

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第12期

Vol.37 No.12

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次(卷终)

基于数值计算的细颗粒物采样管路传输损失评估	罗李娜,程真,朱雯斐,张强,楼晟荣,乔利平,晏乃强(4457)
南京北郊重金属气溶胶粒子来源分析	秦鑫,张泽锋,李艳伟,沈艳,赵姝慧(4467)
南京青奥会期间不同天气条件下大气气溶胶中水溶性离子的分布特征	师远哲,安俊琳,王红磊,邹嘉南,王俊秀(4475)
苏州市 PM _{2.5} 中水溶性离子的季节变化及来源分析	王念飞,陈阳,郝庆菊,王欢博,杨复沐,赵晴,薄宇,贺克斌,姚玉刚(4482)
成都西南郊区春季 PM _{2.5} 中元素特征及重金属潜在生态风险评价	杨怀金,杨德容,叶芝祥,张恒德,马学款,汤志亚,毛冬艳(4490)
泉州市大气降尘中稀土元素地球化学特征及来源解析	张棕巍,于瑞莲,胡恭任,胡起超,王晓明(4504)
青奥会期间基于 $\delta^{13}\text{C}$ 观测的大气 CO ₂ 来源解析	徐家平,李旭辉,肖薇,次仁旺姆,温学发,刘寿东,杜雪婷,曹畅(4514)
民航飞机起飞过程气态污染物排放特征分析	韩博,黄佳敏,魏志强(4524)
畜禽养殖场空气中可培养抗生素耐药菌污染特点研究	张兰河,贺雨伟,陈默,高敏,仇天雷,王旭明(4531)
有序介孔材料过滤脱除纳米颗粒物	邢奕,王骥,路培,李子宜,刘应书,于晗(4538)
基于 DOC + CDPF 技术的公交车燃用生物柴油气态物道路排放特性	楼狄明,张允华,谭丕强,胡志远(4545)
亚热带浅水池塘水-气界面甲烷通量特征	龙丽,肖尚斌,张成,张文丽,谢恒,李迎晨,雷丹,穆晓辉,张军伟(4552)
浙江汤浦水库浮游植物季节演替及其影响因子分析	马沛明,施练东,张俊芳,胡菊香,赵先富(4560)
太湖典型沉水植物生理指标对水质的响应	高敏,胡维平,邓建才,胡春华(4570)
利用 UV-vis 及 EEMs 对比冬季完全混合下两个不同特征水库溶解性有机物的光学特性	黄廷林,方开凯,张春华,周石磊,曾明正,龙圣海,李扬,夏超,从海兵(4577)
三峡前置库汉丰湖试运行年水体水质现状及控制效果评估	杨兵,何丙辉,王德宝(4586)
太湖贡湖湾水域抗生素污染特征分析与生态风险评价	武旭跃,邹华,朱荣,王靖国(4596)
滇池不同湖区沉积物正构烷烃的分布特征及其环境意义	余丽燕,韩秀秀,黄晓虎,吴亚林,杨浩,黄涛,余艳红,黄昌春(4605)
洱海入湖河口湿地干湿季沉积物氮、磷、有机质垂向分布特征及污染风险差异性	王书锦,刘云根,王妍,侯磊,张超(4615)
蠡湖表层沉积物氮矿化过程及其赋存形态变化	赵丽,王书航,姜霞,黄晓峰,陈俊伊(4626)
三峡库区表层沉积物重金属含量时空变化特征及潜在生态风险变化趋势研究	卓海华,孙志伟,谭凌智,吴云丽,兰静(4633)
模拟巢湖流域氯菊酯的迁移转化和生态风险	刘亚莉,王继忠,彭书传,陈天虎(4644)
有机质胶体对卡马西平在多孔介质中迁移影响模拟实验	张思,何江涛,朱晓婧(4651)
无机型城市景观水体表观污染的悬浮颗粒物粒度分布特征:以中国运河苏州段为例	李倩倩,潘杨,贡丹燕,黄勇,夏侯刚(4662)
清水江流域岩石风化特征及其碳汇效应	吕婕梅,安艳玲,吴起鑫,吴永贵(4671)
南方典型农田区浅层地下水污染特征	郭卉,虞敏达,何小松,罗岳平(4680)
水化学和环境同位素在示踪枣庄市南部地下水硫酸盐污染源中的应用	马燕华,苏春利,刘伟江,朱亚鹏,李俊霞(4690)
粗放型绿色屋顶对多环芳烃的控制效果	沈庆然,侯娟,李田(4700)
超滤的预处理工艺对比研究:化学混凝与电絮凝	赵凯,杨春风,孙境求,李静,胡承志(4706)
QCM-D 与 AFM 联用解析 EfOM 在 SiO ₂ 改性 PVDF 超滤膜表面的吸附机制	姜家良,王磊,黄丹曦,黄松,朱振亚,徐亚伟,李青青(4712)
群体感应淬灭菌的分离及其膜污染控制性能	赵畅,王文昭,徐期勇(4720)
水力负荷对生物沉淀池污染物净化性能的影响特性	王文东,马翠,刘荟,范银萍,刘国旗,张珂(4727)
外加微量 N ₂ H ₄ 下 SBR 中硝化微生物特性	肖凡颖,张代钧,卢培利(4734)
部分半硝化 AGS-SBR 工艺的启动及其种群结构分析	鲁航,信欣,管蕾,邹长武,余静(4741)
典型油田多环芳烃污染对土壤反硝化微生物群落结构的影响	姚炎红,王明霞,左小虎,李振轮,罗锋,周志峰(4750)
生物强化膜生物反应器(MBR)处理邻苯二甲酸二乙酯(DEP)效果及微生物群落结构分析	张可,关允,罗鸿兵,陈伟,陈佳,陈强(4760)
开闭路条件下沉积物微生物燃料电池阳极细菌群落差异解析	吴义诚,邓全鑫,王泽杰,郑越,李岱霖,赵峰(4768)
全氟辛酸(PFOA)厌氧生物可降解性	李飞,陈轶丹,周真明,廖晓斌,马红芳,苑宝玲(4773)
水肥用量对玉米季土壤 CO ₂ 排放的综合影响	杨硕欢,张保成,王丽,胡田田(4780)
福建西部山地水土流失区土壤呼吸的空间异质性	姚雄,余坤勇,曾琪,杨玉洁,张今朝,刘健(4789)
基于不确定性分析的土壤-水稻系统镉污染综合风险评估	杨阳,陈卫平,李艳玲,王美娥,彭驰(4800)
北京市不同地区土壤中的球囊霉素荧光特征及其与土壤理化性质的关系	柴立伟,刘梦娇,蒋大林,樊灏,曹晓峰,黄艺(4806)
准东煤炭产业区周边土壤重金属污染与健康风险的空间分布特征	刘芳,塔西甫拉提·特依拜,依力亚斯江·努尔麦麦提,王楠,杨春,夏楠,高宇潇(4815)
河北平原潮土中微生物对氮降解特征	张灿灿,庞会从,高太忠,张静,李晓玉,付胜霞(4830)
砷-非对蜈蚣草根不同碳基团的影响	廖晓勇,龚雪刚,阎秀兰,马旭,吴泽赢(4841)
碱性固体对污泥的调质堆肥影响及产品对土壤的改良潜力	蔡函臻,宁西翠,王权,张增强,任秀娜,李荣华,王美净, Mukesh Kumar Awasthi(4848)
不同热解及来源生物炭对西北黄土吸附敌草隆的影响	孙航,蒋煜峰,石磊平,慕仲峰,展惠英(4857)
南丹矿业活动影响区人群头发中重金属含量特征	田美玲,钟雪梅,夏德尚,伏凤艳,陆素芬,李黎,宋波(4867)
Mg-Al-Me (Me = La, Ce, Zr) 复合氧化物制备及其除氟性能	汪爱河,周康根,刘行,陈泉州,刘芳(4874)
铁锰复合氧化物/壳聚糖珠:一种环境友好型除磷吸附剂	付军,范芳,李海宁,张高生(4882)
不同粒径垃圾焚烧飞灰重金属毒性浸出及生物可给性	王春峰,陈冠飞,朱艳臣,姚丹,皇晓晨,王连军(4891)
《环境科学》第37卷(2016年)总目录	(4899)
《环境科学》征稿简则(4466) 《环境科学》征订启事(4699) 信息(4489,4881)	

