

艾鑫, 王诗语, 马鑫磊, 等. 不同油酸含量花生品种全生育期耐旱性鉴定指标筛选和综合评价[J]. 沈阳农业大学学报, 2024, 55(5): 513-522.

AI Xin, WANG Shiyu, MA Xinlei, et al. Selection and comprehensive evaluation of drought tolerance identification indexes during the whole growth period for peanut varieties with different oleic acid contents[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2024, 55(5): 513-522.

不同油酸含量花生品种全生育期耐旱性鉴定指标 筛选和综合评价

艾鑫¹, 王诗语¹, 马鑫磊¹, 于洋¹, 王婧¹, 钟超¹,
赵新华¹, 张鹤¹, 于海秋^{1,2}

(1. 沈阳农业大学农学院, 沈阳 110161; 2. 辽宁农业职业技术学院, 辽宁 营口 115009)

摘要: 干旱是限制我国花生产量和品质的关键环境因素之一。为探究不同油酸含量花生对干旱胁迫的反应, 筛选抗旱优质花生品种, 以 18 个普通品种和 18 个高油酸品种为试材, 设置全生育期正常灌水和中度干旱胁迫 2 个处理, 通过测定花生产量及其构成因素和籽粒品质指标, 并结合多元统计学分析方法, 对不同类型花生种质的全生育期耐旱性进行了综合评价。结果表明: 全生育期干旱胁迫下, 各品种的产量及其构成因素和可溶性糖含量显著降低, 高油酸花生籽粒粗脂肪含量、油酸含量和油亚比显著降低, 亚油酸含量显著升高, 而普通花生籽粒品质并没有发生显著变化。结合逐步回归分析建立的全生育期耐旱性综合评价数学模型和灰色关联度分析结果发现, 全生育期中度干旱条件下, 单株产量、百果重、单株荚果数、饱果率和可溶性糖含量可作为普通花生耐旱性鉴定的指标, 单株产量、百仁重、油亚比、饱果率和单株荚果数可作为高油酸花生耐旱性鉴定的指标。基于各指标抗旱系数的主成分分析、综合隶属函数和聚类分析结果, 最终筛选出普通耐旱品种 HY25, 普通旱敏感品种 FH18; 高油酸耐旱品种 JH16、KN71、HY665 和 KN1715; 高油酸旱敏感品种 HY52 和 HY951。

关键词: 花生; 油酸含量; 全生育期; 抗旱性评价; 产量; 品质

中图分类号: S565.2

文章编号: 1000-1700(2024)05-0513-10

文献标识码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Selection and Comprehensive Evaluation of Drought Tolerance Identification Indexes During the Whole Growth Period for Peanut Varieties with Different Oleic Acid Contents

AI Xin¹, WANG Shiyu¹, MA Xinlei¹, YU Yang¹, WANG Jing¹, ZHONG Chao¹,
ZHAO Xinhua¹, ZHANG He¹, YU Haiqiu^{1,2}

(1. College of Agronomy, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110161, China;

2. Liaoning Agriculture Vocational and Technical College, Yingkou Liaoning 115009, China)

Abstract: Drought is one of the key environmental factors limiting peanut production and quality in China. In order to explore the response of peanuts with different oleic acid contents to drought stress, and to screen for drought-resistant and high-quality peanut germplasm, this study selected 18 common peanut varieties and 18 high oleic peanut varieties as materials. Two treatments, normal irrigation and moderate drought stress, were set during the whole growth period. By assessing

收稿日期: 2024-04-12

基金项目: 国家现代农业产业技术体系项目(CARS-13); 花生抗逆提质增效技术集成与示范项目(2023JH1/10200002); 花生抗逆种质资源发掘与创新利用研究项目(23-410-2-08)

第一作者: 艾鑫(1996-), 女, 博士研究生, 从事作物逆境生理研究, E-mail: aixin199609@163.com

通信作者: 张鹤(1993-), 女, 博士, 讲师, 从事作物逆境生理与遗传基础研究, E-mail: zhanghe@syau.edu.cn

the yield, its components, and grain quality indexes while employing multivariate statistical analysis methods, a comprehensive evaluation was conducted to determine the drought tolerance of different types of peanut germplasm during the whole growth period. The results revealed that under the drought stress throughout the whole growth period, the yield and its constituent factors, as well as the soluble sugar content, were significantly reduced in all varieties. The fat content, oleic acid content, and oleic-to-linoleic acid ratio of high oleic acid peanut kernels were significantly decreased, while the linoleic acid content showed a significant increase. However, no significant changes were observed in the grain quality of regular peanut kernels. The combined findings of the comprehensive drought tolerance evaluation mathematical model established through stepwise regression analysis and the grey relational analysis revealed that individual plant yield, hundred-pod weight, number of pods per plant, pod filling rate, and soluble sugar content can be used as indicators for identifying drought tolerance in common peanuts during the whole growth period, while individual plant yield, hundred-seed weight, ratio of oleic acid and linoleic acid, pod filling rate, and number of pods per plant can be used as indicators for identifying drought tolerance in high oleic peanuts during the whole growth period. Based on principal component analysis of drought resistance coefficients for various parameters, comprehensive membership function analysis, and cluster analysis, the drought-tolerant common variety HY25 and drought-sensitive common variety FH18 were selected, as well as the drought-tolerant high oleic varieties JH16, KN71, HY665 and KN1715, and the drought-sensitive high oleic varieties HY52 and HY951.

