

杂交籼稻新组合抗旱性鉴定评价及预测研究

张 鸿^{1,2}, 朱从桦², 谭 杰², 李星月², 杨文钰¹, 康海歧³

(1. 四川农业大学农学院, 四川 成都 611130;
2. 四川省农业科学院植物保护研究所/农业部西南作物有害生物综合治理重点实验室, 四川 成都 610066;
3. 四川省农业科学院作物研究所, 四川 成都 610066)

摘 要: 为探索有效鉴定、评价及快速预测杂交籼稻新组合抗旱性的指标和方法, 选择 10 个杂交籼稻新组合和 1 个对照品种为材料, 采用盆栽试验进行正常水分和干旱处理。综合分析干旱胁迫条件下水稻产量及相关农艺性状的变化差异, 借助产量抗旱系数、模糊数学隶属函数、抗旱性综合评价 D 值对杂交籼稻新组合抗旱性进行鉴定和评价, 并通过主成分分析 (PCAM)、相关分析 (CAM) 和逐步回归分析 (SRM) 进行抗旱指标筛选。结果表明: 不同杂交籼稻新组合间抗旱能力存在显著差异, 通过抗旱性综合评价 D 值聚类分析得出 C₈—沪早 7A/成早恢 30241 属于强抗旱型, C₁—沪早 7A/Z4R(Si)、C₂—沪早 7A/成恢 177、C₇—沪早 7A/成早恢 30248、C₉—沪早 7A/成早恢 31708 和 C₁₀—沪早 7A/成早恢 30218 属于抗旱型, C₃—沪早 7A/成恢 178、C₄—沪早 7A/成早恢 31701 和 C₅—沪早 7A/成早恢 31704 属于中间类型, 冈优 725(对照品种) 和 C₆—沪早 7A/成早恢 31621 属于不抗旱型; 有效穗数、单穗实粒重和结实率的相对值可作为鉴定与评价杂交籼稻抗旱性的重要综合指标; 利用逐步回归构建水稻材料抗旱性预测模型 $D = (245.231 + 1.645X_2 + 2.712X_4 + 6.494X_6 + 19.401X_7 - 2.791X_{10}) \times 10^{-3}$ 能准确、快速预测杂交籼稻新组合抗旱能力(其中: D 为供试材料的抗旱综合评价 D 值, X₂、X₄、X₆、X₇ 和 X₁₀ 分别为水稻干旱胁迫下有效穗数、单穗实粒数、单穗总粒重、单穗实粒重和千粒重的相对值)。

关键词: 杂交籼稻; 抗旱性; 评价; 综合评价 D 值; 预测
中图分类号: S511 **文献标志码:** A

Study of identification, evaluation and prediction on the drought resistance of new indicia hybrid rice combinations

ZHANG Hong^{1,2}, ZHU Cong-hua², TAN Jie², LI Xing-yue², YANG Wen-yu¹, KANG Hai-qi³

(1. College agronomy of Sichuan Agricultural University, Chengdu, Sichuan 611130, China;
2. Institute of Plant Protection, Sichuan Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Integrated Pest Management on Crops in Southwest, Ministry of Agriculture, Chengdu, Sichuan 610066, China;
3. Crop Research Institute, Sichuan Academy of Agricultural Sciences, Chengdu, Sichuan 610066, China)

Abstract: In order to explore the effective methods and indexes for identifying, evaluating and predicting the drought resistance of new indicia hybrid rice combinations, eleven new indicia hybrid rice combinations (cultivars) were selected as experiment material and were planted in the drought stress environment and alternating wet and dry environment, respectively, in our pot experiment. The yield and related traits of these new indicia hybrid rice combinations had the different responses to drought stress environments. Drought resistance of materials above were identified and evaluated comprehensively by using drought-resistant coefficient, fuzzy membership function method, and comprehensive D value of each material's index. Drought resistance indexes were screened accurately by the principal component analytical method, correlation analysis method and stepwise regression method. The results showed that the tolerance to drought stresses of eleven indicia hybrid rice combinations (cultivars) were markedly different. By the results of cluster analysis in comprehensive D value, C₈ was classified as high drought-resistant strain; C₁, C₂, C₇, C₉ and C₁₀ as drought-resistant strains; C₃, C₄ and C₅ as intermediate types; Gangyou725 and C₆ as weak drought-resistant type. The related agronomic

收稿日期: 2016-12-28 修回日期: 2017-02-20
基金项目: 国家科技支撑计划项目(2012BAD04B13-2)
作者简介: 张 鸿(1970—), 男, 四川南江人, 研究员, 主要从事农业科研和项目管理工作。E-mail: zhh503@163.com。
通信作者: 杨文钰(1958—), 男, 四川大英人, 教授、博导, 主要从事作物栽培生理研究。E-mail: mssiyangwy@sicau.edu.cn。
康海歧(1972—), 男, 陕西岐山人, 副研究员, 主要从事水稻抗旱育种研究。E-mail: kanghq@126.com。

characters of effective panicle, filled grain weight per panicle and seed setting rate were important drought resistance indexes. The regression equation $D = (245.231 + 1.645X_2 + 2.712X_4 + 6.494X_6 + 19.401X_7 - 2.791X_{10}) \times 10^{-3}$, can be used to predict the drought-tolerance ability of new indicia hybrid rice combinations accurately and rapidly.

Keywords: indica hybrid rice; drought resistance; evaluation; comprehensive evaluation D value; prediction

水稻(*Oryza sativa* L.)是我国的主要粮食作物,也是重要的饲料及能源作物,目前水稻生产耗水量在农业生产中高居榜首。全球气候变暖,极端天气频现,区域性旱灾加重对水稻影响逐渐加剧^[1-4],快速高效地评价和选育抗旱水稻品种成为应对上述问题的重要手段,此外大面积推广和种植耐旱品种还能改善农业水资源利用现状。四川丘陵区水稻生长季的降雨不足,并且降雨量分布极其不均匀,水稻生产容易受季节性干旱的影响,进而导致稻谷产量下降^[5-6]。围绕优化耕作制度、改善稻田灌溉系统、改良节水栽培技术^[7]可以有效降低水稻受旱损失;近年来伴随育种资源日渐丰富和育种手段日新月异,充分挖掘并利用水稻材料的耐旱能力已成为新兴的应对措施^[8-10]。然而,水稻抗旱性鉴定受限于生育时期差异、抗旱鉴定指标多且乱、评价方法多样化等因素,采用单一或少数几个抗旱性评价指标势必会降低评价结果的准确性。以产量为核心,围绕形态特性、生理生化指标差异、水分利用差异、叶片衰老特征等方面,构建综合性指标体系来较全面地评价水稻的抗旱性尤显重要^[11-21],以往众多研究的评价方法多以隶属函数法为主^[22-24]。本研究采用产量抗旱系数、模糊数学隶属函数法、抗旱性综合评价 D 值法对杂交籼稻新组合抗旱性进行综合鉴定和评价,并通过主成分分析、相关分析和逐步回归分析方法对抗旱指标进行比较筛选,以期为四川丘陵地区准确筛选出高抗材料和加快本区水稻抗旱品种选育提供科学借鉴。

