

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

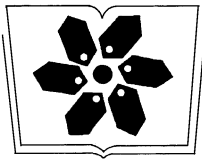
Acta Ecologica Sinica



第33卷 第4期 Vol.33 No.4 **2013**

中国生态学会
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 4 期

2013 年 2 月 (半月刊)

目次

前沿理论与学科综述

- 森林水源涵养功能的多尺度内涵、过程及计量方法 王晓学,沈会涛,李叙勇,等 (1019)
- 植物叶片水稳定同位素研究进展 罗伦,余武生,万诗敏,等 (1031)
- 城市景观格局演变的生态环境效应研究进展 陈利顶,孙然好,刘海莲 (1042)
- 城市生物多样性分布格局研究进展 毛齐正,马克明,邬建国,等 (1051)
- 基于福祉视角的生态补偿研究 李惠梅,张安录 (1065)

个体与基础生态

- 土著菌根真菌和混生植物对羊草生长和磷营养的影响 雷垚,郝志鹏,陈保冬 (1071)
- 干旱条件下 AM 真菌对植物生长和土壤水稳定性团聚体的影响 叶佳舒,李涛,胡亚军,等 (1080)
- 转 *mapk* 双链 RNA 干扰表达载体黄瓜对根际土壤细菌多样性的影响 ... 陈国华,弭宝彬,李莹,等 (1091)
- 北京远郊区臭氧污染及其对敏感植物叶片的伤害 万五星,夏亚军,张红星,等 (1098)
- 茅苍术叶片可培养内生细菌多样性及其促生潜力 周佳宇,贾永,王宏伟,等 (1106)
- 低温对蝶蛹金小蜂卵成熟及其数量动态的影响 夏诗洋,孟玲,李保平 (1118)
- 六星黑点豹蠹蛾求偶行为与性信息素产生和释放的时辰节律 刘金龙,荆小院,杨美红,等 (1126)
- 氟化物对家蚕血液羧酸酯酶及全酯酶活性的影响 米智,阮成龙,李姣蓉,等 (1134)
- 不同温度对脊尾白虾胚胎发育与幼体变态存活的影响 梁俊平,李健,李吉涛,等 (1142)

种群、群落和生态系统

- 生态系统服务多样性与景观多功能性——从科学理念到综合评估 吕一河,马志敏,傅伯杰,等 (1153)
- 不同端元模型下湿地植被覆盖度的提取方法——以北京市野鸭湖湿地自然保护区为例 崔天翔,官兆宁,赵文吉,等 (1160)
- 基于光谱特征变量的湿地典型植物生态类型识别方法——以北京野鸭湖湿地为例 林川,官兆宁,赵文吉,等 (1172)
- 浮游植物群落对海南小水电建设的响应 林彰文,林生,顾继光,等 (1186)
- 菹草种群内外水质日变化 王锦旗,郑有飞,王国祥 (1195)
- 南方红壤区 3 种典型森林恢复方式对植物群落多样性的影响 王芸,欧阳志云,郑华,等 (1204)
- 人工油松林恢复过程中土壤理化性质及有机碳含量的变化特征 胡会峰,刘国华 (1212)
- 不同区域森林火灾对生态因子的响应及其概率模型 李晓炜,赵刚,于秀波,等 (1219)

景观、区域和全球生态

- 快速城市化地区景观生态安全时空演化过程分析——以东莞市为例 杨青生,乔纪纲,艾彬 (1230)
- 海岸带生态系统健康评价中能质和生物多样性的差异——以江苏海岸带为例 唐得昊,邹欣庆,刘兴健 (1240)
- 干湿交替频率对不同土壤 CO₂ 和 N₂O 释放的影响 欧阳扬,李叙勇 (1251)

西部地区低碳竞争力评价..... 金小琴,杜受祜 (1260)

基于 HEC-HMS 模型的八一水库流域洪水重现期研究 郑 鹏,林 韵,潘文斌,等 (1268)

基于修正的 Gash 模型模拟小兴安岭原始红松林降雨截留过程 柴汝杉,蔡体久,满秀玲,等 (1276)

长白山北坡不同林型内红松年表特征及其与气候因子的关系..... 陈 列,高露双,张 赞,等 (1285)

资源与产业生态

河西走廊绿洲灌区循环模式“农田-食用菌”生产系统氮素流动特征 李瑞琴,于安芬,赵有彪,等 (1292)

施肥对旱地花生主要土壤肥力指标及产量的影响..... 王才斌,郑亚萍,梁晓艳,等 (1300)

耕作措施对土壤水热特性和微生物生物量碳的影响..... 庞 绪,何文清,严昌荣,等 (1308)

基于改进 SPA 法的耕地占补平衡生态安全评价 施开放,刁承泰,孙秀锋,等 (1317)

学术争鸣

基于生态-产业共生关系的林业生态安全测度方法构想 张智光 (1326)

中国生态学会 2013 年学术年会征稿须知 (I)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 318 * zh * P * ¥90.00 * 1510 * 34 * 2013-02



封面图说: 石羊河——石羊河流域属大陆性温带干旱气候,气候特点是:日照充足、温差大、降水少、蒸发强、空气干燥。石羊河源出祁连山东段,河系以雨水补给为主,兼有冰雪融水成分。上游的祁连山区降水丰富,有雪山冰川和残留林木,是河流的水源补给地。中游流经河西走廊平地,形成武威和永昌等绿洲,下游是民勤,石羊河最后消失在腾格里沙漠中。随着石羊河流域人水矛盾的不断加剧,水资源开发利用严重过度,荒漠化日趋严重,民勤县的生态环境已经相当恶化,继续下去将有可能变成第二个“罗布泊”。

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/stxb201204190567

雷焱, 郝志鹏, 陈保冬. 土著菌根真菌和混生植物对羊草生长和磷营养的影响. 生态学报, 2013, 33(4): 1071-1079.

Lei Y, Hao Z P, Chen B D. Effects of indigenous AM fungi and neighboring plants on the growth and phosphorus nutrition of *Leymus chinensis*. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(4): 1071-1079.

