

DOI: 10.11913/PSJ.2095-0837.2017.10093

苗灵凤, 张丽佳, 蒲玉瑾, 杨帆. WP4C 露点水势仪测定植物叶片水势时的影响因素——以降香黄檀为例[J]. 植物科学学报, 2017, 35(1): 93~98

Miao LF, Zhang LJ, Pu YJ, Yang F. Factors that affect measurement using the WP4C dewpoint potential meter to determine water potential—Illustrated by the case of *Dalbergia odorifera*[J]. *Plant Science Journal*, 2017, 35(1): 93~88

WP4C 露点水势仪测定植物叶片水势时的影响因素 ——以降香黄檀为例

苗灵凤, 张丽佳, 蒲玉瑾, 杨帆*

(海南大学热带农林学院, 海口 570228)

摘要: 植物叶片的大小、形状、破碎化程度、测定时间及保存时间是影响植物水势测定的主要因素, 但相关研究开展较少。本研究以成熟度相同, 羽状复叶较多的降香黄檀 (*Dalbergia odorifera* T. Chen) 为实验材料, 利用 WP4C 露点水势仪监测叶片水势的日变化动态。结果显示, 叶片水势测定最合理的时间段为 9:00~13:00; 测定叶片在 4℃冰箱中保存不同时间后的水势变化值, 确定 4℃条件下保存 1 h 内为测定叶片水势的最佳保存时间; 比较了不同形状、大小以及不同破碎化程度的叶片对水势测定的影响, 结果显示叶片的大小、形状和破碎化程度对水势均有一定影响。因此, 实际操作中应使用完整的单个叶片覆盖样品室以准确测定叶片水势。在优化测定条件后, 利用该方法测定的水势值具有准确率高、重复性强、稳定性好等特点。

关键词: 叶片水势; 日动态变化; 降香黄檀; 影响因素

中图分类号: Q945.17

文献标识码: A

文章编号: 2095-0837(2017)01-0093-06

Factors that affect measurement using the WP4C dewpoint potential meter to determine water potential —Illustrated by the case of *Dalbergia odorifera*

Miao Ling-Feng, Zhang Li-Jia, Pu Yu-Jin, Yang Fan*

(College of Tropical Agriculture and Forestry, Hainan University, Haikou 570228, China)

Abstract: The main factors that affect the determination of plant water potential are leaf sizes, shapes, fragmentation degree, sampling time, and sample storage; however, relative studies are very limited. In the present research, *Dalbergia odorifera* T. Chen individuals with similar maturity and strong pinnately compound leaves were used to study the above mentioned factors. The diurnal dynamic changes in leaf water potential were measured with the WP4C dewpoint potential meter every hour. Results showed that the most reasonable period for determination of leaf water potential was from 09:00 to 13:00. The leaf water potentials of leaves stored at 4℃ for 0, 0.5, 1, 2, and 3 h were measured, respectively. Results suggested that the best storage duration to measure leaf water potential was within 1 h after sampling. Our results also showed that leaf shapes, sizes, and fragmentation degrees had significant influences on water potential. Single leaf samples should completely cover the sample

收稿日期: 2016-08-24, 退修日期: 2016-09-12。

基金项目: 国家自然科学基金项目(31270449, 31660165); 海南大学科研启动基金项目(kyqd1573)。

This work was supported by grants from the National Natural Science Foundation of China (31270449; 31660165), and Scientific Research Starting Foundation of Hainan University (kyqd1573).

作者简介: 苗灵凤(1979-), 女, 硕士, 讲师, 研究方向为植物生理(E-mail: mlf-sx@163.com)。

* 通讯作者(Author for correspondence): 杨帆(1979-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事植物生理生态与分子遗传学研究(E-mail: yangfan@hainu.edu.cn)。

chamber of the instrument when leaf water potential is determined. Under our optimized conditions, the methods exhibited high accuracy, repeatability, and stability.

