

气象干旱对中亚棉花产量的影响

徐 杨^{1,2}, 李秀芬³, 葛全胜^{1,2}, 郝志新^{1,2}

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所 中国科学院陆地表层格局与模拟重点实验室, 北京 100101;

2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 沈阳农业大学农学院, 沈阳 110866)

摘要: 极端干旱事件频发对中亚棉花生产具有重要影响。本文利用乌兹别克斯坦赞格阿塔实验站棉花大田试验数据评估了 APSIM-Cotton 模型的适用性, 根据 CMIP6 气候模式模拟的 SSP1-2.6、SSP3-7.0 和 SSP5-8.5 等 3 种共享社会经济路径下的气候变化数据集, 分析了 2021—2090 年 SPEI-3 干旱指数的变化特征, 进而利用 APSIM-Cotton 模型模拟了考虑 CO₂ 肥效作用的气象干旱对棉花产量的影响。结果表明: APSIM-Cotton 模型能够准确模拟乌兹别克斯坦塔什干地区的生育期和产量变化趋势; 未来塔什干地区呈现温度明显升高、干旱发生频率明显增加的特征; 气象干旱将导致棉花产量下降, SSP1-2.6、SSP3-7.0 和 SSP5-8.5 等 3 种排放情景下, 严重气象干旱导致 2021—2050 年棉花产量较 1961—1990 年分别下降 28.0%、29.6% 和 32.1%, 2061—2090 年棉花分别减产 31.5%、33.1% 和 35.7%, 在 SSP3-7.0 和 SSP5-8.5 情景下, 极端气象干旱导致 2061—2090 年棉花产量分别下降 41.3% 和 54.2%; CO₂ 浓度升高可提高棉花产量, 贡献率为 14.9%~25.0%, 但浓度达到 750 $\mu\text{mol/mol}$ 以上时, 棉花增产幅度将不再持续增加。

关键词: 气象干旱; 中亚; 棉花产量; APSIM; CMIP 6 共享社会经济路径

DOI: 10.11821/dlxb202209014

1 引言

1965—2014 年中亚地区升温速率明显高于全球或北半球同期平均水平, 且模拟数据也显示未来百年中亚发生极端高温事件和极端降水的频率将显著增大, 这将对中亚农业生产产生不利影响^[1-2]。中亚大湖区的棉花产量位于世界第三位, 其中乌兹别克斯坦素有“白金之国”之称, 2000 年以来棉花年均产量约 110.6 万 t, 是中国棉花的主要进口国之一^[3]。乌兹别克斯坦属于典型的大陆性气候, 夏季高温少雨; 南部 7 月平均温度为 37 °C, 北部为 32~33 °C, 且 1950 年后气温超过 40 °C 的天数一直呈增加趋势; 平均年降水量 191 mm 且主要集中在冬季和春季^[4]。由于生长季降水缺乏, 乌兹别克斯坦难以发展雨养农业, 特别是近些年水资源短缺和高温导致的气象干旱已经成为限制棉花生产的重要因素。因此在全球增温的背景下, 研究气象干旱对棉花产量的影响将有助于深入认识中亚棉花产业的发展前景、科学预测中国与中亚棉花产业的合作潜力。

已有研究发现干旱胁迫严重限制了棉花的生长发育, 如株高、叶干重、茎干重、叶面积指数、果节数、纤维质量、冠层和根系发育等均受到影响^[5-6], 棉花叶片的净光合速

收稿日期: 2021-12-14; 修订日期: 2022-08-11

基金项目: 第三次新疆综合科学考察项目(SQ2021xjkk0802); 中国科学院战略性先导科技专项(XDA20020202)

[Foundation: The Third Xinjiang Scientific Expedition Program, No.SQ2021xjkk0802; Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences, No.XDA20020202]

作者简介: 徐杨(1997-), 男, 辽宁大连人, 博士生, 主要从事农业气象研究。E-mail: xy_7912@163.com

通讯作者: 郝志新(1975-), 女, 内蒙古赤峰人, 博士, 研究员, 主要从事气候变化研究。E-mail: haozx@igsrr.ac.cn

2338-2352 页

率、蒸腾速率、气孔导度、羧化效率和水势等明显下降^[7-8]。植物生长箱中开展的棉花生育控制试验发现,在干旱胁迫下,海岛棉的干物质积累将下降50%,且气孔导度、光合速率和蒸腾速率也有不同程度的下降,并最终影响产量的形成^[9]。田间试验也发现当土壤含水量从田间持水量的75%下降至40%时,产量约下降20%~60%^[10-12];全生育期内灌溉量减少25%~75%时,棉花产量降低17.1%~55.8%^[13-15]。也有研究认为当干旱胁迫发生在不同棉花生育期时,对棉花产量的影响大小存在差异,如初花期受干旱胁迫将导致棉花产量损失约60%;而干旱发生在蕾期、盛花期和吐絮期时,棉花产量将降低25%~35%^[16-18]。近年来,研究人员通过传统的数理统计方法,结合作物模型和区域气候模型对棉花产量进行预测,该方法由于充分考虑了气候条件、土壤特征和管理措施等对作物生产的影响,且克服了以往受气象要素空间差异的影响而无法开展大尺度模拟的缺点,目前在评估区域尺度上未来棉花生产潜力方面得到了广泛应用^[19-20]。如研究表明由于未来温度和降水变化存在显著的区域性差异,中国西北部、希腊北部地区棉花的产量将提高^[21-22],而在澳大利亚东部、埃塞俄比亚北部等地区棉花产量将明显下降^[19, 23]。此外,CO₂浓度升高对棉花产量也有积极影响,但CO₂的肥效作用同样因地区而异^[24-27],且未来升温 and 降水变化对棉花产量的影响甚至可能抵消CO₂浓度升高的贡献^[28-29]。

由于以往在中亚地区棉花大田试验数据积累较少,气候、土壤等相关信息也较为缺乏,因此涉及到气候变化对中亚棉花生产影响的研究还很少。目前主要基于田间试验数据,开展了调整播期^[30]、施氮量^[31]、灌溉制度^[32]、水分胁迫^[33]、覆盖地膜^[34]等措施对乌兹别克斯坦棉花产量的影响研究,但在全球增暖的大背景下,极端气候事件频发,干旱仍然是未来影响中亚棉花生产的重要因素。因此,本文利用2014年和2021年在乌兹别克斯坦塔什干地区开展的棉花田间试验数据,CMIP6模式模拟的2021—2100年气象数据,借助APSIM-Cotton模型,模拟了未来两个时段(2021—2050年和2061—2090年)气象干旱对中亚棉花产量的影响,并辨识了CO₂浓度变化在其中的贡献。研究结果将为制定中亚棉花应对气候变化的适应方案提供科学依据,为未来开展中国与中亚各国棉花产业合作模式提供数据参考。

2 数据与方法

2.1 研究区概况

乌兹别克斯坦是中亚最大的棉花生产国和出口国,棉花生产对乌兹别克斯坦经济起着重要作用。该国每年大约生产83万t棉纤维,棉花生产面积约占全国灌溉土地的40%,2018—2019年生产面积约117万hm²^[30]。本文选择乌兹别克斯坦塔什干地区作为研究区域。该区域属于温带大陆性干旱气候,气温年较差大,7月平均最高气温达37.3℃,1月平均最低气温为-1.0℃,年平均气温15.6℃;年平均降水量316mm,夏季降水不足50mm;年日照时数2692~2889h,无霜期207~230d。

2.2 田间试验设计

2014年和2021年在乌兹别克斯坦科学院遗传与植物实验生物研究所赞格阿塔实验站(Institute of Genetics and PEB of AS of Uzbekistan, 41°10'N, 69°7'E),进行了不同播种密度、灌溉水平和灌溉方式的棉花大田试验。试验地土壤类型为灰漠土,0~1.5m深度内土壤容重为1.38~1.47g/cm³,且土壤没有盐碱化现象发生。供试棉花品种分别为中熟品种“布哈拉-6”和“布哈拉-8”,其生育期均为120d左右且产量较为接近。具体田间试验设计方案为:2014年试验区面积约6hm²,棉花于4月21日播种;试验设3个棉花播种密

