



春小麦重组自交系品质性状与产量、生理性状相关性分析

马斯霜^{1,2},王敬东^{1,2},白海波^{1,2},惠建^{1,2},陈晓军^{1,2},石磊^{1,2},张尚沛³,李树华^{1,2}

(1. 宁夏农林科学院 农业生物技术研究中心,银川 750002;2. 宁夏农业生物技术重点实验室,
银川 750002;3. 宁夏农林科学院 固原分院,宁夏固原 756000)

摘要 以‘宁春4号’与‘宁春27号’为亲本杂交构建重组自交系的128份家系为材料,测定该群体的产量、叶面积指数、碳同位素分辨率、面筋含量等20个性状,分析各性状间的相关性。结果表明,该群体有丰富的变异类型,各性状离散程度较大,存在较大程度的超亲遗传。相关性分析表明生理性状与品质性状间有较强相关性,冠层温度、碳同位素分辨率对品质与产量性状影响较大;产量性状与品质性状大都呈正相关。以差异极显著的20个性状进行主成分分析,选取特征向量累积贡献率达87%的性状,分别是沉降值、稳定时间、湿面筋含量、硬度指数、粗蛋白含量、不实小穗数、穗粒数、吸水率、株高、结实小穗数、冠层温度、千粒质量与碳同位素分辨率;基于各性状聚类共分为9个类群,第九类群材料高产优质且农艺水分利用效率较高,为今后育种工作提供重要材料。

关键词 春小麦;重组自交系;产量性状;品质性状;生理性状

小麦作为中国重要的粮食作物,营养丰富,可为人体提供21%的热量和20%的蛋白,并且在推动社会经济发展发挥重要作用,满足市场不同需求^[1-4]。近年来,气候变化无常,在小麦重要生育时期频繁出现极端高温天气、以及洪涝灾害等,极大程度上制约小麦产业提升。小麦籽粒品质性状是由多基因控制的复杂数量性状,品质性状研究主要集中在蛋白、面筋含量,而其他品质性状的研究相对较少^[5]。据报道,全球小麦蛋白质含量为10.2%~21.46%,平均为14.35%;美国优质小麦面筋含量、稳定时间要求分别为36%~47%、(12±1.5) min。目前,中国小麦蛋白质含量平均值为13.94%,面筋含量为30.40%,稳定时间为5.8 min,与世界平均水平存在较大差距^[6]。因此,优质、抗逆且又高产的小麦是当代小麦遗传改良的主要方向。大量研究表明具有高水分利用效率的小麦品种才会有更高的产量,但是水分利用效率测定异常困难,极大限制了该指标在节水小麦选育工作的应用^[7]。

碳同位素分辨率(Δ)作为气孔导度和光合作

用能力的替代指标,已被提出作为评价C3植物蒸腾效率的有效方法,能够直接反应水分利用效率,且不受时间、空间等外界因素的限制,并与水分利用效率呈负相关^[8-9],也可以利用该指标对植物生理反应做出评价判断,鉴定表现出与抗旱相关的性状;在小麦相关研究中,测定成熟籽粒 Δ ,以筛选更耐旱的品种,可为小麦育种工作提供更好的辅助功能^[10];同时也可对耐盐种质进行筛选^[11],但 Δ 高额的测定成本也限制了大规模的应用。Zhu等^[12]研究了10个不同苜蓿品种在3种水分处理下不同部位 Δ 与长期水分利用效率(WUE)的关系,发现开花期地上部叶片的 Δ 是反映苜蓿地上生物量和综合WUE的重要指标。同样利用碳同位素分辨率(Δ)研究3个水稻品种在干旱环境下不同种植模式的水分利用效率,发现无论种植方式如何,在不同供水条件下所有参试材料的 Δ 变化始终与产量和的变化一致,呈显著相关^[13]。热和干旱是显著降低小麦籽粒产量和品质的主要非生物因子。关二旗等^[14]通过研究小麦籽粒品质与基因型及环境条件的关系,发

收稿日期:2022-06-25 修回日期:2022-10-20

基金项目:国家自然科学基金(31660394,31960428);宁夏回族自治区育种专项(2018NYYZ0202);宁夏自然科学基金(2021AAC03277,2022AAC05047)。

第一作者:马斯霜,女,硕士,研究实习生,从事小麦、水稻生物技术育种研究。E-mail:masishuang@163.com

通信作者:张尚沛,男,农艺师,主要从事小杂粮育种工作。E-mail:1348873283@qq.com

李树华,女,研究员,主要从事小麦、水稻生物技术育种研究。E-mail:shuhua.l@163.com

现小麦籽粒品质主要受基因型控制,但也受环境条件的影响。马斯霜等^[5]研究了小麦籽粒品质性状对气象因子的响应,结果表明,小麦籽粒品质主要受基因型控制,其中,淀粉含量和蛋白质含量受环境影响最小。近年来,也有大量研究表明冠层温度、叶绿素含量、叶面积指数与 Δ 有极大的相关性,成为衡量作物抗旱性的重要指标, Δ 的平价代替^[15-17]。目前关于小麦 Δ 、冠层温度、叶绿素含量、叶面积指数生理指标与产量间的相关性已有大量研究^[18-19],但关于小麦生理、产量、品质性状间的相关性研究相对较少。

宁夏地处西北,作为春小麦主要产区,经常会受到不同程度气候、降水等因素的影响,严重制约小麦产量与品质的提升,农艺水分利用效率不高,使小麦商品化程度大幅受限。因此,优质高产且农艺水分利用效率较强的小麦选育对宁夏粮食产业持续稳定发展至关重要。本试验以课题组构建的 128 份重组自交系群体材料为研究对象,对自交系各家系材料重要的品质性状、生理性状以及产量性状间进行检测分析,探究各性状间的相关性,旨在为选育高产、优质且农艺水分利用效率较高的小麦提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

以水地高产(高 Δ)优质广适小麦品种‘宁春 4 号’与抗旱(低 Δ)高水分利用效率(WUE)小麦品种‘宁春 27 号’杂交,从 F_2 开始采用一粒传法直到遗传性状稳定(F_8)。2012 年经整齐度等性状鉴定,保留 128 个株系构建成 RILs 群体。

1.2 田间种植

该群体材料与亲本种植于宁夏农林科学院永宁王太科研基地,每份家系材料顺序排列,共种 5 行,行长 2.5 m,行距 0.25 m,全生育期常规栽培管理。于拔节期每份家系材料选取 10 株长势较为一致、具有代表性的材料挂牌标记,测定叶绿素、叶面积指数、冠层温度等生理性状。成熟期取挂牌标记材料进行考种,测定单穗粒数、粒质量、千粒质量等产量性状与穗部性状。收获时将小区每份家系材料进行收获脱粒,晒干后称量每份家系材料小区产量,最终将小区产量换算为每 667 m² 的产量。

