洪冰, 胡婷婷, 弓浩然, 等. 河南小麦品种加工品质特性分析与综合评价 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(15): 356−364. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025080093

HONG Bing, HU Tingting, GONG Haoran, et al. Analysis and Comprehensive Evaluation of Processing Quality Characteristics of Wheat Varieties in Henan Province[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(15): 356−364. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025080093

· 分析检测 ·

河南小麦品种加工品质特性分析与综合评价

洪　冰[1], 胡婷婷[1], 弓浩然[1,*], 高晓芳[1], 苏淼冉[1], 李　敏[1], 谢　婕[2,*]

（1.郑州市产品质量检验检测中心, 河南郑州 450000;
2.洛阳市农林科学院, 河南洛阳 471000）

摘　要: 为有效评价不同品种小麦品质的差异，以河南地区种植的 18 个不同小麦品种为研究对象，对其籽粒、面粉及面团品质特性进行分析，并结合相关性分析和主成分分析方法建立一套综合评价模型。通过聚类分析对 18 个不同小麦品种进行分类，分析每类特点挖掘潜在应用价值。结果表明，小麦容重的变异系数最小（1.89%），形成时间的变异系数最大（78.96%）。其中有 1 个品种（新麦 26）6 项指标达到我国小麦品种品质分类标准强筋品质要求，7 个品种达到中强筋品质要求。各品质性状间呈现不同程度的相关性，形成时间与面团稳定时间相关性最强（0.982）。通过主成分分析将 14 个评价指标简化为 4 个主成分，累计贡献率为 82.005%，并对 14 个指标分别赋予权重得到综合品质前三的品种为新麦 26、洛旱 22、豫麦 49，极具定向培育及开发加工价值。通过聚类分析将小麦分为三类：第Ⅰ类籽粒品质居中，面粉品质和面团品质最差，聚集了 10 个小麦品种；第Ⅱ类籽粒品质较差，面粉品质和面团品质居中，表明其磨粉品质较差，加工品质较好，聚集了 6 个小麦品种；第Ⅲ类聚集了 2 个小麦品种，籽粒品质和面粉品质最好，面团品质较好，表明其磨粉、加工品质及食用品质均较好。本研究结果为优质小麦品种的筛选、推广种植及加工产业发展提供了理论参考。

关键词: 小麦, 加工品质, 主成分分析, 聚类分析, 综合评价

中图分类号: TS211.2　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)15−0356−09

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025080093　　本文网刊:

Analysis and Comprehensive Evaluation of Processing Quality Characteristics of Wheat Varieties in Henan Province

HONG Bing[1], HU Tingting[1], GONG Haoran[1,*], GAO Xiaofang[1], SU Miaoran[1], LI Min[1], XIE Jie[2,*]

（1.Zhengzhou Product Quality Inspection and Testing Center, Zhengzhou 450000, China;
2.Luoyang Academy of Agricultural and Forestry Sciences, Luoyang 471000, China）

Abstract: In order to effectively evaluate the quality differences among different wheat varieties, 18 varieties cultivated in the Henan region were selected as the research subjects. An analysis was conducted on their grain, flour, and dough quality characteristics. Furthermore, a comprehensive evaluation model was established by integrating correlation analysis and principal component analysis. Cluster analysis was used to classify 18 different wheat varieties, analyzing the characteristics and potential application value of each category. The results showed that the bulk density had the smallest coefficient of variation (1.89%), while the formation time had the largest (78.96%). One variety (Xinmai 26) met the quality standards for strong-gluten wheat in all six key indicators, and seven varieties met the standards for medium-strong gluten. Various quality traits exhibited different degrees of correlation, with the strongest correlation observed between development time and stability time (0.982). Principal component analysis simplified the 14 evaluation indicators into four principal components, with a cumulative contribution rate of 82.005%. Weighted scores based on these components identified the top three

收稿日期: 2025−08−11

基金项目: 洛阳市指导性科研计划项目（2501035B）。

作者简介: 洪冰（1989−）, 女, 硕士, 工程师, 研究方向: 食品安全与质量控制, E-mail: hongbingice@163.com。

*** 通信作者:** 弓浩然（1992−）, 男, 硕士, 助理工程师, 研究方向: 粮油检测, E-mail: ghr301415@163.com。

谢婕（1988−）, 女, 硕士, 农艺师, 研究方向: 农产品加工, E-mail: xiejie1024@163.com。

varieties with the best comprehensive quality: Xinmai 26, Luohan 22, and Yumai 49, indicating high value for targeted breeding and processing. Cluster analysis categorized the varieties into three groups: Group Ⅰ (10 varieties) exhibited moderate grain quality but the poorest flour and dough quality; Group Ⅱ (6 varieties) had poorer grain quality but moderate flour and dough quality, suggesting inferior milling but acceptable processing quality; Group Ⅲ (2 varieties) demonstrated the best grain and flour quality, along with good dough quality, indicating superior overall milling, processing, and end-use potential. This study provides a theoretical reference for selecting and promoting high-quality wheat varieties and for the development of the processing industry.

Key words: wheat; processing quality; principal component analysis; cluster analysis; comprehensive evaluation

小麦是禾本科小麦属，一年生或越年生草本植物，分布范围广，是我国北方地区重要的口粮作物，是河南省主要粮食经济作物之一[1]。我国小麦育种以提高产量和改良抗病性为主，且在长期演化和育种过程中形成了丰富的种质资源[2]，因受基因型和环境等因素影响，不同小麦品种在品质特性上存在差异，且缺乏加工品质过硬的优质小麦品种[3]。目前小麦已经从“吃饱的需要”向“吃好的保障”发展[4]，如何在提高产量的同时，改良小麦籽粒及小麦粉品质、筛选优质小麦，实现不同小麦品种籽粒或面粉的最终用途专用化成为我国小麦加工产业发展的主要方向。

品质（营养品质、加工品质、食用品质等）是小麦育种和生产的重要参考指标，也是影响产业竞争力的重要因素。小麦加工品质主要分为磨粉品质和食品加工品质。这两个方面分别对应小麦的初次加工和二次加工，对最终食用品质有着重要影响[5]。磨粉品质以籽粒容重、硬度指数为主要评价指标[3]；食品加工品质以面粉的湿面筋含量、面筋指数、沉淀指数、面团流变学特性为主要评价指标；研究发现，蛋白质品质和籽粒硬度是制约中国小麦加工品质的主要因素[3]，面粉及面团品质直接影响面包、馒头、糕点和面条等食品的加工品质[6−8]。目前，评价小麦及小麦粉的食用品质最准确的方法是直接进行面包烘焙、蒸制馒头、制成面条及糕点试验。但因试验过程较为复杂，耗时、费样，试验要求控制的条件严格，人为因素也较多。因此，常以与小麦、小麦粉食用品质密切相关的理化性状测定及面团特性试验（蛋白质含量、面筋指数、粉质特性、拉伸特性等），客观地反映小麦及小麦粉的品质，定量地评价小麦及小麦粉的品质和用途[9−10]。因此，对小麦加工品质进行进一步详细研究尤为重要。

