

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.12

第40卷 第12期

目次(卷终)

研究报告

- 京津冀秋冬季 PM_{2.5} 污染概况和预报结果评估 朱媛媛, 高愈霄, 刘冰, 王晓彦, 朱莉莉, 许荣, 汪巍, 丁俊男, 李健军, 段小丽 (5191)
- 2016 ~ 2017 年采暖期华北平原东部 PM_{2.5} 组分特征及来源解析 张逸琴, 王杰, 高健, 徐仲均, 车飞, 马彤, 杨艳, 刘素, 闫璐璐 (5202)
- 霾不同发展阶段下污染气体和水溶性离子变化特征分析 王振彬, 刘安康, 卢文, 杨晓旻, 王红磊, 陈魁, 夏丽 (5213)
- 上海郊区家庭妇女 PM_{2.5} 重金属组分暴露水平、来源与健康风险 罗燃燃, 戴海夏, 张蕴晖, 乔利平, 马英歌, 周敏, 夏斌, 朱清扬, 赵迎亚, 黄成 (5224)
- 固定污染源可凝结颗粒物测量方法 蒋靖坤, 邓建国, 王刚, 张莹, 李妍菁, 段雷, 郝吉明 (5234)
- 家具企业挥发性有机物排放特征及其环境影响 张嘉妮, 曾春玲, 刘锐源, 姚懿娟, 柯云婷, 范丽雅, 叶代启 (5240)
- 抗生素企业 VOCs 排放清单及影响范围模拟 竹涛, 吕怡蓉, 边文璟, 牛文凤, 袁前程, 段二红, 于洋, 林军 (5250)
- 新乡市机动车排放对道路灰尘中重金属与多环芳烃污染的影响 李琦路, 吴锦涛, 张颖, 孙玉静, 乔泓钦, 张子伟, 裴梦园, 张孟琼, 任明浩 (5258)
- 成都市道路积尘中全氟化合物的污染特征及暴露风险评估 方淑红, 朱和祥, 叶芝祥, 印红玲, 孙静 (5265)
- 祁连山北坡中段降水稳定同位素特征及水汽来源分析 张百娟, 李宗省, 王昱, 李永格, 吕越敏, 袁瑞丰, 桂娟 (5272)
- 长江南京段水源水中抗生素的赋存特征与风险评估 封梦娟, 张芹, 宋宁慧, 卜元卿, 杨正标, 刘艳华, 郭瑞昕, 陈建秋, 张圣虎 (5286)
- 夏秋季混凝剂对复合锰氧化膜去除地表水中氨氮和锰的影响 程丽杰, 黄廷林, 程亚, 张莎莎, 阮昭意, 卢磊 (5294)
- 浙江省 H 市供水系统消毒副产物及其健康风险评价 刘俊萍, 于建全, 李青松, 马晓雁, 杨玉龙, 贾佳 (5302)
- 三峡库区城镇化背景下河流 DOM 的吸收及荧光光谱特征 陈昭宇, 李思悦 (5309)
- 川西高原河流水体 CDOM 的光化学降解特性 刘堰杨, 孙辉, 刘琛, 王小沁 (5318)
- 三峡库区典型紫色土小流域径流及氮磷流失特征 曹瑞霞, 刘京, 邓开开, 先宇, 王伟, 方芳, 欧阳文娟, 郭劲松 (5330)
- 九龙江流域河流磷输出对土地利用模式及水文状况的响应 黄亚玲, 唐莉, 黄金良, 肖才荣 (5340)
- 不同尺度土地利用方式对鄱阳湖湿地水质的影响 方娜, 刘玲玲, 游清徽, 田娜, 吴燕平, 阳文静 (5348)
- 太湖草藻型湖区磷赋存特征及其环境意义 耿雪, 文帅龙, 孙培荣, 徐楚天, 李大鹏, 黄勇 (5358)
- 太湖竺山湾沉积物碳氮磷分布特征与污染评价 方家琪, 祁闯, 张新厚, 韩睿明, 黄和笑, 王卓森, 王国祥 (5367)
- 降雨强度对洱海流域凤羽河氮磷排放的影响 李晓虹, 雷秋良, 周脚根, 张亦涛, 李影, 胡万里, 武淑霞, 翟丽梅, 王洪媛, 刘宏斌 (5375)
- 外源 Ca²⁺ 和 K⁺ 作用下河口区碱蓬水质净化效果和耐盐碱提高机制 吴丹, 孙萍, 陈广琳, 陈友媛, 彭昌盛 (5384)
- 泽泻 (*Alisma orientale*) 对全氟化合物的吸收和传输特征-浓度的影响 王团团, 李贝贝, 王赛, 华佩, 陈军, 应光国 (5394)
- 复合人工湿地中反硝化除磷作用的发生及其稳定性 刘冰, 郑煜铭, 李清飞, 赵承美, 魏巍, 张凯 (5401)
- 铅、镉和铜改性沸石添加控制底泥磷释放的对比 刘婷, 赵钰颖, 林建伟, 詹艳慧, 秦琴 (5411)
- 生物炭结构性质对氨氮的吸附特性影响 陈梅, 王芳, 张德俐, 易维明 (5421)
- 溶解氧对悬浮与附着生长系统短程硝化反应的影响机制 王嗣禹, 刘灵婕, 王芬, 季民 (5430)
- 间歇恒定/梯度曝气对 SNAD 工艺启动的影响 李冬, 刘志成, 徐贵达, 李帅, 张杰 (5438)
- 共基质模式下铁盐脱氮反应器的运行性能及微生物学特征 王茹, 刘梦瑜, 刘冰茵, 赵治国, 袁林江 (5446)
- 阶梯曝气对城市污水好氧颗粒污泥系统的影响 李冬, 魏子清, 劳会妹, 李帅, 张杰 (5456)
- 酵母菌降解胞外聚合物提升剩余活性污泥的脱水性能 俞心怡, 向金豪, 刘英, 龚天翼, 张彬辉, 吕文洲 (5465)
- 基于 GEE 的 1998 ~ 2018 年京津冀土地利用变化对生态系统服务价值的影响 娄佩卿, 付波霖, 林星辰, 闭璐, 马瑞雪, 唐廷元 (5473)
- 基于 MDS 与 TOPSIS 模型的滨海滩涂围垦区土壤质量评价 解雪峰, 濮励杰, 朱明, 吴涛, 许艳 (5484)
- 淹水增加对闽江河口淡水潮汐湿地孔隙水地球化学特征及 CO₂ 和 CH₄ 排放通量的影响 李敬, 黄佳芳, 罗敏, 刘育秀, 谭季, 朱爱菊, 王声钰, 仝川 (5493)
- 养殖塘 CH₄ 排放特征及其影响因素 王娇, 肖薇, 张秀芳, 张弥, 张文庆, 刘强, 陈争, 董保华, 李旭辉 (5503)
- 施肥对高梁地土壤呼吸及其温度敏感性的影响 严俊霞, 张媛, 焦晓燕 (5515)
- 高硒高镉区土地安全区划方法 王锐, 侯宛苓, 李雨潼, 余涛, 陈娟 (5524)
- 不同配比复合材料对农田镉污染土壤的修复效果 陈树兰, 许晨阳, 耿增超, 王强, 祝乐, 龚园, 拓卫卫 (5531)
- 水铝钙石对不同镉污染农田重金属的钝化效果及机制 吴秋梅, 刘刚, 王慧峰, 胡文友, 黄标 (5540)
- 狮子山矿区不同土地利用类型对土壤微生物群落多样性的影响 黄健, 朱旭炎, 陆金, 孙雨, 赵兴青 (5550)
- 林地转型耕地对东北丘陵区白浆土 *cbbL* 细菌群落丰度和结构的影响 王蕊, 吴宪, 李刚, 修伟明, 王丽丽, 张贵龙 (5561)
- 粤港澳大湾区场地污染特征、治理修复与环境管理研究专辑
- 粤港澳大湾区污染场地土壤风险管控制度体系建设与思考 常春英, 董敏刚, 邓一荣, 肖荣波, 刘丽丽 (5570)
- 粤港澳大湾区土壤污染问题计量及可视化分析 张宁, 张盛, 杨海超, 张建通 (5581)
- 城市生活垃圾填埋场的物质存量特征及其环境影响: 以粤港澳大湾区为例 马仕君, 周传斌, 杨光, 赵志岚, 刘懿颀 (5593)
- 粤港澳大湾区丘陵区带某电镀场地重金属污染特征与迁移规律分析 侯文隽, 龚星, 詹泽波, 刘锋, 黄子航, 杨立宏, 林晓琛 (5604)
- 粤港澳大湾区典型化工场地苯系物污染特征及迁移规律 邓一荣, 陆海建, 董敏刚, 程洲, 庄长伟, 肖荣波, 钟音, 彭平安 (5615)
- 针铁矿-富里酸复合材料对铅镉污染土壤的钝化修复性能 刘千钧, 李想, 周阳媚, 唐杰鹏, 林亲铁, 姚琨 (5623)
- 广东大宝山矿区土壤植物体系重金属迁移过程及风险评价 陈洁宜, 刘广波, 崔金立, 肖唐付 (5629)
- Hydrus-1D 模型在推导基于保护地下水的土壤风险控制值中的应用 林挺, 罗飞, 朱艳, 杨坤, 郝秀平 (5640)
- 《环境科学》第 40 卷(2019 年) 总目录 (5649)
- 《环境科学》征订启事(5233) 《环境科学》征稿简则(5285) 信息(5357, 5420, 5429)

