

doi: 10.11918/j.issn.0367-6234.2015.04.014

不同基质条件对亚硝化污泥胞外聚合物的影响

李冬¹, 吴青¹, 梁瑜海¹, 苏庆岭¹, 张金库¹, 卫家驹¹, 张杰^{1,2}

(1.水质科学与水环境恢复工程北京市重点实验室(北京工业大学), 100124 北京;

2.城市水资源与水环境国家重点实验室(哈尔滨工业大学), 150090 哈尔滨)

摘要: 为研究基质质量浓度和类型对污泥中胞外聚合物(EPS)质量分数的影响,采用6个SBR反应器以不同氨氮质量浓度和不同基质为进水对比污泥中EPS质量分数。结果表明:氨氮质量浓度为60~200 mg/L时,EPS质量分数随氨氮质量浓度增大而增加,氨氮质量浓度超过200 mg/L时,EPS质量分数无明显增加;多糖与蛋白质的比与氨氮质量浓度线性相关, R^2 为0.9723;污泥中EPS组分受基质类型的影响,以葡萄糖为基质的污泥EPS组分中多糖质量分数偏高,以生活污水为基质的污泥EPS组分中蛋白质质量分数偏高;EPS中的蛋白质和多糖具有可降解性,当基质缺乏时可作为碳源、能源被微生物消耗;EPS影响污泥沉降性,随EPS质量分数增加,SVI呈逐渐减小趋势。

关键词: SBR反应器;氨氮质量浓度;基质类型;胞外聚合物;污泥沉降性

中图分类号: X703

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2015)04-0081-06

Effect of substrate concentration and type on the content of extracellular polymeric substances in the nitrification sludge

LI Dong¹, WU Qing¹, LIANG Yuhai¹, SU Qingling¹, ZHANG Jinku¹, WEI Jiaju¹, ZHANG Jie^{1,2}

(1.Key Laboratory of Beijing for Water Quality Science and Water Environment Recovery Engineering(Beijing University of Technology), 100124 Beijing, China; 2.State Key Laboratory of Urban Water Resource and Environment (Harbin Institute of Technology), 150090 Harbin, China)

Abstract: The content of EPS affects the characteristics of sludge and formation of the granular sludge. To study the effect of substrate concentration and type on the EPS content and the sludge settling performance, six SBR reactors with different ammonia concentrations and different substrates were used. The results showed that the EPS content increased with the increase of ammonia concentration only when ammonia nitrogen concentration was 60–200 mg/L, but did not increase significantly when the ammonia nitrogen concentration exceeded 200 mg/L. The relationship between the ratio of polysaccharide to protein and ammonia concentration was a linear correlation, with R^2 of 0.9723. The EPS was influenced by the substrate type, higher content of polysaccharide with glucose as organic, and higher content of protein with domestic waste water as substrate. The protein and polysaccharide were biodegradable, which could be used by microorganisms as carbon source and energy when the substrate was deficient. The sludge sedimentation could be affected by the EPS content, and the SVI decreased with the increase of EPS content.

Keywords: SBR; the concentration of ammonia nitrogen; the substrate type; EPS; the sludge sedimentation

胞外聚合物(extracellular polymeric substances, EPS)是在一定环境条件下由微生物分泌于体外

的高分子聚合物,其组分以多糖、蛋白质为主,质量分数约占污泥中总有机质的50%~90%,是细胞和水分外第3大类活性污泥组成物质^[1].EPS直接分散于污泥絮体的间质中,这种特殊位置决定了EPS必然影响污泥的特性.有研究^[2-3]报道了EPS中的多糖、蛋白质等大分子物质对活性污泥疏水性和絮凝沉降性能的影响.此外,胞外聚合

收稿日期: 2014-02-02.

基金项目: 国家自然科学基金(51222807);国家重大科技专项水专项(2012ZX07202-005).

