麦类作物学报 2026,46(10):1356－1365
Journal of Triticeae Crops doi: 10.7606/j.issn.1009-1041.2026.10.10

网络出版时间:2026-09-20
网络出版地址:https://link.cnki.net/urlid/61.1359.S.20260920.1134.004

沿淮稻茬麦区小麦籽粒灌浆特性与粒重的关系研究

李 敏[1],韦前飞[1],刘书栋[1],芦家琛[1],张 凯[1],张由奇[2],殷贵鸿[3],刘红敏[1]
(1.信阳农林学院,河南信阳 464000; 2.潢川豫川粮业有限公司,河南潢川 465150; 3.河南农业大学,河南郑州 450046)

摘 要:为揭示沿淮稻茬麦区不同小麦品种籽粒灌浆特性与粒重的关系,以23份小麦品种为材料,利用Richards方程对籽粒灌浆过程进行模拟,分析粒重与籽粒灌浆特性和籽粒表型间的关系。结果表明,不同小麦品种粒重和灌浆特征参数主要受基因型控制;Richards模型拟合的理论千粒重趋势与实测值高度一致。不同粒重类型品种(高、中、低)间单粒最大灌浆速率和单粒平均灌浆速率存在显著差异,而灌浆期持续时间、活跃灌浆期天数、最大灌浆速率出现时间无显著差异。高粒重、中等粒重和低粒重类型品种的籽粒灌浆速率差异主要集中在快增期,其中高粒重和中等粒重类型品种的平均灌浆速率在快增期比低粒重类型品种分别高16.94%和10.34%,单粒平均灌浆速率分别高16.01%和10.46%。不同粒重类型品种的籽粒长、宽、周长和表面积均存在显著差异,均表现为高粒重>中等粒重>低粒重,籽粒长宽比差异不显著。相关性分析显示,千粒重与籽粒长、宽、周长、表面积及其灌浆速率呈显著正相关($P<0.05$),相关系数为0.88～0.99。综上所述,籽粒库容量(粒长、粒宽等)与快增期灌浆速率的差异是不同粒重类型小麦品种粒重分化的主要原因。

关键词:小麦;粒重;灌浆特性;Richards模型;沿淮稻茬麦区
中图分类号:S512.1; S311 **文献标识码**:A **文章编号**:1009-1041(2026)10-1356-10

Relationship between Grain Filling Characteristics and Grain Weight of Different Wheat Cultivars in Rice-Wheat Cropping Area along the Huaihe River

Li Min[1], Wei Qianfei[1], Liu Shudong[1], Lu Jiachen[1], Zhang Kai[1], Zhang Youqi[2], Yin Guihong[3], Liu Hongmin[1]
(1. Xinyang Agriculture and Forestry University, Xinyang, Henan 464000, China; 2. Huangchuan Yuchuan Grain Industry Co. Ltd, Huangchuang, Henan 465150, China; 3. Henan Agricultural University, Zhengzhou, Henan 450046, China)

Abstract: To investigate the relationship between grain-filling characteristics and grain weight of different wheat varieties in rice-wheat cropping area along the Huaihe River, 23 cultivars were used in this study. The grain-filling process was simulated using the Richards model, to analyze the relationships between grain weight, grain-filling characteristics, and grain phenotype. Results indicated that grain weight and grain-filling parameters were predominantly governed by genotype. The theoretical thousand-kernel weight(TKW) predicted by the Richards model closely aligns with the field-measured values. Significant differences were observed among cultivars of differing grain-weight classes in terms of maximum single-grain filling rate and average single-grain filling rate. Whereas, no significant differences were detected in filling duration, number of active filling days, or the timing of peak filling rate. Differences in grain-filling rates among the three grain-weight classes high-, medium-, and low-grain-weight were primarily confined to the rapid grain-filling phase. The average grain-filling rate of high-grain-weight and medium-grain-weight cultivars increased by 16.94% and 10.34%, respectively,

收稿日期:2026-01-31 修回日期:2026-03-31
基金项目:信阳市科技攻关项目(20250060);河南省校企协同创新项目(26BXQXT056);河南省科技攻关项目(242102110196);信阳农林学院青年教师科研基金项目(QN2023010)
第一作者 E-mail:Limin21006@163.com(李 敏)
通讯作者 E-mail:2302783824@qq.com(刘红敏)

compared with the low-grain-weight cultivars. The average grain-filling rate per single grain of the high-grain-weight and medium-grain-weight types increased by 16.01% and 10.46%, respectively. Grain morphological traits including grain length, grain width, perimeter, and surface area also significantly differed among grain-weight classes, consistently following the order: high-grain-weight > medium-grain-weight > low-grain-weight, whereas there was no significant difference for the grain length-to-width ratio among the cultivar groups. Correlation analysis revealed that TKW was significantly and positively correlated($P<0.05$) with grain length, grain width, perimeter, surface area, and grain-filling rate, with correlation coefficients ranging from 0.88 to 0.99. In summary, this study indicates that the synergistic differences in grain size(e.g., grain length and width) and the rapid grain filling rate during the rapid growth period are the main reasons for the grain weight differentiation among different grain weight types of wheat varieties.

Keywords: Wheat; Grain weight; Grain-filling characteristics; Richards model; Rice-wheat cropping area along the Huaihe River

小麦(*Triticum aestivum* L.)是中国主要的粮食作物之一,其产量的稳定对保障国家粮食安全具有重要意义。黄淮海南部和长江中下游麦区是典型的水旱轮作区,稻-麦轮作成为该区域主要的种植模式,其小麦种植面积及总产量占全国12%[1],对于保障区域粮食总产具有举足轻重的作用。然而,在长期稻茬麦生产过程中,受气候[2]、栽培措施[3]、品种[4]、播期[5]等因素影响,导致小麦灌浆受阻,粒重不高,限制了产量的提高。因此,挖掘该生态区小麦品种的籽粒灌浆能力,是突破产量瓶颈的关键途径之一。

小麦籽粒的灌浆速率、灌浆持续期等参数直接影响其粒重。研究表明,灌浆速率主要受基因型控制,而灌浆持续时间则对环境因素(如温度、水分)更为敏感[6]。关于二者对粒重的相对贡献,结论尚不一致。多数学者认为,在灌浆期常遇逆境(如高温、干旱等)的黄淮麦区,灌浆速率是限制粒重提升的主导因子,灌浆速率的遗传改良对于该区域小麦产量的稳定与提高具有重要意义[6-9]。苗永杰等[7]研究表明,小麦粒重及灌浆参数主要受基因调控,不同粒重类型品种间的灌浆速率差异显著,快增期的灌浆速率是影响粒重的关键因子。灌浆持续时间主要受环境因素调控,适宜的栽培管理措施可有效调控灌浆进程与粒重形成[7]。陈翔等[10]基于长期定位试验发现,秸秆还田等保护性耕作措施能显著优化冬小麦强、弱势籽粒的灌浆过程,协调灌浆各阶段持续时间,最终达到提升粒重与产量的目的。

