

方知库  
Eco-Environmental  
Knowledge Web

# 环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV  
HUANJING KEXUE

- 主办 中国科学院生态环境研究中心
- 出版 科学出版社



2020

Vol.41 No.12  
第41卷 第12期

目次(卷终)

我国地级及以上城市臭氧污染来源及控制区划分 ..... 闫慧, 张维, 侯墨, 李银松, 高平, 夏青, 孟晓艳, 范丽雅, 叶代启(5215)

2015~2018年我国PM<sub>2.5</sub>健康损害价值的动态评估 ..... 李惠娟, 周德群, 魏永杰(5225)

2011~2017年中国PM<sub>2.5</sub>多尺度时空分异特征分析 ..... 杨文涛, 谯鹏, 刘贤赵, 雷雨亮(5236)

关中地区PM<sub>2.5</sub>时空演化及人口暴露风险 ..... 黄晓军, 祁明月, 李艳雨, 王森, 黄馨(5245)

中原城市冬季两次重污染形成机制及来源 ..... 贾佳, 丛怡, 高清敏, 王玲玲, 杨静静, 张国辉(5256)

西北工业城市冬季PM<sub>2.5</sub>污染特征及理化性质 ..... 杨燕萍, 陈强, 王莉娜, 杨丽丽(5267)

基于PMF模型的PM<sub>2.5</sub>中金属元素污染及来源的区域特征分析 ..... 邓林俐, 张凯山, 殷子渊, 李欣悦, 武文琪, 向铎鹏(5276)

重庆主城大气降尘中重金属污染特征及评价 ..... 张夏, 刘斌, 肖柏林, 王佳, 万达(5288)

鄂尔多斯市夏秋季气溶胶新粒子生成过程影响因素分析 ..... 孔祥晨, 王红磊, 张连霞, 呼群, 李瑞峰, 许彩琴(5295)

杭州市城区挥发性有机物污染特征及反应活性 ..... 景盛翱, 高雅琴, 沈建东, 王倩, 彭亚荣, 李英杰, 王红丽(5306)

成都市区夏季大气挥发性有机物污染特征及来源解析 ..... 徐晨曦, 陈军辉, 姜涛, 韩丽, 王波, 李英杰, 王成辉, 刘政, 钱骏(5316)

石家庄市挥发性有机物和臭氧的污染特征及源解析 ..... 王帅, 崔建升, 冯亚平, 刘大喜, 陈静, 田亮, 冯超, 王梦璇, 王学臣, 王婷婷(5325)

厦门市工业源VOCs排放清单及控制对策分析 ..... 吴冬阳, 庄马展, 吴艳聪, 金磊, 吴义诚, 高攀峰, 刘建福, 金月正, 潘亚雷, 傅海燕(5336)

建筑胶黏剂使用VOCs排放系数与排放清单 ..... 梁小明, 孙西勃, 苏燕花, 黄礼海, 陈锋, 任璐, 卢清, 赖君怡, 陈朋龙, 陈来国(5345)

我国西北工业区城市大气多氯联苯来源及健康风险 ..... 毛潇萱, 李子璇, 宋世杰, 章晓冬, 高宏, 李春新, 黄韬, 马建民(5352)

基于广州塔观测的城市近地面甲醛垂直分布特征 ..... 黄山, 裴成磊, 张莹, 宋奇聪, 齐吉朋, 赵一鸣, 王鸣, 邵敏(5362)

新水沙条件下长江中下游干流水体总磷时空变化分析 ..... 卓海华, 娄保锋, 吴云丽, 王瑞琳, 陈杰, 兰静(5371)

三峡库区汉丰湖水体氮磷及化学计量比季节变化特征 ..... 钱田, 黄祺, 何丙辉, 李天阳, 刘淑婧, 付适, 曾荣昌, 向可翠(5381)

衡水湖沉积物营养盐形态分布特征及污染评价 ..... 张嘉雯, 魏健, 刘利, 王俭, 朱元荣, 段亮(5389)

宜兴市横山水库底泥内源污染及释放特征 ..... 崔会芳, 陈淑云, 杨春晖, 唐婉莹, 殷鹏, 尹洪斌(5400)

梅江流域清凉山水库沉积物重金属污染、生态风险评价及来源解析 ..... 江涛, 林伟稳, 曹英杰, 黎坤, 禚映雪, 李睿, 陈建耀(5410)

汉江流域金水河与淇河潜在硝化速率及硝化功能基因的影响因子 ..... 赵彬洁, 王旭, 张健, 谭香, 何睿, 周全, 史航, 张全发(5419)

山东省滨海旅游度假区水体环境典型全氟化合物污染特征及潜在生态风险 ..... 王世亮, 曹雪雅(5428)

太湖重点区域多介质水体中有机磷酸酯的分布特征及来源解析 ..... 吕佳佩, 张振飞, 刘杨, 张恒, 王春英, 罗莹, 郭昌胜, 徐建(5438)

岩溶地下水水体中有机氯农药和多氯联苯的残留特征及健康风险评价 ..... 叶凯, 孙玉川, 贾亚男, 朱琳跃, 徐昕(5448)

澜沧江硅藻的地理分布模式与关键驱动因素 ..... 孙胜浩, 陈娟, 王沛芳, 王超, 王洵, 苗令占, 刘胜, 袁秋生(5458)

白洋淀优势鱼类中喹诺酮类抗生素的生物累积特征及其与环境因子相关性 ..... 申立娜, 付雨, 张璐璐, 秦珊, 剧泽佳, 姚波, 崔建升(5470)

生物质粒径对负载MgO生物炭吸附水体中磷的影响 ..... 王鹏飞, 甄蒙蒙, 储昭升, 崔冠楠(5480)

Bi<sub>2</sub>MoO<sub>6</sub>/Bi<sub>2</sub>S<sub>3</sub>异质结构催化降解四环素-铜复合物 ..... 黄文鑫, 魏虎, 蒋彩云, 王玉萍(5488)

超滤膜负载UiO-66@Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>@UiO-66强化PPCPs去除和膜污染控制 ..... 尹越, 吴道文, 孙梦瑶, 吕路, 张炜铭(5500)

低温季节水平潜流和垂直潜流人工湿地尾水深度处理中试 ..... 廖雪珂, 严晗璐, 王智源, 陈诚, 何东, 吴月龙, 陈求稳(5509)

盐度渐增对水解微生物群落结构与功能的影响 ..... 高京, 张少华, 王锐, 金鹏康(5518)

限NH<sub>4</sub><sup>+</sup>和限NO<sub>2</sub><sup>-</sup>厌氧氨氧化系统的运行特性及微生物种群特征 ..... 宋家俊, 朱明奕, 郭凯成, 汪倩, 刘文如, 沈耀良(5527)

厌氧氨氧化菌富集培养过程微生物群落结构及多样性 ..... 闫冰, 夏嵩, 桂双林, 付嘉琦, 吴九九, 熊继海, 魏源送(5535)

二价铁活化过氧化钙提高剩余活性污泥的脱水性能 ..... 毕薇薇, 阮书瑜, 陈吴傲啸, 梁方艺, 陈智文, 谢松儒, 唐晶, 邓靖(5544)

中国北方某城市绿地土壤重金属空间分布特征、污染评价及来源解析 ..... 赵靓, 梁云平, 陈倩, 徐谦, 荆红卫(5552)

我国南方水稻产地镉环境质量类别划分技术 ..... 窦韦强, 安毅, 秦莉, 林大松, 董明明(5562)

晒在土壤-农作物系统中的分布特征及富硒土壤阈值 ..... 王锐, 邓海, 贾中民, 严明书, 周皎, 何忠庠, 梁绍标, 董金秀, 苏黎明(5571)

广东鼻咽癌高发区土壤-作物系统重金属迁移特征及健康风险评价 ..... 叶脉, 张景茹, 张路路, 李朝晖, 李兴远, 周永章(5579)

胺鲜酯与螯合剂GLDA联合强化柳枝稷吸收积累镉效果 ..... 王正, 孙兆军, SAMEH Mohamed, 王珍, 何俊, 韩磊(5589)

毛竹遗态Fe/C复合材料对As(V)污染土壤的钝化修复性能 ..... 赵宁宁, 何豪, 冯国杰, 朱宗强, 方雅莉, 李超, 朱义年, 张立浩(5600)

大麦虫幼虫肠道菌群对聚苯乙烯泡沫塑料降解 ..... 杨莉, 刘颖, 高婕, 彭霞薇, 白志辉, 庄绪亮(5609)

1株耐油甲醛降解菌的分离鉴定及降解特性 ..... 韩茜, 王蓉蓉, 史纯珍(5617)

铜尾矿白羊草叶际和根际细菌群落特征 ..... 贾彤, 姚玉珊, 王瑞宏(5628)

生物质炭施用对再生水灌溉空心菜根际微生物群落结构及多样性的影响 ..... 崔丙健, 崔二革, 胡超, 樊向阳, 高峰(5636)

废弃物基水热炭改良对水稻产量及氮素吸收的影响 ..... 侯朋福, 薛利红, 冯彦房, 余姗, 杨林章(5648)

基于GIS和PMF模型的石嘴山市土壤多环芳烃空间分布及来源解析 ..... 夏子书, 王玉玉, 钟艳霞, 白一茹, 王幼奇, 杨帆, 李鸣骥(5656)

氮肥和秸秆还田方式对麦玉轮作土壤N<sub>2</sub>O排放的影响 ..... 许宏伟, 李娜, 冯永忠, 任广鑫, 谢呈辉, 吕宏菲, 马星霞, 郝嘉琪(5668)

《环境科学》第41卷(2020年)总目录 ..... (5677)

《环境科学》征订启事(5344) 《环境科学》征稿简则(5361) 信息(5287, 5499, 5508)

# 1 株耐油甲醛降解菌的分离鉴定及降解特性

韩茜, 王蓉蓉, 史纯珍\*

(北京工商大学生态环境学院, 国家环境保护食品链污染防治重点实验室, 北京 100048)

**摘要:** 烹饪油烟的健康危害一直以来受到广泛关注. 以甲醛为代表的醛类污染物是烹饪油烟排放的主要污染物之一. 微生物法降解甲醛具有工艺简单、成本低及无污染等优点. 本研究从烹饪油烟冷凝液中分离筛选出 1 株具有甲醛降解能力的菌株 XF-1, 经序列鉴定结合菌落形态特征及生理生化试验, 该菌株被鉴定为解淀粉芽孢杆菌 (*Bacillus amyloliquefaciens* sp.). 该菌株具有能耐受高油环境的性能, 最大耐受浓度为  $900 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ . 在甲醛浓度为  $100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  的培养基中, 菌株 XF-1 在 34 h 内的甲醛降解率为 95.80%; 当甲醛初始浓度  $< 300 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  时, 菌株 XF-1 能够在 120 h 以内完全降解溶液中的甲醛; 甲醛浓度为  $800 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  时, 在 96 h, 菌株 XF-1 的降解率达到 73.01%, 并可耐受  $1.5 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  浓度的甲醛. 通过单因素 (pH、接种量、甲醛浓度和温度) 试验, 得到该菌株最佳生长温度为  $30^\circ\text{C}$ 、最佳生长 pH 为 6 左右, 最佳接种量为 10%. 利用 GC-TOF-MS 进一步分析测定了菌株的胞外代谢产物, 推测该菌株降解甲醛的途径可能为核酮糖单磷酸 (RuMP) 同化途径. 结果表明, 从烹饪油烟冷凝液中筛选得到的甲醛降解菌 XF-1 对甲醛具有良好的降解能力, 并能够耐受高油环境. 该菌对利用生物技术处理烹饪油烟中的甲醛具有良好的开发应用前景.

