

网络出版时间:2026-06-09

网络出版地址:https://link.cnki.net/urlid/61.1359.S.20260609.1024.004

小麦氮高效品种筛选及其生理特征分析

赵嘉欣, 吴子月, 李庆成, 陈琪文, 张晓燕, 张海艳, 马耕, 张艳菲, 康娟, 王晨阳

(河南农业大学农学院/国家小麦工程技术研究中心, 河南郑州 450002)

摘要:为探究不同小麦品种产量和氮素利用效率的差异及其生理基础,于2023—2024年度小麦生长季在河南省新乡市原阳县河南农业大学试验基地,选用40个已审定小麦品种为试材,对氮肥回收利用效率、氮肥偏生产力、氮素生理利用效率和氮肥农学效率共4个关键氮效率指标进行主成分分析和综合得分计算,再结合产量对小麦品种进行产量和氮效率水平筛选,并比较不同产量-氮效率类型品种的生理指标差异,以解析产量与氮素利用效率差异形成的生理基础。结果显示,不同小麦品种间的产量和4个氮效率指标均存在不同程度变异,变异系数为11.61%和11.61%~46.73%。通过对氮素利用效率指标进行主成分分析和综合得分计算,结合产量水平将40个小麦品种划分为4种类型,分别是高产高效型(11个)、高产低效型(5个)、低产高效型(10个)和低产低效型(14个)。对于干物质积累和转运指标分析发现,高产高效型品种在开花期和成熟期的地上部干物质和氮素积累量显著高于其他类型,且相比高产低效品种具有较高的花前氮素积累量和花前氮素转运量。高产高效型品种开花至灌浆期叶面积指数衰减率较低(高产高效型为18.77%,高产低效型为22.67%),同时高产型品种在灌浆期维持显著较高的SPAD值。在本研究条件下,高产高效型品种能够在开花期保持较高的干物质和氮素积累量,通过优化叶片空间分布、延长功能叶寿命来提高灌浆期干物质的合成,从而获得较高的产量和氮素利用效率。

关键词:小麦;产量;氮素利用效率;生理特征

中图分类号:S512.1;S311

文献标识码:A

文章编号:1009-1041(2026)07-0964-09

Screening of High Nitrogen Use Efficient Varieties and Physiological Characteristics Analysis in Wheat

ZHAO Jiaxin, WU Ziyue, LI Qingcheng, CHEN Qiwen, ZHANG Xiaoyan, ZHANG Haiyan,
MA Geng, ZHANG Yanfei, KANG Juan, WANG Chenyang

(College of Agronomy, Henan Agricultural University/National Engineering Research
Center for Wheat, Zhengzhou, Henan 450002, China)

Abstract: To investigate the differences in grain yield and nitrogen use efficiency among different wheat varieties and their physiological mechanisms, this study was conducted at the experimental station of Henan Agricultural University in Yuanyang County, Xinxiang City, Henan Province, during the 2023–2024 wheat growing season. Forty approved wheat varieties were used as experimental materials. Principal component analysis and comprehensive scoring were performed on four key nitrogen efficiency indices: nitrogen recovery efficiency, partial factor productivity of nitrogen, physiological nitrogen use efficiency, and agronomic nitrogen use efficiency. Combined with grain yield, wheat varieties were screened for yield and nitrogen efficiency levels, and physiological indices of different yield-nitrogen efficiency types were further compared to reveal the physiological basis underlying the differences in yield and nitrogen use efficiency. The results showed that grain yield and the four nitrogen efficien-

收稿日期:2025-12-16

修回日期:2026-02-07

基金项目:河南省自然科学基金(252300423607);国家重点研发计划子课题(2022YFD2300803)

第一作者 E-mail:zhaojiaxin3920@163.com(赵嘉欣)

通讯作者 E-mail:xmzxwang@163.com(王晨阳); kangjuan319@163.com(康娟)

cy indices varied significantly among varieties, with coefficients of variation ranging from 11.61% to 46.73%. Based on principal component analysis, comprehensive scores of nitrogen use efficiency indices, and yield levels, the 40 wheat varieties were classified into four types: high-yield and high-efficiency(11 varieties), high-yield and low-efficiency(5 varieties), low-yield and high-efficiency(10 varieties), and low-yield and low-efficiency(14 varieties). Analysis of dry matter accumulation and translocation revealed that high-yield and high-efficiency varieties had significantly higher aboveground dry matter and nitrogen accumulation at anthesis and maturity than other types. Compared with high-yield and low-efficiency varieties, they also exhibited greater preanthesis nitrogen accumulation and preanthesis nitrogen translocation. In addition, the leaf area index(LAI) attenuation rate from anthesis to grain filling was lower in high-yield and high-efficiency varieties(18.77%) than in high-yield and low-efficiency varieties(22.67%). Meanwhile, high-yield types maintained significantly higher SPAD values during grain filling. Under the experimental cultivation conditions, high-yield and high-efficiency varieties maintained high dry matter and nitrogen accumulation at anthesis. By optimizing leaf spatial distribution and prolonging functional leaf longevity, they sustained dry matter production during grain filling, thereby achieving higher grain yield and nitrogen use efficiency.

