

三种适生植物对热带珊瑚岛胁迫生境的生理生化响应

林忆雪^{1,2}, 刘慧², 贺鹏程^{2,3}, 吴桂林^{2,3}, 华雷^{2,3}, 张辉², 傅声雷⁴,
刘楠², 王俊², 简曙光², 叶清^{2*}

(1. 仲恺农业工程学院, 广州 510225; 2. 中国科学院华南植物园, 中国科学院退化生态系统植被恢复与管理重点实验室, 广东省应用植物学重点实验室, 广州 510650; 3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 河南大学, 河南 开封 475004)

摘要: 为了解热带珊瑚岛对植物生长的影响, 对狗牙根(*Cynodon dactylon*)、大叶相思(*Acacia auriculaeformis*)和木麻黄(*Casuarina equisetifolia*)在热带珊瑚岛的生态适应性进行了研究。结果表明, 与海南文昌苗木基地的同种植物相比, 珊瑚岛胁迫生境下3种植物叶片中的抗氧化酶活性(SOD、CAT和POD)和脯氨酸含量均显著提高($P < 0.05$); 大叶相思和狗牙根的丙二醛含量也极显著提高($P < 0.01$), 但木麻黄则没有显著变化。这表明这些植物可以通过提高抗氧化酶活性和渗透调节物质含量来适应珊瑚岛的胁迫生境。

关键词: 生态适应性; 适生植物; 胁迫环境; 热带珊瑚岛

doi: 10.11926/jtsb.3755

Physiological and Biochemical Responses of Three Species to Environment Stresses of Tropical Coral Islands

LIN Yi-xue^{1,2}, LIU Hui², HE Peng-cheng^{2,3}, WU Gui-lin^{2,3}, HUA Lei^{2,3}, ZHANG Hui², FU Sheng-lei⁴,
LIU Nan², WANG Jun², JIAN Shu-guang², YE Qing^{2*}

(1. Zhongkai University of Agriculture and Engineering, Guangzhou 510225, China; 2. Key Laboratory of Vegetation Restoration and Management of Degraded Ecosystems, Guangdong Provincial Key Laboratory of Applied Botany, South China Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. Henan University, Kaifeng 475004, Henan, China)

Abstract: In order to understand the effect of the environment of tropical coral islands on plant growth, the ecological adaptability of three species grown in tropical coral islands was studied, including *Cynodon dactylon*, *Acacia auriculaeformis* and *Casuarina equisetifolia*. The results showed that the antioxidant enzyme activities, such as SOD, CAT and POD, and proline content in three species grown in coral islands increased significantly ($P < 0.05$) compared with the same species grown in Seedling Base in Wenchang, Hainan Province. The malondialdehyde content in leaves of *A. auriculaeformis* and *C. dactylon* grown in coral islands also significantly increased ($P < 0.01$), while it had no difference in *C. equisetifolia*. Therefore, it was indicated that these species would adapt well to the harsh environmental conditions on the coral island through enhanced activities of antioxidant enzymes and increased contents of osmotic adjustment substances.

Key words: Ecological adaptability; Suitable plant; Stress environment; Tropical coral island

收稿日期: 2017-04-21 接受日期: 2017-07-23

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC1403002); 中国科学院A类战略性先导科技专项(XDA13020500); “十二五”农村领域国家科技计划项目(2015BAL04B04)资助

This work was supported by the Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences (Grant No. XDA13020500), the National Key Research and Development Program of China (Grant No. 2016YFC1403002), and the National Science and Technology Plan Project in Rural Area in 12th Five-Year (Grant No. 2015BAL04B04).

作者简介: 林忆雪, 女, 硕士研究生, 从事植物生理生态研究。E-mail: yixue-lin@qq.com

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: qye@scib.ac.cn

中国热带珊瑚岛(礁)多由珊瑚沙堆积形成, 缺少真正的土壤及肥力, 且具有高盐、强碱、高温和强光等极端环境特点, 植物极难生长、定居, 无法形成宜居的生态环境。植被是海岛三个基本组成要素之一, 具有供给、调节、文化和支持服务等生态系统服务功能, 是人类和其它动物赖以生存的基础, 可以为物种保育提供基础, 也是海岛宜居和可持续发展的基础。海岛植被在自然和人为因素干扰下极易退化, 退化后其生物、土壤和水分条件很难支撑重建或恢复, 因此, 进行珊瑚岛的植被构建具有必要性和紧迫性^[1-3]。由于珊瑚岛(礁)特殊的恶劣生境, 只有少数能耐盐碱、干旱、贫瘠等极端环境特点的热带海滨植物才能在珊瑚岛存活生长。研究这些植物对原生境条件和极端环境的响应规律和适应机制, 有助于深入理解热带珊瑚岛植物定居的限制机制, 可为热带珊瑚岛植被重建的工具种筛选、种植、养护及应用等技术提供重要的参考和理论基础。

