

网络出版时间: 2026-04-13

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1359.S.20260410.1807.003>

1984—2020 年贵州铜仁冬小麦物候期与农业气候变化特征

旷雅琼¹, 陈夏盟¹, 程凯², 张李娟¹, 刘迎霞³, 陈彦希⁴, 吕春艳¹

(1. 贵州省铜仁市气象局, 贵州铜仁 554300; 2. 中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所, 新疆乌鲁木齐 830002;

3. 广东省肇庆市气象局, 广东肇庆 526000; 4. 海南省气象探测中心, 海南海口 570203)

摘要: 基于贵州省铜仁市国家农业气象观测站连续 37 年(1984—2020 年)冬小麦物候期观测资料, 结合同期气象观测数据, 采用核密度估计、气候趋势分析、相关性分析和多元线性回归模型, 系统分析铜仁市冬小麦物候期及农业气候因子的变化特征及其响应关系。结果表明, 1984—2020 年铜仁市冬小麦物候期总体呈阶段性推迟趋势, 其中分蘖期推迟幅度最大 [$10.9 \text{ d} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$]。关键生育阶段持续时间表现为前期延长 [营养生长期延长 $5.6 \text{ d} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$]、中期缩短 [营养与生殖生长并进期缩短 $-10.8 \text{ d} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$]、后期基本稳定 (生殖生长期为 $0.2 \text{ d} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$)。冬小麦生育期间农业气候要素总体表现为气温升高、日照减少及水热条件波动增强。相关分析显示, $\geq 10^\circ\text{C}$ 积温和地面温度与播种、出苗及三叶期物候期日序数呈显著正相关 ($P < 0.001$), 而相对湿度和日照时数与孕穗、开花及乳熟期日序数呈显著负相关 ($P < 0.05$ 或 $P < 0.01$), 成熟期与各气候因子相关不显著。多元回归分析表明, 冬小麦物候期对 $\geq 10^\circ\text{C}$ 积温和地面温度的敏感性最强, 其次为气温日较差、降水量和相对湿度, 对日照时数的敏感性相对较弱。本研究揭示了黔东北地区冬小麦物候期对气候变化的响应特征, 可为区域冬小麦品种选育和栽培管理提供农业气象依据。

关键词: 冬小麦; 物候期; 农业气候因子; 核密度估计; 气候趋势分析

中图分类号: S512.1; S314

文献标识码: A

文章编号: 1009-1041(2026)05-0696-11

Characteristics of Winter Wheat Phenology and Agricultural Climate Change in Tongren, Guizhou Province from 1984 to 2020

KUANG Yaqiong¹, CHEN Xiameng¹, CHENG Kai², ZHANG Lijuan¹,

LIU Yingxia³, CHEN Yanxi⁴, LÜ Chunyan¹

(1. Tongren Meteorological Bureau, Tongren, Guizhou 554300, China; 2. Institute of Desert Meteorology, China Meteorological

Administration, Urumqi, Xinjiang 830002, China; 3. Zhaoqing Meteorological Bureau, Zhaoqing, Guangdong 526000, China;

4. Hainan Meteorological Detection Center, Haikou, Hainan 570203, China)

Abstract: Based on the continuous 37 year(1984—2020) phenological observation data of winter wheat at the National Agricultural Meteorological Observation Station in Tongren City, Guizhou Province, and combined with the meteorological observation data of the corresponding period, the changes and response relationships of the phenological periods of winter wheat and agricultural climate factors were systematically analyzed using kernel density estimation, climate trend analysis, correlation analysis, and multiple linear regression model. The results showed that the phenological periods of winter wheat in Tongren City from 1984 to 2020 generally showed a phased delay trend, among which the tillering period had the largest delay [$10.9 \text{ d} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$]. The duration of key growth stages was characterized by an extension at early stage [vegetative growth period extended by $5.6 \text{ d} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$], a shortening in the middle stage [vegetative and reproductive growth concurrent period shortened by

收稿日期: 2025-10-15 修回日期: 2025-11-14

基金项目: 贵州省气象局科研业务项目(黔气科登[2025]09-06 号); 贵州省气象局省市联合科研基金项目(黔气科合 SS-SZ[2024] 13 号); 贵州省气象局省市联合科研基金项目(黔气科合 QY-MS[2025]08 号)

第一作者 E-mail: kyq0856@163.com(旷雅琼)

通讯作者 E-mail: 1357971975@163.com(吕春艳)

$-10.8 \text{ d} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$], and relative stability at late stag [reproductive growth period changed by $0.2 \text{ d} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$]. During the growth period of winter wheat, the agricultural climate elements generally showed an increase in temperature, a decrease in sunshine, and an increase in the fluctuation of water and heat conditions. Correlation analysis indicated that accumulated temperature and ground temperature were significantly positively correlated with the phenological period day numbers of sowing, emergence and three-leaf stage ($P < 0.001$), while relative humidity and sunshine duration were significantly negatively correlated with the phenological periods of heading, flowering and milk-ripen stage ($P < 0.05$ or $P < 0.01$), yet the maturity period had no significant correlation with each climate factor. The results of multiple regression analysis showed that the phenological periods of winter wheat were most sensitive to accumulated temperature and ground temperature, followed by daily temperature range, precipitation and relative humidity, and less sensitive to sunshine duration. This study revealed the response characteristics of the phenological periods of winter wheat in the northeastern part of Guizhou Province to climate change, which can provide agricultural meteorological basis for the breeding and cultivation management of winter wheat varieties in the region.

Keywords: Winter wheat; Phenological phase; Agricultural meteorological factors; Kernel density estimation; Climate trend analysis

气候波动与变化对作物生长具有显著影响,其中农业气候因子对于作物生育期的影响尤为显著,包括作物的种植面积、产量和品质^[1]。根据IPCC AR6(气候变化专门委员会第六次评估报告),过去近百年来全球气候变化持续加剧^[2]。气候变化不仅表现为气温持续升高,还伴随降水格局改变、极端气候事件频发、大气成分变化等一系列复杂现象^[3],影响全球生态系统和社会经济^[4]。农业生产系统作为对气候条件高度敏感的领域,正面临着前所未有的挑战^[5]。小麦在全球粮食安全中的作用重大,是仅次于水稻的第二大粮食作物,其产量75%来自冬小麦^[6-9]。冬小麦在中国播种面积占粮食总面积1/5以上,主要种植区分布在北方地区^[10-11]。研究表明,全球气候变暖很可能对冬小麦的生长发育、产量和品质产生不同程度的影响^[12-13]。目前有关气候变化对农业发展、农业生态的影响已成为社会各界关注的热点^[14-15]。

由于区域气候背景、地形条件及耕作方式不同,气候变化对冬小麦生育期的影响具有明显的地域差异。西南地区兼具盆地、高原、丘陵等复杂地形,形成冬暖春早、光温水时空异质性强的气候特征^[16-17]。相对于中国北方小麦主产区^[18-20],西南地区的气候与冬小麦物候期之间的研究相对薄弱。基于此,本研究以黔东南地区贵州铜仁冬小麦为研究对象,基于铜仁市农业气象观测站1984—2020年冬小麦物候期观测数据,结合同期国家级气象观测站观测数据,分析冬小麦多年物候期变

化特征及物候期内各农业气候因子的变化趋势,探讨该地区冬小麦物候期演变规律及农业气候变化的特定响应机制,为该地区的小麦种植生产适应气候变化、农业管理、品种选育等提供理论依据及科学建议。