度, 分别为9万株/hm²、18万株/hm²、24万株/hm²; 播种深度为50 mm; 播种前施入基肥417 kg/hm², 生育期追肥310 kg/hm²; 全生育期灌溉总量300 mm, 灌溉方式为地面滴灌, 每区滴灌4~6次, 每次6 h。2021年试验区面积约0.5 hm², 棉花于5月7日播种; 试验设两个棉花播种密度和两个灌溉水平, 播种密度分别为14万株/hm²和26万株/hm², 灌溉水平分别为全生育期滴灌160 mm和275 mm, 灌溉方式为地面滴灌, 每区分别滴灌8次和13次; 此外, 还设置了播种密度为9万株/hm², 全生育期沟灌900 mm的对照试验; 5个试验区的棉花播种深度均为30 mm; 整个生育期施肥1050 kg/hm²。记录的棉花生育期包括播种、出苗、现蕾、开花、吐絮和收获等。棉花成熟时对试验区内所有的植株进行测产, 测定项目包括纤维重量、种子产量等质量指标。

2.3 气象观测与模拟数据

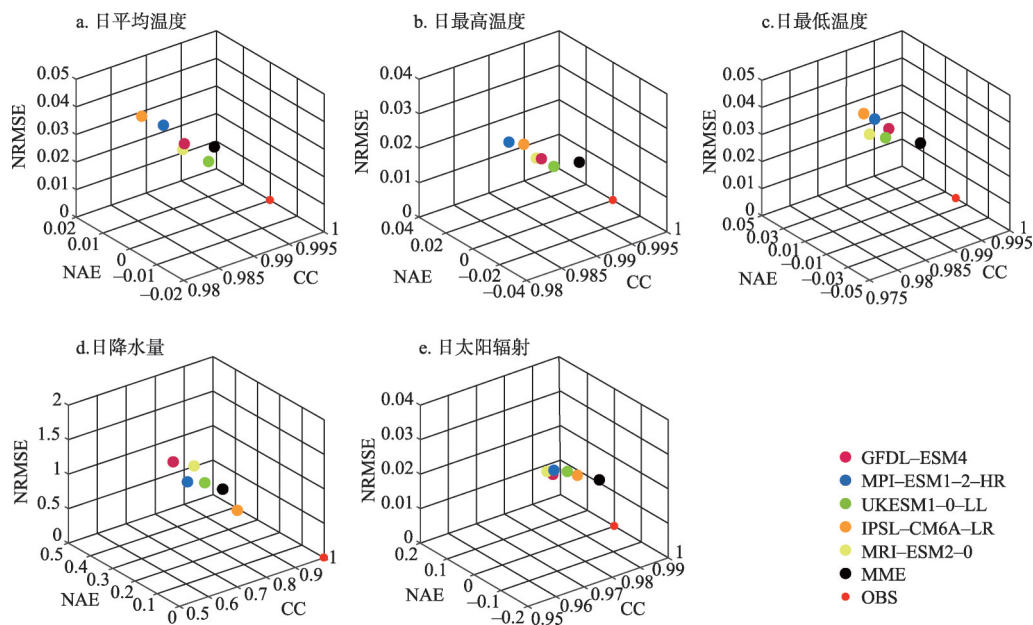
气象数据主要包括观测数据和CMIP6气候模式模拟数据。气象观测数据中, 逐日最高气温、逐日最低气温、逐日降水量数据为乌兹别克斯坦塔什干气象站(41°15'N, 69°16'E) 1961—1990年的地面气象观测资料(<https://www.ncei.noaa.gov/maps/daily/>), 太阳辐射数据为NCEP/NCAR再分析资料^[35](<https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.ncep.reanalysis.surfaceflux.html>)。2021—2090年的气候模拟数据主要来自CMIP6计划中的GFDL-ESM4, UKESM1-0-LL, MPI-ESM1-2-HR, IPSL-CM6A-LR和MRI-ESM2-0等5个气候模式。由于各模式输出结果空间分辨率不一致, ISIMIP(The Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project)计划通过校准5个CMIP6模式数据的月平均值变率与观测数据之间的差异, 保留了模式模拟资料的长期绝对(相对)趋势后采用双线性插值获得了0.5°×0.5°的高分辨率气象数据集^[36](<https://data.isimip.org/search/tree/ISIMIP3b/>, 模式基本信息见表1)。

表1 ISIMIP提供的5个气候模式基本信息
Tab. 1 Brief information on the five GCMs from ISIMIP

模式名称	所属机构及国家	分辨率(°N×°E)
GFDL-ESM4	NOAA-GFDL 美国	1°×1.25°
UKESM1-0-LL	MOHC 英国	1.25°×1.875°
MPI-ESM1-2-HR	MPI-M 德国	0.9375°×0.9375°
IPSL-CM6A-LR	IPSL 法国	1.26°×2.5°
MRI-ESM2-0	MRI 日本	1.125°×1.125°

本文利用Distance between Indices of Simulation and Observation(DISO)指数作为量化模式模拟能力的指标^[37], 该指数综合了相关系数(CC)、均一化均方根误差(NRMSE)和均一化绝对误差(NAE)等统计量, 通过三维空间坐标系中模拟场和观测场之间的距离来评价各模型的模拟能力^[38]。通过分析各模式和模式集合平均(MME)数据对塔什干站所在格点(41.25°N, 69.25°E)4—9月逐日平均温度、最高温度、最低温度、降水量和太阳辐射的模拟能力, 发现相较于单一模式, MME对气象要素的模拟能力更强(图1)。其中MME与观测数据之间的相关系数分别为0.992、0.991、0.988、0.801和0.978, 均通过99%置信水平的显著性检验; 5个气候因子的模拟值与观测数据的NAE均小于0.2; MME与观测数据之间的NRMSE分别为0.026、0.024、0.036、0.913和0.028; MME与观测数据之间的DISO指数分别为0.027、0.036、0.048、0.955和0.180, 其中逐日平均温度、最低温度、降水量的DISO指数均小于其他5个模式, 最高温度和太阳辐射的DISO指数仅略高于IPSL-CM6A-LR。因此, 本文使用模型集合平均数据代表本研究区域的温度、降水和辐射变化。

为了预测气象干旱条件下未来棉花产量, 本文选取了SSP1-2.6、SSP3-7.0和SSP5-8.5等3个共享社会经济路径下的气候变化数据^[39]。其中SSP1-2.6代表了低脆弱性、低减缓挑战组合的低强迫情景, 2100年辐射强迫稳定在约2.6 W/m²; SSP3-7.0代表了高社会



注: OBS代表观测场;点到OBS的距离代表DISO指数。

图1 1961—1990年5个气候模式模拟的塔什干地区日平均温度、日最高温度、日最低温度、日降水量和日太阳辐射变化相对于观测数据的DISO指数

Fig. 1 DISO index program for daily mean temperature, daily maximum temperature, daily minimum temperature, daily precipitation, and daily solar radiation for the historical period of 1961-1990

脆弱性与较高人为辐射强迫组合的中高强迫情景, 2100年辐射强迫稳定在约 7.0 W/m^2 ; SSP5-8.5代表了21世纪高度化石燃料发展的高强迫情景, 是唯一可以实现至2100年排放高至 8.5 W/m^2 的路径, 也是应对和适应气候变化最具挑战性的未来气候情景。

2.4 气象干旱指标的选取

标准化降水蒸散指数 (SPEI) 是近年来广泛使用的一种衡量干旱状况的干旱指数, 该指标综合考虑了降水和蒸散发对局地干湿状况的作用, 且具备了多时间尺度的特征, 目前已被应用在中亚区域干旱的评估和预估工作中^[40-41]。本文采用以3个月为步长的SPEI (SPEI-3) 分析棉花生育期内的干湿变化特征, 该指标通过计算降水量与潜在蒸散的差值并进行正态标准化得到, 其中潜在蒸散由Hargreaves公式计算获得^[42-43]。由于5—8月是影响棉花生育期的重要时段, 因此主要讨论5—8月的SPEI-3变化。结合中亚高温少雨的气候特征, 将干旱等级设定为轻微干旱: $-1.5 < \text{SPEI-3} \leq 0$; 严重干旱: $-3.0 < \text{SPEI-3} \leq -1.5$; 极端干旱: $\text{SPEI-3} \leq -3.0$, 并统计了在对应时段内各等级的干旱发生概率 (时段内某等级干旱发生的年数占总年数的百分比)。

据统计, 1961—1990年塔什干地区5—8月严重干旱发生的概率为16.7%, 极端干旱发生的概率为0。未来情景下, 干旱发生频率将显著增大, 本文主要分析未来严重干旱和极端干旱下棉花的产量变化。

2.5 APSIM-Cotton 模型

APSIM (Agricultural Production Systems sIMulator) 模型由澳大利亚联邦科工组织 (CSIRO) 和昆士兰州政府的农业生产系统研究组 (APSRU) 共同开发, 可以精确地模拟气候、基因型、土壤和农场管理因素对作物生产的影响^[44]。模型自1996年建立以来, 已经从种植系统模型演变为农业生态系统模型。APSIM以土壤模块为核心, 通过与作物