环境胁迫会直接或间接引起植物的一系列代谢功能的变化, 这些变化可以作为鉴定植物抗逆性的重要指标^[4]。植物自身存在的抗氧化系统, 可以在逆境条件下保护植物的膜系统, 清除植物体内多余的自由基^[5]。抗氧化系统是由许多酶和还原性物质组成, 其中超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)和过氧化物酶(POD)是主要的抗氧化酶。张永峰等^[5]指出 SOD 在植物抵抗干旱和盐害的过程中, 主要功能是清除氧离子, 以防止和中断膜脂过氧化, 对细胞膜系统损伤起保护作用。CAT 是催化 H_2O_2 分解成氧和水的酶, 存在于细胞的过氧化物体内, 其功能是催化细胞内过氧化氢的分解防止过氧化, 以维持植物体内的 H_2O_2 处在低浓度水平。POD 在植物体内广泛存在, 是活性较高的一种酶。它与呼吸作用、光合作用及生长素的氧化等都有关系, 同时也是催化 H_2O_2 降解的一种重要的防御酶。脯氨酸(Pro)是植物蛋白质的主要组成部分, 当植物受到干旱胁迫和盐胁迫时, Pro 可作为渗透剂参与植物的渗透调节作用, 增强植物对渗透胁迫的耐性, 因此干旱胁迫和盐胁迫会导致植物体内 Pro 含量的积累增加^[4,6]。丙二醛(MDA)是细胞膜脂质过氧化最终分解的产物, 其含量可以反映植物遭受高盐、干旱等胁迫伤害的程度, 是膜系统受伤害的重要指标之一^[7]。MDA 的产生会加剧膜的损伤, 因此, MDA 产生数量的多少能够代表膜脂过氧化的程度, 也可

间接反映植物组织的抗氧化能力的强弱。植物叶片中 MDA 含量越高, 说明细胞膜脂过氧化作用越强, 该物种的抗逆性可能就越弱。目前对热带珊瑚岛适生植物的生理生态学特征研究还较少。李捷等综合了热带珊瑚岛的苗木生长、存活及光合等数据, 分析推荐了草海桐(*Scaevola sericea*)、红厚壳(*Calophyllum inophyllum*)、海刀豆(*Canavalia maritima*)和榄仁树(*Terminalia catappa*)等物种可用于珊瑚岛的植被重建^[1], 但仍需要更多的物种来增加热带珊瑚岛的生物多样性, 构建稳定的植物群落。本研究基于前期对西沙群岛植物调查和热带珊瑚岛礁植被构建试验与示范结果, 选取狗牙根(*Cynodon dactylon*)、大叶相思(*Casuarina equisetifolia*)和木麻黄(*Casuarina equisetifolia*)等 3 种适宜热带珊瑚岛生长的植物, 以海南省文昌市苗木基地为对照, 测定两种环境下植物的生理生化指标, 分析两种环境下 3 种植物抗氧化系统的适应途径和策略, 以期对热带珊瑚岛植被重建提供理论支持。

1 材料和方法

1.1 研究地概况

本研究的热带珊瑚岛位于海南省, 属热带季风海洋性气候; 光照强烈, 年平均气温约 $28^{\circ}C$, 年平均降水量约 2800 mm, 但降水分配不均, 雨季旱季明显, 雨季占 80% 以上的降水, 旱季降水较少, 且时间长达 4~5 个月; 海拔约 5 m, 现有土壤基质为珊瑚沙, 缺少真正的土壤结构(直径大于 0.5 mm 的粗颗粒约占 80%, 稳定性和保水保肥性差), 缺养分; 盐碱度高, 含水量极低; 加上当地高温(极端高温达 $56^{\circ}C$ 或以上)、强光、多台风和雨旱交替明显等气候环境条件, 植物极难存活或定居。珊瑚岛上移植的苗木来自苗木基地, 位于海南省文昌市郊区, 东经 $110^{\circ}45'$, 北纬 $19^{\circ}31'$, 属热带季风海洋性气候; 年降水量约 1800 mm, 年平均气温约 $24^{\circ}C$; 基地地势低平, 平原阶地, 海拔约 10 m, 土壤类型为滨海沉积物沙壤土。

