

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第10期

Vol.39 No.10

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

我国典型城市环境大气挥发性有机物特征比值	王鸣, 陈文泰, 陆思华, 邵敏 (4393)
2015年北京大气 VOCs 时空分布及反应活性特征	张博韬, 安欣欣, 王琴, 闫贺, 刘保献, 张大伟 (4400)
北京市建筑类涂料 VOCs 排放清单编制技术方法及应用	邓子钰, 高美平, 王庆玮, 聂磊 (4408)
基于实测的建筑类涂料挥发性有机物 (VOCs) 含量水平及组分特征	高美平, 邓子钰, 聂磊, 邵霞, 安小栓 (4414)
2014~2016年京津冀沿山城市空气质量首要污染物特征分析	王晓彦, 王帅, 朱莉莉, 许荣, 李健军 (4422)
北京市大气环境 PM _{2.5} 和 PM ₁ 及其碳质组分季节变化特征及来源分析	樊啸辰, 郎建奎, 程水源, 王晓琦, 吕喆 (4430)
南京春季北郊地区大气 PM _{2.5} 中主要化学组分及碳同位素特征	周一鸣, 韩珣, 王瑾瑾, 陈善莉, 沈潇雨, 章炎麟, 朱彬, 郭照冰 (4439)
热脱附法快速分析大气细颗粒物中非极性有机物	马英歌, 吴霞, 彭梦梦, 冯加良, 郁建珍, 乔利平, 周敏, 朱书慧, 李莉 (4446)
杭州市空气细颗粒物浓度与哮喘就诊人次的关系	王安旭, 陈曦, 宋从波, 应颂敏, 李倩, 吴琳, 毛洪钧 (4457)
基于远程通讯技术的混动公交车 SCR 系统运行及 NO _x 排放特征	杨强, 胡馨遥, 黄成, 陈昀, 刘佳栋, 李莉, 熊忠亮, 唐伟 (4463)
基于环境风险排序的流域优先污染物筛选	李奇峰, 吕永龙, 王佩, 张悦清 (4472)
重庆远郊丰都雪玉洞流域大气无机氮湿沉降变化特征与来源分析	段世辉, 蒋勇军, 张远瞩, 胡刘婵, 曾泽, 吕现福 (4479)
黑龙江凉水国家级自然保护区大气氮沉降特征	宋蕾, 田鹏, 张金波, 金光泽 (4490)
脱甲河水系 N ₂ O 关键产生过程及氮素来源探讨	赵强, 吕成文, 秦晓波, 吴红宝, 万运帆, 廖育林, 鲁艳红, 李健陵 (4497)
生物炭添加对曝气人工湿地脱氮及氧化亚氮释放的影响	王宁, 黄磊, 罗星, 梁岩, 王燕, 陈玉成 (4505)
黑麦草对水体中镉-壬基酚复合污染的生理响应及修复	史广宇, 李中义, 张路, 程媛媛, 陈宏伟, 施维林 (4512)
城市黑臭水体的吸收特性分析	丁潇蕾, 李云梅, 吕恒, 朱利, 温爽, 雷少华 (4519)
岷江上游水体中 DOM 光谱特征的季节变化	范诗雨, 秦纪洪, 刘堰杨, 孙辉 (4530)
防渗型生物滞留中试系统降雨径流水质与三维荧光特征	林修咏, 王书敏, 李强, 谢云成 (4539)
基于δ ¹⁵ N和δ ¹⁸ O的农业区地下河硝酸盐污染来源	盛婷, 杨平恒, 谢国文, 洪爱花, 曹聪, 谢世友, 时伟宇 (4547)
垃圾填埋场地下水溶解性有机物光谱特征	彭莉, 虞敏达, 何小松, 刘思佳, 张鹏 (4556)
铅负载颗粒沸石改良底泥对水中磷酸盐的吸附行为	梁舒静, 林建伟, 詹艳慧, 汪振华, 李雅灵, 何思琪, 陈海洋, 唐凤霞, 李志强 (4565)
基于紫外光谱分析的腐殖质混凝控制	张北辰, 张晓蕾, 秦兰兰, 黄海鸥 (4576)
AAO 工艺联合臭氧削减污水中微量有机污染物及遗传毒性	李默, 汪震哲, 陈志强, 温沁雪 (4584)
抗生素抗性基因在两级废水处理系统中的分布和去除	李奥林, 陈吕军, 张衍, 代天娇, 田金平, 刘锐, 温东辉 (4593)
磁性壳聚糖凝胶球固定厌氧铁氨氧化菌对废水氨氮去除的影响	刘志文, 陈琛, 彭晓春, 谢武明, 黄镇扬, 韩庆吉 (4601)
海藻糖强化厌氧氨氧化耦合反硝化工艺处理高盐废水的脱氮除碳效能	杨振琳, 于德爽, 李津, 王晓霞, 冯莉 (4612)
低温下 A ² /O-BAF 反硝化除磷脱氮特性	黄剑明, 赵智超, 郑隆举, 邵兆伟, 安芳娇, 陈永志 (4621)
O ₃ -BAC 深度处理石化废水厂尾水的特性及菌群结构分析	张超, 单明皓, 许丹宁, 古明哲, 代蓓蓓, 纪轩, 孙井梅 (4628)
基于 MBR 不同种泥短程硝化启动的微生物群落结构分析	吴鹏, 陈亚, 张婷, 沈耀良, 徐乐中 (4636)
3 种不同工艺切换下活性污泥菌群结构及代谢产物对污泥沉降性能的影响	温丹丹, 袁林江, 陈希, 王洋, 申童童, 刘小博 (4644)
硫酸盐还原菌活性污泥胞外聚合物对环丙沙星的吸附机制	张会群, 贾妍艳, 方荷婷, 阴琳婉, 吕慧 (4653)
包埋活性污泥反硝化性能的快速提高及群落分析	杨宏, 徐富, 孟琛, 苏姗, 袁星 (4661)
中国粮食主产区耕地土壤重金属时空变化与污染源分析	尚二萍, 许尔琪, 张红旗, 黄彩红 (4670)
典型区土壤重金属空间插值方法与污染评价	马宏宏, 余涛, 杨忠芳, 侯青叶, 曾庆良, 王锐 (4684)
秸秆与化肥减量配施对菜地土壤温室气体排放的影响	黄容, 高明, 黎嘉成, 徐国鑫, 吕盛, 罗梅 (4694)
不同肥料施用对设施蔬菜地 NH ₃ 挥发和 N ₂ O 排放的影响	山楠, 韩圣慧, 刘继培, 陈清, 袁玉玲, 王立刚, 李虎 (4705)
施肥类型和水热变化对农田土壤氮素矿化及可溶性有机氮动态变化的影响	田飞飞, 纪鸿飞, 王乐云, 郑西来, 辛佳, 能惠 (4717)
长期不同施肥量对全程氨氧化细菌丰度的影响	王梅, 王智慧, 石孝均, 蒋先军 (4727)
典型绿洲不同土壤类型有机碳含量及其稳定碳同位素分布特征	陈新, 贡璐, 李杨梅, 安申群, 赵晶晶 (4735)
凹凸棒石及其改性材料对土壤镉生物有效性的影响与机制	陈展祥, 陈传胜, 陈卫平, 焦文涛 (4744)
天然有机物活化过硫酸盐降解土壤有机污染物效果	刘琼枝, 廖晓勇, 李尤, 龚雪刚, 曹红英, 罗俊鹏 (4752)
水分管理和外源硒对水稻吸收累积铅的影响	万亚男, 刘哲, Aboubacar Younoussa Camara, 余垚, 王琪, 李花粉 (4759)
窖水中微生物降解污染物的关键细菌	杨浩, 杨晓妮, 张国珍, 王宝山, 张翔, 李健 (4766)
砷氧化菌对胡敏酸络合 As(Ⅲ) 的氧化作用	李泽姣, 崔岩山, 尹乃毅, 蔡晓琳, 都慧丽, 王鹏飞 (4778)
海域高温油田 1 株耐高温耐盐硫酸盐还原菌的筛选与生理特性及活性抑制	杨春璐, 苑美玉, 史荣久, 闫鹏举, 赵峰, 韩斯琴, 张颖 (4783)
1 株耐盐异养硝化-好氧反硝化菌 <i>Zobellella</i> sp. B307 的分离及脱氮特性	白洁, 陈琳, 黄潇, 胡春辉, 赵阳国, 李岍然 (4793)
1 株镰刀菌属 KY123915 的分离及其对 17β-雌二醇的降解特性	吴蔓莉, 祝长成, 祁燕云, 时艺馨, 徐会宁, 杨瑾如 (4802)
氟喹诺酮对垂直流人工湿地性能及微生物群落的影响	李新慧, 郑权, 李静, 王晓慧, 海热提 (4809)
林可霉素菌渣堆肥微生物群落多样性分析	任省涛, 郭夏丽, 芦阿度, 张倩倩, 郭笑盈, 王岩, 王连忠, 张宝宝 (4817)
DEP 对蚯蚓抗氧化酶系的影响及 DNA 损伤	平令文, 李现旭, 张翠, 宋佩佩, 王金花, 朱鲁生, 王军 (4825)
生活垃圾焚烧灰灰矿物学特性及重金属分布	李建陶, 曾鸣 (4834)
《环境科学》征订启事 (4429) 《环境科学》征稿简则 (4471) 信息 (4529, 4777, 4816)	

