

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2013.03.004

不同碳源培养的反硝化聚磷菌对电子受体适应性研究

操家顺^{1,2,3},肖敏艳¹,方芳^{1,3},李宇昇¹,陈学明¹,朱耕龙¹

(1. 河海大学浅水湖泊综合治理与资源开发教育部重点实验室,江苏 南京 210098;
2. 河海大学水资源高效利用与工程安全国家工程研究中心,江苏 南京 210098;
3. 河海大学环境学院,江苏 南京 210098)

摘要:采用厌氧/缺氧序批式反应器(SBR)在不同碳源(乙酸钠、丙酸钠、 ρ (乙酸钠): ρ (丙酸钠)=2:1和 ρ (乙酸钠): ρ (丙酸钠)=1:2)条件下成功培养反硝化聚磷菌(DPB),并利用静态试验研究不同碳源培养的DPB对电子受体的适应性。结果表明,不同碳源条件下DPB系统都能利用硝酸盐和亚硝酸盐脱氮除磷,但利用次序及效率不同:仅硝酸盐为电子受体时,乙酸盐含量越高,反应过程中污泥的亚硝酸盐累积量(0~6.60 mg/g)和反硝化速率越高(4.02~8.58 mg/(g·h)),而除磷率越低(81.1%~91.9%);混合电子受体时吸磷总量、吸磷速率、除磷率均下降,且乙酸盐含量越高其除磷率(53.2%~73.9%)和亚硝酸盐去除率越低(34.7%~86.4%),丙酸盐为主的DPB系统可同步利用硝酸盐和亚硝酸盐,而乙酸盐为主的DPB系统在硝酸盐消耗将尽时亚硝酸盐才被用于反硝化吸磷。

关键词:碳源;反硝化聚磷菌;电子受体

中图分类号:X703 文献标志码:A 文章编号:1000-1980(2013)03-0211-07

Adaptability of denitrifying phosphate-accumulating bacteria cultivated under different carbon source conditions to different electron acceptors

CAO Jiashun^{1,2,3}, XIAO Minyan¹, FANG Fang^{1,3}, LI Yusheng¹, CHEN Xueming¹, ZHU Genglong¹

(1. Key Laboratory of Integrated Regulation and Resources Development on Shallow Lakes, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing, 210098, China;

2. National Engineering Research Center of Water Resources Efficient Utilization and Engineering Safety, Hohai University, Nanjing 210098, China;

3. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Denitrifying phosphate-accumulating bacteria (DPB) were successfully cultivated in a sequencing batch reactor (SBR) under alternative anaerobic/anoxic conditions and different carbon source conditions (ρ (sodium acetate): ρ (sodium propionate)=2:1 and ρ (sodium acetate): ρ (sodium propionate)=1:2). The adaptabilities of DPB to different electron acceptors were investigated through static tests. The results show that both nitrate and nitrite can be used as electron acceptors by DPB under different carbon source conditions, while the utilization order and efficiency are not the same. When nitrate was presented as a single electron acceptor, with the increase of the concentration of sodium acetate, the accumulated nitrite per mixed liquor suspended solids increased (from 0 to 6.60 mg/g) and the denitrification rate per mixed liquor suspended solids increased (from 4.02 to 8.58 mg/(g·h)), while the phosphorus removal efficiency decreased (from 91.9% to 81.1%). When nitrite and nitrate were both presented, the total amount of removed phosphorus, the accumulation rate of phosphorus, and the removal efficiency of phosphorus all declined. With an increase of the concentration of sodium acetate, the

收稿日期:2012-11-19

基金项目:国家自然科学基金(51008112);国家水体污染控制与治理科技重大专项(2009ZX07317-005,2011ZX07301-002,2012ZX07101-003);高等学校科技创新重大培育资金(708047)

作者简介:操家顺(1964—),男,浙江嵊州人,教授,博士,主要从事水处理技术研究。E-mail:caojiashun@163.com

phosphorus and nitrite removal efficiencies decreased (from 73.9% to 53.2% and from 86.4% to 34.7%, respectively). Both nitrite and nitrate could be well utilized by the DPB system under the condition of sodium propionate being the main carbon source, while nitrite could only be utilized after the depletion of nitrate under the condition of sodium acetate being the main carbon source.

