

基于 WMAIP 集成模型的华北冬小麦适宜播期与冬前积温下限研究

陈先冠¹ 冯利平² 白慧卿³ 孙爽¹ 李国强^{4,5} 程陈⁶
江敏¹ 李颖^{7,8} 赵锦²

(1. 福建农林大学农学院, 福州 350002; 2. 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193;

3. 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081; 4. 河南省农业科学院农业信息技术研究所, 郑州 450002;

5. 农业农村部黄淮海智慧农业技术重点实验室, 郑州 450002; 6. 丽水学院生态学院, 丽水 323000;

7. 河南省气象科学研究所, 郑州 450003; 8. 中国气象局·河南省农业气象保障与应用技术重点开放实验室, 郑州 450003)

摘要: 为明确气候变暖 and “双晚技术”背景下华北地区冬小麦的适宜播期, 基于 WMAIP 集成模型, 对华北地区冬小麦适宜播期、冬前积温下限及最迟播期进行了分析。研究表明, 华北地区晚播减产幅度由南向北增大, 南部晚播减产幅度最小 (< 19.5%), 中部晚播减产幅度在 26.4% 以内, 北部晚播减产幅度最大, 最高可达 32.0%。华北地区北部、中部和南部的适宜播期分别在 9 月 25 日—10 月 5 日之间、9 月 30 日—10 月 20 日之间和 10 月 10 日—11 月 5 日之间。华北地区冬小麦基于高产和高水分利用效率的适宜冬前积温下限分别在 497 ~ 629℃·d 和 344 ~ 581℃·d 之间, 并由南部向北部递增。在高产和高水分利用效率条件下, 河北、山东、河南大部分地区的最近播期分别为 10 月 1—13 日、10 月 10—16 日、10 月 22—28 日和 10 月 7—19 日、10 月 16—22 日、10 月 31 日—11 月 12 日。研究结果可为气候变暖背景下华北地区“双晚技术”的推广和应用提供参考。

关键词: 冬小麦; 冬前积温下限; 最迟播期; 产量; 水分利用效率; WMAIP

中图分类号: S512.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2024)02-0315-11

OSID:



Suitable Sowing Date and Minimum Pre-winter Accumulated Temperature for Winter Wheat in North China Plain Based on WMAIP Integrated Model

CHEN Xianguan¹ FENG Liping² BAI Huiqing³ SUN Shuang¹ LI Guoqiang^{4,5}
CHENG Chen⁶ JIANG Min¹ LI Ying^{7,8} ZHAO Jin²

(1. College of Agriculture, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China

2. College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China

3. Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China

4. Institute of Agricultural Information Technology, Henan Academy of Agricultural Sciences, Zhengzhou 450002, China

5. Key Laboratory of Huang-Huai-Hai Smart Agricultural Technology,
Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Zhengzhou 450002, China

6. College of Ecology, Lishui University, Lishui 323000, China

7. Henan Institute of Meteorological Sciences, Zhengzhou 450003, China

8. China Meteorological Administration·Henan Agrometeorological Support and Applied Technique Key Laboratory,
Zhengzhou 450003, China)

Abstract: Global warming has direct impacts on agricultural production and food security. The North China Plain (NCP) has adopted the double later-cropping system (the later sowing of winter wheat and the later harvest of summer maize) as a strategy to cope with climate change and increase yield. Determining the latest sowing period for winter wheat in this region under the backdrop of climate change is crucial for ensuring high yield and efficiency, thereby safeguarding China's food security. Based on the WMAIP integrated model, the suitable sowing period and the minimum pre-winter accumulated temperature were analyzed for winter wheat at six representative sites in NCP, including Beijing and

收稿日期: 2023-11-06 修回日期: 2023-12-04

基金项目: 农业农村部黄淮海智慧农业技术重点实验室开放基金项目(202302)和国家自然科学基金项目(41805090)

作者简介: 陈先冠(1994—),男,讲师,博士,主要从事作物模型与智慧决策研究,E-mail: chenxianguan@fafu.edu.cn

通信作者: 李国强(1984—),男,研究员,主要从事农业信息技术与智慧农业研究,E-mail: gqli@hnagri.org.cn

Tianjin in the north, Xingtai and Ji'nan in the middle, and Xihua and Nanyang in the south. The results showed that the yield reduction rate due to late sowing was increased from south to north in NCP, with the southernmost part of NCP having the smallest reduction rate ($< 19.5\%$), the central part having a reduction rate within 26.4% , and the northernmost part having the largest reduction rate, reaching up to 32.0% . The suitable sowing periods for the northern, central, and southern parts of NCP were between September 25 and October 5, September 30 and October 20, and October 10 and November 5, respectively. All sites showed a very significant quadratic relationship between the high stability coefficient and the pre-winter accumulated temperature. Based on this quadratic relationship, the lower limit of suitable pre-winter accumulated temperature can be determined. The suitable pre-winter accumulated temperature for winter wheat varied at different sites, showing a gradually decreasing trend from north to south in NCP. The suitable pre-winter accumulated temperature limits for winter wheat in NCP, based on high yield and high water use efficiency, were between $497^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ and $629^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ and $344^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ and $581^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$, increasing from south to north. Under conditions of high yield, the latest sowing dates for the majority of regions in Hebei, Shandong, and Henan were between October 1 and October 13, October 10 and October 16, October 22 and October 28, respectively, and under high water use efficiency conditions, they were extended to October 7 and October 19, October 16 and October 22, and October 31 and November 12. The insights can provide a reference for the promotion and application of the double later-cropping system in NCP under the context of global warming.

Key words: winter wheat; minimum pre-winter accumulated temperature; latest sowing date; yield; water use efficiency; WMAIP

0 引言

华北地区是中国最主要的小麦生产区,其产量占全国小麦总产量的 50% ,在确保国家粮食安全方面有着至关重要的作用^[1]。然而,近年来全球气候变暖对农业生产和粮食安全产生了直接影响。ASSENG 等^[2]基于多模型集成并结合田间数据评估全球升温对小麦生产的影响,发现温度每升高 1°C ,全球小麦产量下降 6% 。另一方面,华北地区小麦生产也受到干旱、冻害和干热风等农业气象灾害的威胁^[3-7]。越冬冻害和春季霜冻是影响华北地区冬小麦生产的主要气象灾害^[7-10]。因此,如何在资源限制条件下,合理避免农业气象灾害并适应气候变化的影响,成为华北地区小麦生产管理的重要挑战。

为应对气候变暖带来的挑战,华北地区采用“双晚技术”(冬小麦晚播和夏玉米晚收)作为适应气候变化并提高产量的策略。WANG 等^[1]利用 APSIM 模型研究得到“双晚技术”可使华北地区小麦玉米周年产量提升 $4\% \sim 6\%$ 。晚播小麦具有诸多优点,如提高水分利用效率、增强抗倒伏能力以及维持籽粒产量和氮素利用效率,已成为华北地区应对气候变暖的主要措施^[2,11]。WANG 等^[12]发现,在限水灌溉条件下,“晚播增密”可以提高小麦水分利用效率。DAI 等^[13]研究发现,推迟播种可提高冬小麦抗倒伏能力,同时保持籽粒产量和氮素利用效率。为实现冬小麦高产稳产高效,已有大量研究基于田间试验、气象统计分析和作物模型模拟等方法,探讨华北地区冬小麦适宜播期。王志敏等^[14]在冬小麦

