



气候因子对东北地区大豆生产的影响效应分析

赵放^{1,2}, 林伟楠³, 赵春亮⁴, 何锋⁵, 孟祥龙⁶, 初征⁵, 李秀芬⁵, 赵慧颖⁵

(1. 中国气象局 沈阳大气环境研究所, 辽宁 沈阳 110166; 2. 哈尔滨市公共气象服务中心, 黑龙江 哈尔滨 150028; 3. 内蒙古呼伦贝尔市陈巴尔虎旗气象局, 内蒙古 呼伦贝尔 021500; 4. 内蒙古呼伦贝尔市新巴尔虎左旗气象局, 内蒙古 呼伦贝尔 021200; 5. 黑龙江省气象科学研究所, 黑龙江 哈尔滨 150030; 6. 呼兰区气象局, 黑龙江 哈尔滨 150076)

摘要: 为了定量、动态、精细地评估气候因子对大豆产量的影响, 本文选取东北地区 1980—2021 年 182 个气象站 5 月中旬至 9 月下旬的旬平均气温、旬降水量、旬日照时数及大豆产量数据, 基于正交多项式、积分回归原理, 以旬为时间尺度, 建立了基于气候因子的大豆产量动态评估模型, 阐明了气候因子对大豆生产的影响效应及其贡献。结果表明: 大豆营养生长期, 旬平均气温、降水量、日照时数对东北地区大豆影响的产量变率, 旬平均气温对吉林省大豆产量的影响最大, 为 $-4.88 \sim 12.02 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; 旬降水量对辽宁省大豆产量的影响最大, 为 $-7.51 \sim 2.38 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; 旬日照时数对黑龙江省大豆产量的影响最大, 为 $-2.60 \sim 2.68 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。大豆营养和生殖生长并进期, 气温对黑龙江省大豆产量的影响为显著正效应、对吉林省和辽宁省的影响为负显著效应, 黑龙江省和辽宁省旬降水量影响为显著负效应, 旬日照时数影响均为负效应, 黑龙江省旬平均气温对产量的影响幅度最大, 为 $3.67 \sim 11.19 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。大豆生殖生长期, 旬平均气温、旬降水量、旬日照时数对大豆产量影响变率排序为: 旬平均气温对其产量影响变率最大的是黑龙江省, 为 $-11.20 \sim 7.11 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 旬降水量和旬日照时数对其产量影响变率最大的是辽宁省, 分别为 $-6.66 \sim 2.84 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $-2.66 \sim 1.49 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。可见, 基于正交多项式和积分回归方法, 可动态、定量评估气候因子对大豆生产的影响效应, 研究结论可为指导大豆生产提供科学依据。

关键词: 大豆生产; 产量变率; 气候影响; 东北地区; 积分回归; 定量评估

Analysis of the Impact of Climatic Factors on Soybean Production in Northeast China

ZHAO Fang^{1,2}, LIN Weinan³, ZHAO Chunliang⁴, HE Feng⁵, MENG Xianglong⁶, CHU Zheng⁵, LI Xiufen⁵, ZHAO Huiying⁵

(1. Institute of Atmospheric Environment, China Meteorological Administration, Shenyang 110166, China; 2. Harbin Public Meteorological Service Center, Harbin 150028, China; 3. Meteorological Bureau of Chenbalhu Banner, Hulunbuir 021500, China; 4. Meteorological Bureau of XinbalhuLeft Banner, Hulunbuir 021200, China; 5. Heilongjiang Province Institute of Meteorological Science, Harbin 150030, China; 6. Hulan District Meteorological Bureau, Harbin 150076, China)

Abstract: In order to quantitatively and dynamically assess the impact of climate factors on soybean yield, this paper selected the 10 days average temperature, 10 days precipitation, 10 days sunshine hours of 182 meteorological stations in Northeast China from mid-May to late September from 1980 to 2021, as well as the corresponding county (city) soybean production data. Based on the principle of orthogonal polynomial and integral regression, ten-day data were taken as the time scale. Dynamic assessment models of soybean yield based on climate factors were established, and the effects of climate factors on soybean production and their contributions were clarified. The results showed that during the vegetative growth period of soybean, the 10 days average temperature, 10 days precipitation and 10 days sunshine hours had the greatest effect on the yield variability of soybean in northeast China. The 10 days average temperature had the greatest effect on soybean yield in Jilin province, ranging from -4.88 to $12.02 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$. The 10 days precipitation had the greatest effect on Liaoning province, ranging from -7.51 to $2.38 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$. And 10 days sunshine hours had the greatest effect on Heilongjiang, ranging from -2.60 to $2.68 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$. During the vegetative and reproductive growth of soybeans, the effect of 10 days average temperature on soybean yield in Heilongjiang province was significantly positive, while that on Jilin and Liaoning was significantly negative. The effect of 10 days precipitation in Heilongjiang and Liaoning was significantly negative, and the effect of 10 days sunshine hours in the three provinces was significantly negative. The effect of 10 days average temperature in Heilongjiang province was the greatest, ranging from 3.67 to $11.19 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$. During the reproductive growth period of soybean, the effect of 10 days average temperature, 10 days precipitation and 10 days sunshine hours on soybean yield was ranked as follows: The influence of 10 days average temperature on yield was the largest in Heilongjiang province, ranging was

收稿日期: 2024-06-28

基金项目: 中国气象局沈阳大气环境研究所开放基金项目(2021SYIAEKFS28); 黑龙江省自然基金项目(LH2020CI05); 国家自然科学基金项目(31801253)。

第一作者: 赵放(1989—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事农业气象与气候变化影响评估。E-mail: 406154908@qq.com。

通讯作者: 林伟楠(1991—), 女, 硕士, 工程师, 主要从事应用气象研究。E-mail: zhaohyy2008@aliyun.com。

-11.20 to 7.11 kg·ha⁻¹, and that of 10 days precipitation and 10 days sunshine hours was the largest in Liaoning province, the range was -6.66 to 2.84 kg·ha⁻¹ and -2.66 to 1.49 kg·ha⁻¹, respectively. It can be seen that the effects of climate factors on soybean production can be evaluated dynamically and quantitatively based on orthogonal polynomial and integral regression method, and the research conclusions can provide scientific basis for guiding soybean production.

