

基于 DSSAT 模型模拟的气候变化对棉花生产潜力影响研究

谭红^{1,3}, 吕新^{2,3*}, 张泽^{2,3}, 印彩霞^{2,3}, 马露露^{2,3}, 苏维^{2,3}

(1. 石河子大学生命科学学院, 新疆 石河子 832003; 2. 石河子大学农学院, 新疆 石河子 832003;

3. 新疆生产建设兵团绿洲生态农业重点实验室, 新疆 石河子 832003)

摘要:【目的】运用农业技术转移决策支持系统(Decision support system for agrotechnology transfer, DSSAT)模型分析石河子地区气候变化对棉花生产潜力的影响,为棉花种植管理的可持续发展提供思路。【方法】本研究以石河子地区田间试验数据为基础,验证 DSSAT V4.7 模型适用性,模拟棉花光温生产潜力和气候生产潜力,并分析了气候变化对棉花生产潜力的影响。【结果】经过品种参数调试校正,模型的模拟值与试验的实测值吻合度较高,可用于石河子地区棉花的研究。近 51 年来石河子地区棉花生育期的平均气温和太阳总辐射呈显著上升趋势,降水量变化不显著,并且在棉花的不同生育阶段气候变化趋势有所差异;棉花的实际产量和光温生产潜力都呈极显著上升趋势,其中生产潜力的平均值是实际产量的 3.6 倍,由于该地区降水量的稀少导致气候生产潜力模型模拟结果不理想;棉花光温生产潜力与生育期内的气象因子有较强的相关性,与月平均最低气温和月太阳总辐射呈极显著正相关,与大多月降水量和部分月平均最高气温相关性不显著,因此气温和太阳总辐射的增加,有利于棉花增产。【结论】气候变化对石河子地区棉花的产量和生产潜力具有一定的正面影响。
关键词:棉花;气候变化;模型;生产潜力

Influence of Climate Change on Cotton Production Potential Based on DSSAT Model Simulation

Tan Hong^{1,2}, Lü Xin^{2,3*}, Zhang Ze^{2,3}, Yin Caixia^{2,3}, Ma Lulu^{2,3}, Su Wei^{2,3}

(1. College of Life Sciences, Shihezi University, Shihezi, Xinjiang 832003, China; 2. College of Agriculture, Shihezi University, Shihezi, Xinjiang 832003, China; 3. The Key Laboratory of Oasis Ecology Agricultura, Xinjiang Production and Construction Group, Shihezi, Xinjiang 832003, China)

Abstract: [Objective] Analyze the influence of climate change on cotton potential productivity in Shihezi region by using decision support system for agrotechnology transfer (DSSAT) model, so as to provide thoughts for sustainable development of cotton planting management. [Method] Based on the field test data in Shihezi area, this study verified the applicability of DSSAT V4.7 model, simulated cotton light and temperature potential productivity and climate production potential, and analyzed the impact of climate change on potential productivity on cotton. [Results] After the adjustment of variety parameters, the simulated value of the model is in good agreement with the experimental measured value, so the model can be used in the study of cotton in Shihezi. In the past 51 years, the average temperature and total solar radiation in the growth period of cotton in Shihezi have shown a very significant trend of increasing, while the rainfall change is not significant and the trend of climate change is partly various in different growth stages of cotton. The actual yield and light and temperature potential productivity of cotton have shown a very significant improving trend; the average value of production potential was 3.6 times than the actual yield, and due to the lack of precipitation in this area, the simulation results of climate production potential are not good. Cotton light and temperature potential productivity has a strong correlation with the meteorological factors in the growth period, and has a very significant positive correlation with the monthly average minimum temperature and the monthly total solar radiation. But the potential productivity has no significant correlation with most monthly rainfall and some monthly average maximum temperature. Therefore, the increasing of temperature and total solar radiation are conducive to the production of cotton. [Conclusion] Climate change has a positive effect on cotton yield and production potential in Shihezi.

