

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.17.004

SBR 反应器中活性污泥胞外聚合物的提取方法比较

刘心怡^{1,2}, 汤志业^{1,2}, 朱晓茜^{1,2}, 陈庆华^{1,2,3}, 黄磊^{1,2,3}

(1. 西南大学 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400716; 2. 西南大学 资源环境学院, 重庆 400716; 3. 农村清洁工程重庆市工程研究中心, 重庆 400716)

摘要: 比较了酸法、碱法、加热法、超声法、超声 + 阳离子交换树脂 (CER) 法等 5 种方法对 SBR 反应器内活性污泥胞外聚合物 (EPS) 的提取效果。结果表明, 超声 + CER 法是最有效的提取方法, EPS 提取总量达到 (129.05 ± 7.76) mg/gVSS, 而酸法的 EPS 提取总量最少。活性污泥 EPS 的主要成分包括蛋白质 (34.69% ~ 63.49%)、腐殖酸 (24.93% ~ 48.51%) 和多糖 (9.65% ~ 18.51%)。碱法、超声法和超声 + CER 法对蛋白质的提取效率较高, 提取量可以达到 $(56.56 \pm 1.49) \sim (57.30 \pm 3.63)$ mg/gVSS; 加热法对腐殖酸的提取量最高, 为 (55.78 ± 5.08) mg/gVSS。三维荧光光谱分析结果表明, 超声 + CER 法的蛋白质类物质的荧光峰强度最高。傅里叶变换红外光谱分析结果显示, 主要的红外吸收峰与蛋白质、多糖等物质的官能团密切相关, 这与 EPS 提取组分含量相吻合。根据 EPS 总量和各组分提取效果, 推荐超声 + CER 法作为 SBR 反应器中活性污泥 EPS 的提取方法。

关键词: 胞外聚合物; 活性污泥; 提取方法; 超声; 阳离子交换树脂

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2021)17-0025-07

Comparison of Extracellular Polymeric Substance Extraction Methods from Activated Sludge in Sequencing Batch Reactor

LIU Xin-yi^{1,2}, TANG Zhi-ye^{1,2}, ZHU Xiao-xi^{1,2}, CHEN Qing-hua^{1,2,3}, HUANG Lei^{1,2,3}

(1. Key Laboratory of the Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment <Ministry of Education>, Southwest University, Chongqing 400716, China; 2. College of Resources & Environment, Southwest University, Chongqing 400716, China; 3. Chongqing Engineering Research Center of Rural Cleaning, Chongqing 400716, China)

Abstract: The extraction efficiency of extracellular polymeric substances (EPS) from activated sludge in the sequencing batch reactor (SBR) by five methods, including acid extraction method, alkali extraction method, heating extraction method, ultrasonic extraction method and ultrasonic/cation exchange resin (CER) extraction method, was compared. The ultrasonic/CER extraction method was the most effective and the extraction amount of EPS reached (129.05 ± 7.76) mg/gVSS. The total amount of EPS extracted by the acid method was the lowest. The main components of the EPS extracted from the activated sludge were protein (34.69% - 63.49%), humic acid (24.93% - 48.51%) and polysaccharide (9.65% - 18.51%). The alkali, ultrasonic and ultrasonic/CER extraction methods had

基金项目: 西南大学资源环境学院本科生科技创新“光炯”培育项目(2018003)

通信作者: 陈庆华 E-mail: cqh-101@163.com

a higher extraction efficiency of the protein, and the extraction amounts were between (56.56 ± 1.49) mg/gVSS and (57.30 ± 3.63) mg/gVSS. The heating extraction method had the highest extraction efficiency of the humic acid with extraction amount of (55.78 ± 5.08) mg/gVSS. The three-dimensional excitation-emission matrix spectrum showed that the fluorescence peak intensity of proteinaceous substances extracted by ultrasonic/CER method was the highest. The Fourier transform infrared spectrum showed that the main absorption peaks were closely related to the functional groups of the protein and polysaccharide, and the results were consistent with the extraction amounts of EPS. The ultrasonic/CER extraction method was recommended to extract EPS from activated sludge in SBRs after comparing the total extraction amounts and components of EPS.