节水省肥高产简化栽培技术中推荐河北地区冬小麦适宜播期在 10 月 10—20 日之间。ZHOU 等^[15]基于田间试验发现河南新乡地区冬小麦在 10 月 11—28 日之间播种能获得最高产量。MA 等^[16]基于田间试验发现河南新乡地区冬小麦播期和播量分别为 10 月 22 日和 $150\text{ kg}/\text{hm}^2$ 时,可获得最高产量。在冬前积温增加的背景下,华北地区冬小麦适宜播期呈推迟趋势。杨建莹等^[17]研究发现,2000—2009 年华北地区冬小麦播种期较 1971—1980 年普遍推迟 $7 \sim 10\text{ d}$ 。吴云龙等^[18]基于气温法发现 1963—2012 年石家庄地区冬小麦最迟播期每 10 年推迟 2.5 d 。陈英慧等^[19]基于半冬性冬小麦适宜播种的温度指标发现驻马店地区 1994 年以后的适宜播期为 10 月 16 日,较 1980 年以前推迟近 7 d 。胡亚南等^[20]基于 DSSAT-CERES-Wheat 模型分析了未来 40 年冬小麦最适播期,结果表明,郑州地区 2030 年的最适播期比基准时段推迟 $6 \sim 8\text{ d}$ 。前人对冬小麦适宜播期的确定也有较多研究,主要有冬前积温、冬前叶龄等指标,但得到的适宜冬前积温和冬前叶龄结果不一。高亮之等^[21]采用冬前叶龄 $5 \sim 7$ 作为冬小麦的最佳播期指标;王志敏等^[14]指出吴桥县冬小麦节水栽培应以冬前叶龄 $2.5 \sim 4$ 为宜。同样地,不同学者得到的适宜冬前积温指标也不同。王森等^[22]将冬前积温 $500^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ 作为新疆地区冬小麦的最适播期指标;王娜等^[23]将冬前积温 $550^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ 作为华北地区冬小麦的最适播期指标;吴云龙等^[18]将冬前积温 $495 \sim 570^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ 作为石家庄地区冬小麦的适宜播期指标;王斌等^[24]根据前人的研究结果将冬前积温

600℃·d 作为长江以北地区的适宜播期指标;李巧云等^[25]从冬前壮苗与安全越冬的角度考虑河南省半冬性小麦的适宜冬前积温范围为 650 ~ 750℃·d。“双晚技术”作为一种有效适应气候变化的措施,但对于华北地区冬小麦的适宜冬前积温下限还未明确,需要进一步深入研究以确保冬小麦高产高效的同时推迟播期。

由于华北地区的生产条件复杂多变,包括气候条件的年际和年内变化、土壤类型的差异以及种植模式的多样性,这些都对冬小麦的生长和产量有直接影响。因此,仅依赖大田试验或统计分析等方法来研究该区适宜的冬小麦生产管理措施,所得结果具有一定的片面性和局限性。这是因为大田试验通常只能反映特定地点和条件下的生产状况,而统计分析则受制于数据质量和数量问题,以及基于特定假设的模型可能在复杂的实际生产条件下不再适用。作物模型可以捕捉到作物生长的动态过程,揭示作物生产力与环境因素和管理措施之间的内在联系,从而解决大田试验方法的代表性差和统计分析方法缺乏生物学基础的问题。因此,作物模型成为预测和评估生产管理对作物生产力影响的重要量化工具,对于优化作物生产管理,尤其是在华北地区的冬小麦生产,具有重要的应用价值^[26-28]。特别是,多模型集成可以降低作物模型模拟结果的不确定性,提供更为准确和可靠的预测结果^[29]。小麦模型算法集成平台 WMAIP (Wheat model algorithms integration platform) 集成了国内外主流小麦模型的多种算法,能用多模型集成的方法模拟小麦的生长发育指标,在华北地区有较好的适应性,可用于华北地区小麦生产管理和气候变化影响评估^[30]。因此,本研究基于 WMAIP 集成模型对华北地区冬小麦适宜播期进行分析,以明确该区冬小麦高产稳产高效的种植管理模式,为该区冬小麦可持续高产提供科学参考。

1 材料与方法

1.1 数据来源

本研究区域范围为我国华北地区,包括河北、河南和山东 3 省以及北京和天津 2 市,总共 48 个气象站点,如图 1 所示。重点选取 6 个代表性站点进行模拟分析,包括华北地区北部站点(北京、天津)、中部站点(邢台、济南)、南部站点(西华、南阳)。各站点近 60 年(1959—2018 年)的气象资料来自中国气象共享服务网(<http://data.cma.cn/>),主要包括:日最高温度(℃)、日最低温度(℃)、日照时数(h)、日降水量(mm)、相对湿度(%)和风速(m/s)。日

辐射量根据 Angstrom 方程通过日照时数进行计算^[31]。北京站点土壤数据来自文献^[32],南阳站点土壤数据来自中国土种志(<http://www.soil.csdb.cn>),邢台、西华、济南、天津土壤数据来自文献^[33]。

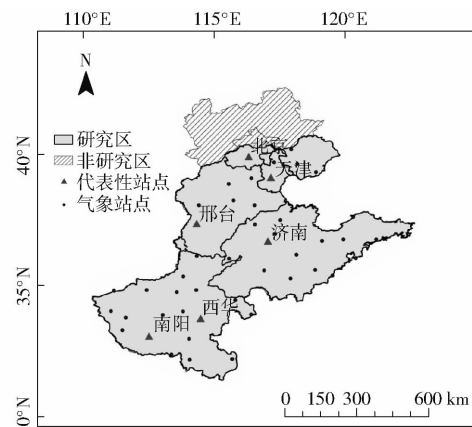


图 1 研究区域及气象站点分布

Fig. 1 Study area and distribution of meteorological station

1.2 小麦模型算法集成平台 WMAIP

小麦模型算法集成平台 WMAIP 是一个集成了国内外主流小麦模型主要模块的多种算法平台,能够用多种方法模拟土壤水分胁迫和冬小麦的生长发育指标^[34-35]。当前,WMAIP 发育期模块集成了 WheatSM 模型的“小麦钟”模型法(CM)和 APSIM - Wheat 模型的热时法(TT);生物量模块集成了 APSIM - Wheat 模型的光能利用效率法(RUE)、WOFOST 模型的二氧化碳同化率法(CA)和 WheatSM 模型的群体光合作用法(CP);产量形成模块集成了 SWAT 模型的收获指数法(HI)、APSIM - Wheat 模型的籽粒灌浆法(GF)和 WheatSM 模型的干物质转移法(BR);水分胁迫模块集成了 WOFOST、AquaCrop 和 STICS 模型的土壤含水率法(SWC)、CERES - Wheat 模型的相对蒸腾法(AP/TP)和 APSIM - Wheat 模型的土壤水分供需比法(WS/WD)。WMAIP 构建原理以及各模块具体算法参见文献^[34-35]。该平台的优势在于它能够在单一平台上集成多种算法,通过算法组合以达到多模型的效果,从而提高了模拟结果的准确性和可信度。研究组前期选取 WMAIP 各模块的两种不同算法进行深入研究,包括发育期模块的 CM 和 TT,生物量模块的 CA 和 CP,产量形成模块的 HI 和 BR,水分胁迫模块的 AP/TP 和 WS/WD。通过这些算法两两组合,得到 16 个不同的模型。基于北京上庄、河北吴桥、河北曲周、河南黄泛区 4 地多年田间试验数据,对 16 个模型进行调参和验证,并使用均值进行多模型集成,证明 WMAIP 集成模型能较好地模

