

# 海滨木巴戟的生理生态特征研究

韩涛涛<sup>1,2</sup>, 刘楠<sup>1</sup>, 宋光满<sup>3</sup>, 陈昊雯<sup>4</sup>, 张炜<sup>1</sup>, 刘慧<sup>1</sup>, 简曙光<sup>1</sup>, 王俊<sup>1</sup>, 任海<sup>1\*</sup>

(1. 广东省应用植物学重点实验室, 中国科学院华南植物园, 广州 510650; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 仲恺农业工程学院园艺园林学院, 广州 510225; 4. 湖南大学生物学院, 长沙 410082)

**摘要:** 为了解海滨木巴戟(*Morinda citrifolia*)生长的抗逆性, 对西沙群岛东岛的海滨木巴戟的生物学和生理生态特征进行了研究。结果表明, 海滨木巴戟属于阳生性植物, 具有较强的光资源竞争能力; 其叶片氮、磷含量、叶绿素 b 含量较高, 是其长期适应热带海岛生境的重要原因。海滨木巴戟叶片的海绵组织及气孔密度大, 导管直径小, 丙二醛含量、超氧化物歧化酶活性和过氧化氢酶活性高, 脯氨酸含量低, 均表明其具有较强的抗旱性。且生长环境中土壤的氮含量低, 盐分含量高。因此, 海滨木巴戟可作为热带海滨植被恢复中的优良适生物种。

**关键词:** 药用植物; 海滨植物; 海滨木巴戟; 生理生态; 开发利用

doi: 10.11926/jtsb.3811

## Eco-physiological Characteristics of *Morinda citrifolia*

HAN Tao-tao<sup>1,2</sup>, LIU Nan<sup>1</sup>, SONG Guang-man<sup>3</sup>, CHEN Hao-wen<sup>4</sup>, ZHANG Wei<sup>1</sup>, LIU Hui<sup>1</sup>, JIAN Shu-guang<sup>1</sup>, WANG Jun<sup>1</sup>, REN Hai<sup>1\*</sup>

(1. Guangdong Provincial Key Laboratory of Applied Botany, South China Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. College of Horticulture & Landscape Architecture, Zhongkai University of Agriculture and Engineering, Guangzhou 510225, China; 4. College of Biology, Hunan University, Changsha 410082, China)

**Abstract:** In order to understand the resistance of *Morinda citrifolia*, its eco-physiological characteristics were studied grown in Dongdao of Xisha Islands, China. The results showed that *M. citrifolia* was a heliophyte with strong competitive ability for light resources. The contents of N, P and chlorophyll b were high in leaves, which was an important character in adaptation to tropical costal island habitat. *M. citrifolia* had big sponge tissue and stoma density with small vessel diameter. The content of malondialdehyde, activities of superoxide dismutase and catalase were high with low proline content, which indicated that *M. citrifolia* had strong drought resistance. In addition, N content in soil was low with high salt content. So, *M. citrifolia* could be used as one of the tool species in the vegetation restoration in tropical coast.

**Key words:** Medicinal plant; Strand plant; *Morinda citrifolia*; Ecophysiology; Exploitation and utilization

海滨木巴戟(*Morinda citrifolia*), 又名海巴戟天、戟天属植物, 是一种热带植物。其分布自印度和斯里兰卡, 经中南半岛, 南至澳大利亚北部, 东至波海巴戟、橘叶巴戟、檳树, 为茜草科(Rubiaceae)巴

收稿日期: 2017-08-30

接受日期: 2017-10-23

**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); 广东省科技计划项目(2016A030303044)资助

This work was supported by the National Key Research and Development Project (Grant No. 2016YFC1403002); the Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences (Grant No. XDA13020500); the National Science and Technology Project in Rural Areas during the 12th Five-year Plan (Grant No. 2015BAL04B04); and the Science and Technology Planning Project in Guangdong Province (Grant No. 2016A030303044).

