



文章栏目: 水污染防治

DOI 10.12030/j.cjee.202008183

中图分类号 X703.1

文献标识码 A

王骞, 袁林江, 陈希, 等. 不同碳源下缺氧/好氧连续流系统生物除磷效果及其机理[J]. 环境工程学报, 2021, 15(3): 954-961.
WANG Qian, YUAN Linjiang, CHEN Xi, et al. Biological phosphorus removal and its mechanism in anoxic/aerobic continuous flow system with different carbon sources [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2021, 15(3): 954-961.

不同碳源下缺氧/好氧连续流系统生物除磷效果及其机理

王骞^{1,2,3}, 袁林江^{1,2,3,*}, 陈希⁴, 魏萍^{1,2,3}, 霍小爱³, 孟元^{1,2,3}

1. 西北水资源与环境生态教育部重点实验室, 西安 710055
2. 陕西省环境工程重点实验室, 西安 710055
3. 西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 西安 710055
4. 西安工程大学城市规划与市政工程学院, 西安 710048

第一作者: 王骞(1994—), 女, 硕士研究生。研究方向: 城市污水处理理论与技术。E-mail: 183375579@qq.com

*通信作者: 袁林江(1966—), 男, 博士, 教授。研究方向: 城市污水处理理论与技术。E-mail: yuanlinjiang@xauat.edu.cn

摘要 为了考察前期发现的以淀粉为唯一碳源、缺氧好氧生物脱氮系统对含多种有机物的废水中磷的脱除, 在以淀粉为唯一碳源、已能稳定生物除磷(除磷率达 72%)的缺氧好氧连续流生物脱氮系统中, 改变进水碳源组成及浓度, 测定了系统对磷去除的变化、分析了系统除磷与进水碳源的关系。结果表明, 在进水中淀粉浓度保持为 $400 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (以 COD 计, 下同)、添加葡萄糖或者蛋白胨与全脂奶粉混合物使得进水的 COD 分别提高至 $500 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $600 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 当投加葡萄糖后, 缺氧段污泥中糖原含量由 $282.9 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 增加至 $312.3 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$, 而液相中乳酸量减少, 最终系统除磷率降低; 投加蛋白胨与全脂奶粉混合物后, 缺氧段液相中乳酸量和污泥对磷的摄取量与改变前均相差不大; 在淀粉量不变、增加进水 COD 的条件下, 无论投加的是葡萄糖还是蛋白胨-奶粉混合物都不能够再提高系统的除磷能力。在保持进水总 COD 不变 ($400 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 时, 减少进水中淀粉量至 300 、 200 和 $100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 并相应增加葡萄糖或蛋白胨与全脂奶粉混合物 (1:1), 随着进水淀粉浓度的降低, 6 种碳源对应系统的除磷率均有所降低; 相对地, 当进水葡萄糖 $100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、淀粉为 $300 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 系统除磷效果最高, 摄磷量为 $2.9 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 吸磷速率为 $0.95 \text{ mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$ 。以上结果表明, 该系统是依靠缺氧段对淀粉碳源发酵产生的乳酸来进行超量摄磷, 但蛋白类碳源不能被发酵产乳酸, 因而无助于系统除磷; 在淀粉碳源充足 ($400 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ COD) 下, 增加葡萄糖碳源, 不利于除磷。而在淀粉不足时, 增加葡萄糖可补充碳源有利于除磷。

关键词 缺氧好氧连续流系统; 生物除磷; 产乳酸发酵菌; 糖原; 乳酸

对于污水生物除磷, WENTZEL 等^[1]于 1986 年提出了强化生物除磷 (enhanced biological phosphorus removal, EBPR) 模型, 他认为污水中的挥发性脂肪酸 (volatile fatty acids, VFAs) 在 EBPR 机制中起关键作用。研究中多以富含 VFAs 的废水来建立 EBPR^[2]。通过研究, 人们获得了一些共识, 即聚磷菌不能摄取水中大分子有机物来进行聚磷。若进水中只含大分子有机物, 就不利于生物除磷。虽然生活污水所含的污染物主要也是大分子有机化合物如蛋白质、碳水化合物和油脂^[3], 但在生活污水生物处理中, 由于污水中存在发酵性细菌, 可将部分大分子有机化合物转化为 VFAs^[4], 然后聚

收稿日期: 2020-08-19; 录用日期: 2020-09-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51078304)