Key words: extracellular polymeric substance; activated sludge; extraction method; ultrasonic; cation exchange resin

胞外聚合物(EPS)是指微生物分泌在细菌表面或者细菌所处环境中,能够聚集和保护细菌,并且在营养物质缺乏的情况下为细菌提供营养的有机物质。EPS 主要是由多糖、蛋白质、核酸等高分子聚合物组成,其中蛋白质和多糖占 EPS 总量的 70% ~ 80%,是 EPS 的主要成分^[1]。作为活性污泥的重要组成部分,EPS 对污泥的絮凝性能、沉降性能和脱水性能有着重要作用^[2]。

目前,EPS 的提取方法主要分为物理方法和化学方法两类。物理法主要包括加热法、蒸汽法、高速离心法、超声法等,化学法主要包括酸法、碱法、EDTA 法、离子交换法、甲醛-氢氧化钠法等。近年来,还出现了物理和化学联合使用的提取方法。提取方法对 EPS 提取效率有着至关重要的影响,好的提取方法应在拥有较高提取效率的基础上,能最大程度地保证细胞的活性和完整性^[2]。孙秀玥等人^[3]认为离心法对活性污泥 EPS 的提取量较少,不适合 EPS 的后续组分分析,一般将其作为其他提取方法的对照;Frolund 等人^[4]发现搅拌中添加阳离子交换树脂(CER)可以提高 EPS 产率;李绍峰等人^[5]将超声法与 CER 法联用提取活性污泥的 EPS,发现联用法优于单独超声法或 CER 法;综合考虑 EPS 提取效果与细胞破碎程度,龙腾锐等人^[6]认为超声 + CER 法为最优组合;Alasonati 等人^[7]认为就 EPS 总量来讲,加热法是最有效的一种 EPS 提取方法;邬卓颖等人^[8]发现 NaOH 法虽然在 EPS 提取效率上占据优势,但破坏了微生物细胞的完整性。另外,不同方法对 EPS 各组分的提取效率也有差异,例如,D'Abzac 等人^[9]发现 96% 的乙醇对 EPS 中的多糖提取效果最好;超声 + CER 法用来提取 EPS 中的蛋

白质最为适宜;而甲醛 + 加热法则是提取 EPS 中腐殖质的最优方法。

虽然国内外关于 EPS 提取方法已有较多讨论,但是由于提取对象、培养条件和具体提取步骤等存在差异,研究者难以对诸多方法归纳形成统一的提取标准。近年来,三维荧光光谱(3D-EEM)、傅里叶变换红外光谱(FTIR)等技术为 EPS 化学组分、基团的测定与分析提供了强有力的支撑。3D-EEM 可用来区分各种来源的复杂 EPS 混合物中的荧光化合物,包括芳香族蛋白质类、腐殖酸类和富里酸类物质,但无法表征多糖组分;FTIR 中吸收峰的位置可以用来表征 EPS 中的化学键及官能团,强度可用来进行相对定量分析^[10]。

笔者使用酸法、碱法、加热法、超声法与超声 + CER 法等 5 种方法,待 SBR 反应器稳定运行后,提取活性污泥的 EPS,并对其主要成分进行比较和分析,探究 EPS 的有效提取手段;同时,对提取后的 EPS 进行 3D-EEM 和 FTIR 分析,比较不同提取方法对 EPS 组分含量和基团组成的影响,以期为其他研究者选择合适的 EPS 提取方法提供参考。

1 材料与方法

1.1 污泥来源

试验接种的活性污泥来自重庆市某生活污水处理厂,污泥经驯化后置于有效容积为 10 L 的 SBR 反应器,反应器运行周期为 6 h(进水 15 min,好氧曝气 240 min,缺氧搅拌 60 min,沉淀 20 min,短曝气 10 min,沉淀 20 min,排水 10 min)。反应器进水为人工模拟的生活污水,具体水质如下:COD 为 386 mg/L, $\text{NH}_3\text{-N}$ 为 35 mg/L, TN 为 37 mg/L, TP 为 3 mg/L, pH 值为 7.5。水浴加热将温度控制在 25 ℃ 左右,