Keywords: Wheat; Yield; Nitrogen use efficiency; Physiological characteristic

小麦是中国重要的口粮作物之一,其生产对于保障国家粮食安全和农业可持续发展具有重要意义。氮素作为作物生长发育的关键营养元素,在小麦光合作用、物质代谢及产量形成过程中发挥着核心作用^[1-4]。然而,随着氮肥施用量的增加,氮肥利用率低的问题日益突出。据统计,中国小麦氮肥利用率仅为 30%~35%,远低于发达国家水平^[5]。合理施用氮肥可以提高小麦产量,改善籽粒品质,但过量、低效、不均衡的氮肥施用不仅会降低经济效益,还引发氮素流失和环境污染等一系列问题^[6-8]。因此,提高小麦氮素利用效率已成为当前农业可持续发展的重要目标。

已有研究表明,氮素利用效率在同一作物的不同品种之间存在显著差异^[8]。选育兼具高产潜力与高氮效率的品种,是提升氮肥利用率、减少资源浪费的重要途径^[9]。然而,氮素利用效率是一个复杂的综合性状,涉及氮素吸收、转运、同化及再分配等多个生理过程,其表达不仅受遗传因素调控,还受到土壤条件、气候环境及栽培措施等多重因素影响^[10]。传统的小麦品种筛选方法主要基于单一指标,难以系统评估品种的综合特性,且由于产量性状与氮效率性状之间往往存在复杂的相互关系,不同氮效率指标在品种间的差异也较大^[11]。因此,需要根据多个氮效率指标进行系统评价与鉴定,提高不同小麦品种氮效率评价的科学性、准确性^[12]。

近年来,多元统计方法在作物性状综合评价中得到了广泛应用,隶属函数、主成分分析、聚类分析、灰色关联度分析、逐步回归分析等方法已成为品种筛选的常用手段。其中主成分分析通过降维整合多指标信息,能够有效提取关键综合变量,减少指标间的信息冗余,已成为作物性状评价的重要工具^[13]。该方法已广泛应用于玉米^[14]、水稻^[15]、小麦^[16]、大麦^[17]、棉花^[18]等作物的筛选和综合评价。但在小麦品种的筛选中,以农艺性状^[19]、品质^[20]、抗逆性^[21]等方面的研究居多,针对高产量、氮高效品种筛选的研究相对较少。基于此,本研究运用主成分分析法对 40 份供试小麦品种的 4 项关键氮效率指标进行综合评价,结合产量将其分为高产高效型、低产高效型、低产低效型和高产低效型 4 种类型,分析高产高效类型品种的生理特性,以期小麦高产高氮效率品种的选育及高效栽培提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2023—2024 年小麦生长季在河南省新乡市原阳县河南农业大学试验基地(35°6'N, 113°56'E)进行。该地属暖温带大陆性季风气候区,年均降水量 573.4 mm,年均气温 15.5℃,年日照时数约 2 144.4 h,无霜期 205 d。供试土壤为砂质潮土,耕层(0~20 cm)pH 值为 7.9,有机质含量 11.3 g·kg⁻¹,全氮含量 0.92 g·kg⁻¹,

碱解氮含量 111.1 mg·kg⁻¹,速效磷含量 7.22 mg·kg⁻¹,速效钾含量 85.9 mg·kg⁻¹。

1.2 试验设计与材料

本试验以 40 个小麦品种(表 1)为材料,采用随机区组设计,每个品种均设置不施氮(对照)和施氮处理。小区面积 15 m²(10 m×1.5 m),每处理 3 次重复。采用小区精量播种机于 2023 年 10 月 17 日播种,密度为 300 万株·hm⁻²,于 2024 年 5 月 31 日收获。氮(尿素,N 含量 46%)、磷(重过磷酸钙,P₂O₅ 含量 44%)和钾(氯化钾,K₂O 含量 60%)施用量分别为 240、150、120 kg·hm⁻²,其中磷、钾肥全部基施,氮肥按基肥与拔节期追肥 1:1 施用,追肥结合灌水进行。拔节期和开花期各灌水 1 次,灌水量为 750 m³·hm⁻²。栽培管理措施及病虫害害的防控同当地大田。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 产量的测定

于成熟期在每个小区人工收割 3 m²(1.5 m×2 m),经脱粒、晒干后称重,用近红外谷物分析仪(FOSS Infratec 1241)测定籽粒含水量,并以 13%含水量计算单位面积籽粒产量。

1.3.2 干物质和氮素积累量的测定

于开花期和成熟期,每小区随机选取长势均匀的 15 个单茎,重复 3 次,按茎秆、叶片、穗(成熟

期分为籽粒与颖壳+穗轴)进行分离,于 105 ℃杀青 30 min,80 ℃烘干至恒重,计算干物质积累量。干样经粉碎后,用凯氏定氮仪(K1100F,山东海能)测定全氮含量,计算氮素积累量。相关指标计算公式如下:

氮肥回收利用效率=(施氮区地上部总氮积累量-不施氮区地上部氮积累量)/施氮量

氮肥偏生产力=籽粒产量/施氮量

氮素生理利用效率=(施氮区籽粒产量-不施氮区籽粒产量)/(施氮区地上部氮积累量-不施氮区地上部氮积累量)

