

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第6期

Vol.34 No.6

2013

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

2008 ~ 2010 年北京城区大气 BTEX 的浓度水平及其 O₃ 生成潜势 曹函玉, 潘月鹏, 王辉, 谭吉华, 王跃思 (2065)

利用 SPAMS 研究上海秋季气溶胶污染过程中颗粒物的老化与混合状态 牟莹莹, 楼晟荣, 陈长虹, 周敏, 王红丽, 周振, 乔利平, 黄成, 李梅, 李莉, 王倩, 黄海英, 邹兰军 (2071)

沈阳市降水化学成分及来源分析 张林静, 张秀英, 江洪, 张清新 (2081)

秦皇岛大气污染物浓度变化特征 刘鲁宁, 申雨璇, 辛金元, 吉东生, 王跃思 (2089)

禽类肉鸡生长过程 NH₃、N₂O、CH₄ 和 CO₂ 的排放 周忠凯, 朱志平, 董红敏, 陈永杏, 尚斌 (2098)

碳化硅协同分子筛负载型催化微波辅助催化氧化甲苯性能 王晓晖, 卜龙利, 刘海楠, 张浩, 孙剑宇, 杨力, 蔡力栋 (2107)

生物滴滤塔净化多组分废气的研究 张定丰, 房俊逸, 叶杰旭, 邱松凯, 钱东升, 戴启洲, 陈东之 (2116)

在氧化和还原氛围下脉冲电晕法降解二硫化碳废气 金圣, 黄立维, 李国平 (2121)

模拟大气 CO₂ 水平升高对春季太湖浮游植物生理特性的影响 赵旭辉, 汤龙升, 史小丽, 杨州, 孔繁翔 (2126)

一种确定湖泊水质基准参照状态浓度的新方法 华祖林, 汪靛 (2134)

HSPF 径流模拟参数敏感性分析与模型适用性研究 李燕, 李兆富, 席庆 (2139)

基于非点源污染的水质监测方案研究 吴喜军, 李怀恩, 李家科, 李强坤, 董雯 (2146)

不同雨强下黄棕壤坡耕地径流养分输出机制研究 陈玲, 刘德富, 宋林旭, 崔玉洁, 张革 (2151)

春季东海赤潮发生前后营养盐及溶解氧的平面分布特征 李鸿妹, 石晓勇, 陈鹏, 张传松 (2159)

三峡库区大宁河枯水期藻细胞的时空分布 张永生, 郑丙辉, 王坤, 姜霞, 郑浩 (2166)

湖泊沉积物溶解性有机氮组分的藻类可利用性 冯伟莹, 张生, 焦立新, 王圣瑞, 李畅游, 崔凤丽, 付绪金, 甄志磊 (2176)

刚毛藻分解对上覆水磷含量及赋存形态的影响 侯金枝, 魏权, 高丽, 孙卫明 (2184)

反复扰动下磷在沉积物和悬浮物以及上覆水间的交换 李大鹏, 王晶, 黄勇 (2191)

三峡库区主要支流表层沉积物多溴联苯醚的分布特征 李昆, 赵高峰, 周怀东, 刘晓茹, 余丽琴, 文武, 张盼伟 (2198)

UV 和 H₂O₂ 联合消毒灭活饮用水中大肠杆菌研究 张一清, 周玲玲, 张吉 (2205)

臭氧降解水中邻苯二甲酸二甲酯的动力学及影响因素 于丽, 张培龙, 侯甲才, 庞立飞, 李越, 贾寿华 (2210)

硝酸根对水体中甲基汞光化学降解的影响 毛雯, 孙荣国, 王定勇, 马明, 张成 (2218)

炔雌醇氯化反应的动力学和机制研究 王斌楠, 刘国强, 孔德洋, 陆隽鹤 (2225)

金属离子对 δ-MnO₂ 去除对叔辛基酚抑制作用的研究 李非里, 牟华倩 (2232)

核壳表面磁性印迹聚合物的制备及其对水中双酚 A 的特异性去除 刘建明, 李红, 熊振湖 (2240)

有机蒙脱石负载纳米铁去除溶液中四溴双酚 A 的研究 闫梦玥, 庞志华, 李小明, 赵建宇, 罗隽 (2249)

纳滤预处理测定景观水体中溶解性有机氮质量浓度及其分布特征 于红蕾, 霍守亮, 杨周生, 席北斗, 咎逢宇, 张靖天 (2256)

改性水凝胶的制备及其对 Pb²⁺、Cd²⁺ 吸附性能研究 吴宁梅, 李正魁 (2263)

直接大红 4BE 的磷钨酸均相催化还原脱色 魏红, 李克斌, 李娟, 陈经涛, 张涛 (2271)

基于微气泡曝气的生物膜反应器处理废水研究 张磊, 刘平, 马锦, 张静, 张明, 吴根 (2277)

Fenton 法处理竹制品废水生化出水研究 郭庆稳, 张敏, 王炜, 杨治中, 吴东雷 (2283)

二价铁离子对 UASB 反应器厌氧发酵产氢效能的影响 李永峰, 王艺璇, 程国玲, 刘春妍 (2290)

进水底物浓度对蔗糖废水产酸合成 PHA 影响研究 陈志强, 邓毅, 黄龙, 温沁雪, 郭子瑞 (2295)

接种好氧颗粒污泥快速启动硝化工艺的过程研究 刘文如, 沈耀良, 丁玲玲, 丁敏 (2302)

聚磷污泥去除高浓度铅的影响因素研究 杨敏, 卢龙, 冯涌, 方超, 李雄清 (2309)

体积分数传递系数在好氧颗粒污泥系统中的变化特性初步分析 李志华, 范长青, 王晓昌 (2314)

我国淡水水体中双酚 A (BPA) 的生态风险评价 汪浩, 冯承莲, 郭广慧, 张瑞卿, 刘跃丹, 吴丰昌 (2319)

麦穗鱼物种敏感性评价 王晓南, 刘征涛, 闫振广, 张聪, 何丽, 孟双双 (2329)

不同评估方法得出的五氯酚的 PNEC 值的比较研究 雷炳莉, 文育, 王艺陪, 康佳, 刘倩 (2335)

桂林市交警头发 Hg、Pb 含量及分布研究 钱建平, 张力, 李成超, 黄栋 (2344)

直流电场处理后降线藻趋光性对 Cl⁻ 和 Hg²⁺ 的响应 王飞翔, 袁玲, 黄建国 (2350)

UV-B 辐射对青冈凋落叶化学组成和分解的影响 宋新章, 卜涛, 张水奎, 江洪, 王志坤, 赵明水, 刘永军 (2355)

7 种树木的叶片微形态与空气悬浮颗粒吸附及重金属累积特征 刘玲, 方炎明, 王顺昌, 谢影, 杨聃聃 (2361)

溶解氧对碳氮硫共脱除工艺中微生物群落影响解析 于皓, 陈川, 张莉, 王爱杰 (2368)

不同耕地利用方式下土壤微生物活性及群落结构特性分析: 基于 PLFA 和 MicroRespTM 方法 陈晓娟, 吴小红, 刘守龙, 袁红朝, 李苗苗, 朱捍华, 葛体达, 童成立, 吴金水 (2375)

