

中国百种杰出学术期刊
中国精品科技期刊
中国科协优秀期刊
中国科学院优秀科技期刊
新中国 60 年有影响力的期刊
国家期刊奖

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica

(Shengtai Xuebao)

第 31 卷 第 4 期
Vol.31 No.4
2011



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 31 卷 第 4 期 2011 年 2 月 (半月刊)

目 次

短期增温对青藏高原高寒草甸植物群落结构和生物量的影响	李 娜,王根绪,杨 燕,等 (895)
三峡库区 9 种植物种子萌发特性及其在植被恢复中的意义	陶 敏,鲍大川,江明喜 (906)
白蜡虫及其 3 种优势寄生蜂的时空生态位	王自力,陈 勇,陈晓鸣,等 (914)
宁夏盐池荒漠草原步甲物种多样性	贺 奇,王新谱,杨贵军 (923)
脂肪酸对中华哲水蚤摄食两种海洋微藻的指示作用	刘梦坛,李超伦,孙 松 (933)
安徽菜子湖大型底栖动物的群落结构特征	徐小雨,周立志,朱文中,等 (943)
乐清湾潮间带大型底栖动物群落分布格局及其对人类活动的响应	彭 欣,谢起浪,陈少波,等 (954)
海蜃养殖对池塘底泥营养盐和大型底栖动物群落结构的影响	冯建祥,董双林,高勤峰,等 (964)
竹巴笼矮岩羊 (<i>Pseudois schaeferi</i>) 昼间行为节律和时间分配	刘国库,周材权,杨志松,等 (972)
干热河谷植物叶片,树高和种子功能性状比较	郑志兴,孙振华,张志明,等 (982)
石羊河中游沙漠化逆转过程土壤种子库的动态变化	马全林,张德魁,刘有军,等 (989)
基于 TM 影像、森林资源清查数据和人工神经网络的森林碳空间分布模拟	汪少华,张茂震,赵平安,等 (998)
山地视觉景观的 GIS 评价——以广东南昆山国家森林公园为例	裘亦书,高 峻,詹起林 (1009)
基于功能分类的城市湿地公园景观格局——以西溪湿地公园为例	李玉凤,刘红玉,郑 因,等 (1021)
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	贺学礼,高 露,赵丽莉 (1029)
农田灌溉对印度区域气候的影响模拟	毛慧琴,延晓冬,熊 喆,等 (1038)
高大气 CO ₂ 浓度下小麦旗叶光合能量利用对氮素和光强的响应	张绪成,于显枫,马一凡,等 (1046)
豌豆过氧化氢酶在烟草叶绿体中的过量表达提高了植物的抗逆性	王凤德,衣艳君,王海庆,等 (1058)
不同小麦品种对低温胁迫的反应及抗冻性评价	王树刚,王振林,王 平,等 (1064)
基于遥感与模型耦合的冬小麦生长预测	黄 彦,朱 艳,王 航,等 (1073)
喷施 ABA 对两个穗型不同小麦穗颈节伤流、穗部性状及产量的影响	崔志青,尹燕枰,田奇卓,等 (1085)
“稻鸭共生”生态系统稻季 N、P 循环	张 帆,隋 鹏,陈源泉,等 (1093)
红壤丘陵区粮食生产的生态成本	李 晓,谢永生,张应龙,等 (1101)
甘南牧区草畜平衡优化方案与管理决策	梁天刚,冯琦胜,夏文韬,等 (1111)
黄龙钙化滩流地物种-面积关系	黄宝强,罗毅波,安德军,等 (1124)
杉木人工林细根寿命的影响因素	凌 华,袁一丁,杨智杰,等 (1130)
长白落叶松林龄序列上的生物量及碳储量分配规律	巨文珍,王新杰,孙玉军 (1139)
生物肥与甲壳素和恶霉灵配施对香蕉枯萎病的防治效果	张志红,彭桂香,李华兴,等 (1149)
北京城区不同水质水体可培养细菌数量的季节动态变化	高 程,黄满荣,陶 爽,等 (1157)
专论与综述	
整树水力导度协同冠层气孔导度调节森林蒸腾	赵 平 (1164)
植物寄生对生态系统结构和功能的影响	李钧敏,董 鸣 (1174)
加拿大一枝黄花的入侵机理研究进展	杨如意,答树婷,唐建军,等 (1185)

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

贺学礼, 高露, 赵丽莉

(河北大学生命科学学院, 河北保定 071002)

摘要: 采用盆栽试验, 研究了水分胁迫下接种丛枝菌根 AM 真菌对民勤绢蒿 (*Seriphidium minchiunense*) 生长和抗旱性的影响。结果表明, 不同水分条件下, 接种 AM 真菌提高了民勤绢蒿菌根侵染率和生物量, 增加了地上部和地下部全 P 含量, 重度胁迫下接种株地上部总黄酮含量显著升高, 而对分枝数和地上部、地下部全 N 含量无显著影响。水分胁迫提高了民勤绢蒿菌根依赖性和全 N、全 P 菌根贡献率。不同生长时期接种 AM 真菌均能提高植株叶片相对含水量、可溶性蛋白和叶绿素含量; 前期接种株叶片可溶性糖含量显著低于未接种株, 而中后期可溶性糖含量显著高于未接种株; 整个生长时期接种株比未接种株叶片维持较低的脯氨酸含量; 不同生长时期接种株叶片全 N 和全 P 含量显著升高, 重度胁迫下接种株叶片总黄酮含量显著升高。AM 真菌促进宿主植物生长和增强抗旱性可能是 AM 真菌直接促进宿主植物根系对土壤水分和矿质元素吸收和间接改善植株体内生理代谢活动的缘故。

关键词: 丛枝菌根 AM 真菌; 水分胁迫; 抗旱性; 氮; 磷; 民勤绢蒿

Effects of AM fungi on the growth and drought resistance of *Seriphidium minchiunense* under water stress

