

DOI: 10.3724/SP.J.1006.2023.21026

弱筋小麦育种品质选择指标及亲本组配原则

张 晓¹ 陆成彬¹ 江 伟¹ 张 勇¹ 吕国锋¹ 吴宏亚¹ 王朝顺¹
李 曼¹ 吴素兰¹ 高德荣^{1,2,*}

¹江苏里下河地区农业科学研究所 / 农业农村部长江中下游小麦生物学与遗传育种重点实验室, 江苏扬州 225007; ²扬州大学 / 江苏省粮食作物现代产业技术协同创新中心, 江苏扬州 225009

摘 要: 为明确弱筋小麦育种高效品质选择指标以及亲本组配原则, 本研究选用 7 个不同品质类型品种作亲本, 按 7×6 半双列杂交配制 21 个组合, 对 F₂ 籽粒主要品质指标进行了遗传分析。结果表明, 不同品质指标的一般配合力 (general combining ability, GCA) 差异极显著, 其中硬度、SDS 沉淀值和溶剂保持力 (solvent retention capacity, SRC) 效应值大, 蛋白质含量和面筋含量效应值较小; 不同品质指标的特殊配合力 (special combining ability, SCA) 除蛋白质含量、沉淀值、蔗糖 SRC 和面筋指数无显著差异, 其余均存在显著或极显著差异; 硬度、SDS 沉淀值和 SRC 一般配合力远大于特殊配合力, 以加性效应的遗传为主。弱筋小麦品质指标一般配合力负向效应显著; 中强筋小麦品质指标一般配合力正向效应显著。硬度、SDS 沉淀值、水 SRC 和碳酸钠 SRC, 狭义遗传力分别为 91.23%、82.66%、83.81% 和 83.96%, 遗传力高, 可在早期世代进行选择; 其次是乳酸 SRC 和蔗糖 SRC, 狭义遗传力分别为 72.79% 和 75.26%; 蛋白质含量、湿面筋含量、干面筋含量和面筋指数, 狭义遗传力分别为 30.72%、25.62%、32.62% 和 49.82%, 遗传力较低。对不同组合高代品系品质分析表明, 弱筋/弱筋小麦组合后代籽粒硬度、蛋白质含量、SDS 沉淀值和 SRC 等品质指标最低, 弱筋/强筋小麦组合居中, 强筋/强筋小麦和中筋/强筋小麦组合最高。硬度、SDS 沉淀值、水 SRC 和碳酸钠 SRC 是弱筋小麦品质育种的高效选择指标; 弱筋小麦品质育种亲本组配, 至少要有有一个弱筋品质类型的亲本。

关键词: 弱筋小麦; 品质选择; 亲本组配; 配合力; 遗传

Quality selection indices and parent combination principle of weak-gluten wheat

ZHANG Xiao¹, LU Cheng-Bin¹, JIANG Wei¹, ZHANG Yong¹, LYU Guo-Feng¹, WU Hong-Ya¹, WANG Chao-Shun¹, LI Man¹, WU Su-Lan¹, and GAO De-Rong^{1,2,*}

¹Lixiahe Institute of Agricultural Sciences of Jiangsu / Key Laboratory of Wheat Biology and Genetic Improvement for Low & Middle Yangtze Valley, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Yangzhou 225007, Jiangsu, China; ²Jiangsu Co-innovation Center for Modern Production Technology of Grain Crops, Yangzhou University, Yangzhou 225009, Jiangsu, China

Abstract: To identify the efficient indices of quality selection and the principle of parent combination for weak-gluten wheat, a 7×6 diallel crossing of Griffing II analysis involving 21 combinations of seven wheat varieties with different quality types was performed, and genetic analyses of the quality indices of F₂ kernels was carried out. The results showed there were extremely significant differences in general combining ability (GCA) of the quality indices. The effect values of GCA of hardness, sodium dodecyl sulfate (SDS) sedimentation value, and solvent retention capacity (SRC) were relatively higher, while those of GCA of protein content and gluten content were relatively lower. Meanwhile, significant or extremely significant differences in special combining ability (SCA) of the quality indices were observed, except for protein content, SDS sedimentation value, sucrose SRC,

本研究由国家自然科学基金项目(32071999), 江苏省重点研发计划项目(BE2021335), 江苏省种业振兴揭榜挂帅项目(JBGS [2021] 006), 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-03-8)资助。

This study was supported by the National Science Foundation of China (32071999), the Key Research and Development Program of Jiangsu Province (BE2021335), the Seed Industry Revitalization Jie Bang Gua Shuai Project of Jiangsu Province (JBGS [2021] 006), and the China Agriculture Research System of MOF and MARA (CARS-03-8).

* 通信作者(Corresponding author): 高德荣, E-mail: gdr@wheat.org.cn

第一作者联系方式: E-mail: zhangxiao820218@163.com

Received (收稿日期): 2022-04-07; Accepted (接受日期): 2022-10-10; Published online (网络出版日期): 2022-11-01.

URL: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1809.S.20221101.1003.002.html>

This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

and gluten index. Hardness, SDS sedimentation value, and SRC had the high general combining ability, indicating that additive effect was dominant. The negative GCA effects of weak-gluten wheat and the positive GCA effects of mid-gluten and strong-gluten wheat were significant. The narrow heritability of hardness, SDS sedimentation value, water SRC, and sodium carbonate SRC was as high as 91.23%, 82.66%, 83.81%, and 83.96%, respectively, indicating that they could be strictly screened in the early generations. The narrow heritability of lactic acid SRC and sucrose SRC was 72.79% and 75.26%, respectively. The narrow heritability of protein content, wet gluten content, dry gluten content, and gluten index was as low as 30.72%, 25.62%, 32.62%, and 49.82%, respectively. The quality analysis of high generation lines in different combinations revealed that grain hardness, protein content, SDS sedimentation value, SRC, and other quality indices of the descendant of weak-gluten/weak-gluten wheat combinations were the lowest, followed by those of the weak-gluten/strong-gluten wheat combinations, while those of the strong-gluten/strong-gluten and medium-gluten/strong-gluten wheat combinations were the highest with the rare separation of weak-gluten lines. In conclusion, hardness, SDS sedimentation value, water SRC, and sodium carbonate SRC were the high-efficient selection indices for quality breeding. We suggested at least one parent of weak-gluten quality should be selected in the breeding of weak-gluten wheat.