磷菌才利用这些 VFAs 去除污水中的磷。

1987年, TRACY等^[5]在以葡萄糖为碳源的废水处理系统中也实现了EBPR, 该研究发现系统内聚磷菌在胞内合成糖原而不是聚羟基脂肪酸酯。此后 SATOH等^[6]、ZENGIN等^[7]和 REY-MARTÍNEZ等^[8]以葡萄糖、天冬氨酸和谷氨酸等为废水碳源, 也均实现了EBPR。这些在不同碳源下的生物除磷与传统的EBPR的模型有一定差别, 但相应的生化机制尚未解明。张鑫等^[9]和陆雨林^[10]以淀粉为唯一碳源, 在缺氧/好氧序批式活性污泥法 (sequencing batch reactor, SBR) 与连续流系统中诱导出生物除磷, 在没有厌氧释磷前提下实现了磷的去除^[11], 他们认为这是一种新的生物除磷机制^[12]。

利用该缺氧好氧工艺, 可以同时去除氮和磷, 可缩短污水脱氮除磷流程、降低处理投资和运行费用。但生活污水中有机物并非单一的淀粉, 而是由碳水化合物(40%左右)、蛋白质(50%左右)和油脂(10%左右)构成^[3]。若进水为生活污水, 对于该缺氧好氧系统的脱氮除磷情况目前尚未见相关的研究报道。本研究将与生活污水成分相近的碳源如葡萄糖、蛋白胨全脂奶粉作为补充碳源, 通过设置不同的混合碳源, 研究以淀粉为唯一碳源的除磷系统是否能维系以及混合碳源下生物除磷情况, 旨在进一步探索该生物除磷的机理、为在生活污水生物处理中建立新型缺氧好氧生物除磷提供参考。

1 材料与方法

1.1 实验装置

驯化污泥采用缺氧/好氧(AO)连续流系统, 实验装置见图1。反应池的体积为9 L, 缺氧池和好氧池体积分别为2.5 L和5.5 L, 沉淀池体积为2.4 L, 反应器的温度为室温, 进水流量为24 L·d⁻¹, 水力停留时间为9 h。缺氧池进行机械搅拌, 好氧池溶解氧(dissolved oxygen, DO)控制在0.5~1.0 mg·L⁻¹。每天从好氧池末端排出污泥来控制污泥停留时间为20 d左右, 维持污泥浓度2 800~3 400 mg·L⁻¹。进水中氮仅为硝酸盐态氮, 在缺氧与好氧段之间不设内回流。二沉池污泥回流缺氧池, 回流比为100%。

1.2 驯化污泥阶段进水水质

本实验接种污泥取自西安某污水处理厂, 驯化污泥进水采用人工废水, 以可溶性淀粉为碳源(COD约为400 mg·L⁻¹), 磷酸二氢钾(PO₄³⁻-P浓度约为8 mg·L⁻¹)和硝酸钾(NO₃⁻-N浓度约为20 mg·L⁻¹), 再加入硫酸镁0.1 g·L⁻¹、硫化钙0.01 g·L⁻¹以维持微生物良好生长。

1.3 分析方法

COD、NO₃⁻-N、PO₄³⁻-P等常规指标的测定采用文献中的方法^[13]。乳酸的测定采用对羟基联苯法^[14], 糖原采用蒽酮比色法^[15], PHB预处理后采用气相色谱法(Agilent 6890N, FID检测器, HP-5型色谱柱)测定, 进样方式为自动进样。色谱条件为分流比2:1, 进样口温度和检测器温度分别为250℃和300℃; 采用柱箱升温, 起始炉温为50℃, 保留1 min, 以10℃·min⁻¹升到120℃, 再120℃·min⁻¹升到270℃, 保留6 min, 进样量为2 μL^[16]。污泥中聚磷颗粒染色方法采用4',6-二咪基-2-苯基吲哚(4',6-diamidino-2-phenylindole dihydrochloride, DAPI)溶液避光染色^[17]。

1.4 实验方案

从反应器^[18]好氧段取1 L活性污泥, 在转速为4 000 r·min⁻¹下离心5 min后, 弃去上清液后,

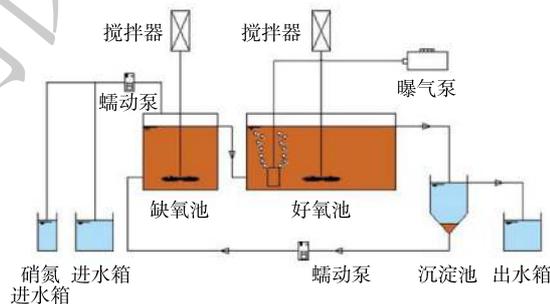


图1 缺氧/好氧连续流装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the anoxic/aerobic continuous flow system