1 材料与方法

1.1 材料

供试材料为 10 个杂交籼稻新组合(四川省农业科学院作物所提供)和冈优 725(对照品种,当地主推高产品种),材料编码及名称见表 1。

1.2 试验设计

在四川省农业科学院试验基地进行大棚盆栽试验。采用 2 因素(A×B)完全随机设计,其中 A 因素为 2 种水分管理:干旱胁迫和正常水分,干旱胁迫为秧苗返青后至收获土壤含水量保持 60%田间持水量,正常水分为干湿交替灌溉;B 因素为 11 个供试材料,每个处理种植 5 盆,重复 3 次,合计 330 盆。

2014 年 4 月 15 日采用水育秧,5 月 30 日单苗移栽至钢化塑料盆(装土 7 kg·盆⁻¹,加水 1.5 kg·盆⁻¹,2~3 cm 浅水层),每盆移栽 3 株,呈三角形栽培,返青后土壤水分按照试验设计进行控管,其余管理同当地高产水稻田块。

表 1 材料的编码及名称
Table 1 The code and name of materials

材料编号 Material code	组合名称 Cultivars (Strains) name
CK	冈优 725
C ₁	沪早 7A/Z4R(Si)
C ₂	沪早 7A/成恢 177
C ₃	沪早 7A/成恢 178
C ₄	沪早 7A/成早恢 31701
C ₅	沪早 7A/成早恢 31704
C ₆	沪早 7A/成早恢 31621
C ₇	沪早 7A/成早恢 30248
C ₈	沪早 7A/成早恢 30241
C ₉	沪早 7A/成早恢 31708
C ₁₀	沪早 7A/成早恢 30218

1.3 测定内容

成熟期,每个处理选取 6 株代表性植株(3 次重复)进行测产;测定植株高、有效穗数、单穗总粒数、单穗实粒数、单穗空壳数、单穗总粒重、单穗实粒重、单穗空壳重和千粒重,测定方法参见任野胜等^[25]。

1.4 评价方法

1.4.1 干旱变异系数 干旱变异系数(Drought variability index)DI = |干旱胁迫某项指标变异系数 - 正常水分某项指标变异系数|/(干旱胁迫某项指标变异系数 × 0.5 + 正常水分某项指标变异系数 × 0.5) × 100%,其中,变异系数(Coefficient of variation)CV = (相同处理下某项指标的标准偏差值/相同处理下某项指标平均值) × 100%。

1.4.2 抗旱性评价方法

1) 抗旱性的直接评价。本文涉及的直接抗旱性评价标准为抗旱系数(Drought resistance coefficient)DC = 某材料干旱胁迫平均产量/某材料正常水分平均产量,抗旱指数(Drought resistance index)DI = 抗旱系数 × (某材料干旱胁迫平均产量/干旱胁迫所有参试材料平均产量)^[26]。

2) 抗旱性的综合评价。① 运用模糊数学中的

隶属函数值法进行抗旱性综合评估。如果某项指标与抗旱性成正相关关系,则采用正隶属函数计算,公式为 $U(x) = (x - x_{\min}) / (x_{\max} - x_{\min})$;如果某项指标与抗旱性成负相关关系,则采用反隶属函数计算,公式为 $U(x) = 1 - (x - x_{\min}) / (x_{\max} - x_{\min})$ 。其中, $U(x)$ 为隶属函数值, x 为干旱胁迫下各参试材料某项指标的测定值, $x_{\min}$ 和 $x_{\max}$ 分别对应所测材料相应指标的最小值和最大值。② 采用标准差系数赋予权重法进行抗旱性综合评价,权重的确定根据各指标相对值标准差系数的大小,计算各指标的权重 $q = x / \sum x$,式中 x 为各指标的标准差系数, $\sum x$ 为各指标标准差系数之和。用公式(1)计算各供试材料的抗旱综合评价 D 值,并对其抗旱能力进行强弱排序、聚类分析和逐步回归分析^[12,26]。

$$D = \sum_{j=1}^m [\mu(X_j) \cdot W_j] \quad j = 1, 2, \cdots, m \quad (1)$$

1.5 数据处理与分析

用 Microsoft Office Excel 2013 和 DPS 14.50 进行数据整理、运算和分析。

2 结果与分析

2.1 不同处理对水稻株高、产量相关性状的影响

从表 2 得出,水分处理极显著影响着水稻株高、

有效穗数、单穗总粒数、单穗实粒数、单穗空壳数、单穗总粒重、单穗实粒重、单穗空壳重、结实率、千粒重;不同水稻组合间,株高、有效穗数、单穗总粒重、单穗实粒重存在极显著差异,单穗空壳数存在显著差异。水分处理和水稻组合对上述部分指标的影响还存在显著交互作用。

2.2 参试材料的产量、抗旱系数和抗旱指数

从表 3 得出,水分胁迫导致各组合产量均有不同程度的降低,且各组合产量存在显著差异。说明尽管干旱胁迫程度较重,但胁迫处理仍展示出了组合间的差异。其中 CK(冈优 725)降幅最大,为 99.89%,其次为 C₆ 和 C₄,降幅分别为 98.83% 和 97.38%,C₈ 降幅最小,为 84.20%。根据抗旱系数大小对各组合的抗旱能力进行比较,C₈ 抗旱性最强,其次是 C₂,冈优 725 最弱。从抗旱指数的计算公式看出,它将材料在胁迫条件下的敏感度、产量水平和不同水分条件下的稳产性进行综合呈现,因此可以直接根据抗旱指数的数值大小进行组合抗旱能力的直接评价。以抗旱指数作为评价指标(将抗旱指数 ≥ 20 划分为抗旱,10 ~ 20 为弱抗旱,≤ 10 为不抗旱)^[26-28],可得:C₈ 为抗旱,C₁、C₂、C₉ 和 C₁₀ 为弱抗旱,C₃、C₄、C₅、C₆、C₇ 和冈优 725 为不抗旱。

