

山西省春玉米气候适宜度评估

田国珍, 张国宏, 李燕, 左小瑞, 杨茜

(山西省气候中心, 山西太原 030006)

摘要:为明确山西省春玉米气候资源适宜性,为山西省春玉米种植布局优化提供一定的参考,根据山西省春玉米生长季内气象要素变化阈值,分别构建山西省春玉米生长的温度、降水量、光照适宜性模型,结合春玉米产量和种植面积建立山西省春玉米综合气候适宜度模型,并分析温度、降水量、光照和综合气候适宜度时空分布特征。结果表明,从生育期来看,山西省春玉米温度适宜性出苗期最好,乳熟期—成熟期最差;降水适宜性在播种期和成熟期较好,抽雄期最差;日照适宜性出苗期最好,成熟期最差。从空间分布来看,山西省春玉米温度适宜性晋西北、晋东部分地区不适宜;降水适宜性在晋中盆地、大同盆地、忻定盆地较差,东南部适宜;日照适宜性从北到南逐渐降低。综合气候适宜性可知,山西省北部、中部大部分地区较适宜种植春玉米,东南部适宜性较差。影响山西省春玉米产量的气象要素从大到小依次为日照、温度、降水量。经与实际产量验证,研究建立的山西省春玉米气候适宜性模型能较好地反映山西省春玉米气候适宜性分布和产量变化趋势。

关键词:春玉米;气象要素;气象产量;适宜度;山西省

中图分类号:S161

文献标识码:A

文章编号:1002-2481(2024)04-0092-09

Climate Suitability Evaluation of Spring Maize in Shanxi Province

TIAN Guozhen, ZHANG Guohong, LI Yan, ZUO Xiaorui, YANG Qian

(Shanxi Climate Center, Taiyuan 030006, China)

Abstract: In order to clarify the suitability of spring maize climate resources in Shanxi province, provide a certain reference for optimizing the planting layout of spring maize in Shanxi, in this study, temperature, precipitation, and light suitability models were constructed for the growth of spring maize in Shanxi province based on the variation domain values of meteorological elements during the growing season of spring maize in Shanxi province. A comprehensive climate suitability model for spring maize in Shanxi province was established by combining spring maize yield per unit area and planting area, and the spatiotemporal distribution characteristics of temperature, precipitation, light, and comprehensive climate suitability were analyzed. The results showed that from the perspective of growth period, Shanxi spring maize had the best temperature suitability at the seedling stage, the worst at the milk maturity stage, the best precipitation suitability at the sowing and maturity stage, the worst at the tasseling stage, the best sunlight suitability at the seedling stage, and the worst at the maturity stage. From the perspective of spatial distribution, the temperature suitability of spring maize in Shanxi was not suitable in some areas of northwestern and eastern Shanxi. The suitability of precipitation was poor in the Jinzhong Basin, Datong Basin, and Xinding Basin, but suitable in the southeast. The suitability of sunlight gradually decreased from north to south. The comprehensive climate suitability showed that it was more suitable for planting maize in the most parts in northern and central Shanxi, but it was worse in the southeast. The meteorological factors affecting the yield per unit area of spring maize in Shanxi from large to small were sunshine, average temperature, and precipitation. The validation with actual yield showed that the climate suitability model established in this study could better reflect the distribution of climate suitability and yield change trends of spring maize in Shanxi.

Key words: spring maize; meteorological factors; meteorological yield; suitability degree; Shanxi province

玉米是华北地区主要的谷物类作物,具有种植范围广、单产高、品质优等优势 and 特色,是农业生产由粮食作物—经济作物的二元结构向粮食作物—饲料作物—经济作物的三元结构转变的关键作物

之一^[1]。玉米作为山西省的主要粮食作物之一,其播种面积和产量居各种作物之首,且播种面积逐年增加。山西省每年的玉米播种面积占全省粮食种植面积的40%左右,但玉米产量占粮食总产的

收稿日期:2023-07-20

基金项目:山西省科技厅青年基金项目(20210302124617);山西省水利厅重点项目(2022GM008);山西省气象局面上项目(SXKMSNY20165212)

作者简介:田国珍(1981-),女,山西阳曲人,高级工程师,硕士,主要从事农业遥感研究工作。

通信作者:张国宏(1968-),男,山西武乡人,正高级工程师,硕士,主要从事气候变化研究工作。

70%以上,其在山西省粮食生产中占有十分重要的地位。虽然玉米能够抵御恶劣的生长环境,但玉米产量的潜力一直得不到充分发挥。利用实时气象要素对区域玉米生长适宜性进行评估^[2],进而优化种植布局,充分挖掘玉米生产潜力,可为区域玉米稳产增收提供科学依据。

农作物的气候适宜度是指将光、温、水等气象要素的数量变化通过模糊数学中的隶属关系转化为对农作物生长发育、产量积累等的适宜程度,建立各气象因子的影响权重,综合评估多种气象要素的影响程度^[3-8]。国内外学者基于气候适宜度对不同区域玉米生育期气候适宜度进行了研究,建立了相应的评估模型,使玉米生长气象条件评估由定性发展为定量评估。已有研究^[9-11]基于模糊数学理论构建了玉米光温水隶属度计算模型以及综合适宜度模型,表明区域作物适宜度受天气条件影响,作物产量高低主要取决于降水条件的优劣。李秀芬等^[12]、BOOGAARD等^[13]基于WOFOST模型模拟地上生物量进行气象适宜度动态诊断,并与综合气象适宜度对比分析,结果表明,作物基理模型能根据气象条件对不同生育期进行动态、定量诊断气候适宜度。已有的气候适宜度模型研究多集中在河北、河南、东北等地势平坦、连片的玉米种植区域,各气象要素均采用统一指标进行评估,而山西省地形地貌以丘陵和山地为主,且南北跨度大,不能简单采用已有模型进行气候适宜性分析。因此,本研究结合气候分区设置了不同的气温阈值,并依据地形修订了降水适宜度模型,对研究区春玉米全生育期及各生育阶段气候适宜度进行分析,旨在为山西省春玉米产业充分利用自然气候资源,优化春玉米种植布局,实现春玉米稳产增收提供参考,同时也为地区玉米管理和政策制定提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 研究数据及数据处理

气象数据为山西省107个国家基准气象站2011—2020年逐日的平均气温、日照时数、降雨量,以及蒸散量计算中需用到的最高气温、最低气温、平均相对湿度、实际水汽压、10 m处风速等。农业气象观测资料为13个玉米观测站2011—2020年玉米生育期观测资料,空间分析时依据距离最近和高程接近原则,将春玉米生育期数据插值到全省春玉米种植区。此外,还有整理统计的分县春玉米种植面积和单产资料。由于单产除了受气象条件的影