Keywords: cotton; climate change; models; potential productivity

以全球变暖为主要特征的气候变化已经成为社会各界学者共同关注的问题,政府间气候变化专门委员会在第五次评估报告中提出,气候系统变暖是毋庸置疑的^[1]。棉花是新疆的优势作物,也是我国纤维类制品的主要材料^[2],气候变化对棉花的种植结构、生育期、品质和产量等均有重要影响^[3-4]。近年来,国内外学者关于气候变化对作物生产潜力影响的研究做了很多工作。Sinnarong 等^[5]运用计量经济学估算了气候变化对泰国稻米生产的潜在影响;徐文修等^[6]通过生态区域法研究北疆棉花生产力及光温生产潜力;Kritika Kothari 等^[7]采用 CERES-Wheat 模型评估得克萨斯州高平原小麦对气候变化的潜在适应策略;赵放等^[8]分析了气候变化对黑龙江省玉米的气候生产潜力的影响。因此,进行气候变化对棉花生产潜力影响的研究,最大限度地发挥当地气候资源优势,挖掘棉花生产潜力,对棉花产业的可持续发展具有重要意义。

农业技术转移决策支持系统 (Decision support system for agrotechnology transfer, DSSAT)是目前世界上使用最广泛的作物模型之一^[9],可以用来研究适应性对策^[10]、耕作方式^[11]、气候变化^[12]、氮肥^[13]和水分^[14]等。在评价气候变化对农业的影响方面,前人主要与区域气候模型结合分析未来气候变化对作物的响应,且多数集中研究粮食作物,而利用历史气象数据分析气候变化对棉花各生育时期生产潜力影响的尚不多见。本研究以新疆石河子市为研究区域,评价 DSSAT V 4.7 中 CROPGRO - Cotton 模型在本地区的适用性,模拟棉花生产潜力并分析气候变化对其影响,为利用模型优化农业生产提供决策支持。

1 材料与amp;方法

1.1 研究区概况和试验设计

1.1.1 研究区域概况。田间试验位于新疆维吾尔自治区石河子市(44°18'52" N、85°58'50" E)。该区属于温带大陆性干旱气候,海拔 442.9 m,多年平均气温 7.7 °C,7 月年平均最高气温为 32.7 °C,1 月年平均最低气温为 -20.3 °C,年平均降水量 199.7 mm,年日照时间 2 800~3 000 h,无霜期 180 d 左右。试验地土壤类型为灰漠土,土壤质地

为壤土。

1.1.2 试验设计。本试验种植的棉花品种为“新陆早 45 号”。播种时间分别为 2015 年 4 月 11 日、2016 年 4 月 11 日、2017 年 4 月 15 日,试验地小区面积为 25 m²(10 m×2.5 m),3 次重复,随机区组排列,并在小区间设有隔离带。采用膜下滴灌的方式,每个小区一膜六行,行距 66 cm+10 cm,株距 10 cm,种植密度为 19 万株·hm⁻²,收获时间为 10 月上旬。

本试验共有 5 个氮肥(N)处理,分别为:N0(不施氮)、N1(120 kg·hm⁻²)、N2(240 kg·hm⁻²)、N3(360 kg·hm⁻²)和 N4(480 kg·hm⁻²)。每个处理所需的氮肥均以 30%作为基肥,其余的 70%在棉花生育期随水施入。磷肥(P₂O₅)和钾肥(K₂O)各 150 kg·hm⁻²播前全部基施。灌溉定额为当地滴灌棉田一般灌溉量,其他田间管理措施均按高产栽培要求进行。

1.1.3 指标测定及田间取样。生育期的确定采用田间观测方式,当一半的植株达到某一生育阶段,即可认为达到该生育期。各生育期田间取样是每个小区随机选取 3 株植株,按叶和其他部位分样,采用叶面积仪获取植株叶片总面积,用于计算叶面积指数。待棉花成熟后,均匀分布随机选取 1 m 行长样方,调查棉花的株数、铃数,采摘吐絮棉铃晾干后称重,用于棉花单产的计算。

1.2 模型数据库的建立

1.2.1 气象数据(Weather Data)。气象数据来自石河子气象局,包括 1967 年至 2017 年日照时间(h)、最高气温(°C)、最低气温(°C)、降水量(mm)逐日数据。利用日照时间(h)估算太阳辐射能,参考“Angstyon(埃斯屈朗)经验公式”进行估算^[15],公式如下:

$$R_s = R_{\max} \left(a_s + b_s \frac{n}{N} \right) \quad (1)$$

式中: R_s 为太阳总辐射(MJ·m⁻²); R_{\max} 为天文辐射(MJ·m⁻²); n 为逐日日照时间(h); N 为逐日可照时间,即最大时长(h); a_s 、 b_s 为经验系数,与当地的大气质量有关系,根据联合国粮食及农业组织(Food and Agriculture Organization, FAO)推荐,选择 $a_s=0.25$, $b_s=0.5$ 。

1.2.2 土壤数据(Sbuild)。土壤数据主要来自

2015年至2017年田间试验的实测数据。每年的土壤参数均是试验前测定,将0~100 cm土壤剖面分为5层,并测定每层土壤的pH、容重、有机质、全氮等,其他值默认系统计算。