加蒸馏水重复操作上述步骤3次,再用蒸馏水将沉淀污泥定容至500 mL,并加入500 mL人工模拟废水,配置总COD为 $400 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的复合碳源组成废水(表1),探究复合碳源中淀粉浓度对除磷的影响。固定淀粉浓度为 $400 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,配制总COD分别为 $500 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $600 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的复合碳源废水(表2),探究葡萄糖碳源以及蛋白类碳源对除磷的影响。批式实验总时长为9 h,缺氧段为2.5 h,好氧段为6.5 h,从添加人工模拟废水开始计时并取第1个样,而后缺氧阶段隔30 min取样,好氧阶段每隔60 min取样,测定 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 、乳酸和糖原的含量。连续流缺氧段除磷物料平衡按式(1)进行计算。

$$R = \frac{P_{A\text{-inf}} - P_{A\text{-eff}}}{V_{\text{SS,A}}T_A} \quad (1)$$

式中: R 为磷酸盐去除率; $P_{A\text{-inf}}$ 和 $P_{A\text{-eff}}$ 分别为缺氧池进出水 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; $V_{\text{SS,A}}$ 为缺氧池VSS浓度, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; T_A 为缺氧池反应时间,h。

2 结果与讨论

2.1 AO连续流系统运行性能

图2为连续流系统对废水中污染物的去除结果。由图2可见,反应器经过40 d的驯化后,除磷效果趋于稳定,出水 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 为 $2.6 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,去除率达到72%左右,缺氧段除磷量为 $3.5\sim 4 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,去除率达到50%;出水COD小于 $50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,去除率达95.6%;出水的 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 为 $0.3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,去除率达98.6%,全程没有释放磷的现象产生。JIN等^[9]的研究也表明,磷的去除可以在厌氧不释放磷的情况下实现。系统在无厌氧条件下,在缺氧段与好氧段均可实现磷去除,故其为新型生物除磷。

为研究该新型缺氧好氧除磷特征,取系统污泥进行批式实验,结果见图3。由图3可知,在缺氧段,糖原含量由 $196.78 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ (以VSS计)增至 $280.44 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$,缺氧段乳酸含量达到 $15.6 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,水中的磷酸盐浓度随之降低,缺

表1 总COD大于 $400 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的废水配方

Table 1 Wastewater composition with total COD higher than $400 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

淀粉	葡萄糖	蛋白胨全脂奶粉	COD	$\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$	$\text{NO}_3^- \text{-N}$
400	—	100	500	8	20
400	—	200	600	8	20
400	100	—	500	8	20
400	200	—	600	8	20

注:蛋白胨与全脂奶粉的配比为1:1。

表2 总COD为 $400 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的废水配方

Table 2 Wastewater composition with total COD of $400 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

淀粉	葡萄糖	蛋白胨全脂奶粉	COD	$\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$	$\text{NO}_3^- \text{-N}$
100	—	300	400	8	20
200	—	200	400	8	20
300	—	100	400	8	20
100	300	—	400	8	20
200	200	—	400	8	20
300	100	—	400	8	20

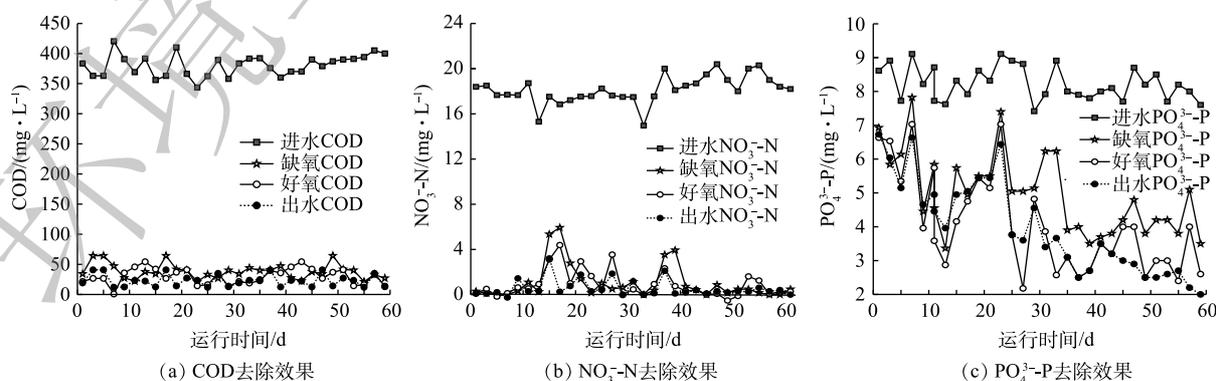


图2 连续流系统污染物去除效果

Fig. 2 Removal of contaminants in the continuous flow system

氧段除磷为 $3.3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 去除率在 40% 左右。这说明在缺氧段, 除磷的能量为产酸菌在糖酵解产乳酸过程中生成的 ATP^[12]。

在好氧段, 糖原含量由 $280.44 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 降低到 $208.26 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$, 好氧段除磷为 $3.2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。在传统生物除磷中, 聚磷菌 (polyphosphate accumulating bacteria, PAOs) 将 VFAs 以 PHA 的形式储存, 并在厌氧段充分释磷。在好氧阶段, PHA 被用作生长和补充体内糖原和多聚磷库的碳源和能量来源^[20]。该系统 (图 3) 中未检测到聚 β 羟基丁酸 (polyhydroxybutyric acid, PHB) 和 VFAs, 碳源在缺氧段以糖原的形式累积, 这与王琰^[21] 的研究结果一致。这说明在好氧阶段中聚磷菌吸磷的能量主要来自糖原的氧化。

