

NO_3^- 和 NO_2^- 作为电子受体时的反硝化除磷实时控制

高大文^{1,2}, 李强¹, 梁红¹, 王文斌², 袁向娟¹

(1. 东北林业大学环境科学系, 哈尔滨 150040; 2. 哈尔滨工业大学城市水资源与水环境国家重点实验室, 哈尔滨 150090)

摘要: 采用 SBR 厌氧/缺氧运行方式, 研究了 NO_3^- 和 NO_2^- 作为电子受体时的反硝化除磷效能及 ORP 与 pH 作为反硝化除磷过程控制参数的可行性. 结果表明, 反硝化除磷过程中 COD、磷酸盐、电子受体浓度与体系 pH 和 ORP 的变化具有较强的相关性. 在厌氧阶段, 当释磷结束时, pH 值平台的出现指示了释磷的结束; 在缺氧阶段, 吸磷结束后, ORP 出现拐点, 标志着缺氧吸磷的完成. 另外, 考察了 2 种电子受体(NO_3^- 和 NO_2^-) 反硝化除磷的效能. 在以 NO_3^- 为电子受体的反应中, 在缺氧初期 30 min 反应中, 平均摄磷速率为 32.68 mg/(L·h), 每吸收 1 mg PO_4^{3-} -P 约消耗 1.14 mg NO_3^- -N. 在以 NO_2^- 为电子受体的反应中, 在缺氧初期 30 min 反应中, 平均摄磷速率为 17.66 mg/(L·h), 每吸收 1 mg PO_4^{3-} -P 约消耗 1.57 mg NO_2^- -N. 综上, 提出 pH 和 ORP 可以作为 2 种电子受体(NO_3^- 和 NO_2^-) 反硝化除磷的实时控制参数, 并且, 以 NO_3^- 为电子受体系统在摄磷方面优于 NO_2^- 电子受体系统.

关键词: 硝酸盐; 亚硝酸盐; 反硝化除磷; 实时控制; ORP; pH

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2009)04-1073-06

Real-time Process Control of Denitrifying Phosphorus and Nitrogen Removal Systems with NO_3^- and NO_2^- as Electron Acceptors

GAO Da-wen^{1,2}, LI Qiang¹, LIANG Hong¹, WANG Wen-bin², YUAN Xiang-juan¹

(1. Department of Environmental Science, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China; 2. State Key Laboratory of Urban Water Resource and Water Environment, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

Abstract: The simultaneous phosphorus and nitrogen removal using denitrifying phosphate-accumulating organisms with NO_3^- and NO_2^- as electron acceptors was investigated in an anaerobic/anoxic process. The results showed that the concentrations of COD, PO_4^{3-} and electron acceptors (NO_3^- and NO_2^-) have a correlation with the variation of pH and ORP during anaerobic/anoxic process. In anaerobic phase, the occurrence of pH flat indicates the end of phosphorus release. In anoxic process, an inflexion was observed in ORP profile when the phosphorus uptake was finished. In addition, the phosphorus uptake rate was investigated in the process with different electron acceptors (NO_3^- and NO_2^-). The average anoxic phosphate uptake rate was 32.68 mg/(L·h) in the early 30 min during anoxic phase when NO_3^- was as electron acceptor, and every 1 mg PO_4^{3-} -P uptake would consume 1.14 mg NO_3^- -N. In the process with NO_2^- as electron acceptor, the average anoxic phosphate uptake rate was 17.66 mg/(L·h) in the early 30 min, and every 1 mg PO_4^{3-} -P uptake would consume 1.57 mg NO_2^- -N. In conclusion, ORP and pH can be used as control parameters for simultaneous phosphorus and nitrogen removal in an anaerobic/anoxic process, and the system with NO_3^- as electron acceptor is superior to the system with NO_2^- as electron acceptor.

