

活性污泥胞外聚合物的组成与结构特点及环境行为

宋悦¹, 魏亮亮¹, 赵庆良^{1,2}, 王胜¹, 王琨^{1,2}

(1.哈尔滨工业大学市政环境工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150090;

2.城市水资源与水环境国家重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150090)

摘要:在活性污泥处理系统中,微生物大多以污泥絮体的形式悬浮在水中。胞外聚合物(EPS)作为污泥絮体的重要组成部分,以其独特的聚合结构和化学组成,在污水生物处理系统中起到重要作用。为了更好的描述EPS的环境行为,文章综合了近年来国内外相关的研究成果,首先分析了EPS的来源、化学组成及结构分布,得出EPS中包含蛋白质、多糖、腐殖酸、核酸、糖醛酸及脂类大分子等化学物质,其中蛋白质和多糖之和占总有机物含量的70%~80%;在结构上,EPS分为SB-EPS、LB-EPS和TB-EPS,三者与细胞结合的紧密程度递增,其中所含化学成分比例的不同将使其具有不同的理化特性。其次,文章对EPS的理化特征对污水处理系统的影响,如对系统中微生物降解特性的影响、磷和重金属的吸附等进行了讨论,并总结了EPS中相关的官能团对上述环境行为的贡献。同时,文章还论述了EPS中官能团的亲疏水特性及化学成分对污泥絮体的脱水性、絮凝沉降性能的影响。

关键词:胞外聚合物(EPS);生物降解性;生物除磷;重金属吸附;污泥特性

中图分类号: X703

文献标志码: A

DOI:10.16803/j.cnki.issn.1004-6216.2017.02.007

Chemical Structure and Environmental Behavior of Extracellular Polymeric Substances in Sludge: A Review

Song Yue¹, Wei LiangLiang¹, Zhao QingLiang^{1,2}, Wang Sheng¹, Wang Kun^{1,2}

(1.School of Municipal & Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China;

2.State Key Laboratory of Urban Water Resources and Environment, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

Abstract: In the traditional activated sludge process, most of the microorganisms are existing as suspended flocs in the units of wastewater treatment plants. Extracellular polymeric substance (EPS), as a significant component in sludge flocs, plays a very important role in the sewage biological system for its unique polymeric structure and chemical composition. With the aim at describing the environmental behavior of EPS in a better way, on the basis of summarization of the typical results of various literatures, the origin, chemical composition and structure distribution of EPS is analyzed firstly. It is found out that protein, polysaccharide, humic acid, nucleic acid, uronic acid, lipids and other chemical substances are the main components of EPS, with protein and polysaccharide accounting for 70~80% of the total organic content. In the terms of structure, EPS are divided into SB-EPS, LB-EPS and TB-EPS. These three fractions are binding tightly with the cells and their various chemical compositions lead to different physical and chemical properties of EPS. Furthermore, the effects of the above characteristics of EPS on the sewage disposal process such as microbial degradability, phosphorus adsorption and heavy metals removal are discussed. Then, contribution of relative functional groups of EPS to the above environmental behaviors is summarized. Meanwhile, the effects of hydrophobic/hydrophilic features and chemical compositions of the functional groups of EPS on the dewaterability and flocculation of sludge flocs are also illustrated.

Keywords: Extracellular Polymeric Substance(EPS); Biodegradability; Biological Phosphorus Removal; Heavy Metal Adsorption; Sludge Characteristics

CLC number: X703

EPS作为活性污泥的重要组成部分,是细菌在一定条件下形成的用于自我保护和相互粘附、并在饥饿环境下为细菌提供碳源和能量的有机物

质^[1];它主要包含:①由细胞分泌的黏液和荚膜;②微生物水解、分泌和代谢产物;③细胞吸附的有机物和无机物等^[2]。简单来讲, EPS类似

收稿日期: 2017-01-10

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07201003-002)基金资助

作者简介: 宋悦(1993-),女,硕士研究生。研究方向: 污水处理。

通信作者: 赵庆良(1962-),男,博士、教授。研究方向: 废水处理与资源化。E-mail: zhql1962@163.com

于细胞的细胞壁,附着在污泥细胞表面,将细胞与外界环境分隔开,它可以吸附污水中的金属离子、非金属离子、生物毒素等,是功能微生物应对有毒物质潜在威胁的第一道屏障;另外, EPS由于含有较多的蛋白质、多糖和腐殖酸等物质,具有一定生物降解性,可作为碳源物质被利用。同时, EPS中成分含量的改变会对污泥絮体的脱水性及絮凝沉降性造成影响,将直接影响到污泥的沉降性能。需要指出的是,当前的研究大多集中在对EPS某一化学特征或者单一环境行为的研究,缺乏对EPS化学组成对其环境行为影响的综述性论述,相关问题的阐明对全面了解EPS具有重要的意义。

