

强冬性冬油菜抗裂角性鉴定筛选及其与相关农艺性状的相关性分析

马愿强¹ 刘丽君² 马骊² 徐新宇¹ 张亚宏³
王娟⁴ 蒲媛媛¹ 王旺田⁵ 杨刚¹ 武军艳¹

(¹甘肃农业大学农学院, 730070, 甘肃兰州; ²省部共建旱生境作物学国家重点实验室, 730070, 甘肃兰州; ³甘肃天水市农业科学研究所, 741001, 甘肃天水; ⁴甘肃张掖市农业科学院, 734099, 甘肃张掖; ⁵甘肃农业大学生命科学技术学院, 730070, 甘肃兰州)

摘要 为筛选出适宜甘肃省种植的高抗裂角冬油菜品系, 推动油菜机械化收获, 提高油菜产量, 选用随机碰撞法对 43 份冬油菜品系进行抗裂角性鉴定, 并结合相关农艺性状对鉴定结果进行系统聚类和相关性分析。聚类分析显示, 43 份材料被分为四大类, 第 I 类群抗裂角指数 (SRI) 平均值为 0.861, 表现为中抗; 第 II 类群 SRI 平均值为 0.958, 表现为高抗; 第 III 类群 SRI 平均值为 0.722, 表现为低抗; 第 IV 类群 SRI 平均值为 0.621, 表现为易裂。相关性分析显示, SRI 与果皮厚度呈极显著正相关, 且相关系数大, 其他农艺性状与 SRI 无显著相关性, 说明果皮厚度显著影响冬油菜的抗裂角性, 可作为抗裂角冬油菜初步筛选的形态指标。结合 43 份强冬性油菜品系的产量、品质性状与 SRI 进行综合分析, 共筛选出 17 份冬油菜品系, 其中 M-8 和 M-14 兼具高抗裂角、高产及优质性状。

关键词 冬油菜; 抗裂角性; 农艺性状; 品质性状

油菜是我国第一大油料作物, 产油量占国产油料作物的 55% 左右, 是国产植物油的主要油源, 油菜产业发展对于保障国家粮油安全具有重要意义^[1]。2020 年, 我国油菜种植面积 676.5 万 hm^2 , 占世界油菜种植面积的 20% 左右。2021 年, 我国食用植物油消耗量总计约 3710 万 t, 其中菜籽油比例约 21.57%, 仅次于大豆油 (43.69%); 油菜籽产量达到 1471.35 万 t, 按 35%~40% 出油率计算, 我国生产菜籽油在 515 万~588.5 万 t, 显然不能满足国内消费^[2]。目前, 我国食用植物油国内供应量不足, 仍依赖从国外进口。2016~2020 年, 我国进口油菜籽总计 1893 万 t, 进口菜籽油总计 631 万 t, 均约占全球出口总量的 1/4。虽然个别年份我国油菜籽进口总量有所减少, 但“以油换籽”仍然是普遍现象^[3]。大力发展油菜生产是提高我国油料自给率的重要途径。因油菜自身生物学特性及种植习惯和轮作制度的特点, 机械收获作业效率较低成为制约油菜收获的主要因素。2020 年, 我国油菜种植生产全程机械化率为 59.9%, 明显低于加拿大 100% 的效

率^[3]。我国不同地区的气候条件和自然生态条件不同, 适宜种植的油菜品种以及栽培技术多种多样^[4]。按播种季节不同可将油菜分为春油菜和冬油菜。根据刘后利^[4]划分, 以山东南部、河北南部、陕西延安南部、山西南部以及甘肃天水为界, 以南以东为冬油菜产区, 以西以北为春油菜产区。我国油菜种植优势区主要有 4 个, 分别为长江上游优势区、长江中游优势区、北方油菜优势区和长江下游优势区, 其中北方油菜优势区主要包括青海、内蒙古和甘肃^[5]。根据周广生等^[6]统计, 4 个优势区的机械收获面积分别占全国总种植面积的 1.55%、23.68%、46.82% 和 8.14%。北方冬油菜优势区的机械化收获水平不高, 使得农户种植油菜成本较高, 积极性降低^[7]。浦惠明等^[8]研究表明, 在油菜生产成本中人工成本占 60% 以上, 其中收获用工成本又占人工成本的 50% 左右, 进行油菜机械收获可平均减少用工数 64.5~70.5 工/ hm^2 , 可降低种植油菜的成本。德国和加拿大等国家在油菜种植过程中全部采用机械化, 生产成本得以降低, 生产效益显著提高^[5]。

作者简介: 马愿强, 研究方向为农艺与种业, E-mail: 2595899034@qq.com

武军艳为通信作者, 研究方向为强冬性油菜新品种选育及其抗寒机理解析, E-mail: 94790094@qq.com

基金项目: 甘肃省高校产业支撑计划项目 (2023CYZC-51); 国家重点研发计划专项子课题 (2022YFD1100500); 财政部和农业农村部: 国家现代农业产业技术体系建设专项 (CARS-12-09); 甘肃省科技计划—科技特派团专项 (23CXNA0041)

收稿日期: 2024-07-22; 修回日期: 2024-09-25; 网络出版日期: 2025-02-25

因此,选择适宜品种,大力推广机械化生产对油菜产业发展至关重要。

油菜成熟后,油菜角果在外力作用下极易开裂,即易裂角性^[9],角果自身易裂一般会导致油菜籽产量损失 8%~12%^[10]。收获延迟使得损失的产量达到 20%^[11-12]。此外,裂角后掉落在土壤里的籽粒可以保持几年的活力,严重阻碍后茬作物的杂草控制^[13]。为确保产量和减少次生苗的产生,大多数农户采用提前收获的方式来减少产量损失^[14]。但提前收获会导致菜籽油品质下降。因此,选育抗裂角性的油菜品种是目前的重要课题。鉴定抗裂角性的试验方法分为田间损失调查法和室内角果检测,前者受人为因素影响过大且不具有可重复性,后者依据测试原理又可分为室内实验装置测量和随机碰撞法^[15]。室内实验装置测量主要有谭小力等^[16]的万能试验机定量法、浦惠明等^[8]的改良拉裂法、Tys^[17]的角果扭转测量法以及李耀明等^[18]的悬空压裂法;随机碰撞法来源于国外,在国内逐步形

成了完整的理论体系,如文雁成等^[19]的随机碰撞法、彭鹏飞等^[20]的改进随机碰撞法、王转茸等^[10]的随机碰撞法以及田正书等^[7]的随机碰撞法。此法操作简便、重复性好,抗裂角指数(SRI)有确切的公式计算^[9,15]。本试验采用随机碰撞法鉴定 43 份冬油菜品系的抗裂角性,通过分析不同品系之间的抗裂角性,结合相关农艺性状进行相关性分析,并进一步进行品质分析,初步筛选高抗裂角且品质优良的冬油菜,为进一步选育适合机械收获的油菜品种提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

于 2022-2023 年在甘肃省兰州市永登县上川镇油菜研究基地、甘肃省天水市农业科学研究所中梁试验站及张掖市农业科学研究院试验基地采集 43 份强冬性冬油菜品系的角果作为供试材料(表 1),均由甘肃农业大学农学院油菜课题组提供。

