

DOI: 10.12357/cjea.20240209

CSTR: 32371.14.cjea.20240209

刘青珊, 刘娜, 邵立威, 陈素英, 张喜英. 气候变化背景下有限供水冬小麦的适宜播期研究[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2025, 33(4): 694–708

LIU Q S, LIU N, SHAO L W, CHEN S Y, ZHANG X Y. A study on the suitable sowing date of winter wheat with limited water supply under the background of climate change[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2025, 33(4): 694–708

气候变化背景下有限供水冬小麦的适宜播期研究*

刘青珊^{1,2}, 刘娜^{1,2}, 邵立威¹, 陈素英¹, 张喜英^{1,2**}

(1. 中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心/河北省节水农业重点实验室 石家庄 050022;

2. 中国科学院大学 北京 100049)

摘 要: 自工业革命以来, 气候变化加剧导致华北平原中北部冬小麦-夏玉米生长条件发生改变, 调整冬小麦播期对该地区实施“两早-两晚”技术具有重要意义。本试验基于中国科学院栾城农业生态系统试验站 2016—2023 年限水灌溉条件下冬小麦 7 个生育期 4 个播期 2 个品种的试验数据, 确定以稳产为前提的冬小麦适宜播期及满足适播的热量条件。4 个播期分别为当地正常播期(播期 1)以及每个播期在上一个播期基础上推迟 5~7 d(播期 2、3 和 4)。结果表明, 除“石优 20”外, 冬小麦在播期 2 后产量明显下降, 播期 4 与其他 3 个播期下的产量差异较大, 根据本试验条件适播日期为 10 月 12—24 日, 以作物发育基点温度为 0 °C 计算的冬前积温和生育期总积温需分别达 350 和 2 010 °C·d。不同播期通过积温影响冬小麦各阶段生育期, 随着播期的推迟, 不同生长阶段(播种—越冬、越冬—拔节、拔节—扬花和扬花—收获)持续时间变化分别为缩短、延长、延长和缩短, 且不同品种对播期的响应不同。晚播冬小麦冬前不具备充分分蘖的气象条件, 在拔节期形成最大群体, 发育进程滞后影响群体数量以及生殖生长持续时间, 从而导致作物减产。冬小麦扬花前生物量增长速率与小麦群体动态变化同步, 若冬末春初遇到高温, 晚播冬小麦能弥补前期生长进程过慢产生的差距。播期对产量三要素产生的影响为: 穗数降低、穗粒数增加和千粒重变化无统计学差异, 晚播冬小麦收获指数高于早播, 籽粒品质随播期推迟存在下降趋势, 但不同品种间存在差异。通过本研究得到以下结论: 在温度升高的气候变化背景下, 冬小麦适宜播种日期可推迟 2.6 d, 为夏玉米延长灌浆期晚收获创造条件, 研究结果为华北平原中北部实施“两早-两晚”技术的决策提供了理论支撑, 为农业发展适应气候变化减轻压力。

关键词: 气候变化; 限水; 冬小麦; 播期; 稳产

中图分类号: S512.11

A study on the suitable sowing date of winter wheat with limited water supply under the background of climate change*

LIU Qingshan^{1,2}, LIU Na^{1,2}, SHAO Liwei¹, CHEN Suying¹, ZHANG Xiying^{1,2**}

(1. Center for Agricultural Resources Research, Institute of Genetics and Developmental Biology, Chinese Academy of Sciences / Hebei Key Laboratory of Agricultural Water-Saving, Shijiazhuang 050022, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Climate change has intensified since the Industrial Revolution, leading to changes in winter wheat and summer maize growth conditions in the central and northern parts of North China Plain. Modifying the sowing date of winter wheat to implement the

* 国家重点研发计划项目子课题(2022YFD1900703-5)资助

** 通信作者: 张喜英, 主要研究方向为农田节水机理与技术。E-mail: xyzhang@sjziam.ac.cn

刘青珊, 主要研究方向为农田节水机理与技术。E-mail: liuqingshan22@mails.ucas.ac.cn

收稿日期: 2024-04-23 接受日期: 2024-09-14

* This study was supported by the National Key Research and Development Program of China (2022YFD1900703-5).

** Corresponding author, E-mail: xyzhang@sjziam.ac.cn

Received Apr. 23, 2024; accepted Sep. 14, 2024

“two early-two late” technology in this area is important. Based on the interannual variation in meteorological factors during the growing season of winter wheat from 2016 to 2023 at the Luancheng Agro-Ecosystem Experimental Station of the Chinese Academy of Sciences, this experiment studied the suitable sowing date of winter wheat in the context of climate change. Using field-measured data of four winter wheat cultivars for seven growing seasons from 2016 to 2023 with four sowing dates under limited irrigation from 2016 to 2023, the suitable sowing date and necessary heat conditions for winter wheat were determined to achieve a stable yield. The four sowing dates were normal (sowing date 1) and extended by 5–7 days each for delayed sowing dates (sowing date 2, 3, and 4). The results showed that the yield of winter wheat (excluding SY20) decreased after date 2 and that the yield for date 4 was lower than that for the other three sowing dates. Under the current climate conditions, the suitable sowing date was October 12–24. The thermal time before winter and the total thermal time during the whole growing season should reach 350 and 2 010 °C·d, respectively. Different sowing dates affect the duration of the different stages of winter wheat through thermal time. With the delay in the sowing date, the durations of sowing—overwintering, overwintering—jointing, jointing—anthesis, and anthesis—maturity were shortened, prolonged, prolonged, and shortened, respectively, and the responses to the sowing date of different cultivars were different. Winter wheat sown late was not capable of sufficient tillering before winter and formed the largest population at the jointing stage. The lag in the development process negatively affected the spike number and reduced the duration of reproductive growth, resulting in reduced crop yield. Before anthesis, the biomass production increase rate of winter wheat was synchronized with the dynamic changes in the community. If high temperatures were encountered in late winter and early spring, the gap caused by the slow growth in the early stages of late-sowing winter wheat could be narrowed. The effects of the sowing date on the three yield elements were as follows: spike number decreased, kernels per spike increased, and no statistically significant difference in the 1000-kernel weight. The harvest index of late-sowing winter wheat was higher than that of early-sowing winter wheat. Grain quality decreased with the delay in the sowing date, but differences existed among the cultivars. In conclusion, the outcome of this study that the suitable sowing date should be postponed under the context of climate change provides theoretical support for the decision to implement the “two early-two late” technology in the central and northern parts of North China Plain and reduces the pressure on agricultural development to adapt to climate change.

Keywords: climate change; water restriction; winter wheat; sowing date; stable yield

华北地区是中国重要的粮食主产区,以冬小麦 (*Triticum aestivum* L.)-夏玉米 (*Zea mays* L.) 一年两季种植模式为主,两种作物播种面积多年平均占比分别为 43.9% 和 33.3%^[1],产量分别占全国的 80% 和 29%^[2-3],在保证国家粮食安全中发挥着重要作用。位于华北北部的冬小麦-夏玉米一年两熟制受制于全年热量条件限制,夏玉米生育期产量受生育期长短和积温影响大,通过夏玉米早播种和晚收获延长夏玉米生育期是提升其产量的重要手段。特别是在气候变化背景下,随着气温升高,夏玉米通过晚收获延长其灌浆期对增加粒重具有显著促进作用^[4]。目前,在华北中北部推广的冬小麦晚播种早收获、夏玉米早播种晚收获的“两早-两晚”技术是生产上主推的栽培技术。同时,随着华北地下水压采政策实施,冬小麦生育期采用有限水灌溉,根据不同地区水资源条件,冬小麦生育期普遍采用拔节期 1 次灌水或拔节与扬花灌浆期两次灌水的灌溉制度,冬小麦收获期比充分供水条件下提前 1~3 d,也为夏玉米早播种创造了条件。因此,在当前生产和气候变化背景下,冬小麦推迟播种对产量不产生影响的优化播期确定是实现“两早-两晚”技术的保证。

通过调整播期和品种对作物生育期进行适应性管理是作物生产系统的核心环节之一,与当地气候

紧密相关^[5]。如今因人类活动导致的气候变化虽改变了之前农业生产管理的客观条件,但温度升高对“两早-两晚”管理技术更有利,小麦在晚播种的同时仍具有适宜生长发育的热量条件,从而在不影响自身产量的前提下,为下茬夏玉米提供了更充裕的生长时间。冬小麦-夏玉米需水量与降雨季节之间极不平衡,造成华北平原大量开采地下水用于小麦灌溉^[6]。为了应对小麦季降水不足和地下水资源减少的问题,华北地区实施地下水限采政策,广泛推行有限灌溉制度^[7],在此背景下,研究发现适度水分亏缺可缩短小麦达最大灌浆速度的时间,从而使得冬小麦提前成熟^[8],为夏玉米早播种提供条件。已有研究表明,延迟冬小麦播种时间和玉米收获时间可使冬小麦-夏玉米系统谷物总产量增加 4%~6%^[9]。

在近几十年来的全球变暖趋势下,小麦在越冬前获得更好的生长条件,而冬前生长旺盛容易造成冻害,进而影响麦苗存活率^[10],故小麦晚播成为必然调整的农业管理决策。但如果小麦播种过晚,气温降低导致出苗时间延长,胚乳消耗较多导致出苗率降低,幼苗弱小影响分蘖成穗继而影响产量,因此明确晚播的最低限度十分必要。在当今气候变化背景和限水灌溉制度下,考虑年际气象条件变化的影响,以不对小麦产量和品质产生影响为前提,晚播的播

