



不同 C/P 下低耗 EBPR 的脱氮除磷及侧流磷回收性能

邓颖¹, 俞小军^{1,2,3}, 蔡雨麒¹, 马娟^{1,2,3}

(1. 兰州交通大学环境与市政工程学院, 甘肃兰州 730070;

2. 甘肃省污水处理行业技术中心, 甘肃兰州 730070;

3. 甘肃省黄河水环境重点实验室, 甘肃兰州 730070)

[摘要] 采用厌氧交替好氧(A/O)模式下运行的SBR反应器,考察低耗(DO=1.0 mg/L)条件下不同进水 $m(\text{COD})/m(\text{P})$ (记作C/P)对主流强化生物除磷(Enhanced biological phosphorus removal, EBPR)系统脱氮除磷效果及其相应的厌氧磷回收性能的影响。结果表明,当进水P浓度保持不变,C/P逐步降低(C/P=400/8、350/8、300/8)时,系统厌氧末期释磷量随进水碳源浓度的降低而逐步减小,相应的侧流磷回收率从61.5%降至45.3%,而磷去除率和出水磷达标率分别从96.7%和93.3%降至87.7%和30.0%,说明侧流系统的磷回收率和主流系统的除磷效率均受进水碳源浓度的影响,期间, NH_4^+-N 去除性能一直良好,TN去除率变化不大。继续降低C/P至400/12,在 NH_4^+-N 去除性能不受影响而TN去除率提升3.8%的同时,主流EBPR系统的除磷率和出水磷达标率分别上升至97.4%和69.2%,相应的厌氧磷回收率达62.6%,说明影响主流系统除磷性能及侧流系统磷回收性能的主要因素是进水碳源浓度和磷源浓度,而与C/P关系不大。研究还发现,前3个实验阶段的污泥胞内多聚磷酸盐(Polyphosphate, poly-P)含量都有缓慢降低的趋势,最后1阶段呈上升趋势,这与污泥吸磷性能的趋势相一致,在整个实验阶段污泥沉降性能则始终变化不大。

[关键词] 侧流磷回收;厌氧上清液;低耗;强化生物除磷

[中图分类号] X703.1 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1005-829X(2022)07-0154-07

Performance of nitrogen and phosphorus removal and sidestream phosphorus recovery by low-consumption EBPR under different C/P ratio

DENG Ying¹, YU Xiaojun^{1,2,3}, CAI Yuqi¹, MA Juan^{1,2,3}

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;

2. Gansu Wastewater Treatment Industry Technology Center, Lanzhou 730070, China;

3. Key Laboratory of Yellow River Environment in Gansu Province, Lanzhou 730070, China)

Abstract: A sequencing batch reactor(SBR) was operated with anaerobic alternating oxic(A/O) condition to investigate the effect of different $m(\text{COD})/m(\text{P})$ (C/P ratio) on nitrogen and phosphorus removal performance of a mainstream EBPR (Enhanced biological phosphorus removal) under low consumption(DO=1.0 mg/L) and anaerobic side-stream phosphorus recovery efficiency. The results showed that the amount of phosphorus released at the end of the anaerobic phase gradually decreased due to the reduction of the influent carbon source when influent P concentration kept constant and C/P ratio gradually decreased(C/P=400/8, 350/8, 300/8). The corresponding anaerobic side-stream phosphorus recovery rate decreased from 61.5% to 45.3%. Besides, the phosphorus removal rate and effluent phosphorus reaching standard rate dropped from 96.7% and 93.3% to 87.7% and 30.0%, respectively. It suggested that both side-stream phosphorus recovery performance and mainstream phosphorus removal rate were influenced by the concentration of carbon source. While NH_4^+-N removal performance kept well and TN removal rate had little change during this period. As C/P decreased to 400/12, mainstream EBPR phosphorus removal rate and effluent phosphorus reaching standard rate increased to 97.4% and 69.2%, respectively. At the same time, TN removal rate increased by 3.8% but NH_4^+-N removal performance not be affected. The corresponding anaerobic phosphorus recovery rate reached 62.6%. It showed that the main factors that

[基金项目] 国家自然科学基金项目(52060013);兰州市人才创新创业项目(2019-RC-109);兰州交通大学天佑创新团队(TY202005)

affected the phosphorus removal performance of the mainstream system and the phosphorus recovery performance of the side-stream system were the influent carbon source concentration and the phosphorus source concentration, but had little relationship with the C/P ratio. It was also observed that poly-P (polyphosphate) content in cells during the first three stages displayed a slow decreasing trend and the last stage showed an upward trend, which was consistent with the phosphorus uptake performance of the sludge. The sludge settling performance kept stable in the whole test stage.

