

硝酸盐对磷酸盐还原系统除磷效能的影响

龙腾锐, 陈 垚, 周 健, 刘 俊

(重庆大学 城市建设与环境工程学院 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400045)

摘要:通过改变进水硝酸盐浓度,考察了硝酸盐对缺氧和好氧两种不同氧环境下的磷酸盐还原系统除磷效能的影响。试验结果表明,硝酸盐对两种氧环境下磷酸盐还原系统的除磷效能影响显著。当进水硝酸盐浓度为105~160 mg/L时有利于缺氧条件下的磷酸盐还原。而进水硝酸盐对好氧条件下的磷酸盐还原产生显著抑制作用,并且两者存在显著的负相关($R^2=0.9827$)。这种差异主要是由于两种不同氧环境下,硝酸盐对微环境构造的影响不同而造成的。同时,不同浓度的进水硝酸盐还会影响反应器内的pH值,进而影响磷酸盐还原进程。结果表明,偏碱性(pH8左右)有利于两种氧环境下的磷酸盐还原。

关键词:硝酸盐;还原反应;好氧;缺氧;微环境;磷酸盐还原;除磷效能

中图分类号:X703.1 文献标志码:A 文章编号:1674-4764(2009)05-0127-05

Effect of Influent Nitrate on Phosphorus Removal Efficiency of Phosphate Reduction System

LONT Teng-rui, CHEN Yao, ZHOU Jian, LIU Jun

(College of Urban Construction and Environmental Engineering, Key Laboratory of Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

Abstract: The influence of influent nitrate on phosphorus removal efficiency of phosphate reduction systems under anoxic and aerobic condition was studied by changing the concentration of influent nitrate. It was shown that nitrate had significant influence on phosphorus removal efficiency of phosphate reduction system under anoxic and aerobic condition. When influent nitrate concentration was between 105 mg/L and 160 mg/L, it was favorable to anoxic phosphate reduction. However, influent nitrate had a remarkable inhibition on aerobic phosphate reduction, and there was a significant negative correlation between them ($R^2=0.9827$). The difference on phosphorus removal efficiency was mainly due to different influence of nitrate on microenvironment structure under various oxygen environments. Moreover, different concentrations of influent nitrate also affected the pH value in the reactor, which can affect phosphate reduction process. It was found that slight alkaline (pH around 8) was favorable for phosphate reduction under anoxic and aerobic condition.

Key words: nitrates; reduction; aerobic; anoxic; microenvironment; phosphate reduction; phosphorus removal efficiency

目前,对于磷化氢(PH_3)的生物形成机制尚不明确,但普遍认为是厌氧微生物生物介导作用的结果^[1-4]。从反应热力学来看磷酸盐还原反应是一个吸能反应,并且需要高能电子供体(如 H_2 或乳酸

盐),并认为磷酸盐还原反应不能自发进行。但在某类微生物的催化作用下,该反应是有可能发生的。如生物固氮反应,在反应的第一步,需极高的活化能和低氧化还原电位(-1.2 V, pH7),这时,生物体内

收稿日期:2009-06-25

基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项(2008ZX07315-004)

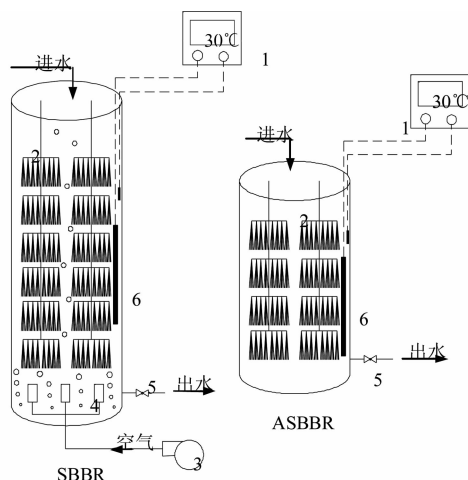
作者简介:龙腾锐(1939-),男,教授,博士生导师,主要从事水污染控制研究,(E-mail)LongTR@126.com。

