

ISSN 1000-0933  
CN 11-2031/Q

# 生态学报

## Acta Ecologica Sinica



第33卷 第7期 Vol.33 No.7 **2013**

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 33 卷 第 7 期 2013 年 4 月 (半月刊)

## 目次

### 前沿理论与学科综述

- 线虫转型发育和寄主识别的化学通讯研究进展..... 张 宾,胡春祥,石 进,等 (2003)
- 生物物种资源监测原则与指标及抽样设计方法..... 徐海根,丁 晖,吴 军,等 (2013)

### 个体与基础生态

- 呼伦贝尔草原人为火空间分布格局..... 张正祥,张洪岩,李冬雪,等 (2023)
- 青藏高原草地地下生物量与环境因子的关系..... 杨秀静,黄 玫,王军邦,等 (2032)
- 1961—2010 年桂林气温和地温的变化特征 ..... 陈 超,周广胜 (2043)
- 黄泥河自然保护区狗冬季卧息地选择..... 朱洪强,葛志勇,刘 庚,等 (2054)
- 青藏高原草地植物叶解剖特征..... 李全发,王宝娟,安丽华,等 (2062)
- 青藏高原高寒草甸夏季植被特征及对模拟增温的短期响应..... 徐满厚,薛 娴 (2071)
- 高温影响番茄小孢子发育的细胞学研究..... 彭 真,程 琳,何艳军,等 (2084)
- 黄土丘陵半干旱区柠条林株高生长过程新模型..... 赵 龙,王振凤,郭忠升,等 (2093)
- 柝属 7 种植物种子的发芽抑制物质研究..... 李庆梅,刘 艳,刘广全,等 (2104)
- 水分胁迫和杀真菌剂对黄顶菊生长和抗旱性的影响..... 陈冬青,皇甫超河,刘红梅,等 (2113)
- 铜尾矿废弃地与相邻生境土壤种子库特征的比较..... 沈章军,欧祖兰,田胜尼,等 (2121)
- 云雾山典型草原火烧不同恢复年限土壤化学性质变化..... 李 媛,程积民,魏 琳,等 (2131)
- 根系分区交替灌溉条件下水肥供应对番茄果实硝酸盐含量的影响..... 周振江,牛晓丽,李 瑞,等 (2139)
- 喀斯特山区土地利用对土壤团聚体有机碳和活性有机碳特征的影响..... 李 娟,廖洪凯,龙 健,等 (2147)
- 自生固氮菌活化土壤无机磷研究..... 张 亮,杨宇虹,李 倩,等 (2157)
- 德国鳶尾对 Cd 胁迫的生理生态响应及积累特性 ..... 张呈祥,陈为峰 (2165)
- 施污土壤重金属有效态分布及生物有效性..... 铁 梅,宋琳琳,惠秀娟,等 (2173)
- 基于叶面积指数改进的直角双曲线模型在玉米农田生态系统中的应用..... 孙敬松,周广胜 (2182)
- 中稻田三种飞虱的捕食性天敌优势种及农药对天敌的影响..... 林 源,周夏芝,毕守东,等 (2189)

### 种群、群落和生态系统

- 珠江口超微型浮游植物时空分布及其与环境因子的关系..... 张 霞,黄小平,施 震,等 (2200)
- 输水前后塔里木河下游物种多样性与水因子的关系..... 陈永金,刘加珍,陈亚宁,等 (2212)
- 南海西北部陆架区鱼类的种类组成与群落格局..... 王雪辉,林昭进,杜飞雁,等 (2225)
- 滇西北高原碧塔湖滨沼泽植物群落分布与演替 ..... 韩大勇,杨永兴,杨 杨 (2236)
- 石羊河下游白刺灌丛演替过程中群落结构及数量特征..... 靳虎甲,马全林,何明珠,等 (2248)

### 资源与产业生态

- 土壤深松和补灌对小麦干物质生产及水分利用率的影响..... 郑成岩,于振文,张永丽,等 (2260)

豆科绿肥及施氮量对旱地麦田土壤主要肥力性状的影响..... 张达斌,姚鹏伟,李 婧,等 (2272)

沟壑全覆盖种植方式对旱地玉米生长及水分利用效率的影响..... 李 荣,侯贤清,贾志宽,等 (2282)

城乡与社会生态

北京北护城河河岸带的温湿度调节效应 ..... 吴芳芳,张 娜,陈晓燕 (2292)

西安太阳总辐射时空变化特征及对城市发展的响应..... 张宏利,张纳伟锐,刘敏茹,等 (2304)

研究简报

安徽琅琊山大型真菌区系多样性..... 柴新义,许雪峰,汪美英,等 (2314)

中国生态学会 2013 年学术年会征稿通知 ..... (2320)

第七届现代生态学讲座、第四届国际青年生态学者论坛通知 ..... ( I )

中、美生态学会联合招聘国际期刊主编 ..... ( i )

期刊基本参数:CN 11-2031/Q \* 1981 \* m \* 16 \* 318 \* zh \* P \* ¥90.00 \* 1510 \* 32 \* 2013-04



封面图说: 金灿灿的小麦熟了——小麦是世界上最早栽培的农作物之一,是一种在世界各地广泛种植的禾本科植物,起源于中东地区。全世界大概有 43 个国家,近 35%—40% 的人口以小麦为主要粮食。小麦是禾谷类作物中抗寒能力较强的越冬作物,具有一定的耐旱和耐盐碱能力。中国的小麦分布于全国各地,主要集中于东北平原、华北平原和长江中下游一带。小麦秋季播种、冬季生长、春季开花、夏季结实。子粒含有丰富的淀粉、较多的蛋白质、少量的脂肪,还有多种矿物质元素和维生素 B,是一种营养丰富、经济价值较高的粮食。

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/stxb201201040011

陈冬青,皇甫超河,刘红梅,王楠楠,杨殿林. 水分胁迫和杀真菌剂对黄顶菊生长和抗旱性的影响. 生态学报, 2013, 33(7): 2113-2120.

Chen D Q, Huangfu C H, Liu H M, Wang N N, Yang D L. Effects of water stress and fungicide on the growth and drought resistance of *Flaveria bidentis*. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(7): 2113-2120.