土著菌根真菌和混生植物对羊草生长和磷营养的影响

雷 焱, 郝志鹏, 陈保冬*

(中国科学院生态环境研究中心, 城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085)

摘要:植物种间相互作用直接影响植物生长、根系可塑性及养分吸收, 而与植物共生的丛枝菌根真菌可以改变植物个体和种间养分资源的分配, 具有协调种间竞争的潜力。以我国北方草甸草原建群种羊草 (*Leymus chinensis*) 和混生植物紫花苜蓿 (*Medicago sativa*) 及独行菜 (*Lepidium spetalum*) 为供试植物, 通过模拟盆栽试验, 研究了土著菌根真菌和混生植物对羊草生长、根系形态及磷营养的影响。试验结果表明, 土著菌根真菌能够与羊草及紫花苜蓿形成良好共生, 而独行菜根内基本未形成菌根共生结构。土著菌根真菌显著降低了羊草及独行菜的生物量, 但促进了紫花苜蓿的生长; 混种紫花苜蓿显著促进了羊草的生长, 而混种独行菜则显著抑制了羊草的生长。土著菌根真菌对羊草根系形态的影响表现出与植株生物量类似的趋势, 但不同混生植物对羊草根系生长均无显著影响。土著菌根真菌和混生植物对羊草植株磷含量均无显著影响。与混生植物相比, 羊草具有较高的比根长和磷吸收能力, 这也解释了其负向菌根依赖性。研究证实了菌根真菌和植物种间相互作用均是影响草原优势植物生长和根系发育的重要因素, 深入研究其交互作用对于科学管理草地生态系统, 维持植物群落的稳定性和生态系统生产力具有重要意义。

关键词:丛枝菌根; 羊草; 植物种间相互作用; 根系形态; 植物磷营养

Effects of indigenous AM fungi and neighboring plants on the growth and phosphorus nutrition of *Leymus chinensis*

LEI Yao, HAO Zhipeng, CHEN Baodong*

State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100085, China

Abstract: Plant interactions may directly affect plant growth, root plasticity and nutrient uptake, while arbuscular mycorrhizal (AM) symbioses can redistribute resources among plants at both individual and community levels, and consequently mediate plant interactions and influence plant community structure. In the present study, a pot experiment was carried out to investigate the influences of indigenous mycorrhizal fungi and neighboring plants, *Medicago sativa* and *Lepidium spetalum*, on the growth and phosphorus nutrition of *Leymus chinensis*, a dominant grass species on the meadow steppe in North China. At experimental harvest, plant growth, root morphology and phosphorus uptake of both plant species were recorded. The results indicated that the indigenous mycorrhizal fungi formed symbiosis with *L. chinensis* and *M. sativa*, but not with non-host plant, *L. spetalum*, while in the non-mycorrhizal treatment where mycorrhizal fungi were eliminated by radiation sterilization, the mycorrhizal colonization rates were generally lower than 2%. The indigenous mycorrhizal fungi significantly suppressed the growth of *L. chinensis* and *L. spetalum*, but promoted growth of *M. sativa*. Neighboring plant *M. sativa* promoted, but *L. spetalum* suppressed the growth of *L. chinensis*. Analysis of variance showed that mycorrhizal fungi and neighboring plants exhibited significant interactions on mycorrhizal colonization. The effects of

基金项目:中国科学院知识创新工程重要方向性项目(KZCX2-YW-BR-17); 国家自然科学基金面上项目(41071178); 城市与区域生态国家重点实验室自主方向项目(SKLURE2008-1-03)

收稿日期: 2012-04-19; 修订日期: 2012-10-23

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: bdchen@cees.ac.cn

mycorrhizal fungi on the root length and root surface area were similar with that on plant biomass, but plant combinations showed no significant effects. As for plant phosphorus concentration, both mycorrhizal fungi and plant combinations showed no significant effects. Compared to the neighboring plants, *L. chinensis* had higher relative root length and P uptake efficiency, which can well explain its negative responses to mycorrhizal fungi. The study demonstrated that mycorrhizal fungi and plant interactions are important factors influencing plant growth and root proliferation. Further studies are still necessary for a better understanding of the importance of mycorrhizal fungi in maintaining plant community stability and productivity, and also for sustainable management of the grasslands.

Key Words: arbuscular mycorrhiza; *Leymus chinensis*; plant interactions; root morphology; phosphorus nutrition

生活于同一生境中的植物在不同物种间存在着复杂的相互作用。尽管农业栽培间套作模式中种间促进作用得到了广泛认识^[1],但自然生态系统中植物种间相互作用则多表现为争夺空间和资源而直接或间接抑制彼此生长的竞争现象^[2]。近年来,植物种间相互作用研究的重点由最初的地上部相互作用^[3]向地下部相互作用转移^[4-7]。植物在养分胁迫条件下,可以通过其根系发育所具有的高度可塑性,改变根系形态结构,提高其自身对土壤中养分的吸收利用能力^[8-9],而植物种间相互过程中根系形态发生改变也是植物适应竞争的重要机制^[10-11]。

另一方面,很多研究表明土壤关键功能微生物对植物个体生长和群落演替具有着重要的影响^[12]。作为迄今发现的与植物关系最为密切的土壤微生物之一,丛枝菌根真菌(arbuscular mycorrhizal fungi,简称AMF)在自然界中广泛存在,能与绝大多数陆地高等植物形成共生体系^[13]。菌根可改善植物对土壤中弱移动性矿质养分(如磷素)的吸收,促进植物的生长。菌根根外菌丝可以在不同植物间中形成菌丝网络,即使非菌根植物也会受菌根真菌的影响^[14]。菌根真菌具有改变植物间资源分配,影响植物种间相互作用的潜力^[15],其在不同植物个体之间的养分交换、能量流动、信息传递,以及维持生态系统生产力、多样性和系统稳定性方面都具有潜在重要作用^[16-17]。

由于环境变化和人类活动的干扰,我国北方草地生态系统普遍面临着严重的退化问题。基于植物种间关系和菌根共生体系对植物群落结构和生产力的潜在影响,本研究以我国北方草甸草原优势植物羊草(*Leymus chinensis* (Trin. ex Bunge) Tzvelev)为研究对象,以豆科植物紫花苜蓿(*Medicago sativa* L.)^[18]及十字花科植物独行菜(*Lepidium spetalum* L.)^[19]为混生植物进行模拟盆栽试验,以土壤灭菌处理为参照,着重考察土著菌根真菌和不同混生植物对羊草生长及磷营养的影响,旨在全面认识菌根真菌在维持草地植物群落结构和生产力方面的重要作用,为科学管理草地生态系统提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 培养基质

