

1991~2022年雅鲁藏布江中游冬小麦生育期及其气候因子的变化特征

郭艺楠¹, 晋美朗杰², 杜 军^{3,4*}, 德庆卓嘎³, 王 挺⁴

¹西藏自治区气象信息网络中心, 西藏 拉萨

²拉萨市气象局大气探测中心, 西藏 拉萨

³西藏高原大气环境科学研究所/西藏高原大气环境开放实验室, 西藏 拉萨

⁴中国气象局墨脱大气水分循环综合观测野外科学试验基地/墨脱国家气候观象台, 西藏 墨脱

收稿日期: 2023年10月7日; 录用日期: 2023年11月8日; 发布日期: 2023年11月15日

摘 要

为评价气候变暖背景下高原冬小麦主要生育期变化, 基于1991~2022年雅鲁藏布江中游(简称雅江中游)的泽当冬小麦生育期及气温、降水量、日照时数等资料, 采用一元回归、Person相关系数和逐步回归方法, 分析了雅江中游冬小麦生育期变化特征以及影响的主导气候因子。结果表明: 1991~2022年, 雅江中游冬小麦营养生长期(VGP)、生殖生长期(RGP)和全生育期(WGP)的平均气温均趋于升高, 平均最高气温升温率明显比平均最低气温要大, 气温日较差呈增大趋势。VGP、WGP的 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温、降水量和日照时数为增加趋势, 平均相对湿度趋于减少, 而RGP这些要素的变化趋势相反。冬小麦各生育期日期都呈推迟趋势, 平均每10 a推迟0.61~14.16 d, 以分蘖期推迟的最为显著。冬小麦VGP延长, RGP、WGP缩短。4月、6月平均最低气温降低, 11月平均最高气温升高、日照时数增加, 是冬小麦生育期普遍推迟的主要原因。

关键词

冬小麦, 生育期, 变化趋势, 响应, 雅鲁藏布江中游

Variation Characteristics of Growth Period and Its Climate Factors of Winter Wheat in Middle Reaches of Yarlung Zangbo River over Xizang from 1991 to 2021

Yinan Guo¹, Namgyal Jigme², Jun Du^{3,4*}, Dolkar Dechen³, Ting Wang⁴

*通讯作者。

文章引用: 郭艺楠, 晋美朗杰, 杜军, 德庆卓嘎, 王挺. 1991~2022 年雅鲁藏布江中游冬小麦生育期及其气候因子的变化特征[J]. 气候变化研究快报, 2023, 12(6): 1147-1155. DOI: 10.12677/ccrl.2023.126118

¹Xizang Meteorological Information and Network Centre, Lhasa Xizang

²Atmospheric Sounding Center of Lhasa Meteorological Bureau, Lhasa Xizang

³Xizang Institute of Plateau Atmospheric and Environmental Science Research/Xizang Open Laboratory of Plateau Atmospheric and Environment, Lhasa Xizang

⁴Field Science Experiment Base for Comprehensive Observation of Atmospheric Water Cycle in Mêdog County/Mêdog National Climate Observatory, CMA, Mêdog Xizang

Received: Oct. 7th, 2023; accepted: Nov. 8th, 2023; published: Nov. 15th, 2023

Abstract

In order to evaluate the main growth period changes of winter wheat in the plateau under the background of climate warming, based on the data for growth period of winter wheat, temperature, precipitation and sunshine duration etc. at Tsedang station in the middle reaches of Yarlung Zangbo River (MYZR) over Xizang from 1991 to 2022, the change characteristics of growth period for winter wheat and the dominant climatic factors in MYZR were analyzed, by using of one-dimensional regression, Person correlation coefficient and stepwise regression methods. The results showed that: From 1991 to 2022, the average temperature of the vegetative growth period (VGP), reproductive growth period (RGP) and whole growth period (WGP) for winter wheat increased in MYZR. The warming rate of the average maximum temperature was significantly higher than that of the average minimum temperature, and the daily temperature range showed an increasing trend. The $\geq 0^{\circ}\text{C}$ accumulated temperature, precipitation and sunshine duration of VGP and WGP increased, and the average relative humidity decreased, while the trend of these elements in RGP was opposite. The date of each growth period of winter wheat delayed in MYZR, with the rate of 0.61~14.16 days per decade, with the most significant delay in the tillering stage. The VGP of winter wheat was prolonged, and RGP and WGP were shortened. The decrease of average minimum temperature in April and June, the increase of average maximum temperature and sunshine duration in November were the main reasons for the general delay in growth period of winter wheat.

