

氨氮对颗粒污泥生物除磷的影响及相关机制探究

刘容麟, 王红涛*

(太原理工大学环境科学与工程学院, 山西 太原 030600)

摘要:为探究进水氨氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)对颗粒污泥生物除磷的影响,构建了序批式反应器(SBR),在中温条件下考察了进水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 对生物除磷颗粒污泥的特征及其污染物去除规律的影响。结果表明,进水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量浓度为40 mg/L时,颗粒污泥沉降性能最好、生物量最大,稳定运行期污泥体积指数(SVI)为52.9 mL/g,总悬浮固体(TSS)质量浓度达到5.7~5.9 g/L,显著高于其他组别。粒径分析表明,适当提高 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量浓度利于颗粒污泥粒径增大,且当进水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量浓度为40 mg/L时,0.8~1.2 mm粒径占比升高至34.6%。进水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 能影响颗粒污泥胞外聚合物的质量分数及组分,当进水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量浓度为40 mg/L时,EPS质量分数可高达134 mg/g,而 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量浓度升高提高了EPS内蛋白质(PN)与多糖(PS)的比值。进水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 能影响颗粒污泥对TP、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 及化学需氧量(COD)的去除效率。当进水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量浓度为40 mg/L、颗粒污泥稳定运行时,TP、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 及COD的去除效率可分别达到95.8%~96.4%、95%和94.6%~95.6%。

关键词:氨氮;颗粒污泥;生物除磷;污泥特征;胞外聚合物

中图分类号:X703

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2021)07-0144-05

DOI:10.16606/j.cnki.issn 0253-4320.2021.07.030

Effect of ammoniacal nitrogen on biological removal of phosphorus by granular sludge and exploration on its mechanism

LIU Rong-lin, WANG Hong-tao*

(College of Environmental Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030600, China)

Abstract:In order to explore the effect and mechanism of influent ammoniacal nitrogen ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) on biological removal of phosphorus by granular sludge, sequencing batch reactors (SBRs) are constructed to investigate the sludge characteristics and pollutant removal rules of biological phosphorus removal granular sludge under the influence of influent $\text{NH}_4^+\text{-N}$ at medium temperature. Results illustrate when the influent $\text{NH}_4^+\text{-N}$ concentration is $40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, granular sludge exhibits the best sedimentation performance, the amount of biomass is the largest, sludge volume index (SVI) is $52.9 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$, and total suspended solids (TSS) concentration is $5.7-5.9 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, which are significantly higher than other groups. Particle size analysis indicates that properly increasing the concentration of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ is beneficial to increase the particle size of granular sludge. When the influent $\text{NH}_4^+\text{-N}$ is $40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, the proportion of granular sludge with a particle size of 0.8~1.2 mm increases to 34.6%. When the influent of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ is $40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, EPS content can reach $134 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$. The ratio of protein (PN) to polysaccharide (PS) in EPS increases with the increase of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ concentration. Influent $\text{NH}_4^+\text{-N}$ concentration can affect the removal efficiencies of TP, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and chemical oxygen demand (COD) by granular sludge. If the influent $\text{NH}_4^+\text{-N}$ concentration is $40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ and granular sludge operates stably, the removal efficiencies of TP, $\text{NH}_4^+\text{-N}$, and COD can reach 95.8% - 96.4%, 95% and 94.6% - 95.6%, respectively.