1 方法和资料

1.1 研究区域

铜仁市位于贵州省东北部($107^{\circ}45' \sim 109^{\circ}39' \text{ E}$, $27^{\circ}7' \sim 29^{\circ}5' \text{ N}$),地处武陵山带腹部地区,全境主要为山地,大部分地区气候属中亚热带湿润气候区,受季风影响明显^[21]。该地平均气温 $13.7 \sim 17.7^{\circ}\text{C}$;年均降水量 $1\,096 \sim 1\,379 \text{ mm}$,集中于4—10月,占全年降水量的75%~85%;全年日照时数 $1\,020 \sim 1\,264 \text{ h}$,无霜期 $270 \sim 306 \text{ d}$ 。其基本气候特征为春温多变,绵雨较多;夏季炎热,日照充足;秋温速降,多阴多雨;冬少严寒,无霜期长。

1.2 数据来源

铜仁市二级国家农业气象观测站修建于1979年,其观测数据有较好的完整性及连续性,且观测方法严格遵照《农业气象观测规范》执行^[22-23],该地段土壤为酸性砂壤土,肥力、管理等级均为中等,地下水位深度大于2 m,有较好的灌溉条件。冬小麦观测地段种植方式及观测方法在过去连续37年均相同。

选取该观测站1984—2020年的冬小麦生育时期(以下称为物候期)观测资料,涵盖冬小麦从播种到成熟的生长季数据,包括播种期(sowing,

SO)、出苗期(emergence, EM)、三叶期(three-leaf, TS)、分蘖期(tillering, TI)、拔节期(jointing, JO)、孕穗期(booting, BO)、抽穗期(heading, HE)、开花期(flowering, FL)、乳熟期(milking, MI)、成熟期(maturity, MA)。关键生育阶段为出苗—分蘖(营养生长期)、分蘖—抽穗(营养与生殖生长并进期)、抽穗—成熟(生殖生长期)、播种—成熟(冬小麦生长季)。同期气象数据来源于铜仁市气象局碧江区国家气象站,具体包括地面温度(ground temperature, GT)、降水量(precipitation, P_r)、相对湿度(relative humidity, RH)、日照时数(sunshine duration, SD)、气温日较差(diurnal temperature range, DTR)、 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温(accumulated temperature, AT)。DTR 为日最高温度与日最低温度之差, $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ AT 为日平均温度 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的累计和,采用五日滑动平均法对部分缺测的数据进行插补。

1.3 研究方法

1.3.1 核密度估计

采用核密度估计(kernel density estimation, KDE)方法对冬小麦生长季的时间变化趋势进行密度估计。其本质是通过“核函数”平滑处理离散的发育期数据,生成连续的密度分布曲面,直观展示冬小麦发育在时间上的集中趋势与离散特征^[24]。KDE 的表达式为:

$$\hat{f}_h(x) = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{x-x_i}{h}\right) \quad (1)$$

式(1)中, $\hat{f}_h(x)$ 为 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ 的概率密度分布函数估计值; n 为样本数量; h 为带宽; K 为核函数。

日序数(days of year, DOY)以 1 月 1 日开始记为 1,按照时间依次递增。物候期以进入该发育阶段的普遍期为标准,即当进入该阶段的植株(茎)数达到观测总数的 50% 以上时所对应的日期,并将其转换为 DOY 进行分析。

1.3.2 气候趋势分析法

为系统探究气候因子与物候期的时间变异特征,采用气候趋势分析方法,以量化气候要素及物候期的长期变化趋势,通过最小二乘法对各气候因子与生育期序列进行线性回归建模,显著性检验水平为 $\alpha=0.05, \alpha=0.01, \alpha=0.001$ 。以生育期天数或农业气候因子为因变量 Y_t , 年份为自变量 t , 构建一元线性回归方程:

$$Y_t = a + bt \quad (2)$$

式中, a 为回归常数, b 为气候倾向率。

1.4 数据分析方法

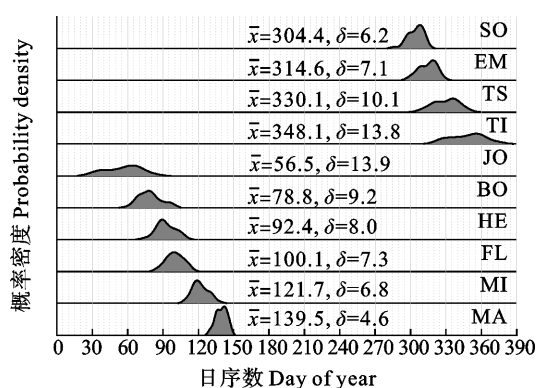
数据统计分析均在 Python 中完成,核密度分析、生育期变化趋势、多元回归分析、显著性检验及作图等均在 Origin 2024 中完成。

2 结果与分析

2.1 铜仁市冬小麦物候期变化趋势分析

2.1.1 冬小麦物候期日序数变化特征

基于铜仁市二级农业气象观测站 1984—2020 年连续 37 年观测资料,对冬小麦全物候期进行核密度估计分析,并计算各物候期 DOY 的平均值及标准差(图 1)。结果表明,铜仁市冬小麦各物候期 DOY 均符合正态分布,SO 一般为 10 月中旬到 11 月上旬,平均 DOY 为 304,大多出现在 10 月末(即 10 月 30 日);EM 一般为 10 月下旬到 11 月下旬,平均 DOY 为 315,大多出现在 11 月上旬末(即 11 月 10 日);TS 一般为 11 月上旬到 12 月中旬,平均 DOY 为 330,大多出现在 11 月下旬末(即 11 月 26 日);TI 一般为 11 月下旬到 1 月下旬,平均 DOY 为 348,大多出现在 12 月中旬(即 12 月 14 日);JO 为 1 月下旬到 3 月下旬,平均 DOY 为 57,大多出现在 2 月下旬(即 2 月 26 日);BO 一般为 3 月上旬到 4 月上旬,平均 DOY 为 79,大多出现在 3 月中旬末(即 3 月 26 日);HE 一般为 3 月中旬到 4 月中旬,平均 DOY 为 92,大多出现在 4 月上旬初(即 4 月 2 日);FL 一般为 3 月下旬到 4 月下旬,平均 DOY 为 100,大多出现在 4 月中旬(即 4 月 10 日);MI 一般为



SO:播种期;EM:出苗期;TS:三叶期;TI:分蘖期;JO:拔节期;BO:孕穗期;HE:抽穗期;FL:开花期;MI:乳熟期;MA:成熟期。下图同。

SO: Sowing period; EM: Emergence period; TS: Three-leaf stage; TI: Tillering stage; JO: Jointing stage; BO: Booting stage; HE: Heading stage; FL: Flowering stage; MI: Milking stage; MA: Maturity stage. The same in figures 2, 4, and 6.