Keywords: weak-gluten wheat; quality selection; principle of parent combination; combining ability; heritability

长江中下游麦区是我国唯一的弱筋小麦优势产区,先后育成宁麦9号、扬麦9号、扬麦13、扬麦15、宁麦13、扬麦20、扬麦24、扬麦30、鄂麦006和皖西麦0638等弱筋小麦。扬麦13饼干评分超对照美红软,连续11年列为全国唯一的弱筋主导品种;扬麦15饼干和蛋糕评分与美红软相当。弱筋小麦品种的育成与推广对我国弱筋小麦产业发展发挥了极大推动作用。然而受氮肥施用量高的影响,目前我国弱筋小麦还存在品质不稳定、达标率低的问题,弱筋小麦品质还需提升。我国小麦育种长期以产量为首要目标,品质育种起步较晚,品质改良初期研究也主要集中于强筋小麦,弱筋小麦育种起步更晚,理论研究相对缺乏^[1-2]。现有优质弱筋小麦评判依据是GB/T 17893-1999,品质指标为蛋白质含量、湿面筋含量和稳定时间,与强筋小麦一致;弱筋小麦相应数值偏小,更易受环境因子影响,2018年弱筋小麦扬麦20在江苏不同地点蛋白质含量为11.60%~15.30%。刘健等^[3]研究表明同等种植条件弱筋小麦扬麦13蛋白质含量达13.10%、饼干直径为18.24 cm,强筋小麦扬麦23蛋白质含量13.32%、饼干直径仅为15.91 cm,2个品种蛋白质含量相近,但扬麦13饼干品质仍显著优于扬麦23。小麦品质性状遗传规律、亲本组配原则是育种工作的基础,但弱筋小麦品质育种亲本组配原则目前鲜有报道,需进一步深入研究。

由于遗传背景及环境条件等影响,已有小麦品质性状遗传研究结果存在差异。刘莲^[4]研究表明硬度、蛋白质含量、沉淀值、糊化参数和揉混仪参数等品质性状一般配合力(GCA)方差均达极显著水平;特殊配合力(SCA)方差除沉淀值、麦谷蛋白和耐揉时间外,其他性状都达到显著或极显著水平;除最终

粘度外,所有品质性状的GCA方差均大于SCA方差。桑伟^[5]研究表明一般配合力对蛋白质含量、沉淀值和粉质仪参数等品质性状影响较大,这些性状主要以加性效应为主。姚金保等^[6]以7个弱筋小麦品种进行双列杂交研究表明小麦蛋白质含量的遗传符合加性-显性模型,蛋白质含量可能受2~3对主效基因的控制,狭义遗传力中等。张媛菲等^[7]研究报道蛋白质含量和湿面筋含量受GCA和SCA共同影响,沉淀值、吸水率、面筋指数和稳定时间受组合影响较小,主要与双亲GCA相关。

籽粒硬度是影响小麦磨粉品质和加工品质的重要因素,与饼干直径呈极显著负相关^[8-10]。蛋白质和湿面筋含量影响弱筋小麦制品质量,优质饼干小麦要求比较低的蛋白质含量^[11-13]。沉淀值与饼干品质或软红冬小麦制作的白盐面条品质密切相关^[14-16]。SRC为面粉保持溶剂的能力,包括乳酸SRC、碳酸钠SRC、蔗糖SRC和水SRC,国内外多项研究表明4种SRC与饼干直径和评分呈极显著相关^[17-20]。小麦育种过程中分离世代群体数量大、种子量少,进行面团和食品品质鉴定难度极大,需要微量、快速且准确反映品质特性的检测方法。籽粒硬度、蛋白质含量、沉淀值和SRC检测样品量少,方法简单、测定快速,是育种材料品质筛选的理想指标。

因此,为明确弱筋小麦品质育种高效的选择指标和亲本组配原则,本研究利用强筋、中筋、弱筋3种类型的7个小麦品种配制杂交组合,对籽粒硬度、蛋白质含量、面筋含量、沉淀值和SRC进行配合力和遗传力分析,并对不同品质类型组合的高代品系品质表现进行测定,以期对弱筋小麦品质育种提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料与设计

试验 1: 选取弱筋小麦扬麦 13、扬麦 18、扬麦 20、扬麦 24, 中筋小麦扬麦 16, 强筋小麦扬麦 23 和镇麦 9 号, 按 Griffing 双列杂交 II 方法配制 21 个杂交组合。2019—2020 年将 21 个杂交组合 F_1 及 7 个亲本统一种植于江苏里下河地区农业科学研究所试验基地(32°24'N, 119°26'E), 前茬为水稻, 土壤为沙壤土。试验采用随机区组设计, 3 次重复, 2 行区, 行长 1.33 m, 行距 0.23 m。

试验 2: 试验材料为 6 个小麦杂交组合的 F_6 株系, 亲本扬麦 16 为中筋品质类型, 镇麦 168 和镇麦 9 号为强筋品质类型, 扬麦 9 号、扬麦 18 和扬辐麦 4 号为弱筋品质类型。2019—2020 年度组合分别为扬麦 16/镇麦 168 (47 个系)、扬麦 15/镇麦 9 号(23 个系)、扬麦 9 号/扬麦 18 (23 个系), 2020—2021 年度组合分别为西农 529/镇麦 9 号(57 个系)、扬麦 22/镇麦 9 号(31 个系)、扬麦 22/扬辐麦 4 号(41 个系), 每个株系 3 行区, 行长 1.33 m, 行距 0.23 m。田间管理与大田生产一致, 生长期间没受到自然灾害, 正常成熟, 按小区收获脱粒, 晾晒除杂后统一进行试验。

1.2 品质性状测定

按照 AACC39-10 用 Perten DA7200 近红外仪测定籽粒蛋白质含量(干基)。按照 AACC55-31 用瑞典波通仪器公司(Perten)的单粒谷物特性测定仪(SKCS-4100)测定籽粒硬度, 硬度指数是无量纲单位, 一般硬度大于 60 为硬质, 小于 45 为软质, 45~60 为混合麦。微量 SDS 沉淀值参照本团队已发表文献方法测定^[21]。按照 GB/T14608-93 利用面筋仪(Perten 2200)、离心机和烘干炉测定面筋参数。按照 AACC56-11 方法测定全麦粉水 SRC、碳酸钠 SRC、乳酸 SRC 和蔗糖 SRC。

1.3 数据分析

采用 Microsoft Excel 2016、IBM SPSS Statistics 22 进行数据统计分析, 并利用 Originpro 进行作图。

2 结果与分析

2.1 品质性状配合力方差分析

一般配合力(GCA)效应值和特殊配合力(SCA)效应值方差分析结果表明, 硬度、蛋白质含量、SDS 沉淀值、水 SRC、乳酸 SRC、蔗糖 SRC、碳酸钠 SRC、湿面筋含量、干面筋含量以及面筋指数等品质指标的一般配合力差异均达极显著水平, 但蛋白质含

