ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica

第31卷 第8期 Vol.31 No.8 2011

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 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 8 期　　2011 年 4 月　（半月刊）

目　　次

塔里木河下游胡杨径向生长与地下水的关系…… 安红燕，徐海量，叶　茂，等（2053）
冲积平原区高程因子对土壤剖面质地构型的影响——以封丘县为例…… 檀满枝，密术晓，李开丽，等（2060）
臭氧胁迫对大豆叶片抗坏血酸-谷胱甘肽循环的影响 …… 王俊力，王　岩，赵天宏，等（2068）
重要理化因子对小球藻生长和油脂产量的影响…… 张桂艳，温小斌，梁　芳，等（2076）
北亚热带马尾松净生产力对气候变化的响应…… 程瑞梅，封晓辉，肖文发，等（2086）
亚热带沟叶结缕草草坪土壤呼吸…… 李熙波，杨玉盛，曾宏达，等（2096）
UV-B 辐射对马尾松凋落叶分解和养分释放的影响 …… 宋新章，张慧玲，江　洪，等（2106）
干旱胁迫下内生真菌感染对羽茅的生理生态影响…… 韩　荣，李　夏，任安芝，等（2115）
蜜环菌对锌的耐性和富集特性…… 朱　林，程显好，李维焕，等（2124）
干旱荒漠区狭叶锦鸡儿灌丛扩展对策…… 张建华，马成仓，刘志宏，等（2132）
黄土高原区不同植物凋落物搭配对土壤微生物量碳、氮的影响 …… 王春阳，周建斌，夏志敏，等（2139）
内蒙古典型草原克氏针茅与冰草的生存策略 …… 孙　建，刘　苗，李胜功，等（2148）
荒漠沙柳根围 AM 真菌的空间分布 …… 贺学礼，杨　静，赵丽莉（2159）
开放式昼夜不同增温对单季稻影响的试验研究…… 董文军，邓艾兴，张　彬，等（2169）
醉马草免培养内生细菌的多样性…… 张雪兵，史应武，曾　军，等（2178）
河南生态足迹驱动因素的 Hi_PLS 分析及其发展对策 …… 贾俊松（2188）
禹城市耕地土壤盐分与有机质的指示克里格分析 …… 杨奇勇，杨劲松，余世鹏（2196）
旋覆花提取物对朱砂叶螨的生物活性及酶活性的影响…… 段丹丹，王有年，成　军，等（2203）
白洋淀湖滨湿地岸边带氨氧化古菌与氨氧化细菌的分布特性…… 叶　磊，祝贵兵，王　雨，等（2209）
干旱胁迫条件下 6 种喀斯特主要造林树种苗木叶片水势及吸水潜能变化……
…… 王　丁，姚　健，杨　雪，等（2216）
桉树人工林物种多样性变化特征…… 刘　平，秦　晶，刘建昌，等（2227）
海河流域湿地生态系统服务功能价值评价…… 江　波，欧阳志云，苗　鸿，等（2236）
芦苇在微咸水河口湿地甲烷排放中的作用…… 马安娜，陆健健（2245）
云南不同土壤铅背景值下大叶茶种群对铅的吸收积累特征及其遗传分化……
…… 刘声传，段昌群，李振华，等（2253）
长江口和杭州湾凤鲚胃含物与海洋浮游动物的种类组成比较…… 刘守海，徐兆礼（2263）
江西大岗山地区 7—9 月降水量的重建与分析 …… 乔　磊，王　兵，郭　浩，等（2272）
山核桃免耕经营的经济效益和生态效益…… 王正加，黄兴召，唐小华，等（2281）
基于 GIS 的广州市中心城区城市森林可达性分析…… 朱耀军，王　成，贾宝全，等（2290）

专论与综述

土壤呼吸温度敏感性的影响因素和不确定性…… 杨庆朋，徐　明，刘洪升，等（2301）
植物代谢速率与个体生物量关系研究进展…… 程栋梁，钟全林，林茂兹，等（2312）
耕地生态补偿实践与研究进展 …… 马爱慧，蔡银莺，张安录（2321）

问题讨论

元谋干热河谷三种植被恢复模式土壤贮水及入渗特性…… 刘　洁，李贤伟，纪中华，等（2331）

研究简报

中微量元素和有益元素对水稻生长和吸收镉的影响…… 胡　坤，喻　华，冯文强，等（2341）

期刊基本参数：CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 296 * zh * P * ￥70.00 * 1510 * 33 * 2011-04

封面图说：巴西热带雨林——美丽的巴西北部玛瑙斯热带雨林景观。位于南美洲的亚马逊河是世界上流域最广、流量最大的河流，孕育了世界面积最大的热带雨林，雨林中蕴藏着极丰富的生物资源。

彩图提供：中国科学院生态环境研究中心徐卫华博士　E-mail：xuweihua@rcees.ac.cn

生 态 学 报 2011,31(8):2115—2123
Acta Ecologica Sinica

干旱胁迫下内生真菌感染对羽茅的生理生态影响

韩 荣,李 夏,任安芝,高玉葆*
(南开大学生命科学学院,天津 300071)

摘要:在田间环境下对感染和未感染内生真菌的天然宿主羽茅(*Achnatherum sibiricum* (L.) Keng)进行了干旱胁迫实验,结果发现在干旱胁迫下,内生真菌感染对宿主植物的营养生长、生物量累积和叶绿素含量都没有显著影响,但对宿主植株光系统Ⅱ光化学效率(F_v/F_m)的维持产生了有利效应。同时,内生真菌感染缓解了宿主植物细胞膜的旱害程度,表现在与未感染植株相比,感染植株的丙二醛(MDA)含量显著降低,但内生真菌的感染并未促使宿主植物体内保护酶如超氧化物歧化酶(SOD)和过氧化氢酶(CAT)活性的增加,只是显著增加了类胡萝卜素的含量。由此推测在羽茅中,内生真菌对宿主植物的保护作用可能更多的体现在非酶系统上。

关键词:干旱胁迫;内生真菌;羽茅;生长;保护酶;丙二醛

Physiological ecological effect of endophyte infection on *Achnatherum sibiricum* under drought stress

HAN Rong, LI Xia, REN Anzhi, GAO Yubao*
College of Life Science, Nankai University, Tianjin 300071, *China*

Abstract: Endophytes and their host grasses are mutually symbiotic. On one hand, the host grasses provide necessary photosynthates for the fungi; on the other hand, endophyte-infected grasses express a range of adaptations to biotic and abiotic stresses, including drought, mineral imbalance, and soil acidity. Cool-season grasses infected with *Neotyphodium* endophytes have an extraordinary impact on the ecology and economy of pasture and turf. In this paper, *Achnatherum sibiricum* infected by *Neotyphodium lolii* was employed to establish endophyte-free (EF) and endophyte-infected (EI) populations. EI and EF *Achnatherum sibiricum* were grown in the field and tested for their ecophysiolocal response to water deficiency. Relative water content (RWC), chlorophyll, soluble sugar and protective enzymes of EI and EF populations under normal and drought stress conditions were calculated.

