

气候变化对关中地区粮食产量的影响及趋势分析

赵茹欣, 王会肖, 董宇轩

引用本文:

赵茹欣, 王会肖, 董宇轩. 气候变化对关中地区粮食产量的影响及趋势分析[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2020, 28(4): 467–479.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.190752>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

近50年气候变化对青藏高原青稞气候生产潜力的影响

Influence of climate change on potential productivity of naked barley in the Tibetan Plateau in the past 50 years
中国生态农业学报. 2015, 23(10): 1329–1338 <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.150552>

近50年气候变化对青藏高原牧草生产潜力及物候期的影响*

Impact of climate change on potential productivity and phenological phase of forage in the Qinghai–Tibet Plateau in the past 50 years
中国生态农业学报. 2016, 24(4): 532–543 <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.151029>

气候变化背景下安徽省冬小麦气候生产潜力和胁迫风险研究

Climatic potential productivity and stress risk of winter wheat under the background of climate change in Anhui Province
中国生态农业学报(中英文). 2020, 28(1): 17–30 <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.190463>

宁夏枸杞生长季气候变化特征及其影响

Variations and effects of climate in growth period of *Lycium barbarum* L. in Ningxia
中国生态农业学报(中英文). 2019, 27(12): 1789–1798 <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.190477>

基于AEZ模型的河南省冬小麦产量差时空特征分析

Spatio-temporal analysis of winter wheat yield gaps in Henan Province using AEZ model
中国生态农业学报. 2018, 26(4): 547–558 <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.170843>

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.190752

赵茹欣, 王会肖, 董宇轩. 气候变化对关中地区粮食产量的影响及趋势分析[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(4): 467-479

ZHAO R X, WANG H X, DONG Y X. Impact of climate change on grain yield and its trend across Guanzhong region[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2020, 28(4): 467-479

气候变化对关中地区粮食产量的影响 及趋势分析*

赵茹欣, 王会肖**, 董宇轩

(北京师范大学水科学研究院/城市水循环及海绵城市技术北京市重点实验室 北京 100875)

摘要: 以增温为主的气候变化对粮食产量具有显著影响。本文利用关中地区 1983—2016 年的站点气象要素、粮食产量统计数据及跨部门影响模型比较计划(Intersectoral Impact Model Intercomparison Project, ISIMIP)中 4 个全球气候模式 2021—2050 年降水、气温输出结果, 采用突变分析、趋势分析和敏感性分析等方法, 从粮食单产、气候产量和气候生产潜力等方面系统分析了我国主要粮食产地之一的陕西关中粮食产量对气候变化的响应特征。结果表明: 1)1983—2016 年, 关中地区年平均气温呈显著上升趋势, 升温速率为 $0.05 \text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{a}^{-1}$ ($P<0.01$), 其中, 最高气温的上升起主要作用; 年降水量则以 $-1 \text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ 的速率呈下降趋势, 但不显著。2)关中地区多年平均粮食单产为 $3\ 599 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 且逐年波动上升, 速率为 $57.17 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ($P<0.001$)。关中多地的气候产量与气温呈正相关, 气温的升高一定程度上促进了关中气候产量的增加, 但并不显著(平均增加率为 $0.85 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)。渭河关中地区多年以来的气候生产潜力为 $7\ 000\sim 12\ 000 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 受气温波动的影响, 1995 年后的平均气候生产潜力高于 1995 年之前, 是整个研究时段气候生产潜力呈现增加趋势的主要时期。3)未来 30 年里(2021—2050 年), 关中地区在 RCP2.6 情景下的平均气候生产潜力略高于 RCP6.0 情景, 但前者的生产潜力呈逐年下降趋势, 后者则表现出逐年上升趋势。关中地区的作物对气候资源的利用空间还很大, 且气候变化对关中粮食产量具有促进作用, 但此正向作用并不是持续不变的。

关键词: 气候变化; 粮食产量; 气候生产潜力; 全球气候模式; 关中地区

中图分类号: S162.5+3

开放科学码(资源服务)标识码(OSID):



