

谭煜,付丽亚,周鉴,等.胞外聚合物(EPS)对污水处理影响的研究进展[J].环境工程技术学报,2021,11(2):307-313.

TAN Y, FU L Y, ZHOU J, et al. Research progress of the effects of extracellular polymeric substances (EPS) on wastewater treatment system[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2021, 11(2): 307-313.

## 胞外聚合物(EPS)对污水处理影响的研究进展

谭煜<sup>1,2</sup>, 付丽亚<sup>1,2</sup>, 周鉴<sup>3</sup>, 李敏<sup>1,2</sup>, 吴昌永<sup>1,2\*</sup>

1. 环境基准与风险评估国家重点实验室, 中国环境科学研究院

2. 中国环境科学研究院环境污染控制工程技术研究中心

3. 中国石油吉林石化污水处理厂

**摘要** 胞外聚合物(EPS)是污水处理厂生物处理单元常见的微生物副产物,它的赋存情况对污水处理厂不同单元的影响不同。基于已有研究成果,总结了EPS的定义,对其架构、组成及功能等进行了详细描述;分别综述了EPS在生物处理单元对微生物生长、颗粒污泥的形成、微生物聚集体的絮凝与沉降性能的影响,在深度处理单元对渗透膜通透性、催化剂传质等性能的影响,在污泥处理单元对污泥消化和脱水性能的影响,并对EPS在不同污水处理单元的行为机理进行了汇总与探索;最后对未来EPS在污水处理中的研究方向与研究内容进行了展望。

**关键词** 胞外聚合物;微生物聚集体;污水处理;絮凝;沉降;黏附

中图分类号:X703.1 文章编号:1674-991X(2021)02-0307-07 doi:10.12153/j.issn.1674-991X.20200178

### Research progress of the effects of extracellular polymeric substances (EPS) on wastewater treatment system

TAN Yu<sup>1,2</sup>, FU Liya<sup>1,2</sup>, ZHOU Jian<sup>3</sup>, LI Min<sup>1,2</sup>, WU Changyong<sup>1,2\*</sup>

1. State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences

2. Research Center of Environmental Pollution Control Engineering Technology, Chinese Research Academy of Environmental Sciences

3. Jilin Petrochemical Wastewater Treatment Plant, PetroChina Jilin Petrochemical Company

**Abstract** Extracellular polymeric substances (EPS) is a common microbial by-product of biological treatment process in wastewater treatment plants. Its occurrence has different effects on various processes of wastewater treatment system. Firstly, on the basis of previous studies, the definition of EPS was summarized, and the structure, compositions and functions of it was described in detail. Secondly, the effects of EPS on the growth of microorganisms, the formation of granular sludge, the flocculation and sedimentation performance of microbial aggregates in the biological treatment process, the permeability of the membrane and the mass transfer of the catalyst in the advanced treatment process, the impact of sludge digestion and dehydration performance in the sludge treatment process were reviewed. The behavior mechanisms of EPS in different wastewater treatment process were summarized and explored. Finally, the future research directions and contents of EPS in wastewater treatment were proposed.

**Key words** extracellular polymeric substances; microbial aggregates; wastewater treatment; flocculation; settlement; adhesion

生物处理单元是传统污水处理厂一级处理的核心单元,其中的微生物大多以污泥絮体、颗粒污泥、

生物膜等微生物聚集体的形式存在。胞外聚合物(extracellular polymeric substances, EPS)主要是由微

收稿日期:2020-07-21

基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07402-002)

作者简介:谭煜(1995—),男,硕士研究生,主要研究方向为石化废水深度处理,474551152@qq.com

\* 责任作者:吴昌永(1980—),男,研究员,博士,主要研究方向为水污染控制技术,wucy@craes.org.cn

生物分泌的、包裹在胞外的高分子聚合物组成,占活性污泥总量的 80%<sup>[1]</sup>,其组成和浓度会因微生物种类、水质环境、提取方法而有所变化。EPS 位于微生物表面的特殊位置以及其理化性质(如荷电性、亲疏水性、黏附性等)决定了 EPS 在微生物聚集体相互作用中的重要地位,因此针对 EPS 的特性以及影响研究已普遍开展。在污水处理过程中,由于部分 EPS 能够随着水流发生移动,在不同的处理单元都存在着 EPS,从能耗效率、出水水质等方面影响水处理效果,但目前关于 EPS 对污水处理系统中各单元的影响尚未有明确定论,导致对存在 EPS 的部分污水处理单元的工艺优化工作无法有效开展。笔者综述了 EPS 在生物处理单元对微生物生长、颗粒污泥的形成、微生物聚集体的絮凝与沉降性能的影响,在深度处理单元对渗透膜通透性、催化剂传质等性能的影响,在污泥处理单元对污泥消化和脱水性能的影响,并对其影响机理进行了阐释。