表 2 水稻株高及产量相关性状的方差分析
Table 2 Variance analysis of plant height and yield-related traits of rice

处理 Treatments	株高 Plant height	有效穗数 Effective panicles	单穗总粒数 GNP	单穗实粒数 FGNP	单穗空壳数 UGNP	单穗总粒重 TGWP	单穗实粒重 FGWP	单穗空壳重 UGWP	结实率 Seed setting rate	千粒重 1000-grain weight
水分管理 Water management	893.63**	43.01**	96.36**	529.26**	153.52**	1095.54**	1292.34**	27.97**	884.64**	97.42**
水稻组合 Hybrid rice combinations	8.42**	5.02**	0.84	1.92	2.09*	6.39**	6.77**	1.28	1.96	1.70
水分管理×水稻组合 Water×Hybrid	3.84**	0.71 ^{ns}	4.91**	1.89	2.11*	7.86**	0.58	1.44**	2.44*	1.76

注:GNP—单穗总粒数,FGNP—单穗实粒数,UGNP—单穗空壳数,TGWP—单穗总粒重,FGWP—单穗实粒重,UGWP—单穗空壳重,*和**分别表示在 0.05 和 0.01 水平上差异显著,下同。

Note: GNP is grain number per panicle, FGNP is filled grain number per panicle, UGNP is unfilled grain number per panicle, TGWP is total grain weight per panicle, FGWP is filled grain weight per panicle, UGWP is unfilled grain weight per panicle, *, ** mean significantly different at 0.05 and 0.01 probability levels, respectively. The same below.

2.3 相对值分析

指标的相对值(某项指标的相对值 = 干旱处理的测量值/正常处理的测量值)消除试验材料间的固有差异,能更好地反映不同品种的抗旱性。从表 4 可得,各组合除有效穗数外,其余各性状均存在显著差异。株高、有效穗数、单穗总粒数、单穗实粒数、单穗空壳数、单穗总粒重、单穗实粒重、单穗空壳重、结实率、千粒重的相对值变化范围分别为 52.51% ~

72.80%、53.94% ~ 86.49%、17.49% ~ 94.12%、0.23% ~ 33.38%、212.34% ~ 1300.56%、3.41% ~ 23.00%、0.15% ~ 19.96%、125.22% ~ 639.08%、0.49% ~ 34.29%、54.56% ~ 90.73%。综上所述,单穗实粒数、单穗实粒重、结实率、单穗空壳重和单穗空壳数对干旱胁迫最敏感,干旱胁迫后组合间的变化区间较大,可作为水稻抗旱能力评价或筛选的初选指标。

表 3 水稻产量、抗旱系数和抗旱指数
Table 3 The yield, drought resistant coefficient
and drought resistance index of rice

组合代号 Combination code	对照产量 Control yield /(g·plant ⁻¹)	胁迫产量 Drought yield /(g·plant ⁻¹)	抗旱系数 Drought resistance coefficient	抗旱指数 Drought resistance index(×10 ²)
CK	19.96ab	0.02d	0.001	0.002
C ₁	21.98a	2.04ab	0.096	16.871
C ₂	17.28b	1.83b	0.111	15.815
C ₃	17.00b	0.60cd	0.037	2.225
C ₄	18.37ab	0.48cd	0.027	1.122
C ₅	17.78ab	0.64cd	0.031	1.939
C ₆	18.85ab	0.22d	0.013	0.223
C ₇	21.52a	1.05bcd	0.049	4.202
C ₈	19.70ab	3.11a	0.158	49.033
C ₉	20.90ab	1.85b	0.088	15.256
C ₁₀	19.92ab	1.42bc	0.071	12.084
F-值 F-Values	0.66 ^{ns}	3.06 [*]	2.777 [*]	2.582 [*]

注:同列数据后不同小写字母表示差异达 5% 显著水平,下同。
Note: Values followed by different small letters in the same column are significantly at the 5% level, the same below.

2.4 主成分分析

水稻抗旱性鉴定和评价指标间关系错综复杂、相互影响和制约,并且各指标反映水稻抗旱性存在强弱差异,因此采用主成分分析得出新的综合性抗旱指标进行抗旱性评价更佳(当所提取主成分的特征值的贡献率≥70%,就能用其概括性地分析事物的属性)。由表 5 可知,前 8 个成分的累积贡献率≥99.98%,其中前 3 个主成分累积贡献率

≥80.11%,可见,采用前 3 个主成分就能体现 10 个原始指标的信息量。

第一主成分的大小主要取决于单穗总粒重(0.452)、单穗实粒数(0.441)、单穗实粒重(0.427)、单穗总粒数(0.388)和结实率(0.382),它等同于 4.42 个原始指标的作用,囊括原始数据 44.21% 的信息量。水稻干旱胁迫后,单穗总粒重、单穗实粒数、单穗实粒重、单穗总粒数和结实率的相对值越大,则第一主成分越大。第二主成分大小主要取决于单穗空壳重(0.597)、单穗空壳数(0.560)、结实率(-0.339)和单穗实粒重(-0.267),它相当于 2.22 个原始指标的作用,涵盖原始数据 22.24% 的信息量。干旱胁迫后,单穗空壳重、单穗空壳数的相对值越大,单穗实粒重和结实率的相对值越小,则第二主成分越大。第三主成分大小主要取决于有效穗(0.713)、千粒重(-0.519)和株高(0.401),它等价于 1.37 个原始指标的作用,反映原始数据 13.67% 的信息量。干旱胁迫后,有效穗、株高的相对值越大,千粒重的相对值越小,则第三主成分越大。综上所述,第一主成分可被称作“穗重因子”,第二主成分可被称作“结实因子”,第三主成分可被称作“穗数因子”。

2.5 模糊隶属函数值与抗旱分析

水稻产量及产量构成等指标的隶属值与其抗旱性密切相关,可以利用各指标的隶属函数平均值的大小来反映水稻的抗旱性强弱。从表 6 可得,依照隶属函数平均值大小排序,各材料抗旱性为 C₈>C₂>C₇>C₁>C₁₀>C₉>C₄>C₃>CK>C₅>C₆,其中 C₈ 抗旱能力最强,C₆ 抗旱能力最差。

