

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

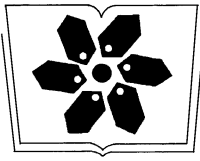
(Shengtai Xuebao)

第 30 卷 第 21 期  
Vol.30 No.21  
**2010**



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 30 卷 第 21 期 2010 年 11 月 (半月刊)

## 目 次

棉铃虫幼虫对人类呈味物质的取食反应.....	李为争,付国需,王英慧,等 (5709)
西藏拉萨机场周边风沙源空间分布及演变趋势.....	李海东,沈渭寿,邹长新,等 (5716)
新疆沙湾冷泉沉积物的细菌系统发育多样性.....	曾 军,杨红梅,徐建华,等 (5728)
应用鱼类完整性评价体系评价辽河流域健康.....	裴雪姣,牛翠娟,高 欣,等 (5736)
不同海拔天山云杉叶功能性状及其与土壤因子的关系.....	张慧文,马剑英,孙 伟,等 (5747)
滨河湿地不同植被对农业非点源氮污染的控制效果.....	徐华山,赵同谦,贺玉晓,等 (5759)
内蒙古温带荒漠草原能量平衡特征及其驱动因子.....	阳伏林,周广胜 (5769)
南北样带温带区栎属树种功能性状对气象因子的响应.....	冯秋红,史作民,董莉莉,等 (5781)
伏牛山自然保护区物种多样性分布格局.....	卢训令,胡 楠,丁圣彦,等 (5790)
减弱 UV-B 辐射对烟草形态、光合及生理生化特性的影响 .....	陈宗瑜,钟 楚,王 毅,等 (5799)
川西亚高山针阔混交林乔木层生物量、生产力随海拔梯度的变化 .....	刘彦春,张远东,刘世荣,等 (5810)
三峡库区消落带水淹初期地上植被与土壤种子库的关系.....	王晓荣,程瑞梅,肖文发,等 (5821)
洞庭湖西岸区防护林土壤和植物营养元素含量特征.....	柏方敏,田大伦,方 晰,等 (5832)
择伐对阔叶红松林主要树种径向与纵向生长的影响.....	蒋子涵,金光泽 (5843)
野鸭湖典型湿地植物光谱特征.....	刘 克,赵文吉,郭逍宇,等 (5853)
三种线性模型在杉木与马尾松地位指数相关关系研究中的比较.....	朱光玉,吕 勇,林 辉,等 (5862)
不同干扰类型下羊草种群的空间格局.....	陈宝瑞,杨桂霞,张宏斌,等 (5868)
基于 SWAT 模型的祁连山区最佳水源涵养植被模式研究——以石羊河上游杂木河流域为例 .....	王军德,李元红,李赞堂,等 (5875)
2D 与 3D 景观指数测定山区植被景观格局变化对比分析 .....	张志明,罗亲普,王文礼,等 (5886)
基于投影寻踪的珠江三角洲景观生态安全评价 .....	高 杨,黄华梅,吴志峰 (5894)
海峡两岸 16 个沿海城市生态系统功能比较 .....	张小飞,王如松,李 锋,等 (5904)
同安湾围(填)海生态系统服务损害的货币化预测评估 .....	王 萱,陈伟琪,张璐平,等 (5914)
太阳辐射对玉米农田土壤呼吸作用的影响 .....	孙敬松,周广胜,韩广轩 (5925)
水分胁迫下 AM 真菌对沙打旺生长和抗旱性的影响.....	郭辉娟,贺学礼 (5933)
宁夏南部旱区坡地不同粮草带比间作种植模式比较.....	路海东,贾志宽,杨宝平,等 (5941)
节节草生长对铜尾矿砂重金属形态转化和土壤酶活性的影响.....	李 影,陈明林 (5949)
自然植物群落形成过程中铜尾矿废弃地氮素组分的变化 .....	安宗胜,詹 婧,孙庆业 (5958)
硅介导的水稻对二化螟幼虫钻蛀行为的影响 .....	韩永强,刘 川,侯茂林 (5967)
饥饿对转基因鲤与野生鲤生长竞争和性腺发育的影响.....	刘春雷,常玉梅,梁利群,等 (5975)
<b>专论与综述</b>	
河流水质的景观组分阈值研究进展 .....	刘珍环,李 猷,彭 建 (5983)
<b>研究简报</b>	
长期模拟增温对岷江冷杉幼苗生长与生物量分配的影响 .....	杨 兵,王进闯,张远彬 (5994)
环境因素对长额斗蟋翅型分化的影响 .....	曾 杨,朱道弘,赵吕权 (6001)

# 水分胁迫下 AM 真菌对沙打旺生长和抗旱性的影响

郭辉娟, 贺学礼\*

(河北大学生命科学学院, 河北保定 071002)

**摘要:** 利用盆栽试验研究了水分胁迫条件下接种 AM 真菌对优良牧草和固沙植物沙打旺 (*Astragalus adsurgens* Pall.) 生长和抗旱性的影响。在土壤相对含水量为 70%、50% 和 30% 条件下, 分别接种摩西球囊霉 (*Glomus mosseae*) 和沙打旺根际土著菌, 不接种处理作为对照。结果表明, 水分胁迫显著降低了沙打旺植株 (无论接种 AM 真菌与否) 的株高、分枝数、地上部干重和地下部干重, 并显著提高了土著 AM 真菌的侵染率, 对摩西球囊霉的侵染率无显著影响。接种 AM 真菌可以促进沙打旺生长和提高植株抗旱性, 但促进效应因土壤含水量和菌种不同而存在差异。不同水分条件下, 接种 AM 真菌显著提高了植株菌根侵染率、根系活力、地下部全 N 含量和叶片 CAT 活性。土壤相对含水量为 30% 和 50% 时, 接种株地上部全 N、叶片叶绿素、可溶性蛋白、脯氨酸含量和 POD 活性显著高于未接种株; 接种 AM 真菌显著降低了叶片 MDA 含量; 接种土著 AM 真菌的植株株高、分枝数、地上部和地下部干重显著高于未接种株。土壤相对含水量为 30% 时, 接种 AM 真菌显著增加了地上部全 P 含量和叶片相对含水量; 接种摩西球囊霉的植株株高、分枝数、地上部和地下部干重显著高于未接种株。水分胁迫 40d, 接种 AM 真菌显著提高了叶片可溶性糖含量。水分胁迫 80d, 接种株叶片 SOD 活性显著增加。菌根依赖性随水分胁迫程度增加而提高。沙打旺根际土著菌接种效果优于摩西球囊霉。水分胁迫和 AM 真菌的交互作用对分枝数、菌根侵染率、叶片 SOD、CAT 和 POD 活性、叶绿素、脯氨酸、可溶性蛋白、地上部全 N 和全 P、地下部全 N 和根系活力有极显著影响, 对叶片丙二醛和地下部全 P 有显著影响。AM 真菌促进根系对土壤水分和矿质营养的吸收, 改善植物生理代谢活动, 从而提高沙打旺抗旱性, 促进其生长。试验结果为筛选优良抗旱菌种, 充分利用 AM 真菌资源促进荒漠植物生长和植被恢复提供了依据。