## 1 EPS 的定义及特性

对 EPS 的认识是由内向外逐步拓宽的。Wingender 等<sup>[2]</sup>将 EPS 作为集合名词,代表微生物聚集体内部各种大分子物质,如多糖、蛋白质、核酸、脂质等多聚物;Nielsen 等<sup>[3]</sup>将 EPS 定义范围扩大,认为位于细胞壁外,即使未直接固定在外膜之上的多聚物同样也属于 EPS;Geesey<sup>[4]</sup>将 EPS 定义为由微生物产生的参与微生物聚集体形成的胞外聚合物;Salama 等<sup>[5]</sup>进一步把 EPS 定义为由微生物产生,在生物膜系统中结合其他颗粒并黏附于其基质之上的有机多聚物。随着研究的深入与拓展,以上定义被发现仅适用于结合态 EPS,而忽略了同样对微生物聚集体中微生物活性及其表面特性有重要作用的溶解态 EPS<sup>[6]</sup>。在许多研究<sup>[7-9]</sup>中,溶解态 EPS 被认为是溶解性微生物产物(soluble microbial products, SMP)。目前,EPS 的定义尚未统一,但 EPS 是由微生物的高分子量分泌物、细胞裂解物和大分子的水解产物以及吸附的部分有机物所组成的多聚物<sup>[3]</sup>这一定义得到了广泛认可。

EPS 根据存在形式可分为结合态 EPS 和溶解态 EPS。结合态 EPS 具有明显的双层结构:1)位于内层,与细胞壁紧密结合且有一定形态的 EPS 为紧密黏附型 EPS(tightly bound EPS, TB-EPS);2)位于 TB-EPS 外,能够向周围延伸和扩散,且没有明显边界和外形的黏液层则称为松散附着型 EPS(loosely

bound EPS, LB-EPS)<sup>[10]</sup>。其结构关系如图 1 所示<sup>[11]</sup>。

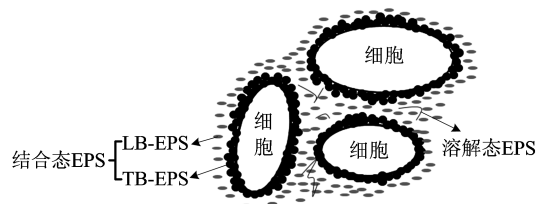


图 1 EPS 的结构示意

Fig. 1 Structure diagram of EPS

EPS 的组成复杂,包括蛋白质、多糖、腐殖酸、核酸、糖醛酸、脂质等有机成分以及一些其他的无机成分,其中蛋白质、多糖被认为是 EPS 中的主要物质,二者约占 EPS 浓度的 70%~80%<sup>[12]</sup>。实际上,EPS 浓度与各组分比例并非恒定,而是与样品的来源、提取方法、工艺参数等因素有着密切的关系。如 Sponza<sup>[13]</sup>对 5 种不同行业的污泥絮体中的 EPS 进行了提取,发现取自市政与酿酒废水活性污泥的 EPS 中蛋白质浓度高出其 DNA 的 11 倍,分别为 70 和 6 mg/g[以挥发性悬浮固体(VSS)计,下同];但在造纸、纺织以及石化行业中,污泥絮体的 EPS 中蛋白质浓度有所下降而 DNA 浓度有所增加,分别为 38~42、11~17 mg/g。王琰等<sup>[14]</sup>利用离心法、加热法、热碱法、甲醛-热碱法、甲醛-NaOH 法 5 种不同的提取方法对亚硝化颗粒污泥中的 EPS 浓度进行对比分析,结果表明,热碱法所提取的 EPS 浓度最高,为(102.1±5.2) mg/g,其蛋白质与多糖浓度比更是高达 8.4,这可能是由于经热碱法处理后的污泥细胞发生破裂,胞内蛋白质大量溶出造成的。赵华南<sup>[15]</sup>研究不同 C/N 下 SBR 脱氮性能发现,当 C/N 为 5 时,最有利于硝化菌进行硝化作用,活性污泥中 EPS 各组分浓度在硝化作用前后明显增加,且在反应结束时 EPS 的浓度最大,为 190.2 mg/g。这说明不同运行参数会影响微生物的活性和反应的进程,从而引起 EPS 浓度的变化。

微生物聚集体中 EPS 的功能有 3 种:1)EPS 具有双层结构,能为微生物形成屏障,抵抗水质、水量变化的冲击以及毒性物质的入侵<sup>[7,16]</sup>;2)EPS 的主要成分是蛋白质与多糖,在营养短缺的情况下,部分胞外蛋白质可以作为酶分解消化 EPS,为微生物的新陈代谢与生长提供碳源和能源<sup>[17-18]</sup>;3)EPS 成分复杂且依附于微生物聚集体的表面,因此会改变其表面特性(如亲疏水性、荷电性等)以及细胞间的相

互作用方式,从而影响微生物聚集体的絮凝、沉降、脱水等性能<sup>[19-21]</sup>。

## 2 EPS对污水处理单元的影响

### 2.1 生物处理单元

#### 2.1.1 对微生物生长的影响

在污水生物处理单元中,绝大多数微生物是通过EPS与其他细胞相互作用并聚集,以活性污泥、颗粒污泥、生物膜等微生物聚集体的形式完成新陈代谢。因此,EPS作用下微生物聚集体的活性与特性将会直接影响生物处理单元对污染物去除的效率和能力。