近年来，以主成分分析和聚类分析为主的统计方法，通过将多个指标整合为新的综合指标，无需人为地为特征分配权重或创建理想值，能够更客观地反映性状之间的关系，因而在大麦[11]、茄子[12]、核桃[13]等多种经济作物的表型性状分析与评价中得到了广泛应用。周文菊等[14]通过主成分分析将 18 个指标转化为 4 个相互独立的综合指标，并筛选出青麦 1 号等优良品种。徐澜等[15]结合主成分分析对 14 个引种春麦进行综合评价，筛选出稳产性好，适合忻定盆地春播及相似生态区种植的品种。韩雪等[16]以 UPGMA（不加权成对算数平均法）法对小麦遗传相似系数进行聚类分析，将 200 个小麦品种（系）分为 5 类，聚类分析结果与品种系谱关系基本一致。昝香存等[17]调查了 607 份小麦种质的 13 个品质性状，聚类分析结果将小麦种质分为 6 类，且不同类群间品质性状存在一定差异，各类群均具有其独特的特征。因此，采用主成分分析和聚类分析等方法可以从多个维度对种质性状进行评价，有助于更全面地了解小麦籽粒、面粉以及面团的质量[18]。

综合得出，小麦加工品质特性是多个品质指标相互作用的综合结果，直接决定其加工应用[19]。目前针对小麦品质的研究，主要侧重于育种及品质性状遗传组成分析，品种区域代表性不强，且对其籽粒、面粉及面团品质特性等综合品质缺乏系统研究[3,20−21]。因此，本研究以 18 个河南小麦品种为研究对象，分析了与小麦籽粒、面粉及面团相关的 15 个品质特性，运用相关分析、聚类分析、主成分分析等方法对小麦进行综合评价，可为河南地区优质小麦品种的筛选和加工产业发展提供理论基础和参考依据。

1　材料与方法

1.1　材料与仪器

实验所选小麦均为郑州市粮食科学研究所 2023~2024 年收获的大田种植小麦，籽粒收获、风干存放 2 个月后进行测定。小麦品种详见表 1；十二烷基硫酸钠（超纯级）　上海阿拉丁生化科技股份有限公司；乳酸（分析纯）、硼酸（分析纯）、硫酸（分析纯）　天津市科密欧化学试剂有限公司；氯化钠（分析纯）　国药集团化学试剂有限公司。

表 1　实验所用小麦品种

Table 1　Wheat cultivars used in this experiment

品种序号	品种	品种序号	品种
1	矮抗58	10	新麦26
2	百农307	11	豫农211
3	百农4199	12	豫农982
4	存麦11	13	郑麦188
5	洛旱22	14	郑麦369
6	平麦189	15	众麦1号
7	伟隆169	16	周麦22
8	温麦168	17	周麦27
9	豫麦49	18	周麦30

3100 锤式实验室粉碎机、GM2200 面筋数量及质量测定仪　瑞典波通仪器公司；LM-85/40 实验

磨　无锡穗邦科技有限公司; HGT-1000 容重器　上海东方衡器有限公司; BF51828C-1 高温炉　美国热电仪器公司; JYDB 100×40 小麦硬度仪　布勒机械有限公司; 8400 型凯氏定氮仪　丹麦 FOSS 公司; Farinograph-E 粉质仪、EXTENSOGRAPH-E 拉伸仪　德国 Brabender 公司。

1.2　实验方法

容重参照 GB/T 5498-2013 测定; 千粒重参照 GB/T 5519-2018 测定; 灰分参照 GB 5009.4-2016 第一法 食品中总灰分的测定, 采用全麦粉进行灰分的测定; 硬度指数参照 GB/T 21304-2007 测定; 蛋白质参照 GB 5009.5-2025 第一法 凯氏定氮法测定, 采用全麦粉进行蛋白质含量的测定; 湿面筋参照 GB/T 5506.2-2024 小麦和小麦粉 面筋含量 第 2 部分: 仪器法测定湿面筋和面筋指数, 采用全麦粉加入氯化钠溶液制成面团, 用 GM2200 面筋数量及质量测定仪清洗面团, 使面筋分离出来; 沉淀指数参照 GB/T 15685-2011 测定; 面筋指数参照 LS/T 6102-1995 测定; 粉质特性参照 GB/T 14614-2019 测定; 拉伸特性参照 GB/T 14615-2019 测定。

1.3　数据处理

所有指标的测定均取 3 个平行样, 进行 3 次重复测定。Excel 2007 进行标准差和变异系数计算; SPSS 27 进行单因素分析、主成分分析及聚类分析, 显著水平为 $P<0.05$, Origin 2021 进行相关性分析。

2　结果与分析

2.1　不同小麦品质特性分析

不同小麦品种特性指标测定结果见表 2 和表 3。结果发现, 在 18 种不同小麦品种中, 15 个品质性状存在不同程度的变异。15 个品质特性的变异系数范围为 1.89%~78.96%。4 个籽粒指标的平均变异系数为 4.31%, 其中灰分变异系数最大(7.37%), 平均值为 1.51%; 其次是硬度指数(4.16%)和千粒重(3.82%), 平均值分别为 62.74% 和 43.25 g; 容重(1.89%)变异系数最小, 平均值为 787.94 g/L。4 个面粉指标的平均变异系数为 12.13%, 其中面筋指数(19.87%)变异系数最大, 平均值为 67.52%; 其次是沉淀指数(15.04%)和湿面筋含量(7.76%), 平均值分别为 35.11 mL 和 30.92%; 蛋白质含量(5.84%)变异系数最小, 平均值为 14.34%。7 个面团指标的平均变异系数为 55.43%, 其中形成时间(78.96%)变异系数最大, 平均值为 5.31 min; 其次是粉质质量指数(73.44%)和面团稳定时间(72.59%), 平均值分别为 107.74 mm 和 7.47 min; 延伸性(15.93%)变异系数最小, 平均值为 144.31 mm。在 15 个品质特性指标中, 变异系数表现为形成时间>粉质质量指数>面团稳定时间>拉伸面积>50 mm 拉伸阻力>最大拉伸阻力>面筋指数>延伸性>沉淀指数>湿面筋含量>灰分>蛋白质含量>硬度指数>千粒重>容重。韩雪等[18] 发现小麦容重的变异系数最小, 稳定时间的变

表 2　不同品种小麦的籽粒品质和面粉品质特性

Table 2　Quality characteristics of grain and flour from different wheat varieties

