

播期和种植密度对早熟冬小麦产量与温光利用效率的影响

梁振宇¹, 祝婷婷¹, 贺大海¹, 陈佳博¹, 郭翔³, 马宏亮¹,

黄秀兰¹, 杨洪坤^{1,2}, 杨世民^{1,2}, 樊高琼^{1,2}

(1. 农业农村部西南作物生理生态与耕作重点实验室, 四川成都 611130;

2. 西南作物基因资源发掘与利用国家重点实验室, 四川成都 611130; 3. 四川省农业气象中心, 四川成都 611130)

摘要:为探究西南麦区稻麦周年丰产下早熟小麦品种晚播早收的丰产特性及温光利用效率, 2022—2023年以早熟小麦品种蜀麦1963为材料, 采用二因素裂区试验, 主区设置早播(S_1 , 10月23日)、常规播期(S_2 , 10月30日)、晚播7 d(S_3 , 11月6日)、晚播14 d(S_4 , 11月13日)和晚播21 d(S_5 , 11月20日)5个播期, 裂区设 2.50×10^6 、 3.25×10^6 、 4.00×10^6 株· hm^{-2} 共3个种植密度, 研究了播期和种植密度对冬小麦产量及构成因素、干物质积累与转运、灌浆特性及温光利用效率的影响。结果表明, S_2 、 S_3 和 S_4 间小麦产量无显著差异, S_1 和 S_5 较 S_2 分别减产7.6%和32.2%;不同种植密度间产量无显著差异。晚播可缩短冬小麦全生育期天数,降低拔节前有效积温和日均温,与 S_2 相比, S_3 、 S_4 和 S_5 的小麦生育期积温分别减少了65.4、84.1和93.8℃,日均温分别降低了1.3、2.4和3.7℃,拔节期—孕穗期和孕穗期—开花期日均温均增加。晚播也减少了有效穗数,提高了穗粒数。晚播小麦花后温光资源充足,表现为花后日均温、日均辐射量增加,花后干物质积累量增加,灌浆速率加快,灌浆持续时间缩短,粒重稳定。增加密度提高了花前干物质对籽粒产量的贡献率,减少了灌浆持续时间和灌浆活跃时间,对灌浆速率影响较小。适时晚播可提高温度利用效率, S_3 和 S_4 的温度利用效率较 S_2 分别提高了2.24%和8.02%。综上所述,晚播冬小麦可通过提高穗粒数获得稳产,且花后干物质积累量及转运速度提高。

关键词: 播期; 种植密度; 灌浆特性; 温、光利用效率

中图分类号: S512.1; S311

文献标识码: A

文章编号: 1009-1041(2025)05-0619-11

Effect of Sowing Date and Planting Density on Yield and Temperature and Light Use Efficiency in Early Maturing Winter Wheat

LIANG Zhenyu¹, ZHU Tingting¹, HE Dahai¹, CHEN Jiabo¹, GUO Xiang³, MA Hongliang¹,

HUANG Xiulan¹, YANG Hongkun^{1,2}, YANG Shimin^{1,2}, FAN Gaoqiong^{1,2}

(1. Southwest Key Laboratory of Crop Physiology, Ecology and Cultivation, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Chengdu, Sichuan 611130, China; 2. State Key Laboratory for Exploitation and Utilization of Crop Genetic Resources in Southwest China, Chengdu, Sichuan 611130, China; 3. Sichuan Agrometeorological Center, Chengdu, Sichuan 611130, China)

Abstract: To investigate the yield characteristics and temperature and light use efficiency of early-maturing wheat varieties under late sowing after rice stubble and early harvest in the southwestern, a two-factor split-plot experiment was designed, with sowing date as the main plot namely, early sowing(S_1 , 23 October), regular sowing(S_2 , 30 October), late sowing for 7 d(S_3 , 6 November), late sowing for 14 d(S_4 , 13 November), and late sowing for 21 d(S_5 , 20 November), and planting density as the split-plot(2.50×10^6 , 3.25×10^6 , 4.00×10^6 plants· hm^{-2}), to study the effects of sowing date and planting density on yield and its components, dry matter accumulation and translocation, fill-

收稿日期: 2024-03-04 修回日期: 2024-06-11

基金项目: 四川省十四五重点研发项目(2021YFYZ0002); 四川省十四五重大科技专项(2022ZDZX0014)

第一作者 E-mail: 1764019646@qq.com(梁振宇)

通讯作者 E-mail: fangao20056@126.com(樊高琼)

ing characteristics and temperature, light use efficiency of winter wheat. The results showed that there was no significant difference in wheat yield among S_2 , S_3 and S_4 , while S_1 and S_5 reduced yields by 7.6% and 32.2%, respectively, compared to S_2 . There is no significant difference in yield between different planting densities. Late sowing can shorten the entire growth period of winter wheat, and reduce the effective accumulated temperature and daily average temperature before jointing. Compared with S_2 , S_3 , S_4 and S_5 reduced the accumulated temperature during wheat growth by 65.4, 84.1 and 93.8 °C, and the daily average temperature by 1.3, 2.4 and 3.7 °C, respectively. Late sowing increased the daily average temperature during jointing to booting and booting to flowering stages, reduced the effective number of spikes, and increased the number of grains per spike. Late sowing wheat has abundant temperature and light resources after flowering, manifested by an increase in daily average temperature and radiation after flowering, an increase in dry matter accumulation after flowering, an acceleration in grain filling rate, a shortened duration of grain filling, and stable grain weight. Increasing planting density increased the contribution rate of pre-flowering dry matter, reduced the duration and activity time of grain filling, and had a relatively small impact on the grain filling rate. Moderate late sowing can improve temperature use efficiency, with an increase rate of 2.24% and 8.02% for S_3 and S_4 , respectively, compared to S_2 . In summary, late sowing winter wheat can achieve stable yield by increasing the number of grains per ear, and the accumulation amount and transport efficiency of dry matter after flowering can be improved.