Key words: carbon source; denitrifying phosphate-accumulating bacteria; electron acceptor

氮、磷是造成水体富营养化及水体污染的重要污染物质。目前城市污水处理厂多采用的传统生物脱氮除磷技术存在脱氮菌与除磷菌竞争碳源有机物、硝化菌长污泥龄与除磷菌短污泥龄(SRT)矛盾、硝酸盐氮回流对厌氧释磷过程产生影响等问题^[1-3],制约了脱氮除磷效率的提高。反硝化除磷技术通过一碳两用的方式完成同步脱氮除磷过程,缓解了反硝化和生物释磷过程对碳源需求的矛盾以及硝化菌与聚磷菌(DPB)SRT矛盾,被视为高效低能耗、可持续污水处理技术,具有广阔的应用前景^[4-5]。我国多数城市污水处理厂进水碳氮比偏低^[6],多种碳源及电子受体(如硝酸盐、亚硝酸盐等)同时存在。废水中最主要的短链脂肪酸是乙酸和丙酸^[7],目前对以乙酸盐作为基质进行反硝化除磷的研究较多,丙酸盐是否具有强化除磷效果存在争议^[8-12],而关于亚硝酸盐在缺氧吸磷中所起作用的结论也尚未统一^[13-15],对于硝酸盐和亚硝酸盐同时存在时反硝化除磷系统中脱氮除磷规律的研究较少。由此,本文采用厌氧/缺氧序批式反应器(SBR)在不同碳源、硝酸盐为电子受体条件下富集DPB,通过静态试验对不同碳源培养的DPB在单一和混合电子受体中脱氮除磷的规律进行研究,同时探讨不同碳源培养的DPB对电子受体的利用次序和效率,为反硝化除磷工艺的稳定运行提供指导,为DPB应用于实际工程提供理论依据。

1 试验材料与方法

1.1 污泥来源

静态试验污泥分别取自实验室已稳定运行的4个不同碳源条件下培养的反硝化除磷系统,碳源均以COD_{Cr}计:R1(以乙酸钠为碳源)、R2(以丙酸钠为碳源)、R3(ρ (乙酸钠): ρ (丙酸钠)=2:1)、R4(ρ (乙酸钠): ρ (丙酸钠)=1:2)。DPB系统反应器采用SBR,总体积3 L,有效容积2.4 L,排水比(排水体积与有效容积之比)66.7%,使用恒温装置保持系统温度为(30±1)℃。反应器运行周期为8 h,包括进水0.15 h、厌氧3 h、缺氧4 h、沉淀0.5 h和排水0.35 h,厌氧末泵入150 mL硝酸盐溶液使 ρ (NO₃⁻-N)=40 mg/L。稳定运行后的污泥龄维持在25 d左右,混合液悬浮固体质量浓度 ρ (MLSS)保持在2500~3000 mg/L,混合液挥发性悬浮固体质量浓度 ρ (MLVSS)与 ρ (MLSS)之比为0.70~0.73。

采用人工配水,进水水质: ρ (COD_{Cr})=250~350 mg/L, ρ (NH₄⁺-N)=5~8 mg/L, ρ (PO₄³⁻-P)=10~15 mg/L, ρ (MgSO₄·7H₂O)=15 mg/L, ρ (CaCl₂)=10 mg/L, ρ (EDTA)=10 mg/L。微量元素按每升水中1 mL计: ρ (FeSO₄·7H₂O)=1.5 g, ρ (CuSO₄·5H₂O)=0.03 g, ρ (H₃BO₃)=0.15 g, ρ (KI)=0.03 g, ρ (MnCl₂·4H₂O)=0.12 g, ρ ((NH₄)₆Mo₇O₂₄·4H₂O)=0.044 g, ρ (ZnSO₄·7H₂O)=0.12 g, ρ (CoCl₂·6H₂O)=0.15 g。

1.2 静态试验设计

a. 厌氧阶段。为使DPB在厌氧阶段磷酸盐能充分释放,在SBR中投加充足的有机物,使 ρ (COD_{Cr})=500 mg/L,其他进水条件不变。厌氧反应4 h后,取厌氧末泥水混合物150 mL于三角烧瓶中,用超纯水清洗污泥3次。

b. 缺氧阶段。为使DPB充分吸磷,投加KH₂PO₄使 ρ (PO₄³⁻-P)≈35 mg/L,根据不同电子受体条件加入相应的硝酸盐、亚硝酸盐,加蒸馏水使泥水混合物最终体积为150 mL,并曝气使 ρ (DO)<0.5 mg/L,之后用氩气驱除瓶口内部上方空气并用塞子密封,放入气浴恒温摇床以180 r/min震荡,温度保持在(30±1)℃,恒温振荡4.5 h。取样时停止震荡,打开瓶塞进行取样的同时通入氩气,防止空气进入瓶内,取样过程控制在1 min之内。考虑与长期运行保持一致,单一电子受体选择硝酸盐且其质量浓度为40 mg/L,R1,R2,R3,R4条件下对应的反应器编号分别为1号、2号、3号、4号;混合电子受体以氮元素计的总质量浓度仍为40 mg/L,考虑硝酸盐和亚硝酸盐初始质量浓度保持一致,设计硝酸盐和亚硝酸盐质量浓度均为20 mg/L,R1,R2,R3,R4条件下对应的反应器编号分别为5号、6号、7号、8号。

