

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第 33 卷 第 13 期 Vol.33 No.13 **2013**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 33 卷 第 13 期 2013 年 7 月 (半月刊)

目次

前沿理论与学科综述

- 强度干扰后退化森林生态系统中保留木的生态效应研究综述..... 缪宁,刘世荣,史作民,等 (3889)
- AM 真菌对重金属污染土壤生物修复的应用与机理..... 罗巧玉,王晓娟,林双双,等 (3898)

个体与基础生态

- 东灵山不同林型五角枫叶性状异速生长关系随发育阶段的变化..... 姚婧,李颖,魏丽萍,等 (3907)
- 不同温度下 CO₂ 浓度增高对坛紫菜生长和叶绿素荧光特性的影响..... 刘露,丁柳丽,陈伟洲,等 (3916)
- 基于 LULUCF 温室气体清单编制的浙江省杉木林生物量换算因子..... 朱汤军,沈楚楚,季碧勇,等 (3925)
- 土壤逐渐干旱对菖蒲生长及光合荧光特性的影响..... 王文林,万寅婧,刘波,等 (3933)
- 一株柠条内生解磷菌的分离鉴定及实时荧光定量 PCR 检测..... 张丽珍,冯利利,蒙秋霞,等 (3941)
- 一个年龄序列巨桉人工林植物和土壤生物多样性..... 张丹桔,张健,杨万勤,等 (3947)
- 不同饵料和饥饿对魁蚶幼虫生长和存活的影响..... 王庆志,张明,付成东,等 (3963)
- 禽畜养殖粪便中多重抗生素抗性细菌研究..... 祁诗月,任四伟,李雪玲,等 (3970)
- 链状亚历山大藻赤潮衰亡的生理调控..... 马金华,孟希,张淑,等 (3978)
- 基于环境流体动力学模型的浅水草藻型湖泊水质数值模拟..... 李兴,史洪森,张树礼,等 (3987)

种群、群落和生态系统

- 干旱半干旱地区围栏封育对甘草群落特征及其分布格局的影响..... 李学斌,陈林,李国旗,等 (3995)
- 宁夏六盘山三种针叶林初级净生产力年际变化及其气象因子响应..... 王云霓,熊伟,王彦辉,等 (4002)
- 半干旱黄土区成熟柠条林地土壤水分利用及平衡特征..... 莫保儒,蔡国军,杨磊,等 (4011)
- 模拟酸沉降对鼎湖山季风常绿阔叶林地表径流水化学特征的影响..... 丘清燕,陈小梅,梁国华,等 (4021)
- 基于改进 PSO 的洞庭湖水源涵养林空间优化模型..... 李建军,张会儒,刘帅,等 (4031)
- 外来植物火炬树水浸液对土壤微生物生态系统的化感作用..... 侯玉平,柳林,王信,等 (4041)
- 崇明东滩抛荒鱼塘的自然演替过程对水鸟群落的影响..... 杨晓婷,牛俊英,罗祖奎,等 (4050)
- 三峡水库蓄水初期鱼体汞含量及其水生食物链累积特征..... 余杨,王雨春,周怀东,等 (4059)
- 元江鲤种群遗传多样性..... 岳兴建,邹远超,王永明,等 (4068)

景观、区域和全球生态

- 中国西北干旱区气温时空变化特征..... 黄蕊,徐利岗,刘俊民 (4078)
- 集水区尺度下东北东部森林土壤呼吸的模拟..... 郭丽娟,国庆喜 (4090)
- 增氮对青藏高原东缘高寒草甸土壤甲烷吸收的早期影响..... 张裴雷,方华军,程淑兰,等 (4101)
- 基于生态系统服务的广西水生态足迹分析..... 张义,张合平 (4111)
- 深圳市景观生态安全格局源地综合识别..... 吴健生,张理卿,彭建,等 (4125)

庐山风景区碳源、碳汇的测度及均衡..... 周年兴,黄震方,梁艳艳 (4134)

气候变化对内蒙古中部草原优势牧草生长季的影响 李夏子,韩国栋,郭春燕 (4146)

民勤荒漠区典型草本植物马蔺的物候特征及其对气候变化的响应..... 韩福贵,徐先英,王理德,等 (4156)

血水草生物量及碳贮量分布格局..... 田大伦,闫文德,梁小翠,等 (4165)

5 种温带森林生态系统细根的时间动态及其影响因子 李向飞,王传宽,全先奎 (4172)

资源与产业生态

干旱胁迫下 AM 真菌对矿区土壤改良与玉米生长的影响..... 李少朋,毕银丽,陈咄圳,等 (4181)

城乡与社会生态

上海环城林带保健功能评价及其机制..... 张凯旋,张建华 (4189)

研究简报

北京山区侧柏林林内降雨的时滞效应 史 宇,余新晓,张佳音 (4199)

采伐剩余物管理措施对二代杉木人工林土壤全碳、全氮含量的长期效应
..... 胡振宏,何宗明,范少辉,等 (4205)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 326 * zh * P * ¥90.00 * 1510 * 35 * 2013-07



封面图说: 岳阳附近的水源涵养林及水系鸟瞰——水源涵养林对于调节径流,减缓水、旱灾害,合理开发利用水资源具有重要的生态意义。洞庭湖为我国第二大淡水湖,南纳湘、资、沅、澧四水,北由岳阳城陵矶注入长江,是长江上最重要的水量调节湖泊。因此,湖周的水源涵养林建设对于恢复洞庭湖调节长江中游地区洪水的功能,加强湖区生物多样性的保护是最为重要的举措之一。对现有防护林采取人为干扰的调控措施,改善林分空间结构,将有利于促进森林生态系统的正向演替,为最大程度恢复洞庭湖水源林生态功能和健康经营提供重要支撑。

彩图及图说提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201209041249

李少朋, 毕银丽, 陈咄圳, 陈书琳, 张延旭, 孔维平, 王瑾. 干旱胁迫下 AM 真菌对矿区土壤改良与玉米生长的影响. 生态学报, 2013, 33(13): 4181-4188.

Li S P, Bi Y L, Chen P Z, Chen S L, Zhang Y X, Kong W P, Wang J. Effects of AMF on soil improvement and maize growth in mining area under drought stress. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(13): 4181-4188.