**关键词:** AM 真菌; 水分胁迫; 生长; 抗旱性; 沙打旺

## Effects of AM fungi on the growth and drought resistance of *Astragalus adsurgens* Pall. under water stress

GUO Huijuan, HE Xueli\*

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

**Abstract:** *Astragalus adsurgens* Pall. is an excellent grass and sand-fixing plant. The paper mainly studied the effects of AM fungi on the growth and drought resistance of *A. adsurgens* subjected to water stress using pot experiments. The experimental design included three levels of water regimes (70%, 50%, and 30% of soil relative water content) and three inoculation treatments (uninoculation, control; inoculation with *Glomus mosseae*; inoculation with indigenous AM fungi of *A. adsurgens* rhizosphere). The results showed that water stress significantly ( $P < 0.05$ ) inhibited the growth of *A. adsurgens* such as plant height, number of branches, shoot dry mass and root dry mass whether inoculated with AM fungi or not, and significantly ( $P < 0.05$ ) increased indigenous AM fungal infection rate, but infection rate of *G. mosseae* was not affected by water stress. The treatment inoculated with AM fungal promoted growth of *A. adsurgens* and strengthened drought resistance of host plant, whereas the contribution extent varied with fungal species and soil water content. Under different water regimes, AM fungi inoculation significantly ( $P < 0.05$ ) increased mycorrhizal infection rate, root activity, root total N content and leaf CAT activity. Under 30% and 50% water treatments, Shoot total N content, leaf chlorophyll, proline, soluble protein content and POD activity were significantly ( $P < 0.05$ ) enhanced, and leaf malondialdehyde

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目 (30670371, 40471637)

收稿日期: 2009-10-13; 修订日期: 2010-03-24

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

(MDA) content was significantly ( $P < 0.05$ ) decreased for mycorrhizal plants, plant height, number of branches, shoot dry mass and root dry mass of plants inoculated with indigenous AM fungi were significantly ( $P < 0.05$ ) more than those of non-mycorrhizal plants. Under 30% water treatment, shoot total P and leaf relative water content of mycorrhizal plants were significantly ( $P < 0.05$ ) improved compared to non-mycorrhizal plants, while plants inoculated with *G. mosseae* had significantly ( $P < 0.05$ ) higher plant height, number of branches, shoot dry mass and root dry mass than non-mycorrhizal plants. After 40 days of water stress leaf soluble sugar content of mycorrhizal plants was significantly ( $P < 0.05$ ) increased. Leaf SOD activity of mycorrhizal plants was significantly ( $P < 0.05$ ) higher than that of non-mycorrhizal plants after 80 days of water stress. Mycorrhizal dependency increased with the extent of water stress increasing. The effects of indigenous AM fungi on the growth and drought resistance of *A. adsurgens* were superior to those of *G. mosseae* regardless of soil water content. The interaction between water stress and AM fungi significantly ( $P < 0.01$ ) affected number of branches, mycorrhizal infection rate, leaf SOD, CAT and POD activities, content of leaf chlorophyll, proline and soluble protein, total N and total P content of shoot, root total N content and root activity, and significantly ( $P < 0.05$ ) affected leaf MDA and root total P content. In summary, AM fungi increased soil water and mineral nutrient uptake and improved plant physiological metabolic activities, and thereby promoted drought resistance and growth of *A. adsurgens*. The results provided the basis for selection of excellent drought-resistant AM fungi and the full application of AM fungi resources in promoting the growth of desert plants and vegetation restoration.

**Key Words:** AM fungi; water stress; growth; drought resistance; *Astragalus adsurgens* Pall.

在全球范围内,尤其是在干旱和半干旱地区,水资源匮乏是限制植物生长和生态系统生产力的主要因素之一,不仅影响着植物生长和发育,而且造成土地荒漠化,生态环境日趋恶化<sup>[1-2]</sup>。利用生物技术提高植物抗旱性和修复生态系统一直是研究的热点领域。AM (arbuscular mycorrhiza) 真菌是广泛分布于自然生态系统中的一类土壤真菌,能与绝大多数高等植物根系形成共生体,促进植物对土壤矿质元素和水分吸收和利用,改善植物营养状况,促进植物生长发育,提高植物抗旱性<sup>[3-4]</sup>。因此,干旱环境中 AM 真菌与植物生长的关系倍受关注。

沙打旺 (*Astragalus adsurgens* Pall.) 是豆科黄芪属多年生草本植物,具有适应性广、抗逆性强、适口性好、蛋白质含量高等优良特性,是我国北方干旱、半干旱地区广泛种植的优良牧草。生产实践证明,沙打旺对退化草地生态恢复与植被重建、防止水土流失和保护生态环境具有重要作用<sup>[5]</sup>。研究发现,沙打旺草地生物量的形成主要取决于土壤水分,当土壤水分供应不能满足植物需求时,植物生长就受到抑制,甚至死亡<sup>[6]</sup>。因此,增强沙打旺的抗旱性是防止沙打旺草地衰败的有效途径之一。目前,自然状态下沙打旺根围 AM 真菌生态分布已有研究<sup>[7]</sup>,而 AM 真菌与沙打旺共生效应及其作用机理的研究未见报道。