拟冬小麦产量对播期的响应,生物量和产量的模拟误差分别为 18.7% 和 11.8%,因此可以用于华北地

区的小麦生产管理和气候变化影响评估^[30]。品种参数如表 1 所示^[30]。

表 1 冬小麦品种济麦 22 和邯鄯 6172 的遗传参数

Tab.1 Genetic parameters for winter wheat variety Jimai_22 and Handan_6172

模块	方法	参数	济麦 22	邯鄯 6172
发育期	小麦钟模型	播种—出苗阶段基本发育系数 k_1	-1.700	-2.200
		春化阶段基本发育系数 k_{21}	-3.254	-3.175
		光周期阶段基本发育系数 k_{22}	-3.156	-2.056
		拔节—开花阶段基本发育系数 k_3	-2.965	-3.335
		开花—成熟阶段基本发育系数 k_4	-3.397	-3.357
		播种—出苗阶段温度系数 p_1	1.000	1.000
		春化阶段温度系数 p_{21}	0.333	0.232
		光周期阶段温度系数 p_{22}	0.252	0.683
		拔节—开花阶段温度系数 p_3	0.977	0.877
		开花—成熟阶段温度系数 p_4	1.242	0.942
		光周期阶段光周期系数 q_2	0.355	0.957
	热时	出苗—拔节阶段所需热时 $T_1/(^{\circ}\text{C}\cdot\text{d})$	385	413
		拔节—开花阶段所需热时 $T_2/(^{\circ}\text{C}\cdot\text{d})$	474	494
		开花—成熟阶段所需热时 $T_3/(^{\circ}\text{C}\cdot\text{d})$	700	683
		光周期敏感系数 R_p	2.76	2.59
		春化效应敏感系数 R_e	2.14	1.62
生物量	群体光合作用	光响应曲线初始斜率 $P_a/(\text{g}\cdot\text{MJ}^{-1})$	16.9	14.9
		最大净光合作用速率 $P_{\text{max}}/(\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1})$	3.82	3.52
	二氧化碳同化率	叶片最大 CO_2 同化速率 $A_{\text{max}}/(\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{h}^{-1})$	41.7	35.7
		单叶片光能利用效率 $E_{FF}/(\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{J}^{-1}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s})$	0.5	0.5
产量形成	生物量转移	抽穗前茎鞘存储物向籽粒转运效率 $T_{r1}/(\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1})$	0.4	0.3
		抽穗后光合产物向籽粒转运效率 $T_{r2}/(\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1})$	0.8	0.7
	收获指数	最大收获指数 HI_{max}	0.51	0.40
		最小收获指数 HI_{min}	0.25	0.15

1.3 冬前积温计算

首先利用五日滑动平均法计算出每年大于或等于 0℃ 的最长一段时期,于最后一个 5 日中挑选最末一个日平均温度大于或等于 0℃ 的日期作为冬小麦越冬始期,若全年中日平均温度均高于 0℃,则以 12 月 31 日作为冬小麦越冬始期。冬前积温计算式为

$$GDD = \sum \left(\frac{T_{\text{max}} + T_{\text{min}}}{2} - T_b \right) \quad \left(\frac{T_{\text{max}} + T_{\text{min}}}{2} > T_b \right)$$

(1)

式中 GDD ——冬前积温,℃·d
 T_{max} ——日最高温度,℃

T_{min} ——日最低温度,℃
 T_b ——基础温度,取 0℃

1.4 播期情景设置

基于文献[35],选择济麦 22 和邯鄯 6172 两个品种进行模拟。以冬前积温 100 ~ 700℃·d 为播期窗口,在 WMAIP 集成模型中设置 8 个播期、2 个品种和 3 个密度,见表 2。在相对含水率为 80% 的底墒条件下,春季灌拔节水,模型设定为养分充足。分别模拟各站点各年不同播期产量,并按照 1959—1978 年、1979—1998 年和 1999—2018 年 3 个年代统计。

表 2 华北地区 6 个站点播期情景设置

Tab.2 Sowing date scenario setting at six stations of NCP

站点	品种	播期	播量/(株·m ⁻²)
北京	邯鄯 6172、济麦 22	9 月 25 日、9 月 30 日、10 月 5 日、10 月 10 日、10 月 15 日、10 月 20 日、10 月 25 日、10 月 30 日	150、300、450
天津	邯鄯 6172、济麦 22	9 月 25 日、9 月 30 日、10 月 5 日、10 月 10 日、10 月 15 日、10 月 20 日、10 月 25 日、10 月 30 日	150、300、450
邢台	邯鄯 6172、济麦 22	9 月 30 日、10 月 5 日、10 月 10 日、10 月 15 日、10 月 20 日、10 月 25 日、10 月 30 日、11 月 5 日	150、300、450
济南	邯鄯 6172、济麦 22	10 月 5 日、10 月 10 日、10 月 15 日、10 月 20 日、10 月 25 日、10 月 30 日、11 月 5 日、11 月 10 日	150、300、450
西华	邯鄯 6172、济麦 22	10 月 10 日、10 月 15 日、10 月 20 日、10 月 25 日、10 月 30 日、11 月 5 日、11 月 10 日、11 月 15 日	150、300、450
南阳	邯鄯 6172、济麦 22	10 月 15 日、10 月 20 日、10 月 25 日、10 月 30 日、11 月 5 日、11 月 10 日、11 月 15 日、11 月 20 日	150、300、450

1.5 冬小麦适宜播期

选择高稳系数 (High-stable coefficient, HSC) 作为评价华北冬小麦适宜播期的指标, 该指标综合反映冬小麦产量或水分利用效率以及各年份之间产量的稳定性^[36]。高稳系数越高, 表示冬小麦在该播期的产量或水分利用效率高且年际之间波动性小。对站点模拟产量和水分利用效率分年代进行高稳系数分析, 针对每个播期得到一个对应高稳系数, 以大于 95% 最大值的播期处理作为冬小麦的适宜播期; 对高稳系数与冬前积温进行二次函数拟合, 在冬前积温范围 150 ~ 700℃·d 内, 将大于 95% 函数最大值的冬前积温作为适宜冬前积温。高稳系数计算式为

$$HSC_i = \frac{x_{avg,i} - s_i}{x_{avg}} \quad (2)$$

式中 HSC_i —— i 处理高稳系数
 $x_{avg,i}$ —— i 处理平均值
 s_i —— i 处理标准差
 x_{avg} ——所有处理平均值

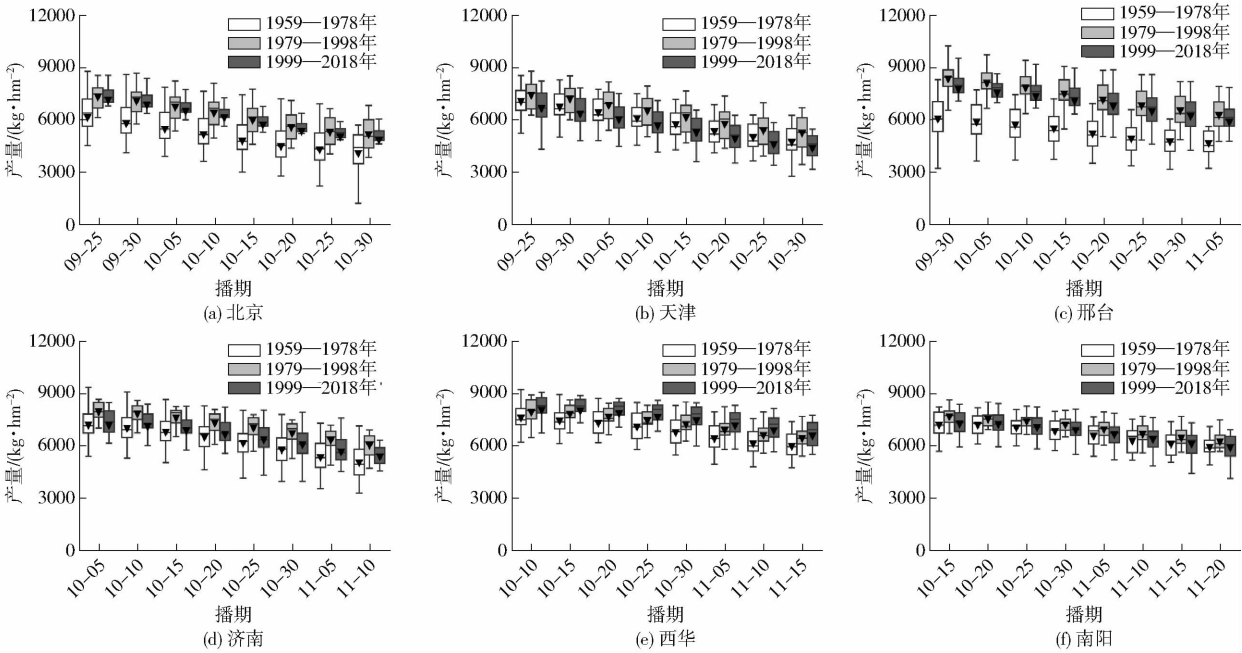


图2 华北地区不同播期和年代的冬小麦产量
Fig.2 Grain yield for each sowing date and period in NCP

由图3可知,不同播期和年代对冬小麦水分利用效率的影响不同。冬小麦水分利用效率均值从1959—1978年的1.53 kg/m³升高到1979—1998年的1.79 kg/m³后降到1999—2018年的1.73 kg/m³。适宜播期范围内,冬小麦水分利用效率随播期推迟基本呈略微下降趋势。北京、天津、邢台、济南、西华和南阳站冬小麦水分利用效率均值从最早播期到最晚播期分别下降0.32、0.34、0.29、0.22、0.14、0.18 kg/m³。