Impact of climate change on grain yield and its trend across Guanzhong region*

ZHAO Ruxin, WANG Huixiao**, DONG Yuxuan

(College of Water Sciences, Beijing Normal University / Beijing Key Laboratory of Urban Hydrological Cycle and Sponge City Technology, Beijing 100875, China)

Abstract: Climate change dominated by warming has a significant impact on grain yield. From an examination of grain yield, climatic yield and climate potential productivity (CPP), this paper systematically analyzed the response of grain yield to climate change in Guanzhong, Shaanxi, one of China's main food-producing areas. Datasets were climate variables at 8 meteorological

* 国家自然科学基金项目(41371043, 51779009)资助

** 通信作者: 王会肖, 主要研究方向为农业水文水资源。E-mail: huixiaowang@bnu.edu.cn

赵茹欣, 研究方向为水文水资源及气候变化。E-mail: zhaorx324@163.com

收稿日期: 2019-10-25 接受日期: 2020-02-01

* This study was founded by the National Natural Science Foundation of China (41371043, 51779009).

** Corresponding author, E-mail: huixiaowang@bnu.edu.cn

Received Oct. 25, 2019; accepted Feb. 1, 2020

stations, grain yield statistics from Guanzhong region during 1983–2016, and the precipitation and temperature simulation results from 4 global climate models of the Intersectoral Impact Model Intercomparison Project for 2021–2050. Mutation analysis, trend analysis, and sensitivity analysis were all used in the study. The results showed that the annual average temperature of Guanzhong region was increasing significantly at the rate of $0.05\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{a}^{-1}$, and a significant increase in the maximum temperature was contributing most to this trend. Meanwhile, annual average precipitation showed a decreasing trend at the rate of $-1\text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ but was not significant. During 1983–2016, the average annual grain yield of Guanzhong region was $3\ 599\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$. Although showing fluctuations, it increased at the rate of $57.17\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ($P < 0.001$). There was a positive correlation between the climatic yield and temperature in many parts of Guanzhong. The increase in temperature had promoted an increase in climatic yield in Guanzhong to a certain extent, but not significantly (the increase was $0.85\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ and $P > 0.05$). The CPP of Guanzhong region ranged between $7\ 000\text{--}12\ 000\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ over 34 years. Due to the fluctuations in temperature, the average CPP after 1995 was higher than that before 1995, which meant that the change in CPP after 1995 was the main driving source of the increasing trend of CPP during the whole study period. During 2021–2050, the average CPP of Guanzhong region under RCP 2.6 scenario will be higher than that of RCP 6.0. However, the CPP decreases under the RCP 2.6 scenario but increases under the RCP 6.0 scenario. There is a plenty room for promotion of climate resources used by crops in Guanzhong region, and climate change has had a positive effect on the grain yield in Guanzhong, but this effect will not persist.

Keywords: Climate change; Grain yield; Climate potential productivity; Global climate model; Guanzhong region

无论是从数据观测角度还是从模型模拟结果来看,以全球变暖为主要特征的气候变化已是毋庸置疑的事实^[1]。农业是对气候变化最为敏感的系统之一^[2],受气候变化影响导致频发的极端灾害等事件可能造成农业气候资源在质量和数量上的损失,进而使耕地的可收获量在年际间发生强烈波动,且在社会经济因素的作用下,粮食安全所受的威胁或将更加严重。研究表明,气候变化对中国的作物气候生产潜力、种植制度、作物品质等均有深远影响^[3]。尽管目前全国粮食产量具有增加趋势^[4],但随着经济和人口的迅速增长,资源与环境间的矛盾日益激化,全球气候变化对我国粮食生产系统的正常运转所造成的影响将会加剧^[5]。