干旱胁迫下 AM 真菌对矿区土壤改良与玉米生长的影响

李少朋¹, 毕银丽^{1,*}, 陈咄圳², 陈书琳¹, 张延旭¹, 孔维平¹, 王瑾¹

(1. 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院, 北京 100083; 2. 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193)

摘要:以神东矿区塌陷区退化土壤为供试基质,以玉米为宿主植物,研究在干旱胁迫下,丛枝菌根真菌(arbuscular mycorrhizal fungi)对玉米生长和养分吸收的影响,以及对矿区退化土壤的改良作用。结果表明:干旱胁迫下,接种 AMF 显著提高了玉米根系侵染率和生物量,玉米叶片相对含水量和叶色值明显高于对照组;接种组玉米地上部分磷、氮、钙和根系部分磷、钾、钙含量显著增加;接种 AMF 后,玉米根际土壤总球囊霉素和易提取球囊霉素含量分别增加了 36.2% 和 33%,且根际土壤中有机质含量显著增加。由此可见,接种 AMF 促进了玉米对矿质养分的吸收,缓解了干旱造成的玉米生长的不利影响,提高了根际土壤中有机质含量,对矿区退化土壤改良有重要意义。

关键词:丛枝菌根;干旱胁迫;煤矿区;玉米;球囊霉素

Effects of AMF on soil improvement and maize growth in mining area under drought stress

LI Shaopeng¹, BI Yinli^{1,*}, CHEN Peizhen², CHEN Shulin¹, ZHANG Yanxu¹, KONG Weiping¹, WANG Jin¹

1 College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining & Technology, Beijing 100083, China;

2 College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China

Abstract: Shendong mining area is one of the largest coalfield and the most important coal production base in China. Water is an important limiting factor of ecological and environmental protection in this area which belongs to the typical semi-arid, semi-desert plateau continental climate. Underground mining is the main form of coal mining, which would inevitably lead to ground subsidence. Surface moisture and nutrient loss form a large number of cracks were caused by the process. Water shortage have become a serious problem in mining area. However water is necessary for biological survival. Lack of water would hinder the growth of crop and exacerbate the agricultural drought. Arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) is a ubiquitous symbiotic fungi. The symbionts body could be formed by AMF with more than 80% of terrestrial plant. It find that using AMF could promote to absorb mineral nutrients and water by plant, enhance the stress resistance and disease resistance of corn, improve the soil structure, increase the soil fertility, raise the survival rate of seedlings transplanting and ameliorate the vegetation restoration of land reclamation in coal mining subsidence area. Under drought stress condition, with maize and degraded soil as the host plant and matrix, effects of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) on the growth and nutrient absorption of maize and the degraded soil in Shendong mine area were studied. The results showed that the

基金项目:教育部博士点基金项目(20090023110009);“十二五”科技支撑计划资助项目(2012BAC10B03)

收稿日期:2012-09-04; **修订日期:**2013-03-21

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: ylb88@126.com

treatment of inoculated AMF significantly increased the biomass and the root colonization rate of maize. Leaf relative water content and leaf color readings significantly higher than the control. The content of P, N, and Ca in shoot and the content of P, K, and Ca in root portion of maize of vaccinated treatments increased significantly. After inoculation with AMF, the phosphorus nutrition for maize was particularly improved. The phosphorus content in aerial parts of corn of inoculation treatments were on average of 0.17 g/kg higher than that of non inoculation treatments and in roots were on average of 0.24 g/kg. Compared with the control, the content of total glomalin and easily extractable glomalin increased by 36.2% and 33% respectively. The content of organic matter in rhizosphere soil also significantly increased. It indicated that the soil inoculated AMF promoted the mineral nutrient absorption by maize and relieved the negative effect of drought on the growth of maize and raised the content of organic matter in rhizosphere soil, which having important meaning on improvement degraded soil in mining area. Using AMF reclamation is conducive to agricultural production and has important meaning for environmental restoration and ecological restoration in Shendong coal mining subsidence area.

Key Words: arbuscular mycorrhizae; drought stress; coal mining area; maize; glomalin

中国是世界上最大的煤炭生产国和消费国,煤炭是中国最主要的能源,约占一次性能源消费量的 74%^[1]。神东矿区是中国目前已探明储量最大的煤田和最主要的煤炭生产基地之一,矿区属典型的半干旱、半沙漠的高原大陆性气候,干旱少雨,水是神东矿区生态环境保护一个重要的限制性因子。中国煤炭开采大约 96% 的为井工开采,4% 的为露天开采。神东矿区主要以井工开采为主,井工开采形成地下采空区,势必会造成地面塌陷^[2]。地面塌陷过程中会产生大量裂缝,导致地表水分和养分流失严重^[3]。煤炭开采导致矿区水资源流失日益严重,而水是生物体赖以生存的基础,水分的缺失阻碍作物的生长和发育,加剧了矿区农业干旱。研究表明^[4],由于水分造成的作物减产超过其他因素导致产量损失的总和。在我国西北地区水分供应不足严重限制了该地区农业发展^[5]。因此,对于神东矿区农业生产来说,提高塌陷区农作物对水分的利用率就变的至关重要。

丛枝菌根真菌(AMF)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^[6]。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^[7-9]。随着研究的不断深入,AMF 的作用越来越广泛。AMF 能促进退化土壤上植物的生长和改善土壤的质量^[10];在营养缺乏条件下,AMF 能显著提高宿主植物对矿质养分的吸收,尤其是磷元素^[11-13],据报道,AMF 的根外菌丝可以向植株提供 70% 的磷^[14]和 30% 的氮^[15];在盐胁迫条件,AMF 能缓解胁迫下植物对 P, Ca 和 K 的吸收,缓解盐害和高盐对植物根系的氧化伤害,植入 AMF 能显著提高植物的生物量和出芽率,在改善土壤质量方面也起到积极作用^[16-18];除此之外,丛枝菌根也能降低其它生物对宿主植物的伤害,提高植物的抗旱性和增加植物的生物量^[19-20]。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的吸收^[21-22]。其中,AMF 产生的土壤相关蛋白是土壤的一个重要碳库,同时可以增强土壤团聚体的稳定性,改善土壤质量。

