

青海省春小麦和油菜播种期气象 条件分析及预测模型构建

申燕玲^{1,2}, 赵梦凡^{1,2}, 赵彤^{1,2}, 沈晓燕^{1,2}

(1.青海省气象科学研究所,青海 西宁 810001;2.青海省防灾减灾重点实验室,青海 西宁 810001)

摘要:利用1961—2019年青海省春小麦和油菜农业气象观测站发育期及气象要素数据,采用统计学方法对播种期相关气象要素进行分析。结果表明:与春小麦和油菜播种期相关的气象条件中,日平均气温和地温的增温趋势较为明显,分别以 $0.40^{\circ}\text{C} \cdot 10\text{a}^{-1}$ 和 $0.44^{\circ}\text{C} \cdot 10\text{a}^{-1}$ 的速度增加;相对湿度在2004年之后呈缓慢降低趋势($-0.57\% \cdot 10\text{a}^{-1}$);地温和气温对播种的影响最大;气温稳定通过 0°C 、 3°C 和 6°C 以及地温稳定通过 0°C 、 6°C 和 10°C 的初日在空间分布上受海拔影响,整体呈现“东南早、西北晚”的分布特征;春小麦和油菜稳定通过 0°C 、 3°C 以及地温稳定通过 0°C 初日提前的趋势较为明显。根据气温、地温稳定通过界限温度初日统计法建立的模型与播种期相关性较高,可为春小麦和油菜播种期预告提供依据。

关键词:春小麦;油菜;气象要素;模型构建;青海省

中图分类号:S165;S512.1⁺2;S634.3 **文献标志码:**A

Study on meteorological conditions and prediction models of sowing date for spring wheat and rape in Qinghai Province

SHEN Yanling^{1,2}, ZHAO Mengfan^{1,2}, ZHAO Tong^{1,2}, SHEN Xiaoyan^{1,2},

(1. Qinghai Academy of Meteorological Sciences, Xining, Qinghai 810001, China;

2. Key Laboratory for Disaster Prevention and Mitigation in Qinghai, Xining, Qinghai 810001, China)

Abstract: Based on the meteorological data of spring wheat and rape observation stations in the eastern agricultural area of Qinghai Province from 1961 to 2019, meteorological elements were analyzed through the statistical methods. The results showed that in the meteorological conditions related to the crop planting period, the temperature and the average ground temperature increased obviously at a rate of $0.4^{\circ}\text{C} \cdot 10\text{a}^{-1}$ and $0.44^{\circ}\text{C} \cdot 10\text{a}^{-1}$, and the relative humidity decreased slowly after 2004 ($-0.57\% \cdot 10\text{a}^{-1}$). Among the meteorological elements related to the sowing period, the ground temperature and air temperature were the important elements. The temperature at which the temperature stably increasing above 0°C , 3°C , 6°C and the ground temperature stably increasing above 0°C , 6°C , 10°C was affected by altitude in spatial distribution. In general, it had the distribution characteristics of “southeast early and northwest late”. The crops in various regions stably increased above 0°C and 3°C , and the ground temperature stably increased above 0°C . The trend of early day advance was more obvious. According to the stable temperature, the temperature stably increased above 0°C , 3°C , the ground temperature passed steadily. The model established based on the first day of temperature and ground temperature had a good verification result, which can provide a scientific basis for agricultural meteorological services.

Keywords: spring wheat; rape; meteorological elements; model construction; Qinghai Province

气温对农作物生长发育至关重要,如果播种过早,气温没有达到种子萌发时对温度的需求,种子

在低温影响下,会出现烂种、弱苗等现象;播种过晚则会影响作物的成熟^[1-2]。由此可见,通过适宜的

气象条件以及气候资源确定作物的适宜播种期是作物高产、稳产的基础^[3-5]。青海省东部农业区是青海省农作物的主要产区,但由于青海省受到青藏高原的动力热力共同影响,气候条件特殊,与其他地区的气候背景有很大差异,加之全球气候变暖加剧、农业区作物品种不断更新、栽培技术和耕作方式改进以及种植制度改变,以及业务中对于播种期的预报指标单一、对播种期气象特征的表征程度不够、使用的数据准确性低等原因^[6],当前农业区播种期指标及其适用性研究已经不能够满足农业气象预报的业务需求,降低了农业气象播种期预报的客观性和时效性。

近年来,越来越多的专家学者投入到气候变暖对作物发育期影响的研究当中^[7-9],有研究表明温度变化是影响作物生育期的主要原因^[10],全球气候变暖对作物的影响普遍表现为返青期和成熟期的提前以及全生育期和越冬期的缩短^[11-12]。由于气候变暖会使作物的生长季延长,种植区域北移西延。春小麦的生长基本不受降水量的影响,并且深层土壤水分能够弥补大气降水的不足,对春小麦苗期生长有利^[13-14]。土壤温度对作物种子发芽出苗有直接影响,因为土壤温度和后期霜冻发生有一定的关系,从而影响作物的春耕春播等农事活动,但由于过去气象观测资料不完整,前人研究中涉及到的温度大都是气温^[15],因此考虑土壤温度分析作物播种期更有实际意义。青海省东部农业区发生霜冻的时段主要在 4—9 月,5 月发生频率最高,会对播种期作物生长发育造成一定的影响^[16]。本研究通过对日平均气温、地温、日平均 5 cm 和 10 cm 地温、 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 和 $\geq 3^{\circ}\text{C}$ 积温、稳定通过界限温度的初日等气象条件及地理信息与适宜播种最佳时段的阈值进行分析,从而为作物应对气候变化及有效防御作物早播的潜在风险提供科学依据。在全球变暖的趋势下,为更好开展播种期气象适宜度评价服务,确定作物播种期气象要素的适宜范围,分析春小麦和油菜播种期气象要素的统计特征,探究主要影响农作物播种期的气象因子,构建适用于青海省春小麦和油菜播种期气象条件适宜性判识指标,对青海省东部农业区作物播种期的农业气象服务具有重要实践意义。

1 资料与方法

1.1 研究区概况

青海省东部农业区是青海省春小麦和油菜的主要产区,农业区光照充足,昼夜温差大,光、温配

合适宜,有利于农作物营养物质的积累。本研究选取青海省东部春小麦和油菜种植区为研究区($89^{\circ}35'\sim 101^{\circ}06'\text{E}$, $35^{\circ}02'\sim 37^{\circ}58'\text{N}$),地处祁连山达坂山以南、日月山以东,属黄土高原向青藏高原过渡镶嵌地带,自然资源丰富,日照时间长、太阳辐射强、土壤肥沃、水资源充足,春小麦和油菜面积约占总播种面积 50% 以上。西部从北至南与海北藏族自治州的祁连县、海晏县,黄南藏族自治州的泽库县相连,包括西宁、共和、贵南、大通、民和、乐都、平安、湟源、互助、化隆、循化、贵德、尖扎、同仁及门源等 15 个县(市),主要分布详见图 1(见 235 页),其中春小麦种植区农气观测站包括德令哈、大通、共和、贵南、互助、湟源、湟中,油菜种植区观测站包括德令哈、共和、贵南、互助、门源。

