

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第4期

Vol.36 No.4

**2015**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

中美空气质量指数(AQI)对比研究及启示 ..... 高庆先,刘俊蓉,李文涛,高文康(1141)

2013年1月北京市PM<sub>2.5</sub>区域来源解析 ..... 李璇,聂滕,齐珺,周震,孙雪松(1148)

2013年1月北京市一次空气重污染成因分析 ..... 程念亮,李云婷,张大伟,聂滕,邱启鸿,徐文帅(1154)

上海大气总悬浮颗粒物中金属的可溶性特征 ..... 常燕,冯冲,瞿建国,张经(1164)

厦门春季PM<sub>10</sub>中PAHs成分谱特征及其与气象要素相关性分析 ..... 张健,樊曙先,孙玉,张悦,魏锦成(1173)

硫氧同位素示踪南京北郊大气PM<sub>2.5</sub>中硫酸盐来源 ..... 魏英,郭照冰,葛鑫,祝胜男,姜文娟,石磊,陈姝(1182)

结合激光雷达分析2014年春季南京地区一次大气污染过程 ..... 包青,贺军亮,查勇,程峰,李倩楠(1187)

春季华东高山背景区域PM<sub>2.5</sub>和PM<sub>2.5-10</sub>中水溶性无机离子特征 ..... 苏彬彬,张智胜,陶俊,许榕洋,纪贤鑫,刘心东,张若宇(1195)

落叶燃烧排放的颗粒物及有机碳、元素碳的研究 ..... 杨伟宗,刘刚,李久海,徐慧,吴丹(1202)

四川省秸秆露天焚烧污染物排放清单及时空分布特征 ..... 何敏,王幸锐,韩丽,冯小琼,毛雪(1208)

深圳市船舶排放清单与时空特征研究 ..... 杨静,尹佩玲,叶斯琪,王水胜,郑君瑜,区家敏(1217)

超细颗粒通过建筑狭缝的传输特性 ..... 孙在,陈秋方,蔡志良,杨文俊,汪晗(1227)

空调病房真菌气溶胶浓度及粒径分布特征 ..... 张华玲,冯鹤华,方子梁,王本栋,李丹(1234)

基于氢氧稳定同位素的黄土高原云下二次蒸发效应 ..... 靳晓刚,张明军,王圣杰,朱小凡,董蕾,任正果,陈粉丽(1241)

黄河小浪底水库水沙调控对DOC输送的影响 ..... 张永领,王明仕,董玉龙(1249)

调水调沙工程长期实施对黄河口近岸沉积物粒度分布与黏土矿物组成特征的影响 ..... 王苗苗,孙志高,卢晓宁,王伟,王传远(1256)

春季生物作用对山地岩溶池水地球化学特征的影响 ..... 于正良,杨平恒,赵瑞一,李林立,张琳,童小容,罗刚(1263)

降雨期间岩溶城镇区地下水重金属变化特征及来源解析 ..... 任坤,杨平恒,江泽利,王尊波,师阳,王凤康,李晓春(1270)

北江和珠江广州河段水体的三卤甲烷风险评价 ..... 钟惠舟,韦朝海(1277)

丰水期洪湖水水质空间变异特征及驱动力分析 ..... 李昆,王玲,李兆华,王祥荣,陈红兵,吴忠,朱鹏(1285)

三峡库区典型干-支流相互作用过程中的营养盐交换:以梅溪河为例 ..... 操满,傅家楠,周子然,邓兵,王雨春,汪福顺(1293)

营养盐输入对太湖水体中磷形态转化及藻类生长的影响 ..... 王睿喆,王沛芳,任凌霄,王超,王颖(1301)

一小型藻华池塘浮游植物群落动态及其影响因子研究 ..... 杨文,朱津永,张克鑫,万莉,陆开宏(1309)

昌黎生态监控区夏季浮游植物群落年际变化特征分析 ..... 梁晓林,杨阳,王玉良,张月明,赵志楠,韩晓庆,张鉴达,高伟明(1317)

河道曝气提升河流水质的WASP模型研究 ..... 朱文博,王洪秀,柳翠,张建,梁爽(1326)

γ辐射降解水中的盐酸环丙沙星的研究 ..... 祝胜男,郭照冰,赵永富,葛鑫,魏英,陈姝,王静(1332)

电化学氢化物发生法处理含镉废水及对镉的回收 ..... 陈京晶,张国平,李海霞,付志平,欧阳小雪,吴琼(1338)

Fe-MCM-41催化臭氧氧化间甲酚废水 ..... 孙文静,王亚曼,卫皇墨,王森,李旭宁,李敬美,孙承林,安路阳(1345)

生物阳极及其反转为生物阴极降解氯霉素 ..... 孔德勇,梁斌,云慧,王爱杰,任南琪(1352)

308 nm光作用下α-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>表面HNO<sub>3</sub>的光解 ..... 陆军,孙云东,谢晶晶,赵军,邹家骥,朱承强(1359)

L-组氨酸-赤藓红复合膜修饰电极同时检测对苯二酚、邻苯二酚 ..... 何家洪,徐强,丁武泉,李强(1365)

酞基功能型高分子生物载体(PET-AQS)制备及催化生物反硝化特性研究 ..... 许晴,侯正浩,田秀蕾,牛春梅,郭延凯,廉静,郭建博(1374)

枯草芽孢杆菌对土臭素和2-甲基异冰片的降解动力学特性 ..... 马念念,罗国芝,谭洪新,姚妙兰,王晓用(1379)

嗜咪降解菌筛选及其对焦化废水强化处理 ..... 李静,李文英(1385)

Fe<sup>3+</sup>对同步硝化反硝化过程氮元素迁移转化及N<sub>2</sub>O释放的影响 ..... 李浩,闫玉洁,谢慧君,贾文林,胡振,张建(1392)

内循环半短程亚硝化工艺运行条件与微生物群落研究 ..... 赵志瑞,焦海华,崔丙健,黄迪,曹世超,王云,刘上千,马斌,白志辉(1399)

利用处理含4-氯苯酚模拟废水的剩余污泥培养普通小球藻 ..... 王璐,陈秀荣,闫龙,何怡萱,施震东(1406)

进水渗滤液总氮和BOD<sub>5</sub>/TN对填埋场反应器反硝化和厌氧氨氧化协同脱氮的影响 ..... 杨盈盈,陈奕,李明杰,谢冰(1412)

重庆金佛山土壤中PAHs含量的海拔梯度分布及来源解析 ..... 师阳,孙玉川,梁作兵,任坤,袁道先(1417)

湖南攸县典型煤矿和工厂区水稻田土壤镉污染特征及污染途径分析 ..... 张敏,王美娥,陈卫平,牛俊杰(1425)

沟渠化对三江平原湿地铁元素沉积过程的影响 ..... 苏文辉,于晓菲,王国平,栾金花,邹元春(1431)

施用磷酸盐和沸石对土壤镉形态转化的影响 ..... 王秀丽,梁成华,马子惠,韩月(1437)