1.2 材料

狗牙根(*Cynodon dactylon*)是禾本科(Poaceae)草本地被植物, 生长于全球温暖潮湿和温暖半干旱地区, 极耐热和抗旱, 近年来在其抗盐机制研究上取得了一些成果^[8]。大叶相思(*Casuarina equisetifolia*)

是豆科(Leguminosae)乔木,我国自引种以来,已在全国大面积种植,在荒山绿化、薪炭林经营、水土保持及公路建设中发挥了重要作用,在其栽培、抚育管理、遗传改良、种源选择方面都已进行了大量的研究^[9]。木麻黄(*Casuarina equisetifolia*)是木麻黄科(Casuaraceae)乔木,是重要的防护林、用材林和多用途林树种,其对防台风和海啸危害,防海浪侵蚀、固沙,对海岸带生态系统的恢复,对贫瘠的沿海沙地和严重退化的南方山区丘陵地区的土壤改良等均有重要作用^[10]。选择这 3 种植物作为热带珊瑚岛的植被重建工具种是因为他们具有一定的生态适应性,这些苗木于 2015 年前种植于海南省文昌市苗木基地,于 2015 年 5 月移植到珊瑚岛。

1.3 方法

健康植株于 2015 年 5 月运输到珊瑚岛后,在 3 d 内完成种植。在修整去除大石块等杂物的平地种植,并在种植穴中施入客土以及基肥,回填客土,浇水定根。其中狗牙根移植 200 m²,大叶相思和木麻黄各移植 20 株。

植物性状测定于 2016 年 5 月全部完成,取样时,文昌的植物长势良好,珊瑚岛的植物长势一般。叶片采集于傍晚时分(19:00 左右),排除幼叶及残缺叶,选择叶片完全展开、长势良好的成熟叶片,每种植物选择 5 株苗木,每株苗木选择 3~5 片叶片,保证样品鲜重在 50 g 左右。采集后样品马上装入带有湿水滤纸的密封袋中,密封袋置于装有冰砖的密封盒里,迅速带回实验室进行测定,每个指标测定 3~5 个重复。

超氧化物歧化酶(SOD)活性 采用氮蓝四唑法^[11]测定,以抑制 NBT 光化学还原的 50%为 1 个酶还原单位,用 U g⁻¹ FW 表示。

过氧化氢酶(CAT)活性 采用紫外吸收法^[12]测定,以 1 min 内 A₂₄₀降低 0.10 为 1 个酶活性单位,用 U g⁻¹ FW 表示。

过氧化物酶(POD)活性 采用愈创木酚显色法^[12]测定,以 1 min 内 470 nm 下的光密度(D_{470 nm})变化 0.10 为 1 个酶活性单位,用 U g⁻¹ FW 表示。

叶片游离脯氨酸(Pro)含量的测定 采用磺基水杨酸提取,酸性茚三酮染色法^[13]测定。

丙二醛(MDA)含量的测定 采用硫代巴比妥酸法^[13]测定。

1.4 数据统计和分析

采用 Excel 2013 及 Origin 8.5 进行简单数据整理及作图,结合 IBM SPSS 20.0 对不同生境同种植物的性状进行独立样本 *t* 检验。

2 结果和分析

2.1 抗氧化酶活性

从图 1 可见,在两种环境下,3 种植物叶片的 SOD、CAT 和 POD 活性均出现显著变化,热带珊瑚岛植物的酶活性显著提高($P < 0.05$),大叶相思的 3 种酶活性均提高了 1.5~2 倍;狗牙根的 CAT 活性提高了 2.5 倍;木麻黄的 POD 活性提高最多,接近

