

O₂、NO₃⁻、NO₂⁻ 为电子受体的生物除磷比较

蒋轶锋¹, 郑建军², 王宝贞³, 王琳³, 陈建孟¹

(1. 浙江工业大学生物与环境工程学院, 杭州 310032; 2. 浙江工商大学环保设计研究院, 杭州 310005; 3. 哈尔滨工业大学市政与环境工程学院, 哈尔滨 150090)

摘要:通过平行运行 3 个分别以 O₂、NO₃⁻、NO₂⁻ 为电子受体的 SBR 除磷系统,探讨了反硝化除磷区别于好氧除磷的工艺特征及其内在微生物竞争机制.NO₂⁻ 不会对经驯化后反硝化聚磷菌(DPAO)的缺氧吸磷产生直接抑制作用,但其作为反硝化除磷电子受体的效能远低于 NO₃⁻;具备利用 NO₃⁻ 而缺乏 NO₂⁻ 反硝化酶系的 DPAO(DPAO₅)流失及聚糖菌(GAO)增殖是根本原因.而 NO₃⁻ 是一种高效电子受体,其反硝化除磷效能与以 O₂ 为受体的好氧除磷系统相当,两者在除磷计量学和功能菌群构成上十分接近.作为聚磷菌(PAO)的竞争者,GAO 在 3 个研究系统中均大量存在.基于对不同电子受体的利用能力,PAO 包含 P₀、P_N、P_n、P_{Nn}、P_{ON}、P_{ONn} 等 6 个种类.P_{ON} 和 P_{ONn} 等兼性 PAO 是生物除磷的主体,其在污泥中比例越高,系统的除磷负荷也越大,即 SBR₀ > SBR₁₅ > SBR₁₃.

关键词:生物除磷; 电子受体; 聚磷菌; 聚糖菌; 计量学

中图分类号:X703.1 **文献标识码:**A **文章编号:**0250-3301(2009)02-0421-06

Comparison of Biological Phosphorus Removal Between Different Systems Using O₂, NO₃⁻ and NO₂⁻ as Electron Acceptors

JIANG Yi-feng¹, ZHENG Jian-jun², WANG Bao-zhen³, WANG Lin³, CHEN Jian-meng¹

(1. College of Biological and Environmental Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310032, China; 2. Institute of Environment Design and Research, Zhejiang Gongshang University, Hangzhou 310005, China; 3. College of Municipal and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

Abstract: By parallel operation of three phosphorus removal systems (SBR) using different electron acceptors of O₂, NO₃⁻ and NO₂⁻, process characteristics and inherent competition mechanism of microorganisms were discussed. Although NO₂⁻ had no direct inhibition on anoxic phosphorus uptake after the DPAO cultivation, system performance was still much lower than that with NO₃⁻ as electron acceptor. And it ultimately resulted from the washout of the group of DPAO (DPAO₅) that lacked the ability to denitrify NO₂⁻ and the enhanced GAO growth in the system. Being the efficient electron acceptor, NO₃⁻ or O₂ supplying SBRs removed phosphorus smoothly and comparatively, in viewpoint of stioichiometry and constitution of functional bacteria. In all three test systems, mass of GAO was present to exhaust limited organics with PAO population. Moreover, total PAO could be divided into 6 distinct groups, i. e., P₀, P_N, P_n, P_{Nn}, P_{ON} and P_{ONn}, based on the abilities of utilizing different electron acceptors. And facultative PAO of P_{ON} and P_{ONn} were found as the main contributors for the phosphorus removal. The higher ratio they accounted in sludge, the more capacity the system possessed to remove phosphorus, i. e., SBR₀ > SBR₁₅ > SBR₁₃.

Key words: biological phosphorus removal; electron acceptor; phosphorus accumulating organism (PAO); glycogen accumulating organism (GAO); stioichiometry

生物脱氮除磷技术是防治水体富营养化的重要途径.但聚糖菌(GAO)的干扰、NO_x⁻ 对厌氧释磷的抑制及过量曝气等原因均会导致城市污水厂生物除磷的失败^[1~5].因此,实现处理系统内电子供体(COD)和受体(O₂、NO_x⁻)的合理布置和分配,已成为根本缓解除磷和脱氮两生化过程间内在矛盾的有效途径;即在一定的进水水质下,通过工艺形式与条件的控制,同时营造聚磷菌(PAO)、脱氮菌等多种功能微生物的各自最佳生长环境^[6~9].

