

# 红马蹄草的生态生物学特征及其扦插繁殖

袁莲莲<sup>1,2</sup>, 王少平<sup>2</sup>, 张倩媚<sup>2</sup>, 崔晓东<sup>3</sup>, 钟文超<sup>3</sup>, 黄小光<sup>3</sup>, 雷泽湘<sup>1</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, 广州 510650; 3. 南昆山自然保护区, 广东 惠州 516873)

**摘要:** 为了解红马蹄草(*Hydrocotyle nepalensis* Hook.)的生态生物学特征,对其形态解剖特征及光合特性进行了研究。结果表明,红马蹄草叶片较薄,栅栏组织不发达,海绵组织与栅栏组织厚度之比较大;遮荫条件下叶片的净光合速率日变化呈单峰型,具有较低的光补偿点、光饱和点、叶绿素 a/b 以及较高的表观量子效率、总叶绿素含量、叶绿素 b 含量,这显示其耐荫特性,对弱光环境的适应能力和利用弱光的能力较强。同时,红马蹄草扦插繁殖迅速,成活率较高,以荫蔽潮湿的生长环境为佳。因此,红马蹄草适合生长在弱光环境中,因其具有较高的观赏价值,是一种值得大力推广的地被植物。

**关键词:** 红马蹄草; 地被植物; 光合速率; 耐荫; 扦插繁殖

doi: 10.11926/j.issn.1005-3395.04.011

## Ecological and Biological Characteristics and Cutting Propagation of *Hydrocotyle nepalensis* Hook.

YUAN Lian-lian<sup>1,2</sup>, WANG Shao-ping<sup>2</sup>, ZHANG Qian-mei<sup>2</sup>, CUI Xiao-dong<sup>3</sup>, ZHONG Wen-chao<sup>3</sup>,  
HUANG Xiao-guang<sup>3</sup>, LEI Ze-xiang<sup>1</sup>, REN Hai<sup>2\*</sup>

(1. Zhongkai College of Agricultural Technology, Guangzhou 510225, China; 2. South China Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China; 3. Nankun Mountain Nature Reserve, Huizhou 516876, China)

**Abstract:** In order to understand the ecological and biological characteristics of *Hydrocotyle nepalensis* Hook., its morphological and photosynthetic features were studied. The results showed that leaf thickness was about 130.7  $\mu\text{m}$  with undeveloped palisade tissue, and the ratio of spongy tissue to palisade tissue was high. The diurnal net photosynthetic rate in leaves was a single peaked curve under shading condition. Meanwhile, *H. nepalensis* had low light saturation point, light compensation point, chlorophyll a/b and high apparent quantum yield, total chlorophyll content, chlorophyll b, which indicated its strong adaptive capacity and utilization ability to weak light. The cutting propagation of *H. nepalensis* had high survival under moist and shady conditions. Therefore, *H. nepalensis* is suitable to be planted in low light environment. Because of its high ornamental value, this species is an excellent ground cover plant for gardening.

**Key words:** *Hydrocotyle nepalensis*; Ground cover plant; Photosynthetic rate; Shade tolerance; Cutting propagation

随着我国城镇化的快速发展,由高层建筑、立交桥、林地等形成的荫蔽、半荫蔽土地日益增多<sup>[1]</sup>,弱光环境限制了植物的生存和生长。因此,结合植

物的生态特性,筛选和应用一些耐荫植物,科学配置乔木、灌木和地被植物显得尤为重要。

红马蹄草(*Hydrocotyle nepalensis* Hook.)为伞

收稿日期: 2014-10-21

接受日期: 2015-03-02

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项子课题(XDA05050206); 广东省科技攻关计划项目(2013B060400016)资助。

作者简介: 袁莲莲(1988~),女,硕士,主要研究方向为植物生理生态。E-mail: yllwsw11@126.com

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

形科(Umbelliferae)天胡荽属多年生草本。茎匍匐蔓生,高5~45 cm;叶片近圆形,掌状5~9浅裂;伞形花序,小球形,单生或数个聚生于小枝上端,小花绿白色。产于陕西、安徽、浙江、江西、湖南、湖北、广东、广西、四川、贵州、云南、西藏等省区,印度、马来西亚、印度尼西亚也有分布。生长于山坡、路旁、荫湿地、水沟和溪边草丛中。全草入药,治跌打损伤、感冒、咳嗽痰血<sup>[2]</sup>。红马蹄草是一种耐荫湿的地被草种,有较好的美化、绿化环境效果,是一种潜在园林植物。目前有关红马蹄草的研究主要集中在分类学描述<sup>[2]</sup>、品种鉴定<sup>[3]</sup>、果实花粉形态<sup>[4-5]</sup>、化学成分及药理作用<sup>[6]</sup>等方面。谢振华等认为红马蹄草病虫害少,可粗放管理,能较好地适应高速公路生境条件,用于公路绿化<sup>[7]</sup>。目前尚未见有关红马蹄草的生态生物学及其繁殖特性的研究报道。本文主要研究其形态解剖特征、光合生理生态指标及其繁殖特性,旨在为红马蹄草的开发利用提供科学参考。

