黄淮海北部优质小麦产质协同性、区域适应性及光谱特征研究

陈皓月 赵 轩 孙 萌 周炳金 李浩然 鞠慧静 张英华 王志敏 孙振才

（中国农业大学农学院/玉米生物育种国家重点实验室，100193，北京）

摘 要 以黄淮海北部地区22个小麦品种（系）为试验材料，在该区的2个试点开展了产量、品质、生理指标及光谱特征的综合分析，结合GGE分析和聚类方法筛选高产稳产的优质品种（系）。结果表明，中强筋品种济麦4072、山农66和强筋品种（系）济麦221001、藁优5218的产量均超过7600 kg/hm^2，蛋白质含量、湿面筋含量及面团稳定时间等指标均达品种审定标准，且GGE和聚类分析表明这些品种（系）具有良好的丰产和稳产性，属高产优质型品种（系）。无人机多光谱遥感分析发现，强筋小麦中I高产优质型在开花期具有高NDVI值，且灌浆期SPAD值降幅较小，在灌浆中后期维持高增强型植被指数（EVI）与低叶绿素吸收反射指数（TCARI），表明了优异的后期持绿性；而中强筋小麦中的I高产优质型则表现为灌浆中后期的低EVI、优化土壤调节植被指数（OSAVI）及氮素反射指数（NRI），表明了其后期迅速衰退伴随氮素高效转出的特性。本试验条件下济麦221001和藁优5218是黄淮海北部强筋小麦的优选品种（系），山农66和济麦4072高产稳产且广适性强，灌浆中后期的EVI可作为筛选高产优质小麦品种的关键快速检测指标。

关键词 高产优质小麦；品种筛选；聚类分析；GGE分析；光谱特征；基因型—环境互作分析

小麦是当今世界最重要的粮食作物之一，而我国是小麦最大的生产国和消费国，对优质小麦的需求日益旺盛，但受产区内品种混杂、区域生态条件影响，不同区域间小麦品质差异显著[1]。与普通中筋小麦相比，由于碳氮代谢的相互联系，一些优质小麦品质和产量协同性差，因此我国小麦产业亟需在兼顾产量的前提下全方位提高品质[2–4]。黄淮海平原拥有丰富的耕地资源和良好的光热条件，是我国优质小麦的主要产区[5-6]。小麦的产量和品质一方面取决于品种特性，另一方面也依赖田间管理方式、气候与环境条件等，所以基于区域适应性开展优质高产小麦品种的精准筛选，已成为未来优质专用小麦的核心任务之一，开展品种区域适应性评价不仅能为优化品种表现提供依据，还将对黄淮海地区乃至全国优质小麦产业链的可持续发展产生深远影响[7–9]。

小麦品质是由形态特性、营养组分及加工性能共同构成的多维特性体系，随着市场需求升级与生产技术革新，优质小麦评判体系持续优化[10-11]。2017年国家修订的品种审定标准[12]对强筋、中强筋小麦的核心参数（如蛋白质含量≥14.0%、湿面筋≥30%）作出明确规定，符合阈值方可认证为优质品种。由于各项品质指标对栽培环境动态变化及基因型与环境互作的响应存在差异，各品质参数呈现不同的变化趋势[13–15]。

无人机技术为作物监测提供了高通量、无损的实时数据获取能力。在此基础上，结构简洁且能有效减少土壤背景干扰的植被指数，被广泛应用于植被覆盖与生长状态评价中[16]。目前，基于无人机光谱数据的小麦产量和蛋白质含量预测研究[16-18]已有报道，其中拔节期到成熟期的优化土壤调节植被指数（OSAVI）、增强型植被指数（EVI）、叶绿素吸收反射指数（TCARI）、氮素反射指数（NRI）与产量和植株氮素含量表现出相关性。

近年来，河北省审定的高产优质小麦品种繁多，但其在不同生态点的适应性与稳定性有待进一步验证[19]。为此，本研究以筛选出兼具高产、优质及适应性强的优良基因型品种为目标，以22个高产优质的品种（系）为材料，在黄淮海北部

作者简介：陈皓月，主要从事小麦高产优质栽培研究，E-mail：chenhy_cau@163.com
孙振才为通信作者，主要从事作物生产系统高产优质绿色的资源管理研究，E-mail：Zhencai_Sun@cau.edu.cn
基金项目：国家重点研发计划项目（2023YFD2300203-03，2022YFD2300801-05）；河北省省级科技计划（225A9908D）；中国农业大学2115人才资助项目
收稿日期：2025-11-12；修回日期：2026-02-02；网络出版日期：2026-05-21

河北省的 2 个试点进行试验，以探究不同类型品种（系）产质协调性及相应生理指标差异，旨在为该地区优质小麦生产的品种选择提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　试验地概况与试验材料

2023−2024 年在河北省石家庄市藁城区赵县（ZX）宏瑞种业强筋麦研发基地（37.86° N，114.79° E）和沧州市吴桥县（WQ）中国农业大学实验站（37.69° N，116.62° E）进行试验，其中藁城区作为石家庄市强筋麦传统种植区，强筋麦种植覆盖率高达 90%，而吴桥县是小麦节水高产技术体系集成与示范的典型区域。2023−2024 年赵县和吴桥县冬小麦生长季≥0 ℃积温分别为 2191.7 和 2251.5 ℃；生育期总降水量分别为 154.30 和 154.50 mm（数据来源于吴桥实验站气象站及河北宏瑞种业赵县强筋麦研发基地设立的气象监测点）。具体的降水分布和气温见图 1。赵县试验田播种前 0~20 cm 土层的土壤中含有机质 18.39 g/kg、全氮 1.15 g/kg、速效磷 20.22 mg/kg、速效钾 162.51 mg/kg；吴桥试验田的 0~20 cm 表层土壤含有机质 11.2 g/kg、全氮 0.98 g/kg、速效磷 25.3 mg/kg、速效钾 106.2 mg/kg。供试材料为黄淮海平原北片当前推广及新育成的 22 个小麦品种（系）（表 1）。

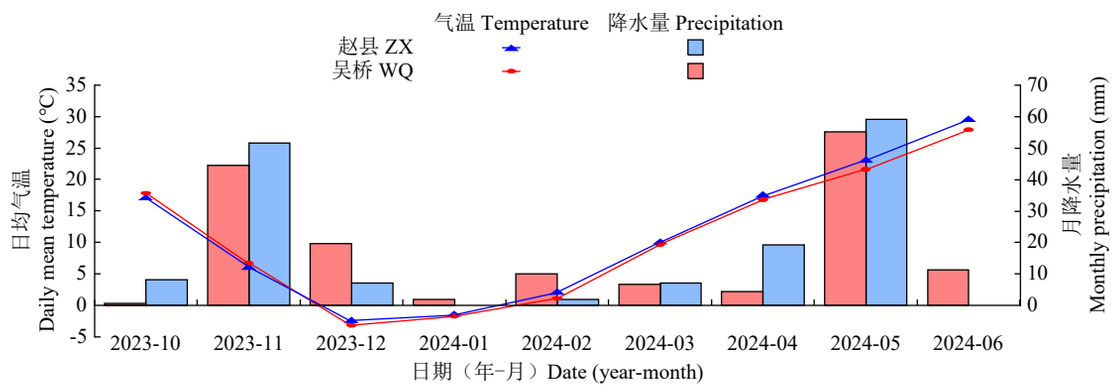


图 1　2023−2024 年 2 个试点冬小麦生长季降水量和温度

Fig.1　Precipitation and temperature during the winter wheat growing season in the two experimental sites from 2023 to 2024

表 1　参试小麦品种（系）

Table 1　Tested wheat varieties (line)

强筋 Strong gluten			中强筋 Medium-strong gluten					
编号 Code	品种 Variety (line)	审定编号 Registration number	编号 Code	品种 Variety	审定编号 Registration number	编号 Code	品种 Variety	审定编号 Registration number
JMU87	冀麦 U87	冀审麦 20210023	SM22	石麦 22	冀审麦 2013002	HM36	衡麦 36	国审麦 20230181
LM-01	LM-01	鲁审麦 20206032	SN086	石农 086	冀审麦 20198017	HM30	衡麦 30	冀审麦 20219002
JM5022	济麦 5022	鲁审麦 20210015	H4399	衡 4399	冀审麦 2008002	DH206	登海 206	国审麦 20190038
ZM578	中麦 578	国审麦 20210059	JIM418	冀麦 418	国审麦 2016026	ND171	农大 171	冀审麦 20239003
GY5218	藁优 5218	冀审麦 2015005	LX103	轮选 103	冀审麦 20198022			
ZM886	中麦 886	冀审麦 20240025	JM4072	济麦 4072	国审麦 20190057			
JMU80	冀麦 U80	国审麦 20210054	G35	衡观 35	国审麦 2006010			
SN44	山农 44	鲁审麦 20210016	HM33	衡麦 33	国审麦 20230180			
JM221001	济麦 221001	未通过审定	SN66	山农 66	鲁审麦 20230031			

