

## 研究报告

## Research Report

# 紫斑牡丹(*Paeonia rockii*)的光合特性及对土壤干旱胁迫的响应

张雯<sup>1</sup> 徐先英<sup>1,2\*</sup> 师生波<sup>3</sup> 马剑平<sup>2</sup> 富丽<sup>1</sup> 种培芳<sup>1</sup> 池政<sup>4</sup>

1 甘肃农业大学林学院, 兰州, 730070; 2 甘肃省治沙研究所, 兰州, 730071; 3 中国科学院西北高原生物研究所, 西宁, 810008; 4 中国林业科学研究院荒漠化研究所, 北京, 100091

\* 通信作者, xyngxu@163.com

**摘要** 为研究持续干旱处理对紫斑牡丹(*Paeonia rockii*)光合生理特性的影响,本研究。以实生苗为材料进行盆栽控水试验,设置对照(compared, CK)、轻度胁迫(light stress, LD)、中度胁迫(moderate stress, MD)、重度胁迫(Severe stress, SD) 4 个水分处理,研究随着干旱胁迫的加剧,叶片水分生理以及光合生理参数的变化。结果表明:在 CK、LD、MD 水分梯度下,紫斑牡丹生长正常,但在 SD 胁迫下受影响明显,植株叶片变黄且萎蔫;各胁迫阶段叶厚、叶水势下降明显,相对含水量(relative water content, RWC)降低幅度小,差异不明显,饱和水分亏(water saturation deficit, WSD)有在 MD 胁迫下有所升高;干旱胁迫抑制了光合色素合成,叶绿素 a (Chlorophyll a, Chla)、叶绿素 b (Chlorophyll b, Chlb)、叶绿素总含量(total chlorophyll content, Chla+b)、类胡萝卜素(Carotenoids, Car)显著依次下降,叶绿素比值(Chlorophyll ratio, Chla/b)则相反;干旱胁迫导致叶片净光合速率(net photosynthetic rate,  $P_n$ )、气孔导度(Stomatal conductance,  $G_s$ )以及蒸腾速率(transpiration rate,  $T_r$ )呈现下降趋势,但胞间二氧化碳浓度(intercellular carbon dioxide concentration,  $C_i$ )则表现为上升后下降,其中水分利用效率(water use efficiency,  $WUE$ )在逐渐上升。在轻度和中度干旱的紫斑牡丹表现出一定的适应性和耐旱能力,而长期重度干旱则对紫斑牡丹影响较为严重,在重度干旱地区栽植需考虑水分供给。本研究为干旱地区和城市的园林绿化植物的选择提供理论支持。

**关键词** 紫斑牡丹, 干旱胁迫, 光合参数, 光合色素, 生理特性

## Photosynthetic Characteristics of *Paeonia rockii* and Its Response to Soil Drought Stress

Zhang Wen<sup>1</sup> Xu Xianying<sup>1,2\*</sup> Shi Shengbo<sup>3</sup> Ma Jianping<sup>2</sup> Fu Li<sup>1</sup> Zhong Peifang<sup>1\*</sup> Chi Zheng<sup>4</sup>

1 College of Forestry, Gansu Agricultural University, Lanzhou, 730070; 2 Gansu Institute of Desertification Control, Lanzhou, 730071; 3 Northwest Institute of Plateau Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining, 810008; 4 Desertification Research Institute of Chinese Academy of Forestry Sciences, Beijing, 100091

\* Corresponding author, xyngxu@163.com

DOI: 10.13271/j.mpb.018.002358

**Abstract** To study the effects of persistent drought on photosynthetic physiological characteristics of *P. rockii*, pot experiments were conducted with seedlings as materials in this study. Four water treatments, CK, LD, MD and SD, were set up to study the changes of leaf water physiology and photosynthetic physiological parameters with the increase of drought stress. Results is under CK, LD and MD water gradients, the growth of *P. rockii* was normal, but under SD stress, it was obviously affected, and the leaves of *P. rockii* became turn yellow and wilt. Leaf thickness, leaf thickness and leaf water potential decreased significantly, relative water content (RWC) decreased slightly, but the difference was not obvious. Saturated water deficit (WSD) increased under MD stress. Drought

基金项目: 本研究由 2016 年省级林业科技项目(kj049)和国家重点研发项目(SQ2016YFHZ020617-03)共同资助

引用格式: Zhang W., Xu X.Y., Shi S.B., Ma J.P., Fu L., Zhong P.F., and Chi Z., 2020, Photosynthetic characteristics of *Paeonia rockii* and its response to soil drought stress, Fenzi Zhiwu Yuzhong (Molecular Plant Breeding), 18(7): 2358-2365 (张雯, 徐先英, 师生波, 马剑平, 富丽, 种培芳, 池政, 2020, 紫斑牡丹(*Paeonia rockii*)的光合特性及对土壤干旱胁迫的响应, 分子植物育种, 18(7): 2358-2365)

stress inhibited the synthesis of photosynthetic pigments, chlorophyll a, chlorophyll b, chlorophyll a+b, carotenoids (Car) decreased significantly in turn, chlorophyll a/b was the opposite. Stomatal closure caused by drought stress affected plant photosynthesis. The net photosynthetic rate ( $P_n$ ), stomatal conductance ( $G_s$ ) and transpiration rate ( $Tr$ ) of leaves decreased under drought stress, but intercellular carbon dioxide concentration ( $C_i$ ) showed an upward and downward trend, with water use efficiency ( $WUE$ ) rising gradually. Conclusion is *P. rockii* spot showed certain adaptability and drought tolerance in mild and moderate drought, while long-term severe drought had a more serious impact on *P. rockii* spot. Water supply should be considered in planting in severe drought areas. This study provides theoretical support for the selection of landscaping plants in arid areas and cities.