**关键词:** 甲醛; 芽孢杆菌属; 筛选鉴定; 降解特性; 代谢机制

中图分类号: X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)12-5617-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.202003282

## Isolation, Identification, and Degrading Characteristics of an Oil Resistant Formaldehyde-Degrading Bacterium

HAN Xi, WANG Rong-rong, SHI Chun-zhen\*

(State Environmental Protection Key Laboratory of Food Chain Pollution Control, College of Ecology and Environment, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China)

**Abstract:** In recent years, the health risks of cooking oil fumes have been widely concerning. Since formaldehyde is one of the major pollutants emitted from cooking oil fumes, the degradation of formaldehyde should be investigated. Due to the advances and innovations in the degradation of pollutants, biodegradation was evaluated in this research. In this study, we screened out the strain of XF-1, which can degrade formaldehyde from cooking oil fume condensates. The strain of XF-1 was identified as *Bacillus amyloliquefaciens* sp. by a sequence analysis combing morphology, physiological, and biochemical experiments. The degrading characteristics of the strain were further studied. In the medium with a formaldehyde concentration of  $100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , the efficiency of XF-1 for degrading formaldehyde was 95.80% within 34 h. When the initial concentration of formaldehyde was  $< 300 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , the XF-1 strain could completely degrade the formaldehyde within 120 h. When the formaldehyde concentration was  $800 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , the degradation rate of the XF-1 strain reached 73.01% at 96 h. The maximum tolerated concentration of formaldehyde was  $1500 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ . According to a single factor experiment (pH, inoculation amount, formaldehyde concentration, and temperature), the influence of each factor on the degradation of formaldehyde was studied. The optimal growth condition of the strain was  $30^\circ\text{C}$  at pH 6 with an inoculum amount of 10%. The degradation specificity of formaldehyde was studied by comparing it with that of other bacillus species. The results showed that XF-1 strain was specific with regard to the function of degrading formaldehyde and was able to withstand a high oil environment. The maximum tolerable oil concentration of XF-1 was  $900 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ . By analyzing the extracellular metabolites, it was determined that the metabolic pathway of formaldehyde degradation was the RuMP assimilation pathway. In this paper, a strain of formaldehyde degrading bacteria that was also resistant to oil was screened out and its metabolic mechanism was studied. The results indicated that the bacteria had broad application prospects in the treatment of formaldehyde emitted from cooking oil fumes.

**Key words:** formaldehyde; *Bacillus*; isolation and identification; degrading characteristics; metabolic mechanism

烹饪油烟是指食物烹饪和食品生产加工过程中挥发的油脂、有机质及热氧化和热裂解产生的混合物<sup>[1-3]</sup>, 具有显著的人体健康危害. 然而, 大部分烹饪油烟由于缺乏实用高效的油烟气净化技术, 未经处理直排至室外, 成为引起城市大气污染的重要排放源之一<sup>[4]</sup>. 烹饪油烟中含有多种挥发性有机物, 如烃类、醛类和酮类等<sup>[5,6]</sup>. 其中, 醛类污染物是最常见的污染物之一<sup>[7]</sup>, 在煎炸过程中其贡献的排放量大于 60%<sup>[8]</sup>. 而醛类污染物的排放又以甲醛和乙

醛为主<sup>[9-13]</sup>. 甲醛在我国优先控制致癌污染物名单中列居第二位<sup>[14]</sup>, 短期接触甲醛会导致人的嗅觉、肺功能异常, 而长期接触可引起各种慢性呼吸道疾病、中枢神经系统紊乱、记忆力和智力下降等<sup>[15]</sup>. 因

收稿日期: 2020-03-27; 修订日期: 2020-07-07

基金项目: 2019 年度北京市属高校高水平教师队伍支持计划青年拔尖人才培养计划项目 (CIT&TCD201904032); 国家自然科学基金项目 (21407006)

作者简介: 韩茜 (1995 ~), 女, 硕士, 主要研究方向为环境污染物的微生物降解机制, E-mail: 1531552737@qq.com

\* 通信作者, E-mail: shichunzhen@btbu.edu.cn

此,研究烹饪油烟中甲醛的净化技术具有重要意义.

甲醛去除方法主要有催化法<sup>[16]</sup>、吸附法<sup>[17]</sup>和等离子体净化法<sup>[18]</sup>等.这些去除方法取得了一定的研究进展,例如:以氧化锰为催化剂对甲醛进行净化,24 h 甲醛的去除率达到 92.3%<sup>[19]</sup>.以氮化硼为原料制成吸附剂去除甲醛,试验运行 4 次后,甲醛去除率可达到  $8.5 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ <sup>[20]</sup>.然而,这些方法存在成本高、体积大和去除效率低的问题<sup>[21,22]</sup>.如催化净化法去除成本较高,吸附法存在吸附能力随时间减弱和更换吸附剂的问题<sup>[23]</sup>.因此,开发一种成本低廉和操作简单的甲醛净化技术是目前亟待解决的问题.

微生物法处理污染物已应用在环境治理各个方面.微生物法废气净化技术是利用微生物废气中的有机组分作为其生命活动的能源或养分,经代谢分解,将其转化为简单的无机物或细胞组成物质.在生物过滤器中,增湿后的有机废气与附着在过滤材料表面的微生物接触时作为能源和营养物质被吸收,在微生物代谢过程中被分解为无害的无机物.因此,生物法具有成本低、安全性好和无二次污染等优点,已成为世界工业废气净化研究的热点之一<sup>[24,25]</sup>.研究微生物法处理醛类 VOCs 可能为烹饪油烟 VOCs 净化技术提供一种安全、高效和经济的解决方案.有研究筛选出针对降解油烟中的脂类、油酸、甲苯和己醛的不同菌种,进行纯种培养后的生物填料塔的降解能力可稳定在 85% 以上<sup>[26,27]</sup>.然而目前利用生物法去除烹饪油烟中甲醛的研究鲜见报道.在现有研究中,优势甲醛降解菌的种类主要包括从活性污泥或土壤等介质驯化分离得到的假单胞菌属和甲基营养菌属等<sup>[28,29]</sup>.由于这些菌株缺少耐油性能的相关研究,难以应用于烹饪油烟中的醛类降解.

本研究从油烟冷凝液中筛选分离得到 1 株耐油的甲醛降解菌.与其他的甲醛降解菌相比,它具有非常明确的耐油性能;并且通过对其进行胞外代谢产物的分析,初步推断了菌株降解甲醛的可能的代谢途径,以期为烹饪油烟的生物净化法提供了一定的试验基础和理论依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

#### 1.1.1 样品采集

本试验油烟冷凝液来源于北京工商大学西区食堂.样品采集后,置于 4℃ 冰箱中待后续试验使用.

#### 1.1.2 培养基

基础培养基 ( $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ ): 蛋白胨 10.0、琼脂 15.0、NaCl 5.0、 $\text{KH}_2\text{PO}_4$  0.45 和  $\text{Na}_2\text{HPO}_4$  0.47; 痕量金属

溶液  $1 \text{ mL} \cdot \text{L}^{-1}$ ; pH  $7.00 \pm 0.2$ , 121℃ 高压灭菌 40 min.

痕量金属溶液 ( $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ ):  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  0.55、 $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  0.23、 $\text{MnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  0.34、 $\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  0.075、 $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  0.047 和  $(\text{NH}_4)_6\text{MO}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  0.025.

无碳培养基 ( $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ ): 氯化铵 1.77、氯化钠 5、磷酸二氢钾 0.45、磷酸氢二钠 0.47、氯化钙 0.02 和硫酸镁 0.25; 痕量金属溶液  $1 \text{ mL} \cdot \text{L}^{-1}$ ; 原始 pH 为 6.60, 并在 121℃ 下灭菌

耐油菌的筛选培养基: 在灭菌后的基本培养基中加入油烟冷凝液.

复筛培养基: 在灭菌后的无碳培养基中加入适当浓度甲醛溶液.

### 1.1.3 主要试剂和仪器

$\text{NH}_4\text{Cl}$ 、 $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{MnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{KH}_2\text{PO}_4$ 、 $\text{Na}_2\text{HPO}_4$ 、 $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 、NaCl、LB 肉汤和蛋白胨等试剂购自北京半夏科技发展有限公司; 甲醛、乙醚和丙酮等试剂购自北京伊诺凯有限公司; BSTFA (with 1% TMCS, 体积比) 购自美国 REGIS Technologies; L-2-氯苯丙氨酸购自上海恒柏生物科技; 饱和脂肪酸甲酯购自 Dr. Ehrenstorfer; 甲氧铵盐购自东京化成工业株式会社.

分析天平, 北京赛多利科学仪器有限公司; 生化培养箱, 上海申贤恒温设备厂; 紫外可见分光光度计 (UV-2550), 日本岛津制作所; 高压蒸汽灭菌器, Panasonic 公司; 超净操作台, 哈尔滨市东联电子技术开发有限公司; 低温冷冻离心机, Sigma 公司; PCR 仪, TECHNE 公司; 智能冰箱, SAMSUNG 公司; 气相色谱 (7890A), Agilent 公司; 质谱仪 (PEGASUS HT), LECO; 超低温冰箱 (Forma 900 series), Thermo Fisher Scientific; 研磨仪 (JXFSTPRP-24), 上海净信科技有限公司.

## 1.2 试验方法

### 1.2.1 菌株分离和纯化

#### 1.2.1.1 菌株获取

取适量油烟冷凝液于洗净的烧杯中, 滤膜封口后在超声清洗机中超声 2 h, 取 1% 的油烟冷凝液加入到 100 mL 灭菌后的基础培养基中培养, 从摇瓶中取 100  $\mu\text{L}$  菌液涂布至营养琼脂的平板中分离纯化.

#### 1.2.1.2 菌株驯化培养

取分离纯化后的菌液按照 5% 的体积比加到灭菌的 LB 肉汤中, 摇瓶培养制成种子液, 在基础培养基中加入  $2.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  的甲醛, 置于  $170 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 、30℃ 的摇床中培养 24 h. 之后, 将 5 mL 的混合物接

种到新的 100 mL 基础培养基中培养, 并加入  $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  的甲醛置于相同条件培养 24 h. 以此类推, 甲醛浓度从  $2.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  升高至  $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  进行驯化培养. 富集结束后, 使用稀释涂布法和平板划线法筛选出能以甲醛为碳源生存的单菌落, 并分离纯化.