表 1 供试材料
Table 1 Test materials

| 编号 ID | 品系 Line | 编号 ID | 品系 Line |
|-------|----------------------------------|-------|----------------------------------|
| M-1 | 天油 606 | M-23 | 2022SC 甘品比 III2021WS-NLJ-113-1 |
| M-2 | 2020-CFL0380 | M-24 | 2022SC 甘品比 III2021QY-16-28-选 1 |
| M-3 | 2022SC 甘品比 II 低 2-80 | M-25 | 17-450 |
| M-4 | 天油 608 | M-26 | 陇油 88 |
| M-5 | 2022SC 甘品比 III2021QY-16-94-示范选 1 | M-27 | 2022SC 甘品比 II2021QY-16-94-示范选 1 |
| M-6 | 2021RGAU-88 | M-28 | 2022SC 甘品比 III2021WS-NLJ-113-2 |
| M-7 | 2022SC 甘品比 III 2021 低 2-80 | M-29 | 2022SC 甘品比 III2021QY-17-45-示范选 1 |
| M-8 | 2022SC 甘品比 III 2021HN 低 2-89 | M-30 | 天油 609 |
| M-9 | 2020R1-519 | M-31 | 2020 低 2 网-366 |
| M-10 | PLB829-3 | M-32 | 天油 14 号 |
| M-11 | 2020R1-512 | M-33 | 2022SC 甘品比 II 2021HN 低 2-89 |
| M-12 | 2020 低 2-矮秆 246 | M-34 | PLB801 |
| M-13 | RGAU-201 | M-35 | 2022SC 甘品比 II2021WS-NLJ-113-1 |
| M-14 | 2022 甘品比 II2021ws-NLJ-113-2 | M-36 | 2021RGAU-12 |
| M-15 | 2022 甘品比 III2021wc-NLJ-113-2 | M-37 | 16QD-15 轮选 8 |
| M-16 | 2020 低-2-173 | M-38 | 16RT3309 轮选 6 |
| M-17 | H614 | M-39 | G1202-20 |
| M-18 | 平试 8 | M-40 | 2022SC 甘品比 II2021QY-17-45-示范选 1 |
| M-19 | RGAU-197 | M-41 | 2021SC 甘品比 II2021HN 低 2-186 |
| M-20 | 天油 4 号 | M-42 | 2022SC 甘品比 II2021QY-16-28-选 1 |
| M-21 | RGAU-13 | M-43 | 2019HN12PZ16-65 |
| M-22 | 2022SC 甘品比 III2021HN 低 2-186 | | |

1.2 试验方法

1.2.1 角果抗裂角性状的鉴定 在角果乳黄熟期,从每份冬油菜品系中随机抽取 5 株样本,用剪刀剪

取单株主花序中部发育正常且充分成熟的 15 个角果,分别放入牛皮纸袋中保存备用。所有角果均进行 80 °C 的烘干处理,烘烤 30 min 后取出,为减少

余温干扰,将角果在室温下密封隔夜保存。每个品系的各个单株随机选取果喙完好无损的10个角果,将50个角果充分混合后,平均分成5份备用,每次取10个烘干角果放入方形带盖子(长11 cm×宽10 cm×高7 cm)的塑料盒内,盒内放置6个小钢珠(6 mm)和15个大钢珠(10 mm),加盖后放置在振幅15 mm、转速为240转/min的摇床(TS-100 ORBITAL SHAKER)上,每次振荡1.5 min后记录1次破裂的角果数,去掉破裂的角果后继续振荡,重复10次,共记录10次。角果破裂是以角果从果柄处断裂到果喙的50%以上或能看见油菜籽粒为标准。43份材料逐一完成试验后,将记录好的数据统一计算SRI, $SRI=1-\sum_{i=1}^{i=10} \frac{X_i(11-i)}{\text{角果数} \times \text{总次数}}$, 式中, X_i 是第 i 次破损的角果数。

1.2.2 角果性状 从各冬油菜品系中随机抽取5个完好无损的角果,用游标卡尺测量角果厚、角果长、角果宽以及果喙长,考察每角果粒数,取平均值。测量后收取5个角果的果喙用电子天平称重。

1.2.3 品质性状 用近红外品质分析仪(NIR 3700, Foss, 瑞典)测定种子含油量、芥酸含量、硫苷含量和含水量等指标。

1.2.4 株型性状统计 在油菜成熟期,每个品系随机选取3株油菜进行株型性状统计。用卷尺测量株高、分枝部位以及主花序长并计算平均值,对一次分枝数、二次分枝数、主花序有效结果数、全株有效结果数和单株产量进行统计并计算平均值,使用千粒重插板测量千粒重。

1.3 数据处理

使用Excel整理数据,选用SPSS 22.0统计分析软件和Origin 2021进行聚类分析、相关性分析、单样本非参数检验,使用SPAARO对角果含水量进行灰色关联度分析。

2 结果与分析

2.1 冬油菜品系抗裂角指数分析

聚类结果(图1)显示,在欧氏距离7.0时把43份冬油菜材料的抗性等级划分为4类,分别为中抗、高抗、低抗和易裂。结合表2可知,第I类19份材料平均SRI为0.861,表现为中抗,占总数的44.19%;第II类6份材料平均SRI为0.958,表现为高抗,占总数的13.95%;第III类12份材料平均SRI为0.722,表现为低抗,占总数的27.91%;第IV类

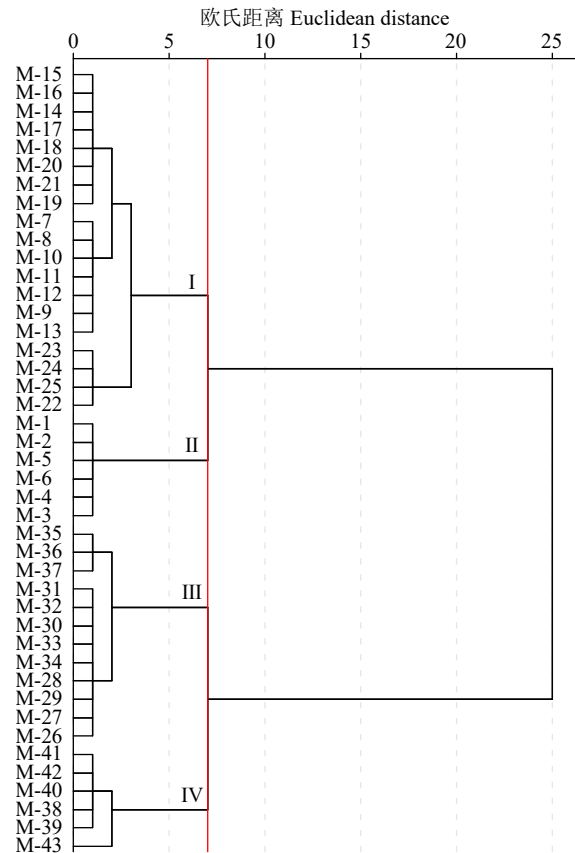


图1 43份冬油菜品系的聚类分析

Fig.1 Cluster analysis of 43 winter rapeseed lines

表2 不同品系的抗裂角指数和抗性等级
Table 2 Pod shattering resistance index and resistance level of different lines