2 结果与分析

2.1 华北地区不同播期冬小麦产量和水分利用效率

由图2(箱体上下边缘分别代表25%和75%顺序的数值,箱体外上下边线分别代表最大值和最小值,箱中横线和三角形分别代表中位数和平均值,下同)可知,不同播期和年代对冬小麦产量的影响不同。冬小麦产量均值从1959—1978年的6 006.1 kg/hm²升高到1979—1998年的6 877.1 kg/hm²后下降到1999—2018年的6 489.3 kg/hm²。适宜播期范围内,华北地区冬小麦的产量随播期推迟基本呈下降趋势。北京、天津、邢台、济南、西华和南阳站冬小麦产量均值从最早播期到最晚播期分别下降2 171.7、2 264.5、1 958.0、1 789.2、1 359.8、1 539.6 kg/hm²。华北地区晚播减产幅度由南向北增大,华北地区南部晚播减产幅度最小(<19.5%),华北地区中部晚播减产幅度在26.4%以内,华北地区北部晚播减产幅度最大,最高可达32.0%。

2.2 华北地区冬小麦适宜播期

从产量高稳系数上看,华北地区不同站点的适宜播期不同,从华北北部向南部推迟(图4)。北京和天津站点1959—1978年、1979—1998年和1999—2018年的适宜播期均为9月25—30日;邢台站点1959—1978年、1979—1998年和1999—2018年的适宜播期均为9月30日—10月5日;济南站点1959—1978年、1979—1998年和1999—2018年的适宜播期分别为10月5—10日、10月5—

