

A^2/O 工艺中污泥聚集体内部除磷菌的原位活性研究

吕永涛^{1,2}, 徒彦^{1,2}, 吴浩伟^{1,2}, 程军³, 徐超^{1,2}, 王磊^{1,2}
(1. 西安建筑科技大学 环境与市政工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 陕西省膜分离技术研究院
陕西省膜分离重点实验室, 陕西 西安 710055; 3. 陕西省水务集团水务科技有限公司, 陕西
西安 710000)

摘要: 利用自制的磷酸盐、DO、ORP 微电极定量研究了某污水厂 A^2/O 工艺中厌氧、缺氧及好氧段污泥聚集体内部微环境及磷酸盐浓度的空间分布特征, 获得了除磷菌原位活性的变化规律。结果表明, 厌氧段污泥聚集体内部的最大净体积释磷速率为 $2.88 \text{ mg}/(\text{cm}^3 \cdot \text{h})$, 厌氧池前端的最大释磷速率是末端的 2 倍, 且主要释磷区域集中在 $0 \sim 1400 \mu\text{m}$; 在缺氧段发现了明显的释磷现象, 但最大释磷速率仅为 $0.83 \text{ mg}/(\text{cm}^3 \cdot \text{h})$, 且主要发生在 $0 \sim 500 \mu\text{m}$ 范围内, 污泥深处几乎不释磷; 好氧池前端的最大净体积吸磷速率为 $0.29 \text{ mg}/(\text{cm}^3 \cdot \text{h})$, 而末端的吸磷反应几乎停止。在此基础上, 研究了 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度对缺氧池前端污泥聚集体内除磷菌原位活性的影响, 结果表明, 随着 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度由 4 mg/L 升至 9 和 15 mg/L , 最大净体积释磷速率由 $0.97 \text{ mg}/(\text{cm}^3 \cdot \text{h})$ 降至 0.53 和 $0.26 \text{ mg}/(\text{cm}^3 \cdot \text{h})$, 呈逐渐降低趋势, 且主要释磷区域由 $0 \sim 1600 \mu\text{m}$ 降至 $0 \sim 1300 \mu\text{m}$ 和 $0 \sim 600 \mu\text{m}$ 。

关键词: A^2/O 工艺; 磷酸盐; 污泥聚集体; 除磷菌; 原位活性; 微电极

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2019)17-0031-07

In-situ Activity of Dephosphorization Bacteria in Sludge Aggregates in A^2/O Process

LÜ Yong-tao^{1,2}, TU Yan^{1,2}, WU Hao-wei^{1,2}, CHENG Jun³, XU Chao^{1,2},
WANG Lei^{1,2}

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2. Key Laboratory of Membrane Separation of Shaanxi Province, Research Institute of Membrane Separation Technology of Shaanxi Province, Xi'an 710055, China; 3. Shaanxi Provincial Water Group Water Technology Company, Xi'an 710000, China)

Abstract: The self-made phosphate, DO and ORP microelectrodes were used to quantitatively study the micro-environment and the spatial distribution characteristics of phosphate concentration in the anaerobic, anoxic and aerobic sludge aggregates in the A^2/O process of a wastewater treatment plant. The regularity of the in-situ activity of dephosphorization bacteria was obtained. The results showed that the maximum net volume release rate of phosphorus in the anaerobic sludge aggregates was $2.88 \text{ mg}/(\text{cm}^3 \cdot \text{h})$.

基金项目: 陕西省重点科技创新团队计划项目(2017KCT-19-01); 陕西省技术创新引导专项(2018HJCG-18); 陕西省水务集团水务科技项目(2018SWAG0201)