量、湿面筋含量以及干面筋含量一般配合力效应值较小; 硬度、水 SRC、乳酸 SRC 和碳酸钠 SRC 特殊配合力效应值呈极显著差异, 湿面筋含量、干面筋含量特殊配合力效应值差异达显著水平, 但蛋白质含量、SDS 沉淀值、蔗糖 SRC 和面筋指数的特殊配合力差异不显著(表 1)。品质指标的一般配合力高于特殊配合力, 硬度、SDS 沉淀值和 SRC 一般配合力效应远大于特殊配合力效应, 表现出以加性效应为主的遗传现象, 蛋白质和面筋含量加性效应成分相对较低。

2.2 一般配合力效应分析

由表 2 可知, 弱筋小麦扬麦 13、扬麦 18、扬麦 20 和扬麦 24 多个籽粒品质和理化品质指标一般配合力呈负向效应, 中强筋小麦扬麦 16、扬麦 23 和镇麦 9 号多个品质指标呈正向效应。在籽粒硬度、SDS 沉淀值、水 SRC、乳酸 SRC、蔗糖 SRC、碳酸钠 SRC 上, 扬麦 13 负向效应最大, 其次是扬麦 18 和扬麦 20, 扬麦 24 负向效应最小。在蛋白质含量、湿面筋含量和干面筋含量上, 扬麦 24 负向效应最大, 其次是扬麦 20, 扬麦 13 和扬麦 18 多呈正向效应; 在面筋指数上, 扬麦 18 负向效应最大, 其次是扬麦 13 和扬麦 20 也呈负向效应, 而扬麦 24 则呈正向效应。因此, 弱筋小麦品质指标一般配合力呈负向优势, 扬麦 13 负向优势最强, 其次是扬麦 18 和扬麦 20, 扬麦 24 负向效应较小, 能有效降低籽粒硬度、沉淀值和 SRC, 是弱筋品质育种的理想亲本。

对于中强筋小麦扬麦 16、扬麦 23 和镇麦 9 号, 在籽粒硬度、蛋白质含量上, 镇麦 9 号、扬麦 16 一般配合力显著高于扬麦 23, 而镇麦 9 号和扬麦 16 品种间无显著差异。在 SDS 沉淀值、水 SRC、乳酸 SRC 上, 镇麦 9 号一般配合力效应值显著高于扬麦 16、扬麦 23, 扬麦 16 和扬麦 23 间无显著差异。在蔗糖 SRC 和碳酸钠 SRC 上, 镇麦 9 号效应值最高, 其次是扬麦 16, 扬麦 23 最低, 镇麦 9 号和扬麦 23 间呈显著差异。在湿面筋、干面筋含量上, 扬麦 16 效应值最高, 湿面筋含量扬麦 23 最低, 干面筋含量镇麦 9 号最低。在面筋指数上, 镇麦 9 号最高, 其次是扬麦 23, 扬麦 16 最低, 扬麦 16 与镇麦 9 号、扬麦 23 均存在显著差异。综合来看, 镇麦 9 号正向优势最强, 其次是扬麦 16 和扬麦 23, 中强筋小麦品质指标正向效应显著, 有利于强筋品种选育, 不适宜用作弱筋品质育种亲本。

2.3 特殊配合力效应分析

不同组合同一品质指标以及同一组合不同品质指标的特殊配合力存在差异(表 3 和表 4)。硬度和水 SRC 特殊配合力差异显著, 扬麦 13/扬麦 16、扬麦 20/扬麦 23、扬麦 18/扬麦 24、扬麦 18/镇麦 9 号等组合存在负向效应, 有利于弱筋品质的形成。一般配合力和特殊配合力不是完全对应关系, 扬麦 13、扬麦 18、扬麦 20、扬麦 24 一般配合力低, 但配制的部分组合特殊配合力效应高。弱筋小麦与中强筋配制的组合特殊配合力低, 负向效应明显; 弱筋小麦之间组配, 特殊配合力多呈正向效应, 但也有负向效应组合, 如扬麦 18/扬麦 24 效应较小, 有利于弱筋筋质筛选。因此, 在一般配合力选择的基础上也

要重视特殊配合力选择。对于弱筋小麦育种, 至少要有 1 个弱筋亲本, 同时加强 2 个亲本特殊配合力筛选。

2.4 品质性状遗传参数估算

硬度、SDS 沉淀值、水 SRC、乳酸 SRC、蔗糖 SRC 和碳酸钠 SRC 的狭义遗传力分别为 91.23%、82.66%、83.81%、72.79%、75.26%和 83.96%(表 5), 加性方差比重显著大于显性方差, F_1 组合间的遗传以加性效应为主, 可以在早期世代进行选择。蛋白质含量、湿面筋含量、干面筋含量和面筋指数狭义遗传力分别为 30.72%、25.62%、32.62%和 49.82%, 加性方差和显性方差相差不大, F_1 组合间遗传的加性效应较小, 早代选择效果可能不佳。4 种 SRC 比

表 1 不同品质性状配合力方差分析(F 值)

Table 1 Analysis of variance for combining ability in different quality traits (F -value)

变异来源 Source of variance	硬度 Grain hardness	蛋白质含量 Protein content	SDS 沉淀值 SDS sedimentation value	水 SRC Water SRC	乳酸 SRC Lactic acid SRC	蔗糖 SRC Sucrose SRC	碳酸钠 SRC Sodium carbonate SRC	湿面筋含量 Wet gluten content	干面筋含量 Dry gluten content	面筋指数 Gluten index
一般配合力 GCA	512.51**	0.77**	7.97**	66.11**	78.06**	76.33**	151.02**	9.76**	2.79**	166.50**
特殊配合力 SCA	11.75**	0.21	0.29	3.75**	7.20**	4.20	6.61**	3.64*	0.81*	26.67

*和**分别表示在 0.05 和 0.01 概率水平差异显著。

* and ** indicate significance difference at the 0.05 and 0.01 probability levels, respectively. GCA: general combining ability; SDS: sodium dodecyl sulfate; SRC: solvent retention capacity; SCA: special combining ability.