Keywords

Winter Wheat, Growth Period, Change Trend, Climate Response, Middle Reaches of Yarlung Zangbo River

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

气候资源是自然资源中影响农业生产的重要组成部分，而农业是对气候变化响应最为敏感和脆弱的领域之一[1]。全球变暖已毋庸置疑，中国气候变化监测蓝皮书 2022 [2]指出：2021 年，全球平均温度较工业化前水平偏高 1.11℃。1951~2021 年中国地表年平均气温以 $0.26^{\circ}\text{C}\cdot 10\text{a}^{-1}$ 的速率显著升高，1961~2021 年中国平均年降水量呈增加趋势，平均每 10 a 增加 5.5 mm，且年代际变化特征明显。在气候变化背景下，国内冬小麦生育期已发生明显改变[1] [3] [4] [5] [6]，但具有较强的区域特征。如 1981~2010 年华北地区冬小麦播种期和出苗期均呈推迟趋势，其他生育期则呈提前趋势，但冬小麦全生育期表现为缩短[7]。

2003~2012 年我国冬小麦返青期、拔节期、成熟期发生时间主要呈延后趋势[8]。1981~2019 年河南省冬小麦播种、出苗和返青 3 个生育期明显推迟,而拔节、开花和成熟 3 个生育期显著提前[9]。1957~2015 年晋南临汾和运城两地小麦越冬阶段持续天数呈下降趋势[10]。1981~2010 年,黄土高原冬小麦播种期推迟 $2\sim 3\text{ d}\cdot 10\text{a}^{-1}$,全生育期缩短 $7\sim 8\text{ d}\cdot 10\text{a}^{-1}$ [11]。1981~2016 年陇东半干旱地区环县冬小麦除分蘖期为推迟外,播种、出苗、三叶、越冬等发育期均为提前[12]。1992~2011 年陕西省关中平原和渭北旱塬两地冬小麦播种、越冬和返青 3 个物候期均明显推迟,而抽穗和成熟 2 个物候期明显提前[13]。1993~2013 年黄淮海地区冬小麦各物候期均推迟,其中返青期、拔节期、抽穗期及成熟期等变化较显著,生长季长度延长[14]。1991~2020 年藏东南冬小麦三叶、分蘖和孕穗 3 个生育期推迟 $0.16\sim 4.12\text{ d}\cdot 10\text{a}^{-1}$,其他生育期提前 $0.41\sim 4.42\text{ d}\cdot 10\text{a}^{-1}$,以开花期提前最多[15]。

雅鲁藏布江中、下游及其主要支流的年楚河、拉萨河、尼洋河、易贡藏布和帕隆藏布,怒江、澜沧江和金沙江流域以及喜马拉雅山南坡等海拔低于 4000 m 地区是西藏冬小麦主要种植区[16]。受全球气候变化影响,西藏气候趋于暖湿化,1961~2020 年地表年平均气温以 $0.32^{\circ}\text{C}\cdot 10\text{a}^{-1}$ 的速率显著上升,年降水量平均每 10 a 增加 7.60 mm [17]。由于气温上升、降水量增加,小麦生长发育期、产量等也会发生变化。目前有关雅鲁藏布江(以下简称雅江)中游冬小麦生育期变化的研究未见报道,然而该流域只有拉萨和泽当 2 个农业气象观测站有冬小麦生育期的观测,因拉萨站观测连续性不好,并借鉴藏东南冬小麦、西藏春小麦和藏中南部油菜生育期变化特征的研究成果[15] [18] [19],基于西藏自治区泽当农业气象观测站 1991~2022 年冬小麦各生育期观测数据和同期气象资料,分析雅江中游冬小麦主要生育期的变化特征,并探讨影响生育期变化的主导气象因子,认知气候变化对高原冬小麦生育期的影响规律,为西藏调整作物种植结构、合理利用农业气候资源和适应气候变化提供参考。

2. 资料与研究方法

2.1. 数据资料

1991~2022 年冬小麦观测数据来自西藏自治区泽当农业气象观测站,包括播种、出苗、分蘖、返青、拔节、抽穗、开花、乳熟和成熟期等生育期,观测标准按照《农业气象观测规范》[20]进行。观测地为大田,冬小麦品种以肥麦和山冬 6 号为主。根据冬小麦生长发育特点,整个生育期可划分为营养生长期(出苗-抽穗)、生殖生长期(抽穗-成熟)和全生育期(播种-成熟) 3 个生长阶段。气象数据选取 1990 年 9 月~2022 年 8 月泽当气象站逐日日照时数(S)、平均气温(T_m)、最高气温($T_{\max}$)、最低气温($T_{\min}$)、降水量(Pr)和相对湿度(RH)等,由西藏自治区气象信息中心提供。

2.2. 分析方法

采用一元线性回归方法[21]计算气象要素、生育期日期和生育期天数的变化趋势,其显著性检验通过相关系数检验法。利用 Person 相关系数来分析冬小麦主要生育期与气象要素的相关性,采用 t 检验进行显著性检验($p < 0.10$, $p < 0.05$, $p < 0.01$ 和 $p < 0.001$)。还利用 Tang 等[22]研发的 DPS 系统中逐步回归方法讨论了影响生育期的主导气候因子。此外,文中数据的处理、分析和绘图均采用 Excel 软件完成。

