

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.5
第40卷 第5期

目次

2016年10~11月期间北京市大气颗粒物污染特征与传输规律	张晗宇,程水源,姚森,王晓琦,张俊峰(1999)
餐饮排放有机颗粒物的质量浓度、化学组成及排放因子特征	王红丽,景盛翱,乔利平(2010)
泰山顶(1534 m)夏季气溶胶粒径分布特征	沈利娟,王红磊,银燕,陈魁,陈景华,施双双(2019)
郑州-新乡冬季PM _{2.5} 中元素浓度特征及其源分析	闫广轩,张朴真,黄海燕,高雅,张靖雯,宋鑫,张佳羽,李怀刚,曹治国,姜继韶,樊静,王跃思,金彩霞(2027)
我国PM _{2.5} 浓度分阶段改善目标情景分析	贺晋瑜,燕丽,王彦超,雷宇,汪旭颖(2036)
安阳市典型工业源PM _{2.5} 排放特征及减排潜力估算	杜小申,燕丽,贺晋瑜,汪旭颖,王克,张瑞芹(2043)
郑州市典型工业炉窑细颗粒物排放特征及清单	赵庆炎,韩士杰,张铁舜,杨留明,张瑞芹,燕启社(2052)
2015年南京市城区挥发性有机物组成特征及大气反应活性	乔月珍,陈凤,赵秋月,刘倩(2062)
兰州市化石燃料燃烧源排放VOCs的臭氧及二次有机气溶胶生成潜势	刘镇,朱玉凡,郭文凯,刘晓,陈强(2069)
12种常见落叶果树BVOCs排放清单和排放特征	李双江,袁相洋,李琦,冯兆忠(2078)
我国典型陆地生态系统水化学离子特征及空间分布	黄丽,张心昱,袁国富,朱治林,唐新斋,孙晓敏(2086)
我国典型区域地表水环境中抗生素污染现状及其生态风险评价	刘昔,王智,王学雷,李珍,杨超,厉恩华,位慧敏(2094)
我国七大流域水体多环芳烃的分布特征及风险评价	范博,王晓南,黄云,李霖,高祥云,李雯雯,刘征涛(2101)
大连海域入海污染源中PFASs的赋存、输入通量和季节特征	陈虹,韩建波,张灿,程嘉熠(2115)
干旱内陆河流域降水稳定同位素的时空特征及环境意义	袁瑞丰,李宗省,蔡玉琴,邹海明(2122)
柳林泉域岩溶地下水区域演化规律及控制因素	黄奇波,覃小群,刘朋雨,程瑞瑞,李腾芳(2132)
崇左响水地区岩溶地下水主要离子特征及控制因素	周巾枚,蒋忠诚,徐光黎,覃小群,黄奇波,张连凯(2143)
三峡水库水体溶解磷与颗粒磷的输移转化特征分析	秦延文,韩超南,郑丙辉,马迎群,杨晨晨,刘志超,张雷,赵艳民(2152)
三峡水库蓄水至175 m后干流沉积物磷蓄积特征及释放潜力	黎睿,潘婵娟,汤显强,肖尚斌,李青云,杨文俊(2160)
不同水期洞庭湖水体中磷分布特征及影响因素	李莹杰,王丽婧,李虹,欧阳美凤(2170)
巢湖十五里河沉积物磷平衡浓度对外源磷的响应及释放风险	李如忠,鲍琴,戴源(2178)
闽江上游溪流沉积物有机磷空间分布及其环境意义分析	徐健,袁旭音,叶宏萌,张晓辉,周慧华,韩年(2186)
生态工程综合治理系统对农业小流域氮磷污染的治理效应	蒋倩文,刘锋,彭英湘,王华,姚燃,李红芳,罗沛,刘新亮,吴金水(2194)
太湖流域河流沉积物重金属分布及污染评估	张杰,郭西亚,曾野,邓建才(2202)
三峡水库支流汝溪河口水体汞的时空变化特征	马尉斌,陈秋禹,尹德良,孙涛,王永敏,王定勇(2211)
多功能型城市人工湿地水体汞分布特征及其量变分析	刘伟豪,王永敏,樊宇飞,吕东威,王定勇(2219)
不同类型城市人工湿地水体汞的分布特征	樊宇飞,刘伟豪,孙涛,苑萌,吕东威,李先源,王永敏,王定勇(2226)
微塑料对河口沉积物抗生素抗性基因的影响	黄福义,杨凯,张子兴,苏建强,朱永官,张娟(2234)
上海市郊道路地表径流多环芳烃污染特征对比及源解析	吴杰,熊丽君,吴健,沙晨燕,唐浩,林匡飞,李大雁,沈城(2240)
异龙湖不同湖区浮游植物群落特征及其与环境因子的关系	王振方,张玮,杨丽,徐玉萍,赵凤斌,王丽卿(2249)
水库热分层期藻类水华与温跃层厌氧成因分析	刘雪晴,黄廷林,李楠,杨尚业,李扬,徐进,王涵玥(2258)
绿狐尾藻对铜绿微囊藻和羊角月牙藻的抑藻效应	毕业亮,吴诗敏,周思宁,吴尚华,宿辉,白志辉,徐圣君(2265)
紫外/亚硫酸钠还原降解三氯乙酰胺的效能	伏芝萱,郭迎庆,楚文海(2271)
UV降解水溶液中拉法辛的影响因素及机制	吕娟,许志伟,王言(2278)
铝代水铁矿协同吸附砷的机制	黄博,郭朝晖,肖细元,彭驰,朱惠文,史磊,阳安迪(2287)
新型材料磁性氧化铁的除氟效能	方文侃,李小娣,方菁,吴德意(2295)
羧基改性阴极对微生物电合成系统产乙酸性能的影响机制	祁家欣,曾翠平,骆海萍,刘广立,张仁铎,卢耀斌(2302)
基于分区供氧与溶解氧调控的低C/N比污水短程硝化反硝化	吴春雷,荣懿,刘晓鹏,史会欣,章武首,金鹏康,马文伟(2310)
不同COD浓度下低基质厌氧氨氧化的启动特征	马艳红,赵智超,安芳娇,黄利,师晓娟,慕浩,陈永志(2317)
15℃SBBR短程硝化快速启动和稳定运行性能	孙艺齐,卞伟,李军,赵青,王文啸,梁东博,吴耀东(2326)
长期低聚磷条件对AO-SBR系统Accumulibacter代谢特性的影响	王少坡,李柱,赵乐丹,于静洁,赵明,郑胜达,孙力平(2333)
厌氧氨氧化颗粒污泥EPS及其对污泥表面特性的影响	杨明明,刘子涵,周杨,祁菁,赵凡,郭劲松,方芳(2341)
HN-AD菌生物强化接触氧化工艺处理猪场沼液	刘向阳,张千,吴恒,李宸,唐健泓,封丽,肖芃颖,赵天涛(2349)
温度对自养型同步脱氮工艺处理猪场废水厌氧消化液性能及微生物群落的影响	黄方玉,邓良伟,杨红男,杨含,肖友乾,王兰(2357)
城市污水处理系统真核微生物群落特性与地域性差异	秦文韬,张冰,孙晨翔,陈湛,文湘华(2368)
三江平原湿地开垦对土壤微生物群落结构的影响	王娜,高婕,魏静,刘颖,庄绪亮,庄国强(2375)
亚高山湖群中真菌群落的分布格局和多样性维持机制	刘晋仙,李鑫,罗正明,王雪,暴家兵,柴宝峰(2382)
生物质炭对双季稻田土壤反硝化功能微生物的影响	刘杰云,邱虎森,王聪,沈健林,吴金水(2394)
地膜覆盖和施肥对菜地CH ₄ 排放的影响	倪雪,江长胜,陈世杰,李晓茜,石孝均,郝庆菊(2404)
亏缺灌溉对冬小麦农田温室气体排放的影响	王晓云,蔡焕杰,李亮,徐家屯,陈慧(2413)
不同施肥模式对热区晚稻田CH ₄ 和N ₂ O排放的影响	田伟,伍延正,汤水荣,胡玉麟,赖倩倩,文冬妮,孟磊,吴川德(2426)
周期性变温对紫色土有机碳矿化的影响	曾蔓蔓,慈恩,樊晶晶,李江文,翁吴璐,李松(2435)
广西高镉异常区水田土壤Cd含量特征及生态风险评价	宋波,王佛鹏,周浪,吴勇,庞瑞,陈同斌(2443)
超富集植物藿香蓟(Ageratum conyzoides L.)对镉污染农田的修复潜力	张云霞,宋波,宾娟,周子阳,陈记玲,陈同斌(2453)
种植油菜麦评价多环芳烃污染土壤的农用风险	焦海华,郭佳佳,张婧旻,张晓霞,茹文明,白志辉(2460)
土壤重金属累积对土地利用与景观格局的响应	舒心,李艳,李锋,冯靖仪,沈嘉瑜,史舟(2471)
某区生活垃圾焚烧发电厂周边及厂区内土壤中重金属元素的污染特征及评价	吕占禄,张金良,陆少游,邹天森,刘凯,张晗,谷亚亚(2483)
《环境科学》征订启事(2018)	《环境科学》征稿简则(2042)
信息(2114, 2348, 2393)	