1.2 研究方法

1.2.1 数据来源 选用 1961—2019 年青海省春小麦和油菜种植区的 8 个农业气象观测站(图 1)的逐日平均地温、5 cm 和 10 cm 地温、土壤相对湿度、观测站海拔和经纬度、作物生长等数据。利用逐日平均气温和地温数据计算得到积温、稳定通过温度和地温的日序数。资料来自青海省气象局信息中心。

1.2.2 气候倾向率 用 x 表示样本量为 n 的气候变量,用 t 表示 x 所对应的时间,利用最小二乘法建立一元线性回归方程,即 $x=b+at_i$ ($i=1,2,3,\cdots,n$),其中, a 为气候变化量的倾向率, $a>0$ 表示直线递增, $a<0$ 表示直线递减, $a\times 10$ 表示每 10 年的趋势变化率,表征了时间序列的变化趋势。

通过计算与播种期相关气象要素的气候倾向率(*Slope*)来分析时间上的变化特征。

$$Slope = \frac{\sum_{i=1}^n x_i t_i - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n x_i) (\sum_{i=1}^n t_i)}{\sum_{i=1}^n t_i^2 - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n t_i)^2} \quad (1)$$

式中, t_i 为气象要素的等变量值。采用时间 t 与序列变量之间相关系数,即气候趋势系数对变化趋势的显著性进行检验。

1.2.3 累积距平 累积距平可以判断气象要素的变化趋势,累积距平曲线若呈上升趋势,则表示距平值增加,反之则表示距平值减小。对于某一序列 x ,其在某一时刻 t 的累积距平表示为:

$$\hat{x}_t = \sum_{i=1}^t (x_i - \bar{x}), t = 1, 2, \cdots, n \quad (2)$$

式中, $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$, 计算出 n 个时刻的累积距平

值,得到累积距平的趋势分析。

1.2.4 评估指标 选取决定性系数 R^2 和均方根误差 $RMSE$ 对模型精度进行评价。

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (D_{est,i} - \overline{D_{est}}) (D_{obs,i} - \overline{D_{obs}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (D_{est,i} - \overline{D_{est}})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (D_{obs,i} - \overline{D_{obs}})^2}} \right]^2 \tag{3}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (D_{est,i} - D_{obs,i})^2}{n}} \tag{4}$$

式中, i 为数据序列; n 为数据总数; $D_{est,i}$ 为序列 i 的估算值; $D_{obs,i}$ 为序列 i 的实测值; $\overline{D_{est}}$ 为估算平均值; $\overline{D_{obs}}$ 为实测平均值。

1.2.5 阈值 对各观测站点作物播种期时间序列与气温、地温、日照等气象要素进行回归分析,并绘制箱线图,进一步分析气象要素的阈值分布,通过分析多年青海省春小麦和油菜播种期的逐日平均气温、

0~5 cm 土壤温度、0~10 cm 土壤温度等气象要素的阈值范围,最终得出播种期适宜的气象要素指标。

2 结果与分析

2.1 气象要素变化趋势

由图 2A 可见,1961—2019 年气温和地温的增温趋势较为明显,尤其在 1990 年开始,有明显的增温趋势。青海省春小麦和油菜种植区日平均气温年际变化呈波动型升高,最大值和最小值分别出现在 2015 年和 1967 年,日平均气温气候倾向率为 $0.4^{\circ}\text{C} \cdot 10\text{a}^{-1}$,平均地温、5cm 和 10cm 平均地温气候倾向率分别为 0.44 、 0.33 、 $0.35^{\circ}\text{C} \cdot 10\text{a}^{-1}$,均通过了显著性检验;相对湿度从 1994 年开始呈现减小趋势,其气候倾向率为 $-5.7\% \cdot 10\text{a}^{-1}$,表明地区相对湿度整体呈现持平略减趋势。由图 2B 累积距平变化曲线可以看出,日平均气温、地温在 1996 年之前呈现递减趋势,其后呈增加趋势。整体来看,青海省春小麦和油菜农业气象观测地区气候表现出温度递增、湿度减小的变化特征。

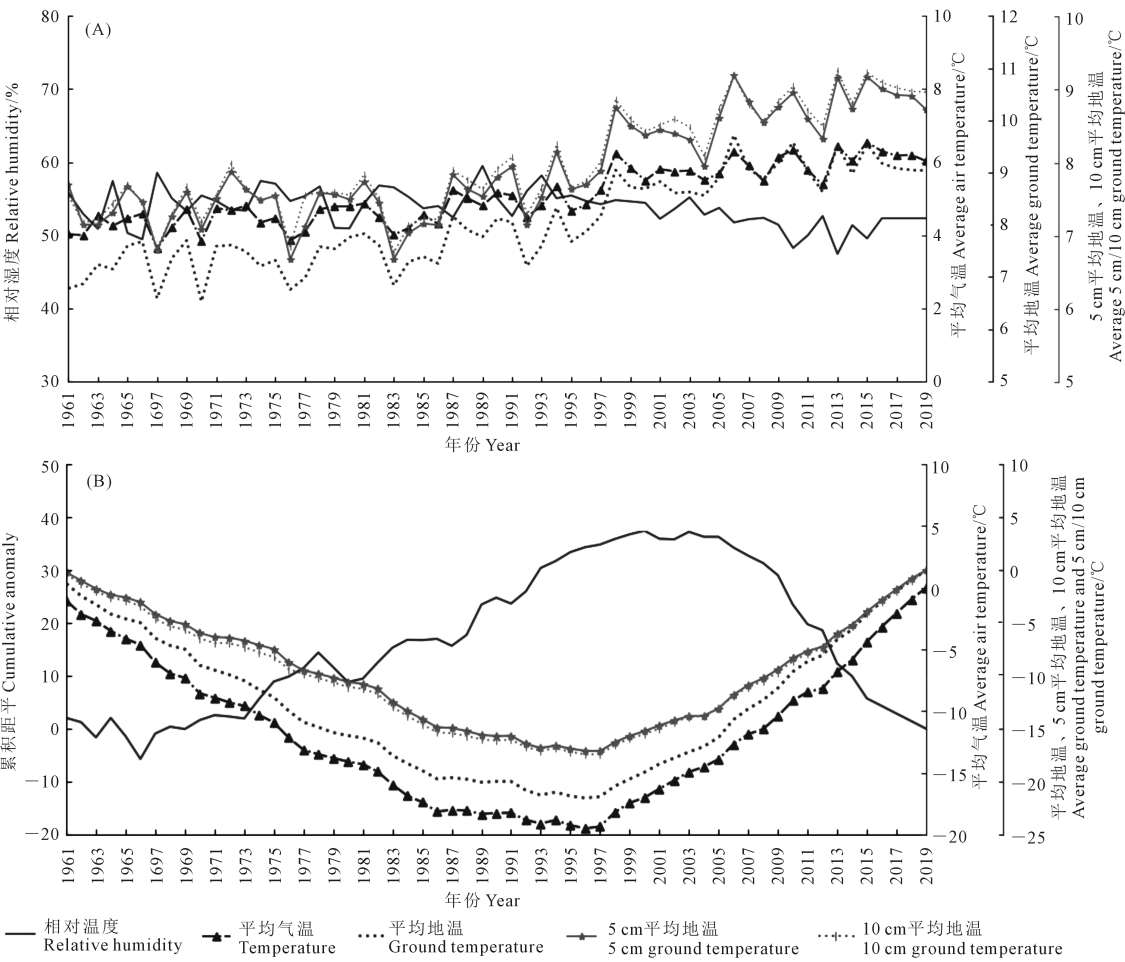


图 2 1961—2019 年青海省春小麦和油菜观测站气象要素年际变化曲线 (A) 和累积距平变化曲线 (B)
Fig.2 Evolution of cumulative anomaly of the meteorological elements with time (A) and interannual variation periods curves of the meteorological elements (B) in 1961–2019