Key words: NO_3^- ; NO_2^- ; denitrifying phosphorus removal; real-time control; ORP; pH

反硝化除磷是指利用反硝化聚磷菌(denitrifying phosphate-accumulating organisms, DNPAOs)在缺氧环境下以 NO_3^- 作为电子受体来实现同步的反硝化和磷的过量吸收. 自 20 世纪 90 年代 Kuba 等^[1]首次提出反硝化除磷的概念以来, 国内外学者针对反硝化除磷开展了一系列的研究^[2~7]. 在反硝化除磷工艺中, 废水中的碳源在厌氧段以 PHB 的形式储存起来, 在缺氧段发挥除磷和脱氮作用, 达到“一碳两用”的目的. 反硝化除磷不仅节省了传统工艺中反硝化过程的碳源, 避免了反硝化菌和聚磷菌之间的竞争, 同时也节省了传统好氧吸磷的曝气过程, 从而节约了整个反应的能源消耗^[8]. 国内外学者也通过研究证实 NO_2^- 可以作为反硝化除磷过程的电子受

体^[9~12]. 从化学计量学上分析, 若将短程硝化和 NO_2^- 作为电子受体的反硝化除磷结合, 必将进一步减少脱氮除磷的能耗.

由于污水生物处理系统是一个相当复杂的动态过程, 仅仅依靠固定时间控制, 很难获得理想的处理效果. 因此, 随着实时控制系统在其它领域的成功应用, 越来越多的水处理工作者开始探索研究污水处理实时控制策略. 近年来实时控制在美国、欧洲和日

收稿日期: 2008-04-24; 修订日期: 2008-05-28

基金项目: 全国优秀博士学位论文作者专项研究基金项目(2005044); 教育部新世纪优秀人才计划项目(NCET-05-0330)

作者简介: 高大文(1967~), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为水污染控制及环境微生物技术, E-mail: dawengao@gmail.com

本的污水生物处理和生物化学处理中都有典型的成功应用,正在研究与开发的更是不胜枚举.其中在污水生物处理实时控制研究中,普遍采用的控制参数为 DO、ORP 和 pH^[13~15].在以 NO₃⁻ 和 NO₂⁻ 为电子受体的反硝化除磷过程中,磷的吸收和释放分别在厌氧和缺氧的条件下发生,因此,实时监控对反应的进行和节约能源显得尤其重要.文献[4,16]使用厌氧/缺氧/好氧工艺,报道了 pH 在反硝化和聚磷的不同运行阶段的变化情况.张超等^[17]对 SBR 工艺中反硝化除磷特性进行了研究.但是,目前对 SBR 厌氧/缺氧条件下以硝酸盐和亚硝酸盐作为电子受体的实时控制研究,国内外还鲜见报道.

本研究的目的是考察 ORP 和 pH 作为反硝化除磷过程实时控制参数的可行性,并比较不同电子受体(NO₃⁻ 和 NO₂⁻)下过程控制点的异同,以及在缺氧吸磷阶段,2 种电子受体在磷的摄取方面的效能,以期对反硝化除磷工艺的实际应用提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 试验装置与方法

采用 SBR 反应器进行试验,反应器高 60 cm,直径 25 cm,有效容积 12 L,如图 1 所示.厌氧和缺氧阶段采用电动搅拌器进行搅拌.实验用水为人工配制模拟生活污水,污水的成分如表 1 所示.试验中通过搅拌使污泥在反应过程中保持悬浮状态.使用加热棒控制温度在 25℃±1℃.试验运行期间,污泥龄控制在 15 d,MLSS 保持在3 000 mg·L⁻¹左右.

表 1 进水组成成分/mg·L⁻¹

Table 1 Influent concentrations and characteristics/mg·L ⁻¹			
进水成分	浓度	进水成分	浓度
葡萄糖	200	FeCl ₃ ·6H ₂ O	1.5
NH ₄ Cl	10	H ₃ BO ₃	0.15
KH ₂ PO ₄	9.5	CuSO ₄ ·5H ₂ O	0.03
KI	0.18	EDTA	10
MnCl ₂ ·4H ₂ O	0.12	ZnSO ₄ ·7H ₂ O	0.12
CoCl ₂ ·6H ₂ O	0.15		

1.2 检测方法

COD 采用微波密闭消解法;PO₄³⁻ 采用钼锑抗分光光度法;NO₃⁻ 采用麝香草酚法;NO₂⁻ 采用 N-(1-萘基)-乙二胺盐酸盐分光光度法;MLSS 用滤纸称量法;ORP 采用 H-211 氧化还原电位仪在线监测;pH 采用 EA-940 酸度计测量.