由于大部分EPS来源于微生物本身所产生的有机物,其生成也要消耗外来的碳源与氮源。在传统观点中,微生物利用基质的方式有2种:1)直接利用分解产生能量;2)合成转化为新的具有活性的细胞物质<sup>[22]</sup>。Laspidou等<sup>[7]</sup>研究指出,EPS中的非活性有机物的合成也同样需要消耗基质,若EPS浓度过高,势必会与微生物生长形成竞争,从而影响微生物的生长。吴杨芳等<sup>[23]</sup>的研究也发现,在50 mg/L高浓度纳米氧化铈的毒性环境下,活性污泥微生物所产生的EPS浓度从对照组的58.00 mg/g增至67.18 mg/g,同时活性污泥系统中的异养菌和亚硝化菌的生长被明显抑制,这是因为细胞在毒性环境下会分泌更多的EPS来吸附纳米氧化铈,形成保护层,减少了细胞与基质的接触,相应地微生物的生长速率就会减缓。因此,即使是在相对温和的生物处理单元,在估算微生物的生长情况时,EPS浓度也是不可忽视的参数。

#### 2.1.2 对微生物聚集体絮凝的影响

微生物聚集体的絮凝性能是保持生物处理单元出水低浊度的一个重要特性。Wilén等<sup>[24]</sup>在厌氧絮凝研究中,发现EPS和微生物是活性污泥解体后最主要的成分,且在生物膜系统中,也是通过微生物分泌大量EPS来实现微生物与载体、微生物与微生物之间的黏附<sup>[25]</sup>。可见,EPS在微生物聚集体的絮凝过程中发挥着重要作用。

早期研究中Tenney等<sup>[26]</sup>发现,随着EPS浓度的增加,微生物在内源呼吸阶段的絮凝程度有所提高;但张兰河等<sup>[27]</sup>研究发现,若将EPS浓度从100 mg/L提高到500 mg/L,污泥的絮凝性能约下降27%,并伴随着出水固体悬浮物浓度的大幅升高;马兴冠等<sup>[28]</sup>也得到了相似的结论,其试验中所建立的EPS浓度与污泥体积指数(SVI)的二项式非线性回

归方程表明,EPS浓度与SVI呈正相关,EPS浓度增大会使污泥的絮凝性能明显下降。这可能是因为高浓度的EPS会携带大量负电荷的功能基团,导致聚集体间排斥力增大,絮凝性能变差。

EPS的组分也会对微生物聚集体的絮凝性能产生影响。Zhang等<sup>[29]</sup>利用过氧乙酸在酸性条件下将EPS中的蛋白质分解后未发现完整的污泥絮体。Ye等<sup>[30]</sup>也发现,若将EPS中的多糖进行提取,污泥的絮凝能力几乎不受影响;相反,若是将EPS中的蛋白质进行提取,则污泥的絮凝性能会削减30%左右。但Kavita等<sup>[31-32]</sup>的对比试验得出了EPS中的单糖浓度会极大影响絮凝性能的结论,即当单糖浓度降低40%左右时,其絮凝能力下降约33%。这说明蛋白质与糖类均会对微生物聚集体的絮凝性能产生影响,一方面由于蛋白质具有疏水基团,能够加快微生物聚集体的聚集过程;另一方面多糖具有一定的黏附性,能够使微生物聚集体间更容易发生结合;再者,蛋白质和多糖带有荷电性相反的基团,能够相互抵消,从而减少微生物聚集体间的静电排斥力。因此,应从蛋白质与多糖的相对浓度来考虑EPS对微生物聚集体絮凝性能的影响。此外,王红武等<sup>[10]</sup>研究发现,LB-EPS浓度越高,污泥絮凝性能越差,而TB-EPS浓度对污泥絮凝性能基本无影响;Li等<sup>[33]</sup>也得到了同样的结论。这是因为LB-EPS相较于TB-EPS位于外层且具有一定的流变性,外层厚度的增加不仅会产生一定的位阻效应,而且会使细胞或絮体表面的zeta电位增加,从而降低污泥的絮凝性能。与此相反,Zhang等<sup>[34]</sup>的试验结果表明,LB-EPS和TB-EPS对悬浮污泥聚集的贡献率分别为16%和30%,其中TB-EPS对微生物聚集体絮凝性能的影响大于LB-EPS。由此可见,EPS对微生物聚集体絮凝性能的影响十分复杂,某些研究结论还存在争议。

关于EPS影响絮凝性能比较成熟的机理有2种:DLVO理论和离子桥联<sup>[19]</sup>。DLVO理论描述的是细胞间或絮体间的分子力与静电力作用,微生物及其聚集体表面EPS中含有多种高分子有机物,存在许多阴离子基团,如—OH、—COOH等,使其表面呈负电性<sup>[35]</sup>,聚集体之间由于静电排斥作用形成稳定的势垒,而环境中存在的反离子可以对聚集体表面的负电荷产生屏蔽作用,压缩双电层厚度,提高絮凝性能。离子桥联则是当细胞或絮体相互靠近时,EPS通过环境中多价阳离子的架桥作用将各种细胞联结形成的一种外部延伸、内部网状多孔的三维立