反硝化除磷菌(DPAO)的发现有助于以上问题的解决,利用其代谢中反硝化和吸磷过程的耦合,不

仅可提高电子供体和受体的使用效率(减少 50% 的 COD 和 30% 的 O₂ 消耗),而且在一定程度上简化了处理工艺的流程与设计^[10~15].为此,掌握反硝化除磷机理、动力学及微生物学,将能显著改善城市污水厂的处理效能.通过对比运行采用不同电子受体的生物除磷反应器,试验将重点研究 NO_x⁻ 对除磷效

收稿日期:2008-03-03;修订日期:2008-05-16

基金项目:国家自然科学基金项目(20776134);浙江省重大科技专项项目(2007C13081);杭州市重大科技攻关项目(20062912A06);浙江工业大学科研启动基金项目(105003529)

作者简介:蒋轶锋(1978~),男,博士,主要研究方向为高效生物脱氮除磷技术,E-mail: jyf@zjut.edu.cn

率、计量学、PAO 生长等的影响,获得反硝化除磷区别于好氧除磷的工艺特征及其内在微生物竞争机制;探讨 NO_2^- 较之 NO_3^- 在反硝化除磷中的作用,以及 PAO 基于不同电子受体利用能力的功能分类.

1 材料与方法

1.1 除磷系统

试验采用 3 个相同的具盖 SBR 平行运行,有效体积 2 L,但分别在不同的电子受体下进行好氧或缺氧吸磷:SBR₀ 为 A/O 交替运行,以 O_2 为电子受体,DO 控制在 2~6 mg/L,并通过降低进水中 NH_4^+ 含量(表 1)减少好氧段 NO_x^- 生成;SBR₁₅ 为 A/A 交替运行,以 NO_3^- 作为电子受体,初始浓度(以 N 计,下同)控制在 18 mg/L, C/N 比 5.5 (COD-NaAc/ NO_3^- -N);SBR₁₃ 以 NO_3^- 和(或) NO_2^- 为电子受体,鉴于 NO_2^- 的生物毒性,在 65 d 内电子受体以阶梯状缓慢从 18 mg/L 的 NO_3^- 过渡至 30 mg/L 的 NO_2^- (两者电子受体数量相等),以此驯化系统中 DPAO 对高浓度 NO_2^- 的有效利用.SBR₀ 和 SBR₁₅ 种泥取自一 Dephanox 双污泥除磷系统;SBR₁₃ 则接种于运行稳定后的 SBR₁₅. 各 SBR 室温下运行(18~24℃),pH 用 0.5 mol/L HCl/NaOH 控制在 7.0 ± 0.5 . 系统间歇循环运行,一个周期包括 1.5 h 厌氧、2.5 h 缺氧或好氧、2 h 沉淀/排水/进水.厌氧和缺氧环境通过磁力搅拌实现.沉淀后排除 1.8 L 上清液(包括剩余污泥),使 HRT 为 6.7 h. SRT 通过缺氧末剩余污泥排放控制在 12.5 d.

1.2 吸磷试验

为更好掌握不同电子受体对不同性质污泥吸磷的影响,在各 SBR 达到稳定后进行静态试验.污泥取 SBR 厌氧末期,等分 3 份后分别在 NO_2^- 、 NO_3^- (20 mg/L)和 O_2 等 3 种电子受体下进行缺氧或好氧吸磷.由于 NO_2^- 对吸磷的抑制,根据前期研究^[16],SBR₀ 系列分 3 次投加 NO_2^- ,每次 N 6 mg/L;SBR₁₅ 系列也分 3 次,而每次 8 mg/L;SBR₁₃ 则为一次性投加 30 mg/L.试验在容积 200 mL 具塞的玻璃反应器中进行,反应持续 2.5 h, pH 维持在 7.0 附近.

1.3 原水及分析方法

试验用水为乙酸钠人工配水,包含微生物必需的营养物质和微量元素(表 1).原水在每次进水前用保存在冰箱的浓缩液稀释调配而成,保持水质稳定.

水质分析前,污泥混合样先用 0.45 μm 定性滤纸过滤,常规水质指标根据国家标准方法^[17]进行监测;活性污泥中 PHA(PHB、PHV)和糖原的定量分析

参考文献[18]; DO、pH 采用 WTW MultiLine P3 pH/Oxi 仪器在线测定.

表 1 人工配水的具体成分

Table 1 Detailed composition of the synthetic wastewater			
化合物	浓度/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	化合物	浓度/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$
COD (NaAc)	110	Cu ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$)	0.001
N (NH_4Cl)	5	H_3BO_3	0.025
P (KH_2PO_4)	5	I (KI)	0.025
Mg ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$)	6	Mn ($\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$)	0.003
Ca ($\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)	3	Zn ($\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$)	0.006
K (KCl)	10	Co ($\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)	0.008
EDTA	2	Fe ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)	0.065

2 结果与讨论

2.1 生物除磷效能

SBR₀、SBR₁₅ 和 SBR₁₃ 分别平行运行 60、60 和 100 d.如图 1,分别在 20 d 和 40 d, SBR₀ 和 SBR₁₅ 除磷率达到稳定,在 88% 和 84% 左右.与 SBR₁₅ 相比, SBR₀ 启动较快、效率较高,其原因:① 同化作用显著.一般认为有氧呼吸比无氧呼吸产能高 40% (氧化单位电子产生 ATP)^[19],这导致 SBR₁₅ 中 DPAO 富集污泥同化磷的作用减弱,而其 VSS 也比 SBR₀ 低 34%,如表 2;② 污泥中存在数量较多的兼性 PAO.