| 编号 ID | 抗裂角 指数 SRI | 抗性等级 Resistance level | 编号 ID | 抗裂角 指数 SRI | 抗性等级 Resistance level |
|----------|------------------|-----------------------------|----------|------------------|-----------------------------|
| M-1 | 0.980 | 高抗 | M-23 | 0.812 | 中抗 |
| M-2 | 0.978 | 高抗 | M-24 | 0.804 | 中抗 |
| M-3 | 0.958 | 高抗 | M-25 | 0.792 | 中抗 |
| M-4 | 0.948 | 高抗 | M-26 | 0.753 | 低抗 |
| M-5 | 0.942 | 高抗 | M-27 | 0.744 | 低抗 |
| M-6 | 0.940 | 高抗 | M-28 | 0.743 | 低抗 |
| M-7 | 0.913 | 中抗 | M-29 | 0.742 | 低抗 |
| M-8 | 0.908 | 中抗 | M-30 | 0.726 | 低抗 |
| M-9 | 0.902 | 中抗 | M-31 | 0.725 | 低抗 |
| M-10 | 0.898 | 中抗 | M-32 | 0.724 | 低抗 |
| M-11 | 0.896 | 中抗 | M-33 | 0.722 | 低抗 |
| M-12 | 0.892 | 中抗 | M-34 | 0.718 | 低抗 |
| M-13 | 0.886 | 中抗 | M-35 | 0.698 | 低抗 |
| M-14 | 0.862 | 中抗 | M-36 | 0.690 | 低抗 |
| M-15 | 0.860 | 中抗 | M-37 | 0.679 | 低抗 |
| M-16 | 0.860 | 中抗 | M-38 | 0.659 | 易裂 |
| M-17 | 0.858 | 中抗 | M-39 | 0.640 | 易裂 |
| M-18 | 0.856 | 中抗 | M-40 | 0.618 | 易裂 |
| M-19 | 0.848 | 中抗 | M-41 | 0.616 | 易裂 |
| M-20 | 0.844 | 中抗 | M-42 | 0.614 | 易裂 |
| M-21 | 0.840 | 中抗 | M-43 | 0.578 | 易裂 |
| M-22 | 0.826 | 中抗 | | | |

6 份材料平均 SRI 为 0.621，表现为易裂，占总数的 13.95%。43 份材料的平均 SRI 为 0.802，最大值为 0.980，最小值为 0.578。

43 份冬油菜品系的 SRI 整体呈现“中间多、两端少”的分布特征，平均 SRI 为 0.802，说明供试材料的抗裂角能力整体处于中等偏上水平。从数值范围来看，SRI 的最大值（0.980）与最小值（0.578）相差 0.402，极差较大，表明不同品系间的抗裂角性存在显著遗传差异，进一步分析可见，仅 13.95% 的材料为易裂类型，其余材料占比 86.05%，这一结果说明 43 份强冬性冬油菜品系中，多数材料具备一定的抗裂角基础。

2.2 冬油菜 SRI 与相关农艺性状的综合分析

2.2.1 相关性分析

单样本非参数检验部分结果（图 2）显示，果皮厚、角果长、角果宽、果喙长和每角粒数均呈近似正态分布，而果喙重不符合正态分布。对各指标进行相关性分析，结果（表 3）表明，SRI 与果皮厚呈极显著正相关，说明果皮厚显著影响冬油菜的抗裂角性，油菜果皮越厚，油菜的 SRI 越高，抗裂角性越强；果皮厚可以作为挑选高抗裂角冬油菜种质的形态指标。其他角果性状与 SRI 无显著相关性。角果长与角果宽、果喙重呈极显著正相关；角果宽与果皮厚、果喙重呈极显著正相关，与每角粒数呈极显著负相关；果皮厚与果喙

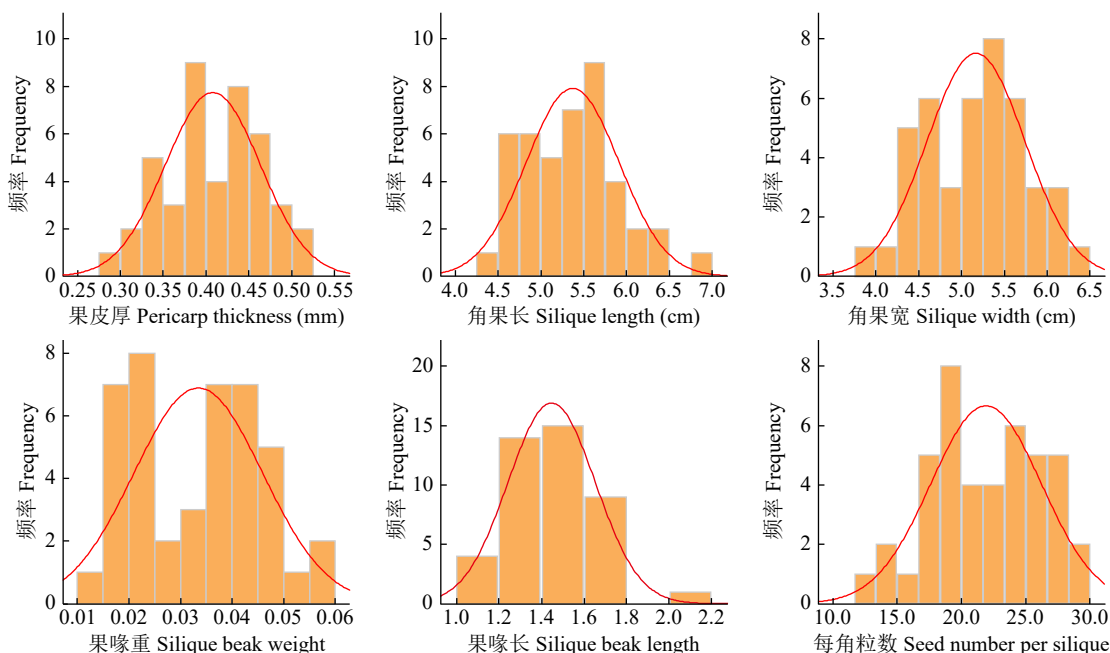


图 2 冬油菜品系农艺性状的分布

Fig.2 Distribution of agronomic traits in winter rapeseed lines

表 3 冬油菜品系农艺性状的相关性分析

Table 3 Correlation analysis of agronomic traits in winter rapeseed lines

| 性状 Trait | 抗裂角 指数 SRI | 角果长 Silique length | 角果宽 Silique width | 果皮厚 Pericarp thickness | 果喙长 Silique beak length | 果喙重 Silique beak weight | 每角粒数 Seed number per silique |
|------------------------------|------------------|--------------------------|-------------------------|------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|------------------------------------|
| 抗裂角指数 SRI | 1.000 | | | | | | |
| 角果长 Silique length | -0.149 | 1.000 | | | | | |
| 角果宽 Silique width | 0.053 | 0.407** | 1.000 | | | | |
| 果皮厚 Pericarp thickness | 0.502** | 0.165 | 0.450** | 1.000 | | | |
| 果喙长 Silique beak length | 0.053 | -0.076 | -0.099 | -0.201 | 1.000 | | |
| 果喙重 Silique beak weight | 0.170 | 0.476** | 0.803** | 0.615** | -0.261 | 1.000 | |
| 每角粒数 Seed number per silique | -0.135 | -0.012 | -0.441** | -0.500** | 0.626** | -0.607** | 1.000 |

“**”表示在 $P < 0.01$ 水平极显著相关，下同。

“**” indicates extremely significant correlation at $P < 0.01$ level, the same below.