1 EPS的化学组成及结构

通常情况下,污泥絮体中的EPS具有黏性,可形成三维网状结构,主要附着在细菌表面或围绕在细菌周围^[3]。其主要来源包括以下4个方面:①微生物自身生长过程中形成的细胞膜;②细胞脱落和凋亡产生的有机物;③细胞裂解后的产物;④微生物吸附的部分有机质。从活性污泥中提取的EPS约占污泥总固体浓度的20%~25%^[4],总有机物的50%~90%^[5]。

从化学组成角度上讲, EPS主要是由蛋白质、多糖、腐殖酸、核酸、糖醛酸及脂类大分子等成分构成,其中前两者占有有机物总量的70%~80%左右,后者仅占10%~20%^[6]。EPS中的类腐殖酸物质主要分布在污泥絮体的外部,在菌胶团内部含量极少^[5]。通常情况下,上述物质的含量易受到污泥种类的影响,如用甲醛或甲酰胺进行絮凝的污泥絮体中,蛋白质与多糖的含量比约为0.9,因此二者在絮体上的分布相对均匀,并在提取过程中存在共同的结合位点。在好氧颗粒污泥提取的EPS中,蛋白质的含量远高于多糖,二者比值可达到3.4~6.2^[7]。EPS中的核酸含量很少,主要来源于细胞裂解后死亡细胞中胞内物质释放,可作为判断EPS提取方法对细胞裂解程度的重要依据^[8]。EPS中的组分含量在不同时期会发生一定程度的变化,这是由于微生物在衰减期

分泌的蛋白质、糖类、DNA、RNA产生变化而引起^[9]。

根据EPS在细胞外分布位置的不同,可将其划分为溶解态EPS(Soluble EPS)和结合态EPS(Bound EPS)。其中,溶解态EPS包括微生物沥出物,附着在其表面的水解产物,以及细胞裂解产生的有机物^[10]。溶解态EPS在溶液中处于游离状态,是生物处理系统出水中BOD或COD的主要组成部分^[11];结合态EPS包括微生物产生的结合态聚合物、裂解/水解产物等^[12],通常呈现出具有流变性的双层结构。根据与EPS和细胞结合的紧密程度,有学者对EPS提出了更为细致的划分:即黏液层(SB-EPS)、松散附着EPS(LB-EPS)和紧密黏附EPS(TB-EPS),它们与细胞相一起构成了污泥絮体^[13]。在污水生物处理系统运行过程中,当细菌处于减速生长期或内源呼吸期时,可分泌出能与细胞紧密结合的高分子聚合物,属于TB-EPS;而细胞长期处于对数生长时,则分泌出呈疏松状态的LB-EPS,并附着于TB-EPS外层^[14]。

对于结构致密的TB-EPS来说,要采取比LB-EPS更为剧烈的提取方法才能将其从细胞表面分离。由于TB-EPS与细胞壁结合牢固不易脱落,故其对污泥絮体的性质影响较小。相对而言, LB-EPS结构松散,具有流动性,可向周围环境扩散,会对污泥的絮凝、沉降、脱水等性能产生直接影响^[15]。不同环境会对EPS的分泌量产生直接影响,如厌氧条件下外界环境氧气含量不足时细胞易发生厌氧代谢,该条件下细胞分泌的EPS量较多。

不同种类的EPS中蛋白质、多糖等含量也差异明显:胡小兵等^[16]分别提取污水厂AAO工艺中曝气池污泥的SB-EPS、LB-EPS、TB-EPS,测定结果显示:上述三组分中蛋白质与多糖含量比值分别为1.28、4.66和4.76,主要原因为:菌体最先排出的EPS大多来自游离的黏液层,后随着菌体表面附着的EPS含量增多、菌体内溶解氧含量的逐渐降低,将使得分泌排出的多糖含量减少; Yu et al^[17]分别提取了AAO及AO工艺曝气池