通信作者: 王磊 E-mail: wl0178@126.com

h), the maximum phosphorus release rate at the front of the anaerobic tank was twice of that of the end, and the main phosphorus release area was 0 – 1 400 μm . The phosphorus release was observed in anoxic zone, but the maximum phosphorus release rate was only 0.83 $\text{mg}/(\text{cm}^3 \cdot \text{h})$. The phosphorus release mainly occurred in 0 – 500 μm , and almost no phosphorus was released in the deeper area of the sludge. The maximum net volume uptake rate of phosphorus at the front of aerobic tank was 0.29 $\text{mg}/(\text{cm}^3 \cdot \text{h})$, and almost no phosphorus uptake took place at the end of aerobic tank. On this basis, the effect of $\text{NO}_3^- - \text{N}$ concentration on the in-situ activity of dephosphorization bacteria in sludge aggregates of the front of the anoxic tank was studied. The results showed that the maximum net volume release rate of phosphorus decreased from 0.97 $\text{mg}/(\text{cm}^3 \cdot \text{h})$ to 0.53 $\text{mg}/(\text{cm}^3 \cdot \text{h})$ and 0.26 $\text{mg}/(\text{cm}^3 \cdot \text{h})$ when the $\text{NO}_3^- - \text{N}$ concentration ranged from 4 mg/L to 9 mg/L and 15 mg/L . The phosphorus release showed a gradual decrease trend, and the main phosphorus release range decreased from 0 – 1 600 μm to 0 – 1 300 μm and 0 – 600 μm .

Key words: A^2/O process; phosphate; sludge aggregate; dephosphorization bacteria; in-situ activity; microelectrode

污水中磷的去除一直是污水处理的重要研究内容。学者们通过大量模拟试验对生物除磷效果及影响因素进行研究,发现碳源^[1]、污泥回流比^[2]、污泥龄(SRT)^[3]、DO^[4]等均会对除磷效果产生影响,其中,污泥回流液中高浓度的硝态氮会对聚磷菌的释磷效果产生抑制^[5],从而影响到后续的吸磷过程。但是现有研究大多停留在宏观层面,对污泥聚集体内部磷素的迁移特性认识不够。

微电极,一种尖端只有数微米至数十微米的微型传感器,能在污泥形态结构完整的前提下,测定不同形态污泥(颗粒污泥、生物膜、污泥聚集体)内部物质浓度的空间分布特征,为污泥的微生物机制研究提供了可能^[6-8]。笔者以某污水处理厂 A^2/O 工艺中的活性污泥为研究对象,利用氧化还原电位(ORP)、DO和磷酸盐微电极对厌氧、缺氧及好氧段污泥聚集体内部微环境条件及磷素浓度的空间分布特征进行了定量化测定,得到了污泥聚集体内部除磷菌的原位活性;在此基础上,研究了 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度对除磷菌活性的影响,旨在为污水厂的运行优化提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 污水厂 A^2/O 工艺运行情况

试验用水和污泥取自西安市某污水厂,该污水厂采用 A^2/O 为核心的二级生化处理工艺,其进水COD、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TP和TN分别为173~209、27~38、6~8、33~42 mg/L , pH值为6~8,水温 $\geq 20^\circ\text{C}$,出水水质执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》

(GB 18918—2002)的一级A标准。

1.2 微电极系统

1.2.1 微电极

本试验采用课题组自制的ORP、DO、磷酸盐微电极测定污泥聚集体内部环境条件及物质浓度的空间分布特征。自制的ORP、DO微电极尖端直径在25 μm 内,响应时间 $< 65\text{ s}$,标定曲线的线性回归系数为 0.995 ± 0.002 ;磷酸盐微电极的尖端直径为20 μm ,标定曲线的线性回归系数均在0.992以上,响应时间 $< 9\text{ s}$ 。

1.2.2 微电极测试装置及方法

本试验采用上流式测试槽装置,取适量污泥置于细密的网状支撑物上,为了保持污泥絮体的稳定且获得稳定的测试环境,取污泥厚度约为5 000 μm ^[8-10]。打开蠕动泵营造上流式环境,并调节流量大小使污泥恰好悬浮于支撑物上,稳定30 min后测量。其中基质溶液分别取自污水厂厌氧、缺氧及好氧池,通过曝氧气和氮气还原实际DO浓度。因物质浓度在污泥层中呈对称分布,故本试验测定深度为上层2 500 μm 。