群体感应淬灭菌的分离及其膜污染控制性能

赵畅, 王文昭*, 徐期勇

(北京大学深圳研究生院环境与能源学院, 聚硅酸盐复合环保材料工程实验室, 深圳 518055)

摘要: 通过淬灭细菌的群体感应系统来抑制生物膜形成、防止膜生物污染的方法近年来受到广泛关注. 本实验从实际运行污水处理厂活性污泥中分离出 5 株具有群体感应淬灭功能的菌株, 其中菌株 HG10 对信号分子 *N*-乙酰高丝氨酸内酯 (C6-HSL) 分解能力最强. 经 16S rRNA 基因序列比对, 初步鉴定为蜡样芽孢杆菌 (*Bacillus cereus*). 用海藻酸钠将菌株 HG10 进行包埋固定, 以探究其在膜过滤系统中对膜污染防治的效果. 结果表明, 经过 8 d 培养, 添加细菌包埋珠 (SA-HG10) 的实验组 B 中膜通量为 $181.29 \text{ L} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, 未投加包埋珠的对照组 A 膜通量为 $110.64 \text{ L} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, B 组膜通量比 A 组高出 63.86%; 对微滤膜片上生物膜中 EPS 含量测定表明, 实验组 B 中 EPS 多糖和蛋白质含量较对照组 A 分别减少了 29% 和 48%, 疏水性蛋白质含量的大量减少是造成膜污染减弱的主要原因; 膜表面胞外聚合物 (EPS) 总含量减少了 43%, 表明投放 SA-HG10 细菌包埋珠对过滤膜片上生物膜形成具有明显抑制作用, 改善了膜过滤性能.

关键词: 群体感应淬灭; 蜡样芽孢杆菌; 固定化; 膜污染; 胞外聚合物

中图分类号: X131.2; X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)12-4720-07 DOI: 10.13227/j.hjks.201606213

Isolation of Quorum Quenching Bacteria and Their Function for Controlling Membrane Biofouling

ZHAO Chang, WANG Wen-zhao*, XU Qi-yong

(Shenzhen Engineering Laboratory for Eco-efficient Polysilicate Materials, School of Environment and Energy, Shenzhen Graduate School, Peking University, Shenzhen 518055, China)

Abstract: Interspecies quorum quenching by bacterial cells has been reported as a novel approach for mitigating the biofouling via restraining quorum sensing (QS). Five indigenous quorum quenching bacterial strains were isolated from activated sludge taken from wastewater treatment plant. Strain HG10 showed high degrading activity against C6-HSL (*N*-hexanoyl-L-Homoserine lactone). The result of 16S rDNA sequencing showed that the isolated strain HG10 belonged to the genus *Bacillus cereus*. Strain HG10 was immobilized in sodium alginate (SA), and the biofouling inhibition of SA-HG10 in membrane filtration treatment system was investigated. The results showed that the membrane flux in experimental group B (provided with SA-HG10) was $181.29 \text{ L} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, and the membrane flux in control group A (without the beads) was $110.64 \text{ L} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$. The membrane flux in group B was 63.86% higher than group A. The content of extracellular polymeric substances (EPS) in the biofilm on the membrane filter was also measured. The results showed that the contents of polysaccharides and proteins in the experimental group B decreased by 29% and 48% respectively than those of group A. A large decrease in the content of hydrophobic proteins was the main reason for the decrease of membrane fouling. The content of EPS in the membrane surface decreased by 43%, indicating that SA-HG10 could inhibit biofilm formation on the membrane filter and effectively improve the filtering performance.

Key words: quorum quenching; *Bacillus cereus* HG10; immobilization; membrane biofouling; extracellular polymeric substances (EPS)

膜过滤处理工艺因其出水浊度低、处理效率高等优势在污水处理中有着广泛应用^[1]. 但膜污染成为限制其长久运行的主要问题, 其中膜表面生物膜形成导致的生物污染占据重要原因^[2]. 目前膜污染防治的方法主要有: ①膜表面改性等物理法^[3]; ②利用强酸、强碱、氧化剂进行清洗等化学法^[4,5]; ③酶干扰及群体感应抑制法等生物法^[6]. 物理法和化学法换膜成本高、风险大, 且易造成抗性菌株的产生及新的环境与健康危害^[7]. 生物法的出现为从根本上防止及控制生物淤积提供了一条可能的途径, 由于其环境友好、安全性高及可持续性等优势在

近年来迅速崛起, 成为近期膜污染研究的热点^[8].

群体感应淬灭法是指通过抑制细菌之间的信号交流 (群体感应, quorum sensing, QS) 来控制细菌生物膜形成的方法^[9]. 在群体感应调控的生物膜形成过程中, AHL 类自诱导物 (*N*-酰基高丝氨酸内酯, *N*-acyl homoserine lactone, AHLs) 是一种非常重要的信号分子. 近年来, 基于群体感应淬灭理论 (quorum

收稿日期: 2016-06-30; 修订日期: 2016-07-18

基金项目: 深圳市科技计划项目 (JCYJ20150626110817181, JCYJ20150806112326712, CXZZ20151117141320317)

作者简介: 赵畅 (1992~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为环境微生物, E-mail: zhaochang@sz.pku.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: wangwz@pku.edu.cn

quenching, QQ) 控制膜污染的生物法受到广泛关注^[9,10]. Oh 等^[11] 尝试将能分解 AHLs 的重组大肠杆菌封装入中空纤维膜的微孔中,有效控制了生物淤积. Kim 等^[12] 从 MBR 活性污泥及膜表面泥饼层中分离出红球属菌(*Rhodococcus* sp. BH4),通过制成细胞包埋珠有效验证了其群体感应淬灭效应.