厌氧氨氧化颗粒污泥 EPS 及其对污泥表面特性的影响

杨明明, 刘子涵, 周杨, 祁菁, 赵凡, 郭劲松, 方芳*

(重庆大学城市建设与环境工程学院, 重庆 400045)

摘要: 取厌氧氨氧化 EGSB 反应器中颗粒污泥, 根据粒径筛分为 R1 (0.5~1.4 mm)、R2 (1.4~2.8 mm) 和 R3 (>2.8 mm) 这 3 组。提取不同粒径厌氧氨氧化颗粒污泥 EPS, 分析 EPS 特性及其对厌氧氨氧化聚集体表面特性的影响。随着厌氧氨氧化颗粒污泥粒径的增加, PS 含量介于 $(10.69 \pm 0.11) \sim (12.28 \pm 0.15) \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 之间, 而 PN 含量从 $(56.88 \pm 0.86) \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 增加到 $(98.59 \pm 2.10) \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 且 PN/PS 从 5.32 提高到 9.05。不同粒径厌氧氨氧化颗粒污泥 EPS 官能团及三维荧光组分含量不同。随着颗粒污泥粒径增大, 蛋白质二级结构 α -螺旋/ $(\beta$ -折叠 + 无规卷曲) 值从 0.60 逐渐降低到 0.43, 这种变化有利于污泥表面疏水性的表达。随着颗粒污泥粒径的增大, 污泥表面疏水性由 54.2% 提高到 63.1%, Zeta 电位由 -41.2 mV 增加到 -31.5 mV , 疏水性的增强和表面电荷的增大有利于颗粒污泥的聚集。厌氧氨氧化颗粒污泥 EPS 可以增强污泥疏水性和提高 Zeta 电位, EPS 中的 PN 发挥着重要的作用。

关键词: 厌氧氨氧化 (ANAMMOX); 颗粒污泥; 胞外聚合物 (EPS); 粒径; 表面特性

中图分类号: X703 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)05-2341-08 DOI: 10.13227/j.hjkk.201809149

Extracellular Polymeric Substances of ANAMMOX Granular Sludge and Its Effects on Sludge Surface Characteristics

YANG Ming-ming, LIU Zi-han, ZHOU Yang, QI Jing, ZHAO Fan, GUO Jing-song, FANG Fang*

(School of Urban Construction and Environmental Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: The anaerobic ammonium oxidation (ANAMMOX) granular sludge in the EGSB reactor was divided into three groups according to particle size, which were R1 (0.5-1.4 mm), R2 (1.4-2.8 mm), and R3 (>2.8 mm). Extracellular polymeric substances (EPS) of different sizes from ANAMMOX granular sludge were extracted, and the EPS characteristics and their influence on the surface characteristics of ANAMMOX aggregates were analyzed. With the increased particle size of ANAMMOX granular sludge, the PS content was between $(10.69 \pm 0.11) \sim (12.28 \pm 0.15) \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, while the PN content increased from $(56.88 \pm 0.86) \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ to $(98.59 \pm 2.10) \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, and PN/PS increased from 5.32 to 9.05. The EPS functional groups and the content of three-dimensional fluorescent components of different size ANAMMOX granular sludge were different. As the granular sludge size increased, the value of α -helix/ $(\beta$ -sheet + random coil) gradually decreased from 0.60 to 0.43, which is beneficial to the hydrophobicity expression of the sludge. Due to the increased particle size of the granular sludge, the hydrophobicity of the sludge surface increased from 54.2% to 63.1%, and the Zeta potential increased from -41.2 mV to -31.5 mV . The increased hydrophobicity and surface charge are beneficial to the formation of sludge aggregates. EPS can enhance ANAMMOX sludge hydrophobicity and increase Zeta potential. The presence of PN in EPS is essential to this process.

Key words: anaerobic ammonium oxidation (ANAMMOX); granular sludge; extracellular polymeric substances (EPS); particle size; surface characteristics

厌氧氨氧化是厌氧氨氧化菌以 NO_2^- -N 为电子受体、 NH_4^+ -N 为电子供体, 将 NO_2^- -N 和 NH_4^+ -N 转化为 N_2 的过程^[1]。与传统的硝化-反硝化脱氮工艺相比, 厌氧氨氧化工艺具有不需要外加碳源, 能耗低, 污泥产量低等优点^[2, 3]。然而, 由于厌氧氨氧化菌生长缓慢、易受环境影响等缺点在一定程度上限制了厌氧氨氧化工艺的应用^[4, 5]。厌氧氨氧化颗粒污泥由于具有可持留大量生物量、沉降性能好、抗冲击能力强等诸多优点而受到学者的广泛关注^[6, 7]。

胞外聚合物 (extracellular polymeric substances, EPS) 是指特定环境条件下细菌代谢分泌的、包裹在细胞壁外的高分子聚合物, 主要由蛋白质 (protein, PN) 和多糖 (polysaccharide, PS) 构成^[8]。EPS 中的 PN 和 PS 极大地影响着细菌表面电荷、疏

水性及聚集体空间结构^[9, 10]。EPS 的物理化学性质和特殊位置使其成为维持颗粒污泥结构和功能的重要部分^[10, 11]。Chen 等^[12]的研究发现, 与活性污泥、硝化污泥、反硝化污泥相比, 厌氧氨氧化污泥能够产生更多的 EPS。陈方敏等^[13]的研究发现, 厌氧氨氧化颗粒污泥 EPS 中 PN/PS 与颗粒污泥的稳定性相关。Hou 等^[14]比较了厌氧氨氧化污泥、传统活性污泥、硝化污泥、反硝化污泥的聚集能力, 结果表明厌氧氨氧化污泥 EPS 中较多的疏水性官能

收稿日期: 2018-09-18; 修订日期: 2018-12-11

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51878091); 国家级大学生创新训练项目 (201810611096)

作者简介: 杨明明 (1994~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为厌氧氨氧化技术, E-mail: 937365878@qq.com

* 通信作者, E-mail: fangfangcq@cqu.edu.cn

团导致其具有较强的聚集能力. Jia 等^[15]的研究结果表明, 厌氧氨氧化污泥 EPS 具有较强的黏性, 容易形成凝胶网状结构而促进污泥的聚集.

目前国内外有关厌氧氨氧化污泥 EPS 的研究主要集中在 EPS 组成及特征的分析, 鲜见学者关注不同粒径厌氧氨氧化颗粒污泥 EPS 特性及其对颗粒污泥表面特性的影响. 反应器持续运行过程中, 小粒径颗粒污泥逐渐变成大粒径颗粒污泥, 探究不同粒径厌氧氨氧化颗粒污泥 EPS 特性及其对颗粒污泥表面特性的影响, 有助于进一步理解厌氧氨氧化颗粒污泥的聚集机制. 本文研究了厌氧氨氧化 EGSB 反应器中不同粒径厌氧氨氧化颗粒污泥 EPS 组成及官能团特征, 探讨了 EPS 提取前后厌氧氨氧化聚集体表面亲疏水性、Zeta 电位的变化, 分析了 EPS 对厌氧氨氧化颗粒污泥聚集机制的影响, 以期对厌氧氨氧化颗粒污泥的形成及稳定运行提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 反应器及颗粒污泥

厌氧氨氧化颗粒污泥取自实验室长期稳定运行的厌氧氨氧化 EGSB 反应器. 反应器进水和回流水经蠕动泵由底部进入反应器, 回流比为 25:1, 反应器上升流速为 $4.42 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$. 反应器进水氨氮和亚硝氮浓度分别约为 $180 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $190 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 总氮负荷为 $2.39 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$. 反应器温度控制在 $(32 \pm 1)^\circ\text{C}$, 进水 pH 值为 7.8~8.0.