Keywords: Sowing date; Planting density; Grain Filling characteristics; Temperature and radiation utilization efficiency

小麦 (*Triticum aestivum* L.) 是世界上种植最广泛的谷类作物之一, 对全球谷物产量和贸易具有重大贡献。中国是世界上最大的小麦生产国和消费国, 小麦产量直接关系到中国的粮食安全和社会稳定。在过去几十年内, 全球气候变暖^[1], 极端气候事件多发^[2], 这种不可逆转的气候波动, 改变了各地作物的物候期^[3-8]。小麦苗期有效积温增加有利于冬前形成壮苗, 但导致前期养分过度消耗, 加快幼穗分化进程, 易因气温骤降或倒春寒引起低温冻害^[9-10]。稻-麦轮作是西南地区主要的粮食生产模式, 但随着机插秧、机直播的普及, 水稻的生育期延长, 收获期延迟, 排湿晒田时间短, 与小麦茬口衔接紧张; 加之近年来 10 月中、下旬阴雨天气增多, 土壤湿烂, 整地困难, 导致小麦难以在正常播期播种。早熟小麦品种适当晚播, 可以缓解湿害影响, 且因生育期较短不会影响水稻早机插或早直播, 因此西南稻-麦轮作区对早熟小麦品种及其丰产栽培技术需求迫切。

气候条件显著影响小麦的生长发育^[11]。温度与小麦的生育进程及各生育阶段持续天数密切相关^[12], 光照主要影响干物质生产效率^[13], 降水决定了生长和蒸腾的水分可利用性^[14]。通过调整作物播期可有效匹配光温资源, 不仅可提升作

物产量, 还可应对气候变化的负面影响^[15-17]。研究发现, 通过苗期覆膜^[18]、增施氮肥^[19-20]、增加播种量^[21-23]、补灌^[24]等栽培措施可以补偿晚播带来的小麦产量损失, 其中增加播种量是降低产量损失的常用有效方法。适宜的播种量可以构建合理的小麦群体结构, 提高光能利用率, 协调穗数、穗粒数和千粒重, 进而提升产量^[25-26]。

种植早熟小麦品种是实现小麦-水稻周年丰产的主要措施, 而不同区域不同品种晚播时适宜的种植密度不尽相同。在西南麦区, 有关小麦晚播后产量变化特征、灌浆特性和温光资源配置尚不明确。基于此, 本试验在四川以小麦-水稻轮作周年高产为目标, 以早熟小麦品种蜀麦 1963 为材料, 探究不同播期和密度下的产量及其构成、籽粒灌浆特性和温光利用特征, 以期为西南麦区小麦-水稻轮作模式下周年高产高效提供小麦优产方案。

1 材料与方法

1.1 供试材料与试验地概况

以早熟小麦品种蜀麦 1963 为材料, 由四川农业大学小麦所提供。于 2022 年 10 月—2023 年 5 月在四川省成都市大邑县现代农业粮食产业园区 (30°58' N, 103°53' E) 进行大田试验。该区为亚热

带季风性湿润气候区,土壤类型为壤土,播前0~20 cm 土层土壤含有有机质 33.63 g·kg⁻¹、有机碳 19.51 g·kg⁻¹、全氮 1.71 g·kg⁻¹、全磷 0.16 g·kg⁻¹、全钾 15.04 g·kg⁻¹、速效磷 8.09 mg·kg⁻¹、速效钾 294.05 mg·kg⁻¹、碱解氮 248.19 mg·kg⁻¹,pH 值 6.69。试验地前茬作物为水稻。试验期间气象资料见图 1。

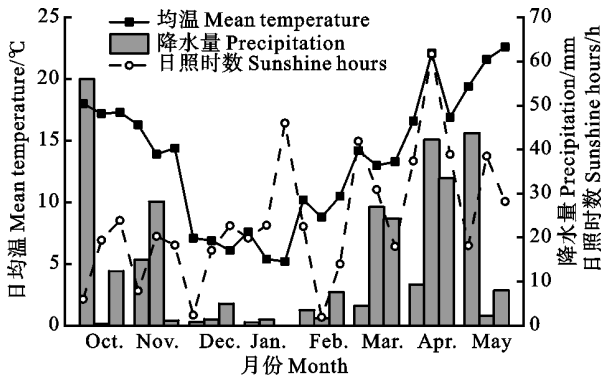


图 1 小麦生长季内温度、降水、日照时数的旬分布
Fig. 1 Distribution of temperature, precipitation and sunshine hours per 10 days during wheat growing season

1.2 试验设计

采用二因素裂区设计:主区为播期,设置 2022 年 10 月 23 日(早播)、10 月 30 日(常规播期)、11 月 6 日(晚播 7 d)、11 月 13 日(晚播 14 d)和 11 月 20 日(晚播 21 d)5 个水平,依次记作 S₁、S₂、S₃、S₄、S₅;裂区为种植密度,设置 2.50×10⁶、3.25×10⁶、4.00×10⁶ 株·hm⁻² 共 3 个水平,依次记作 D₁、D₂、D₃。小区面积 12 m² (3 m×4 m),各小区均施 N 180 kg·hm⁻²、P₂O₅ 60 kg·hm⁻² 和 K₂O 60 kg·hm⁻²,其中磷、钾肥均基施,氮肥基肥、苗肥、拔节肥比例为 6:3:3。小麦采用穴播种植,行距 20 cm,穴距 10 cm,于三叶期定苗。重复 3 次。病虫害防治等其他管理措施同当地大田生产。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 生育期记录

观测并记录小麦分蘖、拔节、开花和成熟等主要生育时期对应的日期。

1.3.2 气象数据收集及温、光利用效率计算

气象数据来源于成都市气象站,主要包括冬小麦生育期内日均温、降水量、日照时数和日均辐射量。按所收集数据计算不同生长阶段的累计辐射量(CRS)、有效积温(EAT)、光能利用效率(RUE)和温度利用效率(TUE)^[27],计算公式如下:

$$\text{CRS} = \sum R_i;$$

$$\text{EAT} = \sum T_i;$$

$$\text{RUE} = \text{籽粒产量} / \text{生长季内 CRS};$$

$$\text{TUE} = \text{籽粒产量} / \text{生长季内 EAT}.$$

式中, i 为天数, R_i 为日均辐射量(R_{mean}), T_i 为日均温(T_{mean}),下限取值为 0 °C。

1.3.3 干物质积累与转运相关指标测定和计算

于小麦开花期和成熟期,在每个小区中随机选取 5 穴(0.1 m²)小麦植株,将地上部分分为茎鞘、叶、穗和籽粒(成熟期),于 105 °C 杀青 30 min,75 °C 烘干至恒重,计算各器官和植株干重,并计算花前干物质转运量、转运效率及其对籽粒产量贡献率和花后干物质积累量及其对籽粒产量贡献率^[28]。

花前干物质转运量=开花期植株干重-成熟期营养器官干重;

花前干物质转运效率=花前干物质转运量/开花期植株干重×100%;

花前干物质对籽粒产量贡献率=花前干物质转运量/成熟期籽粒干重×100%;

花后干物质积累量=成熟期植株干重-开花期植株干重;

花后干物质对籽粒产量贡献率=花后干物质积累量/成熟期籽粒干重×100%。

1.3.4 籽粒灌浆过程拟合

于开花期,在每个小区选择同一天开花、穗大小基本一致的 150 个单茎挂牌标记;从花后第 7 天开始,每 7 d 取样一次,每次取 15 个单穗,直至成熟期;将样穗 105 °C 杀青 30 min,65 °C 烘干后脱粒,调查穗粒数、千粒重。