HE Xueli, GAO Lu, ZHAO Lili

College of Life Sciences, Hebei University, Baoding 071002, China

Abstract: Drought is a world-spread problem seriously influencing production and quality of plants. At the same time, drought is one of the most important environmental factors limiting growth and development of desert plants in Northwest China. It is well known that Arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) can enhance the ability of the plants to establish and cope with stressful situations, such as drought stress, salt stress, nutrient deficiency, etc. Almost eighty percent of land plant species on the earth can form symbiotic associations with AMF. With pot experiment in a greenhouse, the paper studied the effects of arbuscular mycorrhizal fungi (*Glomus mosseae*) on the drought tolerance of *Seriphidium minchiunense* (*S. minchiunense*) under water stress. Seeds were collected from natural growth environment of *S. minchiunense* in Minqin County and sown in training matrix with sandy soil (2:1, mass ratio). Seedlings with similar height and crown were selected and divided into three groups (6 pots per group) when they had 2—3 leaves. The soil relative water content of three groups was severe stress (20% of maximum field capacity), moderate stress (40% of maximum field capacity), and normal water (60% of maximum field capacity), respectively. Each group of *S. minchiunense* seedlings was inoculated with AM fungi *Glomus mosseae* (3 pots), and non-mycorrhizal inoculation (3 pots), namely control (CK), respectively. The results showed that inoculation with AM fungi significantly increased the biomass accumulation and infection rate of *S. minchiunense* seedlings. The total phosphorus (P) content of shoot and root of seedlings were significantly increased under different water treatments, and total flavonoids content of shoot was only significantly increased under severe stress, while branch number and total N content of shoot and root were not significantly affected under inoculation AM fungi. Mycorrhizal

基金项目: 国家自然科学基金项目 (30670371, 40471637)

收稿日期: 2010-01-09; 修订日期: 2010-06-06

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xuelh1256@yahoo.com.cn

dependency and contribution rate of total nitrogen (N) and total P under water stress were higher than that under normal water condition. The content of leaf relative water, soluble protein, chlorophyll, total N and total P were significantly improved in different stages, and total flavonoids content of leaf was significantly increased just under severe stress, while the proline content was decreased throughout the growth period by colonization AM fungi. The content of soluble sugar in leaves of inoculated plant was significantly lower than that of non-inoculated plants in early stage, and significantly higher than that of non-inoculated plant in middle and latter stages. It could be concluded that the mechanism of AM fungi enhancing plant growth and strengthening the drought resistance of host plants may be the direct role of AM fungal hyphal contribution to soil water and minerals uptake in mycorrhizal plant, and the indirect role of AM fungi improves the physiological metabolic activity of host plants.

Key Words: arbuscular mycorrhizal fungi; water stress; drought resistance; nitrogen; phosphor; *Seriphidium minchinense*

民勤绢蒿 (*Seriphidium minchinense*) 属于菊科绢蒿属 (*Seriphidium* (Bess.) Poljak.) 多年生草本植物, 主要分布于甘肃省民勤县, 生于海拔 1300—1380 m 的半固定沙丘、砾质滩地、河谷等地带^[1]。甘肃民勤县三面环沙, 地处腾格里和巴丹吉林两大沙漠包围之中, 沙漠气候明显, 年降雨量 110mm, 而蒸发量高达 2646mm, 荒漠化土地面积达 94.5%, 生态环境极为脆弱^[2]。在这种特定生态环境下, 民勤绢蒿形成了独特的形态结构、生理特征和繁殖习性, 能够很好的适应荒漠环境。作为民勤县荒漠草地基础植被之一, 民勤绢蒿除了具有良好的饲用价值外, 在防止水土流失、防风固沙, 维护荒漠草地生态平衡和绿洲区生态安全等方面具有重要作用^[3]。但近年来, 由于人类过度放牧以及全球气候变化的影响, 民勤绢蒿草地植被受到严重破坏, 其生产及生态功能被严重削弱。因此, 利用生物技术促进民勤绢蒿健康生长是防止民勤绢蒿群落衰败的有效途径之一。

丛枝菌根 AM (arbuscular mycorrhiza, AM) 真菌广泛分布于各种陆地生态系统中, 能与 80% 以上高等植物形成丛枝菌根共生体, 促进宿主植物根系对土壤水分和矿质营养的吸收和利用, 提高植物抗逆性, 促进植物生长^[4], 对被破坏生态系统植被恢复和重建有重要作用^[5-6]。近年来, 利用菌根生物技术使植物充分适应干旱环境, 以提高植物在干旱环境中的成活率和生产力已成为研究的热点领域^[7-8]。本试验以民勤绢蒿为试材, 研究不同水分条件下接种 AM 真菌对民勤绢蒿生长和抗旱性的影响, 以便为充分利用 AM 真菌资源和菌根生物技术促进民勤绢蒿生长和草地生态恢复提供依据。

1 材料和方法

1.1 材料

供试种子取自甘肃省民勤县自然生长的民勤绢蒿植株。供试菌种为摩西球囊霉 (*Glomus mosseae*), 接种剂由本实验室保存菌种摩西球囊霉经黑麦草扩大繁殖后获得含有孢子、菌丝和侵染根段的根际土, 每 10g 菌土含 120 个孢子, 侵染率为 95%。供试土壤有机质 9.14 mg/g, 碱解 N 42.00 μ g/g, 速效 P 16.99 μ g/g, pH 8.00。

盆栽试验在河北大学玻璃温室进行, 培养基质选用农田土壤过筛后按质量比沙: 土 = 2:1 装入有孔塑料盆 (23cm \times 22cm \times 22cm), 每盆装土 4kg, 接种处理每盆层施菌剂 20g, 对照处理加同等质量的灭菌菌剂。每盆每千克土加 100mg P_2O_5 、150mg N 和 150mg K。2009 年 4 月 1 日播种, 15d 后出苗, 待幼苗生长 2—3 片叶时定植, 每盆 2 株。植株生长期间, 各处理统一正常浇水量, 温室常规管理, 不定期松土。

2009 年 6 月 1 日开始不同水分梯度处理, 每天用称重法保持每盆恒定。分别于 6 月 20 日 (前期)、7 月 10 日 (中期) 和 7 月 30 日 (后期) 测定叶片相对含水量、可溶性蛋白、可溶性糖、脯氨酸、叶片全 N、全 P 和总黄酮含量; 8 月 1 日收苗, 先测定株高、根长、分枝数和菌根侵染率, 再将地上部和根分开自然晾干至恒重, 分别称重, 粉碎后测定全 N、全 P 和总黄酮含量。

1.2 方法

试验设 3 个土壤相对含水量,即 20% (重度胁迫)、40% (中度胁迫)和 60% (正常供水),同一水分条件下设接种摩西球囊霉 (*Glaucus mosseae*) (GM) 和不接种 (CK) 2 个处理,重复 3 次,试验盆随机排列。

植株收获时菌根侵染率按 Phillips 和 Hayman 方法测定^[9]。植株形态学指标用测量法,植株干重和叶片相对含水量用称重法,可溶性蛋白用考马斯亮蓝 G-250 染色法测定,可溶性糖用蒽酮法,脯氨酸用茚三酮比色法^[10];叶绿素含量^[11]用超声波提取法;全 N 用凯氏定氮法;全 P 用钒钼黄比色法^[12];总黄酮含量用超声波提取紫外分光光度法测定^[13]。土壤有机质用重铬酸钾硫酸外加加热法,碱解 N 用碱解扩散法,速效 P 用 Olsen 法^[12]。