Keywords: soybean production; yield variability; climate effect; northeast China; integral regression; quantitative assessment

大豆原产于中国,栽培历史悠久,是我国重要的粮油饲兼用作物。随着生活水平的提高和畜牧业的快速发展,人们对大豆的需求超过了国内生产的供应,产需缺口逐渐扩大,中国从大豆净出口国转变为净进口国^[1]。针对中国资源禀赋和生产实际,中共中央调整农业种植策略,2018 年中央一号文件明确提倡并鼓励种植大豆,中国农业农村部于 2019 年制定并发布“大豆振兴计划实施方案”^[2],2022 年中央一号文件进一步提出“大力实施大豆和油料产能提升工程”^[3]。东北地区作为最主要的大豆优势产区,其大豆产量占全国生产总量的 1/2^[1]。然而,东北地区是我国气候变化最显著的地区之一,气温波动上升,同时降水量减少,暖干化趋势明显^[4],这直接决定大豆产量的高低^[5-7]。因此,在气候变化背景下,研究光照、气温、降水对大豆生长发育及产量形成的影响,揭示大豆生产与生长季农业气候资源之间关系,建立基于气候因子变化的大豆产量动态评估模型,为大豆适应气候变化、合理种植及防灾减灾提供科学参考,对保障国家粮食安全战略具有重要的理论与实践意义。

东北地区位于中高纬度、地球环境变率最大的季风气候区,是受气候变化影响的敏感区域之一。大豆生长对气候变化较敏感,气候波动是造成大豆产量不稳定的重要因素^[5-9]。1981—2010 年,我国农业气象观测站实际观测大豆播期和开花期分别以 1.78 d·(10 a)⁻¹和 0.19 d·(10 a)⁻¹的速率推迟,全生长季和营养生长阶段长度缩短,生殖生长阶段日数延长,同时在气候变化背景下,极端天气事件频发,直接影响大豆生长发育和产量形成^[9],例如,大豆受温度限制引起的产量潜力平均损失率高达 51%^[10]。气候变化引发的干旱和雨涝是大豆生产的主要气象灾害^[11],大豆开花~鼓粒期,旱涝与大豆产量的波动密切相关,中度及以上干旱、雨涝均会造成大豆减产^[12-13]。大豆生育期内热量、光照、水分等条件与其产量密切相关^[12-14],播种~出苗期的降水量、开花~结荚期的气温、结荚~鼓粒期的日照时数与大豆产量相关性均较高^[15]。

前人针对大豆生长发育关键期气象条件与大豆单产的相关性进行了研究,揭示了大豆单产与气

象条件的关系,大多数成果是选取大豆 1 个发育期或多个发育期进行定性研究^[9, 16-17],这在指导大豆生产时有很大的局限性。本研究针对大豆全生育期,研究大豆生长发育及产量形成的气候机制,构建气候评估模型,明确旬平均气温、旬降水量、旬日照时数对大豆生长发育及产量形成影响的贡献率。

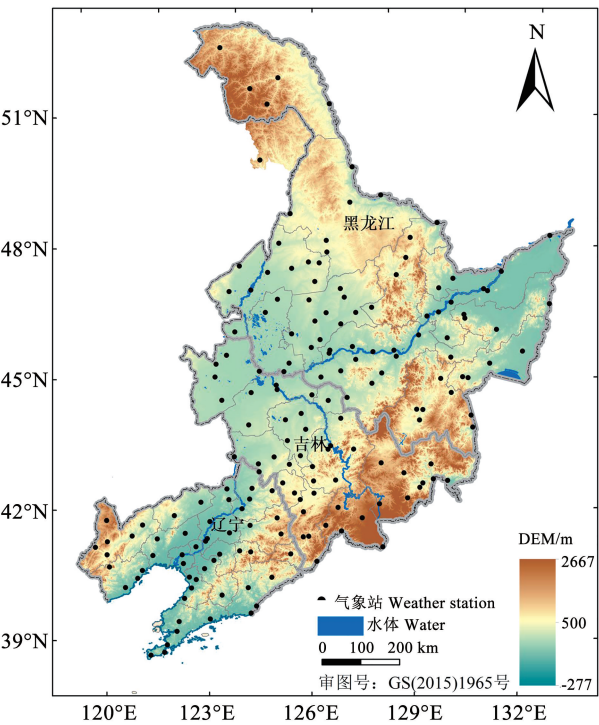
本研究选取东北三省大豆种植区为研究区,利用东北地区 1980—2021 年 182 个气象站 5 月中旬至 9 月下旬的旬平均气温、旬降水量、旬日照时数及对应县(市)的大豆产量数据,基于正交多项式、积分回归原理,分析旬平均气温、旬降水量和旬日照时数对大豆生长发育及产量形成的影响,计算各因子各生长发育时段对大豆气象单产的影响系数,建立大豆单产气象评估模型,定量动态精细评估气候因子对大豆产量的影响,为构建大豆生产气候评估模型、系统指导大豆生产提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域与资料

东北三省(黑龙江省、吉林省和辽宁省)地处中高纬度、地球环境变化速率最大的季风气候区。作物生长季 5—9 月气温较高,降水丰沛,光照时间充足,尽管受到东北季风和西南气流的影响,气候要素具有明显的不稳定性和不均衡性,但是农业气候资源丰富,适宜农作物生长,主要农作物包括玉米、水稻和大豆,是中国主要的粮食生产基地之一。

本研究选取东北地区 182 个气象站(黑龙江省 80 个、辽宁省 52 个、吉林省 50 个)数据:1980—2021 年 5 月上旬至 9 月下旬的旬平均气温、旬降水量、旬日照时数资料;县域大豆产量资料;黑龙江省 23 个农业气象站观测的大豆生长发育期资料(包括实际测产资料),最长资料年代为 1980—2021 年,最短连续观测年份数也达到了 13 年(2008—2020 年);哈尔滨、富裕、五大连池 3 个站大豆分期播种试验,资料年代为 2015—2020 年。所有数据来自东北三省气象局和统计局及中国气象数据网(<http://data.cma.cn>),均经过了严格的质量控制和检查。气象站点分布如图 1 所示。



注:该图基于审图号为GS(2015) 1965号的标准地图制作,底图无修改。

Note:The map was based on the standard map with the drawing review No. GS (2015) 1965, and the base map was not modified.

图1 东北地区气象站点分布示意图

Fig. 1 Distribution of topography and meteorological stations in northeast China

1.2 研究方法

1.2.1 资料处理方法 采用时间降尺度方法,将大豆全生育期5月中旬至9月下旬以每一旬为单位分成14个生物时段($n=14$),然后将气温(T)、降水量(R)和日照时数(S)3个因子以5月中旬为起始旬,9月下旬为终止旬,分为14个旬,这样每个省域5月中旬至9月下旬,旬平均气温、旬降水量和旬日照时数因子数为42个,共计126个气象因子。

1.2.2 大豆气象产量模拟方法 以大豆单产资料作为分析对象,将每年的实际产量(y)看作是趋势产量(y_t)与气象产量(y_c)之和,即: $y=y_t+y_c+\varepsilon$,式中, ε 为随机噪声,由于所占比例很小,实际计算时可忽略不计; y_t 是在各地土壤、气候条件下,农业生产逐步提高的结果; y_c 主要是由每年作物生长期气象条件的利弊而决定的,可以是负值或正值,为正值时表示气象条件有利,增产;为负值时表示气象条件不利,减产。

采用正交多项式法^[18]提取 y_c 。 y_c 可由 $y-y_t$ 得到。

1.2.3 大豆气象敏感系数构建 积分回归分析方

法^[19-21]被广泛应用在气象与气候学这样的多要素领域,它的最大特点是降维个数多,原信息损失少。积分回归法的基本思想就是利用正交多项式,即常用切比雪夫多项式,把原来较多自变量化为较少数自变量。然后,用一般多元回归分析法求出新变量回归模型,最后再根据其基本原理求出原自变量的回归参数,用于分析自变量与因变量之间相关性和相关程度。