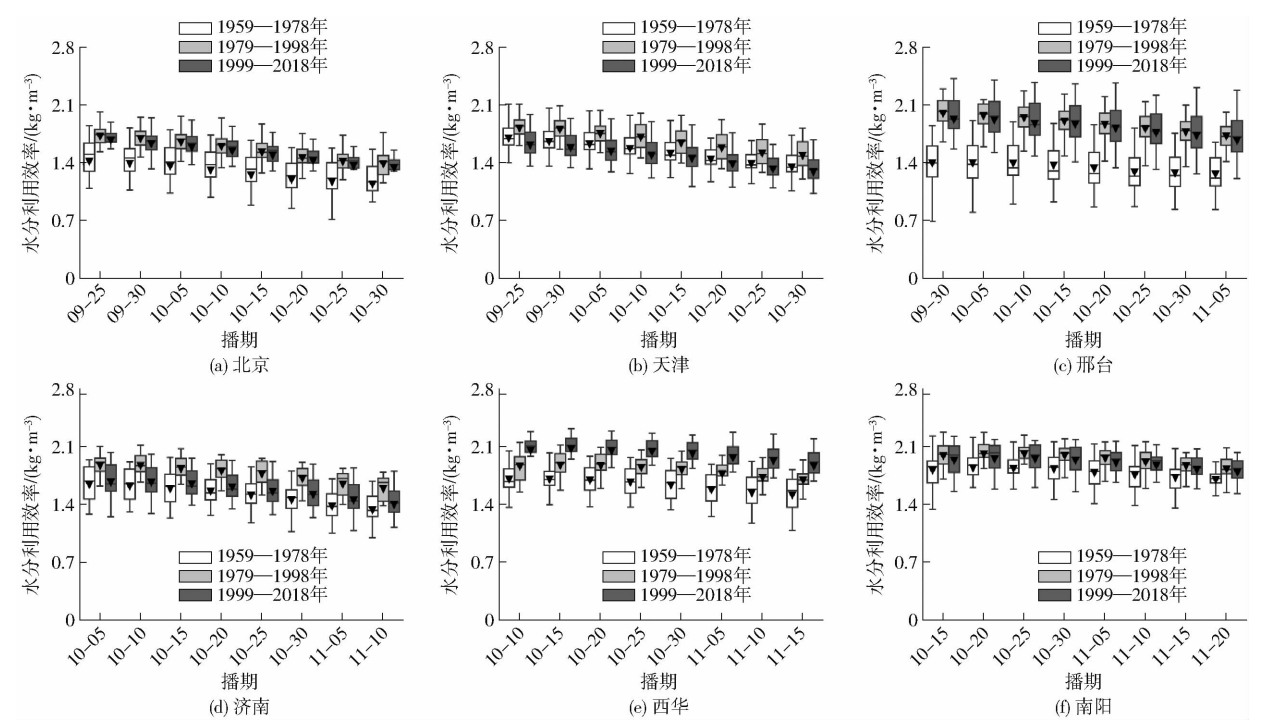


图3 华北地区不同播期和年代的冬小麦水分利用效率

Fig. 3 Water use efficiency for each sowing date and period in NCP

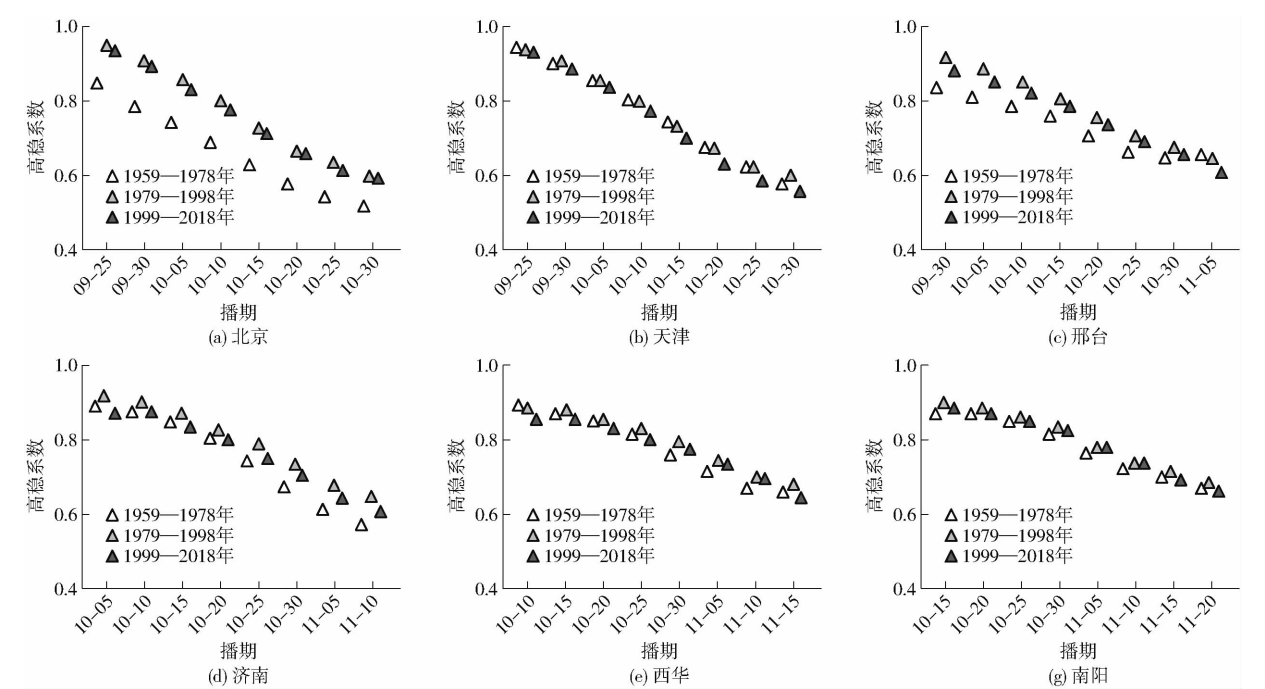


图4 华北地区不同播期和年代的产量高稳系数

Fig. 4 High-stable coefficient of yield for each sowing date and period in NCP

10 日和 10 月 5—15 日；西华站点 1959—1978 年、1979—1998 年和 1999—2018 年的适宜播期分别为 10 月 10—15 日、10 月 10—20 日和 10 月 10—20 日；南阳站点 1959—1978 年、1979—1998 年和 1999—2018 年的适宜播期均为 10 月 15—25 日。

从水分利用效率高稳系数上看，华北地区不同站点的适宜播期不同，从华北地区北部向南部推迟（图 5）。北京站点 1959—1978 年、1979—1998 年和

1999—2018 年的适宜播期分别为 9 月 25 日—10 月 5 日、9 月 25—30 日和 9 月 25—30 日；天津站点 1959—1978 年、1979—1998 年和 1999—2018 年的适宜播期分别为 9 月 25—30 日、9 月 25 日—10 月 5 日和 9 月 25—30 日；邢台站点 1959—1978 年、1979—1998 年和 1999—2018 年的适宜播期分别为 9 月 30 日—10 月 15 日、9 月 30 日—10 月 10 日和 9 月 30 日—10 月 15 日；济南站点 1959—1978 年、

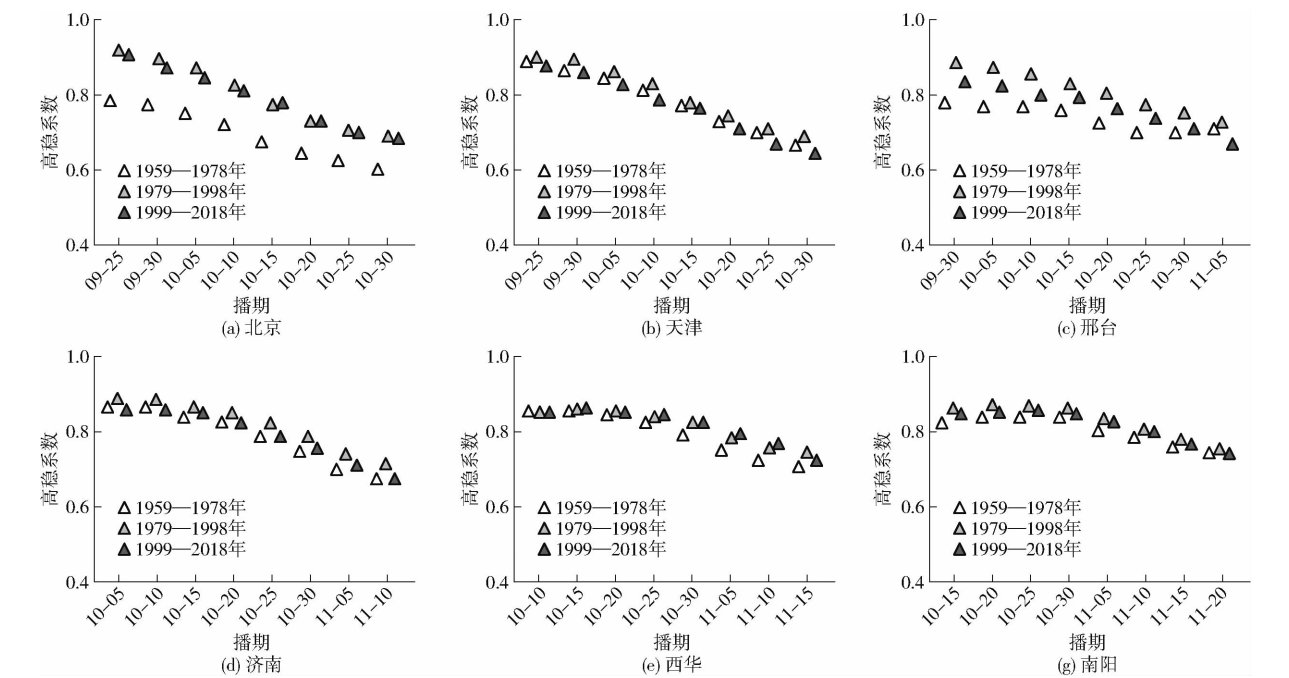


图5 华北地区不同播期和年代的水分利用效率高稳系数

Fig. 5 High-stable coefficient of water use efficiency for each sowing date and period in NCP

1979—1998 年和 1999—2018 年的适宜播期均为 10 月 5—20 日；西华站点 1959—1978 年、1979—1998 年和 1999—2018 年的适宜播期分别为 10 月 10—25 日、10 月 10—30 日和 10 月 10—30 日；南阳站点 1959—1978 年、1979—1998 年和 1999—2018 年的适宜播期均为 10 月 15 日—11 月 5 日。

综合产量和水分利用效率,华北地区北部适宜播期在 9 月 25 日—10 月 5 日之间,中部适宜播期

在 9 月 30 日—10 月 20 日之间,南部适宜播期在 10 月 10 日—11 月 5 日之间。

2.3 华北地区冬小麦适宜播期指标

由图 6(图中 ** 表示极显著 ($P < 0.01$),下同)可知,所有站点的高稳系数与冬前积温均呈极显著的二次曲线关系($R^2 \geq 0.68$),因此可以根据曲线关系确定适宜冬前积温下限。不同站点的冬小麦适宜冬前积温下限不同,呈华北北部向南部逐渐减少趋

