

彩色小麦种质主要农艺性状和营养品质综合评价

应开,孟天琪,高旺南,玉应罕,田汉钊,武军,张正茂,刘玉秀

(西北农林科技大学农学院,陕西杨凌 712100)

摘要:为筛选彩色小麦优异种质,对14份彩色小麦材料和2份白粒小麦材料(对照)的主要农艺性状和营养品质进行测定,并利用主成分分析对彩色小麦种质进行综合评价。结果表明,紫优5号的有效分蘖、穗数、产量、生物量和收获指数以及西黑88的穗长、穗粒数和千粒重较好;西黑88、紫优11号、杨黑1号、紫优5号、灵黑麦2号和西黑-2的整体营养品质好,优于对照。彩色小麦种质的有效分蘖、穗长、产量、形成时间、稳定时间、峰值粘度和矿质营养元素变异系数较高,改良空间较大。经相关性分析,穗粒数、千粒重和穗数与产量呈极显著正相关($P < 0.01$),粗蛋白与湿面筋、吸水率、形成时间和稳定时间呈极显著正相关($P < 0.01$)。利用SDS-PAGE对供试种质进行HMW-GS检测,共检测出8种亚基类型(Null、1、2*、7+8、7+9、14+15、2+12、5+10)和7种亚基组合,其中7份彩色小麦种质的评分达到10分,高于对照;西农彩麦007和杨黑1号含有稀有优质亚基14+15。18个主要农艺性状和营养品质的主成分分析共提取到5个主成分,累积贡献率为81.70%,其中西黑88、紫优11号和西农彩麦3号综合表现优异,在农艺性状和营养品质改良方面具有较高的利用价值,可应用于彩色小麦遗传改良研究。

关键词:彩色小麦;农艺性状;营养品质;HMW-GS;主成分分析

中图分类号:S512.1;S330

文献标识码:A

文章编号:1009-1041(2025)03-0337-12

Comprehensive Evaluation of Main Agronomic Traits and Nutritional Quality of Colored Wheat Germplasms

YING Kai, MENG Tianqi, GAO Wangnan, YU Yinghan, TIAN Hanzhao,
WU Jun, ZHANG Zhengmao, LIU Yuxiu

(College of Agronomy, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Fourteen colored wheat germplasms and two white wheat cultivars (control) were used to investigate the performance of major agronomic traits and nutritional qualities, and to evaluate by principal component analysis for excellent colored wheat germplasm. The results showed that Ziyou 5 had excellent effective tillering, number of spikes, yield, biomass and harvest index; Xihei 88 had good performance in spike length, kernel number and thousand-kernels weight. The nutritional quality of Xihei 88, Ziyou 11, Yanghei 1, Ziyou 5, Lingheimai 2, and Xihei-2 was better than that of the control. High variation coefficients were observed for effective tillering, spike length, yield, dough development time, stability time, peak viscosity and mineral nutrient elements of colored wheat, suggesting wide scope for improvement. Correlation analysis showed that kernel number per spike, 1 000-grain weight and number of panicles were significantly positively correlated with grain yield ($P < 0.01$), and crude protein was significantly positively correlated with wet gluten, water absorption, dough development time and stability time ($P < 0.01$). SDS-PAGE was used for HMW-GS identifica-

收稿日期:2024-04-08 修回日期:2024-06-22

基金项目:国家自然科学基金青年基金项目(32101698);陕西省重点研发计划项目(2024GH-ZDXM-07);陕西省创新能力支撑计划项目(2020GHJD-17);农业生物育种重大专项(2023ZD04025);王同川创新创业基金项目

第一作者 E-mail:yingk34@163.com(应开)

通讯作者 E-mail:yxliu@nwsuaf.edu.cn(刘玉秀)

tion. Eight subunit types(Null, 1, 2*, 7+8, 7+9, 14+15, 2+12, 5+10) and seven subunit combinations were detected. Among the colored wheat, score of seven germplasm was up to 10, higher than that of white-grained wheat. Rare and high-quality subunits 14+15 was found in Xinongcaimai 007 and Yanghei 1. A total of five principal components were extracted from 18 main agronomic traits and nutritional quality by principal component analysis, and the cumulative contribution rate was 81.70%. The composite scores indicated that Xihei 88, Ziyou 11, and Xinongcaimai 3 had excellent overall performance, with high utilization value in agronomic traits and nutritional quality, which could be applied in colored wheat improvement.

Keywords: Colored wheat; Agronomic traits; Nutritional quality; HMW-GS; Principal component analysis

小麦是中国最重要的粮食作物之一,其产量多年保持在1.3亿余t,约占全年粮食总产量的1/5,切实保障了中国的粮食安全。近20年,中国小麦产量和品质改良取得了长足的进展。由于大多数育种家一直重视高产小麦品种的选育,忽略了小麦籽粒中矿物质元素含量的提升,使得因膳食不平衡和微量营养缺乏而导致的隐性饥饿受到全球高度重视^[1]。彩色小麦的籽粒表现为紫色、蓝色、蓝紫色、紫黑色等不同颜色,是普通小麦中的一种特殊类型。由于彩色小麦的籽粒富含硒、锌、维生素等微量营养和蛋白质,在保障粮食安全和人类的生命健康中发挥着重要作用^[2-3]。随着人们对小麦营养和加工品质要求的提高,彩色小麦的营养强化遗传育种和产业化备受关注。张敏敏等^[4]通过分析近25年来中国审定的彩色小麦农艺性状及品质特征,发现产量依然是彩色小麦品种选育的重点,而品质性状也需重点关注。产量和品质通常难以兼顾,如何协调彩色小麦农艺性状与品质性状的关系,培育出高产、优质的彩色小麦品种,是育种家一直追求的目标。

围绕产量构成,鉴定种质的基本农艺性状已成为种质资源发掘和利用的基础,也是新品种选育的重要依据^[5]。朱紫鑫等^[6]通过分析不同彩色小麦种质主要农艺性状及其与籽粒产量的相关关系,筛选出适宜鲁东地区栽培的彩色小麦品种青研紫麦1号。任文斌等^[7]通过比较44份蓝、紫粒糯小麦的8个农艺性状,表明紫粒糯小麦千粒重高于蓝粒糯小麦,为进一步选育特色小麦种质资源提供依据。

种质的品质性状是决定种质利用方向、品种消费预期和深加工潜力评估的重要依据。随着中国经济发展以及国民对多元化、个性化营养膳食需求增加,彩色小麦种质品质性状的评价工作重要性日益增长。王滢颖等^[8]通过比较彩色与普通

白粒小麦的蛋白和加工品质,发现冀紫439的高分子量谷蛋白亚基条带少,不利于面团的黏弹性。Usman等^[9]研究结果显示,黑小麦品系(Bk10和Bk11)具有较高的产量和较好的蛋糕品质。张慧等^[10]研究认为,彩色小麦籽粒的锌、硒、锰含量、面筋含量和可溶性蛋白均远高于普通小麦,且硒元素仅在彩麦中检测到。

主成分分析是种质资源评价的重要方法。金艳等^[11]综合评价小麦农艺和品质性状,明确69份小麦种质株高、生物量、产量、旗叶和品质性状利用价值。宋全昊等^[12]对35份人工合成六倍体小麦的农艺和品质性状进行主成分分析,明确产量、蛋白质、湿面筋含量等性状的利用价值,促进了小麦种质资源创新和在黄淮麦区遗传育种中的应用。倪永静等^[13]对30份国内外种质材料进行主成分分析得出,部分材料表现出对环境的敏感,需加以改良后再利用。武琦等^[14]对22个彩色小麦新品系的13个农艺性状进行主成分分析,筛出穗质量等8个性状作为影响彩色小麦特征特性的主要因素,将主成分分析结果聚类,筛选出2份表现优异的品系。利用产量和品质性状等多个指标综合评价彩色小麦种质的研究较少。本研究通过比较彩色与白粒小麦种质的主要农艺性状和营养品质,分析彩色小麦种质的特点,并利用主成分分析,筛选出综合得分较高的彩色小麦种质,为彩色小麦资源利用和遗传改良提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试材料为14份彩色小麦种质、2份白粒小麦品种西农511(优质强筋小麦)和普冰151(表1),于2022—2023年种植于西北农林科技大学曹新庄试验农场(108.09°E, 34.30°N)。小区面积12 m²(1.2 m×10 m),6行,行距0.20 m,3次重