典型滨海湿地干湿交替过程氮素动态的模拟研究 陈建刚, 曹雪 (2383)

三峡库区巫山建坪地区土壤镉等重金属分布特征及来源研究 刘意章, 肖唐付, 宁增平, 贾彦龙, 黎华军, 杨菲, 姜涛, 孙昊 (2390)

北京市不同区位耕作土壤中重金属总量与形态分布特征 陈志凡, 赵焯, 郭廷忠, 王永锋, 田青 (2399)

季节变化对贵阳市不同功能区地表灰尘重金属的影响 李晓燕 (2407)

东营市孤岛地区土壤中类二噁英类 PCBs 的污染特征 王登阁, 崔兆杰, 傅晓文, 殷永泉, 许宏宇 (2416)

模拟氮沉降对森林土壤有机物淋溶的影响 段雷, 马萧萧, 余德祥, 谭炳全 (2422)

甲基 β 环糊精对污染场地土壤中多环芳烃的异位增效洗脱修复研究 孙明明, 滕应, 骆永明, 李振高, 贾仲君, 张满云 (2428)

胶质芽胞杆菌对印度芥菜根际土壤铜含量及土壤酶活性影响 杨榕, 李博文, 刘微 (2436)

长期施用粪肥蔬菜基地蔬菜中典型抗生素的污染特征 吴小莲, 向垒, 莫测辉, 姜元能, 严青云, 李彦文, 黄献培, 苏青云, 王纪阳 (2442)

有机废弃物堆肥培肥土壤的氮矿化特性研究 张旭, 席北斗, 赵越, 魏自民, 李洋, 赵昕宇 (2448)

北京市生活垃圾转运站耗能和排污特征及其影响因素分析 王昭, 李振山, 冯亚斌, 焦安英, 薛安 (2456)

氨对垃圾焚烧灰渣浸出特性的影响及地球化学模拟 官贞珍, 陈德珍, Thomas Astrup (2464)

焚烧飞灰预处理工艺及其无机氯盐的行为研究 朱芬芬, 高冈昌辉, 大下和傲, 姜惠民, 北岛义典 (2473)

富含中孔与酸性基团的生物炭的制备与吸附性能 李坤权, 李焯, 郑正, 张雨轩 (2479)

生物炭技术缓解我国温室效应潜力初步评估 姜志翔, 郑浩, 李锋民, 王震宇 (2486)

基于物质流分析的钾素流动与循环研究 白桦, 曾思育, 董欣, 陈吉宁 (2493)

《环境科学》征订启事 (2115) 《环境科学》征稿简则 (2224) 信息 (2217, 2289, 2349, 2398) 专辑征稿通知 (2478)

胶质芽胞杆菌对印度芥菜根际土壤镉含量及土壤酶活性影响

杨榕¹, 李博文^{1*}, 刘微²

(1. 河北农业大学资源与环境科学学院, 保定 071001; 2. 河北大学化学与环境科学学院, 保定 071002)

摘要: 采用根袋法盆栽试验, 研究分别接种活菌量浓度为 1×10^{10} CFU·kg⁻¹ (处理 A) 和 2×10^{10} CFU·kg⁻¹ (处理 C) 的胶质芽胞杆菌, 对根际土壤镉含量和土壤酶活性的影响。结果表明, 处理 A、C 对根际土壤镉的去除率分别达到 37.62%、38.27%, 是对照 (24.47%) 的 1.54、1.56 倍。胶质芽胞杆菌处理后土壤酶活性均有所增强, 土壤脲酶、磷酸酶、过氧化氢酶活性在根际土壤大于非根际, 随着时间延长土壤磷酸酶活性逐渐升高, 脲酶和过氧化氢酶呈现先增高后降低的变化趋势, 而脱氢酶活性在非根际土壤大于根际土壤, 也呈现先增高后降低的变化趋势。对照组及处理 A、C 组中根际 Cd 含量与土壤磷酸酶、脲酶呈现显著或极显著负相关。研究表明, 施入胶质芽胞杆菌不仅可以提高超富集植物对土壤 Cd 的净化效果而且对土壤脲酶、磷酸酶、过氧化氢酶及脱氢酶均有一定的积极作用, 其结果可为该菌辅助植物修复镉污染土壤的机制性研究提供理论指导。

关键词: 胶质芽胞杆菌; 根际; Cd; 土壤酶; 印度芥菜

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)06-2436-06

Effects of *Bacillus mucilaginosus* on the Cd Content of Rhizosphere Soil and Enzymes in Soil of *Brassica juncea*

YANG Rong¹, LI Bo-wen¹, LIU Wei²

(1. College of Resources & Environmental Science, Agricultural University of Hebei, Baoding 071001, China; 2. College of Chemistry & Environmental Science, Hebei University, Baoding 071002, China)

Abstract: The effects of two inoculation concentrations of *Bacillus mucilaginosus* (1×10^{10} (treatment A), 2×10^{10} (treatment C) CFU·kg⁻¹) on the Cd content of rhizosphere soil and enzymes in soil were investigated when *Brassica* as a hyperaccumulator grew in the pots experiment. The results showed that the removal rate of rhizosphere soil Cd in treatment A and C were 37.62% and 38.27%, respectively, which were 1.54 and 1.56 times as high as that of the control (24.47%). The activities of urease, phosphatase and catalase in rhizosphere were higher than those in non-rhizosphere. The urease, catalase and dehydrogenase activities increased firstly and then decreased, while the phosphatase activity increased gradually with time. However, the dehydrogenase activity in non-rhizosphere was higher than that in rhizosphere. Correlation analysis showed negative correlation between content of Cd and urease and phosphatase in the control treatment and significantly negative correlation between content of Cd and activities urease and phosphatase in treatment A and C in rhizosphere. The results indicated that inoculation of *Bacillus mucilaginosus* not only had some positive effect on urease, phosphatase, catalase and dehydrogenase in soil but also improved the purification effect of hyperaccumulator on soil Cd. This study provides theoretical guidance for the further mechanism study of Microbe-Phytoremediation.