**Keywords** *P. rockii*, Drought stress, Photosynthetic parameters, Photosynthetic pigments, Physiological characteristics

土壤水分胁迫是干旱和半干旱地区影响植物正常生长发育最主要的环境因素之一(周源, 2006; 姚觉等, 2007)。在目前水资源日益短缺的河西走廊等干旱地区, 如何选择耐旱的城市园林绿化植物, 从而能够合理地利用有效水资源, 是目前国内外学者广泛关注的问题(何宝龙, 2013)。光合作用是植物生长最基本生理过程, 是生物界赖以生存的基础, 它是植物利用无机物生产有机物以及获取能量, 而干旱胁迫间接制约着植物光合作用, 在干旱胁迫下, 气孔关闭, 阻止了  $CO_2$  吸入, 从而导致光合下降。同时叶绿素等光合色素合成受阻, 并且叶绿素不稳定, 干旱会使叶绿素分解加快, 叶绿素含量降低(汪耀富等, 1996; 刘长利等, 2006)。马雪梅和吴朝峰(2018, 江苏农业科学, 46(17): 133-136)发现金银花(*Lonicera japonica*)在干旱胁迫下叶片的 Chla 含量不断降低。植物对干旱胁迫的响应是个复杂的过程, 可通过内源调节物质、光合交换规律和光合色素改变表现植物对干旱胁迫的响应。因此, 研究植物耐旱性与光合特性之间的关系异常重要。

紫斑牡丹(*P. rockii*)属毛茛科芍药属的落叶灌木, 又名甘肃牡丹、西北牡丹, 原产中国、被誉为“国色天香”的牡丹, 具有很高的观赏价值。对于紫斑牡丹人们已经对于其形态特征、花期调控以及繁殖育种方法等有较多的研究(郭绍霞等, 2003, 莱阳农学院学报, 20(2): 116-121)。紫斑牡丹在作为观赏性花卉以盆栽的方式应用, 但由于盆栽方式限制了紫斑牡丹从土壤中吸收水分或水分平衡过程, 容易受到干旱胁迫, 影响植株的正常生长。到目前为止, 学者们对紫斑牡丹的干旱胁迫的研究较少(余小春, 2007)。因此, 本研究以临夏自治区引进的紫斑牡丹为供试材料, 采用盆栽模拟干旱胁迫, 同时测定叶片光合生理与水分生理的变化, 揭示紫斑牡丹对于干旱胁迫的适应机制。

## 1 结果与分析

### 1.1 干旱胁迫对叶厚度和叶水势的影响

随着干旱胁迫的加剧, 紫斑牡丹的叶厚和叶水势均有不同幅度的降低, 其中重度胁迫(SD)的叶厚较对照(CK)下降了 11.31%, 中度胁迫(MD)较 CK 下降了 9.26%, 且下降程度达到显著差异( $p < 0.05$ ), 轻度胁迫(LD)与 CK 无差异, 表明在胁迫程度加剧时, 牡丹叶片变薄; 随着干旱胁迫的加剧, 紫斑牡丹叶片的水势呈显著依次降低( $p < 0.05$ ), LD、MD 和 SD 分别较 CK 下降 34.95%、59.78%和 74.18%(图 1)。这说明紫斑牡丹在受到干旱胁迫时叶片失水。

### 1.2 干旱胁迫对叶片相对含水量和相对水分亏的影响

随着干旱胁迫的加剧, 紫斑牡丹的叶片相对含水量(RWC)变化幅度不大, LD 的 RWC 最高(56.39%), SD 较 LD 下降 5.85%, 差异不显著( $p < 0.05$ ); 随着干旱胁迫的加剧, 叶片相对水分亏(WSD)变化幅度亦不大, MD 的 WSD 最高(49.68%), SD 较 MD 的 WSD 下降了 5.59%, 但差异不显著( $p < 0.05$ ) (图 2), 说明紫斑牡丹叶片有较强的保水能力。

### 1.3 干旱胁迫对光合气体交换参数特性的影响

随着干旱胁迫的加剧, 紫斑牡丹叶片  $P_n$ 、 $Tr$ 、 $G_s$  呈显著依次降低的变化趋势( $p < 0.05$ ), 而叶片  $C_i$  呈先升后降的变化趋势。CK 的  $P_n$  明显高于其他三个干旱处理, SD 的  $P_n$  较 CK 下降了 67.42%, 较 LD 下降了 46.95%, 较 MD 下降了 15.71%, MD 较 CK 下降了 61.34%, 除 MD 和 SD 的  $P_n$  无明显差异外, MD 与 SD 差异不显著(图 3A); 在正常供水条件下牡丹的  $Tr$  最高( $1.545 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ), 而 SD 处理的最低( $0.411 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ), 其中 SD 较 CK 下降了 73.39%, 下降率最高, 不同于干旱胁迫的间差异显著( $p < 0.05$ )

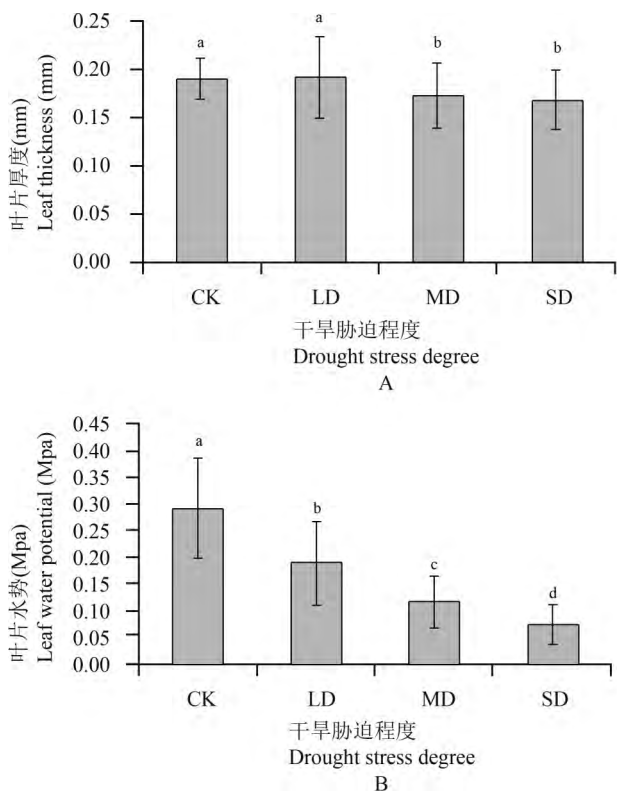


图1 干旱胁迫下紫斑牡丹叶厚和叶水势变化  
注: 不同小写字母表示处理间差异显著( $p < 0.05$ )  
Figure 1 Changes of leaf thickness and leaf water potential of *P. rockii* under drought stress  
Note: Different lower-case letters showed significant difference between treatments ( $p < 0.05$ )

