

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第8期

Vol.35 No.8

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办

科学出版社 出版



目次

2012年春季京津冀地区一次沙尘暴天气过程中颗粒物的污染特征分析	刘庆阳, 刘艳菊, 赵强, 张婷婷, 张美根, 王存美 (2843)
杭州灰霾天气超细颗粒浓度分布特征	陈秋方, 孙在, 谢小芳 (2851)
气象因素对广州市大气中二噁英污染特征的影响	杜国勇, 苏原, 任明忠, 张素坤, 青宪 (2857)
龙凤山本底站大气 CO ₂ 数据筛分及浓度特征研究	栾天, 周凌晔, 方双喜, 姚波, 王红阳, 刘钊 (2864)
区域传输对华东森林及高山背景点位大气污染物浓度的影响	苏彬彬, 许榕洋, 张若宇, 纪贤鑫 (2871)
天津市夏季蜂窝状溶蚀器涂层溶液浓度确定的实验研究	张诗建, 姬亚芹, 张雷波, 赵雪艳, 朱振宇, 杨文 (2878)
铅锌冶炼厂不同工艺铅元素粒径分布特征	梁俊宁, 李文慧, 葛毅, 陈洁, 宋丽娜, 刘杰 (2883)
KI 改性黏土脱除烟气中单质汞的研究	沈伯雄, 陈建宏, 蔡记, 何川, 李卓 (2890)
污泥直接干化产生的恶臭及挥发性有机物特征研究	陈文和, 邓明佳, 罗辉, 张婧赢, 丁文杰, 刘俊新, 李琳 (2897)
基于风险管理的区域(流域)地下水污染预警方法研究	白利平, 王业耀, 郭永丽, 周友亚, 刘俐, 颜增光, 李发生 (2903)
1980~2010年浙江某典型河流硝态氮通量对净人类活动氮输入的动态响应	张柏发, 陈丁江 (2911)
南京仙林新市区土地利用结构与格局对湿地水环境氮、磷影响研究	蔡春晓, 刘红玉, 李玉凤, 王聪, 侯明行 (2920)
三江平原典型沼泽湿地养分累积与沉积特征	李瑞利, 柴民伟, 邱国玉, 石福臣, Sasa Kaichiro (2928)
岩溶地下河流域表层土壤多环芳烃污染特征及来源分析	蓝家程, 孙玉川, 师阳, 徐昕, 袁道先, 胡宁 (2937)
亚热带典型岩溶区地表溪流水文地球化学昼夜变化及其影响因素研究	张陶, 蒲俊兵, 袁道先, 章程, 何师意, 于爽, 刘文, 莫雪, 周建超, 杨会, 唐伟 (2944)
藏南干旱区湖泊及地热水体氢氧同位素研究	肖可, 沈立成, 王鹏 (2952)
广西五里峡水库夏季溶解无机碳行为的初步研究	刘文, 蒲俊兵, 于爽, 章程, 区绎如, 袁道先, 杨会, 唐伟 (2959)
铜陵相思河流域重金属分布特征研究	陈莉薇, 徐晓春, 王军, 陈芳 (2967)
不同压力作用下太湖蓝藻气囊体积分数及上浮特性研究	王巍, 丛海兵, 徐亚军, 陈雯婧, 徐思涛, 吴军, 蒋新跃 (2974)
酸性条件下Ti(IV)催化 O ₃ /H ₂ O ₂ 降解邻苯二甲酸二甲酯	高燕, 沈佟栋, 陈尧, 周慧华, 童少平 (2980)
无机离子与胡敏酸对零价铁去除水中Pb(II)、Hg(II)的影响	施秋伶, 周欣, 张进忠, 邱昕凯 (2985)
羟基磷灰石-四氧化三铁-沸石复合材料制备及去除水中刚果红研究	方巧, 林建伟, 詹艳艳, 杨孟娟, 郑雯婧 (2992)
不锈钢 201、304 和 316L 在模拟污水管道反应器中的腐蚀	鲍国栋, 左剑恶, 王雅娟, 千里里 (3002)
微滤过程中腐殖酸与膜表面黏附特性的试验研究	王磊, 王磊, 黄丹曦, 王旭东 (3007)
不同类型 LDHs 对垂直流人工湿地无烟煤基质的覆膜改性及其脱氮效果研究	张翔凌, 郭露, 陈俊杰, 刘小婷, 徐璐, 陈巧珍, 王晓晓 (3012)
SPG 膜曝气-基因工程菌生物膜反应器处理阿特拉津废水研究	刘春, 龚鹏飞, 肖太民, 张明, 年永嘉, 杨景亮, 张晶 (3018)
SPG 膜微气泡曝气生物膜反应器运行性能影响因素研究	张磊, 张明, 刘春, 张静, 刘俊良 (3024)
曝气膜生物反应器运行过程中污泥活性特征变化及其对膜污染的影响	陈烜, 汤兵, 张姿, 宾丽英, 黄绍松, 付丰连, 邱兵 (3031)
限量曝气进水时间对硝化颗粒污泥的影响特性研究	刘文如, 阴芳芳, 王建芳, 沈耀良 (3038)
UASBB 厌氧氨氧化反应器处理污泥脱水液的影响因素研究	李亚峰, 马晨曦, 张驰 (3044)
开封周边地区地表灰尘中汞背景值及其应用	陈彦芳, 马建华, 董运武, 刘德新, 陈星 (3052)
北京市幼儿园地面尘中有毒金属浓度及其健康风险	段恒轶, 吴亚涛, 王珏, 刘兆荣 (3060)
珠三角电子垃圾和城市地区家庭灰尘中多氯联苯的来源及暴露风险	朱智成, 陈社军, 丁南, 王璟, 罗孝俊, 麦碧娴 (3066)
温带典型草原土壤总有机碳及溶解性有机碳对模拟氮沉降的响应	齐玉春, 彭琴, 董云社, 肖胜生, 孙良杰, 刘欣超, 何亚婷, 贾军强, 曹丛丛 (3073)
不同肥料种类对稻田红壤碳氮淋失的影响	刘希玉, 邹敬东, 徐丽丽, 张心昱, 杨风亭, 戴晓琴, 王忠强, 孙晓敏 (3083)
低分子有机酸对土壤中 Cu 化学形态的影响	黄国勇, 付庆灵, 朱俊, 万田英, 胡红青 (3091)
EDTA 与柠檬酸复配洗涤修复多重金属污染土壤效果研究	尹雪, 陈家军, 蔡文敏 (3096)
不同生态系统土壤生化特征及其与土壤呼吸和 N ₂ O 排放的关系	陈玲, 范会, 蒋静艳 (3102)
黄河口不同恢复阶段湿地土壤 N ₂ O 产生的不同过程及贡献	孙文广, 孙志高, 甘卓亭, 孙万龙, 王伟 (3110)
猪粪化肥配施对双季稻田 CH ₄ 和 N ₂ O 排放及其全球增温潜势的影响	王聪, 沈健林, 郑亮, 刘杰云, 秦红灵, 李勇, 吴金水 (3120)
我国北方两地区环境臭氧浓度对矮菜豆生长的影响	袁相洋, 张巍巍, 孙敬松, 胡恩柱, 张玉龙, 张红星, 田媛, 冯兆忠 (3128)
丛枝菌根影响纳米 ZnO 对玉米的生物效应	王卫中, 王发园, 李帅, 刘雪琴 (3135)
丛枝菌根对翅荚木生长及吸收累积重金属的影响	李霞, 彭霞薇, 伍松林, 李志茹, 冯红梅, 江泽平 (3142)
含磷物质对水稻吸收土壤砷的影响	雷鸣, 曾敏, 廖柏寒, 胡立琼, 周航, 龙水波 (3149)
重金属铬(VI)的生态毒性及其土壤环境基准	王晓南, 刘征涛, 王婉华, 张聪, 陈丽红 (3155)
维生素 B ₁₂ 对脱氮功能蓝藻降解 2,4,4'-三氯联苯的促进作用研究	刘嘉裕, 肖文丰, 鲁莉萍, 张杭君 (3162)
己烯雌酚降解菌株沙雷氏菌的分离鉴定及其降解特性	徐冉芳, 孙敏霞, 刘娟, 汪泓, 李欣, 朱雪竹, 凌婉婷 (3169)
多溴联苯醚在市場鲫鱼体内分布和食鱼暴露量	王俊霞, 王春艳, 刘莉莉, 周啸宇, 刘洋成, 林匡飞 (3175)
稀有鮐鲫 HMGR 基因全长克隆及雄鱼经五氯酚暴露基因表达的分析	邓川, 毛思予, 熊力, 张晓峰, 李伟, 高香, 刘秋萍, 陈韵, 刘堰 (3183)
藻细胞和高岭土的存在对病毒 MS2 存活的影响	何强, 吴庆庆, 马红芳, 周真明, 苑宝玲 (3192)
多胺功能化介孔炭对 Pb(II) 的吸附动力学与机制	李坤权, 王艳锦, 杨美蓉, 朱志强, 郑正 (3198)
生物活性炭投加量对垃圾渗滤液处理效果的影响	崔延瑞, 郭焱, 吴青, 马罗丹, 孙剑辉, 崔凤灵 (3206)
经济结构调整的污染减排效应: 以 COD 减排为例	李名升, 周磊, 陈远航, 李茜, 张建辉 (3212)
中国铅流改变原因分析	马兰, 毛建素 (3219)
放牧阉牦牛提前出栏甲烷排放强度减排潜力探讨	汪诗平, Andreas Wilkes, 汪亚运, 白玲 (3225)
中国水体硝酸盐氮氧双稳定同位素溯源研究进展	徐志伟, 张心昱, 于贵瑞, 孙晓敏, 温学发 (3230)
《环境科学》征稿简则 (2936) 《环境科学》征订启事 (3051) 信息 (2882, 2927, 3059, 3218)	

