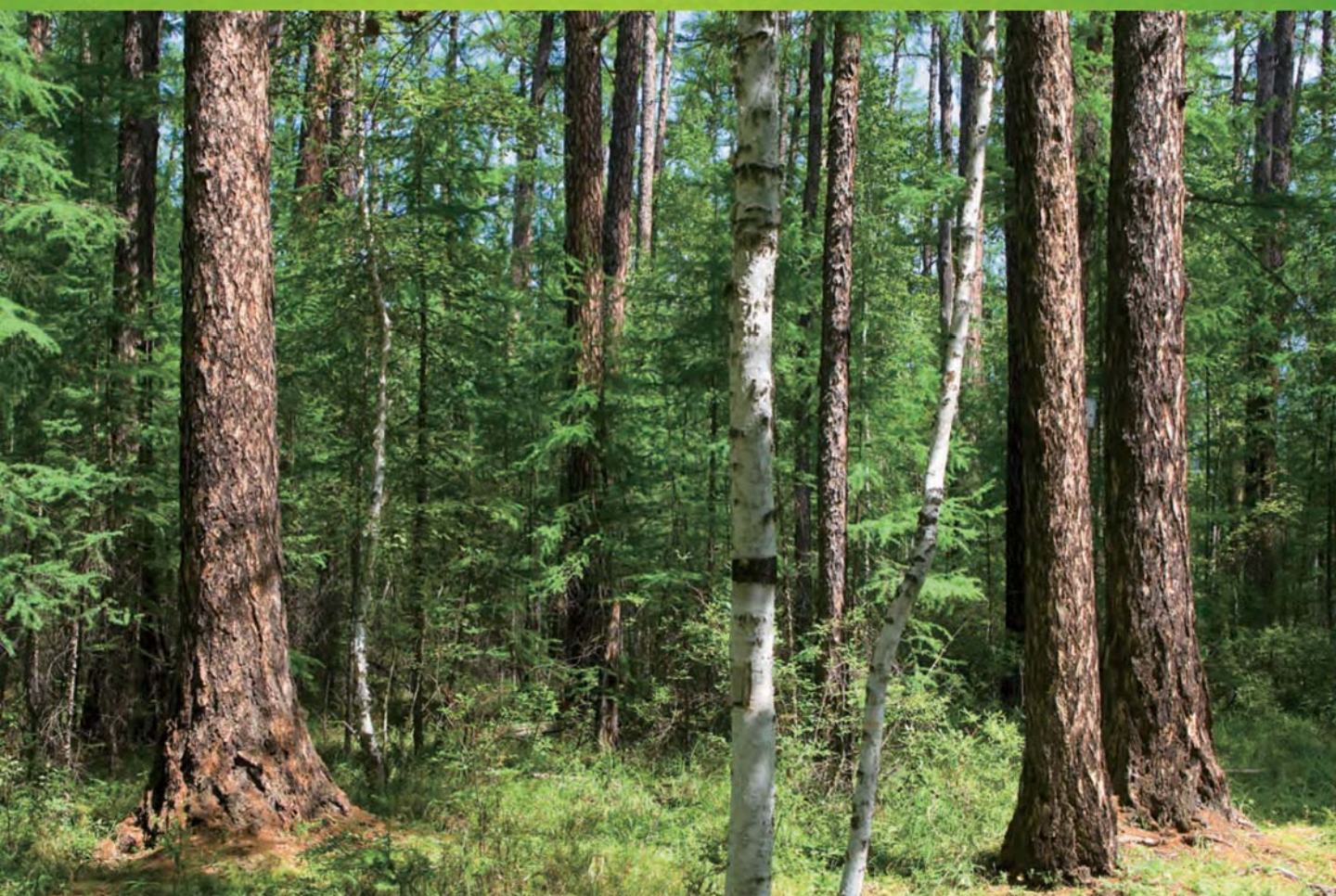


ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第33卷 第23期 Vol.33 No.23 **2013**

中国生态学会
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 23 期 2013 年 12 月 (半月刊)

目次

前沿理论与学科综述

- 基于树干液流技术的北京市刺槐冠层吸收臭氧特征研究..... 王 华, 欧阳志云, 任玉芬, 等 (7323)
- 三疣梭子蟹增殖过程对野生种群的遗传影响——以海州湾为例..... 董志国, 李晓英, 张庆起, 等 (7332)
- 土壤盐分对三角叶滨藜抗旱性能的影响..... 谭永芹, 柏新富, 侯玉平, 等 (7340)
- 南美斑潜蝇为害对黄瓜体内 4 种防御酶活性的影响..... 孙兴华, 周晓榕, 庞保平, 等 (7348)

个体与基础生态

- 模拟氮沉降对华西雨屏区苦竹林凋落物养分输入量的早期影响..... 肖银龙, 涂利华, 胡庭兴, 等 (7355)
- 茎瘤芥不同生长期植株营养特性及其与产量的关系..... 赵 欢, 李会合, 吕慧峰, 等 (7364)
- 雷竹覆盖物分解速率及其硅含量的变化..... 黄张婷, 张 艳, 宋照亮, 等 (7373)
- 渍水对油菜苗期生长及生理特性的影响..... 张树杰, 廖 星, 胡小加, 等 (7382)
- 广西扶绥黑叶猴的主要食源植物及其粗蛋白含量..... 李友邦, 丁 平, 黄乘明, 等 (7390)
- 氮素营养水平对膜下滴灌玉米穗位叶光合及氮代谢酶活性的影响..... 谷 岩, 胡文河, 徐百军, 等 (7399)
- PFOS 对斑马鱼胚胎及仔鱼的生态毒理效应 夏继刚, 牛翠娟, 孙麓垠 (7408)
- 浒苔干粉末提取物对东海原甲藻和中肋骨条藻的克生作用..... 韩秀荣, 高 嵩, 侯俊妮, 等 (7417)
- 基于柑橘木虱 CO I 基因的捕食性天敌捕食作用评估 孟 翔, 欧阳革成, Xia Yulu, 等 (7430)
- 健康和虫害的红松挥发物对赤松梢斑螟及其寄生蜂寄主选择行为的影响.....
..... 王 琪, 严善春, 严俊鑫, 等 (7437)

种群、群落和生态系统

- 小麦蚕豆间作对蚕豆根际微生物群落功能多样性的影响及其与蚕豆枯萎病发生的关系.....
..... 董 艳, 董 坤, 汤 利, 等 (7445)
- 喀斯特峰丛洼地不同生态系统的土壤肥力变化特征..... 于 扬, 杜 虎, 宋同清, 等 (7455)
- 黄土高原人工苜蓿草地固碳效应评估..... 李文静, 王 振, 韩清芳, 等 (7467)

景观、区域和全球生态

- 粉垄耕作对黄淮海北部土壤水分及其利用效率的影响..... 李轶冰, 逢焕成, 杨 雪, 等 (7478)
- 三峡库区典型农林流域景观格局对径流和泥沙输出的影响..... 黄志霖, 田耀武, 肖文发, 等 (7487)
- 基于 BP 神经网络与 ETM+ 遥感数据的盐城滨海自然湿地覆被分类..... 肖锦成, 欧维新, 符海月 (7496)
- 寒温带针叶林土壤 CH₄ 吸收对模拟大气氮沉降增加的初期响应..... 高文龙, 程淑兰, 方华军, 等 (7505)
- 寒温带针叶林土壤呼吸作用的时空特征..... 贾丙瑞, 周广胜, 蒋延玲, 等 (7516)