品种序号	籽粒品质				面粉品质			
	容重(g/L)	千粒重(g)	灰分(%)	硬度指数(%)	蛋白质含量(以干基计)(%)	湿面筋含量(%)	沉淀指数(mL)	面筋指数(%)
1	810.33±1.15^{a}	41.47±0.15^{i}	1.61±0.02^{c}	64.17±0.35^{d}	14.30±0.20^{ef}	30.47±0.15^{h}	27.00±0.50^{h}	68.67±0.58^{h}
2	794.67±0.58^{d}	41.70±0.10^{hi}	1.48±0.01^{ef}	63.47±0.25^{e}	13.90±0.40^{ghij}	27.53±0.21^{l}	38.33±0.29^{d}	72.33±0.58^{f}
3	796.33±0.58^{cd}	42.40±0.10^{g}	1.49±0.02^{e}	65.33±0.51^{c}	14.73±0.06^{cd}	33.47±0.21^{b}	35.67±0.29^{e}	82.00±0.00^{cd}
4	785.00±1.00^{e}	43.07±0.06^{f}	1.51±0.02^{d}	59.27±0.21^{h}	15.07±0.06^{c}	30.90±0.20^{fg}	31.17±0.58^{g}	85.00±1.00^{b}
5	754.67±1.53^{j}	41.57±0.12^{i}	1.62±0.01^{bc}	64.03±0.21^{d}	14.13±0.12^{efgh}	31.60±0.10^{e}	43.17±0.76^{b}	76.33±0.58^{e}
6	802.67±0.58^{b}	45.70±0.10^{a}	1.34±0.01^{j}	57.20±0.26^{i}	14.20±0.10^{efg}	31.17±0.15^{f}	35.83±0.29^{e}	69.00±1.73^{h}
7	810.33±0.58^{a}	45.67±0.06^{a}	1.48±0.01^{ef}	63.03±0.21^{e}	13.53±0.12^{ijk}	28.33±0.06^{k}	41.83±0.76^{c}	81.67±0.58^{d}
8	770.00±1.00^{h}	41.47±0.06^{i}	1.47±0.00^{f}	63.07±0.25^{e}	13.30±0.17^{k}	26.27±0.12^{m}	31.67±0.76^{g}	70.67±0.58^{g}
9	782.33±1.53^{f}	41.93±0.15^{h}	1.69±0.01^{a}	67.03±0.32^{a}	16.67±0.15^{a}	33.20±0.10^{c}	30.83±0.76^{g}	87.00±1.00^{a}
10	803.67±1.53^{b}	45.23±0.06^{b}	1.68±0.01^{a}	66.30±0.20^{b}	15.47±0.29^{b}	31.60±0.10^{e}	46.33±0.29^{a}	83.33±0.58^{c}
11	768.33±0.58^{i}	40.20±0.26^{j}	1.47±0.01^{ef}	64.17±0.15^{d}	14.87±0.35^{c}	32.23±0.21^{d}	35.17±0.29^{e}	59.33±0.58^{j}
12	794.67±0.58^{d}	43.10±0.26^{f}	1.62±0.01^{bc}	63.23±0.15^{e}	14.43±0.29^{de}	30.87±0.21^{g}	31.50±0.87^{g}	57.00±0.00^{k}
13	778.00±1.00^{g}	44.23±0.21^{d}	1.64±0.02^{b}	62.00±0.26^{f}	13.73±0.21^{ij}	29.50±0.10^{i}	32.83±0.29^{f}	58.67±0.58^{j}
14	786.00±0.00^{e}	43.07±0.15^{f}	1.38±0.01^{i}	63.10±0.10^{e}	13.97±0.21^{fghi}	31.10±0.26^{fg}	35.00±0.87^{e}	62.67±0.58^{i}
15	784.33±0.58^{e}	44.77±0.06^{c}	1.38±0.02^{i}	59.40±0.17^{h}	13.80±0.17^{hij}	30.53±0.06^{h}	30.83±0.29^{g}	42.67±1.53^{n}
16	796.67±1.15^{c}	44.93±0.15^{c}	1.41±0.01^{h}	64.13±0.06^{d}	14.73±0.12^{cd}	32.33±0.21^{d}	31.83±0.76^{g}	58.00±1.00^{jk}
17	785.67±1.15^{e}	43.90±0.17^{e}	1.44±0.01^{g}	61.23±0.21^{g}	13.23±0.06^{k}	28.67±0.06^{j}	30.83±0.29^{g}	54.67±1.53^{l}
18	779.33±0.58^{g}	44.03±0.21^{de}	1.39±0.01^{i}	59.23±0.15^{h}	14.10±0.26^{efghi}	36.77±0.12^{a}	42.17±0.76^{c}	46.33±1.53^{m}
最小值	754.67	40.20	1.34	57.20	13.23	26.27	27.00	42.67
最大值	810.33	45.70	1.69	67.03	16.67	36.77	46.33	87.00
平均值	787.94	43.25	1.51	62.74	14.34	30.92	35.11	67.52
标准差	14.86	1.65	0.11	2.61	0.84	2.40	5.28	13.42
变异系数CV(%)	1.89	3.82	7.37	4.16	5.84	7.76	15.04	19.87

注: 同列不同字母表示数值在($P<0.05$)水平上存在显著性差异, 表3同。

表 3　不同品种小麦的面团品质特性

Table 3　Quality characteristics of dough from different wheat varieties

品种序号	粉质特性			拉伸特性			
	形成时间(min)	面团稳定时间(min)	粉质质量指数(mm)	最大拉伸阻力(BU)	50 mm拉伸阻力(BU)	延伸性(mm)	拉伸面积(cm^2)
1	3.23±0.06^{i}	4.20±0.10^{j}	85.67±1.15^{h}	214.67±3.21^{n}	175.67±3.06^{o}	157.00±1.00^{d}	41.67±0.58^{l}
2	6.47±0.15^{e}	8.57±0.06^{e}	52.67±1.15^{l}	264.33±2.31^{j}	237.00±2.65^{j}	161.33±1.53^{bc}	54.33±0.58^{i}
3	5.77±0.15^{f}	8.90±0.10^{d}	239.33±2.31^{b}	396.00±3.00^{f}	336.00±1.73^{e}	132.67±0.58^{hi}	81.33±1.53^{c}
4	3.27±0.06^{i}	3.57±0.06^{k}	109.00±1.00^{f}	347.67±1.15^{h}	267.67±1.15^{h}	141.67±2.52^{f}	66.67±1.15^{f}
5	13.60±0.10^{b}	16.90±0.20^{b}	309.67±1.53^{a}	411.67±1.53^{d}	292.00±3.00^{g}	126.00±2.65^{j}	77.33±1.15^{d}
6	1.87±0.06^{k}	4.37±0.12^{ij}	97.33±0.58^{g}	259.00±2.00^{k}	160.00±1.73^{q}	163.33±2.52^{b}	57.67±1.15^{h}
7	10.20±0.17^{c}	13.07±0.12^{c}	198.33±1.53^{d}	279.67±3.06^{i}	251.33±1.53^{i}	137.33±3.06^{g}	67.33±1.15^{f}
8	3.53±0.06^{h}	4.83±0.12^{h}	68.67±0.58^{i}	235.67±2.08^{l}	203.67±2.52^{n}	154.67±3.79^{de}	43.67±0.58^{k}
9	8.93±0.15^{d}	12.97±0.21^{c}	53.67±1.15^{l}	794.67±5.03^{a}	667.67±6.03^{a}	135.33±3.06^{gh}	49.67±1.53^{j}
10	15.87±0.12^{a}	21.40±0.10^{a}	203.33±1.53^{c}	662.00±4.58^{b}	530.00±4.00^{b}	156.00±1.73^{d}	141.67±1.53^{a}
11	1.57±0.12^{l}	1.77±0.12^{l}	56.67±0.58^{k}	259.67±2.52^{k}	208.67±1.53^{m}	158.00±1.00^{cd}	53.67±0.58^{i}
12	3.63±0.12^{h}	5.47±0.06^{f}	61.67±0.58^{j}	222.67±1.53^{m}	165.67±0.58^{p}	189.67±2.52^{a}	62.00±1.00^{g}
13	4.97±0.12^{g}	8.97±0.15^{d}	147.00±1.73^{e}	497.33±3.06^{c}	345.00±1.00^{d}	138.67±1.15^{fg}	88.67±0.58^{b}
14	1.83±0.12^{k}	4.33±0.15^{ij}	55.67±0.58^{k}	410.33±2.52^{e}	360.67±1.15^{c}	125.00±2.00^{j}	71.00±1.00^{e}
15	1.97±0.06^{k}	1.67±0.06^{l}	28.33±0.58^{m}	97.67±1.53^{o}	95.67±1.15^{r}	158.67±3.06^{cd}	20.67±0.58^{m}
16	3.10±0.10^{i}	3.77±0.06^{k}	53.00±1.00^{l}	268.33±1.15^{j}	218.33±2.52^{l}	159.00±3.61^{cd}	52.67±1.53^{i}
17	2.73±0.12^{j}	5.20±0.17^{g}	57.67±1.15^{k}	257.67±2.31^{k}	227.33±1.15^{k}	151.67±2.08^{e}	43.00±1.00^{kl}
18	3.07±0.12^{i}	4.53±0.06^{i}	61.67±0.58^{j}	381.67±2.08^{g}	331.33±0.58^{f}	131.00±1.00^{i}	81.67±1.53^{c}
最小值	1.57	1.67	28.33	97.67	95.67	125.00	20.67
最大值	15.87	21.40	309.67	794.67	667.67	189.67	141.67
平均值	5.31	7.47	107.74	347.82	281.87	144.31	70.82
标准差	4.19	5.42	79.12	168.46	137.63	22.99	35.31
变异系数CV(%)	78.96	72.59	73.44	48.43	48.83	15.93	49.86