### 1.2.2 菌株鉴定

#### 1.2.2.1 菌株的形态学观察

将分离得到的菌株在平板上涂布后  $30^\circ\text{C}$  培养 2 d, 观察菌落形态. 通过电子显微镜和扫描电镜观察细菌的细胞形态及菌体大小.

扫描电镜样品制备: 取培养至稳定期的菌液 2 mL,  $8000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$  离心 5 min, 弃上清, 加入 40 倍菌体体积的 2.5% 戊二醛固定液, 置于  $4^\circ\text{C}$  冰箱中固定 2.5 h, 用磷酸盐缓冲液冲洗 3 遍, 依次用 50%、70%、90% 和 100% 乙醇进行梯度脱水, 每次脱水时间为 5 min. 脱水结束后, 用乙醇-叔丁醇溶液 (1:1, 体积比, 下同) 置换 20 min, 最后用 100% 叔丁醇置换两次, 每次 20 min. 置换后将样品进行冷冻干燥处理, 干燥后的样品进行离子溅射仪喷镀后, 扫描电子显微镜观察和拍照.

#### 1.2.2.2 菌株的生理生化试验

细菌的生理生化试验根据文献 [30] 进行革兰氏染色、过氧化氢酶、甲基红、吲哚、V-P 反应和淀粉水解等试验测定.

#### 1.2.2.3 16S rDNA 鉴定及系统发育分析

鉴定菌株划线接种于营养琼脂的平板中, 在  $30^\circ\text{C}$  霉菌培养箱中培养至对数期, 对该菌株 16S rDNA 基因序列分析. 利用 DNA 提取试剂盒提取总 DNA 作为 PCR 模板, 选用 16S 菌保守序列进行 PCR 扩增. 16S rDNA 扩增的引物为 27F: AGAGTTTGATCMTGGCTCAG 和 1492R: TACGGYTACCTTGTACGACTT. PCR 程序为:  $95^\circ\text{C}$  预变性 5 min,  $95^\circ\text{C}$  变性 30 s,  $55^\circ\text{C}$  退火 30 s,  $72^\circ\text{C}$  延伸 1 min, 循环 35 次;  $72^\circ\text{C}$  延伸 10 min,  $12^\circ\text{C}$  保存. 得到 750 bp 的片段, 测序得到菌株 XF-1 的 16S rDNA 全序列, 并将序列上传到 NCBI 基因库进行 BLAST 比对. 利用 MEGA 5.05 软件构造系统发育进化树.

### 1.2.3 菌株 XF-1 的降解性能

#### 1.2.3.1 不同培养条件对菌株降解能力的影响及降解过程的研究

取活化后的 XF-1 菌悬液分别按照不同接种量 (8%、10%、12%、15%、18% 和 20%) 接种至甲醛初始浓度为  $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  的培养基中. 每个梯度设置 3 个平行, 以空白培养基为对照. 将摇瓶置于转速为  $170 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 、温度为  $30^\circ\text{C}$  恒温摇床中培养, 定时取样测定培养基中甲醛浓度、 $D_{600}$  [此处的  $D_{600}$  代表溶

液在波长为 600 nm 处的吸光值 (optical density)] 和 pH. 配制含  $300 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  甲醛的培养基, 并进行灭菌. 冷却后, 取对数期的菌悬液以最佳接种量加入其中, 设置不同培养温度 ( $25^\circ\text{C}$ 、 $30^\circ\text{C}$ 、 $35^\circ\text{C}$  和  $40^\circ\text{C}$ ) 和 pH ( $5.0$ 、 $6.0$ 、 $7.0$  和  $8.0$ ), 将摇瓶置于转速为  $170 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$  进行培养. 每组做 3 个平行, 以空白培养基为对照. 培养至一定时间取样并测定培养基中的甲醛浓度.

#### 1.2.3.2 菌株对不同浓度的甲醛降解

为了研究菌株在不同甲醛浓度下的降解能力, 将甲醛浓度梯度分别设置为 100、200、300、500 和  $800 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ . 每个浓度梯度做 3 个平行, 以空白培养基为对照. 培养基中加入的微生物量为 10% (体积分数). 对照组培养基和不同浓度甲醛的培养基同时置于  $30^\circ\text{C}$ 、 $170 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$  的摇床中培养. 定时取样检测甲醛浓度, 所有取样均在无菌操作台里操作.

#### 1.2.3.3 菌株对甲醛的最大耐受浓度

按照 10% 的接种量分别将种子液接种于甲醛浓度为 100、300、800、1000、1500、2000 和  $3000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  的培养基中, 每个浓度梯度设置 2 个平行, 以空白不加菌的培养基为对照. 相同条件培养一段时间后对样品中的菌液稀释涂布进行活菌计数.

### 1.2.4 菌株 XF-1 的特异性

#### 1.2.4.1 菌株 XF-1 的耐油特性

将待测定的菌株活化后的种子液以 10% 的接种量接入至每 100 mL 含食用油 (已灭菌) 分别为 1、4、8、10、20、30、50、60、80 和 90 g 的无碳培养基中, 另将已冷却的接种环伸入菌液中蘸取一环菌液加到含有 100 g 食用油 (已灭菌) 的摇瓶中. 每个浓度梯度样品设置 2 个平行, 以空白不加菌的培养基为对照. 培养基同时置于  $30^\circ\text{C}$ 、 $170 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$  的摇床中培养, 培养一段时间后检测各摇瓶的细菌生长情况. 食用油质量浓度小于 50% 的样品采用重悬法检测  $D_{600}$ ; 食用油质量浓度大于 50% 的样品, 为避免干扰  $D_{600}$  检测结果, 故采用稀释涂布法进行活菌计数检测细菌生长情况.

#### 1.2.4.2 菌株降解甲醛的特异性

为了验证从油烟冷凝液中驯化得到的解淀粉芽孢杆菌 XF-1 具有可降解甲醛的特异性, 与其他解淀粉芽孢杆菌进行对比试验. 从中国微生物菌种保藏管理委员会普通微生物中心 (CGMCC) 购入两株解淀粉芽孢杆菌, 编号分别为 1.8716 和 1.8719 进行甲醛降解试验, 研究相同菌种的菌株对甲醛的降解能力. 甲醛浓度设置为  $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 每种菌株设置 3 个平行, 以空白培养基为对照. 对照组与试验组同时置于  $30^\circ\text{C}$ 、 $170 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$  的摇床中培养. 定时取样检

测微生物的生长情况和甲醛浓度的变化,所有取样均在无菌操作台里操作。

### 1.2.5 分析方法

#### 1.2.5.1 甲醛浓度的测定

参照 GB/T 13197-1991,取适量待测样品加入 10 mL 具塞刻度试管,用蒸馏水定容至 10 mL 刻度线后,吸取 2 mL 乙酰丙酮溶液加入该试管,混匀,60℃水浴 15 min,室温冷却 1 h 后,以蒸馏水为参比检测在波长 413 nm 处的吸光度.并建立如图 1 所示的甲醛标准曲线,线性范围为 0.2 ~ 3.5 mg·L<sup>-1</sup>,线性方程为  $y = 0.22073x + 0.00053$ ,相关度  $R^2 = 0.99997$ .

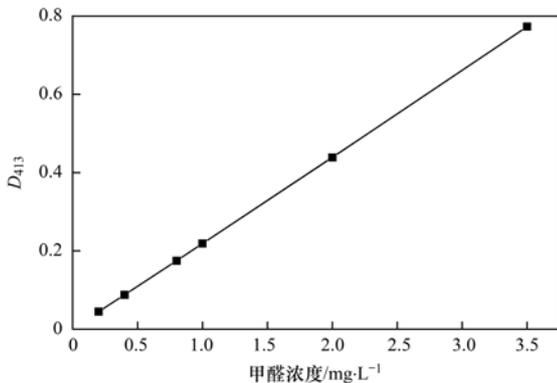


图 1 甲醛标准曲线

Fig. 1 Formaldehyde standard curve

#### 1.2.5.2 菌株生长曲线的测定

取 44 支盛有 5 mL LB 肉汤的试管,灭菌后备用.其中 33 支接种 0.175 mL 已培养 12 h 的菌液(使初始  $D_{600}$  达到 0.01).另 11 支作为对照.将 44 支试管置于恒温摇床中振荡培养,温度设置为 30℃、转速 170 r·min<sup>-1</sup>.每隔一段时间取样检测其在 600 nm 处的吸光度值,得到微生物生长曲线。

根据菌株在不同时间的生长数据,选择修正 SGompertz 模型<sup>[31,32]</sup>拟合降解菌的生长曲线.从而通过模型参数计算方程[公式(1)]推导得到最大比生长速率  $U$ [公式(2)].最终采用  $R^2$  对建立模型进行评价。

$$\ln(N_t/N_0) = a \times \exp\{-\exp[-k \times (x - x_c)]\} \quad (1)$$

由此可以得到  $U$  的计算公式:

$$U = a \times k/e \quad (2)$$

式中, $t$  为时间, $N_t$  和  $N_0$  分别表示在时间  $t$  时和初始时间时的微生物数量, $x_c$  为达到最大生长速率的时间, $e = 2.7182$ .

#### 1.2.5.3 重悬法检测 $D_{600}$

为防止食用油干扰细胞生长量的测定,采用以下方法排除干扰.取 4 mL 样品至离心管中,12 000

r·min<sup>-1</sup>、4℃离心 5 min 倾斜倒去上清液,收集湿菌体并用无菌水洗涤两次,最后将湿菌体转入 4 mL 无菌水中涡旋形成均匀稳定的悬浮液,以蒸馏水为参比,在分光光度计上于 600 nm 检测吸光度。

#### 1.2.5.4 胞外代谢产物测定

代谢物提取:取样本 300 μL 于 1.5 mL EP 管中,加入 300 μL 预冷甲醇提取液,再加入 10 μL L-2-氯苯丙氨酸,涡旋 30 s,然后将样品置于冰水浴中超声 10 min,4℃离心,12 000 r·min<sup>-1</sup>离心 15 min,小心移取 100 μL 上清液于 1.5 mL EP 管中,每个样本各取 50 μL 混合成 QC 样本;在真空浓缩器中干燥提取物并将干燥后的代谢物加入 60 μL 甲氧胺盐试剂(甲氧胺盐酸盐,溶于吡啶 20 mg·mL<sup>-1</sup>),轻轻混匀后,放入烘箱中 80℃孵育 30 min,再向每个样品中加入 80 μL BSTFA (含有 1% TMCS, 体积比),70℃孵育 1.5 h,冷却至室温后向混合的样本中加入 5 μL FAMES(溶于氯仿),随机顺序上机检测。

分析方法:使用 Agilent 7890 气相色谱仪-飞行时间质谱仪进行 GC-TOF-MS 分析,色谱柱:DB-5MS 毛细管柱(30 m × 250 μm × 0.25 μm, J&W Scientific, Folsom, CA, USA).以氦气为载体气体,前段进气吹扫流量为 3 mL·min<sup>-1</sup>,进样量为 1 μL,柱流速为 1 mL·min<sup>-1</sup>.升温程序:初始温度 50℃保持 1 min,以 10℃·min<sup>-1</sup>升至 310℃保持 8 min.前段进样口、传输线、离子源温度分别为 280、280 和 250℃,电子能量:70 eV,质谱数据在全扫描模式下获得, $m/z$  范围为 50 ~ 500,溶剂延迟为 6.30 min。

