

滨豇豆的生态生物学特征

黄耀^{1,2}, 刘楠¹, 简曙光¹, 王俊¹, 任海¹

(1. 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; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 为探究滨豇豆(*Vigna marina*)的生态生物学特性及其对热带珊瑚岛的适应性, 对西沙群岛野生滨豇豆的叶片形态解剖结构、生理特征和营养成分进行了分析。结果表明, 滨豇豆具有叶片厚、比叶面积小、栅栏组织发达、气孔密度大、气孔面积指数大等形态特征, 对减少蒸腾、保持水分起到重要作用。滨豇豆叶片的 SOD 活性和脯氨酸(Pro)含量高, 丙二醛(MDA)含量低, 表明抗氧化能力较强; 滨豇豆叶片养分含量适中但其生境土壤养分含量很低, 说明其对养分有着良好的吸收利用能力, 利于适应贫瘠的环境。因此, 滨豇豆具有能够较好地适应珊瑚岛礁高温、干旱、贫瘠生境的形态解剖结构和生理特征, 加之其具有良好的固氮和养分利用能力, 可作为热带珊瑚岛植被恢复的工具种。

关键词: 滨豇豆; 叶片; 生态学; 生理; 固氮; 西沙群岛

doi: 10.11926/jtsb.3923

Ecological and Biological Characteristics of *Vigna marina*

HUANG Yao^{1,2}, LIU Nan¹, JIAN Shu-guang¹, WANG Jun¹, REN Hai¹

(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)

Abstract: In order to understand the bio-ecological characters of *Vigna marina* and its adaptability to the tropical coral island, the anatomical structure, physiological characteristics and nutritional components of the leaves were studied. The results showed that *V. marina* had thick leaves, low SLA, well-developed palisade tissue, high stomatal density and high stomatal area index, which played an important role in decreasing transpiration and maintaining moisture. The SOD and POD activities in leaves were high, while the MDA content was low, showing strong antioxidant capacity. The content of nutrients in leaves of *V. marina* was moderate, but that in soil was low, indicating that *V. marina* had a good ability to absorb and utilize nutrients, which was beneficial to adapt to the barren environment. Therefore, *Vigna marina* can adapt well to the habitat of high temperature, drought and high salinity. It can be used in wind-break, sand-fixation and vegetation restoration in tropical coral islands.

Key words: *Vigna marina*; Leaf; Ecology; Physiology; Nitrogen fixation; Paracel Island

滨豇豆(*Vigna marina*)是蝶形花科(Fabaceae)豇豆属的多年生藤本植物, 一般生长于海边沙地, 是热带地区(如菲律宾、澳大利亚、非洲和美洲热带地区)的广布种, 同时在我国海南(尤其是西沙群岛)和台湾有分布^[1]。滨豇豆为多年生草质藤本, 其单株长可达数米; 羽状复叶具 3 小叶, 叶片近革质, 卵

圆形或倒卵形, 全缘, 长 3.5~9.5 cm, 宽 2.5~9.5 cm, 基出脉 3 条, 无毛或近无毛; 总状花序, 有花 1 朵或多朵, 长 2~4 cm, 被短柔毛; 花冠黄色, 旗瓣倒卵形(图 1: A); 荚果线状长圆形, 长约 3~6 cm, 宽约 8 mm, 无毛或疏被柔毛, 荚果中部常收缩, 顶端有喙(图 1: C); 每个荚果中有种子 2~6 颗(图 1: B),

收稿日期: 2018-04-08

接受日期: 2018-05-31

基金项目: 中国科学院 A 类战略性先导科技专项(XDA13020500); NSFC-广东联合基金(U1701246); 广州市科技计划项目(201710010137)资助

This work was supported by the Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences (Grant No. XDA13020500), NSFC-Guangdong Joint Fund and Science (Grant No. U1701246), and the Project for Science and Technology Plan of Guangzhou (Grant No. 201710010137).

作者简介: 黄耀(1992~), 男, 博士研究生, 研究方向为景观与恢复生态学。E-mail: huangyao.ok@scbg.ac.cn

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

黄褐色或红褐色，长圆形。滨豇豆的花期 3-10 月，果期 4-11 月。

滨豇豆的研究主要集中在形态学特征和生境^[2-3]、对盐胁迫的适应能力^[4]和同工酶的多态现象^[5]等方面。滨豇豆具有较强的耐盐和抗旱特性，其根与根瘤菌共生，能够固 N 增加土壤肥力的同时改良盐碱环境^[6]；种子淀粉含量丰富，可作为粮食、蔬菜等，叶片中含有的洋槐甙，有较好的利尿和抗炎作用^[7-8]；作为热带海岛适生植物，还具有一定的观赏价值和海岛植被恢复应用潜力。目前，有关在热带珊瑚岛自然生长的滨豇豆生态生物学适应性研究还很少。本文以西沙珊瑚岛生长的滨豇豆为研究对象，从形态解剖学特征、叶片营养元素及抗氧化能力、根际土壤理化性质等方面进行研究，旨在了解滨豇豆的生态生物学基本特性及其对热带珊瑚岛环境的生态适应性，为该物种的引种、栽培、保护及开发利用提供科学参考。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

