分析除磷进程。

在污泥驯化的典型周期中,pH 和 *ORP* 的变化如图 4 所示。厌氧初期 pH 上升,反硝化菌比 PAO 更容易争夺有限碳源,通过反硝化产生碱度,此时 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度变化不大。厌氧后期 pH 下降,这时 $\text{NO}_3^{-}\text{-N}$ 被完全反硝化,对应拐点称为硝酸盐膝。之后聚磷菌开始吸收有机物水解聚合磷酸盐, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度显著上升。*ORP* 在整个厌氧段始终处于下降趋势,这是因为 $\text{NO}_3^{-}\text{-N}$ 等氧化态物质不断减少,三羧酸循环中部分乙酸盐被氧化成 CO_2 并产生合成还原性聚合物(PHA)需要的还原力^[14]。在随后好氧阶段聚磷菌大量吸磷,磷酸盐浓度一直减少。在硝化菌产酸作用下,pH 也呈下降趋势。随着氨氮等还原态物质浓度降低以及 *DO* 增加,*ORP* 在好氧段始终处于上升状态。

2.4 讨论

为探讨根据 pH 和 *ORP* 变化趋势掌握除磷恢复进程的可行性,考察了整个过程中两者的变化情

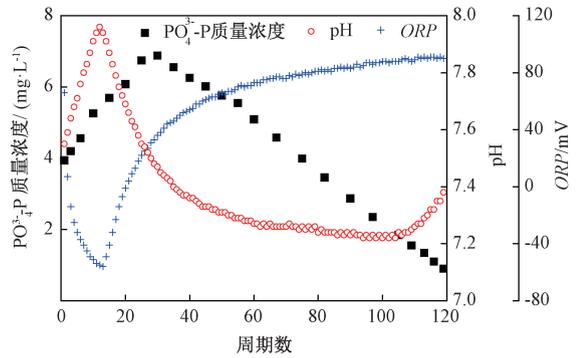


图4 污泥恢复过程中第 55 周期内 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 质量浓度、pH、*ORP* 典型变化曲线

Figure 4 Typical curves of $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 、pH、*ORP* during the 55th cycle of sludge recovery

况,如图 5 所示。从中可见平均每周期始末的 pH 分别为 7.26 和 7.51,*ORP* 分别为 -24 mV 和 77 mV。在污泥驯化初期(0~20 周期),每周期末 pH 从 8.0 逐渐下降至 7.7,之后稳定在 7.5 左右。由 2.3 节分析可知,厌氧段硝酸盐膝后 pH 下降是释磷所致,分析 pH 下降量与释磷量之间的相关性,发现其相关系数达 0.675。充分释磷是后续吸磷的前提,因此硝酸盐膝之后 pH 的下降值可在一定程度上间接反映生物除磷性能。与 pH 的变化趋势相反,*ORP* 在好氧段呈现逐渐升高的趋势,但是 *ORP* 上升量与吸磷量间相关系数仅为 0.321,因此 *ORP* 与生物除磷的关系并不显著,这与 Yang 等^[14]的研究成果一致。

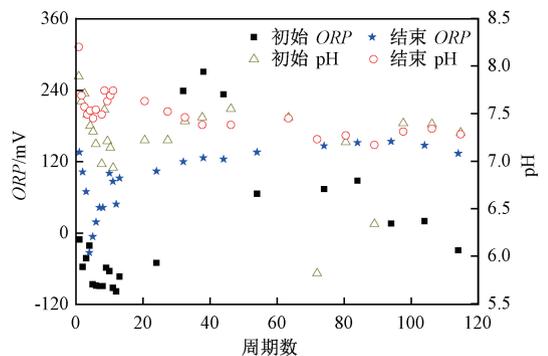


图5 每周期开始和结束的 pH、*ORP*

Figure 5 pH and *ORP* at the beginning and end of each cycle in anaerobic phosphorus release process

聚磷菌在厌氧段释磷,在好氧段过度吸磷,考察实验期间吸磷量与释磷量的比值,结果如图 6 所示。可见吸释比在前 20 个周期内剧烈波动,这是活性污泥结构偏低、污泥浓度不稳定造成的。在第 20 到第 50 周期时吸释比维持在 3.0 左右,结合 2.1 节的分析得知此时除磷性能处于快速恢复期。第 50 周期后吸释比稳定在 1.5~2