复。小区机播,田间管理同一般旱地大田小麦。

1.2 试验方法

1.2.1 主要农艺性状测定

参考《小麦种质资源描述规范和数据标准》^[15],各小区随机选取10株调查有效分蘖数、株高、穗长、小穗数和穗粒数。每区人工收获1 m²,调查穗数。将采取的样品在75℃的烘箱中干燥至恒重,测定并计算生物量;脱粒称重,随机选择1000粒种子测量千粒重。每个小区收获的籽粒样品,计算籽粒含水量为12%时的产量,即是该样品的籽粒产量,并计算收获指数(籽粒产量/生物量×100%)。

1.2.2 营养品质测定

采用近红外分析仪(DA 7250, Perten, Sweden)测定籽粒粗蛋白含量;采用容重器(HGT-1000型,上海东方衡器有限公司),参照GB/T 5498-2013《粮油检验容重测定》测定小麦容重;磨粉后,湿面筋含量采用面筋数量与质量测定系统(GM 2200, Perten, Sweden),参照GB/T 5506.2-2008《小麦和小麦粉面筋含量第2部分:仪器法测定湿面筋》测定;粉质参数采用4g电子式粉质仪(Micro-doughLAB, Perten, Sweden),参照GB/T 14614-2019《粮油检验小麦粉面团流变学特性测试粉质仪法》测定;糊化参数采用快速粘度仪

(RVA 4500, Perten, Sweden),参照GB/T 24853-2010《小麦、黑麦及其粉类和淀粉糊化特性测定快速黏度仪法》测定;面粉色泽采用台式分光测色仪(CS-820N,杭州彩谱科技有限公司)测定。

称取0.2g面粉样品放入50mL微波消解管中,加入6mL硝酸和2mL过氧化氢,混匀后放入全自动微波消解仪(MA165-001 Multiprep-41 FC2, Milestone, Italy)进行消解,利用0.2μm水系滤膜过滤消解液并用蒸馏水定容至50mL,作为待测液,采用电感耦合等离子质谱仪(ICAP RQ, Thermo Fisher, America)测定钙(Ca)、镁(Mg)、铁(Fe)、锌(Zn)和硒(Se)含量。

参照张海龙等^[16]进行麦谷蛋白提取和分离,利用SDS-PAGE测定高分子量谷蛋白亚基。依据Payne等^[17]的品质得分标准,对不同亚基组合进行评分。

1.3 数据分析

数据采用Excel 2010和Origin 2021数据整理、分析制图,SPSS 25.0软件进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 彩色小麦种质主要农艺性状表现

由表2可知,XH-1、XH-2、DH-1、LHM2、ZY5

表1 供试材料信息表

Table 1 Information of the test materials

| 序号 Number | 名称 Name | 代号 Code | 来源 Source | 粒色 Grain color |
|--------------|---------------------------|------------|--------------|-------------------|
| 1 | 宛玉 202 Wanyu 202 | WY202 | 河南 Henan | 蓝色 Blue |
| 2 | 西农彩麦 3 号 Xinongcaimai 3 | XC3 | 陕西 Shaanxi | 黑色 Black |
| 3 | H07 黑 H07 hei | H07H | 陕西 Shaanxi | 黑色 Black |
| 4 | 西黑-1 Xihei-1 | XH-1 | 陕西 Shaanxi | 黑色 Black |
| 5 | 西黑-2 Xihei-2 | XH-2 | 陕西 Shaanxi | 黑色 Black |
| 6 | 东黑-1 Donghei-1 | DH-1 | 陕西 Shaanxi | 黑色 Black |
| 7 | 陇紫麦 1 号 Longzimai 1 | LZM1 | 甘肃 Gansu | 紫色 Purple |
| 8 | 西农彩麦 007 Xinongcaimai 007 | XC007 | 陕西 Shaanxi | 紫色 Purple |
| 9 | 灵黑麦 2 号 Lingheimai 2 | LHM2 | 河南 Henan | 黑色 Black |
| 10 | 西黑 88 Xihei 88 | XH88 | 陕西 Shaanxi | 黑色 Black |
| 11 | 紫优 5 号 Ziyou 5 | ZY5 | 河北 Hebei | 紫色 Purple |
| 12 | 西农彩麦 18 Xinongcaimai 18 | XC18 | 陕西 Shaanxi | 紫色 Purple |
| 13 | 杨黑 1 号 Yanghei 1 | YH1 | 陕西 Shaanxi | 黑色 Black |
| 14 | 紫优 11 号 Ziyou 11 | ZY11 | 河北 Hebei | 紫色 Purple |
| 15 | 普冰 151 Pubing 151 | PB151 | 陕西 Shaanxi | 白色 White |
| 16 | 西农 511 Xinong 511 | XN511 | 陕西 Shaanxi | 白色 White |

和 YH1 的有效分蘖数与两份白粒小麦材料(以下简称白麦)相当。WY202、H07H、DH-1、LHM2 和 YH1 的株高显著低于白麦($P < 0.05$),XC007 最高(112.3 cm),WY202 最矮(71.7 cm)。ZY5 的穗数显著高于白麦,其余 13 份彩色小麦显著低于白麦($P < 0.05$)。XH88 和 XC18 的穗显著长于白麦,其中 XH88 最长(14.4 cm);XC3、XH-1、XH-2 和 LHM2 显著长于白麦 XN511,但与白麦 PB151 无显著差异($P < 0.05$)。WY202、XC3 和 XH-2 的小穗数低于白麦,但无显著差异。XH88 穗粒数最多(52.3 粒)且显著大于白麦($P < 0.05$);WY202 和 XH-2 低于白麦,但无显著差异。XH88 的千粒重显著大于白麦,其余 13 份彩色小麦显著小于白麦($P < 0.05$)。ZY5 的产量低于白麦但无显著差异,其余彩色小麦产量显著低于白麦($P < 0.05$)。ZY5 的生物量显著大于白麦;收获指数显著大于白麦 PB151($P < 0.05$),但与白麦 XN511 无显著差异。彩色小麦种质的主要农艺性状变异系数范围为 3.00%~23.00%,其中生物量、穗粒数变异幅度小,性状比较稳定;穗长、产量和有效分蘖变异幅度大,改良空间大,可应用于彩色小麦农艺性状改良。

综上所述,彩色小麦种质间农艺性状变异类型丰富。XH-1、DH-1 和 LHM2 具有较高的改良潜力;ZY5 的有效分蘖、穗数、产量、生物量和收获指数以及 XH88 的穗长、穗粒数和千粒重表现优异,可作为彩色小麦遗传改良的优异育种材料。

2.2 彩色小麦种质营养品质表现

由表 3 可知,DH-1、XH88 和 YH1 的粗蛋白含量显著高于白麦,其中 XH88 最高;XC3 的容重显著低于白麦 XN511,但显著高于白麦 PB151;其余彩色小麦的容重显著低于白麦($P < 0.05$)。XC007、XH88 和 YH1 的湿面筋含量显著高于白麦,其中 XH88 最大;XC3、H07H、XH88、ZY5 和 ZY11 的吸水率显著大于白麦,其中 XH88 最大($P < 0.05$)。H07H、DH-1、XC007、XH88 和 ZY11 面团形成时间显著长于白麦,其中 ZY11 形成时间最长(6.33 min);彩色小麦中,XH88 稳定时间最长(6.40 min)($P < 0.05$)。LHM2 的峰值粘度显著大于白麦,其余彩色小麦均显著低于白麦($P < 0.05$);WY202、XC3、XH-1 和 XH-2 的面粉白度显著大于白麦,其中 XC3 最大(82.42)($P < 0.05$)。彩色小麦的 Ca、Mg、Fe 和 Zn 含量与白麦差异显著($P < 0.05$)。除 XC3、