模块耦合来模拟作物生长发育，是相对于其他作物模型的独特优势。APSIM在不同气候带的土壤条件下，对作物结构和轮作顺序调整、作物生长发育、产量预测及不同种植方式下水资源管理等具有良好的模拟能力^[45-49]，可模拟不同作物的关键生理过程^[50-51]，特别适用于评价气候波动和环境变化对农作物生产潜力及耕作措施经济效益的影响。目前已开发了针对不同作物的子模型，并应用于模拟小麦、油菜、玉米、马铃薯、棉花、大豆等30种不同作物的产量。其中，APSIM-Cotton模型主要由棉花模块、土壤水分模块、土壤N模块、地表留茬模块、管理模块组成。土壤水分模块中土壤风干含水率（Air dry）、萎蔫系数（LL15）、最大田间持水量（DUL）、饱和含水量（SAT）、棉花利用下限（cotton LL）等参数均通过田间实际观测获取（图2）。驱动模型中需要输入气象、作物品种、管理措施等参数。因此，本文以试验站已知的土壤和气象条件为基础，利用田间试验获得的棉花生产管理数据对棉花品种参数进行调试。

2.6 APSIM模型适应性评价方法及情景设计

APSIM-Cotton模型参数的调整使用2014年田间试验数据进行，通过“试错法”评价调参结果的好坏，即计算 APSIM 模型对棉花产量模拟的实测值和模拟值的相对误差，其值越接近0表明模拟效果越好。模型将棉花生长发育分为9个阶段^[52]，本文通过调整各生长阶段的光热时间及相关参数对棉花的生育期和产量进行校准，经过校正后的棉花主要品种特征参数见表2。

在利用APSIM-Cotton模型模拟未来产量变化时，仍选用布哈拉-6品种，播种日期为4月21日，播种密度为9万株/hm²，播种深度为50 mm；灌水总量为600 mm，其中播种前灌水120 mm；蕾期灌水100 mm；花铃期灌水240 mm；吐絮期灌水140 mm；播种前

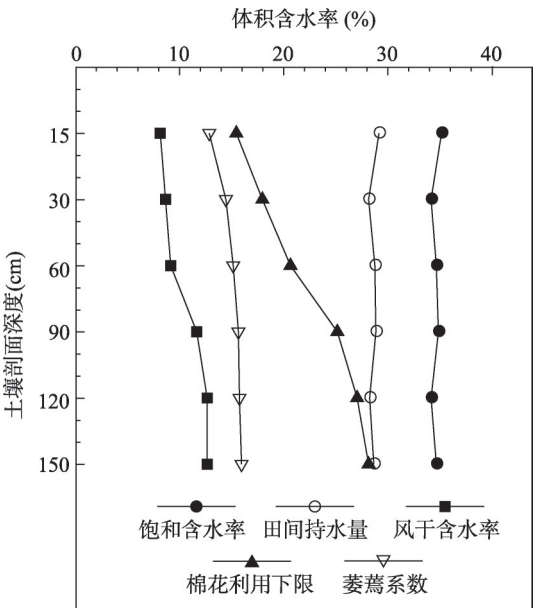


图2 赞格阿塔实验站不同深度的土壤水分参数
Fig. 2 Hydraulic properties of the soil used in simulations at Tashkent station

表2 APSIM-Cotton模型调整的主要品种特征参数

Tab. 2 Main calibrated cultivar parameters for APSIM-Cotton

参数名称	定义	单位	校准值范围	参数值
PERCENT_L	衣分	%	35~45	42
SCBOLL	单铃籽棉重量	g/boll	3.8~7.0	6
BCKGNDRETN	棉铃保留的比例	—	0.2~1.0	0.9
RESPCON	呼吸常数	—	0.015~0.025	0.02306
SQCON	果节产生经验系数	—	0.01~0.03	0.0206
FLAI	叶面积指数修正值	—	0.5~1.0	0.87
DDISQ	播种到现蕾的有效积温(日温≥12℃)	d·℃	300~450	450
FRUDD1~8	蕾铃生长不同阶段所对应的有效积温(日温≥12℃)	d·℃	与生育时段相关	60、210、380、405、510、620、795、930

施 160 kg/hm² 尿素, 生育期内充分施氮且不考虑病虫害。CO₂ 浓度设定源于国际应用系统分析研究所 (IIASA) 提供的 CO₂ 浓度变化数据 (<https://greenhousegases.science.unimelb.edu.au/>)。由于 CO₂ 浓度的变化对棉花产量影响较大, 且未来百年 CO₂ 浓度增加较快, 如仍采用以往研究设定的整个研究时段内 CO₂ 浓度稳定在同一水平, 将无法合理预测棉花产量的阶段性变化特点, 因此, 研究中以 10 a 为统计时段设定 CO₂ 浓度变化 (其中 1961—1970 年、1971—1980 年和 1981—1990 年 CO₂ 浓度分别设为 321 μmol/mol、333 μmol/mol、348 μmol/mol), 未来气候情景下 CO₂ 浓度设定见表 3。

表 3 未来气候情景下 2021—2090 年大气 CO₂ 浓度设定 (μmol/mol)

Tab. 3 Atmospheric CO₂ concentration settings for 2021-2090 under future climate scenarios (μmol/mol)

时段	SSP1-2.6	SSP3-7.0	SSP5-8.5
2021—2030 年	430	437	437
2031—2040 年	452	477	480
2041—2050 年	466	522	537
2061—2070 年	474	628	703
2071—2080 年	471	690	815
2081—2090 年	462	759	945

3 结果与分析

3.1 模型适应性分析结果

利用 2021 年的气象数据和田间试验数据对 APSIM-Cotton 模型模拟结果进行有效性验证 (表 4), 结果表明, 不同播种密度试验下棉花实测产量和模拟产量的相对误差在调参年份和验证年份均小于 10.4%, 生育期长度实测值和模拟值的相对误差均小于 4.7%。说明 APSIM-Cotton 模型能够准确地模拟不同播种密度下的棉花生育期和产量变化, 在塔什干具有较好的适用性。