数据处理:使用 ChromaTOF 软件(V 4.3x, LECO)对质谱数据进行了峰提取、基线矫正、解卷积、峰积分和峰对齐等分析.对物质定性工作中,使用了 LECO-Fiehn Rtx5 数据库,包括质谱匹配及保留时间指数匹配。

## 2 结果与讨论

### 2.1 菌种的鉴定

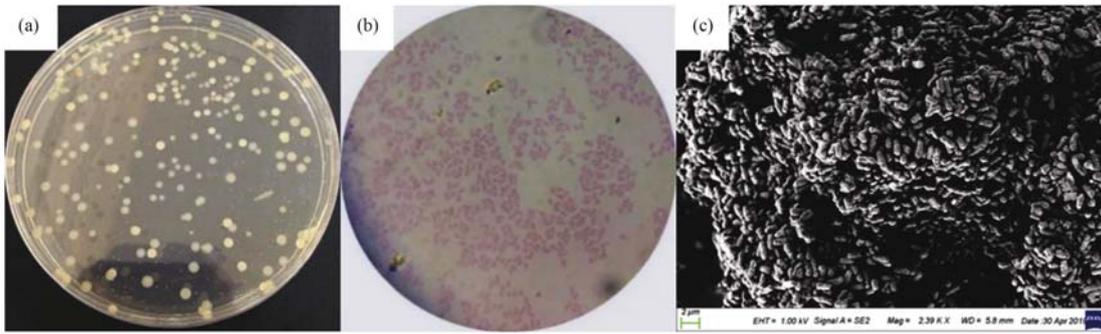
#### 2.1.1 菌株的形态特征观察

筛选分离后,对得到的可降解甲醛的菌株 XF-1 进行形态特征观察.如图 2 所示,可以观察到菌株 XF-1 呈清晰的单菌落,菌株大小 2 mm,圆形,边缘规则,凸起,不透明,乳白色,表面光滑。

通过电子显微镜和扫描电镜进行观察,该菌株呈短杆状,有芽孢产生,为革兰氏染色阳性菌。

#### 2.1.2 菌株的生理生化结果及分子生物学鉴定

菌株 XF-1 的 5 个生理生化试验结果显示(表 1),为革兰氏阳性菌,吡啶试验阴性,V-P 试验阳性,



(a) 平板; (b) 电子显微镜; (c) 扫描电镜

图 2 菌株在平板、电子显微镜下观察和扫描电镜下观察的形态

Fig. 2 Plate, electron microscope, and transmission electron microscope photos of the XF-1 strain

淀粉水解试验阳性, 过氧化氢酶试验阳性. 对菌株的 DNA 进行 PCR 扩增及 16S rDNA 基因鉴定后, 根据 BLAST 结果, 表明该菌株与 *Bacillus* sp. 亲源关系最近, 同源性达 99% 以上. 在 NCBI 上匹配与菌株 XF-

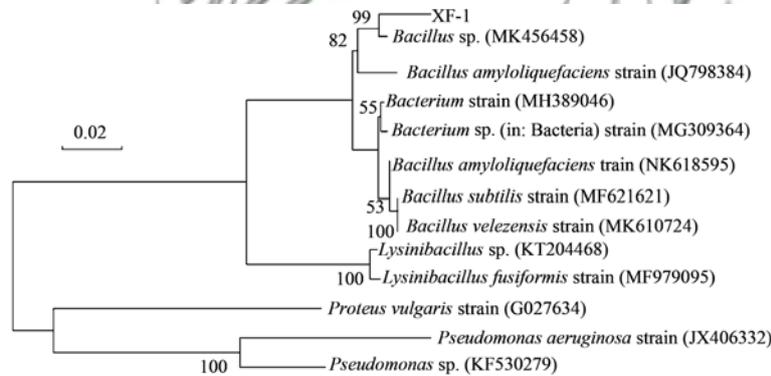
1 所测序列较高相似性的序列, 在 MEGA 5.05 软件中绘制系统发育树图(图 3). 结合菌株的形态观察结果及生理生化试验结果, 确定该菌株鉴定为解淀粉芽孢杆菌.

表 1 生理生化特性鉴定结果<sup>1)</sup>

Table 1 Identification results of the physiological and biochemical characteristics

鉴定试验	革兰氏染色	过氧化氢酶试验	甲基红试验	吲哚试验	V-P 反应	淀粉水解试验
试验结果	+	+	-	-	+	+

1) “+”表示阳性, “-”表示阴性



参与比对序列的 GenBank 登录号列于括号中, 标尺表示序列差异的分支长度

图 3 菌株 XF-1 的系统发育进化树

Fig. 3 Phylogenetic tree derived from 16S rDNA sequences of the XF-1 strain

### 2.1.3 菌株的生长曲线及动力学模型拟合

菌株 XF-1 的生长曲线如图 4 所示. 从中可知, 菌株在 6 ~ 10 h 达到最大生长率速度, 菌株的  $D_{600}$  值最高达  $1.25 \pm 0.036$ . 运用 Origin 软件, 选用 SGompertz 模型拟合菌株的生长曲线 ( $R^2 = 0.985$ ), 如图 4 所示. 根据 1.2.5.2 节中提到的公式(1)计算得到, 菌株达到最大生长速率所需时间  $x_c$  为 6.04 h; 接着由 [公式(2)] 计算可得到菌株的最大比增长率:

$$U = a \cdot k / e = 0.07$$

### 2.2 不同条件下, 接种量、pH 和温度对菌株 XF-1 降解甲醛的影响

为了确定 XF-1 菌株对甲醛的最佳降解效果, 分

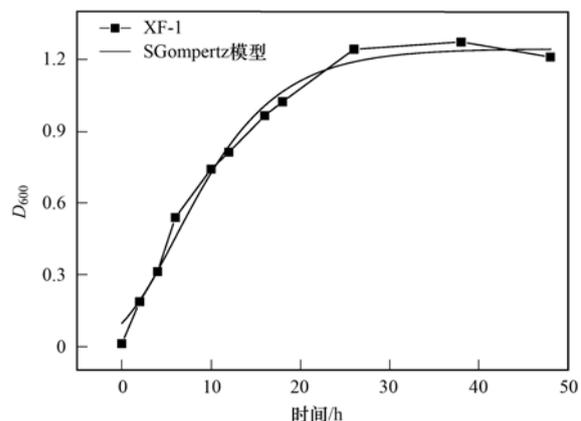


图 4 SGompertz 模型拟合的 *Bacillus* sp. XF-1 的生长曲线

Fig. 4 Growth curve of the XF-1 strain and SGompertz fit of the XF-1 strain

别考察不同接种量、温度和 pH 对菌株降解甲醛性能的影响,以获得最佳降解条件参数.

### 2.2.1 接种量

分别以质量分数为 8%、10%、12%、15%、18% 和 20% 的菌液接种量接种活化后的 XF-1 菌悬液至含  $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  甲醛的培养基中,结果如图 5 所示,甲醛在培养基中的浓度随着时间延长而不断降低. 其中,10% 接种量的甲醛浓度曲线为实线,其余接种量为虚线. 从图 5 中可知,随着接种量的增大,甲醛降解速率随之增加,接种量几乎与甲醛降解成正相关. 在 6 h 以后,除 8% 外,其余接种量条件下的甲醛降解率没有显著差异. 即在接种量达 10% 以后,降解率不再随接种量的增大而显著增加.

由图 6(a) 可得:当接种量为 18% 和 20% 时,虽然降解速率明显在 4 h 高于其他接种量,但由于细菌数较大使得彼此之间的竞争激烈,其衰亡时间也较其他接种量提前,而 10%、12% 和 15% 的接种量所对应的细菌生长量变化较为一致,8% 接种量的降解效果比 10% ~ 20% 接种量的差,因而可认为 10% 为最佳接种量. 图 6(b) 为 XF-1 菌降解甲醛时

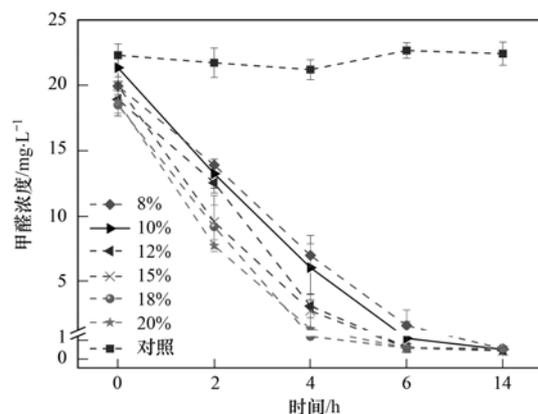


图 5 不同接种量下,菌株 XF-1 降解甲醛时甲醛浓度随时间的变化

Fig. 5 Change in the formaldehyde concentration over time when XF-1 degrades formaldehyde under different inoculation conditions

pH 随时间的变化,从图 5 和图 6 可知,随着时间的变化,pH 不断增大,其甲醛浓度逐渐减小,细菌生长量呈先升高后降低趋势,但各试验组间的 pH 变化相差不大. 综合不同接种量条件下菌株 XF-1 降解甲醛的甲醛浓度变化、 $D_{600}$  和 pH 检测结果分析,可判定 10% 为最佳接种量.

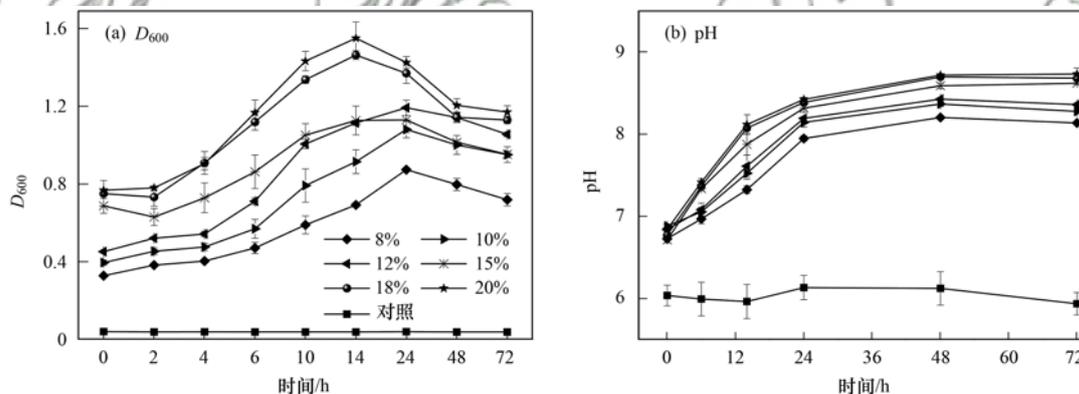


图 6 不同接种量下,菌株 XF-1 降解甲醛时  $D_{600}$  与 pH 随时间的变化

Fig. 6 Change of  $D_{600}$  and pH over time when the bacteria XF-1 degraded formaldehyde at different inoculation quantities

### 2.2.2 pH

选取 4 个 pH 梯度,通过  $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  的 HCl 和 20% 的 NaOH 将初始 pH 分别调为 5.0、6.0、7.0 和 8.0. 以  $300 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  为甲醛初始浓度研究 pH 对菌株 XF-1 降解甲醛的影响,结果如图 7 所示. 尽管菌株在 pH 为 5 ~ 8 时都可以生长,但 pH 等于 6 时的降解效果最好,降解率可达 94.61%,当初始 pH 大于 6 时,降解能力减弱. 微生物在降解污染物的过程中,微生物活性是影响降解率的关键因素. 本研究中,菌株 XF-1 生长的最佳 pH 为 6,在微生物降解 VOCs 的过程中,酸碱环境会改变底物和酶的带电状态,进而影响酶和底物的特异性结合. 当微生物处于最适 pH 范围内会增大活性,达到最佳的状态<sup>[33]</sup>.

