

唐古特白刺(*Nitraria tangutorum*)抗旱 优良家系的生理特性

柴文敏, 李毅, 苏世平, 单立山, 种培芳

(甘肃农业大学 林学院, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 唐古特白刺(*Nitraria tangutorum*)是蒺藜科(Zygophyllaceae)超旱生小灌木。为了筛选抗旱优良家系,分别在武威和兰州进行种源试验,初选两试验点生长健壮、无病虫害的31个3年生唐古特白刺家系,进行过氧化物酶(POD)、超氧化物歧化酶(SOD)、可溶性蛋白(SP)、可溶性糖(SS)、脯氨酸(Pro)及叶绿素(Chl)含量测定,运用主成分分析和隶属函数法进行抗旱性综合评价,筛选抗旱优良家系。结果表明:POD、SOD、SP、SS、Pro、Chl a、Chl b、Chl(a+b)含量及Chl a/b值在31个唐古特白刺家系间变化范围较大、差异性均显著,其中,Chl a含量变异最大,可溶性蛋白含量变异最小。从单个指标入选潜力来看,各试点每个指标下入选的优良家系相互交叉但并不完全相同。采用多指标多试点的综合评价,筛选出5个抗旱性强的优良家系,分别是j3-9、w3-15、w3-12、jc-8、j3-8,其中民勤沙井子w3-12和w3-15号家系表现最好。

关键词: 唐古特白刺(*Nitraria tangutorum*); 早期选择; 优良家系; 主成分分析; 隶属函数法

文章编号: 1000-694X(2017)06-1158-13

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2016.00093

中图分类号: Q945.79

文献标志码: A

0 引言

家系选择是林木遗传改良的主要手段。前期学者对黑荆(*Acacia mearnsii*)^[1]、落叶松(*Larix gmelinii*)^[2]、杉木(*Cunninghamia lanceolata*)^[3]等树种开展了单试验点家系的早期选择研究,对桉木(*Alnus cremastogyne*)^[4]、火炬松(*Pinus taeda*)^[5]、柏(*Cupressus funebris*)^[6]、白桦(*Betula platyphylloides*)^[7]等开展多试点家系选择研究。大量研究表明,林木早期选择是可行也是必要的,并且取得了一定的成果。但是,以往研究对象多以乔木为主,对于灌木抗逆性方面开展家系早期选择研究较少。植物的抗逆性又分为抗寒、抗旱、抗盐、抗病虫害等,在抗旱性研究中,选择哪些抗旱性评价指标及如何选择,直接关系到能否较为真实和准确地反映出抗旱性品种的抗旱能力,对培育和筛选抗旱性强的植物有重要意义。过氧化物酶和超氧化物歧化酶是生物体内的保护性酶,植物细胞中的保护酶系统的存在和活力的增强,是细胞免于伤害或抗性加强的重要原因之一,可作为一项有效的生理指标检验植物的抗旱

性^[8]。叶绿素是植物光合作用最主要的色素,普遍存在于植物体内,其含量与植物光合作用的强弱有密切的关系,叶绿素含量越高,则林木的抗旱性能越强^[9]。渗透调节是植物耐旱和御旱的主要生理机制,即增加细胞内可溶性离子或小分子有机代谢物含量以降低水势。干旱胁迫下植物的渗透调节受到极大的重视,一般认为,植物的耐旱能力与渗透调节能力有关^[10-11]。因此,渗透调节物、抗氧化酶活性和叶绿素是评价植物的抗旱性不可缺少的研究指标^[12-14]。

唐古特白刺(*Nitraria tangutorum*)是矮小的超旱生小灌木,主要分布在中国西北干旱荒漠、高寒地区及北方沿海盐渍地带,抗逆性、萌生力强,在沙漠戈壁地区常常作为主要优势种或建群种形成大片灌丛,是优良的耐盐碱防风固沙植物^[15-16],其果实是罕见的野生水果,被称为“荒漠樱桃”,具有极高的营养价值和药用价值^[17]。目前,对唐古特白刺主要有化学成分分离鉴定^[18]、形态解剖学^[19]、生理生态学^[20-21]、组织培养^[22]、遗传多样性^[23]等方面的研究,在抗逆性方面主要多集中在不同地理种群唐古

收稿日期:2016-05-11; 改回日期:2016-06-08

资助项目:中央财政农业科技成果转化资金项目(2014GB2G100134);国家自然科学基金项目(31460180,41361100,31560135,31360205,41461044);甘肃省教育厅成果转化项目(2017D-14)

作者简介:柴文敏(1990—),女,甘肃庆阳人,硕士研究生,主要从事西北抗旱灌木研究。E-mail: 18794875562@163.com

通信作者:李毅(E-mail: liyi@gsau.edu.cn)

特白刺抗旱性方面的研究^[12,19,24],有关唐古特白刺优良家系选择研究报道较少。因此,本研究分别在武威和兰州建立白刺种源试验,在两个试验点初选相同的 31 个家系,以叶片的渗透调节物、抗氧化酶活性及叶绿素含量为间接评价指标,利用隶属函数法和主成分分析法评价唐古特白刺家系的抗旱性,进行优良家系的早期选择,以期为唐古特白刺抗旱育种材料的选育和推广提供科学的理论参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

唐古特白刺家系试验林位于甘肃省武威市林业技术服务中心(38°24'N,103°9'E)和甘肃省兰州市金梦农业有限责任公司服务中心(36°30'N,103°37'E),分别地处河西走廊北部和黄土高原的西北部,

属典型的温带大陆性荒漠气候和温带半干旱大陆性气候,海拔分别为 1 378 m 和 1 947.2 m,年均降雨量为 113.2 mm 和 328 mm,年均蒸发量为 2 604.3 mm 和 1 880 mm,年均气温 6.9 °C 和 9.6 °C,日最高温度为 35.9 °C 和 29.2 °C,日最低气温为 -25.1 °C 和 -13 °C,1 月平均气温为 -9.92 °C 和 -6.9 °C,7 月平均温度为 24.94 °C 和 22.2 °C,土壤均为碱性砂壤,各试点土壤水分状况一致,土壤水分来源均以自然降水为主。

1.2 试验材料与田间设计

2011 年 11 月在中国甘肃酒泉、张掖、兰州、武威唐古特白刺天然分布区的 8 个群体中,以植株高度为主要选择指标,初选出生长健壮、无病虫害的多个单株,采集种子,标记、分装。采样样本生境概况见表 1。

表 1 唐古特白刺采样地概况

Table 1 General status of *Nitraria tangutorum* plots

家系编号	种群	土壤和伴生种	海拔/m	纬度(N)	经度(E)
j3-8,j3-16,j3-7,j3-20,j3-6,j3-9	酒泉金塔	临近鸳鸯池水库,砂土,砾石,伴生种为红砂	1 359	98°45'834"	39°52'950"
jc-22,jc-8,jc-2,jc-5	酒泉瓜州槽沿子	戈壁,灰棕荒漠土,伴生种为红砂	1 313	40°47'886"	96°04'908"
gl-34,gl-35,gl-5,gl-27,gl-14	张掖甘州龙渠	砾石灰棕荒漠土,荒漠区,伴生种泡泡刺,骆驼刺	1 702	38°48'580"	100°12'261"
zl-22,zl-19,zl-27,zl-23,zl-24	张掖临泽	灰棕荒漠土,林场旁,伴生种黑果枸杞	1 397	39°14'329"	99°57'270"
zglsm-17,zglsm-28	张掖甘州老寺庙	农田旁,砾石灰棕荒漠土,伴生种为梭梭	1 530	38°53'345"	100°92'750"
l-2,l-4	兰州九州台	黄土山坡灌丛,伴生怪柳、柠条	2 067	36°57'783"	103°46'069"
w2-5,w2-10,w2-20,w2-25	武威民勤小坝口	灰棕荒漠土,沙丘,沙丘间,伴生种为梭梭	1 384	38°31'729"	102°56'413"
w3-12,w3-1,w3-15	武威民勤沙井子	荒漠土,戈壁,伴生种梭梭,芦苇	1 386	38°33'790"	102°55'989"

2012 年 1 月进行种子穴盘育苗,建立唐古特白刺家系,并按其亲本选择地进行系统编号。2013 年 4 月,土壤解冻,土层温度 >5 °C 时分别移栽各试点。移栽时采用随机区组设计,重复 3 次,每重复每家系 3 株,株行距 0.5 m × 1.5 m。移栽后灌水,待苗木成活后,适时除草,后期管理以常规方法为主。