1.2　试验设计

采用随机区组设计，2 个试验点每个品种（系）小区面积为 30 m^2，于 2023 年 10 月 21 日用小区播种机条播，吴桥和赵县试验点分别于 2024 年 6 月 6 日和 6 月 10 日收获，底肥为复合肥（15-15-15）750 kg/hm^2、44.8 kg P_2O_5/hm^2（磷酸二铵，46%）和 51.7 kg N/hm^2（尿素，46%），播前灌底墒水，灌溉量为 750 m^3/hm^2，之后的灌溉方式、灌溉量及处理日期如表 2 所示，其余田间管理按照当地高产麦田的标准进行。

1.3　测定项目与方法

1.3.1　生理指标　于 2023−2024 年小麦开花期、灌

表 2 各试点生育期的灌溉量
Table 2 Irrigation amount during the reproductive period of each experimental site

试点 Location	灌溉方式 Irrigation method	灌溉时期 Irrigation period	灌溉日期 Irrigation date	灌溉量 Irrigation (m^3/hm^2)
吴桥 WQ	传统畦灌	拔节期	4 月 4 日	750
		开花期	5 月 4 日	750
赵县 ZX	微喷灌	拔节期	4 月 3 日	600
		开花期	5 月 1 日	600

浆前期和灌浆后期每个小区取 10 个单茎，使用 SPAD-502 叶绿素测定仪（Spectrum technologies，美国）测量旗叶 SPAD 值，每片叶从基部到顶端（避开叶脉）测 3 点取均值，每个小区重复 3 次；使用 GreenSeeker 便携式光谱仪（Trimble，美国）测定植被归一化指数（NDVI），每个小区重复 3 次。

1.3.2 产量及其构成因素 在收获前，每个小区随机选取 60 个穗，考察穗粒数，重复 3 次。收获期每个小区随机选取 3 m^2 考察穗数，重复 3 次，然后脱粒测定实际产量。使用 PM-8188 NEW（Kett，日本）籽粒水分测定仪测定籽粒含水量，统一折算 13%含水量的籽粒，每个样品随机选取 1000 粒测量千粒重，3 次重复。籽粒后熟后进行品质分析。

1.3.3 蛋白质含量 小麦籽粒烘干后磨粉，采用半微量凯氏定氮法测定籽粒氮含量。取 0.25 g 粉样，2.50 g 催化剂（硫酸钾∶无水硫酸铜∶硒粉=100∶10∶1）加入消煮管，再加入 5 mL 浓硫酸，置于石墨消解炉中消煮 1 h。取出后放凉至亮绿色，配制相应 2%硼酸吸收液、40%碱液（NaOH 溶液）、0.05 mol/L 标准酸和指示剂，采用 Hanon K9860 测定样品的耗酸体积。每次试验开始前测定 3 个空白和回收率，并依此计算含氮量，利用蛋白质系数 6.25 计算蛋白质含量。

1.3.4 品质指标 在成熟期，每个小区收割 3 m^2 的小麦，3 次重复，脱粒和清选后放在储存桶中 3 个月。从每个重复中随机选取 2 kg 籽粒，在用 Quadrumat junior 磨粉机（Brabender，德国）磨粉之前，将样品含水量调整到 14%（润麦）。参照程序 AACC 38-12.02（AACC，2004），用 Glutomatic 2200 面筋洗涤主机（Perten，瑞典）测定面粉的湿面筋含量（WGC）。参照 AACC 方法 54-21（AACC，2000），用 Farinograph-AT 全自动粉质仪（Brabender，德国）测定面团形成时间（DDT）和面团稳定时间（DST）。参照 AACC 方法 54-10（AACC，2000），使用 Extensograph-E 面团拉伸仪（Brabender，德国）测定拉伸面积和最大拉伸阻力。

1.3.5 无人机数据 选取的无人机遥感指标为宽波段植被指数，其构建基于植物冠层特有的光谱反射特性。这些指数通过量化特定波段的反射率组合，能够有效反演作物的生理参数[20]。

无人机航拍与田间农艺性状调查同步进行。为获取高质量的遥感影像，飞行作业安排在气象条件稳定、光照充足的时间段（每日 10∶00−14∶00）实施。本试验选用大疆精灵 4 多光谱版无人机平台，其集成的高精度多光谱成像系统具体参数见表 3。

表 3 多光谱相机相关参数
Table 3 Parameters related to multispectral cameras

指标 Index	参数 Parameter
影像传感器 Image sensor	6 个 1/2.9 英寸 CMOS，包括 1 个用于可见光成像的彩色传感器和 5 个用于多光谱成像的单色传感器，单个传感器有效像素 208 万（总像素 212 万）
滤光片 Filter	蓝（B）：450 nm±16 nm； 绿（G）：560 nm±16 nm； 红（R）：650 nm±16 nm； 红边（RE）：730 nm±16 nm； 近红外（NIR）：840 nm±26 nm
镜头 Lens	FOV：62.7°；焦距：5.74 mm（35 mm 格式等效：40 mm）无穷远固定焦距；光圈：f/2.2
彩色传感器 ISO 范围 Color sensor ISO range	200~800
单色传感器增益 Monochrome sensor gain	1~8 倍
电子全局快门 Electronic global shutter	1/100~1/20 000 s（可见光成像）；1/100~1/10 000 s（多光谱成像）
照片最大分辨率 Maximum photo resolution	1600×1300（4.00∶3.25）
照片格式 Photo format	JPEG（可见光成像）+TIFF（多光谱成像）

用 DJI GS PRO 软件规划自动飞行航线。关键飞行参数设置为：相对高度 30 m，传感器垂直向下

（云台俯仰角-90°），航向与旁向重叠率分别设定为 90%和 80%，以确保影像拼接的精度。为进行精确的地理配准，在试验区内均匀布设 8 个地面控制点（GCP），并采用 D-RTK2 高精度 GNSS 移动站采集各控制点的厘米级坐标。

原始多光谱影像通过 Pix4D mapper 软件进行处理。处理流程包括：选择农业多光谱处理模板，导入飞行前拍摄的参考白板图像进行辐射校正，并加载地面控制点坐标文件以完成几何精校正与正射影像图生成。最终输出包含蓝、绿、红、红边和近红外 5 个波段的 GeoTIFF 格式正射影像。将生成的 5 波段正射影像导入 QGIS 地理信息系统平台，运用栅格计算器功能，依据表 4 中的公式计算各植被指数，相关植被指数及其计算公式参照前人[21]研究。为进一步消除土壤背景值对植被指数估算的干扰，采用 OTSU 自动阈值分割算法区分植被与非植被像元，进而基于试验小区边界矢量文件，精确提取各小区在不同生育时期的植被指数均值[22]，每个小区 3 次重复。

表 4　无人机宽波段植被指数计算公式

Table 4　The calculation formula for the wide-band vegetation index of unmanned aerial vehicles

植被指数 Vegetation index	计算公式 Calculation formula
REV-BLUE	BLUE
REV-GREEN	GREEN
REV-RED	RED
REV-RE	REDEDGE
REV-NIR	NIR
EVI	2.5(NIR–RED)/(1+NIR–2.4RED)
NRI	(GREEN–RED)/(GREEN+RED)
OSAVI	1.6[(NIR–RED)/(NIR+RED+0.16)]
TCARI	3[(REDEDGE–RED)–0.2(REDEDGE–GREEN)(REDEDGE/RED)]

1.4　数据处理

使用 Excel 2010 整理数据，使用 SPSS 20.0 软件统计分析，包括使用独立样本 *t* 检验进行品种间和生态区间的显著性检验，使用一般线性模型中的单因素方差分析程序进行交互作用和系统聚类分析，对 Z-score 标准化后的蛋白质含量与产量进行分析。采用 Origin 2021 软件作图。使用 R 4.1.1 进行 GGE 分析与作图。

2　结果与分析

2.1　参试小麦品种（系）产量及其构成因素

根据表 5 和图 2 可知，所有参试中强筋小麦的平均产量为 7993.24 kg/hm^2，品种间变异系数为 9.44%。产量超过平均产量的品种有 9 个，其中登海 206 和衡 4399 在赵县试点表现突出，产量均高于 9000 kg/hm^2。强筋小麦品种（系）的平均产量为 7849.71 kg/hm^2，品种（系）间变异系数为 7.62%，共有 6 个品种（系）产量高于 7500 kg/hm^2。中强筋小麦的高产主要与其成穗数多相关，而强筋小

