

doi:10.16779/j.cnki.1003-5508.2018.03.004

## 红叶石楠在干旱胁迫下的生理响应

朱涵明月<sup>1</sup>, 洪霞<sup>2</sup>, 朱天辉<sup>1\*</sup>

(1. 四川农业大学风景园林学院, 四川 成都 611130; 2. 重庆市梁平区气象局, 重庆 梁平 405200)

**摘要:**以1 a生红叶石楠苗木为材料, 设置正常供水75%~80% (占土壤最大持水量的百分数)、轻度胁迫55%~60%、中度胁迫40%~45%、重度胁迫30%~35% 4个处理, 通过盆栽试验研究干旱胁迫对红叶石楠膜透性与丙二醛含量、净光合速率、蒸腾速率、根系生长特性与活力的影响。结果表明: 干旱胁迫程度和作用时间与红叶石楠膜伤害有一定相关性, 但对照、轻度、中度胁迫间差异不显著, 随着胁迫程度的加重, 丙二醛含量呈上升状态, 第20 d达峰值, 以后处于相对稳定状态; 干旱胁迫程度与光合速率下降成正比, 但净光合速率在较长时间维持在较高水平, 而蒸腾速率日变化呈先升后降的单峰曲线, 重度胁迫处理蒸腾速率变化幅度不大, 下降趋势不明显; 干旱胁迫可抑制红叶石楠主根伸长生长, 侧根长度在干旱胁迫时呈增加趋势, 重度胁迫>中度胁迫>轻度胁迫>对照, 干旱胁迫的加剧, 可减少红叶石楠侧根数量, 而干旱胁迫程度与根系吸收面积、根系活力成反比, 重度胁迫与其他处理差异显著, 轻度胁迫、中度胁迫与对照差异不明显, 以上指标表明红叶石楠在干旱胁迫下有较强的耐受能力。

**关键词:** 红叶石楠; 干旱胁迫; 生理指标; 根系

中图分类号: S687.9 文献标识码: A 文章编号: 1003-5508(2018)03-0020-04

## Physiological Response of *Photinia fraseri* to Water Stress

ZHU Han-ming-yue<sup>1</sup> HONG Xia<sup>2</sup> ZHU Tian-hui<sup>1</sup>

(1. College of Landscape Architecture, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China;

2. Chongqing Liangping District Meteorological Bureau, Chongqing 405200, China)

**Abstract:** The annual seedlings of *Photinia fraseri* were treated with four treatments including normal water supply (75%~80% of soil maximum moisture capacity), mild stress (55%~60%), moderate stress (40%~45%) and severe stress (30%~35%). Through pot experiment, studies were made of the effects of water stress on membrane permeability, MDA content, net photosynthetic rate, transpiration rate, root growth characteristics and activity. The results showed that the degree and time of water stress had certain relativity with membrane permeability. Among control, mild stress and moderate stress, the difference was not significant. Along with the aggravation of stress degree, MDA content would rise and reach the peak in 20<sup>th</sup> day, then maintain a stable state. Water stress and photosynthetic rate had positive correlation, and the net photosynthetic rate maintained a high level in a long period. But the transpiration rate presented unimodal curve with rising and then descending, the change of severe stress treatment was not significant, and the downtrend was not obvious. Water stress could inhibit the main root growth with the branch root growing, the order of growth quantities was severe stress > moderate stress > mild stress > the control. The intensification of water stress could reduce the number of branch root, but the degree of water stress was negatively related to root absorption area and root activity. The treatment of severe stress had a significant difference with the others, the treatments of moderate stress and mild stress had

收稿日期: 2018-02-25

作者简介: 朱涵明月(1990-), 博士, 主要从事园林植物抗逆性研究, e-mail: 1067269908@qq.com。

\* 通讯作者: 朱天辉(1963-), 重庆开州人, 博士, 教授, 博士生导师。主要从事林木抗逆性与林木病虫害研究。

not significant difference with the control. The analyses above indicated that *Photinia fraseri* had strong tolerance to water stress.