## 水分胁迫和杀真菌剂对黄顶菊生长和抗旱性的影响

陈冬青,皇甫超河,刘红梅,王楠楠,杨殿林\*

(农业部环境保护科研监测所,天津市农业环境与农产品安全重点实验室,天津 300191)

**摘要:**利用盆栽试验研究水分胁迫下 AM 真菌对黄顶菊生长和抗旱性的影响,揭示黄顶菊入侵过程中的微生物学机制。以苯菌灵为杀真菌剂,在土壤相对含水量为 120%、80%、40% 和 20% 条件下,分别设灭菌和不灭菌两种处理。结果表明,水分胁迫显著降低了黄顶菊株高、干重和主根长,而对 AM 真菌感染率无显著影响。施用苯菌灵显著降低了菌根感染率、叶片保水力、保护酶活性、可溶性糖和可溶性蛋白含量,提高了 MDA 含量。不灭菌处理下黄顶菊植株对土壤有效 N 和有效 P 的利用率较高,且植株全 N、P 含量显著高于灭菌处理,菌根贡献率随土壤相对含水量降低而逐渐提高,重度胁迫分别是渍水条件下的 1.84 和 1.88 倍。土壤水分状况和 AM 真菌的交互作用对黄顶菊生物量和生理指标影响显著。AM 真菌共生能够促进黄顶菊根系对土壤水分和矿质营养吸收,改善植物代谢活动,提高抗旱性。实验结果为黄顶菊合理防控措施的制定提供了依据,同时作为丛枝菌根的基础性研究也具有重要的意义。

**关键词:**杀真菌剂;水分胁迫;入侵植物;抗旱性;黄顶菊

## Effects of water stress and fungicide on the growth and drought resistance of *Flaveria bidentis*

CHEN Dongqing, HUANGFU Chaohe, LIU Hongmei, WANG Nannan, YANG Dianlin\*

Agro-Environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture, Tianjin Key Laboratory of Agro-environment & Agro-product Safety, Tianjin 300191, China

**Abstract:** *Flaveria bidentis*, an exotic plant with strong invasiveness, spreads at most regions of Tianjin, Hebei, Henan and Shandong Province, China, and many evidences prove that it has high potential to expand to other provinces. According to recent studies, *F. bidentis* is a typical species with arbuscular mycorrhizal (AM) symbiosis and AM symbiosis can alter host plant-water relationships under both well-watered and drought stress conditions by providing water for their hosts thus enhancing the tolerance of the host plants to water deficit. *F. bidentis* can dominate in a wide range of habitats, such as agricultural land, orchards, lawns, roadsides, watersides and waste ground, and can rapidly form dense nearly monospecific stands within several years. However, it is not clear whether its high invasive potential is due to this plant-fungal symbiosis, especially under drought stress.

The present study is to verify the effect of AM fungi on the growth and drought resistance of *F. bidentis* in its invaded process, and to understand the mechanism involved. Four water conditions were designed in this pot experiment: waterlogging (soil relative water content 120%), normal irrigation (80%), moderate stress (60%) and severe stress (40%), and at each water treatment, both sterilization and no sterilization was contained through adding fungicide benomyl to control AM fungi. Each treatment was repeated three times.

The results showed that water stress significantly inhibited the growth of *F. bidentis* such as plant height, main root

**基金项目:**天津市自然科学基金(12JCQNJC09800);天津市科技支撑计划重点项目(11ZCGYNC00300);公益性行业(农业)科研专项(200803022, 201103027)

收稿日期:2012-01-04; 修订日期:2012-08-03

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yangdianlin@caas.cn

length and biomass regardless of fungicide treatment, but infection rate was not affected by water stress. Under different water regimes, fungicide significantly decreased mycorrhizal infection rate and water preservation in leaves. Activity of protective enzymes and total N, P content, soluble sugar, soluble protein significantly decreased with fungicide treatment, while leaf malondialdehyde (MDA) content was significantly increased. The utilization rate of available N and P were higher at no sterilization treatment and total N, P content of *F. bidentis* plant were significantly enhanced. Simultaneously, the degrees of host plant benefits from AM fungi were affected by environment conditions. The contribution rate of mycorrhizal to host plant related to the extent of water stress, being 1.84 and 1.88 times higher at severe stress than those at waterlogging condition respectively.

It is concluded that mycorrhizal associations may significantly related to the invasion history of *F. bidentis* in newly reclaimed habitats. Mycorrhizal associations could improve the ability of *F. bidentis* to withdraw the adverse conditions. AM fungi increased soil water and mineral nutrient uptake and improved plant physiological metabolic activities, thus promoting drought resistance and growth of *F. bidentis*.

The results provided the basis for the invasion mechanism and making effective management measures of *F. bidentis*, meanwhile, it is also a basic research of great significance on AM fungi.

**Key Words:** fungicide; water stress; invasive plant; drought resistance; *Flaveria bidentis*

外来入侵是当今生态学界和环境科学界广泛关注的一个问题,外来入侵生物对入侵地生态系统的结构、功能及生态环境产生严重的干扰与危害,并对全球的农业和自然生态系统的生产力和生态系统构成了严重的威胁<sup>[1]</sup>。外来入侵植物作为一类能够快速入侵新生境的物种,其对环境条件的多变性和异质性有着独特的适应机制,其中菌根作为一种互惠互利的植物-真菌的共生体,是外来植物适应不利生境机制中不可缺少的一个组成部分。越来越多的研究认为丛枝菌根(AM)真菌在外来植物入侵中起到正反馈调节作用,成为外来植物入侵的驱动者<sup>[2]</sup>,特别是外来植物通过与土著 AM 真菌形成互利共生对入侵实现正反馈促进作用及其机制受到极大的关注<sup>[3]</sup>。Mummey 和 Rillig<sup>[4]</sup>通过野外试验表明,外来入侵植物斑点矢车菊(*Centaurea maculosa*)改变了入侵地 AM 真菌群落,促进了矢车菊的成功入侵。金樑等<sup>[5]</sup>研究表明,AM 真菌的存在可以减缓不利水分环境条件对加拿大一枝黄花(*Solidago canadensis*)生长的影响,提高其在新生境中的存活机会,并产生最大的生物量。

黄顶菊[*Flaveria bidentis* (L.) Kuntze]属于菊科黄顶菊属,原产南美洲,是近年来广泛蔓延于我国河北、山东、天津等地的入侵植物,其成功入侵已对我国华北地区生态系统造成重大威胁。黄顶菊是 C4 植物,它的光合作用很强,并和其他植物竞争养料和水分,在光线充足,土地湿润的地方长势很好,而土壤养分对其影响较小。作为一种菌根共生植物<sup>[6]</sup>其抗热性、抗践踏、抗病虫害、耐盐碱等能力较强<sup>[7]</sup>,而这种强抗逆性与 AM 真菌共生的关系尚待研究。

目前报道的影响 AM 真菌作用及其分布的环境因子(水分、营养、土壤氧气含量等)的研究较多<sup>[7]</sup>。而有关不同的环境胁迫条件对菌根真菌与外来种共生机制的影响,以及菌根共生体功能的发挥与程度如何方面的报道较少。为进一步研究环境因子对 AM 真菌与黄顶菊的共生效应的影响,本试验选用苯菌灵为杀真菌剂,从植物生长过程中最常见的水分条件出发,分别模拟干旱条件和渍水条件,以正常的水分为对照,研究不同水分条件下菌根对外来种黄顶菊生长和抗旱性的影响。苯菌灵能很好的抑制 AM 真菌的活性,降低其与植物形成共生体的机会,抑制丛枝菌根的形成<sup>[8]</sup>,导致植物菌根侵染率降低<sup>[9]</sup>,进而导致植物株高降低、生物量减少、相对生长率下降<sup>[10]</sup>,植物抗逆性减弱等。本研究从土壤微生物学角度出发,研究 AM 真菌与入侵植物黄顶菊间的作用关系,对阐明其入侵机制及合理防控措施的制定具有重要的理论意义和应用价值。