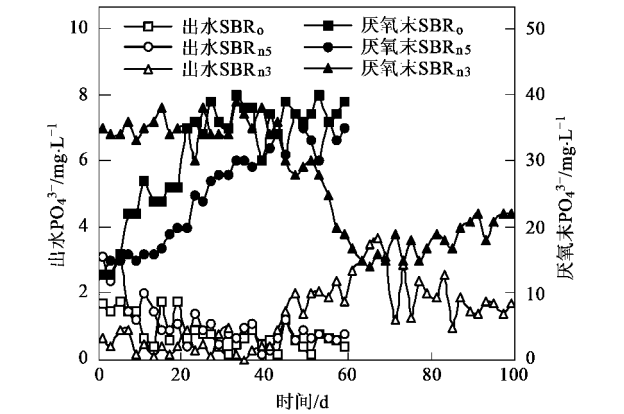


图 1 SBR₀、SBR₁₅ 和 SBR₁₃ 中磷的去除

Fig.1 Phosphorus removal in the SBR₀, SBR₁₅ and SBR₁₃

SBR₁₃ 接种于 SBR₁₅, 额外电子受体 NO_2^- 的缓慢引入(图 2)并未抑制其反硝化除磷,反而促进了前 40 d 除磷的逐步改善, PO_4^{3-} _{ana} (厌氧末 PO_4^{3-}) 和 PO_4^{3-} _{ano} (缺氧末 PO_4^{3-}) 浓度(以 P 计,下同)分别比 SBR₁₅ 上升和下降了 3 mg/L 和 0.4 mg/L(图 1); DPAO 进而得到富集而竞争者聚糖菌(GAO)数量减少.这表明,系统中存在一类以 NO_2^- 为电子受体的 DPAO(命名 DPAO₃₅),引起 40 d 与 1 d 相比 DPAO 对 NO_2^- 消耗增

加而 NO₃⁻ 减少.如图 2,随着进水 NO₂⁻ 从 2 mg/L 升至 30 mg/L,NO₂⁻_{ano} (缺氧末 NO₂⁻)相应地从 2 mg/L 增至 22 mg/L,而 NO₃⁻_{ano} (缺氧末 NO₃⁻)从 1 mg/L 变为 6

mg/L.但由于受到电子供体乙酸数量的限制,即使 NO_x⁻ 充足,SBR_{n3} 中 DPAO₃₅ 增值及除磷率改善也相当有限,这也表明 SBR_{n5} 进水的 C/N 5.5 是合适的.

表 2 SBR₀、SBR_{n5} 和 SBR_{n3} 运行效能比较

Table 2 Comparison of performance between SBR ₀ , SBR _{n5} and SBR _{n3}										
系统	电子受体	SRT /d	SS /mg·L ⁻¹	VSS /mg·L ⁻¹	污泥含磷 (P/VSS)	除磷率 /%	释磷量 /mg·L ⁻¹	厌氧释磷效率 (P/COD)	吸磷量 /mg·L ⁻¹	单位污泥吸磷量 (P/VSS)
SBR ₀	O ₂	12.5	1860	1450	0.064	88	33.7	0.38	37.6	25.9
SBR _{n5}	NO ₃ ⁻	12.5	1340	950	0.092	84	30.8	0.35	34.5	36.3
SBR _{n3}	NO ₂ ⁻	12.5	1160	920	0.059	66	17.6	0.23	20.4	22.0

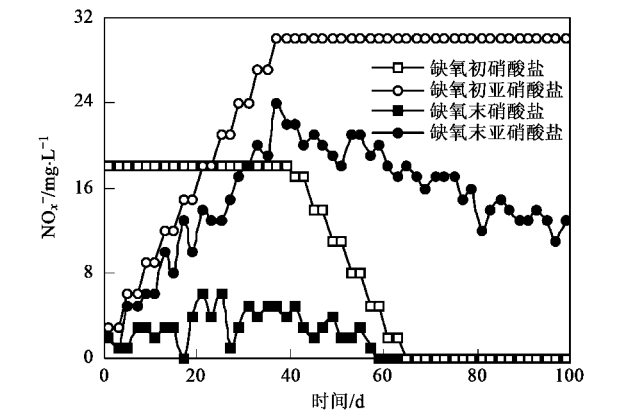


图 2 SBR_{n3} 中缺氧初和末的 NO₃⁻ 和 NO₂⁻ 浓度变化
Fig.2 Concentrations of NO₃⁻ and NO₂⁻ at the start and end of anoxic stage in the SBR_{n3}

