

DOI: 10.11931/guihaia.gxzw201405006

冯士令,程浩然,李旭,等. 长林无性系油茶抗旱性的综合评价 [J]. 广西植物, 2016, 36(6):735-740

FENG SL, CHENG HR, LI X, et al. Comprehensive evaluation of drought tolerance for *Camellia oleifera* Changlin clones [J]. Guihaia, 2016, 36(6):735-740

长林无性系油茶抗旱性的综合评价

冯士令, 程浩然, 李旭, 邓俊琳, 刘露, 丁春邦*

(四川农业大学 生命科学院, 四川 雅安 625014)

摘要: 油茶产区在夏季常伴有持续干旱、高温少雨等天气,造成油茶产量不高。为了解持续干旱对油茶生理造成的影响,该研究以两年生的9个长林无性系油茶为材料,在温室内模拟自然干旱胁迫试验,并研究干旱胁迫第0、5、10、15、20和25天时其叶片生理生化指标的变化。同时以各生理指标的抗旱系数作为衡量油茶抗旱性的指标,利用主成分分析、隶属函数法及权重对其抗旱能力进行综合评价。结果表明:将14个单项指标降维成3个独立的综合指标,并通过隶属函数值和权重确定各油茶耐旱性综合评价值,进而得到长林无性系油茶的抗旱强弱依次为长林59号>长林22号>长林53号>长林4号>长林40号>长林8号>长林3号>长林27号>长林18号。

关键词: 干旱胁迫, 抗旱系数, 相关性分析, 主成分分析, 权重

中图分类号: Q945.78 文献标识码: A 文章编号: 1000-3142(2016)06-0735-06

Comprehensive evaluation of drought tolerance for *Camellia oleifera* Changlin clones

FENG Shi-Ling, CHENG Hao-Ran, LI Xu, DENG Jun-Lin,

LIU Lu, DING Chun-Bang*

(College of Life Sciences, Sichuan Agricultural University, Ya'an 625014, China)

Abstract: In summer, it is often high temperature and drought result in low yield of *Camellia oleifera* in *C. oleifera* plantation. Water defect will reduce the plant photosynthesis with consequent low yield of plants. However, there is little information on the drought stress physiological research of *C. oleifera*. In order to study the effects of physiology of *C. oleifera* under constantly drought stress, the 2-year-old seeding of *C. oleifera* Changlin clones were cultured in pots (30 cm × 30 cm × 25 cm) in greenhouse. There were two water stress treatment groups named respectively control group and drought stress group in this study. The drought stress group suffered from persistent irrigation water deficit, while the control group cultivated under normal irrigation condition. Subsequently, the change of physiological and biochemical indices of leaves including reactive oxygen species contents, antioxidant enzyme activities, osmotic substances contents, cell membrane permeability and photosynthesis were measured on 0, 5, 10, 15, 20 and 25 d after drought stress in order to screen *C. oleifera* of strong resistant of environmental stress. In this study, the different drought resistance coefficients of *C. oleifera* such as superoxide anion radical (O_2^-) content, hydrogen peroxide (H_2O_2) content, the activities of peroxidase (POD), catalase (CAT) and superoxide dismutase (SOD), the relative

收稿日期: 2014-05-05 修回日期: 2015-04-09

基金项目: 四川省科技支撑计划项目(2013NZ0047) [Supported by Key Technology R & D Program of Sichuan Provincial Office of Science and Technology (2013NZ0047)].

作者简介: 冯士令(1987-),女,河北辛集人,博士研究生,主要从事植物逆境生理学研究,(E-mail)915143015@qq.com。

*通讯作者: 丁春邦,教授,博士生导师,主要从事植物学教学与科研工作,(E-mail)dcba@scau.edu.cn。

electric conductivity, proline content (Pro), chlorophyll content, net photosynthetic rate (P_n), stomatal conductance (G_s), transpiration rate (Tr) and water use efficiency (WUE) were as drought tolerance indices. Finally, the comprehensive evaluation of drought resistance coefficients of *C. oleifera* physiological indices was performed with correlation analysis, principal component analysis, subordinative function and weight. The result indicated that 14 indices could be classified into 3 independent comprehensive components, and then utilized the value of weight and subordinative function to perform the values of comprehensive evaluation of different *Camellia* varieties. According to the value of different comprehensive evaluation value, the order of drought-resistance of nine *C. oleifera* Changlin clones was “Changlin59” > “Changlin22” > “Changlin53” > “Changlin4” > “Changlin40” > “Changlin8” > “Changlin3” > “Changlin27” > “Changlin18”. The results extensively provide certain scientific basis for breeding, introduction and cultivation of drought-tolerant *Camellia* varieties in Sichuan.