酵母菌降解胞外聚合物提升剩余活性污泥的脱水性能

俞心怡¹, 向金豪¹, 刘英¹, 龚天翼², 张彬辉¹, 吕文洲^{1*}

(1. 宁波大学土木与环境工程学院, 宁波 315211; 2. 宁波市城市排水有限公司, 宁波 315192)

摘要: 剩余污泥的脱水性能直接影响到污泥处置的效果和成本, 提升污泥脱水性是污泥减量化的重要途径。本研究提出利用复合酵母菌群降解剩余污泥胞外聚合物(EPS)来提升污泥脱水性能的方法。首先评价了复合酵母菌群对灭菌后 EPS 中各组分的降解效果; 继而将混合酵母细胞接入剩余污泥中进行曝气, 考察了酵母菌对污泥脱水性的提升效能。研究结果表明, 酵母菌对提取的 EPS 中蛋白质、多糖和核酸的降解效果明显, 振荡培养 72 h 内最多分别降低了 $(60.43 \pm 2.73)\%$ 、 $(18.94 \pm 2.39)\%$ 和 $(48.30 \pm 3.37)\%$ 。向 2 L 剩余污泥中接入 1.5 g 混合酵母菌湿菌体进行曝气, 24 h 后污泥的毛细吸水时间(CST)下降了 $(17.19 \pm 1.16)\%$, 比对照组多下降了 $(7.03 \pm 1.35)\%$; 与此同时污泥中 EPS 总量比对照污泥多下降了 $(17.46 \pm 3.91)\%$, 表明酵母菌可以通过原位降解污泥中 EPS 来提高污泥的脱水性能。

关键词: 酵母菌; 剩余污泥; 胞外聚合物; 生物降解; 污泥脱水性

中图分类号: X703 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)12-5465-08 DOI: 10.13227/j.hjks.201905001

Improvement of the Dewaterability of Excess Activated Sludge with Mixed Yeasts by Degrading Extracellular Polymeric Substances

YU Xin-yi¹, XIANG Jin-hao¹, LIU Ying¹, GONG Tian-yi², ZHANG Bin-hui¹, LÜ Wen-zhou^{1*}

(1. School of Civil and Environmental Engineering, Ningbo University, Ningbo 315211, China; 2. Ningbo Municipal Sewerage Limited Company, Ningbo 315192, China)

Abstract: The dewaterability of excess sludge directly affects the efficiency and cost of sludge disposal, and improving sludge dewaterability is a crucial way to reduce sludge volume. This study proposes a method to improve the dewaterability of residual sludge by using mixed yeast strains to degrade extracellular polymeric substances (EPS) in activated sludge. Firstly, the mixed cells of three yeast strains were injected into the sterilized EPS solution to investigate the degradation efficiency of EPS components. Secondly, the mixed yeast cells were supplied into the residual sludge, which was aerated for several hours while the sludge dewaterability was evaluated. The results showed that the degradation efficiencies of yeast to proteins, polysaccharides, and nucleic acids in EPS were evident, and reductions of $(60.43 \pm 2.73)\%$, $(18.94 \pm 2.39)\%$, and $(48.30 \pm 3.37)\%$ were achieved, respectively, within 72 hours' oscillating cultivation. The capillary suction time (CST) of the sludge decreased by $(17.19 \pm 1.16)\%$ after aeration, with 1.5 g mixed yeast wet cells added into 2 L excess sludge, $(7.03 \pm 1.35)\%$ more than that of the control test after 24 hours. Meanwhile, the total amount of EPS in sludge decreased by $(17.46 \pm 3.91)\%$ more than that in the control sludge, indicating that the yeast can improve the sludge dewaterability in-situ by degrading EPS in sludge.

Key words: yeast; excess sludge; extracellular polymeric substances; biodegradation; sludge dewaterability

污水厂剩余污泥的处置日益成为一个重要的环境问题^[1], 其处置费用约占污水处理厂总费用的 60%^[2]。受限于填埋场地日趋匮乏及焚烧处理利用价值低的问题, 污泥减量受到了普遍关注^[1, 3~5]。提高污泥脱水性能是污泥减量的重要手段^[6], 其常用的方法有物理法和化学法^[7]。物理法通过外加能量或作用力对污泥进行调理^[8, 9], 存在处理成本高的问题; 而化学法需要投加大量药剂因此存在二次污染问题^[10]。近年来, 生物法被用于提升污泥脱水性能, 比如生物沥浸法^[11, 12], 但该方法需要投入大量的微生物营养盐, 成本较高^[11, 13]。因此, 探索新型的生物法来提高污泥脱水性能具有重要意义。

剩余污泥中的胞外聚合物(EPS)对污泥脱水有重要影响, 过多的 EPS 增加了污泥中结合水的含量从而导致污泥脱水性差^[14~17]。因此, 降低 EPS 含量成为提升污泥脱水性的一个新方向。某些真菌具有

生物转化活性污泥^[18]及降解 EPS 的能力, 从而能提升污泥的脱水性^[19], 如毛霉属的 *Mucor circinelloides* ZG-3^[20] 及嗜热真菌中的蓝状菌属 *Talaromyces flavus* S1^[21, 22]。酵母菌具有丰富的胞外酶系^[23], 具有脂肪酶、蛋白酶、氧化酶和过氧化物酶等, 具有潜在降解污泥 EPS 中蛋白质和多糖的能力, 因此在理论上可以提升污泥的脱水性能。此外, 酵母菌为兼性菌, 更能适应现有的 A²/O 废水处理工艺, 事实上酵母菌在实际废水处理系统中有一定比例的存在(因系统而异)^[24, 25]。本研究分析了酵母菌对于 EPS

收稿日期: 2019-05-01; 修订日期: 2019-07-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(51878359); 环境模拟与污染控制国家重点联合实验室(中国科学院生态环境研究中心)专项(18K01ESPCR); 宁波市自然科学基金项目(2017A610298); 刘孔爱菊教育基金项目(407-880902)

作者简介: 俞心怡(1994~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为污水生物处理及资源化, E-mail: xinyimomo@foxmail.com

* 通信作者, E-mail: wenzhoulv@yahoo.com

组分的降解能力,并探讨了通过向活性污泥中接种一定浓度的酵母细胞来提升剩余污泥的脱水性能的可行性.

1 材料与方 法

1.1 实验材料

污泥取自宁波市某采用 A²/O 工艺污水处理厂的回流污泥. 污泥取回后静置 30 min,倒去上清液并使用孔径 1.2 mm 的筛子过筛. 静置后污泥的性质为:污泥沉降比(SV₃₀)为 89~91,混合液悬浮性固体(MLSS)为 10.5~13.5 g·L⁻¹,挥发性悬浮性固体(MLVSS)为 6.0~6.2 g·L⁻¹,pH 值为 6.5~7.0,毛细吸水时间(CST)为 20~22 s.

1.2 实验方法

1.2.1 酵母菌菌株、活化及培养

复合酵母菌群为实验室筛选并保藏的 3 株假丝酵母属菌株,分别为: *Candida tropicalis* (O2)、*Candida lipolytica* (G1) 和 *Candida halophila* (W1). 将 3 株酵母菌从斜面分别接种于盛有灭菌(115℃, 20 min)YPD 培养液的三角瓶中,并置于摇床上培养(175 r·min⁻¹, 28℃)24 h,之后将 3 瓶菌悬液等体积混合后接入灭菌的 YPD 培养液中进行扩大培养.

1.2.2 酵母菌细胞计数及接种量

将扩大培养获得的酵母菌悬液在 8 000 g 下离心 5 min(Thermo Fisher Multifuge X1R,美国). 酵母细胞用 0.9% 无菌生理盐水洗涤、离心 3 次后,将湿菌体重悬于生理盐水中用血球计数法测量酵母细胞浓度,每次实验将菌悬液稀释至 2.0 × 10⁹ 个·mL⁻¹ 待用.

1.2.3 活性污泥 EPS 的提取

将污泥样品装入 100 mL 离心管中,用超声破碎仪(上超 FS-600N,中国)在 20 kHz,480 W 下冰浴超声 10 min(经过实验,在此条件下超声强度不足以使细胞膜破裂,细胞内容物不会流出),然后分装至 50 mL 离心管在 12 000 g,4℃ 下离心 10 min,上清液即为 EPS^[26].