己烯雌酚降解菌株沙雷氏菌的分离鉴定及其降解特性

徐冉芳, 孙敏霞, 刘娟, 汪泓, 李欣, 朱雪竹, 凌婉婷*

(南京农业大学土壤有机污染控制与修复研究所, 南京 210095)

摘要: 利用具有降解己烯雌酚(diethylstilbestrol, DES)特性的功能微生物来降解 DES、有望实现环境中 DES 的有效去除, 然而迄今关于降解 DES 的功能菌株及其降解特性的报道很少。本研究通过选择性富集培养, 从某污水处理站活性污泥中分离获得 1 株具有 DES 降解特性的细菌(菌株 S)。经形态观察、生理生化试验及 16S rDNA 序列同源性分析将菌株 S 鉴定为沙雷氏菌属(*Serratia* sp.) 细菌。菌株 S 好氧生长, 30℃、150 r·min⁻¹ 摇床培养 7 d 后, 对无机盐培养基中 DES(50 mg·L⁻¹) 的降解率达 68.3%。通过摇瓶实验, 优化了菌株 S 生长和降解 DES 的最适环境条件: 温度 30℃, 底物浓度 40~60 mg·L⁻¹, pH 7.0, 接种量 5%, 盐添加量 0 g·L⁻¹, 装液量 10 mL(100 mL 三角瓶)。

关键词: 己烯雌酚; 雌激素; 菌株鉴定; 生物降解; 沙雷氏菌属

中图分类号: X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)08-3169-06 DOI: 10.13227/j.hjxx.2014.08.047

Isolation, Identification and Characterization of a Diethylstilbestrol-degrading Bacterial Strain *Serratia* sp.

XU Ran-fang, SUN Min-xia, LIU Juan, WANG Hong, LI Xin, ZHU Xue-zhu, LING Wan-ting

(Institute of Organic Contaminant Control and Soil Remediation, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: Utilizing the diethylstilbestrol (DES)-degrading bacteria to biodegrade DES is a most reliable technique for cleanup of DES pollutants from the environment. However, little information is available heretofore on the isolation of DES-degrading bacteria and their DES removal performance in the environment. A novel bacterium capable of degrading DES was isolated from the activated sludge of a wastewater treatment plant. According to its morphology, physiochemical characteristics, and 16S rDNA sequence analysis, this strain was identified as *Serratia* sp.. The strain was an aerobic bacterium, and it could degrade 68.3% of DES (50 mg·L⁻¹) after culturing for 7 days at 30℃, 150 r·min⁻¹ in shaking flasks. The optimal conditions for DES biodegradation by the obtained strain were 30℃, 40-60 mg·L⁻¹ DES, pH 7.0, 5% of inoculation volume, 0 g·L⁻¹ of added NaCl, and 10 mL of liquid medium volume in 100 mL flask.

Key words: diethylstilbestrol(DES); estrogenic hormone; identification; biodegradation; *Serratia* sp.

己烯雌酚(diethylstilbestrol, DES)是一种人工合成雌激素, 极微量就能对生物体造成严重伤害^[1]。在人体医学上, DES 曾被用于预防妊娠妇女自发性流产, 但研究表明其能增高女性后代患阴道腺癌的几率^[2]; 在兽医上, DES 也被用于诱导动物发情、促进生长, 但长期应用会损伤动物的肝脏^[3]。在环境中 DES 不易于降解, 并在水体和畜禽粪便等固体废物中富集, 造成环境雌激素污染^[4]。人类和动物通过消化道、呼吸道、皮肤接触等多种途径暴露雌激素, 而其能在动物和人体脂肪组织中长期滞留, 当体内蓄积的雌激素达到一定浓度时, 其就会从脂肪组织中释放出来进入血液, 对生物体造成不良影响^[5]。近年来, 如何去除水体和固体废物中 DES 备受关注。

光化学降解法是目前去除雌激素污染较有效的一种方法^[6], 但有关 DES 光降解的研究仍很少, 仅 Zhou 等^[7]报道了 DES 在 Fe³⁺-草酸体系中的降解情况。近年来, 利用微生物的降解作用来去除环境中雌

激素的研究很受重视^[8-18]。筛选具有高效降解 DES 的功能微生物有望用于实现环境中 DES 的有效去除, 但迄今国内外关于降解 DES 的功能菌株及其降解特性的报道甚少, 仅 Zhang 等^[19]筛选到 1 株假单胞菌 J51 具有 DES 降解功能。

本研究从某污水处理站活性污泥中驯化、分离得到 1 株能够以 DES 为唯一碳源和能源的沙雷氏菌菌株 S, 并研究该细菌降解 DES 的特性, 以期利用功能细菌降解环境中雌激素提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 实验材料

用于 DES 降解菌富集分离的活性污泥采自南

收稿日期: 2014-01-11; 修订日期: 2014-02-28

基金项目: 江苏省科技支撑计划项目(BE2011780); 国家自然科学基金项目(51278252, 41171193)

作者简介: 徐冉芳(1989~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为环境生物技术, E-mail: 2012103045@njau.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: lingwanting@njau.edu.cn

京某污水处理站. DES 购自上海阿拉丁试剂有限公司,纯度 $\geq 98\%$.

