

云瑞甘蔗创新亲本抗旱性综合评价

田春艳, 边 芯, 俞华先, 郎荣斌, 董立华, 桃联安, 周清明, 安汝东, 孙有芳, 杨李和, 经艳芬
(云南省农业科学院甘蔗研究所瑞丽育种站, 瑞丽 678600)

摘要: 甘蔗基础杂交以种质创新为主, 是甘蔗育种的基础和前提。为建立规范的云瑞甘蔗亲本抗旱性鉴定方法, 并对所创造的具有新血缘的种质资源进行抗旱性评价。以 36 份云瑞创新亲本为研究材料, 设置正常供水和水分胁迫两个处理, 测定水胁迫下甘蔗叶片质膜透性、丙二醛、脯氨酸、叶绿素荧光参数等 12 个性状指标, 结合抗旱系数 DC、综合抗旱系数 CDC、加权抗旱系数 WDC、主成分、隶属函数、聚类以及灰色关联度和逐步回归分析方法, 对其抗旱性进行综合评价并筛选适宜指标。结果表明: 干旱对甘蔗亲本各指标有极显著影响, 配对处理 t 检验各指标处理间 $P=0.0001$, 所选指标对干旱胁迫响应较敏感; 主成分分析表明 7 个主成分可代表甘蔗亲本抗旱性 89.2686% 的原始数据信息量, 可概括为光合作用因子、水分利用因子和生理调控因子 3 类; 系统聚类分析将 36 份亲本材料划分为高度抗旱型 (I)、中高度抗旱型 (II)、中度抗旱型 (III)、低度抗旱型 (IV) 和敏感型 (V) 5 类, 所占比例分别为 25%、25%、25%、13.9%、11.1%, 筛选出云瑞 14-195、云瑞 15-88、云瑞 11-98、云瑞 11-256、云瑞 15-158、云瑞 14-78、云瑞 13-26、云瑞 12-137 和云瑞 15-73 共 9 份抗旱材料; 通过灰色关联度分析和逐步回归分析, 进一步明确了质膜透性、丙二醛、脯氨酸、自由水/束缚水等是甘蔗抗旱性评价的关键指标, 可有效评价甘蔗种质抗旱性。为建立云瑞甘蔗亲本规范的抗旱鉴定体系, 大规模筛选抗旱甘蔗种质资源提供科学依据。

关键词: 甘蔗亲本; 抗旱性评价; 生理生化指标; 叶绿素荧光参数; 基础杂交

Comprehensive Evaluation of Innovative Yunrui Sugarcane Parents for Drought Resistance

TIAN Chun-yan, BIAN Xin, YU Hua-xian, LANG Rong-bin, DONG Li-hua, TAO Lian-an,
ZHOU Qing-ming, AN Ru-dong, SUN You-fang, YANG Li-he, JING Yan-fen

(Ruili Breeding Station, Sugarcane Research Institute, Yunnan Academy of Agricultural Sciences, Ruili 678600)

Abstract: Basic-cross is an approach mainly used for germplasm enhancement, which served as the basis and premise in sugarcane breeding. To establish a normative drought resistance identification system for Yunrui sugarcane parents and evaluate new blood parents from basic-crosses for drought resistance, thirty-six Yunrui sugarcane parents from basic-crossing were used as materials treated by artificial water stress, including normal water supply (as control) and water stress. Twelve indices including PMP, contents of MDA, PRO, chlorophyll fluorescence and other parameters were measured. Then drought resistance coefficient (DC), comprehensive drought resistance coefficient (CDC), drought resistance comprehensive evaluation value (D), weight drought resistance coefficient (WDC), subordinate function analysis, principal component analysis, clustering analysis, grey relational analysis and stepwise regression analysis were applied to identify the drought resistance level

收稿日期: 2018-08-22 修回日期: 2018-10-08 网络出版日期: 2018-11-13

URL: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.4996.S.20181112.0930.003.html>

第一作者研究方向为甘蔗种质资源的研究与利用, E-mail: tianchy89@126.com

通信作者: 经艳芬, 研究方向为甘蔗遗传育种, E-mail: rjyf@126.com

基金项目: 云南省应用基础研究项目 (2015FA034); 国家自然科学基金 (31360358); 云南省科技创新人才计划 (2014HCO15); 云南省甘蔗遗传改良重点实验室开放基金 (2015DG015-05, 2015DG015-09); 云南省农业科学院科技创新及成果转化 (2018BB02901)

Foundation project: Yunnan Applied Basic Research Project (2015FA034), National Natural Science Foundation of China (31360358), Technological Innovation Talent Scheme of Yunnan Province (2014HCO15), Yunnan Key Laboratory of Sugarcane Genetic Improvement Project (2015DG015-05, 2015DG015-09), Technological Innovation and Achievements Transformation of Yunnan Academy and Agricultural Sciences (2018BB02901)

and screen its closely related indices. Firstly, the results indicated that moisture stress had significant effects on all indices at p value 0.0001, which suggested that drought stress was proper and all the indices selected were sensitive to drought. Secondly, the principal component analysis results revealed that seven principal components could represent 89.2686% of the original data information of sugarcane parents drought resistance. These factors could be divided into three groups and named photosynthesis factor, moisture utilization factor and physiological regulation factor. Thirdly, The clustering analysis results showed that thirty-six tested materials could be divided into five groups including high resistance to drought (group I), moderately high resistance to drought (group II), moderate resistance to drought (group III), each accounting for 25% respectively, low resistance to drought (group IV) accounting for 13.9% and sensitive to drought (group V) accounting for 11.1%. Nine elite materials Yunrui14-195, Yunrui15-88, Yunrui11-98, Yunrui11-256, Yunrui15-158, Yunrui14-78, Yunrui13-26, Yunrui12-137 and Yunrui15-73 were identified to have high resistance to drought. The grey relational analysis and stepwise regression analysis results further confirmed PMP, MDA, PRO and the proportion of free water and bound water were the key resistance indices with close correlation to drought, which could efficiently improve sugarcane drought resistance evaluation work. Thus, the established approach might become useful in large-scale screening for drought resistant sugarcane resources.

Key words: sugarcane parents; drought resistance evaluation; physiological and biochemical indices; chlorophyll fluorescence parameters; basic-cross

甘蔗不仅是最主要的糖料作物和重要能源作物,也是热带和亚热带地区的重要经济作物,其需求量在不断增长^[1-2]。甘蔗杂交育种包括基础性杂交和生产性杂交两部分,而甘蔗基础性杂交以种质创新为主,是甘蔗杂交育种的基础性工作。广西、云南为国家甘蔗“双高”基地建设主产区,而在云南蔗区,甘蔗耕地多为山地和旱坡地,全国旱地植蔗面积高达 85% 以上,干旱已成为制约云南蔗糖业发展的关键因子之一。因此,筛选出与干旱响应密切相关指标,结合多种分析方法开展甘蔗种质资源的抗旱性鉴定及综合评价,筛选出高度抗旱型甘蔗种质对甘蔗抗旱育种至关重要。

国内外在作物抗旱性评价、抗旱指标选择及统计分析方法等方面开展了大量研究^[3-5]。植物抗旱性评价指标主要有形态结构^[6-7]、生理生化^[8-9]和生长产量等指标^[10-11]。高三基等^[12]利用主成分、相关、聚类和判别分析,探讨所选生理生化指标与甘蔗品种抗旱性间关系,结果表明质膜透性、丙二醛、Fv/Fm、Fv/Fo、 $\Delta Fv/Fo$ 和 $\Delta Fv/Ft$ 对甘蔗抗旱性分类影响显著。叶绿素荧光参数具有简便、快速的特点,且与植物光合作用过程密切相关,在植物抗旱性评价中也备受关注^[13-14]。罗俊等^[15]探讨了甘蔗苗期叶绿素荧光参数与抗旱性的关系,研究表明甘蔗叶绿素荧光参数受抑程度与其抗旱性强弱密切相关,指出荧光参数的动态变化可作为甘蔗抗旱性强弱诊断指标。随着抗旱研究的发展,作物抗旱性评价方

法出现多元化,结合多指标、多种分析方法的综合评价技术已在其他作物上被广泛应用^[16-18]。汪灿等^[19-21]利用形态指标结合相关、频次、主成分、灰色关联度、隶属函数、聚类和逐步回归分析的综合评价方法,分别筛选出一批评价薏苡萌芽期、苗期和成株期抗旱性指标。谢小玉等^[22]利用综合抗旱系数、聚类分析、灰色关联度相结合的方法评价油菜苗期抗旱性,较好地揭示了指标性状与抗旱性间的关系,认为叶片相对含水量、丙二醛、叶面积可作为油菜抗旱种质筛选的依据。本团队前期利用模糊隶属函数、聚类和灰色关联度分析对 5 种气候生态型割手密的杂交后代进行了耐旱性评价,结果表明质膜透性、丙二醛、叶绿素含量、防御酶活性与甘蔗抗旱性关联度较高,可作为甘蔗抗旱性评价的优良指标^[23],但评价方法相对单一,多指标、多种分析方法的综合评价在甘蔗抗旱研究中应用较少。

本单位长期从事甘蔗种质创新,通过杂交、回交、多个栽培原种杂交后代回交品种等基础性杂交方式创制了大批含云南甘蔗野生资源的云瑞系列甘蔗创新种质。云瑞甘蔗种质资源含云南不同生态型割手密 (*Saccharum spontaneum* L.),可挖掘利用的抗逆性基因丰富,且对解决甘蔗血缘网络化问题具有重要意义。目前,利用云瑞甘蔗亲本生产杂交花穗选育甘蔗新品种的育种部门约 15 个,涵盖了全国甘蔗育种单位的 100%。已育成云瑞 05-292、云瑞 99-113、云瑞 99-155、云瑞 05-282 等优良亲本对外

提供利用,利用云瑞甘蔗亲本育成了云蔗 05-596、云蔗 06-160 等品种,育成云瑞 05-346、云瑞 09-895、云瑞 09-826 等大批优良品系,育种成效显著。然而,对这些创新种质抗旱性的认识以及优良抗旱基因的发掘利用尚处于起步阶段,这严重阻碍了云瑞甘蔗基础杂交种质的升级利用和推广应用。因此,为加快提高甘蔗种质的利用效率,本研究利用前期评价筛选出的 PMP、MDA 含量、CHL 含量等优良抗旱性指标,增加叶绿素荧光参数指标,采用综合评价法对 36 份云瑞亲本种质进行抗旱性鉴定,筛选抗旱型种质,探索可靠的甘蔗抗旱性评价方法。以

