

网络出版时间: 2025-12-15

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1359.S.20251212.1312.008>

耐晚播小麦品种的产量构成、器官发育及温光资源利用特征

周吉鑫¹, 周雯莉¹, 高德荣³, 张弋堃⁴, 李春燕^{1,2},
朱敏^{1,2}, 朱新开^{1,2}, 丁锦峰^{1,2}, 郭文善^{1,2}

(1. 江苏省作物遗传生理重点实验室/扬州大学小麦研究中心, 江苏省扬州 225009; 2. 江苏省粮食作物现代产业技术协同创新中心, 江苏省扬州 225009; 3. 江苏里下河地区农业科学研究所/农业部长江中下游小麦生物学与遗传育种重点实验室, 江苏扬州 225007; 4. 江苏润果农业发展有限公司, 江苏镇江 212136)

摘要: 晚播是限制长江中下游地区小麦生产的主要因素之一。种植耐晚播品种能够有效减轻晚播导致的小麦产量损失。为明确耐晚播小麦品种特征, 在晚播增密模式下比较了小麦品种扬麦 25、扬麦 28、扬麦 30 和扬麦 39 的籽粒产量及其构成、器官发育进程和温光资源利用的差异。结果表明, 随播期的推迟, 小麦总结实粒数和籽粒产量均显著降低。晚播条件下, 扬麦 25 和扬麦 30 具有较高的籽粒产量, 主要得益于较高的穗数, 后者还与较高的穗粒数相关。晚播增密下, 小麦分蘖发生数虽减少, 但其成穗率显著增加。相比其他品种, 扬麦 25 的春季分蘖发生数明显增多, 而扬麦 30 的分蘖成穗率则更高。晚播导致小麦叶龄数和分蘖数量减少, 但扬麦 25 和扬麦 30 叶龄进程较快、高峰分蘖数较多。晚播明显缩短了分蘖至拔节阶段和开花至成熟阶段的持续时间, 不利于分蘖发生和籽粒灌浆。4 个品种中, 扬麦 25 的拔节期在晚播后提前, 拔节至孕穗阶段的持续时间延长, 有助于分蘖成穗阶段积累更多的温光资源; 扬麦 30 的孕穗期提前, 孕穗至开花阶段的持续时间延长, 可为小花分化提供更长的发育时间和更多的温光资源。总之, 耐晚播品种扬麦 25 和扬麦 30 表现出分蘖发生期生育进程快、温光利用高效, 分蘖成穗期生育进程慢、温光积累足的共性特征。

关键词: 晚播; 品种; 产量构成; 器官发育; 温光资源

中图分类号: S512.1; S311

文献标识码: A

文章编号: 1009-1041(2026)06-0805-12

Characteristics of Yield Components, Organ Development, and Thermal and Solar Utilization in Late-Sown-Tolerant Wheat Varieties

ZHOU Jixin¹, ZHOU Wenli¹, GAO Derong³, ZHANG Yikun⁴, LI Chunyan^{1,2},
ZHU Min^{1,2}, ZHU Xinkai^{1,2}, DING Jinfeng^{1,2}, GUO Wenshan^{1,2}

(1. Jiangsu Key Laboratory of Crop Genetics and Physiology/Wheat Research Center, Yangzhou University, Yangzhou, Jiangsu 225009, China; 2. Jiangsu Collaborative Innovation Center of Modern Grain Crop Industry Technology, Yangzhou, Jiangsu 225009, China; 3. Lixiahe Institute of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Wheat Biology and Genetic Breeding in the Middle and Lower Yangtze River, Ministry of Agriculture, Yangzhou, Jiangsu 225007, China; 4. Jiangsu Runguo Agriculture Development Co., Ltd., Zhenjiang, Jiangsu 212136, China)

Abstract: Late sowing is one of the primary factors restricting wheat production in the middle and lower reaches of the Yangtze River. Cultivating late-sowing-tolerant wheat varieties can effectively mitigate yield losses due to delayed sowing. To elucidate the characteristics of late-sowing-tolerant wheat varieties, this experiment compared grain yield and its components, organ development processes, and the utilization of thermal and solar resources among four wheat varieties of Yangmai 25, Yangmai 28, Yangmai 30, and Yangmai 39 under late-sowing pattern with increased planting density. The re-

收稿日期: 2025-08-20

修回日期: 2025-09-26

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFD2300205); 江苏省碳达峰碳中和科技创新专项(BE2023400)

第一作者 E-mail: zhou_jixin8499@163.com(周吉鑫)

通讯作者 E-mail: jfdin@yzu.edu.cn(丁锦峰); guows@yzu.edu.cn(郭文善)

sults indicated that delaying the sowing date led to a significant reduction in grain number and grain yield. Under late-sowing conditions, Yangmai 25 and Yangmai 30 exhibited significantly higher grain yields, primarily attributed to their greater spike numbers. Furthermore, Yangmai 30 exhibited significantly more grains per spike. Under late-sowing pattern with increased planting density, tiller number decreased, while tiller fertility increased significantly. Yangmai 25 exhibited significantly more tillers developed in spring season compared with other varieties, while Yangmai 30 exhibited higher tiller fertility. Although late sowing reduced leaf age and tiller number, Yangmai 25 and Yangmai 30 showed relatively faster leaf age progression and greater total tiller number. Meanwhile, late sowing significantly shortened the period from tillering to jointing and the period from anthesis to maturity. This might be unfavorable for the occurrence of tillering and the filling of grains. Among the four varieties, Yangmai 25 showed an earlier jointing stage and a prolonged duration from jointing to booting, whereas Yangmai 30 exhibited an earlier booting stage and a prolonged duration from booting to anthesis. The former helped accumulate more thermal and solar resources during the productive tillering phase, while the latter provided more time and more thermal and solar resources for floret differentiation. In conclusion, the late-sowing-tolerant varieties, Yangmai 25 and Yangmai 30, share key adaptive traits: accelerated tillering-phase development with efficient temperature and solar radiation resource capture, concomitantly with prolonged process during the productive tillering phase and sufficient accumulation of temperature and solar radiation.

Keywords: Late sowing; Varieties; Yield components; Organ development; Temperature and solar radiation resources

小麦是中国最重要的粮食作物之一,其高产稳产对中国粮食安全具有重要意义^[1]。长江中下游麦区作为中国小麦主要生产地区之一,种植面积约为全国小麦总面积的14%,产量约占全国总产的13%,该地区光热资源充足,降水充沛,生产中主要采用稻麦轮作^[2]。20世纪90年代以来,晚熟粳稻得到推广,种植面积迅速扩大^[3]。加之水稻直播技术的应用使得水稻收获期较人工移栽大幅推迟^[4]。由于全球气温升高,小麦适播期常遇阴雨天气,进一步加剧了该区小麦播期推迟现象^[5]。小麦播期推迟已成为长江中下游地区稻麦轮作体系中的普遍现象^[6]。

晚播会加快小麦生育进程,缩短生育期,不利于积累光温资源^[7]。当越冬前积温小于 $400\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ 时,小麦难以形成冬前壮苗,有效分蘖数量急速下降^[8]。积温的减少不仅会造成小麦总叶片数下降,还影响叶长和叶宽^[9]。晚播会明显抑制小麦拔节前群体叶面积指数的增长,削弱生育前期干物质积累,影响分蘖向有效穗的分化^[10]。此外,晚播小麦存在灌浆期遭遇高温胁迫的风险,易发生“高温催熟”现象,导致籽粒灌浆提前结束,降低粒重^[11]。由此可见,晚播会显著影响小麦产量的形成。

