

不同品系花椒幼苗抗旱性研究

陈红林¹, 林 强², 张 群¹, 郑 涛¹, 苏柯星¹, 王 辉³, 刘淑明¹

(1.西北农林科技大学理学院, 陕西 杨凌 712100; 2.青海省林业专用物资储备中心, 青海 西宁 810000;
3.富平县林业发展中心, 陕西 富平 711700)

摘 要:研究花椒幼苗对土壤干旱胁迫的适应性, 比较不同品系之间的抗旱性差异, 为花椒耐旱品系的确定与应用提供理论依据。以中国北方果实品质较好的循环花椒、凤县花椒、秦安花椒、涉县花椒、韩城花椒等不同品系花椒 1 年生幼苗为材料, 采用盆栽试验方法, 设计 4 个土壤水分梯度进行控水处理, 土壤相对含水量分别为 75%~80% (对照)、55%~60% (轻度胁迫)、40%~45% (中度胁迫) 和 30%~35% (重度胁迫)。2016 年 5—9 月份, 测定不同水分条件下不同品系花椒的蒸腾耗水量、生物量及抗旱生理指标。采用模糊数学隶属函数法进行不同品系的抗旱性综合评价。结果表明, 干旱胁迫时花椒蒸腾耗水量降低, 且不同品系之间差异显著 ($P<0.05$)。在中度水分胁迫条件下, 循环、凤县、秦安、涉县、韩城花椒 5—9 月份的蒸腾耗水量分别为 1 148.97、1 001.78、923.08、792.92、951.06 g。随着干旱胁迫程度的增加, 花椒生物量减小, 根冠比增大, 根系干重占总生物量的比重呈增大趋势, 而叶片干重占生物量的比重呈下降趋势。在中度胁迫时, 循环、凤县、秦安、涉县、韩城花椒叶干重分别较对照降低了 42.9%、42.8%、40.1%、38.5%、30.5%, 在重度胁迫时分别降低了 61.1%、58.4%、52.7%、48.8%、45.6%。重度干旱条件下, 循环、凤县、秦安、涉县、韩城品系的苗高生长量分别较对照减小了 61.6%、67.5%、56.2%、55.8%、47.2% ($P<0.05$), 地径生长量分别较对照减小了 38.7%、44.2%、34.5%、32.4%、32.7% ($P<0.05$), 水分利用效率分别较对照提高了 24.8%、32.7%、44.8%、26.2%、36.4% ($P<0.05$)。在土壤水分不足时, 不同品系之间除了 POD 活性 (轻度胁迫) 外, 各项生理指标差异显著 ($P<0.05$)。韩城花椒和秦安花椒在干旱条件下具有较大的根冠比, 叶片相对含水率较高, 可溶性蛋白含量、脯氨酸含量、SOD 和 POD 活性显著增大, MDA 含量及细胞膜透性增幅较小, 具有较强的抗旱性特征。不同品系花椒幼苗具有比较稳定的抗旱性差异。花椒幼苗的抗旱性排序为陕西韩城>河北涉县>甘肃秦安>青海循环>陕西凤县。生长在高海拔地区的花椒, 对土壤水分不足比较敏感, 抗旱性较差。在中国北方半湿润和半干旱气候区, 适宜栽植陕西韩城和河北涉县品系的花椒。

关键词:花椒; 品系; 干旱胁迫; 蒸腾耗水量; 生物量; 抗旱生理指标; 抗旱性评价
中图分类号:S759.3; S718.43 **文献标志码:**A

A study on drought resistance of seedlings of different
Zanthoxylum bungeanum strains

CHEN Honglin¹, LIN Qiang², ZHANG Qun¹, ZHENG Tao¹, SU Kexing¹, WANG Hui³, LIU Shuming¹
(1.College of Science, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;
2.Qinghai Provincial Forestry Special Material Reserve Center, Xining, Qinghai 810000, China;
3.Forestry Development Center of Fuping County, Fuping, Shaanxi, 711700, China)

Abstract: This study assessed the adaptability of *Zanthoxylum bungeanum* seedlings to drought stress and the difference between different strains including Xunhua (QHXX), Fengxian (SXFX), Qinan (GSQA), Shexian (HBSX), and Hancheng (SXHC) in China. A set of pot experiments was conducted to study water consumption, biomass, and the physiological characteristics of *Z. bungeanum* seedlings. The one-year-old seedlings of Xunhua (QHXX), Fengxian (SXFX), Qinan (GSQA), Shexian (HBSX), and Hancheng (SXHC) *Z. bungeanum*, which have better fruit quality in northern China, were used as materials. Four relative soil moisture contents were