由于批式实验为一次性进水, 在缺氧后期缺少硝酸盐, 进入了厌氧环境, PAOs 出现释磷现象, 这与新型缺氧好氧除磷连续流系统存在差异。为解释批式实验与连续流系统存在的矛盾, 对 AO 连续流污泥聚磷颗粒进行了 DAPI 染色, 镜检照片如图 4 所示。可见细菌的细胞呈蓝色, 聚磷颗粒呈亮黄色颗粒。连续流缺氧段 (图 4(a)) 和好氧段 (图 4(b)) 聚磷颗粒分布以及数量差异较小, 好氧末聚磷颗粒较缺氧末略微增多, 好氧末污泥含磷率较缺氧末轻微增长, 这说明系统除磷主要集中在缺氧阶段, 同时系统中微生物表现为单一的吸磷过程。

在新型缺氧好氧除磷系统中, 缺氧阶段存在聚磷和释磷 2 种现象, 系统中新型的缺氧除磷菌为优势菌种, 因此, 缺氧吸磷大于释磷。在好氧段, PAOs 利用胞内的糖原氧化可以进一步摄取磷。故而 AO 连续流的缺氧阶段总体上是净摄取水中磷。这一结果与霍小爱等^[11] 和 LUO 等^[12] 报道的在 AO-SBR 中除磷过程以及传统厌氧好氧系统中的生物除磷过程均不同。

2.2 进水变为复合碳源、COD 大于 $400 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 对污泥除磷的影响

为探究复合碳源 (葡萄糖与蛋白类碳源) 对系统除磷菌活性的影响, 保持淀粉含量 (以 COD 计) 约为 $400 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 加入蛋白胨全脂奶粉、葡萄糖配制总 COD 为 $500 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $600 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的复合碳源废水进行批式实验, 系统的除磷效果如图 5 所示。由图 5 可见, 加入葡萄糖配制总 COD 为 $500 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $600 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的复合碳源的废水后, 缺氧段除磷分别为 $2.2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.8 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 污泥的吸磷速率分别为 $0.71 \text{ mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$ 和 $0.27 \text{ mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$; 好氧段除磷分别为 $2.4 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $1.8 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。加入蛋白胨全脂奶粉配制总

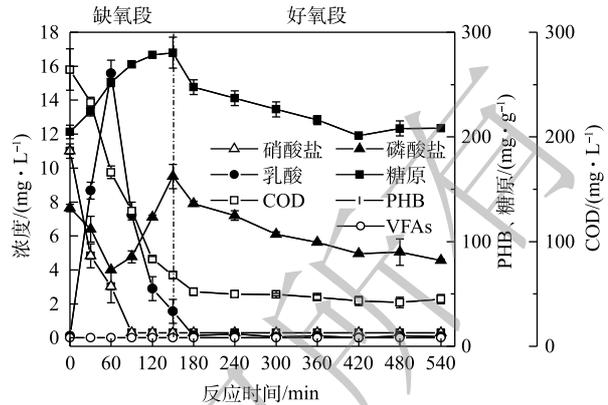
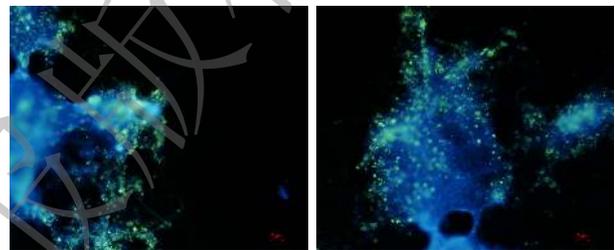


图 3 A/O 系统污泥的特性
Fig. 3 Sludge characteristics in anoxic/aerobic continuous flow system



(a) 污泥缺氧末期 (b) 污泥好氧末期

图 4 聚磷颗粒 DAPI 染色图

Fig. 4 DAPI staining of polyphosphate particles in sludge

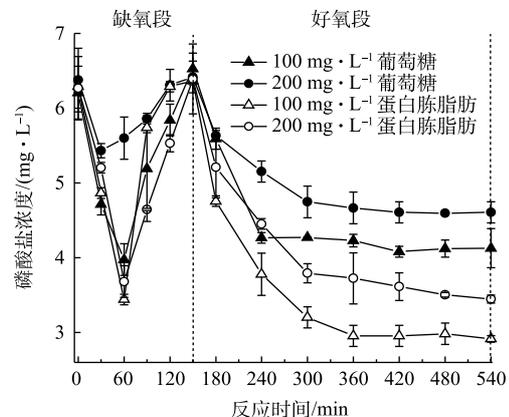


图 5 不同复合碳源组成条件下磷酸盐含量变化
Fig. 5 Changes in phosphate content under the conditions of different composition of combined carbon sources