污泥浓度为3 000 mg/L左右,好氧段DO浓度为2.0~2.5 mg/L。稳定运行后,反应器出水COD为42~50 mg/L、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 为0~1 mg/L、TN为2~10 mg/L、TP为0.1~0.5 mg/L、pH值为7.0~8.0。

1.2 EPS提取方法

取40 mL污泥样品,利用高速冷冻离心机在4℃、1 300 r/min下离心15 min,弃去上清液,加入磷酸缓冲液恢复至40 mL,然后在4℃、2 600 r/min下离心15 min,弃去上清液,加入磷酸缓冲液恢复至40 mL,于4℃下保存。将污泥悬液按下述方法进行处理:

酸法:在污泥悬液中加入数滴1 mol/L的 H_2SO_4 溶液调节pH值为2.5,在300 r/min转速下搅拌1 h^[11]。

碱法:在污泥悬液中加入数滴1 mol/L的NaOH溶液调节pH值为11,在80 r/min下搅拌1 h^[12]。

加热法:将污泥悬液放入水浴锅中,在80℃下加热30 min^[13]。

超声法:超声法作用频率为20 kHz,功率为35 W,作用时间为4 min^[14]。

超声+CER法:将经过上述超声法处理后的污泥悬液,按70 g/gVSS的投加量加入CER后置于摇床中^[15],在250 r/min、4℃条件下振荡1 h。所用树脂为钠型732阳离子交换树脂。

将用上述方法处理后的污泥悬液在4℃、6 500 r/min下离心30 min,然后经0.45 μm滤膜过滤,得到EPS。

1.3 EPS测定方法

多糖采用蒽酮法测定;蛋白质及腐殖质采用修正的Folin-Lowry法测定;DNA采用二苯胺试剂法测定。由于本试验中EPS以蛋白质、多糖及腐殖质为主,所以EPS总量采用三者的总和表示,提取方法对细胞的破坏程度以DNA含量表示。

1.4 红外分析和三维荧光分析

红外光谱采用傅里叶变换红外光谱仪(Nicolet iS1010409,美国)分析,EPS在-20℃冰箱中冷冻24 h后置于冷冻干燥机干燥处理,处理后的样品与KBr以一定比例进行混合,将混合后的样品置于玛瑙研钵中磨匀,然后取适当体积压缩成薄片进行分析。红外光谱分析仪的扫描波数为4 000~500 cm^{-1} ,扫描次数为32次,分辨率为4 cm^{-1} 。

荧光光谱采用荧光分光光度计(Aqualog,

Horiba,美国)测定。三维荧光光谱激发光源为氙弧灯,激发波长(Ex)以5 nm为增量从230 nm扫描到450 nm,发射波长(Em)以0.5 nm为增量从210 nm扫描到620 nm,激发和发射狭缝均为5 nm,扫描速度为1 200 nm/min。

1.5 数据分析

试验数据通过Origin 2018整理作图,并由PASW Statistics 18.0进行数据分析。

2 结果与讨论

2.1 EPS总体提取效果

酸法是利用酸溶液中的 H^+ 进入污泥絮体内部,与EPS的大分子发生化学反应,改变其水溶性而将其高效地提取出来^[16]。本试验中酸法对EPS的总体提取效果不佳,EPS提取总量为 (24.77 ± 3.94) mg/gVSS,这与谢丹瑜等人^[11]的研究结果相类似。

碱法提取EPS是通过加入碱提升活性污泥的pH值,增加EPS的水溶性,使其更容易被提取出。本试验中碱法提取的EPS总量为 (88.51 ± 2.64) mg/gVSS。

加热法是通过加热使污泥结构松散,便于后续离心分离EPS。但是加热法会破坏EPS中分子的空间结构,导致蛋白质等变性,不适合后续对蛋白质做定性分析^[15],所以加热法中温度和控制十分重要^[13]。本试验中,在80℃下加热30 min,提取到的EPS总量为 (109.42 ± 3.44) mg/gVSS,且DNA含量为4.85%,细胞破碎程度小。

超声法主要通过超声产生的剪切力和空穴剥离EPS,可以提取不同类型厌氧颗粒污泥的EPS,并取得较高的提取效率^[17]。本试验中,超声法提取的EPS总量为 (117.94 ± 2.37) mg/gVSS,比一些文献中超声法的EPS提取量要高,这可能是因为活性污泥培养的水质环境和工艺条件存在差异,导致活性污泥EPS性质发生改变。本试验中超声法的DNA破碎率为10.09%,EPS中DNA占比在2%~15%都属于正常范围^[18]。