1.3 分析项目与方法

磷酸盐、硝酸盐、亚硝酸盐、MLSS分别采用标准方法进行测定^[16]。DO采用便携式溶氧仪(HACH)测量。

2 结果与讨论

2.1 单一电子受体试验结果

在厌氧阶段提供足够有机物保证充分释磷情况下,以硝酸盐为单一电子受体,缺氧吸磷静态试验过程中硝酸盐、亚硝酸盐、磷酸盐随时间变化曲线如图 1 所示。由图 1 可知,R1,R2,R3,R4 条件下培养的 DPB 均表现出较强的同步反硝化除磷能力,磷酸盐去除率分别为 81.1% ,91.9% ,83.0% 和 85.3% ,硝酸盐去除率分别为 92.0% ,87.1% ,91.1% 和 91.5% 。

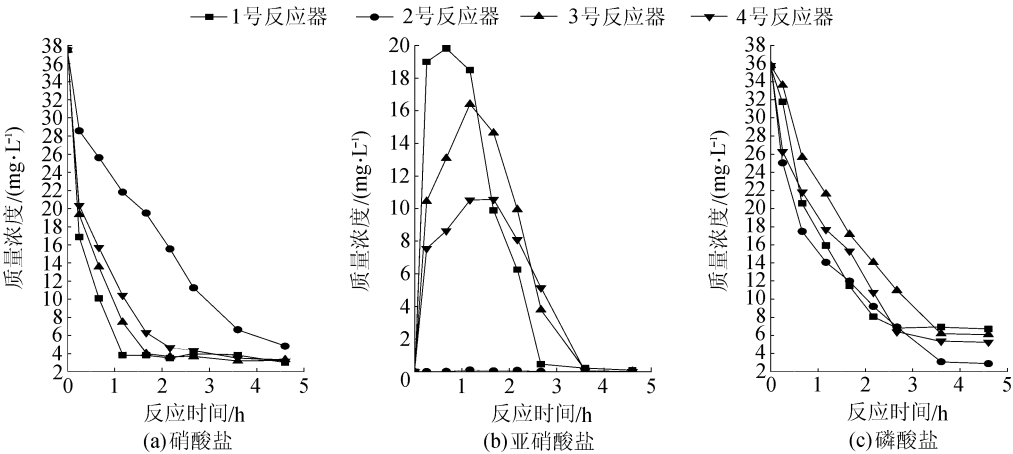


图 1 以硝酸盐为单一电子受体条件时各物质质量浓度变化曲线

Fig. 1 Variations of nitrate, nitrite, and phosphate in DPB system with nitrate as single electron acceptor

反应过程中只有 2 号反应器未检测到亚硝酸盐,而其他 3 组出现了不同程度亚硝酸盐累积现象,且 4 号、3 号和 1 号反应器分别在 1.67 h、1.17 h 和 0.67 h 时亚硝酸盐累积量达到最大。除 2 号反应器外,其他反应器硝酸盐均先转化为亚硝酸盐,待硝酸盐消耗殆尽(1.17 h)时亚硝酸盐才开始被利用(图 2)。在反应开始的 0.25 h 内,1 号反应器中硝酸盐质量浓度减少了 20.63 mg/L,其中 19.00 mg/L 转化为亚硝酸盐,3 号反应器中 10.44 mg/L 转化为亚硝酸盐,4 号反应器中 7.55 mg/L 转化为亚硝酸盐。

单一电子受体时不同碳源条件下 DPB 的相关数据见表 1。由表 1 可知,以硝酸盐作为缺氧段电子受体,在其长期培养过程中碳源种类对硝酸盐反硝化速率产生明显影响,碳源中丙酸盐含量越大,反硝化速率越低,亚硝酸盐中间累积量越低,亚硝酸盐累积量达到最高的时间越早;但是碳源种类对缺氧吸磷总量及平均吸磷速率影响不大(表 1 和图 1(c))。

表 1 单一电子受体不同碳源条件下相关数据

Table 1 Stoichiometric number of DPB system with nitrate as single electron acceptor under different carbon source conditions					
反应器编号	吸磷量/ (mg · L ⁻¹)	平均吸磷速率/ (mg · g ⁻¹ · h ⁻¹)	平均反硝化速率/ (mg · g ⁻¹ · h ⁻¹)	反硝化除磷速率/ (mg · mg ⁻¹)	亚硝酸盐中间累积量/ (mg · g ⁻¹)
1 号	28.87	3.64	8.58	0.43	6.60
2 号	32.81	3.08	4.02	0.77	0
3 号	29.70	3.14	7.65	0.41	5.47
4 号	30.53	3.19	6.81	0.47	3.52

