

网络出版时间:2025-09-24

网络出版地址:https://link.cnki.net/urlid/61.1359.s.20250923.1413.004

山东小麦品质时空变异特征及气象因子影响分析

王雪艳,赵莹,田宪玺,任凌云,王瑞杰,李振华,李晓月

(山东省粮油检测中心,山东济南 250102)

摘要:为探究山东省小麦品质的时空变化特征并明确关键气象因子,基于2018—2024年山东省105个县区673份小麦品种济麦22籽粒样品的9个品质指标数据,运用方差分析和逐步回归方法,分析小麦品质时空变异特征及其与气象因子的关系,并借助地理信息系统(GIS)可视化小麦优质的可能性区域。结果表明,山东省小麦整体呈现中强筋和中筋品质特征,蛋白质和湿面筋含量较高,但稳定时间、最大拉伸阻力等加工品质指标表现中等。时间维度上,小麦品质年际波动明显,中筋以上小麦比例从2018年53.5%显著提升至2024年87.6%。空间格局上,生态区间品质差异明显,胶东地区品质最优,鲁西南地区次之。从气象效应看,开花—成熟期是决定小麦品质的关键阶段,该阶段的日温差与容重、稳定时间和最大拉伸阻力极显著或显著相关,最高气温与蛋白质含量和沉淀指数呈显著或极显著负相关,降水量与湿面筋含量呈极显著正相关,平均温度与沉淀指数和形成时间呈极显著或显著负相关。济麦22在山东省表现出较好的适应性,胶东地区具备发展优质中强筋小麦潜力,鲁西南地区适宜发展优质中筋小麦。

关键词: 山东省;小麦;品质;时空变异;气象因子

中图分类号:S512.1;S314

文献标识码:A

文章编号:1009-1041(2026)04-0520-11

Spatiotemporal Variation Characteristics of Wheat Quality and Influence of Meteorological Factors in Shandong

WANG Xueyan, ZHAO Ying, TIAN Xianxi, REN Lingyun, WANG Ruijie, LI Zhenhua, LI Xiaoyue

(Shandong Grain and Oil Detection Center, Jinan, Shandong 250102, China)

Abstract: In order to explore the spatiotemporal variation characteristics of wheat quality in Shandong Province and identify key meteorological factors, the quality traits of 673 Jimai 22 samples collected from 105 counties and districts in Shandong Province from 2018 to 2024 were analyzed. The spatiotemporal variation characteristics of wheat quality were examined by analysis of variance (ANOVA), and the relationship between wheat quality traits and meteorological factors was analyzed by the stepwise regression method. The high-quality possibility distributions were visualized by geographic information system (GIS). The results showed that Jimai 22 in Shandong Province generally exhibited medium-strong gluten and medium gluten characteristics, with relatively high protein content and wet gluten content, but moderate processing properties such as stability time and maximum tensile resistance. In terms of temporal variation, wheat quality showed significant annual fluctuations, and the proportion of medium-strong gluten and medium gluten wheat increased from 53.5% in 2018 to 87.6% in 2024. In terms of spatial pattern, there were obvious differences in wheat quality among ecological areas, and the quality of wheat in Jiaodong was the best, followed by the southwestern of Shandong Province. Meteorological factors analysis indicated that the anthesis-maturing period was the key period determining wheat quality. During this period, the daily temperature range was significantly

收稿日期:2025-05-29

修回日期:2025-07-07

基金项目:国家粮食和物资储备局粮食质量安全监测项目

第一作者 E-mail: wangxueyanabc@163.com (王雪艳)

通讯作者 E-mail: 860418534@qq.com (赵莹)

correlated with test weight, stability time, and maximum tensile resistance; the maximum temperature was significantly negatively correlated with protein content and sedimentation index; the rainfall was significantly positively correlated with wet gluten content; and the average temperature was significantly negatively correlated with sedimentation index and development time. Jimai 22 showed good adaptability in Shandong Province. Jiaodong had the potential for developing medium-strong gluten wheat, while the southwestern in Shandong Province was suitable for developing medium gluten wheat.

Keywords:Shandong; Wheat; Quality; Spatial and temporal variation; Meteorological factors

随着居民生活水平的提升,优质专用小麦的需求持续增长。小麦品质受环境因素显著影响^[1-2],同一品种的品质在不同年度和地域间存在明显差异^[3],进而影响其产品的专用性和稳定性^[4]。对周麦 33 号、郑麦 119、宁春 4 号等品种的分析表明,不同品质指标对地区和年度的响应各异^[5-7]。因此,探究小麦品质的时空变异特征并明确关键气象因子,对优化区域种植布局、实现“种同质同,种优质优”具有重要意义。

灌浆期降水量、成熟期气温日较差等气象因子对小麦品质形成至关重要^[8]。王东等^[9]依据气象条件将山东省划分为胶东-鲁中强中筋适宜区、鲁西北-鲁西南强中筋次适宜区、鲁南强筋次适宜和中筋适宜区。余维宝等^[10]认为鲁东和鲁南是强筋小麦优势区,而王娜等^[11]则将胶东、鲁西北、鲁中归为强筋小麦适宜区。由此可见,目前对山东小麦品质区划的认识尚未完全统一。

济麦 22 具有产量稳定、综合抗性强、适应性广、品质优良等特点,在山东省乃至全中国被大面积推广种植^[12],也是当前中国小麦育种的重要种质资源之一。山东省地处中国黄淮冬麦区,是中强筋小麦单产水平较高的主产区之一^[13],但因其种植区域广、生态环境多样等常导致小麦品质不稳定。现有小麦品质研究多基于局部少量采集点、少量样品、短期(一两个年度)观测、少数(两三

个)品质指标及灌浆期气象因子,难以从多维度客观评价品质时空稳定性及其与气象因子的关系,更难以进行优质小麦综合区划。

本研究选用广泛种植的中筋小麦品种济麦 22 为对象,连续 7 年在山东省 105 个县区采集 673 份籽粒样品,基于赵君实等^[14]的生态区划系统,分析 9 个品质指标的时空变异规律,明确关键气象因子,划分优质小麦种植优势区域,以期为山东省优质小麦生产基地建设提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试材料为 673 份济麦 22 籽粒样品,采自 2018—2024 年山东省 105 个县区(表 1),每份样品 5 kg。采样点按照县区小麦种植面积比例分配采样量,每个县区随机抽取代表性村庄,优先选择种粮大户集中连片的主栽地块。采样方式分为田间或场院(仓库)两种,田间采用棋盘式“五点取样法”,在每块地选 5 个采样点,每点收获 3 行×1 m 的成熟小麦,混合成 1 个样品;场院(仓库)采样前,先通过“农户确认品种+籽粒形态学筛查”双重验证,确保品种为纯种济麦 22 且收获后单独存放未混杂,再采用“五点混合采样法”,从粮堆不同部位取样,最后混合成 1 个样品。

表 1 济麦 22 样品抽样量和分布范围
Table 1 Distribution and numbers of Jimai 22 samples

生态区 Ecological area	年份 Year							总计 Total
	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	
胶东 JD	4	4	4	9	8	7	7	43
鲁西北 NW	12	16	13	89	82	38	76	326
鲁中 CA	6	9	5	27	22	20	34	123
鲁西南 SW	6	6	7	43	25	42	52	181
山东 SD	28	35	29	168	137	107	169	673

JD:Jiaodong; NW: Northwest of Shandong; CA: Central area of Shandong; SW: Southwest of Shandong; SD: Shandong.