3. 结果分析

3.1. 冬小麦生长阶段气象要素变化

如表 1 所示,1991~2022 年雅江中游冬小麦各生长阶段的 T_m 均表现为升高趋势,升幅为 $0.04\sim 0.21^{\circ}\text{C}\cdot 10\text{a}^{-1}$,以生殖生长期(RGP) T_m 升幅最大; $T_{\max}$ 升温率($p < 0.05$)明显比 $T_{\min}$ 升温率要大,其中

营养生长期(VGP)尤为突出, $T_{\max}$ 升温率是 $T_{\min}$ 升温率的 18.5 倍; 气温日较差(DTR)都呈现为增大趋势, 平均每 10 a 增大 0.13~0.37℃, 以 VGP 的 DTR 增幅最大($p < 0.01$), 其次是全生育期(WGP)的 DTR, 为 $0.35^{\circ}\text{C}\cdot 10\text{a}^{-1}$ ($p < 0.001$)。其他气象要素在 VGP、RGP 表现为相反的变化趋势, 其中, VGP 的 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温($\sum T_0$)、 Pr 和 S 为增加趋势, RH 趋于减少; 而 RGP 的 $\sum T_0$ 、 Pr 和 S 倾向于减少, RH 略增加。全生育期(WGP)气象要素的趋势变化与 VGP 一致。总体来看, 1991~2022 年雅江中游冬小麦 VGP 和 WGP 气候暖湿化较为明显。

Table 1. Linear trend of meteorological elements in different growth stages of winter wheat in the middle reaches of Yarlung Zangbo River (MYZR) from 1991 to 2022

表 1. 1991~2022 年雅江中游冬小麦各生长阶段气象要素的变化趋势

生长阶段	$T_m/$ $^{\circ}\text{C}\cdot 10\text{a}^{-1}$	$T_{\max}/$ $^{\circ}\text{C}\cdot 10\text{a}^{-1}$	$T_{\min}/$ $^{\circ}\text{C}\cdot 10\text{a}^{-1}$	$DTR/$ $^{\circ}\text{C}\cdot 10\text{a}^{-1}$	$RH/$ $\% \cdot 10\text{a}^{-1}$	$Pr/$ $\text{mm}\cdot 10\text{a}^{-1}$	$S/$ $\text{h}\cdot 10\text{a}^{-1}$	$\sum T_0/$ $^{\circ}\text{C}\cdot \text{d}\cdot 10\text{a}^{-1}$
营养生长期 VGP	0.09	0.43**	0.07	0.37***	-1.18*	9.56*	62.25***	24.02
生殖生长期 RGP	0.21	0.41**	0.28*	0.13	0.75	-0.32	-22.40	-57.32***
全生育期 WGP	0.04	0.37**	0.02	0.35****	-1.07	12.26	18.06	-5.65

注: *, **, ***, ****分别表示 $p < 0.10$, $p < 0.05$, $p < 0.01$ 和 $p < 0.001$; 以下类同。

3.2. 冬小麦生育期变化

3.2.1. 生育期日期变化

表 2 给出了 1991~2022 年雅江中游冬小麦生育期日期统计值, 从表 2 可知, 冬小麦最早 9 月下旬开始播种, 最晚推迟到 10 月中旬, 播种平均日期为 10 月 6 日。受播种期波动的影响, 冬小麦最早可在 10 月上旬出苗, 最晚推迟到 10 月下旬, 出苗平均日期为 10 月 17 日。分蘖期出现在 10 月下旬~12 月下旬之间, 早晚相差 58 d, 分蘖平均日期为 11 月 19 日。翌年 2 月初~3 月上旬相继返青, 最早与最晚相差 32 d, 3 月 1 日为平均返青日期。拔节期最早出现在 4 月下旬, 最晚在 5 月底, 早晚相差 36 d, 平均拔节期为 5 月 7 日。5 月上旬~6 月下旬, 冬小麦陆续抽穗, 抽穗平均日期为 6 月 5 日, 最早与最晚相差 44 d。开花期最早开始于 5 月下旬, 最晚 6 月下旬结束, 两者相差 31 d, 6 月 13 日是平均开花日期。乳熟期介于 6 月中旬~8 月初之间, 早晚相差 46 d, 乳熟平均日期为 7 月 11 日。过去 32 a, 冬小麦成熟期最早在 7 月下旬, 8 月中旬最晚, 平均成熟期为 8 月 3 日。

Table 2. Statistical value of growth period for winter wheat in the MYZR from 1991 to 2022

表 2. 1991~2022 年雅江中游冬小麦生育期统计值

生育期	播种	出苗	分蘖	返青	拔节	抽穗	开花	乳熟	成熟
平均日期/(月 - 日)	10-06	10-17	11-19	03-01	05-07	06-05	06-13	07-11	08-03
最早日期/(月 - 日)	09-27	10-08	10-28	02-06	04-23	05-08	05-28	06-16	07-26
最晚日期/(月 - 日)	10-13	10-28	12-25	03-09	05-29	06-21	06-28	08-01	08-13
变化趋势/($\text{d}\cdot 10\text{a}^{-1}$)	2.95***	2.39**	14.16****	4.63****	1.68	4.90***	3.37**	7.51****	0.61