1.3 品质性状测定

每份家系材料收获脱粒后取 100 g,设 3 次重

复,利用近红外分析仪 DA7200(瑞典)对面筋含量、蛋白含量等重要品质性状进行检测。

1.4 生理指标测定

1.4.1 碳同位素分辨率 称取各家系挂牌材料成熟期籽粒,70 °C 烘 24 h,将烘至恒质量籽粒磨细后过 100 目筛,过筛材料避光保存于干燥的离心管中并封口。由中国科学院植物研究所稳定性碳同位素实验室利用质谱仪对碳同位素($\delta^{13}C$)组成进行测定,后根据 $\delta^{13}C$,计算碳同位素分辨率(Δ)。

计算公式: $\Delta^{13}C(\%) = [(\delta^{13}C_{\text{空气}} - \delta^{13}C_{\text{样品}}) \times 1000] / (1 + \delta^{13}C_{\text{样品}})$,计算各家系材料的碳同位素分辨率值, $\delta^{13}C_{\text{空气}} = -8\%$ ^[8]。

1.4.2 叶绿素含量、叶面积指数、冠层温度 在灌浆中期利用手持红外测温仪对冠层温度进行测定,为保证数据的准确性,须选择晴朗无风的天气,测定时间为 13:00 到 15:00,测定时要避免人的影子出现在测定区域。

叶绿素含量利用 SPAD Minolta502 Plus 仪器测定,在灌浆中期对每份家系材料随机挂牌的 10 个小麦主茎旗叶进行测定。

叶面积指数测定时利用叶面积仪(LI-3000C,美国)分别于拔节期、孕穗期和开花期,对每份家系材料随机挂牌的 10 个材料叶面积进行测定,计算叶面积指数。

1.5 数据处理分析

利用 Microsoft Excel 2016 对所有测定数据进行初步统计,利用 GraphPad Prism8 对所有测定数据进行统计性分析,计算均值、标准差、偏度、峰度等基本参数;用 SAS9.3.1 软件进行主成分分析;按非加权配对算数平均法进行聚类分析,绘制树状图。

2 结果与分析

2.1 重组自交系群体品质性状变异分析

对重组自交系群体的 128 份家系与两个亲本材料的吸水率、粗蛋白含量、面筋含量等 8 个重要的品质性状变异性分析表明(表 1),两个亲本的吸水率、出粉率、硬度指数等性状间存在明显差异。128 份家系材料的各品质性状间存在不同程度的差异性,吸水率、粗蛋白含量、沉降值、湿面筋含量、硬度指数、体积质量呈超亲遗传,出粉率介于两亲本之间,稳定时间趋向超低亲遗传。各品质性状的偏度与峰度绝对值均小于 1,说明数据分布形态呈正态分布,可进一步用于遗传定位分

析;粗蛋白含量与湿面筋含量的偏度与峰度较高,粗蛋白含量的偏度与峰度分别为 0.63、0.83,湿面筋含量的偏度与峰度分别为 0.61、0.93,说明粗蛋白含量与湿面筋含量分布为陡峰,且为正偏,

在右端有较多的极端值。稳定时间变异系数最大,为 39.37%,拉伸面积变异系数次之,其变异幅度、标准差最大,说明群体材料的离散程度相对较大,有较为丰富的选择潜力。

表 1 重组自交系群体品质性状变异性分析

Table 1 Variability analysis of quality traits in recombinant inbred lines

| 品质性状 Quality trait | 亲本 Parents | | 重组自交系群体 Recombinant inbred lines | | | | |
|--|----------------------|------------------------|----------------------------------|-------------------|----------------|----------------|---------------------------------------|
| | 宁春 4 号 Ningchun 4 | 宁春 27 号 Ningchun 27 | 平均值±标准差 Mean±standard | 变异 幅度 Range | 偏度 Skewness | 峰度 Kurtosis | 变异系数/% Coefficient of variation |
| 吸水率/% Water absorption rate | 57.07 | 54.06 | 57.95±0.17 | 8.87 | 0.07 | -0.73 | 3.37 |
| 出粉率/% Powderring rate | 75.04 | 69.57 | 72.69±0.12 | 6.53 | -0.18 | -0.25 | 1.92 |
| 粗蛋白/% Crude protein | 13.77 | 13.3 | 15.47±0.08 | 5.43 | 0.63 | 0.83 | 5.93 |
| 沉降值/mL Sedimentation value | 26.56 | 25.53 | 33.98±0.3 | 19.29 | 0.18 | 0.3 | 10.16 |
| 稳定时间/min Stability time | 7.57 | 7.95 | 7.143±0.25 | 12.89 | -0.039 | -0.46 | 16.37 |
| 湿面筋/% Wet gluten | 28.86 | 27.92 | 32.88±0.19 | 12.71 | 0.61 | 0.93 | 6.51 |
| 硬度指数/% Hardness index | 60.31 | 57.08 | 63.51±0.43 | 21.15 | 0.12 | -0.79 | 7.63 |
| 体积质量/(kg/m ³) Volumic mass | 794.33 | 791.15 | 805.40±1.19 | 67.67 | 0.046 | -0.61 | 1.68 |

2.2 重组自交系群体生理性状变异分析

对重组自交系群体的 128 份家系与两个亲本材料的叶绿素含量、叶面积指数、冠层温度、碳同位素分辨率 4 个生理性状统计分析(表 2),结果表明,128 份家系材料各性状偏度与峰度绝对值均小于 1,说明各生理性状在家系材料种呈正态分布。两个亲本的叶绿素含量间存在较大差异,‘宁春 4 号’比‘宁春 27’号高 9.3%,说明‘宁春 4

号’光合能力较强;而叶面积指数、冠层温度、碳同位素分辨率(Δ)两亲本间差异未达到显著水平,差异较小,变异程度低。叶面积指数变异系数最大,为 13.84%,叶绿素含量次之,为 6.09%,且叶绿素含量的变异幅度和标准差最大,说明群体材料叶绿素含量离散程度较大。群体材料冠层温度高于亲本,呈超亲遗传;叶绿素含量与碳同位素分辨率介于亲本之间;叶面积指数低于亲本,呈超低亲遗传。