适宜的气温能够加快作物的生长速度。气温的变化尤其对水稻(*Oryza sativa*)和小麦(*Triticum aestivum*)生产的影响较大^[6-7]。气温的升高虽加速了作物的发育速度,但也会缩短作物生长发育期,造成生物量积累不足,干物质明显降低的结果。受全球升温影响,我国作物的种植界线在向高纬度和高海拔地区发生偏移^[3]。当然,作物生长不仅仅只对气温升高有所响应,降水以及辐射(日照时数)的变化同样会影响作物,导致作物产量发生显著变化。例如,玉米产量关键期干旱胁迫直接影响玉米物候,进而影响最终产量^[8]。日照时间长短能够体现作物接收太阳辐射的多少,太阳辐射能够通过结合水分促进光合作用,累积干物质质量。张荣荣等^[9]研究表明,河南省的冬小麦和夏玉米(*Zea mays*)产量分别对生育期内的平均气温和总日照时数最为敏感;张雪琪等^[10]研究认为叶尔羌河流域的粮食产量与气温、日照时数、化肥

施用量存在明显正相关,并且气候变化在一定程度上利于该地区的粮食单产增加。粮食产量的波动变化除了受气候要素的影响外,还取决于多种其他因素,例如,土壤特性、育种、政策管理和农业技术等。通常情况下认为农业技术等措施对粮食产量的影响是正向的,故而将粮食产量认为是技术产量(趋势产量)和气候产量的组合,并以滑动平均模拟、HP 滤波、神经网络以及分段拟合、经验模态分解、去趋势互相关分析等分离方法^[11-15],将二者单独分离出来进行气候与粮食产量的相关研究。此外,除了实际粮食产量外,气候生产潜力也是衡量一个地区气候资源所能决定的生物学产量的一项重要指标,受气候变化影响,全球主要农区的气候生产潜力表现为波动上升趋势,平均达 $7\ 970\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ^[16];刘新等^[17]研究发现内蒙古地区的气候生产潜力介于 $486\text{--}7\ 963\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,同样表现出上升趋势;董思等^[18]研究表明,陕西省在 1955—2013 年间的平均气候生产潜力达 $10\ 517\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,并存在轻微增加趋势。卢燕宇等^[19]则根据作物不同阶段生长发育特点,建立了作物生长动态统计模型,估算了安徽省冬小麦的气候生产潜力,其多年平均为 $12\ 391\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,变化趋势在空间上具有非一致性。上述研究多分析历史时期气候要素对粮食产量的影响,较少反映未来时期粮食产量对气候变化的响应。

地处陕西中部的关中地区是我国主要粮食生产地之一,厘清粮食产量在过去以及未来对气候变化的响应情况,便于全面了解该地区农业生产与气候资源的协调程度以及空间差异。基于此,本文依据关中地区 1983—2016 年的气象资料以及粮食产量统

计数据,分析其粮食单产、气候产量以及气候生产潜力对气候变化的时空响应特征,并利用全球气候模式的模拟数据分析关中未来气候生产潜力的变化趋势,充分了解气候变化对渭河关中地区粮食产量的影响,为研究区的农业发展以及确保气候变化背景下的粮食安全提供一定的指导作用。

1 数据来源及研究方法

1.1 研究区概况及数据来源

关中地区位于陕西省中部(106°30′~110°30′E, 33°30′~35°40′N),渭河中下游,面积约 5.54 万 km²,涵盖宝鸡、咸阳、西安、铜川、渭南等 5 个市。其南北两侧分别是秦巴山脉和渭北山系,中部为平原。关中地区属于大陆性季风气候区,暖温带半湿润半干旱气候带,冬冷夏热,四季分明,雨热同期,易发生干旱。作为我国重要的商品粮产区之一,关中地区粮食作物主要是一年两熟的冬小麦和夏玉米。

本文粮食产量数据采用陕西省关中、西安、铜川、宝鸡、咸阳和渭南市 1983—2016 年的逐年粮食单产统计数据,作物主要包含谷物、薯类和豆类,数据来源于《陕西省统计年鉴》(1984—2017)(<http://data.cnki.net/yearbook/Single/N2019010189>)。选取研究区内 1983—2016 年记录数据较为完整的 8 个气象站点的气象要素,主要包括逐日降水、气温(平均气温、最高气温和最低气温)、日照时数,数据来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>),缺失数据通过临近站点相同时间的数据序列进行线性插值插补。