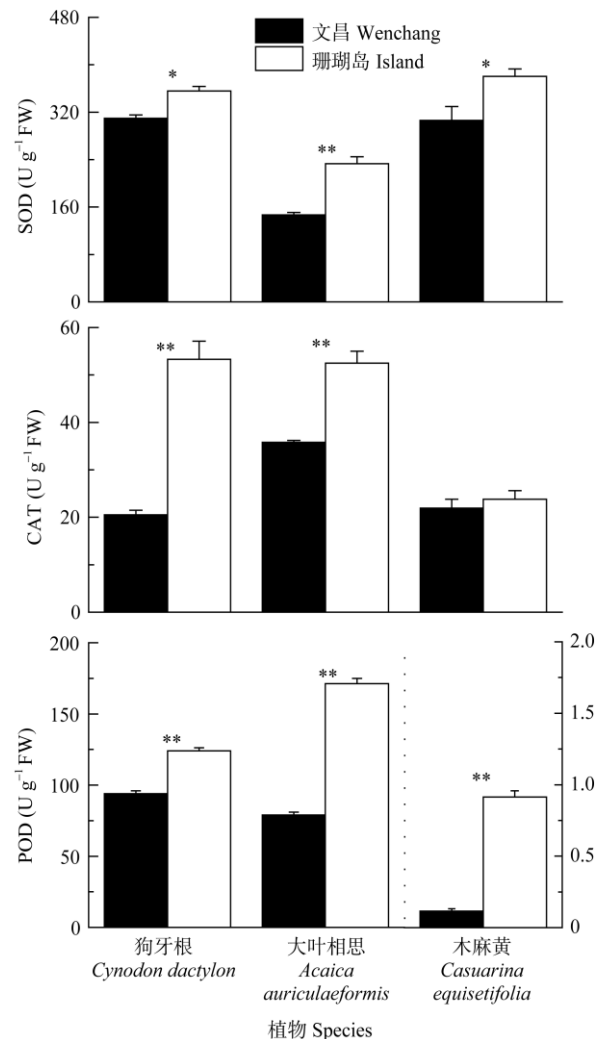


图 1 两地植物的 SOD、CAT 和 POD 活性比较。**: $P < 0.01$; *: $P < 0.05$; $n = 6$ 。

Fig. 1 Comparison of SOD, CAT and POD activities in leaves of three species in two sites. **: $P < 0.01$; *: $P < 0.05$; $n = 6$ 。

9 倍,但在苗木基地木麻黄的 POD 活性极低,而大叶相思和狗牙根的 POD 活性是其 800~1000 倍。

2.2 脯氨酸(Pro)和丙二醛(MDA)的含量

珊瑚岛上 3 种植物的 Pro 含量与文昌的都有极显著差异($P < 0.01$),表现为 Pro 含量显著增加(图 2: A),狗牙根增加了 7.5 倍,大叶相思增加了 3 倍,木麻黄增加的最少,仅 1.6 倍。文昌和珊瑚岛的植物叶片 MDA 含量也不同(图 2: B),珊瑚岛的大叶相思

和狗牙根的 MDA 含量均极显著上升($P < 0.01$),均上升了 1 倍左右,而木麻黄的 MDA 含量没有显著差异,在珊瑚岛的还略微下降。

2.3 植物生长情况

从表 1 可以看出,种植在文昌和珊瑚岛的狗牙根盖度均为 100%。而从株高和胸径上可以看出,虽珊瑚岛的大叶相思和木麻黄长势稍差于文昌苗圃,但差异并不显著,处于同一水平。

