

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第33卷 第6期 Vol.33 No.6 **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 6 期

2013 年 3 月 (半月刊)

目 次

专论与综述

- 基于遥感技术的森林健康研究综述..... 高广磊,信忠保,丁国栋,等 (1675)
Agent 农业土地变化模型研究进展..... 余强毅,吴文斌,杨 鹏,等 (1690)

个体与基础生态

- 辽东湾北部近海沙蜃的动态分布..... 王 彬,秦宇博,董 婧,等 (1701)
口虾蛄 proPO 基因全长 cDNA 的克隆与组织表达..... 刘海映,刘连为,姜玉声,等 (1713)
中缅树鼯头骨及下臼齿几何形态与环境的关系..... 朱万龙,贾 婷,黄春梅,等 (1721)
亚热带 3 种树种凋落叶厚度对其分解速率及酶活性的影响..... 季晓燕,江 洪,洪江华,等 (1731)
浙北地区常见绿化树种光合固碳特征..... 张 娇,施拥军,朱月清,等 (1740)
两种高质牧草不同生育期光合生理日变化及光响应特征..... 郭春燕,李晋川,岳建英,等 (1751)
基于 WOFOST 作物生长模型的冬小麦干旱影响评估技术..... 张建平,赵艳霞,王春乙,等 (1762)
基于线粒体 DNA 控制区的斑翅草螽不同地理种群遗传分化研究..... 周志军,尚 娜,刘 静,等 (1770)
圈养尖吻蝾螈雌体大小、窝卵数和卵大小之间的关系..... 胡明行,谭群英,杨道德 (1778)
应用寄生蜂和不育雄虫防控田间橘小实蝇..... 郑思宁,黄居昌,叶光禄,等 (1784)
青蒿素对外生菌根真菌化感效应..... 李 倩,袁 玲,王明霞,等 (1791)

种群、群落和生态系统

- 海湾生态系统健康评价方法构建及在大亚湾的应用..... 李纯厚,林 琳,徐姗姗,等 (1798)
上升流和水团对浙江中部近海浮游动物生态类群分布的影响..... 孙鲁峰,柯 昶,徐兆礼,等 (1811)
半干旱区生态恢复关键生态系统识别——以内蒙古自治区和林县为例.....
..... 彭 羽,高 英,冯金朝,等 (1822)
太岳山油松人工林土壤呼吸对强降雨的响应..... 金冠一,赵秀海,康峰峰,等 (1832)
重庆酸雨区马尾松林凋落物特征及对干旱胁迫的响应..... 王轶浩,王彦辉,于澎湃,等 (1842)

景观、区域和全球生态

- 城市典型水域景观的热环境效应..... 岳文泽,徐丽华 (1852)
外来树种桉树引种的景观生态安全格局..... 赵筱青,和春兰 (1860)
基于耕地生态足迹的重庆市耕地生态承载力供需平衡研究..... 施开放,刁承泰,孙秀峰,等 (1872)
大气 CO₂ 浓度升高对稻田根际土壤甲烷氧化细菌丰度的影响..... 严 陈,许 静,钟文辉,等 (1881)

资源与产业生态

- 基于可变模糊识别模型的海水环境质量评价..... 柯丽娜,王权明,孙新国,等 (1889)
亚热带养殖海湾皱瘤海鞘生物沉积的现场研究..... 闫家国,齐占会,田梓杨,等 (1900)
黄土高原典型苹果园地深层土壤氮磷钾养分含量与分布特征..... 张丽娜,李 军,范 鹏,等 (1907)

旱作农田不同耕作土壤呼吸及其对水热因子的响应..... 张丁辰,蔡典雄,代 快,等 (1916)

商洛低山丘陵区农林复合生态系统中大豆与丹参的光合生理特性..... 彭晓邦,张硕新 (1926)

外源油菜素内酯对镉胁迫下菊芋幼苗光合作用及镉富集的调控效应..... 高会玲,刘金隆,郑青松,等 (1935)

基于侧柏液流的测定对 Granier 原始公式系数进行校正 刘庆新,孟 平,张劲松,等 (1944)

研究简报

湿地自然保护区保护价值评价方法..... 孙 锐,崔国发,雷 霆,等 (1952)

干热河谷印楝和大叶相思人工林根系生物量及其分布特征..... 高成杰,唐国勇,李 昆,等 (1964)

海滨沙滩单叶蔓荆对沙埋的生理响应特征..... 周瑞莲,王 进,杨淑琴,等 (1973)

宁夏贺兰山、六盘山典型森林类型土壤主要肥力特征 姜 林,耿增超,张 雯,等 (1982)

学术争鸣

小兴安岭十种典型森林群落凋落物生物量及其动态变化..... 侯玲玲,毛子军,孙 涛,等 (1994)

中国生态学会 2013 年学术年会征稿通知 (2002)

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 * 328 * zh * P * ¥90.00 * 1510 * 34 * 2013-03



封面图说: 亭亭玉立的白桦树——白桦为落叶乔木,可高达 25m,胸径 50cm。其树冠呈卵圆形,树皮白色,纸状分层剥离;叶三角状、卵形或菱状卵形;花单性,雌雄同株。白桦树喜光,耐严寒,对土壤适应性强,喜酸性土,沼泽地、干燥阳坡及湿润阴坡都能生长。常与红松、落叶松、山杨、蒙古栎混生。白桦的天然更新好,生长较快,萌芽强,在人为的采伐迹地或火灾、风灾等自然损毁的迹地里,往往由白桦首先进入,为先锋树种,而形成白桦次生林。白桦分布甚广,我国大、小兴安岭及长白山均有成片纯林,在华北平原和黄土高原山区、西南山地亦为阔叶落叶林及针叶阔叶混交林中的常见树种。

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/stxb201112081886

周瑞莲, 王进, 杨淑琴, 杨树德. 海滨沙滩单叶蔓荆对沙埋的生理响应特征. 生态学报, 2013, 33(6): 1973-1981.

Zhou R L, Wang J, Yang S Q, Yang S D. Physiological response of *Vitex trifolia* to sand burial in the sand coast. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(6): 1973-1981.

海滨沙滩单叶蔓荆对沙埋的生理响应特征

周瑞莲^{1,*}, 王 进¹, 杨淑琴², 杨树德¹

(1. 鲁东大学生命科学学院, 烟台 264025; 2. 鲁东大学资产处, 烟台 264025)

摘要:海滨沙滩单叶蔓荆(*Vitex trifolia* L. var. *simplicifolia*)是优良的抗沙埋地被植物。以烟台海岸沙地单叶蔓荆为材料,通过不同厚度沙埋过程中沙上和沙下叶片抗逆生理指标的测定以揭示其抗沙埋生理调控机制。结果表明,轻度和中度沙埋 5d,成株和幼株整株叶片细胞膜透性增大、POD 和 SOD 活力增高、MDA 和脯氨酸含量和叶片相对含水量(RWC)增加、可溶性糖含量下降。但同株沙上叶片细胞膜透性、MDA 含量、SOD 和 POD 活力和可溶性糖含量均高于沙下,而沙上叶片脯氨酸含量低于沙下叶片。在轻度和中度沙埋 10d,沙上叶片细胞膜透性、MDA 和可溶性糖含量、叶片 POD 活力降低,叶片 SOD 活力仍有小幅度增高,但脯氨酸含量增加,沙上叶片生长旺盛。研究表明,沙埋下叶片抗氧化酶活力和脯氨酸含量与细胞膜透性和膜脂过氧化成正相关。沙埋使植株上部叶片接近沙表面而经受干旱和地面热辐射胁迫引起细胞膜脂过氧化加剧和细胞膜透性加大。同时沙埋也使沙下叶片遭遇黑暗和缺氧胁迫诱导细胞内膜脂过氧化,但也激活了叶片抗氧化酶保护系统和叶片脯氨酸的积累抑制细胞膜脂过氧化维护细胞膜的稳定。因此在沙埋过程中,叶片快速响应沙埋胁迫激活叶片抗氧化酶系统抑制膜脂过氧化作用维持氧自由基和抗氧化酶系统的动态平衡在单叶蔓荆适应轻度和中度沙埋,维护沙上叶片旺盛生长中起重要作用,也是重度全埋下沙下植株茎顶端能快速延伸弯曲生长最后顶出沙面再生的主要生理保护原因。