体结构,以此改善微生物聚集体的絮凝性<sup>[36-38]</sup>。

### 2.1.3 对污泥颗粒化的影响

污泥颗粒化是指微生物在污水生物处理反应器中的自固定化所形成的一种结构密实的好氧或厌氧颗粒。颗粒污泥中的各种微生物构成较为独立的微生态系统,使微生物生长在相对稳定的环境中,有利于微生物生长与有机物降解,进而提高出水水质。McSwain 等<sup>[39]</sup>利用共聚焦激光扫描显微镜对荧光染色的好氧颗粒污泥进行观察,发现颗粒污泥的内部存在大量的 EPS,其主要成分蛋白质可以和多价阳离子结合,有利于污泥的颗粒化;李定昌等<sup>[40]</sup>对来源于同一处理单元的 8 种不同粒径的好氧颗粒污泥进行 EPS 的提取,指出粒径为 1.6~2.0 mm 时,颗粒污泥中的蛋白质与多糖浓度比最高,同时 SVI 最低,具有良好的固液分离性能,由此提出在工程实践中,好氧颗粒污泥的培养粒径应控制在 1.6~2.0 mm;Vivanco 等<sup>[41]</sup>在向包含劣活性颗粒污泥的厌氧反应器里添加外源 EPS 时,该单元的运行性能得到了显著提升,COD 去除率从 30.6% 增至 65.5%。上述研究均表明,颗粒污泥的形成在某种程度上离不开 EPS 在细胞间的相互作用。Liu 等<sup>[42]</sup>由此提出了 EPS 的作用机理,认为 EPS 可以通过离子桥联、疏水性的相互影响和聚合物缠结紧密结合细胞,从而增强和促进颗粒污泥的形成(图 2)。

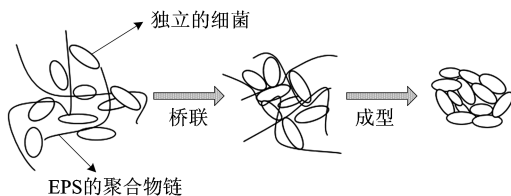


图 2 EPS 细胞间作用示意<sup>[42]</sup>

Fig. 2 Illustration of EPS intercellular functions

### 2.1.4 对污泥沉降的影响

污泥的沉降性能是评价生物处理单元工作运行状况的重要指标,直接影响着处理效率和出水水质。污泥的沉降性能与表面电荷、絮体密度、结合水量等物理化学性质有着密切的关系,SVI 常被用来表征污泥的沉降性能。研究表明,EPS 及其组分浓度对污泥的沉降性能均有影响。由于 EPS 呈负电性,过量的 EPS 会使得污泥间的排斥力增大、污泥表面的 zeta 电位升高,从而导致 SVI 升高<sup>[43-44]</sup>。针对 EPS 不同组分浓度对 SVI 影响的研究中,王红武等<sup>[10]</sup>提出,EPS 中的 LB-EPS 浓度对 SVI 的影响显著,SVI

随着 LB-EPS 浓度的增加而增大,而 TB-EPS 浓度的变化对 SVI 基本无影响。这可能与 LB-EPS 具有结构疏松、含水量高和流变性等特点有关,其浓度的变化会直接导致污泥体积与密度的变化。但也有少数研究得出 SVI 与 EPS 浓度成反比,高 EPS 浓度可以改善污泥沉降性能<sup>[45]</sup>,或 EPS 浓度与 SVI 无关<sup>[46]</sup>的结论。由于水质或污泥性质等因素,EPS 对 SVI 的影响尚无一致的结论,还需要进一步的研究和探讨。

### 2.2 深度处理单元

深度处理单元在工业废水处理中常与生物处理单元联用,目的是去除生物处理单元出水中难生物降解的物质,优化出水水质。但由于工业废水多具有毒性,生物处理单元的微生物活性会受到一定程度的抑制,导致二级出水中的微生物聚集体以及 EPS 浓度有所增加,影响深度处理单元的运行效率。

微生物聚集体表面的 EPS 能够影响微生物聚集体的黏附性,它所含有的某些官能团(如羧酸盐、磷酸盐、胺等)有助于微生物黏附在固体表面<sup>[47]</sup>;此外,由于 EPS 的存在,微生物聚集体表面呈负电性且形成疏水区域,能够吸附环境中的有机物与金属离子。适量的 EPS 能够协助微生物对污染物的去除,但是过量的 EPS 却可能在深度处理单元中引起传质与堵塞问题。在对颗粒污泥进行研究时,Mu 等<sup>[48]</sup>发现在高 EPS 浓度下,厌氧颗粒污泥的渗透性较低,这是因为颗粒污泥表面被 EPS 层所包裹,基质必须先穿过 EPS 层才能与内部的微生物接触。在污水深度处理单元中也观察到了类似的结果,如李亚男等<sup>[49]</sup>对某石化污水处理厂的二级生化池出水端(即催化臭氧氧化单元)进行了研究,发现若不对该单元进水端的生物絮体加以控制,处理效果在 7 h 内会显著下降。同样,催化剂表面也可能因为生物絮体的黏附性而沉积形成 EPS 层,占据催化剂表面的活性位点,同时增大臭氧扩散到催化剂表面的传质阻力。另外,有专家研究了 EPS 对膜生物反应器(MBR)中膜的污染。如 Xiong 等<sup>[50-51]</sup>认为 EPS 参与了膜表面结垢,导致膜的渗透通量减少和跨膜阻力升高;Zhang 等<sup>[52]</sup>提取并分离被污染的膜中的组分,发现膜污染物中的 EPS 浓度是反应器污泥中的 4 倍左右,其中多糖类物质是最主要的膜污染物。因此,若将 MBR 应用于深度处理单元,来自前端的 EPS 物质同样可能会导致膜堵塞,从而降低深度处理单元的效率。