神东矿区位于毛乌素沙地边缘,矿区土壤主要以沙性土壤为主,土壤保水保肥能力差,水分的缺失是矿区退化土壤改良的瓶颈所在,政策上缺乏引导以及经济等因素,目前对矿区退化土壤改良研究较少。本实验室利用 AMF 在煤矿塌陷区土地复垦发现,AMF 能够促进植物吸收矿质养分和水分,提高作物抗逆性和抗病性,改良土壤结构,增强土壤肥力,提高苗木移栽成活率,促进植被恢复^[3,23-24]。本研究在结合前人研究的基础上,以西北地区常见农作物玉米为宿主,以矿区退化土壤为基质,模拟神东地区干旱特点,研究 AMF 在干旱胁迫下对玉米养分的调节,同时研究 AMF 对矿区退化土壤的改良效果,为 AMF 应用于干旱状态下西部矿区农业生产提供一定的理论基础,也为 AMF 菌剂的推广奠定技术基础。

1 材料和方法

1.1 试验材料

供试土壤于 2011 年 4 月采自陕西省神木县李家畔镇活鸡兔矿塌陷区,为沙质退化矿区土,风干,过 1 mm

筛。供试土壤基本性状为 pH 值 7.48;电导率 35.4 $\mu\text{S}/\text{cm}$,最大持水量为 22.86%;有机质 6.07 g/kg;总氮为 0.34 g/kg;全磷 0.41 g/kg;有效磷为 7.2 mg/kg;速效钾 50 mg/kg;将供试的土壤在高温灭菌锅里灭菌 1 h,晾干待用。供试玉米种子由中国农业科学院种子公司提供,玉米品种为农大 CFO24。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提供经本实验室增殖培养的内生菌 *Glomus mosseae*(简称 G. m)。

1.2 试验方法

试验于 2011 年 8 月在中国矿业大学(北京)温室内进行,试验分别设干旱加丛枝菌根组(+M)、干旱不加丛枝菌根组(-M)、正常供水组(NI)和正常供水加菌组(NI+M),接种量按每 1kg 灭菌后的风干矿区退化沙土加 40g 的菌剂充分混合。栽种玉米的塑料盆规格为:11cm(高) $\times$ 13cm(盆口直径) $\times$ 9cm(盆底直径),每盆加矿区土量为 1400g,种植玉米前向矿区退化土壤加入 NH_4NO_3 , KH_2PO_4 , K_2SO_4 配置营养液作为底肥,使供试土壤中 N、P、K 含量分别为 100 mg/kg, 10 mg/kg, 150 mg/kg, 每个处理 3 个重复,浇水达到最大饱和持水量,水分平衡 1 d 后,播种。将玉米种子用 10% H_2O_2 溶液浸泡 10min 做表面消毒,在用去离子水清洗 10 次,每个小盆播种玉米 5 棵,玉米出苗 4d 后间苗,每盆保持 2 株,模拟矿区干旱胁迫,浇水量为土壤最大持水量的(55 $\pm$ 5)% (中度干旱)。利用称重法控制浇水量,使每盆土壤的含水量维持在中度干旱水平,正常供水组每盆土壤含水量维持在最大持水量水平。

1.3 测定项目和方法

1.3.1 玉米生长指标测定

苗期玉米生长到 45d 后,分别收割玉米地上和地下部分,用自来水清洗根系附着的泥土,同时将植物地上部分和根系分开,在 100 $^{\circ}\text{C}$ 烘箱内杀青 30min,然后放到 70 $^{\circ}\text{C}$ 烘箱内直至烘干。分别称量每株玉米的地上部分和根系的干质量。

1.3.2 叶片相对含水量测定

植物叶片相对含水量 $\text{RWC} = (W_f - W_d) / (W_t - W_d) \times 100$

式中, W_f 为叶片鲜重, W_d 为叶片干重, W_t 为叶片被水充分饱和后的重量。

1.3.3 侵染率、菌丝密度和根际土有机质测定方法

玉米收获时,拣出较细的玉米根系,用水清洗干净,剪成 1 cm 长根段,混匀后取鲜根测定菌根侵染率^[25]。菌丝密度采用网格交叉法测定^[26]。土壤有机质含量的测定采用重铬酸钾外加热法($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ - H_2SO_4 法)。

1.3.4 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(glomalin-related soil protein, GRSP),通常定义为 Bradford-反映土壤蛋白,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 Wright 及 Janos 的方法稍加修改^[27-28]。

(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 1.00g 于带刻度离心管中,对应加入 8mL 柠檬酸钠浸提剂(20mmol/L、pH 7.0),加盖,摇匀,在 103kPa、121 $^{\circ}\text{C}$ 下提取 30min, 10000 $\times$ g 下离心 6min,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 1.00g 于带刻度离心管中,对应加入 8mL 柠檬酸钠浸提剂(50mmol/L、pH 8.0),加盖,摇匀,在 103kPa、121 $^{\circ}\text{C}$ 下提取 60min,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 10000 $\times$ g 下离心 6min,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 $^{\circ}\text{C}$ 下直至第 2 天分析。

(2) 球囊霉素相关蛋白的测定

分别吸取 0.5mL 的上清液,加入 5mL 考马斯亮蓝 G-250 染色剂(使用之前过滤),加盖,颠倒,显色 10min,于 595nm 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 1.00g

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。

1.3.5 玉米 TN、TP、K 和 Ca 的测定

玉米叶片和根系中全氮和全磷含量的测定参考鲍士旦^[29]的方法。植物矿质元素离子含量测定,将植物的地上部分和根部的分开,将烘干样品烘干粉碎后,精确称量 0.5000g,用 HNO₃ 消煮,定容于 50ml,用 ICP-AES(inductively coupled plasma atomic emission spectroscopy,电感耦合等离子体发射光谱仪)测定 K⁺、Ca²⁺ 含量。