Key words: side-stream phosphorus recovery; anaerobic supernatant; low-consumption; EBPR

磷(P)以化合态的形式大量存在于动植物体内,其占人体1%的质量。此外,DNA和RNA中的主要化学成分也是磷,质量分数为9%,可见在生命活动中磷是不可缺少的^[1]。再者,磷作为一种战略性资源,对全球粮食生产的贡献也具有不可替代的作用。磷主要以磷矿的形式贮存在地壳之中,是一种难以再生的非金属矿产资源^[2]。据专家推测,以目前的速度开采地球上的磷矿,全球可经济开采的清洁磷矿将会在100 a内消耗殆尽^[3]。与此同时,因磷不具有挥发性,其在自然界的循环是从陆地到海洋的单向直线运动^[4]。正是因为磷的单向流动特点,致使水体富营养化,淡水发生“水华”,海洋发生“赤潮”,造成了湖泊及海洋的严重污染,可用水资源储量严重下降。据调查,我国约75%的湖泊出现了不同程度的富营养化^[5-7]。

就目前而言,一方面,各国专家为了提高污水中磷的去除不遗余力,但含磷废水排放导致的水体富营养化问题仍未得到根本解决;另一方面,当前全球磷资源储量大量减少,我国也即将与世界同步出现“磷荒”,全球正面临着可怕的“磷危机”。因此,要是能将污水中处理掉的多余磷回收并加以利用,既能减轻水体的纳污负担,还能延缓“磷危机”的到来。

厌氧侧流磷回收是在主流强化生物除磷(Enhanced biological phosphorus removal, EBPR)系统厌氧末期时,将其上清液按一定比例提取出来,通过侧流反应将系统中的磷去除并生成磷回收产物,之后将侧流反应上清液返回至主流系统中继续进行好氧反应。侧流反应中对磷的去除使得主流系统中 $m(\text{COD})/m(\text{P})$ (记作C/P)上升,这在一定程度上解决了进水碳源不足的问题^[8-9]。此外,调研结果表明实际污水处理厂中最大耗能单元为曝气,若污水厂在低DO(Dissolved oxygen)条件下能实现稳定达标运行,则整个污水厂的能耗可降低10%左右^[10]。因此,建立一种基于厌氧侧流磷回收技术的低耗EBPR系统,对我国实现碳达峰和碳中和目标具有一定的理论指导意义。有研究表明,进水磷源和碳源浓度

直接影响聚磷菌(Polyphosphate accumulating organisms, PAOs)的释、吸磷性能乃至EBPR系统的稳定运行,因此,本研究基于一个低耗(DO=1 mg/L)下的EBPR系统开展不同进水C/P(400/8、350/8、300/8、400/12)对系统除磷性能、侧流磷回收性能及污泥性能的影响研究,通过分析不同实验阶段各项污染物指标及相应的磷回收率,探究C/P对主流EBPR系统脱氮除磷效果及其相应的厌氧磷回收性能的影响。

1 材料及方法

1.1 实验用水及接种污泥

(1)进水是由碳源、氮源、磷源、浓缩液和微量元素组成的人工配水,其中碳、氮和磷源分别由 CH_3COONa 、 NH_4Cl 和 KH_2PO_4 提供。根据运行工况的不同将实验分为4个阶段,调整碳、磷浓度,设定碳、氮、磷质量浓度在I阶段分别为400、40、8 mg/L, II阶段分别为350、40、8 mg/L, III阶段分别为300、40、8 mg/L, IV阶段分别为400、40、12 mg/L。浓缩液和微量元素在配水中体积分数均为1 mL/L。浓缩液配比为: $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 80 g/L、酵母浸膏 10 g/L、蛋白胨 61 g/L、 $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 21 g/L、 $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 45 g/L。微量元素配比为:苯甲酰胺基醋酸 4.03 g/L、 $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 3.03 g/L、 H_3BO_3 0.5 g/L、 $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 0.12 g/L、 $\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 0.06 g/L、KI 0.06 g/L、 $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 0.24 g/L、 $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 0.06 g/L、 $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.3 g/L、EDTA 10 g/L、柠檬酸 5.51 g/L、 $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 0.06 g/L。

(2)污泥接种于A²/O反应器的二沉池,污泥除磷效果及各项监测指标均良好。

1.2 实验装置及运行模式

(1)本实验采用有效容积4.2 L的序批式活性污泥反应器(Sequencing batch reactor, SBR)作为主反应器进行主流强化生物除磷反应,实验装置见图1。SBR在整个实验阶段采用厌氧-好氧交替运行的模式。好氧阶段的溶解氧采用空气压缩机提供,曝气量通过转子流量计进行调节;计算机控制系统则将好氧

阶段的 DO 保持在 1 mg/L。温度设定在 $(22 \pm 1)^\circ\text{C}$ 。采用 WTW Multi-3420 在线测定仪对 DO 和 pH 进行实时监测。