在 41 ~ 64 d, NO₂⁻ 维持不变而 NO₃⁻ 逐渐下降至 0 mg/L,这引起 SBR_{n3} 的 PO₄³⁻_{ana} 从 38 mg/L 迅速降至 14 mg/L,而 PO₄³⁻_{ano} 从 0.4 mg/L 升至 3.1 mg/L (图 1). 由于电子受体 NO₂⁻ 充足,由此推测 SBR_{n3} (或 SBR_{n5}) 中还存在另一类 DPAO,它们能以 NO₃⁻ 作为电子受体,而缺乏还原 NO₂⁻ 的酶系(命名 DPAO₅). DPAO₃₅ 的存在及其增值速度无法弥补由于 DPAO₅ 被快速冲刷出系统而引起的除磷下降.因此,在 65 ~ 100 d NO₂⁻ 成为唯一电子受体时,除磷效率改善较为迟缓,PO₄³⁻_{ana} 和 PO₄³⁻_{ano} 分别由 14 和 3.1 mg/L 升高和降低至 22 和 1.7 mg/L (图 1),而 NO₂⁻_{ano} 由 18 mg/L 降至 12 mg/L (图 2),表明 GAO 及其它反硝化菌在污泥中增殖.这与图 3 中 P/N (缺氧吸磷量与电子受体消耗量比) 下降及表 2 中污泥含磷率、P/C 等参数变化相符.

2.2 除磷计量学

在各 SBR 运行稳定后,对典型周期内关键物质的转化规律进行了跟踪考察,如图 4 所示,不同系统中同一物质的变化规律基本相同且符合经典的生物除磷理论^[20].

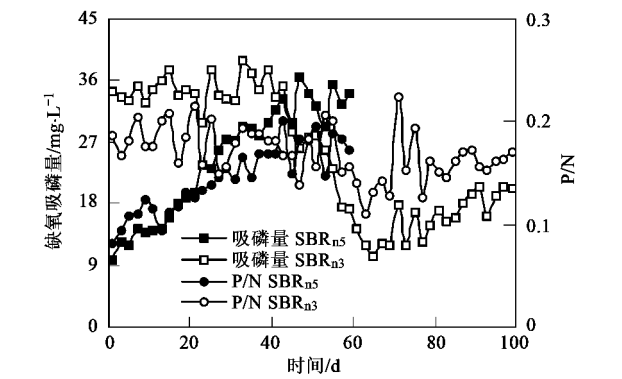


图 3 SBR_{n5} 和 SBR_{n3} 中缺氧吸磷量和 P/N 的变化
Fig.3 Variation of the amounts of anoxic phosphorus uptake and P/N ratio in the SBR_{n5} and SBR_{n3}

表 3 列出了物质在厌氧和好氧/缺氧阶段的变化数量.发现以 O₂ 或 NO₃⁻ 为电子受体的 SBR₀ 和 SBR_{n5} 系统具有十分接近的化学计量学关系,APAO (好氧聚磷菌)和 DPAO 的生化代谢途径相似,这与 Murnleitner 等^[20] 的观点一致.厌氧反应中的 ΔPO₄³⁻ / ΔHAc、ΔGly/ΔHAc、ΔPHA/ΔHAc 分别为 0.96 和 0.85 (P/C)、0.60 和 0.53 (C/C)、1.47 和 1.44 (C/C); 而好氧中的 ΔPO₄³⁻ / ΔPHA、ΔGly/ΔPHA 分别为 0.74 和 0.70 (P/C)、0.36 和 0.43 (C/C). ΔGly/ΔHAc 和 ΔPHA/ΔHAc 比值说明在厌氧反应中,糖原降解不仅是 PAO 吸收底物的能量来源,同时也是 PHA 合成中还原力和碳的来源,这对于维持 PAO 体内 NADH + H⁺ /NAD⁺ 平衡和正常的生理生化作用具有十分重要的意义.另外,糖原的酵解也是 SBR₀ 和 SBR_{n5} 系统中存在 PHV 代谢的原因^[19~20].污泥中较高的糖原比例再次证明,GAO 在 SBR_{n3} 系统中的大量存在.这导致该系统的 ΔPO₄³⁻ / ΔHAc、ΔPHA/ΔHAc 和 ΔPO₄³⁻ / ΔPHA 比值下降,而 ΔGly/ΔHAc 和 ΔGly/ΔPHA 比值上升,表明糖原的代谢在系统得到了加强,而 Poly-P 得到减弱.PHV 在 PHA 中的大量积累(32.8%)也验

表 3 3种系统在一个典型运行周期中液相和污泥相中物质的变化量

Table 3 Change amounts of the substances in bulk and sludge during typical operational cycle in the three test systems