重呈极显著正相关，与每角粒数呈极显著负相关；果喙长与每角粒数呈极显著正相关；果喙重与每角

粒数呈极显著负相关。

由表 4 可知，SRI 和 6 个角果性状的变异系数在

9.97%~36.82%。SRI 平均为 0.802，变幅为 0.578~0.980，极差为 0.402，变异系数为 13.70%；角果长平均为 5.37 cm，变异系数为 9.97%；角果宽平均为 5.17 cm，变异系数为 10.92%；果皮厚平均为

0.41 mm，变异系数为 13.44%；果喙长平均为 1.56 cm，变异系数为 16.07%；果喙重平均为 0.03 g，变异系数为 36.82%；每角粒数平均为 21.91，变异系数为 19.36%。

表 4 SRI 和 6 个角果性状的描述性分析
Table 4 Descriptive analysis of SRI and six silique traits

| 项目 Item | 抗裂角指数 SRI | 角果长 Silique length (cm) | 角果宽 Silique width (cm) | 果皮厚 Pericarp thickness (mm) | 果喙长 Silique beak length (cm) | 果喙重 Silique beak weight (g) | 每角粒数 Seed number per silique |
|-------------|--------------|-------------------------------|------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|
| 平均 Average | 0.802 | 5.37 | 5.17 | 0.41 | 1.56 | 0.03 | 21.91 |
| 极差 Range | 0.402 | 2.39 | 2.36 | 0.23 | 1.39 | 0.05 | 16.44 |
| 最小值 Min. | 0.578 | 4.43 | 3.97 | 0.28 | 1.08 | 0.01 | 13.24 |
| 最大值 Max. | 0.980 | 6.82 | 6.33 | 0.51 | 2.47 | 0.06 | 29.68 |
| 标准差 SD | 0.110 | 0.54 | 0.56 | 0.05 | 0.25 | 0.01 | 4.24 |
| 变异系数 CV (%) | 13.716 | 9.97 | 10.92 | 13.44 | 16.07 | 36.82 | 19.36 |

2.2.2 冬油菜 SRI 与株型性状的相关性分析 由表 5 可知，株型的相关性状与 SRI 无显著的相关性，但各个指标之间存在显著的相关性。其中单株产量与株高、一次分枝数、二次分枝数和全株有效结果数呈极显著正相关，与主花序有效结果数呈显著正相关；千粒重与分枝部位呈显著正相关；

全株有效结果数与一次分枝数、二次分枝数呈极显著正相关，与株高呈显著正相关；主花序有效结果数与株高、一次分枝数呈极显著正相关；二次分枝数与一次分枝数呈极显著正相关，与分枝部位呈显著正相关；株高与分枝部位、一次分枝数呈极显著正相关。

表 5 冬油菜品系株型性状的相关性分析
Table 5 Correlation analysis of plant type traits of winter rapeseed lines

| 项目 Item | 抗裂角 指数 SRI | 株高 Plant height | 分枝部位 Branching position | 一次分枝数 Number of primary branches | 二次分枝数 Number of secondary branches | 主花序长 Main inflorescence length | 主花序有效 结果数 Number of effective fruits in main inflorescence | 全株有效 结果数 Number of effective fruits per plant | 千粒重 1000- grain weight | 单株 产量 Yield per plant |
|---|------------------|-----------------------|-------------------------------|---|---|---|---|--|---------------------------------|-----------------------------------|
| 抗裂角指数 SRI | 1.000 | | | | | | | | | |
| 株高 Plant height | 0.056 | 1.000 | | | | | | | | |
| 分枝部位 Branching position | 0.199 | 0.615** | 1.000 | | | | | | | |
| 一次分枝数 Number of primary branches | -0.048 | 0.639** | 0.174 | 1.000 | | | | | | |
| 二次分枝数 Number of secondary branches | -0.178 | 0.105 | -0.364* | 0.616** | 1.000 | | | | | |
| 主花序长 Main inflorescence length | -0.085 | 0.209 | -0.147 | 0.006 | -0.134 | 1.000 | | | | |
| 主花序有效结果数 Number of effective fruits in main inflorescence | 0.028 | 0.579** | 0.166 | 0.448** | 0.109 | 0.128 | 1.000 | | | |
| 全株有效结果数 Number of effective fruits per plant | -0.226 | 0.344* | -0.001 | 0.704** | 0.776** | -0.137 | 0.239 | 1.000 | | |
| 千粒重 1000-grain weight | 0.235 | 0.255 | 0.320* | 0.165 | -0.053 | 0.111 | 0.279 | 0.129 | 1.000 | |
| 单株产量 Yield per plant | -0.281 | 0.587** | 0.278 | 0.730** | 0.434** | -0.012 | 0.347* | 0.617** | -0.119 | 1.000 |

“*”表示在 $P < 0.05$ 水平显著相关。下同。

“**” indicates significant correlation at $P < 0.05$ level. The same below.

2.2.3 冬油菜 SRI 与角果含水量相关性分析 由表 6 可知，主花序角果含水量与 SRI 之间无显著相关性。灰色关联度分析（表 7）表明，含水量关联度排序为侧枝角果 > 主花序角果 > 主花序种子 >

主花序果壳 > 侧枝果壳 > 侧枝种子，其中侧枝角果和主花序角果含水量关联度分别为 0.808 和 0.802，虽然它们与 SRI 之间没有显著相关性，但是也是影响 SRI 的关键因素。

表 6 角果各个部位含水量相关性分析
Table 6 Correlation analysis of various organs of moisture content in siliques

| 含水量指标 Moisture content index | 主花序角果 Silique of the main inflorescence | 侧枝角果 Silique of the lateral branch | 主花序果壳 Silique shell of the main inflorescence | 主花序种子 Main inflorescence seed | 侧枝果壳 Silique shell of the lateral branch | 侧枝种子 Seeds of the lateral branch | 抗裂角指数 SRI |
|---|--|---------------------------------------|--|----------------------------------|---|-------------------------------------|--------------|
| 主花序角果 Silique of the main inflorescence | 1.000 | | | | | | |
| 侧枝角果 Silique of the lateral branch | 0.700** | 1.000 | | | | | |
| 主花序果壳 Silique shell of the main inflorescence | 0.350 | 0.566* | 1.000 | | | | |
| 主花序种子 Main inflorescence seed | 0.401 | 0.516* | 0.579* | 1.000 | | | |
| 侧枝果壳 Silique shell of the lateral branch | -0.153 | 0.419 | 0.507* | 0.135 | 1.000 | | |
| 侧枝种子 Seeds of the lateral branch | -0.155 | 0.182 | 0.037 | 0.512* | 0.122 | 1.000 | |
| 抗裂角指数 SRI | -0.037 | 0.187 | -0.104 | -0.416 | 0.230 | -0.195 | 1.000 |

表 7 SRI 与角果各个部位含水量间的灰色关联度分析
Table 7 Grey correlation analysis between SRI and moisture content of different silique parts

| 项目 Item | 主花序角果 Silique of the main inflorescence | 侧枝角果 Silique of the lateral branch | 主花序果壳 Silique shell of the main inflorescence | 主花序种子 Main inflorescence seed | 侧枝果壳 Silique shell of the lateral branch | 侧枝种子 Seeds of the lateral branch |
|------------------------|--|---------------------------------------|--|----------------------------------|---|-------------------------------------|
| 关联度 Correlation degree | 0.802 | 0.808 | 0.744 | 0.752 | 0.740 | 0.699 |

2.3 不同地区同一品种的 SRI 对比分析

对种植于甘肃省张掖市甘州区和天水市武山县同一品种的 SRI 进行对比（表 8），发现种植在张掖市的材料 SRI 均低于天水试点，种植于天水市的冬油菜品种抗裂角性更高。张掖市甘州区干燥少雨，温差大，蒸发量大，年均日照时数为 3074 h，年均降水量为 114.9 mm；天水市武山县冬长夏短，年均日照时数为 2331 h，年均降水量为 400 mm，天水市武山县年均日照时数低于张掖市甘州区。在

表 8 不同地区同一品系的 SRI 比较
Table 8 Comparison of SRI of the same line in different regions

| 编号 ID | 抗裂角指数 SRI | | |
|----------|------------|-------------|------------|
| | 张掖 Zhangye | 天水 Tianshui | 兰州 Lanzhou |
| M-38 | 0.580 | 0.645 | |
| M-37 | 0.620 | 0.685 | |
| M-43 | 0.520 | 0.605 | |
| M-17 | 0.820 | 0.850 | |
| M-25 | 0.750 | 0.805 | |
| M-34 | 0.650 | 0.705 | |
| M-10 | 0.850 | 0.905 | |
| M-20 | 0.800 | 0.835 | |
| M-1 | | 0.985 | 0.965 |
| M-4 | | 0.955 | 0.935 |
| M-30 | | 0.735 | 0.728 |
| M-2 | | 0.982 | 0.962 |
| M-32 | | 0.730 | 0.710 |
| M-26 | | 0.750 | 0.732 |
| M-12 | | 0.898 | 0.875 |
| M-16 | | 0.865 | 0.845 |
| M-31 | | 0.730 | 0.712 |