1.2.3 品种遗传参数 (Generalized likelihood uncertainty estimation, GLUE)。 CROPGRO-Cotton模型所需要的遗传系数如表1,采用DSSAT 4.7

的GLUE参数调试程序和“试错法”^[16],对棉花作物品种“新陆早45号”进行参数校准,先用2015年棉花田间试验数据进行参数调试,再用2016和2017年田间数据进行验证。主要以棉花播种至出苗时期、花铃期、吐絮期、叶面积指数以及最终收获产量作为指标进行参数调试和验证。

表1 CROPGRO-Cotton模型所用遗传系数的定义

Table 1 Definition of the genetic coefficient used in the CROPGRO-Cotton model

参数 Trait	定义 Definition of trait	单位 Unit
CSDL	临界短日长,低于此生殖发育过程没有日长效应(短日植物) Critical short day length below which reproductive development progresses with no daylength effect (for short day plants)	h
PPSEN	发育对光周期时间相对反应的斜率(短日植物为正值) Slope of the relative response of development to photoperiod with time (positive for short day plants)	1/h
EM-FL	植物萌发生至现花时间 Time between plant emergence and flower appearance	d
FL-SH	第一朵花和第一个棉铃之间的时间 Time between first flower and first pod	d
FL-SD	第一朵花和第一个籽粒之间的时间 Time between first flower and first seed	d
SD-PM	第一个籽粒产生和生理成熟之间的时间 Time between first seed and physiological maturity	d
FL-LF	第一朵花和叶片扩展结束之间的时间 Time between first flower and end of leaf expansion	d
LFMAX	最适条件下最大光合速率 Maximum leaf photosynthesis rate under optimal conditions	mg·(m ² ·s) ⁻¹
SLAVR	标准生长条件下品种特定叶面积 Specific leaf area of cultivar under standard growth conditions	cm ² ·g ⁻¹
SIZLF	最大展开叶面积 Maximum size of full leaf	cm ²
XFRT	每日分配给棉铃的干物质量的最大比例 Maximum fraction of daily growth that is partitioned to seed + shell	%
WTPSD	籽粒最大重量 Maximum weight per seed	g
SFDUR	标准生长条件下种子填充棉铃的持续时间 Seed filling duration for pod cohort at standard growth conditions	d
SDPDV	标准生长条件下单个棉铃平均籽粒 Average seed per pod under standard growing conditions	个
PODUR	最适生长条件下品种达到最终棉铃饱满所需时间 Time required for cultivar to reach final pod load under optimal conditions	d
THRSH	籽棉质量与棉铃质量的比值 The maximum ratio of (seed/ (seed+ shell)) at maturity causes seed to stop growing as their dry weight increases until shells are filled in a cohort	%
SDPRO	种子中的蛋白质含量 Fraction protein in seeds	%
SDLIP	种子中的油脂含量 Fraction oil in seeds	%

1.2.4 作物管理数据(XBuild)。管理参数来源于棉花田间试验,包括播种日期、种植密度、施肥日期、灌溉日期、施肥量和灌溉量等。棉花光温生产潜力用 DSSAT 模型模拟获得;作物实际产量数据来自 1967 年至 2017 年《新疆生产建设兵团统计年鉴》。棉花生育时期数据通过 2015 年至 2017 年田间观测数据的平均值获得。

1.3 模型评价指标

选用归一化的均方根误差(The normalized root mean square error, n -RMSE)来度量模拟值与实测值的相对差异程度,并用一致性指数(Index of agreement, D)检验模拟值和实测值的吻合度^[17],公式见(2)和(3)。

$$n\text{-RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (S_i - R_i)^2}{n}} \times \frac{100\%}{\bar{R}} \quad (2)$$

$$D = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (S_i - R_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|S_i - \bar{R}| + |R_i - \bar{R}|)^2} \right] \quad (3)$$

式中, S_i 为模拟值, R_i 为实测值,为实测平均值, n 为模拟值的样本数。 n -RMSE 越小,说明模拟值与实测值越可靠;D 值越接近 1,说明模拟值和实测值一致性越好,否则相反。

