

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第11期

Vol.34 No.11

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

北京不同污染事件期间气溶胶光学特性	施禅臻, 于兴娜, 周斌, 项磊, 聂皓浩 (4139)
秋季渤海、北黄海大气气溶胶中水溶性离子组成特性与来源分析	张岩, 张洪海, 杨桂朋 (4146)
中国北部湾地区夏季大气碳气溶胶的空间分布特征	杨毅红, 陶俊, 高健, 李雄, 施展, 韩保新, 谢文彰, 曹军骥 (4152)
改进的大气 CO ₂ 、CH ₄ 、N ₂ O、CO 在线观测 FTIR 系统	夏玲君, 刘立新, 周凌晔, 方双喜, 王红阳, 张振波 (4159)
长沙市郊大气 CH ₄ 浓度变化特征	刘鲁宁, 王迎红, 徐小娟, 王卫东, 王跃思 (4165)
麦草及其烟尘中正构烷烃的组成	刘刚, 李久海, 徐慧, 吴丹 (4171)
过二硫酸盐降解碱液吸收的甲硫醇恶臭	杨世迎, 王雷雷, 冯琳玉, 赵腊娟, 石超 (4178)
污泥堆肥及其土地利用全过程的温室气体与氨气排放特征	钟佳, 魏源送, 赵振凤, 应梅娟, 周国胜, 熊建军, 刘培财, 葛振, 丁刚强 (4186)
长江口沿岸及近海水体中胶体的分布和理化性质研究	顾丽军, 杨毅, 刘敏, 聂明华, 李涛, 侯立军 (4195)
海河流域主要河口区域沉积物中重金属空间分异及生态风险评价	吕书丛, 张洪, 单保庆, 李立青 (4204)
汾河流域太原段河水及沉积物中 PFOS 和 PFOA 的浓度分布特征	东口朋宽, 史江红, 张晖, 刘晓薇 (4211)
基于 L-THIA 模型的市桥河流域非点源氮磷负荷分析	李凯, 曾凡棠, 房怀阳, 林澍 (4218)
合流制排水系统雨天溢流污染 CMB 法源解析	戴梅红, 李田, 张伟 (4226)
微藻脂肪酸在中国近海缺氧海水-沉积物界面中的降解模拟研究	随伟伟, 丁海兵, 杨桂朋, 陆小兰, 李文娟, 孙立群 (4231)
太湖两种水生植物群落对沉积物中氮素的影响	马久远, 王国祥, 李振国, 许宽, 周峰, 张佳 (4240)
表面流人工湿地中硫丹的去除规律研究	秦晶, 高甫威, 谢慧君 (4251)
带菌盐藻对不同形态砷的富集和转化研究	王亚, 张春华, 王淑, 申连玉, 葛滢 (4257)
铜改性沸石活性覆盖控制重污染河道底泥溶解性磷酸盐和铵释放研究	李佳, 林建伟, 詹艳慧 (4266)
底栖动物扰动对河床渗透性的影响研究	任朝亮, 宋进喜, 杨小刚, 薛健 (4275)
铜绿微囊藻胞内物消毒副产物生成: 氯化化和溴化比较	田川, 郭婷婷, 刘锐平, William Jefferson, 刘会娟, 曲久辉 (4282)
天然有机物对混凝效果影响机制及絮体特性分析	徐磊, 俞文正, 梁亮, 王彤 (4290)
DOM 纳滤膜污染及对膜截留卡马西平性能的影响	丰桂珍, 董秉直 (4295)
零价铁去除废水中的汞	周欣, 张进忠, 邱昕凯, 王定勇 (4304)
Fe ₃ O ₄ 稳定化纳米 Pd/Fe 对水中 2,4-D 的催化还原脱氯研究	周红艺, 梁思, 曾思思, 雷双健 (4311)
不同粒径粉末活性炭对水中天然有机物吸附性能的比较研究	李政剑, 石宝友, 王东升 (4319)
氯化十六烷基吡啶改性活性炭对水中硝酸盐的吸附作用	郑雯婧, 林建伟, 詹艳慧, 方巧, 杨孟娟, 王虹 (4325)
改性石墨烯对水中亚甲基蓝的吸附性能研究	吴艳, 罗汉金, 王侯, 张子龙, 王灿, 王雨微 (4333)
经典等温吸附模型在重金属离子/硅藻土体系中的应用及存在问题	朱健, 吴庆定, 王平, 李科林, 雷明婧, 张伟丽 (4341)
硝酸盐对矿化垃圾中兼/厌氧甲烷氧化的影响	刘妍妍, 龙焰, 尹华, 叶锦韶, 何宝燕, 张娜 (4349)
硫酸盐/氨的厌氧生物转化试验研究	张丽, 黄勇, 袁怡, 李祥, 刘福鑫 (4356)
硫酸盐还原-氨氧化反应的特性研究	袁怡, 黄勇, 李祥, 张春蕾, 张丽, 潘杨, 刘福鑫 (4362)
UASB 系统低 pH 运行时对产氢性能的分析	赵健慧, 张百惠, 李宁, 王兵, 李永峰 (4370)
响应面法优化赤泥负载 Co 催化剂制备及活性评价	李华楠, 徐冰冰, 齐飞, 孙德智 (4376)
高浓度氨氮胁迫对纤细裸藻的毒性效应	刘炎, 石小荣, 崔益斌, 李梅 (4386)
NAPLs 污染物垂向指流迁移分形表征中图像处理的影响研究	李慧颖, 杜晓明, 杨宾, 伍斌, 徐竹, 史怡, 房吉敦, 李发生 (4392)
近 50 年浙江省耕作土壤有机质和酸碱度的变化特征	章明奎, 常跃畅 (4399)
浙中典型富硒土壤区土壤硒含量的影响因素探讨	黄春雷, 宋明义, 魏迎春 (4405)
黄河口新生湿地土壤 Fe 和 Mn 元素的空间分布特征	孙文广, 甘卓亭, 孙志高, 李丽丽, 孙景宽, 孙万龙, 牟晓杰, 王玲玲 (4411)
崇明岛土壤中 MCCPs 的污染水平、组成与来源研究	孙阳昭, 王学彤, 张媛, 孙延枫, 李梅, 马中 (4420)
福建戴云山山脉土壤有机氯农药残留及空间分布特征	瞿程凯, 祁士华, 张莉, 黄焕芳, 张家泉, 张原, 杨丹, 刘红霞, 陈伟 (4427)
电子垃圾拆解地周边土壤中二噁英和二噁英类多氯联苯的浓度水平	邵科, 尹文华, 朱国华, 巩宏平, 周欣, 王玲, 刘劲松 (4434)
外源水溶性氟在茶园土壤中赋存形态的转化及其生物有效性	蔡荟梅, 彭传燧, 陈静, 侯如燕, 宛晓春 (4440)
丛枝菌根真菌在不同类型煤矸石山植被恢复中的作用	赵仁鑫, 郭伟, 付瑞英, 赵文静, 郭江源, 毕娜, 张君 (4447)
丛枝菌根真菌在矿区生态环境修复中应用及其作用效果	李少朋, 毕银丽, 孔维平, 王瑾, 余海洋 (4455)
超积累植物垂序商陆 (<i>Phytolacca americana</i> L.) 吸收锰机制的初步探讨	徐向华, 李仁英, 刘翠英, 施积炎, 林佳 (4460)
<i>Shewanella oneidensis</i> MR-1 对硫化汞的生物利用性研究	陈艳, 王卉, 司友斌 (4466)
基于我国西南地区儿童行为模式的 IEUBK 模型本地化研究	蒋宝, 崔晓勇 (4473)
不同结构有机磷在 (氢) 氧化铝表面的吸附与解吸特征	柳飞, 张延一, 严玉鹏, 刘凡, 谭文峰, 刘名茗, 冯雄汉 (4482)
煤中铁元素赋存状态的超声逐级化学提取研究	熊金钰, 李寒旭, 董众兵, 张颂, 钱宁波, 武成利 (4490)
植物对纳米颗粒的吸收、转运及毒性效应	杨新萍, 赵方杰 (4495)
《环境科学》征订启事 (4239)	
《环境科学》征稿简则 (4369)	
信息 (4225, 4265, 4303, 4375)	