期应该安排在怎样的时间,需要进一步研究。同时,品种更新对冬小麦物候变化的影响不能完全忽视^[1],也需要关注不同品种对推迟播期的响应是否存在差异。

本研究利用 2016—2023 年中国科学院栾城农业生态系统试验站 7 个生育期的冬小麦播期试验及每个生育期两个品种的比较,结合 1984—2023 年气象因素和 7 个生育期作物的具体产量及平均水平,研究冬小麦在有限水分供应条件下不同播期对其生长发育和产量形成及品质的影响,为确定气候变化背景下冬小麦适宜的播种日期提供参考,为农业生产管理决策提供指导。

1 材料与方法

1.1 试验地点

试验于 2016 年 10 月—2023 年 6 月在中国科学院栾城农业生态系统试验站(以下简称栾城站)进行。该站位于华北平原北部(37°50'N, 114°40'E, 海拔 50.1 m),属暖温带半湿润半干旱季风气候,年平均气

温 12.3 ℃,光热资源丰富,降雨多集中在 7—9 月。该站土壤为壤质石灰性褐土,较肥沃,耕层(0~20 cm)有机质含量 12.0~13.0 g·kg⁻¹,碱解氮 60~80 mg·kg⁻¹,速效磷 15~25 mg·kg⁻¹,速效钾 150~170 mg·kg⁻¹。0~30 cm 土体平均容重 1.45 g·cm⁻³,0~200 cm 土体平均田间持水量 35.6% (v·v⁻¹)。

1.2 试验设计

设 4 个播期处理,按时间先后分别为播期 1 (SD1)、播期 2 (SD2)、播期 3 (SD3) 和播期 4 (SD4),以当地冬小麦主要播种时间为播期 1 (10 月上旬),推迟 5~7 d 为播期 2,推迟 10~14 d 为播期 3,推迟 15~21 d 为播期 4,各生育期选用当地主栽的两个冬小麦品种,具体播期和品种见表 1。小区面积 5×5 m²,每个处理 3 次重复。不同播期播量为: SD1 播量按照当地常规播量(187.5 kg·hm⁻²)进行,每延后 1 个播期,播量增加 37.5 kg·hm⁻²。2021 年,由于秋季降水影响,冬小麦第 1 次播种推迟,其播量按照其他年份的第 2 次用量,其余播期的播量依次增加。

冬小麦播前玉米秸秆粉碎还田,旋耕两遍,

表 1 2016—2023 年冬小麦品种、播期和播量
Table 1 Winter wheat cultivar, sowing date and sowing rate from 2016 to 2023

生长季 Growing season	品种 Cultivar	播期(月·日) Sowing date (month-day)	播量 Sowing rate /(kg·hm ⁻²)	生育期降水 Seasonal precipitation /mm
2016—2017	石优20、石新633 SY20, SX633	10-06	187.5	86.6
		10-13	225.0	78.0
		10-20	262.5	75.8
		10-27	300.0	63.8
2017—2018	石优20、石新633 SY20, SX633	10-06	187.5	241.4
		10-13	225.0	157.6
		10-20	262.5	152.2
		10-27	300.0	149.2
2018—2019	石优20、石新633 SY20, SX633	10-10	187.5	123.7
		10-15	225.0	123.7
		10-20	262.5	112.9
		10-25	300.0	112.9
2019—2020	石优20、石新633 SY20, SX633	10-12	187.5	75.8
		10-17	225.0	71.6
		10-22	262.5	71.6
		10-27	300.0	71.6
2020—2021	石优20、石新633 SY20, SX633	10-16	187.5	77.3
		10-21	225.0	77.3
		10-26	262.5	77.3
		10-31	300.0	77.1
2021—2022	马兰1号、石新633 ML1, SX633	10-24	225.0	48.8
		10-31	262.5	48.8
		11-07	300.0	47.0
		11-14	337.5	36.0
2022—2023	马兰1号、衡麦29 ML1, HM29	10-15	187.5	181.2
		10-21	213.6	181.2
		10-29	240.0	181.2
		11-05	300.0	181.2

2016—2019年人工播种,等行距20.00 cm;2019—2023年播种机播种,等行距18.75 cm。冬小麦播前基肥:400~425 kg(N)·hm⁻²,180~200 kg(P₂O₅)·hm⁻²,90 kg(K₂O)·hm⁻²。生育期灌水按照冬小麦限水灌溉拔节期灌水一次进行,灌水量90 mm,低压管道输水,水表计量,并结合追施尿素300 kg·hm⁻²(含氮量46%)。按照当地冬小麦常规管理防治杂草和病虫害。

1.3 测定项目和方法

1.3.1 气象因素和积温

气象数据来源于栾城站标准气象站,包括日平均温度、最高温度、最低温度和日降水量,根据Kirby等^[12]的公式计算积温:

$$T_t = \frac{T_{\max} + T_{\min}}{2} - T_b \quad T_{\max}, T_{\min} > T_b \quad (1)$$

$$T_t = \left(\frac{T_{\max} + T_{\min}}{2 - T_b - T_{\min}} \right)^{-4} \quad T_{\max} > T_b, T_{\min} < T_b, \frac{T_{\max} + T_{\min}}{2} > T_b \quad (2)$$

$$T_t = \frac{T_{\max} - T_b}{4} \quad T_{\max} > T_b, T_{\min} < T_b, \frac{T_{\max} + T_{\min}}{2} < T_b \quad (3)$$

式中: T_t 为用于计算积温的日温度; $T_{\max}$ 为日最高温度; $T_{\min}$ 为日最低温度; T_b 为作物发育基点温度。0℃作为冬小麦发育的基点温度已被广泛接受^[13-14],故本研究中 T_b 取0。不同播期下每日 T_t 温度相加,获得一个时段或全生育期的积温。

1.3.2 生育期、群体发育动态、产量及其构成和收获指数

人工记载不同品种和播期下作物主要生育期,包括越冬期、拔节期和扬花期,计算播期调整对冬小麦营养和生殖生长持续时间和积温的影响。在三叶期、越冬期、拔节期、抽穗扬花期和收获期在每个小区定点测定1 m双行的茎数,获得冬小麦密度变化动态和收获期穗数,并在每个小区随机采集60~80茎,利用叶面积仪(Li-3100 C, LI-COR, USA)测定叶面积,结合密度,计算叶面积指数(LAI);烘干样品测定生物量,结合密度,计算单位面积生物量。收获时,每个小区随机采集80~100茎,风干测定总生物量,利用单穗脱粒机,分离籽粒,获得粒重;利用数粒机测定总粒数,计算获取单穗粒数、千粒重和收获指数。收获期,在每个小区中部选取8行小麦,收割长度3 m,用小型脱粒机脱粒,风干后获得每个小区籽粒产量。

选取收获的籽粒用球磨仪(RETSCHE MM400, Germany)研磨后烘干,用H₂SO₄-H₂O₂消煮法对样品

进行消解,消化管中加入0.250 g籽粒样品和5 mL浓硫酸,慢慢将样品摇匀,放入远红外石墨炉加热至400℃,消煮均匀后取出冷却,逐滴加入H₂O₂^[15],用AA3(Auto Analyzer 3, SEAL Analytical, Germany)全自动连续流动分析仪测定籽粒氮含量^[16],乘以6.25后得到不同处理籽粒蛋白质含量。

1.3.3 统计方法

用Microsoft Excel 2021计算1984—2023年冬小麦生长季冬前积温及总积温,2016—2023年主要生育期积温及持续时间、地上部生物量、产量、产量三要素及其平均水平,采用多个重复取平均从单独和长期角度分析其变化。用IBM SPSS Statistics 27进行单因素检验分析不同播期、不同品种基本苗、地上部生物量、产量和收获指数等的差异,并对不同播期生育期积温及持续时间与基本苗、产量、产量三要素等相关关系进行研究。

2 结果与分析

2.1 冬小麦生育期气象条件变化

图1为1984—2023年栾城站冬小麦生长季气象因素年际变化,分析冬小麦生长季年际气象条件变化时,统一按照当年10月15日播种,次年6月15日收获进行。从长期变化看,冬小麦生长季最高气温、平均气温、最低温度及积温均存在不同幅度增长,其中积温上升趋势最明显,尤其是近10年的积温总体高于前30年,2019—2020季积温达到最高值(2 256.9℃·d)。近40年的日照时数同样呈上升趋势,但与温度和热量积累相比,年际变化较大;同期降水呈一定的周期性变化,总体呈下降趋势。在温度升高降水减少的气候变化背景下,冬小麦生育期生长条件发生了改变,冬小麦-夏玉米种植模式下的冬小麦适播期相应发生变化,故研究如何调整冬小麦播期在实际农业生产上具有重要意义。

积温是影响冬小麦适播期最重要的气象因素,通常在越冬前已经奠定了不同播期的积温差异。图2为2016—2023年7个冬小麦生长季和1984—2023年长期冬前积温变化。冬前积温的长期平均水平为387.5℃·d,2021—2022季冬前积温为270.4℃·d,是唯一低于长期平均水平的生长季,2020—2021季冬前积温变化幅度最大,为481.4℃·d,其余年份在积温积累的过程中差异不明显。