黄土高原小麦田土壤呼吸季节和年际变化..... 周小平,王效科,张红星,等 (7525)

不同排放源周边大气环境中 NH₃ 浓度动态..... 刘杰云,况福虹,唐傲寒,等 (7537)

施加秸秆和蚯蚓活动对麦田 N₂O 排放的影响 罗天相,胡 锋,李辉信 (7545)

资源与产业生态

基于水声学方法的天目湖鱼类资源捕捞与放流的生态监测..... 孙明波,谷孝鸿,曾庆飞,等 (7553)

应用支持向量机评价太湖富营养化状态..... 张成成,沈爱春,张晓晴,等 (7563)

研究简报

亚热带 4 种森林凋落物量及其动态特征 徐旺明,闫文德,李洁冰,等 (7570)

青蒿素对蔬菜种子发芽和幼苗生长的化感效应 白 祯,黄 玥,黄建国 (7576)

NO 参与 AM 真菌与烟草共生过程 王 玮,赵方贵,侯丽霞,等 (7583)

基于核密度估计的动物生境适宜度制图方法..... 张桂铭,朱阿兴,杨胜天,等 (7590)

施氮方式对转基因棉花 Bt 蛋白含量及产量的影响 马宗斌,刘桂珍,严根土,等 (7601)

学术信息与动态

未来地球——全球可持续性研究计划..... 刘源鑫,赵文武 (7610)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 292 * zh * P * ¥ 90.00 * 1510 * 33 * 2013-12



封面图说: 兴安落叶松林景观——中国的寒温带针叶林属于东西伯利亚森林向南的延伸部分,它是大兴安岭北部一带的地带性植被类型,一般可分为落叶针叶林和常绿针叶林两类。兴安落叶松林景观地下部分为棕色森林土,中上部为灰化棕色针叶林土,均呈酸性反应。随着全球气候持续变暖,寒温带针叶林生态系统潜在的巨大碳库将可能成为大气 CO₂ 的重要来源,研究表明,温度是寒温带针叶林生态系统土壤呼吸作用的主要调控因子,对温度的敏感性随纬度升高而增加,根系和凋落物与土壤呼吸作用表现出相似的空间变异性。

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/stxb201209021233

谭永芹, 柏新富, 侯玉平, 张振华. 土壤盐分对三角叶滨藜抗旱性能的影响. 生态学报, 2013, 33(23): 7340-7347.

Tan Y Q, Bai X F, Hou Y P, Zhang Z H. The effect of soil salinity to improve the drought tolerance of arrowleaf saltbush. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(23): 7340-7347.

土壤盐分对三角叶滨藜抗旱性能的影响

谭永芹¹, 柏新富^{1,*}, 侯玉平¹, 张振华²

(1. 鲁东大学生命科学学院, 烟台 264025; 2. 鲁东大学地理与规划学院, 烟台 264025)

摘要:用不同浓度 NaCl 溶液浇灌后进行干旱处理,测定了不同处理条件下三角叶滨藜幼苗在干旱持续过程中植株生长状况、叶片光合作用、抗氧化酶活性以及植株水分状况等的变化,以分析土壤盐分对三角叶滨藜耐旱性的影响。结果显示,用 0.1—0.4 mol/L NaCl 溶液浇灌后进行干旱处理(干旱+NaCl)的三角叶滨藜幼苗在干旱持续期间植株生长量、叶片净光合速率均明显高于用水浇灌后进行干旱处理(干旱)的三角叶滨藜幼苗,且后者在干旱处理的后期导致了叶片光合机构的明显损伤,前者则无。同时,干旱+NaCl 处理的植株叶片超氧化物歧化酶、过氧化物酶和过氧化氢酶活性的变化幅度明显小于干旱处理的,且前者的丙二醛含量显著低于后者。进一步分析各处理土壤和植株水分状况发现,与干旱处理相比,干旱+NaCl 处理显著提高了土壤的保水能力,增加了植株对 Na⁺ 的吸收和积累,降低了叶片渗透势。由此可见,土壤中适量盐分存在能够增加三角叶滨藜对 Na⁺ 的吸收和积累、降低组织渗透势、维持较强的吸水力和保水力,从而减弱因干旱脱水导致的过量活性氧自由基产生对细胞膜系统的损伤和对光合机构的破坏,有利于维持相对较高的物质生产能力和细胞的持续生长,最终表现为耐旱性能的增强。

关键词:土壤盐分;三角叶滨藜;抗旱性

The effect of soil salinity to improve the drought tolerance of arrowleaf saltbush

TAN Yongqin¹, BAI Xinfu^{1,*}, HOU Yuping¹, ZHANG Zhenhua²

1 College of Life Sciences, Ludong University, Yantai 264025, China

2 College of Geography and Planning, Ludong University, Yantai 264025, China

Abstract: Drought is one of the important abiotic factors restricting plant growth and development and causing reduction in crop productivity. While drought stress results in water imbalance and consequently oxidative stress in plants, salt stress creates more complicated patterns of stresses such as ion toxicity, etc., in addition to dehydration stress. Eventually, both type of stresses will result in a metabolic disorder and affect the normal growth of plants. In responding to the two types of stresses, plants have developed various kinds of strategic measures to minimize the stress damages, such as reducing the osmotic potential and water potential through osmoregulation, so as to enhance the ability of the stressed plants to water absorption from soil. Under drought stress and certain intensity of soil salinity, cell membrane potential with internal negative and external positive and Na⁺ electrochemical potential gradient created by extracellular Na⁺ concentration will favor Na⁺ passive transport from the external environment to inside plant cells, that is, drought conditions will induce more Na⁺ absorption and accumulation by plants. Because plants can accumulate more osmoregulation substance under the premise of consuming less energy by absorbing inorganic ions such as Na⁺, the existence of proper amount of soil salt may be beneficial rather than adverse for plants to combat drought stress. In this study, growth, photosynthetic rate, antioxidant enzyme activity and water status during drought were measured in seedlings of arrowleaf saltbush (*Atriplex triangularis*) grown in pots with different soil salinity, in order to investigate the effect of soil salinity on drought resistance of the plants. The

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41271236)

收稿日期:2012-09-02; 修订日期:2013-06-21

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: bxf64@163.com

results showed that drought stress inhibited the plantlet growth, but the amount of growth height and net photosynthetic rate in seedlings watered with 0.1—0.4 mol/L NaCl (dry + 0.1—0.4 mol/L NaCl) were significantly higher than watered with 0 mol/L NaCl (dry) during the period of treatment, and the latter led to obvious damage of the leaf photosynthetic apparatus. Meanwhile, the activity change of superoxide dismutase (SOD), peroxidase (POD) and catalase (CAT) in leaves with dry + 0.1—0.4 mol/L NaCl treatment were significantly lower than dry-only treatment, and the malondialdehyde (MDA) content of the former was also significantly lower than the latter. In addition, compared the water status in soil and plantlet and the Na⁺ content in arrowleaf saltbush leaves with the dry-only, dry + 0.1—0.4 mol/L NaCl showed the decline of the relative water content in soil and leaf was slow, Na⁺ content and cell turgor in arrowleaf saltbush leaves were significantly increased. This implied that dry + 0.1—0.4 mol/L NaCl were able to increase the reservation of water in the soil, and increase the accumulation of Na⁺ in the leaves, meanwhile decrease the osmotic potential and enhance the driving forces for water absorption. These all show that a moderate salt stress could increase Na⁺ absorption and accumulation in arrowleaf saltbush, decrease the osmotic potential of the tissues, maintain water absorption and retention, mitigate the destruction in the cell membrane and photosynthetic apparatus caused by drought dehydration, maintain a higher production capacity and growth, thus improve the capability of arrowleaf saltbush to resist drought stress.