2.2 春小麦和油菜播种期影响因子分析

分别对日平均气温、日平均地表温度、日平均 5 cm 和 10 cm 地温、 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 和 $\geq 3^{\circ}\text{C}$ 积温,气温稳定通过界限温度(0°C 和 6°C) 初日日序数、地温稳定通过界限温度(10°C) 初日日序数、土壤相对湿度、海拔高度、经纬度和作物播种期日序数进行相关分析^[17-19]。从图 3 可以看出,与春小麦和油菜播种期日序数相关性较高的温度相关要素包括日平均气温、平均地表温度、日平均 5 cm 和 10 cm 地温;日序数相关要素有气温稳定通过界限温度(0°C 、 6°C)、地温稳定通过界限温度(10°C) 初日日序数;地理信息相关要素有海拔高度和经度。以上温度类要素与播种期日序数的相关性较好,且呈线性正相关关系,通过了显著性检验。

2.3 气象要素阈值分析

研究区日平均气温 3.1°C ,平均 5 cm 地温 5.6°C 、10 cm 地温 4.8°C 作为春小麦进入适播期气象适宜指标(表 1,见 237 页);日平均气温 6.3°C ,平均 5 cm 地温 9.4°C 、10 cm 地温 9.0°C 作为油菜进入适播期气象适宜指标(表 2,见 237 页)。由于各观测站气候条件

差距较大,所以需对不同站点气象要素适宜度指标进行讨论。如图 4 所示,春小麦种植区各站气温较地温四分位差较大,说明播种期气温数据较为分散,10 cm 地温数据分布较为集中,数值变化幅度较小。52737(德令哈)站和 52869(湟中)站地温四分位差较大,数据较其他站分布较为分散;如图 5 所示,油菜种植区 52955(贵南)站的温度数据分布较为分散,52737(德令哈)站 5、10 cm 地温数据分布较为集中,数值变化幅度较小。

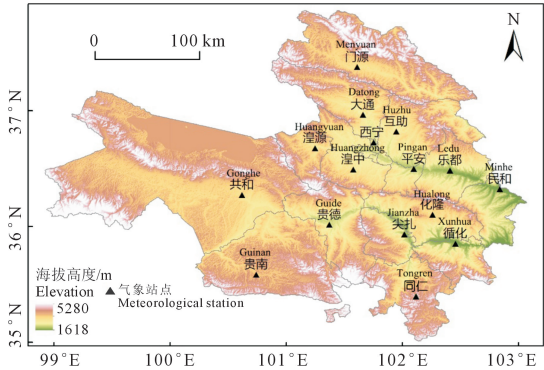
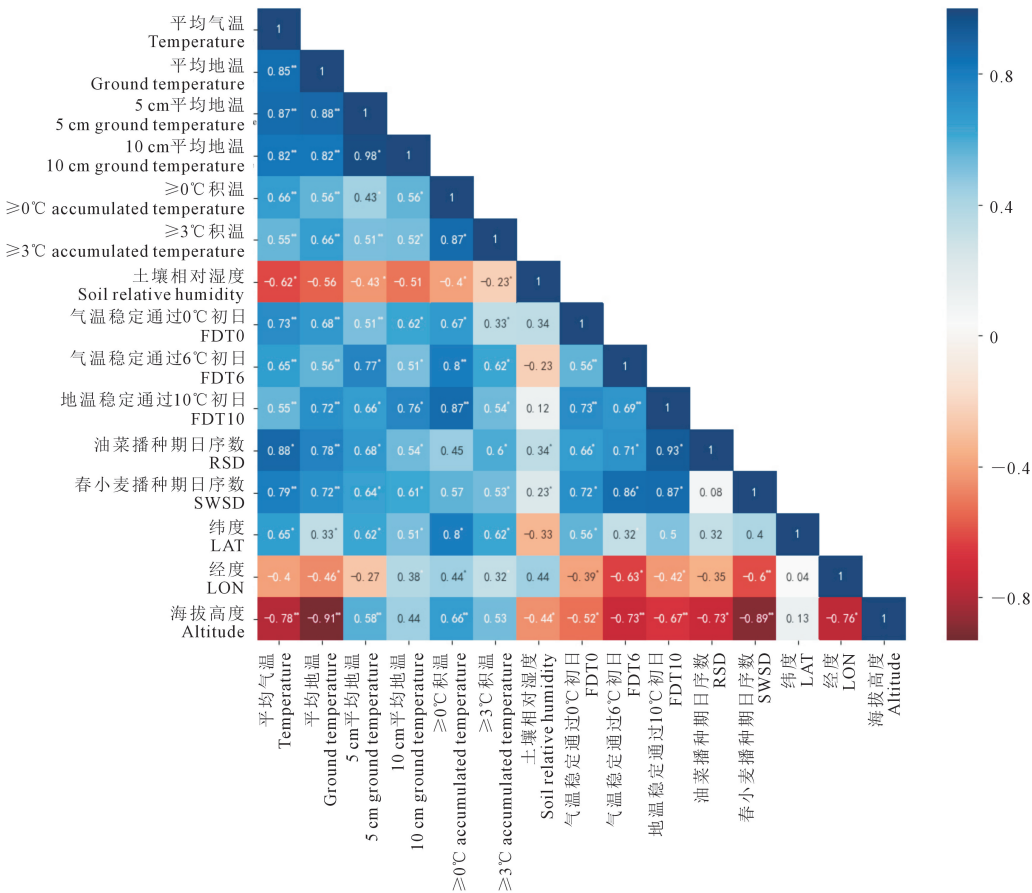


图 1 研究区域分布图
Fig.1 Distribution of meteorological stations in study area



注: *、* * 分别表示系数通过 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 的显著性检验。
Note: * and * * represent significant difference at $P<0.05$ and $P<0.01$, respectively.