不同条件下皂苷对污染壤土中Cu、Pb的淋洗修复 ..... 邓红侠,杨亚莉,李珍,许岩,李荣华,孟昭福,杨亚提(1445)

陕北某化工企业周围污灌区土壤-作物系统重金属积累特征及评价 ..... 齐雁冰,楚万林,蒲洁,刘梦云,常庆瑞(1453)

有机无机缓释复合肥对不同土壤微生物群落结构的影响 ..... 王菲,袁婷,谷守宽,王正银(1461)

玉米对铅胁迫的响应及体内铅化学形态研究 ..... 程海宽,张彪,景鑫鑫,杨素勤,赵鹏,孙晓雪,周志云(1468)

硼钨交互作用对水稻吸收积累镉和硼的影响 ..... 向猛,黄益宗,蔡立群,保琼莉,黄永春,王小玲,乔敏,胡莹,金姝兰,李季,王斐(1474)

丛枝菌根真菌对不同含盐量湿地土壤中芦苇生长的影响 ..... 郭江源,郭伟,毕娜,付瑞英,赵文静,赵仁鑫,王立新(1481)

滨海区芦苇和香蒲耐盐碱性及除氮磷效果对比研究 ..... 陈友媛,孙萍,陈广琳,王宁宁(1489)

不同温度下的土壤微生物呼吸及其与水溶性有机碳和转化酶的关系 ..... 吴静,陈书涛,胡正华,张旭(1497)

工业VOCs经济手段和工程技术减排对比性分析 ..... 王宇飞,刘昌新,程杰,郝郑平,王铮(1507)

《环境科学》征订启事(1216) 《环境科学》征稿简则(1248) 信息(1163,1194,1248,1424)

# 枯草芽孢杆菌对土臭素和2-甲基异冰片的降解动力学特性

马念念<sup>1</sup>, 罗国芝<sup>1,2,3\*</sup>, 谭洪新<sup>1,2,3</sup>, 姚妙兰<sup>1</sup>, 王晓用<sup>1</sup>

(1. 上海海洋大学水产与生命学院, 上海 201306; 2. 上海水产养殖工程技术研究中心, 上海 201306; 3. 上海海洋大学水产动物育种中心上海高校知识服务平台, 上海 201306)

**摘要:** 土臭素 (geosmin, GSM) 和 2-甲基异冰片 (2-methylisoborneol, 2-MIB) 是 2 种普遍存在于养殖水体中的土腥异味化合物, 微生物降解是去除这两种物质的有效途径. 本文研究了枯草芽孢杆菌 (*Bacillus subtilis*) 降解 GSM 和 2-MIB 的动力学特性. 结果表明, 枯草芽孢杆菌对 GSM (1 000 ~ 2 000 ng·L<sup>-1</sup>) 和 2-MIB (1 000 ~ 2 000 ng·L<sup>-1</sup>) 具有较好的降解性能, 降解率均达 90% 以上; 枯草芽孢杆菌对这些异味化合物的降解符合伪一级反应动力学, 其生物降解速率常数 ( $K$ ) 范围为 0.14 ~ 0.41, 降解速率不随 GSM 和 MIB 初始浓度的变化而变化; 枯草芽孢杆菌对 GSM 降解的最大比生长速率  $u_{\max}$  为 0.311, Monod 常数  $K_s$  为 1.73, 而在降解 MIB 过程中枯草芽孢杆菌的生长不符合 Monod 方程 ( $R^2 = 0.781$ ).

**关键词:** 枯草芽孢杆菌; 土臭素; 2-甲基异冰片; 土腥异味化合物; 降解; 动力学

中图分类号: X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)04-1379-06 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.04.033

## Kinetic Characteristics of Degradation of Geosmin and 2-Methylisoborneol by *Bacillus subtilis*

MA Nian-nian<sup>1</sup>, LUO Guo-zhi<sup>1,2,3\*</sup>, TAN Hong-xin<sup>1,2,3</sup>, YAO Miao-lan<sup>1</sup>, WANG Xiao-yong<sup>1</sup>

(1. College of Fisheries and Life Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. Shanghai Aquaculture Engineering Technology Research Center, Shanghai 201306, China; 3. Shanghai Universities Knowledge Service Platform (ZF1206), Aquatic Animal Breeding Center, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

**Abstract:** The earthy and musty odor problem in aquaculture systems has been a worldwide problem, especially in freshwater aquaculture systems. Geosmin (GSM) and 2-methylisoborneol (2-MIB), the most common causative agents of the off-flavor in fish, are lipophilic secondary metabolites of cyanobacteria, actinomycetes, and other microorganisms. The odor threshold concentrations for 2-MIB and GSM are approximately 9-42 ng·L<sup>-1</sup> and 4-10 ng·L<sup>-1</sup>, and 600 ng·kg<sup>-1</sup> and 900 ng·kg<sup>-1</sup> in the aquaculture water and fish, respectively. With such a low odor threshold concentration, the off-flavor compounds greatly reduce the quality and economic value of aquatic products. This renders the fish, especially some valuable fish produced in recirculating aquaculture systems (RAS), unmarketable. The study reported the kinetic characteristics of degradation of GSM and 2-MIB by *Bacillus subtilis* and discussed the impacts of the initial concentration of GSM and 2-MIB (T1, T2) and inoculation amount (T1, T3) on the biodegradation rate. The result demonstrated that these two compounds could be degraded by *B. subtilis* effectively and the biodegradation rate reached more than 90% in T1, T2 and T3 treatments. The biodegradation of these two compounds behaved as a pseudo-first-order kinetics with rate constants ( $K$ ) in the range of 0.14-0.41.  $K$  values indicated that the degradation rate was dependent on the inoculation amount but the start concentration of GSM and MIB. The degradation kinetics showed the maximum specific rate value ( $u_{\max}$ ) and the Monod constant ( $K_s$ ) were 0.311 and 1.73, however, 2-MIB degradation process did not meet the Monod microbial growth equation ( $R^2 = 0.781$ ).

**Key words:** *Bacillus subtilis*; geosmin (GSM); 2-methylisoborneol (2-MIB); off-flavor compounds; degradation; kinetics

土腥异味物质普遍存在于养殖水体,特别是淡水养殖水体,以土臭素 (geosmin, GSM) 和 2-甲基异冰片 (2-methylisoborneol, 2-MIB) 最为常见<sup>[1]</sup>. GSM 和 2-MIB 具挥发性,是放线菌 (*Actinomyces*) 和蓝绿藻 (*Cyanobacteria*) 等微生物的亲脂性次级代谢产物,易在脂质丰富的鱼组织中累积<sup>[2]</sup>,已报道的养殖品种有鲈鱼、虹鳟、大西洋鲑、鲶鱼、罗非鱼、鲤鱼<sup>[3-6]</sup>. GSM 和 2-MIB 的存在降低了水产品品质,影响养殖业的经济效益. 美国养殖者仅因鲶鱼土腥异味问题损失收入 0.04 ~ 0.26 美元·(kg·a)<sup>-1</sup><sup>[2]</sup>.

因此,如何有效控制并消除养殖水体中土腥异味物质已成为研究的热点之一.