2.2 播期调整对冬小麦不同生长阶段积温的影响

不同播期主要通过积温来影响冬小麦物候发育。图3为7个试验年份不同播期冬小麦在重要生长阶

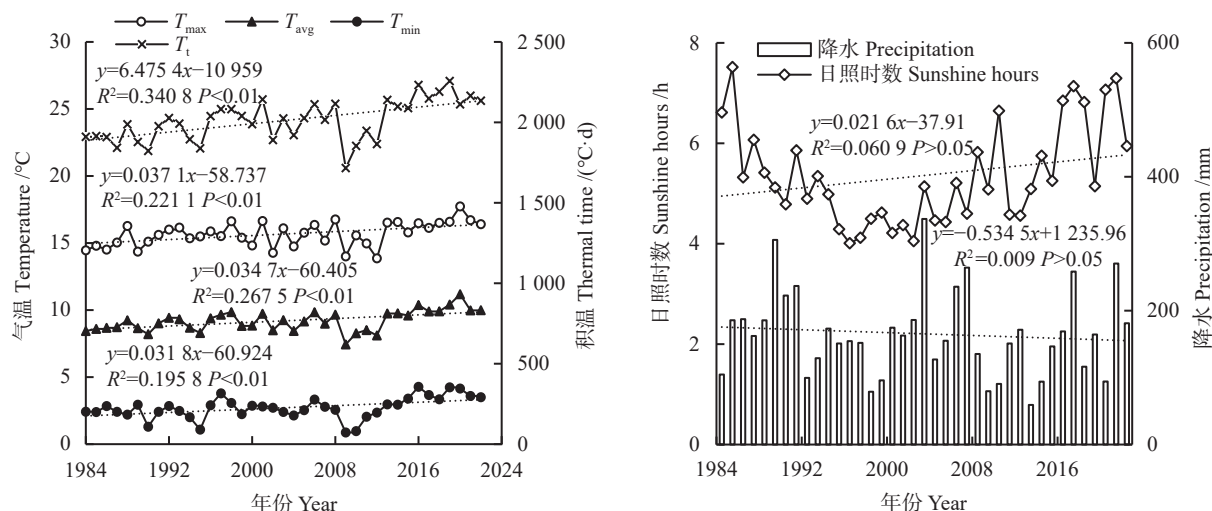


Fig. 1 Annual variations of meteorological factors during the growing seasons of winter wheat at Luancheng Station from 1984 to 2023

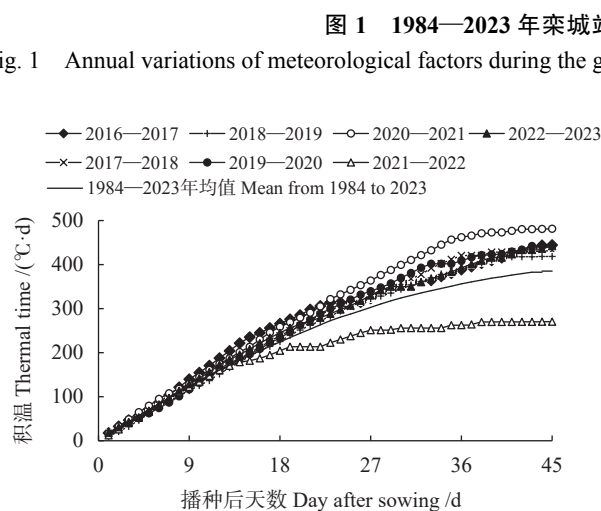


Fig. 2 Accumulation of thermal time before winter dormancy for winter wheat (15th Oct. to 29th Nov.) from 2016 to 2023 and the long-term average for the growing seasons of winter wheat

段(越冬期、拔节期、扬花期和成熟期)的平均积温。结果表明,不同生长季冬小麦生育期积温受越冬前积温影响较大。2020—2021 季积温最高,4 个播期的积温分别为 2 285.4、2 205.9、2 140.5 和 2 072.1 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$; 2021—2022 季积温最低,4 个播期的积温分别为 1 888.7、1 791.8、1 710.1 和 1 675.2 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ 。

不同年份不同处理下冬小麦不同生长阶段积温和持续时间如表 2 所示。从 2016—2023 年多年平均水平来看,随着播期的推迟,播种—越冬阶段积温逐渐降低,持续时间逐渐缩短;越冬—拔节阶段积温逐渐增加,持续时间逐渐延长;拔节—扬花阶段总体上积温逐渐增加,持续时间逐渐延长;扬花—收获阶段积温逐渐降低,持续时间逐渐缩短。由播期造成的不同品种阶段生育期差异在拔节期表现最大,其中播期对‘石新 633’的影响略大于‘石优 20’,‘石新 633’

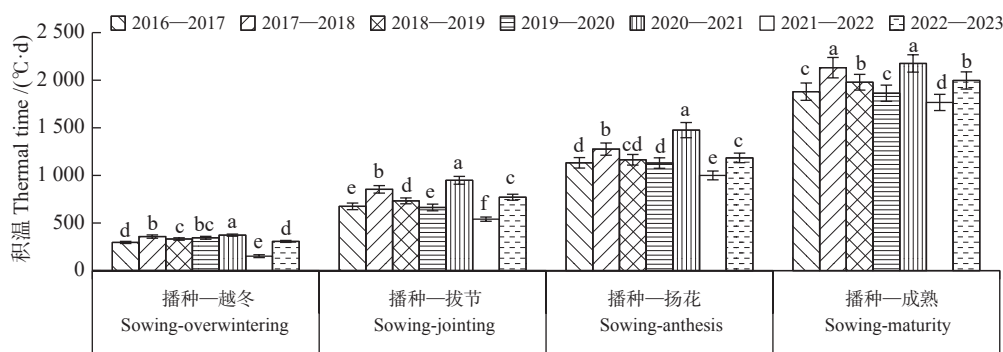


Fig. 3 Average thermal time during important growing stages of winter wheat from 2016 to 2023

图 3 2016—2023 年冬小麦重要生长阶段的平均积温

表 2 2016—2023 年不同品种不同播期冬小麦不同生长阶段积温及持续时间
Table 2 Thermal time and duration of different growing stages of winter wheat for different cultivars and sowing dates from 2016 to 2023

生长季 Growing season	品种 Cultivar	处理 Treatment	播种—越冬 Sowing-overwintering			越冬—拔节 Overwintering-jointing			拔节—扬花 Jointing-anthesis			扬花—收获 Anthesis-maturity			全生育期 Whole growing period		
			积温 Thermal time /(°C·d)	持续时间 Duration /d	积温 Thermal time /(°C·d)	持续时间 Duration /d	积温 Thermal time /(°C·d)	持续时间 Duration /d	积温 Thermal time /(°C·d)	持续时间 Duration /d	积温 Thermal time /(°C·d)	持续时间 Duration /d	积温 Thermal time /(°C·d)	持续时间 Duration /d	积温 Thermal time /(°C·d)	持续时间 Duration /d	积温 Thermal time /(°C·d)
2016—2017	石优20 SY20	SD1	451.9	54	364.6	124	449.3	29	769.7	35	2 035.5	242					
		SD2	348.2	47	364.6	124	466.5	30	752.5	34	1 931.8	235					
		SD3	230.3	40	393.3	126	457.3	29	732.9	33	1 813.9	228					
		SD4	153.9	33	407.5	127	479.0	30	697.1	31	1 737.5	221					
2017—2018	石新633 SX633	SD1	451.9	54	364.6	124	408.8	27	810.1	37	2 035.5	242					
		SD2	348.2	47	364.6	124	449.3	29	769.7	35	1 931.8	235					
		SD3	230.3	40	379.0	125	471.7	30	732.9	33	1 813.9	228					
		SD4	153.9	33	393.3	126	475.9	30	714.4	32	1 737.5	221					
2018—2019	石优20 SY20	SD1	495.8	64	477.7	119	411.4	26	885.0	40	2 269.8	249					
		SD2	401.1	57	477.7	119	411.4	26	885.0	40	2 175.2	242					
		SD3	310.0	50	502.3	122	403.5	24	868.3	39	2 084.1	235					
		SD4	223.6	43	536.5	124	447.2	26	790.4	35	1 997.7	228					
2019—2020	石新633 SX633	SD1	495.8	64	467.3	117	421.9	28	885.0	40	2 269.8	249					
		SD2	401.1	57	467.3	117	438.5	29	868.3	39	2 175.2	242					
		SD3	310.0	50	502.3	122	421.5	25	850.4	38	2 084.1	235					
		SD4	223.6	43	536.5	124	426.3	25	811.3	36	1 997.7	228					
2020—2021	石优20 SY20	SD1	426.9	53	392.1	122	458.6	32	795.9	36	2 073.4	243					
		SD2	365.3	48	404.0	123	479.0	33	763.5	34	2 011.9	238					
		SD3	301.5	43	419.0	124	464.0	32	736.5	34	1 948.0	233					
		SD4	234.8	38	419.0	124	480.2	33	747.3	33	1 881.4	228					
2021—2022	石新633 SX633	SD1	426.9	53	381.3	121	415.5	30	849.8	39	2 073.4	243					
		SD2	365.3	48	381.3	121	450.5	32	814.8	37	2 011.9	238					
		SD3	301.5	43	404.0	123	427.8	30	814.8	37	1 948.0	233					
		SD4	234.8	38	404.0	123	464.1	32	778.5	35	1 881.4	228					
2022—2023	石优20 SY20	SD1	442.4	44	331.1	123	447.1	35	740.3	35	1 960.8	237					
		SD2	380.1	39	331.1	123	447.1	35	740.3	35	1 898.5	232					
		SD3	311.1	34	331.1	123	447.1	35	740.3	35	1 829.5	227					
		SD4	245.7	29	331.1	123	447.1	35	740.3	35	1 764.1	222					