数学模型: $y_c=C+\sum_{i=0}^k\int_0^1a_i(t)x_i(t)dt\quad i=1,2,\cdots,k$,其中: y_c 为用各时段各气象要素估计的大豆产量; k 为气象要素个数; $a_i(t)$ 为 $t+\Delta t$ 时刻的第 i 个气象要素每变化1个单位时,对大豆产量的影响效果; $x_i(t)$ 为 $t+\Delta t$ 时刻的第 i 个气象要素值; C 为常数项。

在实际工作中, $a_i(t)$ 的时间正交多项式函数展开式为: $a_i(t)=\sum_{j=0}^ma_{i,j}\psi_j(t)j=0,1,2,\cdots,m$,式中, m 为展开项次; $\psi_j(t)$ 为时间的正交多项式(查正交多项式表)。则 Y_c 可写为:

$$y_c=C+\sum_{i=0}^k\sum_{j=1}^m\rho_{i,j}a_{i,j}(t)$$

在实际工作中,计算 $\rho_{i,j}$ 的公式为: $\rho_{i,j}=\sum_{t=1}^na_j(t)x_j(t)t=1,2,\cdots,n$,式中, n 为生物时段。

1.2.4 大豆生长气候评估模型构建 在分析的基础上,构建气温、降水和日照对大豆生长影响的评价和评估、预评估模型为:

$$\begin{cases} F_i=\sum a_{T_i}(T_i-T_{i,0}) \\ E_i=\sum a_{R_i}(R_i-R_{i,0}) \\ Z_i=\sum a_{S_i}(S_i-S_{i,0}) \end{cases} i=1,2,\cdots,n$$

$Y_i=\alpha F_i+\beta E_i+\gamma Z_i$,式中 T_i 、 R_i 、 S_i 表示作物生长 i 时段旬平均气温、旬降水与旬日照时数实时和预报值, $T_{i,0}$ 、 $R_{i,0}$ 、 $S_{i,0}$ 表示对应的气温、降水与日照适宜指标值, a_{T_i} 、 a_{R_i} 、 a_{S_i} 表示旬平均气温产量变化率、旬降水产量变化率与旬日照时数产量变化率, α 、 β 、 γ 表示旬平均气温、旬降水、旬日照时数对大豆气候产量变化的贡献率权重系数,以3个模型拟合结果与气象产量间的复相关系数为权重进行加权平均获得^[22-24]。 F_i 、 E_i 、 Z_i 为旬平均气温、旬降水、旬日照分别形成的大豆气候产量, Y_i 为3个气象因子评价与评估时段综合影响形成的大豆气候产量。

2 结果与分析

2.1 气象产量确定

本文选取东北地区大豆种植区为研究区,计算1980—2021年气象产量。作物产量通常定义为:单位面积上所获得的籽粒重量,它有两大大限制因素,受气象条件、气象灾害等环境因素影响部分叫气象产量,受当地的政策水平、农业技术措施、栽培管理

水平等影响部分称作趋势产量。为了分析气象条件对大豆产量形成的影响,根据作物产量的定义将大豆产量分解成趋势产量和气象产量之和。本研究采用正交多项式计算大豆趋势产量,即大豆气象产量 y_c 可分解为实际产量 y 与趋势产量 y_t 的差值。东北大豆趋势产量方程详见表1,大豆产量趋势方程均通过了0.001信度显著性检验。实践证明,选用正交多项式计算大豆趋势产量较适合本研究区。

表1 东北地区大豆各种植区趋势产量拟合方程
Table 1 Fitting equations for trend yield of various soybean planting areas in northeast China

分区 Zones	方程 Equations	r	P
黑龙江 Heilongjiang	$y_t = 1710.375 + 13.305 \psi_1 - 0.616 \psi_2 + 0.158 \psi_3 + 0.001 \psi_4 - 7.64 \times 10^{-6} \psi_5$	0.582	0.001
吉林 Jilin	$y_t = 2039.427 + 24.038 \psi_1 - 1.964 \psi_2 - 0.032 \psi_3 + 0.002 \psi_4 + 2.28 \times 10^{-5} \psi_5$	0.707	0.001
辽宁 Liaoning	$y_t = 1631.128 + 38.155 \psi_1 + 0.062 \psi_2 - 0.268 \psi_3 - 0.002 \psi_4 - 1.44 \times 10^{-5} \psi_5$	0.791	0.001

2.2 大豆生长气象模拟方程及敏感系数

利用大豆全生育期5月中旬至9月下旬按旬分成14个生物时段($n=14$)对应的旬平均气温(T)、旬降水量(R)和旬日照时数(S)资料,与气象产量资料,采用积分回归原理及正交函数的性质,模拟出12组模型如表2所示,在12组模型中,8组模型通过了 $P<0.001$ 的显著性检验,4组模型通过了 $P<0.05$ 的显著性检验,可见模型模拟准确率很高。

气温、降水、日照时数的时间分布与大豆产量的影响变化率,也称敏感系数,一般由 $a_T(t)$ 、 $a_R(t)$ 、 $a_S(t) \in a_it$ 表示,单位: $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot q^{-1}$,其中, q 分别指1个单位的旬平均气温、旬降水量和旬日照时数。

敏感系数 a_it 值计算结果列于表3。敏感系数 a_it 值 >0 ,这一时段气象因子对大豆产量影响为正效应,气象因子在量上增加或减少1个气象单位,大豆产量增加或减少 a_it 值 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$;敏感系数 a_it 值 <0 ,这一时段气象因子对大豆产量影响为负效应,气象因子在量上增加或减少1个气象单位,大豆产量减少或增加 a_it 值 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。不难看出, a_it 值不仅能表征气象因子对大豆产量的定量影响,还能很好地描述大豆在一个生长周期内各个生长发育时段气象因子影响产量的贡献率,依据气象因子影响大豆产量贡献率的大小,很容易确定气象因子影响大豆生长的关键时期。

表2 东北地区以一句为单位气象要素的大豆产量评估方程及敏感函数
Table 2 Evaluation equations for soybean yield in northeast China based on meteorological elements in 10 days