### 2.2.3 温度

以  $300 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  为甲醛初始浓度,分别在不同温度 25、30、35 和  $40^\circ\text{C}$  培养时,温度对菌株 XF-1 降解甲醛的影响如图 8 所示. 在 144 h 时,温度为  $30^\circ\text{C}$ ,菌株降解甲醛能力最佳,降解率为 76.5%,而在  $40^\circ\text{C}$  时,甲醛降解率仅为 49.62%. 菌株 XF-1 最佳生长温度为  $30^\circ\text{C}$  左右,这与张娟等<sup>[34]</sup>的研究发现解淀粉芽孢杆菌的培养温度一致.

### 2.3 菌株 XF-1 对不同浓度甲醛的降解及其最大耐受浓度

菌株 XF-1 对不同浓度甲醛的降解能力如图 9 所示,当甲醛浓度分别为 100、200、300、500 和  $800 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  时,菌株 XF-1 在 48 h 对  $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  甲醛的

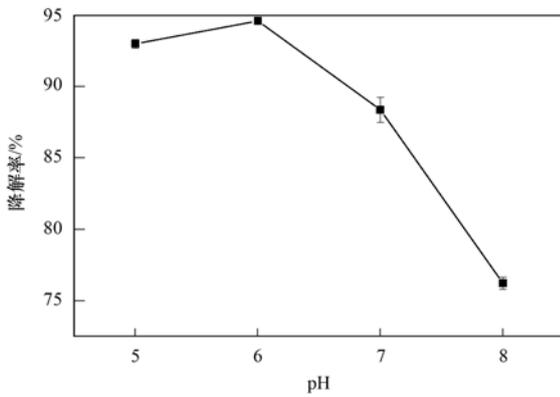


图7 甲醛初始浓度为  $300 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  时, 菌株 XF-1 在不同 pH 下对甲醛降解率的变化

Fig. 7 Change in the formaldehyde degradation rate of the XF-1 strain at different pH levels when the initial concentration of formaldehyde was  $300 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$

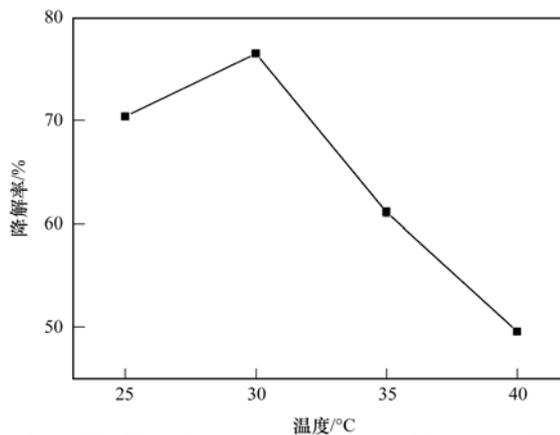


图8 甲醛初始浓度为  $300 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  时, 菌株 XF-1 在不同温度下对甲醛降解率的变化

Fig. 8 Change in the formaldehyde degradation rate of the XF-1 strain at different temperature when the initial concentration of formaldehydes was  $300 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$

降解效率可达 99.63%; 在 96 h, 菌株 XF-1 对  $300 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  甲醛的降解效率可达 89.46%, 对  $800 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  甲醛的降解效率可达到 73.01%。菌株 XF-1 对甲醛有良好的降解能力。

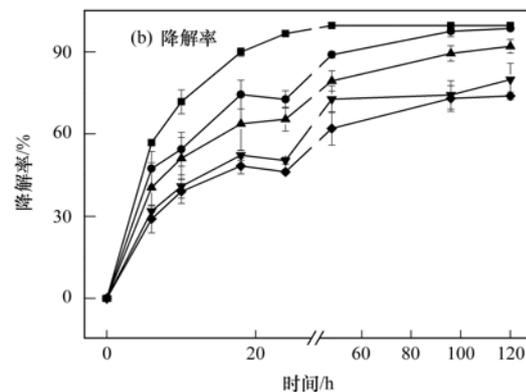
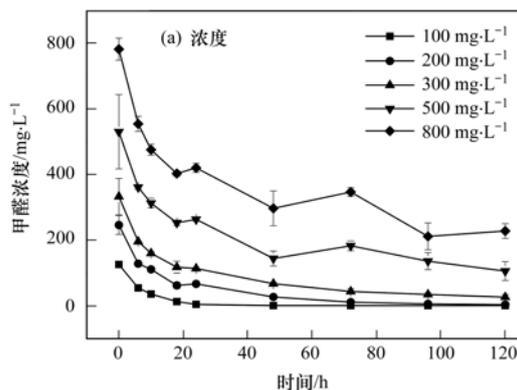


图9 菌株 XF-1 对不同浓度甲醛的降解能力

Fig. 9 Ability of the XF-1 strain to degrade formaldehyde at different concentrations

分别对甲醛浓度为 100、300、800、1 000、1 500、2 000 和 3 000  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  的培养基中的菌液稀释涂布进行活菌计数。在培养一段时间后, 对培养基中的菌液稀释涂布计数, 发现其细菌数呈下降趋势, 表明甲醛对菌株 XF-1 存在一定的生长抑制。同时, 如图 10 所示, 在 50 h, 菌株 XF-1 对甲醛的去除效率开始随着时间变化趋于平缓, 表明菌株对该浓度甲醛的降解能力接近最大, 故对培养至 50 h 的菌液稀释涂布进行活菌计数进而研究其对甲醛的最大耐受浓度。本试验发现, 当培养至 50 h 时, 甲醛浓度大于  $1.5 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  的菌液在平板上没有长出菌落, 而其他甲醛浓度小于  $1.5 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  的菌液经过稀释涂布在平板上均有菌落长出 (图 10), 最后得到菌株 XF-1 的最大耐受甲醛浓度为  $1.5 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

现有研究中甲醛降解菌对不同浓度的甲醛的降解效率和最大耐受浓度存在一定的差异, 如张明等<sup>[35]</sup>以甲醛为唯一碳源, 在小型试验填料塔内长满生物膜的陶粒上分离纯化出两株甲醛降解菌 P1 和 Q1, 在含甲醛浓度  $300 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  的培养基中, 菌株 P1 在 44 h 内的甲醛降解率为 92.8%, 菌株 Q1 在 28 h 内的甲醛降解率为 97.9%。钟卫鸿等<sup>[36]</sup>从污水处理厂收集的土壤中分离到一株能降解甲醛的菌株, 其对甲醛的最大耐受浓度为  $1.2 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。结合试验数据与上述结果进行比较, 表明菌株 XF-1 可以耐受较高浓度的甲醛并且具有良好的甲醛降解能力。

## 2.4 菌株 XF-1 的特异性

### 2.4.1 3 株解淀粉芽孢杆菌对甲醛的降解

从中国微生物菌种保藏管理委员会普通微生物中心 (CGMCC) 购入两株编号分别为 1.8716 和 1.8719 的解淀粉芽孢杆菌, 将其和菌株 XF-1 以相同条件培养进行甲醛降解试验, 3 株解淀粉芽孢杆菌对甲醛的降解效果如图 11 所示, 从中可知, 虽然菌株皆为解淀粉芽孢杆菌, 但从油烟冷凝液中筛选、驯化后的菌株 XF-1 与其他两株菌相比, 对甲醛具有

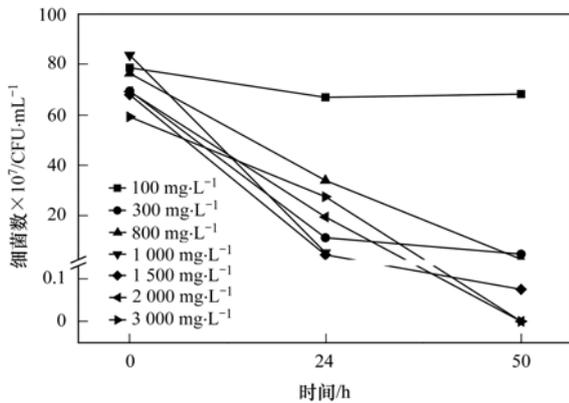


图 10 菌株 XF-1 在不同甲醛浓度培养时细菌数随时间的变化  
Fig. 10 Changes in bacterial number over time in the XF-1 strain culture at different formaldehyde concentrations

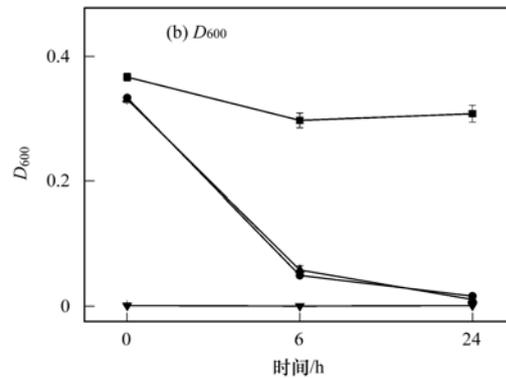
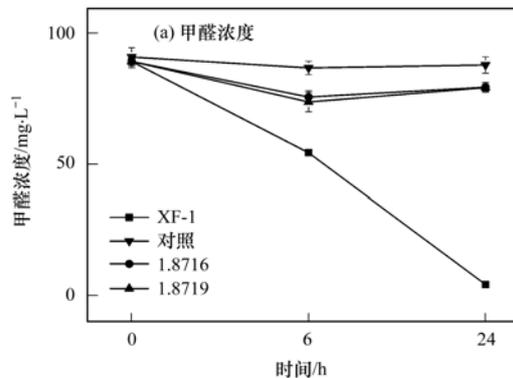


图 11 3 株解淀粉芽孢杆菌甲醛浓度和  $D_{600}$  随时间的变化

Fig. 11 Changes in formaldehyde concentration and  $D_{600}$  of three *Bacillus amyloliquefaciens* sp.