西沙群岛位于我国南海的中北部，海南岛东南，以永兴岛为中心，由宣德群岛和永乐群岛组成，分布于北纬 15°47'~17°08'，东经 111°10'~112°55'，距海南岛约 330 km^[9]。年均温 26℃ 以上， $\geq 10^\circ\text{C}$ 年积温达 9 962.8℃，年降水 1 400 mm 左右，年蒸发量 2 472.6 mm，每年 6-11 月为湿季，降水占全年的 85.7%，12 月至翌年 5 月为干季，蒸发量超过 1 200 mm。西沙群岛降水的季节分布不均，导致岛上植物受干湿季节影响明显，存在季节性干旱，加之土壤沙质，保水能力差，生长在岛上的植物会受到干旱胁迫^[10]。西沙群岛上的植物种类比较少，优势种主要有抗风桐(*Ceodes grandis*)、海岸桐(*Guettarda speciosa*)、草海桐(*Scaevola sericea*)、海滨木巴戟(*Morinda citrifolia*)、厚藤(*Ipomoea pes-caprae*)、滨

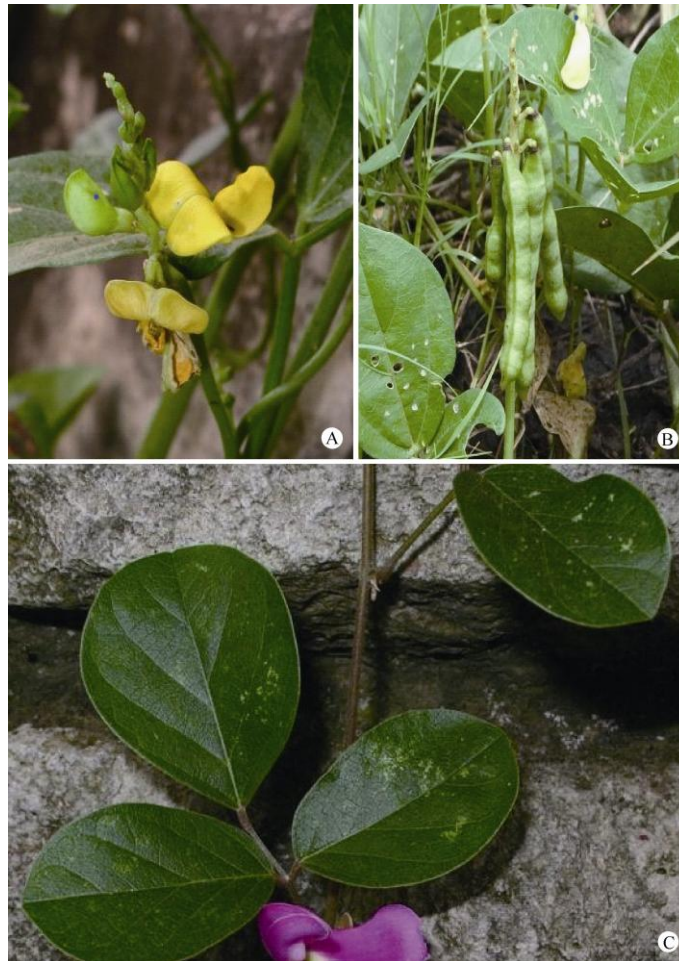


图 1 滨豇豆。A: 花; B: 果实; C: 叶片。

Fig.1 *Vigna marina*. A: Flowers; B: Fruits; C: Leaves.

豇豆、葛雷草(*Thuarea involuta*)等, 滨豇豆通常是以不连续的群丛片段分布于海边的沙地上^[11]。

1.2 方法

2016年6月在西沙群岛的石岛选取5株健康的野生滨豇豆成年植株, 采集生长发育良好的叶片和匍匐茎分别装入装有湿滤纸的封口袋中并置于车载冰箱(4℃), 上岸后用冰盒带回实验室, 保存于4℃冰箱中待用^[12]。

采用LI3000叶面积仪测量叶片的叶面积, 称量叶片鲜重后置于65℃烘箱中烘至恒重, 再称量干重。比叶面积(SLA)=叶面积(LA)/叶片干重(DW)^[13], 叶干物质含量(LDMC)=叶干重(DW)/叶鲜重(FW)^[12]。

采用常规徒手切片法制作叶片切片, 在光学显微镜下观察并测量叶片厚度、海绵和栅栏组织的厚度、上表皮厚度、气孔保卫细胞的大小和气孔密度。气孔面积指数(SPI)^[14]=气孔密度×(保卫细胞)²。