1.3 测定项目与方法

2015 年 8 月 27 至 9 月 4 号分别在武威和兰州的唐古特白刺家系试验林中初选长势良好、无病虫害、家系中重复数量能满足统计要求的 31 个家系为试验材料。每个家系选取 6 个单株,采集每个单株直立茎中部的叶片,立刻装入液氮罐,带回实验室进行叶片渗透调节物质、抗氧化酶活性及叶绿素含量的测定,测定时每个单株 3 次重复。

可溶性糖(SS)采用蒽酮比色法测定,可溶性蛋

白(SP)采用考马斯亮蓝 G-250 染色法测定,游离脯氨酸(Pro)采用磺基水杨酸提取法测定,叶绿素(Chl)相关指标采用丙酮比色法测定,过氧化物酶(POD)采用愈创木酚法测定,超氧化物歧化酶(SOD)采用氮蓝四唑法测定。

1.4 统计分析方法

采用 Excel 2007 和 SPSS 17.0 软件进行数据统计分析,用变异系数比较法评价家系间各指标变异幅度的大小,运用主成分分析法和模糊隶属函数法进行抗旱性综合评价。

$$CV = (SD/MN) \times 100\% \quad (1)$$

式中:CV 为变异系数;SD 为标准方差;MN 为平均值。

$$u(X_{ij}) = \frac{X_{ij} - X_{i \min}}{X_{i \max} - X_{i \min}} \quad (2)$$

式中: $u(X_{ij})$ 为*i*物种*j*指标的隶属函数值; X_{ij} 为*i*物种*j*指标的测定值; X_{\max} 和 X_{\min} 分别为指标的最大值和最小值。本研究中,*i*为唐古特白刺,*j*为过氧化物酶、超氧化物歧化酶、可溶性蛋白、可溶性糖、脯氨酸、叶绿素 a、叶绿素 b、叶绿素(a+b)的含量以及叶绿素 a/b 值。

2 结果与分析

2.1 31 个家系抗旱指标

遗传变异是选择育种的物质基础,丰富的遗传变异意味着有很大的选择潜力。从表 2 可看出,两试点的 31 个家系的抗氧化酶活性、叶片渗透调节物和叶绿素含量均存在较大差异。其中,武威和兰州两试验点的 POD 含量分别为 35.51~118.53 $\mu \cdot g^{-1}FM$ 和 31.35~111.56 $\mu \cdot g^{-1}FM$,临泽种源的 z1-23 和 z1-27 号家系含量最高;SOD 含量分别为 174.91~465.06 $\mu \cdot g^{-1}FM$ 和 152.64~422.72 $\mu \cdot g^{-1}FM$,金塔种源的 j3-9 和 j3-16 号家系含量最高;SP 含量分别为 4.60~8.56 $mg \cdot g^{-1}FM$ 和 3.84~8.55 $mg \cdot g^{-1}FM$,Pro 含量分别为 105.31~281.06 $\mu g \cdot g^{-1}FM$ 和 120.20~297.76 $\mu g \cdot g^{-1}FM$,金塔种源的 j3-8 号和瓜州槽沿子种源的 jc-8 号家系的 SP、Pro 含量均最高;SS 含量分别为 45.00~122.22 $mg \cdot g^{-1}FM$ 和 40.50~75.72 $mg \cdot g^{-1}FM$,瓜州槽沿子种源的 jc-8 号和金塔种源的 j3-16 号家系含量最高;Chl a 含量分别为 422.10~931.71 $\mu g \cdot g^{-1}FM$ 和 540.90~1105.41 $\mu g \cdot g^{-1}FM$,民勤沙井子种源的 w3-15 和 w3-12 号家系含量最高;Chl b 含量分别为 252.45~483.00 $\mu g \cdot g^{-1}FM$ 和 262.55~506.40 $\mu g \cdot g^{-1}FM$,瓜州槽沿子种源的 jc-8 号和金塔种源的 j3-8 号家系含量最高;Chl (a+b)含量分别为 674.55~1371.97 $\mu g \cdot g^{-1}FM$ 和 858.14~1528.49 $\mu g \cdot g^{-1}FM$,瓜州槽沿子种源的 jc-8 号和民勤沙井子种源的 w3-12 号家系含量最高;Chl a/b 含量分别为 1.63~2.39 和 1.43~2.61,金塔种源的 j3-6 号和民勤沙井子种源的 w3-12 号家系含量最高。

由表 3 可知,叶片中 POD、SOD、SP、SS、Pro、Chl a、Chl b、Chl (a+b)含量及 Chl a/b 值在 31 个唐古特白刺家系间差异显著($P < 0.01$),表明唐古特白刺家系间存在丰富变异,开展唐古特白刺优良家系的早期选择是可行的。武威试点唐古特白刺家系的 POD 变异系数最大,其次是 SS 和 SOD 较大,

Pro、Chl b、Chl a/b 处于 15.0%以下的较低水平;兰州试点家系变异系数最大为 POD,其次为 SOD 较大,Pro 处于 15.0%以下的较低水平;两试点的 POD、SOD、SP、Pro、Chl a、Chl b、Chl (a+b)变异较为一致,SS 和 Chl a/b 变异系数相差较大。

2.2 单个指标选择的潜力

对单个指标的选择可以了解唐古特白刺家系内各指标遗传改良的最大潜力。以 20%的入选率选取优良家系,两试点每个指标下入选的优良家系相互交叉但不完全相同。武威试点入选后平均值高出总体平均值的百分比大于 30%的指标为 POD、SOD 和 SS,Chl a/b 和 Pro 高出总体平均值的百分比较小;兰州试点入选后平均值高出总体平均值的百分比大于 30%的指标为 POD、SOD 和 Chl a,最小的为 Pro(表 4)。

2.3 31 个唐古特白刺家系抗旱指标间相关性

从表 5 可以看出,武威试点 POD、SOD、Pro、Chl a、Chl b 和 Chl (a+b)等 6 个指标两两之间均呈显著正相关;SP 与 POD 和 Pro 呈显著正相关;SS 与 Chl a、Chl b 和 Chl (a+b)呈显著正相关;Chl a/b 与 POD、Pro、Chl a 和 Chl (a+b)呈显著正相关。兰州试点 POD、SP、Pro、SS、Chl a、Chl (a+b)等 6 个指标两两之间均呈显著正相关;SOD 与 POD、SP、SS、Chl a、Chl (a+b)和 Chl a/b 呈显著正相关;Chl b 与 POD、SP、Pro、Chl a 和 Chl (a+b)呈显著正相关;Chl a/b 与 Chl a 和 Chl (a+b)呈显著正相关。这些指标间的正相关有利于多个指标的综合选择。

2.4 唐古特白刺优良家系的早期选择

2.4.1 主成分分析法

由表 6 可以看出,根据累计贡献率>80%的原则选取前 3 个主成分进行分析,武威和兰州两试点的累计贡献率分别为 83.31%和 81.51%,表明前 3 个主成分均能代表所有抗旱指标进行不同家系间抗旱性评价。武威试点第 1 主成分主要有 POD、Chl a、Chl b 和 Chl (a+b),其特征值为 4.80,贡献率为 53.4%;第 2 主成分主要有 SP 和 SS,其特征值为 1.84,贡献率为 20.4%;第 3 主成分主要有 Chl a/b,其特征值为 0.86,贡献率为 9.5%。兰州试点第 1 主成分主要有 POD、SP、Chl a 和 Chl (a+b),其特征值为 4.88,贡献率为 54.3%;第 2 主成分主要