作者简介: 韩涛涛(1992~), 男, 博士研究生, 主要从事植物功能性状与森林演替等方面的研究。E-mail: hantt@scbg.ac.cn

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

利尼西亚等广大地区及其海岛<sup>[1]</sup>。海滨木巴戟为常绿灌木或小乔木，高 1~5 m；茎直，枝近四棱柱形；叶交互对生，为圆形、椭圆形或卵圆形；具有头状花序，花多数，与叶片对生，无梗，有管状或漏斗状花白色，在其顶部有 5 小裂片，裂片为披针形，五角星状均匀排列；果实为聚花核果浆果状，卵形，幼时绿色，熟时白色，成熟果实直径一般可达 10 cm 或更长，在其表面多有突起，成多边形形状，可食用，花果期全年。种子为扁长圆形，较小，有翅(图 1)。海滨木巴戟生命力顽强，通常沿海岸带生长于海滩的灌丛以及多石的海岸、路旁、溪流旁及湿地中<sup>[2]</sup>。

海滨木巴戟是一种药材，果实、叶、枝干、根部均可入药，其应用已有上千年历史，可作为保健品及药用饮料。从印度尼西亚到夏威夷等热带地区，海巴戟果实广泛用于治疗糖尿病、口腔疾病、痔疮、结核病、高血压、鱼肉中毒和预防癌症等<sup>[3]</sup>。现代医学和生物学研究均表明，海滨木巴戟具有抗炎、抗氧化、保肝和调节免疫的作用<sup>[4]</sup>，因此具有极大的开发价值及开发潜力。然而，海滨木巴戟在全球的分布范围较小，数量也非常稀少，在我国仅分布于海南岛、西沙群岛和台湾，市场需求量较大但数量相对较少。



图 1 海滨木巴戟。A: 植株; B: 叶片; C: 花; D: 果实。

Fig. 1 *Morinda citrifolia*. A: Plant; B: Leaves; C: Flowers; D: Fruits.

珊瑚岛礁是海洋中一类极为特殊的生态系统，土壤条件特殊。它不仅可以提供海产品、药品、建筑以及工业原材料，还可以防岸护堤、保护环境、是地球上重要的生命支持系统<sup>[5]</sup>。中国的西沙群岛大多数岛屿属于珊瑚岛，土壤富含钙质和磷质<sup>[6]</sup>。由于地理及历史原因，西沙群岛绝大多数岛屿仍处

于未开发状态，但却是海滨木巴戟大规模培育、生长以及繁殖的理想场所。然而目前鲜有珊瑚岛礁中海滨木巴戟的生理生态特征的研究报道。因此，本研究以西沙群岛东岛海滨木巴戟为对象，研究其基本的生理生态特征，探讨其对珊瑚岛礁的适应性，为海滨木巴戟在该地区的规模化种植提供理论依据。

## 1 研究区概况

研究地位于中国南海西沙群岛东岛(16°39'34"~16°40'31" N, 112°43'13"~112°44'22" E), 面积约为1.707 2 km<sup>2</sup>, 是西沙群岛的第二大岛。最高海拔为6.7 m, 海岸线长度6.12 km, 距海南岛约337 km<sup>[7]</sup>。东岛属于热带季风气候, 年平均气温为26℃~27℃, 最热月为5~6月, 平均气温为28.9℃。年降雨量约为1 500 mm, 6~11月为雨季, 降雨量为全年的87%, 干旱降雨量仅为全年的13%, 植物受干湿季节变化的影响较大。东岛年蒸发量将近2 400 mm, 年均日照时长为2 900 h, 年均相对湿度为81%。东岛处于季风区, 年平均风速在5~6 m s<sup>-1</sup>。

东岛属于珊瑚岛类型, 岛上热带植物种类较多, 树林茂密。根据童毅等<sup>[6]</sup>的调查, 东岛共有103种植物, 隶属于35科79属。岛内常绿林群落优势种有白避霜花(*Ceodes grandis*)、草海桐(*Scaevola sericea*)、海岸桐(*Guettarda speciosa*)、银毛树(*Messerschmidia argentea*)等, 海岸边灌木丛群落优势种有草海桐、银毛树等。海滨木巴戟在东岛主要生长于滨海区域。

## 2 材料和方法

### 2.1 材料

以中国西沙群岛东岛的海滨木巴戟(*Morinda citrifolia*)为研究对象, 2016年6月选取生长状态良好的海滨木巴戟成年植株5株, 每株摘取若干成熟叶片(阳光叶)及枝条, 每株分别装袋密封低温保存。同时在每株植株根际采取5个0~20 cm深的表层土样并混匀, 装袋密封低温保存。