分区 Zones	大豆产量评估方程及敏感函数 Soybean yield evaluation equation and sensitivity coefficient	r	P
黑龙江 Heilongjiang	$y_c = 1365.356 + 0.068 \rho_{4,T} - 0.034 \rho_{6,T} - 0.769 \rho_{1,R} - 0.028 \rho_{4,R} - 0.010 \rho_{5,R}$ $- 0.952 \rho_{1,S} + 0.121 \rho_{3,S} - 0.014 \rho_{5,S}$ $a_T(t) = 0.068 \psi_3 - 0.034 \psi_5$ $a_R(t) = -0.769 \psi_0 - 0.028 \psi_3 - 0.010 \psi_4$ $a_S(t) = -0.952 \psi_0 + 0.121 \psi_2 - 0.014 \psi_4$	0.543	0.001
吉林 Jilin	$y_c = -77.913 + 0.486 \rho_{3,T} - 0.040 \rho_{4,T} + 0.239 \rho_{1,R} - 0.056 \rho_{3,R} + 0.004 \rho_{6,R} + 0.084 \rho_{3,S} - 0.004 \rho_{4,S}$ $a_T(t) = 0.486 \psi_2 - 0.040 \psi_3$ $a_R(t) = 0.239 \psi_0 - 0.056 \psi_2 - 0.004 \psi_5$ $a_S(t) = 0.084 \psi_2 - 0.004 \psi_3$	0.410	0.050
辽宁 Liaoning	$y_c = -65.340 - 0.048 \rho_{3,T} + 0.019 \rho_{6,T} + 0.033 \rho_{2,R} - 0.306 \rho_{5,R} - 0.378 \rho_{1,S} + 0.119 \rho_{3,S} - 0.012 \rho_{5,S}$ $a_T(t) = -0.048 \psi_2 + 0.019 \psi_5$ $a_R(t) = 0.033 \psi_1 - 0.306 \psi_4$ $a_S(t) = -0.378 \psi_0 + 0.119 \psi_2 - 0.012 \psi_4$	0.681	0.001

表3 东北地区以旬为单位气象要素的大豆产量敏感系数

Table 3 Sensitivity coefficient of soybean yield in northeast China based on meteorological elements in 10 days

单位: $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{q}^{-1}$

旬序 Sequence	黑龙江 Heilongjiang			吉林 Jilin			辽宁 Liaoning		
	$a_T(t)$	$a_R(t)$	$a_S(t)$	$a_T(t)$	$a_R(t)$	$a_S(t)$	$a_T(t)$	$a_R(t)$	$a_S(t)$
A ₁	-4.86	1.77	2.68	12.02	1.06	1.61	-3.38	-7.51	-0.60
A ₂	-7.11	0.29	0.05	3.84	-0.59	0.63	3.26	-0.83	1.41
A ₃	0.00	-1.29	-1.66	-1.66	-0.65	-0.07	2.44	1.96	1.49
A ₄	7.62	-2.57	-2.60	-4.88	-0.24	-0.52	-0.44	2.38	0.52
A ₅	11.19	-3.26	-2.92	-6.22	0.03	-0.76	-2.43	1.65	-0.81
A ₆	9.49	-3.24	-2.76	-6.07	-0.06	-0.83	-2.45	0.68	-1.99
A ₇	3.67	-2.49	-2.26	-4.84	-0.45	-0.76	-0.77	0.07	-2.66
A ₈	-3.67	-1.17	-1.57	-2.93	-0.93	-0.59	1.54	0.14	-2.66
A ₉	-9.49	0.46	-0.83	-0.73	-1.21	-0.35	3.13	0.88	-1.99
A ₁₀	-11.2	1.98	-0.19	1.36	-1.07	-0.08	2.92	1.98	-0.81
A ₁₁	-7.62	2.84	0.22	2.94	-0.46	0.18	0.64	2.84	0.52
A ₁₂	0.00	2.35	0.24	3.61	0.40	0.41	-2.64	2.55	1.49
A ₁₃	7.11	-0.31	-0.26	2.96	0.90	0.55	-3.93	-0.11	1.41
A ₁₄	4.86	-6.12	-1.44	0.61	-0.08	0.58	2.12	-6.66	-0.60

注:5月中旬至9月下旬旬序为A₁……A₁₄。

Note: From mid-May to late-September, the sequence is A₁... A₁₄.

2.3 确定权重系数

本文利用积分回归方法分别建立大豆全生育期间5月中旬至9月下旬平均气温、旬降水量和旬日照时数3个气象因子与气象产量间的关系模型,然后以3个模型拟合结果与气象产量间的复相关系数为权重进行加权平均,即可得到东北地区各个区

域旬平均气温、旬降水量和旬日照时数对大豆产量贡献率即权重系数,计算结果列于表4。可见,旬平均气温、旬降水量和旬日照时数对大豆产量贡献率排序,黑龙江为旬平均气温>旬降水量>旬日照时数,吉林和辽宁均为旬降水量>旬平均气温>旬日照时数。

表4 东北地区旬平均气温、旬降水量和旬日照时数对大豆产量贡献率(即权重系数)

Table 4 Contribution rate of temperature, precipitation, and sunshine hours per 10 days to soybean yield in northeast China (i. e. weight coefficient)

省域 Province	种植区 Plant area	气温权重(α) Weight of temperature	降水量权重(β) Weight of precipitation	日照时数(γ) Weight of sunshine hours
黑龙江 Heilongjiang	全域 Whole area	0.39	0.33	0.28
吉林 Jilin	全域 Whole area	0.33	0.36	0.31
辽宁 Liaoning	全域 Whole area	0.35	0.38	0.27