表 2 重组自交系群体生理性状变异性分析

Table 2 Variability analysis of physiological traits of recombinant inbred lines

| 生理性状 Physiology trait | 亲本 Parents | | 重组自交系群体 Recombinant inbred lines | | | | |
|---|----------------------|------------------------|----------------------------------|-------------------|----------------|----------------|---------------------------------------|
| | 宁春 4 号 Ningchun 4 | 宁春 27 号 Ningchun 27 | 平均值±标准差 Mean±standard | 变异 幅度 Range | 偏度 Skewness | 峰度 Kurtosis | 变异系数/% Coefficient of variation |
| 叶绿素 Chlorophyll | 53.6 | 44.3 | 50.55±0.27 | 14.6 | -0.37 | -0.036 | 6.09 |
| 叶面积指数 LAI | 4.3 | 4.6 | 3.17±0.04 | 2.1 | 0.31 | -0.41 | 13.84 |
| 冠层温度 Canopy temperature | 27.2 | 27.6 | 27.95±0.06 | 2.9 | 0.14 | -0.74 | 2.35 |
| 碳同位素分辨率 Δ Carbon isotope resolution | 19.73 | 19.06 | 19.20±0.05 | 2.65 | 0.16 | -0.47 | 3.04 |

2.3 重组自交系群体产量性状变异分析

对亲本及群体材料的产量性状进行统计分析(表 3),结果表明,两亲本相比较,‘宁春 27 号’株高、穗长、结实小穗数、穗粒数明显高于‘宁春 4 号’,‘宁春 4 号’每 667 m² 产量、千粒质量等性状高于‘宁春 27 号’。128 份家系材料产量性状也呈现出不同程度的变化。不实小穗数和穗粒数峰度值大于 1,说明群体材料中存在极端材料,其他性状偏度与峰度绝对值均小于 1,呈正态分布。

群体产量性状变异系数较大,除穗长和千粒质量,其余均为 10%以上,说明群体产量性状变异程度较大,不实小穗数变异系数最大,为 40.95%,穗长变异系数最小,为 8.45%;每 667 m² 产量变异幅度和标准差最大,为 286.6 和 4.95,说明各家系材料的每 667 m² 产量差异较大;穗粒质量变异幅度最小,为 1.9。比较发现家系材料穗长、不实小穗数、穗粒质量和千粒质量均高于两亲本,呈超亲遗传,株高、结实小穗数等其余性状均介于两亲本之间。

表 3 重组自交系群体产量性状变异性分析
Table 3 Variability analysis of yield traits of recombinant inbred lines

| 产量性状 Yield trait | 亲本 Parents | | 重组自交系群体 Recombinant inbred lines | | | | |
|-------------------------------------|----------------------|------------------------|----------------------------------|-------------------|----------------|----------------|---------------------------------------|
| | 宁春 4 号 Ningchun 4 | 宁春 27 号 Ningchun 27 | 平均值±标准差 Mean±standard | 变异 幅度 Range | 偏度 Skewness | 峰度 Kurtosis | 变异系数/% Coefficient of variation |
| 株高/cm Plant height | 82.5 | 118.5 | 95.68±0.89 | 48 | 0.33 | -0.62 | 10.56 |
| 穗长/cm Panicle length | 9.6 | 12.7 | 13.07±0.28 | 17.33 | 0.05 | 0.11 | 8.45 |
| 结实小穗 Number of filled spikelets | 13.8 | 17.3 | 15.47±0.15 | 8.5 | 0.37 | -0.05 | 11.01 |
| 不实小穗 Number of unfruitful spikelets | 1.3 | 1.1 | 1.51±0.05 | 3.5 | 0.77 | 1.033 | 40.95 |
| 穗粒数 Number of grains per spike | 37.6 | 41.5 | 41.02±0.54 | 36.4 | 0.73 | 1.35 | 14.99 |
| 穗粒质量/g Grain mass per spike | 1.7 | 1.8 | 2.12±0.03 | 1.9 | 0.76 | 0.31 | 17.41 |
| 千粒质量/g 1 000-grain mass | 45.0 | 44.5 | 51.79±0.43 | 25.6 | 0.098 | 0.058 | 9.32 |
| 产量/(kg/667m ²) Yield | 535.6 | 500.0 | 521.8±4.95 | 286.6 | -0.43 | 0.002 | 10.73 |

2.4 重组自交系群体品质性状与生理性状及产量性状的相关性分析

对重组自交系群体材料品质性状与生理性状、产量性状进行相关性分析(图 1)表明,各品质性状与生理性状、产量性状呈现明显的相关性。由图可知,品质性状与生理性状间有明显的相关性,对个别重要品质性状的影响较大。总体来看叶绿素与小麦籽粒品质性状均呈正相关,但未达到显著水平;叶面积指数与出粉率、硬度指数呈显著正相关,相关系数分别为 0.192*、0.191*;冠层温度与各品质性状均呈负相关,与稳定时间呈显著负相关,相关系数为-0.21*,与体积质量呈极显著负相关,相关系数为-0.288**;碳同位素分辨率与各品质性状大都呈正相关,与体积质量呈负相关,与吸水率呈极显著正相关,相关系数为 0.226**,与硬度指数呈显著正相关,相关系数为 0.175*。品质性状与产量性状间的相关性较强,大都为正相关。穗长与不实小穗数与各品质性状间的相关性未达到显著水平;每 667 m² 产量与各品质性状间都呈正相关,硬度指数、体积质量与每 667 m² 产量相关性呈极显著正相关,相关系数分别为 0.243** 与 0.259**,与稳定时间呈显著正相关,相关系数为 0.201*;株高与粗蛋白含量呈显著正相关,相关系数为 0.187*;结实小穗数与出粉率、硬度指数呈极显著正相关,相关系数分别为 0.328**、0.318**;穗粒数与出粉率、硬度指数也呈极显著正相关,相关系数为 0.322**、0.272**;穗粒质量与吸水率、出粉率、硬度指数呈极显著正相关,与硬度指数相关系数高达 0.42**;千粒质量与吸水率、硬度指数呈极显著

正相关,相关系数分别为 0.311**、0.35**,与沉降值呈显著正相关,相关系数为 0.185*。生理性状与产量性状的相关性也较为明显,冠层温度与所有的产量性状均呈负相关,且与每 667 m² 产量的相关性达到显著水平,相关系数为-0.32**;叶绿素、叶面积指数与株高呈负相关,与穗长没有相关性;碳同位素分辨率与株高、千粒质量呈负相关,其他产量性状呈正相关,但均未达到显著水平,相关性较低。综上所述,绿叶持有面积较大,农艺水分利用效率较高可促进干物质积累,利于品质的形成,但冠层温度过高会影响小麦籽粒品质与产量的形成;产量性状与品质性状的相关性较大,优质与高产可并存。

2.5 重组自交系群体各性状主成分分析

以重组自交系群体材料的 20 个性状为基础数据,利用 SAS 分析软件计算各主成分的特征向量及累积贡献率,根据特征向量绝对值的大小将各性状归类到不同主成分中。由表 4 可以看出。特征值前 9 个主成分分析可代表整体遗传信息的 87%,理论上讲,累积贡献率达 85%即可,可代表群体的大部分信息。