Key words: peanuts; oleic acid content; whole growth period; drought tolerance evaluation; yield; quality

花生(*Arachis hypogaea* L.)是我国重要的经济和油料作物。国家统计局数据显示,2022年全国花生种植面积为468.4万 hm^2 ,相比于2014年增加31.4万 hm^2 ,单产则由2014年的 $3.64\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 上升至2022年的 $3.91\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$,2022年花生全国总产量为1 832.95万t,占油料作物产量一半以上。可见近10年来,全国花生种植面积不断扩大,产能稳步提升,成为种植面积仅次于大豆和油菜,产量仅次于大豆的重要油料作物。花生中脂肪含量占45%~55%,是花生主要营养成分。80%的花生脂肪酸由油酸和亚油酸构成,油酸作为单不饱和脂肪酸,具有稳定的理化性质,油酸/亚油酸比值高的花生产品货架期更长^[1]。此外,油酸还是公认的“安全脂肪酸”,研究表明,油酸具有降低血脂,增强脑认知能力,预防心脑血管疾病的功效^[2]。随着社会进步和人民生活水平提高,中国花生正在经历以营养价值高、耐储藏的高油酸品种替代普通品种为标志的第6次品种更新^[3],高油酸花生的选育和研究成为近年热点^[4-5]。

干旱胁迫作为世界范围内最严重的非生物胁迫之一,对作物生长发育产生不利影响,降低作物产量^[6],影响作物品质^[7]。近年来,干旱的发生频率和持续时间增加,干旱、半干旱地区农业生产受到严重威胁^[8]。花生具有耐贫瘠、耐旱等特点,且能够培肥地力,是理想旱地作物,因此多种植于我国干旱半干旱地区,整个生育期中常受到持续或间断干旱胁迫的影响^[9]。花生遭遇干旱胁迫时,叶片发育受到抑制,气孔关闭,净光合速率与胞间二氧化碳浓度降低,储藏物质消耗,新的光合产物难以形成;同时,茎秆失水弯曲,内部结构破坏,严重地影响了同化物运输能力,使花生中干物质转运和积累受阻,造成减产^[10-11]。叶片中合成的有机质作为花生种子主要内容物的合成前体,一般直接供给发育中的荚果和籽粒,而干旱胁迫会影响物质的分配^[12],优先供应地上部和根系,影响籽粒中脂质和蛋白质合成,花生品质受损^[13-14]。因此筛选培育优质耐旱花生品种对于解决干旱引起的生产力及品质下降十分必要。

目前,广大科研人员已经在花生种质耐旱性鉴定上取得了较大进展,但多集中于某一单一生育时期^[15],而作物各生育期之间耐旱性存在一定差异,只通过单一时期鉴定存在片面性。此外,目前筛选出的耐旱花生种质大多是普通花生品种^[16-17],耐旱鉴定指标的选择也局限于植株形态和生理指标^[18],鲜少将与花生生产直接相关的产量和品质指标同时应用于耐旱性筛选鉴定中。基于此,本研究以18个普通花生品种和18个高油酸花生品种为试材,采用大田人工控水的方式,测定全生育期中度干旱胁迫下花生产量和籽粒品质相关指标,结合多元统计分析,对花生耐旱性进行综合鉴定,以探究不同油酸含量花生品种对全生育期干旱胁迫的响应,为优质耐旱花生品种选育提供依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

以东北花生产区主要栽培的18个普通品种(沈阳农业大学花生研究所:农花5、农花9、农花11、农花12、农花13、农花14、农花15、农花16、农花19;河北省农林科学院粮油作物研究所:冀花4、冀花20;辽宁省风沙地改良利用研究所:阜花12、阜花18;锦州农业科学院:锦花15;青岛农业大学:青花6;山东省花生研究所:花育20、花育22、花育25)和18个高油酸品种(河北省农林科学院粮油作物研究所:冀花16、冀花915;开封市农林科学研究所:开农61、开农71、开农1760、开农1715;山东省花生研究所:花育52、花育51、花育655、花育665、花育668、花育901、花育917、花育951、花育956、花育958、花育962、花育965)为试材,品种具体信息如表1。试验所用种子均由沈阳农业大学花生研究所保存和提供。

表1 供试花生材料

Table 1 Peanut material for testing

高油酸花生品种 High oleic acid peanut variety	品种简称 Abbreviation	油酸含量/% Oleic acid content	油亚比 O/L	普通花生品种 Common peanut variety	品种简称 Abbreviation	油酸含量/% Oleic acid content	油亚比 O/L
花育917 Huayu917	HY917	75.05	13.59	农花9 Nonghua9	NH9	35.67	0.85
花育965 Huayu965	HY965	75.23	14.45	冀花4 Jihua4	JH4	36.47	0.86
花育951 Huayu951	HY951	75.42	12.26	农花15 Nonghua15	NH15	37.21	0.89
花育956 Huayu956	HY956	75.54	12.84	农花19 Nonghua19	NH19	37.25	0.90
花育901 Huayu901	HY901	76.18	12.49	阜花18 Fuhua18	FH18	37.45	0.91
冀花16 Jihua16	JH16	76.29	14.30	农花5 Nonghua5	NH5	37.86	0.92
花育655 Huayu655	HY655	77.75	14.27	农花16 Nonghua16	NH16	38.03	0.91
花育958 Huayu958	HY958	77.87	15.59	锦花15 Jinghua15	JH15	38.08	0.95
花育665 Huayu665	HY665	78.41	15.67	冀花20 Jihua20	JH20	38.24	0.94
冀花915 Jihua915	JH915	78.52	12.82	青花6 Qinghua6	QH6	38.48	0.94
开农71 Kainong71	KN71	78.87	15.47	花育22 Huayu22	HY22	39.5	0.98
花育52 Huayu52	HY52	78.93	15.19	花育25 Huayu25	HY25	39.56	1.00
花育668 Huayu668	HY668	79.52	19.01	阜花12 Fuhua12	FH12	39.62	1.02
花育51 Huayu51	HY51	79.75	10.08	花育20 Huayu20	HY20	40.32	1.06
开农1760 Kainong1760	KN1760	79.81	17.99	农花14 Nonghua14	NH14	40.91	1.10
开农1715 Kainong1715	KN1715	80.31	21.94	农花13 Nonghua13	NH13	41.17	1.06
开农61 Kainong61	KN61	80.49	21.67	农花11 Nonghua11	NH11	45.11	1.31
花育962 Huayu962	HY962	80.79	20.47	农花12 Nonghua12	NH12	45.83	1.28

1.2 试验设计

试验于2021-2023年在农业农村部东北地区作物栽培科学观测实验站(沈阳农业大学)干旱试验棚进行(123°57'E,41°83'N),土壤类型为棕壤土,碱解氮含量104.7 mg·kg⁻¹,速效磷含量25.1 mg·kg⁻¹,速效钾含量118.6 mg·kg⁻¹,pH值6.5。2021年5月28日播种,9月28日收获;2022年5月13日播种,9月20日收获;2023年5月19日播种,9月25日收获。播种前施磷酸二铵150 kg·hm⁻²、过磷酸钙300 kg·hm⁻²和硫酸钾150 kg·hm⁻²作为底肥,其他管理措施同田间管理措施。试验采用随机区组设计,每个处理每

