

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第4期

Vol.38 No.4

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

西宁近郊大气氮干湿沉降研究	许稳, 金鑫, 罗少辉, 冯兆忠, 张霖, 潘月鹏, 刘学军 (1279)
兰州春夏季 PM ₁₀ 碳组分昼夜变化特征与来源分析	马丽, 余晔, 王博, 赵素平, 李刚 (1289)
海南三亚大气颗粒物中水溶性无机离子浓度及其粒径分布特征	王璐, 刘子锐, 温天雪, 苗红妍, 王跃思 (1298)
2015年北京城区大气 PM _{2.5} 中 NH ₄ ⁺ 、NO ₃ ⁻ 、SO ₄ ²⁻ 及前体气体的污染特征	丁萌萌, 周健楠, 刘保献, 王焱, 张博韬, 石爱军, 杨懂艳, 常森 (1307)
北京市某垃圾焚烧厂周边大气二噁英污染特征及暴露风险	齐丽, 任玥, 刘爱民, 黄业茹, 赵震, 王江, 李泓 (1317)
北京和保定地区大气细颗粒物中可培养细菌的种群特征	胡亚东, 马安周, 吕鹏翼, 张扬, 庄国强 (1327)
基于实时交通数据的南京市主次干道机动车排放特征分析	李笑语, 吴琳, 邹超, 张意, 毛洪钧, 荆博宇 (1340)
过渡金属掺杂对铜锡烧绿石催化碳烟燃烧性能的影响	李曦峰, 孙宇琦, 王仲鹏, 牟宗刚, 崔兆杰 (1348)
南水北调中线北京段水质状况分析	徐华山, 赵磊, 孙昊苏, 任玉芬, 丁涛, 常帅, 王海东, 李森, 果钊 (1357)
三峡前置库汉丰湖试运行年水文水质变化特征	杨兵, 何丙辉, 王德宝 (1366)
基于偏最小二乘模型的河流水质对土地利用的响应	李琳琳, 张依章, 唐常源, 郑磊, 孟伟, 卢少勇, 敦宇 (1376)
抚仙湖夏季热分层时期水温及水质分布特征	王琳杰, 余辉, 牛勇, 牛远, 张有林, 刘倩, 吉正元 (1384)
千岛湖溶解氧与浮游植物垂向分层特征及其影响因素	俞焰, 刘德富, 杨正健, 张佳磊, 徐雅倩, 刘晋高, 严广寒 (1393)
高通量测序技术研究辽河真核浮游藻类的群落结构特征	王靖淇, 王书平, 张远, 林佳宁, 高欣, 臧小苗, 赵茜 (1403)
三门湾近海有机污染对浮游细菌群落的影响	戴文芳, 郭永豪, 郁维娜, 熊金波 (1414)
沉积物-水界面氮的源解析和硝化反硝化	金赞芳, 龚嘉临, 施伊丽, 金漫彤, 李非里 (1423)
广州南沙红树林湿地水体和沉积物中有机氯农药的残留特征	丁洋, 黄焕芳, 李绘, 罗杰, 郑煌, 孙焰, 杨丹, 张原, 祁士华 (1431)
太湖西岸河网沉积物中重金属污染特征及风险评价	边博, 周燕, 张琴 (1442)
锁磷剂对杭州西湖底泥磷释放的控制效果	朱广伟, 李静, 朱梦圆, 龚志军, 许海, 杨桂军, 张运林, 秦伯强 (1451)
超滤处理东江水不可逆膜污染物的识别和活性炭对其吸附去除	杨海燕, 王灿, 鄢忠森, 李冬平, 赵焱, 瞿芳术, 梁恒, 徐叶琴, 李圭白 (1460)
UV/SPS 降解水中三氯生的效能及动力学	李青松, 李学艳, 姚宁波, 骆靖宇, 李国新, 陈国元, 高乃云 (1467)
真空紫外-亚硫酸盐法降解 PFOS 影响因素	韩慧丽, 王宏杰, 董文艺 (1477)
g-C ₃ N ₄ 协同光催化还原 Cr(VI) 及氧化磺基水杨酸	李莉莉, 陈翠柏, 兰华春, 刘菲, 安晓强 (1483)
锆改性硅藻土吸附水中磷的研究	范艺, 王哲, 赵连勤, 吴德意 (1490)
3种常规消毒方法对磺胺类抗性基因削减效果的比较	郑吉, 周振超, 陈芳, 陈涛, 魏媛媛, 韩玥, 陈红 (1497)
典型生活污水处理工艺对雌激素效应的去除	张秋亚, 马晓妍, 王晓昌, 游猛 (1506)
SRT 对酵母-SBR 处理油脂废水稳定性的影响	吕文洲, 张树林, 乔宇祥, 刘英 (1513)
分散染料 neocron black (NB) 的生物降解特性	杨波, 丁凤友, 徐辉, 李方, 田晴, 马春燕 (1520)
多聚磷酸盐激酶基因在污水生物除磷中的功能	南亚萍, 周国标, 袁林江 (1529)
生物膜短程硝化系统的恢复及其转化为 CANON 工艺的过程	付昆明, 周厚田, 苏雪莹, 王会芳 (1536)
厌氧氨氧化反应器脱氮性能及细菌群落多样性分析	曹雁, 王桐屿, 秦玉洁, 韩彬, 任君怡 (1544)
内环境调节层对厌氧生物反应器填埋场中氮转化的影响	何正坤, 宋博宇, 朱南文, 董军 (1551)
矿化垃圾中 Fe(III) 还原耦合 CH ₄ 厌氧去除特性	王立立, 何婷, 龙焰, 刘常宝 (1558)
应用铅同位素示踪研究泉州某林地垂直剖面土壤中重金属污染及来源解析	孙境蔚, 于瑞莲, 胡恭任, 苏光明, 王晓明 (1566)
畜禽粪有机肥中重金属在土壤剖面中积累迁移特征及生物有效性差异	何梦媛, 董同喜, 茹淑华, 苏德纯 (1576)
山东省农田土壤多环芳烃的污染特征及源解析	葛蔚, 程琪琪, 柴超, 曾路生, 吴娟, 陈清华, 朱祥伟, 马东 (1587)
江汉平原典型土壤环境中有机磷农药的分布特征及影响因素	王建伟, 张彩香, 潘真真, 廖小平, 刘媛, 吕曲, 汤蜜 (1597)
基于生物有效性的农田土壤磷素组分特征及其影响因素分析	蔡观, 胡亚军, 王婷婷, 袁红朝, 王久荣, 李巧云, 葛体达, 吴金水 (1606)
秸秆还田对外源氮在土壤中转化及其微生物响应的影响	陈珊, 丁咸庆, 祝贞科, 王娟, 彭佩钦, 葛体达, 吴金水 (1613)
生物炭输入对城郊农业区农田地表反照率及土壤呼吸的影响	张阳阳, 胡学玉, 邹娟, 张迪, 陈威, 王向前, 陈窈君, 刘扬 (1622)
淹水水稻土消耗 N ₂ O 能力及机制	王玲, 邢肖毅, 秦红灵, 刘毅, 魏文学 (1633)
不同污水处理工艺非二氧化碳温室气体的释放	李惠娟, 彭党聪, 刘文博, 姚倩, 卓杨 (1640)
施用不同污泥堆肥对土壤温室气体排放的影响	杨雨滢, 易建婷, 张成, 陈宏, 木志坚 (1647)
不同镉水平下纳米沸石对土壤 pH、CEC 及 Cd 形态的影响	迟苏琳, 徐卫红, 熊仕娟, 王卫中, 秦余丽, 赵婉伊, 张春来, 李彦华, 李桃, 张进忠, 熊治庭, 王正银, 谢德体 (1654)
不同作物对外源硒动态吸收、转运的差异及其机制	彭琴, 李哲, 梁东丽, 王梦柯, 郭璐 (1667)
褪黑素对水稻幼芽镍胁迫的缓解作用	刘仕翔, 黄益宗, 罗泽娇, 黄永春, 蒋航 (1675)
不同形态磺胺类药物在根-土界面的空间分布及毒性评价	金彩霞, 司晓薇, 王万峰, 王春峰, 王子英, 张琴文, 王婉 (1683)
三峡库区消落带沉积物对鱼体富集率的影响	孙松, 李楚娴, 张成, 王永敏, 王定勇 (1689)
重庆市居民头发重金属富集特征及相关性分析	何明靖, 李琦, 王登祥, 赵佳渊, 杨婷 (1697)
16S rRNA 高通量测序研究集雨窖水中微生物群落结构及多样性	杨浩, 张国珍, 杨晓妮, 武福平, 赵炜, 张洪伟, 张翔 (1704)
石墨烯掺杂聚苯胺阳极提高微生物燃料电池性能	黄力华, 李秀芬, 任月萍, 王新华 (1717)
美国污染场地清理的风险评估简介及政策制定	容跃 (1726)
《环境科学》征稿简则 (1505) 《环境科学》征订启事 (1682) 信息 (1339, 1459, 1612)	