第一主成分的特征值为 4.72,累积贡献率为 24%,以沉降值、稳定时间、湿面筋含量、硬度指数、粗蛋白含量为主要指标,特征向量值为 0.39、0.37、0.34、0.33、0.31,都是关于小麦籽粒品质的主要性状,因此第一主成分可归结为小麦品质性状因子。第二主成分特征值为 3.46,累积贡献率为 41%,以叶绿素含量与叶面积指数为主要指标,向量值分别为 0.41、0.39,是反映高光合效率的主要性状,第二主成分可归结为高光效因子。

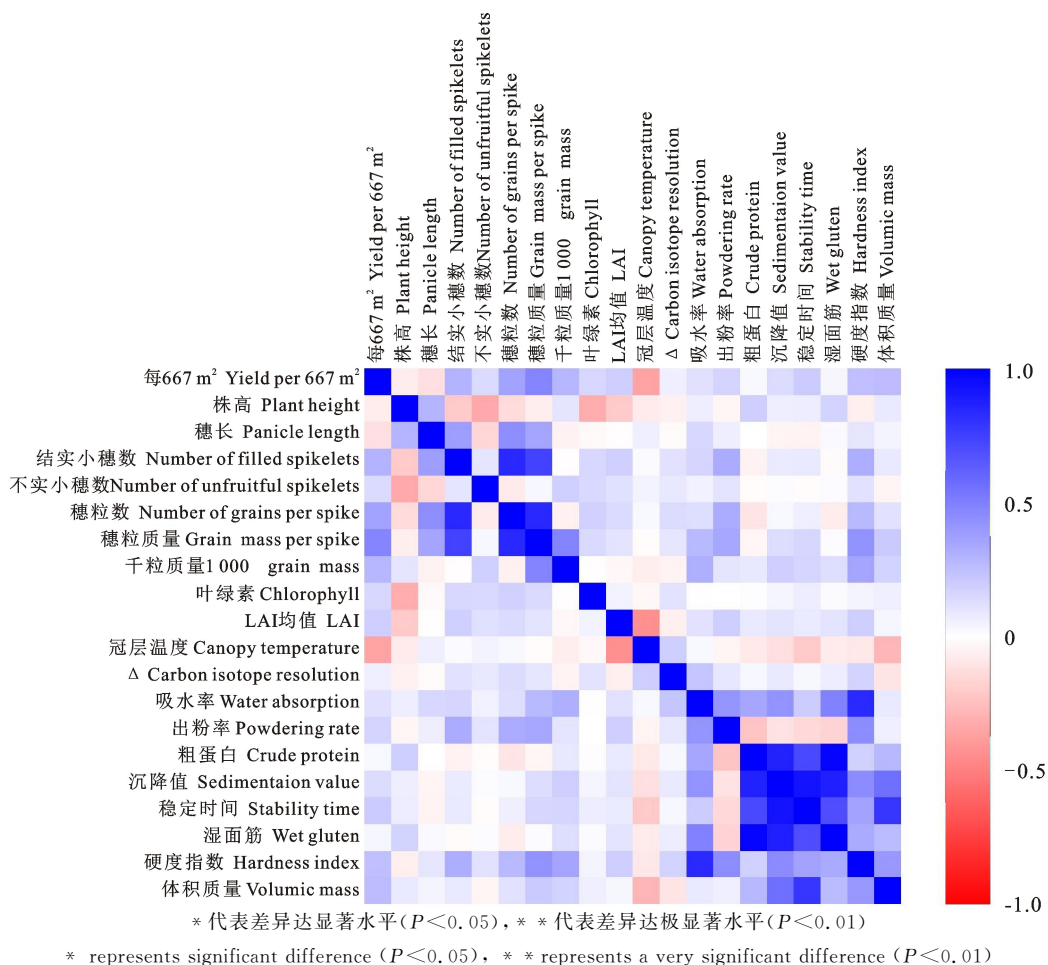


图 1 重组自交系群体各性状相关性分析

Fig. 1 Correlation analysis of various traits in recombinant inbred line population

表 4 入选的特征和特征向量

Table 4 Selected characteristics and corresponding eigenvectors

| 性状 Trait | Prin1 | Prin2 | Prin3 | Prin4 | Prin5 | Prin6 | Prin7 | Prin8 | Prin9 |
|--|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 特征向量 Characteristic root | | | | | | | | | |
| 每 667 m ² 产量 Yield per 667 m ² | 0.19 | 0.19 | -0.31 | -0.16 | -0.13 | 0.21 | 0.05 | 0.45 | -0.11 |
| 株高 Plant height | 0.06 | 0.1 | -0.25 | -0.01 | 0.39 | 0.09 | -0.07 | 0.04 | 0.82 |
| 穗长 Panicle length | 0.11 | 0.09 | -0.32 | -0.1 | -0.11 | -0.58 | 0.22 | 0.03 | -0.04 |
| 结实小穗数 Number of filled spikelets | -0.11 | 0.03 | 0.33 | 0.34 | 0.35 | 0.26 | -0.02 | -0.23 | -0.17 |
| 不实小穗数 Number of unfruitful spikelets | 0.02 | -0.15 | 0.42 | -0.14 | -0.39 | 0.07 | 0.06 | 0.29 | 0.08 |
| 穗粒数 Number of grains per spike | 0.07 | 0.18 | 0.47 | -0.2 | 0.01 | -0.14 | 0.21 | -0.17 | 0.25 |
| 穗粒质量 Grain mass per spike | 0.18 | 0.39 | 0.09 | -0.15 | 0.23 | -0.08 | 0.09 | -0.07 | -0.19 |
| 千粒质量 1 000-grain mass | 0.03 | 0.07 | -0.36 | 0.3 | 0.15 | 0.1 | 0.34 | -0.23 | -0.23 |
| 叶绿素 Chlorophyll | 0.17 | 0.41 | 0.16 | -0.23 | 0.21 | -0.04 | -0.003 | 0.05 | -0.1 |
| 叶面积 LAI | 0.24 | 0.39 | 0.09 | -0.11 | -0.001 | 0.25 | 0.18 | 0.04 | -0.037 |
| 冠层温度 Canopy temperature | 0.17 | 0.05 | -0.09 | 0.18 | -0.35 | 0.51 | -0.30 | -0.003 | 0.14 |
| 碳同位素分辨率(Δ) Carbon isotope resolution | 0.06 | 0.07 | 0.08 | 0.32 | 0.27 | -0.005 | 0.37 | 0.65 | -0.13 |
| 吸水率 Water absorption | 0.29 | 0.06 | 0.15 | 0.45 | -0.18 | -0.18 | -0.006 | 0.004 | 0.2 |
| 出粉率 Powdering rate | 0.09 | 0.3 | -0.01 | 0.24 | -0.28 | -0.21 | -0.29 | -0.12 | -0.04 |
| 粗蛋白 Crude protein | 0.31 | -0.32 | 0.09 | -0.003 | 0.17 | -0.1 | 0.25 | 0.08 | -0.02 |
| 沉降值 Sedimentaion value | 0.39 | -0.24 | 0.01 | -0.015 | 0.13 | 0.001 | -0.03 | -0.05 | -0.09 |
| 稳定时间 Stability time | 0.37 | -0.22 | -0.06 | -0.19 | 0.11 | 0.12 | -0.2 | -0.1 | -0.12 |
| 湿面筋 Wet gluten | 0.34 | -0.29 | 0.09 | 0.08 | 0.14 | -0.14 | 0.23 | 0.07 | 0.02 |
| 硬度指数 Hardness index | 0.33 | 0.13 | 0.01 | 0.31 | -0.2 | -0.08 | -0.22 | -0.16 | 0.08 |
| 体积质量 Volumic mass | 0.28 | -0.08 | -0.1 | -0.28 | -0.11 | 0.21 | -0.47 | -0.28 | -0.03 |
| 特征向量值 Eigenvalue | 4.72 | 3.46 | 1.87 | 1.72 | 1.56 | 1.27 | 0.98 | 0.92 | 0.81 |
| 累积贡献率/% Cumulative rate | 24 | 41 | 50 | 59 | 67 | 73 | 78 | 83 | 87 |

