

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第1期

Vol.35 No.1

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

雾霾重污染期间北京居民对高浓度 PM _{2.5} 持续暴露的健康风险及其损害价值评估	谢元博, 陈娟, 李巍 (1)
长白山 PM _{2.5} 中水溶性离子季节变化特征研究	赵亚南, 王跃思, 温天雪, 戴冠华 (9)
青岛大气颗粒物数浓度变化及对能见度的影响	柯馨姝, 盛立芳, 孔君, 郝泽彤, 屈文军 (15)
重庆市大气二噁英污染水平及季节变化	张晓岭, 卢益, 朱明吉, 蹇川, 郭志顺, 邓力, 孙静, 张芹, 罗财红 (22)
西南地区再生铝冶炼行业二噁英大气排放	卢益, 张晓岭, 郭志顺, 蹇川, 朱明吉, 邓力, 孙静, 张芹 (30)
西南地区新型干法水泥生产中的二噁英大气排放	张晓岭, 卢益, 蹇川, 郭志顺, 朱明吉, 邓力, 孙静, 张芹 (35)
杭州市办公场所室内空气中 PBDEs 的污染现状与特征	蒋欣慰, 孙鑫, 裴小强, 金漫彤, 李云龙, 沈学优 (41)
模拟不同排放源排放颗粒及多环芳烃的粒径分布研究	符海欢, 田娜, 商惠斌, 张彬, 叶素芬, 陈晓秋, 吴水平 (46)
川东北地区元素大气沉降通量及其季节变化	童晓宁, 周厚云, 游镇烽, 汤静, 刘厚均, 黄颖, 贺海波 (53)
重庆市铁山坪 2001 ~ 2010 年酸沉降变化	余德祥, 马萧萧, 谭炳全, 赵大为, 张冬保, 段雷 (60)
汉江上游金水河流域氮湿沉降	王金杰, 张克荣, 吴川, 张全发 (66)
麦秸及其烟尘中正构脂肪酸的组成	刘刚, 李久海, 吴丹, 徐慧 (73)
兰州市室内大气降尘环境磁学特征及其随高度变化研究	吴铎, 魏海涛, 赵瑞瑞, 张蕊, 刘建宝 (79)
中亚热带针阔混交林土壤-大气界面释汞通量研究	马明, 王定勇, 申源源, 孙荣国, 黄礼昕 (85)
水稻秸秆生物炭对耕地土壤有机碳及其 CO ₂ 释放的影响	柯跃进, 胡学玉, 易卿, 余忠 (93)
黄海和东海海域溶解铋地球化学分布特征	吴晓丹, 宋金明, 吴斌, 李学刚 (100)
浑河上游(清原段)水环境中重金属时空分布及污染评价	马迎群, 时瑶, 秦延文, 郑丙辉, 赵艳民, 张雷 (108)
POCIS 采样技术应用于九龙江流域水环境中雌激素的检测	张利鹏, 王新红, 李永玉, 吴玉玲, 张祖麟 (117)
降雨条件下岩溶地下水微量元素变化特征及其环境意义	陈雪彬, 杨平恒, 蓝家程, 莫雪, 师麟 (123)
锡林河流域地表水水化学主离子特征及控制因素	唐玺雯, 吴锦奎, 薛丽洋, 张明泉, Frauke Barthold, Lutz Breuer, Hans-Georg Frede (131)
子牙河水系河流氮素组成及空间分布特征	赵钰, 单保庆, 张文强, 王超 (143)
水稻种植对中亚热带红壤丘陵区小流域氮磷养分输出的影响	宋立芳, 王毅, 吴金水, 李勇, 李裕元, 孟岑, 李航, 张满意 (150)
黄东海表层沉积物中磷的分布特征	宋国栋, 刘素美, 张国玲 (157)
河流沉积物中有机磷提取剂 (NaOH-EDTA) 提取比例与机制研究	张文强, 单保庆, 张洪, 唐文忠 (163)
沉积物短期扰动下 BAPP 再生和转化机制	武晓飞, 李大鹏, 汪明 (171)
三峡库区典型农村型消落带沉积物风险评价与重金属来源解析	敖亮, 雷波, 王业春, 周谐, 张晟 (179)
太湖东部不同类型湖区疏浚后沉积物重金属污染及潜在生态风险评价	毛志刚, 谷孝鸿, 陆小明, 曾庆飞, 谷先坤, 李旭光 (186)
滇池沉积物中主要污染物含量时间分异特征研究	王心宇, 周丰, 伊旋, 郭怀成 (194)
浓度层析荧光光谱局部匹配溢油鉴别技术	王春艳, 史晓凤, 李文东, 张金亮 (202)
光电 Fenton 技术处理污泥深度脱水液研究	王现丽, 王世峰, 吴俊峰, 濮文虹, 杨昌柱, 张敬东, 杨家宽 (208)
同步脱氮除磷颗粒污泥硝化反硝化特性试验研究	刘小英, 林慧, 马兆瑞, 王磊, 刘静伟, 郭超, 姜应和 (214)
垃圾填埋场渗滤液短程生物脱氮的长期稳定性实验研究	孙洪伟, 郭英, 彭永臻 (221)
油田区土壤石油烃组分残留特性研究	胡迪, 李川, 董倩倩, 李立明, 李广贺 (227)
水稻光合同化碳在土壤中的矿化和转化动态	谭立敏, 彭佩钦, 李科林, 李宝珍, 聂三安, 葛体达, 童成立, 吴金水 (233)
土地利用及退耕对喀斯特山区土壤活性有机碳的影响	廖洪凯, 李娟, 龙健, 张文娟, 刘云飞 (240)
水稻土团聚体 Cu ²⁺ 吸附过程中铝的溶出及土壤溶液 pH 变化	许海波, 赵道远, 秦超, 李玉姣, 董长勋 (248)
Cr(VI) 对两种黏土矿物在单一及复合溶液中 Cu(II) 吸附的影响	刘娟娟, 梁东丽, 吴小龙, 屈广周, 钱勋 (254)
淹水时长对 3 种丛枝菌根 (AM) 真菌感染 2 种湿地植物的影响	马雷猛, 王鹏腾, 王曙光 (263)
太湖水质与水生生物健康的关联性初探	周笑白, 张宁红, 张咏, 牛志春, 刘雷, 于红霞 (271)
3 种典型污染物对水生生物的急性毒性效应及其水质基准比较	姜东生, 石小荣, 崔益斌, 李梅 (279)
某制药废水对发光细菌急性毒性的评价研究	杜丽娜, 杨帆, 穆玉峰, 余若祯, 左剑恶, 高俊发, 余忻, 滕丽君, 汤薪瑶 (286)
异丙甲草胺与锌共存对斜生栅藻毒性手性差异影响	胡晓娜, 张淑娟, 陈彩东, 刘惠君 (292)
Biotic Ligand Model 的简化模型及预测性能评价	王万宾, 陈莎, 吴敏, 苏德丽, 赵婧 (299)
基于 USEtox 的焦化行业优先污染物筛选排序研究	郝天, 杜鹏飞, 杜斌, 曾思育 (304)
微囊藻毒素降解菌 <i>Paucibacter</i> sp. CH 菌的分离鉴定及其降解特性	游狄杰, 陈晓国, 向荟圻, 欧阳溱, 杨冰 (313)
硝酸盐抑制油田采出水硫酸盐还原菌活性研究	杨德玉, 张颖, 史荣久, 韩斯琴, 李光哲, 李国桥, 赵劲毅 (319)
降解纤维素产甲烷的四菌复合系	吴俊妹, 马安周, 崔萌萌, 于清, 齐鸿雁, 庄绪亮, 庄国强 (327)
中国陆地生态系统土壤异养呼吸变异的影响因素	谢薇, 陈书涛, 胡正华 (334)
内蒙古羊草草原根呼吸和土壤微生物呼吸区分的研究	史晶晶, 耿元波 (341)
南京河流夏季水-气界面 N ₂ O 排放通量	韩洋, 郑有飞, 吴荣军, 尹继福, 孙霞 (348)
杀菌剂对湖泊水体温室气体浓度分析的影响	肖启涛, 胡正华, James Deng, 肖薇, 刘寿东, 李旭辉 (356)
生物表面活性剂强化剩余污泥微生物燃料电池产电特性研究	彭海利, 张植平, 李小明, 杨麒, 罗琨, 易欣 (365)
不同硅铝比 Fe-ZSM-5 催化剂对氧化亚氮催化分解性能的研究	卢仁杰, 张新艳, 郝郑平 (371)
硫酸铵和尿素对废物焚烧过程中多种途径生成氯苯类的抑制作用	严密, 祁志福, 李晓东, 胡艳军, 陈彤 (380)
县域尺度的京津冀都市圈 CO ₂ 排放时空演变特征	汪浩, 陈操操, 潘涛, 刘春兰, 陈龙, 孙莉 (385)
保水剂性能及其农用安全性评价研究进展	李希, 刘玉荣, 郑袁明, 贺纪正 (394)
《环境科学》征订启事 (65)	
《环境科学》征稿简则 (220)	
信息 (226, 270, 298, 364)	