超声+CER法是在超声的基础上,向污泥样品中添加70 g/gVSS树脂后振荡1 h提取EPS。试验结果表明,该方法对EPS的提取量有所增加,达到了 (129.05 ± 7.76) mg/gVSS,且DNA破碎率为10.35%,与超声法相比并没有明显的细胞破碎增加,而在刘翔等人^[19]的研究中,加入CER的细胞破

碎率达到 50% 以上,这种 DNA 含量的差异可能是 CER 种类、污泥性质、操作条件不同等引起的。

在提取 EPS 总量方面,超声 + CER 法获得的 EPS 总量最高,且 DNA 含量在正常范围内,其次为超声法、碱法和加热法,酸法的提取量最少,故不建议采用。

2.2 EPS 各组分提取效果

不同方法提取 EPS 的各组分含量见图 1。除加热法外,不同提取方法获得的 EPS 各组分含量顺序均为:蛋白质 > 腐殖质 > 多糖 > DNA。试验污泥 EPS 中蛋白质是主要成分,比例在 34.69% ~ 63.49%。值得关注的是,以往的多数文献报道中都将蛋白质和多糖作为 EPS 的主要成分,腐殖质所占比例偏低,而本试验各方法提取到的腐殖质含量均高于多糖含量,占 EPS 总量的比例在 24.93% ~ 48.51% 之间。

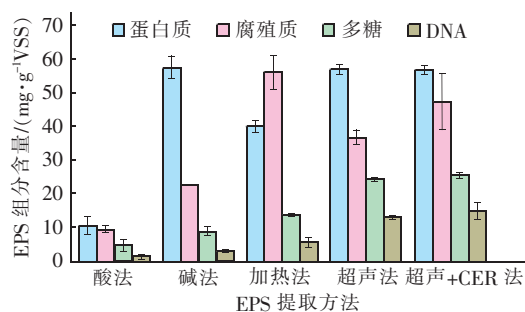


图1 不同方法提取 EPS 的各组分含量

Fig. 1 Content of EPS components extracted by different methods

综合比较以上 5 种提取方法,如果要单独对某一成分进行研究,可以根据不同的试验目的采用适合的提取方法。在蛋白质的提取上,碱法、超声法和超声 + CER 法均有优势,提取量分别为 (57.31 ± 3.63) 、 (56.93 ± 1.41) 和 (56.57 ± 1.49) mg/gVSS。碱法对蛋白质的提取效果突出,相对含量可以达到 63.49%;加热法对腐殖质的提取效果最佳,提取量可以达到 (55.78 ± 5.08) mg/gVSS;与其他三种方法相比,超声法和超声 + CER 法对多糖的提取比较有利。

2.3 红外光谱分析

采用不同方法提取得到的 EPS 的红外光谱如图 2 所示。5 种 EPS 样品都在 3400 cm^{-1} 附近存在宽峰,由羧酸、苯酚、碳水化合物以及残留水分中的—OH 和蛋白质的 N—H 伸缩振动形成,羧酸分子

和分子之间的氢键作用使得该峰峰型普遍较宽^[20]。有文献表明, $2340 \sim 2300\text{ cm}^{-1}$ 波段的吸收峰是由空气中 CO_2 干扰引起的^[21],不予考虑。在 $1640 \sim 1630\text{ cm}^{-1}$ 波段的峰由 C=O 伸缩振动形成,在 5 种 EPS 样品中均存在,主要表征的物质是典型蛋白质类物质^[22]。 $1410 \sim 1350\text{ cm}^{-1}$ 波段的吸收峰峰型在样品中并不显著,主要为醇、酚类物质的 C—H 面内弯曲振动和 C—O 伸缩振动形成。 $1150 \sim 960\text{ cm}^{-1}$ 波段的吸收峰与多糖中 C—O 的伸缩振动有关,其红外吸收峰值不稳定,可以用来反映多糖的结构和数量^[23]。波数低于 900 cm^{-1} 为指纹区,吸收峰主要是硫、磷基团,与 EPS 对污水中重金属离子的去除作用有关^[24]。