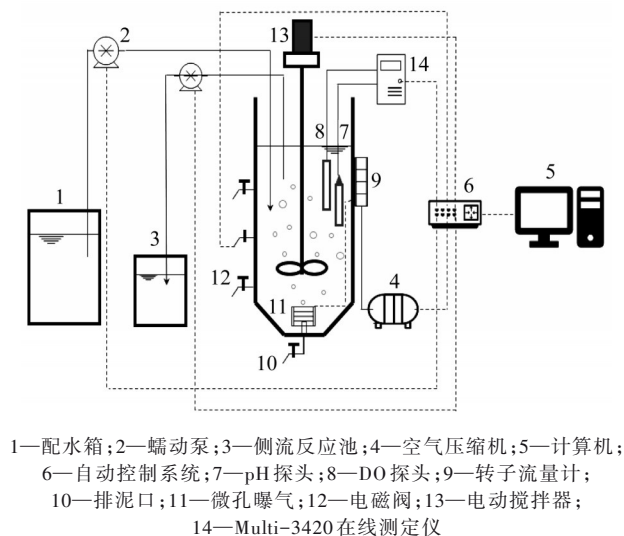


图 1 SBR 实验装置

Fig. 1 SBR Experimental setup diagram

(2) 该 SBR 反应器以每天 3 个周期的模式运行, 每周期 8 h, 控制进水和排水时间为 6 min, 厌氧反应 120 min 后接好氧反应 300 min, 沉淀 54 min。污泥龄 (Solid retention time, SRT) 控制在 21 d, 水力停留时间 (Hydraulic retention time, HRT) 为 24 h。当 SBR 反应器具备 EBPR 功能且系统趋于稳定后, 进行侧流回收磷操作, 具体操作为: 厌氧末期充分释磷后停止搅拌, 然后提取 1/3 的厌氧释磷上清液并添加 $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 或 $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 进行化学沉淀, 期间不停地搅拌, 且用 1 mol/L 的 NaOH 溶液调节 pH 至 8.5~9.5, 沉淀生成后的上清液返回至主流系统进行好氧反应。

实验 4 个阶段反应器运行工况见表 1。

表 1 反应器运行工况

Table 1 Operation conditions of the reactor

运行阶段	C/P	运行天数/d	温度/ $^\circ\text{C}$	MLSS/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	MLVSS/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$
I	400/8	1~15	22	3 337	2 680
II	350/8	16~36	22	3 271	2 671
III	300/8	37~57	22	3 118	2 552
IV	400/12	58~70	22	3 321	2 567

1.3 分析项目与检测方法

实验过程中对 SBR 反应器的 COD、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 、TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、MLSS、MLVSS、污泥容积

指数 (Sludge volume index, SVI) 和 poly-P 等指标进行监测。在不同工况下稳定运行后进行全周期监测并按 30 min 间隔取样。为观察侧流反应中磷回收效果, 分别于 70 min 内每隔 10 min 进行取样测定 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量。

其中 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 、COD、TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、MLSS 及 SVI 分别采用钼锑抗分光光度法、COD 快速测定仪、过硫酸钾氧化-紫外分光光度法、纳氏试剂分光光度法、N-(1-萘基)-乙二胺光度法、麝香草酚法、滤纸重量法及 30 min 沉降法进行测定。温度、DO 及 pH 由 Multi-3420 在线测定仪实时监测。