取厌氧氨氧化颗粒污泥拍照后, 采用 Nano Measurer 1.2 软件分析颗粒污泥粒径分布. 反应器中 99% 以上的颗粒污泥粒径大于 0.5 mm, 所以本试验主要分析了粒径大于 0.5 mm 的颗粒污泥. 经过 35、14 和 7 目筛子筛分, 将颗粒污泥分为 3 组: R1 组粒径为 0.5~1.4 mm, R2 组粒径为 1.4~2.8 mm, R3 组粒径为 >2.8 mm.

1.2 EPS 提取与测试

采用热提取法提取 EPS^[16]. 将颗粒污泥样品用纯水清洗 3 次, 转移至 50 mL 离心管中, 加入 20 mL 纯水, 在 80°C 下加热 10 min, $8000g$ 离心 20 min. 吸取上清液用 $0.45 \mu\text{m}$ 滤膜过滤, 滤液即为 EPS 提取液, 保存在 -20°C 备用. 采用快速 Lowry 法蛋白质试剂盒测定 EPS 中蛋白质含量, 采用蒽酮硫酸比色法测定 EPS 中多糖含量, 采用标准重量法测定挥发性悬浮固体浓度 (MLVSS)^[17], EPS 中蛋白和多糖以每克 VSS 中的蛋白和多糖含量计.

1.3 红外光谱和三维荧光光谱

在 -35°C 下冷冻干燥 EPS 提取液. 将制备的样

品粉末与 KBr 粉末混合, 用 FTIR 光谱仪 (Tensor 27, Bruker, Germany) 测定红外光谱. 使用软件 PeakFit 4.12 分析红外光谱酰胺 I 区域, 确定蛋白质二级结构及相对含量. 酰胺 I ($1700 \sim 1600 \text{ cm}^{-1}$) 谱带的二阶导数经 15% 平滑和高斯函数拟合, 得到若干亚峰, 多次拟合直到 $r^2 \geq 0.999$, 通过峰位置和峰面积确定蛋白质二级结构及相对含量.

取 3 mL 左右的 EPS 样品, 使用荧光光度计 (F-7000 FL, 日本日立) 测定 EPS 荧光光谱, 用纯水作为空白校正水的拉曼散射. 以 5 nm 为采样间隔, 改变 200~400 nm 间的激发波长; 以 5 nm 为增量, 连续扫描 220~500 nm 发射光谱, 扫描速度为 $3000 \text{ nm} \cdot \text{min}^{-1}$. 采用 Origin 8.0 绘制三维荧光光谱图.

1.4 Zeta 电位和疏水性

将颗粒污泥碾碎, 匀浆成污泥悬浮液备用. 污泥 Zeta 电位采用纳米粒度及 Zeta 电位分析仪 (Zetasizer Nano ZS90, 英国马尔文) 测定. 污泥表面疏水性采用基于正十二烷-水系统的微生物黏附烷烃试验测定^[18], 首先将污泥悬浮液的 D_{546} 调整到 0.3 左右, 取 4 mL 悬浮液与 1 mL 正十二烷在比色管中充分混合, 经涡旋振荡器全速振荡 2 min, 随后静置 15 min 以保证相分离. 部分污泥悬浮液被吸附到了烷烃相, 取水相测定 D_{546} . 试验重复 3 次, 采用式 (1) 计算污泥疏水度.

$$\text{疏水度} = (0.3 - D_{546}) / 0.3 \times 100\% \quad (1)$$

式中, D_{546} 为悬浮液在 546 nm 波长处的吸光值.

2 结果与讨论

2.1 反应器性能及颗粒污泥特征

厌氧氨氧化 EGSB 反应器已运行超过 200 d, 脱氮性能保持稳定. 颗粒污泥取样阶段, 反应器 NH_4^+-N , NO_2^--N 和 TN 的平均去除率分别为 $94.3\% \pm 1.2\%$ 、 $97.5\% \pm 1.7\%$ 和 $87.2\% \pm 2.1\%$.

不同粒径厌氧氨氧化颗粒污泥照片及颗粒污泥粒径分布如图 1 所示. 反应器中颗粒污泥平均粒径为 2.71 mm. 99% 以上的颗粒污泥粒径大于 0.5 mm, 并以 2.5~3 mm 粒径范围为中心, 随着粒径的增大或减小, 颗粒污泥的数量均呈现逐渐减少的趋势, 粒径分布大致呈正态分布.

如图 1(a)~1(c) 所示, 厌氧氨氧化颗粒污泥形状规则, 轮廓呈椭球状, 颜色为“铁红色”, 结构较为密实. 随厌氧氨氧化颗粒污泥粒径的增大, 厌氧氨氧化菌的“铁红色”特征越来越明显, 这与厌氧氨氧化菌血红色素含量的增多有关^[19, 20].

2.2 厌氧氨氧化颗粒污泥 EPS 组分及含量分析

EPS 在厌氧氨氧化颗粒污泥形成过程中具有重

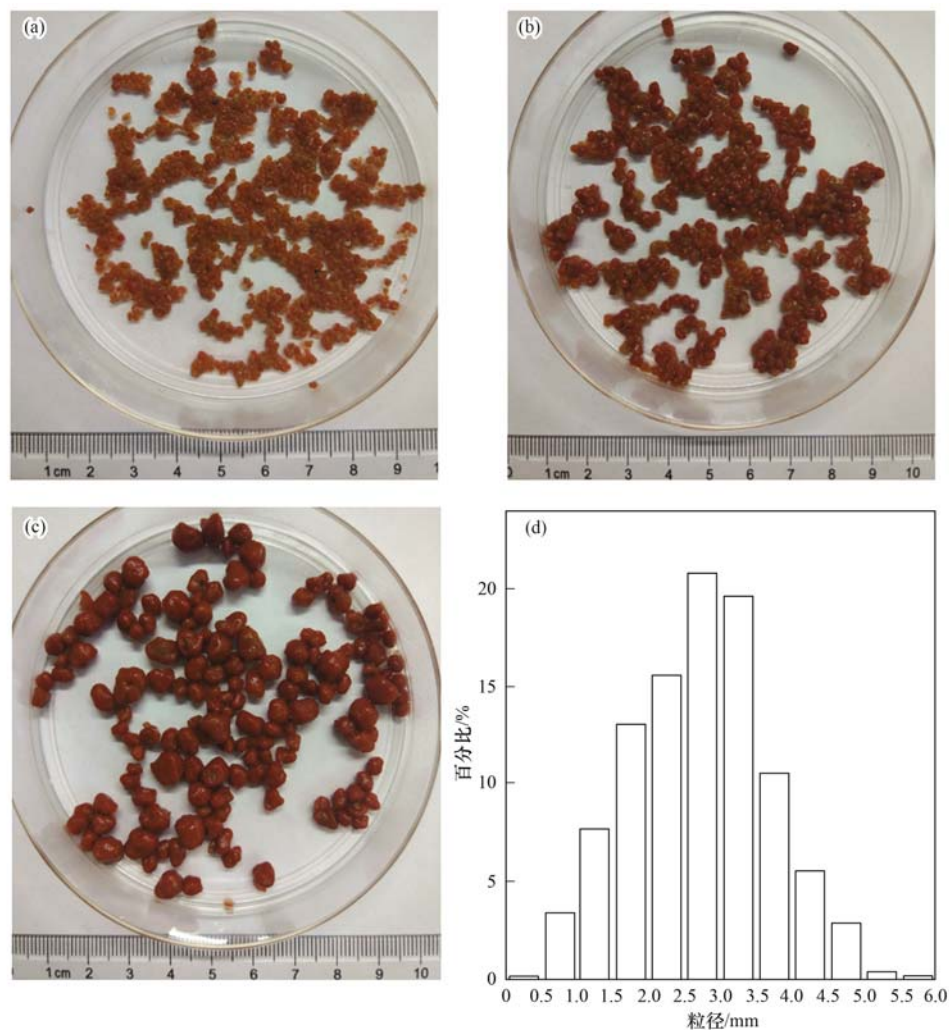


图1 不同粒径厌氧氨氧化颗粒污泥照片及粒径分布

Fig. 1 Photographs with different particle sizes and particle size distribution of ANAMMOX granular sludge

要的作用^[14, 15]. 在厌氧氨氧化污泥颗粒化过程中, 微生物分泌大量的 EPS 促进细胞凝聚而形成颗粒污泥. 不同粒径厌氧氨氧化颗粒污泥 EPS 含量如表 1 所示.