2 结果与讨论

2.1 不同电子受体反硝化聚磷菌的培养驯化

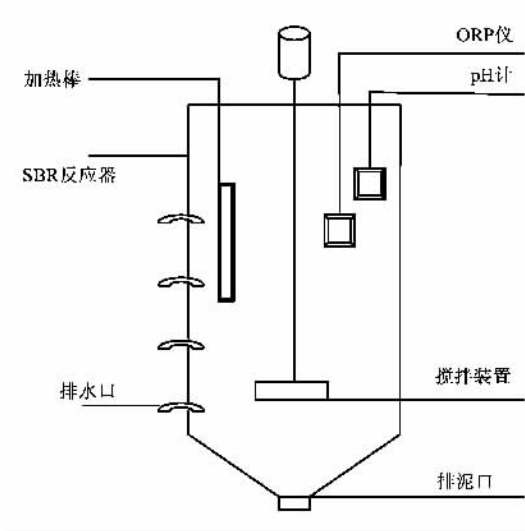


图 1 反应装置示意

Fig.1 Schematic of experimental system

实验接种污泥取自哈尔滨文昌污水处理厂二沉池,采用 SBR 反应器在厌氧/缺氧运行方式下(厌氧 4 h,缺氧 4.5 h)对反硝化聚磷菌进行培养驯化.进水采用瞬间加入,每次投加和排出水量为 9 L.进水 COD 浓度为 200 mg·L⁻¹左右,磷酸盐浓度稳定在 9~10 mg·L⁻¹.试验进水后调节 pH 值在 7.0~7.5 之间.厌氧结束后,在 2 个反应器内分别投加 NO₃⁻ 和 NO₂⁻,缺氧运行 4.5 h,然后沉淀,排水.经过约 100 d 对 NO₃⁻ 和 NO₂⁻ 作为电子受体的反硝化聚磷菌的培养和富集后,2 个反应器内均获得较稳定的反硝化除磷效果.

以 NO₃⁻ 作为电子受体时,培养和驯化过程中磷的吸收如图 2 所示.当进水磷浓度为 8~10 mg·L⁻¹ 时,反应器内经过 4h 厌氧后,释磷量由初期培养时的不到 1 mg·L⁻¹ 逐步增加至 25.27 mg·L⁻¹;而在缺氧吸磷结束后,磷酸盐浓度减少到了 5.94 mg·L⁻¹,表明系统具有良好的释磷和吸磷效果.在 NO₂⁻ 作为电子受体的反应器内(图 3),磷酸盐浓度也由驯化初期 < 1 mg·L⁻¹ 增加至厌氧结束时的 16.45 mg·L⁻¹,磷酸盐浓度在缺氧吸磷反应结束时为 5.85 mg·L⁻¹.

从图 2 和图 3 可以看出,污泥驯化后期,NO₃⁻ 作为电子受体时的系统厌氧释磷量明显高于 NO₂⁻ 作为电子受体的除磷系统;缺氧吸磷阶段,2 个反应器内的吸磷量分别为 19.33 mg·L⁻¹和 10.6 mg·L⁻¹,吸收率分别为 76.49%和 64.44%.相比之下,NO₃⁻ 作为电子受体的磷的吸收量要优于 NO₂⁻ 作为电子受体的除磷系统.

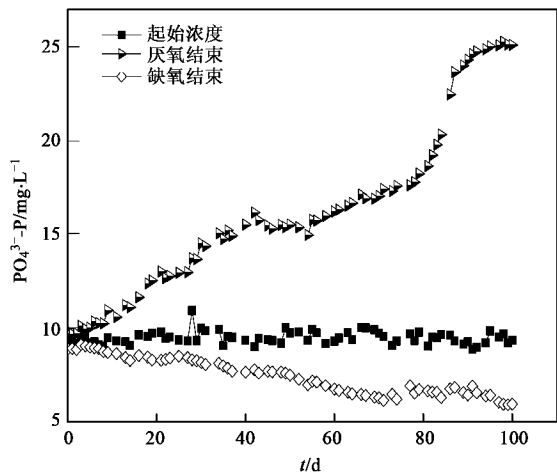


图2 NO_3^- 作为电子受体磷酸盐的释放与吸收

Fig.2 Variations of $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ concentration under anaerobic and anoxic condition (NO_3^- as electron acceptor)