表 4 干旱胁迫下相关农艺性状的相对值/%
Table 4 The related agronomic characters of comparative value under drought stress

组合代号 Combination code	株高 Plant height	有效穗数 Effective panicles	单穗 总粒数 GNP	单穗 实粒数 FGNP	单穗 空壳数 UGNP	单穗 总粒重 TGWP	单穗 实粒重 FGWP	单穗 空壳重 UGWP	结实率 Seed setting rate	千粒重 1000-grain weight
CK	72.80a	75.31a	46.61e	0.23d	440.01bc	7.22cd	0.15d	282.08cd	0.49e	63.90bc
C ₁	66.35abc	81.71a	63.34bcde	15.23bc	498.05bc	17.90abc	11.17abc	309.92bcd	24.27bc	74.69abc
C ₂	73.79a	78.31a	81.72ab	17.34bc	566.48bc	23.00ab	13.93ab	394.50bcd	21.10bcd	80.39ab
C ₃	52.51f	53.94a	76.94abc	10.29bcd	522.09bc	16.46abc	6.91bcd	386.61bcd	15.63cde	66.70bc
C ₄	60.55cde	86.73a	69.70abcde	5.11cd	421.21bc	12.11bcd	3.33cd	272.91cd	7.39de	65.90bc
C ₅	58.37def	56.72a	51.90de	7.59bcd	675.15bc	17.94abc	5.80bcd	593.28abc	13.61cde	90.73a
C ₆	53.54ef	81.30a	17.49f	1.75d	212.34c	3.41d	1.16d	125.22d	10.40cde	65.97bc
C ₇	70.61ab	58.44a	94.12a	16.25bc	867.90ab	24.44a	8.30bcd	639.08ab	17.01cd	55.19c
C ₈	64.55bcd	75.21a	81.11abc	33.38a	542.53bc	25.43a	19.96a	256.14cd	41.56a	54.56c
C ₉	61.20cd	67.01a	56.32cde	20.39ab	339.04c	18.78ab	13.74ab	230.72d	34.29ab	67.12bc
C ₁₀	63.66bcd	86.49a	75.52abcd	12.38bcd	1300.56a	14.73abcd	7.20bcd	853.36a	17.68cd	60.00c
F-值 F-Values	7.99 ^{**}	0.99 ^{ns}	6.36 ^{**}	4.48 ^{**}	2.93 [*]	3.16 [*]	3.73 ^{**}	3.18 [*]	4.74 ^{**}	2.42 [*]

表 5 各成分的特征向量累积贡献率

Table 5 Eigenvectors and percentages o f accumulated contribution of principal components

项目 Item	特征向量 Eigenvector									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
株高 Plant height	0.180	0.179	0.401	0.649	- 0.397	- 0.416	0.096	0.093	0.056	0.037
有效穗数 Effective panicles	- 0.090	- 0.043	0.713	0.172	0.529	0.348	- 0.217	0.039	- 0.045	0.023
单穗总粒数 GNP	0.388	0.239	0.024	- 0.004	- 0.292	0.720	0.329	0.190	0.151	0.142
单穗实粒数 FGNP	0.441	- 0.228	0.051	- 0.079	0.091	- 0.116	- 0.124	- 0.534	0.413	0.502
单穗空壳数 UGNP	0.207	0.560	0.063	- 0.161	0.315	- 0.170	0.214	- 0.246	0.319	- 0.527
单穗总粒重 TGWP	0.452	0.002	- 0.188	0.153	- 0.115	0.148	- 0.740	0.013	- 0.109	- 0.378
单穗实粒重 FGWP	0.427	- 0.267	0.003	0.087	0.173	- 0.023	0.415	- 0.261	- 0.668	- 0.146
单穗空壳重 UGWP	0.162	0.597	- 0.135	- 0.082	0.263	- 0.177	- 0.170	0.208	- 0.374	0.529
结实率 Seed setting rate	0.382	- 0.339	- 0.013	- 0.131	0.285	- 0.258	0.113	0.704	0.251	- 0.050
千粒重 1000-grain weight	- 0.110	- 0.013	- 0.519	0.680	0.420	0.158	0.116	- 0.027	0.195	0.051
特征值 Eigenvectors	4.421	2.224	1.366	0.957	0.727	0.272	0.021	0.010	0.002	0.001
方差贡献率 Proportion	44.207	22.238	13.664	9.572	7.268	2.716	0.211	0.104	0.017	0.005
累计贡献率 Cumulative	44.207	66.445	80.109	89.681	96.948	99.664	99.875	99.979	99.996	100.000

表 6 水稻各指标相对值的隶属函数值

Table 6 The subordinate function values of each index relative value of rice

组合代号 Combination code	株高 Plant height	有效穗数 Effective panicles	单穗总粒数 GNP	单穗实粒数 FGNP	单穗空壳数 UGNP	单穗总粒重 TGWP	单穗实粒重 FGWP	单穗空壳重 UGWP	结实率 Seed setting rate	千粒重 1000-grain weight	平均值 Average	排序 Ordination
CK	0.953	0.652	0.380	0.000	0.209	0.173	0.000	0.785	0.000	0.742	0.389	9
C ₁	0.651	0.847	0.598	0.452	0.263	0.658	0.556	0.746	0.579	0.444	0.579	4
C ₂	1.000	0.743	0.838	0.516	0.325	0.890	0.696	0.630	0.502	0.286	0.643	2
C ₃	0.000	0.000	0.776	0.304	0.285	0.593	0.341	0.641	0.369	0.664	0.397	8
C ₄	0.378	1.000	0.681	0.147	0.192	0.395	0.161	0.797	0.168	0.687	0.461	7
C ₅	0.275	0.085	0.449	0.222	0.425	0.660	0.285	0.357	0.319	0.000	0.308	10
C ₆	0.049	0.834	0.000	0.046	0.000	0.000	0.051	1.000	0.241	0.685	0.291	11
C ₇	0.851	0.137	1.000	0.483	0.602	0.955	0.412	0.294	0.402	0.983	0.612	3
C ₈	0.566	0.649	0.830	1.000	0.303	1.000	1.000	0.820	1.000	1.000	0.817	1
C ₉	0.409	0.399	0.507	0.608	0.116	0.698	0.686	0.855	0.823	0.653	0.575	6
C ₁₀	0.524	0.993	0.757	0.367	1.000	0.514	0.356	0.000	0.419	0.850	0.578	5

