

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第6期

Vol.35 No.6

**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

北京地区冬夏季持续性雾-霾发生的环境气象条件对比分析..... 廖晓农, 张小玲, 王迎春, 刘伟东, 杜佳, 赵玲慧 (2031)

阜康大气气溶胶中水溶性无机离子粒径分布特征研究 ..... 苗红妍, 温天雪, 王跃思, 刘子锐, 王丽, 兰中东 (2045)

上海地铁站台大气颗粒物中过渡金属研究 ..... 包良满, 雷前涛, 谈明光, 李晓林, 张桂林, 刘卫, 李燕 (2052)

七一冰川地区苔藓中重金属元素含量研究 ..... 马娟娟, 李真 (2060)

冬季东海、南黄海 DMS 和 DMSP 浓度分布及影响因素研究 ..... 宋以柱, 张洪海, 杨桂朋 (2067)

大亚湾石化排污海域重金属污染及生态风险评价 ..... 徐姗姗, 李纯厚, 徐娇娇, 肖雅元, 林琳, 黄小平 (2075)

深圳水库群表层水中全氟化合物的分布特征 ..... 王鑫璇, 张鸿, 何龙, 沈金灿, 柴之芳, 杨波, 王艳萍 (2085)

表层岩溶泉水中多环芳烃污染特征及来源解析 ..... 孙玉川, 沈立成, 袁道先 (2091)

桂江主要离子及溶解无机碳的生物地球化学过程 ..... 唐文魁, 陶贞, 高全洲, 毛海若, 姜光辉, 焦树林, 郑雄波, 张乾柱, 马赞文 (2099)

汾河源区不同景观带水文过程研究 ..... 杨永刚, 李彩梅, 秦作栋, 邹松兵 (2108)

北京市通州区地下水分层质量评价及水化学特征 ..... 郭高轩, 琚宜文, 翟航, 许亮, 沈媛媛, 纪轶群 (2114)

光透法定量两相流中流体饱和度的模型及其应用 ..... 章艳红, 叶淑君, 吴吉春 (2120)

紫色土坡耕地氮淋溶过程及其环境健康效应 ..... 陈维梁, 高扬, 林勇明, 朱波, 徐亚娟, 于贵瑞, 吴承祯 (2129)

基于非点源溶解态氮负荷估算的率水流域土地利用结构优化研究 ..... 陆宇超, 毕孟飞, 李泽利, 沙健, 王玉秋, 钱丽萍 (2139)

镇江老城区古运河沉积物氮及有机质垂向分布及污染评价 ..... 周晓红, 李义敏, 周艺, 卫安平, 周广顺, 肖思思 (2148)

两种沉水植物对上覆水和间隙水中可溶性无机氮的影响 ..... 杨文斌, 李阳, 孙共献 (2156)

湖泊沉积物短时间反复扰动下悬浮物上生物有效磷的动态变化 ..... 武晓飞, 李大鹏 (2164)

不同扰动强度下城市重污染河道底泥对磷吸收和固定的影响 ..... 王尚, 李大鹏 (2171)

池塘残饵对底泥氮、磷释放影响的模拟研究 ..... 吕元蛟, 李瑞娇, 张念, 赵峰, 谢从新, 张敏 (2178)

再悬浮过程中河流底泥 PAHs 的迁移与释放 ..... 王晓慧, 毕春娟, 韩景超 (2185)

低分子有机酸对汞氧化还原反应的影响 ..... 赵士波, 孙荣国, 王定勇, 王小文, 张成 (2193)

活性炭催化过氧化氢去除荧光增白剂 ..... 刘海龙, 张忠民, 赵霞, 焦茹媛 (2201)

准分子灯光照降解水中烷基酚的动力学 ..... 刘玉海, 叶招莲, 文颖频, 毕承路 (2209)

AF + BAF 用于处理树脂化工集中区废水厂尾水的研究 ..... 涂勇, 刘伟京, 张耀辉, 徐军, 唐敏, 陈勇, 白永刚 (2216)

镉(II)-8-羟基喹啉分子印迹聚合物微球的合成及吸附性能研究 ..... 杨春艳, 陈复彬, 赵慧, 常自强, 章竹君 (2223)

微气泡曝气生物膜反应器同步硝化反硝化研究 ..... 刘春, 年永嘉, 张静, 张明, 张磊, 龚鹏飞, 肖太民, 李星 (2230)

聚乳酸/淀粉固体缓释碳源生物反硝化研究 ..... 唐丹琦, 王娟, 郑天龙, 刘建国, 汪群慧 (2236)

丝状菌膨胀对无纺布生物反应器处理效果及膜污染特征的影响 ..... 侍宽, 薛罡, 高品, 吴凡 (2241)

聚合氯化铝去除污泥水中磷的工艺优化 ..... 周振, 胡大龙, 乔卫敏, 陈冠翰, 蒋玲燕, 李震, 麦穗海 (2249)

鄱阳湖持久性有机污染物 (POPs) 长距离传输潜力模拟 ..... 弓晓峰, 向洪锐, 陈春丽, 周文斌, 王佳佳, 刘春英, 曾艳 (2256)

基于不确定性分析的垃圾焚烧烟气中重金属的土壤沉积及生态风险评估 ..... 廖志恒, 孙家仁, 吴兑, 范绍佳, 任明忠, 吕家扬 (2264)

农药企业场地土壤中苯系物污染风险及管理对策 ..... 谭冰, 王铁宇, 李奇锋, 张海燕, 庞博, 朱朝云, 王道涵, 吕永龙 (2272)

渤海湾海域 10 种鱼类中二噁英类及指示性多氯联苯的污染特征研究及风险评价 ..... 王莎莎, 高丽荣, 田益玲, 朱帅, 张芹 (2281)

基于荧光传感器 F<sub>rex</sub> 的特性检测水质环境中生物毒性物质 ..... 赵巍, 汪钊, 蔡强, 欧文斌, 孟凡国 (2287)

对苯二酚抑制铜绿微囊藻生长下藻毒素的产生与释放 ..... 张元春, 梁文艳, 赵远, 李飞贞, 曹敬灿, 胡绍杰 (2294)

基于沼液的培养基及产油小球藻藻种选育 ..... 赵凤敏, 梅帅, 曹有福, 丁进锋, 徐嘉杰, 李树君 (2300)

酸性矿山废水库周边土壤微生物多样性及氨氧化菌群落研究 ..... 刘莹, 王丽华, 郝春博, 李璐, 李思远, 冯传平 (2305)

河蚬 (*Corbicula fluminea*) 扰动对表层沉积物中氨氧化菌群落结构和丰度的影响 ..... 王雪, 赵大勇, 曾巾, 余多慰, 吴庆龙 (2314)

海洋油气田沉积物产甲烷活性及微生物生态 ..... 田琪, 王佳, 范晓蕾, 罗生军, 郭荣波, 邱艳玲 (2322)

DGGE 及 T-RFLP 分析光照下电位对细菌群落的影响 ..... 吴义诚, 邓欢, 肖勇, 赵峰 (2328)

重金属抗性解磷细菌的磷溶解特性研究 ..... 田江, 彭霞薇, 李霞, 孙雅君, 冯红梅, 江泽平 (2334)

1 株耐冷兼性嗜碱好氧反硝化菌的分离鉴定及反硝化特性 ..... 王兆阳, 陈国耀, 姜珂, 许培雅 (2341)

黑麦草-丛枝菌根对不同番茄品种抗氧化酶活性、镉积累及化学形态的影响 ..... 江玲, 杨芸, 徐卫红, 王崇力, 陈蓉, 熊仕娟, 谢文文, 张进忠, 熊治庭, 王正银, 谢德体 (2349)

黄河三角洲区土壤活性氮对盐分含量的响应 ..... 李玲, 仇少君, 陈印平, 赵西梅, 刘京涛, 陆兆华 (2358)

宁南山区不同草地土壤原位矿化过程中氮素的变化特征 ..... 蒋跃利, 赵彤, 闫浩, 黄懿梅 (2365)

长期施用四环素残留猪粪对土壤中耐药菌及抗性基因形成的影响 ..... 张俊, 杨晓洪, 葛峰, 王娜, 焦少俊, 叶波平 (2374)