油菜收获期，张掖市温度高于天水市，油菜角果的水分散失加剧，对油菜的后熟程度和机械化收获角果破裂程度均有一定影响。

分析在天水市和兰州市种植的 9 份冬油菜品系的 SRI 可知，天水试点的 SRI 均高于兰州试点。兰州市永登县的年均日照时数为 2659 h，年均降水量为 290 mm。相比于天水市，武山县温度高，热量资源丰富，但收获期同样较高的温度导致水分散失，影响角果抗裂性和后熟程度。油菜是长日照喜凉作物，其生育期需在日均温度 22 °C 以下完成，天水市武山县年均温度为 10.1 °C，且降水量较张掖市和兰州市多。由此可知，平均日照时间和日照温度对角果的抗裂性和后熟程度有一定影响。

2.4 抗裂角性强且产量高的冬油菜品系筛选

为获得产量高且适合机械收获的冬油菜品种，将 43 份冬油菜品系的 SRI 测定结果结合株型性状进行初步筛选，筛选出 SRI 大于 0.700 且单株产量大于 20.00 g 的 11 份品系（表 9）。

2.5 不同抗性等级品系的比较分析

对不同抗性等级品系的角果性状、株型性状和品质性状进行比较分析。从表 10 可以看出，表现为高抗的油菜角果的平均果皮厚为 0.45 mm，易裂的为 0.34 mm，其他角果性状与 SRI 没有显著的关联。不同抗性等级株型性状比较（表 11）发现，表现为高抗的油菜品系千粒重明显高于其他 3 类，平均 7.14 g，而其他的株型性状与 SRI 之间没有显著关联。

表 9 11 份高产且 SRI 强的冬油菜品系株型性状对比
Table 9 Comparison of plant type traits among 11 high yield and SRI strong winter rapeseed lines

| 编号 ID | 株高 Plant height (cm) | 分枝部位 Branching position (cm) | 一次分枝数 Number of primary branches | 二次分枝数 Number of secondary branches | 主花序长 Main inflorescence length (cm) | 主花序有效结果数 Number of effective fruits in the main inflorescence | 全株有效结果数 Number of effective fruits per plant | 千粒重 1000- grain weight (g) | 单株产量 Yield per plant (g) | 抗裂角 指数 SRI |
|----------|-------------------------------|---------------------------------------|---|---|--|--|---|-------------------------------------|-----------------------------------|------------------|
| M-3 | 117.38 | 10.46 | 13.20 | 10.60 | 38.12 | 43.40 | 486.00 | 3.72 | 25.06 | 0.958 |
| M-8 | 107.25 | 21.00 | 10.75 | 10.50 | 45.90 | 44.50 | 414.25 | 3.52 | 20.87 | 0.908 |
| M-14 | 132.10 | 26.10 | 14.00 | 17.00 | 26.70 | 52.00 | 486.00 | 3.40 | 23.39 | 0.862 |
| M-15 | 131.60 | 0.00 | 15.00 | 20.00 | 32.30 | 82.00 | 554.00 | 2.60 | 20.02 | 0.860 |
| M-22 | 114.22 | 17.72 | 12.60 | 16.60 | 39.98 | 26.00 | 454.80 | 4.00 | 23.42 | 0.836 |
| M-24 | 125.60 | 17.10 | 13.00 | 14.00 | 37.20 | 46.00 | 303.00 | 3.40 | 25.88 | 0.804 |
| M-26 | 135.70 | 37.77 | 9.33 | 2.33 | 39.43 | 46.00 | 302.67 | 4.17 | 21.38 | 0.753 |
| M-27 | 135.30 | 24.23 | 12.33 | 9.33 | 68.73 | 51.00 | 334.33 | 4.18 | 21.65 | 0.744 |
| M-29 | 111.50 | 23.97 | 12.00 | 7.67 | 41.13 | 32.33 | 376.00 | 3.60 | 21.72 | 0.742 |
| M-30 | 123.57 | 26.13 | 11.33 | 4.67 | 43.97 | 63.33 | 286.33 | 3.81 | 21.76 | 0.726 |
| M-33 | 102.30 | 15.30 | 13.00 | 18.00 | 31.60 | 32.00 | 634.00 | 3.54 | 21.66 | 0.722 |

表 10 不同抗性等级角果性状比较
Table 10 Comparison of silique traits of different resistance levels

| 抗性等级 Resistance level | 抗裂角 指数 SRI | 角果长 Silique length (cm) | 角果宽 Silique width (cm) | 果皮厚 Pericarp thickness (mm) | 果喙长 Silique beak length (cm) | 果喙重 Silique beak weight (g) | 每角粒数 Seed number per silique |
|--------------------------|------------------|-------------------------------|------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|
| 高抗 High resistance | 0.958 | 5.42 | 5.16 | 0.45 | 1.45 | 0.04 | 19.33 |
| 中抗 Moderate resistance | 0.861 | 5.22 | 5.18 | 0.41 | 1.63 | 0.03 | 22.72 |
| 低抗 Low resistance | 0.722 | 5.59 | 5.33 | 0.41 | 1.51 | 0.04 | 21.39 |
| 易裂 Easy shattering | 0.621 | 5.38 | 4.81 | 0.34 | 1.54 | 0.03 | 22.94 |

表 11 不同抗性等级株型性状比较
Table 11 Comparison of plant types and traits with different resistance levels

| 抗性等级 Resistance level | 株高 Plant height (cm) | 分枝部位 Branching position (cm) | 一次分枝数 Number of primary branches | 二次分枝数 Number of secondary branches | 主花序长 Main inflorescence length | 主花序有效结果数 Number of effective fruits in the main inflorescence | 全株有效结果数 Number of effective fruits per plant | 千粒重 1000- grain weight (g) | 单株 产量 Yield per plant (g) |
|-----------------------------|-------------------------------|---------------------------------------|---|---|---|--|---|-------------------------------------|------------------------------------|
| 高抗 High resistance | 124.22 | 21.56 | 11.74 | 8.79 | 45.99 | 45.27 | 336.96 | 7.14 | 15.04 |
| 中抗 Moderate resistance | 108.32 | 15.26 | 10.26 | 10.49 | 40.06 | 40.43 | 301.98 | 2.98 | 13.07 |
| 抵抗 Low resistance | 115.32 | 20.92 | 10.95 | 10.34 | 40.44 | 39.45 | 393.13 | 3.49 | 16.90 |
| 易裂 Easy shattering | 115.53 | 13.16 | 11.21 | 12.56 | 47.27 | 39.88 | 394.57 | 2.93 | 15.04 |

2.6 抗裂角性强且品质优良的冬油菜品系筛选

为筛选适合机械化收获且品质达标的强冬性冬油菜品系，以 SRI>0.700、芥酸<1%、硫苷<30 μmol/g（符合“双低”优质标准）及含油量>43%（兼顾生产效益）为核心筛选阈值，开展综合评价与优系筛选。

从品质性状整体表现（表 12）来看，43 份品系品质指标存在明显差异，硫苷含量变幅为 26.92~118.19 μmol/g，仅 M-14、M-16 低于 30 μmol/g；含油量介于 37.49%~49.08%，高于 45%的品系共 13 份，其中 M-26 含油量最高，M-7、M-23、M-14 等 6 份品系含油量超 47%；脂肪酸组成中，油酸含量均值为 47.15%，超过 60%的品系占 37.21%，M-41