氮肥农学效率=(施氮区籽粒产量-不施氮区籽粒产量)/施氮量

花后干物质积累量=成熟期地上部干重-开花期地上部干重

花前干物质转运量=开花期地上部干重-成熟期营养器官干重

花后氮素积累量=成熟期地上部氮素积累量-开花期地上部氮素积累量

花前氮素转运量=开花期地上部氮素积累量-成熟期营养器官氮素积累量

收获指数=成熟期籽粒干重/成熟期地上部干重

氮收获指数=成熟期籽粒氮积累量/成熟期地上部氮积累量

表 1 供试小麦品种
Table 1 Names of the tested wheat varieties

品种名称 Variety name	代号 Abbreviation	品种名称 Variety name	代号 Abbreviation	品种名称 Variety name	代号 Abbreviation
周麦 36 号 Zhoumai 36	ZM36	囤麦 127 Tunmai 127	TM127	郑麦 136 Zhengmai 136	ZM136
轮选 145 Lunxuan 145	LX145	新麦 58 Xinmai 58	XM58	豫农 902 Yunong 902	YN902
稷麦 336 Jimai 336	JM336	西农 1155 Xinong 1155	XN1155	泛麦 8 号 Fanmai 8	FM8
西农 20 Xinong 20	XN20	洛麦 47 Luomai 47	LM47	百农 207 Bainong 207	BN207
中麦 578 Zhongmai 578	ZM578	郑麦 1860 Zhengmai 1860	ZM1860	华成 5157 Huacheng 5157	HC5157
禾麦 66 Hemai 66	HM66	百农 607 Bainong 607	BN607	郑麦 379 Zhengmai 379	ZM379
岱麦 366 Daimai 366	DM366	郑麦 113 Zhengmai 113	ZM113	福穗 3 号 Fusui 3	FS3
百农 4199 Bainong 4199	BN4199	偃亳 369 Yanbo 369	YB369	豫农 186 Yunong 186	YN186
国阳 537 Guoyang 537	GY537	赛德麦 8 号 Saidemai 8	SDM8	温麦 802 Wenmai 802	WM802
百农 307 Bainong 307	BN307	轮选 6 号 Lunxuan 6	LX6	轮选 66 Lunxuan 66	LX66
宛 1390 Wan 1390	W1390	泛育麦 18 Fanyumai 18	FYM18	滑育麦 1 号 Huayumai 1	HYM1
中麦 30 Zhongmai 30	ZM30	周麦 16 Zhoumai 16	ZM16	百麦 5811 Baimai 5811	BM5811
郑麦 139 Zhengmai 139	ZM139	怀川 109 Huaichuan 109	HC109		
新麦 26 Xinmai 26	XM26	华成 865 Huacheng 865	HC865		

1.3.3 叶面积指数和 SPAD 的测定

使用 LAI-2200C 植物冠层分析仪,于拔节期、开花期和灌浆期晴朗无风天气的 9:00—10:00 测定小麦冠层叶面积指数,每小区重复 3 次。同时选取生长均匀一致的旗叶,用手持叶绿素测定仪 (SPAD-502 Plus) 测定旗叶的上、中、下部位 SPAD 值,取平均值,每小区测定 6 片叶。

1.4 数据处理

运用 Excel 2013 对原始数据进行整理,使用 Origin 2021 绘制图表,采用 SPSS 26 进行主成分分析, one-way ANOVA 方差分析和 Duncan 多重比较。采用主成分分析评价氮素利用效率,并对相关指标采

用极差标准化(min-max)方法进行归一化处理。

2 结果与分析

2.1 不同小麦品种产量、氮效率指标的变异特征及相关性分析

40 个小麦品种的产量最大值、最小值和平均值分别为 10 199.91、6 506.12 和 7 892.41 kg · hm⁻²,变异系数为 11.61%(表 2)。4 个氮素利用效率指标的变异系数为 11.61%~46.73%,其中 AE_N 的变异系数最大(46.73%),其次为 NPE(41.98%), PFP 的变异系数相对较小(11.61%)。这表明不同品种的产量、氮素吸收、利用及效应存在较大差异。

表 2 供试小麦品种产量及氮效率指标的特征

项目 Item	Y/(kg · hm ⁻²)	RE _N	PFP/(kg · kg ⁻¹)	NPE/(kg · kg ⁻¹)	AE _N /(kg · kg ⁻¹)
最大值 Max. value	10 199.91	0.66	42.50	50.95	26.34
最小值 Min. value	6 506.12	0.21	27.11	0.37	0.10
平均值 Mean	7 892.41	0.44	32.89	27.73	12.26
标准差 SD	916.12	0.12	3.82	11.64	5.73
变异系数 CV/%	11.61	28.02	11.61	41.98	46.73

Y:产量;RE_N:氮肥回收利用效率;PFP:氮肥偏生产力;NPE:氮素生理利用效率;AE_N:氮肥农学效率。图 1 和表 3 同。
Y: Yield; RE_N: Nitrogen fertilizer recovery efficiency; PFP: Nitrogen partial factor productivity; NPE: Physiological nitrogen use efficiency; AE_N: Agronomic nitrogen use efficiency. The same in Fig. 1 and table 3.

产量与氮素利用效率指标之间的相关性分析(图 1)表明,产量与 PFP、NPE 以及 AE_N 呈极显著正相关($P<0.01$),而与 RE_N 相关性不显著; RE_N 与 AE_N、PFP 与 AE_N、PFP 与 NPE 之间均呈极显著正相关。说明不同氮效率指标之间存在较强关联性。由于各指标分别反映氮吸收、氮利用及氮肥增产效应的不同侧面,且部分指标在计算上与产量存在一定关联,因此仅以单一指标评价小麦品种氮效率具有一定局限性,应结合多个指标进行综合分析。

2.2 不同小麦品种氮效率相关指标的主成分分析

2.2.1 氮效率指标主成分提取

为了综合评价 40 个小麦品种的氮效率特征,对其 4 个氮效率指标进行了主成分(表 3)分析。发现前 2 个主成分累计方差贡献率为 86.13%,能够反映原始 4 个指标的大部分信息。其中,第一主成分特征值 2.48,贡献率为 61.97%;第二主成分特征值 1.00,贡献率为 24.16%。从各指标的主成分载荷值来看,氮肥偏生产力和氮肥农学效率在第一主成分上的载荷较高,反映土壤基础养分和化肥施用量对小麦增产的综合效应;氮肥