1.2 培养基组成

LB 培养基 ($\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$): 蛋白胨 10.00, 酵母粉 5.00, NaCl 10.00, 自然 pH 值.

无机盐培养基 (MS) ($\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$): $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 1.50, $\text{K}_2\text{HPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 1.91, KH_2PO_4 0.50, NaCl 0.50, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.20, 微量元素溶液 2 mL, 自然 pH 值. 其中微量元素溶液成分 ($\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$): $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 0.1, $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 0.425, ZnCl_2 0.05, $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 0.01, $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 0.015, $\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 0.01, $\text{Na}_2\text{SeO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 0.01.

DES 降解培养基: $10 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 DES 甲醇溶液过 $0.22 \mu\text{m}$ 滤膜除菌, 取一定量置于灭菌的三角瓶中, 待甲醇挥发完全后加入灭菌的无机盐培养液, 使 DES 的最终浓度达到实验设计浓度.

固体培养基加入 2% 的琼脂.

1.3 细菌分离筛选

将采集的污泥样本按 10% (质量分数) 的接种量加入到 DES 浓度为 $100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的降解培养基中, 于 30°C 、 $150 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 振荡培养 7 d 后进行第一次转接, 通过 4 次转接后收集第 4 次的富集液.

富集培养液经高效液相色谱测定有降解效果后, 将菌液稀释并涂布于 MS 培养基平板表面 (培养基表面预先用 $100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ DES 甲醇溶液涂布), 30°C 恒温培养, 待平板上长出菌落, 用划线分离等分离方法, 经过分离、筛选、纯化的反复过程, 直至得到纯化的单一菌落. 再进行单菌的降解效果验证, 对有明显降解效果的菌株进行鉴定、并研究其对 DES 的降解特性.

1.4 菌株鉴定

对降解效率高的菌株进行形态观察、生理生化试验、16S rDNA 序列同源性比对分析等, 确定其分类学地位. 菌株的形态及生理生化特性测定参照文献[20]进行. 16S rDNA 克隆所用正向引物为 16S-27F: $5'-\text{AGAGTTTGATCCTGGCTCAG}-3'$; 反向引物为 16S-1492R: $5'-\text{TACCTTGTACGACTT}-3'$ (上海英俊生物技术有限公司合成). PCR 扩增产物经电泳检测后, 送南京金斯瑞测序有限公司进行纯化测序. 测序结果使用 GenBank 进行 Blast 比对分析、整理后, 采用 Clustalx 1.83 和 MEGA 4.0 软件构建系统发育树.

1.5 DES 降解实验

(1) DES 降解效率的测定

在 DES 含量为 $50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 DES 降解培养基中, 按 5% (体积分数) 的接种量加入菌悬液 (D_{600} 值为 1.0), 30°C 、 $150 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 振荡培养 7 d, 每天定时取样, 测定培养基中残留 DES 浓度, 并对细菌进行平板计数测定其生长.

DES 浓度测定采用定时整瓶提取培养基的方法^[21]. 向培养基中加入等体积色谱甲醇, 超声混匀, 高速离心后过 $0.22 \mu\text{m}$ 滤膜, 用高效液相色谱法测定 DES 浓度. 高效液相色谱 (岛津 LC-20AT) 设定参数为: Inertsil ODS-SP-C₁₈ 反相色谱柱 ($150 \text{ mm} \times 4.6 \text{ mm}$, $5 \mu\text{m}$), 流动相为乙腈: 水 = 80: 20, 流速 $1.000 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$, 柱温 40°C , 紫外检测波长 230 nm ^[22].

(2) 环境条件对 DES 降解效率的影响

培养条件与 (1) 相同, 只改变相应环境条件进行 DES 降解实验.

温度的影响: 分别在 20、25、30、37、 42°C 条件下, 摇床培养 7 d 后测定 DES 浓度, 并对细菌进行平板计数测定其生长.

初始 pH 值的影响: DES 降解培养基初始 pH 值分别调至 5.0、6.0、7.0、8.0、9.0, 摇床培养 7 d 后测定 DES 浓度, 并对细菌进行平板计数测定其生长.

初始底物浓度的影响: DES 浓度分别为 20、40、60、80、 $100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 摇床培养 7 d 后测定 DES 浓度, 并对细菌进行平板计数测定其生长.

菌株接种量的影响: 在 DES 降解培养基中分别按 0%、2%、5%、10%、15% (体积比) 的接种量接种, 摇床培养 7 d 后测定 DES 浓度, 并对细菌进行平板计数测定其生长.

盐浓度的影响^[23]: 在 DES 降解培养基中另添加 NaCl, 使盐添加的浓度分别为 0、5、10、15、 $20 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$. 摇床培养 7 d 后测定 DES 浓度, 并对细菌进行平板计数测定其生长.

通气量的影响^[24]: 通过改变三角瓶中培养基的装液量来初步研究氧气供给对 DES 降解的影响. 100 mL 三角瓶中 DES 降解培养基的装液量分别为 10、20、30、40、 50 mL , 摇床培养 7 d 后, 测定 DES 浓度, 并对细菌进行平板计数测定其生长.

1.6 数据分析

实验所得数据用 Microsoft office Excel 2003 软件进行处理. DES 残留率计算公式如下:

$$X = \frac{c_x}{c_{\text{CK}}} \times 100\%$$

式中, X 为残留率 (%), c_x 为接菌处理中 DES 浓度,

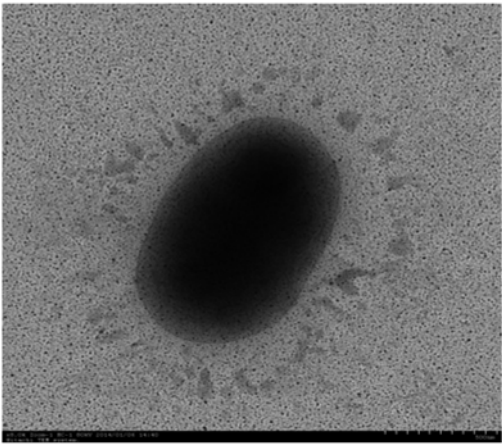
c_{CK} 为未接菌处理中 DES 浓度。

2 结果与讨论

2.1 菌株鉴定

2.1.1 菌落形态及其生理生化特性

菌株 S 从南京某污水处理站活性污泥中分离获得。其在含 DES 的 MS 固体培养基上生长较好,说明其对 DES 具有较强的抗性,可利用 DES 作为唯一碳源进行生长。菌落为圆形,边缘整齐,呈红色,有光泽,菌体易挑起。菌体呈短杆状,大小为 $(7.0 \sim 8.0) \mu\text{m} \times (12.0 \sim 13.0) \mu\text{m}$,无鞭毛,不运动。试验确定菌株为革兰氏阴性细菌,图 1 为菌株透射电镜照片,其生理生化特性见表 1。



