

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

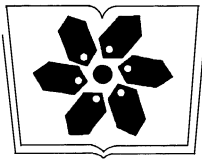
Acta Ecologica Sinica



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/stxb201205140707

叶佳舒, 李涛, 胡亚军, 郝志鹏, 高彦征, 王幼珊, 陈保冬. 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. 生态学报, 2013, 33(4): 1080-1090.

Ye J S, Li T, Hu Y J, Hao Z P, Gao Y Z, Wang Y S, Chen B D. Influences of AM fungi on plant growth and water-stable soil aggregates under drought stresses. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(4): 1080-1090.

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^{1,2}, 李 涛², 胡亚军², 郝志鹏², 高彦征¹, 王幼珊³, 陈保冬^{2,*}

(1. 南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095;

2. 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;

3. 北京市农林科学院植物营养与资源研究所, 北京 100097)

摘要:采用分室培养系统,模拟正常水分和干旱胁迫两种环境条件,探讨不同丛枝菌根真菌(arbuscular mycorrhizal fungi, AMF)对紫花苜蓿(*Medicago sativa* L.)生长和土壤水稳性团聚体的影响。试验条件下,*Glomus intraradices*对苜蓿根系的侵染率均显著高于*Acaulospora scrobiculata*和*Diversispora spurcum*接种处理。正常水分条件下,供试 AM 真菌均能显著提高植株生物量及磷浓度。干旱胁迫显著抑制了植株生长和菌根共生体发育,总体上菌根共生体对植株生长没有明显影响,接种*D. spurcum*甚至趋于降低植株生物量;同时,仅有*G. intraradices*显著提高了植株磷浓度。AM 真菌主要影响到> 2 mm 的水稳性团聚体数量,以*G. intraradices*作用效果最为显著。在菌丝室中,*G. intraradices*显著提高了总球囊霉素含量。研究表明 AM 真菌对土壤大团聚体形成具有积极作用,而菌根效应因土壤水分条件和不同菌种而异,干旱胁迫下仅有*G. intraradices*对土壤结构和植物生长表现出显著积极作用。在应用菌根技术治理退化土壤时,需要选用抗逆性强共生效率高的菌株,对于不同 AM 真菌抗逆性差异的生物学与遗传学基础尚需进一步研究。

关键词:AM 真菌;干旱;土壤结构;水稳定性团聚体

Influences of AM fungi on plant growth and water-stable soil aggregates under drought stresses

YE Jiashu^{1,2}, LI Tao², HU Yajun², HAO Zhipeng², GAO Yanzheng¹, WANG Youshan³, CHEN Baodong^{2,*}

1 College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China

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

3 Institute of Plant Nutrition and Resources, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097, China

Abstract: In the present study the influences of different arbuscular mycorrhizal (AM) fungal species on the formation of water-stable soil aggregates and growth of *Medicago sativa* L. were examined under simulated drought stresses in a compartmented cultivation system. In addition to observations on mycorrhizal colonization, plant growth responses and soil aggregates, we also monitored soil chemo-physical properties and plant physiological responses for uncovering the mechanisms underlying mycorrhizal functions. The experimental results indicated that, root colonization by *Glomus intraradices* was significantly higher than those by the other two fungal species, *Acaulospora scrobiculata* and *Diversispora spurcum* irrespective to soil water conditions. Under well watered conditions, all three AM fungal species significantly

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:2012-05-14; 修订日期:2012-10-23

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

increased plant biomass and P concentrations; while drought stresses significantly inhibited plant growth and mycorrhizal colonization. There were no observable mycorrhizal effects on plant growth under drought stresses, meanwhile, inoculation with *D. spurcum* even reduced plant biomes, and only *G. intraradices* increased plant P concentrations. As for mycorrhizal effects on soil structure, AM fungi mainly affected water stable soil aggregates with particle size > 2 mm, and *G. intraradices* exhibited most prominent effects. Consistently, *G. intraradices* significantly increased the contents of glomalin-related soil proteins in the hyphal compartment of the cultivation system. The study clearly demonstrated the positive influences of AM fungi on formation of large soil aggregates and plant drought tolerance, while there was large variation among different AM fungal species. To make sure of successful ecological restoration of degraded ecosystem with assistance of mycorrhizal fungi, selection of tolerant AM fungal strains should be fully considered. At present, further study is still necessary to reveal the biological and molecular basis for the differences in stress tolerance of different AM fungal species.

Key Words: arbuscular mycorrhizal fungi; drought stress; soil structure; water stable aggregate

我国是世界上受土壤退化影响最严重的国家之一,而土壤侵蚀和水土流失是最主要、危害最严重的土壤退化形式^[1]。在退化土壤地区特别是退化荒地,水土流失严重地区以及沙漠化地区大力恢复植被是生态重建的必然选择,而改善土壤结构提高土壤保水保肥能力是进行植被重建的关键环节之一。

土壤结构的形成是土壤生态系统中物理、化学和生物诸因素综合作用的结果^[2]。在诸多影响因素中,生物因子对土壤结构的稳定起着重要作用。Díaz-Zorita 等人指出土壤大团聚体(>250 μm)主要是由土壤根系和真菌菌丝胶结作用形成,而微团聚体(<250 μm)则非常稳定,主要是通过多价阳离子桥和多糖形成^[3],即使经过 50a 轮作,其数量仍变化较小^[4]。充分挖掘植物和真菌的生物作用潜能将更有效地促进土壤大团聚体形成,从而稳定土壤结构。

在自然界中近 85% 的植物种类和几乎所有的农作物能够形成丛枝菌根(arbuscular mycorrhiza, AM)^[5]。AM 真菌不仅通过多种途径影响植物的矿质营养和生长发育过程,同时还能够在植物群落、植物个体根系和根外菌丝体三个层次上对土壤结构产生深刻影响^[6]。AM 真菌及其多样性是植物群落构成的重要影响因素^[7],而植物群落组成的变化将会影响土壤结构。在个体根系层次,菌根真菌能改变植物根系形态^[8],最终能影响根系对土壤的穿透^[9]和缠绕作用^[10]。在菌丝体层次,AM 真菌通过生物化学作用、生物作用和生物物理作用深刻地影响着土壤结构。菌丝体产生的球囊霉素(Glomalin)具有“超级胶水”的性能,比其他土壤碳水化合物化合物黏附土壤颗粒的能力强 3—10 倍^[11-12],因而在土壤颗粒黏附成大聚合体的过程中发挥着重要作用。从生物物理作用角度,根外菌丝能通过物理缠结作用,菌丝交结作用^[13]以及改变土壤干湿循环作用^[14],促进土壤团聚体的形成。试验数据表明,AM 真菌对土壤大团聚体的形成与稳定具有重要作用^[15],而根据“团聚体形成等级学说”,微团聚体形成在很大程度上又受到大团聚体周转的影响^[16]。可见,AM 真菌作为大多数植物根系和土壤密切联系的桥梁,能够在不同层次,运用不同的作用,促进土壤团聚体的形成,改善土壤结构,进而改善土壤的耕性和土壤肥力,减少土壤侵蚀和水土流失,保持土壤生态系统的稳定性。