SRT 对酵母-SBR 处理油脂废水稳定性的影响

吕文洲, 张树林, 乔宇祥, 刘英*

(宁波大学建筑工程与环境学院, 宁波 315211)

摘要: 污泥龄 (SRT) 是影响废水生物处理系统稳定性的重要参数, SRT 对酵母菌处理废水系统的影响尚不明确. 为探明 SRT 对酵母处理油脂废水的影响, 在序批式反应器 (SBR) 中考察了不同 SRT (5、10、20、40 d) 对废水处理效果、胞外聚合物 (EPS)、酵母污泥沉降性的影响, 并通过 PCR-DGGE 及克隆测序方法解析了系统中的酵母菌群落结构. 结果表明: 酵母菌处理油脂废水合适的 SRT 为 5~10 d; 较长 SRT 会导致 COD 去除率降低及污泥中 EPS 总量下降; 酵母污泥中 EPS 以紧密型 EPS 为主, 主要成分为多糖; 5~40 d 范围内的 SRT 对系统中酵母污泥的污泥容积指数 (SVI) 影响不显著, 但系统在长的 SRT (>20 d) 下运行会导致系统中丝状细胞明显增多, 有丝状菌性膨胀的趋势; 长、短 SRT 下酵母群落结构相似, 系统中都出现了 3 株可以利用或者降解油脂的外源性酵母菌株. 综上结果, 短 SRT 有利于酵母处理油脂废水系统的运行稳定性.

关键词: 污泥龄 (SRT); 酵母菌-SBR; 胞外聚合物; 丝状细胞; 系统稳定性

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)04-1513-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.201607175

Effect of SRT on Stability of Yeast-SBR in Treating Oil-containing Wastewater

LÜ Wen-zhou, ZHANG Shu-lin, QIAO Yu-xiang, LIU Ying*

(College of Architectural, Civil Engineering and Environment, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: Sludge retention time (SRT) is a crucial parameter to influence the stability of biological wastewater treatment systems. Especially, the effects of SRT on yeast-wastewater treatment remain unclear. In this study, mixtures of yeast strains were applied to treat oil-containing wastewater in sequencing batch reactors (SBR) and the effects of sludge retention time (SRT as 5, 10, 20, 40 d) on the removal efficiency of pollutants, contents and composition of extracellular polymeric substances (EPS), yeast cells settleability and yeast communities were investigated. The results showed that the recommended SRT was 5-10 d for the yeast-SBR system; Higher SRT led to decrease of COD removal rate and content of EPS; the tightly-bounded EPS was the major one which consisted of polysaccharides. SRT of 5-40 d had no significant effects on the SVI of yeast cells, however, longer SRT (>20 d) resulted in the increase of mycelial cells and a tendency to produce the filamentous bulking. In the continuous operation of SBR, three extraneous yeast strains capable of utilizing or degrading oil were identified in the systems under the short and long SRT. To conclude, shorter SRT was favorable for the system stability in treating oil-containing wastewater by yeasts.

Key words: sludge retention time (SRT); yeast-SBR; extracellular polymeric substances (EPS); mycelial cells; system stability

酵母菌在处理高浓度有机废水时具有一定的优势, 如处理负荷高、需氧量低、可降解油和脂肪以及可回收单细胞蛋白等^[1, 2], 但系统运行的稳定性问题一直限制着该技术的工程化应用. SRT 是活性污泥法处理废水中一个重要参数, 影响着系统中的污泥浓度、污泥产率、污泥沉降性、微生物群落结构^[3, 4]以及胞外聚合物 (EPS) 的组成及含量等^[5, 6]. EPS 是活性污泥絮体中促使微生物凝聚的关键物质, 是影响活性污泥絮凝沉降性能及表面性质的重要因素^[7~10]. 目前关于活性污泥中 EPS 与污泥沉降性的研究表明, EPS 总量与污泥絮凝性存在正相关性^[11]. 但对于酵母菌废水处理系统而言, 主体微生物是酵母菌群, 有别于以细菌为主体的活性污泥. 迄今为止, 尚未见有关 SRT 对酵母菌在废水处理系统中产 EPS 及 EPS 对酵母沉降性的影响的报道. 本研究在小型 SBR 反应器中考察不同 SRT 对酵母菌产 EPS、EPS 组成以及 EPS 对酵母沉降性的影响,

并利用 PCR-DGGE 及克隆测序解析了长、短 SRT 下的酵母群落结构, 试图探明 SRT 对酵母菌处理油脂废水稳定性的影响, 以期建立高效稳定的酵母废水处理系统奠定基础.

1 材料及方法

1.1 实验材料

本研究使用 3 株酵母菌: 分别是 O2 (*Candida tropicalis*)、G1 (*Candida lipolytica*)、W1 (*Candida halophila*). 菌株活化方法参见文献^[12].

油脂废水取自宁波市某油脂生产企业的碱炼车

收稿日期: 2016-07-26; 修订日期: 2016-11-02

基金项目: 浙江省自然科学基金项目 (LY12E08007); 浙江省教育厅 (理)/科研计划项目 (Y201121195); 宁波大学科研基金 (理)/学科项目 (XK115D229)

作者简介: 吕文洲 (1974~), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为废水生物处理及废物资源化利用, E-mail: wenzhoulv@yahoo.com

* 通信作者, E-mail: liuying1@nbu.edu.cn

间,废水 COD 在 $20\,000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右. 将所取废水根据实验所需进行稀释,稀释后的废水水质为: COD $6\,500\sim 8\,500\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; TN $3.4\sim 5.8\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; TP $32.4\sim 45.4\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; BOD₅ $1\,950\sim 3\,200\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 油 $1\,817\sim 2\,258\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; pH $6.5\sim 8.8$.

