中国生态农业学报(中英文)
Chinese Journal of Eco-Agriculture
中文核心期刊
中国科技核心期刊
中国精品科技期刊
百种中国杰出学术期刊
中国科学引文数据库源刊

甘蓝型油菜苗期耐旱性综合评价与耐旱性鉴定指标筛选

李阳阳，李驰，任俊洋，李志，张晋峰，吕蓉蓉，张恒，吴丹，王芹，周清元，殷家明，李加纳，刘列钊，唐章林

引用本文:
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.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.200877

(向下翻页，阅读全文)

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

不同春小麦品种耐低磷性评价及种质筛选

Evaluation of low phosphorus tolerance and germplasm screening of spring wheat

中国生态农业学报(中英文). 2020, 28(7): 999–1009 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.200098

低氮胁迫对谷子苗期性状的影响和耐低氮品种的筛选

Effects of low nitrogen stress on foxtail millet seedling characteristics and screening of low nitrogen tolerant varieties

中国生态农业学报(中英文). 2020, 28(4): 523–534 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.190847

基于投影寻踪模型的甘蓝型油菜产量因素评价

Evaluation of factors affecting rape (swede type) yield using the projection pursuit model

中国生态农业学报(中英文). 2019, 27(3): 462–473 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.181012

春播半冬性甘蓝型油菜光温因子与产量及农艺性状的典型相关分析

Canonical correlations of light and temperature with yield and agronomic traits of semi–winter rapeseed (Brassica napusL.) sowed in spring

中国生态农业学报. 2015(8): 987–993 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.150210

16份菊芋种质苗期耐盐碱性筛选与综合鉴定

Comprehensive identification of saline–alkaline tolerance of 16 Jerusalem artichoke accessions at seedling stage

中国生态农业学报. 2015(5): 620–627 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.141306

中国生态农业学报(中英文) 2021 年 8 月 第 29 卷 第 8 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Aug. 2021, 29(8): 1327−1338

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.200877

李阳阳, 李驰, 任俊洋, 李志, 张晋峰, 吕蓉蓉, 张恒, 吴丹, 王芹, 周清元, 殷家明, 李加纳, 刘列钊, 唐章林. 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

LI Y Y, LI C, REN J Y, LI Z, ZHANG J F, LYU R R, ZHANG H, WU D, WANG Q, ZHOU Q Y, YIN J M, LI J N, LIU L Z, TANG Z L. Comprehensive evaluation and identification trait selection of drought resistance at the seedling stage of *Brassica napus* L.[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2021, 29(8): 1327−1338

甘蓝型油菜苗期耐旱性综合评价与耐旱性鉴定指标筛选*

李阳阳[1,2], 李　驰[1,2], 任俊洋[1,2], 李　志[1,2], 张晋峰[1,2], 吕蓉蓉[1,2], 张　恒[1,2], 吴　丹[1,2], 王　芹[1,2], 周清元[1], 殷家明[1], 李加纳[1,2], 刘列钊[1,2**], 唐章林[1,2**]

(1. 西南大学农学与生物科技学院　重庆　400715; 2. 西南大学农业科学研究院　重庆　400715)

摘　要: 我国油菜生产经常遭受干旱胁迫而影响产量和品质, 综合评价油菜种质资源的耐旱性, 筛选耐旱种质, 确定耐旱性鉴定指标, 是耐旱新品种培育和耐旱机理研究的基础性工作。本研究利用 229 份甘蓝型油菜种质资源, 在苗期设置干旱胁迫组和正常灌溉(对照)组, 测定地上和地下部鲜重和干重及叶片过氧化物酶活性、丙二醛含量、脯氨酸含量、可溶性蛋白含量、可溶性糖含量和相对含水量 10 个性状, 采用耐旱系数、聚类分析、隶属函数、主成分分析和灰色关联度分析等方法对其耐旱性进行综合评价。结果显示, 苗期干旱胁迫使甘蓝型油菜幼苗地上和地下部干重和鲜重及叶片相对含水量和可溶性蛋白含量显著降低, 使叶片过氧化物酶活性、丙二醛含量、可溶性糖含量和脯氨酸含量显著升高, 而地下部干重在正常灌溉组与干旱胁迫组之间差异不显著。229 份种质资源划分为 8 个类群, 各类群表现出不同的耐旱特性。RR002、9801C、炎 81-2、07037、浙油 758 和 09-P64-1 为耐旱材料, 11-P30、CY16PXW-35、08-P35、09-P36、甲 972 和 A148 为干旱敏感材料。地上部鲜重、叶片脯氨酸含量和可溶性糖含量可作为甘蓝型油菜苗期综合耐旱性快速、简便、准确的鉴定指标。

关键词: 甘蓝型油菜; 耐旱性; 种质筛选; 鉴定指标; 苗期

中图分类号: S326; S565.4　　开放科学码(资源服务)标识码(OSID):

Comprehensive evaluation and identification trait selection of drought resistance at the seedling stage of *Brassica napus* L.*

LI Yangyang[1,2], LI Chi[1,2], REN Junyang[1,2], LI Zhi[1,2], ZHANG Jinfeng[1,2], LYU Rongrong[1,2], ZHANG Heng[1,2], WU Dan[1,2], WANG Qin[1,2], ZHOU Qingyuan[1], YIN Jiaming[1], LI Jiana[1,2], LIU Liezhao[1,2**], TANG Zhanglin[1,2**]

(1. College of Agronomy and Biotechnology, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. Academy of Agricultural Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China)

Abstract: The yield and quality of *Brassica napus* L. are often affected by drought stress in China. To identify

* 国家重点研发计划项目(2018YFD0100500)和重庆市社会事业与民生保障科技创新主题专项(cstc2016shms-ztzx80010)资助

** 通信作者: 唐章林, 主要研究方向为油菜耐旱性品种选育, E-mail: tangzhlin@swu.edu.cn; 刘列钊, 主要研究方向为油菜耐旱性机理研究, E-mail: liezhao2003@126.com

李阳阳, 主要研究方向为油菜耐旱性机理研究。E-mail: liyangyangswu@163.com

收稿日期: 2020-10-29　接受日期: 2021-02-10

* This study was supported by the National Key R&D Program of China (2018YFD0100500) and the Science & Technology Innovation Project of Chongqing Social Undertakings & Livelihood Security (cstc2016shms-ztzx80010).

** Corresponding authors: TANG Zhanglin, E-mail: tangzhlin@swu.edu.cn; LIU Liezhao, E-mail: liezhao2003@126.com

Received Oct. 29, 2020; accepted Feb. 10, 2021

drought-tolerant and drought-sensitive germplasms, screen for indices of drought tolerance to reduce cost and improve efficiency, provide a basis for breeding drought-tolerant varieties, and investigate the mechanisms of drought tolerance, 229 *B. napus* accessions were subjected to two water treatments (drought stress and well watering) at the seedling stage. The shoot fresh weight, shoot dry weight, root fresh weight, root dry weight, leaf peroxidase activity, malonaldehyde content, proline content, soluble protein content, soluble sugar content, and leaf relative water content were measured. The drought resistance index, clustering analysis, subordinative function, principal component analysis, and gray correlation analysis were used to comprehensively evaluate drought tolerance. The correlation coefficients between the drought resistance index of each trait and the average value of the subordinative function, composite value of the principal component factors, and comprehensive relation degree and those among the drought resistance indexes of the ten traits were calculated to determine the drought tolerance index. The results showed significant differences between the drought-stressed and well-watered plants at the seedling stage. During drought stress, the leaves of drought-stressed plants gradually wilted and curled to different degrees, and the leaves were born slowly and became smaller, while the old leaves turned yellow. After 30 days of stress, the drought-stressed plants were shorter, weaker, and had lower biomass than the well-watered plants. The shoot fresh weight, shoot dry weight, root fresh weight, leaf relative water content and soluble protein content were lower, and the leaf peroxidase activity, malonaldehyde content, proline content, and soluble sugar content increased under drought stress. The root dry weight did not differ between drought stress and well watering. The 229 *B. napus* accessions were divided into eight groups, and the accessions of each group showed different drought tolerance characteristics. The significant correlation between the average value of the subordinative function, composite value of the principal component factors, and the comprehensive relation degree indicated that the comprehensive evaluation was reliable. Therefore, by means of the subordinative function, principal component analysis, and gray correlation analysis, accessions RR002, 9801C, Yan81-2, 07037, Zheyou758, and 09-P64-1 were identified as drought tolerant. Accessions 11-P30, CY16PXW-35, 08-P35, 09-P36, Jia972, and A148 were drought sensitive. The correlations of shoot fresh weight, shoot dry weight, root fresh weight, root dry weight, leaf proline content, soluble sugar content with the average value of the subordinative function, composite value of the principal component factors, and the comprehensive relation degree were significant with high correlation coefficients, as did those among shoot fresh weight, shoot dry weight, root fresh weight, and root dry weight. The shoot fresh weight, leaf proline content and soluble sugar content can serve as rapid, simple, and accurate traits to identify comprehensive drought tolerance at the seedling stage in *B. napus*.