叶绿素含量测定 从每株植株上选取3片叶子, 对叶片的不同部位进行打孔, 用80%的丙酮溶液浸提叶圆片, 浸提液使用分光光度计(UV-3802, Unico)测定663、645 nm处的吸光度, 取平均值, 计算滨豇豆叶片中叶绿素a(Chl a)、叶绿素b(Chl b)和总叶绿素(Chl a+b)含量和叶绿素a/b(Chl a/b)^[15]。

脯氨酸和总酚含量测定 脯氨酸(Pro)含量采用磺基水杨酸提取、酸性茚三酮染色法测定, 在520 nm处读取吸光值^[16]; 总酚含量采用Folin-Ciocalteu法测定^[17]。每植株3个重复。

抗氧化酶活性测定 从每株植株上选取3片叶子研磨。超氧化物歧化酶(SOD)活性用氮蓝四唑(NBT)法测定^[18], 以在反应体系中抑制百分率为50%时为1个酶活性单位(U g⁻¹ FW)。过氧化氢酶(POD)活性用愈创木酚显色法^[19], 以1 min内470 nm下的吸光度变化0.5为1个酶活性单位(U g⁻¹ FW)。过氧化物酶(CAT)活性采用紫外吸收法测定^[20], 以1 g组织1 min内催化1 nmol过氧化氢降解为1个酶活性单位。

脱落酸(ABA)和丙二醛(MDA)含量测定 ABA含量采用高效液相色谱法测定^[21], 将研磨后的叶片提取液加入高效液相色谱仪中, 测定在254 nm处的吸光度, 计算ABA含量。丙二醛的测定采用硫代巴比妥酸法^[22], 测定在分光光度计532和600 nm下的吸光值, 计算MDA含量。每植株3个重复。

叶片营养元素测定 取烘干的叶片测定碳、氮、磷含量。总碳采用丘林法进行测定^[23], 总氮采

用凯氏定氮法进行测定^[27]。总磷采用硝酸/高氯酸消煮, 钼蓝比色法测定^[24]。

土壤理化性质测定 在滨豇豆样地中随机选取6个样点, 用直径4 cm的土钻取0~20 cm根际土柱并充分混合, 放入密封袋低温保存, 带回实验室风干, 剔除植物残体、根系和岩屑等异物后过2 mm筛。参照《土壤理化性质分析》, 采用电位法测定土壤pH; 电导率法测定土壤盐分; 有机质采用油浴-加热重铬酸钾-氧化容量法测定; 全氮采用凯氏定氮法测定; 磷含量采用高氯酸-硫酸法; 速效钾采用乙酸铵浸提-火焰光度计法测定; Fe采用邻菲罗啉光度法测定; Ca、Mg、Na采用火焰原子吸收分光光度法测定^[25]。

1.3 数据处理

数据分析采用Microsoft Office Excel 2010软件, 采用Adobe illustrator cs6进行作图。

2 结果和分析

2.1 形态解剖学特征

滨豇豆的叶片厚度和上表皮厚度分别为505.2和40.6 μm, 比叶面积为139.6 cm² g⁻¹。叶片的上表皮厚度、栅栏组织和海绵组织厚度分别为40.6、221.2和213.5 μm, 栅栏组织/海绵组织为1.051, 栅栏组织要比海绵组织略微发达。叶片的气孔保卫细胞长28.1 μm, 气孔密度为211.1 mm⁻², 气孔面积指数为0.139(图1)。

2.2 生理学特征

叶绿素含量 滨豇豆叶片叶绿素a和b含量分别为0.52和0.38 mg g⁻¹, 叶绿素a/b为1.376。

抗氧化酶活性、总酚、丙二醛和脯氨酸含量 滨豇豆SOD、POD和CAT活性分别为208.4、37.9和35.7 U g⁻¹。总酚含量为136.6 mg g⁻¹, 丙二醛含量为41.7 nmol g⁻¹, 脯氨酸含量为90.5 μg g⁻¹。

叶片营养元素和脱落酸含量 滨豇豆叶片总氮、总有机碳和总磷含量分别为24.9、422.2和4.2 g kg⁻¹, 碳氮比为17.0, 氮磷比为5.9, 脱落酸含量为3.0 μg g⁻¹。