然而,目前应用于膜污染防治的群体感应淬灭菌只有为数几株且分解信号分子 AHLs 的种类有限,在不同污水环境中,对膜污染防治效果仍处于探索阶段^[13~15]. 更多用于膜污染防治的群体感应淬灭菌仍待进一步分离^[16]. 本研究从实际污水处理厂活性污泥中分离纯化出 1 株群体淬灭功能菌株蜡样芽孢杆菌 HG10,该种菌在土壤、生活污水和垃圾渗滤液等环境中均有发现且已被证实具有群体感应淬灭功能^[17~19]. 但目前关于该菌在防止膜污染方面的研究尚未见报道;基于此,本实验通过对菌株 HG10 进行包埋固定,验证其群体感应淬灭功能在控制生物膜形成方面的可行性及效果,以期为该种菌在膜污染防治中应用提供数据参考和理论依据.

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 样品来源

用于菌株分离的活性污泥样取自深圳某污水处理厂.

1.1.2 LB 培养基

蛋白胨 10 g、酵母膏粉 5 g、氯化钠 5 g、葡萄糖 1 g;蒸馏水 1 000 mL,121℃ 灭菌 15 min,保存备用. 固体培养基加琼脂 1.5%. 1/2 LB 培养基的各成分含量为上述 0.5 倍.

1.1.3 试剂及菌株

N-乙酰高丝氨酸环内酯(C6-HSL)和 *N*-癸酰高丝氨酸环内酯(C10-HSL)均购于 Cayman Chemical (USA);PCR 反应所用 Premix Taq 混合酶购于 TaKaRa(Japan);包埋菌株所用载体为海藻酸钠(aladdin,AR);实验所用微滤膜为 Millipore 微孔过滤膜(GVWP04700,0.22 μm,47 mm);报告菌 *Chromobacterium violaceum* CV026 和 *Chromobacterium violaceum* VIR07 为实验室保存;人工配置污水配方如表 1^[20].

1.2 菌株分离纯化

采用基本培养基法定向分离具有 QQ 功能的细菌^[13],配置 C6-HSL(2.5 mmol·L⁻¹)为唯一碳源的

表 1 合成污水配方	
Table 1 Components of synthetic wastewater	
组分	浓度/mg·L ⁻¹
葡萄糖	1 600
酵母提取物	56
蛋白胨	460
NH ₄ Cl	340
KH ₂ PO ₄	87
CaCl ₂	9.8
MgSO ₄ ·7H ₂ O	128
MnCl ₂ ·4H ₂ O	9.44
FeCl ₃ ·6H ₂ O	8
NaHCO ₃	1 022
pH	7.0~7.5

基本培养基,将污泥 2 μL 接种于 100 μL 基本培养基中,恒温振荡(700 r·min⁻¹,30℃)培养 3 d 后,取 1 μL 接种到新的 C6-HSL 为唯一碳源的基本培养基中,将连续 3 次富集培养后的菌液涂布于 LB 琼脂培养基 30℃ 恒温培养,于培养 24 h、48 h 时挑取不同形态单菌落进行分离纯化. 对所有分离菌落进行 QQ 功能检测.

1.3 分离菌株 QQ 和 QS 功能检测

使用报告菌 CV026 对分离菌株进行 QQ 功能检测:滴加的样品中含有 C6-HSL 时,含有报告株 CV026 的 LB 培养基上呈现紫色反应^[21]. 将分离菌株于 1/2 LB 培养基前培养 12 h 后,取菌液以 1:100 体积比转接到新的 1/2 LB 培养基中(其中含有浓度为 10 μmol·L⁻¹的 C6-HSL 溶液);在 30℃,170 r·min⁻¹条件下培养 8、10、12、24 h 时,取菌液 500 μL 并离心(13 500 r·min⁻¹,5 min),上清液经 0.22 μm 滤膜过滤后 -20℃ 冻存;将无菌滤纸片放置于含有 CV026 的 LB 平板上,在滤纸片上滴加冻存滤液 20 μL 后,将 LB 平板恒温 30℃ 培养 24 h,观察滤纸周围显色反应.

分离细菌的 QS 功能检测,使用 CV026 和 VIR07 为报告菌,分别对短链类 AHLs(C4-C8)和长链类 AHLs(C10-C16)进行验证^[21]. 将分离纯化的 QQ 菌株菌落与报告菌 CV026 和 VIR07 以“T”型划线的方式接种于同一 LB 平板,恒温(30℃)培养 24 h 后观察报告菌显色反应. 10 μL 的 C6-HSL 和 C10-HSL(10 μmol·L⁻¹)分别被划线在指示菌平板上,作为对照.

1.4 QQ 菌株 16S rRNA 基因序列测定

使用通用引物 27F(5'-AGAGTTTGATCCTGG CTCAG-3')和 1492R(5'-GGCTACCTTGTTACGAC TT-3')进行目的基因片段扩增. 扩增条件:94℃ 预

变性 3 min, 94℃ 变性 1 min, 54℃ 退火 30 s, 72℃ 延伸 1.5 min, 35 次循环, 最后 72℃ 延伸 10 min. 将 PCR 产物进行琼脂糖凝胶电泳后由华大公司进行基因测序, 测定序列通过 GenBank 数据库比对鉴定.

1.5 菌株固定化及 QQ 功能验证

菌株 HG10 与质量-体积浓度为 4% 的海藻酸钠溶液 (SA) 按 100 mg·mL⁻¹ 比例混匀后, 滴加到质量-体积浓度为 3% 的 CaCl₂ 溶液中, 4℃ 交联后低温保存. 制备无细菌包埋的空海藻酸钠珠 (Vacant-beads) 为对照组, 以探究包埋珠对群体感应信号分子的物理吸附作用.

配置 C6-HSL 浓度为 10 μmol·L⁻¹ 的 LB 培养基 20 mL, 设置 3 组实验: 加入 8 颗海藻酸钠细菌包埋珠 (SA-HG10) 的培养基, 加入 8 颗无细菌包埋的空海藻酸钠珠的培养基 (Vacant-beads), 不加任何包埋珠的培养基作为空白对照 (Control). 3 组实验在 70 r·min⁻¹, 30℃ 条件下振荡培养, 分别于 15、17、19、21、24、26、34、54 h 进行取样, 并依据 1.2 节群体淬灭检测所述方法, 测量紫色圆直径, 根据公式 (1) 计算投加不同包埋珠的 C6-HSL 浓度随时间的变化情况^[20,22].

$$c = 0.0825 \times e^{0.1533x} \quad (r^2 = 0.98) \quad (1)$$

式中, c 为 C6-HSL 浓度 (μmol·L⁻¹); x 为显紫色圆直径 (mm).