供试土壤采自中国科学院植物研究所多伦恢复生态学试验示范研究站(42.18°N,116.48°E)。土壤理化性质按鲍士旦主编《土壤农化分析》(第三版)所述方法测定^[20],具体如下:pH值(水土比1:2.5)7.02,速效磷(0.5 mol/L NaHCO₃提取,钼锑抗比色)6.73 mg/kg,速效氮(碱解氮)8.46 mg/kg。土壤过2 mm筛待用。未灭菌原始土壤菌根真菌孢子密度为17个孢子/g。去除土著菌根真菌处理采用辐射灭菌(25 kGy,中国农业科学院原子能所辐照中心),而后添加土壤微生物滤液^[21]以保障除菌根真菌之外灭菌土和原始土具有基本一致的微生物区系。土壤微生物滤液由土壤与灭菌水按体积1:40比例混合后,于100 r/min匀速振荡30 min,然后经双层滤纸(孔径2—4 μm)过滤获得。试验时过滤液与灭菌土壤按照体积1:40比例添加。

1.1.2 供试植物

供试植物为羊草(*L. chinensis*)、紫花苜蓿(*M. sativa*)和独行菜(*L. spetalum*)。挑选大小一致且籽粒饱满

的种子,用 10% H_2O_2 对种子进行表面消毒 10 min,再以蒸馏水冲洗多次后于恒温培养箱 25℃ 催芽,出芽后播种。

1.2 试验设计

试验共包括两种土壤处理:保留土著菌根真菌(+M)和去除土著菌根真菌(-M);3种植物组合:羊草和羊草(L.c + L.c)、羊草和紫花苜蓿(L.c + M.s),以及羊草和独行菜(L.c + L.s)混种。试验共 6 个处理,每个处理设 4 个重复。

1.3 试验实施

试验中采用容积 800 mL 的塑料盆(上口径 15 cm,下口径 10 cm,高 13 cm)作为培养容器,每盆装土 1 kg。每盆中外围种植优势植物羊草,出苗两周后间苗,每盆留 30 株。中间定植 5 株紫花苜蓿或独行菜,并以中间定植羊草为对照处理。考虑到自然条件下优势植物和混生植物种群密度的差异,中间定植羊草株数(10 株)设定为两种混生植物的 2 倍。

试验在中国科学院生态环境研究中心人工智能温室中进行。试验期间保持室内温度为 15—25℃,空气湿度为 60%。植物生长期间定期浇用去离子水,称重法保持土壤重量含水量在 15%(田间持水量 70% 左右)。植物生长 13 周后收获。

1.4 收获与分析测定

将植株地上部分和根系分别收获,用自来水和去离子水冲洗干净。根据 3 种植物的根系形态特征区分和分离不同根系,采用扫描仪(Epson V700, Japan)分别将不同植物根系扫描成电子图像后,应用 Win-Rhizo(Regent, Canada)软件分析植物根长和根面积。每种植物的生物量、根长和根面积均以每盆总量为单位进行分析。选取部分根样剪成 1 cm 左右根段,采用曲利苯蓝-根段法测定根系菌根侵染率^[22]。剩余根系样品和植株地上部分置 80℃ 烘箱中烘 48 h 后称取植物干重(用于测定菌根侵染率的根系样品根据鲜重折算为干重后计入根系总干重),使用球磨机(Retsch-MM400, Germany)粉碎后待用。然后准确称取约 0.5000 g 粉碎植物样品,加入 10 mL 优级纯硝酸,微波消解萃取仪(CEM-MARS, France)消解,50 mL 容量瓶定容,定量滤纸过滤,最后用全谱直读等离子体发射光谱仪(Leeman-Prodigy, USA)测定植物全磷含量。

1.5 数据分析

所有试验数据用 Microsoft Excel 进行均值和标准误计算并作图,菌根侵染率通过反正弦(arcsin)转化,使用 SPSS 统计软件(SPSS 16.0 for Windows, SPSS Inc, Chicago, USA)对数据进行统计分析。对羊草相关数据采用双因素方差分析,根据方差分析结果对各处理进行多重比较。通过配对 T 检验分析每种混生植物观测指标在不同接种处理之间的差异显著性。

2 结果与分析

2.1 菌根侵染率

土壤未灭菌情况下,羊草根系可检测到典型的菌根共生结构,菌根侵染率均在 10% 以上(表 1)。混生植物紫花苜蓿与土著菌根真菌亦形成良好共生,而非菌根宿主植物独行菜鲜见菌根真菌侵染。植物组合对菌根侵染具有显著影响(表 1,表 2)。与混种羊草相比,混种独行菜情况下羊草菌根侵染率显著升高,而混种紫花苜蓿则无显著变化。去除菌根真菌处理中羊草和混生植物根中基本未见菌根真菌侵染迹象。

2.2 植株生长

土著菌根真菌和混生植物均能影响羊草的生长,且二者存在显著交互作用(图 1,表 2)。土著菌根真菌对羊草生长存在着显著的负效应。混种独行菜显著降低了羊草的生物量。各处理之间羊草根系生物量与地上部生物量表现出类似的变化趋势。

土著菌根真菌对混生植物的生长具有不同影响(图 1):显著降低了羊草的根系生物量(降低了 62.5%),地上部生物量也表现出相似的趋势,但差异不显著;显著提高了紫花苜蓿地上部和根系生物量(分别增加 87.9% 和 27.8%);显著降低了独行菜地上部和根系生物量(分别降低了 71.8% 和 53.6%)。

表 1 优势植物与混生植物的菌根侵染率

Table 1 Mycorrhizal colonization rates of dominant and neighboring plants			
植物组合 Plant combination	菌根处理 Mycorrhizal treatment	菌根侵染率 Mycorrhizal colonization rate/%	
		优势植物 Dominant plant	混生植物 Neighboring plant
L. c + L. c ^①	+M ^②	13.4±0.9 b ^③	19.6±4.0 *
	-M	0.4±0.1 c	0.2±0.1
L. c + M. s	+M	13.2±4.4 b	37.5±4.4 *
	-M	0.1±0.1 c	0.5±0.3
L. c + L. s	+M	27.6±3.1 a	0.4±0.1
	-M	0.3±0.1 c	1.7±1.4