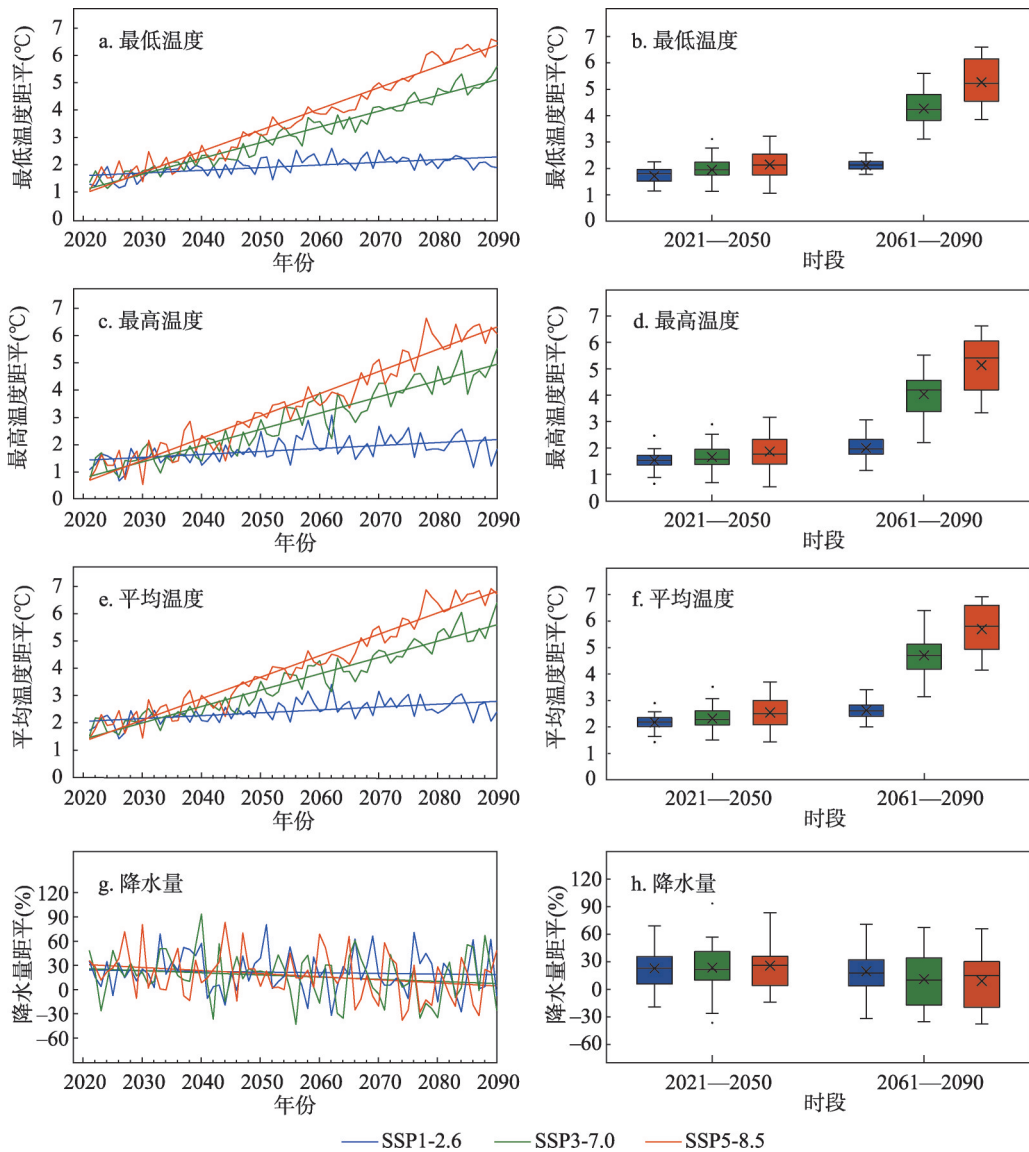
表 4 塔什干棉花产量与生育期天数的验证结果

Tab. 4 Calibration and validation results of cotton yield and growth period in Tashkent

调参验证	播种密度 (万株/hm ²)	灌溉方式	灌溉量 (mm)	产量(kg/hm ²)			生育期天数(d)		
				实测值	模拟值	相对误差(%)	实测值	模拟值	相对误差(%)
调参	9	滴灌	300	1750.0	1723.3	-1.5	110	111	0.9
	18	滴灌	300	2360.0	2114.9	-10.4	109	110	0.9
	24	滴灌	300	2920.0	2799.0	-4.1	110	113	2.7
验证	14	沟灌	900	1386.2	1329.9	-4.1	134	132	-1.5
	14	滴灌	275	1810.6	1950.5	+7.7	127	124	-2.4
	14	滴灌	160	1102.0	1063.6	-3.5	124	125	+0.8
	26	滴灌	275	2914.4	2739.4	-6.0	127	121	-4.7
	26	滴灌	160	1772.4	1882.7	+6.2	124	121	-2.4

3.2 不同情景下中亚地区气候变化特征

2021—2090 年棉花生育期期间 (4 月 15 日—9 月 15 日), SSP1-2.6、SSP3-7.0 和 SSP5-8.5 等 3 种情景下, 塔什干的最高温度、最低温度和平均气温均呈明显上升趋势 (通过 $\alpha = 0.01$ 显著性水平), SSP1-2.6 情景平均气温的温升速率为 0.1 °C/10a, SSP5-8.5 情景的平均气温的温升速率则达 0.8 °C/10a; 降水仅在 SSP5-8.5 情景下呈显著下降趋势, 降水距平百分率下降 3.8%/10a (通过 $\alpha = 0.05$ 显著性检验), 其他两种情景均无明显变化 (图 3)。具体来说, SSP1-2.6、SSP3-7.0 和 SSP5-8.5 等 3 种排放情景下, 与 1961—1990 年相比, 2035 年 (2021—2050 年) 平均最低温度升温 1.7 °C (波动范围: 1.4~2.1 °C)、2.0 °C (1.7~2.5 °C) 和 2.1 °C (1.8~2.7 °C); 2075 年 (2061—2090 年) 升温分别为 2.1 °C



注：图中粗实线为线性趋势；盒须图为2021—2050年和2061—2090年两个时段各变量的第1/4分位数、3/4分位数、最高值、最低值、中位数(—)、平均值(×)及异常值；每个盒须图包含样本量30个。

图3 1961—1990年和2021—2090年共享社会经济路径下棉花生育期最低、最高、平均温度和降水量变化
Fig. 3 Minimum temperature, maximum temperature, mean temperature and precipitation during the cotton growing season in the historical period of 1961-1990 and shared socioeconomic pathways of 2021-2090

(1.8~2.7 °C)、4.3 °C (3.5~5.3 °C) 和5.3 °C (4.3~6.5 °C)；且逐月升温幅度为5月最小、8月最大(图3b)。不同SSP排放情景下2035年塔什干的平均最高温度较1961—1990年分别升高1.5 °C (1.2~1.9 °C)、1.7 °C (1.1~2.1 °C) 和1.9 °C (1.3~2.4 °C)；2075年则分别升高2.0 °C (1.5~2.4 °C)、4.1 °C (3.5~4.8 °C) 和5.2 °C (4.6~5.9 °C)；且逐月升温幅度为6月最小、8月最大，最高温度的升温幅度略低于最低温度的升温量(图3c、3d)。不同SSP排放情景下2035年塔什干的平均温度较1961—1990年分别升高2.2 °C (1.8~2.6 °C)、2.3 °C (1.8~2.8 °C) 和2.5 °C (1.9~3.1 °C)；2075年则分别升高2.6 °C (2.1~

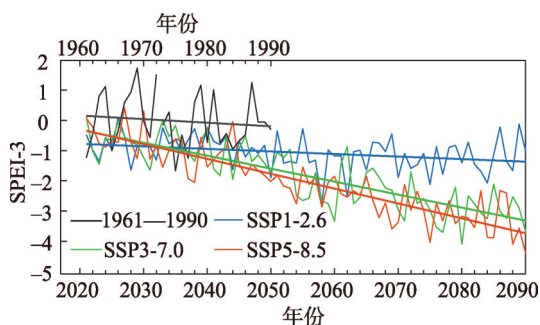
3.1 ℃)、4.7 ℃ (4.1~5.6 ℃) 和 5.7 ℃ (5.0~6.7 ℃) (图 3e、3f)。棉花生育期内降水稀少, 据统计 1961—1990 年棉花生育期平均降水量 80.2 mm, 其中 4 月 15 日—4 月 30 日平均降水量为 34.2 mm, 5 月平均降水量为 31.8 mm, 而 6—8 月的平均降水量分别为 7.3、3.5 和 1.9 mm。SSP1-2.6、SSP3-7.0 和 SSP5-8.5 排放情景下 2035 年降水量距平的平均值为 22.8% (-16.9%~65.2%)、23.6% (-33.6%~108.7%) 和 25.7% (-26.5%~96.8%); 2075 年分别为 19.5% (-15.3%~96.8%)、11.0% (1.1%~36.9%) 和 9.0% (-34.6%~36.8%) (图 3g、3h)。

从 SPEI-3 的变化看, 2021—2090 年 3 种 SSP 情景下棉花生育期内气候呈明显的干旱化趋势 (图 4)。其中 SSP1-2.6 情景下 SPEI-3 以 0.08/10a 的速率减小 (通过 $\alpha = 0.01$ 显著性检验); SSP3-7.0 和 SSP5-8.5 情景下 SPEI-3 下降趋势较明显, 减小速率分别为 0.43/10a 和 0.48/10a, 表明干旱事件发生频率也将明显增加。在 SSP1-2.6 情景下, 2035 和 2075 年两个时段严重干旱事件多发, 其出现概率较 1961—1990 年的 16.7% 分别升高至 20.0% 和 46.7%; 但无极端干旱事件发生。在 SSP3-7.0 和 SSP5-8.5 情景下, 2035 年虽未出现极端干旱事件, 但严重干旱的发生概率由 1961—1990 年的 16.7% 分别升高至 36.7% 和 40.0%; 而在 2075 年严重干旱和极端干旱的发生概率明显增加, 其中发生严重干旱的概率均升高至 100% (即每年都有 $\text{SPEI-3} \leq -1.5$ 的值出现), 发生极端干旱的概率则由从未发生过分别升高至 66.7% 和 86.7%。