响,还受到土壤和生产技术等的影响,所以,需要将产量中气象条件产生的影响分离出来。分离气象条件的影响,常规的作法是把作物的产量分解为趋势产量、气候产量和随机产量3部分。趋势产量反映的是一定时期代表生产力发展水平的长周期产量分量,也称为技术产量。气候产量是受气候要素影响的短周期变化的波动产量。趋势产量常采用滑动平均模拟^[14-15]或线性、非线性模拟^[16-19]。鉴于本研究中产量数据序列较短,采用3 a滑动平均模拟估算气候产量,并将随机产量定义为当年春玉米产量超过前5 a滑动平均产量的±10%的产量部分。

$$Y = Y_q + Y_m + b \quad (1)$$

式中, Y 为作物实际单产, Y_q 为技术产量, Y_m 为气候产量, b 是随机产量。

山西省玉米分为春玉米和夏玉米,且以春玉米为主,只有在运城等部分地区收完小麦后种植夏玉米,本研究涉及的品种为春玉米,主要关注其6个生育期:播种期、出苗期、拔节期、开花期、乳熟期、成熟期,研究区域及玉米观测站点分布如图1所示。

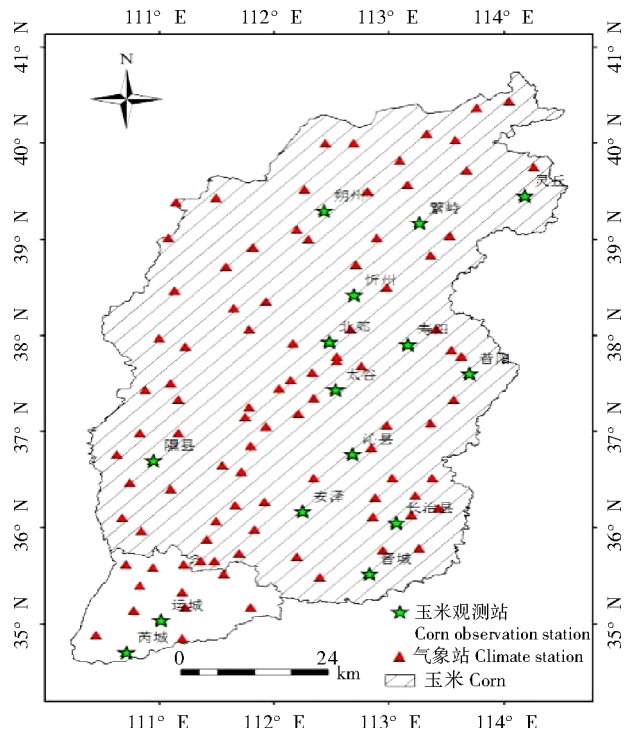


图1 研究区域及玉米观测站分布
Fig.1 Research area and corn observation station

1.2 研究方法

1.2.1 春玉米温度适宜度分析 适宜的温度是玉米生长发育的必要条件,也是其高产的关键因素^[20]。为定量分析山西春玉米气温对玉米各生育期生长发育的满足程度,参考马树庆^[21]和毛留喜等^[22]对玉

米生育期适宜温度研究,综合山西省温度带设定温度适宜度模型及其参数。

$$F(t) = \begin{cases} \frac{(t-t_l)(t_h-t)^B}{(t_0-t_l)(t_h-t_0)^B} & (t_l < t < t_h) \\ 1 & (t \geq t_h) \\ 0 & (t \leq t_l) \end{cases} \quad (2)$$

$$B = (t_h - t_0) / (t_0 - t_l) \quad (3)$$

式中, $F(t)$ 为玉米生育期旬温度适宜度, 介于

0~1; t 为某生育期的平均温度; t_l 、 t_h 、 t_0 分别为山西省玉米某生育期所需的下限温度、上限温度和最适温度; B 为构建的温度适宜度模型的指数。山西省南北跨度大, 从气候类型上分为东南部季风区和西北部温带大陆性气候区, 由于 2 种气候区内玉米的种植时间差异明显, 因而结合文献[19-20]分别设置 2 种气候区春玉米某生育期所需下限温度、上限温度和最适温度^[22-23], 其取值参照表 1。

表 1 山西春玉米各生育期的下限、上限及最适日平均温度
Tab.1 The lower and upper limits, as well as the suitable daily average temperature at different growth stages of spring maize in Shanxi province °C

气候区	参数	播种期	出苗期	拔节期	开花期	乳熟期	成熟期
Climate zone	Parameter	Sowing stage	Emergence stage	Jointing stage	Flowering stage	Milk maturity stage	Maturity stage
大陆性气候区 Continental climate	t_l	9	14	18	19	15	11
	t_h	19	27	27	28	25	20
	t_0	13	19	25	26	22	17
季风气候区 Monsoon climate	t_l	11	16	20	21	18	13
	t_h	19	24	27	28	25	20
	t_0	14	19	25	26	22	17

1.2.2 降水适宜度分析 研究表明, 玉米生育期内, 当降水量/需水量 < 0.7 时为发生旱情; 当降水量/需水量 > 1.3 时为轻涝, 加之研究区山谷交错分布, 需考虑降雨量截流量。根据费道罗夫的研究结果, 当降雨量 < 5 mm 时, 截流量 > 50%; 当降雨量 > 5 mm 时, 截流量 < 20%^[24], 降水截流系数 (K_r) 根据气象站点高程与山西省平均高度的比值确定。调整后降水适宜度模型如下。

$$F(r) = \begin{cases} K_r r / 0.7ET_c & \dots K_r r < 0.7ET_c \\ 1 & \dots K_r r \geq 0.7ET_c \end{cases} \quad (4)$$

式中, $F(r)$ 为春玉米某生育期降水适宜度, K_r 为降水截流系数, r 为某生育期的日均降水量, ET_c 为春玉米生育期内日均需水量。

$$ET_c = K_c \times ET_0 \quad (5)$$

式中, K_c 为作物系数, ET_0 为参考作物蒸散量, 采用改进后的彭曼-孟蒂斯公式进行计算^[25]。

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma(900/(T + 273))U_2(e_a - e_d)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (6)$$

式中, T 为平均日或月气温 (°C), R_n 为作物冠层的净辐射量 (MJ/m²·d), U_2 为地面以上 2 m 处的风速 (m/s), e_a 为饱和水汽压 (kPa), e_d 为实际水汽压 (kPa), G 为土壤热通量 (MJ/(m²·d)), Δ 为饱和水汽压在温度曲线 T 处的斜率 (kPa/°C), γ 为湿度计常数 (kPa/°C)。