丛枝菌根真菌在矿区生态环境修复中应用及其作用效果

李少朋, 毕银丽*, 孔维平, 王瑾, 余海洋

(中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院, 北京 100083)

摘要: 针对煤矿区生态环境修复中存在的主要问题, 研究丛枝菌根真菌与紫穗槐共生状况, 丛枝菌根真菌对紫穗槐根系发育的影响及其对煤炭开采塌陷区退化土壤的改良效应。结果表明, 接种菌根5个月后, 接种丛枝菌根促进紫穗槐地上部分和根系生长, 提高了紫穗槐根系侵染率; 接种区紫穗槐根际土壤中球囊霉素、易提取球囊霉素含量显著增加; 接种菌根提高了紫穗槐根际土壤有效磷和有机质含量, 微生物数量明显提高, 取得较好的菌根生态效应。接种菌根有利于对矿区根际土壤的改良, 促进了矿区生态系统稳定, 对维持矿区生态系统的持续性具有重要意义。

关键词: 丛枝菌根; 紫穗槐; 球囊霉素; 根系; 改良效应; 煤矿区

中图分类号: X171.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2013)11-4455-05

Effects of the Arbuscular Mycorrhizal Fungi on Environmental Phytoremediation in Coal Mine Areas

LI Shao-peng, BI Yin-li, KONG Wei-ping, WANG Jin, YU Hai-yang

(College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining & Technology, Beijing 100083, China)

Abstract: To resolve the key environmental problems in coal mine areas of environmental phytoremediation, symbiosis of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) and *Amorpha fruticosa* was investigated. Effects of AMF on the root growth of *Amorpha fruticosa* and degenerated soil in coal mining subsidence area were studied. Results showed that after 5 months inoculation, AMF improved the shoot and root growth of *Amorpha fruticosa*. After inoculation with arbuscular mycorrhiza (AM) for 5 months, the inoculation significantly increased root colonization of *Amorpha fruticosa*. Total glomalin and easily extractable glomalin were increased significantly in the incubated soil. The content of phosphorus and organic matter were increased in the rhizosphere soil. Population of microorganism increased obviously. All the above results show that their ecological effects are significantly improved. AM would promote rhizosphere soil that will help the sustainability of ecological systems in mining area. It is really of great significance to keep the ecological system stability.

