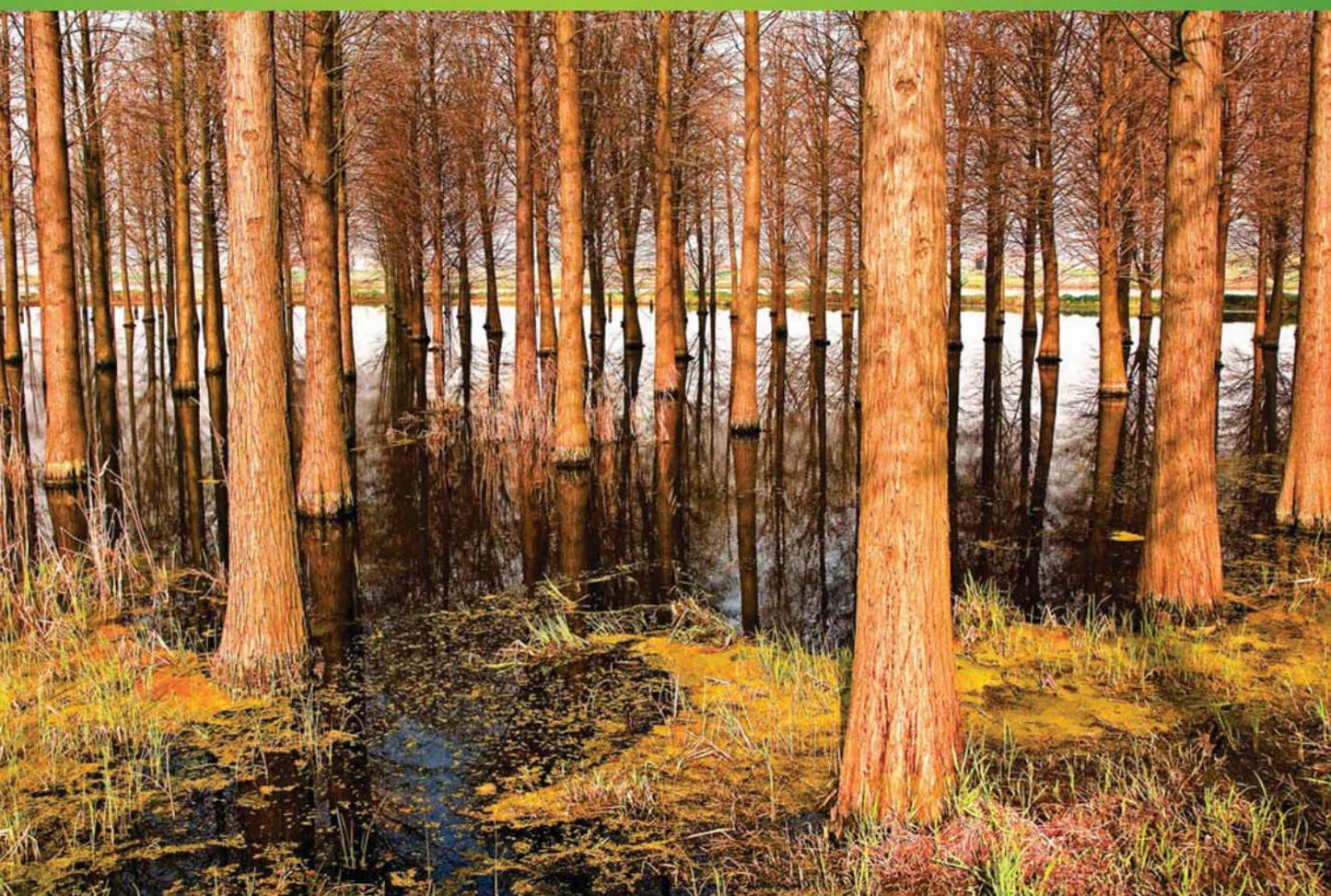


ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第32卷 第3期 Vol.32 No.3 **2012**

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 32 卷 第 3 期

2012 年 2 月 (半月刊)

目 次

夏季可可西里雌性藏原羚行为时间分配及活动节律	连新明, 李晓晓, 颜培实, 等 (663)
热带印度洋黄鳍金枪鱼渔场时空分布与温跃层的关系	杨胜龙, 张禹, 张衡, 等 (671)
洪湖水体藻类藻相特征及其对生境的响应	卢碧林, 严平川, 田小海, 等 (680)
广西西端海岸四种红树植物天然种群生境高程	刘亮, 范航清, 李春千 (690)
高浓度 CO ₂ 引起的海水酸化对小珊瑚藻光合作用和钙化作用的影响	徐智广, 李美真, 霍传林, 等 (699)
盖度与冠层水深对沉水植物水盾草光谱特性的影响	邹维娜, 袁琳, 张利权, 等 (706)
基于 C-Plan 规划软件的生物多样性就地保护优先区规划——以中国东北地区为例	栾晓峰, 孙工棋, 曲艺, 等 (715)
城市化对本土植物多样性的影响——以廊坊市为例	彭羽, 刘雪华, 薛达元, 等 (723)
利用红外相机调查北京松山国家级自然保护区的野生动物物种	刘芳, 李迪强, 吴记贵 (730)
基于树木起源、立地分级和龄组的单木生物量模型	李海奎, 宁金魁 (740)
千岛湖社鼠种群遗传现状及与生境面积的关系	刘军, 鲍毅新, 张旭, 等 (758)
气候变化对内蒙古草原典型植物物候的影响	顾润源, 周伟灿, 白美兰, 等 (767)
中国西北典型冰川区大气氮素沉降量的估算——以天山乌鲁木齐河源 1 号冰川为例	王圣杰, 张明军, 王飞腾, 等 (777)
植被类型对盐沼湿地空气生境节肢动物功能群的影响	童春富 (786)
黔西北铅锌矿区植物群落分布及其对重金属的迁移特征	邢丹, 刘鸿雁, 于萍萍, 等 (796)
云南中南部季风常绿阔叶林恢复生态系统萌生特征	苏建荣, 刘万德, 张志钧, 等 (805)
筑坝扩容下高原湿地拉市海植物群落分布格局及其变化	肖德荣, 袁华, 田昆, 等 (815)
三峡库区马尾松根系生物量的空间分布	程瑞梅, 王瑞丽, 肖文发, 等 (823)
兴安落叶松林生物量、地表枯落物量及土壤有机碳储量随林分生长的变化差异	王洪岩, 王文杰, 邱岭, 等 (833)
内蒙古放牧草地土壤碳固持速率和潜力	何念鹏, 韩兴国, 于贵瑞 (844)
不同林龄马尾松凋落物基质质量与土壤养分的关系	葛晓改, 肖文发, 曾立雄, 等 (852)
不同丛枝菌根真菌侵染对土壤结构的影响	彭思利, 申鸿, 张宇亭, 等 (863)
不同初始含水率下粘质土壤的入渗过程	刘目兴, 聂艳, 于婧 (871)
不同耕作措施的温室气体排放日变化及最佳观测时间	田慎重, 宁堂原, 迟淑筠, 等 (879)
外源铅、铜胁迫对不同基因型谷子幼苗生理生态特性的影响	肖志华, 张义贤, 张喜文, 等 (889)
温度和盐度对吉富品系尼罗罗非鱼幼鱼鳃 Na ⁺ -K ⁺ -ATPase 活力的联合效应	王海贞, 王辉, 强俊, 等 (898)
基于元胞自动机的喀斯特石漠化格局模拟研究	王晓学, 李叙勇, 吴秀芹 (907)
边缘细胞对荞麦根尖铝毒的防护效应和对细胞壁多糖的影响	蔡妙珍, 王宁, 王志颖, 等 (915)
川中丘陵区人工柏木防护林适宜林分结构及水文效应	龚固堂, 黎燕琼, 朱志芳, 等 (923)
基于 AHP 与 Rough Set 的农业节水技术综合评价	翟治芬, 王兰英, 孙敏章, 等 (931)
基于 DMSP/OLS 影像的我国主要城市群空间扩张特征分析	王翠平, 王豪伟, 李春明, 等 (942)
生态旅游资源非使用价值评估——以达赉湖自然保护区为例	王朋薇, 贾竞波 (955)
专论与综述	
基于有害干扰的森林生态系统健康评价指标体系的构建	袁菲, 张星耀, 梁军 (964)
硅对植物抗虫性的影响及其机制	韩永强, 魏春光, 侯茂林 (974)