油酸含量最高（81.05%），芥酸含量均值 18.70%，低于 1%的品系共 14 份，亚油酸、亚麻酸含量符合菜籽油品质基本要求。

结合抗性等级与品质关联分析（表 13），高抗类群（SRI=0.958）表现出显著优质特征：芥酸（6.09%）、硫苷（68.28 μmol/g）、蛋白质（21.13%）含量均最低，含油量（44.61%）最高；而易裂类群（SRI=0.62）则呈现高芥酸（27.94%）、高硫苷（99.67 μmol/g）、低含油量（43.14%）的劣质性状，进一步验证抗裂角性与品质性状的协同性。

基于上述指标筛选，共获得 8 份抗裂角性强且品质优良的品系（表 14）。其中符合“双低”标准的品系有 M-14 和 M-16，硫苷含量分别为 26.92 和

表 12 43 份冬油菜品系品质指标分析
Table 12 Analysis of quality indicators of 43 winter rapeseed lines

| 编号 ID | 含油量 Oil content (%) | 油酸 Oleic acid (%) | 亚油酸 Linoleic acid (%) | 亚麻酸 Linolenic acid (%) | 芥酸 Erucic acid (%) | 硫苷 Glucosinolate (μmol/g) |
|----------|------------------------|----------------------|--------------------------|---------------------------|-----------------------|------------------------------|
| M-1 | 46.77 | 74.08 | 18.79 | 7.64 | 4.22 | 118.19 |
| M-2 | 48.61 | 80.25 | 18.96 | 5.34 | 0.00 | 32.38 |
| M-3 | 40.79 | 69.80 | 19.75 | 6.79 | 2.14 | 41.12 |
| M-4 | 44.97 | 75.11 | 21.56 | 6.21 | 0.16 | 32.77 |
| M-5 | 43.06 | 53.47 | 14.53 | 6.76 | 15.54 | 74.45 |
| M-6 | 43.45 | 18.58 | 18.31 | 7.76 | 40.60 | 110.75 |
| M-7 | 43.71 | 73.12 | 19.58 | 6.33 | 0.82 | 37.69 |
| M-8 | 45.98 | 76.34 | 17.56 | 5.00 | 0.29 | 35.29 |
| M-9 | 41.60 | 23.45 | 17.87 | 7.21 | 33.26 | 84.41 |
| M-10 | 42.59 | 19.63 | 16.79 | 7.48 | 38.97 | 101.42 |
| M-11 | 47.28 | 24.83 | 18.81 | 6.49 | 37.82 | 94.76 |
| M-12 | 44.36 | 72.44 | 22.01 | 5.81 | 3.25 | 45.28 |
| M-13 | 44.58 | 18.64 | 17.62 | 6.28 | 39.55 | 93.07 |
| M-14 | 43.73 | 72.70 | 19.03 | 6.65 | 0.11 | 26.92 |
| M-15 | 43.45 | 68.52 | 18.52 | 8.38 | 2.64 | 58.95 |
| M-16 | 47.43 | 76.14 | 18.50 | 4.82 | 0.07 | 29.50 |
| M-17 | 44.00 | 28.37 | 17.17 | 7.31 | 35.91 | 105.12 |
| M-18 | 40.56 | 22.89 | 16.63 | 8.28 | 42.16 | 108.02 |
| M-19 | 44.14 | 30.15 | 17.62 | 7.84 | 32.85 | 101.81 |
| M-20 | 45.42 | 25.96 | 17.65 | 7.45 | 37.73 | 100.23 |
| M-21 | 47.98 | 19.33 | 17.9 | 6.72 | 40.21 | 86.08 |
| M-22 | 46.44 | 61.12 | 13.55 | 4.83 | 12.15 | 52.24 |
| M-23 | 42.70 | 76.29 | 19.01 | 5.75 | 0.81 | 36.52 |
| M-24 | 43.31 | 37.88 | 13.72 | 6.24 | 30.14 | 93.99 |
| M-25 | 44.32 | 27.16 | 17.24 | 6.99 | 35.52 | 100.77 |
| M-26 | 49.08 | 64.52 | 17.99 | 5.56 | 6.95 | 73.65 |
| M-27 | 40.75 | 50.47 | 16.16 | 6.60 | 13.91 | 70.79 |
| M-28 | 40.17 | 66.91 | 23.18 | 7.23 | 0.42 | 36.09 |
| M-29 | 37.49 | 51.24 | 19.82 | 7.93 | 12.88 | 109.15 |
| M-30 | 42.17 | 43.65 | 16.32 | 8.24 | 19.22 | 87.99 |
| M-31 | 47.33 | 81.05 | 17.04 | 5.99 | 6.16 | 48.55 |
| M-32 | 43.59 | 37.72 | 17.80 | 7.38 | 25.95 | 114.60 |
| M-33 | 43.41 | 78.44 | 17.43 | 6.24 | 6.86 | 42.83 |
| M-34 | 44.45 | 18.96 | 16.55 | 7.92 | 40.81 | 106.71 |
| M-35 | 42.55 | 59.97 | 16.53 | 6.88 | 6.68 | 60.23 |
| M-36 | 46.50 | 24.83 | 18.67 | 6.61 | 33.95 | 95.33 |
| M-37 | 43.57 | 20.47 | 15.57 | 8.46 | 42.38 | 95.21 |
| M-38 | 41.22 | 23.20 | 16.39 | 8.18 | 39.50 | 106.13 |
| M-39 | 45.60 | 16.27 | 20.12 | 7.66 | 37.46 | 85.85 |
| M-40 | 46.86 | 55.67 | 16.96 | 6.51 | 14.03 | 109.55 |
| M-41 | 40.78 | 42.12 | 18.02 | 6.48 | 20.28 | 85.91 |
| M-42 | 39.96 | 42.46 | 17.05 | 6.89 | 20.26 | 106.61 |
| M-43 | 44.42 | 23.30 | 17.61 | 7.24 | 36.10 | 103.95 |

表 13 不同抗性等级品系品质性状比较
Table 13 Comparison of quality traits of lines with different resistance levels

| 抗性等级 Resistance level | 含水量 Moisture content (%) | 蛋白质 Protein (%) | 含油量 Oil content (%) | 油酸 Oleic acid (%) | 芥酸 Erucic acid (%) | 亚油酸 Linoleic acid (%) | 亚麻酸 Linolenic acid (%) | 硫苷 Glucosinolate (μmol/g) |
|--------------------------|-----------------------------|--------------------|------------------------|----------------------|-----------------------|--------------------------|---------------------------|------------------------------|
| 高抗 High resistance | 4.33 | 21.13 | 44.61 | 61.88 | 6.09 | 18.65 | 6.75 | 68.28 |
| 中抗 Moderate resistance | 4.62 | 22.52 | 44.46 | 44.94 | 20.45 | 17.78 | 6.58 | 73.01 |
| 低抗 Low resistance | 4.41 | 22.84 | 43.33 | 49.95 | 15.76 | 17.67 | 7.16 | 78.84 |
| 易裂 Easy shattering | 4.47 | 23.87 | 43.14 | 33.84 | 27.94 | 17.69 | 7.16 | 99.67 |