ATP 的水解,以提供能量用于铁钼蛋白的还原,从而催化该反应的发生。而 pH7 条件下磷化合物的还原电位显然比还原铁钼蛋白的氧化还原电位 -1.0 V 高得多^[5]。因此,某类微生物酶在磷酸盐还原反应过程中起到一定的作用。近年来,在好氧或缺氧环境中检测到 PH_3 的存在^[6-8],表明 PH_3 的形成不局限于厌氧环境。同时,周康群等^[9-11]对不同种源下的产磷化氢细菌进行分离,得到了几株兼性厌氧的产磷化氢功能菌,并且其中一株同时具有反硝化和产磷化氢功能。丁丽丽^[7]发现好氧条件下有利于磷化氢的形成,并指出只有在同时具备厌氧、缺氧和好氧的微环境的大粒径颗粒污泥中才有可能发生。

笔者在对高盐榨菜腌制废水进行生物处理的过程中发现长期无外排剩余污泥的条件下,反应器具有较好的除磷效果。通过测定污泥含磷量、物料衡算及污泥中磷形态转化分析^[12],并且测得污泥中结合态磷化氢的含量远高于文献^[6]的报道值,同时还测得同数量级的还原产物 $\text{P}(+I)$ 的存在,证实其除磷途径为磷酸盐还原。高盐榨菜废水含高浓度氮,其中一小部分以硝酸盐形态存在,以及硝化作用产生的硝酸盐,都会影响氧环境的构造。硝酸盐在一定程度上改变了单一氧环境或微环境的构造,从而构建出适合兼性厌氧的磷酸盐还原菌生存的环境。但也有研究指出,硝酸盐发生还原的缺氧环境又不利于 PH_3 的释放^[8]。该研究在前期构建的缺氧和好氧不同氧环境下的磷酸盐还原系统的基础上,通过改变进水硝酸盐浓度,考察了 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度对不同氧环境下磷酸盐还原系统除磷效能的影响,并对除磷效能的影响差异进行了分析,为磷酸盐生物还原除磷新工艺的开发奠定了基础。

1 材料及方法

1.1 试验装置



1.温度控制仪 2.组合填料 3.空气泵 4.曝气砂头 5.球阀 6.加热棒

图 1 试验装置图

试验中不同氧环境(好氧、缺氧)的试验装置分别采用如图 1 所示的序批式生物膜反应器(Sequencing Batch Biofilm Reactor, SBBR)和缺氧序批式生物膜反应器(Anoxic Sequencing Batch Biofilm Reactor, ASBBR)。反应器均由 UPVC 制成,采用组合填料,挂膜密度为 50%。其中, SBBR 有效容积 10 L, ASBBR 有效容积为 5 L。通过温度控制仪和加热棒将反应器内温度控制在 $30 \pm 0.5\text{ }^\circ\text{C}$ 。反应器的每个运行周期包括进水 0.25 h—反应 11.5 h—出水 0.25 h,共 12 h。

1.2 试验方法及试验水质

采用阶段性试验,分别在 SBBR 和 ASBBR 反应器内通过改变进水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度,考察不同氧环境下磷酸盐还原系统的除磷效能。

1.2.1 进水硝酸盐对缺氧磷酸盐还原系统除磷效能的影响 ASBBR 反应器试验用水取自重庆涪陵某榨菜厂的腌制废水,其水质见表 1 所示。在进水有机负荷为 $0.5\text{ kgCOD}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$,磷负荷为 $5\text{ g}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 条件下,控制反应器的进水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度分别为 29 mg/L 、 59 mg/L 、 81 mg/L 、 105 mg/L 、 134 mg/L 、 160 mg/L 和 200 mg/L ,试验期间测试 COD、 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 、ORP、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 及 pH 等指标。

1.2.2 进水硝酸盐对好氧磷酸盐还原系统除磷效能的影响 试验水质见表 1 所示。在进水有机负荷为 $0.5\text{ kgCOD}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$,磷负荷为 $5\text{ g}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$,DO 为 6 mg/L 条件下,控制反应器的进水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度分别为 5 mg/L 、 52 mg/L 、 113 mg/L 、 149 mg/L 。试验期间测试 COD、 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 、ORP、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 及 pH 等指标。

表 1 试验水质

反应器	盐度/ %	COD/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	$\text{NH}_4^+ - \text{N}/$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	TN/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	$\text{PO}_4^{3-} - \text{P}/$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	pH
ASBBR	6.9~7.1	4 018~4 964	130~150	260~280	48.82~54.39	4.2~4.6
SBBR	6.9~7.1	4 985~5 075	20~30	30~40	52.27~55.70	4.2~4.6