The experiment was carried out on the campus of Nankai University, Tianjin. The stress treatment began in mid-June and ended in mid-July, over a time span of 35 days. All experimental plants were watered to saturation before the experiment. During the treatment, half of the plants were served as the control group, they were watered once or twice a day. The remaining plants were subjected to drought-stress treatment. Every morning, a soil moisture probe (ECH_2O Check, Decagon Devices, Pullman, WA) was inserted to a 5 cm depth into each pot to record the volumetric water content percentage, i. e., the amount of total soil volume consisting of water. Control plants were watered to maintain field capacity, i. e., soil moisture readings at 35%. For plants in the drought treatment, sufficient water was added to keep the soil moisture readings between 5% and 10%.

The results showed that endophyte infection had no significant effect on the host's vegetative growth, total biomass, chlorophyll content. On the other hand, it has a favorable effect on the host's maintenance of photochemical efficiency (F_v/F_m), and made a contribution to keep the stability of photosystem Ⅱ. Endophyte infection had no significant effect on $F_v/$

基金项目:国家重点基础研究发展计划资助项目(2007CB106802);国家自然科学基金(30970460,30770348);教育部高等学校博士学科点专项科研基金(20090031110026);教育部留学回国人员科研启动基金(2009-2011)
收稿日期:2010-03-22; **修订日期**:2010-11-01
* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: ybgao@ mail. nankai. edu. cn

F_m in the control treatment, but enhanced the F_v/F_m of the host plant significantly under drought stress. At the same time, endophyte infection alleviated the drought injury on the cell membrane of the host grass, i. e. endophyte infection reduced the production of malondialdehyde (MDA). Endophyte infection did not improve the activity of protective enzymes such as superoxide dismutase (SOD) and catalase (CAT), while the carotenoid content of the EI plants was significantly higher than that of the EF plants under drought stress. Therefore, we suggested that under drought stress, endophyte infection may alleviate the adverse effect mainly through non-enzyme systems instead of protective enzymes. Others studies have showed that the endophyte promotes host natural grass tolerance of drought mainly by two mechanisms: (1) by changing the morphological and physiological characteristic of the host plants to help them maintain a reasonable growth rate under drought stress; (2) the endophyte enables plant tissues to withstand water deficits, but as a trade-off, the endophyte reduces the host plant's growth. In our study, the endophyte infection did not have a significant effect on the host plant's vegetative growth and biomass accumulation under drought stress, but did remit the drought damage to some extent. We suggest that endophyte may enable plants invest more in structural carbohydrates such as lignin and fiber to help host plant overcome the resource-limited environment. Thus, it will be interesting to determine whether endophyte infection contributes to greater investment in structural carbohydrates in plants.

Key Words: drought stress; endophyte; *Achnatherum sibiricum*; growth; protective enzyme; MDA

内生真菌(endophyte)是存在于健康植物的茎叶中,形成不明显侵染的一类真菌[1]。自 Bacon 等人[2]分离出内生真菌以来,对于内生真菌-禾草共生体的研究一直是生态学的热点之一。全世界现已报道有 14 种内生真菌与 23 个属的禾草形成共生体[3],但目前的研究大多集中于 *Neotyphodium* 属内生真菌[4]与高羊茅(*Festuca arundinacea* Schreb.)和黑麦草(*Lolium perenne* L.)等人工禾草的互利共生方面,大量的研究表明,内生真菌能够促进人工禾草宿主的生长[5-7]、增强其抗生物胁迫[8-10]和抗非生物胁迫[11-14]的能力,其中以干旱胁迫的研究较多,普遍的看法是内生真菌的侵染有助于提高植物对干旱胁迫的抵抗能力。内生真菌对宿主禾草的有益贡献主要表现在如下两个方面:一是形态方面,具体表现在与未感染植株相比,感染植株的叶片加厚变窄,叶片卷曲现象普遍、根系生物量更大并且分布深[15]);二是生理方面,具体包括干旱胁迫下染菌植株的可溶性糖含量较高,膜透性较低[16]、光合能力增强[17-18]等。

Neotyphodium 属内生真菌不仅存在于高羊茅和黑麦草等人工禾草中,而且也广泛存在于天然禾草中。然而关于 *Neotyphodium* 属内生真菌对天然禾草影响的研究与人工禾草相比还比较少,而且对于内生真菌对宿主的作用方面也有较大争议。Saikkonon 等[19]发现在不同的土壤水分和营养条件下亚利桑那羊茅(*Festuca arizonica*)不染菌植株的地下部生物量和地上部生物量均显著高于染菌植株,而 Morse 等[20]则发现在水分充足时内生真菌感染对亚利桑那羊茅的生长没有明显的促进作用,而在重度水分胁迫时染菌植株表现出更高的午间净光合速率。李飞等[21]在对醉马草(*Achnatherum inebrians*)的研究中也发现,在重度水分胁迫下,与不染菌植株相比,内生真菌感染能够显著促进干旱地区醉马草的地下生物量累积、增大植株的根冠比。

羽茅(*Achnatherum sibiricum* (L.) Keng)是禾本科芨芨草属的一种多年生草本植物,在内蒙古的各类草场中较为常见[22],而且具有很高的内生真菌侵染率(86%—100%)[23]。通过对羽茅感染内生真菌菌株的生物学特征和 DNA 分子鉴定结果,发现与羽茅共生的内生真菌主要为子囊菌纲麦角菌科的 *Neotyphodium* 属[24]。到目前为止,除羽茅外,该属中只有分布于我国天然草原的醉马草以及分布于美洲大陆的睡眠草(*Achnatherum robustum*)这两种禾草有感染 *Neotyphodium* 属内生真菌的报道,且二者均能够产生使草食家畜中毒的生物碱[25-26],因此与非感染禾草相比,均具有明显的选择优势。与二者相对照,感染内生真菌的羽茅不含能够使草食家畜中毒的生物碱,结合野外实地观察,推测内生真菌对羽茅抗生物胁迫的贡献不大。目前关于内生真菌感染对天然禾草宿主抗旱性影响的研究报道的比较少,结论也并不一致,而且在内蒙古草原,水分是限制植物生长的重要因素。因此本文以感染内生真菌的天然禾草羽茅为材料,构建内生真菌感染和非感染