本试验利用摩西球囊霉 (*Glomus mosseae*) 和沙打旺根际土著 AM 真菌作为接种剂,研究了不同土壤水分条件下 AM 真菌对沙打旺生长和抗旱性的影响,以便为筛选优良抗旱菌种,利用菌根生物技术进行植被恢复和促进畜牧业生产提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

供试沙打旺种子采自毛乌素沙地正常生长的沙打旺植株,播前用 75% 酒精消毒 10min。供试菌种为摩西球囊霉 (*G. mosseae*) 和沙打旺根际土著菌 (以摩西球囊霉、透光球囊霉 *G. diaphanum* 和瑞氏无梗囊霉 *Acaulospora rehmi* 为优势菌种),接种剂分别是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。

把保定市东郊农田土(褐土)和河沙按质量 1:2 混匀,过 2mm 筛,经 121℃ 蒸汽间歇灭菌 2h,取出放置 14d 后待用。土壤有机质 8.97g/kg,有效 N 15.4μg/g,有效 P 2.39μg/g,pH 8.01,土壤最大持水量 23%。

盆栽容器为 23.0cm × 18.0cm × 14cm 的塑料盆,用前在 0.1% KMnO<sub>4</sub> 溶液中浸泡,再用水冲洗后晾干。

## 1.2 试验设计

试验设 3 个土壤相对含水量,即 30% (重度胁迫)、50% (中度胁迫)和 70% (正常水分),同一水分条件下设不接种(CK)、接种摩西球囊霉(GM)和接种沙打旺根际土著菌(IAMF)3 个处理,每个处理重复 4 次。每盆每 kg 土加 0.429g 尿素、0.438g 磷酸二氢钠和 0.462g 硫酸钾作基肥。试验盆随机排列。

每盆装土 2.8kg,接种处理每盆层施菌剂 35g,对照加入等量灭菌接种剂。2008 年 5 月 25 日播种,在苗高 5cm 时选取长势一致的植株,每盆定苗 4 株。植株生长期间,各处理统一正常浇水量。8 月 5 日开始不同水分梯度处理,每天用称重法保持土壤含水量恒定。试验在河北大学植物玻璃温室中进行,自然光照。

分别于 9 月 15 日(水分胁迫前期)、10 月 25 日(水分胁迫后期)采集不同处理植株相同部位的新鲜叶片测定可溶性蛋白、脯氨酸、可溶性糖、叶绿素、SOD、POD、CAT、丙二醛等指标。收获前一天测定株高、分枝数。11 月 2 日结束试验收获植株,将地下部和地上部分开,将根部立即用水洗干净,取部分根样测定菌根侵染率和根系活力,其余根样和地上部烘干测定干重,粉碎后测定全 N、全 P 含量。

## 1.3 测定方法

土壤有机质用重铬酸钾硫酸外加热法,有效 P 用 Olsen 法,有效 N 用碱解扩散法,土壤 pH 值用电位法,植物组织全 N 用凯氏定氮法,全 P 用钒钼黄比色法<sup>[8]</sup>。叶片相对含水量采用烘干称重法,植株地上部和地下部 105 °C 处理 30min、80 °C 48h 烘干后测定干重,叶绿素含量用浸提法,可溶性糖用硫酸蒽酮法,脯氨酸用茚三酮比色法,可溶性蛋白用考马斯亮蓝 G-250 染色法,丙二醛含量用硫代巴比妥酸比色法,SOD 活性采用氮蓝四唑(NBT)法,CAT 活性采用紫外吸收法,POD 活性采用愈创木酚法,根系活力采用 TTC 法<sup>[9]</sup>。菌根侵染率按 Phillips 和 Hayman 方法<sup>[10]</sup>测定,以侵染根段占总根段的百分比为菌根侵染率。菌根依赖性按 Plenchette 等人的方法<sup>[11]</sup>计算。

## 1.4 数据分析

应用 SPSS16.0 软件对试验数据进行统计分析,Duncan 多重比较法检验各处理平均值间差异的显著性,GLM 过程作双因素交互作用差异显著性测验。

## 2 结果与分析

### 2.1 AM 真菌和水分胁迫对植株生长的影响

由表 1 可见,摩西球囊霉的侵染率随土壤含水量变化无明显差异。土著 AM 真菌的侵染率随土壤含水量降低显著增加,说明土壤干旱有利于土著 AM 真菌侵染。同一水分条件下,接种 AM 真菌显著提高了植株菌根侵染率。未接种株有不超 9% 的菌根侵染率,可能是从接种到收获 5 个月的开放培养,空气或水中传播的真菌孢子污染所致。

水分胁迫严重抑制了植株正常生长。接种 AM 真菌对植株株高、分枝及生物量增加有促进作用,但促进效应因土壤含水量和菌种不同而存在差异。土壤相对含水量为 30% 时,接种摩西球囊霉和土著 AM 真菌显著增加了株高、分枝数、地上部和地下部干重。土壤相对含水量为 50% 时,仅接种土著 AM 真菌显著增加了株高、分枝数和生物量;土壤含水量为 70% 时,接种土著 AM 真菌的植株地上部干重显著高于不接种株。3 个水分条件下,接种土著 AM 真菌的植株菌根依赖性都高于同一水分条件下接种摩西球囊霉的植株,说明前者的接种效应优于后者。菌根依赖性随土壤干旱程度增加而提高。

水分胁迫和 AM 真菌的交互作用对分枝数和侵染率有极显著影响,但对株高、地上部和地下部干重影响不明显。

### 2.2 AM 真菌和水分胁迫对植株叶片相对含水量、叶绿素和丙二醛含量的影响

由表 2 可见,各处理植株叶片相对含水量随土壤含水量降低而降低,丙二醛含量随土壤含水量降低而增加。水分胁迫前期,接种摩西球囊霉的叶片叶绿素含量在土壤相对含水量为 30% 时显著高于不接种株,接种土著 AM 真菌的叶片叶绿素含量在土壤相对含水量为 50% 时显著高于不接种株。接种 AM 真菌对叶片相对

含水量无显著影响。接种摩西球囊霉在土壤相对含水量为 30% 和 50% 时显著降低了叶片丙二醛含量,而接种土著 AM 真菌在 3 个水分条件下均显著降低了叶片丙二醛含量。