表 5　参试品种（系）产量及其构成因素

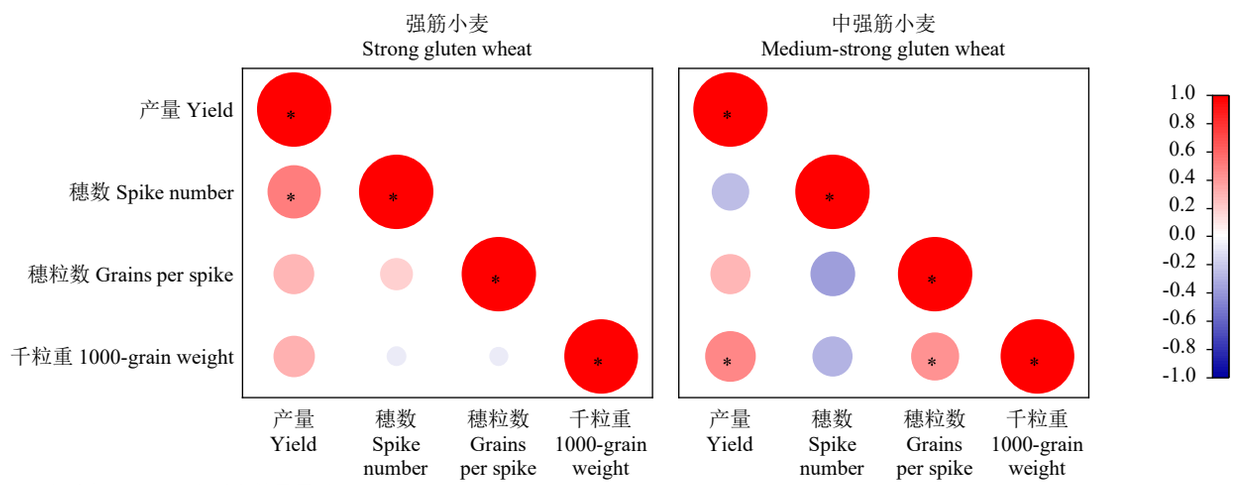
Table 5　Yield and its components of the tested varieties (line)

小麦类型 Wheat type	平均产量排名 Average yield ranking	编号 Code	产量 Yield (kg/hm^2)		穗数 Spike number (×10^4/hm^2)		穗粒数 Grains per spike		千粒重 1000-grain weight (g)	
			吴桥 WQ	赵县 ZX	吴桥 WQ	赵县 ZX	吴桥 WQ	赵县 ZX	吴桥 WQ	赵县 ZX
中强筋小麦 Medium-strong gluten wheat	1	HM30	8035.23	8857.81	756.15	635.50	36.67	33.76	40.77	45.60
	2	SN086	8251.74	8500.34	720.45	522.48	36.67	35.21	41.40	42.62
	3	H4399	7414.99	9261.90	693.15	742.96	38.87	35.33	35.33	37.70
	4	DH206	7488.78	9135.03	833.70	561.39	38.02	35.36	41.87	41.07
	5	HM36	8143.34	8175.31	664.35	587.33	37.97	34.12	38.98	45.20
	6	LX103	7619.30	8691.34	699.00	442.81	41.33	32.45	38.87	40.03
	7	G35	7804.72	8408.24	648.90	544.71	41.90	43.08	41.35	41.28
	8	HM33	8064.46	8064.94	672.30	731.84	40.10	33.65	38.25	40.98
	9	SM22	7702.91	8425.96	659.55	715.17	41.33	34.23	39.77	36.56
	10	SN66	7752.81	7823.78	625.31	542.86	41.65	35.12	38.94	37.53
	11	JM4072	7749.22	7615.03	585.84	442.81	39.27	33.62	43.45	39.96
	12	JM418	6266.84	8359.36	701.70	531.74	36.00	35.60	40.27	38.22
	13	ND171	7019.22	7191.72	627.15	629.94	38.70	34.50	31.98	35.50

续表 5 Table 5 (continued)

小麦类型 Wheat type	平均产量排名 Average yield ranking	编号 Code	产量 Yield (kg/hm²) 吴桥 WQ	产量 Yield (kg/hm²) 赵县 ZX	穗数 Spike number (×10⁴/hm²) 吴桥 WQ	穗数 Spike number (×10⁴/hm²) 赵县 ZX	穗粒数 Grains per spike 吴桥 WQ	穗粒数 Grains per spike 赵县 ZX	千粒重 1000-grain weight (g) 吴桥 WQ	千粒重 1000-grain weight (g) 赵县 ZX
平均值 Mean			7639.50	8346.98	683.66	587.05	39.11	35.08	39.32	40.17
变异系数 *CV* (%)			8.80	10.08	9.24	21.48	6.42	11.08	7.45	7.65
方差分析 Analysis of variance			**	**	**	**	**	**	**	**
强筋小麦 Strong gluten wheat	1	ZM578	8808.62	8337.98	685.45	535.45	37.05	32.23	47.38	46.92
	2	JM221001	8437.55	8098.60	488.47	261.23	45.22	39.33	53.78	47.67
	3	GY5218	7643.49	8329.43	742.03	570.65	31.50	37.42	34.70	36.44
	4	JMU80	8138.11	7739.45	696.35	424.29	38.63	32.85	42.43	41.82
	5	JM5022	8239.64	7585.58	440.44	337.21	55.07	46.83	41.64	40.33
	6	ZM886	7905.18	7322.57	670.66	687.38	34.00	33.37	41.43	42.86
	7	JMU87	7191.03	7922.68	727.36	381.67	36.85	34.28	39.49	41.97
	8	SN44	7416.71	7476.70	834.08	455.78	32.07	30.37	36.23	34.78
	9	LM-01	6975.34	7726.05	589.29	468.75	39.47	36.80	43.54	43.68
平均值 Mean			7861.74	7837.67	652.68	458.04	38.87	35.94	42.29	41.83
变异系数 *CV* (%)			8.61	6.62	19.26	29.45	19.37	15.30	13.17	9.93
方差分析 Analysis of variance			**	**	**	**	**	**	**	**

“**”表示在 $P<0.01$ 水平上差异显著。
“**” indicates significant difference at $P<0.01$ level.



“*”表示在 $P<0.05$ 水平上差异显著。
“*” indicates significant difference at $P<0.05$ level.

图 2 强筋和中强筋小麦品种（系）产量与其构成因素的相关分析热图
Fig.2 Heat map of correlation analysis among yield and its components of strong gluten and medium-strong gluten wheat varieties (line)

麦的高产品种（系）则普遍具有高粒重。由此可见，本试验中穗数和粒重是形成产量差异的主要因素。

2.2 参试小麦品种（系）基因型与环境互作分析

2.2.1 *参试小麦品种（系）的生态适应性分析* 对基因型和基因型与环境互作的主成分进行变异分解，强筋小麦 AXIS1 和 AXIS2 分别解释了 77.7%和 22.3%的变异（图 3a）；中强筋小麦 AXIS1 和 AXIS2 分别解释了 61.2%和 38.8%的变异（图 3b），GGE 双标图共解释 G+G×E 的变异占比为 100%。

GGE 双标图的“丰产性与稳产性”功能图可综合评估小麦区域试验品种的丰产性和稳定性，带箭头的直线为平均环境轴，品种（系）越靠近平均环境轴箭头的正方向代表丰产性越好，反之则越差；品种（系）的稳定性由其对应点向平均环境轴所作垂线的长度来表征，垂线越短表明该品种在不同环境中的产量波动越小，稳产性则越

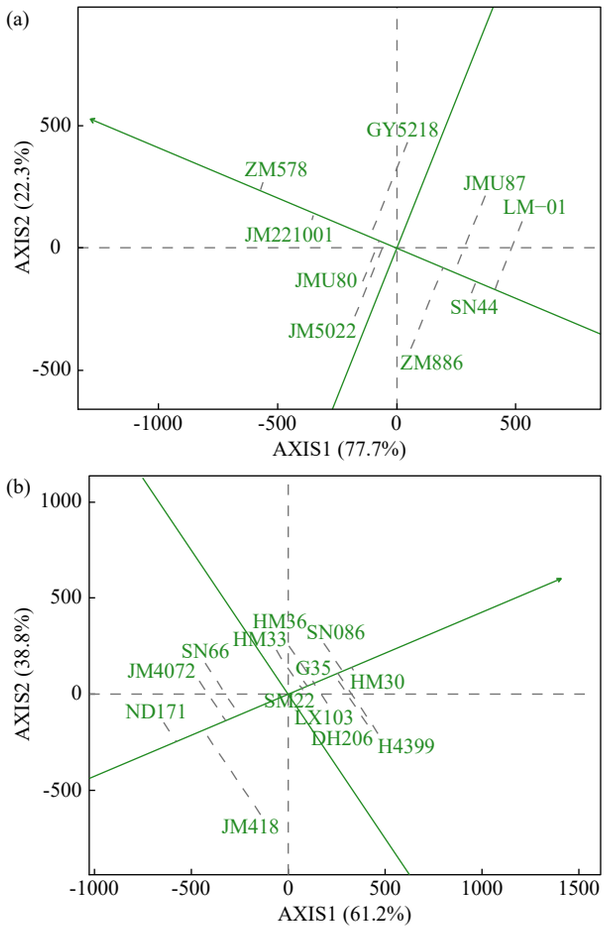


图 3　参试小麦 GGE 双标图的丰产性与稳产性功能分析

Fig.3　Functional analysis of high and stable yield of tested wheat varieties (line) based on GGE biplot

好。强筋小麦中，中麦 578、济麦 221001、藁优 5218、冀麦 U80 和济麦 5022 的产量超过了平均水平，表现出丰产性；在稳产性方面，中麦 578 和济麦 221001 稳产性最好，藁优 5218、中麦 886 和济麦 5022 稳定性弱；中强筋小麦中，衡麦 30、石农 086、衡麦 36、衡麦 33、衡观 35、石麦 22、轮选 103、登海 206 和衡 4399 在产量表现上高于平均水平，展现出丰产性；就稳产性而言，衡麦 30、衡观 35 和石麦 22 表现最佳，而冀麦 418、衡 4399 和登海 206 的稳定性差。