Key words: arbuscular mycorrhiza; *Amorpha fruticosa*; glomalin; root system; amelioration; coal mining area

中国是世界上最大的煤炭生产国和消费国, 在中国能源构成比例中煤炭占74%左右, 在探明的化石能源中, 煤炭占94.3%, 煤炭主要能源地位不会发生变化^[1]。神东矿区是中国已探明储量最大的煤田, 为世界七大煤田之一, 产量居全国之首, 其沉陷面积大^[2]。煤炭开采扰动引起重构土层生物群落急剧减少、开采沉陷造成植物根系损伤、表层土壤肥力降低、土壤水肥不协调和充填材料污染等, 制约着塌陷区地表植被生长与恢复。植被恢复是一个系统工程, 良好的生态环境是植物、土壤、微生物和动物完美耦合的结果。目前神东矿区植被恢复主要以人工种植为主, 而煤炭开采最直接的破坏结果是改变了土壤微环境, 单一的人工种植很难在根本上解决矿区环境问题。因此, 通过一定手段改善根际土壤微环境就变的尤为重要^[3,4]。

丛枝菌根真菌(AMF)是自然界中普遍存在的一种土壤微生物。陆地90%以上的有花植物都能够与它形成菌根共生体^[5]。随着研究不断深入, AMF

的作用越来越广泛, AMF在植物群落结构、演替和稳定性方面具有重要的生态学意义^[6~8]。AMF不但能够促进植物对养分的吸收, 也可降低其它生物对宿主植物的伤害, 提高植物抗旱性和植物生物量^[9,10]。干旱条件下AMF能够提高宿主的耐受性, 有利于宿主植物对水分吸收^[11]。对于地处干旱与半干旱区的神东矿区来说, “丛枝菌根”将成为矿区环境修复和生态恢复的新突破口。

本研究主要针对神东矿区干旱缺水、土壤贫瘠、植被难以建植等特点, 利用丛枝菌根与宿主植物共生关系, 分析丛枝菌根对宿主植物生长的影响, 接种菌根对宿主植物根际微环境的影响及其对矿区退化土壤的改良效应, 以期微生物复垦在矿区推

收稿日期: 2012-12-11; 修订日期: 2013-05-27

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)项目(2013AA102904); “十二五”国家科技支撑计划项目(2012BAC10B03)

作者简介: 李少朋(1982~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为矿区环境治理和生态重建, E-mail: lishapeng518896@163.com

* 通讯联系人, E-mail: ylb188@126.com

广应用提供理论基础和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地点

试验地点选择西部典型煤矿区,神华集团神东煤炭分公司活鸡兔矿区塌陷区,该研究区位于西部干旱半干旱区,地处毛乌素沙地边缘地带,区域内年均气温 7.3℃,年降水量 365 mL,试验区煤炭采空塌陷区合计 4 059 m²,植被覆盖率低,蒸发强烈,年均蒸发量是年均降水量的 4.55~6.72 倍。

1.2 试验材料

供试菌种为北京市农林科学院植物营养与资源研究所微生物室供,经本实验室增殖培养的内生菌 *Glomus mosseae* (G. m)。供试植物是当地绿化和生态治理的先锋植株紫穗槐,2011 年 5 月选择紫穗槐进行研究。试验地土壤为沙质土,基本性状为 pH 7.48;电导率 35.4 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$,最大持水量为 22.86%;有机质 6.07 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$;总氮为 0.34 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$;全磷 0.41 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$;有效磷为 7.2 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;速效钾 50 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

1.3 试验设计和管理

选取紫穗槐进行接种菌根的效应比较研究。设接种菌根菌(+M)与不接种菌根菌(CK)两种处理,接种紫穗槐 372 株,每棵树穴播接种混合菌根菌剂 50 g,CK 区紫穗槐 385 株。在 +M 区与 CK 区按照“S”方法分别选择大小一致的紫穗槐,同时采集紫穗槐根际土,紫穗槐重复数为 10,在目标植物根部埋入植物根系监测管,根管方向与地面水平夹角为 45°。埋入根管 6 个月后,根管周围的微环境趋于稳定,此时利用 CI-600 根系原位监测系统对目标植物局部根系进行监测。

1.4 测定项目和方法

(1)根系监测方法

CI-600 根系原位监测系统工作原理:CI-600 根系生长监测系统是为扫描土壤中活体根系生长动态而设计,可以扫描头扫描不同深度根系分布或土壤剖面图像。它主要由直立旋转型线性扫描头、笔记本计算机和透明塑料管子组成。必须将管子埋入或插入土壤,然后将 CCD 线性扫描头放进管内,计算机将控制扫描头自动沿壁管扫描,即可获得根管周围植物生长状况图片,通过根系分析软件获得根系生长各项指标,从而反映出植物根系对外部环境变化的响应。

通过根系分析软件 WinRHIZO Tron MF 对 CI-

600 的扫描图像进行分析,即可获得根长、表面积、投影面积、体积、平均直径和数目指标。

(2)球囊霉素提取和测定方法

球囊霉素是由丛枝菌根真菌分泌的一种含金属离子的糖蛋白,因被非专一性提取而称为球囊霉素相关土壤蛋白(GRSP),通常定义为 Bradford 土壤蛋白,由土壤样中提取出来,分为易提取球囊霉素(easily extractable glomalin, EEG)和总球囊霉素(total glomalin, TG),按照文献[13,14]的方法稍加修改。

①球囊霉素相关土壤蛋白的提取:易提取球囊霉素相关土壤蛋白的提取方法为:分别称取土样 1.00 g 于带刻度离心管中,对应加入 8 mL 柠檬酸钠浸提剂(20 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 、pH 7.0),加盖,摇匀,在 103 kPa、121℃下提取 30 min,10 000 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 下离心 6 min,收集上清液,每个处理重复 4 次。总球囊霉素相关土壤蛋白的提取:分别称取土样 1.00 g 于带刻度离心管中,对应加入 8 mL 柠檬酸钠浸提剂(50 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 、pH 8.0),加盖,摇匀,在 103 kPa、121℃下提取 60 min,再重复提取 5 次,每次重复提取时,保证提取液体积固定且摇匀土样,使土样与浸提剂充分接触;每提取一次之后迅速在 10 000 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 下离心 6 min,将上浮物从土壤中分离出去,收集上清液,每个处理重复 4 次。上清液储藏在 4℃下直至第 2 d 分析。

