doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.22.014

1980—2020 年气候变化对塔里木河流域棉花生产的影响

岳胜如[1,2]　徐菽悦[1]　胡雪菲[1,2]　侯晓华[1]　孟福军[1]

(1.塔里木大学水利与建筑工程学院,阿拉尔 843300;2.盐碱地综合利用兵团重点实验室,阿拉尔 843300)

摘要:棉花生产对气候变化的反馈机制是棉花种植规划和稳产的重要科学依据。然而,“气候-管理-作物”三元交互对塔里木河流域棉花生产的影响仍不清晰。为此,本研究基于气象观测数据和校准后 DSSAT - CROPGRO - Cotton 作物模型,揭示了 1980—2020 年“气候-管理-作物”下塔里木河流域棉花产量、全生育期和灌溉量的时空变化特征,基于情景扰动评估了棉花生产对气候因子耦合下的综合敏感性。结果表明:1980—2020 年间,塔里木河流域棉花生长季气温显著增加,最低气温升温速率高于最高气温,降水量稀少且年度变异大,辐射量降低不显著。早播对提高产量有巨大潜力,较传统播期可增产 8.7%,但早播带来的气候风险依然存在。早播延长了全生育期,增加了所需灌溉量。流域尺度上,棉花产量呈显著增加趋势,增速为 22.3 kg/(hm^2·a);全生育期呈显著缩短趋势,变化速率为 -0.539 d/a;灌溉量呈不显著减少趋势,变化速率为 -0.650 mm/a。最高气温已处于产量“积极-消极”转变窗口,最高气温升高和辐射量降低对产量影响消极,但最低气温和 CO_2 浓度升高补偿了该影响并促使产量增加。综上,1980—2020 年气候变化对塔里木河流域棉花生产总体呈正向影响,早播是应对气候变化的有效措施,研究结果为未来棉花生产提供了数据参考。

关键词:棉花生产;早播;气候-管理-作物;作物模型;塔里木河流域

中图分类号:S562　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2026)22-0162-11　　**OSID**:

Impact of Climate Change on Cotton Production in Tarim River Basin, 1980—2020

Yue Shengru[1,2]　Xu Shuyue[1]　Hu Xuefei[1,2]　Hou Xiaohua[1]　Meng Fujun[1]

(1. *College of Hydraulic and Architectural Engineering*, *Tarim University*, *Alaer* 843300, *China*

2. *Key Laboratory of Comprehensive Utilization of Saline-Alkali Land*, *Xinjiang Production and Construction Corps*, *Alaer* 843300, *China*)

Abstract: The feedback mechanisms of cotton production to climate change constitute a critical scientific basis for planting planning and yield stabilization. However, the impacts of the “climate - management - crop” triple interaction on cotton production in the Tarim River Basin remain poorly understood. Based on meteorological observation data and a calibrated DSSAT - CROPGRO - Cotton crop model, the spatiotemporal variation characteristics of cotton yield, whole growth duration, and irrigation water requirement in the Tarim River Basin from 1980 to 2020 under the framework of “climate - management - crop” was firstly revealed. Subsequently, the integrated sensitivity of cotton production to coupled climatic factors was evaluated by using scenario perturbation experiments. The results indicated that during 1980—2020, the cotton growing season in the Tarim River Basin experienced a significant increase in air temperature, with the warming rate of minimum temperature exceeding that of maximum temperature. Precipitation remained scarce with large inter-annual variability, and solar radiation showed a non-significant declining trend. Early sowing demonstrated substantial potential for yield improvement, increasing yield by 8.7% compared with the conventional sowing date; however, the associated climatic risks persisted. Early sowing prolonged the whole growth duration and increased irrigation water demand. At the basin scale, cotton yield exhibited a significant increasing trend at a rate of 22.3 kg/(hm^2·a); the whole growth duration showed a significant shortening trend at a rate of -0.539 d/a; and irrigation

收稿日期:2026-04-01　修回日期:2026-04-24

基金项目:兵团科技计划项目(2024AB064、2025DB051)

作者简介:岳胜如(1988—),男,副教授,博士,主要从事气候变化与作物生产研究,E-mail:nmgndysr@163.com

通信作者:胡雪菲(1989—),女,副教授,主要从事气候与土壤污染研究,E-mail:huxf0122@126.com

water requirement displayed a non-significant decreasing trend at a rate of −0.650 mm/a. Maximum temperature approached the critical transition window from positive to negative effects on yield. Elevated maximum temperature and reduced radiation level exerted negative impacts on yield, yet these were compensated by concurrent increases in minimum temperature and CO_2 concentration, resulting in a net yield gain. In conclusion, climate change exerted an overall positive influence on cotton production in the Tarim River Basin during 1980—2020, and early sowing represented an effective adaptation strategy. The research result can provide quantitative data references for future cotton production under continued climate change.

Key words: cotton production; early sowing; climate − management − crop; crop model; Tarim River Basin

0　引言

地球大气化学成分的显著变化正在导致全球变暖[1-2]。不同地区升温幅度和季节特征上存在差异,但全球升温方向一致[3-4]。尽管观测和预估的全球变暖在空间上仅有微小差异,但其对不同区域造成的影响在量级甚至方向上存在显著差别[5]。气候变化的影响最终通过农业生产传导至人类的粮食安全与生计保障,然而,气候变化对农业的影响在不同作物、不同流域、不同管理措施下,会呈现截然不同的结果[6-9]。因此,探究气候变化对农业影响在不同空间尺度上的差异,揭示“气候–作物–管理”三者的交互机制,已成为农业适应研究的核心前沿。

棉花是全球重要的经济作物,也是灌溉水消耗量最高的作物之一[10]。新疆塔里木河流域凭借独特的绿洲灌溉系统,贡献了全国棉花产量的 40% 以上。气候变化通过控制冰川、积雪融水和山地降水改变了塔里木河流域现有的径流模式[11],且影响霜冻事件发生频率,进而改变棉花播期[12]。厘清气候变化对该流域棉花生产的影响,有利于棉花产业的安全可持续发展。相较于田间与受控试验,作物模型以较低成本、较高效率及可重复调控的优势,可动态解析作物生长与气候因子的耦合过程,已成为量化气候变化对农业生产潜在影响的核心工具。作物模型基于生理生态机制,综合量化多因子协同效应,具有机理性强、可外推性高的特点。针对塔里木河流域气候变化与棉花生产这一主题,现有研究主要集中在:产量、需水量结果模拟[13],未来情景下棉花产量预估及抵抗水分亏缺的潜力[14],棉花生产气候适宜区转移[15-17],产量对播期的响应[6] 等方面。然而,现有研究大多存在固定品种、管理措施或将西北棉花种植区作为整体致使缺乏内部差异分析等问题,评估指标主要考虑产量,对物候、灌溉量等生产指标讨论并不充分,且“气候–作物–管理”的系统解析并不完善。基于以上不足,塔里木河流域棉花生产中以下问题值得思考:传统种植日历,4 月中旬播种、9 月中下旬收获,对已经“变暖”的塔里木河流域的适用性;若播期提前或推迟,能否利用或避开高温、干旱与冷害的关键敏感期;不同品种在气候变暖梯度下是否表现出差异化的“播期边际效应”。这些问题的答案关乎塔里木河流域棉花产业布局,国家纤维安全和人民生计保障。

本研究以塔里木河流域 9 个气象站点为核心,选取 1980—2020 年逐日气象、土壤、作物管理记录,结合 8 个主栽棉花品种,设置 3 月 20 日、4 月 1 日、4 月 10 日、4 月 20 日、5 月 1 日、5 月 10 日 6 个播期梯度,采用经本地化校验的 DSSAT − CROPGRO − Cotton 模型开展连续情景模拟。基于情景扰动下作物–气候响应分析,量化棉花产量、全生育期与所需灌溉量对气候因子的敏感性,构建“气候–作物–管理”三元交互框架,并基于边际效应理论识别最优播期窗口。以期揭示近 41 年塔里木河流域棉花生产系统的时空演变规律,阐明播期与品种对产量、全生育期及所需灌溉量的调控机制,获得升温背景下可操作的播期优化策略,评估棉花生产对多气候因子耦合下综合敏感性。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