关键词:沙埋; 生理机理; 抗氧化酶; 单叶蔓荆; 脯氨酸

Physiological response of *Vitex trifolia* to sand burial in the sand coast

ZHOU Ruilian^{1,*}, WANG Jin¹, YANG Shuqin², YANG Shude¹

1 School of Life Science, Ludong University, Yantai 264025, China

2 Asset Section Office, Ludong University, Yantai 264025, China

Abstract: *Vitex trifolia* which grows in the sandy coast of Yantai, China is a plant with high resistance to sand burial and a good ground cover. It was chosen as the plant material to study how a plant adapts physiologically to sand burial. Four levels of sand burial treatment were set up: no sand burial, light (1/3 plant height), moderate (2/3 plant height) and severe sand burial (3/3 plant height). Changes in plasma membrane permeability, MDA content, osmotic regulation (proline and soluble sugar contents), and activities of antioxidant enzymes (SOD, POD, CAT) in the leaves from different levels of sand burials were monitored.

On the 5th day under light and moderate levels of sand burial, leaves of both young and mature plants of *V. trifolia* showed increased membrane permeability, MDA content, activities of POD and SOD, proline content, and RWC while soluble sugar content as compared to controls. We also compared leaves of the same plant above and below sand burial; leaves above sand had higher membrane permeability, MDA content, activities of SOD and POD, and soluble sugar than those below sand burial. In contrast, proline content of leaves below sand was higher than the content of those above sand.

With prolonged time of sand burial (10 days), membrane permeability, MDA, soluble sugar content and activity of

基金项目:国家 973 课题(2009CB421303);国家自然科学基金项目(30972422)资助

收稿日期:2011-12-08; 修订日期:2012-05-29

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhourl@hotmail.com

POD decreased and SOD activity and proline content increased in leaves above sand. After 10 days of light and modest sand burial, leaves above sand also grew well and were stronger than those of control plants. These results indicate that antioxidant enzymes and osmotic matter are involved in adaptation of *V. trifolia* to sand burial through physiological regulation. The sand burial not only intensified drought and ground thermal radiation stress to leaves above sand, but also made the leaves below sand encounter stress due to deficiency of light, O_2 and CO_2 , all of which interrupted normal metabolism and induced the production of active oxygen free radicals resulting in membrane lipid peroxidation. At the same time, sand burial stress activated antioxidant enzymes and promoted the accumulation of proline, eliminating the accumulation of free oxygen radicals and lipid peroxidation, thus maintaining the integrity of the membranes. Therefore, under sand burial, rapidly activated antioxidant enzymes (SOD and POD) hindered membrane lipid peroxidation and kept a dynamic balance between oxygen free radical production and antioxidant enzyme scavenging. This played a very important role in the rapid response of *V. trifolia* to sand burial stress, keeping plants growing well under light and modest sand burials. This may be the main mechanism of protection during sand burial of the whole plant, allowing the shoot apex to grow fast and emerge from the sand.

Key Words: sand burial; physiological mechanism; antioxidation enzymes; *Vitex trifolia*; proline

单叶蔓荆 (*Vitex trifolia* var. *Simplicifolia*) 为马鞭草科 (*Verbenaceae*) 牡荆属 (*Vitex* linn) 落叶小灌木, 根系发达, 匍匐茎着地部分生须根, 广泛分布于海岸沙地上, 其抗盐、抗寒、抗旱、抗沙埋的特点, 成为了优良的地被植物和防风固沙先锋植物^[1], 特别适用于沙地和碱性土壤的改良和地区绿化^[2-3]。但是单叶蔓荆为何不惧沙埋, 导致其沙埋下快速生长减少沙埋伤害的生理调控机制是什么? 目前鲜见报到。

目前关于植物对盐、寒冷、和干旱胁迫的适应机理有了较为深刻的认识。研究发现, 在干旱、盐胁迫和低温胁迫下植物体内会产生活性氧自由基^[4-8], 破坏活性氧代谢平衡, 引起细胞膜脂过氧化, 使细胞膜结构和蛋白质核酸受损, 导致细胞生理代谢紊乱并死亡^[9-13]。同时研究还发现, 在干旱、盐胁迫和低温胁迫时植物体内不仅抗氧化酶 (SOD, CAT, POD) 活力增高清除活性氧自由基, 抑制膜脂过氧化, 保护细胞膜完整性^[14-20]。而且, 细胞中渗透调节物 (可溶性糖和脯氨酸) 含量快速增高参与渗透调解, 维护细胞水分平衡^[21-24]。因此, 人们普遍认为, 胁迫条件下植物体内抗氧化保护酶活力的高低和渗透调节物含量的多少与植物抗逆性强弱密切相关^[25-27]。但目前大量研究多集中在抗氧化保护酶和渗透调节物与植物抗冻性、抗盐性、抗旱性和抗辐射能力相关关系研究^[28]。

沙埋作为一种胁迫因子, 常常是农田作物死亡的主要原因。但对沙生植物而言, 适度沙埋却可促使种子萌发定植^[29-30]。而沙埋后地上植株如何适应沙埋环境生长的生理调控机理目前不清楚。尽管目前有报道, 单叶蔓荆随着海水胁迫程度加深, 组织中细胞膜透性和脯氨酸含量显著增加、SOD 活力先增后减、叶片中叶绿素和类胡萝卜素含量降低^[31-32]。脱水胁迫会造成单叶蔓荆光合机构损伤和光合系统性能的降低^[33]。但目前尚不清楚沙埋胁迫下, 单叶蔓荆抗沙埋生长是否也包含有抗氧化酶和渗透调节物的调控作用。

本文拟通过对烟台海滨沙滩单叶蔓荆不同厚度沙埋下叶片细胞膜透性、抗氧化物酶活力和渗透调节物的测定, 探讨单叶蔓荆抗沙埋生理调控机制, 以揭示沙生植物在极端环境下生存机制, 丰富沙漠科学理论, 为未来植物抗沙埋基因的深入研究提供靶基因和理论依据, 为海岸沙滩生态环境修复和管理提供指导。

1 材料与方法

1.1 研究区自然概况

试验于 2010 和 2011 年 6 月到 9 月在烟台市夹河桥东部海岸沙滩天然单叶蔓荆生长地进行。烟台市地处山东半岛中部, 位于东经 $119^{\circ}34'$ — $121^{\circ}57'$, 北纬 $36^{\circ}16'$ — $38^{\circ}23'$, 属温带季风气候。年平均降水量为 651.9 mm, 主要集中在 7—8 月, 占年降雨量的 49%; 年平均气温 $11.8^{\circ}C$, 最热月为 8 月 ($24.6^{\circ}C$), 历年极端最高气温 $38.4^{\circ}C$ 。土壤 pH 值为 4.22—6.79, 土壤为风沙土。年平均风速内陆地区 3—4 m/s, 沿海地区 4—6 m/s。

研究区天然群落以耐沙埋植物为主,主要有筛草(*Carex kobomugi*)、单叶蔓荆(*V. trifolia* var. *simplicifolia*)等。