表 2 7 个亲本品质性状一般配合力效应分析

Table 2 General combining ability for quality traits in seven wheat parents

亲本 Parent	籽粒硬度 Grain hardness	蛋白质含量 Protein content	SDS 沉淀值 SDS sedimentation value	水 SRC Water SRC	乳酸 SRC Lactic acid SRC	蔗糖 SRC Sucrose SRC	碳酸钠 SRC Sodium carbonate SRC	湿面筋含量 Wet gluten content	干面筋含量 Dry gluten content	面筋指数 Gluten index
扬麦 13 Yangmai 13	-9.53 d	0.38 a	-1.05 c	-4.74 e	-4.59 e	-5.39 d	-6.82 d	1.87 a	1.22 a	-4.14 cd
扬麦 16 Yangmai 16	11.84 a	0.42 a	1.07 b	2.97 b	2.91 b	3.66 ab	5.65 ab	1.46 ab	0.72 ab	-3.11 bcd
扬麦 18 Yangmai 18	-10.63 d	0.05 abc	-1.04 c	-2.41 d	-3.35 de	-2.50 c	-3.16 c	-0.22 bc	0.04 bc	-7.31 d
扬麦 20 Yangmai 20	-5.54 c	-0.22 bcd	-1.02 c	-2.73 d	-2.85 d	-2.83 c	-5.13 d	-0.71 cd	-0.33 cd	-2.08 bc
扬麦 23 Yangmai 23	7.03 b	-0.24 cd	1.08 b	2.25 b	2.92 b	2.72 b	4.16 b	-0.62 cd	-0.26 cd	6.77 a
扬麦 24 Yangmai 24	-5.75 c	-0.65 d	-0.86 c	-0.73 c	-0.98 c	-0.83 c	-1.55 c	-2.23 d	-1.03 d	1.71 b
镇麦 9 号 Zhenmai 9	12.57 a	0.26 ab	1.82 a	5.41 a	5.94 a	5.18 a	6.85 a	0.45 abc	-0.35 cd	8.16 a

同列不同小写字母表示在 0.05 概率水平显著差异。

Different lowercase letters in the same column show significant difference at the 0.05 probability level. SDS: sodium dodecyl sulfate; SRC: solvent retention capacity.

表 3 21 个杂交组合硬度特殊配合力效应分析

Table 3 Special combining ability for hardness in 21 crosses

亲本 Parent	扬麦 16 Yangmai 16	扬麦 18 Yangmai 18	扬麦 20 Yangmai 20	扬麦 23 Yangmai 23	扬麦 24 Yangmai 24	镇麦 9 号 Zhenmai 9
扬麦 13 Yangmai 13	-3.42	3.93	-0.17	2.74	2.65	-5.73
扬麦 16 Yangmai 16		1.34	-0.57	1.70	-1.95	2.90
扬麦 18 Yangmai 18			0.34	0.42	-2.78	-3.25
扬麦 20 Yangmai 20				-1.89	2.39	-0.09
扬麦 23 Yangmai 23					-4.72	1.75
扬麦 24 Yangmai 24						4.42

表 4 21 个杂交组合水 SRC 特殊配合力效应分析

Table 4 Special combining ability for water SRC (solvent retention capacity) in 21 crosses

亲本 Parent	扬麦 16 Yangmai 16	扬麦 18 Yangmai 18	扬麦 20 Yangmai 20	扬麦 23 Yangmai 23	扬麦 24 Yangmai 24	镇麦 9 号 Zhenmai 9
扬麦 13 Yangmai 13	-1.18	1.90	1.55	0.44	0.68	-3.39
扬麦 16 Yangmai 16		-0.34	-0.93	1.23	-2.47	3.69
扬麦 18 Yangmai 18			1.27	-1.16	-0.05	-1.62
扬麦 20 Yangmai 20				-1.64	0.28	-0.54
扬麦 23 Yangmai 23					0.41	0.71
扬麦 24 Yangmai 24						1.15

表 5 小麦品质性状的遗传参数

Table 5 Genetic parameter of different quality traits

品质性状 Quality trait	加性方差 Additive variance	显性方差 Dominance variance	遗传方差 Genetic variance	表型方差 Phenotypic variance	遗传决定度 Degree of genetic determination	狭义遗传力 Narrow sense heritability
籽粒硬度 Grain hardness	200.30	8.01	208.31	219.55	94.88	91.23
蛋白质含量 Protein content	0.22	0.06	0.29	0.73	39.28	30.72
SDS 沉淀值 Sedimentation value	3.07	0.12	3.19	3.72	85.86	82.66
水 SRC Water SRC	24.94	3.21	28.15	29.76	94.59	83.81
乳酸 SRC Lactic acid SRC	28.35	5.50	33.84	38.94	86.90	72.79
蔗糖 SRC Sucrose SRC	28.85	1.56	30.41	38.34	79.31	75.26
碳酸钠 SRC Sodium carbonate SRC	57.77	4.40	62.16	68.80	90.35	83.96
湿面筋含量 Wet gluten content	2.45	1.91	4.35	9.55	45.56	25.62
干面筋含量 Dry gluten content	0.79	0.40	1.19	2.43	48.91	32.62
面筋指数 Gluten index	55.94	11.83	67.77	112.27	60.36	49.82

SDS: sodium dodecyl sulfate; SRC: solvent retention capacity.

较, 水、碳酸钠 SRC 遗传效应高于乳酸和蔗糖 SRC。综合来看, 硬度、SDS 沉淀值、水 SRC 和碳酸钠 SRC 狭义遗传力大于 80%、遗传力高, 是弱筋小麦品质育种的核心选择指标。

2.5 2020 年不同组合高代品系品质效应分析

2020 年对不同品质类型组合高代品系品质指标分析表明(表 6), 弱筋/弱筋组合扬麦 9 号/扬麦 18 株系籽粒硬度、蛋白质含量、SDS 沉淀值和水 SRC 指标较低, 最高值分别为 10.56、12.78%、10 mL 和 76.22%, 均为弱筋品质类型。扬麦 16/镇麦 168 组合

全部株系硬度、沉淀值和水 SRC 品质指标均高于扬麦 9 号/扬麦 18 组合株系, 仅 2 份株系蛋白质含量位于扬麦 9 号/扬麦 18 株系变异范围内, 中筋/强筋组合未有弱筋株系分离。弱筋/强筋组合扬麦 15/镇麦 9 号株系品质指标则位于上述两种不同品质类型组合变异范围内, 既有强筋株系也有弱筋株系分离。不同组合品质性状 boxplot 图可以看出(图 1), 弱筋/弱筋组合类型籽粒硬度、蛋白质含量、沉淀值和水 SRC 品质指标最低, 弱筋/强筋组合居中, 中筋/强筋类型组合最高。

表 6 不同品质类型组合高代品系品质表现(2020 年)

Table 6 Quality trait of high generation lines from different quality types combination in 2020

品质性状 Quality trait	扬麦 16/镇麦 168 Yangmai 16/Zhenmai 168		扬麦 15/镇麦 9 号 Yangmai 15/Zhenmai 9		扬麦 9 号/扬麦 18 Yangmai 9/Yangmai 18	
	Yangmai 16/Zhenmai 168		Yangmai 15/Zhenmai 9		Yangmai 9/Yangmai 18	
	变幅 Range	平均值 Mean±SD	变幅 Range	平均值 Mean±SD	变幅 Range	平均值 Mean±SD
籽粒硬度 Grain hardness	44.70–55.63	49.68±2.68	3.67–60.56	23.05±19.81	0.55–10.56	5.04±2.93
蛋白质含量 Protein content (%)	12.25–15.86	13.86±0.71	12.01–13.58	12.83±0.52	10.76–12.78	12.18±0.45
沉淀值 Sedimentation value (mL)	11.50–18.00	15.06±1.35	9.75–14.50	11.54±1.19	5.25–10.00	7.51±1.18
水 SRC Water solvent retention capacity (%)	77.66–88.43	83.26±2.28	70.06–85.77	75.63±4.63	71.26–76.22	73.79±1.55

SRC: solvent retention capacity.