1.2.4 污泥样品及 EPS 的显微镜观察

取污泥 0.5~1.5 mL 于无菌离心管中,在 8 000 g 下离心 5 min,然后重悬于 2.5% 戊二醛溶液在 4℃ 下放置 2 h. 倒掉固定液,用 1 mol·L⁻¹,pH=7.0 的磷酸缓冲液漂洗样品 3 次,每次的漂洗时间为 15 min. 对样品进行乙醇梯度脱水处理,然后用 100% 乙醇处理 2 次,并于 -80℃ 冷冻干燥(ALPHR1-2LD,德国). 使用扫描电子显微镜(Quanta 250FEG,美国)观察样品. 酵母降解 EPS 实验中,取三角瓶中的混合液制成水浸片,在微分干涉显微镜

(Nikon 80i,日本)中直接观察.

1.2.5 分析方法

污泥脱水性采用毛细吸水时间(CST)来表征^[27],使用 CST 测定仪(Triton Electronics 304M,英国)测定;多糖含量的测定采用苯酚-硫酸法^[28],葡萄糖作为标准物质;蛋白质含量的测定采用 Bradford 法,牛血清蛋白作为标准物质^[29];核酸含量的测定采用二苯胺比色法,小牛胸腺 DNA 作为标准物质^[30].

三维荧光分析(3D-EEM):用无臭氧氙弧灯作为激发光源,激发波长 E_x 的范围是 220~450 nm,发射波长 E_m 的范围是 260~600 nm. 仪器的激发和发射狭缝宽度设定在 5 nm,光栅时间为 0.1 s,扫描速度为 3 200 nm·min⁻¹,使用 Origin 8.6 软件进行数据处理.

1.3 实验设计

1.3.1 酵母降解 EPS 实验

在 6 个 150 mL 的三角瓶中各加入提取的 EPS 溶液(pH 6.8)100 mL,在 115℃ 下灭菌 20 min. 灭菌后置于超净台中冷却至室温,向其中 3 个加入湿菌体 0.5 g,为酵母组;另外 3 个不添加酵母菌作为对照组,将三角瓶放置在摇床上 175 r·min⁻¹,28℃ 下振荡. 分别在 0、24、48 和 72 h 时取混合液测定 pH 值. 为了排除酵母菌细胞对 EPS 组分分析的影响,将取出的混合液在 12 000 g 下离心 10 min(Eppendorf Centrifuge 5415R,德国),测定上清液中蛋白、多糖、核酸含量;同时使用荧光分光光度计(日立 F-4600,日本)对活性污泥中的荧光物质组分进行分析.

1.3.2 酵母菌提升污泥的脱水性实验

在 6 个直径为 15 cm 的有机玻璃反应器中分别装入混合均匀的 2 L 污泥,调节 pH 为 6.8,向 3 个罐子中分别加入 1.5 g 酵母菌湿菌体作为酵母组,另外 3 罐不加酵母菌作为对照组. 使用电磁振动式空气泵通过砂芯曝气头进行曝气,控制溶解氧(DO)为 7 mg·L⁻¹ 左右,温度为 28℃. 分别于 0、24、48 和 72 h 时取污泥样,测定 pH 值和 CST. 分别提取 6 个罐子中污泥的 EPS,测定蛋白、多糖和核酸组分含量. 取出 1 mL 提取的 EPS 稀释 15 倍进行荧光物质分析.

2 结果与讨论

2.1 酵母菌对 EPS 不同组分的降解

图 1 反映了 72 h 内三角瓶中 EPS 组分含量的变化. 从图 1(a)可以看出,接种酵母菌的三角瓶中蛋白质含量在 24 h 内从 81.58 mg·L⁻¹ 下降到 35.73

$\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 降解率达到了 56.20%; 而对照组则从 $81.68 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 下降到 $63.03 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 降解率仅为 22.83%, 说明酵母菌在最初的 24 h 对 EPS 中蛋白组分有较快速的降解作用; 相比之下, 24 h 之后, 蛋白质的降解速度趋于平缓。从图 1(b) 可以看出, 酵母组中多糖含量在逐步降低, 说明在此过程中酵母菌对多糖有一个持续降解过程, 也表明酵母菌能够利用多糖作为其生长的碳源。值得一提的是, 对照组的多糖含量在 24 ~ 48 h 没有下降反而有了略微的上升。为了探究对照组蛋白质和多糖含量变化的原因, 本研究对对照组中 EPS 溶液进行了显微镜观察, 发现有许多游离细菌存在, 这说明在 115°C 下灭菌 20 min 并未能彻底灭活 EPS 中的细菌, 其原因是 EPS 可以维持微生物细胞的生物膜稳定性^[31] 从而对细胞具有保护作用^[32]。这些游离细菌有些可以利用 (降解) EPS 中蛋白质或多糖而生长, 不能利用的细菌因摇瓶 EPS 中的营养成分缺乏而死亡解体, 从而溶出蛋白、多糖等细胞内容物质。可能因为游离细菌对蛋

白和多糖降解能力差异, 造成了降解量和溶出量相对值的不同, 因而出现了蛋白含量降低而后期多糖含量稍有上升的现象。图 1(c) 为酵母组中核酸含量的变化, 在 48 h 内核酸从 $122.50 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 大幅度下降至 $63.33 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, 而对照组中的核酸含量却有略微地上升, 说明在 48 h 内酵母菌能显著降解核酸组分, 但是在 48 h 后三角瓶中核酸含量有所上升, 可能是长时间振荡培养导致了营养物质缺乏或者限制, 造成部分酵母细胞死亡释放出了核酸物质。从图 1(a) ~ 1(c) 中都可以看出酵母菌可以使 EPS 各组分的含量降低, 但是各组分变化规律不尽相同, 这应该归因于各组分在污泥 EPS 中的分布模式不同^[14] 以及酵母菌对各组分的利用机制的差异。从图 1(d) 可以看出在 24 h 内, 酵母组的总 EPS 含量比对照组下降趋势更为明显, 表明酵母菌在提高污泥脱水性能方面具有一定的潜力。24 ~ 48 h, 酵母组和对照组的总 EPS 的含量趋于稳定; 48 h 后酵母组的总 EPS 有一个下降过程, 而对照组基本趋于稳定。