LZM1 和 LHM2 外,其余 11 份彩色小麦的 Ca 含量显著高于白麦,其中 ZY5 最高($P < 0.05$)。YH1 的 Mg 含量显著高于白麦;除 XH-2 外,其余彩色小麦种质的 Mg 含量显著高于白麦 XN511($P < 0.05$)。除 LZM1 外,其余 13 份彩色小麦的 Fe 含量显著高于两个白麦($P < 0.05$)。LHM2 和 ZY11 的 Zn 含量显著高于白麦;XH-1 和 XH-2 的 Se 含量显著高于白麦($P < 0.05$)。小麦种质主要营养品质变异系数范围为 2.00%~75.00%,其中粗蛋白、容重、湿面筋、吸水率和面粉白度的变异系数范围为 2.00%~10.00%,变异幅度小,性状稳定;形成时间、稳定时间、峰值粘度和矿质营养元素的变异幅度大,改良空间大,可应用于彩色小麦品质改良。

上述结果表明,彩色小麦种质的营养品质变异类型丰富且差异较大。大部分彩色小麦种质营养品质优于白麦,综合品质性状较好的种质为 XH88、ZY11、YH1、ZY5、LHM2 和 XH-2,可为品质改良提供优异且丰富的遗传材料。

2.3 彩色小麦种质主要农艺性状和营养品质相关性

由图 1 可知,产量构成因素中,穗粒数、千粒重和穗数与产量呈极显著正相关($P < 0.01$),相关性程度为穗数>千粒重>穗粒数。穗长与有效分蘖数呈极显著负相关($P < 0.01$),与穗粒数、小穗数呈显著正相关($P < 0.05$);收获指数与穗数、千粒重和穗粒数呈极显著正相关($P < 0.01$);株高与生物量、穗长呈极显著正相关($P < 0.01$),表明这些性状对彩色小麦综合农艺性状贡献较大。

在营养品质中,粗蛋白与湿面筋、吸水率、形成时间和稳定时间呈极显著正相关($P < 0.01$)。湿面筋与吸水率呈显著正相关($P < 0.05$),与形成时间和稳定时间呈极显著正相关($P < 0.01$)。形成时间与吸水率、稳定时间呈显著正相关($P < 0.05$)。峰值粘度与吸水率呈极显著负相关($P < 0.01$),与稳定时间呈显著正相关($P < 0.05$)。面粉白度与粗蛋白、湿面筋呈极显著负相关($P < 0.01$),与容重呈极显著正相关($P < 0.01$),表明这些性状对彩色小麦品质影响较大。

以上结果表明,穗粒数、千粒重和穗数对产量提高有重要的作用,在追求彩色小麦产量的同时要注重产量与其构成三要素间的协调联系。适当提高穗长有利于增加穗粒数和小穗数,适当降低穗长有利于增加分蘖数,但二者通常难以协调,因此将大穗品种与大群体品种适当结合,有利于实现

表 2 彩色小麦种质主要农艺性状
Table 2 Main agronomic traits of colored wheat germplasms

| 代号 Code | 有效分蘖数 ETN | 株高 PH/cm | 穗长 SL/cm | 小穗数 SN | 穗数 NP/($\times 10^4 \cdot \text{hm}^{-2}$) | 穗粒数 KPS | 千粒重 TGW/g | 产量 GY/ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) | 生物量 Bio/ ($\times 10^4 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) | 收获指数 HI/% |
|--------------------|--------------|-------------|-------------|--------------|---|------------|--------------|---|--|--------------|
| WY202 | 5.7±0.58cd | 71.7±1.53j | 7.7±0.58fg | 20.7±1.53ab | 560.0±5.00e | 48.3±0.58b | 31.13±0.12i | 6 975.80±163.93c | 1.92±0.03cd | 36.39±0.39d |
| XC3 | 5.0±0.00de | 102.7±2.52c | 10.7±0.29d | 20.3±0.58abc | 594.0±5.29d | 45.0±1.00d | 34.52±0.53g | 7 502.65±177.30b | 1.96±0.07bc | 38.36±1.14c |
| H07H | 5.7±0.58cd | 70.3±0.58j | 8.3±0.58ef | 17.7±0.58def | 492.7±6.11gh | 44.0±1.00d | 32.22±0.19h | 5 826.25±146.33e | 1.76±0.03h | 33.05±1.11e |
| XH-1 | 5.0±0.00de | 96.3±1.53de | 10.3±0.58d | 17.0±2.00efg | 480.4±6.51i | 42.3±0.58e | 29.16±0.14k | 4 980.25±171.79g | 1.92±0.05cd | 25.95±1.17gh |
| XH-2 | 6.7±0.58ab | 93.7±1.53e | 11.5±0.50c | 21.7±1.15a | 488.0±6.08hi | 48.7±0.58b | 28.23±0.20l | 5 533.30±178.39f | 1.87±0.03def | 29.60±1.33f |
| DH-1 | 6.7±0.58ab | 75.0±2.00i | 5.7±0.58h | 17.0±0.00efg | 453.4±5.77j | 41.3±0.58e | 31.07±0.05i | 4 820.10±198.66g | 1.79±0.03gh | 26.99±1.57g |
| LZM1 | 6.0±0.00bc | 107.7±2.52b | 10.5±0.50d | 14.7±1.15h | 479.0±5.29i | 38.3±0.58g | 31.17±0.14i | 4 749.05±171.05g | 1.95±0.01bc | 24.35±0.83h |
| XC007 | 5.7±0.58cd | 112.3±2.52a | 8.8±0.29e | 16.3±0.58fgh | 508.7±7.09f | 41.3±0.58e | 37.99±0.05d | 6 597.15±149.36d | 1.95±0.04bc | 33.78±1.16e |
| LHM2 | 6.3±0.58abc | 75.7±1.53i | 10.4±0.40d | 18.7±1.15cde | 486.7±5.77hi | 40.0±1.00f | 30.41±0.16j | 4 865.75±174.66g | 1.80±0.02gh | 26.98±1.29g |
| XH88 | 3.7±0.58f | 87.0±2.00fg | 14.4±0.40a | 18.7±0.58cde | 356.4±5.69k | 52.3±0.58a | 42.50±0.05a | 6 535.15±166.37d | 1.89±0.04de | 34.66±1.52e |
| ZY5 | 7.0±0.00a | 90.0±2.00f | 8.3±0.58ef | 16.0±1.00fgh | 662.4±4.73a | 44.3±0.58d | 35.05±0.06f | 8 507.95±173.26a | 2.03±0.03a | 41.98±0.34a |
| XC18 | 4.7±0.58e | 106.3±1.53b | 12.5±0.50b | 18.7±1.15cde | 500.0±6.00fg | 46.3±0.58c | 30.13±0.09j | 5 764.15±186.05ef | 1.98±0.02ab | 29.11±1.07f |
| YH1 | 6.0±0.00bc | 76.3±1.53i | 7.0±0.50g | 15.7±0.58gh | 589.4±5.77d | 41.3±0.58e | 37.08±0.14e | 7 171.45±157.97c | 1.82±0.03fg | 39.40±0.81bc |
| ZY11 | 5.7±0.58cd | 97.7±2.52d | 8.0±0.00ef | 19.0±1.00bcd | 591.7±5.77d | 44.3±0.58d | 35.22±0.29f | 7 632.20±170.05b | 1.95±0.02bc | 39.07±0.86bc |
| PB151 | 6.7±0.58ab | 86.3±0.58g | 11.1±0.31cd | 21.7±0.58a | 621.4±1.15c | 47.7±0.58b | 40.49±0.19b | 8 660.57±110.67a | 1.84±0.02efg | 39.00±1.00c |
| XX511 | 6.7±0.58ab | 79.7±0.58h | 8.4±0.32ef | 20.3±0.58abc | 631.4±1.51b | 48.3±0.58b | 39.66±0.22c | 8 775.14±122.48a | 1.80±0.01gh | 41.00±1.00ab |
| 平均值±标准差 Mean±SD | 5.8±0.96 | 89.3±13.48 | 9.6±2.22 | 18.4±2.27 | 530.7±78.38 | 44.3±3.74 | 34.12±4.28 | 6 556.06±1381.26 | 1.89±0.08 | 33.73±1.04 |
| 变异系数 CV | 0.17 | 0.15 | 0.23 | 0.12 | 0.15 | 0.08 | 0.13 | 0.21 | 0.04 | 0.03 |