微囊藻毒素降解菌 *Paucibacter* sp. CH 菌的分离鉴定及其降解特性

游狄杰, 陈晓国*, 向荟圯, 欧阳潦, 杨冰

(武汉理工大学资源与环境工程学院, 武汉 430070)

摘要: 从巢湖沉积物中分离出 1 株 MC 高效降解菌, 命名为 CH 菌. 根据 16S rRNA 基因序列分析结果, 初步确定该菌为 *Paucibacter* sp.. 该菌能以 MCLR 为唯一碳源和能源生长, 并且在 10 h 内可将 $11.6 \mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 的 MCLR 降解至检测限以下, 其一级反应速率常数为 0.242 h^{-1} . CH 菌降解 MCLR 的适宜温度为 $25 \sim 30^\circ\text{C}$, 适宜 pH 为 $6 \sim 9$. MCLR 降解过程中产生 1 种含有 Adda 残基的中间产物, 该产物与已报道的 ACM-3962 菌的降解产物不同, 并且反应过程积累终产物 Adda. 在菌株 CH 中未检测到 *mlrA*、*mlrB*、*mlrC* 和 *mlrD* 这 4 个 MC 降解基因的同源基因. 这些结果表明, *Paucibacter* sp. CH 菌降解 MC 的机制不同于已知的 ACM-3962 菌的降解机制.

关键词: 微囊藻毒素; 降解; *mlrA* 基因; Adda; *Paucibacter*

中图分类号: X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)01-0313-06

Isolation, Identification and Characterization of a Microcystin-degrading Bacterium *Paucibacter* sp. Strain CH

YOU Di-jie, CHEN Xiao-guo, XIANG Hui-yi, OUYANG Liao, YANG Bing

(College of Resources and Environmental Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: A bacterium capable of degrading microcystin (MC), strain CH, was isolated from the sediment of Lake Chaohu, China. Strain CH was tentatively identified as *Paucibacter* sp. based on the analysis of 16S rRNA gene sequences. *Paucibacter* sp. strain CH can use microcystin LR (MCLR) as the sole carbon and energy sources, and $11.6 \mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ of MCLR was degraded to below the detection limit within 10 hours with the first-order reaction rate constant of 0.242 h^{-1} . The optimum temperature and initial pH for MC degradation were $25\text{--}30^\circ\text{C}$ and pH $6\text{--}9$, respectively. A novel intermediate product containing the Adda residue was detected during the degradation of MCLR, which is different from those produced by strain ACM-3962, and Adda was recognized as the final product of the degradation process. Furthermore, no homologue to any of the four genes, *mlrA*, *mlrB*, *mlrC* and *mlrD* previously associated with the degradation of MCLR by strain ACM-3962 was found in strain CH. These findings suggest that *Paucibacter* sp. strain CH might degrade MC through a different pathway from that of strain ACM-3962.

Key words: microcystin; degradation; *mlrA* gene; Adda; *Paucibacter*

微囊藻毒素 (microcystin, MC) 是由水华蓝藻产生的一类环状七肽物质, 目前已经分离鉴定出 90 余种变体, 其中 MCLR 是分布最广、毒性最强的变体之一. 由于具有很强的肝毒性, 水体中的 MC 污染已引起广泛关注, 世界卫生组织 (WHO) 推荐饮用水中 MCLR 的浓度应不高于 $1.0 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ [1].

微生物降解是环境中 MC 自然归趋的主要途径之一 [2]. 目前已经从环境样品中分离并鉴定出 50 余株 MC 降解菌, 它们分布在变形菌门、厚壁菌门和放线菌门, 其中大部分属于变形菌门的鞘脂单胞菌科 [3~18]. Bourne 等 [19, 20] 对 1 株鞘脂单胞菌科的 MC 降解菌 ACM-3962 降解 MCLR 的机制进行了研究, 发现 *MlrA*、*MlrB*、*MlrC* 和 *MlrD* 这 4 种酶参与了该降解过程, 它们分别由 *mlrA*、*mlrB*、*mlrC* 和 *mlrD* 这 4 个基因编码, 并且发现 *mlrA* 是这一过程的关键

基因, 这是迄今为止探明的唯一一条 MC 降解途径. 目前, 多数鞘脂单胞菌科的 MC 降解菌中检测到 *mlrA* 基因, 说明这些细菌很可能与菌株 ACM-3962 具有相同的 MC 降解机制 [3, 6~9, 21]. 然而, 在非鞘脂单胞菌科的 MC 降解菌中, 却很少检测到 *mlrA* 基因 [18, 22], 由于缺乏相关研究, 尚无法确定这些菌是否具有与菌株 ACM-3962 不同的降解机制.