长期不同耕作方式对紫色水稻土重金属含量及有效性的影响 ..... 常同举, 崔孝强, 阮震, 赵秀兰 (2381)

伊犁河流域土壤重金属环境地球化学基线研究及污染评价 ..... 赵新儒, 特拉津·那斯尔, 程永毅, 詹江渝, 杨剑虹 (2392)

江苏如东互花米草盐沼湿地重金属分布及其污染评价 ..... 张龙辉, 杜永芬, 王丹丹, 高抒, 高文华 (2401)

小流域农业面源氮污染时空特征及与土壤呼吸硝化关系分析 ..... 欧阳威, 蔡冠清, 黄浩波, 耿晓君 (2411)

保护性耕作下小麦田土壤呼吸及碳平衡研究 ..... 张赛, 王龙昌, 黄召存, 贾会娟, 冉春燕 (2419)

米楮天然林和人工林土壤呼吸的比较研究 ..... 吴君君, 杨智杰, 翁发进, 刘小飞, 陈朝琪, 林伟盛, 王小红, 陈坦 (2426)

水力停留时间对复合式厌氧折流板反应器乙醇型发酵制氢系统的影响 ..... 刘晓焯, 张洪, 李永峰 (2433)

《环境科学》征订启事 (2208) 《环境科学》征稿简则 (2400) 信息 (2084, 2200, 2229, 2391)

# 重金属抗性解磷细菌的磷溶解特性研究

田江<sup>1</sup>, 彭霞薇<sup>1\*</sup>, 李霞<sup>1</sup>, 孙雅君<sup>1</sup>, 冯红梅<sup>1</sup>, 江泽平<sup>2</sup>

(1. 北京林业大学生物科学与技术学院, 北京 100083; 2. 中国林业科学院林业研究所, 北京 100091)

**摘要:** 从湖南省湘西州花垣县的铅锌矿表层土壤中, 筛选出两株具有重金属抗性和解磷特性的细菌 T PSB1 和 T PSB2. 通过 16S rRNA 基因序列比对, 分别鉴定为嗜麦芽寡养单胞菌 (*Stenotrophomonas maltophilia*) 和 唐菖蒲伯克霍尔德菌 (*Burkholderia gladioli*). T PSB1 和 T PSB2 在含有难溶性无机磷液体培养基中, 其上清液的可溶性磷含量最高分别达到了 402.9 mg·L<sup>-1</sup> 和 589.9 mg·L<sup>-1</sup>; 在难溶性有机磷固体和液体培养基中, 固体平板上均出现解磷圈, 而液体培养基上清液中, 可溶性磷含量也分别达到了 2.97 mg·L<sup>-1</sup> 和 4.69 mg·L<sup>-1</sup>. 另外, 两株细菌对重金属 Zn<sup>2+</sup> 的抗性最高, 在其浓度为 2 000 mg·L<sup>-1</sup> 固体和液体培养基条件下均可以生长, 磷溶解浓度分别为 114.8 mg·L<sup>-1</sup> 和 125.1 mg·L<sup>-1</sup>. 而在含铬和铅的浓度为 1 000 mg·L<sup>-1</sup> 的液体培养基中, 两株细菌同样表现出重金属抗性. 在 Pb<sup>2+</sup> 浓度为 1 000 mg·L<sup>-1</sup> 的液体培养基中, 磷溶解浓度分别达到了 57.9 mg·L<sup>-1</sup> 和 71.7 mg·L<sup>-1</sup>; 而在 Cr<sup>2+</sup> 浓度为 1 000 mg·L<sup>-1</sup> 的培养基中磷溶解浓度分别为 60.1 mg·L<sup>-1</sup> 和 98.4 mg·L<sup>-1</sup>.

**关键词:** 解磷细菌; 可溶磷量; 无机磷; 有机磷; 重金属抗性

中图分类号: X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)06-2334-07 DOI: 10.13227/j.hjks.2014.06.041

## Isolation and Characterization of Two Bacteria with Heavy Metal Resistance and Phosphate Solubilizing Capability

TIAN Jiang<sup>1</sup>, PENG Xia-wei<sup>1</sup>, LI Xia<sup>1</sup>, SUN Ya-jun<sup>1</sup>, FENG Hong-mei<sup>1</sup>, JIANG Ze-ping<sup>2</sup>

(1. College of Biological Sciences and Biotechnology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

**Abstract:** Two phosphate solubilizing bacteria (T PSB1 and T PSB 2) with high heavy metal resistance were isolated from soil of a lead-zinc mine in Huayuan of Hunan Province, China. These two bacteria were identified as *Stenotrophomonas maltophilia* and *Burkholderia gladioli* by 16S rRNA sequencing analysis, respectively. In the media containing insoluble inorganic calcium phosphate, the soluble phosphate amounts reached respectively 402.9 mg·L<sup>-1</sup> and 589.9 mg·L<sup>-1</sup> with the bacteria T PSB1 and T PSB2 after two weeks' growth. Moreover, the two bacteria developed solubilizing halos on the plates supplemented with the organic phosphate compounds, and the resulting soluble phosphate amounts in the broth media were respectively 2.97 mg·L<sup>-1</sup> and 4.69 mg·L<sup>-1</sup>. In addition, these two bacteria showed the resistance to up to 2 000 mg·L<sup>-1</sup> Zn<sup>2+</sup>, and their phosphate solubilizing amounts reached respectively 114.8 mg·L<sup>-1</sup> and 125.1 mg·L<sup>-1</sup>. Similarly, their heavy metal resistance and phosphate solubilizing ability were also found in the Cr and Pb broth media with the concentration of 1 000 mg·L<sup>-1</sup>. In the Pb media, the soluble phosphate amounts reached respectively 57.9 mg·L<sup>-1</sup> and 71.7 mg·L<sup>-1</sup>, and the soluble P amounts in the Cr media were 60.1 mg·L<sup>-1</sup> and 98.4 mg·L<sup>-1</sup> at the concentration of 1 000 mg·L<sup>-1</sup>.

**Key words:** phosphate solubilizing bacteria; soluble phosphate amount; inorganic phosphate compound; organic phosphate compound; heavy metal resistance

磷元素是植物生长所必须的元素, 其重要性仅次于氮<sup>[1]</sup>. 然而, 植物需要的氮元素可以通过土壤中以及根部的固氮菌和硝化细菌将空气中的氮气转化为硝态氮来实现<sup>[2]</sup>, 但所需磷元素只能通过吸收土壤中的可溶性磷来满足<sup>[3]</sup>. 据报道, 我国共有 74% 的耕地存在缺磷现象<sup>[4]</sup>. 土壤中, 尤其是矿区土壤中, 由于存在大量的重金属, 而重金属又极易与可溶性磷元素形成难溶性的磷酸化合物, 如 AlPO<sub>4</sub>、Ca<sub>3</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> 和 FePO<sub>4</sub> 等<sup>[5,6]</sup>, 因而造成土壤中磷元素的缺乏. 国内外常用的改善土壤磷元素的方法是施加化学磷肥, 但是化学磷肥的使用率非常低, 一般在当季的利用率仅为 10% ~ 20%<sup>[7]</sup>. 目前, 我

国采用的磷矿粉加工法制造的化学磷肥成本高<sup>[8]</sup>, 而且, 过量地向土壤中施磷肥, 不仅造成大量经济损失, 同时也带来各种环境污染问题<sup>[9]</sup>.

解磷微生物是大量存在于土壤中的一个类群, 具有将难溶性的磷酸化合物降解为可溶性磷化合物以及释放质子的作用, 因此, 解磷微生物可以提高土壤中植物可吸收磷元素的含量以及促进植物生

收稿日期: 2013-11-22; 修订日期: 2014-01-18

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2012BAC09B03); 中央高校基本科研业务费专项(TD2012-03)

作者简介: 田江(1988~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为环境生物技术, E-mail: witness0528@163.com

\* 通讯联系人, E-mail: xiaweipeng@163.com

长<sup>[10,11]</sup>. 田秀平等<sup>[7]</sup>将两株解磷细菌接种于土壤之后,发现土壤中有效磷的含量分别增加了 14.92 mg·kg<sup>-1</sup>和 5.77 mg·kg<sup>-1</sup>. 魏自民等<sup>[12]</sup>发现,接种了高温解无机磷细菌可明显增加堆肥中难溶性磷矿粉的转化率. Taurian 等<sup>[13]</sup>接种了从土壤中分离得到的 59 株具有解磷特性的细菌,发现这些微生物不仅能增加花生根的长度和干重,还可以促进植物根瘤的形成. 因此解磷微生物可以作为菌剂施用于环境中以改善土壤的理化性质.