作物系数 K_c 是计算作物需水量的重要参数, 反映了作物本身的生物学特性、产量水平、土壤耕作条件等对作物需水量的影响。在充分灌溉条件下, 不同生育阶段 K_c 值为一常数^[26]。但对于山西省的春玉米来说, 大部分生育期处于干旱少雨季节, 加之目前水资源严重缺乏, 很难保证全生育期充分灌溉。当含水量小于土壤适宜含水量时, 作物蒸腾受到抑制, K_c 将按非线性函数变化。 K_c 的选取可参考已有研究成果, 根据文献[26]的研究结果, 山西

春玉米的作物系数 4 月取值 0.3, 5 月取值 0.4, 6 月取值 0.8, 7 月取值 1.26, 8 月取值 0.73, 9 月取值 0.5。

1.2.3 日照时数适宜性分析 玉米是喜光的短日照作物, 在强光条件下可合成更多的光合产物, 在保证正常成熟的条件下, 日照时数越多、光照越强, 制造的干物质越多, 产量也就越高, 根据研究区春玉米各生育期日照时数阈值确定模型如下。

$$F(s) = \begin{cases} (S - S_l) / (S_h - S_l) & \dots S_l < S < S_h \\ 1 & \dots S \geq S_h \\ 0 & \dots S \leq S_l \end{cases} \quad (7)$$

式中, $F(s)$ 为春玉米各生育期日平均日照时数适宜度, 其值介于 0~1; S 为某生育期的平均日照时数; S_l 、 S_h 分别为山西省春玉米某生育期所需的下限和上限日照时数, 根据毛留喜等^[22]对华北玉米的日照时数的研究成果取值, 具体参数见表 2。

表2 山西春玉米各生育期的下限、上限日照时数
Tab.2 The lower and upper limits of sunshine hours at different growth stages of spring maize in Shanxi province h

处理 Treatment	播种期 Sowing stage	出苗期 Emergence stage	拔节期 Jointing stage	开花期 Flowering stage	乳熟期 Milk maturity stage	成熟期 Maturity stage
S _l	9	13	18	19	15	11
S _h	19	23	27	28	25	20

1.2.4 全生育期适宜度分析 参照文献[12]计算春玉米全生育期的温度、降水和日照适宜度。

$$\begin{aligned}
 F(t) &= \sum_{i=1}^6 k_{ti} F_i(t) F(r) \\
 &= \sum_{i=1}^6 k_{ri} F_i(r) F(s) \\
 &= \sum_{i=1}^6 k_{si} F_i(s)
 \end{aligned} \tag{8}$$

$$k_{ti} = \frac{R_{ti}}{R_t}, \quad k_{ri} = \frac{R_{ri}}{R_r}, \quad k_{si} = \frac{R_{si}}{R_s} \tag{9}$$

式中, $F(t)$ 、 $F(r)$ 、 $F(s)$ 分别为全生育期温度、降水、日照气候适宜度, $F_i(t)$ 、 $F_i(r)$ 、 $F_i(s)$ 分别表示

第*i*个生育期的温度、降水量、日照适宜度; k_{ti} 、 k_{ri} 、 k_{si} 分别为各生育期的温度、降水量、日照适宜度的权重系数,通过计算代表站各生育期温度、降水量、日照时数与玉米产量的相关系数 R_{ti} 、 R_{ri} 、 R_{si} 与全生育期的相关系数总和 R_t 、 R_r 、 R_s 的比值得到。

2 结果与分析

2.1 山西省春玉米各生育期气象要素适宜性特征分析

山西省春玉米各生育期温度适宜性空间分布情况如图2所示。

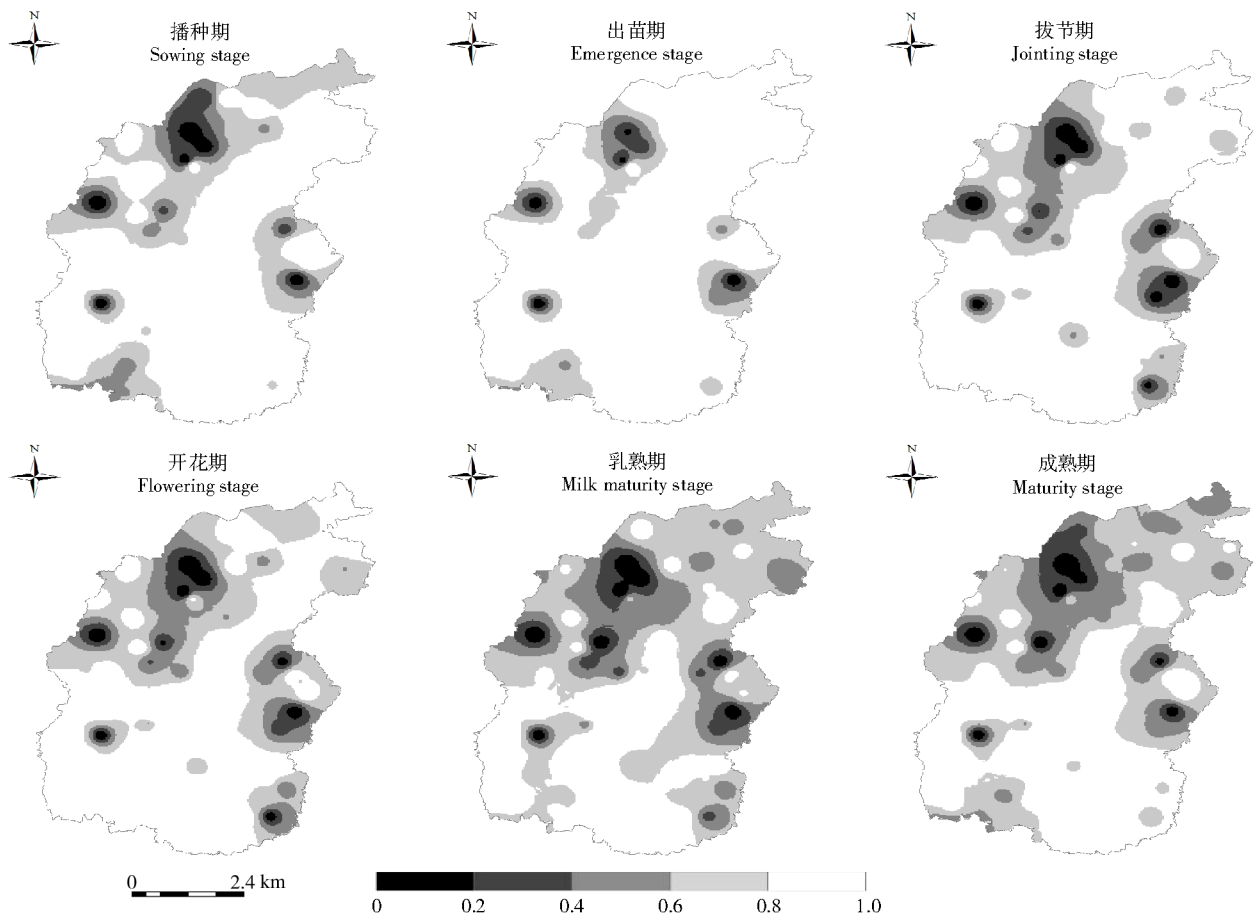


图2 山西省春玉米各生育期温度适宜性空间分布
Fig.2 Spatial distribution of temperature suitability at different growth stages of spring maize in Shanxi province