本研究从巢湖沉积物中分离出 1 株高效 MC 降解菌, 分析了温度和 pH 对该菌降解 MC 活性的影响, 并根据降解产物和降解基因的检测结果对降解机制进行分析, 以期深入了解 MC 的微生物降解过

收稿日期: 2013-04-06; 修订日期: 2013-05-20

基金项目: 国家自然科学基金项目 (21077083); 中央高校基本科研业务费专项 (2012-IV-095)

作者简介: 游狄杰 (1987~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为环境微生物学, E-mail: youdijie999@163.com

* 通讯联系人, E-mail: xiaoguo_chen@tom.com

程,为应用微生物处理 MC 污染提供理论指导和技术支持。

1 材料与方法

1.1 主要试剂和仪器

实验用 MCLR 从室内培养的铜绿微囊藻中提取纯化,纯度大于 90%。沉积物样品采自巢湖表层沉积物。甲醇和三氟乙酸均为色谱纯,其余试剂为分析纯。*Taq* 酶购自天根生化科技,dNTP 购自东洋纺生物科技。

Agilent 1100 型高效液相色谱仪;LS-B50L 型蒸汽灭菌器(滨江医疗设备);SW-CJ-1D 型单人净化工作台(苏州净化);HZQ-F160A 型恒温培养箱(上海一恒);Sartorius pH 计;H-1850R 台式高速冷冻离心机(湖南湘仪);Gel logic 2200 Pro 型凝胶成像系统(Carestream);PCR 仪(PTC-100, BIO-RAD)。

1.2 培养基

无机盐液体培养基组成: K_2HPO_4 0.5 g, KH_2PO_4 0.5 g, $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ 0.5 g, NaCl 0.5 g, $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ 0.01 g,蒸馏水 1 000 mL,按实验要求调节 pH 值。有机液体培养基组成:蛋白胨 0.3 g,酵母粉 0.3 g, $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ 0.05 g, $CaCl_2$ 0.03 g,蒸馏水 100 mL,固体培养基加 1.5% 的琼脂。培养基经 121℃ 高温高压灭菌 30 min。

1.3 MCLR 的测定

样品经 $12\,000\ r \cdot \min^{-1}$ 离心 10 min,上清液用 HPLC 法测定 MCLR 浓度。色谱柱为 Agilent TC C18 分析柱(4.6 mm $\times$ 250 mm, 5 μ m),流动相采用甲醇:0.01% 三氟乙酸 = 60:40,流速为 0.8 mL $\cdot$ min $^{-1}$,DAD 检测波长为 238 nm,光谱扫描范围 200 ~ 300 nm,进样量 10 μ L。

1.4 MC 降解菌的分离

沉积物样品在添加 MCLR 的无机盐培养基中连续富集培养 3 次,然后利用有机固体培养基进行稀释涂布分离,通过 MCLR 降解实验验证降解活性。经过 5 次分离,获得 1 株 MC 降解菌 CH,对该菌进行革兰氏染色分析和扫描电镜观察。

1.5 MCLR 的降解及环境因素的影响

按 10% 的接种量将 CH 菌接种到含有 MCLR 的无机盐液体培养基中,于 25℃ 条件下静置培养,每隔 2 h 取样, HPLC 法检测 MCLR 浓度,分光光度计测定菌液的 D_{600} ,所得结果用来绘制 MCLR 的降解曲线和 CH 菌的生长曲线。通过改变培养温度,研究温度对 MCLR 降解的影响,利用 NaOH 和 HCl 调

节反应体系的 pH,研究初始 pH 对 MCLR 降解的影响,反应液初始 D_{600} 为 0.01。以上实验均设置 3 组平行。

1.6 CH 菌 16S rRNA 基因的扩增及系统发育树

高温裂解法提取 CH 菌基因组 DNA,利用细菌通用引物 27F 和 1492R 扩增 16S rRNA 基因。产物切胶回收后 AxyPrep 试剂盒(Axygen)纯化,由上海美吉生物技术公司完成测序。从 NCBI 上搜索与 CH 菌 16S rRNA 基因相似的序列,选择其中相似度高于 90% 的 22 条序列,利用 Clustalx 1.83 进行序列比对,采用邻接法(N-J)构建系统发育树(MEGA 4.1)。

1.7 CH 菌中 MC 降解基因 *mlr* 的检测

采用 Saito 等^[3]报道的引物 MF-MR 和 Ho 等^[6]报道的引物 *mlrBf1-mlrBr1*、*mlrCf1-mlrCr1* 和 *mlrDf1-mlrDr1* 分别扩增 CH 菌中的 *mlrA*、*mlrB*、*mlrC* 和 *mlrD* 基因,同时选取 1 株含有 *mlr* 基因的 *Sphingopyxis* sp. X20 菌作为阳性对照。PCR 反应条件参照文献^[6],产物经 0.7% 的琼脂糖凝胶电泳分离,EB 染色,紫外检测。

2 结果与讨论

2.1 MC 降解菌的分离及鉴定

经过 5 次平板涂布分离,从巢湖沉积物中分离出 1 株 MC 高效降解菌,命名为 CH。该菌呈短杆状,大小为(1~2) μ m $\times$ (0.1~0.3) μ m,革兰氏染色呈阴性。在 30℃ 有机固体平板上培养 48 h 后,形成直径约为 1 mm,白色、圆形、边缘整齐的菌落。16S rRNA 基因序列分析结果表明,CH 菌与 β 变形菌纲的 *Paucibacter* 菌亲缘关系较近(图 1),并且与 *Paucibacter* sp. 2B3 菌株的 16S rRNA 基因序列相似度高达 99%,初步确定该菌属于 *Paucibacter* sp.。目前,NCBI 报道的 *Paucibacter* 菌共计 21 株,其中有 13 株来自芬兰的富营养化湖泊,它们均具有 MC 降解活性^[23],其它 8 株菌则来自高海拔的冰河、冰川等寒冷地区,这些菌是否具有 MC 降解活性,目前尚不清楚^[24, 25]。此外,在大气气溶胶^[26]和我国北方寒冷地区的水处理装置中^[27]也检测到了 *Paucibacter* 菌。由此可见,目前已经检测到的 *Paucibacter* 菌主要存在于寒冷的生境中。