Key words: drought stress, drought resistance coefficient, correlation analysis, principal component analysis, weight

油茶(*Camellia oleifera*)属于山茶科(Theaceae)多年生四季常绿油料树种(姚小华等,2012),是中国南方乡土植物,与油棕、油橄榄和椰子并称为世界四大名优木本食用油料作物。油茶生长需水期一般在花果发育和油脂转化时期,若降雨量较少会阻碍其正常的生长发育,果实大量脱落。

目前,我国西南地区,干旱次数增多,部分省份干旱持续时间长,严重制约农林产业发展,造成大量经济损失。选育一些优良树种,特别是对水分亏缺有较强抵抗力的林木是我国西南地区农林产业发展所面临的一个重要问题。长林系列油茶无性系在我国南方地区大量引种,但随着其生长环境的改变,以及引种地区夏季常伴有持续伏旱、高温少雨等天气,油茶产量不高,仍需根据该地区气候特点不断进行优种选优工作(左继林等,2013)。因此,研究油茶在缺水情况下的生理生化反应,选择抗旱能力强的油茶无性系,不仅有助于油茶在干旱地区的推广,而且对改善当地经济状况起到积极的作用。

本试验模拟自然干旱胁迫对各油茶品种的活性氧代谢,抗氧化酶活性及光合参数的影响,并采用主成分分析法等多元统计分析法对其抗旱能力进行综合评价,为四川地区选育抗旱性强的油茶品种,以及科学引种栽培提供一定试验依据。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

试验材料为2011年4月引种江西省的2年生长林无性系油茶:长林3号(C_3)、长林4号(C_4)、长林8号(C_8)、长林18号(C_{18})、长林22号(C_{22})、长林27号(C_{27})、长林40号(C_{40})、长林53号(C_{53})及

长林59号(C_{59})共9个品种。于2012年4月中旬,将长势均一旦健康的苗木移植于高30 cm,上下口径分别为30 cm和25 cm塑料盆中,每盆1株,育苗基质为四川农业大学科研农场大田地表土,经测定,土壤有机质含量 $15.98\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,钾含量 $1.319\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,氮含量 $1.14\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,磷含量 $0.296\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,土壤pH值5.78,田间最大持水量40.2%。油茶苗随机摆放在两侧通风且温室内光照条件一致的区域,在缓苗7月,挑选长势基本相同的植株进行自然干旱试验。

1.2 试验处理

试验材料持续3 d浇透水后不再浇水,采用自然干旱法进行试验。试验设置2个水分处理,即对照组(W_{CK}),田间最大持水量的75%,确保植株健康生长;处理组(W_{RS}),进行停水胁迫处理,以5 d为一个处理期,分别干旱胁迫0、5、10、15、20和25 d。各处理3次重复,各品种6株植物。

1.3 试验方法

1.3.1 土壤含水量 采用TDR100土壤水分速测仪进行测定。

1.3.2 生理指标 分别在干旱胁迫处理期的最后一天,测定各品种的光合参数测定后,立即取完全展开功能叶进行以下生理指标测定: $O_2\cdot$ 和 H_2O_2 含量测定参考李忠光和龚明(2005)方法;超氧化物歧化酶(SOD)活性测定参考李合生等(2000)氮蓝四唑光化还原法;过氧化物酶(POD)活性采用Rao et al(1996)测定方法;过氧化氢酶(CAT)活性测定采用Aebi(1984)紫外吸收法;硫代巴比妥酸反应物(TBARS)含量测定采用Koizumi et al(1993)硫代巴比妥酸法;相对电导率测定采用电导仪法(张以顺等,2009);游离脯氨酸(Pro)含量测定参照高俊风