第三主成分特征值为 1.87, 累积贡献率为 50%, 以不实小穗数与穗粒数为主要性状, 特征向量值分别为 0.42、0.47, 是反映小麦穗部性状的指标, 可总结为穗部性状因子。第四主成分特征值 1.72, 累积贡献率为 59%, 吸水率为主要指标, 特征向量值为 0.45, 为小麦籽粒加工品质性状, 为加工品质性状因子。第五主成分特征值 1.56, 累积贡献率 67%, 株高、结实小穗数为主要指标, 为小麦生物产量组成因子。第六主成分特征值 1.27, 累积贡献率 73%, 冠层温度为主要指标, 特征向量值为 0.51, 为生理性状因子。第七主成分特征值为 0.98, 累积贡献率为 78%, 千粒质量与

碳同位素分辨率为主要因子, 但品质性状特征值大都为负值, 为产量因子。第八主成分特征值为 0.92, 累积贡献率为 83%, 碳同位素分辨率为主要指标, 特征向量值为 0.6, 为农艺水分利用效率因子。第九主成分特征值为 0.88, 累积贡献率为 87%, 株高为主要性状, 特征向量值为 0.81, 为小麦农艺性状因子。因此可利用沉降值、稳定时间、湿面筋含量、硬度指数、粗蛋白含量、不实小穗数、穗粒数、吸水率、株高、结实小穗数、冠层温度、千粒质量与碳同位素分辨率筛选出高产优质、农艺水分利用效率较高的小麦新种质。

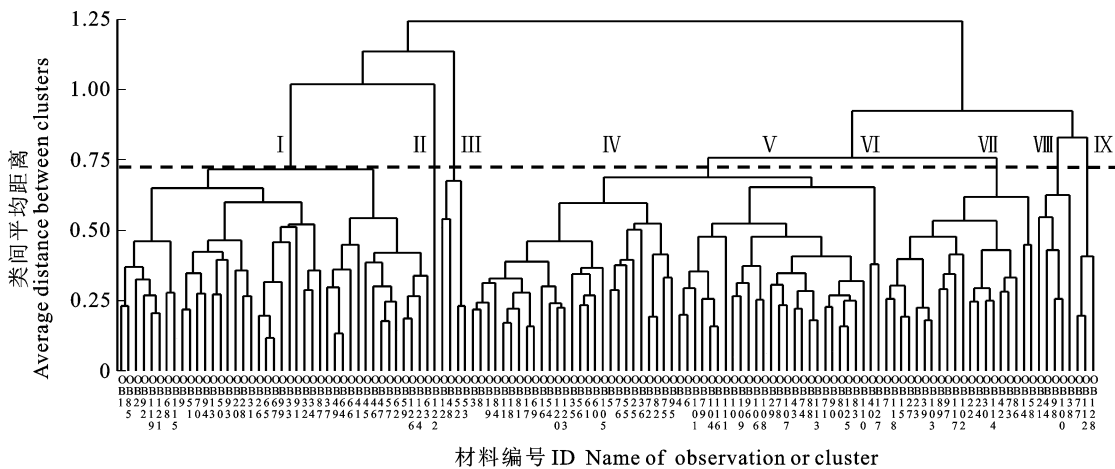


图 2 群体材料聚类分析图

Fig. 2 Cluster analysis of population materials

2.6 重组自交系群体综合性状聚类分析

利用上述主成分分析的性状指标按非加权配对算术平均法, 在遗传距离为 0.7 处将重组自交系群体分为九个类群。第一类群共 41 份材料, 约占整体材料的 32%, 该类群材料的整体特点为矮秆小穗, 叶面积指数较低, 粒数少, 产量低, 冠层温度较高, 为 28.29 °C, 小麦籽粒品质性状整体适中。第二类群仅 1 份材料, 该材料沉降值、降落值较低, 稳定时间较短, 仅 5 min, 明显低于平均水平, 说明小麦蛋白质质量较低, 小麦籽粒硬度低和体积质量较低, 产量低。第三类群共 4 份材料, 该类群材料平均产量为 379.50 kg/667m², 湿面筋含量与粗蛋白含量较低, 冠层温度较高, 28.13 °C, 产量低下, 说明该类群小麦营养品质较低, 灌浆期高温影响了小麦产量和品质的形成。第四类群共 26 份材料, 约为整体家系材料的 20%, 该类群材料产量性状、生理指标及品质性状与群体平均水平相持平, 差异不明显, 为中间类型材料。第五类

群共 24 份材料, 该类群材料平均产量为 580 kg/667m², 其他性状也均达到整体材料的平均水平, 差异不显著, 该类群为中间型材料, 产量相对较高。第六类群仅 2 份材料, 该类群材料产量为 581.15 kg/667m², 产量性状均达到整体平均水平, 但冠层温度较高, 为 28.25 °C, 碳同位素分辨率低, 叶绿素含量、叶面积指数较高于平均水平, 品质性状均明显低于群体平均水平, 矮秆, 但产量较高, 该类群为高产材料, 籽粒品质较低, 水分利用效率较高。第七类群共 19 份材料, 该类群品质整体较高, 产量为 531.83 kg/667 m², 叶绿素含量、叶面积指数较大, 碳同位素分辨率高, 品质性状较高的极端值都在该群体中, 该类群为优质、农艺水分利用效率较低的材料。第八类群中共 5 份材料, 该类群材料平均每 667 m² 产为 584.04 kg/667 m², 高秆但穗长较短, 平均为 10.5 cm, 群体材料平均穗长为 13.07 cm, 碳同位素分辨率高, 为 19.8, 其他性状均高于材料平均水平, 该类