2 试验结果与分析

2.1 进水硝酸盐对缺氧磷酸盐还原系统除磷效能的影响

进水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度对 ASBBR 反应器 COD 的去除无显著影响。出水 COD 维持在 900 mg/L 左右, COD 去除率为 $73.91\% \sim 80.61\%$ 。同时随着进水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度的升高, ASBBR 反应器具有较好的反硝化能力, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 去除率为 $93.53\% \sim 97.98\%$ 。

进水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度对 ASBBR 反应器缺氧磷酸盐还原有显著影响(图 2)。由图 2 可知,当进水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度由 29 mg/L 增加至 105 mg/L 时,出水 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 由 48.82 mg/L 降低至 28.99 mg/L,去除率由 10.27% 上升到 40.52%,去除率显著增加。当进水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度由 105 mg/L 增加至 160 mg/L 时, $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 去除率由 40.52% 下降到 37.18%,去除率略有降低。当进水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度由 160 mg/L 增加至 200 mg/L 时 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 去除率陡降至 22.28%。试验结果表明,进水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度对 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 去除有显著影响,进水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度在 105~160 mg/L 之间有利于缺氧条件下的磷酸盐还原。

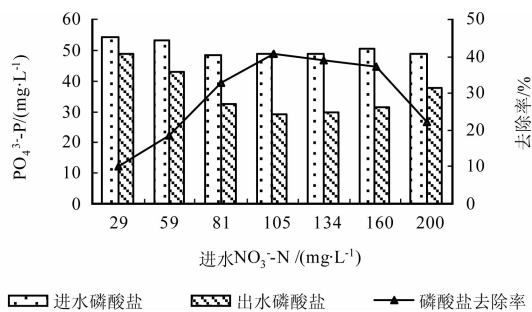
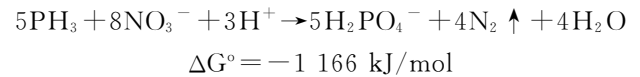


图 2 进水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度对反应器 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 去除的影响

反应器中碳源的利用途径随着进水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度的增加而发生变化,如图 3 所示。由于每去除 1 mg $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 需要有机基质为 8.67 mg。当进水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度由 29 mg/L 增加至 200 mg/L 时,反硝化消耗的碳源 COD 由 235 mg/L 增加至 1 703 mg/L,反硝化利用碳源比例由 5.67% 增加至 35.79%。当进水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度由 29 mg/L 逐步增加至 105 mg/L 时,厌氧环境被破坏,逐步形成缺氧环境(反应器内 ORP 从 -316.0 mV 升高至 -150.3 mV),抑制了产甲烷菌(Methane Producing Bacteria, MPB)的生长,但有利于磷酸盐还原菌(Phosphate Reduction Bacteria, PRB)和反硝化菌(Denitrification Bacteria, DNB)的增殖,COD 的去除由 MPB 降解途径转变为 MPB 降解、反硝化和 PRB 除磷等过程对碳源的共同降解和利用。因此,随着 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度增加,COD 去除率变化不大,而磷酸盐去除率增加。当进水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度由 105 mg/L 增加至 160 mg/L 时,反应器中碳源充足,反硝化消耗的碳源比例在 20.70%~27.47% 之间,使得磷酸盐还原菌也能得到充足碳源,有利于 PRB 活性保持和微生物增殖,除磷效果稳定。当进水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度由 160 mg/L 增加至 200 mg/L

时,反硝化消耗的碳源比例由 27.04% 增长到 35.79%,DNB 与 PRB 争夺碳源,抑制了 PRB 的增殖, $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 去除率降低。同时,由于高浓度 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 所形成的缺氧环境不利于磷酸盐还原产生的 PH_3 气体的释放。 PH_3 作为 DNB 还原硝酸盐过程中的电子供体,与 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 发生如下反应:



使产生的 PH_3 进一步氧化成 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 重新进入水相,从而使 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 去除率下降。