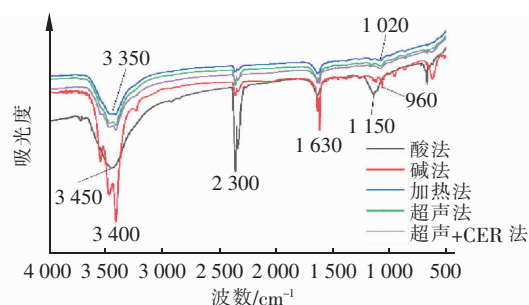


图2 不同方法提取的 EPS 的红外光谱

Fig. 2 FTIR spectra of EPS extracted by different methods

酸法和碱法提取得到的 EPS 的红外光谱峰型和峰强与其他方法相比有明显区别,说明加入化学药剂对提取到的 EPS 有较大影响。加热法提取的 EPS 在 3400 cm^{-1} 附近的红外光谱比酸法复杂。碱法提取的 EPS 虽然在蛋白质的对应峰段具有较高峰强,但考虑到碱法在加入化学试剂后对 EPS 蛋白质活性和结构具有影响^[25],所以应慎重采用。加热法、超声法和超声 + CER 法提取到的 EPS 的红外光谱峰型相似,表明这三种方法在提取 EPS 时,对其主要官能团种类影响不明显,但主要官能团的红外吸收峰强度依次增加,这与 EPS 主要成分提取量变化基本吻合。

2.4 三维荧光光谱分析

不同方法提取 EPS 的三维荧光光谱见图 3。5 种方法提取的 EPS 荧光峰主要有 4 类:类腐殖酸特征峰 A ($\text{Ex}/\text{Em} = 250 \sim 300\text{ nm}/380 \sim 480\text{ nm}$)、类富里酸特征峰 C ($\text{Ex}/\text{Em} = 240 \sim 270\text{ nm}/385 \sim 420\text{ nm}$)、类酪氨酸特征峰 T1 ($\text{Ex}/\text{Em} = 230 \sim 240\text{ nm}/300 \sim 320\text{ nm}$)、类色氨酸特征峰 T2 ($\text{Ex}/\text{Em} = 275 \sim$

290 nm/320 ~ 350 nm)^[26-27]。其中,T1、T2 峰为蛋白质类物质的特征峰。

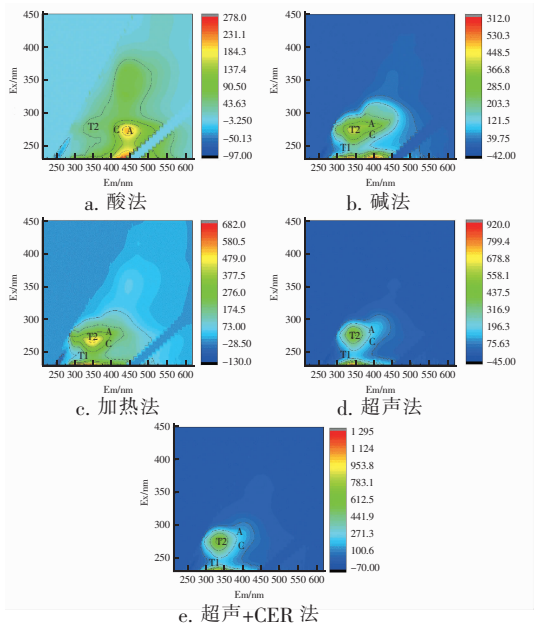


图 3 不同方法提取的 EPS 的三维荧光光谱
Fig.3 3D-EEM fluorescence spectra of EPS extracted by different methods

与其他提取方法相比,酸法提取的 EPS 荧光特

征峰的荧光强度偏小,说明酸法对蛋白质、腐殖酸、富里酸的提取效果都不佳。碱法提取的 EPS 荧光特征峰较为明显,类腐殖酸特征峰 A 和蛋白质类特征峰 T1、T2 的荧光强度较大,相比发现碱法对蛋白质的提取效果最好。加热法提取 EPS 的三维荧光光谱中峰 A 与峰 C 显著,荧光强度最大,说明加热法对腐殖酸的提取效果较好。超声法和超声 + CER 法提取 EPS 的三维荧光光谱中各特征峰的位置相似,但是超声 + CER 法的各项荧光强度均比超声法要大。

