

沿淮地区小麦籽粒淀粉粒度分布与糊化特性分析

肖龙飞^{1,2}, 张培文¹, 李文阳¹, 李浩杰¹, 雍玉东¹, 张士雅¹, 张晓², 闫素辉¹

(1. 安徽科技学院农学院, 安徽凤阳 233100;

2. 江苏里下河地区农业科学研究所/农业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)

摘要: 为了解沿淮地区小麦籽粒淀粉粒度分布特征及其与糊化特性的关系, 于2020—2021年度和2021—2022年度, 以沿淮地区44个小麦品种为材料, 分析了小麦籽粒淀粉粒度分布特征、糊化特性及其相互关系。结果表明, 沿淮地区小麦籽粒B型淀粉粒体积分占比22.45%~45.06%, A型淀粉粒体积分占比54.94%~77.55%; B型淀粉粒表面积占比69.18%~84.45%, A型淀粉粒表面积占比15.55%~30.82%; B型淀粉粒数目占比99.76%~99.90%, A型淀粉粒数目占比0.10%~0.24%。2021年和2022年44个小麦品种的峰值黏度平均值分别为888.24和985.64 cP, 变异系数分别为18.11%和17.98%; 低谷黏度平均值分别为593.56和753.61 cP, 变异系数分别为17.35%和18.52%; 最终黏度平均值分别为1 215.37和1 486.40 cP, 变异系数分别为15.20%和15.91%。小麦糊化参数变异系数均大于10%, 其中稀懈值变异系数最大, 两个年度分别为38.10%和41.96%。经相关分析, B型淀粉粒体积分占比与峰值黏度呈极显著负相关($P < 0.01$); A型淀粉粒体积分占比与峰值黏度、稀懈值及低谷黏度呈极显著或显著($P < 0.05$)正相关。通过主成分分析, A型淀粉粒体积分占比、B型淀粉粒体积分占比对44个小麦品种PC1和PC2成分均有较高的贡献率。聚类分析, 44个小麦品种可分为三类, 第一类小麦品种B型淀粉粒体积分占比最小, 峰值黏度最高, 最终黏度次于第三类, 包括扬麦13、生选6号2个品种; 第二类小麦品种B型淀粉粒体积分占比最大, 峰值黏度、最终黏度均低于第一类和第三类, 包括西农979、鲁原502等11个品种; 第三类小麦品种B型淀粉粒体积分占比介于第一类和第二类之间, 峰值黏度、最终黏度较高, 包括扬麦20、德研8号等31个品种。

关键词: 小麦; 淀粉粒; 粒度分布; 糊化参数

中图分类号: S512.1; S311

文献标识码: A

文章编号: 1009-1041(2025)07-0932-10

Analysis of Starch Granule Size Distribution and Pasting Properties of Wheat Grain in Huai River Region

XIAO Longfei^{1,2}, ZHANG Peiwen¹, LI Wenyang¹, LI Haojie¹, YONG Yudong¹,
ZHANG Shiya¹, ZHANG Xiao², YAN Suhui¹

(1. College of Agronomy, Anhui Science and Technology University, Fengyang, Anhui 233100, China; 2. Jiangsu Lixiahe Institute of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Wheat Biology and Genetic Breeding in the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River, Yangzhou, Jiangsu 225007, China)

Abstract: In order to understand the relationship between starch particle size distribution and pasting properties of wheat grains, 44 wheat varieties were used as materials in 2020—2021 and 2021—2022 to analyze the characteristics of starch particle size distribution, pasting properties and their relationship in wheat grains along the Huai River. The results showed that the volume of B-type starch granules accounted for 22.45%—45.06%, and the volume of A-type starch granules accounted for 54.94%—77.55% in wheat grains along the Huai River. The surface area of B-type starch granules accounted

收稿日期: 2024-08-19 修回日期: 2024-10-22

基金项目: 安徽省科技特派员项目(2023tpt035); 安徽省现代农业产业技术体系建设专项(小麦); 安徽自然科学基金项目(1408085MC48); 安徽省高校协同创新项目(GXXT-2021-089)

第一作者 E-mail: 2898864667@qq.com(肖龙飞)

通讯作者 E-mail: yansh@ahstu.edu.cn(闫素辉); zhangxiao820218@163.com(张晓)

for 69.18%—84.45%, and the surface area of A-type starch granules accounted for 15.55%—30.82%. The number of B-type starch granules accounted for 99.76%—99.90%, and the number of A-type starch granules accounted for 0.10%—0.24%. The average peak viscosity of wheat in 2020—2021 and 2021—2022 were 888.24 and 985.64 cP, respectively, and the coefficient of variation were 18.11% and 17.98%, respectively. The average trough viscosity were 593.56 and 753.61 cP, respectively, and the coefficient of variation were 17.35% and 18.52%, respectively. The average values of final viscosity were 1 215.37 and 1 486.40 cP, and the variation coefficients were 15.20% and 15.91%, respectively. The coefficient of variation of wheat pasting parameters was greater than 10%, and the coefficient of variation of breakdown was the largest, which was 38.10% and 41.96%, respectively. Correlation analysis showed that the volume proportion of B-type starch granules was significant negatively correlated with peak viscosity($P < 0.01$). The volume proportion of A-type starch granules was significant positively correlated with peak viscosity, breakdown and trough viscosity($P < 0.05$). The results of principal component analysis showed that the proportion of A-type starch granule volume and B-type starch granule volume had a higher contribution rate to PC1 and PC2 components of the 44 wheat varieties. The results of cluster analysis showed that the 44 wheat varieties can be divided into three categories. The volume proportion of B-type starch granules in the first category of wheat varieties was the smallest, while the peak viscosity was the highest, and the final viscosity was second to the third category, including Yangmai 13 and Shengxuan 6. The second type of wheat varieties accounted for the largest proportion of B-type starch granule volume, and the peak viscosity and final viscosity were lower than those of the first and third types, including 11 wheat varieties such as Xinnong 979 and Luyuan 502. The proportion of B-type starch granule volume in the third type of wheat varieties was between the first and second types, and the peak viscosity and final viscosity were higher, including 31 wheat varieties such as Yangmai 20 and Deyan 8.