以开花后天数(t)为自变量,千粒重(Y)为因变量,采用 Logistic 方程对籽粒灌浆过程进行拟合,绘制灌浆曲线并计算灌浆特征参数^[29]:

$$Y = K / (1 + A e^{-Bt});$$

对 Logistic 方程一阶求导得到灌浆速率方程:

$$R = KAB e^{-Bt} / (1 + A e^{-Bt})^2$$

式中, K 为理论最大千粒重, A 、 B 为拟合方程参数。

1.4 数据处理

采用 SPSS 19.0 和 Excel 2010 进行数据统计和分析,用 Origin 2023 作图。

2 结果与分析

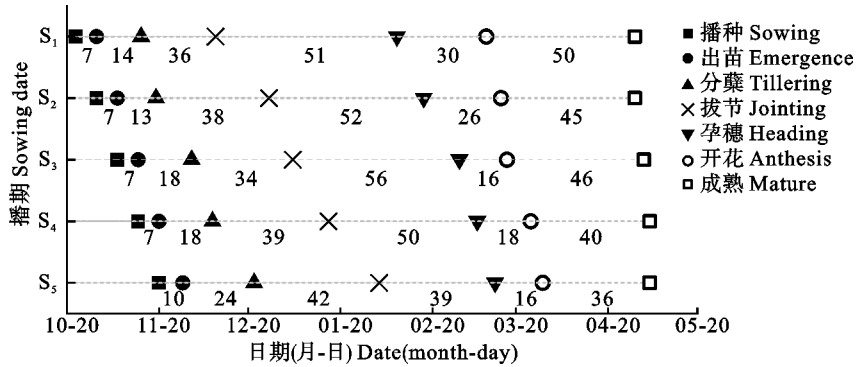
2.1 播期和种植密度对冬小麦生育进程的影响

由图 2 可知,晚播缩短了小麦的全生育期天

数, $S_1 \sim S_5$ 的全生育期天数分别为 188、181、177、172 和 165 d; 晚播后播种—拔节期天数延长, 拔节期—孕穗期、孕穗期—开花期、开花期—成熟期天数均缩短。以孕穗期为界, 晚播导致播种—孕穗期占全生育期的比例增加, $S_1 \sim S_5$ 的此阶段比例依次为 0.57、0.61、0.65、0.66 和 0.68。不同种植密度间冬小麦生育进程没有差异。

2.2 播期和种植密度对冬小麦产量及其构成的影响
由图 3 可知, 播期对小麦产量及其构成均有

极显著影响 ($P < 0.01$), 种植密度极显著影响有效穗数、穗粒数和千粒重, 密度、播期与密度互作对产量影响均不显著, 播期与密度互作对千粒重有显著效应 ($P < 0.05$)。 S_2 、 S_3 、 S_4 间籽粒产量无显著差异, S_5 的有效穗数、穗粒数较 S_2 和籽粒产量均显著下降。随播种日期的延迟, 小麦有效穗数显著降低, 穗粒数呈先升后降趋势, 以 S_4 最高, 表明晚播可通过增加穗粒数提高小麦产量。随种植密度的增加, 有效穗数显著升高 (除 S_1 处理), D_1

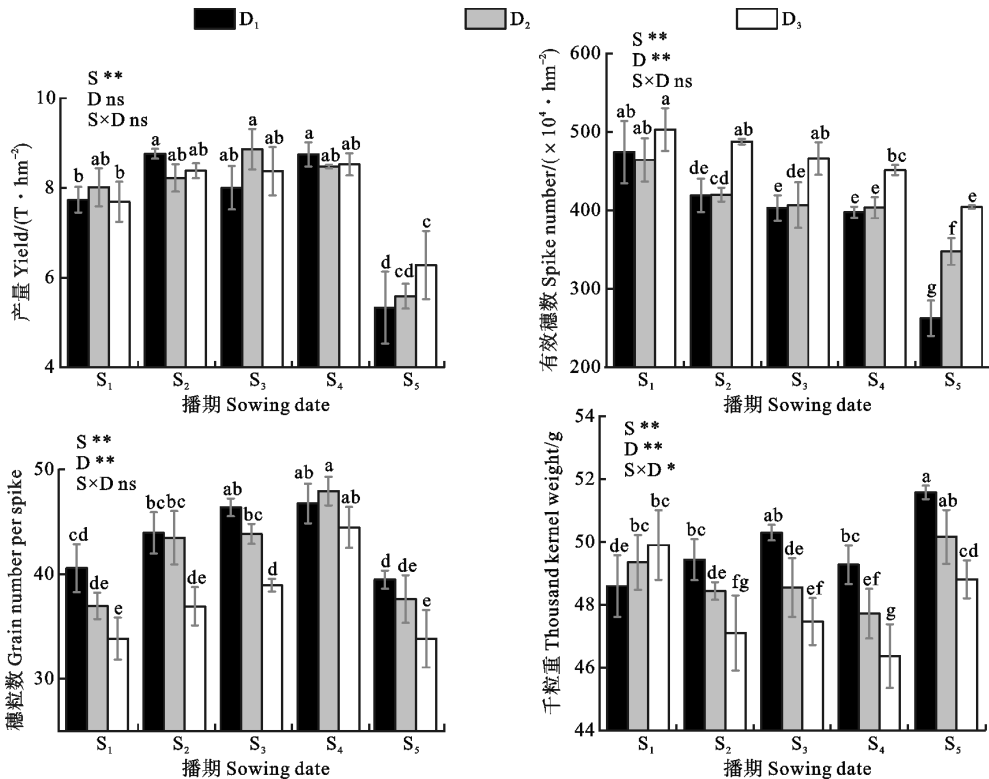


两点之间的数字代表该生育阶段天数。

Number between the two points represents the number of days at this growth stage.

图 2 不同播期对冬小麦生育时期的影响

Fig. 2 Effect of sowing date on growth period of winter wheat



图柱上不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。* : $P < 0.05$; ** : $P < 0.01$ 。图 5 同。

Different lowercase letters above the columns indicate significant differences among different treatments ($P < 0.05$). * : $P < 0.05$; ** : $P < 0.01$. The same in figure 5.