### 2.2 叶片形态解剖特征

利用LI-3000A叶面积仪测量叶片面积, 计算叶片总面积(LA)。称量叶片鲜质量, 烘干后称量干质量(DW)。计算比叶面积(SLA)和叶片干物质质量(LDMC)<sup>[8]</sup>。均设5个重复, 每个重复代表1株植物(下同)。

**叶片解剖结构** 每株海滨木巴戟选取1片健康成熟的叶片, 制作徒手切片及叶表皮切片<sup>[9]</sup>, 用光学显微镜观测叶片厚度、栅栏组织厚度、海绵组织厚度、栅栏组织宽度、叶上表皮厚度、气孔保卫细胞大小以及气孔密度, 同时根据气孔长以及气孔

密度计算气孔面积指数(stomatal pore area index, SPI)<sup>[10]</sup>。均设5个重复。

**茎秆解剖结构** 利用Leica滑走切片机(SM2010R)切取边材横切片(厚度30~50 μm), 利用Leica显微成像系统(DM2500)扫描并拍照, 利用Image J软件分析导管直径(D)和导管密度(VD)。采用排水法测定枝条体积, 烘干后称量干质量, 计算木材密度(WD)<sup>[11]</sup>。均5个重复。

### 2.3 叶片生理指标

**元素含量测定** 叶片全氮含量(TN)采用凯氏定氮法<sup>[12]</sup>测定; 叶片全磷含量(P)采用钼锑抗比色法<sup>[12]</sup>测定; 叶片总有机碳含量(TOC)采用重铬酸钾氧化-硫酸氧化法<sup>[12]</sup>测定。

**可溶性蛋白含量测定** 采用BCA法<sup>[13]</sup>测定。将提取的可溶性蛋白溶液在波长562 nm处测定吸光值, 与标准曲线比较得出样品浓度。3个重复。

**超氧化物歧化酶(SOD)活性** 采用氮蓝四唑法<sup>[14]</sup>测定, 以抑制NBT光化学还原的50%为1个酶还原单位(U g<sup>-1</sup>)表示。3个重复。

**过氧化氢酶(CAT)活性** 采用紫外吸收法<sup>[15]</sup>测定, 以1 min内1 g组织催化1 nmol H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>降解为1个酶活性单位(U g<sup>-1</sup>)表示。3个重复。

**过氧化物酶(POD)活性** 采用愈创木酚显色法<sup>[16]</sup>测定, 以1 min内470 nm波长下的吸光度变化0.5为1个酶活性单位(U g<sup>-1</sup>)表示。3个重复。

**脯氨酸和丙二醛含量的测定** 叶片游离脯氨酸(PRO)含量采用磺基水杨酸提取, 酸性茚三酮染色法<sup>[16]</sup>测定; 丙二醛(MDA)含量采用硫代巴比妥酸法<sup>[16]</sup>测定。3个重复。

**总抗氧化能力、总酚含量及脱落酸含量的测定** 采用ABTS方法<sup>[16]</sup>测定叶片的总抗氧化能力(T-AOC); 采用Folin-Ciocalteu试剂法<sup>[16]</sup>测定叶片总酚(TP)含量, 均3个重复。