研究简报

光照条件、植株冠层结构和枝条寿命的关系——以桂花和水杉为例	占峰, 杨冬梅 (984)
Bt 玉米秸秆还田对小麦幼苗生长发育的影响	陈小文, 祁鑫, 王海永, 等 (993)
汶川大地震灾后不同滑坡体上柏木体内非结构性碳水化合物特性	陈博, 李志华, 何茜, 等 (999)

期刊基本参数: CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 344 * zh * P * ¥ 70.00 * 1510 * 37 * 2012-02



封面图说: 难得的湿地乔木——池杉池杉为落叶乔木, 高达 25 米, 主干挺直, 树冠尖塔。树干基部膨大, 常有屈膝状吐吸根, 池杉为速生树, 强阳性, 耐寒性较强, 耐干旱, 更极耐水淹, 多植于湖泊周围及河流两岸, 是能在在水里生长的极少数的大乔木之一, 故有湿地乔木之称。池杉原产美国弗吉尼亚沼泽地, 中国于本世纪初引种到江苏等地, 之后大量引种南方各省, 尤其是长江南北水网地区作为重要造树和园林树种而大量栽种。

彩图提供: 陈建伟教授 国家林业局 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201104080458

彭思利, 申鸿, 张宇亭, 郭涛. 不同丛枝菌根真菌感染对土壤结构的影响. 生态学报, 2012, 32(3): 863-870.

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.

不同丛枝菌根真菌感染对土壤结构的影响

彭思利^{1,2,3}, 申 鸿¹, 张宇亭¹, 郭 涛^{1,*}

(1. 西南大学资源环境学院, 重庆 400716; 2. 中国科学院成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041;

3. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要:为了量化比较研究接种丛枝菌根真菌后, 根际、菌根际和菌丝际土壤结构的变化, 采用四室分根装置, 比较中性紫色土接种不同 AM 真菌后, 菌根际、根际、菌丝际和非根际土壤平均重量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)和大于 0.25mm 团聚体总量($R_{0.25}$)的变化。结果表明: 接种 3 个菌种后菌丝际 EEG 和有机质含量均呈高于菌根际的趋势。菌丝密度和易提取球囊霉素相关蛋白(EEG)与 MWD、GMD 和 $R_{0.25}$ 呈显著正相关, 菌根际和菌丝际土壤水稳性 $R_{0.25}$ 与菌丝密度显著正相关, 相关系数分别为 0.777 和 0.671。接种 *G. mosseae* 的菌根际土壤 $R_{0.25}$ 值显著高于其它分室土壤, 而接种 *G. etunicatum* 的菌丝际土壤 $R_{0.25}$ 值显著高于其它分室土壤。试验结果在一定程度上说明不同菌种对土壤结构均有不同程度的影响, 反映了丛枝菌根真菌生态功能的多样性。

关键词: 四室; 菌丝际; 平均重量直径; 几何平均直径; 水稳性团聚体

Compare different effect of arbuscular mycorrhizal colonization on soil structure

PENG Sili^{1,2,3}, SHEN Hong¹, ZHANG Yuting¹, GUO Tao^{1,*}

1 College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400716, China

2 Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China

3 Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

Abstract: Soil structure plays important roles in soil ecosystem functioning as it controls water, gas and nutrient fluxes in soil. Aggregate stability is used as an indicator of soil structure. Current approaches to investigate the soil aggregation dynamic in soils have been influenced considerably by the hierarchical model of the aggregation process in which primary particles and clay microstructure are bound into microaggregates (20—250 μm), and larger macroaggregates (>250 μm up to several millimeters diameter) are formed by the binding together of microaggregates and smaller macroaggregates. Many physical, chemical and biological factors (and their interactions) contribute to soil aggregation, yet among the biological aspects, mycorrhizas are recognized as being of special importance. Arbuscular mycorrhizal (AM) fungi form mutualistic symbiosis with more than 80% of the higher plant species. The contribution of AM to soil structure varied at different hierarchical levels: plant community, individual root, and the soil mycelium.

In previous studies, most experiments were carried out with pot or other single compartment devices, this made it difficult to clarify different effects of mycorrhiza symbiosis on soil aggregation. In present study, the split root device with four compartments was used to quantitatively compare the change of soil aggregates in mycorrhizosphere, rhizosphere, hyphosphere and bulk soil. The results showed that there were significant positive correlation between hyphal length

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助(XDJK2010B012); 国家自然科学基金资助项目(40701085); 公益性行业(农业)科研专项经费(201103003)

收稿日期: 2011-04-08; 修订日期: 2011-11-15

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: guotaosd@swu.edu.cn

density, easy extractable glomalin (EEG) and mean weight diameter (MWD), geometric mean diameter (GMD) and the amount of larger macroaggregates ($>250\ \mu\text{m}$ up to several millimeters diameter, $R_{0.25}$). The correlation coefficient between water stable aggregates and hyphal length density in mycorrhizosphere soil and hyphosphere soil was 0.777, 0.671 respectively. The GMD and MWD of $R_{0.25}$ in hyphal compartment were higher than those in root compartment but were lower than those in mycorrhizal compartment, which means mycorrhizal hyphae had greater effect than root did, but less effects than mycorrhizae did, on formation and stabilization of soil aggregates. The different ability of different AM fungi to improve soil structure revealed the function diversity of AM fungi. More AM fungal species and soil types will be considered in following studies.