used including 75%~80% (suitable water, CK), 55%~60% (mild stress, MIS), 40%~45% (moderate stress, MOS) and 30%~35% (severe stress, SES) in the experiments. The water consumption, biomass, and drought resistance physiological indexes of different strains were measured in conditions of different moisture conditions from May to August, 2016. The drought resistance of *Z. bungeanum* seedlings was comprehensively evaluated with the fuzzy mathematical membership function formula. The results showed that water consumption in *Z. bungeanum* decreased under drought stress, with significant differences ($P<0.05$) among strains. Under moderate drought conditions, water consumption of QHXH, SXFX, GSQA, HBSX, and SXHC from May to August were 1 148.97 g, 1 001.78 g, 923.08 g, 792.92 g, and 951.06 g, respectively. Further increase in drought stress resulted in a reduction in total biomass, whereas the ratio of root dry weight to total biomass increased and that of leaf dry weight to total biomass decreased. Under moderate drought conditions, the leaf dry weight of QHXH, SXFX, GSQA, HBSX, and SXHC decreased by 42.9%, 42.8%, 40.1%, 38.5%, and 30.5%, respectively. Under extreme drought conditions, these percentages decreased to 61.1%, 58.4%, 52.6%, 48.9%, and 45.6%, respectively. Under severe water stress, the height and diameter growth of QHXH, SXFX, GSQA, HBSX, and SXHC decreased by 61.6%, 67.5%, 56.2%, 55.8%, and 47.2% ($P<0.05$), and 38.7%, 44.2%, 34.5%, 32.4%, and 32.7% ($P<0.05$), the WUE increased by 24.8%, 32.7%, 44.8%, 26.2% and 36.4% ($P<0.05$), respectively, compared to the CK, and significant ($P<0.05$) changes in the physiological indexes were observed among different strains, except for POD (mild stress). Moreover, the content of soluble protein and proline, activity of superoxide dismutase and peroxidase, relative water content, water use efficiency of GSQA and SXHC significantly increased ($P<0.05$) with drought, which indicated stronger characteristics of drought resistance. Different strains showed relatively stable drought resistance. Drought resistance of different strains in decreasing order was as follow: SXHC>HBSX>GSQA>QHXX>SXFX, which were based on growth and physiological characteristics. The strains of SXHC and HBSX is thus more suitable for propagation in the semi-humid and semi-arid areas of northern China. Comprehensive evaluation of the drought resistance of *Z. bungeanum* was conducted by combining the physiological index and the growth index, which eliminated the one-sidedness of drought resistance evaluation when using a single physiological index.

Keywords: *Zanthoxylum bungeanum*; strains; drought stress; transpiration water consumption; biomass; drought resistance physiological index; drought resistance evaluation

干旱是植物生长过程中经常发生的气象灾害。植物抗旱性研究一直是植物生理生态学研究的热点。大量研究表明,植物抵御干旱的机制复杂多样,不同种类具有不同的抗旱能力,而不同品系的抗旱能力和方式也不尽相同。在水资源短缺和季节性干旱的丘陵山地,选择抗旱性强的植物进行人工造林,无疑是提高造林效率,改善区域生态环境最为经济、有效的方法。因此,研究干旱条件下植物生理生态特征及其调控机制,对实现干旱半干旱地区植物高效用水具有重要意义。

花椒 (*Zanthoxylum bungeanum*) 是芸香科 (Rutaceae) 花椒属落叶小乔木,是中国干旱半干旱地区的木本油料及香料树种。花椒自然分布于中国的东北、华北、华中、西南、西北地区,分布面积达 1 200 km²^[1]。由于其分布范围广泛,长期的栽培和自然选择的结果,品系及个体间性状变异较大^[2]。目前,有关花椒的研究主要集中于栽培^[3]、育种^[4]和

化学成分^[5-6]等方面。有关干旱对花椒幼苗不同品种生理特性^[7-8]及根系形态^[9]的影响已有报道,但对于不同品系及其抗旱性的研究还很少。充分利用花椒资源丰富和地理变异的遗传优势,选育适于特殊生境的抗逆品系或者品种,对促进品种改良,实现丘陵山地造林工程的良种化具有重要意义。本研究通过盆栽实验,分析持续干旱胁迫下不同品系花椒幼苗几种主要生理指标的变化,探讨不同品系对于干旱胁迫的适应机理及差异性,为花椒耐旱品种筛选与应用提供依据。

1 材料与方法

1.1 材 料

1.1.1 材料及处理 试验材料为 6 个品系花椒 1 a 生实生苗,种子来源于陕西凤县、陕西韩城、青海循化、河北涉县、甘肃秦安,采种树树龄约 10 a 生。采种地的地理及气候特征见表 1。

表 1 采种地地理及气候特征

Table 1 Geographical locations and climate characteristics of seeds collected

品系代号 Source code	产地 Place of origin	经度 Longitude	纬度 Latitude	海拔/m Altitude	年平均温度/℃ Mean annual temperature	年降水量/mm Annual precipitation	日照百分率/% Percentage of sunshine	年≥10℃ 积温/℃ ≥10℃ accumulated temperature
SXFX	陕西凤县 Fengxian, Shaanxi	106.5° E	33.9° N	1107.6	11.4	613.3	54	3019.8
SXHC	陕西韩城 Hancheng, Shaanxi	110.5° E	35.5° N	1100.1	13.5	559.7	58	4626.0
QHXX	青海循化 Xunhua, Qinhai	102.5° E	35.8° N	1752.5	9.0	264.4	62	2891.0
HBSX	河北涉县 Shexian, Hebei	113.7° E	36.8° N	850.6	12.5	540.5	59	4566.8
GSQA	甘肃秦安 Qinan, Gansu	105.7° E	34.9° N	1400.2	10.4	507.3	56	3382.8