群为高产优质且农艺水分利用效率较低的材料。第九类群仅 3 份材料,该类群材料每 667 m² 产均值为 634.13 kg/667 m²,株高与穗长明显低于整体平均值 95.77 cm,其他产量相关性状均高于整体平均水平,碳同位素分辨率低、叶绿素含量、叶面积指数较高,冠层温度 27 °C,品质性状各指标明显优于整体材料,农艺水分利用效率较高,该类群为高产优质且农艺水分利用效率较低的材料,今后在育种环节对第八、第九类群材料多加利用。

3 讨论

重组自交系群体是较为理想的遗传分析群体材料,经过多年的连续自交且不加选择,最大程度的保留了遗传信息^[20]。Mohame 等^[21]利用两个 DH 群体在两个不同热处理下测定在小麦品质性状,发现两群体在不同处理下品质性状间的差异均达到极显著水平。Bachiri 等^[22]分析比较了 10 个小麦品种 (*Triticum aestivum* L.) 在不同水分条件下碳同位素分辨率与其他性状之间的关系,研究发现不同品种的碳同位素分辨率差异显著。本研究对重组自交系群体的生理指标、产量性状和品质性状进行变异性分析,发现群体间各性状间的差异均达到显著水平,成正态分布,可进行遗传分析,具有较大的离散程度,存在较大程度的超亲遗传,仅个别指标趋向于超低亲遗传。同时说明该群体能够有效的开展生理指标、产量性状和品质性状的遗传研究分析,为后续群体材料的简化基因组测序分析奠定基础,并且与上述研究结果一致。

目前,关于小麦重组自交系材料的生理性状与品质性状、或与产量性状的相关性已有研究。Borzoue 等^[11]研究发现,耐盐品种在盐胁迫下表现出更高的 Δ ,且 Δ 与产量呈显著正相关。Miloud 等^[23]利用叶面积指数、叶绿素含量等性状检验灌水深度对冬小麦光合作用的影响,发现碳同位素分辨率($\Delta^{13}\text{C}$)与籽粒产量呈正相关,但不显著。陈晓杰等^[24]研究 12 份主栽冬小麦品种在正常灌水、旱环境下碳同位素分辨率($\Delta^{13}\text{C}$)与产量、光合相关性状之间的关系,发现正常灌水条件下 $\Delta^{13}\text{C}$ 与产量性状均呈正相关。本研究发现生理性状与产量性状的相关性较低,冠层温度对产量性状的影响较大,与所有的产量性状均呈负相关,叶绿素、叶面积指数与株高呈负相关,与穗长没有相关性;碳同位素分辨率与株高、千粒质

量呈负相关,与亩每 667 m² 产呈正相关但均未达到显著水平,相关性较低,本研究结果与 Miloud、陈晓杰的结果一致。

Mérida 等^[25]分析了 294 份硬粒小麦品种在不同水分条件下农艺和品质性状的关系,发现沉淀值和千粒质量呈显著正相关。蒋进等^[26]对近年来四川省自育小麦品种产量与品质分析发现高产与优质不能协调发展,优质育种仍有较大提升空间,与本研究结果不一致。Sufian 等^[27]对 189 个不同的春小麦品种在两个不同的干旱胁迫和热胁迫环境下种植,发现籽粒产量和品质性状基因型间存在显著差异,且均呈正相关。本研究发现各产量性状与品质性状间都呈正相关,株高与粗蛋白含量呈显著正相关;结实小穗数、穗粒数与出粉率、硬度指数呈极显著正相关;穗粒质量与吸水率、出粉率、硬度指数呈极显著正相关,与体积质量呈显著正相关;千粒质量与吸水率、硬度指数呈极显著正相关,与沉降值呈显著正相关。本研究结果与上述研究结果一致。

张楠^[28]对不同冬小麦在陕西旱地生理特性与生产能力的研究发现,冠层温度与水分利用效率呈负相关关系,水分利用效率与小麦籽粒蛋白质含量及湿面筋含量均呈极显著正相关关系,水分利用效率与产量和体积质量呈正相关。赵京岚等^[29]以 RIL 群体为材料,对小麦品质性状与面条品质间的关系进行了全面的分析,发现蛋白质含量、湿面筋含量、干面筋含量、沉淀值、直链淀粉含量、支链淀粉含量、降落值、等大多数性状与面条品质相关均不显著。本研究发现重组自交系群体叶绿素与小麦籽粒品质性状均呈正相关,但未达到显著水平;叶面积指数与出粉率、硬度指数呈显著正相关;冠层温度与品质性状均呈负相关;碳同位素分辨率与品质性状都成正相关。高光效、绿叶持有面积较大,农艺水分利用效率较高可促进干物质积累,利于品质的形成,但冠层温度过高会影响小麦籽粒品质与产量的形成;产量性状与品质性状的相关性较大,优质与高产可并存。

为了综合评价该群体,本研究对分析的生理性状、产量性状、品质性状进行主成分分析与聚类分析,从中筛选可用于评价的性状。研究发现自交系群体有丰富的变异类型,可考虑综合这些指标进行综合选择,优先考虑利用利用沉降值、稳定时间、湿面筋含量、硬度指数、粗蛋白含量、不实小穗数、穗粒数、吸水率、株高、结实小穗数、冠层温

度、千粒质量与碳同位素分辨率筛选出高产优质、农艺水分利用效率较高的小麦新种质。将数据标准化处理后进行聚类分析发现,可将整个自交系群体分为 9 个类群,群体内各材料间存在较大的遗传差异,各类群特点突出,性状明显。在今后的育种工作中,可根据育种目标选取材料,为选种工作提供较好的资源。Bachiri 等^[22]研究发现抗旱性强的小麦品种具有较高的碳同位素分辨率,并将碳同位素分辨率作为干旱易发区小麦抗旱品种筛选的有效工具。Mohamed 等^[30]研究两个大麦地方品种于不同生育时期,用 3 种不同灌溉方式对盐渍进行灌溉,以碳同位素分辨率、产量、水分利用效率等性状作为评价指标。Hairat 等^[31]利用不同的生理参数在萌发期、苗期和开花期 3 个发育阶段,分析了 12 个不同品种印度小麦的热胁迫响应,热敏感品种的叶绿素含量、碳同位素分辨率下降幅度较大,根据生理指标鉴定了耐热和热敏感品种。张向前等^[32]研究不同施氮量和不同基追比对弱筋小麦光合效应、产量及品质的影响,发现施氮量增加能显著提高小麦的叶绿素含量、叶面积指数、冠层叶绿素密度和光合速率,蛋白质含量、湿面筋含量、沉淀值等 5 个品质性状筛选强筋小麦;上述研究结果与本研究存在部分一致。曾占奎等^[33]对北方冬麦区的 30 个小麦品种(系)在节水和正常灌溉 2 种处理条件下进行研究,筛选出叶面积指数、等性状作为筛选节水抗旱材料的指标,与本研究结果不存在一致。

在今后的工作中,将会在不同水分条件下种植,并对这些表型性状指标进行互补验证分析;且利用分子标记辅助选择技术与表型检测相结合,对我们筛选出的性状指标在基因水平加以验证,筛选出生理代谢能力较强、光合能力强、农艺水分利用效率较高、品质较好的材料,将其应用于遗传研究与育种工作中。

参考文献 Reference:

[1] 王立祥,廖允成. 中国粮食问题[M]. 北京:阳光出版社, 2012.
WANG L X, LIAO Y CH. China Grain Issue[M]. Beijing: Sunshine Press, 2012.