利用山西省107个站点2011—2020年春玉米生育期逐日光、温、水数据,将其分成6个生育阶段,分别为播种期、出苗期、拔节期、开花期、乳熟期、成

熟期。依据华北春玉米不同生育期的下限、上限及最适日平均温度(表1),利用公式2和公式3计算得到各站点不同生育期多年平均温度适宜性;按照公

式 6 计算得到逐日 ET_0 , 并依据公式 4 和公式 5 计算得到各站点各生育期多年平均降水适宜性; 依据华北春玉米(表 2)不同生育期的下限、上限日照时数, 基于公式 7 计算得到各站点各生育期多年平均日照适宜性。最后采用反距离权重法插值法得到山西省春玉米不同生育期光、温、水适宜性空间分布图(图 2—4), 图中 5 个等级按照平均权重划分为非常适宜(0.8~1.0)、适宜(0.6~0.8)、轻度不适宜(0.4~0.6)、中度不适宜(0.2~0.4)和重度不适宜(0~0.2)。

从山西省春玉米各生育期平均温度适宜性空间分布可以发现(图 2), 受地形影响, 前 4 个生育阶段(播种期、出苗期、拔节期、开花期)在西北和东部晋中阳泉交界的部分山区出现轻度到中度适宜, 其余地区大部分非常适宜; 乳熟—成熟期, 晋中、晋南大部分地区仍为非常适宜, 晋北大部分区为轻度适宜。为此, 晋北可以种植生长期稍短一点的春玉米

品种, 以适应当地气温变化。总体来看, 气温适宜性前期好、后期差, 其中, 出苗期最适宜, 乳熟—成熟期气温适宜性较其他生育阶段最差。

从山西省春玉米 5 个生育阶段降水适宜性空间分布可以发现(图 3), 播种期和成熟期降水适宜性全省均为非常适宜, 降水适宜性在 0.9 以上; 出苗期和乳熟期山西省大部分地区低于 0.8, 出现轻度不适宜; 拔节—开花期全省大部分为中度不适宜, 而此时玉米迅速生长, 叶片增多, 气温也升高, 玉米的蒸腾量加大, 因而需要较多的水分, 从拔节到灌浆需水占总需水量的 1/2 左右, 特别是抽雄穗前后 30 d 内, 缺水对玉米生长影响极明显, 严重缺水时, 造成雄穗或雌穗抽不出, 俗称“卡脖旱”。因此, 山西省发生“卡脖旱”的风险较大, 易造成减产。总体来看, 山西春玉米降水适宜性两头差, 中间好, 其中开花期较其他生育阶段为最差。

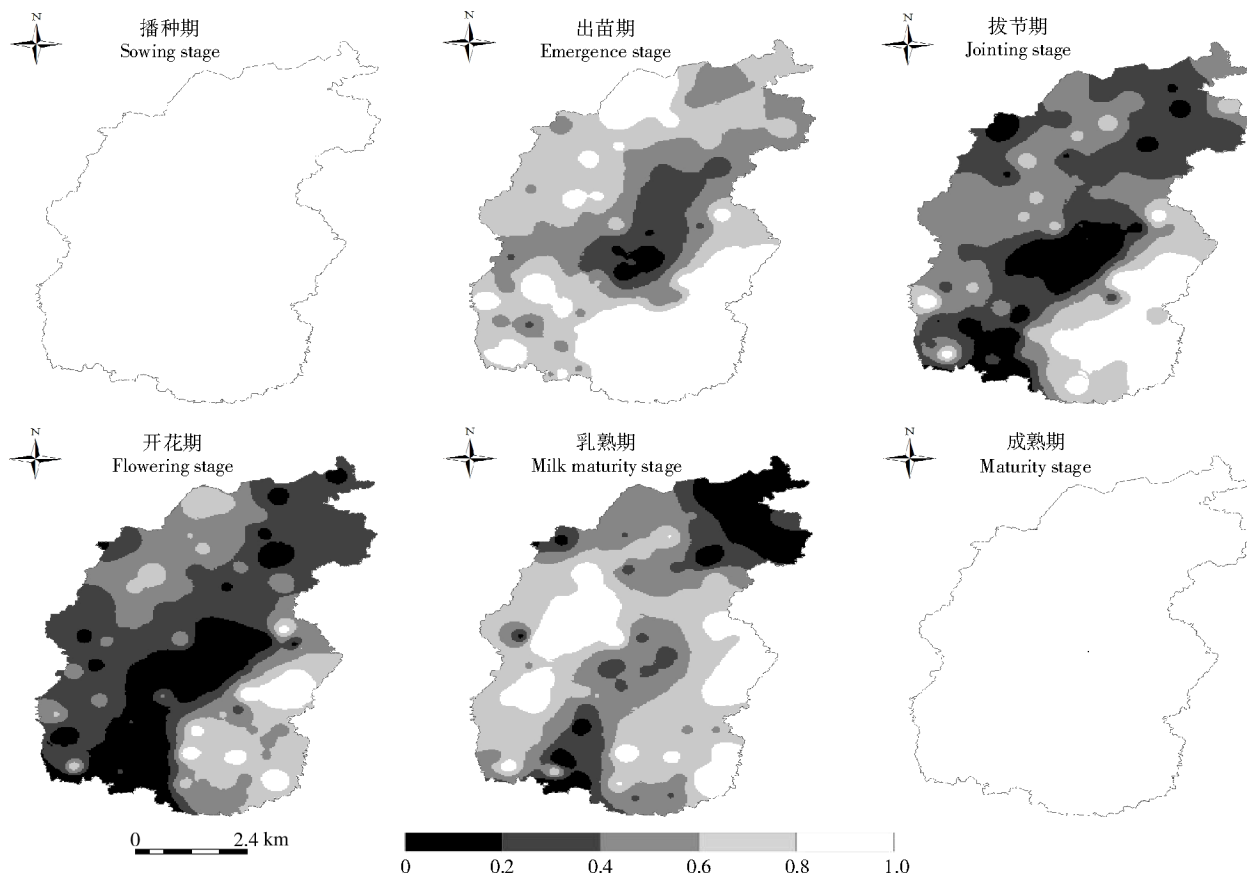


图 3 山西省春玉米各生育期降水适宜性空间分布
Fig.3 Spatial distribution of precipitation suitability at different growth stages of spring maize in Shanxi province