1.4 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 接种菌根对玉米幼苗生长和根系侵染率的影响

干旱胁迫下,丛枝菌根对玉米干重、根系侵染率和叶片相对含水率都有一定程度的影响(表 1),统计分析发现,正常供水条件下,苗期玉米的地上干重和总干重要明显高于不接菌的玉米,且两者的差异性达到显著水平。干旱条件下,菌根对玉米生长促进明显,这可能是菌丝增加了玉米根系与土壤的接触面积,促进了根系对水分和养分的吸收;接种菌根可显著提高玉米组织的相对含水量,平均每株要比对照组高出 14.25%,在组织相对含水量上接菌和不接菌之间表现出明显的差异。同时,接种菌根可显著提高玉米叶片的叶色值 (SPAD)且两者之间的差异性达到显著水平。与干旱胁迫组相比,正常供水条件下的玉米生长表现出明显的优势,且差异系显著。正常供水状况下,加菌和不加菌组的玉米在叶片相对含水量和 SPAD 值差异性不显著,但明显要好于干旱胁迫组。综上所述,在外界胁迫条件下,菌根的作用效率为最大,接种丛枝菌根可缓解干旱缺水对苗期玉米生长的影响,有利于玉米生长。

研究发现,干旱胁迫下,丛枝菌根真菌对玉米根系的侵染率可达到 75.56%,接种菌根强化了菌根对玉米根系的感染能力,形成互惠互利的共生体。接种菌根菌后玉米根系较高的侵染率也说明本试验所选用的菌根菌剂与玉米之间的选择适应性较好,能够很好地发挥共生体的优势作用。菌丝密度反映了菌根在促进植物生长、营养吸收和抗逆性等方面的能力大小。干旱胁迫下,接种菌根组菌丝密度可达到 4.05 m/g,表明接种菌根真菌显著地提高植株根外菌丝密度,扩大了根系生存空间和作用范围,更有利于生态的恢复和营养的吸收。在正常供水的条件下,玉米的根系侵染率和菌丝密度仅为 33.33% 和 2.36 m/g,明显低于干旱胁迫接菌组。由此可见,干旱胁迫条件下,丛枝菌根真菌更加速对宿主植物玉米侵染,两者更容易形成互惠共生关系。

表 1 丛枝菌根真菌对玉米干重、根系侵染率和叶片相对含水率的影响

Table 1 Effect of AMF on dry weight, infection rate and RWC of Maize

处理 Treatment	地上干重/(g/株) Dry weight of shoot	根系干重/(g/株) Dry weight of root	总干重/(g/株) Dry weight	根系侵染率/% Infection rate	菌丝密度/(m/g) Hyphal density	叶片相对 含水率/% RWC	叶色值 SPAD
-M	0.65b	0.38c	1.03c	0	0	71.95c	31.97c
+M	1.59a	0.53c	2.12b	75.6a	4.05a	86.20b	36.84b
NI	1.44a	0.97b	2.41b	0	0	95.8a	43.3a
NI+M	1.55a	1.25a	4.81a	33.33b	2.36b	96.34a	41.72a

表中数值为 3 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; -M 为干旱胁迫不施加丛枝菌根处理, +M 为干旱胁迫并施加丛枝菌根处理, NI 为正常供水不施加丛枝菌根处理, NI+M 为正常供水并施加丛枝菌根处理; SPAD: soil and plant analyzer development

2.2 接种 AMF 对矿区退化土壤中球囊霉素和有机质影响

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,难于分解,自然状态下极为稳定^[30-31],近期被更名为球囊霉素相关土壤蛋白。它产生于 AMF 定居在宿主植物根内的根内菌丝和伸展在根际土壤中的根外菌丝表面,而且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。本研究发现,接种 AMF 组玉米根际土壤中总球囊霉素含量增加率可达 36.2%,两者的差异性达到显

著水平。干旱条件下,接种菌根同时可以提高根际的土壤的易提取球囊霉素的含量,如图 1 所示,接种组易提取球囊霉素增加了 33%。在总球囊霉素和易提取球囊霉素含量上,-M 组与 CK 相比两者无明显的差异,这说明了球囊霉素相关蛋白是从枝菌根真菌特有产物。+M 和 NI+M 组在总球囊霉素和易提取球囊霉素含量上差异性不显著,但和其它处理相比,总球囊霉素含量达到显著性水平。+M 组在易提取球囊霉素含量最高,和其它处理相比表现出明显的差异性。

目前认为球囊霉素的主要作用是增加土壤有机碳库和改善土壤团聚体^[31-32]。球囊霉素是土壤有机质的主要组成部分,是土壤有机碳、氮的一个重要来源^[33],据估计丛枝菌根真菌对土壤生态系统有机碳的贡献为 54—900 kg/hm²^[34]。本研究发现(图 1),干旱胁迫下,加丛枝菌根组的有机质含量可达 7.73 g/kg,比未灭菌矿区退化土壤(CK)有机质含量高出 1.65 g/kg。由图 1 可见,无论干旱胁迫处理,还是正常供水,接入丛枝菌根真菌都可以提高根际土壤的有机质含量,干旱胁迫加菌组和正常供水加菌组两者无明显差异,但与其它处理相比,表现出明显的差异性。由此可见,接种丛枝菌根有利提高土壤的有机质含量,这可能得益于丛枝菌根真菌提高了退化土壤球囊霉素含量。因此,接种菌根对矿区退化土壤的改良意义显著,这也 Rillig MC 和 Miller RM 的研究结果一致^[22,30]。

神东矿区塌陷区的土壤为沙质土为主,土壤的养分含量较低,煤炭开采对其质地和理化性质破坏较大。菌根技术在改善土壤质量方面起到积极作用,菌根共生体中根外菌丝提供植物生长所需要的养分和水分,植物则提供真菌生长代谢所需要的碳水化合物。本研究也验证了干旱条件下接种丛枝菌根能显著提高玉米根际球囊霉素和有机质的含量,而球囊霉素可以极大地提高、改善土壤颗粒的稳定性^[30-31]。目前研究也证实了土壤中球囊霉素量与土壤凝结稳定性和土壤涵水性呈正相关,接种菌根有利于土壤水分的保持,有利于缓解干旱对作物生长的影响^[35],这与本研究结果一致;同时球囊

霉素是 AMF 对其宿主植物生长环境的调整 and 适应,是微生物活动的一种积极应答机制^[36]。Miller 等^[37]还发现粘着球囊霉素的 AMF 根外菌丝可以在土壤水气界面很好生存,这些菌丝在干湿循环过程中可减少土壤大聚集体遭到的破坏,从而提高土壤结构的稳定性和抗侵蚀能力,改良土壤性能。神东矿区属于井工开采,煤炭开采对土壤理化性状破坏严重,而通过菌根来缓解外力对矿区土壤的破坏,恢复土壤的环境质量就变的尤为重要。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。