如表 2 所示, 1991~2022 年雅江中游冬小麦各生育期均表现为推迟趋势, 平均每 10 a 推迟 0.61~14.16 d (除拔节、成熟期外, $p < 0.05$), 以分蘖期推迟的最为显著(图 1(a), $p < 0.001$), 其次是乳熟期($7.51 \text{ d} \cdot 10\text{a}^{-1}$, $p < 0.001$; 图 1(b)), 成熟期推迟的趋势最小(图 1(c), 未通过显著性检验水平)。

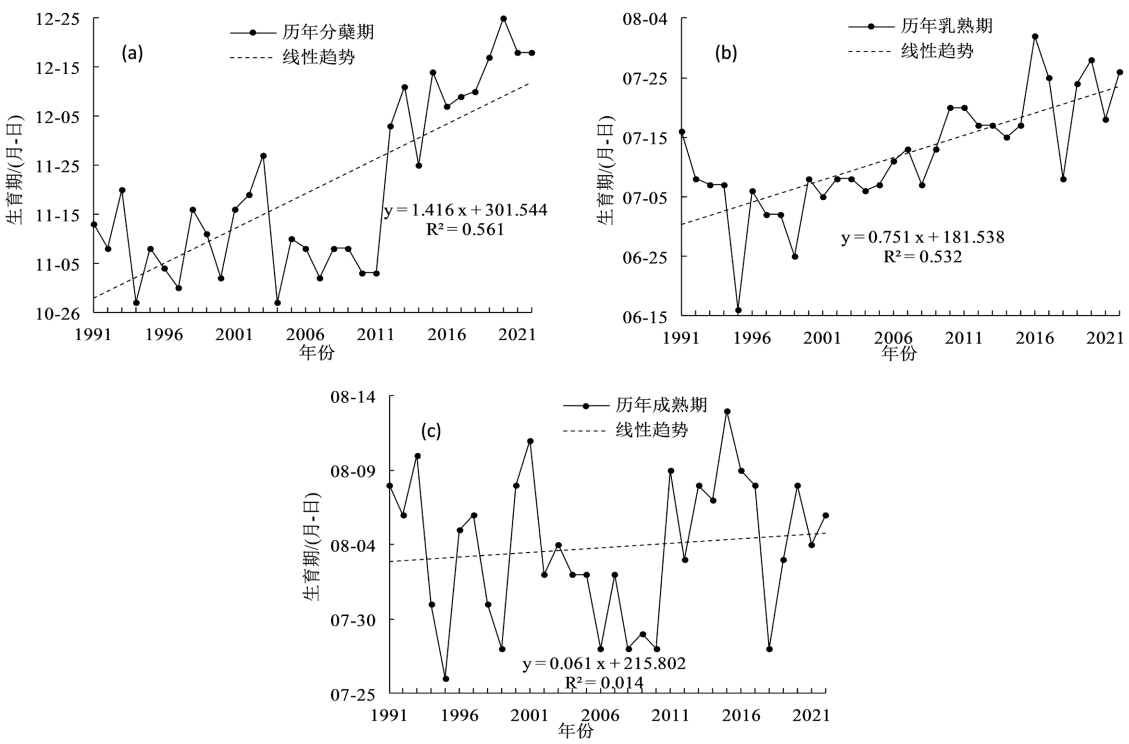


Figure 1. Change of growth period for winter wheat in the MYZR from 1991 to 2022
图 1. 1991~2022 年雅江中游冬小麦生育期变化趋势

3.2.2. 生育期天数变化

从 1991~2022 年雅江中游冬小麦生育期天数的变化趋势来看(表 3), 出苗 - 分蘖、拔节 - 抽穗、开花 - 乳熟期 3 个生育期天数呈延长趋势, 为 $3.12 \sim 11.77 \text{ d} \cdot 10\text{a}^{-1}$ ($p < 0.05$), 以分蘖 - 返青期最为明显; 其他 5 个生育期天数均呈缩短趋势, 其中缩短的最多是分蘖 - 返青天数, 为 $9.03 \text{ d} \cdot 10\text{a}^{-1}$ ($p < 0.01$), 乳熟 - 成熟期天数次之, 缩短率为 $6.61 \text{ d} \cdot 10\text{a}^{-1}$ ($p < 0.001$), 播种 - 出苗期天数缩短率最小, 仅为 $-0.70 \text{ d} \cdot 10\text{a}^{-1}$ ($p > 0.10$)。此外, 1991~2022 年雅江中游冬小麦 VGP 天数趋于延长($2.51 \text{ d} \cdot 10\text{a}^{-1}$, 图 2(a)), 而 RGP、WGP 天数分别以 $-4.39 \text{ d} \cdot 10\text{a}^{-1}$ 、 $-2.34 \text{ d} \cdot 10\text{a}^{-1}$ 的速度缩短(图 2(b), 图 2(c))。总体来看, 各生育期天数变化趋势以缩短为主。