(图3B); 显示,SD较CK的 $G_s$ 下降了71.76%,SD较MD下降了10.11%,差异不显著( $p < 0.05$ ),其他3个干旱胁迫处理差异显著( $p < 0.05$ ) (图3C); 紫斑牡丹叶片 $C_i$ 下降幅度在MD较大,SD较CK下降了24.71%,较LD下降了28.35%,CK与LD差异不显著( $p < 0.05$ ) (图3D),说明干旱胁迫下紫斑牡丹叶片 $P_n$ 降低的原因除过自身因素外,主要是叶片气孔部分关闭,致使气孔限制, $C_i$ 浓度较低。紫斑牡丹的水分利用效率(water use efficiency,  $WUE$ )在CK和LD、MD水分处理间几无差异(图3E); SD明显高于其他3个处理,SD较MD的 $WUE$ 升高了22.23%,较CK升高了18.43%,SD与其他胁迫梯度的水分利用效率差异显著( $p < 0.05$ ) (图3)。表明LD和MD处理的水分利用效率的响应不明显,SD水分利用效率响应明显,说明适度的干旱胁迫有利于紫斑牡丹 $WUE$ 的提高。

#### 1.4 干旱胁迫对光合色素的影响

光合色素参与光合作用过程,其含量直接影响植物的光合能力,其中叶绿素(Chl)与植物的光合作

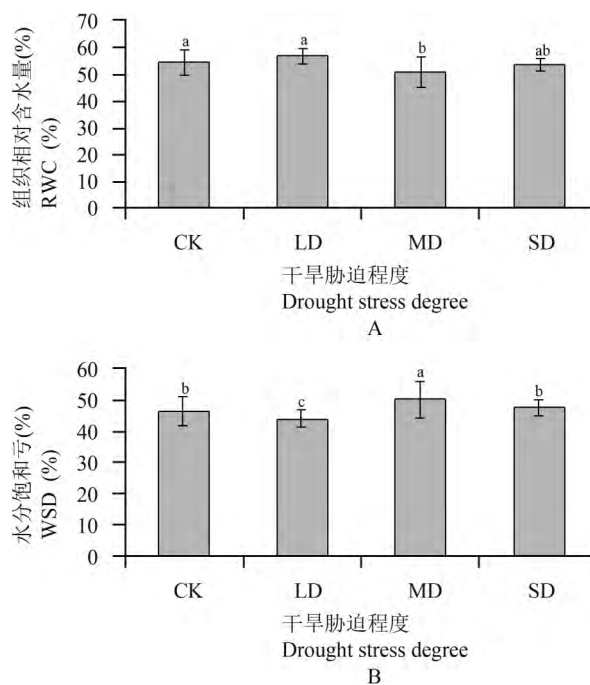


图2 干旱胁迫下紫斑牡丹叶片相对含水量和水分饱和亏变化  
注: 不同小写字母表示处理间差异显著( $p < 0.05$ )  
Figure 2 Changes of relative water content and water saturation deficit in leaves of *P. rockii* under drought stress  
Note: Different lower-case letters showed significant difference between treatments ( $p < 0.05$ )

用密切相关,尤其以叶绿素a(Chla)最为重要。随着干旱胁迫的加剧,紫斑牡丹叶片Chla、Chlb、Chla+b含量和Car均呈显著依次下降的趋势( $p < 0.05$ ),SD的Chla含量较CK相比下降了21.7%,显著低于对照( $p < 0.05$ ); SD的Chlb含量较CK下降了25.8%,而LD的Chlb含量较CK下降了4.2%,LD较CK下降不显著( $p < 0.05$ ); SD的Chla+b较CK下降了22.7%,显著低于对照( $p < 0.05$ ); SD较CK的Car含量相比下降了19.85%,而LD较CK下降了2.27%,下降不显著( $p < 0.05$ ); 同时,随着干旱胁迫的加剧,Chla/b呈现逐渐上升的趋势,SD较CK上升65.64%,SD的Chla/b含量显著高于CK( $p < 0.05$ ),表明紫斑牡丹在干旱胁迫下植物叶片受到了一定损伤和伤害(图4),说明随着干旱胁迫的加剧,植物通过提高叶绿素含量保证光能的充分利用。

## 2 讨论

叶片是植物进化过程中对干旱胁迫较敏感且可塑性较高的器官,叶片形态结构也会随着干旱胁迫的加剧发生变化,也影响植物生理的变化。因此,研究叶片形态对干旱胁迫的响应也是植物抗旱性研究