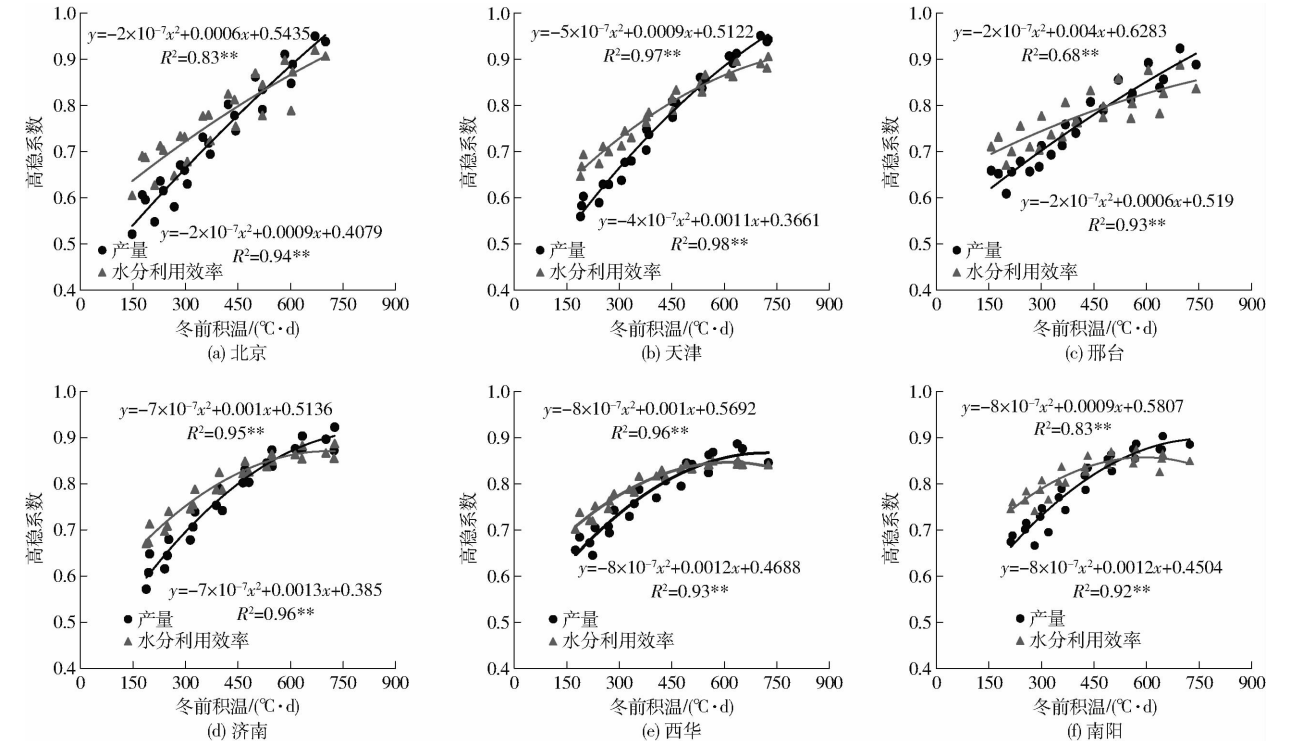


图6 华北地区冬小麦冬前积温和高稳系数的关系

Fig. 6 Relationship of accumulated temperature before wintering and high-stable coefficient in NCP

势。北京、天津、邢台、济南、西华、南阳站点基于高产的适宜冬前积温下限分别为 629、612、593、568、497、533℃·d,基于高水分利用效率的适宜冬前积温下限分别为 581、562、498、460、384、344℃·d。从图 7 可以明显看出,华北地区冬小麦的适宜冬前积温下限与生长季平均温度之间存在极显著的线性关系($R^2\geq 0.76$)。随着生长季平均温度的升高,适宜冬前积温下限降低。相比于基于高产的指标,基于高水分利用效率的指标对生长季平均温度的敏感度更高。

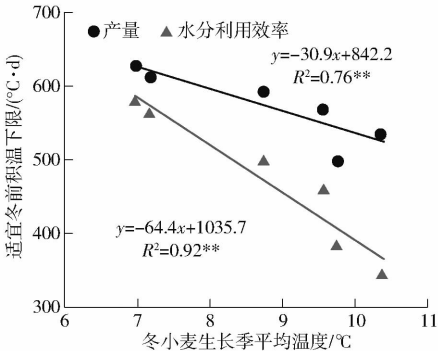


图 7 华北地区冬小麦适宜冬前积温下限和生长季平均温度的关系

Fig. 7 Relationship of suitable accumulated temperature before wintering and average growing season temperature in NCP

2.4 基于高产和高水分利用效率的华北地区冬小麦最迟播期

根据华北地区冬小麦适宜冬前积温下限和生长季平均温度的关系,计算得到华北地区 48 个站点的适宜冬前积温下限,进而确定华北地区 1999—2018 年在高产和高水分利用效率条件下的最迟播期。如图 8 所示,华北地区冬小麦最迟播期在不同站点间有较大差异,并且随着纬度的升高,最迟播期呈提前趋势。在高产条件下,河南大部分地区的最迟播期在 10 月 22—28 日之间,山东大部分地区的最迟播期在 10 月 10—16 日之间,河北南部、中部和北部的最迟播期在 10 月 13 日、10 月 7 日和 10 月 1 日左右,而北京和天津的最迟播期在 9 月 27 日—10 月 3 日之间。在高水分利用效率条件下,河南大部分地区的最迟播期在 10 月 31 日—11 月 12 日之间,山东大部分地区最迟播期在 10 月 16—22 日之间,河北南部、中部和北部的最迟播期在 10 月 19 日、10 月 13 日和 10 月 7 日左右,而北京和天津的最迟播期在 10 月 3—10 日之间。高产和高水分利用效率条件下的最迟播期存在差异,基于高水分利用效率的最迟播期比基于高产的最迟播期推迟 1~18 d,推迟的天数从华北北部向南部逐渐增加。

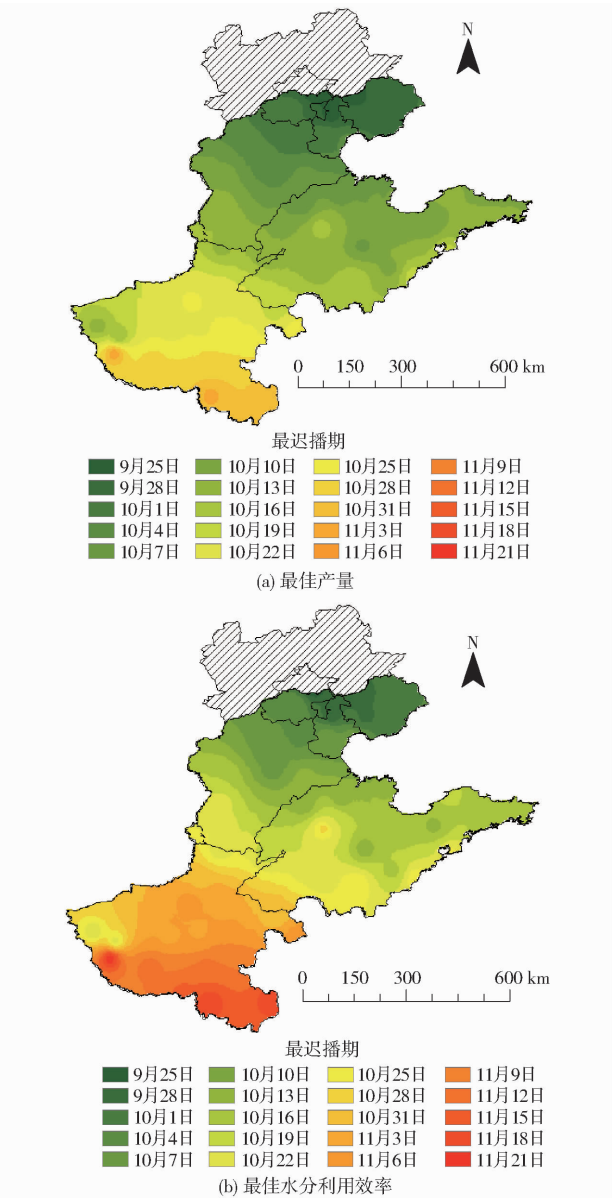


图 8 基于高产和高水分利用效率的华北地区冬小麦最迟播期

Fig. 8 The latest sowing date of winter wheat in NCP under high yield and water use efficiency condition

3 讨论

华北地区气候资源分布不均,从北部到南部温度和降水呈增加趋势。另外,华北地区农业气象灾害多发,冬小麦生长期间会受到越冬冻害、低温霜冻、干旱和高温胁迫等影响。在有限的灌溉水下,通过调整播期减小产量损失对保障华北地区生态和粮食安全都具有重要意义。SHAH 等^[37]基于 4 年的田间试验发现,关中地区冬小麦播期每推迟 1 d,产量下降 1%,而通过综合相关研究结果表明冬小麦播期每推迟 1 d,产量下降 0.7%。对于不同灌溉制度,华北地区冬小麦产量对播期的响应不同,冬小麦播期每推迟 1 d,产量下降 0~0.6%,不灌溉冬小麦