矿区土壤中重金属含量非常高,因此在使用解磷微生物作为菌剂对矿区土壤进行生物修复时,既要选择具有较高重金属抗性的微生物,同时还需考虑在不同重金属条件下对微生物解磷量的影响. 重金属对于解磷微生物生长的抑制作用在国内外已多有报道<sup>[14,15]</sup>,然而到目前为止,重金属对解磷微生物解磷量的研究还非常少. 本研究从湖南省湘西州花垣县的铅锌矿表层土壤中筛选出两株具有降解难溶性无机磷和有机磷化合物的解磷细菌,并测定了在含有 3 种重金属的不同浓度培养基中可溶磷含量变化,以期为重金属污染土壤的生物修复提供优良的菌种资源.

## 1 材料与方法

### 1.1 材料和仪器

#### 1.1.1 土样

表层土样采自于湖南省湘西自治州花垣县铅锌矿. 样品采集时间为 2012 年 7 月,土样采集后分装于塑封袋中,过 1 mm 土壤筛后于 4℃ 保存. 经分析,土样中含有的主要重金属种类和含量分别为: Zn 0.74 g·kg<sup>-1</sup>, Cu 38.7 mg·kg<sup>-1</sup>, Pb 1.1 g·kg<sup>-1</sup>, Cd 6.73 mg·kg<sup>-1</sup>, Sb 0.82 g·kg<sup>-1</sup>.

#### 1.1.2 培养基

无机磷培养基:蔗糖 10 g, Ca<sub>3</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> 10 g, NaCl 0.3 g, KCl 0.3 g, MgSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O 0.3 g, FeSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O 0.03 g, MnSO<sub>4</sub>·H<sub>2</sub>O 0.03 g, (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0.5 g, Yeast Extract 0.5 g, 蒸馏水 1 L, pH 7.2, 121℃ 灭菌 15 min, 固体培养基加入 20 g·L<sup>-1</sup>琼脂.

有机磷固体培养基:将无机磷固体培养基[不加 Ca<sub>3</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>]融化后,冷却至 50℃ 左右,加入卵黄稀释液,每 100 mL 培养基中加 10 mL 卵黄稀释液,以卵黄为唯一磷源.

有机磷液体培养基:于不加磷酸钙的无机磷液体培养基中加入过滤除菌的卵磷脂溶液,终浓度设定为 0.2 g·L<sup>-1</sup>.

#### 1.1.3 仪器

HCY 大容量全温振荡培养箱, JY600C 电泳仪, Tocan 全自动凝胶成像系统, BIO-RAD 基因扩增仪, SPX-150B 生化培养箱, UV-2102C 型紫外可见分光光度计.

### 1.2 方法

#### 1.2.1 土壤中解磷菌的筛选和分离

称量 10 g 保存的土样,倒入已经加入 150 mL 无菌蒸馏水的无菌锥形瓶中,于 28℃ 摇床 150 r·min<sup>-1</sup> 振荡 2 h,然后取出于室温静置 30 min,取 1 mL 上清液于含有 9 mL 无菌水的试管中,按照此方法依次稀释至 10<sup>-6</sup>,然后取每个稀释度的稀释液 200 μL,涂布于无机磷固体培养基,每个稀释度涂布 3 个平板,将平板置于 28℃ 恒温箱中培养 5 d,将平板中出现解磷圈的细菌进行分离纯化并接种于斜面中保存.

#### 1.2.2 细菌 DNA 的提取和 16S rRNA 序列测定

细菌 DNA 的提取:将待鉴定的细菌首先在 LB 培养基上划线,活化,然后挑取单菌落于液体 LB 培养基中培养 48 h,再按照细菌 DNA 提取试剂盒(北京庄盟国际生物基因科技有限公司)中的步骤提取基因组 DNA,产物于 -20℃ 保存.

16S rRNA 基因序列测定:引物选择原核微生物 16S rRNA 的通用引物 1492R (5'-GGTACCTT GTTACGACTT-3') 和 27F (5'-AGAGTTTGTATCCTG GCTCAG-3'), PCR 扩增步骤可见文献[16]的方法进行操作. 将 PCR 扩增产物交予北京诺赛公司进行检测,获得结果后将序列带入 NCBI (<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/>) 的 GenBank 中进行 Blast 同源性分析.

#### 1.2.3 解磷细菌无机磷溶解量的检测

将待测的细菌菌落,取单菌落于 LB 液体培养基中活化 48 h,得到的菌液浓度为 10<sup>8</sup> cfu·mL<sup>-1</sup>,取 1 mL 菌液分别加入已经装有 20 mL 灭菌的液体无机磷培养基的 50 mL 锥形瓶中,每种细菌接种 3 瓶锥形瓶,同时设置不加解磷菌的实验作为对照,然后置于 28℃ 摇床中 150 r·min<sup>-1</sup> 培养 2 周,每隔 24 h 使用磷钼钒蓝分光光度法<sup>[17]</sup>检测上清液中可溶性磷的含量.

#### 1.2.4 解磷细菌有机磷溶解量及酸性磷酸酶的检测

将细菌接种于有机磷平板中,在 28℃ 恒温条件下培养 1 周,观察平板底部产生解磷圈的情况,将具有有机磷降解能力的解磷细菌进行活化,取 1 mL 活化菌液接种于有机磷液体培养基中,每种细菌做 3

个重复,同时设计不接种解磷菌的作为空白对照,28℃摇床中150 r·min<sup>-1</sup>培养1周,测定上清液中可溶性磷含量.根据测定上清液的pH值,偏酸性,因此,使用对硝基酚磷酸钠法<sup>[18]</sup>测定酸性磷酸酶含量.

### 1.2.5 解磷细菌接种于含有重金属的无机磷培养基中溶磷量的检测

分别配制ZnCl<sub>2</sub>、Pb(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>和Cr(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>母液,121℃灭菌之后,分别加入已灭菌的无机磷固体及液体培养基中,使得3种重金属的终浓度均分别为0、100、500、1000和2000 mg·L<sup>-1</sup>,每种重金属的每个浓度梯度均做3次重复.

将活化后的解磷细菌接种于分别含有3种重金属的5个浓度梯度的平板上,每个实验处理重复5次,接种后的平板于28℃恒温培养1周,测定每个平板中细菌菌落直径(colony diameter, CD)以及解磷圈直径(phosphate halo diameter, HD).

取1 mL活化的解磷细菌菌液,加入3种重金属的5个浓度梯度下的液体培养基中,28℃摇床中150 r·min<sup>-1</sup>振荡培养,并于培养的第1、5、10、15 d分别检测上清液中可溶性磷含量.同时设置不加解磷细菌的对照组实验测定上清液中的可溶性磷的含量.

### 1.2.6 结果处理

使用软件Excel和SPSS 19.0对实验所测得的数据进行处理绘图,同时使用邓肯多重范围检测

(Duncan multiple range test)对不同数据之间进行分析.

## 2 结果与分析

### 2.1 解磷细菌的筛选和鉴定

培养1周后,通过平板涂布稀释法,共筛选出17种细菌和2种真菌,其中的两种解磷细菌T PSB1和T PSB2能形成相对较大的解磷圈,通过原核微生物16S rRNA基因序列测序分析,其序列大小分别为1451 bp和1438 bp,与嗜麦芽寡养单胞菌和唐菖蒲伯克霍尔德菌的同源性最高,分别达到了99.65%和99.86%,GenBank的登录号为KC503914.1和AY297695.1.