① L. c; 羊草; M. s; 紫花苜蓿; L. s; 独行菜; ② +M; 保留土著菌根真菌; -M; 去除土著菌根真菌; ③ 表中数据为均值±标准差 (n=4); 对于优势植物, 经方差分析菌根处理和植物组合交互作用显著, 所以对所有试验处理统一进行多重比较; 对于混生植物, 对同一物种两个菌根处理进行配对 *T* 检验; 数值后标注不同小写字母或“*”表示相应处理之间差异显著 (*P*<0.05)

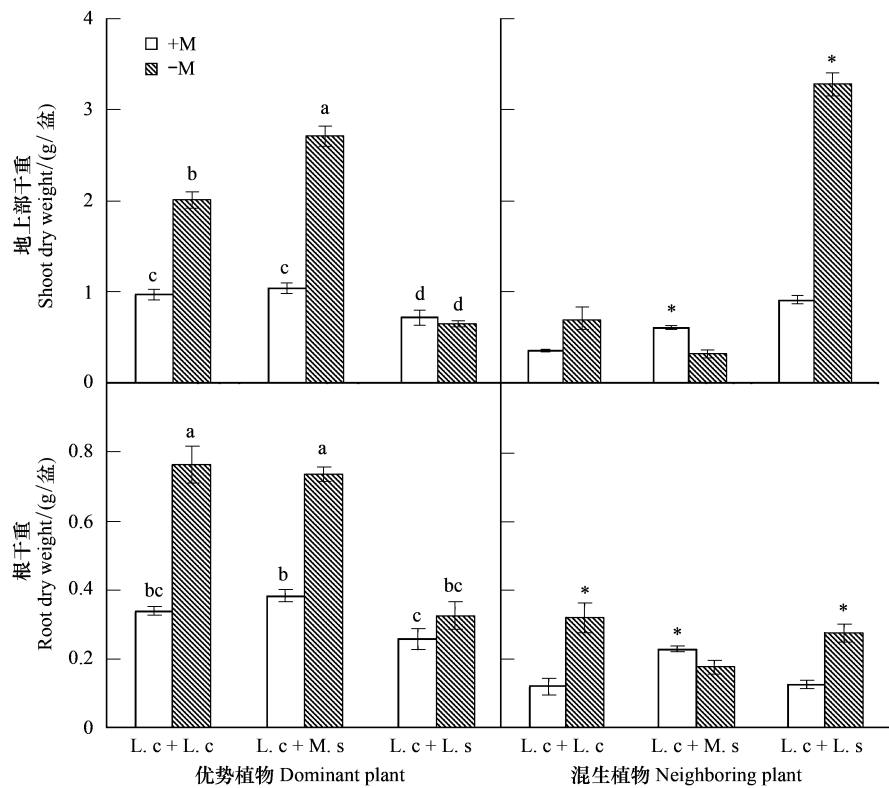


图 1 优势植物与混生植物的地上部和根系干重

Fig. 1 Shoot and root dry weights of dominant and neighboring plants

图中数据为各处理 4 个重复的均值, 误差线代表标准差; L. c; 羊草; M. s; 紫花苜蓿; L. s; 独行菜; +M; 保留土著菌根真菌; -M; 去除土著菌根真菌; 对于优势植物, 方差分析显示菌根处理和植物组合交互作用显著, 因而对所有试验处理统一进行多重比较; 对于混生植物, 对同一物种两个菌根处理进行配对 *T* 检验; 柱形上方标注不同小写字母或“*”表示相应处理之间存在显著差异 (*P* < 0.05)

2.3 植物根系形态

不同混生植物对羊草根系形态指标影响不显著, 且与菌根真菌不存在交互效应 (表 2), 而土著菌根真菌显著降低了羊草的根系长度和根表面积 (图 2)。土著菌根真菌显著降低了混生羊草和独行菜的根系长度和根表面积, 对混生紫花苜蓿则无显著影响。

2.3 植株磷含量

土著菌根真菌和植物种间相互作用对优势植物羊草磷含量没有显著影响 (图 3, 表 2), 而土著菌根真菌对混生植物植株磷含量存在不同的影响 (图 3); 对混生羊草磷含量无显著影响; 显著提高了紫花苜蓿的地上

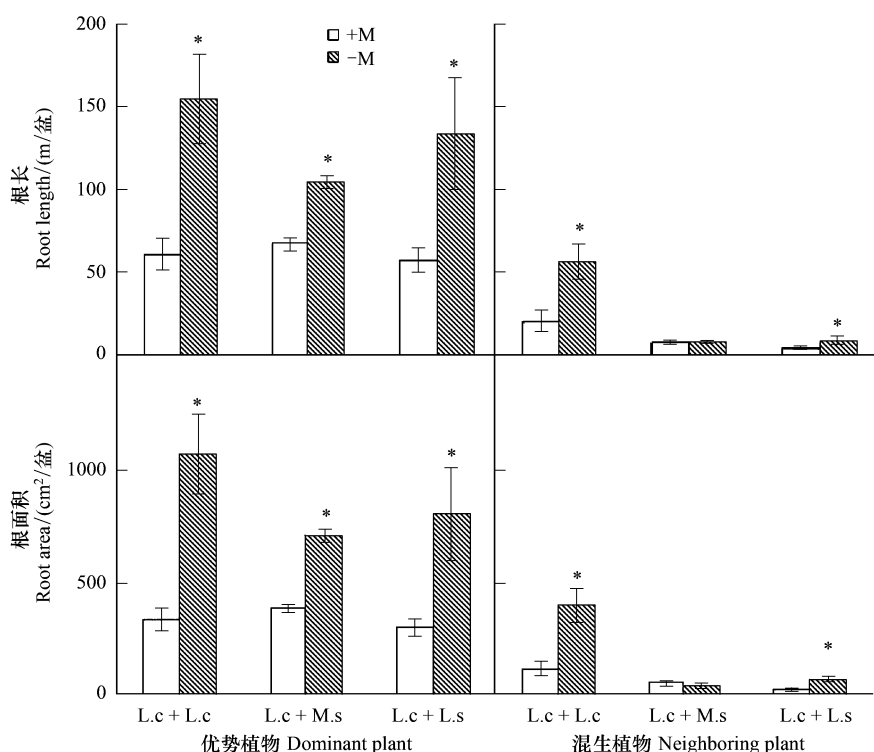


图2 优势植物与混生植物的根长和根面积

Fig. 2 Root length and surface area of dominant and neighboring plants

对于优势植物,方差分析显示不同植物组合对观测指标影响不显著,菌根处理和植物组合交互作用也不显著,因而以植物组合分组进行 *T* 检验;混生植物同样以植物组合分组进行 *T* 检验