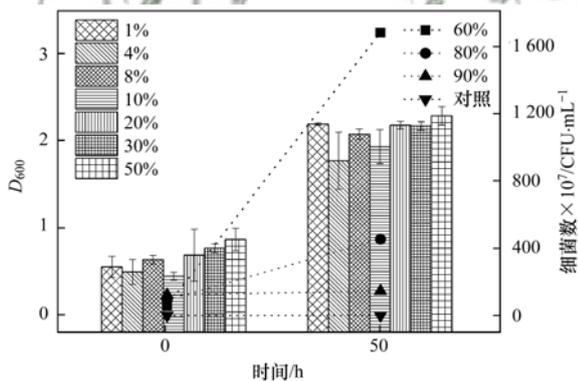


图 12 不同质量分数食用油下, 菌株  $D_{600}$  或细菌数随时间的变化

Fig. 12 Variation of  $D_{600}$  or bacteria number with time at different mass fraction of edible oil

80% 的样品细菌数有明显升高的趋势, 90% 细菌数几乎没有变化, 但是将菌株接种在含 100% 质量分数食用油的样品中并培养 48 h 后, 对样品稀释涂布发现没有菌落长出. 试验表明 1%~80% 质量分数的食用油条件下, 菌株可以良好生长, 最大可以耐受 90% 质量分数, 即  $900 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$  的食用油. 表明菌株 XF-1 可以耐受高油环境, 可以为生物法降解烹饪油烟中的甲醛提供优良的菌株资源.

一定的耐受性和更好的降解效果. 编号为 1.8716 和 1.8719 的解淀粉芽孢杆菌在 6 h 时,  $D_{600}$  从最初的 0.33 下降至 0.05, 表示菌株由于甲醛的毒性抑制, 菌体大部分失活死亡.

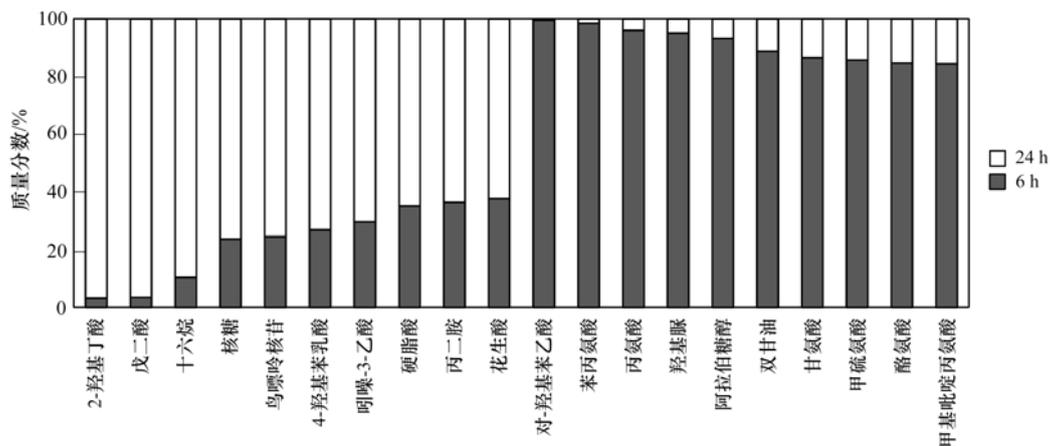
#### 2.4.2 菌株的耐油特性

于食用油质量分别为 1%、4%、8%、10%、20%、30% 和 50% 的无碳培养基中加入 10% 的菌液, 培养一段时间后采用重悬法检测  $D_{600}$ , 如图 12 所示, 含 1%~50% 质量分数食用油的样品  $D_{600}$  均有明显增高. 为防止较大食用油含量影响重悬法检测  $D_{600}$  的准确性, 当食用油质量分数大于 50% 时, 利用活菌计数法检测细菌生长情况. 通过试验发现, 含 60%、80% 和 90% 质量分数食用油的样品经过 48 h 培养

#### 2.5 甲醛降解途径分析

利用 GC-TOF-MS 对胞外代谢产物进行检测分析, 共筛选得到 66 种代谢物. 将 6 h 和 24 h 样品中测得的代谢产物进行比较. 随着时间的变化, 其中有 26 种代谢物上调, 包括 2-羟基丁酸、戊二酸和核糖等; 33 种代谢物下调, 如对-羟基苯乙酸、苯丙氨酸、丙氨酸 (如图 13). 另外有 2 种代谢物只出现在 6 h 的样品中, 分别是苯乙酸和果糖; 5 种代谢物单独存在于 24 h 的样品中, 分别为乙醇胺、甘油、核糖酸、葡萄糖内酯和色醇.

有研究发现生物法降解甲醛过程中甲醛代谢途径主要分为同化与异化两种途径<sup>[37]</sup>. 同化作用主要包括丝氨酸途径 (Serine) 和核酮糖单磷酸途径 (RuMP). 丝氨酸循环途径是通过 C3 化合物酸化生成苹果酸, 苹果酸被再次分解生成甘氨酸. 而 RuMP 途径是存在于许多甲基营养菌中的甲醇、甲酸、甲胺等一碳化合物的同化途径, 磷酸己酮糖合成酶 (HPS) 和磷酸果糖异构酶 (PHI) 是 RuMP 代谢途径的关键酶, 而这两种酶普遍存在于甲基营养菌中<sup>[38]</sup>. 甲醛在整个微生物氧化过程中处于一个中心位置, 作为大多数甲基基质氧化的一个普遍的中间



列举相对变化分别为前十的代谢物

图 13 在不同生长阶段代谢物浓度的相对变化

Fig. 13 Relative changes in metabolite concentrations at different growth stages

体. 在微生物细胞内, 游离甲醛首先通过与各种辅因子的结合形成加合物而脱毒<sup>[39]</sup>.

异化途径主要包括四氢叶酸途径、四氢甲烷蝶呤途径和谷胱甘肽途径<sup>[37]</sup>, 在这 3 种异化途径过程中, 这些反应产生的甲醛加合物主要被甲醛脱氢酶催化氧化为甲酸, 甲酸继而在甲酸脱氢酶的作用下被微生物利用生成 CO<sub>2</sub> 和再生辅因子, 同时提供能量供微生物生长, 其代谢途径产生的甲酸可能会导致 pH 降低<sup>[40]</sup>, 在研究不同接种量对菌株降解能力的影响试验中, 通过检测 pH 指标发现, 试验组随着时间变化, pH 逐渐上升[图 6(b)], 所以推测 XF-1 菌株降解甲醛的途径可能不是通过异化途径进行而是其他代谢途径.

通过对不同时间的胞外代谢产物分析发现, 6 h 样品中检测得到的代谢物果糖并未在 24 h 对应的样品中检测到, 且 24 h 样品主要出现的代谢物包含甘油和核糖. 将这些差异代谢物与前人关于甲醛代谢途径的研究进行比对发现, 本试验结果与 RuMP 途径呈现部分吻合. 在 RuMP 代谢途径中, 6-磷酸果糖(F6P)是在同化作用第一阶段出现的, 在第二阶段会断裂形成 3-磷酸甘油醛(GAP)和磷酸二羟丙酮(DHAP), 而 5-磷酸核糖(Ri5P)是在第三阶段 3-磷酸甘油醛(GAP)通过醛羧酶催化生成的, 这一现象恰与本试验结果相一致. 目前芽孢杆菌作为非甲基营养菌, 其同化甲醛的机制还未研究全面, 但是枯草芽孢杆菌中 HPS 和 PHI 在非甲基营养生物中的生理作用已得到证实<sup>[41]</sup>, 程琴等<sup>[42]</sup>利用激光光镊拉曼光谱系统研究不同浓度甲醛胁迫枯草芽孢杆菌萌发后 2 h 内孢子的响应过程, 发现芽孢杆菌的营养细胞和萌发后孢子对一定浓度的甲醛有耐受能力并且表明营养细胞在甲醛的诱导下, 可以通过 RuMP 途径代谢甲醛进行脱毒. 综上, 初步推测菌株

XF-1 的甲醛降解途径可能为同化途径——核酮糖单磷酸途径.

### 3 结论

(1) 从油烟冷凝液中分离驯化得到 1 株可降解甲醛的菌株, 该菌具有良好的耐油性, 可在高浓度的油脂中存活, 最大可耐受 900 g·L<sup>-1</sup> 的食用油. 通过生理生化以及分子生物学分析, 鉴定该菌株 XF-1 为解淀粉芽孢杆菌(*Bacillus amyloliquefaciens* sp.)

(2) 对菌株 XF-1 降解甲醛的最适条件进行了初步探索, 试验结果表明: 菌株 XF-1 的适宜初始 pH 为 6, 最佳接种量为 10%, 适宜温度为 30℃; 对其生长曲线及生长动力学进行研究, 确定该菌的最佳活性时间(即菌株达到最大生长速率所需时间)为 6.04 h, 这为后期菌株的实际应用提供了理论依据.

(3) 考察了不同初始浓度下菌株 XF-1 对甲醛的降解性能. 结果表明: 随着甲醛浓度的增大, 菌株完全降解甲醛的时间随之延长. 当甲醛浓度为 100 mg·L<sup>-1</sup> 时, 菌株 XF-1 在 48 h 的降解效率可达 99.63%; 当甲醛浓度为 300 mg·L<sup>-1</sup> 时, 在 96 h 的降解率可达 89.46%; 当甲醛浓度为 800 mg·L<sup>-1</sup> 时, 菌株 XF-1 在 96 h 的降解率达到 73.01%. 另外, 菌株 XF-1 对甲醛的最大耐受浓度为 1.5 g·L<sup>-1</sup>.

(4) 通过对菌株的胞外代谢物进行分析, 初步推测该菌降解甲醛的代谢途径可能为同化途径的核酮糖单磷酸途径.

(5) 综上, 菌株 XF-1 是性能良好的耐油甲醛降解菌, 该研究为烹饪油烟的生物净化法提供了一定的试验基础和理论依据.