常见的土腥异味化合物的去除方法有物理吸附、化学氧化法<sup>[7-8]</sup>和微生物降解法,其中微生物降解被认为是具前景的方法之一<sup>[9-11]</sup>. 研究表明,芽孢杆菌 (*Bacillus* sp.) 有效降解土腥异味化合

收稿日期: 2014-09-05; 修订日期: 2014-11-19

基金项目: 上海工程技术中心能力提升项目(13DZ2280500)

作者简介: 马念念(1988~),女,硕士,主要研究方向为循环水养殖水处理, E-mail: mnn2011@126.com

\* 通讯联系人, E-mail: gzhluo@shou.edu.cn

物<sup>[9-10]</sup>. Narayan 等<sup>[12]</sup> 研究证明蜡状芽孢杆菌 (*Bacillus cereus*) 和枯草芽孢杆菌 (*Bacillus subtilis*) 能有效降解 GSM; Silvey 等<sup>[13]</sup> 证明 81% 的 GSM 能被 *B. cereus* 降解, 接种芽孢杆菌的生物膜反应器在连续流的条件下对浓度为  $600 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$  的 2-MIB 的降解率达 90%<sup>[14]</sup>.

枯草芽孢杆菌作为水产养殖中的一种益生菌, 除了能降解 GSM 和 2-MIB 等异味化合物, 还具易培养、繁殖快、易保存、对环境适应性强、无毒无污染等特点, 其胞外酶能分解水体和底泥中的有机质从而改善水质<sup>[15]</sup>. 本实验研究了枯草芽孢杆菌对 GSM 和 2-MIB 降解能力和降解动力学特性, 以底物浓度 (GSM 和 2-MIB) 和降解时间  $t$  的关系进行反应动力学的描述, 并采用合适的反应动力学方程进行拟合求出其动力学反应方程; 进一步讨论了 GSM 和 2-MIB 初始浓度及菌种接种量对 GSM 和 2-MIB 降解速率的影响, 以期对养殖水体中土腥异味化合物的有效控制提供理论参考.

## 1 材料与方法

### 1.1 菌种来源

枯草芽孢杆菌取自上海海洋大学实验教学示范中心, 在无菌条件下接种于 1 L 牛肉膏-蛋白胨液体培养基中,  $37^\circ\text{C}$  摇床内培养 24 h, pH、溶解氧 (dissolved oxygen, DO) 控制在 7.0 和  $4\sim 6 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ . 枯草芽孢杆菌的接种浓度为  $1.0 \times 10^8 \text{ cells}\cdot\text{mL}^{-1}$  和  $1.0 \times 10^5 \text{ cells}\cdot\text{mL}^{-1}$ . 实验中所有的实验材料、试剂 (除 GSM 和 2-MIB) 全部用高压蒸气灭菌器在  $121^\circ\text{C}$  下灭菌 20 min<sup>[16]</sup>.

### 1.2 菌的纯化分离

细菌的纯化分离采用平板涂布和平板划线法. 从 3 个富集烧杯中取细菌悬液 0.1 mL, 用无菌水稀释  $10^3\sim 10^5$  倍. 再从 3 个梯度浓度的稀释液中取 0.1 mL 细菌悬液用涂布刮均匀涂布在培养基上. 将培养皿放在生化培养箱中,  $37^\circ\text{C}$  恒温培养 24 h 至

菌体形态正常. 之后, 取 3 个梯度中菌落密度适当的培养基, 用无菌接种环从培养基中挑取单菌落后在新的培养基上划线. 然后再将新的培养基在  $37^\circ\text{C}$  下恒温培养 24 h, 再重复挑取单菌落划线直至培养基表面的所有菌落外形一致, 有清晰的单菌落, 无杂菌. 之后, 将菌种用斜面保存法保存在  $4^\circ\text{C}$  冰箱中. 每 2~3 周转接种至新的牛肉膏-蛋白胨培养基上, 以保持细菌的活性<sup>[17]</sup>.

### 1.3 细菌的形态鉴定

#### 1.3.1 菌落形态鉴定

将长有单菌落的培养皿放在自然光下拍照, 得到细菌的菌落照片.

#### 1.3.2 菌株形态鉴定

采用革兰氏染色法对细菌进行染色<sup>[17]</sup>. 然后将染色后的细菌放在生物显微镜下观察、拍照, 得到放大 400 倍后的革兰氏染色细菌照片.

### 1.4 细菌的分子生物学鉴定方法

细菌基因组 DNA 的提取与 16S rRNA 基因扩增、16S rRNA 基因序列测定由上海迈浦生物科技有限公司进行检测. 16S rRNA 基因序列比对: 利用 GenBank 数据库 (<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/BankIt>) 进行, 初步确定其所属的细菌种类<sup>[18]</sup>.

### 1.5 实验设计和条件

在 1 L 锥形瓶中设置 5 组 (T1~T5), 每组 3 个平行. 各组的土腥味初始浓度和枯草芽孢杆菌接种量见表 1. 10 d 后, 在 T1, T2 组中再次添加  $2000 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$  和  $1000 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$  的 GSM 和 MIB, 以确定初始浓度对枯草芽孢杆菌降解这两种异味化合物的影响, 共计 17 d.

每天 09:00 点从烧瓶中取水样进行温度、DO、pH、总有机碳 (total organic carbon, TOC) 测定, 13:00 进行 GSM 和 2-MIB 浓度检测, 当浓度降到最低时分析其降解产物, 18:00 进行降解菌浓度测定及菌计数. 实验结束时进行 GSM 和 2-MIB 降解产物的分析和确定.

表 1 各实验组初始 GSM 和 2-MIB 浓度和菌添加量

Table 1 Initial operating parameters of GSM and 2-MIB biodegradation

参数	实验组			对照组	
	T1	T2	T3	T4	T5
GSM/ $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$	2000	1000	2000	2000	0
MIB/ $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$	2000	1000	2000	2000	0
枯草芽孢杆菌/ $\text{cells}\cdot\text{mL}^{-1}$	$1 \times 10^8$	$1 \times 10^8$	$1 \times 10^5$	0	$1 \times 10^8$

### 1.6 分析方法

#### 1.6.1 水质参数

水温、pH、DO 用 YSI (YSI556MPS, 美国维赛公

司, 美国) 测定仪直接测定. 总有机碳 (total organic carbon, TOC) 用 TOC 分析仪测定 (TOC-V. CPH, 日本岛津制作所, 日本).

### 1.6.2 细菌浓度

菌体浓度采用光电比浊法测定,测定波长 600 nm 处的浊度 ( $D_{600}$ ),利用公式  $DCW (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}) = 314.5 \times D_{600}$ ,将  $D$  值转化成干细胞的质量<sup>[19]</sup>.