分析认为,对于缺氧条件下,由于榨菜腌制废水中含一定量的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ (30 mg/L 左右),生物膜的外层可能存在一个缺氧区。在该区域,专性厌氧菌 MPB 受到抑制,很大程度上为 PRB 提供了 H_2 或乳酸盐等高能电子进行磷酸盐还原。因此,进水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 对缺氧磷酸盐还原的影响主要有:1)随着 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度的增加,对 MPB 抑制作用的加强,减少了专性厌氧菌 MPB 对 H_2 或乳酸盐等高能电子的竞争,PRB 能得到充足的碳源基质(如高能电子)而使得除磷能力加强,从而表现为较高浓度的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 对除磷效能增加有促进作用。同时, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 构建的环境 (ORP > -150 mV) 能促进 PRB 的活性。2) $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度过高,会导致缺氧条件下 DNB 与 PRB 争夺碳源。而 DNB 具有很强的竞争力,PRB 在竞争中处于弱势^[13-14],从而削弱除磷效果,表现为过高浓度的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 对除磷效能有抑制作用。同时,高浓度 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 所形成的缺氧环境^[8] 不利于 PH_3 的释放。

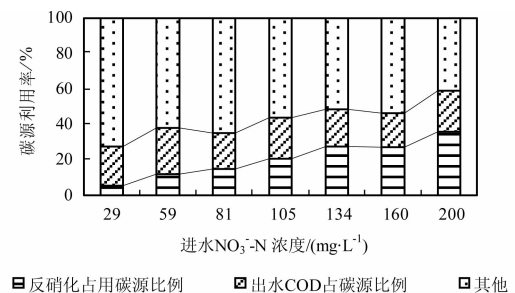


图 3 反应器中碳源分配图

进水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度的变化对缺氧磷酸盐还原系统内的 pH 有影响(图 4)。当进水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度由 29 mg/L 增加至 105 mg/L 时,反应器内 pH 由 7.42 上升到 8.04,并且与 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 去除率存在较好的正相关 ($R^2 = 0.9805$)。当进水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度由 105 mg/L 增加至 160 mg/L 时,反应器内 pH 升高至 8.13, $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 去除率略降低了 3.34%。当进水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度由 160 mg/L 增加

至 200 mg/L 时,反应器内的 pH 值陡降至 7.74, $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 去除率减少了 14.90%。结果表明,偏碱性有利于缺氧条件下磷酸盐还原。这与耿金菊等^[15]研究认为偏碱性(pH8~10)条件有利于磷化氢的生成是一致的,而与周康群及郭夏丽等^[9,16]认为酸性条件(pH6~7)有利于磷酸盐还原酶的合成或酶活性的发挥观点相悖。这可能偏碱性条件下,有利用通过磷形态转化而产生 PRB 能直接利用的“活性磷”。

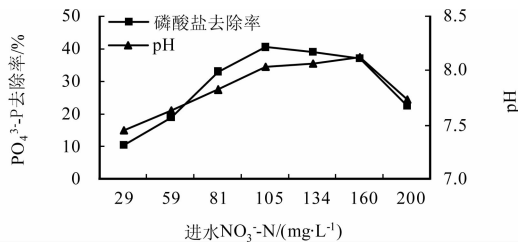


图 4 NO_3^--N 对反应器内 pH 的影响

反应器内有机氮氨化、甲烷化及反硝化都会影响碱度,进而影响反应器内的 pH 值变化。有机氮氨化贡献碱度,甲烷化降解消耗碱度,反硝化贡献碱度。如果 PRB 利用 H_2 或乳酸盐等高能电子作为电子供体,该反应为一个碱度贡献过程。随着磷酸盐还原系统内微环境的变化,使甲烷化作用受到抑制,碱度贡献过程加强,最终使反应器的 pH 升高。但当进水 NO_3^--N 浓度高于 160 mg/L 时,由于 PRB 受碳源限制,贡献碱度的还原反应减弱,最终使反应体系的碱度降低,降低反应器的 pH 值。

2.2 进水硝酸盐对好氧磷酸盐还原系统除磷效能的影响

不同进水 NO_3^--N 水平下, SBBR 反应器对 NO_3^--N 和 COD 的去除结果见表 2。

表 2 SBBR 对 NO_3^--N 与 COD 去除结果

$\text{NO}_3^--\text{N}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$		去除率/%		$\text{COD}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$			去除率/%
进水	出水	去除量	%	进水	出水	去除量	%
4.6	1.8	2.8	61.44	5 050	547	4 503	89.17
51.8	9.3	42.5	82.11	5 033	546	4 488	89.16
113.4	23.4	90.0	79.34	5 075	603	4 472	88.12
148.7	31.5	117.2	78.81	4 850	843	4 008	82.63