COD 为 $500 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $600 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的复合碳源废水后, 系统缺氧段除磷分别为 $2.9 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $2.6 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 污泥吸磷速率分别为 $0.93 \text{ mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$ 和 $0.89 \text{ mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$, 好氧段对磷的去除分别可达 $3.4 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $3.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

缺氧段系统液相中乳酸含量以及污泥中糖原量变化如图 6(a) 和图 6(b) 所示。由图 6 可见, 供给加入葡萄糖总 COD 为 $500 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $600 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的复合碳源废水后, 缺氧段水中乳酸含量分别为 $12.2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $8.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 污泥中糖原含量分别为 $282.9 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $312.3 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$; 好氧段糖原消耗量分别为 $43.0 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $37.1 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 。供给加入蛋白胨全脂奶粉总 COD 为 $500 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $600 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的复合碳源废水后, 缺氧段水中乳酸量分别为 $14.1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $4.4 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 好氧段糖原消耗量分别为 $67.34 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $52.57 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 。

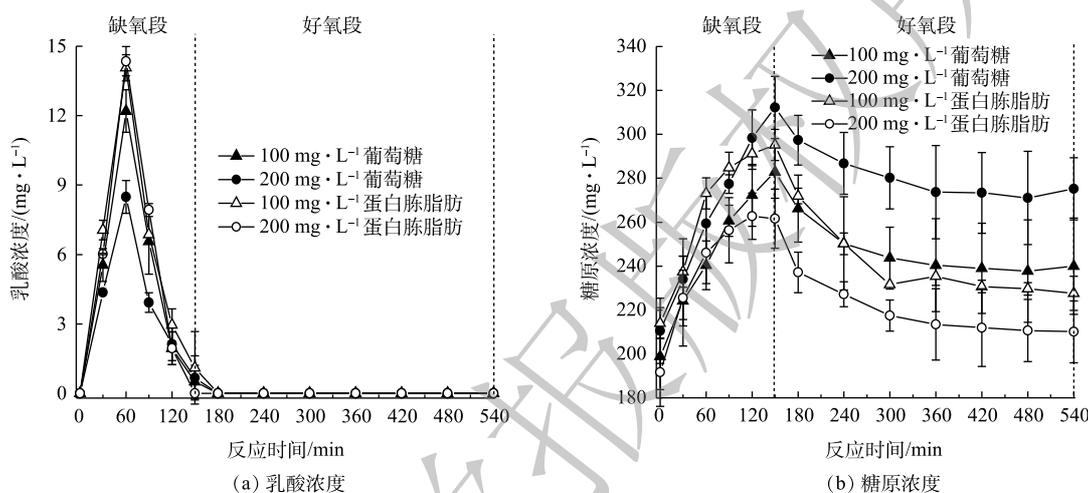


图 6 不同复合碳源组成条件下乳酸、糖原含量变化

Fig. 6 Changes of lactic acid content and glycogen content under the conditions of different composition of combined carbon sources

上述结果说明, 当进水中充足的淀粉时, 再投加葡萄糖, 过量碳源就会抑制新型缺氧好氧除磷^[22], 磷的去除量会有所下降。在不同复合碳源组成下, 缺氧阶段糖原大量合成, 而好氧阶段糖原消耗却减少, 说明糖原没有被聚磷菌储存, 新型缺氧好氧除磷系统中可能存在一定量的聚糖菌 (glycogen accumulating organisms, GAO)^[23], 其能够在缺氧条件下利用碳源而不释放磷酸盐, 糖原在没有能量消耗的情况下合成, 聚糖菌在底物竞争中取得优势, 导致产酸量减少, 从而使得除磷效果变差。因此, 在碳源充足时, 投加葡萄糖会刺激聚糖菌代谢, 抑制新型缺氧好氧除磷除磷。

对于传统生物除磷, 一般水中有机物越充足, 则除磷的效果会越好^[24]。但在本研究中, 当水中淀粉含量充足、再多加入些蛋白胨脂肪后, 除磷效果也并未提高, 且缺氧段也未见有更多的乳酸生成 (图 6(a)), 这从侧面说明蛋白类碳源对依靠淀粉发酵产乳酸来进行的生物除磷是不起作用的。

2.3 进水总 COD 为 $400 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 下复合碳源对污泥除磷的影响