2.3 接种 AMF 对玉米幼苗养分调节

干旱胁迫下,接种丛枝菌根真菌对玉米体氮和磷营养具有改善作用(图 2,图 3)。其中对苗期玉米磷营养改善作用尤为明显,无论玉米地上部分还是根系部分,接菌组和不接菌组的玉米植株在磷含量上表现出明显的差异性。干旱胁迫下,加菌组玉米的地上部分和根系部分的 TN 含量都要高于对照组,但两组的差异性不显著。结果表明,接种丛枝菌根能显著提高了玉米对 P 的吸收,这与其他研究结果一致^[11,13]。在贫瘠土壤上,侵染在玉米根系上丛枝菌根菌丝增加了根系与土壤的接触面积,从而促进了根系对土壤中 P 的吸收。

钾是农作物必需的大量营养元素之一,需要量仅次于氮。逆境条件下不利于植物体对钾元素的吸收,因此,必须通过一定的手段来提高作物对钾的吸收。研究发现,干旱胁迫下,接种 AMF 显著提高了玉米根部的钾元素含量,且两者的差异性达到显著性水平(图 4);同时加菌组玉米地上部分的含钾量要高于对照组,但两者的差异性不显著。结果表明加菌可以提高玉米对钾的吸收,这可能是丛枝菌根的菌丝可以伸展到钾亏缺区以外,有效地吸收根系不能吸收的钾。在不接种菌根真菌的处理中,钾在土壤中的亏缺区约为 5mm;但在接种菌根真菌的处理中,钾亏缺区一直延伸到 50mm,这种现象与菌丝对土壤钾的直接吸收和向植物根系运输

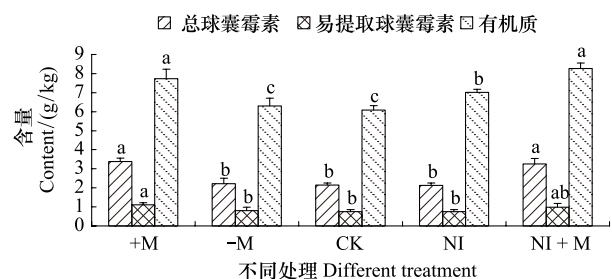


图 1 接种丛枝菌根对玉米根际球囊霉素相关蛋白和根际有机质的影响

Fig. 1 Effect of AMF on glomalin and organic matter content in rhizosphere of Maize

有关^[38]。

钙在植物生长和发育中起到至关重要的作用,钙是细胞膜上最重要的物质之一,也是植物收到外界环境胁迫和激素调节的重要信号分子^[39]。逆境条件下,钙元素参与启动各种生理生化适应机制^[40]。本研究发现(图5),加菌组玉米的地上部钙含量要比对照组高出22.2%;在钙含量上,玉米根系要表现出相同的规律,加菌组要比对照组高出16.8%。由此可见,干旱胁迫条件下,丛植菌根有利于提高玉米对矿质土壤中钙的吸收。

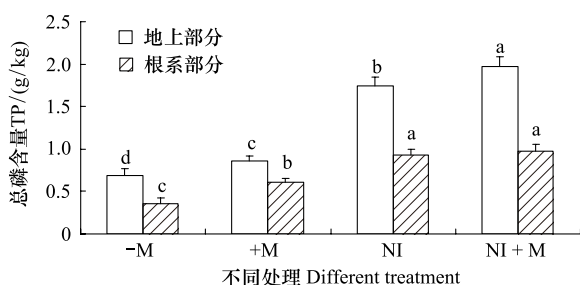


图2 丛枝菌根真菌对玉米 TP 含量的影响

Fig.2 Effect of AMF on TP content of Maize

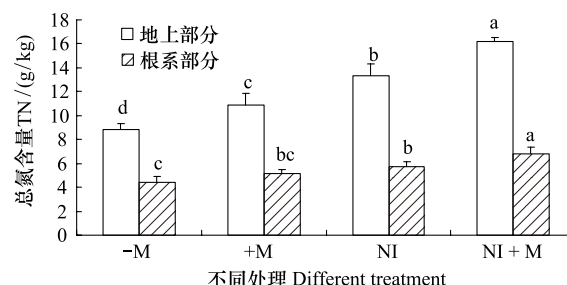


图3 丛枝菌根真菌对玉米 TN 含量的影响

Fig.3 Effect of AMF on TN content of Maize

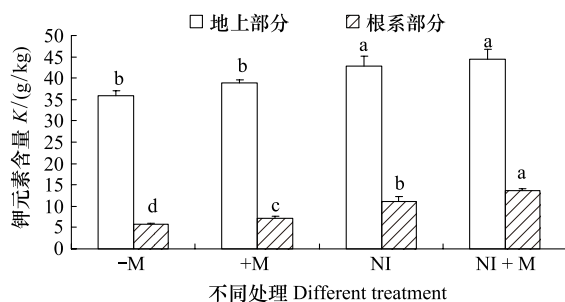


图4 丛枝菌根真菌对玉米 K 含量的影响

Fig.4 Effect of AMF on K content of Maize

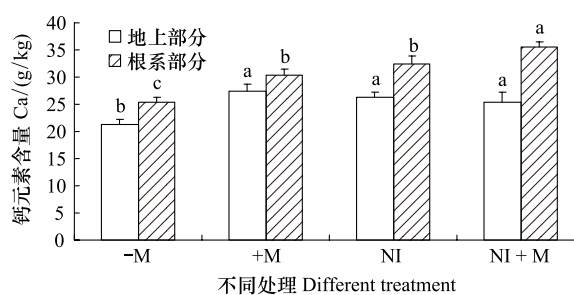


图5 丛枝菌根真菌对玉米 Ca 含量的影响

Fig.5 Effect of AMF on Ca content of Maize

研究发现,干旱胁迫下,玉米植株在氮、磷、钾和钙的含量上都要低于正常供水组和正常供水接菌组,+M组明显好于-M组。由此可见,水分是矿区玉米生长的关键因子,接种丛枝菌根可缓解干旱胁迫对玉米的影响,有利于玉米对养分的吸收。因此,对于地处干旱和半干旱的神东矿区,通过接种丛枝菌根真菌,可以缓解干旱对地表植被的影响,同时有利于提高植物对采煤塌陷区退化土壤上养分的吸收。

