

# 榄仁树的生理和生物学特性

宋光满<sup>1,2</sup>, 刘楠<sup>2</sup>, 简曙光<sup>2</sup>, 刘慧<sup>2</sup>, 张炜<sup>2</sup>, 韩涛涛<sup>2</sup>, 王俊<sup>2</sup>, 任海<sup>2</sup>

(1. 仲恺农业工程学院, 广州 510225; 2. 中国科学院华南植物园, 广东省应用植物学重点实验室, 广州 510650)

**摘要:** 为了解榄仁树(*Terminalia catappa*)的生理生态特性, 对西沙群岛永兴岛上自然生长的榄仁树的叶片形态、生理特征、营养元素含量以及根际土壤特征进行了研究。结果表明, 榄仁树具有比叶面积低、叶片厚、气孔密度小等形态特征。叶绿素 a/b 为 2.25 : 1, 低于理论值 3 : 1。叶片的 SOD 和 POD 活性较低, 脯氨酸和 ABA 含量较高。植物体内养分含量较高, 适生土壤养分含量低。这说明榄仁树叶片的吸收利用光能能力较强, 保水能力较好, 有较强的抗干旱和抗逆能力, 适生于贫瘠的土壤并保持较高的叶片营养。因此, 榄仁树是一种能够适应高温、干旱、贫瘠等恶劣生境条件的树种, 可作为热带珊瑚岛植被恢复的工具种和园林绿化树种。

**关键词:** 榄仁树; 形态; 生理生态; 养分含量

doi: 10.11926/jtsb.3801

## Physiological and Biological Characteristics of *Terminalia catappa*

SONG Guang-man<sup>1,2</sup>, LIU Nan<sup>2</sup>, JIAN Shu-guang<sup>2</sup>, LIU Hui<sup>2</sup>, ZHANG Wei<sup>2</sup>, HAN Tao-tao<sup>2</sup>, WANG jun<sup>2</sup>, REN Hai<sup>2</sup>

(1. Zhongkai University of Agriculture and Engineering, Guangzhou 510225, China; 2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Applied Botany, South China Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China)

**Abstract:** In order to understand the eco-physiological characters of *Terminalia catappa*, its leaf morphology, physiology, nutrient element contents and the rhizosphere soil characteristics were studied grown in Yongxing Island, Xisha Islands. The results showed that *T. catappa* had low specific leaf area, thick leaf thickness and low stomatal density. The chlorophyll a/b (2.25 : 1) was lower than theoretic value (3 : 1). The SOD and POD activities in leaves were low, but proline and abscisic acid contents were high. The nutrient element contents in leaves were high, but the suitable soil nutrient content was low. It indicated that the leaves of *T. catappa* had high light energy absorptivity, good water holding capacity, and high drought tolerance, thus it was suitable to grow in poor soil conditions and maintain high leaf nutrition levels. Overall, *T. catappa* can tolerate high temperature, drought and barren soil and can be used as a tool and landscaping species for vegetation restoration on tropical coral island.

**Key words:** *Terminalia catappa*; Morphological anatomy; Eco-physiology; Nutrient content

榄仁树 (*Terminalia catappa*) 为使君子科 (Combretaceae) 诃子属大乔木, 又名山枇杷树, 广泛分布于马来西亚、越南、印度、大洋洲和南美洲等热带地区, 在我国分布于海南、广东(徐闻)、云南(东

收稿日期: 2017-08-15

接受日期: 2017-09-27

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 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: 宋光满(1992-), 女, 硕士研究生, 主要从事植被与景观生态学方面的研究。E-mail: songguangman@scbg.ac.cn

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

南部)和台湾等地;华南很多地方均有栽培。榄仁树高可达 20 m,树皮褐黑色,呈纵裂剥落状;叶片倒卵形,全缘,稀微波状,常密集于枝端,基部有蜜腺;花序呈穗状,雄花生于上部;果实为核果,椭圆形,具 2 棱,棱上具翅状的狭边,果皮木质坚硬;种子含油质。榄仁树枝条平整,树冠高大,遮阴效果佳,可作为行道树和庭院观赏树,其木材可供建筑及制造家具,树皮含单宁,能生产黑色染料,种子还可食用和榨油<sup>[1]</sup>。不仅如此,榄仁树药用价值也较高,含榄仁树的功能食品,可防治糖尿病;其种子也可清热解毒,有利于咽喉肿痛和痢疾;同时,树皮也具有收敛之效,对解毒止痒、化痰止咳、腹泻等有治疗功效<sup>[1]</sup>。