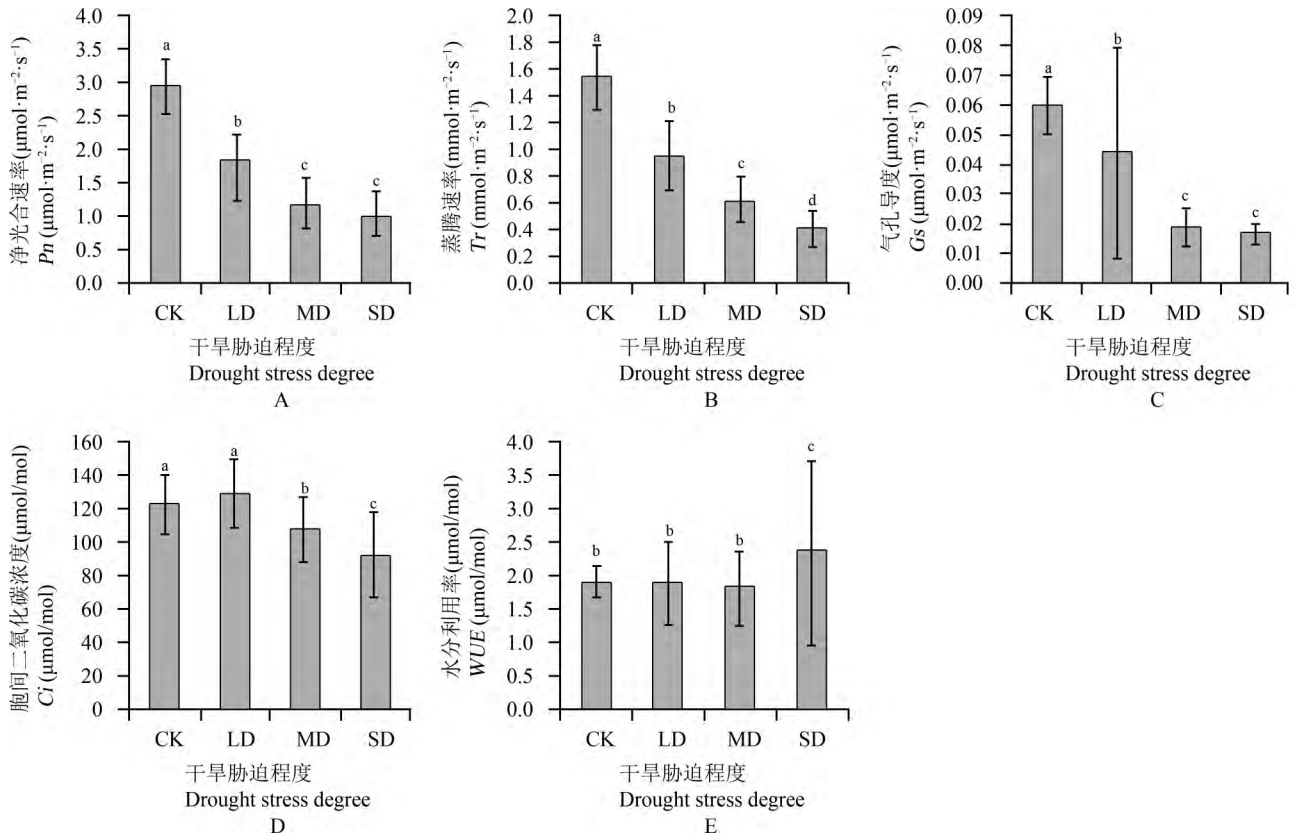


图3 干旱胁迫对紫斑牡丹光合气体参数的影响

注: 不同小写字母表示处理间差异显著( $p<0.05$ )

Figure 3 Effects of drought stress on photosynthetic gas parameters of *P. rockii*

Note: Different lower-case letters showed significant difference between treatments ( $p<0.05$ )

的重要指标之一(田治国, 2012)。孟庆杰等(2004)研究认为叶片形态及叶厚是与植物抗旱性有关, 叶片越厚储水能力相对越强。本研究结果显示随着干旱胁迫的加剧, 叶片形态变化差异突出、叶厚下降幅度明显, 重度胁迫时叶片萎蔫变黄, 叶片出现枯斑点, 枝条下垂, 与其它胁迫梯度对比明显。这与厉广辉等(2014)、庞杰等(2013)研究结果相一致。叶片水势是反映叶片细胞水分状况的重要指标, 叶水势越小叶片细胞越缺水, 吸水能力越强。因此叶水势的变化可以反映植物适应干旱胁迫的能力。王青宁等(2014)研究表明, 植物受到干旱胁迫时组织含水量减少, 植物水流阻力增加, 水势下降。本研究结果显示随着干旱胁迫程度的加剧, 叶片水势变化明显, 降低幅度大。这与吴俊文等(2014)、李继文等(2009)研究结果相一致。

合理充足的土壤水分是紫斑牡丹正常生长发育过程中的环境因子之一。模拟梯度干旱是目前研究干旱胁迫常用的形式, 为贴近紫斑牡丹的实际应用, 本实验采用盆栽控水。叶片相对含水量(RWC)和水分饱和和亏(WSD)这两个指标反映了在水分不足作用下植物组织在蒸腾时耗水补充程度和恢复能力的差

异。因此, 干旱胁迫下的 RWC 和 WSD 能反映植物的抗旱能力(蒋理, 2008)。前人在对大丽花、鸢尾属、景天科等植物的研究中发现, 随着干旱胁迫的加剧, RWC 明显下降, WSD 升高(范苏鲁等, 2011; 张寅媛等, 2014; 黄鹤丽等, 2019)。本研究显示, 紫斑牡丹随着干旱胁迫程度的加剧, RWC 呈现下降的趋势, WSD 呈现上升的趋势, 这与孔艳菊等(2006)、钱璐璜等(2012)研究结果相一致。

光合气体交换参数是反映植物光合作用状况的重要指标, 植物在受到干旱胁迫时光合参数会随着干旱胁迫的加剧而发生变化。大量研究表明, 干旱胁迫下植物的光合能力有不同程度降低, 并且植物在干旱胁迫状态下光合速率降低的幅度与干旱胁迫的程度密切相关(侯小改等, 2006)。本研究表明, 紫斑牡丹的  $P_n$ 、 $T_r$ 、 $G_s$  浓度均呈现下降的趋势, 并且表现差异显著, 这与裴斌等(2013)、韩瑞宏等(2007)研究结果一致。 $WUE$  一般是指叶片  $P_n$  与  $T_r$  的比值, 其变化是植物受到干旱胁迫时重要的表现形式(Hell, 1989)。干旱胁迫下植物是否能适应当前环境条件, 最主要的是看植物能否协调碳同化和水分消耗之间