Keywords: *Brassica napus* L.; Drought tolerance; Germplasm screening; Identification index; Seedling stage

植物生长在多变的外界环境中，经常遭受多种非生物胁迫的影响。其中，干旱胁迫是影响植物地理分布、限制农作物产量，进而威胁粮食安全的主要环境因子之一[1-2]。遭受干旱胁迫时，植物会发生叶片卷曲、气孔关闭、调节地上部和地下部生长速率等以减少水分的散失和增加水分的吸收，会增加脯氨酸、可溶性蛋白和可溶性糖等可溶性有机分子以提高细胞渗透势，同时也通过增强过氧化物酶、过氧化氢酶及超氧化物歧化酶等还原酶活性以清除活性氧对自身的伤害[3-9]。

植物耐旱性由基因型和水分胁迫共同决定，其复杂性决定了单一性状无法全面反映植株对干旱胁迫的响应[10]，需要采用多性状进行综合评价。我国油菜生产以甘蓝型油菜(*Brassica napus* L.)为主，其整个生育期需水量较大，对干旱的适应能力较差，产量和品质均受到影响。综合评价油菜种质资源的耐旱性，鉴定耐旱种质，筛选耐旱性鉴定指标，是耐旱新品种培育和耐旱机理研究的基础性工作。

近年来，关于油菜特别是甘蓝型油菜耐旱性的研究已有一些报道。王璐璐等[11]、胡承伟等[12]、庞红喜和赵兰芝[13]、董小云等[14]、陈致富等[15]和许媛君等[16]在室内利用 PEG-6000 模拟干旱胁迫，探讨了干旱对油菜种子萌发期根系和幼苗生长、抗氧化酶类以及渗透调节物质的影响，比较了不同试验材料的耐旱性差异，发现干旱胁迫下根系和幼苗生长均受到抑制，超氧化物歧化酶、过氧化物酶和过氧化氢酶活性增强，可溶性糖、可溶性蛋白、脯氨酸、丙二醛含量增加，不同材料的耐旱性差异较大。原小燕等[17]在田间自然条件下对甘蓝型油菜与芥菜型油菜(*Brassica juncea* Coss.)种间杂交 DH 株系苗期、薹花期和角果生长期的耐旱性进行了评价，获得了 2 份全生育期耐旱性均较强的材料。朱宗河等[18]在旱棚土壤中进行试验，利用农艺性状和产量性状将甘蓝型油菜花前和花后的耐旱性划分为高度耐旱、中度耐旱和不耐旱 3 类。涂玉琴等[19]和谢小玉等[20]采用盆栽试验对甘蓝型油菜种质资源的苗期耐旱性进行了综合评价，获得了一些强耐旱的材料。在油菜耐旱性鉴定指标筛选方面，桂月晶[21]通过发芽试验提出了种子萌发期耐旱性的鉴定指标是芽苗总长、总鲜重、总干重、脯氨酸含量及超氧化物歧化酶活性相对值，谢小玉等[20]利用盆栽法筛选的鉴定油菜苗期持续干旱胁迫下耐旱性的指标是叶片相对

含水量、丙二醛含量和叶面积，而桂月晶[21]利用同样的方法研究提出以抗坏血酸过氧化物酶活性、超氧化物岐化酶活性、过氧化氢酶活性及可溶性蛋白含量作为油菜苗期耐旱性的鉴定指标，洪双等[22]提出盆栽试验甘蓝型油菜苗期干旱-复水-干旱-复水处理耐旱性的评价指标主要是地上部鲜重胁迫指数、植株总鲜重胁迫指数和旱害指数，牛远等[23]研究认为根长、茎粗、总鲜重、根鲜重、地上部干重和总干重等可作为干旱处理的同时施加氯化胆碱和海藻糖鉴定油菜蕾薹期耐旱性的评价指标。

综合分析发现，在油菜耐旱性鉴定方面，大多采用 PEG-6000 模拟干旱胁迫，鉴定条件与田间生产差异较大，大规模种质资源鉴定更少。在耐旱性评价指标筛选研究中试验材料数量有限，测定的性状较少，筛选的评价指标各不相同，代表性和适用性不强，鉴定效率较低。故本研究采用盆栽试验，在苗期对来源广泛的 229 份种质资源进行正常灌溉和干旱胁迫处理，测定幼苗地上部鲜重和干重、地下部鲜重和干重等生长性状以及叶片过氧化物酶活性、丙二醛含量、脯氨酸含量、可溶性蛋白含量、可溶性糖含量和相对含水量等生理生化性状，利用耐旱系数、聚类分析、隶属函数、主成分分析和灰色关联度分析对耐旱性进行综合评价，以期筛选出耐旱材料和干旱敏感材料，为深入开展干旱胁迫响应机理研究和培育耐旱新品种奠定基础。同时，筛选耐旱性鉴定评价指标，以保证耐旱性鉴定的准确性，降低鉴定成本，提高鉴定效率。

1　材料与方法

1.1　试验材料

试验材料共 229 份，由国内多家油菜研究单位提供，主要来源于我国长江流域和西北油菜主产区，部份材料来源于加拿大、丹麦和瑞典。

1.2　材料种植与干旱处理

229 份材料以盆栽(盆钵直径 25 cm，高 30 cm)方式种植于重庆市油菜工程技术研究中心歇马基地的旱棚内，每份材料种植 10 盆，每盆播种 12 粒，最终定苗 4 株。在 4 叶一心时每材料选择幼苗长势均匀、植株大小一致的 6 盆进行干旱处理(DS)和正常灌溉(WW)，每处理各 3 盆。DS 组土壤含水量维持在 7%~12%，WW 组土壤含水量维持在 20%~23%，采用浙江托普仪器有限公司的 TZS-1K 土壤水分测定仪测定。土壤水分控制方法：每隔 3~5 d 测定土壤含水量，仪器探针插入深度 7 cm，每盆不同位置测定 3 次取平均值，应浇水重量根据每盆土壤干重(装土时已测定)和土壤含水量测定平均值计算，用量筒取水，用洒水器均匀浇于盆钵表面。

1.3　性状测定

干旱胁迫 30 d 后，调查 DS 组和 WW 组幼苗地上部鲜重和干重、地下部鲜重和干重、叶片过氧化物酶活性、丙二醛含量、脯氨酸含量、可溶性蛋白含量、可溶性糖含量和相对含水量。

1.3.1　地上部鲜重、地上部干重、地下部鲜重和地下部干重测定

每份材料 DS 组和 WW 组各随机选取 3 株幼苗，从子叶节处剪开，称其地上部鲜重，将地下部流水洗净并擦干水渍后称鲜重。放置烘箱 110 ℃杀青 30 min 后 75 ℃烘至恒重，称地上部干重和地下部干重。

1.3.2　过氧化物酶活性及脯氨酸、可溶性糖、可溶性蛋白和丙二醛含量测定

每份材料各处理随机选择 3 株幼苗取倒 2 叶和倒 3 叶装入自封袋，保存于–80 ℃冰箱待测。采用南京建成生物工程研究所研发的试剂盒(A084-3)按照说明书步骤测定过氧化物酶活性。采用磺基水杨酸法测定脯氨酸含量，蒽酮比色法测定可溶性糖含量，考马斯亮蓝 G-250 法测定可溶性蛋白含量，硫代巴比妥酸法测定丙二醛含量，均参照侯林涛[24]的操作步骤。

1.3.3　叶片相对含水量测定

每份材料各处理随机选择 3 株幼苗取倒 3 叶，采用王丹丹[25]的方法测定叶片相对含水量。

1.4　统计分析

各性状的描述统计分析采用 Microsoft Office Excel 2016 完成，方差分析和相关性分析采用 DPS V15.10[26]进行，热图采用 TBtools 软件进行绘制。

1.5　耐旱性评价

1.5.1　耐旱系数计算

根据郭雪松[27]的方法，利用式(1)计算地上部鲜重、地上部干重、地下部鲜重、地下部干重，叶片过氧化物酶活性、可溶性蛋白含量、脯氨酸含量、相对含水量和可溶性糖含量的耐旱系数，利用式(2)计算丙二醛含量的耐旱系数。

$$X_{ij}=\frac{t_{ij}}{T_{ij}}\quad (i=1, 2, 3, \cdots, n; j=1, 2, 3, \cdots, m) \qquad (1)$$

$$X_{ij}=\frac{T_{ij}}{t_{ij}}\quad (i=1, 2, 3, \cdots, n; j=1, 2, 3, \cdots, m) \qquad (2)$$