1.6 生物膜生长鉴定

将 PVDF 材质微滤膜片放入锥形瓶中, 依次加入 49 mL 合成污水, 1 mL 实验室驯化良好的活性污泥 (MLSS = 10 g·L⁻¹), 1.4 节实验结果证明无细菌包埋的海藻酸钠珠对 C6-HSL 的降解能力与空白对照组无显著差异可忽略不计 (2.2 节), 故本节设置两组实验: 不加包埋珠的锥形瓶作为对照组 (A), 投加 15 颗 SA-HG10 的锥形瓶作为实验组 (B). 在 70 r·min⁻¹ 恒温 (30℃) 条件下培养, 每 24 h 进行人工配置污水更换, 以提供反应系中微生物生长所需营养成分. 经过一个生物膜生长周期 8 d 后, 取出微滤膜片, 进行膜通量和生物膜 EPS 测量.

膜通量测定采用超滤杯 (UFSC05001, Amicon, USA) 自行搭建 (图 1), 氮气提供稳定正压 15 kPa ± 1 kPa, 膜片置于超滤杯膜固定装置内, 采用超纯水 (MilliQ water) 作为过滤用水, 过滤体积为 50 mL, 使用量筒和秒表分别记录过滤水量和所需时间.

膜表面生物膜中 EPS 的提取, 采用热提取法^[23]: 将反应后膜片剪碎于 15 mL 0.9% NaCl 溶

液中, 超声 10 min, 150 r·min⁻¹ 摇匀 10 min, 超声 5 min, 80℃ 水浴 30 min, 取出碎膜片后, 12 000 r·min⁻¹ 离心 20 min, 取上清液测定 EPS 含量, EPS 总量用多糖与蛋白质之和表征. 多糖和蛋白质分别采用苯酚-硫酸法和考马斯亮蓝法进行测定^[24].

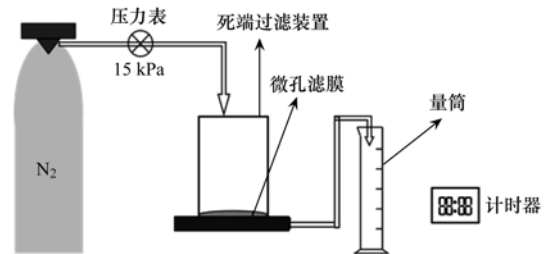


图1 膜通量测定装置示意

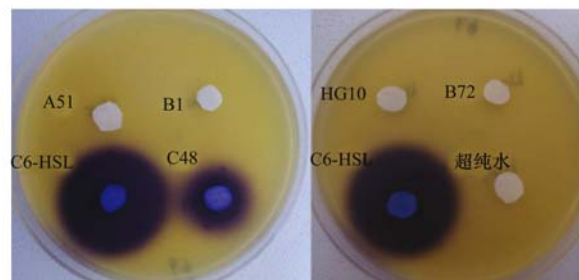
Fig. 1 Schematic of membrane flux test apparatus

2 结果与讨论

2.1 QQ 功能菌株分离及鉴定结果

本研究共分离 18 株优势菌, 对分离菌株全部进行群体感应淬灭功能验证, 得到 5 株具有群体淬灭功能的细菌. 图 2 为培养 24 h 时 5 株细菌的 QQ 功能检验, 菌株 HG10、A51、B1 和 B72 培养 24 h 时, 其上清液在滤纸周围无显紫色反应, 表明菌株在 24 h 内可将 C6-HSL 完全分解; 而菌株 C48 在培养 24 h 后, 其上清液在滤纸片周围出现部分紫色, 表明 C48 在培养 24 h 时能分解部分 C6-HSL, 群体淬灭功能较弱. 5 种分离菌的 16S rRNA 基因鉴定结果如表 2 所示.

在天然环境中存在同时具有 QS 和 QQ 功能的细菌^[25], 对分离菌株的 QS 功能进行检测. 结果如图 3, 同属于 *Burkholderia* sp. 属的 B72 和 C48 自身可产生信号分子 AHLs, 其中菌株 B72 自身可生产短链类信号分子, C48 可同时生产短链类和长链类信号分子. 排除这两株可自身生成 AHLs 的细菌,



培养时间: 24 h, C6-HSL 溶液 (10 μmol·L⁻¹)

和超纯水分别为阳性对照和阴性对照

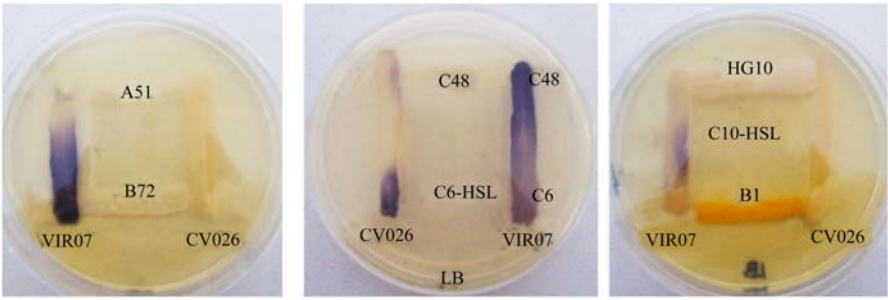
图2 分离5种细菌的群体淬灭功能验证

Fig. 2 Bio agar assay for quorum quenching of each strain

表 2 已分离群体感应淬灭菌株

Table 2 Lists of isolated quorum quenching bacterial strains

菌株	序列号	相似菌株	同源相似性/%
HG10	KX430857	<i>Bacillus cereus</i> strain ATCC 21281	99
A51	KX430853	<i>Delftia tsuruhatensis</i> strain NBRC 16741 ^[26]	99
B1	KX430854	<i>Chryseobacterium indologenes</i> strain NBRC 14944	99
B72	KX430855	<i>Burkholderia cepacia</i> strain ATCC 55792	100
C48	KX430856	<i>Burkholderia cepacia</i> strain ATCC 51671	99



C6-HSL 和 C10-HSL 作为标准样品

图 3 分离细菌的群体感应功能检测

Fig. 3 Bio agar assay for quorum sensing of each strain

并结合之前 QQ 功能的检验,从余下 3 种菌株 HG10、B1 和 B51 中选取分解 C6-HSL 能力最强的 HG10 作为微生物固定包埋的实验菌种.

2.2 固定化包埋菌的 QQ 功能检验

微生物在固定化包埋过程中,海藻酸钠溶液浓度、交联时间及交联剂浓度等包埋条件均会影响固定化微生物性能,导致包埋菌活性降低^[27]. 图 4 为投放 SA-HG10 和空海藻酸钠珠 (Vacant-beads) 的 LB 培养基中,C6-HSL 浓度随时间的变化曲线. 含有菌株 HG10 的海藻酸钠包埋珠在培养 17、19 和 21 h 时,对溶液中 C6-HSL 的降解率分别为

85%、96% 和 99%,表现出极强的群体感应淬灭功能;投放空海藻酸钠珠 (Vacant-beads) 的一组 C6-HSL 减少量仅为 20% ~ 26%,这可能是由于空海藻酸钠珠的物理吸附作用造成^[12]. Khan 等^[14]在对甲基状芽孢杆菌研究中得出类似结果:在培养时间为 16 ~ 23 h 内,甲基状芽孢杆菌对信号分子 C12-HSL 的降解率可达到 90% ~ 96%. 本研究中,用海藻酸钠固定的菌株 HG10 在 24 h 对信号分子 C6-HSL 降解率达到 99% 以上,具有极强的群体淬灭功能.