2.3 土壤理化性质测定

滨豇豆生长在永兴岛、石岛边缘地势较高的沙堤上, 土壤以冲击珊瑚沙混合少许石灰质腐殖土构

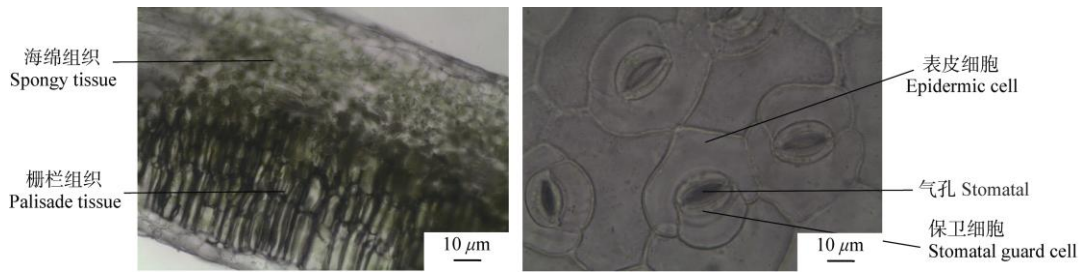


图 2 滨豇豆叶片的解剖结构

Fig. 2 Anatomical structure of *Vigna marina*

成, 土壤 pH 值为 8.53, 偏碱性, 根系土壤含水量为 9.5%, 全磷、全氮和有机碳含量分别为 0.03、3.06 和 9.3 g kg^{-1} 。金属元素中, 钙的含量最高为 54.14 g kg^{-1} , 钠的含量最低, 为 0.131 g kg^{-1} 。

3 结论和讨论

3.1 形态解剖特征

叶片是植物进化过程中对环境变化比较敏感且可塑性较大的器官, 环境的变化会导致叶片的形态特征等出现变化, 而叶片本身对环境变化比较敏感, 通过形态可以了解植物的生态适应情况^[26]。叶表皮角质膜厚度、气孔数量和内部导管大小等能够反映植物对环境水分和湿度条件的适应状况^[27]; 叶片比叶面积则反映了植物获取资源的能力, 比叶面积值越高, 表明植物对营养物质的保存能力越强^[28]。陆地藤本植物三叶爬山虎(*Parthenocissus semicordata*)^[29]的叶片厚度为 $157.77 \sim 299.17 \mu\text{m}$, 上、下表皮厚度分别为 $21.30 \sim 28.40$ 和 $16.14 \sim 19.01 \mu\text{m}$; 栅栏组织厚度为 $30.83 \sim 124.65 \mu\text{m}$, 细胞表面积为 $430.95 \sim 652.97 \mu\text{m}^2$, 细胞长度为 $29.23 \sim 49.54 \mu\text{m}$, 周长为 $86.58 \sim 155.17 \mu\text{m}$; 气孔长度为 $24.13 \sim 27.10 \mu\text{m}$, 气孔密度为 $86.20 \sim 129.41 \text{ mm}^{-2}$ 。相比之下, 滨豇豆叶片栅栏组织更厚、气孔密度也更大, 因此滨豇豆在高温环境下更好地保持水分。在荒漠、沙地等条件下, 多数一年生、多年生灌草的比叶面积为 $86 \sim 295 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$ ^[30]。厚藤作为西沙群岛常见的一种草质藤本, 叶片厚为 $270 \mu\text{m}$, 栅栏组织厚 $126.7 \mu\text{m}$, 比滨豇豆叶片的栅栏组织要薄。栅栏组织的厚度和光合作用息息相关, 栅栏组织越厚, 光合能力越强^[31]。滨豇豆叶片既厚且大, 角质层薄, 气孔多, 叶肉栅栏组织发达, 具有较高的抗旱抗风和抗强光的能力, 也可以更好地吸收空气中的 CO_2 , 相较于厚藤、

爬山虎等草质藤本, 滨豇豆具有更强的光合能力, 较大的气孔密度也可以提高植物体内水分蒸腾, 避免强光、高温条件下植株受到高温伤害。这些阳生植物特征使得滨豇豆可以在干旱的环境下充分利用光合作用有效增加生物量, 植物体有更强的生存竞争能力。

3.2 生理学特征

高等植物叶片中的叶绿素 a 和 b, 是把光能转化成化学能的重要色素, 其主要功能是吸收太阳光并转化成化学能储备于植物体, 为整个生物圈提供能量^[32]。土壤污染、高温、空气污染等都会对叶绿素含量有影响^[33]。陈必胜^[34]报道植物叶片的叶绿素含量为 $0.8 \sim 1.8 \text{ mg g}^{-1}$, 滨豇豆叶片叶绿素含量较低, 可以减少过剩光能进入光合系统而产生过氧化伤害, 而海岛高温、土壤贫瘠也会导致滨豇豆叶片叶绿素分解、合成困难。