Key words: Diurnal dynamics; *Dalbergia odorifera*; Leaf water potential; Influential factors

植物叶片水势是液态水在植物体内流动的驱动力, 它代表植物水分运动的能量水平, 是判断植物水分亏缺、衡量抗旱性的重要指标, 也是目前最常用的植物水分生理指标, 可真实反映植物体内水分运输情况^[1-4]。此外, 了解植物叶片水势的变化动态也能为合理指导农业水肥灌溉提供依据^[1,5,6]。目前, 国内外测量植物水势大都采用 WP4C 露点水势仪(美国基因公司)进行测定。其原理是采用非热电偶方式, 根据物体具有的水势及其在空间中达到平衡时与水气压之间的函数关系, 在保持温度平衡的状态下, 通过测量封闭样品室的相对湿度, 然后根据内部函数计算出待测物件的水势。但是, 利用 WP4C 进行植物叶片水势测定时, 测定时间、样品保存时间、形状和大小对水势的影响并不明确。

目前, 已经利用 WP4C 测定了红豆杉(*Taxus cuspidate* Sieb. et Zucc.)、罗汉松(*Podocarpus macrophylla* (Thunb.) D. Don)、五针松(*Pinus parviflora* Sieb. et Zucc.)^[7]、委陵菜(*Potentilla aiscolor* Bunge)、草地麻花头(*Serratula centaureoides* L.)、糙隐子草(*Cleistogenes squarrosa* (Trin.) Keng)、寸草苔(*Carex duriuscula* C. A. Mey)^[8]、胡杨(*Populus euphratica* Oliv.)^[9]、油蒿(*Artemisia ordosica* Krahch.)^[10]等物种的叶片水势。但这些研究在测定植物叶片水势日变化时, 设置的时间间隔较长(2 h), 没有在 24 h 内连续进行测定, 不能很好地反映叶片水势的日变化动态^[1,3,7,9-25]。且以往的研究也未对样品的采集和水势测定方法进行详细描述, 如刘长成等^[26]的研究“将采集样品放入自封袋密封, 用冰盒带回实验室后利用 WP4C 露点水势仪测定叶片的清晨水势”; 王艳杰等^[27]“将采集的叶片保存在塑料袋中, 装入冰壶带回实验室, 然后将待测样品保存在温度为 3℃ 左右的冰箱里, 保存时间不超过 2 h。最后将叶片剪碎后利用露点水势仪测定叶片的水势”。但实验中样品的采集时间、从采样到测定的间隔时间、样品的保存条件, 以及测定时所用叶片的大小、形状、破碎化程度等因素是否会对叶片水势测

定造成影响尚不明确。

因此, 准确测定叶片水势的日变化需要制定更为合理的方案。本研究选取降香黄檀(*Dalbergia odorifera* T. Chen)为实验材料, 通过对其叶片水势日变化的测定, 明确样品采集和保存的时间、样品形状、大小和破碎化程度等因素对植物叶片水势测定的影响, 以期提高叶片水势测定的实验效率和准确度。

1 材料与方法

1.1 实验材料

选取同一植株相同成熟度叶片较多的物种为研究对象, 有利于减少实验误差, 比较适合用于研究植物叶片水势的测定方法。因此, 本研究以降香黄檀为实验材料, 其叶片为羽状复叶, 长 12 ~ 25 cm, 每片复叶具有 13 ~ 17 片相同成熟度的小叶(图 1)。此外, 相比较其它羽状复叶植物, 降香黄檀的叶片相对较大, 可满足 WP4C 露点水势仪样品室对叶片面积的要求, 最大程度减少因样品大小、形状、破碎化程度不同所带来的实验误差。

本研究选取 10 盆长势基本一致的二年生降香黄檀盆栽苗作为实验材料。每盆种植 1 株苗, 土壤



图 1 降香黄檀羽状复叶
Fig. 1 *Dalbergia odorifera* with pinnately compound leaves

相对含水量维持在 100%。测定时每株选取完全舒展、充分成熟的 3 对复叶, 每片复叶选取 4~10 片完全成熟的小叶。在室温 25℃下, 采用 WP4C 的精确测量模式测定叶片水势。样品测定前使用 1 mol/L 的 KCl 溶液对仪器进行校正。每次实验重复 3 次, 取平均值。

1.2 采样时间对水势的影响

为明确测定水势的最佳时间段, 本实验在 1:00~24:00 时间段内, 每隔 1 h 采样 1 次, 采下样品后立即将叶片剪成直径约 3 cm 的整圆形, 覆盖水势仪样品杯底部, 测定叶片水势。