3.3 CO₂对棉花产量的肥效作用

CO₂ 浓度影响棉花的净光合速率和辐射利用效率, 其与产量变化并非简单的线性关系。为了辨识 CO₂ 浓度变化对产量的贡献, 设定 450 $\mu\text{mol/mol}$ 、550 $\mu\text{mol/mol}$ 、650 $\mu\text{mol/mol}$ 、750 $\mu\text{mol/mol}$ 、850 $\mu\text{mol/mol}$ 和 950 $\mu\text{mol/mol}$ 等 6 个浓度, 分别模拟不同 SSP 情景下、不同研究时段棉花产量相对于 CO₂ 浓度停留在 350 $\mu\text{mol/mol}$ 时的变化量, 其中 SSP3-7.0 情景中包括了 450 $\mu\text{mol/mol}$ 、550 $\mu\text{mol/mol}$ 、650 $\mu\text{mol/mol}$ 和 750 $\mu\text{mol/mol}$ 等 4 个浓度, SSP5-8.5 情景包含了全部 6 个浓度, SSP1-2.6 情景中 CO₂ 浓度与 350 $\mu\text{mol/mol}$ 接近, 未做分析。结果表明, 随着 CO₂ 浓度的增加, 棉花产量不断升高; 当 CO₂ 浓度持续升高至 750 $\mu\text{mol/mol}$ 以上时, 棉花产量增幅稳定, 即不再随 CO₂ 浓度升高而变幅增加 (图 5)。在 SSP3-7.0 情景下, 2035 年和 2075 年棉花产量平均增幅分别为 12.9% (450 $\mu\text{mol/mol}$) ~ 31.1% (750 $\mu\text{mol/mol}$) 和 12.0% (450 $\mu\text{mol/mol}$) ~ 27.2% (750 $\mu\text{mol/mol}$); 在 SSP5-8.5 情景下, 2035 年和 2075 年棉花产量增幅分别为 12.2% (450 $\mu\text{mol/mol}$) ~ 30.1% (750 $\mu\text{mol/mol}$) 和 9.6% (450 $\mu\text{mol/mol}$) ~ 20.3% (750 $\mu\text{mol/mol}$)。不同排放情景下, 2035 年的产量增幅均高于 2075 年, 且不同情景间的产量增幅变化亦存在明显规律, 即同一 CO₂ 浓度水平下, 产量增幅随着辐射强迫的增大而减小。该结果表明不同情景下 CO₂ 的肥效作用有所差异, 且在未来升温较高的情景下, 棉花生育期内的高温有削弱 CO₂ 肥效作用的潜在风险。因此, 在分析气候变化对棉花产量的影响时除了气候要素本身的贡献, 还应充分考虑 CO₂ 的肥效作用。

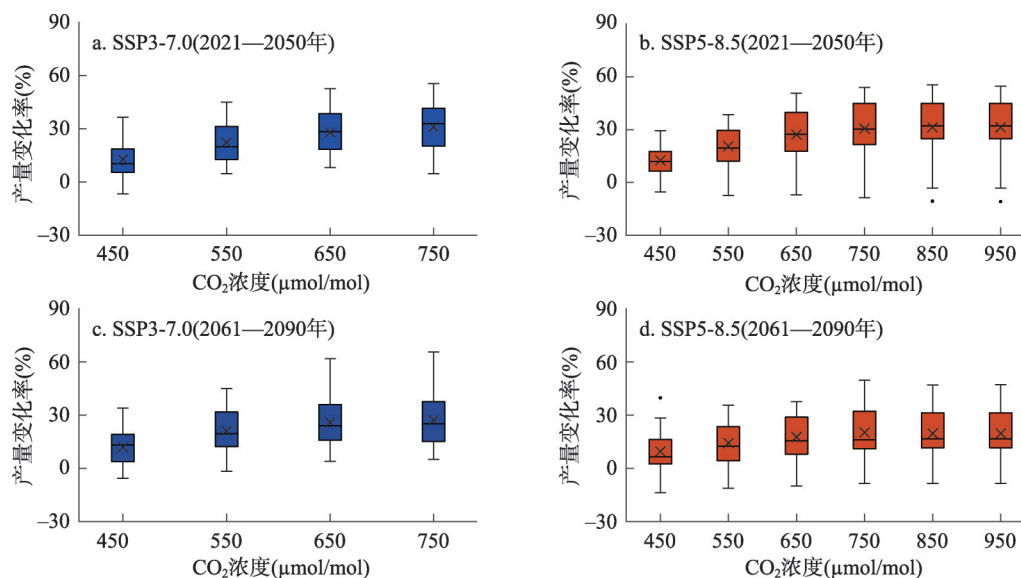
本文还模拟了 CO₂ 浓度稳定在 350 $\mu\text{mol/mol}$ 和不同情景下不同 CO₂ 浓度 (表 3) 的产



注: 粗实线为线性趋势。

图 4 1961—1990 年和 2021—2090 年共享社会经济路径下 SPEI-3 的变化

Fig. 4 Changes in SPEI-3 in the historical period of 1961-1990 and shared socioeconomic pathways of 2021-2090

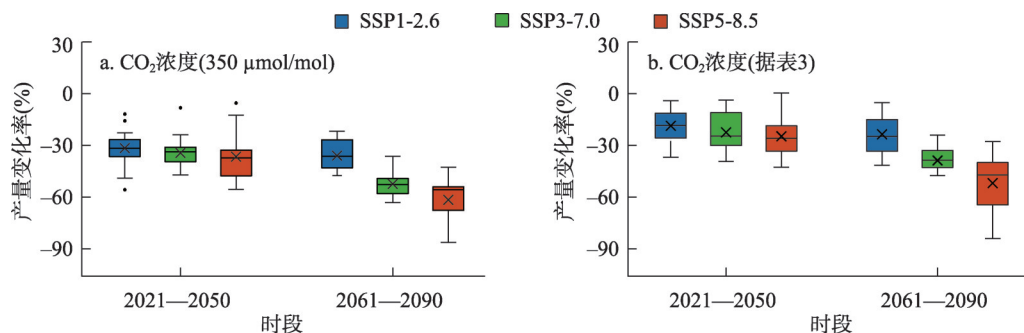


注：盒须图(样本量30个)包含了产量变化率第1/4分位数、第3/4分位数、最高值、最低值、中位数(-)、平均值(×)及异常值。

图5 未来气候情景不同CO₂浓度水平下的棉花产量变化

Fig. 5 Changes in cotton yield at different CO₂ concentration levels under the future climate scenarios

量变化,发现在2035年和2075年两个时段,气候变化将导致棉花产量下降(图6),即虽然CO₂浓度升高对产量有积极影响,但仍无法抵消气候变化对产量的负面影响。若不考虑CO₂的肥效作用(即所有时期CO₂浓度均为350 μmol/mol)时,1961—1990年的棉花年产量为2419.9 kg/hm²,不同SSP排放情景(SSP1-2.6、SSP3-7.0和SSP5-8.5)下的产量在2035年分别下降31.4%、34.2%和36.4%,在2075年分别下降35.8%、52.2%和61.4%(图6a)。若考虑CO₂的肥效作用,历史时期年均皮棉产量为2352.5 kg/hm²,棉花产量在2035年分别下降18.4%、22.2%和24.5%,较不考虑CO₂肥效作用时分别增产15.6%、14.9%和15.3%;在2075年分别下降23.4%、38.6%和51.7%,较不考虑CO₂肥效作用时分别增产16.0%、25.0%和21.7%(图6b)。



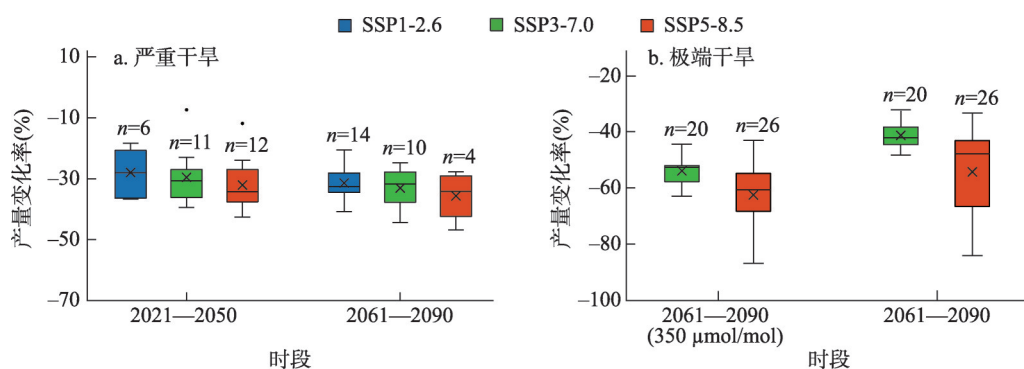
注：盒须图(样本量30个)包含了产量变化率第1/4分位数、第3/4分位数、最高值、最低值、中位数(-)、平均值(×)及异常值。

图6 未来气候情景棉花产量相比于历史时期的变化

Fig. 6 Changes in cotton yield in future periods compared with the historical period of 1961-1990