有关 AM 真菌影响土壤结构的效应及机制已有较为系统深入的研究^[6, 17],最近的研究报道也揭示了不同种属 AM 真菌影响土壤结构作用潜力的差异^[18]。然而,目前为止对于不同水分条件下 AM 真菌对土壤水稳性团聚体形成和结构稳定性的影响尚未见报道。众所周知,水分条件是土壤团聚体和土壤结构形成的重要影响因素,干湿交替对于土壤团粒结构形成具有关键作用^[19],而施加保水剂则通常被作为改善土壤结构和水分状况的重要技术措施^[20-21]。另一方面,土壤水分条件也直接影响到菌根共生体的发育和机能。干旱胁迫下,菌根侵染率通常会严重下降^[22-23]。基于此,本研究选择菌根研究模式植物紫花苜蓿(*Medicago sativa* L.)为植物材料,通过分室盆栽试验研究干旱胁迫下不同种属 AM 真菌对紫花苜蓿生长和土壤团聚体形成的影响,同时综合分析土壤理化性质和植物生理指标以揭示菌根作用机制,旨在为筛选具有干旱生态适应性的菌株用于退化土壤生态恢复提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验装置

本试验采用三分室培养系统:中间分室为植物生长室(PC);一侧分室以孔径 1 mm 粗尼龙网与植物生长室分隔,允许根系和根外菌丝通过,作为菌根室(MC);另一侧分室以孔径 37 μm 的尼龙网与植物生长室分隔,仅允许菌丝通过,作为菌丝室(HC)。分室培养系统长(3+3+3)cm,宽 10 cm,高 12 cm。应用这种培养系统可比较分析根系和菌丝对水稳定性土壤团聚体的影响,从而揭示 AM 真菌影响土壤结构的直接和间接作用。

1.2 试验材料

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°02'N, 116°17'E),土壤基本理化性质:pH 值(水土比 1:2.5)7.02,速效磷(0.5 mol/L NaHCO_3 提取,钼锑抗比色)6.73 mg/kg,全氮(元素分析仪,Vario ELⅢ, Elementar company, Germany)0.17%,有机质(重铬酸钾氧化法)30.45 g/kg,最大田间持水量(环刀法)24.22%。土壤风干后过 2 mm 筛,送至中国农业科学院原子能所辐照中心采用 25 kGy γ 射线辐照灭菌。将土壤以每盆用量 1.08 kg 分装到干净自封袋内,加入基础养分:30 mg/kg P,120 mg/kg N 和 120 mg/kg K。最后,加入 10 mL 土壤微生物过滤液,与土壤混匀风干后装入盆中。土壤微生物过滤液以未灭菌土壤与无菌水体积分数 1:40 混合,100 r/min 匀速振荡 30 min,以双层孔径 2—4 μm 滤纸过滤获得。

供试植物:紫花苜蓿(*Medicago sativa* L.),品种为“阿尔冈金”,购自中国农业科学院。植物种子以 10% H_2O_2 表面消毒 10 min,催芽后播种。

供试 AM 真菌菌种:细凹无梗囊霉(*Acaulospora scrobiculata* Trappe BGC HK02A)、沾屑多孢囊霉(*Diversispora spurcum* syn. *Glomus spurcum* Pfeiffer, Walker & Bloss BGC SD03)和根内球囊霉(*Glomus intraradices* Schenck and Smith BGC AH01)。3 种菌剂均由北京市农林科学院中国丛枝菌根真菌种质资源库(BGC)提供,按照 30 g/kg 土菌剂量,采用湿筛-倾注-孢子离心法将孢子筛出,以孢子悬浮液形式加入植物生长室,并与植物生长室土壤搅拌均匀。未接种对照加入等体积孢子滤液(由孢子悬浮液通过双层慢速定量滤纸获得),以保证土壤中微生物区系一致。

1.3 试验设计

对紫花苜蓿分别接种 *A. scrobiculata*、*D. spurcum* 或 *G. intraradices*,同时设不接种对照。正常水分处理土壤重量含水量为 15% (相当于 70% 最大田间持水量),干旱处理为 7%,幼苗生长两周后开始进行不同水分处理。试验为双因素完全随机区组设计,共 8 个处理,每处理重复 4 次,总计 48 盆。

1.4 试验管理

试验在中国科学院生态环境研究中心智能温室中进行。试验期间保持室内温度为 25℃,空气湿度 60%,每天光照时间 16 h,光照不足时以高压钠灯补充光照。为减少浇水对土壤带来的扰动,分别在菌根室与菌丝室内侧加入两根带筛孔的塑料管,每日称重浇水。

1.5 试验收获与样品分析

植物生长 6 个月后,分别收获植物地上部和根系,根系分为植物生长室与菌根室两部分。将植物生长室中植物地上部剪下,并从土壤中拣出根系用水清洗干净。菌根室与菌丝室中的土壤分别沿自然结构小心掰成小土块,并将菌根室土壤中根系挑出,清洗干净。植物样品放入 -20℃ 冰箱保存,菌根室和菌丝室土壤样品风干备用。

1.5.1 菌根指标

植物根系洗净后剪成 1 cm 左右小段,采用曲利苯蓝染色-根段法观测菌根侵染率^[24-25]。

土壤菌丝密度采用网格交叉法测定^[26]。称 4 g 风干土,置于 200 mL 塑料杯中,加入 100 mL 水与 12 mL 37 g/L 六偏磷酸钠,剧烈摇动后静置,而后将悬浮液过双层土壤筛,以 250 mL 水冲洗下层筛网上的菌丝样品至搅拌器中搅拌,吸取 5 mL 悬浊液抽滤制作滤膜样片,显微镜下进行观测,根据公式计算土壤菌丝密度。