2 结果与分析

2.1 棉花品种参数的校正与模型验证

采用 2015 年数据进行了参数校正,每个处理的模拟值与实测值之间的归一化的均方根误差均小于 10%,调试后棉花品种参数见表 2。

用 2016 年和 2017 年数据验证模型,得出棉花“新陆早 45 号”播种 - 出苗时期、花铃期、吐絮

表 2 调试后的棉花品种参数

Table 2 Cotton variety parameters after commissioning

参数类型 Parameter type	参数值 Parameter value	参数类型 Parameter type	参数值 Parameter value	参数类型 Parameter type	参数值 Parameter value
CSDL	23.00	FL-LF	75.00	SFDUR	26.65
PPSEN	0.01	LFMAX	1.15	SDPDV	23.48
EM-FL	42.91	SLAVR	170.00	PODUR	8.00
FL-SH	8.00	SIZLF	296.20	THRSH	70.00
FL-SD	12.43	XFRT	0.80	SDPRO	0.153
SD-PM	40.53	WTPSD	0.18	SDLIP	0.12

期、叶面积指数和产量的 n -RMSE 分别为 8.16%、3.5%、1.46%、8.78% 和 8.94%,D 分别为

0.952、0.936、0.989、0.992 和 0.965(图 1),表明棉花生育期、叶面积指数和产量的模拟值与实测值

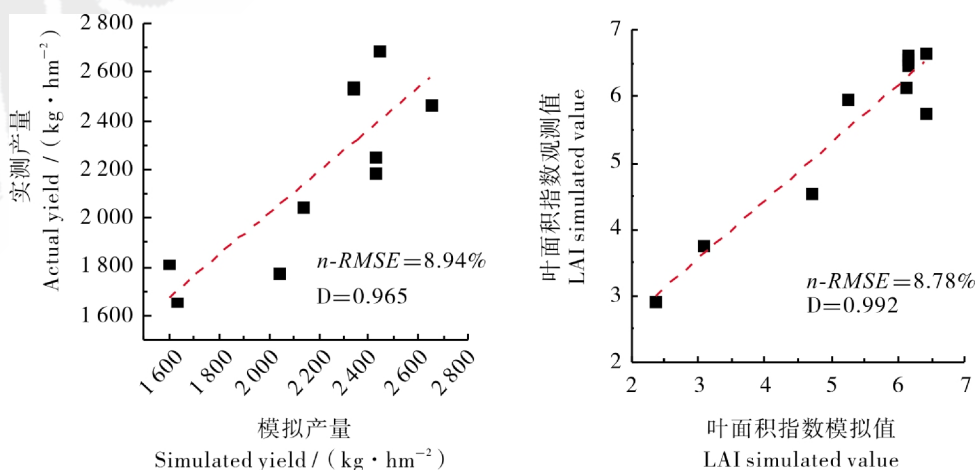


图 1 产量和叶面积指数的模拟值与实测值拟合结果

Fig. 1 Fitting results of simulated and measured values of yield and leaf area index

具有较好的一致性,品种参数可以较准确地反映棉花品种的主要遗传特性,可用于石河子地区棉花的模拟研究。

2.2 棉花生育阶段气象因子的变化趋势

从 1967 年至 2017 年石河子地区棉花生育阶段气象因子发生了明显变化(表 3,图 2),生育

表 3 1967 年至 2017 年棉花各生育阶段平均气温、降水量和太阳总辐射的气候倾向率

Table 2 Climate tendency rate of average temperature, rainfall and total solar radiation in different growth stages of cotton from 1967 to 2017

生育阶段 Growth stage	降水量 Rainfall /mm	平均最高气温 Average maximum temperature /°C	平均最低气温 Average minimum temperature /°C	太阳总辐射 Total solar radiation / (MJ·m ⁻²)
播种 - 出苗 Seeding and emergence	0.058	0.034	0.064**	0.562*
苗期 Seedling stage	0.065	0.021	0.061**	2.467**
蕾期 Bud stage	0.196	0.015	0.054**	1.216**
花铃期 Blooming stage	0.025	0.003	0.039**	1.672**
吐絮期 Boll stage	0.104	0.032*	0.047**	1.44**
生育期 growth stage	0.448	0.019**	0.050**	2.675*

注: * 表示差异显著($P < 0.05$), ** 表示差异极显著($P < 0.01$)。

Note: * indicates that the correlation is significant at the 0.05 level; ** indicates that the correlation is very significant at the 0.05 level.