对于微生物聚集体的黏附性,Poortinga 等<sup>[53]</sup>认为是静电力和化学键共同作用的结果,这一结论得

到了 Tsuneda 等<sup>[54]</sup>的验证,其试验表明当 EPS 浓度相对较低时,静电作用会抑制细胞在固体表面的黏附,若 EPS 浓度较大,胞间的相互作用则会增强其黏附性。但 Zhu 等<sup>[55]</sup>提出,除了包含在 DLVO 理论中的作用力外,还有非 DLVO 力控制着 EPS 对固体的黏附性。因此对 EPS 黏附机理的阐释还需进一步地研究与探索。

### 2.3 污泥处理单元

污泥处理是对污泥进行减量化、稳定化和无害化的过程,其中污泥消化与脱水是污泥处理单元的常见步骤,也是整个污水处理工艺流程高效、经济运行的保障,而 EPS 对污泥的消化与脱水性能有着显著的影响。

厌氧消化产甲烷是污泥消化常用工艺。在以往的观点中,污泥消化主要是为了去除剩余污泥中存在于微生物细胞中的有机物,稳定污泥的性质并减小污泥的体积,但这忽略了污泥中 EPS 的存在,其在活性污泥总有机物中的占比可达 50%~90%<sup>[56]</sup>。卢鹏程<sup>[57]</sup>对剩余污泥预处理-厌氧消化的联合工艺进行研究,发现通过加入柠檬酸对剩余污泥中的 EPS 进行预处理后,厌氧消化产甲烷量提高了 7.42%,挥发性固体的去除率也有所提高;程晓媛<sup>[58]</sup>将剩余污泥中所提取的 EPS 添加到污泥消化的不同阶段,发现不但能促进厌氧消化的增溶水解过程,还能够显著提高产甲烷性能,甲烷产量提高了 82.9%。可见,EPS 对污泥的消化可能具有双重影响,与污泥消化所采用的工艺以及参数有关。

污泥中的水通常可以分为 2 类:1) 与絮体作用力小、容易分离的自由水;2) 通过氢键和静电作用与絮体有强作用的结合水<sup>[59]</sup>。EPS 含有许多亲水性组分,可以结合大量的水,因此 EPS 通常被认为对污泥的脱水性能有负面影响。EPS 对污泥脱水的影响方式大致有 3 种:1) EPS 的某些分子会延伸至污泥表面之外,产生空间阻力,阻止细胞间的接触挤压;2) EPS 中的大分子会导致污泥絮体中保留大量的水,并增加絮体中的间隙水量;3) EPS 分子也可以形成稳定的凝胶类物质,防止水的外渗。Houghton 等<sup>[60]</sup>的研究发现,低浓度的 EPS 有利于污泥的脱水,这可能是因为低浓度 EPS 使污泥絮体结合得更紧密,但超过最佳浓度后,EPS 浓度增加会引起污泥脱水性能的下降;Sanin 等<sup>[61]</sup>通过试验将 EPS 提取后,发现原本靠 EPS 黏附在絮体内部的小颗粒被释放,破坏了污泥的脱水性能。这说明 EPS 浓度对于污泥的脱水性能具有双重作用。

## 3 展望

EPS 在污水处理的各单元中发挥着不同的重要作用,进一步深入探索和阐释 EPS 在污水处理厂各污水处理单元中的行为和作用机制,可以从优化 EPS 研究方法方面着手:1) 建立标准化的 EPS 提取方法。目前尚未形成统一的 EPS 提取方法,不同方法所提取的 EPS 在浓度和组分上有很大的差别,这是造成很多研究结论相互矛盾的一个重要原因。2) 构建 EPS 原位分析方法。EPS 及其组分在微生物聚集体中存在着空间上的架构,经过不同方法的分离和提取,其空间架构可能已被极大地破坏。利用原子力显微镜(AFM)和激光扫描共聚焦显微镜(CLSM)可以观测完全水合的样品,能够更加直接地分析 EPS 及其组分的行为机理。3) 开展对溶解态 EPS 的研究。现在绝大多数研究都是围绕结合态 EPS 而展开,忽略了溶解态 EPS 对微生物聚集体的影响。应进一步开展对溶解态 EPS 与溶解性微生物代谢产物特性的对比研究,如组成、物化性质、在污水处理过程中的行为等,明确溶解态 EPS 的定义与范围,有利于构建完整的 EPS 研究体系。