增加播量能在一定程度上缓解晚播小麦穗数下降所带来的影响,但过高的播量会加剧植株间竞争,造成早衰,影响籽粒灌浆^[12]。此外,通过苗期覆膜、肥料合理运筹等可较好地改善晚播小麦群体结构,增加产量^[13]。选用对晚播适应性强的品种也是保证晚播小麦丰产稳产的重要举措。研究认为,晚播15 d条件下多穗型品种因其较多的成穗数保持产量,而较大穗型品种有较稳定的产量^[14]。晚播条件下,低分蘖小麦品种表现出较高的花后叶片光合同化能力,易实现稳产^[15]。前人研究主要集中于栽培措施的调控和品种选用方面,而有关耐晚播小麦品种特征的研究缺乏。本试验拟通过设置不同播期密度组合模式,探讨不同小麦品种间籽粒产量、生育期、器官发育、温光资源利用等方面的差异,以期明确耐晚播小麦器官发育、产量形成、温光资源利用等特征,为长江中下游地区晚播小麦高产稳产提供参考。

1 材料及方法

1.1 试验场地描述

试验于2023—2024年在扬州大学江苏省作物遗传生理重点实验室试验田($119^{\circ}25'\text{E}$, $32^{\circ}39'\text{N}$)进行。该地区属于亚热带季风性湿润气候向

温带季风气候的过渡区,年平均气温为 14.8℃,年平均降水量为 1 020 mm。试验田前茬作物为水稻,土质为沙壤土;0~20 cm 耕层土壤 pH 值为 7.86,有机质、全氮、碱解氮、有效磷和有效钾的含量分别为 18.466 g·kg⁻¹、1.269 g·kg⁻¹、97.13 mg·kg⁻¹、64.489 mg·kg⁻¹ 和 208.181 mg·kg⁻¹。

1.2 试验设计

试验采用裂区设计,设 3 次重复。以播期与密度组合模式为主区,设 11 月 1 日播种+基本苗 180 万株·hm⁻²(SD1)、11 月 20 日播种+基本苗 300 万株·hm⁻²(SD2)、12 月 9 日播种+基本苗 390 万株·hm⁻²(SD3)共 3 个水平。小麦品种为裂区,分别为扬麦 25、扬麦 28、扬麦 30 和扬麦 39。4 个品种均为长江中下游地区当前主栽品种,由江苏里下河地区农业科学研究所育成,熟期相近,其中扬麦 25 和扬麦 30 在多年大田种植中表现出良好的耐晚播特性。氮肥选用尿素(氮含量 46.3%),磷肥选用过磷酸钙(磷含量 12.0%),钾肥选用氯化钾(钾含量 60.0%)。纯氮施用量为 240 kg·hm⁻²,按基肥:拔节肥:孕穗肥比例为 6:2:2 施用。N:P₂O₅:K₂O=1:0.5:0.5,磷、钾肥作为基肥和拔节肥按照各 50%的比例施用。基肥于播种前施用,拔节肥于叶龄余数 2.5 叶时施用,孕穗肥于倒一叶全展时施用。试验田播种器械为精量播种机,播幅 2.7 m(10 行),行距 27 cm,小区面积为 13.5 m²(2.7 m×5 m)。麦苗进入三叶期进行间苗,以达到设计的基本苗数,并在小区中间设取样区,避开边际效应。其他栽培管理措施同当地大田生产。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 生育进程及气象数据的记录

观察记录各模式下不同小麦品种的出苗期、分蘖期、拔节期、孕穗期、开花期及成熟期。采用 ZQZ-A 型自动气象站(英国)记录每日日均温、日照时数、降水量等气象数据。

1.3.2 气象数据计算及统计

参照文献[16]的方法计算积温(E_{AT}): $E_{AT} = \sum(T_1 - T_0) \times T_G$, $T_1 > T_0$ 。其中, T_1 和 T_0 分别是日均温和生物学零度(作物开始发育的下限温度)。小麦生长的最低温度为 0℃。当 $T_1 < T_0$ 时, $T_1 - T_0 = 0$ 。 T_G 为生长天数。参照文献[17]的方法计算累计太阳辐射(C_{SR}): $C_{SR} = \sum H \times T_G$, H 为逐日太阳辐射。

1.3.3 叶龄动态及茎蘖动态调查

小麦第一片叶全展后,每个小区标记具有代表性、长势相对一致的麦苗 15 株,每隔 7 d 调查 1 次叶龄数,叶龄精确至小数点后一位;第三片叶全展后,每个小区标记具有代表性、长势相对一致的麦苗 15 株,每隔 7 d 调查 1 次茎蘖数。

1.3.4 籽粒产量及其构成因素测定

于乳熟期每个小区连续取样 50 穗,调查穗粒数。于成熟期每个小区划定 1.08 m² 测产区(4 个位于小区中心 1 m 长的小麦播种行),测定区域内穗数后人工收获、脱粒,自然晾晒测定小麦产量及含水量。从测产小麦籽粒中取 1 000 粒测定千粒重,重复 3 次。测定含水量后,以 13%的籽粒含水量折算千粒重和籽粒产量。

1.4 数据处理及统计方法

采用 Excel 2019、Origin 2022 进行数据整理及制图,用 SPSS 27.0 软件进行显著性检验和方差分析。

2 结果与分析

2.1 晚播条件下不同小麦品种籽粒产量的表现

不同模式间小麦籽粒产量差异显著,以 SD1 最高(表 1)。相较于 SD1,SD2 和 SD3 分别减产 10%和 16%。SD1 下,扬麦 28 的籽粒产量最高,但与扬麦 25、扬麦 39 无显著差异,仅显著高于扬麦 30。SD2 下,扬麦 25 的籽粒产量与扬麦 30 无显著差异,均显著高于扬麦 28 和扬麦 39。SD3 下,扬麦 30 的籽粒产量显著高于其他品种,扬麦 25 和扬麦 39 次之。与 SD1 相比,SD2 下扬麦 25、扬麦 30 减产最少,而扬麦 28 减产最多;相较于 SD2,SD3 下扬麦 30、扬麦 39 减产最少,扬麦 25 减产反而最多。总体而言,晚播条件下扬麦 25 和扬麦 30 表现出相对高产稳产的特性。

2.2 晚播条件下不同小麦品种产量构成的表现

由表 1 可知,模式、品种及其互作对产量构成因素均有显著影响。不同模式间穗数表现为 SD1 > SD3 > SD2,穗粒数和千粒重以 SD2 最高,总结实粒数以 SD1 最高。相比 SD1,SD3 的穗数、穗粒数和总结实粒数分别降低 17%、13%和 16%,千粒重上升 2%。

SD1 下,扬麦 25 的穗数最高,与扬麦 28、扬麦 30 无显著差异,仅显著高于扬麦 39;扬麦 30 具有较高的穗粒数,而扬麦 39 的穗粒数最低;扬麦 39 的千粒重显著高于其他品种,扬麦 30 的千

粒重最低;扬麦 30 的总结实粒数显著高于其他品种,而扬麦 39 最低。SD2 下,扬麦 25 的穗数显著多于其他品种,增幅为 17%~24%;扬麦 30 的穗粒数比其他品种高 15%~18%,其余品种间穗粒数无显著差异;品种间千粒重差异显著,表现为扬麦 39>扬麦 28>扬麦 25>扬麦 30;扬麦 25 和扬麦 30 的总结实粒数显著高于扬麦 28 和扬麦 39。与 SD1 相比,SD2 下扬麦 25 的穗数下降最少,降幅为 6%,而扬麦 28 和扬麦 39 分别下降 22%和 24%;扬麦 28 的穗粒数减少,其余品种增加,其中扬麦 30 增加 11%;扬麦 25 的千粒重略降,其余品种升高 6%~11%;扬麦 25、扬麦 30 的总结实粒数分别下降 1%和 10%,而扬麦 28 下降幅度达 23%。SD3 下,扬麦 25 和扬麦 30 间穗数无显著差异,但二者均显著高于扬麦 39;扬麦 30 的穗粒数高于扬麦 25,二者均显著高于扬麦 28、扬麦 39;千粒重表现为扬麦 39>扬麦 28>扬麦 25>扬麦 30,品种间差异显著;扬麦 30 的总结实粒数