图 3 相关系数热力图
Fig.3 Heat map of correlation

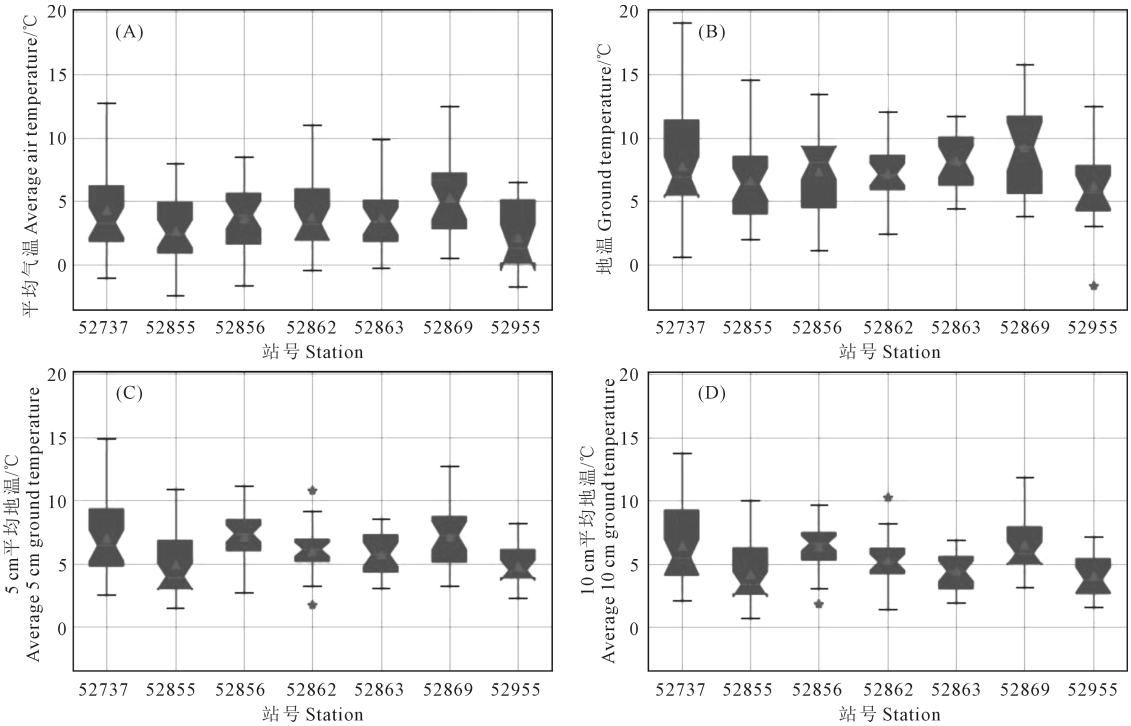


图 4 春小麦种植区不同观测站播种期气象要素阈值
Fig.4 Meteorological elements boxplot of spring wheat

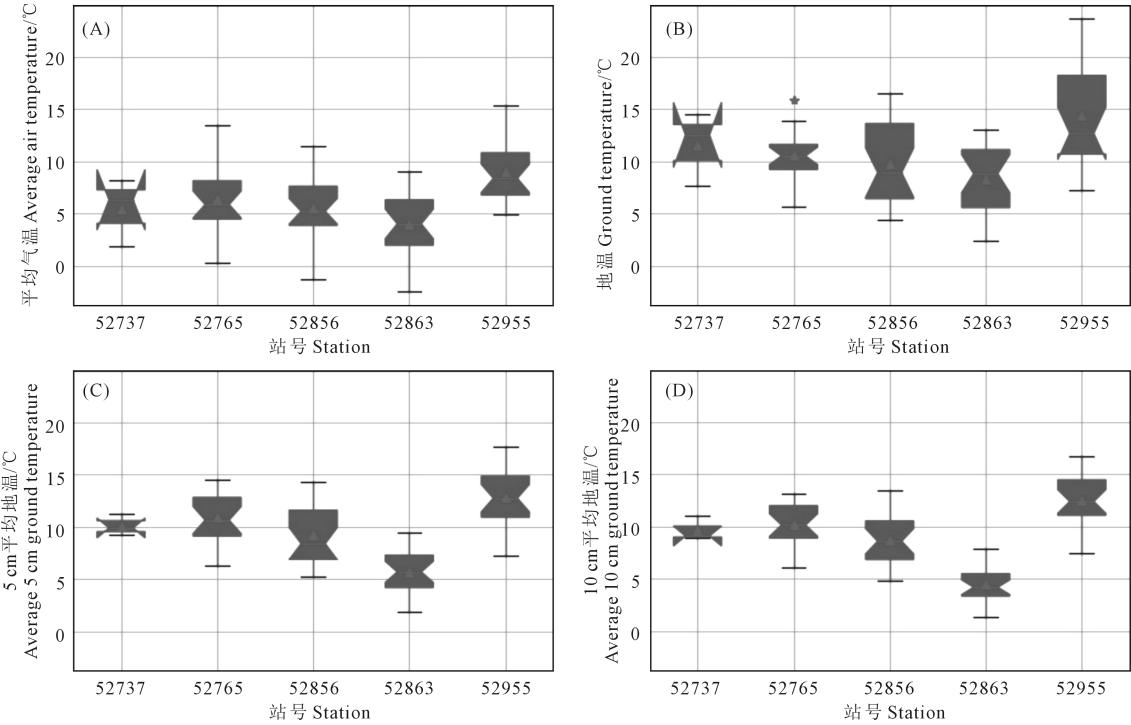


图 5 油菜种植区不同观测站播种期相关性气象要素阈值
Fig.5 Meteorological elements boxplot of rape

2.4 界限温度空间分布特征

如图 6 所示,青海省春小麦和油菜种植区气温稳定通过 0℃、3℃ 和 6℃ 以及地温稳定通过 0℃、6℃ 和 10℃ 的初日在空间分布上受到海拔的影响,大体上呈“东南早、西北晚”的分布特征,其中门源

稳定通过各个界限温度的初日最晚,南部地区中循化、乐都、民和、贵德、尖扎、同仁稳定通过界限温度的初日早。根据图 7 稳定通过 0℃、6℃ 和 10℃ 气温气候倾向率来看,各地区稳定通过界限温度初日提前的趋势较为明显,其中互助、大通稳定通过 0℃、

表 1 春小麦种植区气象观测站播种期气象要素适宜指标/℃

Table 1 Spring wheat optimum index of meteorological elements

指标 Index	气温 Temperature	地温 Ground temperature	5 cm 地温 5 cm ground temperature	10 cm 地温 10 cm ground temperature
平均数 Average	3.31	6.74	5.59	4.87
最小值 Min	-10.80	-7.40	-5.70	-5.10
下四分位数 Lower quartile	1.10	4.20	3.70	2.90
中位数 Median	3.10	6.90	5.60	4.80
上四分位数 Upper quartile	5.80	9.40	7.90	6.90
最大值 Max	13.20	19.10	14.90	13.80