1.2 实验装置以及运行条件

实验在 4 个有效容积为 2 L 的小型 SBR 反应器中进行,由程序控制器控制周期性运行. 废水稀释后,根据废水的 BOD₅ 添加 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 、 KH_2PO_4 使 BOD₅: N: P 为 100: 5: 1. 一个运行周期为曝气 9 h, 静置沉降 3 h, 排水比为 1/2. 静置期间更换新配制的废水,同时将混合液 pH 调整至 5.0~5.5, 温度控制在 28℃ 左右,溶解氧维持在 $0.5\sim 1.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

1.3 实验方法

将活化的复合酵母培养物投入到一个有效体积为 10 L 的有机玻璃容器内,加入 COD 为 $3\,000\sim 4\,000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的含油废水,添加氮源、磷源使废水 BOD: N: P 为 100: 5: 1,同时调节废水的 pH 至 5.0~5.5,进行曝气培养. 培养 4 d 后将废水 COD 逐渐提升至 $7\,500\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右,待系统的 MLSS 增长至 $5.3\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$,转移酵母至小型 SBR 反应器中. 本实验酵母的 MLVSS/MLSS 为 90.93%, 接种 MLSS 为 $4.5\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$. 本实验采用每天定时定量排泥的方式控制 SRT,各反应器的 SRT 依次设计为 5、10、20、40 d. 为保证反应器基本进入稳态运行,每个 SBR 基本运行两倍以上 SRT 时间(除了 SRT = 40 d 的系统,后期出现了 SVI 急剧上升)^[13].

1.4 分析方法

COD: 采用快速消解仪 DRB200 及 DR1010 COD (美国 HACH) 分析仪测定,处理后出水经过 $5\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$, 5 min 离心后取上清液测定 COD; 油含量: 采用四氯化碳萃取法,使用 OIL480 红外测油仪(北京华夏科创)测定; BOD₅ 采用 BOD Trak (美国 HACH) 测定; pH: HM-30P 便携式 pH 仪(日本 DKK-TOA); MLSS 及 MLVSS 采用国家标准方法测定.

本实验中,紧密黏附胞外聚合物(TBEPS)中蛋白质和多糖含量视为 TBEPS 总量;松散附着胞外聚合物(LBEPS)中 2 种组分之和视为 LBEPS 总量. LBEPS 提取方法^[14]: 分别取一定体积的污泥混合液, $8\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 离心 10 min, 去上清液. 将上述污泥沉淀重新悬浮于 0.9% NaCl 溶液中,放置于超声分离器中,超声分离 5 min,然后在 $12\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 离心 15 min, 上清液即为 LBEPS, 收集上清液测定其中

多糖及蛋白质含量. TBEPS 提取方法^[14]: 将提取 LBEPS 后的污泥重新悬浮,然后在 80℃ 下水浴提取 30 min, 在 $12\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 离心 15 min, 获得的上清液即为 TBEPS, 收集上清液测定其中多糖及蛋白质含量. 多糖含量采用苯酚-硫酸法测定, 蛋白质含量采用考马斯亮蓝法测定.

1.5 系统中酵母群落结构分析

1.5.1 DNA 提取

取各 SBR 中混合液 1.5 mL 于 2 mL 的离心管中, $8\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 下离心 2 min, 弃上清, 使用 FastDNA SPIN Kit for Soil 试剂盒(美国 Mpbio)提取生物样的 DNA. 提取的 DNA 存放于 -20℃ 冰箱保存.

1.5.2 PCR-DGGE

PCR 扩增: 上游引物 GC1-NLI (5'-GCATATCAA TAAGCG GAG GAA AAG-3') 和下游引物 LS2 (5'-ATT CCC AAA CAA CTC GAC TC-3'). 引物由上海生工生物技术有限公司合成. 50 μL PCR 反应体系包含: 1 μL 模板 DNA, 1 μL 引物(正向和反向引物各 0.5 μL), 23 μL RNA Freewater, 25 μL Premix (Takara Taq Version 2.0 plus dye).

PCR 反应条件: 预变性条件为 95℃ 5 min; 30 个循环为变性 95℃ 60 s 退火 52℃ 45 s, 延伸 72℃ 60 s; 最后在 72℃ 下延伸 7 min. PCR 扩增产物用 1.0% 琼脂糖凝胶电泳检测.

DGGE 电泳: 在变性梯度凝胶电泳仪(Bio-Rad)上进行. 丙烯酰胺凝胶浓度为 8%, 变性剂梯度为 30%~50%. 向 PCR 扩增的 50 μL 体系中加入 6 × loading buffer 10 μL, 充分混合后点样 35 μL. 电泳条件: 60℃、120 V 下运行 6~8 h, 电泳完毕后, 将凝胶在含 0.01% SYBR (Biotium) 的高纯水中染色 20 min, 取出后用去离子水清洗 2 次, 每次 5 min, 最后置于 Gel DocXR (Bio-Rad, USA) 凝胶成像系统拍照^[15].

1.5.3 16S rRNA 克隆和测序

对 DGGE 凝胶中出现的新的条带进行切胶回收及纯化, 纯化后的样品再用 PMD19-T (Takara) 载体进行连接(16℃ 连接 16h), 然后取 -80℃ 保存的感受态细胞 *Escherichia coli* DH5α (Takara) 迅速融合并置于冰上, 加入 10 μL 连接液, 轻轻摇匀置于 42℃ 水浴锅静置 90 s, 然后转入冰浴 1~2 min 后加入新鲜 LB 培养基 890 μL, 放置在预设为 37℃ 的恒温振荡器中 $170\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 处理 1 h. 然后涂布到含有氨苄青霉素/IPTG/X-Gal 的 LB 培养基平板上, 37℃ 下培养 16 h, 并设置对照. 随机选取一定数量的白

色阳性克隆子,经液体培养后送至上海英骏公司进行序列测定.将测定的目的基因片段序列与 GenBank 中已知序列进行比对(<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/BLAST/>).

2 结果与讨论

2.1 SRT 对 COD 和油去除率的影响

不同 SRT 下酵母菌对 COD 和油的去除效果如图 1 所示.从中可以看出,在运行初期,SRT 为 20 d 的系统对 COD 和油的去除率均较高,第 5 d 后 SRT 为 5 d 的系统对 COD 和油的去除效果最好,而 SRT 为 10 d 和 20 d 的效果较接近.可能的原因是,将扩

大培养好的酵母细胞投入到不同 SRT 的系统中时,细胞需要经过适应新 F/M 的调整期,而 SRT 为 20 d 的系统是最接近原培养系统 SRT 的,所以适应期短;而 SRT = 5 d 的系统由于周期排泥量最大,因而对系统中酵母生物量冲击较大,所以运行初期处理效果较差,而随后酵母细胞适应此排泥周期,且该 SRT 条件下酵母新陈代谢快,所以处理效果逐渐变为最好.对 SRT 为 40 d 的系统,运行到 30 d 后处理效果逐渐变为最差,这是由于对于 SRT 为 40 d 的系统排泥量少,老龄化酵母细胞多,代谢活力低.就不同 SRT 对油去除率的影响来看,除了 SRT 为 40 d 的系统以外,其他 SRT 下油的去除率差异不大.