榄仁树常生于气候湿热的海边沙滩上,对生长环境要求不高,但生长状况受土壤、气温、水分、空气、日照等影响较大。总的来说,榄仁树适宜于中性及微碱性土壤。榄仁树具有较强的耐盐、抗旱和抗风能力,因此常被种植于滨海地区作为行道树,也可与木麻黄(*Casuarina equisetifolia*)混合种植作为沿海防护林<sup>[2]</sup>。因此,榄仁树是构建沿海防护林和滨海地区园林绿化的优良树种。近年来有关榄仁树的研究主要集中于榄仁树叶提取物<sup>[3]</sup>、榄仁树叶氯仿提取物、以及榄仁树成株和幼苗的耐盐性研究<sup>[4]</sup>,榄仁树具有较强的耐盐能力,在高达 17.09% 盐度的情况下均能正常生长<sup>[5]</sup>,但目前对热带珊瑚岛原生条件下榄仁树的生态生物学特性的研究鲜有报道。

本文以西沙群岛永兴岛自然生长的榄仁树为研究对象,分析其叶片的形态解剖学特征、生理生态学特征、主要元素含量特征及根际土壤理化性质,以期为榄仁树的开发利用提供基础资料和理论指导。

## 1 研究地概况

永兴岛位于西沙群岛东部的宣德群岛,是西沙群岛陆域面积最大的自然海岛,位于 112°22' E, 16°51' N,主要由珊瑚、贝壳沙堆积而成的珊瑚岛。永兴岛属热带海洋季风性气候,年均气温为 26.5℃,日照时间长,年均降雨量 1 505 mm,雨量充沛但大多集中在 5-9 月,冬季少雨,存在明显的季节性干旱现象,风力大,蒸发速度快。土壤为由第四纪珊瑚、贝壳碎屑和鸟粪发育而成的石灰质腐殖土<sup>[6]</sup>。

永兴岛上林木深密,植被丰富,常见的有抗风

桐(*Ceodes grandis*)林、榄仁树群落、草海桐(*Scaevola sericea*)群落、银毛树(*Messerschmidia argentea*)群落、厚藤(*Ipomoea pescaprae*)和海刀豆(*Canavalia maritima*)群落等。由于人类活动的影响,永兴岛上栽培植物较多,常见的有椰子(*Cocos nucifera*)、木麻黄、榕树(*Ficus microcarpa*)等<sup>[7]</sup>。

## 2 材料和方法

于 2016 年 6 月,选取西沙永兴岛上 5 株野生、健康的榄仁树(*Terminalia catappa*)为样树,每株采集若干发育长势良好的成熟叶片和枝条放入车载冰箱中,上岸后由冰盒保温带回实验室,随后进行叶片形态指标、生理生态、营养元素的测定。同时,采集每株植物根际土(0~20 cm)测定其理化性质。

### 2.1 形态解剖学特征

**比叶面积和叶干物质含量** 比叶面积(specific leaf area)是叶面积与叶干重的比值,叶干物质含量(leaf dry matter content)是叶片干质量和叶鲜质量的比值。采用 LI-3000 叶面积仪(LI-COR, 美国)测量鲜叶面积(800 cm<sup>2</sup>)并用电子天平称量鲜重,然后置于 65℃ 烘箱中烘干至恒重后称其干重,计算比叶面积和叶干物质含量<sup>[8]</sup>,共 5 个重复。

**叶片解剖结构** 每株样树选取 1 片健康成熟的叶片,采用常规的徒手切片法制作切片,在显微镜下观测叶片厚度、栅栏组织和海绵组织的厚度、气孔大小和密度,计算气孔面积指数(stomatal pore area index, SPI),SPI=气孔密度×(保卫细胞数)<sup>[9]</sup>,共 5 个重复。

**木材密度** 采用传统的称重法,即木材密度为烘干后的枝条质量/烘干前的枝条体积,体积通过排水法获得<sup>[10]</sup>,共 5 个重复。

**导管密度和导管直径** 采用徒手切片法制作茎秆切片,利用 Leica 滑走切片器(SM2010R)在枝条的横切面上获取切片,并在 Leica 显微成像系统(DM2500)下扫描并拍照,利用 Image J 软件分析导管直径和导管密度<sup>[11]</sup>,共 5 个重复。

