



王可馨,王世明,顾向阳. 硝化作用强度对 EBPR 工艺运行效果的影响[J]. 南京农业大学学报,2024,47(3):462-467.

WANG Kexin,WANG Shiming,GU Xiangyang. Effects of nitrification intensity on EBPR process performance[J]. Journal of Nanjing Agricultural University,2024,47(3):462-467.

## 硝化作用强度对 EBPR 工艺运行效果的影响

王可馨<sup>1</sup>,王世明<sup>2</sup>,顾向阳<sup>1\*</sup>

(1.南京农业大学生命科学学院/农业农村部农业环境微生物工程重点实验室,江苏 南京 210095;  
2.南京理工大学环境与生物工程学院,江苏 南京 210094)

**摘要:**[目的]本文旨在探究硝化作用强度对强化生物除磷(EBPR)工艺运行效果的影响。[方法]采用厌氧-好氧型序批式生物反应器(SBR)驯化得到 EBPR 污泥,将进水氨氮浓度提高至  $48 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,比较无硝化抑制剂和添加硝化抑制剂 2 种条件下 EBPR 系统中硝化作用强度及除磷效率的变化,分析硝化作用强度对 EBPR 工艺运行效果的影响。在系统运行各阶段均取 1 个周期,测定混合液中磷酸根、氨氮、硝氮、亚硝氮质量浓度以及 EBPR 污泥中糖原、聚羟基烷酸(PHA)含量的周期变化,分析硝化作用强度对聚磷菌代谢的影响。[结果]在进水氨氮浓度提高至  $48 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  且无硝化抑制剂的情况下,硝化作用强度逐渐增强,17 d 后硝化反应速率上升至  $1.45\sim 1.80 \text{ mg}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$ ,系统出现了好氧磷释放现象,导致除磷效率大幅下降,同时出现糖原的降解量与合成量显著上升、PHA 的合成量与降解量显著下降等代谢异常现象;再次加入硝化抑制剂,系统的除磷功能在 24 h 内恢复正常。[结论]EBPR 工艺运行效果与硝化作用强度密切相关,当硝化反应速率上升到一定程度时可引起好氧磷释放现象,导致 EBPR 工艺除磷效率大幅下降。

**关键词:**强化生物除磷;糖原;聚羟基烷酸;硝化反应速率;好氧磷释放

中图分类号:X172

文献标志码:A

文章编号:1000-2030(2024)03-0462-06

## Effects of nitrification intensity on EBPR process performance

WANG Kexin<sup>1</sup>,WANG Shiming<sup>2</sup>,GU Xiangyang<sup>1\*</sup>

(1.College of Life Sciences/Key Lab of Microbiological Engineering for Agricultural Environments,  
Ministry of Agriculture and Rural Affairs,Nanjing Agricultural University,Nanjing 210095,China;

2.School of Environmental & Biological Engineering,Nanjing University of Science & Technology,Nanjing 210094,China)

**Abstract:**[Objectives]The present study aimed to investigate the effect of nitrification intensity on enhanced biological phosphorus removal(EBPR) process performance. [Methods]Acclimation of EBPR sludge was firstly carried out in an anaerobic-aerobic sequencing batch reactor(SBR). The influent ammonia concentration was raised to  $48 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  and a comparative study was conducted on the nitrification intensity and phosphorus removal efficiency of EBPR system with or without nitrification inhibitors addition for the purpose of further analyzing the effect of nitrification intensity on the operational performance of EBPR process. In each of those operational phases, cyclic changes of phosphate, ammonia, nitrate, nitrite concentrations in the mixed liquor, glycogen and polyhydroxyalkanoate(PHA) contents in EBPR sludge were determined to analyze the effect of nitrification intensity on the metabolism of polyphosphate accumulating organisms(PAOs). [Results]When the influent ammonia concentration raised to  $48 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  and with allylthiourea eliminated, the nitrification rate of EBPR system rose to  $1.45\sim 1.80 \text{ mg}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$  after 17 days of operation, and an unexpected phenomenon of aerobic phosphorus release occurred,leading to a substantial decrease in the phosphorus removal efficiency of the system. Metabolic abnormality also occurred in PAOs as indicated by a significant increase in the amount of glycogen degradation and synthesis and a significant decrease in the amount of PHA synthesis and degradation. However,EBPR performance was restored to the normal level within 24 h following re-supplementation of allylthiourea to the influent. [Conclusions]EBPR process performance was closely related to the nitrification intensity and aerobic phosphorus release occurred as nitrification rate rose up to a certain degree, leading to a significant decline in phosphorus removal efficiency of EBPR process.