图 1 铜仁市 1984—2020 年物候期核密度分布特征

Fig. 1 Characteristics of phenological phase kernel density distribution in Tongren (1984–2020)

4 月中旬到 5 月中旬,平均 DOY 为 122,大多出现在 5 月上旬初(即 5 月 2 日);MA 一般为 5 月中旬至 5 月下旬,平均 DOY 为 140,多集中在 5 月中旬(即 5 月 20 日)。

从铜仁市冬小麦各物候期标准差分析发现,TS、TI、JO 的标准差值较大,分别为 10.1、13.8、13.9 d,表明该阶段年际波动较大;而 SO、MI、MA 的标准差值较小,分别为 6.2、6.8、4.6 d,说明这些阶段的时间稳定性较高;EM、BO、HE、FL 的变化程度适中。

冬小麦各物候期 SO、EM、TS、TI、JO、BO、

HE、MI、MA 的回归斜率均为正(图 2),表明这些物候期随着年份的增加逐渐推迟。其中,SO、EM、TS、TI、JO、BO 和 MI 的推迟趋势分别为 4.4、5.3、8.1、10.9、7.7、1.3 和 2.3 $\text{d} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 推迟趋势明显。FL 的斜率为 $-1.1 \text{ d} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$,表明开花期随着年份的推进提前发生。HE[$0.2 \text{ d} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$]与 MA[$0.04 \text{ d} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$]的变化幅度较小,整体保持相对稳定,几乎不受年份干扰。总体来看,铜仁市冬小麦物候期变化表现为从播种期至抽穗期整体呈推迟趋势,而开花期略有提前,成熟期变化不明显。

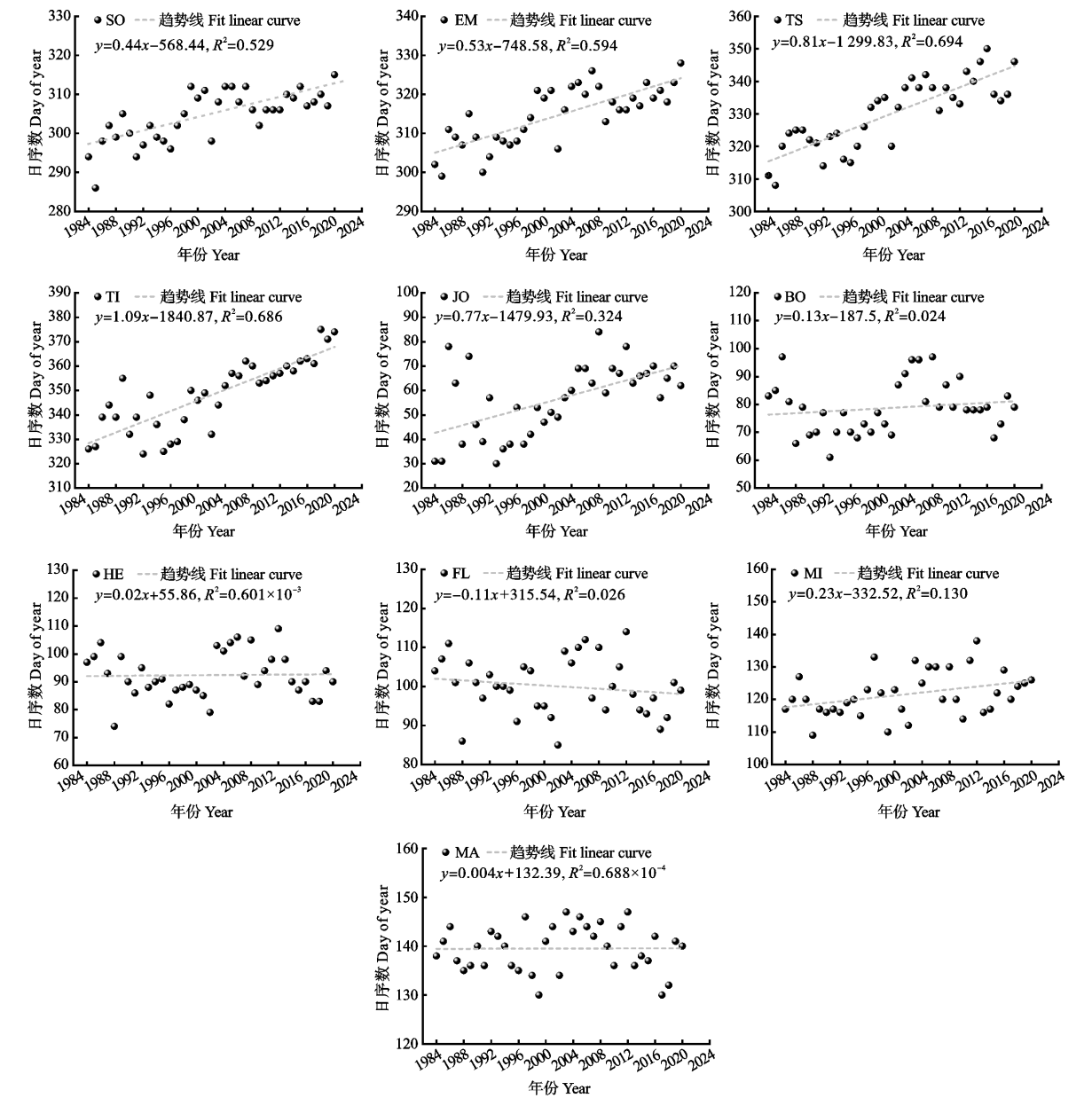


图 2 铜仁市 1984—2020 年各物候期日序数阶段变化趋势

Fig. 2 Trends of the day-of-year of winter wheat phenological phase in Tongren(1984—2020)

2.1.2 冬小麦关键生育阶段长度变化特征

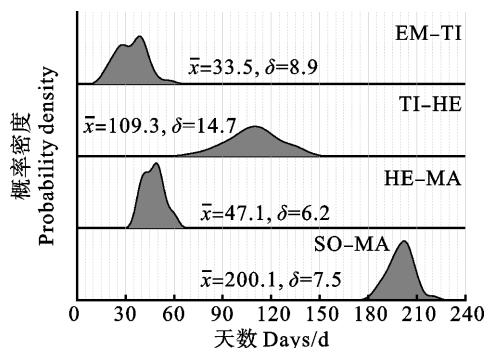
核密度分析结果(图3)表明,不同关键生育阶段持续时间存在明显差异。EM—TI(营养生长期)曲线主要集中在18~57 d区间,呈单峰形态,平均持续33.5 d,标准差适中;TI—HE(营养与生殖生长并进期)峰值集中在73~137 d区间,平均持续109.3 d,标准差较大,表明该阶段持续时间年际波动较明显,对春季温度波动高度敏感,年际间发育节奏差异显著;HE—MA(生殖生长期)曲线窄且峰值高,集中在37~61 d区间,平均持续47.1 d,标准差最小,说明该阶段时长年际稳定性最强,时长波动小;SO—MA核密度曲线峰值集中在183~220 d区间,平均持续200.1 d,标准差适中。

对关键生育阶段长度进行趋势分析(图4),其回归模型的斜率均在显著性水平 $\alpha=0.05$ 下具有统计学意义。EM—TI阶段持续时间随年份的增加呈延长趋势,变化速率为 $5.6 \text{ d} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 。TI—HE、SO—MA持续时间均随年份增加而减少,其中TI—HE的变化速率为 $-10.8 \text{ d} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$,HE—MA变化趋势基本不变,是物候期最稳定的阶段。SO—MA整个生长季持续时间呈缩短趋势,变化速率为 $-4.3 \text{ d} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$,表明冬小麦生长季整体略有缩短。

2.2 铜仁市冬小麦生育期间农业气候因子变化趋势

2.2.1 冬小麦生育期间农业气候因子变化趋势

冬小麦生育期内温度相关因子呈明显上升趋势(图5)。其中,GT以 $0.5 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 的速率显著上升($P<0.001$),决定系数0.536,表明热量积累是近40年的主导特征。 $\geq 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$ AT亦呈显著增加趋势($P<0.01$),变化速率为 $74.8 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$,进一步反映了温度升高对作物有效热量的贡献。降水量与湿度变化较小。 P_r 呈微弱增加



EM—TI: 出苗—分蘖; TI—HE: 分蘖—抽穗; HE—MA: 抽穗—成熟; SO—MA: 冬小麦生长季。下图同。

EM—TI: Emergence—tillering; TI—HE: Tillering—heading; HE—MA: Heading—maturity; SO—MA: Winter wheat growth season. The same in figure 4.