表 2 31 个唐古特白刺家系抗旱指标
Table 2 Drought indices of 31 *Nitraria tangutorum* families

家系	试验点	POD ($\mu \cdot g^{-1} FM$)	SOD ($\mu \cdot g^{-1} FM$)	SP ($mg \cdot g^{-1} FM$)	Pro ($\mu g \cdot g^{-1} FM$)	SS ($mg \cdot g^{-1} FM$)	Chl a ($\mu g \cdot g^{-1} FM$)	Chl b ($\mu g \cdot g^{-1} FM$)	Chl (a+b) ($\mu g \cdot g^{-1} FM$)	Chl a/b
j3-8	武威	99.59±4.71 ^{lm}	295.37±2.94 ^h	8.56±0.34 ^l	281.06±0.16 ^q	60.17±1.23 ^c	795.18±4.26 ^r	334.93±4.26 ^{gh}	1130.11±8.35 ^t	2.37±0.02 ^m
	兰州	89.22±3.37 ^{gh}	364.88±5.41 ^o	6.98±0.74 ^{kl}	281.67±1.23 ⁿ	62.05±1.64 ^{jk}	963.85±3.16 ^v	506.40±3.54 ^v	1470.25±5.25 ^r	1.90±0.01 ^j
j3-16	武威	92.11±5.91 ^{jk}	379.90±3.33 ^o	8.54±0.34 ^l	248.06±3.50 ^{kl}	87.27±1.55 ^{klm}	686.12±2.16 ^l	362.98±3.46 ^l	1049.10±5.56 ^{no}	1.89±0.01 ^e
	兰州	99.51±2.87 ^{km}	422.72±3.15 ^s	6.47±0.32 ^{hijk}	278.56±3.93 ^{mm}	75.72±0.35 ^o	833.44±4.82 ^p	411.24±1.06 ⁿ	1244.69±5.88 ⁿ	2.03±0.01 ^l
j3-7	武威	79.18±4.50 ^{gh}	315.45±4.97 ^l	7.71±0.24 ^k	273.33±1.33 ^p	45.00±0.79 ^a	670.62±3.79 ^k	348.14±4.30 ^l	1018.75±6.95 ^m	1.93±0.02 ^d
	兰州	84.74±3.73 ^g	309.27±1.45 ^k	4.97±0.12 ^{bcde}	252.11±2.01 ^l	57.51±2.80 ^{ghi}	906.79±3.95 ^u	370.11±2.39 ⁱ	1276.90±5.77 ^p	2.45±0.01 ^u
j3-20	武威	109.61±0.90 ⁿ	351.35±3.53 ^l	7.99±0.18 ^k	256.07±3.87 ^{mm}	60.95±0.05 ^e	600.06±4.42 ^g	285.14±2.55 ^c	885.20±6.79 ^g	2.10±0.01 ^{ij}
	兰州	90.39±1.14 ^{hij}	396.15±1.28 ^q	6.09±0.37 ^{efgh}	276.12±4.71 ^{klmn}	52.93±3.36 ^{def}	633.94±4.69 ^f	339.83±2.48 ^f	973.77±2.46 ^c	1.87±0.03 ⁱ
j3-6	武威	105.82±3.91 ^{mn}	312.22±2.20 ⁱ	7.46±0.23 ^{jk}	231.70±3.44 ^{gh}	74.66±3.91 ^{fg}	826.60±2.72 ^s	346.57±4.78 ⁱ	1173.17±6.88 ^v	2.39±0.03 ^m
	兰州	97.68±2.37 ^{kl}	330.42±4.10 ^l	6.41±0.97 ^{efgh}	262.79±4.03 ^{ghi}	69.18±2.20 ^{mm}	891.18±3.28 ^s	476.55±4.66 ^t	1367.73±7.43 ^x	1.87±0.01 ⁱ
j3-9	武威	118.46±2.73 ^o	465.06±4.85 ^r	8.48±0.29 ^l	255.03±1.58 ^{mm}	109.39±2.35 ^q	822.52±2.89 ^s	397.99±2.96 ^l	1220.51±0.88 ^w	2.07±0.02 ^{hi}
	兰州	107.75±4.21 ^{no}	394.30±4.68 ^q	7.20±0.07 ^{kl}	275.13±3.07 ^{klmn}	54.68±3.37 ^{fg}	1012.96±2.80 ^w	473.51±1.26 st	1486.47±3.26 ^s	2.14±0.01 ^o
jc-22	武威	72.80±1.91 ^d	212.75±4.67 ^c	5.95±0.27 ^d	211.81±3.14 ^e	81.71±2.10 ^{hij}	703.20±4.94 ⁿ	394.56±2.34 ^l	1097.76±5.98 ^r	1.78±0.01 ^c
	兰州	91.43±3.61 ^{efgh}	152.64±2.85 ^a	5.38±0.27 ^{cd}	269.34±2.98 ^{ijk}	58.61±3.84 ^{hij}	691.68±3.75 ^t	432.62±3.46 ^q	1124.30±5.69 ⁱ	1.60±0.01 ^c
jc-8	武威	92.26±4.22 ^{jk}	360.29±1.19 ^m	6.21±0.18 ^{efg}	250.45±2.63 ^{klmn}	122.22±1.00 ^s	888.97±1.55 ^t	483.00±4.66 ^o	1371.97±3.84 ^z	1.84±0.02 ^d
	兰州	108.51±5.31 ^{no}	377.61±3.12 ^p	8.55±0.16 ^m	297.76±4.70 ^o	67.03±1.28 ^{lm}	1031.76±4.04 ^x	472.61±3.38 st	1504.37±1.83 ^t	2.18±0.02 ^p
jc-2	武威	35.51±3.31 ^a	270.78±4.95 ^f	5.12±0.24 ^{abc}	105.31±5.90 ^a	82.91±2.04 ^{ijk}	497.45±3.36 ^b	279.56±1.81 ^{bc}	777.01±2.93 ^b	1.78±0.02 ^c
	兰州	76.55±4.22 ^f	200.38±5.17 ^d	5.16±0.57 ^{bcdef}	189.30±3.51 ^c	46.74±2.95 ^{bc}	598.31±1.31 ^d	336.46±1.58 ^{def}	934.76±2.88 ^c	1.78±0.02 ^b
jc-5	武威	67.39±1.58 ^{def}	328.82±2.48 ^k	5.49±0.46 ^{cd}	247.75±3.47 ^{kl}	70.42±1.20 ^f	683.37±4.22 ⁱ	357.09±1.97 ⁱ	1040.46±4.02 ⁿ	1.91±0.02 ^{ef}
	兰州	31.35±5.97 ^a	249.55±0.52 ^h	4.76±0.36 ^{abcd}	249.98±4.16 ^f	50.40±0.90 ^{bed}	637.04±4.75 ⁱ	364.35±1.68 ^{gh}	1001.39±4.12 ^f	1.75±0.02 ^g
gl-34	武威	85.62±3.02 ^{ij}	244.67±3.65 ^e	5.76±0.37 ^{cd}	209.65±2.03 ^c	79.89±1.93 ^{hi}	785.35±1.78 ^q	345.62±4.53 ⁱ	1130.96±2.95 ^t	2.27±0.03 ^l
	兰州	99.97±2.97 ^{klm}	223.52±3.60 ^f	6.79±0.65 ^{ijkl}	264.91±4.37 ^{hij}	49.52±0.14 ^{bed}	695.26±1.23 ⁱ	468.11±4.98 ^s	1163.36±4.27 ^m	1.49±0.02 ^b