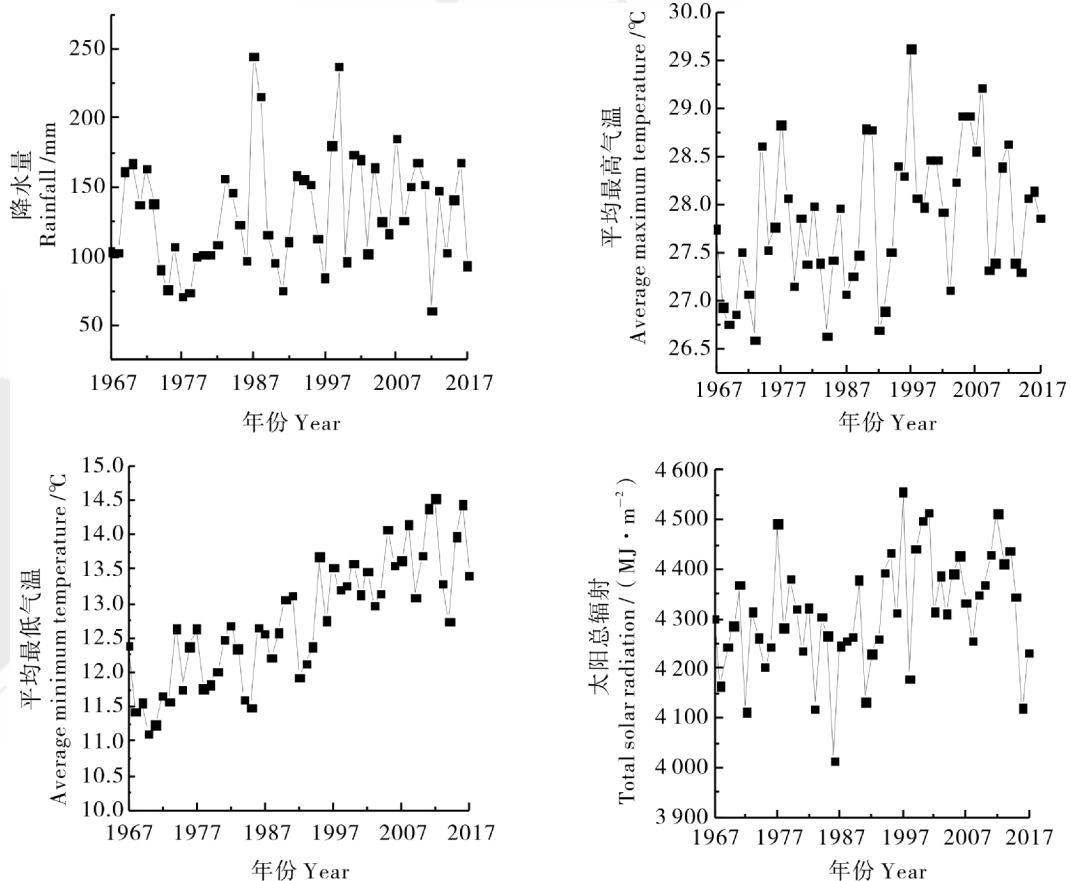


图 2 1967-2017 年石河子地区棉花生育阶段不同气象因子的逐年变化特征

Fig. 1 Year by year change characteristics of different meteorological factors in growth stage of cotton in Shihezi from 1967 to 2017

期的平均气温和太阳总辐射显著升高,降水量变化不显著,并且不同生育阶段气候变化趋势有所差异。播种-出苗时期平均最低气温呈极显著上升趋势,增幅为 $0.064\text{ }^{\circ}\text{C}$,太阳总辐射呈显著上升趋势,且比其他气象因子增幅大;苗期、蕾期和花铃期平均最低气温和太阳总辐射呈极显著上升趋势,而降水量和平均最高气温呈不显著上升趋势;吐絮期除了降水量呈不显著,其余气象因子都呈显著上升趋势。整体来说,生育阶段平均最低气温的上升幅度大于平均最高气温的上升幅度,太阳总辐射也明显增多,气候逐渐变暖。