图3 铜仁市冬小麦关键生育阶段核密度分析
Fig. 3 Kernel density analysis of key growth stages for winter wheat in Tongren

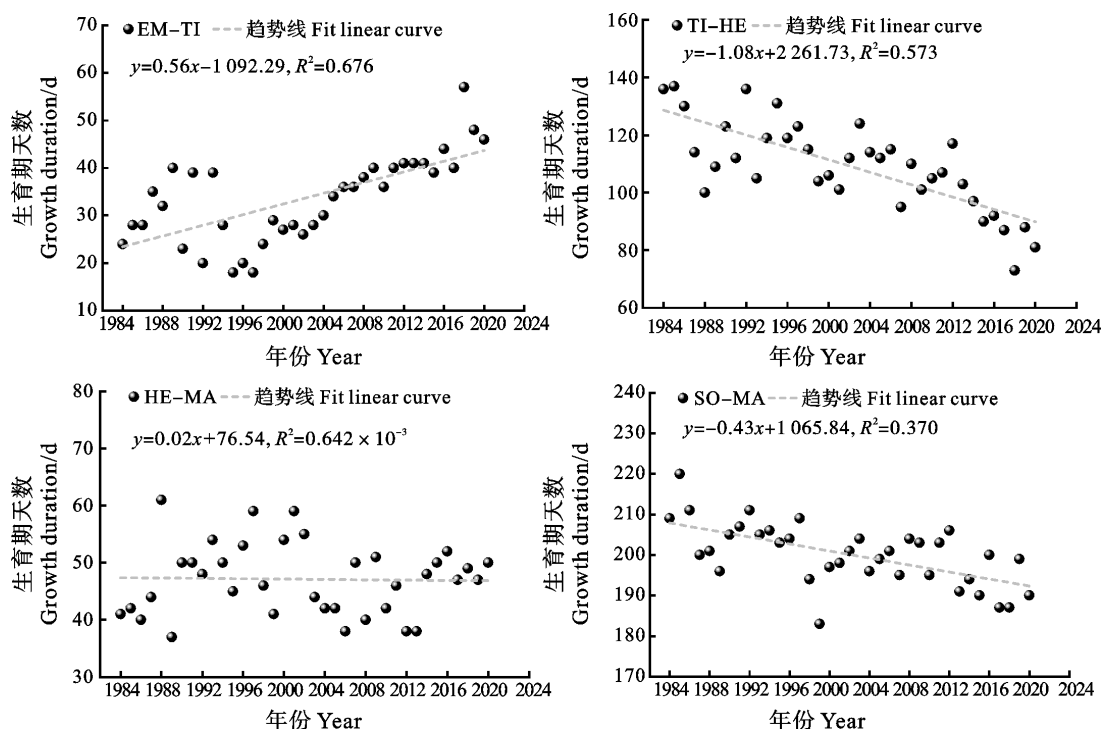


图4 铜仁市冬小麦关键生育阶段长度变化趋势

Fig. 4 Variation trends of the length of winter wheat key growth stages in Tongren

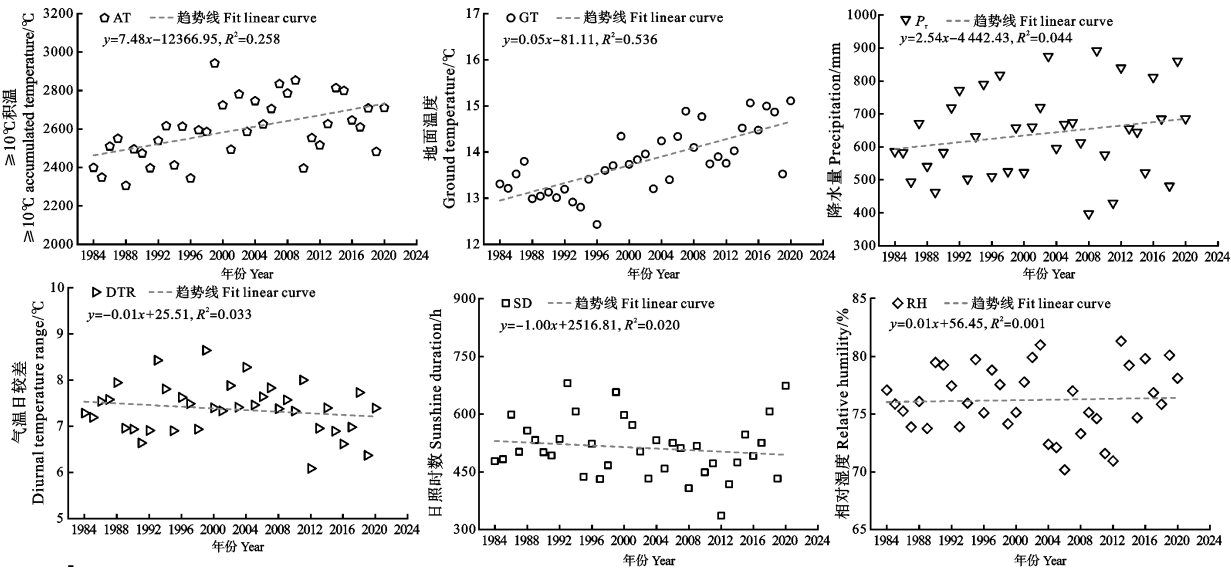


图 5 铜仁市冬小麦生长季内气候因子变化趋势

Fig. 5 Trend of agricultural meteorological factors during winter wheat growth period

趋势 $[25.4 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}, R^2=0.044]$;RH 变化幅度较小 $[0.1 \cdot (10 \text{ a})^{-1}, R^2=0.001]$ 。DTR 略有下降 $[-0.1 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (10 \text{ a})^{-1}, R^2=0.033]$,而 SD 呈显著减少趋势 $[-10.0 \text{ h} \cdot (10 \text{ a})^{-1}, R^2=0.020]$ 。总体来说,近 37 年铜仁市冬小麦生育期间农业气候条件呈现出气温升高、日照减少、降水波动增强的变化特征。