续表 2

家系	试验点	POD ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\text{FM}$)	SOD ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\text{FM}$)	SP ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}\text{FM}$)	Pro ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\text{FM}$)	SS ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}\text{FM}$)	Chl a ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\text{FM}$)	Chl b ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\text{FM}$)	Chl (a+b) ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\text{FM}$)	Chl a/b
gl-35	武威	61.15±4.37 ^c	212.69±5.96 ^c	5.19±0.25 ^{abcd}	202.39±4.62 ^{cd}	87.69±2.83 ^{klmn}	630.88±0.52 ⁱ	329.19±2.88 ^g	960.07±2.56 ⁱ	1.92±0.02 ^d
	兰州	61.28±6.87 ^{cd}	220.97±1.93 ^f	5.38±0.13 ^{cd}	261.28±4.28 ^{gh}	49.26±1.85 ^{bed}	858.87±4.72 ⁿ	415.42±3.13 ^{no}	1274.29±6.49 ^p	2.07±0.02 ^m
gl-5	武威	63.57±3.34 ^{cd}	196.58±6.31 ^b	6.89±0.06 ^{hij}	254.21±2.97 ^{lm}	49.43±0.22 ^{ab}	666.20±4.74 ^{jk}	317.28±2.43 ^f	983.49±7.14 ^k	2.10±0.01 ^j
	兰州	51.23±3.23 ^b	160.95±6.94 ^b	5.43±0.37 ^{cd}	272.82±3.11 ^{klm}	46.50±1.89 ^b	661.60±4.23 ^g	405.30±2.13 ^m	1066.9±2.44 ^g	1.63±0.02 ^d
gl-27	武威	60.47±4.52 ^c	267.21±3.26 ^f	7.28±0.48 ^{ijk}	232.09±2.59 ^{gh}	51.71±3.01 ^{bc}	576.35±4.33 ^e	275.42±3.70 ^b	851.77±7.02 ^d	2.09±0.02 ^j
	兰州	54.91±3.13 ^{bc}	244.32±5.90 ^{gh}	6.41±0.48 ^{hijk}	237.23±4.96 ^c	49.79±1.18 ^{bed}	553.86±1.99 ^b	332.04±2.14 ^c	885.91±1.75 ^b	1.67±0.02 ^e
gl-14	武威	48.79±9.32 ^b	174.91±3.25 ^a	6.92±0.54 ^j	198.47±1.40 ^{cd}	46.70±2.41 ^a	422.10±4.33 ^a	252.45±4.90 ^a	674.55±5.21 ^a	1.67±0.04 ^b
	兰州	71.30±3.55 ^{cd}	207.55±1.28 ^d	5.86±0.15 ^{cd}	260.46±2.99 ^{gh}	41.88±4.94 ^a	563.67±2.78 ^c	393.82±3.84 ^f	957.49±3.86 ^d	1.43±0.02 ^a
zl-22	武威	85.69±1.67 ^j	268.26±5.92 ^f	4.60±0.15 ^a	201.66±2.34 ^{cd}	92.21±1.75 ^{no}	661.64±1.40 ^f	339.26±2.21 ^b	1000.90±3.40 ^f	1.95±0.04 ^g
	兰州	89.50±6.50 ^{ghj}	216.07±3.05 ^{cd}	3.84±0.18 ^a	277.27±2.73 ^{lmn}	50.65±0.22 ^{cde}	738.35±2.80 ^f	376.94±3.07 ^f	1115.29±1.84 ^f	1.96±0.02 ^k
zl-19	武威	72.43±4.06 ^{efg}	318.92±4.31 ^j	5.76±0.11 ^{cd}	233.51±2.27 ^{ghi}	87.34±2.15 ^{klmn}	692.39±3.42 ^m	361.50±2.97 ^f	1053.89±5.48 ^{op}	1.92±0.01 ^{ef}
	兰州	60.66±2.93 ^{cd}	179.47±4.30 ^c	5.29±0.02 ^{cd}	276.00±3.84 ^{klmn}	49.53±1.10 ^{bed}	675.38±4.89 ^b	457.25±4.97 ^r	1132.63±5.50 ^{jk}	1.48±0.02 ^b
zl-27	武威	93.27±3.28 ^{kl}	409.94±5.80 ^q	4.72±0.41 ^{ab}	205.25±1.28 ^{de}	108.46±4.81 ^q	760.75±4.62 ^p	359.58±4.86 ^j	1120.33±9.18 ^s	2.12±0.02 ⁱ
	兰州	111.56±4.75 ^o	378.77±4.70 ^r	5.48±0.26 ^{cd}	272.52±4.93 ^{klm}	64.89±1.77 ^{kl}	719.49±4.41 ^j	419.03±1.94 ^{op}	1138.52±2.73 ^k	11.72±0.02 ^f
zl-23	武威	118.53±3.53 ^o	393.06±5.01 ^p	6.63±0.14 ^{ghi}	265.64±3.98 ^o	84.83±3.66 ^{kl}	788.59±2.62 ⁿ	372.39±1.36 ^k	1160.98±3.88 ^u	2.12±0.01 ⁱ
	兰州	103.16±4.16 ^{lmn}	341.85±2.51 ^{lm}	6.93±0.77 ^{kl}	276.53±4.65 ^{klmn}	67.61±1.30 ^{lmn}	811.29±2.65 ^o	359.72±4.64 ^g	1171.00±5.09 ^m	2.26±0.03 ^r
zl-24	武威	111.34±2.38 ⁿ	370.91±4.31 ⁿ	7.59±0.46 ^{jk}	244.23±2.12 ^{ijk}	57.44±2.41 ^{de}	704.28±4.70 ⁿ	370.91±3.55 ^k	1075.19±7.39 ^q	1.90±0.01 ^e
	兰州	87.74±5.54 ^{gh}	373.72±6.02 ^p	4.54±0.38 ^{abc}	263.96±3.52 ^{ghij}	42.38±1.37 ^a	899.65±4.26 ^t	377.16±3.89 ^j	1276.81±7.56 ^p	2.39±0.02 ^t
l-4	武威	69.47±5.40 ^{def}	266.10±4.29 ^f	5.37±0.50 ^{bcd}	228.14±4.24 ^g	54.98±3.45 ^{cd}	683.94±1.92 ^l	372.04±1.22 ^k	1055.98±1.02 ^{op}	1.84±0.01 ^d
	兰州	84.90±1.47 ^g	391.32±0.97 ^q	5.84±0.59 ^{efghi}	256.82±4.03 ^{fg}	57.10±3.39 ^{ghij}	729.96±2.96 ^k	368.08±1.54 ^{hi}	1098.03±4.37 ^h	1.98±0.01 ^k
l-2	武威	70.85±1.45 ^{def}	199.42±2.18 ^b	6.03±0.18 ^{def}	177.01±2.18 ^b	90.78±4.61 ^{lmno}	559.57±5.36 ^d	305.72±2.38 ^{de}	865.28±2.98 ^e	1.83±0.03 ^d
	兰州	37.03±4.62 ^a	208.53±4.00 ^{de}	4.25±0.11 ^{ab}	120.20±1.68 ^a	40.50±0.48 ^a	540.90±4.67 ^a	317.24±1.56 ^d	858.14±5.53 ^a	1.71±0.01 ^f

续表 2

家系	试验点	POD ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\text{FM}$)	SOD ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\text{FM}$)	SP ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}\text{FM}$)	Pro ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\text{FM}$)	SS ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}\text{FM}$)	Chl a ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\text{FM}$)	Chl b ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\text{FM}$)	Chl (a+b) ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\text{FM}$)	Chl a/b
lsm-17	武威	80.68±1.11 ^{hi}	175.06±6.00 ^a	6.94±0.17 ⁱ	197.74±4.34 ^c	77.44±4.00 ^{gh}	505.09±3.22 ^c	309.75±3.22 ^e	814.84±3.87 ^c	1.63±0.02 ^a
	兰州	67.79±3.56 ^{de}	240.31±2.63 ^g	5.62±0.71 ^{dehgh}	219.23±3.66 ^d	64.48±1.19 ^{kl}	621.60±3.66 ^e	306.77±1.49 ^c	928.36±5.12 ^c	2.03±0.01 ^l
lsm-28	武威	69.74±1.5 ^{def}	247.64±2.84 ^e	5.90±0.89 ^{dehfg}	254.07±4.01 ^{hmn}	94.49±1.15 ^o	700.15±4.38 ⁿ	356.28±4.27 ⁱ	1056.42±4.32 ^{op}	1.97±0.03 ^g
	兰州	62.26±1.12 ^{ed}	300.52±3.16 ^j	5.37±0.18 ^{def}	170.28±2.65 ^b	47.30±2.07 ^{ke}	781.04±4.24 ⁿ	384.69±3.73 ^k	1165.73±7.78 ^m	2.03±0.01 ^l
w2-10	武威	49.55±4.64 ^b	232.64±3.03 ^d	6.88±0.31 ^{hj}	238.13±1.94 ^{ij}	86.05±3.16 ^{klmn}	701.32±0.74 ⁿ	358.35±6.80 ^j	1059.67±6.46 ^p	1.96±0.04 ^g
	兰州	96.69±2.11 ^{ijkl}	360.42±5.37 ^{no}	6.70±0.60 ^{ijkl}	251.30±4.47 ^f	70.35±2.53 ^{mn}	765.83±4.04 ^m	377.79±3.87 ^j	1143.62±7.38 ^l	2.03±0.01 ^l
w3-1	武威	68.92±3.40 ^{def}	230.85±0.52 ^d	6.11±0.27 ^{fg}	223.54±3.99 ^f	52.73±0.48 ^{ke}	565.20±4.37 ^d	309.63±1.99 ^e	874.83±4.05 ^f	1.83±0.02 ^d
	兰州	85.86±6.42 ^g	325.40±4.25 ^l	5.43±0.38 ^{def}	225.12±1.78 ^d	49.26±1.67 ^{bed}	728.52±3.99 ^k	372.54±2.88 ^{ij}	1101.06±3.92 ^h	1.96±0.02 ^k
w2-25	武威	65.50±5.92 ^{cde}	207.38±2.70 ^c	7.29±0.31 ^{ijk}	240.29±3.91 ^{ij}	87.63±1.26 ^{klmn}	615.56±4.30 ^h	302.44±2.55 ^d	918.00±5.83 ^h	2.04±0.02 ^h
	兰州	70.07±4.51 ^{ef}	262.62±6.68 ⁱ	5.17±0.18 ^{bcdef}	270.87±2.97 ^{kl}	50.78±2.23 ^{ode}	871.00±3.90 ^r	391.82±1.53 ^l	1262.83±4.50 ^o	2.22±0.01 ^q
w3-15	武威	108.98±4.66 ⁿ	281.79±3.51 ^g	6.12±0.82 ^{fg}	277.45±6.44 ^{pq}	100.9±0.06 ^p	931.71±1.52 ^r	423.77±2.98 ⁿ	1355.48±2.56 ^y	2.20±0.02 ^k
	兰州	106.05±5.62 ^{mno}	323.21±2.29 ^l	7.54±0.32 ^l	281.00±4.44 ⁿ	71.26±1.12 ⁿ	1032.71±4.14 ^s	490.60±4.83 ^u	1523.31±8.56 ^u	2.11±0.01 ⁿ
w2-5	武威	53.50±3.70 ^b	297.80±3.10 ^h	5.92±0.27 ^{defg}	240.87±3.29 ^j	88.79±2.50 ^{lmn}	583.13±0.70 ^f	356.94±5.40 ^j	940.07±4.70 ⁱ	1.63±0.03 ^a
	兰州	34.85±5.29 ^a	202.54±4.54 ^d	4.71±0.17 ^{abcd}	260.32±4.07 ^{gh}	55.22±0.35 ^{fgh}	676.62±4.73 ^h	282.86±4.77 ^b	959.48±2.45 ^d	2.39±0.02 ^t
w2-20	武威	75.28±2.21 ^{gh}	214.12±5.38 ^c	5.46±0.47 ^{efgh}	237.12±1.39 ^{ij}	79.58±2.02 ^{hi}	712.32±3.82 ^o	336.99±4.36 ^h	1049.32±4.93 ^{no}	2.11±0.03 ^j
	兰州	95.28±0.64 ^{hijk}	353.51±6.73 ⁿ	5.46±0.60 ^{efgh}	262.99±2.84 ^{ghi}	60.11±1.35 ^{ij}	603.02±3.51 ^d	262.55±3.04 ^a	865.57±6.41 ^a	2.30±0.02 ^s
w3-12	武威	105.49±8.21 ^{mn}	322.91±3.21 ^k	5.37±0.57 ^{bed}	e258.99±3.90 ⁿ	117.37±4.97 ^r	924.32±2.72 ^u	410.33±4.66 ^m	1334.65±2.08 ^x	2.25±0.03 ^l
	兰州	108.74±3.03 ^{no}	375.83±3.16 ^p	7.30±0.96 ^k	l273.31±1.21 ^{klm}	54.32±1.44 ^{efg}	1105.41±3.36 ^y	423.08±3.25 ^p	1528.49±5.20 ^u	2.61±0.02 ^v
平均	武威	80.37±21.95	284.67±73.05	6.46±1.15	231.65±34.52	79.72±20.67	688.55±120.36	346.96±46.69	1035.51±16	1.231.98±0.20
	兰州	81.23±22.97	294.17±82.03	5.85±1.12	254.43±36.28	55.73±9.48	768.87±153.91	392.47±60.61	1161.34±198.66	1.97±0.30