Key words: ammoniacal nitrogen; granular sludge; biological removal of phosphorus; sludge characteristics; extracellular polymer

磷(P)是导致水体富营养化的关键因子,控制污水厂总P的排放有利于缓解水体富营养化问题^[1]。生物除磷(BPR)由于运行成本低、除磷效率高而备受关注。传统活性污泥BPR存在生物量低、易发生污泥膨胀及二次释磷等缺陷^[2]。颗粒污泥具有生物量高、沉降性能好、结构稳定等优

点,因此,以富集聚磷菌(PAO)为主体的BPR颗粒污泥成为污水处理工艺中较具应用前景的处理技术^[3-4]。

颗粒污泥稳定性是影响BPR的关键因素,其中碳源种类、进水负荷、运行温度及pH均可影响颗粒污泥的运行效能。YU等^[5]在序批式反应(SBR)内

收稿日期:2020-08-30;修回日期:2021-05-14

基金项目:国家重点研发计划项目(2019YFC0408602)

作者简介:刘容麟(1993-),男,硕士研究生,研究方向为水污染处理,1872406726@qq.com;王红涛(1977-),男,博士,副教授,研究方向为水污染控制,通讯联系人,qqyuan6958@163.com。

探究了进水 COD 负荷对颗粒污泥除磷性能的影响,结果表明,进水 COD 负荷超过 500 mg/L 时,系统内丝状菌过度繁殖,PAO 代谢活性受抑制,颗粒污泥除磷效率显著下降。此外,污泥停留时间(SRT)也会影响颗粒污泥沉降性及含水率;Li 等^[6]发现较高污泥停留时间(SRT)及较高 COD 负荷(300 mg/L)使得颗粒污泥沉降性显著下降,颗粒污泥系统出现恶化。

生活污水中不仅含有 P 而且含有大量的氨氮(NH_4^+-N), NH_4^+-N 质量浓度会影响颗粒污泥的稳定性及其对 P 的去除效率^[7]。徐少娟等^[8]以富集聚磷菌的活性污泥为基础,考察了不同进水 NH_4^+-N 对强化除磷系统效果影响,结果表明,在进水 NH_4^+-N 质量浓度为 20 mg/L 时,生物除磷效率下降至 65% 左右。生物除磷颗粒污泥较传统絮状污泥具有更高耐冲击负荷的能力,然而关于进水 NH_4^+-N 对生物除磷颗粒污泥特征及其对污染物的去除规律影响至今鲜有报道。因此,笔者以生物除磷颗粒污泥为探究对象,考察了不同进水 NH_4^+-N 质量浓度对生物除磷颗粒污泥特征及其对污染物去除规律的影响,以期对生物除磷颗粒污泥的实际应用提供数据参考。

1 实验部分

1.1 实验材料

实验水质:所用实验进水为某污水处理厂进水口,污水经过滤后置于 4℃ 的冰箱内存储备用,水质的主要特征如表 1 所示。

表 1 实验用水主要特征

参数	pH	COD/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	TP/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	$\text{NO}_2^--\text{N}/$ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	$\text{NO}_3^--\text{N}/$ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)
数值	(6.9±0.1)	150~180	6~8	0~0.3	1~1.5

接种污泥:接种污泥取自实验室培养的成熟生物除磷颗粒污泥,颗粒污泥的主要特征如下:pH 为 (5.4±0.1),总悬浮固体(TSS)为 (5.4±0.1) g/L,挥发性悬浮固体(VSS)为 (3.7±0.1) g/L,化学需氧量(COD)去除效率为 85%~91%,TP 去除效率 90% 以上。

实验装置:实验所用 SBR 为有机玻璃构成,高 60 cm,内径 15 cm。在 SBR 侧面每隔 10 cm 配有取样口,SBR 底部配有直径约为 10 cm 的曝气盘,通过

转子流量计控制曝气流量约为 10 L/min。SBR 每日运行 3 个周期,每个周期含有 5 min 快速进水、2 h 厌氧、4 h 好氧曝气、30 min 沉淀、5 min 排水,其余时间为闲置期。