1.2 数据来源

根据山东省气象中心相关站点的气象资料,整理计算 2018—2023 年小麦播种—越冬期、返青—拔节期、拔节—开花期、开花—成熟期的最高气温、最低气温、日平均温度、日温差和降水量共 5 个指标的数据。

1.3 检测指标及方法

分别按照 GB/T 5498、GB/T 24899、GB/T 5506.2 和 GB/T 21119 方法测定容重、蛋白质含量、湿面筋含量和沉淀指数;稳定时间和形成时间按照 GB/T 14614 方法测定;最大拉伸阻力、延伸度、拉伸面积按照 GB/T 14615 方法测定。

1.4 品质分类标准

按照 GB/T 17320—2013《小麦品种品质分类》要求,对 2018—2024 年济麦 22 样品进行单项指标分级,综合蛋白质含量、湿面筋含量、沉淀指数、稳定时间和最大拉伸阻力 5 个主要品质指标进行综合分类(表 2)。

表 2 品质性状分类标准

Table 2 Classification standards for quality traits

性状 Trait	类型 Type			
	强筋 Strong gluten	中强筋 Medium- strong gluten	中筋 Medium gluten	弱筋 Weak gluten
PC/%	≥14.0	≥13.0	≥12.5	<12.5
WGC/%	≥30	≥28	≥26	<26
SI/mL	≥40	≥35	≥30	<30
ST/min	≥8.0	≥6.0	≥3.0	<3.0
MTR/EU	≥350	≥300	≥200	—

PC:蛋白质含量;WGC:湿面筋含量;SI:沉淀指数;ST:稳定时间;MTR:最大拉伸阻力。

PC: Protein content; WGC: Wet gluten content; SI: Sedimentation index; ST: Stability time; MTR: Maximum tensile resistance.

1.5 数据处理

利用 Microsoft Excel 365 进行数据初步整理统计,用 IBM SPSS Statistics 25.0 进行方差分析和逐步回归分析,采用 LSD 法进行多重比较。用 GIS 10.8 对中强筋、中筋小麦分布进行普通克里金插值分析。利用 Origin 2021 进行绘图。

2 结果与分析

2.1 不同年度间小麦品质的变化

2.1.1 品质性状变化

从籽粒品质看,在 2018—2024 年间,每年的

平均容重均大于 770 g · L⁻¹,均达到二等小麦标准(GB 1351—2023);7 年的容重平均为 792 g · L⁻¹,达到一等标准(≥790 g · L⁻¹)(表 3);容重整体在一等和二等麦之间波动,以 2024 年最高,2023 年最低,变异系数 2.29%,说明容重受环境因素影响小。7 年的蛋白质含量平均为 13.8%,2018 和 2020 年的平均值达到强筋小麦标准,其余年份达到中强筋麦标准,在 2018—2024 年间呈下降趋势,但保持在 13.8%左右;有 39.7%样品的蛋白质含量达到强筋小麦标准,43.1%样品达到中强筋小麦标准,14.6%样品达到中筋小麦标准,2.7%达到弱筋小麦标准(表 4)。总体上,小麦籽粒品质整体优良,容重稳定,蛋白质含量以强筋和中强筋为主且呈缓慢下降趋势。

面粉中湿面筋含量平均 31.8%,年平均值均达到强筋麦标准,在 2018—2024 年间呈下降趋势;有 66.3%样品的湿面筋含量达到强筋小麦标准,16.0%样品达到中强筋小麦标准,15.9%样品达到中筋小麦标准,1.8%样品达到弱筋小麦标准。沉淀指数平均 47.3 mL,除了 2019 和 2020 年外,其余年份都达到强筋小麦标准,部分年份间存在显著性差异,2018 年最高。在 2018—2024 年间呈先降后增最后趋于平稳的趋势(表 3)。69.3%样品的沉淀指数达到强筋小麦标准,8.8%样品达到中强筋小麦标准,18.3%样品达到中筋小麦标准,3.5%样品达到弱筋小麦标准(表 4)。这表明,山东省小麦面粉品质以强筋特性为主,湿面筋含量和沉淀指数虽年份间存在波动,但整体表现优良。

在加工品质指标中,形成时间平均 3.2 min,2018 和 2019 年显著低于其余年份,但整体呈上升趋势(表 3)。稳定时间平均 4.0 min,除了 2018 年其余年份达到中筋小麦标准;变异系数 54.00%,说明稳定时间受环境影响较大;在 2018—2024 年间呈缓慢上升趋势,中间略有起伏;有 2.4%样品的稳定时间达到强筋小麦标准,13.1%样品达到中强筋小麦标准,62.0%样品达到中筋小麦标准,22.6%样品达到弱筋小麦标准(表 4)。最大拉伸阻力平均 312 EU,达到中强筋小麦标准,在 2018—2024 年间没有显著性差异;有 31.8%样品的最大拉伸阻力达到强筋小麦标准,17.8%样品达到中强筋小麦标准,40.4%样品达到中筋小麦标准。延伸度平均 138 mm,部分年份间存在显著性差异,但整体比较平稳。拉伸面积平均 65 cm²,在 2018—2024 年间不存在显著性差异。整体上,山

表 3 2018—2024 小麦的品质性状
Table 3 Wheat quality traits from 2018 to 2024

年份 Year	TW/(g·L ⁻¹)	PC/%	WGC/%	SI/mL	DT/min	ST/min	MTR/EU	E/mm	TA/cm ²
2018	789±21bc	14.3±0.7a	36.5±3.4a	56.8±5.0a	2.7±0.6b	2.9±1.1b	281±56a	149±24ab	51±17a
2019	795±15ab	13.8±0.9b	34.5±2.8b	32.7±4.1c	2.7±0.6b	3.7±1.3ab	393±70a	124±15b	69±16a
2020	796±15ab	14.0±0.7ab	34.7±2.6b	32.1±5.0c	3.3±1.1a	3.6±1.6ab	353±67a	144±13ab	77±22a
2021	792±16abc	13.7±1.0b	31.8±3.8c	47.1±10.4b	3.2±0.8a	3.7±1.4ab	270±83a	166±55a	75±42a
2022	789±22bc	13.8±0.9b	30.7±3.2c	50.3±9.4b	3.5±1.1a	4.0±1.5ab	298±99a	123±17b	70±43a
2023	785±17c	13.7±0.8b	31.3±3.3c	50.9±12.5b	3.2±1.3a	4.0±3.1ab	289±110a	139±18ab	65±35a
2024	799±16a	13.8±0.9b	31.2±3.8c	47.0±10.1b	3.3±1.1a	4.6±2.7a	352±127a	129±17b	60±20a
平均值 Mean	792	13.8	31.8	47.3	3.2	4.0	312	138	65
变异系数 CV/%	2.29	6.52	11.86	24.00	32.81	54.00	36.42	23.66	51.25

同列数据后不同字母表示不同年度间差异显著($P<0.05$)。TW:容重;PC:蛋白质含量;WGC:湿面筋含量;SI:沉淀指数;ST:稳定时间;DT:形成时间;MTR:最大拉伸阻力;E:延伸度;TA:拉伸面积。下表同。

Values followed by different letters are significantly different among different years at 0.05 level. TW: Test weight; PC: Protein content; WGC: Wet gluten content; SI: Sedimentation index; ST: Stability time; DT: Development time; MTR: Maximum tensile resistance; E: Extensibility; TA: Tensile area. The same in tables 4—7.