2.3 固定化菌株对膜污染的控制研究

2.3.1 微滤膜片外观变化

于锥形瓶中取出培养 8 d 后的过滤膜片,微滤膜片表观外貌如图 5 所示. 未投加包埋珠的对照组 A 膜表面观察到明显的鞭毛状絮体^[15],已形成成熟生物膜. 实验组 B 滤膜表面微生物絮体附着量较少,表明投加 SA-HG10 细菌包埋珠对滤膜表面微生物的附着生长产生了抑制作用,进而控制膜污染的加剧.

2.3.2 膜通量变化

图 6 为不同反应体系中微滤膜过滤液体积随时间的变化曲线,相比于新膜片过滤 50 mL 超纯水需要 90 s 时间,实验组 B 需要 653 s,未投加任何包埋珠的对照组 A 则需更长时间 (1 070 s),膜过滤渗透性能开始下降,已出现明显膜污染. 通过公式 (2) 计算不同反应体系内过滤膜通量.

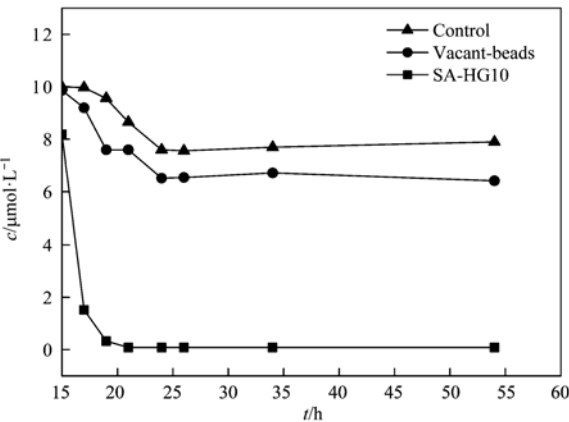
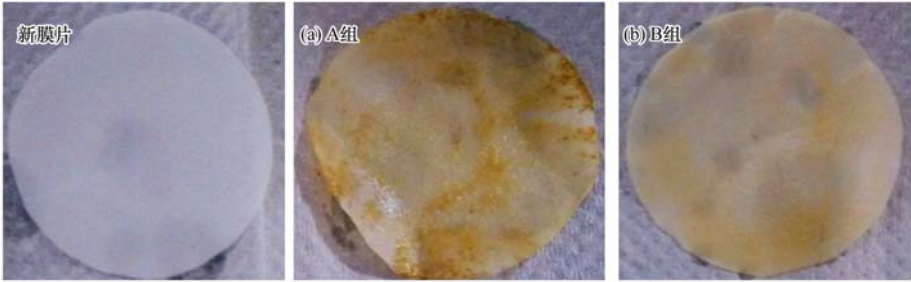


图 4 细菌包埋珠 (SA-HG10)、无细菌空海藻酸钠珠 (Vacant-beads) 对 C6-HSL 降解能力检测

Fig. 4 Comparison of QQ activity of beads with strain HG10, vacant beads and control



A 组和 B 组分别为未投加包埋珠和投加细菌包埋珠 SA-HG10 的测试滤膜,下同

图 5 不同实验条件下过滤膜片对比

Fig. 5 Comparison of membrane filters under different test conditions

$$LMH = \frac{V_{50}}{A \times t} \quad (2)$$

式中,LMH 为膜通量 [$L \cdot (m^2 \cdot h)^{-1}$], V_{50} 为过滤液体积 (50 mL), A 为膜有效过滤面积 (13.4 cm^2), t 为过滤时间 (s).

得出 B 组膜通量为 $181.29 \text{ L} \cdot (m^2 \cdot h)^{-1}$, 比对照组 A 的 $110.64 \text{ L} \cdot (m^2 \cdot h)^{-1}$ 高出 63.9%, 表明通过群体感应淬灭机制有效提高了膜通量. Monzon 等^[28] 提出, 环境中微生物细菌高密度聚集并通过群体感应机制形成生物膜. 本研究中, 群体感应淬灭菌株 HG10 通过抑制上述过程的发生, 使膜表面微生物的附着减少, 膜污染程度显著减缓.

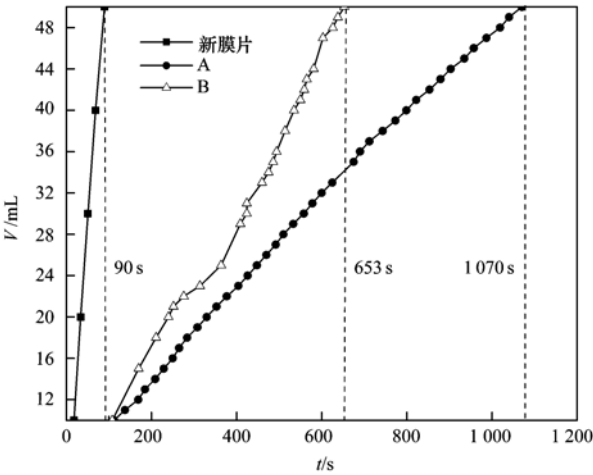


图 6 不同反应体系膜过滤性能比较

Fig. 6 Comparison of membrane flux of different fouled membranes

2.3.3 EPS 含量变化

大量研究表明,生物膜中胞外聚合物 (EPS) 是引起膜污染的主要污染物^[23,29]. 微生物分泌而形成的胞外聚合物中,多糖和蛋白质的含量可以占到其主要成分的 60% ~ 70%^[30],对过滤膜表面生物膜中 EPS 进行提取,并测定其多糖和蛋白质含量,结果如图 7 所示. 对照组 (A) 膜表面多糖和蛋白质含量分

别为 $11.43 \mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$ 和 $37.07 \mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$, 而含有蜡样芽孢杆菌包埋珠的实验组 (B) 滤膜片上生物膜中多糖和蛋白质含量分别为 $8.09 \mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$ 和 $19.32 \mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$, 较对照组 A 分别减少了 29% 和 48%. 蛋白质含量的大量减少很可能是造成生物膜形成减少的主要原因: 蛋白质属疏水性物质, Le-Clech 等^[31] 研究发现较多的疏水性物质将会加强微生物絮体在膜表面的附着, 同时提出相对于多糖, 蛋白质更易导致微生物絮体的疏水性. B 组疏水性蛋白质含量较多糖减少更多, 导致膜表面疏水性物质的大量减少, 进而导致生物膜附着量的减少; B 组胞外聚合物 EPS 较对照组 A 组减少了 43%; Jiang 等^[32] 将海藻酸钠包埋群体淬灭酶运用在膜生物反应器中, 也发现膜组件表面 EPS 较对照组相比减少了大约 50%, 表明在本实验中, 群体感应淬灭技术对膜污染的减缓很可能是由于减少了生物膜中 EPS 含量而造成.