部和根系磷含量(分别增加 17.14% 和 91.43%);显著降低了独行菜的地上部磷含量(降低 60.08%)。

2.4 植物单位根重的根长(比根长)和单位根表面积吸磷量(相对吸磷效率)

土著菌根真菌对优势植物羊草的比根长和根系相对吸磷效率的影响均不显著,且与混生植物不存在交互作用,而不同混生植物显著影响羊草的单位根干重的根长和单位根表面积吸磷量(图 4,表 2)。

土著菌根真菌对混生植物比根长无显著影响,但与其它混生植物相比,单位重量羊草根系具有较长的根长(图 4)。土著菌根真菌显著增加了紫花苜蓿的根系相对吸磷效率(图 4)。

3 讨论

羊草是我国北方草甸草原主要建群种之一,对于草原生态系统结构和功能稳定具有重要意义。本试验采用控制模拟试验,证实了丛枝菌根真菌和混生植物可共同影响羊草的生长和根系形态,揭示了丛枝菌根真菌在草原植物群落生态中的潜在作用。研究结果为应用菌根技术促进退化草地生态恢复及草地生态系统科学管理提供了理论依据。

本研究采用土壤灭菌后回接土壤微生物滤液的方法构建去除土著菌根真菌处理,该处理中的优势植物及混生植物均未形成菌根共生(表 1),表明试验处理达到了预期效果。土著丛枝菌根真菌菌群对羊草、紫花苜蓿和独行菜 3 种植物的侵染率存在显著差异,这在一定程度上是由植物种类自身的特性及其与菌根真菌的适合性所决定的。紫花苜蓿是典型的多年生豆科牧草,通常情况下具有较强的菌根依赖性,并被用作菌根研究的一种模式植物。本试验中紫花苜蓿菌根侵染率明显高于羊草,也对菌根共生表现出积极的生长响应。羊草的菌根侵染率低于紫花苜蓿,而且菌根侵染导致其生物量降低,这与羊草具有发达的根系和较强的养分获取能力相关。对于典型非菌根宿主植物独行菜而言,尽管其基本未受菌根侵染,但和其它植物共存在菌根际(mycorrhizosphere)环境之中,因此其生长和矿质营养也受到菌根的深刻影响。与此同时,混生植物也能够影

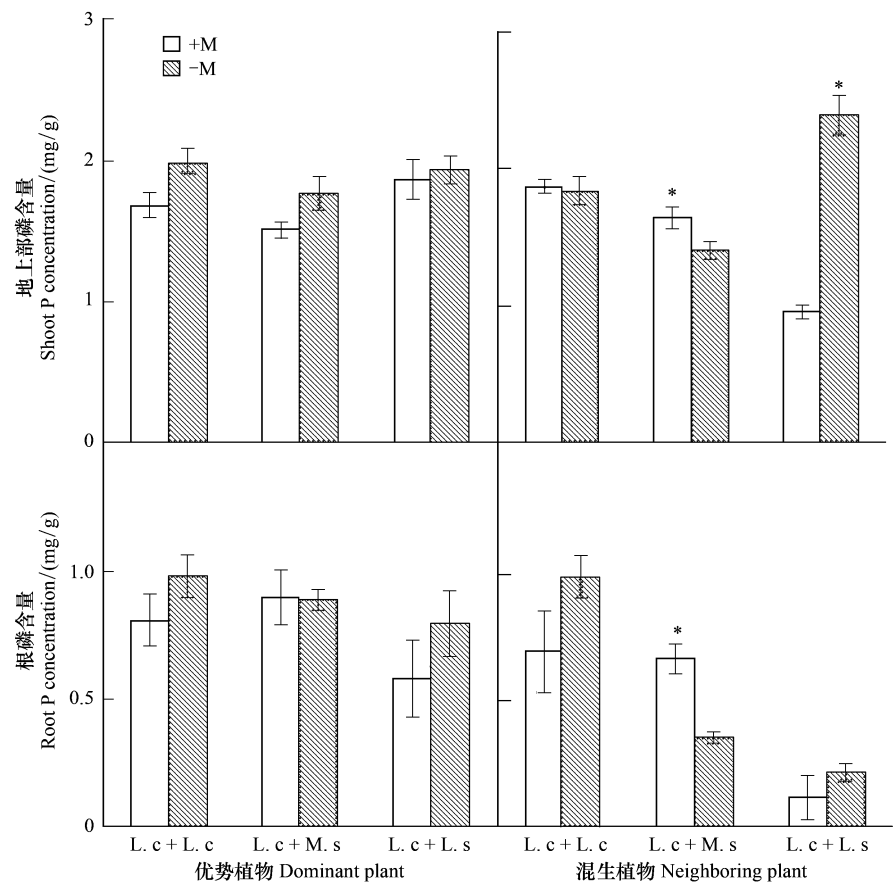


图3 优势植物与混生植物的地上部和根系磷含量

Fig. 3 Shoot and root phosphorus concentration of dominant and neighboring plants

对于优势植物,方差分析显示不同植物组合对观测指标影响不显著,菌根处理和植物组合交互作用也不显著,因而以植物组合分组进行 *T* 检验;混生植物同样以植物组合分组进行 *T* 检验

响到羊草菌根的形成和发育。本试验结果显示混种独行菜显著促进了菌根真菌对羊草根系的侵染(表1),这与一些研究中前茬种植十字花科植物会降低后茬植物菌根侵染率的结果不相符^[23],但 Neumann 和 George 的研究结果表明菌根真菌缺陷型突变体会促进混种的野生型番茄的菌根侵染^[24],也有研究表明十字花科植物根系分泌物同样可以促进菌根的孢子萌发和共生的形成^[25]。

表2 优势植物羊草试验数据的双因素方差分析

Table 2 Two-way ANOVA of experimental data from dominant plants

显著性 Significance	菌根侵染率 Mycorrhizal colonization rate	地上部干重 Shoot biomass	根系干重 Root biomass	根长 Root Length	根面积 Root area	地上部 磷浓度 Shoot P concentration	根系磷浓度 Root P concentration	单位根干 重的根长	单位根面积 吸磷量 Root P content per area
菌根 M	**	**	**	**	**	*	ns	ns	ns
植物 P	**	**	**	ns	ns	ns	ns	**	**
交互作用 M×P	**	**	**	ns	ns	ns	ns	ns	ns