1.2 实验设置

设置 4 组相同的 SBR(R1~R4),每组含有 3 个 SBR。待每组 SBR 运行稳定时改变进水 NH_4^+-N ,以考察进水 NH_4^+-N 负荷对生物除磷颗粒污泥特征及污染物去除规律的影响。R1~R4 进水 NH_4^+-N 中分别添加 1.0 mol/L NH_4Cl 溶液以控制其质量浓度在 20、40、60 mg/L 和 80 mg/L。各 SBR 运行 90 d,通过添加 NaHCO_3 或 NaCO_3 控制每个周期进水 pH 在 (7.0±0.1),而在反应过程中不调控。水温控制在 (20±1)℃。定期进行污泥污水取样测定进水 NH_4^+-N 对颗粒污泥特征及营养盐去除规律的影响。

1.3 分析方法

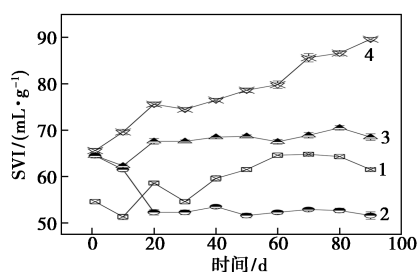
采用国际标准方法测定 COD、TSS、VSS;颗粒污泥粒径采用激光粒度分布测定仪(LS230/SVM+型,美国贝克曼生产)进行测定。胞外聚合物(EPS)提取步骤如下^[9]:取 25 mL 颗粒污泥泥水混合物,于 8 000 r/min 离心 15 min 后,去掉上清液后加入 PBS 溶液并稀释至原体积。PBS 溶液的主要构成如下:50 mmol/L 磷酸钠、150 mmol/L NaCl、pH 7.0。加入 PBS 溶液后的泥水混合物进行超声破碎(3.0 min),然后在 80℃ 条件下加热 30 min,并进行室温冷却处理。再次将冷却后的混合物进行离心(8 000 r/min,15 min),以牛血清蛋白为标准物,采用福林酚法测定蛋白质(PN),以葡萄糖为标准物,采用蒽酮比色法测定多糖(PS)。

2 结果与讨论

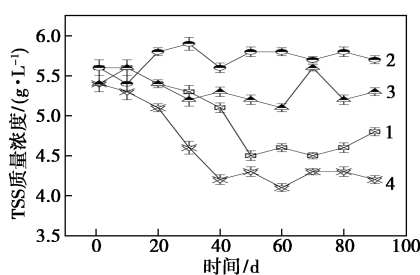
2.1 NH_4^+-N 对颗粒污泥稳定性的影响

颗粒污泥的稳定性是影响除磷效率的关键因素^[10]。不同进水 NH_4^+-N 质量浓度对生物除磷颗粒污泥沉降性及 TSS 浓度的影响如图 1 所示。SVI 常作为污泥沉降性的重要指标,通常,SVI 数值越低,污泥沉降性能越高。由图 1 中可以看出,在低进水 NH_4^+-N 质量浓度 R1 组内,SVI 由初始的 54.6 mL/g 逐渐升高至 60 d 的 64.6 mL/g,并在随后的时间内维持在 61.4~64.8 mL/g,结果表明低质量浓度 NH_4^+-N 能够维持生物除磷颗粒污泥良好的沉降性。当进水 NH_4^+-N 质量浓度为 40 mg/L 时,颗粒污泥稳

定时期 SVI 下降至 52.9 mL/g,显著低于其他组别,说明进水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量浓度为 40 mg/L 利于生物除磷颗粒污泥沉降。然而当进水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 进一步升高至 60 mg/L 和 80 mg/L 时,生物除磷颗粒污泥在温度运行时期 SVI 则分别升高至 70.5 mL/g 和 89.6 mL/g,污泥沉降性下降,尤其在 R4 内,略有污泥膨胀现象。由图 1(b)可知,R1 和 R4 内 TSS 的质量浓度随时间先下降后基本维持在 4.6 g/L 和 4.3 g/L,低于初始污泥质量浓度。而在 R2 内,TSS 的质量浓度随时间先升高后在 5.7~5.9 g/L 波动,高于初始污泥质量浓度。R3 内 TSS 的质量浓度在稳定时期基本保持在 5.2~5.4 g/L,高于 R1 和 R4 但低于 R2。实验结果表明,当进水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量浓度为 40 mg/L 时,颗粒污泥沉降性最好且污泥质量浓度最高。ZOU 等^[1]研究表明进水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量浓度过高时会导致颗粒污泥解体成为小颗粒,污泥沉降性下降,并且部分生物质随排水而被排掉,降低了 TSS 的质量浓度。李冬等^[9]研究表明进水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量浓度对生物除磷颗粒污泥系统中颗粒的沉降性具有重要影响。