1 株镰刀菌属 KY123915 的分离及其对 17 β -雌二醇的降解特性

吴蔓莉, 祝长成, 祁燕云, 时艺馨, 徐会宁, 杨瑾如

(西安建筑科技大学, 西北水资源与环境生态教育部重点实验室, 陕西省环境工程重点实验室, 西安 710055)

摘要: 以西安市某污水处理厂 A²/O 工艺的好氧池活性污泥为雌二醇降解菌菌源, 以 MYE 为筛选培养基, 利用富集培养和平板划线分离法筛选出 1 株可以利用 17 β -雌二醇 (E2) 为唯一碳源和能源进行生长代谢的菌株 Wu-SP1。该菌株经鉴定为镰刀菌属 (*Fusarium* sp.), 菌株的序列号为 KY123915, 该菌株降解 E2 的最适温度为 30℃, 最适 pH 值为 6, 在弱酸性范围内 (pH 4~6), 菌株对 E2 呈现较好的降解活性。在最佳温度和 pH 条件下对浓度为 2 mg·L⁻¹ 的雌二醇 48 h 降解率可达 92.5%。对浓度为 10、100、500 mg·L⁻¹ 雌二醇的降解过程符合一级动力学反应。利用紫外光谱法对代谢中间产物进行测定发现, 与雌二醇单体相比, 代谢产物的最大吸收峰强度减弱, 并在 230nm 和 350nm 处出现了较大吸收峰。中间产物可能为雌酮 (E1)。

关键词: 17 β -雌二醇; 降解菌; 镰刀菌属; 系统发育分析; 降解特性

中图分类号: X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)10-4802-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.201711077

Isolation, Identification and Degradation Characteristics of a 17 β -estradiol Degrading Strain *Fusarium* sp. KY123915

WU Man-li, ZHU Chang-cheng, QI Yan-yun, SHI Yi-xin, XU Hui-ning, YANG Jin-ru

(Key Laboratory of Environmental Engineering, Shaanxi Province, Key Laboratory of Northwest Water Resources, Environment and Ecology, Ministry of Education, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: A 17 β -estradiol (E2) degrading strain (designated as Wu-SP1) was isolated from the activated sludge collected from a wastewater treatment plant (WWTP) in Xi'an. The strain was identified as *Fusarium* sp. according to 18S rDNA sequence and phylogenetic analysis. The optimal pH and temperature for E2 degradation were 6 and 30℃, respectively. Under these conditions, the E2 biodegradation rate of 2 mg·L⁻¹ E2 amounted to 92.5% within 48 h by this strain. The kinetics of E2 degradation by the strain KY123915 were in good accord with the first-order equation, with the concentration ranged from 10 to 500 mg·L⁻¹. UV spectrum analysis showed the strength of maximum absorption of metabolites became weak compared to E2, indicating that E2 may be degraded via estrone (E1) by *Fusarium* sp. KY123915.

Key words: 17 β -Estradiol; degrading bacteria; *Fusarium* sp.; phylogenetic analysis; degradation characteristics

环境内分泌干扰物 (endocrine disrupting compounds, EDCs) 是对人体或动物体的生殖、神经、免疫系统产生影响并具有致癌作用的一类外源性化学物质。近年来, 由于雌激素类药物在日常生活和养殖业中的大量使用, 使得排放到环境中的内分泌干扰物日益增多。目前, 在许多水域及污水处理厂均已发现环境内分泌干扰物质的存在, 这些内分泌干扰物质对水域周围食物链系统内的动物产生不同程度的影响^[1,2]。

17 β -雌二醇 (17 β -Estradiol, E2) 是一种典型的类固醇类内分泌干扰物。在 ng·L⁻¹ 浓度水平下即可对水生生物的内分泌系统造成干扰^[3]。污水处理厂进、出水中常含有该类物质^[4~7]。利用普通的水处理技术很难将水体中的雌激素彻底去除^[8~10]。

微生物降解被认为是去除环境中类固醇激素的主要途径。目前文献报道的可降解类固醇激素的降

解菌属主要包括红球菌 (*Rhodococcus* sp.)、枯草芽孢杆菌 (*Bacillus subtilis*)、香茅醇假单胞菌 (*Pseudomonas citronellolis*)、鞘氨醇杆菌 (*Sphingobacterium* sp.)、欧洲亚硝化单胞菌 (*Nitrosomonas europaea*)、黄杆菌 (*Flavobacterium* sp.)、诺卡氏菌 (*Nocardia* sp.)、铜绿假单胞菌 (*Pseudomonas aeruginosa*) 等细菌^[11~21]。

与细菌相比, 真菌具有较强的环境适应能力和抗毒性, 对于降解存在于环境中的雌激素具有一定的优势^[22]。Křesinová 等^[23] 对 1 株可降解雌二醇的糙皮侧耳菌 (*Pleurotus ostreatus*) 进行了详细报道,

收稿日期: 2017-11-08; 修订日期: 2018-03-28

基金项目: 国家自然科学基金项目 (21577109); 陕西省自然科学基金基础研究基金项目 (2015JM5163)

作者简介: 吴蔓莉 (1974~), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为环境陌生性有机污染物的生物降解和污染土壤的生物修复技术, E-mail: 447005853@qq.com

Eibes 等^[24]报道了 1 株木质素烟管菌 (*Bjerkandera adusta*) 对包括雌二醇等雌激素在内的多种药物的氧化降解情况. Wang 等^[25]对白腐真菌 (*White-rot fungus*) 降解 5 种典型雌激素的情况进行了详细研究. 但总体而言, 目前有关真菌降解雌二醇的研究工作文献报道相对较少.