1.4 侧流磷回收率计算公式

采用式 (1) 对侧流磷回收率进行计算。

$$\text{磷回收率} = \frac{P_2 - P_1}{P_2} \times 100\% \quad (1)$$

式中: P_1 ——侧流反应上清液中磷酸盐质量浓度, mg/L;
 P_2 ——主流系统厌氧末期磷酸盐质量浓度, mg/L。

1.5 磷达标率计算公式

采用式 (2) 对磷达标率进行计算。

$$\text{磷达标率} = \frac{R_1}{R_2} \times 100\% \quad (2)$$

式中: R_1 ——运行达标天数;
 R_2 ——运行总天数。

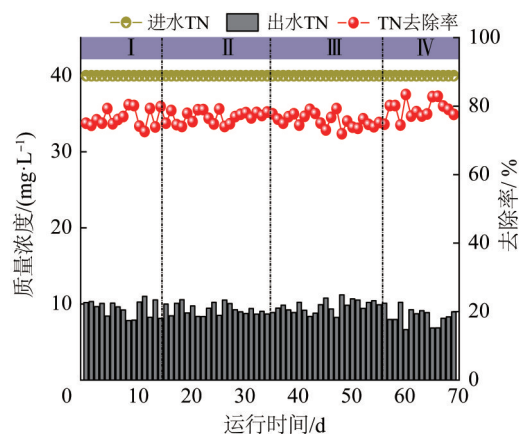
2 结果与讨论

2.1 不同进水 C/P 下磷回收对主流 EBPR 系统脱氮除磷性能的影响

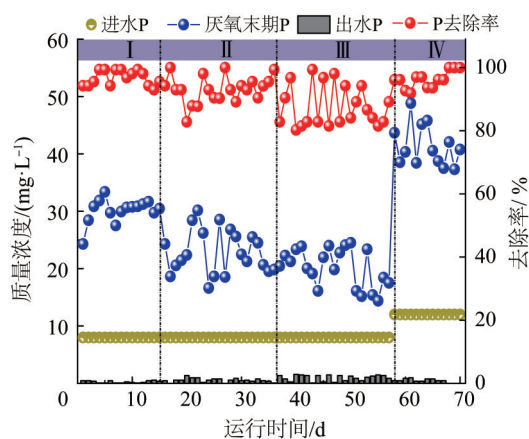
进水 C/P 波动下, 厌氧侧流磷回收对低耗主流 SBR 反应器脱氮除磷性能的影响见图 2。

由图 2(a) 可见, 系统出水 TN 在 4 个实验阶段中变化不大, 均值分别为 9.42、9.27、9.73、8.16 mg/L, 且平均 TN 去除率在整个实验周期无明显变化, 分别为 76.5%、76.8%、75.6%、79.4%, 说明由 COD 和 P 浓度变化导致的 C/P 波动对系统 TN 的去除影响不大, 依据《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002), 其均能满足一级 A 排放标准 ($\text{TN} \leq 15 \text{ mg/L}$)。

由图 2(b) 可知, 在反应器运行的前 3 个阶段, 进水 C/P 为 400/8、350/8、300/8 时, 系统厌氧末期释磷量随进水 C/P 的降低而减少, 均值分别为 31.1、22.9、20.2 mg/L。同时, 系统平均除磷率也呈相同趋势, 由阶段 I 的 96.7% 降至阶段 III 的 87.7%。李萍等^[13]进行此类相关研究, 得到 TP 去除率随进水 COD 减小



(a) 主流EBPR系统脱氮性能



(b) 主流EBPR系统除磷性能

图2 SBR反应器脱氮除磷性能的变化

Fig. 2 Changes of nitrogen and phosphorus removal performance in SBR reactor

而降低的结论,这与本实验研究结论相一致。在阶段Ⅳ中,进一步降低进水C/P至400/12,厌氧释磷量均值迅速升高为43.7 mg/L,平均除磷率回升至95.9%。结合前3个实验阶段的结果,分析得到进水碳源浓度和磷源浓度是影响聚磷菌释磷性能的主要因素,而与C/P关系不大,除磷效率的提升归因于系统厌氧释磷能力的提高,当进水P源丰富,可满足聚磷菌代谢需求的条件下,真正导致系统性能发生变化的原因是进水碳源是否充足。

2.2 不同阶段EBPR系统出水磷达标分析

不同阶段SBR反应器内出水TP见图3。

依据《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)中的规定,一级A排放标准中TP≤0.5 mg/L。由图3可见,从阶段Ⅰ至阶段Ⅲ,随着进水C/P由400/8降至300/8,出水磷一级A排放标准的达标率分别为93.3%、40.0%、30.0%。在阶段Ⅳ中,进一

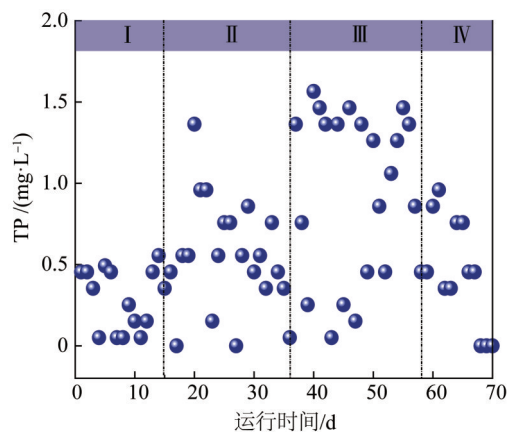


图3 不同阶段SBR反应器内出水TP

Fig. 3 Effluent TP concentration in SBR reactor under different stages

步降低进水C/P为400/12,出水磷的达标率回升至69.2%。分析认为,阶段Ⅳ较阶段Ⅰ进水磷浓度增加而COD不变,PAOs在厌氧释磷时利用相同量的COD合成等量聚-β-羟基丁酸(poly-β-hydroxybutyrate, PHB),故在好氧阶段分解PHB所得的ATP不足以吸收多余的磷导致磷达标率下降。结合图2进一步表明聚磷菌释/吸磷性能受进水碳源及磷源浓度影响较大,而与C/P无关。