### 2.2 无机磷可溶磷量

从图1可看出,两株解磷细菌T PSB1和T PSB2在刚接种的第1 d,解磷量快速升高,分别达到213.4 mg·L<sup>-1</sup>和164.9 mg·L<sup>-1</sup>.在接种的第2 d,解磷量出现了先下降,后上升的趋势,分别在培养到第8 d和第9 d达到最高值,分别为402.9 mg·L<sup>-1</sup>和589.9 mg·L<sup>-1</sup>.随后,解磷量缓慢下降,在培养的最后4 d,液体培养基中的可溶性磷含量基本保持稳定.从图1(a)中可看出,T PSB1在培养了1 d后,培养基的pH从7.2降为最低值4.95,然后缓慢上升,第14 d时达到最大值.从图1(b)中看出,T PSB2在培养了1 d后,pH也迅速下降,在第3 d时达到最低值5.62,然后到第14 d时达到最高值.

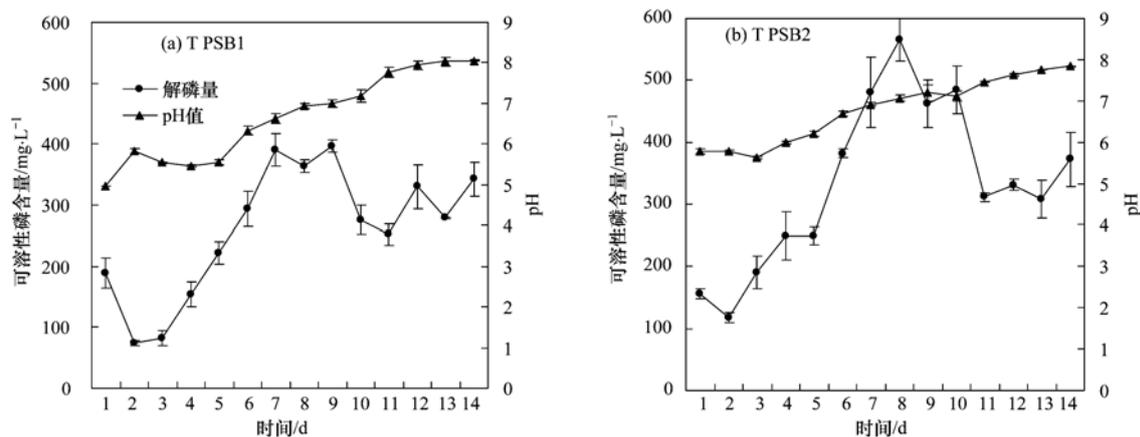


图1 两株解磷细菌的溶磷量和pH值随时间的变化

Fig. 1 Phosphate solubilization capacity and pH values of the two phosphate solubilizing bacteria with the change of time

### 2.3 有机磷可溶磷量及酸性磷酸酶量

如图2所示,T PSB1和T PSB2均能在有机磷平板上生长并形成解磷圈,相比之下,T PSB2形成的解磷圈更明显,且直径较T PSB1大,说明在固体

培养条件下,T PSB2对于卵黄中的难溶性有机磷降解效率强于T PSB1.液体培养1周后,测定培养基中可溶性磷含量(如表1),T PSB2培养基中可溶性磷含量为4.69 mg·L<sup>-1</sup>,比T PSB1的2.97 mg·L<sup>-1</sup>

高,并且培养基中的酸性磷酸酶含量也比 T PSB1 高. 与空白组进行对比,两株解磷细菌分泌的酸性磷酸酶量和培养基的可溶性磷含量均要高,说明两种细菌对难溶性有机磷的降解与其分泌的酸性磷酸酶的量相关.

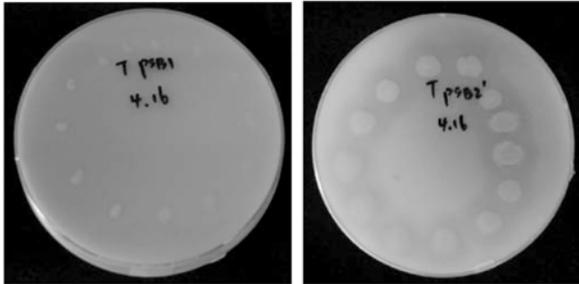


图 2 两株解磷细菌在有机磷平板上的解磷圈

Fig. 2 Halo of the two phosphate solubilizing bacteria on the plates with organic phosphorus

表 1 三组有机磷实验的培养基的理化性质<sup>1)</sup>

Table 1 Properties of the media used in the three different treatments

接种解磷菌	pH 值	解磷量 /mg·L <sup>-1</sup>	酸性磷酸酶含量 /mg·L <sup>-1</sup>
CK	5.40 ± 0.55 <sup>a</sup>	1.46 ± 0.55 <sup>a</sup>	0 <sup>a</sup>
T PSB1	4.82 ± 0.16 <sup>b</sup>	2.97 ± 0.37 <sup>b</sup>	47.64 ± 0.58 <sup>b</sup>
T PSB2	4.68 ± 0.1 <sup>b</sup>	4.69 ± 0.61 <sup>c</sup>	54.88 ± 0.50 <sup>c</sup>

1) 表中的数值均为 3 个重复实验的平均值 ± 标准差,每列数字后不同的字母表示在  $P < 0.05$  水平下数值的差异显著

表 2 两株细菌在不同重金属平板上的菌落直径 (CD)<sup>1)</sup>

Table 2 Colony diameter (CD) of these two bacteria on different heavy metal plates

项目	空白/mg·L <sup>-1</sup>				Pb <sup>2+</sup> /mg·L <sup>-1</sup>				Cr <sup>2+</sup> /mg·L <sup>-1</sup>				Zn <sup>2+</sup> /mg·L <sup>-1</sup>				
	0	100	500	1 000	2 000	100	500	1 000	2 000	100	500	1 000	2 000	100	500	1 000	2 000
T PSB1 CD/mm	5.6 <sup>a</sup>	7.4 <sup>b</sup>	5.4 <sup>a</sup>	3.8 <sup>c</sup>	3.4 <sup>c</sup>	6.8 <sup>b</sup>	2.5 <sup>c</sup>	0 <sup>d</sup>	0 <sup>d</sup>	5.4 <sup>a</sup>	5.4 <sup>a</sup>	4.2 <sup>b</sup>	3.5 <sup>b</sup>				
T PSB2 CD/mm	4.9 <sup>a</sup>	6.1 <sup>b</sup>	4.2 <sup>c</sup>	3.2 <sup>d</sup>	2.5 <sup>e</sup>	4.7 <sup>a</sup>	4.5 <sup>a</sup>	0 <sup>b</sup>	0 <sup>b</sup>	6.8 <sup>b</sup>	5.7 <sup>ab</sup>	3.8 <sup>c</sup>	3.9 <sup>c</sup>				

1) 表中的数值均为 5 个重复实验的平均值,数字后不同的字母表示在  $P < 0.05$  水平下数值的差异显著

表 3 两株细菌在不同重金属平板上的解磷圈直径 (HD)<sup>1)</sup>

Table 3 Phosphate halo diameter (HD) of these two bacteria on different heavy metal plates

项目	空白/mg·L <sup>-1</sup>				Pb <sup>2+</sup> /mg·L <sup>-1</sup>				Cr <sup>2+</sup> /mg·L <sup>-1</sup>				Zn <sup>2+</sup> /mg·L <sup>-1</sup>				
	0	100	500	1 000	2 000	100	500	1 000	2 000	100	500	1 000	2 000	100	500	1 000	2 000
T PSB1 HD/mm	11.4 <sup>a</sup>	10.4 <sup>a</sup>	12.8 <sup>b</sup>	0 <sup>c</sup>	0 <sup>c</sup>	9.0 <sup>b</sup>	0 <sup>c</sup>	0 <sup>c</sup>	0 <sup>c</sup>	10.4 <sup>a</sup>	9.2 <sup>b</sup>	6.4 <sup>c</sup>	4.8 <sup>d</sup>				
T PSB2 HD/mm	8.9 <sup>a</sup>	7.3 <sup>b</sup>	3.4 <sup>c</sup>	0 <sup>d</sup>	0 <sup>d</sup>	8.7 <sup>a</sup>	7.3 <sup>b</sup>	0 <sup>c</sup>	0 <sup>c</sup>	8.6 <sup>a</sup>	7.1 <sup>b</sup>	6 <sup>b</sup>	4.2 <sup>c</sup>				

1) 表中的数值均为 5 个重复实验的平均值,数字后不同的字母表示在  $P < 0.05$  水平下数值的差异显著

度为 1 000 mg·L<sup>-1</sup> 和 2 000 mg·L<sup>-1</sup> 时,两株细菌均没有形成解磷圈,HD/CD 值则为 0.