本研究以某污水处理厂 A²/O 工艺的好氧池活性污泥作为雌二醇降解菌的优良菌源, 以 MYE 培养基作为真菌筛选培养基, 利用平板划线分离法获得 1 株可降解雌二醇的镰刀菌属. 利用高效液相色谱分析和紫外光谱法对菌株降解雌二醇的降解特性进行了研究, 结果对于水环境中内分泌干扰物的有效去除和彻底净化具有重要的理论和现实意义.

1 材料与方法

1.1 实验材料

17 β -雌二醇 (E2, 纯度 99.8%), 购自 Sigma-Aldrich 公司; 乙酸乙酯 (纯度 99.9%), 购自德国 Merck 公司; 实验中所用甲醇和乙腈均为色谱级别; 超纯水, Pure-Lab Option R7 + Ultra Genetic (英国 ELGA 公司).

活性污泥: 取自西安市某污水处理厂 A²/O 工艺的好氧池, 样品取回后置于 4℃ 冰箱中保存, 尽快进行后续操作.

MYE 筛选培养基: 麦芽浸粉 20 g·L⁻¹, 酵母膏 2.0 g·L⁻¹, 氯霉素 0.1 g·L⁻¹, 超纯水配制. 120℃ 高压灭菌 30 min.

MYEA 固体培养基: 麦芽浸粉 20 g·L⁻¹, 酵母膏 2.0 g·L⁻¹, 氯霉素 0.1 g·L⁻¹, 琼脂 20 g·L⁻¹, 超纯水配制. 120℃ 高压灭菌 30 min.

1.2 实验方法

1.2.1 降解菌的富集、筛选与鉴定

移取 5.0 mL 浓度为 100 mg·L⁻¹ 的 E2 甲醇溶液, 加入到 100 mL 灭菌的 MYE 筛选培养基中, 振荡 30 min 使甲醇挥发, 在无菌操作台上加入 10 mL 活性污泥进行接种, 于 150 r·min⁻¹、30℃ 条件下恒温水浴振荡培养 3 d, 吸取 2 mL 培养液转接到含 5 mg·L⁻¹ E2 的 50 mL MYE 培养基中, 相同条件下继续振荡培养 3 d, 如此重复转接 6 次. 驯化结束后, 在 MYEA 平板上进行多次划线分离, 获得 1 株可以利用 E2 为单一碳源进行生长的单菌落, 命名为 Wu-SP1. 将获得的菌落接种于 MYEA 培养基斜面上, 置于 4℃ 冰箱保存.

提取并纯化降解菌 Wu-SP1 的 DNA, 利用真菌

通用引物 NS1 (GTAGTCATATGCTTGTCTC) 和 FUNG (ATTCCCCGTTACCCGTTG)^[26] 对真菌基因组 DNA 进行全序列 PCR 扩增. 将扩增产物送生工生物工程股份有限公司 (Sangon Biotech, 上海) 进行基因测序, 序列信息输入 NCBI (National Center for Biotechnology Information, <http://blast.ncbi.nlm.nih.gov/Blast.cgi>) 数据库进行 BLAST 比对. 利用 MEGA5 软件采用邻接法 (Neighbour Joining, NJ) 构建系统发育树.

1.2.2 菌株的生长曲线

向 100 mL 灭菌的 MYE 培养基中接种保存的菌株 Wu-SP1, 在 30℃、150 r·min⁻¹ 条件下振荡培养 5 d, 每隔一定时间, 以 MYE 空白为参比, 在 600 nm 波长下测定体系的光密度值.

1.2.3 菌悬液的制备

在无菌操作台上用接种环挑取斜面上保存的 E2 降解菌 Wu-SP1, 接种在 100 mL MYE 培养基中, 于 150 r·min⁻¹、30℃ 的条件下振荡培养 48 h. 将培养好的菌液用 8 层纱布 (使用前灭菌) 过滤, 弃去滤液, 用少量无菌水洗涤截留在纱布上的菌体, 并收集在小烧杯中, 用 PBS 缓冲液进行稀释, 调节菌悬液的光密度值为 1.0 (波长 600 nm 处进行测定, 相当于 2.4×10^7 CFU·mL⁻¹ 菌落数).

1.2.4 17 β -雌二醇 (E2) 的测定

利用 LC-2000 型高效液相色谱仪 (JASCO 公司) 对 17 β -雌二醇进行测定. 检测器: MD-2010 型二极管紫外阵列检测器 (PDA); 色谱柱: Agilent 5 TC-C18 (250 mm × 4.6 mm, 5 μ m); 流动相: 乙腈/水 = 60/40, 流速: 1 mL·min⁻¹; 进样体积: 100 μ L; 柱温: 室温; 测定波长: 282 nm.

1.2.5 温度、pH 值对菌株降解 E2 的影响

温度的影响: 取系列锥形瓶, 分别加入 50.0 mL PBS 缓冲溶液、100 mg·L⁻¹ 的 E2 甲醇标准溶液 1.0 mL, 振荡 30 min 使甲醇挥发 (此时体系中 E2 浓度为 2 mg·L⁻¹), 加入 $D_{600} = 1.0$ 的 Wu-SP1 菌悬液 1 mL, 分别在 4、25、30、40、50℃ 的条件下进行 24 h 的降解实验, 利用甲醇作为萃取剂进行萃取, 利用高效液相色谱法测定体系中的 E2 浓度.

pH 值对降解效果的影响: 取系列锥形瓶, 分别加入 50.0 mL PBS 缓冲溶液, 1.0 mL 浓度为 100 mg·L⁻¹ 的 E2 标准溶液液、1 mL 菌悬液 ($D_{600} = 1.0$), 调节锥形瓶中各体系的 pH 值分别为 4、5、6、7、8、9、11, 在 30℃ 条件下进行 48 h 降解实验, 提取并测定体系中的 E2 浓度.

1.2.6 菌株对 E2 的降解动力学

准备系列锥形瓶, 分成 3 组, 每组中 E2 浓度分别为 10、100、500 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 每瓶中分别加入 E2 降解菌 $4.8 \times 10^6 \text{ CFU} \cdot \text{mL}^{-1}$ (加入 0.2 mL $D_{600} = 1.0$ 的菌悬液). 在最适 pH 值和温度条件下进行连续 7 d 的降解实验, 每天取各组中的一瓶测定 E2 的浓度, 以不加菌的体系作为空白对照, 每个实验 3 个平行.

采用一级反应动力学公式[式(1)]对测定结果进行拟合.

$$\ln c_t = -kt + \ln c_0 \quad (1)$$

式中, c_0 : 体系中 E2 的初始溶液, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; c_t : t 时刻体系中 E2 的浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; k : E2 降解速率常数, h^{-1} ; t : 降解时间, h.

1.2.7 雌二醇降解产物的紫外光谱分析

向锥形瓶中加入 50 mL PBS, 加入 E2 使其在体系中的浓度为 50.0 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 加入 $4.8 \times 10^6 \text{ CFU} \cdot \text{mL}^{-1}$ 降解菌, 在最佳温度和 pH 条件下进行降解, 以不加降解菌的体系作为对照. 分别在降解 3、5、7 d 时取样, 用 5 mL 乙酸乙酯进行萃取, 以乙酸乙酯为参比溶液, 利用紫外光谱仪(UV-3100PC)在 200 ~ 800 nm 范围内对萃取液进行扫描得到降解体系的紫外光谱图.

2 结果与讨论

2.1 降解菌 Wu-SP1 的生长特性及鉴定结果

以污水处理厂好氧池活性污泥为菌源, 以

MYE 为分离筛选培养基, 经过多次富集培养和平板划线分离, 获得了 1 株能以 E2 为唯一碳源生长的真菌. 该菌落在固体平板培养基上呈圆形, 表面低凸, 边缘完整, 湿润, 有光泽, 呈橙色并带有白色菌丝(图 1).