图 3 不同播期和种植密度下冬小麦产量及其构成

Fig. 3 Winter wheat yield and yield components under different sowing dates and planting densities

与 D₂ 间差异均不显著(S₅ 处理除外),D₃ 不同程度高于 D₁ 和 D₂;穗粒数和千粒重多呈显著下降趋势,表明晚播可以通过提高种植密度减少产量损失。

2.3 播期和种植密度对冬小麦干物质积累与转运的影响

从表 1 可见,播期显著影响小麦花前干物质转运量及其对籽粒产量贡献率、花后干物质积累量及其对籽粒产量贡献率;密度显著影响花前干物质转运量及其对籽粒产量贡献率和花后

干物质对籽粒产量贡献率。晚播小麦花前干物质转运量较常规播种显著降低,S₁~S₅ 间每推迟一个播期,花前干物质转运量平均减少 6.9%;S₁~S₄ 间每推迟一个播期,花后干物质积累量平均增加 8.4%,花后干物质的贡献率增加 3.3 个百分点。S₅ 的花前干物质转运量和花后干物质积累量显著低于其他播期。增加种植密度提高了花前干物质转运量及其贡献率,降低了花后干物质的贡献率。

表 1 不同播期和种植密度对冬小麦干物质积累与转运的影响

Table 1 Effects of different sowing dates and planting densities on dry matter accumulation and transportation of winter wheat

处理 Treatment	花前干物质转运量 DBFTA/ (kg·hm ⁻²)	花前干物质转运效率 DBFTP/%	花前干物质对 籽粒产量贡献率 CRDBFG/%	花后干物质 积累量 DAPA/(kg·hm ⁻²)	花后干物质对 籽粒产量贡献率 CRDPA/%	
S ₁	D ₁	2 741.39abc	22.08a	33.75abc	4 996.56bcd	66.25abc
	D ₂	3 020.78abc	24.42a	38.26abc	4 993.29bcd	61.74abc
	D ₃	3 525.72abc	26.92a	46.32a	4 164.00de	53.68d
平均值 Average	3 095.96A	24.47A	39.45A	4 717.95C	60.55C	
S ₂	D ₁	2 883.64abc	23.64a	32.87bc	5 878.87abc	67.13ab
	D ₂	2 700.36bcd	22.72a	30.36c	5 524.04abc	69.64a
	D ₃	3 533.50a	26.49a	40.66abc	4 849.40cd	59.34abc
平均值 Average	3 039.17AB	24.28A	34.63AB	5 417.44B	65.37BC	
S ₃	D ₁	2 761.88abc	24.92a	32.63bc	5 242.80abc	67.37ab
	D ₂	2 723.78abc	23.45a	31.05bc	6 139.39ab	68.95ab
	D ₃	2 825.50abc	25.31a	34.48abc	5 546.15abc	65.52abc
平均值 Average	2 770.39AB	24.56A	32.72BC	5 642.78AB	67.28AB	
S ₄	D ₁	2 443.33cd	23.49a	28.26c	6 304.07a	71.74a
	D ₂	2 380.44cd	23.32a	28.49c	6 096.61ab	71.51a
	D ₃	2 940.33abc	25.66a	31.98bc	5 586.28abc	68.02ab
平均值 Average	2 588.04BC	24.16A	29.57C	5 995.65A	70.43A	
S ₅	D ₁	1 935.94d	24.88a	32.07bc	3 393.83e	67.93abc
	D ₂	2 194.28cd	26.23a	34.70abc	3 393.24e	65.30abc
	D ₃	2 833.89abc	30.84a	43.32ab	3 445.63e	56.68bc
平均值 Average	2 321.37C	27.32A	36.70AB	3 410.90D	63.30BC	
F 值 F value	S	5.48*	1.34	7.49**	80.05**	7.49**
	D	18.97**	4.38	15.82**	3.57	15.82**
	S×D	0.87	0.29	0.64	1.23	0.64

同列数据后不同字母表示处理间差异显著(P<0.05),其中大写字母为播期平均数间比较。*:P<0.05; **:P<0.01。下同。

DBFTA: Dry matter before flowering translocation amount; DBFTP: Dry matter before flowering translocation proportion; CRD-BFG: Contribution rate of dry matter before flowering translocation to grain; DAPA: Dry matter accumulation of post-anthesis; CRD-PA: Contribution rate of dry matter of post-anthesis to grain. Different letters following data in the same column mean significant different between treatments(P<0.05). Capital letters are comparisons among the averages of different sowing date. *:P<0.05; **:P<0.01. The same in table 2.

2.4 播期和种植密度对冬小麦灌浆曲线和灌浆特征参数的影响

对不同播期下冬小麦开花后天数与千粒重进

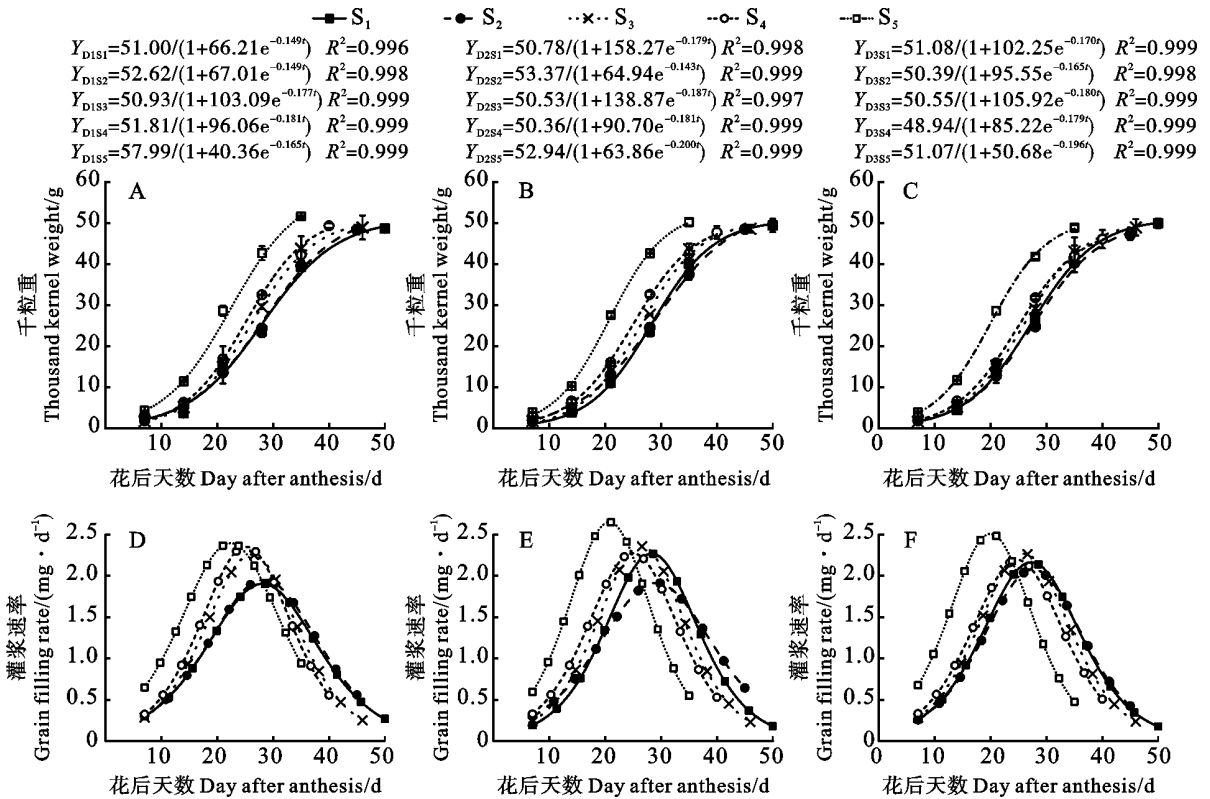
行 Logistic 生长曲线模拟,拟合方程决定系数均大于 0.99;对 Logistic 曲线进行一阶求导,得出其一阶导数曲线即灌浆速率曲线,结果发现,小麦粒