**叶绿素含量测定** 采用分光光度法<sup>[12]</sup>测定, 分光光度计在665和649 nm波长处测定叶绿素浸提液吸光值, 计算叶绿素a、b含量、叶绿素总含量<sup>[17]</sup>, 均3个重复。

**土壤理化指标的测定** 参照土壤理化分析及剖面描述中的标准<sup>[18]</sup>进行。

### 2.4 数据分析和统计

数据分析处理采用Excel软件进行, 作图采用

Photoshop CS6 等软件进行。

### 3 结果和分析

#### 3.1 形态解剖学特征

海滨木巴戟为直立型常绿灌木或小乔木, 主要生长在海滨开阔地及疏密的沿海森林中。海滨木巴戟的比叶面积为 $(166.84 \pm 44.20) \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$ , 大于海南岛热带山地林中大多数乔灌木植物<sup>[19]</sup>。海滨木巴戟的叶片干物质质量、厚度分别为 $(23 \pm 0.02)\%$ 、 $(221.73 \pm 3.90) \mu\text{m}$ 。上表皮厚度为 $(31.23 \pm 2.04) \mu\text{m}$ , 栅栏组织和海绵组织厚度分别为 $(55.03 \pm 4.42)$ 和 $(96.33 \pm 5.35) \mu\text{m}$ , 栅栏组织/海绵组织的比值为 $0.57 \pm 0.07$ 。气孔保卫细胞长度为 $(32.61 \pm 2.18) \mu\text{m}$ , 气孔密度为 $(18.20 \pm 1.33) \text{ mm}^{-2}$ , 气孔面积指数(SPI)为 $0.021 \pm 0.005$ 。木材密度为 $(0.80 \pm 0.06) \text{ g cm}^{-3}$ , 导管密度为 $(68.97 \pm 8.72) \text{ mm}^{-2}$ , 导管直径为 $(45.94 \pm 7.31) \mu\text{m}$ 。与海滨其他植物(数据未发表, 下同)相比, 具有较薄的叶片厚度, 较发达的海绵组织, 较小的栅栏宽 $[(8.82 \pm 2.51) \mu\text{m}]$ , 较大的气孔密度, 较小的导管直径, 以及较大的导管密度。

#### 3.2 生理学特征

海滨木巴戟的叶片总氮、总磷和总有机碳含量分别为 20.23、3.29 和  $472.58 \text{ g kg}^{-1}$ , 其叶绿素 a、b 含量分别为 $(5.84 \pm 0.10)$ 和 $(3.95 \pm 0.11) \mu\text{g cm}^{-2}$ , 叶绿素总量为 $(9.79 \pm 0.22) \mu\text{g cm}^{-2}$ 。海滨木巴戟的 MDA 含量、SOD、CAT 活性分别为 $(65.86 \pm 6.84) \text{ nmol g}^{-1}$ 、 $(212.16 \pm 11.32)$ 和 $(161.41 \pm 2.00) \text{ U g}^{-1}$ , 明显高于与其生长环境类似的海滨植物草海桐(数据未发表, 下同), 但 PRO 含量 $[(190.78 \pm 1.34) \mu\text{g g}^{-1}]$ 却低于草海桐, POD 活性 $[(7.19 \pm 0.11) \text{ U g}^{-1}]$ 与草海桐类似。相比于我们所调查的其他海岛海滨植物, 海滨木巴戟具有较高的总蛋白含量 $[(60.30 \pm 2.43) \text{ mg g}^{-1}]$ 以及总抗氧化能力 $[(386.73 \pm 10.72) \text{ U g}^{-1}]$ 。

#### 3.3 土壤理化性质

海滨木巴戟在东岛生长环境的土壤含水量为 5.27%, 有机碳含量为 2.20%, 有机质含量为 3.80%, 土壤 pH 为 8.47, 为偏碱性土壤。相比于海滨植物厚藤(*Ipomoea pes-caprae*)的土壤环境<sup>[20]</sup>, 其具有较低的土壤全 N 含量(0.08%), 较高的土壤全 P 含量 $(7.30 \text{ mg kg}^{-1})$ 、K 含量 $(547.87 \text{ mg kg}^{-1})$ 、Ca 含量

$(36.62 \text{ g kg}^{-1})$ , 另外 Na、Mn、Zn、Cu 含量分别为 239.03、128.84、144.67、 $4.28 \text{ mg kg}^{-1}$ , Mg 和 Fe 含量分别为 1.24 和  $2.14 \text{ g kg}^{-1}$ 。

### 4 讨论和结论

#### 4.1 形态解剖特征

植物的比叶面积与叶片厚度极易受到光照的影响, 均与抗旱特征密切相关<sup>[21]</sup>。与海南岛热带山地林中的大多数乔灌木植物相比, 海滨木巴戟具有较大的比叶面积, 较薄的叶片厚度, 说明其具有较强的光资源竞争能力<sup>[22]</sup>。