## 1 材料和方法

### 1.1 供试材料

黄顶菊种子采集于河北省献县陌南村荒地,土壤采集于农业部环保所网室(39°05'804"N, 117°08'805"E)。

50% 苯菌灵可湿性粉剂(有效成分:1-正丁氨基甲酰-2-苯并咪唑氨基酸甲酸甲酯)由上海农化实业有限公司生产。供试土壤硝态氮 4.77  $\mu\text{g/g}$ , 铵态氮 2.09  $\mu\text{g/g}$ , 速效磷 10.35  $\mu\text{g/g}$ , 有机质 18.41  $\text{g/kg}$ , pH 值 7.10, 最大田间持水量 31.00%。

本试验分为 4 个水分梯度:渍水条件(相对含水量 120%)、正常供水(相对含水量 80%)、中度胁迫(相对含水量 40%)和重度胁迫(相对含水量 20%),同一水分条件均设灭菌和不灭菌两种处理,每个处理 3 个重复。

2011 年 5 月 25 日开展网室盆栽,试验容器为 240  $\text{cm} \times 280 \text{ cm}$  的塑料盆,每盆装土 4.0  $\text{kg}$ ,在苗高 5  $\text{cm}$  时选长势一致的植株每盆定苗 4 株,灭菌处理每隔 14 d 施苯菌灵 1 次,施用剂量为 50  $\text{mg/kg}$ 。每 14 d 随机转盆 1 次以消除局部环境条件差异影响,称重法保持土壤相对水分含量,90 d 后测定光合相关指标,收获植株,进行生物量及生理生化指标的测定。

## 1.2 试验方法

收获时用常规方法测定植株株高、主根长,称重法测定植株各部分干重。植株保水力测定参见高俊凤《植物生理学实验技术》中的方法<sup>[11]</sup>。光合指标(净光合速率、气孔导度和蒸腾速率)用 LI-6400 型光合仪(LI-COR Inc, Lincoln, USA)测定。菌根侵染率用 Phillips 等<sup>[12]</sup>的方法测定,洗净根系,剪取距根尖 1  $\text{cm}$  左右的根段,以台盼蓝染色测定菌根侵染率。

采集植株顶端起第 3 片新鲜叶子,测定植株生理学特性指标。可溶性糖含量用蒽酮比色法;可溶性蛋白含量用考马斯亮蓝 G-250 染色法;MDA 含量用硫代巴比妥酸比色法。

酶液的提取:0.5  $\text{g}$  鲜叶片加入 5  $\text{mL}$  磷酸缓冲液于冰浴中研磨,匀浆转入离心管,于 5000  $\text{r/min}$  在  $-4 \text{ }^{\circ}\text{C}$  离心 15  $\text{min}$ ,上清液用于保护酶系统测定。SOD、POD、CAT 活性分别采用氮蓝四唑(NBT)法(以抑制 NBT 降解 10% 作为 1 个酶活单位),愈创木酚法(以 1  $\text{min}$  光密度值上升 0.01 作为 1 个酶活单位)和紫外吸收法测定(吸光度每下降 0.1 作为 1 个酶活单位)测定<sup>[13]</sup>。

植株 105  $^{\circ}\text{C}$  杀青 2  $\text{h}$ ,65  $^{\circ}\text{C}$  烘至恒重后,粉碎称取 0.5  $\text{g}$  干物质测定植株全 N、全 P 含量,组织全 N 用凯氏定氮法;组织全 P 用钒钼黄比色法<sup>[14]</sup>。

相关公式如下:

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

$$\text{每株吸收量}(\text{g}) = \text{植株 N、P 含量} \times \text{植株总重}$$

$$\text{菌根贡献率}(\%) = (\text{不灭菌处理的吸收量} - \text{灭菌处理的吸收量}) / \text{不灭菌处理的吸收量} \times 100$$

试验数据用 SPSS17.0 统计软件进行统计分析。同一水分条件下灭菌处理与不灭菌处理用  $T$ -test 进行比较,采用双因子方差分析杀真菌剂和水分胁迫二者之间的交互效应。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同水分条件和杀真菌剂对植株生长的影响

由表 1 可见,杀真菌对植株侵染率影响显著,相同水分条件下,不灭菌处理分别是灭菌处理的 3.55、4.60、3.76 和 3.83 倍;同时,菌根作用效果因水分条件的变化而不同,根系侵染率随相对含水量的降低而先增后降,在相对含水量为 40% 时达最大值。植株株高和主根长随土壤相对含水量降低表现为先增后降,正常水分时达最大值,均显著高于重度胁迫处理。

杀真菌剂对植株各部分生物量影响显著,均表现为灭菌处理低于不灭菌处理,其中地上部分生物量随水分条件变化表现为先增后降,正常水分显著高于重度胁迫处理。灭菌处理时,地下部分和须根生物量随相对含水量的降低先增后降,正常水分处理显著高于重度胁迫;不灭菌处理时两生物量逐渐降低,渍水条件分别是重度胁迫的 3.21 和 3.86 倍。

双因子方差分析结果表明,水分条件和杀真菌剂对植株各生长指标作用显著,且除对侵染率无显著交互作用外,对其余各生长指标均交互作用显著。

表 1 水分胁迫和杀真菌剂处理对黄顶菊生长的影响

Table 1 Effects of water stress and fungicide on the growth of *Flaveria bidentis*

| 处理<br>Treatments         | 土壤相对含水量<br>Soil relative<br>water content/% | 株高<br>Plant<br>height/cm | 主根长<br>Main root<br>length/cm | 地上干重<br>DW of<br>shoots/g | 地下干重<br>DW of<br>roots/g | 须根干重<br>DW of<br>fibrous/g | 侵染率 VInfection<br>rate/% |
|--------------------------|---------------------------------------------|--------------------------|-------------------------------|---------------------------|--------------------------|----------------------------|--------------------------|
| 灭菌                       | 120                                         | 47.67±3.18ab             | 5.67±0.67b                    | 4.12±0.14ab               | 0.79±0.02b               | 0.12±0.01a                 | 16.67±3.33a              |
| Fungicide added          | 80                                          | 56.33±2.96a              | 11.67±0.33a                   | 5.10±0.41a                | 0.98±0.06a               | 0.16±0.01a                 | 18.33±3.33a              |
|                          | 40                                          | 47.33±1.45ab             | 7.33±1.33b                    | 3.07±0.26b                | 0.97±0.05a               | 0.17±0.01a                 | 21.67±1.67a              |
|                          | 20                                          | 37.00±1.15b              | 5.67±0.33b                    | 1.72±0.10c                | 0.23±0.03c               | 0.05±0.02b                 | 20.00±5.77a              |
|                          | 120                                         | 59.67±2.91b              | 10.00±1.53b                   | 4.81±0.34b                | 1.70±0.05a               | 0.27±0.04a                 | 65.00±2.89b              |
| 不灭菌<br>Without fungicide | 80                                          | 79.67±0.33a              | 12.00±1.15a                   | 7.42±0.59a                | 1.44±0.03b               | 0.19±0.01ab                | 76.67±1.67ab             |
|                          | 40                                          | 71.67±4.41ab             | 10.33±1.20ab                  | 5.91±0.54ab               | 1.00±0.05c               | 0.17±0.01b                 | 81.67±4.41a              |
|                          | 20                                          | 46.33±1.86c              | 6.33±0.88b                    | 2.75±0.06c                | 0.53±0.04d               | 0.07±0.01c                 | 76.67±1.67ab             |
|                          | 120                                         | 59.67±2.91b              | 10.00±1.53b                   | 4.81±0.34b                | 1.70±0.05a               | 0.27±0.04a                 | 65.00±2.89b              |
| 显著性 Significance         | W                                           | 0.000                    | 0.001                         | 0.000                     | 0.000                    | 0.000                      | 0.060                    |
|                          | F                                           | 0.000                    | 0.011                         | 0.000                     | 0.000                    | 0.001                      | 0.000                    |
|                          | W×F                                         | 0.019                    | 0.015                         | 0.025                     | 0.000                    | 0.002                      | 0.200                    |