### 2.2 生理生态学特征

**叶绿素含量** 参照张伟伟等<sup>[12]</sup>的方法,采用分光光度计于 663 和 645 nm 处测量吸光度<sup>[12]</sup>,分别计算叶绿素 a、叶绿素 b 和叶绿素总含量。

**超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)活性** 采用氮蓝四唑还原法<sup>[13]</sup>测定。

**过氧化物酶(oxidase, POD)活性** 采用愈创木酚显色法<sup>[13]</sup>测定。

**过氧化氢酶(catalase, CAT)活性** 采用紫外吸收法<sup>[14]</sup>测定。

**脯氨酸含量** 采用茚三酮比色法<sup>[15]</sup>测定。

**丙二醛含量** 采用硫代巴比妥酸(Thiobarbituric acid, TBA)比色法<sup>[16]</sup>测定。

**总抗氧化能力** 采用铁离子还原抗氧化能力分析法(ferric reducing antioxidant power, FRAP)<sup>[17]</sup>测定,在酸性条件下,Fe<sup>3+</sup>-TPTZ(三吡啶三吡嗪)被还原为蓝色的Fe<sup>2+</sup>-TPTZ,且于593 nm处具有最大光吸收,FRAP值反映了总抗氧化能力(total antioxidant capacity, T-AOC)。

**总酚含量** 采用福林酚比色法<sup>[18]</sup>测定。在碱性条件下,酚类物质将钼钼酸还原,产生蓝色化合物,于760 nm处最大吸收,即样品Tp含量。

**脱落酸含量** 采用酶联免疫法<sup>[19]</sup>测定。

所有指标的测量均设3个重复。

### 2.3 植物营养元素

将叶片放入烘箱中65℃烘干,磨碎过筛,采用重铬酸钾-硫酸氧化法测定碳含量,靛酚蓝比色法和

钼锑抗比色法分别测定氮含量和磷含量<sup>[20]</sup>。

### 2.4 土壤理化性质测定

清除榄仁树根际凋落物,并设置6个样方,每个样方随机取6个0~20 cm的表层土柱并充分混合,装入密封袋中低温保存。在实验室风干并过2 mm筛,装入塑封袋,参照《土壤理化分析与剖面描述》<sup>[21]</sup>测定土壤理化性质。

### 2.5 数据分析和统计

数据整理和图像分析分别采用Excel 2010和Photoshop 5进行。

## 3 结果和分析

### 3.1 形态解剖学特征

榄仁树叶片的叶肉细胞有栅栏组织和海绵组织的分化,为典型的异面叶(图1)。栅栏组织细胞呈长柱状,排列紧密有序,栅栏组织厚度为(56.14±4.38) μm;海绵组织位于栅栏组织和下表皮之间,细胞排列疏松,形状不规则,海绵组织厚度为(147.24±3.69) μm;其栅栏组织/海绵组织为(0.38±0.04)。榄仁树叶片的干物质含量为(0.39±0.04)%,比叶面积、厚度、气孔密度分别为(111.12±16.27) cm<sup>2</sup> g<sup>-1</sup>、

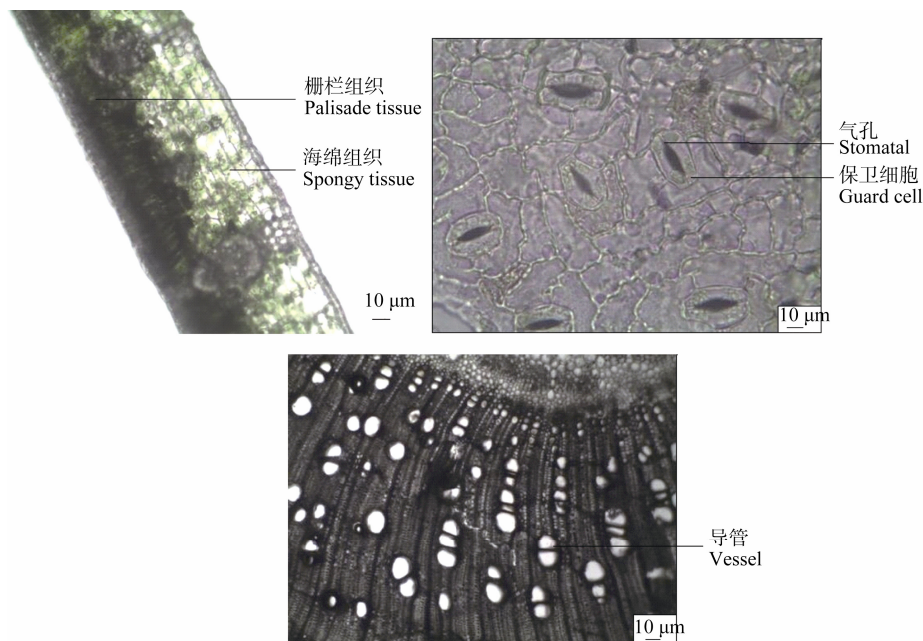


图1 榄仁树的解剖结构

Fig. 1 Anatomical structure of *Terminalia catappa*

( $249.82 \pm 4.53$ )  $\mu\text{m}$ 、( $32.40 \pm 3.58$ )  $\text{mm}^{-2}$ , 气孔保卫细胞的长度为( $24.26 \pm 1.34$ )  $\mu\text{m}$ , 气孔面积指数为( $0.019 \pm 0.004$ ), 表明叶片较厚, 气孔数量少。榄仁树木材密度为( $0.61 \pm 0.04$ )  $\text{g cm}^{-3}$ , 枝条导管直径大, 为( $69.56 \pm 13.92$ )  $\mu\text{m}$ , 导管密度较小, 为( $24.55 \pm 3.44$ )  $\text{mm}^{-2}$ 。