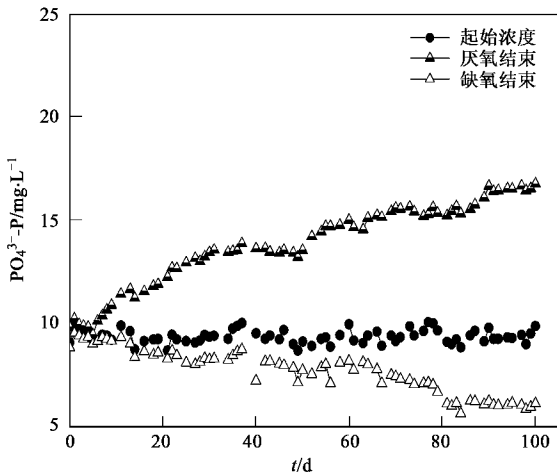


图3 NO_2^- 作为电子受体磷酸盐的释放与吸收

Fig.3 Variations of $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ concentration under anaerobic and anoxic condition (NO_2^- as electron acceptor)

2.2 不同电子受体反硝化除磷过程的实时控制

为了考察 ORP 和 pH 作为反硝化除磷在线过程控制参数的可行性, 试验中每间隔 5 min 记录 ORP 和 pH 的变化值, 并依据这些参数点的变化监测反应系统厌氧释磷和缺氧吸磷情况. 找出反硝化除磷过程中 ORP 和 pH 的变化与 COD、磷酸盐、硝酸盐、亚硝酸盐之间的相关性, 最终实现对 NO_3^- 和 NO_2^- 作为电子受体的反硝化除磷系统进行在线实时控制.

2.2.1 以 NO_3^- 为电子受体的反硝化除磷的实时控制

以 NO_3^- 为电子受体的反硝化除磷过程中, ORP

和 pH 变化与系统反硝化除磷之间的相关性如图 4、图 5 所示. 在厌氧阶段, 磷酸盐的浓度逐渐升高, 磷酸盐释放速率为 $10.37 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$, 体系中磷酸盐释放速率随着反应的进行呈逐渐变缓趋势, 并最终不再释磷. 从图 4 可以看出, 在厌氧阶段, 随着磷的释放, 体系的 ORP 值呈持续下降趋势, 且初始的下降速率为 $4.7 \text{ mV} \cdot \text{min}^{-1}$, 反应进行到 170 ~ 180 min 时速率为 $0.04 \text{ mV} \cdot \text{min}^{-1}$ 并保持稳定. ORP 的下降速率随着体系 COD 的消耗和磷酸盐的释放逐渐降低, 直至反应结束 ORP 下降速率也基本保持稳定.

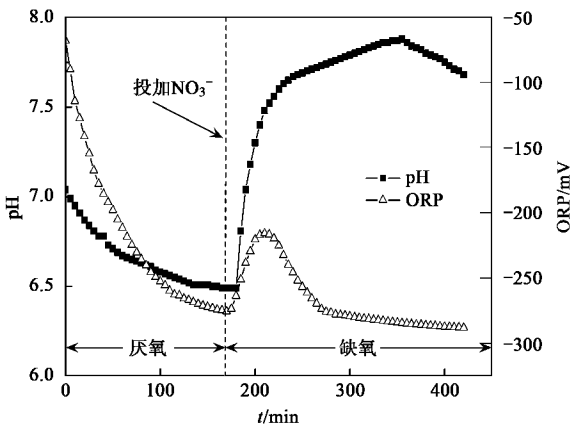


图4 NO_3^- 作为电子受体时 pH 和 ORP 的变化

Fig.4 Variation of pH and ORP when NO_3^- electron acceptor

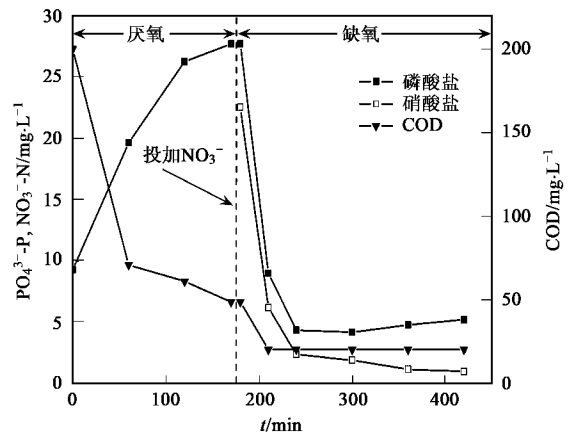


图5 NO_3^- 作为电子受体时 COD、磷酸盐、硝酸盐浓度的变化

Fig.5 Variation of COD, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ and $\text{NO}_3^-\text{-N}$ concentration when NO_3^- as electron acceptor