2.3 不同阶段SBR反应器内典型周期污染物浓度的变化

不同实验阶段典型周期污染物浓度的变化见图4。

由图4可知,各不同阶段EBPR系统均可在1.5 h内将大部分有机物吸收利用。前3个阶段随着进水C/P由400/8降至300/8,厌氧末期磷质量浓度从29.1 mg/L降至19.6 mg/L,说明进水碳源是否充足是导致聚磷菌释磷能力变化的主要因素,进一步降低进水C/P至400/12时,厌氧末期磷质量浓度提升至42.5 mg/L。EBPR系统中聚磷菌的好氧吸磷时间随进水COD的不断降低而延长,第Ⅱ阶段较第Ⅰ阶段吸磷时间延长了120 min,第Ⅲ阶段直至反应结束系统内还残留将近1 mg/L的 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$,系统除磷能力逐步下降。分析原因可能是,PAOs在厌氧阶段进水碳源充足时能合成较多的PHB,因此,在好氧阶段利用PHB降解产生的能量高效吸磷,而当进水COD匮乏时由于聚磷菌活性降低导致系统除磷效果不佳。在第Ⅳ阶段,此时进水碳源充足,系统厌氧释磷量大,且由于进水磷浓度相比阶段Ⅰ更高,聚磷菌需要更长的时间完成吸磷,最终系统于300 min吸

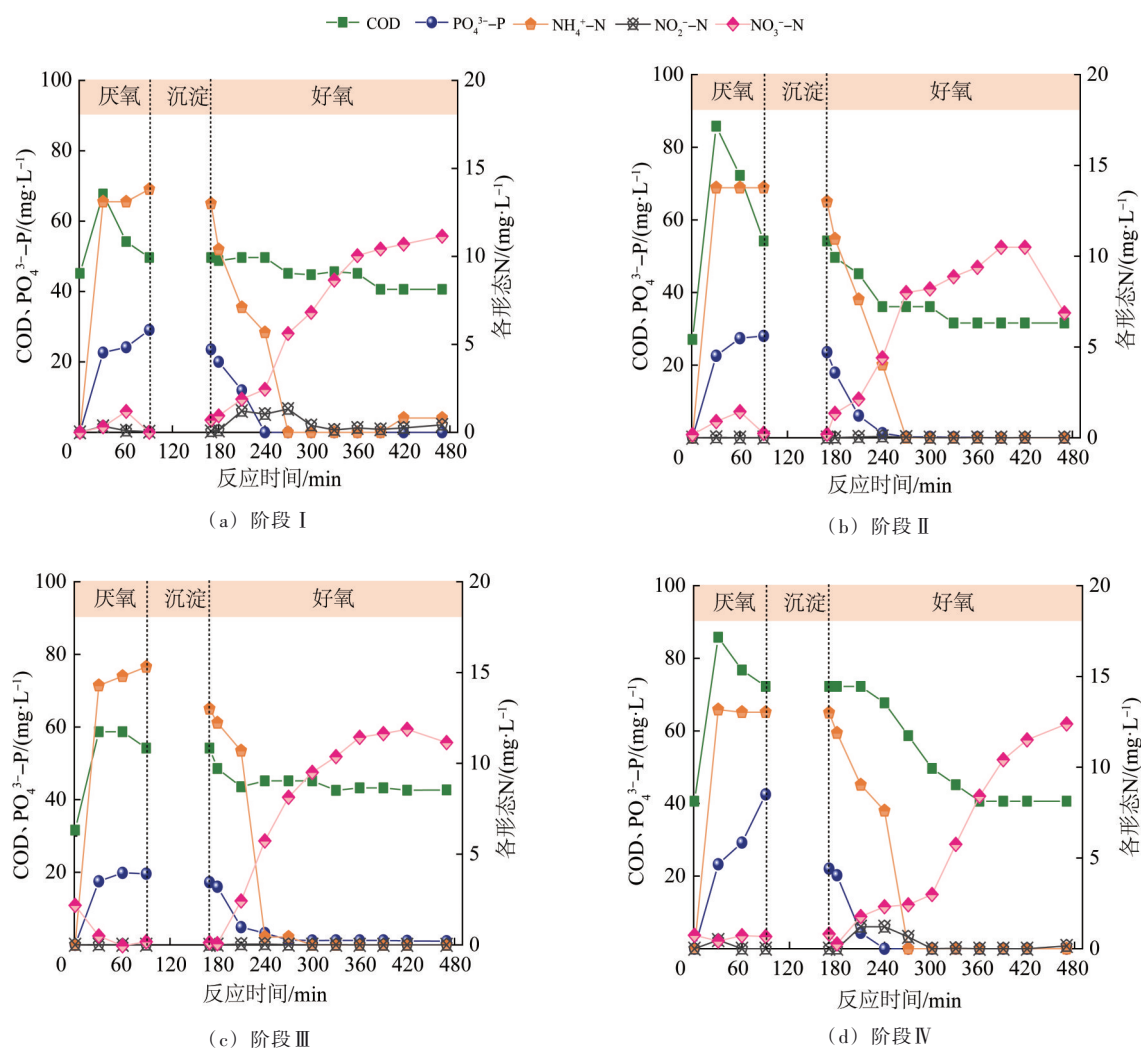


图4 不同阶段典型周期污染物浓度变化

Fig. 4 Variation of pollutant concentration in a typical cycle at different stages