等(2006)酸性茛三酮法;可溶性蛋白含量测定采用考马斯亮蓝法(Bradford, 1976);叶绿素(Chl)含量测定参考李合生等(2000)丙酮法。

1.3.3 光合参数 分别在干旱胁迫处理期的最后一天的早上8:00-10:00,用便携式光合仪GFS-3000,测定油茶幼苗上端第4-6功能叶的光合指标。测定光合参数:蒸腾速率(T_r)、净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s);水分利用率(WUE),其按 $WUE = P_n/T_r$ 公式计算得出(李月灵等,2013)。

1.4 抗旱性评价

1.4.1 抗旱系数 抗旱系数(DRC)=处理组测定值/对照组测定值 $\times 100\%$ (白志英等,2008) (1)

1.4.2 隶属函数分析 各综合指标的隶属函数值(杨升等,2013)用下列公式计算:

$$U(X_j) = (X_j - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}) \quad (2)$$

公式(2)中 X_j 是第 j 个综合指标值, X_{\min} 和 X_{\max} 分别代表第 j 个综合指标测定值的最小值和最大值, $j=1, 2, \dots, n$ 。

1.4.3 权重的确定 据各个综合指标贡献率大小及公式(3)求出3个综合指标重要程度即权重(王军等,2007;周广生等,2003;谢志贤,1983):

$$W_j = p_j / \sum_{j=1}^n p_j \quad (3)$$

式中, W_j 和 p_j 分别表示第 j 个综合指标测定值的权重及贡献率, $j=1, 2, \dots, n$ 。

1.4.4 抗旱性综合评价 由(4)式得出各幼苗抗旱性综合评价值(王树刚等,2011;张耿等,2007;冯士令等,2013):

$$D = \sum_{j=1}^n [U(X_j) \cdot W_j] \quad (4)$$

$$j=1, 2, \dots, n$$

1.5 数据分析

用Excel 2007进行数据整理,SPSS 20.0软件进行数据的差异性检测和多元统计分析等。

2 结果与分析

2.1 干旱胁迫下土壤含水量的变化

由图1可见,随着水分胁迫时间延长,处理组的土壤含水量一直下降,且胁迫前期下降较为迅速。胁迫至10 d,与对照相比土壤含水量降低了40.87%,此时 C_{18} 部分新叶出现萎缩,其他油茶品种叶片正常。胁迫至25 d时,与对照相比土壤含水量

降低了81.05%, C_{18} 、 C_{27} 嫩芽部分脱落,新叶大量脱落; C_3 和 C_8 嫩芽大量呈褐色,新叶部分脱落; C_4 、 C_{22} 、 C_{40} 、 C_{53} 和 C_{59} 新叶大量卷曲,新叶部分脱落。

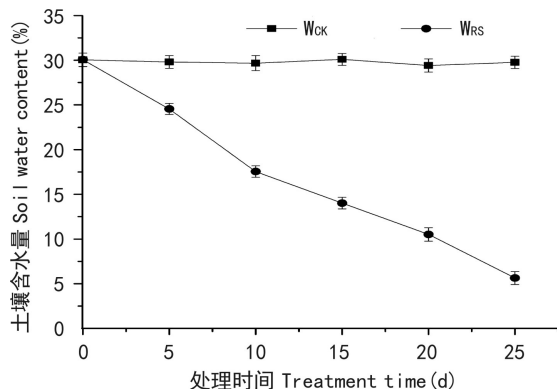


图1 干旱胁迫下土壤含水量变化

Fig. 1 Soil water content under drought stress

2.2 各单项指标的抗旱系数及简单相关性分析

由表1可知,各油茶品种的 P_n 、 T_r 、 G_s 与对照相比均有所降低[DRC(%)<100%], $O_2\cdot$ 含量、 H_2O_2 含量、CAT活性、TBARS含量、相对电导率变化、Pro含量、可溶性蛋白含量及Chl含量与对照相比均有所提高[DRC(%)>100%]。由于不同品种的所有指标的变化程度不同,故各指标的抗旱系数评价油茶抗旱强弱,结果千姿百态。由相关系数矩阵列表(表2)可知,所有的单项生理指标间存在某种程度的相关性,甚至部分指标间的相关性达到显著或极显著水平,说明它们携带的信息具有交叠性,直接运用这些指标研究油茶的抗旱性会造成较大偏差。