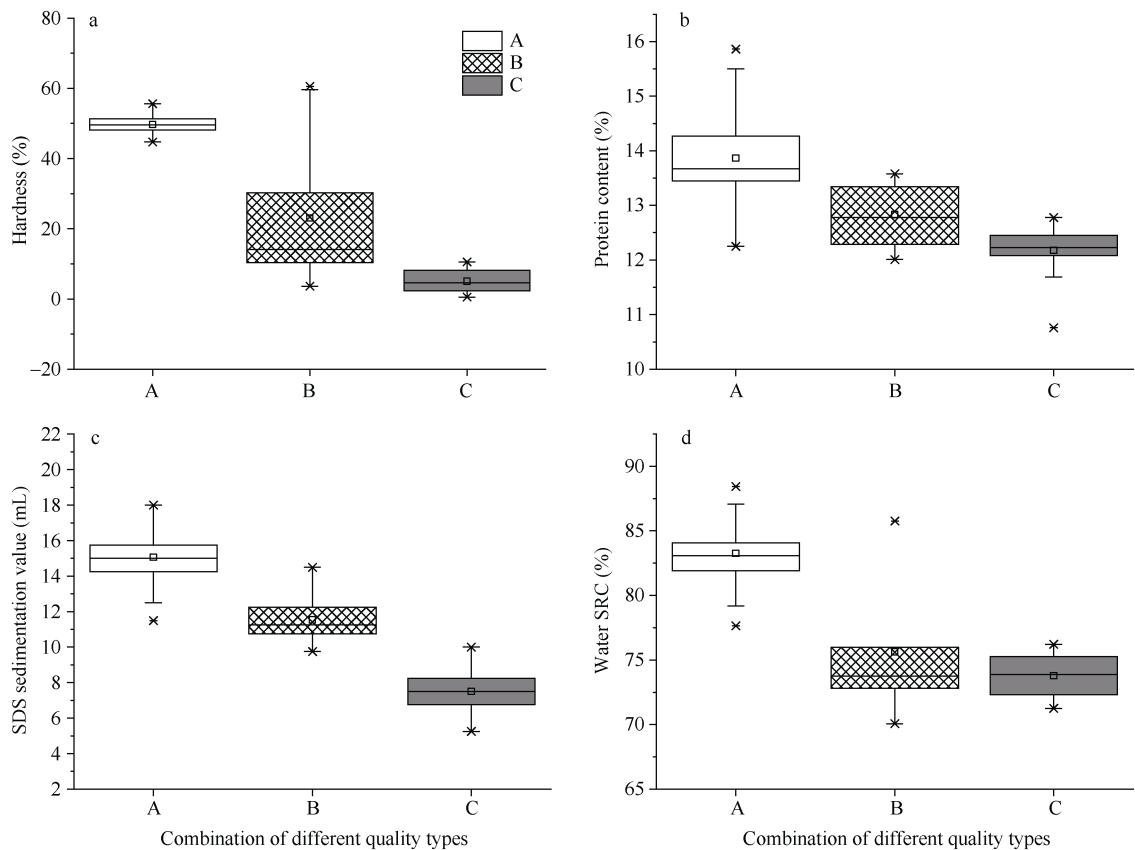


图 1 不同品质类型组合高代品系品质表现

Fig. 1 Quality trait of high generation lines from different quality types combination in 2020

盒图两端表示性状的极值范围；图中方框表示平均值；中间直线表示中位线；*为个别极值。A 代表组合扬麦 16/镇麦 168；B 代表组合扬麦 15/镇麦 9 号；C 代表组合扬麦 9 号/扬麦 18。

Both ends of box plot indicates the extreme range of traits; box: the mean of the trait; the lines in the middle: the median line; *: the individual extreme value. A represents the combination of Yangmai16/Zhenmai 168; B represents the combination of Yangmai 15/Zhenmai 9; C represents the combination of Yangmai 9/Yangmai 18.

2.6 2021 年不同组合高代品系品质效应分析

2021 年对不同品质类型组合高代品系品质指标分析表明(表 7)，弱筋/弱筋组合扬麦 22/扬辐麦 4 号蛋白质含量、沉淀值、水 SRC、乳酸 SRC、碳酸钠 SRC 和蔗糖 SRC 数值最低。强筋/强筋组合 57 份株系有 56 份沉淀值高于弱筋/弱筋组合 31 份株系，两个组合之间有少量株系蛋白质含量和 SRC 变异范围

重合，这可能与 2021 年蛋白质含量和 SRC 更多地受到环境影响有关。弱筋/强筋组合扬麦 22/镇麦 9 号既有强筋株系也有弱筋株系分离。不同组合品质指标表现趋势与 2020 年结果一致。不同组合品质性状的 boxplot 图也可以看出(图 2)，弱筋/弱筋组合类型品质指标最低，弱筋/强筋组合居中，强筋/强筋类型组合最高。

表 7 不同品质类型组合高代品系品质表现(2021 年)

Table 7 Quality trait of high generation lines from different quality types combination in 2021

品质性状 Quality trait	西农 529/镇麦 9 号 Xinong 529/Zhenmai 9		扬麦 22/镇麦 9 号 Yangmai 22/Zhenmai 9		扬麦 22/扬辐麦 4 号 Yangmai 22/Yangfumai 4	
	变幅 Range	平均值 Mean±SD	变幅 Range	平均值 Mean±SD	变幅 Range	平均值 Mean±SD
蛋白质含量 Protein content (%)	11.99–15.02	13.26±0.69	11.05–14.92	12.51±0.79	10.55–13.44	11.78±0.68
沉淀值 Sedimentation value (mL)	7.75–14.25	10.98±1.61	5.00–15.25	10.27±2.94	2.50–12.50	5.65±1.52
水 SRC Water SRC (%)	68.12–92.48	79.48±6.37	65.18–75.60	70.79±2.60	64.94–73.62	68.57±2.33
乳酸 SRC Lactic acid SRC (%)	60.18–99.66	86.23±7.74	69.58–86.90	78.22±3.62	66.46–79.02	70.82±2.71
碳酸钠 SRC Sodium carbonate SRC (%)	85.06–119.88	103.93±11.01	80.50–94.740	87.73±3.31	78.32–87.90	82.96±2.23
蔗糖 SRC Sucrose SRC (%)	95.24–125.92	113.59±9.17	95.06–106.96	100.93±2.77	86.48–99.46	91.88±3.49

SRC: solvent retention capacity.