相关公式如下:

$$\text{菌根侵染率}(\%) = \text{AM 真菌侵染的根段数} / \text{检查的总根段数} \times 100$$

$$\text{菌根依赖性}(\%) = (\text{接种处理干重} - \text{不接种处理干重}) / \text{接种处理干重} \times 100$$

$$\text{菌根贡献率}(\%) = (\text{接种处理的吸收量} - \text{对照处理的吸收量}) / \text{接种处理的吸收量} \times 100$$

试验数据用 SPSS13.0 进行统计分析和作图,不同水分条件下接菌或对照平均值按 Duncan 新复极差分析,同一水分条件下接菌与对照用 *T*-test 进行比较,采用双因子方差分析接种 AM 真菌和水分胁迫二者之间的交互效应。

2 结果与分析

2.1 AM 真菌和水分胁迫对植株生长量的影响

由表 1 可见,同一水分条件下,接种 AM 真菌显著提高了植株根系菌根侵染率,接种株根长,地上部、地下部和全株生物量显著高于未接种株,但对分枝数无显著正效应;土壤含水量为 60% 和 40% 时,接种株株高显著高于未接种株。不同水分条件下,随土壤含水量降低,不仅显著抑制了 AM 真菌对宿主根系的侵染效应,也对植株大部分形态学指标有显著影响。

表 1 AM 真菌和水分胁迫对植株生长量的影响

Table 1 Effects of AM fungi on the growth amount of host plants under water stress

土壤相对含水量 Soil relative water content /%	接种 Inoculation	株高 Plant height /cm	根长 Root length /cm	分枝数 Branch number/枝	侵染率 Infection rate/%	每盆干重 Dry weight per pot/g			菌根依赖性 Mycorrhizal dependency/%
						地上部 Shoot	地下部 Root	全株 Total	
60	CK	42.67a	37.33a	8.60a	61.11a	8.24a	3.07b	11.31a	—
	GM	53.73a*	42.00a*	9.30a	87.50a*	10.31a*	3.63a*	13.69a*	17.38
40	CK	31.83b	33.33a	6.88b	56.21a	6.03b	2.21d	8.24b	—
	GM	46.17ab*	40.00a*	7.25b	83.33a*	7.76b*	2.52c*	10.27b*	19.82
20	CK	29.92b	26.67b	5.13c	22.65b	2.89c	1.26f	4.16c	—
	GM	35.17b	34.67b*	6.29b	65.00b*	3.81c*	1.41e*	5.22c*	20.37
显著性 Significant	P(S)	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	—
	P(GM)	0.002	0.000	0.058	0.000	0.000	0.000	0.000	—
	P(S × GM)	0.418	0.532	0.656	0.084	0.035	0.000	0.006	—

CK:未接种, GM:接种摩西球囊霉,表中同一列不同小写字母表示不同水分条件下接菌或对照在 5% 水平上差异显著,同一列 * 表示在同一水分条件下接菌与对照在 5% 水平上差异显著, *P*(S) < 0.05 表示水分胁迫下在 5% 水平上差异显著, *P*(GM) < 0.05 表示接种 GM 下在 5% 水平上差异显著, *P*(S × GM) < 0.05 表示水分胁迫和 GM 有显著交互效应

随水分胁迫程度提高,接种株和未接种株生物量随之降低。同一水分条件下,接种株生物量显著高于未接种株;不同水分条件下,民勤绢蒿对 AM 真菌的依赖性不同,在土壤含水量为 60%、40% 和 20% 时,民勤绢蒿的菌根依赖性分别是 17.38%、19.82% 和 20.37%,即民勤绢蒿在水分胁迫下较正常水分菌根依赖性高,且水分胁迫和 AM 真菌对植株地上部、地下部和整株干重有显著交互效应 (*P* < 0.05),对其它生长指标没有显著交互效应 (*P* > 0.05)。

2.2 AM 真菌和水分胁迫对植株地上部和地下部全 N,全 P 和总黄酮含量的影响

在土壤含水量为 20% 和 40% 时,接种 AM 真菌对植株地上部和地下部全 N 含量无显著影响,而接种株每

盆吸 N 量显著高于未接种株;接种株地上部、地下部全 P 含量及每盆吸 P 量显著升高;接种株地下部总黄酮含量显著低于未接种株,在土壤含水量为 20% 时,接种株地上部总黄酮含量和每盆黄酮产量高于未接种株。

不同水分条件下,随水分胁迫程度加强,植株地上部和地下部全 N 含量显著升高;地上部和地下部全 P 含量显著降低;每盆吸 N 量和吸 P 量显著降低;无论接种与否,地下部总黄酮含量都显著降低;地上部未接种株总黄酮含量显著降低,接种株则先降后升,每盆地上部黄酮产量显著降低。

双因子方差分析表明,水分胁迫和 AM 真菌对地上部、地下部全 P 和总黄酮含量,每盆吸 N 量、吸 P 量和总黄酮产量有显著交互效应($P < 0.05$),而对地上部和地下部全 N 含量无显著交互效应($P > 0.05$)。

表 2 AM 真菌和水分胁迫对植株全 N、全 P 和总黄酮含量的影响

Table 2 Effects of AM fungi on the content of total N, P and flavonoids of host plants under water stress

土壤相对含水量 Soil relative water content/%	接种 Inoculation	全 N Total N/%		每盆吸 N 量/g Total N uptake per pot	贡献率/% Contribution rate
		地上部 Shoot	地下部 Root		
60	CK	1.65c*	1.06c*	16.81a	—
	GM	1.59c	1.02c	19.65a*	14.45
40	CK	1.79b	1.37b	13.79b	—
	GM	1.77b	1.34b	17.12b*	19.45
20	CK	2.18a	1.75a	8.52c	—
	GM	2.17a	1.75a	10.73c*	20.60
显著性 Significant	P(S)	0.000	0.000	0.000	—
	P(GM)	0.429	0.025	0.000	—
	P(S × GM)	0.809	0.225	0.039	—
土壤相对含水量 Soil relative water content/%	接种 Inoculation	全 P Total P/%		每盆吸 P 量/g Total P uptake per pot	贡献率/% Contribution rate
		地上部 Shoot	地下部 Root		
60	CK	0.35a	0.11a	3.24a	—
	GM	0.37a*	0.14a*	4.27a*	24.12
40	CK	0.32b	0.10ab	2.18b	—
	GM	0.35b*	0.13b*	3.05b*	28.52
20	CK	0.32c	0.10b	1.05c	—
	GM	0.35b*	0.12c*	1.51c*	30.46
显著性 Significant	P(S)	0.000	0.000	0.000	—
	P(GM)	0.000	0.000	0.000	—
	P(S × GM)	0.001	0.007	0.000	—
土壤相对含水量 Soil relative water content/%	接种 Inoculation	总黄酮 Total flavonoids/%		每盆吸黄酮产量/g Production of total flavonoids per pot	贡献率/% Contribution rate
		地上部 Shoot	地下部 Root		
60	CK	0.62a*	0.41a*	6.39a	—
	GM	0.61b	0.38a	7.46a*	14.34
40	CK	0.60b*	0.39b*	4.49b*	—
	GM	0.43c	0.29b	4.04b	-11.14
20	CK	0.54c	0.29c*	1.95c	—
	GM	0.61a*	0.23c	2.66c*	26.69
显著性 Significant	P(S)	0.000	0.000	0.000	—
	P(GM)	0.000	0.000	0.000	—
	P(S × GM)	0.000	0.000	0.000	—