塔里木河流域(34°55′ ~ 43°08′N, 73°10′ ~ 94°05′E)位于新疆维吾尔自治区南部,流域面积约 1.02×10^6 km^2。该地区是典型的温带干旱和半干旱气候,降水稀少,蒸发量高。高山冰川积雪融水和山区降水是主要社会生产水源。凭借充足光照、丰厚热量与冰川融水灌溉,塔里木河流域孕育出全国最大的绿洲棉区,2020 年该流域棉花产量约占全国总产量的 41.5%。

1.2　DSSAT 作物模型与参数设定

DSSAT (Decision support system for agrotechnology transfer)模型是一个综合农业系统模型,整合众多作物生长模型,用于模拟作物生长、发育和产量形成过程。DSSAT − CROPGRO − Cotton 模

型是 DSSAT 模型中的一个重要组成部分[18],能够模拟棉花光合作用、同化物分配、叶面积指数变化、生物量积累以及最终的产量形成[19];且模型还考虑土壤水分、养分供应、温度、光照等环境因素对棉花生长的影响[19-20]。

鉴于模型遗传参数的特异性,本研究并未采用模型默认品种参数,而是直接引用了针对塔里木河流域棉花系统已完成本地化率定和独立验证的遗传参数,具体源自 Wang 等[19]和周琦翔等[21]的研究成果。这些参数基于塔里木河流域多点多年大田试验数据(2006—2018 年)系统率定,率定指标包括土壤含水率、物候期、叶面积指数、地上部生物量、产量等,参数率定采用“试错法”与 GLUE 方法相结合,通过不断调整品种遗传参数,使模拟值与观测值的均方根误差最小化,通过严格统计验证,被证明适用于本研究区的气候与栽培条件[19,21],棉花品种见表 1。在环境与管理方面,选取研究区广泛分布的沙壤土模拟土壤背景,土壤物理性质、田间参数设置参照文献[22]。无病虫害及杂草影响,无养分限制,灌溉方式选择自动滴灌,即当土壤含水率下降至凋萎系数时,系统自动灌溉到田间持水率。气候变量输入包括日最高气温、最低气温、降水量和太阳辐射,数据来源于中国气象数据网。1980—2020 年 CO_2 浓度数据来自国家冰川冻土沙漠科学数据中心。CO_2 浓度由 1980 年的 339 μmol/mol 升高到 2020 年的 419 μmol/mol,升高速率为 1.929 μmol/(mol·a)。

1.3 基于情景扰动的作物-气候响应试验设计

1980—2020 年塔里木河流域 9 个站点气候数据来自中国气象局。对数据进行完整性检验、异常值和错误代码清理、利用线性插值处理缺测值并进行单位与基准换算,最后将日照时数转化为太阳辐射。为分析棉花产量、全生育期和灌溉量对气候变化的响应特征,采用控制变量法结合 DSSAT 模型的输入气候数据调整功能,系统性构建单一气候因子梯度变化情景,而保持其他气候因子及管理措施恒定,以厘清特定气候因子边际效应。具体而言,以 1980—2020 年实测日气象数据为基准,通过系统性对基准气候数据进行增量调整,构建系列敏感性试验情景,其中情景扰动设置方案见表 2。以最高气温为例,在实测日最高气温基础上,控制其他气候要素不变,最高气温通过升高 1℃ 和 2℃,或降低 1℃ 和 2℃,得到相应扰动情景,驱动校准后 DSSAT-CROPGRO-Cotton 模型,并与实测气象数据驱动下棉花生产模拟结果对比,得到作物生产对情景扰动的响应特征。CO_2 浓度变化响应分析则是在 1980—2020 年间保持某一固定值不变方式下进行。为量化气候因子变化对棉花生产的影响程度,计算相对变化率,即情景模拟值相对于基准情景的百分比。

表 1 基于农业气象观测站数据的棉花遗传参数调整和验证

Tab. 1 Adjustment and validation of cotton genetic parameters based on agrometeorological station data

站点	品种	调参年份	验证年份
和田	中棉 49	2006、2007	2008、2009
喀什	新陆中 36	2010、2011	2012
阿克苏	新陆中 40	2009、2010、2011	2012
莎车	中棉 43	2006、2007、2008	2009
于田	新陆早 36	2009、2010	2011、2012
巴楚	新海 24	2008、2009、2010	2012
若羌	新陆中 46	2010、2011	2012
库尔勒	新陆中 32	2007、2008	2009
阿拉尔	新陆中 46	2017	2018

表 2 情景扰动设置方案

Tab. 2 Design of climate scenario perturbations for sensitivity analysis

序号	最高气温/℃	最低气温/℃	降水量变化率/%	辐射量/(MJ·m^{-2}·d^{-1})	CO_2 浓度/(μmol·mol^{-1})
1	-2	-2	80	-2	340
2	-1	-1	90	-1	360
3	0	0	100	0	380
4	1	1	110	1	400
5	2	2	120	2	420

2 结果与分析

2.1 气候变化特征

塔里木河流域 1980—2020 年棉花生长季(3—10 月)气候变化特征如图 1a 所示。流域尺度上,最高气温平均升温速率为 0.354℃/(10a),变化趋势显著($P<0.01$)。最高气温变化趋势在站点间存在差异,阿克苏(0.482℃/(10a))和若羌(0.412℃/(10a))升温速率较高,喀什(0.228℃/(10a))、阿拉尔(0.300℃/(10a))和巴楚(0.310℃/(10a))升温速率较低。若羌最高气温处于流域最高水平,1980—2020 年棉花生长季平均值为 28.4℃,高于流域其他站点平均值 2.2℃。不容忽视的是,流域尺度上,1980—1996 年最高气温呈下降趋势,而在 1997—2020 年则呈上升趋势。

由图 1b 可知,流域尺度上,1980—2020 年最低气温平均升温速率为 0.598℃/(10a),变化趋势显著($P<0.01$),且最低气温升温速率高于最高气温。流域西南部站点最低气温升温速率高于东北部站点,和田(0.971℃/(10a))、喀什(0.898℃/(10a))和阿克苏(0.889℃/(10a))升温速率较高,阿拉尔

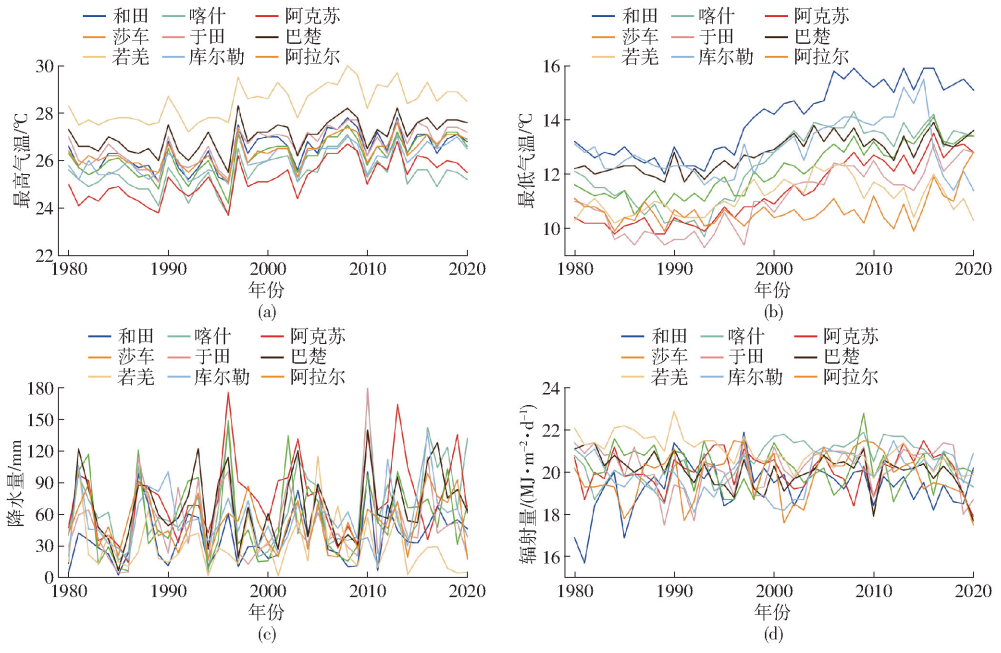


图 1　生长季尺度气候要素变化特征

Fig. 1　Characteristics of climate-element changes at growing-season scale

(0.204℃/(10a))、若羌(0.234℃/(10a))和库尔勒(0.299℃/(10a))升温速率较低。和田最低气温处于流域最高水平,1980—2020 年棉花生长季平均值为 14.1℃,高于流域其他站点平均值 2.3℃。流域尺度上,最低气温在 1980—1993 年呈下降趋势,而在 1994—2006 年呈快速上升趋势,此后升温幅度趋于平缓。