Table 3. Linear trend of growth period days for winter wheat in the MYZR from 1991 to 2022
表 3. 1991~2022 年雅江中游冬小麦生育期天数变化趋势

生育期 天数	播种 - 出苗	出苗 - 分蘖	分蘖 - 返青	返青 - 拔节	拔节 - 抽穗	抽穗 - 开花	开花 - 乳熟	乳熟 - 成熟	营养生 长期 VGP	生殖 生长期 RGP	全生 育期 WGP
变化 趋势 ($\text{d} \cdot 10\text{a}^{-1}$)	-0.70	11.77 *****	-9.03 ***	-3.10	3.12 **	-1.59 **	3.80 ***	-6.61 *****	2.51	-4.39 *****	-2.34 **

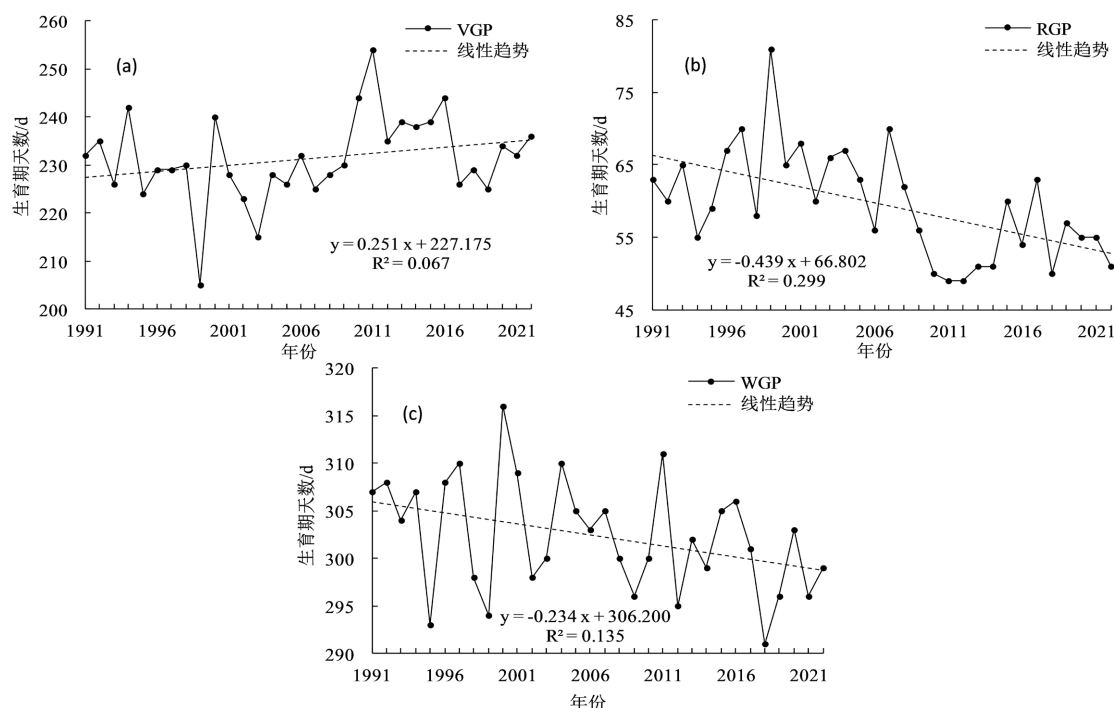


Figure 2. Change trend of growth period days for winter wheat in the MYZR from 1991 to 2022