Keywords: Wheat; Granules; Size distribution; Pasting Properties

淀粉在小麦籽粒化学成分中占比最大,约占籽粒干重的 2/3,是决定小麦产量与品质的重要因素之一^[1-3]。按形状、大小可将小麦籽粒淀粉粒划分为两种类型,粒径 $> 10 \mu\text{m}$ 的饼型淀粉粒为 A 型,粒径 $\leq 10 \mu\text{m}$ 的椭圆形淀粉粒称为 B 型;A 型淀粉粒较大,呈透镜形,直径多为 10~35 μm ,B 型淀粉粒较小,呈球形,直径多为 2~10 μm ,约占总数量的 90%以上^[4-7]。B 型淀粉粒体积小、数量多,表面积相对较大,从而可结合更多的蛋白质、直链淀粉、脂类和水,面团吸水率高,而 A 型淀粉粒则相反;不同类型淀粉粒的占比对面团流变学特性有重要影响^[8]。有研究认为,增大 A 型淀粉粒的比例后,面粉的峰值黏度、最终黏度、稀懈值和回升值增加^[9];小麦大、小淀粉粒具有不同的结构和理化特性,其占比不同引起淀粉糊化特性存在差异,进而影响小麦粉在食品及其他行业中的应用^[10-11]。

淀粉糊化是指在加热过程中,淀粉吸水膨胀,颗粒结构由有序结构转变为无序结构的过程。当

糊化后的淀粉冷却时,淀粉分子运动减慢,分散的直链淀粉和支链淀粉分子相互靠拢,以氢键重新结合,形成交联结构和局部结晶区,导致沉淀或凝胶的形成,这种现象为淀粉的回生或老化^[12-15]。糊化特性是衡量淀粉品质的重要指标,对其加工品质有直接影响,如较低的回升值可以降低面包老化速度,稀懈值降低可增强面包烘烤过程中的稳定性^[16];高峰值黏度及稀懈值面粉的面条品质较好^[17]。研究认为,面条品质与面粉糊化参数等性状呈极显著正相关^[18-19]。谭彩霞等^[20]研究认为,小麦粉峰值黏度、稀懈值表现为弱筋小麦 $>$ 中筋小麦 $>$ 强筋小麦 $>$ 糯小麦。

安徽省沿淮地区位于中国南北交界处,是中国小麦主产区之一^[21-23]。陈娟等^[24]于安徽省滁州市开展的研究表明,花后弱光可降低弱筋小麦籽粒 B 型淀粉粒体积和表面积占比,降低容重、产量和淀粉黏度参数。李浩杰等^[25]研究认为,施氮和增密可提高小麦 A 型淀粉粒占比,降低 B 型淀粉粒占比;施氮增加了淀粉黏度参数,增密降低

了淀粉黏度参数。王犇等^[26]研究表明,外源海藻糖降低了小麦籽粒蛋白质含量、湿面筋含量、形成时间、稳定时间及沉降值。有关沿淮地区单一或少数小麦品种淀粉粒品质方面的研究较多,但关于多种小麦品种淀粉理化特性的研究较为鲜见。为此,本研究以沿淮地区主推种植的44个小麦品种为材料,分析其籽粒淀粉粒度分布特征、糊化特性及其相互关系,以期小麦育种过程淀粉品质筛选和优质栽培提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料与设计

试验于2020—2021和2021—2022年在安徽科技学院农场内进行,以沿淮地区主推种植的44个小麦品种为材料(表1),包括扬麦13等弱筋小麦品种7份,百农207等中筋小麦品种25份,西农979等中强筋、强筋小麦品种12份。试验采用随机区组设计,小区面积为9 m²(3 m×3 m),行距0.25 m,重复3次。试验田前茬作物为玉米,

土壤类型为粘壤土,土壤耕层有机质、碱解氮、速效钾和速效磷含量分别为16.43 g·kg⁻¹、72.67 mg·kg⁻¹、96.14 mg·kg⁻¹和17.35 mg·kg⁻¹。氮、磷、钾肥分别为尿素(N 46%)、过磷酸钙(P₂O₅ 12%)、氯化钾(K₂O 60%)。磷肥、钾肥均全部底施,施用量分别为120 kg P₂O₅·hm⁻²和120 kg K₂O;总施氮量为225 kg·hm⁻²,基追比为7:3,追肥时期为拔节期。播种日期分别为2020年11月11日和2021年11月4日,收获日期分别为2021年6月1日和2022年5月31日,其他管理方法同当地常规大田生产。