中的污泥EPS,发现蛋白质主要集中在TB-EPS组分中,占到该组分的97.5%~98.3%,在上清液、黏液层和LB-EPS中含量仅有1.7%~2.5%,多糖则比较均匀地分布在各组分中;袁冬琴等^[14]就活性污泥中提取的EPS化学组成进行了研究,发现TB-EPS中的蛋白质及多糖含量较多,而黏液层及LB-EPS中二者含量较少。

2 EPS在污水处理系统中的作用

2.1 碳源功能及对应的生物降解性

EPS可被细菌作为碳源和能量利用,如活性污泥处理系统中的细菌可利用其它微生物代谢产生的EPS进行生命活动。由于污泥EPS中的主要成分为多糖、蛋白质、腐殖酸等,故EPS具有一定的生物降解性;通常情况下EPS的降解性除与其自身化学结构相关外,还与污水处理系统中降解此类高聚物的酶含量密切相关。需要指出的是,污泥EPS中仍存在一定量无法生物降解的成分。Zhang et al^[18]发现,生物膜EPS在营养物质缺乏的污水处理系统中可被分泌其的微生物或活性污泥中其它的微生物降解;张云霞等^[19]通过对好氧颗粒污泥EPS生物降解性的研究,指出40%的好氧颗粒污泥EPS可作为碳源而得到利用,剩余的60%EPS不可生物降解,但上述不能被有效降解的部分对保持颗粒污泥的三维立体结构作用显著;Wang et al^[20]同样研究了好氧颗粒污泥EPS的生物降解性,发现EPS中可生物降解部分的降解速率是难生物降解EPS降解速率的50倍,但其降解速率仅为醋酸盐降解速率的1/5。此外,EPS的生物降解性与其同细胞结合的紧密程度以及提取方法也有密切关系^[21]。

2.2 生物除磷

回收污水中的磷既有助于防止水体富营养化,也对维持磷资源的可持续利用有重要意义,强化生物除磷工艺(EBPR)为目前常用的污水除磷工艺之一。近年来国内外学者通过研究发现,除聚磷菌以外,EPS对污水中磷元素的去除也有贡献。Zhang et al^[22]发现EPS中磷的主要赋存状态包括正磷酸盐(ortho P),焦磷酸盐(pyro P)和聚磷酸

盐(Poly P)。如Jing et al^[23]通过化学分馏和³¹P-NMR光谱技术对除磷系统的特性进行研究,发现在EBPR的除磷过程中,通过好氧聚磷反应形成了聚磷酸盐。因此,在除磷体系中,除聚磷菌在厌氧段释磷、好氧段吸磷发挥作用外,污泥中的EPS作为细胞与环境之间传播的必然途径也参与了除磷的反应。李硕^[24]在SBR系统的厌氧末端和好氧末端分别测定污泥EPS中TP的含量,发现TP的含量分别为45.3%和30.2%,表明EPS在除磷系统中发挥了重要的作用。龙向宇等^[25]的研究表明:EPS所吸收的磷可分为无机磷和有机磷两种形式,分别来源于高价阳离子沉淀物或络合物以及细菌细胞的分泌物。在传统的污水处理系统中,EPS的除磷量占系统除磷总量的60%~62%,高于细菌细胞的除磷量,因此,EPS在生物除磷过程中充当了磷储存库的作用。方振东等^[26]在前者的研究基础上发现,EPS中的低分子量聚磷酸盐(LMW Poly-P)和高分子量聚磷酸盐(HMW Poly-P)含量在厌氧系统中会降低,而在好氧状态下会升高,这说明EPS不仅充当了生物除磷过程的中转站,也参与了生物除磷过程。韩玮等^[27]对SBR系统污泥EPS的蓄磷能力进行了计算,发现其蓄磷能力可达10 mP/gVSS。