2.2 混合电子受体试验结果

在厌氧阶段提供足够有机物保证充分释磷条件下,在混合电子受体缺氧吸磷静态试验过程中,硝酸盐、亚硝酸盐、磷酸盐随时间变化曲线如图 3 所示。由图 3 可知:5 号、6 号、7 号和 8 号反应器中硝酸盐去除率分别为 84.1% ,83.0% ,88.3% 和 84.2% ;亚硝酸盐去除率分别为 34.7% ,86.4% ,52.1% 和 72.1% ;磷酸盐去除率分别为 53.2% ,73.9% ,60.9% 和 68.9% ;出水亚硝酸盐质量浓度分别为 13.0 mg/L、2.7 mg/L、9.6 mg/L和 5.63 mg/L。

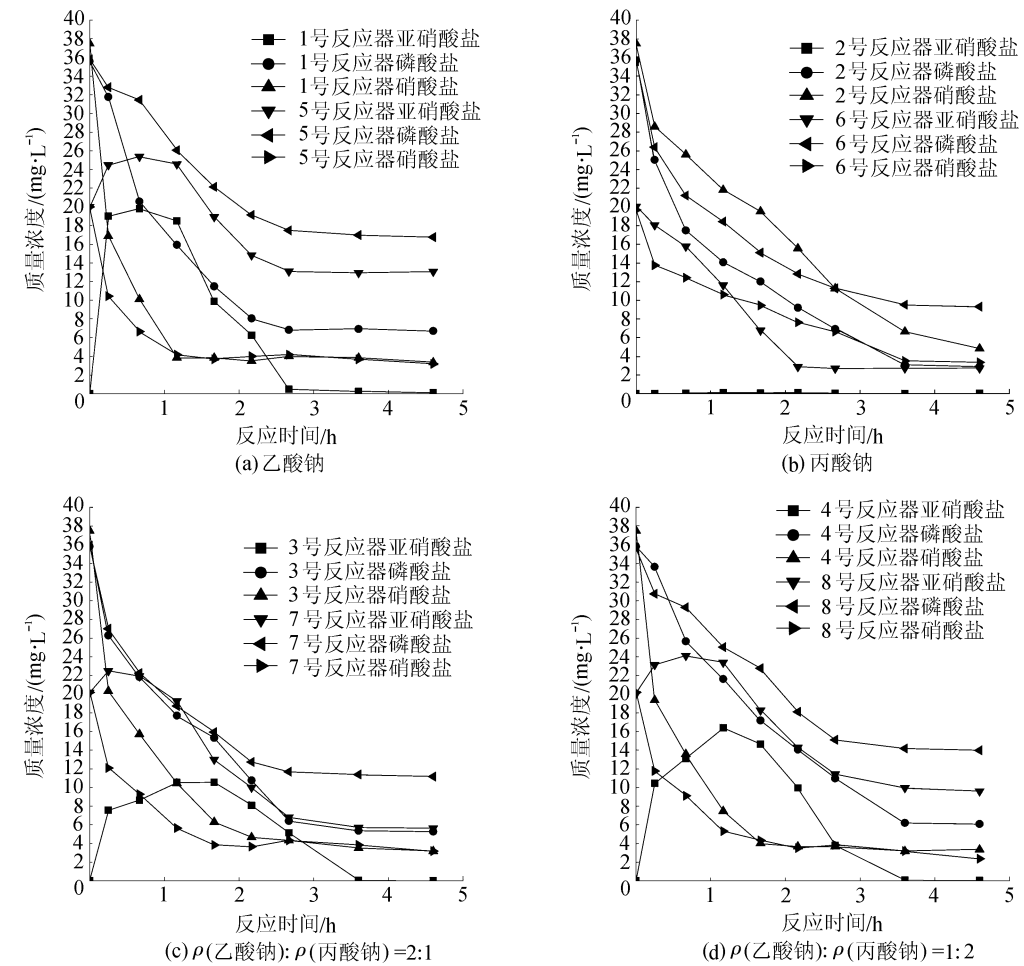


图 2 不同碳源条件下各物质转化过程

Fig. 2 Variations of nitrate, nitrite, and phosphate under different carbon source conditions