1.2 测定项目与方法

1.2.1 淀粉糊化特性测定

每品种称取3 g面粉,放入铝桶中,加入25 mL蒸馏水,混匀后使用Perten公司的Starchmaster-2型快速黏度分析仪测定糊化参数。3次重复。

1.2.2 淀粉粒提取与粒径分析

参照Peng等^[5]方法提取淀粉。每品种称取2 g籽粒置于试管中,加入25 mL蒸馏水,浸泡8 h,

表1 供试小麦品种名称与品质类型
Table 1 Names and quality types of the tested wheat varieties

编号 Number	品种 Variety	品质类型 Quality type	编号 Number	品种 Variety	品质类型 Quality type
YM13	扬麦 13 Yangmai 13	弱筋 Weak gluten	ZM132	郑麦 132 Zhengmai 132	中强筋 Medium strong gluten
YM15	扬麦 15 Yangmai 15	弱筋 Weak gluten	HM168	恒麦 168 Hengmai 168	中筋 Medium gluten
YM22	扬麦 22 Yangmai 22	弱筋 Weak gluten	KM18	开麦 18 Kaimai 18	中筋 Medium gluten
YM19	扬麦 19 Yangmai 19	弱筋 Weak gluten	LM9908	漯麦 9908 Luomai 9908	中筋 Medium gluten
SX6	生选 6号 Shengxuan 6	弱筋 Weak gluten	ZM28	周麦 28 Zhoumai 28	中筋 Medium gluten
YM20	扬麦 20 Yangmai 20	弱筋 Weak gluten	XN979	西农 979 Xinong 979	强筋 Strong gluten
LY128	鲁研 128 Luyan 128	强筋 Strong gluten	HM44	淮麦 44 Huaimai 44	中筋 Medium gluten
JD104	俊达 104 Junda 104	中筋 Medium gluten	GM1	冠麦 1号 Guanmai 1	弱筋 Weak gluten
XM35	徐麦 35 Xumai 35	中强筋 Medium strong gluten	DY8	德研 8号 Deyan 8	强筋 Strong gluten
AN0711	安农 0711 Annong 0711	强筋 Strong gluten	PX8	濮兴 8号 Puxing 8	中筋 Medium gluten
QM31	泉麦 31 Quanmai 31	中筋 Medium gluten	LY502	鲁原 502 Luyuan 502	中筋 Medium gluten
WDM365	沃德麦 365 Wodemai 365	中筋 Medium gluten	ZM30	周麦 30号 Zhoumai 30	强筋 Strong gluten
BN207	百农 207 Bainong 207	中筋 Medium gluten	ZY9302	中育 9302 Zhongyu 9302	中筋 Medium gluten
YN982	豫农 982 Yunong 982	中筋 Medium gluten	FDCM1	丰德存麦 1号 Fengdecunmai 1	强筋 Strong gluten
XM9817	新麦 9817 Xinmai 9817	中筋 Medium gluten	AM1241	安麦 1241 Anmai 1241	中筋 Medium gluten
LM28	洛麦 28 Luomai 28	中筋 Medium gluten	LM26	洛麦 26 Luomai 26	中筋 Medium gluten
YM158	豫麦 158 Yumai 158	中筋 Medium gluten	TYKM5	天益科麦 5 Tianyikemai 5	中筋 Medium gluten
CM11	存麦 11 Cunmai 11	中筋 Medium gluten	HC2019	华成 2019 Huacheng 2019	强筋 Strong gluten
ZM578	中麦 578 Zhongmai 578	强筋 Strong gluten	HC863	华成 863 Huacheng 863	中筋 Medium gluten
YN035	豫农 035 Yunong 035	中筋 Medium gluten	HC5183	华成 5183 Huacheng 5183	中筋 Medium gluten
ZM583	郑麦 583 Zhengmai 583	强筋 Strong gluten	HC5155	华成 5155 Huacheng 5155	中强筋 Medium strong gluten
SDM1	赛德麦 1号 Saidemai 1	中筋 Medium gluten	WM52	皖麦 52号 Wanmai 52	中筋 Medium gluten

祛除种皮与胚乳在研钵中研磨匀浆,200 目筛,沉淀重复研磨 2~3 次;淀粉匀浆以 $3\ 000\ \text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 离心 10 min,去掉上清液,用 $5\ \text{mL}\ 2\ \text{mol} \cdot \text{L}^{-1}\ \text{NaCl}$ 、 $0.2\% \text{ NaOH}$ 、 $2\% \text{ SDS}$ 清洗 3 次后,用丙酮清洗 3 次,自然风干物为淀粉,置于 $-40\ ^\circ\text{C}$ 低温冷藏。使用 LS13320 衍射粒度分析仪(美国贝克曼库尔特公司生产)进行淀粉粒径分析。

1.3 数据分析

采用 Excel 2022 和 DPS 7.0 进行数据整理与分析,利用 Origin 2021 进行相关性分析、主成分分析与聚类分析并绘图。

2 结果与分析

2.1 供试小麦品种淀粉糊化参数分析

由表 2 可知,不同小麦品种面粉糊化参数的变异系数均大于 10%,其中稀懈值的变异系数两年均最大。44 个小麦品种 2021 年和 2022 年峰值黏度平均值分别为 888.24 和 985.64 cP,变化范围分别为 660.00~1 359.33 和 635.67~1 344.67 cP,变异系数分别为 18.11%和 17.98%。两年的低谷黏度平均值分别为 593.56 和 753.61 cP,变化范围分别为 411.00~750.67 和 475.00~975.00 cP,变异系数分别为 17.35%和 18.52%。两年的最终黏度平均值分别为 1 215.37 和 1 486.40 cP,变化范围分别为 873.33~1 482 和 992.33~1 781.33 cP,变异系数分别为 15.20%和 15.91%。稀懈值平均值分别为 292.59 和 232.04 cP,变化范围分别为 99.33~647.67 和 115.67~570.33 cP,变异系数分别为 38.10%和 41.96%。回升值

平均值分别为 633.26 和 732.80 cP,变化范围分别为 462.33~767.67 和 452.67~887.00 cP,变异系数分别为 13.67%和 15.93%。

2.2 供试小麦品种淀粉粒粒度分布

2.2.1 淀粉粒体积分布

两年供试小麦的 A 型淀粉粒体积占比均大于 B 型淀粉粒,2021 和 2022 年 B 型淀粉粒体积占比分别为 22.45%~36.75%和 27.01%~45.06%;A 型淀粉粒体积占比分别为 63.25%~77.55%和 54.94%~72.99%,其中粒径 $10\sim 22\ \mu\text{m}$ 的淀粉粒体积占比比较大,分别为 30.05%~43.78%和 26.36%~39.19%(表 3)。这表明 A 型淀粉粒对小麦籽粒淀粉粒体积贡献更大。

2.2.2 淀粉粒表面积分布

由表 4 可知,2021 和 2022 年供试小麦的 B 型淀粉粒表面积占比分别为 69.18%~81.21%和 74.80%~84.45%,A 型淀粉粒表面积占比分别为 18.79%~30.82%和 15.55%~25.20%;粒径 $>22\ \mu\text{m}$ 淀粉粒表面积占比变异系数最大。由此表明 B 型淀粉粒对小麦淀粉粒表面积贡献更大。

2.2.3 淀粉粒数目分布

由表 5 可以看出,两年供试小麦 A 型淀粉粒数目占比均大于 B 型淀粉粒。2021 和 2022 年不同小麦品种籽粒 B 型淀粉粒数目占比分别为 99.76%~99.89%和 99.85%~99.90%,A 型淀粉粒数目占比分别为 0.11%~0.24%和 0.10%~0.15%;粒径 $>22\ \mu\text{m}$ 淀粉粒变异系数最大,且两个年份表现一致。此结果说明小麦淀粉粒主要由 B 型淀粉粒组成。