尽管 MC 降解菌广泛存在于河流、湖泊、水库等环境样品和水处理装置中,但是已经分离的 MC 降解菌种类仍然有限。目前已经分离的 50 余株菌全部在变形菌门、厚壁菌门和放线菌门的 22 个属

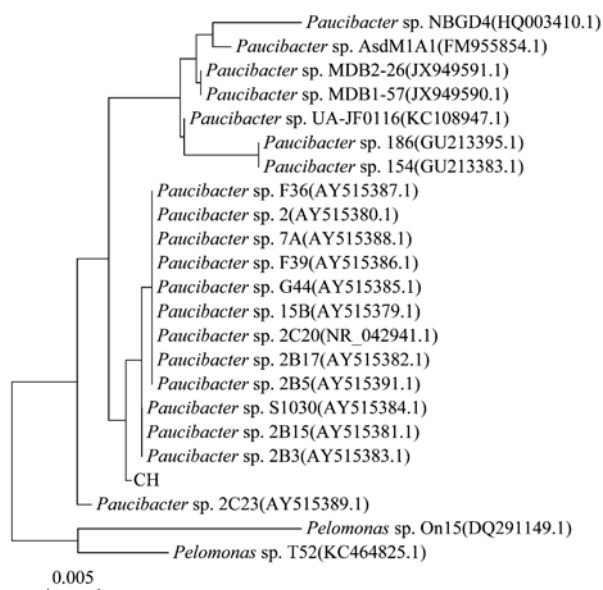


图1 CH 菌的系统发育树

Fig. 1 Neighbour-joining phylogenetic tree showing the position of isolate CH in relation to other closely related species

中,且大部分属于变形菌门 α 变形菌纲的 *Sphingomonas*、*Sphingosinicella* 和 *Sphingopyxis* 这 3 个属^[3~9]。然而,国内报道的属于 α -变形菌纲的 MC 降解菌却很少^[8, 21],大部分降解菌散布在变形菌门的 β -变形菌纲和 γ -变形菌纲以及厚壁菌门的 *Clostridia* 和 *Bacilli* 纲中^[10~18],并且也没有 *Paucibacter* sp. 菌降解 MC 的报道。目前,已经从巢湖水体和沉积物中分离出 2 株 MC 降解菌 *Kurthia* sp. 菌株 M9 和 *Bacillus* sp. 菌株 M6^[17, 28],它们均来自厚壁菌门,与本研究分离的变形菌门的 *Paucibacter* sp. CH 菌亲缘关系较远。这些结果说明,巢湖水体中同时存在多种 MC 降解菌,这有利于 MC 的快速转化。

2.2 CH 菌对 MCLR 的降解及其影响因素

图 2 为 CH 菌于无机盐液体培养基中对 MCLR 的降解过程及其生长曲线。在有 CH 菌存在条件下,11.6 $\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 的 MCLR 在 10 h 内降解到检测限以下,而无菌对照组中 MCLR 的浓度未发生明显变化,说明 CH 菌可以迅速降解 MCLR。随着 MCLR 的降解,CH 菌的生物量明显增加,说明该菌可以利用 MCLR 作为唯一碳源和能源生长,其它 MC 降解菌也有类似的现象^[5, 10, 13, 29],说明 MC 降解过程普遍与 MC 降解菌的生长有关。拟合结果表明,MCLR 的降解曲线可以用准一级反应速率方程描述,MCLR 降解的反应速率常数为 0.242 h^{-1} ,半衰期为 2.86 h ($R^2 = 0.911$)。

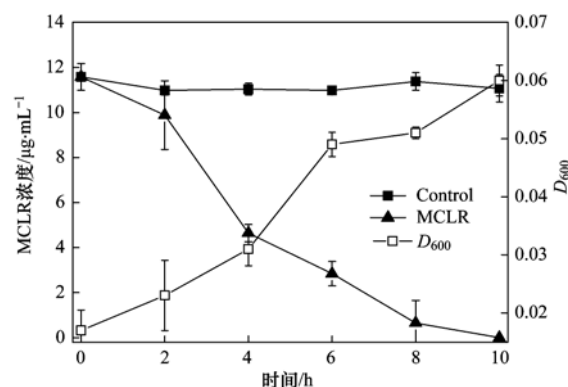


图2 CH 菌对 MCLR 的降解

Fig. 2 Biodegradation of MCLR by strain CH

不同温度下 CH 菌对 MCLR 的降解见图 3,在实验温度范围内,8 $\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 的 MCLR 均在 10 h 内降解至检测限以下。拟合结果表明,MCLR 的反应速率常数 k 在 15 ~ 35 $^{\circ}\text{C}$ 范围内随着温度的升高先增加后降低(0.192 ~ 0.441 h^{-1}),在 30 $^{\circ}\text{C}$ 时达到最大值 0.441 h^{-1} 。 t 检验结果表明,除了 25 $^{\circ}\text{C}$ 实验组的 k 值与 30 $^{\circ}\text{C}$ 和 35 $^{\circ}\text{C}$ 实验组间无显著差异外,其它各温度组之间 k 值均有显著差异($P < 0.05$)。这些结果说明,尽管在不同温度下 MCLR 完全降解所需时间相同,但是温度对降解速率仍有显著影响。

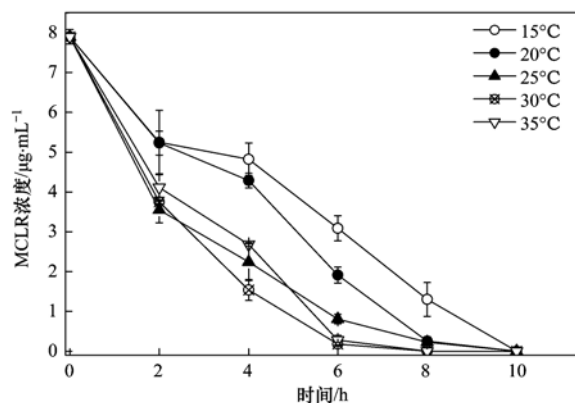


图3 温度对 CH 菌降解 MCLR 的影响

Fig. 3 Effects of incubation temperature on the degradation of MCLR by strain CH

反应体系的初始 pH 值对 CH 菌降解 MCLR 也有重要影响(见图 4)。在中性 pH 值附近(pH 6 ~ 9),MCLR 降解迅速,8 $\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 的 MCLR 在 10 h 内可以降解至检测限以下,反应速率常数在 0.163 ~ 0.343 h^{-1} 之间;而较高 pH 下(pH 10 和 11)降解缓慢,10 h 内 MCLR 只降解了 54.4% 和 47.5%, k 值也只有 0.076 h^{-1} 和 0.047 h^{-1} ;酸性条件下(pH 5)降解更为缓慢,48 h 内 MCLR 只减少了 16.7%,

k 值也只有 0.002 h^{-1} . 统计分析表明,除了 pH 为 6 的实验组与 pH 为 8 和 9 的实验组间反应速率常数 k 无显著性差异外,其它各实验组间都有显著差异 ($P < 0.05$). 类似的结果在其它 MC 降解菌中也有报道^[12, 13, 18]. 尽管 MC 的微生物降解过程对 pH 值比较敏感,但是由于天然水体的 pH 普遍在 6~9 范围内,因此 pH 对天然水体中 CH 菌降解 MC 的影响不大.