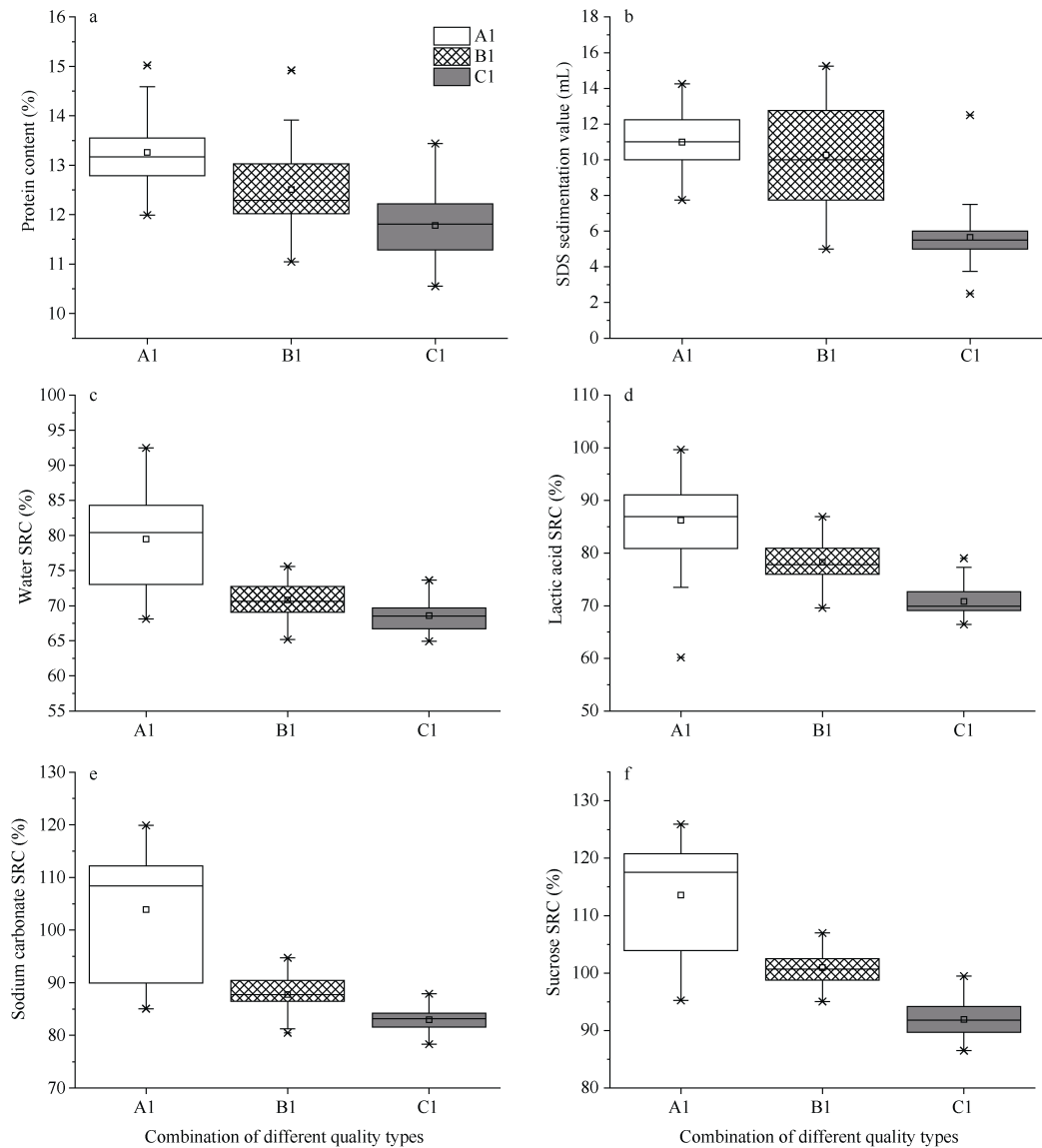


图 2 不同品质类型组合高代品系品质表现

Fig. 2 Quality traits of high generation lines from different quality types combination in 2021

盒图两端表示性状的极值范围; 图中方框表示平均值; 中间直线表示中位线; *为个别极值。A1 代表组合西农 529/镇麦 9 号; B1 代表组合扬麦 22/镇麦 9 号; C1 代表组合扬麦 22/扬辐麦 4 号。

Both ends of box plot indicates the extreme range of traits; box: the mean of the trait; the lines in the middle: the median line; *: the individual extreme value. A1 represents the combination of Xinong 529/Zhenmai 9 combination; B1 represents the combination of Yangmai 22/Zhenmai 9; C1 represents the combination of Yangmai 22/Yangfumai 4.

3 讨论

3.1 弱筋小麦品质育种品质选择指标

《GB/T 17893-1999 优质小麦弱筋小麦》以蛋白质含量、湿面筋含量和稳定时间3项指标为主进行品质分类。《GB/T 17320-2013 小麦品种品质分类》以硬度指数、粗蛋白质含量、湿面筋含量、沉淀值、吸水率和稳定时间为弱筋小麦评价指标。《主要农作物品种审定标准(国家级)》小麦品质以蛋白质含量、湿面筋含量、吸水率和稳定时间为弱筋小麦评价指标。多项研究均表明环境条件对蛋白质含量具有重要影响^[22-25],栽培环境中以氮肥对小麦品质的影响最大^[26-28]。本研究结果表明,硬度、SDS沉淀值和SRC遗传力高,蛋白质含量、湿面筋含量、干面筋含量和面筋指数遗传力较低。仅以蛋白质含量、湿面筋含量和稳定时间进行弱筋小麦分类容易误判,结合硬度、沉淀值、SRC等高遗传力指标分类将更为客观准确。结合本团队多年研究和育种实践^[29-30],在弱筋小麦育种过程中以硬度、SDS沉淀值和SRC为弱筋品质育种核心指标,以蛋白质含量进行生态环境和栽培条件等因素控制;同时由于低世代种子量少,用粉质率代替硬度,粉质率与硬度具有显著相关性^[31]。由此确定,低世代以粉质率 $\geq 75\%$ 、微量SDS沉淀值(1 g全麦粉) ≤ 10 mL、微量水SRC(全麦粉) $\leq 76\%$ 、蛋白质含量 $\leq 12\%$ 进行筛选;中高世代以SKCS籽粒硬度 ≤ 30 、硬度指数 ≤ 45 、常量Zeleny沉淀值(面粉) ≤ 30 mL、水SRC(面粉) $\leq 65\%$ 、蛋白质含量 $\leq 12\%$ 进行筛选。