由图 1c 可知,1980—2020 年塔里木河流域棉花生长季降水量平均值仅为 55.0 mm,呈增加趋势,变化速率为 0.392 mm/a,但并不显著。流域尺度上,极端少雨事件(降水量小于等于 30 mm)发生在 1980、1985、1986、1994、2009 年,极端多雨事件(降水量大于等于 85 mm)发生在 1981、1987、1996、2010、2016 年,降水量年度差异最高超过 100 mm。站点尺度上,仅若羌降水量呈不显著下降趋势,其余站点均呈不显著增加趋势。

由图 1d 可知,1980—2020 年塔里木河流域棉花生长季日辐射量呈不显著降低趋势,变化速率为 −0.001 MJ/(m²·d·a)。站点尺度上,阿克苏、莎车、巴楚和若羌辐射呈下降趋势,其他站点则呈上升趋势。变化趋势显著的站点仅有喀什、巴楚和若羌。

综上所述,1980—2020 年塔里木河流域呈现“升温一致,最低气温升温速率高于最高气温,降水量稀少且年度变异大,辐射量降低”的气候变化特点。

2.2　棉花生产对播期的响应

2.2.1　产量对播期的响应

在气候变暖导致热季提前、高温胁迫与水分错峰背景下,精准调整播期有利于将增温转化为有效积温,重塑气候-作物-管理的时空耦合。1980—2020 年塔里木河流域产量-气候-播期耦合关系如图 2 所示。早播有利于棉花增产,但亦增加气候风险。若播期为 3 月 20 日,则喀什(1994 年)、若羌(2001、2006 年)和库尔勒(2001 年)出现低温胁迫造成的绝产;若播期为 4 月 1 日,若羌(2006 年)出现低温胁迫造成的绝产。在考虑气候风险并做适当调整的情况下,早播在提高产量方面有巨大潜力。

以传统播期 4 月 20 日为基准,3 月 20 日早播在流域尺度上平均增产 8.7%(站点间 3.7% ~ 19.2%),于田(19.2%)、莎车(11.7%)等站点响应最为敏感,而若羌(3.7%)、库尔勒(4.7%)等站点响应相对较弱。相反,晚播导致产量显著下降,5 月 10 日播种较 4 月 20 日平均减产 19.1%(站点间 10.4% ~ 30.5%),降幅约为同等幅度早播增益的 2.2 倍,呈现“增产受限、减产剧烈”非对称风险格局。

1980—2020 年塔里木河流域棉花产量平均值为 3 416.2 kg/hm²(播期为 3 月 20 日),呈显著增加趋势($P<0.01$),增速为 22.3 kg/(hm²·a)。然而各站点棉花产量对气候变化响应的差异性值得关注,在气候变化影响下,产量表现出“增产-减产”“减产-增产-减产”“持续增产”3 种趋势。在和田和若羌,“增产-减产”转折点约出现在 1998 年和 2007 年,即转点后 2 个站点气候条件对产量不利。在喀什和于田,“减产-增产-减产”“减产-增产”转折点分别出现在 1993 年和 1989 年,“增产-减产”转折点则分别出现在约 2012 年和 2006 年。而在阿克苏、莎车、巴楚、库尔勒和阿拉尔等站点,气候变化持续促进了产量增加。