不同提取方法中 EPS 的三维荧光光谱的发射/激发波长和荧光强度见表 1。从各类物质特征荧光峰强度来看,对蛋白质类物质的提取效率:超声法 + CER 法 > 碱法 > 超声法 > 加热法 > 酸法;对腐殖酸类物质的提取效率:加热法 > 超声 + CER 法 > 超声法 > 碱法 > 酸法;对富里酸类物质的提取效率:加热法 > 碱法 > 超声 + CER 法 > 超声法 > 酸法。综合分析可知,加热法对腐殖酸类和富里酸类物质具有良好的提取效果,碱法对蛋白质类物质的提取效率较高,而超声 + CER 法对各类物质均表现出良好的提取效果。

表 1 EPS 荧光特性

Tab.1 Fluorescence characteristics of EPS

项 目	峰 A		峰 C		峰 T1		峰 T2	
	Ex、Em/nm	强度	Ex、Em/nm	强度	Ex、Em/nm	强度	Ex、Em/nm	强度
酸法	280、441	176.08	275、418	149.83	—	—	280、349	55.60
碱法	270、382	178.71	270、385	269.44	235、320	237.17	275、346	423.79
加热法	275、382	358.64	270、385	326.50	235、320	238.37	275、349	346.80
超声法	275、382	229.09	270、385	186.65	235、320	265.97	275、340	469.23
超声 + CER 法	280、382	274.59	270、385	220.48	235、320	491.63	275、330	637.19

3 结论

① 从 EPS 提取总量来看,超声 + CER 法 > 超声法 > 加热法 > 碱法 > 酸法。超声 + CER 法的 EPS 提取总量最高,为(129.05 ± 7.76) mg/gVSS;酸法的 EPS 提取总量仅为(24.77 ± 3.94) mg/gVSS,不宜采用。

② 碱法、超声法和超声 + CER 法对蛋白质具有较高的提取效率,提取量在(56.56 ± 1.49) ~ (57.30 ± 3.63) mg/gVSS 之间;加热法对腐殖酸表现出最好的提取效果,提取量达到(55.78 ± 5.08) mg/gVSS;5 种方法对多糖的提取量均较低。

③ 与其他三种提取方法相比,酸法和碱法的红外光谱图中存在峰型差异,说明化学试剂对官能

团种类有影响。超声 + CER 法提取的蛋白质类物质中类酪氨酸和类色氨酸的特征荧光峰强度高,对芳香族蛋白质类物质的提取效率高。

④ 超声 + CER 法提取的 EPS 总量最多,对蛋白质和腐殖酸的提取效率较高,细胞破碎率在正常范围内,故推荐此法用于 SBR 反应器中活性污泥 EPS 的提取。

参考文献:

[1] D'ABZAC P, BORDAS F, VAN HULLEBUSCH E, et al. Extraction of extracellular polymeric substances (EPS) from anaerobic granular sludges: comparison of chemical and physical extraction protocols [J]. Applied