3 结论

(1) 干旱条件下,接种 AMF 对苗期玉米生长有明显促进作用,接种 AMF 可显著提高玉米叶片相对含水量和 SPAD 值。同时接种菌根可显著提高根系侵染率和土壤菌丝密度。

(2) 接种 AMF 提高了根际土壤球囊霉素和有机质含量。接种菌根后,玉米根际土壤总球囊霉素和易提取球囊霉素含量分别增加了36.2%和33%。接种菌根组土壤有机质有显著的增加,菌根在提高矿区塌陷区退化土壤肥力上将起到积极作用。

(3) 接种 AMF 对苗期玉米磷营养改善作用尤为明显,接种 AMF 组的玉米地上部分磷含量要比不接菌组平均高出0.17g/kg,而根系部分的磷含量要不接菌组高出0.24 g/kg。接种 AMF 显著提高了玉米对 K 和 Ca 的吸收。

(4) 接种 AMF 可显著提高玉米养分的吸收和促进玉米生长。干旱胁迫条件下,丛枝菌根真菌更易和宿主植物形成互利共生关系。在神东采煤塌陷区,利用 AMF 复垦有利于矿区农业生产,对矿区环境修复和生态

恢复具有重要意义。

References:

- [1] Hu Z Q, Wei Z Y. Existing problems and countermeasures on mining and land reclamation in mine area. *Energy Environmental Protection*, 2003, 17(3): 3-7, 10-10.
- [2] Qian M G, Miao X X, Xu J L. Green mining of coal resources harmonizing with environment. *Journal of China Coal Society*, 2007, 32(1): 1-7.
- [3] Wang S M, Huang Q X, Fan L M, Yang Z Y, Shen T. Study on overburden aquiclude and water protection mining regionalization in the ecological fragile mining area. *Journal of China Coal Society*, 2010, 35(1): 7-14.
- [4] Sun J K, Li T, Xia J B, Dong B T. Effects of drought stress on photosynthetic pigment and on root, stem and leaf growth characteristics of *elaegnus angustifolia* seedlings. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2011, 31(1): 68-71.
- [5] Shan L, Chen P Y. *Ecological and physiological basis for the Dryland Agriculture*. Beijing: Science Press, 1999: 159-173.
- [6] Smith S E, Read D J. *Mycorrhizal Symbiosis*. San Diego: Academic Press, 1997.
- [7] Streitwolf Engel R, Van der Heijden M G A, Wiemken A, Sanders R. The ecological significance of arbuscular mycorrhizal fungal effects on clonal reproduction in plants. *Ecology*, 2001, 82(10): 2846-2859.
- [8] Van der Heijden M G A, Boller T, Wiemken A, Sanders I R. Different arbuscular mycorrhizal fungal species are potential determinants of plant community structure. *Ecology*, 1998, 79(6): 2082-2091.
- [9] Koch A M, Kuhn G, Fontanillas P, Fumagalli L, Goudet J, Sanders I R. High genetic variability and low local diversity in a population of arbuscular mycorrhizal fungi. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2004, 101(8): 2369-2374.
- [10] Rillig M C, Mummey D L. Mycorrhizas and soil structure. *New Phytologist*, 2006, 171(1): 41-53.
- [11] Chen X, Tang J J, Zhi G Y, Hu S J. Arbuscular mycorrhizal colonization and phosphorus acquisition of plants: effects of coexisting plant species. *Applied Soil Ecology*, 2005, 28(3): 359-369.
- [12] Jakoben I, Gazey C, Abbott L K. Phosphate transport by communities of arbuscular mycorrhizal fungi in intact soil cores. *New Phytologist*, 2001, 149(1): 95-103.
- [13] Karanika E D, Mamolos A P, Alifragis D A, Kalburtji K L, Veresoglou D S. Arbuscular mycorrhizas contribution to nutrition, productivity, structure and diversity of plant community in mountainous herbaceous grassland of northern Greece. *Plant Ecology*, 2008, 199(2): 225-234.
- [14] George E, Marschner H, Jakobsen I. Role of arbuscular mycorrhizal fungi in uptake of Phosphorus and nitrogen from soil. *Critical Reviews in Biotechnology*, 1995, 15(3/4): 257-270.
- [15] Frey B, Schüepp H. Acquisition of nitrogen by external hyphae of arbuscular mycorrhizal fungi associated with *Zea mays* L.. *New Phytologist*, 1993, 124(2): 221-230.
- [16] Hajiboland R, Aliasgharzadeh N, Laiegh S F, Poschenrieder C. Colonization with arbuscular mycorrhizal fungi improves salinity tolerance of tomato (*Solanum lycopersicum* L.) plants. *Plant and Soil*, 2010, 331(1/2): 313-327.
- [17] Ashwani K, Satyawati S, Saroj M. Influence of Arbuscular Mycorrhizal (AM) fungi and salinity on seedling growth, solute accumulation, and mycorrhizal dependency of *Jatropha curcas* L.. *Journal of Plant Growth Regulation*, 2010, 29(3): 297-306.
- [18] Jin P, Li Y, Shi P, Chen X H, Lin H, Bin Z. The differential behavior of arbuscular mycorrhizal fungi in interaction with *Astragalus sinicus* L. under salt stress. *Mycorrhiza*, 2011, 21(1): 27-33.
- [19] Newsham K K, Fitter A H, Watkinson A R. Multi-functionality and biodiversity in arbuscular mycorrhizas. *Trends in Ecology and Evolution*, 1995, 10(10): 407-411.
- [20] Eissenstat D M, Wells C E, Yanai R D, Whitbeck J L. Building roots in a changing environment: implications for root longevity. *New Phytologist*, 2000, 147(1): 33-42.
- [21] Augé R M. Water relations, drought and vesicular-arbuscular mycorrhizal symbiosis. *Mycorrhiza*, 2001, 11(1): 3-42.
- [22] Miller R M, Miller S P, astrow J D, Rivetta C B. Mycorrhizal mediated feedbacks influence net carbon gain and nutrient uptake in *Andropogon gerardii*. *New Phytologist*, 2002, 155(1): 149-162.
- [23] Bi Y L, Wu F Y, Wu Y K. Application of arbuscular mycorrhizas in ecological restoration of areas affected by coal mining in China. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(8): 2068-2071.
- [24] Bi Y L, Wu F Y. Effects of mycorrhiza on ecological restoration of solid wastes from coal mine and their nutritional dynamics. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2006, 22(5): 147-152.
- [25] Giovannetti M, Mosse B. An evaluation of techniques for measuring vesicular arbuscular mycorrhizal infection in roots. *New Phytologist*, 1980, 84(3): 489-500.