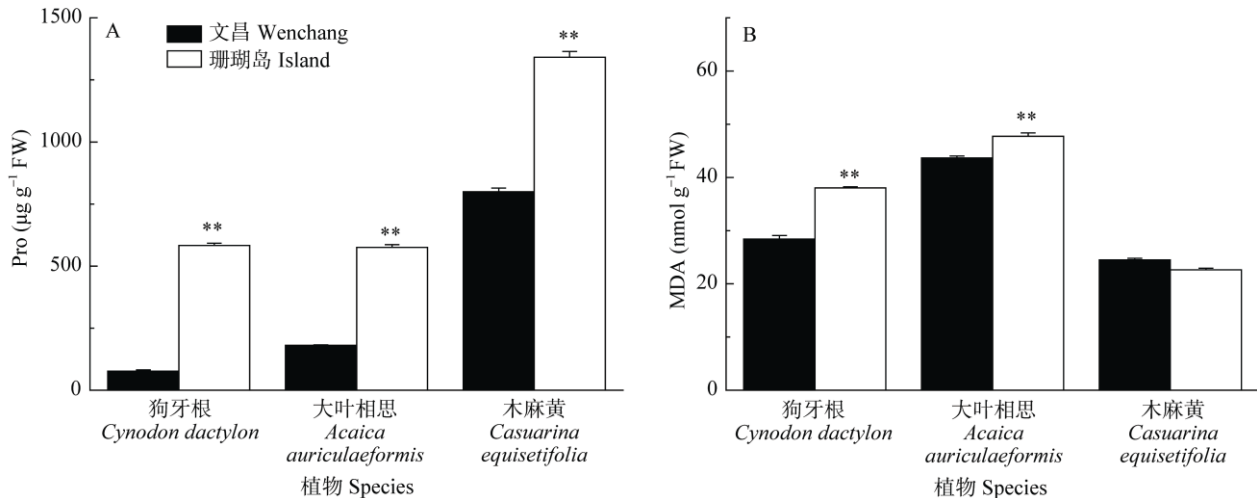


图 2 两地植物的 Pro 和 MDA 含量比较。**: $P < 0.01$; *: $P < 0.05$; $n = 6$ 。

Fig. 2 Comparison of Pro and MDA contents in leaves of three species in two sites. **: $P < 0.01$; *: $P < 0.05$; $n = 6$ 。

表 1 珊瑚岛和文昌苗圃植物生长情况对比

Table 1 Growth status of plants in coral islands and Seedling Base in Wenchang

	狗牙根 <i>Cynodon dactylon</i>	大叶相思($n=20$) <i>Acaica auriculaeformis</i>	木麻黄($n=20$) <i>Casuarina equisetifolia</i>
株高 Height (m)			
珊瑚岛 Coral islands		2.18 ± 0.15	3.51 ± 0.06
苗圃 Seedling Base		2.51 ± 0.18	3.13 ± 0.05
胸径 Diameter at breast height (DBH, cm)			
珊瑚岛 Coral islands		1.75 ± 0.11	2.49 ± 0.16
苗圃 Seedling Base		2.43 ± 0.12	3.12 ± 0.07
盖度 Coverage (%)			
珊瑚岛 Coral islands	100		
苗圃 Seedling Base	100		

3 讨论和结论

3.1 两地植物抗氧化酶活性的差异

SOD、CAT 和 POD 是植物体内抗氧化还原系统中最主要的酶, SOD 催化氧离子形成 H_2O_2 , 再由 CAT 和 POD 将 H_2O_2 转化分解^[14]。本研究中珊瑚岛上 3 种植物的 SOD 活性都明显增强, 表明植物在遭受逆境胁迫时, 产生的氧自由基增多, 为了抵抗逆境的伤害, SOD 活性增加, 以便清除氧自由

基, 减少膜脂过氧化^[2]。

CAT 是催化 H_2O_2 分解成氧和水的酶, 可防止细胞过氧化。本研究中珊瑚岛上 3 种植物的 CAT 活性都有升高或显著升高, 说明其在发挥抗氧化酶的功能, 表明抗氧化系统能增强植物清除活性氧的能力, 保证了膜结构的完整和功能^[15]。植物体内对 H_2O_2 的清除不单是 CAT 这一种酶的作用^[16], POD 与呼吸作用、光合作用及生长素的氧化等都有关系, 同时也是催化 H_2O_2 降解的一种重要的防御酶。

本研究中珊瑚岛上 3 种植物的 POD 活性都显著升高,体现了植物对逆境的适应能力,可以缓解干旱和盐碱环境对植物造成的不利影响。王振镒等^[17]对玉米(*Zea mays*)和克热木·伊力等^[18]对阿月浑子(*Pistacia vera*)的研究表明,较抗逆境的植物品种在重度胁迫下表现为 POD 活性上升。木麻黄的 POD 活性虽然也明显增强,但是其整体活性极低,远远低于其他 2 种植物,说明 POD 并不是木麻黄体内的主要抗氧化酶,它可能是通过 SOD 和 CAT 来调节体内的抗氧化系统的。

3.2 两地植物叶片脯氨酸(Pro)和丙二醛(MDA)含量的差异

大量研究表明,当植物受到干旱胁迫和盐胁迫时会导致植物体内脯氨酸(Pro)的含量积累增加。移植到珊瑚岛上的 3 种植物均表现 Pro 含量增加,这与前人的研究结果相同,在一定范围内,植物受到的干旱胁迫或盐胁迫强度越大,Pro 积累越明显^[19-20],此时 Pro 可作为调节剂参与植物的渗透调节作用^[17]。

丙二醛(MDA)含量越高,说明细胞膜脂过氧化作用越强,植物的抗逆性就越弱。本研究结果表明,在珊瑚岛上的木麻黄 MDA 含量没有显著变化,略微降低,表明其对珊瑚岛的逆境条件比较适应,干旱及其他逆境胁迫并没有损伤到植物细胞膜,这极有可能是植株体内抗氧化酶活性升高清除了氧自由基的直接结果^[21]。