表 2 油菜种植区气象观测站播种期气象要素适宜指标/℃

Table 2 Rape optimum index of meteorological elements

指标 Index	气温 Temperature	地温 Ground temperature	5 cm 地温 5 cm ground temperature	10 cm 地温 10 cm ground temperature
平均数 Average	6.14	10.73	9.60	8.95
最小值 Min	-2.50	2.40	1.90	1.40
下四分位数 Lower quartile	4.00	8.10	6.90	6.20
中位数 Median	6.30	10.50	9.40	9.00
上四分位数 Upper quartile	8.00	12.85	12.35	11.75
最大值 Max	15.30	23.60	17.70	16.70

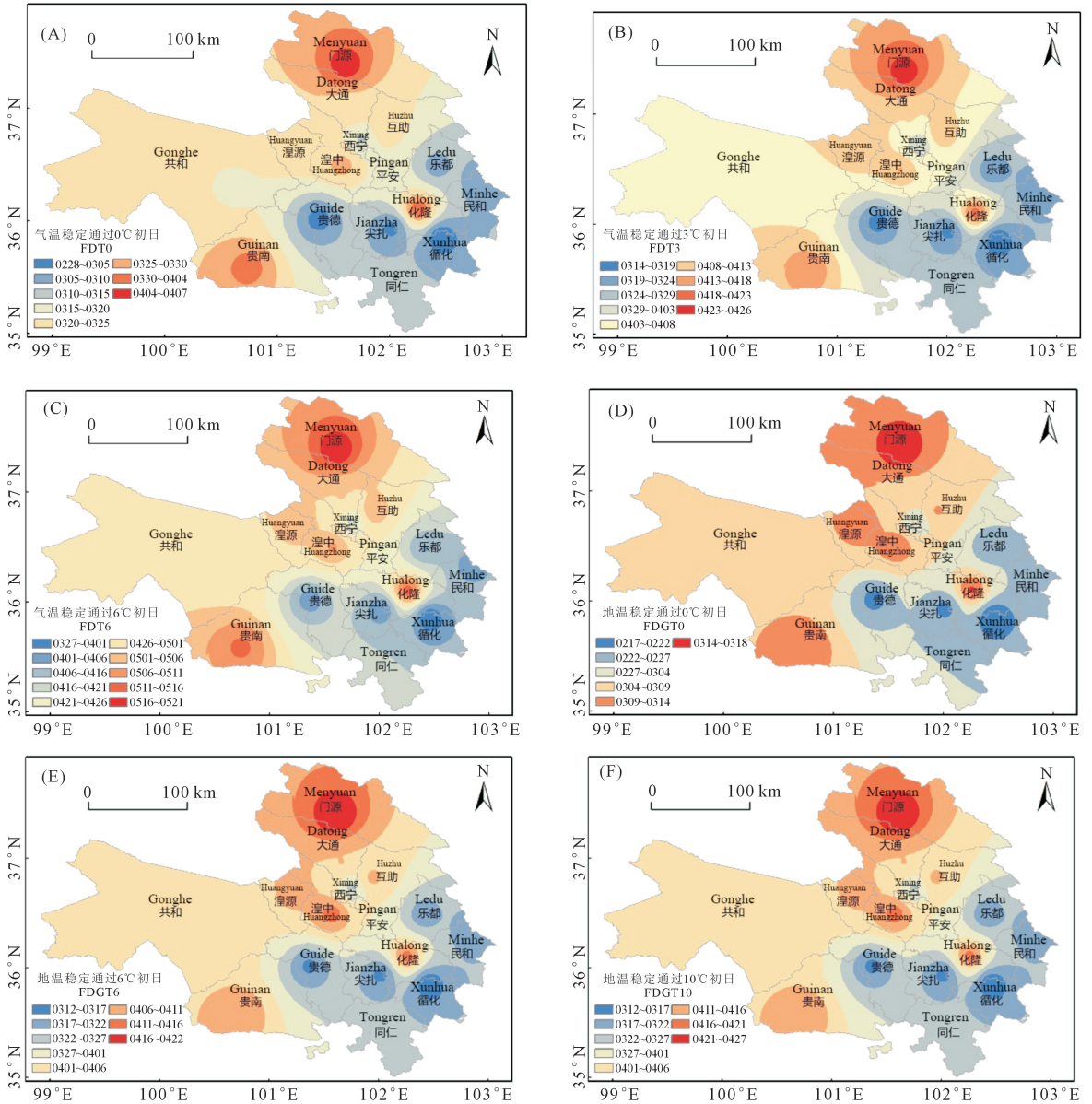


图 6 1961 — 2019 年青海省春小麦油菜种植区日平均气温稳定通过 0℃ (A)、3℃ (B)、6℃ (C) 及日平均地温稳定通过 0℃ (D)、6℃ (E)、10℃ (F) 初日的空间分布

Fig.6 Spatial distribution of the average temperature in the spring wheat rape planting area of Qinghai Province from 1961 to 2019 through 0℃, 3℃ and 6℃ (A, B, C) and the average ground temperature stability through 0℃, 6℃ and 10℃ (D, E, F)