图 2. 1991~2022 年雅江中游冬小麦生育期天数的变化趋势

3.3. 生育期对气候变化的响应

首先采用 Person 相关系数分析雅江中游冬小麦生育期与生长季(10 月至翌年 8 月)逐月气象因子的相关性, 从通过显著性检验($p < 0.05$)的气象因子中, 再利用逐步回归方法得到标准回归系数, 选取其绝对值最大者作为影响各生育期的主导气象因子(表 4), 分析表明: (1) 冬小麦出苗期与 10 月 T_m 、 T_{min} 存在显著的负相关, 经计算, 影响出苗期变化的主导因子是 10 月 T_m , 如图 3(a)所示, 如果 10 月 T_m 每升高(降低) 1°C , 冬小麦出苗期将提早(推迟) 1.60 d。 (2) 分蘖期只与 10 月、11 月的 S 存在显著正相关关系, 计算发现, 影响分蘖期早晚的主导因子是 11 月 S , 如果 11 月 S 每增加(减少) 10 h, 冬小麦分蘖期将推迟(提前) 5.91 d (图 3(b))。 (3) 冬小麦返青期主要与 11 月 T_{max} 、 T_{min} 存在显著的正相关, 分析发现 T_{max} 起主导作用, 如果 11 月 T_{max} 每升高(降低) 1°C , 返青期将推迟(提前) 2.49 d (图 3(c))。 (4) 同理, 统计发现, 拔节期的主导气象因子是翌年 4 月 T_{min} , 如果 4 月 T_{min} 每升高(降低) 1°C , 冬小麦拔节期将提早(推迟) 2.98 d (图 3(d))。抽穗期、乳熟期的主导气候因子都是翌年 2 月 RH , 若 2 月 RH 每增加(减少) 10%, 冬小麦抽穗期、乳熟期将分别提早(推迟) 8.76 d (图 3(e))、10.43 d。而开花期和成熟期的主导气象因子分别是翌年 2 月 S 与 6 月 T_{min} , 若 2 月 S 每增加(减少) 10 h, 冬小麦开花期将提早(推迟) 1.91 d; 而如果 6 月 T_{min} 每升高(降低) 1°C , 冬小麦成熟期将提早(推迟) 3.51 d (图 3(f))。

此外, 从分析影响雅江中游冬小麦主要生育期主导气象因子的变化趋势来看(图表略), 1991~2022 年雅江中游 10 月 T_m 趋于降低($-0.02^{\circ}\text{C} \cdot 10\text{a}^{-1}$, $P > 0.10$), 11 月 T_{max} 显著升高($0.64^{\circ}\text{C} \cdot 10\text{a}^{-1}$, $p < 0.01$)、 S 显著增加($7.06 \text{ h} \cdot 10\text{a}^{-1}$, $p < 0.05$)。翌年 2 月 RH 显著减少($-1.54\% \cdot 10\text{a}^{-1}$, $p < 0.10$)、 S 趋于增多($5.66 \text{ h} \cdot 10\text{a}^{-1}$, $p > 0.10$); 4 月、6 月 T_{min} 均呈下降趋势($p > 0.10$), 分别为 $-0.03^{\circ}\text{C} \cdot 10\text{a}^{-1}$ 和 $-0.06^{\circ}\text{C} \cdot 10\text{a}^{-1}$ 。

综上所述, 1991~2022 年由于雅江中游 10 月 T_m 下降, 冬小麦出苗期推迟; 11 月 T_{max} 升温显著, 返青期明显推迟; 11 月 S 的显著增加, 冬小麦分蘖期呈显著推迟。翌年 2 月 RH 显著减少, 引起冬小麦抽穗期、乳熟期明显推迟, 而 2 月 S 增加, 也使得冬小麦开花期延迟; 4 月和 6 月的 T_{min} 降低, 造成冬小

麦拔节期与成熟期的推迟。

Table 4. Major meteorological factors affecting the phenology of winter wheat in MYZR
表 4. 影响雅江中游冬小麦生育期的气象因子

生育期	通过 $p < 0.05$ 显著性检验的气象因子	主导气象因子及相关系数 R
出苗	$-T_{m10}$ 、 $-T_{min10}$	T_{m10} , $R = -0.386^{**}$
分蘖	$+S_{10}$ 、 $+S_{11}$	S_{11} , $R = 0.514^{***}$
返青	$+T_{max11}$ 、 $+T_{min11}$	T_{max11} , $R = 0.450^{***}$
拔节	$-T_{min04}$ 、 $-R_{03}$	T_{min04} , $R = -0.365^{**}$
抽穗	$-T_{min05}$ 、 $-RH_{02}$ 、 $-Pr_{03}$ 、 $+S_{02}$	RH_{02} , $R = -0.452^{***}$
开花	$-T_{min05}$ 、 $-RH_{02}$ 、 $+S_{02}$	S_{02} , $R = 0.523^{***}$
乳熟	$-RH_{02}$ 、 $+S_{02}$	RH_{02} , $R = -0.493^{***}$
成熟	$-T_{m04}$ 、 $-T_{m05}$ 、 $-T_{m06}$ 、 $-T_{max05}$ 、 $-T_{max06}$ 、 $-T_{min02}$ 、 $-T_{min03}$ 、 $-T_{min04}$ 、 $-T_{min05}$ 、 $-T_{min06}$ 、 $-T_{min08}$ 、 $+RH_{06}$ 、 $+S_{02}$	T_{min06} , $R = -0.616^{****}$