保持总 COD 为 $400 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 不变, 将进水中的淀粉量减少至 300、200、 $100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 并相应增加葡萄糖或蛋白胨与全脂奶粉混合物进行批式实验, 系统除磷效果如图 7 所示。由图 7 可见, 当葡萄糖分别为 100、200、 $300 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 系统缺氧段除磷分别为 2.9、2.4 和 $0.6 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 好氧段除磷分别为 3.3、2.1、 $1.9 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。当含蛋白胨全脂奶粉浓度为 $100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 下, 缺氧段除磷为 $2.2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 好氧段除磷为 $2.9 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 当含蛋白胨全脂奶粉浓度为 $200 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $300 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 下, 系统不具备新型缺氧好氧除磷特征, 为传统厌氧释磷好氧除磷特征。

在不同复合碳源下的缺氧段乳酸产生量和污泥中糖原含量变化结果见图 8(a) 和图 8(b)。当进

水葡萄糖含量为 100、200、300 mg·L⁻¹ 时，缺氧段乳酸的量分别为 13.8、11.1、6.7 mg·L⁻¹，好氧段糖原的消耗量分别为 57.9、49.2、40.2 mg·g⁻¹。当进水蛋白胨全脂奶粉浓度为 100 mg·L⁻¹ 下时，缺氧段乳酸量为 9.4 mg·L⁻¹，好氧段糖原的消耗量为 51.64 mg·g⁻¹；当进水含蛋白胨全脂奶粉量为 200 mg·L⁻¹ 和 300 mg·L⁻¹ 下，缺氧段乳酸量分别为 3.9 mg·L⁻¹ 和 2.1 mg·L⁻¹，好氧段糖原不断累积，这与传统 PAOs 的糖原代谢方式相同。

结合图 7 和图 8 可看出，进水含蛋白胨全脂奶粉与含淀粉混合碳源下的系统除磷效果较差。其原因可能是，尽管系统中新型缺氧好氧除磷污泥具有专性发酵功能^[25]，但其不能有效利用蛋白胨和全脂奶粉进行发酵产乳酸，乳酸量减少，则相关细菌产生可用于摄磷的 ATP 减少，进而影响到除磷效果。

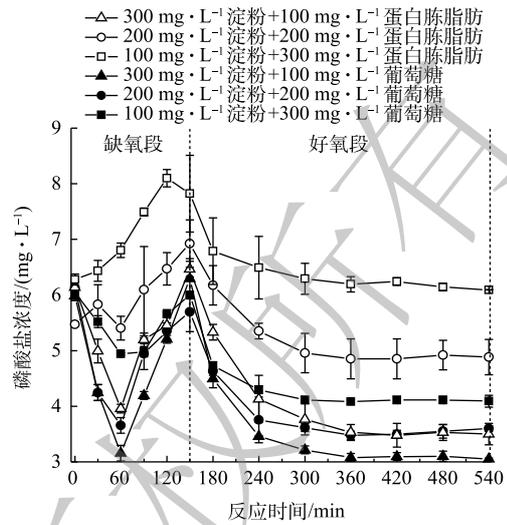


图 7 不同复合碳源组成条件下磷酸盐含量变化
Fig. 7 Phosphate content under the conditions of different composition of combined carbon sources

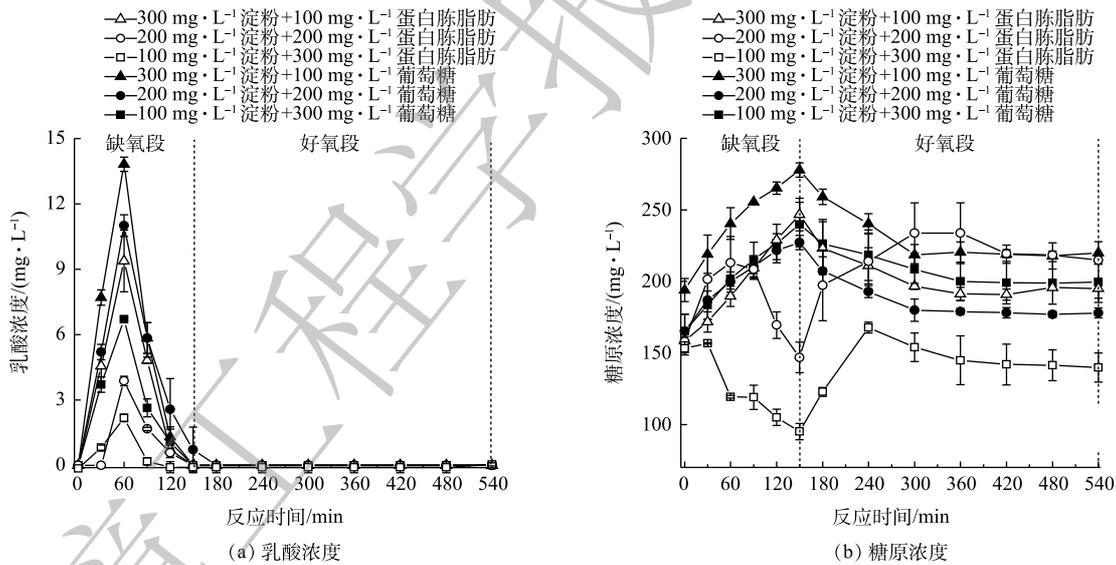


图 8 不同复合碳源组成条件下乳酸和糖原含量的变化

Fig. 8 Changes of lactic acid content and glycogen content under the conditions of different composition of combined carbon sources