Key Words: soil salinity; arrowleaf saltbush; drought resistance

干旱和盐胁迫是影响植物生长发育、引起农作物减产的主要非生物胁迫因子,干旱通过导致植物水分平衡失调,进而引起代谢紊乱^[1];盐分胁迫则会导致渗透胁迫、离子毒害等作用,扰乱植物的营养元素平衡^[2-3],并诱发氧化胁迫等次生胁迫作用^[4-5],从而影响植物正常生长。虽然 Na⁺是造成植物盐分胁迫的主要因子,然而已有实验证明 Na⁺对许多植物的生长发育或产量、品质都有良好的作用^[6-7];Slama 等^[8]研究还显示 Na⁺可以提高渗透胁迫下盐生植物的光合能力。一些荒漠旱生植物更是把地上部积累 Na⁺作为适应干旱环境的有效策略之一^[9-10]。在土壤中较多 NaCl 存在的条件下,植物细胞质膜内负外正的膜电势和胞外 Na⁺浓度升高建立起的 Na⁺电化学势梯度,有利于 Na⁺从外界环境到植物细胞内的被动运输^[11-12],因此,干旱条件将诱使更多 Na⁺被植物体吸收和积累。但是,目前有关植物抗旱性的研究多集中在光合作用、水分利用效率、渗透调节、抗氧化酶活性、抗旱性综合指标等方面,对干旱盐渍环境导致的植物积 Na⁺及其在植物适应干旱中的作用仅有少量相关报道^[13-15],本试验以耐盐植物三角叶滨藜(*Atriplex triangularis* Willd)为材料,研究 NaCl 对干旱胁迫下三角叶滨藜生长、光合作用、抗氧化活性、水分吸收的调节,探讨 NaCl 改善植物对干旱胁迫适应的机制,以丰富人们对植物适应干旱盐渍环境机制的了解。

1 材料与方法

1.1 实验材料与处理

实验于 2012 年 3—5 月在鲁东大学生命科学学院温室内进行,供试材料为三角叶滨藜(*Atriplex triangularis*)。将种子播种于装有混合土壤(园土:细沙=1:1)的直径 45cm 的花盆中,适时浇水,确保土壤湿润,出苗后间苗,每盆留 7 株小苗。待植株长出 6 片真叶(高约 15cm)时将材料分成 A、B、C、D、E 五组(每组 3 盆)。A、B 两组浇水,C、D、E 三组分别浇浓度为 0.1、0.2、0.4mol/L 的 NaCl 溶液,浇水或处理液的量为每盆 12L,确保盆土中溶液被替换为相应浓度的处理液。随后 B、C、D、E 组停止浇灌,进行自然干旱处理;处理 A 则保持见干浇水,即 A 为没有进行干旱处理的对照(CK)、B 为干旱处理(Dry)、C 为干旱加 0.1mol/L 的 NaCl (Dry+0.1mol/L NaCl)、D 为干旱加 0.2 mol/L 的 NaCl (Dry+0.2 mol/L NaCl)、E 为干旱加 0.4 mol/L 的 NaCl (Dry+0.4mol/L NaCl)。在处理期间每 5d 取成熟叶片进行相关指标测定。

1.2 测定方法

1.2.1 植株生长状况测定

株高增加值以处理前子叶至顶端的高度与实验结束时(处理后的第 20 天)子叶至顶端的高度的差值计

算,每处理重复测定 7 株。

1.2.2 光合参数测定

利用便携式光合作用测定系统(TPS-1 型,PP System,英国)对不同处理下的三角叶滨藜光合参数进行测定(测定光强为 960—980 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,开路测定)。该系统能同步获得活体叶片的净光合速率(P_n)、空气 CO_2 浓度(C_a)、细胞间隙 CO_2 浓度(C_i)等生理生态参数,气孔限制值(L_s)用 Berry 和 Downtow^[16] 的方法计算:

$$L_s = 1 - \frac{C_i}{C_a}。 \text{ 每种处理均取上数第 1 个成熟叶为测定对象,各处理均重复测定 5 株植物的 5 个叶片。}$$

1.2.3 抗氧化酶活性和丙二醛(malondialdehyde, MDA)含量测定

超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)活性和过氧化物酶(peroxidase, POD)活性测定参照孙群等^[17]的方法;过氧化氢酶(catalase, CAT)活性测定采用郝建军等^[18]的方法;丙二醛含量参照赵世杰^[19]的方法测定。

1.2.4 土壤、叶片相对含水量(RWC)测定

$$\text{用烘干称重法} \quad \text{RWC}(\%) = \frac{\text{鲜重} - \text{干重}}{\text{饱和鲜重} - \text{干重}} \times 100\%$$

1.2.5 植株水势、渗透势和细胞膨压的测定

植株水势用压力室法测定;叶片渗透势采用露点微伏压计(HR-33T, 美国)测定,叶片先在 -18°C 冰箱冷冻 12h 以上,取出解冻至室温后挤压出组织液测定;细胞膨压由“水势-渗透势”计算得出。

1.2.6 叶片 Na^+ 含量测定

叶片 Na^+ 的提取参照王宝山等^[20]的方法,提取液中 Na^+ 含量用原子吸收分光光度计(GBC-932B 型,澳大利亚)测定。

1.3 数据处理

测定结果以平均值 $\pm$ 标准差计。用 Origin 软件作图、SPSS 统计软件进行数据处理和差异性分析。

2 结果与分析

2.1 土壤盐分对三角叶滨藜生长的调节

很多研究表明植物的生长对水分胁迫最为敏感^[21]。通过对各处理的植株在处理期间生长状况的测定发现,虽然干旱抑制了植株生长,使植株株高增加量显著低于对照(CK),但干旱加 NaCl 处理(Dry+0.1—Dry+0.4mol/L NaCl)的植株生长情况明显优于干旱处理(Dry)(图 1)。经方差分析和多重比较显示,植株株高增加量在处理 D、E 之间以及处理 C、D 之间差异不显著($P > 0.05$),但处理 C、D、E 都显著高于处理 B($P < 0.05$)。说明在土壤加入 0.1—0.4 mol/L NaCl 可明显缓解干旱胁迫对植株生长的抑制作用。