1.3 样品保存时间对水势的影响

为明确样品保存时间对叶片水势的影响, 于 9:00~10:00 时采集叶片, 自封袋密封后立即置于 4℃ 冰箱中, 保存时间分别设为 0.5、1、2 和 3 h, 测定叶片水势。

1.4 叶片大小对水势的影响

为明确叶片大小对水势的影响, 于 9:00~10:00 时采集叶片, 立即将叶片剪成直径约 3 cm 的大圆片和 2.2 cm 的小圆片(面积为大圆片的 1/2), 约占样品杯底部面积的 1/2, 测定叶片水势。

1.5 叶片形状对水势的影响

为明确叶片形状对水势的影响, 于 9:00~10:00 时采集叶片后, 立即剪成直径约 3 cm 的半圆形叶片(与小圆片面积相同), 约占样品杯底部面积的 1/2, 测定叶片水势。

1.6 破碎化对叶片水势的影响

为明确破叶片碎化对水势的影响, 采集叶片后, 立即剪成直径约 3 cm 的圆片, 测定叶片水势。测定完成后将圆片剪成 10 个碎片后放入样品杯底部, 再次测定叶片水势。

1.7 数据分析与统计

采用 SPSS 13.0 软件对所有数据进行统计分析, 对不同处理的数据进行 Duncan 方差分析(ANOVA), 显著性水平设定为 $P < 0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 叶片水势日变化

研究结果表明, 降香黄檀叶片水势的日变化总体趋势呈“V”字形(图 2)。1:00~8:00 时, 水势逐渐降低; 9:00~13:00 时水势相对比较稳定, 是测量的最佳时间段; 14:00~18:00 时水势值进入波动期, 其中在 15:00 时叶片水势最低; 19:00 时以后水势逐步上升。从最高水势到最低水势, 降低了 -1.5 MPa , 降低比率为 41.3%。因此, 叶片水势测定最合理的时间段为 9:00~13:00 时。

2.2 保存时间对叶片水势的影响

样品在 4℃ 条件下的保存时间可对叶片水势产生一定的影响(图 3)。实验结果表明, 保存时间在 0.5~1 h 内, 水势略有降低; 保存时间达到 2 h 后, 水势降低 0.65 MPa , 但统计结果未达到显著水平。因此, 为保证水势测定结果的准确性, 建议保存时间在 1 h 内进行测定。

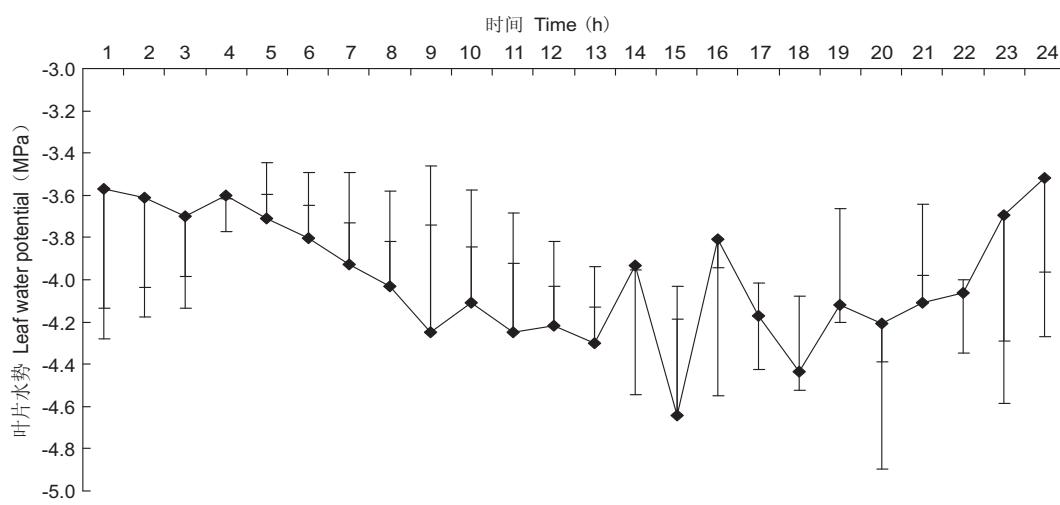
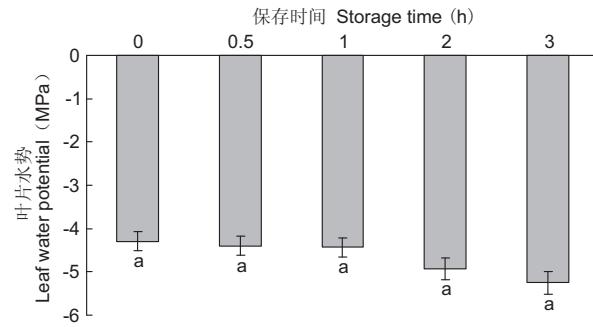