**Keywords:**enhanced biological phosphorus removal;glycogen;polyhydroxyalkanoate;nitrification rate;aerobic phosphorus release

强化生物除磷(EBPR)工艺广泛应用于城市生活污水的处理,对于削减污水处理厂磷的释放,控制水体富营养化起着十分重要的作用<sup>[1-2]</sup>。EBPR 工艺依赖厌氧-好氧交替的环境条件实现聚磷菌的富集。

收稿日期:2023-05-11

基金项目:国家自然科学基金项目(31970121)

\*通信作者:顾向阳,副教授,主要从事环境微生物工程研究,E-mail:gxy@njau.edu.cn。

在厌氧阶段,聚磷菌吸收挥发性脂肪酸并将其转化为聚羟基烷酸 (polyhydroxyalkanoate, PHA), 所需要的能量及还原力分别由多聚磷酸盐 (polyphosphate particles, Poly-P) 和糖原 (glycogen) 水解提供。而在好氧阶段,聚磷菌水解胞内的 PHA, 为正磷酸盐的吸收提供能量,重新合成糖原并实现自身生长,排放富磷污泥即可达到除磷效果<sup>[2]</sup>。EBPR 工艺运行过程中往往存在除磷功能衰退甚至不明原因的工艺失败现象,其原因尚无定论。多数研究者认为硝化作用的产物即硝氮和亚硝氮通过污泥回流破坏了厌氧区严格厌氧的条件,因而是影响 EBPR 工艺稳定性的主要因素。然而近年来的研究发现,硝氮对聚磷菌并无显著的抑制作用,相反在浓度适当条件下还可以作为聚磷菌的电子受体,实现反硝化除磷作用<sup>[3-4]</sup>。亚硝氮对聚磷菌可产生强烈的抑制作用。例如:当亚硝氮浓度超过  $3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  时好氧磷吸收速率大幅降低,而亚硝氮浓度超过  $6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  时好氧磷吸收可被完全抑制<sup>[5]</sup>;当亚硝氮浓度超过  $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  时对缺氧磷吸收过程有显著的抑制作用<sup>[6]</sup>。由于试验条件的差异,不同研究者报道的抑制浓度范围不同,Zhou 等<sup>[7]</sup>通过比较研究认为亚硝氮的质子化形式即游离亚硝酸 (free nitrous acid, FNA) 才是真正的抑制物质,并发现当 FNA 浓度达到  $0.02 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  时,PAOs 的磷吸收功能将会被完全抑制,Pijuan 等<sup>[8]</sup>的研究证实了这一观点。另外,硝化作用的底物氨氮也可能影响聚磷菌的除磷活性<sup>[9-10]</sup>,Yang 等<sup>[11]</sup>和 Zheng 等<sup>[12]</sup>的研究结果表明,游离氨 (free ammonia, FA) 才是真正的抑制物质,其临界毒性浓度为  $17.76 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  (折合  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  浓度为  $400 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ),然而城市生活污水中氨氮的实际浓度远低于其毒性浓度。

一般认为 FNA 是对生物除磷活性抑制作用较强的物质,目前绝大多数研究者通过硝化抑制剂抑制 EBPR 污泥中的硝化细菌活性,避免亚硝氮积累,实现 EBPR 工艺的稳定运行<sup>[5,12-14]</sup>。然而,在实际工程运行的 EBPR 工艺中并无使用硝化抑制剂的报道,硝化作用的发生及硝化产物的积累都是不可避免的。因此,本研究在无硝化抑制剂条件下研究硝化作用强度对 EBPR 工艺运行效果的影响并分析其相关作用机制。

## 1 材料与方法

### 1.1 反应器的运行与取样

试验装置为有效容积 3.4 L 的厌氧-好氧型序批式生物反应器 (sequencing batch reactor, SBR), 种子污泥取自河南信阳某污水处理厂,向反应器中加入 1.7 L 污泥混合液及 1.7 L 人工合成废水,启动运行,控制换水比 50%,水温 ( $20 \pm 1$ )  $^{\circ}\text{C}$ ,每日定时排泥控制泥龄 20 d。运行周期为 8 h,包括进水 15 min,厌氧 120 min,好氧 240 min,沉淀 30 min,排水 15 min,闲置 60 min,每日运行 3 个周期。厌氧阶段依靠磁力搅拌器使污泥保持悬浮状态,好氧阶段依靠微型曝气器供气,曝气量为  $0.88 \text{ L} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ 。