表 1 水分胁迫下接种 AM 真菌对宿主植物生长的影响

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

土壤相对含水量/% Soil relative water content	处理 Treatments	株高/cm Plant height	分枝数/个 Branch Number	地上部干重/g Shoot dry mass	地下部干重/g Root dry mass	侵染率/% Infection rate	菌根依赖性/% Mycorrhizal dependency
30	CK	17.35 ± 1.92e	10.7 ± 1.2d	1.17 ± 0.28f	1.44 ± 0.13f	3.00d ± 0.17d	
	GM	21.28 ± 1.29d	16.6 ± 1.4c	1.72 ± 0.10e	1.89 ± 0.24de	94.00 ± 4.89a	27.70
	IMAF	21.94 ± 1.19d	18.6 ± 1.3bc	2.05 ± 0.02de	1.86 ± 0.19e	97.41 ± 2.51a	33.25
50	CK	24.18 ± 0.63cd	16.5 ± 0.9c	2.07 ± 0.26de	2.28 ± 0.12cd	5.00 ± 0.29d	
	GM	26.39 ± 4.34bc	18.0 ± 0.5c	2.46 ± 0.07cd	2.39 ± 0.23bc	95.42 ± 2.84a	12.12
	IMAF	29.92 ± 1.20ab	20.2 ± 1.8b	2.61 ± 0.40c	2.77 ± 0.39b	87.04 ± 5.49b	19.14
70	CK	30.23 ± 1.31ab	20.4 ± 1.5ab	3.32 ± 0.43b	4.05 ± 0.53a	9.00 ± 0.30d	
	GM	31.40 ± 3.97a	20.5 ± 1.1ab	3.41 ± 0.07b	4.04 ± 0.25a	94.58 ± 3.70a	1.07
	IMAF	32.89 ± 2.95a	22.5 ± 2.2a	4.37 ± 0.66a	4.44 ± 0.12a	76.85 ± 7.73c	16.34
显著性 Significance	S	**	**	**	**	*	
	AMF	**	**	**	**	**	**
	S × AMF	NS	**	NS	NS	**	**

CK 不接种,GM 接种摩西球囊霉,IMAF 接种土著 AM 真菌;表中数据为平均值 ± 标准差,同一列数据中字母不同者表示在 5% 水平上差异显著;S 水分胁迫,AMF 丛枝菌根真菌;\*  $P < 0.05$ , \*\*  $P < 0.01$ , NS 无显著差异

表 2 水分胁迫下接种 AM 真菌对宿主植物叶片相对含水量、叶绿素和丙二醛含量的影响

Table 2 Effects of AM fungi on leaf relative water content, chlorophyll and MDA content of host plant under water stress

土壤相对含水量 Soil relative water content /%	处理 Treatments	相对含水量 Relative water content/%		叶绿素 Chlorophyll/(mg/g)		丙二醛 MDA / (nmol /g 鲜重)	
		40d	80d	40d	80d	40d	80d
30	CK	88.44 ± 2.85b	83.82 ± 3.50c	3.24 ± 0.09c	1.20 ± 0.42c	3.08 ± 0.07a	5.58 ± 0.10a
	GM	91.62 ± 1.50ab	91.27 ± 0.67ab	4.53 ± 0.44a	2.80 ± 0.73ab	2.88 ± 0.05b	4.38 ± 0.41c
	IMAF	90.33 ± 2.47ab	88.18 ± 4.32b	3.35 ± 0.19bc	3.25 ± 0.26a	2.90 ± 0.01b	4.89 ± 0.03b
50	CK	90.67 ± 2.38ab	90.60 ± 0.61ab	3.03 ± 0.09c	1.71 ± 0.29c	2.88 ± 0.04b	4.93 ± 0.06b
	GM	91.87 ± 2.49ab	92.64 ± 1.56a	3.03 ± 0.80c	2.58 ± 0.15b	2.68 ± 0.05c	4.07 ± 0.03cd
	IMAF	92.47 ± 3.09ab	92.89 ± 1.78a	4.02 ± 0.57ab	3.29 ± 0.08a	2.51 ± 0.04d	3.95 ± 0.59cd
70	CK	93.10 ± 2.59ab	91.44 ± 0.42ab	2.62 ± 0.07c	2.89 ± 0.17ab	2.23 ± 0.06e	4.17 ± 0.04c
	GM	94.17 ± 2.12a	92.89 ± 0.65a	2.97 ± 0.32c	3.04 ± 0.02ab	2.20 ± 0.04e	3.92 ± 0.06cd
	IMAF	93.77 ± 2.92ab	92.20 ± 0.19a	2.75 ± 0.35c	3.09 ± 0.09ab	1.53 ± 0.09f	3.65 ± 0.05d
显著性 Significance	S	*	**	**	*	**	**
	AMF	NS	**	*	**	**	**
	S × AMF	NS	NS	**	**	**	*

40d 表示水分胁迫前期,80d 表示水分胁迫后期;CK 不接种,GM 接种摩西球囊霉,IMAF 接种土著 AM 真菌;表中数据为平均值 ± 标准差,同一列数据中字母不同者表示在 5% 水平上差异显著;S 水分胁迫,AMF 丛枝菌根真菌;\*  $P < 0.05$ , \*\*  $P < 0.01$ , NS 无显著差异

水分胁迫后期,土壤相对含水量为 30% 和 50% 时,接种 AM 真菌显著提高了叶片叶绿素含量,且接种土著 AM 真菌的叶绿素含量明显高于接种摩西球囊霉的植株。接种 AM 真菌的叶片相对含水量在土壤含水量为 30% 时显著高于不接种株。接种 AM 真菌对丙二醛含量的影响与水分胁迫前期相同。

水分胁迫和 AM 真菌的交互作用对叶绿素有极显著影响,对丙二醛有显著影响,但对叶片相对含水量无明显影响。

### 2.3 AM 真菌和水分胁迫对植株叶片保护酶系统的影响

由表 3 可见,水分胁迫前期,接种株叶片 SOD 活性在土壤相对含水量为 30% 和 50% 时显著低于不接种株;接种土著 AM 真菌的叶片 POD 活性在土壤相对含水量为 30% 时显著高于不接种株,接种摩西球囊霉的叶片 POD 活性在土壤相对含水量为 50% 和 70% 时显著高于不接种株;不同水分条件下,接种 AM 真菌显著提高了叶片 CAT 活性。