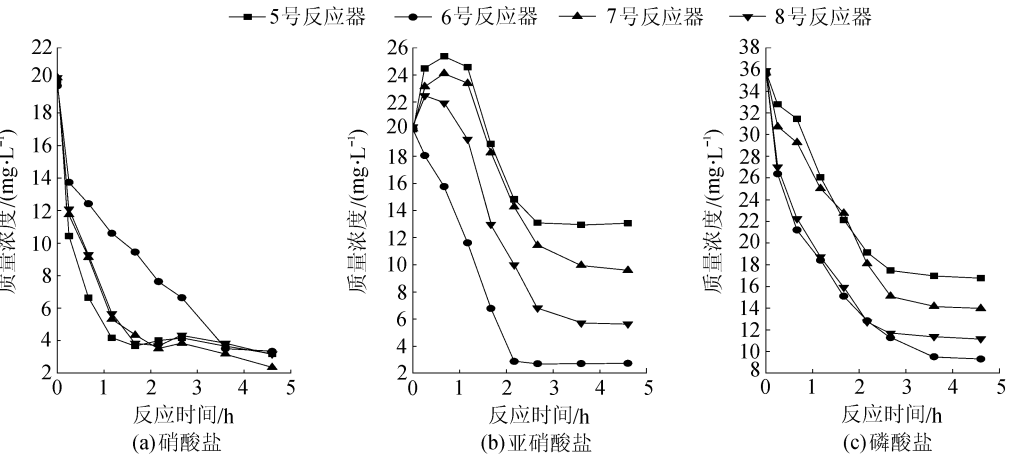


图 3 混合电子受体时各物质质量浓度变化曲线

Fig. 3 Variations of nitrate, nitrite, and phosphate in DPB system with nitrite and nitrate as electron acceptors

在混合电子受体、不同碳源条件下 DPB 的相关数据见表 2。由表 2 可知,混合电子受体时缺氧吸磷总量较单一电子受体时有所降低,除 R1 外,其余平均反硝化速率均明显降低。5 号反应器中硝酸盐在 1.17 h 内污泥以 4.08 mg/(g·h) 的速率快速下降,硝酸盐部分转化成亚硝酸盐导致亚硝酸盐不降反增,质量浓度高达 25.38 mg/L;1.17 h 后硝酸盐几乎消耗完,亚硝酸盐开始下降,污泥的平均反硝化速率为 2.57 mg/(g·h)。7 号反应器趋势大致相同,只是污泥的硝酸盐和亚硝酸盐消耗速率分别为 3.80 mg/(g·h) 和 2.66 mg/(g·h)。而在 6 号反应器中,试验初始硝酸盐质量浓度快速下降的同时亚硝酸盐质量浓度也缓慢

下降,0.25 h 后,污泥对亚硝酸盐的利用率($2.90\text{ mg}/(\text{g}\cdot\text{h})$)反而高于对硝酸盐的利用率($2.26\text{ mg}/(\text{g}\cdot\text{h})$),最终实现对硝酸盐和亚硝酸盐的同步高效去除。8 号反应器亚硝酸盐在开始 0.25 h 内略微上升,随后 0.66 h 内缓慢下降,在 0.66~1.17 h 硝酸盐和亚硝酸盐均被快速利用,1.17 h 时硝酸盐耗尽,亚硝酸盐以 $2.64\text{ mg}/(\text{g}\cdot\text{h})$ 速率下降。

相比于单一电子受体条件,混合电子受体条件下磷酸盐去除率明显下降,且碳源中乙酸盐比例越高磷酸盐去除率越低。不同碳源条件下的 DPB 系统都能利用硝酸盐和亚硝酸盐作为电子受体,但是利用效率及利用顺序却有所不同:以丙酸盐为主的 DPB 系统可同步利用硝酸盐和亚硝酸盐,而以乙酸盐为主的 DPB 系统硝酸盐消耗将尽时亚硝酸盐才被用于反硝化吸磷;碳源中乙酸盐比例越高则亚硝酸盐去除率越低。

2.3 不同碳源培养的 DPB 对电子受体适应性讨论

不同碳源培养的 DPB 在不同电子受体条件下各物质转化过程如图 2 所示。由图 2 可知,在有丙酸盐(图 2(b)(c)(d))存在时,单一电子受体和混合电子受体除磷效率较为接近,而 R1 情况下差别较大(单一电子受体除磷率为 81.1%,而混合电子受体时仅 53.2%),表明丙酸盐系统培养的 DPB 可能对于混合电子受体条件更为适应。