人工合成废水配方 ( $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ ): 丙酸 0.198、NaCl 0.1、CaCl<sub>2</sub> 0.006、NH<sub>4</sub>Cl 0.061、MgSO<sub>4</sub> · 7H<sub>2</sub>O 0.04、K<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub> · 3H<sub>2</sub>O 0.09、烯丙基硫脲 (allylthiourea, ATU) 0.01,微量元素溶液 0.5 mL, pH ( $7 \pm 0.2$ )。微量元素溶液的成份 ( $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ ): FeCl<sub>3</sub> · 6H<sub>2</sub>O 1.5、H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> 0.15、CuSO<sub>4</sub> · 5H<sub>2</sub>O 0.03、KI 0.18、MnCl<sub>2</sub> · 4H<sub>2</sub>O 0.12、Na<sub>2</sub>MoO<sub>4</sub> · 2H<sub>2</sub>O 0.06、ZnSO<sub>4</sub> · 7H<sub>2</sub>O 0.12、CoCl<sub>2</sub> · 6H<sub>2</sub>O 0.15、EDTA 10。

反应器共运行 120 d,分为 4 个阶段,各阶段进水水质指标如表 1 所示,其中阶段 III 进水中未添加硝化抑制剂,阶段 I、II 和 IV 进水中含有 ATU 作为硝化抑制剂。在运行过程中每日定时取样测定厌氧末期和好氧末期混合液中磷酸根、硝氮和亚硝氮浓度。活性污泥的硝化作用强度以硝化反应速率<sup>[15-16]</sup>来表示:硝化反应速率 ( $\text{mg} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$ ) = [好氧末期亚硝氮与硝氮浓度 ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) - 厌氧末期亚硝氮与硝氮浓度 ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )] / [污泥浓度 ( $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ ) × 好氧阶段持续时间 (h)]。在反应器运行的各个阶段,取 1 个代表性周期,每隔 30 min 取 15 mL 混合液,12 000  $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$  离心 3 min,取上清液用于测定混合液中磷酸根、氨氮、硝氮

表 1 不同运行阶段进水水质特征

Table 1 Characteristics of influent wastewater in different operational phases

运行阶段 Operation phase	持续时间/d Duration	COD/( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P 含量/( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P content	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N 含量/( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N content	ATU 含量/( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) ATU content
I	0~60	300	12	16	10
II	>60~67	300	12	48	10
III	>67~94	300	12	48	0
IV	>94~120	300	12	48	10

注:COD:化学需氧量 Chemical oxygen demand; ATU:烯丙基硫脲 Allylthiourea.

和亚硝氮的质量浓度,同时另取 5、30 mL 混合液样各 1 份,分别用于测定 EBPR 污泥中糖原及 PHA 含量。

## 1.2 分析检测方法

采用钼锑抗分光光度法测定混合液或出水中的磷酸根质量浓度(以  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  表示)<sup>[17]</sup>,采用纳氏试剂法测定氨氮质量浓度<sup>[17]</sup>,采用 N-(1-萘基)-乙二胺光度法测定亚硝氮质量浓度<sup>[17]</sup>,采用紫外分光光度法测定硝氮质量浓度<sup>[17]</sup>,采用烘干称重法测定混合液悬浮固体(mixed liquor suspended solids, MLSS)<sup>[17]</sup>。

污泥中糖原的测定方法:在 5 mL 混合液中加入含有 0.5 mL  $6 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$  HCl 的试管中,沸水浴消煮 2 h 后取出冷却至室温,12 000  $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$  离心 3 min,取上清液,采用硫酸蒽酮法测定糖原含量<sup>[18]</sup>。PHA 的测定方法:在 30 mL 混合液中加入 0.3 mL 37% 甲醛溶液,混合均匀,12 000  $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$  离心 3 min 后弃去上清液,再以等体积的磷酸盐缓冲液离心洗涤沉淀,所得污泥样品在  $-35 \text{ }^\circ\text{C}$ 、7.70 Pa 下冷冻干燥 24 h。取 0.01 g 冻干样品于具塞玻璃试管中,加入 2 mL 氯仿及 2 mL 酸化甲醇(硫酸含量为 3%),108  $^\circ\text{C}$  消解 2 h,待混合液冷却后再加入 1 mL 纯水,剧烈振荡 10 min,吸出 1 mL 下层有机相转移至另一根试管中,60  $^\circ\text{C}$  水浴加热 24 h,加入 10 mL 浓硫酸混匀后沸水浴 10 min,冷却混匀后,采用紫外比色法测定 PHA 含量<sup>[18]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 低氨氮条件下 SBR 装置运行效果