### 1.6.3 GSM 和 2-MIB 的分析

采用固相微萃取-气相色谱-质谱联用 (solid phase micro-extraction-gas chromatography-mass spectrum, SPME-GC-MS) 法测定. 将一个微型磁转子放入 15 mL 萃取瓶中,再取 12 mL 水样于萃取瓶中,向萃取瓶中加入 30% 的 NaCl,立即用 20 mL 带 PTFE 涂层硅橡胶垫的瓶盖密封;将瓶放入已恒定在设定温度 60℃ 的水浴中,将 SPME 手柄的不锈钢针管轻轻刺穿硅橡胶垫,插入瓶内顶空中,推出萃取头(萃取头 PDMS/DVB)使其暴露于顶空中;调节好微型磁转子的转速为  $650 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ ,于 60℃ 下顶空萃取 40 min;解吸:萃取完成后将萃取头取出迅速插入到 GC-MS 进样口,在 250℃ 下解吸 3 min. GC-MS: HP-5MS 弹性毛细管柱;载气:高纯 He,恒压 120 kPa;进样方式:无分流进样;载气流速  $1.0 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ ;解析时间 3 min,进样口温度:250℃;程序升温:初始温度 60℃ (保持 3 min),以  $5^\circ \text{C} \cdot \text{min}^{-1}$  上升到 150℃ (保持 2 min),再以  $15^\circ \text{C} \cdot \text{min}^{-1}$  速率上升到 250℃ (保持 3 min);2-MIB、GSM 的保留时间分别为 13.721 min 和 19.858 min<sup>[20,21]</sup>. GSM 和 2-MIB 的平均日去除效率用公式 (1) 和公式 (2) 计算.  $c_{\text{initial}}$  为起始浓度 ( $\text{ng} \cdot \text{L}^{-1}$ ),  $c_{\text{final}}$  为结束时浓度 ( $\text{ng} \cdot \text{L}^{-1}$ ),  $t$  为持续的时间 (d).

$$\text{GSM 去除速率} = (c_{\text{initial}} - c_{\text{final}}) / t \quad (1)$$

$$\text{2-MIB 去除速率} = (c_{\text{initial}} - c_{\text{final}}) / t \quad (2)$$

## 2 结果与讨论

### 2.1 实验菌鉴定

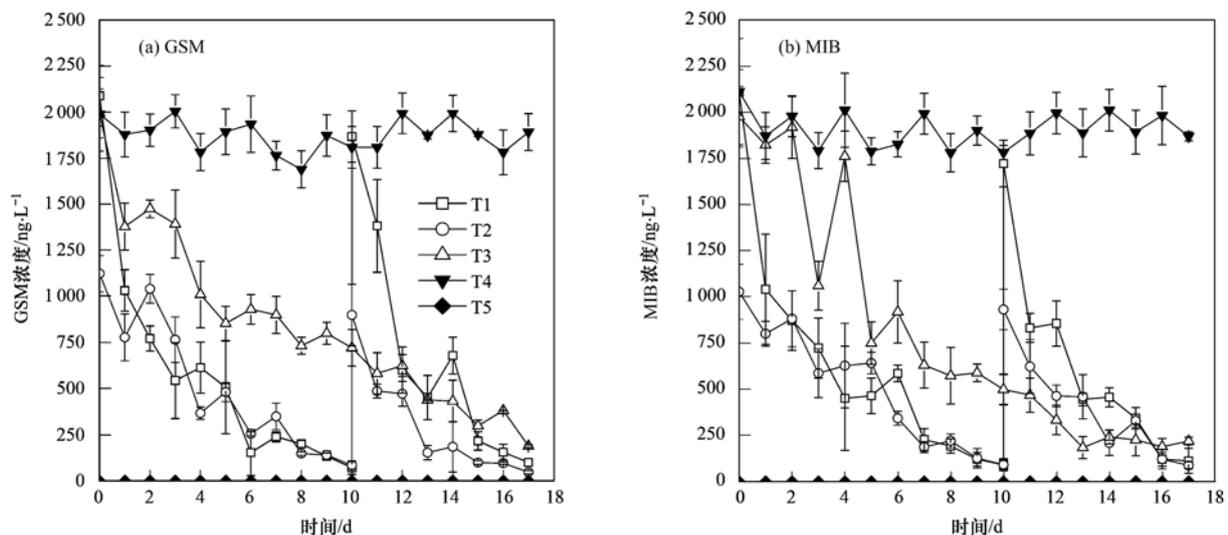
实验用细菌菌落呈椭圆形,表面粗糙,不透明,乳白色;革兰氏染色阳性,与枯草芽孢杆菌的特征相符<sup>[17]</sup>.

测序结果表明菌的 16S rRNA 全长序列为 1.081 kb,将所测菌的 16S rRNA 基因序列提交到 GenBank 数据库 (<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/BankIt>) 中. 比对结果显示该菌与 *Bacillus subtilis* subsp. (NCBI Reference Sequence: NC014479.1) 有 99% 的相似性,进一步说明该菌为枯草芽孢杆菌.

### 2.2 枯草芽孢杆菌对 GSM 和 2-MIB 的降解性能

枯草芽孢杆菌对 GSM 和 MIB 的降解效果如图 1 所示. T1、T2 和 T3 中 GSM 和 MIB 的浓度均随着时间的变化而降低,GSM 的平均去除速率分别为  $95.60\% \pm 1.37\%$ 、 $93.63\% \pm 1.57\%$ 、 $90.53\% \pm 2.65\%$  [图 1(a)],差异不显著 ( $P > 0.05$ ). MIB 的平均去除速率分别为  $94.60\% \pm 1.57\%$ 、 $90.88\% \pm 0.01\%$ 、 $88.92\% \pm 4.86\%$  [图 1(b)],差异不显著 ( $P > 0.05$ ). 实验结果与 Yagi 等研究相符<sup>[22]</sup>. T4 组 GSM 和 MIB 浓度没有明显变化,T5 组没有检测出这两种异味化合物. 实验期间各处理组温度保持在  $35.16 \sim 38.19^\circ \text{C}$ ; pH 保持在  $5.62 \sim 7.93$ .

2.3 枯草芽孢杆菌对 GSM 和 2-MIB 降解反应动力学  
通过对 2.2 节中的数据进行 ln 函数转化,再以



T1、T2、T3、T4、T5 分别代表不同的处理组

图 1 不同组 GSM 和 MIB 浓度变化

Fig. 1 Changes of GSM and MIB concentration in different treatments

lnS-t 作一元线性回归方程得到如表 2 中的相关速率常数和相关系数. 各处理组的决定系数( $R^2$ )都在 0.92 以上,证明 lnS-t 的线性相关显著,根据反应动力学中积分法确定枯草芽孢杆菌对 GSM 和 MIB 的降解反应属于伪一级反应<sup>[23]</sup>. 由表 2 可知,T1 和 T2 组高低浓度的 GSM 和 MIB 的生物降解速率相似,证明 GSM 和 MIB 的初始浓度并没有影响 GSM 和 MIB 的生物降解效率. 此外,与 MIB 相比,GSM 的生物降解速率常数更高. Ho 等<sup>[10]</sup>在研究砂滤和生物反应器中 GSM 和 MIB 生物降解速率时也证明了 *Pseudomonas* sp. 等菌对 GSM 的降解速率高于 MIB,对这两种异味化合物的降解也属于伪一级反应. 这可能与其结构相关,GSM 分子结构相比 MIB 更加平面化、挥发性更高、溶解性更低<sup>[1]</sup>.