表 4 2018—2024 年小麦单项品质性状分类
Table 4 Classification of individual quality traits of wheat from 2018 to 2024 %

性状 Quality trait	强筋 Strong gluten	中强筋 Medium-strong gluten	中筋 Medium gluten	弱筋 Weak gluten
PC	39.7	43.1	14.6	2.7
WGC	66.3	16.0	15.9	1.8
SI	69.3	8.8	18.3	3.5
ST	2.4	13.1	62.0	22.6
MTR	31.8	17.8	40.4	—

东小麦加工品质以中筋为主,但稳定性受环境影响较大,仍需延长稳定时间和提高最大拉伸面积来进一步提升加工品质。

总体而言,除最大拉伸阻力和拉伸面积,其余指标在部分年份间差异显著。容重的变异系数较小,稳定性好。稳定时间、拉伸面积等加工品质的变异系数较大,易受环境因素的影响,属不稳定性状^[15]。80%以上样品的蛋白质和湿面筋含量表现为中强筋以上品质,说明济麦 22 的蛋白质和湿面筋含量总体较高。湿面筋含量和沉淀指数主要表现为强筋品质,而稳定时间和最大拉伸阻力主要表现为中筋品质,说明品质结构不协调。

2.1.2 品质类型变化

按照 GB/T 17320—2013,综合蛋白质含量、湿面筋含量、沉淀指数、稳定时间和最大拉伸阻力 5 个主要品质性状,对不同年份的小麦样品分别按照中强筋和中筋小麦进行归类并计算各类型的比例(图 1)。2018—2024 年中筋以上小麦比例在

波动中呈上升趋势,说明品质在逐步变优。其中,2018 年山东遭遇严重的倒春寒导致稳定时间显著缩短,这可能是当年中筋以上小麦比例偏低的重要原因之一。中强筋小麦样品数占总样品量的 12.6%,年份间比例变化较大,2020 年比例最高,2018 年最低,整体呈先升后降再缓慢升的趋势。中筋小麦占比较大,占总样品量的 63.7%,总体上呈增加趋势,年份间变化幅度较大,2024 年比例最高,2020 年最低。

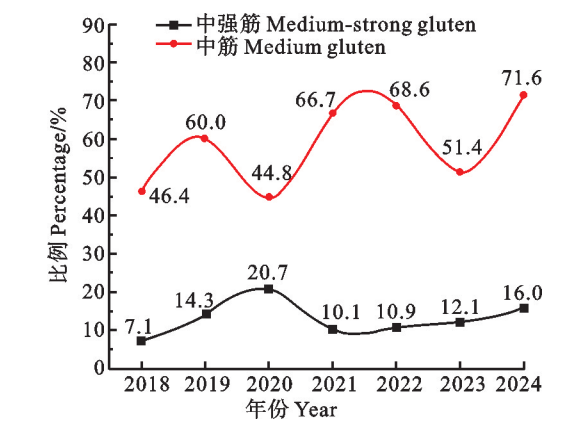


图 1 2018—2024 年小麦品质类型的变化
Fig. 1 Changes of wheat quality types from 2018 to 2024

2.2 不同生态区小麦品质的差异

2.2.1 品质性状的差异

籽粒品质:鲁西南地区容重最高,鲁西北地区次之,蛋白质含量在区域间存在显著性差异,胶东地区显著最高,鲁西南地区最低,表明胶东地区小

麦蛋白质含量优势明显,而鲁西南地区容重表现突出(表 5)。

面粉品质:湿面筋含量表现为胶东地区>鲁西北地区>鲁西南地区>鲁中地区,鲁西南地区的沉淀指数显著低于其他三个地区,说明胶东地区小麦面粉品质较优,而鲁西南地区相对较弱。

加工品质:胶东地区形成时间显著高于其他地区,其他三个地区间不存在显著性差异。稳定时间表现为胶东地区>鲁西南地区>鲁中地区>鲁西北地区。最大拉伸阻力表现为胶东地区>鲁中、鲁西南地区>鲁西北地区。延伸度表现为胶东地区>鲁西北地区>鲁中>鲁西南地区;拉伸面积表现为鲁西南地区>胶东地区>鲁中、鲁西北地区(表 5)。整体来看,胶东地区小麦加工品质较优,而鲁西北地区相对较差。

从单个品质性状的分类情况(表 6)看,胶东地区 5 个指标都达到中筋以上小麦标准,其中稳定时间较长,58%样品符合中强筋标准,33%样品达到中筋标准,其他 4 个指标达到中强筋以上要求的样品比例均超过 85%,说明胶东地区小麦不仅高蛋白、高面筋,而且稳定时间较长,兼具优良的商品品质与加工品质,较适合生产高端面食产品。鲁西北地区小麦蛋白质含量主要表现为中强

筋以上品质,湿面筋含量和沉淀指数主要表现为强筋品质,最大拉伸阻力表现以中筋为主,稳定时间偏短,说明鲁西北地区小麦具备高蛋白、高面筋优势,但面团稳定和弹性较弱,加工品质偏向中筋。鲁中地区小麦蛋白质含量、湿面筋含量和最大拉伸阻力表现为中筋以上品质,沉淀指数表现以强筋为主,稳定时间稍短,说明鲁中地区小麦各项指标处于中等水平,加工品质以中筋为主,较适合常规面制品加工。鲁西南地区小麦蛋白质含量表现为中筋以上品质,湿面筋含量表现以强筋为主,沉淀指数主要表现为强筋品质,稳定时间表现以中筋为主,结合其高容重优势,鲁西南地区小麦具备良好的商品品质和磨粉品质,适合大规模商品化加工,能满足中筋小麦制粉需求。

2.2.2 品质类型分布

按照 GB/T 17320—2013,综合蛋白质含量、湿面筋含量、沉淀指数、稳定时间和最大拉伸阻力 5 个主要品质性状,对不同生态区的小麦样品分别按照中强筋和中筋小麦进行归类并计算各类型的比例(图 2)。山东省小麦主要表现为中强筋和中筋小麦,达到中强筋和中筋小麦标准的样品比例分别为 12.6%和 63.7%。胶东地区的品质最

表 5 不同生态区小麦的品质性状
Table 5 Wheat quality traits from four ecological areas

性状 Trait	胶东 JD	鲁西北 NW	鲁中 CA	鲁西南 SW
TW/(g·L ⁻¹)	789±19b	792±18ab	789±18b	796±17a
PC/%	14.2±1.3a	13.9±0.7b	13.7±0.9bc	13.6±1.0c
WGC/%	32.7±4.1a	32.4±3.9a	30.7±3.8b	31.2±3.2b
SI/mL	50.3±10.9a	49.9±9.3a	48.2±12.9a	42.1±11.7b
DT/min	4.0±1.4a	3.1±0.9b	3.3±1.0b	3.2±1.1b
ST/min	5.8±1.9a	3.4±1.6c	4.2±2.4b	4.6±2.5b
MTR/EU	361±82a	289±124b	327±120ab	322±94ab
E/mm	153±25a	140±34b	137±27b	133±34b
TA/cm ²	71±18b	51±20c	58±19c	87±43a

同行数据后不同字母表示不同生态区间差异显著(P<0.05)。
Values followed by different letters of same line are significantly different at 0.05 level among different ecological areas.