海绵组织一般与植物的气体交换及蒸腾作用相关; 表皮细胞的厚度, 以及气孔密度均与植物的抗旱性相关。一般海绵组织发达, 气孔密度较大的植物具有较强的蒸腾作用, 尤其在水分充足时, 其与植物的光合作用呈正相关关系, 但在水分胁迫环境中, 可能会抑制光合作用的正常进行<sup>[23]</sup>。在海岛海滨生境中, 海滨木巴戟具有较大的气孔密度以及较发达的海绵组织, 这有利于其光合作用的正常进行。同时也可以把因光合作用增大而使植物所接受的多余热量通过蒸腾作用耗散掉, 从而避免了因热害导致原生质及叶绿体变性等危害<sup>[24]</sup>, 但这也可能会使其生长受到水分等环境因素的制约。

导管直径较大的植物更容易受到干旱等引起的空穴化伤害<sup>[25]</sup>, 同时较大的导管密度在某种程度上可以补偿因导管较小而减少的单位边材导水率。海滨木巴戟较小的导管直径以及较大的气孔密度可能是其对海岛较干旱环境的一种长期适应, 同时这也能够在一定程度上说明水分等环境因子可能是其在海岛生长的关键因子之一。

#### 4.2 叶片生理指标特征

光合色素是植物重要的生理性指标之一, 是植物光合作用的主要色素, 其含量及色素之间的比例能够反映植物叶片的光合作用潜能<sup>[26]</sup>。本研究中海滨木巴戟的叶绿素 a 含量和叶绿素总量较低, 说明在光线充足的东岛海滨等生境中, 其较少的叶绿素含量可以有效减少因过剩光能进入光合系统而产生的细胞亚结构氧化伤害; 另外, 海滨木巴戟的叶绿素 a/b 为 2.34, 低于理论值(3:1)。由于植物的抗旱性与叶绿素 a/b 值呈显著负相关<sup>[27]</sup>, 海滨木巴戟较低的叶绿素 a/b 值则说明其可能具有较强

的抗旱性。

植物叶片中的 N、P 元素是植物非常重要的结构组成元素, 其中, N 元素与植物的光合作用密切相关。有研究表明, 植物叶片的 N 含量与光合速率、电子传递量子效率存在明显的正相关关系<sup>[28]</sup>; 另外, P 元素与植物的光合作用, 呼吸作用也有密切的关系, 能够影响光合和呼吸作用中生物能值传递分子, 如 ATP、NADPH 的活性<sup>[29]</sup>。本研究中, 海滨木巴戟比海滨植物厚藤具有较高的 N、P 含量, 说明海滨木巴戟比热带植物厚藤能够更好地适应海滨生态环境, 呼吸作用、光合作用的正常进行似乎不会受到土壤 N、P 元素的限制, 这也从侧面说明在东岛海滨生境中, N、P 元素可能不是其生长过程中的关键环境因子。

植物体内的抗氧化系统可以在逆境条件下保护细胞膜系统、清除体内多余的自由基, 是由多种酶和还原性物质组成, 其中 SOD、CAT 和 POD 是主要的抗氧化酶<sup>[30]</sup>。由于 SOD 在植物抵抗干旱和盐害的过程中主要对植物的细胞膜系统损伤起保护作用, 主要催化超氧自由基转变为  $H_2O_2$ ; 并且 CAT 能够催化  $H_2O_2$  分解成氧和水, 可以防止过氧化反应。海滨木巴戟比海滨植物草海桐具有较高的 SOD 活性, 说明在海岛生境中其可能具有较高的抗旱性, 水、盐分的胁迫可能会延缓其生长进程。

植物体内的 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, 从而增加植物对渗透胁迫的耐性<sup>[31]</sup>。另外, 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<sup>[32]</sup>。一般情况下, 抗旱性越强的植物, PRO 积累的逆境临界点就越低; MDA 含量越高, 说明植物细胞膜脂过氧化作用越强, 植物的抗逆性就越弱。本研究中, 海滨木巴戟比草海桐具有较低的 PRO 含量以及较高的 MDA 含量, 说明了海滨木巴戟具有较强的抗旱性。这些特性可能是其长期适应海滨干旱多盐的环境而发展出的一种适应策略。

### 4.3 土壤理化指标

相比于其他生境, 如海南岛热带山地群落<sup>[19]</sup>, 海滨植物厚藤<sup>[20]</sup>等的生活环境, 海滨木巴戟生活的土壤偏碱性, 具有较低的有机质及 N 含量, 较高的