## 参考文献

- [1] 田禹,黄俊,郑蕾,等. 剩余活性污泥胞外聚合物对水中  $Cd^{2+}$  和  $Zn^{2+}$  的吸附效能[J]. 南京大学学报(自然科学),2006,42(5):543-548.  
TIAN Y, HUANG J, ZHENG L, et al. Adsorption of  $Cd^{2+}$  and  $Zn^{2+}$  in water by extracellular polymeric substances from waste activated sludge [J]. Journal of Nanjing University (Natural Sciences), 2006, 42(5): 543-548.
- [2] WINGENDER J, NEU T R, FLEMMING H C. What are bacterial extracellular polymeric substances [M]//Microbial extracellular polymeric substances. Heidelberg: Springer-Verlag Springer, 1999:1-19.
- [3] NIELSEN P H, JAHN A. Extraction of EPS [M]//Microbial extracellular polymeric substances. Heidelberg: Springer-Verlag, 1999:49-72.
- [4] GEESEY G G. Microbial exopolymers: ecological and economic considerations [J]. American Society Microbiol News, 1982, 48: 9-14.
- [5] SALAMA Y, CHENNAOUI M, SYLLA A, et al. Characterization, structure, and function of extracellular polymeric substances (EPS) of microbial biofilm in biological wastewater treatment systems; a review [J]. Desalination and Water Treatment, 2016, 57(35): 16220-16237.
- [6] SHENG G P, YU H Q. Formation of extracellular polymeric substances from acidogenic sludge in  $H_2$ -producing process [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2007, 74(1): 208-214.
- [7] LASPIDOU C S, RITTMANN B E. A unified theory for extracellular polymeric substances, soluble microbial products,