②球囊霉素相关蛋白的测定:分别吸取 0.5 mL 的上清液,加入 5 mL 考马斯亮蓝 G-250 染色剂(使用之前过滤),加盖,颠倒,显色 10 min,于 595 nm 波长下比色。用牛血清白蛋白(BSA)作标准液,考马斯亮蓝法显色,绘制标准曲线,以 1.00 g 土壤中蛋白质的微克数表示球囊霉素相关土壤蛋白的含量。

(3)侵染率、根际土有机质、速效磷等测定方法

接种 5 个月,测定菌根侵染率^[12],有机质采用高温外热氧化亚铁滴定法^[15];土壤速效磷含量测定采用钼锑抗比色法;pH 值、电导率(EC)测定采用去离子水浸泡法,水土比为 2.5:1^[16];土壤磷酸酶活性测定采用改进的 Tabatabai & Brimmer 法^[17];土壤微生物数量测定采用常规的稀释平板法^[18]。

1.5 数据分析

本研究采用 SAS 统计软件对试验数据进行分析,显著水平设置为 5%。

2 结果与讨论

2.1 接种菌根对紫穗槐生长的影响

接种丛枝菌根真菌促进了紫穗槐的生长, + M 组紫穗槐株高可达 43.4 cm, CK 组紫穗槐株高为 35.8 cm, 两种不同处理紫穗槐株高差异显著, 但两者的冠幅无明显差异, 接种丛枝菌根有利于紫穗槐的生长。紫穗槐生长速度极快、耐干旱、耐贫瘠, 且根瘤可改良土壤, 故成为神东矿区广泛种植的重要造林树种之一。神东矿区植被覆盖率低, 干旱缺水, 加之日蒸发量大, 采煤塌陷区生态环境人工治理不易种植大型乔木, 目前, 紫穗槐在当地人工植被恢复中越来越受青睐。通过在煤矿塌陷区种植单一植物很难取得较大的生态效益, 必须将植物和其它生物“菌肥”进行耦合, 因此, 将菌根技术应用到矿区环境治理中会取得较高的生态学价值。

表 1 接种菌根对紫穗槐根系发育的影响¹⁾

Table 1 Effects of AM fungi inoculation on root development of *Amorpha fruticosa*

不同处理	根长 /cm	投影面积 /cm ²	表面积 /cm ²	平均直径 /mm	根体积 /cm ³	根尖数 /个
+ M	262.600 6a	22.392 6a	70.348 6a	3.389 2a	1.741 7a	67a
CK	157.027 3b	11.897 3b	34.515 3b	3.254 4a	0.765 3b	41b

1) 表中数值为多个重复的平均值, 其后的不同字母代表 5% 水平上的差异显著性

2.3 接种菌根对紫穗槐根系侵染率的影响

水是神东矿区生态环境改善的限制性因子, 也是矿区生态重建的瓶颈所在。大量研究发现, 干旱条件下丛枝菌根有利于促进植物根系对土壤水分的吸收。紫穗槐 + M 区菌根侵染率可达 83.4%, 而 CK 区紫穗槐菌根侵染率只有 36.6%, 接种显著提高了根系侵染率。CK 区未接种菌根紫穗槐的根系也有侵染, 这主要是自然界中存在着土著丛枝菌根真菌, 丛枝菌根真菌是一种普遍存在的内共生真菌, 它能够与 80% 以上的陆生植物形成共生体^[19]。接种菌根菌后紫穗槐根系较高的侵染率也说明菌根和紫穗槐根系形成互惠互利的共生体, 本试验所选用的丛枝菌根真菌与紫穗槐之间的选择适应性较好。神东地区处于干旱半干旱区, 日蒸发量较大, 不易种植高大的乔木, 而应选择耗水量较小、抗逆性强的灌木。紫穗槐生长速度快, 能和丛枝菌根真菌形成互利共生关系。因此, 将本试验选用丛枝菌根真菌和紫穗槐在矿区推广应用, 有利于神东矿区开采塌陷区植被恢复和生态重建。

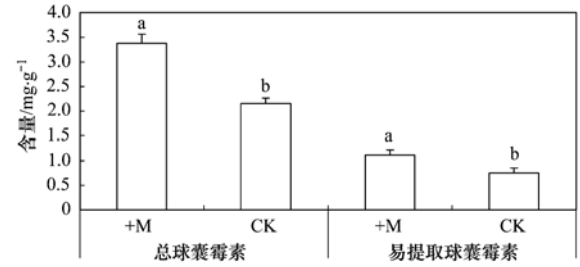
2.4 接种菌根对紫穗槐根际球囊霉素和有机质的影响

球囊霉素 (glomalin) 是丛枝菌根真菌产生的一种含有金属离子的专性糖蛋白, 难溶于水, 难于分

2.2 接种菌根对紫穗槐根系发育的影响

植物根系不但起到固定植株作用, 也是吸收植物生长发育需要的水分、无机营养和少量有机营养的唯一通道。通过 CI-600 根系监测系统对紫穗槐根系原位扫描发现, 接种丛枝菌根真菌有利于紫穗槐根系生长 (表 1)。+ M 组紫穗槐根长、投影面积、表面积、根体积和根尖数高于 CK 组, 且两者差异性显著, 但两种处理根系平均直径差异性不显著。在神东矿区塌陷区, 煤炭开采导致土壤养分和水分流失严重, 丛枝菌根和紫穗槐具有很好的共生关系, 丛枝菌根菌丝可延伸到植物根系无法触及的区域, 从而扩大了紫穗槐根系和周围土壤的接触面积, 有利于紫穗槐对水分和养分的吸收, 促进了紫穗槐根系的生长。