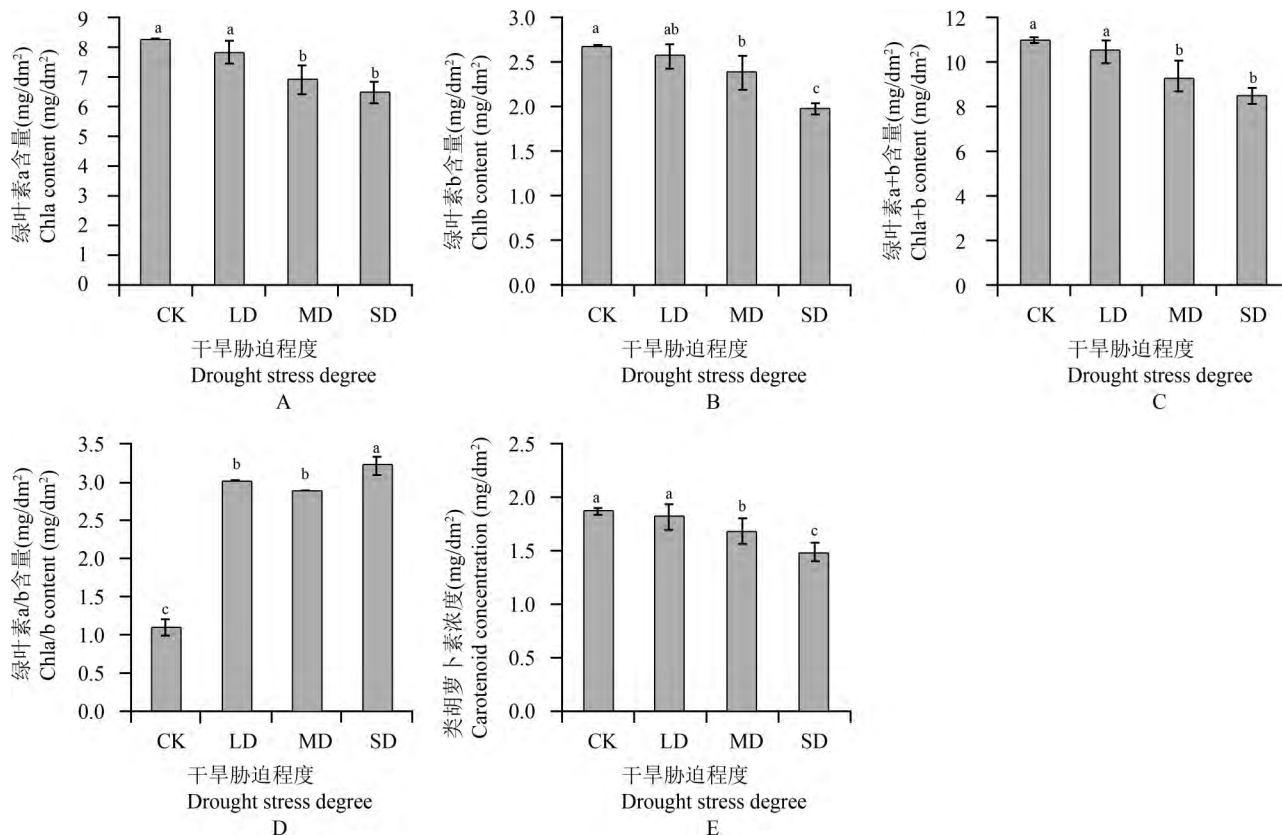


图4 干旱胁迫对紫斑牡丹光合色素的影响

注: 不同小写字母表示处理间差异显著( $p < 0.05$ )

Figure 4 Effects of drought stress on photosynthetic pigments of *P. rockii*

Note: Different lower-case letters showed significant difference between treatments ( $p < 0.05$ )

的关系。由于植物受到干旱胁迫时,对  $P_n$  和  $T_r$  都产生了影响,所以  $WUE$  的高低取决于这两者,也就是说,  $T_r$  下降幅度较  $P_n$  更快,会导致植物  $WUE$  升高。许多研究表明,适度的干旱胁迫会使  $WUE$  显著提高(刘海燕等, 2007)。本研究中,紫斑牡丹的  $WUE$  呈现上升的趋势,但上升趋势不明显,这与刘海燕等(2007)、柴胜丰等(2008)研究结果一致。

光合色素是叶片光合作用的物质基础,其中 Chl 和 Car 含量与植物光合作用密切相关,光合色素含量的高低可表现植物叶片进行光合同化的能力,它们反映植物光能吸收和光保护的关系(孙景宽等, 2011; 朱广龙, 2012)。并且有研究表明干旱胁迫会对植物的叶绿体造成伤害,使 Chl 含量和 Car 含量下降,李伟和曹坤芳(2006)、蔡海霞等(2011)在对三叶漆幼苗(*Terminthia paniculata*)、高山柳(*Salix cupularis*)和沙棘幼苗(*Hippophae rhamnoides* Linn)的抗旱中发现随着胁迫程度的加剧叶片的 Chl 和 Car 含量呈降低的趋势。在孔艳菊等(2006)在干旱胁迫对黄栌幼苗的研究中 Chla/b 较对照上升。本研究中,紫斑牡丹叶片的 Chla、Chlb、Chla+b 和 Car 含量均出现不同程度

的降低,并且差异显著( $p < 0.05$ ),而 Chla/b 有上升的趋势,这与郭有燕等(2016)、兰艳等(2016)研究结果一致。

综上所述,综合分析 12 个紫斑牡丹对干旱胁迫响应的生理指标中发现,紫斑牡丹叶片的叶厚、叶水势、光合气体参数( $P_n$ ,  $T_r$  和  $G_s$ )以及光合色素(Chla, Chlb, Chla+b 和 Car)含量均随水分梯度的降低呈现显著降低的趋势;而水分利用效率( $WUE$ )则呈上升的趋势;叶片相对含水量下降幅度不明显、叶绿素比值(Chla/b)含量随随水分梯度的降低表现为先上升后下降的趋势。由于干旱胁迫导致气孔关闭,气孔导度下降影响光合气体代谢,因此,紫斑牡丹盆栽期间保证水分供应可能是必需的。试验结果表明,紫斑牡丹在干旱胁迫下响应变化明显,为河西走廊等干旱地区和城市的园林绿化植物的选择提供科学依据。

### 3 材料与方法

#### 3.1 研究区概况

试验在甘肃武威治沙研究所绿洲站(37°23'15"~38°12'54"N, 101°59'35"~103°23'40"E)进行。试验区域

属带大陆性气候,年平均气温 7.8℃,年平均最大降雨量 263 mm (1994 年),最小降雨量 89 mm (1939 年),蒸发量 1 400~3 010 mm,日照时数 2 200~3 030 h,无霜期 85~165 d,太阳辐射量 127~138 mol·s<sup>-1</sup>·m<sup>-2</sup>。

### 3.2 供试材料和试验设计

试验于 2017 年 11 月中旬,从大田牡丹中挑选长势相似的 5 a 生紫斑牡丹实生苗进行带土移植至规格为 36 cm×54 cm 的塑料盆中,进行正常的田间水肥管理来保证植株的正常生长,待第二年 7 月份进行紫斑牡丹盆栽控水处理。试验在通风遮雨棚进行,雨棚由塑料薄膜搭建,除无天然降雨影响外,其余环境因子与自然条件相似,栽植土为沙填土,容重为 1.18 g/cm<sup>3</sup>。