1.3 试验方案

1.3.1 除磷菌的原位活性测定试验

取样:为了对比研究厌氧段、缺氧段及好氧段污泥聚集体内除磷菌的原位活性变化,分别在厌氧池前端、厌氧池末端、缺氧池前端、缺氧池末端、好氧池前端和好氧池末端取1 L泥水混合液,测定其COD、 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、DO浓度和

pH 值,为基质液的配制提供依据。

样本处理:取 1 L 泥水混合液,通过滤纸过滤实现泥水分离,将污泥及水样分开保存,其中滤出的污泥用去离子水淘洗 3 遍。

测试:取适量污泥样本,放置于测试槽中,调节压力泵及阀门使污泥处于悬浮状态,待污泥絮体达到稳态后开始测量。

1.3.2 NO₃⁻-N 对除磷菌原位活性的影响试验

取缺氧池前端还未混合内回流的泥水混合液 1 L,经滤纸过滤后用去离子水淘洗 3 遍,然后置于无氧去离子水中保存。取 1 L 缺氧池前端泥水混合物,测定其 COD、NH₄⁺-N、NO₂⁻-N、NO₃⁻-N、PO₄³⁻-P、DO 浓度及 pH 值,为基质液的配制提供依据。

配制 3 组不同 NO₃⁻-N 浓度(4、9、15 mg/L)的基质液,基质液中的其余物质均按照缺氧池前端泥水混合液中的物质浓度配制,测试方法同上。

以上测试均进行 3 次,最后试验结果取 3 次的平均值。

1.4 PO₄³⁻-P 净体积生成/消耗速率计算

PO₄³⁻-P 在污泥絮体内的浓度受微生物和扩散的共同作用,因此絮体内基质浓度的变化并不能直接反映除磷菌的活性。根据 Fick 第二定律,计算基质从液相主体扩散进入污泥絮体内部的净体积生成/消耗速率,具体如下^[8]:

$$\frac{\partial C(z,t)}{\partial t} = D_s \cdot \frac{\partial^2 C(z,t)}{\partial z^2} - Q(z) + P(z) \quad (1)$$

式中: $C(z,t)$ 为界面以下 z 距离处在 t 时刻的基质浓度; D_s 为絮体中的扩散系数,取 $3.33 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$ ^[6]; $Q(z)$ 为总消耗量; $P(z)$ 为总产量。

当污泥聚集体内部处于稳定状态时,可以认为 $\partial C(z,t)/\partial t = 0$,代入式(1)得:

$$D_s \cdot \frac{\partial^2 C(z,t)}{\partial z^2} = Q(z) - P(z) \quad (2)$$

定义 $R(z) = Q(z) - P(z)$ 为净体积生成速率,并使用欧拉方程对上式进行数值积分,则有:

$$\frac{\partial C}{\partial z_{n+1}} = \frac{\partial C}{\partial z_n} + h \times R_n / D_s \quad (3)$$

式中: h 为步长值,取 $100 \mu\text{m}$ 。对式(3)进一步积分得:

$$C_{n+1} = C_n + h \times \frac{\partial C}{\partial z_n} \quad (4)$$

将 $\partial C/\partial z_n$ 代入到式(1),可计算出基质的净体积生成/消耗速率:

$$R_{n-1}/D_s = [(C_{n+1} - C_n)/h - \partial C/\partial z_{n-1}]/h \quad (5)$$

净体积生成/消耗速率的数值为负时代表生成、为正时代表消耗。

2 结果与讨论

2.1 不同阶段污泥聚集体内除磷菌的原位活性

2.1.1 厌氧池

厌氧池污泥聚集体内 PO₄³⁻-P、DO、ORP 分布及 PO₄³⁻-P 净体积生成/消耗速率见图 1(上半部分曲线图为 PO₄³⁻-P、DO、ORP 在污泥絮体中的分布情况,S 代表溶液,F 代表污泥絮体;下半部分柱状图为 PO₄³⁻-P 的净体积生成/消耗速率,下同)。