## 1 材料和方法

### 1.1 材料

红马蹄草(*Hydrocotyle nepalensis* Hook.)种植于中国科学院华南植物园繁育中心荫棚(黑色遮荫网覆盖),荫棚日间气温为14℃~30℃,透光率约为40%,常规水肥管理。

### 1.2 形态解剖观察

从成熟叶片中部切取5 mm×5 mm的小块,用FAA固定,乙醇和二甲苯系列脱水透明,渗蜡并包埋,制作切片,用番红-固绿染色,于光学显微镜下观察、测量及照相<sup>[8]</sup>。利用数码相机和Photoshop软件计算叶面积<sup>[9]</sup>,将叶片烘干称重,计算比叶面积。每个数据均测量6次。

### 1.3 光合作用参数测定

采用LI-6400型便携式光合测定仪,使用开放气路对光合有效辐射(Par)、净光合速率( $P_n$ )、蒸腾速率(Tr)、气孔导度(Gs)等参数进行测定。于阳光充足的晴天,从08:00–18:00每隔2 h测量1次。选取3株生长良好的红马蹄草植株,每株4片叶,每叶片测3次,共36个重复。同时,利用仪器配置的人工光源,将光照强度分别设定为1400、1200、1000、800、500、300、150、100、50、30、0  $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ,

绘制光合作用-光响应曲线<sup>[10]</sup>。

根据非直角双曲线模型拟合光响应曲线,得出最大净光合速率( $P_{\text{max}}$ )、表观量子效率(AQY)、光下呼吸速率( $R_d$ )。非直角双曲线公式为:

$$A = \frac{\phi I + P_{\text{max}} - \sqrt{(\phi I + P_{\text{max}})^2 - 4\theta\phi I P_{\text{max}}}}{2\theta} - R_d$$

式中,  $A$  为净光合速率,  $I$  为光照强度,  $\phi$  为表观量子效率(AQY),  $P_{\text{max}}$  为最大净光合速率,  $R_d$  为光下呼吸速率,  $\theta$  为曲线形状参数<sup>[11]</sup>。光补偿点(LCP)为当净光合速率为0时的光照强度,光饱和点(LSP)为当净光合速率达到最大净光合速率时的光照强度。根据测量结果,计算植物在光强500~1400  $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 下的瞬时水分利用效率( $\text{IWUE} = P_n/\text{Tr}$ )<sup>[12]</sup>和瞬时光能利用率( $\text{ILUE} = P_n/\text{Par}$ )<sup>[13]</sup>。

### 1.4 光合色素含量的测定

取测定光合作用相同位置的叶片,在叶片不同部位打孔,获取叶圆片(直径0.6 cm),用80%丙酮浸提法提取,用分光光度计(Unico, UV-3802, China)测量并计算其含量<sup>[14]</sup>。实验设3个重复。

### 1.5 繁殖技术

采用扦插繁殖方法,从苗圃中挖取红马蹄草植株,将其茎枝剪成二节一段,分别扦插到室外树下、水岸边及温室中(透光率分别约为30%、60%和40%;土壤相对含水量分别约为40%、70%和80%),每个处理设3组重复,每个重复30株。室外树下和温室中的红马蹄草扦插到培养袋中,扦插基质与水岸边的基质相同,扦插后浇透水,4周后观察统计植株的成活情况。

### 1.6 数据分析

所有数据用Excel 2007和SigmaPlot 10.0处理和作图,光响应曲线及各参数用SPSS 13.0统计软件中的非线性回归进行计算分析。

## 2 结果和分析

### 2.1 形态解剖学特征

红马蹄草的叶片及叶肉栅栏组织较薄,分别为(130.67±7.18)  $\mu\text{m}$ 和为(24.46±3.37)  $\mu\text{m}$ 。红马蹄

草的平均叶面积为(27.76±6.85) cm<sup>2</sup>, 而比叶面积为(429.89±28.72) cm<sup>2</sup> g<sup>-1</sup>。由图 1 也可看出, 红马蹄草的栅栏组织不发达, 海绵组织与栅栏组织厚度之比较大, 表现出阴生特点<sup>[15]</sup>。

### 2.2 光合色素含量

叶绿素在光合色素中起着吸收、传递和转换光能的作用, 而类胡萝卜素则是吸收光能的辅助色素<sup>[16]</sup>。红马蹄草的总叶绿素和类胡萝卜素含量分别为(20.14±1.16) μg cm<sup>-2</sup> 和(1.41±0.33) μg cm<sup>-2</sup>, 而叶绿素 a/b 为 1.31±0.09, 低于 3:1 的理论值。