图 2 降香黄檀叶片水势日变化

Fig. 2 Diurnal dynamic variations in leaf water potential of *Dalbergia odorifera*

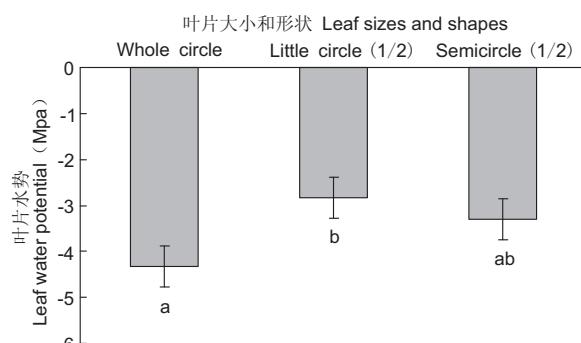


相同字母代表在 $P < 0.05$ 水平上没有显著性差异。
Values followed by letter indicate not insignificantly different at $P < 0.05$.

图 3 4°C下保存时间对叶水势的影响
Fig. 3 Effects of storage time at 4°C on leaf water potential

2.3 叶片大小、形状对水势的影响

实验结果显示,叶片大小和形状的差异可对叶片水势产生影响(图4)。小圆片水势高于大圆片1.5 MPa,差异达到显著水平;半圆形叶片水势高于大圆片1.0 MPa,但差异不显著;半圆形叶片与相同面积的小圆片相比水势较低,但它们之间的差异也未达到显著水平。因此,测量水势时应尽量选择大叶片或选用较多小叶片排列以覆盖全部样品室。



不同字母表示在 $P < 0.05$ 水平上有显著性差异,下同。
Values followed by different letters indicate significantly different at $P < 0.05$, same below.

图 4 叶片大小、形状对水势的影响
Fig. 4 Effect of leaf size and shape on leaf water potential

2.4 叶片破碎化对水势的影响

实验结果显示,叶片破碎化对水势有显著影响(图5)。与完整的圆形叶片相比,破碎叶片水势增加了1.1 MPa。因此,测定叶片水势时应尽量避免叶片破碎,尽可能使用可覆盖全部样品室的单个叶片。

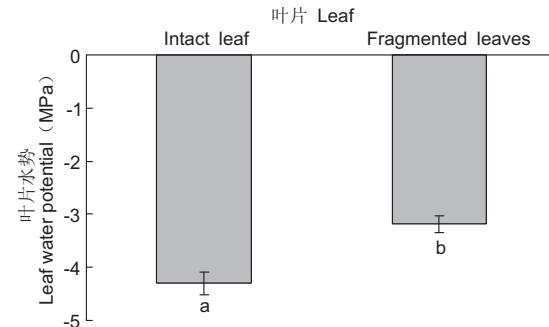


图 5 叶片破碎化对水势的影响
Fig. 5 Effect of leaf fragmentation on leaf water potential

3 讨论

植物水势发生日动态变化是由植株蒸腾耗水和根系水分供应之间存在阻力和时间差造成的。叶片水势会随太阳辐射强度的变化而变化。不同植物的日动态变化会有所区别,但整体来说都呈现“V”字形变化趋势,一般在下午叶水势值降到最低。比如油蒿和胡杨的叶水势在5:00和7:00时达到最高值,随后逐渐降低,直到13:00时左右降到最低,随后叶水势又开始逐渐升高^[9,10]。因此,连续监测叶水势的日动态变化对确定最佳采样时间和水势测定时间具有重要价值。样品采集后,即使立刻低温保存,也会造成叶片水分丧失,随着保存时间的增加,组织失水更为严重,水势值降低就会更加明显。因此采样后,应尽量将叶片置于低温环境下,减少水分丧失,并尽快进行测定^[26]。