期建立规范的云瑞甘蔗种质抗旱性鉴定体系并对具有新血缘的甘蔗种质进行抗旱性评价,为云瑞创新种质资源在甘蔗育种上的进一步利用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试材料共 36 份,来源于 35 个基础性杂交组合,含野生种、栽培原种血缘的甘蔗创新亲本(表 1)。其中,杂交世代以杂交或回交野生种、栽培原种的杂交代数计算。

表 1 供试材料

Table 1 The materials tested in this study

编号 Number	名称 Name	杂交世代 Generation	母本 × 父本 Female × Male	编号 Number	名称 Name	杂交世代 Generation	母本 × 父本 Female × Male
YR08-1276	云瑞 08-1276	BC ₅	云瑞 03-11 × Rb72-454	YR14-100	云瑞 14-100	BC ₂	云瑞 11-256 × Q124
YR08-2138	云瑞 08-2138	BC ₂	云瑞 03-315 × 粤糖 00-236	YR14-122	云瑞 14-122	BC ₂	福农 99-20169 × 云瑞 09-44
YR10-1229	云瑞 10-1229	BC ₂	云瑞 08-722 × 云瑞 99-151	YR14-138	云瑞 14-138	BC ₂	云蔗 05-51 × 云瑞 11-134
YR10-1284	云瑞 10-1248	BC ₂	云瑞 99-711 × 云瑞 99-537	YR14-195	云瑞 14-195	F ₂	云瑞 09-168 × 云瑞 08-475
YR10-550	云瑞 10-550	BC ₂	云瑞 05-782 × 云瑞 03-80	YR14-248	云瑞 14-248	BC ₃	云瑞 09-164 × 云瑞 05-724
YR10-913	云瑞 10-913	F ₁	普瓢果蔗 × Badila	YR14-268	云瑞 14-268	BC ₂	云瑞 09-167-1 × 云瑞 11-111
YR11-101	云瑞 11-101	F ₂	POJ213 × 云瑞 09-156	YR14-78	云瑞 14-78	BC ₂	云瑞 10-1241 × 云蔗 94-343
YR11-103	云瑞 11-103	F ₂	POJ213 × 云瑞 09-156	YR14-89	云瑞 14-89	BC ₂	云瑞 11-206 × 粤甘 24
YR11-256	云瑞 11-256	F ₂	云瑞 08-99 × 云瑞 08-472	YR15-32	云瑞 15-32	F ₂	云瑞 09-150 × C ₀ 285
YR11-98	云瑞 11-98	F ₂	POJ213 × Zopilata	YR15-37	云瑞 15-37	F ₂	云瑞 09-162 × 崖城 58-43
YR12-137	云瑞 12-137	BC ₄	CP94-1100 × 云瑞 05-160	YR15-73	云瑞 15-73	F ₂	云瑞 09-176 × 崖城 58-43
YR12-153	云瑞 12-153	BC ₁	POJ213 × 云瑞 03-393	YR15-88	云瑞 15-88	BC ₂	C ₀ 285 × 云瑞 03-73
YR12-204	云瑞 12-204	BC ₃	粤糖 00-236 × 云瑞 09-p61	YR15-90	云瑞 15-90	BC ₂	CP94-1100 × 云瑞 11-103
YR13-3	云瑞 13-3	F ₂	云瑞 09-152 × 河八王	YR15-104	云瑞 15-104	BC ₂	福农 15 × 云瑞 11-103
YR13-18	云瑞 13-18	BC ₄	zopilata × 云瑞 05-767	YR15-115	云瑞 15-115	BC ₂	粤糖 82-882 × 云瑞 11-103
YR13-26	云瑞 13-26	BC ₃	德蔗 93-94 × zopilata	YR15-146	云瑞 15-146	BC ₂	云瑞 11-256 × 德蔗 03-68
YR13-49	云瑞 13-49	F ₂	云瑞 09-169 × 云瑞 10-915	YR15-153	云瑞 15-153	BC ₂	云蔗 03-194 × 云瑞 03-78
YR14-19	云瑞 14-19	BC ₂	桂糖 97-40 × 云瑞 11-22	YR15-158	云瑞 15-158	BC ₂	福农 99-20169 × 云瑞 10-1182

1.2 试验方法

抗旱性鉴定试验于 2017 年在云南省农业科学院甘蔗研究所瑞丽育种站温室进行,采用桶栽人工控水干旱胁迫的方法。试验材料于 2017 年 3 月初进行桶栽种植,每桶 5 个芽,每个材料种植 9 桶,浇水管理供其正常生长发育。于 2017 年 9 月下旬(甘蔗伸长期)把材料分成 2 组,每桶保留 5 株。第 1 组 3 桶(作为对照组),第 2 组 6 桶(干旱胁迫处

理组),各处理设置 3 次重复。第 1 组(CK)继续供水;第 2 组停止供水,进行水分胁迫处理(T)。水分胁迫 5 d 后,处理组材料清晨无“吐水”,部分叶片叶尖呈轻微萎蔫状态,此时每桶复水 2 L,复水后停止供水,继续胁迫,观察其干旱胁迫后再生长情况,待一半材料叶部卷曲,部分叶片枯黄,呈严重缺水等症状,此时于 8:00 开始取样,进行抗旱性指标的测定。

1.3 抗旱性指标性状测定

参照李忠光等^[24]方法测定质膜透性(PMP, plasma membrane permeability)、丙二醛(MDA, malondialdehyde)、脯氨酸(PRO, proline)含量、叶片相对含水量(RWC, relative water content)、自由水与束缚水含量的比值(RFB, ratio of free water to bound water)、超氧化物歧化酶活性(POD, peroxidase);采用 SPAD 叶绿素仪测定叶绿素含量(CHL, chlorophyll);叶面积用直尺进行手工测量,其中叶片基部到中部面积按梯形面积计算,叶片中部到叶尖面积按三角形面积计算,并计算+1~+3 绿叶面积比例(GLA, green leaf area ratio);叶绿素荧光参数,最小荧光 F_0 、最大荧光 F_M 、PS II 光能转换效率参数 F_v/F_M 、PS II 光能潜在活性参数 F_v/F_0 利用基础性调制叶绿素荧光仪(JUNIOR-PAM)测定,测定前先进行暗处理 30 min,测量 F_v/F_M 前调解测量光强度,确保实时荧光(Ft)小于 600。其中 POD 酶活性的测定用心叶, PMP、MDA、PRO、RWC 的测定用+1 叶, CHL、叶面积连续测定了+1~+3 叶。

1.4 数据统计分析

用 Excel 整理数据, DPS ver 16.05 进行统计分析。参照谢小玉等^[22]、罗俊杰等^[5]、汪灿等^[19-21]的方法,采用配对处理 t 检验对对照组、处理组进行各指标测定值平均数的差异显著性检测。按公式(1)、(2)分别计算各测定指标的抗旱系数(DC, drought resistance coefficient)和研究材料综合抗旱系数(CDC, comprehensive drought resistance coefficient)。式中 x_i 表示干旱胁迫(处理组 T)指标测定值, CK_i 表示正常供水(对照组 CK)测定值。

$$DC = \frac{x_i}{CK_i} \quad (1)$$

$$CDC = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n DC \quad (2)$$

根据各指标 DC 值进行主成分分析。按公式(3)计算因子权重系数(ω_i)、按公式(4)计算各基因型各综合指标的隶属函数值[$\mu(x_i)$](由于本研究所选指标与作物抗旱性存在正相关和负相关关系,所以[$\mu(x_i)$]的计算与上述参考文献分析方法有所改动),当指标与抗旱性正相关时用(4-1),负相关用(4-2)进行反转。按公式(5)计算抗旱性度量值 D。式中 P_i 为主成分分析中第 i 个指标贡献率,表示其在所有指标中的重要程度; x_i 、 $x_{i \max}$ 和 $x_{i \min}$ 分别表示第 i 个指标处理组测定值、第 i 个指标最大测定值和最小测定值。

$$\omega_i = P_i \div \sum_{j=1}^n P_j \quad (3)$$

$$\mu(x_i) = \frac{x_i - x_{i \min}}{x_{i \max} - x_{i \min}} \quad (4-1) \text{ 或 } \mu(x_i) = \frac{x_{i \max} - x_i}{x_{i \max} - x_{i \min}} \quad (4-2)$$

$$D = \sum_{i=1}^n \left[\mu(x_i) \times \left(P_i \div \sum_{j=1}^n P_j \right) \right] \quad (5)$$

参照孟庆立等^[25]、祁旭升等^[26]的方法,以各指标抗旱系数 DC 为母序列,抗旱性度量值 D 为子序列进行灰色关联度分析,获得各指标抗旱系数与抗旱性度量值间关联度(γ_D),再按公式(6)计算各指标权重系数[$\omega_i(\gamma_i)$],按公式(7)计算研究材料加权抗旱系数(WDC, weight drought resistance coefficient),式中 γ_i 为灰色关联度分析所得的各指标关联度。

$$\omega_i(\gamma_i) = \gamma_i \div \sum_{j=1}^n \gamma_j \quad (6)$$

$$WDC = \sum_{j=1}^n \left[DC \times \left(\gamma_j \div \sum_{i=1}^n \gamma_i \right) \right] \quad (7)$$

参照朱宗河等^[27]的方法,以各指标 DC 值为母序列,研究材料 WDC 值为子序列,进行灰色关联分析,获得各指标 DC 值与各材料 WDC 值间关联度(γ_{WDC})。根据供试甘蔗创新种质的抗旱性度量值 D,采用最大距离和加权配对算术平均法(WPGMA, weighted pair group method average)进行聚类分析和抗旱级别划分。并分别以 D 值、CDC 值和 WDC 值为参考序列,对各指标 DC 值进行逐步回归分析,求取回归方程。