表 6 不同生态区小麦单个品质性状分类(强筋/中强筋/中筋/弱筋)及比例
Table 6 Ratio and Classification(strong gluten/ medium-strong gluten/ medium gluten/
weak gluten) of individual quality traits in four ecological areas

生态区 Ecological area	PC	WGC	SI	ST	MTR	%
胶东 JD	53/35/12/0	75/16/9/0	75/20/5/0	9/58/33/0	52/39/9	
鲁西北 NW	41/51/5/3	72/14/13/1	83/5/8/4	1/7/61/31	24/11/65	
鲁中 CA	36/42/20/2	48/24/26/2	69/10/15/6	4/15/58/23	45/25/30	
鲁西南 SW	36/31/29/4	67/14/16/3	47/11/39/3	3/11/74/12	41/23/36	

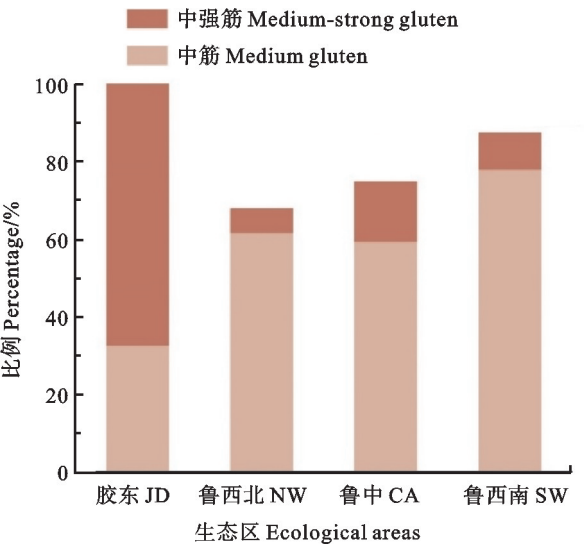


图 2 不同生态区小麦品质类型构成
Fig. 2 Composition of wheat quality types in four ecological areas

好,全部表现为中筋以上品质,中强筋和中筋品质的比例分别为 67.4%和 32.6%;鲁西南地区次之,以中筋为主,中筋以上品质占比 87.3%;鲁中和鲁西北地区以中筋为主,主要受稳定时间较短的影响。

2.3 品质性状与气象因子的关系

逐步回归分析结果(表 7)显示,小麦品质性状与不同时期气象因子存在一定线性关系。其中,容重与开花一成熟期日温差呈极显著正相关;蛋白质含量与返青一拔节期降水量极显著正相关,与开花一成熟期最高气温呈显著负相关;湿面筋含量与开花一成熟期降水量呈极显著正相关;沉淀指数与开花一成熟期平均温度和最高温度呈

极显著负相关;形成时间与播种一越冬期最高气温呈极显著正相关,与开花一成熟期平均温度呈显著负相关;稳定时间和最大拉伸阻力均与开花一成熟期日温差呈极显著或显著负相关,稳定时间还与播种一越冬期降水量呈极显著正相关;拉伸面积主要受返青一拔节期温度影响,与最低温度和日温差分别呈极显著正相关和负相关;延伸度与拔节一开花期最低温度呈显著负相关。整体来看,开花一成熟期是决定小麦籽粒品质的关键时期,该时期的温度、降水等气象因子显著影响着小麦的品质。返青一拔节期的气象因子与拉伸面积关系更为密切。

2.4 中强筋和中筋优势区域可能性分布评价

以主要县区的中强筋和中筋小麦比例情况为依据,利用 GIS 插值空间分析得到优势区域可能性分布图(图 3)。各县区的中强筋小麦比例差异较大,其中青岛平度、即墨和烟台蓬莱比例较高,可能性均在 80%以上。中强筋小麦优质可能性呈块状分布,胶东地区是中强筋小麦可能性高值区域,可能性达 60%以上,适宜发展中强筋小麦。中筋小麦比例较高地区主要集中在滨州邹平,济宁的任城、泗水,泰安的岱岳区、宁阳,枣庄滕州,菏泽的单县、成武、东明,潍坊诸城,可能性均在 80%以上。中筋小麦优质可能性呈带状分布,可能性从高到低依次为鲁西南、鲁中、鲁西北、胶东地区。菏泽市和济宁西南部为中筋小麦优质可能性高值区域,可能性达 79%以上,适宜发展中筋小麦。泰安市、枣庄市、济宁东部和北部、济南南部、滨州邹平市、临沂平邑县种植中筋小麦的优质可能性在 73%以上,较适宜发展中筋小麦。

表 7 品质指标与气象因子相关性
Table 7 Correlations between the quality indicators and meteorological factors

性状 Trait	回归方程 Regression equation	相关系数 Correlation coefficient
TW	$Y=765.74+1.669X_{4d}$	$X_{4d}:0.200^{**}$
PC	$Y=13.645+0.023X_{5b}-0.006X_{2d}$	$X_{5b}:0.410^{**};X_{2d}:-0.349^{*}$
WGC	$Y=61.605+0.012X_{5d}$	$X_{5d}:0.512^{**}$
SI	$Y=94.772-0.846X_{2d}-1.206X_{1d}$	$X_{1d}:-0.428^{**};X_{2d}:-0.407^{**}$
DT	$Y=4.709+0.244X_{2a}-0.225X_{1d}$	$X_{2a}:0.415^{**};X_{1d}:-0.282^{*}$
ST	$Y=5.694+0.010X_{5a}-0.169X_{4d}$	$X_{5a}:0.423^{**};X_{4d}:-0.357^{**}$
MTR	$Y=459.599-11.822X_{4d}$	$X_{4d}:-0.474^{*}$
TA	$Y=148.625+10.357X_{3b}-7.996X_{4b}$	$X_{3b}:0.495^{**};X_{4b}:-0.512^{**}$
E	$Y=180.107-4.164X_{3c}$	$X_{3c}:-0.392^{*}$

自变量 X 的下脚 a、b、c 和 d 分别代表播种—越冬期、返青—拔节期、拔节—开花期和开花—成熟期;X₁、X₂、X₃、X₄ 和 X₅ 分别代表生育期内平均温度、平均最高温度、平均最低温度、日温差和降雨量。* *:P<0.01;* :P<0.05。

a, b, c, and d in the subscript of the independent variable X represent sowing to overwintering period, re-greening to jointing period, jointing to anthesis period, and anthesis to maturity period, respectively. X₁, X₂, X₃, X₄, and X₅ represent average temperature, maximum temperature, minimum temperature, daily temperature range, and rainfall, respectively. * *:P<0.01;* :P<0.05.

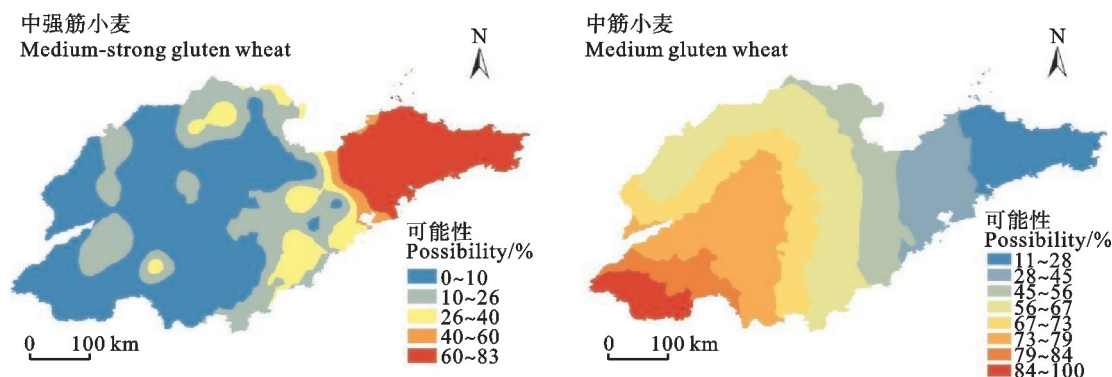


图 3 中强筋和中筋小麦的适应可能性分布图

Fig. 3 Distribution map of adaptation possibility of medium-to-strong and medium-gluten wheat