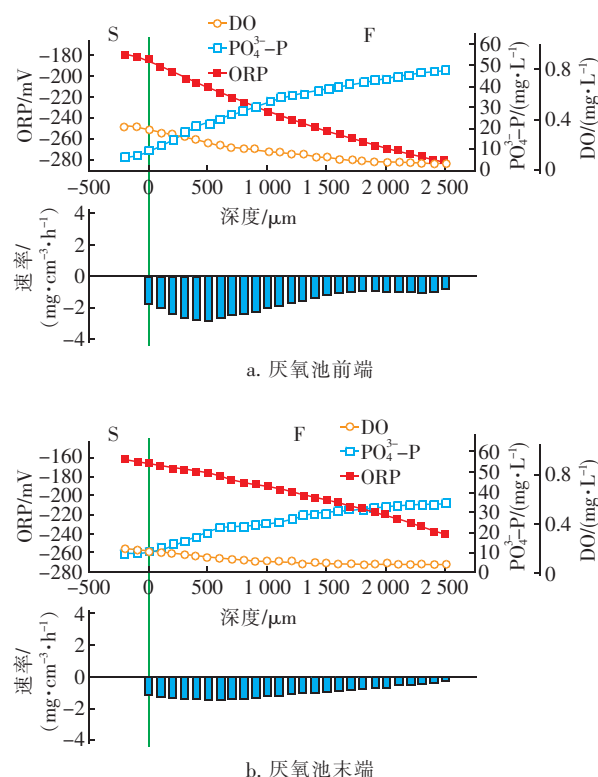


图 1 厌氧池污泥聚集体内 PO₄³⁻-P、DO、ORP 分布及 PO₄³⁻-P 净体积生成/消耗速率

Fig. 1 Distribution of PO₄³⁻-P, DO and ORP in the anaerobic sludge aggregates and the net volume release/uptake rate of PO₄³⁻-P

由图 1(a)可以看出,在厌氧池前端,进入污泥絮体后 DO 浓度不断下降,由溶液中的 0.35 mg/L 降至中心点处的 0.05 mg/L;ORP 亦不断降低,最小值为 -282.2 mV,表明此时为厌氧环境。PO₄³⁻-P 浓度在进入污泥絮体后不断增大,最大值为 47.52 mg/L;在 0~500 μm 的表层和 500~1 500 μm 的中层 PO₄³⁻-P 净体积生成速率分别为 1.75~2.88、1.03~2.51 mg/(cm³·h),在 1 500~2 500 μm 的

深层则基本维持在 $1 \text{ mg}/(\text{cm}^3 \cdot \text{h})$ 左右。由图 1(b)可以看出,厌氧池末端的污泥聚集体中,DO 浓度由溶液中的 0.18 mg/L 降至中心点处的 0.04 mg/L ;ORP 值随着污泥深度的增加也不断降低,由 -162.33 mV 降至 -241.23 mV 。 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 浓度在污泥絮体中呈增加趋势,在絮体中心为 33.36 mg/L ;其净体积生成速率在表层、中层和深层区域分别为 $1.26 \sim 1.52$ 、 $0.97 \sim 1.51$ 、 $0.29 \sim 0.93 \text{ mg}/(\text{cm}^3 \cdot \text{h})$,相较于厌氧池前端, $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 的生成速率整体明显降低,最大释磷速率约为厌氧池前端的 $1/2$ 。

综上,厌氧池前端和末端污泥聚集体内部的释磷速率较高,且主要释磷区域集中在 $0 \sim 1400 \mu\text{m}$,此时 ORP 与磷的释放呈现出良好的相关关系,这与 Kim 等人^[11]的研究结果类似。在厌氧池末端,整体释磷速率相较于厌氧池前端明显降低,推测可能是由于快速可降解 COD 浓度的降低,使得污泥释磷反应能力下降。Lee 等人^[6]利用微电极对厌氧后期污泥进行测定,发现在污泥絮体深层区域 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 浓度基本不发生变化,与本试验结果一致。