**Key words:** *Photinia fraseri*, Water stress, Physiological index, Root

红叶石楠(*Photinia fraseri*)是蔷薇科石楠属杂交种的统称,原产亚热带地区,引种我国长江流域并在城市园林绿地中得到广泛应用。红叶石楠有很强的适应性,耐低温,耐土壤瘠薄,有一定的耐盐碱性和耐干旱能力,关于非生物因子胁迫下林木抗逆性报道较多<sup>[1-3]</sup>,而干旱是自然界常见的逆境胁迫因素,不仅制约植物的生长发育与产量,也会引起植被结构与功能的时空变化,植物对干旱胁迫的适应过程和受伤害程度与干旱胁迫强度以及植物自身的抗性紧密联系,并从生化代谢、生理功能<sup>[4]</sup>和形态适应等多种形式表现出来,但国内外有关红叶石楠抗旱性研究较少,本文通过人工控制水分胁迫,研究红叶石楠的膜透性与丙二醛含量、蒸腾作用与光合速率、根系生长特性与根活力变化,探索其抗旱机理,评价其抗旱性,为红叶石楠绿化种植提供理论与实践支持。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验材料与控水设计

以 1 a 生红叶石楠为材料,采用盆栽方法(塑料桶高 35 cm,直径 25 cm。试验土按园土:腐殖质:细砂=5:1:1 比例混合,每桶装土 10 kg),将长势一致、无病虫的红叶石楠苗木定植于塑料桶内(苗高 35 cm),每桶栽植 1 株。试验地设在四川农业大学温江校区温室大棚内,720 株红叶石楠苗木购于青州三景花卉苗木有限公司。

控水方法采用孔艳菊<sup>[5]</sup>中植物水分梯度划分法:对照 75%~80%(占土壤最大持水量的百分数)、轻度胁迫 55%~60%、中度胁迫 40%~45%、重度胁迫 30%~35%。每处理 6 重复,每重复 30 株。试验观测前控制水分,达到上述 4 个水分梯度时开始试验测定。期间每天下午测定土壤容积含水量并补充当天失去的水分,保持各处理水平达到设定的含水量。试验时用保鲜膜覆盖塑料桶表面以防止水分蒸发。

### 1.2 观测指标

#### 1.2.1 膜透性与丙二醛含量(MDA)测定

胁迫试验开始第 1 天、第 10 天、第 20 天、第 30 天、第 40 天用 DDS-11A 型电导率仪测定红叶石楠

膜透性<sup>[6]</sup>,用电导率表示膜伤害程度。丙二醛含量(MDA)采用硫代巴比妥酸法测定

#### 1.2.2 净光合速率、蒸腾速率日变化测定

胁迫试验开始第 1 天、第 10 天、第 20 天、第 30 天、第 40 天上午 10 时选取功能叶 5 片测定净光合速率;在胁迫 20 d(中期)时测定蒸腾速率,6.00~18.00 每两小时测定 1 次,TSP-1 便携式光合测定系统测定净光合速率、蒸腾速率,每叶叶片均读数 6 次取期均值。

#### 1.2.3 根生长系特性与抗旱指标测定

在胁迫试验中期(20 d)运用 TTC 法<sup>[7]</sup>测定根系活力、甲烯蓝法<sup>[7]</sup>测定根系吸收面积。在胁迫试验末期(40 d),将各处理的根系冲洗干净后,测定根系长度和直径,主根和侧根长度(同一植株的多个侧根,取其均值)用直尺测量,根直径用游标卡尺测定,并统计直径 0~2 和  $\geq 2$  mm 的侧根数量。计算不同干旱胁迫下主根和侧根长度、侧根数量相对于对照的增幅。