3 讨论

3.1 年份和生态区对小麦品质影响

山东省小麦品质整体表现为中筋和中强筋,满足面条、馒头、水饺等要求,与山东以传统面食为主的饮食结构相适应。山东小麦的籽粒蛋白质含量高于全中国平均值^[16],略低于黄淮北麦区^[17];湿面筋含量和沉淀指数均高于黄淮北麦区^[17]和全中国^[16]平均水平;稳定时间和最大拉伸阻力均低于全中国^[16]的平均值。湿面筋含量和沉淀指数是山东小麦优势品质指标,整体表现为强筋品质。蛋白质含量是良好品质指标,整体表现为中强筋以上品质。稳定时间和最大拉伸阻力是劣势品质指标,整体表现为中筋品质。各指标均存在强中弱筋小麦特性交叉不协调的现象,导致优质专用小麦产量偏低,这可能与小麦育种重高产轻品质相关^[18]。稳定时间是制约山东小麦高品质的关键因素。

同一小麦品种在区域间和年份间的品质稳定性是衡量其推广价值的关键因素^[4]。济麦 22 的最大拉伸阻力和拉伸面积不易受年份影响,其他品质指标在不同年份间表现不一致,可能与当年气候因素相关。2022 和 2023 年容重偏低,或归因于收获季节遭遇降水,致使籽粒多次吸胀并发生不规则形变^[19]。2018 年和 2020 年济麦 22 表现出蛋白质和湿面筋含量偏高但稳定时间偏短的品质特征,这可能与当年遭遇倒春寒密切相关。已有研究表明,低温胁迫会显著提高小麦蛋白质和湿面筋含量,同时显著缩短稳定时间^[20-21]。其原因可能是低温会抑制叶绿素合成^[22],并降低 1, 5-二磷酸核酮糖羧化酶、磷酸烯醇式丙酮酸羧化酶等光合关键酶活性^[23],进而导致光合碳同化受

阻,碳水化合物积累减少;与此同时,低温胁迫会促进可溶性蛋白的积累^[24],最终使籽粒蛋白质含量显著提高。湿面筋主要由醇溶蛋白和谷蛋白组成,其含量随着蛋白质总量增加而同步上升。然而,低温胁迫会改变面筋蛋白组成比例,表现为醇溶蛋白含量升高、麦谷蛋白含量降低,从而使麦谷蛋白/醇溶蛋白比值下降^[20]。由于麦谷蛋白是决定面团弹性和稳定性的关键组分,其比例降低会削弱面筋网络结构的稳定性,进而缩短稳定时间。2022 年湿面筋含量较低可能与当年开花一成熟期间降水较少有关。近 7 年蛋白质和湿面筋含量总体呈下降趋势,可能因为近几年小麦产量的提升伴随着籽粒淀粉含量的同步增加,加上气候因素等影响,共同导致蛋白质和湿面筋含量的减少。稳定时间易受环境的影响,这与前人研究结果^[25]相似,但整体呈上升趋势,说明加工性能逐步优化,这可能源于播种—越冬阶段适宜降水有助于延长稳定时间^[26]。在山东不同生态区,可能因为土壤、气候及灌溉等因素的影响,济麦 22 的品质表现出明显差异,中强筋小麦在胶东地区相对集中,中筋小麦在鲁西南、鲁西北和鲁中地区分布较广。胶东地区土壤相对肥沃,气候适宜,有利于蛋白质的积累和质量提高,可考虑将发展优质中强筋小麦作为主要目标。鲁西南地区的气候条件对增加容重较为有利,连年品质大多表现为中筋,可侧重发展优质高容重中筋小麦。鲁西北和鲁中地区主要因为稳定时间较短导致品质指标不够协调,田间管理时可根据降雨情况和土壤墒情,采取合理灌溉^[27]或适时追加氮肥^[28-29]等措施来改善小麦加工品质。

3.2 气象因子对小麦容重的影响

本研究中,小麦容重表现为鲁西南地区最高,

胶东地区偏低,与李永庚等^[30]利用山东省18个品种研究得出的小麦平均容重趋势一致。余维宝等^[10]发现,小麦品种济麦44的容重在山东随经度升高而降低,呈现出由西向东、由南向北降低的主要趋势,与本研究结果一致。孙丽娟等^[8]分析了2010—2015年济麦22在中国小麦主要生产区品质空间分布变化特征,认为容重自西向东、自南向北呈现先增后减的分布规律,冀、鲁、豫三省交界区域高于其他区域,高点多次出现在鲁西(南)地区,鲁西地区的容重整体偏高。

通过回归相关分析,小麦容重与开花一成熟期日温差呈极显著正相关。灌浆期较大的日温差有利于增加容重,而过高的夜间温度会缩短灌浆期,不利于提高籽粒千重日增率,进而导致粒重下降^[31]。有研究表明,灌浆收获期降水量的减少会增加小麦容重^[32-33]。相较于鲁中和胶东地区,鲁西地区灌浆收获期降水量少、日温差大,容重整体表现较好。因年份和生态区间灌浆期气温日较差和降水量变化幅度较小,容重整体稳定性较高,变异系数小。

3.3 气象因子对小麦蛋白质含量、湿面筋含量和沉淀指数的影响

蛋白质含量与湿面筋含量^[34]、沉淀指数^[35]呈正相关。本研究中,山东省各生态区的蛋白质含量、湿面筋含量和沉淀指数呈现相似规律。蛋白质含量自西向东逐渐升高,湿面筋含量呈现东北高西南低,这与余维宝等^[10]研究结果一致。而李永庚等^[30]利用山东省18个小麦品种分析发现,蛋白质含量以鲁西南地区最高,胶东地区最低。这说明不同品种对生态环境敏感程度存在差异。胶东地区的沉淀指数最高,鲁西南地区最低,与李永庚等^[30]研究结果基本一致。

小麦开花到成熟期是蛋白质合成和积累的关键时期,在一定温度范围内,蛋白质含量随着温度同步增长,但温度过高反而会降低蛋白质含量^[36-37],即使高温时间很短(35℃,1h),也会造成蛋白质含量的降低^[38]。本研究中,济麦22的籽粒蛋白质含量与灌浆期平均温度无显著相关性,但与开花一成熟期最高气温呈显著负相关,与返青—拔节期降水量呈极显著正相关。胶东地区开花一成熟期温度适宜,蛋白质合成酶活性强,加快籽粒干物质积累的速度,缩短灌浆持续时间,降低粒重,提高籽粒的氮磷浓度,从而提高蛋白质含量^[39]。返青—拔节期是小麦前期生长发育的重

要阶段,期间降雨能显著促进小麦的返青和生长,有助于提高叶片硝酸还原酶和谷氨酰胺合成酶的活性,促进氮素积累,进而提高蛋白质含量。鲁西南地区可能由于返青—拔节期降水量较少,加上灌浆成熟期容易出现高温天气,不利于蛋白质的积累。

回归分析结果显示,湿面筋含量与开花一成熟期降水量呈极显著正相关,灌浆前期的降水量过少时,土壤水分亏缺会降低植株氮素利用率,不利于储藏蛋白和麦谷蛋白大聚体的积累,影响面筋含量^[40]。小麦的沉淀指数主要受抽穗一成熟期温度影响,与抽穗一成熟期的日均温^[34]和灌浆期高温(高于32℃)时长^[41-42]呈负相关,这与本研究结果一致。小麦灌浆成熟期的高温天气会加快醇溶蛋白的合成速度,从而降低麦谷蛋白/醇溶蛋白的比值,沉淀指数随之下降^[43-44]。鲁西南地区日均温较高且高温时间长,沉淀指数较低。