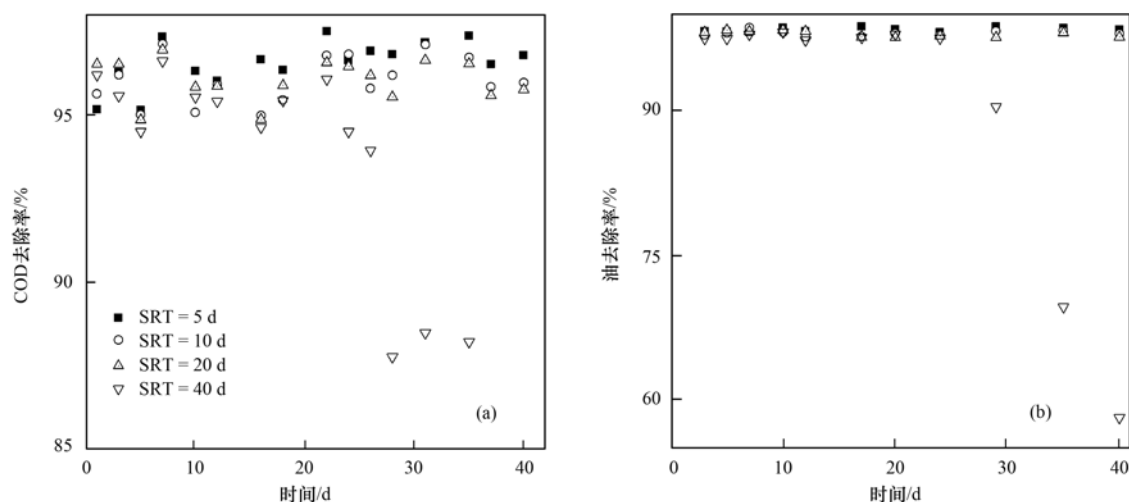


图 1 SRT 对 COD 和油去除率的影响

Fig. 1 Effect of SRT on the COD and oil removal rate

2.2 SRT 对 EPS 的组成及含量的影响

EPS 是活性污泥絮体中继水分和细胞后的第三大组成部分^[16],主要是细菌细胞新陈代谢分泌的高分子聚合物聚集在细胞外部,形成絮凝胶体物质,同时还含有废水中的某些物质,即污泥所处的基质环境^[17, 18]. Ravella 等^[19]研究表明酵母菌也能产生 EPS. TBEPS 位于里层,与细胞表面结合较紧,稳定地附着于细胞壁外,具有一定外形;LBEPS 位于 TBEPS 外层,具有较松散的结构,是可向周围环境扩展、无明显边缘的黏液层. EPS 的主要成分是糖类和蛋白质,两者的总有机碳占整个 EPS 的 70% ~ 80%^[17]. 有研究表明, SRT 不仅影响着 EPS 的总量,还影响其组成成分及比例^[20].

不同 SRT 条件下酵母系统中 LBEPS 的组成和含量的变化如图 2 所示,可以看出,对于酵母菌来说, LBEPS 的主要成分是多糖,蛋白质含量很少,且 EPS 总量随 SRT 的增大而减少. 根据劳伦斯-麦卡

蒂方程及其衍生关系式 $1/\theta_c = Y \times N_{rs} - K_d$ 可知 SRT 与负荷呈负相关. Batstone 等^[21]、李久义等^[22]认为 EPS 与污泥负荷呈正比(即与 SRT 呈反比),所以在低 SRT 情况下 F/M 较高,微生物细胞不能将所有碳源用于细胞合成,多余的含碳基质可以转化成胞内存储粒子和在 EPS 中积累的胞外高分子^[23]. 从图 2 可看出,对 SRT 为 5 d、10 d 的系统,在开始的 4~5 d 内, LBEPS 呈递增的趋势,这可能是由于酵母系统对新环境的一种适应过程,为了适应较短的 SRT,酵母细胞新陈代谢比较旺盛,所以将油脂废水中脂肪酸转化为多糖的量也增多,导致多糖积累,待系统稳定后, LBEPS 也基本稳定. 对于 SRT 为 40 d 的系统,从 30 d 后有大幅度的降低,这是由于随着运行的持续,酵母产乳化剂能力相对于酵母增长能力减弱^[24],表现为油脂降解能力下降[见图 1(b)],同时酵母细胞的菌丝化也影响了油脂的代谢,此时酵母细胞为维持自身生理代谢,可能对 EPS 中的多

糖类物质进行降解。

利用 Matlab 数据分析软件将 SRT 为 5、10、20、40 d 作为因素 X1, 不同时间段测得的 LBEPS 为 X2

进行差异性分析, 得 $\alpha = 0.000 (\alpha < 0.01)$, 即不同 SRT 条件下 LBEPS 含量具有显著性差异, 说明 SRT 对酵母处理油脂废水 LBEPS 的产生影响显著。

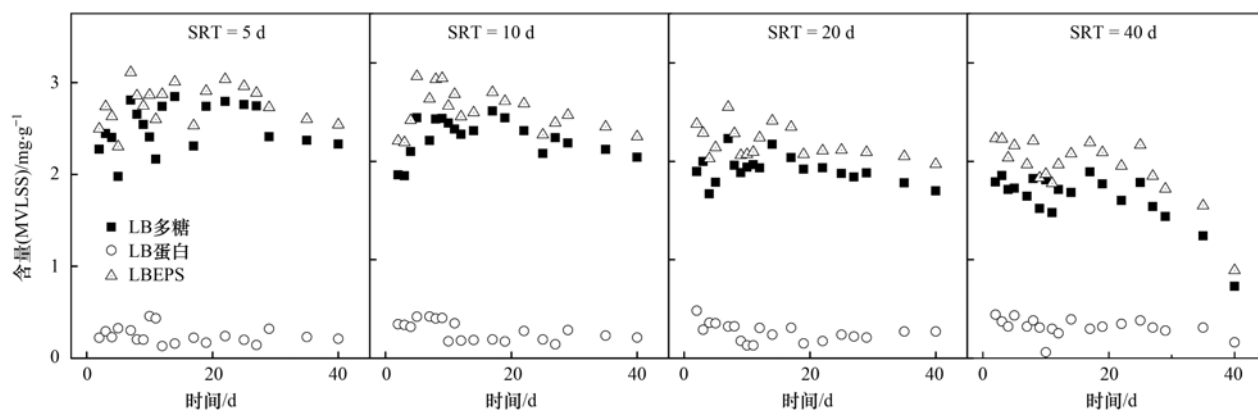


图2 SRT 对 LBEPS 的组成和含量影响

Fig. 2 Effect of SRT on composition and content of LBEPS

图3 反映了各系统中 TBEPS 的变化. 可以看出 TBEPS 仍然以多糖为主, 结合图2, TBEPS 的含量远远大于 LBEPS, 大约是后者 10 倍左右, 这与一些研究的结果^[13]一致. TBEPS 的组成及含量变化与 LBEPS 相同, 含量随着 SRT 的增大而减少. 对于 SRT 为 5、10、20 d 的系统在最初 5 d 内 TBEPS 有所增加, 这是酵母对新环境的一种适应, 随后逐渐稳定. 对于 SRT 为 40 d 的系统, 随着时间的延长, 酵母细胞老龄化及代谢产物的积累, 酵母细胞有丝化现象, 丝化后酵母细胞对油脂类代谢能力减弱, 进而转为利用和代谢 TB 多糖, 导致在 20 d 后 TBEPS 逐渐减少。