2.2.2　*参试小麦品种（系）的综合表现*　理想型品种（系）兼具高产与稳产特性的基因型，以原点为圆心绘制同心圆，品种在 GGE 双标图中距离圆心越近，表明其越接近理想型。由图 4a 可知，在强筋小麦中，中麦 578 和济麦 221001 位于最内侧同心圆，说明中麦 578 和济麦 221001 属于高产稳产的品种（系），综合表现最好。LM-01 距离圆心位置最远，综合表现最差。由图 4b 可知，在中强筋小麦中，衡麦 30 和石农 086 位于最内侧同心圆，属于高产稳产的品种，农大 171 和冀麦 418 仅在单一试点产量表现优异。

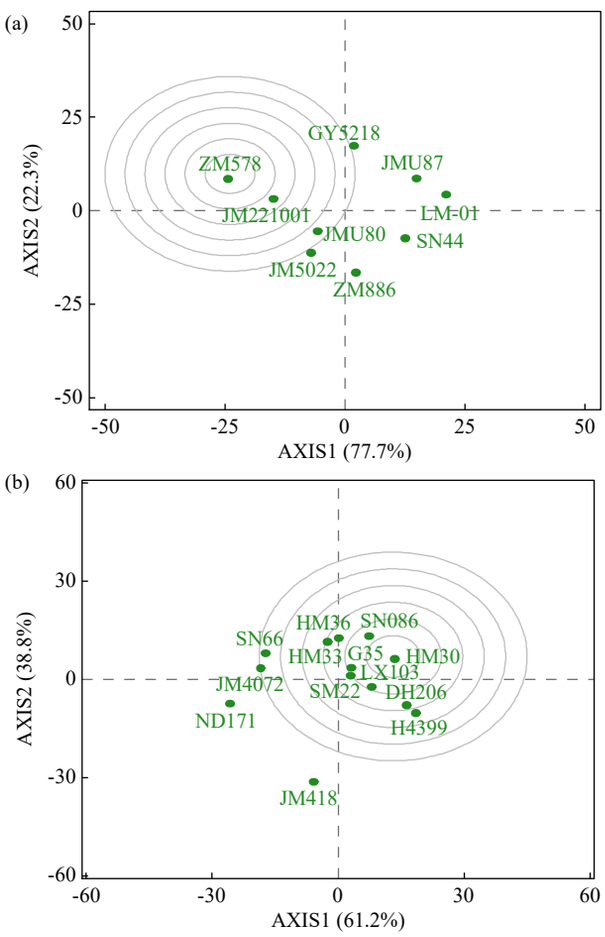


图 4　参试小麦 GGE 双标图的理想品种（系）功能分析

Fig.4　Analysis of the ideal varieties (line) function of tested wheats based on GGE biplot

2.3　参试小麦品种（系）蛋白质含量

根据表 6 可知，强筋小麦的平均蛋白质含量显著高于中强筋小麦，其中强筋小麦在吴桥的蛋白质含量低于赵县，且中强筋小麦在 2 个试点的平均值差值较小。

强筋小麦品种（系）中 JMU87 总平均蛋白质含量最高，且在 2 个试点均保持高水平，ZM886 和 SN44 在 2 个试点的含量非常接近，显示出强稳定性，而 LM-01 呈现出地点间变异，其在赵县的蛋白质含量显著高于吴桥，2 个试点相差大于 1%；中强筋小麦中 ND171 总平均蛋白质含量最高，而 JM418 和 SM22 的平均蛋白质含量最低，从稳定性看，JM4072、HM36 和 DH206 在 2 个试点间的蛋

表 6 参试小麦品种（系）蛋白质含量

Table 6 Protein content of the tested wheat varieties (line) %

小麦类型 Wheat type	排名 Ranking	编号 Code	蛋白质含量 Protein content		
			吴桥 WQ	赵县 ZX	平均值 Mean
强筋小麦 Strong gluten wheat	1	JMU87	15.66	14.70	15.19
	2	ZM886	15.39	14.91	15.15
	3	SN44	14.86	15.28	15.07
	4	JM221001	14.84	14.86	14.85
	5	LM-01	13.92	15.37	14.64
	6	GY5218	14.61	14.45	14.53
	7	ZM578	14.61	14.21	14.41
	8	JM5022	14.00	14.44	14.22
	9	JMU80	13.91	14.21	14.06
	平均值		14.65	14.71	14.68
中强筋小麦 Medium-strong gluten wheat	1	ND171	14.93	15.03	14.98
	2	SN66	14.36	14.56	14.46
	3	JM4072	14.39	14.25	14.32
	4	HM36	14.18	14.14	14.16
	5	DH206	14.19	14.11	14.15
	6	H4399	13.84	14.31	14.07
	7	SN086	14.02	14.04	14.03
	8	HM30	13.92	14.12	14.02
	9	G35	14.01	13.97	13.99
	10	LX103	14.05	13.78	13.91
	11	HM33	13.99	13.83	13.91
	12	SM22	14.03	13.69	13.86
	13	JM418	13.76	13.61	13.69
	平均值		14.13	14.11	14.12

白质含量差距小，且组内标准差小，表现出强稳定性，相较之下，H4399、LX103 和 SM22 在 2 个试点间的蛋白质含量差值大，稳定性差。

2.4 不同小麦品种（系）产量和蛋白质含量的聚类分析

以籽粒蛋白质含量和产量作为关键指标筛选高产优质小麦品种（系），对不同品种（系）开展系统聚类分析，在欧氏距离 14 处 9 个强筋小麦品种（系）可聚为 4 类（图 5a）；欧氏距离 6.5 处 13 个中强筋品种同样聚为 4 类（图 5b）。

参试小麦的产量及蛋白质含量数据详见表 7。强筋小麦品种（系）中筛选出 4 个类型：第 I 类为高产优质型，包括藁优 5218 和济麦 221001，其平均产量和蛋白质含量分别达到 8127.27 kg/hm^2 与 14.69%；第II类为高产型，仅包含中麦 578，产量达 8573.30 kg/hm^2，蛋白质含量为 14.41%；第III类为优质型，包括冀麦 U87、中麦 886、山农 44 和 LM-01 共 4 个品种，平均蛋白质含量为 15.01%，而平均产量为 7492.03 kg/hm^2；第IV类则为均衡型，包括冀麦 U80 和济麦 5022，平均产量与蛋白质含量分别为 7925.69 kg/hm^2 和 14.14%。

中强筋小麦品种（系）中筛选出 4 个类型：第 I 类为高产优质型，包括山农 66 和济麦 4072，其

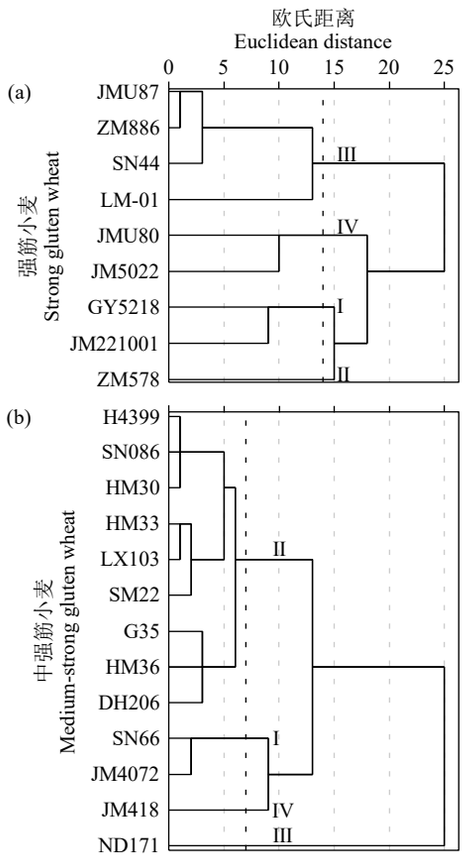


图 5 参试小麦产量与蛋白质含量聚类

Fig.5 Clustering of yield and protein content of tested wheats

表 7 参试小麦品种（系）的产量和蛋白质含量

Table 7 Yield and protein content of different types of the tested wheat varieties (line)

类型 Type	强筋小麦 Strong gluten wheat		中强筋小麦 Medium-strong gluten wheat	
	平均产量 Average yield (kg/hm^2)	平均蛋白质含量 Average protein content (%)	平均产量 Average yield (kg/hm^2)	平均蛋白质含量 Average protein content (%)
I	8127.27b	14.69ab	7735.21b	14.39b
II	8573.30a	14.41ab	8224.80a	14.01bc
III	7492.03c	15.01a	7105.47c	14.98a
IV	7925.69b	14.14b	7313.10bc	13.69c

不同小写字母表示在 $P < 0.05$ 水平上差异显著。下同。

Different lowercase letters indicate significant differences at $P < 0.05$ level. The same below.