表 14 8 份冬油菜品系各类品质指标对比
Table 14 Comparison of quality indexes of eight winter rapeseed lines

| 编号 ID | 含水量 Moisture content (%) | 蛋白质 Protein (%) | 含油量 Oil content (%) | 芥酸 Erucic acid (%) | 硫甙 Glucosinolate ($\mu\text{mol/g}$) | 抗裂角指数 SRI |
|----------|-----------------------------|--------------------|------------------------|-----------------------|---|--------------|
| M-2 | 4.06 | 16.93 | 48.61 | 0.00 | 32.38 | 0.978 |
| M-4 | 4.34 | 19.17 | 44.97 | 0.16 | 32.77 | 0.948 |
| M-7 | 4.50 | 21.85 | 43.71 | 0.82 | 37.69 | 0.913 |
| M-8 | 4.09 | 21.37 | 45.98 | 0.29 | 35.29 | 0.908 |
| M-14 | 4.12 | 21.80 | 43.73 | 0.11 | 26.92 | 0.862 |
| M-16 | 4.18 | 17.11 | 47.43 | 0.07 | 29.50 | 0.860 |
| M-23 | 4.38 | 22.56 | 42.70 | 0.81 | 36.52 | 0.812 |
| M-28 | 4.89 | 23.64 | 40.17 | 0.42 | 36.09 | 0.743 |

29.50 $\mu\text{mol/g}$ ，芥酸含量均低于 0.3%，含油量分别为 43.73% 和 47.43%，且油酸含量超 72%，综合品质最优；含油量超 47% 的品系有 6 份（M-7、M-23、M-14、M-41、M-8、M-29），可作为高油种质，其中 M-8（SRI=0.908）含油量 45.98%，芥酸 0.29%，硫苷 35.29 $\mu\text{mol/g}$ ，兼具高抗裂角性与高油特性，适合机械化收获与优质油用需求。

3 讨论

3.1 SRI 偏高的原因及改进方法

在现代农业生产实践的条件下，油菜角果破碎会造成严重的产量损失^[21]。高抗裂角种质资源鉴定是开发适宜机械化收获油菜籽粒的必要条件。本研究采用随机碰撞法对 43 份冬油菜品系的抗裂角性状进行鉴定，结果显示，抗裂角性强（SRI>0.700）的材料占 86.05%。与王转茸等^[10]的研究结果相比，SRI 整体偏高。可能有以下几个原因：一是利用随机碰撞法进行试验时，容器内置的钢珠数目不够且钢珠内径较小，碰撞力度不够强；二是碰撞时间不足，导致角果与钢珠碰撞不充分；三是容器规格问题，容器形状为方形且底部有轻微凹陷，所以在使用方形带盖的塑料盒进行随机碰撞时，方形的限制使得钢珠集中在一侧，无法完全晃动，导致和角果无法充分碰撞；四是摇床型号和规格不同，本试验采用 TS-100 ORBITAL SHAKER 脱色摇床，回转半径（振幅）为 15 mm，而王转茸等^[10]使用的哈东联 HZQ-C 双层空气恒温振荡器振幅为 20 mm，即使 2 台设备转速均为 240 转/min，相比之下，脱色摇床略显温和，使角果和钢珠两者处于相对运动而不是绝对运动，也就无法充分碰撞，这是造成研究结果整体偏高的主要原因。与彭鹏飞等^[20]的研究结果相比，SRI 也整体偏高。可能有以下几个原因：一是

利用随机碰撞法进行试验时，容器内置钢珠的内径较小，容器为方形，不利于钢珠与角果的充分碰撞；二是每次置于容器内的角果数目偏少，碰撞不均匀；三是所使用的摇床振幅和转速较小，并且在进行试验时没有固定容器，使角果和钢珠两者处于相对运动而不是绝对运动，也就无法充分碰撞。针对以上原因，参考彭鹏飞等^[20]的抗裂角检测方法提出改进方法：一是选用直径更大的钢珠，减少钢珠数量，增加碰撞空间和碰撞力度；二是适当延长碰撞时间，减少记录次数，保证钢珠和角果充分接触；三是选用圆形铁盒子进行试验；四是选用振幅更大的设备，保证试验的碰撞强度；五是在摇床上进行测定时对圆形铁盒子进行固定，保证碰撞次数。总体看来，随机碰撞法简单易操作，但大多是在室内进行。试验能否准确模拟在大田时机器收获的场景，设置的试验参数能否大致对应收割机的强度，以及在真实收获过程中油菜角果如何运动等问题，有待进一步的研究考证。

3.2 间接影响 SRI 的农艺性状

农艺性状指标可为鉴定冬油菜引种适应性提供参考，以便筛选出适宜当地种植的品种^[22]。本研究通过对 43 份冬油菜品系农艺性状的相关性分析，发现各农艺性状紧密关联。其中，SRI 与果皮厚呈极显著正相关，与王转茸等^[10]研究结果一致。表现高抗的油菜角果果皮厚度平均为 0.45 mm，而易裂的为 0.34 mm，从抗性等级层面也能看出 SRI 与果皮厚相关联。因此，如果想在当地实现高抗裂角油菜的种植，应该选择果皮较厚的油菜品种。表现为易裂的油菜品系角果的平均宽度明显小于其他 3 类，平均 4.81 cm；表现高抗的油菜品系每角粒数最少，平均 19.33。表现为易裂的油菜品系千粒重要显著低于其他 3 类，平均 2.93 g，而其他性状没

有明显的差异。由此可见，冬油菜品系的角果宽、果喙重、每角粒数、千粒重和角果含水量间接影响油菜品种的 SRI，选择角果较宽、果喙较重、每角粒数较少和千粒重较大的品种有助于筛选高抗裂角油菜的种质资源^[23]。

3.3 环境因素对抗裂角性的影响

环境因素对抗裂角性的影响主要有 4 个方面：一是气候条件。种植的气温和湿度变化能直接影响到油菜角果的裂角性。在高温低湿的环境中，角果会因水分快速散失而导致果皮厚度不均，角果易破裂。在低温高湿的环境中，会因果皮所含水分多导致膨胀，从而发生破裂。因此，适宜的温度和湿度对于果皮的薄厚起关键作用。二是光照条件。光照是植物生长的重要因素之一，对油菜角果的发育和抗裂角性也有影响。充足的光照有利于角果进行光合作用，积累干物质和油分，从而提高果皮的弹性和韧性，减少破裂造成的损失。相反，光照不足可能导致角果发育不良，果皮薄弱导致角果容易破裂。三是土壤因素。土壤水分、养分及土壤质地等因素也会影响油菜角果的抗裂性。土壤水分过多或过少都可能导致角果发育不均，果皮脆弱，容易破裂。土壤中养分的均衡供应也是保证角果健康发育的关键。如果在某一生长期缺少一种或多种营养元素则可能导致角果生长不良，果皮容易破裂。四是其他环境因素。如土壤酸碱度和大气污染物等其他环境因素也可能对油菜角果的抗裂角性产生影响。这些因素可能对油菜的生长和发育造成一定的压力，导致角果发育不均或果皮脆弱，从而增加裂角的风险。环境因素对油菜角果抗裂角性的影响是多方面的，包括气候条件、光照条件、土壤条件以及其他环境因素。为了保持油菜角果的抗裂性，在种植过程中应综合调控影响因素，为油菜生长发育提供一个良好的环境条件。

3.4 种质资源选择以及不同抗性等级品质性状特征

随着研究不断深入，油菜品质改良标准由“双低”油菜逐渐变为“四高三低两适中”的油菜，不仅要求低芥酸、低硫苷，还要对脂肪酸成分进一步改良，将菜籽油改良为对人体健康更有益的植物油^[23]。本试验分析发现，油酸含量超过 80%的材料有 2 份，分别是 M-42 和 M-41，可以将其作为高油酸油菜的种质资源。高油酸油菜制成菜籽油能够降低血液中有毒胆固醇含量，减少心血管疾病发生，对人体新陈代谢起重要作用^[24]。蛋白质含量