个品种播种1垄,垄长1.5 m,垄距0.5 m,穴距0.07 m,双粒播种,出苗后间苗至每穴1株(图1)。试验设置全生育期中度干旱胁迫[DT,土壤相对含水量为田间持水量的(55±5)%]和正常供水[CK,土壤相对含水量为田间持水量的(70±5)%]2个处理,从出苗后开始控制水分,一直持续至成熟收获,于15 cm深处埋设土壤水分测定仪实时监测土壤含水量,每个处理3次重复。试验重复3年,本研究数据为3年试验结果的平均值。

1.3 测定项目及方法

花生成熟后,选取10株长势一致、有代表性的植株进行考种测产,调查花生单株荚果数、单株荚果重、单株果仁数、饱果率、百仁重、百果重,以单株荚果重作为单株产量。选取脱壳脱水后大小均匀一致的花生籽粒进行粗脂肪、粗蛋白、可溶性糖及脂肪酸含量的测定。

粗脂肪含量采用油重法^[19]测定;粗蛋白含量采用 $H_2SO_4 - H_2O_2$ 消煮凯氏定氮法测定;可溶性糖含量采用蒽酮法测定;脂肪酸含量采用气相色谱归一化法^[20]测定。

1.4 数据处理与统计分析

使用Microsoft Excel 2016进行数据整理。使用SPSS 26进行差异显著性检验、主成分分析、灰色关联度分析、聚类分析和逐步回归分析。使用Origin 2023进行作图。具体计算过程如下。

(1)以每一个测定指标3次重复的平均值为基础数据。计算每个测定指标的耐旱系数(drought resistance coefficient, DC)。

$$DC = \text{干旱胁迫性状值} / \text{对照性状值}$$

$$(2) \text{综合指标: } X = V_1 Y_1 + V_2 Y_2 + \dots + V_{11} Y_{11}$$

式中: $V_1 \sim V_{11}$ 为性状参数的抗旱系数值; $Y_1 \sim Y_{11}$ 为性状参数对应的各成分值。

$$(3) \text{隶属函数值: } U(X_j) = (X_j - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})$$

式中: X_j 为某综合指标, $j = 1, 2, 3, \dots, n$; X_{\max} 和 X_{\min} 分别为第 j 个综合指标的最大值和最小值。隶属函数转换可以消除不同性状数值的纲量级差异。

$$(4) \text{主成分权重: } W_j = P_j / \sum_{i=1}^n P_i$$

式中: P_j 为某综合指标贡献率。

$$(5) \text{综合评价: } D = \sum_{j=1}^n [U(X_j) \times W_j]$$

式中: $U(X_j)$ 为第 j 个综合指标的隶属函数值; W_j 为第 j 个主成分的权重,具体表示各花生品种在干旱处理下由综合指标评价所得的耐旱性综合评价。

$$(6) \text{灰色关联度系数: } LO_i(k) = (\Delta_{\min} + \rho \Delta_{\max}) / [\Delta O_i(k) + \rho \Delta_{\max}]$$

式中: $\Delta O_i(k)$ 为 k 时刻2个序列的绝对差; Δ_{\max} 和 Δ_{\min} 分别为所有比较序列各时刻绝对差中的最大值和最小值, $\Delta_{\min} = 0$,分辨系数 $\rho = 0.5$ 。

以各指标 DC 值为比较序列,分别以 D 值为参考序列进行灰色关联度分析,获得各指标 DC 值与 D 值的关联度,并以 D 值为因变量,对各指标 DC 值进行逐步回归分析,获得回归方程。