异系数最大，而且面粉品质和面团品质变异系数大于籽粒品质变异系数。

分析可以看出，15 个品质特性指标中，形成时间(78.96%)变异系数最大，范围为 1.57~15.87 min，其次是粉质质量指数(73.44%)、面团稳定时间(72.59%)，范围分别为 28.33~309.67 mm、1.67~21.40 min，变异系数前三的品质性状均为小麦粉质特性，说明小麦粉质特性具有很大的改进潜力及丰富的遗传特性。容重、千粒重、硬度指数变异系数分别为 1.89%、3.82%、4.16%，遗传特性相对稳定。各品质性状间呈现不同程度的相关性，其中面团品质改善的潜力更大，籽粒品质更稳定，这与李晓丽等[5] 研究结果基本一致。

据 GB/T 17320-2013《小麦品种品质分类》对小麦品种进行分类，硬度指数、蛋白质含量、湿面筋含量、稳定时间、最大拉伸阻力和拉伸面积 6 项指标全部达到强筋品质要求的有 1 个，即新麦 26；达到中强筋品质要求的有 7 个，即百农 4199、存麦 11、洛旱 22、伟隆 169、郑麦 188、郑麦 369 和周麦 30。

2.2　不同品质特性间的相关性

大量研究表明[22−24]，相关性分析可以直观地反映小麦品质特性之间的关系。对小麦不同品质指标之间的相关性进行分析，从图 1 可以看出，15 个品质特性之间存在不同程度的相关性，且多数指标间存在显著(P<0.05)或极显著(P<0.01)相关性。

小麦籽粒容重与千粒重呈正相关(P<0.05)，但小麦籽粒容重、千粒重与面粉指标和面团指标无显著相关性，表明容重、千粒重与面粉指标和面团指标之间的相关性相对独立；灰分与硬度指数、蛋白质含量、面筋指数及大部分面团品质特性呈显著(P<0.05)或极显著(P<0.01)正相关，与 SHARIATIPOUR 等[25]、孙创举[26] 研究一致；在面团指标方面，硬度指数与形成时间、面团稳定时间、最大拉伸阻力及 50 mm 拉伸阻力呈显著正相关(P<0.05)，与陈妍妍等[27] 研究一致。蛋白质含量与湿面筋含量、面筋指

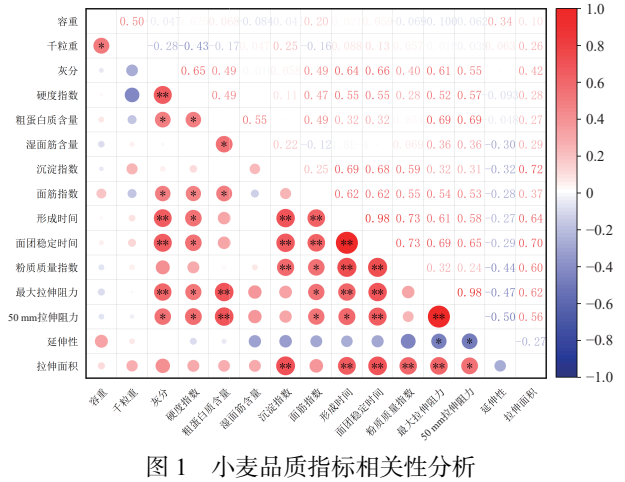


图 1　小麦品质指标相关性分析

Fig.1　Correlation analysis of wheat quality indices

注：*：P<0.05；**：P<0.01；红色表示 2 个指标之间呈现出正相关关系，蓝色表示 2 个指标之间呈现出负相关关系，颜色越深表示相关程度越高，其 R^2 越接近 1。

数呈显著正相关(P<0.05),与最大拉伸阻力、50 mm 拉伸阻力呈极显著正相关(P<0.01),与韩雪等[16]研究一致。沉淀指数与粉质特性、拉伸面积呈极显著正相关(P<0.01)。面筋指数与形成时间、面团稳定时间呈极显著正相关(P<0.01),与粉质质量指数、最大拉伸阻力、50 mm 拉伸阻力等面团特性呈显著正相关(P<0.05),表明面粉的面筋指数与面包筋力和面粉耐搅拌性呈正比,与姜小苓等[28]、王伟玲等[29]研究结果一致。然而,湿面筋含量与稳定时间、延伸性、拉伸面积等面团指标相关性不显著,与前人结果不一致[30−31]。进一步分析表明,小麦面筋蛋白主要由麦谷蛋白和麦醇溶蛋白组成,它们通过二硫键、氢键、离子键和疏水相互作用形成复杂的网络结构,使面团具有黏着性、湿润性、弹性等流变学特性[32−34]。然而,由于面筋蛋白的复杂结构,面团中其他成分的相互作用等原因,湿面筋含量通常无法准确反映面团流变学特性[35]。与湿面筋含量相比,面筋指数是保留在筛板上面筋重量与全部面筋重量的百分率,能更好地反映面筋筋力强弱。粉质特性指标与拉伸特性指标之间大多存在显著(P<0.05)或极显著(P<0.01)相关,其中形成时间与面团稳定时间相关性最强(0.982),与湿面筋含量、蛋白质含量与沉淀指数相关性较弱。虽然其他品质指标间也存在不同程度的相关性,但均未达到显著水平。因此,一个性状是否可以根据其与其他性状的相关性程度来间接改善,还需要进一步详细研究。

分析结果显示,不同品质指标间均存在相关性,导致部分信息重叠。因此,可进一步引入主成分分析以探寻评价河南小麦综合品质的主要特性指标。

2.3 不同品质特性的主成分分析结果

主成分分析将多个指标简化为少数几个综合指标,根据主成分因子得分和方差贡献率计算综合得分。然而,使用这种方法没有综合考虑多个指标之间的相互作用和影响,可能导致信息丢失。因此,通过方差分析和相关性分析,将因素的单边影响和因素的相互影响相结合,对小麦进行品质分析,减少单一方法的局限性,增强结果可靠性。虽然 15 项品质指标间均存在不同程度的相关性,但容重与千粒重之外的指标间相关性均未达到显著水平,综合看其相关性最低,不适合被提取为公因子,为提高整体的相关性,取得更理想的降维结果,故在主成分分析中选择剔除容重指标。