的实验种群,通过比较生长和生理生化指标的差异来探讨羽茅染菌和不染菌种群对干旱胁迫的适应性差异,以了解在干旱胁迫下内生真菌对宿主植物的作用,为有效地利用内生真菌-植物共生体这一特殊的生物资源提供科学依据。

1　材料与方法

1.1　种子的采集

羽茅与 *Neotyphodium* 属内生真菌共生,种子于 2005 年采集自内蒙古草原阿尔山样地,该样地位于 119.55°E,47.12°N,海拔 1122m,年降雨量 460mm,年均温-3.1℃,年总日照时间 2440h,土壤为黑土,植被为林原草甸,山坡上主要生长针茅、羽茅、无芒雀麦、蒿子等。将采集的羽茅种子分别置于 4℃冰箱和室温中存放,在 4℃冰箱中保存,可以保证种子中内生真菌活性,室温放置 18 个月后,种子中内生真菌活性大大降低,此时,将室温放置的种子也移至 4℃冰箱中保存。

1.2　羽茅染菌(EI)和不染菌(EF)种群的构建

选取不同温度处理的、饱满成熟的种子分别播种于装满蛭石的育苗盆中,置于温室中培养,待长到足够多可检测分蘖后,每种温度处理分别选取 30 株长势良好的羽茅进行内生真菌的检测,检测方法参考 Latch 等的苯胺兰染色法[27]。检测结果显示一直在 4℃冰箱存放的种子(EI)所获得的植株的染菌率为 96.7%,室温存放过的种子(EF)所获得的植株染菌率为 0。选取生长健壮,大小均一的 EI 和 EF 植株分别移栽至直径 18cm,高 19cm 的花盆中,每盆 3 株,地上部剪至 10cm。实验所用的土壤为沙质壤土,土壤有机质含量为 4.12 g/kg、总氮含量为 196 mg/kg、总磷含量为 212 mg/kg、有效磷含量 1.1 mg/kg、速效钾含量为 4.3 mg/kg,土壤与蛭石按照 1∶1 的比例均匀混合,每盆 2 kg,作为培养基质继续培养(混合土壤的田间持水量为 30.4%,永久萎蔫系数为 6.3%)。每盆施加 1 g 复合肥(N∶P∶K=15∶8∶6),以保证羽茅生长期间的充足养分供应。采用人工浇水的方式,给予植株充足的水分供应。

1.3　干旱胁迫处理

经过 1 个月的缓苗期后,开始对羽茅进行干旱胁迫实验,采用两因素完全随机区组设计。因素之一是水分,分为正常供水和干旱 2 个水平;因素之二为内生真菌感染状况,分为染菌(EI)和不染菌(EF)2 个水平,即共 2×2 个处理,各设 5 个重复,共 20 盆。实验持续 35d。不同水分处理通过 ECH_2O 土壤含水量监测系统(Decagon)控制,每天早晨将 5 cm 探针分别插入各盆土壤以测定水含量(用盆中土壤水分的体积占土壤总体积的比值来表示),正常供水组控制在田间持水量水平,土壤湿度读数在 35% 左右;干旱胁迫组控制土壤湿度读数在 5%—10% 之间。实验末期检测所有植株的染菌率,发现对照和干旱胁迫下染菌种群的感染率均为 100%,不染菌种群为 0,实验过程并没有改变植株的染菌情况。

1.4　各项指标的测定

胁迫中期(第 15 天),用 LI-6400 便携式光合作用测定仪(LI-COR,Lincoln,USA)测定植株的净光合速率。测定时选取植株刚刚完全伸展开的叶片,光强由 LI-6400-02BLED 红蓝光源自动控制到 1200 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$,叶温控制为环境温度,测定时每只叶片连续记录 5 次,取平均值作为该叶片的测定值以减小误差。在光合测定当天,用 Handy PEA(Hansatech,UK)非调制式荧光仪测定植株的叶绿素荧光,每次测定前叶片均暗适应 10min,测定时的作用光强为 3000 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$。

胁迫前测量植株的株高和分蘖数;胁迫中期测量净光合速率和叶绿素荧光;胁迫末期测量株高、分蘖数、光合色素含量、比叶面积和叶片相对水分含量(RWC);部分鲜叶储存于-70℃冰箱,之后测量酶活性、丙二醛和可溶性糖含量;将其余植株的地上部和根分开,洗去根表面残留的土壤并烘干称重,计算生物量和根冠比。

随机剪取植株的自心叶起第 2 叶和第 3 叶,测定 SOD 和 CAT 活性、MDA、可溶性糖含量和光合色素含量。SOD 活性测定采用氮蓝四唑(NBT)法,以单位时间内抑制光化还原 50% 的氮蓝四唑为一个酶活性单位 U;CAT 活性测定采用高锰酸钾滴定法,用每克鲜重样品 1min 内分解 H_2O_2 的 mg 数表示;MDA 含量的测定采用硫代巴比妥酸(TBA)氧化法;可溶性糖含量测定采用比色法[28];光合色素含量的测定采用丙酮乙醇混合液法

[无水乙醇:丙酮=1:1];RWC 的测定采用称重法,计算公式为:[(鲜重-干重)/(饱和鲜重-干重)]×100%。

1.5 数据分析

所得数据采用 SPSS 13.0 软件进行统计处理,采用单因素方差分析检验染菌与不染菌植株间和胁迫处理间的差异,采用双因素方差分析检验内生真菌感染和干旱胁迫之间的交互作用。

2 结果与分析

2.1 营养生长

2.1.1 分蘖数和株高

实验结束后,所有处理下植株的分蘖数和株高都有所增长。从双因素方差分析表可以看出,干旱胁迫对植株分蘖数和株高有显著影响,而内生真菌感染对其没有显著影响,干旱胁迫和内生真菌感染之间也不存在交互作用(表 1)。具体表现在:正常供水组(对照组)的分蘖数和株高显著高于干旱胁迫组,相同处理下 EI 和 EF 植株之间均无显著差异(图 1)。