表 2 供试小麦糊化参数的分析

Table 2 Analysis of gelatinization parameters of wheat

年度 Year	糊化参数 Gelatinization parameter	极差 Range	最小值 Minimum value	最大值 Maximum value	平均数 Average	变异系数 Coefficient of variation/%
2020—2021	峰值黏度 Peak viscosity/cP	925.00	660.00	1 359.33	888.24±160.85	18.11
	低谷黏度 Trough viscosity/cP	473.00	411.00	750.67	593.56±103.05	17.35
	最终黏度 Final viscosity/cP	850.00	873.33	1 482.00	1 215.37±184.94	15.20
	稀懈值 Breakdown/cP	599.00	99.33	647.67	292.59±111.49	38.10
	回升值 Setback/cP	426.00	462.33	767.67	633.26±85.13	13.67
2021—2022	峰值黏度 Peak viscosity/cP	784.00	635.67	1 344.67	985.64±177.18	17.98
	低谷黏度 Trough viscosity/cP	588.00	475.00	975.00	753.61±139.56	18.52
	最终黏度 Final viscosity/cP	934.00	992.33	1 781.33	1 486.40±236.44	15.91
	稀懈值 Breakdown/cP	518.00	115.67	570.33	232.04±97.35	41.96
	回升值 Setback/cP	521.00	452.67	887.00	732.80±116.71	15.93

表 3 供试小麦不同粒径淀粉粒体积占比分析

Table 3 Analysis of the volume proportion of starches of different particle sizes in wheat tested

%

年度 Year	粒径 Starch granule size/ μm	极差 Range	最小值 Minimum value	最大值 Maximum value	平均数 Average	变异系数 Coefficient of variation
2020—2021	<2.8	6.08	7.37	11.38	9.42±1.22	13.03
	2.8~10	18.52	14.44	27.02	21.37±3.48	16.27
	≤10	22.71	22.45	36.75	30.79±4.33	14.06
	>10	22.71	63.25	77.55	69.21±4.33	6.25
	10~22	24.12	30.05	43.78	34.60±3.60	10.42
	>22	33.08	20.86	41.06	34.11±4.65	13.44
2021—2022	<2.8	7.46	7.86	13.31	10.26±1.43	13.95
	2.8~10	18.66	18.94	32.84	26.48±3.53	13.31
	<10	23.95	27.01	45.06	36.75±4.48	12.19
	>10	23.95	54.94	72.99	63.25±4.48	7.08
	10~22	19.03	26.36	39.19	30.98±3.15	10.15
	>22	27.12	19.67	43.13	32.28±4.64	14.39

表 4 供试小麦不同粒径淀粉粒表面积占比分析

Table 4 Analysis of the surface area proportion of starches of different particle sizes in wheat tested

%

年度 Year	粒径 Starch granule size/ μm	极差 Range	最小值 Minimum value	最大值 Maximum value	平均数 Average	变异系数 Coefficient of variation
2020—2021	<2.8	27.86	44.55	54.34	49.89±3.00	6.00
	2.8~10	23.59	21.72	31.87	26.91±2.83	10.53
	≤10	26.24	69.18	81.21	76.80±3.40	4.42
	>10	26.24	18.79	30.82	23.20±3.40	14.64
	10~22	21.42	11.22	19.73	15.00±0.21	15.78
	>22	8.00	4.47	11.20	8.20±1.54	18.79
2021—2022	<2.8	15.92	44.67	53.90	49.40±2.56	5.18
	2.8~10	14.62	25.45	37.16	31.10±2.56	8.23
	≤10	16.12	74.80	84.45	80.50±2.84	3.53
	>10	16.12	15.55	25.20	19.50±2.84	14.58
	10~22	8.04	10.26	15.81	12.48±1.63	13.06
	>22	9.76	3.84	10.81	7.02±1.60	22.86

表 5 供试小麦不同粒径淀粉粒数目占比分析

Table 5 Analysis of the number proportion of starches of different particle sizes in wheat tested

%

年度 Year	粒径 Starch granule size/ μm	最小值 Minimum value	最大值 Maximum value	平均数 Average	变异系数 Coefficient of variation
2020—2021	<2.8	96.48	98.07	97.56±0.34	0.34
	2.8~10	1.80	3.31	2.29±0.32	14.04
	≤10	99.76	99.89	99.86±0.03	0.03
	>10	0.11	0.24	0.14±0.04	24.67
	10~22	0.09	0.21	0.12±0.30	25.67
	>22	0.01	0.04	0.02±0.01	33.99
2021—2022	<2.8	96.29	97.65	97.24±0.37	0.38
	2.8~10	2.22	3.58	2.64±0.36	13.75
	≤10	99.85	99.90	99.88±0.02	0.02
	>10	0.10	0.15	0.12±0.02	15.15
	10~22	0.09	0.12	1.00±0.01	13.40
	>22	0.01	0.05	0.02±0.01	50.19

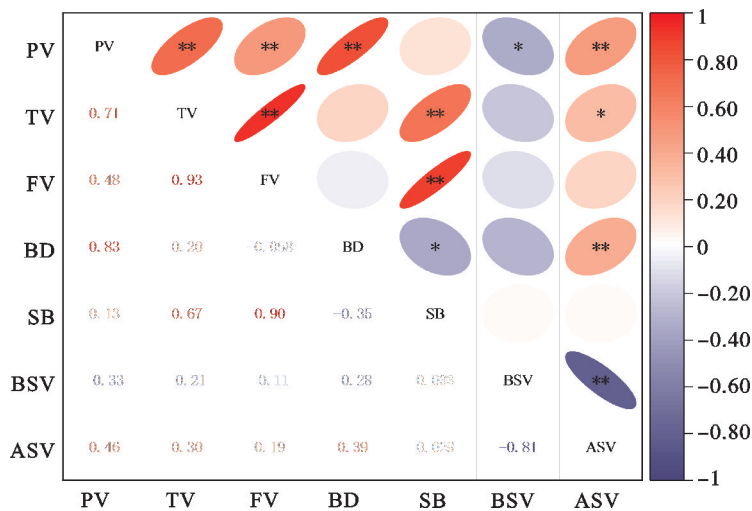
2.3 供试小麦淀粉粒体积分布与糊化参数相关性分析

由图 1 可知,峰值黏度与低谷黏度、最终黏度及稀懈值呈极显著正相关($P < 0.01$),低谷黏度与最终黏度和回升值呈极显著正相关;最终黏度与回升值呈极显著正相关;稀懈值与回升值呈显著负相关($P < 0.05$);B 型淀粉粒体积占比与峰值黏度呈显著负相关;A 型淀粉粒体积占比与峰值黏度、稀懈值及低谷黏度呈极显著或显著正相