由表 2 可知,进水 NO_3^--N 浓度对 SBBR 反应器的反硝化效能及 COD 降解效能无显著影响,去除率分别为 61.44%~82.11%和 82.63%~89.17%。

进水 NO_3^--N 浓度对 SBBR 反应器好氧条件

下磷酸盐还原有显著的影响,如图 5 所示。随着进水 NO_3^--N 浓度的升高,出水 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 浓度也随之升高, $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 去除率从 67.06%降低至 34.70%。试验结果表明,高浓度的 NO_3^--N 对好氧条件下磷酸盐还原产生显著的抑制作用。

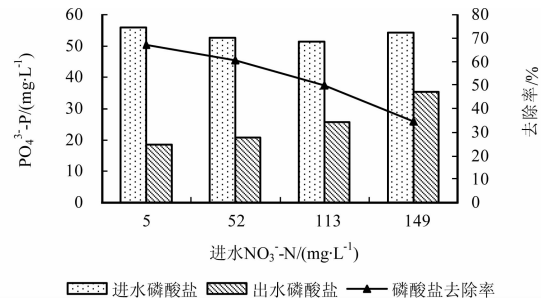


图 5 进水 NO_3^--N 浓度对反应器 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 去除的影响

由试验结果可知,反应器对 NO_3^--N 的去除效果较好,反应器内 DNB 活性较好。反硝化和磷酸盐还原过程均需要碳源。由表 2 可知,当进水 NO_3^--N 浓度由 4.6 mg/L 增加至 148.7 mg/L 时, COD 去除量由 4 503 mg/L 降低至 4 008 mg/L,其中反硝化消耗 COD 由 24 mg/L 增加至 1 016 mg/L,反硝化利用碳源比例由 0.54% 增加至 25.36%。PRB 可利用 COD 由 4 479 mg/L 降低至 2 992 mg/L,使实际 C/P 由 80 降低至 55。若考虑其他细菌对碳源的利用或是与 PRB 在碳源利用上存在竞争关系,使得 PRB 对碳源的实际利用量大大降低。同时,也存在着 PH_3 作为 DNB 还原硝酸盐过程中的电子供体,被氧化成 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 重新进入水相。此外,有报道指出,好氧条件下 PH_3 是由同时具备厌氧、缺氧和好氧 3 种微环境的颗粒污泥中兼性菌产生的^[8]。随着进水 NO_3^--N 浓度的升高,3 种微环境所占的比例开始发生变化,最终影响 PRB 还原磷酸盐的进程。从而表现为反应器对 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 的去除率随进水 NO_3^--N 浓度增加而降低,且反应器内的 NO_3^--N 去除量与磷酸盐去除量之间存在负相关性($R^2=0.9827$)。

分析认为, SBBR 反应器内的生物膜厚实,存在好氧、缺氧和厌氧 3 个微环境,同时在反应初期存在一个低氧段 (ORP 为 $-150 \sim -100$ mV), 厌氧微环境存在的区域更大。这种交替共存的微环境为兼性 PRB 提供了较好的生存环境。在低氧段的兼性厌氧区,水解酸化菌产生 H_2 或乳酸盐等高能电子, PRB 利用这些高能电子作为电子供体进行磷酸盐还原。随着进水 NO_3^--N 浓度的升高,低氧段的兼性厌氧区逐渐受到破坏,同时反硝化消耗的碳源也逐渐增加,使得高能电子数量下降,抑制了磷酸盐

还原反应。从而表现为进水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 对好氧磷酸盐还原系统有抑制作用。

进水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度的变化对好氧磷酸盐还原系统内的 pH 有影响,如图 6 所示。随着进水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度的升高,反应器内 pH 由 8.35 降低至 7.42,并且与 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 去除率存在较好的正相关 ($R^2=0.9927$)。这是由于 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 可通过传质作用影响生物膜内微环境的构造,削弱产生碱度的磷酸盐还原作用,最终降低反应器内的 pH 值。试验结果表明,偏碱性同样有利于好氧条件下磷酸盐还原。