1.5.2 植物生理生化指标

脯氨酸含量采用酸性茚三酮法测定^[27]。在试验收获前取新鲜植物叶片 0.1 g,用 3% 磺基水杨酸研磨提取,匀浆转入离心管后沸水浴浸提 10 min。冷却后 3000 r/min 离心 10 min,取上清液 2 mL,加入 2 mL 3% 磺基水杨酸、2 mL 冰乙酸和 4 mL 2.5% 酸性茚三酮溶液置沸水显色 60 min,冷却后加入 4 mL 甲苯萃取红色物质。静置后,取甲苯相测定 520 nm 波长吸光值。

剩余植物样品置 105℃ 烘箱中杀青,调至 70℃ 烘干至恒重,称干物重,而后用球磨仪粉碎。称取 0.5 g 左右粉碎样品于消煮管中,加入 10 mL 浓 HNO₃ 进行微波消解,将消煮液转移至 50 mL 容量瓶并用超纯水定容,过滤,制备待测液。采用 ICP-AES (Optima-2000DV) 测定磷浓度^[17]。

1.5.3 土壤理化指标

土壤基本理化性质参照鲍士旦主编的《土壤农化分析》(第三版)^[28]所述方法测定。土壤有机质用重铬酸钾氧化法,pH 用电位法,速效 N 用碱解扩散法,有效磷测定采用钼锑抗比色法,最大田间持水量用环刀法测定。土壤全 N 和全 C 由元素分析仪 (Vario EL III, Elementar Company, Germany) 测定^[29]。

球囊霉素相关土壤蛋白 (glomalin-related soil protein, GRSP) 采用考马斯亮蓝法^[21]测定。根据其不同提取方式 GRSP 可分为总球囊霉素相关土壤蛋白 (T-GRSP) 和易提取球囊霉素相关土壤蛋白 (EE-GRSP)。T-GRSP 提取方法:称取 0.5 g 风干土,加入 4 mL 50 mmol/L pH 8.0 柠檬酸钠浸提剂,在 100 kPa 121℃ 条件下连续提取 3 次,每次 60 min;EE-GRSP 提取方法:称取 0.5 g 风干土,加入 8 mL pH 7.0 20 mmol/L 的柠檬酸钠浸提剂,在 100 kPa 121℃ 条件下提取 30 min。将提取液在 10000 r/min 下离心 5 min,收集上清液。吸取上清液 0.5 mL,加入 5 mL 考马斯亮蓝 G-250 染色剂,在 595 nm 波长下比色。用牛血清蛋白标液-考马斯亮蓝法显色绘制标准曲线,计算提取球囊霉素土壤相关蛋白的含量。

1.5.4 土壤水稳定性团聚体

土壤水稳定性团聚体测定采用湿筛法^[30]。称取 40 g 风干土,将土壤样品置于套筛顶层。套筛由 2、1、0.5、0.25 mm 筛网由上到下组成,将套筛浸泡在水中,使土壤样品浸水 10 min 后,上下移动套筛,2 min 内 50 次,上下移动幅度 3 cm。然后将留在套筛每层筛网上的土壤样品在 105℃ 烘干称重。计算土壤各粒级水稳定性团聚体所占比例。平均重量直径 (mean weight diameter, MWD) 按照如下公式计算:

$$MWD = \sum_{i=1}^n X_i W_i$$

几何平均直径 (geometric mean diameter, GMD) 按照如下公式计算:

$$GMD = \exp \left[\left(\sum_{i=1}^n W_i \ln X_i \right) / \left(\sum_{i=1}^n W_i \right) \right]$$

式中, X_i 为筛分出来的第 i 粒级团聚体平均直径; W_i 为筛分出来的第 i 粒级团聚体重量占土壤样品总重百分数。

1.6 数据分析

采用 Excel 和 SPSS (SPSS 13.0 for Windows, SPSS Inc, Chicago, USA) 对数据进行统计分析和作图。双因素方差分析检验接种 AM 真菌和水分处理二者之间的交互作用。当接种处理与水分处理交互作用显著时,采用 Duncan 新复极差法将全部处理统一进行多重比较。当接种处理与水分处理交互作用不显著时,在同一水分处理下,不同接种处理数据按 Duncan 新复极差法进行多重比较;同一接种处理下,采用 T 检验比较两个水分处理之间的差异显著性。应用 Pearson 相关系数进行数据相关分析。

2 试验结果

2.1 菌根侵染状况

正常供水条件下,3 种 AM 真菌均对紫花苜蓿形成良好侵染,*G. intraradices* 侵染率接近 72%,其次为 *A. scrobiculata*,侵染率接近 52%,*D. spurcum* 侵染率最低,仅 20% 左右。干旱处理显著降低了所有 3 个菌种的

菌根侵染率,但 *A. scrobiculata* 和 *D. spurcum* 侵染率降低至 2% 左右,而 *G. intraradices* 侵染率维持在 20%,显著高于其它菌种(表 1)。

在个别未接种处理根段内观测到菌根共生结构,因而有极低的菌根侵染率,推测为培养过程中出现不可控的污染。

相同水分条件下,菌丝室中接菌处理的菌丝密度显著高于未接菌处理。正常水分处理下,接种 *G. intraradices* 菌丝室中菌丝密度显著高于其它接种处理。

2.2 植株生物量

干旱处理显著降低了植株地上部、根系及总生物量。在正常水分条件下,3 种接种处理植物地上部、根系及总生物量均显著高于未接菌处理。干旱条件下,3 种接种处理与未接种处理相比,地上部、根系及总生物量均无显著差异,但接种 *G. intraradices* 和 *D. spurcum* 趋于提高植物总生物量,而接种 *A. scrobiculata* 有降低植物生物量趋势。不同菌种之间,接种 *G. intraradices* 处理的植株总生物量显著高于 *A. scrobiculata* 接种处理。

表 1 干旱胁迫下不同 AM 真菌对紫花苜蓿侵染状况及植株生物量

Table 1 Colonization of different AM fungal species on *M. sativa* and the mycorrhizal effects on plant growth under drought stresses