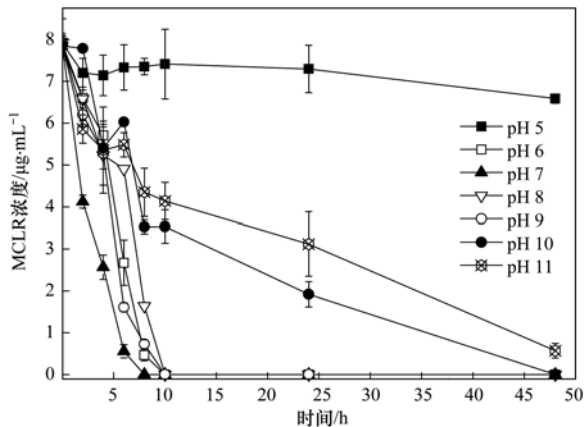


图 4 初始 pH 对 CH 菌降解 MCLR 的影响

Fig. 4 Effects of initial pH on the degradation of MCLR by strain CH

2.3 CH 菌降解 MCLR 的途径

在 CH 菌降解 MCLR 过程中,随着反应的进行,样品的色谱图中先后在 5.7 min (产物 A) 和 7.2 min 处出现 2 个产物峰 (见图 5), 且后者至 48 h 仍未发生降解. 这 2 个产物的光谱图与 MCLR 一样, 都在 238 nm 处有特征吸收 (图 5), 说明它们都具有 Adda 基团. 进一步 HPLC 检测发现, 出峰时间为 7.2 min 的产物与 Adda 在不同色谱条件下的保留时间均一致, 光谱图也相同, 所以初步判断该产物为 Adda. 尽管此前报道的其它菌降解 MC 过程中也可以产生 Adda, 但它们很快被降解, 因此降解过程中很难检测到 Adda, 只有利用 MC 降解菌粗酶降解 MC 时才能大量积累 Adda^[2, 30, 31]. HPLC 检测结果表明, 在相同的色谱条件下, 产物 A (图 5) 与 ACM-3962 菌降解 MCLR 的中间产物 (线性 MCLR 和 Adda-Glu-Mdha-Ala)^[20] 具有不同的出峰时间, 说明 CH 菌降解 MCLR 的中间产物与 ACM-3962 菌的产物不同, 目前正在对该产物进行质谱鉴定.

迄今为止, 只有一条完整的 MCLR 降解途径被揭示, 该过程由 *mlrA*、*mlrB*、*mlrC* 和 *mlrD* 这 4 个基因编码的蛋白参与, 它们通过水解肽键依次产生线性 MCLR、Adda-Glu-Mdha-Ala 和 Adda 这 3 种中间

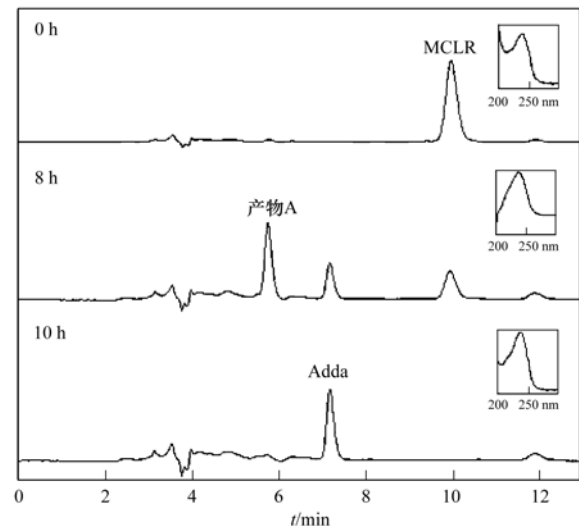


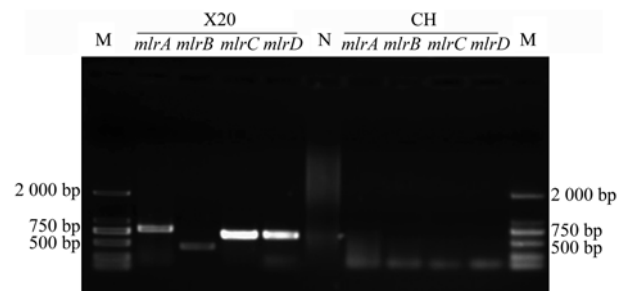
图 5 MCLR 降解前后的 HPLC 图

Fig. 5 HPLC profiles of MCLR before and after biodegradation by strain CH

产物^[7, 19, 32]. 与这一已知的降解途径不同, CH 菌降解 MCLR 最终积累产物 Adda, 说明该菌对 Adda 没有降解能力, 并且, 该过程产生的中间产物 A 也不同于已报道的中间产物, 说明 CH 很可能具有新的降解途径.

为了进一步验证这一假说, 利用文献^[3, 6]报道的引物对 CH 菌中的 *mlrA*、*mlrB*、*mlrC* 和 *mlrD* 这 4 个基因进行了检测, 结果如图 6 所示. 在阳性对照样品 (X20 菌) 中扩增出了全部 4 个基因, 而 CH 菌中 4 个基因均未检测到. 通过降低退火温度等方法对 PCR 反应条件进行了优化, 但 CH 菌中仍然无法扩增出 *mlr* 基因, 说明 CH 菌中很可能含有新的 MC 降解基因. 这些结果表明, CH 菌降解 MCLR 的机制与已知的 ACM-3962 菌^[6, 19] 不同. 为了揭示 CH 菌降解 MCLR 的机制, 目前正在构建基因文库, 筛选 MC 降解基因.

目前为止, 检测到含有 *mlr* 基因的 MC 降解菌大部分集中在 α -变形菌纲, 而 β -变形菌纲和 γ -变形



M: Marker, X20: 阳性, N: 阴性

图 6 CH 菌中 MC 降解基因 *mlr* 的检测

Fig. 6 Detection of *mlr* gene fragments in strain CH

菌纲,以及厚壁菌门和放线菌门的 MC 降解菌多数未检测或未检测到 *mlr* 基因. 本研究结果表明,这些不含 *mlr* 基因的 MC 降解菌很可能具有与 ACM-3962 菌不同的 MC 降解途径,说明环境中可能存在多种 MC 降解途径,因此,有必要对这些新的降解途径进行深入研究.