2.3 主成分分析

运用主成分分析法对9个油茶品种的光合参数、抗氧化酶活性、活性氧及渗透物质含量等14个生理指标的抗旱系数进行分析,并得到前三个综合指标的贡献率,第一、二、三主成分贡献率分别为55.431%、17.666%、9.054%,累积贡献率为82.151%,前三个主成分累积贡献率大于75%,能够充分概括该试验数据的大部分信息,这样把最初14个生理指标降维并简化为3个新的彼此独立的综合指标(表3),分别用CI、CII和CIII表示。

第1主成分表达式:

$$CI = 0.114X_1 + 0.111X_2 + 0.005X_3 + 0.015X_4 + 0.119X_5 + 0.119X_6 + 0.124X_7 + 0.113X_8 + 0.117X_9 -$$

表 1 各油茶品种各项指标的抗旱系数

Table 1 Drought resistance coefficient of every index of *Camellia oleifera*

品种 Variety	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11	X12	X13	X14
C ₃	111.908	122.073	107.575	104.962	126.254	178.202	174.326	160.698	132.648	92.661	56.040	65.716	53.735	107.707
C ₄	131.482	126.019	103.356	97.123	141.085	245.784	189.569	130.299	132.068	98.521	55.909	56.949	48.286	130.308
C ₈	128.467	137.092	100.932	105.903	133.355	188.001	184.043	125.697	135.002	94.574	62.630	67.552	52.242	153.412
C ₁₈	119.698	128.179	99.409	107.773	124.661	186.425	245.982	119.433	139.204	82.471	42.187	51.675	39.552	144.459
C ₂₂	122.464	126.625	103.016	106.253	121.432	188.387	165.364	115.286	145.155	82.294	57.807	56.903	55.685	112.242
C ₂₇	128.576	126.140	119.115	108.738	116.872	196.343	163.566	112.744	131.978	89.893	49.351	62.334	42.905	128.791
C ₄₀	127.404	124.685	98.113	101.666	120.238	186.324	181.211	114.277	133.291	85.509	46.689	56.496	43.852	147.275
C ₃₃	130.272	118.907	117.864	102.113	115.772	154.612	183.832	138.532	120.108	84.119	59.741	67.725	60.216	106.022
C ₅₉	133.342	131.775	116.438	106.902	124.157	165.121	147.359	115.082	137.362	114.312	55.898	64.224	59.187	108.323

注: X1.超氧阴离子产生速率; X2.过氧化氢含量; X3.超氧化物歧化酶活性; X4.过氧化物酶活性; X5.过氧化氢酶活性; X6.硫代巴比妥酸反应含量; X7.相对电导率; X8.脯氨酸含量; X9.可溶性蛋白含量; X10.叶绿素含量; X11.净光合速率; X12.气孔导度; X13.蒸腾速率; X14.水分利用率。下同(X1-X14)。

Note: X1. Generating rate of O₂⁻; X2. H₂O₂ content; X3. The activity of SOD; X4. The activity of POD; X5. The activity of CAT; X6. TBARS content; X7. Relative electric conductivity; X8. Pro content; X9. Soluble protein content; X10. Chlorophyll content; X11. P_n; X12. G_s; X13. T_r; X14. WUE。The same below (X1-X14)。

表 2 各单项指标的相关系数矩阵

Table 2 Correlation coefficient matrix of every single index

	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11	X12	X13	X14
X1	1.000													
X2	0.870 **	1.000												
X3	0.058	0.060	1.000											
X4	0.121	0.162	0.632 **	1.000										
X5	0.889 **	0.871 **	0.112	0.223 *	1.000									
X6	0.757 **	0.755 **	-0.023	0.192 *	0.834 **	1.000								
X7	0.859 **	0.795 **	0.025	0.109	0.892 **	0.917 **	1.000							
X8	0.813 **	0.816 **	0.168	0.334 **	0.924 **	0.821 **	0.802 **	1.000						
X9	0.864 **	0.872 **	0.154	0.324 **	0.951 **	0.856 **	0.848 **	0.952 **	1.000					
X10	-0.174	-0.127	0.339 **	0.095	-0.153	-0.329 **	-0.255 **	-0.148	-0.125	1.000				
X11	-0.455 **	-0.429 **	0.073	0.226 *	-0.444 **	-0.616 **	-0.681 **	-0.376 **	-0.420 **	0.208 *	1.000			
X12	-0.610 **	-0.614 **	-0.020	0.051	-0.647 **	-0.732 **	-0.773 **	-0.609 **	-0.635 **	0.201 *	0.895 **	1.000		
X13	-0.400 **	-0.330 **	0.101	0.286 **	-0.360 **	-0.556 **	-0.627 **	-0.271 **	-0.301 **	0.245 *	0.947 **	0.836 **	1.000	
X14	0.468 **	0.357 **	-0.187	-0.246 *	0.454 **	0.456 **	0.524 **	0.386 **	0.361 **	-0.297 **	-0.421 **	-0.479 **	-0.537 **	1.000