### 3.2 叶片生理生态学特征

榄仁树叶片的叶绿素 a、叶绿素 b 含量分别为( $1.28 \pm 0.06$ )、( $0.57 \pm 0.05$ )  $\text{mg g}^{-1}$ , Chl a+b 为( $1.85 \pm 0.10$ )  $\text{mg g}^{-1}$ , Chl a/b 为( $2.25 \pm 0.08$ ), 低于理论值 3 : 1, 有利于吸收光能并进行光合作用。榄仁树叶片的 SOD 和 POD 活性较低, 分别为( $148.47 \pm 5.83$ )和( $0.32 \pm 0.04$ )  $\text{U g}^{-1}$ , CAT 活性为( $243.08 \pm 23.10$ )  $\text{U g}^{-1}$ ; PRO 和 ABA 含量较高, 分别达( $284.70 \pm 3.52$ )和( $13.00 \pm 0.69$ )  $\mu\text{g g}^{-1}$ , MAD 含量为( $44.24 \pm 1.28$ )  $\text{nmol g}^{-1}$  和总酚含量为( $17.46 \pm 0.40$ )  $\text{mg g}^{-1}$ 。

### 3.3 叶片营养成分

榄仁树叶片的总氮含量、有机碳含量和总磷含量分别为 21.22、406.58 和 2.02  $\text{g kg}^{-1}$ , 以有机碳含量最高; 叶片的 C : N 和 C : P 分别为 19.16 和 201.28, 表明榄仁树叶片能吸收少量的 N 和 P, 同化更多的 C, 说明榄仁树对 N 和 P 的利用率较高。

### 3.4 土壤理化性质

对榄仁树生长环境的土壤养分含量进行分析, 永兴岛土壤含水量为 5%, 含水量较低。pH 为 8.54, 土壤呈微碱性。土壤有机碳含量为 1.99%, 含量较高; 全磷和全氮含量分别为 0.005 和 0.500  $\text{g kg}^{-1}$ , 含量较低。土壤钙含量最高, 达到 59.253  $\text{g kg}^{-1}$ , 其次是镁含量( $4.208 \text{ g kg}^{-1}$ ), 其他元素含量较低, 钾、钠、铁、锰、锌含量分别为 0.548、0.207、1.834、0.124 和 0.112  $\text{g kg}^{-1}$ , 铜含量最低, 仅为 0.003  $\text{g kg}^{-1}$ , 这是由于永兴岛的土壤发育于珊瑚化石, 其主要矿物成分是钙和镁的碳酸盐。

## 4 结论和讨论

### 4.1 叶片解剖结构特征

比叶面积是叶片重要性状, 为单位干物质的叶面积, 可表示为叶面积和叶干重的比值, 反映了叶片捕获光能的能力。通常, 比叶面积小的植物叶片

投资能力高, 能够适应干旱和高光强的环境<sup>[22]</sup>。卜文圣等<sup>[23]</sup>对热带低地雨林植物功能性状进行研究, 报道植物比叶面积为 120~140  $\text{cm}^2 \text{g}^{-1}$ 。与以上研究结果相比, 榄仁树的比叶面积较小, 说明榄仁树抵御环境胁迫能力较强, 能够较好的适应西沙群岛强光照和干旱的环境条件。

叶片厚度与其生理学特性相关, 通常叶片厚度越大, 光合作用速率越高, 水分散失越慢, 保水能力越强, 可以提高叶片的光合能力和抗旱能力<sup>[24]</sup>。植物常发育成较厚的叶片以减少水分散失对抗干旱地区的环境压力, 榄仁树的叶片较厚, 说明其具有较好的光合能力、抗旱和抗风能力。植物叶片的海绵组织较厚, 利于植物在水分缺失的环境中储备水分。气孔是植物进行气体交换和控制水分进入的通道, 影响植物的蒸腾效率。榄仁树的气孔密度为 32.40  $\text{mm}^{-2}$ , 气孔密度较大, 具有较强的蒸腾作用, 且有利于植物进行光合作用。