显著高于其他品种,扬麦 25 又显著高于扬麦 28 和扬麦 39。与 SD1 相比,SD3 下只有扬麦 39 的穗数显著降低;所有品种的穗粒数显著降低,但扬麦 25、扬麦 30 降幅较低,分别为 9%、8%;千粒重只有扬麦 25 显著降低,其余品种表现为显著上升,其中扬麦 39 增加最多(增幅 6%);扬麦 25 和扬麦 30 的总结实粒数分别下降 10%和 9%,远低于其他品种。综合来看,在 SD2 下扬麦 25 的穗数、总结实粒数优于其他品种;扬麦 30 在 SD2、SD3 下具有较高的穗数和穗粒数。

2.3 晚播条件下不同小麦品种群体茎蘖数及成穗率的表现

越冬始期,仅 SD1 下小麦开始发生分蘖,SD3 下未出苗。由表 2 可知,相比 SD1,SD2 和 SD3 下拔节期茎蘖数分别减少 9%和 30%;SD2 的茎蘖成穗率和分蘖成穗率降低,SD3 的茎蘖成穗率和分蘖成穗率则因较多的基本苗而提高;SD2 和 SD3 的单株成穗数分别下降 50%和 57%。

表 1 不同模式下 4 个小麦品种的籽粒产量及其构成因素

Table 1 Grain yield and its components of four wheat varieties under different patterns

模式 Pattern	品种 Variety	籽粒产量 Grain yield/ (kg · hm ⁻²)	较 SD1 减产 Reduction relative to SD1/(kg · hm ⁻²)	较 SD2 减产 Reduction relative to SD2/(kg · hm ⁻²)	穗数 Spike number/ (spikes · m ⁻²)	穗粒数 Grains per spike	总结实粒数 Grain number/ (×10 ⁶ · hm ⁻²)	千粒重 1 000-grain weight/g
SD1	扬麦 25 Yangmai 25	8 758ab			518a	41.1de	213.0b	43.9d
	扬麦 28 Yangmai 28	8 845a			500abc	43.5cd	217.6b	44.1d
	扬麦 30 Yangmai 30	8 475bc			499abc	47.5b	237.2a	38.0h
	扬麦 39 Yangmai 39	8 630ab			485bc	40.3e	195.6cd	46.9b
SD2	扬麦 25 Yangmai 25	8 217c	540		488bc	43.1cd	210.1bc	43.3e
	扬麦 28 Yangmai 28	7 219e	1 626		390ef	42.9cd	167.7e	47.1b
	扬麦 30 Yangmai 30	8 173c	302		407e	52.6a	213.7b	42.2f
	扬麦 39 Yangmai 39	7 477e	1 153		369f	44.9c	165.7e	49.6a
SD3	扬麦 25 Yangmai 25	7 343e	1 415	874	512ab	37.5f	192.1d	43.1e
	扬麦 28 Yangmai 28	6 642f	2 204	578	476cd	33.3g	158.3e	44.6c
	扬麦 30 Yangmai 30	7 827d	648	346	490abc	43.9c	215.2b	39.5g
	扬麦 39 Yangmai 39	7 321e	1 308	156	455d	34.3g	156.1e	49.6a
方差分析 Analysis of variance								
模式 Pattern(P)		**			**	**	**	**
品种 Variety(V)		**			**	**	**	**
P×V		**			**	**	**	**

同列数据后的不同小写字母代表处理间差异在 0.05 水平下显著。*: $P<0.05$; **: $P<0.01$ 。下表同。
Different lowercase letters following the values in the same columns indicate significant differences among treatments at the 0.05 level. *: $P<0.05$; **: $P<0.01$. The same in tables 2-5.

表 2 不同模式和小麦品种对群体茎蘖数和成穗率的影响

Table 2 Effects of different patterns and wheat varieties on the number of stem and tiller and their fertility in population

模式 Pattern	品种 Variety	茎蘖数 Stem and tiller number/($\times 10^4 \cdot \text{hm}^{-2}$)		单株成穗数 Spikes per plant	茎蘖成穗率 Stem and tiller fertility/%	分蘖成穗率 Tiller fertility/%
		越冬始期 Wintering	拔节期 Jointing			
SD1	扬麦 25 Yangmai 25	633a	1 716a	2.88a	30.30f	22.10e
	扬麦 28 Yangmai 28	570b	1 272bc	2.78ab	39.69de	29.70cd
	扬麦 30 Yangmai 30	618a	1 059def	2.77ab	47.15c	36.32b
	扬麦 39 Yangmai 39	570b	1 098d	2.70b	44.28cd	33.36bc
SD2	扬麦 25 Yangmai 25	300c	1 340b	1.63c	36.45ef	26.59de
	扬麦 28 Yangmai 28	300c	1 160cd	1.30def	33.69ef	21.51e
	扬麦 30 Yangmai 30	300c	1 040def	1.36d	40.02de	27.34cde
	扬麦 39 Yangmai 39	300c	1 080de	1.23def	34.30ef	21.15e
SD3	扬麦 25 Yangmai 25		942efg	1.31de	54.39ab	43.62a
	扬麦 28 Yangmai 28		843g	1.22ef	56.49a	44.67a
	扬麦 30 Yangmai 30		845g	1.26def	58.02a	46.65a
	扬麦 39 Yangmai 39		919fg	1.17f	49.59bc	37.31b
方差分析 Analysis of variance						
模式 Pattern(P)		*	*	*	*	*
品种 Variety(V)		*	*	*	*	*
模 P×V		*	*	*	*	*

SD1 下,扬麦 25 越冬始期茎蘖数与扬麦 30 无显著差异,均显著高于其余两品种;拔节期茎蘖数表现为扬麦 25>扬麦 28>扬麦 39>扬麦 30;扬麦 30 茎蘖成穗率及分蘖成穗率显著高于其他品种,其次为扬麦 39、扬麦 28;单株成穗数方面,扬麦 25 显著高于扬麦 39,但扬麦 28、扬麦 30 无显著差异。SD2 下,扬麦 25 拔节期茎蘖数最高,其他品种间无显著差异;扬麦 30 茎蘖成穗率和分蘖成穗率最高,但品种间无显著差异;单株成穗数以扬麦 25 显著高于其他品种。与 SD1 相比,SD2 下拔节期茎蘖数以扬麦 25 降幅最大,为 22%,其次扬麦 28,下降 9%;扬麦 25 成穗率上升,其他品种则表现为下降;扬麦 25 单株成穗数降幅最小,为 43%,其他品种下降 51%~54%。SD3 下,品种间拔节期茎蘖数扬麦 25 最高,品种间无显著差异;茎蘖成穗率及分蘖成穗率表现为扬麦 30>扬麦 28>扬麦 25>扬麦 39,扬麦 39 显著低于其他品种;单株成穗数以扬麦 25 最高,但仅显著高于扬麦 39。与 SD1 相比,SD3 下扬麦 25 和扬麦 28 拔节期茎蘖数分别下降 45%、34%,高于扬麦 30 和扬麦 39;茎蘖成穗率和分蘖成穗率方面,除扬麦 39 提升不显著外,其他品种均显著提高;所有品种的单株成穗数均显著降低。