表 1 不同粒径厌氧氨氧化颗粒污泥 EPS 组分及含量

Table 1 EPS composition and content of ANAMMOX granular sludge with different particle sizes					
组别	粒径范围 /nm	PN /mg·g ⁻¹	PS /mg·g ⁻¹	(PN + PS) /mg·g ⁻¹	PN/PS
R1	0.5 ~ 1.4	56.88 ± 0.86	10.69 ± 0.11	67.57 ± 0.97	5.32
R1	1.4 ~ 2.8	80.75 ± 1.31	12.28 ± 0.15	93.02 ± 1.46	6.98
R3	> 2.8	98.59 ± 2.10	10.89 ± 0.10	109.48 ± 2.20	9.05

由表 1 可知, PN 是厌氧氨氧化颗粒污泥 EPS 中的主要成分, 占 EPS 含量(以每 g VSS 中的 EPS 含量计, 下同)的 84% 以上, 这与陈方敏等^[13]得到的研究结果是相似的. 随着厌氧氨氧化颗粒污泥粒径的增大, PS 含量只有轻微的变化, 介于(10.69 ± 0.11) ~ (12.28 ± 0.15) mg·g⁻¹之间, 而 PN 含量从(56.88 ± 0.86) mg·g⁻¹增加到(98.59 ± 2.10) mg·g⁻¹, EPS 总量从(68.05 ± 0.97) mg·g⁻¹增加到(94.26 ± 2.20) mg·g⁻¹, PN/PS 从 5.32 提高到 9.05.

从结果可知, EPS 的含量与厌氧氨氧化颗粒污泥的粒径大小呈正相关关系, 这表明较大的颗粒污泥会分泌更多的 EPS. 文献[14, 21]指出, 较多的 EPS 含量有利于厌氧氨氧化菌细胞间的互相聚集及细胞交流. 随着粒径的增加, PN 含量和 PN/PS 都增大, 这表明蛋白质在厌氧氨氧化颗粒污泥颗粒化过程中起着关键作用. Yan 等^[22]对比了不同粒径好氧颗粒污泥 EPS 中蛋白质和多糖的组成, 发现了相同的规律. PS 属于亲水性物质, PN 属于疏水性物质, 两种物质的含量和比例影响颗粒污泥的表面疏

水性^[8], 污泥表面疏水性的增强是聚集体颗粒化过程的触发力^[23]. 因此, PN/PS 的提高可以增强污泥的相对疏水性, 从而促进厌氧氨氧化颗粒污泥的聚集.

2.3 表面官能团特征分析

2.3.1 红外光谱

红外光谱可表征厌氧氨氧化颗粒污泥 EPS 官能团组成特征, 不同粒径厌氧氨氧化颗粒污泥 EPS 红外光谱如图 2(a) 所示. 红外光谱中, 波数为 $3\,278\text{ cm}^{-1}$ 处的振动主要代表 O—H 伸缩振动^[22], $2\,961\text{ cm}^{-1}$ 处代表着烷烃有机物和多糖分子中的 C—H 伸缩振动^[15], $1\,636\text{ cm}^{-1}$ 附近为蛋白质酰胺 I 的 C=O 伸缩振动^[22], $1\,562\text{ cm}^{-1}$ 附近为酰胺 II 的 N—H 变形振动^[22], $1\,454\text{ cm}^{-1}$ 附近主要为蛋白质结构中的 C—OH、CH₃、CH₂ 变形振动^[24], $1\,340\text{ cm}^{-1}$ 处主要代表了和氨基酸相关的 C—O 和 C—H

伸缩振动^[24], $1\,243\text{ cm}^{-1}$ 处为蛋白质酰胺 III 处 C—N 伸缩振动^[22], $1\,076\text{ cm}^{-1}$ 附近主要代表多糖糖苷键 C—O—C 伸缩振动^[15], $1\,045\text{ cm}^{-1}$ 附近处的振动代表了磷酸化蛋白和醇类物质的存在^[22, 24]. 红外光谱的结果表明了厌氧氨氧化颗粒污泥 EPS 中存在蛋白质、多糖、醇类等物质.

随着颗粒污泥粒径增大, $1\,636$ 、 $1\,563$ 和 $1\,454\text{ cm}^{-1}$ 处的波峰强度逐渐增大, 表明蛋白质酰胺 I 的 C=O 伸缩振动、酰胺 II 的 N—H 变形振动和蛋白质结构中的 C—OH、CH₃、CH₂ 变形振动增强, 这种变化与 EPS 中 PN 的含量变化相一致. 而 $1\,076\text{ cm}^{-1}$ 和 $1\,045\text{ cm}^{-1}$ 处的波峰强度逐渐减小, 表明糖苷键 C—O—C 含量、磷酸化蛋白、醇类物质的含量随着颗粒污泥粒径的增大而减小. 这些结果表明不同粒径厌氧氨氧化颗粒污泥 EPS 中官能团含量不同.

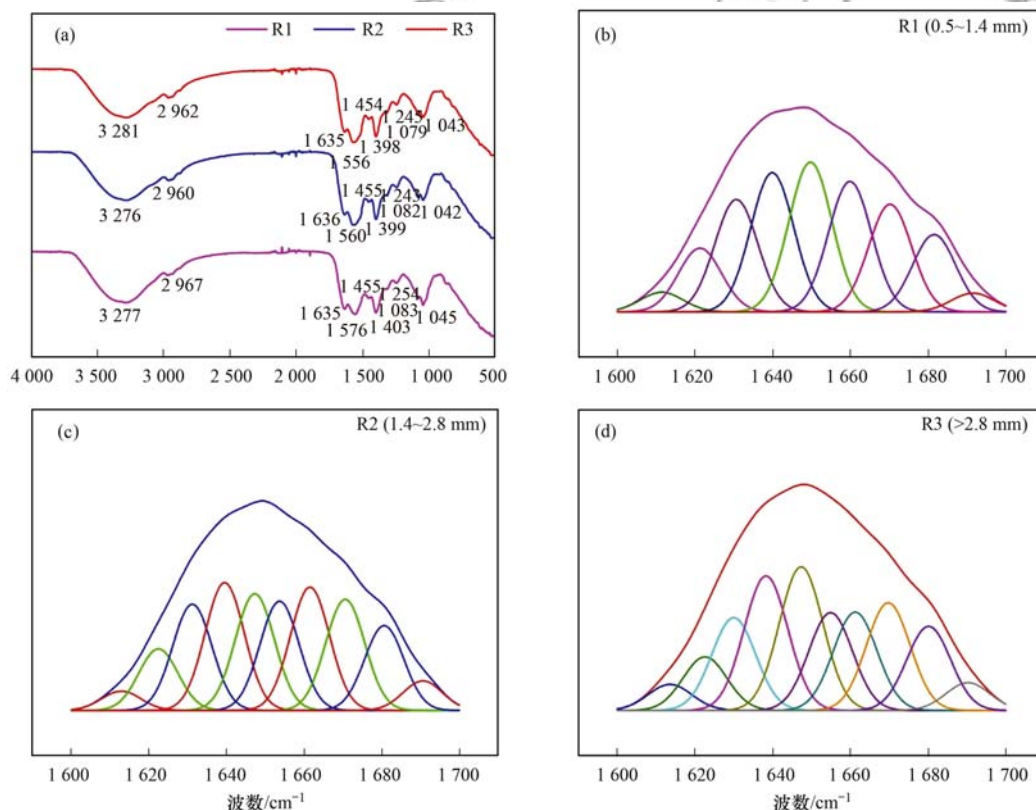


图 2 不同粒径厌氧氨氧化颗粒污泥 EPS 红外光谱及蛋白质二级结构分峰

Fig. 2 Infrared spectrum and peaking diagram of protein secondary structure of EPS in ANAMMOX granular sludge with different particle sizes