- and active and inert biomass [J]. *Water Research*, 2002, 36 (11): 2711-2720.
- [ 8 ] TSAI B N, CHANG C H, LEE D J. Fractionation of soluble microbial products (SMP) and soluble extracellular polymeric substances (EPS) from wastewater sludge [J]. *Environmental Technology*, 2008, 29(10): 1127-1138.
- [ 9 ] IBEID S, ELEKTOROWICZ M, OLESZKIEWICZ J A. Impact of electrocoagulation of soluble microbial products on membrane fouling at different volatile suspended solids' concentrations [J]. *Environmental Technology*, 2017, 38(4): 385-393.
- [ 10 ] 王红武, 李晓岩, 赵庆祥. 胞外聚合物对活性污泥沉降和絮凝性能的影响研究 [J]. *中国安全科学学报*, 2003, 13(9): 31-34.
- WANG H W, LI X Y, ZHAO Q X. Effect of extracellular polymeric substances (EPS) on bio-flocculation and settlement of activated sludge [J]. *China Safety Science Journal*, 2003, 13(9): 31-34.
- [ 11 ] NIELSEN P H, JAHN A. Extraction of EPS [M] // WINGENDER J, NEU T R, FLEMMING H C. *Microbial extracellular polymeric substances: characterization, structure and function*. Heidelberg: Springer-Verlag, 1999: 49-72.
- [ 12 ] DIGNAC M F, URBAIN V, RYBACKI D, et al. Chemical description of extracellular polymers: implication on activated sludge floc structure [J]. *Water Science and Technology*, 1998, 38(8/9): 45-53.
- [ 13 ] 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.
- [ 14 ] 王琰, 钱飞跃, 王建芳, 等. 亚硝化颗粒污泥中 EPS 提取方法与组成特性的比较研究 [J]. *环境科学学报*, 2015, 35(11): 3515-3521.
- WANG Y, QIAN F Y, WANG J F, et al. Comparative study on extraction methods and composition of extracellular polymeric substances (EPS) in granular nitrification sludge [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, 35(11): 3515-3521.
- [ 15 ] 赵华南. SBR 运行方式、温度及 C/N 对生物脱氮过程胞外聚合物 (EPS) 组分的影响 [D]. 兰州: 兰州交通大学, 2016.
- [ 16 ] COMTE S, GUIBAUD G, BAUDU M. Relations between extraction protocols for activated sludge extracellular polymeric substances (EPS) and complexation properties of Pb and Cd with EPS: Part II. consequences of EPS extraction methods on Pb<sup>2+</sup> and Cd<sup>2+</sup> complexation [J]. *Enzyme and Microbial Technology*, 2006, 38(1/2): 246-252.
- [ 17 ] BOYD A, CHAKRABARTY A M. Role of alginate lyase in cell detachment of *Pseudomonas aeruginosa* [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1994, 60(7): 2355-2359.
- [ 18 ] ZHANG X, BISHOP P L. Biodegradability of biofilm extracellular polymeric substances [J]. *Chemosphere*, 2003, 50(1): 63-69.
- [ 19 ] SHENGG P, YU H Q, LI X Y. Extracellular polymeric substances (EPS) of microbial aggregates in biological wastewater treatment systems: a review [J]. *Biotechnology Advances*, 2010, 28(6): 882-894.
- [ 20 ] 张鹏. 废水处理微生物胞外聚合物成分及表面特性 [D]. 重庆: 重庆大学, 2016.
- [ 21 ] 杨毅, 马新培, 杨霞霞. 城市污水生物处理过程中 SMP 与 EPS 的光谱特性和荷电特征 [J]. *环境工程学报*, 2017, 11(3): 1395-1401.
- YANG Y, MA X P, YANG X X. Spectral characteristics and charged characteristics of SMP and EPS in urban sewage biological treatment [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2017, 11(3): 1395-1401.
- [ 22 ] RITTMANN B E, MCCARTY P L. *Environmental biotechnology: principles and applications* [M]. New York: Tata McGraw-Hill Education, 2012.
- [ 23 ] 吴杨芳, 冯骞, 薛朝霞, 等. 纳米氧化铈作用下活性污泥胞外聚合物及溶解性微生物产物特性 [J]. *微生物学通报*, 2016, 43(2): 262-269.
- WU Y F, FENG Q, XUE Z X, et al. Characterization of extracellular polymeric substance and soluble microbial products under impact of CeO<sub>2</sub> nanoparticles [J]. *Bulletin of Microbiology*, 2016, 43(2): 262-269.
- [ 24 ] WILÉN B M, JIN B, LANT P. The influence of key chemical constituents in activated sludge on surface and flocculating properties [J]. *Water Research*, 2003, 37(9): 2127-2139.
- [ 25 ] 李硕, 彭永臻, 王然登. 胞外聚合物在污水生物处理中的作用 [J]. *黑龙江大学自然科学学报*, 2016, 33(4): 515-520.
- LI S, PENG Y Z, WANG R D. The role of extracellular polymers substance in biological treatment of wastewater [J]. *Journal of Natural Science of Heilongjiang University*, 2016, 33(4): 515-520.
- [ 26 ] TENNEY M W, STUMM W. Chemical flocculation of microorganisms in biological waste treatment [J]. *Journal of Water Pollution Control Federation*, 1965, 37(10): 1370-1388.
- [ 27 ] 张兰河, 李军, 郭静波, 等. EPS 对活性污泥絮凝沉降性能与表面性质的影响 [J]. *化工学报*, 2012, 63(6): 1865-1871.
- ZHANG L H, LI J, GUO J B, et al. Effect of EPS on flocculation-sedimentation and surface properties of activated sludge [J]. *Journal of Chemical Industry and Engineering*, 2012, 63(6): 1865-1871.
- [ 28 ] 马兴冠, 纪文娟, 孙俊平, 等. 生活污水处理中胞外聚合物对膜污染的影响 [J]. *过程工程学报*, 2012, 12(5): 834-838.
- [ 29 ] ZHANG W, CAO B, WANG D, et al. Influence of wastewater sludge treatment using combined peroxyacetic acid oxidation and inorganic coagulants re-flocculation on characteristics of extracellular polymeric substances (EPS) [J]. *Water Research*, 2016, 88: 728-739.
- [ 30 ] YE J, HU A, REN G, et al. Enhancing sludge methanogenesis with improved redox activity of extracellular polymeric substances by hematite in red mud [J]. *Water Research*, 2018, 134: 54-62.
- [ 31 ] KAVITA K, SINGH V K, MISHRA A, et al. Characterisation and anti-biofilm activity of extracellular polymeric substances from *Oceanobacillus iheyensis* [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2014, 101: 29-35.
- [ 32 ] FREITAS F, ALVES V D, PAIS J, et al. Characterization of an extracellular polysaccharide produced by a *Pseudomonas* strain grown on glycerol [J]. *Bioresource Technology*, 2009, 100(2): 859-865.
- [ 33 ] LI X Y, YANG S F. 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.
- [ 34 ] ZHANG P, FANG F, CHEN Y P, et al. Composition of EPS fractions from suspended sludge and biofilm and their roles in