3 结论

(1)从巢湖沉积物中分离出 1 株高效 MC 降解菌 *Paucibacter* sp. CH 菌. 该菌呈短杆状,革兰氏染色阴性,可以利用 MCLR 做为唯一碳源和能源,10 h 内可将 $11.6 \mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 的 MCLR 降解到检测限以下.

(2)温度和 pH 对 CH 菌降解 MCLR 具有显著影响,pH 在 6 ~ 9 范围,温度在 25 ~ 35℃ 范围有利于 MCLR 的降解.

(3)CH 菌降解 MCLR 的机制与已报道的 ACM-3962 菌降解 MC 的机制不同,CH 菌中不含 *mlr* 基因,MCLR 的降解中间产物不同于 ACM-3962 菌的中间产物,并且降解过程最终积累 Adda.

参考文献:

- [1] Falconer I R. An overview of problems caused by toxic blue-green algae (cyanobacteria) in drinking and recreational water [J]. *Environmental Toxicology*, 1999, **14**(1): 5-12.
- [2] 胡越. X20 菌的鉴定及其对 MCLR 的酶学降解途径研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2012.
- [3] Saito T, Okano K, Park H D, *et al.* Detection and sequencing of the microcystin LR-degrading gene, *mlrA*, from new bacteria isolated from Japanese lakes [J]. *FEMS Microbiology Letters*, 2003, **229**(2): 271-276.
- [4] Jones G J, Bourne D G, Blakeley R L, *et al.* Degradation of the cyanobacterial hepatotoxin microcystin by aquatic bacteria [J]. *Natural Toxins*, 1994, **2**(4): 228-235.
- [5] Valeria A M, Ricardo E J, Stephan P, *et al.* Degradation of microcystin-RR by *Sphingomonas* sp. CBA4 isolated from San Roque reservoir (Córdoba-Argentina) [J]. *Biodegradation*, 2006, **17**(5): 447-455.
- [6] Ho L, Hoefel D, Saint C P, *et al.* Isolation and identification of a novel microcystin-degrading bacterium from a biological sand filter [J]. *Water Research*, 2007, **41**(20): 4685-4695.
- [7] Shimizu K, Maseda H, Okano K, *et al.* Enzymatic pathway for biodegrading microcystin LR in *Sphingopyxis* sp. C-1 [J]. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 2012, **114**(6): 630-634.
- [8] Yan H, Wang J F, Chen J, *et al.* Characterization of the first step involved in enzymatic pathway for microcystin-RR biodegraded by *Sphingopyxis* sp. USTB-05 [J]. *Chemosphere*, 2012, **87**(1): 12-18.
- [9] Ho L, Tang T, Monis P T, *et al.* Biodegradation of multiple cyanobacterial metabolites in drinking water supplies [J]. *Chemosphere*, 2012, **87**(10): 1149-1154.
- [10] 刘凯英, 薛罡, 程起跃, 等. 微囊藻毒素-RR 高效降解菌的分离鉴定及降解特性 [J]. *环境科学与技术*, 2012, **35**(4): 22-26.
- [11] Zhang M L, Yan H, Pan G. Microbial degradation of microcystin-LR by *Ralstonia solanacearum* [J]. *Environmental Technology*, 2011, **32**(15): 1779-1787.
- [12] Chen J, Hu L B, Zhou W, *et al.* Degradation of microcystin-LR and RR by a *Stenotrophomonas* sp. strain EMS isolated from Lake Taihu, China [J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2010, **11**(3): 896-911.
- [13] 赵俊斌, 刘凯英, 薛罡, 等. 微囊藻毒素-LR 降解菌的筛选及降解特性研究 [J]. *环境工程学报*, 2012, **6**(2): 671-676.
- [14] Hu L B, Yang J D, Zhou W, *et al.* Isolation of a *Methylobacillus* sp. that degrades microcystin toxins associated with cyanobacteria [J]. *New Biotechnology*, 2009, **26**(3-4): 205-211.
- [15] 刘晓文, 李现尧, 史全良. 一株微囊藻毒素降解菌的分离与鉴定 [J]. *环境工程学报*, 2010, **4**(9): 2023-2028.
- [16] 尹玉芬, 胡梁斌, 周威, 等. 微囊藻毒素降解菌 EMB 分离鉴定及其降解特性 [J]. *江苏农业学报*, 2010, **26**(3): 631-636.
- [17] 王光云, 吴涓, 谢维, 等. 微囊藻毒素降解菌的筛选、鉴定及其胞内粗酶液对藻毒素 MC-LR 的降解 [J]. *微生物学报*, 2012, **52**(1): 96-103.
- [18] 刘海燕, 宦海琳, 汪育文, 等. 微囊藻毒素降解菌 S3 的分子鉴定及其降解毒素的研究 [J]. *环境科学学报*, 2007, **27**(7): 1145-1150.
- [19] Bourne D G, Riddles P, Jones G J, *et al.* Characterisation of a gene cluster involved in bacterial degradation of the cyanobacterial toxin microcystin LR [J]. *Environmental Toxicology*, 2001, **16**(6): 523-534.
- [20] Bourne D G, Jones G J, Blakeley R L, *et al.* Enzymatic pathway for the bacterial degradation of the cyanobacterial cyclic peptide toxin microcystin LR [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1996, **62**(11): 4086-4094.
- [21] Jiang Y G, Shao J H, Wu X Q, *et al.* Active and silent members in the *mlr* gene cluster of a microcystin-degrading bacterium isolated from Lake Taihu, China [J]. *FEMS Microbiology Letters*, 2011, **322**(2): 108-114.
- [22] Manage P M, Edwards C, Singh B K, *et al.* Isolation and identification of novel microcystin-degrading bacteria [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2009, **75**(21): 6924-6928.
- [23] Rapala J, Berg K A, Lyra C, *et al.* *Paucibacter toxinivorans* gen. nov., sp. nov., a bacterium that degrades cyclic cyanobacterial hepatotoxins microcystins and nodularin [J]. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 2005, **55**(Pt 4): 1563-1568.
- [24] Vardhan Reddy P V, Shiva Nageswara Rao S S, Pratibha M S, *et al.* Bacterial diversity and bioprospecting for cold-active enzymes from culturable bacteria associated with sediment from a melt