### 2.3 光响应曲线

图 2: A 为红马蹄草光合作用光响应曲线的拟合曲线, 在光合有效辐射(Par)达到 500 μmol m<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup> 之前, 随 Par 增加, 光合速率(P<sub>n</sub>)迅速增加, Par 继

续增大而 P<sub>n</sub> 升高的速率减慢, 最后趋于稳定状态, 700 μmol m<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup> 为其光饱和点。红马蹄草在 700~1400 μmol m<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup> 光强下, P<sub>n</sub> 未出现下降的光抑制现象, 表明其可适应的光强幅度较宽。瞬时光能利用率(ILUE)随着光强的增加而减小, 与光强的相关系数 r > 0.9 (图 2: B), 这表明随着光强的增加, 叶片吸收的光能参与到光化学反应的部分减少, 光合作用趋向于饱和状态。

从光合速率-光强响应曲线中导出红马蹄草的光合特征参数。结果表明, 红马蹄草的光补偿点(LCP, 23.22 μmol m<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup>)和光饱和点(LSP, 700 μmol m<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup>)较低, 而表观量子效率(AQY, 0.08±0.01)、最大净光合速率[P<sub>max</sub>, (13.75±1.10) μmol m<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup>]和瞬时光能利用效率[ILUE, (10.933±3.325) μmol mmol<sup>-1</sup>]较高, 这说明红马蹄草对弱光量子通量密度的环境表现出了极强的适应性。另外, 其蒸腾

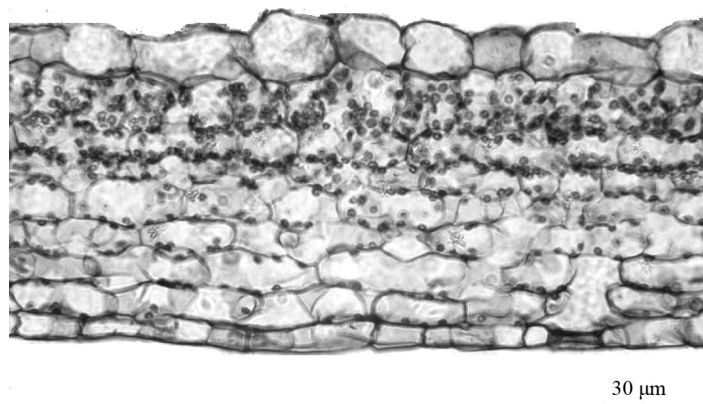


图 1 红马蹄草的叶片形态解剖图

Fig. 1 Leaf structure of *Hydrocotyle nepalensis*

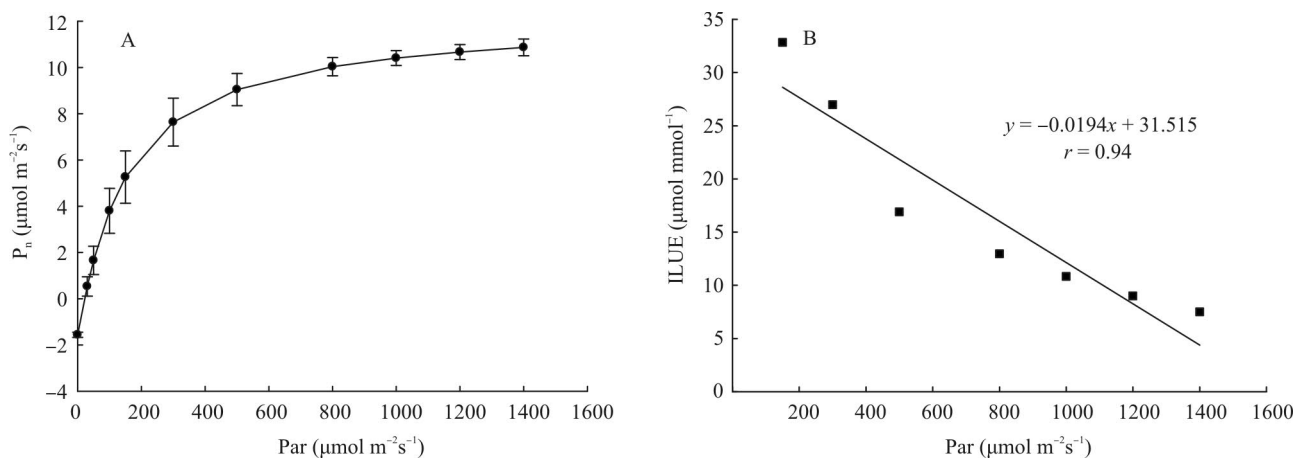


图 2 红马蹄草叶片的光合速率-光强(P<sub>n</sub>-PAR)响应曲线和瞬时光能利用效率(ILUE)