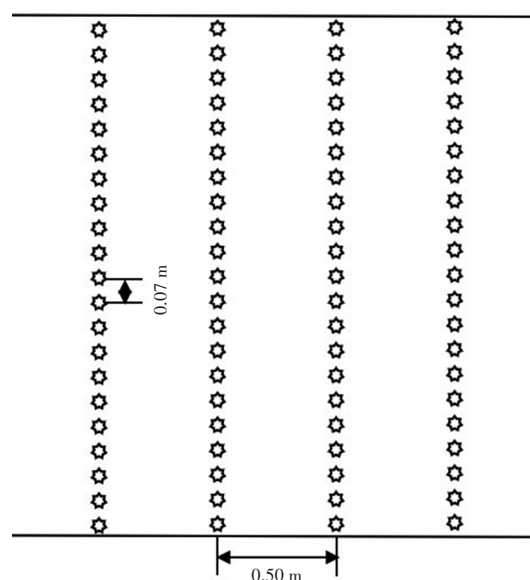


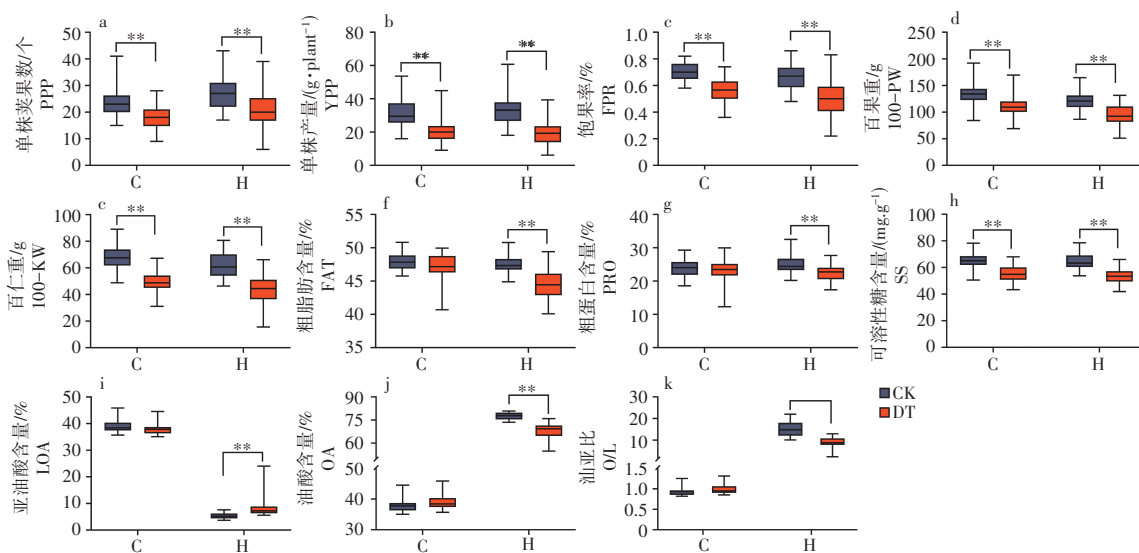
图1 种植分布图

Figure 1 Planting distribution map

2 结果与分析

2.1 全生育期干旱胁迫对花生籽粒主要性状影响

由图2可知,普通花生和高油酸花生单株产量、单株荚果数、饱果率、百果重、百仁重等产量相关指标在干旱胁迫下均显著降低。但籽粒品质相关指标的变化存在明显差异,普通花生仅可溶性糖含量显著降低,其他品质指标无显著变化;而高油酸花生的粗脂肪含量、油酸含量和油亚比等品质指标均大幅降低,亚油酸含量显著升高。对各品种11个性状的耐旱系数(DC)进行统计分析发现,同一指标下的不同油酸含量花生DC值存在较大差异,普通花生单株产量、百果重、百仁重、油酸、油亚比DC平均值显著高于高油酸花生,而亚油酸和粗蛋白的DC平均值显著低于高油酸花生,不同指标DC值变异系数介于3.75%~47.821%之间(表2),说明不同花生品种的各指标对干旱胁迫的响应规律不同。



**表示在0.01水平上显著差异。PPP.单株荚果数;YPP.单株产量;FPR.饱果率;100-PW.百果重;100-KW.百仁重;FAT.粗脂肪含量;PRO.粗蛋白含量;SS.可溶性糖含量;LOA.亚油酸含量;OA.油酸含量;O/L.油亚比;C.普通花生;H.高油酸花生。下同
 ** is significant different at the 0.01 probability levels.PPP.Pods per plant;YPP.Yield per plant;FPR.Full pod rate;100-PW.100-pod weight;100-KW.100-kernel weight;FAT.Fat content;PRO.Protein content;SS.Soluble sugar content;LOA.Linoleic acid content;OA.Oleic acid content;O/L.Oleate to linoleate ratio; C.Common peanut;H.High oleic acid peanut.The same below

图2 干旱胁迫对花生产量及其构成因素和籽仁品质指标影响

Figure 2 Effects of drought stress on peanut yield,its constituent factors and physiological indexes of peanut grains

表2 干旱胁迫下花生各性状耐旱系数描述性统计

Table 2 Descriptive statistics of drought resistance coefficient of peanut traits under drought stress

指标 Indexes	普通花生 Common peanut				高油酸花生 High oleic acid peanut			
	最大值 Maximum	最小值 Minimum	平均值 Average	变异系数/% CV	最大值 Maximum	最小值 Minimum	平均值 Average	变异系数/% CV
单株荚果数 PPP	1.095	0.462	0.758±0.184 ^a	24.254	1.004	0.476	0.761±0.142 ^a	18.633
单株产量 YPP	0.911	0.319	0.655±0.201 ^a	30.780	0.825	0.275	0.605±0.159 ^b	26.243
饱果率 FPR	0.986	0.542	0.788±0.123 ^a	15.640	0.916	0.473	0.749±0.130 ^a	17.368
百果重 100-PW	1.191	0.680	0.853±0.134 ^a	15.672	0.999	0.563	0.788±0.144 ^b	18.298
百仁重 100-KW	0.911	0.411	0.764±0.129 ^a	16.840	0.940	0.460	0.700±0.158 ^b	22.559
粗脂肪 FAT	1.040	0.852	0.979±0.047 ^a	4.785	0.995	0.467	0.911±0.118 ^a	12.996
粗蛋白 PRO	1.221	0.715	0.992±0.141 ^b	14.201	1.798	0.493	1.081±0.391 ^a	36.197
油酸 OA	1.134	0.963	1.028±0.041 ^a	3.954	0.958	0.698	0.881±0.064 ^b	7.264
亚油酸 LOA	1.040	0.886	0.983±0.037 ^b	3.758	4.635	1.078	1.728±0.827 ^a	47.821
油亚比 O/L	1.280	0.940	1.049±0.081 ^a	7.747	0.864	0.151	0.584±0.176 ^b	30.140
可溶性糖 SS	0.907	0.754	0.850±0.046 ^a	5.368	0.922	0.678	0.825±0.061 ^a	7.404

注:不同小写字母表示处理间差异显著(p<0.05)。

Note:Different lowercase letters indicate differences within treatments are significant at p<0.05.

2.2 相关性分析

由图 3 可知,普通花生中单株产量耐旱系数与单株荚果数、饱果率、百果重、百仁重和可溶性糖等显著正相关,粗脂肪与粗蛋白显著负相关,油酸与油亚比之间呈正相关关系,与可溶性糖显著负相关,亚油酸与油酸、油亚比显著负相关,与可溶性糖显著正相关,但脂肪酸品质相关指标与产量相关指标之间无显著相关性。在高油酸花生中,单株产量及构成因素与油酸、油亚比显著正相关,饱果率与可溶性糖显著正相关,可溶性糖含量与油亚比显著正相关,与亚油酸含量极显著负相关。以上结果表明普通花生和高油酸花生的品质指标对干旱胁迫的响应不甚相同,并且单项指标在花生耐旱性的评价结果中存在较大差异,直接利用某一个单项指标难以准确、直观地判断花生耐旱性。