CK: 未接种, GM: 接种摩西球囊霉, 表中同一列不同小写字母表示不同水分条件下接菌或对照在 5% 水平上差异显著, 同一列 * 表示在同一水分条件下接菌与对照在 5% 水平上差异显著, $P(S) < 0.05$ 表示水分胁迫下在 5% 水平上差异显著, $P(GM) < 0.05$ 表示接种 GM 下在 5% 水平上差异显著, $P(S \times GM) < 0.05$ 表示水分胁迫和 GM 有显著交互效应

2.3 AM 真菌和水分胁迫对不同时期叶片生理生化特性的影响

植株通过提高叶片相对含水量来维持干旱和高温对叶片结构胁迫下的生理活动, 并随胁迫时间延长, 叶片相对含水量有升高趋势(图 1)。同一水分条件下, 接种株叶片相对含水量显著升高; 不同水分条件下, 随胁

胁迫程度加强,叶片相对含水量显著降低。水分胁迫和 AM 真菌对中后期叶片相对含水量有显著交互效应 ($P < 0.05$) (表 3)。

由图 1 可见,同一水分条件下,接种 AM 真菌显著增加了不同时期叶片可溶性蛋白含量;不同水分条件下,随胁迫程度加强可溶性蛋白含量显著降低;叶片可溶性蛋白含量随生长期延长经历了一个先缓慢上升后快速降低的过程。水分胁迫和 AM 真菌对不同时期叶片可溶性蛋白含量有显著交互效应 ($P < 0.05$)。

同一水分条件下,前期接种株比未接种株维持较低的可溶性糖含量,中后期接种株可溶性糖含量显著高于未接种株;不同水分条件下,随胁迫程度加强,可溶性糖含量逐渐升高;整个生长期可溶性糖含量变化稳定。水分胁迫和 AM 真菌对中期叶片可溶性糖含量有显著交互效应 ($P < 0.05$)。

同一水分条件下,接种株比未接种株叶片维持较低脯氨酸含量;不同水分条件下,随胁迫程度加强脯氨酸含量升高;不同时期叶片脯氨酸含量变化较大,随生育期延长明显降低。水分胁迫和 AM 真菌对前期和后期叶片脯氨酸含量有显著交互效应 ($P < 0.05$)。

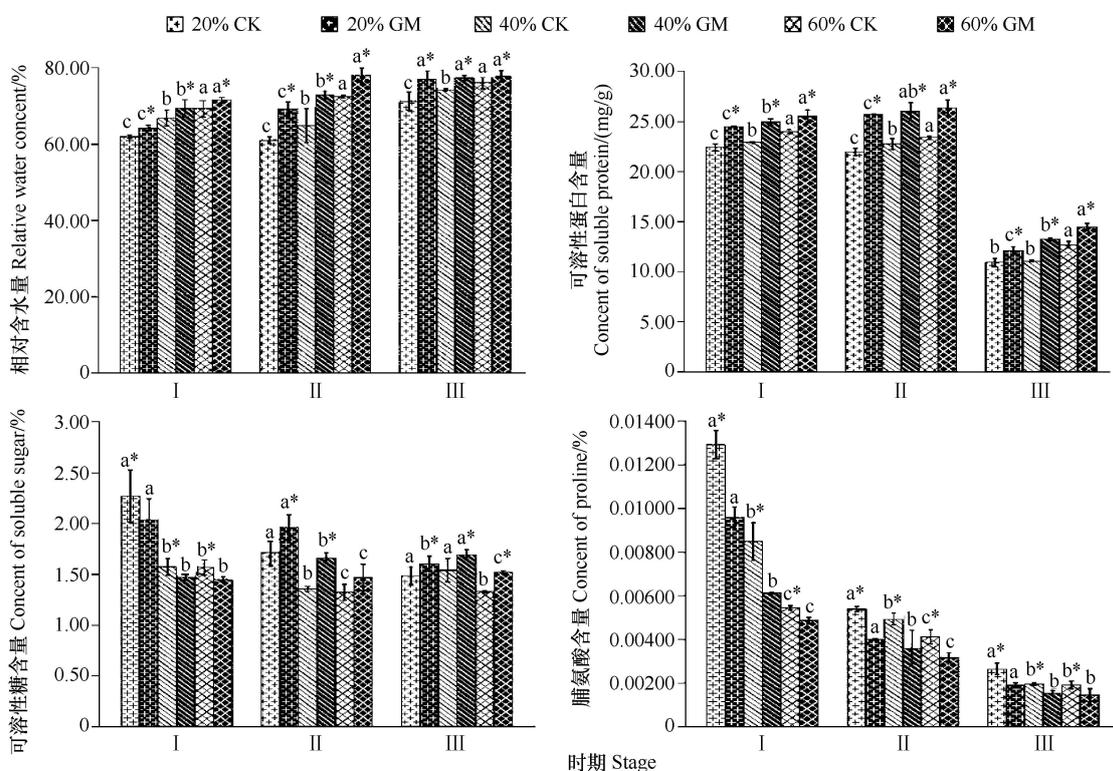


图 1 水分胁迫下 AM 真菌对不同时期植株叶片相对含水量和渗透调节物质含量影响

Fig. 1 Effects of AM fungi on the leaf relative water content and osmotic adjustment of host plants under water stress in different stages I:前期(6月20日) II:中期(7月10日) III:后期(7月30日)图中不同小写字母表示同一时期不同水分条件下接菌或对照在5%水平上差异显著,同一列*表示在同一水分条件下接菌与对照在5%水平上差异显著

表 3 AM 真菌和水分胁迫对不同时期植株叶片相对含水量和渗透调节物质双因子方差分析

Table 3 Double factor variance analysis of AM fungi on the leaf relative water content and osmotic adjustment of host plants under water stress in different stages