2.6 参试材料各项指标的标准差系数、权重、综合评价 D 值及抗旱评价

从表 7 可得,对各性状相对值的标差系数归一化处理得到其权重,计算各个材料抗旱综合评价 D 值 = ∑各指标隶属值 × 权重,各材料综合评价 D 值排序为 C₈ > C₉ > C₂ > C₁ > C₇ > C₁₀ > C₃ > C₄ > C₅ > CK > C₆, C₈ 的综合评价 D 值最大,表明其抗旱能力最强; C₆ 的综合评价 D 值最小,表明其抗旱能力最差,这与隶属函数值评价结果基本一致。

采用欧式最长距离法对 D 值进行聚类分析(见图 1),可将参试材料划分为 4 类: C₈ 属于强抗旱型; C₁、C₂、C₇、C₉ 和 C₁₀ 为一类,属于抗旱型; C₃、C₄ 和 C₅ 为一类,属于中间类型; 冈优 725(对照品种)和 C₆ 属

于不抗旱型。

2.7 筛选抗旱性鉴定指标

2.7.1 综合评价 D 值与各项指标相对值的相关性

从表 8 可得,综合评价 D 值与单穗总粒重、单穗实粒数、单穗实粒重、结实率及单穗总粒数的相对值极显著相关,与株高、有效穗数、单穗空壳数、单穗空壳重和千粒重的相对值相关性不显著,表明干旱胁迫后,各相关农艺性状与水稻耐旱性的相关程度依次为单穗总粒重 > 单穗实粒数 > 单穗实粒重 > 结实率 > 单穗总粒数 > 单穗空壳数 > 单穗空壳重 > 株高 > 千粒重 > 有效穗数; 各农艺性状指标之间也存在相关性,其中结实率与单穗实粒数、单穗实粒重、单穗总粒重,单穗总粒重与单穗总粒数、单穗实粒数、

单穗实粒重,单穗总粒数与单穗实粒数之间存在显著或极显著正相关关系。但干旱胁迫下,结实率高的水稻组合并非单穗总粒重高,单穗总粒重高的材料并非单穗总粒数、单穗实粒数和单穗实粒重都高,单穗总粒数高的材料并非单穗实粒数高,表明各农艺性状指标所提供的信息存在叠加现象,且各指标

在耐旱性中所起的作用也不尽相同。从表 9 可得,综合评价 D 值与抗旱系数和抗旱指数的相关性达到极显著水平,说明利用综合评价 D 值对进行水稻抗旱能力评价更可靠。可见,单项指标评价水稻的耐旱性存在局限性,应选择与抗旱性相关性密切的多个指标进行综合评价。

表 7 水稻各指标的标准差系数、权重、综合评价 D 值及抗旱评价

Table 7 The standard deviation coefficient, index weight and D value of each material's comprehensive index and comprehensive evaluation on rice drought-resistance

组合代号 Combination code	株高 Plant height	有效穗数 Effective panicles	单穗总粒数 GNP	单穗实粒数 FGNP	单穗空壳数 UGNP	单穗总粒重 TGWP	单穗实粒重 FGWP	单穗空壳重 UGWP	结实率 Seed setting rate	千粒重 1000-grain weight	综合评价 D 值 CED	排序 Ordination
CK	0.025	0.025	0.029	0.000	0.024	0.017	(0.000)	0.099	0.000	0.027	0.246	10
C ₁	0.017	0.032	0.045	0.078	0.031	0.064	0.092	0.094	0.085	0.016	0.554	4
C ₂	0.026	0.028	0.063	0.089	0.038	0.086	0.115	0.079	0.073	0.010	0.609	3
C ₃	0.000	0.000	0.059	0.052	0.033	0.057	0.057	0.081	0.054	0.024	0.417	7
C ₄	0.010	0.038	0.052	0.025	0.022	0.038	0.027	0.101	0.025	0.025	0.362	8
C ₅	0.007	0.003	0.034	0.038	0.050	0.064	0.047	0.045	0.047	0.000	0.335	9
C ₆	0.001	0.032	0.000	0.008	(0.000)	0.000	0.008	0.126	0.035	0.025	0.236	11
C ₇	0.022	0.005	0.076	0.083	0.070	0.092	0.068	0.037	0.059	0.036	0.549	5
C ₈	0.015	0.025	0.063	0.172	0.035	0.097	0.166	0.103	0.146	0.037	0.858	1
C ₉	0.011	0.015	0.038	0.104	0.014	0.067	0.114	0.108	0.120	0.024	0.616	2
C ₁₀	0.014	0.038	0.057	0.063	0.117	0.050	0.059	0.000	0.061	0.031	0.490	6
SDC	0.357	0.519	1.033	2.348	1.598	1.320	2.267	1.723	2.001	0.501	—	—
IW	0.026	0.038	0.076	0.172	0.117	0.097	0.166	0.126	0.146	0.037	—	—

注: CED 表示综合评价 D 值, SDC 表示标准差系数, IW 表示权重。
Note: CED is D value of each material's comprehensive index, SDC is standard deviation coefficient, IW is index weight.

表 8 综合评价 D 值与各项农艺性状的相关系数

Table 8 Correlation coefficient matrix between related agronomic characters, drought coefficient, drought index and comprehensive value D

指标 Indexes	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	D
X1	1.00	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
X2	0.22	1.00	—	—	—	—	—	—	—	—	—
X3	0.42	-0.20	1.00	—	—	—	—	—	—	—	—
X4	0.23	-0.09	0.59*	1.00	—	—	—	—	—	—	—
X5	0.25	0.00	0.56	0.16	1.00	—	—	—	—	—	—
X6	0.37	-0.36	0.82**	0.85**	0.34	1.00	—	—	—	—	—
X7	0.24	-0.06	0.55	0.98**	0.09	0.84**	1.00	—	—	—	—
X8	0.19	-0.18	0.50	0.03	0.96**	0.32	-0.02	1.00	—	—	—
X9	0.03	-0.07	0.37	0.95**	0.02	0.71**	0.95**	-0.10	1.00	—	—
X10	-0.09	-0.17	-0.27	-0.27	-0.18	-0.02	-0.09	0.02	-0.18	1.00	—
D	0.31	-0.01	0.65*	0.99**	0.19	0.85**	0.97**	0.05	0.92**	-0.28	1.00

注: X1 ~ X10 分别为株高、有效穗数、单穗总粒数、单穗实粒数、单穗空壳数、单穗总粒重、单穗实粒重、单穗空壳重、结实率和千粒重的相对值, “ D ” 为综合评价 D 值; * 表示在 0.05 水平上显著相关, ** 表示在 0.01 水平上极显著相关。

Note: X1 ~ X10 were the related agronomic characters plant height, effective panicles, grain number per panicle, filled grain number per panicle, empty grain number per panicle, grain weight per panicle, filled grain weight per panicle, empty grain weight per panicle, seed setting rate and 1000-grain weight, respectively, D - Comprehensive value D ; * shows correlation is significant at the 0.05 level, ** shows correlation is significant at the 0.01 level.