2.1.2 比叶面积和叶片相对水分含量

干旱胁迫对植株的比叶面积和叶片相对水分含量(RWC)都有显著影响,而内生真菌感染对其没有显著影响,干旱胁迫和内生真菌感染之间也不存在交互作用(表 1)。干旱胁迫在显著降低 RWC 的同时对叶片的比叶面积也有显著降低作用,而同一处理下 EI 和 EF 植株之间并无显著差异(图 2)。

表 1 内生真菌感染和干旱胁迫对羽茅影响的双因素方差分析

Table 1 Two-way ANOVA of the influence of endophyte infection and drought stress on *Achnatherum sibiricum*

变量 Variables	内生真菌感染 Endophyte infection		干旱胁迫 Drought stress		交互作用 Interaction	
	F	Sig.	*F*	Sig.	*F*	Sig.
分蘖数 Tiller numbers	0.28	NS	151.26	**	3.19	NS
株高 Plant height	0.04	NS	197.73	**	1.72	NS
比叶面积 Specific leaf area	1.66	NS	22.461	**	0.004	NS
相对水分含量 Relative water content	0.64	NS	212.22	**	0.01	NS
根重 Root weight	0.06	NS	54.66	**	0.85	NS
地上部生物量 Above-ground biomass	0.02	NS	73.09	**	0.56	NS
总生物量 Total biomass	0.06	NS	54.66	**	0.85	NS
根冠比 Root-shoot ratio	0.12	NS	39.65	**	0.003	NS
净光合速率 Net photosynthetic rate	0.74	NS	739.42	**	2.44	NS
最大光化学效率 F_v/F_m	2.42	*	18.56	**	0.67	NS
Chla 含量 Chla content	0.09	NS	83.47	**	1.58	NS
Chlb 含量 Chlb content	1.28	NS	122.66	**	2.04	NS
Car 含量 Car content	0.19	NS	265.06	**	42.78	**
SOD 活性 SOD activity	4.39	*	141.22	**	0.86	NS
CAT 活性 CAT activity	1.98	NS	22.82	**	2.97	*
MDA 含量 MDA content	0.24	NS	13.99	**	7.51	*
可溶性糖含量 Soluble sugar content	2.06	NS	63.28	**	10.52	**

*,** 分别表示 $P<0.05$,0.01,NS 表示结果不显著

2.1.3 生物量分配

干旱胁迫显著影响了植株的生物量和根冠比,而内生真菌感染对其没有显著影响,且干旱胁迫和内生真菌感染之间也不存在交互作用(表 1)。干旱胁迫显著降低了植株的根重、地上部生物量和总生物量,显著增大了根冠比;但是相同处理下 EI 与 EF 植株之间均没有显著差异(表 2)。说明干旱胁迫限制了植株的生长,同时将更多的能量分配于根部,致使根冠比显著大于对照组。

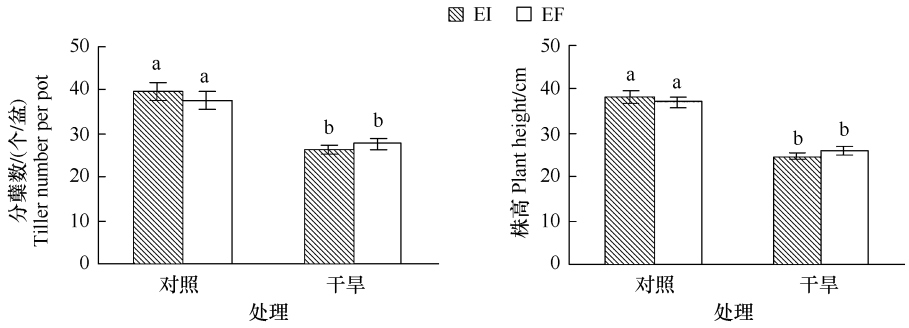

图 1　干旱胁迫和内生真菌感染对羽茅分蘖数和株高的影响

Fig. 1　Effect of drought stress and endophyte infection on the tiller number and plant height of *Achnatherum sibiricum*

不同字母表示各处理间差异显著($P<0.05$)

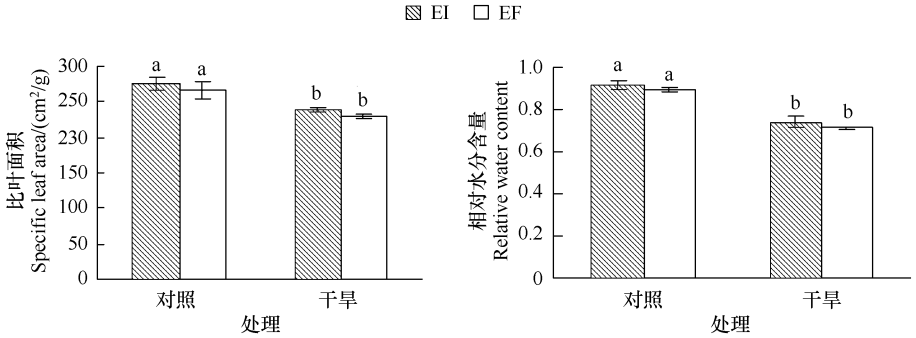

图 2　干旱胁迫和内生真菌感染对羽茅相对水分含量和比叶面积的影响

Fig. 2　Effect of drought stress and endophyte infection on the relative water content and specific leaf area of *Achnatherum sibiricum*

不同字母表示各处理间差异显著($P<0.05$)

表 2　干旱胁迫和内生真菌感染对羽茅生物量分配的影响

Table 2　Effect of drought stress and endophyte infection on the biomass allocation of *Achnatherum sibiricum*

处理 Treatment		根重/g Root weight	地上部生物量/g Above-ground biomass	总生物量/g Total biomass	根冠比 Root-shoot ratio
对照 Control	EI	2.80±0.38a	3.82±0.42a	6.62±0.77a	0.75±0.04b
	EF	2.61±0.27a	3.63±0.20a	6.24±0.47a	0.71±0.03b
干旱 Drought	EI	1.10±0.06b	0.82±0.16b	1.92±0.22b	1.42±0.07a
	EF	1.48±0.04b	1.11±0.06b	2.58±0.10b	1.38±0.06a

同一列中右侧字母不同表示差异显著($P<0.05$)