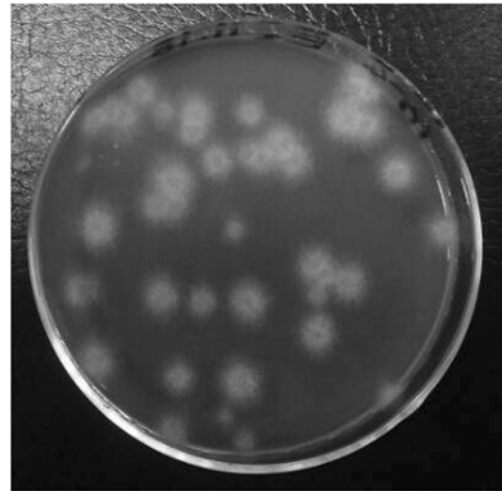


图 1 E2 降解菌 Wu-SP1 的培养特征

Fig. 1 Culture characteristics of E2 degrading bacteria

对菌株 Wu-SP1 申请的序列号为 KY123915. Blast 结果显示该菌株的 18S rDNA 基因序列与 NCBI 数据库中的许多镰刀菌属(*Fusarium* sp.) 基因序列同源性为 100%. 结合菌株的形态以及构建的系统发育树(图 2), 将菌株 Wu-SP1 鉴定为镰刀菌属.

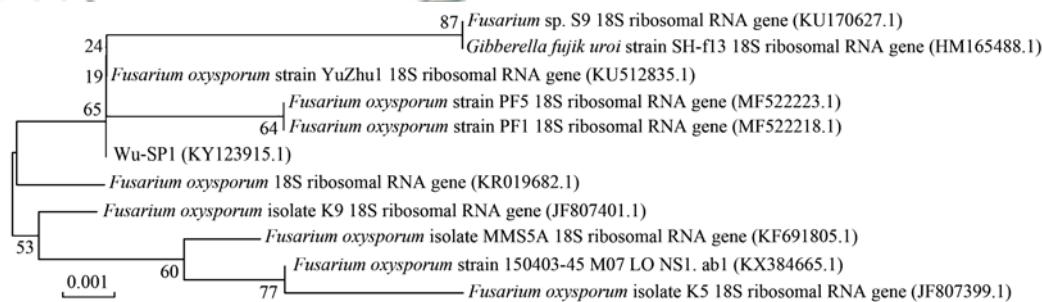


图 2 E2 降解菌 Wu-SP1 系统发育树的构建

Fig. 2 Phylogenetic tree of E2 degrading bacteria

镰刀菌属是自然界中广泛存在的一种真菌, 环境适应性强. 有研究报道了利用镰刀菌属降解苯酚、三氯苯酚、原油等的相关研究工作^[27~31], Shi 等^[32]对 1 株可降解雌激素的镰刀菌属进行了详细研究. 但总体而言, 利用镰刀菌属降解雌激素的研究工作目前报道相对少.

镰刀菌属 Wu-SP1 的生长曲线如图 3 所示. 在 120 h 内, 菌株在 MYE 培养基中的生长经历了 3 个

时期: 在 0 ~ 22 h 为生长延滞期, 该阶段菌株生长缓慢; 22 ~ 60 h 为对数生长期, 降解菌在该阶段内迅速生长繁殖; 60 ~ 120 h 内降解菌的生长处于稳定平衡期, 这一阶段真菌在 MYE 培养基中繁殖速度减缓, 菌数趋于稳定.

2.2 温度、pH 对菌株降解 E2 的影响作用

温度、pH 对菌株降解 E2 的影响作用如图 4 所示. 当体系温度为 30 $^{\circ}\text{C}$ 时, 菌株 Wu-SP1 对雌二醇

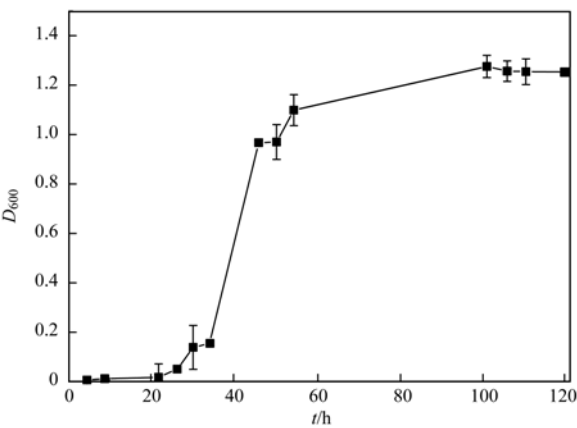


图3 E2 降解菌的生长曲线
Fig. 3 Growth curve of E2 degrading bacteria

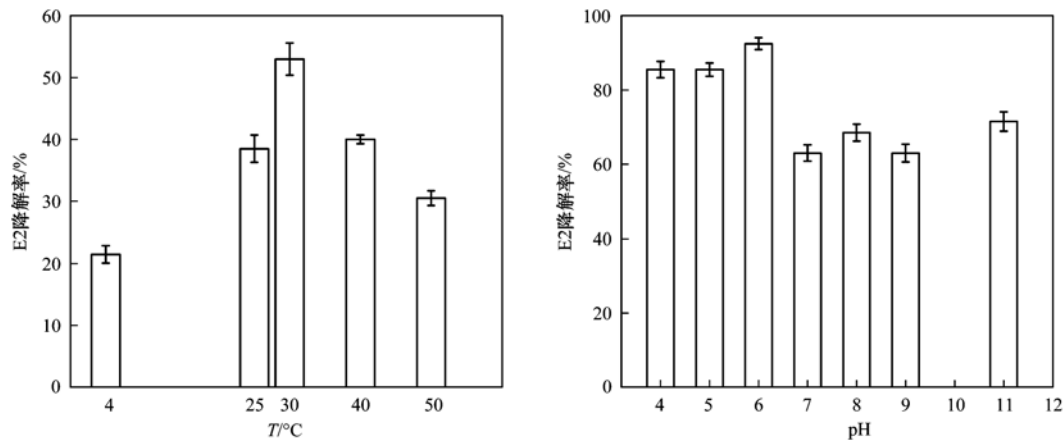


图4 温度和 pH 对菌株 Wu-SP1 降解 E2 的影响
Fig. 4 Effects of temperature and pH on the degradation of E2 by strain Wu-SP1

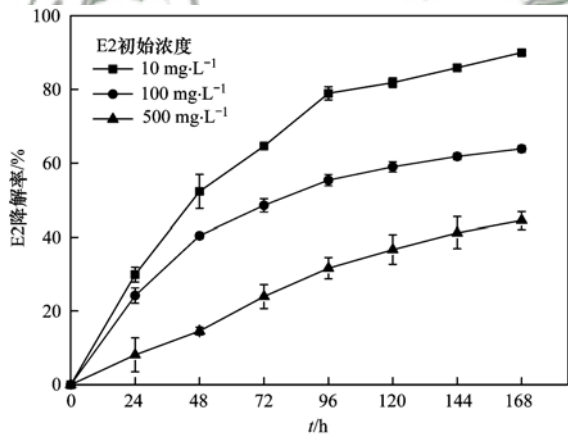


图5 菌株 Wu-SP1 对不同浓度 E2 的降解效果
Fig. 5 Degradation rates of different concentration of E2 by strain Wu-SP1

表 1 为不同浓度 E2 的降解动力学参数. 从中可知, 镰刀菌属 Wu-SP1 对 10、100、500 mg·L⁻¹ E2 的降解速率常数分别为 0.013 64、0.005 89、0.003 61 h⁻¹. 在菌量一定时, 雌二醇的降解

的降解活性最好, 降解 24 h 时 E2 降解率为 53%. pH 值为 6 时, Wu-SP1 对 E2 的降解效果最好. 降解 48 h 的 E2 去除率可达到 92.5%. 并在弱酸性范围内 (pH 4~6), 菌株对 E2 呈现较好的降解活性.