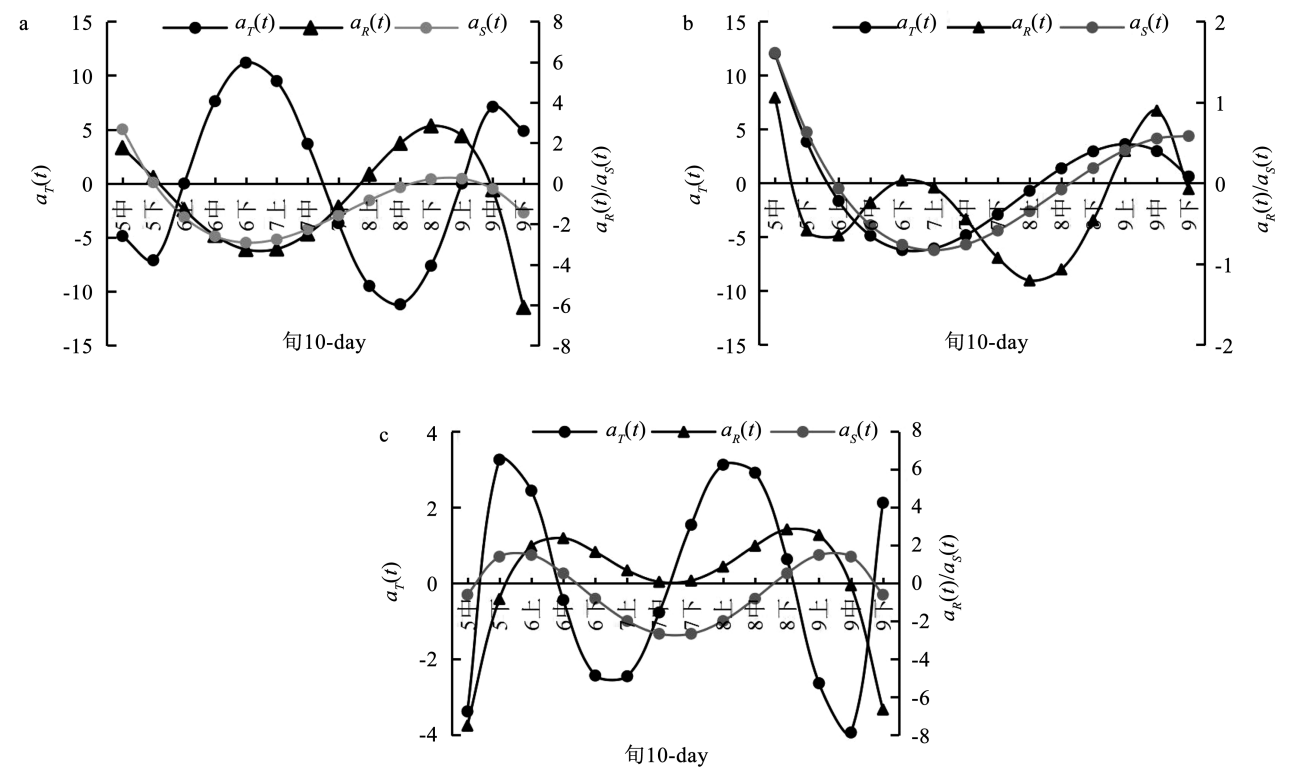
2.4 气象因子对东北地区大豆生长影响效应分析

为了分析大豆生长发育产量与气候条件的定量关系,首先在分析东北三省大豆生长发育期的基础上,将大豆全生育期划分为:大豆营养生长前期大致为播种至三真叶期,一般在5月中旬至6月中旬,40 d左右;大豆营养生长和生殖生长并进期大致为分枝至开花期,一般在6月下旬至7月中旬,30 d左右;大豆生殖生长期大致为结荚至成熟期,一般在7月下旬至9月下旬,70 d左右。7月中旬至9月上旬大豆生长先后进入结荚期、鼓粒及乳熟期,

同时大豆也进入了生殖生长关键期。其次将各省域的旬平均气温、旬降水量、旬日照时数的时间分布与大豆产量的影响敏感系数 a_{it} 值绘制成曲线图,时间尺度为10 d,发现曲线存在明显的谷值区和峰值区,能体现 a_{it} 变化趋势和变化幅度,谷值和峰值变化分别对应于大豆营养生长中后期、营养生长和生殖生长并进期及生殖生长前中期,表明这3个阶段是大豆产量形成的关键期,为了分析明确,将大豆生育期及其对应生长时段列于表5,以敏感系数 a_{it} 值绘制成的曲线图详见图2。

表 5 东北地区大豆平均发育期及对应生长时段

关键期 Critical period	发育期 Growth stage	生长时段 Growth period
营养生长期 Nutritional growth period(N)	播种 ~ 三真叶期 Sowing-Third ternately compound leaf stage	5 月中旬—6 月中旬 Mid May-Mid June
营养和生殖生长并进期 Nutritional and reproductive common growth period(N & R)	分枝 ~ 开花期 Branch-Bloom stage	6 月下旬—7 月中旬 Late June-Mid July
生殖生长期 Reproductive growth period(R)	结荚 ~ 成熟期 Podding-Maturity stage	7 月下旬—9 月下旬 Late July-Late September



注:a. 黑龙江;b. 吉林;c. 辽宁。
Note:a. Heilongjiang; b. Jilin; c. Liaoning.

图 2 东北地区以 10 d 为单位气象要素的大豆产量敏感系数变化图
Fig. 2 Sensitivity coefficient variation of soybean yield in northeast China based on a unit meteorological factor of 10 days

2.4.1 气象因子对大豆营养生长期的影响效应
大豆营养生长期为播种至三真叶期,一般在 5 月中旬至 6 月中旬 40 d 左右,图 2 和表 3 表明,东北地区旬平均气温、旬降水量、旬日照时数敏感系数变化图类似“正弦图像”,具有不规则的周期变化,区间内升、降趋势明显,且能确定极值。旬平均气温对大豆营养生长期的影响效应为:黑龙江为负—正效应,吉林为正—负效应,辽宁为负—正—负效应,最大值分别为 7.26,12.02 和 3.26 kg·hm⁻²·℃⁻¹。在大豆生长气象适宜指标范围内,当旬平均气温

每升高 1℃,大豆的产量变化依次为 -7.11 ~ 7.62 kg·hm⁻²、-4.88 ~ 12.02 kg·hm⁻²和 -3.38 ~ 3.26 kg·hm⁻²。旬降水量对大豆营养生长期的影响效应为:黑龙江、吉林为正—负效应,辽宁为负—正效应,最大值分别为 1.77,1.06 和 2.38 kg·hm⁻²·mm⁻¹;在大豆生长气象适宜指标范围内,旬降水量每增加 1 mm,大豆的产量变化依次为 -2.57 ~ 1.77 kg·hm⁻²、-0.65 ~ 1.06 kg·hm⁻²和 -7.51 ~ 2.38 kg·hm⁻²。旬日照时数对大豆营养生长期的影响效应为:黑龙江、吉林为正—负效应,辽宁为负—正效应,最大值

分别为2.68,1.61和1.49 kg·hm⁻²·h⁻¹。在大豆生长气象适宜指标范围内,当旬日照时数每增加1 h,大豆的产量变化依次为-2.60~2.68 kg·hm⁻²、-0.52~1.61 kg·hm⁻²和-0.6~1.49 kg·hm⁻²。

2.4.2 气象因子对大豆营养生长和生殖生长并进期的影响效应 大豆营养生长和生殖生长并进期大致为分枝至开花期,一般在6月下旬至7月中旬30 d左右,图2和表3表明,旬平均气温对大豆营养生长和生殖生长的影响效应为:黑龙江正效应显著、吉林和辽宁负效应显著,变化幅度黑龙江>吉林>辽宁,在大豆生长气象适宜指标范围内,当旬平均气温每升高1℃,大豆的产量变化依次为3.67~11.19 kg·hm⁻²、-4.84~-6.22 kg·hm⁻²和-0.77~-2.45 kg·hm⁻²。旬降水量对大豆营养生长期的影响效应为:黑龙江负效应显著、吉林由弱的正效应转为负效应,辽宁负效应显著,变化幅度为黑龙江>辽宁>吉林,在大豆生长气象适宜指标范围内,当旬降水量每增加1 mm,大豆的产量变化依次为-2.49~-3.26 kg·hm⁻²、-0.45~0.03 kg·hm⁻²和-0.77~-2.45 kg·hm⁻²。旬日照时数对大豆营养生长期的影响效应为:黑龙江、吉林和辽宁均为负效应,最值分别为-2.92,-0.83和-2.66 kg·hm⁻²·h⁻¹。在大豆生长气象适宜指标范围内,当旬日照时数每增加1 h,大豆的产量变化依次分别为-2.26~-2.92 kg·hm⁻²、-0.76~-0.83 kg·hm⁻²和-0.81~-2.66 kg·hm⁻²。