解, 自然状态下极为稳定, 近期被更名为球囊霉素相关土壤蛋白^[20,21]。球囊霉素主要作用是增加土壤有机碳库和改善土壤团聚体^[22]。它产生于 AMF 定居在宿主植物根内菌丝和伸展在根际土壤中的根外菌丝表面, 在土壤生态系统中含量不低, 因此, 它赋予了 AMF 新的生态学功能。研究发现, + M 组总球囊霉素含量达到 3.38 mg·g⁻¹, CK 组总球囊霉素含量只有 2.15 mg·g⁻¹, 两者差异性显著。同时接种菌根可显著提高紫穗槐根际易提取球囊霉素含量, + M 组易提取球囊霉素含量要比 CK 平均高出 0.37 mg·g⁻¹ (图 1)。接种菌根可提高紫穗槐根际土壤有机质含量, 接种菌根 5 个月后, 紫穗槐根际土壤有机质含量得到 7.73 mg·g⁻¹, 而未接种组为 6.07 mg·g⁻¹ (图 2)。CK 组紫穗槐根际土壤也含有球囊霉素与易提取球囊霉素, 这主要是采煤沉陷区存在着土著丛枝菌根。结果表明, 接种菌根可显著提高根际土壤球囊霉素和有机质含量, 因此, 接种菌根对矿区退化土壤具有显著改良作用。神东矿区塌陷区土壤为沙质土为主, 土壤养分含量较低, 煤炭开采对其质地和理化性质破坏较大, 通过菌根缓解采煤对矿区土壤的破坏, 恢复土壤的环境质量至关重要。因此, 将菌根应用矿区塌陷区土壤改善和生态环境治理方面有显著性意义。



图中数值为多个重复的平均值,其后的不同字母代表 5% 水平上的差异显著性,下同

图 1 接种菌根对根际土壤球囊霉素含量的影响

Fig. 1 Effects of AM fungi inoculation on glomalin in rhizosphere soil

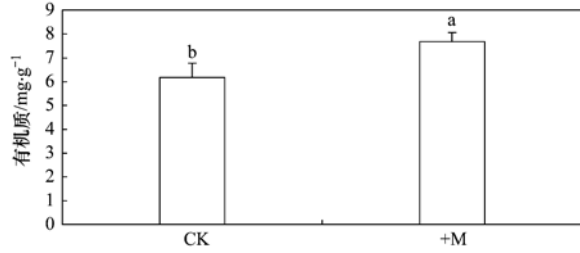


图 2 接种菌根对根际土壤有机质含量的影响

Fig. 2 Effects of AM fungi inoculation on organic matter in rhizosphere soil

2.5 接种菌根对根际土壤有效磷和酸性磷酸酶的影响

土壤酶在土壤碳、氮、磷等元素循环中起着重要的生物学催化剂作用,土壤新陈代谢的重要因素,土壤肥力形成和转化与土壤酶有密切关系^[23~26]. 土壤酸性磷酸酶可促进有机磷向无机磷转化,其活性可以表征土壤肥力状况,特别是磷状况^[4]. 研究发现,接种菌根组酸性磷酸酶活性高于 CK 组,两者差异显著(图 3). 速效磷是紫穗槐从土壤获取的主要磷养分资源, + M 组紫穗槐根际土壤速效磷含量显著高于 CK 组(图 4). 根际土壤有效磷的增加可能是由于接种菌根显著提高了根际土壤有机质含量,土壤有机质是土壤肥力的重要基础物质,存在数

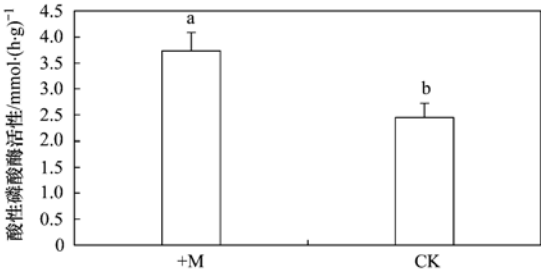


图 3 接种菌根对根际土壤酸性磷酸酶的影响

Fig. 3 Effects of AM fungi inoculation on acid phosphatase activity in rhizosphere soil

量、形态在很大程度上决定着土壤肥力状况. 在土壤酶参与下土壤有机质分解释放出植物生长所需的氮、磷、硫等营养元素. 结果表明,接种菌根能够显著提高土壤酸性磷酸酶活性,促进土壤有效磷释放,有利于改善土壤肥力状况.

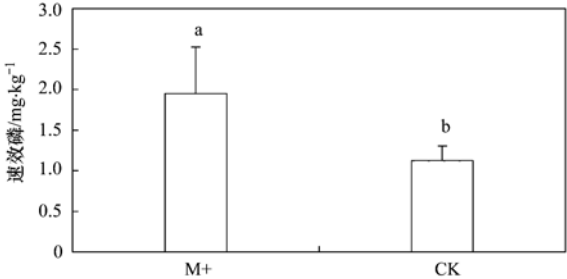


图 4 接种菌根对根际土壤速效磷含量的影响

Fig. 4 Effects of AM fungi inoculation on available P in rhizosphere soil

2.6 接种菌根对紫穗槐根际微生物的响应

神东矿区位于毛乌素沙地边缘,土壤多以风沙土为主,土壤贫瘠,持水能力差,且土壤不适合生命体生存. 因此,改善土壤微环境,增加土壤生物量就变的尤为重要. 接种丛枝菌根 5 个月后,通过对紫穗槐根际土壤微生物测定发现(表 2),接种丛枝菌根组细菌、放线菌和霉菌数量都明显高于对照组. 土壤微生物是土壤的重要组成部分,是整个生态系统养分和能源循环的“关键”和“动力”,其对土壤养分的转化吸收和根系生长有其独特影响. 接种丛枝菌根显著提高了根际微生物数量,这对塌陷区退化土壤生产力的恢复与提高具有重要的推动作用,有利于根际微环境的稳定.