指标	厌氧段			好氧/缺氧段		
	SBR ₀	SBR _{0.5}	SBR _{0.3}	SBR ₀	SBR _{0.5}	SBR _{0.3}
HAc (以 C 计) /mg·L ⁻¹	- 36	- 36	- 36	—	—	—
PO ₄ ³⁻ (以 P 计) /mg·L ⁻¹	33.7	30.8	17.6	- 37.6	- 34.5	- 20.4
糖原 (以 C 计) /mg·L ⁻¹	- 21.6	- 18.9	- 28.2	18.3	21.2	31.3
PHB (以 C 计) /mg·L ⁻¹	47.3	48.1	41.7	- 46.2	- 45.0	- 42.1
PHV (以 C 计) /mg·L ⁻¹	5.7	3.8	19.5	- 4.5	- 4.1	- 19.6
污泥 PHV/PHA/%	—	—	—	5.0	9.4	32.8
污泥中糖原比例 (Gly/VSS)	—	—	—	0.15	0.14	0.19

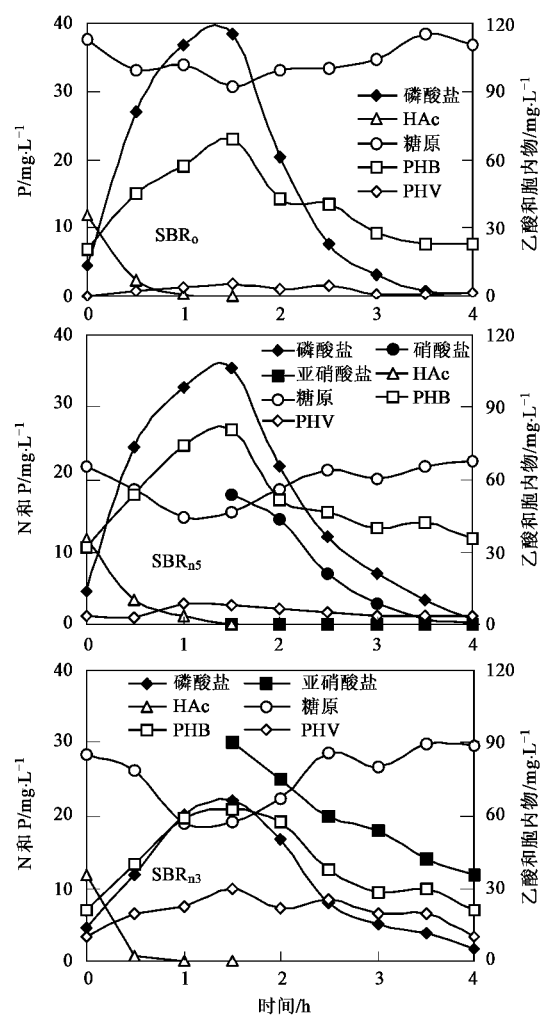


图 4 3种系统典型运行周期中 N、P、乙酸和胞内聚合物的变化

Fig.4 Profiles of N, P, acetate and cell-stored polymers during a typical operational cycle in the three test systems

证了以上的结果。

2.3 功能菌群

电子受体变化使 SBR 中 PAO、GAO 等功能菌群发生动态响应,并根本上决定除磷效能.为确定各自数量比例,作以下假定:① PAO、GAO 和 OHO(一般

异养菌)生长时的比 COD 利用率相等;② 非 PAO 菌的含磷率为 0.02(P/VSS);③ 厌氧段 PAO 对 COD 吸收引起 PO₄³⁻ 释放,反之认为 COD 下降由 GAO 引起;④ COD 在好氧或缺氧段的下降归因于 OHO;⑤ PAO 的产率为 0.07 ~ 0.10(P/COD-HAc)^[21].根据物料平衡原则,在稳态条件下系统去除的 PO₄³⁻ 数量等于剩余污泥中的总磷含量.由图 4,笔者分别对 SBR₀、SBR_{0.5}和 SBR_{0.3}中的 PAO、GAO 和 OHO 含量进行估算.如表 4, SBR₀ 和 SBR_{0.5}具有相同的功能菌群构成,且 PAO > GAO > OHO,而绝对数量上差别来源于 NO₃⁻ 和 O₃ 的产能系数的不同.GAO 的大量存在说明,即使在性能优良的除磷系统中,GAO 仍然是 PAO 对碳源的有力竞争者.NO₂⁻ 逐步替代 NO₃⁻ 便轻易使 GAO 成为 SBR_{0.3}污泥中的优势菌群(0.54 ~ 0.67),引起除磷效能降低.