2.2 土壤盐分对三角叶滨藜叶片光合作用的调节

对各处理叶片光合速率的测定结果表明,干旱胁迫导致三角叶滨藜叶片的光合速率显著降低(图 2),其中处理 B(Dry)在处理第 5 天光合速率开始大幅下降,至处理后第 20 天降至近 0;而处理 C、D、E(Dry+0.1—Dry+0.4mol/L NaCl)的光合速率下降幅度明显小于处理 B。进一步分析各处理的细胞间隙 CO_2 浓度和气孔限制值的变化发现,处理 B 植株在处理后的前 10 d 叶片

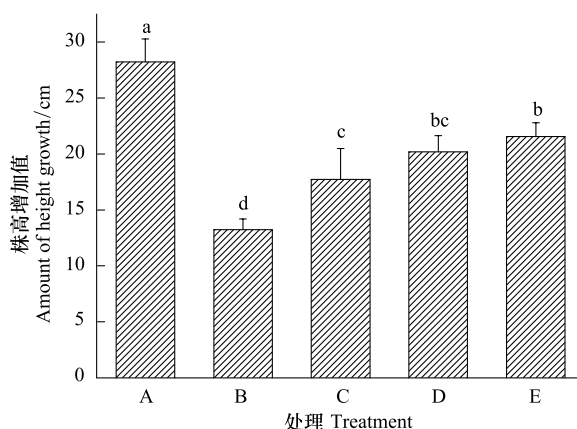


图 1 各处理三角叶滨藜植株株高在处理期间的增长量

Fig.1 The amount of height growth in arrowleaf saltbush during the period of treatment

A: 对照 CK; B: 干旱 Dry; C: 干旱+0.1mol/L 氯化钠 Dry+0.1mol/L NaCl ; D: 干旱+0.2mol/L 氯化钠 Dry+0.2mol/L NaCl ; E: 干旱+0.4mol/L 氯化钠 Dry+0.4mol/L NaCl ; 数据柱上方的标记字母不同表示差异显著($P < 0.05$)

细胞间隙 CO_2 浓度下降、气孔限制值升高,10 d 后细胞间隙 CO_2 浓度快速升高、气孔限制值则大幅下降;而处理 C、D、E 的细胞间隙 CO_2 浓度和气孔限制值均无大幅度的下降和升高的变化(图 2)。依据高辉远等^[22]的观点,可以认为处理 B 在处理后的前 10 d 光合速率下降的原因是气孔关闭或部分关闭导致的 CO_2 供应不足,10 d 后光合速率下降的主要原因则是光合机构受损导致的叶肉细胞光合活性的降低;而处理 C、D、E 在测定期限内,光合速率下降的原因主要是气孔因素,并没有引起光合机构的明显受损。可见,在土壤中适量 NaCl 的存在可缓解干旱对叶片光合作用的影响。

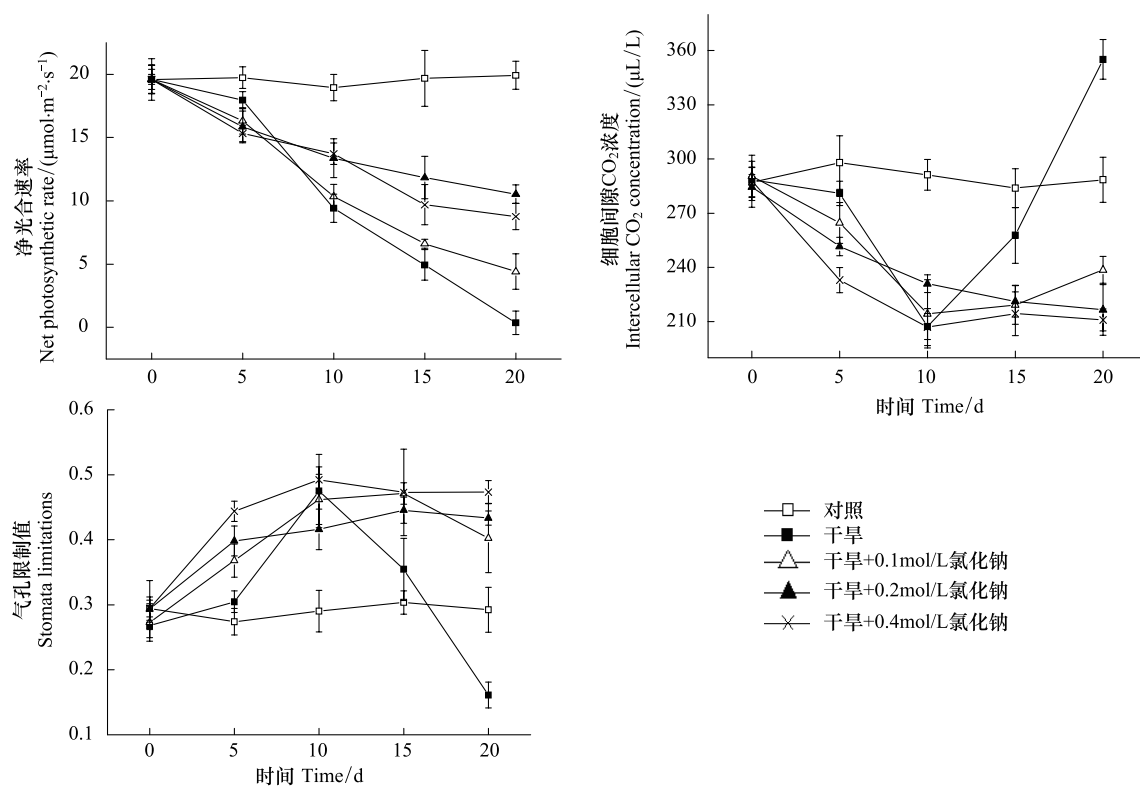


图 2 叶片净光合速率、细胞间隙 CO_2 浓度和气孔限制值随干旱时间的变化

Fig.2 Changes in net photosynthesis, intercellular CO_2 concentration and stomata limitations in arrowleaf saltbush upon treatment time

2.3 土壤盐分对三角叶滨藜叶片抗氧化活性的调节

超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)和过氧化氢酶(CAT)是植物抗氧化系统中重要的抗氧化酶,分别清除超氧阴离子自由基^[23]、羟基自由基和过氧化氢^[24],是植物体内消除活性氧伤害的重要防线。从图 3 中可看出,处理 A(CK)植株叶片 3 种酶活性相对稳定,干旱处理的植株叶片 3 种酶的活性则显著升高,且处理 B(Dry)的 3 种酶活性的升高幅度明显高于处理 C、D、E(Dry+0.1—Dry+0.4mol/L NaCl),并在处理 15d 后又出现 SOD 和 CAT 活性的急剧下降。

MDA 是脂质过氧化的产物,其含量表明植物体受活性氧破坏的程度。MDA 积累越多,表明植物细胞受伤害程度越大^[25-26]。图 3 显示,三角叶滨藜叶片中 MDA 含量随干旱时间的延长均呈增加趋势,但处理 B 的植株叶片 MDA 含量显著高于处理 C、D、E,在干旱处理后 20d 其 MDA 含量约为的后三者的 1.5—2 倍。