3.4 气象干旱对棉花产量的影响

气候模拟数据显示, 2035年不同 SSP 排放情景下发生严重干旱的概率分别为 20.0%、36.7%和 40.0%。严重干旱年棉花产量较历史时期分别下降 28.0%、29.6%和 32.1%。在 SSP1-2.6 情景下, 2075 年发生严重干旱的概率为 46.7%, 棉花产量下降 31.5%。在 SSP3-7.0 和 SSP5-8.5 情景下, 2075 年发生严重干旱的概率均升高至 100%, 棉花产量分别下降 33.1%和 35.7% (图 7a)。2075 年发生极端干旱的概率分别为 66.7%和 86.7%, 棉花产量分别下降 41.3%和 54.2% (图 7b)。3.3 节中已证明 CO_2 具有明显的肥效作用, 因此我们对比了棉花产量较 CO_2 浓度稳定在 $350 \mu\text{mol/mol}$ 之间的差异。以极端干旱年为例, 当 CO_2 浓度稳定在 $350 \mu\text{mol/mol}$ 时, SSP3-7.0 情景下的棉花产量较历史时期下降 54.2%, 较不固定 CO_2 浓度模拟的棉花产量低 19.9%; SSP5-8.5 情景下的棉花产量较历史时期下降 62.5%, 较不固定 CO_2 浓度模拟的棉花产量低 16.0% (图 7b)。



注: 盒须图包含了产量变化率的第一/四分位数、第三/四分位数、最高值、最低值、中位数(—)、平均值(×)及异常值。

图 7 未来干旱条件下棉花产量相比于历史时期的变化

Fig. 7 Changes in cotton yield under future droughts compared with the historical period of 1961-1990

4 讨论

农业生产一直与气候变化紧密结合, 气候变化在很大程度上决定着作物生长发育进程与产量形成。相关研究表明, 在 $550 \mu\text{mol/mol}$ 的 CO_2 水平下, C_3 作物的产量将增加 10%~20%^[53], 故本文在分析气象干旱对棉花产量影响的同时, 充分考虑了 CO_2 的肥效作用。发现 CO_2 浓度升高对棉花产量有积极影响, 且当浓度达到 $750 \mu\text{mol/mol}$ 时, 对棉花的增产贡献达到最大, 然而 CO_2 仍无法抵消气候变化对产量的负面影响。由于干旱事件的频繁发生, 导致未来产量严重下降, 这与前人的结论一致^[25]。也有研究发现在 CO_2 的肥效作用下, 澳大利亚东部棉花产量在 2021—2040 年将增加 5.9%^[54], 2041—2070 年美国德克萨斯高原的棉花产量将升高 14%~29%^[24]。这可能与上述研究区在历史时期 (1961—1990 年) 气候条件更加湿润且升温幅度较小有关。而 Adhikari 在 CO_2 浓度升高对棉花水分利用率影响的研究中提出, 缺水会限制 CO_2 浓度升高时的棉花产量^[55]。因此, 在中亚研究区域内, 棉花生育期内降水量稀少、温度高、且升温速率高于全球平均^[56], 这些因素可能共同导致未来棉花产量明显下降。需要说明的是, 相关研究发现温度超过 38°C 时棉花将不再积累热量, 且严重影响棉花的产量形成^[54]。

CO_2 浓度、生育期内日最高温度、日最低温度、日平均温度、降水、辐射等气候因素在作物的生长发育中起着关键作用^[57], 但可能对产量形成具有不同贡献。因此本文基

于历史（1961—1990 年）时期和共享社会经济路径下（2021—2090 年）模拟的棉花产量，采用逐步回归方法分析了关键气候要素对产量的贡献（表 5）。结果发现，各时段或各情景下的棉花产量虽与温度均呈显著负相关（通过 $\alpha = 0.01$ 显著性检验），但其关系并不稳定。其中历史时期与 SSP1-2.6 和 SSP5-8.5 情景下的产量均与平均温度呈负相关，SSP1-2.6 情景下的产量还与 CO₂呈负相关（通过 $\alpha = 0.05$ 显著性检验）；SSP3-7.0 情景下的产量则与最高温度呈负相关。产量对降水和 CO₂浓度不敏感，其原因可能是由于中亚棉花生育期内降水过于稀少，导致降水对于灌溉棉田的产量贡献较低；而 CO₂肥效作用仅通过统计分析无法检测到其对产量形成的贡献，可能因为情景数据中温度与 CO₂浓度的变化具有明显的共线性关系。未来我们将增加极端高温、极端降水、极端低温等气候事件对棉花产量影响的研究，以此丰富未来中亚在棉花种植方面可采取的气候变化减缓与适应措施的相关科学数据。

表 5 气候变量与棉花产量的逐步回归分析
Tab. 5 Multiple linear regression analysis of climatic factors and cotton yield

时段	1961—1990 年	2021—2090 年		
		SSP1-2.6	SSP3-7.0	SSP5-8.5
回归预测方程	$Y=10820.5-351.3tas$	$Y=16598.5-419.7tas-8.5CO_2$	$Y=7392.1-166.1tasmax$	$Y=7972.7-231.3tas$
方差解释量(%)	40.61	41.89	64.41	76.75
显著性	$P<0.001$	$P<0.001$	$P<0.001$	$P<0.001$

注：tas、tasmax 分别表示棉花生育期内平均温度和最高温度，CO₂表示相应年份的 CO₂浓度。

由于数据的不确定性和农业生产本身的复杂性，本文还存在一些局限性。模型是作物生长发育过程的简化，与自然条件下的作物生长情况不可能完全一致。例如在全球变暖背景下，棉花生产可能更易受到病虫害的间接生物影响^[58]，而本文没有考虑养分胁迫、病虫害、草害等限制条件，这可能导致模型高估 CO₂的肥效作用，致使模型模拟结果会出现偏差。其次在不同研究时段设置的棉花播种期均一致，且只对单一品种棉花进行了模拟，未能全面揭示未来中亚棉花生产的发展变化规律。而相关研究已经证明了推迟播种期、提高灌溉水平以及培育中、晚熟品种有利于提高气候变暖下的棉花产量^[14, 26, 59]。此外，作物模型的选用也可能造成未来棉花产量的差异。DSSAT 对中国^[60]、美国^[24]、巴基斯坦^[61]等境内的干旱、半干旱地区的棉花产量的模拟能力已得到验证，相对误差一般可控制在 15%以内。因此在未来的工作中，将通过调整适用于中亚的棉花生产管理策略，应用多种作物模型模拟气候变化对棉花生产的影响，并对比不同作物模型在中亚的适用性及优缺点，为合理制定农业生产适应气候变化的战略政策提供理论基础。

5 结论

本文基于气象观测资料和棉花大田试验数据，评价了 APSIM-Cotton 模型在乌兹别克斯坦塔什干地区的适应性，并利用气候模式模拟的 SSP1-2.6、SSP3-7.0 和 SSP5-8.5 等 3 种共享社会经济路径下的气候变化数据集，预估了未来 2021—2050 年和 2061—2090 年两个时段气象干旱发生特征，探讨了气象干旱对中亚棉花产量的影响。主要结论如下：

APSIM-Cotton 模型具有较高的田间棉花生育模拟能力，能够准确地模拟乌兹别克斯坦塔什干地区棉花不同播种密度（9 万~26 万株/hm²）下的生育期天数和产量变化。相比于历史时期（1961—1990 年），2021—2090 年 3 种 SSP 情景下棉花生育期内气候呈暖干化特征，其中 SSP1-2.6 情景下 SPEI-3 变化较为平缓，2035 和 2075 年两个时段发生严重干旱

的概率分别为20.0%和46.7%且均无极端干旱事件发生; SSP3-7.0和SSP5-8.5情景下SPEI-3下降趋势较为明显, 未来干旱发生的概率明显增加; 2035年严重干旱的发生概率分别为36.7%和40.0%, 2075年极端干旱的发生概率分别为66.7%和86.7%。

棉花产量在不同情景下均呈下降趋势, CO₂的肥效作用可使产量提高14.9%~25.0%。2021—2050年严重干旱年棉花产量较历史时期分别下降28.0%、29.6%和32.1%; 2061—2090年3种情景下, 严重干旱年棉花产量下降31.5%、33.1%和35.7%。极端干旱年各情景的产量降幅差异较大, 在SSP3-7.0和SSP5-8.5情景下, 产量分别下降41.3%和54.2%。当CO₂浓度稳定在350 μmol/mol时, SSP3-7.0情景下的极端干旱年产量较考虑CO₂肥效作用模拟的棉花产量降低19.9%; SSP5-8.5情景则降低16.0%。此外, 研究还发现尽管CO₂浓度升高对棉花产量形成有积极作用, 但当浓度达到750 μmol/mol以上时, 其对提高棉花产量变幅的贡献将不再持续增加。