Fig. 2 Photosynthetic rate-light (P<sub>n</sub>-PAR) response curve and instantaneous light use efficiency (ILUE) in leaves of *Hydrocotyle nepalensis*

速率( $Tr$ )为 $(2.05 \pm 0.26) \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ , 暗呼吸速率为 $(1.56 \pm 0.11) \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ , 瞬时水分利用效率 $[IWUE, (2.05 \pm 0.26) \mu\text{mol mmol}^{-1}]$ 较低, 显示其抗旱能力不强, 喜湿润的环境, 这可能与红马蹄草的根系分布较浅有关。

遮荫条件下红马蹄草的净光合速率( $P_n$ )日变化曲线呈单峰型(图 3: C), 没有“午休”现象, 上午  $P_n$  逐渐升高, 12:00 左右达到峰值, 下午逐渐降低。这与余红兵等报道的铜钱草(*Hydrocotyle vulgaris*) 光合作用日变化结果不同, 铜钱草叶片  $P_n$  日变化呈双峰型, 有光合“午休”现象<sup>[17]</sup>。另外光合有效辐射( $Par$ )、蒸腾速率( $Tr$ )和气孔导度( $G_s$ )与  $P_n$  的日变化趋势基本一致, 均为单峰型, 均达到峰值后逐渐下降(图 3: B~D), 红马蹄草  $Tr$  的峰值提前, 约在 10:00 左右, 避免中午丧失过多的水分。胞间  $\text{CO}_2$  浓度( $C_i$ )的日变化(图 3: D)呈低谷曲线, 峰谷与  $P_n$

互补, 与前人研究二者呈负相关的结论相一致<sup>[18]</sup>。

## 2.4 扦插繁殖

从图 4 可以看出, 红马蹄草扦插繁殖的成活率较高, 均在 70% 以上。3 种环境下, 以温室栽培的红马蹄草成活率最高, 约为 97%, 2 周后的成活率显著高于栽培在室外树下和水边的( $P < 0.05$ ), 后者间差异不显著, 这可能与室外树下缺少充足的水分条件, 而水边缺少适宜的荫蔽环境有关。

## 3 讨论

植物叶片的形态、解剖结构和光合生理特性与生长环境等密切相关, 而光是重要的生态因子, 且叶片对环境变化较敏感, 是可塑性较大的器官<sup>[19-20]</sup>。比叶面积是指单位干重的鲜叶表面积, 而