#### 2.4.3 液体培养条件下的可溶磷含量

在接种两株解磷菌的第 1、5、10、15 d 分别测定每个实验组的培养基上清液中可溶性磷的含量. 从图 4 中可以看出,溶磷量在 3 种重金属培养基中均随着重金属浓度的升高而降低. 而在 3 种重金属培养基中,两株细菌在含有 Zn<sup>2+</sup> 的培养基中具有有

#### 2.4 重金属对解磷细菌可溶磷量的影响

##### 2.4.1 固体培养条件下对解磷细菌生长的影响

在培养 1 周后,对每个平板上的菌落直径 CD 值分别进行测定,如表 2. 两株细菌对 Zn<sup>2+</sup> 和 Pb<sup>2+</sup> 的抗性非常高,在最高浓度为 2 000 mg·L<sup>-1</sup> 的条件下仍然能够生长,菌落的大小随着重金属浓度的升高而逐渐降低. 两株细菌在 Cr<sup>2+</sup> 浓度为 500 mg·L<sup>-1</sup> 的平板上均能生长,而在 1 000 mg·L<sup>-1</sup> 和 2 000 mg·L<sup>-1</sup> 的平板上,菌落生长受到了限制,没有形成菌落,CD 值为 0.

##### 2.4.2 固体培养条件下菌落和解磷圈直径的测定

在培养 1 周后,对每个平板上的菌落 HD 值和 CD 值分别测定,分别记录于表 2 和表 3,然后得到含 3 种重金属培养条件下的 HD/CD 值,如图 3. 从表 2 和表 3 看出,两株细菌对 Zn<sup>2+</sup> 的抗性非常高,在最高浓度 2 000 mg·L<sup>-1</sup> 的条件下即可以生长,并且还具解磷能力,HD/CD 值随着浓度的升高而降低(图 3). 在含 Cr<sup>2+</sup> 浓度超过 1 000 mg·L<sup>-1</sup> 的平板上,由于两株细菌不能生长,因此没有形成解磷圈. T PSB2 在浓度为 500 mg·L<sup>-1</sup> 条件下可以形成解磷圈,而 T PSB1 在该浓度下只有生长活性,没有形成解磷圈. 两株细菌对于 Pb<sup>2+</sup> 的抗性也非常高,浓度为 2 000 mg·L<sup>-1</sup> 的平板上依然可以长出菌落,但浓

高的解磷率[如图 4(e) 和图 4(f)]. 培养第 5 d 时, Zn<sup>2+</sup> 最高浓度 2 000 mg·L<sup>-1</sup> 下的可溶性磷量达到最高值,分别为 114.8 mg·L<sup>-1</sup> 和 125.1 mg·L<sup>-1</sup>,而在不含 Zn<sup>2+</sup> 的培养基中可溶性磷含量分别为 190.27 mg·L<sup>-1</sup> 和 192.44 mg·L<sup>-1</sup>,即在 2 000 mg·L<sup>-1</sup> 的 Zn<sup>2+</sup> 浓度培养条件下,两株解磷菌的可溶性磷含量均超过了对照组的 50%. 在培养的第 10 d 和第 15 d,高浓度重金属离子的培养基中可溶性磷含量逐渐

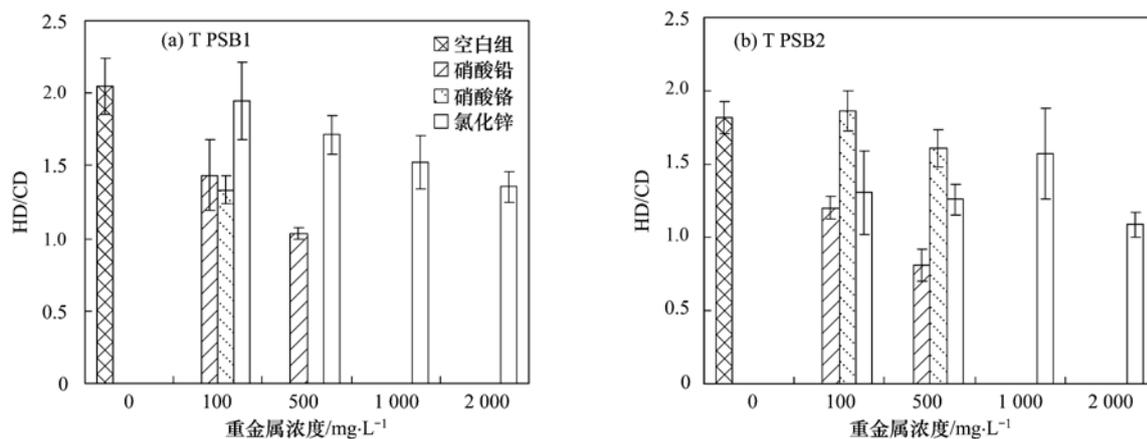


图 3 两株细菌在不同平板上的 HD/CD 值

Fig. 3 HD/CD values of these two bacteria on different plates

降低. 在固体培养的条件下, 两株细菌在浓度为  $1\ 000\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  和  $2\ 000\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  的  $\text{Cr}^{2+}$  平板上不能形成菌落, 而在液体培养条件下, 两株细菌对于铬的抗性要高, 在  $1\ 000\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  浓度下, 两株细菌 T PSB1 和 T PSB2 的解磷量分别在接种的第 15 d 和第 10 d 达到了最高值, 为  $60.1\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  和  $98.4\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ . T PSB1 在  $\text{Cr}^{2+}$  浓度为  $2\ 000\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  的液体培养条件下不能生长 [如图 4(c)], 而 T PSB2 在该浓度下依然能生长, 并且解磷量也在接种的第 10 d 达到了最高值  $76.6\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  [如图 4(d)]. 相比前两种重金属,  $\text{Pb}^{2+}$  在液体培养的条件下对两株解磷细菌的抑制性最强, 浓度在  $2\ 000\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  时, 两株细菌均不能生长, T PSB1 在  $1\ 000\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  浓度下在培养第 5 d 测定出最高溶磷量为  $57.9\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  [如图 4(a)], T PSB2 同样在第 5 d 达到最高值  $71.7\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  [如图 4(b)]. 从图 4 中分析发现, 两株细菌对于锌的抗性均非常高, 浓度超过了  $2\ 000\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 而在  $\text{Pb}^{2+}$  和  $\text{Cr}^{2+}$  的液体培养条件下, 细菌 T PSB2 对于  $\text{Pb}^{2+}$  和  $\text{Cr}^{2+}$  的抗性要高于 T PSB1.

### 3 讨论

土壤中解磷微生物的种类非常多, 其中以细菌的种类最多, 常见的具有解磷特性的细菌种类有: 根瘤菌属、克雷白氏杆菌属、肠杆菌属、泛菌属、欧文氏菌属、假单胞菌属和芽孢杆菌属等<sup>[7,19,20]</sup>. 本研究筛选到的两株细菌, 经鉴定为嗜麦芽寡养单胞菌和唐菖蒲伯克霍尔德菌. 在含有难溶性磷酸钙的液体培养基中培养 1 周后, 其解磷量最高分别达到  $402.9\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  和  $589.9\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 解磷率分别达到 19.7% 和 28.8%, 同时, 在有机磷液体培养基中, 其

解磷量也达到了  $2.97\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  和  $4.69\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ . 余贤美等<sup>[21]</sup> 筛选到 1 株平板培养条件下 HD/CD 值为 4.13 的解磷菌, 液体培养条件下的溶磷量在第 4 d 达到了  $218.6\ \mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ . Park 等<sup>[22]</sup> 将筛选到的 14 株解磷细菌接种于 NBRIP 液体培养基 14 d 后发现最高的溶磷量可以达到  $479.2\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ . 相比较而言, 本研究中筛选到的两株细菌具有较强的解磷能力.