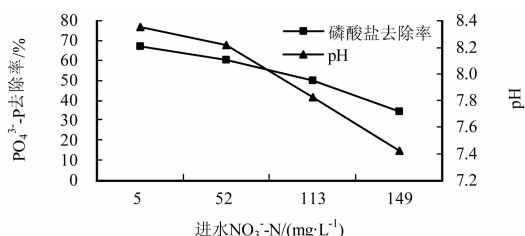


图 6 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 对反应器内 pH 的影响

3 结 论

1) 进水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度对缺氧磷酸盐还原系统的 COD 去除及反硝化效能无显著影响。COD 去除率为 73.91%~80.61%, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 去除率为 93.53%~97.98%。较高浓度的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 所构建的环境条件有利于磷酸盐还原,但浓度过高则会抑制磷酸盐还原。当进水浓度控制在 105 mg/L~160 mg/L 时, $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 去除率高达 37.18%~40.52%。此外,不同浓度的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 还会影响系统内的 pH 值,表现为偏碱性(pH 8 左右)有利于磷酸盐还原。

2) 进水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度对 SBBR 反应器的反硝化效能及 COD 降解效能无显著影响,去除率分别为 61.44%~82.11% 和 82.63%~89.17%。而对 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 去除有明显的抑制作用,随着进水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度的升高,由于反硝化对碳源的大量消耗,使得磷酸盐还原受到抑制,表现为 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 去除量与 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 去除量存在显著的负相关 ($R^2=0.9827$)。当进水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度控制在 5 mg/L 时, $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 去除率达到最高,为 67.06%。此外,进水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度的升高还会改变系统内的偏碱性环境,进一步抑制磷酸盐还原。

参考文献:

[1] HANRAHAN G, SALMASSI T M, KHACHIKIAN C S, et al. Reduced inorganic phosphorus in the natural

environment: significance, speciation and determination [J]. *Talanta*, 2005, 66: 435-444.

[2] JORIS R, GWEN H, WILLY V. Microbially mediated phosphine emission [J]. *Science of the Total Environment*, 2005, 338: 253-265.

[3] LIU Z P, JIA S F, WANG X R, et al. Preliminary investigation on the role of microorganisms in the production of phosphine [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2008, 20: 885-890.

[4] 牛晓君. 自然环境中磷化氢研究进展 [J]. *中国沼气*, 2007, 25(1): 18-22.

NIU XIAO-JUN. Research progress of phosphine in natural environment [J]. *China Biogas*, 2007, 25(1): 18-22.

[5] 郭夏丽. 磷酸盐生物还原研究进展与应用前景 [J]. *江苏环境科技*, 2006, 19(5): 53-55.

GUO XIA-LI. Research progress and application prospect of biological reduction of phosphate [J]. *Jiangsu Environment Science and Technology*, 2006, 19(5): 53-55.

[6] 丁丽丽, 朱益新, 梁瀚文, 等. 大型 UASB 系统磷化氢分布及磷平衡研究 [J]. *南京大学学报: 自然科学版*, 2005, 41(6): 620-626.

DING LI-LI, ZHU YI-XIN, LIANG HAN-WEN, et al. Distribution of phosphine and phosphorus balance in a full-scale UASB system [J]. *Journal of Nanjiang University: Natural Sciences*, 2005, 41(6): 620-626.

[7] DING L L, LIANG H W, ZHU Y X, et al. Sources of matrix-bound phosphine in advanced wastewater treatment system [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2005, 50(12): 1274-1276.

[8] 丁丽丽. 颗粒污泥、污水处理系统磷化氢释放及环境因素研究 [D]. 南京: 南京大学环境学院, 2005.

[9] 周康群, 刘晖, 崔英德, 等. 一株新的厌氧除磷功能菌株的鉴定与活性 [J]. *化工学报*, 2008, 59(6): 1522-1530.

ZHOU KANG-QUN, LIU HUI, CUI YING-DE, et al. Identification of a novel anaerobic dephosphorization bacterial strain and its activity in phosphate removal under anaerobic condition [J]. *Journal of Chemical Industry and Engineering (China)*, 2008, 59(6): 1522-1530.

[10] 周康群, 刘晖, 孙彦富, 等. 一株源于污泥浓缩池厌氧除磷菌的分离、鉴定及特性研究 [J]. *环境科学研究*, 2008, 21(4): 38-42.

ZHOU KANG-QUN, LIU HUI, SUN YAN-FU, et al. Isolation, identification and characteristic analysis of anaerobic dephosphorization bacteria strain from the concentrated pool [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2008, 21(4): 38-42.