水分胁迫后期,不同水分条件下,接种 AM 真菌显著增加了叶片 SOD 活性,且接种土著 AM 真菌的叶片 SOD 活性显著高于接种摩西球囊霉的植株;接种摩西球囊霉的叶片 POD 活性在 3 个水分条件下显著高于不接种株,接种土著 AM 真菌的叶片 POD 活性在土壤相对含水量为 30% 和 50% 时显著高于不接种株。接种株叶片 CAT 活性在 3 个水分条件下高于不接种株。

水分胁迫和 AM 真菌的交互作用对 SOD、CAT 和 POD 活性有极显著影响。

表 3 水分胁迫下接种 AM 真菌对宿主植物叶片保护酶系统的影响  
Table 3 Effects of AM fungi on leaf defense enzyme system of host plant under water stress

土壤相对含水量 Soil relative water content /%	处理 Treatments	SOD /(U/g 鲜重)		CAT /(U/(g 鲜重·min))		POD /(U/(g 鲜重·min))	
		40d	80d	40d	80d	40d	80d
		30	CK	110.02 ± 5.19a	80.48 ± 1.53c	66.00 ± 6.22g	41.33 ± 0.48f
	GM	82.71 ± 4.54bc	91.10 ± 1.25b	75.44 ± 3.01f	94.67 ± 11.16b	4489 ± 301b	7707 ± 502a
	IMAF	81.34 ± 25.06bc	97.40 ± 1.10a	195.22 ± 4.11a	51.11 ± 3.85e	7062 ± 404a	7742 ± 64a
50	CK	115.56 ± 8.78a	45.76 ± 1.16f	95.11 ± 1.71e	35.41 ± 0.68f	4542 ± 944b	2667 ± 146e
	GM	82.30 ± 5.72bc	53.57 ± 1.00e	149.11 ± 1.07b	58.37 ± 4.13de	7661 ± 559a	3004 ± 32d
	IMAF	71.56 ± 2.67c	81.29 ± 0.50c	107.00 ± 7.06d	80.59 ± 5.26c	4689 ± 951b	7665 ± 46a
70	CK	115.44 ± 16.07a	42.63 ± 1.03g	52.44 ± 2.46h	77.19 ± 5.30c	607 ± 162d	2874 ± 14de
	GM	44.44 ± 3.19d	53.18 ± 0.80e	123.44 ± 5.12c	67.11 ± 2.78d	3122 ± 210c	3570 ± 5c
	IMAF	97.39 ± 6.68ab	55.60 ± 1.05d	114.44 ± 2.22d	115.11 ± 5.41a	616 ± 516d	2684 ± 54de
显著性 Significance	S	NS	**	**	**	**	**
	AMF	**	**	**	**	**	**
	S × AMF	**	**	**	**	**	**

40d 表示水分胁迫前期,80d 表示水分胁迫后期;CK 不接种,GM 接种摩西球囊,IMAF 接种土著 AM 真菌;表中数据为平均值 ± 标准差,同一列数据中字母不同者表示在 5% 水平上差异显著;S 水分胁迫,AMF 丛枝菌根真菌;\*  $P < 0.05$ , \*\*  $P < 0.01$ , NS 无显著差异

### 2.4 AM 真菌和水分胁迫对植株叶片渗透调节物质和可溶性蛋白的影响

由表 4 可见,随土壤含水量降低,各处理的叶片可溶性糖和脯氨酸含量不同程度增加。水分胁迫前期,不同水分条件下,接种株叶片可溶性糖和蛋白质含量显著提高;接种摩西球囊霉的叶片脯氨酸含量在土壤相对含水量为 50% 和 70% 时显著高于不接种株,接种土著 AM 真菌的叶片脯氨酸含量在土壤相对含水量为 30% 和 70% 时显著高于不接种株。

水分胁迫后期,接种株叶片脯氨酸含量在不同水分条件下显著高于不接种株,接种土著 AM 真菌的叶片脯氨酸含量显著高于接种摩西球囊霉;接种土著 AM 真菌的叶片可溶性蛋白含量在土壤相对含水量为 30% 和 50% 时显著高于接种摩西球囊霉和不接种株,而接种摩西球囊霉的叶片可溶性蛋白含量在土壤相对含水量为 30% 时显著高于不接种株;接种摩西球囊霉的叶片可溶性糖含量在土壤相对含水量为 50% 和 70% 时显著高于不接种株。

水分胁迫和 AM 真菌的交互作用对叶片脯氨酸和可溶性蛋白含量有极显著影响,仅在水分胁迫前期对可溶性糖含量有极显著影响。

表 4 水分胁迫下接种 AM 真菌对宿主植物叶片渗透调节物质和可溶性蛋白含量的影响

Table 4 Effects of AM fungi on the content of leaf osmotic regulation matter and soluble protein of host plant under water stress