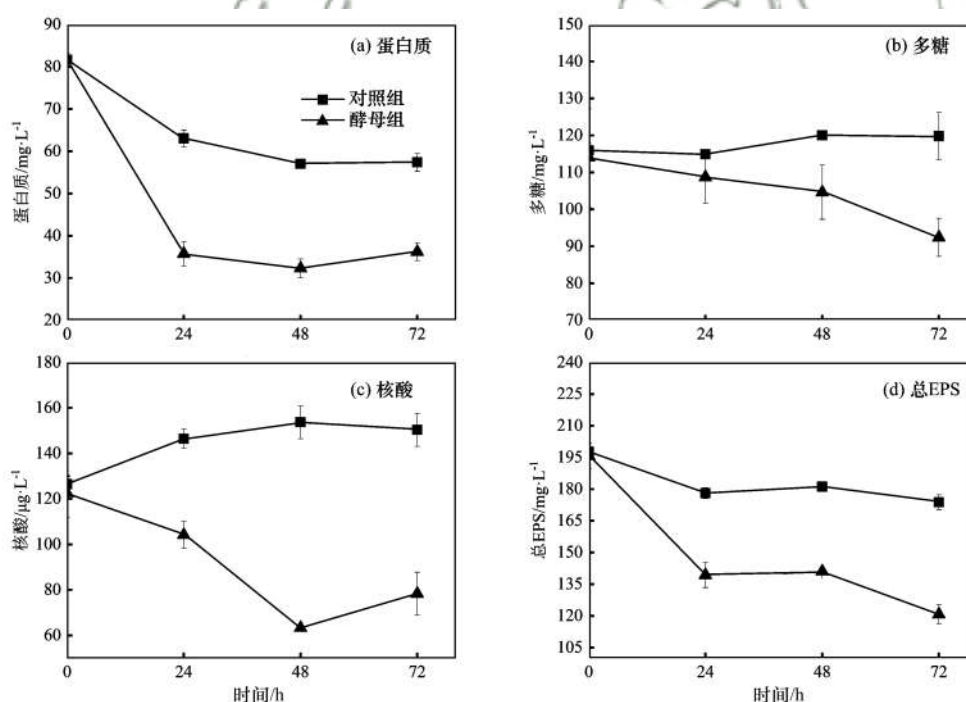


图 1 酵母菌对 EPS 不同组分及总 EPS 的降解效果

Fig. 1 Degradation efficiencies of EPS components and total EPS by yeasts

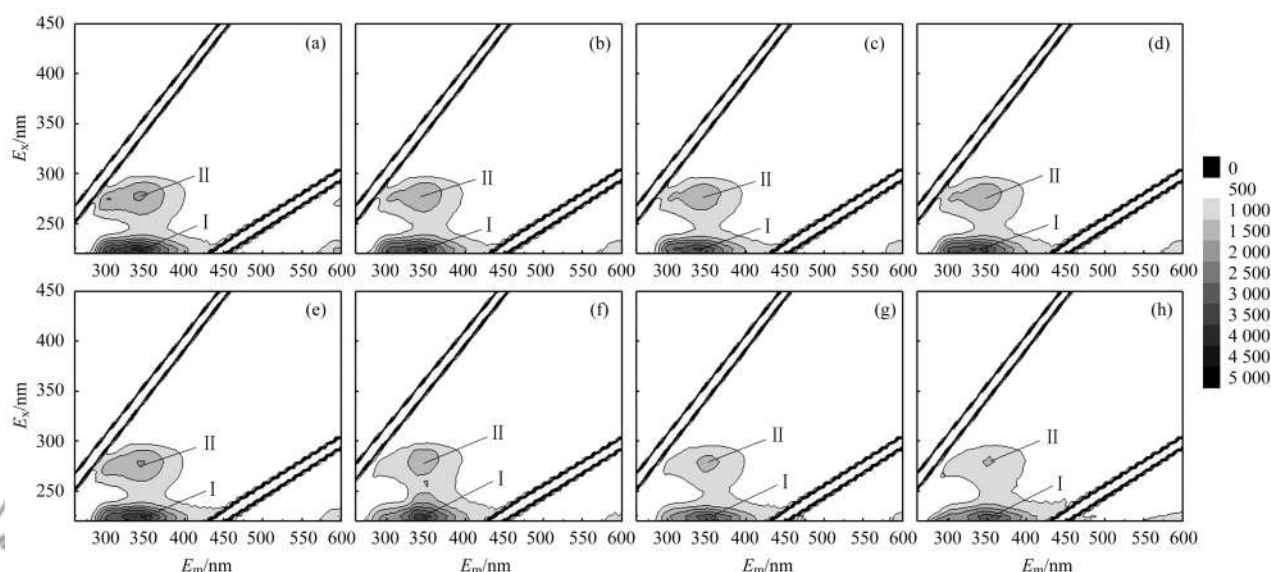
2.2 酵母菌对 EPS 中荧光组分的降解

为了更进一步探明酵母菌降解 EPS 中蛋白质的大致分类, 采用 3D-EEM 方法对酵母菌降解 EPS 过程中的荧光物质信号变化进行了跟踪分析。图 2 中的三维荧光图谱可定义为 I 和 II 两种峰。其中, I 峰的中心位置约为 $E_x/E_m = 220 \sim 225 \text{ nm}/330 \sim 340 \text{ nm}$, 属于芳香蛋白区域, 是低激发波长类色氨酸; II 峰的中心位置约为 $275 \sim 280 \text{ nm}/305 \sim 350$

nm, 属于可溶性微生物副产物区域, 是高激发波长类色氨酸^[33]。图 2 结果显示, 在 24 h 内, 对照组 EPS 的 I 峰荧光强度从 3 712 下降到 3 363, 下降率为 9.40%; II 峰的荧光强度从 1 589 下降到 1 407, 下降率为 11.45%; 酵母组 I 峰的荧光强度从 3 716 下降到 3 354, 下降率为 9.74%, II 峰的荧光强度从 1 529 下降到 1 294, 下降率为 15.37%。由此可以看出, 酵母组的蛋白含量在 24 h 内比对照组下降更多, 尤其是

对 II 峰表示的可溶性微生物副产物有更好地降解效果;因此可以判定,酵母菌对于活性污泥中的可溶性微生物产物有较好地降解作用,而这部分物质与污泥的脱水性能关系密切^[34, 35]. 在 24~48 h 内,对照组 I 峰的荧光强度从 3 363 下降到 3 128, II 峰的荧光强度从 1 407 下降到 1 353,下降率分别为 6.99% 和 3.84%;酵母组 I 峰的荧光强度从 3 354 下降到 2 844, II 峰的荧光强度从 1 294 下降到 1 117,下降率分别为 15.21%

和 13.68%,可以看出在这段时间内,酵母菌能继续降解 EPS 组分中的蛋白质;在 48 h 至 72 h 内,对照组 I 峰的荧光强度和 II 峰的荧光强度没有太大的变化,与化学分析测定的结果相比,荧光强度下降趋势一致但下降率偏低,这是因为荧光分析只能表征一些种类的蛋白,但化学分析测定测得的是总蛋白含量;酵母组 I 峰的荧光强度有略微上升但幅度很小, II 峰的荧光强度则没有太大的变化.



(a)~(d)和(e)~(h)分别为对照组和酵母组在 0、24、48 和 72 h 的 EPS 组分荧光

图 2 酵母菌对 EPS 中荧光组分的降解效果

Fig. 2 Degradation efficiencies of EPS fluorescent components by yeasts

2.3 酵母菌降解 EPS 组分的作用机制

图 3 是向 EPS 中加入酵母细胞培养后观察到 EPS 絮体的微分干涉照片. 可以看出,酵母菌细胞(较大的圆形或者卵圆形细胞)可以与 EPS 中的胶状物有效结合,形成了明显的絮状物,类似于活性污泥的菌胶团结构. 有研究表明, EPS 可以维持微生物细胞的生物膜稳定性,是细菌之间相互黏附的重要介质^[31]. 本研究中絮状物的形成可能与酵母菌细胞表面性质有关. 前期研究中表明,酵母 O2 和 G1 细胞表面具有较强的疏水性,可以与油脂等疏水性污染物结合,从而有利于胞外酶对污染物基质的降解以及对代谢产物的吸收^[36]. EPS 的主要组分是蛋白质和多糖,其中蛋白质部分具有明显的疏水性基团^[37],酵母细胞可能与这些疏水性基团相黏附,形成絮体并将附着的此类物质降解,代谢产生的小分子物质可以为酵母细胞提供碳源、氮源等营养. 有研究表明,在不外加营养物质的情况下, EPS 可以作为支持某些微生物生命活动的碳源和氮源^[17]. 本研究中,酵母菌与 EPS 胶状物体结合在一起,一方面有利于酵母细胞对 EPS 的降解,另一方

面可以减少游离水中单细胞酵母的数量,两者对于提高污泥的脱水性都是有利因素.

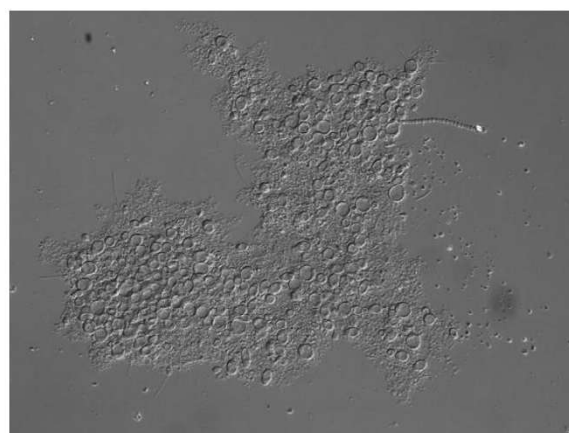


图 3 酵母菌与 EPS 组分形成的絮状物质的显微图片 (10×40)

Fig. 3 Differential interferogram of yeast cells combined with EPS components (10×40)

2.4 酵母菌对提高污泥脱水性的作用

将一定量的酵母菌加入剩余污泥中进行曝气,评价了酵母菌对于污泥脱水性的提升作用. 提取不同曝气时间下的污泥的 EPS 并对其组分进行分析

发现,在 24 h 内,投加酵母菌的反应器中,蛋白质和多糖的含量下降率分别是 $(76.73 \pm 1.66)\%$ 和 $(44.80 \pm 3.68)\%$;而对照组的罐子中蛋白质和多糖含量下降了 $(67.02 \pm 3.09)\%$ 和 $(23.67 \pm 0.92)\%$. 相比较可以看出,酵母菌的添加对于 EPS 组分中的多糖有明显的降解作用. 有研究表明,酵母 *Pseudozyma brasiliensis* 能通过分泌木聚糖酶从而降解植物多糖^[38];1 株土著酵母 *Saccharomyces*

cerevisiae 依靠 PGU1 单基因编码的多聚半乳糖醛酸内切酶来降解可可浆中的果胶类多糖^[39]. 从图 4 (c)可以看出,酵母组和对照组的 EPS 中核酸含量都有所下降,酵母组比对照组略高;鉴于核酸在总 EPS 中的占比很低,因此核酸含量不是影响污泥脱水性的主因. 从图 4(d)中可以看出,在 24 h 内,酵母组中总 EPS 下降程度比对照组大,且在 24 h 时 EPS 的总量更低,相应地酵母处理后的污泥 CST 下