POD, 过氧化物酶; SOD, 超氧化物歧化酶; SP, 可溶性蛋白; Pro, 脯氨酸; SS, 可溶性糖; Chl a, 叶绿素 a; Chl b, 叶绿素 b。不同字母表示同一生理指标在不同家系间差异显著 ($P < 0.05$)。

表 3 31 个唐古特白刺家系抗旱指标的方差分析

Table 3 Variance analysis among drought indices of 31 *Nitraria tangutorum* families

指标	变异来源	自由度	武威		兰州	
			F 值	变异系数%	F 值	变异系数%
POD	家系间	30	82.51**	27.31	91.55**	28.27
	误差	155				
	总和	185				
SOD	家系间	30	964.48**	25.66	853.02**	27.88
	误差	155				
	总和	185				
SP	家系间	30	25.23**	17.87	12.72**	19.15
	误差	155				
	总和	185				
Pro	家系间	30	226.11**	14.90	258.56**	14.26
	误差	155				
	总和	185				
SS	家系间	30	191.15**	25.93	58.27**	17.01
	误差	155				
	总和	185				
Chl a	家系间	30	3 617.23**	17.48	5 043.02**	20.02
	误差	155				
	总和	185				
Chl b	家系间	30	495.45**	13.46	1 079.31**	15.44
	误差	155				
	总和	185				
Chl (a+b)	家系间	30	2 907.27**	15.57	4 195.13**	17.11
	误差	155				
	总和	185				
Chl a/b	家系间	30	222.48**	9.90	929.77**	15.15
	误差	155				
	总和	185				

POD, 过氧化物酶; SOD, 超氧化物歧化酶; SP, 可溶性蛋白; Pro, 脯氨酸; SS, 可溶性糖; Chl a, 叶绿素 a; Chl b, 叶绿素 b。*, $P < 0.05$; **, $P < 0.01$ 。

表 4 单个指标下优良家系的选择

Table 4 Superior family selection under the single index

指标	武威			兰州		
	入选家系	入选后平均值	>总体平均/%	入选家系	入选后平均值	>总体平均/%
POD/($\mu \cdot g^{-1}$ FM)	j3-20, j3-6, j3-9, zl-23, zl-24, w3-15	112.12	39.51	j3-9, jc-8, zl-27, zl-23, w3-15, w3-12	107.63	32.51
SOD/($\mu \cdot g^{-1}$ FM)	j3-16, j3-9, jc-8, zl-27, zl-23, zl-24	396.53	39.29	j3-6, j3-20, j3-9, jc-8, zl-27, l-4	398.48	35.46
SP/($mg \cdot g^{-1}$ FM)	j3-8, j3-16, j3-7, j3-20, j3-9, zl-24	8.15	26.11	j3-8, j3-9, jc-8, zl-23, w3-15, w3-12	7.42	26.79
Pro/($\mu g \cdot g^{-1}$ FM)	j3-8, j3-7, j3-20, zl-23, w3-15, w3-12	268.75	16.02	j3-8, j3-16, jc-8, zl-22, zl-23, w3-15	282.13	10.89
SS/($mg \cdot g^{-1}$ FM)	j3-9, jc-8, zl-27, lsm-28, w3-15, w3-12	108.81	36.49	j3-16, j3-6, jc-8, zl-23, w2-10, w3-15	70.19	25.95
Chl a/($\mu g \cdot g^{-1}$ FM)	j3-8, j3-6, j3-9, jc-8, w3-15, w3-12	864.88	25.61	j3-8, j3-7, j3-9, jc-8, w3-15, w3-12	1 008.91	31.22
Chl b/($\mu g \cdot g^{-1}$ FM)	j3-9, jc-22, jc-8, zl-23, w3-15, w3-12	413.67	19.23	j3-8, j3-6, j3-9, jc-8, gl-34, w3-15	481.30	22.63
Chl (a+b)/($\mu g \cdot g^{-1}$ FM)	j3-6, j3-9, jc-8, zl-23, w3-15, w3-12	1 269.46	22.59	j3-8, j3-6, j3-9, jc-8, w3-15, w3-12	1 480.10	27.45
Chl a/b	j3-8, j3-6, gl-34, zl-23, w3-15, w3-12	2.27	14.46	j3-7, zl-23, zl-24, w2-5, w2-20, w3-12	2.40	21.91

POD, 过氧化物酶; SOD, 超氧化物歧化酶; SP, 可溶性蛋白; Pro, 脯氨酸; SS, 可溶性糖; Chl a, 叶绿素 a; Chl b, 叶绿素 b。

表 5 31 个唐古特白刺家系抗旱指标间的相关系数

Table 5 Correlation coefficients among drought indices of the 31 *Nitraria tangutorum* families

试验地	指标	超氧化物歧化酶	可溶性蛋白	脯氨酸	可溶性糖	SS	叶绿素 a	Chl a	叶绿素 b	叶绿素(a+b)	叶绿素 a/b
武威	POD	0.669**	0.359*	0.552**	0.280		0.694**	0.501**	0.663**	0.562**	
	SOD		0.261	0.375*	0.342		0.527**	0.499**	0.538**	0.287	
	SP			0.476**	-0.337		0.014	-0.114	-0.023	0.198	
	Pro				-0.028		0.584**	0.462**	0.570**	0.449*	
	SS						0.537**	0.626**	0.582**	0.101	
	Chl a							0.832**	0.987**	0.673**	
	Chl b								0.910**	0.155	
	Chl(a+b)									0.547**	
兰州	POD	0.666**	0.613**	0.509**	0.579**		0.578**	0.472**	0.592**	0.269	
	SOD		0.501**	0.302	0.535**		0.538**	0.174	0.470**	0.499**	
	SP			0.437*	0.573**		0.563**	0.561**	0.607**	0.131	
	Pro				0.440*		0.466**	0.467**	0.504**	0.170	
	SS						0.415*	0.265	0.402*	0.283	
	Chl a							0.649**	0.973**	0.616**	
	Chl b								0.808**	-0.190	
	Chl(a+b)									0.419*	