参考文献(References)

- [1] Li Z, Chen Y N, Fang G H, et al. Multivariate assessment and attribution of droughts in Central Asia. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 1316. DOI: 10.5194/gmd-13-3571-2020.
- [2] Chen Yaning, Li Zhi, Fang Gonghuan, et al. Impact of climate change on water resources in the Tianshan Mountains, Central Asia. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(1): 18-26. [陈亚宁, 李稚, 方功焕, 等. 气候变化对中亚天山山区水资源影响研究. *地理学报*, 2017, 72(1): 18-26.]
- [3] Wang Li, Miao Haimin, Wen Ya. The potentials of cotton cooperation between China and the five Central Asian countries. *Journal of Xinjiang University (Philosophy, Humanities & Social Sciences)*, 2016, 44(5): 64-69. [王力, 苗海民, 温雅. 中国与中亚五国棉花合作潜力分析及模式探究. *新疆大学学报(哲学·人文社会科学版)*, 2016, 44(5): 64-69.]
- [4] Brody M, Eshchanov B, Golub A. Approaches to optimize Uzbekistan's investment in irrigation technologies. *Economic Policy*, 2020, 15(2): 136-147.
- [5] Hu W, Snider J L, Wang H M, et al. Water-induced variation in yield and quality can be explained by altered yield component contributions in field-grown cotton. *Field Crops Research*, 2018, 224: 139-147.
- [6] Ayele A G, Dever J K, Kelly C M, et al. Responses of upland cotton (*Gossypium hirsutum* L.) lines to irrigated and rainfed conditions of texas high plains. *Plants*, 2020, 9(11): E1598. DOI: 10.3390/plants9111598.
- [7] Kumar B, Pandey D M, Goswami C L, et al. Effect of growth regulators on photosynthesis, transpiration and related parameters in water stressed cotton. *Biologia Plantarum*, 2001, 44(3): 475-478.
- [8] Zhao W Q, Wang R, Hu W, et al. Spatial difference of drought effect on photosynthesis of leaf subtending to cotton boll and its relationship with boll biomass. *Journal of Agronomy Crop Science*, 2018, 205(3): 263-273.
- [9] Hejnák V, Tatar Ö, Gd A, et al. Growth and photosynthesis of Upland and Pima cotton: Response to drought and heat stress. *Plant, Soil and Environment*, 2016, 61(11): 507-514.
- [10] Gao M, Xu B J, Wang Y H, et al. Quantifying individual and interactive effects of elevated temperature and drought stress on cotton yield and fibre quality. *Journal Agronomy Crop Science*. 2021, 207(3): 422-436.
- [11] Wang R, Ji S, Zhang P, et al. Drought effects on cotton yield and fiber quality on different fruiting branches. *Crop Science*, 2016, 56(3): 1265-1276.
- [12] Niu J, Zhang S P, Liu S D, et al. The compensation effects of physiology and yield in cotton after drought stress. *Journal of Plant Physiology*, 2018, 224: 30-48.
- [13] Zhan D X, Zhang C, Yang Y, et al. Water deficit alters cotton canopy structure and increases photosynthesis in the mid-canopy layer. *Agronomy Journal*, 2015, 107(5): 1947-1957.
- [14] Dagdelen N, Basal H, Yilmaz E, et al. Different drip irrigation regimes affect cotton yield, water use efficiency and fiber quality in western Turkey. *Agricultural Water Management*, 2009, 96(1): 111-120.
- [15] Chen Yuliang, Shi Yutai, Luo Junjie, et al. Effect of drought stress on agronomic traits, quality, and WUE in different colored upland cotton varieties (Lines). *Acta Agronomica Sinica*, 2013, 39(11): 2074-2082. [陈玉梁, 石有太, 罗俊杰, 等. 干旱胁迫对彩色棉花农艺、品质性状和水分利用效率的影响. *作物学报*, 2013, 39(11): 2074-2082.]
- [16] Luo H H, Zhang Y L, Zhang W F. Effects of water stress and rewetting on photosynthesis, root activity, and yield of cotton with drip irrigation under mulch. *Photosynthetica*, 2016, 54(1): 65-73.

- [17] Snowden M C, Ritchie G L, Simao F R, et al. Timing of episodic drought can be critical in cotton. *Agronomy Journal*, 2014, 106(2): 452-458.
- [18] Qian L, Chen X H, Wang X G, et al. The effects of flood, drought, and flood followed by drought on yield in cotton. *Agronomy*, 2020, 10(4): 555. DOI: 10.3390/agronomy10040555.
- [19] Luo Q Y, Bange M, Braunack M, et al. Effectiveness of agronomic practices in dealing with climate change impacts in the Australian cotton industry: A simulation study. *Agricultural Systems*, 2016, 147. DOI: 10.1016/j.agry.2016.05.006.
- [20] Li N, Li Y, Biswas A, et al. Impact of climate change and crop management on cotton phenology based on statistical analysis in the main-cotton-planting areas of China. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 298(3): 126750. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.126750.
- [21] Chen Chao, Pan Xuebiao, Zhang Lizhen, et al. Impact of climate change on cotton production and water consumption in Shiyang River Basin. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27(1): 57-65. [陈超, 潘学标, 张立祯, 等. 气候变化对石羊河流域棉花生产和耗水的影响. *农业工程学报*, 2011, 27(1): 57-65.]
- [22] Georgiou P, Koukoulis P. Evaluation of climate change impacts on cotton yield using Cropsyst and Regression Models. *Journal of Advances in Agriculture*, 2018, 8(1): 1433-1451.
- [23] Asaminew T G, Araya A, Atkilt G, et al. Modeling the potential impact of climate change on cotton (*Gossypium hirsutum*) production in northeastern semi-arid afar and western Tigray Regions of Ethiopia. *Journal of Earth Science & Climatic Change*, 2017, 8(3). DOI: 10.4172/2157-7617.1000390.
- [24] 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. *Agricultural Water Management*, 2016, 164(2): 317-330.
- [25] Hebbar K B, Venugopalan M V, Prakash A H, et al. Simulating the impacts of climate change on cotton production in India. *Climatic Change*, 2013, 118(3): 701-713.
- [26] Yang Y M, Yang Y H, Han S M, et al. Prediction of cotton yield and water demand under climate change and future adaptation measures. *Agricultural Water Management*, 2014, 144: 42-53.
- [27] Osanai Y, Tissue D T, Bange M P, et al. Interactive effects of elevated CO₂, temperature and extreme weather events on soil nitrogen and cotton productivity indicate increased variability of cotton production under future climate regimes. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2017, 246: 343-353.
- [28] Nasim W, Ahmad A, Belhouchette H, et al. Evaluation of the OILCROP-SUN model for sunflower hybrids under different agro-meteorological conditions of Punjab-Pakistan. *Field Crops Research*, 2016, 188: 17-30.
- [29] Hatfield J L, Prueger J H. Temperature extremes: Effect on plant growth and development. *Weather and Climate Extremes*, 2015, 10: 4-10.
- [30] Montanaro G, Nangia V, Gowda P, et al. Heat units-based potential yield assessment for cotton production in Uzbekistan. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 2021, 14(6): 137-144.
- [31] Allanov K, Shamsiev A, Durdiev N, et al. Improving nutrition and water use efficiencies of pima cotton (*Gossypium barbadense* L.) varieties under arid conditions of Uzbekistan. *Journal of Plant Nutrition*, 2020, 43(17): 2590-2600.
- [32] Ibragimov N, Avliyakov M, Durdiev N, et al. Cotton irrigation scheduling improvements using wetting front detectors in Uzbekistan. *Agricultural Water Management*, 2021, 244: 106538. DOI: 10.1016/j.agwat.2020.106538.
- [33] Bozorov T A, Usmanov R M, Yang H L, et al. Effect of water deficiency on relationships between metabolism, physiology, biomass, and yield of upland cotton (*Gossypium hirsutum* L.). *Journal of Arid Land*, 2018, 10(3): 441-456.
- [34] Bezborodov G A, Shadmanov D K, Mirhashimov R T, et al. Mulching and water quality effects on soil salinity and sodicity dynamics and cotton productivity in Central Asia. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2010, 138: 95-102.
- [35] Kalney E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1996, 77(3): 437-472.
- [36] Lange S. Trend-preserving bias adjustment and statistical downscaling with ISIMIP3BASD (v1.0). *Geoscientific Model Development*, 2019, 12(7): 3055-3070.
- [37] Hu Z, Chen X, Zhou Q, et al. DISO: A rethink of taylor diagram. *International Journal of Climatology*, 2019, 39(5): 2825-2832.
- [38] Zhou Q, Chen D, Hu Z, et al. Decompositions of taylor diagram and DISO performance criteria. *International Journal of Climatology*, 2021, 41(12): 5726-5732.
- [39] Meinshausen M, Nicholls Z, Lewis J, et al. The SSP greenhouse gas concentrations and their extensions to 2500. *Geoscientific Model Development*, 2020, 13(8): 3571-3605.
- [40] Zhang Leyuan, Wang Yi, Chen Yaning. Spatial and temporal distribution characteristics of drought in Central Asia based