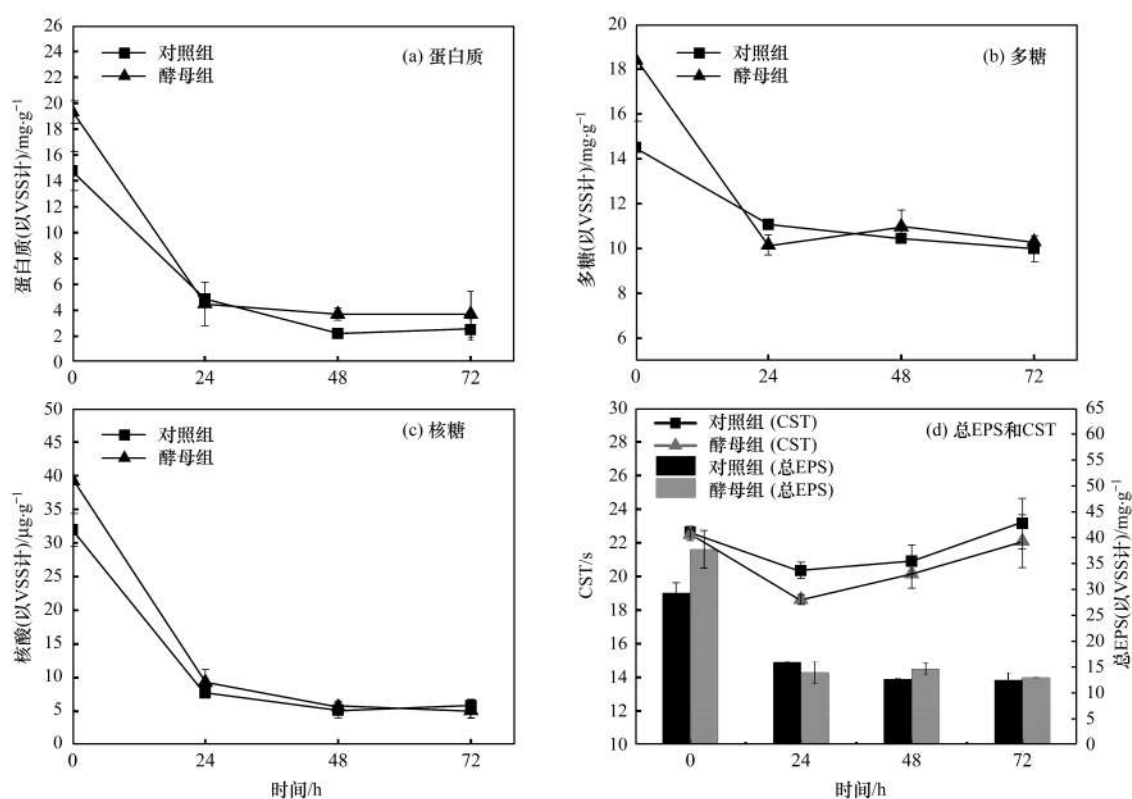
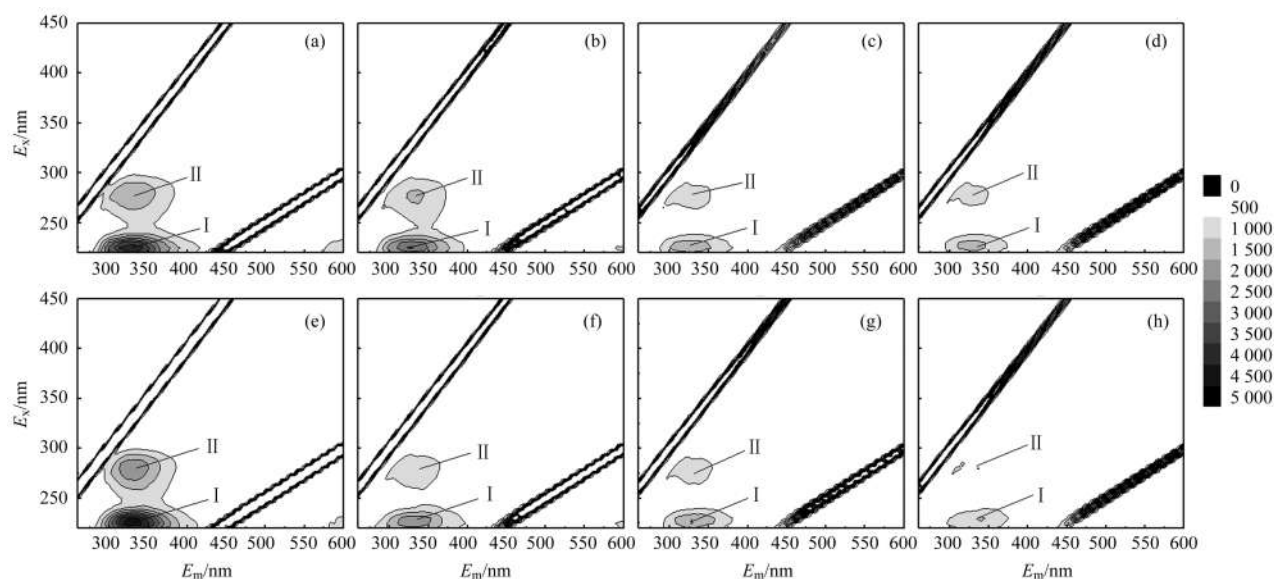


图 4 添加酵母并曝气不同时间后污泥中 EPS 组分和 CST 的变化

Fig. 4 Variation of EPS composition and CST of sludge with aeration time



(a) ~ (d) 和 (e) ~ (h) 分别为对照组和酵母组在 0、24、48 和 72 h 的 EPS 组分荧光

图 5 酵母菌对污泥中 EPS 荧光组分的降解

Fig. 5 Degradation efficiencies of EPS fluorescent components in activated sludge by yeasts

降了 $(17.19 \pm 1.16)\%$,比对照组多下降了 $(7.03 \pm 1.35)\%$ 。但是在24 h之后,接种酵母的污泥中EPS的多糖和蛋白有略微上升,这可能与酵母菌自身代谢产物的积累有关,酵母菌在降解污泥EPS中的多糖后,经过一定时间培养后自身也会合成多糖排到细胞外。因此,对于利用添加酵母来提升污泥脱水性能可能存在一个合理的处理时间问题。曝气时间超过24 h,酵母组和对照组的CST值都出现了上升,但是在酵母组中总EPS高于对照组的情况下,酵母组的CST会更低一些,可能与酵母细胞参与污泥絮体的构建有关。继续曝气至48 h后,两组污泥的CST持续上升,对照组的CST达到23.15 s,高于采集污泥的原始值;酵母组污泥CST值上升至22.1 s,与采集污泥的原始值接近。

从图4(d)可以看出EPS的含量在一定的范围内对污泥的脱水性有一定的影响,EPS含量太高会降低污泥脱水性,有研究报道当活性污泥的微生物胞外聚合物的含量(以ECP/SS计)为 $35 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ (其中ECP为胞外多聚物)时脱水性能最好^[40]。EPS在污泥絮状物结构的稳定性中起重要作用,EPS含量增加,活性污泥的剪切敏感度降低,污泥分散度也会降低^[41],这表明不是EPS含量越低,污泥脱水性就越好。本研究结果表明,酵母菌能在24 h内有效降低污泥EPS中的蛋白质和多糖含量,同时也能降低活性污泥的CST值,从而有效提高活性污泥的脱水性。从运行的经济性和效果两方面来考虑,24 h应该是酵母提升污泥脱水性的理想处理时间。