从山西省春玉米 5 个生育阶段日照适宜性空间分布可以发现(图 4), 出苗期日照适宜性最好, 大部分为非常适宜。5 个生育阶段表现出同样的分布趋势, 从北到南日照适宜性逐渐降低, 北部地区全生育期日照适宜性均为非常适宜, 中部出现轻度到

中度不适宜, 南部大部为中度不适宜, 临汾和长治交界处出现重度不适宜, 这也与临汾和长治种植面积全省最少(仅占到 10%)的实际相符。总体来看, 山西省春玉米日照适宜性北部好, 中南部差; 出苗期最好, 成熟期最差。

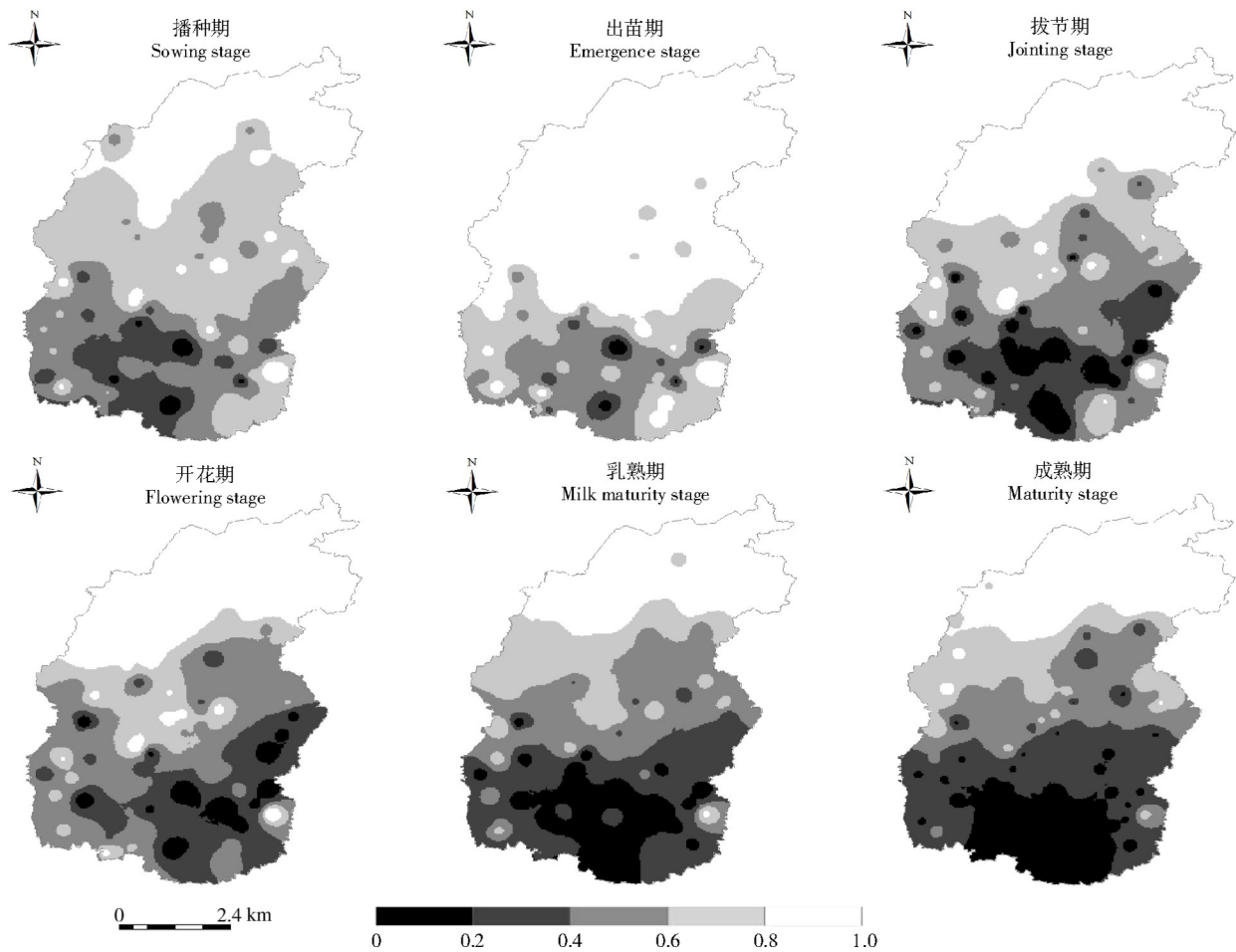


图4 山西省春玉米各生育期日照适宜性空间分布
Fig.4 Spatial distribution of sunshine suitability at different growth stages of spring maize in Shanxi province

2.2 山西省春玉米综合气象要素适宜性特征分析

根据公式8和公式9,对春玉米全生育期气象要素适宜性进行分析,需要通过分析各生育期的温度、降水量、日照适宜度与对应年份玉米气候产量的相关关系(图5),进而得到平均温度、降水量、日照适宜度的权重系数。

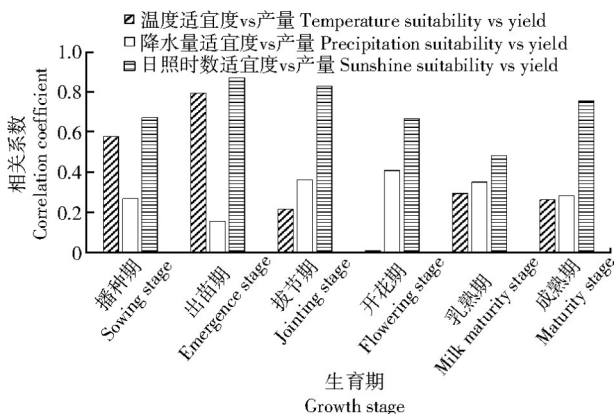


图5 山西省春玉米各全生育期光、温、水与产量的相关性
Fig.5 Correlation between sunshine, temperature, precipitation, and yield per unit area at different growth stages of spring maize in Shanxi province