- water stream of midtre loenbreen glacier, an arctic glacier [J]. *Research in Microbiology*, 2009, **160**(8): 538-546.
- [25] Gangwar P, Alam S I, Bansod S, *et al.* Bacterial diversity of soil samples from the western Himalayas, India [J]. *Canadian Journal of Microbiology*, 2009, **55**(5): 564-577.
- [26] Fahlgren C, Bratbak G, Sandaa R A, *et al.* Diversity of airborne bacteria in samples collected using different devices for aerosol collection [J]. *Aerobiologia*, 2011, **27**(2): 107-120.
- [27] Lin S S, Jin Y, Fu L, *et al.* Microbial community variation and functions to excess sludge reduction in a novel gravel contact oxidation reactor [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, **165**(1-3): 1083-1090.
- [28] 吴涓, 钟升, 王光云, 等. 一株降解微囊藻毒素菌种的鉴定及其活性研究 [J]. *中国环境科学*, 2011, **31**(1): 116-122.
- [29] 谢维, 吴涓, 李玉成, 等. 一株微囊藻毒素降解菌的筛选及鉴定 [J]. *生物学杂志*, 2012, **29**(6): 35-38.
- [30] Imanishi S, Kato H, Mizuno M, *et al.* Bacterial degradation of microcystins and nodularin [J]. *Chemical Research in Toxicology*, 2005, **18**(3): 591-598.
- [31] Harada K I, Imanishi S, Kato H, *et al.* Isolation of Adda from microcystin-LR by microbial degradation [J]. *Toxicon*, 2004, **44**(1): 107-109.
- [32] Dziga D, Wasylewski M, Szetela A, *et al.* Verification of the role of Mlrc in microcystin biodegradation by studies using a heterologously expressed enzyme [J]. *Chemical Research in Toxicology*, 2012, **25**(6): 1192-1194.