表 2 不同处理植物根际微生物数量的变化

Table 2 Microbe population changes in different treatments			
处理	细菌 $\times 10^6/\text{cfu}\cdot\text{g}^{-1}$	放线菌 $\times 10^5/\text{cfu}\cdot\text{g}^{-1}$	霉菌 $\times 10^4/\text{cfu}\cdot\text{g}^{-1}$
+ M	8. 54	9. 15	12
CK	4. 24	5. 83	3. 48

3 结论

(1)接种菌根显著促进了紫穗槐地上部分和根系生长. 强化接种菌根有利于菌根真菌与植物建立互惠互利的共生关系,紫穗槐 + M 区菌根侵染率可达 83. 4% ,高于 CK 区的 36. 6% . 本试验室筛选的菌根适合在西部典型矿区推广应用.

(3)接种菌根 5 个月后, + M 区紫穗槐根际土壤总球囊霉素、易提取球囊霉素和有机质增加显著. 接种丛枝菌根有利于煤炭塌陷区退化土壤

改良.

(4)接种菌根区紫穗槐根际酸性磷酸酶活性增加显著,同时速效磷含量远高于对照区. 接种菌根有利于根际土壤养分的活化,有助于矿区植物生长.

(5)接种菌根显著提高了根际土壤微生物含量,改善了宿主植物根际微环境,这对于土壤生产力的恢复与提高、生态重建都具有重要的现实意义.

参考文献:

- [1] 唐跃刚,代世峰,唐真. 乌达矿区煤质特性及动态评价研究[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,1999. 1-8.
- [2] 周莹,贺晓,徐军,等. 半干旱区采煤沉陷对地表植被组成及多样性的影响[J]. 生态学报,2009,29(8): 4518-4523.
- [3] 李少朋,毕银丽,陈咄圳,等. 外源钙与丛枝菌根真菌协同对玉米生长的影响与土壤改良效应[J]. 农业工程学报,2013,29(1): 109-115.
- [4] 杜善周,毕银丽,王义,等. 丛枝菌根对神东煤矿区塌陷地的修复作用与生态效应[J]. 科技导报,2010,28(7): 41-44.
- [5] Heijden V, Klironomos N, Ursic M, et al. Mycorrhizal fungal diversity determines plant biodiversity, ecosystem variability and productivity[J]. Nature, 1998, 396(5): 69-72.
- [6] Hajboland R, Aliasgharzadeh N, Laiegh S F, et al. Colonization with arbuscular mycorrhizal fungi improves salinity tolerance of tomato (*Solanum lycopersicum* L.) plants[J]. Plant and Soil, 2010, 331(1-2): 313-327.
- [7] Kumar A, Sharma S, Mishra S. Influence of Arbuscular mycorrhizal (AM) fungi and salinity on seedling growth, solute accumulation, and mycorrhizal dependency of *Jatropha curcas* L. [J]. Journal of Plant Growth Regulation, 2010, 29(3): 297-306.
- [8] Mohammad R A, Daryush M, Saeed M, et al. Absorption efficiency of N, P, K through triple inoculation of wheat (*Triticum aestivum* L.) by *Azospirillum brasilense*, *Streptomyces* sp., *Glomus intraradices* and manure application[J]. Physiology Molecular Biology Plants, 2011, 17(2): 181-192.
- [9] Karanika E D, Mamolos A P, Alifragis D A, et al. Arbuscular mycorrhizas contribution to nutrition, productivity, structure and diversity of plant community in mountainous herbaceous grassland of northern Greece[J]. Plant Ecology, 2008, 199(2): 225-234.
- [10] Eissenstat D M, Wells C E, Yanai R D. Building roots in a changing environment: implications for root longevity[J]. New Phytologist, 2000, 147(1): 33-42.
- [11] Augé R M. Water relations, drought and vesicular-arbuscular mycorrhizal symbiosis[J]. Mycorrhiza, 2001, 11(1): 3-42.
- [12] Phillips J M, Hayman D S. Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection[J]. Transactions of the British Mycological Society, 1970, 55(1): 158-161.
- [13] Rilling M C, Caldwell B A, Wösten H A B, et al. Role of proteins in soil carbon and nitrogen storage: controls on persistence[J]. Biogeochemistry, 2007, 85(1): 25-44.
- [14] Janos D P, Gáramszegi S, Beltrán B. Glomalin extraction and measurement[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2008, 40(3): 728-739.
- [15] 钱宝,刘凌,肖潇. 两种不同方法测定土壤中有机质含量[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2011, 39(1): 34-38.
- [16] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京:中国农业出版社,2000.
- [17] 赵兰坡,姜岩. 土壤磷酸酶活性测定方法的探讨[J]. 土壤通报,1986,17(3): 138-142.
- [18] 沈萍,范秀容,李广斌. 微生物学实验[M]. (第三版). 北京:高等教育出版社,1999.
- [19] Smith S E, Read D J. Mycorrhizal symbiosis[M]. San Diego: Academic Press, 1997.
- [20] Rilling M C, Wright S F, Nichols K A, et al. Large contribution of arbuscular mycorrhizal fungi to soil carbon pools in tropical forest soils[J]. Plant and Soil, 2001, 233(2): 167-177.
- [21] Wright S F, Upadhyaya A. A survey of soils for aggregate stability and glomalin, a glycoprotein produced by hyphae of arbuscular mycorrhizal fungi[J]. Plant and Soil, 1998, 198(1): 97-107.
- [22] 田慧,刘晓蕾,盖京苹,等. 球囊霉素及其作用研究进展[J]. 土壤通报,2009,40(5): 1215-1219.
- [23] 张志丹,赵兰坡. 土壤酶在土壤有机培肥研究中的意义[J]. 土壤通报,2006,37(2): 362-367.
- [24] 刘美英,高永,李强,等. 神东矿区复垦地土壤酶活性变化和分布特征[J]. 干旱区资源与环境,2012,26(1): 164-168.
- [25] 杨清,姚多喜,张治国,等. 煤矿复垦区重金属与土壤酶活性的研究[J]. 煤炭技术,2012,31(2): 6-8.
- [26] 孔龙,谭向平,和文祥,等. 黄土高原沟壑区宅基地复垦土壤酶动力学研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2013,(2): 1-7.