晚播减产最高^[38]。本研究发现,冬小麦产量随播期的推迟呈下降趋势(图 2),这与前人的研究结果较为一致^[37-38]。而关于播期和水分利用效率的关系,前人的研究结果不一致,MA 等^[16]发现适期播种小麦的水分利用效率最高,早播和晚播都会导致水分利用效率下降;WANG 等^[12]研究表明,限水灌溉下,“晚播增密”可以提高小麦水分利用效率;孙文彦等^[39]研究表明,晚播小麦处理虽然降低了耗水量但是产量降低更甚,结果导致水分利用效率显著低于适期晚播小麦。本研究发现,在适宜播期内,推迟播期可以减少耗水量,但也会导致产量下降,从而使水分利用效率下降(图 3)。华北地区不同站点冬小麦产量对晚播的响应不同,晚播减产幅度呈从南向北递增趋势,这与华北地区热量资源分布有关。华北地区热量资源分布呈北少南多,华北地区南部热量资源多,且越冬期短,冬小麦晚播仍能形成较大的群体,也可减小低温霜冻的影响,因此产量损失小;华北地区北部热量资源少,且越冬期长,晚播冬小麦群体较小,因此产量损失大。华北地区冬小麦适宜播期由北向南呈推迟趋势,华北地区北部适宜播期在 9 月 25 日—10 月 5 日之间,中部适宜播期在 9 月 30 日—10 月 20 日之间,南部适宜播期在 10 月 10 日—11 月 5 日之间。前人对冬小麦适宜播期确定也有较多的研究,主要有冬前积温、冬前叶龄等指标,但得到的适宜冬前积温和冬前叶龄结果不一^[21-23]。本研究结果表明,华北地区北部、中部和南部冬小麦基于高产的适宜冬前积温下限分别为 612 ~ 629℃·d、568 ~ 593℃·d 和 497 ~ 533℃·d,基于高水分利用效率的适宜冬前积温下限分别为 562 ~ 581℃·d、460 ~ 498℃·d 和 344 ~ 384℃·d。基于得到的适宜冬前积温下限确定了华北地区的最迟播期,在高产和高水分利用效率条件下,河北、山东、河南大部分地区的最迟播期分别在 10 月 1—13 日、10 月 10—16 日、10 月 22—28 日和 10 月 7—19 日、10 月 16—22 日、10 月 31 日—11 月 12 日。本研究得到的指标更具有针对性,弥补了当前积温指标关于适宜冬前积温下限的研究不足,且发现适宜冬前积温下限在区域上的差异,这

对气候变暖背景下华北地区“双晚技术”的推广及应用有较大的参考价值,有助于在冬小麦高产高效的基础上进行晚播,实现更大的效益。

农业模型是农业生产系统的抽象、定量和简化表示,因此,所有农业模型都会有其一定的局限性。尽管 WMAIP 是一个模块化、多算法集成的平台,它目前还无法准确反映冬小麦冬前不同生长状态下越冬期抗寒能力的差异,因此得到的不同播期产量可能存在一定的误差。本研究基于已验证的 WMAIP 平台、气象数据和土壤数据,分析了播期对华北地区冬小麦产量和水分利用效率的影响,然而适宜播期可能会随着底墒、品种、管理措施的不同而有所差异,因此进一步研究应考虑不同环境和管理措施下的适宜播期。本研究仅选取华北地区 6 个代表性站点进行模拟研究,虽然尽量扩大代表性站点空间上的差异,但研究结果对于反映整个区域适宜播期还有一定局限性。

4 结论

(1)华北地区晚播减产幅度由南向北增大,华北地区南部晚播减产幅度最小(<19.5%),华北地区中部晚播减产幅度在 26.4%以内,华北地区北部晚播减产幅度最大,最高可达 32.0%。

(2)综合产量和水分利用效率,华北地区北部适宜播期在 9 月 25 日—10 月 5 日之间,中部适宜播期在 9 月 30 日—10 月 20 日之间,南部适宜播期在 10 月 10 日—11 月 5 日之间。

(3)华北地区北部、中部和南部冬小麦基于高产的适宜冬前积温下限分别为 612 ~ 629℃·d、568 ~ 593℃·d 和 497 ~ 533℃·d,基于高水分利用效率的适宜冬前积温下限分别为 562 ~ 581℃·d、460 ~ 498℃·d 和 344 ~ 384℃·d。

(4)华北地区冬小麦的最迟播期随纬度而推迟。在高产和高水分利用效率条件下,河北、山东、河南大部分地区的最迟播期分别为 10 月 1—13 日、10 月 10—16 日、10 月 22—28 日和 10 月 7—19 日、10 月 16—22 日、10 月 31 日—11 月 12 日。

参 考 文 献

[1] WANG J, YANG X, ZHANG F, et al. Increased yield potential of wheat-maize cropping system in the North China Plain by climate change adaptation[J]. Climatic Change, 2012, 113(3-4): 825-840.

[2] ASSENG S, EWERT F, MARTRE P, et al. Rising temperatures reduce global wheat production[J]. Nature Climate Change, 2015, 5(2): 143-147.

[3] 孙爽, 杨晓光, 张镇涛, 等. 华北平原不同等级干旱对冬小麦产量的影响[J]. 农业工程学报, 2021, 37(14): 69-78. SUN Shuang, YANG Xiaoguang, ZHANG Zhentao, et al. Impacts of different grades of drought on winter wheat yield in North China Plain[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(14): 69-78. (in Chinese)

[4] 钱永兰, 王建林, 郑昌玲, 等. 近 50 年华北地区冬小麦低温灾害的时空演变特征[J]. 生态学杂志, 2014, 33(12):

3245 – 3253.

QIAN Yonglan, WANG Jianlin, ZHENG Changling, et al. Spatial-temporal change of low temperature disaster of winter wheat in North China in last 50 years[J]. Chinese Journal of Ecology, 2014, 33(12): 3245 – 3253. (in Chinese)