EPS 蛋白质二级结构的组成特征影响着微生物聚集体的结构和性能^[14, 15], 而红外光谱酰胺 I 区域常被用于蛋白质二级结构的研究^[24, 25]. 为进一步分析不同粒径厌氧氨氧化颗粒污泥 EPS 中蛋白质二级结构的不同, 对红外光谱酰胺 I 区域进行分峰处理, 根据模型肽段和具有已知蛋白结构的光谱数据确定蛋白质二级结构^[26, 27]. 分峰结果如图 2 所示, 蛋白质二级结构的相对含量在表 2 中显示. 结果表

明厌氧氨氧化颗粒污泥 EPS 酰胺 I 中含有聚合链 ($1\,625 \sim 1\,610\text{ cm}^{-1}$), β -折叠 ($1\,640 \sim 1\,630\text{ cm}^{-1}$), α -螺旋 ($1\,657 \sim 1\,648\text{ cm}^{-1}$), 3-转动螺旋 ($1\,666 \sim 1\,659\text{ cm}^{-1}$) 和反平行 β -折叠/聚合链 ($1\,695 \sim 1\,680\text{ cm}^{-1}$) 这 5 种蛋白质二级结构, 无规卷曲 ($1\,645 \sim 1\,640\text{ cm}^{-1}$) 在结果中没有发现. β -折叠是厌氧氨氧化颗粒污泥 EPS 中最主要的蛋白质二级结构, 其含量约占总蛋白质二级结构含量的 40%.

表 2 不同粒径厌氧氨氧化颗粒污泥 EPS 中蛋白质二级结构相对含量¹⁾

Table 2 Relative contents of protein secondary structure of EPS in ANAMMOX granular sludge with different particle sizes								
组别	粒径范围 /nm	聚合链 /%	β -折叠 /%	无规卷曲 /%	α -螺旋 /%	3-转角螺旋 /%	反平行 β -折叠/聚合链 /%	α -螺旋 (β -折叠 + 无规卷曲)
R1	0.5 ~ 1.4	14.1	39.4	—	23.4	20.4	2.7	0.60
R2	1.4 ~ 2.8	13.1	40.4	—	19.5	22.0	5.1	0.48
R3	>2.8	15.0	42.9	—	18.4	18.6	5.0	0.43

1) 相对含量指该二级结构含量占总二级结构含量的质量分数

随着颗粒污泥粒径的增大，颗粒污泥 EPS 中蛋白质二级结构的相对含量发生了变化。蛋白质二级结构相对含量与污泥的疏水性相关。当 α -螺旋含量低， β -折叠和无规卷曲含量高时，蛋白质分子具有更松散的结构，内部疏水位点可以更充分暴露出来，分子内疏水位点的暴露将导致微生物表面强的疏水性^[14]。 α -螺旋/(β -折叠 + 无规卷曲) 比值常被用于表征蛋白质二级结构的组成特征^[14, 15]。随着颗粒污泥粒径的增大，该值从 0.60 逐渐降低到 0.43。该结果表明随着厌氧氨氧化颗粒污泥粒径的增加，厌氧氨氧化污泥 EPS 中的疏水性蛋白质二级结构含量增加，这种变化使得疏水基团更容易表达其疏水性质，从而促进颗粒污泥的聚集。

2.3.2 荧光光谱分析

图 3 为不同粒径厌氧氨氧化颗粒污泥中 EPS 组分的三维荧光光谱图，表 3 总结了各 EPS 组分三维荧光光谱参数。

由图 3 可知，EPS 组分中有 3 个明显的三维荧光光谱峰。根据文献[28, 29]确定三维荧光光谱峰，峰 A 的激发/发射波长 E_x/E_m 位于 275/335 ~ 345 nm，指定为色氨酸蛋白类物质；峰 B 的 E_x/E_m 位于 220/325 ~ 345 nm，指定为芳香族蛋白类物质；C 峰的 E_x/E_m 位于 225/305 ~ 310 nm，指定为酪氨酸蛋白类物质。由表 3 可知，随着粒径的增大，A、B、C 峰的强度都有一定程度提升，这主要是因为粒径的增大，EPS 中蛋白质组分含量增加。同时，峰 A 的发射波长发生蓝移，峰 B 和峰 C 的发射波长先发生蓝移，再发生红移。荧光峰的蓝移表明链结构中的芳环和共轭键等官能团含量的减少，荧光峰的红移表明荧光基团中羰基、羧基、羟基和胺基含量有所增加^[28]。此外随着粒径的增大，A/C 的比值逐渐增大，且 R2 和 R3 中 A/B 峰的比值明显大于 R1。三维荧光基团的变化可以提供污泥 EPS 样品化学结构变化的光谱信息，这些结果表明 EPS 荧光组分的变化与厌氧氨氧化聚集体聚集过程有关，而这种关系与规律需要进一步的研究。

2.4 EPS 对厌氧氨氧化颗粒污泥表面特性的影响

EPS 覆盖在微生物表面可以改变微生物聚集体

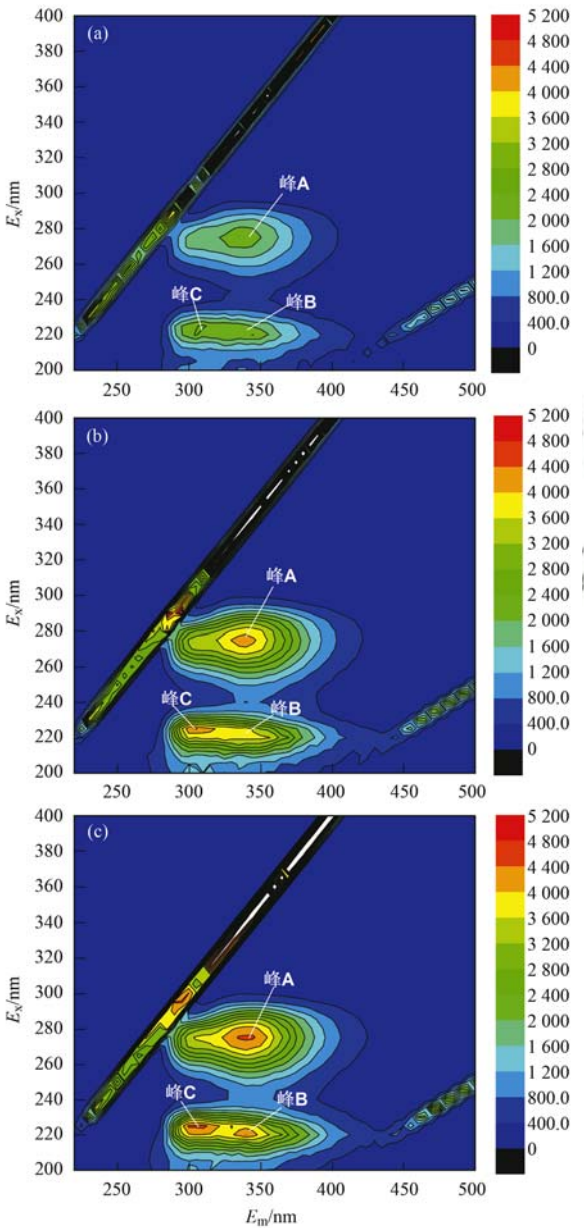


图 3 不同粒径厌氧氨氧化颗粒污泥 EPS 三维荧光光谱
Fig. 3 Three-dimensional fluorescence spectrum of EPS in ANAMMOX granular sludge with different particle sizes

的表面特性如亲疏水性、Zeta 电位等，进而影响微生物的聚集和颗粒污泥的稳定性。为了进一步探究 EPS 对厌氧氨氧化颗粒污泥表面特性的影响，分析了 EPS 提取前后厌氧氨氧化聚集体疏水性和 Zeta 电位的变化。图 4(a) 是不同粒径厌氧氨氧化颗粒污泥 EPS 提取前后表面疏水性的变化。

表 3 不同粒径厌氧氨氧化颗粒污泥 EPS 三维荧光光谱参数

Table 3 Parameters of three-dimensional fluorescence spectrum of EPS in ANAMMOX granular sludge with different particle sizes