Key Words: four compartment; hyphosphere; MWD; GMD; water stable aggregate

土壤结构是在矿物颗粒和有机物等土壤成分参与下,在干湿冻融交替等自然过程作用下形成不同尺度大小的多孔单元,具有多级层次性^[1]。土壤团聚体是土壤养分的贮存库和各种土壤微生物的生境,土壤团聚体形成和稳定是生物、物理、化学的作用及它们之间协同作用的结果,而微生物又是其中最重要和最活跃的因素^[2-3]。丛枝菌根真菌(Arbuscular mycorrhizal fungi, AMF)是自然界中分布极其广泛,农业和生态意义十分重大的一类土壤微生物,它能够与陆地上 90% 以上的植物根系形成丛枝菌根(Arbuscular mycorrhiza, AM)共生体^[4]。在 AM 共生体中,包括根系、真菌的丛枝、泡囊、菌丝、孢子和孢子果等一系列结构和组成。因其特殊的菌丝结构和生理活动分泌产生的一类糖蛋白——球囊霉素相关土壤蛋白(Glomalin related soil protein, GRSP)参与土壤团聚体形成和稳定,丛枝菌根真菌这方面的作用受到越来越多的关注^[5-8]。

在已经开展的研究中,菌丝密度、有机质和 GRSP 在土壤团聚体形成和稳定中都有重要作用^[5-8],但已经进行的研究大多是盆栽试验或者两室分根试验,在这些研究中植株的根系、菌丝、GRSP 等都生长和分布于同一空间内,同时作用于土壤团聚体,无法直接区分比较这些因素的作用大小,只能通过通径分析(path analysis)间接获得的。因此,本研究采用四室分根装置,空间隔离菌根、植物根系以及菌根菌丝,分析比较菌根际土壤(Mycorrhizosphere soil, M)、根际土壤(Rhizosphere soil, R)、菌丝际土壤(Hyphosphere soil, H)和非根际土壤(Bulk soil, S)土壤团聚体特征,从而能够定量评价根系与菌丝、根系、根外菌丝在土壤团聚体的形成和稳定中的作用。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试植物:小麦 *Triticum aestivum* L. (绵阳 14 号)。

供试 AM 菌种: *Glomus mosseae* (*G. mosseae*)、*Glomus intraradices* (*G. intraradices*) 和 *Glomus etunicatum* (*G. etunicatum*)。3 个菌种均来自中国农业大学资源环境学院,采用三叶草扩繁,接种剂含有 AMF 孢子、菌丝片段、侵染根段。

供试土壤为中性紫色土,采自重庆市北碚区西南农业大学后山。土壤为中生代侏罗系沙溪庙组灰棕紫色沙泥岩母质上发育的中性紫色土(紫色湿润锥形土),基本性状为 pH 7.1;有机质 10.79 g/kg;全氮 0.78 g/kg;全磷 0.82 g/kg;全钾 20.54 g/kg;碱解氮 28.34 mg/kg;有效磷 10.91 mg/kg;速效钾 53.2 mg/kg。土壤经风干后,用 γ 射线灭菌以去除土壤中的微生物。

1.2 试验设计

试验所用装置如图 1 所示,为四室隔板分室系统。此装置采用 3mm 厚的有机玻璃板加工而成,每个室的长 $\times$ 宽 $\times$ 高均为:5cm $\times$ 10 cm $\times$ 15 cm。M 室和 R 室用长 14 cm,宽 10cm,厚 3 mm 的有机玻璃隔板隔开,而 S 室和 R 室以及 H 室和 M 室则由 400 目的尼龙网隔开,菌丝和溶液能透过此尼龙网,而根系则不能。试验设置接种 3 种不同的菌种处理,每个处理 3 个重复。每个处理将得到 4 种不同的土壤:菌根际土壤(Mycorrhizosphere soil, M)、根际土壤(Rhizosphere soil, R)、菌丝际土壤(Hyphosphere soil, H)和非根际土壤

(Bulk soil, S)。

验小麦种子用 10% 的 H_2O_2 消毒 10 min, 去离子水冲洗后置于装有土:沙 = 1:1 的培养盆中, 并用沙覆盖, 浇足水分使之发芽。待小麦长出 5—10 cm 的根系时进行分根: 先分别加 0.25 kg 土壤置于中间两室底, 将根系分成均匀的两部分分别置于两室中, 然后在 M 室加入与接种剂充分混合均匀的 0.5 kg 土壤, R 室则加入与灭菌的接种剂混合均匀的土壤, 最后再加 0.25 kg 土壤覆盖。S 室和 H 室加入的土壤与 R 室相同。分根后每室浇水 150 mL, 以后每天利用称重法浇水补足水分, 并保持四室土壤湿度一致。试验于 2009 年 12 月至 2010 年 3 月在西南大学植物营养网室进行。

1.3 样品分析

盆栽 3 个月收获, 收获时样品地上部分和地下部分分开, 四个室的土壤分开收获。将土壤沿自然结构小心掰成 1 cm 左右的小土块, 拣出其中的根系, 用水清洗干净, 取一半根系剪成 1 cm 长根段, 混匀后取鲜根约 1 g 测定根系侵染率。剩下的样品 105 °C 杀青半小时后 70 °C 烘干, 用于生物量和氮磷含量的测定。土壤样品风干备用。

土壤有机质含量的测定采用重铬酸钾外加热法 ($K_2Cr_2O_7-H_2SO_4$ 法)。土壤团聚体的分布状况采用筛分法^[9]。根系侵染率采用方格交叉法测定^[10], 菌丝密度的测定菌丝密度按照 Abbott 等人的方法进行^[11]。生物量的测定采用烘干称量法。氮含量采用 $H_2SO_4-H_2O_2$ 消煮, 半微量凯氏蒸馏定氮法测定。磷含量采用 $H_2SO_4-H_2O_2$ 消煮, 钒钼黄比色法测定。