- [26] Abbott L K, Robson A D, De Boer G. The effect of phosphorus on the formation of hyphae in soil by the vesicular-arbuscular mycorrhizal fungus, *Glomus fasciculatum*. *New Phytologist*, 1984, 97(3): 437-446.
- [27] Wright S F, Upadhyaya A. A survey of soils for aggregate stability and glomalin, a glycoprotein produced by hyphae of arbuscular mycorrhizal fungi. *Plant and Soil*, 1998, 198(1): 97-107.
- [28] Janos D P, Garamszegi S, Beltran B. Glomalin extraction and measurement. *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, 40(3): 728-739.
- [29] Bao S D. *Handbook of Analysis of Soil and Agricultural Chemistry*. Beijing: Agricultural Science Press, 2000.
- [30] Rillig M C, Wright S F, Nichols K A, Schmidt W F, Torn M S. Large contribution of arbuscular mycorrhizal fungi to soil carbon pools in tropical forest soils. *Plant and Soil*, 2001, 233(2): 167-177.
- [31] 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 Plant Growth Regul*, 2010, 29:297-306
- [32] Tian H, Liu X L, Gai J P, Zhang J L, Li X L. Review of glomalin related soil protein and its function. *Chinese Journal of Soil Science*, 2009, 40(5): 1215-1219.
- [33] Rillig M C, Allen M F. What is the role of arbuscular mycorrhizal fungi in plant-to-ecosystem responses to Elevated atmospheric CO₂? *Mycorrhiza*, 1999, 9(1): 1-8.
- [34] Zhu Y G, Miller R M. Carbon cycling by arbuscular mycorrhizal fungi in soil-plant systems. *Trends in Plant Science*, 2003, 8(9): 407-409.
- [35] Wright S F, Anderson R L. Aggregate stability and glomalin in alternative crop rotations for the central Great Plains. *Biology and Fertility of Soils*, 2000, 31(3/4): 249-253.
- [36] Rillig M C, Steinberg P D. Glomalin production by an arbuscular mycorrhizal fungus: a mechanism of habitat modification?. *Soil Biology and Biochemistry*, 2002, 34(9): 1371-1374.
- [37] Miller R M, Jastrow J D. Mycorrhizal fungi influence soil structure // Kapulnik Y, ed. *Arbuscular Mycorrhizas: Physiology and Function*. Dordrecht: Kluwer Academic Press, 2000: 4-18.
- [38] Li X L, Feng G. *Arbuscular mycorrhizal ecology of physiological*. Beijing: Sino-culture Press, 2001: 104-106.
- [39] Hirschi K D. The calcium conundrum. Both versatile nutrient and specific signal. *Plant Physiology*, 2004, 136(1): 2438-2442.
- [40] Yang T B, Poovaiah B W. Calcium/calmodulin-mediated signal network in plants. *Trends in Plant Science*, 2003, 8(10): 505-512.

参考文献:

- [1] 胡振琪, 魏忠义. 煤矿区采动与复垦土壤存在的问题与对策. *能源环境保护*, 2003, 17(3): 3-7, 10-10.
- [2] 钱鸣高, 缪协兴, 许家林. 资源与环境协调(绿色)开采. *煤炭学报*, 2007, 32(1): 1-7.
- [3] 王双明, 黄庆享, 范立民, 杨泽元, 申涛. 生态脆弱矿区含(隔)水层特征及保水开采分区研究. *煤炭学报*, 2010, 35(1): 7-14.
- [4] 孙景宽, 李田, 夏江宝, 董波涛. 干旱胁迫对沙枣幼苗根茎叶生长及光合色素的影响. *水土保持通报*, 2011, 31(1): 68-71.
- [5] 山仑, 陈培元. *旱地农业生理生态基础*. 北京: 科学出版社, 1999: 159-173.
- [23] 毕银丽, 吴福勇, 武玉坤. 丛枝菌根在煤矿区生态重建中的应用. *生态学报*, 2005, 25(8): 2068-2071.
- [24] 毕银丽, 吴福勇. 菌根对煤矿废弃物生态恢复的营养动力学影响. *农业工程学报*, 2006, 22(5): 147-152.
- [29] 鲍士旦. *土壤农化分析*. 北京: 农业出版社, 2000.
- [32] 田慧, 刘晓蕾, 盖京苹, 张俊伶, 李晓林. 球囊霉素及其作用研究进展. *土壤通报*, 2009, 40(5): 1215-1219.
- [38] 李晓林, 冯固. *丛枝菌根生态生理*. 北京: 华文出版社, 2001: 104-106.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 33, No. 13 Jul. ,2013 (Semimonthly)

CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

- A review of ecological effects of remnant trees in degraded forest ecosystems after severe disturbances MIAO Ning, LIU Shirong, SHI Zuomin, et al (3889)
- Mechanism and application of bioremediation to heavy metal polluted soil using arbuscular mycorrhizal fungi LUO Qiaoyu, WANG Xiaojuan, LIN Shuangshuang, et al (3898)