由图5可知,山西省春玉米产量与气象要素的相关性从高到低依次为日照>温度>降水量。日照时数在乳熟期与产量的相关性稍偏低,其他生育期均较高,光照对玉米产量影响显著,日照充足的玉米容易获得高产,播种前至乳熟期为8~10 h,至成熟期为9 h以上最为适宜。平均气温在播种期和出苗期与产量的相关性较高,之后保持低水平,说明影响山西省春玉米产量的气温因素关键在于4月下旬至5月的播种出苗期阶段,后期气温对于产量的影响较小。有研究表明,随着气候变暖,玉米的播种日期提前,玉米的适宜种植期延长,导致温度不再成为限制因子。降水量与产量的相关性各生育期普遍不高,这与常规的认知出入较大。山西省大部分地区属于干旱和半干旱地区,旱灾历年都是所有气象灾害中最重的,春玉米在拔节—开花期不仅需水量大,而且一旦缺水,会导致大量减产。结合统计年鉴数据可发现,2011—2020年,山西省农村常住人口减少约30%,而玉米种植面积增长约13%,由于大部分地区玉米种植和灌溉实现规模化、机械化,使原来农

业劳动密集型杂粮种植转为玉米种植;同时春玉米品种也在不断改良,使玉米的抗旱性加强。多种因素综合作用下,导致降水对玉米产量的影响不明显,呈现不规则的变化趋势。综合气候适宜性指数按照光、温、水 3 个基本要素同等权重计算得到。

由图 5 可知,山西省各气象要素不同生育期与气候产量的相关性差异特别大,为方便不同气象要素适宜性之间的比较,将权重系数进行标准化处理,即全生育期各气象要素的权重系数之和为 1,再利用各气象要素全生育期适宜性与气候产量进行

相关分析,得到不同气象要素的权重系数,结合公式 9 得到山西省春玉米气候适宜性分布图(图 6)。

由图 6 可知,从温度适宜性来看,晋西北和晋东太行山中部部分地区不适宜,其他地区大部分为适宜,北部比南部适宜性差;从降水适宜性来看,适宜性差的区域主要分布在山西省主要粮食产区,包括北部大同盆地、忻定盆地,中部的晋中盆地最差,西部出现轻度不适宜,东南部为适宜;从日照适宜性来看,从北到南日照适宜性逐渐降低,呈现明显的纬度地带性。

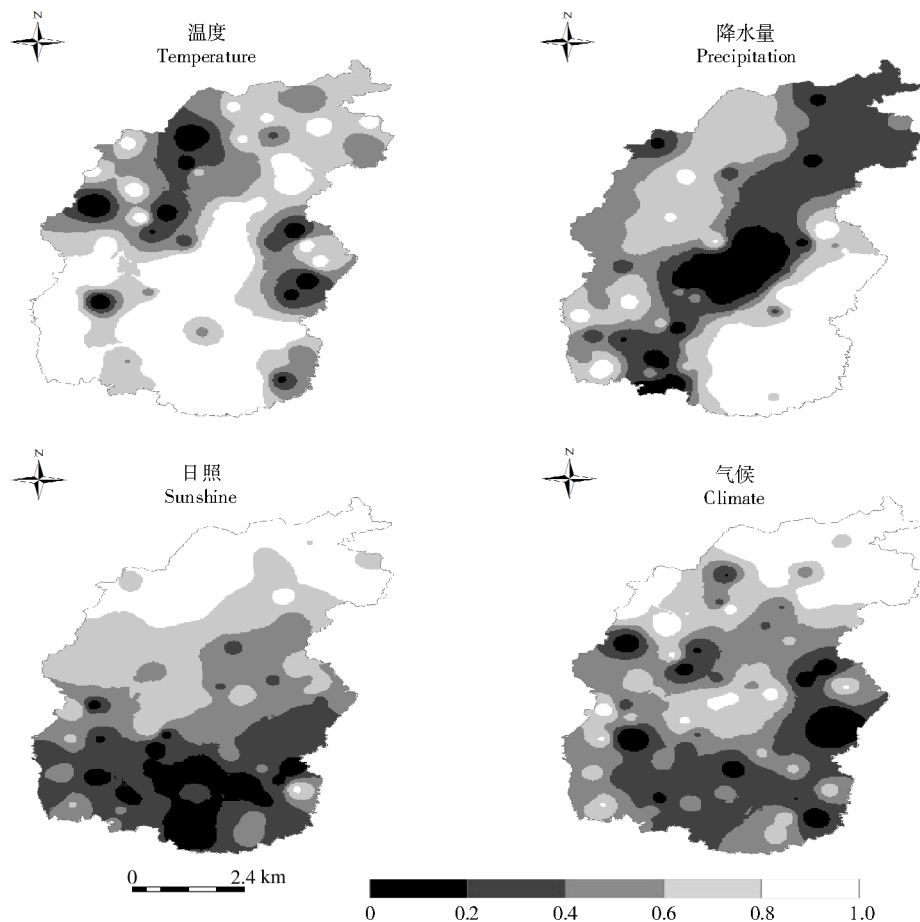


图 6 山西省春玉米各全生育期光、温、水和综合气候适宜性分布
Fig.6 Spatial distribution of sunshine, temperature, precipitation and climate suitability at different growth stages of spring maize in Shanxi province

从图 6 可以看出,春玉米适宜性最好的区域分布于晋北、大同地区以及晋中,较差的区域位于阳泉,临汾和长治的交界处。从气象条件总体来说,北部和中部大部分地区为春玉米种植较适宜区域,东南部地区气候适宜性较差。

2.3 气象条件适宜性模型及合理性检验

为消除不同地区、不同技术的差异,将产量数据进行标准化处理,同时鉴于部分春玉米种植面积小的地区不具有代表性,且对气象条件与产量的分

析有干扰作用,因此,剔除春玉米种植面积小于耕地面积 1/3 的县,将山西省春玉米全生育期光、温、水与产量指标进行回归分析,得到如下公式。

$$Y = 0.59X_T + 0.21X_P + 1.09X_S - 0.46 \quad (10)$$

其中, Y 为春玉米预测气候产量, X_T 、 X_P 、 X_S 分别为春玉米全生育期温度、降水、日照适宜度。

利用公式 1 和公式 10, 计算得到 2021 年山西省各县春玉米气候产量与预测产量, 对上述气象条件适宜性模型进行合理性检验(图 7)(气象站号按照

由北到南的顺序排列)。

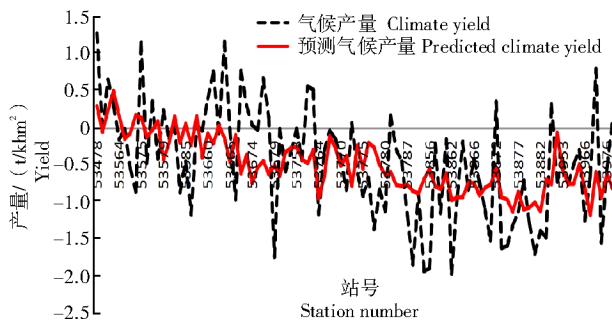


图7 山西省2021年各站春玉米气候产量和预测气候产量变化

Fig.7 Changes of climate yield and predicted climate yield of spring maize at various stations in Shanxi province in 2021