2.3 降解动力学分析

固定体系中菌量为 4.8 × 10⁶ CFU·mL⁻¹, 对浓度分别为 10、100、500 mg·L⁻¹ 的 E2 进行连续 7 d 的降解实验, 结果如图 5 所示. 当 E2 初始浓度分别为 500、100、10 mg·L⁻¹ 时, E2 的 7 d 降解率分别为 38.5%、59.2%、86.1%. 对不同初始浓度 E2 进行一级动力学模型拟合, 所得的相关系数值 (R²) 均大于 0.9, 说明菌株 Wu-SP1 对 10~500 mg·L⁻¹ E2 的降解符合一级动力学反应 (图 6).

表 1 不同 E2 浓度的降解动力学参数

Table 1 Degradation rate constants for different concentrations of E2			
E2 浓度 /mg·L ⁻¹	投菌量 /CFU·mL ⁻¹	降解速率常数 /h ⁻¹	R ²
10	4.8 × 10 ⁶	0.013 64	0.982 23
100	4.8 × 10 ⁶	0.005 89	0.912 48
500	4.8 × 10 ⁶	0.003 61	0.992 35

速率随初始浓度的增大而减小.

相关研究报道的一些微生物降解雌激素的速率常数如表 2 所示. 史江红等的系列研究中, 获得的 1 株层生镰刀菌属 (*Fusarium proliferatum*)^[32] 对初始浓度为 25 mg·L⁻¹ 的 EE2 降解速率常数为 0.025 h⁻¹; 1 株氢氧化细菌 (*Nitrosomonas europaea*)^[33] 对 0.4 mg·L⁻¹ E2 降解速率常数为 0.002 0 h⁻¹; 1 株香茅假单胞菌 (*Pseudomonas citronellolis*)^[15] 对 4.0 mg·L⁻¹ E2 降解速率常数为 0.221 h⁻¹. 胡碧波等^[34] 利用 1 株包埋硝化菌对水中的 17β-雌二醇进

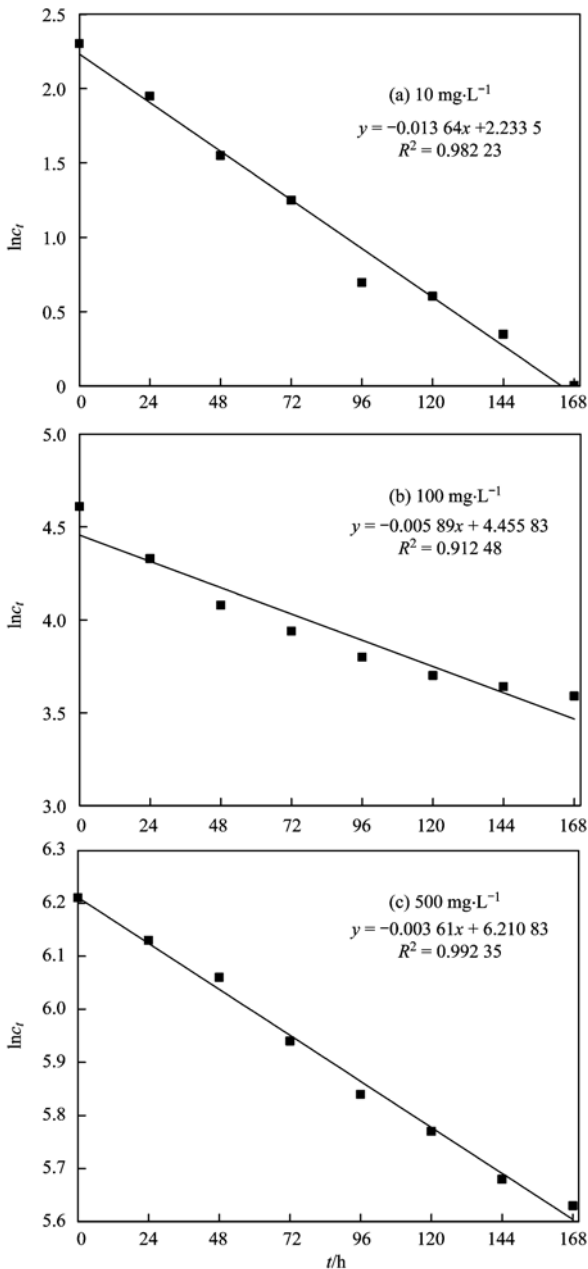


图 6 降解菌对不同浓度 E2 的降解动力学分析
Fig. 6 Degradation kinetics of different concentrations of E2 by strain Wu-SP1

行降解研究时发现,在 E2 初始浓度为 880.0 ng·L⁻¹时,包埋硝化菌(nitrifying bacteria)投加体积比为 5% 的条件下,E2 的生物降解反应速率常数为 0.11 h⁻¹.

本研究中,分离筛选出的镰刀菌属降解菌 Wu-SP1 对雌二醇的降解过程符合一级动力学,与多数已有报道相符,而且对浓度很大的雌二醇(500 mg·L⁻¹)仍然具有较好的降解活性.

2.4 中间产物的紫外扫描谱图分析

以乙酸乙酯为溶剂,对降解不同时间的 E2 中间产物紫外谱图进行扫描,结果如图 7 所示.在 278~281 nm 处出现的最大吸收峰是由 E2 单体产生的.随着降解时间的增加,最大吸收峰强度减弱,说明 E2 被逐渐降解.与 E2 单体的紫外谱图相比,在降解 3、5、7d 的中间产物谱图中,代谢产物在 230 nm 和 350 nm 处出现了较大吸收峰.根据文献[17],不饱和醛酮的 K 带一般出现在 230 nm 处.因此,降解中间产物中可能有醛类物质或酮类物质存在.

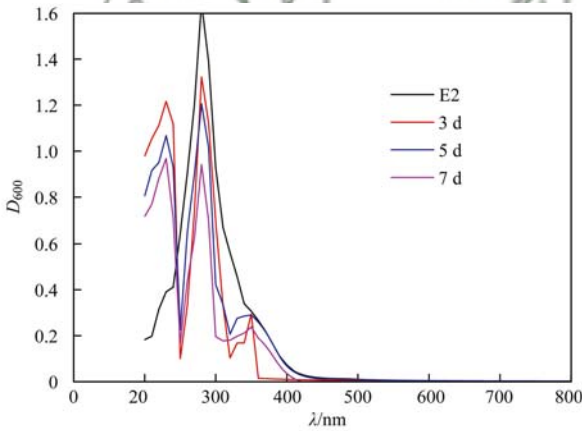


图 7 不同降解时间内 E2 降解的中间产物紫外扫描谱图
Fig. 7 Ultraviolet spectra of intermediates at different times

表 2 文献报道的不同菌属对雌激素降解的速率常数及浓度

Table 2 Degradation rate constants of EDCs by different degrading bacteria reported in the literature