考虑到全球较为关注的升温 1.5 和 2 问题,本文选取 IPCC AR5 提出的典型浓度路径

(Representative Concentration Pathway, RCPs)排放情景中的低排放情景 RCP2.6 和介于中等排放和高排放之间的 RCP6.0 两种情景对关中地区未来气候生产潜力进行评估。跨部门影响模型比较计划(Intersectoral Impact Model Intercomparison Project, ISIMIP)主要目的在于探讨全球变化对地表过程和人类社会的影响,目前有 ISIMIP2a 和 ISIMIP2b 两种协议,其中涉及的模式是基于第 5 阶段多模式比较计划(Coupled Model Intercomparison Project Phase 5, CIMP5)挑选得到的^[20-21]。本文所采用的 2021—2050 年降水、气温数据则是 ISIMIP2b 中 4 个全球气候模式(GFDL-ESM2M, HadGEM2-ES, IPSL-CAM5-LR, MIROC5)的模拟结果,其空间分辨率为 0.5°×0.5°,时间分辨率为天,各模式的详细情况参见 <https://www.isimip.org/>。本文分析过程以年尺度为主,故将所得日尺度数据经求和或平均后得到年时间尺度的序列。

研究区、气象站点及气候模式格点位置详见图 1,气象站点的详细信息见表 1,表 2 为不同气候模式的基本信息。

1.2 研究方法

1.2.1 气候产量

作物的生长情况不仅取决于作物对所处地区气候的适应程度,农业种植管理等措施同样影响着粮食产量的变化。通常情况下认为,粮食产量由趋势产量和气候产量两部分构成,趋势产量反映人类对作物生长所付出的耕种方式以及农业机械技术的提高所带来的产量变化,一般情况下处于不断增加的状态,气候产量则表示气候要素引起的作物产量变化^[22]。从实际粮食产量中剔除趋势产量便能得到气候产量:

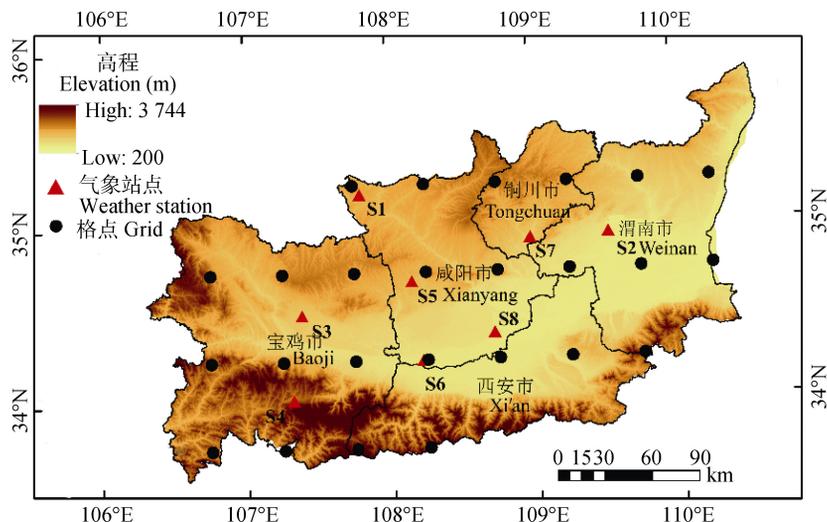


图 1 关中地区及气象站点和格点地理位置

Fig. 1 Location of Guanzhong region, weather stations and grids

表 1 关中地区气象站点信息

Table 1 Information of weather stations of Guanzhong region

序号 No.	站台号 Station number	站名 Station name	纬度 Latitude (°N)	经度 Longitude (°E)	高程 Elevation (m)
S1	53929	长武 Changwu	35.20	107.80	1 206.5
S2	53948	蒲城 Pucheng	34.95	109.58	499.2
S3	57025	凤翔 Fengxiang	34.52	107.38	781.1
S4	57028	太白 Taibai	34.03	107.32	1 543.6
S5	57030	永寿 Yongshou	34.70	108.15	994.6
S6	57034	武功 Wugong	34.25	108.22	447.8
S7	57037	耀县 Yaoxian	34.93	108.98	710.0
S8	57048	秦都 Qindu	34.40	108.72	472.8