厌氧运行 180 min 后加入 NO_3^- 作为电子受体, 开始进行反硝化除磷阶段. 从图 5 可以看出, 随着反硝化聚磷菌开始吸磷, NO_3^- 浓度和体系磷酸盐浓度逐渐降低. 当初始 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度为 $22.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 经

过 30 min(即整个运行 210 min),硝酸盐降低到了 $9.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,磷酸盐的浓度也由最初的 $27.69\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 减少到了 $6.16\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.同时,由图 4 也可以看出,系统 ORP 值迅速升高,在 210 min 时达到最大值,为 -215.7 mV ,随后 ORP 值开始下降,100 min 后(即反应进行到 280 min 时)ORP 的下降明显变缓,但仍然以 $0.04\text{ mV}\cdot\text{min}^{-1}$ 的速率降低.主要是由于反应器内仍然存有少量的 NO_3^- -N,而反硝化除磷菌仍具有普通反硝化菌的特性,在不摄磷的情况下仍然可以进行反硝化作用;或者污泥中仍然有少量的普通反硝化菌进行反硝化,导致了 ORP 的逐渐降低.从磷的吸收来看,在第 240 min 和 300 min 时,两者磷的浓度差值仅为 $0.17\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,磷的浓度下降已经非常微弱,标志着磷的吸收已经基本结束,对应的 ORP 正处于一个拐点,因此,ORP 可以在缺氧时很好地指示磷的吸收.

体系的 pH 值在厌氧阶段逐渐下降,当初始 pH 值为 7.04 时,反应进行到 165 ~ 180 min, pH 下降到 6.5 后出现稳定的平台,不再下降.反应进入缺氧阶段后, pH 值经历了一个平缓阶段后,开始逐渐上升,30 min 后(即 210 min 后),pH 的上升速率明显减缓.减缓的原因主要是由于硝酸盐和磷酸盐大部分消耗完.反应进行至 240 min 时,体系中 COD、 PO_4^{3-} -P 浓度值达到最低,之后 pH 值缓慢上升,但 COD、磷酸盐浓度变化不太明显.因此,反应进行至 240 min 时,即缺氧运行 60 min 时,取得较好的反硝化和除磷的效果.

从以上分析可以看出,在厌氧期间, pH 变化出现一个平台,能够较好地指示释磷反应的结束;在缺氧阶段, ORP 的变化出现了一个拐点,能够很好地对吸磷反应的结束起到指示作用,因此 ORP 和 pH 共同作为控制参数,有利于节约反硝化除磷过程的反应时间和能源消耗.

2.2.2 以 NO_2^- 为电子受体的反硝化除磷的实时控制

尽管很多研究得出反硝化除磷可以 NO_2^- 为电子受体来实现^[18~20],但是,同时也发现 NO_2^- 对聚磷菌有抑制^[21~24].而对聚磷菌的抑制浓度却有很多争议,如 Meinhold 等^[21]认为低浓度的 NO_2^- -N ($4\sim5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)不会对吸磷有毒害作用,并且可以作为缺氧摄磷的电子受体,但当 NO_2^- -N 超过 $8\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,将会完全抑制缺氧摄磷.而 Huang 等^[22]的研究结果却显示,只有当 NO_2^- -N 超过 $30\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时才对缺氧摄磷

有抑制. Hu 等^[24]认为 NO_2^- -N 不是反硝化除磷的抑制剂,而是可以替代氧气或 NO_3^- -N 的电子受体,并且只有当它的浓度超过 $115\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时才对反硝化除磷有抑制.