Autecology & Fundamentals

- Changes of allometric relationships among leaf traits in different ontogenetic stages of *Acer mono* from different types of forests in Donglingshan of Beijing YAO Jing, LI Ying, WEI Liping, et al (3907)
- The combined effects of increasing CO₂ concentrations and different temperatures on the growth and chlorophyll fluorescence in *Porphyra haitanensis* (Bangiales, Rhodophyta) LIU Lu, DING Liuli, CHEN Weizhou, et al (3916)
- Research on biomass expansion factor of chinese fir forest in Zhejiang Province based on LULUCF greenhouse gas Inventory ZHU Tangjun, SHEN Chuchu, JI Biyong, et al (3925)
- Influence of soil gradual drought stress on *Acorus calamus* growth and photosynthetic fluorescence characteristics WANG Wenlin, WAN Yinjing, LIU Bo, et al (3933)
- Isolation, identification, real-time PCR investigation of an endophytic phosphate-solubilizing bacteria from *Caragana korshinskii* Kom. roots ZHANG Lizhen, FENG Lili, MENG Qixia, et al (3941)
- Plant's and soil organism's diversity across a range of *Eucalyptus grandis* plantation ages ZHANG Danju, ZHANG Jian, YANG Wanqin, et al (3947)
- Effects of diet and starvation on growth and survival of *Scapharca broughtonii* larvae WANG Qingzhi, ZHANG Ming, FU Chengdong, et al (3963)
- Multidrug-resistant bacteria in livestock feces QI Shiyue, REN Siwei, LI Xueling, et al (3970)
- Physiological regulation related to the decline of *Alexandrium catenella* MA Jinhua, MENG Xi, ZHANG Shu, et al (3978)
- Numerical simulation of water quality based on environmental fluid dynamics code for grass-algae lake in Inner Mongolia LI Xing, SHI Hongsen, ZHANG Shuli, et al (3987)

Population, Community and Ecosystem

- Influence of enclosure on *Glycyrrhiza uralensis* community and distribution pattern in arid and semi-arid areas LI Xuebin, CHEN Lin, LI Guoqi, et al (3995)
- The interannual variation of net primary productivity of three coniferous forests in Liupan Mountains of Ningxia and its responses to climatic factors WANG Yunni, XIONG Wei, WANG Yanhui, et al (4002)
- Soil water use and balance characteristics in mature forest land profile of *Caragana korshinskii* in Semiarid Loess Area MO Baoru, CAI Guojun, YANG Lei, LU Juan, et al (4011)
- Effect of simulated acid deposition on chemistry of surface runoff in monsoon evergreen broad-leaved forest in Dinghushan QIU Qingyan, CHEN Xiaomei, LIANG Guohua, et al (4021)
- A space optimization model of water resource conservation forest in Dongting Lake based on improved PSO LI Jianjun, ZHANG Huiru, LIU Shuai, et al (4031)
- Allelopathic effects of aqueous extract of exotic plant *Rhus typhina* L. on soil micro-ecosystem HOU Yuping, LIU Lin, WANG Xin, et al (4041)
- The impact of natural succession process on waterbird community in a abandoned fishpond at Chongming Dongtan, China YANG Xiaoting, NIU Junying, LUO Zukui, et al (4050)
- Mercury contents in fish and its biomagnification in the food web in Three Gorges Reservoir after 175m impoundment YU Yang, WANG Yuchun, ZHOU Huaidong, et al (4059)

- Microsatellite analysis on genetic diversity of common carp, *Cyprinus carpio*, populations in Yuan River
 YUE Xingjian, ZOU Yuanchao, WANG Yongming, et al (4068)

Landscape, Regional and Global Ecology

- Research on spatio-temporal change of temperature in the Northwest Arid Area HUANG Rui, XU Ligang, LIU Junmin (4078)
- Simulation of soil respiration in forests at the catchment scale in the eastern part of northeast China
 GUO Lijuan, GUO Qingxi (4090)
- The early effects of nitrogen addition on CH₄ uptake in an alpine meadow soil on the Eastern Qinghai-Tibetan Plateau
 ZHANG Peilei, FANG Huajun, CHENG Shulan, et al (4101)
- Analysis of water ecological footprint in Guangxi based on ecosystem services ZHANG Yi, ZHANG Heping (4111)
- The integrated recognition of the source area of the urban ecological security pattern in Shenzhen
 WU Jiansheng, ZHANG Liqing, PENG Jianet al (4125)
- Carbon sources and storage sinks in scenic tourist areas: a Mount Lushan case study
 ZHOU Nianxing, HUANG Zhenfang, LIANG Yanyan (4134)
- Impacts of climate change on dominant pasture growing season in Central Inner Mongolia
 LI Xiazi, HAN Guodong, GUO Chunyan (4146)
- Phenological Characteristics of Typical Herbaceous Plants (*Lris lacteal*) and Its Response to Climate Change in Minqin Desert
 HAN Fugui, XU Xianying, WANG Lide, et al (4156)
- Biomass and distribution pattern of carbon storage in *Eomecon chionantha* Hance
 TIAN Dalun, YAN Wende, LIANG Xiaocui, et al (4165)
- Temporal dynamics and influencing factors of fine roots in five Chinese temperate forest ecosystems
 LI Xiangfei, WANG Chuankuan, QUAN Xiankui (4172)

Resource and Industrial Ecology

- Effects of AMF on soil improvement and maize growth in mining area under drought stress
 LI Shaopeng, BI Yinli, CHEN Peizhen, et al (4181)

Urban, Rural and Social Ecology

- Health function evaluation and exploring its mechanisms in the Shanghai Green Belt, China
 ZHANG Kaixuan, ZHANG Jianhua (4189)

Research Notes

- Time lag effects of rainfall inside a *Platycladus Orientalis* plantation forest in the Beijing Mountain Area, China
 SHI Yu, YU Xinxiao, ZHANG Jiayin (4199)
- Long-term effects of harvest residue management on soil total carbon and nitrogen concentrations of a replanted Chinese fir
 plantation HU Zhenhong, HE Zongming, FAN Shaohui, et al (4205)

《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是由中国科学技术协会主管,中国生态学学会、中国科学院生态环境研究中心主办的生态学高级专业学术期刊,创刊于 1981 年,报道生态学领域前沿理论和原始创新性研究成果。坚持“百花齐放,百家争鸣”的方针,依靠和团结广大生态学科工作者,探索生态学奥秘,为生态学基础理论研究搭建交流平台,促进生态学研究深入发展,为我国培养和造就生态学科人才和知识创新服务、为国民经济建设和发展服务。

《生态学报》主要报道生态学及各分支学科的重要基础理论和应用研究的原始创新性科研成果。特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评价和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,300 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

本期责任副主编 彭少麟

编辑部主任 孔红梅

执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 33 卷 第 13 期 (2013 年 7 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 13 (July, 2013)

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	王如松	Editor-in-chief	WANG Rusong
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 90.00 元