目前,利用数学模型(如 Logistic 方程、Richards 方程或多项式方程)对籽粒灌浆过程进行拟合,进而提取和比较各类灌浆特征参数,已成为解析粒重形成机制的常用方法。任红松等[11]应用 Richards 方程,依据强、弱势粒灌浆的同步/异步型对小麦品种进行分类,发现异步灌浆型品种更有利于高产稳产。宋晓等[12]研究表明,Logistic 模型能有效区分不同氮效率品种的灌浆特性,其中高产、氮高效品种表现出灌浆启动早、速率快的特点。针对黄淮海平原南部麦区,姜沣益等[1]和姜丽娜等[13]采用三次多项式方程拟合当地小麦灌浆进程,均发现千粒重与最大灌浆速率、平均灌浆速率等参数呈显著正相关。

尽管前人围绕小麦籽粒灌浆过程已开展了广泛研究,但大多工作侧重于单一或少数品种的灌浆模式分析,或聚焦于极端类型(如大粒与小粒)间的比较。而涵盖高、中、低不同粒重等级的品种、涉及多阶段(渐增期、快增期、缓增期)、多参数(速率、积累量)灌浆动态的研究较少,而这种系统性研究对于全面揭示粒重分化的生理基础至关重要。因此,本研究以黄淮海南片主栽的 23 份小麦品种为试验材料,采用 Richards 方程模拟其籽粒灌浆过程,系统分析不同粒重类型品种之间灌浆参数的差异及各阶段的变化规律,并探讨粒重与籽粒表型性状、灌浆参数之间的关系,以期明确影响该生态区小麦品种粒重的关键因素,为沿淮稻茬麦的高产高效栽培与优良品种选育提供参考依据。

1　材料与方法

1.1　试验材料与设计

供试材料为 23 个在黄淮麦区广泛种植的小

麦品种，具体信息见表 1。试验于 2023—2024 年在河南省信阳市平桥区甘岸镇(114°04′E，32°19′N)进行。该地位于黄淮海平原南部，淮河沿岸，属亚热带向暖温带过渡区，年均气温 15.3 ℃，年均降水量 1 100 mm，年均日照时间 1 594.0 h，无霜期平均 220～230 d。试验田实行稻-麦两熟种植制度，前茬作物为水稻。土壤耕层(0～20 cm)基础肥力为：有机质 10.24 g·kg^{-1}，碱解氮 99.55 mg·kg^{-1}，速效磷 7.76 mg·kg^{-1}，速效钾 83.49 mg·kg^{-1}。试验采用随机区组设计，小区面积为 20 m^2(4 m×5 m)，行距 20 cm，3 次重复。全生育期施纯氮 240 kg·hm^{-2}，60%作为基肥施入，40%于拔节期追施，磷(P_2O_5)、钾(K_2O)分别施用 90 kg·hm^{-2}，全部作为基肥施入。每公顷基本苗 225 万株。其他田间管理措施同该地区常规大田。于 2023 年 11 月 2 日播种，2024 年 5 月 21 日收获。试验期间气象数据如图 1 所示。

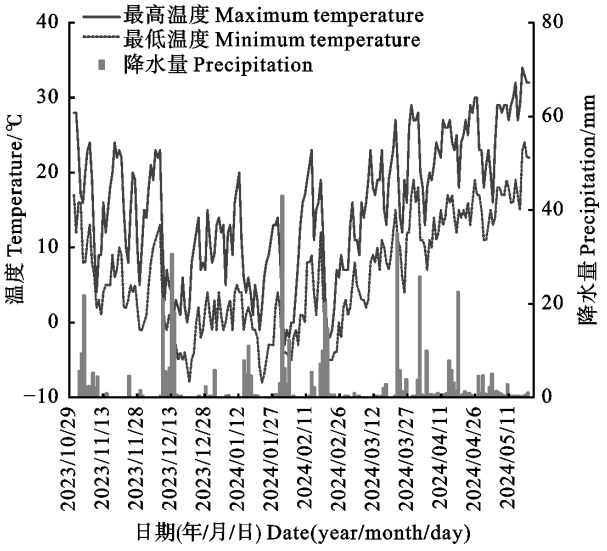


图 1 试验期间温度和降雨量的日变化

Fig. 1 Daily variation of temperature and precipitation during the experiment

表 1 供试小麦品种

Table 1 Information of wheat accessions used in this study

品种 Cultivar	选育单位 Breeding institute
西农 979 Xinong 979	西北农林科技大学 Northwest A&F University
中麦 255 Zhongmai 255	中国农业科学院棉花研究所 Institute of Cotton Research of Chinese Academy of Agricultural Sciences
郑麦 9134 Zhengmai 9134	河南省作物分子育种研究院与河南中育分子育种研究院有限公司 Henan Crop Molecular Breeding Research Institute and Henan Zhongyu Molecular Breeding Research Institute Co., Ltd.
豫农 902 Yunong 902	河南农业大学 Henan Agricultural University
郑麦 379 Zhengmai 379	河南省农业科学院小麦研究所 Institute of Wheat Research of Henan Academy of Agriculture Sciences
周麦 33 Zhoumai 33	周口市农业科学院 Zhoukou Academy of Agriculture Sciences
郑麦 158 Zhengmai 158	河南省农业科学院小麦研究所 Institute of Wheat Research of Henan Academy of Agriculture Sciences
豫农 914 Yunong 914	中国贵州茅台酒厂(集团)有限责任公司与河南农业大学 China Kweichow Moutai (Group) Distillery Co., Ltd. And Henan Agricultural University
安农 1124 Annong 1124	安徽农业大学 Anhui Agricultural University
百农 207 Bainong 207	河南百农种业有限公司与河南华冠种业有限公司 Henan Bainong Seed Co.,Ltd and Henan Huaguan Seed Co.,Ltd
中垦麦 616 Zhongkenmai 616	安徽源隆生态农业有限公司 Anhui Yuanlong Eco-Agricultural Co., Ltd.
豫农 926 Yunong 926	河南农业大学 Henan Agricultural University
镇麦 16 Zhenmai 16	江苏丘陵地区镇江农业科学研究所 Jiangsu Hilly Region Zhenjiang Agricultural Science Research Institute
豫农 905 Yunong 905	河南农业大学 Henan Agricultural University
扬麦 25 号 Yangmai 25	江苏里下河地区农业科学研究所 Jiangsu Lixiahe Region Agricultural Science Research Institute
皖垦麦 9 号 Wankenmai 9	安徽皖垦种业股份有限公司 Anhui Wanken Seed Industry Co., Ltd.
郑麦 0926 Zhengmai 0926	河南省农业科学院小麦研究所 Institute of Wheat Research of Henan Academy of Agriculture Sciences
豫农 910 Yunong 910	中国贵州茅台酒厂(集团)有限责任公司与河南农业大学 China Kweichow Moutai (Group) Distillery Co., Ltd. And Henan Agricultural University
中麦 578 Zhongmai 578	中国农业科学院作物科学研究所与中国农业科学院棉花研究所 Institute of Crop Sciences, Chinese Academy of Agricultural Sciences and Institute of Cotton Research of Chinese Academy of Agricultural Sciences
万麦 1 号 Wanmai 1	河南万担粮农业科技有限公司 Wan Dan Liang Agriculture Group Co.,Ltd
万麦 3 号 Wanmai 3	河南万担粮农业科技有限公司 Wan Dan Liang Agriculture Group Co.,Ltd
龙科 1109 Longke 1109	安徽皖垦种业股份有限公司 Anhui Wanken Seed Industry Co., Ltd.
大平原 1 号 Dapingyuan 1	河南秋乐种业科技股份有限公司 Henan Qiule Seeds Technology,Co.,Ltd