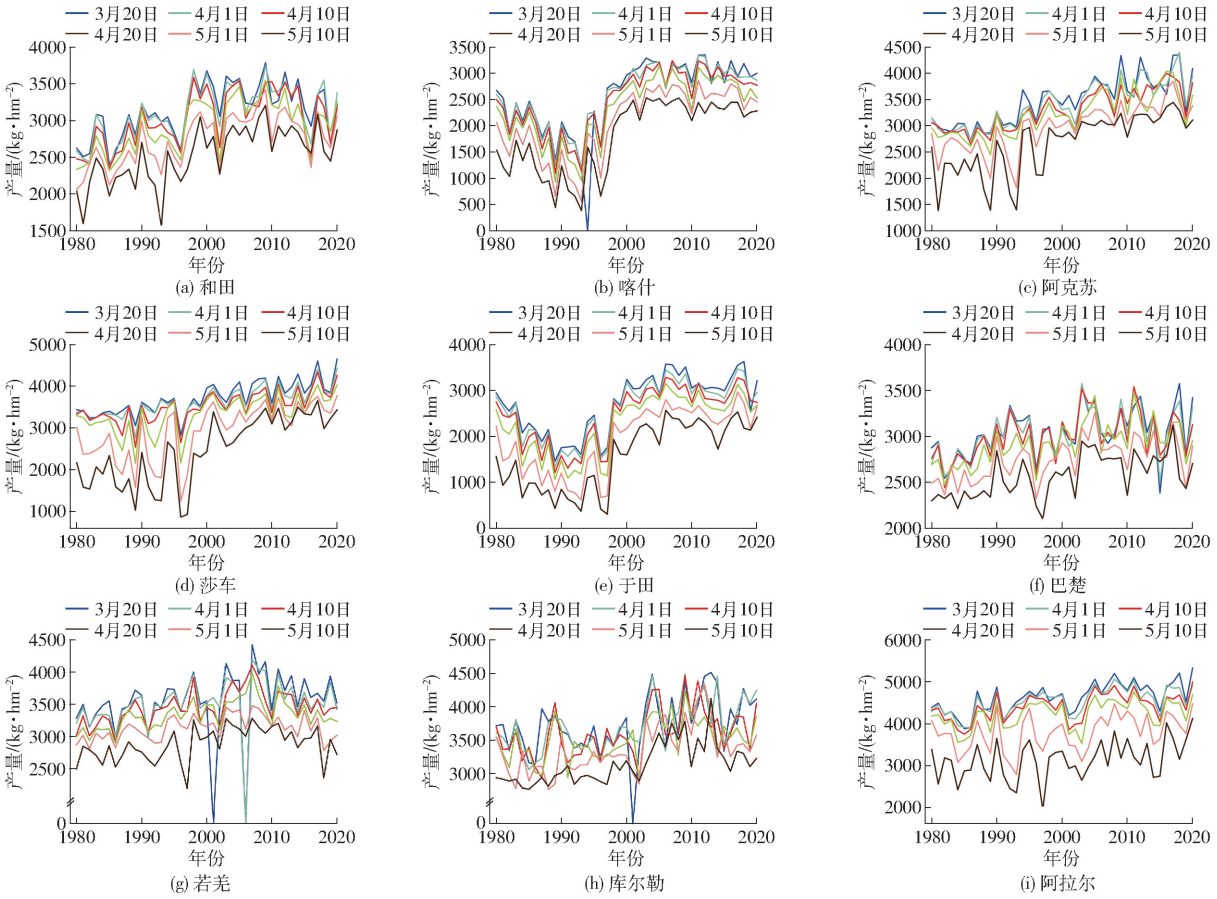


图 2 产量对播期调整的响应

Fig. 2 Yield response to sowing-date adjustment

2.2.2 全生育期对播期的响应

1980—2020 年塔里木河流域棉花全生育期-气候-播期耦合关系如图 3 所示。在流域尺度上,早播延长了棉花全生育期。以 4 月 20 日为参照基准,早播(3 月 20 日)使全生育期平均延长 18.3 d(站点间 12.2 ~ 27.7 d),于田(27.7 d)、莎车(26.3 d)等站点响应最为突出,而喀什(12.2 d)、库尔勒(12.5 d)等站点响应相对较弱。相反,晚播对生育期的缩短效应显著弱于早播的延长效应,5 月 10 日播种较 4 月 20 日平均仅缩短 9.8 d,且于田(-20.2 d)、莎车(-20.2 d)等站点出现大幅缩短,而和田(1.9 d)、巴楚(6.3 d)等站点则出现延长现象。播期对全生育期影响的站点差异,可归纳为 3 种形式:“差异大”“差异小”“差异前大后小”。“差异大”主要表现在莎车、于田、若羌和阿拉尔站点,差异分别为 46.6、48.0、36.6、39.4 d。相对而言,巴楚和库尔勒站点表现为“差异小”,全生育期受播期的影响较小,差异分别为 10.0、13.0 d。而和田、喀什和阿克苏则表现为“差异前大后小”,全生育期受播期影响的差异存在时段区别,例如,在 1980—2007 年阿克苏全生育期受播期影响最大差异为 43.8 d,而在 2008—2020 年间,差异仅为 15.8 d。以 3 月 20 日为例(部分微调以避免绝产),在流域尺度上,1980—2020 年间棉花全生育期呈显著缩短趋势($P < 0.01$),变化速率为 -0.539 d/a。

2.2.3 灌溉量对播期的响应

流域尺度上,1980—2020 年塔里木河流域棉花生产灌溉量-气候-播期耦合关系如图 4 所示,播期调整对灌溉需水量呈现“早增晚减”的单调响应格局。以 4 月 20 日为基准,3 月 20 日播种使灌溉量平均增加 3.8%(站点间 0.6% ~ 7.8%),莎车(7.8%)、于田(7.4%)等站点增幅最大,和田(0.6%)、巴楚(0.9%)等站点响应微弱;而 5 月 10 日晚播使灌溉量平均减少 8.0%(站点间 1.2% ~ 13.0%)。莎车、于田、若羌和阿拉尔等站点灌溉量受播期影响较大,灌溉量差异最大可达 118.0、100.8、88.5、90.0 mm。巴楚和库尔勒灌溉量受播期影响较小,仅为 11.2、18.6 mm。若 3 月 20 日播种,1980—2020 年塔里木河流域棉花生产灌溉量呈不显著减少趋势,变化速率为 -0.650 mm/a。

2.3 基于情景扰动下的作物-气候响应

2.3.1 情景扰动下产量变化

解析气候变化对棉花生产系统的敏感性机制,是构建气候韧性农业、保障粮食与纤维安全及实现

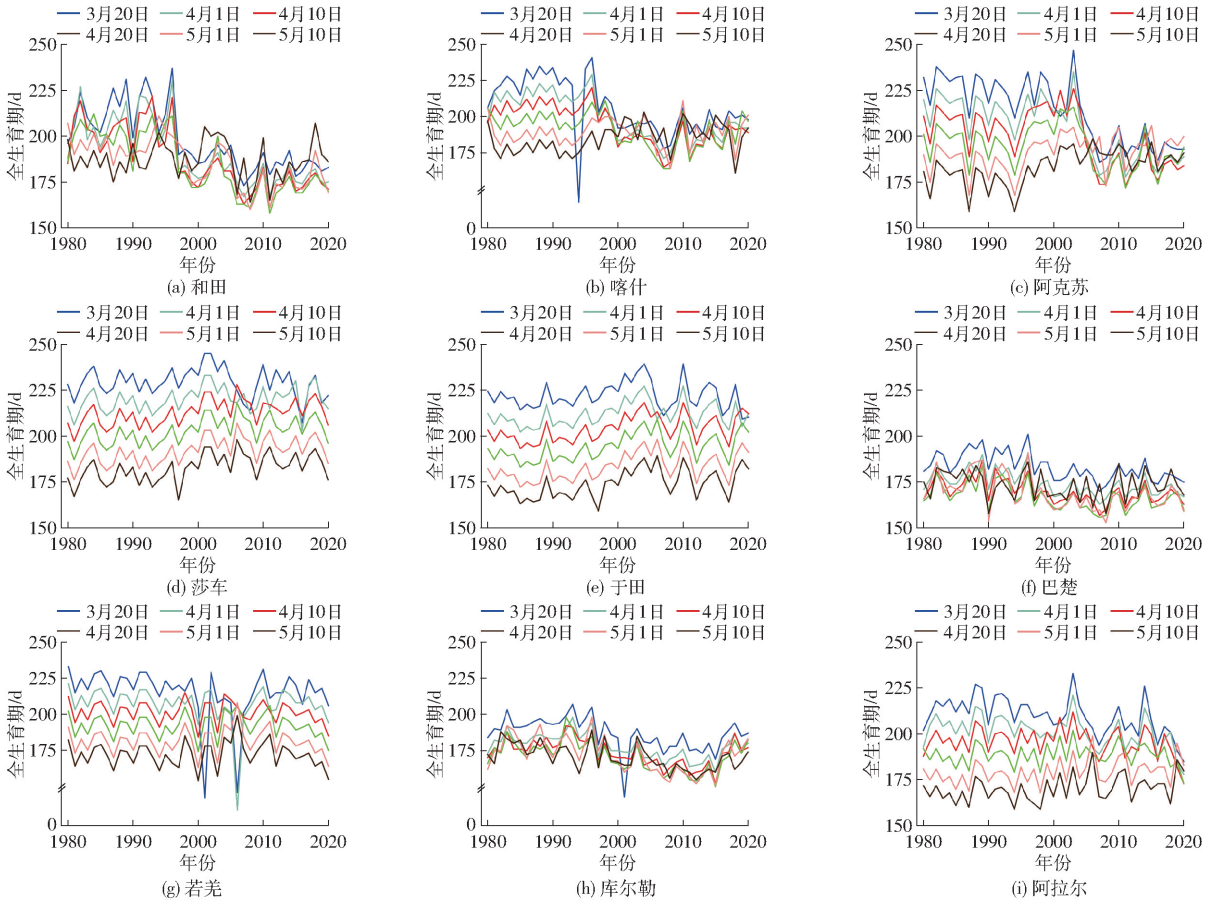


图 3　全生育期对播期调整的响应

Fig. 3　Response of whole growth period to sowing-date adjustment

可持续供给的理论基础。以 3 月 20 日为例，在情景扰动下，产量变化气候敏感性如图 5 所示，其中最高气温、最低气温、降水量变化率和辐射量分别用 Tmax、Tmin、Pre 和 Ra 表示。数据分析过程剔除部分因低温胁迫造成的绝产情况，全生育期和灌溉量的气候敏感性分析数据剔除亦同。由图 5 可知，在充分灌溉前提下，棉花产量与最高气温、最低气温、辐射量和 CO_2 浓度密切相关。尽管产量对气候变化的敏感性存在站点差异，但仍存在以下共识性结论：塔里木河流域最高气温对产量的影响正处于“积极-消极”的临界状态或已处于消极影响阶段，最低气温、辐射量和 CO_2 浓度升高促使产量增加。

由产量对最高气温敏感性分析发现，在和田、阿克苏、巴楚、若羌、库尔勒和阿拉尔，最高气温升高 1℃将导致产量平均下降 2.3%，升高 2℃将导致产量平均下降 5.6%；在喀什和莎车，最高气温升高 1℃将导致产量平均增加 0.4%，但升高 2℃将导致产量平均下降 1.0%；在于田，最高气温升高对产量保持积极作用，升高 1℃增产 2.0%，升高 2℃增产 1.2%。