#### 参考文献:

[1] 何万清, 聂磊, 田刚, 等. 基于 GC-MS 的烹调油烟 VOCs 的

- 组分研究[J]. 环境科学, 2013, **34**(12): 4605-4611.
- He W Q, Nie L, Tian G, *et al.* Study on the chemical compositions of VOCs emitted by cooking oils based on GC-MS [J]. Environmental Science, 2013, **34**(12): 4605-4611.
- [ 2 ] Xue Y B, Jiang Y, Jin S, *et al.* Association between cooking oil fume exposure and lung cancer among Chinese nonsmoking women: a meta-analysis [J]. OncoTargets and Therapy, 2016, **9**: 2987-2992.
- [ 3 ] Yin Z H, Li H, Cui Z G, *et al.* Polymorphisms in pre-miRNA genes and cooking oil fume exposure as well as their interaction on the risk of lung cancer in a Chinese nonsmoking female population [J]. OncoTargets and Therapy, 2016, **9**: 395-401.
- [ 4 ] 朱春, 李旻雯, 缪盈盈, 等. 城市烹饪油烟颗粒物排放特性分析[J]. 绿色建筑, 2014, (5): 57-60, 71.
- Zhu C, Li M W, Miu Y Y, *et al.* Analysis of characters of particulate emissions generated from urban cooking fume [J]. Green Building, 2014, (5): 57-60, 71.
- [ 5 ] 高雅琴, 王红丽, 许睿哲, 等. 餐饮源挥发性有机物组成及排放特征[J]. 环境科学, 2019, **40**(4): 1627-1633.
- Gao Y Q, Wang H L, Xu R Z, *et al.* Characterization of volatile organic compounds from cooking emissions [J]. Environmental Science, 2019, **40**(4): 1627-1633.
- [ 6 ] Yi H H, Huang Y H, Tang X L, *et al.* Mn-CeOx/MeOx (Ti, Al)/cordierite preparation with ultrasound-assisted for non-methane hydrocarbon removal from cooking oil fumes [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2019, **53**: 126-133.
- [ 7 ] Peng C Y, Lan C H, Lin P C, *et al.* Effects of cooking method, cooking oil, and food type on aldehyde emissions in cooking oil fumes [J]. Journal of Hazardous Materials, 2017, **324**: 160-167.
- [ 8 ] Klein F, Platt S M, Farren N J, *et al.* Characterization of gas-phase organics using proton transfer reaction time-of-flight mass spectrometry: Cooking emissions [J]. Environmental Science & Technology, 2016, **50**(3): 1243-1250.
- [ 9 ] Wu M T, Lin P C, Pan C H, *et al.* Risk assessment of personal exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons and aldehydes in three commercial cooking workplaces [J]. Scientific Reports, 2019, **9**(1), doi: 10.1038/s41598-018-38082-5.
- [ 10 ] Cheng J H, Lee Y S, Chen K S. Carbonyl compounds in dining areas, kitchens and exhaust streams in restaurants with varying cooking methods in Kaohsiung, Taiwan [J]. Journal of Environmental Sciences, 2016, **41**: 218-226.
- [ 11 ] Alves C A, Evtugina M, Cerqueira M, *et al.* Volatile organic compounds emitted by the stacks of restaurants [J]. Air Quality, Atmosphere & Health, 2015, **8**(4): 401-412.
- [ 12 ] 程婧晨, 崔彤, 何万清, 等. 北京市典型餐饮企业油烟中醛酮类化合物污染特征 [J]. 环境科学, 2015, **36**(8): 2743-2749.
- Cheng J C, Cui T, He W Q, *et al.* Pollution characteristics of aldehydes and ketones compounds in the exhaust of Beijing typical restaurants [J]. Environmental Science, 2015, **36**(8): 2743-2749.
- [ 13 ] Lin J M, Liou S J. Aliphatic aldehydes produced by heating Chinese cooking oils [J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2000, **64**(6): 817-824.
- [ 14 ] 徐云, 金晶, 郑重, 等. 高活性高耐受甲醛降解菌株的分离鉴定及降解条件研究 [J]. 环境科学, 2010, **31**(10): 2481-2486.
- Xu Y, Jin J, Zheng Z, *et al.* Isolation, identification and conditions of bacterial strain capable to metabolize high concentrations of formaldehyde [J]. Environmental Science, 2010, **31**(10): 2481-2486.
- [ 15 ] 冯永, 王茹, 陈丽梅. 固定沼泽红假单胞菌构建悬浮式生物反应器对室内甲醛的去除 [J]. 环境工程学报, 2018, **12**(4): 1071-1082.
- Feng Y, Wang R, Chen L M. Performance of suspension bioreactor with fixed *Rhodospseudomonas palustris* for removal of formaldehyde in indoor [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2018, **12**(4): 1071-1082.
- [ 16 ] Bai B Y, Qiao Q, Li J H, *et al.* Progress in research on catalysts for catalytic oxidation of formaldehyde [J]. Chinese Journal of Catalysis, 2016, **37**(1): 102-122.
- [ 17 ] 蒋昕楠, 孔振凯, 王际童, 等. 高锰酸钾改性球形中孔炭的甲醛吸附性能 [J]. 环境工程学报, 2018, **12**(6): 1676-1682.
- Jiang X N, Kong Z K, Wang J T, *et al.* Formaldehyde adsorption performance of KMnO<sub>4</sub> modified mesoporous carbon spheres [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2018, **12**(6): 1676-1682.
- [ 18 ] 高丁丁, 蒙冕武, 谢君梁, 等. 改性活性炭纤维协同等离子体去除甲醛 [J]. 环境工程, 2018, **36**(12): 125-129.
- Gao D D, Meng M W, Xie J L, *et al.* Formaldehyde removal by modified activated carbon fiber combined with plasma [J]. Environmental Engineering, 2018, **36**(12): 125-129.
- [ 19 ] Sekine Y. Oxidative decomposition of formaldehyde by metal oxides at room temperature [J]. Atmospheric Environment, 2002, **36**(35): 5543-5547.
- [ 20 ] Ye J W, Zhu X F, Cheng B, *et al.* Few-layered graphene-like boron nitride: a highly efficient adsorbent for indoor formaldehyde removal [J]. Environmental Science & Technology Letters, 2017, **4**(1): 20-25.
- [ 21 ] Bao M T, Chen Q G, Li Y M, *et al.* Biodegradation of partially hydrolyzed polyacrylamide by bacteria isolated from production water after polymer flooding in an oil field [J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, **184**(1-3): 105-110.
- [ 22 ] Miao L, Wang J L, Zhang P Y, *et al.* Review on manganese dioxide for catalytic oxidation of airborne formaldehyde [J]. Applied Surface Science, 2019, **466**: 441-453.
- [ 23 ] 姜威. 吸附法油烟处理研究 [J]. 现代农业, 2009, (5): 104-105.
- [ 24 ] Dhamodharan K, Varma V S, Veluchamy C, *et al.* Emission of volatile organic compounds from composting: a review on assessment, treatment and perspectives [J]. Science of the Total Environment, 2019, **695**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.133725.
- [ 25 ] Rezaei M, Moussavi G, Naddafi K, *et al.* Enhanced biodegradation of styrene vapors in the biotrickling filter inoculated with biosurfactant-generating bacteria under H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> stimulation [J]. Science of the Total Environment, 2020, **704**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.135325.
- [ 26 ] 刘超, 廖雷, 魏建文, 等. 不同填料-液相油烟微生物降解动力学研究 [J]. 环境科学与技术, 2016, **39**(11): 95-100.
- Liu C, Liao L, Wei J W, *et al.* Kinetic study on the biodegrading pollutants from cooking fume in different bio-packing [J]. Environmental Science & Technology, 2016, **39**(11): 95-100.
- [ 27 ] 徐健全, 茹江华, 郑连英. 固定化混合菌降解油烟废气的研究 [J]. 中国粮油学报, 2006, **21**(4): 97-100, 105.
- Xu J Q, Ru J H, Zheng L Y. Degradation of oil smoke with immobilized bacteria [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2006, **21**(4): 97-100, 105.
- [ 28 ] Yu D S, Song G, Song L L, *et al.* Formaldehyde degradation by

- a newly isolated fungus *Aspergillus* sp. HUA[J]. International Journal of Environmental Science and Technology, 2015, **12** (1): 247-254.
- [29] 谢文娟, 王洁, 孙佩石, 等. 高效降解甲醛菌株的分离鉴定及其特性[J]. 微生物学通报, 2011, **38**(11): 1626-1631.  
Xie W J, Wang J, Sun P S, *et al.* Isolation and identification of bacterial strains efficient degrading formaldehyde and their degrading characteristics [J]. Microbiology China, 2011, **38** (11): 1626-1631.
- [30] 东秀珠, 蔡妙英. 常见细菌系统鉴定手册[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [31] Zwietering M H, Jongenburger I, Rombouts F M, *et al.* Modeling of the bacterial growth curve [J]. Applied and Environmental Microbiology, 1990, **56**(6): 1875-1881.
- [32] Tjørve K M C, Tjørve E. The use of Gompertz models in growth analyses, and new Gompertz-model approach: an addition to the Unified-Richards family[J]. PLoS One, 2017, **12** (6), doi: 10.1371/journal.pone.0178691.
- [33] Zhou X, Jin W B, Sun C F, *et al.* Microbial degradation of *N,N*-dimethylformamide by *Paracoccus* sp. strain DMF-3 from activated sludge[J]. Chemical Engineering Journal, 2018, **343**: 324-330.
- [34] 张娟, 杨彩梅, 曹广添, 等. 解淀粉芽孢杆菌及其作为益生菌的应用[J]. 动物营养学报, 2014, **26**(4): 863-867.  
Zhang J, Yang C M, Cao G T, *et al.* *Bacillus amyloliquefaciens* and its application as a probiotic[J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2014, **26**(4): 863-867.
- [35] 张明, 王洁, 孙佩石, 等. 甲醛降解功能菌的分离鉴定及降解特性[J]. 环境保护科学, 2018, **44**(2): 65-70.  
Zhang M, Wang J, Sun P S, *et al.* Isolation and identification of bacteria strains able to degrade formaldehyde and their degrading characteristics[J]. Environmental Protection Science, 2018, **44** (2): 65-70.
- [36] 钟卫鸿, 吴婉欣, 陈雯雯, 等. 一株甲醛降解菌的分离鉴定及降解条件研究[J]. 浙江工业大学学报, 2013, **41**(1): 25-30.  
Zhong W H, Wu W X, Chen W W, *et al.* Isolation, identification and degrading conditions of a formaldehyde-degrading bacterium [J]. Journal of Zhejiang University of Technology, 2013, **41**(1): 25-30.
- [37] Marx C J, van Dien S J, Lidstrom M E. Flux analysis uncovers key role of functional redundancy in formaldehyde metabolism [J]. PLoS Biology, 2005, **3** (2), doi: 10.1371/journal.pbio.0030016.
- [38] 张伟, 宋中邦, 陈丽梅. 甲基营养微生物的甲醛代谢途径及其在环境生物技术中的应用[J]. 生命科学, 2012, **24**(3): 266-273.  
Zhang W, Song Z B, Chen L M. Formaldehyde metabolic pathways in methylotroph and their applications in environmental biotechnology[J]. Chinese Bulletin of Life Sciences, 2012, **24** (3): 266-273.
- [39] Baghalian K, Hajirezaei M R, Schreiber F. Plant metabolic modeling: achieving new insight into metabolism and metabolic engineering[J]. The Plant Cell, 2014, **26**(10): 3847-3866.
- [40] Shao Y H, Li J, Wang Y X, *et al.* Comparative genomics and transcriptomics insights into the C1 metabolic model of a formaldehyde-degrading strain *Methylobacterium* sp. XJLW[J]. Molecular Omics, 2019, **2**(15): 138-149.
- [41] Mitsui R, Kusano Y, Yurimoto H, *et al.* Formaldehyde fixation contributes to detoxification for Growth of a nonmethylotroph, *Burkholderia cepacia* TMI, on vanillic acid[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2003, **69**(10): 6128-6132.
- [42] 程琴, 董蓉, 黄大林, 等. 枯草芽孢杆菌萌发后孢子响应甲醛胁迫过程的拉曼光谱研究[J]. 中国激光, 2011, **38**(10): 230-236.  
Cheng Q, Dong R, Huang D L, *et al.* Raman spectrum of germinated spores of *Bacillus subtilis* in response to formaldehyde stress[J]. Chinese Journal of Lasers, 2011, **38**(10): 230-236.