3.4 气象因子对小麦面团流变学特性的影响

粉质特性和拉伸特性与面粉加工品质密切相关,但易受环境因素的影响。济麦22面团流变学参数的变异系数较大,稳定性差,这与前人^[25,44]研究结果一致。孙连发^[45]对不同地点间和同一地点的龙麦26品质稳定性进行研究,发现稳定时间和形成时间对环境、农艺措施反应敏感,稳定性差。Branlard等^[46]认为,延伸度主要受地点或地点遗传互作效应的影响。张学林等^[47]研究连续两年生态因子与冬小麦拉伸参数之间的关系,发现拉伸参数在年份间变化没有规律,气象因子的影响因年份而异。面团流变学参数稳定性差是由气象因子、土壤性质、栽培技术等多因素共同作用的综合结果。

蛋白质作为决定小麦加工品质的核心成分,其质量主要由醇溶蛋白与麦谷蛋白的含量及其组成比例所决定。赵春等^[48]发现,胶东地区的稳定时间长于其他地区,与本研究结果一致。李永庚等^[49]认为,胶东地区面粉加工品质优于其他地区的重要生理原因是胶东地区的麦谷蛋白及其大聚合体的含量、麦谷蛋白/麦醇蛋白的比值较高。小麦籽粒灌浆前期适当的日最高气温(30℃)有助于麦谷蛋白和大聚合体的积累,并提高了麦谷蛋白/麦醇蛋白比例,有利于改善加工品质。而灌浆中后期高温(>30℃)会造成麦谷蛋白含量降低,升高麦醇蛋白含量,降低麦谷蛋白/麦醇蛋白比例,使品质变差,只有温度适宜(25~30℃)才

有助于碳氮代谢和麦谷蛋白及大聚合体的形成,对改善蛋白质品质有利。另外,灌浆前中后期的温度(日均温、昼夜温差、 $>30^{\circ}\text{C}$ 天数)对形成时间和稳定时间的影响不同。余维宝等^[10]提出,稳定时间与拔节至开花期最高气温呈显著负相关。本研究中面团流变学参数受温度影响显著,形成时间主要受播种—越冬期的最高气温和开花—成熟期的平均温度的影响;稳定时间和最大拉伸阻力均受开花—成熟期日温差的负面影响;拉伸面积主要受返青—拔节期温度的综合影响,受最低温度的正效应和日温差的负效应;延伸度主要受拔节—开花期最低温度的负面影响。综合看,在播种—越冬期最高温度为 15°C 左右、开花—成熟期的平均温度为 20°C 左右和日温差为 10°C 左右时,有利于小麦面团流变特性的形成。

3.5 山东省中强筋和中筋小麦区划分析

山东省在中强筋和中筋小麦生产上表现出较高的单产水平,是中国优质小麦的主要优势产区之一。基于连续7年对山东省大范围主产县区的取样分析,济麦22在山东省表现出较好的适应性。胶东地区冬季降雨量相对充足且低温持续时间较长,且开花—成熟期温度适宜,有助于提高蛋白质含量和品质,使得该地区发展优质中强筋小麦的潜力较大,优质概率可达60%以上。鲁西南地区地势平坦,灌溉条件较好,开花—成熟期日温差较大,有利于增加粒重,该地区发展优质高容重中筋小麦的优势较为明显,优质概率可达79%以上。综合来看,胶东和鲁西南地区的生态环境更有利于发展优质中强筋和中筋专用小麦。

本研究以济麦22为代表,通过连续7年在山东省105个县区的大范围取样分析,明确了该品种品质的时空变异特征及其与关键气象因子的关系,为山东省优质小麦生产布局提供了科学依据。需要指出的是,不同小麦品种的遗传背景各异,其对生态环境的敏感性和响应机制可能存在差异,因此本研究结论在其他品种上的普适性有待进一步验证。未来研究需要利用不同品质类型(强筋、中筋、弱筋)和遗传背景的小麦品种,深入比较不同基因型小麦的品质稳定性及其与环境因子的互作效应。此外,小麦品质不仅受气候影响,也受土壤肥力、基础地力^[50-52]以及灌溉、施肥等田间管理措施^[27,29,53-54]的影响,而气象因子与土壤、栽培等因素的综合交互作用对品质的影响尚未深入探讨。后续研究需进一步整合气象、土壤、栽培等关

键因素,构建更综合的品质评价模型。

4 结论

山东省小麦整体以中强筋和中筋品质为主。受气候、土壤等因素影响,部分品质指标在不同年份及生态区间存在显著差异。其中,2024年济麦22品质较优,中筋以上样品比例达87.6%;而2018年表现较差,中筋以上样品比例仅为53.5%。从生态区分布看,胶东地区小麦样品全部达到中筋以上品质,表现最佳;鲁西南地区次之,中筋以上样品比例为87.3%;鲁中和鲁北地区样品比例均低于80%。综合品质性状分析表明,济麦22在山东省适应性良好,具备发展优质中强筋和中筋小麦的潜力。其中,胶东地区更适宜发展中强筋小麦,鲁西南和鲁中地区则较适宜发展中筋小麦。为提升优质小麦生产的稳定性,建议重点关注对环境敏感的稳定时间、最大拉伸阻力等关键面团流变学参数。鉴于播种至越冬期的降水量与稳定时间呈极显著正相关,生产实践中可根据墒情考虑适当灌溉越冬水,以改善品质。

参考文献:

- [1]关二旗,魏益民,张波.小麦籽粒品质与基因型及环境条件的关系[J].麦类作物学报,2010,30(5):963.
GUAN E Q, WEI Y M, ZHANG B. Relationships between wheat kernel quality and genotype as well as environmental conditions [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2010, 30(5): 963.
- [2]张素瑜,靳海洋,崔静宇,等.不同生态环境对强筋小麦产量和品质的影响[J].河南农业科学,2022,51(7):22.
ZHANG S Y, JIN H Y, CUI J Y, et al. Effect of different ecological environments on yield and quality of strong gluten wheat [J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2022, 51(7): 22.
- [3]GRAYBOSCH R A, PETERSON C J, SHELTON D R, et al. Genotypic and environmental modification of wheat flour protein composition in relation to end-use quality [J]. *Crop Science*, 1996, 36(2): 296.
- [4]孙振纲,许琦.小麦品质稳定性研究进展[J].山西农业科学,2010,38(12):90.
SUN Z G, XU Q. Study on quality stability in wheat [J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2010, 38(12): 90.
- [5]洪宇,吴海彬,段晓亮,等.强筋小麦品种周麦33号品质性状稳定性及食品加工适用性分析[J].粮油食品科技,2021,29(2):94.
HONG Y, WU H B, DUAN X L, et al. Stability of quality characters and applicability of food processing of strong gluten wheat variety Zhoumai 33 [J]. *Science and Technology of Cereals, Oils and Foods*, 2021, 29(2): 94.
- [6]秦毛毛,刘艳喜,王雯雯,等.优质小麦品种郑麦119品质及其稳定性分析[J].河南农业科学,2023,52(2):21.
QIN M M, LIU Y X, WANG W F, et al. Quality and its stability of wheat variety Zhengmai 119 with high quality [J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2023, 52(2): 21.
- [7]张春娥,孙悦,刘新保,等.宁春4号小麦品质及相关性分析[J].中国粮油学报,2024,39(5):54.