作者简介: 李冬(1976—),女,教授,博士生导师;

张杰(1938—),男,博士生导师,中国工程院院士.

通信作者: 李冬, lidong2006@bjut.edu.cn.

物假说是目前比较流行的颗粒污泥形成假说^[4-5], Ross^[6]提出细胞通过 EPS 的架桥作用连接在一起,从而形成了颗粒污泥.因此, EPS 在絮状污泥颗粒化过程中具有重要作用. EPS 组成及质量分数的变化与进水基质及基质中营养物质水平密切相关^[7]. 废水中基质不同, 活性污泥系统中优势菌种种类不同, 细菌分泌的 EPS 产量和成分也不同. D.T. Sponza^[8]发现酿酒、城市污泥 EPS 以蛋白质为主, 化学、皮革、染料 3 种污泥 EPS 中蛋白质和核酸质量分数相差不大. 基质中碳氮比、碳磷比及 K、Ca、Mg、Fe 等元素质量分数影响着 EPS 的产生. 周玲君等^[9]研究的亚硝化污泥比普通污泥中的 EPS 质量分数高, 且多糖与蛋白质比值较低.

目前国内外关于 EPS 的研究主要集中在 EPS 的组成成分、物理化学性质以及改变污泥特性等方面^[10-13]. 本研究在已有研究的基础上, 采用 SBR 反应器在室温 (18~20 ℃) 环境下, 系统研究了氨氮质量浓度和基质类型对 EPS 质量分数及其组分的影响, 以期探索形成颗粒污泥的最佳

水质条件, 研究 EPS 对污泥特性的影响, 为其在城市污水处理中取得更好的效果提供基础数据与技术支持.

1 实验

1.1 实验装置

采用 6 个完全相同的 SBR 反应器, 均由有机玻璃制成, 高 18 cm, 内径 10 cm, 有效容积为 1 L, 反应器换水比为 50%. 反应器底部安装内径为 8 cm 的曝气环进行微孔曝气, 由气泵及气体流量计控制曝气强度, 并利用六连搅拌机的搅拌装置使菌种与基质充分接触混匀.

1.2 接种污泥及实验用水

接种污泥采用氨氮质量浓度为 200 mg/L 配水启动成功的亚硝化污泥, 亚硝化率达 90% 以上. 每个反应器接种的污泥量约 4 g. 实验用水 1#~5# 为人工配水, 6# 为某大学家属区实际生活污水. 人工配水中以 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 、 KH_2PO_4 为营养物质, NaHCO_3 为无机碳源, 葡萄糖为有机碳源. 各反应器具体水质见表 1.

表 1 各反应器实验水质

实验用水		$\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$	$\rho(\text{NO}_2^--\text{N})$	$\rho(\text{NO}_3^--\text{N})$	COD	有机碳源
1#	人工配水	60	<1	<1	0	0
2#	人工配水	200	<1	<1	0	0
3#	人工配水	600	<1	<1	0	0
4#	人工配水	1 000	<1	<1	0	0
5#	人工配水	60	<1	<1	280~320	葡萄糖
6#	生活污水	50~60	<1	<1	280~320	生活污水

1.3 实验方法及控制条件

采用 SBR 的运行方式, 包括瞬时进水、搅拌 (80 r/min)、曝气 (DO 为 0.3~0.5 mg/L)、沉淀 (20 min)、排水 (2 min). SBR 反应器成功运行后, 对活性污泥循环进行加水 (自来水)—搅拌—沉淀—排水过程, 将反应器中上次运行周期残留的 NH_4^+-N 、 NO_2^--N 、 NO_3^--N 、COD 淘洗干净后重新进行 SBR 运行, 每天运行 1~2 周期. 温度为室温 18 ℃ 左右, 各反应器进水 pH 为 7.4~7.8, 运行中搅拌速度为 80 r/min.