2.3 吸附重金属

污水中的重金属离子来源广泛且不能被微生物分解,因此过量的重金属在污水处理系统中将通过生物链的积累进而得到去除。Brown et al^[28]研究了活性污泥EPS对钙、镍、锰、钴等金属离子的吸附过程,得出二者结合的机理主要归功于表面络合,即金属离子与EPS上带负电的官能团的络合;Sun et al^[29]在此基础上做了进一步分析,发现能够与重金属离子进行络合配位的EPS官能团主要来自于羧基、氨基基团;Yin et al^[30]利用EDX研究Cu²⁺、Cd²⁺在EPS上的附着特性,发现离子交换机制在此反应中效果显著;除此之外,EPS与可溶性金属成键、物理吸附和沉淀^[15]等也对重金属的吸附起到了重要作用。

不同的EPS组分、金属离子种类对于二者之间的吸附效能、结合强度及吸附机制等也会产生

一定的影响。Zheng et al^[31]利用从活性污泥中提取的EPS分别吸附 Cd^{2+} 、 Zn^{2+} 、 Pb^{2+} ，得出含氮基团在吸附 Cd^{2+} 、 Pb^{2+} 过程中起到了主要作用，而氨基S-、P-基团与 Pb^{2+} 吸附密切相关。Wen et al^[32]选取的金属离子与前者相同，通过吸附实验证实了EPS中蛋白质表面附着的羧基和羟基可通过络合作用与重金属离子结合，同时，EPS含有的亲水和疏水基团使其可通过静电引力和离子交换作用吸附金属离子；Guo et al^[33]研究发现：EPS与 Hg^{2+} 、 Ca^{2+} 的结合机制不同，前者主要通过络合作用附着在EPS上，而后者主要以静电引力被EPS吸附；此外他们^[34]通过对EPS对 Cu^{2+} 的吸附热力学的研究，证明该吸附过程为放热反应，增加 Cu^{2+} 浓度会使EPS结构趋于紊乱；Jin et al^[35]提取了硫酸盐还原菌内的EPS，发现其中的多糖和腐殖酸均可为 Zn^{2+} 提供吸附位点，而 Cu^{2+} 只能与多糖进行结合，他们还证明蛋白质中的色氨酸对重金属离子吸附意义重大；Sophie et al^[12]分别对溶解态、结合态EPS吸附重金属进行了研究，发现溶解态与结合态EPS在吸附重金属时，二者的结合强度无明显差别，但结合位点数量明显不同：溶解态EPS与 Cu^{2+} 、 Pb^{2+} 、 Ni^{2+} 吸附时的结合位点远多于结合态EPS。

3 EPS对污泥性能的影响

在活性污泥法系统中，微生物EPS、有机颗粒、无机颗粒等是通过复杂的聚合过程形成污泥絮体，故絮体的结构及其凝聚、沉降性能会直接影响污水处理系统的处理效果。EPS在活性污泥絮体中的含量仅次于微生物细胞和结合水，它在细胞表面形成巨大的网状结构有利于两者的相互作用。因此，一旦环境条件改变使EPS中官能团发生变化，将对污泥的脱水、絮凝、沉降等性能产生直接影响。

3.1 EPS对污泥脱水的影响

污泥的脱水性能与颗粒污泥粒径、污泥浓度、有机物含量、菌胶团组成、污泥中水的形态及分布、污泥中胶体物多少直接相关，因此，EPS理化性质的改变会对污泥的脱水性能产生影

响。Joranad^[36]用XAD树脂对EPS组分进行分离，发现蛋白质占疏水组分的7%，而亲水组分中的主要含量为多糖，这说明EPS中蛋白质和多糖比例的会影响污泥亲疏水性的表现，从而影响污泥的脱水性。刘轶等^[37]对SBR中的EPS进行提取和SPSS软件分析，发现EPS总含量对污泥脱水效能影响不大，而EPS组分比例会对污泥脱水性能产生直接影响：胞外蛋白质与多糖的比值越大，污泥的Zeta电位越大，从而导致污泥絮体的亲水性增强、脱水性能变差；同时，EPS组分中LB-EPS的增多会导致污泥絮体内间隙水增多、Zeta电位增大，故LB/TB值升高会使污泥的脱水性能变差；周俊等^[38]对石湖墟和昂船州污泥脱水性能的研究，发现EPS组分中黏液层含量与污泥脱水性呈负相关；朱睿等^[39]以CST作为表征手段探究了EPS组分对污泥脱水性的影响，指出EPS中溶解性多糖的含量是影响厌氧消化浓缩污泥脱水性的主要因素，而EPS中蛋白质和结合态多糖的含量与污泥脱水性关系甚微。