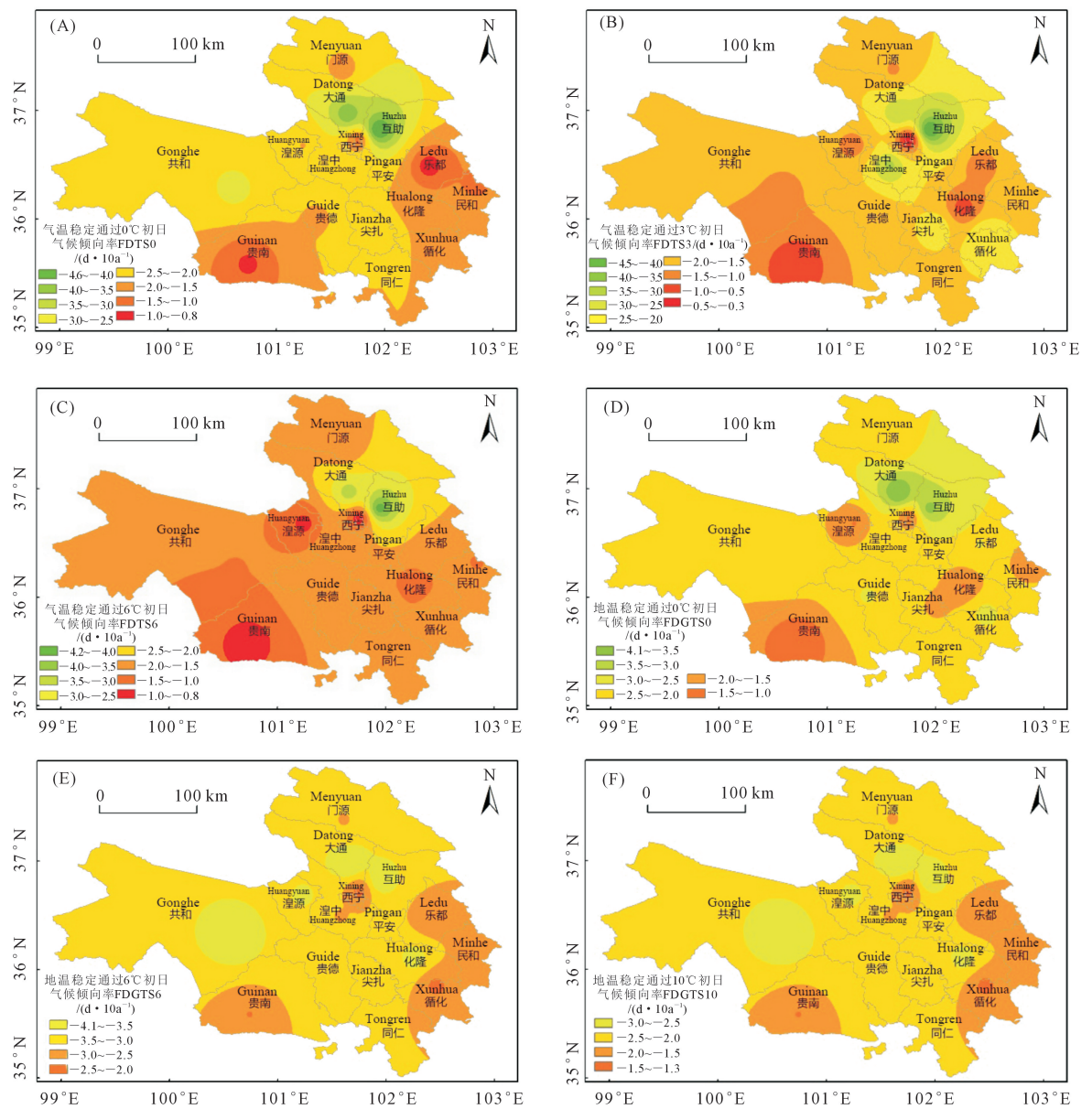


图 7 1961—2019 年青海省春小麦油菜种植区日平均气温稳定通过 0℃ (A)、3℃ (B)、6℃ (C) 及日平均地温稳定通过 0℃ (D)、6℃ (E)、10℃ (F) 初日气候倾向率的空间分布

Fig.7 Spatial distribution of the average temperature of the spring wheat and rapeseed planting areas in Qinghai Province from 1961 to 2019 stably passed 0℃, 3℃, and 6℃ (A, B, C), and the average ground temperature passed 0℃, 6℃, and 10℃ (D, E, F)

3℃、6℃气温与0℃地温的初日提前日数幅度最大，贵南和乐都最小，且气温较地温的气候倾向率变化幅度大。根据图 8 稳定通过界限温度的初日与年份计算的相关系数来看，互助、大通稳定通过 0℃、3℃、6℃气温与 0℃地温初日呈负相关关系。

2.5 模型构建

根据相关文献及现有资料以及与春小麦和油菜播种期的相关性分析,采用百分位法确定通过 80%、90%、95% 保证率下,将气温稳定通过 0℃、3℃、6℃和地温稳定通过 0℃、6℃、10℃的初日作为

春小麦和油菜适宜播种的开始日期,同时将稳定通过界限温度的初日、经度、纬度、海拔高度等地理因子作为模型因子,模型如式(5)所示:

$$Y = f(h, \lambda, \Psi) + \varepsilon \tag{5}$$

式中, Y 为稳定通过界限温度的初日日序数, h 、 λ 、 Ψ 分别表示海拔高度、纬度、经度, ε 为综合地理残差。利用日平均气温稳定通过界限温度的初日日序通过多元回归分析得到春小麦和油菜进入适宜播种期的模型,如表 3、4 所示。

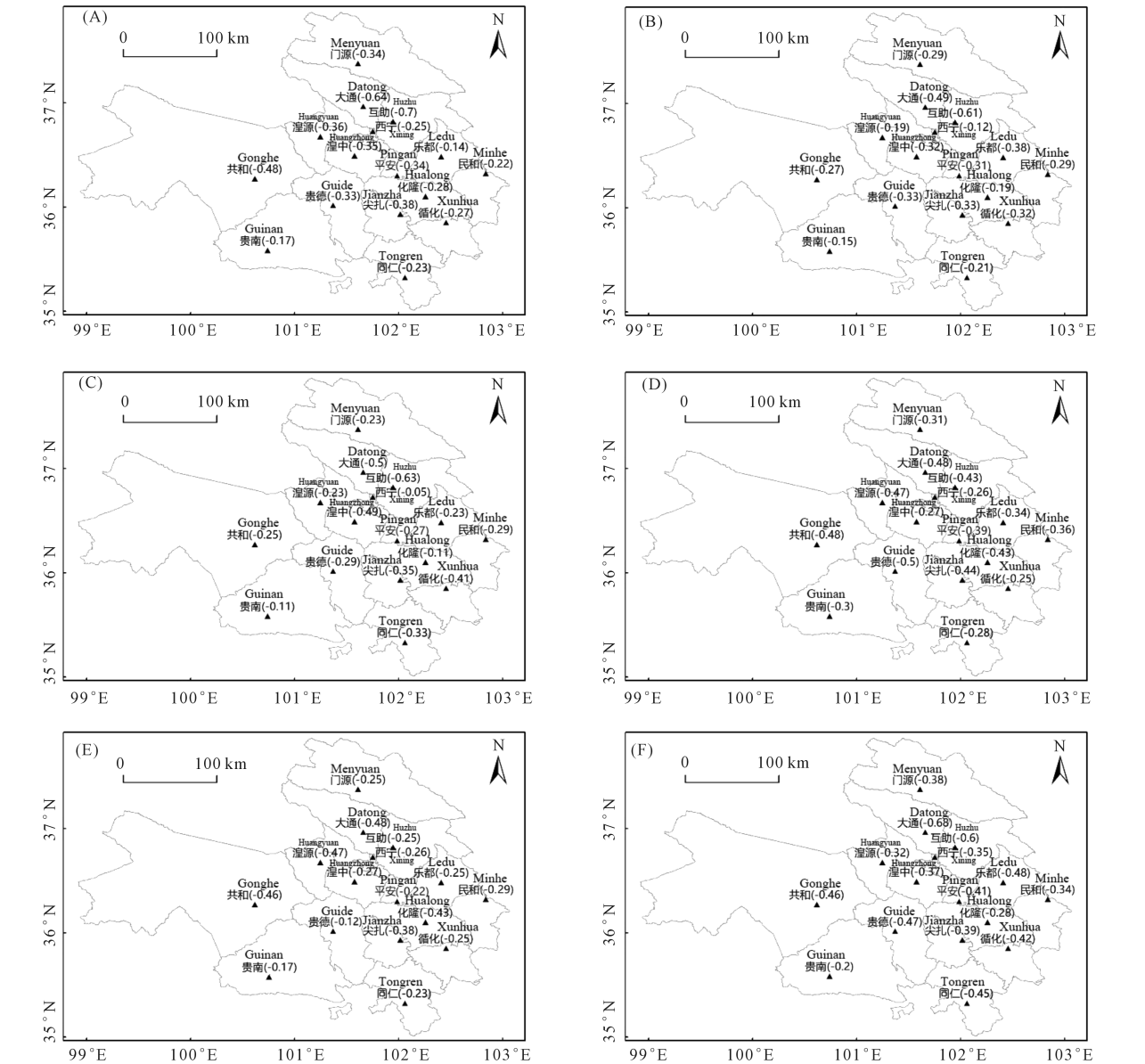


图 8 1961—2019 年青海省春小麦油菜种植区日平均气温稳定通过 0℃ (A)、3℃ (B)、6℃ (C) 及日平均地温稳定通过 0℃ (D)、6℃ (E)、10℃ (F) 初日相关系数的空间分布