菌株名称	菌株分类	初始浓度	降解速率常数/h ⁻¹	文献
包埋硝化菌	<i>Nitrifying bacteria</i>	880.0 ng·L ⁻¹	0.11	[30]
HNS-1	<i>Fusarium proliferatum</i>	25.0 mg·L ⁻¹	0.025	[28]
ammonia-oxidizing bacterium	<i>Nitrosomona seuropaea</i>	0.4 mg·L ⁻¹	0.002 0	[29]
SS-2	<i>Pseudomonas citronellolis</i>	4.0 mg·L ⁻¹	0.221	[15]

3 结论

从西安市某污水处理厂A²/O工艺的好氧池活性污泥中分离筛选出 1 株可降解雌二醇的镰刀菌属

KY123915. 该菌株降解雌二醇的最适温度为 30℃,最佳 pH 值为 6,在此条件下菌株对 2 mg·L⁻¹雌二醇的 48 h 降解率可达 92.5%. 当菌量为 4×10⁶ CFU·mL⁻¹时,对初始浓度为 10、100、500 mg·L⁻¹

的雌二醇降解 7 d 时的降解率分别为 86.1%、59.2%、38.5%，降解率随底物浓度的增大而减小，降解过程符合一级动力学反应。对 10 mg·L⁻¹雌二醇的降解速率常数可达 0.013 64 h⁻¹，并对高浓度雌二醇(500 mg·L⁻¹)仍具有较好的降解活性。

参考文献:

- [1] McCarty P L, Reinhard M, Rittmann B E. Trace organics in groundwater[J]. Environmental Science & Technology, 1981, 15(1): 40-51.
- [2] Chang H S, Choo K H, Lee B, et al. The methods of identification, analysis, and removal of endocrine disrupting compounds (EDCs) in water [J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 172(1): 1-12.
- [3] Ternes T A, Stumpf M, Mueller J, et al. Behavior and occurrence of estrogens in municipal sewage treatment plants—I. investigations in Germany, Canada and Brazil[J]. Science of the Total Environment, 1999, 225(1-2): 81-90.
- [4] 吴蔓莉, 时艺馨, 李炜, 等. 高效液相色谱-二极管紫外阵列/荧光串联测定雌激素的方法及污水处理厂对雌激素的去除特性[J]. 环境工程学报, 2017, 11(4): 2614-2620.
- Wu M L, Shi Y X, Li W, et al. High performance liquid chromatography coupling with photo-diode array and fluorescence detector for sensitive analysis of environmental endocrine disruptors (EDCs) in wastewater [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2017, 11(4): 2614-2620.
- [5] 王凌云, 张锡辉, 陶益. 城市污水处理厂内分泌干扰物浓度分布和去除规律[J]. 环境科学学报, 2012, 32(11): 2741-2747.
- Wang L Y, Zhang X H, Tao Y. Occurrence and removal of typical endocrine disrupting chemicals in sewage treatment plants [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2012, 32(11): 2741-2747.
- [6] 周海东, 王晓琳, 高密军, 等. 北京污水厂进、出水中内分泌干扰物的分布[J]. 中国给水排水, 2009, 25(23): 75-78.
- Zhou H D, Wang X L, Gao M J, et al. Distribution of endocrine disrupting compounds in wastewater treatment plants of Beijing [J]. China Water & Wastewater, 2009, 25(23): 75-78.
- [7] Fernandez M P, Buchanan I D, Ikononou M G. Seasonal variability of the reduction in estrogenic activity at a municipal WWTP[J]. Water Research, 2008, 42(12): 3075-3081.
- [8] Komesli O T, Muz M, Ak M S, et al. Occurrence, fate and removal of endocrine disrupting compounds (EDCs) in Turkish wastewater treatment plants[J]. Chemical Engineering Journal, 2015, 277: 202-208.
- [9] Liu Z H, Kanjo Y, Mizutani S. Removal mechanisms for endocrine disrupting compounds (EDCs) in wastewater treatment—physical means, biodegradation, and chemical advanced oxidation: a review [J]. Science of the Total Environment, 2009, 407(2): 731-748.
- [10] Qiang Z M, Dong H Y, Zhu B, et al. A comparison of various rural wastewater treatment processes for the removal of endocrine-disrupting chemicals (EDCs) [J]. Chemosphere, 2013, 92(8): 986-992.
- [11] 于清森, 王平, 刘东波, 等. 17 β -雌二醇降解菌红球菌 (*Rhodococcus* sp.) DS201 的分离鉴定及其特性研究[J]. 东
- 北师大学报(自然科学版), 2017, 49(1): 140-147.
- Yu Q M, Wang P, Liu D B, et al. Isolation, identification of 17 β -estradiol-degrading *Rhodococcus* sp. strain DS201 and its degradation characteristics [J]. Journal of Northeast Normal University (Natural Science Edition), 2017, 49(1): 140-147.
- [12] 马聪, 秦丹, 孙倩, 等. 耐盐类固醇激素降解菌交替赤杆菌 MH-B5 的降解特性、降解途径及其固定化[J]. 环境科学, 2015, 36(12): 4651-4658.
- Ma C, Qin D, Sun Q, et al. Degradation of steroidal hormones by salt-tolerant *altererythrobacter* strain MH-B5: degradation characteristics, metabolites and its immobilization [J]. Environmental Science, 2015, 36(12): 4651-4658.
- [13] 方会, 陈梅雪, 秦德韬, 等. 集约化养猪废水 SBR 中 17 β -雌二醇高效降解菌的分离鉴定及其降解特性[J]. 环境工程学报, 2012, 6(10): 3361-3366.
- Fang H, Chen M X, Qin D T, et al. Isolation and identification of 17 β -estradiol-degrading strains from SBR for swine wastewater and their degradation characteristics [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2012, 6(10): 3361-3366.
- [14] 杨俊, 姜理英, 陈建孟. 1 株 17 β -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.
- Yang J, Jiang L Y, Chen J M. Isolation, identification of 17 β -estradiol (E2)-degrading strain and its degradation characteristics [J]. Environmental Science, 2010, 31(5): 1313-1319.
- [15] 史江红, 韩蕊, 宿凌燕, 等. 某污水处理厂中 17 α -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.
- Shi J H, Han R, Su L Y, et al. Isolation and identification of a 17 α -ethynylestradiol-degrading strain from a wastewater treatment plant and its degradation characteristics [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2010, 30(12): 2414-2419.
- [16] 任海燕, 纪淑兰, 崔成武, 等. 鞘氨醇杆菌 (*Sphingobacterium* sp.) JCR5 降解 17 α -乙炔基雌二醇的代谢途径[J]. 环境科学, 2006, 27(9): 1835-1840.
- Ren H Y, Ji S L, Cui C W, et al. Degradation pathway of 17 α -ethynylestradiol by *Sphingobacterium* sp. JCR5 [J]. Environmental Science, 2006, 27(9): 1835-1840.
- [17] Nakai S, Yamamura A, Tanaka S, et al. Pathway of 17 β -estradiol degradation by *Nitrosomonas europaea* and reduction in 17 β -estradiol-derived estrogenic activity [J]. Environmental Chemistry Letters, 2011, 9(1): 1-6.
- [18] Yu C P, Roh H, Chu K H. 17 β -estradiol-degrading bacteria isolated from activated sludge [J]. Environmental Science & Technology, 2007, 41(2): 486-92.
- [19] Zeng Q L, Li Y M, Gu G W, et al. Sorption and biodegradation of 17 β -estradiol by acclimated aerobic activated sludge and isolation of the bacterial strain [J]. Environmental Engineering Science, 2009, 26(4): 783-790.
- [20] 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.
- [21] Fujii K, Kikuchi S, Satomi M, et al. Degradation of 17 β -estradiol by a gram-negative bacterium isolated from activated sludge in a sewage treatment plant in Tokyo, Japan [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2002, 68(4): 2057-2060.