1.2 研究方法

1.2.1 试验地和试验材料的标记

试验地标记:在海滨沙滩上选择生长均匀的单叶蔓荆地块为样地,并除去杂草,将样地插牌作标记。

试验材料标记:为了解不同株龄单叶蔓荆对沙埋生理响应差异,分别选用成株(株高约 30 cm)和幼株(株高 12 cm)为试验材料。从标记的样地中挑选成株和幼株挂标签并在标记的成株近地表部位、株高 1/3 处、株高 2/3 处用记号笔做标记。用同样的方法对幼株单叶蔓荆进行标记。

1.2.2 沙埋处理

沙埋设立 4 个处理,即对照、轻度沙埋(10 cm 厚,1/3 处)、中度沙埋(20 cm 厚,2/3 处)、重度沙埋(30 cm 厚,全部沙埋)。沙埋的具体操作,即分别用高 30 cm(重度沙埋)、20 cm(中度沙埋)、10 cm(轻度沙埋)的纸盒子围成面积约 1—2 m² 的方框。按沙埋厚度选取方框将所选植株框起,收集远处地表干沙倾入框内外至框高,同时一边覆沙,一边尽量将叶片摆放自然。沙埋后将方框去除,沙埋区域周围再补充少量沙与地面成斜坡状与自然沙地成一体。每个沙埋处理至少包括 30 株标记的植物,每个处理重复两次,最后将沙埋处理区域标记。用同样方法,对幼株进行中度和重度沙埋处理。

1.2.3 试验取材

本研究预试验发现,沙埋后 10 d,单叶蔓荆沙上叶片快速生长,沙下叶片趋于变黄脱落。这表明沙埋 10 d 内是叶片对不同程度沙埋生理响应的敏感时间。因此本研究试验取材定在沙埋后第 5 天和第 10 天。在沙埋第 5 天和第 10 天,随机从标记的材料中选取 15 株植株,将沙子拨除,用剪刀小心地从植株近地表作记号部位剪下,同时在植株 1/3 和 2/3 作标记处将植株剪为三段并取下各段叶片,分别收集各段叶片。一部分叶片即刻带回实验室测叶片细胞膜透性和叶片相对含水量,另一部分材料迅速包裹放液 N 中固定用于渗透调节物(脯氨酸、可溶性糖)含量、保护酶(SOD、POD、CAT)活力的分析,所有测定至少重复 3 次。

1.3 样品分析

1.3.1 细胞膜透性和丙二醛(MDA)含量的测定

采用电导率法测定细胞膜透性^[34];采用硫代巴比妥酸法测定 MDA 含量^[35];用称重法测定叶片相对含水量^[35]。

1.3.2 酶液提取

酶液提取是在 4 ℃ 条件下进行。准确称取液氮固定的样叶于预冷研钵中,加入酶提取液(pH 值 7.8 的磷酸缓冲液),冰浴上研磨成匀浆,在 15000 r/min 4 ℃ 条件下离心 15 min,上清液用于酶活力和脯氨酸、可溶性糖和丙二醛含量的测定。

1.3.3 抗氧化酶活性的测定

采用愈创木酚法测定 POD 活性^[35];采用氮蓝四唑(NBT)光还原法测定 SOD 活性^[36];采用过氧化氢-碘量法测定 CAT 活性^[37]。

1.3.4 渗透调节物质含量的测定

采用茚三酮比色法测定游离脯氨酸含量^[35];采用蒽酮法测可溶性糖含量^[35]。

1.4 数据处理

实验数据采用 3 个以上重复的平均值±标准差,用 SPSS 11.5 软件进行数据分析。

2 结果与分析

2.1 不同厚度沙埋下单叶蔓荆叶片细胞膜透性、MDA 含量和 RWC 变化

结果表明,沙埋处理 5 d,轻度、中度、重度沙埋下成株整株单叶蔓荆叶片平均细胞膜透性分别较对照增加了 3.02%、28.5%、6.23%,但与对照差异不显著(表 1)。而同株沙上叶片细胞膜透性均高于沙下叶片。沙埋处理 10 d,轻度、中度、重度沙埋下成株整株植株叶片平均细胞膜透性分别较对照低 7.6%、17.4%、

35.8%, 且与对照差异不显著。但沙下叶片细胞膜透性则高于沙上叶片。幼株整株单叶蔓荆叶片细胞膜透性对沙埋的响应与成株相同(表2)。

同样发现,沙埋处理5 d,轻度、中度、重度沙埋下成株整株叶片MDA含量分别较对照增加115.7%、6.7%、16.7%,但与对照差异不显著(表1)。且成株同株沙上叶片MDA含量高于沙埋下叶片,如轻度和中度沙埋沙上叶片MDA含量分别比沙下叶片MDA含量高19.8%和109.2%。在中度、重度沙埋下,幼株整株叶片MDA含量较对照增加了2.4倍、1.3倍,与对照差异显著($P < 0.05$)(表2)。沙埋处理10 d,成株整株叶片MDA含量均低于对照,但同株沙上和沙下叶片MDA含量差异不显著($P > 0.05$)。幼株在沙埋条件下叶片MDA含量变化与成株植株叶片相同。结果表明,短期(处理5 d)沙埋胁迫造成叶片膜脂过氧化加剧,尤其是位于顶部叶片,但长期(处理10 d)沙埋下,由于植物对沙埋的适应而膜脂过氧化作用减弱,MDA含量下降。

不同厚度沙埋处理5 d和10 d,幼株和成株整株叶片RWC均较对照高(表1,表2)。沙埋提高了整株叶片含水量,但沙埋处理间及与对照没有显著差异($P > 0.05$)。

表1 沙埋过程中成株单叶蔓荆叶片细胞膜透性、MDA和RWC含量的变化

Table 1 The changes in membrane permeability and contents of MDA and RWC in the leaves of *V. trifolia* with mature plant under sand burial

项目 Item		对照 Control		轻度沙埋 LSB		中度沙埋 MSB		重度沙埋 SSB	
		5D	10D	5D	10D	5D	10D	5D	10D
细胞膜透性/%	顶部	2.69±0.90a	4.87±0.21a	3.73±1.28b	3.64±0.70b	6.02±1.50c	3.41±0.66b	3.16±0.81ab	1.91±0.76c
Membrane permeability	2/3处	4.48±0.63a	4.79±0.67a	3.85±0.94ab	3.82±0.98ab	3.37±0.70bc	4.03±0.12a	2.84±0.83c	3.16±0.27b
	1/3处	3.10±0.27a	5.02±0.49ab	3.00±0.15a	6.11±0.11a	3.81±0.80a	4.69±0.07b	4.91±0.88b	3.34±1.74c
丙二醛 MDA	顶部	0.77±0.09a	0.72±0.01a	1.73±0.29b	0.21±0.06b	1.15±0.61ab	0.46±0.14c	0.97±0.04a	0.53±0.04ac
/(μmol/鲜重 g)	2/3处	0.73±0.14a	0.54±0.06a	1.48±0.01b	0.54±0.07a	0.42±0.18b	0.54±0.11a	0.87±0.10a	0.37±0.09b
	1/3处	0.61±0.13a	0.93±0.04a	1.34±0.29b	0.31±0.09b	0.68±0.14a	0.37±0.05b	0.63±0.03a	0.32±0.07b
相对含水量/%	顶部	80.50±2.50a	80.87±4.60a	83.01±1.20a	84.17±2.71a	83.20±2.60a	82.09±0.37a	83.27±0.82a	85.12±3.50a
Relative water content (RWC)	2/3处	81.84±3.10a	80.05±1.12a	84.96±4.85a	84.02±0.03a	84.44±2.69a	87.36±0.41a	86.43±1.36a	90.06±1.50b
	1/3处	78.63±1.88a	77.04±1.35a	86.06±5.10a	86.97±1.18a	85.02±4.80a	87.86±0.65a	85.81±5.80a	92.84±2.42b

LSB: light sand burial; MSB: moderate sand burial; SSB: severe sand burial; 黑体为沙下部位; 小写字母为同一天不同沙埋处理和对照及不同沙埋处理间数据比较

表2 沙埋过程中幼株单叶蔓荆叶片细胞膜透性、MDA和RWC变化

Table 2 The changes in membrane permeability and content of MDA and RWC in the leaves of *V. trifolia* with young plant under sand burial.