表 5 为基于 PAO 含量得到的 PAO 含磷率、比磷酸盐释放[SPRR = P/(VSS_{PAO} · t)]和吸收速率[SPUR = P/(VSS_{total} · t)].可见,尽管 GAO 的生长导致 SBR_{0.3}除磷下降,污泥含磷率降低,但其 PAO 含磷率仍保持与 SBR_{0.5}相同,表明 DPAO 在元素构成上的一致性.SBR₀ 中 PAO 含磷率反而较低,表明磷元素对于 APAO 生长是一个限制性因子,即 A/O 好氧除磷系统具备比 A/A 反硝化除磷系统较高的除磷负荷,试验采用的进水 PO₄³⁻ 负荷远小于 SBR₀ 的处理能力而接近 SBR_{0.5}和大于 SBR_{0.3}.

2.4 PAO 构成特点

PAO 种类组成具有多样性的特点,不同 PAO 的存在是导致以 O₂、NO₃⁻ 和 NO₂⁻ 为电子受体的好氧和反硝化除磷系统效能不一的根本原因.通过静态吸磷试验,对各 SBR 中的 PAO 构成特点进行探讨和功能分类.图 5 表示 SBR₀、SBR_{0.5}和 SBR_{0.3}污泥在 NO₂⁻、NO₃⁻ 和 O₂ 等 3 个不同电子受体条件下的吸磷数量(M_{ONn}、M_{ON}和 M_O).结合前文论述和以往研

究^[22~23],笔者推测 PAO 分为 6 类而非通常认为的 3 类:① P_O,只以 O₂ 作为电子受体;② P_{ON},以 O₂ 和 NO₃⁻ 为电子受体;③ P_{ONn},以 O₂、NO₃⁻ 和 NO₂⁻ 为电子受体;④ P_N,只以 NO₃⁻ 为电子受体;⑤ P_n,只以 NO₂⁻ 为电子受体;⑥ P_{Nn},以 NO₃⁻ 和 NO₂⁻ 为电子受体的 DPAO. 根据 Murnleitner 等^[20]观点,笔者假设同一类 PAO 在缺氧下的吸磷数量为好氧下的 50%.

表 4 3 种系统污泥中 PAO、GAO 和 OHO 的数量比例

Table 4 Mass fraction of PAO, GAO and OHO in sludge from the three test systems					
系统	电子受体	MLVSS	PAO	GAO	OHO
SBR ₀	O ₂	1 450	0.39 ~ 0.62	0.34 ~ 0.55	0.06
SBR _{n5}	NO ₃ ⁻	950	0.40 ~ 0.61	0.31 ~ 0.52	0.08
SBR _{n3}	NO ₂ ⁻	920	0.28 ~ 0.41	0.54 ~ 0.67	0.05

表 5 3 种系统中 PAO 含磷率和 SPRR/SPUR

Table 5 Calculated P content in PAO and SPRR/SPUR based on PAO mass in the three test systems				
系统	污泥含磷率 (P/VSS _{total})	PAO 含磷率 (P/VSS _{PAO})	SPRR /mg·(g·h) ⁻¹	SPUR /mg·(g·h) ⁻¹
SBR ₀	0.064	0.091 ~ 0.138	25.2 ~ 40.1	10.4
SBR _{n5}	0.092	0.134 ~ 0.209	35.7 ~ 54.4	14.7
SBR _{n3}	0.059	0.119 ~ 0.175	31.8 ~ 46.6	8.7

如前所述,SBR_{n3} 相比 SBR_{n5} 的 PAO 数量和种类较少(DPAO₅ 被排除出系统).NO₂⁻ 和 NO₃⁻ 下相等的吸磷量说明,SBR_{n3} 内 DPAO₃₅ 对 NO₃⁻ 的利用效率等同于 NO₂⁻,并且认为能利用 NO₂⁻ 的 DPAO 必能以 NO₃⁻ 为有效电子受体,即 P_n 和 P_{Nn} 重合.好氧吸磷量 M₀ (16 mg P/L) 小于缺氧吸磷量 M_{ONn} 或 M_{ON} (20 mg/L)表明,先前 PAO 定量方法^[22,24]并不适用反硝化除磷系统,但仍可借鉴其计算思路.据上文假设,SBR_{n3} 中 P_n/P_{Nn} 和 P_{ONn} 占 PAO 数量的 60% 和 40%,而 P_O、P_N 和 P_{ON} 并不存在(因为 M_{ONn} ≥ M_{ON} > M₀).可见,即使系统长期在 A/A 环境运行,驯化得到的 PAO 中仍包含较大比例 P_{ONn} 兼性菌,它们的存在丰富了微生物的代谢途径,利于系统运行稳定.