接近 25%的是 M-38，含量为 23.18%。综合以上 3 种性状分析，初步筛选出 8 份抗裂角性强且品质优良的冬油菜品系，其中，M-14 和 M-16 的硫苷含量符合国家优质油菜标准，M-16 含油量为 47.43%，芥酸质量分数为 0.07，硫苷含量为 29.50 $\mu\text{mol/g}$ ，可以作为高油优质且最适宜机械收获的冬油菜新品系。

4 结论

本研究以 43 份强冬性冬油菜品系为材料，基于欧氏距离 7.0 的聚类阈值，将其划分为 4 个抗性等级。通过产量性状筛选出 11 份 SRI>0.700 且单株产量>20 g 的品系，品质分析筛选出 8 份 SRI>0.700 且品质优良的品系，最终筛选出 17 份综合优良品系，分别为 M-2、M-3、M-4、M-7、M-8、M-14、M-15、M-16、M-22、M-23、M-24、M-26、M-27、M-28、M-29、M-30、M-33。其中，M-16 兼具高抗裂角性、双低特性与高含油量，是最适合甘肃机械化收获的品系；M-8 和 M-14 则同时满足品质与产量标准，可作为后备种质资源。

参考文献

- [1] 杨红旗, 徐艳华. 我国油菜生产现状与发展. 种子世界, 2010 (7): 1-2.
- [2] 蒲晓斌, 冯林. 2021 年长江上游区夏收油菜生产形势调研报告. 四川农业科技, 2021(12): 9-12.
- [3] 朋文欢. 我国油菜籽和菜籽油进口形势与问题分析. 中国农民合作社, 2022(12): 28-30.
- [4] 刘后利. 实用油菜栽培学. 北京: 中国农业出版社, 1982.
- [5] 吴崇友, 王积军, 廖庆喜, 等. 油菜生产现状与问题分析. 中国农机化学报, 2017, 38(1): 124-131.
- [6] 周广生, 左青松, 廖庆喜, 等. 中国油菜机械化生产现状、存在问题及对策. 湖北农业科学, 2013, 52(9): 2153-2157.
- [7] 田正书, 罗延青, 迟旭春, 等. 早熟甘蓝型油菜抗裂角性鉴定及材料筛选. 农学学报, 2022, 12(2): 40-46.
- [8] 浦惠明, 龙卫华, 高建芹, 等. 甘蓝型油菜角果的抗裂角特性及其相关分析. 中国油料作物学报, 2013, 35(5): 469-475.
- [9] 乔金平, 李耀明, 赵湛, 等. 成熟期橄榄型油菜角果抗裂角性试验与分析. 农机化研究, 2015, 37(5): 204-207.
- [10] 王转茸, 万丽丽, 杨光圣, 等. 甘蓝型油菜新品系的抗裂角性筛选与相关性状分析. 湖北农业科学, 2019, 58(24): 34-37, 42.
- [11] Child R D, Chauvaux N, John K, et al. Ethylene biosynthesis in oilseed rape pods in relation to pod shatter. Journal of Experimental Botany, 1998, 49: 829-838.
- [12] Price J S, Hobson R N, Neale M A, et al. Seed losses in commercial harvesting of oilseed rape. Journal of Agricultural Engineering Research, 1996, 65: 183-191.
- [13] Morgan C L, Ladbrooke Z L, Bruce D M, et al. Breeding oilseed rape for pod shattering resistance. The Journal of Agricultural Science, 2000, 135: 347-359.
- [14] Hu Z Y, Yang H L, Zhang L, et al. A large replum-valve joint

- area is associated with increased resistance to pod shattering in rapeseed. *Journal of Plant Research*, 2015, 128: 813-819.
- [15] 青苡任. 面向低损失机械化收获的油菜角果抗裂角性和株型结构与拨禾机理研究. 镇江: 江苏大学, 2021.
- [16] 谭小力, 张洁夫, 杨莉, 等. 油菜角果裂角力的定量测定. *农业工程学报*, 2006, 22(11): 40-43.
- [17] Tys J. An evaluation of the mechanical properties of winter rape siliques in respect of their susceptibility to cracking. *International Rapeseed Congress*, 1987(1): 185-194.
- [18] 李耀明, 朱俊奇, 徐立章, 等. 基于悬空压裂法的油菜角果抗裂角力测试试验. *农业工程学报*, 2012, 28(8): 111-115.
- [19] 文雁成, 傅廷栋, 涂金星, 等. 影响甘蓝型油菜角果抗裂特性的因素分析. *中国油料作物学报*, 2010, 32(1): 25-29.
- [20] 彭鹏飞, 李云昌, 胡琼, 等. 甘蓝型油菜新品系的抗裂角性鉴定及品种筛选. *华北农学报*, 2009, 24(6): 223-226.
- [21] Chu W, Liu J, Cheng H T, et al. A lignified-layer bridge controlled by a single recessive gene is associated with high pod-shatter resistance in *Brassica napus* L. *The Crop Journal*, 2022, 10(3): 638-646.
- [22] 李积铭, 李爱国, 李和平, 等. 黑龙江流域不同白菜型冬油菜品种的农艺性状评价分析. *分子植物育种*, 2021, 19(4): 1312-1319.
- [23] 熊秋芳, 张效明, 文静, 等. 菜籽油与不同食用植物油营养品质的比较—兼论油菜品质的遗传改良. *中国粮油学报*, 2014, 29(6): 122-128.
- [24] 龙卫华, 浦惠明, 高建芹, 等. 油菜高油酸种质的创建及高油酸性状遗传与生理特性的分析. *中国农业科学*, 2021, 54(2): 261-270.

Identification and Screening of Pod Shattering Resistance and It's Correlation with Agronomic Traits in Strong Winter Rapeseed

Ma Yuanqiang¹, Liu Lijun², Ma Li², Xu Xinyu¹, Zhang Yahong³, Wang Juan⁴,
Pu Yuanyuan¹, Wang Wangtian⁵, Yang Gang¹, Wu Junyan¹

(¹College of Agronomy, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, Gansu, China; ²State-Ministry Joint Key Laboratory of Aridland Crop Science, Lanzhou 730070, Gansu, China; ³Tianshui Institute of Agricultural Sciences, Tianshui 741001, Gansu, China; ⁴Gansu Zhangye Academy of Agricultural Sciences, Zhangye 734099, Gansu, China; ⁵College of Life Science and Technology, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, Gansu, China)

Abstract In order to screen winter rapeseed lines with high resistance to pod shattering suitable for planting in Gansu Province, promote mechanized harvesting, and increase yield, the random impact method was used to identify pod shattering resistance of 43 winter rapeseed lines. The results were analyzed through systematic clustering and correlation analysis in combination with related agronomic traits. Clustering analysis revealed that the 43 materials were classified into four groups. The average pod shattering resistance index (SRI) of the Group I was 0.861, presenting moderate resistance to shattering. The average SRI of Group II was 0.958, presenting high resistance to shattering. The average SRI of Group III was 0.722, presenting low resistance to shattering. The average SRI of Group IV was 0.621, presenting easy shattering. Correlation analysis showed that SRI had an extremely significantly positive correlation with pericarp thickness with a large correlation coefficient. There was no significant correlation between SRI and the other agronomic traits, indicating that pericarp thickness significantly affected pod shattering resistance of winter rapeseed, and it could be used as a morphological index for screening of pod shattering resistant varieties. Based on a comprehensive analysis of the yield, quality traits, and SRI of 43 strong-winter rapeseed lines, a total of 17 winter rapeseed lines were screened. Among them, M-8 and M-14 had a high SRI, high yield, and excellent quality traits.

Key words Winter rapeseed; Pod shattering resistance; Agronomic traits; Quality traits