Key words: *Bacillus mucilaginosus*; rhizosphere; Cd; enzymes; *Brassica juncea*

随着国民经济的快速发展, 土壤中重金属污染情况日趋严重。受工业“三废”排放及农药、化肥不合理施用的影响, 农产品中重金属超标事件屡见报道。有调查表明, 20 世纪末我国遭受镉污染的耕地面积已达 1.33 万 hm²[1]。镉是一种极具生物毒性的环境污染元素, 被称为“五毒 (Cd、Hg、Pb、Cr、As) 之首”, 其在土壤中的积累不仅影响土壤的生态功能, 还可以通过土壤-植物系统危害作物生长以及通过食物链最终危害人类健康[2-4]。因此, 对于重金属污染尤其是镉污染土壤的生物修复问题一直是环境科学界致力研究的热点。目前, 就微生物修复重金属污染土壤虽有一些研究, 但由于重金属污染面

积大, 污染物具有在土壤中移动性差、滞留时间长、不能被微生物降解等特点, 治理和修复效果鲜见报道[5,6]。此外, 为了促进植物修复效果, 国内外已开展了植物-微生物联合修复体系, 其研究的重点在于寻找适合某种污染物的菌株接种在超级累植物上, 然而在探讨适宜微生物与植物匹配组合及匹配量方面的研究也鲜见报道。

土壤微生物功能群的研究意义不仅关系到农业

收稿日期: 2012-08-29; 修订日期: 2012-10-10

基金项目: 河北省自然科学基金项目 (C2010000666)

作者简介: 杨榕 (1987~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤重金属污染与生物修复, E-mail: yangrong2011@163.com

* 通讯联系人, E-mail: kjli@hebau.edu.cn

生产,而且关系到环境污染的治理和修复领域^[7,8]. 微生物进入土壤后能够与相匹配的超级累植物进行协同作用,有效促进超级累植物对重金属的富集,改变重金属在土壤中生物有效性,进而影响土壤酶的活性. 土壤中很多生物化学过程都离不开各类酶的参与,同时土壤酶活性大小能反应土壤潜在的肥力水平,可较敏感地反映土壤中生化反应的方向和深度. 因此,土壤酶是讨论重金属污染土壤生态效应的有效指标之一^[9]. 近 20 年来,国内外学者对重金属的土壤酶效应开展了广泛的研究, Maliszewska-Kordybach 等^[10]发现,酸性磷酸酶和脱氢酶均可很好地表征土壤汞的污染程度;沈桂琴等^[11]认为, Hg、Cd、Pd 显著抑制了土壤脲酶、转化酶、碱性磷酸酶和蛋白酶的活性. 土壤酶是一种具有生物催化能力和蛋白质性质的高分子活性物质. 土壤酶主要来源于土壤微生物活动分泌、植物根系分泌和植物残体以及土壤动物区系分解. 土壤微生物不仅数量巨大而且繁殖速度快,能够向土壤中分泌土壤酶^[12]. 大量资料表明,许多微生物都可以产生胞外酶,因此,微生物是土壤酶的一个重要来源. 但是目前对于功能性微生物对土壤酶的影响研究并不多,而将受微生物影响的几种主要酶进行综合分析将更

有助于讨论其在修复重金属污染土壤过程中的机制性问题.

胶质芽胞杆菌 (*Bacillus mucilaginosus*) 俗称硅酸盐细菌,是一种较为特殊的土壤芽胞杆菌,作为土壤中重要的功能菌,它能分解长石、云母等硅酸盐类的原生态矿物,使土壤中难溶性 K、P 等转变为可溶性以供植物生长利用,同时还可以产生多种生物活性物质促进植物生长^[13]. 胶质芽胞杆菌在微生物肥料方面的应用已趋于成熟,然而其在重金属污染土壤的植物修复领域的研究鲜有报道. 本研究通过土培根际试验,探讨该菌剂施入土壤后,印度芥菜在不同时期根际土壤镉含量和土壤酶活性的动态变化,以期为微生物-植物联合修复领域提供适宜的菌种资源和理论依据.

1 材料与方法

1.1 供试植物和土壤

供试植物:印度芥菜为 *Brassica juncea* 的 Wild Garden Pagent Mix 品种. 种子来自于美国俄勒冈州一名为“Wild Garden Seed”农场.

供试土壤:采自河北农业大学西校区标本园 0 ~ 40 cm 的潮褐土,理化性质特征见表 1.

表 1 供试土壤的理化性质特征

Table 1 Characteristics of physical and chemical properties in tested soil

土壤类型	Cd /mg·kg ⁻¹	有机质 /g·kg ⁻¹	全 N /g·kg ⁻¹	碱解 N /mg·kg ⁻¹	速效 P /mg·kg ⁻¹	速效 K /mg·kg ⁻¹	pH
潮褐土	0.32	9.68	0.49	46.61	22.17	133.04	8.05

1.2 供试菌株及培养

供试菌株:胶质芽胞杆菌由河北农业大学生命科学学院提供.

将胶质芽胞杆菌菌株接种于 LB 培养基(胰蛋白胨 10 g·L⁻¹、酵母提取物 5 g·L⁻¹、氯化钠 10 g·L⁻¹)平板上活化 24 h,转接于 LB 液体培养基,28℃、230 r·min⁻¹振荡培养至 90% 以上芽孢脱落,用分光光度计在 $\lambda = 660 \text{ nm}$ 下,将该菌液的透光率 (T)调至 50%,此时菌液活菌浓度约为 $1 \times 10^9 \text{ CFU} \cdot \text{mL}^{-1}$,作为原液备用.

1.3 试验方案与布置

土培根际试验在河北农业大学东校区日光温室中进行. 镉污染土壤的制备:重金属镉以 $\text{CdCl}_2 \cdot 3/2 \text{ H}_2\text{O}$ (分析纯)固体粉末形式施入土壤中,使土壤镉含量均为 $5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,干湿交替一周,于室温下平衡 2 个月后备用.

试验设计:试验用塑料小盆钵,每盆装土 2.5 kg

(以烘干土计),同时每盆加入 0.2 g 尿素和 0.4 g 磷酸二胺作底肥,均采用分析纯试剂,与土壤一并混合装盆. 装盆时采用根袋法分离根际土壤和非根际土壤. 每个根袋内装土 300 g 置于盆钵中间,根袋高于土面 2 cm,保持根袋内外装土高度一致. 加入去离子水使水含量为田间持水量的 60% 保持一周后将印度芥菜种子直接播种于根袋,生长一周后间苗,每盆保留 4 株苗. 在印度芥菜生长 10 d 后,分别对根际和非根际土壤进行微生物接种.

试验分为两组,以不接种菌液作为对照组 CK,试验设不同接菌浓度 A、C 两个处理. 分别将活菌量为 $1 \times 10^9 \text{ CFU} \cdot \text{mL}^{-1}$ 的胶质芽胞杆菌原液 25、50 mL,用无菌水稀释至 100 mL,均匀喷洒于各试验盆,使 A 处理活菌量浓度为 $1 \times 10^{10} \text{ CFU} \cdot \text{kg}^{-1}$ (处理 A),C 处理活菌量浓度为 $2 \times 10^{10} \text{ CFU} \cdot \text{kg}^{-1}$ (处理 C). 试验采用破坏性采样方式,每次每个处理均采样 3 盆,根据芥菜生长情况接种菌液前 1 d 对土壤

进行第一次采样,接种后每 10 d 采样一次,共采样 5 次。

1.4 样品采集与分析方法

土壤样品的采集:小心将根袋取出采用抖落法收集距根表面 4 mm 左右的土壤作为根际土. 收集非根际土壤时,对根袋 5 mm 外土壤分 6 点进行采集. 将所取样品充分混合后在室内自然风干,过不同粒级筛保存备用。

供试土壤基本理化性质分析采用土壤农化常规分析法^[14];土壤全镉采用 HCL-HNO₃-HClO₄ 消解,石墨炉原子吸收光谱法测定(ZEEnit 600,德国耶拿公司)。