项目 Item		对照 Control		中度沙埋 MSB		重度沙埋 SSB	
		5D	10D	5D	10D	5D	10D
细胞膜透性/%	顶部	3.14±0.60a	6.00±1.39a	3.49±0.50a	2.81±0.65b	4.95±0.25b	2.57±0.04b
Membrane permeability	1/2处	3.03±0.69a	5.42±1.15a	2.92±0.49a	4.11±0.97b	6.15±0.42b	4.01±0.83b
丙二醛 MDA	顶部	0.27±0.03a	0.79±0.05a	2.58±0.03b	0.16±0.05b	0.71±0.17a	0.41±0.10c
/(μmol/鲜重 g)	1/2处	0.46±0.03a	0.69±0.02a	0.21±0.11b	0.29±0.05b	0.95±0.04c	0.37±0.03b
相对含水量/%	顶部	79.99±3.43a	78.59±1.40a	88.59±0.76b	87.07±0.78b	85.01±3.99b	90.27±2.40b
Relative water content (RWC)	1/2处	83.54±1.27a	77.13±2.01a	85.83±0.78a	82.64±1.46a	83.42±1.76a	80.70±1.24a

黑体为沙下部位

2.2 不同厚度沙埋下单叶蔓荆抗叶片氧化酶活力变化

结果表明,沙埋第5天和第10天,随沙埋厚度增加整株单叶蔓荆叶片SOD活力呈增加趋势(表3,表4)。与对照相比,成株整株在轻度、中度、重度沙埋5d,叶片SOD活力分别增加了28.1%、20.2%、54.9%。幼株整株在中度和重度沙埋下叶片SOD活力也分别增加了14.7%、16.5%。但同株沙上叶片SOD活力大于沙下叶片,两者差异明显($P < 0.05$)。沙埋处理提高了沙上植物叶片SOD活力,但却降低了沙下叶片SOD活力。

不同厚度沙埋均使成株和幼株单叶蔓荆整株叶片POD活力增加(表3,表4)。成株在轻度、中度、重度沙

埋处理 5 d, 整株叶片 POD 活力分别较对照增加了 63.5%、34.9%、100.8%, 并与对照差异显著 ($P < 0.05$)。幼株在中度和重度沙埋处理 5 d, 整株叶片 POD 活力也分别增加了 84.8%、13.3%。沙埋 10 d, 单叶蔓荆叶片 POD 活力变化趋势与沙埋 5 d 的一致。但沙埋 5 d 和 10 d, 成株同株沙上叶片 POD 活力高于沙下叶片。

不同厚度沙埋 5 d, 成株单叶蔓荆整株叶片 CAT 活力增加 (表 3)。如在轻度、中度、重度沙埋下, 成株整株叶片 CAT 活力分别较对照增加 10.8%、10.16%、17.4%, 与对照差异不显著。但顶部叶片 CAT 活力均低于对照, 而沙下叶片 CAT 活力大于对照, 且两者差异显著 ($P < 0.05$)。同株沙上叶片 CAT 活力低于沙下叶片。幼株单叶蔓荆在中度和重度沙埋 5 d, 整株叶片 CAT 活力下降了 47.1%、12.7% (表 4)。沙埋 10 d, 成株和幼株单叶蔓荆整株叶片 CAT 活力呈下降趋势。

表 3 沙埋过程中成株单叶蔓荆叶片 POD、SOD 和 CAT 活力的变化

Table 3 The changes in the activities of antioxidant enzymes (POD, SOD, CAT) in the leaves of *V. trifolia* with mature plant under sand burial

项目 Item		对照 Control		轻度沙埋 LSB		中度沙埋 MSB		重度沙埋 SSB	
		5D	10D	5D	10D	5D	10D	5D	10D
SOD	顶部	72.67±1.07a	65.27±2.01a	144.34±6.92b	111.82±7.81b	124.15±3.65c	129.71±2.35c	157.85±4.43d	120.82±6.31c
/(U·g ⁻¹ 鲜重·h ⁻¹)	2/3 处	91.36±6.33a	67.92±2.99a	103.79±3.11b	129.91±10.5b	87.31±1.42a	79.65±6.67a	120.51±1.79c	108.46±7.00c
	1/3 处	99.01±12.32a	62.71±3.92a	109.93±2.31b	118.83±11.2b	105.84±2.31a	99.23±2.38c	130.44±3.41c	120.16±4.52b
POD	顶部	0.74±0.02a	0.45±0.08a	0.70±0.02a	0.36±0.13a	0.95±0.03b	0.85±0.03b	0.96±0.02b	0.84±0.04b
/(μmol H ₂ O ₂ ·min ⁻¹ ·g ⁻¹ 鲜重)	2/3 处	0.35±0.07a	0.29±0.08a	0.67±0.06b	0.38±0.11b	0.37±0.04a	0.39±0.09b	0.62±0.03b	0.40±0.07b
	1/3 处	0.17±0.05a	0.29±0.10a	0.67±0.02b	0.34±0.10b	0.58±0.03b	0.39±0.08b	0.95±0.05c	0.53±0.04c
CAT	顶部	47.80±6.15a	34.82±4.71a	31.55±3.53b	35.32±1.83a	32.26±1.67b	35.79±11.07a	36.34±6.97b	53.15±5.53b
/(μmol H ₂ O ₂ /g 鲜重)	2/3 处	29.23±6.43a	31.92±8.04a	28.91±5.69a	42.35±8.77b	43.75±9.76b	31.11±5.73a	50.73±11.03b	33.40±7.99a
	1/3 处	31.48±4.45a	50.68±12.04a	53.13±1.47b	47.38±11.57a	36.87±1.35a	26.91±4.20b	33.30±8.35a	25.21±7.97b

LSB: light sand burial; MSB: moderate sand burial; SSB: severe sand burial; 黑体为沙下部位

表 4 沙埋过程中幼株单叶蔓荆叶片 POD、SOD 和 CAT 活力的变化

Table 4 The changes in the activities of antioxidant enzymes (POD, SOD, CAT) in the leaves of *V. trifolia* with young plant under sand burial

项目 Item		对照 Control		中度沙埋 MSB		重度沙埋 SSB	
		5D	10D	5D	10D	5D	10D
SOD/(U·g ⁻¹ 鲜重·h ⁻¹)	顶部	105.42±1.99a	104.81±3.79a	110.35±0.97a	117.49±13.4a	126.02±11.05b	138.44±2.42b
	1/2 处	106.8±4.42a	116.11±0.98a	133.15±2.72b	122.67±3.83a	121.30±4.76c	115.57±5.70a
POD	顶部	0.32±0.12a	0.39±0.01a	1.19±0.02b	0.44±0.12a	0.54±0.04a	0.38±0.08a
/(μmol H ₂ O ₂ ·min ⁻¹ ·g ⁻¹ 鲜重)	1/2 处	0.73±0.05a	0.45±0.01a	0.75±0.06a	0.43±0.07a	0.65±0.03a	0.82±0.06b
CAT	顶部	66.28±16.20a	27.65±8.18a	20.05±6.09b	23.46±4.06a	47.89±3.64c	43.73±4.04b
/(μmol H ₂ O ₂ /g 鲜重)	1/2 处	21.4±10.80a	54.51±6.02a	26.32±5.33a	29.74±10.5b	29.91±6.40a	11.17±4.70c

LSB: light sand burial; MSB: moderate sand burial; SSB: severe sand burial; 黑体为沙下部位