双因素方差分析, ** 表示在 $P < 0.01$ 水平差异显著; * 表示在 $P < 0.05$ 水平差异显著; ns 表示作用不显著

不同植物对菌根真菌的依赖性存在很大差异,其菌根效应可以是正的、中性的或负的。本研究中供试土壤 P 元素基本能够满足植物生长需要(图3),土著菌根真菌对优势植物羊草的生长和养分吸收表现出显著的

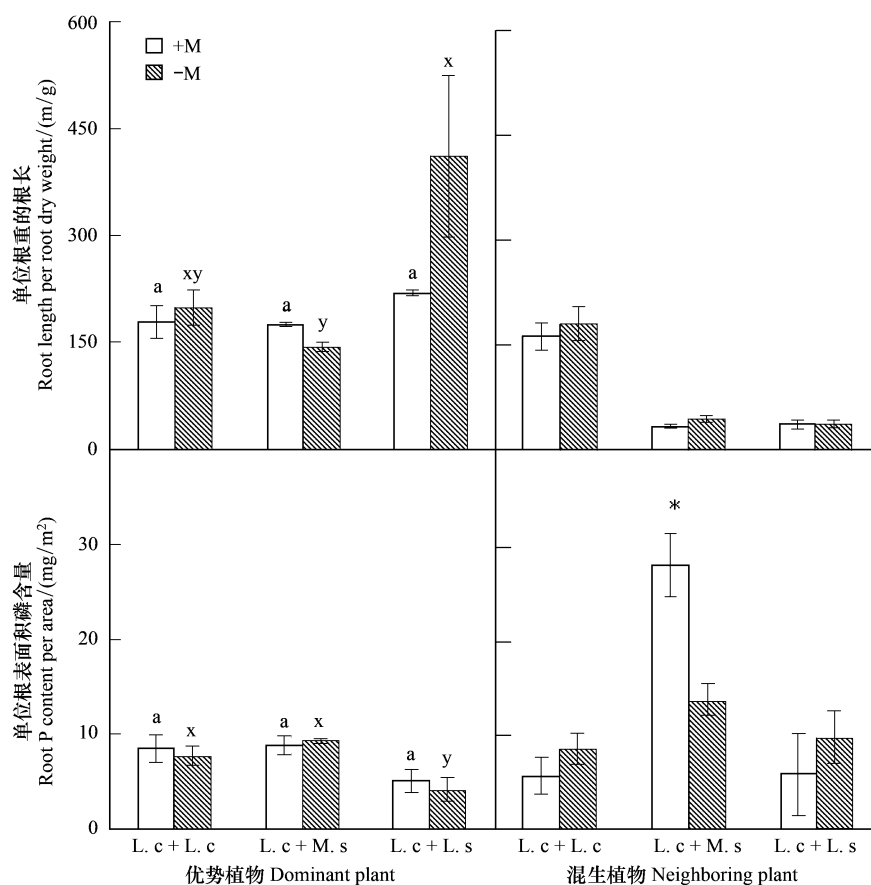


图 4 优势植物与混生植物的比根长和单位根表面积吸磷量

Fig. 4 Specific root length and phosphorus uptake efficiency of dominant and neighboring plants

对于优势植物,方差分析结果显示菌根处理对观测指标影响不显著,菌根处理和植物组合无显著交互作用,因而以菌根处理分组进行多重比较;混生植物以植物组合分组进行 *T* 检验

负效应(图 1)。菌根真菌与宿主植物间的共生关系是建立在互惠互利基础上的,即菌根真菌向宿主植物提供养分,而从植物那里获得生长所需的光合产物。当土壤有效养分供应充足情况下,宿主植物和菌根真菌之间的互惠共生关系可能就转变为一种偏利共生关系:菌根真菌从宿主植物获取光合产物,但其帮助宿主植物吸收的矿质养分对于植物生长已是无足轻重,因而菌根共生对植物生长没有积极影响,甚至会导致植物生物量下降。同时,植物的菌根依赖性也与植物自身的许多特性相关,如须根系和根毛数量等,须根系和根毛发达的植物其菌根依赖性也相对较弱^[26]。本研究中根系形态分析结果同样表明羊草具有较高的比根长,其生长对菌根真菌也表现出负向响应(图 2,图 4)。相比之下,紫花苜蓿则表现出了较高的菌根依赖性,这与之前的很多研究结果(如黄晶等^[27])是一致的。

植物种间相互作用受多种因素的综合影响,如养分竞争、根系分泌物的化感作用、根系自身识别机制等^[10,28],其中土壤微生物在其中的作用也受到越来越多的关注^[12]。很多研究表明,丛枝菌根真菌能对植物多样性、群落结构、资源分配和系统生产力产生显著影响^[14-16]。丛枝菌根真菌与宿主之间较弱的选择性使其在植物群落中可同时侵染多个宿主,并通过菌丝网络将整个植物群落联系在一起,从而影响植物系统内的资源配置,进而调节植物种间相互作用。van der Heijden 等发现,不同的 AMF 能够显著影响禾本科羽状短柄草 *Brachypodium pinnatum* 和唇形科夏枯草 *Prunella vulgaris* 的共存方式和 P 资源在两种宿主间的分配^[29]。本研究中不同混生植物的菌根依赖性存在明显差异,因此当其与优势植物羊草共存时,菌根真菌也表现出不同的效应。其中,混种独行菜处理显著降低了优势植物羊草的生物量,土著菌根真菌的存在则较好的维持了优势植物羊草的生物量,或者说抵消了独行菜对羊草生长的抑制效应。这项结果证实了丛枝菌根真菌可以调节植

物种间相互作用,对不同植物种间获得的资源进行平衡分配,降低某些物种的优势度,促进更多植物物种共存,从而增加植物群落的稳定性和生产力^[14]。

本研究证实了土著菌根真菌和混生植物会深刻影响到草原优势植物羊草的生长,同时菌根真菌可以平衡优势物种与邻近物种间的竞争,进而协调植物种间关系。针对菌根在植物个体、群落以及生态系统等不同层次的具体表现,深入分析菌根在植物群落演替中的作用、进一步阐明其在整个生态系统中的功能和生态意义,对于科学管理草地生态系统,保持系统稳定性和生产力具有重要意义。

致谢:吉林省吉生羊草良种站成文革先生为本试验提供羊草种子,北京城市学院吕英硕和王娜娜同学协助完成根系扫描测定,特此致谢。

References:

- [1] Li L, Li S M, Sun J H, Zhou L L, Bao X G, Zhang H G, Zhang F S. Diversity enhances agricultural productivity via rhizosphere phosphorus facilitation on phosphorus-deficient soils. *Proceedings of National Academy of Sciences USA*, 2007, 104(27): 11192-11196.
- [2] Semchenko M, Zobel K, Hutchings M J. To compete or not to compete: an experimental study of interactions between plant species with contrasting root behaviour. *Evolutionary Ecology*, 2010, 24(6): 1433-1445.
- [3] Faurie O, Sinoquet H. Radiation interception, partitioning and use in grass-clover mixture. *Annals of Botany*, 1996, 77(10): 35-45.
- [4] O'Brien E, Gersani M, Brown J S. Root proliferation and seed yield in response to spatial heterogeneity of below-ground competition. *New Phytologist*, 2005, 168(2): 401-412.
- [5] Hodge A. Root decisions. *Plant Cell and Environment*, 2009, 32(6): 628-640.
- [6] Murphy G P, Dudley S A. Above- and below-ground competition cues elicit independent responses. *Journal of Ecology*, 2007, 95(2): 261-272.
- [7] Schenk H J. Root competition: beyond resource depletion. *Journal of Ecology*, 2006, 94(4): 725-739.
- [8] Hodge A. Plastic plants and patchy soils. *Journal of Experimental Botany*, 2006, 57(2): 401-411.
- [9] Fang S, Gao X, Deng Y, Chen X, Liao H. Crop root behavior coordinates phosphorus status and neighbors: from field studies to three-dimensional in situ reconstruction of root system architecture. *Plant Physiology*, 2011, 15(3): 1277-1285.
- [10] Craine J. M. Competition for nutrients and optimal root allocation. *Plant and Soil*, 2006, 285(1/2): 171-185.
- [11] McNickle G G, St Clair C C, Cahill J F Jr. Focusing the metaphor: plant root foraging behavior. *Trends in Ecology and Evolution*, 2009, 24(8): 419-426.
- [12] Wolfe B E, Husband B C, Klironomos J N. Effects of a belowground mutualism on an aboveground mutualism. *Ecology Letters*, 2005, 8(2): 218-223.
- [13] Li X L, Feng G. *Eco-physiology of arbuscular mycorrhiza*. Beijing: Sino-Culture Press, 2001: 178-199.
- [14] Klironomos J, Zobel M, Tibbett M, Stock W D, Rillig M C, Parrent J L, Moora M, Koch A M, Facelli J M, Facelli E, Dickie I A, Bever J D. Forces that structure plant communities: quantifying the importance of the mycorrhizal symbiosis. *New Phytologist*, 2011, 189(2): 366-370.
- [15] Bever J D. Host-specificity of AM fungal population growth rates can generate feedback on plant growth. *Plant and Soil*, 2002, 244(1/2): 281-290.
- [16] Hart M M, Reader R J, Klironomos J N. Plant coexistence mediated by arbuscular mycorrhizal fungi. *Trends in Ecology and Evolution*, 2003, 18(8): 418-423.
- [17] van der Heijden, M G A, Klironomos J N, Ursic M, Moutoglis P, Streitwolf-Engel R, Boller T, Wiemken A, Sanders I R. Mycorrhizal fungal diversity determines plant biodiversity, ecosystem variability and productivity. *Nature*, 1998, 396(6706): 69-72.
- [18] Hou Z A, Li P F, Guo S W, Ye J. Effect of NaCl stress on growth and water use efficiency of *Aneurolepidium Chinense* and *Medicago sativa* L. in drying soil. *Scientia Agricultura Sinica*, 2002, 35(7): 894-900.
- [19] Chun L. The comparative study on soil characteristics and the characteristics of plant communities under different patterns of uses-as Mongolia Altiplano typical steppe example. MA. Sc. dissertation of Inner Mongolia Agricultural University, 2009, 26-27.
- [20] Bao S D. *Soil and Agrochemical analysis (3rd edition)*. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [21] Marschner P, Baumann K. Changes in bacterial community structure induced by mycorrhizal colonization in split-root maize. *Plant and Soil*, 2003, 251(2): 279-289.
- [22] Biermann B J, Linderman R G. Quantifying vesicular-arbuscular mycorrhizae: a proposed method towards standardization. *New Phytologist*, 1981, 87(1): 63-67.
- [23] Schreiner R P, Koide R T. Antifungal compounds from the roots of mycotrophic and non-mycotrophic plant species. *New Phytologist*, 1993, 123

(10): 99-105.

- [24] Neumann E, George E. Does the presence of arbuscular mycorrhizal fungi influence growth and nutrient uptake of a wild-type tomato cultivar and a mycorrhiza-defective mutant, cultivated with roots sharing the same soil volume? *New Phytologist*, 2005, 166(2): 601-609.
- [25] Giovannetti M, Sbrana C. Meeting a non-host: the behavior of AM fungi. *Mycorrhiza*, 1998, 8(3): 123-130.
- [26] Janos, D. P. Plant responsiveness to mycorrhizas differ from dependence upon mycorrhizas. *Mycorrhiza*, 2007, 17(2): 75-91.
- [27] Hang J, Ling W T, Sun Y D, Liu J. Impacts of arbuscular mycorrhizal fungi inoculation on the uptake of cadmium and zinc by alfalfa in contaminated soil. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(1): 99-105.
- [28] Falik O, Reides P, Gersani M, Novoplansky A. Self/non-self discrimination in roots. *Journal of Ecology*, 2003, 91(4): 525-531.
- [29] van der Heijden M G A, Wiemken A, Sanders I R. Different arbuscular mycorrhizal fungi alter coexistence and resource distribution between co-occurring plants. *New Phytologist*, 2003, 157(3): 569-578.