2 结果与分析

2.1 正常供水与干旱胁迫下各指标测定值分析

结果表明,干旱胁迫对供试甘蔗种质各指标测定值有显著影响(表 2),材料间变异系数介于 0~1.757,说明研究材料类型丰富,具有较好的代表性。 t 检验结果表明,各指标处理间差异均达极显著水平($P=0.0001 < 0.01$),说明干旱胁迫处理效果好,所选指标对干旱胁迫响应较敏感,各指标对干旱胁迫响应具有极显著差异。此外,各指标正常供水(CK)和干旱胁迫(T)的测定值相关系数绝对值介于 0~0.987,进一步说明不同指标对干旱胁迫反应的敏感性差异较大,所以,采用单一或较少指标很难准确鉴定研究材料耐旱性。与对照组相比,干旱胁迫处理后供试材料各指标均发生了不同程度变化(表 3),相同指标各材料间 DC 值存在明显差异,变

表2 正常供水和干旱胁迫条件下各指标测定值及其均值差异性分析
Table 2 Measured values of all indices in tested sugarcane materials under normal water supply and drought stress and its mean variance analysis

编号 Number	质膜透性(%) PMP		丙二醛含量(μmol/g) MDA		脯氨酸含量(μg/g) PRO		相对含水量(%) RWC		自由水/结合水 RFB		过氧化氢酶活性(U/g) POD		叶绿素含量 CHL		绿叶面积比 GLA		最小荧光 F _o		最大荧光 F _M		PS II 最大光合量子产量 F _v /F _M		PS II 潜在活性 F _v /F _o			
	CK	T	CK	T	CK	T	CK	T	CK	T	CK	T	CK	T	CK	T	CK	T	CK	T	CK	T	CK	T	CK	T
YR08-1276	38.21	81.87	0.014	0.021	2.82	67.13	78.47	55.53	26.00	4.00	2000.0	2633.3	44.8	23.4	1.00	0.65	389.3	326.0	1688.0	423.0	0.769	0.214	3.338	0.274		
YR08-2138	51.27	86.00	0.016	0.020	2.38	20.63	77.17	62.35	15.00	11.63	1046.7	1190.0	41.8	25.9	1.00	0.73	432.3	108.0	1877.3	335.0	0.770	0.374	3.341	1.083		
YR10-1229	45.13	91.75	0.018	0.018	2.63	313.08	65.31	34.90	8.63	4.13	2043.0	2173.0	45.4	26.2	1.00	0.70	398.0	171.0	1832.7	175.0	0.783	0.025	3.606	0.026		
YR10-1284	39.30	47.39	0.015	0.023	4.81	480.37	68.68	42.77	12.00	8.00	1793.3	2137.3	44.1	24.7	1.00	0.77	519.3	311.3	2024.3	989.3	0.743	0.685	2.896	2.181		
YR10-550	15.78	88.49	0.013	0.027	2.07	94.91	73.30	14.85	12.13	2.43	2133.3	2794.0	45.6	25.6	1.00	0.53	390.0	80.3	1843.7	87.0	0.788	0.079	3.726	0.086		
YR10-913	13.02	58.08	0.012	0.016	1.69	93.35	90.36	72.44	29.27	9.60	1493.3	2148.7	45.4	13.7	1.00	0.67	495.7	219.0	2110.3	695.7	0.765	0.498	3.264	1.597		
YR11-101	11.43	97.65	0.015	0.016	1.44	44.35	87.86	45.87	25.00	10.00	1906.7	2226.0	35.4	20.2	1.00	0.59	400.0	33.3	1722.0	40.7	0.768	0.183	3.315	0.230		
YR11-103	56.23	91.01	0.012	0.019	0.76	33.43	83.20	10.95	11.38	7.61	1290.0	2146.0	42.3	41.8	1.00	0.60	486.0	57.3	1979.0	64.7	0.755	0.115	3.078	0.130		
YR11-256	9.52	39.33	0.013	0.022	1.75	180.43	83.45	46.74	18.00	7.00	3473.3	3573.3	39.3	21.2	1.00	0.71	457.7	137.3	1847.0	156.0	0.752	0.117	3.043	0.143		
YR11-98	47.60	53.36	0.014	0.021	3.63	39.36	61.17	56.39	28.60	19.86	2053.3	2152.0	44.9	25.7	1.00	0.88	401.0	454.0	1726.3	911.0	0.768	0.496	3.310	0.997		
YR12-137	19.63	49.64	0.012	0.015	2.88	64.33	66.92	44.33	25.00	11.00	1453.3	2246.7	45.5	21.9	1.00	0.67	371.0	89.3	1726.0	93.7	0.785	0.050	3.658	0.054		
YR12-153	11.14	71.47	0.015	0.015	3.06	35.61	63.54	20.52	11.00	6.00	2133.0	2420.0	47.6	31.5	1.00	1.00	406.3	323.0	1739.0	1080.3	0.766	0.703	3.302	2.409		
YR12-204	47.62	57.85	0.013	0.016	1.00	24.38	70.10	59.97	11.00	5.00	2160.0	2726.7	40.1	18.5	1.00	0.71	413.3	279.7	1800.7	1088.0	0.771	0.742	3.379	2.935		
YR13-18	61.89	71.00	0.012	0.023	0.63	29.68	84.44	70.60	11.00	8.00	1753.3	1876.0	43.7	39.5	1.00	0.74	390.3	92.0	1764.0	100.0	0.778	0.079	3.535	0.086		
YR13-26	31.09	54.60	0.013	0.016	2.38	37.48	69.37	57.07	20.00	13.00	1425.0	1486.0	39.7	28.5	1.00	0.94	532.0	282.7	1860.0	579.3	0.712	0.264	2.484	0.755		
YR13-3	40.52	59.04	0.016	0.018	2.88	320.26	61.66	51.72	9.27	6.53	2360.0	2728.0	41.8	24.0	1.00	0.85	468.0	245.3	1960.3	448.3	0.761	0.340	3.194	0.684		
YR13-49	47.10	71.22	0.010	0.020	1.88	18.45	95.70	90.65	9.00	5.00	858.0	1340.0	32.1	22.7	1.00	0.54	438.7	61.0	1677.3	72.3	0.739	0.166	2.834	0.205		
YR14-100	62.71	96.00	0.013	0.015	2.63	21.25	71.29	62.39	20.00	10.00	3053.3	3240.0	44.7	32.4	1.00	0.87	429.7	546.0	1856.7	1872.3	0.769	0.708	3.352	2.430		
YR14-122	79.42	89.44	0.207	0.210	2.38	87.73	63.40	4.55	2.14	0.50	2233.3	2246.7	38.4	19.7	1.00	0.66	460.7	197.7	1793.0	444.3	0.742	0.238	2.883	0.658		
YR14-138	53.45	91.69	0.011	0.014	1.94	18.13	75.50	44.65	20.00	4.00	3126.7	4320.0	40.4	28.3	1.00	0.70	480.3	274.0	1845.3	555.0	0.741	0.360	2.867	0.800		
YR14-19	71.78	102.00	0.011	0.039	3.13	46.22	59.56	47.89	30.73	11.18	1913.3	2577.3	39.0	30.0	1.00	0.95	404.0	400.3	1705.0	1237.0	0.763	0.673	3.224	2.090		
YR14-195	29.55	38.33	0.014	0.014	2.69	12.52	94.73	82.33	11.00	5.00	2426.7	2593.3	48.3	23.2	1.00	0.66	412.7	258.3	1698.0	758.3	0.758	0.338	3.186	1.087		
YR14-248	39.36	55.22	0.014	0.020	2.68	30.31	69.93	35.99	24.00	6.00	753.0	2400.0	42.7	25.8	1.00	0.73	375.3	407.0	1559.0	677.3	0.759	1.091	3.164	0.776		
YR14-268	88.99	105.00	0.012	0.024	1.82	191.67	73.99	30.82	2.56	2.59	1106.7	1310.0	31.9	14.8	1.00	0.31	415.3	84.7	1794.0	89.7	0.770	0.067	3.349	0.074		

表 2(续)

编号 Number	质膜透性 (%) PMP		丙二醛含量 (μmol/g) MDA		脯氨酸含量 (μg/g) PRO		相对含水量 (%) RWC		自由水/结合水 RFB		过氧化物酶活性 (U/g) POD		叶绿素含量 CHL		绿叶面积比 GLA		最小荧光 F ₀		最大荧光 F _M		PS II 最大光合量子产量 F _v /F _M		PS II 潜在活性 F _v /F ₀		
	CK	T	CK	T	CK	T	CK	T	CK	T	CK	T	CK	T	CK	T	CK	T	CK	T	CK	T	CK	T	
YR14-78	45.84	54.82	0.013	0.016	1.82	16.26	82.49	73.99	22.00	4.00	1426.7	1712.0	42.8	39.3	1.00	0.95	4600	530.7	1941.3	1729.3	0.763	0.690	3.259	2.248	
YR14-89	68.12	92.00	0.014	0.016	3.44	22.50	79.08	71.24	12.00	9.00	1326.7	2143.3	42.7	20.9	1.00	0.83	4300	131.0	1780.0	138.3	0.759	0.056	3.155	0.059	
YR15-104	66.29	72.40	0.012	0.019	2.88	32.18	73.54	44.17	28.33	4.92	1206.7	2036.0	39.9	26.7	1.00	0.77	342.0	95.3	1572.3	106.7	0.783	0.101	3.600	0.114	
YR15-115	48.08	75.32	0.012	0.018	2.19	66.82	75.18	69.57	26.00	22.00	2393.3	2400.0	47.2	19.0	1.00	0.59	484.7	282.0	1928.3	514.7	0.750	0.325	3.028	0.826	
YR15-146	45.51	56.82	0.013	0.014	2.69	9.71	72.63	54.04	8.00	3.00	3153.3	3266.7	45.4	21.2	1.00	0.92	413.0	161.3	1906.0	398.3	0.783	0.270	3.616	0.712	
YR15-153	14.39	69.51	0.013	0.015	2.63	34.36	60.67	17.82	17.90	5.81	1946.0	2466.0	31.8	25.4	1.00	0.62	432.7	321.67	1778.0	852.3	0.757	0.620	3.116	1.641	
YR15-158	22.11	57.32	0.014	0.015	2.19	25.94	66.71	63.41	23.24	20.04	1073.3	1332.7	41.8	24.8	1.00	0.87	437.3	157.7	1896.0	380.7	0.770	0.261	3.369	0.716	
YR15-32	54.76	85.87	0.012	0.015	1.32	15.01	78.99	53.46	24.37	13.58	1607.0	2026.0	40.4	27.5	1.00	0.86	421.0	111.3	1819.0	116.0	0.768	0.044	3.325	0.046	
YR15-37	95.63	102.00	0.012	0.021	2.19	69.94	92.59	20.55	8.26	1.60	1726.7	2554.0	45.4	22.8	1.00	0.53	437.3	529.0	1876.0	1856.7	0.769	0.713	3.376	2.503	
YR15-73	38.78	68.51	0.010	0.017	1.57	30.31	88.38	84.30	21.10	14.80	2120.0	2520.0	44.5	25.8	1.00	0.70	413.0	156.3	1433.3	456.7	0.670	0.564	2.533	1.516	
YR15-88	4.99	38.68	0.013	0.020	2.69	166.70	75.32	58.92	98.86	14.87	1446.7	1770.0	48.9	36.3	1.00	0.73	387.0	351.0	1853.7	1246.7	0.792	0.506	3.833	2.015	
YR15-90	24.96	67.14	0.015	0.025	2.69	137.05	70.10	8.06	5.81	0.69	986.9	1049.3	42.8	25.3	1.00	0.46	409.0	134.7	1601.3	140.3	0.745	0.041	2.929	0.043	
平均值	42.81	71.89	0.019	0.024	2.34	81.34	75.13	49.05	19.13	9.62	1844.5	2276.7	42.2	25.7	1.00	0.72	428.7	233.4	1800.4	580.8	0.761	0.356	3.235	0.951	
Average	变异系数 CV	0.534	0.273	1.757	1.327	0.351	1.263	0.133	0.454	0.829	0.662	0.361	0.297	0.102	0.246	0	0.211	0.098	0.616	0.075	0.900	0.029	0.766	0.094	0.938
标准误差 SE	3.810	0.001	17.08	4.630	3.318	7.862	4.277	60.221	1.130	0.025	24.067	85.323	0.046	0.159	14.411	8.803	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
t 值 t value	9.113	6.606	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
P 值 P value	0.603	0.987	0.428	0.447	0.370	0.855	0.232	0.000	0.129	0.208	0.142	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
相关系数	Correlation coefficient	0.987	0.428	0.447	0.370	0.855	0.232	0.000	0.129	0.208	0.142	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001