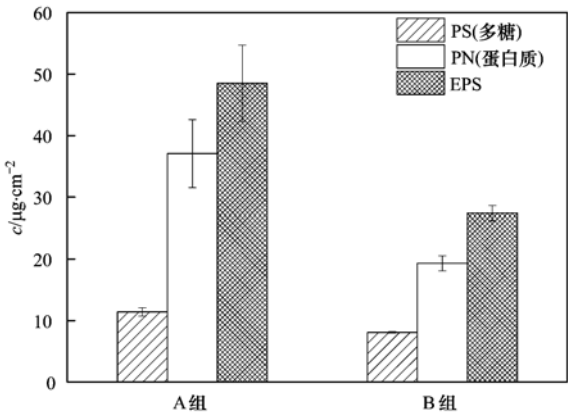


图 7 无细菌包埋珠的对照组 (A 组) 和含有细菌包埋珠的实验组 (B 组) 过滤膜表面多糖和蛋白质含量

Fig. 7 PS and PN concentrations on the surface of membrane filter in control group (A) and experiment group (B)

3 结论

(1) 从实际运行的污水处理厂活性污泥中分离

出 1 株新型群体感应淬灭菌 HG10, 初步鉴定为蜡样芽孢杆菌 *Bacillus cereus*。

(2) HG10 制成的包埋珠 (SA-HG10) 对群体感应信号分子 C6-HSL 具有 99% 的降解能力; 其投加到模拟废水过滤系统中, 提高了 63.9% 的膜通量, 改善了膜过滤性能, 为该菌在实际工程应用中节省能耗和成本提供了理论基础。

参考文献:

- [1] Zheng X, Zhang Z X, Yu D W, *et al.* Overview of membrane technology applications for industrial wastewater treatment in China to increase water supply[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2015, **105**: 1-10.
- [2] Huang J H, Shi Y H, Zeng G M, *et al.* Acyl-homoserine lactone-based quorum sensing and quorum quenching hold promise to determine the performance of biological wastewater treatments: An overview [J]. *Chemosphere*, 2016, **157**: 137-151.
- [3] Mollahosseini A, Rahimpour A. Interfacially polymerized thin film nanofiltration membranes on TiO₂ coated polysulfone substrate[J]. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2014, **20**(4): 1261-1268.
- [4] Cai W W, Liu Y. Enhanced membrane biofouling potential by on-line chemical cleaning in membrane bioreactor[J]. *Journal of Membrane Science*, 2016, **511**: 84-91.
- [5] 张静, 肖太民, 张晶, 等. SpG 膜表面润湿性对膜污染和化学耐受性的影响[J]. *环境科学*, 2015, **36**(5): 1694-1699.
Zhang J, Xiao T M, Zhang J, *et al.* Effect of membrane wettability on membrane fouling and chemical durability of SPG membranes [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(5): 1694-1699.
- [6] Luo J X, Zhang J S, Tan X H, *et al.* Characterization of the archaeal community fouling a membrane bioreactor[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2015, **29**: 115-123.
- [7] Calderon K, Rodelas B, Cabirol N, *et al.* Analysis of microbial communities developed on the fouling layers of a membrane-coupled anaerobic bioreactor applied to wastewater treatment[J]. *Bioresour Technology*, 2011, **102**(7): 4618-4627.
- [8] Lade H, Paul D, Kwon J H. Combined effects of curcumin and (-)-epigallocatechin gallate on inhibition of n-acylhomoserine lactone-mediated biofilm formation in wastewater bacteria from membrane bioreactor [J]. *Microbiol Biotechnology*, 2015, **25**(11): 1908-1919.
- [9] Malaeb L, Le-Clech P, Vrouwenvelder J S, *et al.* Do biological-based strategies hold promise to biofouling control in MBRs? [J]. *Water Research*, 2013, **47**(15): 5447-5463.
- [10] Katebian L, Gomez E, Skillman L, *et al.* Inhibiting quorum sensing pathways to mitigate seawater desalination RO membrane biofouling[J]. *Desalination*, 2016, **393**: 135-143.
- [11] Oh H S, Yeon K M, Yang C S, *et al.* Control of membrane biofouling in mbr for wastewater treatment by quorum quenching bacteria encapsulated in microporous membrane [J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, **46**(9): 4877-4884.
- [12] Kim S R, Oh H S, Jo S J, *et al.* Biofouling control with bead-entrapped quorum quenching bacteria in membrane bioreactors: Physical and biological effects [J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, **47**(2): 836-842.
- [13] Cheong W S, Lee C H, Moon Y H, *et al.* Isolation and identification of indigenous quorum quenching bacteria, pseudomonassp. 1A1, for biofouling control in MBR [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2013, **52**(31): 10554-10560.
- [14] Khan R, Shen F, Khan K, *et al.* Biofouling control in a membrane filtration system by a newly isolated novel quorum quenching bacterium, *Bacillus methylotrophicus* sp. WY [J]. *RSC Advances*, 2016, **6**(34): 28895-28903.
- [15] 叶姜瑜, 谭旋, 吕冰, 等. 细菌群体感应现象及其在控制膜生物污染中的应用[J]. *环境工程*, 2013, **31**(S1): 196-199.
Ye J Y, Tan X, Lü B, *et al.* Bacteria quorum sensing system and its application in controlling membrane biofouling [J]. *Environmental Engineering*, 2013, **31**(S1): 196-199.
- [16] Christaen S E A, Brackman G, Nelis H J, *et al.* Isolation and identification of quorum quenching bacteria from environmental samples[J]. *Journal of Microbiological Methods*, 2011, **87**(2): 213-219.
- [17] Wahman S, Emara M, Shawky R M, *et al.* Inhibition of quorum sensing-mediated biofilm formation in pseudomonas aeruginosa by a locally isolated bacillus cereus [J]. *Journal of Basic Microbiology*, 2015, **55**(12): 1406-1416.
- [18] 葛峰, 郭坤, 周广灿, 等. 南京市 4 个污水处理厂的活性污泥中细菌的分离鉴定和抗生素耐药性分析[J]. *环境科学*, 2012, **33**(5): 1646-1651.
Ge F, Guo K, Zhou G C, *et al.* Isolation and identification of bacteria in the activated sludge from four sewage treatment plants in Nanjing city and its antibiotic resistance analysis [J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(5): 1646-1651.
- [19] 肖勇, 杨朝晖, 曾光明, 等. PCR-DGGE 研究处理垃圾渗滤液序批式生物膜反应器 (SBBR) 中的细菌多样性 [J]. *环境科学*, 2007, **28**(5): 1095-1101.
Xiao Y, Yang Z H, Zeng G M, *et al.* Bacterial diversity in sequencing batch biofilm reactor (SBBR) for landfill leachate treatment using PCR-DGGE [J]. *Environmental Science*, 2007, **28**(5): 1095-1101.
- [20] Yeon K, M, Cheong W S, Oh H S, *et al.* Quorum sensing: A new biofouling control paradigm in a membrane bioreactor for advanced wastewater treatment [J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, **43**(2): 380-385.
- [21] Ochiai S, Morohoshi T, Kurabeishi A, *et al.* Production and degradation of n-acylhomoserine lactone quorum sensing signal molecules in bacteria isolated from activated sludge [J]. *Bioscience Biotechnology and Biochemistry*, 2013, **77**(12): 2436-2440.
- [22] Dong Y H, Xu J L, Li X Z, *et al.* Aiia, an enzyme that inactivates the acylhomoserine lactone quorum-sensing signal and attenuates the virulence of *erwinia carotovora* [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2000, **97**(7): 3526-3531.
- [23] Zhang H M, Xia J, Yang Y, *et al.* Mechanism of calcium mitigating membrane fouling in submerged membrane bioreactors [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2009, **21**(8): 1066-1073.