内,López-Vázquez 等^[15]发现,当吸释比在 1~2 时生物除磷效果较为理想,本研究在第 50 周期之后除磷性能也趋于稳定,这进一步证实了结构稳定的活性污泥是保障生物除磷的前提。

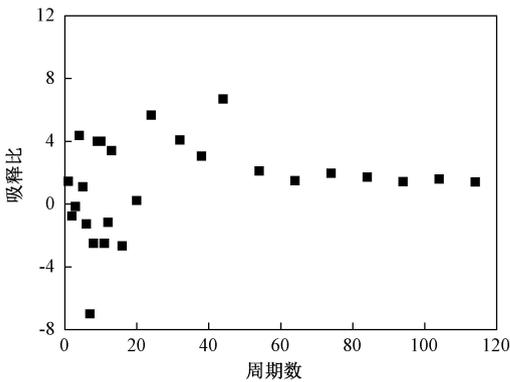


图 6 吸磷量与释磷量之比

Figure 6 Ratio of phosphorus uptake to phosphorus release

3 结论

采用厌氧/好氧方式驯化闲置污泥,除磷性能于污泥结构稳定后开始恢复,在污泥更换率为 45.8% 时迅速提高,在 58.3% 时基本恢复到最高水平。释磷能力与吸磷能力的恢复进程保持同步,相关系数可达 0.927。可以通过分析厌氧段硝酸盐氮之后 pH 的下降值以及吸磷量与释磷量的比值来间接掌握除磷性能的恢复情况,而 ORP 与除磷能力之间的关系并不显著。

参考文献:

[1] HREIZ R, LATIFI M A, ROCHE N. Optimal design and operation of activated sludge processes: state-of-the-art [J]. *Chemical engineering journal*, 2015, 281: 900-920.

[2] 徐颖,苏墨,邵文华,等. 好氧颗粒污泥储存后快速恢复活性最优条件的试验研究[J]. *工业水处理*, 2014, 34(1): 65-67.

[3] WANG K, WU Y Q, WANG Z, et al. Insight into effects of electro-dewatering pretreatment on nitrous oxide emission involved in related functional genes in sewage sludge composting [J]. *Bioresource technology*, 2018, 265: 25-32.

[4] 王新华,张捍民,夏丽萍,等. 好氧硝化颗粒污泥搁置后活性恢复研究[J]. *环境科学*, 2008, 29(11): 3119-3123.

[5] 路青,李秀芬,华兆哲,等. 接种污泥源对厌氧氨氧化启动效能的影响[J]. *生态与农村环境学报*, 2009, 25(4): 60-65.

[6] MA H Y, ZHANG Y L, XUE Y, et al. A new process for simultaneous nitrogen removal and phosphorus recovery using an anammox expanded bed reactor [J]. *Bioresource technology*, 2018, 267: 201-208.

[7] APHA. Standard methods for the examination of water and wastewater [M]. 20th ed. Washington DC, USA: APHA/AWWA/WEF, 1998.

[8] 赵爽,彭党聪,常青,等. EBPR 系统中微生物群落结构及其除磷效能分析[J]. *中国给水排水*, 2014, 30(9): 9-13.

[9] LIU Y Q, LIU Y, TAY J H. Relationship between size and mass transfer resistance in aerobic granules [J]. *Letters in applied microbiology*, 2005, 40(5): 312-315.

[10] 魏玉,张捍民,杨凤林,等. 反硝化除磷颗粒污泥的活性恢复及对生活污水处理能力[J]. *环境工程学报*, 2012, 6(3): 839-842.

[11] 张亚伟,李志华,杨成建,等. 呼吸图谱表征活性污泥微生物的休眠与流失[J]. *中国给水排水*, 2017, 33(11): 7-11.

[12] 韦佳敏,黄慧敏,程诚,等. 污泥龄及 pH 值对反硝化除磷工艺效能的影响[J]. *环境科学*, 2019, 40(4): 1900-1905.