续表 2

生长季 Growing season	品种 Cultivar	处理 Treatment	播种—越冬 Sowing-overwintering		越冬—拔节 Overwintering-jointing		拔节—扬花 Jointing-anthesis		扬花—收获 Anthesis-maturity		全生育期 Whole growing period	
			积温 Thermal time (/°C·d)	持续时间 Duration /d	积温 Thermal time (/°C·d)	持续时间 Duration /d	积温 Thermal time (/°C·d)	持续时间 Duration /d	积温 Thermal time (/°C·d)	持续时间 Duration /d	积温 Thermal time (/°C·d)	持续时间 Duration /d
2020—2021	石新633 SX633	SD1	442.4	44	305.7	121	472.4	37	740.3	35	1 960.8	237
		SD2	380.1	39	305.7	121	472.4	37	740.3	35	1 898.5	232
		SD3	311.1	34	305.7	121	472.4	37	740.3	35	1 829.5	227
		SD4	245.7	29	305.7	121	472.4	37	740.3	35	1 764.1	222
	石优20 SY20	SD1	482.0	46	584.6	121	525.7	33	693.2	34	2 285.4	234
		SD2	402.5	41	584.6	121	525.7	33	693.2	34	2 205.9	229
		SD3	337.1	36	584.6	121	525.7	33	693.2	34	2 140.5	224
		SD4	268.7	31	584.6	121	543.1	34	675.7	33	2 072.1	219
2021—2022	石新633 SX633	SD1	482.0	46	567.3	119	501.5	32	734.7	37	2 285.4	234
		SD2	402.5	41	567.3	119	526.5	34	709.6	35	2 205.9	229
		SD3	337.1	36	567.3	119	526.5	34	709.6	35	2 140.5	224
		SD4	268.7	31	567.3	119	543.0	35	693.2	34	2 072.1	219
	马兰1号 ML1	SD1	274.0	48	365.9	113	446.3	30	802.5	39	1 888.7	230
		SD2	177.1	41	365.9	113	466.2	31	782.6	38	1 791.8	223
		SD3	95.4	34	390.6	115	441.5	29	782.6	38	1 710.1	216
		SD4	60.5	27	390.6	115	441.5	29	782.6	38	1 675.2	209
2022—2023	石新633 SX633	SD1	274.0	48	365.9	113	446.3	30	802.5	39	1 888.7	230
		SD2	177.1	41	365.9	113	466.2	31	782.6	38	1 791.8	223
		SD3	95.4	34	390.6	115	441.5	29	782.6	38	1 710.1	216
		SD4	60.5	27	390.6	115	441.5	29	782.6	38	1 675.2	209
	马兰1号 ML1	SD1	443.9	49	450.6	119	424.2	32	815.9	39	2 134.5	239
		SD2	362.3	43	450.6	119	442.6	33	797.5	38	2 052.9	233
		SD3	248.2	35	481.3	121	447.6	33	761.7	36	1 938.8	225
		SD4	172.3	28	481.3	121	447.6	33	761.7	36	1 862.9	218
	衡麦29 HM29	SD1	443.9	49	436.8	118	353.0	28	900.9	44	2 134.5	239
		SD2	362.3	43	450.6	119	403.2	31	836.8	40	2 052.9	233
		SD3	248.2	35	481.3	121	393.5	30	815.9	39	1 938.8	225
		SD4	172.3	28	481.3	121	393.5	30	815.9	39	1 862.9	218

SD: 播期。SD: sowing date.

与‘马兰1号’对播期的响应程度相同,‘马兰1号’比‘衡麦29’更易受播期影响。不同品种对播期的响应同样受年份的影响,在7个试验年份里,仅2019—2020季两个品种对播期均无响应。

2.3 播期对冬小麦群体动态的影响

表3为两个冬小麦品种(‘石优20’和‘石新633’)连续5个生长季,基本苗、分蘖数、分蘖成穗率、株高和最大叶面积指数的平均值。‘石优20’在播期2时基本苗达最大,播期1、3、4下,基本苗无显著差异;‘石新633’的基本苗在播期1时最大,后3个播期基本苗差异不显著;晚播小麦基本苗数量较早播有所减少,但由于播期推迟和播量增加,其变化幅度在不同播期及不同品种间存在差异。小麦分蘖进程随着播期的推迟而加快,在无效分蘖消亡后最终的平均分蘖数在两个品种下均表现为早播大于晚播。不同品种分蘖成穗率对播期的响应不同,‘石优20’在

不同播期下的分蘖成穗率无显著差别,‘石新633’的分蘖成穗率在播期3时最大、播期1时最小,播期2和4同播期1和3无显著差异。‘石新633’的株高比‘石优20’对播期的响应更明显,随播期推迟逐渐降低,‘石优20’的株高由播期2推迟至播期3时显著下降($P<0.05$)。表3结果显示,最后两个播期下冬小麦的最大叶面积指数变小,且品种‘石优20’受播期的影响更大。

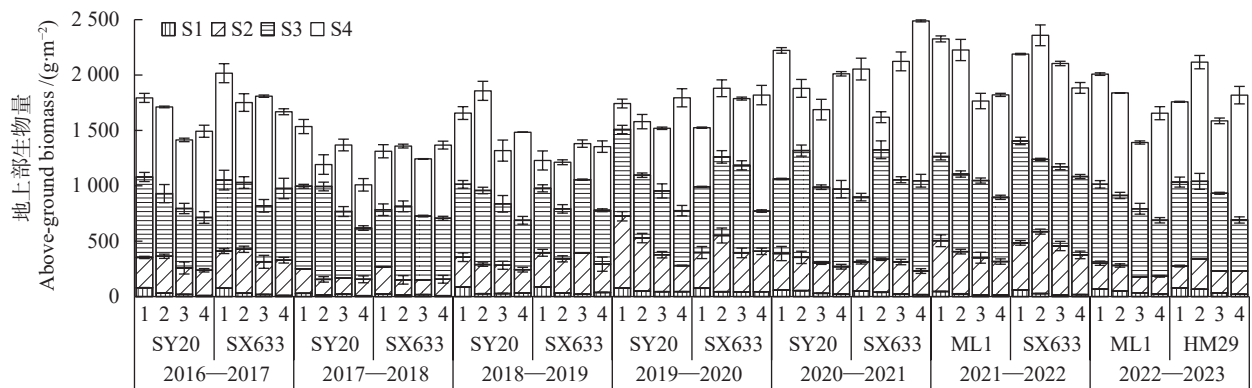
2.4 播期变化对生物量累积分配和产量形成的影响

冬小麦生物量的积累进程总体随播期推迟而逐渐加快,图4为2016—2023年不同播期冬小麦越冬、拔节和扬花阶段干物质累积量,反映了不同播期不同品种越冬生物量、营养生长和生殖生长阶段的差异。结果表明,早播和晚播间各阶段生物量差异明显。早播冬小麦冬前平均气温较高,干物质累积时间较长,故越冬期生物量基本上随着播期的推迟而

表3 2016—2021年两个冬小麦品种在4个播期下的基本苗、分蘖数、分蘖成穗率、株高和最大叶面积指数的平均值
Table 3 Average values of basic seedlings, tillers number per plant, ear-bearing rate of tillers, plant height, and maximum leaf area index from 2016 to 2021

品种	处理	基本苗	平均分蘖数	分蘖成穗率	株高	最大叶面积指数
Cultivar	Treatment	Basic seedlings/(seedling·m ⁻²)	Tillers number per plant	Ear-bearing rate of tillers	Plant height/cm	Maximum leaf area index
石优20	SD1	327.5±38.6b	3.4±0.8a	0.6±0.02a	71.6±5.9ab	4.3±1.0a
SY20	SD2	390.2±40.9a	2.7±0.4b	0.5±0.10a	72.8±8.9a	3.8±1.0b
	SD3	344.5±30.7b	2.3±0.3c	0.6±0.04a	70.5±4.6b	3.8±0.8b
	SD4	338.0±40.0b	2.1±0.5d	0.6±0.10a	71.5±7.5ab	3.1±0.8c
石新633	SD1	344.3±25.9a	3.5±0.5a	0.5±0.01b	71.8±9.1a	3.9±1.3a
SX633	SD2	295.7±36.5b	3.5±0.8a	0.6±0.05ab	70.8±6.1b	3.8±1.0ab
	SD3	303.0±28.5b	2.2±0.6b	0.7±0.11a	68.4±7.7c	3.5±0.6b
	SD4	308.3±29.0b	2.0±0.2b	0.6±0.09ab	67.6±7.0d	3.8±0.7ab

SD: 播期。同列同一品种不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)。SD: sowing date. Different lowercase letters in the same column for the same cultivar indicate significant differences among different treatments at $P<0.05$ level.



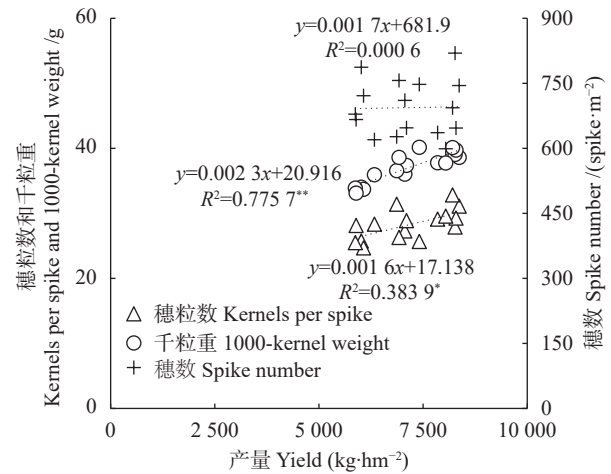
横坐标1、2、3、4依次为播期1、2、3和4。SY20: 石优20; SX633: 石新633; ML1: 马兰1号; HM29: 衡麦29; S1: 播种—越冬阶段; S2: 越冬—拔节阶段; S3: 拔节—扬花阶段; S4: 扬花—成熟阶段。1, 2, 3, and 4 on the X-axis represent sowing date 1, 2, 3 and 4, respectively. SY20, SX633, ML1 and HM29 are different cultivars of winter wheat. S1: sowing-overwintering stage; S2: overwintering-jointing stage; S3: jointing-anthesis stage; S4: anthesis-maturity stage.