上旬,对所有紫斑牡丹植株进行完全透水处理后,于牡丹花盆底部铺设厚塑料薄膜,防止试验中土壤水分的影响。以不同浇水量方式控制土壤水分,于透水后第 3 天进行控水试验,浇水量分别为 1 000 mL (CK)、750 mL (LD)、500 mL (MD)、250 mL (SD),每个处理重复 5 盆,每 2 d 浇一次,其土壤容积含水量分别为 23%~27%、19%~21%、15%~19%、8%~13%。如遇温度过高土壤干旱较快的话,及时给四个处理补充相同水分,处理 30 d 后,进行水分生理和光合生理指标的测定和取样。试验期间棚内日夜均温 32.8℃/15.6℃,相对湿度 47%~78%,中午光合有效辐射约为 675.66 mol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>,棚外日夜均温 33.12℃/14.8℃,相对湿度 32%~58%,中午光合有效辐射约为 1 034 mol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>。

### 3.3 测定项目与方法

(1)土壤容积含水量:采用 TRIME-P 便携式土壤水分速测仪(TDR),于控水 20 d 后每 3 d 上午 7:00~9:00 进行土壤容积含水量测定,每个处理随机选择 4 盆,每盆 3 次重复。

(2)叶厚度与叶水势:叶厚度采用 YHD-1 叶厚度仪,在上午 7:00~9:00,每个处理随机选择 4 盆,每盆一株牡丹测 60 片叶片。干旱处理 30 d 后,在上午 9:00,每个处理随机选择 4 盆,采用露点水势仪 Decagon WP4C (美国)测定叶水势。

(3)叶片相对含水量和水分饱和亏缺:RWC 与 WSD 测定采用饱和称重法。取不同干旱胁迫梯度的叶片用打孔器打取直径 8 mm 的叶圆片 60 枚,收拾叶脉和枯叶边后迅速称鲜重,继而用蒸馏水浸泡叶圆片 8~10 h,取出,用滤纸吸干叶圆片表面水分,迅

速称取饱和鲜重,再放置 80℃ 下烘干至恒重,得干重。RWC=(鲜重-干重)/(饱和鲜重-干重)×100%; WSD=1-RWC

(4)光合气体交换参数:控水处理 20 d 后,于上午 9:00~11:00,每个处理随机选 4 盆,用 Li-6400 便携式光合仪,测定干旱胁迫下紫斑牡丹顶端叶片的光合指标,设置仪器光源为 800 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>,流速为 400 μmol/s,并控制叶温为 20℃。测定指标为 P<sub>n</sub>、T<sub>r</sub>、G<sub>s</sub> 和 C<sub>i</sub> 等参数,并计算 WUE: WUE=P<sub>n</sub>/T<sub>r</sub>。

(5)光合色素含量:Chl 含量测定与计算参照 Arnon (1949)的方法,Car 含量的测定与计算参照朱广廉(1990)的测定方法,光合色素以叶片单位面积的含量来表示。将混合均匀叶样洗净取直径 8 mm 叶圆片 15 枚,装入 20 mL 的溶液中,每个干旱程度重复 3 次。提取液配比为丙酮:乙醇:水=4.5:4.5:1,然后盖紧瓶盖,置低温处避光浸提约 10 d 至叶片无色。然后在 UV-1800 分光光度计下测定波长 400~669 nm 时的吸光值 A<sub>400</sub>~A<sub>669</sub>,并按以下公式计算 Chla、Chlb、Chla/b、Chla+b 和 Car:

$$\text{Chla}=12.21A_{663}-2.59A_{645}$$

$$\text{Chlb}=22.9A_{645}-4.67A_{663}$$

$$\text{Chla/b}=\text{Chla/Chlb}$$

$$\text{Chla+b}=20.3A_{645}+8.04A_{663}$$

$$\text{Car}=(1\ 000A_{470}-3.27Ca-104Cb)/229$$

### 3.4 数据分析

采用 SPSS 20.0 和 Excel 2010 对 4 次重复试验数据进行统计和分析,采用最小显著差数法(least significant difference, LSD)在 a=0.05 水平上做显著性比较。

### 作者贡献

张雯是本研究的试验方案设计和试验主要执行人,并负责数据分析和论文的撰写,徐先英、师生波以及马剑平负责指导试验方案设计和构思,富丽及池政参与试验材料的前期准备和试验实施,种培芳是本研究的通信作者,主要负责试验的论文写作与修改以及最终审阅。全体作者都阅读并同意最终的文本。