P、K、Na、Ca 等盐分含量, 而从叶片的营养元素含量来看, 说明其能适生于滨海贫瘠生境。

综合海滨木巴戟的形态解剖及生理指标, 海滨木巴戟属于典型的阳生性植物; 具有较强的光资源捕获、光资源竞争能力。海滨木巴戟叶片 N、P 含量和叶绿素 b 含量较高, 是其长期适应海岛生境的特征之一。同时, 较大的海绵组织, 气孔密度以及较小的导管直径, 较高的 MDA、SOD、CAT 含量以及较低的 PRO 含量均表明海滨木巴戟具有较强的抗旱性, 水环境因子可能是其生长的关键因子。另外, 其生长环境中除 N 含量较低外, 其他盐分含量均较高。这表明在干旱多盐的热带海滨环境中, 海滨木巴戟良好的适应性使其可作为海滨植被恢复的主要物种之一。同时, 在西沙群岛如东岛等其他岛屿人工种植海滨木巴戟时, 需考虑水和 N 等的施加。

### 参考文献

- [1] GUO J, ZHU P F, FANG D, et al. Experiment on tissue culture of *Morinda citrifolia* [J]. *J Zhejiang For Sci Technol*, 2013, 33(5): 81–84. doi: 10.3969/j.issn.1001-3776.2013.05.016.  
郭佳, 朱鹏飞, 房丹, 等. 海滨木巴戟组织培养研究 [J]. *浙江林业科技*, 2013, 33(5): 81–84. doi: 10.3969/j.issn.1001-3776.2013.05.016.
- [2] Delectis Flora Reipublicae Popularis Sinicae Agendae Academiae Sinicae Edita. *Flora Reipublicae Popularis Sinicae*, Tomus 71(2) [M]. Beijing: Science Press 1999: 182.  
中国科学院中国植物志编辑委员会. 中国植物志, 第 71 卷第 2 分册 [M]. 北京: 科学出版社, 1999: 182.
- [3] WEST B J, JENSEN C J, WESTENDORF J, et al. A safety review of noni fruit juice [J]. *J Food Sci*, 2006, 71(8): R100–R106. doi: 10.1111/j.1750-3841.2006.00164.x.
- [4] DENG S X, PALU A K, WEST B J, et al. Lipxygenase inhibitory constituents of the fruits of noni (*Morinda citrifolia*) collected in Tahiti [J]. *J Nat Prod*, 2007, 70(5): 859–862. doi: 10.1021/np0605539.
- [5] ZHAO M X, YU K F, ZHANG Q M. Review on coral reefs biodiversity and ecological function [J]. *Acta Ecol Sin*, 2006, 26(1): 186–194. doi: 10.3321/j.issn:1000-0933.2006.01.025.  
赵美霞, 余克服, 张乔民. 珊瑚礁区的生物多样性及其生态功能 [J]. *生态学报*, 2006, 26(1): 186–194. doi: 10.3321/j.issn:1000-0933.2006.01.025.
- [6] TONG Y, JIAN S G, CHEN Q, et al. Vascular plant diversity of the Paracel Islands, China [J]. *Biodiv Sci*, 2013, 21(3): 364–374. doi: 10.3724/SPJ.1003.2013.11222.