关,且与 B 型淀粉粒体积占比呈极显著负相关。

2.4 供试小麦品种淀粉品质指标主成分分析

供试小麦淀粉粒体积分布与糊化参数的主成分分析结果(图 2)表明,主成分一(PC1)和主成分二(PC2)的累计贡献率为 79.00%,其中 PC1 贡献率为 47.30%,峰值黏度和低谷黏度对 PC1 贡献较大;PC2 贡献率为 31.70%,最终黏度、稀懈值和回升值对其贡献较大。A 型和 B 型淀粉粒体积分布对 PC1 和 PC2 均有较大的贡献率。



PV:峰值黏度;TV:低谷黏度;FV:最终黏度;BD:稀懈值;SB:回升值;BSV:B 型淀粉粒体积占比;ASV:A 型淀粉粒体积占比。* : $P < 0.05$; * * : $P < 0.01$ 。下同。

PV: Peak viscosity; TV: Trough viscosity; FV: Final viscosity; BD: Breakdown; SB: Setback; BSV: B-type starch granule volume ratio; ASV: A-type starch granule volume ratio. * : $P < 0.05$; * * : $P < 0.01$. The same in figure 2.

图 1 淀粉粒体积分布与糊化参数间的相关性分析

Fig. 1 Correlation analysis between starch granule volume distribution and pasting parameters

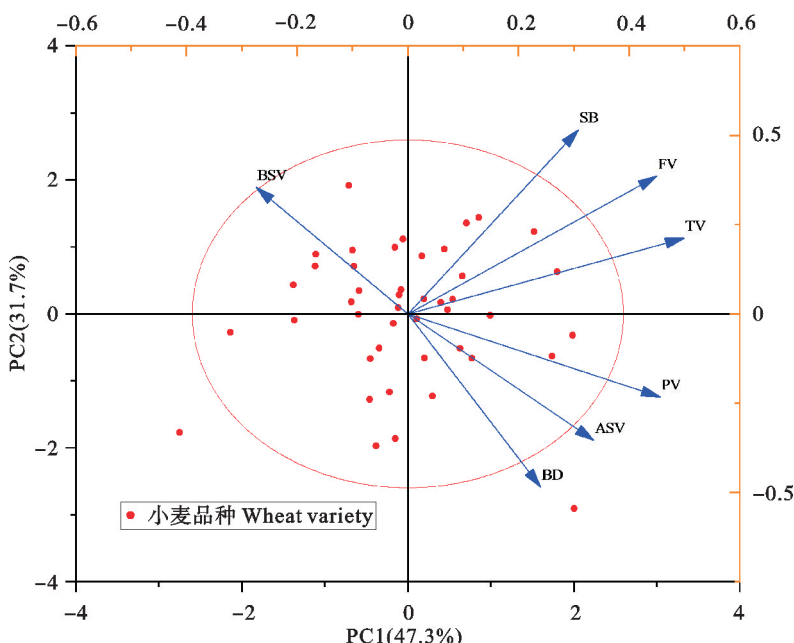


图 2 供试小麦品种淀粉品质指标主成分分析

Fig. 2 Principal component analysis of starch quality indices of the tested wheat varieties

2.5 供试小麦品种淀粉品质指标聚类分析

对供试小麦品种淀粉糊化参数及粒度分布指标进行聚类分析,当距离为 500 时,可将 44 个小麦品种分为三大类(图 3)。I 类小麦品种的 B 型淀粉粒体积占比最小,峰值黏度和稀懈值显著高于其他两类,低谷黏度、最终黏度、回升值介于 II 类与 III 类之间,峰值黏度为 1 241~1 301 cP,低谷黏度为 731~789 cP,最终黏度为 1 327~1 518 cP,稀懈值为 452~570 cP,回升值为 596~730 cP(表 6),包括扬麦 13 和生选 6 号两个品种; II 类小麦品种的 B 型淀粉粒体积占比最大,峰值黏

度、低谷黏度、最终黏度和回升值最低,稀懈值介于 I 类与 III 类之间,峰值黏度为 636~1 106 cP,低谷黏度为 475~821 cP,最终黏度为 992~1 358 cP,稀懈值为 116~391 cP,回升值为 453~773 cP,包括西农 979 和鲁原 502 等 11 个小麦品种; III 类小麦品种的 B 型淀粉粒体积占比、峰值黏度介于 I 类和 II 类之间,低谷黏度、最终黏度及回升值较高,稀懈值最低,峰值黏度为 757~1 345 cP,低谷黏度为 601~975 cP,最终黏度为 1 240~1 781 cP,稀懈值为 157~370 cP,回升值为 639~806 cP,包括扬麦 20 和德研 8 号等 31 个小麦品种。

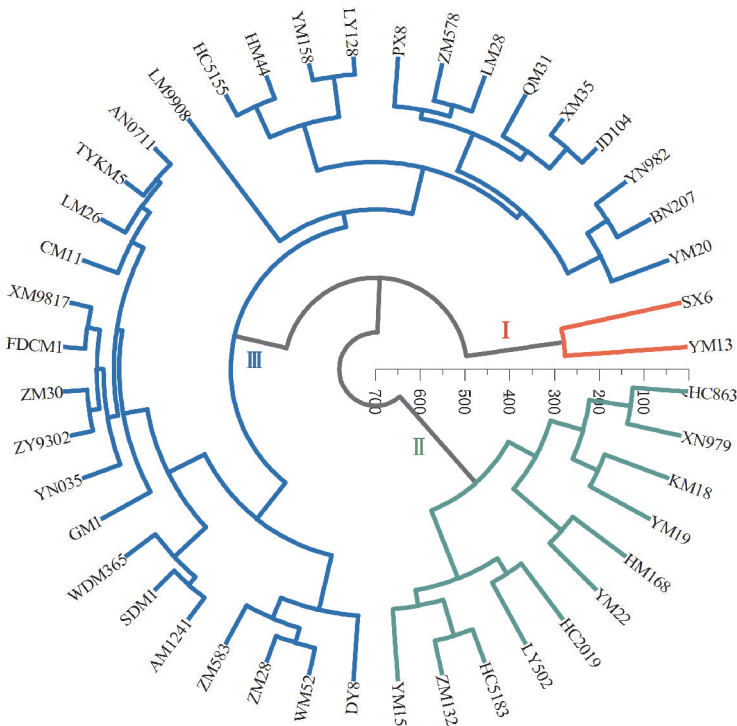


图 3 供试小麦品种淀粉品质指标间聚类分析

Fig. 3 Cluster analysis of starch quality indices of the tested wheat varieties

表 6 供试小麦品种淀粉品质指标间聚类分析

Table 6 Cluster analysis of starch quality indices of the tested wheat varieties

类别 Category	峰值黏度 Peak viscosity/cP	低谷黏度 Trough viscosity/cP	最终黏度 Final viscosity/cP	稀懈值 Breakdown/cP	回升值 Setback/cP	B 型淀粉粒体积占比 B-type starch granule volume ratio/%	A 型淀粉粒体积占比 A-type starch granule volume ratio/%
I	1 271.00a	759.67a	1 422.50a	511.33a	662.83ab	19.74b	70.90a
II	827.70c	587.15b	1 211.18b	240.55b	624.03b	32.87a	64.33b
III	1 023.28b	806.86a	1 588.18a	211.00b	775.90a	32.44a	66.61a