POD, 过氧化物酶; SOD, 超氧化物歧化酶; SP, 可溶性蛋白; Pro, 脯氨酸; SS, 可溶性糖; Chl a, 叶绿素 a; Chl b, 叶绿素 b。*, $P < 0.05$; **, $P < 0.01$ 。

表 6 31 个唐古特白刺家系抗旱指标主成分分析

Table 6 Principal component analysis of drought indices of 31 *Nitraria tangutorum* families

指标	武威主成分载荷矩阵			兰州主成分载荷矩阵		
	主成分 1	主成分 2	主成分 3	主成分 1	主成分 2	主成分 3
POD	0.82	0.29	0.11	0.81	0.04	0.29
SOD	0.69	0.12	0.51	0.70	0.46	0.22
SP	0.17	0.85	0.30	0.77	-0.18	0.27
Pro	0.67	0.50	-0.04	0.65	-0.20	0.15
SS	0.54	-0.68	0.15	0.67	0.18	0.51
Chl a	0.96	-0.12	-0.22	0.89	0.06	-0.44
Chl b	0.83	-0.38	0.18	0.68	-0.69	-0.18
Chl(a+b)	0.96	-0.20	-0.11	0.90	-0.16	-0.40
Chl a/b	0.62	0.32	-0.62	0.45	0.78	-0.37
特征值	4.80	1.84	0.86	4.88	1.42	1.03
贡献率/%	53.38	20.39	9.54	54.27	15.83	11.41
累计贡献率	53.38	73.77	83.31	54.27	70.10	81.51

POD, 过氧化物酶; SOD, 超氧化物歧化酶; SP, 可溶性蛋白; Pro, 脯氨酸; SS, 可溶性糖; Chl a, 叶绿素 a; Chl b, 叶绿素 b。

有 Chl b 和 Chl a/b, 其特征值为 1.42, 贡献率为 15.8%; 第 3 主成分主要有 SS, 其特征值为 1.03, 贡献率为 11.4%。

运用主成分分析法对 31 个唐古特白刺家系进

行抗旱性排序, 排序前 20% 的家系共 6 个(表 7), 武威试点排序为 j3-9 > w3-15 > jc-8 > w3-12 > zl-23 > j3-8, 兰州试点排序为 jc-8 > w3-15 > w3-12 > j3-9 > j3-16 > j3-8, 两试点共 5 个人选家系一致。按照

10%的人选率进行选择,入选的家系分别为 j3-9>w3-15>jc-8 和 jc-8>w3-15>w3-12,共 2 个家系一

致。按照 5%的人选率进行选择,入选家系分别为 j3-9>w3-15和jc-8>w3-15,其中,w3-15号家系在

表 7 31 个唐古特白刺家系抗旱指标主成分综合得分

Table 7 Comprehensive principal component scores of drought indices of 31 *Nitraria tangutorum* families

武威主成分得分						兰州主成分得分					
家系	主成分 1	主成分 2	主成分 3	综合	排序	家系	主成分 1	主成分 2	主成分 3	综合	排序
j3-8	1.82	2.75	-1.09	1.71	6	j3-8	2.86	-1.21	-0.38	1.61	6
j3-9	3.62	0.78	1.85	2.72	1	j3-16	2.30	0.66	1.43	1.86	5
jc-8	3.69	-2.20	1.28	1.97	3	j3-9	3.20	-0.33	-0.80	1.95	4
zl-23	2.58	0.66	0.42	1.86	5	jc-8	4.29	-0.42	0.12	2.79	1
w3-15	3.76	-0.61	-0.97	2.15	2	w3-15	3.78	-0.74	-0.15	2.36	2
w3-12	3.75	-1.44	-0.96	1.94	4	w3-12	3.55	1.07	-1.62	2.34	3

两试点均入选。

2.4.2 隶属函数法

运用隶属函数法排序后,排在前 20%的家系共 6 个(表 8),武威试点平均隶属函数值 0.69~0.83,排序为 j3-9>w3-15>w3-12>jc-8>zl-23>j3-8,兰州试点值 0.72~0.88,排序为 jc-8>w3-15>w3-12

>j3-9>j3-8>j3-16,两试点共 5 个人选家系一致。按照 10%的人选率进行选择,入选的家系分别为 j3-9>w3-15>w3-12 和 jc-8>w3-15>w3-12,共 2 个人选家系一致。按照 5%的人选率进行选择,入选的家系分别为 j3-9>w3-15 和 jc-8>w3-15,其中,w3-15 号家系在两试点均入选。

表 8 31 个唐古特白刺家系抗旱指标隶属函数值

Table 8 Subordinative function value of drought indices of 31 *Nitraria tangutorum* families

试验点	家系	POD	SOD	SP	Pro	SS	Chl a	Chl b	Chl (a+b)	Chl a/b	平均隶属函数	排序
武威	j3-9	1.00	1.00	0.98	0.85	0.83	0.79	0.63	0.78	0.58	0.83	1
	w3-15	0.89	0.37	0.38	0.98	0.72	1.00	0.74	0.98	0.75	0.76	2
	w3-12	0.84	0.51	0.19	0.87	0.94	0.99	0.68	0.95	0.82	0.76	3
	jc-8	0.68	0.64	0.41	0.83	1.00	0.92	1.00	1.00	0.28	0.75	4
	zl-23	1.00	0.75	0.51	0.91	0.52	0.72	0.52	0.70	0.65	0.70	5
	j3-8	0.77	0.42	1.00	1.00	0.20	0.73	0.36	0.65	0.99	0.68	6
	j3-6	0.85	0.47	0.72	0.72	0.38	0.79	0.41	0.71	1.00	0.67	7
	j3-16	0.68	0.71	0.99	0.81	0.55	0.52	0.48	0.54	0.34	0.62	8
	zl-27	0.70	0.81	0.03	0.57	0.82	0.66	0.46	0.64	0.64	0.59	9
	zl-24	0.91	0.68	0.76	0.79	0.16	0.55	0.51	0.57	0.36	0.59	10
	j3-20	0.89	0.61	0.86	0.86	0.21	0.35	0.14	0.30	0.63	0.54	11
	gl-34	0.60	0.24	0.29	0.59	0.45	0.71	0.40	0.65	0.85	0.53	12
	j3-7	0.53	0.48	0.79	0.96	0.00	0.49	0.42	0.49	0.39	0.50	13
	lsm-28	0.41	0.25	0.33	0.85	0.64	0.55	0.45	0.55	0.44	0.50	14
	zl-19	0.44	0.50	0.29	0.73	0.55	0.53	0.47	0.54	0.38	0.49	15
	w2-10	0.17	0.20	0.58	0.76	0.53	0.55	0.46	0.55	0.43	0.47	16
	jc-5	0.38	0.53	0.23	0.81	0.33	0.51	0.45	0.52	0.38	0.46	17
	w2-20	0.48	0.14	0.22	0.75	0.45	0.57	0.37	0.54	0.64	0.46	18
	jc-22	0.45	0.13	0.34	0.61	0.48	0.55	0.62	0.61	0.20	0.44	19
	w2-25	0.36	0.11	0.68	0.77	0.55	0.38	0.22	0.35	0.54	0.44	20
	zl-22	0.60	0.32	0.00	0.55	0.61	0.47	0.38	0.47	0.42	0.42	21
	gl-5	0.34	0.07	0.58	0.85	0.06	0.48	0.28	0.44	0.62	0.41	22