表 9 隶属函数值、综合评价 D 值与抗旱系数、抗旱指数的相关系数

Table 9 The correlation coefficient of subordinate function values, D value of comprehensive evaluation and drought coefficient

指标 Indexes	隶属函数值 Subordinate function values	综合评价 D 值 D value of each material's comprehensive index	抗旱系数 Drought resistance coefficient	抗旱指数 Drought resistance index
隶属函数值 Subordinate function values	1.00	—	—	—
综合评价 D 值 D value of each material's comprehensive index	0.95 * *	1.00	—	—
抗旱系数 Drought resistance coefficient	0.90 * *	0.96 * *	1.00	—
抗旱指数 Drought resistance index	0.85 * *	0.90 * *	0.93 * *	1.00

注：* * 表示在 0.01 水平上极显著相关。
Note: * * shows correlation is significant at the 0.01 level.

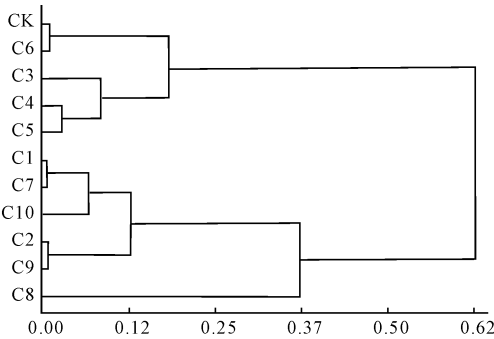


图 1 不同水稻组合的聚类图

Fig.1 Clustering diagram of different rice combinations

2.7.2 参试材料各项指标的变异系数和干旱变异指数 变异系数是反映数据离散程度的绝对值^[28]。从表 10 可见,对备筛选指标的干旱变异系数的进行分析得出:与正常水分处理相比较,不同杂交籼稻新组合经过干旱胁迫后各指标均会做出适应性变化。采用干旱变异指数量化这种差异变化,并将干旱变异指数数值大于 100% 的指标定义为对干旱胁迫敏感的指标,筛选出前 3 个干旱敏感的初选指标,依次是结实率、单穗实粒重和单穗实粒数,对应的干旱变异指数分别为 150.16%、114.84% 和 111.42%。

表 10 参试材料各项指标的变异系数和干旱变异指数

Table 10 Coefficient of variation and drought variability index of tested varieties

供试指标 Tested indicators	对照处理 Control treatment		胁迫处理 Drought treatment		干旱变异指数 Drought variability index/ %
	平均值 Average	变异系数 Coefficient of variation/ %	平均值 Average	变异系数 Coefficient of variation/ %	
株高 Plant Height	100.00	7.70	63.24	12.40	46.77
有效穗数 Effective panicles	21.30	19.69	15.42	30.53	43.17
单穗总粒数 GNP	119.60	18.90	74.02	30.56	47.15
单穗实粒数 FGNP	103.88	23.96	12.17	84.24	111.42
单穗空壳数 UGNP	15.72	64.37	61.85	33.58	62.87
单穗总粒重 TGWP	2.98	22.78	0.47	52.72	79.31
单穗实粒重 FGWP	2.90	23.44	0.23	86.66	114.84
单穗空壳重 UGWP	0.08	55.44	0.24	66.98	18.85
结实率 Seed setting rate	86.47	10.61	15.90	74.54	150.16
千粒重 1000-grain weight	28.52	20.59	18.55	7.04	98.08

2.8 水稻抗旱性预测和抗旱指标筛选

参试材料在受到干旱胁迫后,各项指标的相对值会因材料自身的特性不同而存在差异,采用逐步回归分析,抗旱性综合评价 D 值作因变量,各单项指标相对值作自变量,建立最优回归方程: $D = (245.231 + 1.645X_2 + 2.712X_4 + 6.494X_6 + 19.401X_7 - 2.791X_{10}) \times 10^{-3}$, 决定系数 $R^2 = 0.9993$, $F = 1401.71$ 。该回归方程中, X_2 、 X_4 、 X_6 、 X_7 和 X_{10} 分别为水稻干旱胁迫下有效穗数、单穗实粒数、单穗总粒

重、单穗实粒重和千粒重的相对值。11 个供试组合的抗旱综合评价 D 值与预测值极显著正相关($r = 0.9998$),表明使用此方程预测水稻抗旱能力的准确性很高。由方程可知,上述 5 个指标囊括了初选出的指标:单穗实粒数、单穗实粒重和千粒重。综上可得,在相同条件下,在鉴定水稻材料抗旱能力时优先测定上述 5 个指标,利用该方程计算综合评价 D 值,进而简单、快速预判其抗旱能力。