表 2 处理组 GSM 和 MIB 生物降解的伪一级反应速率常数<sup>1)</sup>

Table 2 Pseudo-first-order rate constants ( $K$ ) of GSM and MIB biodegradation in different treatments

处理组	GSM		2-MIB	
	$K/d^{-1}$	$R^2$	$K/d^{-1}$	$R^2$
T1	0.29	0.93	0.28	0.94
T2	0.25	0.92	0.24	0.92
T3	0.14	0.92	0.13	0.94
T1 <sup>2)</sup>	0.41	0.93	0.38	0.94
T2 <sup>2)</sup>	0.40	0.94	0.32	0.92

1)  $K$  为速率常数; 2) 为实验第 10 d 时将 GSM 和 2-MIB 分别添加于 T1 和 T2 组

2.4 枯草芽孢杆菌降解 GSM 和 2-MIB 的生物动力学在降解异味化合物的反应体系中其动力学行为表现为细菌的生长和底物基质的消耗,因此分析了 GSM 和 2-MIB 降解与菌体生长量之间的关系. 根据

表 3 T1 组 GSM 动力学参数

Table 3 GSM kinetic experiment quality in treatment T1

时间 /d	$c_s$ / $mg \cdot L^{-1}$	$c_x$ / $mg \cdot L^{-1}$	$\Delta t$ /d	$\Delta c_x$ / $mg \cdot L^{-1}$	$c_s^{-1} \times 10^3$ / $mg \cdot L^{-1}$	$r_x = \Delta c_x / \Delta t$ / $mg \cdot (L \cdot d)^{-1}$	$c_x / r_x$ /h	$c_x - c_{x0}$ / $mg \cdot L^{-1}$	$c_{s0} - c_s$ / $mg \cdot L^{-1}$	$Y_{X/S}$
0	2089.23	573.96								
1	1032.78	972.33	1	398.37	0.97	398.37	2.44	398.33	1056.45	0.37
2	772.39	1153.17	1	180.84	1.29	180.84	6.38	579.17	1316.84	0.44
3	544.039	1341.87	1	188.7	1.84	188.7	7.11	767.87	1545.2	0.49
4	614.719	1458.76	1	116.9	1.63	116.9	12.48	884.77	1474.52	0.60
5	506.99	1591.25	1	132.5	1.97	132.49	12.01	1017.25	1582.24	0.64
6	153.54	1652.98	1	61.73	6.51	61.73	26.78	1078.98	1935.69	0.56
7	238.78	1756.65	1	103.66	4.19	103.66	16.95	1182.64	1850.45	0.64
8	200.89	1854.79	1	98.14	4.98	98.14	18.9	1280.79	1888.34	0.68
9	133.24	1913.62	1	58.83	7.51	58.83	32.53	1339.62	1955.99	0.68
10	71.55	1937.20	1	23.59	13.97	23.59	82.13	1363.20	2017.67	0.68

2.5 反应器对 GSM 和 2-MIB 降解反应动力学通过对反应器中 GSM 和 MIB 浓度随时间变化

韦朝海等报道得出基质消耗速率公式(3),将公式(3)做相应的处理得到公式(4)<sup>[24]</sup>. 现以  $c_x/r_x$  和  $c_s^{-1}$  作图(图 2),图 2 表明枯草芽孢杆菌降解 GSM 过程中微生物的生长符合 Monod 方程( $R^2 = 0.95$ ),其动力学参数  $K_s$  为 1.73,  $u_{max}$  为 0.311. 将其动力学参数代入公式(1)可得 T1 组 GSM 降解动力学模型为:  $r = 0.536 \cdot c_s / (1.73 + c_s) \cdot c_x$ . 但结果表明枯草芽孢杆菌在降解 MIB 过程中微生物生长并不符合 Monod 方程( $R^2 = 0.781$ )(文中未给出).

$$r_s = (1/Y_{X/S}) \cdot u_{max} \cdot c_s / (K_s + c_s) \cdot c_x \quad (3)$$

$$c_x / r_x = (K_s / u_{max}) \cdot c_s^{-1} + 1 / u_{max} \quad (4)$$

式中,  $r_x$  和  $r_s$  分别代表细菌生长速率和异味物质消耗速率;  $c_x$  和  $c_s$  分别代表细菌浓度和异味物质浓度;  $K_s$  代表 Monod 常数;  $u_{max}$  代表细菌的比生长速率;  $Y_{X/S}$ : 单位基质细菌得率系数,  $mg \cdot mg^{-1}$ .

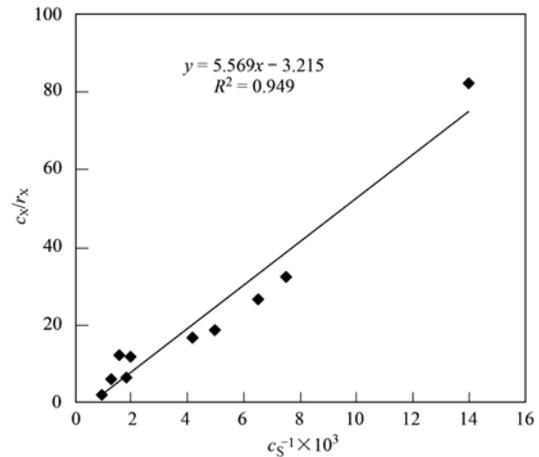


图 2  $c_x/r_x$  与  $c_s^{-1}$  的关系曲线

Fig. 2 Relationship figure of  $c_x/r_x$  and  $c_s^{-1}$

的相关数据进行 ln 函数转化,再以 lnS-t 作一元线性回归方程得到如表 4 中的相关生物降解速率常数

( $K$ )和决定系数( $R^2$ ). 由表 4 可知,接种枯草芽孢杆菌的反应器对 GSM 和 MIB 均具有较好的降解效率,其生物降解速率常数范围为 0.36 ~ 0.53,均高于对照组(0.07 ~ 0.29). 接种相同浓度枯草芽孢杆菌的不同初始浓度的异味化合物的反应器中,其生物降解速率常数相近,证明枯草芽孢杆菌反应器中这两种异味化合物的降解也属伪一级反应.

表 4 反应器中 GSM 和 2-MIB 的生物降解速率常数<sup>1)</sup>

Table 4 Biodegradation rate constants of GSM and 2-MIB in all reactors

处理组	GSM		2-MIB	
	$K/d^{-1}$	$R^2$	$K/d^{-1}$	$R^2$
A	0.42	0.99	0.45	0.92
B	0.36	0.95	0.53	0.93
C	0.37	0.99	0.44	0.87

1) A、B、C 分别代表反应器中 GSM 和 2-MIB 添加量为 700/1 000、500、100  $ng \cdot L^{-1}$

## 2.6 降解产物的初步确定

通过 GC-MS 分析得到 GSM 的降解产物为 2H-

Benzocyclohepten-2-one, 1,4a,5,6,7,8,9,9a-octahydro-4a-methyl-, trans-(8Cl), 分子式  $C_{12}H_{18}O$ , 其 CAS 登录号为 17429-26-4 [图 3(a)], 2-MIB 的降解产物为 1,1,5-Dimethyl-6-oxabicyclo[3.2.1]octan-7-one, CAS 登录号为 13747-98-3, 分子式  $C_9H_{14}O_2$  [图 3(b)].