2.1.2 缺氧池

缺氧池污泥聚集体内 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 、DO、ORP 分布及 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 净体积生成/消耗速率如图 2 所示。由图 2(a)可以看出,缺氧池前端的 DO 浓度由溶液中的 0.14 mg/L 降至中心处的 0.04 mg/L ;ORP 在污泥絮体层内亦呈现不断降低的趋势,由 -83.11 mV 降至 -126.93 mV ,降低速率随着污泥深度的增加而不断降低; $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 浓度则呈现升高趋势,由溶液中的 2.99 mg/L 升至 12.69 mg/L 。由 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 净体积生成/消耗速率的变化可知,此时污泥絮体内仍然发生释磷反应,最大净体积释磷速率为 $0.83 \text{ mg}/(\text{cm}^3 \cdot \text{h})$,相较于厌氧池释磷速率明显降低,在絮体深处几乎停止释磷。

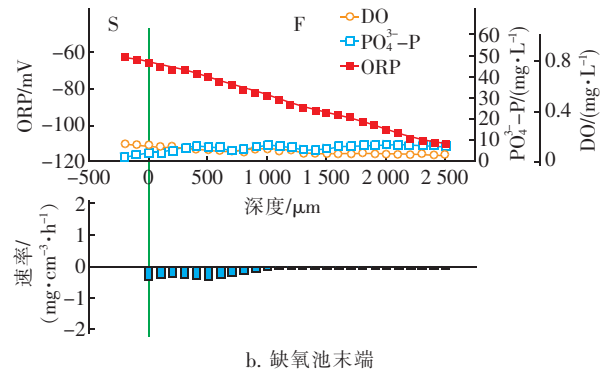
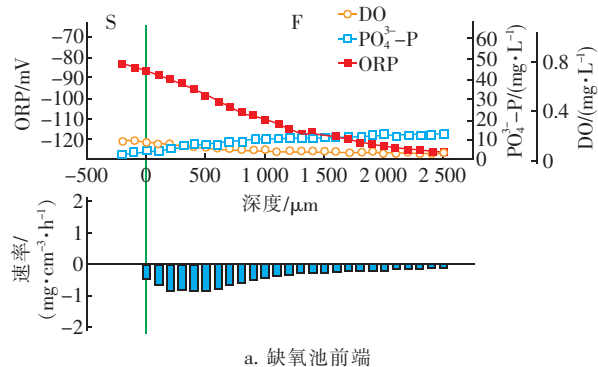


图2 缺氧池污泥聚集体内 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 、DO、ORP 分布及 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 净体积生成/消耗速率

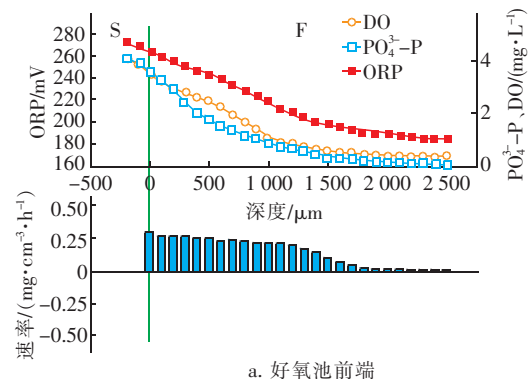
Fig.2 Distribution of $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$, ORP and DO in the anoxic sludge aggregates and the net volume release/uptake rate of $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$

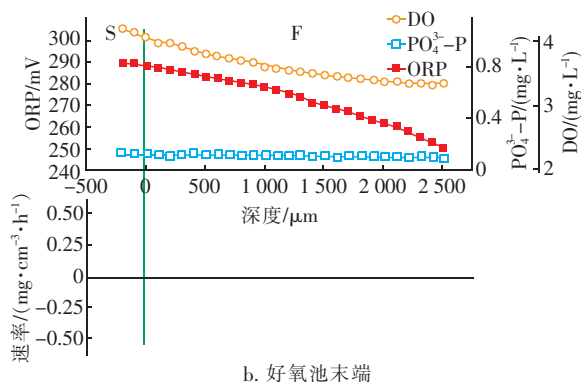
由图 2(b)可以看出,在缺氧池末端,DO 进入污泥絮体后呈下降趋势,由 0.13 mg/L 降至最低的 0.05 mg/L ;ORP 亦呈下降趋势,由溶液中的 -63.3 mV 降至 -110.44 mV ; $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 浓度在污泥絮体中逐渐增大,最大值为 7.84 mg/L 。分析 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 净体积生成/消耗速率的变化可知,此时依旧发生的是释磷反应,最大净体积释磷速率为 $0.4 \text{ mg}/(\text{cm}^3 \cdot \text{h})$,在 $1500 \mu\text{m}$ 以上深度处污泥停止释磷。