依据 Wright 等^[12] 的方法, 测定土壤的总球囊霉素 (total glomalin, TG) 和易提取的球囊霉素 (easy extractive glomalin, EEG)。TG 测定过程如下: 称取 0.25 g 土壤加 2 ml pH8.0、50 mmol/L 柠檬酸钠浸提剂在 121 °C 下提取 90 min, 然后在 10000 g 下离心 6min, 移走上清液后, 再加入等量的柠檬酸钠浸提剂, 高温提取 60 min, 同前面一样的条件离心并移走上清液, 重复操作, 连续提取 5 次, 每次重复的提取液收集起来后 10000 g 离心 10 min, 上清液中的球囊霉素使用考马斯亮蓝法显色, 牛血清蛋白作标准曲线。而 EEG 则是用 pH7.0、20 mmol/L 柠檬酸钠浸提剂在 121 °C 下提取 30 min。

1.4 数据处理

应用 SPSS 软件对试验数据进行单因素统计分析, 5% 水平下 LSD 多重比较检验各处理平均值之间的差异显著性。

利用各粒径团聚体数据, 计算大于 0.25mm 团聚体 $R_{0.25}$:

$$R_{0.25} = \frac{M_{r>0.25}}{M_T} = 1 - \frac{M_{r<0.25}}{M_T}$$

式中, $M_{r>0.25}$ 表示大于 0.25mm 团聚体数量, M_T 表示团聚体总量, $M_{r<0.25}$ 表示小于 0.25mm 团聚体数量。

平均重量直径 (MWD) 和几何平均直径 (GMD) 都是基于不同粒径的团聚体的重量得到的, 计算公式分别如下^[13]:

$$MWD = \sum_{i=1}^n x_i w_i \quad GMD = \exp \left[\left(\sum_{i=1}^n w_i \lg x_i \right) / \left(\sum_{i=1}^n w_i \right) \right]$$

式中, x_i 是筛分出来的任一粒径范围团聚体的平均重量直径, w_i 是任一粒径范围团聚体的重量占土壤样品干

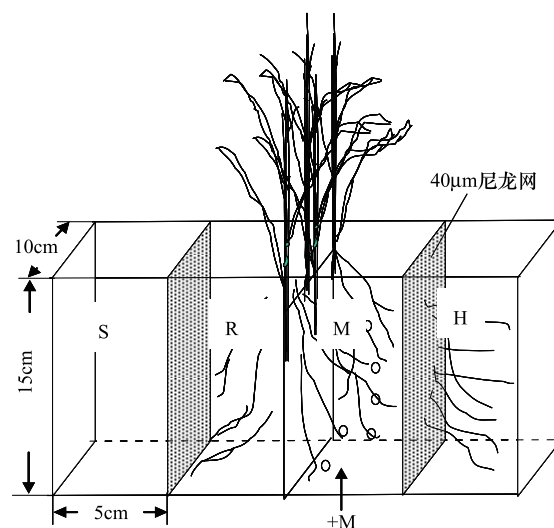


图1 分根装置示意图

Fig. 1 Split-root system

M: 菌根际土壤 Mycorrhizosphere soil, R: 根际土壤 Rhizosphere soil, H: 菌丝际土壤 Hyphosphere soil, S: 和非根际土壤 Bulk soil

重的分数。

2 结果

2.1 接种不同丛枝菌根真菌对小麦生长状况和菌根侵染率的影响

从表 1 可以看出接种 3 种菌种的 M 室均形成了良好的菌根共生体,根系侵染率为 30%—44%,其中接种 *G. intraradices* 和 *G. mosseae* 的根系侵染率显著高于接种 *G. etunicatum* 的根系,而不接种的 R 室均未形成菌根共生体。接种 3 种菌种的 M 和 R 室根系生物量差异均不显著,因此 M 和 R 室土壤团聚体结构特征的不同缘于接种处理。含氮量和含磷量乘以生物量得到吸氮量和吸磷量。所有处理的 M 室和 R 室的根系生物量差异均不显著,但 M 室根系含磷量和吸磷量均有高于 R 室的趋势。表 2 得出的地上部分氮磷含量差异不显著,且地上部分干重差异也不显著,但是接种 *G. mosseae* 地上部分吸磷量显著低于接种 *G. intraradices* 和 *G. etunicatum* 的吸磷量。

表 1 接种菌根真菌的小麦地下部生物量、氮磷营养状况及菌根侵染状况
Table 1 Root biomass, N and P content and uptake in the split-root system

接种处理 Mycorrhizal status	根系生物量 Root biomass /g	根系含氮量 Root N content /(g/kg)	根系含磷量 Root P content /(g/kg)	地下部吸氮量 Root N uptake /mg	地下部吸磷量 Root P uptake /mg	根系侵染率 Mycorrhizal colonization/%
<i>G. intraradices</i>						
M	0.62 a	6.74 ab	2.89 a	4.16 a	1.79 a	42.6 a
R	0.67 a	6.02 b	2.47 a	4.08 a	1.64 a	0 c
<i>G. mosseae</i>						
M	0.66 a	6.15 ab	2.72 a	4.07 a	1.81 a	44.0 a
R	0.54 a	6.19 ab	2.52 a	3.34 a	1.33 a	0 c
<i>G. etunicatum</i>						
M	0.58 a	6.91 a	2.75 a	4.00 a	1.60 a	30.4 b
R	0.58 a	6.19 ab	2.31 a	3.60 a	1.34 a	0 c

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

表 2 接种菌根真菌的小麦地上部干重及氮磷营养状况
Table 2 Shoot biomass, N and P content and uptake in the split-root system

接种处理 Mycorrhizal status	地上部干重 Shoot biomass /g	地上部含氮量 Shoot N content /(g/kg)	地上部含磷量 Shoot P content /(g/kg)	地上部吸氮量 Shoot N uptake /mg	地上部吸磷量 Shoot P uptake /mg
<i>G. intraradices</i>	17.45 a	13.88 a	6.41 a	242.1 a	111.8 ab
<i>G. mosseae</i>	17.49 a	14.24 a	5.43 a	249.1 a	94.8 b
<i>G. etunicatum</i>	18.09 a	13.64 a	6.63 a	246.9 a	120.0 a

2.2 接种不同丛枝菌根真菌对四室土壤菌丝密度、有机质和球囊霉素含量的影响

表 3 显示,由于丛枝菌根真菌根外菌丝可以通过 M 室和 H 室之间的尼龙网到达 H 室,在 M 室和 H 室均有大量的菌丝,菌丝密度在 64—81cm/g 之间,接种 *G. mosseae* 的 M 室最高,为 80.65cm/g。R 室和 S 室没有菌丝存在。接种 *G. mosseae* 和 *G. etunicatum* 时,H 室 TG 含量最高;而接种 *G. intraradices* 时,M 室 TG 高于其他 3 个室。对于 EEG 含量,接种 3 种菌种的四室土壤均表现出相同的趋势:H>M>S>R,其中接种 *G. mosseae* 和 *G. etunicatum* 的 H 室显著高于对应的 R 室和 S 室,各室中又以接种 *G. etunicatum* 的 H 室最高。