产量对最低气温敏感性分析发现，最低气温升高对产量保持积极作用，最低气温升高 1℃，棉花增产 5.5%，升高 2℃增产 8.9%。最低气温升高对于田棉花产量作用最为显著，最低气温升高 1℃，棉花增产 13.2%，升高 2℃增产 22.2%。最低气温升高对库尔勒棉花产量作用小且可能有消极影响，最低气温升高 1℃，棉花增产 1.2%，但升高 2℃减产 0.8%。

辐射量增加促使棉花增产，辐射量降低则导致减产。辐射量增加 1 MJ/(m²·d)，产量平均增加 2.6%，增加 2 MJ/(m²·d)，产量平均增加 5.0%。辐射量降低 1 MJ/(m²·d)，产量平均减少 2.7%，若降低 2 MJ/(m²·d)，产量平均减少 5.5%。CO_2 肥效对棉花产量作用显著。以 340 μmol/mol 为浓度基准，若 CO_2 浓度增加 20 μmol/mol，棉花产量增加 4.4%；若 CO_2 浓度由 340 μmol/mol 增加到 420 μmol/mol，则产量增加 15.7%。

综上所述，情景扰动下，气候要素与产量呈非线性响应。塔里木河流域棉花产量的高温胁迫已然存在，最低气温和 CO_2 浓度升高对产量有正向效应，辐射量下降对产量有消极影响。

2.3.2　情景扰动下全生育期变化

情景扰动下，全生育期变化气候敏感性如图 6 所示。由图 6 可知，在充分灌溉前提下，棉花全生育

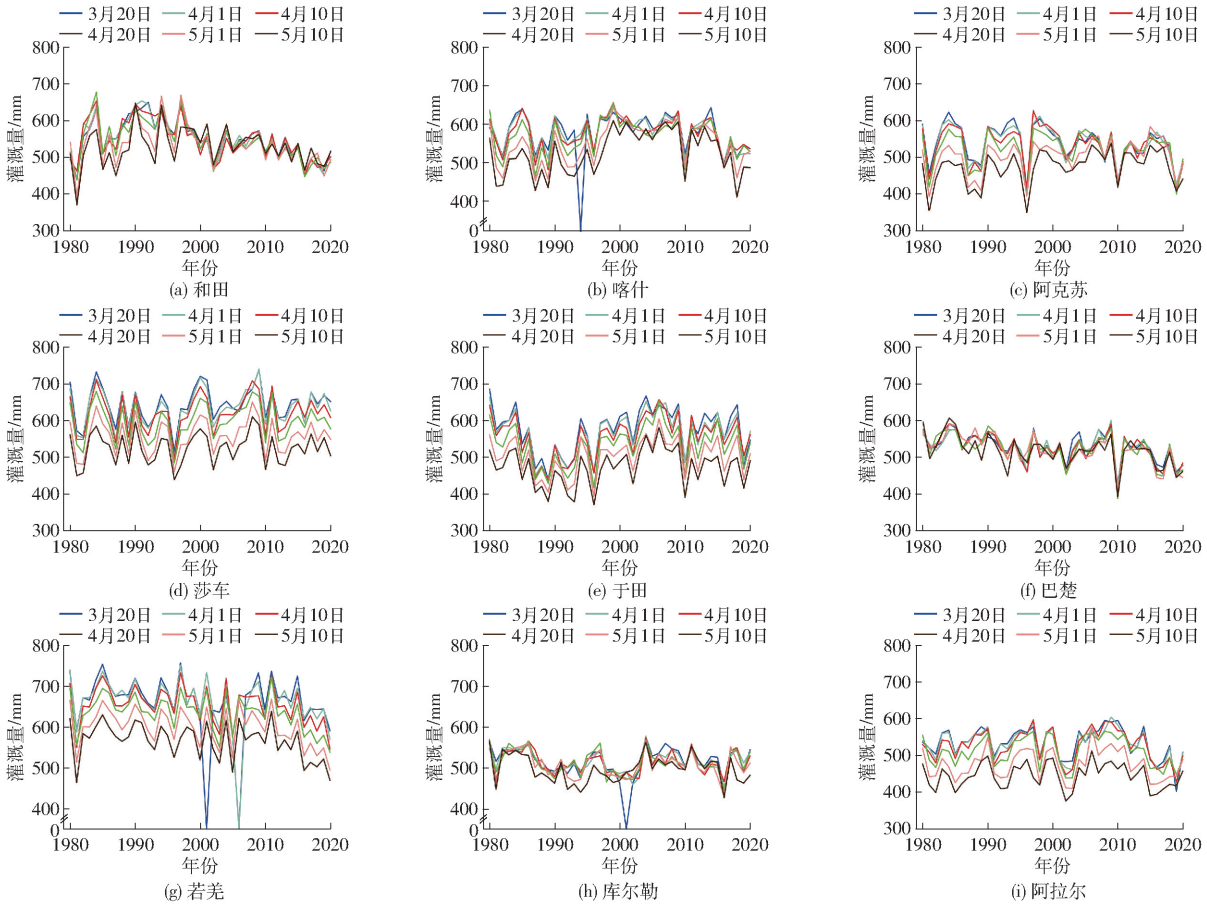


图 4 灌溉量对播期调整的响应

Fig. 4 Response of irrigation amount to sowing-date adjustment

期与最高气温和最低气温密切相关,降水量、辐射量和 CO_2 浓度变化对全生育期影响有限。最高气温升高可缩短全生育期,最低气温与全生育期关系存在站点差异。在和田、喀什、阿克苏、巴楚、库尔勒和阿拉尔,最低气温升高使全生育期缩短,但在莎车、于田和若羌,当前最低气温下全生育期最长,最低气温升高或降低均使全生育期缩短。

流域尺度上,最高气温升高 1℃,棉花全生育期平均减少 5.1 d,升高 2℃,全生育期平均减少 9.8 d。最高气温升高对阿拉尔站点棉花全生育期影响最大,升高 1℃,全生育期平均减少 8.3 d,升高 2℃,全生育期平均减少 14.7 d。在流域尺度上,最低气温升高将缩短全生育期,最低气温升高 1℃,棉花全生育期平均减少 5.5 d,升高 2℃,全生育期平均减少 12.4 d。然而,在莎车、于田和若羌,最低气温降低时,全生育期同样缩短;特别是莎车,最低气温降低 1℃,棉花全生育期减少 3.2 d,降低 2℃,全生育期减少 6.8 d。

2.3.3 情景扰动下灌溉量变化

灌溉量变化气候敏感性如图 7 所示。尽管灌溉量变化的气候敏感性存在站点间差异,但在流域尺度上仍能得到以下共识:最高气温和辐射量升高促使棉花所需灌溉量增加,最低气温升高或降低均导致灌溉量减少。降水量增加降低灌溉量需求。CO_2 浓度升高促使灌溉量增加,但增加幅度有限。

流域尺度上,最高气温升高 1℃,灌溉量平均增加 1.0%,升高 2℃ 导致灌溉量增加 2.4%;若最高气温降低 1℃,灌溉量平均减少 1.0%,降低 2℃ 则灌溉量平均减少 2.2%。最低气温升高 1℃,灌溉量平均减少 0.4%,升高 2℃ 导致灌溉量减少 1.5%;若最低气温降低 1℃,灌溉量平均减少 1.3%,降低 2℃ 灌溉量平均减少 3.3%。流域尺度上,降水量增加 10% 降低 0.7% 的灌溉需求,降水量增加 20% 则降低 1.5% 的灌溉需求;降水量减少 10% 增加 0.6% 的灌溉需求,降水量减少 20% 则增加 1.2% 的灌溉需求。辐射量增加促使棉花灌溉需求增加,辐射量降低导致灌溉需求减少。辐射量增加 1 MJ/(m^2·d),灌溉量平均增加 4.9%,辐射量增加 2 MJ/(m^2·d),灌溉量平均增加 10.2%;辐射量降低 1 MJ/(m^2·d),灌溉量平均降低 5.3%,辐射量降低 2 MJ/(m^2·d),灌溉量平均降低 10.4%。CO_2 浓度变化对灌溉量影响有限。相比较 340 μmol/mol CO_2 浓度水平,浓度增加 20 μmol/mol,灌溉量平均增加 0.5%,若 CO_2 浓度由 340 μmol/mol 增加到