平均产量达 7735.21 kg/hm^2，平均蛋白质含量为 14.39%；第II类为高产型，包括衡 4399、石农 086、衡麦 30、衡麦 33、轮选 103、石麦 22、衡观 35、衡麦 36 和登海 206 共 9 个品种，该类平均产量最高，达 8224.80 kg/hm^2，但平均蛋白质含量为 14.01%；第III类为优质型，仅包括农大 171，平均蛋白质含量表现最高，为 14.98%；第IV类为均衡型，仅包括冀麦 418，平均产量为 7313.10 kg/hm^2，平均蛋白质含量为 13.69%。

由表 8 和表 9 可知，强筋品种（系）济麦 221001 和藁优 5218 的蛋白质含量高，分别达到 14.73%和 15.07%，优于中强筋品种山农 66 和济麦 4072。所有品种（系）的湿面筋含量均超过 28.0%，其中藁优 5218 的湿面筋含量最高，符合强筋小麦

表 8　高产优质小麦品种（系）的品质指标

Table 8　Quality indexes of high yield and quality wheat varieties (line)

类型 Type	品种（系） Variety (line)	蛋白质含量 Protein content (%)		面团形成时间 Dough development time (min)		面团稳定时间 Dough stability time (min)	
		吴桥 WQ	赵县 ZX	吴桥 WQ	赵县 ZX	吴桥 WQ	赵县 ZX
强筋 Strong gluten	济麦 221001	14.73±0.23	14.29±1.62	5.77±0.36	5.34±0.33	15.97±1.06	16.64±1.81
	藁优 5218	15.07±0.45	14.66±0.39	2.37±0.31	3.10±0.18	12.64±0.38	13.70±0.20
中强筋 Medium-strong gluten	山农 66	14.38±0.44	13.74±0.12	2.91±0.90	2.81±0.17	9.15±0.93	9.98±1.07
	济麦 4072	13.96±0.37	14.02±0.26	1.87±0.33	1.90±0.21	12.10±1.71	11.62±0.90

表 9　高产优质小麦品种（系）的品质性状

Table 9　Grain quality characteristics of high yield and quality wheat varieties (line)

类型 Type	品种（系） Variety (line)	湿面筋含量 Wet gluten content (%)		面团拉伸面积 Dough extension area (cm^2)		面团最大拉伸阻力 Dough maximum resistance (E.U.)	
		吴桥 WQ	赵县 ZX	吴桥 WQ	赵县 ZX	吴桥 WQ	赵县 ZX
强筋 Strong gluten	济麦 221001	30.9±1.0	31.3±2.6	100.07±3.76	91.87±1.47	485.54±13.44	415.22±4.91
	藁优 5218	31.9±3.8	32.3±1.4	116.30±5.75	105.50±3.56	669.47±2.84	617.79±4.26
中强筋 Medium-strong gluten	山农 66	29.9±1.1	30.2±0.6	97.17±4.26	98.71±2.00	539.74±13.21	504.52±8.87
	济麦 4072	28.8±1.4	29.3±0.9	100.30±7.75	109.90±4.57	455.53±9.74	430.53±9.02

标准（＞30%）。

在面团流变学特性方面，强筋品种表现出显著优势。济麦 221001 的面团形成时间最长，稳定时间最高，符合强筋小麦标准（＞8 min）。藁优 5218 的面团拉伸面积和面团最大拉伸阻力均显著高于其他品种，表明其面筋网络结构稳定，延展性和弹性俱佳。相比之下，中强筋品种山农 66 和济麦 4072 的面团稳定时间和面团拉伸阻力虽低于强筋品种，但仍达到中强筋水平。

试点间比较显示，赵县试点的济麦 221001 在蛋白质含量和稳定时间上优于吴桥试点，而藁优 5218 在吴桥试点的拉伸阻力表现更佳，表明环境因素对部分品质指标有一定影响。综上，济麦 221001 和藁优 5218 在蛋白质含量、湿面筋含量及面团流变学特性上均表现优异，符合优质强筋小麦标准，适合高筋粉加工；而山农 66 和济麦 4072 的品质指标达到中强筋水平，可用于中高档面制品生产。

赵县试点的强筋品种济麦 221001 和藁优 5218 的蛋白质含量较吴桥试点低 0.4%~0.5%，但稳定时间更长，表明赵县环境可能更利于面筋质量发育而非蛋白质积累。强筋品种在吴桥表现出更强的拉伸阻力即面筋强度，而赵县更利于稳定时间延长，说明环境对品质的影响具有指标特异性。中强筋品种受环境影响小，可能因其遗传背景更适应广泛生态条件。

2.5　不同类型品种（系）的 SPAD 值及 NDVI 值

由表 10 可知，I和II类小麦开花期的 NDVI 值显著高于IV类；灌浆前期，II类显著高于I与III类，IV类仍为最低；灌浆后期IV类显著低于其他类型。各类型旗叶 SPAD 值均在开花期达到最高，灌浆后期IV类的 SPAD 值显著高于高产型，与其他 2 个类型无显著差异。

由表 11 可知，在中强筋小麦中，IV类的 NDVI 值显著高于I和III类；灌浆前期则为II类显著高于IV类，与其他 2 种类型无显著差异。对于 SPAD

表 10 强筋小麦品种（系）不同类型的 SPAD 值及 NDVI 值

Table 10 SPAD and NDVI values of different types of strong gluten wheat varieties (line)

品种（系）类型 Variety (line) type	归一化植被指数 NDVI			SPAD 值 SPAD value		
	开花期 Anthesis stage	灌浆前期 Early filling stage	灌浆后期 Later filling stage	开花期 Anthesis stage	灌浆前期 Early filling stage	灌浆后期 Later filling stage
I	0.83a	0.81b	0.77a	56.9a	54.8a	51.0ab
II	0.84a	0.84a	0.76a	60.4a	56.5a	49.4b
III	0.81ab	0.81b	0.75a	56.7a	54.4a	50.4ab
IV	0.77b	0.76c	0.71b	57.8a	55.6a	53.1a

表 11 中强筋小麦品种不同类型的 SPAD 值及 NDVI 值

Table 11 SPAD and NDVI values of different types of medium-strong gluten wheat varieties

品种类型 Variety type	归一化植被指数 NDVI			SPAD 值 SPAD value		
	开花期 Anthesis stage	灌浆前期 Early filling stage	灌浆后期 Later filling stage	开花期 Anthesis stage	灌浆前期 Early filling stage	灌浆后期 Later filling stage
I	0.82b	0.82ab	0.78a	55.6a	55.7a	53.7b
II	0.84ab	0.84a	0.77a	57.9a	56.0a	55.1a
III	0.82b	0.82ab	0.78a	57.1a	54.8a	53.8b
IV	0.86a	0.79b	0.77a	56.6a	54.5a	52.4b

值而言，II类从开花至灌浆后期始终高于其他类别，且在灌浆后期与其他类型存在显著差异。

2.6 不同类型品种（系）无人机植被指数特征

为进一步探究可鉴别不同类型小麦品种在关键生育阶段生理差异的快速方法，基于无人机获取的多种植被指数（EVI、NRI、OSAVI 和 TCARI），系统比较了强筋与中强筋小麦中 4 种不同品种类型在多个生育阶段的植被指数变化（表 12~13）。

表 12 强筋小麦不同类型的植被指数

Table 12 Vegetation indexes of different types of strong gluten wheats

植被指数 Vegetation index	生育时期 Growing stage	品种（系）类型 Variety (line) type			
		I	II	III	IV
增强型植被指数 EVI	拔节期	0.872±0.023b	0.749±0.103c	0.879±0.024b	1.004±0.013a
	孕穗期	0.636±0.023b	0.565±0.021c	0.654±0.011b	0.703±0.011a
	开花期	0.192±0.007b	0.148±0.008d	0.172±0.001c	0.208±0.002a
	花后 7 d	0.068±0.001a	0.057±0.002b	0.064±0.000b	0.070±0.001a
	花后 14 d	0.180±0.007b	0.152±0.001d	0.164±0.004c	0.209±0.008a
	花后 21 d	0.626±0.020a	0.550±0.001b	0.556±0.003b	0.512±0.019c
氮素反射指数 NRI	拔节期	0.140±0.022b	0.079±0.066b	0.154±0.029b	0.266±0.018a
	孕穗期	0.353±0.015a	0.330±0.022a	0.333±0.004a	0.336±0.004a
	开花期	0.322±0.022a	0.244±0.028b	0.276±0.019b	0.325±0.010a
	花后 7 d	0.134±0.013a	0.081±0.008b	0.077±0.018b	0.124±0.013a
	花后 14 d	0.104±0.004a	0.074±0.006b	0.052±0.009c	0.111±0.003a
	花后 21 d	0.163±0.002a	0.156±0.009a	0.131±0.003b	0.112±0.004c
优化土壤调节植被指数 OSAVI	拔节期	0.961±0.032ab	0.834±0.137b	1.016±0.020a	1.128±0.019a
	孕穗期	1.030±0.011a	0.972±0.022b	1.036±0.004a	1.056±0.004a
	开花期	0.516±0.013b	0.420±0.021c	0.479±0.002d	0.546±0.003a
	花后 7 d	0.235±0.004a	0.201±0.005c	0.225±0.001b	0.241±0.003a
	花后 14 d	0.495±0.013b	0.439±0.003d	0.463±0.008c	0.540±0.013a
	花后 21 d	0.914±0.005a	0.870±0.003b	0.864±0.010b	0.773±0.012c
叶绿素吸收反射指数 TCARI	拔节期	0.232±0.015a	0.212±0.015ab	0.177±0.004b	0.067±0.032c
	孕穗期	−0.463±0.045a	−0.367±0.064a	−0.406±0.021a	−0.367±0.010a
	开花期	−0.008±0.008b	0.018±0.007a	−0.001±0.005b	−0.012±0.004b
	花后 7 d	−0.066±0.004b	−0.042±0.003a	−0.046±0.003a	−0.064±0.002b
	花后 14 d	−0.042±0.001c	−0.027±0.000a	−0.023±0.005a	−0.032±0.002b
	花后 21 d	0.030±0.015c	0.027±0.006c	0.058±0.018b	0.125±0.004a