2.4 各处理土壤和植株水分状况及组织 Na^+ 含量的比较

为了进一步探明土壤盐分在三角叶滨藜耐旱中的作用,本实验对不同处理的土壤和植株水分状况以及组织 Na^+ 含量进行了测定,结果见图 4 和表 1。图 4 显示土壤 RWC 除对照组因浇水而保持较高外,各处理均随干旱时间的延长而持续下降,但处理 C、D、E 的土壤 RWC 下降幅度明显小于处理 B;叶片 RWC 的变化只是在干旱处理的前 5d,因土壤水分较充足,各处理的叶片 RWC 变化均较小,随后变化趋势与土壤相似。这一结果

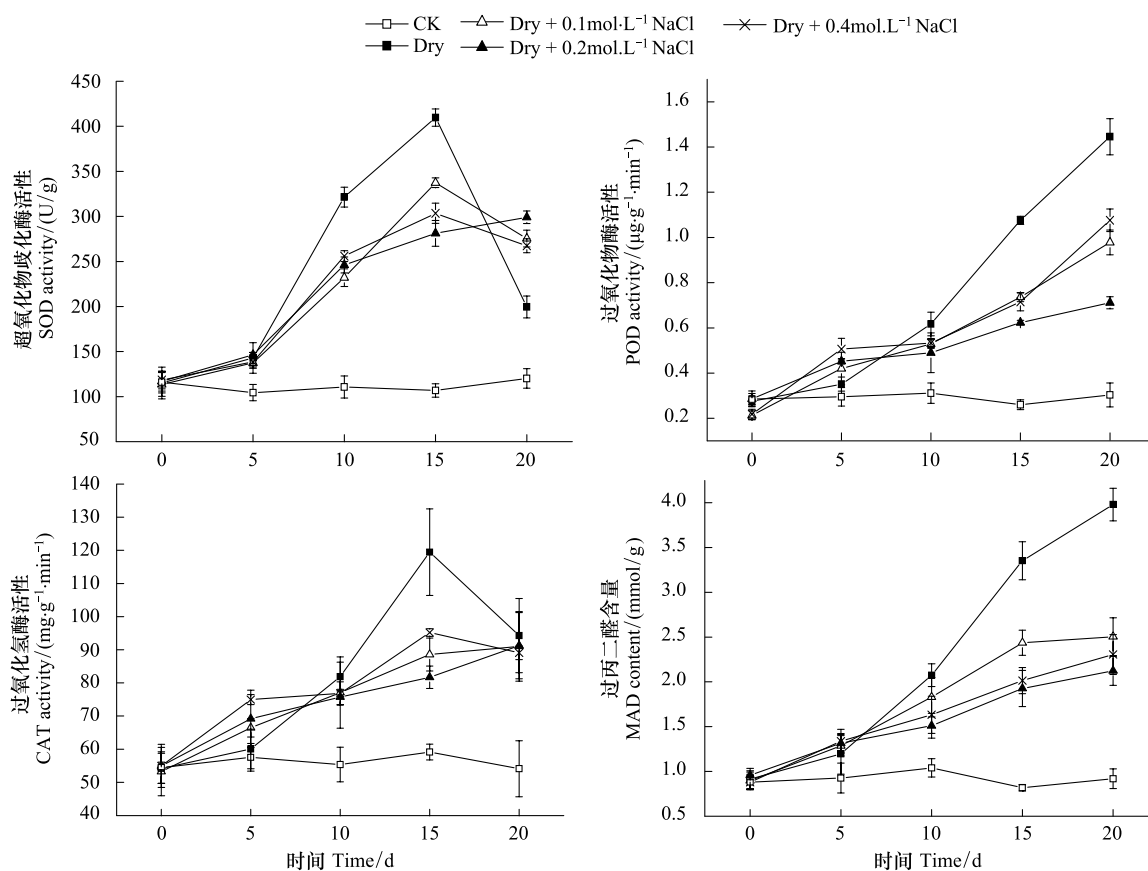


图3 不同土壤盐分下三角叶滨藜叶片抗氧化酶活性和丙二醛含量随干旱持续时间的变化

Fig.3 Changes in antioxidant enzyme activity and MAD content in arrowleaf saltbush upon drought duration under different soil salinity

说明土壤盐分的增加既可使土壤维持相对较高的含水量,也有利于保持植株水分。对植株水势、渗透势等的测定结果(表1)进一步证实,虽然处理C、D、E的植株水势与处理B的差异不明显,但由于组织内积累了较多的Na⁺,降低了渗透势,从而维持了相对较高的细胞膨压和叶片姿态。

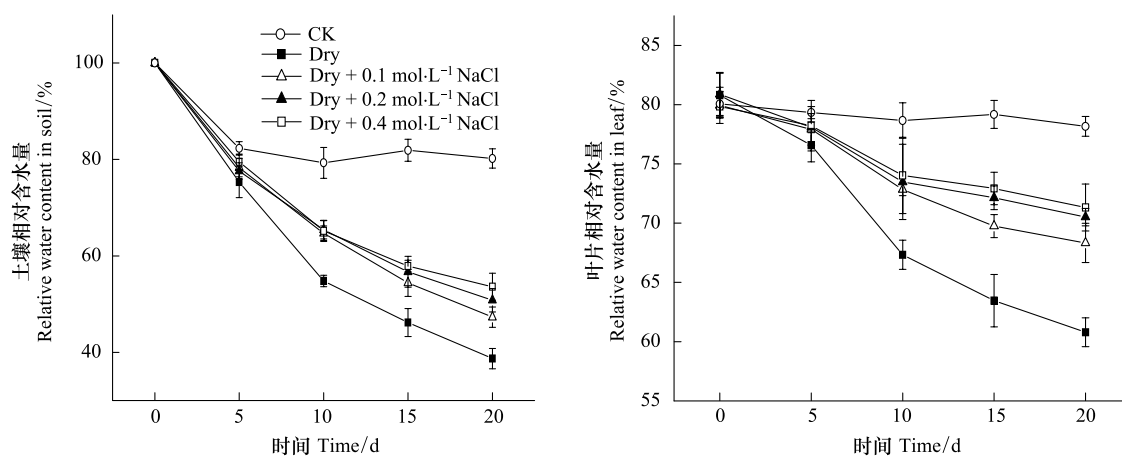


图4 土壤和叶片相对含水量随干旱处理时间的变化

Fig.4 Variations of RWC in soil and leaves upon drought duration under different soil salinity

3 讨论

干旱胁迫导致植物细胞供水不足,进而影响植物代谢和生长发育的各个方面,包括光合速率下降、膜脂过

氧化加剧、生长受抑制等。植物则通过渗透调节降低其渗透势和水势,增强从外界介质吸水的动力,以维持细胞膨压和植株的代谢、生长^[27]。有研究显示,Na⁺可以改善渗透胁迫下盐生植物的渗透势,增加组织的含水量,且盐分的摄入使植物能够在较低能耗的前提下积累 Na⁺,比合成、积累有机物进行渗透调节更为经济有效^[8,28]。本试验结果表明,处理 C、D、E(盆土用 0.1—0.4 mol/L NaCl 溶液浇灌后进行干旱处理)与处理 B(盆土直接用水浇灌后进行干旱处理)相比,随着干旱持续时间的延长,不仅土壤和植株均能维持相对较高的含水量,而且由于组织内积累了较多的 Na⁺,使渗透势显著降低,增强了植株吸水力和保水力,使叶片能够维持相对较高的细胞膨压,进而有利于植株代谢的维持和保持生长。