土壤相对含水量 Soil relative water content /%	处理 Treatments	可溶性糖 Soluble sugar/%		脯氨酸 Proline/( $\mu\text{g/g}$ 鲜重)		可溶性蛋白 Soluble protein/( $\text{mg/g}$ 鲜重)	
		40d	80d	40d	80d	40d	80d
		30	CK	2.47 $\pm$ 0.01c	2.38 $\pm$ 0.12a	40.82 $\pm$ 0.29cd	42.07 $\pm$ 1.10e
	GM	2.58 $\pm$ 0.07b	2.46 $\pm$ 0.21a	42.29 $\pm$ 0.36c	72.15 $\pm$ 0.42c	26.63 $\pm$ 1.10a	12.21 $\pm$ 0.65d
	IMAF	2.65 $\pm$ 0.03a	2.47 $\pm$ 0.03 a	54.52 $\pm$ 0.63a	232.66 $\pm$ 0.59a	12.20 $\pm$ 1.17c	15.54 $\pm$ 0.43b
50	CK	1.71 $\pm$ 0.02g	1.50 $\pm$ 0.10b	38.98 $\pm$ 1.17d	33.93 $\pm$ 0.01f	12.65 $\pm$ 0.48c	12.58 $\pm$ 0.53 cd
	GM	1.78 $\pm$ 0.01f	2.40 $\pm$ 0.65a	46.33 $\pm$ 1.00b	42.30 $\pm$ 0.93e	15.72 $\pm$ 0.09b	13.27 $\pm$ 0.79c
	IMAF	2.07 $\pm$ 0.04d	2.06 $\pm$ 0.26ab	39.26 $\pm$ 0.52d	115.64 $\pm$ 5.32b	16.24 $\pm$ 1.49b	16.89 $\pm$ 0.84a
70	CK	1.64 $\pm$ 0.02h	1.46 $\pm$ 0.52b	31.54 $\pm$ 0.60f	31.66 $\pm$ 2.13f	6.47 $\pm$ 0.07e	15.18 $\pm$ 0.03b
	GM	1.79 $\pm$ 0.01f	2.16 $\pm$ 0.39a	36.23 $\pm$ 3.24e	38.75 $\pm$ 2.96e	9.90 $\pm$ 0.43d	14.64 $\pm$ 0.32b
	IMAF	1.87 $\pm$ 0.02e	1.54 $\pm$ 0.12b	35.73 $\pm$ 1.33e	47.20 $\pm$ 1.77d	12.12 $\pm$ 0.07c	15.03 $\pm$ 0.33b
显著性 Significance	S	**	**	**	**	**	**
	AMF	**	**	**	**	**	**
	S $\times$ AMF	**	NS	**	**	**	**

40d 表示水分胁迫前期,80d 表示水分胁迫后期;CK 不接种,GM 接种摩西球囊,IMAF 接种土著 AM 真菌;表中数据为平均值  $\pm$  标准差,同一列数据中字母不同者表示在 5% 水平上差异显著;S 水分胁迫,AMF 丛枝菌根真菌;\*  $P < 0.05$ , \*\*  $P < 0.01$ , NS 无显著差异

## 2.5 AM 真菌和水分胁迫对植株全 N、全 P 含量和根系活力的影响

由表 5 可见,不同水分条件下,接种 AM 真菌显著提高了地下部全 N 含量和根系活力,且接种土著 AM 真菌处理显著高于接种摩西球囊霉处理。接种土著 AM 真菌植株地上部全 N 含量在 3 个水分条件下显著高于接种摩西球囊霉和不接种株,接种摩西球囊霉植株地上部全 N 含量在土壤相对含水量 30% 和 50% 时显著高于不接种株。接种株地上部全 P 含量在土壤相对含水量为 30% 时显著高于不接种株。接种摩西球囊霉植株地下部全 P 含量在土壤相对含水量 30% 和 50% 时显著高于不接种株,水分胁迫条件下接种土著 AM 真菌对地下部全 P 含量无明显影响。

水分胁迫和 AM 真菌的交互作用对地上部全 N 和全 P 含量、地下部全 N 含量及根系活力有极显著影响,对地下部全 P 有显著影响。

表 5 水分胁迫下接种 AM 真菌对宿主植物全 N、全 P 含量和根系活力的影响

Table 5 Effects of AM fungi on N and P content, root activity of host plant under water stress

土壤相对含水量 Soil relative water content /%	处理 Treatments	地上部 Shoot		地下部 Root		根系活力 Root activity /( $\text{mg}/(\text{g} \cdot \text{h})$ )
		全 N Total N /( $\text{g}/\text{kg}$ )	全 P Total P /( $\text{g}/\text{kg}$ )	全 N Total N /( $\text{g}/\text{kg}$ )	全 P Total P /( $\text{g}/\text{kg}$ )	
		30	CK	14.72 $\pm$ 0.02g	1.63 $\pm$ 0.17d	
	GM	17.62 $\pm$ 1.20f	2.31 $\pm$ 0.07ab	18.43 $\pm$ 0.10g	2.78 $\pm$ 0.10b	288.98 $\pm$ 13.16e
	IMAF	25.08 $\pm$ 0.82b	2.19 $\pm$ 0.01bc	22.87 $\pm$ 0.10c	2.21 $\pm$ 0.05e	510.61 $\pm$ 14.26c
50	CK	19.07 $\pm$ 0.91e	2.34 $\pm$ 0.05a	18.78 $\pm$ 0.35f	2.70 $\pm$ 0.17bc	196.29 $\pm$ 36.19fg
	GM	21.12 $\pm$ 0.12d	2.44 $\pm$ 0.10a	20.32 $\pm$ 0.02e	3.17 $\pm$ 0.09a	378.97 $\pm$ 36.19d
	IMAF	26.83 $\pm$ 0.23a	2.34 $\pm$ 0.01a	25.88 $\pm$ 0.02a	2.72 $\pm$ 0.07bc	890.74 $\pm$ 85.54a
70	CK	24.38 $\pm$ 0.12c	2.17 $\pm$ 0.05c	22.14 $\pm$ 0.07d	2.46 $\pm$ 0.02d	248.68 $\pm$ 13.16ef
	GM	23.22 $\pm$ 0.12c	2.17 $\pm$ 0.02c	22.87 $\pm$ 0.10c	2.58 $\pm$ 0.10cd	440.76 $\pm$ 69.09cd
	IMAF	25.78 $\pm$ 1.75ab	1.71 $\pm$ 0.01d	23.92 $\pm$ 0.12b	2.07 $\pm$ 0.07e	593.89 $\pm$ 75.67b
显著性 Significance	S	**	**	**	**	**
	AMF	**	**	**	**	**
	S $\times$ AMF	**	**	**	*	**

CK 不接种,GM 接种摩西球囊,IMAF 接种土著 AM 真菌;表中数据为平均值  $\pm$  标准差,同一列数据中字母不同者表示在 5% 水平上差异显著;S 水分胁迫,AMF 丛枝菌根真菌;\*  $P < 0.05$ , \*\*  $P < 0.01$ , NS 无显著差异

## 3 讨论和结论

研究表明,AM 真菌与沙打旺根系能够形成良好的共生关系<sup>[7]</sup>。不同水分条件下,摩西球囊霉的侵染率



达 90% 以上,说明干旱对摩西球囊霉的侵染影响不大<sup>[12]</sup>。土著 AM 真菌的侵染率随土壤含水量增加显著降低,这与 Davis 等的研究结果一致<sup>[13]</sup>。不同种类 AM 真菌具有不同的水分适应范围,土著 AM 真菌来自毛乌素沙地沙打旺根际土,长期适应干旱环境,所以干旱条件更有利于土著 AM 真菌的侵染。