为了避免不同维度对分析结果的影响,使用 SPSS 27 对 14 个品质指标的原始数据进行标准化处理,然后进行主成分分析,提取了特征值大于 1 的 F_1、F_2、F_3、F_4 共 4 个主成分因子(表 4),特征值分别为 6.443、2.207、1.749、1.081,其累计贡献率为 82.005%,表明 4 个主成分因子代表了 14 个品质指标的大部分信息。第 1 主成分的贡献率为 46.019%,主要由面团稳定时间、形成时间、最大拉伸阻力、50 mm 拉伸阻力、拉伸面积、灰分、面筋指数、粉质质量指数、硬度指数构成;第 2 主成分的贡献率为 15.767%,主要由沉淀指数、千粒重、蛋白质含量构成;第 3 主成分的贡献率为 12.494%,主要由湿面筋含量构成;第 4 主成分的贡献率为 7.725%,主要由延伸性构成;由此看出,这 4 个主要成分可以替代原始 14 个特征中的大部分信息,因此它们被用来代表原始的 14 个指标,可在小麦加工品质综合评价中使用。

表 4 主成分载荷矩阵、特征值及贡献率

Table 4 Principal component loading matrix, eigenvalues and contribution rates

品质指标	主成分因子(PC)			
	主成分1	主成分2	主成分3	主成分4
千粒重X_1	−0.028	0.628	0.303	0.506
灰分X_2	0.703	−0.366	−0.355	0.217
硬度指数X_3	0.651	−0.456	−0.310	−0.037
蛋白质含量X_4	0.571	−0.599	0.344	0.240
湿面筋含量X_5	0.251	−0.118	0.833	−0.015
沉淀指数X_6	0.584	0.662	0.113	−0.006
面筋指数X_7	0.703	−0.129	−0.306	−0.156
形成时间X_8	0.888	0.250	−0.266	0.095
面团稳定时间X_9	0.917	0.243	−0.223	0.114
粉质质量指数X_{10}	0.675	0.465	−0.237	−0.269
最大拉伸阻力X_{11}	0.865	−0.249	0.293	0.039
50 mm拉伸阻力X_{12}	0.839	−0.290	0.310	−0.001
延伸性X_{13}	−0.443	−0.164	−0.355	0.746
拉伸面积X_{14}	0.754	0.365	0.176	0.206
特征值	6.443	2.207	1.749	1.081
方差贡献率(%)	46.019	15.767	12.494	7.725
累积贡献率(%)	46.019	61.786	74.280	82.005

根据表 4 构建得分模型，F_1~F_4 表示不同小麦品种各主成分的得分公式，F 为综合评价得分公式，得分及排名结果见表 5。

$F_1=-0.011X_1+0.277X_2+0.256X_3+0.225X_4+0.099X_5+0.230X_6+0.277X_7+0.350X_8+0.361X_9+0.266X_{10}+0.341X_{11}+0.330X_{12}-0.174X_{13}+0.297X_{14}$

$F_2=0.423X_1-0.246X_2-0.307X_3-0.403X_4-0.080X_5+0.446X_6-0.087X_7+0.168X_8+0.163X_9+0.313X_{10}-0.168X_{11}-0.195X_{12}-0.111X_{13}+0.246X_{14}$

$F_3=0.229X_1-0.268X_2-0.234X_3+0.260X_4+0.630X_5+0.086X_6-0.231X_7-0.201X_8-0.169X_9-0.179X_{10}+0.222X_{11}+0.235X_{12}-0.268X_{13}+0.133X_{14}$

$F_4=0.487X_1+0.209X_2-0.036X_3+0.231X_4-0.015X_5-0.005X_6-0.150X_7+0.091X_8+0.110X_9-0.259X_{10}+0.037X_{11}-0.001X_{12}+0.717X_{13}+0.198X_{14}$

结合主成分因子得分公式，以方差贡献率占比为权重，小麦品质综合评价模型为：

$F=0.561\ F_1+0.192F_2+0.152F_3+0.094F_4$

由表 5 可知，综合得分前三的小麦分别是新麦 26、洛旱 22、豫麦 49。新麦 26 面团稳定时间、形成时间、拉伸面积、沉淀指数最高，最大拉伸阻力、50 mm 拉伸阻力、千粒重、灰分、硬度指数、蛋白质含量、延伸性较高，而面团稳定时间、形成时间、拉伸面积、沉淀指数、最大拉伸阻力、50 mm 拉伸阻力、灰分、硬度指数、蛋白质含量与第 1 主成分呈正相关，千粒重、延伸性分别与第 2、第 4 主成分呈正相关，所以新麦 26 F_1 第一，F_2 第四，F_4 第一，综合评分第一；洛旱 22 粉质质量指数最高，灰分、沉淀指数、面筋指数、形成时间、面团稳定时间较高，但延伸性较低，粉质质量指数、灰分、面筋指数、形成时间、面团稳定时间为第 1 主成分正向指标，沉淀指数为第 2 主成分正向指标，所以洛旱 22 F_1 第三，F_2 第三，综合评分第二；豫麦 49 灰分、硬度指数、蛋白质含量、面筋指数、最大拉伸阻力、50 mm 拉伸阻力最高，湿面筋含量较高，拉伸面积较低，灰分、硬度指数、蛋白质含量、面筋指数、最大拉伸阻力、50 mm 拉伸阻力与第 1 主成分呈正相关，湿面筋含量与第 3 主成分呈正相关，其他指标不占优势，所以该品种 F_1 第二，F_3 第三，综合评分第三。

2.4　聚类分析

聚类分析是研究作物品种资源差异和分类的评价方法。对 18 份不同小麦品种进行聚类分析，基于 14 个品质性状构建了聚类分析图（图 2），对不同类群 14 个品质参数进行统计分析（表 6）。在平方欧式距离为 6 处，小麦品种可分为三大类：第Ⅰ类包括 10 个小麦品种，分别为豫农 211、周麦 22、周麦 27、百农 307、矮抗 58、温麦 168、豫农 982、平麦 189、伟隆 169 和众麦 1 号，与其他类群相比，其延伸性表现最好，硬度指数表现适中，其他指标均表现最差，主要特征为籽粒品质居中，面粉品质和面团品质最差，表明该类群磨粉品质较好，加工品质较差；第Ⅱ类包括 6 个小麦品种，分别为百农 4199、洛旱 22、郑麦 369、周麦 30、存麦 11 和郑麦 188，其硬度指数和延伸性表现最差，其他指标均表现适中，主要特征为籽粒品质较差，面粉品质和面团品质居中，表明其磨粉品质较差，加工品质较好；第Ⅲ类包括 2 个小麦品种，即豫麦 49 号和新麦 26，其粉质质量指数和延伸性表现适中，其他指标均表现最好，主要特征为籽粒品质和面粉品质最好，面团品质较好，表明其磨粉、加工品质及食用品质均较好。

研究表明，小麦面筋蛋白中的醇溶蛋白与面团延伸性有关，是面包、馒头等体积膨胀的主要因素之一，麦谷蛋白吸水后与面团黏弹性有关[36−38]。麦谷蛋白中的高、低分子量麦谷蛋白亚基的数量和性质的变化是小麦面团流变学特性变化的主要原因[39]，亚基 14+15、17+18、GluB3d 等对蛋白质和湿面筋含量