1.2 测定项目与方法

1.2.1 千粒重测定

于小麦开花期在各小区内选取长势一致、开花期相同的主茎穗进行挂牌标记,花后 7 d 开始,于无雨天气上午 9—11 点取 30 个标记小麦穗,带回实验室,于烘箱中 105 ℃杀青 30 min,75 ℃烘干至恒重,脱粒后称重,并计算千粒重,每 7 d 取样一次,至籽粒完全成熟。记录各取样时期的千粒重用于灌浆动态分析。

1.2.2 产量及其构成因素测定

成熟期在各小区选取 1 m 双行调查有效穗数,把样品带回实验室统计穗粒数。在各小区避开边际效应区域,随机选取 3 个 1 m^2(1 m×1 m)样方,人工收割、脱粒后称重,并折算为 13%含水量的产量。

1.2.3 籽粒表型性状测定

每个品种随机选取约 400 粒完整饱满无病害的籽粒,利用浙江托普云农智能考种分析系统(TP-KZ-3)测定籽粒长(GL)、宽(GW)、长宽比(GLWR)、周长(GP)、表面积(GA)及千粒重(TGW),每个品种重复 3 次。

1.3 籽粒灌浆特性分析

为量化籽粒灌浆进程,参照陈翔等[10]、李澳旗等[14]的方法用 Richards 方程拟合小麦籽粒灌浆进程。方程为 $Y=A/(1+e^{B-Kt})^{1/N}$,式中,Y 为开花后 t 天时的籽粒千粒重(g),A 为理论最大千粒重(g),B、K、N 分别为初级参数、生长速率参数和形状参数。当 $N=1$ 时,该方程为 Logistic 方程。

通过对 Richards 方程进行求导,可推导出起始生长势、单粒最大灌浆速率、单粒平均灌浆速率、灌浆速率变化率、最大灌浆速率出现时间、活跃灌浆期天数。

基于生长速率曲线的拐点,将灌浆过程分为渐增期、快增期和缓增期。渐增期为开花至籽粒重达到理论最大千粒重(A)的 5%的时间,用 t_1 表示;快增期为 t_1 至籽粒重达到 A 的 95%的时间,用 t_2 表示;缓增期为 t_2 至籽粒重达到 A 的 99%的时间,用 t_3 表示,其计算公式如下:

$$t_1=-\ln\left[\frac{N^2+3N+N\times\sqrt{N^2+6N+5}}{2B}\right]/K;$$

$$t_2=-\ln\left[\frac{N^2+3N-N\times\sqrt{N^2+6N+5}}{2B}\right]/K;$$

$$t_3=-\ln\left[\frac{(100/99)^N-1}{B}\right]/K。$$

各阶段的平均灌浆速率为籽粒增长的重量除以该阶段灌浆持续天数。

1.4 数据处理

用 Excel 2016 对数据进行整理,用 SPSS 26.0 进行方差分析(LSD 法)、相关性分析及聚类分析。利用 Excel 2016 和 Origin 2025 绘图。

2 结果与分析

2.1 籽粒灌浆特征分析

由表 2 可知,参试小麦品种的起始生长势(R_0)、灌浆期持续时间、活跃灌浆期天数、最大灌浆速率出现时间、单粒最大灌浆速率和单粒平均灌浆速率的均值分别为 0.24、35.70 d、25.66 d、16.66 d、2.26 mg·d^{-1} 和 1.51 mg·d^{-1},变化范围分别为 0.13～0.42、32.52～40.57 d、21.33～28.64 d、14.59～20.40 d、1.94～2.71 mg·d^{-1} 和 1.31～1.80 mg·d^{-1};籽粒灌浆渐增期、快增期和缓增期的变化范围分别为 8.20～13.63 d、9.29～12.78 d 和 8.95～19.59 d,其平均灌浆速率依次为 0.68 mg·d^{-1}、1.99 mg·d^{-1}、0.56 mg·d^{-1},变异系数分别为 13.95%、7.25%和 17.50%。被测指标中,起始生长势的变异系数最大(28.39%),灌浆期持续时间的变异系数最小(5.62%),说明不同品种的灌浆时长相对稳定。

2.2 不同粒重类型的籽粒参数分析

根据千粒重进行聚类分析,将 23 个小麦品种划分为高、中、低三个粒重类型(图 2)。豫农 926、中麦 578 和万麦 3 号为高粒重品种;中麦 255、郑麦 9134、豫农 902、郑麦 379、豫农 914、安农 1124、百农 207、镇麦 16、郑麦 0926、万麦 1 号和龙科 1109 为中等粒重品种;西农 979、周麦 33 号、郑麦 158、中垦麦 616、豫农 905、扬麦 25、皖垦麦 9 号、豫农 910 和大平原 1 号为低粒重品种。