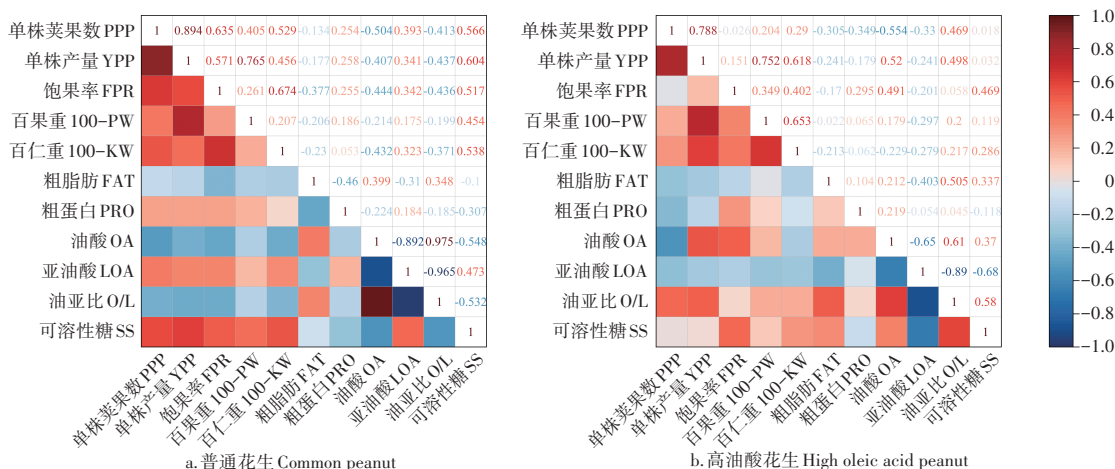


图3 全生育期干旱胁迫下普通和高油酸花生各指标抗旱系数的相关性分析

Figure 3 Correlation analysis of drought resistance coefficients for various parameters in common and high oleic peanut under full reproductive stage drought stress

2.3 主成分分析

为了弥补单项指标评价抗旱性的不足,进一步通过多项指标的多元统计分析对花生耐旱性进行综合评价。对普通花生和高油酸花生 11 个性状的耐旱系数进行主成分分析,按照其特征值大于 1 的原则,从普通花生中提取出 4 个主成分,累计贡献率为 81.457%;从高油酸花生中提取出 4 个主成分,累计贡献率为 80.294%,均具有较强信息代表性。其中普通花生品种 4 个综合指标分别反映原始数据的 40.003%、18.315%、13.281% 和 9.859%,高油酸花生品种 4 个综合指标分别反映原始数据的 32.386%、24.835%、13.734% 和 9.339%(表 3)。

表3 普通花生和高油酸花生各指标主成分特征向量及贡献率

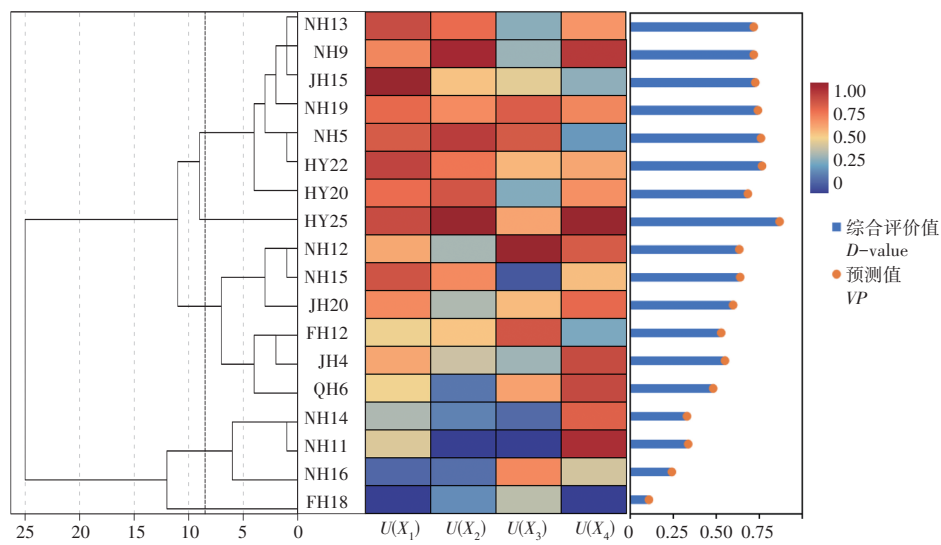
Table 3 Eigenvector and contribution rate of principal components of Common peanut and High oleic acid peanut all traits

主成分 Principle factor	普通花生 Common peanut				高油酸花生 High oleic acid peanut			
	PI1	PI2	PI3	PI4	PI1	PI2	PI3	PI4
特征值 Eigen value	4.400	2.015	1.461	1.084	3.562	2.732	1.511	1.027
贡献率 Contribution rate/%	40.003	18.315	13.281	9.859	32.386	24.835	13.734	9.339
累计贡献率 CCR/%	40.003	58.318	71.598	81.457	32.386	57.220	70.955	80.294
特征向量 Eigenvector								
单株荚果数 PPP	0.417	0.371	0.060	-0.203	0.149	0.399	-0.383	0.125
单株产量 YPP	0.405	0.479	0.116	-0.021	0.282	0.465	-0.131	0.265
饱果率 FPR	0.189	-0.192	-0.259	0.544	0.236	0.075	0.578	-0.302
百果重 100-PW	0.207	0.425	0.175	0.257	0.327	0.294	0.205	0.260
百仁重 100-KW	0.170	-0.011	0.266	0.574	0.295	0.361	0.182	-0.267
粗脂肪 FAT	-0.260	-0.198	0.337	0.391	0.144	-0.391	-0.177	0.003
粗蛋白 PRO	0.161	0.216	-0.650	0.287	0.020	-0.178	0.579	0.465
油酸 OA	0.328	-0.280	-0.039	-0.084	0.299	-0.287	0.002	0.412
亚油酸 LOA	-0.379	0.368	0.061	0.101	-0.468	0.194	0.140	-0.039
油亚比 O/L	0.332	-0.330	-0.056	-0.123	0.420	-0.258	-0.199	0.061
可溶性糖 SS	0.316	-0.085	0.519	-0.007	0.377	-0.176	-0.002	-0.543

特征向量表现了各鉴定指标对主成分的影响程度。在普通花生中,单株产量、单株荚果数、百果重、百仁重、饱果率是第一、二、四主成分的主要指标,这3个主成分与花生产量关系紧密。粗蛋白含量和可溶性糖含量是第三主成分的主要指标,该主成分与花生籽粒品质关系密切。高油酸花生中第一、三、四主成分与亚油酸、粗蛋白、可溶性糖、油亚比相关性较大,反映了干旱胁迫下花生籽粒品质情况;第二主成分主要指标是单株荚果数和单株产量,反映了胁迫下高油酸花生生产力(表3)。