以氨氧化率达 60%~65% 确定各反应器的反应时间. 为比较不同底物条件亚硝化活性污泥分泌 EPS 的量, 具体操作方法为: 在各反应刚刚结束未静置前取泥水混合液并做 3 个平行样, 立刻进行 EPS 的提取和多糖、蛋白质质量分数的测

定, 取 3 个平行样的平均值作为不同基质条件下 EPS (多糖、蛋白质) 的质量分数. 为比较不同反应时期亚硝化活性污泥分泌 EPS 的量, 具体操作方法为: 于各反应器不同时期 (进水 15 min、氨氮氧化 60%、氨氮氧化 100%、饥饿 17 h) 分别取泥水混合液并做 3 个平行样, 提取其中的 EPS 后进行 EPS (多糖、蛋白质) 的测定, 取 3 个平行样的平均值作为各反应时期 EPS (多糖、蛋白质) 的质量分数. 为考察 EPS 质量分数对污泥沉降性的影响, 在各反应刚刚结束未静置前取泥水混合液, 进行沉降性 SVI 的测定.

1.4 分析项目与监测方法

DO、T、pH 均采用 WTW 便携测定仪测定, MLSS 采用 MODEL711 手提式测定仪测定, COD 采用 COD 快速测定仪测定. 水样分析中 NH_4^+-N

测定采用纳氏试剂光度法, $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 测定采用 N-(1-萘基)乙二胺光度法, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 测定采用紫外分光光度法. 亚硝化率、氨氧化率按下式计算:

$$\text{亚硝化率} = \frac{\Delta\rho_{\text{NO}_2^- - \text{N}} \times 100\%}{\Delta\rho_{\text{NO}_2^- - \text{N}} + \Delta\rho_{\text{NO}_3^- - \text{N}}}$$

$$\text{氨氧化率} = \frac{\Delta\rho_{\text{NH}_4^+ - \text{N}} \times 100\%}{\rho_{\text{NH}_4^+ - \text{N}}}$$

式中: $\Delta\rho_{\text{NO}_2^- - \text{N}}$ 为进出水亚硝酸盐氮的质量浓度差, mg/L; $\Delta\rho_{\text{NO}_3^- - \text{N}}$ 为进出水硝酸盐氮的质量浓度差, mg/L; $\Delta\rho_{\text{NH}_4^+ - \text{N}}$ 为进出水氨氮的质量浓度差, mg/L; $\rho_{\text{NH}_4^+ - \text{N}}$ 为进水氨氮质量浓度, mg/L.

EPS 的提取分为物理提取法、化学提取法、物理法和化学法联用的组合法^[14]. 为最大限度地提取细胞表面的 EPS, 且对细胞不破坏或破坏程度最小, 本实验采用了高速离心-超声波-热提取的物理组合法. 首先取泥水混合样品于 10 mL 离心管中, 室温下用离心机以 5 000 r/min 离心 15 min, 倒掉上清液, 加入适量磷酸盐缓冲溶液, 将污泥稀释至原体积, 之后将污泥摇散后超声处理 3 min, 80 °C 水浴 30 min (每隔 10 min 左右将泥摇匀一次), 最后用离心机 5 000 r/min 离心 15 min, 取上清液测定多糖、蛋白质质量分数, 剩余污泥测定 MLSS. EPS 中多糖质量分数的测定采用苯酚-硫酸比色法^[15], 蛋白质质量分数的测定采用考马斯亮蓝法^[16]. SVI 为混合液沉淀 30 min 后污泥容积 (mL) 与污泥干质量比 (g).

2 结果与讨论

2.1 氨氮质量浓度对污泥系统中 EPS 质量分数的影响

在控制温度、pH、DO 等运行条件相同的情况下, 1#、2#、3#、4# 反应器进水设计不同的氨氮质量浓度, 对比各氨氮水平下亚硝化污泥系统中的 EPS 质量分数. 图 1 为 4 个反应器反应结束时 EPS 质量分数的对比, 图 2 为不同氨氮质量浓度对多糖与蛋白质比值的影响.