×8 000 Zoom-1 HC-1 80 kV
图 1 菌株 S 的透射电镜照片
Fig. 1 Transmission micrograph of strain S

2.1.2 菌株 16S rDNA 序列测序

16S rDNA 序列测序结果表明,菌株 S 与 *Serratia marcescens* 的序列相似性达到 99%,结合生理生化、细菌形态,可确定菌株 S 为沙雷氏菌属

表 1 菌株 S 的生理生化特性¹⁾

Table 1 Physiological characteristics of strain S			
测定项目	结果	测定项目	结果
革兰氏染色	-	M. R 试验	+
葡萄糖发酵试验	+	V. P 试验	+
淀粉水解	+	吡啉试验	-
硝酸盐反应	+	明胶水解	+
苯丙氨酸脱氨酶	-	产 H ₂ S 试验	-
柠檬酸盐利用	+	过氧化氢酶试验	+

1) + 表示发酵糖类只产酸不产气及其它试验中呈阳性反应, - 为阴性反应

(*Serratia* sp.). 菌株 S 的系统发育树见图 2。

2.2 降解菌生长及其对 DES 的降解能力

菌株 S 以 DES 为唯一碳源的的生长和 DES 降解曲线见图 3。从中可知,在菌株培养的 7 d 内,随着培养天数的增加,DES 的降解率逐渐增加。培养至 5 d 时,菌体数量达到稳定值为 $7.77 \times 10^8 \text{ cfu} \cdot \text{mL}^{-1}$,之后菌体数量呈较稳定的趋势。在前 4 d 内 DES 的降解速率较缓慢,培养 4 d 后,DES 降解速率明显加快。究其原因,可能是由于前期菌株生长不适应,导致降解较慢;后期菌株快速生长直到稳定期,表现出对 DES 良好的降解效果。这与 Ren 等^[25]筛选到的鞘氨醇杆菌属细菌 JCR5 生长和降解雌激素 17 α -乙炔基雌二醇的规律类似。培养 7 d 后,空白对照组中 DES 的回收率为 99.8%,菌株 S 处理组的降解率则为 68.3%,而 Zhang 等^[19]筛选的菌株 J51 不能以 DES 为唯一碳源进行生长,对 DES 的降解率约为 60%。菌株 S 与 J51 相比较,表明菌株 S 能以 DES 为唯一碳源进行生长且对 DES 具有显著的降解能力。

2.3 环境条件对菌株降解 DES 的影响

2.3.1 温度

由图 4 可见,温度对菌株 S 生长和其对 DES 降

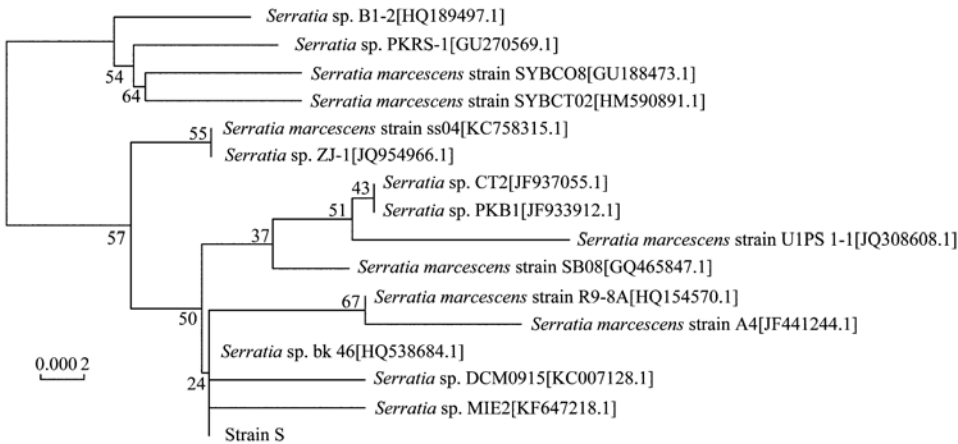


图 2 基于 16S rDNA 基因序列同源性的菌株 S 系统发育树
Fig. 2 Phylogenetic tree of strain S based on the 16S rDNA gene homology

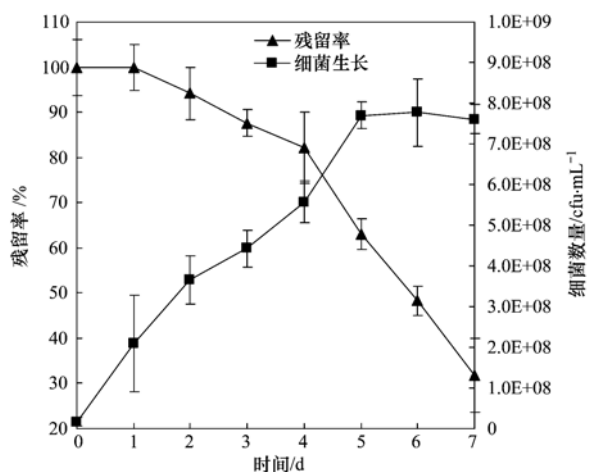


图3 以DES为唯一碳源时菌株S生长及其对DES降解曲线

Fig. 3 Utilization of DES as the sole carbon source for growth and DES-degradation by strain S

解效率的影响趋势一致. 30℃时, 细菌数量最多, 为 6.87×10^8 cfu·mL⁻¹, 且 DES 降解率也较高, 达 67.6%. 30℃以下时, 随着温度的上升, 菌株生长增加, DES 降解率升高. 30℃以上时, 随着温度上升, 菌株生长减少, DES 降解率降低. 这很可能是由于温度对微生物的酶的合成与活性产生了一定的影响^[26]. 通常, 在 15~30℃之间, 随着温度的升高, 菌株中的酶活性增强, 生化反应速度会加快, 菌株生长及降解速率提高; 若温度继续升高, 菌株中一些温度敏感物质会受到不可逆的破坏, 进而其生物活性受到影响^[27]. 因此, 选择 30℃作为菌株 S 生长和降解 DES 的最适温度.