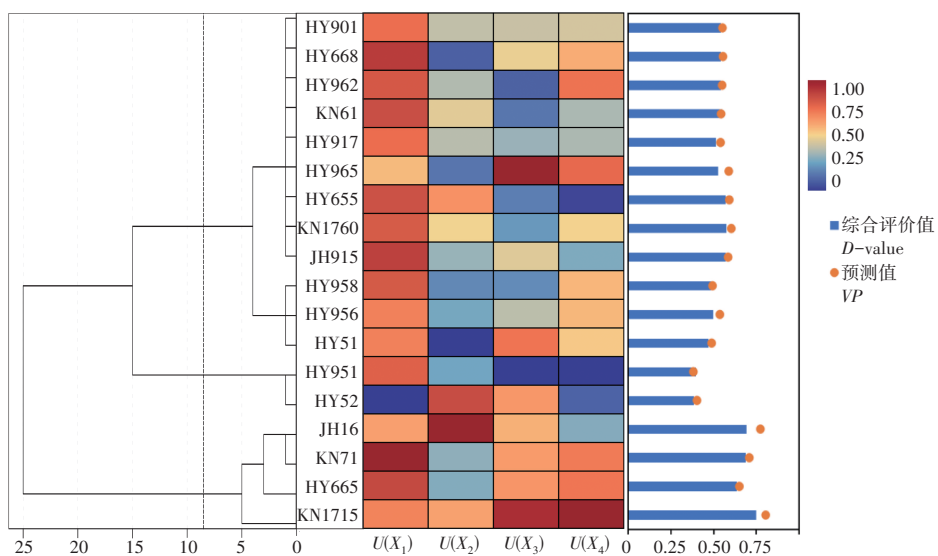
2.4 综合隶属函数分析

根据不同的主成分值,计算4个综合指标的隶属函数值,并基于4个主成分因子的贡献率计算各综合指标的权重分别为49.109%、22.484%、16.304%和12.103%,进一步计算各花生品种耐旱性综合评价价值(D)。按照 D 值大小评价不同花生品种耐旱性,其中普通花生中HY25和HY22的 D 值最大,分别为0.866和0.764,FH18和NH16的 D 值最小,分别为0.107和0.240;高油酸花生中,KN1715和JH16的 D 值最大,分别为0.804和0.773,HY951和HY52的 D 值最小,分别为0.381和0.402(图4)。



a. 普通花生隶属函数值 $U(X_j)$ 、综合评价价值(D)和预测值(VP)

Value of each common peanut cultivar's $U(X_j)$, integrated assessment value (D) and prediction (VP)



b. 高油酸花生隶属函数值 $U(X_j)$ 、综合评价价值(D)和预测值(VP)

Value of each high oleic acid peanut cultivar's $U(X_j)$, integrated assessment value (D) and prediction (VP)

图4 普通花生和高油酸花生基于 D 值的聚类分析

Figure 4 Cluster analysis of common peanut and high oleic acid peanut based on D -value

2.5 聚类分析

采用平均欧氏距离法对各品种的D值进行系统聚类,在距离为8.5处可以将普通花生分为5类,高油酸花生分为3类(图4)。其中普通花生分为强耐旱型品种HY25;耐旱型品种7个,包括NH5和HY22等;中度旱敏感型品种6个,包括NH15和NH12等;旱敏感型品种3个,包括NH16等;极端旱敏感型品种FH18。高油酸花生分为耐旱型品种4个,包括KN1715和KN71等;中度耐旱型品种12个,包括HY655和KN1760等;旱敏感型品种2个,包括HY951和HY52。

2.6 逐步回归分析

为筛选评价花生全生育期耐旱性的鉴定指标,以11个性状指标相对值为作自变量,将D值作为因变量进行逐步回归分析。普通花生得到方程 $Y=-1.194+0.316X_1+0.397X_2+0.107X_3+0.422X_4+0.356X_5-0.006X_6+0.019X_7+0.081X_8+0.145X_9+0.362X_{10}$ ($R^2=1.000, p<0.001$),高油酸花生得到方程 $Y=0.014+0.140X_1+0.189X_2+0.159X_3+0.210X_4+0.0098X_5-0.196X_6+0.151X_7+0.091X_8-0.005X_9-0.083X_{10}-0.026X_{11}$ ($R^2=1.000, p<0.001$)。方程可知,普通花生除了亚油酸,其他指标均与D值有显著相关关系,可作为鉴定指标。高油酸花生11项生理及产量指标均可以作为花生耐旱性鉴定指标。用该方程对各花生耐旱能力进行预测,预测值VP(图3)与D值相关系数分别为0.999和0.982,显著相关,说明该方程能够较好地预测花生全生育期耐旱能力。

2.7 灰色关联度分析

对各时期生理指标耐旱系数DC与综合评价D值进行灰色关联度分析,关联度大小反映了指标DC值与D值的关系密切程度(图5)。结果表明,干旱胁迫下普通花生中单株产量、百仁重、单株荚果数、饱果率和可溶性糖与综合评价D值关系较为密切,关联度分别为0.86,0.73,0.72,0.70,0.67。而高油酸花生中与综合评价D值关系密切的测定指标是单株产量、百仁重、油亚比、饱果率和单株荚果数,关联度分别为0.96,0.93,0.92,0.91,0.91。

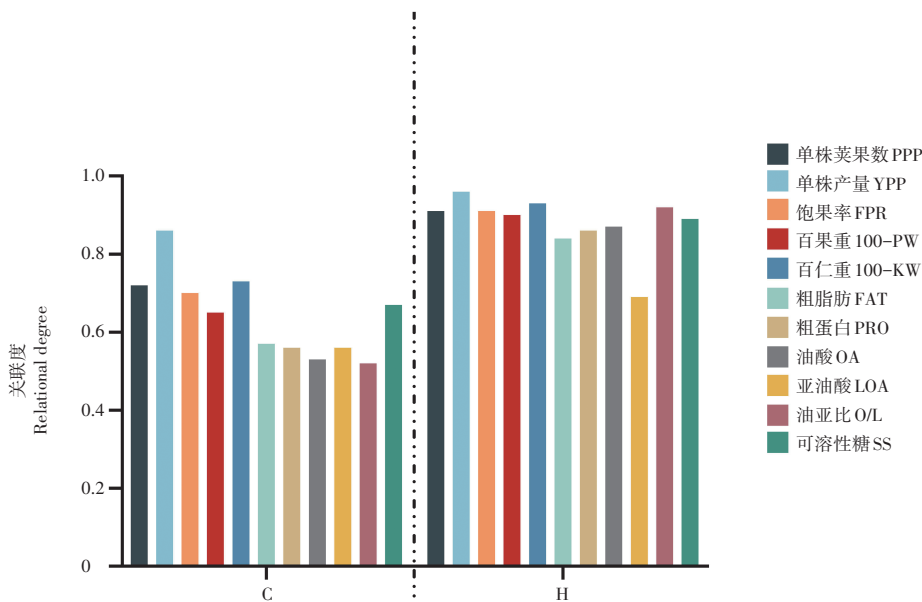


图5 各生理指标相对值与综合评价D值灰色关联度

Figure 5 Grey relational degree between relative value of single index and comprehensive evaluation