3.2 EPS对污泥絮凝沉降的影响

目前，学者们普遍认可的活性污泥絮体的絮凝动力学机理包括以下两种：聚合物的阳离子架桥(DCB)理论和双电层理论。其中，DCB理论认为：二价或更高价阳离子可以结合污泥EPS中带负电荷的位点通过吸附架桥形成聚合物，附着在细菌或污泥絮体表面，以此种方式聚集稳定细菌和EPS的基质。Higgins et al^[40]经实验研究发现，向活性污泥系统中增加 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 的含量会使系统中结合态蛋白质含量升高，同时污泥沉降性能得到改善，而向系统中投加一价阳离子会导致系统沉降性能恶化。这是由于一价阳离子可以通过离子交换机制置换二价阳离子，使得EPS与其分离导致污泥解絮。

双电层理论是指EPS为具有带负电的负离子层，会由于电性吸引而在其外部形成反离子层。基于此理论，Overbeek et al^[22]提出DLVO理论，以溶胶粒子间存在的范德华引力和静电斥力来解释粒子间吸附性能的变化，但将此理论应用到污水处理系统中时，未考虑体系中的水分子会在污泥

颗粒间形成中等强度的氢键,水分子的运动打破这种氢键进而影响污泥絮体的絮凝沉降效果。基于此,Stewart et al^[41]将酸碱水合作用加入上述理论,成为XDLVO理论,该理论更适用于活性污泥体系。根据上述理论,污泥絮体表面负电荷的增加将会提高絮体间的静电斥力,进而削弱絮凝作用^[42]。EPS中的主要成分蛋白质和多糖所含的氨基和羧基分别带有正电荷和负电荷,如果EPS中蛋白质的含量高于多糖,就能中和污泥表面的负电荷,降低污泥絮体间的排斥力,促进污泥絮体的絮凝。基于此推论,何志江等^[43]分析了北京市7个不同污水处理厂污泥的絮凝性能,发现当EPS中蛋白质与多糖的比例从1.28增至25.34时,絮凝性能(FA)从0.19增加到0.73,同时出水悬浮物浓度明显下降;李军等^[44]研究了LB-EPS对污泥沉降性能的影响,通过不断增加曝气强度,EPS中的LB组分不断升高,致多糖含量不断增大,此时污泥沉降性能显著下降;陈瑶^[45]提取了污泥表面的LB-EPS和TB-EPS,发现二者对污泥絮体的絮凝沉降效果均有贡献,且对于自养、异养和混合营养的污泥体系,二者的贡献程度不同。

4 结语

EPS中所包含的物质来源复杂、种类繁多,它独特的三维网状结构使其具有诸多特性,可在污水处理系统中广泛应用。EPS由外到内的分布为SB-EPS、LB-EPS和TB-EPS,它们的共同作用维持着污泥絮体结构的稳定性,并实现了细胞内外的物质和能量交换。EPS部分具有生物降解性,可作为细菌或其它微生物的碳源,另外不能被生物降解的部分具有维持细胞结构的功能。同时,由于EPS具有一定的蓄磷能力并参与除磷反应,可应用于生物除磷系统。EPS中所包含的羧基、羟基等官能团可通过络合配位、离子交换、成键、物理吸附和沉淀等作用吸附污水中的重金属,且不同组分的EPS与不同重金属结合的吸附位点种类和数量都不同。在对污泥性能的影响方面,由于EPS中多糖疏水而蛋白质亲水,两者比

例增大会降低污泥的脱水性。同时,溶解性多糖、黏液层、LB-EPS的含量变化也会对污泥脱水性造成影响。此外,EPS中的组分会通过影响吸附架桥、范德华引力、静电斥力、酸碱水合作用等影响污泥的絮凝沉降。结合上述结论,不难发现EPS在水处理系统中的应用存在巨大潜力,故今后对EPS的研究应更加深入且有针对性,通过研究EPS化学结构特征和环境行为间的相关性,对化学组成进行优化,以便将其有益的环境行为高效发挥出来。