3.2 弱筋小麦品质育种亲本选择

本研究结果表明弱筋小麦扬麦13、扬麦18、扬麦20和扬麦24籽粒品质指标和理化品质指标一般配合力多呈负向效应,有利于弱筋小麦育种亲本组配,其中扬麦13负向优势最大,是弱筋小麦育种的优质亲本;中强筋小麦扬麦16、扬麦23和镇麦9号多数品质指标一般配合力呈正向效应,其中镇麦9号正向优势最强。一般配合力和特殊配合力不完全对应,强筋小麦尤其双亲均为强筋的组合特殊配合力相对较高。综合不同组合高代品系品质表现,弱筋/弱筋组合高代品系籽粒品质和理化品质指标最低,其次是弱筋/强筋组合,强筋/强筋、中筋/强筋组合最高。因此,在弱筋小麦育种亲本选配时,要求品质性状一般配合力呈负向效应,并且至少要有有一个弱筋小麦亲本,同时注重亲本间特殊配合力选择。

在扬麦弱筋品种20多年育种实践中,通过弱筋

核心亲本持续挖掘创新,不断改良提升弱筋品质,相继育成多个弱筋小麦品种并大面积推广应用。弱筋小麦育种起步阶段,加强弱筋种质资源筛选鉴定,在大量材料中筛选出弱筋中间材料扬鉴三,对扬鉴三组合后代进行遗传分析,表明扬鉴三高粉质率、低沉淀值等性状遗传力高、一般配合力好,被确定为弱筋小麦育种的核心亲本。利用弱筋核心亲本扬鉴三育成了扬麦9号、扬麦13和扬麦15,其中扬麦13是我国推广面积最大的弱筋小麦品种,扬麦15是我国主推优质弱筋小麦品种。利用扬麦9号作核心亲本育成弱筋小麦扬麦20,其组合为扬麦10号(中强筋)/扬麦9号(弱筋),2016年起列入全国主导品种。进一步利用扬麦9号优系育成弱筋小麦新品种扬麦30,种植面积也逐步扩大。制定弱筋小麦育种目标,以弱筋核心亲本创制利用为基础,强化弱筋品质跟踪鉴定,重视丰产性、抗病抗逆和综合农艺选择,聚合优质弱筋和高产抗病抗逆性状,实现弱筋小麦品种选育的新突破。

4 结论

硬度、SDS沉淀值、水SRC和碳酸钠SRC是弱筋小麦品质育种的高效选择指标,可以在早世代进行严格筛选,而蛋白质含量、湿面筋含量等遗传力较低,受环境影响大。弱筋小麦品质育种亲本组配至少要有有一个弱筋品质类型的亲本。

References

- [1] 魏益民,张波,关二旗,张国权,张影全,宋哲民.中国冬小麦品质改良研究进展.中国农业科学,2013,46:4189-4196.
Wei Y M, Zhang B, Guan E Q, Zhang G Q, Zhang Y Q, Song Z M. Advances in study of quality property improvement of winter wheat in China. *Sci Agric Sin*, 2013, 46: 4189-4196 (in Chinese with English abstract).
- [2] 张晓,张勇,高德荣,别同德,张伯桥.中国弱筋小麦育种进展及生产现状.麦类作物学报,2012,32:184-189.
Zhang X, Zhang Y, Gao D R, Bie T D, Zhang B Q. The development of weak-gluten wheat breeding and present situation of its production. *J Triticeae Crops*, 2012, 32: 184-189 (in Chinese with English abstract).
- [3] 刘健,张晓,李曼,文莉,江伟,张勇,高德荣.扬麦系列小麦品种的饼干品质分析.麦类作物学报,2021,41:50-60.
Liu J, Zhang X, Li M, Wen L, Jiang W, Zhang Y, Gao D R. Quality analysis of Yangmai series wheat varieties for biscuit-making. *J Triticeae Crops*, 2021, 41: 50-60 (in Chinese with English abstract).
- [4] 刘莲.小麦部分品质性状与主要农艺性状的遗传及配合力分析.山东农业大学硕士学位论文,山东泰安,2004.
Liu L. The Analysis of Genetic and Combining Ability for Some Quality and Major Agronomic Characters in Wheat. MS Thesis of