3 讨 论

水稻经过自然进化和人工选择,形成多种适应或抵抗干旱胁迫的机制,尽管众多科研工作者在鉴定和评估水稻全生育期抗旱性中依旧缺少统一的标准^[26-27,29-31],但是在选育抗旱品种、根据不同的生态环境进行良种良法栽培时,产量高低是判断水稻抗旱与否的直接指标,也因此导致鉴定结果存在局限性或不足之处。前人在鉴定和评价水稻组合的抗旱能力时采用产量抗旱系数和抗旱指数,其中产量抗旱系数主要反映水稻对干旱的敏感程度,弱化了水稻自身的丰产特性;产量抗旱指数将水稻抗旱性与基因型、生态环境和产量水平联系起来,弥补抗旱系数的不足,但运用此项指标开展评测工作时,仍需基于一定数量的水稻材料,对少量或单一水稻材料进行抗旱性评价时准确性下降^[16-17,32-34]。水稻抗旱能力强弱受环境因子、基因型差异等多种因素影响,加之不同的杂交水稻新组合的某项指标在评价抗旱性时重要程度不同,因此单一指标无法准确地鉴定杂交水稻新组合的抗旱性强弱^[12,15,18-19]。本研究中,采用各性状指标相对值的隶属函数平均值鉴定与评价杂交水稻新组合抗旱性的准确性和可靠度更高,能较好地弥补抗旱系数、抗旱指数及以单一指标进行抗旱性评价的不足。在此方法基础上,对各性状相对值的标准差系数归一化处理得到其权重,计算各材料抗旱综合评价 D 值^[26],抗旱综合评价 D 值在综合鉴定与评价水稻全生育期的抗旱性方面比隶属函数平均值的评价结果更加全面和确切,主要原因是:该方法将传统主观的、经验上的对水稻材料抗旱性的模糊判断变为定量数字表达,并且融合了各项指标相对值在鉴定水稻材料抗旱性时的重要程度。对各参试材料综合评价 D 值进行聚类分析可得: C_8 属于强抗旱型, C_1 、 C_2 、 C_7 、 C_9 、 C_{10} 属抗旱型, C_3 、 C_4 、 C_5 属中间类型,冈优 725(对照品种)和 C_6 属于不抗旱型。

水稻抗旱性鉴定与评价的指标主要包括农艺性状、形态解剖和生理生化指标 3 类,其中以农艺性状与其生产密切相关,但常被研究者轻视^[35]。本试验中以产量及产量构成为研究核心,采用干旱胁迫贯穿整个生育期的方法,以综合评价 D 值为因变量,各供试材料的测量指标相对值为自变量进行逐步回归分析,建立预测抗旱性的最优回归方程 $D = (245.231 + 1.645X_2 + 2.712X_4 + 6.494X_6 + 19.401X_7 - 2.791X_{10}) \times 10^{-3}$,回归方程中, X_2 、 X_5 、 X_6 、 X_7 、 X_9 分别为水稻干旱胁迫下有效穗数、单穗空壳数、单穗总粒重、单穗实粒重、结实率相关指标的相对

值。结合相关分析、干旱变异指数及各指标相对值变幅的筛选结果发现,单穗实粒重和结实率可作为水稻全生育期抗旱性的鉴定指标。水稻作为分蘖高产作物,其成熟期有效穗数在产量形成中占据决定性地位;干旱胁迫发生后,水稻分蘖发生适应性变化,直接影响后期灌浆,最终影响单穗空壳数、单穗总粒重和单穗实粒重。结实率和抗旱能力密切相关可能是因水稻在受到水分胁迫时,穗的正常分化受到干扰,生育后期植株早衰严重,籽粒灌浆被抑制,为在逆境下繁殖种子,迫使其以结实率下降做出响应。

4 结 论

① 与抗旱指数、隶属函数平均值相比,利用综合评价 D 值能更加准确地鉴定、评价水稻材料的抗旱能力,对各参试材料综合评价 D 值进行聚类分析可得: C_8 属于强抗旱型, C_1 、 C_2 、 C_7 、 C_9 、 C_{10} 属抗旱型, C_3 、 C_4 、 C_5 属中间类型,冈优 725(对照品种)和 C_6 属于不抗旱型。② 相同条件下,借助水稻抗旱性鉴定回归模型 $D = (245.231 + 1.645X_2 + 2.712X_4 + 6.494X_6 + 19.401X_7 - 2.791X_{10}) \times 10^{-3}$ (其中: D 为供试材料的抗旱综合评价 D 值, X_2 、 X_4 、 X_6 、 X_7 和 X_{10} 分别为水稻干旱胁迫下有效穗数、单穗实粒数、单穗总粒重、单穗实粒重和千粒重的相对值)能方便快捷准确地预测杂交水稻新组合的抗旱能力。③ 干旱胁迫后,有效穗数、单穗实粒重和结实率的相对值是有效鉴定、评价水稻杂交新组合抗旱性的首选指标。

参 考 文 献:

- [1] 李 玥.全球半干旱气候变化的观测研究[D].兰州:兰州大学,2015:120-131.
- [2] 符淙斌,马柱国.全球变化与区域干旱化[J].大气科学,2008,32(4):106-114.
- [3] 王 婷,袁淑杰,王 婧,等.四川省水稻干旱灾害承灾体脆弱性研究[J].自然灾害学报,2013,22(5):221-226.
- [4] IPCC. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2007.
- [5] 庞艳梅,陈 超,马振峰.未来气候变化对四川省水稻生育期气候资源及生产潜力的影响[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2015,43(1):66-76.
- [6] 张建平,刘宗元,何永坤,等.西南地区水稻干旱时空分布特征[J].应用生态学报,2015,26(10):3103-3110.
- [7] F Yao, J Huang, K Cui, et al. Agronomic performance of high[J]. Field Crops Research, 2012,126(1):16-22.
- [8] 王士梅,沈国霞,陈秀晨,等.不同水(陆)稻品种(系)干旱胁迫效应分析评价[J].中国农学通报,2015,31(6):16-23.
- [9] 段 骅,唐 琪,剧成欣,等.抽穗灌浆早期高温与干旱对不同

水稻品种产量和品质的影响[J]. 中国农业科学, 2012, 45(22): 4561-4573.

[10] 段 骅, 苏京平, 傅 亮, 等. 耐热耐旱性不同水稻品种的农艺和生理性状[J]. 植物生理学报, 2015, 51(10): 1658-1668.

[11] 敬礼恒. 水稻抗旱鉴定与苗期生理基础[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2013: 22-35.

[12] 王贺正. 水稻抗旱性研究及其鉴定指标的筛选[J]. 成都: 四川农业大学, 2007: 31-40.

[13] 田又升, 谢宗铭, 吴向东, 等. 水稻种质资源萌发期抗旱性综合鉴定[J]. 干旱地区农业研究, 2015, 33(4): 179-186.

[14] 王 毅. 水稻抗旱性的主要鉴定指标及其抗旱相关基因的分子生物学研究进展[J]. 热带农业科学, 2009, 29(2): 40-45.

[15] 程建峰, 潘晓云, 刘宜柏, 等. 水稻抗旱性鉴定的形态指标[J]. 生态学报, 2005, 22(11): 325-333.

[16] 王贺正, 马 均, 李旭毅. 水稻开花期抗旱性鉴定指标的筛选[J]. 作物学报, 2005, 31(11): 1485-1489.