土壤有机质指存在于土壤中的所有有机物质,包括土壤中的新鲜有机物质(未分解的植物残体)、土壤微生物、微生物代谢产物和腐殖质,真菌在有机质的循环中起着重要的作用,同时有机质参与土壤结构的形成^[14-15]。在接种 3 种菌种的处理中,均为 H 室的有机质含量最高,其中又以接种 *G. intraradices* 的 H 室最高。菌丝际有机含量最高与 AMF 分泌物 EEG 含量较高有关,因为 GRSP 主要由蛋白质和碳水化合物组成,对有机质含量有积极的贡献。

表 3 四室土壤菌丝密度、有机质和球囊霉素含量

Table 3 Hyphal density, OM content, TG and EEG content of soils in the four compartments

接种处理 Mycorrhizal status	菌丝密度 Hyphal density /(cm/g)	有机质 Organic matter /(g/kg)	总球囊霉素 TG/(g/kg)	易提取球囊霉素 EEG /(g/kg)
<i>G. intraradices</i>				
M	65.36 a	15.91 a	4.69 a	1.03 a
R	0 b	15.03 a	4.56 a	0.95 a
H	66.00 a	16.19 a	4.64 a	1.05 a
S	0 b	15.63 a	4.59 a	1.01 a
<i>G. mosseae</i>				
M	80.65 a	14.89 a	4.57 b	0.96 b
R	0 c	13.95 a	4.62 ab	0.89 c
H	64.97 b	15.54 a	4.82 a	1.04 a
S	0 c	15.36 a	4.65 ab	0.94 bc
<i>G. etunicatum</i>				
M	71.24 a	15.10 b	4.70 ab	1.05 ab
R	0 b	15.40 ab	4.57 bc	0.97 b
H	74.77 a	15.82 a	4.79 a	1.13 a
S	0 b	15.58 ab	4.54 c	0.99 b

2.3 接种不同丛枝菌根真菌对四室土壤结构特征的影响

表 4 是干筛和湿筛条件下 M、R、H、S 中土壤 MWD、GMD 和 $R_{0.25}$ 的分析结果。干筛法获得的团聚体量包括水稳性团聚体和非水稳性团聚体,干筛法反映的是水稳性和非水稳性团聚体的总体特征,湿筛法反映的是水稳性团聚体特征^[1],湿筛法更能体现土壤结构的变化,在土壤肥力和生态中起作用的也主要是水稳性团聚体。表 4 中干筛获得的 $R_{0.25}$ 显著高于湿筛,说明该土壤团聚体大部分为非水稳性团聚体。干筛条件下,接种 *G. intraradices* 和 *G. mosseae*, $R_{0.25}$ 值均为 R>S>H>M,接种 *G. etunicatum* 为 H>R>S>M。尽管干筛条件下 M 室 $R_{0.25}$ 为四室最小,但在湿筛条件下,接种 *G. intraradices* 和 *G. mosseae* 时, $R_{0.25}$ 值均为 M>H>R>S,其中接种 *G. mosseae* 时, M 室显著高于其它几室,接种 *G. etunicatum* 的 H 室显著高于其它几室。湿筛条件下的 MWD 和 GMD 表现出相同的变化规律:接种 *G. intraradices* 时为 M>H>S>R,接种 *G. mosseae* 时为 M>H>R>S,接种 *G. etunicatum* 时为 H>M>S>R。

表 4 土壤团聚体平均重量直径、几何平均直径和大于 0.25mm 水稳性团聚体总量

Table 4 MWD, GMD and $R_{0.25}$

接种处理 Mycorrhizal status	干筛 Dry sieving			湿筛 Wet sieving		
	MWD	GMD	$R_{0.25}$	MWD	GMD	$R_{0.25}$
<i>G. intraradices</i>						
M	5.68 a	3.04 a	90.68 a	0.445 a	0.239 a	35.98 a
R	5.99 a	3.45 a	93.63 a	0.374 b	0.216 b	33.55 a
H	6.15 a	3.48 a	91.61 a	0.392 b	0.223 b	35.40 a
S	5.85 a	3.29 a	92.99 a	0.379 b	0.218 b	33.95 a
<i>G. mosseae</i>						
M	6.19 a	3.49 bc	92.45 a	0.525 a	0.258 a	40.09 a
R	5.57 b	3.35 c	94.23 a	0.442 bc	0.233 bc	35.96 b
H	6.54 a	4.03 a	93.99 a	0.490 ab	0.244 ab	36.36 b
S	6.13 a	3.69 b	94.07 a	0.416 c	0.225 c	33.98 b
<i>G. etunicatum</i>						
M	5.50 ab	2.79 b	87.83 b	0.525 a	0.253 ab	37.73 b
R	5.19 b	2.92 b	91.53 a	0.466 a	0.238 b	36.58 b
H	5.81 a	3.56 a	93.13 a	0.538 a	0.269 a	42.38 a
S	5.26 b	3.05 b	91.36 a	0.477 a	0.245 b	36.84 b

2.4 相关性分析

有机质含量(X_1)、易提取球囊霉素含量(X_2)、总球囊霉素含量(X_3)、侵染率(X_4)和菌丝密度(X_5)与 MWD、GMD 和 $R_{0.25}$ 之间的相关系数如表 5 所示。统计结果显示:菌丝密度与 MWD、GMD 和 $R_{0.25}$ 均有极显著的正相关关系,EEG 和侵染率也与 MWD 和 GMD 有显著的正相关关系,EEG 与有机质、TG 和菌丝密度也有显著的正相关关系。

表 5 四室分根装置中各因素的相关系数

	有机质含量 organic matter /(g/kg) (X_1)	易提取球囊 霉素含量 EEG /(g/kg) (X_2)	总球囊霉素 含量 TG /(g/kg) (X_3)	侵染率 Rate of inoculation /% (X_4)	菌丝密度 Length of hyphae /(cm/g) (X_5)	平均重量直径 MWD (Y_1)	几何平均直径 GMD (Y_2)	大于 0.25mm 的 水稳性团聚体 含量 $R_{0.25}$ (Y_3)
X_1	1.00							
X_2	0.383 *	1.00						
X_3	0.065	0.439 **	1.00					
X_4	-0.040	0.084	0.032	1.00				
X_5	0.212	0.535 **	0.377 *	0.581 **	1.00			
Y_1	0.027	0.396 *	0.208	0.352 *	0.578 **	1.00		
Y_2	-0.057	0.331 *	0.206	0.374 *	0.534 **	0.964 **	1.00	
Y_3	-0.029	0.377 *	0.171	0.266	0.601 **	0.844 **	0.785 **	1.00