2.2　光合生理

2.2.1　净光合速率和叶绿素荧光

光合速率是反映光合作用强弱的最重要也是最直接的指标,光合速率越大,表明植物光合作用的水平越高。干旱胁迫显著影响了植株的净光合速率,而内生真菌感染对植株的净光合速率没有显著影响,并且与干旱胁迫也不存在交互作用(表 1)。实验结果显示,干旱胁迫严重影响了植物的光合作用,使其净光合速率下降到约 4 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$,不到对照组的 1/4(图 3)。

F_v/F_m是 PSⅡ最大光化学量子产量,表示最大光化学效率,其在非胁迫条件下变化极小,是反映 PSⅡ光化学效率的稳定指标。从表 1 可以看出,干旱胁迫和内生真菌感染对植株的 F_v/F_m均有显著影响,但两者之间并无交互作用。干旱胁迫下,植株的 F_v/F_m显著低于对照,其中 EF 植株降低的更大,表现为 EI 植株的 F_v/F_m显著高于 EF 植株,而对照组 EI 与 EF 植株之间没有差异(图 3)。说明干旱胁迫下内生真菌感染对于植株

F_v/F_m的维持产生了有利效应,对 PSⅡ光化学效率的维持做出了一定的贡献。

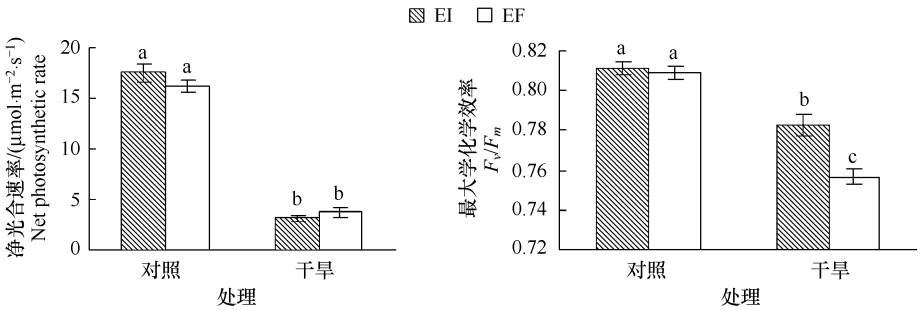

图 3 干旱胁迫和内生真菌感染对羽茅叶片净光合速率和 F_v/F_m 的影响

Fig. 3 Effect of drought stress and endophyte infection on the net photosynthetic rate and F_v/F_m of *Achnatherum sibiricum*

不同字母表示各处理间差异显著($P<0.05$)

2.2.2 叶绿素(Chl)与类胡萝卜素(Car)含量

干旱胁迫对植株的 Chl 和 Car 含量均有显著影响,而内生真菌感染对其均无显著影响,干旱胁迫和内生真菌感染仅对 Car 含量有交互作用(表 1)。

干旱胁迫显著降低了叶片中 Chla、Chlb 和 Car 的含量,至于内生真菌的作用,其对 Chl 和 Car 的影响有所不同(表 3)。对于 Chl,无论是充足供水的对照组还是干旱胁迫组,内生真菌的感染与否对 Chla 和 Chlb 均无显著影响;而对于 Car,对照组 EF 植株的 Car 含量显著高于 EI 植株,而干旱胁迫下 EI 植株的 Car 含量显著高于 EF 植株。可见干旱胁迫下内生真菌感染对植株 Car 含量的维持有利。

表 3 干旱胁迫和内生真菌感染对羽茅叶绿素和类胡萝卜素含量的影响

Table 3 Effect of drought stress and endophyte infection on the chlorophyll and carrotinoid content of *Achnatherum sibiricum*

处理 Treatment		Chla 含量/(mg/g 干重) Chla content	Chlb 含量/(mg/g 干重) Chlb content	Car 含量/(mg/g 干重) Car content
对照 Control	EI	5.14±0.11a	1.22±0.03a	1.47±0.01b
	EF	5.31±0.19a	1.30±0.04a	1.56±0.01a
干旱 Drought	EI	4.26±0.08b	0.92±0.02b	1.35±0.01c
	EF	4.19±0.07b	0.91±0.02b	1.27±0.01d

2.3 生理生化指标

2.3.1 保护酶活性及 MDA 含量

干旱胁迫显著影响了植株的 SOD、CAT 活性和 MDA 含量,内生真菌感染仅对 SOD 活性有显著的影响,干旱胁迫与内生真菌感染对 CAT 活性和 MDA 含量有交互作用(表 1)。胁迫末期,干旱胁迫显著增大了叶片的 SOD 和 CAT 活性。对照条件下,EI 植株的 SOD 活性显著低于 EF 植株,CAT 活性显著高于 EF 植株;干旱胁迫下,EI 植株的 SOD 和 CAT 活性都有大于 EF 植株的趋势,只是均无显著性差异(表 4)。

无论对内生真菌感染植株还是非感染植株,干旱胁迫都显著增加了植株的 MDA 含量,但内生真菌的存在使宿主植物的 MDA 含量增加的趋势要小于非感染植株,最终导致 EI 植株的 MDA 含量显著低于 EF 植株。

2.3.2 可溶性糖含量

干旱胁迫对植株的可溶性糖含量有显著影响,而内生真菌感染对其没有显著影响,且两者之间存在着显著的交互作用(表 1)。干旱胁迫显著增大了植株的可溶性糖含量,而且 EF 植株增大的量要大于 EI 植株,使得 EF 植株的可溶性糖含量显著高于 EI 植株。对照组 EI 与 EF 植株间可溶性糖含量没有差异(表 4)。

表 4　干旱胁迫和内生真菌感染对羽茅保护酶活性和 MDA 及可溶性糖含量的影响

Table 4　Effect of drought stress and endophyte infection on the activity of protective enzymes, MDA and soluble sugar content of *Achnatherum sibiricum*

处理 Treatment		SOD 活性 SOD activity /(U/g 鲜重)	CAT 活性 CAT activity /($mgH_2O_2 \cdot g^{-1}$ 鲜重·min^{-1})	MDA 含量 MDA content /(nmol/g 鲜重)	可溶性糖含量 Soluble sugar content /(μmol/g 鲜重)
对照 Control	EI	364.40±21.66c	420.81±70.73b	12.36±0.51c	110.23±4.69c
	EF	437.43±14.68b	256.47±13.50c	13.89±0.87bc	119.52±2.95c
干旱 Drought	EI	709.37±35.90a	599.71±42.43a	14.57±0.67b	143.75±4.69b
	EF	684.36±22.15a	583.98±65.56a	16.77±0.63a	167.81±7.28a