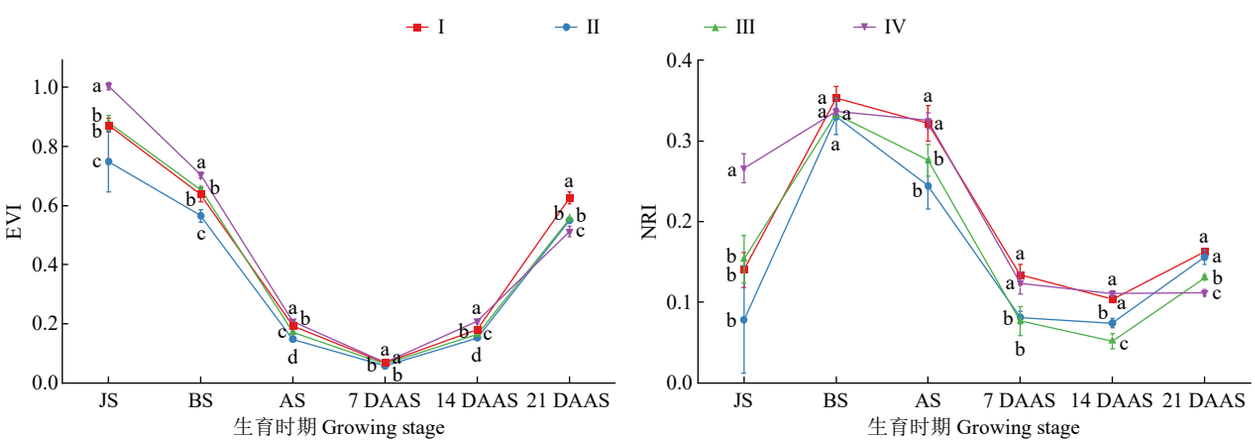
表 13　中强筋小麦不同类型的植被指数

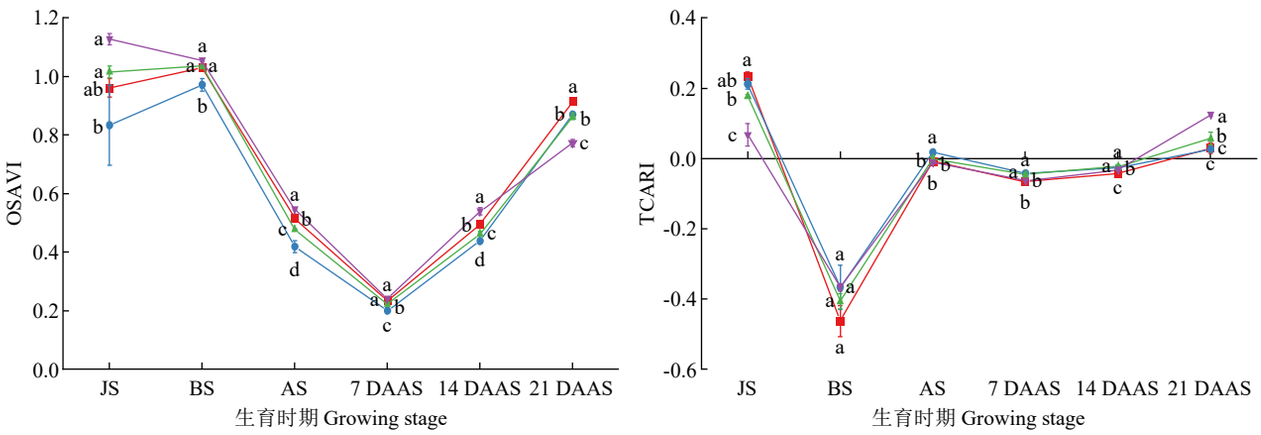
Table 13　The vegetation indexes of different types of medium-strong gluten wheats

植被指数 Vegetation index	生育时期 Growing stage	品种类型 Variety type			
		I	II	III	IV
增强型植被指数 EVI	拔节期	0.900±0.057ab	0.920±0.047ab	0.950±0.043a	0.840±0.059b
	孕穗期	0.622±0.021a	0.658±0.045a	0.685±0.007a	0.684±0.017a
	开花期	0.166±0.008b	0.181±0.016b	0.188±0.007ab	0.208±0.003a
	花后 7 d	0.060±0.005b	0.065±0.004ab	0.068±0.002a	0.071±0.001a
	花后 14 d	0.155±0.008c	0.165±0.010bc	0.197±0.022a	0.183±0.002b
	花后 21 d	0.512±0.020b	0.551±0.032b	0.668±0.076a	0.615±0.006a
氮素反射指数 NRI	拔节期	0.197±0.061ab	0.187±0.033ab	0.229±0.029a	0.133±0.052b
	孕穗期	0.325±0.004c	0.335±0.007bc	0.346±0.004ab	0.352±0.008a
	开花期	0.223±0.081b	0.305±0.029a	0.293±0.005a	0.362±0.005a
	花后 7 d	0.048±0.068c	0.110±0.024b	0.105±0.001b	0.168±0.004a
	花后 14 d	0.028±0.034c	0.074±0.020b	0.082±0.006b	0.126±0.005a
	花后 21 d	0.109±0.009b	0.135±0.020b	0.139±0.017b	0.183±0.015a
优化土壤调节植被指数 OSAVI	拔节期	1.057±0.068a	1.039±0.035a	1.079±0.056a	0.954±0.080b
	孕穗期	1.022±0.013b	1.039±0.024ab	1.065±0.005a	1.055±0.009ab
	开花期	0.460±0.029b	0.497±0.033ab	0.510±0.014ab	0.547±0.004a
	花后 7 d	0.211±0.015b	0.227±0.012a	0.235±0.005a	0.246±0.002a
	花后 14 d	0.442±0.021b	0.467±0.021b	0.522±0.032a	0.505±0.003a
	花后 21 d	0.821±0.029c	0.870±0.028b	0.901±0.004ab	0.934±0.012a
叶绿素吸收反射指数 TCARI	拔节期	0.113±0.065a	0.172±0.029a	0.119±0.088a	0.205±0.022a
	孕穗期	−0.395±0.028b	−0.445±0.038ab	−0.508±0.046a	−0.483±0.029a
	开花期	0.011±0.017a	−0.008±0.008b	−0.002±0.003ab	−0.023±0.003b
	花后 7 d	−0.037±0.015c	−0.058±0.008b	−0.052±0.001b	−0.082±0.003a
	花后 14 d	−0.014±0.011a	−0.034±0.006b	−0.024±0.009ab	−0.054±0.005c
	花后 21 d	0.068±0.015ab	0.036±0.010b	0.104±0.073a	−0.016±0.026c

由图 6 可知强筋小麦不同类型的植被指数变化。EVI 能够反映冠层结构和生物量，在拔节期到花后 21 d 呈现显著的“高－低－高”趋势，其中拔节期数值最高，在花后 7 d 降至最低，而在花后 21 d 即灌浆中后期再次回升。拔节期至开花期IV均衡型的 EVI 显著高于其他类型，但在花后 21 d 显著低于其他类型，表明其灌浆中后期绿叶面积和生物量快速降低。

在花后 21 d，I类表现最好且显著高于其他类型，一定程度上显示出后期生物量维持能力与氮素含量相关，在孕穗期和开花期维持在高水平，花后 21 d 除了IV类其他类型均回升。在开花期到花后 14 d，I类均高于平均水平，且显著高于II和III类；在花后 14~21 d II类显著高于III类。





不同小写字母表示在 $P < 0.05$ 水平上差异显著。JS：拔节期；BS：孕穗期；AS：开花期；7 DAAS：花后 7 d；14 DAAS：花后 14 d；21 DAAS：花后 21 d。下同。

Different lowercase letters indicate significant differences at $P < 0.05$ level. JS: jointing stage; BS: booting stage; AS: anthesis stage; 7 DAAS: seven days after anthesis stage; 14 DAAS: 14 days after anthesis stage; 21 DAAS: 21 days after anthesis stage. The same below.