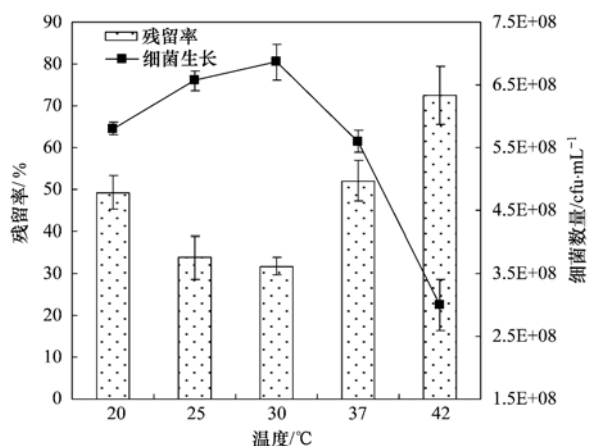


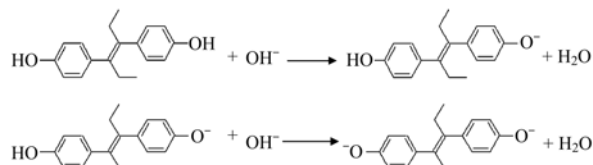
图4 温度对菌株S生长和DES降解的影响

Fig. 4 Effects of temperature on the growth and DES degradation of strain S

2.3.2 初始 pH 值

从图5可以看出, 随着 pH 的升高, DES 残留率逐渐下降, 而菌株 S 在 pH 为 7.0 左右时生长最好,

为 6.70×10^8 cfu·mL⁻¹. pH 偏高或偏低都对其生长存在抑制作用. 对照组中 DES 的回收率随着 pH 升高也逐渐下降, 结合 DES 的结构式可知, 因其含有两个酚羟基, 在不同的酸碱环境下 DES 会有不同的存在形式^[28]. 在碱性环境下, DES 可能会发生如下反应:



pH 为 9.0 时的残留率最低可能是化学和生物共同作用的结果. 故选择菌株 S 生长最好的中性环境 pH 7.0 作为其最适 pH 值, 同时也能达到较好的降解效果.

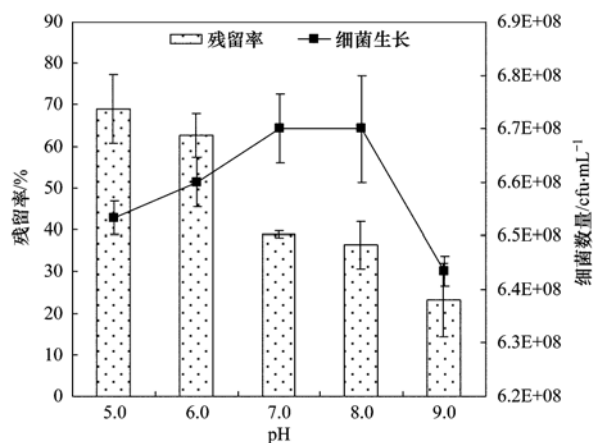


图5 初始 pH 对菌株 S 生长和 DES 降解的影响

Fig. 5 Effects of initial pHs on the growth and DES degradation of strain S

2.3.3 初始底物浓度

由图6可知, 供试底物浓度 (20~100 mg·L⁻¹) 范围内, DES 浓度 >60 mg·L⁻¹ 时, 其对菌株 S 的生长情况表现出一定程度的抑制作用, 说明高浓度的底物会对菌株产生一定的毒害作用^[29], 抑制了菌株 S 的生长. 底物浓度较低时 (20~60 mg·L⁻¹), DES 的降解效率均为 63.0% 左右. 故选择 40~60 mg·L⁻¹ 为菌株 S 生长和降解 DES 的最适底物浓度.

2.3.4 菌株接种量

如图7所示, 当接种量较低时 (2%~10%), 随着接种量的增加, 细菌数量增大, 且 DES 的降解率也随之升高; 而当接种量 >10% 时, 细菌生长减少, 降解效率反而下降. 这可能是因为接种量少时, DES 与菌体的接触不够充分, 菌株未能充分发挥其降解作用; 而接种量过多则会导致菌株营养供应不

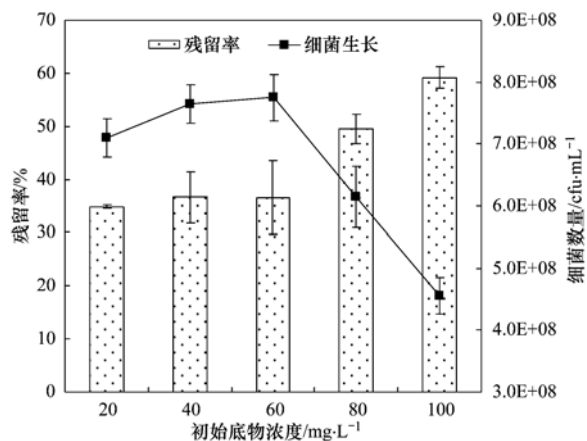


图6 初始底物浓度对菌株 S 生长和 DES 降解的影响

Fig. 6 Effects of initial concentrations on the growth and DES degradation of strain S

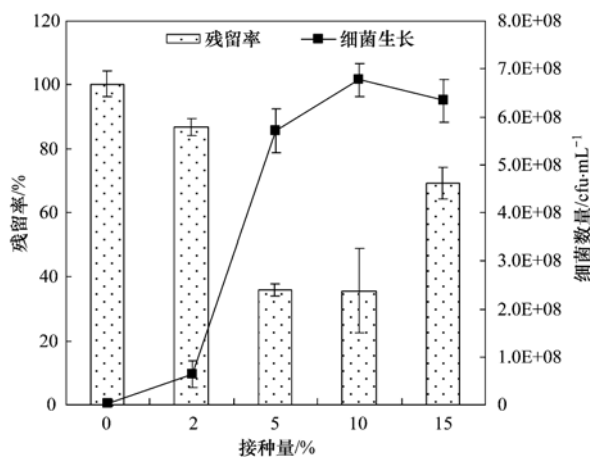


图7 接种量对菌株 S 生长和 DES 降解的影响

Fig. 7 Effects of inoculation quantity on the growth and DES degradation of strain S

足,使之生物量减少,从而导致降解率下降^[30]. 故选择接种量为 5% 即可避免投菌量过多造成浪费、也可有较好的 DES 降解效果.

2.3.5 盐浓度

由图 8 可知,当添加的 NaCl 浓度为 0 g·L⁻¹时,菌株 S 生长最好,DES 的降解效率最高、为 66.0%. 随着盐浓度升高,菌株 S 生长和其对 DES 降解能力都有所下降. 当盐添加浓度为 20 g·L⁻¹时,菌株 S 对 DES 的降解率仅为 16.0%. 研究表明,低浓度的盐对微生物生长和 DES 降解具有促进的作用,但当盐浓度过高时就会引起微生物吸收水分困难,从而抑制其生长和对 DES 的降解^[31]. 了解菌株 S 的耐盐性对于菌株的实际应用有指导意义.