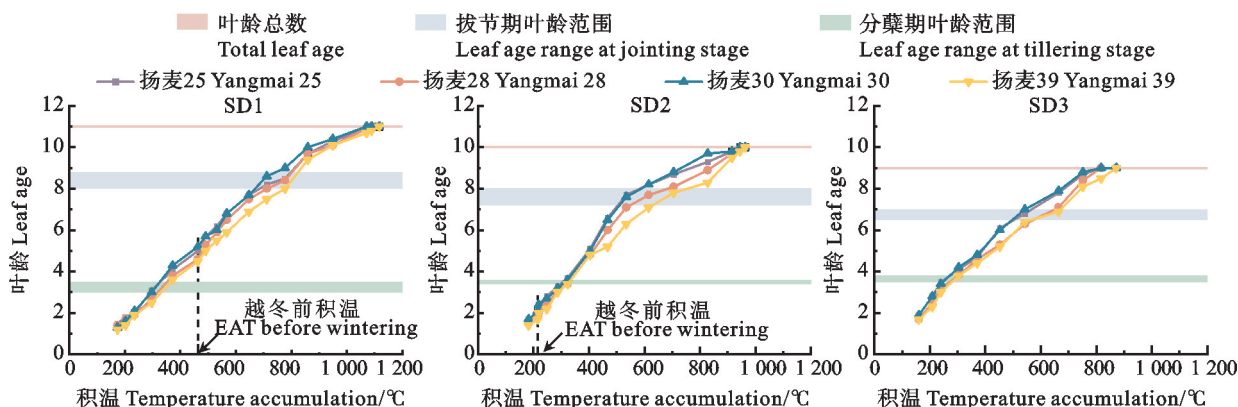
综上所述,扬麦 25、扬麦 28、扬麦 30 实现高穗数的途径不同,其中扬麦 25 依赖于高茎蘖数,扬麦 30 主要通过高茎蘖成穗率,扬麦 28 则有较

高的茎蘖数和茎蘖成穗率。晚播密植生产条件下,较高的分蘖发生数量,尤其是春季分蘖,对稳定穗数具有重要作用。

2.4 不同品种小麦在晚播生产条件下器官发育动态

2.4.1 叶龄动态

随播期推迟,小麦越冬前积温逐渐下降(图 1)。SD1 下各品种的叶龄总数均为 11 叶,SD2 和 SD3 下则分别降至 10 和 9 叶。拔节期叶龄范围以 SD1 最大,其次为 SD2。在 SD1 下,积温相同时扬麦 25、扬麦 28 和扬麦 30 的叶龄进程明显快于扬麦 39。700 ℃·d 的积温是扬麦 25、扬麦 28、扬麦 30 的叶龄进程分界点,从 700 ℃·d 之后,扬麦 30 的叶龄进程明显慢于扬麦 25、扬麦 28。SD2 下,扬麦 25、扬麦 30 的叶龄进程始终快于扬麦 28、扬麦 39,品种间叶龄差异在积温为 500~800 ℃·d 较明显。与 SD1 相比,SD2 下品种间叶龄进程差异呈扩大趋势,扬麦 28 与扬麦 25 和扬麦 30 的叶龄差异越发明显。SD3 下,扬麦 25 和扬麦 30 的叶龄进程接近,扬麦 28 和扬麦 39 的叶龄进程接近,两组之间叶龄进程在 500~800 ℃·d 积温时差异明显,前组叶龄进程较快。与 SD1 相比,SD3 下扬麦 28 的叶龄逐渐从扬麦 25、扬麦 30 趋同转变为与扬麦 39 一致。综上,扬麦 25、扬麦 30 在 3 种模式下叶龄进程总体快于其他品种,扬麦 39 叶龄进程始终较慢。



箭头所指为冬前积温。

The arrow indicates the temperature accumulation before wintering.

图 1 不同模式下各品种小麦叶龄动态

Fig. 1 Leaf age dynamics of various wheat varieties under different patterns

2. 4. 2 分蘖动态

由图 2 可知,SD1 下分蘖发生数量最多,其次为 SD2,SD3 最低。同时,随着播期推迟和密度的增加,4 个品种达到最高分蘖数时所需积温逐渐减少,由 SD1 下 700~900 °C · d 降至 SD3 下 660 °C · d。

SD1 下,达到最高分蘖时的所需积温表现为扬麦 30>扬麦 39>扬麦 28、扬麦 25,最高分蘖数量表现为扬麦 25>扬麦 39>扬麦 28>扬麦 30。SD2 下,扬麦 30 达到最高分蘖数时的积温低于其他品种,扬麦 25 与扬麦 39 相同,而扬麦 28 最高;扬麦 30 的最高分蘖数仅次于扬麦 25,而扬麦 39 最低。与 SD1 相比,SD2 下扬麦 30 和扬麦 39 的最高分蘖数下降幅度分别最小(9%)和最大(52%);在最高分蘖数所需积温方面,扬麦 28 要求最多,而其余品种要求降低。在 SD3 下,各品种的最高分蘖数所需积温接近;最高分蘖数以扬麦 30 最多,扬麦 28 最少,扬麦 25 与扬麦 39 接近。与 SD1 相比,SD3 下扬麦 30 最高分蘖数下降

69%,其他品种下降 80%~84%;最高分蘖数所需积温均减少,扬麦 30 降低幅度最高,为 34%。

综上,扬麦 25 在 SD1、SD2 下有高峰分蘖数多、高峰分蘖数积温低的特点,能够更有效利用温度资源,实现分蘖快发多发。扬麦 30 在 SD2、SD3 下分别表现出高峰分蘖数积温低、高峰分蘖数多的特点,能够在晚播条件下实现更高效的温度资源利用。

2. 5 晚播条件下不同小麦品种主要生育时期的差异

由图 3 可知,相比 SD1,SD2 和 SD3 的小麦生育期分别缩短 7% 和 15%。SD2 和 SD3 下 SO—SE 阶段的持续时间分别延长 83% 和 300%,SE—TI 阶段分别延长 132% 和 124%。从 TI—JO 阶段开始,SD2 和 SD3 的主要生育阶段持续时间均较 SD1 缩短,其中 SD2、SD3 的 TI—JO 阶段分别缩短 42% 和 64%,JO—BO 阶段分别缩短 8% 和 33%;AN—MA 阶段分别缩短 8% 和 13%。

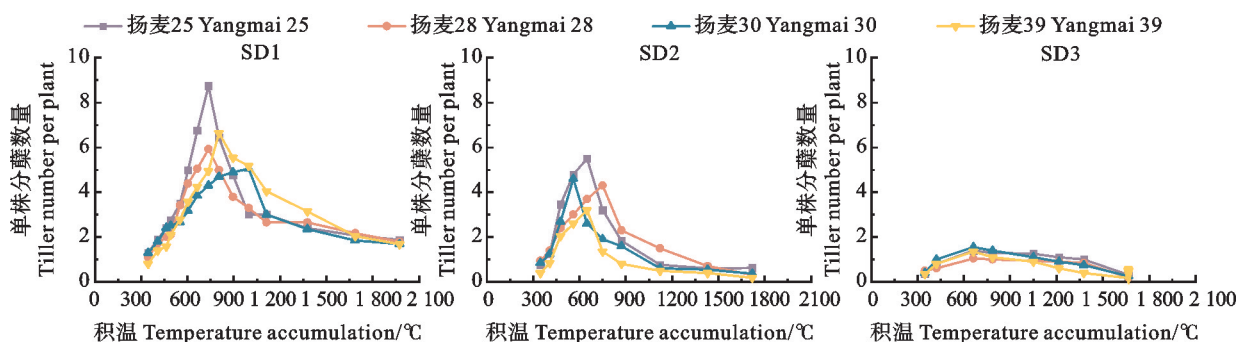
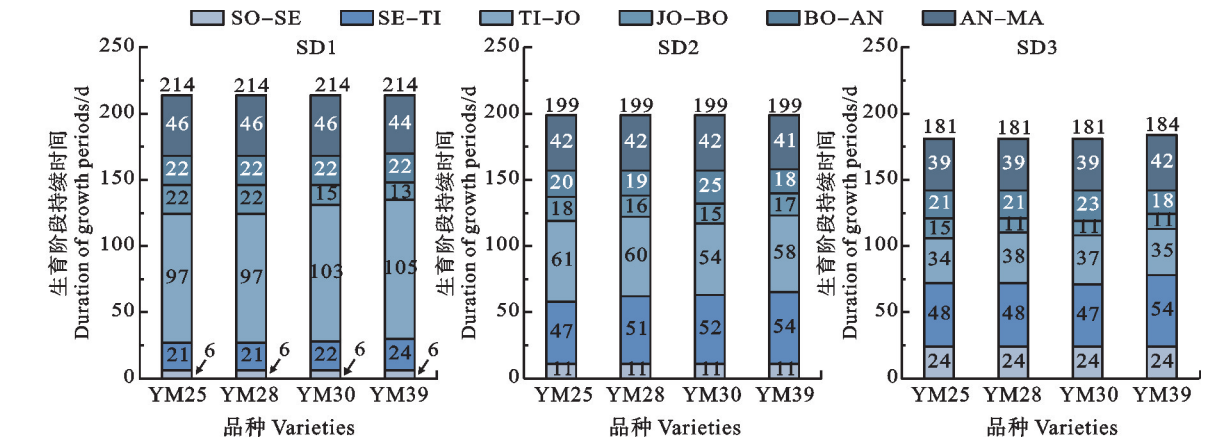