- Microbiology and Biotechnology, 2010, 85 (5): 1589 – 1599.
- [2] 罗曦,雷中方,张振亚,等. 好氧/厌氧污泥胞外聚合物(EPS)的提取方法研究[J]. 环境科学学报, 2005, 25(12): 1624 – 1629.
- LUO Xi, LEI Zhongfang, ZHANG Zhenya, *et al.* Study on the extraction of extracellular polymeric substances (EPS) from aerobic/anaerobic sludges [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2005, 25(12): 1624 – 1629 (in Chinese).
- [3] 孙秀玥,唐珠,杨新萍. 活性污泥胞外多聚物提取方法的比较[J]. 环境科学, 2018, 39(7): 3306 – 3313.
- SUN Xiuyue, TANG Zhu, YANG Xinping. Comparison of extraction methods of extracellular polymeric substances from activated sludge[J]. Environmental Science, 2018, 39(7): 3306 – 3313 (in Chinese).
- [4] FROLUND B, PALMGREN R, KEIDING K, *et al.* Extraction of extracellular polymers from activated sludge using a cation exchange resin [J]. Water Research, 1996, 30(8): 1749 – 1758.
- [5] 李绍峰,王宏杰,王雪芹,等. 超声波树脂联用法提取活性污泥中的胞外聚合物[J]. 安全与环境学报, 2006, 6(5): 11 – 13.
- LI Shaofeng, WANG Hongjie, WANG Xueqin, *et al.* New method on extracting ultrasonic joint cation resin EPS [J]. Journal of Safety and Environment, 2006, 6(5): 11 – 13 (in Chinese).
- [6] 龙腾锐,罗太忠,龙向宇,等. 超声波-树脂法提取活性污泥胞外聚合物的研究[J]. 给水排水, 2008, 34(5): 34 – 39.
- LONG Tengrui, LUO Taizhong, LONG Xiangyu, *et al.* Research on extraction of extracellular polymeric substances from activated sludge by ultrasonic and cation resin [J]. Water & Wastewater Engineering, 2008, 34(5): 34 – 39 (in Chinese).
- [7] ALASONATI E, SLAVEYKOVA V I. Effects of extraction methods on the composition and molar mass distributions of exopolymeric substances of the bacterium *Sinorhizobium meliloti* [J]. Bioresource Technology, 2012, 114: 603 – 609.
- [8] 邬卓颖,郭峰,叶成松,等. 管网生物膜菌株胞外聚合物的提取方法比较[J]. 环境化学, 2012, 31(4): 539 – 544.
- WU Zhuoying, GUO Feng, YE Chengsong, *et al.* Comparison of extraction methods for extracellular polymeric substances from a drinking water biofilm-forming bacteria [J]. Environmental Chemistry, 2012, 31(4): 539 – 544 (in Chinese).
- [9] D'ABZAC P, BORDAS F, JOUSSEIN E, *et al.* Characterization of the mineral fraction associated to extracellular polymeric substances (EPS) in anaerobic granular sludges [J]. Environmental Science and Technology, 2010, 44(1): 412 – 418.
- [10] 李金璞,张雯雯,杨新萍. 活性污泥污水处理系统中胞外多聚物的作用及提取方法[J]. 生态学杂志, 2018, 37(9): 2825 – 2833.
- LI Jinpu, ZHANG Wenwen, YANG Xinping. The roles and extraction methods of extracellular polymeric substances in activated sludge wastewater treatment system [J]. Chinese Journal of Ecology, 2018, 37(9): 2825 – 2833 (in Chinese).
- [11] 谢丹瑜,康得军,唐虹,等. 活性污泥胞外聚合物提取方法比较与热碱法优化[J]. 环境工程学报, 2016, 10(9): 5295 – 5300.
- XIE Danyu, KANG Dejun, TANG Hong, *et al.* Extraction of extracellular polymeric substances from activated sludge and optimization of thermal-alkaline method [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2016, 10(9): 5295 – 5300 (in Chinese).
- [12] 唐金花,许国仁,萧静,等. 活性污泥胞外聚合物提取条件的优化[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(6): 3505 – 3507, 3535.
- TANG Jinhua, XU Guoren, XIAO Jing, *et al.* Optimization of extraction condition of extracellular polymeric substances from activated sludge [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2012, 40(6): 3505 – 3507, 3535 (in Chinese).
- [13] 王暄,季民,王景峰,等. 好氧颗粒污泥胞外聚合物提取方法研究[J]. 中国给水排水, 2005, 21(8): 91 – 93.
- WANG Xuan, JI Min, WANG Jingfeng, *et al.* Study on the extraction of extracellular polymer from aerobic granular sludge [J]. China Water & Wastewater, 2005, 21(8): 91 – 93 (in Chinese).
- [14] 方亮,张丽丽,蔡伟民. 活性污泥胞外多聚物提取方法的比较[J]. 环境科学与技术, 2006, 29(3): 46 – 47, 53.
- FANG Liang, ZHANG Lili, CAI Weimin. Comparative study of extraction methods of extracellular polymeric substances from activated sludge [J]. Environmental Science and Technology, 2006, 29(3): 46 – 47, 53 (in Chinese).