表 6 各类 PAO 菌在不同污泥中的比例/%

Table 6 Percentage of different groups of PAO occupied in different types of sludge/%							
系统	电子受体	PAO	P _O	P _N	P _n /P _{Nn}	P _{ON}	P _{ONn}
SBR ₀	O ₂	占 PAO 的比例	5	0	0	58	37
		占 VSS 的比例	1 ~ 2	0	0	16 ~ 24	10 ~ 15
SBR _{n5}	NO ₃ ⁻	占 PAO 的比例	0	31	25	44 ¹⁾	
		占 VSS 的比例	0	12 ~ 19	10 ~ 15	18 ~ 27 ¹⁾	
SBR _{n3}	NO ₂ ⁻	占 PAO 的比例	0	0	60	0	40
		占 VSS 的比例	0	0	23 ~ 37	0	16 ~ 25

1) 为 P_{ON} 与 P_{ONn} 之和(未能获得 P_{ON}、P_{ONn} 各自对好氧吸磷量的贡献比例)

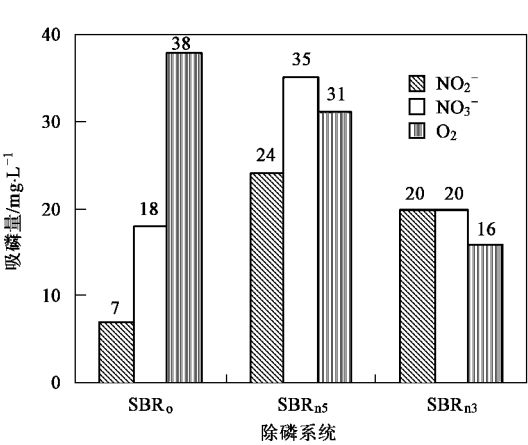


图 5 3 种系统污泥在不同电子受体条件下的吸磷量

Fig.5 Amounts of P uptake by three types of sludge under different conditions of electron acceptor

SBR_{n5} 情况类似,M₀ (31 mg/L) 仍然小于 M_{ON} (35 mg/L),但却大于 M_{ONn} (24 mg P/L).M_{ON} > M_{ONn} 说明能利用 NO₃⁻ 的 DPAO 未必能利用 NO₂⁻,因为前者还包括只能利用 NO₃⁻ 的 P_N.由此,P_N 和 P_n/P_{Nn} 比例分别为 31% 和 25%,而剩下的 44% 为 P_{ON} 和 P_{ONn} 的总和,由于无法区分 P_{ON} 和 P_{ONn} 对好氧吸磷量的贡献百分比,因此它们的具体比例无法获得.与 SBR_{n3} 比较发现,P_N 和 P_{ON} 为前文所述之 DPAO₅.

作为好氧除磷系统,SBR₀ 污泥的 M_{ONn}、M_{ON} 和 M₀ (以 P 计) 分别为 10、23 和 38 mg/L,依次增加.因此,适宜用前人提出的 PAO 定量方法^[22] 进行计算.P_O、P_{ON} 和 P_{ONn} 比例分别为 5%、58% 和 37%,表明由 A/O 环境培养的 PAO 中绝大部分属于兼性的 P_{ON} 和 P_{ONn}.

由此,除磷系统中共存在 P_O、P_N、P_n、P_{Nn}、P_{ON}、P_{ONn} 等 6 类不同 PAO(P_n 等同于 P_{Nn}): 其中,P_O 属于 APAO 大类;P_N、P_n/P_{Nn} 属于 DPAO 大类;而 P_{ON} 和 P_{ONn} 同时属于 APAO 和 DPAO 大类,为兼性的 PAO 菌.由表 6,无论在好氧和缺氧除磷 SBR 中,兼性 PAO 都是系统完成除磷功能的主体,在 PAO 中的比例分别达

到 95%、44% 和 40%。其多样的生化代谢途径及其较强适应环境的能力,是造成其普遍存在于生物除磷系统,并占据主导地位的原因。此外,各系统根据自身电子受体不同而生长专一性强的 PAO 种类,在此不再赘述。

3 结论

(1)与 NO_2^- 相比(SBR_{N_3}), NO_3^- 是一种高效的电子受体,其(SBR_{N_5})除磷效能甚至与以 O_2 为受体的好氧除磷系统(SBR_0)相当,而且两者在除磷计量学和功能菌群构成上均十分接近。

(2) SBR_0 具有较高的除磷负荷,这归因于 PAO 的好氧呼吸产能高及其内在种类构成特点。 NO_2^- 代替 NO_3^- 会引起反硝化除磷系统中 GAO 的增殖和除磷效能下降, DPAO_5 被缓慢淘汰出系统是其中根本原因。

(3)根据所用电子受体的不同, P_0 、 P_N 、 P_n 、 P_{Nn} 、 P_{ON} 、 P_{ONn} 等 6 类不同 PAO 被各 SBR 系统筛选和富集,其中 P_{ON} 和 P_{ONn} 等兼性 PAO 是生物除磷的主体。系统中兼性 PAO 比例越高、PAO 种类越丰富,越利于除磷系统的稳定,除磷容量也越高。

参考文献:

- [1] Jiang Y F, Wang B Z, Wang L, *et al.* Dynamic response of denitrifying poly-P accumulating organisms batch culture to increased nitrite concentration as electron acceptor[J]. J Environ Sci Health Part A, 2006, **41**(11): 2557-2570.
- [2] Pijuan M, Oehmen A, Baeza J A, *et al.* Characterizing the biochemical activity of full scale enhanced biological phosphorus removal systems: a comparison with metabolic models[J]. Biotech Bioengin, 2008, **99**: 170-179.
- [3] Saito T, Brdjanovic D, van Loosdrecht M C M. Effect of nitrite on phosphate uptake by phosphate accumulating organisms[J]. Wat Res, 2004, **17**(38): 3760-3768.
- [4] Kuba T, Wachtmeister A, van Loosdrecht M C M, *et al.* Effect of nitrate on phosphorus release in biological phosphorus removal system[J]. Wat Sci Technol, 2004, **30**(6): 263-269.
- [5] 张超,吕锡武. SBR 工艺中反硝化除磷特性研究[J]. 环境科学, 2007, **28**(10): 2259-2263.
- [6] López-Vázquez C M, Hooijmans C M, Brdjanovic D, *et al.* Factors affecting the microbial populations at full-scale enhanced biological phosphorus removal wastewater treatment plants in Netherlands[J]. Wat Res, 2008, **42**(10-11): 2349-2360.

- [7] Oehmen A, Lemos P C, Carvalho G, *et al.* Advances in enhanced biological phosphorus removal: From micro to macro scale[J]. Wat Res, 2007, **41**(11): 2271-2300.
- [8] 郝王娟,薛涛,黄霞. 进水磷碳比对聚磷菌与聚糖菌竞争生长的影响[J]. 中国给水排水, 2007, **23**(17): 95-98.
- [9] 尹军,王晓玲,吴相会,等. 低 C/N 条件下 MUCT 工艺的反硝化除磷特性[J]. 环境科学, 2007, **28**(11): 2478-2483.
- [10] Jørgensen K S, Pauli A S L. Polyphosphate accumulation among denitrifying bacteria in activated sludge[J]. Anaerobic Environ Microbio, 2005, **1**: 161-168.
- [11] Zhang C, Chen Y G, Liu Y. The long-term effect of initial pH control on the enrichment culture of phosphorus- and glycogen-accumulating organisms with a mixture of propionic and acetic acids as carbon sources[J]. Chemosphere, 2007, **69**(11): 1713-1721.
- [12] Puig S, Coma M, Monclus H, *et al.* Selection between alcohols and volatile fatty acids as external carbon sources for EBPR[J]. Wat Res, 2008, **42**(3): 557-566.
- [13] Seviour R, Mino T, Onuki M, *et al.* The microbiology of biological phosphorus removal in activated sludge systems[J]. FEMS Microbio Reviews, 2003, **27**: 99-127.
- [14] 吴广华,张耀斌,全燮,等. 温度及反硝化聚磷对 SBMBBR 脱氮除磷的影响[J]. 环境科学, 2008, **28**(11): 2484-2487.
- [15] 李金页,郑平,梅玲玲. 反硝化除磷工艺及其特点[J]. 科技通报, 2006, **22**(6): 882-886.
- [16] 蒋铁锋. 短程硝化除磷工艺特征及运行效能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.
- [17] 国家环境保护局. 水和废水监测分析方法[M]. (第三版). 北京: 中国环境科学出版社, 1997.
- [18] Fang H H P, Zhang T, Liu Y. Characterization of an acetate degrading sludge without intracellular accumulation of polyphosphate and glycogen[J]. Wat Res, 2002, **36**: 3211-3218.
- [19] Ahn J, Daidou T, Tsuneda S, *et al.* Selection and dominance mechanism of DPAO in biological phosphate removal process[J]. Biotech Letters, 2004, **23**: 2005-2008.
- [20] Mumleitner E, Kuba T, van Loosdrecht M C M, *et al.* An integrated metabolic model for the aerobic and denitrifying biological phosphorus removal[J]. Biotech Bioengin, 1997, **54**(5): 434-450.
- [21] Henze M, Gujer W, Mino T, *et al.* Activated sludge model No. 2d, ASM2D[J]. Wat Sci Technol, 1999, **39**(1): 165-182.
- [22] Jiang Y F, Wang L, Yu Y, *et al.* Characterization of phosphorus removal bacteria in an $(\text{AO})^2\text{SBR}$ System[J]. J Harbin Instit Technol, 2007, **14**(2): 155-159.
- [23] Jiang Y F, Wang L, Wang B Z, *et al.* Biological nitrogen removal with enhanced phosphate removal in $(\text{AO})^2\text{SBR}$ using single sludge system[J]. J Environ Sci, 2004, **16**(6): 1037-1040.
- [24] Hu J Y, Ong S L, Ng W J, *et al.* A new method for characterizing denitrifying phosphorus removal bacteria by using three different types of electron acceptors[J]. Wat Res, 2003, **37**: 3463-3471.