2.3.6 通气量

由图 9 可见,各处理组随着三角瓶中培养基体

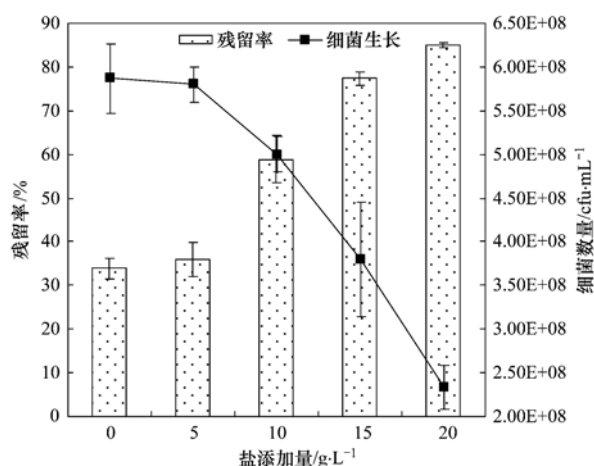


图8 盐含量对菌株 S 生长和 DES 降解的影响

Fig. 8 Effects of salinity on the growth and DES degradation of strain S

积的增加,DES 降解率降低. 当 100 mL 的三角锥形瓶中培养基体积为 10 mL 时,菌株 S 对 DES 的降解效率最高,为 70.3%; 当 100 mL 的三角锥形瓶中培养基体积为 50 mL 时,菌株 S 对 DES 的降解效率降至最低值、为 41.9%. 随着装液量的增加,空气中的氧气向培养基扩散速率下降,故推测菌株 S 为好氧菌,当氧气供给不能满足菌株 S 生长需求时,微生物生长受到抑制,菌株 S 对 DES 的降解效率有所下降^[32]. 因此,菌株 S 为好氧菌,培养过程中通气量越高菌株生长越好.

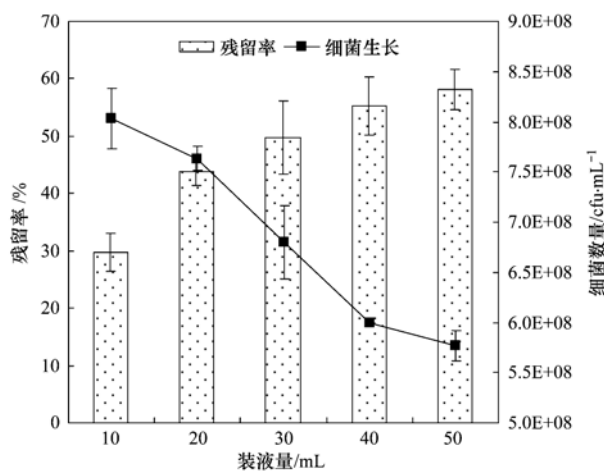


图9 通气量对菌株 S 生长和 DES 降解的影响

Fig. 9 Effects of aeration conditions on the growth and DES degradation of strain S

3 结论

(1)从南京某污水处理站活性污泥中分离获得 1 株能以 DES 为唯一碳源和能源生长的沙雷氏菌属 (*Serratia* sp.) 菌株 S,其在实验室培养条件下能显

著降解 DES, 7d 的 DES 降解率为 68.3%。

(2) 对菌株降解特性研究结果表明, 菌株 S 为好氧菌, 具有较好的环境适应能力, 适宜菌株生长和降解 DES 的环境条件为: 30℃, 底物浓度为 40 ~ 60 mg·L⁻¹, pH 为 7.0, 接种量为 5%, 盐添加量 0 g·L⁻¹, 装液量 10 mL (100 mL 三角瓶)。

参考文献:

- [1] Isidori M, Bellotta M, Cangiano M, *et al.* Estrogenic activity of pharmaceuticals in the aquatic environment [J]. *Environment International*, 2009, **35**(5): 826-829.
- [2] Herbst A L, Ulfelder H, Poskanzer D C. Adenocarcinoma of the vagina: association of maternal stilbestrol therapy with tumor appearance in young women [J]. *The New England Journal of Medicine*, 1971, **284**(15): 878-881.
- [3] 杜克久, 徐晓白. 环境雌激素研究进展 [J]. *科学通报*, 2000, **45**(21): 2241-2251.
- [4] Doherty L F, Bromer J G, Zhou Y P, *et al.* In utero exposure to diethylstilbestrol (DES) or bisphenol-A (BPA) increases EZH2 expression in the mammary gland: An epigenetic mechanism linking endocrine disruptors to breast cancer [J]. *Hormones and Cancer*, 2010, **1**(3): 146-155.
- [5] Fawell J K, Young W F. Assessment of the human risk associated with the presence of carcinogenic compounds in drinking water [J]. *Annali-Istituto Superiore Di Sanita*, 1993, **29**(2): 313-313.
- [6] 李艳霞, 段晓勇, 李先国, 等. 水体中壬基酚光降解机理研究 [J]. *化学学报*, 2012, **70**(17): 1819-1826.
- [7] Zhou D N, Wu F, Deng N S. Fe (III)-oxalate complexes induced photooxidation of diethylstilbestrol in water [J]. *Chemosphere*, 2004, **57**(4): 283-291.
- [8] Vader J S, Ginkel C G, Sperling F M G M, *et al.* Degradation of ethinyl estradiol by nitrifying activated sludge [J]. *Chemosphere*, 2000, **41**(8): 1239-1243.
- [9] Sarah C, Guillermina H R. Occurrence, fate, and biodegradation of estrogens in sewage and manure [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2010, **86**(6): 1671-1692.
- [10] Racz L A, Goel R K. Fate and removal of estrogens in municipal wastewater [J]. *Journal of Environmental Monitoring*, 2010, **12**(1): 58-70.
- [11] Yu C P, Roh H, Chu K H. 17β-Estradiol-degrading bacteria isolated from activated sludge [J]. *Environmental Science and Technology*, 2007, **41**(2): 486-492.
- [12] Pauwels B, Wille K, Noppe H, *et al.* 17α-ethinylestradiol cometabolism by bacteria degrading estrone, 17β-estradiol and estril [J]. *Biodegradation*, 2008, **19**(5): 683-693.
- [13] Yoshimoto T, Nagai F, Fujimoto J, *et al.* Degradation of estrogens by *Rhodococcus zopfii* and *Rhodococcus equi* isolates from activated sludge in wastewater treatment plants [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2004, **70**(9): 5283-5289.
- [14] O'Grady D, Evangelista S, Yargeau V. Removal of aqueous 17α-ethinylestradiol by *Rhodococcus* species [J]. *Environmental Engineering Science*, 2009, **26**(9): 1393-1400.
- [15] Kurisu F, Ogura M, Saitoh S, *et al.* Degradation of natural estrogen and identification of the metabolites produced by soil isolates of *Rhodococcus* sp. and *Sphingomonas* sp. [J]. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 2010, **109**(6): 576-582.
- [16] 史江红, 韩蕊, 宿凌燕, 等. 某污水处理厂中 17α-乙炔基雌二醇降解菌的分离鉴定及其降解特性 [J]. *环境科学学报*, 2010, **30**(12): 2414-2419.
- [17] Hashimoto T, Onda K, Morita T, *et al.* Contribution of the estrogen-degrading bacterium *Novosphingobium* sp. strain JEM-1 to estrogen removal in wastewater treatment [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2010, **136**(9): 890-896.
- [18] Jiang L Y, Yang J, Chen J M. Isolation and characteristics of 17β-estradiol-degrading *Bacillus* spp. strains from activated sludge [J]. *Biodegradation*, 2010, **21**(5): 729-736.
- [19] Zhang W W, Niu Z L, Liao C Y, *et al.* Isolation and characterization of *Pseudomonas* sp. strain capable of degrading diethylstilbestrol [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2013, **97**(9): 4095-4104.
- [20] 东秀珠, 蔡少英. 常见细菌系统鉴定手册 [M]. 北京: 科学出版社, 2001. 353-387.
- [21] Gao Y Z, Li Q L, Ling W T, *et al.* Arbuscular mycorrhizal phytoremediation of soils contaminated with phenanthrene and pyrene [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, **185**(2-3): 703-709.
- [22] 付银杰, 高彦征, 董长勋, 等. SPE-HPLC/FLD 法同时测定水中 4 种雌激素 [J]. *农业环境科学学报*, 2012, **31**(11): 2296-2303.
- [23] 周乐, 盛下放. 昆降解菌株的筛选及降解条件的研究 [J]. *农业环境科学学报*, 2006, **25**(6): 1504-1507.
- [24] Ma Y F, Wang L, Shao Z Z. *Pseudomonas*, the dominant polycyclic aromatic hydrocarbon-degrading bacteria isolated from Antarctic soils and the role of large plasmids in horizontal gene transfer [J]. *Environmental Microbiology*, 2006, **8**(3): 455-465.
- [25] Ren H Y, Ji S L, Wang D, *et al.* Degradation characteristics and metabolic pathway of 7α-ethynylestradiol by *Sphingobacterium* sp. JCR5 [J]. *Chemosphere*, 2007, **66**(2): 340-346.
- [26] 杨俊, 姜理英, 陈建孟. 1 株 17β-雌二醇高效降解菌的分离鉴定及降解特性 [J]. *环境科学*, 2010, **31**(5): 1313-1319.
- [27] 沈萍. 微生物学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [28] 王伟, 王建龙. 利用动力学模型探讨底物浓度对生物产氢的影响 [J]. *中国科学 B 辑: 化学*, 2008, **38**(8): 715-720.
- [29] 方振伟, 徐德强, 张亚雷, 等. 2, 6-二叔丁基酚降解菌的降解特性研究 [J]. *环境科学*, 2004, **25**(3): 98-101.
- [30] 刘艳, 范丽薇, 王晓萍. 氯喹磺隆降解菌 L-6 的分离鉴定及其降解特性 [J]. *中国农学通报*, 2010, **26**(19): 339-343.
- [31] 董滨, 王凤花, 林爱军, 等. 乙草胺降解菌 A-3 的筛选及其降解特性 [J]. *环境科学*, 2011, **33**(2): 542-547.
- [32] 倪雪, 刘娟, 高彦征, 等. 2 株降解非的植物内生细菌筛选及其降解特性 [J]. *环境科学*, 2013, **34**(2): 746-752.