2.4.3 气象因子对大豆生殖生长期的影响效应 大豆生殖生长期大致为结荚至成熟期,一般在7月下旬至9月下旬70 d左右。7月中旬至9月上、中旬大豆生长先后进入结荚期、鼓粒及乳熟期,同时大豆也进入了生殖生长关键期。图2和表3表明,旬平均气温对大豆生殖生长的影响效应为:黑龙江7月下旬至8月下旬负效应显著,9月中、下旬正效应显著,吉林7月下旬至8月上旬为负效应,8月中旬至9月下旬正效应显著,辽宁7月下旬至8月下旬及9月下旬呈显著正效应,9月上、中旬负效应显著,变化幅度为黑龙江>辽宁>吉林,在大豆生长气象适宜指标范围内,当旬平均气温每升高1℃,大豆的产量变化依次分别为-11.20~7.11 kg·hm⁻²、-2.93~3.61 kg·hm⁻²和-3.93~3.13 kg·hm⁻²。旬降水量对大豆生殖生长期的影响效应为:黑龙江8月上旬至9月上旬正效应显著,其余时段为负效应,吉林7月下旬至8月下旬、9月下旬为负效应,9月上、中旬为正效应,辽宁7月下旬至9月上旬呈正效应,9月中、下旬为负效应,变化幅度为黑龙江

>辽宁>吉林,在大豆生长气象适宜指标范围内,当旬降水量每增加1 mm,大豆的产量变化依次分别为-6.12~2.84 kg·hm⁻²、-1.21~0.90 kg·hm⁻²和-6.66~2.84 kg·hm⁻²。旬日照时数对大豆生殖生长期的影响效应为:黑龙江8月下旬至9月上旬呈弱的正效应,其余时段为负效应,吉林8月下旬至9月下旬呈正效应,其余时段为负效应,辽宁8月下旬至9月中旬呈正效应,其余时段为负效应,变化幅度为辽宁>黑龙江>吉林。在大豆生长气象适宜指标范围内,当旬日照时数每增加1 h,大豆的产量变化依次为-1.57~0.24 kg·hm⁻²、-0.59~0.58 kg·hm⁻²和-2.66~1.49 kg·hm⁻²。

2.4.4 气象因子对东北地区大豆生产的影响评估示例 本文选取东北地区2022年大豆生长季5月中旬至9月下旬的气温、降水量及日照时数14旬数据,依据本文1.2.4节表达式及表3和表4数据,结合本文计算获得东北三省大豆生长的旬平均气温、旬降水量及旬日照时数适宜指标,获得2022年东北地区大豆生长发育气象评价与评估数据,计算结果列于表6。

分析表6可知,2022年东北地区大豆生长季光温水匹配较理想,气温、降水量、日照时数对大豆生长发育和产量形成的影响属正常偏好气候年型,分析评估大豆气象产量与2022年大豆实际产量比值,东北地区大豆年景总体属丰年,黑龙江省为丰年,吉林为平年偏丰,辽宁为平年略减年景,黑龙江、吉林、辽宁大豆生长季5月中旬至9月下旬气象产量变化分别为14.76~195.48 kg·hm⁻²、-0.12~76.75 kg·hm⁻²和37.72~-64.99 kg·hm⁻²。分析光温水对大豆生长发育及产量形成的影响,发现降水量是大豆减产的主要气象因子,其次是气温。辽宁因降水量使大豆减产的表现最突出,大豆生长季、营养生长期、生殖生长期因降水量引起的气象产量变化分别为-3.57~-161.50 kg·hm⁻²、14.50~-8.46 kg·hm⁻²和-68.69~-172.55 kg·hm⁻²,大豆生长季和生殖生长期因降水量偏多,多于降水量适宜指标上限,诱发洪涝灾害而使大豆减产,营养生长期因降水量偏少导致大豆阶段性生理干旱使其减产。吉林因气温使大豆减产的表现明显,大豆生长季、营养生长期、营养生长和生殖生长并进期、生殖生长期因气温导致的气象产量变化分别为-9.54~-3.96 kg·hm⁻²、0.78~-6.67 kg·hm⁻²、-7.46~10.18 kg·hm⁻²和-2.87~-7.47 kg·hm⁻²。日照时数对大豆产量的影响相对气温、降水量而言表现较好,仅辽宁大豆营养生长期为减产效应显著,气

象产量变化为 $-14.89 \sim -36.88 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。不同地区及生长时段大豆减产的影响因子差异较大,大豆减产生长时段,黑龙江、辽宁为生殖生长期,产量变化(Y_i)分别为 $-13.38 \sim 25.74 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $-39.52 \sim 25.74 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,吉林为营养生长期,产量变化(Y_i)为 $-6.87 \sim -17.58 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,分析原因,生殖生长

期7月下旬至9月下旬,黑龙江日照时数影响大豆产量变化为 $-8.25 \sim 24.66 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,常由阴雨寡照协同作用导致大豆减产;辽宁常因降水量异常偏多导致洪涝灾害而减产;吉林大豆减产生长时段为营养生长期,气温影响大豆产量变化为 $0.78 \sim -6.67 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,常常因高温干旱协同作用使大豆减产。

表6 2022年东北地区大豆生长发育气象评价与评估
Table 6 Meteorological evaluation and assessment of soybean growth in northeast China in 2022

单位: $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$

省域 Province	生长时段 Growth period	F_i	E_i	Z_i	Y_i
黑龙江 Heilongjiang	营养生长 N	10.12 ~ 14.42	-5.60 ~ 8.31	14.15 ~ 21.52	18.67 ~ 44.25
	营养生长 + 生殖生长并进 N & R	20.39 ~ -10.17	-45.96 ~ 68.20	35.04 ~ 99.37	9.47 ~ 157.4
	生殖生长 R	0.88 ~ 27.85	-6.01 ~ -26.77	-8.25 ~ 24.66	-13.38 ~ 25.74
	全生育期 Whole growth period	31.39 ~ 32.10	-57.57 ~ 47.75	40.94 ~ 115.63	14.76 ~ 195.48
吉林 Jilin	营养生长 N	0.78 ~ -6.67	-17.60 ~ -16.41	9.95 ~ 5.50	-6.87 ~ -17.58
	营养生长 + 生殖生长并进 N & R	-7.46 ~ 10.18	-3.48 ~ 8.50	11.85 ~ 45.42	0.91 ~ 64.1
	生殖生长 R	-2.87 ~ -7.47	0.15 ~ 45.82	8.62 ~ 2.88	5.90 ~ 41.23
	全生育期 Whole growth period	-9.54 ~ -3.96	-20.99 ~ 37.90	30.41 ~ 42.81	-0.12 ~ 76.75
辽宁 Liaoning	营养生长 N	2.30 ~ -0.22	14.50 ~ -8.46	-14.89 ~ -36.88	1.91 ~ -45.56
	营养生长 + 生殖生长并进 N & R	-5.17 ~ 1.27	50.62 ~ 19.51	29.88 ~ 78.88	75.33 ~ 99.66
	生殖生长 R	7.22 ~ 2.79	-68.69 ~ -172.55	21.95 ~ 50.67	-39.52 ~ -119.09
	全生育期 Whole growth period	4.35 ~ 3.84	-3.57 ~ -161.50	36.94 ~ 92.67	37.72 ~ -64.99