- [22] Combalbert S, Hernandez-Raquet G. Occurrence, fate, and biodegradation of estrogens in sewage and manure[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2010, **86**(6): 1671-1692.
- [23] Křesinová Z, Linhartová L, Filipová A, *et al.* Biodegradation of endocrine disruptors in urban wastewater using *Pleurotus ostreatus* bioreactor[J]. New Biotechnology, 2018, **43**: 53-61.
- [24] Eibes G, Debernardi G, Feijoo G, *et al.* Oxidation of pharmaceutically active compounds by a ligninolytic fungal peroxidase[J]. Biodegradation, 2011, **22**(3): 539-550.
- [25] Wang J Q, Majima N, Hirai H, *et al.* Effective removal of endocrine-disrupting compounds by lignin peroxidase from the white-rot fungus *Phanerochaete sordida* YK-624 [J]. Current Microbiology, 2012, **64**(3): 300-303.
- [26] Deng Y Q, Zhang Y, Gao Y X, *et al.* Microbial community compositional analysis for series reactors treating high level antibiotic wastewater[J]. Environmental Science & Technology, 2012, **46**(2): 795-801.
- [27] Cai W J, Li J W, Zhang Z. The characteristics and mechanisms of phenol biodegradation by *Fusarium* sp [J]. Journal of Hazardous Materials, 2007, **48**(1-2): 38-42.
- [28] 朱凌, 李济吾. 镰刀菌 HJ01 对对氯苯酚的降解特性[J]. 化工环保, 2009, **29**(5): 402-405.
- Zhu L, Li J W. Degradation characteristics of *Fusarium* sp. HJ01 on 4-chlorophenol [J]. Environmental Protection of Chemical Industry, 2009, **29**(5): 402-405.
- [29] 李济吾, 蔡伟建. CMC-膨润土交联固定镰刀菌反应器对对氯苯酚废水的降解特性[J]. 环境科学学报, 2011, **31**(6): 1248-1253.
- Li J W, Cai W J. 4-Chlorophenol removal in a bioreactor using CMC-bentonite gel immobilized *Fusarium* sp[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2011, **31**(6): 1248-1253.
- [30] 蔡伟建, 潘俊雅, 李济吾. 镰刀菌(*Fusarium* sp.)对2, 4, 6-三氯苯酚的降解特性及其机制[J]. 环境科学学报, 2016, **36**(9): 3187-3192.
- Cai W J, Pan J Y, Li J W. Biodegradation characteristics and mechanism of 2, 4, 6-trichlorophenol by *Fusarium* sp. in solution [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, **36**(9): 3187-3192.
- [31] Hidayat A, Tachibana S. Crude oil and n-octadecane degradation under saline conditions by *Fusarium* sp., F092 [J]. Journal of Environmental Science and Technology, 2013, **6**(1): 29-40.
- [32] Shi J H, Suzuki Y, Lee B D, *et al.* Isolation and characterization of the ethynylestradiol-biodegrading microorganism *Fusarium proliferatum* strain HNS-1 [J]. Water Science and Technology, 2002, **45**(12): 175-179.
- [33] Shi J H, Fujisawa S, Nakai S, *et al.* Biodegradation of natural and synthetic estrogens by nitrifying activated sludge and ammonia-oxidizing bacterium *Nitrosomonas europaea* [J]. Water Research, 2004, **38**(9): 2322-2329.
- [34] 胡碧波, 阳春, 张伟, 等. 包埋硝化菌颗粒对17 β -雌二醇的去除特性研究[J]. 中国给水排水, 2015, **31**(15): 89-92.
- Hu B B, Yang C, Zhang W, *et al.* Removal of 17 β -estradiol by embedded nitrobacteria pellets [J]. China Water & Wastewater, 2015, **31**(15): 89-92.