- [24] 周卫松. 裙带菜中岩藻黄质、岩藻多糖的综合提取纯化研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
- [25] Chong T M, Koh C L, Sam C K, *et al.* Characterization of quorum sensing and quorum quenching soil bacteria isolated from malaysian tropical montane forest [J]. *Sensors*, 2012, **12**(4): 4846-4859.
- [26] Li C T, Yan Z F, Chu X, *et al.* *Delfia deserti* sp nov., isolated from a desert soil sample [J]. *Antonie van Leeuwenhoek*, 2015, **107**(6): 1445-1450.
- [27] 张静进, 刘云国, 张薇, 等. 海藻酸钠包埋活性炭与细菌的条件优化及其对 Pb^{2+} 的吸附特征研究 [J]. *环境科学*, 2010, **31**(11): 2684-2690.
- Zhang J J, Liu Y G, Zhang W, *et al.* Optimization immobilizing activated carbon and bacteria by sodium alginate and its character of adsorption of Pb^{2+} [J]. *Environmental Science*, 2010, **31**(11): 2684-2690.
- [28] Monzon O, Yang Y, Li Q L, *et al.* Quorum sensing autoinducers enhance biofilm formation and power production in a hypersaline microbial fuel cell [J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2016, **109**: 222-227.
- [29] Matar G, Gonzalez-Gil G, Maab H, *et al.* Temporal changes in extracellular polymeric substances on hydrophobic and hydrophilic membrane surfaces in a submerged membrane bioreactor [J]. *Water Research*, 2016, **95**: 27-38.
- [30] Yao M, Zhang K S, Cui L. Characterization of protein-polysaccharide ratios on membrane fouling [J]. *Desalination*, 2010, **259**(1-3): 11-16.
- [31] Le-Clech P, Chen V, Fane T A G. Fouling in membrane bioreactors used in wastewater treatment [J]. *Journal of Membrane Science*, 2006, **284**(1-2): 17-53.
- [32] Jiang W, Xia S Q, Liang J, *et al.* Effect of quorum quenching on the reactor performance, biofouling and biomass characteristics in membrane bioreactors [J]. *Water Research*, 2013, **47**(1): 187-196.