表 1 干旱处理后第 20 天植株叶片水分状况和 Na⁺含量的比较Table 1 Comparison of the water status and Na⁺ content in arrowleaf saltbush leaves in 20 days after drought treatment

处理 Treatment	叶片水势 Water potential in leaf/MPa	叶片渗透势 Osmotic potential in leaf/MPa	细胞膨压 Cell turgor /MPa	叶片 Na ⁺ 含量 Na ⁺ content in leaf/(mg/g 干重)	叶片状态 Leaves state
A: CK	-(0.912±0.035) aA	-(1.275±0.014) A	0.363±0.026aA	17.90±1.25aA	正常
B: Dry	-(1.533±0.031) bB	-(1.366±0.035) B	-(0.167±0.005) eD	19.01±0.71aA	重度萎蔫
C: Dry+0.1mol/L NaCl	-(1.552±0.018) bB	-(1.481±0.024) C	-(0.071±0.006) dC	36.38±1.26bB	轻度萎蔫
D: Dry+0.2mol/L NaCl	-(1.547±0.027) bB	-(1.604±0.008) D	0.057±0.019cB	44.79±1.82cC	无萎蔫
E: Dry+0.4mol/L NaCl	-(1.591±0.026) bB	-(1.684±0.014) E	0.093±0.016bB	57.56±2.69dD	无萎蔫

数据后字母相同表示无显著差异($P>0.05$),小写字母和大写字母不同表示在 5%或 1%水平上差异显著

干旱胁迫下细胞内产生过剩的活性氧自由基,造成细胞膜系统损伤,影响植物的光合作用等一系列代谢活动^[29];同时,活性氧也可作为第二信使介导逆境胁迫下植物体内的信号转导,调节抗氧化酶等相关基因表达及酶活性的上升,从而提高植物的耐逆性^[24,30]。SOD、POD 和 CAT 是植物体内重要的抗氧化酶,已有大量研究证明植物的抗旱能力和受伤害程度与这 3 种酶的活性密切相关,总体表现为 SOD、POD、CAT 活性随干旱胁迫强度的增大而升高,当胁迫强度超出植物能够承受的程度后,SOD、CAT 活性出现降低,POD 活性则因植物种类不同而表现出差异^[31-34]。本试验对各处理植株光合指标和抗氧化酶活性的测定结果显示,处理 B 在干旱处理后的前 10 d 光合速率下降的原因是气孔关闭或部分关闭导致的 CO₂ 供应不足;10 d 后光合速率下降的主要原因则是光合机构受损导致的叶肉细胞光合活性的降低;而处理 C、D、E 在测定期限内光合速率下降的原因主要是气孔因素,并没有引起光合机构的明显受损。对抗氧化酶活性测定结果则表明,处理 B 的三角叶滨藜叶片 SOD、POD、CAT 活性显著增加,在干旱处理后第 15 天后,SOD 和 CAT 活性又大幅度下降;而处理 C、D、E 的 SOD、POD、CAT 活性变化幅度均明显小于处理 B。根据前人的研究与分析,可以推测,处理 B 干旱期间 SOD、POD、CAT 活性的大幅升高是干旱胁迫导致的大量活性氧自由基产生所诱导的植株保护性反应,后期 SOD 和 CAT 活性的大幅降低则是活性氧自由基产生的超出了植株清理能力所能承受的范围而导致细胞伤害的结果;而处理 C、D、E 在干旱期间 3 种酶活性的变化幅度较小,说明 NaCl 溶液浇灌土壤减弱了干旱胁迫诱导的活性氧自由基的产生,本试验中对 MDA 含量的测定结果也证明了这一点。可见,在土壤中适量 NaCl 的存在可减少活性氧自由基的产生,缓解活性氧自由基诱导的膜脂过氧化作用,降低了干旱胁迫对叶片光合系统的损伤。

可见,土壤中适量盐分存在能够增加三角叶滨藜对 Na⁺的吸收和积累、降低组织渗透势、维持较强的吸水力和保水力,从而减弱因干旱脱水导致的过量活性氧自由基产生对细胞膜系统的损伤和对光合机构的破坏,有利于维持相对较高的物质生产能力和细胞的持续生长,最终表现为耐旱性能的增强。

References:

- [1] Lu C M, Zhang Q D, Kuang T Y, Wang Z, Gao Y Z. The mechanism for the inhibition of photosynthesis in rice by water stress. *Acta Agronomica Sinica*, 1994, 20(5): 601-606.
- [2] Akita S, Cabuslay G S. Physiological basis of differential response to salinity in rice cultivars//Bassam N E, Dambroth M, Loughman B C, eds.