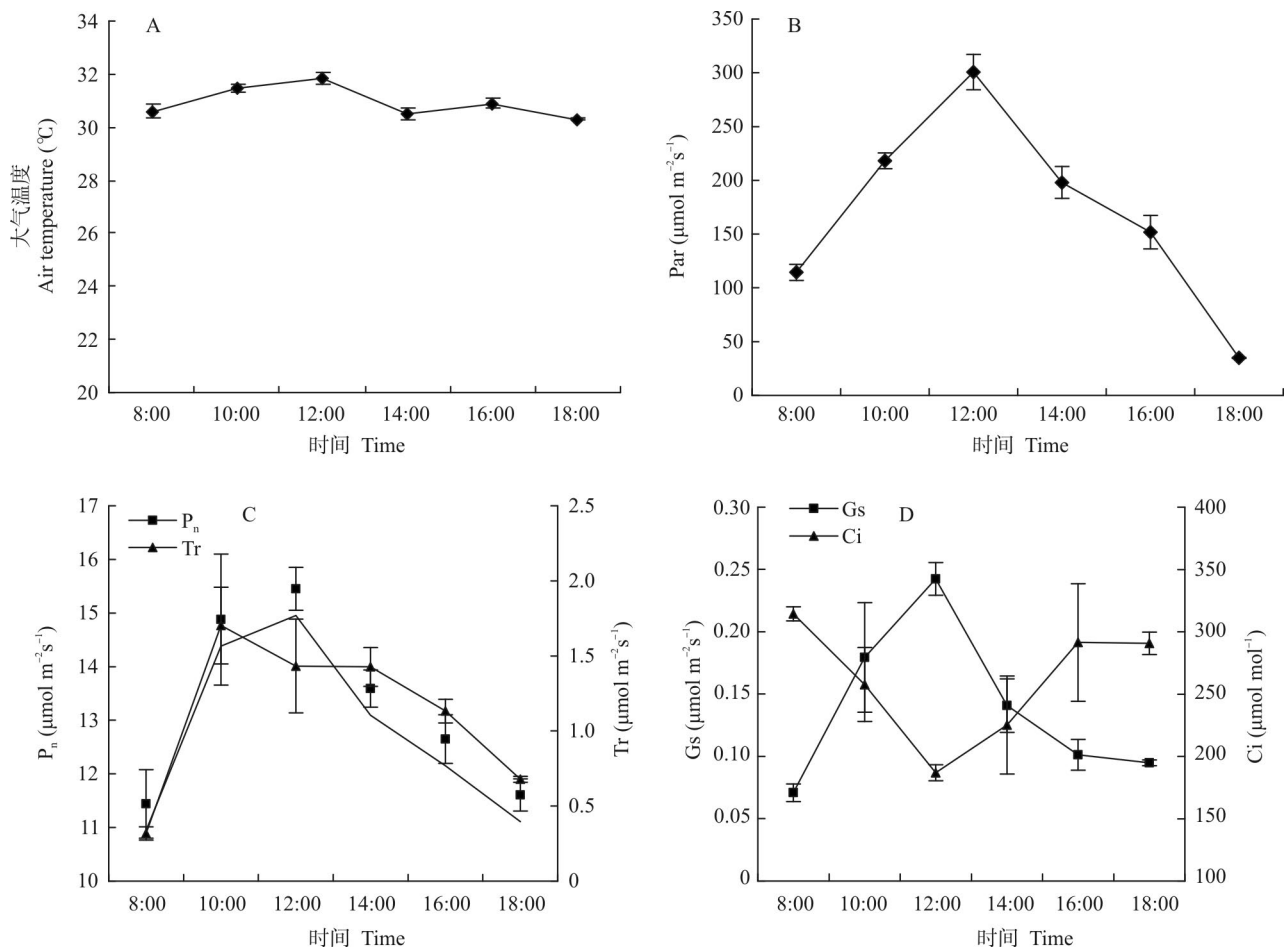


图 3 红马蹄草叶片光合特性的日变化曲线。Par: 光合有效辐射;  $P_n$ : 净光合速率;  $Tr$ : 蒸腾速率;  $G_s$ : 气孔导度;  $C_i$ : 胞间  $\text{CO}_2$  浓度。

Fig. 3 Diurnal changes in photosynthetic characters of *Hydrocotyle nepalensis*. Par: Photosynthetic active radiation;  $P_n$ : Net photosynthetic rate;  $Tr$ : Transpiration rate;  $G_s$ : Stomatal conductance;  $C_i$ : Intercellular  $\text{CO}_2$  concentration.

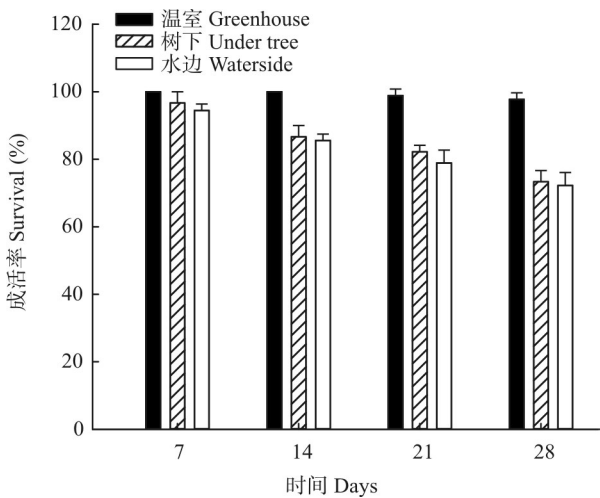


图4 红马蹄草扦插繁殖的成活率

Fig. 4 Survival of *Hydrocotyle nepalensis* by cutting propagation

叶片厚度对其有直接影响,一定程度上可反映叶片截获光的能力<sup>[21]</sup>。红马蹄草比叶面积大,叶片薄,利于捕获更多的光能,促进其快速生长。游文娟等认为,低光强下耐阴性越强的植物叶片厚度越小,海绵组织相对更发达,海绵组织栅栏组织厚度比值越大<sup>[22]</sup>,本文研究结果与其一致。在弱光环境下,红马蹄草栅栏组织较薄,海绵组织细胞较多,这可提高叶绿体对光的吸收能力,减少光量子的透射损失,提高叶片在弱光下的光能利用效率,体现红马蹄草对弱光环境具有较强的适应能力。

通常在阴蔽环境中,植物为更好地利用环境光能以对生长进行补偿,首先表现在光合色素含量上,一般叶绿素含量较高,而且叶绿素 a/b 小于 3<sup>[23-24]</sup>。本研究中,红马蹄草叶绿素含量相对较高,说明光合作用单位较多,有利于在低光照下充分吸收光能,从而促进光合作用,增加生物量的积累<sup>[25]</sup>。同时,其叶绿素 a/b 比值(1.31:1)低于阳生植物的理论值(3:1)<sup>[26]</sup>,这说明红马蹄草叶绿体中聚光色素(主要为叶绿素 b)的含量相对较高,而作用中心色素(主要为叶绿素 a)含量相对较低,提高了对蓝紫光的利用效率,有利于其在低光照下生长,是对弱光环境的生理响应和适应。此外,一定含量的类胡萝卜素则可防止叶绿素分子受过量激发能与氧化损伤<sup>[16]</sup>。