阶段 I (0~60 d) 为 EBPR 污泥驯化阶段。结果(图 1)显示,驯化初期装置的除磷效率有短暂下降趋势,运行 6 d 以后除磷效率持续上升,出水磷酸根浓度持续下降,运行至 13 d 除磷效率上升至最大值,之后一直保持在 99.5% 以上,说明经过 13 d 的运行 SBR 装置已经实现稳定的 EBPR 功能。在稳定运行期间(13~60 d)厌氧末期磷酸根质量浓度稳定在  $39.35\sim 49.11 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,出水磷质量浓度低于  $0.1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。此阶段总氮去除率为 45.93%~74.21%,出水氨氮质量浓度在  $3.70\sim 5.94 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  内波动,由于进水中添加了硝化抑制剂,硝化反应速率极低,出水硝氮仅为  $0.50\sim 2.05 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,无亚硝氮的积累。

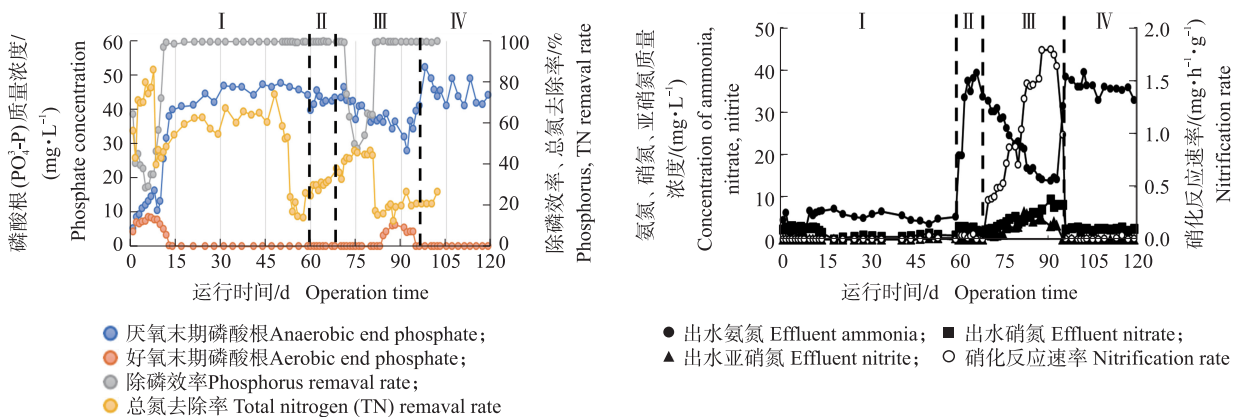


图 1 不同阶段反应器的运行效果

Fig. 1 Reactor performance during different operational phases

### 2.2 高氨氮条件下 SBR 装置运行效果

阶段 II (60~67 d) 将进水氨氮质量浓度提高至  $48 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,但在硝化抑制剂的作用下硝化反应速率仍低于  $0.05 \text{ mg}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$ ,好氧末期出水硝氮质量浓度仅为  $2.00\sim 2.97 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,无亚硝氮积累(图 1)。此阶段总氮去除率由 58.55% 迅速下降至 13.88%,出水氨氮质量浓度从  $24.04 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  逐渐上升至  $39.33 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,而装置的除磷效率仍稳定在 99.5% 以上,说明较高浓度的氨氮并不影响聚磷菌的除磷活性。

阶段 III (67~94 d),进水停止添加硝化抑制剂,硝化作用强度逐渐增强,总氮去除率转为上升趋势,在随后的 16 d 内硝化反应速率持续上升至  $1.47 \text{ mg}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$ ,总氮去除率由 13.88% 逐渐上升至 41.54%,好氧阶段出现硝化产物的积累,其中硝氮质量浓度从  $1.95 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  逐渐上升到  $5.28 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,亚硝氮质量浓度从  $0.004 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  逐渐上升至  $5.90 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,此阶段装置厌氧释磷量及除磷效率无明显变化(图 1)。运行 84 d 后总氮去除率大致稳定在 43.13%~46.64%,但出水亚硝氮和硝氮持续积累,硝化反应速率继续上升至  $1.45\sim 1.80 \text{ mg}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$ 。同时,系统的除磷效率出现大幅度下降现象,88 d 降至最低(47.56%),出水磷酸根质量浓度达到  $6.29 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,89~94 d 除磷效率略有回升,但除磷效率仅有 64.16% 不再继续回升,上述结