重呈现“S”型增加趋势,灌浆速率呈先增后降趋势(图 4)。在不同种植密度下,晚播均增加了前期和中期籽粒灌浆速率,缩短了灌浆期持续时间,加速了粒重的增加。进一步分析灌浆参数(表 2),发现晚播缩短了籽粒渐增期(R_1)、快增期(R_2)和缓增期(R_3)的持续时间,提高了各阶段的灌浆速率。 $S_1 \sim S_5$ 间每推迟一个播期,上述 3 个阶段持续时间依次减少 10.90%、6.96%、6.97%,灌浆速率分别增加 11.31%、7.57%、7.96%;平均灌浆速率(R_{ave})增加 0.07 $\text{mg} \cdot \text{d}^{-1}$,灌浆持续时间减少 2.75 d。晚播显著缩短了灌浆最大速率出现时间,提高了最大灌浆速率(R_{max})。增加种植密度减少了灌浆持续时间和灌浆活跃期天数,种植密度对渐增期持续时间和灌浆速率有显著影响,对快增期和缓增期影响不显著。

2.5 播期和种植密度对冬小麦不同生育阶段温光资源分配的影响

随播期的推迟,小麦全生育期有效积温和累

积辐射量呈下降趋势,播期每推迟 7 d,有效积温减少 83.75 $^{\circ}\text{C}$,日均温降低 0.09 $^{\circ}\text{C}$,累计辐射量减少 18.48 $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$,日均辐射量增加 0.18 $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ 。在播种—拔节期,与 S_2 相比, S_3 、 S_4 和 S_5 的有效积温依次减少 65.4、84.1 和 93.8 $^{\circ}\text{C}$,日均温分别减少 1.3、2.4 和 3.7 $^{\circ}\text{C}$;累积辐射量在 $S_1 \sim S_4$ 间变幅较小,而 S_5 的累积辐射量相较于 S_2 增加 113.96 $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ 。晚播小麦拔节—孕穗、孕穗—开花的日均温、花后日均温和日均辐射量均增加,在 S_2 基础上,播期每推迟 7 d,拔节—孕穗日均温增加 2.02 $^{\circ}\text{C}$,孕穗—开花日均温增加 1.42 $^{\circ}\text{C}$,花后日均温增加 1.2 $^{\circ}\text{C}$,日均辐射量增加 1.85 $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ 。由图 5 可知,晚播可提高小麦温、光利用效率(S_5 除外), S_3 和 S_4 的温度利用效率较 S_2 分别增加 2.24% 和 8.02%,光能利用效率分别增加 -1.61% 和 4.97%。这表明晚播小麦在拔节后温度更加适宜,花后生产潜力更大,有利于高效利用温光资源。



A~C:籽粒灌浆曲线;D~F:灌浆速率曲线。A、D: 2.50×10^6 株 $\cdot \text{hm}^{-2}$; B、E: 3.25×10^6 株 $\cdot \text{hm}^{-2}$; C、F: 4.00×10^6 株 $\cdot \text{hm}^{-2}$ 。

A—C: Grain filling curve; D—F: Grain filling rate curve. A, D: 2.50×10^6 plants $\cdot \text{hm}^{-2}$; B, E: 3.25×10^6 plants $\cdot \text{hm}^{-2}$; C, F: 4.00×10^6 plants $\cdot \text{hm}^{-2}$.

图 4 不同播期和种植密度下冬小麦的灌浆曲线

Fig. 4 Grain filling curve of winter wheat under different sowing dates and planting densities

表3 不同播期下冬小麦各生育阶段的有效积温和日均温

Table 3 Effective accumulated temperature and daily average temperature of winter wheat at different growth stage under different sowing dates

播期 Sowing date	SO—SE		SE—TI		TI—JO		JO—HE		HE—AN		AN—MA		WGP	
	有效积温 EAT	日均温 T_{mean}	有效积温 EAT	日均温 T_{mean}	有效积温 EAT	日均温 T_{mean}	有效积温 EAT	日均温 T_{mean}	有效积温 EAT	日均温 T_{mean}	有效积温 EAT	日均温 T_{mean}	有效积温 EAT	日均温 T_{mean}
	S_1	115.8	16.5	228.3	16.3	380.4	10.6	338.0	6.6	326.4	10.9	832.5	16.7	2 221.4
S_2	114.7	16.4	191.8	14.8	351.9	9.3	370.7	7.1	310.8	12.0	765.7	17.0	2 105.6	11.6
S_3	113.6	16.2	250.8	13.9	215.5	6.7	454.8	7.8	218.4	13.7	796.0	17.3	2 049.1	11.6
S_4	92.3	13.2	202.1	11.2	279.9	7.2	422.8	8.5	248.3	13.8	733.3	18.3	1 978.7	11.5
S_5	121.1	15.1	183.7	7.7	259.8	6.2	434.1	11.1	202.9	12.7	684.8	19.0	1 886.4	11.4

EAT:有效积温; T_{mean} :日均温; SO:播种期; SE:出苗; TI:分蘖期; JO:拔节期; HE:孕穗期; AN:开花期; MA:成熟期; WGP:全生育期。下同。

ETA: Effective accumulated temperature; T_{mean} : Daily average temperature; SO: Sowing date; SE: Emergence; TI: Tillering stage; JO: Jointing stage; HE: Heading stage; AN: Anthesis stage; MA: Maturity stage; WGP: Whole growth period. The same in table 5.