木材密度是木材性能的关键指标, 能够反映植物的水分运输和对干旱的抵御能力。榄仁树的木材密度为 0.61  $\text{g cm}^{-3}$ , 相对较大<sup>[23]</sup>。相比耐旱树种<sup>[11]</sup>, 导管直径大致范围为 23.57~56.96  $\mu\text{m}$ , 榄仁树的导管直径较大。Cai 等<sup>[25]</sup>的研究表明, 导管直径越大, 栓塞脆弱性越大, 越容易发生栓塞。因此榄仁树主要通过牺牲耐旱性, 以提高导水潜力来保证叶片供水。

### 4.2 生理生态学特征

叶绿素是植物进行光合作用的主要色素, 它的含量和比例可以反映叶片的光合潜能和植物的生长状况<sup>[26]</sup>。榄仁树的叶绿素 a/b 为 2.25 : 1, 低于理论值 3 : 1, 说明叶绿体中聚光色素(叶绿素 b)的含量要比叶绿体作用中心色素(叶绿素 a)的含量高, 光合系统结构更合理, 更有利于吸收光能并进行光合作用<sup>[12]</sup>。

植物体内氧化酶的活性高低影响着植物的抗逆能力。不同生长季节的桑(*Morus alba*)叶抗氧化能力为 70.05~127.53  $\text{U g}^{-1}$ <sup>[27]</sup>, 榄仁树的总抗氧化能力明显高于桑树, 说明榄仁树防御逆境的能力强。其植物体内 SOD、POD 和 CAT 能够清除体内过量的活性氧, 使植物本身免受或少受活性氧伤害, 以保证细胞的正常运行机能。在酶促防御系统中, SOD 活性起着主要的作用, 它能够有效地清除超氧阴离子  $\text{O}_2^-$ , 减轻膜脂过氧化引起的膜伤害; POD 活性能够清除植物体内  $\text{H}_2\text{O}_2$ , 并催化  $\text{H}_2\text{O}_2$  氧化后

产生  $H_2O$ ; CAT 活性也是植物体内极为重要的保护酶,它能清除细胞内过多的  $H_2O_2$ ,保护膜的结构<sup>[28]</sup>。潘文等<sup>[29]</sup>报道红花荷(*Rhodoleia championii*)等 26 种植物的 SOD 活性为 38.2~1947.84  $U\ g^{-1}$ 。本研究结果表明,榄仁树的 SOD 活性较低,抗氧化酶的总体活力不高。

MDA 是细胞膜脂过氧化作用的主要产物之一,其含量反映了植物遭受逆境伤害的程度,MDA 含量越高,植物细胞膜受到的损害越大,植物的抗逆性就越弱<sup>[30]</sup>。榄仁树的 MDA 含量为 44.24  $nmol\ g^{-1}$ ,处于较低水平,说明榄仁树的抗逆性较好,能够有效抵御热带海岛的环境逆境带来的氧化胁迫,防止膜脂结构受到损伤。PRO 是植物体内适应逆境胁迫的渗透调节物质,在受到高温干旱等胁迫条件时,植物会大量合成和积累 PRO 以增强对渗透胁迫的抵抗力,保护细胞的结构<sup>[31]</sup>。榄仁树的 PRO 含量较高,说明榄仁树通过提高 PRO 含量进行渗透调节以适应环境逆境带来的胁迫,能极强的适应逆境。ABA 在逆境胁迫中扮演着重要的角色,逆境下,植物会合成大量的 ABA,增强抵抗力,且减少水分散失,保持叶片的水分含量<sup>[27]</sup>。李长宁等<sup>[19]</sup>对甘蔗(*Saccharum officinarum*)的 ABA 和抗旱性进行研究,其 ABA 含量为 0.5  $\mu g\ g^{-1}$ ,榄仁树的 ABA 含量相对较高,可增强对逆境的抵抗能力,从而提高对永兴岛环境的适应能力。

#### 4.3 营养元素与土壤养分

植物体中营养元素的含量体现了植物吸收养分的能力,对养分的利用效率、植物的生长发育起着重要作用<sup>[12]</sup>。全球 492 种陆地植物叶片的碳含量为 464  $g\ kg^{-1}$ ,榄仁树叶片的总有机碳含量为 406.58  $g\ kg^{-1}$ ,低于陆地植物叶片的碳含量<sup>[32]</sup>。通常,植物体内 N 含量为 10~50  $g\ kg^{-1}$ ,P 含量为 1~5  $g\ kg^{-1}$ <sup>[33]</sup>,榄仁树叶片的总 N 和总 P 含量分别为 21.22 和 2.02  $g\ kg^{-1}$ ,均处于正常范围内,且均略高于全球水平(20.1, 1.99  $g\ kg^{-1}$ )<sup>[34]</sup>。叶片的 C:N 和 C:P 可反映植物对营养元素的利用效率,从榄仁树叶片的 C:N 和 C:P 可见,其对 N 和 P 的吸收利用效率较高。张川等<sup>[35]</sup>对喀斯特坡面表层土壤进行研究,表明土壤含水量为 6.7%~71.1%,而永兴岛土壤含水量较低,保水能力弱。土壤含 Ca 量高,N、P、K、Na 较低,土壤养分含量低,说明榄仁树营养养分利用率较高,且能够耐贫瘠、适应性强。