果说明硝化作用强度过高时将导致 EBPR 工艺的除磷效率下降。值得注意的是,硝化作用强度过高时还影响聚磷菌的厌氧磷释放功能,导致厌氧释磷量较阶段 II 低  $10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  左右。

阶段 IV (94~120 d), 进水中重新添加硝化抑制剂。由于硝化作用受到抑制, 24 h 后硝化反应速率由  $1.64 \text{ mg}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$  下降至  $0.99 \text{ mg}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$ , 好氧末期出水氨氮质量浓度大幅上升至  $31.40 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 硝氮质量浓度略微降至  $8.26 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  且不再积累亚硝氮(图 1)。同时, EBPR 工艺的除磷效率大幅回升至 99.5%。实际上 48 h 后系统的硝化反应速率已接近于 0, 硝氮质量浓度回落至  $2.11\sim 2.81 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 而出水氨氮质量浓度稳定在  $31.40\sim 39.54 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 出水磷酸根质量浓度始终保持在  $0.1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  以下, 说明 EBPR 工艺除磷功能已完全恢复正常。厌氧释磷量回升至  $39.59\sim 52.40 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 意味着硝化作用强度过高引起的厌氧磷释放功能下降恢复正常。

### 2.3 运行周期中特征参数的变化

图 2 为阶段 II 第 7 天装置运行周期的结果。该阶段硝化作用强度极弱, 好氧末期出水中无亚硝氮积累, 硝氮质量浓度低于  $1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。在厌氧阶段磷的释放伴随糖原的降解及 PHA 的合成, 好氧阶段 PHA 被分解利用, 用于聚磷菌的生长和磷的吸收, 同时胞内糖原重新合成, 符合聚磷菌典型的代谢特征。EBPR 污泥中磷的释放量在厌氧 60 min 达到最大值, 之后一直稳定在  $52.36 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  左右, 厌氧阶段释放的磷酸根在 180 min 被完全吸收, 出水磷酸根质量浓度低于  $0.1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。在厌氧阶段 EBPR 污泥中糖原含量在厌氧 60 min 降至最低, PHA 含量在厌氧 30 min 达到最高, 糖原降解量及 PHA 合成量分别为  $0.76、0.45 \text{ mmol}\cdot\text{g}^{-1}$ 。好氧阶段 PHA 含量在 150 min 降至最低, 糖原含量在 210 min 达到最大值, 糖原降解量及 PHA 合成量分别为  $1.04、0.55 \text{ mmol}\cdot\text{g}^{-1}$ 。

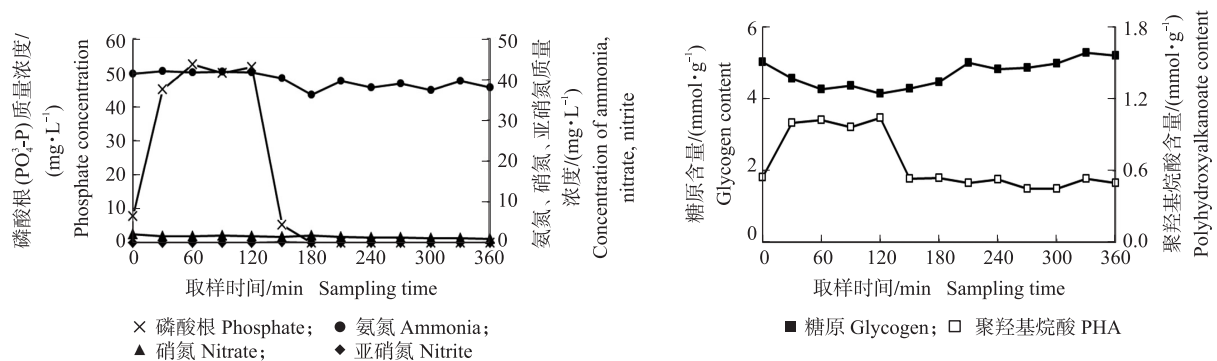


图 2 阶段 II 第 7 天装置运行中各参数的周期变化

Fig. 2 Cyclic profile of selected parameters on day 7 of phase II

图 3 为阶段 III 后期除磷功能下降时(第 24 天)装置运行周期的结果。该阶段磷酸根的释放曲线及吸收曲线与阶段 II 相似, 区别在于厌氧磷释放量 ( $35 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) 比阶段 II 略低, 且在 150 min 已经完成磷的好氧吸收; 从 240 min 开始, 出现了好氧磷释放现象, 导致混合液中磷酸根浓度逐渐上升, 除磷效率大幅度下降至 52.7%。好氧磷释放导致 EBPR 工艺除磷效率降低的现象尚未见文献报道。硝化作用强度增强至一定程度不仅影响聚磷菌的除磷功能, 还影响其胞内糖原和 PHA 的代谢, 具体表现为糖原降解量及合成量