表4 不同播期下冬小麦各生育阶段的累计辐射量和日均辐射量

Table 4 Accumulated radiation and daily average radiation at different growth stages of winter wheat under different sowing dates

播期 Sowing date	SO—SE		SE—TI		TI—JO		JO—HE		HE—AN		AN—MA		WGP	
	累计辐射量 CRS	日均辐射量 R_{mean}	累计辐射量 CRS	日均辐射量 R_{mean}	累计辐射量 CRS	日均辐射量 R_{mean}	累计辐射量 CRS	日均辐射量 R_{mean}	累计辐射量 CRS	日均辐射量 R_{mean}	累计辐射量 CRS	日均辐射量 R_{mean}	累计辐射量 CRS	日均辐射量 R_{mean}
	S_1	30.6	4.4	89.8	6.4	204.4	5.7	358.3	7.0	230.6	7.7	644.3	12.9	1 558.1
S_2	55.5	7.9	75.3	5.8	224.0	5.9	330.7	6.4	276.8	10.6	565.2	12.6	1 527.5	8.4
S_3	34.3	4.9	119.0	6.6	168.8	5.3	389.3	6.7	219.7	13.7	613.4	13.3	1 544.6	8.7
S_4	53.1	7.6	90.6	5.0	223.2	5.7	331.8	6.6	193.4	10.7	585.2	14.6	1 477.2	8.6
S_5	53.1	6.6	121.7	5.1	293.9	7.0	315.1	8.1	150.7	9.4	549.7	15.3	1 484.2	9.0

CRS:累计辐射量; R_{mean} :日均辐射量。

CRS: Cumulative radiation; R_{mean} : Daily average radiation.

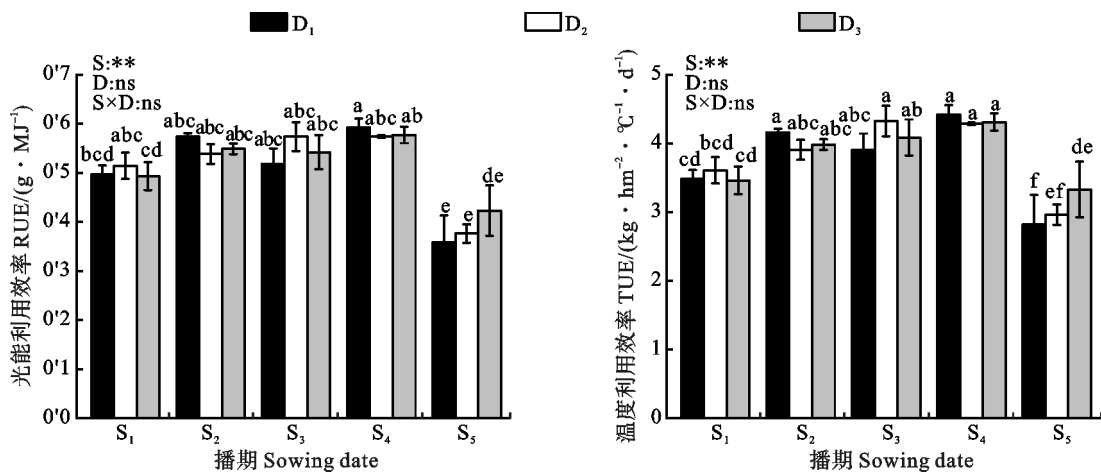


图5 不同播期和种植密度下冬小麦的温光利用效率

Fig. 5 Temperature and radiation use efficiency of winter wheat under different sowing dates

3 讨论

3.1 晚播对小麦产量的影响

晚播可引起小麦冬前积温不足^[18,30],导致分蘖能力减弱,适当晚播虽可以减少无效分蘖比例,提高分蘖成穗率,但有效穗数仍显著低于常规播期^[31]。我们前期研究表明,播种后30~40 d是四川地区小麦分蘖快发期,也是有效分蘖临界期^[32]。本试验中,S₁~S₅播期播种后35 d有效积温依次为542.3、495.5、435.8、375.4、324.5℃,积温降低导致冬前不能形成足够的群体数量,这也是晚播减产的主要原因。在不同生态条件下,穗粒数对晚播的响应存在差异。在河南和河北地区,晚播小麦的穗粒数显著降低^[33-34],但该地区也有迟播小麦穗粒数与正常播种差异不显著的报道^[35-36],这可能是由于播期跨度和供试品种不同所致。不同播期下,光温资源与作物物候期匹配度不同是小麦产量及产量构成变化的根本原因。本研究中,晚播可通过增加小麦穗粒数增产,与Dai等^[37-38]在山东地区研究结果一致;研究发现,晚播小麦拔节期—孕穗期、孕穗期—开花期日均温更高,更接近幼穗分化最适温度10.1~13.3℃^[39],这可能是穗粒数增加的主要原因。Zhang等^[40]在江苏的研究发现,小麦晚播后拔节期日均温自12.9℃增至16.8℃,穗粒数下降;Yu等^[41]认为,拔节期增温促进了小穗分化进程,增加了每穗小穗数和小花数,也验证了这一点。本研究中,S₁条件下小麦遭遇了拔节期低温冻害,导致主茎及大分蘖部分冻死,而晚播推迟了拔节日期,避免了该阶段的低温,说明晚播还有利于提高农业生产系统抗灾力。增大种植密度可以补偿和部分补偿晚播带来的产量损失,而不同播期下资源配置模式的改变,导致穗数和穗粒数之间呈现更强的负相关关系^[42],使得最终产量在统计水平上没有显著的差异。

3.2 晚播对小麦灌浆速率和干物质积累的影响

晚播后,灌浆后期气温回升快,加速了小麦的成熟,缩短小麦全生育期天数。适宜播期有利于增加籽粒渐增期持续时间,促进胚乳细胞分化,进而增加籽粒“库容”,同时加快籽粒快增期灌浆速率,利于提高粒重^[43-44]。晚播小麦开花推迟,易受花后高温胁迫,导致植株加速衰老^[45],缩短灌浆持续时间^[46],虽加快灌浆速率,但降低粒重。本研究中,晚播小麦灌浆速率加快,而粒重变化较

小,这可能与花后日均温仍处于适宜灌浆温度范围有关,短暂的高温未对粒重造成影响^[39]。小麦籽粒灌浆过程与花后干物质积累量密切相关。屈会娟等^[47]指出,在中密度和高密度下,晚播减少了小麦花后干物质积累量。马尚宇等^[23]研究也表明,晚播不利于小麦干物质积累。在本试验条件下,推迟播期后开花—成熟阶段日均温和日均辐射量增加,花后干物质积累量和籽粒灌浆速率显著提升,晚播条件下花后干物质生产与转化能力提高,籽粒产量更多依赖于花后的物质积累,这与Zhu等^[48]和钤太峰等^[49]发现晚播提高了RUE,且小麦拔节后干物质积累速率增加的结果存在相似之处,这也体现了生殖恢复力是晚播增产的基础^[50]。此外,S₅播期下灌浆速率显著高于其他播期,而花后干物质积累量却显著降低,这可能是由于籽粒库容量不足造成的。