式中：X_{ij} 为第 i 个材料第 j 个性状的耐旱系数值，t_{ij} 为 DS 组第 i 个材料第 j 个性状的测定值，T_{ij} 为 WW 组第 i 个材料第 j 个性状的测定值，n 为材料数，

m 为性状数。

1.5.2 系统聚类分析

基于 10 个性状的耐旱系数值，对数据进行标准化后，采用欧氏距离+可变类平均法进行聚类分析，并比较不同类群材料间各性状耐旱系数值的差异。标准化按照式(3)和式(4)进行。

$$S_j=\sqrt{\frac{1}{n-1}\left[\sum_{i=1}^{n}X_{ij}^2-\frac{1}{n}\left(\sum_{i=1}^{n}X_{ij}\right)^2\right]} \quad (i=1, 2, 3, \cdots, n; j=1, 2, 3, \cdots, m) \tag{3}$$

$$X'_{ij}=\frac{X_{ij}-\sum_{i=1}^{n}X_{ij}/n}{S_j} \quad (i=1, 2, 3, \cdots, n; j=1, 2, 3, \cdots, m) \tag{4}$$

式中：S_j 为第 j 个性状耐旱系数的标准差，X'_{ij} 为第 i 个材料第 j 个性状耐旱系数的标准化值。

1.5.3 隶属函数

根据郭雪松[27]的方法，采用式(5)计算各材料各性状耐旱系数的隶属函数值，采用式(6)计算各材料耐旱系数的平均隶属函数值。

$$\mathrm{SF}_{ij}=\frac{X_{ij}-X_{\min j}}{X_{\max j}-X_{\min j}} \quad (i=1, 2, 3, \cdots, n; j=1, 2, 3, \cdots, m) \tag{5}$$

$$\mathrm{ASF}_i=\frac{1}{m}\sum_{j=1}^{m}\mathrm{SF}_{ij} \quad (i=1, 2, 3, \cdots, n; j=1, 2, 3, \cdots, m) \tag{6}$$

式中：SF_{ij} 为第 i 个材料第 j 个性状耐旱系数的隶属函数值，$X_{\min j}$ 为第 j 个性状耐旱系数的最小值，$X_{\max j}$ 为第 j 个性状耐旱系数的最大值，ASF_i 为第 i 个材料的平均耐旱系数隶属函数值。

1.5.4 主成分分析

将各材料各性状的耐旱系数按照式(3)和式(4)标准化后计算各因子特征值、贡献百分率和累计贡献百分率，选择累计贡献百分率达 80%以上的主成分因子数，按照式(7)计算各材料的各主成分因子值，按照式(8)计算各材料各主成分因子的综合值[26]。

$$\mathrm{PCA}_{ik}=\lambda_{kj}X_{ij} \ (i=1, 2, 3, \cdots, n; j=1, 2, 3, \cdots, m; k=1, 2, 3, \cdots, p) \tag{7}$$

$$\mathrm{PCA}_i=\frac{1}{p}\sum_{k=1}^{p}\mathrm{PCA}_{ik} \ (i=1, 2, 3, \cdots, n; k=1, 2, 3, \cdots, p) \tag{8}$$

式中：PCA_{ik} 为第 i 个材料第 k 个主成分因子值，λ_{kj} 为第 k 个主成分因子第 j 个性状的特征向量值，PCA_i 为第 i 个材料各主成分因子的综合值，p 为所选择的主成分因子数。

1.5.5 灰色关联度分析

选择各性状耐旱系数最大值构成理想耐旱品种各性状的耐旱系数值，根据式(9)计算各材料与理想耐旱品种各性状耐旱系数值的关联系数(ε_{ij})，并根据式(10)计算各材料的综合关联度[28]。

$$\varepsilon_{ij}=\frac{\min_i\min_j\left|C_j-X_{ij}\right|+\rho\max_i\max_j\left|C_j-X_{ij}\right|}{\left|C_j-X_{ij}\right|+\rho\max_i\max_j\left|C_j-X_{ij}\right|} \quad (i=1, 2, 3, \cdots, n; j=1, 2, 3, \cdots, m) \tag{9}$$

$$\mathrm{CR}_i=\frac{1}{m}\sum_{j=1}^{m}\varepsilon_{ij} \quad (i=1, 2, 3, \cdots, n; j=1, 2, 3, \cdots, m) \tag{10}$$

式中：ε_{ij} 为第 i 个材料第 j 个性状与理想耐旱品种第 j 个性状的耐旱系数值的关联系数，CR_i 为第 i 个材料的综合关联度，C_j 为理想耐旱品种第 j 个性状的耐旱系数值，$\min_i\min_j\left|C_j-X_{ij}\right|$ 为二级最小差，$\max_i\max_j\left|C_j-X_{ij}\right|$ 为二级最大差，ρ 为分辨系数(在此取 0.5)。

2 结果与分析

2.1 各性状的统计分析

干旱胁迫处理过程中，干旱处理组(DS)幼苗叶片逐渐发生不同程度的萎蔫和卷曲，新叶出生变慢，叶片变小，老叶变黄。胁迫 30 d 后，与正常灌溉组(WW)相比，各材料 DS 组植株矮小，瘦弱，生物量明显降低。

对 10 个性状的测定值进行描述统计和方差分析，结果如表 1 所示。WW 组和 DS 组各性状在材料间均表现出极显著差异($P<0.01$)。DS 组的地上部鲜重、地上部干重、地下部鲜重及叶片可溶性蛋白含量和相对含水量相对于 WW 组极显著降低($P<0.01$)，而叶片过氧化物酶活性、丙二醛含量、脯氨酸含量和可溶性糖含量相对于 WW 组极显著升高($P<0.01$)，地下部干重在 DS 组和 WW 组之间的差异不显著。说明本研究选用的试验材料广泛，代表性强，所测性状均可用于耐旱性鉴定。

2.2 耐旱性的单方法评价

2.2.1 系统聚类分析

基于 10 个性状的耐旱系数标准化值，对 229 份材料进行系统聚类。当 229 份材料被分为 8 个类群时各性状耐旱系数值在类群间的差异均达极显著水平(表 2、图 1)。由图 1 可知，Ⅰ类群材料的叶片可溶性蛋白含量、丙二醛含量和相对含水量的耐旱性最强；Ⅱ类群材料的叶片丙二醛含量和相对含水量

表 1　干旱处理和正常灌溉处理下 229 份甘蓝型油菜各性状的变化

Table 1　Trait changes of 229 *Brassic napus* accessions under drought stress and well watering conditions

性状 Trait	处理 Treatment	平均值 Average	标准差 Standard error	最小值 Min	最大值 Max	变异系数 Coefficient of variation
地上部鲜重 Shoot fresh weight (g·plant^{-1})	正常灌溉 Well watering	45.109**(A)	11.407	21.247	81.800	0.253
	干旱处理 Drought stress	8.656**(B)	2.483	4.327	17.990	0.287
地上部干重 Shoot dry weight (g·plant^{-1})	正常灌溉 Well watering	3.063**(A)	0.776	1.170	6.237	0.253
	干旱处理 Drought stress	1.354**(B)	0.392	0.505	3.288	0.289
地下部鲜重 Root fresh weight (g·plant^{-1})	正常灌溉 Well watering	1.241**(A)	0.515	0.173	3.094	0.414
	干旱处理 Drought stress	0.790**(B)	0.272	0.227	1.621	0.344
地下部干重 Root dry weight (g·plant^{-1})	正常灌溉 Well watering	0.333**(A)	0.093	0.089	0.691	0.279
	干旱处理 Drought stress	0.348**(A)	0.077	0.172	0.628	0.221
叶片过氧化物酶活性 Leaf peroxidase activity (U·g^{-1})	正常灌溉 Well watering	5.987**(B)	0.994	3.681	9.723	0.166
	干旱处理 Drought stress	6.907**(A)	1.284	2.682	10.434	0.186
叶片丙二醛含量 Leaf malonaldehyde content (μmol·g^{-1})	正常灌溉 Well watering	0.030**(B)	0.011	0.011	0.073	0.371
	干旱处理 Drought stress	0.057**(A)	0.025	0.022	0.182	0.447
叶片可溶性蛋白含量 Leaf soluble protein content (mg·g^{-1})	正常灌溉 Well watering	7.380**(A)	2.507	2.799	16.195	0.340
	干旱处理 Drought stress	1.987**(B)	0.697	0.708	4.671	0.351
叶片脯氨酸含量 Leaf proline content (mg·g^{-1})	正常灌溉 Well watering	1.786**(B)	1.517	0.125	13.237	0.849
	干旱处理 Drought stress	3.546**(A)	2.017	0.254	13.271	0.569
叶片相对含水量 Leaf relative water content (%)	正常灌溉 Well watering	94.117**(A)	4.079	70.086	99.965	0.043
	干旱处理 Drought stress	72.259**(B)	7.509	54.926	96.282	0.104
叶片可溶性糖含量 Leaf soluble sugar content (mg·g^{-1})	正常灌溉 Well watering	16.355**(B)	4.774	6.199	37.745	0.292
	干旱处理 Drought stress	31.153**(A)	5.971	16.401	50.094	0.192

“**”表示不同材料间差异达 $P<0.01$ 显著水平；不同大写字母表示各性状在干旱处理和正常灌溉间差异达 $P<0.01$ 显著水平。“**” shows significant difference at $P<0.01$ probability level among accessions. Different capital letters show significant differences at $P<0.01$ probability level between drought stress and well watering.