由反硝化除磷机理可知,DPB 需要利用反硝化 NO_3^- 作用产生的能量来完成细胞增殖、糖原再生、 PO_4^{3-} 的吸收和多聚磷酸盐的合成,因此,反硝化作用直接影响聚磷和除磷效率。在混合电子受体时,不同碳源条件下硝酸盐去除率均较高,而丙酸盐含量越高则亚硝酸盐去除率越高,能为 DPB 聚磷提供越多能量,最终导致除磷率越高。分析单一电子受体、不同碳源条件下培养的 DPB 为何对亚硝酸盐有不同程度的适应性,可能存在以下原因。

a. 基于 DPB 对硝酸盐亲和性以及亚硝酸盐毒性和抑制浓度的考虑。Carvalho 等^[17]指出,由于不同类型的 DPB 对硝酸盐有不同的亲和性,在乙酸盐条件下,DPB 能利用氧气、亚硝酸盐而不能利用硝酸盐,而在丙酸盐条件下则三者都可以利用。因此硝酸盐存在时,乙酸盐系统可能还存在其他提供硝酸盐到亚硝酸盐还原过程的微生物,这些微生物先将硝酸盐转化成亚硝酸盐,导致亚硝酸盐在反应过程中累积。目前对于亚硝酸盐抑制浓度并没有统一的结论,抑制的质量浓度由 $10\sim80\text{ mg/L}$ ^[18-19]不等。1 号反应器硝酸盐转化为亚硝酸盐时累积质量浓度仅为 19.80 mg/L ,而 5 号反应器在混合电子受体条件下亚硝酸盐中间累积质量浓度高达 25.38 mg/L ,后者可能超过了 DPB 亚硝酸盐抑制浓度,导致反硝化效率的降低。

b. 考虑不同的反硝化速率。反硝化是一种微生物过程,其中硝酸盐氮在下列连续的反应中分步被还原成分子态氮气: $\text{NO}_3^- \rightarrow \text{NO}_2^- \rightarrow \text{NO} \rightarrow \text{N}_2\text{O} \rightarrow \text{N}_2$,忽略 NO 和 N_2O 的还原可简化为: $\text{NO}_3^- \rightarrow \text{NO}_2^- \rightarrow \text{N}_2$,该过程主要涉及硝酸盐还原酶、亚硝酸盐还原酶。以硝酸盐为单一电子受体、R2 条件下,硝酸盐还原为亚硝酸盐的速率远小于亚硝酸盐被还原成氮气的速率,因此中间未观察到亚硝酸盐累积,由此推测丙酸盐含量越高,亚硝酸盐还原酶活性越高。这一现象在王伟^[20]研究过程中也曾出现。在硝酸盐和亚硝酸盐初始浓度相同的条件下,丙酸盐系统能同步利用硝酸盐和亚硝酸盐,而乙酸盐系统中其他微生物先利用硝酸盐,当硝酸盐消耗将尽时 DPB 才开始利用亚硝酸盐,进一步证实了上述推测。因此丙酸盐系统培养的 DPB 可能对亚硝酸盐有更强的亲和性,对于混合电子受体条件更为适应。

本文对于不同碳源条件培养的 DPB 进行研究,得出的相关结论与鲍林林等^[21-22]的结论并不完全相同,这可能与接种污泥性质、污泥龄、系统运行参数控制(如温度)不同有关。Garcia 等^[23]研究发现,分别以乙酸盐和丙酸盐为碳源的 EBPR 系统中的 DPB 没有可以编码硝酸氮还原酶的基因,然而由于系统中还存在其他提供硝酸盐氮到亚硝酸盐氮还原过程的微生物,基于硝酸盐的 DPB 也可以实现。

3 结 论

a. 不同碳源(乙酸钠、丙酸钠) $\rho(\text{乙酸钠}):\rho(\text{丙酸钠})=2:1$ 和 $\rho(\text{乙酸钠}):\rho(\text{丙酸钠})=1:2$ 条件

表 2 混合电子受体不同碳源条件下吸磷计量

Table 2 Stoichiometric number of DPB system with nitrite and nitrate as electron acceptors under different carbon source conditions

反应器编号	吸磷量/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	平均吸磷速率/ ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$)	平均反硝化速率/ ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$)
5 号	19.04	2.58	3.10
6 号	26.29	3.09	4.20
7 号	21.73	2.45	3.27
8 号	24.73	3.15	4.09

下的DPB系统都能以硝酸盐和亚硝酸盐为电子受体,但利用次序及效率不同。

b. 以硝酸盐为单一电子受体时,碳源种类对缺氧吸磷总量及平均吸磷速率影响不大,高乙酸盐含量导致反应过程中更高的亚硝酸盐累积量($0 \sim 6.60 \text{ mg/g}$)和反硝化速率($4.02 \sim 8.58 \text{ mg/(g} \cdot \text{h)}$),但除磷率却越低($81.11\% \sim 91.90\%$)。以丙酸盐为主要碳源的DPB系统,硝酸盐的反硝化作用直接用于吸磷;以乙酸盐为主要碳源的DPB系统,硝酸盐消耗将尽时亚硝酸盐用于反硝化吸磷。

c. 在混合电子受体($\rho(\text{NO}_3^- - \text{N}) : \rho(\text{NO}_2^- - \text{N}) = 1 : 1$)条件下,除磷率、吸磷总量、吸磷速率均比单一电子受体时下降,且乙酸盐含量越高除磷率($53.19\% \sim 73.85\%$)和亚硝酸盐去除率越低($34.68\% \sim 86.4\%$);丙酸盐为主的DPB系统可同步利用硝酸盐和亚硝酸盐,而乙酸盐为主的DPB系统硝酸盐消耗将尽时亚硝酸盐用于反硝化吸磷。