注: *表示 $P < 0.05$ 的显著水平, **表示 $P < 0.01$ 的极显著水平。

Note: * Significant at $P < 0.05$, ** Significant at $P < 0.01$.

$$0.034X_{10} - 0.090X_{11} - 0.108X_{12} - 0.082X_{13} + 0.064X_{14} \\ 0.073X_{14}$$

第 3 主成分表达式:

$$C_{III} = 0.130X_1 + 0.123X_2 - 0.477X_3 - 0.143X_4 + \\ 0.114X_5 + 0.054X_6 - 0.003X_7 + 0.109X_8 + 0.095X_9 - \\ 0.379X_{10} + 0.350X_{11} + 0.272X_{12} + 0.341X_{13} + \\ 0.130X_{14}$$

第 2 主成分表达式:

$$C_{II} = 0.064X_1 + 0.090X_2 + 0.265X_3 + 0.328X_4 + \\ 0.102X_5 + 0.010X_6 - 0.006X_7 + 0.141X_8 + 0.138X_9 + \\ 0.148X_{10} + 0.207X_{11} + 0.117X_{12} + 0.247X_{13} +$$

表 3 各综合指标的系数和贡献率
Table 3 Coefficients of comprehensive indexes and proportion

	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11	X12	X13	X14	贡献率 Cumulative (%)
CI	0.114	0.111	0.005	0.015	0.119	0.119	0.124	0.113	0.117	-0.034	-0.090	-0.108	-0.082	0.073	55.431
CII	0.064	0.090	0.265	0.328	0.102	0.010	-0.006	0.141	0.138	0.148	0.207	0.117	0.247	0.064	17.666
CIII	0.130	0.123	-0.477	-0.143	0.114	0.054	-0.003	0.109	0.095	-0.379	0.350	0.272	0.341	0.130	9.054

表 4 不同品种的综合指标值、隶属函数值、权重及 D 值

Table 4 Comprehensive index values, subordinative function values, weights, and D values of different varieties

品种 Variety	综合指标值 Comprehensive index value[C(x)]			隶属函数值 Subordinative function value[U(x)]			综合评价值 Comprehensive evaluation value(D)
	C(I)	C(II)	C(III)	U(I)	U(II)	U(III)	
C ₃	22.018	172.653	-107.547	0.315	0.410	0.718	0.380
C ₄	16.133	177.526	-93.574	0.330	0.427	0.690	0.390
C ₈	30.890	171.345	-120.880	0.337	0.445	0.560	0.385
C ₁₈	34.951	153.438	-75.176	0.293	0.398	0.566	0.346
C ₂₂	20.860	166.620	-89.623	0.323	0.512	0.600	0.393
C ₂₇	27.065	155.654	-98.511	0.299	0.421	0.670	0.366
C ₄₀	30.446	154.885	-107.921	0.313	0.583	0.479	0.389
C ₅₃	24.069	139.357	-44.094	0.299	0.538	0.683	0.392
C ₅₉	16.859	177.852	-104.349	0.330	0.459	0.662	0.394
权重 Weight				0.675	0.215	0.110	

由上述 3 个表达式可知,在 CI 表达式中 CAT 活性、TBARS 含量、相对电导率及可溶性蛋白含量的系数较大,所以第一主成分基本体现蛋白质含量和细胞膜透性指标;在 CII 表达式中 SOD 活性、POD 活性、净光合速率、蒸腾速率的系数相对较大,故第二主成分大致概括为抗氧化酶活性、光合参数指标;在 CIII 表达式中 P_n 、 Tr 、 G_s 、Chl 含量、SOD 活性的系数较大,因此第三主成分大致概括为光合参数指标。上述分析表明蛋白质含量、细胞膜透性、抗氧化酶活性及光合参数是反应抗旱性重要指标。