表 5　小麦主成分得分及综合得分

Table 5　Principal component scores and composite scores of wheat

品种序号	F_1	F_2	F_3	F_4	F	F排名
1	−1.28	−1.79	−1.26	−0.24	−1.28	15
2	−0.59	−0.03	−1.66	0	−0.59	10
3	1.9	−0.03	0.39	−1.33	0.99	4
4	−0.31	−0.57	0.45	−0.37	−0.25	9
5	3.46	1.48	−1.16	−1.64	1.89	2
6	−2.15	1.6	0.95	0.88	−0.67	11
7	1.27	2.56	−1.27	−0.29	0.98	5
8	−1.74	−0.4	−2.07	−0.76	−1.44	17
9	4.13	−3.87	1.08	0.08	1.75	3
10	6.07	1.23	−0.04	2.16	3.84	1
11	−1.34	−1.63	0.21	−0.48	−1.08	14
12	−1.44	−0.9	−0.99	2.12	−0.93	13
13	0.82	0.48	−0.13	0.17	0.55	6
14	−0.49	−0.04	1.28	−1.27	−0.21	8
15	−4.01	0.57	0.4	0.54	−2.03	18
16	−1.46	−0.38	0.82	0.89	−0.68	12
17	−2.29	0.4	−0.46	−0.04	−1.28	16
18	−0.56	1.34	3.46	−0.4	0.43	7

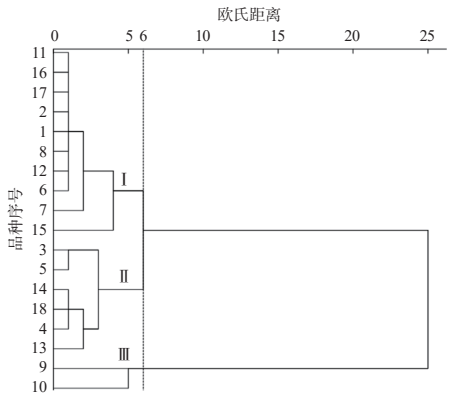


图 2 基于表型数据的聚类分析图

Fig.2 Cluster analysis based on phenotypic characters

表 6 不同类群 14 个品质参数平均数

Table 6 Average of 14 quality parameters in different groups

品质参数	类群		
	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ
千粒重(g)	43.30±1.98^{a}	43.07±0.98^{a}	43.60±2.26^{a}
灰分(%)	1.47±0.09^{b}	1.51±0.11^{b}	1.69±0.01^{a}
硬度指数(%)	62.10±2.38^{b}	62.00±2.53^{b}	66.50±0.71^{a}
蛋白质含量(%)	14.02±0.58^{b}	14.28±0.52^{b}	16.10±0.85^{a}
湿面筋含量(%)	29.84±2.03^{a}	32.23±2.58^{a}	32.40±1.13^{a}
沉淀指数(mL)	33.60±4.25^{a}	36.67±4.84^{a}	38.50±10.61^{a}
面筋指数(%)	63.50±11.14^{b}	68.50±15.08^{ab}	85.00±2.83^{a}
形成时间(min)	3.83±2.63^{b}	5.43±4.25^{b}	12.40±4.95^{a}
面团稳定时间(min)	5.31±3.36^{b}	7.87±5.02^{b}	17.20±5.94^{a}
粉质质量指数(mm)	76.10±46.81^{a}	153.83±101.69^{a}	128.50±105.36^{a}
最大拉伸阻力(BU)	236.10±52.69^{c}	407.50±49.72^{b}	728.50±94.05^{a}
50 mm拉伸阻力(BU)	194.40±45.89^{c}	322.17±35.05^{b}	599.00±97.58^{a}
延伸性(mm)	159.10±13.06^{a}	132.67±6.83^{b}	145.50±14.85^{ab}
拉伸面积(cm^2)	49.80±13.03^{b}	77.83±7.96^{ab}	96.00±65.05^{a}

注: 同一行中的不同字母表示有显著差异(P<0.05)。

具有显著正向效应, 亚基 17+18、5+10、GluA3f 等对面团形成时间和稳定时间具有显著的正向效应[40]。小麦醇溶蛋白中的 ω13.5、β63 和 α72.5 等谱带与面筋弹性、膨胀性、黏性及延展性呈正向效应, 而 ω35.5、γ42.5 和 β57.5 与这些指标呈负向效应[41], 因此可通过定向导入与目标性状相关的亚基, 或定向突变去除负向效应的亚基, 对第Ⅰ类品种的面粉品质和面团品质进行有效改良。第Ⅱ类主要特征为籽粒品质较差, 粉质质量指数(153.83 mm)最高, 延伸性(132.67 mm)最差, 程晓明等[42] 协调最大灌浆速率和灌浆持续时间, 可以显著提高生理成熟期籽粒质量; 蒋欣东[43] 通过对化肥减施 17% 及农药减施 30% 配施激健, 发现小麦籽粒较大且籽粒均匀度较好。第Ⅲ类形成时间(12.40 min)和面团稳定时间(17.20 min)在三个类群中最高, 形成时间和稳定时间长的面粉适用于制作馒头面包等食品, 且优质面筋可以显著延长稳定时间, 提高面团的耐搅拌性能[44]。表明该类群面粉品质含量高, 营养品质好。由此得出, 类群Ⅰ综合品质表现较差, 类群Ⅲ综合品质表现最好, 可大致区分小麦品系品质性状综合表现。

3 结论

本研究测定了河南地区种植的 18 个不同小麦品种的籽粒、面粉及面团品质特性。试验所测定的 15 个品质指标均存在差异, 其中差异最大指标为形成时间, 变异系数为 78.96%, 容重变异系数为 1.89%, 差异最小; 新麦 26 的 6 项指标达到我国小麦品种品质分类标准强筋品质要求, 7 个品种达到中强筋品质要求。相关性分析和主成分分析将评价指标简化为 4 个主成分, 并对 14 个指标分别赋予权重, 进行综合评价, 得到 18 个小麦品种的综合加工品质从高到低的排序, 排名前三依次为新麦 26、洛旱 22、豫麦 49; 聚类分析将 18 个品种归纳为 3 类, 通过综合分析不同类特点, 建议在强筋小麦育种改良工作中, 可优先考虑类群Ⅲ中强筋小麦新麦 26 与类群Ⅱ中百农 4199、洛旱 22 等为代表的中强筋小麦作为组合亲本, 有效利用品质优良的育成品种对小麦加工品质进行改良及种质资源创新, 有针对性地对其开发利用, 加工生产专用面粉相关产品。本研究结果为筛选优质小麦品种提供了参考, 对实现不同小麦品种籽粒或面粉的最终用途专用化具有重要意义, 然而, 仍需要后续观察和试验来研究其产量和加工品质稳定性。

© The Author(s) 2026. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

参考文献

[1] 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, 8(1): 107−114. [HE Zhonghu, ZHUANG Qiaosheng, CHENG Shunhe, et al. Wheat production and technology improvement in China[J]. Journal of Agriculture, 2018, 8(1): 107−114.]

[2] 马国江, 马靖福, 张沛沛, 等. 128 份抗旱冬小麦新品系农艺性状遗传多样性分析[J]. 甘肃农业大学学报, 2021, 56(3): 37−44. [MA Guojiang, MA Jingfu, ZHANG Peipei, et al. Genetic diversity analysis of agronomic characters of 128 new drought-resistant winter wheat strains[J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2021, 56(3): 37−44.]