植物光合日变化可反映光合作用随环境而发生的变化,是植物对环境的适应结果<sup>[10]</sup>。遮荫条件下红马蹄草的  $P_n$  日进程呈单峰型,无“光合午休”现象,其峰值较高( $15.45 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ),日平均光合

速率也较高( $13.27 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ),总体上,  $Tr$ 、 $G_s$  的变化规律与  $P_n$  的日变化趋势相近。不同植物在长期对生态环境的适应中对光照的需求不同。植物叶片的 LSP 和 LCP 可反映植物对光照条件的需求,同时也在一定程度上也能反映植物的耐阴性<sup>[27]</sup>。蒋高明等认为阴生植物的 LSP 为  $500\sim 1000 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$  或者更低,阳生植物 LCP 一般在  $50\sim 100 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ , 阴生植物因其耐阴性不同而不同<sup>[28]</sup>。红马蹄草的 LCP 为  $24.08 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ , LSP 为  $600 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ , 属于阴生植物范畴。AQY 能反映叶片在弱光环境下的光合能力,植物在适生环境下 AQY 越大,对弱光的利用能力越强<sup>[29]</sup>。红马蹄草的 AQY 较大,表明其在弱光环境下,捕获光量子用于光合作用的能力较强且具有较低的呼吸速率,能较好地维持植物正常生长,从而对弱光环境表现出较强的适应能力。同时,红马蹄草的蒸腾速率较高,有利于矿质元素和光合产物在体内高效运输,且有助于降低叶片温度,保障光合系统的正常运行。

红马蹄草生性强健,有性和无性繁殖能力强,因种子细小,难以采收,且出苗后生长缓慢,故常采用无性繁殖。红马蹄草自然更新能力强,从植株基生叶腋生出匍匐茎枝,每节均能生根并长出子株,而子株又会以同样的方式向四周扩繁,可快速覆盖地面。本研究中,红马蹄草扦插繁殖的株苗成活率较高,均在 70% 以上。温室中栽培的红马蹄草成活率最高,达 97%,高于室外树下及水边种植的,这是由于温室较好地控制了水分和光照条件,保障了其荫蔽潮湿的生长环境,而室外树下则缺少充足的水分条件,水边缺少适宜的荫蔽环境。因此,红马蹄草栽培以半荫蔽或荫蔽处为佳,忌阳光直射,栽培土不限,但以松软排水良好的栽培土为宜。

红马蹄草耐荫湿,对弱光环境的适应性和弱光利用效率较强,适合栽培在荫蔽、半荫蔽的环境中,是一种值得推广应用的地被植物。其外形美观,叶片碧绿富有光泽,草群低矮致密、平整而美观,适应性强,抗病虫害,管理粗放,用途多样。红马蹄草在华南地区可露地栽培,其叶片嫩、水分多,不耐践踏,故最适合用于建筑物阴面、半阴面疏林下及有一定荫蔽条件的公园、居家庭院等的非践踏性观赏草坪。在园林应用中还可作花坛、花丛、盆花、盆景等的底色草被,加上其良好的水土保持作用,也可用作公路两侧或丘陵山地阴坡或半阴坡的水土保持地被。此外,由于红马蹄草植株耐湿,为挺水型,