品种代号同表 1; ETN:有效分蘖数; PH:株高; SL:穗长; SN:小穗数; NP:穗数; KPS:穗粒数; TGW:千粒重; GY:产量; HI:收获指数; 图 1、表 7 和 8 同。同一列中不同小写字母表示不同材料间在 0.05 水平上差异显著。表 3 同。

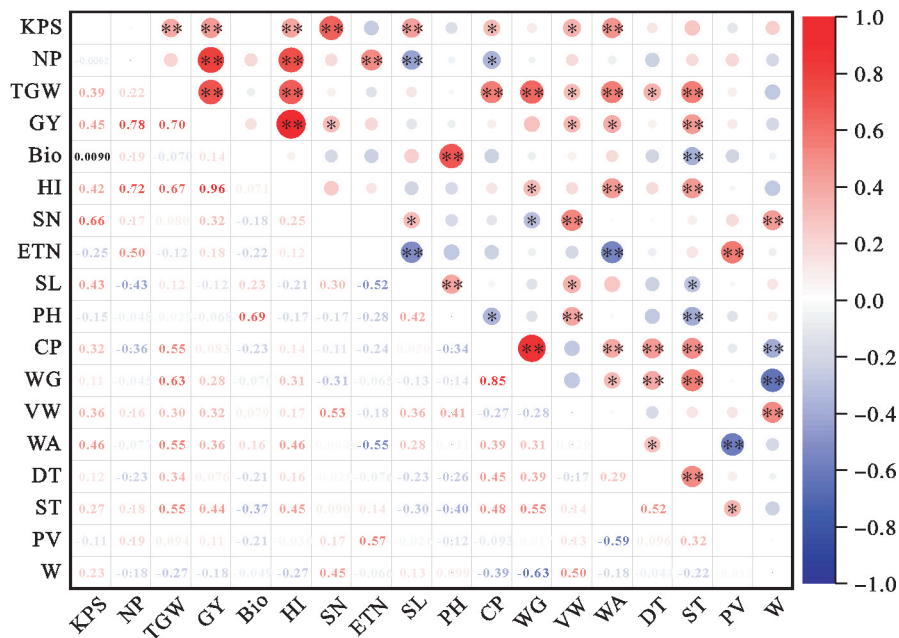
The codes of varieties are as same in table 1; ETN: Effective tiller number; PH: Plant height; SL: Spike length; SN: Spikelet number; NP: Number of panicles; KPS: Kernel number per spike; TGW: 1 000-grain weight; GY: Grain yield; Bio: Biomass; HI: Harvest index; The same in figure 1, table 7 and table 8. Different letters in the same column indicate that the means are significantly different among different materials at 0.05 level. The same in table 3.

表 3 彩色小麦种质营养成分分析
Table 3 Nutritional quality of colored wheat germplasms

| 代号 Code | 粗蛋白 CP/% | 容重 VW/(g·L ⁻¹) | 湿面筋含量 WG/% | 吸水率 WA/% | 形成时间 DT/min | 稳定时间 ST/min | 峰值粘度 PV/cP | 面粉白度 W | Ca/ (mg·kg ⁻¹) | Mg/ (mg·kg ⁻¹) | Fe/ (mg·kg ⁻¹) | Zn/ (mg·kg ⁻¹) | Se/ (mg·kg ⁻¹) |
|------------------------|---------------|-------------------------------|---------------|--------------|----------------|----------------|---------------|--------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| WY202 | 14.23±0.15c | 729.33±1.15h | 28.52±0.34f | 61.43±0.40f | 3.37±0.15cd | 4.43±0.60d | 781.00±2.65j | 82.18±0.09a | 770.61±1.65d | 547.64±1.46h | 51.67±0.20b | 17.90±0.73hi | 0.03±0.00def |
| XC3 | 12.17±0.23g | 807.67±2.52b | 25.52±0.34i | 64.67±0.50bc | 2.00±0.20e | 2.53±0.15ef | 337.67±2.52n | 82.42±0.17a | 463.84±1.21m | 523.48±1.56i | 52.22±0.06b | 14.91±0.13j | 0.02±0.00gh |
| H07H | 13.33±0.51de | 701.00±3.61j | 27.41±0.20g | 64.93±0.51bc | 5.87±0.35ab | 4.77±0.25d | 439.33±3.06l | 81.18±0.04c | 552.66±1.72i | 630.71±1.29g | 51.89±1.48b | 19.00±0.83g | 0.03±0.00efg |
| XH-1 | 12.67±0.64fg | 778.00±2.65d | 26.47±0.30h | 64.33±0.21cd | 1.73±0.31e | 1.43±0.21g | 373.00±4.58m | 82.33±0.21a | 830.30±1.16b | 524.48±1.42i | 48.11±0.59c | 19.58±0.13g | 0.10±0.00b |
| XH-2 | 12.30±0.20g | 761.67±2.89e | 25.45±0.22i | 60.67±0.80g | 1.97±0.35e | 2.23±0.15f | 1146.00±4.00e | 82.16±0.41a | 574.47±2.22h | 424.25±1.97m | 49.02±0.48c | 17.26±0.57i | 0.13±0.00a |
| DH-1 | 15.63±0.12b | 702.67±4.62j | 31.39±0.24c | 60.20±0.30g | 5.93±0.21ab | 5.50±0.79c | 865.00±5.00i | 81.56±0.34bc | 482.89±1.82k | 513.71±2.27j | 45.04±0.96d | 18.10±0.10h | 0.04±0.00de |
| LZM1 | 12.77±0.23efg | 741.67±2.89g | 27.45±0.27g | 57.97±0.21i | 1.50±0.10e | 2.50±0.10ef | 1431.67±3.51d | 81.12±0.17c | 422.62±2.19n | 480.90±2.40k | 22.84±0.39f | 13.63±0.25k | 0.03±0.01g |
| XC007 | 14.33±0.50c | 761.00±3.61e | 32.49±0.20b | 63.10±0.30e | 5.43±0.55b | 4.80±0.36d | 940.67±4.04h | 80.46±0.27d | 800.96±2.55c | 678.70±1.87d | 48.60±1.02c | 20.81±0.25f | 0.03±0.01fg |
| LHM2 | 13.90±0.00ed | 717.67±2.52i | 28.61±0.28f | 58.73±0.25h | 3.83±0.87c | 4.37±0.51d | 2013.33±4.93a | 79.29±0.40e | 389.10±2.28o | 675.20±1.75e | 44.10±0.46d | 32.95±0.61a | 0.01±0.00i |
| XH88 | 17.60±0.26a | 752.67±4.04f | 33.39±0.22a | 70.30±0.66a | 6.13±0.50a | 6.40±0.36b | 596.67±3.06k | 80.27±0.19d | 721.64±2.77f | 645.72±1.50f | 55.37±0.29a | 24.38±0.19c | 0.04±0.00de |
| ZY5 | 13.90±0.20cd | 677.00±2.65k | 31.21±0.08c | 64.83±0.35bc | 3.87±0.12c | 4.33±0.15d | 1111.33±4.16f | 78.66±0.16f | 968.90±2.13a | 752.00±2.38c | 54.30±0.25a | 23.48±0.52d | 0.07±0.00cd |
| XC18 | 14.30±0.17c | 744.33±4.04g | 30.55±0.10d | 62.83±0.47e | 1.83±0.21e | 2.47±0.31ef | 234.67±3.06p | 79.49±0.28e | 621.35±2.22g | 525.51±2.91i | 44.44±0.84d | 23.84±0.36d | 0.04±0.01d |
| YH1 | 15.17±0.29b | 701.67±2.89j | 32.56±0.08b | 65.27±0.31b | 1.50±0.10e | 4.53±0.15d | 267.00±4.58o | 77.39±0.28g | 545.83±2.37j | 865.50±2.03a | 45.05±0.99d | 22.01±0.20e | 0.03±0.00fg |
| ZY11 | 13.17±0.38ef | 779.67±4.51d | 28.51±0.28f | 64.93±0.31bc | 6.33±0.31a | 5.60±0.10c | 1038.67±5.03g | 80.25±0.20d | 733.24±2.33e | 547.38±1.52h | 51.19±0.64b | 30.40±0.17b | 0.02±0.01hi |
| PB151 | 13.90±0.53cd | 793.33±3.06e | 29.20±0.89e | 63.87±0.60d | 2.80±0.20d | 3.00±0.10e | 1490.00±5.57c | 81.71±0.23b | 485.13±1.60l | 790.83±1.66b | 37.73±0.44e | 24.55±0.02c | 0.04±0.01de |
| XN511 | 14.50±0.20cd | 816.67±2.89a | 31.45±0.29c | 60.33±0.42g | 3.77±0.15c | 11.70±0.26a | 1664.00±4.00b | 80.67±0.40d | 463.17±2.20m | 431.49±2.64l | 38.69±0.50e | 13.81±0.07k | 0.02±0.00gh |
| 平均值± 标准差 Mean±SD | 13.99±1.37 | 747.88±40.34 | 29.39±2.51 | 63.03±3.02 | 3.62±1.80 | 4.41±2.37 | 920.63±525.74 | 80.70±1.43 | 614.79±166.03 | 597.34±125.91 | 46.27±7.91 | 21.04±5.38 | 0.04±0.03 |
| 变异系数 CV | 0.10 | 0.05 | 0.09 | 0.05 | 0.49 | 0.54 | 0.57 | 0.02 | 0.27 | 0.21 | 0.17 | 0.26 | 0.75 |