土壤酶活性测定方法:土壤脲酶活性采用靛酚蓝比色法测定,以 24 h 每克干土产生 NH₃-N 的量(以 mg 计)为脲酶的 1 个活性单位;土壤磷酸酶活性采用磷酸苯二钠比色法测定,以 24 h 每克干土产生的酚的毫克数表示;土壤过氧化氢酶活性采用高锰酸钾滴定法测定,以 20 min 每克土壤消耗 0.1 mol·L⁻¹ KMnO₄ 的毫升数表示;土壤脱氢酶活性采用三苯基四唑氯化物(TTC)比色法测定,以 24 h 每克干土产生的 TTC 的还原产物计算. 具体测定方法参见文献[15]。

1.5 数据处理

所得相关数据的试验与测定在 2012 年 1 月 ~ 2012 年 6 月内完成. 数据均用 SPSS 17.0 软件进行方差显著性及相关性分析,用“平均值 ± 标准差”表示,采用 Excel 2003 软件作图。

2 结果与分析

2.1 胶质芽胞杆菌处理对根际土壤镉含量的影响

根际是植物与土壤接触的微域环境,根际土壤不仅是超富集植物富集土壤重金属的主要区域而且可以通过影响根际周围微生物的生物活性,进而改变土壤酶的活性. 对不同采样时期不同浓度接菌量处理后根际土壤中重金属镉含量进行测定,结果见图 1. 随着时间延长,根际土壤中镉含量均呈现明显

降低趋势. 经菌液处理后 A、C 中土壤镉含量在接菌初期与对照(CK)相比并没有显著变化,但在接菌 20 d 以后,处理 A、C 的根际土壤镉含量均明显低于对照(CK),而处理 A、C 之间的差异性并不显著. 对照组中根际土壤镉含量从 4.41 mg·kg⁻¹降低到收获时的 3.33 mg·kg⁻¹,对土壤 Cd 的去除率为 24.47%,而处理 A、C 分别从 4.49、4.38 mg·kg⁻¹降低到 2.80、2.71 mg·kg⁻¹,对土壤 Cd 的去除率分别达到 37.62%、38.27%,是对照组的 1.54、1.56 倍. 由此可以看出,经胶质芽胞杆菌处理后作为超富集植物的印度芥菜根际土壤 Cd 含量降低效果更加明显,说明该菌在辅助印度芥菜修复 Cd 污染土壤的过程中可以起到明显的协同作用。

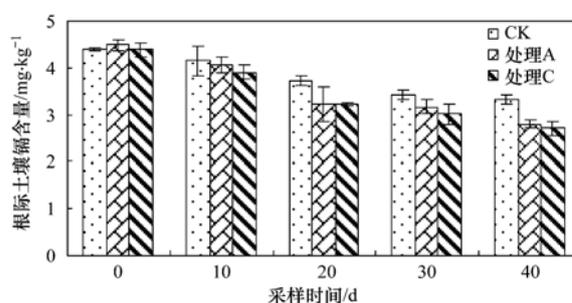


图 1 根际土壤 Cd 含量随时间变化情况

Fig. 1 Change of Cd contents in rhizosphere over time

2.2 胶质芽胞杆菌处理对土壤脲酶活性的影响

土壤脲酶是决定土壤中氮转化的关键酶,主要来源于微生物和植物代谢,其活性的变化不仅与土壤氮素状况有关还能反应土壤微生物的活性变化情况. 图 2 表示接种胶质芽胞杆菌后根际和非根际土壤脲酶随时间变化情况. 无论根际还是非根际土壤脲酶均表现为初期逐渐升高,达到最高点时缓慢下降的变化趋势. 处理 A 和 CK 均在接种菌液后 20 d 左右脲酶活性达到最高值,而处理 C 在 20 d 以后继续升高,到 30 d 左右才出现最高点. 在不同采样时期,不同处理根际土壤(R)脲酶活性均高于非根际土壤(N),CK 组根际土壤脲酶活性比非根际土壤提高 2.85% ~ 34.75%,处理 A、C 根际土壤脲酶活性

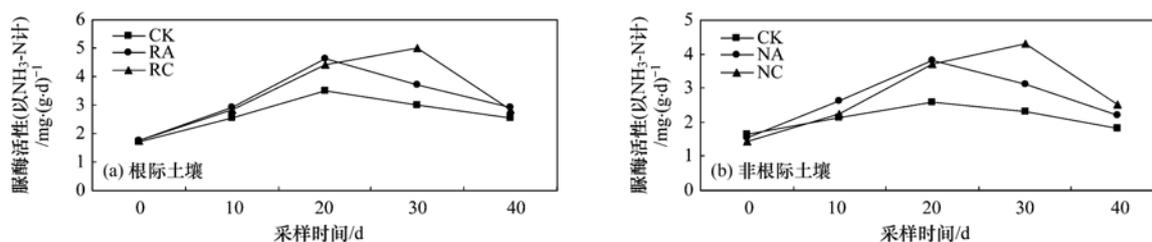


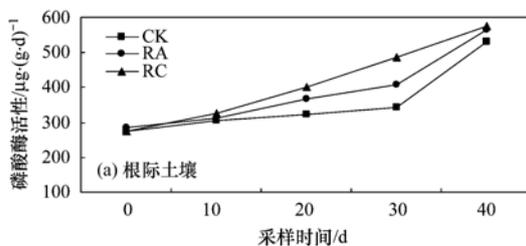
图 2 胶质芽胞杆菌对土壤脲酶活性的影响

Fig. 2 Effect of *Bacillus mucilaginosus* on urease enzyme activity

比非根际土壤分别提高 11.55% ~ 32.27%、12.31% ~ 26.71%, CK 组中提高率稍高显然是由于 CK 组非根际土壤中脲酶活性在不同采样时期都偏低所致,由此可见,经过菌液处理土壤脲酶活性会有显著提高. 具体来看,在根际土壤中,处理 A 土壤脲酶活性在接种 20 d 达到最高值比同时期对照组提高 31.4%,处理 C 的最大值出现在接种后 30 d,比同时期对照组提高 66.11%. 这种变化趋势在非根际土壤中同样有所体现,处理 A、C 对土壤脲酶活性的最大提高率分别为 46.33%、85.71%,由此,无论是根际土壤还是非根际土壤微生物的进入都会导致土壤脲酶活性显著提高.

2.3 胶质芽胞杆菌处理对土壤磷酸酶活性的影响

土壤磷酸酶活性取决于土壤微生物的数量、种



类、植物类型等因素,胶质芽胞杆菌作为土壤中重要的解磷解钾菌,其对土壤磷酸酶活性的影响如图 3 所示. 根际土壤磷酸酶活性均呈现开始缓慢升高,到达 30 d 左右时又快速升高的变化趋势. 经过菌液处理的根际土壤磷酸酶活性均高于对照,在接菌 30 d 左右时,处理 A、C 土壤磷酸酶活性分别是对照的 1.20、1.42 倍. 非根际土壤中,对照组土壤磷酸酶活性在不同采样时期基本没有变化,而经过菌液处理的 A、C 组土壤磷酸酶活性均大于对照并且逐渐升高,收获时,处理 A、C 组非根际土壤磷酸酶活性分别是对照的 1.43、1.45 倍. 说明该菌施入土壤后促进了土壤无机磷酸盐的溶解,磷素活性的增加引起土壤磷酸酶活性增加,由此可以看出,该菌对土壤磷酸酶的活性有明显的激活作用.