指标 Indicators	相对含水量 Relative water content			可溶性蛋白含量 Content of soluble protein			可溶性糖含量 Content of soluble sugar			脯氨酸含量 Content of proline		
	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III
P(S)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
P(GM)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
P(S × GM)	0.912	0.038	0.001	0.008	0.034	0.000	0.146	0.000	0.115	0.000	0.073	0.005

2.4 AM 真菌和水分胁迫对不同时期叶片叶绿素,全 N,全 P 和总黄酮含量的影响

由图 2 可见,同一水分条件下,接种株叶片叶绿素含量显著增加;不同时期,叶绿素含量变化不同,随胁迫程度加强,前期接种株叶绿素含量先降后升,未接种株先升后降,中后期接种株叶绿素含量显著增加;随生长期延长,叶绿素含量有升高趋势。水分胁迫和 AM 真菌对不同时期叶片叶绿素含量有显著交互效应 ($P < 0.05$) (表 4)。

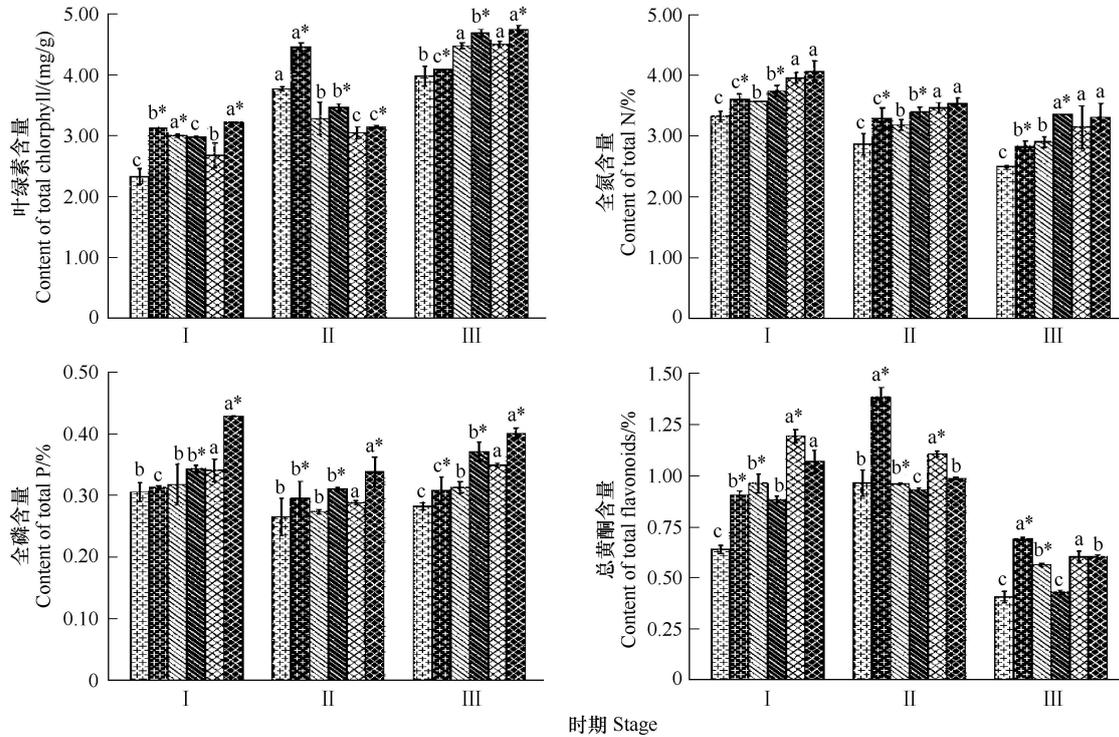


图 2 水分胁迫下 AM 真菌对不同时期植株叶片叶绿素、全 N、全 P 和总黄酮含量的影响

Fig. 2 Effects of AM fungi on the content of chlorophyll, total N, total P and total flavonoids of host plants under water stress in different stages

I:前期(6月20日) II:中期(7月10日) III:后期(7月30日)图中不同小写字母表示同一时期不同水分条件下接菌或对照在5%水平上差异显著,同一列*表示在同一水分条件下接菌与对照在5%水平上差异显著

表 4 AM 真菌和水分胁迫对不同时期植株叶片叶绿素、全 N、全 P 和总黄酮含量双因子方差分析

Table 4 Double factor variance analysis of AM fungi on the content of chlorophyll, total N, total P and total flavonoids of host plants under water stress in different stages

指标 Indicators	叶绿素含量 Content of chlorophyll			全 N 含量 Content of total N			全 P 含量 Content of total P			总黄酮含量 Content of total flavonoids		
	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III
P(S)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
P(GM)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.011	0.000	0.000
P(S × GM)	0.000	0.000	0.009	0.009	0.000	0.012	0.000	0.130	0.000	0.000	0.000	0.000

不同水分条件下,接种 AM 真菌对植株叶片全 N,全 P 和总黄酮含量影响显著。同一水分条件下,接种 AM 真菌显著提高了叶片全 N 和全 P 含量;随胁迫程度加强,全 N 和全 P 含量呈下降趋势;不同生长期间,叶片全 N 和全 P 含量趋于稳定。水分胁迫和 AM 真菌对不同时期叶片全 N 和全 P 含量有显著交互效应 ($P < 0.05$)。

水分胁迫和接种 AM 真菌对叶片总黄酮含量有较大影响。不同生长时期,接种株在土壤含水量为 20%

时叶片总黄酮含量显著高于未接种株,土壤含水量为 40% 和 60% 时叶片总黄酮含量低于未接种株或差异不显著;整个水分处理期间,总黄酮含量先升后降。水分胁迫和 AM 真菌对不同时期叶片总黄酮含量有显著交互效应($P < 0.05$)。

3 讨论

试验结果表明,接种 AM 真菌后民勤绢蒿菌根侵染率显著高于未接种株,提高了叶片相对含水量和叶绿素含量,这对于改善植株水分生理状况,提高植物光合速率,进而促进植物生长发育有重要作用。生物量的变化能够直观反映菌根的效应,Plenchette 等根据菌根依赖性来描述 AM 真菌对宿主植物生物量的影响^[14]。本试验中,在土壤含水量为 40% 和 20% 时,植株菌根依赖性为 19.82% 和 20.37%,氮的菌根贡献率为 19.45% 和 20.60%,磷的菌根贡献率为 28.52% 和 30.46%,都较正常水分条件下菌根依赖性和贡献率高(表 2)。说明水分胁迫下接种 AM 真菌能够促进植株养分吸收,特别是促进磷的吸收,而磷营养的改善,有利于叶绿素含量和光合效率的提高,最终促进了植株生长^[15]。