同列数据后不同字母表示不同类别间差异显著 ($P < 0.05$)。

Different letters following data in same column mean significant difference among different categories ($P < 0.05$).

3 讨论

小麦淀粉糊化参数是衡量小麦品质的重要指标,受基因型和环境及其互作影响^[27-28]。宋建民

等^[29]研究发现,淀粉的性状受基因型和环境的影响,基因型对淀粉品质起决定作用。阎俊等^[30]研究发现,峰值黏度主要受基因型与环境互作的影响,稀懈值受基因型的影响更大。张勇

等^[31]研究发现,淀粉糊化特性间及其与降落值间均显著正相关,但相关系数大小因性状而异,其中峰值黏度是衡量淀粉糊化特性的最重要指标。本研究发现,相较于中、强筋小麦,弱筋小麦淀粉糊化参数更高,这与谭彩霞等^[20]研究结果一致;在 44 个小麦品种中,糊化参数变异系数均大于 10%,其中稀懈值的变异系数最大,为 38.10%,2021 年与 2022 年相同糊化参数间变异系数差异较小,说明生态类型对小麦糊化参数影响较小,而品种间的糊化参数均存在极显著差异,这与刘建军等^[32]的研究结果基本一致,说明糊化参数主要受基因型控制。

小麦淀粉以淀粉粒形式存在于胚乳中,其中淀粉粒度分布特征受基因型和环境共同影响。蔡瑞国等^[33]研究认为,强筋小麦品种 B 型淀粉粒体积、数量占比分别为 46.85%、99.89%,A 型淀粉粒体积、数量占比分别为 53.15%、0.11%。马冬云等^[34]发现,中筋小麦品种籽粒 B 型淀粉粒体积占比为 49%左右,A 型淀粉粒体积占比为 51%。本研究中,供试材料 B 型淀粉粒体积占比为 22.45%~45.06%,A 型淀粉粒体积占比为 54.94%~77.55%;B 型淀粉粒数目占比为 99.76%~99.90%,A 型淀粉粒数目占比为 0.10%~0.24%。相较于中、强筋小麦,弱筋小麦籽粒中的 A 型淀粉粒含量较高,而 B 型淀粉粒含量较低。不同小麦品种 A 型淀粉粒和 B 型淀粉粒的数量占比没有显著差异。

本研究中,44 个小麦品种的峰值黏度与 B 型淀粉粒体积占比呈显著负相关,峰值黏度、稀懈值及低谷黏度与 A 型淀粉粒体积占比呈极显著或显著正相关。研究表明,峰值黏度、低谷黏度、最终黏度及回升值与 B 型淀粉粒体积占比呈显著或极显著正相关。马小飞等^[36]研究发现,A 型淀粉粒体积占比与低谷黏度和最终黏度呈极显著负相关,与峰值黏度和回升值呈显著负相关。本研究结果与上述结果不尽相同,原因可能与供试材料有关。多项研究结果显示,A 型淀粉粒的峰值黏度、低谷黏度、最终黏度、稀懈值、回升值较高^[35,37-39];可能因为小麦面粉中脂肪、蛋白质、淀粉含量对糊化参数影响较大^[40]。本研究以 44 个小麦品种为材料,而其他研究仅用少数材料,脂肪、蛋白质、淀粉含量可能存在较大差异,导致研究结果不同。经主成分分析,A、B 型淀粉粒体积占比对 PC1 和 PC2 两种成分均有较高的贡献率,说明 A、B 型淀粉粒体积占比对小麦的糊化参数

具有重要影响。根据 44 个小麦品种粒度分布与糊化参数进行聚类分析,结果显示,44 个小麦品种可分为三类,I 类包括扬麦 13 和生选 6 号两个品种,具有较高的峰值黏度和最终黏度;II 类包括西农 979 和鲁原 502 等 11 个小麦品种,峰值黏度较低;III 类包括扬麦 20 和德研 8 号等 31 个小麦品种,最终黏度较高。糊化参数较高的多为弱筋小麦品种。

本研究明确了沿淮地区 44 个主推小麦品种淀粉粒度分布与糊化特性的关系,并筛选出扬麦 13 和德研 8 号等峰值黏度高的小麦品种资源;其中发现 A 型淀粉粒体积占比对小麦淀粉糊化参数影响更大,可通过遗传育种和优化栽培技术提高 A 型淀粉粒体积占比,进而提升淀粉品质,以提高淀粉品质以及终端食品品质。

参考文献:

- [1]ZHANG Y, GUO Q, FENG N, *et al.* Characterization of A- and B-type starch granules in Chinese wheat cultivars [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2016, 15(10): 2203.
- [2]宋韵琳, 蔡剑. 小麦籽粒淀粉理化特性与品质关系及其生理机制研究进展[J]. 麦类作物学报, 2018, 38(11): 1338.
- [3]SONG Y L, CAI J. Correlation between starch physiochemical properties and quality, as well as its physiological mechanism of starch formation in wheat grains [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2018, 38(11): 1338.
- [4]CORNEJO-RAMÍREZ Y I, MARTÍNEZ-CRUZ O, DEL TORO-SÁNCHEZ C L, *et al.* The structural characteristics of starches and their functional properties [J]. *CyTA - Journal of Food*, 2018, 16(1): 1003.
- [5]李明菲, 安迪, 郑学玲, 等. 小麦 A/B 损伤淀粉-面筋蛋白混合体系流变学特性研究[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2020, 41(4): 1.
- [6]LI M F, AN D, ZHENG X L, *et al.* Study on rheological properties of A/B damaged starch-gluten protein systems [J]. *Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition)*, 2020, 41(4): 1.
- [7]PENG M S, GAO M, ABDEL-AAL E S M, *et al.* Separation and characterization of A- and B-type starch granules in wheat endosperm [J]. *Cereal Chemistry*, 1999, 76(3): 375.
- [8]KIM H S, HUBER K C. Channels within soft wheat starch A- and B-type granules [J]. *Journal of Cereal Science*, 2008(1): 48.
- [9]李文阳, 闫素辉, 王振林. 小麦胚乳 A、B 型淀粉粒的形成与生长特征及氮素调节[J]. 中国粮油学报, 2016, 31(5): 22.
- [10]LI W Y, YAN S H, WANG Z L. Formation and developmental characteristics of A and B type starch granule in wheat endosperm and response to nitrogen [J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2016, 31(5): 22.