磷结束。

由图4还可以看出,4个实验阶段系统内 NH_4^+-N 在厌氧段基本没有变化,氨氧化过程在之后的好氧段完成, NH_4^+-N 最终转化为 NO_3^--N 。在整个实验周期中,系统在反应结束时均未检测出 NO_2^--N ,出水TN以 NO_3^--N 为主。

2.4 SBR反应器内污泥的吸磷和释磷能力

实验总结了主流EBPR系统在4个实验阶段的吸磷能力及释磷能力,结果见图5。

由图5可知,从阶段I至阶段III随C/P逐步降低,释磷量与吸磷量均呈下降趋势,与图2除磷性能下降趋势相吻合。分析原因是碳源不足导致释磷下降,后续好氧阶段因PHB提供给系统吸磷的能量不足,PAOs活性下降以致吸磷量下降。在第IV阶段由

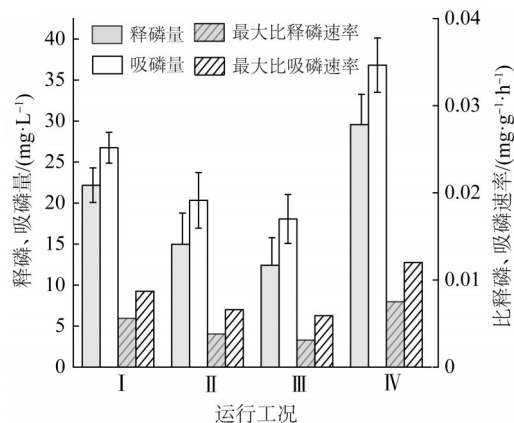


图5 SBR反应器内污泥释/吸磷能力

Fig. 5 Phosphorus release/uptake ability of sludge in SBR reactor

于碳源及磷源充足,磷释放和磷吸收量均是最高。单位VSS最大厌氧释磷速率、最大好氧吸磷速

率分别和释磷量、吸磷量呈相同趋势。

2.5 进水C/P波动下侧流磷回收分析

进水C/P波动下侧流磷回收性能的变化见图6。

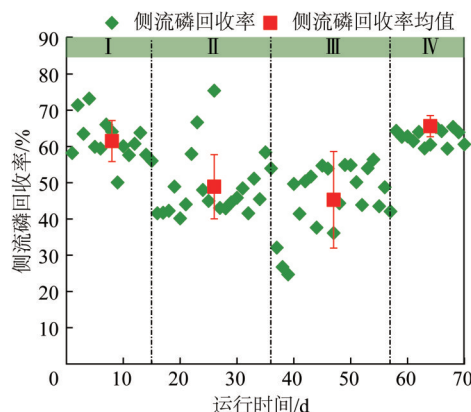


图6 进水C/P波动下侧流磷回收性能

Fig. 6 Side-stream phosphorus recovery performance under influent C/P ratio fluctuation

由图6可知,从阶段I至阶段III随着进水C/P的逐步降低,侧流磷回收率呈下降趋势,均值分别为61.5%、48.9%、45.3%。结合图2分析原因,推测为由于厌氧末期释磷量下降导致可回收的磷减少,磷回收率下降。随后将进水C/P进一步降至400/12,侧流磷回收率立刻升高至62.6%,偏差最小且运行最稳定。依据侧流磷回收原理来看,系统厌氧释磷量越高,用于进行化学磷回收操作的磷则越多。由此表明,除碳源浓度外,磷源浓度同样是影响化学磷回收的重要因素。

2.6 进水C/P波动下侧流磷回收对低耗主流EBPR系统污泥性能的影响

不同阶段污泥性质变化见图7。

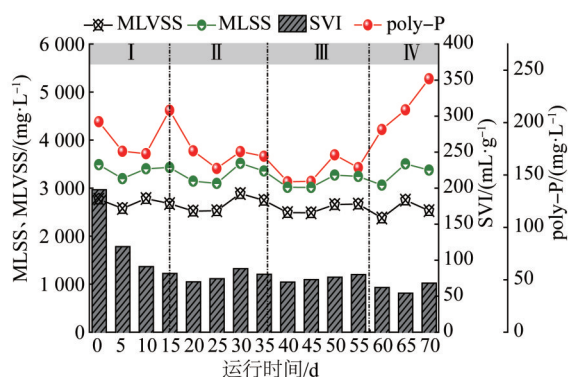


图7 不同阶段污泥性质变化

Fig. 7 Change of sludge characteristics in different stages

由图7可知,MLSS及MLVSS在整个实验过程中始终保持稳定,MLSS均值和MLVSS均值在4个实验阶段都分别保持在 $(3\ 270\pm100)$ mg/L和 $(2\ 600\pm100)$ mg/L。