同样以 SRT 为 5、10、20、40 d 作为因素 X1, 不同时间段测得的 LBEPS 为 X2 进行差异性分析, 得 $\alpha = 0.00 (\alpha < 0.05)$, 可以认为不同 SRT 条件下测得的 TBEPS 具有显著性差异, 说明 SRT 对酵母处理油脂废水 TBEPS 的产生也有显著影响。

2.3 SRT 对酵母污泥 SVI 的影响

对不同 SRT 下 4 个系统的 SVI 进行了连续监测, 结果如图4 所示. 从中可以看出, 在前 20 d 运行中 SVI 基本稳定, SVI 值随 SRT 的延长而增大, 说明增大 SRT 会引起 SVI 值升高, 与陶丽佳等^[13]的研究结论相同. 但从 18 d 后, 直至 30 d 间污泥的 SVI 值随 SRT 延长反而减小, 可见其规律有别于普通活性污泥, 这可能与酵母细胞菌丝化有关. 在这个阶段, 各 SRT 系统中酵母细胞均有不同程度丝化现象, 由丝化导致了污泥质量浓度 (MLSS) 减小, 所以总体 SVI 较运行前期要大; 此时, 各系统酵母污泥的 SV30 差异减小, 而 SRT 越长对应系统中的 MLSS 越大, 因而出现了 SVI 值随 SRT 的增长而降低的现象. 运行至 30 d 后, 对 SRT 为 40 d 的系统, SVI 值呈直线上升, 一方面是由于较长的 SRT 条件下, EPS 的浓度相对较低 (见图2 和图3), 不利于酵母细胞絮凝; 另一方面酵母细胞由酵母型向菌丝态转化导

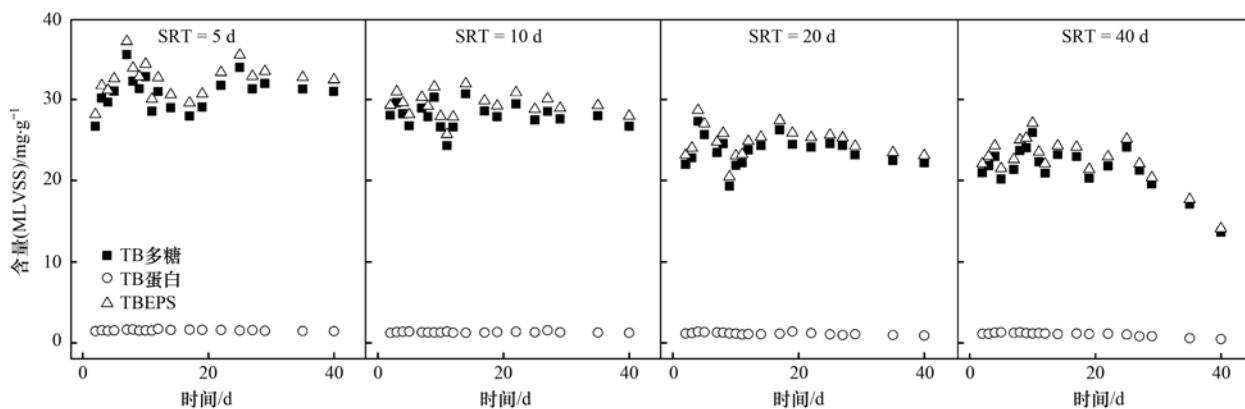


图3 SRT 对 TBEPS 的组成和含量影响

Fig. 3 Effect of SRT on composition and content of TBEPS

致污泥呈蓬松状态,难以沉降,周期性排泥导致更低的 MLSS. SRT 为 20 d 的系统中 SVI 的变化与前者相似,但变化幅度稍微缓慢,推测与细胞不同的丝化程度有关. 图 5 为不同 SRT 下各系统在运行后期的显微镜图片. 比较可以看出,在 SRT 为 5 d 时系统中酵母絮体中菌丝很少;SRT 为 10、20、40 d 时菌丝化程度递增,在 SRT 为 40 d 时可以观察到明显的细胞丝化现象. 通过 Matlab 对 SRT 和 SVI 因素进行差异性分析,得 $\alpha = 0.45$,可以认为不同 SRT 条件下测得的 SVI 不具有显著性差异,说明在当前区间内 SRT 对酵母处理油脂废水 SVI 的影响不显著. 因此,不同 SRT 对酵母系统的影响,可能更多地体现在 SRT 对酵母细胞菌丝化程度的影响,低 SRT 更有利于细胞丝化的控制.

2.4 系统中酵母群落结构解析

选取 SRT 为 5 d 和 SRT 为 40 d 系统,运行后期对其生物样品进行 PCR-DGGE 分析,结果如图 6. 对比两个系统的 DGGE 图谱可以看出,初始添加的 3 株酵母 O2、G1、W1 在各系统中一直存在,前期研究也表明这 3 株酵母菌可以稳定存在于酵母菌处理含油废水系统中^[15]. 随着系统的运行,大约在 22 d 后,3 株菌株的条带有所减弱,说明对应酵母细胞的浓度有所降低. 但与此同时,在系统运行的第 10 d,长和短 SRT 下均出现了另外 3 个条带(分别命名为

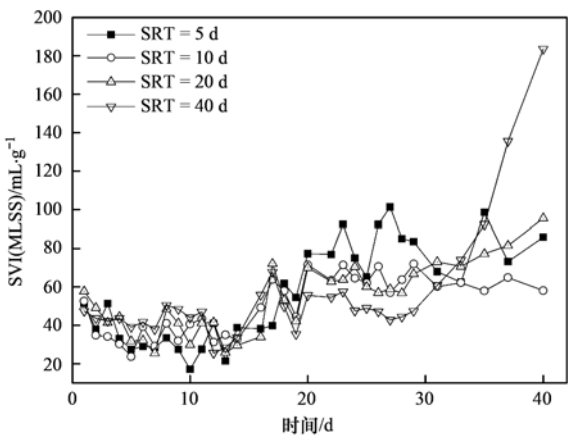


图 4 不同 SRT 下各 SBR 中污泥 SVI 的变化
Fig. 4 Variation of SVI of yeast cells with different SRT in SBRs

1、2、3),特别对于 SRT 为 40 d 的系统,3 个条带亮度在运行后期有所加强,说明对应微生物的丰度增强. 通过对这些新增条带的切胶、克隆和测序并与 GenBank 中序列比对,初步判定新增的酵母分别是: 1. *Candida cylindracea* (相似度 100%); 2. *Candida intermedia* (相似度 99%); 3. *Yarrowia lipolytica* (相似度 99%),结果见表 1. 通过查阅已有研究发现,这 3 株酵母均可以利用或者水解橄榄油等油脂,均可以产生脂肪酶,因此 3 株菌株的出现是系统运行过程中自然选择的一个结果,菌株可能来源于废水^[25~27]. 对于 SRT 为 40 d 的系统出现的明显的真