表 2 4 个全球气候模式的相关信息统计表

Table 2 Descriptions of the 4 global circulation models used in this study

模式名称 Model name	机构缩写 Institute acronyms	机构全称 Institute full name
GFDL-ESM2M	NOAA GFDL	美国国家海洋与大气管理局和美国地球物理流体动力学实验室 National Oceanic and Atmospheric Administration, U.S. Department of Commerce; U.S. Geophysical Fluid Dynamics Laboratory
HadGEM2-ES	MOHC (additional realizations by INPE)	英国气象局哈德利中心和西班牙国家气象局 Met Office Hadley Centre and Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPSL-CAM5-LR	IPSL	法国皮埃尔西蒙拉普拉斯研究所 Institute Pierre-Simon Laplace
MIROC5	MIROC	日本海洋与地球科学技术厅、大气和海洋研究所(东京大学)和国家环境研究所 Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Atmosphere and Ocean Research Institute (University of Tokyo), and National Institute for Environmental Studies

$$Y_c = Y - Y_t \quad (1)$$

式中: Y 表示粮食实际产量, $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$; Y_t 表示趋势产量, $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$; Y_c 表示气候产量, $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

考虑到趋势产量可能存在的非线性特征, 本文采用经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)方法对粮食产量序列进行分解, 将得到的最后余项作为这里所需的趋势产量。EMD 方法的基本思想是将一个频率不规则的波化为多个单一频率的波(即若干不同尺度的本征模态函数分量, intrinsic mode function, IMF)和 1 个残波(趋势项)的形式^[13]。

计算过程概述如下:

1) 确定时间序列 $X(t)$ 的局部最大值序列 $X_{\max}(t)$ 和最小值序列 $X_{\min}(t)$, 利用三次样条函数对 $X_{\max}(t)$ 和 $X_{\min}(t)$ 序列进行差值计算, 得到时间序列 $X(t)$ 的上包络线 $U(t)$ 和下包络线 $L(t)$ 。上、下包络线的平均曲线 $M(t)$ 为:

$$M(t) = \frac{U(t) + L(t)}{2} \quad (2)$$

2) 时间序列 $X(t)$ 减去 $M(t)$ 后剩余部分记为 $H_1(t)$:

$$H_1(t) = X(t) - M(t) \quad (3)$$

若 $H_1(t)$ 满足极大值、极小值点和过零点的数目相等或至多相差 1 点, 且在任意时间点, 上下包络线的均值为零, 则 $H_1(t)$ 为 1 个 IMF; 如果不满足上述两个条件, 则需将 $H_1(t)$ 当作新的时间序列进行

上述筛选过程, 直到 $H_k(t)$ 满足 IMF 的两个条件, 时间序列的第一个分量 $C_1(t)$ 被提取出来。

3) 时间序列 $X(t)$ 减去 $C_1(t)$ 后剩余部分记为 $R_1(t)$:

$$R_1(t) = X(t) - C_1(t) \quad (4)$$

对剩余部分 $R_1(t)$ 重复过程(1)-(2), 当最后所剩余的部分为一个单调序列时, 结束分解, 该序列即为时间序列 $X(t)$ 的趋势项。最终 $X(t)$ 可表示为:

$$X(t) = \sum_{i=1}^k \text{IMF}_i + R(t) \quad (5)$$

此时, 将分解得到的趋势项 $R(t)$ 表示作物趋势产量。

1.2.2 气候生产潜力

本文采用 Thornthwaite Memorial 模型计算气候生产潜力^[17]:

$$Y_c = 3\,000 \{1 - \exp[-0.000\,969\,51(V-20)]\} \quad (6)$$

$$V = \frac{1.05P}{\sqrt{1 + (1.05P/L)^2}} \quad (7)$$

$$L = 300 + 25t + 0.05t^3 \quad (8)$$

式中: V 为年平均实际蒸散量(mm), P 为年降水量(mm), L 为年平均最大蒸散量(mm), t 表示年平均气温($^{\circ}\text{C}$), Y_c 为气候生产潜力($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)。