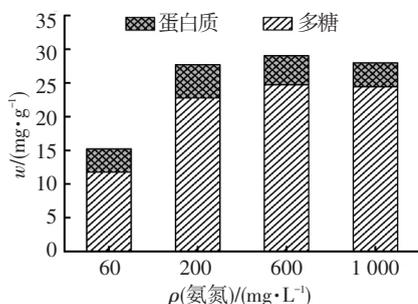


图1 氨氮质量浓度对污泥系统中 EPS 质量分数的影响

如图 1 所示, 1#、2#、3#、4# 反应器的氨氮质量浓度为 60, 200, 600, 1 000 mg/L, 其多糖质量分数分别为 11.766, 22.777, 24.744, 24.443 mg/g, 随氨氮质量浓度的增加, 多糖质量分数整体呈逐渐增大的趋势, 氨氮质量浓度在 60~200 mg/L 时, 蛋白质随氨氮质量浓度增大而增大, 之后蛋白质质量分数随氨氮质量浓度增大呈降低趋势. 由图 2 可以看出, 氨氮质量浓度在 60~1 000 mg/L 时, 多糖与蛋白质的比与氨氮质量浓度显著线性相关, 随着氨氮质量浓度增加, 比值增加.

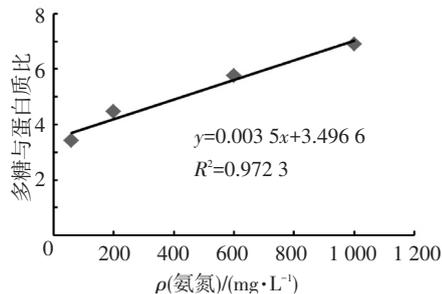


图2 氨氮质量浓度对多糖与蛋白质比的影响

分析认为, 1#、2#、3#、4# 反应器中基质相同、控制条件相同、活性污泥系统中优势菌种类相同, 细菌分泌的 EPS 产量和成分的不同主要取决于氨氮质量浓度. 研究表明, EPS 的组成物质中只有多糖是胞外合成的, 而蛋白质、脂类物质是从胞内分泌出来的^[17], 因此, 多糖的质量分数受微生物代谢活性和基质两方面影响, 而蛋白质质量分数主要受微生物代谢活性影响. 本研究中氨氮质量浓度在 60~200 mg/L 时, 随着氨氮质量浓度增加, 多糖和蛋白质质量分数均明显增加, 主要是细菌可利用的基质增多, 微生物处于较高的食物/微生物 (F/M) 条件下, 细胞合成量大, 增殖速率升高, 细菌数量逐渐增多, 代谢增强, 此时细菌分泌的 EPS 量较高^[18]. 氨氮质量浓度为 600, 1 000 mg/L, 游离氨分别达 14, 25 mg/L, 高游离氨对 AOB 菌活性有一定的抑制作用, 细菌活性降低, 因此, 蛋白质的量又呈减少趋势, EPS 量无增加趋势.

有研究表明^[19-20], 多糖与蛋白质比的降低可以促进絮状污泥之间相互聚集, 形成颗粒污泥. 因为蛋白质与多糖比值的增加提高了污泥的相对疏水性. 根据热力学原理, 污泥相对疏水性的增加将导致表面 Gibbs 能的降低, 污泥间的亲和力增强, 进而形成一个致密的结构, 进一步促使凝聚成团的污泥脱离水相^[21]; 另外, 蛋白质中氨基等正电官能团产生的正电荷能够中和多糖中羧基等负电官能团产生的负电荷, 降低污泥表面的负电