污泥SVI在实验运行的4个阶段平均值分别为109.4、89.5、75.8、58.0 mL/g,均在50~120 mL/g的范围内,表明污泥具有良好的活性。由图7还可以看出,从阶段I至阶段III, poly-P质量浓度平均分别为181.8、165.0、154.7 mg/L,呈缓慢下降的趋势,与图2中系统除磷性能从阶段I至阶段III逐渐下降的趋势相吻合。而在IV阶段由于进水磷浓度的提高,PAOs体内的poly-P含量随之升高。

3 结论

(1)当进水C/P由400/8逐步降低至300/8时,主流系统厌氧末期释磷量及除磷率逐渐降低,侧流系统磷回收率随之下降。进一步降低C/P至400/12时,尽管比值降低,由于碳源浓度和磷源浓度的增加而获得了最高除磷率及最高磷回收率,可见C/P与主流系统除磷性能和侧流系统磷回收性能之间无必然联系。

(2)在进水C/P波动下,主流EBPR系统TN去除性能在整个实验阶段变化不大。

(3)在整个实验阶段,污泥胞内poly-P含量与污泥除磷性能变化趋势一致,污泥沉降性能一直较佳,MLSS及MLVSS始终保持稳定。说明进水C/P的改变对污泥性质影响不大。

(4)影响聚磷菌释/吸磷性能的主要因素是进水碳源浓度和磷源浓度,而与C/P关系不大。当进水P源丰富,可满足聚磷菌代谢需求的条件下,真正导致系统性能发生变化的原因是进水碳源浓度的改变。

参考文献

- [1] 郝晓地,王崇臣,金文标. 磷危机概观与磷回收技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2011: 5-10.
- HAO Xiaodi, WANG Chongchen, JIN Wenbiao. Overview of phosphorus crisis and phosphorus recovery technology [M]. Beijing: Higher Education Press, 2011: 5-10.
- [2] VAN DIJK K C, LESSCHEN J P, OENEMA O. Phosphorus flows and balances of the European Union Member States [J]. Science of the Total Environment, 2016, 542: 1078-1093.
- [3] FANG Le, LI Jiangshan, DONATELLO S, et al. Recovery of phosphorus from incinerated sewage sludge ash by combined two-step extraction and selective precipitation [J]. Chemical Engineering Journal, 2018, 348: 74-83.
- [4] RIBAROVA I, DIMITROVA S, LAMBEVA R, et al. Phosphorus recovery potential in Sofia WWTP in view of the national sludge management strategy [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2017, 116: 152-159.
- [5] JACOBS B, CORDELL D, CHIN J, et al. Towards phosphorus sustainability in North America: A model for transformational change [J]. Environmental Science & Policy, 2017, 77: 151-159.
- [6] CLOETE T E, EHLERS M M, VAN HEERDEN J, et al. The microbiology