- ZHANG C E, SUN Y, LIU X B, *et al.* Quality and correlation analysis of Ningchun 4 [J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2024, 39(5): 54.
- [8] 孙丽娟, 胡学旭, 陆伟, 等. 基于GIS的小麦籽粒品质空间分布特征和影响因子分析[J]. *中国农业科学*, 2018, 51(5): 999.
- SUN L J, HU X X, LU W, *et al.* Spatial distribution characteristics of wheat grain quality and analysis of factors based on GIS [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(5): 999.
- [9] 王东, 于振文, 张永丽. 山东强筋和中筋小麦品质形成的气象条件及区划[J]. *应用生态学报*, 2007, 18(10): 2269.
- WANG D, YU Z W, ZHANG Y L. Meteorological conditions affecting the quality of strong gluten- and medium gluten-wheat and climate division in Shandong Province [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(10): 2269.
- [10] 余维宝, 李楠, 寇泓, 等. 山东省强筋小麦品质评价及与气象因子关系分析[J]. *中国农业科学*, 2022, 55(22): 4383.
- YU W B, LI N, KOU Y H, *et al.* Study on the quality parameters of strong gluten wheat and analysis of its relationship with meteorological factors in Shandong Province [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2022, 55(22): 4383.
- [11] 王娜, 李楠, 南镇武, 等. 气候变暖前后山东省优质专用小麦品质气候区划研究[J]. *山东农业科学*, 2025, 57(1): 40.
- WANG N, LI N, NAN Z W, *et al.* Study on climate zoning of high-quality special wheat quality in Shandong Province before and after climate warming [J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2025, 57(1): 40.
- [12] 郭军, 李蒙圣, 刘建军, 等. 三个优质小麦品种品质稳定性分析[J]. *中国粮油学报*, 2019, 34(6): 12.
- GUO J, LI H S, LIU J J, *et al.* Quality stability analysis of three elite wheat cultivars with good end-use quality [J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2019, 34(6): 12.
- [13] 王东, 鞠正春. 山东小麦生产发展潜力分析[J]. *山东农业科学*, 2013, 45(12): 99.
- WANG D, JU Z C. Analysis on the development potential of wheat production in Shandong Province [J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2013, 45(12): 99.
- [14] 赵君实, 荆淑民, 王法宏. 山东小麦生态区划的研究[J]. *山东农业科学*, 1992, 24(6): 3.
- ZHAO J S, JING S M, WANG F H. Study on ecological zoning of wheat in Shandong Province [J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 1992, 24(6): 3.
- [15] 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.
- YI H, LU H L, WANG Y P, *et al.* Correlations and multiple regression analysis on the index of wheat quality and dough rheological characters [J]. *Cereal & Feed Industry*, 2014(10): 4.
- [16] 吴海彬, 孙辉, 洪宇, 等. 2022年我国小麦品质分析[J]. *粮油食品科技*, 2024, 32(2): 92.
- WU H B, SUN H, HONG Y, *et al.* Analysis on the quality of wheat in China in 2022 [J]. *Science and Technology of Cereals, Oils and Foods*, 2024, 32(2): 92.
- [17] 温建, 孙成金, 汪松玉, 等. 中国小麦主产区重要品质性状演变分析[J]. *江苏农业科学*, 2023, 51(19): 75.
- WEN J, SUN C J, WANG S Y, *et al.* Evolution of important quality traits in China's main wheat-producing regions [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2023, 51(19): 75.
- [18] 黄德华, 张珊, 曹新有, 等. 山东省小麦育种现状与建议[J]. *山东农业大学学报(自然科学版)*, 2024, 55(4): 599.
- HUANG D H, ZHANG S, CAO X Y, *et al.* Current situation and suggestions of wheat breeding in Shandong Province [J]. *Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition)*, 2024, 55(4): 599.
- [19] 廖先静, 邱冬云, 陈慧芳, 等. 收获期降雨对强筋小麦品质的影响[J]. *安徽农业科学*, 2010, 38(15): 7988, 8132.
- LIAO X J, QIU D Y, CHEN H F, *et al.* Effects of raining during harvest season on quality of strong-gluten wheat [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2010, 38(15): 7988, 8132.
- [20] 秦毛毛, 刘艳喜, 张琨, 等. 倒春寒对优质强筋小麦品种郑麦366品质的影响[J]. *河南农业科学*, 2021, 50(3): 42.
- QIN M M, LIU Y X, ZHANG K, *et al.* Effect of late spring coldness on quality of high-quality strong gluten wheat Zhengmai 366 [J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2021, 50(3): 42.
- [21] LIU L L, SONG H, SHI K J, *et al.* Response of wheat grain quality to low temperature during jointing and booting stages: On the importance of considering canopy temperature [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2019, 278: 107658.
- [22] 张磊, 李国领, 张建周, 等. 拔节期低温胁迫对小麦生理特性和产量的影响[J]. *河南农业科学*, 2017, 46(11): 13.
- ZHANG L, LI G L, ZHANG J Z, *et al.* Effects of low temperature stress on physiological characters and yield of two wheat varieties at jointing stage [J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2017, 46(11): 13.
- [23] 范琼花, 孙万春, 李兆君, 等. 硅对短期低温胁迫小麦叶片光合作用及其主要相关酶的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2009, 15(3): 544.
- FAN Q H, SUN W C, LI Z J, *et al.* Effects of silicon on photosynthesis and its major relevant enzyme activities in wheat leaves under short-term cold stress [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2009, 15(3): 544.
- [24] 孙苗苗, 王志强, 高翔, 等. 河南主推小麦品种对低温胁迫的生理响应及耐寒性分析[J]. *麦类作物学报*, 2016, 36(3): 316.
- SUN M M, WANG Z Q, GAO X, *et al.* Cold tolerance evaluation of wheat varieties in Henan based on their physiological response to low temperature stress [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2016, 36(3): 316.
- [25] 杨学举, 周进宝, 王永红. 优质小麦品质性状的环境变异研究[J]. *麦类作物学报*, 2000, 20(3): 21.
- YANG X J, ZHOU J B, WAN Y H. Study on variation of quality characters of high quality wheat grown in different environment [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2000, 20(3): 21.
- [26] SI Z Y, QIN A Z, LIANG Y P, *et al.* A review on regulation of irrigation management on wheat physiology, grain yield, and quality [J]. *Plants*, 2023, 12(4): 692.
- [27] 李琦, 王佳宇, 吴强, 等. 限水灌溉对河套灌区小麦籽粒品质的影响[J]. *内蒙古农业大学学报(自然科学版)*, 2022, 43(6): 28.
- LI Q, WANG J Y, WU Q, *et al.* Effects of restricted irrigation on wheat grain quality in Hetao irrigation area [J]. *Journal of Inner Mongolia Agricultural University (Natural Science Edition)*, 2022, 43(6): 28.
- [28] WU W, WANG Y, WANG L, *et al.* Booting stage is the key timing for split nitrogen application in improving grain yield and quality of wheat: A global meta-analysis [J]. *Field Crops Research*, 2022, 287: 108665.
- [29] 王荣荣, 徐宁璐, 黄修利, 等. 一次灌溉和氮肥运筹对旱地小麦籽粒产量和品质的影响[J]. *中国农业科学*, 2025, 58(1): 43.
- WANG R R, XU N L, HUANG X L, *et al.* Effects of one-off irrigation and nitrogen fertilizer management on grain yield and quality in dryland wheat [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2025, 58(1): 43.