M 室和 H 室菌丝密度与水稳性 $R_{0.25}$ 含量的相关关系如图 2 所示。M 室和 H 室大于 0.25mm 水稳性团聚体数量与菌丝密度有显著的正相关关系,相关系数分别为 0.777 和 0.671。

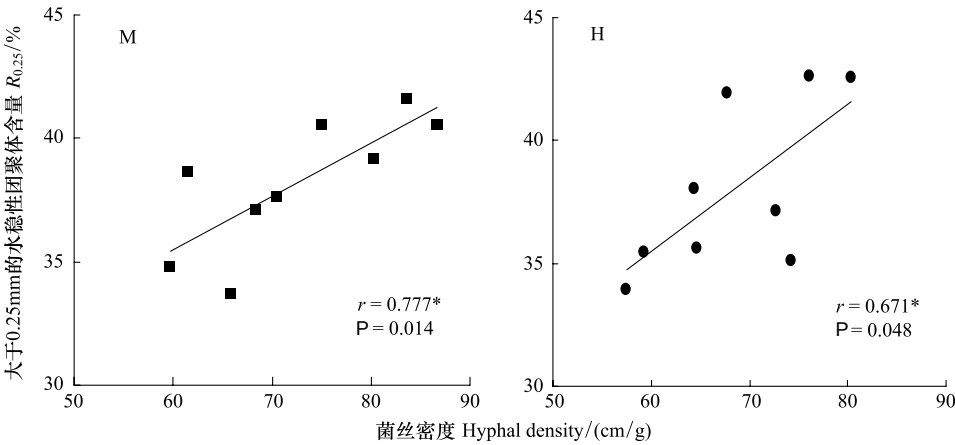


图 2 土壤菌丝密度与大于 0.25mm 水稳性团聚体含量之间的关系

Fig. 2 Relationships between Hyphal density and $R_{0.25}$ in the mycorrhizosphere soil and hyphosphere soil

3 讨论

此研究应用四室分根装置研究了中性紫色土接种不同 AM 真菌后菌根际土壤 (Mycorrhizosphere soil, M)、根际土壤 (Rhizosphere soil, R)、菌丝际土壤 (Hyphosphere soil, H) 和非根际土壤 (Bulk soil, S) MWD、GMD 和 $R_{0.25}$ 含量的变化。M 内含有植物根系和菌丝, R 内含有植物根系, H 只含有菌丝, 因此在 M 室内意味着植物根系和菌丝共同作用于土壤结构, 而在 R 室内只有植物根系的作用, 在 H 室内只有菌丝的作用。在此试验条件下, 根系和菌丝、根系以及菌丝对土壤团聚体结构特征的影响程度就可通过 M、R 及 H 团聚体结构特征的变化中得到。

根据 Tisdall 和 Oades 的团聚体分级理论, 大团聚体 ($>0.25\text{mm}$) 主要是由土壤根系和菌丝缠绕胶结微团聚体形成, 而微团聚体 ($<0.25\text{mm}$) 主要是通过多价阳离子桥和多糖胶结土壤矿物颗粒形成的, 在此形成过程

中,根系和微生物的分泌物是主要胶结剂^[16]。AM 真菌侵染植物根系后对土壤团聚体的影响主要是源于 AM 菌丝对土壤颗粒的网织作用^[17]和 AM 真菌产生的分泌物的超强黏合作用^[18]。

AM 真菌侵染植物后可形成大量的菌丝,它是植物与土壤联系的桥梁。本试验中菌丝在促进植物磷营养中的作用得到了充分发挥^[19],接种菌根真菌的 M 室根系无论是含磷量还是吸磷量都有高于 R 室的趋势。数据显示菌丝密度与 MWD、GMD 和 $R_{0.25}$ 均呈极显著的正相关关系(表 5),说明了菌丝在团聚体形成和稳定中的积极作用。菌丝将土壤彼此机械的缠绕在一起而形成团聚体,随着菌丝长度的增加,土壤团聚体稳定性也相应增强,接种 *G. etunicatum* 时,H 室水稳性 $R_{0.25}$ 显著高于 M 和 R 室,与此菌株的菌丝密度较大有关。因此丛枝菌根对土壤团聚体的影响因素中,菌种差异主要表现在菌丝量的不同^[8]。

GRSP 作为一类重要的 AM 菌根真菌分泌物,较其他土壤热水提取碳水化合物黏附土壤颗粒的能力强 3—10 倍,能够把小的土壤颗粒粘成直径 $<0.25\text{ mm}$ 的微团聚体,进而形成大聚合体,最后形成一个较小的含有泥土、淤泥、沙石及矿物质和有机质等成分的土壤单位,因此 GRSP 促进土壤团聚体的形成和稳定而见诸于相关报道^[18,20-21]。本研究中 EEG 含量与 MWD、GMD 和 $R_{0.25}$ 均有显著的正相关关系,表明了 EEG 在团聚体形成中的巨大作用。TG 是由高浓度的柠檬酸钠溶液 121°C 下多次提取出来,它可能同时提取出了土壤中的其他蛋白质以及多酚类物质^[22],其含量与土壤团聚体结构特征有正相关关系,但不显著,因此本研究认为 EEG 比 TG 更能表征 GRSP 与土壤团聚体之间的关系。接种 3 种菌种的四室 EEG 含量均为 $H>M>S>R$,GRSP 是由菌丝分泌的,大部分分布在菌丝体表面的,通过菌丝的周转后到达土壤^[16],因此菌丝密度较高的 H 室内含有较多的 GRSP,也可能与根系周围的微生物对 GRSP 的降解有关^[23]。

许多研究表明,根系、菌丝密度和菌根分泌物 GRSP 对团聚体形成和稳定都有促进作用,而三者作用的大小及其相互之间的关系也因试验条件的不同而有所差异。Miller 和 Jastrow 的研究表明菌丝密度较 $0.2\text{—}1\text{ mm}$ 直径的细根对 GMD 有更强的直接作用^[24],冯固等^[25]认为菌根菌丝对土壤中 $5\text{—}2\text{ mm}$ 和 $2\text{—}1\text{ mm}$ 土壤水稳性大团聚体形成的贡献超过了根系的作用。本研究数据表明,菌丝单独存在的 H 室 MWD、GMD 和 $R_{0.25}$ 高于 R 室(表 4),因此在此实验条件下,分室试验的数据直接表明了菌丝在团聚体形成和稳定中的作用超过了根系的作用,但是这种作用还是远不及菌丝和根系共同的作用,接种 *G. intraradices* 和 *G. mosseae* 时,M 室 MWD、GMD 和 $R_{0.25}$ 均高于 H 室。将 M 和 H 室菌丝密度与水稳性 $R_{0.25}$ 分别做相关分析,相关系数分别为 0.777 和 0.671(图 2),也说明菌丝在根系存在条件下与水稳性大团聚体的相关性更高。而在接种 *G. etunicatum* 时,H 室水稳性 $R_{0.25}$ 显著高于 M 和 R 室,这可能与菌根分泌物 GRSP 和菌丝密度都为最大值有关,这也说明在一定条件下 GRSP 和菌丝密度对土壤团聚体形成的共同作用甚至高出了根系和菌丝的共同作用,因此不同 AM 菌种之间的结构和生理特征是影响土壤团聚体特征的一个重要因素。