CONTENTS

Chemical Characteristics in Airborne Particulate Matter (PM ₁₀) During a High Pollution Spring Dust Storm Episode in Beijing, Tianjin and Zhangjiakou, China	LIU Qing-yang, LIU Yan-ju, ZHAO Qiang, <i>et al.</i> (2843)
Distribution of Atmospheric Ultrafine Particles During Haze Weather in Hangzhou	CHEN Qiu-fang, SUN Zai, XIE Xiao-fang (2851)
Effect of Meteorological Factors on Characteristics of PCDD/F Pollution in Guangzhou	DU Guo-yong, SU Yuan, REN Ming-zhong, <i>et al.</i> (2857)
Atmospheric CO ₂ Data Filtering Method and Characteristics of the Molar Fractions at the Longfengshan WMO/GAW Regional Station in China	LUAN Tian, ZHOU Ling-xi, FANG Shuang-xi, <i>et al.</i> (2864)
Influence of Atmospheric Transport on Air Pollutant Levels at a Mountain Background Site of East China	SU Bin-bin, XU Ju-yang, ZHANG Ruo-yu, <i>et al.</i> (2871)
Determining the Concentration of Coating Solution Attaching to Honeycomb Denuder in Summer in Tianjin	ZHANG Shi-jian, JI Ya-qin, ZHANG Lei-bo, <i>et al.</i> (2878)
Characterization of Lead Size Distributions with Different Process in Lead-Zinc Smelter	LIANG Jun-ning, LI Wen-hui, GE Yi, <i>et al.</i> (2883)
Effect of KI Modified Clay on Elemental Mercury Removal Efficiency	SHEN Bo-xiong, CHEN Jian-hong, CAI Ji, <i>et al.</i> (2890)
Characteristics of Odors and VOCs from Sludge Direct Drying Process	CHEN Wen-he, DENG Ming-jia, LUO Hui, <i>et al.</i> (2897)
Research of Early-warning Method for Regional Groundwater Pollution Based on Risk Management	BAI Li-ping, WANG Ye-yao, GUO Yong-li, <i>et al.</i> (2903)
Dynamic Response of Riverine Nitrate Flux to Net Anthropogenic Nitrogen Inputs in A Typical River in Zhejiang Province over the 1980-2010 Period	ZHANG Bai-fa, CHEN Ding-jiang (2911)
Research on the Influence of Urban Land Use Structure and Pattern on Nitrogen, Phosphorus of Wetland Water Environment in Xianlin New Town of Nanjing	CAI Chun-xiao, LIU Hong-yu, LI Yu-feng, <i>et al.</i> (2920)
Profile Nutrient Distribution and Sedimentary Characteristics in Typical Marshes of Sanjiang Plain	LI Rui-li, CHAI Min-wei, QIU Guo-yu, <i>et al.</i> (2928)
Source and Contamination of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Soil in Karst Underground River Basin	LAN Jia-cheng, SUN Yu-chuan, SHI Yang, <i>et al.</i> (2937)
Diel Variations of Hydrochemistry and Influencing Factors in a Surface Stream in Subtropical Karst Area, SW China	ZHANG Tao, PU Jun-bing, YUAN Dao-xian, <i>et al.</i> (2944)
Hydrogen and Oxygen Isotopes of Lake Water and Geothermal Spring Water in Arid Area of South Tibet	XIAO Ke, SHEN Li-cheng, WANG Peng (2952)
Preliminary Research on the Feature of Dissolved Inorganic Carbon in Wulixia Reservoir in Summer, Guangxi, China	LIU Wen, PU Jun-bing, YU Shi, <i>et al.</i> (2959)
Distribution of Heavy Metals in Xiangsi River Valley of Tongling, China	CHEN Li-wei, XU Xiao-chun, WANG Jun, <i>et al.</i> (2967)
Volume Fraction of Gas Vesicle and Floating Characteristics of Cyanobacteria in Taihu Lake Under Different Pressures	WANG Wei, CONG Hai-bing, XU Ya-jun, <i>et al.</i> (2974)
Degradation of Dimethyl Phthalate by Ti(IV)-catalyzed O ₃ /H ₂ O ₂ Under Acidic Conditions	GAO Yan, SHEN Tong-dong, CHEN Yao, <i>et al.</i> (2980)
Influence of Inorganic Ions and Humic Acid on the Removal of Pb(II) and Hg(II) in Water by Zero-Valent Iron	SHI Qiu-ling, ZHOU Xin, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (2985)
Synthesis of Hydroxyapatite/Magnetite/Zeolite Composite for Congo Red Removal from Aqueous Solution	FANG Qiao, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (2992)
Corrosion of Stainless Steel 201, 304 and 316L in the Simulated Sewage Pipes Reactor	BAO Guo-dong, ZUO Jian-e, WANG Ya-jiao, <i>et al.</i> (3002)
Experimental Study of Adhesion Properties Between Membrane Surface and Humic Acid During Microfiltration	WANG Lei, WANG Lei, HUANG Dan-xi, <i>et al.</i> (3007)
Coating Modification of Anthracite Substrates in Vertical-flow Constructed Wetlands by LDHs Synthesized from Different Metal Compounds and the Nitrogen Removal Efficiencies	ZHANG Xiang-ling, GUO Lu, CHEN Jun-jie, <i>et al.</i> (3012)
Atrazine Wastewater Treatment in a SPC Membrane-Aerated Genetically Engineered Microorganism Biofilm Reactor	LIU Chun, GONG Peng-fei, XIAO Tai-min, <i>et al.</i> (3018)
Influencing Factors for Operational Performance of a Biofilm Reactor with Microbubble Aeration Using SPG Membrane	ZHANG Lei, ZHANG Ming, LIU Chun, <i>et al.</i> (3024)
Variations in the Active Characteristics of Sludge During the Operation of an Aerobic Membrane Bioreactor and Their Effects on Membrane Fouling	CHEN Xuan, TANG Bing, ZHANG Zi, <i>et al.</i> (3031)
Effects of Anaerobic Feeding Period on Nitrifying Granular	LIU Wen-ru, YIN Fang-fang, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (3038)
Influencing Factors of Sludge Liquor Treatment in UASBB	LI Ya-feng, MA Chen-xi, ZHANG Chi (3044)