4 结论

晚播缩短了冬小麦全生育期天数,降低苗期有效积温和日均温,减少有效穗数,增加拔节期—孕穗期和孕穗期—开花期日均温,提高了穗粒数。晚播使小麦花后温光资源更加充足,促进了花后干物质积累和籽粒灌浆,提高了温光利用效率,在晚播7和14 d时维持了产量的稳定。

参考文献:

- [1] TIERNEY J E, POULSEN C J, MONTANEZ I P, *et al.* Past climates inform our future [J]. *Science*, 2020, 370(6517): 1.
- [2] 房强. 当前中国粮食安全的形势和应对举措分析[J]. 作物研究, 2021, 35(5): 421.
FANG Q. Analysis of current food security situation and countermeasures [J]. *Crop research*, 2021, 35(5): 421.
- [3] XIAO D, TAO F, LIU Y, *et al.* Observed changes in winter wheat phenology in the North China Plain for 1981—2009 [J]. *International Journal of Biometeorology*, 2013, 57(2): 275.
- [4] HE L, ASSENG S, ZHAO G, *et al.* Impacts of recent climate warming, cultivar changes, and crop management on winter wheat phenology across the Loess Plateau of China [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2015, 200: 136.
- [5] ZHANG T Y, HUANG Y, YANG X G. Climate warming over the past three decades has shortened rice growth duration in China and cultivar shifts have further accelerated the process for late rice [J]. *Global Change Biology*, 2013, 19: 564.
- [6] HE H, DANG H, LIU C, *et al.* Optimizing delayed sowing date decreases methane emissions from paddies and ensures the comprehensive benefits of rice production [J]. *European Journal of Agronomy*, 2023, 151: 127001.
- [7] LI Z G, YANG P, TANG H J, *et al.* Response of maize phenology to climate warming in Northeast China between 1990

- and 2012 [J]. *Regional Environmental Change*, 2014, 14(1): 40.
- [8] XIAO D P, QI Y Q, SHEN Y J, *et al.* Impact of warming climate and cultivar change on maize phenology in the last three decades in North China Plain [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2016, 124: 653.
- [9] 杜世州, 乔玉强, 李玮, 等. 低温冷害下不同播期和播量对冬小麦籽粒灌浆特征的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2014, 22(5): 552.
DU S Z, QIAO Y Q, LI W, *et al.* Effects of sowing date and rate on grain filling characteristics of winter wheat under chilling injury [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2014, 22(5): 552.
- [10] 宋艳玲, 周广胜, 郭建平, 等. 北方冬小麦冬季冻害及播期延迟应对[J]. *应用气象学报*, 2022, 33(4): 454.
SONG Y L, ZHOU G S, GUO J P, *et al.* Winter freezing injury of winter wheat in north china and its response to sowing date delay [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2022, 33(4): 454.
- [11] KADAM N, XIAO G, MELGAR R J, *et al.* Agronomic and physiological responses to high temperature, drought, and elevated CO₂ interactions in cereals [J]. *Advances in Agronomy*, 2014, 147: 112.
- [12] FLOHR B M, HUNT J R, KIRKEGAARD J A, *et al.* Fast winter wheat phenology can stabilise flowering date and maximise grain yield in semiarid Mediterranean and temperate environments [J]. *Field Crops Research*, 2018, 223: 19.
- [13] WANG H, PRENTICE I C, KEENAN T F, *et al.* Towards a universal model for carbon dioxide uptake by plants [J]. *Nature Plants*, 2017, 3(9): 734.
- [14] ELLIOTT J, DERYNG D, MÜLLER C, *et al.* Constraints and potentials of future irrigation water availability on agricultural production under climate change [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2014, 111(9): 3240.
- [15] DUERI S, BROWN H, ASSENG S, *et al.* Simulation of winter wheat response to variable sowing dates and densities in a high-yielding environment [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2022, 73(16): 5718.
- [16] PARENT B, LECLERE M, LACUBE S, *et al.* Maize yields over europe may increase in spite of climate change, with an appropriate use of the genetic variability of flowering time [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018, 115(42): 10642.
- [17] HUNT J R, LILLEY J M, TREVASKIS B, *et al.* Early sowing systems can boost Australian wheat yields despite recent climate change [J]. *Nature Climate Change*, 2019, 9(3): 244.
- [18] 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.
- [19] 杜同庆, 李振宏, 徐鹏. 淮北地区种植密度与肥料对稻茬晚播小麦生长特性的影响[J]. *大麦与谷类科学*, 2022, 39(2): 14.
DU T Q, LI Z H, XU P. Effects of planting density and fertilizer on growth characteristics of late sown wheat after rice in Huaibei region [J]. *Barley and Cereal Sciences*, 2022, 39(2): 14.
- [20] 王慧, 刘大同, 朱冬梅, 等. 氮肥调控对稻茬晚播小麦产量、品质及氮素利用的影响[J]. *麦类作物学报*, 2023, 43(7): 832.
WANG H, LIU D T, ZHU D M, *et al.* Effects of nitrogen regulation on yield, quality and nitrogen use of late-sowing wheat after stubble [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2023, 43(7): 832.
- [21] 张向前, 杜世州, 曹承富, 等. 播期和密度对淮北地区皖麦52群体质量、叶绿素荧光及产量的影响[J]. *麦类作物学报*, 2014, 34(3): 396.
ZHANG X Q, DU S Z, CAO C F, *et al.* Effects of sowing date and density on population quality, chlorophyll fluorescence and yield of Wanmai 52 in Huaibei Area [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2014, 34(3): 396.
- [22] SHAH F, COULTER J A, YE C, *et al.* Yield penalty due to delayed sowing of winter wheat and the mitigatory role of increased seeding rate [J]. *European Journal of Agronomy*, 2020, 119: 126120.
- [23] 马尚宇, 王艳艳, 刘雅男, 等. 播期、播量和施氮量对小麦干物质积累、转运和分配及产量的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2020, 28(3): 375.
MA S Y, WANG Y Y, LIU Y N, *et al.* Effect of sowing date, planting density, and nitrogen application on dry matter accumulation, transfer, distribution, and yield of wheat [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2020, 28(3): 375.
- [24] 王森, 尚云秋, 朱俊科, 等. 不同播种方案下补灌对冬小麦水分利用和产量的影响[J]. *麦类作物学报*, 2021, 41(9): 1151.
WANG S, SHANG Y Q, ZHU J K, *et al.* Effect of supplemental irrigation on water use and grain yield of winter wheat with different sowing schemes [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2021, 41(9): 1151.
- [25] LINDQUIST J L, ARKEBAUER T J, WALTERS D T, *et al.* Maize radiation use efficiency under optimal growth conditions [J]. *Agronomy Journal*, 2005, 97(1): 76.
- [26] 孔令英, 赵俊晔, 于振文, 等. 宽幅播种条件下种植密度对小麦群体结构和光能利用率的影响[J]. *麦类作物学报*, 2020, 40(7): 855.
KONG L Y, ZHAO J Y, YU Z W, *et al.* Effects of planting density on population structure and light use efficiency of wheat under wide-width sowing conditions [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2020, 40(7): 855.
- [27] HUANG X F, DENG F, ZHANG C, *et al.* Effect of sowing date on radiation and temperature use efficiencies of rice in the low-light region of China [J]. *Field Crops Research*, 2024, 309: 109329.
- [28] 田中伟, 王方瑞, 戴廷波, 等. 小麦品种改良过程中物质积累转运特性与产量的关系[J]. *中国农业科学*, 2012, 45(4): 803.
TIAN Z W, WANG F R, DAI T B, *et al.* Characteristics of Dry matter accumulation and translocation during the wheat genetic improvement and their relationship to grain yield