3 讨论与结论

干旱作为所有非生物胁迫中对农作物影响最大的因素,抑制作物生长,影响作物“源-库-流”之间协调能力,降低产量。作物籽粒利用和储存同化物,在“源库”关系中扮演“库”的角色,衡量库的大小和强度的指标有粒数、粒重等,而产量是库容最直接的反映。干旱胁迫下小麦籽粒数目减少,产量大

幅降低^[21-22],大豆的结荚数、粒数、百粒重也在干旱胁迫下显著降低^[23],花前干旱通过减少玉米穗粒数降低产量^[24-27]。本研究中也得到相似的结论,全生育期干旱胁迫下普通花生和高油酸花生的单株产量、单株荚果数、饱果率、百果重和百仁重均极显著下降,其中高油酸花生单株产量、百仁重、百果重耐旱系数均值显著低于普通花生,这说明相较于普通花生,高油酸花生应对干旱能力较弱,产能不稳定。

SHINOZAKI等^[28]认为,干旱有利于作物籽粒品质的提高。但干旱胁迫对于作物品质的影响因作物类型差异很大。干旱胁迫下大豆粗蛋白、粗脂肪、果糖含量呈上升趋势^[29];玉米粗脂肪和蛋白含量先升高后降低^[30];花生籽仁粗蛋白含量和增长速率胁迫下显著升高,但对脂肪含量影响较小^[31-32]。本研究中,全生育期干旱胁迫对于普通花生粗脂肪和粗蛋白含量没有显著的影响,但是显著降低可溶性糖含量。高油酸花生粗脂肪、粗蛋白、可溶性糖含量在干旱胁迫下均显著降低。干旱胁迫还会通过影响作物脂肪酸的生化途径,改变脂肪酸比例构成。干旱胁迫使菜籽中的油酸含量减少,亚油酸和亚麻酸含量增加^[33];大豆种子中棕榈酸、亚油酸和亚麻酸含量在干旱胁迫下降低,硬脂酸和油酸含量升高^[34]。前人针对花生的研究中,发现干旱处理对花生成熟籽粒油亚比无显著影响^[35]。这与本研究部分结果一致,全生育期干旱胁迫下普通花生的油酸、亚油酸含量和油亚比均没有发生显著的变化,但高油酸花生油酸含量显著降低,亚油酸含量显著升高,油亚比显著降低,籽粒品质严重受损。

作物的耐旱性作为受到多个数量性状控制的复杂性状,并不能被单一的指标准确评价。目前,为避免单一评价指标带来的片面性与不稳定性,减少指标间信息的交叉重叠,采用多个指标对作物耐旱性进行综合评价的方法已经得到广泛应用^[36-39]。本研究选取了11个性状,涵盖花生产量及其构成因素和籽仁品质,综合主成分分析、灰色关联度分析和逐步回归方程的结果,进行最适鉴定指标的筛选。主成分分析显示,普通花生中对四个主成分影响最强的评价指标是单株产量、单株荚果数、百果重、粗蛋白含量、可溶性糖含量、饱果率和百仁重;而高油酸花生中,对主成分影响程度最大的是亚油酸含量、油亚比、单株总荚数、单株产量、饱果率、粗蛋白含量和可溶性糖含量。逐步回归方程结果中,普通花生剔除了亚油酸含量这一指标,认为其他10项评价指标与*D*值具有显著相关关系,而高油酸花生逐步回归分析认为所有评价指标均对*D*值产生显著影响。灰色关联度分析结果对*D*值与各评价指标关联度进行了排序,普通花生排在前五位的是单株产量、百果重、单株荚果数、饱果率和可溶性糖含量。高油酸花生关联度前五位的是单株产量、百仁重、油亚比、饱果率、单株荚果数。

综合上述结果,本研究表明全生育期干旱胁迫显著降低各品种花生产量及其构成因素,对普通花生籽仁品质几乎无影响,但显著降低了高油酸花生籽仁品质。利用多元统计分析,对11个鉴定指标进行筛选,确定单株产量、百果重、单株荚果数、饱果率和可溶性糖含量为普通花生全生育期耐旱性筛选的指标,而单株产量、百仁重、油亚比、饱果率、单株荚果数为高油酸花生全生育期耐旱性筛选的指标。基于花生产量及其构成因素和籽粒品质性状,采用聚类分析对不同油酸含量花生进行耐旱性综合鉴定评价,筛选出了普通耐旱花生品种HY25,普通早敏感花生品种FH18;高油酸耐旱花生品种JH16、KN71、HY665和KN1715;高油酸早敏感花生品种HY52和HY951。

参考文献:

- [1] MARTÍN M P, GROSSO A L, NEPOTE V, et al. Sensory and chemical stabilities of high-oleic and normal-oleic peanuts in shell during long-term storage[J]. *Journal of Food Science*, 2018, 83(9):2362-2368.
- [2] 全国农业技术推广服务中心. 高油酸花生产业纵论[M]. 北京:中国农业科学技术出版社, 2019.
- [3] 周小静, 任小平, 黄莉, 等. 花生种质资源研究进展与展望[J]. *植物遗传资源学报*, 2020, 21(1):33-39.
- [4] GULTEN H T, POLAT M, BASAK M, et al. Molecular breeding to develop advanced lines with high oleic acid and pod yield in peanut[J]. *Industrial Crops and Products*, 2023, 203:117231.
- [5] 胡延岭, 杨海棠, 李盼, 等. 不同气象条件对高油酸花生产量的影响[J]. *中国油料作物学报*, 2024, 46(1):129-134.
- [6] 崔蓉, 柳鑫婧, 李锦秀, 等. 不同干旱胁迫程度对不同品种玉米关键生育期抗氧化特性的影响[J]. *南京农业大学学报*, 2022, 45(3):545-552.
- [7] ILYAS M, NISAR M, KHAN N, et al. Drought tolerance strategies in plants: A mechanistic approach[J]. *Journal of Plant Growth Regulation*, 2021, 40(3):926-944.
- [8] ULLAH S, KHAN M N, LODHI S S, et al. Targeted metabolomics reveals fatty acid abundance adjustments as play-