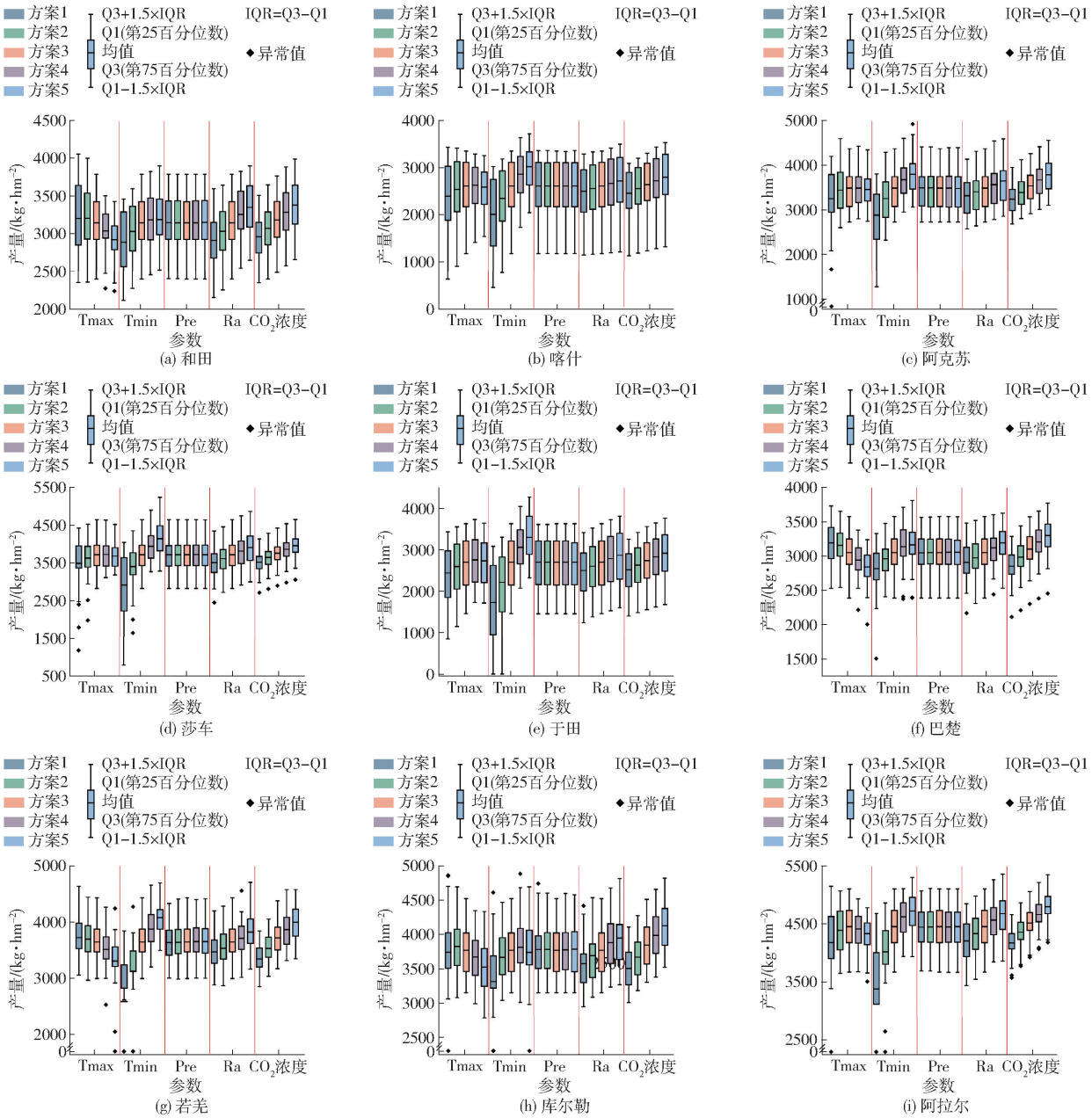


图 5　产量变化气候敏感性分析

Fig. 5　Climate sensitivity analysis of yield changes

420 μmol/mol，灌溉量增加 1.2%。

3　讨论

本研究揭示了 1980—2020 年塔里木河流域“升温主导、不对称性显著”的气候变化格局，与西北干旱区“暖湿化”背景下热力增强机制总体一致。最高气温以速率 0.354℃/(10a)上升，这与中国西北部升温速率(0.327℃/(10a))研究结果相近[23]。最低气温升温速率较最高气温高，这一“夜间增温偏强”特征与干旱半干旱地区的普遍规律相符[24]。中国西北干旱区降水量增加趋势存在显著的非平稳性，增长速率受年代际波动强烈调制，本研究结果为该结论提供了进一步支撑[25]。1980—2020 年塔里木河流域辐射量呈微弱下降趋势，与相关研究结果一致，但揭示了流域内更多的变化细节[26]。

采用的遗传参数源自 Wang 等[19]和周琦翔等[21]针对塔里木河流域棉花生产系统的本地化率定，率定指标包括土壤含水率、物候期、叶面积指数、地上部生物量、产量等，通过不断调整品种遗传参数，使模拟值与观测值的均方根误差最小化，从而保障模拟结果有效性。诸多研究结果均表明，参数本地化作物模型具有很好的可靠性[6-7,14,27]。然而，模型在长时间序列应用中结构不确定性存在局限。首先，品种遗传参数的时序代表性问题：本研究假设 1980—2020 年间遗传参数恒定，实际育种进展对棉花生产的影响未被考虑，可能低估实际产量增速。