(下转第 137 页)

- Instrumental Analysis, 2006(2):100-102.
- [13] SUPHI URAL. Comparison of fly ash properties from Afsin-Elbistan coal basin, Turkey [J]. Journal of Hazardous Materials, 2005, 119(1-3): 85-92.
- [14] 吴传明,侯鹏坤,汪克进,等. 湿排粉煤灰活性影响因素试验[J]. 重庆大学学报, 2009,32(6):643-647.
WU CHUAN-MING, HOU PENG-KUN, WANG KE-JIN et al. Factors influencing activation of wet fly ash[J]. Journal of Chongqing University. 2009,32(6): 643-647.
- [15] 钱觉时,吴传明,汪克进,等. 模拟湿排粉煤灰的性能[J]. 硅酸盐学报,2007,35(7):871-876.
QIAN JUE-SHI, WU CHUAN-MIGN, WANG KE-JIN, et al. Properties of simulative wetting fly ash[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2007, 35(7): 871-876.
- [16] LI GENG-YING, WU XIAO-ZHONG. Influence of fly ash and its mean particle size on certain engineering properties of cement composite mortars[J]. Cement and Concrete Research, 2005, 35(6): 1128-1134.
- [17] BAERT, GERT, POPPE, Anne-Mieke, De Belie, Nele, Strength and durability of high-volume fly ash concrete[J]. Structural Concrete, 2008, 9(2): 101-108.
- [18] LAMMERTIJN, S, DE BELIE, N POROSITY. gas permeability, carbonation and their interaction in high-volume fly ash concrete [J]. Magazine of Concrete Research, 2008, 60(7):535-545.
- [19] KHUMTHONGKEAW J, TANGTERMSIRIKUL S, LEELAWAT T. A study on carbonation depth prediction for fly ash concrete[J]. Construction and Building Materials 2006, 20(9) 744-753.

(编辑 胡 玲)

(上接第 131 页)

- [11] 周康群,刘晖,孙彦富,等. 厌氧条件总磷还原为磷化氢种泥筛选及功能菌株鉴定[J]. 生态环境,2007,16(6): 1669-1673.
ZHOU KANG-QUN, LIU HUI, SUI YAN-FU, et al. Screening the phosphate reducer deoxidizing total phosphate into PH₃ and the identification of the functional bacteria[J]. Ecology and Environment,2007, 16(6):1669-1673.
- [12] 陈垚,龙腾锐,周健等. 超高盐高磷废水磷酸盐还原系统构建过程中磷系统转化分析研究[J]. 环境科学, 2009,30(9):2592-2597.
CHEN YAO, LONG TENG- RUI, ZHOU JIAN, et al. Transformation of phosphorus forms in the construction process of phosphate reduction system of hypersaline and high-phosphorus wastewater [J]. Environmental Science,2009,30(9):2592-2597.
- [13] MUNEYAMA E, KUNISHIGE A, OHDAN K, et al. Reduction and reoxidation of iron phosphate and its catalytic activity for oxidative dehydrogenation of isobutyric acid[J]. J. Catalysis,1996,158:378-384.
- [14] PERCHERON G, BERNET N, MOLETTA R. Interaction between methanogenic and nitrate reducing bacteria during the anaerobic digestion of an industrial sulfate rich wastewater[J]. FEMS Microbiol. Ecol. , 1999,29:341-350.
- [15] 耿金菊,王强,牛晓君,等. 环境因子对湖泊沉积物中吸附态磷化氢生成和释放的影响[J]. 环境科学学报, 2005,25(5):681-685.
GENG JIN- JU, WANG QIANG, NIU XIAO- JUN, et al. Effects of environmental factors on the production and release of matrix bound phosphine from lake sediments[J]. Acta Scientiae Circumstantiae,2005,25 (5):681-685.
- [16] 郭夏丽,郑平,梅玲玲. 厌氧除磷种源的筛选与厌氧除磷条件的研究[J]. 环境科学学报,2005,25(2):238-241.
GUO XIA- LI, ZHENG PING, MEI LING- LING. Screening for the phosphate reducer and study on their dephosphorization conditions [J]. Acta Scientiae Circumstantiae,2005,25(2):238-241.

(编辑 王秀玲)