- [5] 孟繁圆, 冯利平, 张丰瑶, 等. 北部冬麦区冬小麦越冬冻害时空变化特征[J]. 作物学报, 2019, 45(10): 1576 – 1585.
MENG Fanyuan, FENG Liping, ZHANG Fengyao, et al. Temporal and spatial variations of winter wheat freezing injury in northern winter wheat region[J]. Acta Agronomica Sinica, 2019, 45(10): 1576 – 1585. (in Chinese)
- [6] LIU B, LIU L L, TIAN L Y, et al. Post-heading heat stress and yield impact in winter wheat of China[J]. Global Change Biology, 2014, 20(2): 372 – 381.
- [7] 郑冬晓. 不同冬春性小麦低温灾害指标和可种植界限变化研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2019.
ZHENG Dongxiao. Study on low temperature disaster indicators and planting limit changes of different winter wheat [D]. Beijing: China Agricultural University, 2019. (in Chinese)
- [8] 郑殿峰, 王广军, 宫占元, 等. 不同播期冬小麦抗寒力的鉴定[J]. 黑龙江八一农垦大学学报, 2000, 12(2): 13 – 16.
ZHENG Dianfeng, WANG Guangjun, GONG Zhanyuan, et al. Determining the cold hardiness of different plant date winter wheat[J]. Journal of Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2000, 12(2): 13 – 16. (in Chinese)
- [9] 于晶, 张林, 苍晶, 等. 冬小麦抗寒性的研究进展[J]. 东北农业大学学报, 2008, 39(11): 123 – 127.
YU Jing, ZHANG Lin, CANG Jing, et al. Research progress on cold resistance of winter wheat [J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2008, 39(11): 123 – 127. (in Chinese)
- [10] ZHENG B Y, CHAPMAN S C, CHRISTOPHER J T, et al. Frost trends and their estimated impact on yield in the Australian wheatbelt[J]. Journal of Experimental Botany, 2015, 66(12): 3611 – 3623.
- [11] XIAO D, TAO F. Contributions of cultivars, management and climate change to winter wheat yield in the North China Plain in the past three decades[J]. European Journal of Agronomy, 2014, 52: 112 – 122.
- [12] WANG B, ZHANG Y, HAO B, et al. Late sowing with high seeding rate increases wheat water use efficiency under deficit irrigation[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, 72(6): 629 – 638.
- [13] DAI X L, WANG Y C, DONG X C, 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): 541 – 552.
- [14] 王志敏, 王璞, 李绪厚, 等. 冬小麦节水省肥高产简化栽培理论与技术[J]. 中国农业科技导报, 2006, 8(5): 38 – 44.
WANG Zhimin, WANG Pu, LI Xuhou, et al. Principle and technology of water saving fertilizer saving hight yielding and simple cultivation in winter wheat[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2006, 8(5): 38 – 44. (in Chinese)
- [15] 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): 985 – 997.
- [16] MA S, WANG T, GUAN X, 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 – 174.
- [17] 杨建莹, 梅旭荣, 刘勤, 等. 气候变化背景下华北地区冬小麦生育期的变化特征[J]. 植物生态学报, 2011, 35(6): 623 – 631.
YANG Jianying, MEI Xurong, LIU Qin, et al. Variations of winter wheat growth stages under climate changes in northern China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2011, 35(6): 623 – 631. (in Chinese)
- [18] 吴云龙, 范凤翠, 李静, 等. 气候变暖对石家庄冬小麦最迟播期的影响[J]. 贵州农业科学, 2015, 43(8): 92 – 94.
WU Yunlong, FAN Fengcui, LI Jing, et al. Effects of warming climate on the latest sowing date of winter wheat in Shijiazhuang[J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2015, 43(8): 92 – 94. (in Chinese)
- [19] 陈英慧, 王志强. 气候变化对冬小麦播期的影响[J]. 河南气象, 2005(1): 33 – 34.
- [20] 胡亚南, 梁驹, 梁社芳, 等. 基于 DSSAT CERES – Wheat 模型的未来 40 年冬小麦最适播期分析[J]. 智慧农业(中英文), 2021, 3(2): 68 – 76.
HU Ya'nan, LIANG Ju, LIANG Shefang, et al. Optimum sowing date of winter wheat in next 40 years based on DSSAT – CERES – Wheat model[J]. Smart Agriculture (Chinese and English), 2021, 3(2): 68 – 76. (in Chinese)
- [21] 高亮之, 金之庆, 郑国清, 等. 小麦栽培模拟优化决策系统(WCSODS)[J]. 江苏农业学报, 2000, 16(2): 65 – 72.
GAO Liangzhi, JIN Zhiqing, ZHENG Guoqing, et al. Wheat cultivation simulation optimization decision making system (WCSODS)[J]. Journal of Jiangsu Agriculture, 2000, 16(2): 65 – 72. (in Chinese)
- [22] 王森, 张山清, 王雪姣, 等. 冬前积温对新疆冬小麦适宜播期的影响[J]. 新疆农业科技, 2016(5): 1 – 2.
- [23] 王娜, 王靖, 冯利平, 等. 华北平原冬小麦-夏玉米轮作区采用“两晚”技术的产量效应模拟分析[J]. 中国农业气象, 2015, 36(5): 611 – 618.
WANG Na, WANG Jing, FENG Liping, et al. Modeling the impact of “double-delay” technology on yield of wheat-maize cropping system in the North China Plain[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2015, 36(5): 611 – 618. (in Chinese)
- [24] 王斌, 顾蕴倩, 刘雪, 等. 中国冬小麦种植区光热资源及其配比的时空演变特征分析[J]. 中国农业科学, 2012, 45(2): 228 – 238.
WANG Bin, GU Yunqian, LIU Xue, et al. Analysis of the temporal and spatial changes of photo-thermal resources in winter

wheat growing regions in China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2012, 45(2): 228 – 238. (in Chinese)

[25] 李巧云, 年力, 刘万代, 等. 冬前积温对河南省小麦冬前生长发育的影响[J]. 中国农业气象, 2010, 31(4): 563 – 569.
LI Qiaoyun, NIAN Li, LIU Wandai, et al. Effects of accumulated temperature before winter on growth and development of wheat in Henan Province[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2010, 31(4): 563 – 569. (in Chinese)

[26] WALLACH D, MARTRE P, LIU B, et al. Multimodel ensembles improve predictions of crop environment-management interactions[J]. Global Change Biology, 2018, 24(11): 5072 – 5083.

[27] BAI H, WANG J, FANG Q, et al. Does a trade-off between yield and efficiency reduce water and nitrogen inputs of winter wheat in the North China Plain? [J]. Agricultural Water Management, 2020, 233: 106095.

[28] CHEN X, BAI H, XUE Q, et al. WheatSM V5.0: a Python-based wheat growth and development simulation model with cloud services integration to enhance agricultural applications[J]. Agronomy, 2023, 13: 2144.

[29] MARTRE P, WALLACH D, ASSENG S, et al. Multimodel ensembles of wheat growth: many models are better than one[J]. Global Change Biology, 2014, 21(2): 911 – 925.

[30] 陈先冠, 冯利平, 白慧卿. 小麦模型算法集成平台在华北平原区的适应性评价[J]. 农业工程学报, 2023, 39(7): 128 – 136.
CHEN Xianguan, FENG Liping, BAI Huiqing. Adaptability of wheat model algorithms integration platform in North China Plain[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(7): 128 – 136. (in Chinese)

[31] ANGSTROM A. Solar and terrestrial radiation. Report to the international commission for solar research on actinometric investigations of solar and atmospheric radiation[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1924, 50(210): 121 – 126.

[32] 张祎. 未来气候变化对黄淮海平原冬小麦生产影响及适应措施分析[D]. 北京: 中国农业大学, 2012.
ZHANG Yi. The impacts of climate changes on winter wheat(*Triticum aestivum* L.) production and its adaptation strategies in Huang – Huai – Hai plain[D]. Beijing: China Agricultural University, 2012. (in Chinese)

[33] 陈超. 华北平原作物水分生产力-农田水平衡-气候波动/变化的系统分析[D]. 北京: 中国科学院, 2009.
CHEN Chao. Response of crop water productivity and water balance to climate variability/change in the North China Plain [D]. Beijing: Chinese Academy of Sciences, 2009. (in Chinese)

[34] 陈先冠, 冯利平, 白慧卿, 等. 小麦模型算法集成平台构建与算法比较[J]. 农业机械学报, 2022, 53(6): 237 – 249.
CHEN Xianguan, FENG Liping, BAI Huiqing, et al. Establishmnet of wheat model algorithm integration platform and algorithm comparison[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(6): 237 – 249. (in Chinese)

[35] 陈先冠, 冯利平, 白慧卿, 等. 基于小麦模型算法集成平台的三种水分胁迫算法比较[J]. 农业工程学报, 2021, 37(16): 47 – 57.
CHEN Xianguan, FENG Liping, BAI Huiqing, et al. Comparison of three water stress algorithms based on the integration platform of wheat model algorithms[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(16): 47 – 57. (in Chinese)

[36] 张镇涛, 杨晓光, 高继卿, 等. 气候变化背景下华北平原夏玉米适宜播期分析[J]. 中国农业科学, 2018, 51(17): 3258 – 3274.
ZHANG Zhentao, YANG Xiaoguang, GAO Jiqing, et al. Analysis on suitable sowing date for summer maize in North China Plain under climate change[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2018, 51(17): 3258 – 3274. (in Chinese)

[37] 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.

[38] 王彬. 限水灌溉下极端晚播冬小麦的产量形成与水氮利用特征[D]. 北京: 中国农业大学, 2016.
WANG Bin. Characteristics of yield formation and water-nitrogen use in extremely-late sown winter wheat under limited irrigation[D]. Beijing: China Agricultural University, 2016. (in Chinese)

[39] 孙文彦, 宁东峰, 李志杰, 等. 不同播期配合播量对冬小麦水氮利用及品质的影响[J]. 中国农学通报, 2013, 29(36): 91 – 95.
SUN Wenyan, NING Dongfeng, LI Zhijie, et al. The effect of different sowing date and rate on winter wheat grain quality and water and nitrogen utilization[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2013, 29(36): 91 – 95. (in Chinese)