由图7可知,预测值和实际值总体趋势一致,均表现为由北向南逐渐降低,相关系数为0.5097,通过了0.01的极显著性检验,说明本研究建立的春玉米气候适宜度模型能较好地反映山西省春玉米气候适宜性分布和产量变化趋势,可用来评价山西省春玉米生长适宜情况。

3 结论与讨论

山西省春玉米不同生育期气候适宜性结果为:各生育期温度适宜性均表现为晋中、晋南大部分地区非常适宜,晋北大部分地区为轻度适宜,且前期好,后期差,其中出苗期最适宜,乳熟—成熟期最差。降水适宜性表现为播种期和成熟期降水适宜性全省均为非常适宜,出苗期和乳熟期出现轻度不适宜,拔节—开花期全省大部分为中到重度不适宜。各生育期日照适宜性均表现为北部好,中南部差,出苗期最好,成熟期最差。从全生育期来看,温度和降水各生育期变化较小,表现为一致的特征,降水适宜性变化较大,尤其是拔节—开花期,适宜性明显降低,此时发生干旱,俗称“卡脖旱”,即使后期水分条件好转,也会对产量造成极大影响,甚至绝收^[27]。

山西省春玉米气候适宜性空间分布结果为:气温适宜性晋西北和晋东太行山部分地区不适宜,其余地区大部分为适宜;降水适宜性晋中盆地最差,其次为大同盆地、忻定盆地,东南部为适宜;日照适宜性从北到南逐渐降低。综合气候适宜性,晋北、大同以及晋中地区最好,阳泉、临汾和长治的交界处最差。总体来看,北部和中部大部分地区较适宜,东南部较差。这与目前春玉米的种植区分布基本一致。

山西省春玉米产量与气象要素的相关性从高到低依次为日照>温度>降水量,日照时数各生育期(除乳熟期外)与产量的相关性均较高;温度在播

种和出苗期与产量的相关性较高;各生育期降水量与产量的相关性普遍不高,说明降水对产量的影响较小,与以往的研究结果不一致^[28],主要是由于近年来人工灌溉面积逐年增加^[29],在很大程度上造成降水因子对气候产量的影响不明显,掩盖了降水对玉米产量的影响。

综合温度、降水、日照对春玉米产量的影响权重,建立山西省春玉米气候适宜性模型,结合各县产量对模型进行趋势分析和相关分析,结果显示,二者相关性极显著,表明本研究建立的春玉米气候适宜度模型能较好反映山西省春玉米气候适宜性分布和产量变化情况,可用来评价山西省春玉米生长适宜度。

本研究中,春玉米生育期数据是利用全省13个具有代表性的农业气象观测站的数据插值得到,基本能反映研究区春玉米的气候适宜性特征,但是由于观测站点较稀疏,且分布不均匀,东部多西部少,且南北纬度跨度大,导致气候、土壤、地形对作物的生长发育产生的影响过程比较复杂,因此,需进一步结合自然环境分析春玉米气候适宜度的影响因素。此外,影响春玉米产量变化的气候因子,只考虑了光、温、水三要素,事实上风速、持续性干旱以及各因子之间的相互作用等均会对产量造成影响,同时,玉米品种、种植技术、政策等社会因素也会影响其产量,因此,有待于进一步研究各因子对春玉米产量的综合影响。

参考文献:

- [1] 李嗣山,刘庆庆.论中国粮食产业发展的消费政策体系[J].河南工业大学学报(社会科学版),2016,12(4):10-15,21.
LI T S, LIU Q Q. On the consumption policy system of commissariat industry development[J]. Journal of Henan University of Technology (Social Science Edition), 2016, 12(4): 10-15, 21.
- [2] 马树庆.农田水分资源质量的农业气候鉴定方法及应用[J].气象,1987,13(4):46-48.
MA S Q. Agroclimatic identification method and its application of farmland water resources quality[J]. Meteorological Monthly, 1987, 13(4): 46-48.
- [3] 罗怀良,陈国阶,朱波.农业生态气候适宜度研究进展[J].中国农业资源与区划,2004,25(1):28-32.
LUO H L, CHEN G J, ZHU B. Review on suitability of agro-climate[J]. Journal of China Agricultural Resources and Regional Planning, 2004, 25(1): 28-32.
- [4] 魏瑞江,张文宗,李二杰.河北省冬小麦生育期气象条件定量评价模型[J].中国农业气象,2007,28(4):367-370.
WEI R J, ZHANG W Z, LI E J. A quantitative evaluation model of meteorological factors during growing period of winter wheat in Hebei province[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2007, 28(4): 367-370.
- [5] 赵峰,千怀遂,焦士兴.农作物气候适宜度模型研究:以河南省冬小麦为例[J].资源科学,2003,25(6):77-82.
ZHAO F, QIAN H S, JIAO S X. The climatic suitability model