- Shandong Agricultural University, Tai'an, Shandong, China, 2004 (in Chinese with English abstract).
- [5] 桑伟. 冬小麦 F_1 、 F_2 代主要品质性状和产量性状杂种优势的关系及其遗传分析. 石河子大学硕士学位论文, 新疆石河子, 2007.
- Sang W. Study on Heterosis and Inheritance of Main Quality and Yield Traits of Winter Wheat in F_1 and F_2 Hybrid. MS Thesis of Shihezi University, Shihezi, Xinjiang, China, 2007 (in Chinese with English abstract).
- [6] 姚金保, 杨学明, 姚国才, 张艳, 顾正中, 周羊梅. 弱筋小麦品种蛋白质含量的遗传分析. 麦类作物学报, 2007, 27: 1005–1009.
- Yao J B, Yang X M, Yao G C, Zhang Y, Gu Z Z, Zhou Y M. Inheritance of protein content in weak gluten wheat cultivars. *J Triticeae Crops*, 2007, 27: 1005–1009 (in Chinese with English abstract).
- [7] 张媛菲, 彭绍峰, 郭军伟, 雷全奎, 王洁琼, 吕树作. 几个小麦品种品质性状遗传特性分析. 作物研究, 2020, 34: 469–475.
- Zhang Y F, Peng S F, Guo J W, Lei Q K, Wang J Q, Lyu S Z. Genetic characteristics analysis of quality traits in wheat. *Crop Res*, 2020, 34: 469–475 (in Chinese with English abstract).
- [8] Pasha I, Anjum F M, Morris C F. Grain hardness: a major determinant of wheat quality. *Food Sci Technol Internat*, 2010, 16: 511–522.
- [9] Ma F, Baik B K. Soft wheat quality characteristics required for making baking powder biscuits. *J Cereal Sci*, 2018, 79: 127–133.
- [10] Zheng B Q, Zhao H, Zhou Q, Cai J, Wang X, Cao W X, Dai T B, Jiang D. Relationships of protein composition, gluten structure, and dough rheological properties with short biscuits quality of soft wheat varieties. *Agron J*, 2020, 112: 1921–1930.
- [11] Huebner F R, Bietz J A, Nelsen T, Bains G S, Finney P L. Soft wheat quality as related to protein composition. *Cereal Chem*, 1999, 76: 650–655.
- [12] Bettge A D, Morris C F. Relationships among grain hardness, pentosan fractions, and end-use quality of wheat. *Cereal Chem*, 2000, 77: 241–247.
- [13] Gaines C S. Prediction of sugar-snap cookie diameter using sucrose solvent retention capacity, milling softness, and flour protein content. *Cereal Chem*, 2004, 81: 549–552.
- [14] 陈满峰. 弱筋小麦面粉理化品质性状遗传变异、肥料运筹及其与酥性饼干品质的关系. 扬州大学硕士学位论文, 江苏扬州, 2008.
- Chen M F. The Variation of Flour Quality Characters and the Fertilizer Operations in Chinese soft Wheat and Correlation with the Short Biscuit Quality. MS Thesis of Yangzhou University, Yangzhou, Jiangsu, China, 2008 (in Chinese with English abstract).
- [15] 吴宏亚. 农学角度的中国饼干研究. 扬州大学博士学位论文, 江苏扬州, 2014.
- Wu H Y. Chinese Biscuit Study-from View of Agronomy. PhD Dissertation of Yangzhou University, Yangzhou, Jiangsu, China, 2014 (in Chinese with English abstract).
- [16] Jeon S, Baik B K, Kweon M. Solvent retention capacity application to assess soft wheat flour quality for making white-salted noodles. *Cereal Chem*, 2019, 96: 497–507.
- [17] Bettge A D, Morris C F, DeMacon V L, Kidwell K K. Adaptation of AACC method 56-11, solvent retention capacity, for use as an early generation selection tool for cultivar development. *Cereal Chem*, 2002, 79: 670–674.
- [18] 张岐军, 张艳, 何中虎, Pena R J. 软质小麦品质性状与酥性饼干品质参数的关系研究. 作物学报, 2005, 31: 1125–1131.
- Zhang Q J, Zhang Y, He Z H, Pena R J. Relationship between soft wheat quality traits and cookie quality parameters. *Acta Agron Sin*, 2005, 31: 1125–1131 (in Chinese with English abstract).
- [19] Kweon M, Slade L, Levine H. Solvent retention capacity (SRC) testing of wheat flour: principles and value in predicting flour functionality in different wheat-based food processes and in wheat breeding: a review. *Cereal Chem*, 2011, 88: 537–552.
- [20] Souza E J, Sneller C, Guttieri M J, Sturbaum A, Griffey C, Sorrells M, Ohm H, Sanford D V. Basis for selecting soft wheat for end-use quality. *Crop Sci*, 2012, 52: 21–31.
- [21] 张晓, 李曼, 江伟, 朱冬梅, 高德荣. 小麦三个品质性状微量检测方法的应用与评价. 麦类作物学报, 2014, 34: 1651–1655.
- Zhang X, Li M, Jiang W, Zhu D M, Gao D R. Application and evaluation of three micro detection methods for process quality in wheat breeding. *J Triticeae Crops*, 2014, 34: 1651–1655 (in Chinese with English abstract).
- [22] 郭天财, 马冬云, 朱云集, 王晨阳, 夏国军, 罗毅. 冬播小麦品种主要品质性状的基因型与环境及其互作效应分析. 中国农业科学, 2004, 37: 948–953.
- Guo T C, Ma D Y, Zhu Y Q, Wang C Y, Xia G J, Luo Y. Genotype, environment and their interactive effects on main quality traits of winter-sown wheat variety. *Sci Agric Sin*, 2004, 37: 948–953 (in Chinese with English abstract).
- [23] Kong L A, Si J S, Zhang B, Feng B, Li S D, Wang F H. Environmental modification of wheat grain protein accumulation and associated processing quality: a case study of China. *Austr J Crop Sci*, 2013, 7: 173–181.
- [24] 李朝苏, 吴晓丽, 汤永禄, 杨武云, 吴元奇, 吴春, 马孝玲, 李式昭. 四川近十年小麦主栽品种的品质状况. 作物学报, 2016, 42: 803–812.
- Li Z S, Wu X L, Tang Y L, Yang W Y, Wu Y Q, Wu C, Ma X L, Li S Z. Quality of major wheat cultivars grown in Sichuan province in recent decade. *Acta Agron Sin*, 2016, 42: 803–812 (in Chinese with English abstract).
- [25] 高德荣, 宋归华, 张晓, 张伯桥, 李曼, 江伟, 吴素兰. 弱筋小麦扬麦 13 品质对氮肥响应的稳定性分析. 中国农业科学, 2017, 50: 4100–4106.
- Gao D R, Song G H, Zhang X, Zhang B Q, Li M, Jiang W, Wu S L. Quality consistency of soft wheat Yangmai 13 under different. *Sci Agric Sin*, 2017, 50: 4100–4106 (in Chinese with English abstract).
- [26] 张美微, 王晨阳, 郭天财, 马冬云, 朱云集. 施氮量对冬小麦蛋白质品质和面粉色泽的影响. 植物营养与肥料学报, 2012, 18: 1312–1318.
- Zhang M W, Wang C Y, Guo T C, Ma D Y, Zhu Y J. Effects of nitrogen fertilization on protein quality and flour color of winter wheat. *Plant Nutr Fert Sci*, 2012, 18: 1312–1318 (in Chinese with English abstract).
- [27] 金欣欣, 姚艳荣, 贾秀领, 姚海坡, 申海平, 崔永增, 李谦. 基因型和环境对小麦产量、品质和氮素效率的影响. 作物学报, 2019, 45: 635–644.
- Jin X X, Yao Y R, Jia X L, Yao H P, Shen H P, Cui Y Z, Li Q. Effects of genotype and environment on wheat yield, quality, and

- nitrogen use efficiency. *Acta Agron Sin*, 2019, 45: 635–644 (in Chinese with English abstract).
- [28] De Santis M A, Giuliani M M, Flagella Z, Reyneri A, Blandino M. Impact of nitrogen fertilization strategies on the protein content, gluten composition and rheological properties of wheat for biscuit production. *Field Crops Res*, 2020, 254: 107829.
- [29] 张晓, 李曼, 刘大同, 江伟, 张勇, 高德荣. 扬麦系列品种品质性状分析及育种启示. *中国农业科学*, 2020, 53: 1309–1321. Zhang X, Li M, Liu D T, Jiang W, Zhang Y, Gao D R. Analysis of quality traits and breeding inspiration in Yangmai series wheat varieties. *Sci Agric Sin*, 2020, 53: 1309–1321 (in Chinese with English abstract).
- [30] 李曼, 张晓, 刘大同, 江伟, 高德荣, 张勇. 弱筋小麦品质评价指标研究. *核农学报*, 2021, 35: 1979–1986. Li M, Zhang X, Liu D T, Jiang W, Gao D R, Zhang Y. Research on quality evaluation indices of weak gluten wheat. *J Nucl Agric Sci*, 2021, 35: 1979–1986 (in Chinese with English abstract).
- [31] 陈锋, 李根英, 耿洪伟, 夏兰芹, 夏先春, 何中虎. 小麦籽粒硬度及其分子遗传基础研究回顾与展望. *中国农业科学*, 2005, 38: 1088–1094. Chen F, Li G Y, Geng H W, Xia L Q, Xia X C, He Z H. Review and prospect of wheat kernel hardness and its molecular genetics basis. *Sci Agric Sin*, 2005, 38: 1088–1094 (in Chinese with English abstract).