图4 2016—2023年冬小麦生长季4个播期两个品种不同生长阶段地上部生物量

Fig. 4 Above-ground biomass during different growing periods of winter wheat for two cultivars and four sowing dates from 2016 to 2023

逐渐减小,播期 1 在每个生长季均处于最高水平,不同品种对播期的响应趋势一致。越冬—拔节期,晚播冬小麦干物质积累速度加快,各播期间差异相较于越冬期时有所减小,品种间无较大差异。自扬花期起,生殖生长为干物质主要积累过程,晚播冬小麦生物量后来居上,弥补了前期与早播冬小麦生物量间的差距。拔节前,播期 1 或 2 处理下的生物量处于领先地位(2018—2019 季‘石新 633’除外),扬花后晚播处理生物量累积速率大幅增长,花后干物质积累主要对籽粒产量具有重要影响。晚播小麦后期生物量累积速度和量的增加在一定程度上弥补了前期和中期生物量减少对产量的影响。

由图 5 产量与产量构成因素(穗数、穗粒数和千粒重)间的回归分析结果可以看出,产量与穗粒数和千粒重分别呈显著($P<0.05$)和极显著($P<0.01$)正相关关系。虽然推迟播种和增加播量对不同年份和不同品种的穗数影响各异,但晚播明显缩短了冬小麦整个生育期的持续时间,播种—拔节持续时间极显著缩短($P<0.01$),进而导致穗分化时间短,不易形成大穗,且影响花粉质量,不孕小穗增多,灌浆时间减少影响籽粒形成。表 4 为 2016—2023 年不同试验处理冬小麦产量三要素和收获指数,晚播冬小麦的穗粒数和收获指数总体高于早播,对于千粒重的影



*: $P<0.05$; **: $P<0.01$.

图 5 2016—2023 年不同播期、不同品种冬小麦平均产量与产量构成因素回归分析

Fig. 5 Regression analysis of yield and yield components at the average levels of different cultivars of winter wheat with different sowing dates from 2016 to 2023

响未呈明显规律,总体而言早播小麦穗数更高。从产量构成因素方面看,推迟播种主要通过缩短春季生育进程影响幼穗分化,导致穗数降低,进而造成晚播小麦产量降低。

2.5 播期对冬小麦产量和品质的影响

图 6 为 2016—2023 年 4 个品种平均产量在不同

表 4 2016—2023 年不同品种、不同播期冬小麦产量构成要素及收获指数

Table 4 Yield components and harvest indexes of different cultivars of winter wheat with different sowing dates from 2016 to 2023

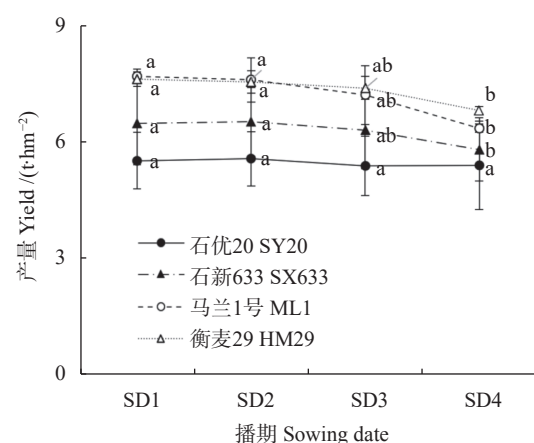
生长季 Growing season	品种 Cultivar	处理 Treatment	穗数 Spike number ($\times 10^4$ spike·hm $^{-2}$)	穗粒数 Kernels per spike	千粒重 1000-kernel weight /g	收获指数 Harvest index
2016—2017	石优20 SY20	SD1	949.2±7.6a	19.6±1.0b	35.1±0.9a	0.36b
		SD2	889.0±17.0a	23.8±1.3ab	32.3±1.0b	0.40±0.01ab
		SD3	620.3±10.5b	28.6±1.8a	33.7±0.8ab	0.42a
		SD4	697.9±7.6b	27.0±1.0a	31.7±0.5b	0.40±0.01ab
	石新633 SX633	SD1	796.8±18.1a	28.0±0.3b	32.7±1.4c	0.36±0.01b
		SD2	695.2±25.4b	27.9±0.7b	34.3±0.9b	0.38±0.02ab
		SD3	594.9±5.7c	35.8±1.3a	35.9±1.5a	0.42±0.02a
		SD4	545.5±12.7d	33.3±1.4ab	35.6±1.6a	0.38±0.01ab
2017—2018	石优20 SY20	SD1	825.9a	22.6±0.2b	29.7±0.7b	0.38±0.02b
		SD2	703.7b	23.0±0.5b	31.2±0.4a	0.38b
		SD3	577.9c	25.1±0.4a	31.0±1.6a	0.41a
		SD4	555.2c	24.9±0.6a	30.0±1.1b	0.41a
	石新633 SX633	SD1	716.1a	24.2±1.3c	35.3±1.5b	0.39±0.02a
		SD2	676.5a	24.3±0.2c	37.2±1.6a	0.39±0.01a
		SD3	568.5b	25.2±0.7b	35.9±0.9b	0.39±0.02a
		SD4	487.4c	27.6±1.7a	35.5±1.4b	0.40±0.01a
2018—2019	石优20 SY20	SD1	528.8±26.6a	27.5±1.0b	33.6±0.6ab	0.39b
		SD2	515.0±24.3a	28.4±0.5b	33.5±1.2ab	0.40±0.02b
		SD3	532.5±8.6a	28.7±1.2b	34.2±0.3a	0.43±0.02a
		SD4	457.5±5.5b	37.9±1.4a	32.7±1.4b	0.40±0.02b
	石新633 SX633	SD1	542.5±19.5ab	34.5±1.6ab	35.3±1.7a	0.41±0.02ab
		SD2	451.3±13.0b	37.7±1.5a	35.7±0.2a	0.42a
		SD3	577.5±17.7a	35.5±1.5ab	35.0±1.5a	0.39b
		SD4	580.0a	30.3±1.6b	34.7±0.1a	0.42±0.02a

续表 4

生长季 Growing season	品种 Cultivar	处理 Treatment	穗数 Spike number ($\times 10^4$ spike hm^{-2})	穗粒数 Kernels per spike	千粒重 1000-kernel weight /g	收获指数 Harvest index
2019—2020	石优20 SY20	SD1	1 020.0 $\pm$ 37.3a	18.3 $\pm$ 0.3b	30.3 $\pm$ 0.3b	0.38a
		SD2	840.0 $\pm$ 22.6b	21.8 $\pm$ 0.6ab	32.9 $\pm$ 0.2ab	0.38 $\pm$ 0.02a
		SD3	837.3 $\pm$ 29.7b	18.7 $\pm$ 0.9b	34.1 $\pm$ 0.7ab	0.35 $\pm$ 0.02b
		SD4	824.0 $\pm$ 12.2b	23.0 $\pm$ 0.2a	35.3 $\pm$ 0.9a	0.37 $\pm$ 0.01ab
	石新633 SX633	SD1	741.3 $\pm$ 14.1b	23.4 $\pm$ 1.2ab	37.7 $\pm$ 1.0a	0.38 $\pm$ 0.01a
		SD2	798.7 $\pm$ 5.7a	23.1 $\pm$ 0.8ab	38.0 $\pm$ 1.6a	0.37 $\pm$ 0.02ab
		SD3	816.0 $\pm$ 23.3a	20.9 $\pm$ 0.9b	35.2 $\pm$ 0.3b	0.34 $\pm$ 0.02b
		SD4	688.0 $\pm$ 6.74c	26.6 $\pm$ 0.2a	38.1a	0.38 $\pm$ 0.01a
2020—2021	石优20 SY20	SD1	565.9 $\pm$ 24.7b	20.7 $\pm$ 0.7b	41.4 $\pm$ 1.5a	0.42 $\pm$ 0.01a
		SD2	733.9 $\pm$ 25.6ab	26.4 $\pm$ 0.8a	38.6 $\pm$ 0.6b	0.40 $\pm$ 0.01ab
		SD3	688.2 $\pm$ 14.2ab	26.3 $\pm$ 1.0a	36.7 $\pm$ 1.1c	0.39 $\pm$ 0.02b
		SD4	802.4 $\pm$ 20.9a	27.9 $\pm$ 1.2a	36.0 $\pm$ 0.5c	0.40 $\pm$ 0.02ab
	石新633 SX633	SD1	764.8 $\pm$ 28.8a	26.4 $\pm$ 1.3b	37.0 $\pm$ 0.4b	0.35 $\pm$ 0.02b
		SD2	579.3 $\pm$ 11.3b	32.8 $\pm$ 0.3a	39.6 $\pm$ 0.6a	0.40 $\pm$ 0.02a
		SD3	540.3 $\pm$ 14.2b	33.5 $\pm$ 1.4a	37.2 $\pm$ 1.1b	0.41 $\pm$ 0.01a
		SD4	646.5 $\pm$ 9.5ab	29.0 $\pm$ 1.1ab	35.9 $\pm$ 1.1c	0.41 $\pm$ 0.01a
2021—2022	马兰1号 ML1	SD1	847.0 $\pm$ 24.6ab	27.3 $\pm$ 1.0b	38.4 $\pm$ 1.0a	0.42 $\pm$ 0.02b
		SD2	908.5 $\pm$ 81.3a	26.9 $\pm$ 0.2b	38.4a	0.45 $\pm$ 0.02a
		SD3	706.3 $\pm$ 26.5b	30.1 $\pm$ 1.7a	38.3 $\pm$ 0.4a	0.46 $\pm$ 0.01a
		SD4	844.5 $\pm$ 153.1ab	25.4 $\pm$ 0.8c	37.7 $\pm$ 0.2b	0.43 $\pm$ 0.02b
	石新633 SX633	SD1	809.1 $\pm$ 96.4a	27.3 $\pm$ 1.0ab	38.2 $\pm$ 0.5ab	0.39 $\pm$ 0.01ab
		SD2	778.3 $\pm$ 87.0b	27.6 $\pm$ 0.6ab	39.5 $\pm$ 0.2a	0.39 $\pm$ 0.02ab
		SD3	691.5 $\pm$ 52.9c	30.6 $\pm$ 1.8a	40.3 $\pm$ 0.9a	0.42 $\pm$ 0.02a
		SD4	696.8 $\pm$ 90.8c	23.3 $\pm$ 0.5b	36.0 $\pm$ 1.0b	0.35 $\pm$ 0.02b
2022—2023	马兰1号 ML1	SD1	642.9 $\pm$ 32.2ab	35.0 $\pm$ 1.6a	38.8 $\pm$ 0.3ab	0.44c
		SD2	730.9 $\pm$ 32.2a	28.9 $\pm$ 0.5b	39.7 $\pm$ 1.0a	0.45b
		SD3	566.0 $\pm$ 49.0b	28.1 $\pm$ 1.1b	37.3 $\pm$ 0.1b	0.43d
		SD4	668.8 $\pm$ 6.6ab	27.2b	39.5 $\pm$ 1.1a	0.46 $\pm$ 0.01a
	衡麦29 HM29	SD1	646.9 $\pm$ 59.5c	29.3ab	39.7 $\pm$ 1.8a	0.44a
		SD2	693.6 $\pm$ 37.7b	32.9 $\pm$ 1.0a	40.1 $\pm$ 1.3a	0.43 $\pm$ 0.02ab
		SD3	599.1 $\pm$ 1.5d	29.6 $\pm$ 1.3ab	37.8 $\pm$ 1.2b	0.42 $\pm$ 0.01b
		SD4	747.9 $\pm$ 16.1a	25.7 $\pm$ 1.1b	40.2 $\pm$ 0.8a	0.42 $\pm$ 0.01b