- 童毅, 简曙光, 陈权, 等. 中国西沙群岛植物多样性 [J]. 生物多样性, 2013, 21(3): 364–374. doi: 10.3724/SP.J.1003.2013.11222.
- [7] CAO L, ZHANG S F, SHI H Q, et al. Primarily observation of breeding population of great frigatebirds (*Fregata minor*) on Dong Island of Xisha Archipelago [J]. Zool Res, 2003, 24(6): 457–461. doi: 10.3321/j.issn:0254-5853.2003.06.010.
- 曹垒, 张苏芳, 史洪泉, 等. 西沙群岛东岛小军舰鸟繁殖种群的初步观察 [J]. 动物学研究, 2003, 24(6): 457–461. doi:10.3321/j.issn:0254-5853.2003.06.010.
- [8] HULSHOF C M, SWENSON N G. Variation in leaf functional trait values within and across individuals and species: an example from a Costa Rican dry forest [J]. Funct Ecol, 2010, 24(1): 217–223.
- [9] LIANG Y, WANG M, GUO J, et al. Morphologies and structures of seedlings and their phylogenies for three species in three genera of ranunculaceae [J]. Acta Bot Boreali-Occid Sin, 2007, 27(7): 1357–1363. doi: 10.3321/j.issn:1000-4025.2007.07.012.
- 梁彦, 汪矛, 郭洁, 等. 3 属 3 种毛茛科植物幼苗形态结构及其系统演化分析 [J]. 西北植物学报, 2007, 27(7): 1357–1363. doi: 10.3321/j.issn:1000-4025.2007.07.012.
- [10] YANG X Y, WANG X J, DE Y J. Drought-resistant characteristics of leaf anatomical structure of three tree species [J]. J Inner Mongolia For Sci Technol, 2008, 34(2): 40–42. doi: 10.3969/j.issn.1007-4066.2008.02.011.
- 杨小玉, 王晓江, 德永军. 山桃等 3 个树种叶片解剖结构的耐旱性特征研究 [J]. 内蒙古林业科技, 2008, 34(2): 40–42. doi: 10.3969/j.issn.1007-4066.2008.02.011.
- [11] SCHULDT B, KNUTZEN F, DELZON S, et al. How adaptable is the hydraulic system of European beech in the face of climate change-related precipitation reduction? [J]. New Phytol, 2016, 210(2): 443–458. doi: 10.1111/nph.13798.
- [12] Dong M. Survey, Observation and Analysis of Terrestrial biocommunities [M]. Beijing: Standards Press of China, 1996.
- 董鸣. 陆地生物群落调查观测与分析 [M]. 北京: 中国标准出版社, 1996.
- [13] YUAN Y, DUAN L Y, GUO L H, et al. Protein concentration determination of a novel plant toxin from *Malania oleifera* by BCA method [J]. J Kunming Univ, 2009, 31(3): 60–61. doi: 10.3969/j.issn.1674-5639.2009.03.019.
- 袁燕, 段玲燕, 郭丽红, 等. BCA 法测定新的植物毒素——蒜头果蛋白质质量浓度 [J]. 昆明学院学报, 2009, 31(3): 60–61. doi: 10.3969/j.issn.1674-5639.2009.03.019.
- [14] WANG Z Y, GUO A G, LUO S P. Effect of water stress upon SOD and POD activity and isoenzyme of corn [J]. J NW Agric For Univ (Nat Sci), 1989, 17(1): 45–49.
- 王振镒, 郭嵩光, 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.
- [15] WANG M L, WEI X, TANG H, et al. Effects of light intensity on growth and photosynthesis of three karst plant seedlings [J]. Chin J Ecol, 2015, 34(3): 604–610. doi: 10.13292/j.1000-4890.2015.0083.
- 王满莲, 韦霄, 唐辉, 等. 光强对三种喀斯特植物幼苗生长和光合特性的影响 [J]. 生态学杂志, 2015, 34(3): 604–610. doi: 10.13292/j.1000-4890.2015.0083.
- [16] SUN Q, HU J J. Research Technology of Plant Physiology [M]. Yangling: Northwest Agriculture and Forestry University Press, 2006.
- 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.
- [17] ZHANG Y H. Studies on the characteristics of water consumption and drought resistance of 14 tree species in Shandong [D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2006.
- 张迎辉. 山东省 14 个造林绿化树种蒸腾耗水性与抗旱性的研究 [D]. 泰安: 山东农业大学, 2006.
- [18] LIU G S. Soil Physical and Chemical Analysis & Description of Soil Profiles [M]. Beijing: Standards Press of China, 1996.
- 刘光崧. 土壤理化分析与剖面描述 [M]. 北京: 中国标准出版社, 1996.
- [19] ZHANG M, LIU F D, WANG Z S, et al. Differences of leaf traits between pioneer and non-pioneer tree species in early succession stage of tropical montane rain forest [J]. J Nanjing For Univ (Nat Sci), 2008, 32(4): 28–32. doi: 10.3969/j.issn.1000-2006.2008.04.006.
- 张明, 刘福德, 王中生, 等. 热带山地雨林演替早期先锋树种与非先锋树种叶片特征的差异 [J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2008, 32(4): 28–32. doi: 10.3969/j.issn.1000-2006.2008.04.006.
- [20] OUYANG P Y, LIU N, ZHANG W W, et al. Biological and ecophysiological characteristics of a beach plant *Ipomoea pescaprae* [J]. J Hunan Univ Sci Technol (Nat Sci), 2011, 26(4): 117–121. doi: 10.3969/j.issn.1672-9102.2011.04.025.
- 欧阳蒲月, 刘楠, 张伟伟, 等. 海滩植物厚藤(*Ipomoea pescaprae*)的生物学及生理生态特性 [J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2011, 26(4): 117–121. doi: 10.3969/j.issn.1672-9102.2011.04.025.
- [21] COSTA-SAURA J M, MARTÍNEZ-VILALTA J, TRABUCCO A, et al. Specific leaf area and hydraulic traits explain niche segregation along an aridity gradient in Mediterranean woody species [J]. Perspect Plant Ecol Evolut Syst, 2016, 21: 23–30. doi: 10.1016/j.ppees.2016.05.001.
- [22] WESTOBY M. A leaf-height-seed (LHS) plant ecology strategy scheme [J]. Plant Soil, 1998, 199(2): 213–227. doi: 10.1023/A:1004327224729.