- of crop: a case study of winter wheat in Henan province[J]. Resources Science, 2003, 25(6): 77-82.
- [6] 李阳, 刘静. 宁夏中南部山区马铃薯气候适宜度时空变化特征[J]. 干旱气象, 2020, 38(6): 1001-1008.
LI Y, LIU J. Temporal-spatial characteristics of climate suitability of potato in mountainous area of central and southern Ningxia[J]. Journal of Arid Meteorology, 2020, 38(6): 1001-1008.
- [7] 胡峰, 张建涛, 张杰. 河南省芝麻种植气候适宜度时空变化研究[J]. 河南农业科学, 2023, 52(8): 56-68.
HU F, ZHANG J T, ZHANG J. Study on spatio-temporal variation of climatic suitability of sesame planting in Henan province[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2023, 52(8): 56-68.
- [8] 曹永强, 齐静威, 王菲, 等. 辽宁省春玉米全育期的气候适宜度及年景评估[J]. 地理科学, 2020, 40(7): 1210-1220.
CAO Y Q, QI J W, WANG F, et al. Analysis of climate suitability of spring maize in Liaoning province based on modulus and mathematics[J]. Scientia Geographica Sinica, 2020, 40(7): 1210-1220.
- [9] 魏瑞江, 宋迎波, 王鑫. 基于气候适宜度的玉米产量动态预报方法[J]. 应用气象学报, 2009, 20(5): 622-627.
WEI R J, SONG Y B, WANG X. Method for dynamic forecast of corn yield based on climatic suitability[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2009, 20(5): 622-627.
- [10] 李树岩, 陈怀亮. 河南省夏玉米气候适宜度评价[J]. 干旱气象, 2014, 32(5): 751-759.
LI S Y, CHEN H L. Evaluation studies on climate suitability of summer maize in Henan province[J]. Journal of Arid Meteorology, 2014, 32(5): 751-759.
- [11] 王贺然, 李晶, 张慧, 等. 基于气候适宜度的辽宁省春玉米产量动态预报研究[J]. 安徽农业科学, 2018, 46(23): 121-125, 138.
WANG H R, LI J, ZHANG H, et al. Study on dynamic prediction of spring maize yield based on climate suitability in Liaoning province[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2018, 46(23): 121-125, 138.
- [12] 李秀芬, 马树庆, 宫丽娟, 等. 基于 WOFOST 的东北地区玉米生育期气象条件适宜度评价[J]. 中国农业气象, 2013, 34(1): 43-49.
LI X F, MA S Q, GONG L J, et al. Evaluation of meteorological suitability degree during maize growth period based on WOFOST in northeast China[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2013, 34(1): 43-49.
- [13] BOOGAARD L H. User's guide for the WOFOST 7.1 crop growth simulation model and WOFOST control center 1.5 [M]. Wageningen: DLO Win and Staring Centre, 1998.
- [14] 薛思嘉. 基于产量历史丰歉气象影响指数的河北省马铃薯产量预报[J]. 沙漠与绿洲气象, 2021, 15(3): 137-143.
XUE S J. A dynamic prediction method for potato yield based on influence index for bumper or poor harvest from historical yield in Hebei province[J]. Desert and Oasis Meteorology, 2021, 15(3): 137-143.
- [15] 邱美娟. 基于气候适宜度指数预报玉米产量时句权重系数的确定方法[J]. 中国农业气象, 2018, 39(10): 664-673.
QIU M J. Determination methods of weight coefficient in spring maize yield prediction based on climatic suitability index[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2018, 39(10): 664-673.
- [16] 王媛, 方修琦, 徐铤. 气候变化背景下“气候产量”计算方法的探讨[J]. 自然资源学报, 2004, 19(4): 531-536.
WANG Y, FANG X Q, XU T. A method for calculating the climatic yield of grain under climate change[J]. Journal of Natural Resources, 2004, 19(4): 531-536.
- [17] 邱美娟, 刘布春, 刘园, 等. 春玉米产量动态预报技术的改进方法探索[J]. 气象与环境科学, 2020, 43(1): 1-8.
QIU M J, LIU B C, LIU Y, et al. Exploration of an improved method for yield dynamic prediction of spring maize[J]. Meteorological and Environmental Sciences, 2020, 43(1): 1-8.
- [18] 徐敏, 徐经纬, 高苹, 等. 不同统计模型在冬小麦产量预报中的预报能力评估: 以江苏麦区为例[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(3): 438-447.
XU M, XU J W, GAO P, et al. Evaluation of winter wheat yield prediction ability of different statistical models—a case study of Jiangsu wheat-growing region[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2020, 28(3): 438-447.
- [19] 侯磊, 李靖涛, 周伟, 等. 播期对糯玉米棒三叶生理指标、籽粒品质及产量的影响[J]. 山西农业科学, 2022, 50(2): 170-178.
HOU L, LI J T, ZHOU W, et al. Effect of sowing date on physiological indexes of three-ear-leaves, grain quality and yield of waxy maize[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2022, 50(2): 170-178.
- [20] 王会涛, 袁刘正, 柳家友, 等. 花期高温对玉米的影响研究进展[J]. 河南农业科学, 2022, 51(9): 1-9.
WANG H T, YUAN L Z, LIU J Y, et al. Research progress on effect of high temperature on maize at flowering stage[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2022, 51(9): 1-9.
- [21] 马树庆. 吉林省农业气候研究[M]. 北京: 气象出版社, 1996.
MA S Q. Study on agricultural climate in Jilin province[M]. Beijing: China Meteorological Press, 1996.
- [22] 毛留喜, 魏丽. 大宗作物气象服务手册[M]. 北京: 气象出版社, 2015: 46-52.
MAO L X, WEI L. Handbook of meteorological services for bulk crops[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2015: 46-52.
- [23] 郭慕萍. 山西气候[M]. 北京: 气象出版社, 2015.
GUO M P. Shanxi climate[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2015.
- [24] 何东进, 洪伟. 植被截留降水量公式的改进[J]. 农业系统科学与综合研究, 1999, 15(3): 200-202.
HE D J, HONG W. Study of the improvement of formula of rainfall interception by vegetation[J]. System Sciences and Comprehensive Studies in Agriculture, 1999, 15(3): 200-202.
- [25] RICHARD G A, LUIS S P. Crop evapotranspiration, FAO irrigation and drainage paper 56[R]. Rome: FAO, 1998: 24-25.
- [26] 王宇, 周广胜. 雨养玉米农田生态系统的蒸散特征及其作物系数[J]. 应用生态学报, 2010, 21(3): 647-653.
WANG Y, ZHOU G S. Evapotranspiration characteristics and crop coefficient of rain-fed maize agroecosystem[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(3): 647-653.
- [27] 董朝阳, 刘志娟, 杨晓光. 北方地区不同等级干旱对春玉米产量影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(11): 157-164.
DONG C Y, LIU Z J, YANG X G. Effects of different grade drought on grain yield of spring maize in northern China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(11): 157-164.
- [28] 陈妮娜, 纪瑞鹏, 贾庆宇, 等. 关键发育期干旱对春玉米产量及籽粒品质的影响[J]. 生态学杂志, 2021, 40(6): 1687-1694.
CHEN N N, JI R P, JIA Q Y, et al. Effects of drought stress at key growth stages on yield and grain quality of spring maize[J]. Chinese Journal of Ecology, 2021, 40(6): 1687-1694.
- [29] 王柳, 熊伟, 温小乐, 等. 温度降水等气候因子变化对中国玉米产量的影响[J]. 农业工程学报, 2014, 30(21): 138-146.
WANG L, XIONG W, WEN X L, et al. Effect of climatic factors such as temperature, precipitation on maize production in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(21): 138-146.