- [30]李永庚,于振文,梁晓芳,等.山东省强筋小麦种植区划研究[J].山东农业科学,2001,33(5):3.
LI Y G, YU Z W, LIANG X F, *et al.* Study on planting zoning for strong gluten wheat in Shandong Province [J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2001, 33(5):3.
- [31]GARCÍA G A, SERRAGO R A, DRECCER M F, *et al.* Post-anthesis warm nights reduce grain weight in field-grown wheat and barley [J]. *Field Crops Research*, 2016, 195:50.
- [32]张学林,梅四伟,郭天财,等.遗传和环境因素对不同冬小麦品种品质性状的影响[J].麦类作物学报,2010,30(2):249.
ZHANG X L, MEI S W, GUO T C, *et al.* Effects of genotype and environment on winter wheat qualities [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2010, 30(2):249.
- [33]于立河,刘德福,郭伟,等.收获期降雨对春小麦品质的影响[J].麦类作物学报,2007,27(4):658.
YU L H, LIU D F, GUO W, *et al.* Effects of raining during harvest season on quality of spring wheat [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2007, 27(4):658.
- [34]王中秋,应鹏飞,陈梦涛,等.普通小麦-野生二粒小麦染色体臂置换系籽粒与品质性状分析[J].作物杂志,2020(4):37.
WANG Z Q, YING P F, CHEN M T, *et al.* Analysis of grain and quality traits of chromosome arm substitution lines of *Triticum dicoccoides* in the background of *Triticum aestivum* [J]. *Crops*, 2020(4):37.
- [35]沈业松,王歆,顾正中,等.296份黄淮麦区小麦品种资源在江淮淮北地区的品质分析[J].浙江农业学报,2018,30(10):1617.
SHEN Y S, WANG X, GU Z Z, *et al.* Quality analysis of 296 wheat varieties from the Huang-Huai wheat region planted in Huaibei area of Jiangsu [J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2018, 30(10):1617.
- [36]罗丕,周美兰,骆叶青,等.气象因子对小麦生长发育及品质性状的影响[J].作物研究,2008,22(5):424.
LUO P, ZHOU M L, LUO Y Q, *et al.* Effects of climatic factors on wheat quality [J]. *Crop Research*, 2008, 22(5):424.
- [37]SMIKA D E, GREBB W. Protein content of winter wheat grain as related to soil and climatic factors in the semiarid central great plains [J]. *Agronomy Journal*, 1973, 65(3):433.
- [38]BLUMENTHAL C S, BATEY I L, BEKES F, *et al.* Seasonal changes in wheat-grain quality associated with high temperatures during grain filling [J]. *Australian Journal of Agricultural Research*, 1991, 42(1):21.
- [39]RANDALL P J, MOSS H J. Some effects of temperature regime during grain filling on wheat quality [J]. *Australian Journal of Agricultural Research*, 1990, 41(4):603.
- [40]许振柱,于振文,王东,等.灌溉条件对小麦籽粒蛋白质组分积累及其品质的影响[J].作物学报,2003,29(5):682.
XU Z Z, YU Z W, WANG D, *et al.* Effect of irrigation conditions on protein composition accumulation of grain and its quality in winter wheat [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2003, 29(5):682.
- [41]GRAYBOSCH R A, PETERSON C J, BAENZIGER P S, *et al.* Environmental modification of hard red winter wheat flour protein composition [J]. *Journal of Cereal Science*, 1995, 22(1):45.
- [42]RHARRABTI Y, GARCÍA DEL MORAL L F, VILLEGAS D, *et al.* Durum wheat quality in Mediterranean environments III. Stability and comparative methods in analysing G × E interaction [J]. *Field Crops Research*, 2003, 80(2):141.
- [43]赵辉,戴廷波,荆奇,等.灌浆期温度对两种类型小麦籽粒蛋白质组分及植株氨基酸含量的影响[J].作物学报,2005,31(11):82.
ZHAO H, DAI T B, JING Q, *et al.* Effects of temperature during grain filling on the contents of grain protein components and free amino acid in two different wheat cultivars [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2005, 31(11):82.
- [44]姚艳荣,贾秀领,马瑞崑,等.冀中南强筋小麦品种品质性状稳定性差异及地域和气候因子效应[J].华北农学报,2006,21(S2):23.
YAO Y R, JIA X L, MA R K, *et al.* Stability difference of quality traits of strong gluten wheat varieties in central and southern Hebei Province and the effects of regional and climatic factors [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2006, 21(S2):23.
- [45]孙连发.强筋小麦品种龙麦26品质性状稳定性的研究[J].黑龙江农业科学,2002(3):5.
SUN L F. Study on quality traits stability of strong gluten bread wheat cultivar Longmai 26 [J]. *Heilongjiang Agricultural Science*, 2002(3):5.
- [46]BRANLARD G, DARDEVET M, SACCOMANO R, *et al.* Genetic diversity of wheat storage proteins and bread wheat quality [M]//Wheat in a Global Environment. Dordrecht: Springer Netherlands, 2001:157.
- [47]张学林,王晨阳,郭天财,等.生态因子对不同冬小麦品种面粉拉伸参数的影响[J].应用生态学报,2009,20(12):2971.
ZHANG X L, WANG C Y, GUO T C, *et al.* Effects of ecological factors on the dough extensograph parameters of different winter wheat cultivars [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(12):2971.
- [48]赵春,宁堂原,焦念元,等.基因型与环境对小麦籽粒蛋白质和淀粉品质的影响[J].应用生态学报,2005,16(7):1257.
ZHAO C, NING T Y, JIAO N Y, *et al.* Effects of genotype and environment on protein and starch quality of wheat grain [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(7):1257.
- [49]李永庚,于振文,张秀杰,等.小麦产量与品质对灌浆不同阶段高温胁迫的响应[J].植物生态学报,2005,29(3):461.
LI Y G, YU Z W, ZHANG X J, *et al.* Response of yield and quality of wheat to heat stress at different grain filling stages [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2005, 29(3):461.
- [50]MOTZO R, GIUNTA F, DEIDDA M. Relationships between grain-filling parameters, fertility, earliness and grain protein of durum wheat in a Mediterranean environment [J]. *Field Crops Research*, 1996, 47(2-3):129.
- [51]化党领,刘方,介晓磊.土壤类型与不同筋力小麦产量和品质的关联性[J].麦类作物学报,2011,31(2):286.
HUA D L, LIU F, JIE X L. Association between different soil ecotype with yield, quality of three wheat varieties with different gluten content [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2011, 31(2):286.
- [52]马政华,刘芳,介晓磊,等.不同土壤类型对不同筋力型小麦产量和品质的影响[J].土壤通报,2010,41(4):898.
MA Z H, LIU F, JIE X L, *et al.* Effect of different type soils on yields and qualities of different gluten wheat [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2010, 41(4):898.
- [53]唐继伟,孙文彦,田昌玉,等.不同氮肥类型和用量对小麦产量和加工品质的影响[J].植物营养与肥料学报,2021,27(4):728.
TANG J W, SUN W Y, TIAN C Y, *et al.* Effects of different nitrogen sources and rates on the yield and processing quality of winter wheat [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2021, 27(4):728.
- [54]XIN L, FU Y Y, MA S T, *et al.* Effects of post-anthesis irrigation on the activity of starch synthesis-related enzymes and wheat grain quality under different nitrogen conditions [J]. *Plants*, 2023, 12(24):4086.