2.3 不同厚度沙埋下单叶蔓荆叶片渗透调节物含量的变化

结果表明, 轻度、中度和重度沙埋 5 d, 成株单叶蔓荆整株叶片脯氨酸含量分别较对照增加 4.8%、24.2%、120% (表 5)。但在轻度和中度沙埋下, 沙上叶片脯氨酸含量分别比沙下叶片低 40.4% 和 51.9%, 且两者差异显著 ($P < 0.05$)。随沙埋时间延长 (沙埋 10 d), 成株沙上叶片脯氨酸含量增加, 沙下叶片脯氨酸趋于降低。在轻度和中度沙埋下, 成株沙上叶片脯氨酸含量分别比沙下高 22.9% 和 96.9%。幼株单叶蔓荆叶片脯氨酸对沙埋的响应与成株相同 (表 6)。

然而, 叶片中可溶性糖对沙埋的响应与脯氨酸相反。成株单叶蔓荆在轻度、中度和重度沙埋 5 d, 整株叶片可溶性糖含量较对照分别下降 13.7%、15.7%、26.3%, 但顶部叶片可溶性糖含量高于对照, 同株沙上叶片可溶性糖含量高于沙下 (表 5)。沙埋 10 d, 不同厚度沙埋下, 叶片不仅可溶性糖含量下降, 而且均较对照低。同样沙上叶片可溶性糖略高于沙下。幼株单叶蔓荆叶片可溶性糖对沙埋的响应与成株相同 (表 6)。

表 5 沙埋过程中成株单叶蔓荆叶片脯氨酸和可溶性糖含量的变化

Table 5 The changes in the contents of the proline and soluble sugar in the leaves of *V. trifolia* with mature plant under sand burial

项目 Item		对照 Control		轻度沙埋 LSB		中度沙埋 MSB		重度沙埋 SSB	
		5D	10D	5D	10D	5D	10D	5D	10D
脯氨酸	顶部	0.61±0.02a	0.71±0.03a	0.51±0.06a	1.81±0.06b	0.45±0.09a	2.26±0.47c	1.23±0.15b	1.27±0.11b
Proline content	2/3 处	0.63±0.01a	0.72±0.03a	0.55±0.11a	0.89±0.02b	1.00±0.04b	0.55±0.05c	1.42±0.02b	0.91±0.12b
/(μg/g 鲜重)	1/3 处	0.61±0.02a	0.75±0.03a	0.89±0.03b	0.87±0.10b	0.87±0.09b	0.73±0.01a	1.42±0.19c	0.61±0.08a
可溶性糖	顶部	15.25±0.69a	27.73±1.31a	24.64±1.15b	21.76±0.42a	25.09±0.81b	24.80±2.22a	19.48±0.59a	17.17±2.18b
Soluble sugar	2/3 处	27.83±1.85a	37.05±6.69a	23.37±0.83a	27.06±0.55b	21.47±1.58a	21.96±2.31b	17.18±0.17b	18.47±1.62c
content/(μg/g 鲜重)	1/3 处	37.89±1.58a	37.17±0.91a	21.85±1.62b	24.50±1.11b	21.72±0.39b	21.22±1.58b	22.97±0.64b	15.54±1.39c

表 6 沙埋过程中幼株单叶蔓荆叶片脯氨酸和可溶性糖含量的变化

Table 6 The changes in the contents of the proline and soluble sugar in the leaves of *V. trifolia* with young plant under sand burial

项目 Item		对照 Control		中度沙埋 MSB		重度沙埋 SSB	
		5D	10D	5D	10D	5D	10D
脯氨酸 Proline content	顶部	0.61±0.18a	0.65±0.11a	0.62±0.14a	0.85±0.06ab	1.44±0.37b	1.23±0.17b
/(μg/g 鲜重)	1/2 处	0.60±0.08a	0.70±0.07a	0.88±0.05b	0.84±0.02a	0.88±0.03b	0.68±0.07a
可溶性糖 Soluble sugar	顶部	26.09±0.43a	22.36±0.64a	24.64±0.31a	21.46±0.01a	18.56±1.48b	18.36±2.11a
content(μg/g 鲜重)	1/2 处	24.16±3.46a	22.56±0.71a	23.91±0.56a	21.10±0.68a	22.78±1.33a	15.31±0.43b

LSB; light sand burial; MSB; moderate sand burial; SSB; severe sand burial; 黑体为沙下部位

3 讨论与结论

3.1 沙埋过程中, 叶片细胞膜透性和 MDA 变化与抗氧化酶活力变化的关系

许多研究发现, 细胞膜在植物抗逆性方面起着重要作用, 膜系统的稳定性与植物的抗逆性密切相关^[38]。逆境条件下细胞内积累的氧自由基通过膜脂过氧化作用破坏蛋白质和脂肪等, 最终导致细胞死亡^[39-40]。本研究结果表明, 轻度和中度沙埋 5 d, 成株和幼株整株叶片 MDA 含量的增高伴随有细胞膜透性的增大(表 1); 同株沙上叶片细胞膜透性和 MDA 含量高于沙下叶片; 重度全埋下, 叶片 MDA 含量下降伴随有细胞膜透性降低。可见, 沙埋下叶片细胞膜透性的增加与膜脂过氧化产物 MDA 增多成正相关($R=0.76$), 沙埋导致叶片细胞膜脂过氧化作用加剧是引起细胞膜受损的主要因子。

另外, 研究结果还表明, 轻度和中度沙埋 5 d, 在成株和幼株整株叶片 MDA 含量增高和细胞膜透性增大(表 1, 表 2)的同时, 叶片 POD 和 SOD 活力也增加(表 3, 表 4)。而且同株沙上叶片细胞膜透性、MDA 含量、POD 和 SOD 活力均高于沙下。沙埋条件下, 沙上叶片抗氧化酶活力增高与叶片细胞膜脂过氧化作用增强和细胞膜透性增大呈正相关。随沙埋时间延长(沙埋 10 d), 伴随着沙上叶片细胞膜透性和叶片 MDA 含量趋于下降, 叶片 POD 活力也降低, 叶片 SOD 活力仍有小幅度增高, 而叶片健壮生长。值得注意的是, 重度沙埋 5 d, 成株整株叶片 SOD 和 POD 活力较对照高、MDA 含量增加较少、细胞膜透性没有增大; 沙埋 10 d, 整株叶片 SOD 和 POD 活力、MDA 含量和细胞膜透性降低。这一方面表明, 沙埋胁迫导致氧自由基积累引起细胞膜脂过氧化和细胞膜通透性增大, 但另一方面, 成株和幼株叶片具有对沙埋反应敏感的保护酶系统。在沙埋下细胞通过快速激活抗氧化酶及时抑制氧自由基积累, 维护细胞氧自由基和清除剂平衡这可能是沙埋下沙上单叶蔓荆能旺盛生长、沙下植株茎顶端能快速延伸弯曲生长最后能顶出沙面再生的主要生理保护原因。

此外, 研究结果还显示, 沙埋 5 d, 成株沙上叶片 SOD 和 POD 活力、MDA 含量和细胞膜透性均大于沙下(表 1, 表 3)。有研究表明, 活性氧(ROS)产生于植物光呼吸、光合作用和呼吸作用过程中^[12]。沙埋造成同株沙上和沙下叶片抗氧化酶活力和膜脂过氧化程度不同与其叶片所处环境不同有关。沙埋使远离地表的上部叶片接近沙表面, 导致叶片接受的地面热辐射增多和受干旱和热胁迫加剧。强光照下叶片光呼吸、光合作用诱生活性氧自由基使细胞膜脂过氧化增强和细胞膜透性增大。但反过来, 积累的活性氧自由基也激活抗氧化保护酶系统。但沙埋使沙下叶片处于低温潮湿、黑暗、缺氧和 CO₂ 不足。沙下黑暗和低温抑制了叶片光合作