细菌对 GSM 和 2-MIB 的降解产物的性质受环境条件和细菌种类的影响. Saito 等<sup>[25]</sup>的研究表明,相同的微生物对活性污泥和生物过滤器反冲水 GSM 的降解产物不同,这可能是因为不同的环境条件下,不同的降解菌的降解产物会有差别. Tanaka 等<sup>[26]</sup>研究报道 *Pseudomonas* sp. 和 *Enterobacter* sp. 对 2-MIB 的降解产物分别为 2-methylcamphene 和 2-methyl-2-bornane; Yuan 等<sup>[27]</sup>研究表明 *Micrococcus* spp., *Flavobacterium* spp., *Brevibacterium* spp. 及 *Pseudomonas* spp. 对 2-MIB 的降解产物为 2-methylenebornane 和 2-methyl-2-bornane.

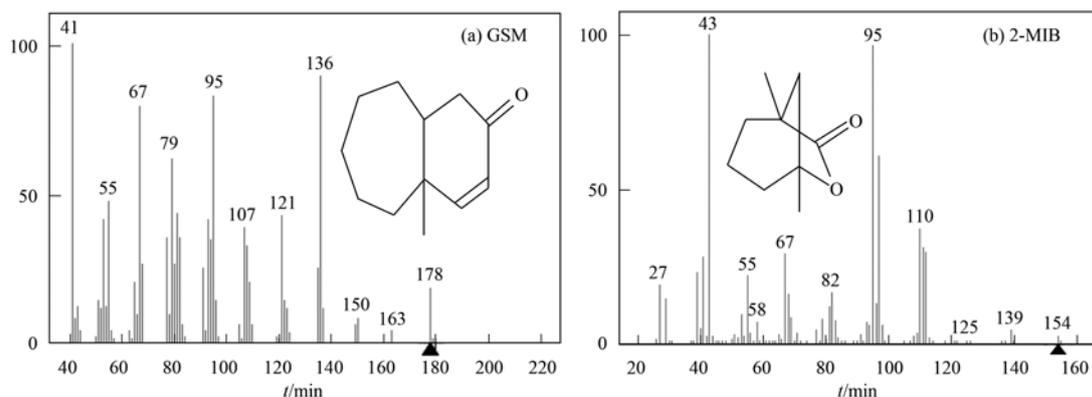


图 3 GSM 和 2-MIB 的降解产物

Fig. 3 Degradation products of GSM and 2-MIB

## 3 结论

(1) 枯草芽孢杆菌对 GSM 和 2-MIB 具有较好的降解性能,对 GSM 和 MIB 的降解效率均达 90% 以上.

(2) 枯草芽孢杆菌对这些异味化合物的降解符合伪一级反应动力学,相关系数  $r$  均大于 0.964,且对 GSM 的生物降解速率常数高于 MIB.

(3) 降解动力学表明枯草芽孢杆菌对 GSM 降解的最大比生长速率  $u_{max}$  为 0.311, Monod 常数  $K_s$  为 1.73,生长的 Monod 公式为  $r = 0.536 \cdot c_s / (1.73 + c_s) \cdot c_x$ ,而在降解 MIB 降解过程中枯草芽孢杆菌的生长不符合 Monod 方程( $R^2 = 0.781$ ).

## 参考文献:

- [1] Tucker C S. Off-flavor problems in aquaculture[J]. Reviews in Fisheries Science, 2000, 8(1): 45-88.
- [2] Schrader K K, Rimando A M. Off-flavors in aquaculture: an overview[M]. Washington, DC: American Chemical Society, 2003. 1-12.
- [3] Schrader K K, Rubio S A, Piedrahita R H, et al. Geosmin and 2-methylisoborneol cause off-flavors in cultured largemouth bass and white sturgeon reared in recirculating-water systems[J]. North American Journal of Aquaculture, 2005, 67(3): 177-180.
- [4] Schrader K K, Summerfelt S T. Distribution of off-flavor compounds and isolation of geosmin-producing bacteria in a series of water recirculating systems for rainbow trout culture[J]. North American Journal of Aquaculture, 2010, 72(1): 1-9.