传统理论认为硝态氮会对释磷过程产生抑制作用。郑燕清等人^[12]研究发现厌氧释磷基本是在反硝化完成后才开始进行的,而高兰等人^[13]在研究中发现影响污泥释磷的主要因素是进水碳源浓度而并非 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 。在本研究中发现,即使在缺氧池前端硝态氮浓度较高的情况下,污泥聚集体内部依旧发生了释磷现象,推测可能是 COD 浓度较高的原因。

2.1.3 好氧池

好氧池污泥聚集体内 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 、DO、ORP 分布及 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 净体积生成/消耗速率见图 3。





b. 好氧池末端

图3 好氧池污泥聚集体内 $PO_4^{3-}-P$ 、DO、ORP 分布及 $PO_4^{3-}-P$ 净体积生成/消耗速率

Fig.3 Distribution of $PO_4^{3-}-P$, DO and ORP in the aerobic sludge aggregates and the net volume release/uptake rate of $PO_4^{3-}-P$

由图3(a)可知,在好氧池前端,DO在进入污泥絮体后迅速减小,由表层的4.05 mg/L降至中心点处的0.38 mg/L,同时ORP由溶液中的270.51 mV降至183.4 mV; $PO_4^{3-}-P$ 浓度在进入絮体后快速下降,由溶液中的4.02 mg/L降至絮体中心处的0.05 mg/L。分析 $PO_4^{3-}-P$ 净体积生成/消耗速率可知,此时发生了好氧吸磷现象,0~500 μm 处吸磷速率较大,为0.29 $mg/(cm^3 \cdot h)$,随着深度的增加吸磷速率逐渐下降,在深层区域几乎不发生吸磷反应。由图3(b)可知,在好氧池末端,污泥絮体中DO浓度最小为3.33 mg/L,可见DO穿透了整个污泥絮体;此时絮体中ORP最小值为250.83 mV;在整个污泥絮体中 $PO_4^{3-}-P$ 浓度只是略微减小,净体积吸磷速率较低几乎为零。

在好氧池前端的污泥聚集体内部,由于有机物的氧化以及硝化作用导致溶解氧浓度迅速降低^[9],此时吸磷作用主要发生在污泥的表层及中层,因为溶解氧和PHB均充足,所以吸磷速率较大,到污泥絮体深层时溶解氧浓度几乎为零,导致吸磷过程几乎停止。在好氧阶段后期,污泥即使在溶解氧充足的情况下吸磷反应也非常微弱,原因是此时污泥絮体内的PHB消耗殆尽,电子供体的缺失导致吸磷速率下降。

2.2 $NO_3^- - N$ 对缺氧污泥除磷菌原位活性的影响

图4为不同 $NO_3^- - N$ 浓度条件下缺氧池前端污泥聚集体内 $PO_4^{3-}-P$ 、DO、ORP 分布及 $PO_4^{3-}-P$ 净体积生成/消耗速率。