参考文献:

- [1] GERBER A, MOSTERT E S, WINTER C T, et al. Interactions between phosphate, nitrate, and organic substrate in biological nutrient removal process[J]. *Water Science & Technology*, 1987, 19: 183-194.
- [2] 张波, 高廷耀. 生物脱氮除磷工艺厌氧/缺氧环境倒置效应[J]. *中国给水排水*, 1997, 13(3): 7-10. (ZHANG Bo, GAO Tingyao. Enhancement of nitrogen and phosphorus removal by reversal of anaerobic and anoxic zones sequence[J]. *China Water and Wastewater*, 1997, 13(3): 7-10. (in Chinese))
- [3] 张杰, 臧景红, 杨宏, 等. A^2/O 工艺的固有缺欠和对策研究[J]. *给水排水*, 2003, 29(3): 22-26. (ZHANG Jie, ZANG Jinghong, YANG Hong, et al. A study on the inherent shortcomings and countermeasures of the A^2/O process[J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2003, 29(3): 22-26. (in Chinese))
- [4] 陈鹏, 张克峰. 反硝化除磷机理与工艺研究进展[J]. *水处理技术*, 2009, 35(9): 1-5. (CHEN Peng, ZHANG Kefeng. Development of denitrifying phosphorus removal mechanisms and process[J]. *Technology of Water Treatment*, 2009, 35(9): 1-5. (in Chinese))
- [5] 马娟, 彭永臻, 王丽, 等. 反硝化除磷技术及其影响因素分析[J]. *工业水处理*, 2009, 29(4): 4-8. (MA Juan, PENG Yongzhen, WANG Li, et al. Analysis of denitrification-dephosphorization technology and its influential factors[J]. *Industrial Water Treatment*, 2009, 29(4): 4-8. (in Chinese))
- [6] 刘礼祥. 城市污水处理连续流一体化生物反应器工艺研究与能效分析[D]. 武汉: 华中科技大学, 2007.
- [7] 刘燕, 陈银广, 郑弘, 等. 乙酸丙酸比例对富集聚磷菌生物除磷系统影响研究[J]. *环境科学学报*, 2006, 26(8): 1278-1283. (LIU Yan, CHEN Yinguang, ZHENG Hong, et al. Effect of different ratios of propionic to acetic acid on phosphorus removal by an enriched culture of phosphorus accumulating organisms[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2006, 26(8): 1278-1283. (in Chinese))
- [8] 李观元. 以丙酸为碳源的反硝化除磷工艺运行特性及影响因素研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- [9] PIJUAN M, SAUNDERS A M, GUIASOLA A A, et al. Enhanced biological phosphorus removal in a sequencing batch reactor using propionate as the sole carbon source[J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 2004, 85(1): 56-67.
- [10] OEHMEN A, YUAN Z, BLACKALL L L. Comparison of acetate and propionate uptake by polyphosphate accumulating organisms and glycogen accumulating organisms[J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 2005, 91(2): 162-168.
- [11] VARGAS M, CASAS C, BAEZA J A. Maintenance of phosphorus removal in an EBPR system under permanent aerobic conditions using propionate[J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2009, 43(3): 288-296.
- [12] 李亚静, 陈修辉, 孙力平, 等. 丙酸/乙酸比值对反硝化除磷的影响[J]. *中国给水排水*, 2011, 27(1): 79-81. (LI Yajing, CHEN Xiuhui, SUN Liping, et al. Effects of propionic/acetic acid ratios on denitrifying phosphorus removal[J]. *China Water & Wastewater*, 2011, 27(1): 79-81. (in Chinese))
- [13] 裴宁, 赵俊山, 王成彦, 等. 亚硝酸盐对反硝化聚磷菌抑制机理研究[J]. *哈尔滨商业大学学报: 自然科学版*, 2009, 25(4): 415-418. (PEI Ning, ZHAO Junshan, WANG Chengyan, et al. Inhibition mechanisms of nitrite on denitrifying phosphorus accumulating organisms[J]. *Journal of Harbin University of Commerce: Natural Sciences Edition*, 2009, 25(4): 415-418. (in Chinese))
- [14] JOHWAN A, TOMOTAKA D, SATOSHI T, et al. Metabolic behavior of denitrifying phosphate-accumulating organisms under nitrate and nitrite electron acceptor conditions[J]. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 2001, 92(5): 442-446.
- [15] 韦启信, 操家顺, 徐明, 等. 影响反硝化除磷与厌氧氨氧化耦合的因素[J]. *水资源保护*, 2009, 25(3): 29-32. (WEI Qixin, CAO Jiashun, XU Ming, et al. Summing up the factors affecting the coupling of denitrifying phosphorus removal with anaerobic

ammonium oxidation[J]. Water Resources Protection,2009,25(3):29-32. (in Chinese))

[16] 国家环保总局《水和废水监测分析方法》编委会. 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.