### 致谢

本研究由 2016 年省级林业科技项目(kj049)和国家重点研发项目(SQ2016YFHZ020617-03)共同资助。

## 参考文献

- Aron D.I., 1949, Copper enzymes in isolated chloroplasts, bet polyphenol oxidase, *Plant Physiol.*, 24(1): 1
- Cai H.X., Wu F.Z., and Yang W.Q., 2011, Effects of drought stress on the photosynthesis of *Salix paraqpleisia* and *Hippophae rhamnoides* seedlings, *Shengtai Xuebao (Acta Ecologica Sinica)*, 31(9): 2430-2436 (蔡海霞, 吴福忠, 杨万勤, 2011, 干旱胁迫对高山柳和沙棘幼苗光合生理特征的影响, *生态学报*, 31(9): 2430-2436)
- Chai S.F., Jiang Y.S., Wei X., Li H., and Wang M.L., 2008, Effects of drought stress on growth and eo-physiological properties of *Sophora japonica* seedlings, *Zhejiang Linye Keji (Journal of Zhejiang Forestry Science and Technology)*, 28(2): 43-47 (柴胜丰, 蒋运生, 韦霄, 李虹, 王满莲, 2008, 干旱胁迫对槐树幼苗生长和生理生态特征的影响, *浙江林业科技*, 28(2): 43-47)
- Fan S.L., Yuan Z.H., Feng L.J., Wang X.H., Ding X.M., and Zhen H.L., 2011, Effects of drought stress on physiological and biochemical parameters of *Dahlia pinnata*, *Yingyong Shengtai Xuebao (Chinese Journal of Applied Ecology)*, 22(3): 651-657 (范苏鲁, 苑兆和, 冯立娟, 王晓慧, 丁雪梅, 甄红丽, 2011, 干旱胁迫对大丽花生理生化指标的影响, *应用生态学报*, 22(3): 651-657)
- Guo Y.Y., Liu H.J., Kong D.S., Yan F., Zhang Y.J., and Liu D.H., 2016, Effects of drought stress on photosynthesis characteristics of *Lycium ruthenicum* seedlings, *Xibei Zhiwu Xuebao (Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica)*, 36(1): 124-130 (郭有燕, 刘宏军, 孔东升, 闫芳, 张亚娟, 刘东花, 2016, 干旱胁迫对黑果枸杞幼苗光合特性的影响, *西北植物学报*, 36(1): 124-130)
- Han R.H., Lu X.S., Gao G.J., and Yang X.J., 2007, Photosynthetic physiological response of alfalfa (*Medicago sativa*) to drought stress, *Shengtai Xuebao (Acta Ecologica Sinica)*, 27(12): 5229-5237 (韩瑞宏, 卢欣石, 高桂娟, 杨秀娟, 2007, 紫花苜蓿(*Medicago sativa*)对干旱胁迫的光合生理响应, *生态学报*, 27(12): 5229-5237)
- He B.L., 2013, The response of photosynthesis system to drought stress of five species of landscape plants, Thesis for M.S., Zhejiang Agricultural and Forestry University, Supervisor: Lai Q.X., pp.12-17 (何宝龙, 2013, 五种园林植物光合作用系统对干旱胁迫的响应研究, 硕士学位论文, 浙江农林大学, 导师: 赖齐贤, pp.12-17)
- Hell J.J., 1989, Water use efficiency and dry matter distribution in nitrogen- and water-stressed winter wheat, *Agronomy J.*, 81(3): 464-469
- Hou X.G., Duan C.Y., Liu G.X., Yin W.L., and Wang H.F., 2006, Photosynthesis characters of tree peony in response to soil water content, *Huebei Nongxuebao (Acta Agriculturae Boreali-Sinica)*, 21(2): 91-94 (侯小改, 段春燕, 刘改秀, 尹伟伦, 王华芳, 2006, 土壤含水量对牡丹光合特性的影响, *华北农学报*, 21(2): 91-94)
- Huang H.L., Lin D., Zhang J.Q., and Sun K.Z., 2009, Effect of water stress and flooding on the water state, membrane permeability and root activity in brazil banana seedling, *Jiyinzuxue Yu Yingyong Shengwuxue (Genomics and Applied Biology)*, 28(4): 740-744 (黄鹤丽, 林电, 章金强, 孙恪志, 2009, 水分胁迫对巴西香蕉幼苗水分状况, 质膜透性和根系活力的影响, *基因组学与应用生物学*, 28(4): 740-744)
- Jiang L., 2008, Studies on the comparison of drought and garden application of five cover plants, Thesis for M.S., Nanjing Forestry University, Supervisor: Ding Y.F., pp.47-62 (蒋理, 2008, 几种地被植物抗旱性比较及园林应用研究, 硕士学位论文, 南京林业大学, 导师: 丁彦芬, pp.47-62)
- Kong Y.J., Sun M.G., Hu X.J., and Miao H.X., 2006, Effects of drought stress on several physiological indexes of *Cotinus coggygia* seedlings, *Zhongnan Linxueyuan Xuebao (Journal of Central South Forestry University)*, 26(4): 42-46 (孔艳菊, 孙明高, 胡学俭, 苗海霞, 2006, 干旱胁迫对黄栌幼苗几个生理指标的影响, *中南林学院学报*, 26(4): 42-46)
- Lan Y., Xu Y.J., Tan F., Ding C.B., Li T., and Su G.C., 2016, Photosynthetic characters of different introduced olive varieties under drought stress, *Xibei Zhiwu Xuebao (Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica)*, 36(11): 2247-2255 (兰艳, 徐应杰, 谭枫, 丁春邦, 李天, 苏光灿, 2016, 干旱胁迫下油橄榄品种光合特性研究, *西北植物学报*, 36(11): 2247-2255)
- Li G.H., Zhang K., Liu F.Z., Liu D.D., and Wan Y.S., 2014, Morphological and physiological traits of leaf in different drought resistant peanut cultivars, *Zhongguo Nongye Kexue (Scientia Agricultura Sinica)*, 47(4): 644-654 (厉广辉, 张昆, 刘凤珍, 刘丹丹, 万勇善, 2014, 不同抗旱性花生品种的叶片形态及生理特性, *中国农业科学*, 47(4): 644-654)
- Li J.W., Wang J.X., Zhang M.L., Ji Z.B., and Xue S., 2009, Effect of drought and rewater on leaf water potential of *Robinia pseudoacacia*, *Xibei Linxueyuan Xuebao (Journal of Northwest Forestry College)*, 24(3): 33-36 (李继文, 王进鑫, 张慕黎, 吉增宝, 薛设, 2009, 干旱及复水对刺槐叶水势的影响, *西北林学院学报*, 24(3): 33-36)
- Li W., and Cao K.F., 2006, Effects of drought stress on photosynthetic characteristics and chlorophyll fluorescence parameters in seedlings of *Terminthia paniculata* grown under different light level, *Xibei Zhiwu Xuebao (Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica)*, 26(2): 266-275 (李伟, 曹坤芳, 2006, 干旱胁迫对不同光环境下的三叶漆幼苗光合特性和叶绿素荧光参数的影响, *西北植物学报*, 26(2): 266-275)
- Liu C.L., Wang W.Q., Cui J.R., and Li S.Y., 2006, Effects of drought stress on photosynthesis characteristics and biomass allocation of *Glycyrrhiza uralensis*, *Zhongguo Shamo (Journal*