PMP: plasma membrane permeability, MDA: malondialdehyde content, PRO: proline content, RWC: relative water content, RFB: ratio of free water to bound water, POD: peroxidase, CHL: chlorophyll content, GLA: green leaf area ratio, F₀: minimal fluorescence, F_M: maximal fluorescence, F_v: variable fluorescence, F_v/F_M: maximum photochemical quantum yield of photosystem II, F_v/F₀: potential activity of photosystem II, CK: control, T: drought stress. The same as below

表3 供试云瑞创新亲本材料各指标抗旱系数

Table 3 Drought resistance coefficients of tested materials in this study

编号 Number	质膜透 性(%) PMP	丙二醛含量 ($\mu\text{mol/g}$) MDA	脯氨酸 含量 ($\mu\text{g/g}$) PRO	相对含 水量 (%) RWC	自由水/ 结合水 RFB	过氧化 物酶活性 (U/g) POD	叶绿素 含量 CHL	绿叶面 积比 GLA	最小 荧光 F_0	最大 荧光 F_M	PS II最 大光合 量子产 量 F_v/F_M	PS II 潜在活 性 F_v/F_0
YR08-1276	2.143	1.527	23.847	0.708	0.154	1.317	0.523	0.648	0.837	0.251	0.278	0.082
YR08-2138	1.677	1.203	8.675	0.808	0.775	1.137	0.620	0.729	0.250	0.178	0.486	0.324
YR10-1229	2.033	1.442	119.133	0.534	0.478	1.064	0.578	0.698	0.430	0.095	0.032	0.007
YR10-1284	1.206	1.493	99.812	0.623	0.667	1.192	0.560	0.770	0.599	0.489	0.922	0.753
YR10-550	5.607	2.112	45.937	0.203	0.201	1.310	0.562	0.530	0.206	0.047	0.100	0.023
YR10-913	4.461	1.332	55.185	0.802	0.330	1.439	0.301	0.666	0.442	0.330	0.651	0.489
YR11-101	8.547	1.049	30.758	0.522	0.400	1.167	0.571	0.591	0.083	0.024	0.239	0.069
YR11-103	1.619	1.639	44.256	0.132	0.669	1.664	0.988	0.598	0.118	0.033	0.152	0.042
YR11-256	4.130	1.694	102.865	0.560	0.389	1.029	0.539	0.709	0.300	0.084	0.155	0.047
YR11-98	1.121	1.434	10.852	0.922	0.695	1.048	0.571	0.880	1.132	0.528	0.646	0.301
YR12-137	2.529	1.250	22.354	0.662	0.440	1.546	0.481	0.674	0.241	0.054	0.064	0.015
YR12-153	6.410	1.044	11.619	0.323	0.545	1.135	0.661	1.000	0.795	0.621	0.918	0.730
YR12-204	1.215	1.167	24.255	0.856	0.455	1.262	0.462	0.706	0.677	0.604	0.962	0.869
YR13-18	1.147	1.927	47.079	0.836	0.727	1.070	0.904	0.743	0.236	0.057	0.102	0.024
YR13-26	1.756	1.202	15.761	0.823	0.650	1.043	0.718	0.943	0.531	0.311	0.371	0.304
YR13-3	1.457	1.110	111.291	0.839	0.705	1.156	0.574	0.852	0.524	0.229	0.447	0.214
YR13-49	1.512	1.989	9.817	0.947	0.556	1.562	0.709	0.543	0.139	0.043	0.225	0.073
YR14-100	1.531	1.151	8.088	0.875	0.500	1.061	0.725	0.867	1.271	1.008	0.921	0.725
YR14-122	1.126	1.013	36.890	0.072	0.233	1.006	0.513	0.659	0.429	0.248	0.320	0.228
YR14-138	1.715	1.282	9.341	0.591	0.200	1.382	0.698	0.705	0.570	0.301	0.487	0.279
YR14-19	1.421	3.611	14.780	0.804	0.364	1.347	0.769	0.953	0.991	0.726	0.882	0.648
YR14-195	1.297	1.012	4.652	0.869	0.455	1.069	0.480	0.656	0.626	0.447	0.446	0.341
YR14-248	1.403	1.444	11.532	0.515	0.250	3.187	0.605	0.729	1.084	0.434	1.438	0.245
YR14-268	1.180	1.941	105.515	0.416	0.805	1.184	0.465	0.314	0.204	0.050	0.087	0.022
YR14-78	1.196	1.195	8.952	0.897	0.182	1.200	0.919	0.951	1.154	0.891	0.904	0.690
YR14-89	1.350	1.127	6.543	0.901	0.750	1.616	0.491	0.834	0.305	0.078	0.073	0.019
YR15-104	1.092	1.632	11.182	0.601	0.174	1.687	0.667	0.771	0.279	0.068	0.129	0.032
YR15-115	1.567	1.559	30.499	0.925	0.846	1.003	0.402	0.590	0.582	0.267	0.434	0.273
YR15-146	1.249	1.077	3.608	0.744	0.375	1.036	0.467	0.918	0.391	0.209	0.344	0.197
YR15-153	4.831	1.143	13.076	0.294	0.324	1.267	0.799	0.619	0.743	0.479	0.819	0.527
YR15-158	2.592	1.112	11.838	0.951	0.862	1.242	0.595	0.872	0.361	0.201	0.339	0.212
YR15-32	1.568	1.260	11.398	0.677	0.557	1.261	0.681	0.860	0.264	0.064	0.057	0.014
YR15-37	1.067	1.813	31.923	0.222	0.193	1.479	0.503	0.532	1.210	0.990	0.928	0.741
YR15-73	1.767	1.669	19.343	0.954	0.702	1.189	0.581	0.696	0.379	0.319	0.841	0.599
YR15-88	7.754	1.482	61.961	0.782	0.150	1.224	0.743	0.732	0.907	0.673	0.639	0.526
YR15-90	2.689	1.641	50.940	0.115	0.120	1.063	0.593	0.459	0.329	0.088	0.055	0.015
平均值 Average	2.416	1.466	34.321	0.647	0.469	1.296	0.612	0.722	0.545	0.320	0.469	0.297
变异系数 CV	0.805	0.326	0.983	0.414	0.488	0.292	0.240	0.211	0.622	0.882	0.766	0.921

异系数介于 0.211~0.983, 同一材料各指标 DC 值间差异较大, 说明各指标对干旱胁迫反应敏感性不同。但不同指标 DC 值大小与抗旱性强弱并非皆为正相关关系, 也就是各指标 DC 值越大, 并不代表供试材料抗旱性越强。

2.2 主成分分析

对本研究 12 个抗旱指标 DC 值进行主成分分析(表 4)。结果表明, 前 7 个主成分累积贡献率达 89.2686%, 特征根 $\lambda > 0.5973$ 。所以, 抽取前 7 个因子, 将具有相同本质的变量归类, 可将原来 12 个抗旱指标转换为 7 个新的相互独立的抗旱性综合指标(分别用 F1、F2、F3、F4、F5、F6、F7 表示)。其中, F1 在 4 个叶绿素荧光参数 (F_0 、 F_M 、 F_V/F_M 和 F_V/F_0) 上有较高载荷量, 叶绿素荧光参数可间接反映甘蔗光合作用效率, 因此可概括为光合作用因子。F2 在绿叶面积比值 (GLA) 上有较高载荷量, 绿叶直接影响甘蔗光合作用, 可与 F1 一样, 概括为光合作用因子。F3 在过氧化物酶 (POD) 上有较高载荷量, POD 可清除氧自由基, 在逆境中保护植物, 抵御逆境损伤。F4 在相对含水量 (RWC)、自由水 / 结合水 (RFB) 上有较高载荷量, 与甘蔗叶片水分含量、水分利用效率直接相关, 因此可概括为水分利用因子。F5 在叶绿素含量 (CHL) 上有较高载荷量, F6 在质膜透性 (PMP) 和丙二醛含量 (MDA) 上有较高载荷量, F7 在脯氨酸含量 (PRO) 上有较高载荷量,