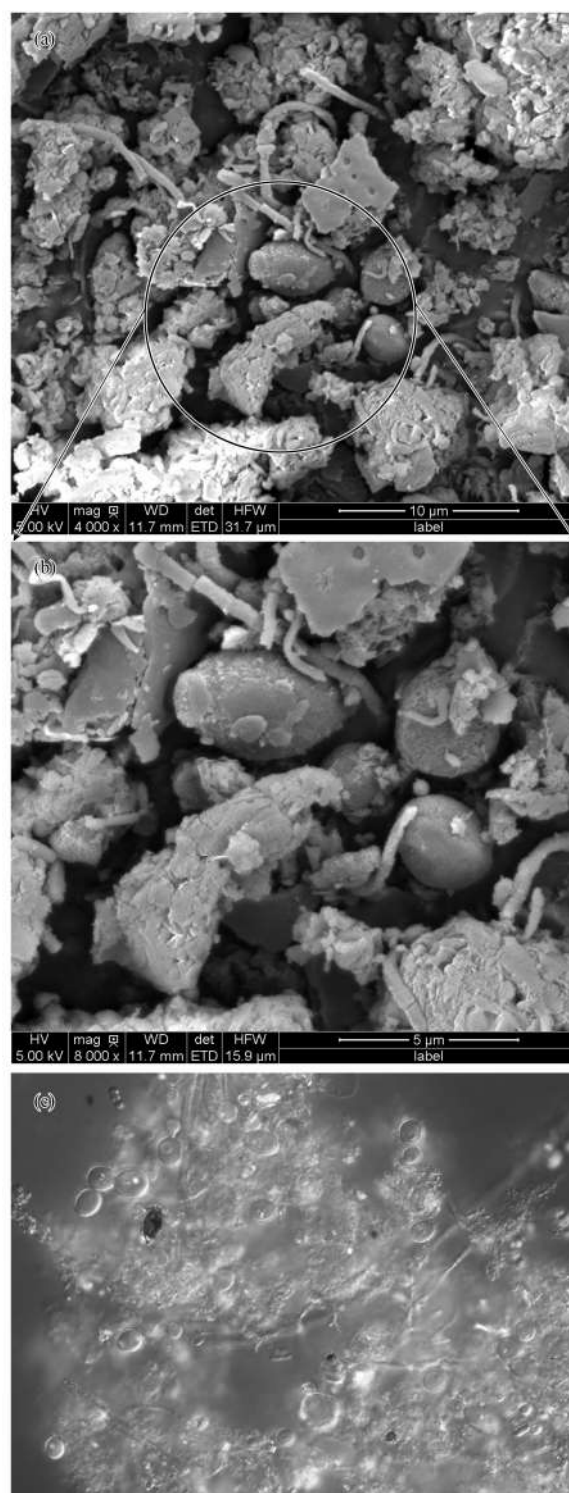
2.5 酵母菌对活性污泥中EPS的荧光组分原位降解

对不同处理时间后酵母组和对照组反应器中污泥的EPS进行三维荧光分析,谱图见图5。从中可以看出0~24 h,对照组I峰的荧光强度从3 785下降到2 577,II峰的荧光强度从1 409下降到1 070,下降率分别为31.92%和24.06%;酵母组I峰的荧光强度从4 655下降到1 958,II峰的荧光强度从1 924下降到812,下降率分别为57.94%和57.80%。从结果可以看出,相较于对照组,酵母组污泥中EPS的蛋白含量下降更多,降解速率更快,且II峰表征的可溶性微生物副产物降解率是对照组的2.4倍;I峰表征的芳香族蛋白的降解率是对照组的1.8倍。但在24 h后酵母组对蛋白的降解速率相对下降,如24~48 h,对照组I峰的荧光强度从2 577下降到1 409,II峰的荧光强度从1 070下降到729,下降率分别为45.32%和31.87%;酵母组I峰的荧光强度从1 958下降到1 534,II峰的荧光强度从812下降到

了695,下降率分别为21.65%和14.41%。但直到72 h时,酵母组对I峰和II峰表征物质的总降解率仍然高于对照组,分别高出了9.22%和16.43%。

2.6 酵母菌提升污泥脱水性的机制

从图6(a)和6(b)可以清晰地看到酵母菌在活性污泥中的细胞形态特征,它们处于活性污泥絮体



(a)和(b)为扫描电镜;(c)为微分干涉

图6 酵母菌在活性污泥絮体中的存在形态

Fig. 6 Scanning electron micrograph and differential interferogram of yeasts in activated sludge

之中,与污泥的菌胶团结合在一起,这使得污泥颗粒变大,更容易沉降和脱水。从图 6(b) 可以看到酵母细胞具有明显的芽痕,说明酵母细胞在处理污泥过程中可能有出芽生殖现象,印证了酵母细胞在系统中具有生物活性,为连续处理污泥提供了基础。图 6(c) 是通过微分干涉显微镜对酵母菌在处理活性污泥中的形态进行观察,从中也可以明显看到酵母菌与活性污泥中的胶状物(EPS)结合在一起,与在三角瓶实验中观察到的结果相吻合。综上,酵母菌可以紧密结合污泥中 EPS 并将其作为营养物质而消耗,这使得污泥 EPS 的含量得到了有效地降低,可以在一定程度上降低剩余污泥的 CST 值,从而提升活性污泥的脱水性。从上述实验结果可以看出,酵母菌对污泥的原位降解率低于摇瓶实验,这是由于实际污泥的生物系统十分复杂,大量微生物的存在会影响酵母菌的生存繁殖。此外,环境因素也会影响到酵母菌对污泥 EPS 的降解。因此,后续研究需要通过优化相应条件来提高酵母菌对污泥 EPS 的降解效率,如 pH、碳源、氮源及影响酵母细胞相关酶活性的微量元素等。

3 结论

(1) 酵母菌对活性污泥中提取的 EPS 中蛋白质、多糖及核酸组分都有明显的降解作用;在 72 h 内,酵母对不同组分的最佳降解时间不同。

(2) 酵母菌对提取的 EPS 中蛋白质的降解速率较快,在 24 h 后降解速率趋于平缓;对多糖的降解速率较慢,但在 72 h 内具有持续降解作用。

(3) 酵母菌对 EPS 中蛋白质组分的芳香蛋白和可溶性微生物副产物都有一定降解效果,其中对可溶性微生物副产物的降解效果更好。酵母细胞与 EPS 组分结合为絮体有利于酵母菌对 EPS 组分的降解。

(4) 酵母菌能原位降解活性污泥中的 EPS 组分,24 h 内污泥中 EPS 总量比对照组多下降 $(17.46 \pm 3.91)\%$,污泥的毛细吸水时间(CST)下降了 $(17.19 \pm 1.16)\%$,比对照组多下降了 $(7.03 \pm 1.35)\%$ 。

致谢:感谢宁波大学韩俊成、徐科锋、董世闻及中国台湾淡江大学陈甬安等对本研究的协助。

参考文献:

[1] Cao B D, Zhang W J, Du Y J, *et al.* Compartmentalization of extracellular polymeric substances (EPS) solubilization and cake microstructure in relation to wastewater sludge dewatering behavior assisted by horizontal electric field: effect of operating conditions[J]. *Water Research*, 2018, **130**: 363-375.

[2] Wang Q L, Wei W, Gong Y Y, *et al.* Technologies for reducing

sludge production in wastewater treatment plants: state of the art [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **587-588**: 510-521.

[3] Xu Q Y, Wang Q D, Zhang W J, *et al.* Highly effective enhancement of waste activated sludge dewaterability by altering proteins properties using methanol solution coupled with inorganic coagulants[J]. *Water Research*, 2018, **138**: 181-191.

[4] Zhang W J, Chen Z, Cao B D, *et al.* Improvement of wastewater sludge dewatering performance using titanium salt coagulants (TSCs) in combination with magnetic nano-particles: significance of titanium speciation[J]. *Water Research*, 2017, **110**: 102-111.

[5] 卢怡清, 许颖, 董滨, 等. 去除城市生活污水污泥中有机络合态金属强化其厌氧生物制气[J]. *环境科学*, 2018, **39**(1): 284-291.

Lu Y Q, Xu Y, Dong B, *et al.* Enhancement of anaerobic methane production by removal of organic-bonding metals from sewage sludge[J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(1): 284-291.

[6] 刘吉宝, 李亚明, 吕鑑, 等. 污水处理厂不同工艺的污泥脱水效能分析及其影响因素研究[J]. *环境科学*, 2015, **36**(10): 3794-3800.

Liu J B, Li Y M, Lü J, *et al.* Performance and factors analysis of sludge dewatering in different wastewater treatment processes[J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(10): 3794-3800.

[7] 洪晨, 邢奕, 王志强, 等. 无机调理剂与表面活性剂联合调理对污泥脱水性能的影响[J]. *化工学报*, 2014, **65**(3): 1068-1075.

Hong C, Xing Y, Wang Z Q, *et al.* Dewatering performance of sludge modified by inorganic conditioner combined with surfactant [J]. *CIESC Journal*, 2014, **65**(3): 1068-1075.

[8] Pilli S, Bhunia P, Yan S, *et al.* Ultrasonic pretreatment of sludge: a review[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2011, **18**(1): 1-18.

[9] Camacho P, Deleris S, Geaugey V, *et al.* A comparative study between mechanical, thermal and oxidative disintegration techniques of waste activated sludge [J]. *Water Science and Technology*, 2002, **46**(10): 79-87.

[10] Murugesan K, Selvam A, Wong J W C. Flocculation and dewaterability of chemically enhanced primary treatment sludge by bioaugmentation with filamentous fungi [J]. *Bioresource Technology*, 2014, **168**: 198-203.

[11] 刘昌庚, 张盼月, 蒋娇娇, 等. 生物沥浸耦合类 Fenton 氧化调理城市污泥[J]. *环境科学*, 2015, **36**(1): 333-337.

Liu C G, Zhang P Y, Jiang J J, *et al.* Sewage sludge conditioning by bioleaching combined with Fenton-like oxidation [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(1): 333-337.

[12] 朱海凤, 周立祥, 王电站. 生物沥浸的酸化效应对城市污泥脱水性能的影响[J]. *环境科学*, 2012, **33**(3): 916-921.

Zhu H F, Zhou L X, Wang D Z. Effect of acidification on the dewaterability of sewage sludge in bioleaching [J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(3): 916-921.