注：气象因子下标数字表示月份，“+”“-”分别表示正相关和负相关。

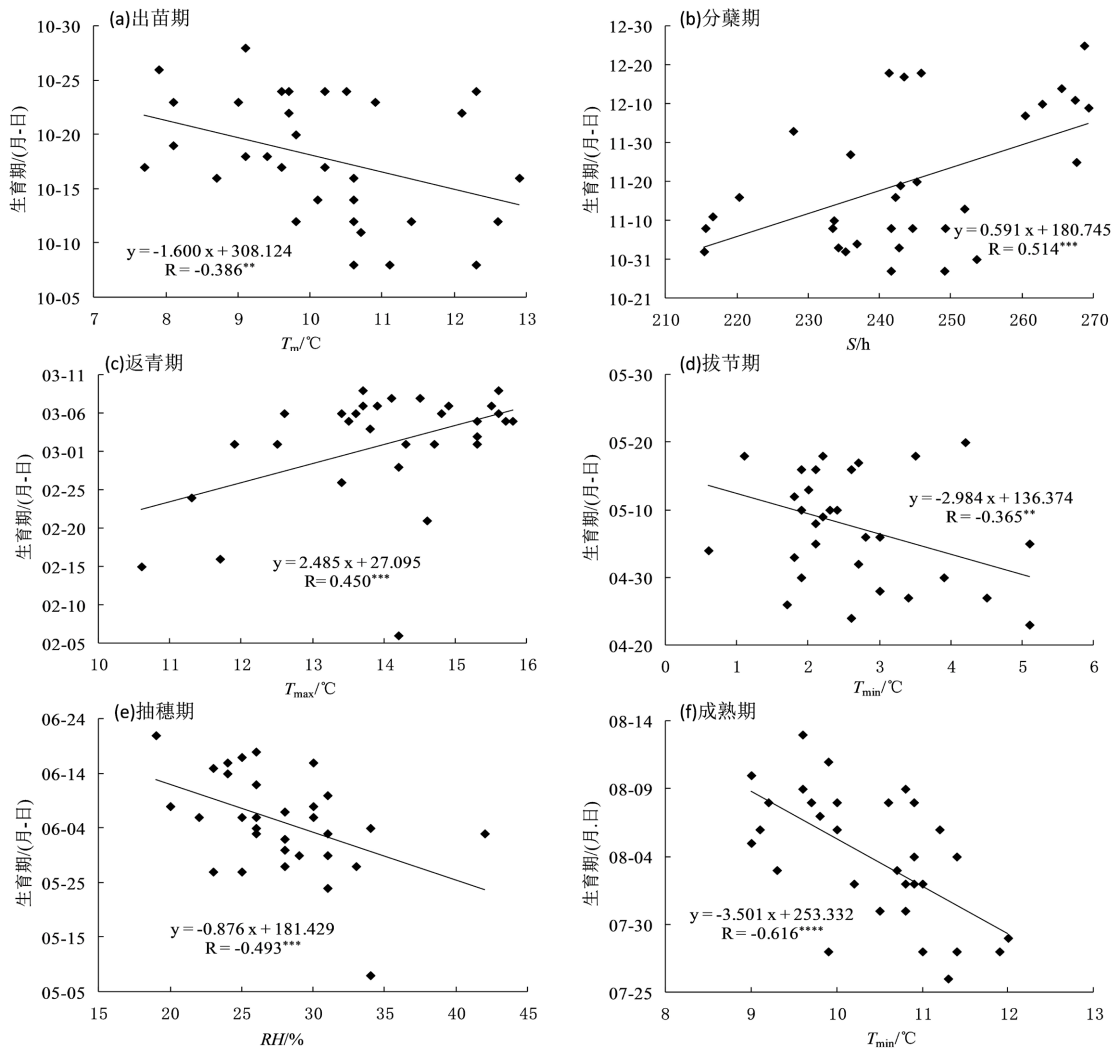


Figure 3. The dot plot of major growth periods and meteorological factors of winter wheat in MYZR from 1991 to 2022
图 3. 1991~2022 年雅江中游冬小麦主要生育期与主导气象因子的点聚图

4. 结论与讨论

1) 1991~2022 年雅江中游冬小麦 VGP、RGP 和 WGP 的 T_m 均趋于升高, T_{max} 升温率明显大于 T_{min} 的升温率, 气温日较差都呈增大趋势。VGP、WGP 的 $\sum T_0$ 、 Pr 和 S 为增加趋势, RH 趋于减少, 而 RGP 这些要素的趋势相反。总体来看, 1991~2022 年雅江中游冬小麦 VGP 和 WGP 气候暖湿化较为明显。

2) 雅江中游冬小麦各生育期日期均表现为推迟趋势, 平均每 10 a 推迟 0.61~14.16 d, 以分蘖期推迟的最为明显, 这与国内其他区域冬小麦部分生育期呈推迟趋势不同[3] [4] [5] [6] [12] [13] [14], 同样与藏东南冬小麦生育期变化趋势不同[15]。出苗 - 分蘖、拔节 - 抽穗、开花 - 乳熟期 3 个生育期天数呈延长趋势, 为 3.12~11.77 d·10a⁻¹, 其他 5 个生育期天数均为缩短趋势, 平均每 10 a 缩短 0.70~9.03 d。冬小麦 VGP 天数趋于延长, 而 RGP、WGP 天数倾向于缩短。从国内来看, 大多数地方都是 VGP、WGP 缩短, RGP 延长[23] [24] [25]。