图 2 不同模式下各品种小麦分蘖动态

Fig. 2 Tillering dynamics of various wheat varieties under different patterns



YM25: 扬麦 25; YM28: 扬麦 28; YM30: 扬麦 30; YM39: 扬麦 39。SO: 播种; SE: 出苗; TI: 分蘖期; JO: 拔节期; BO: 孕穗期; AN: 开花期; MA: 成熟期。堆积柱形图各堆积部分内数字为该生育阶段持续时间, 柱形图顶部为总生育期持续时间。

YM25: Yangmai 25; YM28: Yangmai 28; YM30: Yangmai 30; YM39: Yangmai 39。SO: Sowing; SE: Seedling emergence; TI: Tillering; JO: Jointing; BO: Booting; AN: Anthesis; MA: Maturity。The numbers within individual segments of the stacked bar chart represent the duration of each growth stage, while the value above each bar indicates duration of the total growth period.

图 3 不同模式下各品种小麦主要生育阶段持续时间

Fig. 3 Duration of the main growth periods of various wheat varieties under different patterns

SD1 下, 在 SE—JO 阶段, 扬麦 39 的持续时间最长, 扬麦 25、扬麦 28 最短; 在 BO—AN 阶段, 各品种的持续时间接近。SD2 下, 在 SE—TI 阶段, 扬麦 25 持续时间最短, 扬麦 39 最长; 在 TI—JO 阶段, 品种间持续时间表现为扬麦 25 > 扬麦 28 > 扬麦 39 > 扬麦 30; 在 BO—AN 阶段, 扬麦 30 的持续时间较其他品种多 25%~28%, 而扬麦 39 在所有品种中最短。与 SD1 相比, SD2 下扬麦 25 的 SE—TI 阶段持续时间增加 26 d, 其他品种增加达 30 d; TI—JO 阶段的持续时间以扬麦 30 缩减最多, 扬麦 25 最少; 在 BO—AN 阶段, 除扬麦 30 的持续时间延长外, 其他品种均缩短。SD3 下, 在 SE—TI 阶段, 扬麦 39 的持续时间多于其他品种; 在 TI—JO 阶段, 品种间的持续时间差距缩小, 扬麦 28 和扬麦 30 的持续时间较长; 在 JO—BO 阶段, 扬麦 25 的持续时间较长; 在 BO—AN 阶段, 扬麦 30 的持续时间仍多于其他品种, 而扬麦 39 的持续时间最短。与 SD1 相比, SD3 下扬麦 39 的 SE—TI 阶段持续时间增加了 30 d, 而扬麦 30 的持续时间延长 25 d; 在 TI—JO 阶段, 扬麦 39 的持续时间缩短最多, 达 70 d, 而扬麦 28 缩短最少, 为 59 d; 在 JO—BO 阶段, 扬麦 39 的持续时间仅缩短 2 d, 而扬麦 28 缩短高达 11 d; 在 BO—AN 阶段, 仅扬麦 30 的持续时间延长, 其他品种均缩短。

综上, 在 SD2、SD3 下, 扬麦 25、扬麦 30 的 SE—JO 阶段持续时间较短, 且扬麦 30 的 BO—

AN 阶段持续时间长于其他品种。

2.6 晚播条件下不同小麦品种温光资源利用的差异

2.6.1 积温和日均温

相较于 SD1, SD2 和 SD3 的全生育期积温分别下降 7% 和 12%, 主要表现在 SO—SE、TI—JO 和 AN—MA 阶段(表 3)。不同品种对模式的响应存在差异, 主要体现在 TI—JO、JO—BO 和 BO—AN 阶段。在 SD1 下, 相比扬麦 30 和扬麦 39, 扬麦 25 和扬麦 28 的 SE—JO 阶段积温明显较低, 但 JO—BO 阶段积温明显较高。SD2、SD3 下, 在 TI—JO 阶段, 扬麦 25、扬麦 30 的积温较低; 在 JO—BO 阶段, 扬麦 30 的积温低于其他品种, 而扬麦 25 较高; 在 BO—AN 阶段, 扬麦 30 的积温高于其他品种, 扬麦 39 最低。与 SD1 相比, SD2 和 SD3 下 TI—JO 阶段积温以扬麦 25 和扬麦 30 的降低幅度较高; 在 JO—BO 阶段, 扬麦 25 和扬麦 30 的积温未有明显降低, 甚至在 SD2 下有所增加。此外, SD2 和 SD3 下扬麦 30 的 BO—AN 阶段积温明显增加, 较 SD1 分别提升 26% 和 18%。

相比 SD1, SD2 和 SD3 下 SO—SE、EM—TI 阶段的日均温降低, 而其他生育阶段的日均温增加(表 4)。SD1 下, 扬麦 39 具有较高的 TI—MA 阶段日均温, 其次为扬麦 30。在 SD2、SD3 下, 扬麦 25 和扬麦 30 表现出较低的 TI—BO 阶段日均温, 其中扬麦 30 的 BO—AN 阶段日均温较低; 而

表 3 不同模式下小麦品种的主要生育阶段积温

Table 3 Accumulated temperature during the main growth periods of wheat varieties under different patterns $^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$

模式 Pattern	品种 Variety	主要生育阶段 Main growth period						全生育期 Whole growth period
		SO—SE	SE—TI	TI—JO	JO—BO	BO—AN	AN—MA	
SD1	扬麦 25 Yangmai 25	120.1	195.8	395.2	209.1	321.9	911.1	2 153.2
	扬麦 28 Yangmai 28	120.1	195.8	395.2	209.1	321.9	911.1	2 153.2
	扬麦 30 Yangmai 30	120.1	204.9	435.9	159.3	321.9	911.1	2 153.2
	扬麦 39 Yangmai 39	120.1	226.0	455.1	148.4	329.4	874.2	2 153.2
SD2	扬麦 25 Yangmai 25	106.8	190.1	292.2	238.7	318.9	850.0	1 996.7
	扬麦 28 Yangmai 28	106.8	212.3	305.3	221.6	300.7	850.0	1 996.7
	扬麦 30 Yangmai 30	106.8	215.0	246.6	171.0	407.3	850.0	1 996.7
	扬麦 39 Yangmai 39	106.8	216.6	310.8	239.1	289.9	833.5	1 996.7
SD3	扬麦 25 Yangmai 25	86.5	186.6	239.8	209.9	353.7	803.8	1 880.3
	扬麦 28 Yangmai 28	86.5	186.6	291.1	158.6	353.7	803.8	1 880.3
	扬麦 30 Yangmai 30	86.5	169.2	286.6	153.7	380.5	803.8	1 880.3
	扬麦 39 Yangmai 39	86.5	200.6	321.1	156.5	311.8	874.8	1 951.3

SO:播种;SE:出苗;TI:分蘖期;JO:拔节期;BO:孕穗期;AN:开花期;MA:成熟期。

SO: Sowing; SE: Seedling emergence; TI: Tillering; JO: Jointing; BO: Booting; AN: Anthesis; MA: Maturity.