[3] 何中虎, 晏月明, 庄巧生, 等. 中国小麦品种品质评价体系建立与分子改良技术研究[J]. 中国农业科学, 2006, 39(6): 1091−1101. [HE Zhonghu, YAN Yueming, ZHUANG Qiaosheng, et al. Establishment of quality evaluation system and utilization of molecular methods for the improvement of Chinese wheat quality[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2006, 39(6): 1091−1101.]

[4] 王宏广, 李立军, 胡志全, 等. 中国粮食安全战略与对策[M]. 北京: 中信出版集团, 2020. [WANG H G, LI L J, HU Z Q, et al. China's food security strategy and countermeasures[M]. Beijing: CITIC Press Group, 2020.]

[5] 李晓丽, 姜兰芳, 马小飞, 等. 基于主成分分析的强筋小麦加工品质综合评价[J]. 麦类作物学报, 2022, 42(12): 1473−1483. [LI Xiaoli, JIANG Lanfang, MA Xiaofei, et al. Comprehensive processing quality evaluation of strong gluten wheat based on principal component analysis[J]. Journal of Triticeae Crops, 2022, 42(12): 1473−1483.]

［6］ SPINA A, DINELLI G, PALUMBO M, et al. Evaluation of standard physico-chemical and rheological parameters in predicting bread-making quality of durum wheat（*Triticum turgidum* L. ssp. *durum* ［Desf.］ Husn.）［J］. International Journal of Food Science and Technology, 2021, 56(7): 3278−3288.
［7］ PARK C S, BAIK B K. Relationship between protein characteristics and instant noodle making quality of wheat flour［J］. Cereal Chemistry, 2004, 81(2): 159−164.
［8］ MARTI A, ULRICI A, FOCA G, et al. Characterization of common wheat flours（*Triticum aestivum* L.）through multivariate analysis of conventional rheological parameters and gluten peak test indices［J］. LWT-Food Science and Technology, 2015, 64(1): 95−103.
［9］ 国家粮食局职业技能鉴定指导中心. 农产品食品检验员-粮油质量检验员［M］. 北京：中国轻工业出版社, 2018. ［National Grain Administration Vocational Skills Appraisal Guidance Center. Agricultural product and food inspector-grain and oil quality inspector［M］. Beijing: China Light Industry Press, 2018.］
［10］ AKAMINE I T, MANSOLDO F R P, VERMELHO A B. Probiotics in the sourdough bread fermentation: Current status［J］. Fermentation, 2023, 9(2): 90.
［11］ 郜战宁, 杨永乾, 冯辉, 等. 58 份大麦品种（系）主要农艺性状的遗传多样性分析［J］. 江苏农业科学, 2025, 53(2): 144−149. ［GAO Z N, YANG Y G, FENG H, et al. Genetic diversity analysis of agronomic traits of 58 barley varieties(lines)［J］. Jiangsu Agricultural Sciences, 2025, 53(2): 144−149.］
［12］ 应学兵, 陈萍梅, 李璐瑶, 等. 不同茄子品种的综合评价［J］. 浙江农林大学学报, 2025, 42(2): 357−364. ［YING Xuebing, CHEN Pingmei, LI Luyao, et al. Comprehensive evaluation of *Solanum melongena* cultivars［J］. Journal of Zhejiang A& F University, 2025, 42(2): 357−364.］
［13］ 郝苑汝, 陈芮蝶, 翟梅枝. 不同品种核桃氨基酸组成及营养价值评价［J］. 食品工业科技, 2025, 46(16): 281−290. ［HAO Yuanru, CHEN Ruidie, ZHAI Meizhi. Evaluation on amino acid composition and nutritional value from different walnut varieties［J］. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(16): 281−290.］
［14］ 周文菊, 张文韬, 陈志国, 等. 青海主推春小麦品种品质特性分析与综合评价［J］. 中国粮油学报, 2025, 40(8): 53−59. ［ZHOU Wenju, ZHANG Wentao, CHEN Zhiguo, et al. Comprehensive evaluation of quality characteristics of mainly promoted spring wheat varieties in Qinghai Province［J］. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2025, 40(8): 53−59.］
［15］ 徐澜, 秦秀娟, 安伟, 等. 基于主成分分析的南引小麦品种综合评价［J］. 甘肃农业大学学报, 2022, 57(3): 32−41. ［XU Lan, QIN Xiujuan, AN Wei, et al. Comprehensive evaluation of wheat cultivars introduced from south China based on principal component analysis［J］. Journal of Gansu Agricultural University, 2022, 57(3): 32−41.］
［16］ 韩雪, 杨丹丹, 孔欣欣, 等. 200 份小麦种质品质性状及醇溶蛋白遗传多样性分析［J］. 作物杂志, 2024(6): 61−70. ［HAN Xue, YANG Dandan, KONG Xinxin, et al. Genetic diversity analysis of quality traits and gliadin in 200 wheat germplasm resources［J］. Crops, 2024(6): 61−70.］
［17］ 咎香存, 常莹莹, 董海滨, 等. 河南省小麦种质资源品质特性多样性分析［J］. 植物遗传资源学报, 2025, 26(1): 67−78. ［ZAN Xiangcun, CHANG Yingying, DONG Haibin, et al. Quality characteristics diversity of wheat germplasm resources in Henan Province［J］. Journal of Plant Genetic Resources, 2025, 26(1): 67−78.］
［18］ 韩雪, 孔欣欣, 杨丹丹, 等. 基于主成分分析的 72 份中强筋小麦面粉加工品质综合评价［J］. 中国种业, 2024(5): 72−78. ［HAN Xue, KONG Xinxin, YANG Dandan, et al. Comprehensive processing quality evaluation of 72 medium strong gluten wheat flour samples based on principal component analysis［J］. China Seed Industry, 2024(5): 72−78.］
［19］ 王康君, 孙中伟, 郭明明, 等. 小麦营养品质的研究进展与展望［J］. 农业与技术, 2020, 40(7): 7−12. ［WANG K J, SUN Z W, GUO M M, et al. Research progress and prospect of nutritional quality of wheat［J］. Agriculture and Technology, 2020, 40(7): 7−12.］
［20］ 齐双丽, 李伟, 魏雅红, 等. 黄淮南片冬小麦品种（系）主要农艺性状和品质性状综合分析［J］. 天津农业科学, 2022, 28(6): 27−34. ［QI Shuangli, LI Wei, WEI Yahong, et al. Comprehensive analysis of main traits of agronomic and quality traits of winter wheat varieties（lines）in south Huang-Huai region［J］. Tianjin Agricultural Sciences, 2022, 28(6): 27−34.］
［21］ 张会芳, 韩琳琳, 王楠, 等. 河南省 2020 年主推小麦品种农艺及品质性状分析［J］. 种业导刊, 2022(2): 6−8. ［ZHANG Huifang, HAN Linlin, WANG Nan, et al. Analysis of agronomic and quality traits of main wheat varieties in Henan Province in 2020［J］. Journal of Seed Industry Guide, 2022(2): 6−8.］
［22］ 尹成华, 王亚平, 路辉丽, 等. 小麦品质指标与面团流变学特性指标的相关性分析［J］. 河南工业大学学报（自然科学版）, 2012, 33(4): 41−44. ［YIN Chenghua, WANG Yaping, LU Huili, et al. Correlation analysis of wheat quality index and dough rheological property index［J］. Journal of Henan University of Technology（Natural Science Edition）, 2012, 33(4): 41−44.］
［23］ 尹豪, 路辉丽, 王亚平, 等. 小麦品质指标与面团流变学特性指标的相关性及多元回归分析［J］. 粮食与饲料工业, 2014(10): 4−9. ［YIN Hao, LU Huili, WANG Yaping, et al. Correlations and multiple regression analysis on the index of wheat quality and dough rheological characters［J］. Cereal & Feed Industry, 2014(10): 4−9.］
［24］ 巴瑞新, 于素平, 冯丽英, 等. 小麦粉流变学特性品质指标间的关系研究［J］. 粮油食品科技, 2019, 27(6): 81−85. ［BA Ruixin, YU Suping, FENG Liying, et al. Study on the relationship between quality indexes of rheological properties of wheat flour［J］. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2019, 27(6): 81−85.］
［25］ SHARIATIPOUR N, HEIDARI B, TAHMASEBI A, et al. Comparative genomic analysis of quantitative trait loci associated with micronutrient contents, grain quality, and agronomic traits in wheat（*Triticum aestivum* L.）［J］. Frontiers in Plant Science, 2021, 12: 709817.
［26］ 孙创举. 不同粒度小麦粉组成的差异及其对面制品品质的影响［D］. 郑州：河南工业大学, 2016. ［SUN Chuangju. The difference of the composition of different granularity endosperm particles and the influence of particle size on the quality of flour product［D］. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2016.］
［27］ 陈妍妍, 田双起, 孟凡浩, 等. 河南省中强筋小麦的基础理化指标及其与面团流变学特性相关性研究［J］. 食品与发酵工业, 2025, 51(10): 177−185. ［CHEN Yanyan, TIAN Shuangqi, MENG Fanhao, et al. Correlation of basic physicochemical indexes with dough rheology in medium-strong gluten wheat from Henan Province［J］. Food and Fermentation Industries, 2025, 51(10): 177−185.］