续表 8

试验点	家系	POD	SOD	SP	Pro	SS	Chl a	Chl b	Chl (a+b)	Chl a/b	平均隶属函数	排序
	l-4	0.41	0.31	0.20	0.70	0.13	0.51	0.52	0.55	0.28	0.40	23
	w2-5	0.22	0.42	0.33	0.77	0.57	0.32	0.45	0.38	0.00	0.39	24
	gl-27	0.30	0.32	0.68	0.72	0.09	0.30	0.10	0.25	0.61	0.37	25
	gl-35	0.31	0.13	0.15	0.55	0.55	0.41	0.33	0.41	0.38	0.36	26
	l-2	0.43	0.08	0.36	0.41	0.59	0.27	0.23	0.27	0.26	0.32	27
	w3-1	0.40	0.19	0.38	0.67	0.10	0.28	0.25	0.29	0.26	0.31	28
	lsm-17	0.54	0.00	0.59	0.53	0.42	0.16	0.25	0.20	0.00	0.30	29
	jc-2	0.00	0.33	0.13	0.00	0.49	0.15	0.12	0.15	0.20	0.17	30
	gl-14	0.16	0.00	0.59	0.53	0.02	0.00	0.00	0.00	0.06	0.15	31
兰州	jc-8	0.96	0.83	1.00	1.00	0.75	0.87	0.86	0.96	0.64	0.88	1
	w3-15	0.93	0.63	0.79	0.91	0.87	0.87	0.94	0.99	0.57	0.83	2
	w3-12	0.96	0.83	0.74	0.86	0.39	1.00	0.66	1.00	1.00	0.83	3
	j3-9	0.95	0.89	0.71	0.87	0.40	0.84	0.87	0.94	0.60	0.79	4
	j3-8	0.72	0.79	0.67	0.91	0.61	0.75	1.00	0.91	0.40	0.75	5
	j3-16	0.85	1.00	0.56	0.89	1.00	0.52	0.61	0.58	0.50	0.72	6
	j3-6	0.83	0.66	0.55	0.80	0.81	0.62	0.88	0.76	0.37	0.70	7
	zl-23	0.90	0.70	0.66	0.88	0.77	0.48	0.40	0.47	0.70	0.66	8
	w2-10	0.81	0.77	0.61	0.74	0.85	0.40	0.47	0.43	0.50	0.62	9
	zl-27	1.00	0.95	0.35	0.86	0.69	0.32	0.64	0.42	0.24	0.61	10
	j3-7	0.67	0.58	0.24	0.74	0.48	0.65	0.44	0.62	0.86	0.59	11
	zl-24	0.70	0.82	0.15	0.81	0.05	0.64	0.47	0.62	0.81	0.56	12
	l-4	0.67	0.88	0.43	0.77	0.47	0.33	0.43	0.36	0.47	0.53	13
	w2-25	0.48	0.41	0.28	0.85	0.29	0.58	0.53	0.60	0.67	0.52	14
	gl-34	0.86	0.26	0.63	0.82	0.26	0.27	0.84	0.46	0.05	0.49	15
	j3-20	0.74	0.90	0.48	0.88	0.35	0.16	0.32	0.17	0.37	0.49	16
	gl-35	0.37	0.25	0.33	0.79	0.25	0.56	0.63	0.62	0.54	0.48	17
	w2-20	0.80	0.74	0.35	0.80	0.56	0.11	0.00	0.01	0.73	0.46	18
	w3-1	0.68	0.64	0.34	0.59	0.25	0.33	0.45	0.36	0.44	0.45	19
	jc-22	0.75	0.00	0.33	0.84	0.51	0.27	0.70	0.40	0.14	0.44	20
	zl-22	0.72	0.23	0.00	0.88	0.29	0.35	0.47	0.38	0.45	0.42	21
	lsm-28	0.39	0.55	0.33	0.28	0.19	0.43	0.50	0.46	0.51	0.40	22
	zl-19	0.37	0.10	0.31	0.88	0.26	0.24	0.80	0.41	0.04	0.38	23
	lsm-17	0.45	0.32	0.38	0.56	0.68	0.14	0.18	0.10	0.50	0.37	24
	gl-5	0.25	0.03	0.34	0.86	0.17	0.21	0.59	0.31	0.17	0.33	25
	w2-5	0.04	0.18	0.19	0.79	0.42	0.24	0.08	0.15	0.81	0.32	26
	gl-14	0.50	0.20	0.43	0.79	0.04	0.04	0.54	0.15	0.00	0.30	27
	gl-27	0.29	0.34	0.55	0.66	0.26	0.02	0.28	0.04	0.20	0.29	28
	jc-5	0.00	0.36	0.20	0.73	0.28	0.17	0.42	0.21	0.27	0.29	29
	jc-2	0.56	0.18	0.28	0.39	0.18	0.10	0.30	0.11	0.29	0.27	30
	l-2	0.07	0.21	0.09	0.00	0.00	0.00	0.22	0.00	0.23	0.09	31

2.4.3 优良家系综合选择

利用主成分分析法和隶属函数法 2 种评价方法得到的结果不完全相同,但总体趋势一致(表 7、8),以两试点及 2 种评价方法共有的家系为入选家系,选出 j3-9、w3-15、w3-12、jc-8、j3-8,共 5 个优良家系,入选率达 16.13%,最优家系为民勤沙井子 w3-12 和 w3-15 号家系。

3 讨论与结论

耐旱性是植物在长期复杂的生态环境中形成的适应性机制,植物耐旱性不是单个因素作用,是多种性状的一个综合,评价抗旱性指标主要有水分生理指标(如水势)、光合、荧光特性、酶活性及原生质特性、渗透调节、内源激素等。其中,渗透调节是植物耐旱和御旱的一种重要的生理机制。保护酶系统是植物抵御逆境的重要手段,植物通过抗氧化防御酶系统来防止膜脂过氧化作用。种培芳等^[12]在 4 个地理种群唐古特白刺的抗旱性系统评价中发现,唐古特白刺叶片中的抗氧化酶和脯氨酸、可溶性糖等渗透调节物与抗旱性关联度相对较高,均能很好地反映其抗旱性,可作为评价抗旱性的鉴定指标。刘芳等^[25]发现叶绿素含量可作为灌木品种抗旱性评价的重要指标。本研究中,POD、SOD、SP、SS、Pro、Chl a、Chl b、Chl (a+b)含量及 Chl a/b 在两试点点的 31 个唐古特白刺家系间变化范围较大,差异性均显著,反映出唐古特白刺家系间具有丰富的遗传变异和选育潜力,为开展唐古特白刺家系选择提供了物质基础,基于抗氧化酶活性、渗透调节物及叶绿素为指标的抗旱性评价方法,可在其他灌木抗旱育种中被广泛应用。变异系数能直观方便地衡量和比较各观测值的离散程度。在一定范围内,某指标的变异系数越大,表明该指标反映家系间生理状态差异的敏感性越强,应受到的关注度也越高^[26-31]。本试验中,武威和兰州两试点的唐古特白刺家系的 POD 变异系数最大,其次为 SOD,说明 POD 是反应家系间生理状态差异性最敏感的生理指标,后期在抗旱品种选育中应受到的关注度也最高。两试点的 SS 和 Chl a/b 变异系数相差较大,原因可能是两试点的唐古特白刺家系分布于甘肃的不同地区,其变异系数存在差异与其生长条件及相关的自然环境因子相关。

在单项指标评价植物的抗旱性研究中,种培芳

等^[13]在 4 个地理种群红砂的抗旱性综合评价中发现,用任何一种指标来判定红砂的抗旱性都显然比较片面而不具有说服力。李爱平等^[27]认为,没有一项耐旱指标能单独运用从而达到选择目标,多指标的评价同时结合分析单一指标的评判结果,是进一步探明旱生灌木树种的综合耐旱性的强弱研究途径之一。徐永杰等^[31]在油桐优良家系抗性综合评价中发现,单个指标不能判断油桐家系的抗逆性,需要综合考虑与抗性有关的多种因素来综合分析。本研究中,从单个指标选择潜力来看,不同指标入选的唐古特白刺家系相互交叉但不完全相同,说明选择的评价指标都不同程度地反映了这类指标的信息,变量之间存在重叠、相关的关系;另一方面,在抗旱选育中各单项指标所起的作用不同,采用单项指标评价抗旱性都太片面或无代表性,这与前期研究结果一致。因此,为了能客观准确地评价植物的抗旱性,需采用诸如主成分分析法、抗旱性指数法、聚类分析法和隶属函数法等综合评价方法^[28]。田治国等^[29]在万寿菊品种抗旱性评价中采用了主成分分析法、隶属函数法和聚类分析法;王兰芬等^[30]在绿豆种质资源成株期抗旱性鉴定中采用了抗旱性指数法和隶属函数法;徐永杰等^[31]在油桐优良家系抗性综合评价中采用聚类分析和主成分分析将油桐家系分为 3 个抗性等级。大量研究表明,植物抗旱性能通过主成分分析法或隶属函数法进行综合评价^[32-33]。为了探讨不同综合评价方法的可靠性和适用性,本研究分别采用主成分分析法和隶属函数法对武威和兰州两试点的 31 个唐古特白刺家系进行评价,结果发现:在各试点优良家系选择重合率均高达 80%以上,最后筛选出 5 个优良家系,分别是金塔种源的 j3-9 和 j3-8 号家系、民勤沙井子种源的 w3-15 和 w3-12 号家系以及瓜州槽沿子种源的 jc-8 号家系,说明这几个家系能够很好地适应不同的生境条件;同时,采用任何一种方法均能对植物的抗旱性强弱进行客观的综合评价。