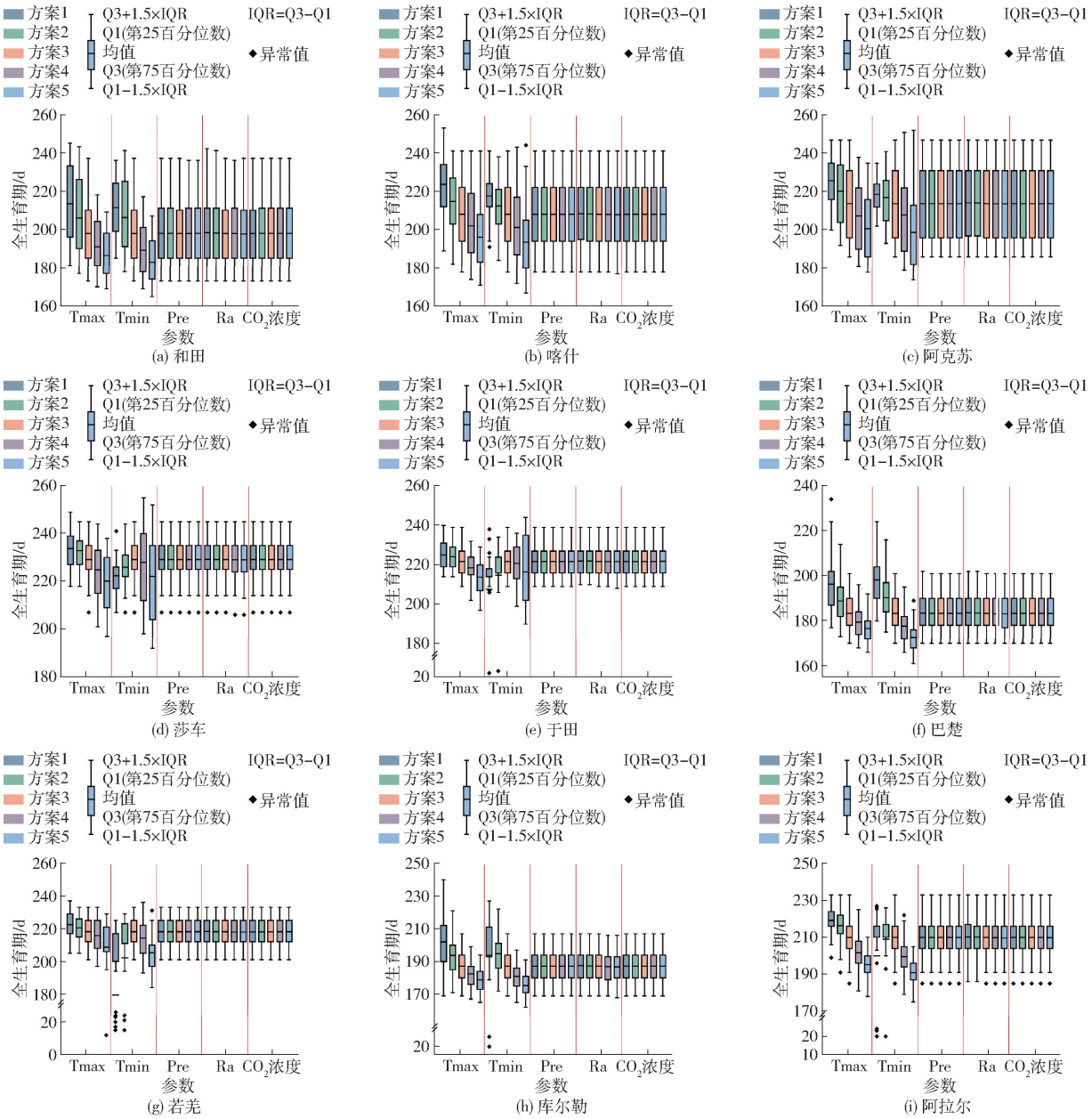


图 6 全生育期变化气候敏感性分析

Fig. 6 Climate sensitivity analysis of whole growth period changes

其次,未考虑病虫害、杂草等因素影响,且灌溉方式为充分灌溉,使模拟结果更加乐观。

通过“基准-扰动”双框架揭示的棉花生产响应规律,为理解干旱区绿洲农业的气候适应性提供了新视角。敏感性分析证实 1980—2020 年塔里木河流域最高气温对棉花产量的影响已处于“积极-消极”转变临界,最高气温升高和辐射量降低对产量影响消极,但最低气温和 CO_2 浓度升高补偿了该影响,并促使产量增加。气候变化对塔里木河流域棉花产量的正向效应在相似研究中亦得到证实[28]。充分灌溉的模拟背景,削弱了降水量和水分胁迫对棉花生产的影响。棉花最佳代谢活动的热动力学窗口温度为 23 ~ 32℃,最大光合作用温度为 28℃[29],当温度大于 35℃或低于 15℃时将受到高温或低温胁迫[30]。CO_2 浓度升高可增加作物光合作用,降低气孔导度,减少叶面积蒸腾,从而促进作物生长和产量形成[7]。播期提前或推迟,可以避开高温、干旱与冷害的关键敏感期,是一项对作物产量以及田间资源积累与利用具有显著影响的农艺管理措施[6]。

4 结论

(1)1980—2020 年,塔里木河流域气温显著增加,最低气温升温速率高于最高气温,降水量稀少且年度变异大,辐射量降低不显著,CO_2 浓度匀速增加。

(2)以产量为评价指标,传统种植日历已不适应当前气候条件。早播对提高产量有巨大潜力,但气候风险仍存在。较 4 月 20 日播种,早播在流域尺

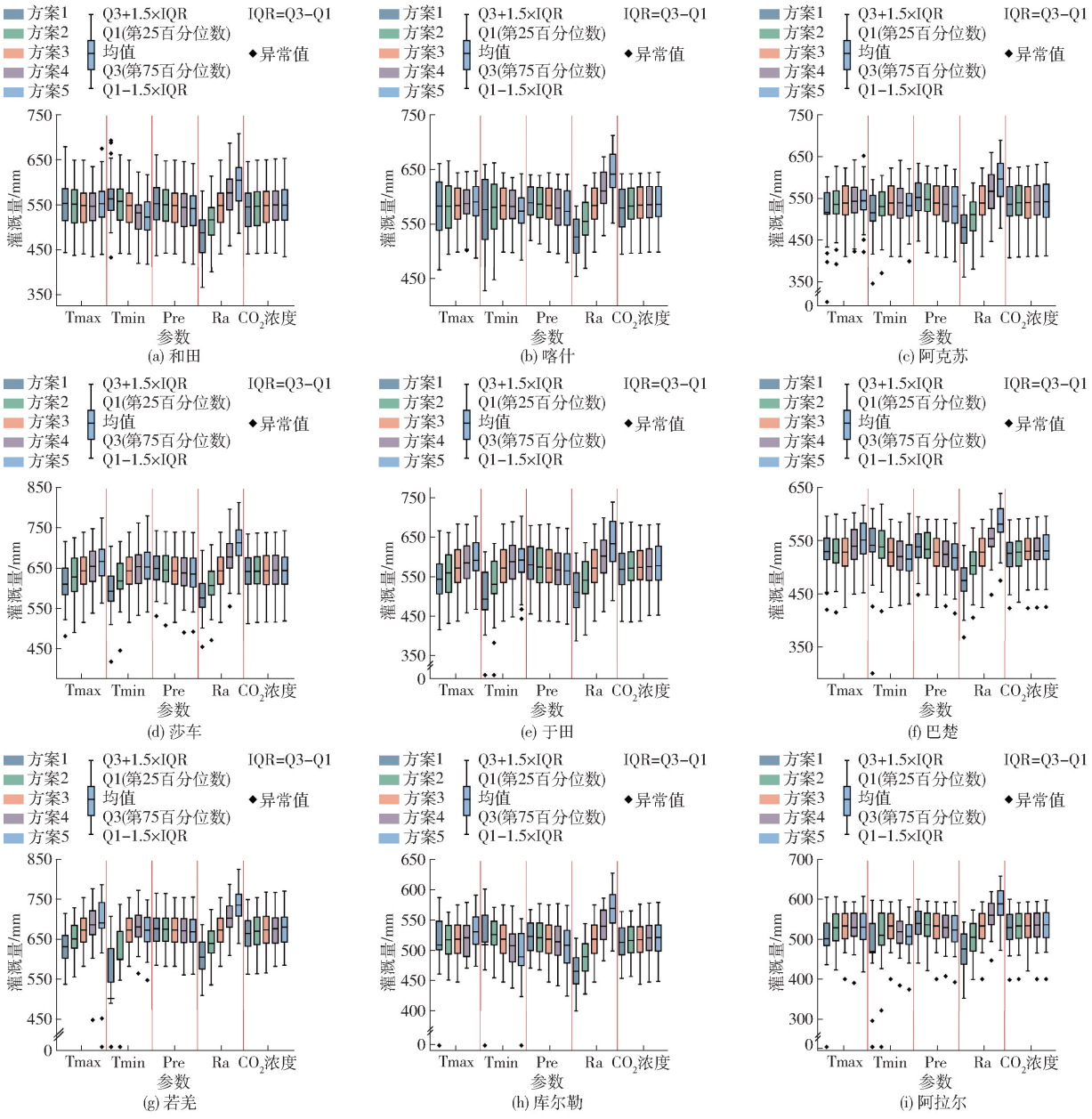


图 7　灌溉量变化气候敏感性分析

Fig. 7　Climate sensitivity analysis of irrigation amount changes

度上可使棉花产量提高 8.7%。不同品种在气候变暖梯度下表现相似,没有表现出差异化的“播期边际效应”。早播延长了棉花全生育期,较 4 月 20 日播种,3 月 20 日播种可使全生育期平均增加 18.3 d。以 4 月 20 日为基准,3 月 20 日播种使灌溉量平均增加 3.8%。流域尺度上(3 月 20 日播种),1980—2020 年棉花产量呈显著增加趋势($P<0.01$),增速为 22.3 kg/(hm^2·a);全生育期呈显著缩短趋势($P<0.01$),变化速率为 −0.539 d/a;灌溉量呈不显著减少趋势,变化速率为 −0.650 mm/a。

(3)塔里木河流域最高气温对产量的影响正处于“积极–消极”的临界状态或已处于消极影响阶段;最低气温和 CO_2 浓度升高对产量有正向效应,辐射量下降对产量有消极影响。棉花全生育期与最高气温和最低气温密切相关,降水量、辐射量和 CO_2 浓度变化对全生育期影响有限。最高气温和辐射量升高促使棉花所需灌溉量增加,最低气温升高或降低均导致灌溉量减少;降水量增加降低了灌溉量需求;CO_2 浓度升高促使灌溉量增加,但增加幅度有限。

参　考　文　献

[1]　Hansen G, Stone D. Assessing the observed impact of anthropogenic climate change[J]. Nature Climate Change, 2016, 6(5): 532 −537.