组别	粒径范围/mm	峰	$E_x/E_m/\text{nm}$	强度	峰 A/峰 B	峰 A/峰 C
R1	0.5 ~ 1.4	A	275/345	2 320	0.91	0.89
		B	220/345	2 559		
		C	225/310	2 600		
R2	1.4 ~ 2.8	A	275/335	4 280	1.04	0.94
		B	220/325	4 124		
		C	225/305	4 520		
R3	>2.8	A	275/335	4 534	1.00	0.97
		B	220/330	4 516		
		C	225/310	4 652		

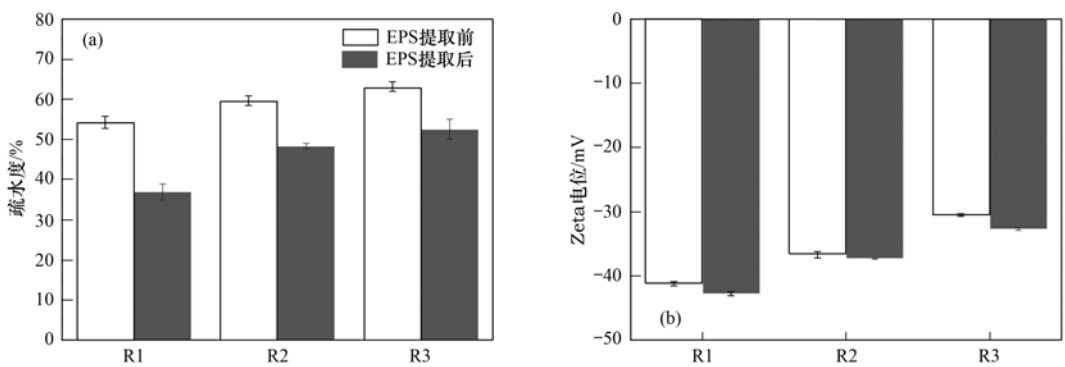


图 4 EPS 提取前后厌氧氨氧化聚集体表面特性的变化

Fig. 4 Changes in surface characteristics of ANAMMOX aggregates before and after EPS extraction

由图4(a)可知, R1、R2 和 R3 颗粒污泥在 EPS 提取前的表面疏水度分别为 54.2%、59.5% 和 63.1%。随着颗粒污泥粒径的增大, 厌氧氨氧化聚集体表面疏水性增强。从前文分析可知, PN/PS 组成和疏水性蛋白质二级结构的变化导致了污泥表面疏水性增强, 这进一步证明了蛋白质在厌氧氨氧化颗粒污泥聚集中的重要作用。颗粒污泥 EPS 去除之后, 3 组不同粒径颗粒污泥的表面疏水性均有一定程度的下降, 这表明 EPS 的存在影响了厌氧氨氧化聚集体的疏水性。厌氧氨氧化污泥 EPS 中具有含量较高的丙氨酸、缬氨酸、亮氨酸、苯丙氨酸、脯氨酸等疏水性氨基酸等物质^[14], EPS 中的疏水性组分可以增强厌氧氨氧化污泥表面疏水性。

图4(b)是不同粒径厌氧氨氧化颗粒污泥 EPS 提取前后 Zeta 电位的变化。R1、R2 和 R3 颗粒污泥在 EPS 提取前的 Zeta 电位分别是 -41.2、-36.7 和 -31.5 mV。随着颗粒污泥粒径越大, 颗粒之间的排斥力越小, 有利于颗粒之间的聚集。颗粒污泥 EPS 提取以后, 3 组不同粒径颗粒污泥的 Zeta 电位有所降低, 表明聚集体 EPS 去除以后, 聚集体表面负电荷的相互排斥力增加, 增强了聚集体表面的电负性。EPS 中带正电荷的蛋白质(如含有较多赖氨酸和精氨酸的贻贝蛋白), 常具有较高的等电点, 可通过静电作用促进细胞或菌胶团(一般带负电

荷)间的吸引和接触, 从而促进了污泥的聚集^[30, 31]。同时, 蛋白质可通过螯合作用和离子键与金属离子发生反应, 该反应将压缩双电层并增大 Zeta 电位, 这有利于微生物细胞之间的聚集^[32]。

以上分析表明, 厌氧氨氧化颗粒污泥 EPS 的存在影响了污泥的疏水性和表面电荷, 进而影响颗粒污泥的聚集能力。随着颗粒污泥粒径的增大, PS 含量一直维持在较低的含量, 而 PN 含量不断增加, PN、PN/PS 的变化与颗粒污泥表面疏水度和 Zeta 电位均呈现一定的正相关, 这进一步证明了厌氧氨氧化颗粒污泥 EPS 中的 PN 影响着聚集体表面疏水性和表面电荷, 进而影响污泥的聚集能力。随着颗粒污泥粒径的增加, 厌氧氨氧化颗粒污泥的表面疏水性增加, 疏水性的增加将增强聚集体疏水性作用力。疏水性作用力是颗粒污泥发生聚集的重要作用力之一, 在颗粒污泥形成的初期其作用尤其重要^[3]。污泥表面 Zeta 电位也随着粒径的增大而变大, Zeta 电位的变化将会增强微生物之间的压缩双电层作用。这些结果表明疏水性作用和压缩双电层作用均作用于厌氧氨氧化颗粒污泥的聚集。

3 结论

(1)PN 是厌氧氨氧化颗粒污泥 EPS 的主要成分, EPS 中 PN 含量和 PN/PS 随着颗粒污泥粒径的

增大而提高。

(2) 厌氧氨氧化颗粒污泥粒径不同, EPS 官能团及三维荧光组分含量不同。厌氧氨氧化颗粒污泥 EPS 中含有 5 种蛋白质二级结构, 随着粒径的增加, 蛋白质二级结构相对含量的变化有利于颗粒污泥的聚集。

(3) 随着厌氧氨氧化颗粒污泥粒径的增大, 污泥表面疏水性和 Zeta 电位的变化有利于污泥的聚集。厌氧氨氧化颗粒污泥 EPS 可以增强污泥疏水性、降低污泥表面的负电排斥力。EPS 中的 PN 影响了污泥疏水性和 Zeta 电位。

参考文献:

- [1] Jetten M S M, Wagner M, Fuerst J, *et al.* Microbiology and application of the anaerobic ammonium oxidation (‘anammox’) process[J]. *Current Opinion in Biotechnology*, 2001, **12**(3): 283-288.
- [2] Kartal B, Kuenen J G, van Loosdrecht M C M. Sewage treatment with anammox[J]. *Science*, 2010, **328**(5979): 702-703.
- [3] Zhao Y P, Feng Y, Li J Q, *et al.* Insight into the aggregation capacity of anammox consortia during reactor start-up [J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, **52**(6): 3685-3695.
- [4] Strous M, Heijnen J J, Kuenen J G, *et al.* The sequencing batch reactor as a powerful tool for the study of slowly growing anaerobic ammonium-oxidizing microorganisms [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 1998, **50**(5): 589-596.
- [5] Ma B, Wang S Y, Cao S B, *et al.* Biological nitrogen removal from sewage via anammox: recent advances [J]. *Bioresource Technology*, 2016, **200**: 981-990.
- [6] Fang F, Yang M M, Wang H, *et al.* Effect of high salinity in wastewater on surface properties of anammox granular sludge[J]. *Chemosphere*, 2018, **210**: 366-375.
- [7] 唐崇俭, 熊蕾, 王云燕, 等. 高效厌氧氨氧化颗粒污泥的动力学特性[J]. *环境科学*, 2013, **34**(9): 3544-3551.
- Tang C J, Xiong L, Wang Y Y, *et al.* Kinetic characteristics of high-rate ANAMMOX Granules [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(9): 3544-3551.
- [8] Sheng G 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.
- [9] Adav S S, Lee D J, Tay J H. Extracellular polymeric substances and structural stability of aerobic granule[J]. *Water Research*, 2008, **42**(6-7): 1644-1650.
- [10] 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.
- [11] Liu X M, Sheng G P, Luo H W, *et al.* Contribution of extracellular polymeric substances (EPS) to the sludge aggregation[J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, **44**(11): 4355-4360.
- [12] Chen T T, Zheng P, Shen L D. Growth and metabolism characteristics of anaerobic ammonium-oxidizing bacteria aggregates[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2013, **97**(12): 5575-5583.
- [13] 陈方敏, 顾澄伟, 胡羽婷, 等. 厌氧氨氧化污泥恢复过程中
- 的颗粒特性[J]. *环境科学*, 2018, **39**(12): 5605-5611.
- Chen F M, Gu C W, Hu Y T, *et al.* Granular characteristics of anaerobic ammonia oxidation sludge during the recovery process [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(12): 5605-5611.
- [14] Hou X L, Liu S T, Zhang Z T. Role of extracellular polymeric substance in determining the high aggregation ability of anammox sludge[J]. *Water Research*, 2015, **75**: 51-62.
- [15] Jia F X, Yang Q, Liu X H, *et al.* Stratification of extracellular polymeric substances (EPS) for aggregated anammox microorganisms [J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, **51**(6): 3260-3268.
- [16] 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 & Technology*, 2010, **44**(1): 412-418.
- [17] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [18] Pembrey R S, Marshall K C, Schneider R P. Cell surface analysis techniques: what do cell preparation protocols do to cell surface properties? [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1999, **65**(7): 2877-2894.
- [19] Strous M, Kuenen J G, Fuerst J A, *et al.* The anammox case—a new experimental manifesto for microbiological eco-physiology [J]. *Antonie van Leeuwenhoek*, 2002, **81**(1-4): 693-702.
- [20] 王淑莹, 刘晔, 袁悦, 等. 厌氧氨氧化颗粒污泥上浮机理及控制策略进展[J]. *北京工业大学学报*, 2015, **41**(10): 1501-1507.
- Wang S Y, Liu Y, Yuan Y, *et al.* Progress in mechanism and control strategy of anaerobic ammonium oxidation (Anammox) granular sludge floating [J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2015, **41**(10): 1501-1507.
- [21] Kartal B, Maalcke W J, de Almeida N M, *et al.* Molecular mechanism of anaerobic ammonium oxidation[J]. *Nature*, 2011, **479**(7371): 127-130.
- [22] Yan L L, Liu Y, Wen Y, *et al.* Role and significance of extracellular polymeric substances from granular sludge for simultaneous removal of organic matter and ammonia nitrogen [J]. *Bioresource Technology*, 2015, **179**: 460-466.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] Yin C Q, Meng F G, Chen G H. Spectroscopic characterization of extracellular polymeric substances from a mixed culture dominated by ammonia-oxidizing bacteria[J]. *Water Research*, 2015, **68**: 740-749.
- [26] Beech I, Hanjagat L, Kalaji M, *et al.* Chemical and structural characterization of exopolymers produced by *Pseudomonas* sp. NCIMB 2021 in continuous culture [J]. *Microbiology*, 1999, **145**(6): 1491-1497.
- [27] Buijs J, Norde W, Lichtenbelt J W T. Changes in the secondary structure of adsorbed IgG and F(ab')₂ studied by FTIR spectroscopy[J]. *Langmuir*, 1996, **12**(6): 1605-1613.
- [28] Chen W, Westerhoff P, Leenheer J A, *et al.* Fluorescence excitation-emission matrix regional integration to quantify spectra for dissolved organic matter [J]. *Environmental Science & Technology*, 2003, **37**(24): 5701-5710.

- [29] Zhu L, Qi H Y, Lv M L, *et al.* Component analysis of extracellular polymeric substances (EPS) during aerobic sludge granulation using FTIR and 3D-EEM technologies [J]. *Bioresource Technology*, 2012, **124**: 455-459.
- [30] White J D, Wilker J J. Underwater bonding with charged polymer mimics of marine mussel adhesive proteins[J]. *Macromolecules*, 2011, **44**(13): 5085-5088.
- [31] 李旖瑜, 郑平, 张萌. 颗粒污泥结构体及其粘连机理[J]. 中国给水排水, 2017, **33**(22): 33-37.
- [32] Li Y Y, Zheng P, Zhang M. Structure and interaction force of biological granular sludge [J]. *China Water & Wastewater*, 2017, **33**(22): 33-37.
- [32] Bourven I, Joussein E, Guibaud G. Characterisation of the mineral fraction in extracellular polymeric substances (EPS) from activated sludges extracted by eight different methods [J]. *Bioresource Technology*, 2011, **102**(14): 7124-7130.

《环境科学》多项引证指标名列前茅

2018 年 11 月 1 日,中国科学技术信息研究所在中国科技论文统计结果发布会上公布了 2017 年度中国科技论文统计结果. 统计结果显示《环境科学》2017 年度总被引频次11 228,影响因子 1.958,多项引证指标位居环境科学技术及资源科学技术类科技期刊前列.