2015 年 10 月下旬,选取生长良好且规格相对一致的幼苗移栽到容器(桶高 30 cm,口径 25 cm)中,每桶栽 1 株。试验用土按园土:腐殖质:河沙=4:1:1 的比例混合而成。每桶装土 12 kg,田间持水量 22.28%(采用环刀法测定),为确保生长状况一致,幼苗进行了基部截干处理。2016 年春季,当花椒萌芽后,留取生长健壮的萌芽 1 个。4 月下旬开始进行土壤梯度控水,共设 4 个水分梯度处理,土壤相对含水量分别为 75%~80%(对照,适宜水分,CK)、55%~60%(轻度胁迫,MIS)、40%~45%(中度胁迫,MOS)和 30%~35%(重度胁迫,SES),每个处理重复 5 次。同时,每个处理中用不栽植苗木的桶测定蒸发量(E_1), E_1 为相邻 2 次测定值之差。2016 年从 5 月 1 日开始,隔日 18:00 用电子天平对各处理称质量,并补充散失的水量(E_2),记录桶质量及灌水量,计算单株蒸腾耗水量(L): $L=E_2-E_1$ 。9 月底测定结束。干旱试验在西北农林科技大学试验苗圃智能温室内进行。

1.2 测定方法

1.2.1 耗水量 隔日 18:00 对各处理进行称重,计算并补充散失的水量。

1.2.2 生长量 控水前和生长结束时,分别测定地径和苗高。地径采用游标卡尺(精度 0.02 mm)测定,高度采用钢卷尺测定。

1.2.3 生物量

(1)地上部分。2016 年 10 月初,剪去花椒地上部分,将茎和叶分开,并立即称重,得鲜重;在 105℃ 下杀青 30 min,再在 80℃ 下烘至恒重,得花椒地上各部分干重。

(2)地下部分。将根系冲洗干净后,用吸水纸吸干根系表面的水分,称得单株鲜重;在 80℃ 下烘至恒重,得地下部分单株干重。

1.2.4 水分利用效率 以单株地上部分干质量与其同期蒸腾耗水量之比来表示。

1.2.5 生理指标测定 从 2016 年 5 月下旬开始,在 5 个盆栽幼苗的树冠中部,从 3 个不同方向分别采样,混合后用密封袋保存带回实验室,对叶片相对含水率和细胞膜透性快速测定,剩余材料保存于-70℃ 冰箱中,用于其他生理指标的测定。每月采样并测定 1 次,每次测定重复 3 次,8 月下旬结束。

(1)叶片相对含水率(RWC)。采用烘干法测定,并用以下公式计算:

$$RWC(\%) = (\text{鲜重} - \text{干重}) / (\text{饱和重} - \text{干重}) \times 100\%$$

(2)保护酶活性^[10]。超氧化物歧化酶(SOD)采用氮蓝四唑光还原法测定;过氧化物酶(POD)采用愈创木酚显色法测定;

(3)丙二醛(MDA)。采用硫代巴比妥酸法测定^[11];

(4)渗透调节物质含量^[11]。游离脯氨酸含量采用茚三酮法测定;可溶性蛋白采用考马斯亮蓝染色法测定;细胞膜透性采用电导仪法测定。

1.2.6 数据处理 采用模糊数学隶属函数法进行抗旱性综合评价^[12]。每个品系各指标综合评判采用模糊数学隶属函数计算公式进行定量转换后,再将各指标隶属函数值取平均,进行比较。隶属函数公式为: $R(X_j) = (X_j - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})$,如果指标与抗旱性呈负相关,则: $R(X_j) = 1 - (X_j - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})$ 。式中, X_j 为干旱胁迫下指标测定值, $X_{\min}$ 和 $X_{\max}$ 为胁迫下所有参试材料某一指标的最小值和最大值。将抗旱隶属函数值进行累加,并求其平均值。

对试验数据用 SPSS 进行方差分析,差异显著性运用 Duncan's 检验法进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 干旱胁迫对不同品系花椒蒸腾耗水的影响

研究表明,干旱胁迫时花椒蒸腾耗水量降低(图1)。在不同水分处理条件下,耗水量差异较大。水分适宜时花椒生长旺盛,叶面积大,蒸腾强烈,耗水量多;相反,干旱胁迫时生长受抑,其叶面积减小,蒸腾耗水量降低。可以看出,6—7月份是