2.2.2 不同生育阶段农业气候因子变化特征

对 1984—2020 年铜仁市冬小麦生长季(10 月至次年 5 月)农业气候因子进行分生育阶段趋势分析(表 1)表明,AT、GT、DTR、SD 变化较为显著,而 P_r 和 RH 整体变化不明显。其中 AT 在 TS—TI、MI—MA 阶段呈显著下降趋势,变化速率分别为 $-45.83 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (10 \text{ a})^{-1} (P<0.001)$ 和 $-47.65 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (10 \text{ a})^{-1} (P<0.01)$;而 FL—MI 阶段则表现为显著增加趋势,变化速率为 $73.51 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (10 \text{ a})^{-1} (P<0.001)$ 。GT 在 EM—TS 和 TS—TI 阶段呈显著下降趋势($P<0.001$),变化速率分别为 $-1.13 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 和 $-1.40 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$;而在 JO—BO、JO—HE 及 SO—MA 阶段则呈显著上升趋势($P<0.001$),变化速率分别为 $1.54、1.48$ 和 $0.37 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$;在 BO—HE 阶段亦表现为显著升温趋势($1.14 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (10 \text{ a})^{-1}, P<0.01$)。DTR 在 JO—BO 和 JO—HE 阶段显著增加($P<0.01$),变化速率分别为 $0.84 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot$

$(10 \text{ a})^{-1}$ 和 $0.50 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$;而在 SO—EM 和 SO—JO 阶段则呈显著下降趋势,下降速率分别为 $-0.96 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 和 $-0.36 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 。SD 在 TI—JO、MI—MA、SO—JO 和 SO—MA 阶段显著减少($P<0.05$ 或 $P<0.01$),变化速率分别为 $-11.52、-12.84、-17.61$ 和 $-26.34 \text{ h} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 。

2.3 铜仁市冬小麦物候期与农业气候因子的关系

铜仁市冬小麦物候期的 DOY 与生长季内各关键农业气候因子的平均值做相关性分析(图 6)表明,不同气候因子对冬小麦物候期的影响存在明显差异,其中温度相关因子影响较为显著。SO、EM、TS 和 TI 的 DOY 与 AT 均呈显著正相关($P<0.001$ 或 $P<0.01$);SO、EM、TS、TI 和 JO 的 DOY 与 GT 亦呈显著正相关($P<0.001$ 或 $P<0.01$);BO、HE、FL 和 MI 的 DOY 与 SD 呈显著负相关($P<0.05$ 或 $P<0.01$);JO、BO、HE 和 FL 的 DOY 与 RH 呈显著负相关($P<0.05$);成熟期的 DOY 与各气候因子相关性均不显著;各物候期的 DOY 与 P_r 和 DTR 相关性整体不显著($P>0.05$)。

从气候因子之间的相关性看,AT 与 GT 呈显著正相关($P<0.001$);RH 与 P_r 呈显著正相关($P<0.01$);而 DTR 与 SD 呈显著正相关($P<0.001$);DTR 与 RH、 P_r 均表现为显著负相关($P<0.01$);SD 与 P_r 之间亦呈显著负相关($P<0.01$)。

表 1 铜仁市冬小麦各生育阶段农业气候因子变化趋势

Table 1 Changes of agricultural meteorological factors at different growth stages of winter wheat in Tongren

生育阶段 Growth stage	AT/ [℃ · (10 a) ⁻¹]	GT/ [℃ · (10 a) ⁻¹]	P _r / [mm · (10 a) ⁻¹]	RH/ [% · (10 a) ⁻¹]	DTR/ [℃ · (10 a) ⁻¹]	SD/ [h · (10 a) ⁻¹]
SO—EM	4.48	−0.37	5.69	1.80	−0.96 [*]	−4.79
EM—TS	−6.44	−1.13 ^{***}	0.94	0.21	−0.78	−1.28
TS—TI	−45.83 ^{***}	−1.40 ^{***}	5.38	0.87	−0.66	−2.54
TI—JO	3.38	0.34 [*]	7.27	0.12	−0.14	−11.52 [*]
JO—BO	9.07	1.54 ^{***}	−5.00	−0.32	0.84 ^{**}	−2.05
BO—HE	7.01	1.14 ^{**}	−1.91	−0.18	0.04	−0.98
HE—FL	−6.39	0.95 [*]	−8.97 [*]	−1.46	0.66	−1.66
FL—MI	73.51 ^{***}	0.64 [*]	22.19 [*]	0.24	−0.11	7.77
MI—MA	−47.65 ^{**}	0.15	−4.39	0.58	−0.39	−12.84 [*]
SO—JO	−37.80	−0.02	19.32	0.36	−0.36 ^{**}	−17.61 ^{**}
JO—HE	13.59	1.48 ^{***}	−7.85	−0.01	0.50 ^{**}	−3.48
HE—MA	18.33	0.51 [*]	8.00	−0.02	−0.03	−5.85
SO—MA	−6.20	0.37 ^{***}	19.69	0.14	−0.13	−26.34 ^{**}

SO:播种期;EM:出苗期;TS:三叶期;TI:分蘖期;JO:拔节期;BO:孕穗期;HE:抽穗期;FL:开花期;MI:乳熟期;MA:成熟期。*: $P<0.05$, **: $P<0.01$, ***: $P<0.001$ 。下同。

SO: Sowing period; EM: Emergence period; TS: Three-leaf stage; TI: Tillering stage; JO: Jointing stage; BO: Booting stage; HE: Heading stage; FL: Flowering stage; MI: Milking stage; MA: Maturity stage. *: $P<0.05$, **: $P<0.01$, ***: $P<0.001$. The same in table 2.

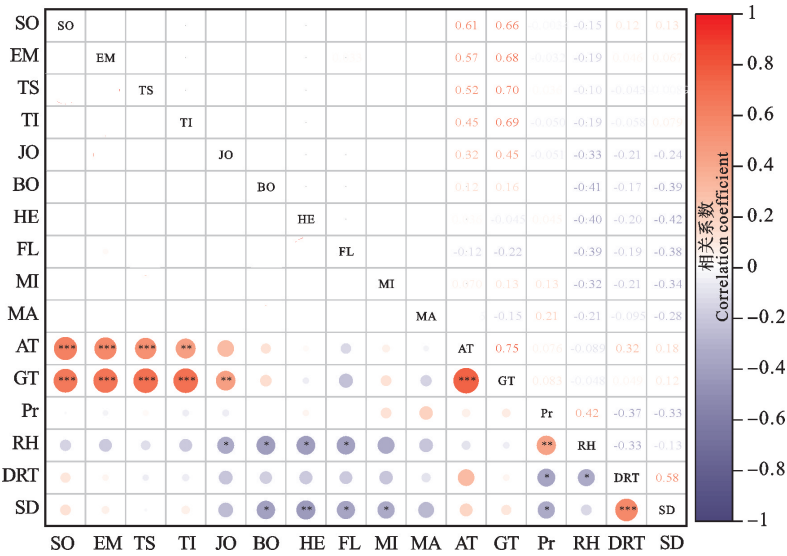


图 6 铜仁市冬小麦物候期日序数与气候因子的相关性分析

Fig. 6 Correlation analysis between the day-of-year of winter wheat phenological stages and agricultural meteorological factors in Tongren

2.4 铜仁市冬小麦物候期对农业气候变化的响应

为进一步分析各气候因子对冬小麦物候期的综合影响,构建多元回归模型(表 2)发现,AT、GT、DTR、P_r和RH对冬小麦物候期具有显著影响,而SD的影响相对较弱。AT在EM、TS、BO、HE、FL、MI和MA阶段均表现为显著正效应($P<0.01$ 或 $P<0.001$),表明积温增

加会推迟相应物候期的DOY。GT在EM、TS、JO和MI阶段表现出显著影响($P<0.01$ 或 $P<0.001$),且多为负效应,说明地温升高可能导致相关物候期提前发生。RH在FL和MI阶段呈显著负效应($P<0.01$ 或 $P<0.001$),在JO阶段亦呈显著负效应($P<0.05$)。P_r在HE阶段表现为高度显著正效应($P<0.001$),在BO