尽管接种 3 种菌种的有机质和 EEG 含量均为 H 室高于 M 室(表 3),但是接种 *G. intraradices* 和 *G. mosseae* 的 M 室土壤团聚体特征(MWD、GMD 和 $R_{0.25}$ 值)优于 H 室土壤,接种 *G. etunicatum* 则相反。不同的菌种无论是在菌丝直径、壁厚、分支模式和分隔,还是形成外延菌丝网络的范围和密度及产生 GRSP 的量都有所不同^[26-27],而菌丝密度、侵染率、有机质和 GRSP 等因素共同作用于团聚体的形成和稳定,因此不同的菌种在土壤团聚体形成和稳定中各因素的作用程度也有所差异。

References:

- [1] Dexter A R. Advances in characterization of soil structure. Soil and Tillage Research, 1988, 11:199-238.
- [2] Six J, Bossuyt B, Degryze H, Denef K. A history of research on the link between (micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. Soil and Tillage Research, 2004, 79:7-31.
- [3] Nimmo J R, Perkins K S. Aggregates stability and size distribution//Methods of Soil Analysis, Part 4-Physical Methods. Madison, Wisconsin, USA: Soil Science Society of America, Inc. 2002: 317-328.
- [4] Pennisi E. The Secret life of fungi. Science, 2004, 304(11):1620
- [5] Rilling C R, Mummey D L. Mycorrhizal and soil structure. New Phytologist, 2006, 171: 41-53

- [6] Peng S L, Shen H, Guo T. Influence of arbuscular mycorrhizal fungi inoculation on 1—2mm soil water stable aggregates in split root system. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2010, 16(6):1546-1550.
- [7] Peng S L, Shen H, Guo T. Influence of mycorrhizal inoculation on water stable aggregates traits. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2010, 16(3):695-700.
- [8] Peng S L, Yuan J J, Wei C F, Shen H, Guo T. Impacts of arbuscular mycorrhizal fungi on soil aggregation dynamics of neutral purple soil. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(2):498-505
- [9] Kemper W D, Rosenau R C. Aggregate stability and size distribution. Klute A ed. *Methods of Soil Analysis. Part 1. Physical and Mineralogical Methods*. 2nd ed, WI: Agronomy Monograph American Society of Agronomy and Soil Science Society of America, 1986: 425-442.
- [10] Giovannetti M, Mosse B. An evaluation of techniques for measuring vesicular-arbuscular mycorrhizal infection in roots. *New phytologist*, 1980, 84: 489-500.
- [11] 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 fasciculuntm*. *New Phytologist*, 1984, 97: 437-446.
- [12] Wright S F, Franke S M, Morton J B, Upadhyaya A. Time course study and partial characterization of a protein on hyphae of arbuscular mycorrhizal fungi during active colonization of roots. *Plant and Soil*, 1996, 181: 193-203.
- [13] Shao M A, Wang Q J, Huang M B. *Soil Physics*. Beijing: High Education Press, 2006.
- [14] Peng X H, Zhang B, Zhao Q G. A review on relationship between soil organic carbon pools and soil structure stability. *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41: 618-622.
- [15] Zhang B, Peng X H. Organic matter enrichment and aggregate stabilization in a severely degraded ultisol after reforestation. *Pedosphere*, 2006, 16(6):699-706.
- [16] Tisdall J M, Oades J M. Organic mater and water-stable aggregates in soils. *Journal of Soil Science*, 1982, 33: 141-163.
- [17] Smith S E, Read D J. *Mycorrhizal symbiosis*. London: Academic Press, 2008. 1-20.
- [18] 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: 97-107.
- [19] Li X L, George E, Marschner H. Extension of the phosphorus depletion zone in VA-mycorrhizal white clover in a calcareous soil. *Plant and Soil*, 1991, 136(1): 41-48.
- [20] Wright S F, Upadhyaya A, Buyer J S. Comparison of N-linked oligosaccharides of glomalin from arbuscular mycorrhizal fungi and soils by capillary electrophoresis. *Soil Biol. Biochem*, 1998, 30: 1853-1857.
- [21] Rillig M C, Wright S F, Eviner V T. The role of arbuscular mycorrhizal fungi and glomalin in soil aggregation: Comparing effects of five plant species. *Plant Soil*, 2002, 238: 325-333.
- [22] David P J, Sara G, Bray B. Glomalin extraction and measurement. *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, 40:728-739.
- [23] Jastrow J D, Miller R H. Methods for assessing the effect of biota on soil structure. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 1991, 34:279-303.
- [24] Miller R H, Jastrow J D. Hierarchy of root and mycorrhizal fungal interactions with soil aggregation. *Soil Biology and Biochemistry*. 1990, 22(5): 579-584.
- [25] 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: 99-102.
- [26] Hart M M, Reader R J. The role of the external mycelium in early colonization for three arbuscular mycorrhizal fungal species with different colonization strategies. *Pedobiol*, 2005, 49: 269-279.
- [27] Stefano Bedini et al. 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 & Biochemistry*, 2009, 41:1491-1496.

参考文献:

- [6] 彭思利, 申鸿, 袁俊吉, 郭涛. 分根装置中接种 AMF 对 1—2mm 土壤水稳性团聚体的影响. *植物营养与肥料学报*, 2010, 16(6): 1546-1550.
- [7] 彭思利, 申鸿, 郭涛. 接种丛枝菌根真菌对土壤水稳性团聚体特征的影响. *植物营养与肥料学报*, 2010, 16(3): 695-700.
- [8] 彭思利, 申鸿, 袁俊吉, 魏朝富, 郭涛. 丛枝菌根真菌对中性紫色土土壤团聚体特征的影响. *生态学报*, 2011, 31(2): 498-505.
- [13] 邵明安, 王全九, 黄明斌. *土壤物理学*. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [14] 彭新华, 张斌, 赵其国. 土壤有机碳库与土壤结构稳定性关系的研究进展. *土壤学报*, 2004, 41: 618-622.
- [25] 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: 99-102.