Fig.8 Spatial distribution of the average temperature in the spring wheat and rapeseed planting area of Qinghai Province from 1961 to 2019 stably passed 0℃, 3℃, and 6℃ (A, B, C), and the average ground temperature passed 0℃, 6℃, and 10℃ (D, E, F)

表 3 气温稳定通过界限温度的初日与经度、纬度、海拔高度建立春小麦播种期预报模型
Table 3 First day of stable air temperature passing through the boundary temperature with longitude, latitude, and altitude to establish the model

保证率/% Assurance rate	地温稳定通过 0℃ Stable ground temperature passing through 0℃	地温稳定通过 3℃ Stable ground temperature passing through 3℃	地温稳定通过 6℃ Stable ground temperature passing through 6℃
95	$Y=0.04h+7.331\lambda+5.102\Psi-830.449$	$Y=0.039h+5.095\lambda+8.567\Psi-1080.836$	$Y=0.049h+8.026\lambda+8.278\Psi-1167.785$
90	$Y=0.043h+8.001\lambda+8.985\Psi-1250.84$	$Y=0.039h+6.154\lambda+8.064\Psi-1064.192$	$Y=0.043h+9.828\lambda+6.061\Psi-988.761$
80	$Y=0.043h+7.062\lambda+11.477\Psi-1468.158$	$Y=0.044h+6.017\lambda+10.088\Psi-1273.213$	$Y=0.042h+9.881\lambda+6.458\Psi-1023.887$

对所构建的春小麦和油菜进入适宜播种期的预报模型进行评估,如表 5、6 所示,95%、90%、80% 保证率始播期稳定通过 0℃、6℃、10℃ 初日所有模型因变量 Y 的 90% 以上的变化由自变量海拔高度、

纬度、经度来解释,所有模型 90%、80% 保证率 $RMSE$ 小于 3.8 d,其中 95% 保证率下,气温稳定通过 6℃ 初日的 R^2 最大(0.97)、 $RMSE$ 最小(2.96 d);地温稳定通过 0℃ 初日的 R^2 最大(0.97)、 $RMSE$ 最小(1.86 d)。

表 4 地温稳定通过界限温度的初日与经度、纬度、海拔高度建立油菜预报模型
Table 4 First day of stable ground temperature passing through the boundary temperature with longitude, latitude, and altitude to establish the model

保证率/% Assurance rate	地温稳定通过 0℃ Stable ground temperature passing through 0℃	地温稳定通过 6℃ Stable ground temperature passing through 6℃	地温稳定通过 10℃ Stable ground temperature passing through 10℃
95	$Y=0.032h+6.579\lambda+6.587\Psi-944.268$	$Y=0.03h+5.32\lambda+6.732\Psi-881.309$	$Y=0.035h+5.404\lambda+5.868\Psi-795.371$
90	$Y=0.035h+4.389\lambda+7.698\Psi-981.644$	$Y=0.031h+4.953\lambda+6.668\Psi-861.152$	$Y=0.036h+7.531\lambda+6.603\Psi-945.998$
80	$Y=0.033h+4.26\lambda+7.444\Psi-943.175$	$Y=0.032h+7.597\lambda+6.836\Psi-974.676$	$Y=0.037h+11.111\lambda+6.743\Psi-1089.204$

表 5 气温稳定通过 0℃、3℃ 和 6℃ 初日播种期
预报模型决定系数及均方根误差
Table 5 Coefficient of determination and root mean square error
of the temperature has passed 0℃, 6℃ and 10℃ first day

气温 Air temperature	保证率/% Assurance rate	R^2	$RMSE/d$
通过 0℃ 初日 First day of passing 0℃	95	0.95	3.23
	90	0.97	2.64
	80	0.97	2.30
通过 3℃ 初日 First day of passing 3℃	95	0.83	5.53
	90	0.92	3.79
	80	0.97	2.56
通过 6℃ 初日 First day of passing 6℃	95	0.97	2.96
	90	0.97	2.78
	80	0.97	2.77

表 6 地温稳定通过 0℃、6℃ 和 10℃ 初日播种期
预报模型决定系数及均方根误差
Table 6 Coefficient of determination and root mean square error
of the ground temperature has passed 0℃, 6℃ and 10℃

地温 Ground temperature	保证率/% Assurance rate	R^2	$RMSE/d$
通过 0℃ 初日 First day of passing 0℃	95	0.97	1.86
	90	0.96	2.16
	80	0.91	3.13
通过 6℃ 初日 First day of passing 6℃	95	0.90	3.16
	90	0.93	2.64
	80	0.95	2.54
通过 10℃ 初日 First day of passing 10℃	80	0.94	3.13
	90	0.95	2.89
	80	0.97	2.61

3 讨 论

由于春天天气变化异常,春小麦和油菜播种过早,地温较低,更容易出现发芽慢、粉种、坏种的现象,所以受气候变暖的影响,研究区春小麦和油菜播种期气象适宜指标、播种期气象条件预报模型也需要及时调整。前人研究表明,气温、土壤温度和后期霜冻发生有一定关系,从而影响作物的春耕春播等农事活动,所以温度、土壤温度是影响作物生育期的重要气象因素。本研究表明,与春小麦和油菜播种期相关的气象要素中,地温和气温的影响最大(相关系数达到 0.72 以上),这也验证了前人的研究结果,所以考虑增加地温作为播种期相关气象因子,土壤相对湿度与播种期的相关性不大(相关系数 0.34 以下),地理信息因子如经纬度、海拔高度也与播种期日序数有一定的相关性。

4 结 论

1) 研究区与春小麦和油菜播种期相关的气象条件中,日平均气温、地温的增温趋势较为明显,分

别以 $0.40^{\circ}\text{C} \cdot 10\text{a}^{-1}$ 和 $0.44^{\circ}\text{C} \cdot 10\text{a}^{-1}$ 的速度增加,并且春小麦和油菜种植区北部地温增温较南部明显,相对湿度在 1994 年之后,则呈缓慢减少趋势 ($-0.57\% \cdot 10\text{a}^{-1}$)。

2) 当日平均气温达到 3.1°C , 平均 5 cm 地温达到 5.6°C 、10 cm 地温达到 4.8°C 建议开展春小麦播种农事活动;日平均气温达到 6.3°C , 平均 5 cm 地温达到 9.4°C 、10 cm 地温达到 9.0°C 建议开展油菜播种农事活动。

3) 气温稳定通过 0℃、3℃ 和 6℃ 以及地温稳定通过 0℃、6℃ 和 10℃ 的初日在空间分布上受到海拔的影响,大体上呈“东南早、西北晚”的分布特征;春小麦和油菜稳定通过 0℃、3℃,地温稳定通过 0℃ 初日提前的趋势较为明显。通过气温,地温稳定通过界限温度初日统计法建立的春小麦和油菜播种期预测模型,其中 95% 保证率时,气温稳定通过 6℃ 初日、地温稳定通过 0℃ 初日模型效果最佳。

参考文献:
[1] 张翠英.气候变暖对鲁西南冬小麦播种期的影响[J].气象科技, 2008, 36(5): 609-611.