### 1.3 统计分析

数据采用 SPSS16.0 方差分析和最小显著差异法(LSD)比较不同处理间数据差异。

## 2 结果与分析

### 2.1 干旱胁迫对红叶石楠细胞膜的伤害

逆境伤害首先作用于质膜,膜透性增加是膜系统受破坏的表现之一,膜透性的测定常作为植物抗性研究的一个重要生理指标。

表 1 显示,干旱胁迫程度和作用时间与红叶石楠膜伤害(膜透性用电导率表示)有一定相关性,但在对照、轻度、中度胁迫间差异不显著,细胞膜透性整体增幅很小,在轻度和中度胁迫后期膜系统适应性恢复,而重度胁迫膜透性持续增高,可造成红叶石楠膜较大伤害。

同一作用时间下,随着胁迫程度的加重,丙二醛含量呈上升状态(见表 2),除重度胁迫外,对照、轻度、中度胁迫间差异不显著;同一胁迫程度下,丙二醛含量随作用时间逐渐升高,至第 20 天达峰值,以后处于相对稳定状态,表明红叶石楠有一定抗旱能力,丙二醛含量可作为检测红叶石楠抗旱性的重要指标。

表 1 干旱胁迫下红叶石楠膜相对电导率变化趋势

Tab. 1 Change of electrolyte leakage of *Photinia fraseri* under water stress

处理	膜相对电导率(反正玄转换)				
	第 1 天	第 10 天	第 20 天	第 30 天	第 40 天
对照	8.7 ± 0.3b A	8.8 ± 0.2b A	8.5 ± 0.1b A	8.3 ± 0.1b A	8.0 ± 0.2b A
轻度胁迫	8.9 ± 0.1bB	9.3 ± 0.3bA	9.6 ± 0.3bA	8.7 ± 0.1bB	8.2 ± 0.1bB
中度胁迫	9.1 ± 0.1bB	9.7 ± 0.1bA	10.1 ± 0.1bA	9.0 ± 0.2bB	8.5 ± 0.2bB
重度胁迫	11.5 ± 0.2a C	12.1 ± 0.3aB	12.9 ± 0.3aB	13.2 ± 0.3a A	14.5 ± 0.3a A

注:表中数据为平均数 ± SD,不同小写字母为同时间下不同胁迫间的差异显著性(LSD, P < 0.05)。不同大写字母为相同胁迫下不同时间的差异显著性(LSD, P < 0.05)。

表 2 干旱胁迫下红叶石楠丙二醛含量变化

Tab. 2 Change of MDA of *Photinia fraseri* under water stress

处理	丙二醛含量 (umol/kg. Fw)				
	第 1 天	第 10 天	第 20 天	第 30 天	第 40 天
对照	3.21 ± 0.02bA	3.28 ± 0.01bA	3.37 ± 0.03cA	3.31 ± 0.07bA	3.25 ± 0.05bA
轻度胁迫	3.56 ± 0.03b	3.72 ± 0.02b	3.99 ± 0.04bc	3.52 ± 0.08b	3.50 ± 0.02b
中度胁迫	3.79 ± 0.01b	3.86 ± 0.03b	4.08 ± 0.06b	3.63 ± 0.05b	3.60 ± 0.01b
重度胁迫	5.98 ± 0.13aC	7.21 ± 0.15aB	9.45 ± 0.20aA	9.11 ± 0.16aA	9.03 ± 0.14aA

注:表中数据为平均数 ± SD,不同小写字母为同时间下不同胁迫间的差异显著性(LSD, P < 0.05)。不同大写字母为相同胁迫下不同时间的差异显著性(LSD, P < 0.05)。

2.2 干旱胁迫对红叶石楠净光合速率的影响

干旱胁迫对红叶石楠光合速率的影响如表 3 所示,与对照相比,随着干旱胁迫时间的增加,叶片净光合速率为下降趋势,胁迫处理的净光合速率显著低于对照。干旱胁迫程度与光合速率下降成正比,但净光合速率在较长时间维持在较高水平,说明红叶石楠有忍耐较长时间干旱能力。