## CONTENTS

Sources and Control Area Division of Ozone Pollution in Cities at Prefecture Level and Above in China .....	YAN Hui, ZHANG Wei, HOU Mo, <i>et al.</i> (5215)
Dynamic Assessment of PM <sub>2.5</sub> Health Damage Value in China from 2015 to 2018 .....	LI Hui-juan, ZHOU De-qun, WEI Yong-jie (5225)
Analysis of Multi-scale Spatio-temporal Differentiation Characteristics of PM <sub>2.5</sub> in China from 2011 to 2017 .....	YANG Wen-tao, QIAO Peng, LIU Xian-zhao, <i>et al.</i> (5236)
Spatio-temporal Evolution and Population Exposure Risk to PM <sub>2.5</sub> in the Guanzhong Area .....	HUANG Xiao-jun, QI Ming-yue, LI Yan-yu, <i>et al.</i> (5245)
Formation Mechanism and Source Analysis of Two Heavy Pollution Periods in Winter in a Central Plains City .....	JIA Jia, CONG Yi, GAO Qing-min, <i>et al.</i> (5256)
Winter Pollution Characteristics and Physicochemical Properties of PM <sub>2.5</sub> in a Northwest Industrial City .....	YANG Yan-ping, CHEN Qiang, WANG Li-na, <i>et al.</i> (5267)
Characterization of Metal Pollution of Regional Atmospheric PM <sub>2.5</sub> and Its Sources Based on the PMF Model .....	DENG Lin-li, ZHANG Kai-shan, YIN Zi-yuan, <i>et al.</i> (5276)
Pollution Characteristics and Assessment of Heavy Metals in Atmospheric Deposition in Core Urban Areas, Chongqing .....	ZHANG Xia, LIU Bin, XIAO Bo-lin, <i>et al.</i> (5288)
Factors Influencing New Atmospheric Particle Formation in Ordos During Summer and Autumn 2019 .....	KONG Xiang-chen, WANG Hong-lei, ZHANG Lian-xia, <i>et al.</i> (5295)
Characteristics and Reactivity of Ambient VOCs in Urban Hangzhou, China .....	JING Sheng-ao, GAO Ya-qin, SHEN Jian-dong, <i>et al.</i> (5306)
Characteristics and Sources of Atmospheric Volatile Organic Compounds Pollution in Summer in Chengdu .....	XU Chen-xi, CHEN Jun-hui, JIANG Tao, <i>et al.</i> (5316)
Characteristics and Source Apportionment of VOCs and O <sub>3</sub> in Shijiazhuang .....	WANG Shuai, CUI Jian-sheng, FENG Ya-ping, <i>et al.</i> (5325)
Analysis of Industrial VOCs Emission Inventory and Countermeasures in Xiamen .....	WU Dong-yang, ZHUANG Ma-zhan, WU Yan-cong, <i>et al.</i> (5336)
Emission Inventory and Emission Factors of Volatile Organic Compounds (VOCs) from Architectural Adhesives .....	LIANG Xiao-ming, SUN Xi-bo, SU Yan-hua, <i>et al.</i> (5345)
Sources and Health Risks of Atmospheric Polychlorinated Biphenyls in an Urban/Industrial Areas, Northwest China .....	MAO Xiao-xuan, LI Zi-xuan, SONG Shi-jie, <i>et al.</i> (5352)
Vertical Distribution of Surface Formaldehyde in the Pearl River Delta Urban Area Based on Observations at the Canton Tower .....	HUANG Shan, PEI Cheng-lei, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (5362)
Temporal and Spatial Characteristics of Total Phosphorus in the Middle and Lower Yangtze River Mainstem Under New Water and Sediment Conditions .....	ZHUO Hai-hua, LOU Bao-feng, WU Yun-li, <i>et al.</i> (5371)
Seasonal Variations in Nitrogen and Phosphorus Concentration and Stoichiometry of Hanfeng Lake in the Three Gorges Reservoir Area .....	QIAN Tian, HUANG Qi, HE Bing-hui, <i>et al.</i> (5381)
Distribution Characteristics and Pollution Assessment of Nutrients in Hengshui Lake Sediments .....	ZHANG Jia-wen, WEI Jian, LIU Li, <i>et al.</i> (5389)
Endogenous Pollution and Release Characteristics of Bottom Sediments of Hengshan Reservoir in Yixing City .....	CUI Hui-fang, CHEN Shu-yun, YANG Chun-hui, <i>et al.</i> (5400)
Pollution and Ecological Risk Assessment and Source Apportionment of Heavy Metals in Sediments of Qingliangshan Reservoir in the Meijiang Basin .....	JIANG Tao, LIN Wei-wen, CAO Ying-jie, <i>et al.</i> (5410)
Influence Factors of Potential Nitrification Rates and Functional Genes Abundance in the Jinshui River and the Qihe River of the Hanjiang River Basin .....	ZHAO Bin-jie, WANG Xu, ZHANG Jian, <i>et al.</i> (5419)
Contamination Characteristics and Potential Ecological Risks of Typical Perfluoroalkyl Substances in the Water and Sediment of Coastal Tourism Resorts in Shandong Province .....	WANG Shi-liang, CAO Xue-zhi (5428)
Distribution Characteristics and Source Identification of Organophosphate Esters in Key Waters Areas of Taihu Lake .....	LÜ Jia-pei, ZHANG Zhen-fei, LIU Yang, <i>et al.</i> (5438)
Residual Characteristics and Health Assessment Analysis of OCPs and PCBs in Karst Groundwater .....	YE Kai, SUN Yu-chuan, JIA Ya-nan, <i>et al.</i> (5448)
Biogeographic Distribution Patterns of Diatoms in Lancang River and Their Key Drivers .....	SUN Sheng-hao, CHEN Juan, WANG Pei-fang, <i>et al.</i> (5458)
Bioaccumulation Characteristics of Quinolones (QNs) in Dominant Fish Species and Their Correlation with Environmental Factors in Baiyangdian Lake .....	SHEN Li-na, FU Yu, ZHANG Lu-lu, <i>et al.</i> (5470)
Effect of Biomass Particle Size on the Adsorption of Phosphorus from Aqueous Solution by MgO-loaded Biochar .....	WANG Peng-fei, ZHI Meng-meng, CHU Zhao-sheng, <i>et al.</i> (5480)
Photocatalytic Degradation of Tetracycline and Copper Complex by Bi <sub>2</sub> MoO <sub>6</sub> /Bi <sub>2</sub> S <sub>3</sub> Heterojunction .....	HUANG Wen-xin, WEI Hu, JIANG Cai-yun, <i>et al.</i> (5488)
Enhancing PPCPs Removal and Membrane Fouling Control of Ultrafiltration Membrane by UiO-66@Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> @UiO-66 .....	YIN Yue, WU Dao-wen, SUN Meng-yao, <i>et al.</i> (5500)
Advanced Treatment of Tail Water Using Pilot-scale Horizontal and Vertical Subsurface Flow Constructed Wetlands in Low-temperature Seasons .....	LIAO Xue-ke, YAN Han-lu, WANG Zhi-yuan, <i>et al.</i> (5509)
Metagenomic Insights into Salinity Build-up in Microbial Communities and Metabolism of Hydrolytic Bioreactor Treating High-color PDWW .....	GAO Jing, ZHANG Shao-hua, WANG Rui, <i>et al.</i> (5518)
Performance and Microbial Characteristics of Ammonium-limited and Nitrite-limited ANAMMOX Systems .....	SONG Jia-jun, ZHU Ming-yi, GUO Kai-cheng, <i>et al.</i> (5527)
Microbial Community Structure and Diversity During the Enrichment of Anaerobic Ammonium Oxidation Bacteria .....	YAN Bing, XIA Song, GUI Shuang-lin, <i>et al.</i> (5535)
Enhanced Dewaterability of Waste-Activated Sludge in Presence of Fe(II)-Activated Calcium Peroxide .....	BI Wei-wei, RUAN Shu-yu, CHEN Wu-ao-xiao, <i>et al.</i> (5544)
Spatial Distribution, Contamination Assessment, and Sources of Heavy Metals in the Urban Green Space Soils of a City in North China .....	ZHAO Liang, LIANG Yun-ping, CHEN Qian, <i>et al.</i> (5552)
Technological Classification of Cadmium Quality in the Rice Producing Areas of South China .....	DOU Wei-qiang, AN Yi, QIN Li, <i>et al.</i> (5562)
Distribution Characteristics of Selenium in a Soil-Crop System and the Threshold of Selenium-Rich Soils .....	WANG Rui, DENG Hai, JIA Zhong-min, <i>et al.</i> (5571)
Transfer Factor and Health Risk Assessment of Heavy Metals in a Soil-Crop System in a High Incidence Area of Nasopharyngeal Carcinoma, Guangdong .....	YE Mai, ZHANG Jing-ru, ZHANG Lu-lu, <i>et al.</i> (5579)
DA-6 and GLDA Enhanced <i>Panicum virgatum</i> L. to Phytoextract Cd from Contaminated Soils .....	WANG Zheng, SUN Zhao-jun, Sameh Mohamed, <i>et al.</i> (5589)
Remediation Performance via the Passivation of a Porous Biomorph Genetic Composite of $\alpha$ -Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> /C Using a Bamboo Template on As(V) Contaminated Soils .....	ZHAO Ning-ning, HE Hao, FENG Guo-jie, <i>et al.</i> (5600)
Biodegradation of Expanded Polystyrene Foams in <i>Zophobas morio</i> : Effects of Gut Microbiota .....	YANG Li, LIU Ying, GAO Jie, <i>et al.</i> (5609)
Isolation, Identification, and Degrading Characteristics of an Oil Resistant Formaldehyde-Degrading Bacterium .....	HAN Xi, WANG Rong-rong, SHI Chun-zhen (5617)
Characteristics of Phyllosphere and Rhizosphere Bacterial Communities in <i>Bothriochloa ischaemum</i> in Copper Tailings .....	JIA Tong, YAO Yu-shan, WANG Rui-hong (5628)
Effects of Selected Biochars Application on the Microbial Community Structures and Diversities in the Rhizosphere of Water Spinach ( <i>Ipomoea aquatica</i> Forss.) Irrigated with Reclaimed Water .....	CUI Bing-jian, CUI Er-ping, HU Chao, <i>et al.</i> (5636)
Effects of Modified Biowaste-based Hydrochar on Rice Yield and Nitrogen Uptake .....	HOU Peng-fu, XUE Li-hong, FENG Yan-fang, <i>et al.</i> (5648)
Spatial Distribution Characteristics and Source Apportionment of Soil PAHs in Shizuishan City Based on GIS and PMF Model .....	XIA Zi-shu, WANG Yu-yu, ZHONG Yan-xia, <i>et al.</i> (5656)
Effects of Nitrogen Fertilizer and Straw Returning Methods on N <sub>2</sub> O Emissions in Wheat-Maize Rotational Soils .....	XU Hong-wei, LI Na, FENG Yong-zhong, <i>et al.</i> (5668)