- of Desert Research), 26(1): 142-145 (刘长利, 王文全, 崔俊茹, 李帅英, 2006, 干旱胁迫对甘草光合特性与生物量分配的影响, 中国沙漠, 26(1): 142-145)
- Liu H.Y., Li J.Y., Zhao Y., and Huang K.K., 2007, Influence of drought stress on gas exchange and water use efficiency of *Salix psammophila* growing in five places, Ganhanqu Yanjiu (Arid Zone Research), 24(6): 6815-6820 (刘海燕, 李吉跃, 赵燕, 黄看看, 2007, 干旱胁迫对 5 个种源沙柳(*Salix psammophila*)气体交换及水分利用效率的影响, 干旱区研究, 24(6): 6815-6820)
- Meng Q.J., Wang G.Q., Dong S.F., Zhang L., and Gong Z.D., 2004, Relation between leaf tissue parameters and drought resistance of peaches, Ganhan Diqu Nongye Yanjiu (Agricultural Research in the Arid Areas), 22(3): 123-126 (孟庆杰, 王光全, 董绍锋, 张丽, 龚正道, 2004, 桃叶片组织解剖结构特征与其抗旱性关系的研究, 干旱地区农业研究, 22(3): 123-126)
- Pang J., Zhang F.L., Hao L.Z., Yang Z.G., and Zhao P., 2013, Effect of drought stress on anatomical structure and photosynthesis of *Pugionium cornutum* (L.) Gaertn. leaves in seedling, Shengtai Xuebao (Ecology and Environmental Sciences), 22(4): 575-581 (庞杰, 张凤兰, 郝丽珍, 杨忠仁, 赵鹏, 2013, 沙芥幼苗叶片解剖结构和光合作用对干旱胁迫的响应, 生态环境学报, 22(4): 575-581)
- Pei B., Zhang G.C., Zhang S.Y., Wu Q., Xu Z.Q., and Xu P., 2013, Effects of soil drought stress on photosynthetic characteristics and antioxidant enzyme activities in *Hippophae rhamnoides* Linn. seedlings, Shengtai Xuebao (Acta Ecologica Sinica), 33(5): 1386-1396 (裴斌, 张光灿, 张淑勇, 吴芹, 徐志强, 徐萍, 2013, 土壤干旱胁迫对沙棘叶片光合作用和抗氧化酶活性的影响, 生态学报, 33(5): 1386-1396)
- Qian J.H., Lei J.L., and Zhuang X.Y., 2012, Comparative research on drought resistance of 8 common garden ground cover plants in south China, Xibei Zhiwu Xuebao (Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica), 32(4): 759-766 (钱璩璩, 雷江丽, 庄雪影, 2012, 华南地区 8 种常见园林地被植物抗旱性比较研究, 西北植物学报, 32(4): 759-766)
- Sun J.K., Li T., Xia J.B., and Dong B.T., 2011, Effects of drought stress on photosynthetic pigments and on root, stem and leaf growth characteristics of *Elaeagnus Angustifolia* seedlings, Shuitu Baochi Tongbao (Bulletin of Soil and Water Conservation), 31(1): 68-71 (孙景宽, 李田, 夏江宝, 董波涛, 2011, 干旱胁迫对沙枣幼苗根茎叶生长及光合色素的影响, 水土保持通报, 31(1): 68-71)
- Tian Z.G., 2012, Evaluation on heat and drought tolerance of marigold (*Tagetes*) and study on its growth physiological characteristics, Dissertation for Ph.D., Northwest University of Agriculture and Forestry, Supervisor: Wang F., pp.103-109 (田治国, 2012, 万寿菊属植物耐热性与抗旱性的评价及生长生理特性的研究, 博士学位论文, 西北农林科技大学, 导师: 王飞, pp.103-109)
- Wang Q.N., Yi X.H., Wang H.S., Han G., and Zhao Z., 2014, Study on water status of six sand-fixing shrubs under drought stress, Henan Nongye Xuebao (Journal Henan Agricultural Science), 43(2): 63-67 (王青宁, 衣学慧, 王晗生, 韩刚, 赵忠, 2014, 干旱胁迫下 6 种固沙灌木叶片水分状况研究, 河南农业科学, 43(2): 63-67)
- Wang Y.F., Han J.F., and Liu X.W., 1996, Study on physiological and biochemical responses of flue-cured tobacco to drought stress during early growth of the plants, Zuowu Xuebao (Acta Agronomica Sinica), 22(1): 117-121 (汪耀富, 韩锦峰, 林学梧, 1996, 烤烟生长前期对于干旱胁迫的生理生化响应研究, 作物学报, 22(1): 117-121)
- Wu J.W., Bai J.J., He Q., Li J.Y., Qiu Q., and Pan X., 2014, The relationship of leaf water potential and soil water content of five kinds of seedlings in south China, Fujian Linye Keji (Fujian Forestry Science and Technology), 41(3): 16-21 (吴俊文, 白晶晶, 何茜, 李吉跃, 邱权, 潘昕, 2014, 华南地区 5 种苗木叶水势与土壤含水量的关系, 福建林业科技, 41(3): 16-21)
- Yao J., Yu X.Y., Qiu S., and Li D., 2007, Progress in research of drought resistance mechanism in plants, Huabei Nongxuebao (Acta Agriculturae Boreali-Sinica), 32(S1): 51-56 (姚觉, 于晓英, 邱收, 李达, 2007, 植物抗旱机理研究进展, 华北农学报, 32(S1): 51-56)
- Yu X.C., 2007, Studies on physiology of *Paeonia rockii* flower period control, Thesis for M.S., Gansu Agricultural University, Supervisors: Sun X.G., and Wu Y.H., pp.38-41 (余小春, 2007, 紫斑牡丹花期调控生理特性的研究, 硕士学位论文, 甘肃农业大学, 导师: 孙学刚, 吴永华, pp.38-41)
- Zhang Y.Y., Liu Y., and Bai L., 2014, Effects of drought stress on physiological indices of 4 crassulaceae species, Caoye Kexue (Pratacultural Science), 31(4): 724-731 (张寅媛, 刘英, 白龙, 2014, 干旱胁迫对 4 种景天科植物生理生化指标的影响, 草业科学, 31(4): 724-731)
- Zhou Y., 2006, Studies on the drought of 7 Iris species, Thesis for M.S., Xinjiang Agricultural University, Supervisor: Dong Y. Z., pp.37-42 (周源, 2006, 七种鸢尾的抗旱性研究, 硕士学位论文, 新疆农业大学, 导师: 董玉芝, pp.37-42)
- Zhu G.L., 2012, The characteristics of physio-biochemical and features of morphological structure of *Zizyphus jujube* Mill, Thesis for M.S., Shanxi Normal University, Supervisor: Wei X.X., pp. 90-98 (朱广龙, 2012, 酸枣生理生化特性及结构特征对梯度干旱的响应, 硕士学位论文, 山西师范大学, 导师: 魏学智, pp.90-98)