2.3 红叶石楠蒸腾速率对干旱胁迫的响应

蒸腾速率日变化呈先升后降的单峰曲线(见表 4)。对照、轻度、中度胁迫,蒸腾速率在 12:00 时达到峰值,随后开始下降,重度胁迫处理蒸腾速率在 12:00 后变化幅度不大,下降趋势不明显。试验表明红叶石楠可通过降低蒸腾速率以减少水分消耗,对水分亏缺环境具有一定的适应能力。

表 3 红叶石楠叶片净光合速率对干旱胁迫的响应

Tab. 3 Response of net photosynthetic rate of *Photinia fraseri* to water stress

处理	光合速率 (umol · m <sup>-2</sup> · s <sup>-1</sup> )				
	第 1 天	第 10 天	第 20 天	第 30 天	第 40 天
对照	9.03 ± 0.85a A	9.07 ± 0.77a A	8.95 ± 0.70a A	8.79 ± 0.68a A	9.02 ± 0.80a A
轻度胁迫	7.95 ± 0.71b A	7.87 ± 0.61b A	5.52 ± 0.35b B	5.14 ± 0.31b B	4.32 ± 0.21b B
中度胁迫	7.93 ± 0.74b A	7.32 ± 0.52b A	5.10 ± 0.30b B	4.82 ± 0.29b B	4.30 ± 0.22bBC
重度胁迫	6.78 ± 0.52b A	5.07 ± 0.41c B	4.85 ± 0.29b C	4.32 ± 0.28b C	4.20 ± 0.21b C

注:表中数据为平均数 ± SD,不同小写字母为同时间下不同胁迫间的差异显著性(LSD, P < 0.05)。不同大写字母为相同胁迫下不同时间的差异显著性(LSD, P < 0.05)。

表 4 干旱胁迫下红叶石楠蒸腾速率日变化

Tab. 4 Daily change of transpiration rate of *Photinia fraseri* under water stress

处理	蒸腾速率(mmol · m <sup>-2</sup> · s <sup>-1</sup> )						
	6:00	8:00	10:00	12:00	14:00	16:00	18:00
对照	0.75 ± 0.01a E	1.05 ± 0.02a D	1.41 ± 0.02a C	2.02 ± 0.03a A	1.59 ± 0.02a B	1.12 ± 0.02a D	1.10 ± 0.02a D
轻度胁迫	0.75 ± 0.01a E	0.99 ± 0.02a E	1.35 ± 0.03a D	1.98 ± 0.02a A	1.63 ± 0.02a B	1.54 ± 0.02a C	1.36 ± 0.02a D
中度胁迫	0.73 ± 0.01a C	0.89 ± 0.01a C	1.22 ± 0.01a B	1.56 ± 0.01b A	1.39 ± 0.02b A	1.23 ± 0.01aB	1.15 ± 0.02a B
重度胁迫	0.72 ± 0.01a C	0.81 ± 0.01b B	0.89 ± 0.01b AB	1.01 ± 0.01c A	0.97 ± 0.01c A	0.96 ± 0.01b A	0.95 ± 0.01b A

注:表中数据为平均数 ± SD,不同小写字母为同时间下不同胁迫间的差异显著性(LSD, P < 0.05)。不同大写字母为相同胁迫下不同时间的差异显著性(LSD, P < 0.05)。

2.4 干旱胁迫对红叶石楠根系生长特性的影响

(1)对根系长度的影响 干旱胁迫可抑制红叶石楠主根伸长生长(见表 5),根长生长表现为对照

轻度胁迫 > 中度胁迫 > 重度胁迫。轻度胁迫条件下,主根长度与对照差异不显著。侧根长度在干旱胁迫时呈增加趋势,重度胁迫 > 中度胁迫 > 轻度胁迫。

迫)对照,与对照差异显著,表明在干旱条件下红叶石楠通过增加侧根长度,从而扩大了吸收范围,表现出对土壤干旱的适应性特征<sup>[8]</sup>。

(2)对侧根数量的影响 随着干旱胁迫的加剧,红叶石楠侧根数量减少(见表6),直径0~2 mm和 $\geq 2$  mm的侧根均表现为对照)轻度胁迫)中度胁迫)重度胁迫,但只有在中度、重度胁迫时差异显著,说明红叶石楠对于旱有一定忍耐力。