利用 Richards 模型分别拟合三种粒重类型小麦籽粒的灌浆过程,所得的灌浆特征参数、拟合方程及决定系数(r^2)如表 3 所示,高粒重、中等粒重和低粒重品种的理论最大千粒重分别为 42.13 g、39.16 g 和 38.10 g,三种类型间存在显著差异。其生长速率参数(K)分别为 0.25、0.24 和 0.22,表现为高粒重>中等粒重>低粒重。

如图 3 所示,利用 Richards 模型拟合的三个类型粒重增长过程均呈现典型的“慢－快－慢”动态。与实测千粒重的变化趋势基本一致,二者数值偏差较小(－0.16 ～ 0.41 g),且所有拟合的决定系数(r^2)均大于 0.999,表明该模型适用于模拟本试验中不同粒重类型小麦的籽粒灌浆过程。

表 2 23 份小麦品种的籽粒灌浆特征

Table 2 Grain-filling parameters of the 23 cultivars

灌浆参数 Grain-filling parameter	均值 Mean	范围 Range	变异系数 CV/%
起始生长势 R_0	0.24	0.13～0.42	28.39
灌浆期持续时间 T/d	35.70	32.52～40.57	5.62
活跃灌浆期天数 D/d	25.66	21.33～28.64	6.95
最大灌浆速率出现时间 T_{max}/d	16.66	14.59～20.40	9.47
单粒最大灌浆速率 V_{max}/(mg·d^{-1})	2.26	1.94～2.71	10.99
单粒平均灌浆速率 V_{ave}/(mg·d^{-1})	1.51	1.31～1.80	11.14
籽粒灌浆渐增期持续天数 t_1/d	10.97	8.20～13.63	13.95
籽粒灌浆渐增期平均灌浆速率 $\bar{V}_1$/(g·d^{-1})	0.68	0.55～0.86	11.17
籽粒灌浆快增期持续天数 t_2/d	11.10	9.29～12.78	7.25
籽粒灌浆快增期平均灌浆速率 $\bar{V}_2$/(g·d^{-1})	1.99	1.69～2.38	11.00
籽粒灌浆缓增期持续天数 t_3/d	13.63	8.95～19.59	17.50
籽粒灌浆缓增期平均灌浆速率 $\bar{V}_3$/(g·d^{-1})	0.56	0.46～0.67	11.07

R_0: Initial growth potential; T: Grain-filing duration days; D: Grain filling active days; T_{max}: Occurrence time of the maximum grain-filling rate; V_{max}: Maximum grain filling rate per grain; V_{ave}: Mean grain-filling rate per grain; t_1: Grain-filling duration days in grain-filling pyramid period; $\bar{V}_1$: Mean grain-filling rate in grain-filling pyramid period; t_2: Mean grain-filling rate in grain-filling rapid increase period; $\bar{V}_2$: Mean grain-filling rate in grain-filling rapid increase period; t_3: Grain-filling duration days in grain-filling slowly increase period; $\bar{V}_3$: Mean grain-filling rate in grain-filling slowly increase period. The same below.

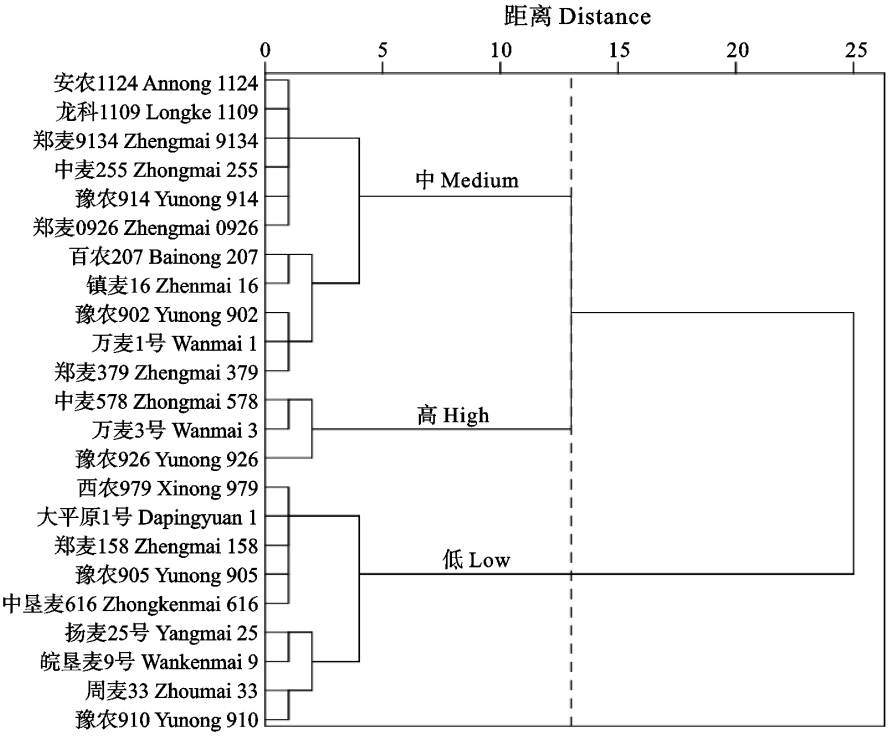


图 2 23 个参试小麦品种聚类树状图

Fig. 2 Dendrogram of the 23 wheat cultivars

2.3 不同粒重类型间籽粒灌浆特征参数分析

根据表 3 的 Richards 模型计算三种粒重类型小麦的籽粒灌浆特征参数，结果(表 4)发现，三种粒重类型的单粒最大灌浆速率和单粒平均灌浆速率间均存在显著差异，表现为高粒重＞中等粒重＞低粒重；与低粒重类型相比，高粒重和中等粒重类型的单粒最大灌浆速率分别提高 16.70%和 10.34%，单粒平均灌浆速率分别提高 16.01%和 10.46%，但灌浆期持续时间、活跃灌浆期天数、最大灌浆速率出现时间无显著差异。