[13] 周俊, 刘奋武, 崔春红, 等. 生物沥浸对城市污泥脱水及其重金属去除的影响[J]. *中国给水排水*, 2014, **30**(1): 86-89.

Zhou J, Liu F W, Cui C H, *et al.* Effect of bioleaching on dewaterability of sewage sludge and removal of heavy metals [J]. *China Water & Wastewater*, 2014, **30**(1): 86-89.

[14] 何培培, 余光辉, 邵立明, 等. 污泥中蛋白质和多糖的分布对脱水性能的影响[J]. *环境科学*, 2008, **29**(12): 3457-3461.

- He P P, Yu G H, Shao L M, *et al.* Effect of proteins and polysaccharides in sewage sludge on dewaterability [J]. *Environmental Science*, 2008, **29**(12): 3457-3461.
- [15] Wingender J, Neu T R, Flemming H C. Microbial extracellular polymeric substances: characterization, structure and function [M]. Berlin Heidelberg: Springer, 1999. 1-19.
- [16] Mowla D, Tran H N, Allen D G. A review of the properties of biosludge and its relevance to enhanced dewatering processes [J]. *Biomass and Bioenergy*, 2013, **58**: 365-378.
- [17] 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.
- [18] Mannan S, Fakhru'l-Razi A, Alam M Z. Use of fungi to improve bioconversion of activated sludge[J]. *Water Research*, 2005, **39**(13): 2935-2943.
- [19] More T T, Yan S, Tyagi R D, *et al.* Potential use of filamentous fungi for wastewater sludge treatment [J]. *Bioresource Technology*, 2010, **101**(20): 7691-7700.
- [20] 周雨珺, 付豪逸, 范先锋, 等. 改善污泥脱水性能的丝状真菌的分离及其促进污泥脱水的机制初探[J]. *环境科学*, 2015, **36**(2): 612-618.
- Zhou Y J, Fu H Y, Fan X F, *et al.* Isolation of filamentous fungi capable of enhancing sludge dewaterability and study of mechanisms responsible for the sludge dewaterability enhancement[J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(2): 612-618.
- [21] 史佳晟, 杨硕, 余雷, 等. 丝状真菌 *Talaromyces flavus* S1 在污泥中的成球特性及改善脱水性能的研究[J]. *环境科学学报*, 2017, **37**(10): 3672-3678.
- Shi J S, Yang S, Yu L, *et al.* The pelletization characteristics of the filamentous fungi *Talaromyces flavus* S1 in sludge and the improvement for sludge dewatering [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, **37**(10): 3672-3678.
- [22] Liu H, Shi J S, Xu X Y, *et al.* Enhancement of sludge dewaterability with filamentous fungi *Talaromyces flavus* S1 by depletion of extracellular polymeric substances or mycelium entrapment[J]. *Bioresource Technology*, 2017, **245**: 977-983.
- [23] Yang Q X, Zhang H, Li X L, *et al.* Extracellular enzyme production and phylogenetic distribution of yeasts in wastewater treatment systems [J]. *Bioresource Technology*, 2013, **129**: 264-273.
- [24] Maza-Márquez P, Vilchez-Vargas R, Kerckhof F M, *et al.* Community structure, population dynamics and diversity of fungi in a full-scale membrane bioreactor (MBR) for urban wastewater treatment[J]. *Water Research*, 2016, **105**: 507-519.
- [25] Yang Q X, Angly F E, Wang Z, *et al.* Wastewater treatment systems harbor specific and diverse yeast communities [J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2011, **58-59**: 168-176.
- [26] Wang T F, Shao L M, Li T S, *et al.* Digestion and dewatering characteristics of waste activated sludge treated by an anaerobic biofilm system[J]. *Bioresource Technology*, 2014, **153**: 131-136.
- [27] Wong J W C, Murugesan K, Yu S M, *et al.* Improved dewatering of CEPT sludge by biogenic flocculant from *Acidithiobacillus ferrooxidans*[J]. *Water Science & Technology*, 2016, **73**(4): 843-848.
- [28] Herbert D, Philipps P J, Strange R E. Carbohydrate analysis [J]. *Methods Enzymol*, 1971, **5B**: 265-277.
- [29] Bradford M M. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding[J]. *Analytical Biochemistry*, 1976, **72**(1-2): 248-254.
- [30] Sun Y, Clinkenbeard K D, Clarke C, *et al.* *Pasteurella haemolytica* leukotoxin induced apoptosis of bovine lymphocytes involves DNA fragmentation[J]. *Veterinary Microbiology*, 1999, **65**(2): 153-166.
- [31] Wolfaardt G M, Lawrence J R, Korber D R. Function of EPS [A]. In: Wingender J, Neu T R, Flemming H C (Eds.). *Microbial extracellular polymeric substances* [M]. Berlin Heidelberg: Springer, 1999. 171-200.
- [32] 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.
- Tang C C, Liu M, Chen H M, *et al.* Advances in extracellular polymeric substances in biological wastewater treatment system [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2014, **33**(6): 1576-1581.
- [33] 张俊珂, 曾萍, 宋永会, 等. 受四环素影响的活性污泥胞内外聚合物特征[J]. *中国环境科学*, 2016, **36**(3): 751-758.
- Zhang J K, Zeng P, Song Y H, *et al.* The characteristics of extracellular polymeric substances and intracellular polymeric substances in activated sludge fed with tetracycline[J]. *China Environmental Science*, 2016, **36**(3): 751-758.
- [34] Yu G H, He P J, Shao L M, *et al.* Stratification structure of sludge flocs with implications to dewaterability [J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, **42**(21): 7944-7949.
- [35] Chen Z, Zhang W J, Wang D S, *et al.* Enhancement of activated sludge dewatering performance by combined composite enzymatic lysis and chemical re-flocculation with inorganic coagulants: kinetics of enzymatic reaction and re-flocculation morphology[J]. *Water Research*, 2015, **83**: 367-376.
- [36] Lv W Z, Hesham A E L, Zhang Y, *et al.* Impacts of cell surface characteristics on population dynamics in a sequencing batch yeast reactor treating vegetable oil-containing wastewater [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2011, **90**(5): 1785-1793.
- [37] Jorand F, Boué-Bigne F, Block J C, *et al.* Hydrophobic/hydrophilic properties of activated sludge exopolymeric substances [J]. *Water Science and Technology*, 1998, **37**(4-5): 307-315.
- [38] Kaupert Neto A A, Borin G P, Goldman G H, *et al.* Insights into the plant polysaccharide degradation potential of the xylanolytic yeast *Pseudozyma brasiliensis* [J]. *FEMS Yeast Research*, 2016, **16**(2): fov117.
- [39] Meersman E, Struyf N, Kyomugasho C, *et al.* Characterization and degradation of pectic polysaccharides in cocoa pulp [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2017, **65**(44): 9726-9734.
- [40] Houghton J J, Quarmby J, Stephenson T. Municipal wastewater sludge dewaterability and the presence of microbial extracellular polymer[J]. *Water Science & Technology*, 2001, **44**(2-3): 373-379.
- [41] Mikkelsen L H, Keiding K. Physico-chemical characteristics of full scale sewage sludges with implications to dewatering [J]. *Water Research*, 2002, **36**(10): 2451-2462.