荷及污泥间的静电斥力,有利于污泥间相互接近聚集形成稳定的颗粒结构。

综上,氨氮质量浓度在 60~200 mg/L 时, EPS 质量分数随氨氮质量浓度增大而增大,氨氮质量浓度超过 200 mg/L 时, EPS 质量分数无明显增加趋势;随着氨氮质量浓度的增加,多糖与蛋白质比呈线性增加趋势。实际应用于亚硝化污泥的颗粒化过程中,初期亚硝化污泥纯化过程宜选择较高的氨氮质量浓度,形成较高游离氨抑制 NOB 菌,纯化亚硝化污泥,但是过高的游离氨质量浓度也会对 AOB 菌有一定的抑制作用。结合本实验氨氮质量浓度在 200 mg/L 左右即可实现亚硝化污泥的纯化,后期污泥颗粒化过程应适当降低氨氮质量浓度为 60~200 mg/L,因为氨氮质量浓度的降低可以减小多糖与蛋白质的比值,从而促进絮状污泥之间相互聚集形成颗粒。因此,后期应适当降低氨氮质量浓度,快速实现亚硝化污泥的颗粒化。

2.2 基质类型对污泥系统中 EPS 质量分数的影响

关于基质类型对污泥系统中 EPS 质量分数的影响,设计了 1#、5#、6# 反应器,氨氮质量浓度均为 60 mg/L 左右。1# 不含有机物,6# 为生活污水,5# 模拟生活污水,加入葡萄糖作为有机物,5#、6# 进水 COD 均在 280 mg/L 左右。图 3 为 3 个反应器反应结束时污泥系统中 EPS 组分的质量分数及多糖与蛋白质比的对比图。可以看出,3 个反应器中 EPS 产量和成分明显不同。人工配水以葡萄糖为有机物的 5# 和以生活污水为基质的 6# 污泥系统中 EPS 质量分数均明显高于不含有机物的 1#。其中 5# 系统中多糖质量分数最高,6# 系统中蛋白质质量分数明显高于其他反应器,多糖与蛋白质比明显低于其他反应器。

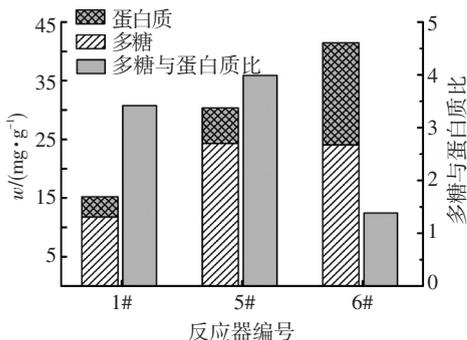


图 3 基质类型对亚硝化污泥系统中 EPS 组分的质量分数及其比值的影响

分析认为,废水中基质类型不同使得活性污泥系统中优势菌种类不同,细菌分泌的 EPS 产量和成分不同。一方面,5#、6# 中有机物的加入使

得菌种类及菌量增多,可以分泌更多的 EPS。另一方面, COD 的存在会使含碳基质转化为胞内储存粒子和在 EPS 中积累的胞外高分子,使 EPS 质量分数增加,故 5#、6# 污泥系统中 EPS 质量分数均高于 1#。5# 污泥系统中多糖水平较高,原因是以葡萄糖为有机物的配水中含有大量的碳水化合物,使多糖成为活性污泥的主要成分。6# 污泥系统中蛋白质水平较高,可能是由于城市污水可生化性较好,含有大量可生物降解的有机物,并且微生物对废水中可生物降解有机物的降解和摄取可以导致分泌大量蛋白质,因此,6# 蛋白质水平高于其他反应器,多糖与蛋白质比明显低于其他反应器。