- [8] GAINES C S, TILLEY M, *et al.* Associations of starch gel hardness, granule size, waxy allelic expression, thermal pasting, milling quality, and kernel texture of 12 soft wheat cultivars [J]. *Cereal Chemistry*, 2000, 77(2): 163.
- [9] YAN H L, LU Q Y. Effect of A- and B-granules of wheat starch on Chinese noodle quality [J]. *Journal of Cereal Science*, 2020, 91: 102860.
- [10] 张敏, 蔡瑞国, 徐彩龙, 等. 种植密度对小麦胚乳淀粉粒度分布特征及产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2013, 33(3): 544. ZHANG M, CAI R G, XU C L, *et al.* Effects of plant density on size distribution of starch granule and grain yield in wheat [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2013, 33(3): 544.
- [11] 张燕, 王传仁, 李鸽子, 等. 小麦品种鑫华麦 818 籽粒淀粉粒结构的动态变化及粒度分布[J]. 电子显微学报, 2020, 39(4): 409. ZHANG Y, WANG C R, LI G Z, *et al.* Dynamic changes and size distribution of starch granules in the grains of Xinhumai 818 wheat cultivar [J]. *Journal of Chinese Electron Microscopy Society*, 2020, 39(4): 409.
- [12] 张光, 李侯霏, 马春敏, 等. 小麦淀粉改性技术及应用研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(22): 39. ZHANG G, LI Y F, MA C M, *et al.* Research progress in modification technology and application of wheat starch [J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2023, 14(22): 39.
- [13] 苏键, 李振玉. 几种不同来源淀粉的水合特性和糊化特性研究[J]. 粮食与油脂, 2022, 35(8): 43. SU J, LI Z Y. Study on hydration and gelatinization properties of starch from different sources [J]. *Cereals & Oils*, 2022, 35(8): 43.
- [14] 傅宝尚, 胡雪微, 祁立波, 等. 冲泡方式对米糊冲泡品质影响的研究进展[J]. 粮油食品科技, 2022, 30(2): 132. FU B S, HU X W, QI L B, *et al.* Research progress on effect of brewing methods on brewing quality of rice paste [J]. *Science and Technology of Cereals, Oils and Foods*, 2022, 30(2): 132.
- [15] 孔露, 孔茂竹, 余佳熹, 等. 糊化处理对藜麦淀粉形态、结构及热特性的影响[J]. 食品工业科技, 2019, 40(14): 56. KONG L, KONG M Z, YU J X, *et al.* Effect of gelatinization treatment on morphology, structure and thermal properties of Chenopodium quinoa starch [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2019, 40(14): 56.
- [16] 黄薇, 刘远晓, 李萌萌, 等. 湿热处理改性淀粉的研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2025, 51(1): 354. HUANG W, LIU Y X, LI M M, *et al.* Recent advances in heat-moisture modified starch [J]. *Food and Fermentation Industries*, 2025, 51(1): 354.
- [17] 杨春娇, 肖富彤, 李俏, 等. 3 个青稞品种不同粒度面粉和面条的品质差异[J]. 应用与环境生物学报, 2024, 30(6): 1198. YANG C J, XIAO F T, LI Q, *et al.* The differences of flour and noodles quality with different particle sizes for three highland barley varieties [J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2024, 30(6): 1198.
- [18] 姚大年, 李保云, 梁荣奇, 等. 小麦品种面粉粘度性状及其在面条品质评价中的作用[J]. 中国农业大学学报, 2000, 5(3): 25. YAO D N, LI B Y, LIANG R Q, *et al.* Effects of flour viscosity traits in evaluating wheat varieties for their noodle quality [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2000, 5(3): 25.
- [19] ZI Y, SHEN H, DAI S, *et al.* Comparison of starch physicochemical properties of wheat cultivars differing in bread- and noodle-making quality [J]. *Food Hydrocolloids*, 2019, 93: 78.
- [20] 谭彩霞, 封超年, 郭文善, 等. 不同品种小麦粉黏度特性及破损淀粉含量的差异[J]. 中国粮油学报, 2011, 26(6): 4. TAN C X, FENG C N, GUO W S, *et al.* Difference of starch viscosity characteristic and damaged starch content among different wheat cultivars [J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2011, 26(6): 4.
- [21] 陈金华, 余卫国, 刘瑞娜, 等. 日尺度标准化前期降水蒸散指数及其在安徽省的适用性分析[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(6): 919. CHEN J H, YU W G, LIU R N, *et al.* Daily standardized antecedent precipitation evapotranspiration index (SAPEI) and its adaptability in Anhui Province [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2019, 27(6): 919.
- [22] 程颖, 焦碧玉, 王磊, 等. 安徽麦区软质小麦面粉溶剂保持力的基因型与环境互作[J]. 安徽农业大学学报, 2024, 51(2): 191. CHENG Y, JIAO B Y, WANG L, *et al.* Genotype and environment interaction and stability of solvent retention capacity in soft wheat flour in Anhui Province [J]. *Journal of Anhui Agricultural University*, 2024, 51(2): 191.
- [23] 张平平, 姚金保, 王化敦, 等. 江苏省优质软麦品种品质特性与饼干加工品质的关系[J]. 作物学报, 2020, 46(4): 491. ZHANG P P, YAO J B, WANG H D, *et al.* Soft wheat quality traits in Jiangsu Province and their relationship with cookie making quality [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2020, 46(4): 491.
- [24] 陈娟, 袁雅妮, 张培文, 等. 花后弱光对弱筋小麦淀粉粒度分布与黏度参数的影响[J]. 麦类作物学报, 2024, 44(3): 385. CHEN J, YUAN Y N, ZHANG P W, *et al.* Effect of post-anthesis weak light on starch granules size distribution and viscosity parameters of weak gluten wheat [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2024, 44(3): 385.
- [25] 李浩杰, 闫素辉, 张士雅, 等. 氮密对小麦籽粒淀粉粒分布与糊化特性的互作效应[J]. 麦类作物学报, 2024, 44(3): 378. LI H J, YAN S H, ZHANG S Y, *et al.* Effect of nitrogen-density interaction on starch granule size distribution and pasting properties of wheat grains [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2024, 44(3): 378.
- [26] 王犇, 李宇星, 李哲, 等. 海藻糖处理对花后高温胁迫弱筋小麦生选 6 号产量形成及品质的影响[J]. 浙江农业学报, 2023, 35(1): 1.