CONTENTS

Transport Loss Estimation of Fine Particulate Matter in Sampling Tube Based on Numerical Computation	LUO Li-na, CHENG Zhen, ZHU Wen-fei, <i>et al.</i> (4457)
Sources Analysis of Heavy Metal Aerosol Particles in North Suburb of Nanjing	QIN Xin, ZHANG Ze-feng, LI Yan-wei, <i>et al.</i> (4467)
Distribution Characteristics of Water Soluble Ions Under Different Weather Conditions During the Youth Olympic Games in Nanjing	SHI Yuan-zhe, AN Jun-lin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (4475)
Seasonal Variation and Source Analysis of the Water-soluble Inorganic Ions in Fine Particulate Matter in Suzhou	WANG Nian-fei, CHEN Yang, HAO Qing-ju, <i>et al.</i> (4482)
Characteristics of Elements and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in PM _{2.5} at the Southwest Suburb of Chengdu in Spring	 YANG Huai-jin, YANG De-rong, YE Zhi-xiang, <i>et al.</i> (4490)
Geochemical Characteristics and Source Apportionment of Rare Earth Elements in the Dustfall of Quanzhou City	ZHANG Zong-wei, YU Rui-lian, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (4504)
¹³ C-based Sources Partitioning of Atmospheric CO ₂ During Youth Olympic Games, Nanjing	XU Jia-ping, LI Xu-hui, XIAO Wei, <i>et al.</i> (4514)
Gaseous Emission Characterization of Civil Aviation Aircraft During Takeoff	HAN Bo, HUANG Jia-min, WEI Zhi-qiang (4524)
Pollution Characteristics of Antibiotic Resistant Bacteria from Atmospheric Environment of Animal Feeding Operations	ZHANG Lan-he, HE Yu-wei, CHEN Mo, <i>et al.</i> (4531)
Removing Nano Particles by Filtration Using Materials with Ordered Mesoporous Structure	XING Yi, WANG Cong, LU Pei, <i>et al.</i> (4538)
Emission Characteristics of Gaseous Pollutants from City Bus Fueled with Biodiesel Based on DOC + CDPF Technology in Real Road Conditions	 LOU Di-ming, ZHANG Yun-hua, TAN Pi-qiang, <i>et al.</i> (4545)
Characteristics of Methane Flux Across the Water-air Interface in Subtropical Shallow Ponds	LONG Li, XIAO Shang-bin, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (4552)
Succession of Phytoplankton Assemblages and Its Influencing Factors in Tangpu Reservoir, Zhejiang Province	MA Pei-ming, SHI Lian-dong, ZHANG Jun-fang, <i>et al.</i> (4560)
Responses of Physiological Indices of Typical Submerged Macrophytes to Water Quality in Taihu Lake	GAO Min, HU Wei-ping, DENG Jian-cai, <i>et al.</i> (4570)
Optical Characteristics of Dissolved Organic Matter from Two Different Full Mixed Reservoirs in Winter Based on UV-vis and EEMs	 HUANG Ting-lin, FANG Kai-kai, ZHANG Chun-hua, <i>et al.</i> (4577)
Hanfeng Pre-dam Commissioning Eutrophication Status and Control Evaluation in Three Gorges Reservoir	YANG Bing, HE Bing-hui, WANG De-bao (4586)
Occurrence, Distribution and Ecological Risk of Antibiotics in Surface Water of the Gonghu Bay, Taihu Lake	WU Xu-yue, ZOU Hua, ZHU Rong, <i>et al.</i> (4596)
Distribution Characteristics of <i>n</i> -alkanes in Sediment Core and Implication of Environment in Different Lakes of Dianchi	YU Li-yan, HAN Xiu-xiu, HUANG Xiao-hu, <i>et al.</i> (4605)
Vertical Distribution and Pollution Risk Assessment of Nitrogen, Phosphorus, and Organic Matter in Sediment of Inflowing Rivers of Erhai Lake Estuarine Wetland in Wet and Dry Seasons	 WANG Shu-jin, LIU Yun-gen, WANG Yan, <i>et al.</i> (4615)
Variation of Nitrogen Forms in Sediments of Lihu Lake During Mineralization	 ZHAO Li, WANG Shu-hang, JIANG Xia, <i>et al.</i> (4626)
Temporal and Spatial Variation Characteristics of the Heavy Metals Content in the Surface Sediment and the Potential Ecological Risk Trends in the Three Gorges Reservoir Area	 ZHUO Hai-hua, SUN Zhi-wei, TAN Ling-zhi, <i>et al.</i> (4633)
Modeling the Environmental Behaviors and Ecological Risks of Permethrin in Chaohu Lake	LIU Ya-li, WANG Ji-zhong, PENG Shu-chuan, <i>et al.</i> (4644)
Simulation Experiment; Effect of Organic Colloid on Carbamazepine Transport in Porous Media	ZHANG Si, HE Jiang-tao, ZHU Xiao-jing (4651)
Grain Size Distribution Characteristics of Suspended Particulate Matter as Influenced by the Apparent Pollution in the Inorganic Type Urban Landscape Water: Taking the Canal of Suzhou Section as Example	LI Qian-qian, PAN Yang, GONG Dan-yan, <i>et al.</i> (4662)
Rock Weathering Characteristics and the Atmospheric Carbon Sink in the Chemical Weathering Processes of Qingshuijiang River Basin	LÜ Jie-mei, AN Yan-ling, WU Qi-xin, <i>et al.</i> (4671)
Pollution Characteristics Analysis in Shallow Groundwater of Typical Farmland Area, Southern China	GUO Hui, YU Min-da, HE Xiao-song, <i>et al.</i> (4680)
Identification of Sulfate Sources in the Groundwater System of Zaozhuang; Evidences from Isotopic and Hydrochemical Characteristics	MA Yan-hua, SU Chun-li, LIU Wei-jiang, <i>et al.</i> (4690)
Removal of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons by Extensive Green Roofs	SHEN Qing-ran, HOU Juan, LI Tian (4700)
Comparative Study on Pretreatment Process of Ultrafiltration; Chemical Coagulation and Electrocoagulation	ZHAO Kai, YANG Chun-feng, SUN Jing-qiu, <i>et al.</i> (4706)
Adsorption Mechanisms Analysis of EOM on PVDF Ultrafiltration Membranes Modified by SiO ₂ Using QCM-D and AFM	JIANG Jia-liang, WANG Lei, HUANG Dan-xi, <i>et al.</i> (4712)
Isolation of Quorum Quenching Bacteria and Their Function for Controlling Membrane Biofouling	ZHAO Chang, WANG Wen-zhao, XU Qi-yong (4720)
Effects of Hydraulic Loading Rate on the Removal of Pollutants from an Integrated Biological Settling Tank	WANG Wen-dong, MA Cui, LIU Hui, <i>et al.</i> (4727)
Characteristics of Nitrobacteria in SBR with Trace N ₂ H ₄ Addition	XIAO Peng-ying, ZHANG Dai-jun, LU Pei-li (4734)
Start-up of Partial Nitrification AGS-SBR and Analysis of Its Microbial Community Composition	LU Hang, XIN Xin, GUAN Lei, <i>et al.</i> (4741)
Effects of PAHs Pollution on the Community Structure of Denitrifiers in a Typical Oilfield	YAO Yan-hong, WANG Ming-xia, ZUO Xiao-hu, <i>et al.</i> (4750)
Performance and Microbial Community Analysis of Bioaugmented Treatment of Diethyl Phthalate (DEP) in Membrane Bioreactor	ZHANG Ke, GUAN Yun, LUO Hong-bing, <i>et al.</i> (4760)
Comparative Analysis of the Bacterial Community on Anodic Biofilms in Sediment Microbial Fuel Cell Under Open and Closed Circuits	 WU Yi-cheng, DENG Quan-xin, WANG Ze-jie, <i>et al.</i> (4768)
Anaerobic Biodegradability of Perfluorooctanoic Acid (PFOA)	LI Fei, CHEN Yi-dan, ZHOU Zhen-ming, <i>et al.</i> (4773)
Comprehensive Effects of the Application of Water and Fertilizer Amount on CO ₂ Emission from Soils of Summer-maize Field	YANG Shuo-huan, ZHANG Bao-cheng, WANG Li, <i>et al.</i> (4780)
Spatial Heterogeneity of Soil Respiration in the Soil Erosion Area of West Mountains in Fujian Province, China	YAO Xiong, YU Kun-yong, ZENG Qi, <i>et al.</i> (4789)
Comprehensive Risk Evaluation of Cadmium in Soil-rice System Based on Uncertainty Analysis	YANG Yang, CHEN Wei-ping, LI Yan-ling, <i>et al.</i> (4800)
Fluorescence Properties of Glomalin and Its Relationship with Soil Physicochemical Characteristics in Different Regions of Beijing City	 CHAI Li-wei, LIU Meng-jiao, JIANG Da-lin, <i>et al.</i> (4806)
Spatial Distribution Characteristics of Heavy Metal Pollution and Health Risk in Soil Around the Coal Industrial Area of East Junggar Basin	 LIU Fang, Tashpolat Tiyp, Ilyas Nurmamat, <i>et al.</i> (4815)
Characteristics of Microbial Nitrogen Degradation in Fluvo-aquic Soil of Hebei Plain	ZHANG Can-can, PANG Hui-cong, GAO Tai-zhong, <i>et al.</i> (4830)
Influence of Arsenate and Phenanthrene on Carbon-groups of <i>Pteris vittata</i> L. Roots	LIAO Xiao-yong, GONG Xue-gang, YAN Xiu-lan, <i>et al.</i> (4841)
Effect of Alkali Solids Amendment on Sewage Sludge Aerobic Composting and the Potential of Related Products on Infertile Soil Amelioration	 CAI Han-zhen, NING Xi-cui, WANG Quan, <i>et al.</i> (4848)
Adsorption and Influential Factors of Diuron on the Loess Soil by Adding Different Biochar Prepared at Varying Temperatures	SUN Hang, JIANG Yu-feng, SHI Lei-ping, <i>et al.</i> (4857)
Characteristics of Heavy Metal Contents in Human Hairs of Mine Contaminated Areas in Nandan County	TIAN Mei-ling, ZHONG Xue-mei, XIA De-shang, <i>et al.</i> (4867)
Preparation of Mg-Al-Me (Me = La, Ce, Zr) Composite Oxides for Efficient Fluoride Uptake	WANG Ai-he, ZHOU Kang-gen, LIU Xing, <i>et al.</i> (4874)
Fe-Mn Binary Oxide Impregnated Chitosan Bead (FMCB): An Environmental Friendly Sorbent for Phosphate Removal	FU Jun, FAN Fang, LI Hai-ning, <i>et al.</i> (4882)
Leaching Toxicity and Bioaccessibility of Heavy Metals in MSWI Fly Ash with Various Particle Sizes	WANG Chun-feng, CHEN Guan-fei, ZHU Yan-chen, <i>et al.</i> (4891)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
赵进才 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2016年12月15日 第37卷 第12期(卷终)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 12 Dec. 15, 2016

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易集团有限公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行