3　讨论

3.1　内生真菌对天然禾草营养生长的影响

内生真菌与高羊茅、黑麦草等人工禾草的互利共生关系已经被大量的实验证据所证实。与人工禾草不同,已有的研究表明内生真菌与天然禾草宿主的共生关系现出明显的不确定性[29],即天然禾草和内生真菌的关系被认为是从拮抗性的(antagonistic)、中性的过渡到互惠性的(mutualistic),形成一个连续体[30-31],共生体双方的相互作用与宿主植物的基因型、内生真菌的种类和基因型以及共生体所处的环境条件均有关系,同一共生体之间的相互作用由于环境条件的差异也会表现出从拮抗、中性到互利等多种可能[32]。关于内生真菌感染对天然禾草宿主抗旱性影响的研究目前报道的比较少,而且结论也并不一致。Saikkonon 等[19]对不同土壤水分和营养条件下天然禾草亚利桑那羊茅进行了研究,发现在田间实验中,EF 植株的营养生长均比 EI 植株要旺盛;在严格控制亚利桑那羊茅基因型的温室实验中,EF 植株的地下部生物量和地上部生物量均显著高于 EI 植株。而与此相反的报道也有,例如,Zhang 等[33]发现干旱胁迫下,披碱草 EI 植株的地下部生物量和地上部生物量都显著大于 EF 植株,分蘖数和相对水分含量也显著高于 EF 植株。李飞等[21]对与羽茅同属的醉马草的研究中也发现,在重度干旱胁迫下,内生真菌感染能够明显促进干旱地区醉马草地下部生物量的累积。本实验结果显示,干旱胁迫下内生真菌感染对宿主植物的营养生长和生物量累积都没有显著影响。

3.2　内生真菌对天然禾草光合生理的影响

干旱胁迫下内生真菌感染对植株 F_v/F_m 的影响鲜有报道。F_v/F_m 是 PSⅡ最大光化学量子产量,表示最大光化学效率,其在非胁迫条件下变化极小,且不受物种的影响,是反映 PSⅡ光化学效率的稳定指标。本研究表明,干旱胁迫下内生真菌感染在宿主植物净光合速率以及叶绿素含量上均无显著影响。在充足供水条件下,F_v/F_m 在 EI 与 EF 植株之间也没有差异;而在干旱胁迫条件下,EI 植株的 F_v/F_m 显著高于 EF 植株,说明干旱胁迫下内生真菌感染对于植株 F_v/F_m 的维持产生了有利效应,对 PSⅡ光化学效率的稳定做出了一定的贡献。与本研究相类似,Morse 等[20]也发现只有在严重干旱胁迫条件下,亚利桑那羊茅的 EI 植株才表现出与 EF 植株相比更高的午间净光合速率。

3.3　干旱条件下内生真菌感染对天然禾草中膜脂过氧化与体内保护系统的影响

在植物的正常生命过程中,植物细胞中存在着活性氧的产生和清除两个过程。逆境胁迫会促进活性氧产生增加、引起膜脂过氧化等。植物有两种系统防止活性氧的危害:酶系统和非酶系统。酶系统包括 SOD、CAT、POD;非酶系统包括抗坏血酸、类胡萝卜素、谷胱甘肽等。本研究发现,干旱胁迫下 EI 植株的 MDA 含量显著低于 EF 植株,说明干旱胁迫下内生真菌感染对于抑制 MDA 的产生起到了有利的作用,即有利于缓解干旱对宿主植物细胞膜所造成的伤害。同时我们也发现,干旱条件下内生真菌感染并未促使宿主植物体内保护酶如 SOD 和 CAT 活性的增加,但内生真菌感染显著增加了非酶系统中重要的抗氧化物质之一——类胡萝卜素含量的增加,由此推测,内生真菌对宿主植物的保护作用可能更多的体现在非酶系统上。

以人工禾草为研究对象的已有研究表明,内生真菌对宿主植物耐旱性的有益影响可能表现在两个方面[34]:一是通过对宿主植物形态、生理等方面的改变使宿主植物在干旱条件下仍然能保持较好的生长;二是

内生真菌能以维持甚至减少宿主植物的生长为代价,帮助宿主植物度过不良环境,一旦逆境消除,宿主植物则能够迅速恢复生长。本研究中内生真菌感染没有对干旱胁迫下宿主植物的营养生长和生物量累积产生有益影响,但能在一定程度上缓解宿主植物所受的旱害,如维持 PSⅡ的光化学效率,减小膜脂的过氧化程度。另外,干旱胁迫下,非感染植株在生物量和感染植株接近的情况下,将更多的物质分配于可溶性糖,可溶性糖属于非结构碳水化合物,可溶性糖含量的增加有可能导致结构性碳水化合物的比例降低,换句话说,感染植株有可能将更多的物质分配于结构性碳水化合物如木质素和纤维素等上,以助于宿主植物度过不良环境。内生真菌是否有助于羽茅干旱胁迫后的恢复,有待深入研究。

References:

[1] Arnold A E, Maynard Z, Gilbert G S, Coley P D, Kursar T A. Are tropical fungal endophytes hyperdiverse?. Ecology Letters, 2000, 3(4): 267-274.

[2] Bacon C W, Porter J K, Robbins J D, Luttrell E S. *Epichlo typhina* fromtoxic tall fescue grasses. Applied and Environmental Microbiology, 1997, 34(5): 576-581.

[3] Wei Y K, Gao Y B, Li C, Xu H, Ren A Z. Genetic diversity of *Neotyphodium* Endophytes isolated from achnatherumsibiricumpopulations in midand eastern Inner Mongolia steppe, China. Journal of Plant Ecology, 2006, 30(4): 640-649.

[4] Malinowski D P, Belesky D P. Ecological importance of *Neotyphodium* sp. grass and endophytes in agroecosystems. Grassland Science, 2006, 52(1): 23-28.

[5] Clay K. Effects of fungalendophytes on the seed and seedling biology of *Loliumperenne* and *Festuca arundinacea*. Oecologia, 1987, 73: 358-362.

[6] De Battista J P, Bouton J H, Bacon C W, Siegel M R. Rhizome and herbage production of endophyte-removed tall fescue clones and populations. Agronomy Journal, 1990, 82(4): 651-654.

[7] Rice J S, Pinkerton B W, Stinger W C, Undersander D J. Seed production in tall fescue as affected by fungal endophytes. Crop Science, 1990, 30: 1303-1305.