综上,亚硝化污泥的 EPS 明显受基质类型的影响:废水中含有机物的污泥系统中 EPS 质量分数明显高于相同氨氮质量浓度、不含有机物质的污泥系统;废水中以葡萄糖为有机物的污泥系统 EPS 组分中多糖质量分数偏高,以生活污水为基质的污泥系统 EPS 组分中蛋白质质量分数偏高,多糖与蛋白质的比值明显偏低。国内外研究表明^[19-20],多糖与蛋白质比的降低可以促进污泥颗粒化,因此,将基质类型对 EPS 质量分数的影响应用于污泥的颗粒化,以生活污水为基质的污泥系统中 EPS 质量分数较高,多糖与蛋白质比较低,生活污水更利于亚硝化污泥的颗粒化。

2.3 各反应时期亚硝化污泥系统中 EPS 质量分数的变化

以 1# 反应器为例分析不同阶段污泥系统中 EPS 质量分数的变化,结果见图 4。可以看出,由进水 15 min、氨氮氧化 60% 至氨氮完全氧化时,多糖质量分数分别为 9.890, 11.766, 13.982 mg/g, 蛋白质质量分数分别为 3.061, 3.442, 4.428 mg/g。多糖、蛋白质质量分数均呈逐渐增加趋势。而当无基质静置饥饿 17 h 时,多糖、蛋白质质量分数分别降至 7.673, 1.200 mg/g, 多糖、蛋白质质量分数均明显减少。多糖与蛋白质比在有氨氮存在时均在 3.1~3.4, 无明显变化,但在静置饥饿 17 h 后比值增至 6.4, 表明在环境中营养饥饿时首先减少 EPS 中的蛋白质。原因可能是反应时期,微生物处于较高的食物/微生物 (F/M) 条件,微生物的代谢速率和生长速率均很高,此时主要由细菌的分泌导致 EPS 质量分数增加。而饥饿期,初期由于没有底物基质的存在,营养缺乏使得微生物处于较低的代谢活性。随着饥饿期的延长,微生物逐渐进入休眠或内源呼吸阶段,积累的 EPS 中多糖、蛋白质等大分子物质又充当为细菌的碳源或能源被消耗,因此,在静置饥饿 17 h 后, EPS 中多

糖、蛋白质质量分数明显降低。张云霞等^[22]的研究也证明了EPS可以被处于饥饿状态的其产生者和其他微生物降解,与本实验的研究结果相符。

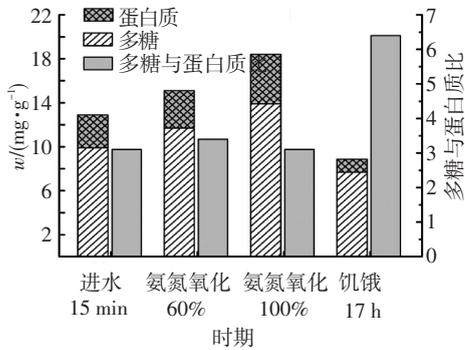


图4 典型亚硝化污泥系统中EPS质量分数的变化

综上,EPS可以抵御反应系统内恶劣环境对细胞的危害,在外部基质缺乏时充当碳源和能源物质,维持细胞的正常生命活动。对于亚硝化污泥系统,饥饿会导致多糖与蛋白质比值增大,不利于絮状污泥之间相互聚集。因此,应用到亚硝化污泥的颗粒化过程时,应避免长时间的静置饥饿,相比SBR的静置饥饿期,连续流更有利于亚硝化污泥的颗粒化。

2.4 EPS对污泥沉降性的影响

EPS影响活性污泥絮体的物化性质,如絮体密度、絮体颗粒大小、表面积、电荷密度、结合水质量分数和疏水性,而这些物化性质是反映活性污泥沉降性能的重要指标。6组反应器的EPS质量分数与SVI的关系如图5。可以看出,随EPS质量分数增大,SVI整体呈逐渐减小趋势。EPS质量分数从15.207 mg/g增加到38.511 mg/g,SVI由175.610 mL/g降至74.074 mL/g。原因为:一方面,EPS架桥学说认为,当EPS中高分子物质与微生物接触时,EPS中含线性或分支状长链结构的活性基团借助离子键、氢键、配位键等与微生物细胞结合形成三维网状结构的絮凝体,有利于污泥沉降;另一方面,多糖、蛋白质等疏水性聚合物的疏水基团或疏水侧链与微生物细胞表面的疏水性区域出于避开水的需要而被迫接近,形成更大比表面积的空间三维间质复合物。以上两种学说均支持EPS对活性污泥絮凝沉降有促进作用,与本实验结果相符。