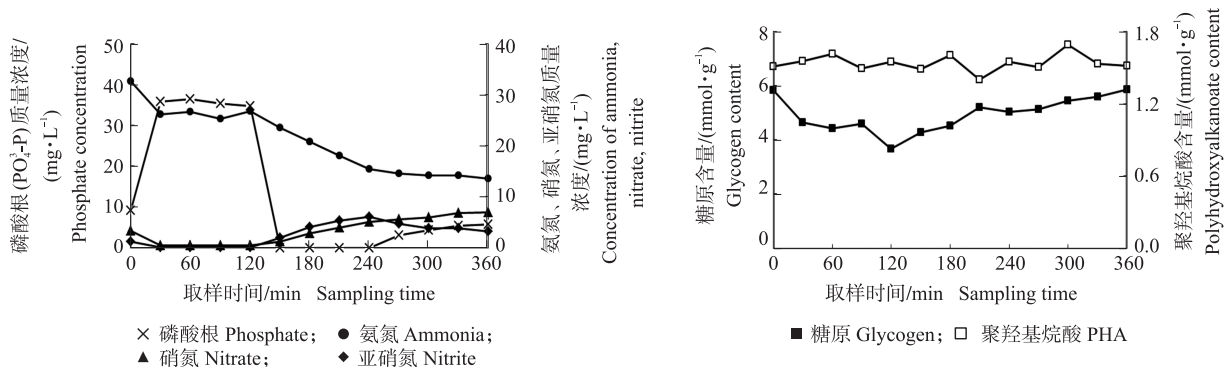


图 3 阶段 III 第 24 天装置运行中各参数的周期变化

Fig. 3 Cyclic profile of selected parameters on day 24 of phase III

分别为 2.15、2.18  $\text{mmol}\cdot\text{g}^{-1}$ ,较阶段 II 分别提高 1.83、1.09 倍,而 PHA 含量在运行过程中始终在 1.40~1.69  $\text{mmol}\cdot\text{g}^{-1}$  小幅波动,不再有明显的合成及降解现象。Randall 等<sup>[19]</sup>认为,进水氮浓度较高时厌氧阶段部分氨氮或氨基酸态氮可被用于蛋白质合成,同时不再进行 PHA 合成。阶段 III 厌氧前 30 min 内阶段氨氮浓度明显降低,符合这一假说。

图 4 为阶段 IV 第 22 天装置运行周期的结果。重新加入硝化抑制剂后污泥的硝化作用被完全抑制,厌氧磷释放量回升至 42.03  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,好氧磷释放现象消失,出水磷酸根质量浓度回落至 0.10  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  以下,除磷效率恢复至 99.5% 以上;同时,糖原降解量及合成量分别回落至 1.31、1.41  $\text{mmol}\cdot\text{g}^{-1}$ ,PHA 合成量及降解量分别上升到 0.62、0.68  $\text{mmol}\cdot\text{g}^{-1}$ ,说明聚磷菌胞内糖原和 PHA 的代谢已经恢复正常。由此可见,EBPR 系统硝化作用过强时可引起好氧磷释放现象,干扰聚磷菌糖原和 PHA 代谢,从而影响 EBPR 工艺的稳定性,而加入硝化抑制剂可以逆转上述现象。