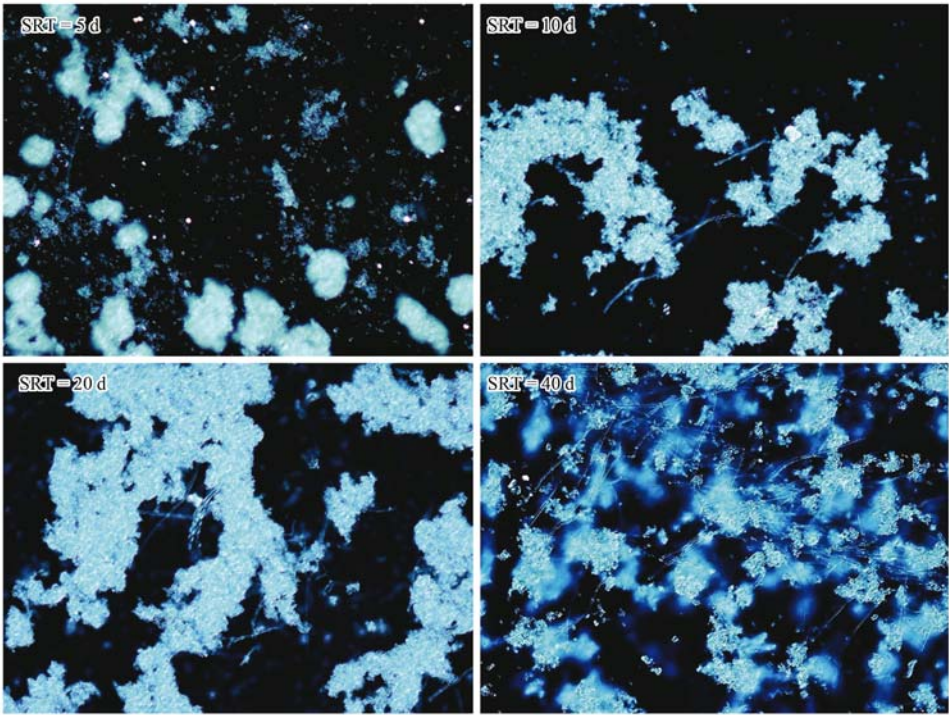


图 5 各 SRT 运行后期酵母污泥显微镜检图片
Fig. 5 Microscopy images of yeast cells with different SRT in SBRs

菌丝,目前尚不能判定是系统中原有的酵母还是外源性酵母发生菌丝化而形成,但可以肯定的是,无论是哪种酵母细胞发生菌丝化,短 SRT 比长 SRT 更能抑制细胞的丝化程度,从而更有利于系统运行的稳定. 相关研究结果表明,白假丝酵母 (*Candida albicans*) 的细胞在一定的物质条件刺激下可能发生细胞形态转化^[28]. 对于长 SRT 的系统,污泥浓度高,老龄细胞比例大,产生的代谢产物容易在系统中积累,这可能是诱导某些酵母细胞丝化的原因,具体情况还需要进一步的研究.

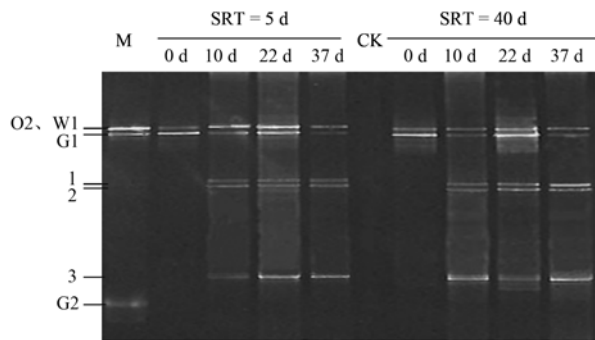


图 6 不同 SRT 下系统中酵母群落的 DGGE 图谱
Fig. 6 DGGE image of yeast community with different SRT in SBRs

表 1 系统中外源性酵母16S rRNA基因序列比对结果

Table 1 Comparison of extraneous yeast strains by 16S rRNA sequences

条带	已知基因序列	相似度/%	匹配菌株名称	已知基因来源
1	DQ377633	100	<i>Candida cylindracea</i> strain VTT C-04529	酵母工业麦芽制造
2	AB278599	99	<i>Candida intermedia</i>	水体筛选出
3	EU239379	99	<i>Yarrowia lipolytica</i> strain TJY18b	海洋酵母的多样性

3 结论

(1)SRT 为 5~10 d 时系统对油脂废水 COD 和油的去除率较高;长 SRT 会使 COD 处理效果下降,但短期对油的去除率影响不大.

(2)酵母污泥的 EPS 中以 TBEPS 为主,EPS 的主要成分为多糖,蛋白质的含量较少;长 SRT 会导致 EPS 含量降低及酵母污泥的 SVI 升高.

(3)SRT 在 5~40 d 区间内,SRT 对酵母污泥的 SVI 影响差异不显著;但长 SRT 有导致系统发生丝状菌性膨胀的风险.

(4)长期连续运行后系统中均出现了可以利用或降解油脂的外源性酵母菌株.

参考文献:

[1] Jarbouï R, Baati H, Fetoui F, *et al.* Yeast performance in wastewater treatment: case study of *Rhodotorula mucilaginosa* [J]. *Environmental Technology*, 2012, **33**(8): 951-960.

[2] Daverey A, Pakshirajan K. Treatment of dairy wastewater containing high amount of fats and oils using a yeast-bioreactor system under batch, fed-batch and continuous operation [J]. *Desalination and Water Treatment*, 2016, **57**(12): 5473-5479.

[3] 田园, 段亮, 宋永会, 等. 不同污泥龄膜生物反应器内微生物的群落结构特征[J]. *环境科学研究*, 2015, **28**(3): 453-459.

Tian Y, Duan L, Song Y H, *et al.* Characteristics of microbial community structure in membrane reactors under different solid retention times[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2015, **28**(3): 453-459.

[4] Silva A F, Antunes S, Saunders A, *et al.* Impact of sludge retention time on the fine composition of the microbial community and extracellular polymeric substances in a membrane bioreactor [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2016, **100**(19):

8507-8521.

[5] Al-Halbouni D, Traber J, Lyko S, *et al.* Correlation of EPS content in activated sludge at different sludge retention times with membrane fouling phenomena [J]. *Water Research*, 2008, **42**(6-7): 1475-1488.

[6] Basuvaraj M, Fein J, Liss S N. Protein and polysaccharide content of tightly and loosely bound extracellular polymeric substances and the development of a granular activated sludge floc [J]. *Water Research*, 2015, **82**: 104-117.

[7] 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.

[8] Ding ZJ, Bourven I, Guibaud G, *et al.* Role of extracellular polymeric substances (EPS) production in bioaggregation: application to wastewater treatment [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2015, **99**(23): 9883-9905.

[9] 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**(8): 3135-3143.

He Z J, Zhao Y, Zhang Y K, *et al.* Influence of activated sludge surface properties on flocculating settling and effluent suspended solid[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(8): 3135-3143.