W: 水分条件 water condition, F: 杀真菌剂 fungicide treatment; 同一列数据中字母不同者表示在灭菌处理(或不灭菌处理) $P=0.05$ 水平上差异显著

## 2.2 不同水分条件和杀真菌剂对植株光合指标的影响

净光合速率、气孔导度和蒸腾速率均随相对含水量降低表现出先增后降的趋势(表 2), 正常水分处理时最高, 且显著高于重度胁迫处理; 杀真菌剂对各光合指标影响显著, 除蒸腾速率在渍水条件下表现不一致外, 其余条件下各光合指标均表现为灭菌处理低于不灭菌处理。

净光合速率/蒸腾速率表示在消耗单位重量的水分条件下, 植物固定  $\text{CO}_2$  的量的多少, 该比值越高, 代表植物水分利用效率越高; 反之该值越低, 则代表植物水分利用效率越低。由表 2 可知, 植株水分利用率随土壤相对含水量降低而升高, 重度胁迫下最高, 灭菌与不灭菌处理分别为 6.51 和 5.75, 均显著高于渍水条件和正常水分处理, 与中度胁迫无显著差异。

双因子方差分析结果表明, 水分条件对黄顶菊光合指标和水分利用率均影响显著, 杀真菌剂对净光合速率、气孔导度和蒸腾速率影响显著, 对水分利用率无显著影响, 且水分条件与杀真菌剂对各指标均无显著的交互作用。

表 2 水分胁迫和杀真菌剂处理对黄顶菊光合作用的影响

Table 2 Effects of water stress and fungicide on the physiological indices of *Flaveria bidentis*

| 处理<br>Treatments         | 土壤相对含水量<br>Soil relative<br>water content /% | 净光合速率<br>Photo<br>$/(\mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$ | 气孔导度<br>Cond<br>$/(\text{molH}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$ | 蒸腾速率<br>Tmmol<br>$/(\text{mmolH}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$ | 水分利用率<br>WUE |
|--------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| 灭菌                       | 120                                          | 13.84±0.15b                                                                      | 0.14±0.01ab                                                                        | 4.36±0.12a                                                                           | 3.04±0.15c   |
| Fungicide added          | 80                                           | 15.96±0.48a                                                                      | 0.17±0.03a                                                                         | 4.57±0.09a                                                                           | 3.67±0.15bc  |
|                          | 40                                           | 13.78±0.49b                                                                      | 0.087±0.00bc                                                                       | 2.48±0.13b                                                                           | 5.6±0.48ab   |
|                          | 20                                           | 11.08±0.17c                                                                      | 0.067±0.01c                                                                        | 1.74±0.19b                                                                           | 6.51±0.68a   |
|                          | 120                                          | 14.21±0.29ab                                                                     | 0.18±0.01a                                                                         | 4.29±0.23a                                                                           | 3.32±0.04b   |
| 不灭菌<br>Without fungicide | 80                                           | 16.69±0.45a                                                                      | 0.19±0.00a                                                                         | 4.73±0.39a                                                                           | 3.58±0.31b   |
|                          | 40                                           | 14.21±0.62ab                                                                     | 0.12±0.01b                                                                         | 2.91±0.14b                                                                           | 4.93±0.45ab  |
|                          | 20                                           | 12.21±1.06b                                                                      | 0.1±0.00c                                                                          | 2.12±0.01b                                                                           | 5.75±0.48a   |
|                          | 120                                          | 14.21±0.29ab                                                                     | 0.18±0.01a                                                                         | 4.29±0.23a                                                                           | 3.32±0.04b   |
| 显著性<br>Significance      | W                                            | 0.000                                                                            | 0.000                                                                              | 0.000                                                                                | 0.000        |
|                          | F                                            | 0.038                                                                            | 0.001                                                                              | 0.018                                                                                | 0.144        |
|                          | W×F                                          | 0.797                                                                            | 0.0654                                                                             | 0.987                                                                                | 0.718        |

### 2.3 不同水分条件和杀真菌剂对植株叶片保水力的影响

叶片在离体条件下具有保持原有水分的能力,在一定时间内含水量越高,表明植物保水力越强,抗旱性也越强。8月24日(35℃,室内湿度43%)收取样品,测定黄顶菊叶片保水力,结果如表3所示,水分条件和杀真菌剂均对黄顶菊失水率产生显著影响。室内自然干燥条件下离体叶在不同时刻累计失水结果表明,灭菌处理在单位时间内累计失水量都高于不灭菌处理,同一时刻叶片失水率随土壤相对含水量的变化而不同,渍水条件和正常水分时失水率较高,重度胁迫时较低,特别是在48h和72h,重度胁迫下叶片失水率均显著低于渍水条件和正常水分处理。

对植株叶片失水率进行双因子方差分析,结果表明(表3),不同时刻,水分条件和杀真菌剂对叶片保水力均影响显著,且除8h外均交互作用显著。

表3 水分胁迫和杀真菌剂处理对植株叶片保水力的影响

| Table 3 Effects water stress of and fungicide on the water preservation in leaves of <i>Flaveria bidentis</i> |                                            |                                      |             |              |              |              |             |              |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|--------------------------------------|-------------|--------------|--------------|--------------|-------------|--------------|
| 处理<br>Treatments                                                                                              | 土壤相对含水量<br>Soil relative<br>water conten/% | 叶片保水力 Water preservation in leaves/% |             |              |              |              |             |              |
|                                                                                                               |                                            | 2h                                   | 4h          | 8h           | 12h          | 24h          | 48h         | 72h          |
| 灭菌                                                                                                            | 120                                        | 10.40±0.56a                          | 12.40±1.04a | 27.27±2.88a  | 43.81±5.01a  | 65.67±6.60a  | 78.43±3.09a | 77.56±2.16b  |
| Fungicide added                                                                                               | 80                                         | 8.81±0.56ab                          | 14.81±2.12a | 26.51±3.11ab | 37.07±4.00ab | 54.61±5.25ab | 79.60±1.09a | 90.60±1.30a  |
|                                                                                                               | 40                                         | 6.91±0.73b                           | 11.29±0.91a | 17.16±1.07b  | 28.04±4.13c  | 43.42±3.75b  | 62.67±3.75b | 73.15±1.50bc |
|                                                                                                               | 20                                         | 8.94±1.02ab                          | 12.91±0.88a | 16.58±0.69b  | 30.37±2.67bc | 42.98±4.61b  | 60.46±5.77b | 68.51±5.25c  |
| 不灭菌                                                                                                           | 120                                        | 8.00±0.25ab                          | 11.04±0.97a | 20.29±1.58ab | 29.78±2.49ab | 47.67±3.49ab | 62.30±1.30b | 72.00±1.53b  |
| Without fungicide                                                                                             | 80                                         | 8.44±0.46a                           | 13.86±1.31a | 23.74±1.50a  | 36.60±1.75a  | 53.12±1.30a  | 74.00±0.33a | 84.10±0.89a  |
|                                                                                                               | 40                                         | 6.46±0.09b                           | 10.24±0.62a | 17.73±1.32b  | 26.14±2.71bc | 42.61±2.81b  | 61.14±1.69b | 72.58±2.09b  |
|                                                                                                               | 20                                         | 3.51±0.69c                           | 5.79±0.42b  | 7.67±0.43c   | 18.69±1.08c  | 27.78±0.93c  | 42.26±1.43c | 49.13±0.83c  |
| 显著性                                                                                                           | W                                          | 0.000                                | 0.004       | 0.000        | 0.000        | 0.000        | 0.000       | 0.000        |
| Significance                                                                                                  | F                                          | 0.000                                | 0.007       | 0.003        | 0.000        | 0.001        | 0.000       | 0.000        |
|                                                                                                               | W×F                                        | 0.002                                | 0.039       | 0.076        | 0.003        | 0.021        | 0.001       | 0.000        |