2.3 棉花产量和光温生产潜力的时间变化特征 利用 CROPGRO-Cotton 模型模拟石河子地

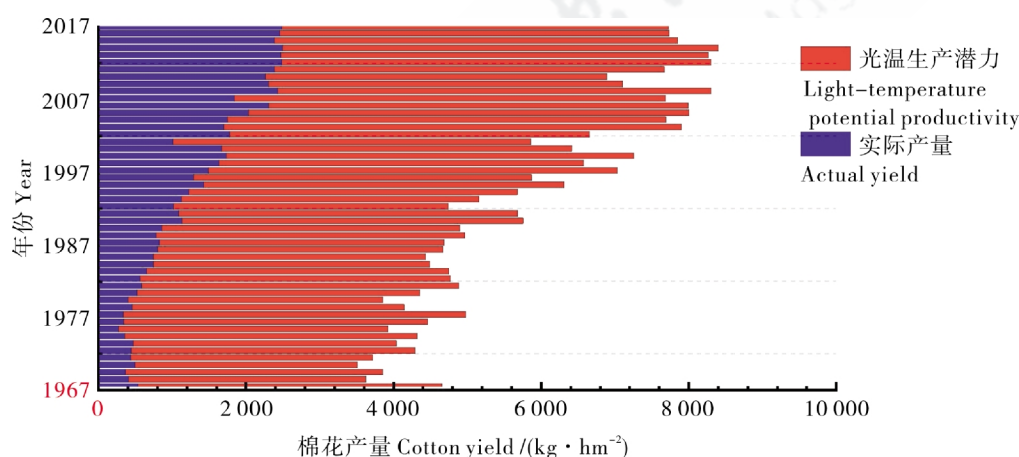


图3 石河子地区棉花光温生产潜力和实际产量

Fig. 3 Light and temperature production potential and actual yield of cotton in Shihezi

2.4 气象因子对棉花光温生产潜力的影响

石河子地区棉花生育阶段为当年4月—10月,棉花光温生产潜力与月平均最低气温和月太阳总辐射呈极显著正相关,但与大多月降水量和部分月平均最高气温相关性不显著。月降水量与棉花光温生产潜力相关系数在8月为显著正相关,其余月份相关性不显著;月平均最高气温与棉花光温生产潜力相关系数除了5月、7月和8月呈不显著正相关,其余月份均呈显著或极显著正相关;月平均最低气温与棉花光温生产潜力的最大相关系数为0.68;月太阳总辐射与棉花光温生产潜力的相关系数变化幅度为 $0.431\sim 0.556$ (表4)。说明光热的增加对棉花产量和光温生产潜力有促进作用,石河子地区近51年来影响棉

区棉花光温生产潜力(图3)。近51年来棉花实际产量和光温生产潜力呈极显著增长趋势,平均每年增长 $108.33\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 $49.86\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,变化趋势有明显波动。棉花实际产量平均值为 $1\,262.77\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,但年际增长显著,尤其是从2001年之后,实际产量稳步增加,其中2008年至2017年比2007年至1998年显著增长 $671.5\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$;光温生产潜力平均值为 $4\,585.73\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,在2003年达到高产 $6\,000\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 以上,并且光温生产潜力的平均值是实际产量的3.6倍。此外,棉花产量主要是由自然因素和人为因素决定,在相同的气候条件下,随着年份的推移棉花实际产量与光温生产潜力的差距逐渐缩短,说明耕作栽培技术和水肥管理技术在不断的提升。

花光温生产潜力的气象因子以气温和太阳总辐射为主要影响因素,降水量为次要因素。

3 讨论

3.1 DSSAT 模型在石河子地区的适用性

本研究的模型模拟结果能够较客观地反映气候变化对棉花生产潜力的影响,但还是存在一些问题需要探讨。

一方面在未来研究 DSSAT 模型时应尽量搜集更多的气象因子、土壤组成和田间管理数据,减少默认值的输入,使模型的模拟结果更加精准^[18]。或者扩大研究区域,使模型更具有代表性,能够广泛应用。

另一方面未考虑极端气候和病虫害事件,在

表 4 棉花光温生产潜力与气象因子相关性分析

Table 4 Correlation analysis of cotton light and temperature production potential and meteorological factors

月份	降水量	平均最高气温	平均最低气温	太阳总辐射
Month	Rainfall/mm	Average maximum temperature/°C	Average minimum temperature/°C	Total solar radiation/(MJ·m ⁻²)
4	0.026	0.442**	0.598**	0.475**
5	0.041	0.268	0.592**	0.513**
6	-0.060	0.445**	0.680**	0.556**
7	-0.086	0.007	0.467**	0.456**
8	0.324*	0.105	0.570**	0.494**
9	-0.063	0.391**	0.506**	0.556**
10	0.020	0.348*	0.428**	0.431**

注:*表示气象因子与光温生产潜力呈显著相关($P<0.05$),**表示气象因子与光温生产潜力呈极显著相关($P<0.01$)。

Note: * indicates significant correlation between meteorological factors and production potential of light and temperature ($P<0.05$) and ** indicates very significant correlation between meteorological factors and production potential of light and temperature ($P<0.01$).