[10] Liao B Q, Allen D G, Droppo I G, *et al.* Surface properties of sludge and their role in bioflocculation and settleability [J]. *Water Research*, 2001, **35**(2): 339-350.

[11] Barker D J, Stuckey D C. A review of soluble microbial products (SMP) in wastewater treatment systems [J]. *Water Research*, 1999, **33**(14): 3063-3082.

[12] 吕文洲, 刘英, 朱建林. 不同酵母菌组合处理含油废水的效能及酵母菌群落结构研究[J]. *环境科学*, 2008, **29**(9): 2488-2492.

Lü W Z, Liu Y, Zhu J L. Efficiency and yeast community structure of oil-containing wastewater treatment system inoculated by different yeast strains complex [J]. *Environmental Science*, 2008, **29**(9): 2488-2492.

- [13] 陶丽佳, 李秀芬, 王新华. SRT 对 MBR 污泥性质的影响[J]. 环境工程学报, 2012, **6**(3): 719-724.
- Tao L J, Li X F, Wang X H. Effects of sludge retention time on sludge characteristics in membrane bioreactors [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2012, **6**(3): 719-724.
- [14] Liu H, Fang H H P. Extraction of extracellular polymeric substances (EPS) of sludges [J]. Journal of Biotechnology, 2002, **95**(3): 249-256.
- [15] 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.
- [16] Frølund 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.
- [17] 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.
- [18] Neyens E, Baeyens J, Dewil R. Advanced sludge treatment affects extracellular polymeric substances to improve activated sludge dewatering[J]. Journal of Hazardous Materials, 2004, **106**(2-3): 83-92.
- [19] Ravella S R, Quiñones T S, Retter A, *et al.* Extracellular polysaccharide (EPS) production by a novel strain of yeast-like fungus *Aureobasidium pullulans* [J]. Carbohydrate Polymers, 2010, **82**(3): 728-732.
- [20] Jahn A, Nielsen P H. Cell biomass and exopolymer composition in sewer biofilms[J]. Water Science and Technology, 1998, **37**(1): 17-24.
- [21] Batstone D J, Keller J. Variation of bulk properties of anaerobic granules with wastewater type [J]. Water Research, 2001, **35**(7): 1723-1729.
- [22] 李久义, 左华, 栾兆坤, 等. 不同基质条件对生物膜细胞外聚合物组成和含量的影响[J]. 环境化学, 2002, **21**(6): 546-551.
- Li J Y, Zuo H, Luan Z K, *et al.* Effects of substrate conditions on compositions of extracellular polymeric substances in biofilms [J]. Environmental Chemistry, 2002, **21**(6): 546-551.
- [23] Andreadakis A D. Physical and chemical properties of activated sludge floc[J]. Water Research, 1993, **27**(12): 1707-1714.
- [24] 田凤蓉, 刘英, 吕文洲, 等. 酵母菌产乳化剂能力及其对含油废水降解性能的影响研究[J]. 环境工程学报, 2011, **5**(5): 1062-1066.
- Tian F R, Liu Y, Lü W Z, *et al.* Effects of emulsifier production and emulsification ability on biodegradation efficiency of oil-containing wastewater by different yeast strains [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2011, **5**(5): 1062-1066.
- [25] Salihu A, Alam M Z, AbdulKarim M I, *et al.* Optimization of lipase production by *Candida cylindracea* in palm oil mill effluent based medium using statistical experimental design [J]. Journal of Molecular Catalysis B: Enzymatic, 2011, **69**(1-2): 66-73.
- [26] Wang L, Chi Z M, Wang X H, *et al.* Diversity of lipase-producing yeasts from marine environments and oil hydrolysis by their crude enzymes[J]. Annals of Microbiology, 2007, **57**(4): 495-501.
- [27] Nicaud J M. *Yarrowia lipolytica* [J]. Yeast, 2012, **29**(10): 409-418.
- [28] Sudbery P E. Growth of *Candida albicans* hyphae [J]. Nature Reviews Microbiology, 2011, **9**(10): 737-748.