表 2　229 份甘蓝型油菜聚类为不同类群数时各性状耐旱系数值差异的 *F* 值

Table 2　*F*-values of differences of trait drought resistance indexes when 229 *Brassic napus* accessions clusting-analyzed into different cluster group numbers

性状 Trait	类群数 Group number						
	2	3	4	5	6	7	8
叶片过氧化物酶活性 Leaf peroxidase activity	0.489	0.715	12.104**	9.059**	7.548**	6.453**	12.331**
地上部鲜重 Shoot fresh weight	26.750**	33.086**	58.725**	44.722**	36.595**	30.552**	40.273**
地上部干重 Shoot dry weight	46.248**	65.830**	63.557**	48.365**	38.818**	32.323**	29.134**
地下部干重 Root dry weight	38.043**	67.687**	59.565**	44.475**	36.575**	42.757**	40.889**
地下部鲜重 Root fresh weight	11.921**	24.513**	19.320**	14.526**	11.577**	19.368**	17.046**
叶片丙二醛含量 Leaf malonaldehyde content	50.342**	82.932**	56.235**	60.838**	48.967**	40.951**	35.821**
叶片可溶性蛋白含量 Leaf soluble protein content	0.006	0.185	9.628**	7.340**	49.138**	42.310**	36.506**
叶片脯氨酸含量 Leaf proline content	17.476**	17.839**	14.067**	117.741**	94.409**	78.327**	67.303**
叶片相对含水量 Leaf relative water content	0.228	0.248	0.781	1.117	1.017	1.046	3.697**
叶片可溶性糖含量 Leaf soluble sugar content	0.371	0.189	3.303*	2.797*	4.261**	18.019**	15.594**

“**”和“*”分别表示各类群间性状差异达 $P<0.01$ 和 $P<0.05$ 显著水平。“**” and “*” show significant difference in traits among groups at $P<0.01$ and $P<0.05$ probability levels, respectively.

的耐旱性最强，但地上和地下部干、鲜重和叶片过氧化物酶活性的耐旱性较差；Ⅲ类群材料地上部鲜重、地上部干重、地下部鲜重和地下部干重的耐旱性最强，叶片丙二醛含量和相对含水量的耐旱性较强；Ⅳ类群材料叶片相对含水量的耐旱性最强，丙二醛含量和脯氨酸含量的耐旱性最差；Ⅴ类群材料叶片过氧化物酶活性的耐旱性最强，但叶片相对含水量的耐旱性最差；Ⅵ类群材料叶片可溶性糖含量和丙二醛含量的耐旱性最强，但叶片过氧化物酶活性、地上部鲜重和地上部干重的耐旱性较差；Ⅶ类群材料叶片脯氨酸含量的耐旱性最强，叶片相对含水量、可溶性糖含量和地下部鲜重的耐旱性较差；Ⅷ类群材料叶片相对含水量和地上部鲜重的耐旱性相对较强，叶片可溶性糖含量的耐旱性较差。

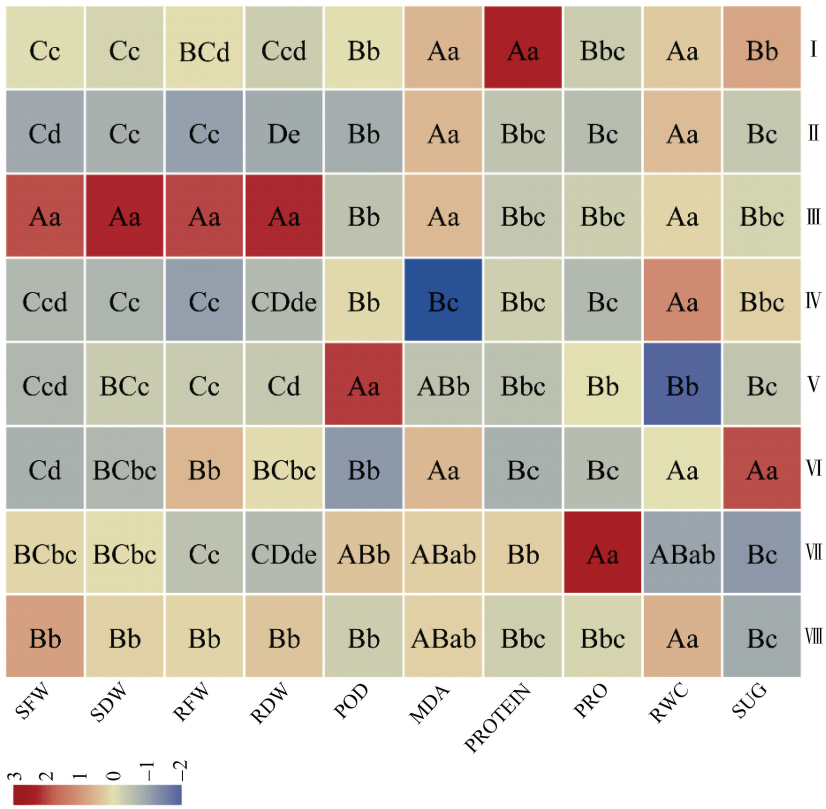

图 1　229 份甘蓝型油菜的 8 个类群各性状耐旱系数值的热图和多重比较

Fig. 1　Heatmap and multiple comparisons for drought resistance index values of traits in 8 groups of 229 *Brassic napus* accessions

对于同一性状，不同大、小写字母分别表示类型间差异达 $P<0.01$ 和 $P<0.05$ 显著水平。SFW：地上部鲜重；SDW：地上部干重；RFW：地下部鲜重；RDW：地下部干重；POD：叶片过氧化物酶活性；MDA：叶片丙二醛含量；PROTEIN：叶片可溶性蛋白含量；PRO：叶片脯氨酸含量；RWC：叶片相对含水量；SUG：叶片可溶性糖含量。For one trait, different capital and lowercase letters mean significant differences among groups at $P<0.01$ and $P<0.05$ levels, respectively. SFW: shoot fresh weight; SDW: shoot dry weight; RFW: root fresh weight; RDW: root dry weight; POD: leaf peroxidase activity; MDA: leaf malonaldehyde content; PROTEIN: leaf soluble protein content; PRO: leaf proline content; RWC: leaf relative water content; SUG: leaf soluble sugar content.

2.2.2　隶属函数、主成分分析及灰色关联度分析

229 份甘蓝型油菜材料耐旱系数的平均隶属函数值介于 0.0840~0.3744，平均为 0.1949。其中，平均隶属函数值较大的材料是 RR002、CY12PXW-6、09-P64-1、SWU44、宁油 1 号、9801C、07037、炎 81-2、11-9-700、SWU40 和浙油 758，位于所有材料的前 5%，其耐旱性强；平均隶属函数值较小的是甲 972、09-P36、科里纳、A148、12-P01、甲预 05 棚、08-P35、CY16PXW-35、10-P29、垦 C1 和 11-P30，位于所有材料的后 5%，属于干旱敏感材料(表 3)。

表 3　229 份甘蓝型油菜的部分极端材料的平均隶属函数值、主成分因子综合值、综合关联度和类群

Table 3　Average values of subordinative function, composite values of principal component factors and comprehensive relation degrees of some extreme materials in 229 *Brassic napus* accessions and their groups

材料名称 Accession name	来源地 Source	平均隶属函数值 Average value of subordinative function		主成分因子综合值 Composite value of principal component factors		综合关联度 Comprehensive relation degree		类群 Group
		值 Value	排序 Rank	值 Value	排序 Rank	值 Value	排序 Rank	
科里纳 Kelina	重庆 Chongqing	0.1033	227	0.7811	217	0.8772	222	II
炎 81-2 Yan81-2	重庆 Chongqing	0.3148	8	1.3903	8	0.8983	6	III
SWU40	重庆 Chongqing	0.2961	10	1.2003	32	0.8937	23	I
SWU44	重庆 Chongqing	0.3381	4	1.2326	25	0.8962	13	I
SWU59	重庆 Chongqing	0.2400	37	1.3770	11	0.8948	15	VIII
CY12PXW-6	四川 Sichuan	0.3500	2	1.2908	21	0.8963	12	III
CY16PXW-35	四川 Sichuan	0.1223	222	0.7263	223	0.8770	225	II