CONTENTS

An Assessment of PM _{2.5} Related Health Risks and Impaired Values of Beijing Residents in a Consecutive High-Level Exposure During Heavy Haze Days	XIE Yuan-bo, CHEN Juan, LI Wei (1)
Seasonal Variation of Water-Soluble Ions in PM _{2.5} at Changbai Mountain	ZHAO Ya-nan, WANG Yue-si, WEN Tian-xue, <i>et al.</i> (9)
Variation of Atmospheric Particle Number Concentrations in Qingdao and Its Impact on Visibility	KE Xin-shu, SHENG Li-fang, KONG Jun, <i>et al.</i> (15)
Concentrations of PCDD/Fs in the Atmosphere of Chongqing City and Its Seasonal Variation	ZHANG Xiao-ling, LU Yi, ZHU Ming-ji, <i>et al.</i> (22)
Atmospheric Emission of PCDD/Fs from Secondary Aluminum Metallurgy Industry in the Southwest Area, China	LU Yi, ZHANG Xiao-ling, GUO Zhi-shun, <i>et al.</i> (30)
Atmospheric Emission of PCDD/Fs from Modern Dry Processing Cement Kilns with Preheating in the Southwest Area, China	ZHANG Xiao-ling, LU Yi, JIAN Chuan, <i>et al.</i> (35)
Pollution Status and Characteristics of PBDEs in Indoor Air of Hangzhou	JIANG Xin-wei, SUN Xin, PEI Xiao-qiang, <i>et al.</i> (41)
Size Distribution of Particle and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Particle Emissions from Simulated Emission Sources	FU Hai-huan, TIAN Na, SHANG Hui-bin, <i>et al.</i> (46)
Atmospheric Deposition Fluxes and Seasonal Variations of Elements in Northeast of Sichuan, Central China	TONG Xiao-ning, ZHOU Hou-yun, YOU Chen-feng, <i>et al.</i> (53)
Trend in Acid Deposition at Tieshanping, Chongqing During 2001-2010	YU De-xiang, MA Xiao-xiao, TAN Bing-quan, <i>et al.</i> (60)
Wet Deposition of Atmospheric Nitrogen of the Jinshui Watershed in the Upper Hanjiang River	WANG Jin-jie, ZHANG Ke-rong, WU Chuan, <i>et al.</i> (66)
Chemical Compositions of <i>n</i> -Alkanoic Acids in Wheat Straw and Its Smoke	LIU Gang, LI Jiu-hai, WU Dan, <i>et al.</i> (73)
Magnetic Properties of Indoor Dustfall at Different Heights in Lanzhou	WU Duo, WEI Hai-tao, ZHAO Rui-rui, <i>et al.</i> (79)
Mercury Fluxes from Conifer-Broadleaf Forested Field in Central Subtropical Forest Zone	MA Ming, WANG Ding-yong, SHEN Yuan-yuan, <i>et al.</i> (85)
Impacts of Rice Straw Biochar on Organic Carbon and CO ₂ Release in Arable Soil	KE Yue-jin, HU Xue-yu, YI Qing, <i>et al.</i> (93)
Geochemical Distribution of Dissolved Bismuth in the Yellow Sea and East China Sea	WU Xiao-dan, SONG Jin-ming, WU Bin, <i>et al.</i> (100)
Temporal-spatial Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in the Upper Reaches of Hunhe River (Qingyuan Section), Northeast China	MA Ying-qun, SHI Yao, QIN Yan-wen, <i>et al.</i> (108)
Determination of Estrogenic Compounds in Water of Jiulong River Using Polar Organic Chemical Integrative Sampler	ZHANG Li-peng, WANG Xin-hong, LI Yong-yu, <i>et al.</i> (117)
Variation Characteristics and Environmental Significant of Trace Elements Under Rainfall Condition in Karst Groundwater	CHEN Xue-bin, YANG Ping-heng, LAN Jia-cheng, <i>et al.</i> (123)
Major Ion Chemistry of Surface Water in the Xilin River Basin and the Possible Controls	TANG Xi-wen, WU Jin-kui, XUE Li-yang, <i>et al.</i> (131)
Forms and Spatial Distribution Characteristics of Nitrogen in Ziya River Basin	ZHAO Yu, SHAN Bao-qing, ZHANG Wen-qiang, <i>et al.</i> (143)
Impact of Rice Agriculture on Nitrogen and Phosphorus Exports in Streams in Hilly Red Soil Earth Region of Central Subtropics	SONG Li-fang, WANG Yi, WU Jin-shui, <i>et al.</i> (150)
Study on Distribution of Phosphorus in Surface Sediments of the Yellow Sea and the East China Sea	SONG Guo-dong, LIU Su-mei, ZHANG Guo-ling (157)
Characterization and Optimization of the NaOH-EDTA Extracts for Solution ³¹ P-NMR Analysis of Organic Phosphorus in River Sediments	ZHANG Wen-qiang, SHAN Bao-qing, ZHANG Hong, <i>et al.</i> (163)
Regeneration and Transformation of BAPP in Suspended Solids Under Short-term Sediment Disturbance	WU Xiao-fei, LI Da-peng, WANG Ming (171)
Sediment Risk Assessment and Heavy Metal Source Analysis in Typical Country Water Level Fluctuated Zone (WLFZ) of the Three Gorges	AO Liang, LEI Bo, WANG Ye-chun, <i>et al.</i> (179)
Pollution Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments from the Different Eastern Dredging Regions of Lake Taihu	MAO Zhi-gang, GU Xiao-hong, LU Xiao-ming, <i>et al.</i> (186)
Study on the Stages of Major Sediments in Dianchi Lake	WANG Xin-yu, ZHOU Feng, YI Xuan, <i>et al.</i> (194)
Oil Spill Identification Using Partial Surface Fitting Method Based on Concentration-Synchronous-Matrix-Fluorescence Spectra	WANG Chun-yan, SHI Xiao-feng, LI Wen-dong, <i>et al.</i> (202)
Treatment of Sludge Liquor Produced in Deep Dehydration by Photoelectro-Fenton Process	WANG Xian-li, WANG Shi-feng, WU Jun-feng, <i>et al.</i> (208)
Characteristics of Nitrification and Denitrification for Simultaneous Nitrogen and Phosphorus Removal by Granular Sludge	LIU Xiao-ying, LIN Hui, MA Zhao-rui, <i>et al.</i> (214)
Study on Long-Term Stability of Biological Nitrogen Removal via Nitrite from Real Landfill Leachate	SUN Hong-wei, GUO Ying, PENG Yong-zhen (221)
Compositions and Residual Properties of Petroleum Hydrocarbon in Contaminated Soil of the Oilfields	HU Di, LI Chuan, DONG Qian-qian, <i>et al.</i> (227)
Dynamics of the Mineralization and Transformation of Rice Photosynthesized Carbon in Paddy Soils - a Batch Incubation Experiment	TAN Li-min, PENG Pei-qin, LI Ke-lin, <i>et al.</i> (233)
Effects of Land Use and Abandonment on Soil Labile Organic Carbon in the Karst Region of Southwest China	LIAO Hong-kai, LI Juan, LONG Jian, <i>et al.</i> (240)
Aluminum Dissolution and Changes of pH in Soil Solution During Sorption of Copper by Aggregates of Paddy Soil	XU Hai-bo, ZHAO Dao-yuan, QIN Chao, <i>et al.</i> (248)
Effect of Cr(VI) Anions on the Cu(II) Adsorption Behavior of Two Kinds of Clay Minerals in Single and Binary Solution	LIU Juan-juan, LIANG Dong-li, WU Xiao-long, <i>et al.</i> (254)
Effect of Flooding Time Length on Mycorrhizal Colonization of Three AM Fungi in Two Wetland Plants	MA Lei-meng, WANG Peng-teng, WANG Shu-guang (263)
Preliminary Study on the Relationship Between the Water Quality and the Aquatic Biological Health Status of Taihu Lake	ZHOU Xiao-bai, ZHANG Ning-hong, ZHANG Yong, <i>et al.</i> (271)
Acute Toxicity of Three Typical Pollutants to Aquatic Organisms and Their Water Quality Criteria	JIANG Dong-sheng, SHI Xiao-rong, CUI Yi-bin, <i>et al.</i> (279)
Evaluation of the Acute Toxicity of Pharmaceutical Wastewater to Luminescent Bacteria	DU Li-na, YANG Fan, MU Yu-feng, <i>et al.</i> (286)
Influence of the Coexistence of Zn ²⁺ on the Enantioselective Toxicity of Metolachlor to <i>Scenedesmus obliquus</i>	HU Xiao-na, ZHANG Shu-xian, CHEN Cai-dong, <i>et al.</i> (292)
Simplification of Biotic Ligand Model and Evaluation of Predicted Results	WANG Wan-bin, CHEN Sha, WU Min, <i>et al.</i> (299)
Priority Pollutants Ranking and Screening of Coke Industry based on USEtox Model	HAO Tian, DU Peng-fei, DU Bin, <i>et al.</i> (304)
Isolation, Identification and Characterization of a Microcystin-degrading Bacterium <i>Paucibacter</i> sp. Strain CH	YOU Di-jie, CHEN Xiao-guo, XIANG Hui-yi, <i>et al.</i> (313)
Inhibition of the Activity of Sulfate-reducing Bacteria in Produced Water from Oil Reservoir by Nitrate	YANG De-yu, ZHANG Ying, SHI Rong-jiu, <i>et al.</i> (319)
Bioconversion of Cellulose to Methane by a Consortium Consisting of Four Microbial Strains	WU Jun-mei, MA An-zhou, CUI Meng-meng, <i>et al.</i> (327)
Factors Influencing the Variability in Soil Heterotrophic Respiration from Terrestrial Ecosystem in China	XIE Wei, CHEN Shu-tao, HU Zheng-hua (334)
Study on the Distinguishing of Root Respiration from Soil Microbial Respiration in a <i>Leymus chinensis</i> Steppe in Inner Mongolia, China	SHI Jing-jing, GENG Yuan-bo (341)
Nitrous Oxide Flux at the Water-Air Interface of the Rivers in Nanjing During Summer	HAN Yang, ZHENG You-fei, WU Rong-jun, <i>et al.</i> (348)
Effects of Antiseptic on the Analysis of Greenhouse Gases Concentrations in Lake Water	XIAO Qi-tao, HU Zheng-hua, James Deng, <i>et al.</i> (356)
Electricity Generation of Surplus Sludge Microbial Fuel Cell Enhanced by Biosurfactant	PENG Hai-li, ZHANG Zhi-ping, LI Xiao-ming, <i>et al.</i> (365)
Fe-ZSM-5 Catalysts with Different Silica-Alumina Ratios for N ₂ O Catalytic Decomposition	LU Ren-jie, ZHANG Xin-yan, HAO Zheng-ping (371)
Inhibition of Chlorobenzene Formation via Various Routes During Waste Incineration by Ammonium Sulfate and Urea	YAN Mi, QI Zhi-fu, LI Xiao-dong, <i>et al.</i> (380)
County Scale Characteristics of CO ₂ Emission's Spatial-Temporal Evolution in the Beijing-Tianjin-Hebei Metropolitan Region	WANG Hao, CHEN Cao-cao, PAN Tao, <i>et al.</i> (385)
Characterization and Soil Environmental Safety Assessment of Super Absorbent Polymers in Agricultural Application	LI Xi, LIU Yu-rong, ZHENG Yuan-ming, <i>et al.</i> (394)

《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1月15日 35卷 第1期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 1 Jan. 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