[17] CARVALHO G, LEMOS P C, OEHMEN A, et al. Denitrifying phosphorus removal: linking the process performance with the microbial community structure[J]. Water Research,2007,41:4383-4396.

[18] LEE D S, JEON C O, PARK J M. Biological nitrogen removal with enhanced phosphate uptake in a sequencing batch reactor using single sludge system[J]. Water Research,2001,35(16):3968-3976.

[19] 张晓洁,周少奇,丁进军,等. 不同电子受体影响下的反硝化除磷过程[J]. 华南理工大学学报:自然科学版,2007,35(6):120-126. (ZHANG Xiaojie, ZHOU Shaoqi, DING Jingjun et al. Denitrifying phosphorus removal affected by different electron acceptors[J]. Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition,2007,35(6):120-126. (in Chinese))

[20] 王伟. 碳源及电子受体对反硝化除磷系统的影响研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2007.

[21] 鲍林林,李相昆,张杰. 碳源类型对反硝化除磷系统的影响[J]. 环境工程学报,2011,5(7):1567-1571. (BAO Linlin, LI Xiangkun, ZHANG Jie. Effect of carbon sources on denitrifying phosphorus removal system[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering,2011,5(7):1567-1571. (in Chinese))

[22] 李亚静,陈修辉,孙力平,等. 不同碳源和泥龄对反硝化聚磷的影响[J]. 环境工程学报,2010,4(3):513-516. (LI Yajing, CHEN Xiuhui, SUN Liping, et al. Effect of different carbon sources and SRT on denitrifying phosphorus removal[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering,2010,4(3):513-516. (in Chinese))

[23] GARCIA M H, IVANOVA N, KUNIN V, et al. Metagenomic analysis of two enhanced biological phosphorus removal (EBPR) communities[J]. Nature Biotechnology,2006,24(10):1263-1269.

+++++

· 简讯 ·

河海大学举办“世界水日”“中国水周”专家论坛

2013 年 3 月 20 日,河海大学 2013 年“世界水日”“中国水周”专家主题论坛在江宁校区会议中心举行。论坛上,法学专家徐军副教授、社会学专家陈阿江教授和水文学专家王卫光副教授分别做了题为“地下水资源法律保护的现状”、“水污染的社会学研究”和“南方灌区生态节水工程建设与管理”的主题演讲。

专家们从各自专业视角,围绕“节约保护水资源,大力建设生态文明”的主题,阐述了各自的观点。徐军副教授指出,现行《水法》、《水污染防治法》在解决地下水污染方面存在着原则粗疏、可操作性不强的弊端,他结合典型案例,剖析了“严格立法、普遍违法、选择执法”的现象在地下水资源保护方面的具体表现,呼吁坚持科学发展观,在地下水保护立法的完善方面体现民主立法、科学立法的要求,敦促政府有关部门在地下水资源保护方面的信息公开。陈阿江教授指出,随着经济社会的发展,水环境污染、水资源短缺的问题日益突显,应该从人的行动、从社会结构等方面探讨水问题的成因,从“人水不谐”及“人水和谐”2 种理想类型论述了人与水环境的互动关系:在“人水不谐”类型里,水污染导致疾病、诱发贫困、人口迁移,进而加剧社会分化与社会不平等次生社会问题;在“人水和谐”类型里,良好的生态环境下发展生产,产生良好的经济、社会效益。最后讨论了 2 种类型转化的可能性。王卫光副教授指出,农业节水是保障粮食安全与水安全的重大战略措施,生态健康是维持灌区可持续发展的重要因素,节水型生态灌区是新时期的要求,构建生态灌区,实现生态与经济双赢,是灌区建设的必由之路。他认为,通过南方渠灌区节水改造技术集成以及南方灌区生态节水工程建设与管理模式的研究与示范,形成了现代化的南方生态型灌区节水示范区,为我国南方灌区的节水改造、生态灌区建设与管理提供了理论依据和可借鉴的样板,对于推动南方渠灌区社会经济发展和生态环境的改善具有重大的战略意义。

(本刊编辑部供稿)