为了避免由于 NO_2^- -N 抑制聚磷菌而对实时控制研究产生影响,本研究以 NO_2^- -N 为电子受体反硝化除磷实时控制前,首先考察了 NO_2^- -N 对聚磷菌的抑制浓度,发现当 NO_2^- -N 低于 $20\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时对聚磷菌抑制不明显,因此,在后续的实时控制研究中选择 $<20\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ NO_2^- -N 作为反硝化除磷的电子受体.结果显示,以 NO_2^- 为电子受体的反硝化除磷体系, ORP 和 pH 的变化规律和以 NO_3^- 为电子受体的变化规律相类似(图 6).在厌氧阶段, ORP 值持续下降,厌氧开始时 ORP 为 -30.4 mV ,厌氧结束时为 -263.2 mV .在厌氧运行 180 min 后,向系统中投加亚硝酸盐作为电子受体,反硝化聚磷菌开始吸磷,此时,作为电子受体的亚硝酸盐浓度和体系的磷酸盐浓度逐渐降低. ORP 值开始升高,在 215 min 时达到最大值(-166.9 mV),随后 ORP 值开始下降;反应进行至 260 min 时, ORP 下降趋势明显变缓,并最终保持在 $0.04\text{ mV}\cdot\text{min}^{-1}$ 的速率上.从图 7 可以看出,当反应进行至 240 min 和 300 min 时,测得体系中 PO_4^{3-} -P 浓度值相差为 $0.3\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,这时 NO_2^- -N 浓度趋近于 0,吸磷反应由于缺少电子受体而终止. ORP 拐点的出现很好地指示了反应的结束.

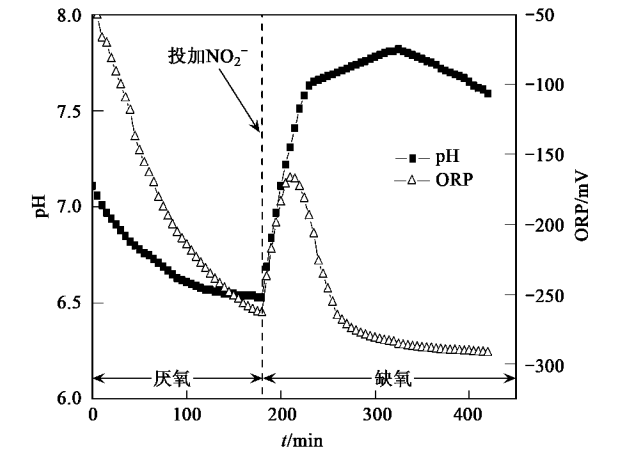


图 6 NO_2^- 作为电子受体时 pH 和 ORP 的变化
Fig.6 Variation of pH and ORP when NO_2^- as electron acceptor

厌氧阶段 pH 值持续下降,初始 pH 值为 7.11,厌氧结束时 pH 值为 6.53.随着系统 COD 的消耗,磷酸盐量的增加速度变缓, pH 值的下降速率也逐渐变小.在缺氧阶段, pH 迅速上升,当反应进行到 215

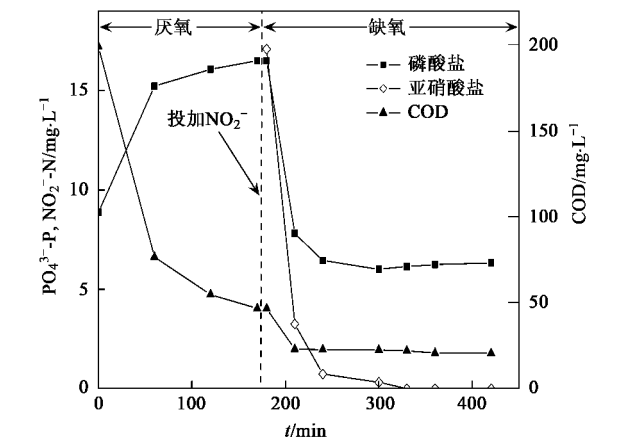


图 7 NO_2^- 作为电子受体时 COD、磷酸盐、亚硝酸盐浓度的变化

Fig.7 Variation of COD, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ and $\text{NO}_2^-\text{-N}$ concentration when NO_2^- as electron acceptor

~ 240 min 时, pH 值保持几乎匀速上升, 反应进行至 330 min 时(即缺氧吸磷反应进行至 150 min), pH 值上升至最大值 7.82, 之后转为下降.

2 种电子受体反硝化除磷系统 pH 值均在缺氧吸磷反应结束后出现由上升到下降的转折(355 min、330 min), 而此时 ORP 均保持稳定速率下降. 对于 pH 的这种变化规律的解释, 有待进一步研究.