续表 3

材料名称 Accession name	来源地 Source	平均隶属函数值 Average value of subordinative function		主成分因子综合值 Composite value of principal component factors		综合关联度 Comprehensive relation degree		类群 Group
		值 Value	排序 Rank	值 Value	排序 Rank	值 Value	排序 Rank	
wx10213	湖南 Hunan	0.1434	203	0.7196	224	0.8789	216	II
10-804	湖南 Hunan	0.1411	208	0.6731	227	0.8768	226	VIII
631	湖南 Hunan	0.2492	31	1.6645	3	0.9119	3	VII
1360	湖南 Hunan	0.2083	70	1.7604	2	0.9242	2	VII
07037	湖北 Hubei	0.3154	7	1.3807	10	0.8968	10	III
RR002	湖北 Hubei	0.3744	1	1.5993	4	0.9048	4	III
宁油 1 号 Ningyou 1	湖北 Hubei	0.3331	5	1.3065	18	0.8968	9	III
11-9-700	湖北 Hubei	0.3039	9	1.3080	17	0.8956	14	I
09-P64-1	湖北 Hubei	0.3473	3	2.2955	1	0.9571	1	VII
11-P74-8 父本 Male parent of 11-P74-8	湖北 Hubei	0.1366	214	0.7644	219	0.8780	219	II
甲 972 Jia 972	湖北 Hubei	0.0840	229	0.6112	229	0.8737	229	II
甲预 05 棚 Jiayu 05 Peng	湖北 Hubei	0.1187	224	0.8147	212	0.8795	215	II
浙油 758 Zheyou 758	浙江 Zhejiang	0.2878	11	1.4124	7	0.8972	8	VI
垦 C1 Ken C1	陕西 Shaanxi	0.1250	220	0.7721	218	0.8778	221	II
GY284	陕西 Shaanxi	0.1258	218	0.7384	222	0.8771	224	IV
A82	江西 Jiangxi	0.1501	196	0.7552	220	0.8801	210	V
A148	瑞典 Sweden	0.1144	226	0.6761	226	0.8767	227	IV
08-P35	湖北 Hubei	0.1204	223	0.7055	225	0.8772	223	II
09-P36	湖北 Hubei	0.0952	228	0.6681	228	0.8759	228	II
10-P29	湖北 Hubei	0.1233	221	0.8305	206	0.8797	214	II
11-P30	湖北 Hubei	0.1258	219	0.7526	221	0.8780	220	II
12-P01	湖北 Hubei	0.1168	225	0.8235	209	0.8788	217	IV
9801C	甘肃 Gansu	0.3315	6	1.4178	6	0.8982	7	III
SWU41	重庆 Chongqing	0.2584	23	1.5867	5	0.9014	5	VI
SWU69	重庆 Chongqing	0.2381	40	1.3873	9	0.8964	11	VI

229 份材料详情可扫本文首页 OSID 码查看。Scan the OSID code in the first page of this article to view the details of 229 accessions.

基于各性状的耐旱系数值，对 229 份甘蓝型油菜进行主成分分析，各主成分因子的特征值、累计贡献率和特征向量值如表 4 所示。当选取前 6 个主成分因子时，累计百分率为 80.591%，可基本代表所有性状的信息。在因子 1 中，地上部鲜重、地上部干重、地下部鲜重和地下部干重所占的比重较大；因子 2 中，叶片脯氨酸含量、相对含水量和可溶性糖含量所占比重较大；因子 3 中，叶片可溶性蛋白含量所占比重最大；因子 4 中，叶片过氧化物酶活性和可溶性糖含量所占比重较大；因子 5 中叶片脯氨酸含量所占比重最大；因子 6 中叶片相对含水量所占比重最大。各材料的主成分因子综合值为 0.6112~2.2955，平均 1.027，位于前 5%的材料是 09-P64-1、1360、631、RR002、SWU41、9801C、浙油 758、炎 81-2、SWU69、07037 和 SWU59，其耐旱性强；位于后 5%的材料是甲 972、09-P36、10-804、A148、08-P35、wx10213、CY16PXW-35、GY284、11-P30、A82 和 11-P74-8 父本，属于干旱敏感材料(表 3)。

灰色关联度分析显示，综合关联度介于 0.8737~0.9571，平均为 0.8864。09-P64-1、1360、631、RR002、SWU41、炎 81-2、9801C、浙油 758、宁油 1 号、07037 和 SWU69 位于所有材料的前 5%，其耐旱性强。甲 972、09-P36、A148、10-804、CY16PXW-35、GY284、08-P35、科里纳、垦 C1、11-P30 和 11-P74-8 父本位于所有材料的后 5%，属于干旱敏感材料(表 3)。

2.3　耐旱性综合评价

对 229 份材料的平均隶属函数值、主成分因子综合值和综合关联度进行相关性分析，发现其两两呈极显著正相关(表 5)，表明 3 种分析方法具有较高

表 4 229 份甘蓝型油菜各主成分因子的特征值、贡献率和特征向量值

Table 4 Eigen values of all indexes and their contributions and loading matrix of principal component factors of 229 *Brassic napus* accessions

因子 Factor	特征值 Eigen value	累计贡献率 Cumulative contribution (%)	特征向量值 Eigen vector									
			叶片过氧化物酶活性 Leaf peroxidase activity	地上部鲜重 Shoot fresh weight	地上部干重 Shoot dry weight	地下部干重 Root dry weight	地下部鲜重 Root fresh weight	叶片丙二醛含量 Leaf malonal-dehyde content	叶片可溶性蛋白含量 Leaf soluble protein content	叶片脯氨酸含量 Leaf proline content	叶片相对含水量 Leaf relative water content	叶片可溶性糖含量 Leaf soluble sugar content
1	2.630	26.302	0.026	0.511	0.494	0.544	0.431	–0.004	0.069	0.035	0.075	–0.031
2	1.476	41.059	–0.350	–0.178	–0.196	0.145	0.278	0.391	–0.053	–0.426	0.429	0.434
3	1.151	52.564	–0.024	0.163	0.096	–0.160	–0.266	0.412	0.698	0.363	0.230	0.158
4	1.012	62.680	0.668	–0.075	–0.054	0.052	0.055	–0.324	0.314	–0.286	–0.022	0.503
5	0.913	71.807	0.262	–0.133	–0.003	0.068	0.158	0.379	–0.423	0.568	–0.236	0.428
6	0.878	80.591	0.357	0.077	–0.088	–0.013	–0.118	–0.109	–0.310	0.205	0.813	–0.183
7	0.820	88.792	0.479	–0.040	–0.111	0.011	0.141	0.609	0.057	–0.314	–0.128	–0.498
8	0.596	94.749	–0.058	–0.242	–0.485	0.123	0.582	–0.211	0.340	0.370	0.040	–0.224
9	0.298	97.730	0.018	–0.729	0.644	–0.018	0.097	–0.026	0.093	0.035	0.140	–0.120
10	0.227	100.000	0.016	0.245	0.189	–0.796	0.507	–0.025	–0.062	–0.048	0.049	0.059

表 5 229 份甘蓝型油菜的平均隶属函数值、主成分因子综合值和综合关联度的相关性

Table 5 Correlations among average value of subordinative function, composite value of principal component factors and comprehensive relation degree of 229 *Brassic napus* accessions

性状 Trait	平均隶属函数值 Average value of subordinative function	主成分因子综合值 Composite value of principal component factors
主成分因子综合值 Composite value of principal component factors	0.78^{**}	
综合关联度 Comprehensive relation degree	0.74^{**}	0.94^{**}

“**”表示相关性达 $P<0.01$ 显著水平。“**” shows significant correlation at $P<0.01$ probability level.