- Genetic Aspects of Plant Mineral Nutrition (Vol 42). London: Kluwer Academic Publishers, 1990; 431-448.
- [3] Stepień P, Kłbus G. Water relations and photosynthesis in *Cucumis sativus* L. leaves under salt stress. *Biologia Plantarum*, 2006, 50(4): 610-616.
- [4] Zhang Z G, Shang Q M, Wang L H, Mao S L, Zhang B X. The characteristics of active oxygen metabolism in pepper leaf cells under suboptimal temperature, weak light and salt stress. *Acta Horticulturae Sinica*, 2009, 36(11): 1603-1610.
- [5] Han B, Sun J, Guo S R, Jin C Y. Effects of calcium on antioxidant enzymes activities of cucumber seedlings under salt stress. *Acta Horticulturae Sinica*, 2010, 37(12): 1937-1943.
- [6] Harmer P M, Benne E J. Sodium as a crop nutrient. *Soil science*, 1945, 60(2): 137-148.
- [7] Truog E, Berger K C, Attoe O J. Response of nine economic plants to fertilization with sodium. *Soil Science*, 1953, 76(1): 41-50.
- [8] Slama I, Ghnaya T, Messedi D, Hessini K, Labidi N, Savoure A, Abdelly C. Effect of sodium chloride on the response of the halophyte species *Sesuvium portulacastrum* grown in mannitol-induced water stress. *Journal of Plant Research*, 2007, 120(2): 291-299.
- [9] Wang S M, Wan C G, Wang Y R, Chen H, Zhou Z Y, Fu H, Sosebee R E. The characteristics of Na^+ , K^+ and free proline distribution in several drought-resistant plants of the Alxa Desert, China. *Journal of Arid Environments*, 2004, 56(3): 525-539.
- [10] Yang X G, Fu H, Niu D C. Response of physiology of *Zygophyllum xanthoxylum* seedlings under drought stress. *Acta Prataculturae Sinica*, 2007, 16(5): 107-112.
- [11] Chen M, Li P H, Wang B S. Na^+ transporters and plant salt tolerance. *Plant Physiology Communications*, 2007, 43(4): 617-622.
- [12] Niu X, Bressan R A, Hasegawa P M, Pardo J M. Ion homeostasis in NaCl stress environments. *Plant Physiology*, 1995, 109(3): 735-742.
- [13] Huang W, Li Z G, Qiao H L, Li C Z, Liu X J. Interactive effect of sodium chloride and drought on growth and osmotica of *Suaeda salsa*. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2008, 16(1): 173-178.
- [14] Liu J P, Gao B, Li X, Song J, Fan H, Wang B S, Zhao K F. The effects of salinity and drought interaction on seed germination and seedling growth of *Suaeda salsa* L. from different habitats. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(20): 5485-5490.
- [15] Bai X F, Zhu J J, Wang Z L, Tan Y Q, Liu L D. Relationship between the Salt accumulation and the drought resistance in several woody plants in arid zone. *Scientia Silvae Sinicae*, 2012, 48(7): 45-49.
- [16] Berry J A, Downton W J S. Environmental regulation of photosynthesis. // Govind J, ed. *Photosynthesis (Vol II)*. New York: Academic Press, 1982; 263-343.
- [17] Sun Q, Hu J J. *Research Technology of Plant Physiology*. Yangling: Northwest A & F University Press, 2006: 165-177.
- [18] Hao J J, Kang Z L, Yu Y. *Experimental Techniques of Plant Physiology*. Beijing: Chemical Industry Press, 2007: 102-103.
- [19] Zhao S J, Liu H S, Dong X C. *The Experimental Guide for Plant Physiology*. Beijing: China Agricultural Science & Technology Press, 1998: 161-165.
- [20] Wang B S, Zhao K F. Comparison of extractive methods of Na and K in wheat leaves. *Plant Physiology Communications*, 1995, 31(1): 50-52.
- [21] Shan L. Plant drought resistance and semi-dryland farming. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2007, 25(1): 1-5.
- [22] Gao H Y, Zou Q, Cheng B S. Study on the stomatal and nonstomatal limitation during the diurnal course of photosynthesis in soybean leaves. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 1993, 13(2): 96-102.
- [23] Asada K. Production and scavenging of reactive oxygen species in chloroplasts and their functions. *Plant Physiology*, 2006, 141(2): 391-396.
- [24] Apel K, Hirt H. Reactive oxygen species; metabolism, oxidative stress, and signal transduction. *Annual Review of Plant Biology*, 2004, 55(1): 373-399.
- [25] Jiang M Y, Guo S C. Iron-catalysed lipid peroxidation in rice seedlings under osmotic stress. *Acta Physiologica Sinica*, 1996, 22(1): 6-12.
- [26] Yu Z Q, Sun M G, Wei H X, Kong Y J, Kong H L. Effect of salt and drought intercross stress on lipid peroxidation and activity of cell defense enzymes in leaves of *Gleditsia sinensis* seedlings. *Journal of Northwest Forestry University*, 2007, 22(3): 47-50.
- [27] Chen H, Jiang J G. Osmotic adjustment and plant adaptation to environmental changes related to drought and salinity. *Environmental Reviews*, 2010, 18(NA): 309-319.
- [28] Chen C S, Xie Z X, Liu X J. Interactive effects of drought and salt stresses on winter wheat seedlings growth and physiological characteristics of stress-resistance. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(4): 811-816.
- [29] Elstner E F. Oxygen activation and oxygen toxicity. *Annual Review of Plant Physiology*, 1982, 33(1): 73-96.
- [30] Mano J. Early events in environmental stresses in plants-induction mechanisms of oxidative stress//Inze D, Montago MV, eds. *Oxidative Stress in Plants*. New York: Taylor and Francis Publishers, 2002: 217-245.
- [31] Yan X F, Li J, Zu Y G. Effect of drought stress on activity of cell defense enzymes and lipid peroxidation in korean pine seedlings. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, 19(6): 850-854.
- [32] Peng L X, Wu D, Li H, Yan G R. Effects of water stress on activities of antioxidant enzymes of *Elaeagnus angustifolia* L. seedlings. *Journal of Tianjin Agricultural University*, 2007, 14(1): 1-5.

- [33] Zhou H B, Wang Y C, Shi S L, Zhou J H. Response of antioxidant system in leaves of *Tetraena mongolica* and *Zygophyllum xanthoxylon* seedlings to drought stress. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2011, 31(6): 1188-1194.
- [34] Wang S C, Liang D, Li C, Hao Y L, Ma F W, Shu H R. Influence of drought stress on the cellular ultrastructure and antioxidant system in leaves of drought-tolerant and drought-sensitive apple rootstocks. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2012, 51: 81-89.

参考文献:

- [1] 卢从明, 张其德, 匡廷云, 王忠, 高煜珠. 水分胁迫抑制水稻光合作用的机理. *作物学报*, 1994, 20(5): 601-606.
- [4] 张志刚, 尚庆茂, 王立浩, 毛胜利, 张宝玺. 亚适温、弱光照及盐胁迫下辣椒叶片活性氧代谢特征. *园艺学报*, 2009, 36(11): 1603-1610.
- [5] 韩冰, 孙锦, 郭世荣, 金春燕. 钙对盐胁迫下黄瓜幼苗抗氧化系统的影响. *园艺学报*, 2010, 37(12): 1937-1943.
- [10] 杨鑫光, 傅华, 牛得草. 干旱胁迫下幼苗期霸王的生理响应. *草业学报*, 2007, 16(5): 107-112.
- [11] 陈敏, 李平华, 王宝山. Na^+ 转运体与植物的耐盐性. *植物生理学通讯*, 2007, 43(4): 617-622.
- [13] 黄玮, 李志刚, 乔海龙, 李存桢, 刘小京. 早盐互作对盐地碱蓬生长及其渗透调节物质的影响. *中国生态农业学报*, 2008, 16(1): 173-178.
- [14] 刘金萍, 高奔, 李欣, 宋杰, 范海, 王宝山, 赵可夫. 盐旱互作对不同生境盐地碱蓬种子萌发和幼苗生长的影响. *生态学报*, 2010, 30(20): 5485-5490.
- [15] 柏新富, 朱建军, 王仲礼, 谭永芹, 刘林德. 干旱区木本植物盐分积累与其耐旱性的关系. *林业科学*, 2012, 48(7): 45-49.
- [17] 孙群, 胡景江. 植物生理学研究技术. 杨凌: 西北农林科技大学出版社, 2006: 165-177.
- [18] 郝建军, 康宗利, 于洋. 植物生理学实验技术. 北京: 化学工业出版社, 2007: 102-103.
- [19] 赵世杰, 刘华山, 董新纯. 植物生理学实验指导. 北京: 中国农业科技出版社, 1998: 161-165.
- [20] 王宝山, 赵可夫. 小麦叶片中 Na 、 K 提取方法的比较. *植物生理学通讯*, 1995, 31(1): 50-52.
- [21] 山仑. 植物抗旱生理研究与发展半旱地农业. *干旱地区农业研究*, 2007, 25(1): 1-5.
- [22] 高辉远, 邹琦, 程炳嵩. 大豆光合日变化过程中气孔限制和非气孔限制的研究. *西北植物学报*, 1993, 13(2): 96-102.
- [25] 蒋明义, 郭绍川. 渗透胁迫下水稻中铁催化的膜脂过氧化作用. *植物生理学报*, 1996, 22(1): 6-12.
- [26] 于振群, 孙明高, 魏海霞, 孔艳菊, 孔红岭. 干旱和盐分交叉胁迫对皂角幼苗膜脂过氧化及保护酶活性的影响. *西北林学院学报*, 2007, 22(3): 47-50.
- [28] 陈成升, 谢志霞, 刘小京. 早盐互作对冬小麦幼苗生长及其抗逆生理特性的影响. *应用生态学报*, 2009, 20(4): 811-816.
- [31] 阎秀峰, 李晶, 祖元刚. 干旱胁迫对红松幼苗保护酶活性及脂质过氧化作用的影响. *生态学报*, 1999, 19(6): 850-854.
- [32] 彭立新, 吴迪, 李慧, 阎国荣. 水分胁迫对沙枣幼苗抗氧化酶活性的影响. *天津农学院学报*, 2007, 14(1): 1-5.
- [33] 周红兵, 王迎春, 石松利, 周健华. 四合木和霸王幼苗抗氧化系统对于干旱胁迫的响应差异. *西北植物学报*, 2011, 31(6): 1188-1194.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.33, No.23 Dec., 2013 (Semimonthly)

CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

- Ozone uptake at the canopy level in *Robinia pseudoacacia* in Beijing based on sap flow measurements WANG Hua, OUYANG Zhiyun, REN Yufen, et al (7323)
- Genetic impact of swimming crab *Portunus trituberculatus* farming on wild genetic resources in Haizhou Bay DONG Zhiguo, LI Xiaoying, ZHANG Qingqi, et al (7332)
- The effect of soil salinity to improve the drought tolerance of arrowleaf saltbush TAN Yongqin, BAI Xinfu, HOU Yuping, et al (7340)
- Effects of *Liriomyza huidobrensis* infestation on the activities of four defensive enzymes in the leaves of cucumber plants SUN Xinghua, ZHOU Xiaorong, PANG Baoping, et al (7348)

Autecology & Fundamentals

- Early effects of simulated nitrogen deposition on annual nutrient input from litterfall in a *Pleioblastus amarus* plantation in Rainy Area of West China XIAO Yinlong, TU Lihua, HU Tingxing, et al (7355)
- Relationship between nutrient characteristics and yields of tumorous stem mustard at different growth stage ZHAO Huan, LI Huihe, LÜ Huifeng, et al (7364)
- Decomposition rate and silicon dynamic of mulching residue under *Phyllostachys praecox* stands HUANG Zhangting, ZHANG Yan, SONG Zhaoliang, et al (7373)
- Effects of waterlogging on the growth and physiological properties of juvenile oilseed rape ZHANG Shujie, LIAO Xing, HU Xiaojia, et al (7382)
- The crude protein content of main food plants of François' langur (*Trachypithecus francoisi*) in Fusui, Guangxi, China LI Youbang, DING Ping, HUANG Chengming, et al (7390)
- Effects of nitrogen on photosynthetic characteristics and enzyme activity of nitrogen metabolism in maize under-mulch-drip irrigation GU Yan, HU Wenhe, XU Baijun, et al (7399)
- Ecotoxicological effects of exposure to PFOS on embryo and larva of zebrafish *Danio rerio* XIA Jigang, NIU Cuijuan, SUN Luyin (7408)
- Allelopathic effects of extracts from *Ulva prolifera* powders on the growth of *Prorocentrum donghaiense* and *Skeletonema costatum* HAN Xiurong, GAO Song, HOU Junni, et al (7417)
- Predation evaluation of *Diaphorina citri*'s (Homoptera: Pemphigidae) natural enemies using the CO I marker gene MENG Xiang, OUYANG Gecheng, XIA Yulu, et al (7430)
- Effect of volatiles from healthy or worm bored Korean pine on host selective behavior of *Dioryctria sylvestrella* and its parasitoid *Macrocentrus* sp. WANG Qi, YAN Shanchun, YAN Junxin, et al (7437)

Population, Community and Ecosystem

- Relationship between rhizosphere microbial community functional diversity and faba bean fusarium wilt occurrence in wheat and faba bean intercropping system DONG Yan, DONG Kun, TANG Li, et al (7445)
- Characteristics of soil fertility in different ecosystems in depressions between karst hills YU Yang, DU Hu, SONG Tongqing, et al (7455)
- Evaluation on carbon sequestration effects of artificial alfalfa pastures in the Loess Plateau area LI Wenjing, WANG Zhen, HAN Qingfang, et al (7467)

Landscape, Regional and Global Ecology

- Effects of deep vertically rotary tillage on soil water and water use efficiency in northern China's Huang-huai-hai Region LI Yibing, PANG Huancheng, YANG Xue, et al (7478)

- Effects of landscape patterns on runoff and sediment export from typical agroforestry watersheds in the Three Gorges Reservoir area, China HUANG Zhilin, TIAN Yaowu, XIAO Wenfa, et al (7487)
- Land cover classification of Yancheng Coastal Natural Wetlands based on BP neural network and ETM+ remote sensing data XIAO Jincheng, OU Weixin, FU Haiyue (7496)
- Early responses of soil CH₄ uptake to increased atmospheric nitrogen deposition in a cold-temperate coniferous forest GAO Wenlong, CHENG Shulan, FANG Huajun, et al (7505)
- Temporal-spatial characteristics of soil respiration in Chinese boreal forest ecosystem JIA Bingrui, ZHOU Guangsheng, JIANG Yanling, et al (7516)
- Seasonal and interannual variability in soil respiration in wheat field of the Loess Plateau, China ZHOU Xiaoping, WANG Xiaoke, ZHANG Hongxing, et al (7525)
- Dynamics of atmospheric ammonia concentrations near different emission sources LIU Jieyun, KUANG Fuhong, TANG Aohan, et al (7537)
- Influence of residues and earthworms application on N₂O emissions of winter wheat ... LUO Tianxiang, HU Feng, LI Huixin (7545)
- Resource and Industrial Ecology**
- Ecological monitoring of the fish resources catching and stocking in Lake Tianmu basing on the hydroacoustic method SUN Mingbo, GU Xiaohong, ZENG Qingfei, et al (7553)
- Application of support vector machine to evaluate the eutrophication status of Taihu Lake ZHANG Chengcheng, SHEN Aichun, ZHANG Xiaoqing, et al (7563)
- Research Notes**
- Amount and dynamic characteristics of litterfall in four forest types in subtropical China XU Wangming, YAN Wende, LI Jiebing, et al (7570)
- Allelopathic effects of artemisinin on seed germination and seedling growth of vegetables BAI Zhen, HUANG Yue, HUANG Jianguo (7576)
- Nitric oxide participates symbiosis between am fungi and tobacco plants WANG Wei, ZHAO Fanggui, HOU Lixia, et al (7583)
- Mapping wildlife habitat suitability using kernel density estimation ZHANG Guiming, ZHU A'xing, YANG Shengtian, et al (7590)
- Effects of nitrogen fertilizer methods on the content of *Bacillus thuringiensis* insecticidal protein and yield of transgenic cotton MA Zongbin, LIU Guizhen, YAN Gentu, et al (7601)

《生态学报》2014 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,探索生态学奥秘,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,280 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 王德利

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 23 期 (2013 年 12 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 23 (December, 2013)

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel: (010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	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 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717	Published by	Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail: journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel: (010)64034563 E-mail: journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add: P.O.Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 90.00 元