高浓度的重金属是矿区土壤生物修复过程中最重要的限制性因素, 因此需要筛选一些具有很强抗性的微生物作为菌剂使用. 杨亮等<sup>[23]</sup> 从土样中分离出能在  $\text{Pb}^{2+}$  浓度为  $750\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  的培养基中生长的抗性镰刀菌属真菌, 同时发现该种真菌在该浓度下对铅的吸附率达到了 77.9%. Lai 等<sup>[24]</sup> 从样品中分离到对  $1\ 000\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  的  $\text{Cr}^{6+}$  具有抗性的菌株, 并且发现这些菌株不仅具有很高的  $\text{Cr}^{6+}$  抗性, 同时在含有 Cu、Pb 和 Fe 的重金属培养基中仍然具有生长活性. 刘云国等<sup>[25]</sup> 分离到 1 株同时具有铜和锌抗性的曲霉, 其最低抑制浓度分别为  $400\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  和  $800\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ . 而本研究从铅锌矿区表层土壤中所筛选到的两株解磷细菌, 除了具有很强的无机磷以及有机磷解磷能力之外, 对于重金属  $\text{Pb}^{2+}$ 、 $\text{Zn}^{2+}$  和  $\text{Cr}^{2+}$  的抗性也非常强, 抗性浓度最高达到了  $2\ 000\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ .

本研究通过测定在含有重金属的培养基中两种解磷细菌解磷能力的变化情况, 发现培养基中可溶性磷含量随着重金属浓度的升高而降低. 其原因可能由于重金属对于可溶性磷化合物具有很强的吸附性, 同时形成难溶性的重金属磷酸化合物<sup>[26]</sup>, 这些化合物不容易被解磷微生物降解, 导致

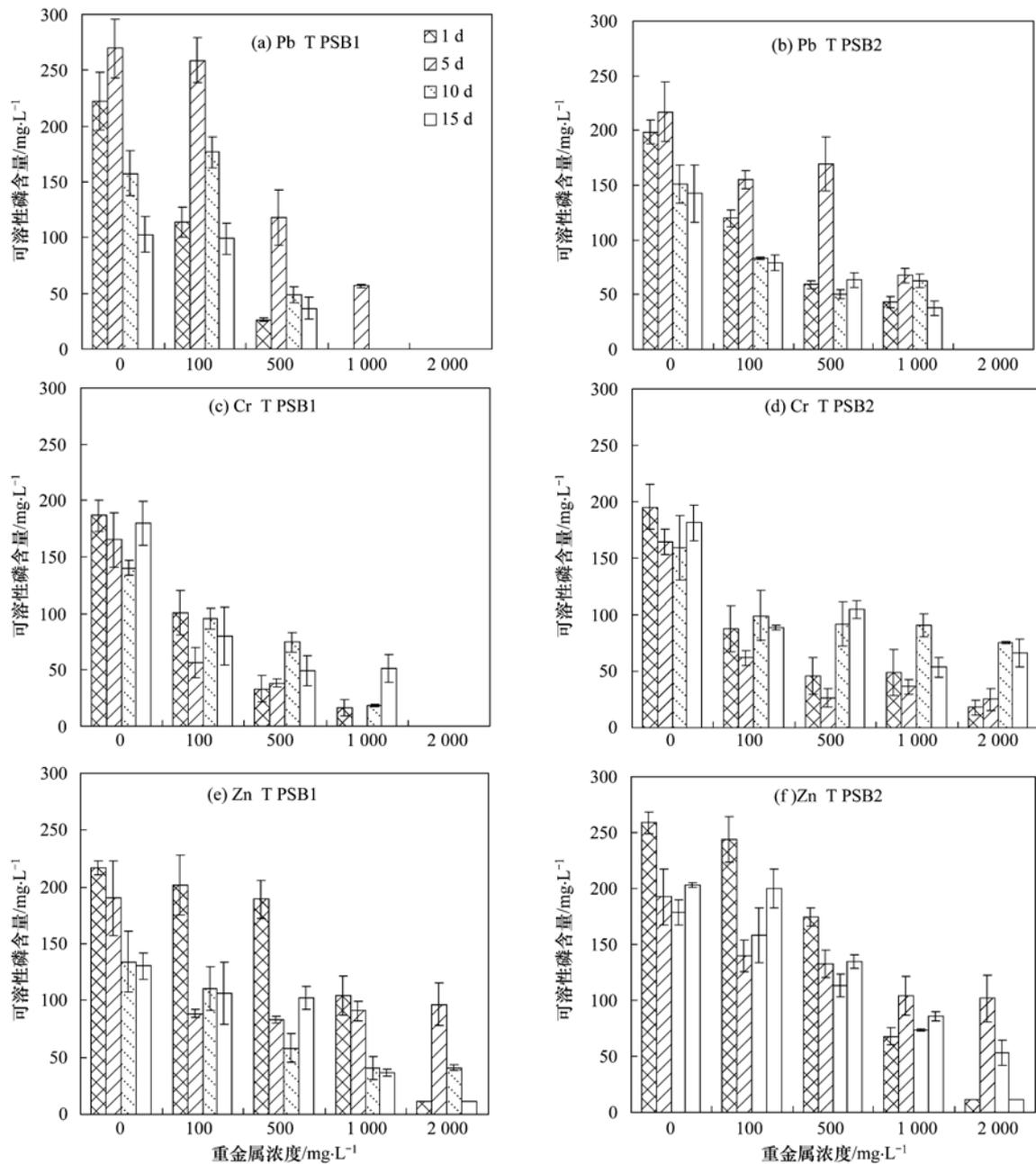


图4 两株细菌在3种重金属5种浓度下培养基中可溶性磷含量在15 d内的变化

Fig. 4 Changes of the soluble phosphate amounts of the two bacteria in the mediums containing three heavy metals at five concentrations in fifteen days

溶液中可溶性磷的降低。两种解磷细菌,在高浓度培养条件下,仍然具有解磷性,尤其在  $Zn^{2+}$  培养基中,2000  $mg \cdot L^{-1}$  浓度下的解磷量的最高值达到了 114.8  $mg \cdot L^{-1}$  和 125.1  $mg \cdot L^{-1}$ ,说明本研究获得的两种解磷细菌,既具有非常高的对 Zn、Pb 和 Cr 的抗性,同时,在高浓度培养条件下,仍然具有很好的解磷性。因此,这两种细菌具有用作微生物菌剂作为生物修复的工具来改善矿区土壤理化性质的潜能。

#### 4 结论

(1) 本研究从湖南省湘西自治州花垣县铅锌矿的表层土壤中,筛选出两株具有较强解磷能力的解磷细菌,经 16S rRNA 基因测序分析鉴定为嗜麦芽寡养单胞菌(T PSB1)和唐菖蒲伯克霍尔德菌(T PSB2)。

(2) 在含有难溶性磷酸钙的液体培养基中接种该两株细菌 T PSB1 和 T PSB2,培养 1 周后发现培

培养基上清液中所含有的可溶性磷含量最高达到了  $402.9 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  和  $589.9 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。同时两株细菌还被证实具有有机磷降解特性,通过液体培养基中可溶性磷含量和酸性磷酸酶含量的检测,发现两株细菌有机磷降解的效率同分泌的酸性磷酸酶相关。

(3)两株细菌对重金属 Zn、Pb 和 Cr 具有很强的抗性,能分别在含  $\text{Zn}^{2+}$  浓度为  $2\ 000 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  和  $\text{Pb}^{2+}$ 、 $\text{Cr}^{2+}$  浓度为  $1\ 000 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  的培养基中生长,并且通过无机磷液体培养基上清液中可溶性磷含量的检测发现,两株细菌在含有最高浓度的重金属培养基中依然具有解磷特性。