故也适于水盆、水池栽培,还可用于沟边、河岸、河滩等隐蔽的湿地绿化。

## 参考文献

- [1] Xiao Y F. Study on the wild lawn plant: *Hydrocotyle sibthorpioides* Lam. [J]. J Sichuan Grassl, 1999(4): 30–33.  
萧运峰. 野生草坪植物——天胡荽的研究 [J]. 四川草原, 1999(4): 30–33.
- [2] Shan R H, She M L. Flora Reipublicae Popularis Sinicae, Tomus 55(1) [M]. Beijing: Science Press, 1979: 1–14.  
单人骅, 余孟兰. 中国植物志, 第55卷第1分册 [M]. 北京: 科学出版社, 1979: 1–14.
- [3] Song L K, Jiang H Z, Yi Z G, et al. Identification of *Hydrocotyle nepalensis* and other similars [J]. Lishizhen Med Mat Med Res, 2006, 17(6): 1022–1023.  
宋良科, 蒋合众, 易志刚, 等. 红马蹄草及其类似品的鉴别 [J]. 时珍国医国药, 2006, 17(6): 1022–1023.
- [4] She M L, Shu P. Observation on pollen morphology of Hydrocotyloideae and Saniculoideae in China [J]. Acta Phytotax Sin, 1992, 30(2): 126–136.  
余孟兰, 舒璞. 中国天胡荽、变豆菜两亚科花粉形态的观察 [J]. 植物分类学报, 1992, 30(2): 126–136.
- [5] Liu Q X, Hui H, Pan Z H, et al. Fruit anatomical characters of Hydrocotyloideae (Apiaceae) in China and its systematic significance [J]. J Plant Resour Environ, 2002, 11(3): 1–7.  
刘启新, 惠红, 潘泽惠, 等. 中国伞形科天胡荽亚科果实解剖特征及其系统学意义 [J]. 植物资源与环境学报, 2002, 11(3): 1–7.
- [6] Chen Y, Zheng H C, Qin L P. The chemical constituents and pharmacology of Hydrocotyloideae (Apiaceae) [J]. World Phytomed, 2004, 19(2): 51–55.  
陈瑶, 郑汉臣, 秦路平. 伞形科天胡荽亚科植物化学成分和药理作用 [J]. 国外医药: 植物药分册, 2004, 19(2): 51–55.
- [7] Xie Z H, Li H, Chen Z Y. The numerical classification of native plants and its application in the ecological vireescence in Jingzhu Expressway (the Hengyang Zone) [J]. Chin Agric Sci Bull, 2011, 27(31): 310–316.  
谢振华, 李红, 陈志阳. 京珠高速公路(衡阳段)乡土植物数量分类及其在生态绿化中的应用 [J]. 中国农学通报, 2011, 27(31): 310–316.
- [8] Wang Y, Zhang M. Comparison study of anatomy structure of *Zoysia japonica* and *Poa pratensis* related with characteristics of drought and tramp resistance and elasticity [J]. J Liaoning Univ (Nat Sci), 2000, 27(4): 371–375.  
王艳, 张绵. 结缕草和早熟禾解剖结构与其抗旱性、耐践踏性和弹性关系的对比研究 [J]. 辽宁大学学报: 自然科学版, 2000, 27(4): 371–375.
- [9] Xiao Q, Ye W J, Zhu Z, et al. A simple non-destructive method to measure leaf area using digital camera and Photoshop Software [J]. Chin J Ecol, 2005, 24(6): 711–714.  
肖强, 叶文景, 朱珠, 等. 利用数码相机和Photoshop软件非破坏性测定叶面积的简便方法 [J]. 生态学杂志, 2005, 24(6): 711–714.
- [10] Gao H, Zong J Q, Chen J B, et al. Diurnal change of photosynthetic characteristics and response to light intensity of seven ornamental grasses [J]. Acta Pratac Sin, 2010, 19(4): 87–93.  
高鹤, 宗俊勤, 陈静波, 等. 7种优良观赏草光合生理日变化及光响应特征研究 [J]. 草业学报, 2010, 19(4): 87–93.
- [11] Lambers H, Chapin F S, Pons T L. Plant Physiological Ecology [M]. New York: Springer, 1998: 1–27.
- [12] Lin Z F, Wu T, Kong G H, et al. Photosynthesis and water relations in eight urban landscape climbing plants [J]. J Trop Subtrop Bot, 2007, 15(6): 473–481.  
林植芳, 吴彤, 孔国辉, 等. 8种城市绿化攀缘植物的光合作用和水关系特性 [J]. 热带亚热带植物学报, 2007, 15(6): 473–481.
- [13] Cui X Y, Du Z C, Wang Y F. Photosynthetic characteristics of a semi-arid sandy grassland community in Inner Mongolia [J]. J Plant Ecol, 2000, 24(5): 541–546.  
崔骁勇, 杜占池, 王艳芬. 内蒙古半干旱草原区沙地植物群落光合特征的动态研究 [J]. 植物生态学报, 2000, 24(5): 541–546.
- [14] Lin Z F, Li S S, Lin G Z, et al. Superoxide dismutase activity and lipid peroxidation in relation to senescence of rice leaves [J]. Acta Bot Sin, 1984, 26(6): 605–615.  
林植芳, 李双顺, 林桂珠, 等. 水稻叶片的衰老与超氧化物歧化酶活性及脂质过氧化作用的关系 [J]. 植物学报, 1984, 26(6): 605–615.
- [15] Shi G R, Xing H T. Eco-anatomical characteristics of eight tree species in Xiangshan Mountain, Huaibei [J]. Sci Silv Sin, 2007, 43(3): 28–33.  
史刚荣, 邢海涛. 淮北相山8个树种叶片的生态解剖特征 [J]. 林业科学, 2007, 43(3): 28–33.
- [16] Johnson G N, Scholes J D, Horton P, et al. Relationship between carotenoid composition and growth habit in British plant species [J]. Plant Cell Environ, 1993, 16(6): 681–686.
- [17] Yu H B, Xiao R L, Yang Z J, et al. Diurnal photosynthetic changes of *Hydrocotyle vulgaris* in the ecological ditch [J]. Guihaia, 2012, 32(3): 340–344.  
余红兵, 肖润林, 杨知建, 等. 生态沟渠铜钱草光合日变化的研究 [J]. 广西植物, 2012, 32(3): 340–344.
- [18] Zhou C, Guo X Y, Wang R Z, et al. Photosynthesis and evaporation of *Chloris virgate* in alkalized meadow on Songnen Plain of China [J]. Acta Pratac Sin, 2001, 10(1): 42–47.  
周婵, 郭晓云, 王仁忠, 等. 松嫩草地虎尾草光合与蒸腾作用的研究 [J]. 草业学报, 2001, 10(1): 42–47.
- [19] Zhang X W, Zhang X P, Yang K J, et al. Study on anatomical