西沙群岛年降水量很高, 但降水有明显的季节性, 通常生长在不易保水的冲击珊瑚沙上的滨豇豆经常受到干旱胁迫, 而植物体的代谢会随着环境的变化而发生改变^[35]。当遇到胁迫环境时, 滨豇豆叶片的酶保护系统启动, 如 SOD、POD 等, 以清除活性氧, 防止膜系统遭到活性氧的破坏, 使其维持正常的生理功能。SOD 能够催化 O_2^- 发生歧化反应生成 H_2O_2 和 O_2 , CAT 和 POD 等将产生的 H_2O_2 进一步分解^[35-36]。受到高温、干旱等逆境的植物, 其 SOD 和 CAT 活性有所提高^[37]。干旱胁迫下芒草(*Epimeredi indica*)的 SOD 活性约为 $150 \sim 400 \text{ U g}^{-1}$ ^[38], 而滨豇豆 SOD 活性中等, 可以在一定程度上减轻植物受干旱胁迫的伤害。不仅如此, 植物体内的酚类物质也具有较强的抗氧化活性, 是天然抗氧化化合物的重要来源, 与沿海红树植物红海榄(*Rhizophora stylosa*)的总酚含量为 $10.72 \sim 16.91 \text{ mg g}^{-1}$ ^[39],

滨豇豆的达 136.64 mg g^{-1} , 说明滨豇豆的抗氧化能力在一定程度上来自总酚。

MDA 含量可反映过氧化作用对细胞膜脂的损伤程度^[40], 受逆境胁迫的芒草 MDA 含量为 $1.387 \sim 29.142 \mu\text{mol g}^{-1}$ ^[41], 而滨豇豆的 MDA 含量较低, 说明滨豇豆抗氧化系统活跃, 清除了逆境下体内聚集的大量活性氧, 膜脂过氧化程度较低^[42], 植物细胞生物膜的结构功能并没有因为受到热带珊瑚岛高温干旱的气候而遭到明显破坏。

3.3 叶片营养元素和土壤理化性质

滨豇豆通常分布在地势较高、排水良好的沙堤上, 土壤含水量仅 9.5%, 参照《中华人民共和国水利行业标准》, 属于严重干旱等级的砂质土或珊瑚沙^[43], 土壤碱性较高, Ca^{2+} 含量高, N、P、K、Na 含量低。石岛是主要由碳酸钙等物质长期形成的珊瑚岛, 土壤干旱且贫瘠。湖滨带生长的 4 种植物的总氮、总磷含量分别为 $2.36 \sim 24.47$ 、 $2 \sim 7.35 \text{ g kg}^{-1}$ ^[44], 而滨豇豆叶片的全氮、全磷含量都很高, 说明滨豇豆可以通过根系富集生境中的水和营养元素, 对土壤中养分利用能力比较高, 能够很好地适应水分、养分贫瘠的土壤。

西沙群岛上自然生长的滨豇豆叶片厚, 栅栏组织发达, 叶绿素含量高; SOD 活性高, MDA 含量较低, 表明滨豇豆是阳生植物, 对热带珊瑚岛礁海滨沙地具有良好的适应性, 具有耐贫瘠的特性。在西沙群岛的滨豇豆生长速度快, 叶片面积大, 生长密度大, 地表覆盖率高, 根系生长快且深, 具有很强的固沙能力, 因此滨豇豆可作为一种构建海滨绿地、防风固沙的优良工具种。

参考文献

[1] Deletis Florae Reipublicae Popularis Sinicae, Agendae Academiae Sinicae Edita. Florae Reipublicae Popularis Sinicae, Tomus 41 [M]. Beijing: Science Press, 2004: 154–157.
中国科学院中国植物志编辑委员会. 中国植物志, 第 41 卷 [M]. 北京: 科学出版社, 2004: 154–157.

[2] WU Z Y, RAVEN P H, HONG D Y, et al. Flora of China, Vol. 10 [M]. Beijing: Science Press & St. Louis: Missouri Botanical Garden Press, 2010: 109,256.

[3] ZENG X F, QIU H Y, ZHENG Z H, et al. Three newly recorded naturalized plants in Hainan province [J]. Guangdong Agric Sci, 2013, 40(8): 170–171.

曾宪锋, 邱贺媛, 郑泽华, 等. 海南 3 种新记录归化植物 [J]. 广东农业科学, 2013, 40(8): 170–171.

[4] REN H, JIAN S G, ZHANG Q M, et al. Plants and vegetation on South China Sea Islands [J]. Ecol Environ Sci, 2017, 26(10): 1639–1648.
任海, 简曙光, 张倩媚, 等. 中国南海诸岛的植物和植被现状 [J]. 生态环境学报, 2017, 26(10): 1639–1648.

[5] LIU Y M, FENG Y, YANG H B, et al. Effects of salt stress on seed germination and growth of two *Vigna* plants [J]. Chin J Trop Agric, 2017, 37(11): 11–15,26.
刘一明, 冯宇, 杨虎彪, 等. NaCl 对 2 种豇豆属植物种子萌发和幼苗生长的影响 [J]. 热带农业科学, 2017, 37(11): 11–15,26.

[6] GARBA M, PASQUET R S. Isozyme polymorphism within section reticulatae of genus *Vigna* (tribe Phaseoleae: Fabaceae) [J]. Biochem Syst Ecol, 1998, 26(3): 297–308.