参考文献:

- [13] 李晓林, 冯固著. 丛枝菌根生理生态. 北京: 华文出版社, 2001: 178-199.
- [18] 侯振安, 李品芳, 郭世文, 冶军. NaCl 胁迫对苜蓿和羊草生长与水分利用的影响. *中国农业科学*, 2002, 35(7): 894-900.
- [19] 春兰. 不同利用方式下土壤特性及植被群落特征对比研究——以蒙古高原典型草原为例. 内蒙古农业大学硕士学位论文, 2009, 26-27.
- [20] 鲍士旦. 土壤农化分析(第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [27] 黄晶, 凌婉婷, 孙艳娣, 刘娟. 丛枝菌根真菌对紫花苜蓿吸收土壤中镉和锌的影响. *农业环境科学学报*, 2012, 31(1): 99-105.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 33, No. 4 February, 2013 (Semimonthly)

CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

- Concepts, processes and quantification methods of the forest water conservation at the multiple scales WANG Xiaoxue, SHEN Huitao, LI Xuyong, et al (1019)
- Advances in the study of stable isotope composition of leaf water in plants LUO Lun, YU Wusheng, WAN Shimin, et al (1031)
- Eco-environmental effects of urban landscape pattern changes: progresses, problems, and perspectives CHEN Liding, SUN Ranhao, LIU Hailian (1042)
- An overview of advances in distributional pattern of urban biodiversity MAO Qizheng, MA Keming, WU Jianguo, et al (1051)
- Ecological compensation boosted ecological protection and human well-being improvement LI Huimei, ZHANG Anlu (1065)

Autecology & Fundamentals

- Effects of indigenous AM fungi and neighboring plants on the growth and phosphorus nutrition of *Leymus chinensis* LEI Yao, HAO Zhipeng, CHEN Baodong (1071)
- Influences of AM fungi on plant growth and water-stable soil aggregates under drought stresses YE Jiashu, LI Tao, HU Yajun, et al (1080)
- The effect of transgenic cucumber with double strands RNA of *mapk* on diversity of rhizosphere bacteria CHEN Guohua, MI Baobin, LI Ying, et al (1091)
- The ambient ozone pollution and foliar injury of the sensitive woody plants in Beijing exurban region WAN Wuxing, XIA Yajun, ZHANG Hongxing, et al (1098)
- Diversity and plant growth-promoting potential of culturable endophytic bacteria isolated from the leaves of *Atractylodes lancea* ZHOU Jiayu, JIA Yong, WANG Hongwei, et al (1106)
- Effects of the low temperature treatment on egg maturation and its numerical dynamics in the parasitoid *Pteromalus puparum* (Hymenoptera: Pteromalidae) XIA Shiyang, MENG Ling, LI Baoping (1118)
- Circadian rhythm of calling behavior and sexual pheromone production and release of the female *Zeuzera leuconotum* Butler (Lepidoptera: Cossidae) LIU Jinlong, JING Xiaoyuan, YANG Meihong, et al (1126)
- Influence of fluoride on activity of carboxylesterase and esterase in hemolymph of *Bombyx mori* MI Zhi, RUAN Chenglong, LI Jiaorong, et al (1134)
- Effects of water temperature on the embryonic development, survival and development period of larvae of ridgetail white prawn (*Exopalaemon carinicauda*) reared in the laboratory LIANG Junping, LI Jian, LI Jitao, et al (1142)

Population, Community and Ecosystem

- Diversity of ecosystem services and landscape multi-functionality: from scientific concepts to integrative assessment LÜ Yihe, MA Zhimin, FU Bojie, et al (1153)
- Research on estimating wetland vegetation abundance based on spectral mixture analysis with different endmember model: a case study in Wild Duck Lake wetland, Beijing CUI Tianxiang, GONG Zhaoning, ZHAO Wenji, et al (1160)
- Identifying typical plant ecological types based on spectral characteristic variables: a case study in Wild Duck Lake wetland, Beijing LIN Chuan, GONG Zhaoning, ZHAO Wenji, et al (1172)
- Responses of phytoplankton community to the construction of small hydropower stations in Hainan Province LIN Zhangwen, LIN Sheng, GU Jiguang, et al (1186)
- Diurnal variation of water quality around *Potamogeton crispus* population WANG Jinqi, ZHENG Youfei, WANG Guoxiang (1195)
- Effects of three forest restoration approaches on plant diversity in red soil region, southern China WANG Yun, OUYANG Zhiyun, ZHENG Hua, et al (1204)
- Dynamics of soil physical-chemical properties and organic carbon content along a restoration chronosequence in *Pinus tabulaeformis* plantations HU Huifeng, LIU Guohua (1212)
- Probability models of forest fire risk based on ecology factors in different vegetation regions over China LI Xiaowei, ZHAO Gang, YU Xiubo, et al (1219)

Landscape, Regional and Global Ecology

- Landscape ecological security dynamics in a fast growing urban district: the case of Dongguan City YANG Qingsheng, QIAO Jigang, AI Bin (1230)
- The difference between exergy and biodiversity in ecosystem health assessment: a case study of Jiangsu coastal zone TANG Dehao, ZOU Xinqing, LIU Xingjian (1240)
- Impacts of drying-wetting cycles on CO₂ and N₂O emissions from soils in different ecosystems OUYANG Yang, LI Xuyong (1251)
- Evaluation of low-carbon competitiveness in Western China JIN Xiaoqin, DU Shouhu (1260)
- Flood return period analysis of the Bayi Reservoir Watershed based on HEC-HMS Model ZHENG Peng, LIN Yun, PAN Wenbin, et al (1268)
- Simulation of rainfall interception process of primary korean pine forest in Xiaoxing'an Mountains by using the modified Gash model CHAI Rushan, CAI Tiju, MAN Xiuling, et al (1276)
- Characteristics of tree-ring chronology of *Pinus koraiensis* and its relationship with climate factors on the northern slope of Changbai Mountain CHEN Lie, GAO Lushuang, ZHANG Yun, et al (1285)

Resource and Industrial Ecology

- Nitrogen flows in "crop -edible mushroom" production systems in Hexi Corridor Oasis Irrigation Area LI Ruiqin, YU Anfen, ZHAO Youbiao, et al (1292)
- Effects of fertilization on soil fertility indices and yield of dry-land peanut WANG Caibin, ZHENG Yaping, LIANG Xiaoyan, et al (1300)
- Effect of tillage and residue management on dynamic of soil microbial biomass carbon PANG Xu, HE Wenqing, YAN Changrong, et al (1308)
- Evaluation of eco-security of cultivated land requisition-compensation balance based on improved set pair analysis SHI Kaifang, DIAO Chengtai, SUN Xiufeng, et al (1317)

Opinions

- Methodology for measuring forestry ecological security based on ecology-industry symbiosis: a research framework ZHANG Zhiguang (1326)

《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,探索自然奥秘,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

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 4 期 (2013 年 2 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 4 (February, 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