CONTENTS

Aerosol Optical Properties During Different Air-Pollution Episodes over Beijing	SHI Chan-zhen, YU Xing-na, ZHOU Bin, <i>et al.</i> (4139)
Characteristics and Source Analysis of Atmospheric Aerosol Ions over the Bohai Sea and the North Yellow Sea in Autumn	ZHANG Yan, ZHANG Hong-hai, YANG Gui-peng (4146)
Spatial Distribution Characteristics of Carbonaceous Aerosol During Summer in Beibu Gulf Zone, China	YANG Yi-hong, TAO Jun, GAO Jian, <i>et al.</i> (4152)
Study on the <i>in-situ</i> Measurement of Greenhouse Gas by an Improved FTIR	XIA Ling-jun, LIU Li-xin, ZHOU Ling-xi, <i>et al.</i> (4159)
Distribution of CH ₄ in the Suburb of Changsha City, China	LIU Lu-ning, WANG Ying-hong, XU Xiao-juan, <i>et al.</i> (4165)
Chemical Composition of <i>n</i> -Alkanes in Wheat Straw and Smoke	LIU Gang, LI Jiu-hai, XU Hui, <i>et al.</i> (4171)
Degradation of the Absorbed Methyl Mercaptan by Persulfate in Alkaline Solution	YANG Shi-ying, WANG Lei-lei, FENG Lin-yu, <i>et al.</i> (4178)
Emissions of Greenhouse Gas and Ammonia from the Full Process of Sewage Sludge Composting and Land Application of Compost ...	ZHONG Jia, WEI Yuan-song, ZHAO Zhen-feng, <i>et al.</i> (4186)
Distribution and Physicochemical Properties of Aquatic Colloids in the Yangtze Estuarine and Coastal Ecosystem	GU Li-jun, YANG Yi, LIU Min, <i>et al.</i> (4195)
Spatial Distribution and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in the Estuaries Surface Sediments from the Haihe River Basin	 LÜ Shu-cong, ZHANG Hong, SHAN Bao-qing, <i>et al.</i> (4204)
Distribution of Perfluorooctanesulfonate and Perfluorooctanoate in Water and the Sediment in Fenhe River, Shanxi Province	Higashiguchi Tomohiro, SHI Jiang-hong, ZHANG Hui, <i>et al.</i> (4211)
Analysis on Nitrogen and Phosphorus Loading of Non-point Sources in Shiqiao River Watershed Based on L-THIA Model	LI Kai, ZENG Fan-tang, FANG Huai-yang, <i>et al.</i> (4218)
Pollutant Source Apportionment of Combined Sewer Overflows Using Chemical Mass Balance Method	DAI Mei-hong, LI Tian, ZHANG Wei (4226)
Simulated Study of Algal Fatty Acid Degradation in Hypoxia Seawater-Sediment Interface Along China Coastal Area	SUI Wei-wei, DING Hai-bing, YANG Gui-peng, <i>et al.</i> (4231)
Influence of Two Different Species of Aquatic Plant Communities on the Concentration of Various Nitrogen Forms in Sediment of Lake Taihu	 MA Jiu-yuan, WANG Guo-xiang, LI Zhen-guo, <i>et al.</i> (4240)
Study on Removal Rule of Endosulfan in Surface Flow Constructed Wetland	QIN Jing, GAO Fu-wei, XIE Hui-jun (4251)
Accumulation and Transformation of Different Arsenic Species in Nonaxenic <i>Dunaliella salina</i>	WANG Ya, ZHANG Chun-hua, WANG Shu, <i>et al.</i> (4257)
Evaluation of <i>in situ</i> Capping with Lanthanum-Modified Zeolite to Control Phosphate and Ammonium Release from Sediments in Heavily Polluted River	 LI Jia, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui (4266)
Effects of Invertebrate Bioturbation on Vertical Hydraulic Conductivity of Streambed for a River	REN Chao-liang, SONG Jin-xi, YANG Xiao-gang, <i>et al.</i> (4275)
Formation of Disinfection By-products by <i>Microcystis aeruginosa</i> Intracellular Organic Matter; Comparison Between Chlorination and Bromination	 TIAN Chuan, GUO Ting-ting, LIU Rui-ping, <i>et al.</i> (4282)
Effect of Natural Organic Matter on Coagulation Efficiency and Characterization of the Flocs Formed	XU Lei, YU Wen-zheng, LIANG Liang, <i>et al.</i> (4290)
DOM Membrane Fouling and Effects on Rejection Behaviors of NF Membranes	FENG Gui-zhen, DONG Bing-zhi (4295)
Removal of Hg in Wastewater by Zero-Valent Iron	ZHOU Xin, ZHANG Jin-zhong, QIU Xin-kai, <i>et al.</i> (4304)
Catalytic Dechlorination of 2,4-D in Aqueous Solution by Fe ₃ O ₄ -Stabilized Nanoscale Pd/Fe	ZHOU Hong-yi, LIANG Si, ZENG Si-si, <i>et al.</i> (4311)
Comparative Study on Adsorption Behaviors of Natural Organic Matter by Powered Activated Carbons with Different Particle Sizes	LI Zheng-jian, SHI Bao-you, WANG Dong-sheng (4319)