花椒生长旺盛的时期,不同水分条件下的耗水量均较高。不同品系的花椒在相同水分处理条件下,蒸腾耗水量表现出凤县花椒>循化花椒>涉县花椒>秦安花椒>韩城花椒。

2.2 干旱胁迫对不同品系花椒生物量的影响

随着干旱胁迫程度的增加,不同品系根系干重呈下降趋势(表2)。其中,降幅最大的是凤县花椒,在轻度、中度和重度胁迫时,根系干重分别较对照降

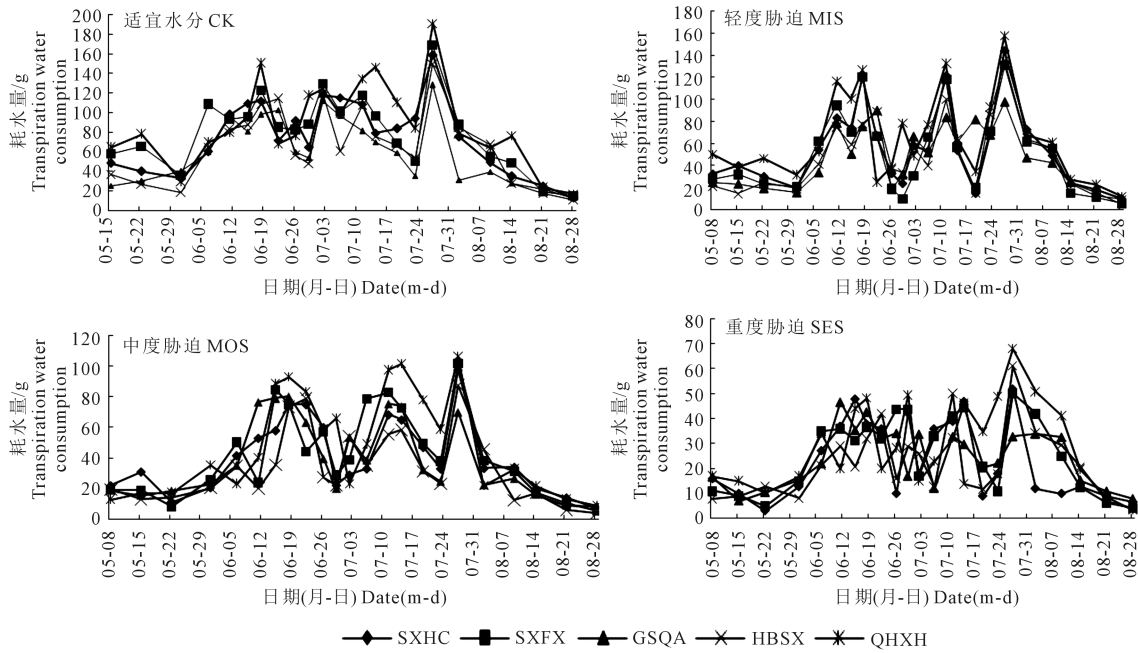


图1 不同处理条件下花椒日蒸腾耗水量

Fig.1 Daily water consumption of *Z. bungeanum* under different drought stress treatments

表2 不同品系花椒生物量

Table 2 Biomass of *Z. bungeanum* from different strains

品系 Strain	处理 Treatment	干重 Dry weight/g					根冠比 Root/Crown
		根 Root	茎 Stem	叶 Leaf	地上部分 Above ground part	总干重 Total dry weight	
QHXX	CK	77.5a	80.1a	50.4a	130.5a	208.0a	0.59c
	MIS	69.7b	72.7b	37.2b	109.9b	179.6b	0.63bc
	MOS	45.8c	43.3c	28.8c	72.1c	117.9c	0.64bc
	SES	31.8d	23.2d	19.6d	42.8d	74.6d	0.74a
SXFX	CK	76.8a	81.5a	48.1a	129.6a	206.4a	0.59c
	MIS	65.8b	70.3b	38.3b	108.6b	174.4b	0.61bc
	MOS	45.1c	44.1c	27.5c	71.6c	116.7c	0.63bc
	SES	30.6d	25.3d	20.0d	45.3d	75.9d	0.68a
GSQA	CK	80.1a	74.9a	45.0a	119.9a	200.0a	0.67b
	MIS	75.7a	69.6a	35.0b	104.6b	182.3a	0.74ab
	MOS	55.1b	45.9b	26.6c	72.5c	127.6c	0.76ab
	SES	33.9c	23.8c	21.3d	45.1d	79.0d	0.75a
HBSX	CK	82.4a	83.7a	49.4a	133.1a	215.5a	0.62c
	MIS	75.4a	63.2b	38.8b	102.0b	177.4b	0.74b
	MOS	56.7b	38.7c	30.4c	69.1c	125.8c	0.82a
	SES	39.9c	24.2d	25.3d	49.5d	89.4d	0.81a
SXHC	CK	79.4a	75.9a	45.2a	121.1a	200.5a	0.66b
	MIS	73.0a	52.0b	40.2b	92.2b	165.2b	0.79a
	MOS	62.6b	40.7c	31.4c	72.1c	134.7c	0.86a
	SES	41.5c	23.0d	24.6d	47.6d	89.1d	0.87a

注:同列中不同字母表示该品系处理间差异显著($P<0.05$)。
Note: Different lowercase letters in the same column with the same strains indicate significant differences ($P<0.05$).

低了 14.3%、41.3%和 60.2%。降幅最小的是韩城花椒,分别较对照降低了 8.1%、21.2%和 47.7%。随着胁迫程度的增加,不同品系的根系生物量分别占总生物量的比例呈增大趋势。循化花椒、凤县花椒、涉县花椒、秦安花椒、韩城花椒在中度胁迫时,根系生物量分别占总生物量的 38.8%、38.6%、43.2%、45.1%和 46.5%;在重度胁迫时,分别占总生物量的 42.6%、40.3%、42.9%、44.6%、46.6%。干旱胁迫后,不同品系花椒地上部分生长受抑,干重降低,且随着胁迫程度增加而降幅增大。在中度胁迫时,循化花椒、凤县花椒、秦安花椒、涉县花椒、韩城花椒叶干重分别较对照降低了 42.9%、42.8%、40.1%、38.5%、30.5%;在重度胁迫时,降低了 61.1%、58.4%、52.7%、48.8%、45.6%。表明花椒不同品系适应干旱的能力存在差异,涉县花椒、韩城花椒适应性较强,干旱胁迫对其地上部分生长的影响较小,而循化和凤县花椒生长显著降低,干旱对其生长的抑制作用较为显著。

研究结果表明,干旱胁迫条件下花椒的根冠比增大(表 2),且重度水分胁迫时根冠比显著高于适宜水分($P<0.05$),表明干旱胁迫影响了花椒营养物质的分配,干旱促进营养物质向根的分配,减少了向冠部的运输,导致根冠比增大。同时,秦安、韩城花椒具有较大的根冠比,表明其根系发达,具有耐旱性特征。