参考文献

- [1]夏志红,任勇翔,杨 垒,等. 自养菌和异养菌胞外聚合物对活性污泥絮凝特性的影响[J]. 环境科学学报,2015,35(02):468-475.
- [2]王盛勇. 贫营养条件下微生物代谢产物和生物多样性的研究[D]. 天津: 天津大学,2009.
- [3]万金保,朱邦辉. 废水生物处理领域中胞外聚合物的研究进展[J]. 环境污染与防治,2009,31(07):77-81.
- [4]Frønd 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]常 青. 活性污泥中胞外聚合物的组成及功能分析[D]. 西安: 西安建筑科技大学,2014.
- [6]Liu H, Fang H H. Extraction of extracellular polymeric substances(EPS) of sludges [J]. Journal of Biotechnology, 2002, 95(3):249-256.
- [7]Adav S S, Lee D J. Extraction of extracellular polymeric substances from aerobic granule with compact interior structure [J]. Journal of Hazardous Materials, 2008, 154(1-3):1120-1126.
- [8]刘 美,王 湛. 胞外聚合物对膜污染的影响[J]. 水处理技术,2007,33(10):7-13.
- [9]李海松,闻 岳,曹阿生,等. 胞外多聚物对活性污泥絮凝性能影响的研究进展[J]. 环境污染与防治,2012,34(07):64-69+89.
- [10]Comte S, Gulbaud G, Baudu M. Biosorption properties of extracellular polymeric substances (EPS) resulting from activated sludge according to their type: soluble or bound[J]. Process Biochemistry, 2006, 41(4):815-823.
- [11]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(1):2711-2720.
- [12]Nielsen P H, Jahn A, Palmgren R. Conceptual model for production and composition of exopolymers in biofilms[J]. Water Science and Technology, 1997, 36(1):11-19.
- [13]袁冬琴,王毅力. 活性污泥胞外聚合物(EPS)的分层组分及其理化性质的变化特征研究[J]. 环境科学,2012,33(10):3522-3528.
- [14]唐朝春,刘 名,陈惠民,等. 废水生物处理系统中胞外多聚物的研究进展[J]. 化工进展,2014,33(6):1576-1581.
- [15]Li X Y, Yang S F. Influence of loosely bound extracellular polymeric substance (EPS) on the flocculation, sedimentation and dewaterability of activated sludge[J]. Water Research, 2007, 1(5):1022-1030.
- [16]胡小兵,叶 星,周元凯,等. 胞外聚合物对活性污泥吸附生活污水