(a) 对 SVI 的影响



(b) 对 TSS 的影响

1—R1;2—R2;3—R3;4—R4

图 1 进水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 对生物除磷颗粒污泥 SVI 及 TSS 质量浓度的影响

进水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 对各反应器内颗粒污泥粒径分布的影响如表 2 所示。由表 2 可知,在进水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量浓度为 20 mg/L 时,粒径在 0.5~0.8 mm 和 0.8~1.2 mm 范围内污泥占比分别为 21.3% 和 34.5%。

当进水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量浓度升高至 40 mg/L 时,生物除磷污泥粒径在 0.5~0.8 mm 范围内减少至 19.5%;而在 0.8~1.2 mm 内的占比升高至 34.6%,说明适当升高进水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量浓度利于提高污泥粒径。然而当进水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量浓度进一步升高至 80 mg/L 时,生物除磷颗粒污泥粒径在 0.5~0.8 mm 范围占比则下降 24.3%,而低于 0.25 mm 的粒径占比升高至 21.5%,说明高质量浓度 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 进水不利于颗粒污泥的形成而利于絮状污泥。ZHENG 等^[11]研究表明,进水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量浓度较高时,颗粒污泥不稳定且易破碎成为小颗粒污泥,同时导致污泥沉降性变差,这与本研究结果相一致。

表 2 进水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 对生物除磷颗粒污泥粒径分布的影响

进水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量浓度/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	粒径分布百分比/%					
	<0.25 mm	0.25~ 0.5 mm	0.5~ 0.8 mm	0.8~ 1.2 mm	1.2~ 1.5 mm	>1.5 mm
20	15.6	21.3	34.5	12.5	1.5	5.6
40	12.3	19.5	36.5	16.5	10.8	4.4
60	15.9	15.6	34.2	19.6	10.2	4.5
80	21.5	26.3	24.3	12.3	10.3	5.3

EPS 是一类由微生物分泌的胞外聚合物,其主要成分为 PN 和 PS,约占 EPS 总质量的 70%^[12]。探究了进水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量浓度对各反应器内颗粒污泥 EPS 质量分数及主要组分的影响,结果如表 3 所示。由表 3 中可以看出,在 40 d 时,进水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量浓度为 40 mg/L 和 60 mg/L 的组别中 EPS 的质量分数分别为 128 mg/g 和 127 mg/g,显著高于其他 2 个组别。在颗粒污泥运行至 60 d 和 80 d 时,R2 内 EPS 的质量分数在各反应器内最大且分别为 133 mg/g 和 134 mg/g。在 60 d 和 80 d 时,R1 内 EPS 的质量分数最低,仅为 105 mg/g 和 103 mg/g。各反应器稳定运行时(取样时间为 60 d)PN 与 PS 质量分数对比如表 4 所示。由表 4 中可以看出,随着进水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量浓度的升高,颗粒污泥内 PN 的质量分数呈上升趋势,如进水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量浓度由 20 mg/L 增加至 80 mg/L 时,颗粒污泥内 PN 的质量分数由 56.3 mg/g 增加至 68.6 mg/L,然而颗粒污泥内 PS 的质量分数增加不显著,各反应器内颗粒污泥 PS 的质量分数基本在 23.2~25.6 mg/g。表明进水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量浓度较高时会抑制颗粒污泥内 PS 的合成与分泌,水体内大部分有机质被用于合成含