本研究采用的WP4C露点水势仪,利用冷镜露点技术测量样品的水势。水势是在一个密封气室内空气气压与样品水蒸汽压达到平衡时的压力值,在平衡点时,样品室内空气的水势与样品水势相同。因此,叶片的大小和形状可以影响叶片水势。另外,破碎化也可对叶水势产生较大影响,因为叶片剪碎时会造成其四周大量细胞破损,改变细胞间隙质外体溶液原本的水势;其次,由于破损处水分蒸发造成细胞溶液浓缩,加大了破损细胞溶液对水势测定的干扰,导致测定结果不准确^[27,28]。综上所述,测定叶水势时,应尽量选择能覆盖样品室的单个完整叶片,或用小叶片排列覆盖样品室,以减少实验误差^[29,30],保证测量结果准确可靠。

参考文献:

- [1] Miranda LP, Vitória AP, Funch LS. Leaf phenology and water potential of five arboreal species in gallery and montane forests in the Chapada Diamantina; Bahia; Brazil [J]. *Enviro Exp Bot*, 2011, 70: 143–150.
- [2] 周晓燕, 陈永亮. 几种盆景植物水势日变化及其与大气水势关系的研究 [J]. 北方园艺, 2006, 6: 102–103.
- Zhou XY, Chen YL. Studies on daily water potential variation of several spotted plant and its relationship with atmospheric water potential [J]. *Northern Horticulture*, 2006, 6: 102–103.
- [3] Motalebifard R, Najafi N, Oustan S, Nyshabouri MR, Valizadeh M. The combined effects of phosphorus and zinc on evapotranspiration, leaf water potential, water use efficiency and tuber attributes of potato under water deficit conditions [J]. *Sci Hortic-Amsterd*, 2013, 162: 31–38.
- [4] 李小琴, 张小由, 刘晓晴, 高冠龙. 额济纳绿洲河岸胡杨 (*Populus euphratica*) 叶水势变化特征 [J]. 中国沙漠, 2014, 34(3): 712–717.
- Li XQ, Zhang XY, Liu XQ, Gao GL. Leaf water potential of *Populus euphratica* in the Ejin Oasis [J]. *Journal of Desert Research*, 2014, 34(3): 712–717.
- [5] Argyrokastritis IG, Papastylianou PT, Alexandris S. Leaf water potential and crop water stress index variation for full and deficit irrigated cotton in Mediterranean conditions [J]. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, 2015, 4: 463–470.
- [6] Sato T, Abdalla OS, Oweis TY, Sakuratani T. The validity of predawn leaf water potential as an irrigation-timing indicator for field-grown wheat in northern Syria [J]. *Agr Water Manage*, 2006, 82: 223–236.
- [7] Corell M, Pérez-López D, Martín-Palomo MJ, Centeno A, Girón I, Galindo A, Moreno MM, Moreno C, Memmic H, Torrecillas A, Moreno F, Moriana A. Comparison of the water potential baseline in different locations. Usefulness for irrigation scheduling of olive orchards [J]. *Agr Water Manage*, 2016, 177: 308–316.
- [8] 宋敏超, 杜广明, 冯朝阳, 朱琳. 呼伦贝尔典型草原四种优势植物水势日变化规律研究 [J]. 中国草地学报, 2012, 34(5): 114–119.
- Song MC, Du GM, Feng CY, Zhu L. Research of diurnal variation of water potential of four dominant plants in Hulunbeier typical steppe [J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2012, 34(5): 114–119.