图 6 强筋小麦不同类型的植被指数变化

Fig.6 The vegetation index changes of different types of strong gluten wheats

OSAVI 反映植被覆盖情况，也呈现出“V”形变化规律。在花后 7~21 d，I类均显著高于II和III类；在花后 21 d，II和III类显著高于IV类。

TCARI 对叶绿素含量敏感，通常与叶绿素含量呈负相关。结果显示其在孕穗期出现负值低谷。I类在开花期至花后 21 d 相较于其他类型均维持在低水平，但在花后 14~21 d 升幅小于其他类型，表现出灌浆中后期缓慢的叶片叶绿素降解速度；II类在花后 21 d 的表现与I类相似，说明其良好的叶片持绿性，而III类升幅大于I和II类，表示其叶绿素降解速度相较I和II类更快。

由图 7 可知中强筋小麦不同类型的植被指数变化。中强筋小麦的 EVI 和强筋小麦呈现出相似变化规律。I类在孕穗期和花后 21 d 均维持在最低

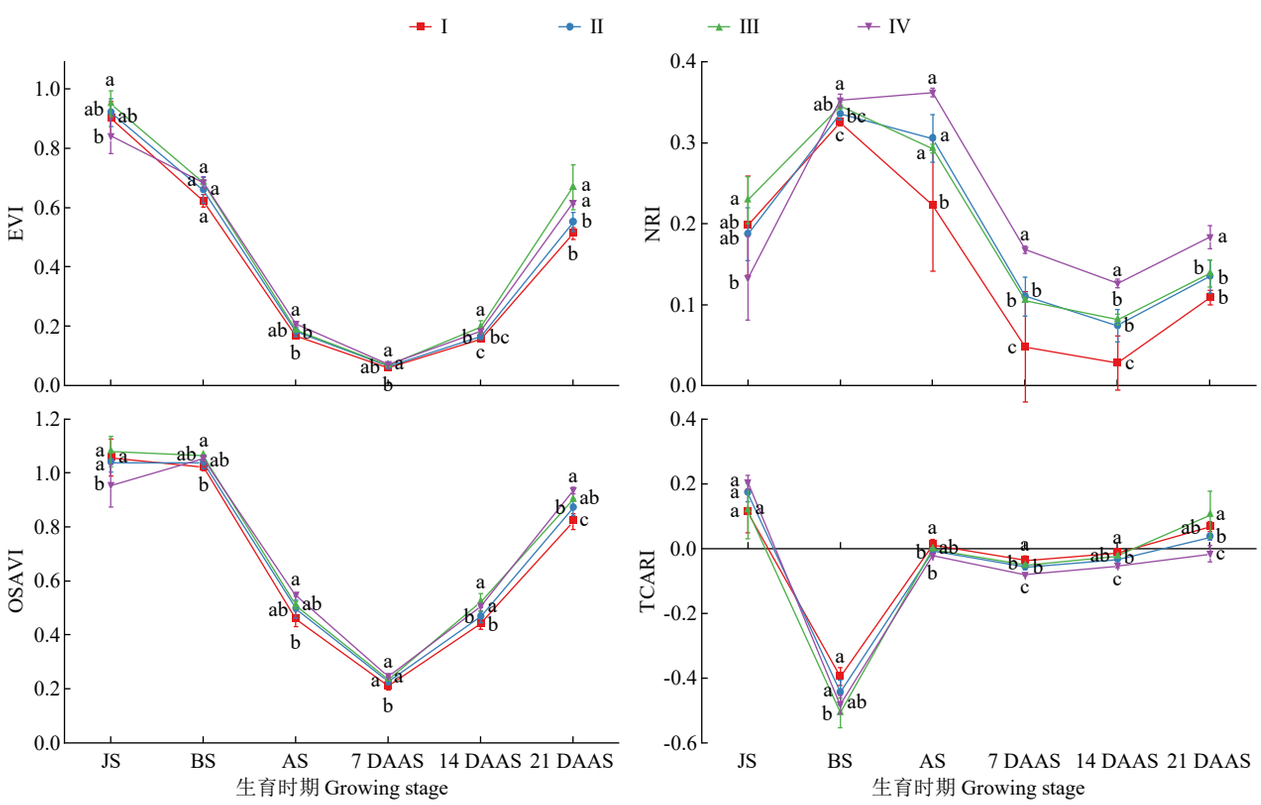


图 7 中强筋小麦不同类型的植被指数变化

Fig.7 The vegetation index changes of different types of medium-strong gluten wheats

水平，但在花后 14~21 d 上升幅度相较其他类型更小；而III类在花后 14~21 d 均高于其他类型。NRI 从开花期开始明显下降，在花后 21 d 有小幅回升。I类相较于其他类型在开花期出现断崖式下降，且一直到花后 21 d 相较其他类型均保持在最低水平；而II和III类则从孕穗期到花后 21 d 均表现出相近的数值。OSAVI 其变化规律也与强筋小麦相似，呈现出“V”形变化规律。从孕穗期到花后 21 d，I类的 OSAVI 值均最低。TCARI 变化规律也与强筋小麦相似，在孕穗期出现低谷。I类在孕穗期到花后 14 d 均高于其他类型，在花后 14~21 d 上升幅度小于其他类型，说明在灌浆中后期叶绿素降解速率小于其他类型；而III类在花后 14~21 d 上升幅度最大，表明其灌浆中后期叶绿素快速降解的特征。

3　讨论

随着农业供给侧改革的深化，叠加消费需求升级、食品加工业转型及国际贸易格局变化，小麦品质改良已成为研究热点[23-24]。研究[15,25-26]表明，小麦产量与品质的形成不仅由遗传因素决定，还与生态环境密切相关。然而，黄淮海北片近年推广的新育成小麦品种在不同生态区表现出显著差异[27]。因此，可有效利用基因与环境互作效应，系统评估其产量与品质的生态适应性，推动产量品质协同提升[15,28]。本研究表明，黄淮海北部试点的中强筋小麦品种平均产量为 7993.24 kg/hm^2，变异系数为 8.04%，其中 11 个品种产量超过 7600 kg/hm^2，登海 206 和衡 4399 在赵县试点的产量甚至突破 9000 kg/hm^2。强筋小麦的平均产量高于中强筋品种，表明 2 类品种（系）均具备高产潜力。进一步分析产量构成因素发现，中强筋品种的高产主要依赖高的成穗数，而强筋品种（系）则通过高千粒重实现高产。这一结果与前期研究一致，即群体数量和籽粒灌浆能力是小麦高产的关键驱动因素。例如，登海 206 的高产得益于其高穗粒数与千粒重，说明优化分蘖成穗与同化物转运能力是提升产量的核心策略[29]。

通过 GGE 双标图分析，强筋品种（系）中麦 578 和济麦 221001 兼具高产与稳产特性。赵县试点的济麦 221001 面团稳定时间长于吴桥试点，而吴桥试点的藁优 5218 面团最大拉伸阻力高于赵县，这种环境特异性差异可能与 2 个试点土壤养分差异有关：赵县土壤速效钾含量高于吴桥，而钾素对淀粉合成和面筋网络稳定性的促进作用已被广泛报道[30-31]。中强筋品种中，衡麦 30 和石农 086 的广适性较强，而高产型品种衡 4399 虽产量突出，但蛋白质含量低。

基于聚类分析，强筋小麦和中强筋小麦被划分为 4 类：I高产优质型、II高产型、III优质型和IV均衡型。这一分类揭示了产量与品质的关系：高产型品种通常蛋白质含量低，而优质型品种因光合产物更多分配至籽粒氮积累，导致生物量受限。例如，农大 171 的蛋白质含量最高，但其成穗数低于高产型。

小麦生育进程对其产量与品质的形成具有决定性影响，因此，构建小麦生育期间生理指标与产量、品质之间的关联，并基于前期生理表现调整栽培措施，进而预测后期产量与品质表现，对推动优质高产小麦生产具有重要意义[32]。灌浆期生理指标分析表明，II类品种（系）在灌浆前期 NDVI 和 SPAD 值显著高于其他类型，灌浆后期降幅大可能与大风天气导致的倒伏相关。I和III类品种（系）的 SPAD 值下降幅度均低于其他 2 种类型，表明叶片氮素滞留能力对蛋白质积累至关重要。然而，I类品种（系）的 SPAD 值动态未表现出显著优势，灌浆后期高 SPAD 值可通过延缓叶片衰老支撑粒重增加[33]。

无人机多光谱遥感分析从冠层尺度揭示了不同类型品种的光谱生理特征，强筋小麦中I高产优质型在花后 21 d 表现出显著高 EVI、高 OSAVI 和低 TCARI 的特征，表明该类型在生育后期具有更完整的冠层结构和叶片生理活性，能够通过延缓衰老来保障高产与优质[34-35]；II类品种（系）各项植被指数在各生育期高于平均值；III类品种（系）花后 14 d 的 NRI 降至全生育期最低，推测是因为该时期发生了快速的氮素转运[16]。中强筋小麦各植被指数变化规律与强筋小麦相似，I类品种（系）EVI 和 OSAVI 在花后 21 d 降至所有类型中的最低水平，NRI 从开花期迅速下降并维持在低水平，表明其在花后将茎叶中的干物质和氮素迅速转移至籽粒，以实现高产与优质的平衡[18]；III类品种（系）的突出特征是花后 21 d 时 EVI 和 OSAVI 值都达到最高水平，同时 TCARI 也是最高值，呈

现出后期持续性降低的特征[20]。

4 结论

（1）中强筋品种济麦 4072、山农 66 和强筋品种济麦 221001、藁优 5218 产量均超过 7600 kg/hm^2，中强筋高产主要依赖高成穗数，而强筋品种（系）则通过较高的千粒重实现高产。GGE 双标图表明强筋品种（系）藁优 5218、济麦 221001 和中强筋品种济麦 4072、山农 66 兼具高产与稳产特性。聚类分析表明，济麦 221001、藁优 5218 为高产优质型强筋品种（系），济麦 4072、山农 66 为高产优质型中强筋品种。

（2）强筋小麦中I高产优质型在开花期具有高 NDVI 值，在灌浆前期到后期降幅最小，表现出后期较好的持绿性。

（3）相较于其他类型，高产优质型的强筋小麦在花后 21 d 即灌浆中后期维持了显著的高 EVI 与低 TCARI。高产优质型的中强筋小麦在花后 21 d 表现出显著低 EVI、低 OSAVI 和低 NRI。灌浆中后期 EVI 可作为快速筛选强筋及中强筋高产优质型的关键指标。

参考文献

[1] 蒋赟，张丽丽，薛平，等. 我国小麦产业发展情况及国际经验借鉴. 中国农业科技导报，2021，23(7)：1-10.