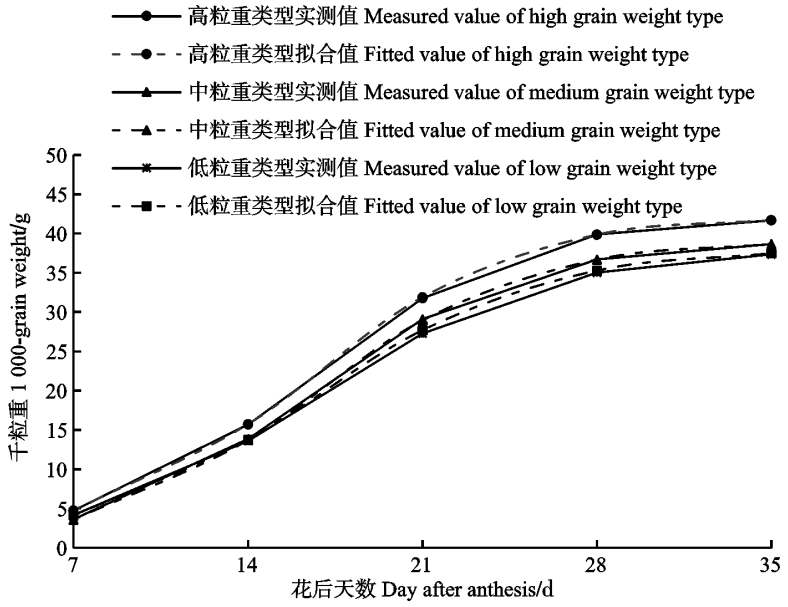


图 3　不同粒重类型小麦千粒重曲线

Fig. 3　1 000-grain weight of different grain-weight types of wheat cultivars

表 3　不同粒重类型下的 Richards 模型参数

Table 3　Parameters of Richards model under different grain-weight cultivars

类型 Type	理论最大千粒重 A/g	初级参数 B	生长速率参数 K	形状参数 N	拟合方程 Fitting equation	决定系数 r^2
高粒重 High grain weight	42.13a	77.70a	0.25a	1.23a	$Y=42.13/[(1+77.70\times\exp(-0.25\ t))^{1/1.23}]$	0.999**
中等粒重 Medium grain weight	39.16b	47.33b	0.24b	0.97b	$Y=39.16/[(1+47.33\times\exp(-0.24\ t))^{1/0.97}]$	0.999**
低粒重 Low grain weight	38.10c	39.26b	0.22c	1.01b	$Y=38.10/[(1+39.26\times\exp(-0.22\ t))^{1/1.01}]$	0.999**

同列数据后不同小写字母表示不同类型间差异达显著水平($P<0.05$)。表 5 同。

Different lowercase letters following data in same column indicate significant differences between types($P<0.05$). The same in table 5.

表 4　三种粒重类型小麦的籽粒灌浆参数

Table 4　Grain-filling parameters of the three grain-weight types of wheat cultivars

灌浆参数 Grain-filling parameter	高粒重 High grain weight	中等粒重 Medium grain weight	低粒重 Low grain weight
起始生长势 R_0	0.20b	0.24a	0.22ab
灌浆期持续时间 T/d	35.01a	36.02a	36.45a
活跃灌浆期天数 D/d	25.85a	25.24a	27.16a
最大灌浆速率出现时间 T_{max}/d	16.61a	16.47a	16.36a
单粒最大灌浆速率 V_{max}/(mg·d^{-1})	2.46a	2.33b	2.11c
单粒平均灌浆速率 V_{ave}/(mg·d^{-1})	1.63a	1.55b	1.41c

同行数据后不同小写字母表示不同类型间差异达显著水平($P<0.05$)。表 6 同。

Different lowercase letters following data in same row indicate significant differences between types($P<0.05$). The same in table 6.

2.4　不同粒重类型间籽粒灌浆速率动态及灌浆阶段分析

三种粒重类型品种的灌浆速率均呈现“慢—快—慢”的特征(图 4)。与低粒重类型相比,中等粒重和高粒重类型的籽粒灌浆速率在灌浆中期明显较高,而灌浆后期的灌浆速率基本一致。由表 5 可知,不同粒重类型小麦的平均灌浆速率在渐增期、快增期存在显著差异,而缓增期差异不显

著，灌浆持续时间仅高粒重与低粒重间差异显著。高粒重、中等粒重、低粒重类型的渐增期占整个灌浆期的比例分别为 31.65%、30.29%和 26.71%，快增期占整个灌浆期的比例分别为 31.57%、30.87%和 32.67%，缓增期占整个灌浆期的比例分别为 36.77%、38.84%和 40.62%。在渐增期，高粒重和中等粒重类型的平均灌浆速率较低粒重类型分别高 28.50%和 10.59%，快增期的平均灌浆速率较低粒重类型分别高 16.94%与 10.34%，缓增期各类型品种间的平均灌浆速率差异不显著。

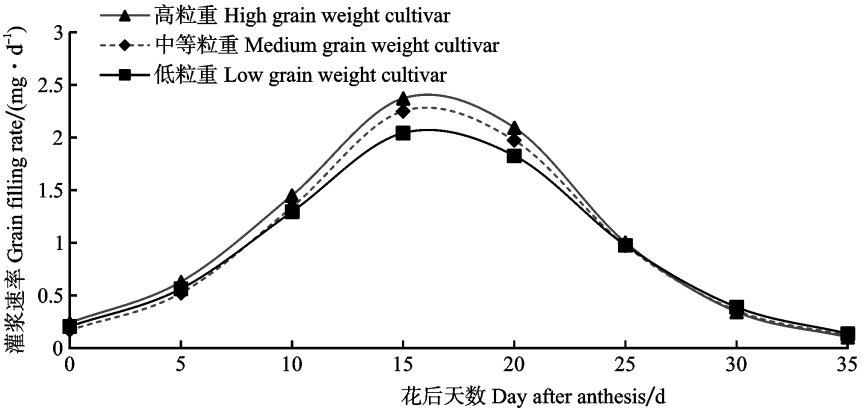


图 4 不同粒重类型小麦籽粒灌浆速率动态

Fig. 4 Dynamics of grain filling rate within different grain-weight types of wheat cultivars

表 5 不同粒重类型小麦籽粒不同灌浆期的持续天数和灌浆速率

Table 5 Grain filling duration days and rate at different stages within different grain-weight types of wheat cultivars

类型 Type	渐增期 Grain-filling pyramid period		快增期 Grain-filling rapid increase period		缓增期 Grain-filling slowly increase period	
	持续天数 T_1/d	平均灌浆速率 V_1/(g · d^{-1})	持续天数 T_2/d	平均灌浆速率 V_2/(g · d^{-1})	持续天数 T_3/d	平均灌浆速率 V_3/(g · d^{-1})
高粒重 High grain weight	11.08a	0.79a	11.06a	2.16a	12.88b	0.61a
中等粒重 Medium grain weight	10.91a	0.68b	11.12a	2.04b	13.99a	0.57a
低粒重 Low grain weight	9.74b	0.61c	11.91a	1.85c	14.81a	0.69a

2.5 不同粒重类型间籽粒形状及千粒重分析

高粒重、中等粒重和低粒重类型品种的籽粒长、宽、周长和表面积均存在显著差异(表 6)，均表现为高粒重＞中等粒重＞低粒重，三个类型品种间的籽粒长宽比差异不显著。高粒重、中等粒重和低粒重类型品种的千粒重差异显著，依次为 45.09 g、40.24 g 和 34.71 g。