### 2.4 不同水分条件和杀真菌剂对植株生理学特性的影响

如表4所示,同一水分条件,灭菌处理降低了黄顶菊酶活性、可溶性糖和可溶性蛋白含量。但变化趋势和作用程度随土壤相对含水量变化而不同。在渍水条件和中度胁迫处理时,植株SOD、POD活性较正常水分有所上升,在重度胁迫时SOD升高,POD降低。CAT表现为正常水分最大,显著高于中度和重度胁迫处理。无论灭菌与否,渍水条件均增加了可溶性糖与可溶性蛋白含量,但作用程度因土壤相对含水量不同而存在差异,可溶性糖含量在重度胁迫达到最大值,两处理分别为0.71和1.05,可溶性蛋白在渍水条件时最大,两处理分别为4.9和5.67。黄顶菊叶片MDA含量随土壤相对含水量降低而逐渐增高,且随相对含水量降低,菌根作用逐渐增强,相对于灭菌处理,不灭菌植株体内MDA含量随相对含水量降低依次降低了2.04%、7.02%、18.84%和25.00%。

双因子方差分析结果表明,水分条件和杀真菌剂对植株各生理学指标均影响显著,且对POD、CAT和可溶性糖含量交互作用显著,对SOD、MDA和可溶性蛋白无显著交互作用。

### 2.5 不同水分条件和杀真菌剂对植株全N、P含量的影响

如表5所示,杀真菌剂对黄顶菊植株全N、P含量影响显著,灭菌处理均低于不灭菌处理。灭菌处理下,随相对含水量降低,全N、P含量均逐渐降低。菌根对植株全N、P贡献率均逐渐上升,即随胁迫程度增强菌根作用增强。

双因子方差分析表明,水分条件和杀真菌剂对植株全N含量、每株吸氮量有显著交互效应,而对植株全P、每株吸P含量无显著交互效应。

表 4 水分胁迫和杀真菌剂处理对黄顶菊生理学特性的影响

Table 4 Effects of water stress and fungicide on the physiological indices of *Flaveria bidentis*

| 处理<br>Treatments         | 土壤相对含水量<br>Soil relative<br>water content<br>/% | SOD<br>/(m/g 鲜重) | POD<br>/(μg/g 鲜重) | CAT<br>/(μg/g 鲜重) | MDA<br>/(μmol/g 鲜重) | 可溶性糖<br>Soluble sugar<br>/(mg/g 鲜重) | 可溶性蛋白<br>Soluble protein<br>/(mg/g 鲜重) |
|--------------------------|-------------------------------------------------|------------------|-------------------|-------------------|---------------------|-------------------------------------|----------------------------------------|
| 灭菌                       | 120                                             | 0.35±0.02ab      | 117.50±3.13a      | 60.83±2.76a       | 0.49±0.02c          | 0.53±0.03b                          | 4.9±0.10a                              |
| Fungicide added          | 80                                              | 0.29±0.048b      | 97.81±1.90b       | 70.73±0.87a       | 0.57±0.03bc         | 0.52±0.03b                          | 4.05±0.06b                             |
|                          | 40                                              | 0.50±0.04a       | 101.67±0.63b      | 32.73±1.03b       | 0.69±0.03b          | 0.75±0.03a                          | 3.90±0.18b                             |
|                          | 20                                              | 0.40±0.03a       | 48.65±0.85c       | 23.85±0.64b       | 0.84±0.03a          | 0.71±0.02a                          | 4.33±0.04ab                            |
|                          | 120                                             | 0.47±0.04ab      | 121.77±1.15b      | 85.31±3.98b       | 0.48±0.01a          | 0.76±0.02bc                         | 5.67±0.33a                             |
| 不灭菌<br>Without fungicide | 80                                              | 0.34±0.10b       | 100.73±0.85c      | 124.38±2.58a      | 0.53±0.06a          | 0.59±0.01c                          | 4.47±0.09b                             |
|                          | 40                                              | 0.62±0.04a       | 147.40±1.38a      | 61.25±0.22c       | 0.58±0.01a          | 0.86±0.01ab                         | 4.53±0.14b                             |
|                          | 20                                              | 0.49±0.037ab     | 71.15±0.73d       | 33.65±0.16d       | 0.63±0.04a          | 1.05±0.09a                          | 4.42b±0.03                             |
|                          | 120                                             | 0.47±0.04ab      | 121.77±1.15b      | 85.31±3.98b       | 0.48±0.01a          | 0.76±0.02bc                         | 5.67±0.33a                             |
| 显著性 Significance         | W                                               | 0.002            | 0.000             | 0.000             | 0.000               | 0.000                               | 0.000                                  |
|                          | F                                               | 0.019            | 0.000             | 0.000             | 0.011               | 0.000                               | 0.000                                  |
|                          | W×F                                             | 0.860            | 0.000             | 0.000             | 0.273               | 0.021                               | 0.173                                  |
|                          |                                                 |                  |                   |                   |                     |                                     |                                        |