2.3 干旱胁迫对不同品系花椒水分利用的影响

干旱胁迫条件下,花椒水分利用效率(WUE)提高(表 3),重度胁迫时 WUE 最大,循化、凤县、涉县、秦安、韩城品系分别较对照提高了 24.8%、32.7%、44.8%、26.2%和 36.4%($P<0.05$),表明花椒通过降低对水分的消耗而适应干旱条件。同时,韩城、秦安、涉县品系在不同水分条件下,其水分利用率均较

表 3 不同品系花椒水分利用效率/(g·g⁻¹)
Table 3 Water use efficiency of *Z. bungeanum* of different strains

品系 Strain	适宜水分 CK	轻度胁迫 MIS	中度胁迫 MOS	重度胁迫 SES
QHXX	0.113b(c)	0.136b(ab)	0.125b(b)	0.141c(a)
SXFX	0.101c(b)	0.115c(b)	0.085c(c)	0.134c(a)
GSQA	0.116b(c)	0.149a(b)	0.151a(b)	0.168b(a)
HBSX	0.145a(c)	0.161a(b)	0.152a(bc)	0.183b(a)
SXHC	0.151a(c)	0.162a(bc)	0.166a(b)	0.206a(a)

注:同行不同小写字母(带括号)表示差异显著($P<0.05$)。同列不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。下同。

Note: Different lowercase letters (with parentheses) in the same line and different lowercase letters in the same column indicate significant differences ($P<0.05$). The same below.

高,显著高于循化和凤县品系($P<0.05$);凤县花椒对干旱条件较为敏感,随胁迫程度的增加,生长量显著减小,水分利用率降低。

2.4 干旱胁迫对不同品系花椒地上部分生长的影响

干旱胁迫条件下,不同品系的苗高生长和地径生长均表现出适宜水分>轻度胁迫>中度胁迫>重度胁迫,同时,各品系的生长状况存在差异,重度水分胁迫时,循化、凤县、秦安、涉县、韩城品系的苗高生长量分别较对照减小了 61.6%、67.5%、56.2%、55.8%、47.2%($P<0.05$),地径生长量分别较对照减小了 38.7%、44.2%、34.5%、32.4%、32.7%($P<0.05$)(表 4)。

2.5 干旱胁迫对不同品系花椒生理特性的影响

花椒叶片相对含水率与土壤含水量有关,随干旱程度的增加,叶片相对含水率显著减小(表 5)。相同水分条件下,韩城花椒的相对含水率较高,重度胁迫时,其相对含水率较循化、凤县、涉县、秦安花椒分别高 16.2%、29.7%、11.3%、4.1%。表明持续干旱条件下,韩城花椒叶片的保水能力较强。

研究结果表明,随土壤含水量降低,花椒叶片的脯氨酸含量增大(表 5)。重度胁迫时,脯氨酸含量显著高于对照($P<0.05$),且不同品系之间差异显著($P<0.05$)。MDA 是脂膜过氧化的产物之一,其含量高低能够反映细胞受到胁迫的严重程度^[13]。干旱条件下,花椒 MDA 含量呈上升趋势,其中凤县花椒 MDA 含量增幅最大,重度和中度胁迫时,分别较对照高 248.8%和 177.6%,表明随胁迫程度的增加,对其细胞膜伤害较大,而秦安花椒和韩城花椒的 MDA 含量增幅较小。重度胁迫时,不同品系之间差异显著($P<0.05$)。干旱胁迫条件下,花椒可溶性蛋白含量增大,且秦安花椒和韩城花椒的可溶性蛋白含量较高,重度胁迫时,二者与循化、凤县、涉县花椒差异显著($P<0.05$)。花椒细胞膜透性随干旱胁迫程度增加而增大,除韩城花椒和秦安花椒外,其他品系在轻度胁迫、中度和重度胁迫时差异显著($P<0.05$)。凤县花椒在重度胁迫时,细胞膜透性最大,分别较循化、秦安、涉县、韩城花椒高 4.5%、10.0%、18.1%、32.0%。

SOD 和 POD 活性与植物细胞的抗氧化能力呈正相关^[14-15]。表 5 表明,花椒 SOD 活性在中度胁迫时最高,随胁迫程度的增加活性下降,涉县、秦安、韩城花椒在中度胁迫和重度胁迫时,SOD 活性差异不显著,而凤县、循化花椒差异显著($P<0.05$)。其中,涉县花椒的 SOD 活性较高,在中度胁迫时,分别较循化、凤县、秦安、韩城花椒高 18.5%、17.7%、14.9%、

表 4 不同水分条件下花椒苗高和地径生长量

Table 4 Height and ground diameter growth of <i>Z. bungeanum</i> under different water conditions								
品系 Strain	苗高生长量 Height increment/cm				地径生长量 Ground diameter increment/mm			
	CK	MIS	MOS	SES	CK	MIS	MOS	SES
QHXH	58.3(a)a	49.7(b)b	31.8(b)c	22.4(c)c	2.30(a)a	1.81(b)b	1.67(b)ab	1.41(c)ab
SXFX	59.3(a)a	50.2(b)b	30.8(c)c	19.3(d)d	2.40(a)a	2.08(b)a	1.53(b)b	1.34(c)b
GSQA	57.3(a)a	50.5(b)b	36.0(b)b	25.1(c)b	2.26(a)a	2.07(a)a	1.69(b)a	1.48(b)a
HBSX	60.6(a)a	57.5(a)a	38.6(b)ab	26.8(c)b	2.25(a)a	2.11(a)a	1.70(ab)a	1.52(b)a
SXHC	58.0(a)a	56.6(a)a	41.7(b)a	30.6(c)a	2.23(a)a	2.19(a)a	1.72(b)a	1.50(b)a