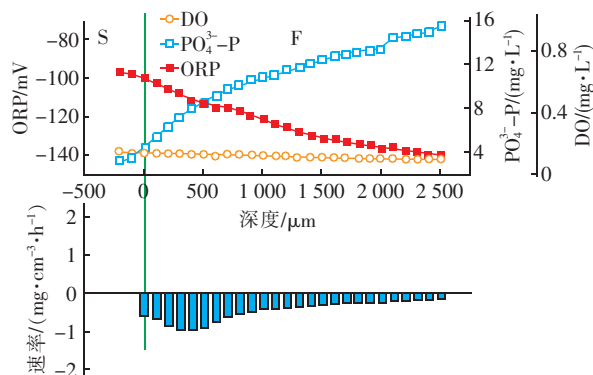
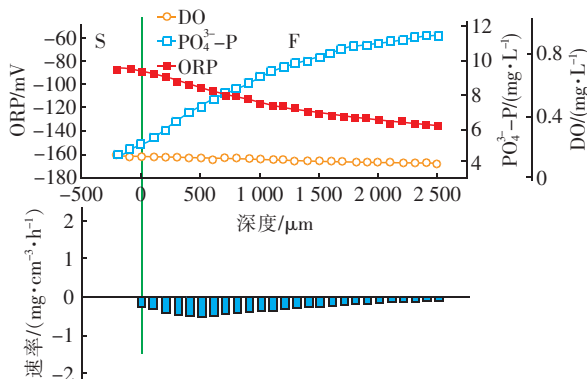
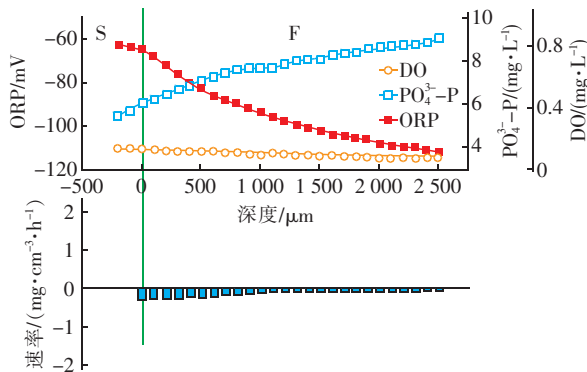
a. $NO_3^- - N = 4 \text{ mg/L}$ b. $NO_3^- - N = 9 \text{ mg/L}$ c. $NO_3^- - N = 15 \text{ mg/L}$

图4 $NO_3^- - N$ 浓度对缺氧池前端污泥聚集体内 $PO_4^{3-}-P$ 、DO、ORP 分布及 $PO_4^{3-}-P$ 净体积生成/消耗速率的影响

Fig.4 Effect of $NO_3^- - N$ concentration on the distribution of $PO_4^{3-}-P$, ORP and DO in the sludge aggregates at the front of the anoxic tank and the net volume release/uptake rate of $PO_4^{3-}-P$

由图4可知,在这3组试验中,DO浓度基本不变,在0.1 mg/L;当 $NO_3^- - N$ 浓度由4 mg/L增加至15 mg/L时,基质溶液中的ORP值逐渐增大,由-97.25 mV增加至-62.58 mV,而且ORP在整个污泥絮体内的变化绝对值逐渐增大,分别为43.13、

48.89、49.82 mV。分析 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 净体积生成/消耗速率可知,不同 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 初始浓度下,污泥均发生释磷现象,随着 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度由 4 mg/L 升至 9 和 15 mg/L,最大释磷速率由 0.97 mg/($\text{cm}^3 \cdot \text{h}$) 降低至 0.53 和 0.28 mg/($\text{cm}^3 \cdot \text{h}$),而且主要释磷区域由 0~1 600 μm 降至 0~1 300 μm 和 0~600 μm ,在污泥深层区域释磷反应停止。李茂侨等^[14] 研究发现随着硝态氮浓度的增加,污泥释磷速率逐渐减缓。综上所述, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 对除磷菌活性有抑制作用,但在不同 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度条件下均会发生释磷现象。

3 结论

① 污泥的释磷反应主要发生在厌氧池前端,最大净体积释磷速率为 2.88 mg/($\text{cm}^3 \cdot \text{h}$),且厌氧段的 ORP 与聚磷菌的释磷有着较好的相关性;在缺氧段依旧发生的是释磷反应,但最大净体积释磷速率仅为 0.83 mg/($\text{cm}^3 \cdot \text{h}$);好氧池前端的最大净体积吸磷速率为 0.29 mg/($\text{cm}^3 \cdot \text{h}$),主要吸磷反应发生在 0~1 500 μm 范围内,好氧池末端吸磷停止。