CONTENTS

Ratios of Volatile Organic Compounds in Ambient Air of Various Cities of China	WANG Ming, CHEN Wen-tai, LU Si-hua, <i>et al.</i> (4393)
Temporal Variation, Spatial Distribution, and Reactivity Characteristics of Air VOCs in Beijing 2015	ZHANG Bo-tao, AN Xin-xin, WANG Qin, <i>et al.</i> (4400)
Research and Application of the Technical Method for the Compilation of VOCs Emission Inventories from Architectural Coatings in Beijing	DENG Zi-yu, GAO Mei-ping, WANG Qing-wei, <i>et al.</i> (4408)
Content Levels and Compositions Characteristics of Volatile Organic Compounds(VOCs) Emission from Architectural Coatings Based on Actual Measurement	GAO Mei-ping, DENG Zi-yu, NIE Lei, <i>et al.</i> (4414)
Characteristics of Primary Pollutants of Air Quality in Cities Along the Taihang Mountains in Beijing-Tianjin-Hebei Region During 2014-2016	WANG Xiao-yan, WANG Shuai, ZHU Li-li, <i>et al.</i> (4422)
Seasonal Variation and Source Analysis for PM _{2.5} , PM ₁ and Their Carbonaceous Components in Beijing	FAN Xiao-chen, LANG Jian-lei, CHENG Shui-yuan, <i>et al.</i> (4430)
Chemical Constitution and Carbon Isotopic Compositions of PM _{2.5} in the Northern Suburb of Nanjing in Spring	ZHOU Yi-ming, HAN Xun, WANG Jin-jin, <i>et al.</i> (4439)
Analysis of Non-polar Organic Compounds in PM _{2.5} by Rapid Thermo-desorption Method Coupled with GC/MS	MA Ying-ge, WU Xia, PENG Meng-meng, <i>et al.</i> (4446)
Association Between Fine Particulate Matter and Asthma Hospital Outpatient Visits in Hangzhou	WANG An-xu, CHEN Xi, SONG Cong-bo, <i>et al.</i> (4457)
Hybrid Electric Bus SCR System Operation and NO _x Emission Characteristics Based on Remote Communication Technology	YANG Qiang, HU Qing-yao, HUANG Cheng, <i>et al.</i> (4463)
Selection of Priority Contaminants in a Watershed Using Risk Ranking Methodology	LI Qi-feng, LÜ Yong-long, WANG Pei, <i>et al.</i> (4472)
Characteristics and Sources of Atmospheric Inorganic Nitrogen Wet Deposition in Xueyu Cave Watershed, Outer Suburbs of Chongqing City	DUAN Shi-hui, JIANG Yong-jun, ZHANG Yuan-zhu, <i>et al.</i> (4479)
Characteristics of Nitrogen Deposition in Heilongjiang Liangshui National Nature Reserve	SONG Lei, TIAN Peng, ZHANG Jin-bo, <i>et al.</i> (4490)
Key Production Process of Nitrous Oxide and Nitrogen Sources in Tuojia River	ZHAO Qiang, LÜ Cheng-wen, QIN Xiao-bo, <i>et al.</i> (4497)
Impact of Biochar on Nitrogen Removal and Nitrous Oxide Emission in Aerated Vertical Flow Constructed Wetland	WANG Ning, HUANG Lei, LUO Xing, <i>et al.</i> (4505)
Physiological Responses of Ryegrass in Cadmium-Nonylphenol Co-contaminated Water and the Phytoremediation Effects	SHI Guang-yu, LI Zhong-yi, ZHANG Lu, <i>et al.</i> (4512)
Analysis of Absorption Characteristics of Urban Black-odor Water	DING Xiao-lei, LI Yun-mei, LÜ Heng, <i>et al.</i> (4519)
Seasonal Variations of DOM Spectral Characteristics in the Surface Water of the Upstream Minjiang River	FAN Shi-yu, QIN Ji-hong, LIU Yan-yang, <i>et al.</i> (4530)
Water Quality and Three-Dimensional Fluorescence of Stormwater Runoff from Lined Bioretention Field Cells	LIN Xiu-yong, WANG Shu-min, LI Qiang, <i>et al.</i> (4539)
Nitrate-Nitrogen Pollution Sources of an Underground River in Karst Agricultural Area Using ¹⁵ N and ¹⁸ O Isotope Technique	SHENG Ting, YANG Ping-heng, XIE Guo-wen, <i>et al.</i> (4547)
Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter in Landfill Groundwater	PENG Li, YU Min-da, HE Xiao-song, <i>et al.</i> (4556)
Adsorption Behavior of Phosphate from Water on Zirconium-loaded Granular Zeolite-amended Sediment	LIANG Shu-jing, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (4565)
Control of Coagulant Dosing for Humic Substances Based on Ultraviolet Spectrum Analysis	ZHANG Bei-chen, ZHANG Xiao-lei, QIN Lan-lan, <i>et al.</i> (4576)
Reduction of Wastewater Organic Micro-pollutants and Genotoxicity in a Hybrid Process Involving Anaerobic-anoxic-oxic and Ozonation Treatments	LI Mo, WANG Zhen-zhe, CHEN Zhi-qiang, <i>et al.</i> (4584)
Distribution and Removal of Antibiotic Resistance Genes in Two Sequential Wastewater Treatment Plants	LI Ao-lin, CHEN Li-jun, ZHANG Yan, <i>et al.</i> (4593)
Effect of Magnetic Chitosan Hydrogel Beads with Immobilized Feamox Bacteria on the Removal of Ammonium from Wastewater	LIU Zhi-wen, CHEN Chen, PENG Xiao-chun, <i>et al.</i> (4601)
Enhanced Nitrogen and Carbon Removal Performance of Simultaneous ANAMMOX and Denitrification (SAD) with Trehalose Addition Treating Saline Wastewater	YANG Zhen-lin, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (4612)
Characteristics of Denitrifying Phosphorus Removal by A ² /O-BAF at Low Temperatures	HUANG Jian-ming, ZHAO Zhi-chao, ZHENG Long-ju, <i>et al.</i> (4621)
Characteristics of Advanced Treatment of Treated Petrochemical Water by O ₃ -BAC and Analysis of Consortium Structure	ZHANG Chao, SHAN Ming-hao, XU Dan-ning, <i>et al.</i> (4628)
Microbial Community Characteristics of Shortcut Nitrification Start-up in Different MBR-Inoculated Sludges	WU Peng, CHEN Ya, ZHANG Ting, <i>et al.</i> (4636)
Effect of Microbial Community Structure and Metabolites on Sludge Settling Ability Under Three Different Switching Condition Processes	WEN Dan-dan, YUAN Lin-jiang, CHEN Xi, <i>et al.</i> (4644)
Adsorption Mechanisms of Ciprofloxacin by Extracellular Polymeric Substances of Sulfate-reducing Bacteria Sludge	ZHANG Hui-qun, JIA Yan-yan, FANG He-ting, <i>et al.</i> (4653)
Rapid Improvement of Denitrification Performance of Embedded Activated Sludge and Community Analysis	YANG Hong, XU Fu, MENG Chen, <i>et al.</i> (4661)
Spatial-Temporal Trends and Pollution Source Analysis for Heavy Metal Contamination of Cultivated Soils in Five Major Grain Producing Regions of China	SHANG Er-ping, XU Er-qi, ZHANG Hong-qi, <i>et al.</i> (4670)
Spatial Interpolation Methods and Pollution Assessment of Heavy Metals of Soil in Typical Areas	MA Hong-hong, YU Tao, YANG Zhong-fang, <i>et al.</i> (4684)
Effect of Straw Residues in Combination with Reduced Fertilization Rate on Greenhouse Gas Emissions from a Vegetable Field	HUANG Rong, GAO Ming, LI Jia-cheng, <i>et al.</i> (4694)
Emission of NH ₃ and N ₂ O from Spinach Field Treated with Different Fertilizers	SHAN Nan, HAN Sheng-hui, LIU Ji-pei, <i>et al.</i> (4705)
Effects of Various Combinations of Fertilizer, Soil Moisture, and Temperature on Nitrogen Mineralization and Soluble Organic Nitrogen in Agricultural Soil	TIAN Fei-fei, JI Hong-fei, WANG Le-yun, <i>et al.</i> (4717)
Long-term Fertilization Effects on the Abundance of Complete Ammonia Oxidizing Bacteria(Comammox <i>Nitrospira</i>) in a Neutral Paddy Soil	WANG Mei, WANG Zhi-hui, SHI Xiao-jun, <i>et al.</i> (4727)
Spatial Variation of Soil Organic Carbon and Stable Isotopes in Different Soil Types of a Typical Oasis	CHEN Xin, GONG Lu, LI Yang-mei, <i>et al.</i> (4735)
Effect and Mechanism of Attapulgite and Its Modified Materials on Bioavailability of Cadmium in Soil	CHEN Zhan-xiang, CHEN Chuan-sheng, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i> (4744)
Persulfate Oxidation Effect of Soil Organic Pollutants by Natural Organic Matters	LIU Qiong-zhi, LIAO Xiao-yong, LI You, <i>et al.</i> (4752)
Lead Uptake and Accumulation in Rice (<i>Oryza sativa</i> L.) with Water Management and Selenite Fertilization	WAN Ya-nan, LIU Zhe, Aboubacar Younoussa Camara, <i>et al.</i> (4759)
Key Bacteria for the Microbial Degradation of Pollutants in Cellar Water	YANG Hao, YANG Xiao-ni, ZHANG Guo-zhen, <i>et al.</i> (4766)
Oxidation of Humic Acid Complexing As(III) by As(III)-Oxidizing Bacteria	LI Ze-jiao, CUI Yan-shan, YIN Nai-yi, <i>et al.</i> (4778)
A Thermotolerant and Halotolerant Sulfate-reducing Bacterium in Produced Water from an Offshore High-temperature Oilfield in Bohai Bay, China: Isolation, Phenotypic Characterization, and Inhibition	YANG Chun-lu, YUAN Mei-yu, SHI Rong-jiu, <i>et al.</i> (4783)
Isolation and Nitrogen Removal Characteristics of Salt-tolerant Heterotrophic Nitrification and Aerobic Denitrification Bacteria <i>Zobellella</i> sp. B307	BAI Jie, CHEN Lin, HUANG Xiao, <i>et al.</i> (4793)
Isolation, Identification and Degradation Characteristics of a 17 β -estradiol Degrading Strain <i>Fusarium</i> sp. KY123915	WU Man-li, ZHU Chang-cheng, QI Yan-yun, <i>et al.</i> (4802)
Effect of Fluoroquinolones on Performance and Microbial Community of a Vertical Flow Constructed Wetland	LI Xin-hui, ZHENG Quan, LI Jing, <i>et al.</i> (4809)
Microbial Community Diversity Analysis During Lincomycin Mycelia Dreg with Manure	REN Sheng-tao, GUO Xia-li, LU A-qian, <i>et al.</i> (4817)
Oxidative Stress and DNA Damage Induced by DEP Exposure in Earthworms	PING Ling-wen, LI Xian-xu, ZHANG Cui, <i>et al.</i> (4825)
Mineralogy Characteristics and Heavy Metal Distribution of MSWI Fly Ash	LI Jian-tao, ZENG Ming (4834)