SD: 播期。同列同一生长季同一品种不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P<0.05$)。SD: sowing date. Different lowercase letters in the same column for the same cultivar during the same growing season indicate significant differences among different treatments at $P<0.05$ level.

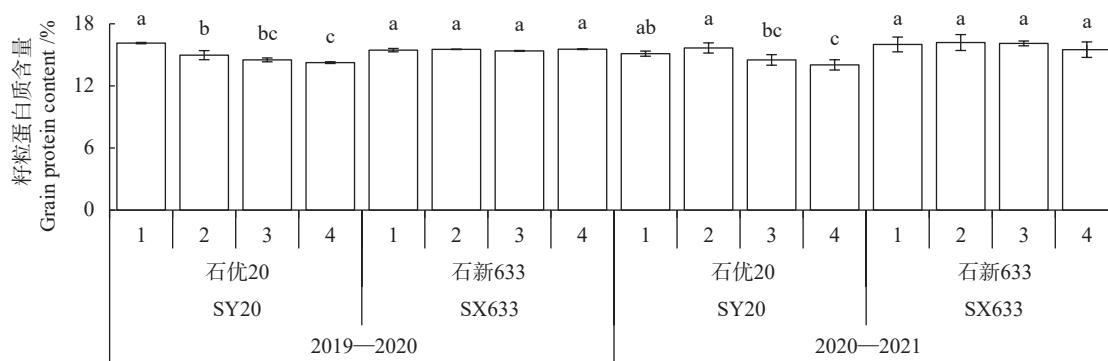
播期下的变化趋势。结果显示, 冬小麦整体产量随播期推迟逐渐降低, 晚于播期 2 的产量下降明显, 但早于播期 2 的播种产量无显著差异, 不同品种变化趋势基本一致, 但‘石优 20’播期 3 和播期 4 平均产量分别为 5 873.4 和 5 892.0 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 后者较前者虽略有增加, 但变化不显著, 可忽略。播期 2 后播量增加无法弥补播期推迟对冬小麦产量的影响, 故冬小麦适宜播期可延后到播期 2, 即 10 月 12—24 日。图 7 为 2019—2021 年不同播期、不同品种冬小麦籽粒蛋白质含量。结果表明, 不同品种籽粒蛋白质含量对播期的响应不同, 推迟播期显著影响‘石优 20’籽粒品质, 尤其在播期 2 之后, ‘石新 633’籽粒品质在不同播期下无显著差异, 维持在一个稳定状态。播期 1、2、3 和 4 在 7 个生育期的平均总积温分别为 2 092.6、2 009.7、1 923.6 和 1 855.8 $^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$, 平均冬前积温分别为 431.0、348.1、262.0 和 194.2 $^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$, 结合本研究结



同一品种不同小写字母表示不同播期间差异显著 ($P<0.05$)。Different lowercase letters for the same cultivar indicate significant differences among different sowing dates ($P<0.05$).

图 6 2016—2023 年不同播期、不同品种冬小麦多年平均产量趋势

Fig. 6 Annual average yield trend of winter wheat with different cultivars and sowing dates from 2016 to 2023



横坐标 1、2、3 和 4 依次为播期 1、2、3 和 4。同一生长季同一品种不同小写字母表示不同播期间差异显著 ($P < 0.05$)。1, 2, 3, and 4 on the X-axis represent sowing date 1, 2, 3, and 4, respectively. Different lowercase letters for the same cultivar during the same growing season indicate significant differences among different sowing dates at $P < 0.05$ level.

图 7 2019—2021 年不同播期不同品种冬小麦籽粒蛋白质含量

Fig. 7 Grain protein contents of winter wheat with different cultivars and sowing dates from 2019 to 2021

果, 适播期冬前 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上积温应达 $350\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$, 生育期总积温应达 $2\ 010\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$, 以避免冬小麦产量受到显著影响。

2.6 以稳产为前提适宜播期的长期变化

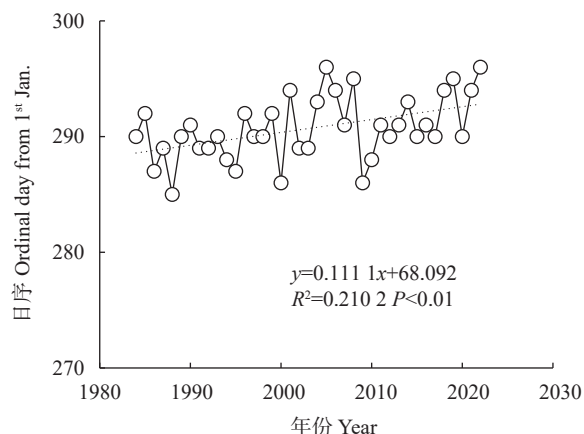
根据张悦等^[17]的研究结果, 1961—2017 年华北平原冬小麦平均越冬期初日在气候变化背景下大概推迟 3.7 d, 且主要在小雪节气上下波动。华北中北部地区越冬期晚于平均水平, 以每年 12 月 1 日为越冬期初日, 往前推算适宜播种日期, 即冬前积温达 $350\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$, 1984—2023 年最适播种日期年际变化趋势如图 8 所示。分析结果发现, 播种时间与年份通过了显著性检验 ($P < 0.01$), 变化曲线在波动中呈上升趋势, 随着时间推移, 在不影响产量的前提下, 冬前积温达 $350\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ 的适宜播种时间越来越晚, 本世纪比

上世纪适宜播种日期推迟 2.6 d 左右, 从播种到越冬期初日持续时间平均为 45 d。此结果与前文结果相符, 故在气候变化背景下, 不影响产量降低的适宜播期逐渐推迟。

3 讨论

3.1 播期通过积温影响冬小麦各阶段生育期

播期延迟和积温减少会造成冬小麦全生育期缩短, 但各生长阶段进程快慢不一。从长期角度看, 冬小麦生育期积温在波动中不断增加。本研究将冬小麦生长阶段分为播种—越冬、越冬—拔节、拔节—扬花和扬花—收获, 随着播期的推迟, 各阶段持续时间变化分别表现为缩短、延长、延长和缩短。播种—拔节持续时间与播期呈极显著负相关 ($P < 0.01$, 相关结果见电子版资源附件), 早播冬小麦越冬前积温更高, 穗分化时间更长, 能为高产奠定更好的群体基础^[18]。Xu 等^[19]发现, 晚播冬小麦出苗—拔节持续时间显著缩短, 导致单株分蘖和干物质积累减少。本研究结果发现, 播种—越冬持续期缩短, 而越冬—拔节持续期延长, 故冬前生育期缩短才是影响冬小麦群体生长发育的主要原因。晚播造成的冬前生育期缩短对作物干物质积累时间的影响从拔节期开始显现一直持续到扬花期, 晚播冬小麦拔节—扬花时间比早播长, 导致冬小麦后续灌浆效率降低从而造成减产。高温环境下, 冬小麦抽穗时间通常会提前, 冬小麦生殖生长期相应增加, 从而提高产量^[20]。本研究发现, 拔节—抽穗持续时间与拔节—抽穗平均温度呈显著负相关 ($P < 0.05$), 平均温度越高抽穗时间越提前, 结论与前者相符, 但不同冬小麦品种响应存在差异, ‘石优 20’和‘石新 633’的拔节—抽穗持续时间与平均温度呈极显著负相关 ($P < 0.01$), 而‘马兰 1 号’



越冬期之前的积温 $> 350\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$, 越冬期初日为每年 12 月 1 日。Thermal time before overwintering stage is over $350\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$, and the initial day of overwintering stage is 1st December of each year.