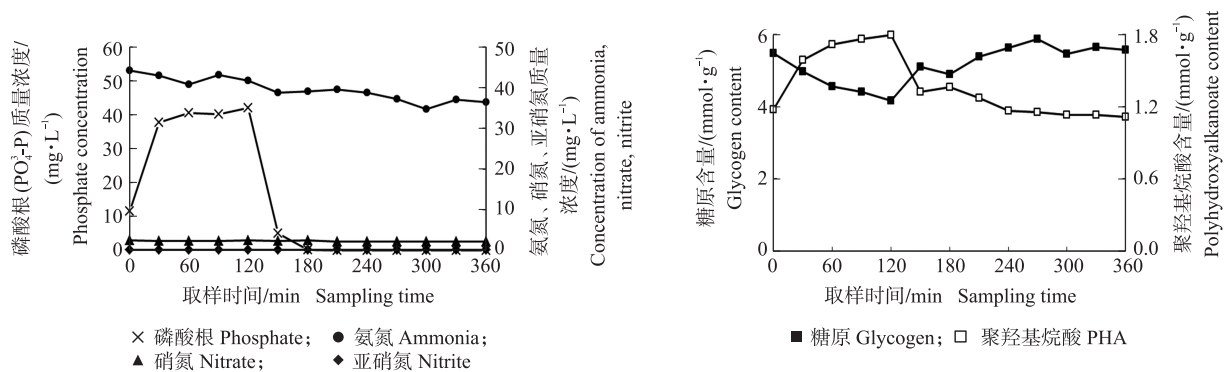


图 4 阶段 IV 第 22 天装置运行中各参数的周期变化

Fig. 4 Cyclic profile of selected parameters on day 22 of phase IV

### 3 结论与讨论

本文首次报道 EBPR 工艺运行中由强硝化作用引起的好氧磷释放现象,同时观察到糖原降解量与合成量显著上升、PHA 合成量与降解量显著下降等代谢异常现象。磷的释放通常发生在 EBPR 工艺的厌氧阶段,好氧磷释放现象尚未见文献报道,虽然释放的磷浓度远低于厌氧释放的磷浓度,但直接导致出水磷浓度超标排放,严重影响生物除磷系统运行效果。好氧磷释放现象同硝化作用强度有密切关系,只有硝化反应速率高于  $1.45 \text{ mg}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$  才会引起好氧磷释放,并导致除磷效率大幅下降,因此,EBPR 工艺除磷功能衰退甚至失败。

目前尚无现成的理论解释好氧磷释放现象,可能与聚磷菌 PHA 和糖原代谢异常有关,而何种物质引起聚磷菌代谢异常并导致好氧磷释放现象还不清楚。本研究装置运行期间混合液氨氮浓度始终低于  $48 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,折合 FA 浓度低于  $0.25 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  ( $20 \text{ }^\circ\text{C}$ , pH7)<sup>[20]</sup>,远低于 Zheng 等<sup>[12]</sup>提出的 FA 抑制浓度 ( $17.76 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ),因此 FA 的抑制作用无法解释好氧磷释放现象。在阶段 III 后期出现好氧磷释放现象和除磷功能下降现象时,混合液中积累硝氮浓度为  $5.28\sim 9.50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,而阶段 IV 进水重新添加硝化抑制剂后 24 h 内混合液中仍有  $8.26 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  的硝氮积累,此时除磷效率已恢复至 99.5%,说明阶段 III 后期好氧磷释放现象也不是由硝氮引起的。阶段 III 后期 (84~94 d) 混合液中积累的亚硝氮浓度最高为  $5.66 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,折合 FNA 浓度最高为  $0.0014 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ <sup>[20]</sup>,低于文献报道的 FNA 抑制浓度 ( $0.002\sim 0.02 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )<sup>[7-8]</sup>,难以达到抑制除磷效果的程度。本课题组试验中也发现,无论在厌氧阶段加入  $10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  亚硝氮或好氧阶段加入  $15 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  亚硝氮,均不影响 EBPR 系统的除磷效率<sup>[21]</sup>。综合来看,好氧磷释放现象虽然与硝化作用密切相关,却不能归因于氨氮、亚硝氮或硝氮的抑制作用,推测存在未知代谢产物引起好氧磷释放的现象。van Niel 等<sup>[22]</sup>曾报道  $0.3 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  的 NO 强烈抑制聚磷菌 Poly-P 厌氧水解、PHB 合成以及碳源利用等代谢活动,好氧磷释放现象与 NO 的关系尚需试验验证,相关机制有待进一步研究。

#### 参考文献 References:

- [1] Li D H, Li W G, Zhang K L, et al. Nutrient removal by full-scale Bi-Bio-Selector for nitrogen and phosphorus removal process treating urban domestic sewage at low C/N ratio and low temperature conditions[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2020, 140: 199-210.