这 3 个因子与 F3 因子一样, 都与甘蔗生理代谢和调控密切相关, 可称其为生理调控因子。

2.3 供试材料抗旱性综合评价

36 份供试材料的 CDC 值、WDC 值变异系数分别为 0.777 和 0.762, 变异系数较大(表 5); D 值变异系数为 0.242, 变异系数较小。此外, 根据 D 值计算公式可知, D 值既考虑了各指标重要性, 又考虑到指标间与抗旱性的相互关系。所以, 根据 D 值大小, 采用加权配对算术平均和最大距离法对供试材料抗旱性进行排序和聚类分析, 在最大距离 0.55 时可将 36 份亲本材料分为 5 类(图 1)。第 I 类为高度抗旱型材料, 包括 YR14-195、YR15-88、YR11-98、YR11-256、YR15-158、YR14-78、YR13-26、YR12-137 和 YR15-73 共 9 份材料, 占 25%; 第 II 类为中高度抗旱型材料, 包括 YR15-146、YR12-204、YR10-913、YR14-248、YR15-115、YR13-18、YR13-49、YR10-1284 和 YR13-3 共 9 份材料, 占 25%; 第 III 类为中度抗旱型材料, 包括 YR15-104、YR12-153、YR15-153、YR15-32、YR08-2138、YR14-100、YR08-1276、YR14-89 和 YR14-138 共 9 份材料, 占 25%; 第 IV 类为低度抗旱型材料, 包括 YR15-90、YR11-103、YR11-101、YR14-19 和 YR10-550 共 5 份材料, 约占 13.9%, 第 V 类为干旱敏感型材料, 包括 YR10-1229、YR14-268、YR15-37、YR14-122 共 4 份材料, 约占 11.1%。

表 4 供试材料各指标主成分的特征向量及贡献率

Table 4 Eigenvectors and contribution rates of principal components of all indices in tested materials

指标 Indices	因子载荷 Factor pattern						
	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7
质膜透性 PMP	-0.0486	0.0906	-0.0858	-0.7109	0.1278	0.4440	0.2008
丙二醛含量 MDA	-0.0168	0.3040	0.3638	0.3437	0.4365	0.5815	-0.2790
脯氨酸含量 PRO	-0.2157	0.4094	-0.2706	0.0065	0.2305	0.0797	0.5755
相对含水量 RWC	0.1564	-0.4017	-0.2832	0.4405	-0.0128	0.4465	0.2218
自由水 / 结合水 RFB	-0.1927	0.3808	-0.1932	0.4108	0.0022	-0.2673	0.2627
过氧化物酶活性 POD	0.0646	0.0936	0.6205	0.0580	-0.5296	0.1488	0.4126
叶绿素含量 CHL	0.1032	-0.1413	0.4702	-0.0545	0.6082	-0.3818	0.2542
绿叶面积比 GLA	0.2926	-0.4633	-0.0694	0.0442	0.2043	0.0313	0.3823
最小荧光 F_0	0.4395	0.1905	-0.0009	0.0356	-0.0156	-0.0771	-0.0129
最大荧光 F_M	0.4618	0.2169	-0.1009	-0.0196	0.0871	-0.0970	-0.1152
PS II 最大光合量子产量 F_V/F_M	0.4426	0.2320	0.0493	-0.0247	-0.1891	0.0578	0.1743
PS II 潜在活性 F_V/F_0	0.4318	0.2118	-0.2143	-0.0551	0.0641	0.0021	-0.0877
特征值 Eigen value	3.9871	1.6272	1.3638	1.3148	1.1235	0.6985	0.5973
贡献率 (%) Contribution rate	33.2262	13.5604	11.3651	10.9565	9.3627	5.8206	4.9771
累计贡献率 (%) Cumulative contribution rate	33.2262	46.7866	58.1517	69.1081	78.4708	84.2915	89.2686
因子权重 Factor weight	0.3722	0.1519	0.1273	0.1227	0.1049	0.0652	0.0558

表5 供试材料抗旱性评价的CDC值、WDC值及D值

Table 5 CDC value, WDC value, D value of drought resistance evaluation of tested materials

编号 Number	隶属函数 Subordinate function value							CDC 值 CDC value	WDC 值 WDC value	D 值 D value	排序 Rank	分类 group	抗旱性 Drought resistance
	μ_1	μ_2	μ_3	μ_4	μ_5	μ_6	μ_7						
YR14-195	1.000	1.000	0.994	0.903	0.209	0.472	0.338	1.029	0.993	0.833	1	I	高度抗旱型
YR15-88	0.994	0.970	0.666	0.631	0.668	0.220	0.804	6.464	5.921	0.809	2	I	高度抗旱型
YR11-98	0.774	0.965	0.937	0.602	0.901	0.337	0.426	1.677	1.590	0.768	3	I	高度抗旱型
YR11-256	0.985	0.960	0.637	0.490	0.302	0.772	0.266	9.375	8.502	0.750	4	I	高度抗旱型
YR15-158	0.715	0.993	0.966	0.684	0.909	0.087	0.396	1.765	1.667	0.747	5	I	高度抗旱型
YR14-78	0.752	0.989	0.986	0.806	0.163	0.203	0.912	1.594	1.517	0.736	6	I	高度抗旱型
YR13-26	0.756	0.990	0.941	0.610	0.581	0.134	0.525	2.034	1.903	0.725	7	I	高度抗旱型
YR12-137	0.830	0.996	0.884	0.462	0.488	0.366	0.292	2.526	2.332	0.721	8	I	高度抗旱型
YR15-73	0.547	0.983	0.956	0.926	0.665	0.450	0.432	2.420	2.259	0.712	9	I	高度抗旱型
YR15-146	0.722	1.000	1.000	0.575	0.116	0.678	0.267	0.885	0.856	0.690	10	II	中高度抗旱型
YR12-204	0.707	0.992	0.969	0.644	0.209	0.513	0.173	2.791	2.590	0.681	11	II	中高度抗旱型
YR10-913	0.703	0.987	0.822	0.788	0.427	0.336	0.000	5.536	5.065	0.680	12	II	中高度抗旱型
YR14-248	0.746	0.968	0.956	0.365	0.256	0.413	0.432	1.906	1.795	0.669	13	II	中高度抗旱型
YR15-115	0.445	0.980	0.879	0.755	1.000	0.413	0.188	3.245	2.994	0.661	14	II	中高度抗旱型
YR13-18	0.510	0.953	0.958	0.767	0.349	0.253	0.916	4.571	4.175	0.655	15	II	中高度抗旱型
YR13-49	0.506	0.969	0.981	1.000	0.209	0.089	0.321	1.510	1.423	0.629	16	II	中高度抗旱型
YR10-1284	0.864	0.956	0.000	0.444	0.349	0.333	0.391	9.090	8.257	0.601	17	II	中高度抗旱型
YR13-3	0.689	0.981	0.340	0.548	0.281	0.513	0.366	9.950	9.025	0.599	18	II	中高度抗旱型
YR15-104	0.489	0.974	0.952	0.46	0.206	0.302	0.46	1.526	1.424	0.574	19	III	中度抗旱型
YR12-153	0.503	0.993	0.945	0.186	0.256	0.419	0.632	2.150	2.031	0.570	20	III	中度抗旱型
YR15-153	0.532	0.997	0.948	0.154	0.247	0.433	0.416	2.077	1.945	0.566	21	III	中度抗旱型
YR15-32	0.287	0.995	0.989	0.568	0.608	0.299	0.492	1.555	1.456	0.564	22	III	中度抗旱型
YR08-2138	0.285	0.971	0.977	0.671	0.517	0.043	0.435	1.405	1.333	0.542	23	III	中度抗旱型
YR14-100	0.135	0.995	0.975	0.672	0.442	0.67	0.665	1.560	1.494	0.535	24	III	中度抗旱型
YR08-1276	0.347	0.965	0.878	0.592	0.163	0.484	0.347	2.693	2.485	0.528	25	III	中度抗旱型
YR14-89	0.195	0.992	0.973	0.775	0.395	0.334	0.259	1.174	1.122	0.520	26	III	中度抗旱型
YR14-138	0.200	0.998	0.982	0.466	0.163	1.000	0.515	1.463	1.376	0.519	27	III	中度抗旱型
YR15-90	0.568	0.944	0.729	0.041	0.01	0.000	0.415	4.842	4.397	0.476	28	IV	低度抗旱型
YR11-103	0.21	0.973	0.95	0.074	0.331	0.335	1.000	4.326	3.939	0.468	29	IV	低度抗旱型
YR11-101	0.11	0.99	0.926	0.48	0.442	0.36	0.232	3.668	3.383	0.451	30	IV	低度抗旱型
YR14-19	0.045	0.871	0.922	0.503	0.497	0.467	0.58	2.275	2.138	0.443	31	IV	低度抗旱型
YR10-550	0.247	0.932	0.819	0.12	0.09	0.533	0.425	4.736	4.323	0.420	32	V	干旱敏感型
YR10-1229	0.199	0.977	0.355	0.352	0.169	0.344	0.447	10.544	9.543	0.376	33	V	干旱敏感型
YR14-268	0.000	0.951	0.613	0.305	0.934	0.08	0.041	9.953	9.120	0.365	34	V	干旱敏感型
YR15-37	0.045	0.963	0.872	0.186	0.051	0.46	0.325	3.467	3.187	0.350	35	V	干旱敏感型
YR14-122	0.233	0.000	0.834	0.000	0.000	0.366	0.214	3.561	3.243	0.229	36	V	干旱敏感型
平均值 Average	—	—	—	—	—	—	—	3.648	3.356	0.588	—	—	—
变异系数 CV	—	—	—	—	—	—	—	0.777	0.762	0.242	—	—	—