在大叶相思和狗牙根中,其 MDA 含量显著上升,虽然其抗氧化酶系统的功能也是整体增加了,这可能是其调节能力有限,因此体内还是积累了一些氧自由基没有被抗氧化酶系统清除,进而引起膜过氧化并最终导致了 MDA 含量的增加^[2]。丁玉梅等^[22]对耐旱性马铃薯(*Solanum tuberosum*)的研究表明,植株中 MDA 含量增高,推测可能是植株中的膜脂过氧化作用加剧,在水分胁迫下植株中与清除细胞膜脂过氧化作用产物的相关生理生化代谢也随之被激活,但主要的机理还需要更加深入的了解其抗氧化的理化代谢途径。

3.3 两地植物生长情况

珊瑚岛上植物在种植初期,都在种植穴中施入客土以及基肥,保证了植物幼苗初期的生长,也为植物后期生长提供了部分肥力。这点尤其体现在狗

牙根上,缓释肥料对狗牙根的效果持久^[23],加上草本需要肥料较少,所以在生长后期受到基肥的影响仍比较大,长势也更好,覆盖度达到 100%,和文昌一样的覆盖水平。而大叶相思和木麻黄则需要较多肥力,基肥供应不如狗牙根充足,后期长势虽不如狗牙根但是也在健康水平。

珊瑚岛礁的胁迫环境(高温、强光、干旱和盐碱)对植物的生存和生长具有重要影响,因此,在进行海岛植被重建过程中,选择潜在适生植物应考虑植物对这些逆境的适应能力。本研究表明,狗牙根、大叶相思和木麻黄不仅能通过增强整体的抗氧化酶系统来适应珊瑚岛的环境,并且还可以通过脯氨酸含量的升高以提高对渗透胁迫的耐受性。从植物生长情况来看,狗牙根在珊瑚岛上的生长更具有优越性,大叶相思和木麻黄次之。本研究提供了岛礁植物生长的生理生化基础数据,对热带珊瑚岛的植被重建和恢复具有重要参考价值。

参考文献

- [1] LI J, LIU N, REN H, et al. Ecological adaptability of seven plant species to tropical coral island habitat [J]. *Ecol Environ Sci*, 2016, 25(5): 790-794. doi: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2016.05.009.
李婕, 刘楠, 任海, 等. 7 种植物对热带珊瑚岛环境的生态适应性 [J]. *生态环境学报*, 2016, 25(5): 790-794. doi: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2016.05.009.
- [2] YOU C J, HOU P X, DENG C F, et al. Investigation of tourism resources in Xisha Islands [J]. *Resour Sci*, 2015, 37(8): 1609-1620.
游长江, 侯佩旭, 邓灿芳, 等. 西沙群岛旅游资源调查与评价 [J]. *资源科学*, 2015, 37(8): 1609-1620.
- [3] LI P, HUANG Z L. A study on vegetation restoration for the degenerated sloping grassland in Nan'ao Island [J]. *Trop Geogr*, 2007, 27(1): 21-24.65. doi: 10.3969/j.issn.1001-5221.2007.01.005.
李萍, 黄忠良. 南澳岛退化草坡的植被恢复研究 [J]. *热带地理*, 2007, 27(1): 21-24.65. doi: 10.3969/j.issn.1001-5221.2007.01.005.
- [4] GUI Z, GAO J M. Influence of 6 alfalfa varieties on free proline content and SOD activity in salt stress [J]. *J Tianjin Agric Univ*, 2007, 14(4): 18-21. doi: 10.3969/j.issn.1008-5394.2007.04.005.
桂枝, 高建明. 盐胁迫对 6 个苜蓿品种脯氨酸含量和超氧化物歧化酶活性的影响 [J]. *天津农学院学报*, 2007, 14(4): 18-21. doi: 10.3969/j.issn.1008-5394.2007.04.005.
- [5] ZHANG Y F, YIN B. Influences of salt and alkali mixed stresses on antioxidative activity and MDA content of *Medicago sativa* at seedling stage [J]. *Acta Pratac Sin*, 2009, 18(1): 46-50. doi: 10.3321/j.issn:

- 1004-5759.2009.01.007.
- 张永峰, 殷波. 混合盐碱胁迫对苗期紫花苜蓿抗氧化酶活性及丙二醛含量的影响 [J]. 草业学报, 2009, 18(1): 46-50. doi: 10.3321/j.issn:1004-5759.2009.01.007.
- [6] ZHANG H P, NIU J Y, XUAN C X, et al. Effects of drought stress and rewatering on content of proline and malondialdehyde in pea leaves [J]. J Gansu Agric Univ, 2008, 43(5): 50-54. doi: 10.3969/j.issn.1003-4315.2008.05.010.
- 张红萍, 牛俊义, 轩春香, 等. 干旱胁迫及复水对豌豆叶片脯氨酸和丙二醛含量的影响 [J]. 甘肃农业大学学报, 2008, 43(5): 50-54. doi: 10.3969/j.issn.1003-4315.2008.05.010.
- [7] ZHAO F B, WANG L Q, JI G H, et al. Effects of NaCl stress on plant biology indicators and MDA content of 3 submerged plants [J]. Environ Poll Control, 2012, 34(10): 40-44. doi: 10.3969/j.issn.1001-3865.2012.10.009.
- 赵风斌, 王丽卿, 季高华, 等. 盐胁迫对 3 种沉水植物生物学指标及叶片中丙二醛含量的影响 [J]. 环境污染与防治, 2012, 34(10): 40-44. doi: 10.3969/j.issn.1001-3865.2012.10.009.
- [8] CHEN J B, LIU J X. Salinity tolerance evaluation and mechanisms in bermudagrass (*Cynodon spp.*) [J]. Acta Pratac Sin, 2012, 21(5): 302-310.
- 陈静波, 刘建秀. 狗牙根抗盐性评价及抗盐机理研究进展 [J]. 草业学报, 2012, 21(5): 302-310.
- [9] ZHANG W H, ZHANG F Q, ZHANG S G, et al. Analysis on major physiological components for drought-resistance of *Acacia auriculaeformis* [J]. J Zhejiang For Sci Technol, 2005, 25(6): 15-19. doi: 10.3969/j.issn.1001-3776.2005.06.004.
- 张卫华, 张方秋, 张守攻, 等. 大叶相思抗旱性生理指标主成分分析 [J]. 浙江林业科技, 2005, 25(6): 15-19. doi: 10.3969/j.issn.1001-3776.2005.06.004.
- [10] ZHONG C L, BAI J Y, ZHANG Y. Introduction and conservation of *Casuarina* trees in China [J]. For Res, 2005, 18(3): 345-350. doi: 10.3321/j.issn:1001-1498.2005.03.02.
- 仲崇禄, 白嘉雨, 张勇. 我国木麻黄种质资源引种与保存 [J]. 林业科学研究, 2005, 18(3): 345-350. doi: 10.3321/j.issn:1001-1498.2005.03.02.
- [11] ZHENG B S. Research Techniques in Contemporary Plant Physiology and Biochemistry [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2006: 91-92.
- 郑炳松. 现代植物生理生化研究技术 [M]. 北京: 气象出版社, 2006: 91-92.
- [12] SUN Q, HU J J. Research Technology of Plant Physiology [M]. Yangling: Northwest Agricultural and Forestry University Press, 2006: 167-170.
- 孙群, 胡景江. 植物生理学研究技术 [M]. 杨凌: 西北农林科技大学出版社, 2006: 167-170.
- [13] ZHANG Z A, ZHANG M S, WEI R H. Experimental Guidance in Plant Physiology [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2004: 138-141.
- 张志安, 张美善, 蔚荣海. 植物生理学实验指导 [M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2004: 138-141.
- [14] ZHANG X Q, ZHAO Y Z, WANG S J. Responses of antioxidant defense system of epilithic mosses to drought stress in karst rock desertified areas [J]. Acta Geochim, 2017, 36(2): 205-212. doi: 10.1007/s11631-017-0140-z.
- [15] LIU J X, HU H B, ZHAO G L. Effects of alkaloid extract from *Peganum multiseptum* on growth and some physiological characteristics of *Zea mays* seedlings [J]. Acta Pratac Sin, 2007, 16(1): 75-80. doi: 10.3321/j.issn:1004-5759.2007.01.013.
- 刘建新, 胡浩斌, 赵国林. 多裂骆驼蓬中生物碱类物质对玉米幼苗生长及某些生理特性的影响 [J]. 草业学报, 2007, 16(1): 75-80. doi: 10.3321/j.issn:1004-5759.2007.01.013.
- [16] GONG J R, ZHAO A F, ZHANG L X, et al. A comparative study on anti-oxidative ability of several desert plants under drought stress [J]. Acta Bot Boreali-Occid Sin, 2004, 24(9): 1570-1577. doi: 10.3321/j.issn:1000-4025.2004.09.002.
- 龚吉蕊, 赵爱芬, 张立新, 等. 干旱胁迫下几种荒漠植物抗氧化能力的比较研究 [J]. 西北植物学报, 2004, 24(9): 1570-1577. doi: 10.3321/j.issn:1000-4025.2004.09.002.
- [17] WANG Z Y, GUO A G, LUO S P. Effect of water stress on SOD and POD activities and isoenzyme of corn [J]. Acta Univ Septentri Occid Agric, 1989, 17(1): 45-49.
- 王振镒, 郭蔼光, 罗淑萍. 水分胁迫对玉米 SOD 和 POD 活力及同工酶的影响 [J]. 西北农业大学学报, 1989, 17(1): 45-49.
- [18] KARIM ALI, YUAN L, QIMAN YUNUS, et al. Effects of salt tolerance on activity of SOD, CAT, POD of pistachio [J]. Xinjiang Agric Sci, 2004, 41(3): 129-134. doi: 10.3969/j.issn.1001-4330.2004.03.001.
- 克热木 伊力, 袁琳, 齐曼 尤努斯, 等. 盐胁迫对阿月浑子 SOD、CAT、POD 活性的影响 [J]. 新疆农业科学, 2004, 41(3): 129-134. doi: 10.3969/j.issn.1001-4330.2004.03.001.
- [19] LU J J, DUO L A, LIU X J. Changes in SOD and POD activity and free proline content of *Lolium perenne* and *Festuca elata* leaves under different levels of salt stress [J]. Bull Bot Res, 2004, 24(1): 115-119. doi: 10.3969/j.issn.1673-5102.2004.01.027.
- 卢静君, 多立安, 刘祥君. 盐胁迫下两草种 SOD 和 POD 及脯氨酸