- [ 5 ] Schrader K K, Tucker C S, Hanson T R, *et al.* Management of musty off-flavor in channel catfish from commercial ponds with weekly applications of copper sulfate [ J ]. North American Journal of Aquaculture, 2005, **67**(2): 138-147.
- [ 6 ] Robertson R F, Hammond A, Jauncey K, *et al.* An investigation into the occurrence of geosmin responsible for earthy-musty taints in UK farmed rainbow trout, *Onchorhynchus mykiss* [ J ]. Aquaculture, 2006, **259**(1-4): 153-163.
- [ 7 ] Matsui Y, Yoshida T, Nakao S, *et al.* Characteristics of competitive adsorption between 2-methylisoborneol and natural organic matter on superfine and conventionally sized powdered activated carbons [ J ]. Water Research, 2012, **46**(15): 4741-4749.
- [ 8 ] Sagehashi M, Shiraishi K, Fujita H, *et al.* Ozone decomposition of 2-methylisoborneol (MIB) in adsorption phase on high silica zeolites with preventing bromate formation [ J ]. Water Research, 2005, **39**(13): 2926-2934.
- [ 9 ] McDowall B, Hoefel D, Newcombe G, *et al.* Enhancing the biofiltration of geosmin by seeding sand filter columns with a consortium of geosmin-degrading bacteria [ J ]. Water Research, 2009, **43**(2): 433-440.
- [ 10 ] Ho L, Hoefel D, Bock F, *et al.* Biodegradation rates of 2-methylisoborneol (MIB) and geosmin through sand filters and in bioreactors [ J ]. Chemosphere, 2007, **66**(11): 2210-2218.
- [ 11 ] Elhadi S L N, Huck P M, Slawson R M. Factors affecting the removal of geosmin and MIB in drinking water biofilters [ J ]. Journal-American Water Works Association, 2006, **98**(8): 108-119.
- [ 12 ] Narayan L V, Nunez W J III. Biological control: isolation and bacterial oxidation of the taste-and-odor compound geosmin [ J ]. Journal-American Water Works Association, 1974, **66**(9): 532-536.
- [ 13 ] Silvey J K G, Henley D E, Hoehn B, *et al.* Musty-earthy odors and their biological control [ A ]. In: Proceedings of the AWWA Conference on water quality control [ C ]. 1975. 1-17.
- [ 14 ] Ishida H, Miyaji Y. Biodegradation of 2-methylisoborneol by oligotrophic bacterium isolated from a eutrophied lake [ J ]. Water Science and Technology, 1992, **25**(2): 269-276.
- [ 15 ] Wu Y H, Li T L, Yang L Z. Mechanisms of removing pollutants from aqueous solutions by microorganisms and their aggregates: a review [ J ]. Bioresource Technology, 2012, **107**: 10-18.
- [ 16 ] Lu L, Tan H X, Luo G Z, *et al.* The effects of *Bacillus subtilis* on nitrogen recycling from aquaculture solid waste using heterotrophic nitrogen assimilation in sequencing batch reactors [ J ]. Bioresource Technology, 2012, **124**: 180-185.
- [ 17 ] 白延琴, 辛小玲, 来有志, 等. 枯草芽孢杆菌的分离筛选 [ J ]. 畜牧兽医杂志, 2013, **32**(2): 24-27.
- [ 18 ] Zhou B H, Yuan R F, Shi C H, *et al.* Biodegradation of geosmin in drinking water by novel bacteria isolated from biologically active carbon [ J ]. Journal of Environmental Sciences, 2011, **23**(5): 816-823.
- [ 19 ] Wang S J, Loh K C. Modeling the role of metabolic intermediates in kinetics of phenol biodegradation [ J ]. Enzyme and Microbial Technology, 1999, **25**(3-5): 177-184.
- [ 20 ] Lin T F, Liu C L, Yang F C, *et al.* Effect of residual chlorine on the analysis of geosmin, 2-MIB and MTBE in drinking water using the SPME technique [ J ]. Water Research, 2003, **37**(1): 21-26.
- [ 21 ] Watson S B, Brownlee B, Satchwill T, *et al.* Quantitative analysis of trace levels of geosmin and MIB in source and drinking water using headspace SPME [ J ]. Water Research, 2000, **34**(10): 2818-2828.
- [ 22 ] Yagi M, Nakashima S, Muramoto S. Biological degradation of musty odor compounds, 2-methylisoborneol and geosmin, in a bio-activated carbon filter [ J ]. Water Science and Technology, 1988, **20**(8-9): 255-260.
- [ 23 ] 许越. 化学反应动力学 [ M ]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- [ 24 ] 韦朝海, 任源, 吴超飞, 等. 专性好氧菌降解苯胺废水的动力学研究 [ J ]. 环境科学研究, 1999, **12**(4): 15-18.
- [ 25 ] Saito A, Tokuyama T, Tanaka A, *et al.* Microbiological degradation of (-)-geosmin [ J ]. Water Research, 1999, **33**(13): 3033-3036.
- [ 26 ] Tanaka A, Oritani T, Uehara F, *et al.* Biodegradation of a musty odour component, 2-methylisoborneol [ J ]. Water Research, 1996, **30**(3): 759-761.
- [ 27 ] Yuan R F, Zhou B H, Shi C H, *et al.* Biodegradation of 2-methylisoborneol by bacteria enriched from biological activated carbon [ J ]. Environmental Science Engineering, 2012, **6**(5): 701-710.