[2]　Legg S. IPCC, 2021: climate change 2021-the physical science basis[J]. Interaction, 2021, 49(4): 44 −45.

[3] Choi Y W, Khalifa M, Eltahir E A. North-south disparity in impact of climate change on "outdoor days"[J]. Journal of Climate, 2024, 37(12): 3269 - 3282.
[4] Betts R A, Collins M, Hemming D L, et al. When could global warming reach 4℃? [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2011, 369(1934): 67 - 84.
[5] Eltahir E A, Choi Y W. A theory on regional impacts of global warming[J]. Geophysical Research Letters, 2025, 52(19): e2025GL118808.
[6] Li Y, Li N, Javed T, et al. Cotton yield responses to climate change and adaptability of sowing date simulated by AquaCrop model[J]. Industrial Crops and Products, 2024, 212: 118319.
[7] Adhikari P, Ale S, Bordovsky J P, et al. Simulating future climate change impacts on seed cotton yield in the Texas High Plains using the CSM - CROPGRO - Cotton model[J]. Agricultural Water Management, 2016, 164: 317 - 330.
[8] Chen X, Wang L, Niu Z, et al. The effects of projected climate change and extreme climate on maize and rice in the Yangtze River Basin, China[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2020, 282: 107867.
[9] 刘小刚, 普嘉鹏, 韩焕豪, 等. 未来气候变化下中国西南地区节水抗旱稻适生区变化特征研究[J]. 农业机械学报, 2025, 56(7): 618 - 626, 652.
Liu Xiaogang, Pu Jiapeng, Han Huanhao, et al. Suitability area of water-saving and drought-resistant rice cultivation in Southwest China under future climate scenarios[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(7): 618 - 626, 652. (in Chinese)
[10] Geng Q, Zhao Y, Sun S, et al. Spatio-temporal changes and its driving forces of irrigation water requirements for cotton in Xinjiang, China[J]. Agricultural Water Management, 2023, 280: 108218.
[11] Zhang Q, Chen Y, Li Z, et al. Recent changes in water discharge in snow and glacier melt-dominated rivers in the Tienshan Mountains, Central Asia[J]. Remote Sensing, 2020, 12(17): 2704.
[12] Yue Z, Xu Z, Wang Y. The spatio-temporal variation of spring frost in Xinjiang from 1971 to 2020[J]. Atmosphere, 2022, 13(7): 1087.
[13] Chen X, Qi Z, Gui D, et al. Simulating impacts of climate change on cotton yield and water requirement using RZWQM2[J]. Agricultural Water Management, 2019, 222: 231 - 241.
[14] Yue S, Wang L, Cao Q, et al. Assessment of future cotton production in the Tarim River Basin under climate model projections and water management[J]. Journal of Earth Science, 2025, 36(4): 1780 - 1792.
[15] 岳胜如, 胡雪菲, 侯晓华, 等. 基于 CMIP6 模式的塔里木河流域棉花生产评估[J]. 干旱区研究, 2025, 42(10): 1925 - 1938.
Yue Shengru, Hu Xuefei, Hou Xiaohua, et al. Cotton production assessment in the Tarim River Basin based on CMIP6 models [J]. Arid Zone Research, 2025, 42(10): 1925 - 1938. (in Chinese)
[16] Li L, Wu H, Gao Y, et al. Predicting ecologically suitable areas of cotton cultivation using the MaxEnt model in Xinjiang, China[J]. Ecologies, 2023, 4(4): 654 - 670.
[17] Zhu Y, Sun L, Luo Q, et al. Spatial optimization of cotton cultivation in Xinjiang: a climate change perspective[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2023, 124: 103523.
[18] Mishra S K, Kaur V, Singh K. Evaluation of DSSAT - CROPGRO - Cotton model to simulate phenology, growth, and seed cotton yield in Northwestern India[J]. Agronomy Journal, 2021, 113(5): 3975 - 3990.
[19] Wang X, Wang H, Si Z, et al. Modelling responses of cotton growth and yield to pre-planting soil moisture with the CROPGRO - Cotton model for a mulched drip irrigation system in the Tarim Basin[J]. Agricultural Water Management, 2020, 241: 106378.
[20] Srikanth K, Manikanta V, Umamahesh N. Investigating the impact of compound extremes on crop yield response of cotton using DSSAT - CROPGRO - Cotton crop simulation model[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2025, 151(1): 04024038.
[21] 周琦翔, 朱艳, 汪楚博, 等. 基于 DSSAT 模型模拟气候变化对新疆棉花物候期及产量的影响[J]. 作物学报, 2026, 52(2): 590 - 602.
Zhou Qixiang, Zhu Yan, Wang Chubo, et al. Modeling the effects of climate change on cotton phenology and potential yield in Xinjiang based on the DSSAT model[J]. Acta Agronomica Sinica, 2026, 52(2): 590 - 602. (in Chinese)
[22] 王兴鹏, 辛朗, 杜江涛, 等. 基于 DSSAT 模型的南疆膜下滴灌棉花生长与产量模拟[J]. 农业机械学报, 2022, 53(9): 314 - 321.
Wang Xingpeng, Xin Lang, Du Jiangtao, et al. Simulation of cotton growth and yield under film drip irrigation condition based on DSSAT model in Southern Xinjiang[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(9): 314 - 321. (in Chinese)
[23] Zhang Q, Yang J, Duan X, et al. The eastward expansion of the climate humidification trend in Northwest China and the synergistic influences on the circulation mechanism[J]. Climate Dynamics, 2022, 59(7): 2481 - 2497.
[24] Heng T, Feng G, Ouyang Y, et al. The spatiotemporal patterns of climate asymmetric warming and vegetation activities in an arid and semiarid region[J]. Climate, 2020, 8(12): 145.
[25] Niu H, Sun W, Huai B, et al. Causes of increased compound temperature and precipitation extreme events in the arid region of Northwest China from 1961 to 2100[J]. Remote Sensing, 2024, 16(17): 3111.
[26] Tong H, Lv Z, Jiang J, et al. Analysis of regional photovoltaic power generation suitability in China using multi-source data [J]. Frontiers in Earth Science, 2025, 12: 1528134.
[27] 张文韬, 杨启良, 李娜, 等. 未来气候变化下有机无机肥配施与灌溉对西南地区水稻产量和土壤养分的影响[J]. 农业机械学报, 2026, 57(8): 331 - 343.
Zhang Wentao, Yang Qiliang, Li Na, et al. Effects of combined organic-inorganic fertilization and irrigation on rice yield and soil nutrients in Southwest China under future climate change[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2026, 57(8): 331 - 343. (in Chinese)
[28] 李娜. 气候变化对棉花生长和产量的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2021.
Li Na. Effects of climate change on cotton growth and yield[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2021. (in Chinese)
[29] Burke J J, Hatfield J L, Klein R R, et al. Accumulation of heat shock proteins in field-grown cotton[J]. Plant Physiology, 1985, 78(2): 394 - 398.
[30] Li Z B, Zeng X Y, Xu J W, et al. Transcriptomic profiling of cotton *Gossypium hirsutum* challenged with low-temperature gradients stress[J]. Scientific Data, 2019, 6(1): 197.