对榄仁树的生态生物学研究表明,榄仁树属阳性树种,其形态解剖特征、叶片生理生态特征以及营养元素含量等显示了其抗旱、耐贫瘠等强抗逆性,对西沙群岛的环境具有较强的适应能力,适合用于热带及南亚热带地区的海岛和海岸防护林构建及园林绿化,能改善海岛的生态环境,从而发挥良好的生态效益。

#### 参考文献

- [1] CHEN J. *Florae Reipublicae Popularis Sinicae* [M]. Beijing: Science Press, 1984: 10–11.  
陈介. 中国植物志 [M]. 北京: 科学出版社, 1984: 10–11.
- [2] FENG J, LIU Q, WANG J, et al. Effects of leachates from *Casuarina equisetifolia* on growth and physiological and biochemical characteristics of *Terminalia catappa* seedlings [J]. *Guihaia*, 2016, 36(3): 308–314.  
冯剑, 刘强, 王瑾, 等. 木麻黄浸提液对榄仁树幼苗生长及生理生化影响 [J]. *广西植物*, 2016, 36(3): 308–314.
- [3] TANG X H, GAO J, WANG Y P, et al. Hepatoprotective effects of chloroform extract from leaf of *Terminalia catappa* in relation to the inhibition of liver IL-6 expression [J]. *China J Chin Mat Med*, 2003, 28(12): 1170–1174. doi: 10.3321/j.issn:1001-5302.2003.12.022.  
汤新慧, 高静, 王燕萍, 等. 榄仁叶氯仿提取物的护肝作用及其对肝脏 IL-6 表达的抑制作用 [J]. *中国中药杂志*, 2003, 28(12): 1170–1174. doi: 10.3321/j.issn:1001-5302.2003.12.022.
- [4] BIAN A N, LIN M, WANG W Q. Effects of salt spray on growth and compartmental allocation of mineral element of *Terminalia catappa* seedlings [J]. *Ecol Environ Sci*, 2014, 23(11): 1752–1758. doi: 10.3969/j.issn.1674-5906.2014.11.005.  
卞婀娜, 林鸣, 王文卿. 盐雾胁迫对榄仁幼苗生长及体内矿质元素分布的影响 [J]. *生态环境学报*, 2014, 23(11): 1752–1758. doi: 10.3969/j.issn.1674-5906.2014.11.005.
- [5] LIN X, YAN Z Z, WANG W Q. Ecological distribution and salt tolerance of *Terminalia catappa* [J]. *Subtrop Plant Sci*, 2004, 33(4): 22–25. doi: 10.3969/j.issn.1009-7791.2004.04.007.  
林晞, 闫中正, 王文卿. 榄仁树的生态分布与耐盐性研究 [J]. *亚热带植物科学*, 2004, 33(4): 22–25. doi: 10.3969/j.issn.1009-7791.2004.04.007.
- [6] LIAO B B, CAI Y L, XIE C K, et al. Pattern and dynamic of habitats of coral reefs in Yongxing Island, South China Sea [J]. *Marine Environ Sci*, 2013, 32(5): 746–751.  
廖彬彬, 蔡永立, 谢长坤, 等. 南海永兴岛珊瑚岛礁生境格局动态研究 [J]. *海洋环境科学*, 2013, 32(5): 746–751.