## CONTENTS

Comparative Analysis and Inspiration of Air Quality Index Between China and America .....	GAO Qing-xian, LIU Jun-rong, LI Wen-tao, <i>et al.</i>	(1141)
Regional Source Apportionment of PM <sub>2.5</sub> in Beijing in January 2013 .....	LI Xuan, NIE Teng, QI Jun, <i>et al.</i>	(1148)
Formation Mechanism of a Serious Pollution Event in January 2013 in Beijing .....	CHENG Nian-liang, LI Yun-ting, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i>	(1154)
Soluble of Metals within TSP in Shanghai .....	CHANG Yan, FENG Chong, QU Jian-guo, <i>et al.</i>	(1164)
Analysis of Component Spectral Characteristics of PM <sub>10</sub> -Bound PAHs and the Influence of Weather Conditions During Spring in Xiamen .....	ZHANG Jian, FAN Shu-xian, SUN Yu, <i>et al.</i>	(1173)
Tracing Sources of Sulfate Aerosol in Nanjing Northern Suburb Using Sulfur and Oxygen Isotopes .....	WEI Ying, GUO Zhao-bing, GE Xin, <i>et al.</i>	(1182)
Analysis of an Air Pollution Process Using LiDAR in Nanjing, Spring of 2014 .....	BAO Qing, HE Jun-liang, ZHA Yong, <i>et al.</i>	(1187)
Characteristics of Water-soluble Inorganic Ions in PM <sub>2.5</sub> and PM <sub>2.5-10</sub> in Mountain Background Region of East China in Spring .....	SU Bin-bin, ZHANG Zhi-sheng, TAO Jun, <i>et al.</i>	(1195)
Emission of Particulate Matter, Organic and Elemental Carbon from Burning of Fallen Leaves .....	YANG Wei-zong, LIU Gang, LI Jiu-hai, <i>et al.</i>	(1202)
Emission Inventory of Crop Residues Field Burning and Its Temporal and Spatial Distribution in Sichuan Province .....	HE Min, WANG Xing-rui, HAN Li, <i>et al.</i>	(1208)
Marine Emission Inventory and Its Temporal and Spatial Characteristics in the City of Shenzhen .....	YANG Jing, YIN Pei-ling, YE Si-qi, <i>et al.</i>	(1217)
Characteristic of Ultrafine Particles Transferring Through Building Envelopes .....	SUN Zai, CHEN Qiu-fang, CAI Zhi-liang, <i>et al.</i>	(1227)
Airborne Fungal Aerosol Concentration and Distribution Characteristics in Air-Conditioned Wards .....	ZHANG Hua-ling, FENG He-hua, FANG Zi-liang, <i>et al.</i>	(1234)
Effect of Below-cloud Secondary Evaporation in Precipitations over the Loess Plateau Based on the Stable Isotopes of Hydrogen and Oxygen .....	JIN Xiao-gang, ZHANG Ming-jun, WANG Sheng-jie, <i>et al.</i>	(1241)
Effect of the Runoff-sediment Control of the Xiaolangdi Reservoir on DOC Transport .....	ZHANG Yong-ling, WANG Ming-shi, DONG Yu-long	(1249)
Effects of Long-term Implementation of the Flow-Sediment Regulation Scheme on Grain and Clay Compositions of Inshore Sediments in the Yellow River Estuary .....	WANG Miao-miao, SUN Zhi-gao, LU Xiao-ning, <i>et al.</i>	(1256)
Influences of Biological Processes on Geochemical Characteristics: An Example of a Mountain Karst Pool in Spring Season .....	YU Zheng-liang, YANG Ping-heng, ZHAO Rui-yi, <i>et al.</i>	(1263)
Variation Characteristics and Sources of Heavy Metals in an Urban Karst Groundwater System during Rainfall Event .....	REN Kun, YANG Ping-heng, JIANG Ze-li, <i>et al.</i>	(1270)
Risk Assessment of Trihalomethane Production Using the Beijiang River and the Pearl River, Guangzhou as Drinking Water Sources .....	ZHONG Hui-zhou, WEI Chao-hai	(1277)
Spatial Variability Characteristics of Water Quality and Its Driving Forces in Honghu Lake During High Water-level Period .....	LI Kun, WANG Ling, LI Zhao-hua, <i>et al.</i>	(1285)
Nutrient Exchange Between Meixi River and Yangtze River Due to the Typical Interaction Process of the Three Gorges Reservoir and Its Tributary .....	CAO Man, FU Jia-nan, ZHOU Zi-ran, <i>et al.</i>	(1293)
Effects of Nutrient Inputs on Changes of Phosphorus Forms and Phytoplankton Growth in Taihu Lake .....	WANG Rui-zhe, WANG Pei-fang, REN Ling-xiao, <i>et al.</i>	(1301)
Community Dynamics of Phytoplankton and Related Affecting Factors in a Eutrophicated Small Pond .....	YANG Wen, ZHU Jin-yong, ZHANG Ke-xin, <i>et al.</i>	(1309)
Yearly Changes of Phytoplankton Community in the Ecology-monitoring Area of Changli, Hebei in Summer .....	LIANG Xiao-lin, YANG Yang, WANG Yu-liang, <i>et al.</i>	(1317)
Improvement of River Water Quality by Aeration: WASP Model Study .....	ZHU Wen-bo, WANG Hong-xiu, LIU Cui, <i>et al.</i>	(1326)
Radiolytic Decomposition of Ciprofloxacin Hydrochloride in Aqueous Solution Using $\gamma$ Irradiation .....	ZHU Sheng-nan, GUO Zhao-bing, ZHAO Yong-fu, <i>et al.</i>	(1332)
Removal of Antimony in Wastewater by Electrochemical Hydride Generation and the Recovery of Antimony .....	CHEN Jing-jing, ZHANG Guo-ping, LI Hai-xia, <i>et al.</i>	(1338)
Degradation of <i>m</i> -Cresol with Fe-MCM-41 in Catalytic Ozonation .....	SUN Wen-jing, WANG Ya-min, WEI Huang-zhao, <i>et al.</i>	(1345)
Bioanode and Inversion of Bioanode to Biocathode for the Degradation of Antibiotic Chloramphenicol .....	KONG De-yong, LIANG Bin, YUN Hui, <i>et al.</i>	(1352)
Photolysis of Gaseous HNO <sub>3</sub> on the $\alpha$ -Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Films Under 308 nm UV Light .....	LU Jun, SUN Yun-dong, XIE Jing-jing, <i>et al.</i>	(1359)
Simultaneous Determination of Hydroquinone and Catechol Based on L-Histidine-Erythrosine Composite Film Modified Glassy Carbon Electrode .....	HE Jia-hong, XU Qiang, DING Wu-quan, <i>et al.</i>	(1365)
Preparation and Characterization of Quinone Functional Polymer Biocarrier (PET-AQS) for Bionitrification Catalysis .....	XU Qing, HOU Zheng-hao, TIAN Xiu-lei, <i>et al.</i>	(1374)
Kinetic Characteristics of Degradation of Geosmin and 2-Methylisoborneol by <i>Bacillus subtilis</i> .....	MA Nian-nian, LUO Guo-zhi, TAN Hong-xin, <i>et al.</i>	(1379)
Screening of a Highly Efficient Quinoline-degrading Strain and Its Enhanced Biotreatment on Coking Waste Water .....	LI Jing, LI Wen-ying	(1385)
Effect of Ferric Iron on Nitrogen Immigration and Transformation and Nitrous Oxide Emission During Simultaneous Nitrification Denitrification Process .....	LI Hao, YAN Yu-jie, XIE Hui-jun, <i>et al.</i>	(1392)
Running Condition and Bacterial Community Associated with the Partial Nitritation System .....	ZHAO Zhi-rui, JIAO Hai-hua, CUI Bing-jian, <i>et al.</i>	(1399)
Using Excess Activated Sludge Treated 4-Chlorophenol Contained Waste Water to Cultivate <i>Chlorella vulgaris</i> .....	WANG Lu, CHEN Xiu-rong, YAN Long, <i>et al.</i>	(1406)
Effects of Total Nitrogen and BOD <sub>5</sub> /TN on Anaerobic Ammonium Oxidation-Denitrification Synergistic Interaction of Mature Landfill Leachate in Aged Refuse Bioreactor .....	YANG Ying-ying, CHEN Yi, LI Ming-jie, <i>et al.</i>	(1412)
Altitudinal Gradient Distribution and Source Analysis of PAHs Content of Topsoil in Jinfo Mountain, Chongqing .....	SHI Yang, SUN Yu-chuan, LIANG Zuo-bing, <i>et al.</i>	(1417)
Characteristics and Inputs of Cd Contamination in Paddy Soils in Typical Mining and Industrial Areas in Youxian County, Hunan Province .....	ZHANG Min, WANG Mei-e, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i>	(1425)
Effects of Canalization on the Iron Deposition in Sanjiang Plain .....	SU Wen-hui, YU Xiao-fei, WANG Guo-ping, <i>et al.</i>	(1431)
Effects of Phosphate and Zeolite on the Transformation of Cd Speciation in Soil .....	WANG Xiu-li, LIANG Cheng-hua, MA Zi-hui, <i>et al.</i>	(1437)
Leaching Remediation of Copper and Lead Contaminated Lou Soil by Saponin Under Different Conditions .....	DENG Hong-xia, YANG Ya-li, LI Zhen, <i>et al.</i>	(1445)
Accumulation Characteristics and Evaluation of Heavy Metals in Soil-Crop System Affected by Wastewater Irrigation Around a Chemical Factory in Shenmu County .....	QI Yan-bing, CHU Wan-lin, PU Jie, <i>et al.</i>	(1453)
Effects of Organic and Inorganic Slow-Release Compound Fertilizer on Different Soils Microbial Community Structure .....	WANG Fei, YUAN Ting, GU Shou-kuan, <i>et al.</i>	(1461)
Response of Maize to Lead Stress and Relevant Chemical Forms of Lead .....	CHENG Hai-kuan, ZHANG Biao, JING Xin-xin, <i>et al.</i>	(1468)
Effect of Boron-antimony Interaction on the Uptake and Accumulation of Antimony and Boron by Rice Seedling .....	XIANG Meng, HUANG Yi-zong, CAI Li-qun, <i>et al.</i>	(1474)
Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on the Growth of Reeds in Wetland Soils with Different Salt Content .....	GUO Jiang-yuan, GUO Wei, BI Na, <i>et al.</i>	(1481)
A Contrastive Study on Salt-alkaline Resistance and Removal Efficiency of Nitrogen and Phosphorus by <i>Phragmites australis</i> and <i>Typha angustifolia</i> in Coastal Estuary Area .....	CHEN You-yuan, SUN Ping, CHEN Guang-lin, <i>et al.</i>	(1489)
Soil Microbial Respiration Under Different Soil Temperature Conditions and Its Relationship to Soil Dissolved Organic Carbon and Invertase .....	WU Jing, CHEN Shu-tao, HU Zheng-hua, <i>et al.</i>	(1497)
Comparison Analysis of Economic and Engineering Control of Industrial VOCs .....	WANG Yu-fei, LIU Chang-xin, CHENG Jie, <i>et al.</i>	(1507)

# 《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)

2015年4月15日 第36卷 第4期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 4 Apr. 15, 2015

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: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行