水分处理 Watertreatment	接种处理 Inoculation treatment	植物干重 Dry weight / (g/盆)			菌丝密度(HC) Hyphal length density in HC /(m/g)	菌根侵染率 Mycorrhizal colonization rate/%
		地上部 Shoot	根系(PC+MC) Root (PC+MC)	总生物量 Total biomass		
正常供水	NM	1.22c	5.75b *	6.97b *	1.53c	0.17d
Well-watered	<i>A. scrobiculata</i>	2.30a	7.11ab *	9.40ab *	2.66b	51.79b
	<i>D. spurcum</i>	1.83b	6.92ab *	8.75ab *	2.53b	20.62c
	<i>G. intraradices</i>	1.88b	8.77a *	10.65a *	3.90a	71.88a
干旱 Drought	NM	0.25d	1.41a	1.66ab	1.55c	0.52d
	<i>A. scrobiculata</i>	0.19d	1.06a	1.25b	3.01b	2.46d
	<i>D. spurcum</i>	0.23d	1.92a	2.15ab	2.49b	2.09d
	<i>G. intraradices</i>	0.55d	1.77a	2.31a	2.67b	19.70c
显著性	<i>P</i> (W)	0.000	0.000	0.000	0.124	0.000
Significance	<i>P</i> (I)	0.001	0.079	0.032	0.000	0.000
	<i>P</i> (W×I)	0.000	0.191	0.111	0.046	0.000

表中数据为各处理 4 各重复的均值; PC、MC 和 HC 分别代表植物生长室、菌根室和菌丝室; NM 代表不接种对照处理; 试验处理显著性检验, W、I 和 W×I 分别表示水分处理、接种处理及二者交互作用; 当水分处理和接种处理交互作用显著时, 同一列全部均值统一采用 Duncan 新复极差法进行多重比较, 以不同小写字母标注均值之间的显著性差异 ($P < 0.05$); 水分处理和接种处理交互作用不显著时, 采用 Duncan 新复极差法多重比较同一水分处理下不同接种处理之间的差异显著性, 以不同小写字母标注处理之间的显著性差异; *T* 检验比较同一接种处理下两个水分处理之间的差异显著性, 以“*”标注水分处理之间的显著性差异

2.3 植株磷浓度和吸磷量

由表 2 可知, 干旱胁迫显著降低了植物根系磷浓度, 对于未接种和 *D. spurcum* 接种处理, 干旱胁迫也显著降低了植株地上部磷浓度。无论是地上部、根系吸磷量还是植株总吸磷量, 均因干旱处理而显著降低。

正常水分条件下, 与未接种相比, 3 个接种处理对植株地上部磷浓度无显著影响, 但均显著提高了植株根系磷浓度。相应地, 接种 3 种 AM 真菌显著提高了植株地上部和根系吸磷量及植物吸磷总量。在 3 个不同菌种之间, *G. intraradices* 接种处理植株吸磷总量显著高于其它菌种。干旱胁迫下, 总体上只有 *G. intraradices* 接种处理能够促进植物对磷的吸收, 植株磷浓度和吸磷量均显著高于其它接种处理, 而 *A. scrobiculata* 和 *D. spurcum* 接种处理植株磷浓度和吸磷量和未接种处理基本无异。

2.4 土壤有效磷

无论是菌根室还是菌丝室, 干旱处理下土壤有效磷含量普遍显著高于正常水分处理(表 2)。

正常水分条件下, 相比未接种处理, 接种 3 种 AM 真菌均显著降低了菌根室和菌丝室中土壤有效磷含量,

而以接种 *G. intraradices* 处理最低。干旱处理下,仅有 *G. intraradices* 处理显著降低了土壤有效磷含量。

表 2 干旱胁迫下不同菌种对植物磷浓度、吸磷量及土壤有效磷的影响

Table 2 Effects of different AM fungal species on the content of concentration of P and total P in host plants and soil available P under drought stress

水分处理 Water treatment	接种处理 Inoculation treatment	植物磷浓度 P concentration (mg/g)		植物吸磷量 P uptake (mg/株)			土壤有效磷含量 Soil available P (mg/kg)	
		地上部 Shoot	根系 Root	地上部 Shoot	根系 Root	总量 Total	菌根室 MC	菌丝室 HC
正常水分	NM	2.66a *	1.59c	2.37c	8.90c	11.27c	17.87a	20.59ab
Well-watered	<i>A. scrobiculata</i>	2.74a	2.51ab	4.89a	17.96b	22.85b	13.49b	9.83d
	<i>D. spurcum</i>	2.66a *	2.29b	3.39b	15.96b	19.90b	9.46c	12.13d
	<i>G. intraradices</i>	3.40a	2.95a	4.26ab	26.16a	30.42a	6.28d	3.11e
干旱 Drought	NM	1.71ab	1.07d	0.44e	1.50d	1.94d	23.67a *	21.89a
	<i>A. scrobiculata</i>	1.95ab	1.09d	0.44e	1.14d	1.58d	21.43ab *	20.24ab
	<i>D. spurcum</i>	1.07b	1.09d	0.27e	1.95d	2.22d	22.06ab *	18.64b
	<i>G. intraradices</i>	2.70a	1.71c	1.38d	2.96d	4.35d	15.59b *	15.14c
显著性	<i>P</i> (W)	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000
Significance	<i>P</i> (I)	0.020	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	<i>P</i> (W×I)	0.621	0.036	0.003	0.003	0.004	0.363	0.000

2.5 植物叶片脯氨酸含量

干旱胁迫显著提高了植物叶片脯氨酸含量(图 1)。无论正常水分或干旱处理,与未接种相比,接种 3 种 AM 真菌均使叶片脯氨酸含量下降。正常水分条件下,*G. intraradices* 接种处理叶片脯氨酸含量显著低于未接种处理,而干旱处理下,*A. scrobiculata* 和 *D. spurcum* 接种处理与未接种处理之间差异显著。

2.6 土壤 GRSP 含量

由表 3 可见,无论是水分还是接种处理对菌根室中 GRSP 含量均无显著影响。在菌丝室中,水分处理对 GRSP 含量也没有显著影响,而接种处理对 T-GRSP 含量表现出显著影响;*G. intraradices* 接种处理 T-GRSP 含量显著高于其它接种处理,*A. scrobiculata* 和 *D. spurcum* 接种处理则与对照无显著差异。

2.7 土壤水稳定性团聚体

在菌根室中,水分处理仅影响到 2—1 mm 水稳性土壤团聚体和水稳性团聚体总百分含量,正常水分条件下 2—1 mm 水稳性团聚体百分含量相对高于干旱处理(表 4)。