3) 影响雅江中游冬小麦出苗期、返青期、拔节期和成熟期的主导气候因子是 T , 而其他生育期变化的主导气候因子是 RH 或 S 。总体来看, 1991~2022 年雅江中游 4 月、6 月平均最低气温趋于降低, 11 月平均最高气温升高和日照时数增加, 是导致冬小麦生育期普遍推迟的主要原因。

基金项目

中国气象科学研究院青藏高原与极地气象科学研究所开放课题(ITPP2021K03), 第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZKK0106)。

参考文献

- [1] Porter, J.R. and Semenov, M.A. (2005) Crop Responses to Climatic Variation. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, **360**, 2021-2035. <https://doi.org/10.1098/rstb.2005.1752>
- [2] 中国气象局气候变化中心. 中国气候变化蓝皮书 2021 [M]. 北京: 科学出版社, 2021.
- [3] 姬兴杰, 朱业玉, 刘晓迎, 等. 气候变化对北方冬麦区冬小麦生育期的影响[J]. 中国农业气象, 2011, 32(4): 576-581.
- [4] 严华, 晏中文, 马玉平. 新源县冬小麦对气候变化的响应[J]. 沙漠与绿洲气象, 2021, 15(2): 131-137.
- [5] 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): 388-396.
- [6] 谢芳, 刘杨, 郝宏飞. 巴楚县冬小麦生长期气候变化特征及其对冬小麦发育期的影响[J]. 沙漠与绿洲气象, 2018, 12(5): 90-94.
- [7] 胡玮, 严昌荣, 李迎春, 刘勤. 气候变化对华北冬小麦生育期和灌溉需水量的影响[J]. 生态学报, 2014, 34(9): 2367-2377.
- [8] 张宸赫, 王琳, 赵天良, 等. 气候变暖背景下中国冬小麦物候期的时空特征[J]. 江苏农业科学, 2016, 44(4): 448-452.
- [9] 檀艳静, 杨慧洁, 李辉. 1981~2019 年气候变化对河南省冬小麦生育期的影响分析[J]. 山东农业科学, 2020, 52(12): 30-38.
- [10] 钟融, 任永康, 王培如, 等. 晋南地区冬小麦生育期气候变化特征及其对产量的影响[J]. 生态学杂志, 2022, 41(1): 81-89.
- [11] 姚玉璧, 王润元, 杨金虎, 等. 黄土高原半湿润区气候变化对冬小麦生育及水分利用效率的影响[J]. 西北植物学报, 2011, 31(11): 2290-2297.
- [12] 郭海瑛, 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): 101-105.
- [13] 林文, 同延安, 杨宪龙, 等. 陕西冬小麦物候期对气候特征响应研究[J]. 干旱区资源与环境, 2013, 27(8): 59-64.
- [14] 王倩. 我国冬小麦物候变化时空特征及基于 APSIM 模型的播种期适宜性评价[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京师范大学, 2020.

-
- [15] 杜军, 厉爱丽, 次旺顿珠, 等. 藏东南冬小麦生育期变化及其对气候变化的响应[J]. 生态学杂志, 2022, 41(4): 668-675.
- [16] 胡颂杰. 西藏农业概论[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 1995.
- [17] 边多, 黄晓清, 卓玛, 等. 西藏气候变化监测公报(2020) [M]. 北京: 气象出版社, 2022.
- [18] 杜军, 高佳佳, 索朗塔杰, 等. 1991~2020 年西藏春小麦生育期对气候变化的响应[J]. 麦类作物学报, 2021, 41(8): 1044-1054.
- [19] 杜军, 高佳佳, 厉爱丽, 等. 2010~2019 年西藏中南部春油菜生育期变化特征[J]. 中国农学通报, 2021, 37(20): 77-84.
- [20] 国家气象局. 农业气象观测规范[M]. 北京: 气象出版社, 1993.
- [21] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 第 2 版. 北京: 气象出版社, 2007.
- [22] Tang, Q.Y. and Zhang, C.X. (2013) Data Processing System (DPS) Software with Experimental Design, Statistical Analysis and Data Mining Developed for Use in Entomological Research. *Insect Science*, **20**, 254-260. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7917.2012.01519.x>
- [23] Liu, Y., Chen, Q., Ge, Q., *et al.* (2018) Modelling the Impacts of Climate Change and Crop Management on Phenological Trends of Spring and Winter Wheat in China. *Agricultural and Forest Meteorology*, **248**, 518-526. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.09.008>
- [24] Xiao, D.P., Tao, F.L., Liu, Y.J., *et al.* (2013) Observed Changes in Winter Wheat Phenology in the North China Plain for 1981-2009. *International Journal of Biometeorology*, **57**, 275-285. <https://doi.org/10.1007/s00484-012-0552-8>
- [25] 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): 2201-2210.