表5 干旱胁迫对红叶石楠根长的影响

Tab.5 Response of root length of *Photinia fraseri* to water stress

	主根		侧根	
	根长(cm)	增幅(%)	根长(cm)	增幅(%)
对照	15.4 ± 0.9a	0	18.6 ± 1.5d	0
轻度胁迫	13.9 ± 1.3a	-9.7	21.0 ± 0.6c	12.9
中度胁迫	10.7 ± 1.1b	-30.5	23.1 ± 1.4b	24.2
重度胁迫	9.6 ± 0.6b	-37.7	25.3 ± 1.7a	36.0

注:表中数据为平均数 ± SD,同列中不同字母表示差异显著(LSD, P < 0.05)。

表6 干旱胁迫对红叶石楠侧根数量的影响

Tab.6 Response of branch root number of *Photinia fraseri* to water stress

	0~2 mm		$\geq 2$ mm	
	数量	增幅(%)	数量	增幅(%)
对照	30 ± 3a	0	8 ± 2a	0
轻度胁迫	26 ± 2a	-13.3	7 ± 2a	-12.5
中度胁迫	20 ± 1b	-33.3	3 ± 1b	-62.5
重度胁迫	11 ± 1c	-63.3	1 ± 0b	-87.5

注:表中数据为平均数 ± SD,同列中不同字母表示差异显著(LSD, P < 0.05)。

### 2.5 干旱胁迫对红叶石楠根系活力的影响

试验表明,干旱胁迫程度与根系吸收面积、根系活力成反比(见表7),即干旱胁迫程度的加剧,二者呈下降趋势。重度胁迫与其他处理差异显著,轻度胁迫、中度胁迫与对照在无显著差异,其根系活力、根系吸收面积能维持在一个较高水平,说明红叶石楠在一定程度干旱胁迫下,能保持较高的吸收水分和养分能力,这是园林植物抗干旱胁迫能力的一种体现。

表7 红叶石楠根系活力对干旱胁迫的响应

Tab.7 Response of root activity of *Photinia fraseri* to water stress

处理	根系活力 ( $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ )	总吸收面积 ( $\text{m}^2$ )	活跃吸收面积 ( $\text{m}^2$ )
对照	59.36 ± 3.24a	0.52 ± 0.01a	0.31 ± 0.02a
轻度胁迫	56.95 ± 3.12a	0.49 ± 0.02a	0.29 ± 0.01a
中度胁迫	53.45 ± 2.35a	0.45 ± 0.01a	0.27 ± 0.01a
重度胁迫	35.11 ± 1.21b	0.25 ± 0.01b	0.16 ± 0.01b

注:表中数据为平均数 ± SD,同列中不同字母表示差异显著(LSD, P < 0.05)。

## 3 讨论与结论

水分是植物生长的重要环境因子,影响着植物形态、生理生化代谢及地理分布范围,植物对水分胁迫的响应包含着极其复杂的生理生化变化,并形成了受遗传性制约的适应机制<sup>[9-11]</sup>。本试验表明干旱胁迫对红叶石楠的生理指标与根系特征产生重要影响,各项指标在干旱胁迫下都有所变化,在一定程度上反映了红叶石楠对水分亏缺的调整适应。细胞膜不仅是细胞与环境发生物质交换的主要通道,也是感受环境最敏感部分,处于干旱环境中的植物有一个共同特征就是膜系统受到破坏,质膜相对透性增加,红叶石楠在轻度、中度干旱胁迫下其膜透性相对变化平稳,说明该植物本身存在一定程度抗旱调节机制。丙二醛是反映植物膜在逆境下伤害的指标,是膜脂氧化的最终产物,其含量高低可以反映植物遭受逆境伤害程度<sup>[12]</sup>,随着胁迫程度加剧,丙二醛含量呈上升趋势,说明细胞膜出现不同程度的损坏,但轻度、中度干旱胁迫下丙二醛含量上升幅度小,这与相对电导率结果一致。