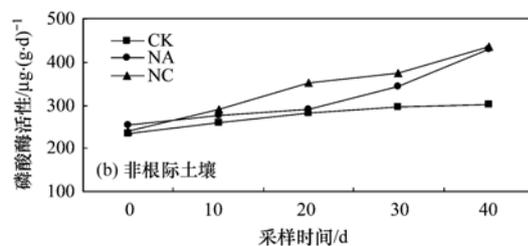
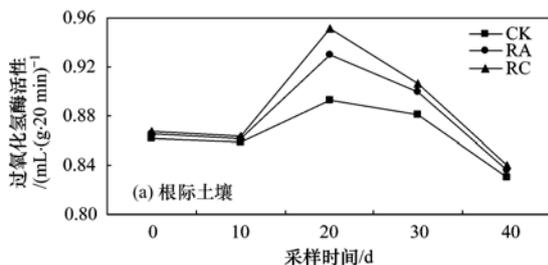


图 3 胶质芽胞杆菌对土壤磷酸酶活性的影响

Fig. 3 Effect of *Bacillus mucilaginosus* on phosphatase activity

2.4 胶质芽胞杆菌处理对土壤过氧化氢酶活性的影响

土壤过氧化氢酶属于氧化还原酶类,它能酶促 H_2O_2 分解,从而解除 H_2O_2 的毒害. 它的活性可以作为土壤呼吸强度和微生物活性的重要指标. 胶质芽胞杆菌对根际、非根际土壤过氧化氢酶活性影响如图 4 所示,过氧化氢酶的活性呈现出先略微降低后快速升高,接种 20 d 左右达到最高点,之后又逐渐降低的变化趋势,这种变化趋势在根际和非根际土壤中有着相似的规律. 经菌液处理的土壤过氧化氢酶活性均高于对照,在接菌 20 d 左右,根际土壤处理 A、C 分别比对照提高 4.23%、6.60%,非根际土壤处理 A、C 分别比对照提高 2.52%、3.52%. 在



不同采样时期根际土壤过氧化氢酶活性略大于非根际土壤,可能与根际土壤中重金属镉生物活性较高、微生物较为活跃有关.

2.5 胶质芽胞杆菌对土壤脱氢酶活性的影响

脱氢酶能酶促脱氢反应,属于胞内酶,糖类和有机酸可作为氢供体. 由图 5 可见,在不同采样时期,对照组中脱氢酶的活性基本没有变化,经胶质芽胞杆菌处理后,根际和非根际土壤脱氢酶活性均高于对照,呈现先增高后降低的变化趋势,在接种菌液 20 d 时达到最大值,此时根际土壤处理 A、C 脱氢酶活性分别是对照的 1.64、1.99 倍,非根际土壤 A、C 分别是对照的 1.68、2.79 倍. 整体来看,在不同时期根际土壤脱氢酶活性均低于非根际,对照组

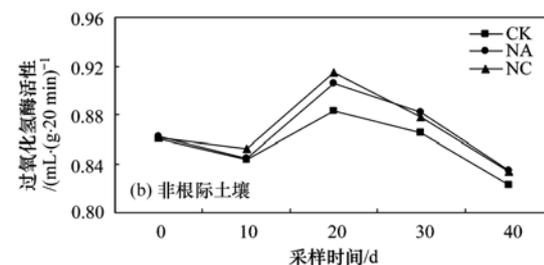


图 4 胶质芽胞杆菌对土壤过氧化氢酶活性的影响

Fig. 4 Effect of *Bacillus mucilaginosus* on catalase activity

中这种降低率为 1.96% ~ 8.84%, 处理 A、C 的降低率分别达到 2.18% ~ 10.63%、5.43% ~ 35.12%, 由此可以看出, 胶质芽胞杆菌在非根际对脱氢酶活性的激活作用比根际更加明显, 这可能是

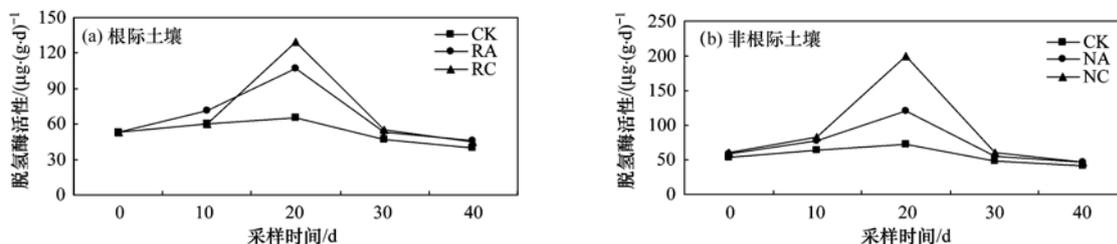


图 5 胶质芽胞杆菌对土壤脱氢酶活性的影响

Fig. 5 Effect of *Bacillus mucilaginosus* on dehydrogenase activity

2.6 根际土壤镉含量与土壤酶活性相关分析

将对照组 (CK) 与不同浓度胶质芽胞杆菌处理 (A、C) 的根际土壤镉含量与土壤脲酶、磷酸酶、过氧化氢酶、脱氢酶活性进行相关分析. 从表 2 可以看出, 经过菌液处理后土壤镉含量与过氧化氢酶、脱氢酶活性的相关性有所增长但并不显著. 对照组中土壤镉含量与脲酶、磷酸酶呈显著负相关 ($P < 0.05$), 而处理 A、C 中土壤镉含量与脲酶、磷酸酶呈极显著负相关 ($P < 0.01$).

表 2 根际土壤镉含量与土壤酶活性的相关分析¹⁾

Table 2 Correlation analysis between content of Cd and enzyme activity in Rhizosphere soil

处理	脲酶	磷酸酶	过氧化氢酶	脱氢酶
CK 中镉含量	-0.618 *	-0.556 *	-0.079	-0.023
处理 A 镉含量	-0.661 **	-0.872 **	-0.140	-0.039
处理 C 镉含量	-0.649 **	-0.962 **	-0.160	-0.091

1) * 表示 0.05 水平上相关性显著; ** 表示 0.01 水平上相关性显著

3 讨论

土壤酶主要来源于土壤微生物和植物根系的分泌物, 在物质循环和营养转化过程中起着关键作用^[16]. 其大小可较为敏感地反映土壤中生化反应的程度, 是探讨重金属污染生态效应的有效指标之一^[17]. 王涵等^[18]认为在影响土壤酶活性变化的各种因素中, 重金属与理化性质处于同等重要的地位. 本试验采用低浓度 $5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的镉污染处理, 主要研究在同一浓度重金属污染水平下, 施用胶质芽胞杆菌对土壤脲酶、磷酸酶、过氧化氢酶和脱氢酶的影响. 研究表明, 所选则的这 4 种与土壤质量评价密切相关的酶在胶质芽胞杆菌的刺激下, 除脱氢酶外根际土壤酶的活性都大于非根际土壤, 这可能是由于根际区域植物根系的分泌物与微生物共同作用导致, 同时也说

明, 土壤酶在促进土壤物质与能量的交换中, 不仅有其专属性, 而且存在着共性关系, Zheng 等^[19] 和 Knowalchek 等^[20] 的研究也有类似结论.