和 FL 阶段亦达到显著水平 ($P < 0.05$)。DTR 在 TS、TI、BO、FL 和 MI 阶段表现出显著负效应 ($P < 0.05$)。相比之下,SD 仅在 TI 阶段表现为显著正效应 ($P < 0.05$),其余阶段均未达到显著水平。综合来看,铜仁市冬小麦物候期

对热量条件(AT 和 GT)的响应最为敏感,其次为 DTR、 P_r 和 RH,而对 SD 的敏感性相对较低。根据表决定系数结果可知,农业气候因子对铜仁市冬小麦物候期 DOY 变化的解释率为 54.6%。

表 2 铜仁市冬小麦物候期日序数与农业气候因子的多元回归分析
Table 2 Multiple regression analysis between the day-of-year of winter wheat phenological phase and agricultural meteorological factors in Tongren

物候期 Growthperiod	气候因子回归系数 Regression coefficient						回归统计参数 Statistical parameter		
	β_{AT}	β_{GT}	β_{DTR}	β_{RH}	β_{P_r}	β_{SD}	R^2	F	P
播种 SO	-0.37	0.36	0.52	-0.25	-0.28	-0.86	0.35	2.72	<0.05
出苗 EM	0.13**	-3.40***	0.60	-0.39	-0.0052	-0.31	0.47	4.41	<0.01
三叶 TS	0.078***	-5.77***	-2.36*	-0.25	-0.048	0.068	0.83	25.23	<0.001
分蘖 TI	0.20	0.40	34.52*	-4.87	0.12	-2.09*	0.30	2.16	<0.01
拔节 JO	0.029	-5.93**	-9.98	-1.35*	0.050	0.035	0.44	3.86	<0.01
孕穗 BO	0.033**	-2.12	-4.99*	-1.06	0.029*	-0.021	0.53	5.65	<0.001
抽穗 HE	0.033***	-3.06	-3.69	-1.05	0.025***	-0.037	0.69	11.01	<0.001
开花 FL	0.030***	-4.0	-3.83*	-0.98***	0.023*	-0.027	0.70	11.86	<0.001
乳熟 MI	0.020**	0.40**	-3.50*	-0.78**	0.011	-0.0054	0.64	8.74	<0.001
成熟 MA	0.016**	-0.72	-1.66	-0.51	0.010*	0.0020	0.51	5.13	<0.001

3 讨论

3.1 冬小麦物候期与农业气候变化特征

本研究通过分析铜仁市连续 37 年(1984—2020 年)冬小麦物候期与农业气候变化特征发现,多数物候期与年份存在显著线性关系,总体呈现播种期至乳熟期整体推迟,而开花期略有提前。冬小麦各关键生育阶段持续天数表现为前期延长、中期缩短、后期相对稳定,小麦生长季整体略缩短。生长季内的农业气候因子变化显著,主要表现为温度升高、日照减少、水热波动大。这种物候期变化趋势与张全军等^[24]的结论类似,该研究基于 1981—2021 年全国 62 个观测站的长期数据分析发现,冬小麦前期物候(播种、出苗、分蘖)整体后移,而中期物候(拔节、抽穗、开花)显著提前,关键生育阶段持续时间重新分配,从而在一定程度上抵消了前期物候推迟对生长季长度的影响。此外,华北北部播期试验也表明,在晚播条件下冬小麦生长季缩短^[25]。本研究也与部分研究的物候期阶段性推迟结果存在差异^[26-27],这可能与研究区域气候条件、地形特征、数据来源及分析方法等因素不同有关。

3.2 冬小麦物候期与农业气候因子的响应机制

物候期与农业气候变化趋势密切相关,主要影响因子为积温、地温、降水量、相对湿度、气温日较差及日照时数。温度类因子是驱动冬小麦生长发育的重要因素,但不同温度指标的作用阶段与方向存在显著差异。本研究发现积温仅与前期物候期(播种、出苗、三叶)呈高度显著正相关,而经多元回归剔除地温、气温日较差的干扰后,其对生长季(出苗至成熟)均表现为显著正效应,说明积温累积过快可能延缓前期生育进程,小麦需通过延长前期生长以匹配自身发育节律^[28];地温与前期物候期也呈高度显著正相关,但在控制积温后,其对出苗、三叶、拔节、乳熟期呈显著负效应,即地温升高促使物候期提前。气温日较差对冬小麦部分物候期呈负效应,气温日较差过大可能不利于冬小麦生长发育。有研究发现春化阶段对热量敏感,过高积温会干扰春化作用,推迟生育转换^[29-30]。也有研究指出不同播种日期通过积温影响冬小麦不同阶段的时长,合适的积温条件是冬小麦稳定产量的关键因素之一^[31]。本研究发现,物候期积温的变化会对冬小麦生育时期产生不同程度的影响^[32-34],进一步证实了前期积温对物候

期的影响机制。此外,地温在播种至分蘖期阶段起关键驱动作用,其异常升高可能导致持续生长甚至倒伏,从而影响产量^[26,35]。作物模型模拟发现从气温日较差在冬小麦营养生长期表现为抑制作用^[32]。王妍等^[36]研究发现小麦生长发育受气温日较差的影响最大,气温日较差呈显著减小趋势会对小麦生产产生不利影响。铜仁市气温日较差多年连续变化也呈现下降趋势,与物候期所受抑制响应相符。

水分因子(降水量、相对湿度)同样也对冬小麦生殖生长阶段(拔节—开花)起关键调节作用。降水量在孕穗、抽穗和开花期以显著正效应为主,即降水增多会推迟物候期。相对湿度在开花与乳熟期则表现为负效应,高湿度促使物候期提前。研究指出冬小麦返青后降水对发育进程影响显著^[37],过量降水会抑制根系呼吸与光合作用,延缓孕穗至成熟期进程^[38],本研究结论与其一致。也有研究表明,适度的空气湿度能促进小麦生育进程^[40],如西藏地区相对湿度增加会导致冬小麦抽穗期将提前^[39]。相对湿度主要通过影响生殖发育过程来促进物候期提前,而降水量则主要通过影响土壤环境和光合作用来导致物候期推迟^[36,41]。本研究发现,相对湿度升高倾向于促进物候期提前,而降水增加则倾向于导致物候期推迟。因此在实际生产中,高湿地区可借湿度促进效应优化农事安排,而多雨地区需加强排水以缓解物候期推迟。

日照时数对冬小麦物候期影响较弱,主要表现为抑制分蘖阶段。这一发现与肖登攀等^[41]研究相似,积温升高间接引起抑制影响,控制温度因子后其标准化系数下降,说明日照的影响在中后期受温度因子干扰。相关研究也表明,仅调控日照对物候期作用甚微,应优先考虑温度调控^[20,36]。陕西安康地区研究亦指出,日照影响较小,主导因子为气温、地温和气温日较差^[43]。在不同地区,日照时数的影响也可能存在差异。拉萨河谷拔节后日照增加会推迟物候期^[44],而华北平原总辐射量减少对冬小麦造成减产影响^[45]。所以在分蘖期,保证充足的日照对于促进分蘖、形成壮苗至关重要。在实际生产中,可以通过合理密植、调整行距等方式优化群体光照分布,提高光能利用效率。