[7] XIA J H, YU H R, ZOU R Y, et al. Effects of 6-BA, GA₃ and SA on seed germination of muskmelon [J]. Jiangsu Agric Sci, 2015, 43(12): 204–206.
夏瑾华, 喻慧荣, 邹如意, 等. 6-BA、赤霉素和水杨酸对甜瓜种子萌发的影响 [J]. 江苏农业科学, 2015, 43(12): 204–206.

[8] ZHOU Y Z. Studies on components of leguminous plants: Flavonoids in eight species, *Acacia*, *Dachshund*, etc [J]. For Med Sci Sect Pharm, 1979(2): 121. doi: 10.13220/j.cnki.jjpr.1979.02.018.
周有作. 豆科植物成份研究: 银合欢、腊肠树等八种植物中的黄酮类成份 [J]. 国外医学: 药学分册, 1979(2): 121. doi: 10.13220/j.cnki.jjpr.1979.02.018.

[9] ПОГОДИНА Л И. YUAN Y W, translated. Bioactive substance and pharmacological action of *Robinia* [J]. For Med Sci Sect Pharm, 1981 (6): 332–334. doi: 10.13220/j.cnki.jjpr.1981.06.003.
ПОГОДИНА Л И. 袁以苇, 译. 刺槐属植物的生物活性物质及其药理作用 [J]. 国外医学: 药学分册, 1981(6): 332–334. doi: 10.13220/j.cnki.jjpr.1981.06.003.

[10] 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.
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.

[11] JIAN S G, REN H. Atlas on Tool Species for Vegetation Restoration on Tropical Coral Islands [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2017: 104–105.
简曙光, 任海. 热带珊瑚岛礁植被恢复工具种图谱 [M]. 北京: 中国林业出版社, 2017: 104–105.

[12] YU J. Research on anatomical structure and ecological adaptability of dominant plants in Poyang Lake wetland [D]. Nanchang: Nanchang University, 2014: 13–17.
余静. 鄱阳湖湿地优势植物的解剖结构及其生态适应性研究 [D].