表 4 不同模式下小麦品种的主要生育阶段日均温

Table 4 Mean daily temperature during the main growth periods of wheat varieties under different patterns $^{\circ}\text{C}$

模式 Pattern	品种 Variety	主要生育阶段 Main growth period						全生育期 Whole growth period
		SO—SE	SE—TI	TI—JO	JO—BO	BO—AN	AN—MA	
SD1	扬麦 25 Yangmai 25	20.0	10.0	5.3	9.6	15.4	20.2	11.4
	扬麦 28 Yangmai 28	20.0	10.0	5.3	9.6	15.4	20.2	11.4
	扬麦 30 Yangmai 30	20.0	10.0	5.4	11.1	15.4	20.2	11.4
	扬麦 39 Yangmai 39	20.0	10.0	5.5	12.2	15.6	20.3	11.4
SD2	扬麦 25 Yangmai 25	9.7	5.6	5.9	13.9	16.9	20.6	11.5
	扬麦 28 Yangmai 28	9.7	5.2	6.3	14.4	16.8	20.6	11.5
	扬麦 30 Yangmai 30	9.7	5.1	5.8	12.1	16.7	20.6	11.5
	扬麦 39 Yangmai 39	9.7	5.0	6.6	14.6	16.9	20.6	11.5
SD3	扬麦 25 Yangmai 25	5.4	4.7	8.3	15.2	17.5	21.1	12.0
	扬麦 28 Yangmai 28	5.4	4.7	8.8	15.4	17.5	21.1	12.0
	扬麦 30 Yangmai 30	5.4	4.4	8.8	15.2	17.1	21.1	12.0
	扬麦 39 Yangmai 39	5.4	4.1	9.4	16.0	18.0	21.3	12.2

SO:播种;SE:出苗;TI:分蘖期;JO:拔节期;BO:孕穗期;AN:开花期;MA:成熟期。

SO: Sowing; SE: Seedling emergence; TI: Tillering; JO: Jointing; BO: Booting; AN: Anthesis; MA: Maturity.

扬麦 39 具有最低的 SE—TI 阶段日均温,但 TI—MA 阶段日均温高于其他品种。

2.6.2 累计太阳辐射(CSR)

相较于 SD1,SD2 和 SD3 的全生育期 CSR 分别下降 6%和 12%,且主要表现在 TI—JO、JO—BO、AN—MA 阶段(表 5)。在 SD1 下,扬麦 39 的 CSR 在 SE—JO 阶段较高,其次为扬麦 30,但扬麦 39 在 JO—MA 阶段较低。在 SD2、SD3 下,扬麦 25 的 CSR 在 TI—JO 阶段较低,但在 JO—

BO 阶段高于其他品种;扬麦 30 的 CSR 在 TI—BO 阶段最低,但在 BO—AN 阶段明显更高;扬麦 39 表现出较高的 SE—BO 阶段 CSR,但 BO—AN 阶段较低。与 SD1 相比,SD2 和 SD3 下扬麦 30 和扬麦 39 的 CSR 在 TI—JO 阶段大幅减少,减少量多于其他品种;SD2 下在 JO—BO 阶段仅扬麦 39 的 CSR 增加,在 SD3 下扬麦 39 的 CSR 减少量最少;SD2 下在 BO—AN 阶段仅扬麦 30 的 CSR 提高;SD3 下仅扬麦 39 的 CSR 减少。

表 5 不同模式下小麦品种主要生育阶段的累计太阳辐射量

Table 5 Accumulated solar radiation during the main growth periods of wheat varieties under different patterns MJ · m⁻²

模式 Pattern	品种 Variety	主要生育阶段 Main growth period						全生育期 Whole growth period
		SO—SE	SE—TI	TI—JO	JO—BO	BO—AN	AN—MA	
SD1	扬麦 25 Yangmai 25	77.3	249.7	884.2	320.2	314.5	857.4	2 659.7
	扬麦 28 Yangmai 28	77.3	249.7	884.2	320.2	314.5	857.4	2 659.7
	扬麦 30 Yangmai 30	77.3	263.1	967.0	246.8	314.5	857.4	2 659.7
	扬麦 39 Yangmai 39	77.3	285.8	1 012.1	203.3	285.1	837.8	2 659.7
SD2	扬麦 25 Yangmai 25	129.9	430.7	626.0	254.7	279.8	827.4	2 497.6
	扬麦 28 Yangmai 28	129.9	446.7	643.8	231.8	261.8	827.4	2 497.6
	扬麦 30 Yangmai 30	129.9	450.7	573.1	210.1	351.4	827.4	2 497.6
	扬麦 39 Yangmai 39	129.9	462.9	639.2	239.2	250.1	827.4	2 497.6
SD3	扬麦 25 Yangmai 25	203.1	454.2	414.2	203.4	320.5	783.7	2 309.8
	扬麦 28 Yangmai 28	203.1	454.2	456.1	146.2	320.5	783.7	2 309.8
	扬麦 30 Yangmai 30	203.1	445.7	457.8	138.0	334.2	783.7	2 309.8
	扬麦 39 Yangmai 39	203.1	485.3	447.8	165.4	270.6	860.3	2 386.4

SO:播种;SE:出苗;TI:分蘖期;JO:拔节期;BO:孕穗期;AN:开花期;MA:成熟期。
SO: Sowing; SE: Seedling emergence; TI: Tillering stage; JO: Jointing stage; BO: Booting stage; AN: Anthesis; MA: Maturity.

3 讨论

研究表明,小麦播期每推迟 1 d,产量平均下降 0.9%^[18]。晚播小麦穗数对产量形成的贡献大于穗粒数和千粒重^[19]。晚播会缩短小麦冬前生育天数,减少日均温,降低分蘖数量和成穗率^[20]。适期晚播小麦拔节至孕穗阶段温度更接近幼穗分化的最适温度,有利于每穗小花数和穗粒数的增加^[21],但过于晚播会缩短小麦幼穗分化持续时间,显著减少小花分化数量,增加小花退化率^[22-23]。小麦千粒重受播期的影响因品种、密度等因素表现出较大的差异。有研究认为,晚播可促进同化物向小麦籽粒的分配,进而提升粒重^[24];但播期推迟会降低花后同化物的积累量,减少籽粒灌浆物质的来源^[25]。本研究在播期推迟下相应增加小麦基本苗,结果表明,产量逐渐减少,穗数先降后升,千粒重和穗粒数均表现出先升后降的趋势,但总结实粒数持续减少。这说明,本试验条件下增加密度未能补偿晚播导致的减产,主要由于单株分蘖成穗和穗粒形成能力的降低。

选用合适的小麦品种是适应晚播生产的重要途径^[26]。张明伟等^[27]认为,选用高分蘖品种有利于弥补冬前分蘖损失,提高成熟期穗数。Yin 等^[15]报道,小麦低分蘖、大穗型品种能够保持单位面积穗数和穗粒数的平衡,晚播条件下其产量高于高分蘖品种。本研究中,不同小麦品种穗型特征在不同播期条件下有所差异,总体而言扬麦

25 穗数最多,扬麦 28 产量结构较为均衡,扬麦 30 穗粒数偏多,扬麦 39 粒重较高。扬麦 25 和扬麦 30 在 SD2 下穗数、总结实粒数和籽粒产量显著高于其他品种。SD3 下,扬麦 25 和扬麦 30 穗数相近,扬麦 30 表现出显著更多的穗粒数和更高的产量。与 SD1 相比,SD2 下扬麦 25 和扬麦 30 的减产较低,SD3 下扬麦 30 减产最少。这说明,不同晚播天数下耐晚播品种的特征存在差异,晚播(晚 20 d)下穗数多且穗粒数高的品种易高产,而过晚播(晚 40 d)下穗粒数多的品种产量较高。