回收利用效率在第二主成分上的载荷较高,反映品种对氮肥的吸收能力;氮肥生理利用效率在第一、第二主成分均有分布,反映小麦植株将吸收的肥料氮转化为产量的能力。

2.2.2 氮效率主成分得分及综合评价

对氮效率指标采用最大最小值归一化后进行主成分分析,根据各指标在主成分上的载荷构建

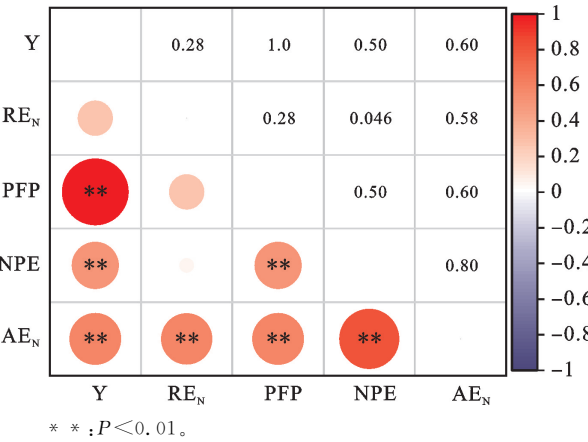


图 1 小麦产量与氮效率指标相关性分析
Fig. 1 Correlation analysis of yield and nitrogen efficiency indices of wheat varieties

主成分得分函数;再以各主成分的方差贡献率占累计贡献率的比值作为权重,计算综合得分^[22],公式如下:

$$\begin{aligned} F_1 &= 0.35X_1 + 0.49X_2 + 0.51X_3 + 0.61X_4, \\ F_2 &= 0.84X_1 - 0.12X_2 - 0.52X_3 + 0.05X_4, \\ F &= 0.72 \times F_1 + 0.28 \times F_2; \end{aligned}$$

表 3 氮效率指标主成分的特征值、方差贡献率及载荷矩阵

Table 3 Eigenvalues, variance contribution rates, cumulative contribution rates, and component loadings of principal components for nitrogen efficiency indices			
指标 Index	主成分 1 PC1	主成分 2 PC2	
RE _N	0.35	0.84	
PFP	0.49	-0.12	
NPE	0.51	-0.52	
AE _N	0.61	0.05	
特征值 Eigenvalue	2.48	1.00	
方差贡献率 Variance contribution rate/%	61.97	24.16	
累计贡献率 Cumulative variance contribution rate/%	61.97	86.13	

其中, X_1 、 X_2 、 X_3 和 X_4 分别表示氮肥回收利用效率、氮肥偏生产力、氮素生理利用效率和氮肥农学效率归一化后的值; F_1 和 F_2 分别表示主成分 1 和主成分 2 的得分; F 为各主成分得分与其对应权重乘积之和。

综合得分越高,说明该品种的综合氮效率越高。对 40 个小麦品种的综合得分进行计算并排序(表 4),40 个品种综合得分范围为 0.10~1.35,平均值为 0.70。高于平均水平的品种共有 21 个,分别为华成 865、周麦 16、泛育麦 18、周麦 36 号、郑麦 1860、百农 607、郑麦 113、郑麦 136、华成 5157、西农 20、豫农 186、新麦 26、怀川 109、偃亳 369、百麦 5811、中麦 30、西农 1155、宛 1390、福穗 3 号、百农 4199 和滑育麦 1 号。其中,华成 865、周麦 16 和泛育麦 18 综合得分位居前 3 位,表明其在供试品种中具有较高的综合氮效率水平。

2.3 不同小麦品种产量与氮效率类型划分

以 40 个供试小麦品种的平均产量(7 892.41 kg·hm⁻²)和平均氮效率综合得分(0.70)分别作为横、纵坐标分界线,采用四象限法将 40 个小麦

表 4 不同品种小麦主成分得分及综合评价

Table 4 Principal component scores and comprehensive evaluation of different wheat varieties									
代号 Abbreviation	F_1	F_2	F	排序 Rank	品种 Variety	F_1	F_2	F	排序 Rank
ZM36	1.24	0.54	1.04	4	ZM113	1.13	0.34	0.91	7
LX145	0.59	0.23	0.49	33	YB369	1.08	0.22	0.84	14
JM336	0.57	-0.10	0.38	34	SDM8	0.90	-0.36	0.55	30
XN20	1.14	0.21	0.88	10	LX6	0.92	0.07	0.68	23
ZM578	0.61	0.57	0.60	27	FYM18	1.44	0.41	1.15	3
HM66	0.90	-0.21	0.59	28	ZM16	1.53	0.42	1.22	2
DM366	0.90	-0.14	0.61	26	HC109	1.16	0.06	0.85	11
BN4199	1.16	-0.29	0.75	20	HC865	1.82	0.12	1.35	1
GY537	0.46	-0.12	0.30	37	ZM136	1.37	-0.23	0.92	6
BN307	0.56	0.36	0.50	32	YN902	1.02	-0.19	0.68	22
W1390	1.04	0.11	0.78	18	FM8	0.27	-0.16	0.15	39
ZM30	1.16	-0.07	0.82	15	BN207	0.23	0.03	0.17	38
ZM139	0.86	0.11	0.65	24	HC5157	1.17	0.19	0.90	9
XM26	1.00	0.44	0.84	13	ZM379	0.43	0.17	0.36	36
TM127	0.73	0.37	0.63	25	FS3	0.90	0.42	0.76	19
XM58	0.82	-0.12	0.55	29	YN186	0.95	0.56	0.84	12
XN1155	1.08	0.09	0.80	16	WM802	0.67	0.10	0.51	31
LM47	0.50	0.01	0.36	35	LX66	0.09	0.13	0.10	40
ZM1860	1.48	-0.10	1.04	5	HYM1	1.00	0.02	0.72	21
BN607	1.09	0.46	0.91	8	BM5811	0.92	0.49	0.80	17