菌根主要影响到 > 1 mm 大团聚体含量;提高 > 2 mm 团聚体含量,而降低 2—1 mm 团聚体含量。正常水分条件下,*G. intraradices* 接种处理 MWD 和 GMD 相对高于其它接种处理,而干旱情况下,*A. scrobiculata* 接种处理 MWD 和 GMD 明显低于其它接种处理(表 4)。

在菌丝室中,各级水稳性土壤团聚体百分含量及 MWD、GMD 等土壤结构指标普遍受到水分处理显著影响:相对于正常水分情况,干旱处理下 > 2 mm 团聚体含量显著升高,2—1 mm 团聚体无明显变化,而 < 1 mm

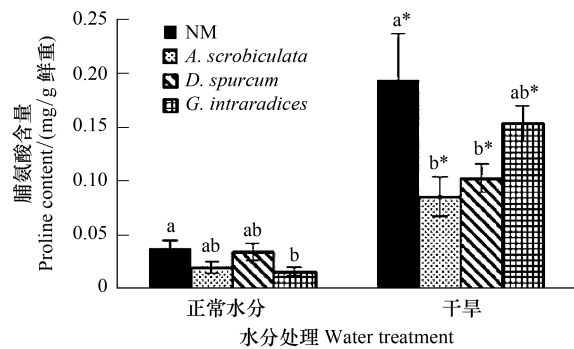


图 1 干旱胁迫下接种不同 AM 真菌对紫花苜蓿叶片脯氨酸含量的影响

Fig.1 Effects of different AM fungal species on the leaf proline contents of *M. sativa* under drought stress

表中数据为各处理 4 各重复的均值。NM 代表不接种对照处理;方差分析结果显示,水分处理对叶片脯氨酸含量有极显著影响($P < 0.01$),接种处理对叶片脯氨酸含量有显著影响($P < 0.05$),但二者交互作用不显著。采用 Duncan 新复极差法多重比较同一水分处理下不同接种处理之间的差异显著性,以不同小写字母标注处理之间的显著性差异;*T* 检验比较同一接种处理下两个水分处理之间的差异显著性,以“*”标注处理之间的显著性差异

团聚体含量显著下降。水稳性团聚体总百分数、MWD 和 GMD 在干旱情况下均显著升高(表 5)。

表 3 干旱胁迫下不同 AM 真菌对土壤 GRSP 含量的影响

Table 3 Effects of different AM fungal species on the GRSP content in soil under drought stress

水分处理 Water treatment	接种处理 Inoculation Treatment	土壤球囊霉素相关蛋白含量 GRSP content in soil/(mg/g)			
		T-GRSP		EE-GRSP	
		菌根室 MC	菌丝室 HC	菌根室 MC	菌丝室 HC
正常水分	NM	4.91a	4.59c	0.34b	0.41abc
Well-watered	<i>A. scrobiculata</i>	5.77a	4.27c	0.36b	0.46a
	<i>D. spurcum</i>	5.54a	5.16c	0.43ab	0.29c
	<i>G. intraradices</i>	5.92a	6.29b	0.47a [*]	0.35abc
干旱 Drought	NM	6.59a	4.56c	0.43a	0.38abc
	<i>A. scrobiculata</i>	4.82b	4.41c	0.36a	0.30c
	<i>D. spurcum</i>	4.94b	4.50c	0.37a	0.33bc
	<i>G. intraradices</i>	5.68ab	7.99a	0.37a	0.44ab
显著性	<i>P</i> (W)	0.933	0.280	0.503	0.579
Significance	<i>P</i> (I)	0.543	0.000	0.440	0.114
	<i>P</i> (W×I)	0.053	0.029	0.088	0.019

表 4 干旱胁迫下不同 AM 真菌侵染紫花苜蓿根系对土壤水稳性团聚体百分含量、MWD 和 GMD 影响

Table 4 Effects of *M. sativa* roots colonized by different AM fungal species on the content, MWD and GMD of water-stable soil aggregates under drought stress

水分处理 Water treatment	接种处理 Inoculation treatment	菌根室水稳定性团聚体 Water stable aggregates in MC/%				总百分数 Total percent /%	MWD	GMD
		>2 mm	2—1 mm	1—0.5 mm	0.5—0.25 mm			
正常水分	NM	41.11cd	2.71a	10.25a *	14.74a	68.80b	0.99cd	1.20bc
Well-watered	<i>A. scrobiculata</i>	57.27abc	1.72ab	8.12a	10.89a	77.98ab *	1.27abc	1.42ab
	<i>D. spurcum</i>	60.48ab	1.28b	6.07a	8.86a	76.69ab	1.31ab	1.52a
	<i>G. intraradices</i>	70.89a	1.69ab	7.43a	8.83a	88.84a	1.53a	1.56a
干旱 Drought	NM	52.30bcd	4.37a *	6.70b	10.83b	74.20a	1.20bcd	1.41ab
	<i>A. scrobiculata</i>	38.26d	3.46ab *	10.03a	14.96a	66.71a	0.95d	1.17c
	<i>D. spurcum</i>	56.83abc	2.08bc	7.92ab	8.98b	75.82a	1.26abc	1.47a
	<i>G. intraradices</i>	54.83abc	1.56c	6.54b	8.80b	71.73a	1.20bcd	1.47a
显著性	<i>P</i> (W)	0.070	0.003	0.935	0.827	0.046	0.079	0.388
Significance	<i>P</i> (I)	0.009	0.000	0.185	0.017	0.126	0.020	0.008
	<i>P</i> (W×I)	0.029	0.144	0.094	0.167	0.080	0.024	0.036

AM 真菌主要影响到 > 2 mm 水稳性团聚体。在正常水分和干旱条件下,相对于未接种处理,接种 3 种 AM 真菌均提高了 > 2 mm 水稳性团聚体百分含量、水稳性团聚体总百分数及 MWD。对于 GMD,仅有 *G. intraradices* 接种处理在正常水分下表现出显著影响(表 5)。

2.8 相关性分析

在菌根室中,菌根侵染率与菌丝室中菌丝密度、> 2 mm 水稳性团聚百分数及 MWD 均呈极显著正相关($P < 0.01$),与 GMD 显著正相关($P < 0.05$)。T-GRSP 含量分别与 > 2 mm 水稳性团聚百分数、MWD 及 GMD 显著正相关($P < 0.05$)。