- WANG B, LI Y X, LI Z, *et al.* Performance of trehalose treatment on yield formation and quality of post-flowering heatstressed weak gluten wheat Shengxuan 6 [J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2023, 35(1): 1.
- [27] 姚大年, 李保云, 梁荣奇, 等. 基因型和环境对小麦品种淀粉性状及面条品质的影响[J]. 中国农业大学学报, 2000, 5(1): 63.
- YAO D N, LI B Y, LIANG R Q, *et al.* Effects of wheat genotypes and environments to starch properties and noodle quality [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2000, 5(1): 63.
- [28] 闫素辉, 李勇, 李文阳, 等. 不同直链淀粉含量小麦品种的淀粉粒度分布特征[J]. 麦类作物学报, 2016, 36(3): 386.
- YAN S H, LI Y, LI W Y, *et al.* Starch granule size distribution in grain of wheat cultivars with different amylose content [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2016, 36(3): 386.
- [29] 宋建民, 刘爱峰, 刘建军, 等. 环境与品种对小麦淀粉理化特性和面条品质的影响[J]. 作物学报, 2005, 31(6): 796.
- SONG J M, LIU A F, LIU J J, *et al.* Effects of environment and genotype on wheat starch physicochemical properties and noodle quality [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2005, 31(6): 796.
- [30] 阎俊, 何中虎. 基因型、环境及其互作对黄淮麦区小麦淀粉品质性状的影响[J]. 麦类作物学报, 2001, 21(2): 14.
- YAN J, HE Z H. Effects of genotype, environment and G × E interaction on starch quality traits of wheat grown in Yellow and Huai River Valley [J]. *Acta Triticeal Crops*, 2001, 21(2): 14.
- [31] 张勇, 何中虎. 我国春播小麦淀粉糊化特性研究[J]. 中国农业科学, 2002, 35(5): 471.
- ZHANG Y, HE Z H. Investigation on paste property of spring-sown Chinese wheat [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2002, 35(5): 471.
- [32] 刘建军, 何中虎, 杨金, 等. 小麦品种淀粉特性变异及其与面条品质关系的研究[J]. 中国农业科学, 2003, 36(1): 7.
- LIU J J, HE Z H, YANG J, *et al.* Variation of starch properties in wheat cultivars and their relationship with dry white Chinese noodle quality [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2003, 36(1): 7.
- [33] 蔡瑞国, 张敏, 朱桓, 等. 糯小麦籽粒淀粉粒度分布特征[J]. 麦类作物学报, 2010, 30(2): 254.
- CAI R G, ZHANG M, ZHU H, *et al.* Starch granule size distribution in grains of waxy wheat [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2010, 30(2): 254.
- [34] 马冬云, 郭天财, 王晨阳, 等. 施氮水平对小麦籽粒淀粉粒度分布及淀粉粒糊化特性的影响[J]. 西北农业学报, 2010, 19(11): 43.
- MA D Y, GUO T C, WANG C Y, *et al.* Effects of nitrogen fertilizer application rate on starch granule size distribution and starch pasting properties in wheat (*Triticum aestivum* L.) grain [J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2010, 19(11): 43.
- [35] 李浩杰, 张士雅, 雍玉东, 等. 施氮量对软质小麦强、弱勢籽粒淀粉粒分布与糊化特性的影响[J]. 生态学杂志, 2024, 43(4): 1065.
- LI H J, ZHANG S Y, YONG Y D, *et al.* Effects of nitrogen application rate on starch granule distribution and pasting properties in superior and inferior grains of soft wheat [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2024, 43(4): 1065.
- [36] 马小飞, 乔玲, 崔欢虎, 等. 微喷灌水量对两种筋型小麦淀粉粒度分布及糊化特性的影响[J/OL]. 分子植物育种. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.S.20230506.1742.032.html>.
- MA X F, QIAO L, CUI H H, *et al.* Effects of micro sprinkler irrigation amounts on granule size distribution and pasting properties of two gluten types wheat starch [J/OL]. *Molecular Plant Breeding*, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.S.20230506.1742.032.html>.
- [37] 田益华, 张传辉, 蔡剑, 等. 小麦籽粒A型和B型淀粉粒的理化特性[J]. 作物学报, 2009, 35(9): 1755.
- TIAN Y H, ZHANG C H, CAI J, *et al.* Physico-chemical properties of A- and B-type starch granules in wheat [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2009, 35(9): 1755.
- [38] 高欣, 郭雷, 单宝雪, 等. 淀粉颗粒类型及其比例在小麦品质特性形成与改良中的作用[J]. 作物学报, 2023, 49(6): 1447.
- GAO X, GUO L, SHAN B X, *et al.* Types and ratios of starch granules in grains and their roles in the formation and improvement of wheat quality properties [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2023, 49(6): 1447.
- [39] SHANG J, LI L, ZHAO B, *et al.* Comparative studies on physicochemical properties of total, A- and B-type starch from soft and hard wheat varieties [J]. *Int J Biol Macromol*, 2020, 154: 714.
- [40] 李春燕, 张雯霞, 张玉雪, 等. 小麦籽粒淀粉与面粉的理化特性差异[J]. 作物学报, 2018, 44(7): 1077.
- LI C Y, ZHANG W X, ZHANG Y X, *et al.* Differences in physicochemical properties between flour and starch of wheat grain [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2018, 44(7): 1077.