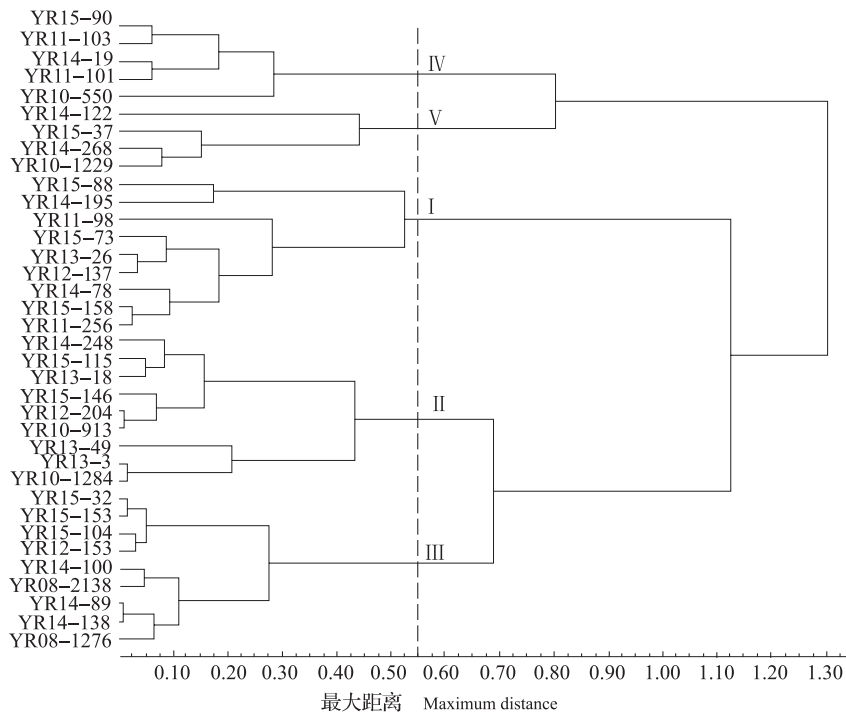


图 1 基于 D 值的供试云南创新亲本抗旱性聚类图
Fig.1 Cluster result of drought resistance in tested materials

2.4 灰色关联度分析

各指标 DC 值与 D 值间关联度大小依次为 PRO>PMP>MDA>RFB>CHL>POD>GLA>F₀>RWC=F_V/F_M>F_V/F₀=F_M (表 6), 反映了各指标 DC 值与 D 值密切程度; 各指标 DC 值与 WDC 值间关联度大小依次为 PRO>PMP>MDA>RFB>CHL>POD>GLA>F₀>F_V/F_M>RWC>F_V/F₀>F_M, 与各指标 DC 值与 D 值间密切程度基本一致。这进一步证明脯氨酸、质膜透性、丙二醛、自由水 / 束缚水、叶绿素含量、过氧化

物酶活性等指标与甘蔗抗旱性密切相关。

2.5 逐步回归分析及抗旱指标筛选

分别以抗旱性度量值 D, 综合抗旱系数 CDC 和加权抗旱系数 WDC 为母序列, 对供试材料各指标抗旱系数 DC 进行逐步回归分析, 得到 3 个回归方程 (表 7)。除 D 值回归方程决定系数为 0.5740, 回归系数的偏相关系数 P=0.0005 外, CDC 和 WDC 得到的回归方程决定系数 R²≈1, 统计量 d≈2, P=0.0001, F 检验均达极显著水平。说明回归方程

表 6 供试材料各指标 DC 值与 D 值和 WDC 值的关联度及各指标权重

Table 6 Correlation degree between DC value of all indices and D value together with WDC value and indices weight in tested materials

指标 Indices	关联度 (γ _D) Correlation degree (γ _D)	排序 Rank	权重 Weight	关联度 (γ _{WDC}) Correlation degree (γ _{WDC})	排序 Rank
质膜透性 PMP	0.710	2	0.088	0.713	2
丙二醛含量 MDA	0.699	3	0.086	0.707	3
脯氨酸含量 PRO	0.863	1	0.107	0.848	1
相对含水量 RWC	0.620	9	0.077	0.622	10
自由水 / 结合水 RFB	0.695	4	0.086	0.695	4
过氧化物酶活性 POD	0.671	6	0.083	0.680	5
叶绿素含量 CHL	0.676	5	0.084	0.679	6
绿叶面积比 GLA	0.662	7	0.082	0.669	7
最小荧光 F ₀	0.637	8	0.079	0.643	8
最大荧光 F _M	0.613	10	0.076	0.619	12
PS II 最大光合量子产量 F _V /F _M	0.620	9	0.077	0.626	9
PS II 潜在活性 F _V /F ₀	0.613	10	0.076	0.620	11

表 7 供试材料抗旱性模型预测

Table 7 Model predict of drought resistance in tested materials

因变量 Dependent variable	多元逐步回归方程 Multiple stepwise regression equation	决定系数 R ²	F 值 F value	P 值 P value	统计量 Statistic
D 值 D value	$Y=0.273+0.014x_1-0.062x_2+0.392x_4-0.012x_5+0.052x_6+0.084x_7$	0.5740	5.3889**	0.0005	1.2901
CDC 值 CDC value	$Y=0.270+0.08x_1+0.093x_2+0.083x_3+0.079x_5+0.191x_9+0.168x_{12}$	0.9998	19503.24**	0.0001	2.1317
WDC 值 WDC value	$Y=0.169+0.077x_1+0.079x_2+0.075x_3+0.087x_5+0.088x_6+0.156x_9+0.218x_{12}$	0.9998	23878.33**	0.0001	2.0853

x1: 质膜透性; x2: 丙二醛含量; x3: 脯氨酸含量; x4 相对含水量; x5: 自由水 / 束缚水; x6: 过氧化物酶活性; x7: 叶绿素含量; x9: 最小荧光; x12: PS II 光能潜在活性. ** 表示 0.01 水平下差异显著

x1: PMP, x2: MDA content, x3: PRO content, x4: RWC, x5: RFB, x6: POD activity, x7: CHL content, x9: F₀, x12: F_v/F₀. ** indicates significant differences under 0.01 level

拟合度好, 预测精度高, 抗旱性评价效果较好。在甘蔗抗旱性鉴定中, 可有针对性地选择与甘蔗抗旱性密切相关的, 如质膜透性、丙二醛含量、脯氨酸含量、自由水 / 束缚水、叶绿素荧光参数等指标进行评价。

3 讨论

3.1 甘蔗种质抗旱性评价方法选择

研究表明, 合适的评价指标和适宜的分析方法是准确评价作物抗旱性的关键, 目前, 多指标多方法结合的作物抗旱性评价方法已被广泛采用^[28]。而且, 伸长期是甘蔗的大生长期, 需水、需肥量较大, 是株高增长的黄金时期。干旱影响甘蔗节间伸长, 进而影响株高造成减产^[29]。但干旱对植株生长的抑制在不同品种、不同生长时期之间存在差异。杨建波等^[29]研究发现甘蔗苗期干旱的影响效应有后续性, 其他生长发育时期经过反复干旱胁迫处理的植株长势远不及仅在苗期、伸长期受干旱胁迫的植株。这表明甘蔗苗期、伸长期是进行抗旱性鉴定、筛选抗旱材料的适宜时期。本研究参照前人研究的多指标、结合多种分析方法的综合评价法, 对 36 份含细茎野生种血缘的甘蔗创新种质伸长期抗旱性进行综合评价, 有效避免了前期单一分析方法的缺陷, 同时结合各指标与综合评价指标的关联度及回归方程, 确定各生理生化指标对甘蔗抗旱性鉴定的重要程度, 对与抗旱性密切相关的指标在供试甘蔗抗旱性度量值计算中赋予较高的权重。本研究中采用的各项生理生化指标, 与作物抗旱性既有正相关关系(如过氧化物酶活性、自由水 / 结合水、叶绿素荧光参数等), 又有负相关指标(如质膜透性、丙二醛等)。因此, 采用隶属函数分析, 结合主成分分析所得的甘蔗抗旱性度量值 D, 既考虑了各指标的重要性, 又考虑到了指标间以及各指标与甘蔗抗旱性间的相互关系, 比抗旱系数更能代表甘蔗实际的抗

旱性强弱。汪灿等^[19-21, 28]、祁旭升等^[26]研究表明基于 D 值的抗旱性系统聚类结果与各材料的田间实际抗旱表现更接近。因此本研究借鉴前人研究结果, 利用供试材料抗旱性度量值进行聚类分析和抗旱性水平划分, 这既体现了各指标的重要性, 指标与抗旱性的密切程度, 又考虑了指标间的相互关系, 评价结果较为可靠。

3.2 甘蔗基础性杂交种质资源的抗旱性

甘蔗基础性杂交以种质创新为主, 是甘蔗杂交育种的关键源头, 而抗旱型种质和亲本是培育抗旱甘蔗新品种的前提基础。经艳芬等^[30]基于云南不同生态型割手密及其血缘 F₁ 种质的抗旱性遗传分析表明, 甘蔗亲本抗旱性在后代中的遗传变异较为复杂, 后代抗旱性具有超父优势和无优势两种表现。割手密杂交后代抗旱性表现与其亲本原生地气候生态类型和父本抗旱性强弱无明显的一致性。彭远英等^[31]基于不同倍性燕麦属种质资源抗旱性的研究也表明燕麦的抗旱性不具有种属和分布区域的特异性, 二者研究结果相似。本研究针对 36 份含甘蔗细茎野生种、栽培原种的创新种质, 通过前期研究, 综合考虑评价指标的重要性及其相互关系, 利用抗旱性度量值 D 进行抗旱性排名和聚类分析, 将材料聚为 5 类, 划分为 5 个抗旱级别, 第 I 类为高度抗旱型, 第 II 类为中高度抗旱型, 第 III 类为中度抗旱型, 第 IV 类为低度抗旱型, 第 V 类为干旱敏感型。其中, 第 I 类、第 II 类、第 III 类材料各占 25%, 共计 27 份, 占总数的 75%, 体现了甘蔗野生资源后代的优良抗旱特性。这与前期研究显示的甘蔗细茎野生种后代抗旱性强的结果基本一致^[32-34]。云瑞 14-195、云瑞 15-88、云瑞 11-98、云瑞 11-256、云瑞 15-158、云瑞 14-78、云瑞 13-26、云瑞 12-137 和云瑞 15-73 等抗旱型材料可为甘蔗抗旱育种、甘蔗野生种抗旱机理探讨等提供种质材料。