表 5 水分胁迫和杀真菌剂处理对黄顶菊植株全 N、P 含量的影响

Table 5 Effects of water stress and fungicide on the complete N and P content of *Flaveria bidentis*

| 处理<br>Treatments         | 土壤相对含水量<br>Soil relative<br>water content<br>/% | 全 N<br>Total N<br>/(g/kg) | 每株吸 N 量<br>Total N uptake<br>per plant/g | 贡献率<br>Contribution<br>rate/% | 全 P<br>Total P<br>/(g/kg) | 每株吸 P 量<br>Total P uptake<br>per plant/g | 贡献率<br>Contribution<br>rate/% |
|--------------------------|-------------------------------------------------|---------------------------|------------------------------------------|-------------------------------|---------------------------|------------------------------------------|-------------------------------|
| 灭菌                       | 120                                             | 15.08±0.04a               | 74.04±1.69ab                             | —                             | 2.14±0.09a                | 10.53±0.67ab                             | —                             |
| Fungicide added          | 80                                              | 14.24±0.53a               | 86.50±3.20a                              | —                             | 2.11±0.07a                | 13.05±1.36a                              | —                             |
|                          | 40                                              | 13.47±0.33ab              | 54.73±2.06b                              | —                             | 1.80±0.03b                | 7.58±0.36b                               | —                             |
|                          | 20                                              | 13.02±0.40c               | 25.66±1.09c                              | —                             | 1.16±0.08c                | 2.26±0.16c                               | —                             |
|                          | 120                                             | 15.61±0.30a               | 101.41±3.55b                             | 26.88                         | 2.24±0.05ab               | 14.55±0.59b                              | 27.75                         |
| 不灭菌<br>Without fungicide | 80                                              | 15.73±15.73a              | 144.48±4.73a                             | 36.32                         | 2.45±0.17a                | 21.71±2.38a                              | 38.91                         |
|                          | 40                                              | 14.08±0.33a               | 97.61±3.63b                              | 43.11                         | 2.02±0.17ab               | 13.81±0.99b                              | 44.69                         |
|                          | 20                                              | 15.54±0.08a               | 50.69±0.65c                              | 49.40                         | 1.67±0.07c                | 5.46±0.23c                               | 58.26                         |
|                          | 120                                             | 15.61±0.30a               | 101.41±3.55b                             | 26.88                         | 2.24±0.05ab               | 14.55±0.59b                              | 27.75                         |
| 显著性 Significance         | W                                               | 0.001                     | 0.000                                    | —                             | 0.000                     | 0.000                                    | —                             |
|                          | F                                               | 0.000                     | 0.000                                    | —                             | 0.003                     | 0.000                                    | —                             |
|                          | W×F                                             | 0.036                     | 0.017                                    | —                             | 0.246                     | 0.094                                    | —                             |
|                          |                                                 |                           |                                          |                               |                           |                                          |                               |

3 讨论

目前,关于 AM 真菌提高植物抗旱性的机理有多种解释。主要通过改善植株水分和养分吸收<sup>[15]</sup>,调节细胞渗透势<sup>[16]</sup>,以及改变植物体内一些次级代谢产物<sup>[17]</sup>等过程来调控植物生长。

Wright 等<sup>[18-19]</sup>研究表明,AM 真菌能够明显改善宿主植物水分状况,提高水分利用效率,增强宿主植物的耐旱性。本试验结果与之相似,杀真菌剂处理显著降低了黄顶菊菌根侵染率,降低了离体叶片保水力,减弱了黄顶菊在干旱环境中的生存与生长的能力。生物量的变化能够直观反映菌根的效应,贺学礼等<sup>[20]</sup>通过菌根依赖性和贡献率来描述 AM 真菌对宿主植物生物量的影响。本试验中,在中度和重度胁迫时,氮的菌根贡献率为 43.11% 和 49.40%,磷的菌根贡献率为 44.69% 和 58.26%,都较正常水分条件下菌根贡献率高,这与前人研究结果相似,说明水分胁迫下 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,有利于光合效率的提高,最终促进了植株生长<sup>[21]</sup>。

许多研究者认为<sup>[22-23]</sup>,干旱胁迫下,植物体为缓解干旱胁迫影响会诱导或加速多种生理反应,促进可溶性糖等渗透调节物质的积累。本试验中,水分胁迫促进黄顶菊叶片可溶性糖的合成,不灭菌处理下叶片可溶

性糖含量均高于灭菌处理,与刘盛林<sup>[24]</sup>在甘草上的研究结果一致,可能因为 AM 真菌可通过促进氮、磷等营养元素的吸收进而促进宿主植物光合速率,可溶性糖的积累可稳定植物体内渗透压平衡,保证蛋白质结构稳定<sup>[17]</sup>,从而增强植物抗旱能力,维持植物正常生长。

大量研究表明,AM 真菌提高植物抗旱性可能与其增强植物酶促防御系统和非酶促防御系统功能有关<sup>[16,25]</sup>。干旱胁迫下,植物自动和被动地调节非酶促保护物质,以缓解细胞伤害<sup>[26]</sup>。本研究表明,AM 真菌显著提高了植株叶片可溶性蛋白含量,增强了非酶促防御系统的能力,相似的结果在赵金莉<sup>[26]</sup>关于油蒿以及贺学礼<sup>[20]</sup>关于民勤绢蒿的研究中也有描述。关于干旱胁迫对 SOD、POD、CAT 活性的影响,不同作者以不同作物或不同品种为对象,所得的研究结果颇为不同。贺学礼等<sup>[27]</sup>报道,干旱胁迫丛下,AM 真菌显著提高了柠条锦鸡儿的 SOD、POD 和 CAT 酶活性。张焕仕等<sup>[28]</sup>研究表明 AM 真菌提高了油蒿 POD 和 CAT 酶活性,MDA 的积累减少,SOD 活性受到了抑制。胡桂馨<sup>[29]</sup>研究发现,干旱胁迫下 AM 真菌增强了 CAT 酶的活性,但同时又抑制了 POD 酶活性,而侵染植株较不带菌植株表现出更强的抗旱性。本研究结果表明,灭菌处理均降低了 POD、SOD、CAT 活性并提高了 MDA 含量。AM 真菌可通过提高 SOD、POD 和 CAT 酶活性进而清除因干旱胁迫导致的活性氧积累,从而减轻细胞膜脂过氧化的伤害,减少膜脂过氧化产物 MDA 的合成,最终提高植株的抗旱性<sup>[30]</sup>。本实验结果说明 AM 真菌的存在确实一定程度上提高了植物的抗旱性,但不同植物应对水分胁迫时保护酶的变化趋势不尽相同,这可能是因为不同植物对干旱胁迫的响应机制不同,保护酶通过调节其含量变化协调干旱胁迫对植物生理的影响,其含量的多少与酶反应顺序有关,也与植物种类和抗旱性以及土壤性质有关,反应机理有待进一步研究。

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<sup>[21]</sup>。本研究也的到了相似的结果,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,从而进一步满足叶片光合代谢需要<sup>[31]</sup>,促进植物生长。

综上所述,AM 真菌能与黄顶菊根系形成良好的共生关系,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氮、磷元素等的吸收,刺激抗氧化保护酶生成以及渗透调节物质积累,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。本研究为菌根生物技术在黄顶菊入侵及防治等方面的应用提供了科学依据,对于防控黄顶菊向我国南方扩散具有重要的实践价值,同时对其他入侵植物入侵机理的研究也具有重要的借鉴意义。