[2] 刘玉秀,黄淑华,王琳琳,等. 小麦籽粒钙元素含量的研究进展[J]. 作物学报, 2021, 47(2): 187-196.
LIU Y X, HUANG SH H, WANG J L, et al. Research advance on calcium content in wheat grains[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2021, 47(2): 187-196.

[3] 勾晓婉. 新形成异源四倍体小麦 AADD 在传代过程中沉淀的核型变异以及表型多样性的研究[D]. 长春:东北师范大

学, 2018.

GOU X W. Transgenerationally precipitated karyotypic variation and phenotypic diversity in a synthetic allotetraploid wheat with genome AADD[D]. Changchun: Northeast Normal University, 2018.

- [4] 何中虎,庄巧生,程顺和,等. 中国小麦产业发展与科技进步[J]. 农学学报, 2018(1): 99-106.
HE ZH H, ZHUANG Q SH, CHENG SH H, et al. Wheat production and technology improvement in China[J]. *Journal of Agriculture*, 2018(1): 99-106.
- [5] 马斯霜,白海波,惠建,等. 小麦主要品质性状研究进展[J]. 中国农学通报, 2021, 37(24): 1-5.
MA S SH, BAI H B, HUI J, et al. Main quality characters of wheat: a review[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2021, 37(24): 1-5.
- [6] 胡学旭,孙丽娟,周桂英,等. 2006—2015 年中国小麦质 QTL 分析量年度变化[J]. 中国农业科学, 2016, 49(16): 3063-3072.
HU X X, SUN L J, ZHOU G Y, et al. Variations of wheat quality in China from 2006 to 2015[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(16): 3063-3072.
- [7] 张正斌. 作物抗旱节水的生理遗传育种基础[M]. 北京:科学出版社, 2003.
ZHANG ZH B. Fundamentals of Physiology and Genetics and Breeding in Crop Drought Resistance and Water Saving [M]. Beijing: Science Press, 2003.
- [8] FARQUHAR G, RICHARDS R. Isotopic composition of plant carbon correlates with water-use efficiency of wheat genotypes[J]. *Australian Journal of Plant Physiology*, 1984, 11(6): 539-552.
- [9] HUBICK K T, FARQUHAR G D, SHORTER R. Correlation between water-use efficiency and carbon isotope discrimination in diverse peanut (*Arachis*) germplasm [J]. *Australian Journal of Plant Physiology*, 1986, 13: 803-816.
- [10] LDIXON, A CARTER. Toward a new use for carbon isotope discrimination in wheat breeding [J]. *Agronomy*, 2019, 9(7): 385-385.
- [11] BORZOU EI A, SHALMANI MAM, ESKANDARI A. Effects of salt and nitrogen on physiological indices and carbon isotope discrimination of wheat cultivars in the northeast of Iran[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2020, 19(3): 656-667.
- [12] ZHU L, GAO X, SU Y, et al. Relationship of carbon isotope discrimination with biomass and water use efficiency for alfalfa in Northwestern China[J]. *Crop Science*, 2019, 59(1): 400-412.
- [13] GAO Q, SUN J, TONG H, et al. Evaluation of rice drought stress response using carbon isotope discrimination[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2018, 132: 80-88.
- [14] 关二旗,魏益民,张波. 小麦籽粒品质与基因型及环境条件的关系[J]. 麦类作物学报, 2010, 30(5): 963-969.
GUAN E Q, WEI Y M, ZHANG B. Relationships between