品种划分为高产高效型、低产高效型、低产低效型和高产低效型 4 类(图 2)。其中,I 区为高产高效型,共 11 个品种,包括西农 20、中麦 30、西农 1155、郑麦 1860、百农 607、郑麦 113、泛育麦 18、周麦 16、怀川 109、华成 865 和郑麦 136,该类型品种的平均产量和平均氮效率综合得分分别为 $8\,985.49\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 0.99;Ⅱ区为低产高效型,共 10 个品种,包括周麦 36 号、百农 4199、宛 1390、新麦 26、偃亳 369、华成 5157、福穗 3 号、豫农 186、滑育麦 1 号和百麦 5811,平均产量和氮效率得分分别为 $7\,524.55\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 0.83;Ⅲ区为低产低效型,共 14 个品种,包括轮选 145、稷麦 336、中麦 578、禾麦 66、国阳 537、百农 307、新麦 58、洛麦 47、赛德麦 8 号、泛麦 8 号、百农 207、郑麦 379、温麦 802 和轮选 66,平均产量和氮效率得分分别为 $7\,105.48\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 0.40;Ⅳ区为高产低效型,共 5 个品种,包括岱麦 366、郑麦 139、罔麦 127、轮选 6 号和豫农 902,平均产量和氮效率得分分别为 $8\,427.58\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 0.65。

2.4 不同类型小麦品种干物质、氮素积累、转运及叶片生理特征分析

高产高效型品种在开花期和成熟期的地上部干物质积累量及氮素积累量均显著高于其他 3 种类型(表 5)。高产低效型、低产高效型和低产低效型 3 类品种之间的差异主要体现在花后干物质积累量、花后氮素积累量以及花前氮素转运量上。与高产低效型品种相比,高产高效型品种的开花期氮素积累量和花前氮素转运量均较高。不同类型品种间 HI 和 NHI 差异均不显著。这说明较

高的干物质和氮素积累能力以及较强的氮素转运能力可能是高产高效型品种形成的重要生理基础。

不同类型小麦品种的 LAI 笔 SPAD 值随时间推移均呈先升高后降低的趋势,在开花期达到峰值(表 6)。其中,高产低效型品种在开花期的 LAI 和 SPAD 值均最高,高产高效型次之。高产高效型品种开花至灌浆期 LAI 衰减率为 18.77%,而高产低效与低产高效型品种衰减率分别为 22.67% 和 23.70%,SPAD 值变化趋势与 LAI 一致。灌浆期高产型品种的 SPAD 值显著高于低产型品种推测灌浆期较高的叶面积指数和叶片叶绿素含量是高产型品种干物质积累量较高的主要生理基础。

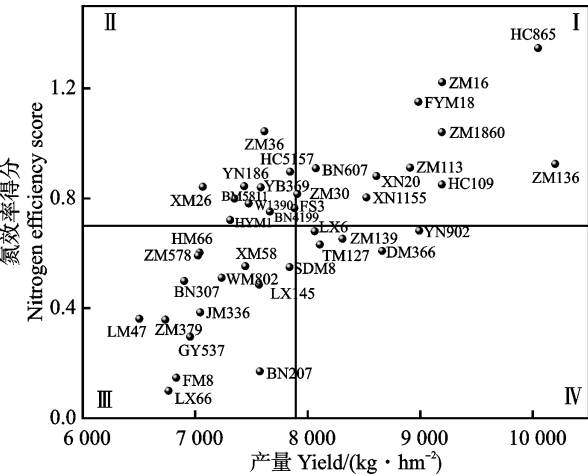


图 2 基于产量与氮效率综合得分的小麦品种分类
Fig. 2 Classification of wheat varieties based on yield and comprehensive nitrogen efficiency scores

表 5 不同类型小麦干物质及氮素积累转运差异

Table 5 Differences in dry matter and nitrogen accumulation and translocation among different types of wheat										
品种类型 Variety type	干物质积累量 Dry matter accumulation/(kg · hm ⁻²)				HI	氮素积累量 Nitrogen accumulation/(kg · hm ⁻²)				NHI
	开花期 Flowering	成熟期 Maturity	PFA _D	PFT _D		开花期 Flowering	成熟期 Maturity	PFA _N	PFT _N	
高产高效型 High-yield and high-efficiency	10 455.77a	17 371.69a	6 915.92a	2 658.91a	0.55a	173.56a	208.30a	34.73b	139.56a	0.84a
高产低效型 High-yield and low-efficiency	9 020.10b	15 512.77b	6 492.67b	2 401.61b	0.57a	151.80b	186.82b	35.02b	124.35b	0.85a
低产高效型 Low-yield and high-efficiency	9 003.71b	15 141.12b	6 137.41c	2 368.82b	0.56a	142.77b	184.26b	41.49a	115.63c	0.85a
低产低效型 Low-yield and low-efficiency	8 926.58b	14 565.56c	5 638.98d	2 451.30b	0.56a	151.12b	173.95b	22.83c	123.84b	0.84a

PFA_D: 花后干物质积累量; PFT_D: 花前干物质转运量; PFA_N: 花后氮素积累量; PFT_N: 花前氮素转运量; HI: 收获指数; NHI: 氮收获指数。同列数据后不同小写字母表示不同类型之间在 0.05 水平上差异显著。下同。
PFA_D: Post-flowering dry matter accumulation; PFT_D: Pre-flowering dry matter translocation; PFA_N: Post-flowering nitrogen accumulation; PFT_N: Pre-flowering nitrogen translocation; HI: Harvest index; NHI: Nitrogen harvest index. Lowercase letters following data in same column indicate significant differences between different types at the 0.05 level. The same below.