表 5 不同水分条件下花椒叶片的生理指标

Table 5 Physiological indexes of leaves of <i>Z. bungeanum</i> under different water conditions								
处理 Treatment	品系 Strain	生理指标 Physiological index						
		相对含水量 Relative water content/%	脯氨酸含量 Proline content /(mg · g ⁻¹)	MDA 含量 MDA content /(mmol · g ⁻¹)	可溶性蛋白含量 Soluble protein content/(mg · g ⁻¹)	细胞膜透性 Cell membrane permeability/%	SOD 活性 SOD activity /(U · g ⁻¹ · h ⁻¹)	POD 活性 POD activity /(U · g ⁻¹ · min ⁻¹)
CK	QHXH	77.3a(a)	0.056a(c)	3.683a(d)	35.573a(a)	27.120a(c)	259.201a(d)	141.471a(a)
	SXFX	80.6a(a)	0.055a(c)	3.561a(d)	38.071a(a)	26.773a(d)	280.516a(d)	132.760a(a)
	GSQA	80.8a(a)	0.058a(d)	3.863a(d)	36.855a(a)	27.101a(c)	271.828a(c)	138.662a(a)
	HBSX	79.4a(a)	0.056a(d)	3.691a(d)	35.632a(a)	28.811a(b)	260.439a(c)	135.263a(a)
	SXHC	78.6a(a)	0.055a(d)	3.643a(d)	37.979a(a)	26.988a(b)	266.265a(c)	139.111a(a)
MIS	QHXH	75.5ab(a)	0.060c(c)	4.173c(c)	31.859b(b)	31.530a(c)	331.113b(c)	128.100a(b)
	SXFX	73.6b(b)	0.065bc(b)	6.380a(c)	32.99b(b)	29.003ab(c)	355.608a(c)	123.827a(a)
	GSQA	78.0ab(a)	0.071a(c)	4.731b(c)	32.982ab(b)	28.627b(c)	360.223a(b)	130.279a(a)
	HBSX	77.3ab(a)	0.067ab(c)	4.401bc(c)	34.811ab(a)	30.850a(ab)	343.557ab(b)	129.856a(a)
	SXHC	78.2a(a)	0.069a(c)	4.155c(c)	35.252a(a)	27.760b(ab)	375.132a(b)	132.813a(a)
MOS	QHXH	67.1bc(b)	0.067d(b)	8.633b(b)	20.893e(c)	35.512a(b)	418.250b(b)	90.006c(c)
	SXFX	65.4c(c)	0.062d(b)	9.885a(b)	24.810d(c)	34.621ab(b)	421.307b(b)	95.800c(b)
	GSQA	72.1ab(b)	0.079c(b)	6.660c(b)	27.192bc(c)	32.098bc(b)	431.315b(a)	110.912ab(b)
	HBSX	73.2ab(a)	0.087b(b)	6.195c(b)	29.845a(b)	31.223cd(ab)	495.701a(a)	105.334b(b)
	SXHC	76.8a(a)	0.098a(b)	5.135d(b)	25.819c(b)	29.136d(ab)	485.656a(a)	118.473a(b)
SES	QHXH	58.7bc(c)	0.071e(a)	10.489b(a)	12.276e(d)	37.935ab(a)	320.018d(c)	71.811c(d)
	SXFX	52.6d(d)	0.085d(a)	12.422a(a)	15.930d(d)	39.630a(a)	365.431c(c)	69.761c(c)
	GSQA	61.3b(c)	0.092c(a)	8.341c(a)	16.768c(d)	36.036bc(a)	410.400b(a)	92.500a(c)
	HBSX	65.5ab(b)	0.119b(a)	7.552d(a)	22.275a(c)	33.550c(a)	451.521a(a)	85.604b(c)
	SXHC	68.2a(b)	0.140a(a)	6.239e(a)	19.857b(c)	30.032d(a)	474.117a(a)	97.773ab(c)

2.1%。花椒 POD 活性在适宜水分时最高,随土壤含水量的减少 POD 活性降低。在不同水分胁迫条件下,韩城花椒的 POD 活性均最大,如在重度胁迫时,分别较循化、凤县、秦安、涉县花椒高 36.2%、40.2%、5.7%、14.2%。

2.6 大红袍花椒抗旱性综合评价

植物的抗旱性是生理、生化及形态特征的综合表现^[16-17]。从以上的分析可以看出,单一指标并不能准确地反映花椒的抗旱性。以苗高、地径、相对含水率、脯氨酸含量、MDA 含量、可溶性蛋白含量、细胞膜透性、POD 活性、SOD 活性、水分利用效率为指标,采用隶属函数法对花椒的抗旱性进行综合评

价。由表 6 可知,根据隶属函数的平均值,不同品系的抗旱性排序为韩城花椒>涉县花椒>秦安花椒>循化花椒>凤县花椒。

3 结论与讨论

研究结果表明,干旱胁迫时花椒蒸腾耗水量降低,且不同品系之间差异显著($P<0.05$)。在中度水分胁迫条件下,循化、凤县、秦安、涉县、韩城花椒 5—9 月份的蒸腾耗水量分别为 1 148.97、1 001.78、923.08、792.92、951.06 g。随着干旱胁迫程度的增加,花椒生物量减小,根冠比增大,根系干重占总生物量的比重呈增大趋势,而叶片干重占生物量的比重