- wheat kernel quality and genotype as well as environmental conditions[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2010, 30(5):963-969.
- [15] 董建力, 白海波, 赵朋, 等. 不同水分条件下小麦碳同位素分辨率的遗传分析和 QTL 定位[J]. 麦类作物学报, 2015, 35(12):1664-1670.
DONG J L, BAI H B, ZHAO P, *et al.* Genetic analysis and QTL mapping of wheat carbon isotope discrimination under different water conditions[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2015, 35(12):1664-1670.
- [16] 田龙, 杨志远, 郝留根, 等. 碳同位素分辨率与小麦光合生理指标的关系[J]. 麦类作物学报, 2013, 33(4):682-686.
TIAN L, YANG ZH Y, HAO L G, *et al.* Relationship between carbon isotope discrimination and photosynthetic and physiological indices in wheat[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2013, 33(4):682-686.
- [17] 李树华, 白海波, 吕学莲, 等. 春小麦碳同位素分辨率与冠层温度的相关性研究[J]. 麦类作物学报, 2013, 33(2):313-319.
LI SH H, BAI H B, LÜ X L, *et al.* Study on correlation between carbon isotope discrimination and canopy temperature of wheat[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2013, 33(2):313-319.
- [18] 董建力, 许兴, 李树华, 等. 不同春小麦品种碳同位素分辨率和叶绿素含量的差异及其与抗旱性的关系[J]. 麦类作物学报, 2011, 31(1):88-91.
DONG J L, XU X, LI SH H, *et al.* Variation of carbon isotope discrimination and chlorophyll content among different cultivars of spring wheat and their relatedness to drought resistance[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2011, 31(1):88-91.
- [19] 张冬玲, 张洪娜, 郝晨阳, 等. 花后冠层温度对小麦产量的影响及几个关联 SSR 位点的效应分析[J]. 作物学报, 2015, 41(4):548-556.
ZHANG D L, ZHANG H N, HAO CH Y, *et al.* Influence of canopy temperature (CT) during grain-filling period on yield and effects of several ct-associated SSR loci[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2015, 41(4):548-556.
- [20] MBARAKAT, M SALEH, A ALDOSS, *et al.* Identification of new SSR markers linked to leaf chlorophyll content, flag leaf senescence and cell membrane stability traits in wheat under water stressed condition[J]. *Acta Biologica Hungarica*, 2015, 66(1):93-102.
- [21] MOHAMED N B, ABDULLAH A A, KHALED A M, *et al.* Molecular detection of QTLs for flour quality traits in two doubled haploid populations in spring wheat under heat stress[J]. *Cereal Research Communications*, 2020:1-8.
- [22] BACHIRI H, DJEBBAR R, MEKLIICHE A, *et al.* Carbon isotope discrimination as physiological marker to select tolerant wheat genotypes (*Triticum aestivum* L.) under water limited conditions[J]. *American Journal of Plant Physiology*, 2018, 13(1):1-7.
- [23] MILOUD H. Stability value of carbon isotope discrimination tool for durum wheat selection in semi-arid condition[J]. *Agricultural Research & Technology: Open Access Journal*, 2018, 18(2):556051.
- [24] 陈晓杰, 张建伟, 杨保安, 等. 冬小麦碳同位素分辨率与产量、旗叶光合性状的关系[J]. 干旱地区农业研究, 2016, 34(1):166-172.
CHEN X J, ZHANG J W, YANG B A, *et al.* Relationships among carbon isotope discrimination, grain yield and photosynthetic traits of flag leaves in winter wheat[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2016, 34(1):166-172.
- [25] MÉRIDA-GARCÍA R, BENTLEY A R, GÁLVEZ S, *et al.* Mapping agronomic and quality traits in elite durum wheat lines under differing water regimes[J]. *Agronomy*, 2020, 10(1):144-144.
- [26] 蒋进, 蒋云, 王淑荣. 四川省近年育成小麦品种农艺性状和品质性状分析[J]. 麦类作物学报, 2019, 39(6):682-691.
JIANG J, JIANG Y, WANG SH R. Agronomic and quality traits of wheat varieties bred in sichuan in recent years[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2019, 39(6):682-691.
- [27] SUFIAN S, ADMAS A, ABDALLA A, *et al.* Genome-wide association analysis uncovers stable QTLs for yield and quality traits of spring bread wheat (*Triticum aestivum*) across contrasting environments[J]. *Plant Gene*, 2020, 25:100269.
- [28] 张楠. 陕西旱地不同基因型冬小麦生理特性与生产能力的研究[D]. 陕西杨凌:西北农林科技大学, 2014.
ZHANG N. Physiological characteristics and production capacity of different winter wheat genotypes in dry land in Shaanxi[D]. Yangling Shaanxi:Northwest A&F University, 2014.
- [29] 赵京岚, 陈民生, 李瑞军, 等. 利用 RIL 群体分析小麦品质与中国干面条加工品质的关系[J]. 麦类作物学报, 2008, 28(2):227-231.
ZHAO J L, CHEN M SH, LI R J, *et al.* The relationship between wheat quality traits and chinese dry noodle quality using recombinant inbred lines (RILs)[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2008, 28(2):227-231.
- [30] MOHAMED B, BAGUES, BEHROOZ, *et al.* The validity of carbon isotope discrimination as a screening criterion for grain yield in two barley landraces under deficit irrigation with saline water in southern Tunisia[J]. *Plant Biotechnology*, 2018, 35(3):193-206.
- [31] HAIRAT S, KHURANA P. Photosynthetic efficiency, temperature induction response, carbon isotope discrimination correlate with expression profiling in Indian wheat cultivars[J]. *Plant Signaling & Behavior*, 2016, 11(9):e1179416.
- [32] 张向前, 徐云姬, 杜世州, 等. 氮肥运筹对稻茬麦区弱筋小麦生理特性、品质及产量的调控效应[J]. 麦类作物学报, 2019, 39(7):810-817.
ZHANG X Q, XU Y J, DU SH ZH, *et al.* Regulation on

effect of nitrogen application on physiological characteristics, quality and yield of weak gluten wheat rice-wheat cropping area [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2019, 39(7):810-817.

[33] 曾占奎,王征宏,王黎明,等. 北部冬麦区小麦新品种(系)的节水生理特性与综合评判[J]. 干旱地区农业研究,

2019,37(5):137-143.

ZENG ZH K, WANG ZH H, WANG L M, *et al.* Water-saving physiological characteristics and comprehensive evaluation of new wheat varieties (lines) in northern winter wheat region [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2019, 37(5):137-143.

Correlation Analysis of Quality Traits, Yield and Physiological Traits in Recombinant Self-Incompatible Lines of Spring Wheat

MA Sishuang^{1,2}, WANG Jingdong^{1,2}, BAI Haibo^{1,2}, HUI Jian^{1,2},
CHEN Xiaojun^{1,2}, SHI Lei^{1,2}, ZHANG Shangpei³ and LI Shuhua^{1,2}

(1. Agricultural Biotechnology Research Center, Ningxia Academy of Agricultural and Forestry Sciences, Yinchuan

750002 China; 2. Ningxia Key Laboratory of Agricultural Biotechnology, Yinchuan 750002, China;

3. Guyuan Branch of Ningxia Academy of Agricultural and Forestry Sciences, Guyuan Ningxia 756000, China)

Abstract In this study, we created a recombinant self-incompatible line by crossing 128 family lines of ‘Ningchun 4’ with ‘Ningchun 27’. We analyzed 20 traits such as yield, leaf area index, carbon isotope resolution, and gluten content to examine their interrelationships. The results indicated substantial variation within the population, wide dispersion for each trait, and a significant degree of superparental inheritance. Correlation analysis indicated a robust correlation between physiological and quality traits, with canopy temperature, carbon isotope discrimination, and both quality and yield traits exerting significant influence; the yield traits exhibited positive correlations with quality traits. Principal component analysis of 20 traits, with eigenvectors contributing cumulatively to 87%, led to the selection of specific traits, including settling value, stabilization time, wet gluten content, hardness index, crude protein content, number of infertile spikelets, number of grains, water absorption rate, plant height, number of fruiting spikelets, canopy temperature, thousand kernel mass, and carbon isotope discrimination. These traits were subsequently categorized into nine clusters. The ninth cluster exhibited high yield and quality, along with superior agronomic water use efficiency, providing valuable resources for future breeding.

Key words Spring wheat; Recombinant self-reproducing lines; Yield traits; Quality traits; Physiological traits

Received 2022-06-25

Returned 2022-10-20

Foundation item National Natural Science Foundation of China (No. 31660394, No. 31960428), Special Breeding Project of Ningxia Hui Autonomous Region (No. 2018NYYZ0202); Natural Science Foundation of Ningxia Hui Autonomous Region (No. 2021AAC03277, No. 2022AAC05047).

First author MA Sishuang, female, master, research assistant. Research area: biotechnology breeding in wheat and rice. E-mail: masishuang@163.com

Corresponding author ZHANG Shangpei, male, agronomist. Research area: breeding in minor grains. E-mail: 1348873283@qq.com

LI Shuhua, female, research fellow. Research area: biotechnology breeding in wheat and rice. E-mail: shuhua.l@163.com

(责任编辑:成敏 Responsible editor: CHENG Min)