CP: 粗蛋白; VW: 容重; WG: 湿面筋含量; WA: 吸水率; DT: 形成时间; ST: 稳定时间; PV: 峰值粘度; W: 面粉白度; 图 1 和表 7 同。

CP: Crude protein; VW: Test weight; WG: Wet gluten content; WA: Water absorption; DT: Dough development time; ST: Stability time; PV: Peak viscosity; W: Whiteness; The same in figure 1 and table 7.



* : $P < 0.05$; ** : $P < 0.01$.

图 1 彩色小麦种质主要农艺性状和营养品质的相关性

Fig. 1 Correlations between main agronomic traits and nutritional quality of colored wheat germplasm

增产。适当提升穗粒数和千粒重,有利于提高粗蛋白和湿面筋含量,而适当降低穗数有利于粗蛋白的积累,培育高产优质品种要兼顾考虑,做好协调平衡。

2.4 彩色小麦种质 HMW-GS 组成类型及品质评分

如图 2 和表 4 所示, *Glu-1* 共出现了 8 种亚基类型,其中 *Glu-A1* 位点出现 3 种: Null、1 和 2*, 以优质亚基 1 为主; *Glu-B1* 位点检测出 3 种: 7+8、7+9、14+15, 以 7+9 亚基和优质 7+8 亚基为主; *Glu-D1* 位点共检测出 2 种: 2+12 和 5+10, 以优质亚基 5+10 为主。

由表 5 可知,彩色小麦种质 HMW-GS 共检测出 7 种亚基组合 (Null/7+9/2+12、1/7+8/2+12、1/7+8/5+10、1/7+9/2+12、1/14+15/5+10、2*/7+8/5+10、2*/7+9/5+10), 其中出现频率最高的亚基组合是 1/7+8/5+10, 共 4 份种质, 占比为 28.57%。供试种质品质得分范围为 5~10, 平均得分 8.4, 其中评分为 10 的亚基组合有 3 组 (1/7+8/5+10、1/14+15/5+10、2*/7+8/5+10), 共 7 份种质 (WY202、DH-1、XC007、ZY11、H07H、YH1、LHM2), 占比为 50.00%; 仅 XH88 的品质评分为 9 分, 亚基组合为 2*/7+9/5+10。

综上所述,有 11 份彩麦种质 (DH-1、XC007、

ZY11、H07H、YH1、LHM2、WY202、LZM1、ZY5、XC18、XH88) 亚基组合评分大于 8, 为优质亚基组合; 其中 7 份种质的亚基组合评分达到 10 分, 高于白麦, H07H、和 YH1 出现稀有优质亚基 14+15, 这些含有优质亚基的种质可为彩色小麦品质改良提供优异的遗传材料。

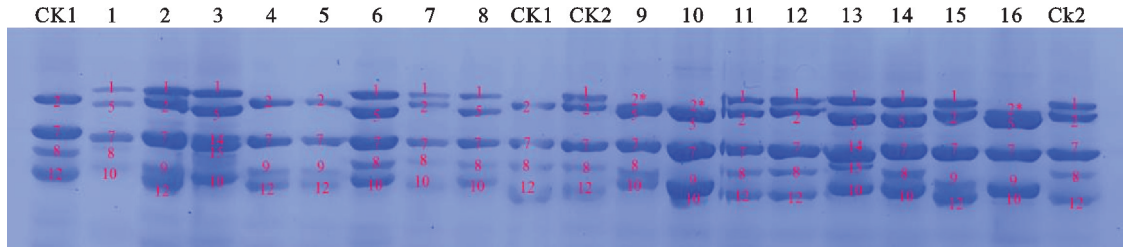
2.5 彩色小麦种质主要农艺性状和营养品质的主成分分析

2.5.1 18 个主要性状的主成分因子选择

由表 6 可知, 选取前 5 个主成分作为综合评价指标。其中, PC1 的特征值为 4.65, 方差贡献

表 4 彩色小麦种质 HMW-GS 等位变异及频率
Table 4 Variation and frequency of HMW-GS alleles in colored wheat germplasm

| 位点 Locus | 亚基类型 Subunit types | 种质数量 Number of germplasm | 频率 Frequency/% |
|---------------|-----------------------|--------------------------------|-------------------|
| <i>Glu-A1</i> | Null | 2 | 14.29 |
| | 1 | 10 | 71.42 |
| | 2* | 2 | 14.29 |
| <i>Glu-B1</i> | 7+8 | 8 | 57.14 |
| | 7+9 | 4 | 28.57 |
| | 14+15 | 2 | 14.29 |
| <i>Glu-D1</i> | 2+12 | 6 | 42.86 |
| | 5+10 | 8 | 57.14 |



CK1:中国春 Chinese spring;CK2:西农 979 Xinong 979; 1: WY202; 2: XC3; 3: H07H; 4: XH-1; 5: XH-2; 6: DH-1; 7: LZM1; 8: XC007; 9: LHM2; 10: XH88; 11: ZY5; 12: XC18; 13: YH1; 14: ZY11; 15: PB151; 16: XN511.