氮有机物如 PN, 而 PS 的质量分数大幅下降^[13]。李冬等^[9]研究表明, 进水 NH_4^+-N 质量浓度超过 45 mg/L 时, 颗粒污泥体系内 PN 的质量分数会急剧上升, 而 PS 的质量分数略有下降。PS 可作为细胞的凝聚与黏合物质对颗粒污泥的完整性具有重要作用, 在本研究中随着进水 NH_4^+-N 质量浓度的升高, PS 的质量分数基本保持不变, 而 PN 的质量分数升高, 从而导致 PS 在 EPS 中占比略有下降。颗粒污泥内 $w(\text{PN})/w(\text{PS})$ 作为一项重要指标对指示颗粒污泥的稳定性具有重要作用。随进水 NH_4^+-N 质量浓度由 20 mg/L 升高至 80 mg/L, $w(\text{PN})/w(\text{PS})$ 由 2.29 升高至 2.67, 而李冬等^[9]研究表明生物除磷颗粒污泥内 $w(\text{PN})/w(\text{PS})$ 可高达 7 以上, 显著高于本研究结果, 产生这种现象的原因在于本研究中进水 COD 较低。

表 3 各反应器内颗粒污泥 EPS 质量分数随时间的变化规律

时间/d	变化规律			
	R1	R2	R3	R4
20	120±2.3	124±4.5	124±3.6	123±4.1
40	114±3.5	128±4.1	127±2.9	116±4.3
60	105±5.2	133±3.9	125±5.4	114±4.6
80	108±4.3	134±5.2	124±6.2	112±5.3

表 4 颗粒污泥稳定运行时各反应器内 PN 与 PS 质量分数比较

进水 NH_4^+-N 质量浓度/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	PN 质量分数/($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	PS 质量分数/($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	$w(\text{PN})/w(\text{PS})$
20	56.3±2.3	24.5±0.5	2.29
40	59.8±2.1	23.2±0.3	2.57
60	64.2±2.6	24.6±0.4	2.60
80	68.6±3.1	25.6±0.6	2.67

2.2 氨氮对生物除磷颗粒污泥处理性能的影响

生物除磷颗粒污泥对 TP 的去除变化规律如图 2 所示。由图 2 中可以看出, 在 R1 内, TP 的去除效率在前 50 d 内逐渐提高并达到 91.3%, 在随后的时间内基本保持在 90.5%~92.3%。低进水 NH_4^+-N 影响下, 生物除磷颗粒污泥能有效去除 TP。在 R2 内, 进水 NH_4^+-N 质量浓度为 40 mg/L, TP 去除效率在前 60 d 内持续上升, 并达到 95.6%, 在随后的时间内基本保持在 95.8%~96.4%, 显著高于其他组别。在 R3 和 R4 内, 进水 NH_4^+-N 质量浓度较高时, 颗粒污泥稳定运行期内 TP 去除效率显著低于 R2,

尤其在 R4 内, TP 的去除效率仅为 81.6%~82.9%。较高进水 NH_4^+-N 质量浓度会抑制 PAO 的活性同时促进其他异养菌的增殖。此外, NH_4^+-N 生物转化过程中会导致 NO_2^--N 或 NO_3^--N 的积累, 而过高 NO_2^--N 具有一定生物毒性, 这也会抑制 PAO 的活性^[14]。再者, 颗粒污泥系统内会存在部分反硝化异养菌, 过量 NH_4^+-N 会强化反硝化过程, 从而加速反硝化异养菌与 PAO 对碳源的竞争^[15]。