CONTENTS

Behavioural time budgets and diurnal rhythms of the female Tibetan gazelles in the Kekexili National Nature Reserve	LIAN Xinming, LI Xiaoxiao, YAN Peishi, et al (663)
The relationship between the temporal-spatial distribution of fishing ground of yellowfin tuna (<i>Thunnus albacares</i>) and thermocline characteristics in the tropic Indian Ocean	YANG Shenglong, ZHANG Yu, ZHANG Heng, et al (671)
Characteristics of algous facies of planktonic algae in lake honghu and its response to habitat	LU Bilin, YAN Pingchuan, TIAN Xiaohai, et al (680)
Tide elevations for four mangrove species along western coast of Guangxi, China	LIU Liang, FAN Hangqing, LI Chungan (690)
Effects of CO ₂ -induced seawater acidification on photosynthesis and calcification in the coralline alga <i>Corallina pilulifera</i>	XU Zhiguang, LI Meizhen, HUO Chuanlin, et al (699)
Impacts of coverage and canopy water depth on the spectral characteristics for a submerged plant <i>Cabomba caroliniana</i>	ZOU Weina, YUAN Lin, ZHANG Liquan, et al (706)
Prioritizing biodiversity in conservation planning based on C-Plan: a case study from northeast China	LUAN Xiaofeng, SUN Gongqi, QU Yi, et al (715)
Effects of urbanization on indigenous plant diversity: a case study of Langfang City, China	PENG Yu, LIU Xuehua, XUE Dayuan, et al (723)
Using infra-red cameras to survey wildlife in Beijing Songshan National Nature Reserve	LIU Fang, LI Diqiang, WU Jigui (730)
Individual tree biomass model by tree origin, site classes and age groups	LI Haikui, NING Jinkui (740)
Population genetics of <i>Niviventer confucianus</i> and its relationships with habitat area in Thousand Island Lake region	LIU Jun, BAO Yixin, ZHANG Xu, et al (758)
Impacts of climate change on phenological phase of herb in the main grassland in Inner Mongolia	GU RunYuan, ZHOU Weican, BAI Meilan, et al (767)
Atmospheric nitrogen deposition in the glacier regions of Northwest China: a case study of Glacier No. 1 at the headwaters of Urumqi River, Tianshan Mountains	WANG Shengjie, ZHANG Mingjun, WANG Feiteng, et al (777)
Effects of vegetation type on arthropod functional groups in the aerial habitat of salt marsh	TONG Chunfu (786)
The plant community distribution and migration characteristics of heavy metals in tolerance dominant species in lead/zinc mine areas in Northwestern Guizhou Province	XING Dan, LIU Hongyan, YU Pingping, et al (796)
Sprouting characteristic in restoration ecosystems of monsoon evergreen broad-leaved forest in south-central of Yunnan Province	SU Jianrong, LIU Wande, ZHANG Zhijun, et al (805)
Distribution patterns and changes of aquatic communities in Lashihai Plateau Wetland after impoundment by damming	XIAO Derong, YUAN Hua, TIAN Kun, et al (815)
Spatial distribution of root biomass of <i>Pinus massoniana</i> plantation in Three Gorges Reservoir area, China	CHENG Ruimei, WANG Ruili, XIAO Wenfa, et al (823)
Differences in biomass, litter layer mass and SOC storage changing with tree growth in <i>Larix gmelinii</i> plantations in Northeast China	WANG Hongyan, WANG Wenjie, QIU Ling, et al (833)
Soil carbon sequestration rates and potential in the grazing grasslands of Inner Mongolia	HE Nianpeng, HAN Xingguo, YU Guirui (844)
Relationships between litter substrate quality and soil nutrients in different-aged <i>Pinus massoniana</i> stands	GE Xiaogai, XIAO Wenfa, ZENG Lixiong, et al (852)
Compare different effect of arbuscular mycorrhizal colonization on soil structure	PENG Sili, SHEN Hong, ZHANG Yuting, et al (863)
The infiltration process of clay soil under different initial soil water contents	LIU Muxing, NIE Yan, YU Jing (871)
Diurnal variations of the greenhouse gases emission and their optimal observation duration under different tillage systems	TIAN Shenzhong, NING Tangyuan, CHI Shuyun, et al (879)
Effects of exogenous pb and cu stress on eco-physiological characteristics on foxtail millet seedlings of different genotypes	XIAO Zhihua, ZHANG Yixian, ZHANG Xiwen, et al (889)
Combined effect of temperature and salinity on the Na ⁺ -K ⁺ -ATPase activity from the gill of GIFT tilapia juveniles (<i>Oreochromis niloticus</i>)	WANG Haizhen, WANG Hui, QIANG Jun, et al (898)
Pattern simulation of karst rocky desertification based on cellular automata	WANG Xiaoxue, LI Xuyong, WU Xiuqin (907)
The role of root border cells in protecting buckwheat root apices from aluminum toxicity and their effect on polysaccharide contents of root tip cell walls	CAI Miaozhen, WANG Ning, WANG Zhiying, et al (915)
The suitable stand structure and hydrological effects of the cypress protection forests in the central Sichuan hilly region	GONG Gutang, LI Yanqiong, ZHU Zhifang, et al (923)
Comprehensive evaluation of agricultural water-saving technology based on AHP and Rough Set method	ZHAI Zhifen, WANG Lanying, SUN Minzhang, et al (931)
Analysis of the spatial expansion characteristics of major urban agglomerations in China using DMSP/OLS images	WANG Cuiping, WANG Haowei, LI Chunming, et al (942)
Evaluation of non-use value of ecotourism resources: a case study in Dalai Lake protected area of China	WANG Pengwei, JIA Jingbo (955)
Review and Monograph	
Assessment indicators system of forest ecosystem health based on the harmful disturbance	YUAN Fei, ZHANG Xinyao, LIANG Jun (964)
Role of silicon in regulating plant resistance to insect herbivores	HAN Yongqiang, WEI Chunguang, HOU Maolin (974)
Scientific Note	
Relationships among light conditions, crown structure and branch longevity: a case study in <i>Osmanthus fragrans</i> and <i>Metasequoia glyptostroboides</i>	ZHAN Feng, YANG Dongmei (984)
Effects of maize straw with Bt gene return to field on growth of wheat seedlings	CHEN Xiaowen, QI Xin, WANG Haiyong, et al (993)
Studies of non-structural carbohydrates of <i>Cupressus funebris</i> in different landslides after Wenchuan Earthquake	CHEN Bo, LI Zhihua, HE Qian, et al (999)

《生态学报》2012 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的自然科学高级学术期刊,创刊于 1981 年。主要报道生态学研究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;新书评介和学术、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,280 页,国内定价 70 元/册,全年定价 1680 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 32 卷 第 3 期 (2012 年 2 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA
(Semimonthly, Started in 1981)
Vol. 32 No. 3 2012

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	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
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 70.00 元