1981年至2008年期间发生气象灾害的次数明显上升^[19],在2015年新疆棉花虫害发生面积占总播种面积的29.7%^[20],对棉花产量造成不可忽略的影响,所以气候变化对棉花生产潜力的影响还需要进一步研究。

3.2 棉花生产潜力的估算

利用不同的作物生产潜力估算方法计算出来的数值有所差异,本研究运用DSSAT模型估算的棉花光温生产潜力比农业生态区划法^[21-22]估算的数值低,因为DSSAT模型不仅仅是自然资源的生产潜力,还考虑作物自身的发育过程^[23]。另外,石河子为干旱半干旱地区,只靠自然条件下的降水无法满足棉花正常生长需求,必须进行适量的灌溉,因此降水量的稀少导致模型对棉花气候生产潜力的模拟结果不理想。

4 结论

经过品种参数的调试校正,DSSAT模型的模拟值与田间试验的实测值吻合度较高,表明能够用于石河子地区棉花的模拟研究。近51年来石河子地区棉花生育期的平均气温和太阳总辐射呈显著上升趋势,降水量呈不显著变化,棉花的实际产量和光温生产潜力呈极显著上升趋势,平均生产潜力是实际产量的3.6倍,说明棉花产量存在很大的上升空间。气象因子变化对棉花光温生产潜力的影响以气温和太阳总辐射为主要影响因素,降水量为次要因素。表明光热资源的

增加有利于棉花产量的提高。

参考文献:

- [1] 秦大河, Stocker T. IPCC第五次评估报告第一工作组报告的亮点结论[J]. 气候变化研究进展, 2014, 10(1): 1-6. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-1719.2014.01.001>
- [2] 朱鹏, 王飞, 温鹏飞, 等. 不同滴灌施肥装置施肥对棉花植株生长及产量的影响[J]. 节水灌溉, 2016(1): 27-29. Zhu Peng, Wang Fei, Wen Pengfei, et al. Effects of different drip irrigation fertilization device on plant growth and yield of cotton [J]. Water Saving Irrigation, 2016(1): 27-29.
- [3] 李景林, 普宗朝, 张山清, 等. 近52年北疆气候变化对棉花种植气候适宜性分区的影响[J]. 棉花学报, 2015, 27(1): 22-30. Li Jinglin, Pu Zongchao, Zhang Shanqing, et al. Impact of climate change on cotton-planting zoning in Northern Xinjiang during 1961-2012[J]. Cotton Science, 2015, 27(1): 22-30.
- [4] 王占彪, 陈静, 毛树春, 等. 气候变化对河北省棉花物候期的影响[J]. 棉花学报, 2017, 29(2): 177-185. <https://doi.org/10.11963/j.issn.1002-7807.201702007> Wang Zhanbiao, Chen Jing, Mao Shuchun, et al. Impact of climate change on cotton phenophase in Hebei Province[J]. Cotton Science, 2017, 29(2): 177-185.
- [5] Sinnarong N, Chen C C, Mearl B, et al. Estimating the potential effects of climate change on rice production in Thailand[J]. Paddy and Water Environment, 2019, 17(4): 761-769. <https://doi.org/10.1007/s10333-019-00755-w>
- [6] 徐文修, 许秉钊. 北疆棉花生产力及生产潜力的研究[J]. 棉花