- microbial cell aggregation[J]. *Chemosphere*, 2014, 117: 9-65.
- [35] 赵军,徐高田,秦哲,等. 胞外聚合物 EPS 组成及对污泥特性的影响研究[J]. *安全与环境工程*, 2008, 15(1): 66-69.  
ZHAO J, XU G T, QIN Z, et al. Composing of extracellular polymeric substances and its effect on sludge characteristics[J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2008, 15(1): 66-69.
- [36] LIU X M, SHENG G P, YU H Q. DLVO approach to the flocculability of a photosynthetic H<sub>2</sub>-producing bacterium, *Rhodospseudomonas acidophila* [J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, 41(13): 4620-4625.
- [37] NGUYEN T P, HANKINS N P, HILAL N. A comparative study of the flocculation behaviour and final properties of synthetic and activated sludge in wastewater treatment[J]. *Desalination*, 2007, 204(1/2/3): 277-295.
- [38] 周琪,林涛,谢丽,等. 污水处理生物絮体絮凝沉淀机理分析的综述[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2009, 37(1): 78-83.  
ZHOU Q, LIN T, XIE L, et al. Review of mechanism of bioflocculation and settleability of activated sludge bioflocs[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science Edition)*, 2009, 37(1): 78-83.
- [39] MCSWAIN B S, IRVINE R L, HAUSNER M, et al. Composition and distribution of extracellular polymeric substances in aerobic flocs and granular sludge [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2005, 71(2): 1051-1057.
- [40] 李定昌,王琦,高景峰,等. 不同粒径成熟好氧颗粒污泥 EPS 的三维荧光光谱特性[J]. *中国给水排水*, 2018, 7(34): 26-31.  
LI D C, WANG Q, GAO J F, et al. Three-dimensional excitation emission matrix fluorescence spectroscopic characterization of extracellular polymeric substances of mature aerobic granular sludge with different particle sizes [J]. *China Water & Wastewater*, 2018, 7(34): 26-31.
- [41] VIVANCO E, PUNAL A, CHAMY R. Effect of addition of an exogenous exopolymeric substance in UASB and EGSB reactors [J]. *Water Science and Technology*, 2006, 54(2): 25-31.
- [42] LIU Y Q, LIU Y, TAY J H. The effects of extracellular polymeric substances on the formation and stability of biogranules [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2004, 65(2): 143-148.
- [43] FORSTER C F. Factors involved in the settlement of activated sludge; I. Nutrients and surface polymers[J]. *Water Research*, 1985, 19(10): 1259-1264.
- [44] MORGAN J W, FORSTER C F, EVISON L. A comparative study of the nature of biopolymers extracted from anaerobic and activated sludges[J]. *Water Research*, 1990, 24(6): 743-750.
- [45] GOODWIN J A S, FORSTER C F. A further examination into the composition of activated sludge surfaces in relation to their settlement characteristics [J]. *Water Research*, 1985, 19(4): 527-533.
- [46] CHAO A C, KEINATH T M. Influence of process loading intensity on sludge clarification and thickening characteristics [J]. *Water Research*, 1979, 13(12): 1213-1223.
- [47] LONG G, ZHU P, SHEN Y, et al. Influence of extracellular polymeric substances (EPS) on deposition kinetics of bacteria [J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, 43(7): 2308-2314.
- [48] MU Y, YU H Q, WANG G. Permeabilities of anaerobic CH<sub>4</sub>-producing granules [J]. *Water Research*, 2006, 40(9): 1811-1815.
- [49] 李亚男,谭煜,吴昌永,等. 臭氧催化氧化在石化废水深度处理应用中的若干问题[J]. *环境工程技术学报*, 2019, 9(3): 275-281.  
LI Y N, TAN Y, WU C Y, et al. Application and problems of catalytic ozonation in advanced treatment of petrochemical wastewater [J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2019, 9(3): 275-281.
- [50] XIONG Y, LIU Y. Biological control of microbial attachment: a promising alternative for mitigating membrane biofouling [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2010, 86(3): 825-837.
- [51] STUCKEY D C. Recent developments in anaerobic membrane reactors[J]. *Bioresource Technology*, 2012, 122: 137-148.
- [52] ZHANG B, SUN B S, JIN M, et al. Extraction and analysis of extracellular polymeric substances in membrane fouling in submerged MBR [J]. *Acta Entiae Circumstantiae*, 2007, 227(1/2/3): 286-294.
- [53] POORTINGA A T, BOS R, NORDE W, et al. Electric double layer interactions in bacterial adhesion to surfaces [J]. *Surface Science Reports*, 2002, 47(1): 1-32.
- [54] TSUNEDA S, AIKAWA H, HAYASHI H, et al. Extracellular polymeric substances responsible for bacterial adhesion onto solid surface [J]. *FEMS Microbiology Letters*, 2003, 223(2): 287-292.
- [55] ZHU P, LONG G, NI J R, et al. Deposition kinetics of extracellular polymeric substances (EPS) on silica in monovalent and divalent salts [J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, 43(15): 5699-5704.
- [56] 周健,龙腾锐,苗利利. 胞外聚合物 EPS 对活性污泥沉降性能的影响研究[J]. *环境科学学报*, 2004, 24(4): 613-618.  
ZHOU J, LONG T R, MIAO L L. Effect of extracellular polymeric substances (EPS) on sedimentation of activated sludge [J]. *Journal of Environmental Science*, 2004, 24(4): 613-618.
- [57] 卢鹏程. 以剩余污泥胞外聚合物为处理对象的厌氧发酵预处理研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2017.
- [58] 程晓媛. 胞外聚合物促进污泥厌氧消化产甲烷性能及机制研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2019.
- [59] 刘玉学,吴伟祥,朱荫涓,等. 胞外聚合物对污泥脱水性能的影响及其提取方法研究 [J]. *科技通报*, 2008, 24(4): 565-569.  
LIU Y X, WU W X, ZHU Y M, et al. Effect of extracellular polymeric substances on dewatering of activated sludge and study on extraction methods [J]. *Bulletin of Science and Technology*, 2008, 24(4): 565-569.
- [60] HOUGHTON J J, QUARMBY J, STEPHENSON T. Municipal wastewater sludge dewaterability and the presence of microbial extracellular polymer [J]. *Water Science and Technology*, 2001, 44(2/3): 373-379.
- [61] SANIN F D, VESILIND P A. Effect of centrifugation on the removal of extracellular polymers and physical properties of activated sludge [J]. *Water Science and Technology*, 1994, 30(8): 117-127. □