表 6 不同类型小麦叶面积指数(LAI)和 SPAD 值的差异

Table 6 Differences in leaf area index(LAI) and SPAD value of different types of wheat

品种类型 Variety type	LAI			SPAD		
	拔节期 Jointing stage	开花期 Flowering stage	灌浆期 Grain-filling stage	拔节期 Jointing stage	开花期 Flowering stage	灌浆期 Grain-filling stage
高产高效型 High-yield and high-efficiency	4.12a	5.86b	4.76ab	48.39a	54.24b	52.26a
高产低效型 High-yield and low-efficiency	4.25a	6.66a	5.15a	49.54a	56.61a	53.18a
低产高效型 Low-yield and high-efficiency	4.02a	5.78b	4.41b	48.75a	53.99b	49.77b
低产低效型 Low-yield and low-efficiency	3.87a	5.74b	4.68ab	49.34a	54.16b	49.01b

3 讨论

提高氮素利用效率是近年来小麦研究的重点,而生产和研究中评价氮效率的指标很多,其中 RE_N 从“吸收维度”反映了作物在土壤中“捕获”氮素的能力;PFP从“产出维度”反映了土壤养分、栽培管理、品种特性以及氮肥吸收能力的综合效应; NPE 从“转化维度”反映作物同化、转运和再利用氮素的能力; AE_N 直接衡量了施肥对作物的增产效应,代表了氮效率的“增效维度”。本研究通过对 40 个不同小麦品种的生理特性分析发现,品种间的产量和氮素利用效率均存在不同程度的差异,变异系数为 11.61 和 11.61%~46.73%,较高的变异系数表明不同品种在氮素的吸收、产出、内部转化和氮肥增产效应方面差异显著^[23]。为了能够更全面、系统地评价小麦的氮效率,本研究对 RE_N 、PFP、 NPE 和 AE_N 共 4 项氮效率指标进行主成分分析,并进一步计算得到各品种的氮效率综合得分值。参考前人的研究方法^[24-25],根据小麦的氮效率综合得分和产量水平,将 40 个小麦品种划分为高产高效型、高产低效型、低产高效型和低产低效型 4 类。其中高产高效品种 11 个,分别为西农 20、中麦 30、西农 1155、郑麦 1860、百农 607、郑麦 113、泛育麦 18、周麦 16、怀川 109、华成 865 和郑麦 136。与采用单一氮效率指标的评价方法相比,多指标体现了其综合优势,但是需要根据作物类型和环境差异选用氮效率评价指标和评价体系^[26-27]。

小麦产量和氮素利用效率的形成离不开植株物质积累、分配和转运的调控^[28]。本试验结果显示,品种间干物质积累和转运量、氮素积累和转运量的变异系数较大,收获指数和氮素收获指数差异较小。可能是因为品种迭代优化了成熟期小麦

各个器官物质和氮素的积累,并通过提高籽粒分配比例来提升产量和氮效率^[29]。对比不同类型品种间的氮素积累与转运特征发现,高产型品种的干物质和氮素积累量显著高于低产型品种,并且高产高效型品种籽粒氮素积累主要依赖于花前氮素转运,而低产高效型品种的花后氮素积累量较高。这可能与高产高效型品种在开花期和成熟期具有较高的地上部干物质及氮素积累量有关,促使其花前氮素转运能力也更为突出。有研究也提出,高产高效型品种在开花期具有较高的干物质积累基础,并能在籽粒灌浆期保持较强的花前氮素转运能力^[30]。综上表明,较高的干物质和氮素积累量是小麦形成高产的基础,兼顾高产高效型品种的同时在干物质和氮素转运与分配方面表现出较为协调的生理特征,这可能是实现小麦高产与高效协同的重要生理基础。

LAI 作为表征作物群体光合性能的核心参数,其时空分布特征直接影响冠层光截获效率和同化产物积累^[31]。本研究发现,虽然高产低效型品种在开花期和灌浆期 LAI 值较高,但其从开花期到灌浆期 LAI 的衰减率为 22.67%,显著高于高产高效型的 18.77%。据此推测,相较于 LAI 的峰值水平,灌浆期 LAI 的稳定维持能力可能是影响氮效率的一个重要因素。通过比较旗叶 SPAD 值发现,高产高效型品种灌浆期 SPAD 值的降低速率相较于高产低效型也较小。这可能是因为高产低效型植株开花期积累的氮素较少,籽粒灌浆对叶片氮素的调动影响较大,诱导了其衰老,而高产高效型品种植株开花期的氮素储备更充足,从而延缓叶片衰老进程,使叶片能够维持较长的光合功能期和物质转运相关酶的活性^[32-33]。综合来看,高产高效型品种能够通过优化叶面积时空分布和延长功能叶寿命来支持小麦灌浆期干