- 学报, 2002, 14(2): 113-116.
- Xu Wenxiu, Xu Bingzhao. Study on the productivity and productive potentiality of cotton in the north of Xinjiang[J]. Cotton Science, 2002, 14(2): 113-116.
- [7] Kritika K, Srinivasulu A, Ahmed A, et al. Potential climate change adaptation strategies for winter wheat production in the Texas High Plains[J]. Agricultural Water Management, 2019, 225: 105764. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105764>
- [8] 赵放, 李秀芬, 林伟楠, 等. 气候变化对玉米气候生产潜力的影响[J]. 农业工程, 2019, 9(8): 132-134.
- Zhao Fang, Li Xiufen, Lin Weinan, et al. Impact of climate change on climate productivity potential of maize[J]. Agricultural Engineering, 2019, 9(8): 132-134.
- [9] Jones J W, Hoogenboom G, Porter C H, et al. The DSSAT cropping system model[J]. European Journal of Agronomy, 2003, 18(3-4): 235-265.
- [10] 孙芳, 林而达, 李剑萍, 等. 基于 DSSAT 模型的宁夏马铃薯生产的适应对策[J]. 中国农业气象, 2008, 29(2): 127-129.
- Sun Fang, Lin Erda, Li Jianping, et al. Study on adaptation measures of potato production by using DSSAT crop model[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2008, 29(2): 127-129.
- [11] 鲁向晖, 穆兴民, Vinay N, 等. DSSAT 模型对豫西冬小麦保护性耕作效应模拟效果验证[J]. 干旱地区农业研究, 2010, 28(3): 64-70.
- Lu Xianghui, Mu Xingmin, Vinay N, et al. Simulation of simulated effects of DSSAT model on protective tillage of winter wheat in Western Henan[J]. Agriculture Research in Arid Areas, 2010, 28(3): 64-70.
- [12] 杨勤, 陈晓光, 许吟隆, 等. 宁夏春小麦对气候变化情景的响应模拟[J]. 麦类作物学报, 2009, 29(3): 491-496
- Yang Qin, Chen Xiaoguang, Xu Yinlong, et al. Response simulation of spring wheat in Ningxia region to climate change scenario[J]. Journal of Triticeae Crops, 2009, 29(3): 491-496.
- [13] 刘建刚, 褚庆全, 王光耀, 等. 基于 DSSAT 模型的氮肥管理下华北地区冬小麦产量差的模拟[J]. 农业工程学报, 2013, 29(23): 124-129. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1002-6819.2013.23.017>
- Liu Jiangan, Chu Qingquan, Wang Guangyao, et al. Simulating yield gap of winter wheat in response to nitrogen management in North China Plain based on DSSAT model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(23): 124-129.
- [14] 陈丹丹, 李国强, 张杰, 等. 基于 DSSAT 模型的河南省冬小麦需水量分析[J]. 河南农业科学, 2017, 46(2): 153-160. <https://doi.org/10.15933/j.cnki.1004-3268.2017.02.032>
- Chen Dandan, Li Guoqiang, Zhang Jie, et al. Analysis on water demand of winter wheat in Henan Province based on DSSAT model[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2017, 46(2): 153-160.
- [15] 邹龙, 冯浩. DSSAT-CERES 模型在黄土高原丘陵沟壑地区春玉米生产中的适用性评价[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(6): 1413-1420. <https://doi.org/10.11674/zwyf.2014.0611>
- Zou Long, Feng Hao. Applicability evaluation of DSSAT-CERES model on production of spring maize in hill and gully area of the Loess Plateau[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2014, 20(6): 1413-1420.
- [16] 郑云龙. DSSAT 模型对河北省不同施氮水平棉花生长的适用性评价[D]. 保定: 河北农业大学, 2018.
- Zheng Yunlong. Applicability of DSSAT model to cotton growth at different nitrogen levels in Hebei[D]. Baoding: Hebei Agriculture University, 2018.
- [17] 文新亚, 陈阜. 基于 DSSAT 模型模拟气候变化对不同品种冬小麦产量潜力的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(S2): 74-79. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1002-6819.2011.z2.015>.
- Wen Xinya, Chen Fu. Simulation of climatic change impacts on yield potential of typical wheat varieties based on DSSAT model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(S2): 74-79.
- [18] 蒋忆文. DSSAT 模型在黑河流域的适用性评价及节水灌溉应用研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2016.
- Jiang Yiwen. Modeling irrigation management for water conservation by DSSAT model in the Heihe River watershed[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2016.
- [19] 范文波, 江煜, 吴普特, 等. 新疆石河子垦区 50 年气候变化对棉花种植的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2011, 29(6): 244-248.
- Fan Wenbo, Jiang Yu, Wu Pute, et al. Impact of climate change on cotton planting in Shihezi reclamation area of Xinjiang[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2011, 29(6): 244-248.
- [20] 张国龙. 棉蚜发生量信息快速获取方法与监测模型的建立研究[D]. 石河子: 石河子大学, 2017.
- Zhang Guolong. Research of real-time acquisition method and monitoring model establishment of aphid gossypii occurrence quantity information[D]. Shihezi: Shihezi University, 2017.
- [21] 牛新湘. 新疆棉花生产力及生产潜力的研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2003.
- Niu Xinxiang. Study on the productivity and its potential productivity of cotton in Xinjiang[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2003.
- [22] 徐文修, 牛新湘, 边秀举. 新疆棉花光温生产潜力估算与分析[J]. 棉花学报, 2007, 19(6): 455-460.
- Xu Wenxiu, Niu Xinxiang, Bian Xiujie. The calculations and analyses on thermal production potential of cotton in Xinjiang[J]. Cotton Science, 2007, 19(6): 455-460.
- [23] 李国强, 陈丹丹, 张建涛, 等. 基于 DSSAT 模型的河南省小麦生产潜力定量模拟与分析[J]. 麦类作物学报, 2016, 36(4): 507-515. <https://doi.org/10.7606/j.issn.1009-1041.2016.04.17>
- Li Guoqiang, Chen Dandan, Zhang Jiantao, et al. Quantitative simulation and analysis of winter wheat production potential in Henan Province[J]. Journal of Triticeae Crops, 2016, 36(4): 507-515. ●