- 南昌: 南昌大学, 2014: 13–17.
- [13] GOWER S T, KUCHARIK C J, NORMAN J M. Direct and indirect estimation of leaf area index, f_{APAR} , and net primary Production of terrestrial ecosystem [J]. *Remote Sens Environ*, 1999, 70(1): 29–51. doi: 10.1016/S0034-4257(99)00056-5.
- [14] GONG P. Ecological adaptation of five aromatic plants at Hainan region [D]. Haikou: Hainan University, 2011: 13–16.
龚萍. 五种香草植物在海南地区的生态适应性研究 [D]. 海口: 海南大学, 2011: 13–16.
- [15] PAN J, HAN L. Comparison of methods for determination of chlorophyll content in grape leaves [J]. *NW Hort (Integ)*, 2017(6): 58–60.
潘静, 韩蕾. 葡萄叶片叶绿素含量测定方法比较 [J]. *西北园艺(综合版)*, 2017(6): 58–60.
- [16] 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.
- [17] SUN Q, HU J J. Research Technology of Plant Physiology [M]. Yangling: Northwest Agricultural and Forestry University Press, 2006: 23–36.
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: 23–36.
- [18] LIAO Z R, ZHANG S, SHI J E, et al. An assay of superoxide dismutase activity of binuclear copper (II), iron (III), manganese (II) model compounds: By means of nitroblue tetrazolium photoreduction [J]. *J C China Norm Univ (Nat Sci)*, 1993, 27(2): 71–77.
廖展如, 张舒, 石巨恩, 等. 双核铜(II), 铁(III), 锰(II)模型化合物的超氧化物歧化酶活性检测——氮蓝四唑光还原法 [J]. *华中师范大学学报(自然科学版)*, 1993, 27(2): 71–77.
- [19] BEVILACQUA A, SINIGAGLIA M, CORBO M R. *Alicyclobacillus acidoterrestris*: New methods for inhibiting spore germination [J] *Int J Food Microbiol*, 2008, 125(2): 103–110. doi: 10.1016/j.ijfoodmicro.2008.02.030.
- [20] CHEN H Y, FAN T, ZHANG Z, et al. Effects of four plants on soil microbial biomass and soil enzyme activity in heavy metal combined polluted soil [J]. *Environ Prot*, 2018, 46(1): 65–69. doi: 10.14026/j.cnki.0253-9705.2018.01.013.
陈海燕, 樊霆, 张泽, 等. 不同植物修复重金属复合污染土壤对土壤中微生物数量与酶活性的影响 [J]. *环境保护*, 2018, 46(1): 65–69. doi: 10.14026/j.cnki.0253-9705.2018.01.013.
- [21] XU L F. Study and application of high performance liquid chromatography and mass spectrometry in the analysis of plant hormones and organic acids [D]. Kaifeng: Henan University, 2016: 25–31.
徐林芳. 高效液相色谱及质谱技术在植物激素和有机酸分析中的研究与应用 [D]. 开封: 河南大学, 2016: 25–31.
- [22] LI Z F, WU X D. Experimental design scheme for the effect of drought stress on content of malondialdehyde of indoor ornamental plants [J]. *Tianjin Agric Sci*, 2016, 22(9): 49–51. doi: 10.3969/j.issn.1006-6500.2016.09.011.
李子芳, 吴锡冬. 植物丙二醛含量测定试验设计方案 [J]. *天津农业科学*, 2016, 22(9): 49–51. doi: 10.3969/j.issn.1006-6500.2016.09.011.
- [23] LI H E, LIU H R, ZHANG J X, et al. Improvement of thalumus method for measuring soil organic [J]. *Chin J Soil Sci*, 1987(4): 187–188. doi: 10.19336/j.cnki.trtb.1987.04.016.
李鸿恩, 刘惠容, 张建新, 等. 测定土壤有机质丘林法的改进 [J]. *土壤通报*, 1987(4): 187–188. doi: 10.19336/j.cnki.trtb.1987.04.016.
- [24] SUN Z X. Comparison between Keeldahl method and Nye colorimetric method for determination of total nitrogen in plants [J]. *Mod Agric Sci Technol*, 2011(24): 41,44. doi: 10.3969/j.issn.1007-5739.2011.24.016.
孙宗训. 凯氏定氮法和奈氏比色法测定植株全氮方法的比较 [J]. *现代农业科技*, 2011(24): 41,44. doi: 10.3969/j.issn.1007-5739.2011.24.016.
- [25] YANG G Y, ZHOU J. Determination of phosphorus content in oil by microwave digestion-ascorbic acid-molybdenum blue colorimetric method [J]. *J Chin Cer Oils Assoc*, 2016, 31(1): 117–122. doi: 10.3969/j.issn.1003-0174.2016.01.023.
杨国燕, 周坚. 微波消解-抗坏血酸-钼蓝比色法测定油脂中磷含量 [J]. *中国粮油学报*, 2016, 31(1): 117–122. doi: 10.3969/j.issn.1003-0174.2016.01.023.
- [26] YANG J H, WANG C L, DAI H L. *Soil Agrochemical Analysis and Environmental Monitoring* [M]. Beijing: China Earth Press, 2008: 26–79.
杨剑虹, 王成林, 代亨林. 土壤农化分析与环境监测 [M]. 北京: 中国大地出版社, 2008: 26–79.
- [27] CAI Y L, SONG Y C. Adaptive ecology of lianas in Tiantong evergreen broad-leaved forest, Zhejiang, China: I. Leaf anatomical characters [J]. *Acta Phytoecol Sin*, 2001, 25(1): 90–98.
蔡永立, 宋永昌. 浙江天童常绿阔叶林藤本植物的适应生态学: I. 叶片解剖特征的比较 [J]. *植物生态学报*, 2001, 25(1): 90–98.
- [28] LAMBERS H, POORTER H. Inherent variation in growth rate between higher plants: A search for physiological causes and ecological consequences [J]. *Adv Ecol Res*, 1992, 23: 187–261. doi: 10.1016/S0065-2504(08)60148-8.
- [29] WU T, GENG Y F, CHAI Y, et al. Response of leaf anatomical structure and photosynthesis characteristics of *Parthenocissus himalayana* to three habitat types [J]. *Ecol Environ Sci*, 2014, 23(10): 1586–1592. doi: 10.3969/j.issn.1674-5906.2014.10.004.
吴涛, 耿云芬, 柴勇, 等. 三叶爬山虎叶片解剖结构和光合生理特