- 碳源的影响[J]. 环境科学学报, 2016, 36(11):4062–4069.
- [17] Yu G H, He P J, Shao L M. Characteristics of extracellular polymeric substances (EPS) fractions from excess sludges and their effects on bioflocculability[J]. Bioresource Technology, 2009, 100(13):3193–3198.
- [18] Zhang X, Bishop P L. Biodegradability of biofilm extracellular polymeric substances[J]. Chemosphere, 2003, 50(1):63–69.
- [19] 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.
- [20] Wang Z W, Liu Y, Tay J H. Biodegradability of extracellular polymeric substances produced by aerobic granules[J]. Applied Microbiology And Biotechnology, 2007, 74(2):462–466.
- [21] More T T, Yadav J S S, Yan S, et al. Extracellular polymeric substances of bacteria and their potential environmental applications [J]. Journal of Environmental Management, 2014, 144:1–25.
- [22] Li W W, Zhang H L, Sheng G P, et al. Roles of extracellular polymeric substances in enhanced biological phosphorus removal process[J]. Water Research, 2015, 86:85–95.
- [23] Jing S R, Benefield L D, Hill W. Observations relating to enhanced phosphorus removal in biological–systems[J]. Water Research, 1992, 26(2):213–223.
- [24] 李硕. 生物除磷颗粒污泥对污水中锌和铅的去除性能[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- [25] 龙向宇, 方振东, 唐然, 等. 胞外聚合物在生物除磷中作用的研究[J]. 环境科学学报, 2012, 32(04):784–789.
- [26] 方振东, 仙光, 龙向宇, 等. 胞外聚合物磷酸盐形态对生物除磷过程的影响研究[J]. 环境科学学报, 2014, 34(09):2205–2212.
- [27] 韩玮, 袁林江, 柴璐. 胞外聚合物蓄磷能力及其与生物除磷的关系[J]. 安全与环境学报, 2012, 12(05):23–28.
- [28] Brown M J, Lester J N. Role of bacterial extracellular polymers in metal uptake in pure bacterial culture and activated sludge–II: Effects of mean cell retention time[J]. Water Research, 1982, 16(11):1549–1560.
- [29] Sun X F, Wang S G, Zhang X M, et al. Spectroscopic study of Zn^{2+} and Co^{2+} , binding to extracellular polymeric substances (EPS) from aerobic granules[J]. Journal of Colloid & Interface Science, 2009, 335(1):11–17.
- [30] Yin Y, Hu Y, Xiong F. Sorption of $\text{Cu}(\text{II})$ and $\text{Cd}(\text{II})$ by extracellular polymeric substances (EPS) from *Aspergillus fumigatus*[J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2011, 65(7):1012–1018.
- [31] Zheng L, Tian Y, Ding A Z, et al. Spectral analysis of Cd , Zn , and Pb adsorption by extracellular polymeric substances from activated sludge[J]. Journal of Residuals Science & Technology, 2012, 9(1):29–39.
- [32] Liu W, Zhang J S, Jin Y J, et al. Adsorption $\text{Pb}(\text{II})$, $\text{Cd}(\text{II})$, and $\text{Zn}(\text{II})$ by extracellular polymeric substances extracted from aerobic granular sludge: Efficiency of protein[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2015, 3(2):1223–1232.
- [33] Sheng G P, Xu J, Li W H, et al. Quantification of the interactions between Ca^{2+} , Hg^{2+} and extracellular polymeric substances(EPS) of sludge[J]. Chemosphere, 2013, 93(7):1436–1441.
- [34] Sheng G P, Xu J, Luo H W, et al. Thermodynamic analysis on the binding of heavy metals onto extracellular polymeric substances(EPS) of activated sludge[J]. Water Research, 2013, 47(2):607–614.
- [35] Wang J, Li Q, Li M M, et al. Competitive adsorption of heavy metal by extracellular polymeric substances(EPS) extracted from sulfate reducing bacteria[J]. Bioresource Technology, 2014, 163:374–376.
- [36] Jorand F, Boue–Bigne F, Block J C, et al. Hydrophobic/hydrophilic properties of activated sludge exopolymeric substances[C]. Water Science and Technology, 1998, 37(4–5):307–315.
- [37] 刘轶, 周健, 刘杰, 等. 污泥脱水性能的关键影响因素研究[J]. 环境工程学报, 2013, 7(07):2689–2693.
- [38] 周俊, 周立祥, 黄焕忠. 污泥胞外聚合物的提取方法及其对污泥脱水性能的影响[J]. 环境科学, 2013, 34(07):2752–2757.
- [39] 朱睿, 吴敏, 杨健, 等. 浓缩污泥中胞外聚合物组分与脱水性的关系[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2010, 46(03):385–388.
- [40] Higgins M J, Novak J T. Characterization of exocellular protein and its role in bioflocculation [J]. Journal of Environmental Engineering, 1997, 123(5):479–485.
- [41] Valin S D, Sutherland D J. Predicting bioflocculation: New developments in the application of flocculation theory [J]. Environmental Technology Letters, 1982, 3(1–11):363–374.
- [42] Zita A, Hermansson M. Effects of ionic strength on bacterial adhesion and stability of flocs in a wastewater activated–sludge system[J]. Applied and Environmental Microbiology, 1994, 60(9):3041–3048.
- [43] 何志江, 赵媛, 张源凯, 等. 活性污泥表面性质对絮凝沉降性能与出水悬浮物的影响[J]. 环境科学, 2016, 37(08):3135–3143.
- [44] 李军, 商卫纯, 蔡娟, 等. 不同曝气强度下活性污泥中松散束缚型胞外聚合物组分含量及其对污泥沉降性能的影响[J]. 环境污染与防治, 2014, 36(04):6–10.
- [45] 陈瑶. 基于XDLVO理论的污泥絮凝沉降性能影响因素研究[D]. 重庆: 西南大学, 2015.