林木早期选择是利用幼苗的性状对后期的生长做出预测,是一种间接选择方法。本研究只采用抗氧化酶活性、渗透调节物质和叶绿素三大生理指标在唐古特白刺生长早期进行家系抗旱性评价,存在一定的局限性,其结果与成年时期所表达出性状间的关联程度还需要进一步的验证。在今后的研究中将与水分生理(如水势)、荧光、光合、内源激素等指

标评价结果进行对比和优化,并结合造林试验,将早期间接指标的选择结果与实地测定对比研究,探讨早期选择的可靠性和科学性,并进行优良家系的再次选择,以期获得唐古特白刺抗旱优良的品种。

参考文献:

- [1] 任华东,姚小华,康文玲,等. 黑荆树种源和家系的遗传变异与早期选择[J]. 林业科学, 2010, 46(3): 153—160.
- [2] 孙晓梅,张守攻,周德义,等. 落叶松种间及种内和种间杂种家系间的物候变异与早期选择[J]. 林业科学, 2008, 44(1): 77—84.
- [3] 郑仁华,施季森,肖晖,等. 杉木第3代种质资源自由授粉子代生长性状遗传变异及早期选择[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2014(6): 38—42.
- [4] 王军辉,顾万春,李斌,等. 桉木优良种源/家系的选择研究——生长的适应性和遗传稳定性分析[J]. 林业科学, 2000, 36(3): 59—66.
- [5] 黄少伟,钟伟华,黄凯,等. 火炬松自由授粉子代多地点试验[J]. 林业科学研究, 2001, 14(5): 509—514.
- [6] 牛焕琼,袁赶年,李学新,等. 西藏柏木半同胞家系子代测定及优良家系选择[J]. 林业调查规划, 2014, 39(3): 106—110.
- [7] 徐焕文,刘宇,李志新,等. 5年生白桦杂种子代多点稳定性分析及优良家系选择[J]. 北京林业大学学报, 2015, 37(12): 24—31.
- [8] 周宜君,刘春兰,冯金朝,等. 沙冬青抗旱、抗寒机理的研究进展[J]. 中国沙漠, 2001, 21(3): 312—316.
- [9] 曹兵,苏润海,王标,等. 水分胁迫下臭椿幼苗几个生理指标的变化[J]. 林业科技, 2003, 28(3): 1—3.
- [10] 桑子阳,马履一,陈发菊,等. 干旱胁迫对红花玉兰幼苗生长和生理特性的影响[J]. 西北植物学报, 2011, 31(1): 109—115.
- [11] 李磊,贾志清,朱雅娟,等. 我国干旱区植物抗旱机理研究进展[J]. 中国沙漠, 2010, 30(5): 1053—1059.
- [12] 种培芳,苏世平,高暝,等. 4个地理种群唐古特白刺的抗旱性系统评价[J]. 水土保持通报, 2011, 31(3): 213—218.
- [13] 种培芳,苏世平,李毅. 4个地理种群红砂的抗旱性综合评价[J]. 草业学报, 2011, 20(5): 26—33.
- [14] Zhiguo Tian, Fei Wang, Wene Zhang, et al. Antioxidant mechanism and lipid peroxidation patterns in leaves and petals of marigold in response to drought stress[J]. Horticulture, Environment, and Biotechnology, 2012, 53(3): 183—192.
- [15] 杨秀艳,张华新,唐欣,等. 我国白刺植物资源及其开发利用[J]. 世界林业研究, 2013, 26(5): 64—68.
- [16] 常国华,陈映全,高天鹏,等. 膜果麻黄(*Ephedra przewalskii*)和白刺(*Nitraria tangutorum*)幼枝水势及影响因素[J]. 中国沙漠, 2015, 35(2): 385—392.
- [17] 罗光宏,王进,颜霞,等. 干旱胁迫对唐古特白刺(*Nitraria tangutorum*)种子吸胀萌发和幼苗生长的影响[J]. 中国沙漠, 2014(6): 1537—1543.
- [18] 张勇,李鹏,李彩霞,等. 甘肃白刺属3种植物叶片营养成分含量的测定与分析[J]. 草业科学, 2007, 24(7): 37—39.
- [19] 白潇,李毅,苏世平,等. 不同居群唐古特白刺叶片解剖特征对生境的响应研究[J]. 西北植物学报, 2013, 33(10): 1986—1993.
- [20] 杨秀艳,张华新,张丽,等. NaCl胁迫对唐古特白刺幼苗生长及离子吸收、运输与分配的影响[J]. 林业科学, 2013, 49(9): 165—171.
- [21] 种培芳,苏世平,高暝,等. 4个地理种群白刺气体交换特性比较[J]. 草业学报, 2013, 22(2): 307—312.
- [22] 郭晔红,蔺海明,武睿,等. 唐古特白刺组织培养及其培养基筛选研究[J]. 草业学报, 2009, 18(6): 59—64.
- [23] 张晓明. 内蒙古白刺属植物遗传分化及其适应性的研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2005.
- [24] 高暝,李毅,种培芳,等. 渗透胁迫下不同地理种群白刺的生理响应[J]. 草业学报, 2011, 20(3): 99—107.
- [25] 刘芳,陈海玲,徐军,等. 不同灌木品种抗旱性机理研究[J]. 中国农学通报, 2014, 30(28): 13—17.
- [26] 蔡婧,杨晴,张国君,等. 沙枣半同胞家系光合及生理特性的比较分析[J]. 河北农业大学学报, 2013, 36(3): 50—54.
- [27] 李爱平,王晓江,杨小玉,等. 库布齐沙漠几种沙生灌木叶解剖结构耐旱特征研究[J]. 中国沙漠, 2010, 30(6): 1405—1410.
- [28] 王维睿,苏世平,李毅,等. 6个地理种群红砂(*Reaumuria soongocica*)叶片生态解剖特征及抗旱性评价[J]. 中国沙漠, 2015(4): 895—900.
- [29] 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.
- [30] 王兰芬,武晶,景蕊莲,等. 绿豆种质资源成株期抗旱性鉴定[J]. 作物学报, 2015, 41(8): 1287—1294.
- [31] 徐永杰,邓先珍,代新平,等. 基于主成分分析和聚类分析的油桐优良家系抗性综合评价[J]. 中南林业科技大学学报, 2012, 32(7): 24—27.
- [32] 曾宪海,安锋,蔡明道,等. 高渗胁迫后橡胶树萌发籽苗抗旱性主成分及隶属函数分析[J]. 中国农学通报, 2010, 26(1): 260—264.
- [33] 杨进文,朱俊刚,王曙光,等. 用GGE双标图及隶属函数综合分析山西小麦地方品种抗旱性[J]. 应用生态学报, 2013, 24(4): 1031—1038.

Early Selection of Superior Families with High Drought-resistance in *Nitraria tangutorum* Based on the Physiological Indices

Chai Wenmin, Li Yi, Su Shiping, Shan Lishan, Chong Peifang

(College of Forestry, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: In order to select superior family for drought resistance of *Nitraria tangutorum* ultra-xeromoph shrubs. Provenance experiment on 31 families of 3 years-old *N. tangutorum* that strong growth, disease and pest resistance was carried out to investigate the contents of peroxidase (POD), superoxide dismutase (SOD), soluble protein (SP), soluble sugar (SS), proline (Pro) and chlorophyll (Chl) in Wuwei and Lanzhou city of Gansu province, principal component analysis and subordinate function method were both used in this study. Results indicated that peroxidase, superoxide dismutase, soluble protein, soluble sugar, proline and chlorophyll a, chlorophyll b, chlorophyll (a+b) and chlorophyll a/b values of *N. tangutorum* families varied in a large range among the 31 families, chlorophyll a content varied most, while the smallest was in soluble protein content. Superior families of *N. tangutorum* were selected by single index which was not identical. Adopting synthesis evaluation method selected the superior family for drought resistance, were j3-8, j3-6, jc-8, w3-12, j3-9 respectively, and Sha Jin zi w3-12 and w3-15 family in Minqin performed best in drought resistance.

Key words: *Nitraria tangutorum*; early selection; superior family; principal component analysis; membership function method