- 性对 3 种生境的响应 [J]. 生态环境学报, 2014, 23(10): 1586–1592. doi: 10.3969/j.issn.1674-5906.2014.10.004.
- [30] LI Y L, CUI J H, SU Y Z. Specific leaf area and leaf dry matter content of some plants in different dune habitats [J]. Acta Ecol Sin, 2005, 25(2): 304–311. doi: 10.3321/j.issn:1000-0933.2005.02.019.
- 李玉霖, 崔建垣, 苏永中. 不同沙丘生境主要植物比叶面积和叶干物质含量的比较 [J]. 生态学报, 2005, 25(2): 304–311. doi: 10.3321/j.issn:1000-0933.2005.02.019.
- [31] SUN J, NISHIO J N, VOGELMANN T C. High-light effects on CO₂ fixation gradients across leaves [J]. Plant Cell Environ, 1996, 19(11): 1261–1271.
- [32] ZHANG Y S, ZHANG S J, LI Z K. Characteristics of plant chlorophyll and the prospects for its use in forest ecological study [J]. J Anhui Agric Sci, 2008, 36(3): 1014–1017. doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2008.03.073.
- 张友胜, 张苏峻, 李镇魁. 植物叶绿素特征及其在森林生态学研究中的应用 [J]. 安徽农业科学, 2008, 36(3): 1014–1017. doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2008.03.073.
- [33] de VRIES W, KLAP J M, ERISMAN J W. Effects of environmental stress on forest crown condition in Europe. Part 1: hypotheses and approach to the study [J]. Water Air Soil Pollut, 2000, 119(1/2/3/4): 317–333. doi: 10.1023/A:1005157509454.
- [34] CHEN B S, JIANG C H, QIN J, et al. Impact of different artificial conditions on some physiological indexes of tropical plants [J]. J Anhui Agric Sci, 2005, 33(12): 2363–2364. doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2005.12.081.
- 陈必胜, 蒋昌华, 秦俊, 等. 可控温室环境对热带植物部分生理指标的影响 [J]. 安徽农业科学, 2005, 33(12): 2363–2364. doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2005.12.081.
- [35] LUO Q, LIU H, WU G L, et al. Using functional traits to evaluate the adaptability of five plant species on tropical coral islands [J]. Acta Ecol Sin, 2018, 38(4): 1256–1263. doi: 10.5846/stxb201612152597.
- 罗琦, 刘慧, 吴桂林, 等. 基于功能性状评价 5 种植物对热带珊瑚岛环境的适应性 [J]. 生态学报, 2018, 38(4): 1256–1263. doi: 10.5846/stxb201612152597.
- [36] TONG F D, HU J S, CHEN J H, et al. Effect of the different methods of rice nursery on activity of superoxide dismutase, ion leakage of rice leaves and root growing power [J]. J Zhejiang Agric Univ, 1997, 23(6): 682–686.
- 童富淡, 胡家恕, 陈进红, 等. 不同育秧方式对早稻叶片 SOD 活性、电解质渗透率和发根力的影响 [J]. 浙江农业大学学报, 1997, 23(6): 682–686.
- [37] YANG Y F, LIANG Y C, LOU Y S, et al. Influences of silicon on peroxidase, superoxide dismutase activity and lignin content in leaves of wheat (*Triticum aestivum* L.) and its relation to resistance to powdery mildew [J]. Sci Agric Sin, 2003, 36(7): 813–817. doi: 10.3321/j.issn:0578-1752.2003.07.014.
- 杨艳芳, 梁永超, 娄运生, 等. 硅对小麦过氧化物酶、超氧化物歧化酶和木质素的影响及与抗白粉病的关系 [J]. 中国农业科学, 2003, 36(7): 813–817. doi: 10.3321/j.issn:0578-1752.2003.07.014.
- [38] MA W R, TONG J M, SHAN C H. The characteristics of superoxide dismutase and its research in plant resistance [J]. Food Ind, 2013, 34(9): 154–158.
- 马伟荣, 童军茂, 单春会. 超氧化物歧化酶(SOD)的特征及在植物抗逆性方面的研究进展 [J]. 食品工业, 2013, 34(9): 154–158.
- [39] ZHOU J, LI G, XU J. Contents analysis antioxidant activities of total phenolics and flavonoid from different parts of *Rhizophora stylosa* [J]. Food Sci Technol, 2017, 42(6): 220–224. doi: 10.13684/j.cnki.spkj.2017.06.048.
- 周婧, 李钢, 徐静. 红海榄不同部位总酚和总黄酮含量分析及抗氧化活性研究 [J]. 食品科技, 2017, 42(6): 220–224. doi: 10.13684/j.cnki.spkj.2017.06.048.
- [40] PRYOR W A. Free Radicals in Biology [M]. New York: Academic Press, 1976: 331–332.
- [41] MA F L, CHEN Y, NIE J J, et al. Physiological response of 4 species of *Miscanthus* ornamental grass to drought stress [J]. J For Environ, 2016, 36(2): 180–187. doi: 10.13324/j.cnki.jfcf.2016.02.009.
- 马芳蕾, 陈莹, 聂晶晶, 等. 4 种芒属观赏草对干旱胁迫的生理响应 [J]. 森林与环境学报, 2016, 36(2): 180–187. doi: 10.13324/j.cnki.jfcf.2016.02.009.
- [42] 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.
- [43] Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Water Conservancy Industry Standard of the People's Republic of China [M]. Beijing: China Water Power Press, 2009.
- 中华人民共和国水利部. 中华人民共和国水利行业标准 [S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009.
- [44] ZHANG C Y, XU D L, WAN L, et al. Relationship between N and P contents in four types of plants and soils in riparian zone of Luomahu Lake [J]. Res Soil Water Conserv, 2013, 20(2): 38–42,47.
- 张翠英, 徐德兰, 万蕾, 等. 骆马湖滨岸带 4 种植物氮磷与土壤氮磷含量关系 [J]. 水土保持研究, 2013, 20(2): 38–42,47.