② 当 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度由 4 mg/L 升至 15 mg/L 时,缺氧池前端活性污泥聚集体内的聚磷菌一直保持释磷状态,但是释磷速率逐渐降低,最大释磷速率由 0.97 mg/($\text{cm}^3 \cdot \text{h}$) 降至 0.28 mg/($\text{cm}^3 \cdot \text{h}$),且主要释磷区域逐渐变窄。

参考文献:

- [1] 吉芳英,杨勇光,万小军,等. 碳源种类对反硝化除磷系统运行状态的影响[J]. 中国给水排水,2010,26(15):5-9.
Ji Fangying, Yang Yongguang, Wan Xiaojun, et al. Effects of carbon source types on operation of denitrifying phosphorus removal system [J]. China Water & Wastewater, 2010, 26(15): 5-9 (in Chinese).
- [2] 吕亮,尤雯,张敏,等. 硝化液回流比对 ABR-MBR 工艺反硝化除磷效能的影响[J]. 环境科学,2018,39(3):1309-1315.
Lü Liang, You Wen, Zhang Min, et al. Effect of $\text{NO}_x^- - \text{N}$ recycling ratio on denitrifying phosphorus removal efficiency in the ABR-MBR combined process [J]. Environmental Science, 2018, 39(3): 1309-1315 (in Chinese).
- [3] 左宁,吉芳英. 污泥龄对 HA-A/A-MCO 工艺除磷和污泥特性的影响[J]. 中国给水排水,2012,28(9):30-34.
Zuo Ning, Ji Fangying. Effect of SRT on phosphorus removal and sludge characteristics in HA-A/A-MCO sludge reduction process [J]. China Water & Wastewater, 2012, 28(9): 30-34 (in Chinese).
- [4] 马娟,宋璐,俞小军,等. 超低溶解氧条件下的 EBPR 系统除磷性能[J]. 环境科学,2016,37(8):3128-3134.
Ma Juan, Song Lu, Yu Xiaojun, et al. Phosphorus removal performance in EBPR system under extra-low dissolved oxygen condition [J]. Environmental Science, 2016, 37(8): 3128-3134 (in Chinese).
- [5] 唐蕾,陈立伟,蔡天明,等. 污泥回流分离工艺(RSSP)除磷脱氮试验研究[J]. 环境工程学报,2009,3(9):1552-1556.
Tang Lei, Chen Liwei, Cai Tianming, et al. Research on phosphorus and nitrogen removal of an urban wastewater by return sludge separate process [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2009, 3(9): 1552-1556 (in Chinese).
- [6] Lee W H, Seo Y, Bishop P L. Characteristics of a cobalt-based phosphate microelectrode for *in situ* monitoring of phosphate and its biological application [J]. Sens Actuators B: Chem, 2009, 137(1): 121-128.
- [7] Lü Y, Ju K, Wang L, et al. Effect of pH on nitrous oxide production and emissions from a partial nitrification reactor under oxygen-limited conditions [J]. Process Biochem, 2016, 51(6): 765-771.
- [8] Lü Y, Ju K, Sun T, et al. Effect of the dissolved oxygen concentration on the N_2O emission from an autotrophic partial nitrification reactor treating high-ammonium wastewater [J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2016, 114: 209-215.
- [9] Lee W H, Bishop P L. In situ microscale analyses of activated sludge flocs in the enhanced biological phosphate removal process by the use of microelectrodes and fluorescent *in situ* hybridization [J]. J Environ Eng, 2010, 136(6): 561-567.
- [10] Li B, Bishop P L. Micro-profiles of activated sludge floc determined using microelectrodes [J]. Water Res, 2004, 38(5): 1248-1258.
- [11] Kim K S, Yoo J S, Kim S, et al. Relationship between the electric conductivity and phosphorus concentration variations in an enhanced biological nutrient removal process [J]. Water Sci Technol, 2007, 55(1/2): 203-

(下转第 55 页)