2.2.3 ORP 和 pH 作为反硝化除磷过程控制参数的探讨

无论是以 NO_2^- 还是以 NO_3^- 为电子受体的反硝化除磷系统, 在厌氧阶段, ORP 和 pH 值与体系中 COD 和磷酸盐的变化具有密切的相关性. 随着体系 COD 消耗和磷酸盐释放, ORP 和 pH 值的下降速率逐渐变小. 其中, ORP 在厌氧过程中的变化规律与王亚宜等^[25]的结果相一致. 而当厌氧释磷结束, ORP 值并未出现一个稳定的平台, 而是呈现稳定的低速率($0.04\text{ mV}\cdot\text{min}^{-1}$)下降, 这是因为在厌氧条件下, 反应器内可能仍然有少量的生化反应发生, 导致 ORP 的持续匀速下降. 厌氧释磷结束时, pH 的变化近乎出现一个平台. 因此, 可以将 ORP 的稳定速率下降和 pH 的出现平台做为系统厌氧释磷的指示参数点. 在缺氧阶段, 在 NO_3^- 、 NO_2^- 为电子受体的系统中 ORP 值均迅速升高, 当反应进行至 210 min 和 215 min 时分别出现峰值, 峰值的出现与体系磷酸盐的吸收曲线相吻合; 然后转为下降并且在磷的吸收结束时出现拐点.

因此, 从反硝化除磷过程中 ORP、pH 的变化与 COD、磷酸盐、硝酸盐、亚硝酸盐之间的相关性上, 可

以得出 ORP 和 pH 可以作为 NO_3^- 和 NO_2^- 为电子受体的反硝化除磷过程控制参数, 并应用它们在线控制整个反硝化除磷过程中的厌氧和缺氧时间, 节约运行成本.

2.3 NO_3^- 和 NO_2^- 作为电子受体的反硝化除磷效能对比

在以硝酸盐为电子受体的系统中, 在缺氧初期 30 min 反应中, 平均反硝化速率(以 N 计)为 $37.37\text{ mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{h})^{-1}$, 平均摄磷速率(以 P 计)为 $32.68\text{ mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{h})^{-1}$, 即每吸收 $1\text{ mg PO}_4^{3-}\text{-P}$ 约消耗 $1.14\text{ mg NO}_3^-\text{-N}$. 在以亚硝酸盐为电子受体的系统中, 在缺氧初期 30 min 反应中, 平均反硝化速率(以 N 计)为 $27.66\text{ mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{h})^{-1}$, 平均摄磷速率(以 P 计)为 $17.66\text{ mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{h})^{-1}$, 即每吸收 $1\text{ mg PO}_4^{3-}\text{-P}$ 约消耗 $1.57\text{ mg NO}_2^-\text{-N}$. 因此, 以 NO_3^- 为电子受体的反硝化除磷系统在摄磷速率方面明显优于以 NO_2^- 为电子受体的反硝化除磷系统.

3 结论

(1) 无论是以 NO_3^- 还是以 NO_2^- 作为电子受体进行反硝化除磷, 反应系统内 ORP、pH 的变化与 COD、磷酸盐、硝酸盐和亚硝酸盐之间均存在较好的相关性, 即在厌氧阶段, pH 出现平台能够作为厌氧结束的指示点, 在缺氧阶段, ORP 出现拐点能够指示缺氧的摄磷结束. 因此, 可以应用 ORP 和 pH 作为过程控制参数实时控制反硝化除磷过程.

(2) 在以 NO_3^- 为电子受体的反硝化除磷系统中, 平均摄磷速率(以 P 计)为 $32.68\text{ mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{h})^{-1}$; 在以 NO_2^- 为电子受体的反应中, 平均摄磷速率(以 P 计)为 $17.66\text{ mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{h})^{-1}$. 因此, 以 NO_3^- 为电子受体的反硝化除磷系统在摄磷方面明显优于以 NO_2^- 为电子受体的反硝化除磷系统.

参考文献:

[1] Kuba T, Smolders G J F, van Loosdrecht M C M, *et al.* Phosphorus removal from wastewater by anaerobic-anoxic sequencing batch reactor [J]. *Wat Sci Tech*, 1993, **27** (5-6): 241-252.

[2] Bortone G, Libelli S, Tiche A, *et al.* Anoxic phosphate uptake in the dephano process [J]. *Wat Sci Tech*, 1999, **4-5** (40): 177-180.

[3] Kuba T, Van Loosdrecht M C M. Occurrence of denitrifying phosphorus removal bacteria in modified UCT-type waste water treatment plants [J]. *Wat Res*, 1997, **31**(4): 777-786.