- [9] Asasama K, Söber A. Stomatal sensitivities to changes in leaf water potential, air humidity, CO₂ concentration and light intensity, and the effect of abscisic acid on the sensitivities in six temperate deciduous tree species [J]. *Environ Exp Bot*, 2011, 71(1): 72–78.
- [10] 张军红. 不同固定程度沙地油蒿叶水势的日动态及其环境影响因子的研究 [J]. 西部林业科学, 2014, 43(1): 17–22.
- Zhang JH. Study on the leaf water potential of *Artemisia ordosica* in different fixation stage of sand dunes and its influence factors [J]. *Journal of West China Forestry Science*, 2014, 43(1): 17–22.
- [11] Gomes-Laranjo J, Coutinho JP, Gahano V, Cordeiro V. Responses of five almond cultivars to irrigation: Photosynthesis and leaf water potential [J]. *Agr Water Manage*, 2006, 83(3): 261–265.
- [12] 杨有俊, 郑明珠, 秦伟志, 陈焘, 江世高, 刘金荣. 干旱及复水处理下坪用黑麦草和高羊茅抗旱特性比较 [J]. 草业科学, 2012, 29(3): 370–376.
- Yang YJ, Zheng MZ, Qin WZ, Chen T, Jiang SG, Liu JR. Responses of tall fescue and perennial ryegrass turfgrasses to drought stress and re-watering treatment [J]. *Pratacultural Science*, 2012, 29(3): 370–376.
- [13] 杨再强, 张婷华, 李永秀, 彭晓丹, 周志龙, 朱凯. 不同水分胁迫条件下温室番茄茎流和叶片水势的反应 [J]. 中国农业气象, 2012, 33(3): 382–387.
- Yang ZQ, Zhang TH, Li YX, Peng XD, Zhou ZL, Zhu K. Response of sap flow and leaf water potential for greenhouse tomato under moisture stress [J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2012, 33(3): 382–387.
- [14] 郎坤, 赵丹丹, 沈加印, 刘泉汝, 李全起. 缺乏灌溉频次对冬小麦叶片水分生理特征的影响 [J]. 灌溉排水学报, 2013, 32(6): 130–132.
- Lang K, Zhao DD, Shen JY, Liu QR, Li QQ. Effect of deficit irrigation frequency on leaf water physiological characteristics and water use efficiency of winter wheat [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2013, 32(6): 130–132.
- [15] 文晓鹏, 郑思成, 樊庆杰, 颜凤霞. 火龙果试管苗对干旱胁迫的生理生化反应 [J]. 西南大学学报: 自然科学版, 2013, 35(4): 8–13.
- Wen XP, Zheng SC, Fan QJ, Yan FX. Physiological and biochemical responses of regenerated dragonfruit plantlets to drought stress [J]. *Journal of Southwest University: Natural Science Edition*, 2013, 35(4): 8–13.
- [16] Seghieri J, Laloë F. Characterization of the variability of the daily course of leaf water potential in the dominant shrub species within Sahelian fallows in south-west Niger [J]. *Ecol Model*, 2004, 173(2–3): 271–281.
- [17] 丁雷, 李英瑞, 李勇, 沈其荣, 郭世伟. 梯度干旱胁迫对水稻叶片光合和水分状况的影响 [J]. 中国水稻科学, 2014, 28(1): 65–70.
- Ding L, Li YR, Li Y, Shen QR, Guo SW. Effects of drought stress on photosynthesis and water status of rice leaves [J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2014, 28(1): 65–70.