晚播会明显改变小麦器官发育进程。随播期的推迟,小麦叶片伸长速度减慢,分蘖发生数量减少甚至无分蘖发生,使得个体冬前叶龄、分蘖数下降,从而降低了群体茎蘖数、生物量和叶面积指数^[28]。本研究中,随播期推迟,各小麦品种植株的冬前叶龄数和分蘖发生数量均持续减少,即使增加基本苗数,冬前群体茎蘖数量仍显著不足。高德荣等^[29]研究得出,适合晚播条件下种植的小麦品种应具有出苗快、生根快、分蘖发生早、生长量大的特征。本研究表明,扬麦 25 和扬麦 30 在晚播条件下表现出冬前叶龄进程快,冬春季分蘖发生快、数量多的特征。

晚播小麦器官发育进程的改变会影响温光资源利用效率。晚播小麦生育期缩短、营养生长阶段积温和太阳辐射总量减少,造成幼苗生长缓慢、苗体质量下降^[30]。此外,晚播小麦开花期推迟,易受到花后高温胁迫,表现出灌浆持续时间缩

短^[31]。本试验条件下,晚播导致各品种全生育期时间缩短、积温和太阳辐射减少。其中,出苗至分蘖阶段的积温、日均温和太阳辐射减少明显,开花至成熟阶段的积温和太阳辐射亦呈下降趋势,但日均温升高。前人研究认为,拔节至孕穗阶段气温升高不利于穗数形成,延长该阶段生育时长可以提高温光积累,增加最终穗数^[32]。王沅等^[33]研究提出,弱光会导致分化阶段小花的光合物质供应不足,阻碍小花分化,减少每穗结实粒数。Dreccer等^[34]研究表明,孕穗至开花阶段积温的提升会增加小麦孕穗期生物量积累和糖分含量,从而促进可孕小花分化。然而,孕穗至开花阶段日均温的升高会缩短该阶段持续时间,影响小花分化质量,使得穗粒数下降^[35]。开花时间在一定程度上影响小花分化的数量和质量,因此控制植物开花的春化基因对植株生长发育有重要作用^[36]。春化基因VRN作为影响小麦开花时间的关键基因,其表达量的多少在很大程度上影响开花时间^[37]。光周期基因*Photoperiod*可以降低小麦对光周期变化的敏感性,缩短开花时间^[38]。VRN基因和*Photoperiod*基因表达的改变可能是造成不同小麦品种开花期差异的遗传生理原因。本研究中晚播密植条件下扬麦25和扬麦30在出苗至拔节阶段发育时间较短,积温和太阳辐射较少,但拔节期至开花阶段发育较长,积温和太阳辐射较多。此外,扬麦30还表现出孕穗期提前,孕穗至开花阶段发育时间较其他品种明显延长,但日均温较低。在过晚播条件下,扬麦30籽粒产量较扬麦28高17.8%,这可能与孕穗质开花阶段积温增加12.3%、累计太阳辐射提升4.3%直接相关,而温光资源的高效积累又源于其孕穗期提前2 d、孕穗质开花阶段延长3 d。这表明,扬麦30在晚播条件下具有物候合理调整、光温高效利用、群体适应改变的协同丰产特征。总体而言,扬麦25和扬麦30通过压缩分蘖发生所需的温光资源,转而提高分蘖成穗阶段温光累积,为分蘖成穗和小花分化争取到了更长的发育时间和更多的温光资源,协同提升总结实粒数,实现耐晚播丰产。本研究采用了生产中晚播适应性较突出的两个品种,其他耐晚播品种的特征特性仍待明确。此外,晚播条件下往往进行增密种植,对于上述两个耐晚播品种的耐密性有待探讨。

4 结论

晚播生产条件下扬麦25和扬麦30籽粒产量

显著高于扬麦28和扬麦39,且较适期播种减产更少,表现出耐晚播特点。扬麦30在过晚播条件下耐晚播性更优。晚播导致总结实粒数显著下降,耐晚播品种表现出显著较多的总结粒数,其中扬麦25得益于更多的穗数,扬麦30则依赖于较多的穗数和穗粒数。扬麦25春季分蘖发生多,扬麦30则分蘖成穗率高,但两者出苗至拔节期均较短,而拔节期至开花阶段较长,尤其是扬麦30通过提前孕穗期更明显地延长孕穗至开花阶段。扬麦30孕穗开花期较低的日均温,为小花分化争取到了更长的发育时间和更多的温光资源,可能是形成更多穗粒数的关键机制。总之,耐晚播品种扬麦25和扬麦30表现出分蘖发生期生育进程快、温光利用高效,分蘖成穗期生育进程慢、温光积累足的共性特征。

参考文献:

- [1] GONG K Y, RONG L B, ZHANG Y H, *et al.* Efficient agronomic practices narrow yield gaps and alleviate climate change impacts on winter wheat production in China [J]. *Communications Earth & Environment*, 2025, 6: 290.
- [2] 李壮, 黄彦川, 张传量, 等. 长江中下游小麦新品系条锈病抗性评估与抗病基因分析[J]. 麦类作物学报, 2024, 44(7): 835.
LI Z, HUANG Y C, ZHANG C L, *et al.* Evaluation of stripe rust resistance and analysis of disease resistance genes of the new wheat lines in the middle and lower reaches of the Yangtze River [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2024, 44(7): 835.
- [3] 张洪程, 张军, 龚金龙, 等. “籼改粳”的生产优势及其形成机理[J]. 中国农业科学, 2013, 46(4): 686.
ZHANG H C, ZHANG J, GONG J L, *et al.* The productive advantages and formation mechanisms of “indica rice to Japonica rice” [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46(4): 686.
- [4] 廖萍, 翁文安, 高辉, 等. 我国直播稻栽培技术应用现状与发展建议[J]. 中国农业科学, 2024, 57(24): 4854.
LIAO P, WENG W A, GAO H, *et al.* Application status and development suggestion of direct-seeding rice cultivation in China [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2024, 57(24): 4854.
- [5] PIAO S L, CIAIS P, HUANG Y, *et al.* The impacts of climate change on water resources and agriculture in China [J]. *Nature*, 2010, 467(7311): 43.
- [6] 王慧, 刘大同, 徐莎莎, 等. 耐迟播小麦品种扬麦25的苗期群体生长及产量形成特性[J]. 麦类作物学报, 2025, 45(9): 1235.
WANG H, LIU D T, XU S S, *et al.* Seedling growth and yield formation characteristics of Yangmai 25 under late sowing [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2025, 45(9): 1235.
- [7] AHMED M, FAYYAZ-UL-HASSAN. Response of spring wheat (*Triticum aestivum* L.) quality traits and yield to so-