综上,EPS质量分数的增加有利于污泥的沉降。应用于亚硝化污泥的颗粒化过程,3#、4#、6#反应器系统中污泥的沉降性好。但对于颗粒形成,絮状污泥之间的相互聚集及污泥的良好沉降性都是重要因素。在2.1节中,2#反应器多糖与蛋白质比较低利于污泥相互聚集,3#、4#反应器的污

泥沉降性好。而2.2节以生活污水为基质的6#系统中,多糖与蛋白质比较低有利于污泥之间的相互聚集,且污泥沉降性好,因此,含有机物的生活污水更有利于亚硝化污泥的颗粒化。

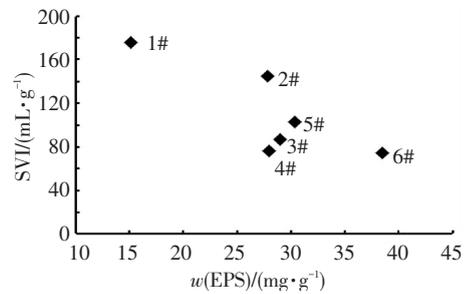


图5 EPS质量分数与污泥容积指数SVI的关系

3 结论

1) 氨氮质量浓度影响污泥系统中EPS质量分数。氨氮质量浓度在60~200 mg/L时,EPS质量分数随氨氮质量浓度增大而增大。氨氮质量浓度超过200 mg/L时,EPS质量分数无明显增加趋势。且EPS组分中多糖与蛋白质的比与氨氮质量浓度线性相关,其 R^2 为0.972。3.亚硝化污泥的颗粒化过程,初期宜选择200 mg/L的氨氮质量浓度,形成较高游离氨抑制NOB菌,纯化亚硝化污泥。后期应适当降低氨氮质量浓度为60~200 mg/L,以降低多糖与蛋白质的比,从而快速实现亚硝化污泥的颗粒化。

2) 污泥的EPS明显受基质类型的影响。氨氮质量分数相同的情况下,以含有机物的废水为基质的活性污泥比单纯以含氨氮的废水为基质的活性污泥能分泌更多的EPS。废水中以葡萄糖为有机物的污泥系统EPS组分中多糖质量分数偏高,以生活污水为基质的污泥系统EPS组分中蛋白质质量分数偏高,多糖与蛋白质的比明显偏低,因此,生活污水更利于亚硝化污泥的颗粒化。

3) EPS中蛋白质和多糖均具有可生化降解性,在外部基质缺乏时可以充当碳源和能源物质,维持细胞的正常生命活动。但饥饿会导致污泥系统中多糖与蛋白质的比升高,不利于亚硝化污泥的颗粒化。