图 8 1984—2023 年冬小麦适宜播种日期年际变化

Fig. 8 Annual variation of suitable sowing date of winter wheat from 1984 to 2023

和‘衡麦 29’对其响应并不明显(相关结果见电子版资源附件)。

3.2 冬小麦群体动态的变化

冬小麦扬花前生物量增长速率与小麦群体动态变化同步(相关结果见电子版资源附件)。晚播冬小麦苗弱分蘖少,越冬密度与基本苗数量差异较小,群体不够强壮不利于越冬,而早播群体在冬前分蘖数增加明显,说明早播冬小麦前期发育充分,为冬小麦生长奠定了一个良好的群体基础。早播冬小麦在返青期形成最大群体,整体发育进程早于晚播冬小麦,与张敏等^[21]研究结果一致的是,晚播密度最大出现在拔节期,因为前期小麦植株分蘖节积累糖分消耗较少,故在相应推迟的生长阶段才快速分蘖。晚播冬前有效分蘖株数量少,群体生殖生长稍微滞后,若冬末春初遇到高温晚播冬小麦能弥补前期生长进程过慢产生的差距。本研究4个品种最大群体(拔节期群体密度)均与产量和穗数呈极显著正相关关系($P<0.01$,相关结果见电子版资源附件),与千粒重呈显著正相关关系($P<0.05$),说明晚播冬小麦通过影响群体数量以及生殖生长时间与质量而导致作物减产。最大叶面积指数(LAI)的变化规律与冬小麦最大群体(拔节期群体密度)同步,两者呈极显著正相关关系($P<0.01$),早播小麦更好的温度条件使得各种营养元素的同化过程更加充分,产生的碳同化物更多地被分配到叶,故不同播期下冬小麦的LAI差异主要来源于生物量积累和分配的差异^[22]。单株分蘖除了与播期相关,还受基因型的影响,不同品种的分蘖能力不同。陈素英等^[23]指出,冬小麦在10月10日前播种春季单株分蘖达3.5,本研究中‘石新633’在播期2同样达3.5,‘马兰1号’分蘖能力明显强于其他品种。提高成穗率要求低位分蘖和早发分蘖,并快速集中消亡,这样既可以保证群体数量,又能够增强群体通风透光性能^[24-25],刚好也符合晚播冬小麦的成穗特性,但通过对比‘石优20’和‘石新633’发现,分蘖成穗同样在不同品种间存在差异。

3.3 播期对干物质积累、产量形成和品质的影响

越冬前生物量主要取决于冬小麦群体的多少,到拔节后不同播期间的差异逐渐凸显。根据前文对群体密度的分析结果,晚播冬小麦最大群体在拔节期形成,而在拔节后晚播冬小麦干物质积累速度明显加快,说明生殖生长前不同播期冬小麦生物量增长速率与冬小麦群体动态变化高度相关。Zhu等^[26]研究表明,推迟播期有利于增加拔节期间的干物质积累,故拔节—扬花阶段持续时间的延长有利于加

速拔节期干物质积累,也是弥补晚播与早播间差距的重要因素。扬花—成熟阶段生物量的积累主要源于籽粒形成,不同播期花后干物质积累无统计学差异,可能是由于试验的7个生育期不同播期时间差距较大所致。晚播作物必须在关键物候期(灌浆前)经历较高温度才能弥补前期生长进程过慢带来的负面影响^[27]。2020—2021季在2月出现大幅增温现象,冬末春初适当增温有利于穗分化和穗粒数的增加^[28],且晚播冬小麦穗粒数增加的主要原因是同一小穗上穗顶端和远端位置的谷粒数量增加^[29],因此晚播冬小麦可以弥补春季群体生长过慢的缺点,通过提升穗粒数发育达到增产目的,该季两个品种在播期1、2、3和4的平均产量分别为6 894.0、6 813.0、6 836.8和7 241.8 kg·hm⁻²,最晚播冬小麦产量最高可佐证上述理论。关于推迟播期对籽粒产量的影响具有争议,部分研究表明,晚播冬小麦扬花—成熟时间的缩短影响灌浆时间,且在此期间容易遇到高温,从而加速籽粒发育,导致谷物干瘪,影响产量^[30];也有研究证明,推迟播期并不会造成减产^[31]。本研究与朱元刚等^[32]的研究结果一致,随着播期的推迟,产量三要素的差异总体表现为:穗数降低,穗粒数增加,千粒重变化无统计学差异,而产量总体呈下降趋势,说明推迟播期主要通过影响冬小麦穗数造成减产。

关于冬小麦的籽粒品质,推迟播期会对其产生负面影响,且不同品种对其响应存在差异。本研究结果显示,播期推迟降低了‘石优20’的籽粒蛋白质含量,而‘石新633’的籽粒蛋白质含量随播期变化不明显。麦穗中穗粒数和¹³C同化物的增加是同步进行的,在延迟播种的条件下,平均粒重保持不变,穗粒数增加,说明有限的氮供应被稀释成更多谷物,谷物蛋白质含量降低,进而导致籽粒品质降低^[29]。不同品种对播期响应差异明显的主要原因是基因型的差异。吕丽华等^[33]根据冬小麦对播期响应的敏感程度将其划分为迟钝型、中间型和敏感型品种,并明确3类品种的适宜播期和冬前积温下限;根据春化阶段所需温度高低和时间长短,冬小麦品种可分为冬性、半(弱)冬性和春性3种类型。冬性小麦所需春化时间较长,不适合晚播;半冬性小麦春化时间较短,抗寒性好,但易感赤霉病,从而增加穗发芽风险;春性品种易受冻害,但对赤霉病和穗发芽具有一定抗性^[34]。有研究表明,环境、管理和品种对产量变异的贡献分别为80%、6%和3%^[35],品种与环境和管理条件间的相互作用非常大,故对不同品种冬小麦来说,需结合当地气候条件,适期适墒播种,提高播种质量,

合理施肥, 培育冬前壮苗, 以上是保证第 2 年夏粮丰收的前提。

3.4 未来气候变化下的冬小麦播期选择

Liu 等^[36]1997—2021 年在河北固城农业气象国家观测研究站的长期研究表明, 冬小麦适宜播期为 10 月 1—15 日, 冬前积温应达 400 °C·d 才能保证产量稳定性最高; 邵立威等^[37]2011—2013 年在中国科学院南皮生态农业试验站和南皮县白坊子示范区的研究指出, 冬小麦可适当晚播, 但不能晚于 10 月 15 日; 本研究结果与前人研究结果相比, 在气候变化背景下冬小麦的适宜播期有所推迟。2011—2020 年全球地表温度比 1850—1900 年上升 1.1 °C, 联合国政府间气候变化专门委员会第六次评估报告预测, 持续排放温室气体将导致 2021—2040 年全球升温达 1.5 °C, 而一旦升温幅度超过 1.5 °C, 可能对极地和高山区造成不可逆的影响^[38]。赵天保等^[39]发现, 20 世纪 50 年代至 21 世纪初华北北部部分地区的增温幅度超过了 2 °C; Kang 等^[40]预测, 2070—2100 年气候变化和灌溉导致的极端热浪在华北平原出现的概率大大增加, 尽管 RCP 4.5 (representative concentration pathway 4.5) 温室气体排放情景下热浪频率明显降低, 但气温将多次迈过 35 °C 门槛, 这不仅影响农业生产, 更严重者会影响此地宜居性。基于以上分析, 未来气候变化情景下冬小麦的开花和成熟期提前^[41], 适宜播期将逐渐推迟, 种植北界北移^[42], 对于适宜播种日期, 建议结合种植区域水热资源, 选择适合的优良品种, 配合机械化耕作进行选择。

4 结论

确定冬小麦适宜播种时间对冬小麦-夏玉米种植模式下获得谷物最大产值具有重要影响。本研究结果显示, 在气候变化背景下, 冬小麦适宜播期有所推迟。本研究对 2016—2023 年栾城站冬小麦播期试验观测数据进行分析, 结果表明, 气候变化表现为温度升高, 降水减少, 在产量没有显著下降的前提下, 冬小麦适播日期为 10 月 12—24 日, 冬前积温和生育期总积温需分别达 350 和 2 010 °C·d。延迟播期导致冬小麦生长进程加快, 冬前生长和生殖生长时间的缩短影响分蘖和灌浆过程, 从而导致冬小麦减产。不同品种间冬小麦分蘖能力差异显著, 晚播下在拔节时群体数量达最大, 最大叶面积指数与最大群体呈极显著正相关关系 ($P < 0.01$), 晚播冬小麦分蘖较早, 分蘖消亡迅速且集中, 因而其成穗率高于早播。从拔节起, 晚播冬小麦生物量随着密度的增加而快速

增加, 一定程度上弥补了前期生长落后的差距。随着播期的推迟, 冬小麦穗数减少、穗粒数增多, 营养元素被均分, 导致劣质籽粒增多, 进而影响籽粒品质, 可能也是不同播期下千粒重未表现出明显规律的原因。本研究主要考虑从温度、积温和品种等方面分析适宜播期的变化, 并未对光照和降水等气象因素进行分析, 未来研究还需从更全面的角度着手, 为气候变化下的农业发展创造新的生命力。