物质的合成与花前贮存物质的转运。

在本研究条件下,开花期和成熟期植株较高的干物质和氮素积累量是小麦高产的基础,而花后干物质积累量和花前氮素转运量是小麦产量与氮素利用效率能否实现协同的关键因素。高产品在开花期和灌浆期具有较高的叶面积指数和叶绿素含量。因此,在育种过程中可以根据小麦的干物质积累和转运特性初步筛选高产高效的品种。

参考文献:

- [1] SUN H W, WANG Y H, WANG L. Impact of climate change on wheat production in China [J]. *European Journal of Agronomy*, 2024, 153: 127066.
- [2] LI H R, HAO W P, LIU Q, et al. Developing nitrogen management strategies under drip fertigation for wheat and maize production in the North China Plain based on a 3-year field experiment [J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2019, 182(3): 335.
- [3] 王小纯, 王晓航, 熊淑萍, 等. 不同供氮水平下小麦品种的氮效率差异及其氮代谢特征[J]. *中国农业科学*, 2015, 48(13): 2569.
WANG X C, WANG X H, XIONG S P, et al. Differences in nitrogen efficiency and nitrogen metabolism of wheat varieties under different nitrogen levels [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(13): 2569.
- [4] LIU Y N, LI Y C, PENG Z P, et al. Effects of different nitrogen fertilizer management practices on wheat yields and N₂O emissions from wheat fields in North China [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2015, 14(6): 1184.
- [5] 李含婷. 间作绿肥及减氮对玉米氮素高效利用的微生物机制[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2023.
LI H T. Microbial mechanism of intercropping green manure and nitrogen reduction on efficient utilization of nitrogen in maize [D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2023.
- [6] LASSALETTA L, BILLEN G, GARNIER J, et al. Nitrogen use in the global food system: Past trends and future trajectories of agronomic performance, pollution, trade, and dietary demand [J]. *Environmental Research Letters*, 2016, 11(9): 095007.
- [7] 白由路. 植物营养与肥料研究的回顾与展望[J]. *中国农业科学*, 2015, 48(17): 3477.
BAI Y L. Review on research in plant nutrition and fertilizers [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(17): 3477.
- [8] GOVINDASAMY P, MUTHUSAMY S K, BAGAVATHIA-NNAN M, et al. Nitrogen use efficiency — a key to enhance crop productivity under a changing climate [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2023, 14: 1121073.
- [9] 宋晓, 张珂珂, 黄晨晨, 等. 不同氮效率小麦品种根系特征及根际土壤酶活性的分析[J]. *核农学报*, 2023, 37(3): 617.
SONG X, ZHANG K K, HUANG C C, et al. Analysis of root characteristics and rhizosphere soil enzyme activities of wheat varieties with different nitrogen efficiencies [J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2023, 37(3): 617.
- [10] 刘秋员. 江淮东部中梗优质高产氮高效类型及其若干形态生理特征[D]. 扬州: 扬州大学, 2021.
LIU Q Y. Good quality, high grain yield and high nitrogen efficiency types of medium Japonica rice in the eastern region of Jianghuai and their morphological and physiological characteristics [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2021.
- [11] 董召娣, 张明伟, 易媛, 等. 部分春性和半冬性小麦品种氮效率差异分析[J]. *麦类作物学报*, 2014, 34(9): 1267.
DONG Z D, ZHANG M W, YI Y, et al. Analysis on the difference in nitrogen efficiency of semi-winter and spring wheat varieties [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2014, 34(9): 1267.
- [12] 张恒, 陈艳琦, 任杰莹, 等. 西南麦区小麦苗期氮高效品种筛选及指标体系构建[J]. *四川农业大学学报*, 2022, 40(1): 10.
ZHANG H, CHEN Y Q, REN J Y, et al. Screening of wheat cultivars with high nitrogen efficiency at seedling stage and construction of index system in southwest wheat region [J]. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 2022, 40(1): 10.
- [13] 邵战宁, 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.
GAO Z N, YANG Y Q, FENG H, et al. Genetic diversity analysis of major agronomic traits of 58 barley varieties(lines) [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2025, 53(2): 144.
- [14] 密菲瑶, 张腾, 李卓远, 等. 施氮和覆膜对陕北地区玉米生长及氮素转运的影响[J]. *中国农业大学学报*, 2023, 28(8): 65.
MI F Y, ZHANG T, LI Z Y, et al. Effects of nitrogen application and plastic mulching on the growth and nitrogen transport of maize in northern Shaanxi Province [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2023, 28(8): 65.
- [15] 侯天钰, 杜孝敬, 赵志强, 等. 梗稻品种芽期耐冷性评价及耐冷种质筛选[J]. *作物学报*, 2025, 51(3): 812.
HOU T Y, DU X J, ZHAO Z Q, et al. Evaluation of cold tolerance of Japonica rice varieties at germination stage and construction of identification system [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2025, 51(3): 812.
- [16] 黄晨晨, 宋晓, 黄绍敏, 等. 基于主成分分析和聚类分析的磷高效品种筛选和评价[J]. *中国土壤与肥料*, 2021(6): 292.
HUANG C C, SONG X, HUANG S M, et al. Screening and evaluation of phosphorus high efficient varieties based on principal component analysis and cluster analysis [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2021(6): 292.
- [17] 吕二锁, 马宇, 徐广祥, 等. 37份大麦新品种(系)主要农艺性状分析与评价[J]. *大麦与谷类科学*, 2024, 41(5): 29.
LÜ E S, MA Y, XU G X, et al. Analysis and evaluation of main agronomic traits of 37 new barley varieties(lines) [J]. *Barley and Cereal Sciences*, 2024, 41(5): 29.
- [18] 祝令晓, 宋世佳, 李浩然, 等. 基于耐低氮综合指数的棉花苗期耐低氮品种筛选[J]. *作物学报*, 2022, 48(7): 1800.
ZHU L X, SONG S J, LI H R, et al. Screening of low nitrogen tolerant cultivars based on low nitrogen tolerance com-