- structure of leaf and ecological adaptability of *Pteroceltis tartarinowii* Maxim. [J]. Bull Bot Res, 2007, 27(1): 38–42.
- 张兴旺, 张小平, 杨开军, 等. 珍稀植物青檀叶的解剖结构及其生态适应性特征 [J]. 植物研究, 2007, 27(1): 38–42.
- [20] Hu Y, Chu H J, Li J Q. Response of leaf anatomy characteristics and its plasticity to different soil-water conditions of *Medicago ruthenica* in four populations [J]. J Plant Sci, 2011, 29(2): 218–225.
- 胡营, 楚海家, 李建强. 4个花苜蓿居群叶片解剖结构特征及其可塑性对不同水分处理的响应 [J]. 植物科学学报, 2011, 29(2): 218–225.
- [21] Zhang L, Luo T X. Advances in ecological studies on leaf lifespan and associated leaf traits [J]. Acta Phytoecol Sin, 2004, 28(6): 844–852.
- 张林, 罗天祥. 植物叶寿命及其相关叶性状的生态学研究进展 [J]. 植物生态学报, 2004, 28(6): 844–852.
- [22] You W J, Zhang Q F, Xia L. Responses of leaf structure of urban greening plants to different light conditions [J]. J NW For Coll, 2008, 23(5): 22–25.
- 游文娟, 张庆费, 夏樵. 城市绿化植物叶片结构对光强的响应 [J]. 西北林学院学报, 2008, 23(5): 22–25.
- [23] Luo J, Zhang M Q, Lü J L, et al. Effects of water stress on the chlorophyll a fluorescence induction kinetics of sugarcane genotypes [J]. J Fujian Agri Univ, 2000, 29(1): 18–22.
- 罗俊, 张木清, 吕建林, 等. 水分胁迫对不同甘蔗品种叶绿素a荧光动力学的影响 [J]. 福建农业大学学报, 2000, 29(1): 18–22.
- [24] Xu D Q. Some noteworthy problems in measurement and investigation of photosynthesis [J]. Plant Physiol Commun, 2006, 42(6): 1163–1167.
- 许大全. 光合作用测定及研究中一些值得注意的问题 [J]. 植物生理学通讯, 2006, 42(6): 1163–1167.
- [25] Yang H, Song X Z, Chen L. Study on the photosynthetic characteristics of *Tetrastigma hemsleyanum* by shade treatments [J]. China For Sci Techn, 2010, 24(5): 57–59.
- 杨华, 宋绪忠, 陈磊. 不同遮阴处理的三叶崖爬藤光合作用特性 [J]. 林业科技开发, 2010, 24(5): 57–59.
- [26] Wang S S, Gao R F, Wu G M, Plant Physiology [M]. Beijing: Chinese Forestry Press, 1991: 1–136.
- 王沙生, 高荣孚, 吴贯明. 植物生理学 [M]. 北京: 中国林业出版社, 1991: 1–136.
- [27] Lü J H, Wang X, Feng Y M, et al. Effects of shading on the photosynthetic characteristics and anatomical structure of *Trollius chinensis* Bunge [J]. Acta Ecol Sin, 2012, 32(19): 6033–6043.
- 吕晋慧, 王玄, 冯雁梦, 等. 遮荫对金莲花光合特性和叶片解剖特征的影响 [J]. 生态学报, 2012, 32(19): 6033–6043.
- [28] Jiang G M. Plant Ecophysiology [M]. Beijing: Higher Education Press, 2004: 65–68, 161–169.
- 蒋高明. 植物生理生态学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2004: 65–68, 161–169.
- [29] Richardson A D, Berlyn G P. Spectral reflectance and photosynthetic properties of *Betula papyrifera* (Betulaceae) leaves along an elevational gradient on Mt. Mansfield, Vermont, USA [J]. Amer J Bot, 2002, 89(1): 88–94.