- ZHANG C Y. Impact of climate change on seeding time of winter wheat [J]. *Meteorological Science and Technology*, 2008, 36(5): 609-611.
- [2] 吕佳佳, 王秋京, 闫平, 等. 基于气温资料的黑龙江省玉米播种期分析[J]. *中国农业气象*, 2014, 35(1): 68-73.
- LYU J J, WANG Q J, YAN P, et al. Study on maize sowing time in Heilongjiang Province based on temperature data[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2014, 35(1): 68-73.
- [3] 李祥. 不同播期条件下气象因子对各类油菜品种生长发育的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2017.
- LI X. Effects of meteorological factors on development of rapeseed varieties under different sowing dates[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2017.
- [4] 宫丽娟, 王萍, 姜蓝齐, 等. 高寒区大豆适宜播种期研究[J]. *中国农学通报*, 2021, 37(5): 57-64.
- GONG L J, WANG P, JIANG L Q, et al. Suitable sowing date of soybean in the frigid region[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2021, 37(5): 57-64.
- [5] 李树岩, 刘伟昌. 基于气象关键因子的河南省夏玉米产量预报研究[J]. *干旱地区农业研究*, 2014, 32(5): 223-227.
- LI S Y, LIU W C. Research on the yield prediction of summer maize in Henan Province based on meteorological key factors[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2014, 32(5): 223-227.
- [6] 张佩, 高苹, 刘彦丽. 江苏省冬小麦播种期对气候要素变化的响应[J]. *气象科学*, 2011, 31(6): 763-769.
- ZHANG P, GAO P, LIU Y L. Response of sowing date of winter wheat to climate change in Jiangsu Province[J]. *Journal of the Meteorological Sciences*, 2011, 31(6): 763-769.
- [7] 孔坚文, 王连喜, 李琪, 等. 陕西省主要农业气象灾害分析及其对粮食产量的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2015, 33(4): 220-226.
- KONG J W, WANG L X, LI Q, et al. Analyses of main agro-meteorological disasters and their impacts on food production in Shaanxi Province[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2015, 33(4): 220-226.
- [8] 和骅芸, 胡琦, 潘学标, 等. 气候变化背景下华北平原夏玉米花期高温热害特征及适宜播期分析[J]. *中国农业气象*, 2020, 41(1): 1-15.
- HE H Y, HU Q, PAN X B, et al. Characteristics of heat damage during flowering period of summer maize and suitable sowing date in North China plain under climate change[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2020, 41(1): 1-15.
- [9] 余卫东, 赵国强, 陈怀亮. 气候变化对河南省主要农作物生育期的影响[J]. *中国农业气象*, 2007, 28(1): 9-12.
- YU W D, ZHAO G Q, CHEN H L. Impacts of climate change on growing stages of main crops in Henan Province[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2007, 28(1): 9-12.
- [10] 崔耀平, 路婧琦, 秦耀辰, 等. 我国春小麦物候变化及其与水热气候条件的关系研究[J]. *河南大学学报(自然科学版)*, 2018, 48(1): 1-9.
- CUI Y P, LU J Q, QIN Y C, et al. The phenology variations of spring wheat and their correlations with hydrothermal conditions in China [J]. *Journal of Henan University (Natural Science)*, 2018, 48(1): 1-9.
- [11] 牛冬, 唐红艳. 基于土壤温度的春玉米适宜播种指标及播种期分析[J]. *中国农学通报*, 2019, 35(2): 79-85.
- NIU D, TANG H Y. Suitable sowing date and sowing indexes of spring maize based on soil temperature[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2019, 35(2): 79-85.
- [12] 薛丽华, 赛力汗·赛, 曾朝武, 等. 冬、春小麦冬前播种对干物质积累与产量的影响[J]. *新疆农业科学*, 2018, 55(12): 2236-2241.
- XUE L H, SAILIHAN S, ZENG C W, et al. Effects of spring and winter wheat sown before winter on dry matter accumulation and yield [J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2018, 55(12): 2236-2241.
- [13] 王丽莉. 青海省东部干旱风险及对春小麦种植的影响[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2017.
- WANG L L. Drought risk in eastern Qinghai Province and its impact on spring wheat cultivation[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Technology, 2017.
- [14] 许怡然, 鲁帆, 谢子波, 等. 潮白河流域气象水文干旱特征及其响应关系[J]. *干旱地区农业研究*, 2019, 37(2): 220-228.
- XU Y R, LU F, XIE Z B, et al. Characteristics and responses of hydrological and meteorological drought in Chaobai River Basin [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2019, 37(2): 220-228.
- [15] 王小桃, 李辑, 晁华, 等. 辽西地区春播期土壤湿度变化特征及气象影响因子分析[J]. *干旱地区农业研究*, 2014, 32(4): 250-255.
- WANG X T, LI J, CHAO H, et al. Analysis on soil moisture variation and its meteorological influencing factors at spring sowing period in western Liaoning Province[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2014, 32(4): 250-255.
- [16] 严应存, 周秉荣, 陈国茜. 1961-2010年青海省霜冻灾害变化特征及风险区划[J]. *气象科技*, 2015, 43(5): 986-991.
- YAN Y C, ZHOU B R, CHEN G Q. Variation characteristics and risk regionalization of frost disasters in Qinghai Province [J]. *Meteorological Science and Technology*, 2015, 43(5): 986-991.
- [17] 王发科, 祁贵明, 郭晓宁, 等. 柴达木盆地南缘农业界限温度的气候变化特征[J]. *干旱气象*, 2009, 27(3): 227-231.
- WANG F K, QI G M, GUO X N, et al. Climatic change of agricultural critical temperature in the southern margin of Qaidam Basin[J]. *Journal of Arid Meteorology*, 2009, 27(3): 227-231.
- [18] 潘冬梅. 吉木乃县近50年积温变化特征及其对小麦产量的影响分析[J]. *沙漠与绿洲气象*, 2012, 6(3): 70-74.
- PAN D M. Accumulated temperature variation in Jimunai during 1961-2010 and its influence on wheat yield[J]. *Desert and Oasis Meteorology*, 2012, 6(3): 70-74.
- [19] 尚艳, 柴守玺, 万信, 等. 气候变暖下品种更新对河西地区春小麦生育期与产量的影响[J]. *中国农学通报*, 2016, 32(33): 24-28.
- SHANG Y, CHAI S X, WAN X, et al. Effect of cultivar renovation on growth period and yield of spring wheat in Hexi area under climate warming[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2016, 32(33): 24-28.