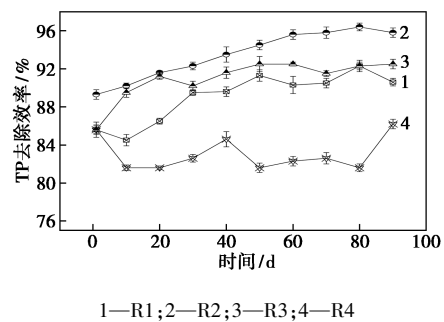


图 2 各反应器内 TP 去除效率随时间的变化规律

生物除磷颗粒污泥对 NH_4^+-N 去除效率的影响如图 3 所示。由图 3 中可以看出, 在 R1 和 R2 内, 生物除磷颗粒污泥稳定时期 NH_4^+-N 去除效率相似且均处于较高水平(大于 95%)。R1 内进水 NH_4^+-N 质量浓度小, 部分 NH_4^+-N 被微生物同化, 而剩余部分被氨氧化细菌所利用。而在 R2 内, 进水 NH_4^+-N 质量浓度升高至 40 mg/L, 颗粒污泥活性较高, 微生物代谢能力强, 从而加速了 NH_4^+-N 的代谢与转化。然而在 R3 和 R4 内, 生物除磷颗粒污泥稳定运行期, NH_4^+-N 的去除效率却显著低于 R1 或 R2, 尤其在 R4 内, 稳定时期 NH_4^+-N 的去除效率仅为 81.6%。在高质量浓度 NH_4^+-N 进水的 R4, NH_4^+-N 负荷过高, 从而抑制了微生物的活性, 并且 R4 内颗粒污泥稳定性差、生物量低, 这也是导致 NH_4^+-N 去除效率较低的原因。

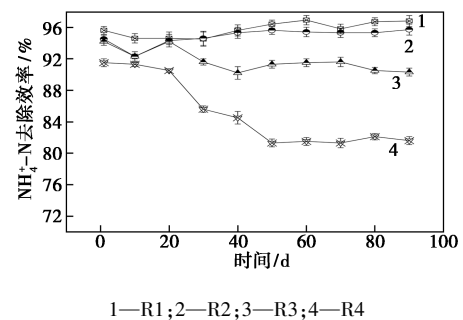


图 3 各反应器内 NH_4^+-N 去除效率随时间的变化规律

各反应器在稳定运行时期 COD 的去除效率的对比如表 5 所示。由表 5 可知,在 R1 内 COD 的去除效率显著低于另外 3 组,R1 在 60 d 和 80 d 时 COD 的去除效率分别为 92.3% 和 92.9%。R2~R4 在 60 d 和 80 d 时 COD 的去除效率大致相似,均在 94.6%~95.6% 之间。低质量浓度 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 进水导致 COD 去除效率略低的原因在于颗粒污泥活性较低,微生物增殖代谢对 COD 的消耗不足。R2 内 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量浓度为本研究最佳浓度,颗粒污泥内生物量最大,且增殖代谢旺盛,COD 的消耗量大。另一方面,R2 内除磷及 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除效率较高,而脱氮除磷过程需要大量碳源作为电子供体,这也提高了 COD 的去除效率。在 R4 内,进水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量浓度较高,反硝化过程消耗大量 COD,这也导致 R4 内 COD 的去除效率较理想。

表 5 稳定运行时期各反应器对 COD 的去除规律比较

时间/d	COD 去除效率/%			
	R1	R2	R3	R4
60	92.3±2.3	95.6±3.4	94.6±3.5	95.4±3.8
80	92.9±2.5	95.2±3.6	94.6±4.2	94.6±3.4

3 结论

(1) 进水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量浓度为 40 mg/L 时,生物除磷颗粒污泥具有良好的沉降性及较大生物量,SVI 可达到 52.9 mL/g,TSS 质量浓度达到 5.7~5.9 g/L,显著高于其他组别,而 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量浓度为 80 mg/L 时,生物量下降,颗粒污泥略有污泥膨胀趋势。

(2) 进水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 能影响颗粒污泥的粒径分布,当进水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量浓度为 20 mg/L 时,粒径在 0.5~0.8 mm 和 0.8~1.2 mm 范围内污泥占比分别为 21.3% 和 34.5%。当进水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量浓度升高至 40 mg/L 时,污泥粒径在 0.5~0.8 mm 范围内减少至 19.5%,而在 0.8~1.2 mm 内的占比升高至 34.6%。