- [15] 段亮,夏四清,宋永会,等. 活性污泥胞外聚合物提取方法的优化[J]. 环境工程学报,2010,4(1):63-66. DUAN Liang, XIA Siqing, SONG Yonghui, *et al.* Optimization of extracellular polymeric substances extraction method[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2010, 4(1): 63-66 (in Chinese).
- [16] 毛艳萍,陈泉源,杜菲菲. 酸热处理提剩余污泥胞外聚合物的条件优化[J]. 环境工程学报,2012,6(9):3294-3298. MAO Yanping, CHEN Quanyuan, DU Feifei. Condition optimization of extracting extracellular polymers substance from excess sludge by acid thermal treatment [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2012, 6(9): 3294-3298 (in Chinese).
- [17] JIA X S, FURUMAI H, FANG H H P. Yields of biomass and extracellular polymers in four anaerobic sludges[J]. Environmental Technology, 1996, 17(3): 283-291.
- [18] LIAO B Q, ALLEN D G, DROPPA I G, *et al.* Surface properties of sludge and their role in bioflocculation and settleability[J]. Water Research, 2001, 35(2): 339-350.
- [19] 刘翔,黄映恩,刘燕,等. 活性污泥和生物膜的胞外聚合物提取方法比较[J]. 复旦学报(自然科学版), 2011, 50(5): 556-562. LIU Xiang, HUANG Ying'en, LIU Yan, *et al.* The comparison of effectiveness of different methods in extracting extracellular polymeric substances (EPS) from biofilm and activated sludge [J]. Journal of Fudan University (Natural Science), 2011, 50(5): 556-562 (in Chinese).
- [20] WANG Z W, WU Z C, YIN X, *et al.* Membrane fouling in a submerged membrane bioreactor (MBR) under sub-critical flux operation: membrane foulant and gel layer characterization [J]. Journal of Membrane Science, 2008, 325(1): 238-244.
- [21] 戚韩英. 影响好氧颗粒污泥形成与结构稳定的胞外多聚物关键组分研究[D]. 杭州:浙江大学,2012. QI Hanying. Study of Key Component in Extracellular Polymeric Substances during the Formation and Stability of Aerobic Granular Sludge [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012 (in Chinese).
- [22] BADIREDDY A R, CHELLAM S, GASSMAN P L, *et al.* Role of extracellular polymeric substances in bioflocculation of activated sludge microorganisms under glucose-controlled conditions [J]. Water Research, 2010, 44(15): 4505-4516.
- [23] BARTH A, ZSCHERP C. What vibrations tell us about proteins[J]. Quarterly Reviews of Biophysics, 2002, 35(4): 369-430.
- [24] FANG L C, HUANG Q Y, WEI X, *et al.* Microcalorimetric and potentiometric titration studies on the adsorption of copper by extracellular polymeric substances (EPS), minerals and their composites [J]. Bioresource Technology, 2010, 101(15): 5774-5779.
- [25] CHEN Y P, LI C, GUO J S, *et al.* Extraction and characterization of extracellular polymeric substances in biofilm and sludge via completely autotrophic nitrogen removal over nitrite system [J]. Applied Biochemistry and Biotechnology, 2013, 169(2): 526-538.
- [26] 王旭东,梁勇,王磊,等. 典型城市污水二级处理水中DOM性状特征[J]. 工业水处理, 2014, 34(12): 17-21. WANG Xudong, LIANG Yong, WANG Lei, *et al.* Characteristics of dissolved organic matter in the secondary effluent of typical urban sewage [J]. Industrial Water Treatment, 2014, 34(12): 17-21 (in Chinese).
- [27] 张晓娜,何嘉莉,陈卓华,等. 南方某水厂臭氧/活性炭深度处理工艺运行效果[J]. 中国给水排水, 2020, 36(1): 43-46. ZHANG Xiaona, HE Jiali, CHEN Zhuohua, *et al.* Performance of ozone/biological activated carbon advanced treatment process in a water treatment plant in south China [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(1): 43-46 (in Chinese).

作者简介:刘心怡(1998-),女,四川成都人,本科,研究方向为水环境污染治理。

E-mail: 437155769@qq.com

收稿日期:2020-03-14

修回日期:2020-06-02

(编辑:刘贵春)