由于土壤是一个复杂的体系, 土壤酶活性不仅与微生物种类和数量有关还与土壤中污染物的浓度有关, 根际重金属 Cd 的活性相对较高, 对土壤脱氢酶的活性会有所抑制.

胶质芽胞杆菌处理后, 不同土壤酶发生不同的变化, 可能与各种不同酶在微生物细胞内所处的位置不同以及在不同时期印度芥菜根系分泌物的作用有关. 从酶分布位置来看, 土壤脲酶、磷酸酶和过氧化氢酶主要分布在微生物细胞内部, 而大对数脱氢酶可以通过微生物细胞分泌到细胞外部. 从试验结果看, 脲酶是土壤中最活跃的水解酶之一, Zantua 等^[21] 认为, 土壤中施入能促进微生物活动的葡萄糖或其他有机质能增大土壤脲酶的活性. 本研究中施入胶质芽胞杆菌对印度芥菜土壤脲酶活性具有明显促进作用, 可能是由于外源菌株的加入, 对于土著有害菌株有所抑制, 增强土壤的生物活性, 从而提高脲酶活性.

本试验中, 各处理的根际、非根际土壤磷酸酶活性都呈现逐渐增高的变化趋势, 并且在收获时, 磷酸酶活性仍然保持较高水平. 这可能是由于胶质芽胞杆菌作为解磷解钾菌, 它能分泌有机酸等物质促进土壤难溶磷酸盐的溶解和矿物中磷的释放, 磷素的增加引起土壤中磷酸酶活性增加, 从印度芥菜的生物量也可以看出, 在植物生长后期经过菌液处理的植株生物量明显高于对照.

过氧化氢酶可促进土壤中多种化合物的氧化分解, 并可防止过氧化氢的积累对生物体造成毒害. 本试验中不同处理根际、非根际土壤中过氧化氢酶活性均表现为先升高后下降的变化趋势, 这一结果与赵艳等^[22] 研究结果一致. 其原因可能与印度芥菜土壤过氧化氢含量不同有关, 尚待进一步讨论.

土壤脱氢酶的主要作用是酶促碳水化合物、有

机酸等脱氢,其含量高低标志着微生物分解代谢的强弱,比脲酶更能反映出土壤中微生物活性变化,常可作为反映微生物活性的指标^[23]。本研究发现,土壤脱氢酶呈现先增高后降低的变化趋势,并且非根际土壤中脱氢酶活性大于根际土壤,这可能与非根际土壤中重金属镉生物活性较低有关。

相关分析表明,没有菌液处理时土壤 Cd 含量与土壤磷酸酶、脲酶、过氧化氢酶、脱氢酶呈负相关,但在添加菌液后,土壤 Cd 含量与磷酸酶、脲酶呈极显著负相关,并且随着接菌量的增加这种相关性更加明显。说明在胶质芽胞杆菌的作用下,一方面该菌与印度芥菜根系的协同作用促进了植物根系对土壤中 Cd 的富集,从而降低了土壤 Cd 含量尤其是根际土壤中镉含量(如图 1),因此,根际土壤中磷酸酶、脲酶、过氧化氢酶活性均大于非根际土壤(土壤脱氢酶则相反);另一方面可能是由于该菌通过自身生命代谢活动直接刺激土壤酶的活性,无论在根际还是非根际土壤中菌液处理后土壤酶活性均高于对照(图 2~5)。由此可以看出,微生物、土壤酶和重金属在超富集植物根际进行物质转化和能量交换中关系密切,它们之间的内在联系有待深入研究。

4 结论

(1) 胶质芽胞杆菌对根际土壤镉有明显的活化作用,处理 A、C 对土壤镉的去除率分别是对照 1.54、1.56 倍。说明该菌在辅助印度芥菜修复 Cd 污染土壤的过程中有明显的协同作用。

(2) 不同浓度胶质芽胞杆菌处理,土壤脲酶、磷酸酶和过氧化氢酶活性在根际土壤大于非根际土壤,随着时间的延长土壤磷酸酶活性逐渐升高,脲酶和过氧化氢酶呈现先升高后降低的变化趋势;非根际土壤脱氢酶活性大于根际土壤,也呈现先增高后降低的变化趋势。

(3) 对照组和不同浓度胶质芽胞杆菌处理后土壤镉含量与脲酶、磷酸酶呈显著或极显著负相关,其相关性与接种菌液浓度有关。

参考文献:

- [1] 赵中秋,朱永官,蔡运龙. 镉在土壤-植物系统中的迁移转化及其影响因素[J]. 生态环境, 2005, **14**(2): 282-286.
- [2] Chaney R L, Reeves P G, Ryan J A, *et al.* An improved understanding of soil Cd risk to humans and low cost methods to phytoextract Cd from contaminated soils to prevent soil Cd risks [J]. *Biomaterials*, 2004, **17**(5): 549-553.
- [3] 崔岩山,陈晓晨. 土壤中镉的生物可给性及其对人体的健康风险评估[J]. 环境科学, 2010, **31**(2): 403-408.
- [4] 陈朗,宋玉芳,张薇,等. 土壤镉污染毒性效应的多指标综合评价[J]. 环境科学, 2008, **29**(9): 2606-2612.
- [5] 崔德杰,张玉龙. 土壤重金属污染现状与修复技术研究进展[J]. 土壤通报, 2004, **35**(3): 366-370.
- [6] 王立群,罗磊,马义兵,等. 重金属污染土壤原位钝化修复研究进展[J]. 应用生态学报, 2009, **20**(5): 1214-1222.
- [7] 于寿娜,廖敏,黄昌勇. 镉、汞复合污染对土壤脲酶和酸性磷酸酶活性的影响[J]. 应用生态学报, 2008, **19**(8): 1841-1847.
- [8] 赵萌,李敏,王森焱,等. 西瓜连作对土壤主要微生物类群和土壤酶活性的影响[J]. 微生物学通报, 2008, **35**(8): 1251-1254.
- [9] 王新,周启星. 土壤重金属污染生态过程、效应及修复[J]. 生态科学, 2004, **23**(3): 278-281.
- [10] Maliszewska-Kordybach B, Smreczak B. Habitat function of agricultural soils as affected by heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons contamination [J]. *Environment International*, 2003, **28**(8): 719-728.
- [11] 沈桂琴,廖瑞章. 重金属、非金属、矿物油对土壤酶活性的影响[J]. 农业环境科学学报, 1987, **6**(3): 24-27.
- [12] 刘善江,夏雪,陈桂梅,等. 土壤酶的研究进展[J]. 中国农学通报, 2011, **27**(21): 1-7.
- [13] 葛诚. 微生物肥料生产应用基础[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000. 81-84.
- [14] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. (第三版)北京: 中国农业出版社, 2000. 30-163.
- [15] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986.
- [16] 邱莉萍,刘军,王益权,等. 土壤酶活性与土壤肥力的关系研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2004, **10**(3): 277-280.
- [17] 杨燕娜,温小乐. 土壤汞污染及其治理措施的研究综述[J]. 能源与环境, 2006, (3): 9-11.
- [18] 王涵,高树芳,陈炎辉,等. 重金属污染区土壤酶活性变化——以福建龙岩新罗区特钢厂污水灌溉区为例[J]. 应用生态学报, 2009, **20**(12): 3034-3042.
- [19] Zheng Z M, Macleod J A, Sanderson J B, *et al.* Soil phosphorus dynamics after ten annual applications of mineral fertilizers and liquid dairy manure: Fractionation and path analyses [J]. *Soil Science*, 2004, **169**(6): 449-456.
- [20] Knowalchuk G A, Buma D S, De Boer W, *et al.* Effects of above-ground plant species composition and diversity on the diversity of soil-borne microorganisms [J]. *Antonie van Leeuwenhoek*, 2002, **81**(1-4): 509-520.
- [21] Zantua M L, Bremner J M. Production and persistence of urease activity in soils [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1976, **8**(5): 369-374.
- [22] 赵艳,张晓波. 施用胶质芽胞杆菌菌剂对黑麦草根际土壤脲酶、磷酸酶及过氧化氢酶活性的影响[J]. 微生物学杂志, 2011, **31**(6): 49-52.
- [23] Xie J, Qi F, Pei H Y, *et al.* Determining method of dehydrogenase activity and its application in environmental monitoring [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2006, **22**(5): 13-18.