CONTENTS

Dry and Bulk Nitrogen Deposition in Suburbs of Xining City	XU Wen, JIN Xin, LUO Shao-hui, <i>et al.</i> (1279)
Day-Night Variation and Source Apportionment of Carbonaceous Aerosols in PM ₁₀ During Spring and Summer of Lanzhou	MA Li, YU Ye, WANG Bo, <i>et al.</i> (1289)
Characteristics of the Size Distribution of Water Soluble Inorganic Ions in Sanya, Hainan	WANG Lu, LIU Zi-rui, WEN Tian-xue, <i>et al.</i> (1298)
Pollution Characteristics of NH ₄ ⁺ , NO ₃ ⁻ , SO ₄ ²⁻ in PM _{2.5} and Their Precursor Gases During 2015 in an Urban Area of Beijing	DING Meng-meng, ZHOU Jian-nan, LIU Bao-xian, <i>et al.</i> (1307)
Pollution Characteristics of PCDD/Fs in Ambient Air and Exposure Risk Assessment Around a Municipal Solid Waste Incinerator in Beijing	QI Li, REN Yue, LIU Ai-min, <i>et al.</i> (1317)
Community Characteristics of Cultivable Bacteria in Fine Particles (PM _{2.5}) of Beijing and Baoding	HU Ya-dong, MA An-zhou, LÜ Peng-yi, <i>et al.</i> (1327)
Emission Characteristics of Vehicle Exhaust in Artery and Collector Roads in Nanjing Based on Real-time Traffic Data	LI Xiao-yu, WU Lin, ZOU Chao, <i>et al.</i> (1340)
Catalytic Combustion of Soot Particulates over Rare Earth Pyrochlore Oxides Doped with Transition Metals	LI Xi-feng, SUN Yu-qi, WANG Zhong-peng, <i>et al.</i> (1348)
Water Quality Analysis of Beijing Segment of South-to-North Water Diversion Middle Route Project	XU Hua-shan, ZHAO Lei, SUN Hao-su, <i>et al.</i> (1357)
Hanfeng Pre-reservoir Commissioning Time Variation Feature of the Hydrology and Water Quality in Three Gorges Reservoir	YANG Bing, HE Bing-hui, WANG De-bao (1366)
Modeling of Water Quality Response to Land-use Patterns in Taizi River Basin Based on Partial Least Squares	LI Lin-lin, ZHANG Yi-zhang, TANG Chang-yuan, <i>et al.</i> (1376)
Distribution Characteristics of Water Temperature and Water Quality of Fuxian Lake During Thermal Stratification Period in Summer	WANG Lin-jie, YU Hui, NIU Yong, <i>et al.</i> (1384)
Vertical Stratification Characteristics of Dissolved Oxygen and Phytoplankton in Thousand-Island Lake and Their Influencing Factors	YU Yan, LIU De-fu, YANG Zheng-jian, <i>et al.</i> (1393)
Community Structure Characteristics of Eukaryotic Planktonic Algae in Liaoh River Through High-throughput Sequencing	WANG Jing-qi, WANG Shu-ping, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (1403)
Effects of Coastal Organic Pollution on Bacterioplankton Community in Sanmen Bay	DAI Wen-fang, GUO Yong-hao, YU Wei-na, <i>et al.</i> (1414)
Nitrate Source Identification and Nitrification-denitrification at the Sediment-water Interface	JIN Zan-fang, GONG Jia-lin, SHI Yi-li, <i>et al.</i> (1423)
Residues of Organochlorine Pesticides (OCPs) in Water and Sediments from Nansha Mangrove Wetland	DING Yang, HUANG Huan-fang, LI Hui, <i>et al.</i> (1431)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals from River Network Sediment in Western Area of Taihu Lake	BIAN Bo, ZHOU Yan, ZHANG Qin (1442)
Efficacy of Phoslock® on the Reduction of Sediment Phosphorus Release in West Lake, Hangzhou, China	ZHU Guang-wei, LI Jing, ZHU Meng-yuan, <i>et al.</i> (1451)
Identification and PAC Adsorption of Foulants Responsible for Irreversible Fouling During Ultrafiltration of Dongjiang River Water	YANG Hai-yan, WANG Can, YAN Zhong-sen, <i>et al.</i> (1460)
Efficiency and Kinetics of Triclosan Degradation in Aqueous Solution by UV/Sodium Persulfate	LI Qing-song, LI Xue-yan, YAO Ning-bo, <i>et al.</i> (1467)
Influencing Factors on the Degradation of PFOS Through VUV-SO ₃ ²⁻	HAN Hui-li, WANG Hong-jie, DONG Wen-yi (1477)
Simultaneous Photocatalytic Reduction of Cr(VI) and Oxidation of SSA by Carbon Nitride	LI Li-li, CHEN Cui-hai, LAN Hua-chun, <i>et al.</i> (1483)
Modification of Diatomite by Zirconium and Its Performance in Phosphate Removal from Water	FAN Yi, WANG Zhe, ZHAO Lian-qin, <i>et al.</i> (1490)
Reducing Effect of Three Disinfection Technologies for Sulfonamides Resistance Genes	ZHENG Ji, ZHOU Zhen-chao, CHEN Fang, <i>et al.</i> (1497)
Removal of Estrogenic Effect by Typical Domestic Wastewater Treatment Processes	ZHANG Qiu-ya, MA Xiao-yan, WANG Xiao-chang, <i>et al.</i> (1506)
Effect of SRT on Stability of Yeast-SBR in Treating Oil-containing Wastewater	LÜ Wen-zhou, ZHANG Shu-lin, QIAO Yu-xiang, <i>et al.</i> (1513)
Degradation of the Disperse Dye Neocron Black(NB) by Biological Treatment	YANG Bo, DING Feng-you, XU Hui, <i>et al.</i> (1520)
Function of Polyphosphate Kinase Gene in Biological Phosphate Removal During the Wastewater Treatment Process	NAN Ya-ping, ZHOU Guo-biao, YUAN Lin-jiang (1529)
Short-cut Nitrification Recovery and Its Transformation into CANON Process in a Biofilm Reactor	FU Kun-ming, ZHOU Hou-tian, SU Xue-ying, <i>et al.</i> (1536)
Nitrogen Removal Characteristics and Diversity of Microbial Community in ANAMMOX Reactor	CAO Yan, WANG Tong-yu, QIN Yu-jie, <i>et al.</i> (1544)
Effect of Environment Adjustment Layers on Nitrogen Transformation in Anaerobic Bioreactor Landfills	HE Zheng-kun, SONG Bo-yu, ZHU Nan-wen, <i>et al.</i> (1551)
Characteristics of Anaerobic Methane Removal Coupled to Fe(III) Reduction in Aged Refuse	WANG Li-li, HE Ting, LONG Yan, <i>et al.</i> (1558)
Assessment of Heavy Metal Pollution and Tracing Sources by Pb & Sr Isotope in the Soil Profile of Woodland in Quanzhou	SUN Jing-wei, YU Rui-lian, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (1566)
Accumulation and Migration Characteristics in Soil Profiles and Bioavailability of Heavy Metals from Livestock Manure	HE Meng-yuan, DONG Tong-xi, RU Shu-hua, <i>et al.</i> (1576)
Pollution Characteristics and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Agricultural Soils from Shandong	GE Wei, CHENG Qi-qi, CHAI Chao, <i>et al.</i> (1587)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Organophosphorus Pesticides in Typical Soil Environment of Jiangnan Plain	WANG Jian-wei, ZHANG Cai-xiang, PAN Zhen-zhen, <i>et al.</i> (1597)
Characteristics and Influencing Factors of Biologically-based Phosphorus Fractions in the Farmland Soil	CAI Guan, HU Ya-jun, WANG Ting-ting, <i>et al.</i> (1606)
Effect of Straw Application on the Dynamics of Exogenous Nitrogen and Microbial Activity in Paddy Soil	CHEN Shan, DING Xian-qing, ZHU Zhen-ke, <i>et al.</i> (1613)
Effects of Biochar on Surface Albedo and Soil Respiration in Suburban Agricultural Soil	ZHANG Yang-yang, HU Xue-yu, ZOU Juan, <i>et al.</i> (1622)
N ₂ O Consumption Ability of Submerged Paddy Soil and the Regulatory Mechanism	WANG Ling, XING Xiao-yi, QIN Hong-ling, <i>et al.</i> (1633)
Non-CO ₂ Greenhouse Gas Release from Different Biological Wastewater Treatment Processes	LI Hui-juan, PENG Dang-cong, LIU Wen-bo, <i>et al.</i> (1640)
Effect of Application of Sewage Sludge Composts on Greenhouse Gas Emissions in Soil	YANG Yu-han, YI Jian-ting, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (1647)
Effect of Nano Zeolites on pH, CEC in Soil and Cd Fractions in Plant and Soil at Different Cadmium Levels	CHI Sun-lin, XU Wei-hong, XIONG Shi-juan, <i>et al.</i> (1654)
Dynamic Differences of Uptake and Translocation of Exogenous Selenium by Different Crops and Its Mechanism	PENG Qin, LI Zhe, LIANG Dong-li, <i>et al.</i> (1667)
Alleviation Effects of Exogenous Melatonin on Ni Toxicity in Rice Seedlings	LIU Shi-xiang, HUANG Yi-zong, LUO Ze-jiao, <i>et al.</i> (1675)
Forms Distribution and Ecotoxicity of Three Forms of Sulfonamides in Root-Soil Interface of Maize	JIN Cai-xia, SI Xiao-wei, WANG Wan-feng, <i>et al.</i> (1683)
Effect of Sediments on Bioaccumulation of Mercury in Fish Body in the Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir Area	SUN Song, LI Chu-xian, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (1689)
Bioaccumulation and Correlation of Heavy Metals in Human Hairs From Urban and Rural Areas of Chongqing	HE Ming-jing, LI Qi, WANG Deng-xiang, <i>et al.</i> (1697)
Microbial Community Structure and Diversity in Cellar Water by 16S rRNA High-throughput Sequencing	YANG Hao, ZHANG Guo-zhen, YANG Xiao-ni, <i>et al.</i> (1704)
Performance Improvement of Microbial Fuel Cell with Polyaniline Doped Graphene Anode	HUANG Li-hua, LI Xiu-fen, REN Yue-ping, <i>et al.</i> (1717)
Brief Introduction of Pollution Sites Remediation and Risk Assessment and Its Policy Making in United States	RONG Yue (1726)