- wing date [J]. *PLoS One*, 2015, 10(4): e0126097.
- [8] YIN L J, LIAO Y X, MOU X. Delayed sowing can improve potassium utilization efficiency and grain potassium concentration in winter wheat [J]. *Agriculture*, 2024, 14(5): 678.
- [9] 吕丽华, 吴立勇, 李 谦, 等. 播期对小麦产量形成及株型结构的影响[J]. 华北农学报, 2024, 39(S1): 53.
- LÜ L H, WU L Y, LI Q, *et al.* Effect of sowing date on yield formation and plant type structure of wheat [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2024, 39(S1): 53.
- [10] YIN L J, XU H C, DONG S X, *et al.* Optimised nitrogen allocation favours improvement in canopy photosynthetic nitrogen-use efficiency: Evidence from late-sown winter wheat [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2019, 159: 75.
- [11] 张 月, 贺 威, 崔国际, 等. 夜间增温对灌浆期高温胁迫下小麦干物质及灌浆特性的影响[J]. 麦类作物学报, 2024, 44(5): 626.
- ZHANG Y, HE W, CUI G J, *et al.* Effects of night warming on dry matter and grouting characteristics of wheat under high temperature stress at grain filling stage [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2024, 44(5): 626.
- [12] MA S C, WANG T C, GUAN X K, *et al.* Effect of sowing time and seeding rate on yield components and water use efficiency of winter wheat by regulating the growth redundancy and physiological traits of root and shoot [J]. *Field Crops Research*, 2018, 221: 166.
- [13] 刘安康, 马瑞琦, 王德梅, 等. 覆膜和补施氮肥对晚播冬小麦冬前植株生长及群体质量的影响[J]. 作物学报, 2022, 48(7): 1771.
- LIU A K, MA R Q, WANG D M, *et al.* Effects of filming and supplemental nitrogen fertilizer application on plant growth and population quality of late sowing winter wheat before winter [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2022, 48(7): 1771.
- [14] 易 媛, 马红勃, 王 静, 等. 播期和播量对不同穗型小麦品种群体性状和产量的影响[J]. 河南农业科学, 2022, 51(7): 13.
- YI Y, MA H B, WANG J, *et al.* Effects of sowing date and seeding rate on population characteristics and yield of wheat with different spike types [J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2022, 51(7): 13.
- [15] YIN L J, ZHANG C X, LIU K Z, *et al.* Low-tillering winter wheat cultivars are more adaptable to late sowing [J]. *The Journal of Agricultural Science*, 2020, 158(10): 870.
- [16] ZHANG Z Z, CHENG S, FAN P, *et al.* Effects of sowing date and ecological points on yield and the temperature and radiation resources of semi-winter wheat [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2023, 22(5): 1366.
- [17] 童成立, 张文菊, 汤 阳, 等. 逐日太阳辐射的模拟计算[J]. 中国农业气象, 2005, 26(3): 165.
- TONG C L, ZHANG W J, TANG Y, *et al.* Estimation of daily solar radiation in China [J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2005, 26(3): 165.
- [18] LIU K Z, ZHANG C X, GUAN B B, *et al.* The effect of different sowing dates on dry matter and nitrogen dynamics for winter wheat: An experimental simulation study [J]. *PeerJ*, 2021, 9: e11700.
- [19] DING Y G, ZHANG X B, MA Q, *et al.* Tiller fertility is critical for improving grain yield, photosynthesis, and nitrogen efficiency in wheat [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2023, 22(7): 2054.
- [20] ZHANG Z Z, ZHOU N B, XING Z P, *et al.* Effects of temperature and radiation on yield of spring wheat at different latitudes [J]. *Agriculture*, 2022, 12(5): 627.
- [21] YU H W, GAO Z, ZHAO J S, *et al.* The effects of phased warming during late winter and early spring on grain yield and quality of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. *Agronomy*, 2023, 13(7): 1909.
- [22] 朱元刚, 肖岩岩, 初金鹏, 等. 不同播期冬小麦小花发育特性与同化物代谢的相关性[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(3): 370.
- ZHU Y G, XIAO Y Y, CHU J P, *et al.* Correlation between floret development characteristics and photosynthate metabolism of winter wheat in different sowing dates [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, 25(3): 370.
- [23] 刘 威, 杨传敏, 刘馨怡, 等. 基于 Meta 分析研究主要栽培措施对强筋小麦量质协同的调控[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2025, 33(7): 1322.
- LIU W, YANG C M, LIU X Y, *et al.* Effects of main cultivation practices on simultaneous improvement in grain yield and protein content of strong-gluten wheat: A Meta analysis [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2025, 33(7): 1322.
- [24] CHU J P, GUO X H, ZHENG F N, *et al.* Effect of delayed sowing on grain number, grain weight, and protein concentration of wheat grains at specific positions within spikes [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2023, 22(8): 2359.
- [25] 邵庆勤, 闫素辉, 张从宇, 等. 密度对沿淮晚播小麦产量形成及品质性状的影响[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(9): 1366.
- SHAO Q Q, YAN S H, ZHANG C Y, *et al.* Effect of planting density on yield and quality of later-sown winter wheat along Huaihe River [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2018, 26(9): 1366.
- [26] 黎文龙, 黄欣怡, 高健祁, 等. 迟播对小麦生长发育的影响及耐迟播小麦研究进展[J]. 麦类作物学报, 2025, 45(8): 1136.
- LI W L, HUANG X Y, GAO J Q, *et al.* Effect of late sowing on the growth and development of wheat and research progress of late sowing resistant wheat [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2025, 45(8): 1136.
- [27] 张明伟, 王梦尧, 马 泉, 等. 稻茬过晚播小麦不同品种适应性的比较[J]. 扬州大学学报(农业与生命科学版), 2020, 41(3): 73.
- ZHANG M W, WANG M Y, MA Q, *et al.* Adaptation comparison of different wheat varieties in super-late sowing

- wheat following rice [J]. *Journal of Yangzhou University (Agricultural and Life Science Edition)*, 2020, 41(3): 73.
- [28] 陈素英, 张喜英, 毛任钊, 等. 播期和播量对冬小麦冠层光合有效辐射和产量的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2009, 17(4): 681.
- CHEN S Y, ZHANG X Y, MAO R Z, *et al.* Effect of sowing date and rate on canopy intercepted photo-synthetically active radiation and yield of winter wheat [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2009, 17(4): 681.
- [29] 高德荣, 张晓, 康建鹏, 等. 长江中下游麦区小麦迟播的不利影响及育种对策[J]. *麦类作物学报*, 2014, 34(2): 279.
- GAO D R, ZHANG X, KANG J P, *et al.* Negative effects of late sowing on wheat production in middle and lower reaches of Yangtze River valley and breeding strategies [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2014, 34(2): 279.
- [30] HUANG T T, YANG M Y, ZHANG M X, *et al.* Crop management measures to mitigate negative impacts of late sowing on winter wheat production in China: A meta-analysis [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2025, 105(10): 5280.
- [31] LI Q, YE Y C, WANG D M, *et al.* Post-flowering high temperature and drought stress impair wheat yield *via* physiological and molecular disruption of source-sink dynamics and starch metabolism [J]. *Plant, Cell & Environment*, 2025, 48(10): 7408.
- [32] 祝新建, 陈怀亮, 臧新洲, 等. 气温变化和分期播种对获嘉县小麦生长发育及产量的影响[J]. *中国农学通报*, 2013, 29(6): 148.
- ZHU X J, CHEN H L, ZANG X Z, *et al.* Analysis of the impact of temperature changes and different sowing dates on the growth and yield of wheat in Huojia [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2013, 29(6): 148.
- [33] 王沅, 田正国, 邱泽生, 等. 小麦小花发育不同时期遮光对穗粒数的影响[J]. *作物学报*, 1981, 7(3): 157.
- WANG Y, TIAN Z G, QIU Z S, *et al.* The effect of shading on the number of grains per spike at different stages of floret development in wheat [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 1981, 7(3): 157.
- [34] DRECCER M F, WOICKNER K B, PALTA J A, *et al.* More fertile florets and grains per spike can be achieved at higher temperature in wheat lines with high spike biomass and sugar content at booting [J]. *Functional Plant Biology*, 2014, 41(5): 482.
- [35] SAINI H S, SEDGLEY M, ASPINALL D. Development anatomy in wheat of male sterility induced by heat stress, water deficit or abscisic acid [J]. *Functional Plant Biology*, 1984, 11(4): 243.
- [36] PRESTON J C, KELLOGG E A. Reconstructing the evolutionary history of paralogous *APETALA1/FRUITFULL*-like genes in grasses (poaceae) [J]. *Genetics*, 2006, 174(1): 421.
- [37] CHEN A, DUBCOVSKY J. Wheat TILLING mutants show that the vernalization gene *VRN1* down-regulates the flowering repressor *VRN2* in leaves but is not essential for flowering [J]. *PLoS Genetics*, 2012, 8(12): e1003134.
- [38] BODEN S A, CAVANAGH C, CULLIS B R, *et al.* *Ppd-1* is a key regulator of inflorescence architecture and paired spikelet development in wheat [J]. *Nature Plants*, 2015, 1: 14016.