图 2 彩色小麦种质 HMW-GS 的 SDS-PAGE 图谱

Fig. 2 SDS-PAGE patterns of HMW-GS in colored wheat germplasm

表 5 彩色小麦种质 HMW-GS 组合类型及品质得分

Table 5 Type and quality score of HMW-GS combination of colored wheat germplasm

| 位点 Locus | | | 种质数量 Number of germplasm | 频率 Frequency/% | 品质得分 Quality score |
|---------------|---------------|---------------|-----------------------------|-------------------|-----------------------|
| <i>Glu-A1</i> | <i>Glu-B1</i> | <i>Glu-D1</i> | | | |
| Null | 7+9 | 2+12 | 2 | 14.29 | 5 |
| 1 | 7+8 | 2+12 | 3 | 21.43 | 8 |
| 1 | 7+8 | 5+10 | 4 | 28.57 | 10 |
| 1 | 7+9 | 2+12 | 1 | 7.14 | 7 |
| 1 | 14+15 | 5+10 | 2 | 14.29 | 10 |
| 2* | 7+8 | 5+10 | 1 | 7.14 | 10 |
| 2* | 7+9 | 5+10 | 1 | 7.14 | 9 |

表 6 18 个主要性状特征值大于 1 的方差总解释

Table 6 Total variance explanation of the 18 main characters with eigenvalue greater than 1

| 主成分 Principal component | 初始特征值 Initial eigenvalue | | |
|----------------------------|--------------------------|---------------------------------------|---|
| | 总计 Total | 方差贡献率 Variance contribution rate/% | 累积贡献率 Accumulative contribution rate/% |
| PC1 | 4.65 | 25.82 | 25.82 |
| PC2 | 3.28 | 18.24 | 44.07 |
| PC3 | 3.12 | 17.35 | 61.42 |
| PC4 | 2.27 | 12.62 | 74.04 |
| PC5 | 1.38 | 7.66 | 81.70 |

率为 25.82%；PC2 的特征值为 3.28，方差贡献率为 18.24%；PC3 的特征值为 3.12，方差贡献率为 17.35%。前 5 个主成分的累计贡献率为 81.70%，表明前 5 个主成分可以解释原始数据大部分信息。

由表 7 可知，第 1 主成分主要包括千粒重、收获指数、产量、湿面筋、粗蛋白和稳定时间，向量关系表明，千粒重越大则收获指数、产量越大；粗蛋白和湿面筋含量越多，则稳定时间越长，因此称为农艺与品质相关因子。第 2 主成分主要包括穗长、穗粒数和小穗数，向量关系表明穗子越长、小穗数越多则穗粒数越多，因此称为穗部相关因子；第 3 主成分主要包括有效分蘖数和产量，向量关

系表明有效分蘖数越多产量越大，因此称为产量相关因子。上述表明，5 个主成分所对应的特征向量的大小和方向体现了农艺性状、营养品质相互作用与影响，可为彩色小麦育种提供思路。

2.5.2 农艺性状和营养品质的综合评价结果

利用特征值、特征向量计算出各个性状的系数，将原始数据标准化，计算出小麦各个主成分因子得分。方差贡献率作为综合评价的系数，与对应各项主成分得分相乘后，将各个成分求和得出综合得分模型： $F = 0.26Y_1 + 0.18Y_2 + 0.17Y_3 + 0.13Y_4 + 0.08Y_5$ 。

由表 8 可知,综合得分大于 0 的彩色小麦种质依次为,XH88(0.57) > ZY11(0.49) > XC3(0.34) > WY202(0.23) > ZY5(0.03)。彩色小麦种质综合得分均低于 2 份白麦材料,彩麦种质 XH88、ZY11、XC3 的综合表现比较好,其中 XH88 的穗粒数、千粒重、稳定时间、粗蛋白和湿面筋含量表

现优异,但有效分蘖数一般;ZY11 的形成时间与吸水率表现优异,但粗蛋白含量较低;XC3 的小穗数、容重和面粉白度表现优异,但千粒重较低。综上所述,XH88、ZY11 和 XC3 是综合性状表现优异的种质,在农艺和品质性状改良方面有较高的利用价值。

表 7 18 个性状前 5 个主成分所对应的特征向量

Table 7 Feature vectors corresponding to the first five principal components of the 18 traits

| 主要性状 Major character | 第 1 主成分 PC1 | 第 2 主成分 PC2 | 第 3 主成分 PC3 | 第 4 主成分 PC4 | 第 5 主成分 PC5 |
|-------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 千粒重 TGW | 0.86 | 0.19 | -0.09 | -0.05 | 0.27 |
| 收获指数 HI | 0.80 | 0.25 | 0.36 | -0.29 | -0.22 |
| 产量 GY | 0.78 | 0.34 | 0.44 | -0.26 | -0.05 |
| 稳定时间 ST | 0.73 | -0.26 | 0.16 | 0.31 | 0.23 |
| 湿面筋 WG | 0.71 | -0.39 | -0.38 | -0.15 | 0.28 |
| 粗蛋白 CP | 0.63 | -0.30 | -0.57 | 0.21 | 0.12 |
| 形成时间 DT | 0.47 | -0.29 | -0.25 | 0.31 | 0.03 |
| 容重 VW | 0.07 | 0.75 | 0.26 | 0.22 | 0.32 |
| 穗长 SL | -0.13 | 0.64 | -0.43 | 0.17 | 0.34 |
| 穗粒数 KPS | 0.50 | 0.59 | -0.10 | 0.39 | -0.16 |
| 小穗数 SN | 0.16 | 0.58 | 0.34 | 0.57 | -0.14 |
| 穗数 NP | 0.35 | 0.11 | 0.78 | -0.46 | -0.14 |
| 有效分蘖数 ETN | 0.00 | -0.44 | 0.76 | 0.00 | 0.08 |
| 吸水率 WA | 0.53 | 0.37 | -0.55 | -0.20 | -0.35 |
| 生物量 Bio | -0.15 | 0.42 | -0.11 | -0.68 | 0.19 |
| 面粉白度 W | -0.40 | 0.47 | 0.18 | 0.51 | -0.14 |
| 峰值粘度 PV | 0.04 | -0.23 | 0.55 | 0.31 | 0.63 |
| 株高 PH | -0.34 | 0.50 | -0.16 | -0.49 | 0.50 |

表 8 主成分因子及综合得分

Table 8 Principal component factors and composite score

| 代号 Code | 主成分 1 Y ₁ | 主成分 2 Y ₂ | 主成分 3 Y ₃ | 主成分 4 Y ₄ | 主成分 5 Y ₅ | 综合得分(F) Comprehensive score |
|------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------------|
| XN511 | 3.54 | 0.07 | 2.85 | 1.53 | 1.36 | 1.72 |
| PB151 | 1.62 | 1.92 | 2.06 | 0.73 | 0.32 | 1.24 |
| XH88 | 3.35 | 1.50 | -4.89 | 1.60 | 0.66 | 0.57 |
| ZY11 | 1.17 | 0.73 | 0.83 | -0.75 | 0.08 | 0.49 |
| XC3 | -0.90 | 3.42 | 0.79 | -0.85 | -0.86 | 0.34 |
| WY202 | 0.15 | 0.28 | 0.89 | 0.90 | -1.58 | 0.23 |
| ZY5 | 1.77 | -1.06 | 1.12 | -3.14 | -0.27 | 0.03 |
| XH-2 | -2.58 | 1.55 | 1.22 | 1.59 | -0.26 | 0.00 |
| XC007 | 0.57 | -0.37 | -0.87 | -1.31 | 1.67 | -0.10 |
| YH1 | 1.83 | -2.25 | -0.46 | -2.15 | -1.29 | -0.39 |
| H07H | -0.21 | -1.37 | -0.54 | 1.21 | -2.19 | -0.41 |
| LHM2 | -1.58 | -2.43 | 0.59 | 1.42 | 1.16 | -0.47 |
| XC18 | -1.34 | 1.25 | -2.05 | -1.12 | 0.31 | -0.59 |
| DH-1 | -0.51 | -3.53 | -0.51 | 1.58 | -0.43 | -0.68 |
| XH-1 | -3.17 | 1.16 | -1.04 | -0.27 | -0.67 | -0.88 |
| LZM1 | -3.72 | -0.87 | 0.03 | -0.99 | 2.00 | -1.09 |