- prehensive index at seeding stage in cotton [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2022, 48(7):1800.
- [19] 许小宛, 姚俭昕, 高雅洁, 等. 一批新育成小麦品种(系)主要农艺性状分析及其分子标记鉴定[J]. 麦类作物学报, 2019, 39(5):520.
- XU X W, YAO J X, GAO Y J, *et al.* Analyses on main agronomic traits of a batch of new wheat varieties(lines) and detection by molecular markers [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2019, 39(5):520.
- [20] 毛红艳, 于明, 祖力皮牙·买买提, 等. HP-SPME-GC-MS结合ROAV分析新疆不同小麦品种面粉主要挥发性成分[J]. 麦类作物学报, 2023, 43(5):640.
- MAO H Y, YU M, ZULIPIYA M M T, *et al.* Analysis of main flavor substances in Xinjiang wheat flours by HP-SPME-GC-MS coupled with ROAV [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2023, 43(5):640.
- [21] BAO X Y, HOU X Y, DUAN W W, *et al.* Screening and evaluation of drought resistance traits of winter wheat in the North China Plain [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2023, 14:1194759.
- [22] 聂波涛, 刘德泉, 陈健, 等. 北方春大豆品种农艺和品质性状分析与综合评价[J]. 作物学报, 2024, 50(9):2248.
- NIE B T, LIU D Q, CHEN J, *et al.* Analysis and comprehensive evaluation of agronomic and quality traits of spring soybean varieties in northern China [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2024, 50(9):2248.
- [23] 李强, 罗延宏, 谭杰, 等. 玉米杂交种苗期耐低氮指标的筛选与综合评价[J]. 中国生态农业学报, 2014, 22(10):1190.
- LI Q, LUO Y H, TAN J, *et al.* Indexes screening and comprehensive evaluation of low nitrogen tolerance of hybrid maize cultivars at seedling stage [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2014, 22(10):1190.
- [24] 刘星. 氮磷高效水稻品种筛选及其形态生理特征[D]. 扬州: 扬州大学, 2024.
- LIU X. Screening of nitrogen-and phosphorus-efficient rice varieties and their morpho-physiological characteristics [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2024.
- [25] 刘秋员, 周磊, 田晋钰, 等. 长江中下游地区常规中熟粳稻氮效率综合评价及高产氮高效品种筛选[J]. 中国农业科学, 2021, 54(7):1397.
- LIU Q Y, ZHOU L, TIAN J Y, *et al.* Comprehensive evaluation of nitrogen efficiency and screening of varieties with high grain yield and high nitrogen efficiency of inbred middle-ripe Japonica rice in the middle and lower reaches of Yangtze River [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2021, 54(7):1397.
- [26] 王英, 马建森, 王芳, 等. 引黄灌区水稻氮高效品种筛选评价[J]. 中国稻米, 2025, 31(1):74.
- WANG Y, MA J S, WANG F, *et al.* Screening and evaluation of nitrogen-efficient varieties of rice in the yellow river irrigation area [J]. *China Rice*, 2025, 31(1):74.
- [27] 姜琰, 戚秀秀, 李祥剑, 等. 不同小麦品种的氮素利用特性研究[J]. 麦类作物学报, 2019, 39(6):702.
- JIANG Y, QI X X, LI X J, *et al.* Study on nitrogen utilization characteristics of different wheat cultivars [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2019, 39(6):702.
- [28] 吕广德, 亓晓蕾, 张继波, 等. 中、高产型小麦干物质和氮素累积转运对水氮的响应[J]. 植物营养与肥料学报, 2021, 27(9):1534.
- LU G D, QI X L, ZHANG J B, *et al.* Response of nitrogen and dry matter accumulation in middle and high yield wheat cultivars to water and nitrogen supply [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2021, 27(9):1534.
- [29] 冯昌杰. 小麦品种氮效率演替规律及其对氮肥的响应[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2025.
- FENG C J. Succession law of nitrogen efficiency of wheat varieties and its response to nitrogen fertilizer [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2025.
- [30] 柏慧. 不同氮效率类型冬小麦品种产量构成、氮素积累与转运特征的比较分析[D]. 泰安: 山东农业大学, 2022.
- BAI H. Comparative analysis of yield components, nitrogen accumulation and transport characteristics of winter wheat varieties with different nitrogen efficiency types [D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2022.
- [31] 吴晓丽, 李朝苏, 汤永禄, 等. 氮肥运筹对小麦产量、氮素利用效率和光能利用率的影响[J]. 应用生态学报, 2017, 28(6):1889.
- WU X L, LI Z S, TANG Y L, *et al.* Effect of nitrogen management modes on grain yield, nitrogen use efficiency and light use efficiency of wheat [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(6):1889.
- [32] GAJU O, ALLARD V, MARTRE P, *et al.* Identification of traits to improve the nitrogen-use efficiency of wheat genotypes [J]. *Field Crops Res.* 2011, 123:139.
- [33] ZHANG Z Y, XU S J, WEI Q R, *et al.* Variation in Leaf type, canopy architecture, and light and nitrogen distribution characteristics of two winter wheat (*Triticum aestivum* L.) varieties with high nitrogen-use efficiency [J]. *Agronomy*, 2022, 12(10):2411.