用并降低了代谢速率也减小了活性氧自由基积累速率,同时也抑制了抗氧化酶活力的增高导致沙下抗氧化酶活力低于沙上。但黑暗和缺氧及 CO_2 不足,引起细胞呼吸代谢紊乱,诱导氧自由基积累和膜脂过氧化导致沙下叶片抗氧化酶活力、细胞膜透性和 MDA 含量大于对照。

3.2 沙埋过程中,叶片渗透调节物的生理调节作用

在盐、低温和干旱胁迫下植物体可快速积累可溶性糖和脯氨酸^[20-24]。脯氨酸是目前所知分布最广的渗透保护物质^[24]。植物缺水时体内脯氨酸含量的增加可作为植物缺水的指标^[35]。本研究结果表明,沙埋 5 d,随着沙埋梯度的增加,成株和幼株单叶蔓荆整株叶片脯氨酸含量和相对含水量均呈增加趋势(表 1,表 2,表 5,表 6)。在轻度和中度沙埋 5 d,成株沙上叶片脯氨酸含量分别比沙下降低 40.5% 和 51.9%,而沙上叶片相对含水量分别比沙下低 2.1% 和 6.3%。沙埋下叶片脯氨酸含量与叶片水分多寡呈正相关。沙埋下单叶蔓荆叶片脯氨酸未参与细胞水分调解。

在轻度和中度沙埋 5 d,成株沙下叶片脯氨酸含量高于沙上(表 5),但 MDA 含量和细胞膜透性却低于沙上(表 1)。重度沙埋 5 d,叶片脯氨酸含量较对照增加了 120%,而叶片 MDA 含量仅增高 17%。沙下叶片脯氨酸增高与沙下细胞膜透性降低和 MDA 含量较低成负相关。而且沙埋 10 d,沙上叶片脯氨酸含量的增加与沙上细胞膜透性和 MDA 含量的下降成负相关。一些研究发现脯氨酸既可清除氧自由基危害,并被认为是氧自由基的清除剂^[41-42]。研究表明,沙埋后沙下叶片积累的脯氨酸在防止膜脂过氧化维护细胞膜稳定上具有重要的生理调节作用上。沙上和沙下叶片脯氨酸含量的差异主要源于所处环境不同。沙上叶片仍能维护光合作用,平衡的碳氮代谢抑制了脯氨酸的合成导致其含量较低。而沙下黑暗、缺氧引起脯氨酸氧化受抑^[43]。叶片碳氮代谢紊乱使细胞中积累的有机氮化物为脯氨酸合成提供了材料,同时代谢紊乱也诱发氧自由基积累。因此,由于单叶蔓荆具有较好的保水能力,沙埋胁迫中叶片脯氨酸的渗透调节作用不是十分明显。而沙下叶片积累的脯氨酸在抑制细胞膜脂过氧化维护细胞膜稳定上起重要作用。

沙埋 5 d 和 10 d,随沙埋厚度增加叶片可溶性糖含量呈下降趋势与沙埋下叶片 RWC 增多成负相关。这不仅表明,沙埋后叶片可溶性糖没有直接参与调解水分平衡,而沙埋后沙上叶片快速生长对光合产物的快速利用是导致叶片可溶性糖含量减少的直接原因。沙下黑暗对光合作用的抑制使沙下叶片中储存的糖可能被用作能量物质而消耗。可见,在植株部分叶片被沙埋后,沙埋叶片中存储的可溶性糖是沙埋后植株快速恢复生长的能源物质。

综上所述,在相同沙埋厚度下,单叶蔓荆幼株具有和成株一样的耐沙埋能力。抗氧化酶和渗透调节物质参与了单叶蔓荆适应沙埋的生理调解过程。沙埋不仅加剧了沙上叶片受干旱和地面热辐射胁迫影响,引起细胞膜脂过氧化加剧和细胞膜透性加大,而且也使沙下叶片遭遇黑暗、缺氧和 CO_2 不足的胁迫,诱导细胞内膜脂过氧化。但沙埋激活了叶片抗氧化酶保护系统和叶片脯氨酸的积累抑制细胞膜脂过氧化维护细胞膜的稳定,叶片中存储的可溶性糖是沙埋下植株快速恢复生长的能源物质。在沙埋胁迫下,单叶蔓荆叶片快速激活抗氧化酶活力抑制膜脂过氧化作用,维持氧自由基积累和清除剂间的动态平衡在其适应轻度和中度沙埋后沙上叶片旺盛生长中起重要作用,也是重度沙埋下,沙下植株茎顶端能快速延伸弯曲生长最后能顶出沙面再生的主要生理保护机制。因此,在海岸沙丘人工单叶蔓荆绿化带建造过程中,可采用适度沙埋以促进植株快速繁衍生长和种群密度增加及绿化带的建成。

References:

- [1] Tang C, Wang H M. *Vitex trifolia* var. *Simplicifolia* — a special plant with higher resistance to salt, drought and ground cover grown on the sandy coast. *Garden*, 2008, (5):65-65.
- [2] Jiao Y J, Zhang D L, Xi J B, Wang K F, Feng Z X. Analysis of soil improvement and community features of *vitex trifolia* var. *Simplicifolia* on the sandy coast. *Protection Forest Science and Technology*, 2001, (4):6-8.
- [3] Song T Y. Effects of *vitex trifolia* on the soil nutrients of coastal sandy lands and *casuarina equisetifolia* growth. *Journal of Fujian Forestry Science and Technology*. 2002, 29(2): 44-45, 53-53.