CONTENTS

Concentration Characteristics and Assessment of Model-Predicted Results of PM _{2.5} in the Beijing-Tianjin-Hebei Region in Autumn and Winter	ZHU Yuan-yuan, GAO Yu-xiao, LIU Bing, <i>et al.</i> (5191)
Chemical Composition Characteristics and Source Apportionment of PM _{2.5} During the Heating Period of 2016-2017 in the Eastern Part of the North China Plain	ZHANG Yi-qin, WANG Jie, GAO Jian, <i>et al.</i> (5202)
Change in Characteristics of Pollution Gas and Water-soluble Ions at Different Development Stages of Haze	WANG Zhen-bin, LIU An-kang, LU Wen, <i>et al.</i> (5213)
Exposure Levels, Sources, and Health Risks of Heavy Metal Components of PM _{2.5} in Housewives in Rural Shanghai	LUO Ran-ran, DAI Hai-xia, ZHANG Yun-hui, <i>et al.</i> (5224)
Measuring the Condensable Particle Matter from a Stationary Source	JIANG Jing-kun, DENG Jian-guo, WANG Gang, <i>et al.</i> (5234)
Volatile Organic Compound Emission Characteristics of Furniture Manufacturing Enterprises and the Influence on the Atmospheric Environment	ZHANG Jia-mi, ZENG Chun-ling, LIU Rui-yuan, <i>et al.</i> (5240)
VOCs Emission Inventory and Impact Range Simulation of Antibiotic Enterprises	ZHU Tao, LÜ Yi-rong, BIAN Wen-jing, <i>et al.</i> (5250)
Effects of Vehicle Emissions on Heavy Metals and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Pollution in Road Dust in Xinxiang	LI Qi-lu, WU Jin-tao, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (5258)
Pollution Characteristics and Exposure Risk Assessment of Perfluoroalkyl Substances in Road Dust, Chengdu	FANG Shu-hong, ZHU He-xiang, YE Zhi-xiang, <i>et al.</i> (5265)
Characteristics of Stable Isotopes and Analysis of Water Vapor Sources of Precipitation at the Northern Slope of the Qilian Mountains	ZHANG Bai-juan, LI Zong-xing, WANG Yu, <i>et al.</i> (5272)
Occurrence Characteristics and Risk Assessment of Antibiotics in Source Water of the Nanjing Reach of the Yangtze River	FENG Meng-juan, ZHANG Qin, SONG Ning-hui, <i>et al.</i> (5286)
Effects of Different Coagulants on Co-manganese Oxides Filter Media for Removing Ammonium and Manganese from Surface Water in Summer and Autumn	CHENG Li-jie, HUNAG Ting-lin, CHENG Ya, <i>et al.</i> (5294)
Disinfection By-products and the Relevant Health Risk in the Water Supply System in H City of Zhejiang Province	LIU Jun-ping, YU Jian-quan, LI Qing-song, <i>et al.</i> (5302)
Absorption and Fluorescence Spectra of Dissolved Organic Matter in Rivers of the Three Gorges Reservoir Area Under the Background of Urbanization	CHEN Zhao-yu, LI Si-yue (5309)
Characteristics of Chromophoric Dissolved Organic Matter (CDOM) in Natural Rivers of Western Sichuan Plateau	LIU Yan-yang, SUN Hui, LIU Chen, <i>et al.</i> (5318)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Losses and Runoff in a Typical Purple Soil Watershed in the Three Gorges Reservoir Area	CAO Rui-xia, LIU Jing, DENG Kai-kai, <i>et al.</i> (5330)
Responses of Riverine Phosphorus Exports to Land Use and Hydrological Regime in the Jiulong River Watershed	HUANG Ya-ling, TANG Li, HUANG Jin-liang, <i>et al.</i> (5340)
Effects of Land Use Types at Different Spatial Scales on Water Quality in Poyang Lake Wetland	FANG Na, LIU Ling-ling, YOU Qing-hui, <i>et al.</i> (5348)
Environmental Significance of Phosphorus Fractions of Phytoplankton-and Macrophyte-Dominated Zones in Taihu Lake	GENG Xue, WEN Shuai-long, SUN Pei-rong, <i>et al.</i> (5358)
Spatial Distribution and Pollution Evaluation of Carbon, Nitrogen, and Phosphorus in Sediments of Zhushan Bay at Taihu Lake	FANG Jia-qi, QI Chuang, ZHANG Xin-hou, <i>et al.</i> (5367)
Effect of Rainfall Intensity on the Content of Nitrogen and Phosphorus Components in Plateau Areas: A Case Study of the Fengyu River Watershed	LI Xiao-hong, LEI Qiu-liang, ZHOU Jiao-gen, <i>et al.</i> (5375)
Water Purification Effect and Saline-alkali Tolerance Improvement Mechanism of <i>Suaeda salsa</i> in the Estuary Area	WU Dan, SUN Ping, CHEN Guang-lin, <i>et al.</i> (5384)
Concentration-dependent Accumulation and Translocation of PFASs by Wetland Plant <i>Alisma orientale</i>	WANG Tuan-tuan, LI Bei-bei, WANG Sai, <i>et al.</i> (5394)
Occurrence of Denitrifying Dephosphatation in a Hybrid Constructed Wetland System and Its Stability	LIU Bing, ZHENG Yu-ming, LI Qing-fei, <i>et al.</i> (5401)
Comparison of the Control of Sedimentary Phosphorus Release Using Zirconium-, Lanthanum-, and Lanthanum/Zirconium-Modified Zeolites as Sediment Amendments	LIU Ting, ZHAO Yu-ying, LIN Jian-wei, <i>et al.</i> (5411)
Effect of Biochar Structure on Adsorption Characteristics of Ammonia Nitrogen	CHEN Mei, WANG Fang, ZHANG De-li, <i>et al.</i> (5421)
Effect of Dissolved Oxygen on Partial Nitrification of Suspended and Attached Growth Systems	WANG Si-yu, LIU Ling-jie, WANG Fen, <i>et al.</i> (5430)
Effects of Different Intermittent Aeration Strategies on the Start-up of SNAD Process	LI Dong, LIU Zhi-cheng, XU Gui-da, <i>et al.</i> (5438)
Operational Performance and Microbiological Characteristics of an Iron-Salt Denitrification Reactor in Co-substrate Mode	WANG Ru, LIU Meng-yu, LIU Bing-yin, <i>et al.</i> (5446)
Effect of Step Aeration on a Municipal Sewage Aerobic Granular Sludge System	LI Dong, WEI Zi-qing, LAO Hui-mei, <i>et al.</i> (5456)
Improvement of the Dewaterability of Excess Activated Sludge with Mixed Yeasts by Degrading Extracellular Polymeric Substances	YU Xin-yi, XIANG Jin-hao, LIU Ying, <i>et al.</i> (5465)
Influence of Land Use Change on Ecosystem Service Value Based on GEE in the Beijing-Tianjin-Hebei Region from 1998 to 2018	LOU Pei-qing, FU Bo-lin, LIN Xing-chen, <i>et al.</i> (5473)
Assessment of Soil Quality in Coastal Tidal Flat Reclamation Areas Based on MDS-TOPSIS Model	XIE Xue-feng, PU Li-jie, ZHU Ming, <i>et al.</i> (5484)
Effect of Increasing Tidewater Inundation on Porewater Geochemistries and CO ₂ and CH ₄ Effluxes in the Tidal Freshwater Marshes of the Minjiang River Estuary, Southeast China	LI Jing, HUANG Jia-fang, LUO Min, <i>et al.</i> (5493)
Methane Emission Characteristics and Its Influencing Factors over Aquaculture Ponds	WANG Jiao, XIAO Wei, ZHANG Xiu-fang, <i>et al.</i> (5503)
Effect of Fertilization on Soil Respiration and Its Temperature Sensitivity in a Sorghum Field	YAN Jun-xia, ZHANG Yuan, JIAO Xiao-yan (5515)
Land Safety Zoning Method in High-Selenium and High-Cadmium Areas	WANG Rui, HOU Wan-ling, LI Yu-tong, <i>et al.</i> (5524)
Remediation Effects of Different Composite Materials on Cadmium-Contaminated Farmland Soil	CHEN Shu-lan, XU Chen-yang, GENG Zeng-chao, <i>et al.</i> (5531)
Hydrocalumite Passivation Effect and Mechanism on Heavy Metals in Different Cd-Contaminated Farmland Soils	WU Qiu-mei, LIU Gang, WANG Hui-feng, <i>et al.</i> (5540)
Effects of Different Land Use Types on Microbial Community Diversity in the Shizishan Mining Area	HUANG Jian, ZHU Xu-yan, LU Jin, <i>et al.</i> (5550)
Effects of Conversion of Forest to Arable Land on the Abundance and Structure of the <i>cbbL</i> -Harboring Bacterial Community in Albic Soil of the Hilly Region of Northeast China	WANG Rui, WU Xian, LI Gang, <i>et al.</i> (5561)
Thoughts on and Construction of a Risk Management and Control System for Contaminated Sites in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	CHANG Chun-ying, DONG Min-gang, DENG Yi-rong, <i>et al.</i> (5570)
Visualized Quantitative Research of Soil Pollution in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	ZHANG Ning, ZHANG Sheng, YANG Hai-chao, <i>et al.</i> (5581)
Characteristics and Environmental Impacts of Materials Stored in Municipal Solid Waste Landfills: A Case Study of the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	MA Shi-jun, ZHOU Chuan-bin, YANG Guang, <i>et al.</i> (5593)
Heavy Metal Contamination and Migration in Correspondence of an Electroplating Site on the Hilly Lands of the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area, China	HOU Wen-juan, GONG Xing, ZHAN Ze-bo, <i>et al.</i> (5604)
Pollution Characteristics and Migration of BTEX at a Chemical Contaminated Site in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	DENG Yi-rong, LU Hai-jian, DONG Min-gang, <i>et al.</i> (5615)
Immobilization Impact of Goethite-Fulvic Acid Composites on Pb-Cd Contaminated Soil	LIU Qian-jun, LI Xiang, ZHOU Yang-mei, <i>et al.</i> (5623)
Mobilization of Heavy Metals in a Soil-Plant System and Risk Assessment in the Dabaoshan Mine Area, Guangdong Province, China	CHEN Jie-yi, LIU Guang-bo, CUI Jin-li, <i>et al.</i> (5629)
Calculation of the Soil Risk Control Value through a Hydrus-1D Model for Groundwater Protection	LIN Ting, LUO Fei, ZHU Yan, <i>et al.</i> (5640)
INDEX HUANJING KEXUE CONTENTS 2019, Vol. 40	(5659)