Background Values of As and Hg in Surface Dusts in the Vicinity of Kaifeng City and Their Application	CHEN Yan-fang, MA Jian-hua, DONG Yun-wu, <i>et al.</i> (3052)
Concentrations and Health Risks of Toxic Metals in Surface Dust in Kindergartens of Beijing	DUAN Heng-yi, WU Ya-tao, WANG Jue, <i>et al.</i> (3060)
Polychlorinated Biphenyls in House Dust at an E-waste Site and Urban Site in the Pearl River Delta, Southern China; Sources and Human Exposure and Health Risks	ZHU Zhi-cheng, CHEN She-jun, DING Nan, <i>et al.</i> (3066)
Responses of Soil Total Organic Carbon and Dissolved Organic Carbon to Simulated Nitrogen Deposition in Temperate Typical Steppe in Inner Mongolia, China	QI Yu-chun, PENG Qin, DONG Yun-she, <i>et al.</i> (3073)
Effects of Different Fertilizer Species on Carbon and Nitrogen Leaching in a Reddish Paddy Soil	LIU Xi-yu, ZOU Jing-dong, XU Li-li, <i>et al.</i> (3083)
Effects of Low Molecular Weight Organic Acids on Speciation of Exogenous Cu in an Acid Soil	HUANG Guo-yong, FU Qing-ling, ZHU Jun, <i>et al.</i> (3091)
Evaluation of Compounding EDTA and Citric Acid on Remediation of Heavy Metals Contaminated Soil	YIN Xue, CHEN Jia-jun, CAI Wen-min (3096)
Soil Biochemical Characteristics in Different Ecological Systems and Their Relationships with Soil Respiration and N ₂ O Emission	CHEN Ling, FAN Hui, JIANG Jing-yang (3102)
Contribution of Different Processes in Wetland Soil N ₂ O Production in Different Restoration Phases of the Yellow River Estuary, China	SUN Wen-guang, SUN Zhi-gao, GAN Zhuo-ting, <i>et al.</i> (3110)
Effects of Combined Applications of Pig Manure and Chemical Fertilizers on CH ₄ and N ₂ O Emissions and Their Global Warming Potentials in Paddy Fields with Double-Rice Cropping	WANG Cong, SHEN Jian-lin, ZHENG Liang, <i>et al.</i> (3120)
Influence of Ozone on Snap Bean Under Ambient Air in Two Sites of Northern China	YUAN Xiang-yang, ZHANG Wei-wei, SUN Jing-song, <i>et al.</i> (3128)
Arbuscular Mycorrhizal Symbiosis Influences the Biological Effects of Nano-ZnO on Maize	WANG Wei-zhong, WANG Fa-yuan, LI Shuai, <i>et al.</i> (3135)
Effect of Arbuscular Mycorrhizae on Growth, Heavy Metal Uptake and Accumulation of <i>Zenia insignis</i> Chun Seedlings	LI Xia, PENG Xia-wei, WU Song-lin, <i>et al.</i> (3142)
Effects of Phosphorus-containing Substances on Arsenic Uptake by Rice	LEI Ming, ZENG min, LIAO Bo-han, <i>et al.</i> (3149)
Ecotoxicological Effect and Soil Environmental Criteria of the Heavy Metal Chromium(VI)	WANG Xiao-nan, LIU Zheng-tao, WANG Wan-hua, <i>et al.</i> (3155)
Promotion Effects of Vitamin B ₁₂ on the Degradation of 2,4,4'-Trichlorobiphenyl by <i>Nostoc</i> PD-2	LIU Jia-yu, XIAO Wen-feng, LU Li-ping, <i>et al.</i> (3162)
Isolation, Identification and Characterization of a Diethylstilbestrol-degrading Bacterial Strain <i>Serratia</i> sp.	XU Ran-fang, SUN Min-xia, LIU Juan, <i>et al.</i> (3169)
Distribution of Polybrominated Diphenyl Ethers in Wild Crucian Carp and Exposure Estimation of Dietary Intake	WANG Jun-xia, WANG Chun-yan, LIU Li-li, <i>et al.</i> (3175)
Cloning of Full-length cDNA of HMGR from <i>Gobiocypris rarus</i> and Analysis of Its Expression Profiles in Male Exposed to Pentachlorophenol	DENG Chuan, MAO Si-yu, XIONG Li, <i>et al.</i> (3183)
Effects of Algae and Kaolinite Particles on the Survival of Bacteriophage MS2	HE Qiang, WU Qing-qing, MA Hong-fang, <i>et al.</i> (3192)
Adsorption Kinetics and Mechanism of Lead(II) on Polyamine-Functionalized Mesoporous Activated Carbon	LI Kun-quan, WANG Yan-jin, YANG Mei-rong, <i>et al.</i> (3198)
Influence of Biological Activated Carbon Dosage on Landfill Leachate Treatment	CUI Yan-rui, GUO Yan, WU Qing, <i>et al.</i> (3206)
Effect of Economic Structure Adjustment on Pollution Emission: A Case Study of COD	LI Ming-sheng, ZHOU Lei, CHEN Yuan-hang, <i>et al.</i> (3212)
Reasons for the Changes in Anthropogenic Lead Flows of China	MA Lan, MAO Jian-su (3219)
Discussion on Reduction Potential of CH ₄ Emission Intensity for Early Off-take Practice of Grazing Yak	WANG Shi-ping, Andreas Wilkes, WANG Ya-yun, <i>et al.</i> (3225)
Review of Dual Stable Isotope Technique for Nitrate Source Identification in Surface- and Groundwater in China	XU Zhi-wei, ZHANG Xin-yu, YU Gui-rui, <i>et al.</i> (3230)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

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 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 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)

2014年8月15日 第35卷 第8期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 8 Aug. 15, 2014

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	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
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	中国国际图书贸易总公司 (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: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行