致谢:在土样采集和对土样理化性质分析过程中,得到了中国林业科学院林业研究所博士后赵秀莲的帮助,在此表示感谢。

#### 参考文献:

- [ 1 ] Khan A A, Jilani G, Akhtar M S, *et al.* Phosphorus solubilizing bacteria: occurrence, mechanisms and their role in crop production [J]. *Journal of Agriculture Biological Science*, 2009, **1**(1): 48-58.
- [ 2 ] 方晶晶,周爱国,刘存富,等. 全球氮循环新理论的发现及其环境意义——同位素技术的新贡献[J]. *安全与环境工程*, 2013, **20**(2): 1-4.
- [ 3 ] 叶震,陈秀蓉,杨淑君. 东祁连山高寒植被土壤解磷菌筛选及其解磷能力的初步研究[J]. *草原与草坪*, 2010, **30**(5): 6-10.
- [ 4 ] 李振东,陈秀蓉,杨成德,等. 乳白香青内生解磷菌的筛选鉴定及解磷特性研究[J]. *草叶学报*, 2013, **22**(6): 150-158.
- [ 5 ] Chang C H, Yang S S. Thermo-tolerant phosphate-solubilizing microbes for multi-functional biofertilizer preparation [J]. *Bioresource Technology*, 2009, **100**(4): 1648-1658.
- [ 6 ] 赵越,赵霞,侯佳奇,等. 耐高温解无机磷菌的解磷特性及生长动态研究[J]. *东北农业大学学报*, 2013, **44**(8): 64-69.
- [ 7 ] 田秀平,马宏颖,卢显芝. 解磷菌在土壤中解磷能力的研究[J]. *天津农学院学报*, 2013, **20**(1): 28-30.
- [ 8 ] 侯佳奇,李鸣晓,贾璇,等. 复合菌剂解无机磷条件优化研究[J]. *农业环境科学学报*, 2013, **32**(2): 385-392.
- [ 9 ] 李海峰,李志建,屈建航. 解磷微生物及其应用的研究进展[J]. *贵州农业科学*, 2012, **40**(10): 108-110.
- [ 10 ] Ahemad M, Khan M S. Phosphate-solubilizing and plant-growth-promoting *Pseudomonas aeruginosa* PS1 improves greengram performance in Quizalafop-p-ethyl and clodinafop amended soil [J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2010, **58**(2): 361-372.
- [ 11 ] 洪秀杰,华霜,赵冠羽. 解磷菌的降解能力及其培养特性的研究[J]. *安徽农业通报*, 2012, **18**(13): 47-49.
- [ 12 ] 魏自民,席北斗,王世平,等. 高温解磷菌对堆肥所添加难溶性磷素转化的试验研究[J]. *环境科学*, 2008, **29**(7): 2073-2076.
- [ 13 ] Taurian T, Anzuay M S, Angelini J G, *et al.* Phosphate-solubilizing peanut associated bacteria: screening for plant growth-promoting activities [J]. *Plant and Soil*, 2010, **329**(1): 421-431.
- [ 14 ] Chai B, Wu Y, Liu P M, *et al.* Isolation and phosphate-solubilizing ability of a fungus, *Penicillium* sp. from soil of an alum mine [J]. *Journal of Basic Microbiology*, 2011, **51**(1): 5-14.
- [ 15 ] 虞伟斌. 解磷菌 K3 的溶磷特性及其在不同土壤中定殖研究 [D]. 南京:南京农业大学, 2010. 4-8.
- [ 16 ] Yu X, Liu X, Zhu T H, *et al.* Isolation and characterization of phosphate-solubilizing bacteria from walnut and their effect on growth and phosphorus mobilization [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2011, **47**(4): 437-446.
- [ 17 ] Murphy J, Riley J P. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters [J]. *Analytica Chimica Acta*, 1962, **27**: 31-36.
- [ 18 ] 钟传青,黄为一. 不同种类解磷微生物的溶磷效果及其磷酸酶活性的变化[J]. *土壤学报*, 2005, **42**(2): 286-294.
- [ 19 ] 张丽珍,冯利利,蒙秋霞,等. 一株柠条内生解磷菌的分离鉴定及实时荧光定量 PCR 检测[J]. *生态学报*, 2013, **33**(13): 3941-3946.
- [ 20 ] Prasanna A, Deepa V, Balakrishna P, *et al.* Insoluble phosphate solubilization by bacterial strains isolated from rice rhizosphere soils from Southern India [J]. *International Journal of Science*, 2011, **6**(2): 134-141.
- [ 21 ] 余贤美,王义,沈奇宾,等. 解磷细菌 PSB3 的筛选及拮抗作用的研究[J]. *微生物学通报*, 2008, **35**(9): 1398-1403.
- [ 22 ] Park J H, Bolan N, Megharaj M, *et al.* Isolation of phosphate solubilizing bacteria and their potential for lead immobilization in soil [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, **185**(2-3): 829-836.
- [ 23 ] 杨亮,郝瑞霞,吴津,等. 耐受铅真菌的筛选及其对  $\text{Pb}^{2+}$  吸附的初步研究[J]. *环境科学学报*, 2012, **32**(10): 2366-2374.
- [ 24 ] Lai J L, Tang X Y, Zhong L S, *et al.* Study on screening of fungi with high-resistance against chromium and on related characteristics [J]. *Agricultural Science & Technology*, 2011, **12**(12): 1765-1768.
- [ 25 ] 刘云国,樊霆,周娜,等.  $\text{Cu}^{2+}$  和  $\text{Zn}^{2+}$  抗性真菌的分离、鉴定及其富集特性[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2009, **40**(1): 60-66.
- [ 26 ] Hameeda B, Harini G, Rupela O P, *et al.* Growth promotion of maize by phosphate solubilizing bacteria isolated from composts and macrofauna [J]. *Microbiological Research*, 2008, **163**(2): 234-242.