Removal of Nitrate from Aqueous Solution Using Cetylpyridinium Chloride (CPC)-Modified Activated Carbon as the Adsorbent	ZHENG Wen-jing, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (4325)
Adsorption Properties of Modified Graphene for Methylene Blue Removal from Wastewater	WU Yan, LUO Han-jin, WANG Hou, <i>et al.</i> (4333)
Application of Classical Isothermal Adsorption Models in Heavy Metal Ions/Diatomite System and Related Problems	ZHU Jian, WU Qing-ding, WANG Ping, <i>et al.</i> (4341)
Effects of Nitrate on Anoxic/Anaerobic Oxidation of Methane in the Aged Refuse	LIU Yan-yan, LONG Yan, YIN Hua, <i>et al.</i> (4349)
Study on the Biotransformation of Sulfate and Ammonia in Anaerobic Conditions	ZHANG Li, HUANG Yong, YUAN Yi, <i>et al.</i> (4356)
Characteristics of Sulfate Reduction-Ammonia Oxidation Reaction	YUAN Yi, HUANG Yong, LI Xiang, <i>et al.</i> (4362)
Analysis of Hydrogen-production Performance in a UASB System at Low pH	ZHAO Jian-hui, ZHANG Bai-hui, LI Ning, <i>et al.</i> (4370)
Preparation of Red Mud Loaded Co Catalysts; Optimization Using Response Surface Methodology (RSM) and Activity Evaluation	LI Hua-nan, XU Bing-bing, QI Fei, <i>et al.</i> (4376)
Toxic Effects of High Concentrations of Ammonia on <i>Euglena gracilis</i>	LIU Yan, SHI Xiao-rong, CUI Yi-bin, <i>et al.</i> (4386)
Influence of Image Process on Fractal Morphology Characterization of NAPLs Vertical Fingering Flow	LI Hui-ying, DU Xiao-ming, YANG Bin, <i>et al.</i> (4392)
Changing Characteristics of Organic Matter and pH of Cultivated Soils in Zhejiang Province over the Last 50 Years	ZHANG Ming-kui, CHANG Yue-chang (4399)
Study on Selenium Contents of Typical Selenium-rich Soil in the Middle Area of Zhejiang and Its Influencing Factors	HUANG Chun-lei, SONG Ming-yi, WEI Ying-chun (4405)
Spatial Distribution Characteristics of Fe and Mn Contents in the New-born Coastal Marshes in the Yellow River Estuary	SUN Wen-guang, GAN Zhuo-ting, SUN Zhi-gao, <i>et al.</i> (4411)
Level, Composition and Sources of Medium-Chain Chlorinated Paraffins in Soils from Chongming Island	SUN Yang-zhao, WANG Xue-tong, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (4420)
Distribution Characteristics of Organochlorine Pesticides in Soil from Daiyun Mountain Range in Fujian, China	QU Cheng-kai, QI Shi-hua, ZHANG Li, <i>et al.</i> (4427)
Levels of PCDD/Fs and Dioxin-Like PCBs in Soils Near E-Waste Dismantling Sites	SHAO Ke, YIN Wen-hua, ZHU Guo-hua, <i>et al.</i> (4434)
Chemical Form Changes of Exogenous Water Solution Fluoride and Bioavailability in Tea Garden Soil	CAI Hui-mei, PENG Chuan-yi, CHEN Jing, <i>et al.</i> (4440)
Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on the Vegetation Restoration of Different Types of Coal Mine Spoil Banks	ZHAO Ren-xin, GUO Wei, FU Rui-ying, <i>et al.</i> (4447)
Effects of the Arbuscular Mycorrhizal Fungi on Environmental Phytoremediation in Coal Mine Areas	LI Shao-peng, BI Yin-li, KONG Wei-ping, <i>et al.</i> (4455)
Preliminary Analysis of Manganese Uptake Mechanism in the Hyperaccumulator <i>Phytolacca americana</i> L.	XU Xiang-hua, LI Ren-ying, LIU Cui-ying, <i>et al.</i> (4460)
Research on the Bioaccessibility of HgS by <i>Shewanella oneidensis</i> MR-1	CHEN Yan, WANG Hui, SI You-bin (4466)
Study on IEUBK Model Localization Based on Behavior Parameters of Children from Southwestern China	JIANG Bao, CUI Xiao-yong (4473)
Sorption and Desorption Characteristics of Different Structures of Organic Phosphorus onto Aluminum (Oxyhydr) Oxides	LIU Fei, ZHANG Yan-yi, YAN Yu-peng, <i>et al.</i> (4482)
Study on the Occurrence of Ferrum in Coal by Ultrasound-assisted Sequential Chemical Extraction	XIONG Jin-yu, LI Han-xu, DONG Zhong-bing, <i>et al.</i> (4490)
A Review of Uptake, Translocation and Phytotoxicity of Engineered Nanoparticles in Plants	YANG Xin-ping, ZHAO Fang-Jie (4495)

《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11月15日 34卷 第11期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 11 Nov. 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