干旱胁迫下,植物体为缓解干旱胁迫的影响会诱导或加速多种生理反应,如可溶性糖和脯氨酸等渗透调节物质的积累^[16]。这些物质的积累,一方面可以通过渗透调节稳定体内渗透压平衡,增强植物保水能力;另一方面在干旱胁迫下与蛋白质疏水表面结合,将疏水表面转化成亲水表面,使更多水分子结合在蛋白质原来的疏水区域,稳定了疏水表面,保证蛋白质结构的稳定性^[16]。本试验中,水分胁迫促进植株叶片可溶性糖的合成,接种 AM 真菌后,前期叶片可溶性糖含量显著低于未接种株,而中后期可溶性糖含量显著高于未接种株,与在油蒿上的研究结果一致^[17],可能因为前期 AM 真菌与宿主植物建立的共生关系需要消耗宿主植物一定的养分,当二者共生关系稳定后 AM 真菌通过促进氮磷等营养元素的吸收和叶绿素合成,进而促进宿主植物光合速率,有利于保留菌根化植株光合代谢产物,提高了渗透调节能力,使民勤绢蒿在水分胁迫下保持较低的渗透势,维持植物正常生长。

干旱胁迫下,植物通过合成大量脯氨酸来增强植株的渗透调节作用,同时对酶、抗逆性蛋白和生物膜起保护作用。因此,脯氨酸含量的高低可以反映植物遭受干旱的强弱^[18]。本试验中,接种株叶片脯氨酸含量低于未接种株,说明接种 AM 真菌改善了植株水分代谢,有效减轻了植株受胁迫的程度。

干旱胁迫下,植物自动和被动地调节非酶促保护物质(如可溶性蛋白和黄酮类物质),以缓解细胞伤害^[16,19]。本研究表明,接种 AM 真菌显著提高了植株叶片可溶性蛋白含量,与赵金莉^[19]关于油蒿的研究相一致,可能由于可溶性蛋白是强亲水性胶体物质,其含量增加可增强植物细胞的保水能力,提高植物抗旱性。黄酮类物质是绢蒿属植物主要有效成分之一,具有较强的生物活性^[20]。本试验中,重度胁迫下接种 AM 真菌显著促进民勤绢蒿地上部和不同时期叶片总黄酮含量,而中度胁迫下接种株总黄酮含量低于未接种株,这可能由于黄酮类物质本身具有较强的抗氧化活性^[21],重度胁迫下接种 AM 真菌后植株通过调节体内黄酮代谢途径,积累黄酮类物质来增强植物对干旱胁迫的耐受性,是植物体对不良环境的一种适应。

AM 真菌改善植物氮、磷营养已得到广泛认可,尤其是促进磷的吸收^[15]。菌根的作用不仅局限在植物根部对养分的吸收,而且可能通过一定途径调节植物养分运输的生理过程,促进根部养分通过茎尽快向叶片转移,以满足叶片光合代谢需要,改变了养分在植物体内的分配比例^[22]。如接种 AM 真菌对民勤绢蒿地上部和地下部全 N 含量无显著影响,而叶片全 N 含量在不同时期却显著高于未接种株。

目前,关于 AM 真菌提高植物抗旱性的机理有多种解释。(1) AM 真菌的侵染扩大了宿主植物根系表面积和增强了宿主植物水分运输。干旱条件下菌丝能够利用根系无法利用的土壤水分,改善植株水分状况,提高植株抗旱性^[23]。(2) 通过菌丝吸收养分(如增加磷),改善植株营养水平,促进植株生长,增大根系吸收面积^[15,24]。(3) 通过增加宿主体内可溶性碳水化合物,如可溶性糖、游离氨基酸等物质浓度,使细胞渗透势降低,有利于宿主植物保持水分^[25]。(4) AM 真菌通过改变植物体内次级代谢产物(如内源激素,黄酮类物质)来间接影响植物水分代谢^[16,26]。本试验中,接种 AM 真菌改变了宿主根系形态,改善植株保水能力,提高宿主植物对土壤 P 元素等的吸收,调节体内养分分配,促进营养物质向叶片转移,刺激黄酮类抗氧化物质生成,

缓解了由于干旱引起的细胞生理代谢紊乱,增强了宿主抗旱性,促进了宿主植物生长。这为菌根生物技术在民勤绢蒿荒漠草地恢复和生态重建中的应用提供了依据。

References:

- [1] Lin Y R. Flora of China (Volume 76 of second fascicle). Beijing: Science Press, 1991.
- [2] Song D M, Wu Y L, Zhang Z C, Wang J, Li X Y. Desertification evolution prediction for lake area of Minqin oasis based on integration of GIS and cellular automata. *Journal of Desert Research*, 2009, 29(5):802-807.
- [3] Lu W H, Zhu J Z, Wang D J, Jin G L, Yu B. Distribution pattern and dynamic population changes of *Seriphidium transiliense* seedlings in fenced enclosures in the northern Tianshan Mountains. *Acta Prataculturae Sinica*, 2009, 18(4):17-26.
- [4] Smith S E, Read D J. *Mycorrhizal Symbiosis*. 2nd edn. London: Academic Press, 1997: 11-32.
- [5] Hartnen D C, Wilson G W T. Mycorrhiza influence plant community structure and diversity in tall grass prairie. *Ecology*, 1999, 80 (4): 1187-1195.
- [6] Klironomos J N, McCune J, Hart M, Neville J. The influence of arbuscular mycorrhizae on the relationship between plant diversity and productivity. *Ecology Letters*, 2000, (3):137-141.
- [7] Sylvia D M. Nursery inoculation of sea oats with vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi and outplanting performance on Florida Beaches. *Jornal of Coastal Research*, 1989, 5 (4):747-754.
- [8] Requena N, Perez-Solis E, Azcòn-Aguilar C, Jeffries P, Barea J M. Management of indigenous plant-microbe symbioses aids restoration of desertified ecosystems. *Applied and Environmental Microbiology*, 2001, 67 (2):495-498.
- [9] Phillips J M, Hayman D S. Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection. *Transactions of the British Mycological Society*, 1970, 55:158-161.
- [10] Wang X K. *Physiology and Biochemistry of Plant Experimental Principle and Technical*. Beijing: Higher Education Press, 2006.
- [11] Wang L J. Technology for extracting chlorophyll from leaves of *Syringa Oblata* L. by ultrasonic-assisted method. *Transactions of the CSAE*, 2009, 25(1):171-174.
- [12] Li Y K. *Conventional Analysis Methods of Soil Agricultural Chemistry*. Beijing: Science Press, 1983.
- [13] Ke S Y, Liu D L, MA Z D, Liu Y J. Study on the extraction of total flavonoids from *Mentha spicata* by ultrasonic method. *Journal of Chinese Medicinal Materials*, 2009, 32(8):1288-1290.
- [14] Plenchette C, Fortin J A, Furlan V. Growth responses of several plant species to mycorrhizae in a soil of moderate P-fertility. I. Mycorrhizal dependency under field conditions. *Plant and Soil*, 1983, 70(2):199-209.
- [15] Li X L, Yao Q. VA mycorrhiza and plant mineral nutrition. *Progress in Natural Science*, 2000, 10(6):524-531.
- [16] Qu T, Nan Z B. Research progress on responses and mechanisms of crop and grass under drought stress. *Acta Prataculturae Sinica*, 2008, 17(2): 126 135.
- [17] He X L, Zhang H S, Zhao L L. Effects of AM fungi and water stress on drought resistance of *Artemisia ordosica* in different soils. *Journal of Plant Ecology*, 2008, 32 (5) 994-1001.
- [18] Ren W W, Qian J, Ma J, Zheng S Z. Comparative study of *Leymuschinensis's* water content and free proline of different geographic population s under the force of different consistency PEG. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 20 (2):349-352.
- [19] Zhao J L, He X L. Effects of AM fungi on the growth and drought-resistance of *Artemiia ordosic*. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2007, 22(5): 994-1001.
- [20] Hua Y, Wang H Q. Studies on the flavonoids from whole herbs of *Seriphidium terrae-albae*. *China Journal of Chinese Materia Medica*, 2006, 31 (10):820-822.
- [21] Cai N, Dan R, Chen P. Effects of water stress on flavonoids content of *Tartary Buckwheat* seedling. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2008, 17(4):91-93.
- [22] Yan X F, Wang Q. Effects of ectomycorrhizal inoculation on the seedling growth of *Quercus Liaotungensis*. *Acta Phytocologica Sinica*, 2002, 26 (6): 701-707.
- [23] Graham J H, Syvertsen J P. Influence of vesicular-arbuscular mycorrhiza on the hydraulic conductivity of roots of two citrus rootstocks. *New Phytologist*, 1984, 97(2): 277- 284.
- [24] Nelson C E, Safir G R. Increased drought tolerance of mycorrhizal onion plants caused by imp roved phosphorus nutrition. *Planta*, 1982, 154(5): 407-413.
- [25] Ruiz-Lozano J M. Arbuscular mycorrhizal symbiosis and alleviation of osmotic stress new perspectives for molecular studies. *Mycorrhiza*, 2003, 13

(6): 309-317.

- [26] Duan X R, Neuman D S, Reiber J M, Green C D, Saxton A M, Augé R M. Mycorrhizal influence on hydraulic and hormonal factors implicated in the control of stomatal conductance during drought. *Journal of Experimental Botany*, 1996, 47(10): 1541-1550.

参考文献:

- [1] 林有润. 中国植物志(第七十六卷第二分册). 北京:科学出版社,1991.
- [2] 宋冬梅,吴远龙,张志诚,王建,李小明. 基于元胞自动机民勤绿洲湖区荒漠化演化预测. *中国沙漠*,2009, 29(5):802-807.
- [3] 鲁为华,朱进忠,王东江,靳瑰丽,余博. 天山北坡围栏封育条件下伊犁绢蒿幼苗分布格局及数量动态变化规律研究. *草业学报*,2009, 18(4):17-26.
- [10] 王学奎. 植物生理生化实验原理和技术. 北京:高等教育出版社,2006.
- [11] 王立娟. 超声波辅助提取紫丁香叶叶绿素的工艺. *农业工程学报*,2009,25(1):171-174.
- [12] 李西开. 土壤农业化学常规分析方法. 北京:科学出版社,1983.
- [13] 客绍英,刘冬莲,马作东,刘玉军. 超声波辅助提取留兰香中总黄酮的研究. *中药材*, 2009, 32(8):1288-1290.
- [15] 李晓林,姚青. VA 菌根与植物的矿质营养. *自然科学进展*,2000,10(6):524-531.
- [16] 曲涛,南志标. 作物和牧草对干旱胁迫的响应及机理研究进展. *草业学报*,2008,17(2):126 - 135.
- [17] 贺学礼,张焕仕,赵丽莉. 不同土壤中水分胁迫和 AM 真菌对油蒿抗旱性的影响. *植物生态学报*,2008, 32(5) 994-1001.
- [18] 任文伟,钱吉,马骏,郑师章. 不同地理种群羊草在聚乙二醇胁迫下含水量和游离脯氨酸含量的比较. *生态学报*, 2000, 20(2): 349- 352.
- [19] 赵金莉,贺学礼. AM 真菌对油蒿生长和抗旱性的影响. *华北农学报*,2007, 22(5):994-1001.
- [20] 滑艳,汪汉卿. 白茎绢蒿黄酮类化合物的研究. *中国中药杂志*,2006, 31(10):820-822.
- [21] 蔡娜,淡荣,陈鹏. 水分胁迫对苦荬幼苗黄酮类物质含量的影响. *西北植物学报*,2008, 17(4):91-93.

CONTENTS

Short-term effects of temperature enhancement on community structure and biomass of alpine meadow in the Qinghai-Tibet Plateau ... LI Na, WANG Genxu, YANG Yan, et al (895)

Effects of submergence on seed germination of nine annual plant species in the Three Gorges Reservoir region and their implication to vegetation restoration ... TAO Min, BAO Dachuan, JIANG Mingxi (906)

Temporal-spatial niches of Chinese White Wax Scale insect (*Ericerus pela*) and its three dominant parasitoid wasps ... WANG Zili, CHEN Yong, CHEN Xiaoming, et al (914)

Species diversity of carabid beetles in desert-steppe in Yanchi of Ningxia, China ... HE Qi, WANG Xinpu, YANG Guijun (923)

Identification of trophic relationships between marine algae and the copepod *Calanus sinicus* in a fatty acid approach ... LIU Mengtan, LI Chaolun, SUN Song (933)

Community structure of macrozoobenthos in Caizi Lake, China ... XU Xiaoyu, ZHOU Lizhi, ZHU Wenzhong, et al (943)

The community distribution pattern of intertidal macrozoobenthos and the responses to human activities in Yueqing Bay ... PENG Xin, XIE Qilang, CHEN Shaobo, et al (954)

The effects of jellyfish (*Rhopilema esculentum* Kishinouye) farming on the sediment nutrients and macrobenthic community ... FENG Jianxiang, DONG Shuanglin, GAO Qinfeng, et al (964)