- [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(4): 803.
- [29] 刘红杰, 倪永静, 任德超, 等. 不同基因型冬小麦籽粒灌浆特征及其与千粒重的关系[J]. 中国农业气象, 2019, 40(10): 632.
LIU H J, NI Y J, REN D C, *et al.* Grain filling characters and its correlation with 1000-grain weight in different winter wheat varieties [J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2019, 40(10): 632.
- [30] LIU J H, HE Q J, ZHOU G S, *et al.* Effects of sowing date variation on winter wheat yield: Conclusions for suitable sowing dates for high and stable yield [J]. *Agronomy*, 2023, 13(4): 991.
- [31] 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: 168.
- [32] 王思宇, 荣晓椒, 樊高琼, 等. 播期对四川小麦分蘖发生、消亡及成穗特性的影响[J]. 麦类作物学报, 2017, 37(5): 662.
WANG S Y, RONG X J, FAN G Q, *et al.* Effects of sowing date on tiller occurring, withering away and earbearing [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2017, 37(5): 662.
- [33] ZHOU B Y, SUN X F, GE J Z, *et al.* Wheat growth and grain yield responses to sowing date associated variations in weather conditions [J]. *Agronomy Journal*, 2020, 112(2): 990.
- [34] 赵花荣, 周广胜, 齐月, 等. 播期调整对华北北部冬小麦、夏玉米产量和品质的影响[J]. 中国农业科学, 2024, 57(15): 2971.
ZHAO H R, ZHOU G S, QI Y, *et al.* Effects of sowing date adjustment on yield and quality of winter wheat and summer maize in northern area of North China [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2024, 57(15): 2971.
- [35] 孟祥海, 乔文臣, 赵明辉, 等. 播期与种植密度对冬小麦新品种衡麦 26 产量及其构成因素的影响[J]. 河北农业科学, 2020, 24(5): 27.
MENG X H, QIAO W C, ZHAO M H, *et al.* Effects of sowing date and planting density on yield and its components of winter wheat new cultivar Hengmai 26 [J]. *Journal of Hebei Agricultural Sciences*, 2020, 24(5): 27.
- [36] WEN P F, WEI Q R, ZHENG L, *et al.* Adaptability of wheat to future climate change: Effects of sowing date and sowing rate on wheat yield in three wheat production regions in the North China Plain [J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 901: 165906.
- [37] DAI X, WANG Y, DONG X, *et al.* Delayed sowing can increase lodging resistance while maintaining grain yield and nitrogen use efficiency in winter wheat [J]. *Crop Journal*, 2017, 5(6): 547.
- [38] 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): 2363.
- [39] FAROOQ M, BRAMLEY H, PALTA J A, *et al.* Heat stress in wheat during reproductive and grain-filling phases [J]. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 2011, 30(6): 492.
- [40] 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.
- [41] 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.
- [42] SLAFER G, SAVIN R, SADRAS V. Coarse and fine regulation of wheat yield components in response to genotype and environment [J]. *Field Crops Research*, 2014, 157: 73.
- [43] 信志红, 郭建平, 谭凯炎. 典型高温年分期播种冬小麦生育及产量性状差异性分析[J]. 中国农业气象, 2018, 39(9): 607.
XIN Z H, GUO J P, TAN K Y, *et al.* Differences in growth and yield traits for winter wheat under different sowing dates in typical high temperature year [J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2018, 39(9): 607.
- [44] 李世清, 邵明安, 李紫燕, 等. 小麦籽粒灌浆特征及影响因素的研究进展[J]. 西北植物学报, 2003, 23(11): 2034.
LI S Q, SHAO M A, LI Z Y, *et al.* Review of characteristics of wheat grain fill and factors to influence it [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2003, 23(11): 2034.
- [45] 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): 597.
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): 597.
- [46] 崔国际, 王传伟, 贺威, 等. 外源海藻糖对灌浆期高温胁迫下小麦灌浆特性和糖组分含量的影响[J]. 应用生态学报, 2023, 34(11): 3024.
CUI G J, WANG C W, HE W, *et al.* Effects of exogenous trehalose on filling characteristics and sugar component content of wheat under high temperature stress during the filling period [J]. *Chinese journal of applied ecology*, 2023, 34(11): 3024.
- [47] 屈会娟, 李金才, 沈学善, 等. 种植密度和播期对冬小麦品种兰考矮早八干物质和氮素积累与转运的影响[J]. 作物学报, 2009, 35(1): 128.
QU J H, LI J C, SHEN X S, *et al.* Effects of plant density and seeding date on accumulation and translocation of dry matter and nitrogen in winter wheat cultivar Lankao Aizao 8 [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2009, 35(1): 128.
- [48] ZHU Y G, LIU J, LI J Q, *et al.* Delayed sowing increased dry matter accumulation during stem elongation in winter wheat by improving photosynthetic yield and nitrogen accumulation [J]. *European Journal of Agronomy*, 2023, 151: 127004.
- [49] 铃太峰, 董秀春, 张秀, 等. 播期对冬小麦干物质积累、分配与产量的影响[J]. 山东农业科学, 2019, 51(3): 26.
QIAN T F, DONG X C, ZHANG X, *et al.* Effect of sowing date on dry matter accumulation, distribution and yield of winter wheat [J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2019, 51(3): 26.
- [50] FENG X J, HUAI Y B, KANG S Q, *et al.* Reproductive resilience of growth and nitrogen uptake underpins yield improvement in winter wheat with forced delay of sowing [J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 949: 175108.