播种—拔节期持续时间与播期, 拔节—抽穗期持续时间与平均温度, 冬小麦生物量与群体密度以及拔节期群体密度与产量、穗数、千粒重和最大叶面积指数相关关系, 4 个播期冬小麦地上部生物量差异显著性结果见电子版资源附件: <http://www.ecoagri.ac.cn/article/doi/10.12357/cjea.20240209>。

参考文献 References

- [1] 黄峰, 杨晓琳, 方瑜, 等. 适应水土资源条件的华北地区农业种植布局研究[J]. 中国工程科学, 2022, 24(5): 89–96
HUANG F, YANG X L, FANG Y, et al. Exploring water-and-land-adapted spatial layout of crop planting in North China[J]. *Strategic Study of CAE*, 2022, 24(5): 89–96
- [2] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴 2002[M]. 北京: 中国统计出版社, 2002
National Bureau of Statistics of China. Statistical Yearbook of China in 2002[M]. Beijing: China Statistics Press, 2002
- [3] LEI H. Distribution maps of crop planting areas in the North China Plain (2001–2018). National Tibetan Plateau Data Center, 2022
- [4] 任三学, 周广胜, 赵花荣, 等. 华北北部夏玉米适期早播的增产效果[J]. 华北农学报, 2023, 38(6): 81–93
REN S X, ZHOU G S, ZHAO H R, et al. Yield promoting effect of early sowing of summer maize at appropriate time in northern North China[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2023, 38(6): 81–93
- [5] MINOLI S, JÄGERMEYER J, ASSENG S, et al. Global crop yields can be lifted by timely adaptation of growing periods to climate change[J]. *Nature Communications*, 2022, 13(1): 7079
- [6] SUN H, SHAO L, CHEN S, et al. Effects of sowing time and rate on crop growth and radiation use efficiency of winter wheat in the North China Plain[J]. *International Journal of Plant Production*, 2013, 7(1): 117–138
- [7] LIU Y, CAO H N, DU C H, et al. Novel water-saving cultivation system maintains crop yield while reducing environmental costs in North China Plain[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2023, 197: 107111
- [8] 王书吉, 康绍忠, 李涛. 基于节水高产优质目标的冬小麦适宜水分亏缺模式[J]. 农业工程学报, 2015, 31(12): 111–118
WANG S J, KANG S Z, LI T. Suitable water deficit mode for winter wheat basing objective of water saving as well as high yield and quality[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(12): 111–118

- [9] WANG J, WANG E L, YANG X G, et al. Increased yield potential of wheat-maize cropping system in the North China Plain by climate change adaptation[J]. *Climatic Change*, 2012, 113(3): 825–840
- [10] 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: 135–143
- [11] XIAO D P, TAO F L, LIU Y J, et al. Observed changes in winter wheat phenology in the North China Plain for 1981–2009[J]. *International Journal of Biometeorology*, 2013, 57(2): 275–285
- [12] KIRBY E J M, SPINK J H, FROST D L, et al. A study of wheat development in the field: Analysis by phases[J]. *European Journal of Agronomy*, 1999, 11(1): 63–82
- [13] SALAZAR-GUTIERREZ M R, JOHNSON J, CHAVES-CORDOBA B, et al. Relationship of base temperature to development of winter wheat[J]. *International Journal of Plant Production*, 2013, 7(4): 741–762
- [14] SLAFER G A, SAVIN R. Developmental base temperature in different phenological phases of wheat (*Triticum aestivum*)[J]. *Journal of Experimental Botany*, 1991, 42(8): 1077–1082
- [15] 李朝英, 郑路, 卢立华, 等. 测定植物全氮的 $H_2SO_4-H_2O_2$ 消煮法改进[J]. *中国农学通报*, 2014, 30(6): 159–162
- LI Z Y, ZHENG L, LU L H, et al. Improvement in the $H_2SO_4-H_2O_2$ digestion method for determining plant total nitrogen[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2014, 30(6): 159–162
- [16] 刁超朋, 李小涵, 王朝辉, 等. 旱地高产小麦品种籽粒含磷量差异与氮磷钾吸收利用的关系[J]. *植物营养与肥料学报*, 2019, 25(3): 351–361
- DIAO C P, LI X H, WANG Z H, et al. Difference in grain phosphorus content of high-yielding wheat cultivars and its relation to NPK uptake and utilization in dryland[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, 25(3): 351–361
- [17] 张悦, 胡琦, 和骅岩, 等. 气候变化背景下华北平原冬小麦冬前生育期与节气对应及偏移分析[J]. *中国农业气象*, 2019, 40(7): 411–421
- ZHANG Y, HU Q, HE H Y, et al. Correspondence and shifting analysis for the winter wheat growing period before winter and solar terms in the North China Plain under climate change background[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2019, 40(7): 411–421
- [18] 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: 53–62
- LÜ L H, WU L Y, LI Q, et al. Effect of sowing date on yield formation and plant structure of wheat[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2024, 39: 53–62
- [19] XU C L, ZHAO H X, ZHANG P, et al. Delaying wheat seeding time and maize harvest improved water use efficiency in a warm temperature continental monsoon climate[J]. *Agronomy Journal*, 2018, 110(4): 1420–1429
- [20] 肖登攀, 陶福祿, 沈彦俊, 等. 华北平原冬小麦对过去 30 年气候变化响应的敏感性研究[J]. *中国生态农业学报*, 2014, 22(4): 430–438
- XIAO D P, TAO F L, SHEN Y J, et al. Sensitivity of response of winter wheat to climate change in the North China Plain in the last three decades[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2014, 22(4): 430–438
- [21] 张敏, 王岩岩, 蔡瑞国, 等. 播期推迟对冬小麦产量形成和籽粒品质的调控效应[J]. *麦类作物学报*, 2013, 33(2): 325–330
- ZHANG M, WANG Y Y, CAI R G, et al. Regulating effect of delayed sowing date on yield formation and grain quality of winter wheat[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2013, 33(2): 325–330
- [22] LIU F S, CHEN Y, BAI N N, et al. Divergent climate feedbacks on winter wheat growing and dormancy periods as affected by sowing date in the North China Plain[J]. *Biogeosciences*, 2021, 18(7): 2275–2287
- [23] 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): 681–685
- 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): 681–685
- [24] 于振文. 作物栽培学各论: 北方本[M]. 北京: 中国农业出版社, 2013
- YU Z W. Various Theories of Crop Cultivation: Northern Book[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2013
- [25] 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): 656–665
- WANG S Y, RONG X J, FAN G Q, et al. Effect of sowing dates on tiller occurring, withering away and earbearing[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2017, 37(5): 656–665
- [26] 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
- [27] SATTAR A, NANDA G, SINGH G, et al. Responses of phenology, yield attributes, and yield of wheat varieties under different sowing times in Indo-Gangetic Plains[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2023, 14: 1224334
- [28] 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
- [29] 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): 2359–2369
- [30] BAILEY-SERRES J, PARKER J E, AINSWORTH E A, et al. Genetic strategies for improving crop yields[J]. *Nature*, 2019, 575(7781): 109–118
- [31] YAO F M, LI Q Y, ZENG R Y, et al. Effects of different agricultural treatments on narrowing winter wheat yield gap and nitrogen use efficiency in China[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2021, 20(2): 383–394
- [32] 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): 370–381
- 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): 370–381
- [33] 吕丽华, 梁双波, 张丽华, 等. 不同小麦品种产量对冬前积温变化的响应[J]. *作物学报*, 2016, 42(1): 149–156
- LÜ L H, LIANG S B, ZHANG L H, et al. Yield in response to accumulated temperature before winter in winter wheat[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2016, 42(1): 149–156
- [34] 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): 613–623
- 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): 613–623
- [35] ANDERSON W K. Closing the gap between actual and potential yield of rainfed wheat. The impacts of environment, management and cultivar[J]. *Field Crops Research*, 2010, 116(1/2): 14–22
- [36] 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
- [37] 邵立威, 罗建美, 尹工超, 等. 河北低平原区冬小麦夏玉米产量提升的理论与技术研究[J]. *中国生态农业学报*, 2016, 24(8): 1114–1122
- SHAO L W, LUO J M, YIN G C, et al. Research on exploiting wheat-maize grain yield theory and technology in the eastern low plain of Hebei Province[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2016, 24(8): 1114–1122
- [38] Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2022 – Impacts, Adaptation and Vulnerability[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2023
- [39] 赵天保, 李春香, 左志燕. 基于 CMIP5 多模式评估人为和自然因素外强迫在中国区域气候变化中的相对贡献[J]. *中国科学: 地球科学*, 2016, 46(2): 237–252
- ZHAO T B, LI C X, ZUO Z Y. Contributions of anthropogenic and external natural forcings to climate changes over China based on CMIP5 model simulations[J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 2016, 46(2): 237–252
- [40] KANG S, ELTAHIR E A B. North China Plain threatened by deadly heatwaves due to climate change and irrigation[J]. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 2894
- [41] 肖登攀, 陶福祿. 过去 30 年气候变化对华北平原冬小麦物候的影响研究[J]. *中国生态农业学报*, 2012, 20(11): 1539–1545
- XIAO D P, TAO F L. Impact of climate change in 1981–2009 on winter wheat phenology in the North China Plain[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2012, 20(11): 1539–1545
- [42] 张梦婷, 张玉静, 佟金鹤, 等. 未来气候情景下冬小麦潜在北移区农业气候资源变化特征[J]. *气候变化研究进展*, 2017, 13(3): 243–252
- ZHANG M T, ZHANG Y J, TONG J H, et al. Variations of agro-climatic resources under a future climate scenario in the potential northward region of winter wheat[J]. *Climate Change Research*, 2017, 13(3): 243–252