由此可见，该新型缺氧好氧除磷系统中淀粉浓度是影响除磷效果的关键。降低淀粉浓度，会导致缺氧阶段乳酸浓度减少，从而影响除磷效果。当葡萄糖浓度为 100 mg·L⁻¹ 淀粉为 300 mg·L⁻¹ 时，缺氧段乳酸产生量最多，糖原在好氧段消耗量也最大，除磷效果最优。因此，在以淀粉为唯一碳源的系统中，葡萄糖可在淀粉不充足时补充碳源用于除磷。

3 结论

1) 在以淀粉为碳源下，AO 连续流生物脱氮系统缺氧段除磷为产酸菌通过淀粉发酵产乳酸提供

能量进行超量摄磷, 在好氧段系统中存在的传统 PAOs 通过糖原提供能量进行摄磷, 在这 2 类除磷菌作用下, 实现了好氧缺氧条件下的废水中磷的去除。

2) 进水中可溶性淀粉的量减少, 会导致乳酸的产量减少和除磷效果变差。

3) 缺氧好氧除磷污泥不能利用蛋白类碳源进行除磷代谢, 系统内发酵产酸菌能够代谢葡萄糖并产乳酸用于除磷, 一定的葡萄糖可以弥补淀粉不足对除磷的影响, 但淀粉充足时, 葡萄糖或者蛋白类碳源的存在对除磷会不利。故该生物除磷还是很难在含多种碳源的污水中实现高效除磷。

参 考 文 献

- [1] WENTZEL M C, LÖTTER L H, LOEWENTHAL R E, et al. Metabolic behaviour of *Acinetobacter* spp. in enhanced biological phosphorus removal: A biochemical model[J]. *Water S A*, 2000, 12(4): 209-224.
- [2] 彭党聪, 张晓霞, 樊香妮, 等. 温度对 SBR 强化生物除磷工艺除磷性能的影响[J]. *环境工程学报*, 2016, 10(11): 6106-6110.
- [3] 谢婷, 莫创荣, 李小明, 等. 不同葡萄糖和乙酸比对强化生物除磷系统的影响[J]. *水处理技术*, 2014, 40(11): 37-42.
- [4] 余谱颖, 邓风, 徐华, 等. 水解酸化+水力增氧床+人工湿地组合工艺处理生活污水的试验研究[J]. *现代化工*, 2018, 38(1): 118-120.
- [5] TRACY K D, FLAMMINO A. Biochemistry and energetics of biological phosphorus removal[C]. *Proceedings of an IAWPRC Specialized Conference Held in Rome, Italy*, 1987: 15-26.
- [6] SATOH H, MINO T, MATSUO T. Deterioration of enhanced biological phosphorus removal by the domination of microorganisms without polyphosphate accumulation[J]. *Water Science and Technology*, 1994, 30(6): 203-211.
- [7] ZENGIN G E, ARTAN N, ORHON D, et al. Effect of aspartate and glutamate on the fate of enhanced biological phosphorus removal process and microbial community structure[J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102(2): 894-903.
- [8] REY-MARTÍNEZ N, BADIA-FABREGAT M, GUIASOLA A, et al. Glutamate as sole carbon source for enhanced biological phosphorus removal[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 657: 1398-1408.
- [9] 张鑫, 袁林江, 陈光秀, 等. SBR脱氮系统污泥对磷的去除研究[J]. *环境工程学报*, 2010, 4(5): 1003-1007.
- [10] 陆林雨. 缺氧/好氧活性污泥生物除磷的机理研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2010.
- [11] 霍小爱, 袁林江, 罗大成, 等. 亚硝酸盐对乳酸发酵缺氧-好氧SBR脱氮系统除磷的影响[J]. *环境科学学报*, 2019, 39(12): 3966-3972.
- [12] LUO D, YUAN L, LIU L, et al. Biological phosphorus removal in anoxic-aerobic sequencing batch reactor with starch as sole carbon source[J]. *Water Science and Technology*, 2017, 75(1): 28-38.
- [13] 国家环境保护总局. 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.
- [14] 张丽, 郭莹姿, 李志朋. 功能性微生物制剂中乳酸含量的测定方法[J]. *广东饲料*, 2015, 24(7): 37-38.
- [15] 杨翠, 彭党聪, 张新艳, 等. 有机物对蒽酮-硫酸法测定葡萄糖含量的影响[J]. *环境化学*, 2014, 33(11): 1994-1998.
- [16] 由阳, 彭永臻, 王淑莹, 等. 强化生物除磷系统胞内聚合物测定方法优化[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2010, 42(2): 207-211.
- [17] 杨平平, 甄玉国, 郑艳秋, 等. 优化对羟基联苯法定量测定瘤胃液中乳酸含量[J]. *畜牧与饲料科学*, 2013, 34(2): 1-2.
- [18] 薛欢婷, 袁林江, 刘小博, 等. 连续流系统中好氧段及沉淀段对污泥及其缺氧段脱氮能力的影响[J]. *环境科学*, 2019, 40(8): 3675-3682.
- [19] JIN Y, DING D, FENG C, et al. Performance of sequencing batch biofilm reactors with different control systems in treating synthetic municipal wastewater[J]. *Bioresource Technology*, 2012, 104: 12-18.
- [20] TORRESI E, TANG K, DENG J, et al. Removal of micropollutants during biological phosphorus removal: Impact of redox conditions in MBBR[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 663: 496-506.