[4] Tsuneda S, Ohno T, Soejima K, *et al.* Simultaneous nitrogen and phosphorus removal using denitrifying phosphate-accumulating

- organisms in a sequencing batch reactor [J]. *Biochem Eng J*, 2006, **27**(3): 191-196.
- [5] Soejima K, Oki K, Terada A, *et al.* Effects of acetate and nitrite addition on fraction of denitrifying phosphate-accumulating organisms and nutrient removal efficiency in anaerobic/aerobic/anoxic process [J]. *Bioproc Biosys Eng*, 2006, **29**(5-6): 305-313.
- [6] Peng Y Z, Hou H X, Wang S Y, *et al.* Nitrogen and phosphorus removal: pilot-scale anaerobic-anoxic oxidation ditch system [J]. *J Environ Sci*, 2008, **20**(4): 398-403.
- [7] Wang Y Y, Pan M L, Yan M, *et al.* Characteristics of anoxic phosphorus removal in sequence batch reactor [J]. *J Environ Sci*, 2007, **19**(7): 776-782.
- [8] 王亚宜, 彭永臻, 王淑莹, 等. 反硝化除磷理论工艺及影响因素 [J]. *中国给水排水*, 2003, **19**(1): 33-36.
- [9] Carvalho G, Lemos P C, Oehmen A, *et al.* Denitrifying phosphorus removal: Linking the process performance with the microbial community structure [J]. *Wat Res*, 2007, **41**(19): 4383-4396.
- [10] Zhang X L, Wang Z Y, Zhao Q. Biological phosphorus removal with nitrite as electron acceptor [J]. *Wat Sci Tech*, 2006, **53**(9): 185-191.
- [11] 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.
- [12] 李捷, 熊必永, 张树德, 等. 亚硝酸盐对聚磷菌吸磷效果的影响 [J]. *环境科学*, 2006, **27**(4): 701-703.
- [13] Holman J B, Wareham D G. Oxidation - reduction potential as a monitoring tool in a low dissolved oxygen wastewater treatment process [J]. *J Environ Eng*, 2003, **129**(1): 52-58.
- [14] John A P, Spyros G P. Real-time monitoring and control of sequencing batch reactors for secondary treatment of a poultry processing wastewater. [J]. *Wat Environ Res*, 2000, **72**(5): 585-592.
- [15] Zeng W, Peng Y Z, Wang S Y, *et al.* Process control of an alternating aerobic-anoxic sequencing batch reactor for nitrogen removal via nitrite [J]. *Chem Eng Tech*, 2008, **31**(4): 582-587.
- [16] Kishida N, Kim J, Tsuneda S, *et al.* Anaerobic/oxic/anoxic granular sludge process as an effective nutrient removal process utilizing denitrifying polyphosphate-accumulating organisms [J]. *Wat Res*, 2006, **40**(12): 2303-2310.
- [17] 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.
- [18] Lemaire R, Meyer R, Taske A, *et al.* Identifying causes for NO_2^- accumulation in a lab-scale sequencing batch reactor performing simultaneous nitrification, denitrification and phosphorus removal [J]. *J Biotech*, 2006, **122**(1): 62-72.
- [19] 刘晖, 周康群, 刘开启, 等. 利用亚硝酸盐的反硝化除磷菌及影响因素 [J]. *环境科学与技术*, 2006, **29**(7): 14-16.
- [20] 张朝升, 范建华, 张可方, 等. 亚硝酸盐型同步硝化反硝化耦合除磷研究 [J]. *环境科学与技术*, 2007, **30**(8): 13-15.
- [21] Meinhold J, Arnold E, Isaacs S. Effect of nitrite on anoxic phosphate phosphorus removal activated sludge [J]. *Wat Res*, 1999, **33**(8): 1871-1883.
- [22] Huang R, Li D, Li X, *et al.* Positive role of nitrite as electron acceptor on anoxic denitrifying phosphorus removal process [J]. *Chinese Sci Bull*, 2007, **52**(16): 2179-2183.
- [23] 张小玲, 王磊, 王志盈. NO_2^- 作为缺氧吸磷电子受体的试验研究 [J]. *环境科学*, 2006, **27**(5): 930-934.
- [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**(14): 3463-3471.
- [25] 王亚宜, 彭永臻, 王淑莹, 等. 碳源和硝态氮浓度对反硝化聚磷的影响及 ORP 的变化规律 [J]. *环境科学*, 2004, **25**(4): 54-58.