- ing a crucial role in drought-stress response and post-drought recovery in wheat[J].Frontiers in Genetics,2022,13:972696.
- [9] 潘德成,宋冬,孟宪华,等.近50年辽西北半干旱区降水变化与花生水分适宜性评价[J].干旱地区农业研究,2013,31(5):9-13.
- [10] BAROOWA B,GOGOI N.Biochemical changes in two *Vigna* spp.during drought and subsequent recovery[J].Indian Journal of Plant Physiology,2013,18(4):319-325.
- [11] NADEEM M,LI J J,YAHYA M,et al.Grain legumes and fear of salt stress:Focus on mechanisms and management strategies[J].International Journal of Molecular Sciences,2019,20(4):799.
- [12] 师亚婷,单立山,解婷婷,等.干旱胁迫下红砂幼苗非结构性碳水化合物动态变化特征[J].西北植物学报,2023,43(1):116-126.
- [13] 曹铁华,梁烜赫,张磊,等.开花后水分胁迫对花生产量形成过程的影响[J].吉林农业大学学报,2011,33(1):9-13.
- [14] 嵇军德.花生品种抗旱性与开花结实特性的关系[D].泰安:山东农业大学,2015.
- [15] 刘永惠,詹成芳,沈一,等.不同花生品种(系)萌发期抗旱性鉴定评价[J].植物遗传资源学报,2016,17(2):233-238.
- [16] 张智猛,戴良香,丁红,等.中国北方主栽花生品种抗旱性鉴定与评价[J].作物学报,2012,38(3):495-504.
- [17] MEHER,SHIVAKRISHNA P,ASHOK REDDY K,et al.Effect of PEG-6000 imposed drought stress on RNA content,relative water content (RWC),and chlorophyll content in peanut leaves and roots[J].Saudi Journal of Biological Sciences,2018,25(2):285-289.
- [18] 于树涛,于国庆,孙泓希,等.高油酸花生品种(系)抗旱性综合评价[J].分子植物育种,2021,19(8):2747-2757.
- [19] 中华人民共和国农业部.谷类、油料作物种子粗脂肪测定方法:GB2906-1982[S].北京:中国标准出版社,1982.
- [20] 纪红昌,胡畅丽,邱晓臣,等.花生籽仁品质性状高通量表型分析模型的构建[J].作物学报,2023,49(3):869-876.
- [21] 刘希伟,王德梅,王艳杰,等.小麦生育中后期干旱高温对籽粒产量形成过程的影响机制及缓解措施[J].作物杂志,2023(6):17-25.
- [22] 任洪雷,朱筱,张丰屹,等.干旱胁迫的影响及抗旱性研究进展[J/OL].分子植物育种,https://link.cnki.net/urlid/46.1068.S.20240119.1548.002.
- [23] 季亚卉.碳量子点调控大豆耐旱性和品质的机制研究[D].无锡:江南大学,2023.
- [24] DU X B,ZHANG X Y,CHEN X F,et al.Drought stress reduces the photosynthetic source of subtending leaves and the transit sink function of podshells,leading to reduced seed weight in soybean plants[J].Frontiers in Plant Science,2024,15:1337544.
- [25] HAMEED S,ATIF M,PERVEEN S.Role of gibberellins,neem leaf extract,and serine in improving wheat growth and grain yield under drought-triggered oxidative stress[J].Physiology and Molecular Biology of Plants,2023,29(11):1675-1691.
- [26] 朱丽杰.不同生育期干旱胁迫/复水对大豆光合特性、产量及品质的影响[D].沈阳:沈阳农业大学,2022.
- [27] 李小凡.高温、干旱及其复合胁迫对夏玉米产量形成的影响[D].泰安:山东农业大学,2022.
- [28] SHINOZAKI K,DENNIS E S.Cell signalling and gene regulation:Global analyses of signal transduction and gene expression profiles[J].Current Opinion in Plant Biology,2003,6(5):405-409.
- [29] 王兴荣,张彦军,陈光荣,等.干旱胁迫对大豆光合、产量及品质的影响[J].干旱地区农业研究,2023,41(2):150-159.
- [30] 孔建禄,曾湧,李世成,等.干旱胁迫对玉米生长、生理指标及品质的影响[J].玉米科学,2023,31(4):91-98.
- [31] 康涛,戴良香,李文金,等.干旱胁迫对不同类型花生根系生理特性及产量品质的影响[J].花生学报,2017,46(1):53-58.
- [32] 张晨,戴良香,张冠初,等.旱盐复合胁迫对花生荚果发育特性、产量和品质的影响[J].花生学报,2023,52(1):72-79.
- [33] SAFAVI FARD N,HEIDARI SHARIF ABAD H,SHIRANI RAD A H,et al.Effect of drought stress on qualitative characteristics of canola cultivars in winter cultivation[J].Industrial Crops and Products,2018,114:87-92.
- [34] GAO J,HAO X M,THELEN K D,et al.Agronomic management system and precipitation effects on soybean oil and fatty acid profiles[J].Crop Science,2009,49(3):1049-1057.
- [35] 刘海东,陈庆政,林秀芳,等.干旱胁迫对花生生理特性与产质量的影响[J].贵州农业科学,2022,50(12):25-34.
- [36] 李阳阳,李驰,任俊洋,等.甘蓝型油菜苗期耐旱性综合评价与耐旱性鉴定指标筛选[J].中国生态农业学报(中英文),2021,29(8):1327-1338.
- [37] 任婧瑶,王婧,蒋春妮,等.花生种质苗期耐旱性鉴定与综合评价[J].沈阳农业大学学报,2019,50(6):722-727.
- [38] 王永刚,张胜军,刘亚丽,等.新疆冬小麦品种资源萌发期耐旱性鉴定与筛选[J].新疆农业科学,2021,58(11):2024-2034.
- [39] 肖继兵,刘志,辛宗绪,等.基于主成分分析和隶属函数的谷子全生育期耐旱性鉴定[J].干旱地区农业研究,2022,40(6):34-44.