- [7] TONG Y, JIAN S G, CHEN Q, et al. Vascular plant diversity of the Parcel Islands, China [J]. *Biodiv Sci*, 2013, 21(3): 364–374. doi: 10.3724/SP.J.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.
- [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] SACK L, COWAN P D, JAIKUMAR N, et al. The ‘hydrology’ of leaves: co-ordination of structure and function in temperate woody species [J]. *Plant Cell Environ*, 2003, 26(8): 1343–1356. doi: 10.1046/j.0016-8025.2003.01058.x.
- [10] HACKE U G, SPERRY J S, POCKMAN W T, et al. Trends in wood density and structure are linked to prevention of xylem implosion by negative pressure [J]. *Oecologia*, 2001, 126(4): 457–461.
- [11] LI R, DANG W, CAI J, et al. Relationships between xylem structure and embolism vulnerability in six species of drought tolerance trees [J]. *Chin J Plant Ecol*, 2016, 40(3): 255–263. doi: 10.17521/cjpe.2015.0260.  
李荣, 党维, 蔡靖, 等. 6 个耐旱树种木质部结构与栓塞脆弱性的关系 [J]. *植物生态学报*, 2016, 40(3): 255–263. doi: 10.17521/cjpe.2015.0260.
- [12] ZHANG W W, LIU N, WANG J, et al. Ecological and biological characteristics of *Hibiscus tiliaceus*, a mangrove associate in China [J]. *Guihaia*, 2012, 32(2): 198–202. doi: 10.3969/j.issn.1000-3142.2012.02.011.  
张伟伟, 刘楠, 王俊, 等. 半红树植物黄槿的生态生物学特性研究 [J]. *广西植物*, 2012, 32(2): 198–202. doi: 10.3969/j.issn.1000-3142.2012.02.011.
- [13] DENG J M, XIONG G S, YUAN X L, et al. Differences in SOD, POD, CAT activities and MDA content and their responses to high temperature stress at peak flowering stage in cotton lines with different tolerance to high temperature [J]. *Cotton Sci*, 2010, 22(3): 242–247. doi: 10.3969/j.issn.1002-7807.2010.03.009.  
邓茝明, 熊格生, 袁小玲, 等. 棉花不同耐高温品系的 SOD、POD、CAT 活性和 MDA 含量差异及其对盛花期高温胁迫的响应 [J]. *棉花学报*, 2010, 22(3): 242–247. doi: 10.3969/j.issn.1002-7807.2010.03.009.
- [14] AEBI H. Catalase *in vitro* [J]. *Methods Enzymol*, 1984, 105: 121–126. doi: 10.1016/S0076-6879(84)05016-3.
- [15] BATES L S, WALDREN R P, TEARE I D. Rapid determination of free proline for water-stress studies [J]. *Plant Soil*, 1973, 39(1): 205–207. doi: 10.1007/BF00018060.
- [16] HEALTH R L, PACKER L. Photoperoxidation in isolated chloroplasts: I. Kinetics and stoichiometry of fatty acid peroxidation [J]. *Arch Biochem Biophys*, 1968, 125(1): 189–198. doi: 10.1016/0003-9861(68)90654-1.
- [17] BENZIE I F F, STRAIN J J. The ferric reducing ability of plasma (FRAP) as a measure of “antioxidant power”: The FRAP assay [J]. *Anal Biochem*, 1996, 239(1): 70–76. doi: 10.1006/abio.1996.0292.
- [18] SINGLETON V L, ORTHOFER R, LAMUELA-RAVENTÓS R L. Analysis of total phenols and other oxidation substrates and antioxidants by means of folin-ciocalteu reagent [J]. *Methods Enzymol*, 1999, 299: 152–178. doi: 10.1016/S0076-6879(99)99017-1.
- [19] LI C N, SRIVASTAVA M K, NONG Q, et al. Mechanism of tolerance to drought in sugarcane plant enhanced by foliage dressing of abscisic acid under water stress [J]. *Acta Agron Sin*, 2010, 36(5): 863–870. doi: 10.3724/SP.J.1006.2010.00863.  
李长宁, SRIVASTAVA M K, 农倩, 等. 水分胁迫下外源 ABA 提高甘蔗抗旱性的作用机制 [J]. *作物学报*, 2010, 36(5): 863–870. doi: 10.3724/SP.J.1006.2010.00863.
- [20] CORNELISSEN J H C, LAVOREL S, GARNIER E, et al. A handbook of protocols for standardised and easy measurement of plant functional traits worldwide [J]. *Aust J Bot*, 2003, 51(4): 335–380. doi: 10.1071/BT02124.
- [21] LIU G S. Soil Physical and Chemical Analysis & Description of Soil Profiles [M]. Beijing: Standards Press of China, 1996: 1–266.  
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: 1–266.
- [22] GARNIER E, SHIPLEY B, ROUMET C, et al. A standardized protocol for the determination of specific leaf area and leaf dry matter content [J]. *Funct Ecol*, 2001, 15(5): 688–695. doi: 10.1046/j.0269-8463.2001.00563.x.
- [23] BU W S, ZANG R G, DING Y, et al. Relationships between plant functional traits at the community level and environmental factors during succession in a tropical lowland rainforest on Hainan Island, South China [J]. *Biodiv Sci*, 2013, 21(3): 278–287. doi: 10.3724/SP.J.1003.2013.10012.  
卜文圣, 臧润国, 丁易, 等. 海南岛热带低地雨林群落水平植物功能性状与环境因子相关性随演替阶段的变化 [J]. *生物多样性*, 2013, 21(3): 278–287. doi: 10.3724/SP.J.1003.2013.10012.
- [24] ZHANG X N, WANG B P, SUN X Y, et al. Ability of anti-dehydration and aridity to anatomical structure of leaves of *Larrea tridentate* [J]. *Ecol Environ Sci*, 2011, 20(11): 1634–1637. doi: 10.3969/j.issn.1674-5906.2011.11.008.  
张香凝, 王保平, 孙向阳, 等. *Larrea tridentata* 叶片解剖结构与保水特性的研究 [J]. *生态环境学报*, 2011, 20(11): 1634–1637. doi: 10.3969/j.issn.1674-5906.2011.11.008.