4) EPS质量分数影响污泥沉降性。EPS质量分数增大,SVI呈逐渐减小趋势。对于颗粒污泥形成,絮状污泥之间的相互聚集及污泥的良好沉降性都是重要影响因素。

参考文献

[1] FRLUND B, PALMGREN R, KEIDING K. Extraction

- of extracellular polymers from activated sludge using a cation exchange resin [J]. *Water Research*, 1996, 30 (8):1749-1758.
- [2] YANG Shufang, LI Xiaoyan. Influences of extracellular polymeric substances (EPS) on the characteristics of activated sludge under non-steady-state conditions [J]. *Process Biochemistry*, 2009, 44 (1):91-96.
- [3] 马兴冠, 纪文娟, 江涛, 等. 生活污水处理中胞外聚合物对活性污泥絮凝沉降性的影响 [J]. *过程工程学报*, 2013, 13 (2):207-211.
- [4] 崔成武, 纪树兰, 高景峰, 等. 好氧颗粒污泥的形成机理 [J]. *水处理技术*, 2006, 32 (2): 13-15, 19.
- [5] 易诚, 湛含辉, 程胜高, 等. 好氧颗粒污泥颗粒化研究进展及发展趋势 [J]. *环境科学导刊*, 2007, 26 (5): 1-6.
- [6] ROSS W R. The phenomenon of sludge pelletisation in the anaerobic treatment of a maize processing waste [J]. *Water S AFR*, 1984, 10 (4):197-204.
- [7] KIFFR J. A study on the factors affecting biofloculation in the activated sludge process [J]. *Water Pollution Control*, 1978, 77 (4):464-470.
- [8] SPONZA D T. Investigation of extracellular polymer substances (EPS) and physicochemical properties of different activated sludge flocs under steady-state conditions [J]. *Enzyme and Microbial Technology*, 2003, 32 (3/4):375-385.
- [9] 周玲君, 杨朝晖, 罗远玲, 等. 常温下亚硝化活性污泥的驯化及其特征 [J]. *中国给水排水*, 2011, 27 (7): 10-14.
- [10] CIGDEM E, KEVIN J K, RONALD L D. Characterization of soluble organic matter of waste activated sludge before and after thermal pretreatment [J]. *Water Research*, 2006, 40 (20):3725-3736.
- [11] TIAN Yu, ZHENG Lei, SUN Dezhi. Functions and behaviors of activated sludge extracellular polymeric substances (EPS): a promising environmental interest [J]. *Journal of Environmental Sciences (China)*, 2006, 18 (3):420-427.
- [12] ANTONIO D B. Composition, fate and transformation of extracellular polymers in wastewater and sludge treatment processes [D]. USA: Cornell University, 2000.
- [13] LI Xiaoyan, YANG Shufang. Influence of loosely bound extracellular polymeric substances (EPS) on the flocculation, sedimentation and dewaterability of activated sludge [J]. *Water Research*, 2007, 41 (5): 1022-1030.
- [14] 严杰能, 许燕滨, 段晓军, 等. 胞外聚合物的提取与特性分析研究进展 [J]. *科技导报*, 2009, 27 (20):106-110.
- [15] 徐晓飞, 陈健. 多糖质量分数测定的研究进展 [J]. *食品科学*, 2009, 30 (21):443-448.
- [16] 路苹, 于同泉, 王淑英, 等. 蛋白质测定方法评价 [J]. *北京农学院学报*, 2006, 21 (2):65-69.
- [17] 吴昌永, 王然登, 彭永臻. 污水处理颗粒污泥技术原理与应用 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- [18] 李久义, 左华, 栾兆坤, 等. 不同基质条件对生物膜细胞外聚合物组成和质量分数的影响 [J]. *环境化学*, 2002, 21 (6):546-551.
- [19] 张丽丽, 陈效, 陈建孟, 等. 胞外多聚物在好氧颗粒污泥形成中的作用机制 [J]. *环境科学*, 2007, 28 (4): 795-799.
- [20] 廖青, 李小明, 杨麒, 等. 好氧颗粒污泥的快速培养以及胞外多聚物对颗粒化的影响研究 [J]. *工业用水与废水*, 2008, 39 (4): 13-19.
- [21] LIU Y, YANG S F, QIN L T, et al. A thermodynamic interpretation of cell hydrophobicity in aerobic granulation [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2004, 64 (3): 410-415.
- [22] 张云霞, 季民, 李超, 等. 好氧颗粒污泥胞外聚合物 (EPS) 的生化性研究 [J]. *环境科学*, 2008, 29 (11): 3124-3127.

(编辑 刘 彤)