蒸腾强度影响着植物水分状况,在一定程度上反映了植物调节水分损失的能力及适应干旱环境能力的大小<sup>[13]</sup>。蒸腾速率日变化为先升后降,且比净光合速率下降的幅度大,说明红叶石楠在干旱胁迫下通过降低蒸腾速率以减少水分消耗,提高水分利用效率,具有较强避旱能力。

在干旱环境中,植物根系可产生一系列适应性机制,主要表现在根系长度、直径、数量及其生理特性等方面的变化,这是根系对干旱环境适应的结果,也是抵御干旱、维持生长的生理学基础<sup>[14,15]</sup>,本研究结果表明,持续干旱胁迫导致红叶石楠根系生长特性向利于耐旱性改变,如侧根长度增加,以扩大吸收范围;另外,根系活力是反映根系吸功能的综合指标,其大小直接影响到植株的生长和抗逆能力<sup>[16]</sup>,是衡量根系抗御干旱能力大小的重要指标<sup>[17]</sup>,根系总吸收面积能反映根系吸收水分、养分能力的大小,而活跃吸收面积则能在一定程度上反映根系活力状况<sup>[18]</sup>。本研究证实红叶石楠根系活力、根系吸收面积能维持在一个较高水平,说明该植物在一定程度干旱胁迫下,能保持较高的吸收水分和养分能力。

(下转第39页)

- 次生林林地水文效应的影响[J]. 生态学报, 2016, 36(17): 5432~5439.
- [4] 彭闪江, 黄忠良, 彭少麟, 等. 植物天然更新过程中种子和幼苗死亡的影响因素[J]. 广西植物, 2004, 24(2): 113~121.
- [5] 马姜明, 李昆, 张昌顺. 元谋干热河谷苏门答腊金合欢, 新银合欢人工林天然更新初步研究[J]. 应用生态学报, 2006, 17(8): 1365~1369.
- [6] 李贤伟, 罗承德, 胡庭兴, 等. 长江上游退化森林生态系统恢复与重建刍议[J]. 生态学报, 2001, 21(12): 2117~2124.
- [7] 蔺菲, 郝占庆, 叶吉. 苔藓植物对植物天然更新的影响[J]. 生态学杂志, 2006, 25(4): 456~460.
- [8] Liu SR, Wang JX, Chen LW. Ecology and restoration of sub-alpine ecosystem in western Sichuan, China. *Informare Botanico Italiano*, 2003, 35(1): 29~34.
- [9] 李媛, 陶建平, 王永建, 等. 亚高山暗针叶林缘华西箭竹对岷江冷杉幼苗更新的影响[J]. 植物生态学报, 2007, 31(2): 283~290.
- [10] 张远彬, 王开运, 鲜骏仁. 岷江冷杉林林窗小气候及其对不同龄级岷江冷杉幼苗生长的影响[J]. 植物生态学报, 2006, 30(6): 941~946.
- [11] 张万儒, 许本彤. 森林土壤定位研究方法[M]. 北京: 中国林业出版社, 1986: 30~36.
- [12] 冯宗炜, 王效科, 吴刚. 中国森林生态系统的生物量和生产力[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [13] 童雀菊, 张述垠. 抚育间伐对北美短叶松的生长及材质的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2005, 29(6): 73~75.
- [14] 李莲芳, 李卫冲, 郑树宏, 等. 滇中云南松低质低效人工林疏伐的密度及生长动态研究[J]. 西南林业大学学报, 2014, 34(5): 1~7.
- [15] 赵庆霞. 亚高山云杉人工林林窗疏伐的林木生长效应与驱动机制[M]. 成都: 中国科学院大学, 2016.
- [16] 杨运来, 刘凤玉, 杨旭, 姜宗辉, 王大明. 对近、成熟油松纯林天然更新措施的探讨[J]. 辽宁林业科技, 2003(5): 45~46.
- [17] 杜洪波. 改造方式对人工更新幼树高生长的影响[J]. 牡丹江师范学院学报(自然科学版), 2011, 77(4): 19~21.