［28］ 姜小苓, 李小军, 冯素伟, 等. 蛋白质和淀粉对面团流变学特性和淀粉糊化特性的影响[J]. 食品科学, 2014, 35(1): 44−49. ［JIANG Xiaoling, LI Xiaojun, FENG Suwei, et al. Effects of addition of different amounts of gluten and starch on wheat dough rheological properties and starch pasting characteristics[J]. Food Science, 2014, 35(1): 44−49.］

［29］ 王伟玲, 钟昔阳, 潘燕, 等. 干热处理对小麦粉热力学特性与面团流变学性质影响[J]. 食品科技, 2020, 45(5): 134−142. ［WANG Weiling, ZHONG Xiyang, PAN Yan, et al. Effect of thermodynamic characteristics of wheat flour with dry heat treatment and rheological properties of dough[J]. Food Science and Technology, 2020, 45(5): 134−142.］

［30］ 赵鹏涛, 赵卫国, 罗红炼, 等. 小麦主要品质性状相关性及主成分分析[J]. 中国农学通报, 2019, 35(21): 7−13. ［ZHAO Pengtao, ZHAO Weiguo, LUO Honglian, et al. The main quality traits of wheat: Correlation analysis and principal components analysis[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2019, 35(21): 7−13.］

［31］ 刘莹, 靳晓杰, 凌冬, 等. 不同麦区小麦种质资源在鄂北岗地的品质表现及农艺性状分析[J]. 湖北农业科学, 2020, 59(24): 35−40. ［LIU Ying, JIN Xiaojie, LING Dong, et al. Analysis of agronomic characters and quality performances on wheat germplasm of different types planted in humpy ground in northern Hubei Province[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2020, 59(24): 35−40.］

［32］ GUO Xingfeng, SUN Xiaohong, ZHANG Yingying, et al. Interactions between soy protein hydrolyzates and wheat proteins in noodle making dough[J]. Food Chemistry, 2018, 245: 500−507.

［33］ MA Hongliang, YANG Yongheng, ZHAO Jiarong, et al. Relationship between the baking quality of wheat (*Triticum aestivum* L.) and the protein composition and structure after shading[J]. Food Chemistry, 2024, 441: 138392.

［34］ GUO Jia, WANG Fengcheng, ZHANG Zhongwei, et al. Characterization of gluten proteins in different parts of wheat grain and their effects on the textural quality of steamed bread[J]. Journal of Cereal Science, 2021, 102: 103368.

［35］ LOU Hongyao, ZHANG Runqi, LIU Yitong, et al. Genome-wide association study of six quality-related traits in common wheat (*Triticum aestivum* L.) under two sowing conditions[J]. Theoretical and Applied Genetics, 2021, 134(1): 399−418.

［36］ SHEN Yuanxin, HAN Xiaojie, FENG Haoxiang, et al. Wheat GSPs and processing quality are affected by irrigation and nitrogen through nitrogen remobilisation[J]. Foods, 2023, 12(24): 4407.

［37］ IRONDI E A, IMAM Y T, AJANI E O, et al. Natural and modified food hydrocolloids as gluten replacement in baked foods: Functional benefits[J]. Grain & Oil Science and Technology, 2023, 6(4): 163−171.

［38］ GUO Weiwei, HAN Xiaofan, HE Zihan, et al. Functions and composition variations of wheat glutenin proteins in steamed bread and noodles[J]. Journal of Agricultural Science, 2021, 14(1): 31.

［39］ 张雪珂. 小麦面筋品质相关低分子量麦谷蛋白亚基的鉴定、基因克隆与分析[D]. 郑州: 河南农业大学, 2021. ［ZHANG Xueke. Identification, cloning and analysis of low-molecular-weight glutenin subunit genes involved with gluten quality in wheat[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2021.］

［40］ 程西永, 吴少辉, 李海霞, 等. 小麦高、低分子量麦谷蛋白亚基对品质性状的影响[J]. 麦类作物学报, 2014, 34(4): 482−488. ［CHENG Xiyong, WU Shaohui, LI Haixia, et al. Effects of HMW and LMW glutenin subunits on wheat quality traits[J]. Journal of Triticeae Crops, 2014, 34(4): 482−488.］

［41］ BRANLARD G, DARDEVET M. Diversity of grain proteins and bread wheat quality I. Correlation between gliadin bands and flour quality characteristics[J]. Journal of Cereal Science, 1985, 3(4): 329−343.

［42］ 程晓明, 王慧, 陈树林, 等. 不同小麦品种籽粒灌浆、脱水特性及其与产量和品质的关系[J]. 河南农业大学学报, 2023, 57(2): 197−206,230. ［CHENG Xiaoming, WANG Hui, CHEN Shulin, et al. Analysis on the characteristics of grain filling and dehydration rate and their relationship with yield and grain quality of different wheat varieties[J]. Journal of Henan Agricultural University, 2023, 57(2): 197−206,230.］

［43］ 蒋欣东. 化肥农药减施对稻茬冬小麦生长、产量及籽粒品质的影响[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2021. ［JIANG Xindong. Effects of reduced application of chemical fertilizers and pesticides on growth, yield and grain quality of winter wheat in rice stubble[D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2021.］

［44］ 孙颖颖. 小麦新品种(系)面包和馒头加工鉴评与配粉研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2024. ［SUN Yingying. Study on processing evaluation and flour blending of new wheat varieties (lines) bread and steamed bread[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2024.］