[8] Breen J P. *Acremonium* endophyte interactions with enhanced plant resistance to insects. Annual Review of Entomology, 1994, 39: 401-423.

[9] Ball D M. Significance of Endophyte Toxicosis and Current Practices in Dealing with the Problem in the United States. *Neotyphodium/*grass interactions. New York: Plenum Press, 1997, 40: 395-410.

[10] Peters S, Dammeyer B, Schulz B. Endophyte-host interactions I: plants defence reactions to endophytic and pathogenic fungi. Symbiosis, 1998, 25:193-211.

[11] Elberson H W, West C P. Growth and water relations of field-grown tall fescue as influenced by drought and endophyte. Grass and Forage Science, 1996, 51(4): 333-342.

[12] Marks S, Clay K. Physiological response of *Festuca arundinacea* to fungal endophyte infection. New Phytologist, 1996, 133(4): 727-733.

[13] Cheplick G P. Recovery fromdrought stress in *Loliumperenne* (Poaceae): are fungal endophytes detrimental. American Journal of Botany, 2004, 91(12): 1960-1968.

[14] Monnet F, Vaillant N, Hitmi A, Coudret A, Sallanon H. Endophytic *Neotyphodium lolii* induced tolerance to Zn stress in *Lolium perenne*. Physiologia Plantarum, 2001, 113(4): 557-563.

[15] White R H, Engelke M C, Morton S J, Johnson-cicalese J M, Ruemmele B A. *Acremonium* endophyte effects on tall fescue drought tolerance. Crop Science, 1992, 32: 1392-1396.

[16] Ren A Z, Gao Y B, Li X. Effect of fungal endophyte infection on some physiological characters of *Lolium perenne* under drought conditions. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2002, 8(5): 535-539.

[17] Amalric C, Sallanon H, Monnet F, Hitmi A, Coudret A. Gas exchange and chlorophyll fluorescence in symbiotic and non-symbiotic ryegrass under water stress. Photosythetica, 1999, 37(1): 107-112.

[18] Liang Y, Gao Y B, Chen S P, Ren A Z. Effect of endophyte infection on photosynthesis, transpiration and water use efficiency of *Lolium perenne* L. under drought stress. Acta Phytoecologica Sinica, 2001, 25(5): 537-543.

[19] Saikkonon K, Wali P, Helander M, Faeth S H. Evolution of endophyte-plant symbioses. Trends in Plant Science, 2004, 9(6): 275-280.

[20] Morse L J, Day T A, Faeth S H. Effect of *Neotyphodium* endophyte infection on growth and leaf gas exchange of Arizona fescue under contrasting water availability regimes. Environmental and Experimental Botany, 2002, 48 (3): 257-268.

[21] Li F. Effect of Endophyte Infection on Drought Resistance to Drunken Horse Grass (*Achnatherum inebrians*). Gansu: Lanzhou University, 2007.

[22] Wu Z L, Lu S L. On geographical distribution of *Achnatherum* Beauv. (Gramineae). Acta Phytotaxonomica Sinica, 1995, 34(2): 152-161.

[23] Wei Y K,Gao Y B, Xu H, Su D, Zhang X, Wang Y H, Lin F, Chen L, Nie L Y, Ren A Z. Occurrence of endophytes in grasses native to northern China. Grass and Forage Science, 2006, 61: 422-429.

[24] Zhang X,Li Y,Wei Y K, Wang Y H, Lin F, Ren A Z, Gao Y B. Distribution and rDNA-ITS sequence analysis of *Epichloë*endophyte symbiosis with *Achnatherum sibiricum* in mid-and eastern Inner Mongolia Steppe. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(7): 2904-2910.

[25] Li X S, Zhang X Z,Gu X, Zheng Y. The relationship of *Achnatherum inebrians*'s toxic substances and endophytic fungi. Grass-feeding Livestock, 1998, 4: 44-47.

[26] Tunali B, Shelby R A, Morgan-Jones G, Kodan M. Endophytic fungi and ergot alkaloids in native Turkish grasses. Phytoparasitica, 2000, 28(4): 375-377.

[27] Latch G C M, Christensen M J, Samuels G J. Fiveendophytes of *Lolium* and *Festuca* in New Zealand. Mycotaxon, 1984, 20: 535-550.

[28] Hao Z B, Cang J, Xu Z. Plant Physiology Experiments. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2004.

[29] Wali P R, Helander M, Nissinen O, Saikkonen K. Susceptibility of endophyte-infected grasses to winter pathogens (snow molds). Canadian Journal of Botany, 2006, 84(7): 1043-1051.

[30] Cheplick G P, Cho R. Interactive effects of fungal endophyte infection and host genotype on growth and storage in *Loliumperenne*. New Phytologist, 2003, 158(1): 183-191.

[31] Schardl C L, Leuchtmann A, Spiering M J. Symbioses of grasses with seedborne fungal endophytes. Annual Review of Plant Biology, 2004, 55: 315-340.

[32] Faeth S H, Bulman T L. Endophytic fungi and interactions among host plants, herbivores and natural enemies//Tscharntke T, Hawkins B A, eds. Multitrophic Level Interactions. Cambridge: Cambridge University Press, 2002: 89-123.

[33] Zhang Y P, Nan Z B. Growth andanti-oxidative systems changes in *Elymus dahuricus* is affected by *Neotyphodium* endophyte under contrasting water availability. Agronomy and Crop Science, 2007, 193: 377-386.

[34] Malinowski D P,Belesky D P. Adaptations of endophyte-infected cool-season grasses to environmental stresses: mechanisms of drought and mineral stress tolerance. Crop Science, 2000, 40(4): 923-940.

参考文献:

[3] 魏宇昆, 高玉葆, 李川, 许华, 任安芝. 内蒙古中东部草原羽茅内生真菌的遗传多样性. 植物生态学报, 2006, 30(4): 640-649.

[16] 任安芝, 高玉葆, 李侠. 内生真菌感染对黑麦草若干抗旱生理特征的影响. 应用与环境生物学报, 2002, 8(5): 535-539.

[18] 梁宇, 高玉葆, 陈世苹, 任安芝. 干旱胁迫下内生真菌感染对黑麦草实验种群光合、蒸腾和水分利用的影响. 植物生态学报, 2001, 25(5): 537-543.

[21] 李飞. 内生真菌对醉马草抗旱性影响的研究. 甘肃: 兰州大学, 2007.