2.6 被测指标相关性分析

对千粒重与籽粒长、宽、周长、表面积及籽粒灌浆特征参数等指标进行相关性分析，结果如图 5 所示。千粒重与籽粒长、宽、周长、表面积均呈显著正相关($P<0.05$)，相关系数达 0.99 及以上，与单粒最大灌浆速率、单粒平均灌浆速率及各时期籽粒灌浆速率呈显著正相关，相关系数为 0.88～0.97，说明不同粒重类型小麦粒重主要受库大小及灌浆速率的影响。

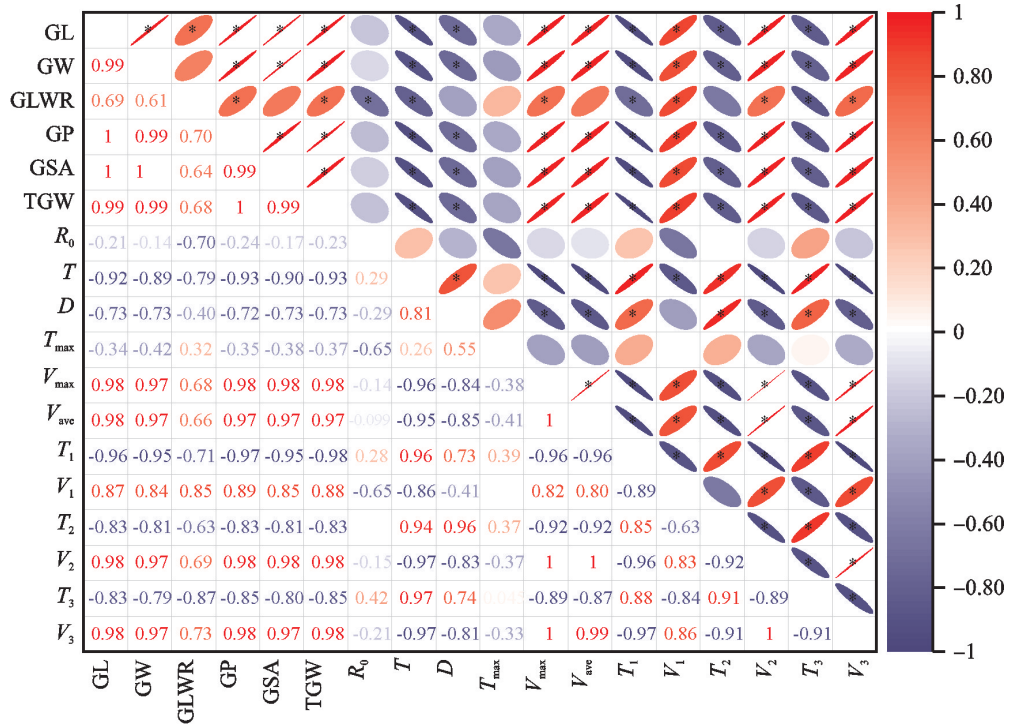
表 6 不同粒重类型下的千粒重及籽粒形状

Table 6 Thousand-grain weight and grain shape within different grain-weight types of wheat cultivars

指标 Index	高粒重 High grain weight	中等粒重 Medium grain weight	低粒重 Low grain weight
GL/mm	5.95a	5.71b	5.41c
GW/mm	3.03a	2.94b	2.79c
GLWR	1.99a	1.97a	1.96a
GP/mm	15.26a	14.58b	13.84c
GSA/mm^2	13.52a	12.58b	11.32c
TGW/g	45.09a	40.24b	34.71c

GL：粒长；GW：粒宽；GLWR：粒长/粒宽；GP：粒周长；GSA：粒表面积；TGW：千粒重。下同。

GL: Grain length; GW: Grain width; GLWR: Grain length width ratio; GP: Grain perimeter; GSA: Grain surface area; TGW: Thousand grain weight. The same below.



*：$P<0.05$。椭圆越小代表相关系数越大。

*：$P<0.05$. The smaller the ellipse the higher the correlation coefficient.

图 5　籽粒性状及其灌浆特征参数相关性分析

Fig. 5　Correlation between grain and its filling characteristics

3　讨论

源库协调发展是小麦高产优质的基础[15]。籽粒灌浆过程中,同化物供应(源)与籽粒接纳、转化能力(库)之间的互作共同决定了最终粒重[16-18]。本研究采用 Richards 方程对 23 份沿淮稻茬麦区小麦品种的灌浆过程进行拟合,相较于以往常用的三次多项式方程,Richards 方程通过引入形状参数 N,能够更灵敏地反映灌浆曲线的偏斜特征。本研究结果显示,高粒重品种的 N 值大于 1,而中等与低粒重品种的 N 值接近 1,表明高粒重品种的灌浆曲线更偏向于前期快速上升,其灌浆过程受库容限制较小,具备更强的物质积累潜力。这一结果与陈翔等[10]在秸秆还田条件下对冬小麦强、弱势粒灌浆的研究一致,说明 N 值可作为评价小麦品种灌浆策略的重要参数。

粒重的形成是籽粒灌浆速率与持续时间的综合体现,二者可以量化灌浆过程[17,19]。本研究中,高、中、低粒重类型品种间的灌浆持续期、活跃灌浆期等时间参数无显著差异,但其单粒最大灌浆速率和平均灌浆速率差异显著,且二者与千粒重呈极显著正相关(图 5,表 4),这与苗永杰等[7]在黄淮麦区的研究一致,即“小麦品种的粒重差异主要来自灌浆速率,尤其是快增期的灌浆速率,灌浆持续时间的影响相对较小”。本研究发现灌浆持续时间对粒重的贡献不显著,这可能与本试验区域灌浆期间气象条件相对稳定、未遭遇极端高温或干旱等逆境有关。在环境条件较为适宜的年份,基因型对灌浆速率的调控作用更大,而灌浆持续期则更多受环境因素调控。将籽粒灌浆进程划分为渐增期、快增期和缓增期,三类品种的灌浆速率差异主要集中在快增期。与低粒重类型相比,高粒重和中等粒重类型在快增期的平均灌浆速率分别提高 16.94%和 10.34%,而各阶段持续时间均无显著差异。这一结果表明,快增期是沿淮稻茬麦区小麦粒重提升的关键时期,通过调控快增期灌浆速率可有效提高粒重,该结论与辛海滨等[20]在长江中下游地区的研究一致,均强调快增期灌浆速率对粒重的主导作用。相较于延长灌浆期,提高灌浆速率是更高效的高产调控途径。