菌丝室中,菌丝密度与 T-GRSP 含量成显著正相关($P < 0.05$)。T-GRSP 含量与 > 2 mm 水稳性团聚百分数及 MWD 显著正相关($P < 0.05$)。

总体上,EE-GRSP 与菌根指标无显著相关。

表 5 干旱胁迫下不同 AM 真菌对土壤水稳定性团聚体百分含量、MWD 及 GMD 的影响

Table 5 Effects of different AM fungal species on the content MWD and GMD of water-stable soil aggregates under drought stress

水分处理 Water treatment	接种处理 Inoculation treatment	菌丝室水稳定性团聚体 Water stable aggregates in HC/%				总百分数 Total percent /%	MWD	GWD
		>2 mm	2— 1 mm	1— 0.5 mm	0.5— 0.25 mm			
正常水分	NM	4.56b	2.08b	16.39a	24.14a *	47.17b	0.34b	0.60b
Well-watered	<i>A. scrobiculata</i>	8.15ab	3.28ab	16.42a *	25.46a *	53.30ab	0.43ab	0.66ab
	<i>D. spureum</i>	12.74a	3.53ab	15.26a	28.86a *	60.39a	0.53a	0.69ab
	<i>G. intraradices</i>	14.38a	3.33ab	16.29a	23.97a	57.96a	0.55a	0.75a
干旱 Drought	NM	20.99b *	4.38a	12.99a	18.76a	57.11b *	0.65b *	0.90a *
	<i>A. scrobiculata</i>	38.21a *	3.31ab	10.36b	15.79a	67.66ab *	0.95a *	1.15a *
	<i>D. spureum</i>	38.46a *	3.28ab	13.29a	14.04a	69.07ab	0.97a *	1.17a *
	<i>G. intraradices</i>	46.58a *	3.08ab	13.23a	16.53a	79.43a *	1.14a *	1.19a *
显著性	<i>P</i> (W)	0.000	0.236	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000
Significance	<i>P</i> (I)	0.000	0.930	0.741	0.911	0.001	0.001	0.013
	<i>P</i> (W×I)	0.559	0.032	0.532	0.195	0.220	0.289	0.486

表 6 各观测指标相关性分析

Table 6 Correlation coefficients between variables

分室 Compartment	变量 Variables	菌根侵染率 Mycor. Colon. rate	HC 菌丝密度 Hyphal length	菌根室 MC			菌丝室 HC		
				>2 mm	MWD	GMD	>2 mm	MWD	GMD
菌根室 RC	菌根侵染率	—	0.684 **	0.591 **	0.592 **	0.448 *	—	—	—
	T-GRSP	0.208	—	0.401 *	0.405 *	0.370 *	—	—	—
	EE-GRSP	0.251	—	0.101	0.135	-0.029	—	—	—
菌丝室 HC	菌丝密度	—	—	—	—	—	0.105	0.112	0.047
	T-GRSP	—	0.356 *	—	—	—	0.399 *	0.434 *	0.321
	EE-GRSP	—	-0.137	—	—	—	-0.062	-0.034	-0.075

* 两个变量显著相关($\alpha = 0.05$); ** 两个变量极显著相关($\alpha = 0.01$);—未做相关分析

3 讨论

本研究在正常水分和模拟干旱条件下探讨了不同 AM 真菌对植物生长和土壤水稳定性团聚体的影响。正常水分条件下,不同种属 AM 真菌对紫花苜蓿都体现出明显的促生效应,而在干旱胁迫条件下,仅有 *G. intraradices* 依然能够和紫花苜蓿建立良好共生并显著促进植物生长。另一方面,在正常水分和干旱胁迫条件下接种 AM 真菌对土壤团聚体的形成均有显著积极作用。菌根真菌主要影响到大团聚体(> 2 mm)的相对含量,并影响到水稳性团聚体总百分数及平均重量直径(MWD)。

干旱胁迫对菌根共生体的发育具有显著抑制作用,本试验中干旱处理显著降低了菌根侵染率,这与前人研究结果基本一致。贺学礼等在土壤相对含水量为 60% 条件下接种 AM 真菌能够显著促进植物生长,而土壤相对含水量为 20% 时,侵染率显著下降,但接种处理仍有显著促生效应^[22]。在王如岩等的研究中,重度干旱(土壤含水量为 5%—10%)情况下,根系侵染率均在 10% 以下,接种 AM 真菌后滇柏(*Cupressus duclouxiana* Hichel)幼苗生物量与未接种对照均无显著差异^[23]。本试验中尽管干旱胁迫抑制了菌根侵染,发现不同菌种对干旱胁迫的响应存在显著差异。*A. scrobiculata* 和 *D. spureum* 对紫花苜蓿根系侵染率降低至 2% 左右,已经无益于植物适应逆境胁迫,*D. spureum* 接种处理甚至趋于降低植物生物量,但 *G. intraradices* 侵染率仍高达 20%,并表现出显著促生效应。不同菌种抗逆性不同,表明完全有可能筛选出适宜菌种用于提高植物抗逆性,从而促进退化土壤生态恢复。综合分析试验结果,不难发现 AM 真菌对紫花苜蓿的促生效应与其改善植物磷营养密切相关。正常水分条件下,接种 3 种菌根真菌均显著提高了植株吸磷量,而在干旱胁迫下,只有接种

G. intraradices 能够促进植物对磷的吸收。这可能意味着菌根共生体系磷营养效率决定了共生体抗逆能力,而菌根共生体的磷营养效率则很大程度上取决于 AM 真菌的特定生物学及生理特征。

脯氨酸是植物体内主要渗透调节物质之一。在干旱胁迫下,植物通过合成大量脯氨酸来增强自身渗透调节能力,从而对关键酶、抗逆性蛋白和生物膜起保护作用^[31]。已有研究表明,受干旱胁迫的苗木接种 AM 真菌后根系与叶片中脯氨酸含量显著降低,苗木抗旱性增强^[32]。本试验结果也显示,干旱处理下植物叶片脯氨酸含量显著升高,而接种 AM 真菌后,脯氨酸含量下降,表明菌根共生体系能够缓解干旱胁迫对植物造成的生理伤害。