Diurnal activity rhythm and time budgets of the Dwarf Blue Sheep (*Pseudois schaeferi*) in Zhubalong Nature Reserve ... LIU Guoku, ZHOU Caiquan, YANG Zhisong, et al (972)

Comparison of leaf, height and seed functional traits of species in dry-hot valleys ... ZHENG Zhixing, SUN Zhenhua, ZHANG Zhiming, et al (982)

Dynamics of soil seed banks in the reversion process of desertification in the middle reaches of the Shiyang River ... MA Quanlin, ZHANG Dekui, LIU Youjun, et al (989)

Modelling the spatial distribution of forest carbon stocks with artificial neural network based on TM images and forest inventory data ... WANG Shaohua, ZHANG Maozhen, ZHAO Pingan, et al (998)

The GIS-based visual landscape evaluation in mountain area: a case study of Mount Nan-kun National Forest Park, Guangdong Province ... QIU Yishu, GAO Jun, ZHAN Qilin (1009)

A functional classification method for examining landscape pattern of urban wetland park: a case study on Xixi Wetland Park, China ... LI Yufeng, LIU Hongyu, ZHENG Nan, et al (1021)

Effects of AM fungi on the growth and drought resistance of *Seriphidium minchinense* under water stress ... HE Xueli, GAO Lu, ZHAO Lili (1029)

Modeled impact of irrigation on regional climate in India ... MAO Huiqin, YAN Xiaodong, XIONG Zhe, et al (1038)

The responses of photosynthetic energy use in wheat flag leaves to nitrogen application rates and light density under elevated atmospheric CO₂ concentration ... ZHANG Xucheng, YU Xianfeng, MA Yifan, et al (1046)

Enhanced drought and photooxidation tolerance of transgenic tobacco plants overexpressing pea catalase in chloroplasts ... WANG Fengde, YI Yanjun, WANG Haiqing, et al (1058)

Evaluation of wheat freezing resistance based on the responses of the physiological indices to low temperature stress ... WANG Shugang, WANG Zhenlin, WANG Ping, et al (1064)

Predicting winter wheat growth based on integrating remote sensing and crop growth modeling techniques ... HUANG Yan, ZHU Yan, WANG Hang, et al (1073)

Effects of spraying ABA on bleeding intensity in neck-panicle node, spike traits and grain yields of two different panicle-type winter wheat ... CUI Zhiqing, YIN Yanping, TIAN Qizhuo, et al (1085)

Nitrogen and phosphorus cycling from rice-duck mutual ecosystem during late rice growth season ... ZHANG Fan, SUI Peng, CHEN Yuanquan, et al (1093)

Initial exploration of the ecological costs of food production in the hilly red soil region of Southern China ... LI Xiao, XIE Yongsheng, ZHANG Yinglong, et al (1101)

Optimization strategy and management decision-making in balancing forage and livestock in Gannan pastoral area ... LIANG Tiangang, FENG Qisheng, XIA Wentao, et al (1111)

Species-area relationship in travertine area in Huanglong valley, Sichuan ... HUANG Baoqiang, LUO Yibo, AN Dejun, et al (1124)

Influencing factors of fine root lifespans in two Chinese fir plantations in subtropical China ... LING Hua, YUAN Yiding, YANG Zhijie, et al (1130)

Age structure effects on stand biomass and carbon storage distribution of *Larix olgensis* plantation ... JU Wenzhen, WANG Xinjie, WANG Xinjie (1139)

Effects on controlling banana Fusarium wilt by bio-fertilizer, chitosan, hymexazol and their combinations ... ZHANG Zhihong, PENG Guixiang, LI Huaxing, et al (1149)

Seasonal dynamics of culturable bacterium numbers in freshwater bodies of different water quality in Beijing ... GAO Cheng, HUANG Manrong, TAO Shuang, et al (1157)

Review and Monograph

On the coordinated regulation of forest transpiration by hydraulic conductance and canopy stomatal conductance ... ZHAO Ping (1164)

Impacts of plant parasitism on structure and function of ecosystems ... LI Junmin, DONG Ming (1174)

Invasion mechanisms of *Solidago canadensis* L.: a review ... YANG Ruyi, ZAN Shuting, TANG Jianjun, et al (1185)

2009 年度生物学科总被引频次和影响因子前 10 名期刊*

(源于 2010 年版 CSTPCD 数据库)

排序 Order	期刊 Journal	总被引频次 Total citation	排序 Order	期刊 Journal	影响因子 Impact factor
1	生态学报	11764	1	生态学报	1.812
2	应用生态学报	9430	2	植物生态学报	1.771
3	植物生态学报	4384	3	应用生态学报	1.733
4	西北植物学报	4177	4	生物多样性	1.553
5	生态学杂志	4048	5	生态学杂志	1.396
6	植物生理学通讯	3362	6	西北植物学报	0.986
7	JOURNAL OF INTEGRATIVE PLANT BIOLOGY	3327	7	兽类学报	0.894
8	MOLECULAR PLANT	1788	8	CELL RESEARCH	0.873
9	水生生物学报	1773	9	植物学报	0.841
10	遗传学报	1667	10	植物研究	0.809

★《生态学报》2009 年在核心版的 1964 种科技期刊排序中总被引频次 11764 次,全国排名第 1;影响因子 1.812,全国排名第 14;第 1—9 届连续 9 年入围中国百种杰出学术期刊;中国精品科技期刊

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 31 卷 第 4 期 (2011 年 2 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA
(Semimonthly, Started in 1981)
Vol. 31 No. 4 2011

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

主 编 冯宗炜
主 管 中国科学技术协会
主 办 中国生态学会
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

出 版 科 学 出 版 社
地址:北京东黄城根北街 16 号
邮政编码:100717

印 刷 北京北林印刷厂
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

订 购 全国各地邮局
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

广告经营 京海工商广字第 8013 号
许 可 证

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

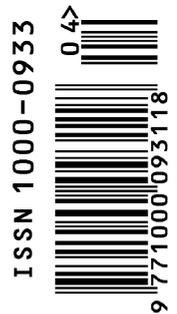
Editor-in-chief FENG Zong-Wei
Supervised by China Association for Science and Technology
Sponsored by Ecological Society of China
Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS
Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China

Published by Science Press
Add:16 Donghuangchenggen North Street,
Beijing 100717, China

Printed by Beijing Bei Lin Printing House,
Beijing 100083, China

Distributed by Science Press
Add:16 Donghuangchenggen North
Street, Beijing 100717, China
Tel:(010)64034563
E-mail:journal@cspg.net

Domestic All Local Post Offices in China
Foreign China International Book Trading
Corporation
Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China



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