沙打旺生长期需水量较多,水分供应对其生长和产量影响很大<sup>[6]</sup>,本试验中,水分胁迫显著抑制了沙打旺的生长,而水分胁迫条件下,接种 AM 真菌促进了沙打旺根系对土壤矿质元素和水分的吸收和利用,提高了根系活力和植株各部分磷和氮含量,改善了植株水分状况,提高了叶片叶绿素含量和光合效率,促进了植物生长。这与 AM 真菌在其他植物上的接种效应相一致<sup>[14-16]</sup>。

干旱条件下, $\text{NO}_3^-$  在土壤中的移动受到抑制,潜在缺氮也成为植物生长的限制因素。AM 真菌不仅改善植株磷素营养,还能改善植株氮的吸收和代谢。在豆科植物上,接种 AM 真菌对植物氮素营养有重要意义<sup>[17]</sup>。本试验中,水分胁迫条件下,接种 AM 真菌显著增加了植株地上部和地下部全 N 含量。说明接种 AM 真菌促进了沙打旺植株对土壤氮素的吸收和利用,也导致接种株叶片蛋白质含量明显增加。推测 AM 真菌改善沙打旺氮素营养与其促进根瘤菌的固氮作用密切相关<sup>[18]</sup>。

大量研究表明,AM 真菌提高植物抗旱性可能与其增强抗氧化酶活性有关<sup>[19-20]</sup>。本试验中,水分胁迫条件下,接种 AM 真菌明显提高了叶片 CAT 和 POD 活性,在胁迫后期显著增加了 SOD 活性。说明接种 AM 真菌改善了植物的酶促反应系统,减少了由于水分胁迫引起的活性氧积累,降低膜脂过氧化产物 MDA 含量,从而减轻因干旱造成的膜伤害,提高其抗旱性。接种株叶片可溶性蛋白含量的增加,说明 AM 真菌侵染可能减少了植株体内 RNA 的降解,增强非酶促防御系统能力,其含量增加也可增强宿主细胞的保水力<sup>[21]</sup>。

有关接种 AM 真菌对叶片脯氨酸含量影响的结果不一<sup>[22-23]</sup>。本试验中,不同水分条件下,接种 AM 真菌显著增加了沙打旺叶片可溶性糖和脯氨酸含量,而这些渗透调节物质在叶片中的积累,有利于降低细胞水势,增大细胞内外渗透势差,使得外界水分有利于向细胞内扩增,进而提高植物抗旱性<sup>[24]</sup>。

AM 真菌促进植物生长和提高旱性的效应因 AM 真菌菌种、宿主植物和生态环境不同而有差异<sup>[13,25]</sup>。本试验中,沙打旺根际土著 AM 真菌接种效果优于摩西球囊霉,这是由于在长期进化和自然选择过程中土著 AM 真菌已与沙打旺形成了良好的共生关系,多种 AM 真菌可通过协同作用比单一菌种能更好地发挥菌根效应。在被干扰的生境恢复中外来菌种的引入和土著菌种的培育,能够增加植物产量,促进原生植被恢复<sup>[26]</sup>。因此,研究不同菌种提高植物抗旱性的效应及机理,筛选适应不同生态条件下的高效菌种,对于应用菌根生物技术促进牧草生产和植被恢复有重要意义。