3 讨论

以往大多数学者研究作物生长发育及产量形成对光温水因子需求时,选取作物几个关键生长期^[15-16, 24-26],研究气象要素与气象产量的相关关系,确定定性的气象适宜指标,或用气象要素历史均值代替作物生长气象适宜指标,从农业气象学的角度分析,用其描述作物全生育期生长发育对气象条件的响应难免具有片面性,本研究以大豆全生育期为研究对象,尝试研究逐旬及逐旬累加的光温水组成的气象条件对大豆生长发育及产量的影响模拟,结合研究分析及大豆生长试验数据,综合确定量的气象适宜指标,指标的生物学意义更能贴近大豆生长发育对气象条件的需求规律。

关于气象要素和气象灾害对粮食作物生长及产量影响的模拟与评估成果较多^[27-29],但很少有采用光温水三大因子组成的气象条件对大豆生长发育及产量的影响进行模拟及评估,本研究采用正交多项式和积分回归方法,在大豆生长全生育期内,分析了旬尺度的光、温、水气象因子对大豆气象产量的影响,并采用产量影响敏感系数来衡量气象因

子在各阶段对最终气象产量形成的影响程度,揭示大豆生长对光温水三大因子的敏感期和敏感程度,实现了为大豆生产提供实时定量动态气象评价与评估及预评估。但是积分回归法仍属于统计模型,在解释作物生长对气象条件的响应机理方面具有它的局限性,能否与不同作物生长模型嵌套融合建立新型作物生长气象评价与评估及预估模型,或借鉴作物生长模型创建思想,改进传统积分回归模型,在作物生长气象评估中赋予它较强的机理性,进一步探讨大豆不同生育阶段、不同气候因子效应的机理,这是今后重点研究任务。

在气候变化背景下,探讨和研究各气候因子变化对作物生长发育及产量形成的影响和贡献,是进一步理解和评估气候变化影响农业生产的机理和机制的有效途径之一。尽管气候变化对农业生产系统的影响评估研究工作起步较早,但因农业生产系统具有复杂、动态、多变的特性,使得研究进展缓慢,在作物生长全生育期内,动态的、定量的、多气候因子的气候影响评估成果尚不多见,本研究尝试实现这一目标,而在评估气候变化影响农业生产系统的很多研究方向上,仍存在很多科学问题亟待探

讨和深入研究。因此,改变以往气象条件对作物生长发育及产量形成影响的静态定性评价和评估技术,采用动态定量评价和评估技术,建立定性和定量相结合、静态和动态相结合的农业生产综合气候影响评估技术应是今后努力研究的方向。

4 结论

本文建立了东北地区旬平均气温、旬降水量和旬日照时数对大豆产量影响评估模型 12 组,敏感系数 126 组。研究发现,大豆营养生长期,旬平均气温对大豆产量影响变率最大的是吉林,为 $-4.88 \sim 12.02 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,旬降水量对大豆产量影响变率最大的是辽宁,为 $-7.51 \sim 2.38 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,旬日照时数对大豆产量影响变率最大的是黑龙江,为 $-2.60 \sim 2.68 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,可见东北地区春夏之交气温骤升骤降、干旱频发是控制大豆生长及产量形成的主要因子。大豆营养和生殖生长期,旬平均气温、旬降水量、旬日照时数对大豆产量影响变率,除黑龙江旬平均气温($3.67 \sim 11.19 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)影响较大外,其余均较小。大豆生殖生长期,旬平均气温、旬降水量、旬日照时数对大豆产量影响变率,旬平均气温对其产量影响变率最大的是黑龙江,为 $-11.20 \sim 7.11 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,旬降水量和旬日照时数对其产量影响变率最大的是辽宁,分别为 $-6.66 \sim 2.84 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $-2.66 \sim 1.49 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,实际上,在这一时期,研究区低温水涝寡照协同作用是制约大豆产量高低的主控因子。对 2022 年东北地区大豆年景进行的定量评估结果显示,黑龙江省为丰年,吉林为平年偏丰年景,辽宁为平年略减年景,这与实际产量基本相符,辽宁因降水量异常偏多导致的洪涝灾害使其减产。

参考文献

[1] 王晨,褚琳,杨喆,等. 蔡崇法东北地区大豆单产空间分异特征及其影响因素分析[J]. 农业工程学报, 2023, 39(21): 108-119. (WANG C, CHU L, YANG Z, et al. Spatial heterogeneity and determinants of soybean yield in northeast China [J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(21): 108-119.)

[2] 中国农业农村部. 大豆振兴计划实施方案 [EB/OL]. [2022-04-26]. https://www.moa.gov.cn/nybg/2019/0201903/201905/t20190525_6315395.htm. (Ministry of Agriculture and Rural Affairs of China. Implementation plan for soybean revitalization plan[EB/OL]. [2022-04-26]. https://www.moa.gov.cn/nybg/2019/0201903/201905/t20190525_6315395.htm.)

[3] 中共中央国务院关于做好 2022 年全面推进乡村振兴重点工作的意见[EB/OL]. [2022-04-15]. http://www.qstheory.cn/yaowen/2022-02/22/c_1128406852.htm. (Opinions of the Central Committee of the Communist Party of China and the State

Council on Doing a Good Job in the Key Work of Comprehensively Promoting Rural Revitalization in 2022 [EB/OL]. [2022-04-15]. http://www.qstheory.cn/yaowen/2022-02/22/c_1128406852.htm.)

[4] 刘志娟,杨晓光,王文峰,等. 气候变化背景下我国东北三省农业气候资源变化特征[J]. 应用生态学报, 2009, 20(9): 2199-2206. (LIU Z J, YANG X G, WANG W F, et al. Characteristics of agricultural climate resources in three provinces of northeast China under global climate change [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2009, 20(9): 2199-2206.)

[5] SYROMYATNIKOV Y, SEMENENKO I, MAKSIMOVICH K, et al. Influence of agrotechnical practices and sowing time in various weather on soybean yield [J]. Acta Technologica Agriculturae, 2023, 26(1): 9-16.

[6] LUBINGA P N, CHABALA L M, KACHULU M, et al. Effect of climatic variability on maize and soybean yield under high input farming system in Copperbelt province, Zambia [J]. Journal of Sustainable Development, 2019, 12(4): 53.

[7] 郭世博,张方亮,张镇涛,等. 全球气候变暖对中国种植制度的可能影响 XIV. 东北大豆高产稳产区及农业气象灾害分析 [J]. 中国农业科学, 2022, 55(9): 1763-1780. (GUO S B, ZHANG F L, ZHANG Z T, et al. The possible effects of global warming on cropping systems in China XIV. distribution of high-stable-yield zones and agro-meteorological disasters of soybean in northeast China [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2022, 55(9): 1763-1780.)

[8] HE L, JIN N, YU Q. Impacts of climate change and crop management practices on soybean phenology changes in China [J]. The Science of the Total Environment, 2020, 707: 135638.

[9] WANG X Y, ZHANG L. Analysis of meteorological factors influencing soybean yield in Keshan County and research on meteorological model of yield [J]. Academic Journal of Engineering and Technology Science, 2020, 3(1): 46-54.

[10] 王晓煜,杨晓光,孙爽,等. 气候变化背景下东北三省主要粮食作物产量潜力及资源利用效率比较[J]. 应用生态学报, 2015, 26(10): 3091-3102. (WANG X Y, YANG X G, SUN S, et al. Comparison of potential yield and resource utilization efficiency of main food crops in three provinces of northeast China under climate change [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(10): 3091-3102.)