- on SPEI index. *Arid Zone Research*, 2020, 37(2): 331-340. [张乐园, 王弋, 陈亚宁. 基于 SPEI 指数的中亚地区干旱时空分布特征. *干旱区研究*, 2020, 37(2): 331-340.]
- [41] Hu Z Y, Chen X, Chen D L, et al. "Dry gets drier, wet gets wetter": A case study over the arid regions of Central Asia. *International Journal of Climatology*, 2019, 39(2): 1072-1091.
- [42] Hargreaves G H, Samani Z A. Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Engineering in Agriculture*, 1985, 1(2): 96-99.
- [43] Beguería S, Vicente-Serrano S M, Reig F, et al. Standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) revisited: Parameter fitting, evapotranspiration models, tools, datasets and drought monitoring. *International Journal of Climatology*, 2014, 34(10): 3001-3023.
- [44] Keating B A, Carberry P S, Hammer G L, et al. An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation. *European Journal of Agronomy*, 2003, 18(3-4): 267-288.
- [45] Archontoulis S V, Castellano M J, Licht M A, et al. Predicting crop yields and soil-plant nitrogen dynamics in the US Corn Belt. *Crop Science*, 2020, 60(2): 721-738.
- [46] Sun H Y, Zhang X Y, Liu X J, et al. Impact of different cropping systems and irrigation schedules on evapotranspiration, grain yield and groundwater level in the North China Plain. *Agricultural Water Management*, 2019, 211: 202-209.
- [47] Xiao D P, Liu D L, Feng P Y, et al. Future climate change impacts on grain yield and groundwater use under different cropping systems in the North China Plain. *Agricultural Water Management*, 2021, 246(106685): 14. DOI: 10.1016/j.agwat.2020.106685.
- [48] Liu Xiaoyu, Zhang Doudou, Jiao Jinyu, et al. Analysis on limiting factors of efficient utilization of winter wheat and summer maize farmland resources. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, 53(19): 3900-3914. [刘肖瑜, 张豆豆, 焦进宇, 等. 冬小麦—夏玉米周年农田资源高效利用限制因素分析. *中国农业科学*, 2020, 53(19): 3900-3914.]
- [49] Wang Jun, Li Guang, Yan Lijuan, et al. Simulation of spring wheat yield response to temperature changes of different growth stages in drylands. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, 53(5): 904-916. [王钧, 李广, 闫丽娟, 等. 旱地春小麦产量对不同生育阶段温度变化的响应模拟. *中国农业科学*, 2020, 53(5): 904-916.]
- [50] Beah A, Kamara A Y, Jibrin J M, et al. Simulating the response of drought-tolerant maize varieties to nitrogen application in contrasting environments in the Nigeria Savannas using the APSIM model. *Agronomy*, 2020, 11(1): 76. DOI: 10.3390/agronomy11010076.
- [51] Snapp S S, Grabowski P, Chikowo R, et al. Maize yield and profitability tradeoffs with social, human and environmental performance: Is sustainable intensification feasible? *Agricultural Systems*, 2018, 162: 77-88.
- [52] Hearn A B. OZCOT: A simulation model for cotton crop management. *Agricultural Systems*, 1994, 44(3): 257-299.
- [53] Ainsworth E A, Long S P. What have we learned from 15 years of free-air CO₂ enrichment (FACE)? A meta-analytic review of the responses of photosynthesis, canopy properties and plant production to rising CO₂. *New Phytologist*, 2005, 165(2): 351-371.
- [54] Williams A, White N, Mushtaq S, et al. Quantifying the response of cotton production in eastern Australia to climate change. *Climatic Change*, 2015, 129(1/2): 183-196.
- [55] Adhikari U, Nejadhashemi A P, Woznicki S A J F, et al. Climate change and eastern Africa: A review of impact on major crops. *Food and Energy Security*, 2015, 4(2): 110-132.
- [56] Luo M, Liu T, Meng F H, et al. Spatiotemporal characteristics of future changes in precipitation and temperature in Central Asia. *International Journal of Climatology*, 2019, 39(3): 1571-1588.
- [57] Liu Yujie, Tao Fulu. Probabilistic assessment and uncertainties analysis of climate change impacts on wheat biomass. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(3): 337-345. [刘玉洁, 陶福祿. 气候变化对小麦生物量影响的概率预测和不确定性分析. *地理学报*, 2012, 67(3): 337-345.]
- [58] Xiong Wei, Lin Erda, Jiang Jinhe, et al. An integrated analysis of impact factors in determining China's future grain production. *Acta Geographica Sinica*, 2010, 65(4): 397-406. [熊伟, 林而达, 蒋金荷, 等. 中国粮食生产的综合影响因素分析. *地理学报*, 2010, 65(4): 397-406.]
- [59] Anwar M R, Wang B, Liu L, et al. Late planting has great potential to mitigate the effects of future climate change on Australian rain-fed cotton. *Science of the Total Environment*, 2020, 714: 136806. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.136806.
- [60] Patil D D, Pandey V, Kapadia V, et al. Sensitivity analysis of CROPGRO-cotton model to intra-seasonal climatic variability in middle Gujarat. *Journal of Agrometeorology*, 2019, 21(2): 34-39.
- [61] Amin A, Nasim W, Mubeen M, et al. Optimizing the phosphorus use in cotton by using CSM-CROPGRO-cotton model for semi-arid climate of Vehari-Punjab, Pakistan. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, 24(6): 5811-5823.

Effect of meteorological drought on cotton yield in Central Asia

XU Yang^{1,2}, LI Xiufen³, GE Quansheng^{1,2}, HAO Zhixin^{1,2}

(1. Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. College of Agronomy, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China)

Abstract: Frequent occurrence of extreme drought events has great impacts on cotton production in Central Asia. In this study, data from field experiments designed for different sowing densities and irrigation levels at the Zangiata experimental station in the Tashkent of Uzbekistan were adopted for calibration and validation. Using the CMIP6 climate change datasets for three shared socioeconomic pathways (SSP1-2.6, SSP3-7.0 and SSP5-8.5), we analyzed the variations in the standardized precipitation evapotranspiration index in three-month steps (SPEI-3) within the growing seasons from May to August during the period from 2021 to 2090 and simulated the changes in cotton yields under meteorological drought conditions using the APSIM-Cotton model considering CO₂ fertilization. The results showed that the APSIM-Cotton model accurately simulated the cotton yield in Tashkent, and the relative errors between the simulated and measured yields were lower than 10.4% in both the calibration and validation years. Both temperature and drought frequency are expected to increase in the future during the cotton growing period in Tashkent. For the SSP3-7.0 and SSP5-8.5 scenarios, the percentages of severe drought are 36.7% and 40.0% from 2021 to 2050, respectively, and the percentages of extreme drought are 66.7% and 86.7% from 2061 to 2090, respectively. Severe meteorological droughts under three emission scenarios (SSP1-2.6, SSP3-7.0, and SSP5-8.5) would cause reductions of 28.0%, 29.6%, and 32.1% in cotton yields from 2021 to 2050, respectively, compared with the period 1961-1990. Severe meteorological droughts under the SSP1-2.6 scenario would result in a reduction of 31.5% in cotton yield from 2061-2090. Under the SSP3-7.0 and SSP5-8.5 scenarios, severe meteorological droughts would result in reductions of 33.1% and 35.7% in cotton yield, respectively, and extreme meteorological droughts would cause reductions of 41.3% and 54.2% in cotton yields, respectively. CO₂ has a certain fertilization effect. The rise in CO₂ concentration would increase the cotton yield by 14.9% to 25.0%; however, the increase in yields will not be sustained at concentrations above 750 $\mu\text{mol/mol}$. The results will provide scientific data for planting strategies for cotton in Central Asia that account for climate change and a reference for the future cooperation mode of the cotton industry between China and Central Asian countries.

Keywords: meteorological drought; Central Asia; cotton yield; APSIM; CMIP6 shared socioeconomic pathways