CONTENTS

Pollution Characteristics and Regional Transport of Atmospheric Particulate Matter in Beijing from October to November, 2016	ZHANG Han-yu, CHENG Shui-yuan, YAO Sen, <i>et al.</i> (1999)
Chemical Compositions, Mass Concentrations, and Emission Factors of Particulate Organic Matters Emitted from Catering	WANG Hong-li, JING Sheng-ao, QIAO Li-ping (2010)
Size Distributions of Aerosol During the Summer at the Summit of Mountain Taishan (1 534 m) in Central East China	SHEN Li-juan, WANG Hong-lei, YIN Yan, <i>et al.</i> (2019)
Concentration Characteristics and Source Analysis of PM _{2.5} During Wintertime in Zhengzhou-Xinxiang	YAN Guang-xuan, ZHANG Pu-zhen, HUANG Hai-yan, <i>et al.</i> (2027)
Scenario Analysis of PM _{2.5} Concentration Targets and Milestones in China	HE Jin-yu, YAN Li, WANG Yan-chao, <i>et al.</i> (2036)
PM _{2.5} Emission Characteristics and Estimation of Emission Reduction Potential from Typical Industrial Sources in Anyang	DU Xiao-shen, YAN Li, HE Jin-yu, <i>et al.</i> (2043)
Emission Characteristics and List of Inorganic Elements in Fine Particles of Typical Industrial Kilns in Zhengzhou City	ZHAO Qing-yan, HAN Shi-jie, ZHANG Yi-shun, <i>et al.</i> (2052)
Composition and Atmospheric Reactivity of Ambient Volatile Organic Compounds(VOCs)in the Urban Area of Nanjing, China	QIAO Yue-zhen, CHEN Feng, ZHAO Qiu-yue, <i>et al.</i> (2062)
Formation Potential of Ozone and Secondary Organic Aerosol of VOCs from Fossil Fuel Combustion in Lanzhou City	LIU Zhen, ZHU Yu-fan, GUO Wen-kai, <i>et al.</i> (2069)
Inventory and Characteristics of Biogenic Volatile Organic Compounds (BVOCs) for 12 Deciduous Fruit Trees	LI Shuang-jiang, YUAN Xiang-yang, LI Qi, <i>et al.</i> (2078)
Ion Concentrations and Their Spatial Variability in Underground Water and Surface Water in Typical Terrestrial Ecosystems in China	HUANG Li, ZHANG Xin-yu, YUAN Guo-fu, <i>et al.</i> (2086)
Status of Antibiotic Contamination and Ecological Risks Assessment of Several Typical Chinese Surface-Water Environments	LIU Xi, WANG Zhi, WANG Xue-lei, <i>et al.</i> (2094)
Distribution and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Water Bodies in Seven Basins of China	FAN Bo, WANG Xiao-nan, HUANG Yun, <i>et al.</i> (2101)
Occurrence, Input, and Seasonal Variations of Poly- and Perfluoroalkyl Substances (PFASs) in Rivers and Drain Outlets from the Dalian Coastal Area, China	CHEN Hong, HAN Jian-bo, ZHANG Can, <i>et al.</i> (2115)
Space-time Characteristics and Environmental Significance of Stable Isotopes in Precipitation at an Arid Inland River Basin	YUAN Rui-feng, LI Zong-xing, CAI Yu-qin, <i>et al.</i> (2122)
Regional Evolution and Control Factors of Karst Groundwater in Liulin Spring Catchment	HUNAG Qi-bo, QIN Xiao-qun, LIU Peng-yu, <i>et al.</i> (2132)
Major Ionic Characteristics and Controlling Factors of Karst Groundwater at Xiangshui, Chongzuo	ZHOU Jin-mei, JIANG Zhong-cheng, XU Guang-li, <i>et al.</i> (2143)
Analysis of Transport and Transformation Characteristics Between Dissolved Phosphorus and Particulate Phosphorus in Water of the Three Gorges Reservoir	QIN Yan-wen, HAN Chao-nan, ZHENG Bing-hui, <i>et al.</i> (2152)
Vertical Distribution Profiles and Release Potential of Mainstream Column Sediments in the Three Gorges Reservoir After Impoundment to 175 m	LI Rui, PAN Chan-juan, TANG Xian-qiang, <i>et al.</i> (2160)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Phosphorus in the Dongting Lake at Different Water Periods	LI Ying-jie, WANG Li-jing, LI Hong, <i>et al.</i> (2170)
Effects of Exogenous Carbon Addition on Equilibrium Phosphate Concentration and Risk of Phosphorus Release from Sediments in the Shiwuli River, Chaohu Lake Basin	LI Ru-zhong, BAO Qin, DAI Yuan (2178)
Spatial Distribution of Organic Phosphorus in Sediment and Its Environmental Implication in the Upper Stream of Minjiang River	XU Jian, YUAN Xu-yin, YE Hong-meng, <i>et al.</i> (2186)
Nitrogen and Phosphorus Removal by Integrated Ecological Engineering Treatment System in a Small Agricultural Watershed	JIANG Qian-wen, LIU Feng, PENG Ying-xiang, <i>et al.</i> (2194)
Spatial Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in River Sediments from Lake Taihu Basin	ZHANG Jie, GUO Xi-ya, ZENG Ye, <i>et al.</i> (2202)
Temporal and Spatial Variation of Mercury in the Water of the Ruxi River Estuary, a Typical Tributary of the Three Gorges Reservoir Area	MA Wei-bin, CHEN Qiu-yu, YIN De-liang, <i>et al.</i> (2211)
Mercury Distribution Characteristics and Its Mass Balance in a Multifunctional Urban Wetland	LIU Wei-hao, WANG Yong-min, FAN Yu-fei, <i>et al.</i> (2219)
Distribution Characteristics of Mercury in Different Urban Constructed Wetlands	FAN Yu-fei, LIU Wei-hao, SUN Tao, <i>et al.</i> (2226)
Effects of Microplastics on Antibiotic Resistance Genes in Estuarine Sediments	HUANG Fu-yi, YANG Kai, ZHANG Zi-xing, <i>et al.</i> (2234)
Comparison and Source Apportionment of PAHs Pollution of Runoff from Roads in Suburb and Urban Areas of Shanghai	WU Jie, XIONG Li-jun, WU Jian, <i>et al.</i> (2240)
Characteristics of Phytoplankton Community and Its Relationship with Environmental Factors in Different Regions of Yilong Lake, Yunnan Province, China	WANG Zhen-fang, ZHANG Wei, YANG Li, <i>et al.</i> (2249)
Algal Bloom and Mechanism of Hypoxia in the Metalimnion of the Lijiahe Reservoir During Thermal Stratification	LIU Xue-qing, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i> (2258)
Allelopathic Effects and Allelochemicals of <i>Myriophyllum elatinoide</i> s on <i>Microcystis aeruginosa</i> and <i>Selenastrum capricornutum</i>	BI Ye-liang, WU Shi-min, ZHOU Si-ning, <i>et al.</i> (2265)
Removal Efficiency of Trichloroacetamide by UV/Sodium Sulfite	FU Zhi-xuan, GUO Ying-qing, CHU Wen-hai (2271)
Influencing Factors and Transformation Mechanism of Venlafaxine Degradation by UV	LÜ Juan, XU Zhi-wei, WANG Yan (2278)
Mechanism of Synergistic Adsorption of Arsenic and Cadmium by Aluminium-substituted Ferrihydrites	HUANG Bo, GUO Zhao-hui, XIAO Xi-yuan, <i>et al.</i> (2287)
Fluoride Removal Efficiency of Novel Material: Magnetite Core/Zirconia Shell Nanocomposite	FANG Wen-can, LI Xiao-di, FANG Jing, <i>et al.</i> (2295)
Impact Mechanisms of Carboxyl Group Modified Cathode on Acetate Production in Microbial Electrosynthesis Systems	QI Jia-xin, ZENG Cui-ping, LUO Hai-ping, <i>et al.</i> (2302)
Partial Nitrification and Denitrification of Low C/N Ratio Sewage Based on Zoning Oxygen and Dissolved Oxygen Control	WU Chun-lei, RONG Yi, LIU Xiao-peng, <i>et al.</i> (2310)
Start-up Performance of Low-substrate Anaerobic Ammonium Oxidation Under Different COD Concentrations	MA Yan-hong, ZHAO Zhi-chao, AN Fang-jiao, <i>et al.</i> (2317)
Partial Nitrification Fast Start-up and Stable Performance of 15°C SBBR	SUN Yi-qi, BIAN Wei, LI Jun, <i>et al.</i> (2326)
Effects of Long-term Poly-P Deficiency on the Metabolic Properties of <i>Accumulibacter</i> in AO-SBR System	WANG Shao-po, LI Zhu, ZHAO Le-dan, <i>et al.</i> (2333)
Extracellular Polymeric Substances of ANAMMOX Granular Sludge and Its Effects on Sludge Surface Characteristics	YANG Ming-ming, LIU Zi-han, ZHOU Yang, <i>et al.</i> (2341)
Treatment of Piggery Biogas Slurry by Enhanced Biological Contact Oxidation with HN-AD Bacteria	LIU Xiang-yang, ZHANG Qian, WU Heng, <i>et al.</i> (2349)
Effect of Different Temperatures on the Performance of Autotrophic Nitrogen Removal and Microbial Community from Swine Wastewater	HUANG Fang-yu, DENG Liang-wei, YANG Hong-nan, <i>et al.</i> (2357)
Characteristics and Regional Heterogeneity of Eukaryotic Microbial Community in Wastewater Treatment Plants	QIN Wen-tao, ZHANG Bing, SUN Chen-xiang, <i>et al.</i> (2368)
Effects of Wetland Reclamation on Soil Microbial Community Structure in the Sanjiang Plain	WANG Na, GAO Jie, WEI Jing, <i>et al.</i> (2375)
Distribution Pattern and Diversity Maintenance Mechanisms of Fungal Community in Subalpine Lakes	LIU Jin-xian, LI Cui, LUO Zheng-ming, <i>et al.</i> (2382)
Influence of Biochar Amendment on Soil Denitrifying Microorganisms in Double Rice Cropping System	LIU Jie-yun, QIU Hu-sen, WANG Cong, <i>et al.</i> (2394)
Effects of Plastic Film Mulching and Nitrogen Fertilizer Application on CH ₄ Emissions from a Vegetable Field	NI Xue, JIANG Chang-sheng, CHEN Shi-jie, <i>et al.</i> (2404)
Effects of Water Deficit on Greenhouse Gas Emission in Wheat Field in Different Periods	WANG Xiao-yun, CAI Huan-jie, LI Liang, <i>et al.</i> (2413)
Effects of Different Fertilization Modes on Greenhouse Gas Emission Characteristics of Paddy Fields in Hot Areas	TIAN Wei, WU Yan-zheng, TANG Shui-rong, <i>et al.</i> (2426)
Effects of Cyclical Temperature Fluctuations on Organic Carbon Mineralization in Purple Soil	ZENG Man-man, CI En, FAN Jing-jing, <i>et al.</i> (2435)
Cd Content Characteristics and Ecological Risk Assessment of Paddy Soil in High Cadmium Anomaly Area of Guangxi	SONG Bo, WANG Fo-peng, ZHOU Lang, <i>et al.</i> (2443)
Remediation Potential of <i>Ageratum conyzoides</i> L. on Cadmium Contaminated Farmland	ZHANG Yun-xia, SONG Bo, BIN Juan, <i>et al.</i> (2453)
Evaluation of the Potential Agricultural Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Contaminated Soil by Planting <i>Lactuca sativa</i> L.	JIAO Hai-hua, GUO Jia-jia, ZHANG Jing-min, <i>et al.</i> (2460)
Impacts of Land Use and Landscape Patterns on Heavy Metal Accumulation in Soil	SHU Xin, LI Yan, LI Feng, <i>et al.</i> (2471)
Pollution Characteristics and Evaluation of Heavy Metal Pollution in Surface Soil Around a Municipal Solid Waste Incineration Power Plant	LÜ Zhan-lu, ZHANG Jin-liang, LU Shao-you, <i>et al.</i> (2483)