尽管已有研究证明 AM 真菌通过促进植物对水分的吸收来增强植物对干旱的适应性^[33],但考虑到干旱条件下土壤水分有效性大大降低,土壤水稳定性团聚体作为衡量土壤结构的重要指标,其数量与分布状况会对土壤水分和养分可利用性产生显著影响,故而菌根真菌影响土壤水稳性团聚体数量和分布状况也会潜在影响到植物对土壤水分的利用,或者说改善土壤结构和土壤水分特性也可认为是菌根增强植物抗旱性的一种潜在机制。与以往的研究报道^[34-35]相一致,AM 真菌主要影响到大团聚体(> 2 mm)的形成,并在总体上提高了水稳性团聚体百分含量。另一方面,MWD 与 GWD 作为表征土壤团聚体粒级分布状况的指标,大量研究证明其值越大土壤团聚体水稳性越高,土壤结构状况越好^[36-37]。本试验中,正常水分条件下 3 种 AM 真菌均能提高菌根室与菌丝室的 MWD 值,而在干旱处理中,除菌根室 *A. scrobiculata* 处理出现降低,其它接菌处理均呈上升趋势(表 5,表 6),而 *G. intraradices* 接种处理 MWD 与 GMD 值在大多数情况下均高于其它处理。这些试验结果一方面表明菌根真菌在土壤团聚体形成的积极作用,另一方面则显示了不同菌种之间的功能差异。干旱情况下 *G. intraradices* 在改善土壤结构方面的优异表现也与其增强宿主植物抗旱性的能力相一致。

以往有关菌根真菌与土壤结构的研究中,往往会考虑到球囊霉素相关土壤蛋白(GRSP)的作用。GRSP 作为一类稳定的糖蛋白在土壤团聚体形成中起着重要作用^[38-39],多数研究认为 T-GRSP 是 AM 真菌长期积累的稳定糖蛋白,EE-GRSP 则是 AM 真菌新近产生的^[11]。本试验中,菌根室和菌丝室中 T-GRSP 含量均与 > 2 mm 水稳定性团聚体及 MWD 显著正相关,这与前人研究结果基本一致^[36, 40]。然而,在本试验中并没有发现 EE-GRSP 与菌根指标及 MWD、GMD 无相关性,AM 菌丝密度与 MWD 和 GMD 也无显著相关。这种结果可能与菌丝在土壤中的周转及试验周期有关,但具体原因还需进一步研究。

综上所述,本研究表明干旱胁迫下 AM 真菌可通过改善植物磷营养、调节植物体内渗透物质含量等多种机制增强植物抗旱性并促进植物生长,同时通过影响土壤大团聚体的形成和水稳性团聚体稳定性调节土壤结构。不同 AM 真菌与植物形成的共生体有显著不同的逆境适应性,*G. intraradices* 在改善植物矿质营养与促进植物生长方面表现优异,其在提高土壤水稳性团聚体数量与质量方面也明显优于其它菌种,因而可以认为在干旱环境中,*G. intraradices* 具有更强的生态适应性,可能作为干旱地区生态恢复的备选菌种。

References:

- [1] Yang L Z, Xu Q. The soil ecosystem. Beijing: Science Press, 2005.
- [2] Zhong J H, Tang S Y, Tan J. Structure characteristics of red soils and their effective factors. Soil and Environmental Sciences, 2002, 11(1): 61-65.
- [3] Diaz-Zorita M, Perfect E, Grove J H. Disruptive methods for assessing soil structure. Soil and Tillage Research, 2002, 64(1/2): 3-22.
- [4] Feng G, Zhang Y F, Li X L. Effect of external hyphae of arbuscular mycorrhizal plant on water-stable aggregates in sandy soil. Journal of Soil and Water Conservation, 2001, 15(4): 99-102.
- [5] Harley J L. The significance of mycorrhiza. Mycological Research, 1989, 92(2): 129-139.
- [6] Rillig M C, Mummey D L. Mycorrhizas and soil structure. New Phytologist, 2006, 171(1): 41-53.
- [7] van der Heijden M G A, Klironomos J N, Ursic M, Moutoglou 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.
- [8] Berta G, Fusconi A, Trotta A. VA mycorrhizal infection and the morphology and function of root systems. Environmental and Experimental Botany, 1993, 33(1): 159-173.