(3) 进水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量浓度升高促进了颗粒污泥外 EPS 内 PN 的质量分数升高,导致 PN/PS 比例升高,而当进水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量浓度为 40 mg/L 时,颗粒污泥 EPS 的质量分数达到最大值 139 mg/g。

(4) $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量浓度能影响生物除磷颗粒污泥对 TP、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 及 COD 的去除效率。当进水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量浓度为 40 mg/L、颗粒污泥稳定运行

时,TP、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除效率可分别达到 95.8%~96.4%、95% 和 94.6%~95.6%。

参考文献

- [1] Zou H, Wang Y. Phosphorus removal and recovery from domestic wastewater in a novel process of enhanced biological phosphorus removal coupled with crystallization [J]. *Bioresource Technology*, 2016, 211: 87-92.
- [2] Mielczarek A T, Nguyen H T T, Nielsen J L, et al. Population dynamics of bacteria involved in enhanced biological phosphorus removal in Danish wastewater treatment plants [J]. *Water Research*, 2013, 47(4): 1529-1544.
- [3] 蔡涛. 好氧颗粒污泥生物脱氮除磷对盐度的响应 [J]. *工业安全与环保*, 2018, 44(6): 50-52.
- [4] 樊晓燕, 高景峰, 王时杰, 等. 同步脱氮除磷系统中两种颜色好氧颗粒污泥的微生物群落特征 [J]. *环境科学研究*, 2017, 30(8): 1287-1294.
- [5] Yu S, Sun P, Zheng W, et al. The effect of COD loading on the granule-based enhanced biological phosphorus removal system and the recoverability [J]. *Bioresource Technology*, 2014, 171: 80-87.
- [6] Li D, Lv Y, Cao M, et al. Optimized hydraulic retention time for phosphorus and COD removal from synthetic domestic sewage with granules in a continuous-flow reactor [J]. *Bioresource Technology*, 2016, 216: 1083-1087.
- [7] Peng Y, Wang X, Li B. Anoxic biological phosphorus uptake and the effect of excessive aeration on biological phosphorus removal in the A²O process [J]. *Desalination*, 2006, 189(1-3): 155-164.
- [8] 徐少娟, 蒋涛, 殷峻, 等. 进水氨氮浓度对强化生物除磷 (EBPR) 系统除磷特性及微生物群落结构的影响 [J]. *环境科学学报*, 2011, 31(4): 745-751.
- [9] 李冬, 曹美忠, 郭跃洲, 等. 进水氨氮浓度对生物除磷颗粒系统的影响 [J]. *环境科学*, 2019, 40(3): 1360-1366.
- [10] 彭永臻, 潘聪, 孙事昊, 等. 进水碳氮比对中试 AAO-BAF 系统脱氮除磷性能的影响 [J]. *北京工业大学学报*, 2019, 45(9): 904-910.
- [11] Zheng X, Sun P, Lou J, 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.
- [12] Wei D, Li M, Wang X, et al. Extracellular polymeric substances for Zn(II) binding during its sorption process onto aerobic granular sludge [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2016, 301: 407-415.
- [13] Zou J, Li Y, Zhang L, et al. Understanding the impact of influent nitrogen concentration on granule size and microbial community in a granule-based enhanced biological phosphorus removal system [J]. *Bioresource Technology*, 2015, 177: 209-216.
- [14] Ye L, Pijuan M, Yuan Z. The effect of free nitrous acid on key anaerobic processes in enhanced biological phosphorus removal systems [J]. *Bioresource Technology*, 2013, 130: 382-389.
- [15] Obaja D, Mace S, Costa J, et al. Nitrification, denitrification and biological phosphorus removal in piggyback wastewater using a sequencing batch reactor [J]. *Bioresource Technology*, 2003, 87(1): 103-111. ■