- of phosphorus removal in activated sludge[M]//Handbook of Water and Wastewater Microbiology. Amsterdam: Elsevier, 2003: 373-390.
- [7] SEVIOUR R J, MINO T, ONUKI M. The microbiology of biological phosphorus removal in activated sludge systems[J]. FEMS Microbiology Reviews, 2003, 27(1): 99-127.
- [8] HAO Xiaodi, VAN L M C M. Model-based evaluation of struvite recovery from an in-line stripper in a BNR process(BCFS)[J]. Water Science and Technology: A Journal of the International Association on Water Pollution Research, 2006, 53(3): 191-198.
- [9] BARAT R, VAN LOOSDRECHT M C M. Potential phosphorus recovery in a WWTP with the BCFS process: Interactions with the biological process[J]. Water Research, 2006, 40(19): 3507-3516.
- [10] LUO Dacheng, YUAN Linjiang, LIU Lun. Effect of dissolved oxygen on biological phosphorous removal in continuous-flow anoxic-oxic process using starch as sole carbon source[J]. Journal of Environmental Engineering, 2018, 144(6): 04018037.
- [11] 王榕, 成鹏飞, 张建, 等. 碳磷比对 SND 过程污染物去除及 N_2O 释放的影响[J]. 中国环境科学, 2014, 34(2): 378-382.
- WANG Rong, CHENG Pengfei, ZHANG Jian, et al. Effects of COD/P ratio on contaminant removal and N_2O emission during simultaneous nitrification and denitrification process[J]. China Environmental Science, 2014, 34(2): 378-382.
- [12] 李茂侨, 陈志强, 温沁雪. 硝态氮及碳源浓度对 A-AAO 工艺厌氧释磷影响的研究[J]. 环境科学与管理, 2018, 43(2): 107-111.
- LI Maoqiao, CHEN Zhiqiang, WEN Qinxue. Effects of nitrate nitrogen and carbon source concentration on anaerobic phosphorus release on A-AAO process[J]. Environmental Science and Management, 2018, 43(2): 107-111.
- [13] 李萍, 林海, 何建敏, 等. COD 对生物流化床法降低污泥回流液中氮磷的影响[J]. 工业水处理, 2009, 29(9): 19-21.
- LI Ping, LIN Hai, HE Jianmin, et al. Effect of COD on the removal of nitrogen and phosphorus in the reduction of concentration of sludge refluxing liquid by biological fluidized bed[J]. Industrial Water Treatment, 2009, 29(9): 19-21.
- [14] WELLES L, LOPEZ-VAZQUEZ C M, HOOIJMANS C M, et al. Prevalence of 'Candidatus Accumulibacter phosphatis' type II under phosphate limiting conditions[J]. AMB Express, 2016, 6(1): 44.
- [15] 郝晓地, 衣兰凯, 付昆明. 侧流磷回收强化低碳源污水脱氮除磷效果的模拟与实验研究[J]. 环境工程学报, 2013, 7(1): 231-236.
- HAO Xiaodi, YI Lankai, FU Kunming. Modeling and experimental study on enhancing effect of BNR by phosphate recovery in side-stream of anaerobic supernatant[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2013, 7(1): 231-236.
- [16] 李楠. SBR 系统在低温条件下的废水生物除磷性能及除磷途径分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- LI Nan. Performance and removal approaches of biological phosphorus removal from wastewater in SBR under low temperature[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.
- [17] SENA M, RODRIGUEZ MORRIS M, SEIB M, et al. An exploration of economic valuation of phosphorus in the environment and its implications in decision making for resource recovery[J]. Water Research, 2020, 172: 115449.
- [18] 许德超, 陈洪波, 李小明, 等. 进水氨氮浓度对静置/好氧/缺氧 SBR 脱氮除磷性能的影响[J]. 中国环境科学, 2013, 33(11): 1984-1992.
- XU Dechao, CHEN Hongbo, LI Xiaoming, et al. Effect of influent ammonia concentration on biological nutrient removal in sequencing batch reactor with static/aerobic/anoxic regime[J]. China Environmental Science, 2013, 33(11): 1984-1992.
- [19] PRADHAN S K, HEINONEN-TANSKI H, VEIJALAINEN A M, et al. Phosphorus recovery from sewage sludge using acidithiobacilli[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2021, 18(13): 7135.
- [20] ZU Xuehui, NAN Jun, HE Li, et al. Development of a double-layer EPS-ASM2d model to illustrate the effect on mainstream biological phosphorus system in side-stream phosphorus recovery process[J]. Science of the Total Environment, 2021, 772: 144961.
- [21] 俞小军, 李杰, 周猛, 等. 长期侧流提取对 EBPR 系统除磷及其磷回收性能的影响[J]. 环境科学, 2018, 39(9): 4274-4280.
- YU Xiaojun, LI Jie, ZHOU Meng, et al. Effects of long-term side stream extraction on phosphorus removal and recovery performance of EBPR system[J]. Environmental Science, 2018, 39(9): 4274-4280.
- [22] DAI Hongliang, DAI Zheqin, PENG Lihong, et al. Metagenomic and metabolomic analysis reveals the effects of chemical phosphorus recovery on biological nutrient removal system[J]. Chemical Engineering Journal, 2017, 328: 1087-1097.
- [23] 刘国华, 陈燕, 范强, 等. 溶解氧对活性污泥系统的脱氮效果和硝化细菌群落结构的影响[J]. 环境科学学报, 2016, 36(6): 1971-1978.
- LIU Guohua, CHEN Yan, FAN Qiang, et al. Effects of dissolved oxygen concentration on nitrogen removal and nitrifying bacterial community structure in an activated sludge system[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, 36(6): 1971-1978.
- [24] SUN Huijuan, MOHAMMED A N, LIU Yang. Phosphorus recovery from source-diverted blackwater through struvite precipitation[J]. Science of the Total Environment, 2020, 743: 140747.
- [25] RONG Yi, LIU Xiaochai, WEN Lijie, et al. Advanced nutrient removal in a continuous A^2/O process based on partial nitrification-anammox and denitrifying phosphorus removal[J]. Journal of Water Process Engineering, 2020, 36: 101245.
- [作者简介] 邓颖(1996—), 硕士研究生. E-mail: 1609147861@qq.com. 通讯作者: 马娟, 教授. E-mail: meggyma@163.com.
- [收稿日期] 2022-03-17(修改稿)