3.3 甘蔗抗旱性评价指标的选择

作物抗旱性(或抗旱性)是多基因控制的数量性状,由多种机制,一系列生理生化代谢调控途径相互作用。并通过多个指标、在不同的生育阶段反映出来^[27]。因此,筛选出与作物抗旱性密切相关的重要指标,是作物抗旱性鉴定工作的关键。本研究共选取 8 个生理指标和 4 个叶绿素荧光参数指标,结合多种分析方法,开展了甘蔗亲本的抗旱性综合评价。结果表明各指标对于旱胁迫反应的敏感性差异较大,与汪灿等^[19-21,28]、孟庆立等^[25]、祁旭升等^[26]的研究结果一致。通过主成分分析,将原来 12 个抗旱单项指标转换为 7 个新的综合指标。根据 7 个公因子中各指标的载荷量和作用,可大致概括为光合作用因子、水分利用因子和生理调控因子 3 大类,是作物生长发育的重要组成部分。此外,本研究通过灰色关联度分析,得到各指标与 D 值和 WDC 值的密切程度,结果表明脯氨酸、质膜透性、丙二醛、自由水/束缚水、叶绿素含量、过氧化物酶活性等指标与甘蔗抗旱性密切相关,且两者的分析结果基本一致,进一步表明了抗旱性鉴定的可靠性和全面性,这与前期研究结果基本一致^[23]。同时,本研究利用逐步回归分析,建立了 D 值、CDC 值和 WDC 值与各指标间的回归方程,且得到的 3 个回归方程拟合度好,预测精度较高。因此,在甘蔗抗旱性评价中,可有针对性地选择与甘蔗抗旱性密切相关的质膜透性、丙二醛含量、脯氨酸含量、自由水/束缚水等抗旱性指标。这与其他作物筛选的评价指标有部分相同^[35-37]。可有效提高甘蔗抗旱性鉴定工作效率,也可为其他作物的抗旱性鉴定提供参考。

参考文献

- [1] Luo J, Pan Y B, Xu L P, Grisham M P, Zhang H, Que Y X. Rational regional distribution of sugarcane cultivars in China. *Scientific Reports*, 2015, 5: 15721
- [2] Que Y X, Pan Y B, Lu Y H, Yang C, Yang Y T, Huang N, Xu L P. Genetic analysis of diversity within a Chinese local sugarcane germplasm based on start codon targeted polymorphism. *Biomed Research International*, 2014, 5: 1-10
- [3] 兰巨生. 农作物综合抗旱性评价方法的研究. *西北农业学报*, 1998, 7(3): 85-87
Lan J S. Comparison of evaluating methods for agronomic drought resistance in crops. *Acta Agricultural Boreali-Occidentales Sinica*, 1998, 7(3): 85-87
- [4] Kamoshit A, Babu R C, Boopathi N M, Fukai S. Phenotypic and genotypic analysis of drought-resistance traits for development of rice cultivars adapted to rainfed environments. *Field Crops Research*, 2008, 109: 1-23
- [5] 罗俊杰, 欧巧明, 叶春雷, 王方, 王镛臻, 陈玉梁. 重要胡麻栽培品种的抗旱性综合评价及指标筛选. *作物学报*, 2014, 40(7): 1259-1273
Luo J J, Ou Q M, Ye C L, Wang F, Wang Y Z, Chen Y L. Comprehensive valuation of drought resistance and screening of indices of important flax cultivars. *Acta Agronomica Sinica*, 2014, 40(7): 1259-1273
- [6] 厉广辉, 张昆, 刘风珍, 刘丹丹, 万勇善. 不同抗旱性花生品种的叶片形态及生理特性. *中国农业科学*, 2014, 47(4): 644-654
Li G H, Zhang K, Liu F Z, Liu D D, Wan Y S. Morphological and physiological traits of leaf in different drought resistant peanut cultivars. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(4): 644-654
- [7] Olmo M, Lopez-iglesias B, Villar R. Drought changes the structure and elemental composition of very fine roots in seedlings of ten woody tree species. Implications for a drier climate. *Plant and Soil*, 2014, 384(1-2): 113-129
- [8] 马富举, 李丹丹, 蔡剑, 姜东, 曹卫星, 戴廷波. 干旱胁迫对小麦幼苗根系生长和叶片光合作用的影响. *应用生态学报*, 2012, 23(3): 724-730
Ma F J, Li D D, Cai J, Jiang D, Cao W X, Dai T B. Responses of wheat seedlings root growth and leaf photosynthesis to drought stress. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(3): 724-730
- [9] Yin L, Wang S, Liu P, Wang W H, Cao D, Deng X P, Zhang S Q. Silicon-mediated changes in polyamine and 1-aminocyclopropane-1-carboxylic acid are involved in silicon induced drought resistance in *Sorghum bicolor* L. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2014, 80: 268-277
- [10] 刘光辉, 陈全家, 吴鹏昊, 曲延英, 高文伟, 杨军善, 杜荣光. 棉花花铃期抗旱性综合评价及指标筛选. *植物遗传资源学报* 2016, 17(1): 53-62
Liu G H, Chen Q J, Wu P H, Qu Y Y, Gao W W, Yang J S, Du R G. Screening and comprehensive evaluation of drought resistance indices of cotton at blossing and boll-forming stages. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2016, 17(1): 53-62
- [11] 李瑞雪, 孙任洁, 汪泰初, 陈丹丹, 李荣芳, 李龙, 赵卫国. 植物抗旱性鉴定评价方法及抗旱机制研究进展. *生物技术通报*, 2017, 33(7): 40-48
Li R X, Sun R J, Wang T C, Chen D D, Li R F, Li L, Zhao W G. Research progress on identification and evaluation methods, and mechanism of drought resistance in plants. *Biotechnology Bulletin*, 2017, 33(7): 40-48
- [12] 高三基, 罗俊, 陈如凯, 张木清, 潘大仁. 甘蔗品种抗旱性光合生理指标及其综合评价. *作物学报*, 2002, 28(1): 94-98
Gao S J, Luo J, Chen R K, Zhang M Q, Pan D R. Photosynthetic physiology indexes of the drought resistance of sugarcane and its comprehensive evaluation. *Acta Agronomica Sinica*, 2002, 28(1): 94-98
- [13] 原佳乐, 马超, 冯雅岚, 张均, 杨发强, 李友军. 不同抗旱性小麦快速叶绿素荧光诱导动力学曲线对干旱及复水的响应. *植物生理学报*, 2018, 54(6): 1119-1129
Yuan J L, Ma C, Feng Y L, Zhang J, Yang F Q, Li Y J. Response of chlorophyll fluorescence transient in leaves of wheats with different drought resistances to drought stresses and rehydration. *Plant Physiology Journal*, 2018, 54(6): 1119-1129
- [14] 曾辉, 曹苑南, 王述民, 王兰芬, 董海鸿, 陈吉宝. 30 份普通菜

- 豆苗期抗旱性鉴定及抗旱指标的确定. 植物遗传资源学报, 2016, 17(6): 1014-1021
- Zeng H, Cao Y N, Wang S M, Wang L F, Dong H H, Chen J B. Evaluation of drought tolerance of 30 common bean in seedling stage and screening of drought-tolerance assessment index. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2016, 17(6): 1014-1021
- [15] 罗俊, 张木清, 林彦铨, 张华, 陈如凯. 甘蔗苗期叶绿素荧光参数与抗旱性关系研究. 中国农业科学, 2004, 37(11): 1718-1721
- Luo J, Zhang M Q, Lin Y Q, Zhang H, Chen R K. Studies on the relationship of chlorophyll fluorescence characters and drought tolerance in seedling of sugarcane under water stress. *Scientia Agricultura Sinica*, 2004, 37(11): 1718-1721
- [16] 张彦军, 苟作旺, 王兴荣, 陈伟英, 祁旭升. 胡麻种质萌发期抗旱性综合评价. 植物遗传资源学报, 2015, 16(3): 520-527
- Zhang Y J, Gou Z W, Wang X R, Chen W Y, Qi X S. Comprehensive valuation of drought resistance of flax germplasm in germination. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2015, 16(3): 520-527
- [17] 王兴荣, 张彦军, 李玥, 刘天鹏, 张金福, 祁旭升. 干旱胁迫对大豆生长的影响及抗旱性评价方法与指标筛选. 植物遗传资源学报, 2018, 19(1): 49-56
- Wang X R, Zhang Y J, Li Y, Liu T P, Zhang J F, Qu X S. Effects of drought stress on growth and screening methods and indexes for drought-resistance in soybean. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2018, 19(1): 49-56
- [18] 张芳, 颜安, 任毅, 杨卫君, 耿洪伟. 新疆冬小麦萌发期抗旱性综合评价. 植物遗传资源学报, 2019, 20(1): 100-112
- Zhang F, Yan A, Ren Y, Yang W J, Geng H W. Evaluation on drought resistance of winter wheat cultivars in Xinjiang. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2019, 20(1): 100-112
- [19] 汪灿, 周棱波, 张国兵, 张立异, 徐燕, 高旭, 姜讷, 邵明波. 薏苡种质资源萌发期抗旱性鉴定及抗旱指标筛选. 植物遗传资源学报, 2017, 18(5): 846-859
- Wang C, Zhou L B, Zhang G B, Zhang L Y, Xu Y, Gao X, Jiang N, Shao M B. Identification and indices screening of drought resistance in Job's Tears germplasm resources at germination stage. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2017, 18(5): 846-859
- [20] 汪灿, 周棱波, 张国兵, 张立异, 徐燕, 高旭, 姜讷, 邵明波. 薏苡种质资源苗期抗旱性鉴定及抗旱指标筛选. 中国农业科学, 2017, 50(15): 2872-2887
- Wang C, Zhou L B, Zhang G B, Zhang L Y, Xu Y, Gao X, Jiang N, Shao M B. Drought resistance identification and drought resistance indices screening of Job's Tears (*Coxi lacryma-jobi* L.) germplasm resources at seedling stage. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(15): 2872-2887
- [21] 汪灿, 周棱波, 张国兵, 张立异, 徐燕, 高旭, 姜讷, 邵明波. 薏苡种质资源成株期抗旱性鉴定及抗旱指标筛选. 作物学报, 2017, 43(9): 1381-1394
- Wang C, Zhou L B, Zhang G B, Zhang L Y, Xu Y, Gao X, Jiang N, Shao M B. Identification and indices screening of drought resistance at adult plant stage in job's Tears germplasm rResources. *Acta Agronomic Sinica*. 2017, 43(9): 1381-1394
- [22] 谢小玉, 张霞, 张兵. 油菜苗期抗旱性评价及抗旱相关指标变化分析. 中国农业科学, 2013, 46(3): 476-485
- Xie X Y, Zhang X, Zhang B. Evaluation of drought resistance and analysis of variation of relevant parameters at seedling stage of Rapeseed (*Brassica napus* L.). *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46(3): 476-485
- [23] 田春艳, 桃联安, 俞华先, 董立华, 经艳芬, 边芯, 郎荣斌, 周清明, 安汝东, 孙有芳, 杨李和. 5种气候生态型割手密 F₁ 和 F₂ 杂种的耐旱性评价. 中国农业科学, 2017, 50(22): 4408-4420
- Tian C Y, Tao L A, Yu H X, Dong L H, Jing Y F, Bian X, Lang R B, Zhou Q M, An R D, Sun Y F, Yang L H. Drought resistance evolution of F₁ and F₂ hybrids from five climatic ecotypes *Saccharum spontaneum* L. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(22): 4408-4420
- [24] 李忠光, 龚明. 植物生理学综合性和设计性实验教程. 武汉: 华中科技大学出版社, 2014: 52-144
- Li Z G, Gong M. A comprehensive and experimental course of plant physiology. Wuhan: Hua zhong University of Science Technology Press, 2014: 52-144
- [25] 孟庆立, 关周博, 冯佰利, 柴岩, 胡银岗. 谷子抗旱相关性状的主成分与模糊聚类分析. 中国农业科学, 2009, 42(8): 2667-2675
- Meng Q L, Guan Z B, Feng B L, Chai Y, Hu Y G. Principal component analysis and fuzzy clustering on drought-tolerance related traits of foxtail millet (*Setaria italica*). *Scientia Agricultura Sinica*, 2009, 42(8): 2667-2675
- [26] 祁旭升, 王兴荣, 许军, 张建平, 米君. 胡麻种质资源成株期抗旱性评价. 中国农业科学, 2010, 43(15): 3076-3087
- Qi X S, Wang X R, Xu J, Zhang J P, Mi J. Drought-resistance evaluation of flax germplasm at adult plant stage. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(15): 3076-3087
- [27] 朱宗河, 郑文寅, 张学坤. 甘蓝型油菜耐旱相关性状的主成分分析及综合评价. 中国农业科学, 2011, 44(9): 1775-1787
- Zhu Z H, Zheng W Y, Zhang X K. Principal component analysis and comprehensive evaluation on morphological and agronomic traits of drought tolerance in Rapeseed (*Brassica napus* L.). *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(9): 1775-1787
- [28] 汪灿, 周棱波, 张国兵, 徐燕, 张立异, 高旭, 高杰, 姜讷, 邵明波. 酒用糯高粱资源成株期抗旱性鉴定及抗旱指标筛选. 中国农业科学, 2017, 50(8): 1388-1402
- Wang C, Zhou L B, Zhang G B, Xu Y, Zhang L Y, Gao X, Gao J, Jiang N, Shao M B. Drought resistance identification and drought resistance indices screening of liquor-making waxy sorghum resources at adult plant stage. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(8): 1388-1402
- [29] 杨建波, 诸葛少军, 黎海涛, 杨丽涛, 李杨瑞. 干旱胁迫对甘蔗生长生理的影响及品种抗旱性评价. 南方农业学报, 2012, 43(8): 1114-1120
- Yang J B, Zhuge S J, Li H T, Yang L T, Li Y R. Impact of drought stress on sugarcane growth physiology and evaluation on drought resistance of sugarcane cultivars. *Journal of Southern Agriculture*, 2012, 43(8): 1114-1120
- [30] 经艳芬, 董立华, 孙有芳, 桃联安, 朱建荣, 周清明, 杨李和, 安汝东. 云南不同生态型割手密及其血缘 F₁ 代种质的抗旱性遗传分析. 湖南农业大学学报, 2013, 39(1): 1-6
- Jing Y F, Dong L H, Sun Y F, Tao L A, Zhu J R, Zhou Q M, Yang L H, An R D. Genetic analysis of drought resistance from