[2] Ma M M，Li Y C，Cheng X，et al. Current situation and key parameters for improving wheat quality in China. Frontiers in Plant Science，2021，12：638525.

[3] Hu N Y，Du C H，Zhang W Q，et al. Did wheat breeding simultaneously improve grain yield and quality of wheat cultivars releasing over the past 20 years in China?. Agronomy，2022，12 (9)：2109.

[4] Ren J，Li H R，Yao C S，et al. Coordinating yield and quality formation of wheat through post-anthesis nitrogen spraying. Crop and Environment，2025，4(1)：45-56.

[5] 胡卫国，赵虹，王西成，等. 黄淮冬麦区小麦品种品质改良现状分析. 麦类作物学报，2010，30(5)：936-943.

[6] 赵广才. 中国小麦种植区划研究（一）. 麦类作物学报，2010，30(5)：886-895.

[7] 魏益民，张波，关二旗，等. 中国冬小麦品质改良研究进展. 中国农业科学，2013，46(20)：4189-4196.

[8] Tilman D，Balzer C，Hill J，et al. Global food demand and the sustainable intensification of agriculture. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America，2011，108(50)：20260-20264.

[9] 杨永明，宗义湘，孙玉竹，等. 河北省发展小麦经济的问题研究. 湖北农业科学，2014，53(11)：2707-2710，2714.

[10] 孔欣欣，张艳，赵德辉，等. 北方冬麦区新育成优质小麦品种面条品质相关性状分析. 作物学报，2016，42(8)：1143-1159.

[11] Li L，Chen S，Deng M L，et al. Optical techniques in non-destructive detection of wheat quality: a review. Grain & Oil Science and Technology，2022，5(1)：44-57.

[12] 农业农村部. 小麦品种品质分类：GB/T 17320-2013. 北京：中国国家标准化管理委员会，2013.

[13] 訾金爽，李四方，汪芳芳，等. 安徽麦区软质小麦主要品质性状的基因型-环境互作分析. 江苏农业学报，2024，40(7)：1161-1169.

[14] 刘鹏鹏，桑伟，徐红军，等. 基因型、环境对新疆冬小麦品种蛋白质品质的影响. 新疆农业科学，2022，59(1)：45-54.

[15] 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. 河南农业科学，2022，51(7)：22-30.

[16] 赵泽阳，李美玲，徐伟，等. 基于无人机多时相多特征的冬小麦产量预测模型研究.麦类作物学报，2025，45(8)：1089-1100.

[17] 郭燕，井宇航，王来刚，等. 基于无人机影像特征的冬小麦植株氮含量预测及模型迁移能力分析. 中国农业科学，2023，56(5)：850-865.

[18] 臧少龙，刘淋茹，高越之，等. 基于无人机影像多时相的小麦品种氮效率分类识别. 中国农业科学，2024，57(9)：1687-1708.

[19] 申晓晴，成林. 气象因子对河南省小麦主要品质指标的影响. 气象与环境科学，2022，45(6)：43-50.

[20] 曹中盛. 高温胁迫下小麦花后功能叶片衰老的高光谱监测诊断技术研究. 南京：南京农业大学，2021.

[21] Wang J J，Zhou Q，Shang J L，et al. UAV- and machine learning-based retrieval of wheat SPAD values at the overwintering stage for variety screening. Remote Sensing，2021，13(24)：5166.

[22] 呼斯乐，包玉龙. 基于 UAV 高光谱遥感的春小麦表型特征提取. 农业与技术，2024，44(4)：1-5.

[23] 张立全，张晓东. 我国优质小麦生产现状及其开发对策. 现代农业科技，2009(22)：66-68.

[24] 路燕，周正富，王强，等. 推进小麦供给侧结构性改革的思考——以河南优质专用型小麦产业为例. 农业科技管理，2017，36(1)：71-74.

[25] 杨晓婉，朱志明，马自清，等. 小麦品质影响因子研究进展. 耕作与栽培，2019(5)：30-38.

[26] 金欣欣，姚艳荣，贾秀领，等. 基因型和环境对小麦产量、品质和氮素效率的影响. 作物学报，2019，45(4)：635-644.

[27] 张羽丰，谢付振，牛聪聪，等. 黄淮麦区品种审定情况及品质分析. 中国种业，2023(4)：47-50.

[28] 潘洁，姜东，戴廷波，等. 不同生态环境与播种期下小麦籽粒品质变异规律的研究. 植物生态学报，2005，29(3)：367-373.

[29] 姜东，于振文，李永庚，等. 施氮水平对高产小麦蔗糖含量和光合产物分配及籽粒淀粉积累的影响. 中国农业科学，2002，35(2)：157-162.

[30] 吴金芝，吕淑芳，黄明，等. 钾肥施用量对 2 种筋型小麦主要品质性状的影响. 河南农业科学，2008(10)：67-69.

[31] 姜东，戴廷波，荆奇，等. 氮磷钾肥长期配合施用对冬小麦籽粒品质的影响. 中国农业科学，2004，37(4)：566-571.

[32] 毕新铜，葛子菲，杨洋，等. 豫北灌区优质高产小麦品种鉴选及其生理特征. 河南农业大学学报，2025，59(2)：199-211.

[33] 李春喜，姜丽娜，代西梅，等. 小麦氮素营养与后期衰老关系的研究. 麦类作物学报，2000，20(2)：39-41.

[34] Feng H K，Tao H L，Li Z H，et al. Comparison of UAV RGB imagery and hyperspectral remote-sensing data for monitoring winter wheat growth. Remote Sensing，2022，14(15)：3811.

[35] Wang F L，Li W，Liu Y，et al. Characterization of N distribution in different organs of winter wheat using UAV-based remote sensing. bioRxiv，2022，11(3)：514839.

Study on Yield-Quality Synergy, Regional Adaptation and Spectral Characteristics of High-Quality Wheat in the Northern Huang-Huai-Hai Plain

Chen Haoyue, Zhao Xuan, Sun Meng, Zhou Bingjin, Li Haoran, Ju Huijing, Zhang Yinghua, Wang Zhimin, Sun Zhencai

(College of Agronomy and Biotechnology, China Agricultural University / State Key Laboratory of Maize Bio-Breeding, Beijing 100193, China)

Abstract　A total of 22 wheat varieties (line) from the northern Huang-Huai-Hai region were used as experimental materials, and a comprehensive analysis of yield, quality, physiological indices, and spectral characteristics was conducted at two experimental sites in this region. GGE analysis and a clustering method were combined to screen high-yielding, stable-yielding, and high-quality varieties (line). The results showed that the medium- strong-gluten varieties Jimai 4072 and Shannong 66, and the strong-gluten varieties (line) Jimai 221001 and Gaoyou 5218, all had yields exceeding 7600 kg/ha, and their protein content, wet gluten content, dough stability time, and other indicators all met cultivar approval standards. Moreover, GGE and cluster analyses indicated that these varieties (line) had good high-yielding and stable-yielding performance and were classified as high-yield and high-quality varieties (line). UAV-based multispectral remote sensing analysis revealed that among strong-gluten wheat, Type I high-yield and high-quality varieties (line) had high NDVI values at anthesis and a smaller decrease in SPAD values during grain filling, and maintained a high enhanced vegetation index (EVI) and a low transformed chlorophyll absorption in reflectance index (TCARI) during mid-to-late grain filling, indicating excellent late-stage stay-green ability. In contrast, Type I high-yield and high-quality varieties (line) among medium-strong-gluten wheat showed low values of EVI, optimized soil-adjusted vegetation index (OSAVI), and nitrogen reflectance index (NRI) during mid-to-late grain filling, indicating rapid late-stage senescence accompanied by efficient nitrogen remobilization. Under the present experimental conditions, Jimai 221001 and Gaoyou 5218 are preferred varieties (line) of strong-gluten wheat in the northern Huang-Huai-Hai region, while Shannong 66 and Jimai 4072 exhibit high and stable yields and strong broad adaptability. The EVI during mid-to-late grain filling can serve as a key rapid detection indicator for screening high-yield and high-quality wheat varieties.

Key words　High-yield and high-quality wheat; Variety selection; Cluster analysis; GGE analysis; Spectral characteristics; Genotype-environment interaction analysis