的一致性。综合聚类分析结果及各材料的平均隶属函数值、主成分因子综合值和综合关联度, Ⅲ类群的 RR002、9801C、炎 81-2、07037 和Ⅵ类群的浙油 758 及Ⅶ类群的 09-P64-1 在 3 个排名中均位于前 5%, 为耐旱材料。Ⅱ类群的 11-P30、CY16PXW-35、08-P35、09-P36、甲 972 和Ⅳ类群的 A148 在 3 个排名中均位于后 5%, 为干旱敏感材料。干旱胁迫条件下, 耐旱材料各性状的表现优于干旱敏感材料(图 2)。

2.4 耐旱性鉴定指标筛选

分析甘蓝型油菜 10 个性状的耐旱系数值与平均隶属函数值、主成分因子综合值和综合关联度的相关性(表 6)发现, 地上部鲜重、地上部干重、地下部干重、地下部鲜重、叶片脯氨酸含量和叶片可溶性糖含量与平均隶属函数值、主成分因子综合值和综合关联度均呈极显著正相关, 且相关系数较大, 这 6 个性状可作为甘蓝型油菜苗期耐旱性的鉴定指标。进一步分析各性状耐旱系数的相关性(表 7)表明, 地上部鲜重、地上部干重、地下部鲜重和地下部干重两两之间呈极显著正相关; 地上部鲜重与叶片可溶性蛋白含量和脯氨酸含量呈显著正相关, 与叶片可溶性糖含量呈显著负相关。说明甘蓝型油菜幼苗地上部鲜重和干重对干旱胁迫的反应与地下部具有高度一致性, 地上部鲜重与叶片蛋白质含量和脯氨酸含量的反应相似, 但与可溶性糖含量相反。

3 讨论

3.1 干旱对油菜幼苗的影响

干旱是影响油菜生长发育和产量品质的重要非生物胁迫因子之一。本研究发现干旱胁迫降低了甘蓝型油菜幼苗地上部干重和鲜重、叶片相对含水量, 升高了叶片过氧化物酶活性和丙二醛、脯氨酸和可溶性糖含量, 这与涂玉琴等[19]、谢小玉等[20]、桂月晶[21]和张朋飞等[29]的研究结果一致。干旱对油菜幼苗根系生长的影响因材料不同而异, 有的抑制生长, 有的促进生长[12,19,30], 水稻(*Oryza sativa* L.)也存在这种现象[31]。本研究中干旱胁迫与正常灌溉幼苗地下部干重差异不显著, 其原因正在于此。

3.2 油菜耐旱性鉴定评价

干旱胁迫对油菜植株产生的影响是多方面的, 不仅引起体内多种生理生化特性的变化, 如光合作用、渗透调节、抗氧化酶活性、内源激素水平和水分利用效率等, 也使得外部形态、生长发育和产量

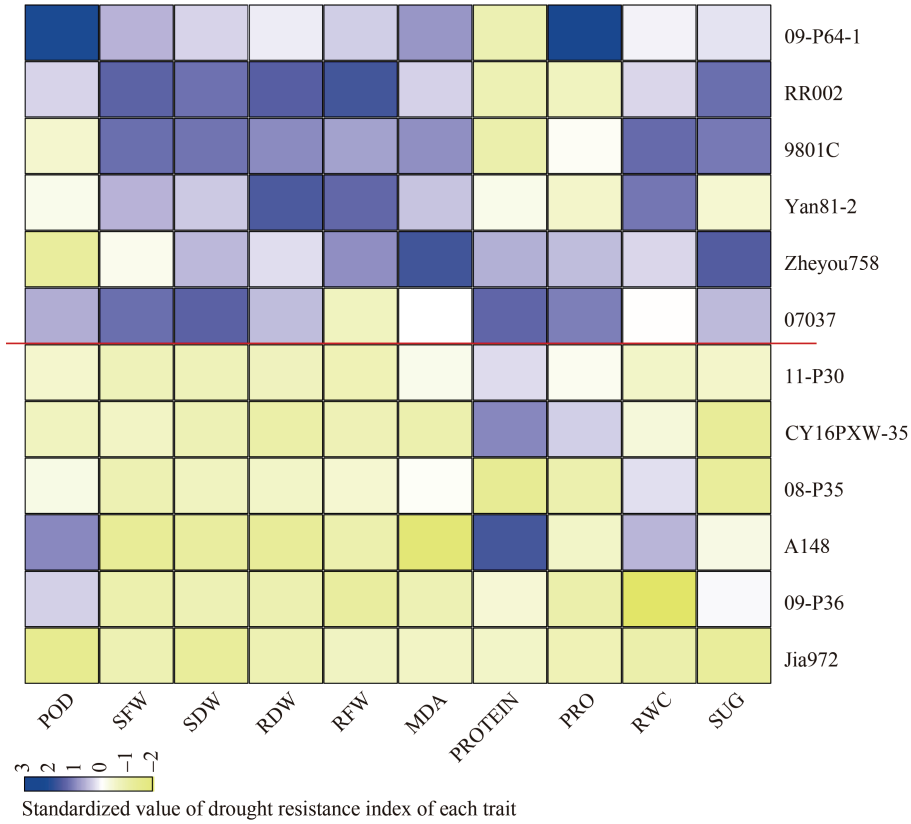

图 2　甘蓝型油菜耐旱材料和干旱敏感材料各性状耐旱系数值热图

Fig. 2　Heatmap of drought resistance index values of traits of drought resistant and sensitive accessions of *Brassic napus*

红线以上为耐旱材料，红线以下为干旱敏感材料。SFW：地上部鲜重；SDW：地上部干重；RFW：地下部鲜重；RDW：地下部干重；POD：叶片过氧化物酶活性；MDA：叶片丙二醛含量；PROTEIN：叶片可溶性蛋白含量；PRO：叶片脯氨酸含量；RWC：叶片相对含水量；SUG：叶片可溶性糖含量。Accessions above the red line are drought-resistant and those below the red line are drought-sensitive. SFW: shoot fresh weight; SDW: shoot dry weight; RFW: root fresh weight; RDW: root dry weight; POD: leaf peroxidase activity; MDA: leaf malonaldehyde content; PROTEIN: leaf soluble protein content; PRO: leaf proline content; RWC: leaf relative water content; SUG: leaf soluble sugar content.

表 6　甘蓝型油菜各性状耐旱系数值与平均隶属函数值、主成分因子综合值和综合关联度的相关性

Table 6　Correlations between drought resistance index value of each trait and average value of subordinative function, composite value of principal component factors and comprehensive relation degree

性状 Trait	叶片过氧化物酶活性 Leaf peroxidase activity	地上部鲜重 Shoot fresh weight	地上部干重 Shoot dry weight	地下部干重 Root dry weight	地下部鲜重 Root fresh weight	叶片丙二醛含量 Leaf malonaldehyde content	叶片可溶性蛋白含量 Leaf soluble protein content	叶片脯氨酸含量 Leaf proline content	叶片相对含水量 Leaf relative water content	叶片可溶性糖含量 Leaf soluble sugar content
平均隶属函数值 Average value of subordinative function	0.21**	0.69**	0.66**	0.69**	0.56**	0.27**	0.42**	0.22**	0.25**	0.22**
主成分因子综合值 Composite value of principal component factors	0.13*	0.40**	0.42**	0.53**	0.47**	0.18**	0.11	0.62**	0.13	0.42**
综合关联度 Comprehensive relation degree	0.21**	0.38**	0.39**	0.44**	0.40**	0.15*	0.15*	0.70**	0.09	0.26**

“**”和“*”分别表示相关性达 $P<0.01$ 和 $P<0.05$ 显著水平。“**” and “*” show significant correlation at $P<0.01$ and $P<0.05$ levels, respectively.

品质发生改变[32]。在油菜耐旱性鉴定评价研究中，有的直接采用干旱胁迫与正常灌溉的性状调查值进行比较[13]，有的利用简单的相对活力指数[11-12,14]或综合耐旱系数[17,20]。由于不同性状对干旱胁迫的敏感程度不同，适应干旱胁迫的内在机制也不同，产生的反应表现不一，使用单一性状很难准确评价不同油菜材料的耐旱性。近年来，随着对油菜耐旱性认识的逐渐深入，开始逐步引入多性状研究的隶属函数法[15-16,33-35]、灰色关联度分析[17,20]以及聚类分析[17,27,36]、主成分分析[18-19,37]和因子分析[38]等多元分析方法用于油菜耐旱性的综合评价。这些方法能将油菜多个相互关联的单一性状转化为少数几

表 7 229 份甘蓝型油菜各性状耐旱系数的相关系数

Table 7 Correlation coefficients of trait drought resistance index values in 229 *Brassic napus* accessions

性状 Trait	叶片过氧化物酶活性 Leaf peroxidase activity	地上部鲜重 Shoot fresh weight	地上部干重 Shoot dry weight	地下部干重 Root dry weight	地下部鲜重 Root fresh weight	叶片丙二醛含量 Leaf malonaldehyde content	叶片可溶性蛋白含量 Leaf soluble protein content	叶片脯氨酸含量 Leaf proline content	叶片相对含水量 Leaf relative water content
地上部鲜重 Shoot fresh weight	0.053								
地上部干重 Shoot dry weight	0.044	0.676**							
地下部干重 Root dry weight	0.011	0.592**	0.571**						
地下部鲜重 Root fresh weight	–0.031	0.343**	0.314**	0.691**					
叶片丙二醛含量 Leaf malonaldehyde content	–0.130*	–0.046	–0.049	0.004	0.071				
叶片可溶性蛋白含量 Leaf soluble protein content	0.038	0.170*	0.102	–0.011	–0.048	0.065			
叶片脯氨酸含量 Leaf proline content	0.083	0.140*	0.133*	–0.057	–0.114	–0.006	0.028		
叶片相对含水量 Leaf relative water content	–0.090	0.087	–0.033	0.124	0.080	0.133	0.033	–0.093	
叶片可溶性糖含量 Leaf soluble sugar content	–0.034	–0.151*	–0.074	0.043	0.071	0.107	0.059	–0.089	0.119

“**”和“*”分别表示相关性达 $P<0.01$ 和 $P<0.05$ 显著水平。“**” and “*” show significant correlation at $P<0.01$ and $P<0.05$ levels, respectively.