3 讨论

随着人们的生活水平提高,饮食结构从温饱型向功能营养型转变^[18]。彩色小麦作为中国优质小麦资源,其蛋白质含量高,富含矿质营养、膳食纤维、花色苷等,具有巨大的开发潜力^[19]。近年来彩色小麦发展迅速,中国已育成了61个彩色小麦品种和19份彩色小麦种质新资源^[2]。农艺与品质性状间的不平衡,阻碍了彩色小麦的进一步发展^[20]。因此,本研究通过比较彩色小麦与普通白麦农艺性状和营养品质,筛选出优于白麦的彩色小麦种质;并根据相关性分析,分析彩色小麦种质间各性状的关系;利用主成分分析,筛选出综合性状优良的彩色小麦种质,为彩色小麦资源利用和遗传改良提供理论参考。

彩色小麦农艺性状及产量构成因素方面,种质间变异类型丰富。白建军等^[21]对10份黑小麦种质的农艺性状研究表明,7个农艺性状的变异系数范围为6.74%~21.44%。任文斌等^[22]对30份彩色小麦的农艺性状分析表明,6个农艺性状的变异系数范围为7.70%~17.60%。本研究结果表明彩色小麦种质10个农艺性状变异系数在3.00%~23.00%之间,这与前人研究结果存在差异,这些差异可能来自材料自身的特性和农艺性状统计类型的不同。本研究发现,彩色小麦产量与产量构成三要素存在紧密联系,其中穗数与产量相关性最大,这与任文斌等^[22]和马娟娟等^[23]研究结果一致。因此,在品种选育过程中,应适当选用多穗型彩色小麦品种,作为提高彩色小麦产量的基础。

在彩色小麦营养品质方面,种质变异类型丰富。本研究中彩色小麦粗蛋白、湿面筋含量和容重的变异系数范围为5.00%~10.00%,变异系数较低,种质较稳定,与张敏敏等^[4]的研究结果不一致,可能与供试种质的数量和来源有关。彩色小麦种质的形成时间为1.50~6.33 min,稳定时间为1.43~6.40 min;与高向阳等^[24]的研究结果基本一致。矿质营养元素含量作为彩色小麦的重要指标之一,备受人们关注。李杏普等^[25]对来自不同国家的13个蓝、黑粒小麦品种籽粒微量元素进行分析,发现多数蓝或紫粒小麦的铜、铁、锰和锌含量高于白粒对照;何一哲等^[26]分析秦黑1号的矿质营养元素发现,铁、锌、锰、铜、硒、镁、钾和磷等矿质元素含量高于普通白麦;Guo等^[27]研究

认为紫色小麦锌、铁、镁和钾的含量高于对照白麦,紫小麦在营养含量上比普通白麦有明显优势。本研究中大多数彩色小麦钙、铁含量高于白麦对照,但大部分彩麦的镁、锌和硒含量低于对照白麦;这与李杏普等^[25]、何一哲等^[26]、Guo等^[27]结果不一致,可能是小麦种植地理环境差异所导致。

关于高分子谷蛋白方面,王艳丽等^[28]对蓝粒小麦衍生后代进行检测,共发现18种亚基组合类型,以Null/20/2+12为主;Šudyová等^[29]在不同国家的21个彩色小麦中检测出10种亚基类型和12种亚基组合,其中*Glu-A1*位点上,以优质亚基1为主,*Glu-B1*位点上以优质亚基7+8为主,并检测出稀有优质亚基17+18,*Glu-D1*位点以2+12亚基为主。本研究表明,彩色小麦种质在*Glu-1*染色体上共出现了8种亚基类型和7种亚基组合,*Glu-A1*位点上以优质亚基1为主,*Glu-B1*位点上以优质亚基7+8和7+9为主,并检测出稀有优质亚基14+15,*Glu-D1*位点以5+10亚基为主;这与王艳丽等^[28]的研究结果不一致,这可能是前人所用材料仅为蓝粒后代导致;与Šudyová等^[29]研究结果不同,这可能是前人所用彩麦来自不同国家导致。本研究表明,优质亚基组合1/7+8/5+10出现频率最高,这与程雪妮等^[30]的研究基本一致。这些优质亚基在品质性状改良方面有较高的利用价值,可应用于彩色小麦遗传改良研究。

主成分分析是一种降维的方法分析,利用降维后的综合因子来反映原来变量的信息量^[31]。张敏敏等^[4]对来自国内不同地区的56份彩麦品种利用主成分分析筛选出3份综合性状优良的品种,从6个性状中提取到3个主成分,累积贡献率为67.55%。袁青锋等^[32]对14个黑小麦品种进行主成分分析筛选出2份综合农艺性状优良品种,从8个主要农艺性状中提取到3个主成分,累积贡献率为89.60%,分别对应株高因子、穗数因子和穗长因子。本研究从14份彩色小麦种质中筛选出3份综合品质优良的种质,18个性状中提取到5个主成分,可解释81.70%信息,第1主成分为农艺与品质相关因子;第2主成分为穗部相关因子;第3主成分为产量相关因子。这与前人研究结果不一致,可能是材料的来源、种类、数量和研究性状不同导致。主成分所对应的特征向量的大小和方向体现了农艺性状与品质性状相互作用及影响,可为彩色小麦育种提供思路。

参考文献:

- [1]张正斌,徐萍,张锦鹏,等.彩色小麦种质资源在生物强化和功能食品应用中的研究进展[J].植物遗传资源学报,2022,23(6):1572.
ZHANG Z B,XU P,ZHANG J P,*et al.* Research progress in application of colored wheat germplasm resources in biofortification and functional foods [J]. *Journal of Plant Genetic Resources*,2022,23(6):1572.
- [2]徐萍,张正斌,张锦鹏,等.彩色小麦基因发掘和种质资源育种利用[J].植物遗传资源学报,2022,23(6):1549.
XU P,ZHANG Z B,ZHANG J P,*et al.* Gene discovery and germplasm resource breeding utilization of colored wheat [J]. *Journal of Plant Genetic Resources*,2022,23(6):1549.
- [3]PADHY A K,KAUR P,SINGH S,*et al.* Colored wheat and derived products:Key to global nutritional security [J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*,2024,64(7):1894.
- [4]张敏敏,闫秋艳,董飞,等.近25年我国审定的彩色小麦农艺性状及品质特征分析[J].植物遗传资源学报,2023,24(2):458.
ZHANG M M,YAN Q Y,DONG F,*et al.* Analysis of agronomic and quality characters of color-grained wheat in China in the past 25 years [J]. *Journal of Plant Genetic Resources*,2023,24(2):458.
- [5]王晓鸣,邱丽娟,景蕊莲,等.作物种质资源表型性状鉴定评价:现状与趋势[J].植物遗传资源学报,2022,23(1):12.
WANG X M,QU L J,JING R L,*et al.* Evaluation on phenotypic traits of crop germplasm:Status and development [J]. *Journal of Plant Genetic Resources*,2022,23(1):12.
- [6]朱紫鑫,张玉璐,贾靖,等.不同品种(系)彩色小麦干物质积累转运和产量形成分析[J].华北农学报,2023,38(5):128.
ZHU Z X,ZHANG Y L,JIA J,*et al.* Analysis of dry matter accumulation and remobilization,and yield formation in different varieties (lines) of colored-grain wheat [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*,2023,38(5):128.
- [7]任文斌,谢三刚,李素娟,等.蓝、紫粒糯小麦农艺性状比较分析[J].山西农业科学,2014,42(12):1239.
REN W B,XIE S G,LI S J,*et al.* Comparative Analysis of Agronomic Character in Blue-grained Waxy Wheat and Purple-grained Waxy Wheat [J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*,2014,42(12):1239.
- [8]王滢颖,王晗,李慧静.冀紫439黑小麦与济麦22普麦蛋白及加工品质的比较[J].食品研究与开发,2023,44(4):29.
WANG Y Y,WANG H,LI H J. Comparison of proteins and processing quality between Jizi 439 *Triticale* and Jimai 22 wheat [J]. *Food Research and Development*,2023,44(4):29.
- [9]ALI U,CHAUDHARY E,KAUR S,*et al.* Evaluation of anthocyanin rich color wheat lines (black,blue,purple) for their cake making quality [J]. *Journal of Cereal Science*,2023,113:103757.
- [10]张慧,李莉,张朝旭,等.彩色小麦籽粒营养成分成分的差异[J].云南农业大学学报(自然科学),2019,34(6):911.
ZHANG H,LI L,ZHANG C X,*et al.* Differences in nutritional functional components of color wheat grains [J]. *Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Science)*,2019,34(6):911.
- [11]金艳,宋全昊,宋佳静,等.69份小麦种质资源的综合性评价[J].中国农业科技导报,2024,26(2):33.
JIN Y,SONG Q H,SONG J J,*et al.* Comprehensive evaluation of 69 wheat germplasm resources [J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*,2024,26(2):33.
- [12]宋全昊,金艳,宋佳静,等.35份人工合成六倍体小麦的综合评价[J].作物杂志,2022(4):69.
SONG Q H,JIN Y,SONG J J,*et al.* Comprehensive evaluation of 35 synthetic hexaploid wheat cultivars [J]. *Crops*,2022(4):69.
- [13]倪永静,姜晓君,卢祖权,等.30份国内外小麦种质资源主要农艺性状的分析与评价[J].中国农学通报,2020,36(3):16.
NI Y J,JIANG X J,LU Z Q,*et al.* 30 worldwide wheat germplasm resources:Analysis and evaluation of main agronomic traits [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*,2020,36(3):16.
- [14]武琦,史华伟,王硕,等.彩粒小麦新品系主要农艺性状与产量的相关性分析[J].山西农业科学,2020,48(3):309.
WU Q,SHI H W,WANG S,*et al.* Correlation analysis of main agronomic traits and yield of new color grain wheat lines [J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*,2020,48(3):309.
- [15]李立会,李秀全,杨欣明.小麦种质资源描述规范和数据标准[M].北京:中国农业出版社,2006.
LI L H,LI X Q,YANG X M. Descriptors and data standard for germplasm resources of wheat [M]. Beijing:China Agriculture Press,2006.
- [16]张海龙,宋鹏博,张傲琰,等.57份陕西新育成小麦品种(系)HMW-GS组成及品质分析[J].麦类作物学报,2023,43(12):1578.
ZHANG H L,SONG P B,ZHANG A Y,*et al.* HMW-GS composition and quality analysis of 57 new Shaanxi wheat varieties(lines) [J]. *Journal of Triticeae Crops*,2023,43(12):1578.
- [17]PAYNE P I,NIGHTINGALE M A,KRATTIGER A F,*et al.* The relationship between HMW glutenin subunit composition and the bread-making quality of British-grown wheat varieties [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*,1987,40(1):51.
- [18]辛良杰.中国居民膳食结构升级、国际贸易与粮食安全[J].自然资源学报,2021,36(6):1469.
XIN L J. Dietary structure upgrade of China's residents,international trade and food security [J]. *Journal of Natural Resources*,2021,36(6):1469.
- [19]时玉晴,苏东民,陈志成.彩色小麦品质特性及其开发应用[J].粮食与油脂,2014,27(11):1.
SHI Y Q,SU D M,CHEN Z C. Quality characteristics of color wheat and it's application in food processing [J]. *Cereals*

- & *Oils*, 2014, 27(11): 1.
- [20] 张小燕, 高迢竹, 高向阳. 特殊粒色小麦研究进展[J]. 粮油食品科技, 2016, 24(4): 7.
ZHANG X Y, GAO Q Z, GAO X Y. Research progress on special color wheat [J]. *Science and Technology of Cereals, Oils and Foods*, 2016, 24(4): 7.
- [21] 白建军, 周生伟, 汤开东, 等. 黑小麦单株产量性状的相关性, 多元回归及通径分析[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(25): 15236.
BAI J J, ZHOU S W, TANG K D, *et al.* Correlation, multiple regression and path analysis of main agronomic characters influencing the yield of black wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2011, 39(25): 15236.
- [22] 任文斌, 谢三刚, 宋 昱, 等. 黑小麦农艺性状和品质性状分析[J]. 山西农业科学, 2010, 38(4): 11.
REN W B, XIE S G, SONG Y, *et al.* Analysis of agronomic and quality characters in black wheat [J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2010, 38(4): 11.
- [23] 马娟娟, 杨珍平, 夏 清, 等. 彩色小麦品种在晋中麦区产量与品质性状研究[J]. 山西农业科学, 2016, 44(11): 1615.
MA J J, YANG Z P, XIA Q, *et al.* Study on yield and quality traits of color wheat varieties in Jinzhong wheat area [J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2016, 44(11): 1615.
- [24] 高向阳, 王 翠, 冉慧慧, 等. 南阳彩色小麦面团拉伸性能测定及粉质评价研究初报[J]. 食品科学, 2006, 27(10): 32.
GAO X Y, WANG C, RAN H H, *et al.* Determination of Nanyang color wheat paste's tensility and evaluation of the powder quality [J]. *Food Science*, 2006, 27(10): 32.
- [25] 李杏普, 侯红军, 刘玉平, 等. 蓝、紫粒小麦的营养品质研究[J]. 华北农学报, 2002, 17(1): 21.
LI X P, HOU H J, LIU Y P, *et al.* Studies of grain nutritional quality on wheat with blue or purple kernels [J]. *Acta Agriculturae Boreal-Sinica*, 2002, 17(1): 21.
- [26] 何一哲, 宁军芬. 高铁锌小麦特异新种质“秦黑1号”的营养成分分析[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2003, 31(3): 87.
HE Y Z, NING J F. Analysis of nutrition composition in the special purple grain wheat “Qinhei No. 1” containing rich Fe and Zn [J]. *Journal of Northwest A & F University (Natural Science)*, 2003, 31(3): 87.
- [27] GUO Z F, ZHANG Z B, XU P, *et al.* Analysis of nutrient composition of purple wheat [J]. *Cereal Research Communications*, 2013, 41(2): 293.
- [28] 王艳丽, 隋建枢, 陈天青, 等. 蓝粒小麦育种衍生材料的改良及选育[J]. 种子, 2018, 37(7): 107.
WANG Y L, SUI J S, CHEN T Q, *et al.* Improvement and breeding of derivative materials from blue-grained wheat [J]. *Seed*, 2018, 37(7): 107.
- [29] GREGOVA E, ŠLIKOVÁ S, ŠUDYOVÁ V, *et al.* Characterization of gliadin and HMW glutenin protein composition in coloured wheat (*Triticum aestivum* L.) varieties [J]. *Journal of Food Sciences*, 2011, 5(4): 25.
- [30] 程雪妮, 李依明, 雷忠萍, 等. 九份紫色蓝色小麦的麦谷蛋白、醇溶蛋白和农艺性状分析[J]. 华北农学报, 2016, 31(5): 108.
CHENG X N, LI Y M, LEI Z P, *et al.* The analysis of glutenin, gliadin and agronomic traits for nine purple and blue grain wheat [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2016, 31(5): 108.
- [31] 薛 香, 郜庆炉, 杨忠强. 小麦品质性状的主成分分析[J]. 中国农学通报, 2011, 27(7): 38.
XUE X, GAO Q L, YANG Z Q. Principal components analysis on major quality traits of winter wheat [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2011, 27(7): 38.
- [32] 袁青锋, 郑新疆, 张 静, 等. 黑小麦主要农艺性状的相关性和主成分分析[J]. 安徽农业科学, 2015, 43(14): 36.
YUAN Q F, ZHENG X J, ZHANG J, *et al.* Principal component analysis on main agronomic traits of black wheat germplasm [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2015, 43(14): 36.