[13] 彭赵旭,韩微,彭志远,等. 反应时间和碳磷比对单级好氧除磷的影响[J]. *郑州大学学报(工学版)* 2018, 39(4): 46-50.

[14] YANG Q, PENG Y Z, LIU X H, et al. Nitrogen removal via nitrite from municipal wastewater at low temperatures using real-time control to optimize nitrifying communities [J]. *Environmental science & technology*, 2007, 41(23): 8159-8164.

[15] LÓPEZ-VÁZQUEZ C M, HOOIJMANS C M, BRDJANOVIC D, et al. Factors affecting the microbial population at full-scale enhanced biological phosphorus removal (EBPR) wastewater treatment plants in The Netherlands [J]. *Water research*, 2008, 42(10/11): 2349-2360.

- 滚动轴承智能故障诊断方法[J].机械设计与研究, 2017,33(2):93-97.
- [8] 管腾飞.全矢高阶统计量及其在故障诊断中的应用研究[D].郑州:郑州大学,2015.
- [9] 韩捷,石来德.全矢谱技术及工程应用[M].北京:机械工业出版社,2008:65-70.
- [10] 张伟.基于卷积神经网络的轴承故障诊断算法研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2017.
- [11] GOODFELLOW I, BENGIO Y, COURVILLE A. Deep learning[M/OL]. Cambridge, MA: MIT Press, 2016 [2019-05-07]. <http://www.deeplearningbook.org>.

Bearing Fault Diagnosis Based on Full Vector-CNN

HAO Wangshen¹, CHEN Yao¹, SUN Hao¹, FU Yaokun², LI Wei¹

(1.School of Mechanical and Power Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2.Navigation Bureau of Henan Communications and Transportation Department, Zhengzhou 450016, China)

Abstract: Aimed to improved at the traditional intelligent fault diagnosis system, which required a large amount of prior knowledge, and had the complexity of its model and the information loss caused by the incompleteness of single-channel signal, a full-vector deep convolutional neural network diagnosis model of rolling bearing was proposed. The full-vector technique was used to fuse the acquired two-channel signals to obtain the fused main vibration vector data, which contained more complete information than the single-channel data. Combining the main vibration vector and deep learning algorithm to construct the full vector depth convolutional neural network, the model could adaptively extract the fault features and use the back propagation algorithm to adjust the model parameters. The experimental results showed that the method could extract more complete fault information, and the model had higher accuracy and better stability.

Key words: fault diagnosis; full vector spectrum; deep learning; convolutional neural network (CNN); rolling bearing

(上接第 75 页)

Phosphorus Removal Performance During the Recovery Process of Residual Sludge

PENG Zhaoxu, HAN Wei, LOU Tianyu, JIANG Kun, LI Lei

(School of Water Conservancy Science and Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: In order to investigate phosphorus removal performance during the recovery process of residual sludge, an anaerobic-aerobic alternating sequencing batch reactor (SBR) was used for domestication, and the changes of specific phosphorus release (uptake) amount, specific phosphorus release (uptake) rate, *MLSS* and the ratio of phosphorus uptake to phosphorus release (uptake-release) were investigated. It was found that when the sludge retention time was controlled at 12.5 d, specific phosphorus release amount and specific phosphorus uptake amount were increased synchronously, the correlation coefficient was 0.927. Phosphorus removal performance began to recover when the activated sludge was regenerated by 16.7%, and improved obviously after 45.8%. At this time, the ratio of uptake-release was stable at 1.5~2. When activated sludge was regenerated by 58.3%, phosphorus removal performance almost recovered completely. The decrease of pH during anaerobic stage could indirectly indicate the performance of phosphorus release. The correlation coefficient between the variation of pH after the nitrate knee and the phosphorus release amount was 0.675, while the oxidation and reduction potential (*ORP*) could not indicate phosphorus removal performance either in the anaerobic stage or aerobic stage. A stable structure of activated sludge was the prerequisite for biological phosphorus removal. When the sludge concentration was stable during domestication process, the phosphorus removal performance began to improve significantly.

Key words: idle sludge; activity recovery; phosphorus release amount; phosphorus uptake amount; phosphorus removal performance