个彼此独立的综合指标，进而构成一个综合值，能够对复杂性状进行全面准确地综合评价，使鉴定结果更接近材料真实的耐旱性。陈致富等[15]采用隶属函数法，使用多性状的平均隶属函数值鉴定了 203 份白菜型油菜种质资源的耐旱性。谢小玉等[20]采用灰色关联度分析，以各性状与综合抗旱指数的关联度为权重的加权抗旱指数衡量 10 个油菜资源的耐旱性强弱。朱宗河等[18]利用隶属函数法、聚类分析和主成分分析对甘蓝型油菜花前和花后的耐旱性进行综合评价，筛选出 2 个在花前和花后均表现出高度耐旱的油菜种质。

本研究使用 229 个油菜资源群体，测定了反映植株生长状况和生理特性变化的 10 个性状，基于各性状的耐旱系数，采用聚类分析将其分为 8 个不同的类群，各类群资源在不同性状上的耐旱性表现不同，这可为耐旱性新品种培育中针对不同性状的耐旱性改良提供目标明确的种质资源。本研究还同时使用隶属函数、主成分分析和灰色关联度分析 3 种方法进行耐旱性综合评价，鉴定筛选出在各评价方法中均位于前 5%的 6 个耐旱材料和均位于后 5%的 6 个干旱敏感材料。这些材料的耐旱性鉴定结果应是可靠的，可作为综合耐旱性优良的种质资源在油菜耐旱性新品种培育中加以利用，亦可作为极端材料在油菜耐旱性形成机理解析中加以利用。

3.3 甘蓝型油菜苗期耐旱性鉴定指标

关于油菜苗期耐旱性鉴定指标筛选前人已经做过一些探索[19-20,27,29]，不同学者提出的鉴定指标不尽相同，这可能与鉴定材料的类型和数量、鉴定评价的方法不同有关。在甘蓝型油菜中，谢小玉等[20]通过 10 个种质研究认为叶片相对含水量、丙二醛和叶面积可作为油菜苗期耐旱种质筛选的依据。洪双等[22]以 107 份微核心种质为材料研究认为地上部鲜重胁迫指数、植株总鲜重胁迫指数和旱害指数 3 个二级指标可作为苗期耐旱性的主要评价指标。陈娇等[38]研究 10 个油菜品种的耐旱性认为光合参数指标、含水量指标、植株形态和根系性状指标应作为油菜苗期耐旱性鉴定的核心指标。

耐旱性是植物在干旱胁迫条件下各种形态、生理和代谢反应的综合表现，耐旱性的准确鉴定是一项复杂困难的工作，必须进行多材料的大规模研究才能有效确定其评价指标。本研究利用大量资源材料(229 份)分析发现，地上部鲜重和干重、地下部鲜重和干重、叶片脯氨酸含量和可溶性糖含量与平均隶属函数值、主成分因子综合值和综合关联度的相关性均极显著，这些性状都可作为油菜苗期耐旱性的鉴定指标。而干旱胁迫下油菜幼苗性状之间的相关性分析

表明, 地上部鲜重和干重、地下部鲜重和干重两两之间均呈极显著正相关, 说明测定地上部鲜重就能够较好地反映干旱胁迫对油菜幼苗生长和干物质积累的影响。因此, 综合考虑鉴定结果的准确性和操作方法的简便高效, 推荐使用地上部鲜重、叶片脯氨酸含量和可溶性糖含量作为油菜苗期耐旱性鉴定评价的指标。

4　结论

本研究分析比较了 229 份甘蓝型油菜种质资源苗期干旱胁迫和正常灌溉条件下生长和生理指标上的差异, 发现干旱胁迫使幼苗地上部干重和鲜重、地下部鲜重、叶片相对含水量、叶片可溶性蛋白含量显著降低, 使叶片过氧化物酶活性、丙二醛含量、可溶性糖含量和脯氨酸含量显著升高, 而地下部干重差异不显著。通过聚类分析将 229 份种质资源划分为 8 个类群, 各类群资源在 10 个性状中表现出不同的耐旱性。利用隶属函数、主成分分析和灰色关联度分析 3 种方法进行耐旱性综合评价, 鉴定筛选出 6 份耐旱材料和 6 份干旱敏感材料。使用地上部鲜重、叶片脯氨酸含量和可溶性糖含量作为油菜苗期耐旱性的鉴定评价指标, 可提高准确性和鉴定效率。

参考文献 References

[1] ZHU J K. Abiotic stress signaling and responses in plants[J]. Cell, 2016, 167(2): 313–324

[2] BAC-MOLENAAR J A, GRANIER C, KEURENTJES J J, et al. Genome-wide association mapping of time-dependent growth responses to moderate drought stress in *Arabidopsis*[J]. Plant, Cell & Environment, 2016, 39(1): 88–102

[3] MARSHALL A, AALEN R B, AUDENAERT D, et al. Tackling drought stress: RECEPTOR-LIKE KINASES present new approaches[J]. The Plant Cell, 2012, 24(6): 2262–2278

[4] MITTLER R. Oxidative stress, antioxidants and stress tolerance[J]. Trends in Plant Science, 2002, 7(9): 405–410

[5] LI L H, YI H L. Effect of sulfur dioxide on ROS production, gene expression and antioxidant enzyme activity in *Arabidopsis* plants[J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2012, 58: 46–53

[6] CAO Y, LUO Q X, TIAN Y, et al. Physiological and proteomic analyses of the drought stress response in *Amygdalus* Mira (Koehne) roots[J]. BMC Plant Biology, 2017, 17(1): 53

[7] HATAMI M, HADIAN J, GHORBANPOUR M. Mechanisms underlying toxicity and stimulatory role of single-walled carbon nanotubes in *Hyoscyamus niger* during drought stress simulated by polyethylene glycol[J]. Journal of Hazardous Materials, 2017, 324: 306–320

[8] HE F, SHENG M, TANG M. Effects of *Rhizophagus irregularis* on photosynthesis and antioxidative enzymatic system in *Robinia pseudoacacia* L. under drought stress[J]. Frontiers in Plant Science, 2017, 8: 183

[9] SHEIKH MOHAMMADI M H, ETEMADI N, ARAB M M, et al. Molecular and physiological responses of Iranian perennial ryegrass as affected by trinexapac ethyl, paclobutrazol and abscisic acid under drought stress[J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2017, 111: 129–143

[10] 路之娟, 张永清, 张楚, 等. 不同基因型苦荞苗期抗旱性综合评价及指标筛选[J]. 中国农业科学, 2017, 50(17): 3311–3322
LU Z J, ZHANG Y Q, ZHANG C, et al. Comprehensive evaluation and indicators of the drought resistance of different genotypes of Fagopyrum tataricum at seedling stage[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2017, 50(17): 3311–3322

[11] 王璐璐, 杨斌, 肖华贵, 等. PEG-6000 模拟干旱胁迫下油菜的根系特性与抗旱性[J]. 种子, 2017, 36(8): 93–95
WANG L L, YANG B, XIAO H G, et al. Root system characteristics and drought resistance of rape under drought stress by PEG-6000[J]. Seed, 2017, 36(8): 93–95

[12] 胡承伟, 张学昆, 邹锡玲, 等. PEG 模拟干旱胁迫下甘蓝型油菜的根系特性与抗旱性[J]. 中国油料作物学报, 2013, 35(1): 48–53
HU C W, ZHANG X K, ZOU X L, et al. Root structure and drought tolerance of rapeseed under PEG imposed drought[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2013, 35(1): 48–53

[13] 庞红喜, 赵兰芝. 干旱胁迫下不同油菜新品种萌发期耐旱性的比较[J]. 安徽农业科学, 2016, 44(19): 38–41
PANG H X, ZHAO L Z. Comparison in drought resistance of different rapeseed varieties in germination period under drought stress[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2016, 44(19): 38–41