- [4] Pan Y, Wu L J, Yu Z L. Effect of salt and drought stress on antioxidant enzymes activities and SOD isoenzymes of liquorice (*Glycyrrhiza uralensis Fisch*) Plant Growth Regulation, 2006, 49(2/3): 157-165.
- [5] Meloni DA, Oliva M A, Martinez C A, Cambraia J. Phytosynthesis and activity of superoxide dismutase, peroxidase and glutathione reductase in cotton under salt stress. Environmental Experimental Botany, 2003, 49(1): 69-76.
- [6] Benson E E, Lynch P T, Jones J. The detection of lipid peroxidation products in cryoprotected and frozen rice cells; consequences for post-thaw survival. Plant Science, 1992, 85(1): 107-114.
- [7] Bor M, Özdemir F, Türkan I. The effect of salt stress on lipid peroxidation and antioxidants in leaves of sugar beet *Beta vulgaris* L. and wild beet *Beta maritima* L. Plant Science. 2003, 164(1): 77-84.
- [8] Fleck R A, Day J G, Clarke K J, Benson E E. Elucidation of the metabolic and structural basis for the cryopreservation recalcitrance of *Vaucheria sessilis*. Cryo-Letters, 1999, 20(5): 271-282.
- [9] Rout N P, Shaw B P. Salt tolerance in aquatic macrophytes; possible involvement of the antioxidative enzymes Plant Science. 2001, 160(3): 415-423.
- [10] Boo Y C, Jung J. Water deficit-induced oxidative stress and antioxidative defenses in rice plants. Journal of Plant Physiology. 1999, 155(2): 255-261.
- [11] Gueta-Dahan, Y, Yaniv Z, Zilinskas B A, Ben-Hayyim G. Salt and oxidative stress; similar and specific responses and their relation to salt tolerance in Citrus. Planta, 1997, 203(4): 460-469.
- [12] Korniyev D, Logan B A, Allen R D, Holadag A S. Effect of chloroplastic overproduction of ascorbate peroxidase on photosynthesis and photoproduction in cotton leaves subjected to low temperature photoinhibition. Plant Science, 2003, 165(5): 1033-1041.
- [13] Yamazaki J Y, Ohashi A, Hashimoto Y, Nigishi E, Kumagai S, Kubo T, Oikawa T, Maruta E, Maruta E, Kamimura Y. Effects of high light and low temperature during harsh winter on needle photodamage of *Abies mariesii* growing at the forest limit on Mt. Norikura in Central Japan. Plant Science, 2003, 165(1): 257-264.
- [14] Sreenivasulu N, Grimm B, Wobus U, Weschke W. Differential response of antioxidant components to salinity stress in salt tolerant and salt sensitive seedlings of foxtail millet (*Setaria italica*). Physiologia Plantarum, 2000, 109(4): 435-442.
- [15] Hernandez J A, Jimenez A, Mullineaux P, Sevilla F. Tolerance of pea (*Pisum sativum* L.) to long-term salt stress is associated with induction of antioxidant defenses. Plant Cell and Environment, 2000, 23(8): 853-862.
- [16] Sairam R K, Srivastava G C. Changes in antioxidant activity in sub-cellular fractions of tolerant and susceptible wheat genotypes in response to long-term salt stress. Plant Science, 2002, 162(6): 897-904.
- [17] Zhou R L, Zhao H L. Seasonal pattern of antioxidant enzyme system in the roots of perennial forage grasses grown in alpine habitat related to freezing tolerance. Physiologia Plantarum 2004, 121(3): 399-408.
- [18] Sairam R K, Deshmukh P S, Saxena D C. Role of antioxidant systems in wheat genotypes tolerance to water stress. Biologia Plantarum, 1998, 41(3): 384-394.
- [19] Guo F X, Zhang M X, Chen Y, Zhang W H, Xu S J, Wang J H, An L Z. Relation of several antioxidant enzymes to rapid freezing resistance in suspension cultured cells from alpine *Chorispora bungeana* Cryobiology, 2006, 52(2): 241-250.
- [20] Acar O, Türkan I, Özdemir F. Superoxide dismutase and peroxidase activities in drought sensitive and resistant barley (*Hordeum vulgare* L.) varieties. Acta Physiologiae Plantarum, 2001 23(3): 351-356.
- [21] Chen Y, Zhang M, Chen T, Zhang Y, An L. The relationship between seasonal changes in anti-oxidative system and freezing tolerance in the leaves of evergreen woody plants of Sabina. South African Journal of Botany, 2006, 72(2): 272-279.
- [22] Mutlu S, Atici Ö, Nalbantoglu B. Effects of salicylic acid and salinity on apoplastic antioxidant enzymes in two wheat cultivars differing in salt tolerance. Biologia Plantarum. 2009, 53(2): 334-338.
- [23] Deirdre G, Lelu-Walter M A, Parkinson M. Overproduction of proline in transgenic hybrid larch (*Larix x leptoeuropaea* (Dengler)) cultures renders them tolerant to cold, salt and frost. Molecular Breeding: New Strategies in Plant Improvement, 2005, 15(1): 21-29.
- [24] Slama I, Messedi D, Ghnaya T, Savoure A, Abdelly C. Effects of water deficit on growth and proline metabolism in *Sesuvium portulacastrum*. Environmental Experiment Botany. 2006, 56(3): 231-238.
- [25] Zhou R L, Zhao H L, Chen G D. Seasonal changes in enzymatic antioxidant system in roots of alpine perennial forage grasses related to freezing tolerance. Acta Ecologica Sinica, 2001, 21(6): 865-870.
- [26] Khayatnezhad M, Gholamin R. Effects of water and salt stresses on germination and seedling growth in two durum wheat (*Triticum durum* Desf.) genotypes. Scientific Research and Essays, 2011, 6(21): 4597-4603.
- [27] Sairam R K, Srivastava G C, Saxena D C. Increased antioxidant activity under elevated temperatures: A mechanism of heat stress tolerance in wheat genotypes. Biologia Plantarum. 2000, 43(2): 245-251.

- [28] Wang J, Li D Q. The accumulation of plant osmoticum and activated oxygen metabolism under stress. *Chinese Bulletin of Botany*, 2001, 18(4): 459-465.
- [29] Liu H J, Guo K. The impacts of sand burial on seedling development of *Caragana intermedia*. *Acta Ecologica Sinica*. 2005, 25(10):2550-2555.
- [30] Li Q Y, Zhao W Z. Seedling emergence and growth responses of five desert species to sand burial depth. *Acta Ecologica Sinica*. 2006, 26(6): 1802-1808.
- [31] Zhao Q C, Gou K N, Zhu H W, Tian T, Guan H B. Physiological and biochemical research on *Vitex trifloia* var. *Simplicifolia* under seawater stress. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2010, (3):218-220.
- [32] Cao X X, Liu Q C, Liu Q H, Tang Q H, Wang K L. Effects of salt stress on the seed germination and young seedling growth of *vitex trifolia* var. *simplicifolia*. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2011, 27(8): 53-57
- [33] Bian D X, Zhu J J, Bai X F. Effect of dehydration method on chlorophyll fluorescence characteristics in *vitex trifolia*. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*. 2010, (6):3214-3216.
- [34] Lutts S, Kiner J M, Bouharmont J. NaCl-induced senescence in leaves of rice (*Oryzasativa* L.) cultivars differing in salinity resistance. *Annals of Botany*. 1996, 78(3): 389-398.
- [35] Zhang Z L, Zai W Q. The experimental guide for plant physiology. Beijing: Higher Education Press, 2003. 123-276.
- [36] Sundar D, Perianayaguy B, Ramachandra Reddy A. Localization of antioxidant enzymes in the cellular compartments of sorghum leaves. *Plant Growth Regulation*. 2004, 44(2): 157-163.
- [37] Drackiewicz M, Skórzyńska-Polit E, Krupa Z. Copper-induced oxidative stress and antioxidant defence in *Arabidopsis thaliana*. *BioMetal*, 2004, 17(4): 379-387.
- [38] Kirsti R, Olavi J, Arild E, Nina S. Development of cold tolerance in white clover (*Trifolium repens* L.) in relation to carbohydrate and free amino acid content. *Acta Agriculturae Scandinavica*, 1993, 43(3):151-155.
- [39] Imlay J A, Linn S. DNA damage and oxygen radical toxicity. *Science*, 1988, 240(4857):1302-1309.
- [40] Sairam R K, Tyagi A. Physiology and molecular biology of salinity stress tolerance in plants. *Current Science*, 2004, 86(3): 407-421.
- [41] Elstner E F. Mechanisms of oxygen activation in different compartments of plant cells // Pell E J, Steffen K L, eds. *Active Oxygen/Oxidative Stress and plant Metabolism*. Rockville: American Society of Plant Physiologists, 1990.
- [42] Taschler D, Beikircher B, Neuner G. Frost resistance and ice nucleation in leaves of five woody timberline species measured in situ during shoot expansion. *Tree Physiology*, 2004, 24(3):331-337.
- [43] Delauney A J, Verma D P S. Proline biosynthesis and osmoregulation in plants. *Plant Journey*, 1993, 4(2): 215-223.