[17] 胡标林, 余守武, 万 勇, 等. 东乡普通野生稻全生育期抗旱性鉴定[J]. 作物学报, 2007, 33(3): 425-432.

[18] 王贺正, 马 均, 李旭毅, 等. 水稻种质芽期抗旱性和抗旱性鉴定指标的筛选研究[J]. 西南农业学报, 2004, 17(5): 55-60.

[19] 敬礼恒, 陈光辉, 刘利成, 等. 水稻种子萌发期的抗旱性鉴定指标研究[J]. 杂交水稻, 2014, 29(3): 68-72.

[20] 高吉寅, 胡荣海, 路 漳, 等. 水稻等品种苗期抗旱生理指标的探讨[J]. 中国农业科学, 1984, (4): 43-47.

[21] 安永平, 强爱玲, 张媛媛, 等. 渗透胁迫下水稻种子萌发特性及抗旱性鉴定指标研究[J]. 植物遗传资源学报, 2006, 7(4): 47-52.

[22] 胡标林, 李名迪, 万 勇, 等. 我国水稻抗旱性鉴定方法与指标研究进展[J]. 江西农业学报, 2005, 17(2): 57-61.

[23] 李 艳, 马 均, 王贺正, 等. 水稻品种苗期抗旱性鉴定指标筛选及其综合评价[J]. 西南农业学报, 2005, 18(3): 27-32.

[24] 寇姝燕, 邓剑川, 杨 旭, 等. 我国水稻抗旱性主要指标及抗旱性鉴定方法研究进展[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(17): 9244-9246.

[25] 任野胜, 肖培村, 黄 湘, 等. 几个香稻保持系主要农艺性状和品质性状研究[J]. 中国稻米, 2005, (1): 16-18.

[26] 胡标林, 余守武, 万 勇, 等. 东乡普通野生稻全生育期抗旱性鉴定[J]. 作物学报, 2007, 33(3): 425-432.

[27] 张灿军, 姚子卿, 王育红, 等. 早稻抗旱性鉴定方法与指标研究—I 鉴定方法与评价指标[J]. 干旱地区农业研究, 2005, 23(3): 33-36.

[28] 曹 兴, 万 瑜, 胡双全, 等. 干旱条件下吐鲁番盆地相对湿度指数变化特征分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2013, 79(6): 42-49.

[29] 张安宁, 王飞名, 余新桥, 等. 基于土壤水分梯度鉴定法的栽培稻抗旱标识品种筛选[J]. 作物学报, 2008, 34(11): 2026-2032.

[30] 钱晓晴, 沈其荣, 柏彦超, 等. 旱作条件下不同水稻品种响应特征[J]. 作物学报, 2004, 30(6): 555-562.

[31] 程建峰, 何冬发, 刘宜柏, 等. 杂交稻新组合产量及其抗旱性的鉴定与评价[J]. 安徽农学通报, 2007, 13(1): 66-69.

[32] 李 艳, 马 均, 王贺正. 水稻品种苗期抗旱性鉴定指标筛选及其综合评价[J]. 西南农业学报, 2005, 18(3): 250-255.

[33] 周国雁, 伍少云, 隆文杰, 等. 云南省不同小麦资源种子萌发期抗旱性相关性状差异及与抗旱指数、抗旱系数的相关性[J]. 华南农业大学学报, 2015, 36(2): 13-18.

[34] 栗雨勤, 张文英, 王有增, 等. 作物抗旱性鉴定指标研究及进展[J]. 河北农业科学, 2004, 8(1): 58-61.

[35] 敬礼恒, 刘利成, 梅 坤, 等. 水稻抗旱性能鉴定方法及评价指标研究进展[J]. 中国农学通报, 2013, 29(12): 8-12.

(上接第 117 页)

[6] Zhang H M, Zhang L S, Liu L, et al. Changes of dehydrin profiles induced by drought in winter wheat at different developmental stages[J]. *Biologia Plantarum*, 2013, 57(4): 797-800.

[7] 张宏一, 朱志华. 植物干旱诱导蛋白研究进展[J]. 植物遗传资源学报, 2004, 5(3): 268-270.

[8] 李富生, 何丽莲. 植物对非生物胁迫的生理响应及甘蔗抗旱抗寒性研究进展[J]. 甘蔗, 2004, 11(1): 31-37.

[9] 张 凯, 冯 起, 王润元, 等. CO₂ 浓度升高对春小麦灌浆特性及产量的影响[J]. 中国农学通报, 2014, 30(3): 189-195.

[10] Herrero A, Zamora R. Plant responses to extreme climatic events: a field test of resilience capacity at the southern range edge[J]. *PLoS One*, 2014, 9(1): 1-12.

[11] Levitt J. High-temperature stress in responses of plants to environmental stresses, chilling, freezing and high temperature stresses[J]. Academic Press, 1980, 1: 347-445.

[12] Shinozaki K, Yamaguchi - Shinozaki K. Molecular responses to dehydration and low temperature: differences and cross - talk between two stress signaling pathways[J]. *Current Opinion in Plant Biology*, 2000, 3(3): 217-223.

[13] Chakrabortee S, Boschetti C, et al. Hydrophilic protein associated with desiccation tolerance exhibits broad protein stabilization function[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2007, 104(46): 18073-18078.

[14] Bohnert H J, Nelson D E, et al. Adaptations to environmental stresses[J]. *Plant Cell*, 1995, 7(7): 1099-1111.

[15] 张正斌. 植物对环境胁迫整体抗逆性研究若干问题[J]. 西北农业学报, 2000, 9(3): 112-116.

[16] 徐慧妮, 王秀峰. 植物生长发育逆境胁迫及其研究方法[J]. 园艺学进展, 2006, (7): 887-892.

[17] Kurusu T, Kuchitsu K, Tada Y. Plant signaling networks involving Ca²⁺ and Rboh/Nox - mediated ROS production under salinity stress[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2015, 6(7): 427.

[18] Durian G, Rahikainen M, Alegre S. Protein phosphatase 2A in the regulatory network underlying biotic stress resistance in plants[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2016, 6(7): 1-17.

[19] 陈 雷, 李 磊, 李金花, 等. 植物 LEA 蛋白及其功能[J]. 中国农学通报, 2009, 25(24): 143-146.

[20] 林秀琴, 袁 坤, 王真辉, 等. 植物响应逆境胁迫的比较蛋白质组学研究进展[J]. 杭州农业科技, 2002, 2: 15-18.