- [2] Izadi P, Andalib M. Anaerobic zone functionality, design and configurations for a sustainable EBPR process: a critical review[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 870: 162018.
- [3] Yin J, Hunt K A, Xie T, et al. Pairing denitrifying phosphorus accumulating organisms with anaerobic ammonium oxidizing bacteria for simultaneous N and P removal[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 787: 147521.
- [4] Yun G, Lee H, Hong Y, et al. The difference of morphological characteristics and population structure in PAO and DPAO granular sludges[J]. *Journal of Environmental Science (China)*, 2019, 76: 388–402.
- [5] Saito T, Brdjanovic D, van Loosdrecht M C M. Effect of nitrite on phosphate uptake by phosphate accumulating organisms[J]. *Water Research*, 2004, 38(17): 3760–3768.
- [6] Coma M, Verawaty M, Pijuan M, et al. Enhancing aerobic granulation for biological nutrient removal from domestic wastewater[J]. *Bioresource Technology*, 2012, 103(1): 101–108.
- [7] Zhou Y, Pijuan M, Yuan Z G. Free nitrous acid inhibition on anoxic phosphorus uptake and denitrification by poly-phosphate accumulating organisms[J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 2007, 98(4): 903–912.
- [8] Pijuan M, Ye L, Yuan Z G. Free nitrous acid inhibition on the aerobic metabolism of poly-phosphate accumulating organisms[J]. *Water Research*, 2010, 44(20): 6063–6072.
- [9] 郭海燕, 郭祯, 柳志刚, 等. 不同曝气强度下 SBMBBR 和 SBR 脱氮除磷性能对比研究[J]. *环境科学学报*, 2012, 32(3): 568–576.  
Guo H Y, Guo Z, Liu Z G, et al. Characteristics of nitrogen and phosphorus removal in SBR and SBMBBR with different aeration rates[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, 32(3): 568–576 (in Chinese with English abstract).
- [10] Freitas F, Temudo M F, Carvalho G, et al. Robustness of sludge enriched with short SBR cycles for biological nutrient removal[J]. *Bioresource Technology*, 2009, 100(6): 1969–1976.
- [11] Yang G J, Xu Q X, Wang D B, et al. Free ammonia-based sludge treatment reduces sludge production in the wastewater treatment process[J]. *Chemosphere*, 2018, 205: 484–492.
- [12] Zheng X L, Sun P D, Lou J Q, et al. Inhibition of free ammonia to the granule-based enhanced biological phosphorus removal system and the recoverability[J]. *Bioresource Technology*, 2013, 148: 343–351.
- [13] Rubio-Rincón F J, Welles L, Lopez-Vazquez C M, et al. Effect of lactate on the microbial community and process performance of an EBPR system[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2019, 10: 125.
- [14] Nguyen P Y, Marques R, Wang H M, et al. The impact of pH on the anaerobic and aerobic metabolism of *Tetrasphaera*-enriched polyphosphate accumulating organisms[J]. *Water Research*, 2023, 19: 100177.
- [15] Smith K A, Caffrey J M. The effects of human activities and extreme meteorological events on sediment nitrogen dynamics in an urban estuary, Escambia Bay, Florida, USA[J]. *Hydrobiologia*, 2009, 627(1): 67–85.
- [16] Hem L J, Rusten B, Ødegaard H. Nitrification in a moving bed biofilm reactor[J]. *Water Research*, 1994, 28(6): 1425–1433.
- [17] 国家环境保护总局《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.  
Editorial Board for Methods for *Monitoring and Analysis of Water and Wastewater*, State Environmental Protection Administration. *Methods for Monitoring and Analysis of Water and Wastewater*[M]. 4th ed. Beijing: China Environmental Science Press, 2002 (in Chinese).
- [18] 李夕耀, 彭永臻, 王淑莹, 等. 聚磷菌胞内多聚物的分析检测方法[J]. *四川环境*, 2009, 28(2): 106–111.  
Li X Y, Peng Y Z, Wang S Y, et al. Analytical method for intracellular polymers of polyphosphate accumulating organisms[J]. *Sichuan Environment*, 2009, 28(2): 106–111 (in Chinese with English abstract).
- [19] Randall A A, Benefield L D, Hill W E. Induction of phosphorus removal in an enhanced biological phosphorus removal bacterial population[J]. *Water Research*, 1997, 31(11): 2869–2877.
- [20] Andreadakis D, Noutsopoulos C, Mamais D, et al. The inhibitory effect of free nitrous acid and free ammonia on the anoxic phosphorus uptake rate of polyphosphate-accumulating organisms[J]. *Energies*, 2022, 15(6): 2108.
- [21] 乐星星, 顾向阳. 亚硝酸盐对 EBPR 工艺除磷效率的影响[J]. *南京农业大学学报*, 2017, 40(2): 266–272. DOI: 10.7685/jnau.201604050.  
Le X X, Gu X Y. Effects of nitrite on phosphorus removal rate during EBPR process[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2017, 40(2): 266–272 (in Chinese with English abstract).
- [22] van Niel E W, Appeldoorn K J, Zehnder A J, et al. Inhibition of anaerobic phosphate release by nitric oxide in activated sludge[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1998, 64(8): 2925–2930.