[25] 李学森, 张学洲, 顾祥, 郑瑛. 醉马草有毒物质与其内生真菌的关系. 草食家畜, 1998, 4: 44-47.

[28] 郝再彬, 苍晶, 徐仲. 植物生理实验. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2004.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 31, No. 8 April, 2011 (Semimonthly)

CONTENTS

The relationship between *Populus euphratica*'s radial increment and groundwater level at the lower reach of Tarim River ····· AN Hongyan, XU Hailiang, YE Mao, et al (2053)
Influence of elevation factor on soil profile texture configuration: a case study of the alluvial plain of Fengqiu County ····· TAN Manzhi, MI Shuxiao, LI Kaili, et al (2060)
Effects of ozone on AsA-GSH cycle in soybean leaves ····· WANG Junli, WANG Yan, ZHAO Tianhong, et al (2068)
The effects of physical and chemical factors on the growth and lipid production of *Chlorella* ····· ZHANG Guiyan, WEN Xiaobin, LIANG Fang, et al (2076)
Response of net productivity of masson pine plantation to climate change in North Subtropical Region ····· CHENG Ruimei, FENG Xiaohui, XIAO Wenfa, et al (2086)
Soil respiration of *Zoysia matrella* turfgrass in subtropics ····· LI Xibo, YANG Yusheng, ZENG Hongda, et al (2096)
Effect of UV-B radiation on the leaf litter decomposition and nutrient release of *Pinus massoniana* ····· SONG Xinzhang, ZHANG Huiling, JIANG Hong, et al (2106)
Physiological ecological effect of endophyte infection on *Achnatherum sibiricum* under drought stress ····· HAN Rong, LI Xia, REN Anzhi, et al (2115)
Zinc Tolerance and Accumulation Characteristics of *Armillara mellea* ····· ZHU Lin, CHENG Xianhao, LI Weihuan, et al (2124)
Expansion strategies of *Caragana stenophylla* in the arid desert region ····· ZHANG Jianhua, MA Chengcang, LIU Zhihong, et al (2132)
Effects of mixed plant residues from the Loess Plateau on microbial biomass carbon and nitrogen in soil ····· WANG Chunyang, ZHOU Jianbin, XIA Zhimin, et al (2139)
Survival strategy of *Stipa krylovii* and *Agropyron cristatum* in typical steppe of Inner Mongolia ····· SUN Jian, LIU Miao, LI Shenggong, et al (2148)
Spatial distribution of arbuscular mycorrhizal fungi in *Salix psammophila* root-zone soil in Inner Mongolia desert ····· HE Xueli, YANG Jing, ZHAO Lili (2159)
An experimental study on the the effects of different diurnal warming regimes on single cropping rice with Free Air Temperature Increased (FATI) facility ····· DONG Wenjun, DENG Aixing, ZHANG Bin, et al (2169)
Endophytic bacterial diversity in *Achnatherum inebrians* by culture-independent approach ····· ZHANG Xuebing, SHI Yingwu, ZENG Jun, et al (2178)
Hierarchical Partial Least Squares (Hi_PLS) model analysis of the driving factors of Henan's Ecological Footprint (EF) and its development strategy ····· JIA Junsong (2188)
Evaluation on spatial distribution of soil salinity and soil organic matter by indicator Kriging in Yucheng City ····· YANG Qiyong, YANG Jinsong, YU Shipeng (2196)
The toxicity of lupeol of *Inula britanica* on *Tetranychus cinnabarinus* and its effects on mite enzyme activity ····· DUAN Dandan, WANG Younian, CHENG Jun, et al (2203)
Abundance and biodiversity of ammonia-oxidizing archaea and bacteria in littoral wetland of Baiyangdian Lake, North China ····· YE Lei, ZHU Guibing, WANG Yu, et al (2209)
Changes of leaf water potential and water absorption potential capacities of six kinds of seedlings in Karst mount area under different drought stress intensities: Taking six forestation seedlings in karst Mountainous region for example ····· WANG Ding, YAO Jian, YANG Xue, et al (2216)
Comparison of structure and species diversity of *Eucalyptus* community ····· LIU Ping, QIN Jing, LIU Jianchang, et al (2227)
Ecosystem services valuation of the Haihe River basin wetlands ····· JIANG Bo, OUYANG Zhiyun, MIAO Hong, et al (2236)
Effects of *Phragmites australis* on methane emission from a brackish estuarine wetland ····· MA Anna, LU Jianjian (2245)
Genetic differentiation and the characteristics of uptake and accumulation of lead among *Camellia sinensis* populations under different background lead concentrations of soils in Yunnan, China ····· LIU Shengchuan, DUAN Changqun, LI Zhenhua, et al (2253)
Comparison of zooplankton lists between *Coilia mystus* food contents and collections from the Yangtze River Estuary & Hangzhou Bay ····· LIU Shouhai, XU Zhaoli (2263)
Reconstruction and analysis of July-September precipitation in Mt. Dagangshan, China ····· QIAO Lei, WANG Bing, GUO Hao, et al (2272)
Analysis on economic and ecological benefits of no-tillage management of *Carya cathayensis* ····· WANG Zhengjia, HUANG Xingzhao, TANG Xiaohua, et al (2281)
GIS-based analysis of the accessibility of urban forests in the central city of Guangzhou, China ····· ZHU Yaojun, WANG Cheng, JIA Baoquan, et al (2290)

Review and Monograph

Impact factors and uncertainties of the temperature sensitivity of soil respiration ····· YANG Qingpeng, XU Ming, LIU Hongsheng, et al (2301)
The advance of allometric studies on plant metabolic rates and biomass ····· CHENG Dongliang, ZHONG Quanlin, LIN Maozi, et al (2312)
Practice and the research progress on eco-compensation for cultivated land ····· MA Aihui, CAI Yinying, ZHANG Anlu (2321)

Discussion

Soil water holding capacities and infiltration characteristics of three vegetation restoration models in dry-hot valley of Yuanmou ····· LIU Jie, LI Xianwei, JI Zhonghua, et al (2331)

Scientific Note

Effects of secondary, micro- and beneficial elements on rice growth and cadmium uptake ····· HU Kun, YU Hua, FENG Wenqiang, et al (2341)

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 8 期　（2011 年 4 月）

ACTA ECOLOGICA SINICA
（Semimonthly，Started in 1981）
Vol. 31　No. 8　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
广告经营许可证　京海工商广字第 8013 号

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

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