2.4 综合评价

2.4.1 隶属函数分析 根据表 3 中各综合指标系数求出 9 个油茶品种各自的 3 个综合指标值分别用 C(I)、C(II)和 C(III)表示;再由公式(2)求出各品种的综合指标的隶属函数值用 U(I)、U(II)、U(III)(表 4)。

2.4.2 权重的确定 根据公式(3),计算得出 3 个综

合指标权重分别为 0.675、0.215、0.110(表 4)。

2.4.3 综合评价 根据公式(4)计算出各油茶品种的综合抗旱能力大小,由 D 值(见表 4)对植物幼苗的耐旱性强弱进行评估得到:长林 59 号>长林 22 号>长林 53 号>长林 4 号>长林 40 号>长林 8 号>长林 3 号>长林 27 号>长林 18 号,其中长林 59 号的 D 值最大,表明该品种抗旱能力最强;其次是长林 22 号;长林 18 号的 D 值最小,说明其抗旱能力最差。

3 讨论

干旱胁迫下,植物体内活性氧产生和清除的平衡体系紊乱(周有文等,2013),植物自身会通过调节细胞的渗透物质含量(赵法等,2010),使其渗透势保持在较高水平,但随着胁迫时间延长,胁迫程度超过植物自我调适范围,抗氧化酶清除自由基能力下降,细胞膜系统遭到破坏,电解质外渗,细胞膜相

对透性增加(崔晓涛等,2009),叶绿素分解,叶绿素含量下降,进而造成植物光合作用下降。

植物抗旱性是个复杂的生理调控过程,受到诸多体内环境因素影响,在水分亏缺环境下,植物各项生理指标所指示的胁迫抵抗力往往不一致,一般简单方法难以得到准确结果(赵一鹤等,2012;冯慧芳等,2011;赵兰等2011)。从油茶品种抗旱系数可以看出,不同品种生理指标的变化幅度不同,其相应的抗旱系数会得出不同抗旱结果,而且由相关系数矩阵可知,大部分指标间存在显著或极显著的相关性,它们所传达的信息重叠性严重,直接运用这些数据研究油茶幼苗的耐旱性会引起较大偏差。

综上所述,单一指标难以全面地体现油茶抗胁迫能力,而直接运用大量的油茶生理指标来评价其抗性也有不足之处,因此需要采用主成分分析等多元统计分析法对油茶幼苗的抗旱能力进行综合评价才具有一定的科学性。本研究采用主成分分析法,把最初的具有信息相关性的14个生理指标转换为3个新的彼此独立的综合指标(CI-CIII),由于主成分累积贡献率达到82.151%,故在原有信息不损失或损失很少情况下,不仅克服了生理指标间交叠性,也可以在此基础上利用各样品的综合指标值及其综合隶属函数值,得出权重值,避免了试验者确定权重的主观性,最后得到一个无量纲的纯数D值。这样使各油茶品种抗旱性的强弱具有可比性,客观地筛选出抗旱性强的品种,初步评定9个油茶无性系耐旱性强弱为长林59号>长林22号>长林53号>长林4号>长林40号>长林8号>长林3号>长林27号>长林18号。

参考文献:

AEBI H, 1984. Catalase *in vitro* [J]. Meth Enzymol, 105: 121-126.
 BRADFORD MM, 1976, A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding [J]. Analyt Biochem, 72: 248-254.
 BAI ZY, LI CD, SUN HC, et al, 2008. Principal component analysis and comprehensive evaluation on physiological indices of drought resistance in wheat substitution [J]. Sci Agric Sin(中国农业科学), 41(12): 4 264-4 272. [白志英, 李存东, 孙红春, 等, 2008. 小麦换代系抗旱指标的主成分分析及综合评价[J]. 中国农业科学, 41(12): 4 264-4 272.]
 CUI XT, YANG L, SHEN HL, 2009. Effects of drought stress on protective enzyme activities and seedling growth in *Populus bichofenii* × *P. pyramidalis* ROZ [J]. Bull Bot Res, 29(6): 701-707. [崔晓涛, 杨玲, 沈海龙, 2009. 干旱胁迫对新西伯利亚银白杨抗氧化系统和幼苗生长的影响[J]. 植物研究, 29