(上接第 23 页)

综合以上结果与分析, 红叶石楠在不同干旱胁迫下的膜透性与丙二醛含量、净光合速率、蒸腾速率、根生长系特性与活力有显著差异, 轻度干旱胁迫下红叶石楠各项指标显著优于其他处理, 表明红叶石楠能够适应一定的水分亏缺环境, 对轻度干旱有较强耐受能力。

#### 参考文献:

- [1] 张卫华, 张方秋, 张守攻, 等. 马占相思抗旱性生理指标的选择研究[J]. 中南林学院学报, 2005, 25(6): 56~59.
- [2] 张玲, 王华, 汪天, 等. 不同桉树品种在低温胁迫下的生理反应[J]. 安徽农业大学学报, 2014, 41(3): 456~461.
- [3] 王红梅, 包维楷, 李芳兰. 不同干旱强度胁迫下白刺花幼苗叶片的生理生化反应[J]. 应用环境生物学报, 2008, 14(6): 757~762.
- [4] 赵和文, 崔金腾, 王杰, 等. 干旱胁迫下常春藤响应的生理生化机制[J]. 中国农学通报, 2013, 29(7): 12~19.
- [5] 孔艳菊, 孔明高, 胡学俭, 等. 干旱胁迫对黄栌幼苗几个生理指标的影响[J]. 中南林学院学报, 2006, 26(4): 43~46.
- [6] 张志良. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 1990: 165~681.
- [7] 袁晓华, 张中汉. 植物生理生化实验[M]. 北京: 高等教育出版社, 1983, 128~133.
- [8] 朱新强, 张新颖, 师尚礼, 等. 干旱胁迫下 4 个苜蓿品种根系抗旱性的比较[J]. 甘肃农业大学学报, 2012, 47(1): 103~107.
- [9] Damiano R, Rossano M. Comparison of water status indicators for young peach tree[J]. *Irrigation Science*, 2003, 22(1): 39~46.
- [10] Feanaasez R J, Reynold J F. Potential growth and drought tolerance of eight desert grasses[J]. *Oncologic*, 2000, 123: 90~98.
- [11] Egert M, Tevini M. Influence of drought on some physiological parameters symptomatic for oxidative stresses in leaves of onions (*Allium schoenoprasum*) [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2002, 48: 43~49.
- [12] Hodges D M, DeLong J M, Fomey C F, et al. Improving the thiobarbituric acid-reactive-substances assay for estimating lipid peroxidation in plant tissues containing anthocyanin and other interfering compounds[J]. *Planta*. 1999, 207: 604~611.
- [13] 曾凡江, 张希明, 李小明, 等. 柽柳的水分生理特性研究进展[J]. 应用生态学报, 2002, 13(5): 611~614.
- [14] Wilson JB. Shoot competition and root competition[J]. *Journal of Applied Ecology*, 1988, 25(1): 279~296.
- [15] Guow H, Li B, Zhang X S. Architectural plasticity and growth responses of *Hippophae rhamnoides* and *Caragana intermedia* seedlings to simulated water stress[J]. *Journal of Arid Environments* 2007, 69(3): 385~399.
- [16] 束良佐, 刘英慧. 硅对盐胁迫下玉米幼苗生长的影响[J]. 农业环境保护, 2001, 20(1): 38~40.
- [17] 赵忠, 李鹏. 渭北黄土高坡主要造林树种根系分布特征及抗旱性研究[J]. 水土保持学报, 2002, 16(1): 96~99.
- [18] 宋海星, 李生秀. 玉米生长空间对根系吸收特性的影响[J]. 中国农业科学, 2003, 36(8): 899~904.