4 结论与展望

1984—2020年铜仁市冬小麦物候期总体呈

现阶段性变化特征。多数物候期表现为推迟趋势,推迟速率为 $0.2 \sim 10.9 \text{ d} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$,其中仅开花期呈提前趋势 $[-1.1 \text{ d} \cdot (10 \text{ a})^{-1}]$,而成熟期变化幅度较小 $[0.04 \text{ d} \cdot (10 \text{ a})^{-1}]$,整体较为稳定。关键生育阶段变化特征表现为生长季持续时间整体呈缩短趋势 $[-4.3 \text{ d} \cdot (10 \text{ a})^{-1}]$,其中营养生长期延长 $[5.6 \text{ d} \cdot (10 \text{ a})^{-1}]$,营养与生殖生长并进期缩短 $[-10.8 \text{ d} \cdot (10 \text{ a})^{-1}]$,生殖生长期基本不变 $[0.2 \text{ d} \cdot (10 \text{ a})^{-1}]$ 。农业气候因子总体表现为气温升高、日照减少及水热条件波动增强。冬小麦物候期日序数对农业气候因子的响应呈现为前期主要受温度因子驱动,中后期受非温度因子的影响增强,成熟阶段自主稳定的特征。

在农业生产实践中,应根据铜仁市气候变化趋势优化冬小麦栽培管理措施。例如,在品种选育方面可优先选择耐低温、耐弱光的中熟品种,缩短分蘖—拔节期敏感窗口;在栽培管理方面可通过合理调整播期以避免倒春寒高发期,并在干旱年份采取秸秆覆盖保墒、分蘖期增施磷钾肥等措施,以提高冬小麦对气候变化的适应能力。未来研究还需结合产量和品质指标,进一步深入探讨农业气候因子对冬小麦生长发育的综合影响机制,为铜仁市乃至西南地区冬小麦生产提供更加可靠的农业气象依据。

参考文献:

- [1] WHEELER T, VON BRAUN J. Climate change impacts on global food security [J]. *Science*, 2013, 341(6145): 509.
- [2] IPCC. Climate Change 2021: The Physical Science Basis [R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.
- [3] TAO F L, ZHANG S, ZHANG Z. Spatiotemporal changes of wheat phenology in China under the effects of temperature, day length and cultivar thermal characteristics [J]. *European Journal of Agronomy*, 2012, 43: 201.
- [4] 刘苇航, 叶涛, 史培军, 等. 气候变化对粮食生产风险的影响研究进展[J]. 自然灾害学报, 2022, 31(4): 31.
LIU W H, YE T, SHI P J, et al. Advances in the study of climate change impact on crop producing risk [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2022, 31(4): 31.
- [5] 中国气象局气候变化中心. 中国气候变化蓝皮书(2024) [M]. 北京: 科学出版社, 2022.
Climate Change Center of China Meteorological Administration. China Climate Change Blue Book (2024) [M]. Beijing: Science Press, 2022.
- [6] OZBERK I, OZBERK F, COSKUN Y, et al. Role of sustainable wheat production to ensure food security in the CWANA region [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2023, 74(18): 5829.
- [7] ULUKAN H. Wheat production trends and research priori-

- ties: A global perspective [M]//Advances in Wheat Breeding. Singapore: Springer Nature Singapore, 2024: 1.
- [8] HOLMAN J D, OBOUR A K, O'BRIEN D, *et al.* Winter wheat historic trends and yield gaps in the wheat state [J]. *Crops & Soils*, 2024, 57(5): 26.
- [9] ERENSTEIN O, JALETA M, MOTTALEB K A, *et al.* Global trends in wheat production, consumption and trade [M]//Wheat Improvement: Food Security in a Changing Climate. Cham: Springer International Publishing, 2022: 47.
- [10] 赵广才. 中国小麦种植区划研究(二)[J]. 麦类作物学报, 2010, 30(6): 1140.
- ZHAO G C. Study on Chinese wheat planting regionalization (II) [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2010, 30(6): 1140.
- [11] 赵广才, 常旭虹, 王德梅, 等. 小麦生产概况及其发展[J]. 作物杂志, 2018(4): 1.
- ZHAO G C, CHANG X H, WANG D M, *et al.* General situation and development of wheat production [J]. *Crops*, 2018(4): 1.
- [12] 赵鸿, 王润元, 尚艳, 等. 粮食作物对高温干旱胁迫的响应及其阈值研究进展与展望[J]. 干旱气象, 2016, 34(1): 2.
- ZHAO H, WANG R Y, SHANG Y, *et al.* Progress and perspectives in studies on responses and thresholds of major food crops to high temperature and drought stress [J]. *Journal of Arid Meteorology*, 2016, 34(1): 2.
- [13] 侯学会, 隋学艳, 姚慧敏, 等. 中国北方麦区冬小麦物候期对气候变化的响应[J]. 麦类作物学报, 2019, 39(2): 202.
- HOU X H, SUI X Y, YAO H M, *et al.* Response of winter wheat phenology to climate change in northern China [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2019, 39(2): 202.
- [14] IPCC. Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability—Summary for Policymakers [R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2022.
- [15] 马明明, 李迎春, 薛澄, 等. 中国冬小麦品质时空变异特征及关键气象因子分析[J]. 麦类作物学报, 2023, 43(1): 113.
- MA M M, LI Y C, XUE C, *et al.* Spatial and temporal variations of winter wheat quality and key meteorological factors in China [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2023, 43(1): 113.
- [16] 戴彤, 王靖, 赫迪, 等. 1961—2010年气候变化对西南冬小麦潜在和雨养产量影响的模拟分析[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(3): 293.
- DAI T, WANG J, HE D, *et al.* Impact simulation of climate change on potential and rainfed yields of winter wheat in southwest China from 1961 to 2010 [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2016, 24(3): 293.
- [17] 刘杨洋, 王明田. 主要粮食作物精细化农业气候区划: 以四川省中江县为例[J]. 中国农学通报, 2023, 39(31): 129.
- LIU Y Y, WANG M T. Refined agro-climatic zoning of main food crops: Taking Zhongjiang County of Sichuan Province as an example [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2023, 39(31): 129.
- [18] 高辉明, 张正斌, 徐萍, 等. 2001—2009年中国北部冬小麦生育期和产量变化[J]. 中国农业科学, 2013, 46(11): 2207.
- GAO H M, ZHANG Z B, XU P, *et al.* Changes of winter wheat growth period and yield in northern China from 2001 to 2009 [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46(11): 2207.
- [19] 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): 455.
- SONG Y L, ZHOU G S, GUO J P, *et al.* Freezing injury of winter wheat in northern China and delaying sowing date to adapt [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2022, 33(4): 455.
- [20] 李菲菲, 汤军, 高贤君, 等. 基于GEE的气候变化对豫北地区冬小麦播种面积与产量影响研究[J]. 河南农业科学, 2022, 51(8): 150.
- LI F F, TANG J, GAO X J, *et al.* Analysis of climate change effects on winter wheat sowing area and yield in northern Henan based on GEE [J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2022, 51(8): 150.
- [21] 冉红玲, 何博, 龙河春, 等. 铜仁市植被NPP时空演变及驱动因素分析[J]. 山地气象学报, 2024, 48(4): 72.
- RAN H L, HE B, LONG H C, *et al.* Spatial and temporal evolution of vegetation NPP and its driving factors in Tongren City [J]. *Journal of Mountain Meteorology*, 2024, 48(4): 72.
- [22] 国家气象局. 农业气象观测规范[M]. 北京: 气象出版社, 1993.
- China Meteorological Administration. Specification for agrometeorological observation [M]. Beijing: China Meteorological Press, 1993.
- [23] 张全军, 宏观, 吴东丽, 等. 中国农业气象观测业务的发展及未来展望[J]. 中国农业气象, 2023, 44(8): 735.
- ZHANG Q J, HONG G, WU D L, *et al.* Development status, problems and prospects of agrometeorological observation operation in China [J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2023, 44(8): 735.
- [24] ZHANG Q J, WU D L, GAO J. Variation of winter wheat phenology dataset in Huang Huai Hai Plain of China from 1981 to 2021 [J]. *Scientific Data*, 2025, 12: 1203.
- [25] 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): 2968.
- 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): 2968.
- [26] 谭凯炎, 房世波, 任三学. 增温对华北冬小麦生产影响的试验研究[J]. 气象学报, 2012, 70(4): 902.
- TAN K Y, FANG S B, REN S X. Experiment study of winter wheat growth and yield response to climate warming [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2012, 70(4): 902.
- [27] 蒋冲, 王飞, 穆兴民, 等. 近20年来陕西中部地区主要农作物生育期变化趋势分析[J]. 水土保持研究, 2011, 18(5): 67.
- JIANG C, WANG F, MU X M, *et al.* Change in growth stages of major crops in the last 20 years in the middle region of Shaanxi Province [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2011, 18(5): 67.
- [28] 郭海璇, 王胜, 王娟, 等. 陇东半干旱地区冬季积温变化特征及其对冬小麦的影响[J]. 中国农学通报, 2018, 34(20): 101.
- GUO H Y, WANG S, WANG J, *et al.* Variation of winter accumulated temperature and its influence on winter wheat in the semi-arid region of Longdong [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2018, 34(20): 101.