表 6 不同品系花椒隶属函数及抗旱性排序
Table 6 Subordinate function and drought-resistance ranking of different strains

品系 Strain	隶属函数值 Membership function value			平均值 Average	抗旱性排序 Drought-resistance rank
	轻度胁迫	中度胁迫	重度胁迫		
	MIS	MOS	SES		
QHXX	0.223	0.196	0.235	0.218	4
SXFX	0.272	0.082	0.086	0.147	5
GSQA	0.508	0.581	0.647	0.579	3
HBSX	0.784	0.792	0.803	0.793	2
SXHC	0.816	0.845	0.891	0.851	1

呈下降趋势。根据生长及生理指标进行抗旱性综合比较,不同品系的抗旱性表现依次为韩城花椒>涉县花椒>秦安花椒>循化花椒>凤县花椒。

花椒属于喜光树种,耐旱、耐瘠薄。6-7 月份光照和热量充足,是花椒的速生期。当水分条件适宜时,其代谢旺盛,蒸腾加强,耗水量大,生长快。在干旱胁迫条件下,花椒苗高和地径生长量降低,根冠比增大,表明干旱条件下根系生长较冠部受到的影响较小^[18],花椒将有限的光合产物较多地分配到地下部分,增大根系对水分吸收的范围,这是花椒降低地上部分水分消耗和避免水分亏缺的适应策略,尤其是涉县、秦安、韩城花椒具有较大的根冠比,表现较为突出。随干旱程度的增强,根系生长受到的影响程度逐渐增加,生物量减小。事实上,在干旱、半干旱地区,花椒虽然有分布,但树体较小,产量低,主要是水分条件限制了其地上部分的生长,因此,应选择有利的地形和土壤,合理布局。

植物的抗旱性是受形态、解剖及生理生化特性控制的复合性状^[19]。干旱发生时,植物通过多种途径抵御或忍耐干旱,单一的指标难以反映出植物对干旱适应的综合能力^[20-22]。因此,只有采用多项指标的综合才能比较准确地评价植物的耐旱水平。本文选择的评价指标主要从植物对干旱的适应性和抗旱生产力两方面考虑。适应性指标包括根冠比、叶片相对含水率、细胞膜透性、可溶性糖含量、可溶性蛋白含量、MDA 含量、POD、SOD 活性,抗旱性生产力指标包括苗高、地径、生物量、水分利用效率。这些指标基本上包括了树木对干旱的适应性和抗旱生产力的主要方面^[23],用它们评判无性系的抗旱能力是比较客观和科学的。韩城花椒和涉县花椒在干旱条件下,相对含水率较高,MDA 含量及细胞膜透性增幅较小,可溶性蛋白含量、脯氨酸含量、SOD 和 POD 活性显著增大,表明这两个品系的

花椒叶片的保水能力较强,对可溶性蛋白及脯氨酸的积累较多,增强了细胞的渗透调节性能,在干旱胁迫时,具有较强的消除活性氧对细胞伤害的能力,稳定膜系统。同时,从根冠比可以看出,涉县、韩城花椒具有较大的根冠比,表明其通过增大根系以增加对水分的吸收,从而抵御干旱。循化花椒和凤县花椒由于其分布区气候较为湿润,在水分条件适宜及轻度水分胁迫时,蒸腾量大,地上部分生长较快,但对于干旱条件较为敏感,随胁迫程度的增加,生长量显著减小,水分利用率降低,抗旱性相对较弱。

在实际推广工作中,应根据立地条件和各地的气候特征进行引种和栽植。如果在干旱较轻的地区,则可选择轻度和中度水分胁迫下生长较好且品质优良的品系,如凤县花椒含油率高、麻味浓、香味浓郁,虽然在重度水分条件下生长受抑,抗旱生产力低,但在轻度胁迫条件下(土壤相对含水率 55%~60%)生长良好,具有较高的经济价值。如应用于比较干旱的地区,则应选择在严重胁迫时抗旱生产力高的品系,如韩城花椒和涉县花椒,在发挥生态效益的同时,亦具有一定的经济价值。

本研究是针对花椒幼苗阶段抗旱性进行的研究,由于植物在不同生长发育时期其抗旱性存在一些差异性。因此,可进一步对花椒不同生长发育阶段的抗旱性进行长期观测和深入研究,以期获得更为全面、系统的抗旱性评价。

参 考 文 献:

[1] 曾京京.我国花椒的栽培起源和地理分布[J].中国农史, 2000, 19 (4):68-75.

[2] Bi J, Zhao J X, Wang C R, et al. World research progress in bunge pricklyash (*Zanthoxylum bungeanum*) [J]. Economic Forest Researches, 2002, 20(1):46-48.

[3] 李宝旗,许畴. 4 个花椒品种的引种试验初报[J].农业科学研究, 2007, 28(4):30-33.

[4] 王港,李周岐,刘晓敏,等.花椒组织培养再生体系的建立[J].西北林学院学报, 2008, 23(3):117-119.

[5] Chen G, Gao X, Zhen K S, et al. Extract of *Zanthoxylum bungeanum* maxim seed oil reduces hyperlipidemia in hamsters fed high-fat diet via activation of peroxisome proliferator-activated receptor upsilon [J]. Tropical Journal of Pharmaceutical Research, 2014, 13 (11): 1837-1843.