- [25] CAI J, TYREE M T. The impact of vessel size on vulnerability curves: Data and models for within-species variability in saplings of aspen, *Populus tremuloides* Michx [J]. Plant Cell Environ, 2010, 33(7): 1059–1069. doi: 10.1111/j.1365-3040.2010.02127.x.
- [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] SHEN W Z, ZOU Y X, LIU F, et al. Study on the correlation between total polyphenol content in mulberry leaves and its *in vitro* antioxidant activity [J]. Sci Sericult, 2012, 38(6): 1073–1078. doi: 10.13441/j.cnki.cykx.2012.06.003.  
沈维治, 邹宇晓, 刘凡, 等. 桑叶总多酚含量与体外抗氧化能力的相关性研究 [J]. 蚕业科学, 2012, 38(6): 1073–1078. doi: 10.13441/j.cnki.cykx.2012.06.003.
- [28] LI N, HUANG J L, QU B, et al. Effect of drought on membrane lipid peroxidation and protective enzyme activities of *Potentilla* [J]. Chin J Grassland, 2011, 33(4): 73–77.  
李楠, 黄佳丽, 曲波, 等. 干旱胁迫对委陵菜膜脂过氧化作用及保护酶活性的影响 [J]. 中国草地学报, 2011, 33(4): 73–77.
- [29] PAN W, ZHANG F Q, ZHANG W Q, et al. Effects of high temperature and humidity stress on physiological-biochemical indexes of *Rhodoleia championii* and others and its comprehensive evaluation [J]. Guangdong For Sci Technol, 2012, 28(3): 1–8. doi: 10.3969/j.issn.1006-4427.2012.03.001  
潘文, 张方秋, 张卫强, 等. 高温高湿胁迫对红花荷等植物生理生化指标的影响及评价 [J]. 广东林业科技, 2012, 28(3): 1–8. doi: 10.3969/j.issn.1006-4427.2012.03.001
- [30] JIAO R, LIU H B, LIU G S, et al. Discussion of accumulation of proline and its relationship with osmotic stress tolerance of plants [J]. Chin Agric Sci Bull, 2011, 27(7): 216–221.  
焦蓉, 刘好宝, 刘贵山, 等. 论脯氨酸累积与植物抗渗透胁迫 [J]. 中国农学通报, 2011, 27(7): 216–221.
- [31] IKEGAMI K, OKAMOTO M, SEO M, et al. Activation of abscisic acid biosynthesis in the leaves of *Arabidopsis thaliana* in response to water deficit [J]. J Plant Res, 2009, 122(2): 235–243. doi: 10.1007/s10265-008-0201-9.
- [32] ELSER J J, FAGAN W F, DENNO R F, et al. Nutritional constraints in terrestrial and freshwater food webs [J]. Nature, 2000, 408(6812): 578–580. doi: 10.1038/35046058.
- [33] LU Q, WANG J, ZHANG Q M, et al. The ecological and biological characteristics of *Mucuna birdwoodiana* [J]. Ecol Sci, 2009, 28(3): 212–216. doi: 10.3969/j.issn.1008-8873.2009.03.004.  
卢琼, 王俊, 张倩媚, 等. 白花油麻藤(*Mucuna birdwoodiana*)的生态生物学特征 [J]. 生态科学, 2009, 28(3): 212–216. doi: 10.3969/j.issn.1008-8873.2009.03.004.
- [34] REICH P B, OLEKSYN J. Global patterns of plant leaf N and P in relation to temperature and latitude [J]. Proc Natl Acad Sci USA, 2004, 101(30): 11001–11006. doi: 10.1073/pnas.0403588101.
- [35] ZHANG C, CHEN H S, ZHANG W, et al. Spatial variation characteristics of surface soil water content, bulk density and saturated hydraulic conductivity on Karst slopes [J]. Chin J Appl Ecol, 2014, 25(6): 1585–1591. doi: 10.13287/j.1001-9332.20140415.013.  
张川, 陈洪松, 张伟, 等. 喀斯特坡面表层土壤含水量、容重和饱和导水率的空间变异特征 [J]. 应用生态学报, 2014, 25(6): 1585–1591. doi: 10.13287/j.1001-9332.20140415.013.