[14] 董小云, 米超, 刘自刚, 等. PEG 模拟水分胁迫对白菜型冬油菜幼苗生长及生长特性的影响[J]. 河南农业大学学报, 2018, 52(3): 313–321
DONG X Y, MI C, LIU Z G, et al. Response of winter rapessed seeding growth and physiological characteristics under PEG drought tolerance[J]. Journal of Henan Agricultural University, 2018, 52(3): 313–321

[15] 陈致富, 李勤菲, 张永晶, 等. 白菜型油菜品种萌发期的抗旱性鉴定与筛选[J]. 植物遗传资源学报, 2015, 16(1): 15–22
CHEN Z F, LI Q F, ZHANG Y J, et al. Identification and screening of resources with tolerance against drought stress in *Brassica rapa* during germination stage[J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2015, 16(1): 15–22

[16] 许媛君, 张生萍, 马晓岗, 等. 白菜型油菜种质资源抗旱鉴定[J]. 青海大学学报: 自然科学版, 2016, 34(1): 1–8
XU Y J, ZHANG S P, MA X G, et al. The drought resistance identification of *Brassica* rape germplasm[J]. Journal of Qinghai University: Natural Science Edition, 2016, 34(1): 1–8

[17] 原小燕, 符明联, 李根泽, 等. 甘蓝型与芥菜型油菜种间杂交后代 DH 系抗旱性评价[J]. 中国油料作物学报, 2015, 37(1): 62–71
YUAN X Y, FU M L, LI G Z, et al. Evaluation of drought resistance of DH lines from hybrid of *B. napus* and *B. juncea*[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2015, 37(1): 62–71

[18] 朱宗河, 郑文寅, 张学昆. 甘蓝型油菜耐旱相关性状的主成分分析及综合评价[J]. 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.)[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2011, 44(9): 1775–1787

[19] 涂玉琴, 汤洁, 涂伟凤, 等. 与蔊菜属间杂交产生的甘蓝型油菜新材料的抗旱性综合评价[J]. 西南农业学报, 2016, 29(7): 1506–1513
TU Y Q, TANG J, TU W F, et al. Comprehensive evaluation of drought resistance of novel *Brassica napus* germplasm derived from intergeneric hybridizations with *Rorippa indica*[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2016, 29(7): 1506–1513

[20] 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[J]. 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.)[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2013, 46(3): 476–485

[21] 桂月晶. 油菜抗旱指标筛选及抗旱相关基因的表达分析[D]. 开封: 河南大学, 2011: 23–59
GUI Y J. Screening of drought resistance indexes and expression of drought-resistant related genes in *Brassica napus* L.[D]. Kaifeng: Henan University, 2011: 23–59

[22] 洪双, 李浩, 许鲲, 等. 甘蓝型油菜微核心种质耐旱鉴定与评价指标筛选[J]. 中国油料作物学报, 2018, 40(2): 209–217
HONG S, LI H, XU K, et al. Identification of a mini-core collection of *Brassica napus* accessions for drought tolerance and selection of evaluation indices[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2018, 40(2): 209–217

[23] 牛远, 李玲芬, 杨修艳, 等. 氯化胆碱和海藻糖对油菜蕾薹期干旱胁迫的缓解效应研究和耐旱指标筛选[J]. 核农学报, 2020, 34(4): 860–869
NIU Y, LI L F, YANG X Y, et al. Drought tolerance effects of choline chloride and trehalose on rapeseed (*Brassica napus* L.) at bud stage under drought stress and selection of related indices[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2020, 34(4): 860–869

[24] 侯林涛. 甘蓝型油菜种子老化处理后发芽指数 QTL 定位及生理分析[D]. 重庆: 西南大学, 2017: 18–20
HOU L T. Germination index QTL mapping and physiological analysis for *Brassica napus* L. seed after artificial aging treatment[D]. Chongqing: Southwest University, 2017: 18–20

[25] 王丹丹. 甘蓝型油菜遗传图谱构建及苗期耐旱相关性状的 QTL 定位[D]. 重庆: 西南大学, 2014: 20–21
WANG D D. Mapping and QTL analysis of genes to drought tolerance in *Brassica napus* L.[D]. Chongqing: Southwest University, 2014: 20–21

[26] 唐启义. DPS 数据处理系统: 实验设计、统计分析及数据挖掘[M]. 2 版. 北京: 科学出版社, 2010
TANG Q Y. DPS Data Processing System: Experimental Design, Statistical Analysis and Data Mining (Second Edition)[M]. Beijing: Science Press, 2010

[27] 郭雪松. 油菜种质资源耐旱性的鉴定[D]. 重庆: 西南大学, 2009: 9–13
GUO X S. Evaluation on drought tolerance ability of rapeseed resources[D]. Chongqing: Southwest University, 2009: 9–13

[28] 李莉, 杨雷, 杨莉, 等. 应用灰色关联分析法综合评价草莓种质资源[J]. 河北农业科学, 2008, 12(4): 18–19, 21
LI L, YANG L, YANG L, et al. A comprehensive assessment on strawberry germplasm resource by using the grey relevant analysis method[J]. Journal of Hebei Agricultural Sciences, 2008, 12(4): 18–19, 21

[29] 张朋飞, 武军艳, 孙万仓, 等. 干旱胁迫对白菜型冬油菜苗期生理特性的影响[J]. 西北农业学报, 2015, 24(2): 84–90
ZHANG P F, WU J Y, SUN W C, et al. Effect of drought stress on physiological character of winter rape (*Brassica campestris* L.) at seedling stage[J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 2015, 24(2): 84–90

[30] 王卫芳. 油菜苗期抗旱性评价及生理机制研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2018: 13–18
WANG W F. Evaluation and physiological mechanism of drought resistance in rape seedling stage[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2018: 13–18

[31] 孔宪旺, 孙明茂. 水稻不同种质苗期耐旱性综合评价[J]. 江西农业学报, 2019, 31(4): 1–7
KONG X W, SUN M M. Comprehensive evaluation of drought tolerance of different rice germplasms at seedling stage[J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2019, 31(4): 1–7

[32] 蔡东芳, 张书芬, 何俊平, 等. 甘蓝型油菜抗旱性鉴定研究进展[J]. 中国农学通报, 2017, 33(28): 7–12
CAI D F, ZHANG S F, HE J P, et al. Drought resistance identification in *Brassica napus*[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2017, 33(28): 7–12

[33] 田宏先, 李小玉, 施毅, 等. 晋北区地方油菜品种苗期抗旱性比较[J]. 山西农业科学, 2020, 48(9): 1411–1417
TIAN H X, LI X Y, SHI Y, et al. Comparison of drought resistance of *Brassica juncea* varieties in northern Shanxi[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2020, 48(9): 1411–1417

[34] 田宏先, 施毅, 王瑞霞. 春油菜光合作用及其相关生理特性对苗期干旱胁迫的响应[J]. 种业导刊, 2020, (4): 7–12
TIAN H X, SHI Y, WANG R X. Response of photosynthesis and related physiological characteristics of *Brassica juncea* to drought stress at seedling stage[J]. Journal of Seed Industry Guide, 2020, (4): 7–12

[35] 田宏先, 王瑞霞, 施毅, 等. 油菜根系对苗期水分胁迫的形态及生理响应[J]. 农业科技通讯, 2020, (8): 148–153
TIAN H X, WANG R X, SHI Y, et al. Morphological and physiological responses of roots to water stress at seedling stage in *Brassica juncea*[J]. Bulletin of Agricultural Science and Technology, 2020, (8):148–153

[36] 原小燕, 铁朝良, 符明联, 等. 甘芥种间杂交后代 DH 系花期抗旱性评价[J]. 干旱地区农业研究, 2017, 35(2): 79–88
YUAN X Y, TIE C L, FU M L, et al. Drought resistance evaluation of DH lines from interspecific hybrid of *B. napus* and *B. juncea* in flowering stage[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2017, 35(2): 79–88

[37] 王瑞霞, 李小玉, 田宏先. 晋北区芥菜型油菜抗旱性鉴定及综合抗旱指标筛选[J]. 中国农业科技导报, 2020, 22(11): 42–51
WANG R X, LI X Y, TIAN H X. Drought resistance identification and comprehensive drought resistance index screening of rapeseed (*Brassica juncea* L.)in north Shanxi[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2020, 22(11): 42–51

[38] 陈娇, 谢小玉, 张小短, 等. 甘蓝型油菜苗期抗旱性鉴定及综合抗旱指标筛选[J]. 中国油料作物学报, 2019, 41(5): 713–722
CHEN J, XIE X Y, ZHANG X D, et al. Seedling drought resistance and parameter screening of rapeseed[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2019, 41(5): 713–722