- different eco-types *Saccharum spontaneum* and its F₁ hybrids germplasm. *Journal of Hunan Agricultural University*, 2013, 39 (1): 1-6
- [31] 彭远英, 颜红海, 郭来春, 任长忠. 燕麦属不同倍性种质资源的抗旱性状评价及筛选. *生态学报*, 2011, 31 (9): 2478-2491
Peng Y Y, Yan H H, Guo L C, Ren C Z. Evaluation and selection on drought resistance of germplasm resources of avena species with different types of ploidy. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31 (9): 2478-2491
- [32] 桃联安, 杨李和, 经艳芬, 段慧芬, 董立华, 安汝东, 周清明, 朱建荣. 云南割手密血缘 F₂ 代抗旱性隶属函数法综合评价. *西南农业学报*, 2011, 24 (5): 1676-1680
Tao L A, Yang L H, Jing Y F, Duan H F, Dong L H, An R D, Zhou Q M, Zhu J R. Comprehensive evaluation of drought resistance for descendant F₂ of *Saccharum spontaneum* in Yunnan by subsection function. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2011, 24 (5): 1676-1680
- [33] 桃联安, 安汝东, 杨李和, 经艳芬, 董立华, 周清明, 朱建荣, 边芯. 甘蔗属割手密种 (*Saccharum spontaneum*) ‘云南 82-114’ 的 F₂ (BC₁) 代同异法综合评价及同一度分类. *热带亚热带植物学报*, 2014, 22 (6): 590-600
Tao L A, An R D, Yang L H, Jing Y F, Dong L H, Zhou Q M, Zhu J R, Bian X. Integrated evaluating and classifying of the similarity-difference analysis for the generation F₂ (BC₁) from *Saccharum Spontaneum* ‘Yunnan 82-114’. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 2014, 22 (6): 590-600
- [34] 边芯, 董立华, 孙有芳, 桃联安, 朱建荣, 周清明, 杨李和, 安汝东, 郎荣斌, 俞华先, 冯蔚, 经艳芬. 云南割手密及其血缘 F₁ 代材料抗旱相关性状的成分分析. *干旱地区农业研究*, 2014, 32 (3): 56-61
Bian X, Dong L H, Sun Y F, Tao L A, Zhu J R, Zhou Q M, Yang L H, An R D, Lang R B, Yu H X, Feng W, Jing Y F. Principal component analysis of drought resistant related traits of *Saccharum spontaneum* L. and its F₁ hybrids. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2014, 32 (3): 56-61
- [35] 黎冬华, 刘文萍, 张艳欣, 王林海, 危文亮, 高媛, 丁霞, 王蕾, 张秀荣. 芝麻耐旱性的鉴定方法及关联分析. *作物学报*, 2013, 39 (8): 1425-1433
Li D H, Liu W P, Zhang Y X, Wang L H, Wei W L, Gao Y, Ding X, Wang L, Zhang X R. Identification method of drought tolerance and association mapping for sesame (*Sesamum indicum* L.). *Acta Agronomica Sinica*, 2013, 39 (8): 1425-1433
- [36] 王萍, 张希吏, 石磊. 干旱胁迫下沙芥幼苗叶片光合特性和叶绿素荧光参数的变化. *干旱地区农业研究*, 2017, 35 (3): 159-163
Wang P, Zhang X L, Shi L. Changes of photosynthetic characteristics and chlorophyll fluorescence parameters of *Pugionium Cornutum* (L.) gaertn seedlings leaf under drought stress. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2017, 35 (3): 159-163
- [37] 赵媛媛, 石瑛, 张丽莉. 马铃薯抗旱种质资源的评价. *分子植物育种*, 2018, 16 (2): 633-642
Zhao Y Y, Shi Y, Zhang L L. Evaluation of drought resistant germplasm resources in potato. *Molecular Plant Breeding*, 2018, 16 (2): 633-642
- ~~~~~
- (上接 609 页)
- [19] 王士强, 胡银岗, 余奎军, 周琳璘, 孟凡磊. 小麦抗旱相关农艺性状和生理生化性状的灰色关联度分析. *中国农业科学*, 2007, 40 (11): 2452-2459
Wang S Q, Hu Y G, She K J, Zhou L L, Meng F L. Gray relational grade analysis of agronomical and physi-biochemical traits related to drought tolerance in wheat. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, 40 (11): 2452-2459
- [20] 李贵全, 张海燕, 季兰, 赵二开, 刘建兵, 李玲, 张家蓉. 不同大豆品种抗旱性综合评价. *应用生态学报*, 2006 (12): 2408-2412
Li G Q, Zhang H Y, Ji L, Zhao E K, Liu J B, Li L, Zhang J R. Comprehensive evaluation on drought-resistance of different soybean varieties. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006 (12): 2408-2412
- [21] 祁旭升, 王兴荣, 许军, 张建平, 米君. 胡麻种质资源成株期抗旱性评价. *中国农业科学*, 2010, 43 (15): 3076-3087
Qi X S, Wang X R, Xu J, Zhang J P, Mi J. Drought-resistance evaluation of flax germplasm at adult plant stage. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43 (15): 3076-3087
- [22] Upadhyaya H D. Variability for drought resistance related traits in the mini core collection of peanut. *Crop Science*, 2005, 45 (4): 1432-1440
- [23] 岳爱琴, 杜维俊, 赵晋忠, 李贵全. 不同大豆品种抗旱性的研究. *山西农业大学学报: 自然科学版*, 2005, 25 (2): 157-160
Yue A Q, Du W J, Zhao J Z, Li G Q. Study on analysis of drought resistance in soybean. *Journal of Shanxi Agricultural University: Natural Science Edition*, 2005, 25 (2): 157-160
- [24] 罗俊杰, 欧巧明, 叶春雷, 王方, 王镛臻, 陈玉梁. 重要胡麻栽培品种的抗旱性综合评价及指标筛选. *作物学报*, 2014, 40 (7): 1259-1273
Luo J J, Ou Q M, Ye C L, Wang F, Wang Y Z, Chen Y L. Comprehensive valuation of drought resistance and screening of indices of important flax cultivars. *Acta Agronomica Sinica*, 2014, 40 (7): 1259-1273
- [25] 高雪芹, 伏兵哲, 穆怀彬, 兰剑, 李小伟. PEG-6000 干旱胁迫对沙芦草种子萌发特性的影响及其抗旱性评价. *种子*, 2013, 32 (8): 11-16
Gao X Q, Fu B Z, Mu H B, Lan J, Li X W. Effects and drought-resistances evaluation of drought simulate by PEG-6000 on *Agropyron mongolicum* Keng seed germination. *Seed*, 2013, 32 (8): 11-16
- [26] 陈小倩, 徐庆国. PEG-6000 干旱胁迫对 5 种牧草种子萌发的影响研究. *中国农学通报*, 2015, 31 (26): 7-11
Chen X Q, Xu Q G. Effects of PEG-6000 drought stress on seed germination of five forage grass species. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2015, 31 (26): 7-11