起始势高和灌浆速率快是小麦高产的基础[21]。本研究中,高粒重类型品种具有更高的起始势和灌浆速率(表 5),这可能是因为高粒重品种具备更强且更持续的光合能力,在中午高温强

光条件下维持相对较好的光合状态，在一定程度上缓解了“光合午休”的负面影响，为籽粒灌浆提供了更充足、更稳定的同化物供应[16]。灌浆速率的快慢受维管束结构[22]、前期营养物质[23]、干物质积累[24]等因素影响，较快的灌浆速率会提前激活淀粉生物合成相关基因，影响直链淀粉链长、结晶度及淀粉颗粒类型，从而对最终籽粒的加工品质产生重要影响[25]。因此，筛选和培育具有高灌浆速率，特别是快增期高灌浆速率潜力的基因型，是同步提高小麦产量与品质潜力的有效途径[26]。

籽粒形态（尤其是籽粒长和籽粒宽）直接决定其潜在“库容”大小[27]。更大的库容为光合产物的积累提供了充足的空间，而灌浆速率则决定了单位时间内向该库容填充物质的效率[28]。高产既要求“源足”又要求“库大”，籽粒长、宽、周长、表面积等是库容大小的关键评价指标。本研究发现，千粒重与上述籽粒表型指标呈极显著正相关（相关系数＞0.99），高粒重类型同时具备较大的籽粒库容（表 6）和较高的灌浆速率（表 4），实现了“大库容”与“快速填充”的优化组合，这表明高粒重品种不仅灌浆速率快，其籽粒的潜在“装载”空间也更大，体现了“库”能力与“灌”效率的高度协同[29]。值得注意的是，籽粒长宽比在三类品种间无显著差异，说明小麦粒形的“轮廓”相对稳定，粒重的提升主要依赖于整体尺寸的增大，而非形态比例的显著改变。这一发现为沿淮稻茬麦区高产小麦品种的早期选育提供了简便有效的表型指标。

综上所述，小麦最终粒重是籽粒库容潜力、灌浆速率与持续期等多因子互作的结果。快增期的灌浆速率是造成品种间粒重差异的主要因素，相较于延长灌浆期，提高灌浆速率是更高效的高产调控途径。此外，通过栽培措施优化作物“源—库”关系，改变“库/源”比，促进同化物向籽粒优先分配，可实现小麦增产[30]。

4 结论

沿淮稻茬麦区小麦品种粒重和灌浆速率参数主要受基因型控制；不同粒重类型品种间灌浆速率及库容量均有显著差异，表现为高粒重＞中等粒重＞低粒重，其中快增期灌浆速率是导致不同品种粒重差异的关键因素，而灌浆期持续时间、活跃灌浆期天数、最大灌浆速率出现时间对粒重无显著影响；籽粒库容量与粒重呈显著正相关，高粒重品种通过协同提升籽粒库容量与灌浆速率（尤其是快增期灌浆速率），实现“大库”与“快充”的优化组合，最终达成高产。

参考文献：

[1]姜沣益，王 犇，任开明，等. 沿淮稻茬麦区小麦的产量及籽粒灌浆特性[J]. 安徽农业大学学报，2022，49(3)：395.
Jiang F Y，Wang B，Ren K M，*et al*. Wheat yield and grain filling characteristics in rice-wheat double cropping area along the Huaihe River [J]. *Journal of Anhui Agricultural University*，2022，49(3)：395.

[2]陈长青，李伟玮，朱相成，等. 江淮稻-麦两熟种植制度对气候变暖的适应[J]. 作物学报，2021，47(11)：2250.
Chen C Q，Li W W，Zhu X C，*et al*. Adaption of rice-wheat cropping system to climate warming in Jianghuai area [J]. *Acta Agronomica Sinica*，2021，47(11)：2250.

[3]肖治林，吴 昊，顾汉柱，等. 不同栽培措施集成对稻茬小麦产量、农艺及光合特性的影响[J]. 麦类作物学报，2022，42(8)：988.
Xiao Z L，Wu H，Gu H Z，*et al*. Effect of different integrated cultivation modes on yield，agronomic and photosynthetic characteristics of wheat following rice stubble [J]. *Journal of Triticeae Crops*，2022，42(8)：988.

[4]赵 莉，何贤芳，都斌斌，等. 播期和品种对沿淮晚播稻茬小麦产量和产值的影响[J]. 麦类作物学报，2021，41(5)：613.
Zhao L，He X F，Du B B，*et al*. Effects of sowing date and variety on yield and output value of late-sown wheat after rice in the region along Huaihe River [J]. *Journal of Triticeae Crops*，2021，41(5)：613.

[5]颜 磊，赵凌天，张雨婷，等. 基本苗和施氮量对稻茬迟播小麦品质的影响[J]. 扬州大学学报(农业与生命科学版)，2024，45(5)：20.
Yan L，Zhao L T，Zhang Y T，*et al*. Effect of basic seedling and nitrogen application rate on the quality of late-sown wheat with rice stubble [J]. *Journal of Yangzhou University(Agricultural and Life Science Edition)*，2024，45(5)：20.

[6]胡阳阳，卢红芳，刘卫星，等. 灌浆期高温与干旱胁迫对小麦籽粒淀粉合成关键酶活性及淀粉积累的影响[J]. 作物学报，2018，44(4)：591.
Hu Y Y，Lu H F，Liu W X，*et al*. Effects of high temperature and water deficiency during grain filling on activities of key starch synthesis enzymes and starch accumulation in wheat [J]. *Acta Agronomica Sinica*，2018，44(4)：591.

[7]苗永杰，阎 俊，赵德辉，等. 黄淮麦区小麦主栽品种粒重与籽粒灌浆特性的关系[J]. 作物学报，2018，44(2)：260.
Miao Y J，Yan J，Zhao D H，*et al*. Relationship between grain filling parameters and grain weight in leading wheat cultivars in the yellow and Huai Rivers valley [J]. *Acta Agronomica Sinica*，2018，44(2)：260.

[8]李静雯，董亚超，肖永贵，等. 黄淮麦区部分小麦品种粒重基因 *TaGS5-A1* 的等位变异分布及其效应分析[J]. 麦类作物学报，2021，41(3)：272.
Li J W，Dong Y C，Xiao Y G，*et al*. Distribution of allelic variations and effect of *TaGS5-A1* on kernel weight in part varieties from Huanghuai wheat area [J]. *Journal of Triticeae*

Crops,2021,41(3):272.