- [29] 杨建堂, 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.
YANG J Y, MEI X R, LIU Q, *et al.* Variations of winter wheat growth stages under climate changes in northern China [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2011, 35(6): 623.
- [30] 马玉平, 霍治国, 王培娟, 等. 中国农业气象模式(CAMM1.0)构建与应用[J]. 应用气象学报, 2019, 30(5): 528.
MA Y P, HUO Z G, WANG P J, *et al.* The construction and application of Chinese Agro-Meteorological model(CAMM1.0) [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2019, 30(5): 528.
- [31] 刘青娜, 刘娜, 邵立威, 等. 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.
LIU Q S, LIU N, SHAO L W, *et al.* 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.
- [32] 郑娜, 刘秀位, 王锡平. 利用产量差距方法进行华北冬小麦产量受气候影响规律的分析: 以河北省栾城县为例[J]. 中国生态农业学报, 2014, 22(2): 234.
ZHENG N, LIU X W, WANG X P. Determining the effects of climate on winter wheat yield in northern China *via* yield gap analysis: A case study of Luancheng County, Hebei Province [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2014, 22(2): 234.
- [33] 马倩倩, 贺勇, 张梦婷, 等. 中国北部冬麦区小麦生育期对生育阶段积温变化的响应[J]. 中国农业气象, 2018, 39(4): 233.
MA Q Q, HE Y, ZHANG M T, *et al.* Responses of winter wheat phenology to accumulated temperature during growing periods in northern China wheat belt [J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2018, 39(4): 233.
- [34] 崔耀平, 肖登攀, 刘素洁, 等. 中国夏玉米和冬小麦近年生育期变化及其与气候的关系[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(3): 388.
CUI Y P, XIAO D P, LIU S J, *et al.* Growth periods variation of summer maize and winter wheat and their correlations with hydrothermal conditions in recent years in China [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2018, 26(3): 388.
- [35] 余忠水, 唐叔乙, 云丹尼玛. 1971—2010年雅鲁藏布江中游气候生长期变化特征[J]. 高原气象, 2015, 34(2): 338.
YU Z S, TANG S Y, YUN D. Variation characteristics of climatic growing season in the middle course of Yarlung Zangbo River during 1971—2010 [J]. *Plateau Meteorology*, 2015, 34(2): 338.
- [36] 王妍, 张晓龙, 石嘉丽, 等. 中国冬小麦主产区气候变化及其对小麦产量影响研究[J]. 中国生态农业学报, 2022, 30(5): 723.
WANG Y, ZHANG X L, SHI J L, *et al.* Climate change and its effect on winter wheat yield in the main winter wheat production areas of China [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2022, 30(5): 723.
- [37] 代立芹, 李春强, 魏瑞江, 等. 河北省冬小麦生长和产量对气候变化的响应[J]. 干旱区研究, 2011, 28(2): 294.
DAI L Q, LI C Q, WEI R J, *et al.* Response of growth and yield of winter wheat to climate change in Hebei Province [J]. *Arid Zone Research*, 2011, 28(2): 294.
- [38] 李德, 周文麟, 杨霏云. 基于云模型的冬小麦气候适宜度评价方法: 以安徽省宿州市为例[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(7): 944.
LI D, ZHOU W L, YANG F Y. Evaluation of climate suitability of winter wheat based on cloud model analysis: A case study of Suzhou, Anhui Province [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2016, 24(7): 944.
- [39] WANG X W, LI L, DING Y B, *et al.* Adaptation of winter wheat varieties and irrigation patterns under future climate change conditions in northern China [J]. *Agricultural Water Management*, 2021, 243: 106409.
- [40] KOLBAEV G, EGAMBERDIEV K, KUZIEV J, *et al.* The Effect of air temperature and relative humidity to winter wheat growth during vegetation period in Uzbekistan [J]. *American Journal of Agriculture and Horticulture Innovations*, 2022, 6(4): 38.
- [41] 滕世辉, 李晓霞, 刘庆娟. 气候变化对临沂冬小麦主要生育期的影响及适播期研究[J]. 农学学报, 2023, 13(4): 18.
TENG S H, LI X X, LIU Q J. Effects of climate change on main growth stages of winter wheat in Linyi and determination of suitable sowing time [J]. *Journal of Agriculture*, 2023, 13(4): 18.
- [42] 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.
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.
- [43] 张全军, 吴东丽, 宏观, 等. 1981—2020年陕西安康冬小麦生育期对农业气象条件的响应[J]. 麦类作物学报, 2024, 44(12): 1560.
ZHANG Q J, WU D L, HONG G, *et al.* Response of winter wheat growth period in Ankang, Shaanxi to agrometeorological condition from 1981 to 2020 [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2024, 44(12): 1560.
- [44] 晋美朗杰, 巴桑, 郭艺楠, 等. 气候变化对拉萨河谷冬小麦主要生育期的影响分析[J]. 高原山地气象研究, 2023, 43(3): 73.
JIN M, BA S, GUO Y N, *et al.* Impacts of climate change on the major growth stage of winter wheat in Lhasa River valley from 1996 to 2021 [J]. *Plateau and Mountain Meteorology Research*, 2023, 43(3): 73.
- [45] 胡润珉, 王靖. 气候要素、品种及管理措施变化对河南省冬小麦和夏玉米生育期的影响[J]. 中国农业大学学报, 2019, 24(11): 16.
HU X Y, WANG J. Effects of change in climatic factors, cultivar shifts and agronomic management practices on the growth duration of winter wheat and summer maize in Henan Province [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2019, 24(11): 16.