参考文献:

- [1] 唐村, 王慧梅. 耐盐、耐旱、固沙地被——单叶蔓荆. *园林*, 2008, (5):65-65.
- [2] 乔勇进, 张敦论, 郝金标, 王开芳, 丰宗新. 沿海沙质海岸单叶蔓荆群落特点及土壤改良的分析. *防护林科技*, 2001, (4):6-8.
- [3] 宋天英. 单叶蔓荆对滨海沙地土壤养分和木麻黄生长的影响. *福建林业科技*, 2002, 29(2):44-45, 53-53.
- [25] 周瑞莲, 赵哈林, 程国栋. 高寒山区植物根抗氧化酶系统的季节变化与抗冷冻的关系. *生态学报*, 2001, 21(6):865-870.
- [28] 王娟, 李德全. 逆境条件下植物体内渗透调节物质的积累与活性氧代谢. *植物学报*, 2001, 18(4):459-465.
- [29] 刘海江, 郭柯. 沙埋对中间锦鸡儿幼苗生长发育的影响. *生态学报*, 2005, 25(10):2550-2555.
- [30] 李秋艳, 赵文智. 五种荒漠植物幼苗出土及生长对沙埋深度的响应. *生态学报*. 2006, 26(6):1802-1808.
- [31] 赵前程, 郭冠男, 朱慧文, 田甜, 关洪斌. 海水胁迫下单叶蔓荆生理生化研究. *江苏农业科学*, 2010, (3):218-220.
- [32] 曹晓晓, 刘庆超, 刘庆华, 唐启和, 王奎玲. 盐胁迫对单叶蔓荆种子萌发及幼苗生长的影响. *中国学通报*, 2011, 27(8): 53-57.
- [33] 卞佃霞, 朱建军, 柏新富. 脱水方式对单叶蔓荆叶绿素荧光特性的影响. *安徽农业科学*, 2010, 6:3214-3216.
- [35] 张志良, 瞿伟菁. *植物生理学实验指导*. 北京:高等教育出版社, 2003:123-276.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 33, No. 6 March, 2013 (Semimonthly)

CONTENTS

Review and Monograph

- Forest health studies based on remote sensing: a review GAO Guanglei, XIN Zhongbao, DING Guodong, et al (1675)
- Progress of agent-based agricultural land change modeling: a review YU Qiangyi, WU Wenbin, YANG Peng, et al (1690)

Autecology & Fundamentals

- Dynamic distribution of *Nemopilema nomurai* in inshore waters of the northern Liaodong Bay, Bohai Sea
..... WANG Bin, QIN Yubo, DONG Jing, et al (1701)
- Full length cDNA cloning and tissue expression of prophenoloxidase from *Oratosquilla oratoria*
..... LIU Haiying, LIU Lianwei, JIANG Yusheng, et al (1713)
- Morphometrics investigation of the skulls, mandibles and molar in *Tupaia belangeri* from Yunnan, Guizhou, Guangxi
..... ZHU Wanlong, JIA Ting, HUANG Chunmei, et al (1721)
- Effects of litter thickness on leaf litter decomposition and enzyme activity of three trees in the subtropical forests
..... JI Xiaoyan, JIANG Hong, HONG Jianghua, et al (1731)
- The photosynthetic carbon fixation characteristics of common tree species in northern Zhejiang
..... ZHANG Jiao, SHI Yongjun, ZHU Yueqing, et al (1740)
- Diurnal changes in the photosynthetic characteristics of two high yield and high quality grasses during different stages of growth
and their response to changes in light intensity GUO Chunyan, LI Jinchuan, YUE Jianying, et al (1751)
- Evaluation technology on drought disaster to yields of winter wheat based on WOFOST crop growth model
..... ZHANG Jianping, ZHAO Yanxia, WANG Chunyi, et al (1762)
- Genetic diversity of *Conocephalus maculatus* of different geographic populations based on mitochondrial DNA control region analysis ...
..... ZHOU Zhijun, SHANG Na, LIU Jing, et al (1770)
- Relationships among female body size, clutch size, and egg size in captive *Deinagkistrodon acutus*
..... HU Minghang, TAN Qunying, YANG Daode (1778)
- The field control of *Bactrocera dorsalis* (Hendel) with parasitoid and sterile male
..... ZHENG Sining, HUANG Juchang, YE Guanglu, et al (1784)
- Allelopathic effects of artemisinin on ectomycorrhizal fungi LI Qian, YUAN Ling, WANG Mingxia, et al (1791)

Population, Community and Ecosystem

- Establishment of integrated methodology for bay ecosystem health assessment and its application in Daya Bay
..... LI Chunhou, LIN Lin, XU Shannan, et al (1798)
- The influence of upwelling and water mass on the ecological group distribution of zooplankton in Zhejiang coastal waters
..... SUN Lufeng, KE Chang, XU Zhaoli, et al (1811)
- Identification of key ecosystem for ecological restoration in semi-arid areas: a case study in Helin County, Inner Mongolia
..... PENG Yu, GAO Ying, FENG Jinzhao, et al (1822)
- The great rainfall effect on soil respiration of *Pinus tabulaeformis* plantation in Taiyue Mountain
..... JIN Guanyi, ZHAO Xiuhai, KANG Fengfeng, et al (1832)
- The litter-fall characteristics and their response to drought stress in the Masson pins forests damaged by acid rain at Chongqing,
China WANG Yihao, WANG Yanhui, YU Pengtao, et al (1842)

Landscape, Regional and Global Ecology

- Thermal environment effect of urban water landscape YUE Wenze, XU Lihua (1852)
- Landscape ecological security pattern associated with the introduction of exotic tree species *Eucalyptus*
..... ZHAO Xiaoqing, HE Chunlan (1860)
- Ecological balance between supply and demand in Chongqing City based on cultivated land ecological footprint method
..... SHI Kaifang, DIAO Chengtai, SUN Xiufeng, et al (1872)
- Effect of elevated CO₂ on methanotrophs in the rhizosphere of rice plant YAN Chen, XU Jing, ZHONG Wenhui, et al (1881)

Resource and Industrial Ecology

- The seawater environment quality evaluation research base on variable fuzzy pattern recognition model KE Lina, WANG Quanming, SUN Xinguo, et al (1889)
- An *in situ* study on biodeposition of ascidian (*Styela plicata*) in a subtropical aquaculture bay, southern China YAN Jiaguo, QI Zhanhui, TIAN Ziyang, et al (1900)
- Distribution of soil NPK nutrient content in deep soil profile of typical apple orchards on the Loess Plateau ZHANG Lina, LI Jun, FAN Peng, et al (1907)
- Soil respiration and its responses to soil moisture and temperature under different tillage systems in dryland maize fields ZHANG Dingchen, CAI Dianxiong, DAI Kuai, et al (1916)
- Photosynthetic characteristics of soybean and salvia in an agroforestry system in the Hilly Region, Shangluo, China PENG Xiaobang, ZHANG Shuoxin (1926)
- Regulation of exogenous brassinosteroid on growth and photosynthesis of *Helianthus tuberosus* seedlings and cadmium biological enrichment under cadmium stress GAO Huiling, LIU Jinlong, ZHENG Qingsong, et al (1935)
- Calibration coefficients of Granier original formula based on sap flow of *Platycladus orientalis* LIU Qingxin, MENG Ping, ZHANG Jinsong, et al (1944)

Research Notes

- An evaluation index system classifying the conservation value of wetland nature reserves based on AHP SUN Rui, CUI Guofa, LEI Ting, et al (1952)
- Root biomass and its distribution of *Azadirachta indica* and *Acacia auriculiformis* plantations in the Dry-hot Valley GAO Chengjie, TANG Guoyong, LI Kun, et al (1964)
- Physiological response of *Vitex trifolia* to sand burial in the sand coast ... ZHOU Ruilian, WANG Jin, YANG Shuqin, et al (1973)
- Soil fertility under different forest types in the Helan and Liupan Mountain ranges of Ningxia Province JIANG Lin, GENG Zengchao, ZHANG Wen, et al (1982)

Opinions

- Dynamic of litterfall in ten typical community types of Xiaoxing'an Mountain, China HOU Lingling, MAO Zijun, SUN Tao, et al (1994)

《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

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)

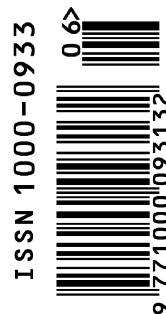
第 33 卷 第 6 期 (2013 年 3 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 6 (March, 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