CONTENTS

Concentrations and Ozone Formation Potentials of BTEX During 2008-2010 in Urban Beijing, China	CAO Han-yu, PAN Yue-peng, WANG Hui, <i>et al.</i> (2065)
Aging and Mixing State of Particulate Matter During Aerosol Pollution Episode in Autumn Shanghai Using a Single Particle Aerosol Mass Spectrometer (SPAMS)	MU Ying-ying, LOU Sheng-rong, CHEN Chang-hong, <i>et al.</i> (2071)
Chemical Characteristics and Source Assessment of Rainwater at Shenyang	ZHANG Lin-jing, ZHANG Xiu-ying, JIANG Hong, <i>et al.</i> (2081)
Variation of Atmospheric Pollutants in Qinhuangdao City	LIU Lu-ning, SHEN Yu-xuan, XIN Jin-yuan, <i>et al.</i> (2089)
NH ₃ , N ₂ O, CH ₄ and CO ₂ Emissions from Growing Process of Caged Broilers	ZHOU Zhong-kai, ZHU Zhi-ping, DONG Hong-min, <i>et al.</i> (2098)
Synergetic Effects of Silicon Carbide and Molecular Sieve Loaded Catalyst on Microwave Assisted Catalytic Oxidation of Toluene	WANG Xiao-hui, BO Long-li, LIU Hai-nan, <i>et al.</i> (2107)
Removal of Mixed Waste Gases by the Biotrickling Filter	ZHANG Ding-feng, FANG Jun-yi, YE Jie-xu, <i>et al.</i> (2116)
Decomposition of Carbon Disulfide by Pulse Corona Under Oxidizing and Reducing Atmosphere	JIN Sheng, HUANG Li-wei, LI Guo-ping (2121)
Effects of Simulated Elevation of Atmospheric CO ₂ Concentration on the Physiological Features of Spring Phytoplankton in Taihu Lake	ZHAO Xu-hui, TANG Long-sheng, SHI Xiao-li, <i>et al.</i> (2126)
A New Method for Estimation the Lake Quality Reference Condition	HUA Zu-lin, WANG Liang (2134)
Parameter Sensitivity Analysis of Runoff Simulation and Model Adaptability Research Based on HSPF	LI Yan, LI Zhao-fu, XI Qing (2139)
Study on Water Quality Monitoring Scheme Based on Non-Point Source Pollution	WU Xi-jun, LI Hui-en, LI Jia-ke, <i>et al.</i> (2146)
Characteristics of Nutrient Loss by Runoff in Sloping Arable Land of Yellow-brown Under Different Rainfall Intensities	CHEN Ling, LIU De-fu, SONG Lin-xu, <i>et al.</i> (2151)
Distribution of Dissolved Inorganic Nutrients and Dissolved Oxygen in the High Frequency Area of Harmful Algal Blooms in the East China Sea in Spring	LI Hong-mei, SHI Xiao-yong, CHEN Peng, <i>et al.</i> (2159)
Temporal-Spatial Distribution of Algal Cells During Drought Period in Daning River of Three Gorges	ZHANG Yong-sheng, ZHENG Bing-hui, WANG Kun, <i>et al.</i> (2166)
Bioavailability of Dissolved Organic Nitrogen Components in the Lake Sediment to Algae	FENG Wei-ying, ZHANG Sheng, JIAO Li-xin, <i>et al.</i> (2176)
Influence of Decomposition of <i>Cladophora</i> sp. on Phosphorus Concentrations and Forms in the Overlying Water	HOU Jin-zhi, WEI Quan, CAO Li, <i>et al.</i> (2184)
Phosphorus Exchange Between Suspended Solids Sediments Overlying Water Under Repeated Disturbance	LI Da-peng, WANG Jing, HUANG Yong (2191)
Distribution Characteristics of PBDEs in Surface Sediment from the Three Gorges Reservoir of Yangtze River	LI Kun, ZHAO Gao-feng, ZHOU Hui-dong, <i>et al.</i> (2198)
Study on UV and H ₂ O ₂ Combined Inactivation of <i>E. coli</i> in Drinking Water	ZHANG Yi-qing, ZHOU Ling-ling, ZHANG Yong-ji (2205)
Kinetics and Influencing Factors of Dimethyl Phthalate Degradation in Aqueous Solution by Ozonation	YU Li, ZHANG Pei-long, HOU Jia-cai, <i>et al.</i> (2210)
Effects of Nitrate Ion on Monomethylmercury Photodegradation in Water Body	MAO Wen, SUN Rong-guo, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (2218)
Chlorination of Ethynyl Estradiol: A Kinetic and Mechanistic Study	WANG Bin-nan, LIU Guo-qiang, KONG De-yang, <i>et al.</i> (2225)
Metal Ions Restrain the Elimination of 4- <i>tert</i> -Octylphenol by δ -MnO ₂	LI Fei-li, MOU Hua-qian (2232)
Removal of Bisphenol A in Aqueous Solutions by Core-shell Magnetic Molecularly Imprinted Polymers	LIU Jian-ming, LI Hong-hong, XIONG Zhen-hu (2240)
Research on Removal of Tetrabromobisphenol A from Synthetic Wastewater by Nanoscale Zero Valent Iron Supported on Organobentonite	YAN Meng-yue, PANG Zhi-hua, LI Xiao-ming, <i>et al.</i> (2249)
Measurement of Dissolved Organic Nitrogen with Nanofiltration Pretreatment and Its Distribution Characteristics in Landscape Water	YU Hong-lei, HUO Shou-liang, YANG Zhou-sheng, <i>et al.</i> (2256)
Preparation of a Novel Modified Hydrogel and Study of Its Adsorption Performance	WU Ning-mei, LI Zheng-kui (2263)
Photocatalytic Reductive Degradation of Direct Red 4BE by Posphotungstic Acid	WEI Hong, LI Ke-bin, LI Juan, <i>et al.</i> (2271)
Wastewater Treatment Using a Microbubble Aerated Biofilm Reactor	ZHANG Lei, LIU Ping, MA Jin, <i>et al.</i> (2277)
Research on Fenton Treatment of the Biochemical Processes Effluent of Bamboo Industry Wastewater	GUO Qing-wen, ZHANG Min, WANG Wei, <i>et al.</i> (2283)
Effect of Fe ²⁺ on Fermentation Hydrogen Production in an UASB	LI Yong-feng, WANG Yi-xuan, CHENG Guo-ling, <i>et al.</i> (2290)