- [18] 柳永强, 杨谋, 马廷蕊, 马勇. 外源 NO 和 H_2O_2 诱导马铃薯对盐碱土壤的适应 [J]. 土壤通报, 2012, 6: 1380–1384.
- Liu YQ, Yang M, Ma TR, Ma Y. Exogenous NO and H_2O_2 induced potato adaptation to saline-alkali soil [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2012, 6: 1380–1384.
- [19] 鲁艳, 雷加强, 曾凡江, 徐立帅, 刘国军, 彭守兰, 黄彩变. $NaCl$ 胁迫对大果白刺幼苗生长和抗逆生理特性的影响 [J]. 应用生态学报, 2014, 25(3): 711–717.
- Lu Y, Lei JQ, Zeng FJ, Xu LS, Liu GJ, Peng SL, Huang CB. Effects of salt stress on *Nitraria roborowskii* growth and physiological characteristics of stress resistance [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(3): 711–717.
- [20] 张力思, 王洁, 艾呈祥, 安森, 秦志华. 外源 NO 对干旱胁迫下君迁子幼苗光合作用的影响 [J]. 江苏农业学报, 2014, 30(3): 623–628.
- Zhang LS, Wang J, Ai CX, An M, Qin ZH. Photosynthesis of *Diospyros lotus* seedlings under drought stress responding to exogenous nitric oxide [J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2014, 30(3): 623–628.
- [21] 田伟丽, 王亚路, 梅旭荣, 李玉中, 郭家选. 水分胁迫对设施马铃薯叶片脱落酸和水分利用效率的影响研究 [J]. 作物杂志, 2015, 1: 103–108.
- Tian WL, Wang YL, Mei XR, Li YZ, Guo JX. Effect of water stress on ABA content in leaf and water use efficiency of facilities potato [J]. *Crops*, 2015, 1: 103–108.
- [22] Grzesiak S, Grzesiak MT, Hura T, Marcinska I, Rzepka A. Changes in root system structure, leaf water potential and gas exchange of maize and triticale seedlings affected by soil compaction [J]. *Environ Exp Bot*, 2013, 88: 2–10.
- [23] 张树斌, 张教林, 曹坤芳. 季节性干旱对白皮乌口树 (*Tarenna depauperata* Hutchins) 水分状况、叶片光谱特征和荧光参数的影响 [J]. 植物科学学报, 2016, 34(1): 117–126.
- Zhang SB, Zhang JL, Cao KF. Effects of seasonal drought on water status, leaf spectral traits and fluorescence parameters in *Tatenna depauperata* Hutchins, a Chinese savanna evergreen species [J]. *Plant Science Journal*, 2016, 34(1): 117–126.
- [24] 刘金玉, 付培立, 王玉杰, 曹坤芳. 热带喀斯特森林常绿和落叶榕树的水力特征和水分关系与抗旱策略 [J]. 植物科学学报, 2012, 30(5): 484–493.
- Liu JY, Fu PL, Wang YJ, Cao KF. Different drought-adaptation strategies as characterized by hydraulic and water-relation traits of evergreen and deciduous figs in a tropi-
- cal karst forest [J]. *Plant Science Journal*, 2012, 30(5): 484–493.
- [25] 董雪, 高永, 虞毅, 杨永华, 包金刚, 孙彦楠, 扎其其格. 平茬措施对天然沙冬青生理特性的影响 [J]. 植物科学学报, 2015, 33(3): 388–395.
- Dong X, Gao Y, Yu Y, Yang YH, Bao JG, Sun YN, Zha QG. Effect of stubble treatment on the physiological characteristics of *Ammopiptanthus mongolicus* [J]. *Plant Science Journal*, 2015, 33(3): 388–395.
- [26] 刘长成, 刘玉国, 郭柯. 四种不同生活型植物幼苗对喀斯特生境干旱的生理生态适应性 [J]. 植物生态学报, 2011, 10: 1070–1082.
- Liu CC, Liu YG, Guo K. Ecophysiological adaptations to drought stress of seedlings of four plant species with different growth forms in karst habitats [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2011, 10: 1070–1082.
- [27] 王艳杰, 彭羽, 薛达元, 马帅, 李征珍, 关越. 七个引种葡萄的生理生态特征的比较研究 [J]. 中外葡萄与葡萄酒, 2012, 6: 6–13.
- Wang YJ, Peng Y, Xue DY, Ma S, Li ZZ, Guan Y. Comparison of physiological and ecological characteristic parameters of seven introduced grape varieties [J]. *Sino-Overseas Grapevine & Wine*, 2012, 6: 6–13.
- [28] 朱建军, 柏新富, 刘林德. 露点水势仪用于植物活体原位水势测定的技术改进 [J]. 植物学报, 2013, 48(5): 531–539.
- Zhu JJ, Bai XF, Liu LD. Improved protocol for the in situ measurement of water potential of plants with a thermocouple psychrometer [J]. *Chinese Bulletin of Botany*, 2013, 48(5): 531–539.
- [29] 刘爱荣, 张远兵, 钟泽华, 吴夏, 张明. 盐胁迫对彩叶草生长和渗透调节物质积累的影响 [J]. 草业学报, 2013, 22(2): 211–218.
- Liu AR, Zhang YB, Zhong ZH, Wu X, Zhang M. Effects of salt stress on the growth and osmotic accumulation of *Coleus blumei* [J]. *Prataculturae Sinica*, 2013, 22(2): 211–218.
- [30] 韩张雄, 李利, 徐新文, 吕湘芳, 岳红霞, 边振. $NaCl$ 对 4 种荒漠豆科植物幼苗生理参数的影响 [J]. 植物学报, 2012, 47(5): 491–499.
- Han ZX, Li L, Xu XW, Lü XF, Yue HX, Bian Z. Effect of $NaCl$ on physiological features of 4 legume seedlings in desert areas of Xinjiang, China [J]. *Chinese Bulletin of Botany*, 2012, 47(5): 491–499.