- [9] Carter M R, Angers D A, Kunelius H T. Soil structural form and stability, and organic matter under cool-season perennial grasses. *Soil Science Society of America Journal*, 1994, 58(4): 1194-1199.
- [10] Miller R M, Jastrow J D. Hierarchy of roots and mycorrhizal fungal interactions with soil aggregation. *Soil Biology & Biochemistry*, 1990, 22(5): 579-584.
- [11] Wright S F, Upadhyaya A. Extraction of an abundant and unusual protein from soil and comparison with hyphal protein of arbuscular mycorrhizal fungi. *Soil Science*, 1996, 161(9): 575-586.
- [12] 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.
- [13] Wessels J G H. Fungi in their own right. *Fungal Genetics and Biology*, 1999, 27(2/3): 134-145.
- [14] Querejeta J I, Egerton-Warburton L M, Allen M F. Direct nocturnal water transfer from oaks to their mycorrhizal symbionts during severe soil drying. *Oecologia*, 2003, 134(1): 55-64.
- [15] Neergaard B B. Influence of arbuscular mycorrhizal fungi on soil structure and soil water characteristics of vertisols. *Plant and Soil*, 2001, 229(2): 245-258.
- [16] Six J, Elliott E T, Paustian K. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: a mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32(14): 2099-2103.
- [17] Li T, Zhao Z W. Advance in researches on glomalin produced by arbuscular mycorrhizal fungi. *Chinese Journal of Ecology*, 2005, 24(9): 1080-1084.
- [18] Peng S L, Shen H, Zhang Y T, Guo T. Compare different effect of arbuscular mycorrhizal colonization on soil structure. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(3): 863-870.
- [19] Yao S H. Soil Biophysical processes involved in decomposition of rice straw incorporated in upland soils under wetting and drying cycles for stabilization of soil carbon pools and soil structure. MD thesis of Nanjing Agricultural University, 2005.
- [20] Yang K. Effects of organic-inorganic superabsorbent composite on water absorbency and physicochemical properties soils. MD thesis of Gansu Agricultural University, 2008.
- [21] Yang Y H, Wu J C, Wu P T, Zhao S W, He F, Shi F G. Effect mechanism of straw mulching and water-retaining agent on soil structure, evaporation, and infiltration process. *Science of Soil and Water Conservation*, 2009, 7(5): 70-75.
- [22] He X L, Gao L, Zhao L L. Effects of AM fungi on the growth and drought resistance of *Seriphidium minchinense* under water stress. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(4): 1029-1037.
- [23] Wang R Y, Yu S Q, Zhang J C, Cong R L, Wang Q, Chen L X, Si D Y. Impact of mycorrhizal fungus on the growth and nutrient absorption of *Cupressus duclouxiana* Hichel seedlings under water stress. *Carsologica Sinica*, 2011, 30(3): 314-318.
- [24] Phillips J M, Hayman D S. Improved procedures for clearing and staining parasitic and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection. *Transactions of British Mycological Society*, 1970, 55(1): 158-161.
- [25] Biermann B J, Linderman R G. Quantifying vesicular-arbuscular mycorrhizae: a proposed method towards standardization. *New Phytologist*, 1981, 87(1): 63-67.
- [26] Jakobsen I, Abbott L K, Robosen A D. External hyphae of vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi associated with *Trifolium subterraneum* L. 2. Hyphal transport of P over defined distances. *New Phytologist*, 1992, 120(3): 514-516.
- [27] Tang Z C. Experimental guide of modern plant physiology. Beijing: Science Press. 1999.
- [28] Bao S D. Agricultural Soil Analysis. Beijing: China Agriculture Press. 2000.
- [29] Zhen Z, Li Y, Chen H W. Sulphur determination by Vario EL III Elemental Analyzers. *Electric Power Science and Engineering*, 2002, 4: 43-45.
- [30] Kemper W D, Rosenau K. Size distribution of aggregates//Klute A, ed. *Methods of Soil Analysis, Part 1. Physical and Mineralogical Methods*. 2nd ed. Madison, WI: Agron. Monogr. 9. ASA and SSSA, 1986: 425-442.
- [31] Verslues P E, Agarwal M, Katiyar-Agarwal S, Zhu J, Zhu J K. Methods and concepts in quantifying resistance to drought, salt and freezing, abiotic stresses that affect plant water status. *The Plant Journal*, 2006, 45(4): 523-539.
- [32] Abbaspour H, Saeidi-Sar S, Afshari H. Improving drought tolerance of *Pistacia vera* L. seedlings by arbuscular mycorrhiza under greenhouse conditions. *Journal of Medicinal Plants Research*, 2011, 5(32): 7065-7072.
- [33] Allen M F. Mycorrhizal fungi: highways for water and nutrients in arid soils. *Soil Science Society of America Journal*, 2007, 6(2): 291-297.
- [34] Miller R M, Jastrow J D. Mycorrhizal fungi influence soil structure//Kapulnik Y, Douds D D, eds. *Arbuscular mycorrhizas: molecular biology and physiology*. Dordrecht, the Netherlands: Kluwer Academic, 2000: 3-18.
- [35] Rillig M C, Wright S F, Eviner V. The role of arbuscular mycorrhizal fungi and glomalin in soil aggregation: comparing effects of five plant species. *Plant and Soil*, 2002, 238(2): 325-333.

- [36] Bedini S, Pellegrino E, Avio L, Pellegrini S, Bazzoffi P, Argese E, Giovannetti M. Changes in soil aggregation and glomalin-related soil protein content as affected by the arbuscular mycorrhizal fungal species *Glomus mosseae* and *Glomus intraradices*. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, 41(7): 1491-1496.
- [37] Márquez C O, García V J, Cambardella C A, Schultz R C, Isenhardt T M. Aggregate-size stability distribution and soil stability. *Soil Science Society of America Journal*, 2004, 68(3): 725-735.
- [38] Spohn M, Giani L. Water-stable aggregates, glomalin-related soil protein, and carbohydrates in a chronosequence of sandy hydromorphic soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 2010, 42(9): 1505-1511.
- [39] Rillig M C. Arbuscular mycorrhizae, glomalin and soil quality. *Canadian Journal of Soil Science*, 2004, 84(4): 355-363.
- [40] Wu Q S, Xia R X, Zou Y N. Improved soil structure and citrus growth after inoculation with three arbuscular mycorrhizal fungi under drought stress. *European journal of soil biology*, 2007, 44(1): 122-128.

参考文献:

- [1] 杨林章, 徐琪. 土壤生态系统. 北京: 科学出版社, 2005.
- [2] 钟继红, 唐淑英, 谭军. 广东红壤类土壤结构特征及其影响因素. *土壤与环境*, 2002, 11(1): 61-65.
- [4] 冯固, 张玉凤, 李晓林. 丛枝菌根真菌的外生菌丝对土壤水稳性团聚体形成的影响. *水土保持学报*, 2001, 15(4): 99-102.
- [17] 李涛, 赵之伟. 丛枝菌根真菌产球囊霉素进展. *生态学杂志*, 2005, 24(9): 1080-1084.
- [18] 彭思利, 申鸿, 张宇亭, 郭涛. 不同丛枝菌根真菌侵染对土壤结构的影响. *生态学报*, 2012, 32(3): 863-870.
- [19] 尧水红. 干湿交替强度对旱地土壤结构形成及水稻秸秆分解过程的相互作用的影响. 南京农业大学硕士学位论文, 2005.
- [20] 杨逵. 有机-无机复合保水剂的保水性能和对土壤理化性质的影响. 甘肃农业大学硕士学位论文, 2008.
- [21] 杨永辉, 武继承, 吴普特, 赵世伟, 何方, 史福刚. 秸秆覆盖与保水剂对土壤结构、蒸发及入渗过程的作用机制. *中国水土保持科学*, 2009, 7(5): 70-75.
- [22] 贺学礼, 高露, 赵丽莉. 水分胁迫下丛枝菌根 AM 真菌对民勤绢蒿生长与抗旱性的影响. *生态学报*, 2011, 31(4): 1029-1037.
- [23] 王如岩, 于水强, 张金池, 丛日亮, 王群, 陈丽莎, 司登宇. 水分胁迫下菌根真菌对滇柏(*Cupressus duclouxiana* Hiehl) 幼苗生长和养分吸收的影响. *中国岩溶*, 2011, 30(3): 314-318.
- [27] 汤章城. 现代植物生理学实验指南. 北京: 科学出版社, 1999: 303.
- [28] 鲍士旦. 土壤农化分析(第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [29] 甄志, 李宇, 陈鸿伟. Vario EL III 元素分析仪测硫方法分析. *电力科学与工程*, 2002, 4: 43-45.

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