## References:

- [ 1 ] Dukes J S, Mooney H A. Does global change increase the success of biological invaders?. Trends in Ecology and Evolution, 1999, 14 (4): 135-139.
- [ 2 ] Shah M A, Reshi Z A, Khosa D P. Arbuscular mycorrhizas: drivers or passengers of alien plant invasion. Botanical Review, 2009, 75 (4): 397-417.
- [ 3 ] Harner M J, Mummey D L, Stanford J A, Rillig M C. Arbuscular mycorrhizal fungi enhance spotted knapweed growth across a riparian chronosequence. Biological Invasions, 2009, 12 (6): 1481-1490.
- [ 4 ] Mummey D L, Rillig M C. The invasive plant species *Centaurea maculosa* alters arbuscular mycorrhizal fungal communities in the field. Plant and Soil, 2006, 288 (1/2): 81-90.
- [ 5 ] Jin L. Ecology of Arbuscular Mycorrhizal Associations in *Solidago Canadensis*, An Invasive Alien Plant [D]. Shanghai: Fudan University, 2005.
- [ 6 ] He B, He X L. Study on correlations between AM fungi and soil factors in the rhizosphere of *Flaveria bidentis*. Journal of Agricultural University of Hebei, 2010, 33 (1): 34-38.
- [ 7 ] Raed D J. Mycorrhizas in ecosystems. Cellular and Molecular Life Sciences, 1991, 47 (4): 376-391.
- [ 8 ] O'Connor P J, Smith S E, Smith F A. Arbuscular mycorrhizas influence plant diversity and community structure in a semiarid herbland. New Phytologist, 2002, 154 (1): 209-218.
- [ 9 ] Allen M F. Formation of vesicular-arbuscular mycorrhizae in *atriplex gardneri* (Chenopodiaceae): seasonal response in a cold desert. Mycologia, 1983, 75 (5): 773-776.
- [ 10 ] Brundrett M C. Mycorrhizas in natural ecosystems. Advances in Ecological Research, 1991, 21: 171-313.
- [ 11 ] Gao J F. Experiment Technology of Plant Physiology. Xi'an: Corporation of World Books Press, 2000: 19-19.
- [ 12 ] 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(1): 158-161.
- [13] Li H S. Principle and Technology of Plant. Physiological Biochemical Experiment. Beijing: Higher Education Press, 2000:164-168
- [14] Lu R K. Conventional Analysis Methods of Soil Agricultural Chemistry. Beijing: Science Press, 1983: 18.
- [15] Nelson C E, Safir G R. Increased drought tolerance of mycorrhizal onion plants caused by improved phosphorus nutrition. Planta, 1982, 154(5): 407-413.
- [16] Ruiz-Lozanouan J M. Arbuscular mycorrhizal symbiosis and alleviation of osmotic stress: new perspectives for molecular studies. Mycorrhiza, 2003, 13(6): 309-317.
- [17] 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.
- [18] Wright D P, Scholes J D, Read D J. Effects of VA mycorrhizal colonization on photosynthesis and biomass production of *Trifolium repens* L. Plant, Cell and Environment, 1998, 21(2): 209-216.
- [19] Bethlenfalvay G J, Brown M S, Ames R N, Thomas R S. Effects of drought on host and endophyte development in mycorrhizal soybeans in relation to water use and Phosphate uptake. Physiologia Plantarum, 1988, 72(3): 565-571.
- [20] 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.
- [21] Li X L, Yao Q. VA mycorrhiza and plant mineral nutrition. Progress in Natural Science, 2000, 10(6): 524-531.
- [22] Amundson R G, Kohut R J, Laurence J A, Fellows S, Colavito L J. Moderate water stress alters carbohydrate content and cold tolerance of red spruce foliage. Environmental and Experimental Botany, 1993, 33(3): 383-390.
- [23] Zwiazek J J. Cell wall changes in white spruce (*Picea glauca*) needles subjected to repeated drought stress. Physiologia Plantarum, 1991, 82(4): 513-518.
- [24] Liu S L, He X L. Effects of AM fungi on growth of *Glycyrrhiza inflata* Bat under water stress. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2009, 23(4): 692-696.
- [25] Alguacil M, Caravaca F, Díaz-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(1/2): 209-218.
- [26] Zhao J L, He X L. Effects of AM fungi on the growth and drought-resistance of *Artemisia ordosica*. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2007, 22(5): 994-1001.
- [27] He X L, Liu T, An X J, Zhao L L. Effects of AM fungi on the growth and drought resistance of *Caragana korshinskii* under water stress conditions. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(1): 47-52.
- [28] Zhang H S, He X L. Effect of AM fungi on the protective system in leaves of *Artemisia ordosica* under drought stress. Biotechnology Bulletin, 2007, (3): 129-133.
- [29] Hu G Q, Wang D J, Liu R T. The effect of endophyte on activities of protective enzyme of tall fescue under drought stress. Grassland and Turf, 2001, 92(1): 28-31.
- [30] Wu Q S, Zou Y N, Xia R X. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on reactive oxygen metabolism of Citrus tangerine leaves under water stress. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, 18(4): 825-830.
- [31] Yan X F, Wang Q. Effects of ectomycorrhizal inoculation on the seedling growth of *Quercus Liaotungensis*. Acta Phytoecologica Sinica, 2002, 26(6): 701-707.

#### 参考文献:

- [5] 金樑. 外来入侵种加拿大一枝黄花的菌根生态学研究 [D]. 上海: 复旦大学, 2004.
- [6] 何博, 贺学礼. 黄顶菊根围 AM 真菌与土壤因子相关性研究. 河北农业大学学报, 2010, 33(1): 34-38.
- [11] 高俊凤. 植物生理学实验技术. 西安: 世界图书出版社, 2000: 19-19.
- [13] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术. 北京: 高等教育出版社, 2000:164-168.
- [14] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国科学技术出版社, 1983: 18.
- [17] 曲涛, 南志标. 作物和牧草对于干旱胁迫的响应及机理研究进展. 草业学报, 2008, 17(2): 126-135.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [24] 刘盛林, 贺学礼. 水分胁迫下 AM 真菌对甘草生长的影响. 核农学报, 2009, 23(4): 692-696.
- [26] 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.
- [27] 贺学礼, 刘媿, 安秀娟, 赵丽莉. 水分胁迫下 AM 真菌对柠条锦鸡儿 (*caragana korshinskii*) 生长和抗旱性的影响. 生态学报, 2009, 29(1): 47-52.
- [28] 张焕仕, 贺学礼. 干旱胁迫下 AM 真菌对油蒿叶片保护系统的影响. 生物技术通报, 2007, (3): 129-133.
- [29] 胡桂馨, 王代军, 刘荣堂. 干旱胁迫下内生真菌对高羊茅保护酶活性的影响. 草原与草坪, 2001, 92(1): 28-31.
- [30] 吴强盛, 邹英宁, 夏仁学. 水分胁迫下丛枝菌根真菌对红橘叶片活性氧代谢的影响. 应用生态学报, 2007, 18(4): 825-830.
- [31] 阎秀峰, 王琴. 接种外生菌根对辽东栎幼苗生长的影响. 植物生态学报, 2002, 26(6): 701-707.

# ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 33, No. 7 April, 2013 (Semimonthly)

## CONTENTS

### Frontiers and Comprehensive Review

- Research progress on chemical communication of development and host-finding of nematodes ..... ZHANG Bin, HU Chunxiang, SHI Jin, et al (2003)
- Principles, indicators and sampling methods for species monitoring ..... XU Haigen, DING Hui, WU Jun, et al (2013)

### Autecology & Fundamentals

- Spatial distribution pattern of human-caused fires in Hulunbeir grassland ..... ZHANG Zhengxiang, ZHANG Hongyan, LI Dongxue, et al (2023)
- Belowground biomass in Tibetan grasslands and its environmental control factors ..... YANG Xiuqing, HUANG Mei, WANG Junbang, et al (2032)
- Analysis on variation characteristics of air temperature and ground temperature in Guilin from 1961 to 2010 ..... CHEN Chao, ZHOU Guangsheng (2043)
- Winter bed-site selection by roe deer (*Capreolus capreolus*) in Huangnihe Nature Reserve ..... ZHU Hongqiang, GE Zhiyong, LIU Geng, et al (2054)
- Leaf anatomical characteristics of the plants of grasslands in the Tibetan Plateau ..... LI Quanfa, WANG Baojuan, AN Lihua, et al (2062)
- A research on summer vegetation characteristics & short-time responses to experimental warming of alpine meadow in the Qinghai-Tibetan Plateau ..... XU Manhou, XUE Xian (2071)
- Cytological study on microsporogenesis of *Solanum lycopersicum* var. Micro-Tom under high temperature stress ..... PENG Zhen, CHENG Lin, HE Yanjun, et al (2084)
- A new plant height growth process model of *Caragana* forest in semi-arid loess hilly region ..... ZHAO Long, WANG Zhenfeng, GUO Zhongsheng, et al (2093)
- Germination inhibitory substances extracted from the seed of seven species of *Quercus* ..... LI Qingmei, LIU Yan, LIU Guangquan, et al (2104)
- Effects of water stress and fungicide on the growth and drought resistance of *Flaveria bidentis* ..... CHEN Dongqing, HUANGFU Chaohe, LIU Hongmei, et al (2113)
- Characters of soil seed bank in copper tailings and its adjacent habitat ... SHEN Zhangjun, OU Zulan, TIAN Shengni, et al (2121)
- Changes of soil chemical properties after different burning years in typical steppe of Yunwun Mountains ..... LI Yuan, CHENG Jimin, WEI Lin, et al (2131)
- Effects of water and fertilizers on nitrate content in tomato fruits under alternate partial root-zone irrigation ..... ZHOU Zhenjiang, NIU Xiaoli, LI Rui, et al (2139)
- Effect of land use on the characteristics of organic carbon and labile organic carbon in soil aggregates in Karst mountain areas ..... LI Juan, LIAO Hongkai, LONG Jian, et al (2147)
- Mobilization of inorganic phosphorus from soils by five azotobacters ..... ZHANG Liang, YANG Yuhong, LI Qian, et al (2157)
- Physiological-ecological responses of *Iris germanica* L. to Cd stress and its accumulation of Cd ..... ZHANG Chengxiang, CHEN Weifeng (2165)
- The available forms and bioavailability of heavy metals in soil amended with sewage sludge ..... TIE Mei, SONG Linlin, HUI Xiujuan, et al (2173)
- LAI-based photosynthetic light response model and its application in a rainfed maize ecosystem ..... SUN Jingsong, ZHOU Guangsheng (2182)
- The dominant species of predatory natural enemies of three kinds of planthoppers and impact of pesticides on natural enemies in paddy field ..... LIN Yuan, ZHOU Xiazhi, BI Shoudong, et al (2189)

### Population, Community and Ecosystem

- Spatial and temporal variation of picophytoplankton in the Pearl River Estuary ..... ZHANG Xia, HUANG Xiaoping, SHI Zhen, et al (2200)

|                                                                                                                                                                                  |                                                        |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| Analysis of the relationship between species diversity and hydrologic factors during an interval of intermittent water delivery at the Lower Reaches of Tarim River, China ..... | CHEN Yongjin, LIU Jiazhen, CHEN Yaning, et al (2212)   |
| Fish species composition and community pattern in the continental shelf of northwestern South China Sea .....                                                                    | WANG Xuehui, LIN Zhaojin, DU Feiyan, et al (2225)      |
| Distribution and succession of plant communities in Lake Bita coastal swamp on the plateau region, northwestern Yunnan .....                                                     | HAN Dayong, YANG Yongxing, YANG Yang (2236)            |
| Analysis on community structure and quantitative characteristics of <i>Nitraria tangutorum</i> nebkhas at different succession stage in lower reaches of Shiyang River .....     | JIN Hujia, MA Quanlin, HE Mingzhu, et al (2248)        |
| <b>Resource and Industrial Ecology</b>                                                                                                                                           |                                                        |
| Effects of subsoiling and supplemental irrigation on dry matter production and water use efficiency in wheat .....                                                               | ZHENG Chengyan, YU Zhenwen, ZHANG Yongli, et al (2260) |
| Effects of two years' incorporation of leguminous green manure on soil properties of a wheat field in dryland conditions .....                                                   | ZHANG Dabin, YAO Pengwei, LI Jing, et al (2272)        |
| Effects of planting with ridge and furrow mulching on maize growth, yield and water use efficiency in dryland farming .....                                                      | LI Rong, HOU Xianqing, JIA Zhikuan, et al (2282)       |
| <b>Urban, Rural and Social Ecology</b>                                                                                                                                           |                                                        |
| Effects of riparian buffers of North Mort of Beijing on air temperature and relative humidity .....                                                                              | WU Fangfang, ZHANG Na, CHEN Xiaoyan (2292)             |
| Characteristics of spatial and temporal variations of global solar radiation in Xi'an and relevant response in urban development .....                                           | ZHANG Hongli, ZHANG Naweirui, LIU Minru, et al (2304)  |
| <b>Research Notes</b>                                                                                                                                                            |                                                        |
| A analysis of macrofungal flora diversity in Langyashan Nature Reserve, Anhui Province, China .....                                                                              | CHAI Xinyi, XU Xuefeng, WANG Meiyang, et al (2314)     |

# 《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

本期责任副主编 陈利顶

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 7 期 (2013 年 4 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 7 (April, 2013)

|               |                                                                                                                    |                 |                                                                                                                                                                                 |
|---------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 编 辑           | 《生态学报》编辑部<br>地址:北京海淀区双清路 18 号<br>邮政编码:100085<br>电话:(010)62941099<br>www.ecologica.cn<br>shengtaixuebao@rcees.ac.cn | Edited by       | Editorial board of<br>ACTA ECOLOGICA SINICA<br>Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China<br>Tel:(010)62941099<br>www.ecologica.cn<br>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<br>中国科学院生态环境研究中心<br>地址:北京海淀区双清路 18 号<br>邮政编码:100085                                                        | Sponsored by    | Ecological Society of China<br>Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS<br>Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China                                 |
| 出 版           | 科 学 出 版 社<br>地址:北京东黄城根北街 16 号<br>邮政编码:100717                                                                       | Published by    | Science Press<br>Add:16 Donghuangchenggen North Street,<br>Beijing 100717, China                                                                                                |
| 印 刷           | 北京北林印刷厂                                                                                                            | Printed by      | Beijing Bei Lin Printing House,<br>Beijing 100083, China                                                                                                                        |
| 发 行           | 科 学 出 版 社<br>地址:东黄城根北街 16 号<br>邮政编码:100717<br>电话:(010)64034563<br>E-mail:journal@cspg.net                          | Distributed by  | Science Press<br>Add:16 Donghuangchenggen North<br>Street, Beijing 100717, China<br>Tel:(010)64034563<br>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<br>地址:北京 399 信箱<br>邮政编码:100044                                                                         | Foreign         | China International Book Trading<br>Corporation<br>Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China                                                                                      |
| 广告经营<br>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