## References:

- [ 1 ] Klich M G. Leaf variation in *Elaeagnus angustifolia* related to environmental heterogeneity. *Environmental and Experimental Botany*, 2000, 44: 171-183.
- [ 2 ] Tian H Q, Xu X F, Song X. Drought impacts on terrestrial ecosystem productivity. *Journal of Plant Ecology*, 2007, 31 (2): 231-241.
- [ 3 ] Bolandnaza S, Aliasgarzad N, Neishabur M R, Chaparzaeh N. Mycorrhizal colonization improves onion (*Allium cepa* L.) yield and water use efficiency under water deficit condition. *Scientia Horticulturae*, 2007, 114:11-15.
- [ 4 ] Augé R M. Water relations, drought and vesicular arbuscular mycorrhizal symbiosis. *Mycorrhiza*, 2001, 11:3-42.
- [ 5 ] Li L L, Li C, Wang Y C, Miao L H. Effects of irrigation and planting density on seed yield and its components of *Astragalus adsurgens*. *Acta Agrestia Snicia*, 2008, 16(1): 65-69.
- [ 6 ] Cheng J M, Wan H E, Wang J, Yong S P. Over depletion and recovery of soil moisture on *Astragalus adsurgens* grasslands in the loess hilly-gully region. *Acta Ecologica Snicia*, 2004, 24(12):2979-2983.
- [ 7 ] Bai C M, He X L, Tang H L, Shan B Q, Zhao L L. Spatial distribution of arbuscular mycorrhizal fungi, glomalin and soil enzymes under the canopy of *Astragalus adsurgens* Pall. in the Mu Us sandland, China. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, 41: 941-947.
- [ 8 ] Agricultural Chemistry Professional Committee of Chinese Soil Science Society. *Conventional Analysis Methods of Soil Agricultural Chemistry*. Beijing: Science Press, 1983: 67-101.
- [ 9 ] Wang X K. *Experimental Principle and Technology of Plant Physiology and Biochemistry*. Beijing: Higher Education Press, 2006: 105-281.
- [ 10 ] 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.
- [11] Planchette C, Fortin J A, Furlan V. Growth response of several plant species to mycorrhiza in a soil of moderate fertility. I. Mycorrhizal dependency under field conditions. Plant and Soil, 1983, 70:199-209.
- [12] Lu J Y, Mao Y M, Shen L Y, Peng S Q, Li X L. Effects of VA mycorrhizal fungi inoculated on drought tolerance of wild Jujube (*Zizyphus spinosus* Hu) Seedlings. Acta Horticulturae Sinica, 2003, 30(1): 29-33.
- [13] Davies F T Jr, Olalde-Portugal V, Aguilera-Gomez L, Alvarado M J, Ferrera-Cerrato R C, Boutton T W. Alleviation of drought stress of Chile ancho pepper (*Capsicum annuum* L. cv. San Luis) with arbuscular mycorrhiza indigenous to Mexico. Scientia Horticulturae, 2002, 92:347-359.
- [14] 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.
- [15] Subramanian K S, Santhanakrishnan P, Balasubramanian P. Response of field grown tomato plants to arbuscular mycorrhizal fungal colonization under varying intensities of drought Stress. Scientia Horticulturae, 2006, 107:245-253.
- [16] Zhao S J, Li S L, Wang Z Q. Effects of VA mycorrhizal fungi on drought resistance of spring wheat under non-irrigation. Journal of Inner Mongolia Agricultural University, 2004, 25(4):43-46.
- [17] Li X L, Yao Q. VA mycorrhizas and mineral nutrition of plant. Progress in Natural Science, 2000, 10(6): 524-531.
- [18] Mortimer P E, Pérez-Fernández M A, Valentine A J. Arbuscular mycorrhizae affect the N and C economy of nodulated *Phaseolus vulgaris* (L.) during  $\text{NH}_4^+$  nutrition. Soil Biology & Biochemistry, 2009, 41: 2115-2121.
- [19] Alguacil M, Caravaca F, Diaz-Vivancos P, Hernández J A, Roldán A. Effect of arbuscular mycorrhizae and induced drought stress on antioxidant enzyme and nitrate reductase activities in *Juniperus oxycedrus* L. grown in a composted sewage sludge-amended semi-arid soil. Plant and Soil, 2006, 279:209-218.
- [20] Ruiz-Lozanouan J M. Arbuscular mycorrhizal symbiosis and alleviation of osmotic stress: New perspectives for molecular studies. Mycorrhiza, 2003, 13:309-317.
- [21] Wu Q S, Xia R X, Hu Z J. Effects of arbuscular mycorrhiza on drought tolerance of *Poncirus trifoliata*. Chinese Journal of Applied Ecology, 2005, 16(3):459-463.
- [22] He X L, Li S X. Effect of VA mycorrhizal fungi on the growth and drought resistance of maize. Acta Universitatis Agriculturae Boreali-occidentalis, 1999, 27(6):49-53.
- [23] Nishi M, Anil V. Influence of arbuscular mycorrhizae on biomass production, nutrient uptake and physiological changes in *Zizyphus mauritiana* Lam. under water stress. Journal of Arid Environments, 2000, 45:191-195.
- [24] Yu S W, Tang Z C. Plant Physiology and Molecular Biology. Beijing: Science Press, 1999:739-742.
- [25] Querejeta J I, Allen M F, Caravaca F, Roldán A. Differential modulation of host plant  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{18}\text{O}$  by native and non-native arbuscular mycorrhizal fungi in a semiarid environment. New Phytologist, 2006, 169: 379-387.
- [26] Allen E B, Allen M F. Competition between plants of different succession stages: mycorrhizae as regulators. Canadian Journal of Botany, 1984, 62:2625-2629.

#### 参考文献:

- [2] 田汉勤, 徐小锋, 宋霞. 干旱对陆地生态系统生产力的影响. 植物生态学报, 2007, 31(2): 231-241.
- [5] 李蕾蕾, 李聪, 王永辰, 苗丽宏. 灌溉与密度对沙打旺种子产量及其构成因素的影响. 草地学报, 2008, 16(1): 65-69.
- [6] 程积民, 万惠娥, 王静, 雍绍萍. 黄土丘陵区沙打旺草地土壤水分过耗与恢复. 生态学报, 2004, 24(12): 2979-2983.
- [8] 中国土壤学会农业化学专业委员会. 土壤农业化学常规分析方法. 北京: 科学出版社, 1983: 67-101.
- [9] 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: 105-281.
- [12] 鹿金颖, 毛永民, 申连英, 彭士琪, 李晓林. VA 菌根真菌对酸枣实生苗抗旱性的影响. 园艺学报, 2003, 30(1): 29-33.
- [14] 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.
- [16] 赵士杰, 李树林, 王志强. VA 菌根真菌对旱作春小麦抗旱性的影响. 内蒙古农业大学学报, 2004, 25(4): 43-46.
- [17] 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.
- [21] 吴强盛, 夏仁学, 胡正嘉. 丛枝菌根对枳实生苗抗旱性的影响研究. 应用生态学报, 2005, 16(3): 459-463.
- [22] 贺学礼, 李生秀. 不同 VA 菌根真菌对玉米生长及抗旱性的影响. 西北农业大学学报, 1999, 27(6): 49-53.
- [24] 余叔文, 汤章成. 植物生理与分子生物学. 北京: 科学出版社, 1999:739-742.

# 2008 年度生物学科总被引频次和影响因子前 10 名期刊\*

(源于 2009 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	8956	1	生态学报	1.669
2	应用生态学报	7979	2	植物生态学报	1.656
3	植物生态学报	3742	3	应用生态学报	1.632
4	西北植物学报	3584	4	生物多样性	1.474
5	JOURNAL OF INTEGRATIVE PLANT BIOLOGY	3460	5	生态学杂志	1.276
6	植物生理学通讯	3187	6	植物学通报	1.058
7	生态学杂志	3148	7	西北植物学报	1.046
8	遗传学报	2142	8	植物生理与分子生物学 学报	1.034
9	植物生理与分子生物学学报	1855	9	遗传学报	0.887
10	昆虫学报	1580	10	遗传	0.835

★《生态学报》2008 年在核心版的 1868 种科技期刊排序中总被引频次 8956 次,全国排名第 2;影响因子 1.669,全国排名第 14;第 1~8 届连续 8 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 30 卷 第 21 期 (2010 年 11 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA  
(Semimonthly, Started in 1981)  
Vol. 30 No. 21 2010

**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

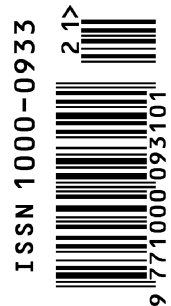
**Editor-in-chief** FENG Zong-Wei  
**Supervised** by China Association for Science and Technology  
**Sponsored** by Ecological Society of China  
Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS  
Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China

**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