## CONTENTS

Comparative Analysis on Meteorological Condition for Persistent Haze Cases in Summer and Winter in Beijing .....	LIAO Xiao-nong, ZHANG Xiao-ling, WANG Ying-chun, <i>et al.</i> (2031)
Size Distributions of Water-Soluble Inorganic Ions in Atmospheric Aerosols in Fukang .....	MIAO Hong-yan, WEN Tian-xue, WANG Yue-si, <i>et al.</i> (2045)
Study on Transition Metals in Airborne Particulate Matter in Shanghai City's Subway .....	BAO Liang-man, LEI Qian-tao, TAN Ming-guang, <i>et al.</i> (2052)
Heavy Metal Concentrations in Mosses from Qiyi Glacier Region .....	MA Juan-juan, LI Zhen (2060)
Distributions of Dimethylsulfide and Dimethylsulfoniopropionate and Influencing Factors in the East China Sea and the Southern Yellow Sea During the Winter .....	SONG Yi-zhu, ZHANG Hong-hai, YANG Gui-peng (2067)
Pollution by Heavy Metals in the Petrochemical Sewage Waters of the Sea Area of Daya Bay and Assessment on Potential Ecological Risks .....	XU Shan-nan, LI Chun-hou, XU Jiao-jiao, <i>et al.</i> (2075)
Distribution of Perfluorinated Compounds in Surface Water of Shenzhen Reservoir Groups .....	WANG Xin-xuan, ZHANG Hong, HE Long, <i>et al.</i> (2085)
Contamination and Source of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Epikarst Spring Water .....	SUN Yu-chuan, SHEN Li-cheng, YUAN Dao-xian (2091)
Biogeochemical Processes of the Major Ions and Dissolved Inorganic Carbon in the Guijiang River .....	TANG Wen-kui, TAO Zhen, GAO Quan-zhou, <i>et al.</i> (2099)
Hydrologic Processes of the Different Landscape Zones in Fenhe River Headwater Catchment .....	YANG Yong-gang, LI Cai-mei, QIN Zuo-dong, <i>et al.</i> (2108)
Assessment of Groundwater Quality of Different Aquifers in Tongzhou Area in Beijing Plain and Its Chemical Characteristics Analysis .....	GUO Gao-xuan, JU Yi-wen, ZHAI Hang, <i>et al.</i> (2114)
Models for Quantification of Fluid Saturation in Two-Phase Flow System by Light Transmission Method and Its Application .....	ZHANG Yan-hong, YE Shu-jun, WU Ji-chun (2120)
Nitrogen Leaching and Associated Environmental Health Effect in Sloping Cropland of Purple Soil .....	CHEN Wei-liang, GAO Yang, LIN Yong-ming, <i>et al.</i> (2129)
Research on Land Use Structure Optimization Based on Nonpoint Source Dissolved Nitrogen Load Estimation in Shuashui Watershed .....	LU Yu-chao, BI Meng-fei, LI Ze-li, <i>et al.</i> (2139)
Nitrogen and Organic Matter Vertical Distribution Characteristics and Evaluation in Ancient Canal Sediments of Zhenjiang Old Town .....	ZHOU Xiao-hong, LI Yi-min, ZHOU Yi, <i>et al.</i> (2148)
Effects of Two Submerged Macrophytes on Dissolved Inorganic Nitrogen in Overlying Water and Interstitial Water .....	YANG Wen-bin, LI Yang, SUN Gong-xian (2156)
Bioavailable Phosphorus on Suspended Solids of Lake Under Short-term and Repeated Sediment Disturbance .....	WU Xiao-fei, LI Da-peng (2164)
Influence of Different Disturbance Intensity on the Phosphorus Adsorption and Immobilization by the Sediments from an Inner City Heavily Polluted Canal .....	WANG Shang, LI Da-peng (2171)
Effect of Feed Residues on the Release of Nitrogen and Phosphorus of Pond Sediment .....	LÜ Yuan-jiao, LI Rui-jiao, ZHANG Nian, <i>et al.</i> (2178)
Delivery and Release of Sediment PAHs During Resuspension .....	WANG Xiao-hui, BI Chun-juan, HAN Jing-chao (2185)
Effects of Low Molecular Weight Organic Acids on Redox Reactions of Mercury .....	ZHAO Shi-bo, SUN Rong-guo, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (2193)
Removal of Fluorescent Whitening Agent by Hydrogen Peroxide Oxidation Catalyzed by Activated Carbon .....	LIU Hai-long, ZHANG Zhong-min, ZHAO Xia, <i>et al.</i> (2201)
Kinetics of Alkylphenols Degradation in Aqueous Phase with Excilamp Irradiation .....	LIU Yu-hai, YE Zhao-lian, WEN Ying-pin, <i>et al.</i> (2209)
AF + BAF for Treating Effluent in the Sewage Plant of the Resin and Chemical Industry Park .....	TU Yong, LIU Wei-jing, ZHANG Yao-hui, <i>et al.</i> (2216)
Synthesis and Adsorption Property of Cd(II)-8-hydroxyquinoline Molecularly Imprinted Polymer Microspheres .....	YANG Chun-yan, CHEN Fu-bin, ZHAO Hui, <i>et al.</i> (2223)
Simultaneous Nitrification and Denitrification in a Microbubble-aerated Biofilm Reactor .....	LIU Chun, NIAN Yong-jia, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (2230)
Effect of PLA/Starch Slow-Release Carbon Source on Biological Denitrification .....	TANG Dan-qi, WANG Juan, ZHENG Tian-long, <i>et al.</i> (2236)
Impacts of Filamentous Bulking on Treatment Effect and Fouling Characteristics of Nonwoven Bioreactor .....	SHI Kuan, XUE Gang, GAO Pin, <i>et al.</i> (2241)
Optimization for Phosphorous Removal in Thickening and Dewatering Sludge Water by Polyaluminum Chloride .....	ZHOU Zhen, HU Da-long, QIAO Wei-min, <i>et al.</i> (2249)
Simulation of Long-Range Transport Potential of POPs in Poyang Lake .....	GONG Xiao-feng, XIANG Hong-rui, CHEN Chun-li, <i>et al.</i> (2256)
Uncertainty Analysis of Ecological Risk Assessment Caused by Heavy-metals Deposition from MSWI Emission .....	LIAO Zhi-heng, SUN Jia-ren, WU Dui, <i>et al.</i> (2264)
Risk Assessment and Countermeasures of BTEX Contamination in Soils of Typical Pesticide Factory .....	TAN Bing, WANG Tie-yu, LI Qi-feng, <i>et al.</i> (2272)
Levels Distribution and Risk Assessment of the Indicator and Dioxin-Like Polychlorinated Biphenyls in Ten Different Species of Marine Fish of Bohai Bay, China .....	WANG Sha-sha, GAO Li-rong, TIAN Yi-ling, <i>et al.</i> (2281)
Detection of Biohazardous Materials in Water upon the Characteristics of Fluorescent Sensor Flex .....	ZHAO Wei, WANG Zhao, CAI Qiang, <i>et al.</i> (2287)
Generation and Release of Microcystin-LR by <i>Microcystis aeruginosa</i> Under Hydroquinone Inhibition .....	ZHANG Yuan-chun, LIANG Wen-yan, ZHAO Yuan, <i>et al.</i> (2294)
Culture Medium Based on Biogas Slurry and Breeding of Oil Chlorella .....	ZHAO Feng-min, MEI Shuai, CAO You-fu, <i>et al.</i> (2300)
Microbial Diversity and Ammonia-Oxidizing Microorganism of a Soil Sample Near an Acid Mine Drainage Lake .....	LIU Ying, WANG Li-hua, HAO Chun-bo, <i>et al.</i> (2305)
Effects of <i>Corbicula fluminea</i> Bioturbation on the Community Composition and Abundance of Ammonia-Oxidizing Archaea and Bacteria in Surface Sediments .....	WANG Xue, ZHAO Da-yong, ZENG Jin, <i>et al.</i> (2314)
Methanogenic Activity and Methanogen Diversity in Marine Gas Field Sediments .....	TIAN Qi, WANG Jia, FAN Xiao-lei, <i>et al.</i> (2322)
Effect of the Potential on Bacterial Community Under Illumination by DGGE and T-RFLP .....	WU Yi-cheng, DENG Huan, XIAO Yong, <i>et al.</i> (2328)
Isolation and Characterization of Two Bacteria with Heavy Metal Resistance and Phosphate Solubilizing Capability .....	TIAN Jiang, PENG Xia-wei, LI Xia, <i>et al.</i> (2334)
Identification and Denitrification Characteristics of a Psychrotolerant Facultative Basophilic Aerobic Denitrifier .....	WANG Zhao-yang, CHEN Guo-yao, JIANG Ke, <i>et al.</i> (2341)
Effects of Ryegrass and Arbuscular Mycorrhiza on Activities of Antioxidant Enzymes, Accumulation and Chemical Forms of Cadmium in Different Varieties of Tomato .....	JIANG Ling, YANG Yun, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (2349)
Response of Active Nitrogen to Salinity in a Soil from the Yellow River Delta .....	LI Ling, QIU Shao-jun, CHEN Yin-ping, <i>et al.</i> (2358)
Variation of Soil Nitrogen During <i>in situ</i> Mineralization Process Under Different Grasslands in the Mountainous Area of Southern Ningxia, Northwest China .....	JIANG Yue-li, ZHAO Tong, YAN Hao, <i>et al.</i> (2365)
Effects of Long-Term Application of Pig Manure Containing Residual Tetracycline on the Formation of Drug-Resistant Bacteria and Resistance Genes .....	ZHANG Jun, YANG Xiao-hong, GE Feng, <i>et al.</i> (2374)
Long-Term Effects of Tillage Methods on Heavy Metal Accumulation and Availability in Purple Paddy Soil .....	CHANG Tong-ju, CUI Xiao-qiang, RUAN Zhen, <i>et al.</i> (2381)
Environmental Geochemical Baseline of Heavy Metals in Soils of the Ili River Basin and Pollution Evaluation .....	ZHAO Xin-ru, Telajin Nasier, CHENG Yong-yi, <i>et al.</i> (2392)
Distribution Patterns and Pollution Assessments of Heavy Metals in the <i>Spartina alterniflora</i> Salt-Marsh Wetland of Rudong, Jiangsu Province .....	ZHANG Long-hui, DU Yong-fen, WANG Dan-dan, <i>et al.</i> (2401)
Temporal-Spatial Distribution of Agricultural Diffuse Nitrogen Pollution and Relationship with Soil Respiration and Nitrification .....	OUYANG Wei, CAI Guan-qing, HUANG Hao-bo, <i>et al.</i> (2411)
Soil Respiration and Carbon Balance in Wheat Field Under Conservation Tillage .....	ZHANG Sai, WANG Long-chang, HUANG Zhao-cun, <i>et al.</i> (2419)
Comparison of Soil Respiration in Natural <i>Castanopsis carlesii</i> Forest and Plantation Forest .....	WU Jun-jun, YANG Zhi-jie, WENG Fa-jin, <i>et al.</i> (2426)
Influences of Hydraulic Retention Time on the Ethanol Type Fermentation Hydrogen Production System in a Hybrid Anaerobic Baffled Reactor .....	LIU Xiao-ye, ZHANG Hong, LI Yong-feng (2433)

# 《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6月15日 第35卷 第6期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 6 Jun. 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