- [21] 王琰. 高效除磷酵母菌株的筛选及其磷代谢基本特性研究[D]. 济南: 济南大学, 2019.
- [22] 韦佳敏. ABR-MBR组合工艺反硝化除磷效能与优化研究[D]. 苏州: 苏州科技大学, 2019.
- [23] 罗大成. AO脱氮系统生物除磷及机理研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2018.
- [24] 刘胜军, 杨学, 石凤, 等. 多段多级AO除磷脱氮工艺分析与研究[J]. 给水排水, 2012, 48(S1): 191-194.
- [25] ALBERTSEN M, HUGENHOLTZ P, SKARSHEWSKI A, et al. Genome sequences of rare, uncultured bacteria obtained by differential coverage binning of multiple metagenomes[J]. Nature Biotechnology, 2013, 31(6): 533-538.

(责任编辑: 曲娜)

Biological phosphorus removal and its mechanism in anoxic/aerobic continuous flow system with different carbon sources

WANG Qian^{1,2,3}, YUAN Linjiang^{1,2,3,*}, CHEN Xi⁴, WEI Ping^{1,2,3}, HUO Xiaohai³, MENG Yuan^{1,2,3}

1. Key Laboratory of Northwest Water Resource, Environment and Ecology, Ministry of Education, Xi'an 710055, China

2. Shaanxi Key Laboratory of Environmental Engineering, Xi'an 710055, China

3. School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China

4. School of Urban Planning and Municipal Engineering, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China

*Corresponding author, E-mail: yuanlinjiang@xauat.edu.cn

Abstract To investigate the phosphate removal from wastewater containing many types of organics by anoxic/aerobic biological denitrification system with starch alone as carbon source, which was observed before, the effects of the constitution and concentration of carbon source on the performance of the continuous flow system, which achieved good phosphorus removal (efficiency of 72%) with starch alone as carbon source, were studied, as well as the change of phosphorus removal and the relationship between the carbon source and phosphorus removal. The results showed that when the concentration of starch in the influent was at $400 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, and the COD value of the wastewater increased to $500 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ and $600 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ with addition of glucose or a mixture of peptone and milk powder, respectively, the glycogen content in the sludge under anoxic period increased from $282.9 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ to $312.3 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ with addition of glucose, while the amount of lactic acid in the bulk liquid decreased, at last the decrease in phosphorus removal rate occurred. When different mixtures of peptone and milk powder (1:1) were added, the amount of lactic acid in the bulk liquid of anoxic period and the phosphorus removal by the sludge were almost the same as before. Under the conditions of constant starch content and increased influent COD value, the phosphate removal of the system did not increase with addition of glucose or a mixture of peptone and milk powder. Under the conditions of maintaining the total influent COD of $400 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, reducing the amount of starch in the influent to 300, 200 and $100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, respectively, and increasing glucose or a mixture of peptone and milk powder (1:1) at the same time, the reduction of starch in influent resulted in the decrease of phosphorus removal efficiency of the system with 6 types of carbon sources. When the glucose concentration was $100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ and starch $300 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, phosphorus removal efficiency of the system was the highest, phosphorus intake amount and rate were $2.9 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ and $0.95 \text{ mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$, respectively. It implies that the system relied on lactic acid produced by starch fermentation at anoxic stage to achieve excessive phosphorus uptake, while the sludge in the system did not use protein substances to ferment and produce lactic acid, which did not help to remove phosphorus. When the starch was sufficient ($\text{COD } 400 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), glucose addition was not conducive to phosphorus removal. Glucose could be used as a supplementary carbon source when the starch was insufficient.

Keywords anoxic-aerobic continuous flow system; biological phosphorus removal; lactic acid-producing fermentation bacteria; glycogen; lactic acid