(6): 701-707.]
 FENG HF, XUE L, REN XR, et al, 2011. Physiological responses of four broad leaved seedlings to drought stress simulated by PEG [J]. Acta Ecol Sin, 31(2): 371-382. [冯慧芳, 薛立, 任向荣, 等, 2011. 4种阔叶幼苗对PEG模拟干旱的生理响应[J]. 生态学报, 31(2): 371-382.]
 FENG SL, CHENG HR, LI QQ, et al, 2013. Physiological responses of three *Camellia oleifera* in seedling stage under drought stress [J]. Acta Bot Boreal-Occident Sin, 33(8): 1 651-1 657. [冯士令, 程浩然, 李倩倩, 等, 2013. 3个油茶品种幼苗对干旱胁迫的生理响应[J]. 西北植物学报, 33(8): 1 651-1 657.]
 GAO JF, 2006. Plant physiology experiment technology [M]. Xi'an: The World Book Press: 196-197. [高俊风, 2006. 植物生理学实验技术[M]. 西安: 世界图书出版社: 196-197.]
 KOIZUMI M, YAMAGUCHI-SHINOZAKI K, TSUJI H, et al, 1993. Structure and expression of two genes that encode distinct drought-inducible cysteine proteinases in *Arabidopsis thaliana* [J]. Gene, 129(2): 175-182.
 LI YL, JIN ZX, GUAN M, et al, 2013. Effects of soil microbes on photosynthetic characteristics and chlorophyll fluorescence parameters of *Elsholtzia splendens* under copper stress condition [J]. Bull Bot Res, 33(6): 684-689. [李月灵, 金则新, 管铭, 等, 2013. 铜胁迫条件下土壤微生物对海州香薷光合特性和叶绿素荧光参数的影响[J]. 植物研究, 33(6): 684-689.]
 LI GZ, GONG M, 2005. Improvement of measurement method for superoxide anion radical in plant [J]. Acta Bot Yunnan, 27(2): 211-216. [李忠光, 龚明, 2005. 植物中超氧阴离子自由基测定方法的改进[J]. 云南植物研究, 27(2): 211-216.]
 LI HS, 2000. The experiment principle and technique on plant physiology and biochemistry [M]. Beijing: China Higher Education Press: 97-100. [李合生, 2000. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社: 97-100.]
 RAO MV, PALIYATH C, ORMROD DP, 1996. Ultraviolet-b and ozone-induced biochemical changes in antioxidant enzymes of *Arabidopsis thaliana* [J]. J Plant Physiol, 110: 125-136.
 WANG J, ZHOU MX, XU RG, 2007. Studies on selecting indices and evaluation methods for barley's (*Hordeum vulgare* L.) waterlogging tolerance [J]. Sci Agric Sin, 40(10): 2 145-2 152. [王军, 周美学, 许如根, 2007. 大麦耐湿性鉴定指标和评价方法研究[J]. 中国农业科学, 40(10): 2 145-2 152.]
 WANG SG, WANG ZL, WANG P, et al, 2011. Evaluation of wheat freezing resistance based on the responses of the physiological indices to low temperature stress [J]. Acta Ecol Sin, 31(4): 1 064-1 072. [王树刚, 王振林, 王平, 等, 2011. 不同小麦品种对低温胁迫的反应及抗冻性评价[J]. 生态学报, 31(4): 1 064-1 072.]
 XIE ZX, 1983. The fuzzy mathematics method in agricultural science [M]. Wuhan: Huazhong University Press: 99-193. [谢志贤, 1983. 农业科学中的模糊数学法[M]. 武汉: 华中理工大学出版社: 99-193.]
 YANG S, LIU ZY, ZHANG HX, 2013. Comprehensive evaluation of salt tolerance and screening identification indexes for three tree species [J]. Sci Sil Sin, 49(1): 91-98. [杨升, 刘正祥, 张华新, 2013. 3个树种苗期耐盐性综合评价及指标筛选[J]. 林业科学, 49(1): 91-98.]
 YAO XH, WANG KL, REN HD, et al, 2012. *Camellia* resources (下转第757页 Continue on page 757)