[11] 何亮,毛留喜. 气候变化背景下东北大豆种植区气候适宜性变化[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2023, 31(5): 690-698. (HE L, MAO L X. Change of soybean climatic suitability in northeast China under climate change [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2023, 31(5): 690-698.)

[12] 杨晓强,张立群,李帅,等. 1980—2008 年黑龙江省气候变暖及其对大豆种植的影响[J]. 气象与环境学报, 2013, 29(2): 96-100. (YANG X Q, ZHANG L Q, LI S, et al. Climate warming and its effect on soybean from 1980 to 2008 in Heilongjiang province [J]. Journal of Meteorology and Environment, 2013, 29(2): 96-100.)

[13] 李秀芬,郭昭滨,朱海霞,等. 黑龙江省大豆生长季旱涝时序特征及其对产量的影响[J]. 应用生态学报, 2020, 31(4): 1223-1232. (LI X F, GUO Z B, ZHU H X, et al. Time-series

- characteristics of drought and flood in spring soybean growing season and its effect on soybean yield in Heilongjiang province, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(4): 1223-1232.)
- [14] 崔振才, 沈能展. 哈尔滨地区降水量对大豆产量影响的研究[J]. 东北农业大学学报, 2003, 34(1): 30-33. (CUI Z C, SHEN N Z. Study on effects of rainfall quantity to soybean's yield in Harbin district [J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2003, 34(1): 30-33.)
- [15] 刘景利, 杨扬, 梁涛, 等. 气象要素对大豆产量的影响分析[J]. 气象与环境学报, 2013, 29(5): 136-139. (LIU J L, YANG Y, LIANG T, et al. The effect of meteorological factors on soybean yield [J]. Journal of Meteorology and Environment, 2013, 29(5): 136-139.)
- [16] 许佳琦, 郭立峰, 殷世平, 等. 黑龙江省大豆不同生育阶段适宜温度与降水量化指标研究[J]. 东北农业大学学报, 2017, 48(8): 33-44. (XU J Q, GUO L F, YIN S P, et al. Study on suitable temperature and precipitation quantification indexes in different soybean growth periods in Heilongjiang province [J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2017, 48(8): 33-44.)
- [17] 李阳, 魏然, 韩德志, 等. 黑河地区气象因子对大豆品种黑河43产量构成的影响[J]. 黑龙江农业科学, 2022(6): 18-23. (LI Y, WEI R, HAN D Z, et al. Effects of meteorological factors on yield of soybean variety Heihe 43 in Heihe region [J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2022(6): 18-23.)
- [18] 贾建英, 刘一锋, 彭妮, 等. 基于积分回归法甘肃省冬小麦产量动态预报[J]. 气象与环境学报, 2016, 32(2): 100-105. (JIA J Y, LIU Y F, PENG N, et al. Dynamic forecast of winter wheat yield based on an integral regression method in Gansu province[J]. Journal of Meteorology and Environment, 2016, 32(2): 100-105.)
- [19] 郝文俊, 赵慧颖, 侯琼, 等. 内蒙古典型农牧交错区气候对作物产量的影响评估[J]. 中国农学通报, 2009, 25(21): 310-314. (HAO W J, ZHAO H Y, HOU Q, et al. Farming-Pastoral zone of Inner Mongolia to climate impact on crop yield assessment-As an example to Balinuoqi[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2009, 25(21): 310-314.)
- [20] 赵放. 黑龙江省玉米生长发育对气候变化的响应[D]. 银川: 宁夏大学, 2019. (ZHAO F. Response of maize growth and development to climate change in Heilongjiang province [D]. Yinchuan: Ningxia University, 2019.)
- [21] 赵年武, 郭连云, 赵恒和. 高寒半干旱地区马铃薯生育期气候因子变化规律及其影响[J]. 干旱气象, 2015, 33(6): 1024-1030. (ZHAO N W, GUO L Y, ZHAO H H. Variation characteristics of climate factors during potato growth period and their effect on yield in the alpine semiarid zone[J]. Journal of Arid Meteorology, 2015, 33(6): 1024-1030.)
- [22] 马玉平, 孙琳丽, 俄有浩, 等. 预测未来40年气候变化对我国玉米产量的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(1): 224-232. (MA Y P, SUN L L, E Y H, et al. Predicting the impact of climate change in the next 40 years on the yield of maize in China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(1): 224-232.)
- [23] 邱美娟, 宋迎波, 王建林, 等. 农业气象产量预报方法中权重系数的确定[J]. 气象与环境学报, 2016, 32(2): 106-111. (QIU M J, SONG Y B, WANG J L, et al. Determination of weight coefficient in agro-meteorological yield prediction [J]. Journal of Meteorology and Environment, 2016, 32(2): 106-111.)
- [24] 姜丽霞, 李帅, 李秀芬, 等. 黑龙江省近三十年气候变化对大豆发育和产量的影响[J]. 大豆科学, 2011, 30(6): 921-926. (JIANG L X, LI S, LI X F, et al. Impacts of climate change on development and yield of soybean over past 30 years in Heilongjiang province[J]. Soybean Science, 2011, 30(6): 921-926.)
- [25] 朱海霞, 李东明, 王铭, 等. 基于积分回归法黑龙江省作物产量动态预报研究[J]. 气象与环境学报, 2018, 34(3): 86-92. (ZHU H X, LI D M, WANG M, et al. Research on crop yield dynamic forecast based on integration regression method in Heilongjiang province [J]. Journal of Meteorology and Environment, 2018, 34(3): 86-92.)
- [26] 宫丽娟, 吴双, 田宝星, 等. 黑龙江省大豆生长季适宜气象指标的研究[J]. 大豆科学, 2019, 38(3): 391-398. (GONG L J, WU S, TIAN B X, et al. Optimal meteorological indices during the growing season of soybean in Heilongjiang province [J]. Soybean Science, 2019, 38(3): 391-398.)
- [27] 张智韬, 兰玉彬, 郑永军, 等. 影响大豆NDVI的气象因素多元回归分析[J]. 农业工程学报, 2015, 31(5): 188-193. (ZHANG Z T, LAN Y B, ZHENG Y J, et al. Multiple regression analysis of soybean NDVI affected by meteorological factors[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(5): 188-193.)
- [28] 解文娟, 杨晓光, 杨婕, 等. 气候变化背景下东北三省大豆干旱时空特征[J]. 生态学报, 2014, 34(21): 6232-6243. (XIE W J, YANG X G, YANG J, et al. Spatio-temporal characteristics of drought for soybean under climate change in the three provinces of northeast China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(21): 6232-6243.)
- [29] 徐春萌, 田芷源, 陈威, 等. 基于DSSAT作物模型的中美大豆主产区单产模拟与验证[J]. 农业工程学报, 2021, 37(3): 132-139. (XU C M, TIAN Z Y, CHEN W, et al. Simulations and validations of the soybean yields per unit area using DSSAT crop model in the major soybean producing areas of China and America[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(3): 132-139.)