Influence of Substrate Concentration on PHA Production Using Fermented Sugar Cane as Substrate	CHEN Zhi-qiang, DENG Yi, HUANG Long, <i>et al.</i> (2295)
Study on Rapid Start-up of a Nitrifying Process Using Aerobic Granular Sludge as Seed Sludge	LIU Wen-ru, SHEN Yao-liang, DING Ling-ling, <i>et al.</i> (2302)
Influencing Factors of High-Concentration Lead Removal Using the Phosphorus-Accumulating Sludge	YANG Min, LU Long, FENG Yong, <i>et al.</i> (2309)
Preliminary Study on Characteristics of Volumetric Oxygen Transfer Coefficient in Granular Sludge Systems	LI Zhi-hua, FAN Chang-qing, WANG Xiao-chang (2314)
Ecological Risk Assessment of Bisphenol A in Chinese Freshwaters	WANG Hao, FENG Cheng-lian, GUO Guang-hui, <i>et al.</i> (2319)
Species Sensitivity Evaluation of <i>Pseudorasbora parva</i>	WANG Xiao-nan, LIU Zheng-tao, YAN Zhen-guang, <i>et al.</i> (2329)
Comparison of Aquatic Predicted No-Effect Concentrations (PNECs) for Pentachlorophenol Derived from Different Assessment Approaches	LEI Bing-li, WEN Yu, WANG Yi-pei, <i>et al.</i> (2335)
Study on Hair Hg and Pb Content Distribution of Traffic Polices, Guilin	QIAN Jian-ping, ZHANG Li, LI Cheng-chao, <i>et al.</i> (2344)
Changes in Phototaxical Index of <i>Daphnia carinata</i> Under Electric Field of Direct Current in Response to Cr ⁶⁺ and Hg ²⁺	WANG Fei-xiang, YUAN Ling, HUANG Jian-guo (2350)
Effect of UV-B Radiation on the Chemical Composition and Subsequent Decomposition of <i>Cyclobalanopsis glauca</i> Leaf Litter	SONG Xin-zhang, BU Tao, ZHANG Shui-kui, <i>et al.</i> (2355)
Leaf Micro-morphology and Features in Adsorbing Air Suspended Particulate Matter and Accumulating Heavy Metals in Seven Tress Species	LIU Ling, FANG Yan-ming, WANG Shun-chang, <i>et al.</i> (2361)
Effect of Dissolved Oxygen on Microbial Community in Simultaneous Removal of Carbon, Nitrogen and Sulfur Process	YU Hao, CHEN Chuan, ZHANG Li, <i>et al.</i> (2368)
Microbial Activity and Community Structure Analysis Under the Different Land Use Patterns in Farmland Soils: Based on the Methods PLFA and MicroResp TM	CHEN Xiao-juan, WU Xiao-hong, LIU Shou-long, <i>et al.</i> (2375)
Effects of Drying-rewetting Alternation on Nitrogen Dynamics in a Typical Coastal Wetland: A Simulation Study	HAN Jian-gang, CAO Xue (2383)
Cadmium and Selected Heavy Metals in Soils of Jianping Area in Wushan County, the Three Gorges Region: Distribution and Source Recognition	LIU Yi-zhang, XIAO Tang-fu, NING Zeng-ping, <i>et al.</i> (2390)
Total Contents of Heavy Metals and Their Chemical Fractionation in Agricultural Soils at Different Locations of Beijing City	CHEN Zhi-fan, ZHAO Ye, GUO Ting-zhong, <i>et al.</i> (2399)
Influence of Season Change on the Level of Heavy Metals in Outdoor Settled Dusts in Different Functional Areas of Guiyang City	LI Xiao-yan (2407)
Characteristics of Dioxin-Like Polychlorinated Biphenyls Contamination in Soils of Gudao Region in Dongying	WANG Deng-ge, CUI Zhao-jie, FU Xiao-wen, <i>et al.</i> (2416)
Effects of Simulated Nitrogen Deposition on Organic Matter Leaching in Forest Soil	DUAN Lei, MA Xiao-xiao, YU De-xiang, <i>et al.</i> (2422)
<i>Ex-situ</i> Remediation of PAHs Contaminated Site by Successive Methyl- β -Cyclodextrin Enhanced Soil Washing	SUN Ming-ming, TENG Ying, LUO Yong-ming, <i>et al.</i> (2428)
Effects of <i>Bacillus mucilaginosus</i> on the Cd Content of Rhizosphere Soil and Enzymes in Soil of <i>Brassica juncea</i>	YANG Rong, LI Bo-wen, LIU Wei (2436)
Concentrations of Antibiotics in Vegetables from Manure-mended Farm	WU Xiao-lian, XIANG Lei, MO Ce-hui, <i>et al.</i> (2442)
Characteristics of Organic Nitrogen Mineralization in Organic Waste Compost-Amended Soil	ZHANG Xu, XI Bei-dou, ZHANG Yue, <i>et al.</i> (2448)
Characteristics and Influence Factors of the Energy Consumption and Pollutant Discharge of Municipal Solid Waste Transfer Stations in Beijing	WANG Zhao, LI Zhen-shan, FENG Ya-bin, <i>et al.</i> (2456)
Influence of Ammonia on Leaching Behaviors of Incineration Fly Ash and Its Geochemical Modeling	GUAN Zhen-zhen, CHEN De-zhen, Thomas Astrup (2464)
Pretreatment Technology for Fly Ash from MSWI and the Corresponding Study of Chloride Behavior	ZHU Fen-fen, Takaoka Masaki, Oshita Kazuyuki, <i>et al.</i> (2473)
Preparation, Characterization and Adsorption Performance of Mesoporous Activated Carbon with Acidic Groups	LI Kun-quan, LI Ye, ZHENG Zheng, <i>et al.</i> (2479)
Preliminary Assessment of the Potential of Biochar Technology in Mitigating the Greenhouse Effect in China	JIANG Zhi-xiang, ZHENG Hao, LI Feng-min, <i>et al.</i> (2486)
Research of Potassium Flow and Circulation Based on Substance Flow Analysis	BAI Hua, ZENG Si-yu, DONG Xin, <i>et al.</i> (2493)

《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)

2013年6月15日 34卷 第6期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 6 Jun. 15, 2013

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