- 动态研究 [J]. 植物研究, 2004, 24(1): 115–119. doi: 10.3969/j.issn.1673-5102.2004.01.027.
- [20] LUO J X, MA L, CHAI C J, et al. Effect of drought stress on growth and MDA and proline of *Cotoneaster hjelmqvistii* [J]. J Tianjin Agric Sci, 2009, 15(1): 1–4. doi: 10.3969/j.issn.1006-6500.2009.01.001.
- 骆建霞, 马莉, 柴慈江, 等. 干旱胁迫对海姆维斯蒂栒子生长及丙二醛和脯氨酸含量的影响 [J]. 天津农业科学, 2009, 15(1): 1–4. doi: 10.3969/j.issn.1006-6500.2009.01.001.
- [21] WANG L X, ZHAO Z G, WANG S M. Effect of nitric oxide on metabolism of reactive oxygen species and membrane lipid peroxidation in *Triticum aestivum* leaves under water stress [J]. Acta Pratac Sin, 2006, 15(4): 104–108. doi: 10.3321/j.issn:1004-5759.2006.04.017.
- 王罗霞, 赵志光, 王锁民. 一氧化氮对水分胁迫下小麦叶片活性氧代谢及膜脂过氧化的影响 [J]. 草业学报, 2006, 15(4): 104–108. doi: 10.3321/j.issn:1004-5759.2006.04.017.
- [22] DING Y M, MA L H, ZHOU X G, et al. Effects of drought stress on free proline and malonaldehyde contents in potato leaves and correlation analysis of drought-tolerant level among different varieties [J]. SW China J Agric Sci, 2013, 26(1): 106–110. doi: 10.3969/j.issn.1001-4829.2013.01.022.
- 丁玉梅, 马龙海, 周晓罡, 等. 干旱胁迫下马铃薯叶片脯氨酸、丙二醛含量变化及与耐旱性的相关性分析 [J]. 西南农业学报, 2013, 26(1): 106–110. doi: 10.3969/j.issn.1001-4829.2013.01.022.
- [23] CAO K, WANG J H, TAO X D, et al. Effect of slow release fertilizer on turf quality of bermudagrass [J]. J Zhejiang Agric Sci, 2008, (01): 27–29. doi: 10.16178/j.issn.0528-9017.2008.01.032.
- 曹凯, 王建红, 陶晓东, 等. 缓释肥料对狗牙根草坪质量的影响 [J]. 浙江农业科学, 2008(1): 27–29. doi: 10.16178/j.issn.0528-9017.2008.01.032.