- [23] SONG J Q. Research of the relationship between morphologic and anatomic structure and drought resistance of rice [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2010. doi: 10.7666/d.Y1799364.
- 宋俊乔. 水稻叶片形态、解剖结构与抗旱性的关系研究 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2010. doi: 10.7666/d.Y1799364.
- [24] MENG Q J, WANG G Q, DONG S F, et al. Relation between leaf tissue parameters and drought resistance of peaches [J]. *Agric Res Arid Areas*, 2004, 22(3): 123–126. doi: 10.3321/j.issn:1000-7601.2004.03.029.
- 孟庆杰, 王光全, 董绍锋, 等. 桃叶片组织解剖结构特征与其抗旱性关系的研究 [J]. *干旱地区农业研究*, 2004, 22(3): 123–126. doi: 10.3321/j.issn:1000-7601.2004.03.029.
- [25] DOMEK J C, GARTNER B L. Age- and position-related changes in hydraulic versus mechanical dysfunction of xylem: Inferring the design criteria for Douglas-fir wood structure [J]. *Tree Physiol*, 2002, 22(2/3): 91–104.
- [26] FILELLA I, SERRANO L, SERRA J, et al. Evaluating wheat nitrogen status with canopy reflectance indices and discriminant analysis [J]. *Crop Sci*, 1995, 35(5): 1400–1405. doi: 10.2135/cropsci1995.0011183X003500050023x.
- [27] ZHANG M S, TAN F. Relationship between ratio of chlorophyll a and b under water stress and drought resistance of different sweet potato varieties [J]. *Seed*, 2001, 20(4): 23–25. doi: 10.3969/j.issn.1001-4705.2001.04.010.
- 张明生, 谈锋. 水分胁迫下甘薯叶绿素 a/b 比值的变化及其与抗旱性的关系 [J]. *种子*, 2001, 20(4): 23–25. doi: 10.3969/j.issn.1001-4705.2001.04.010.
- [28] TAKASHIMA T, HIKOSAKA K, HIROSE T. Photosynthesis or persistence: Nitrogen allocation in leaves of evergreen and deciduous *Quercus* species [J]. *Plant Cell Environ*, 2004, 27(8): 1047–1054. doi: 10.1111/j.1365-3040.2004.01209.x.
- [29] MOLLIER A, PELLERIN S. Maize root system growth and development as influenced by phosphorus deficiency [J]. *J Exp Bot*, 1999, 50(333): 487–497.
- [30] ZHENG B S. Research Techniques in Contemporary Plant Physiology and Biochemistry [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2006.
- 郑炳松. 现代植物生理生化研究技术 [M]. 北京: 气象出版社, 2006.
- [31] DOBRA J, MOTYKA V, DOBREV P, et al. Comparison of hormonal responses to heat, drought and combined stress in tobacco plants with elevated proline content [J]. *J Plant Physiol*, 2010, 167(16): 1360–1370. doi: 10.1016/j.jplph.2010.05.013.
- [32] SOFO A, DICHIO B, XILOYANNIS C, et al. Effects of different irradiance levels on some antioxidant enzymes and on malondialdehyde content during rewatering in olive tree [J]. *Plant Sci*, 2004, 166(2): 293–302. doi: 10.1016/j.plantsci.2003.09.018.