[9]李 敏,苏 慧,李阳阳,等.黄淮海麦区小麦耐热性分析及其鉴定指标的筛选[J].中国农业科学,2021,54(16):3381.
Li M,Su H,Li Y Y,*et al*. Analysis of heat tolerance of wheat with different genotypes and screening of identification indexes in Huang-Huai-Hai Region [J]. *Scientia Agricultura Sinica*,2021,54(16):3381.

[10]陈 翔,唐志伟,翁 颖,等.不同秸秆还田技术模式对冬小麦强弱势粒灌浆特性的影响[J].农业工程学报,2024,40(12):128.
Chen X,Tang Z W,Weng Y,*et al*. Effects of straw returning modes on the superior/inferior grain filling of winter wheat [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*,2024,40(12):128.

[11]任红松,朱家辉,艾比布拉,等.小麦籽粒灌浆特性分析[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2006,34(3):55.
Renh S,Zhu J H,Aibibula,*et al*. Analysis on grain filling characteristics of wheat variety [J]. *Journal of Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry*(*Natural Science Edition*),2006,34(3):55.

[12]宋 晓,张珂珂,岳 克,等.不同氮效率小麦品种的籽粒灌浆特性[J].中国土壤与肥料,2024,61 (3):174.
Song X,Zhang K K,Yue K,*et al*. Grain filling characteristics of wheat cultivar with different nitrogen efficiency [J]. *Soils and Fertilizers Sciences in China*,2024,61(3):174.

[13]姜丽娜,张雅雯,朱娅林,等.不同小麦品种籽粒灌浆特性及产量研究[J].华北农学报,2019,34(3):96.
Jiang L N,Zhang Y W,Zhu Y L,*et al*. A study on grain filling characteristics and yield in different wheat varieties [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*,2019,34(3):96.

[14]李澳旗,张 俊,崔晓路,等.不同灌水量下尿素添加适宜氮肥增效剂促进夏玉米灌浆增产[J].农业工程学报,2023,39(16):99.
Li A Q,Zhang J,Cui X L,*et al*. Nitrogen fertilizer synergist in urea under irrigation for high yield of summer maize at the filling stage [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*,2023,39(16):99.

[15]Slafer G A,Foulkes M J,Reynolds M P,*et al*. A 'wiring diagram' for sink strength traits impacting wheat yield potential [J]. *Journal of Experimental Botany*,2023,74(1):40.

[16]Dai Y L,Liao Z Q,Pei S Z,*et al*. Winter wheat source-sink relationships under various planting modes,complementary irrigation,and planting densities [J]. *Agronomy Journal*,2024,116(5):2483.

[17]Fang L,Struik P C,Girousse C,*et al*. Source-sink relationships during grain filling in wheat in response to various temperature,water deficit,and nitrogen deficit regimes [J]. *Journal of Experimental Botany*,2024,75(20):6563.

[18]Lichthardt C,Chen T W,Stahl A,*et al*. Co-evolution of sink and source in the recent breeding history of winter wheat in Germany [J]. *Frontiers in Plant Science*,2020,10:1771.

[19]Li M,Feng J M,Zhou H,*et al*. Overcoming reproductive compromise under heat stress in wheat:Physiological and genetic regulation,and breeding strategy [J]. *Frontiers in Plant Science*,2022,13:881813.

[20]辛海滨,刘翠莲,唐建鹏,等.长江中下游地区不同小麦品种籽粒灌浆特性及脱水速率探究[J].大麦与谷类科学,2025,42(3):22.
Xin H B,Liu Cl,Tang J P,*et al*. Exploration on grain filling characteristics and dehydration rate of different wheat varieties in middle and lower reaches of Yangtze River [J]. *Barley and Cereal Sciences*,2025,42(3):22.

[21]姚素梅,康跃虎,吕国华,等.喷灌与地面灌溉条件下冬小麦籽粒灌浆过程特性分析[J].农业工程学报,2011,27(7):13.
Yao S M,Kang Y H,Lü G H,*et al*. Analysis on grain filling characteristics of winter wheat under sprinkler irrigation and surface irrigation conditions [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*,2011,27(7):13.

[22]Rutten T,Thirulogachandar V,Huang Y Y,*et al*. Anatomical insights into the vascular layout of the barley *Rachis*:Implications for transport and spikelet connection [J]. *Annals of Botany*,2024,133(7):983.

[23]Maydup M L,Antonietta M,Guiamet J J,*et al*. The contribution of ear photosynthesis to grain filling in bread wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. *Field Crops Research*,2010,119(1):48.

[24]Jiang X D,Chen Q H,Agathokleous E,*et al*. Effects of low-temperature stress during anthesis stage on dry matter accumulation and yield of winter wheat [J]. *Agronomy*,2025,15(4):761.

[25]Li F J,Zhao C,Xu D A,*et al*. Understanding the formation of starch structure during grain development in two wheat cultivars with different filling rate [J]. *Carbohydrate Polymers*,2025,370:124379.

[26]孟祥宇,刁邓超,刘雅睿,等.小麦新品种西农 877 高产稳产的遗传特性解析[J].作物学报,2025,51(5):1261.
Meng X Y,Diao D C,Liu Y R,*et al*. Genetic analysis of high yield and yield stability characteristics of new wheat variety Xinong 877 [J]. *Acta Agronomica Sinica*,2025,51(5):1261.

[27]李艳霞,杨卫兵,尹燕枰,等.小麦小穗不同粒位粒重形成的生理特性差异[J].作物学报,2019,45(11):1715.
Li Y X,Yang W B,Yin Y P,*et al*. Difference of physiological characteristics of grain weight at various kernel po-sitions in wheat spikelets [J]. *Acta Agronomica Sinica*,2019,45(11):1715.

[28]南 瑞,杨玉存,石芳慧,等.小麦源库优异种质的鉴定与源库类型的划分[J].中国农业科学,2023,56(6):1019.
Nan R,Yang Y C,Shi F H,*et al*. Identification of excellent wheat germplasms and classification of source-sink types [J]. *Scientia Agricultura Sinica*,2023,56(6):1019.

[29]Rivera-Amado C,Molero G,Trujillo-Negrellos E,*et al*. Estimating organ contribution to grain filling and potential for source upregulation in wheat cultivars with a contrasting source-sink balance [J]. *Agronomy*,2020,10(10):1527.

[30]Liu J M,Si Z Y,Li S,*et al*. Effects of water and nitrogen rate on grain-filling characteristics under high-low seedbed cultivation in winter wheat [J]. *Journal of Integrative Agriculture*,2024,23(12):4018.