[6] Zhang J, Wang X J, Han Q L, et al. Acid-catalyzed esterification and kinetics of *Zanthoxylum bungeanum* seed oil for biodiesel preparation [J]. Research Journal of Chemistry and Environment, 2013, 17(12): 38-44.

[7] 刘玲,刘淑明,孙丙寅.不同产地花椒幼苗光合特性研究[J].西北农业学报, 2009, 18(3):160-165.

[8] 刘杜玲,刘淑明.不同花椒品种抗旱性比较研究[J].干旱地区农业研究, 2010, 28(6):183-290.

[9] 刘淑明,孙佳乾,邓振义,等.干旱胁迫对花椒不同品种根系生长及水分利用的影响[J].林业科学,2013, 49(12):30-36.

[10] 张志良,瞿伟菁.植物生理学实验指导[M].北京:高等教育出版社, 2003:123-124, 127-128.

[11] 李合生.植物生理生化实验原理和技术[M].北京:高等教育出版社, 2000:164-167.

[12] 田治国,王飞,张文娥,等.多元统计分析方法在万寿菊品种抗旱性评价中的应用[J].应用生态学报, 2011, 22(12): 3315-3320.

[13] Mittler R. Oxidative stress, antioxidants and stress tolerance [J]. Trends Plant Sci, 2002, 7:405-410.

[14] Apel K, Hirt H. Reactive oxygen species: metabolism, oxidative stress, and signal transduction [J]. Annual Review of Plant Biology, 2004, 55:373-399.

[15] Moller I M, Jensen P E, Hansson A. Oxidative modifications to cellular components in plants [J]. Annual Review of Plant Biology, 2007, 58: 459-481.

[16] Benjamin J G, Nielsen D C. Water deficit effects on root distribution of soybean, field pea and chickpea [J]. Field Crops Res, 2006, 97: 248-253.

[17] Praba M L, Cairns J E, Babu R C, et al. Identification of physiological traits underlying cultivar differences in drought tolerance in rice and wheat [J]. Journal of Agronomy and Crop Science, 2009, 195: 30-46.

[18] Jaleel C A, Gopi R, Sankar B, et al. Differential responses in water use efficiency in two varieties of *Catharanthus roseus* under drought stress [J]. Comptes Rendus Biologies, 2008, 331(1):42-47.

[19] Duan B, Yang Y, Lu Y, et al. Interactions between water deficit, ABA, and strains in *Picea asperata* [J]. Journal of Experimental Botany, 2007, 58(11):3025-3036.

[20] Upadhyaya H D. Variability for drought resistance related traits in the mini core collection of peanut [J]. Crop Science, 2005, 45: 1432-1440.

[21] Hura T, Hura K, Grzesiak S. Physiological and bio-chemical parameters for identification of QTLs controlling the winter triticale drought tolerance at the seedling stage [J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2009, 47:210-214.

[22] 张智猛,万书波,戴良香,等.花生抗旱性鉴定指标的筛选与评价[J].植物生态学报, 2011, 35(1): 100-109.

[23] Shakeel A A, Xie X Y, Wang L C, et al. Morphological, physiological and biochemical responses of plants to drought stress [J]. African Journal of Agricultural Research, 2011, 6(9):2026-2032.

(上接第 7 页)

[16] 陈娟.干旱诱导基因 TaDLea3 的功能及在小麦不同生长期的时空表达规律研究[D]: 杨凌: 西北农林科技大学,2016.

[17] Vasil V, Castillo A M, Fromm M E, et al. Herbicide resistant fertile transgenic wheat plants obtained by microprojectile bombardment of regenerable embryogenic callus[J]. Nature Biotechnology, 1992, 10 (6):667-674.

[18] Weeks J T, Blechl A A E. Rapid production of multiple independent lines of fertile transgenic wheat (*Triticum aestivum*) [J]. Plant Physiology, 1993, 102(4):1077-1084.

[19] Archana Chugh, Paramjit Khurana. Regeneration via somatic embryogenesis from leaf basal segments and genetic transformation of bread and emmer wheat by particle bombardment [J]. Plant Cell, Tissue and Organ Culture, 2003,74(2):151-161.

[20] 喻修道,徐兆师,陈明,等.小麦转基因技术研究及其应用[J].中国农业科学,2010,43(8):1539-1553.

[21] Hashem H A, Hassanein R A, Fahmy A H, et al. Particle bombardment-mediated co-transformation of the *Chl-2* gene in wheat and the associated changes in defense mechanisms in transgenic plants infected with *Fusarium graminearum*[J]. Biocatalysis & Agricultural Biotechnology, 2018,14:204-214.

[22] Duan X, Hou Q, Liu G, et al. Expression of *Pinellia pedatisecta* lectin gene in transgenic wheat enhances resistance to wheat aphids[J]. Molecules, 2018, 23(4):748-757.

[23] Ainur I, Nannan Y, Elina M, et al. A biolistic method for high-throughput production of transgenic wheat plants with single gene insertions [J]. BMC Plant Biology, 2018, 18(1):135-142.

[24] 史学英,田野,李核,等.小麦 K₂ 型脱水蛋白 DHN14 响应非生物胁迫的功能分析[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2019,47 (5):23-31,41.

[25] Chen J, Fan L, Du Y., et al. Temporal and spatial expression and function of *TaDlea3* in *Triticum aestivum* during developmental stages under drought stress [J]. Plant Science, 2016, 252:290-299.