1.2.3 Mann-Kendall 突变分析

本文采用 Mann-Kendall(MK)方法^[23]判断主要

气候要素的变化变异点, 具体计算过程如下:

1) 计算具有 n 个样本的时间序列 x 在顺序情况下对应的秩序列 S_k :

$$S_k = \sum_{i=1}^k a_i \quad (k=1, 2, 3, \dots, n) \quad (9)$$

其中:

$$a_i = \begin{cases} +1 & (x_i > x_j, j=1, 2, 3, \dots, i) \\ 0 & (x_i \leq x_j, j=1, 2, 3, \dots, i) \end{cases} \quad (10)$$

2) 计算顺序时间序列对应的 UK_k 统计量:

$$UK_k = \frac{S_k - E(S_k)}{\sqrt{\text{Var}(S_k)}} \quad (k=1, 2, 3, \dots, n) \quad (11)$$

式中: $UK_1 = 0$, $E(S_k)$ 与 $\text{Var}(S_k)$ 分别是 S_k 的均值与方差, $E(S_k) = \frac{k(k-1)}{4}$, $\text{Var}(S_k) = \frac{k(k-1)(2k+5)}{72}$, $k=1, 2, 3, \dots, n$ 。

3) 计算时间序列在逆序情况下对应的秩序列 S_k :

将 n 个样本的顺序时间序列 x 倒置, 变为 x_n, x_{n-1}, \dots, x_1 , 重复上述过程, 得到逆序秩序列 S_k 和 UB_k 。令 $UB_k = -UF_k (k=n, n-1, n-2, \dots, 3, 2, 1)$, 其中 $UB_1 = 0$ 。

在给定显著性水平(本文选取 0.05 显著性水平)的情况下, 如果 UF 曲线超过置信水平线 ($U_{0.05} = \pm 1.96$), 则认为研究要素发生突变, 且 UF 与 UB 在置信水平线之间的交点为突变开始时间。

1.2.4 趋势分析

根据线性最小二乘回归方法进行变量的趋势检测^[24]:

$$\hat{y} = ax + b \quad (12)$$

式中: x 表示时间, \hat{y} 表示研究变量的回归值, a 和 b 为拟合系数, 可通过下式计算得到:

$$b = \bar{y} - a\bar{x} \quad (13)$$

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - n\bar{x}\bar{y}}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - n\bar{x}^2} \quad (14)$$

式中: \bar{x} 和 \bar{y} 分别为 x 和 y 序列的平均值, x_i 和 y_i 分别为两序列第 i 个数值, n 为时间序列长度, a 则表示变量的变化趋势。为评估该变化趋势的置信水平 P , 需要先计算线性回归的相关系数 r :

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (15)$$

进而得到服从自由度为 $(n-2)$ 的 t 分布统计值:

$$t(r, n) = \frac{|r|\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}} \quad (16)$$

最后置信度 $1-p$ 由下式计算得到:

$$1-p = \int_{-t(r,n)}^{t(r,n)} f(t, n) dt \quad (17)$$

式中: $f(t, n)$ 为 t 分布的概率分布函数; p 为置信水平, 若 p 小于本文所取的置信水平 0.05、0.01 或 0.001, 则表明所研究变量的趋势显著, 相反, 则表示研究变量的变化趋势不显著。

1.2.5 敏感性分析

参考潜在蒸散发对不同气候要素的敏感分析方法^[25], 考虑到气候生产潜力是年降水及平均气温组合而成的方程, 即:

$$Ye = f(P, T_{\text{mean}}) \quad (18)$$

那么, 气候生产潜力对降水和气温的敏感性可表示为:

$$Ye_i = \lim_{\Delta v_i \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta Ye}{\Delta v_i} \right) = \frac{\partial Ye}{\partial v_i} \cdot \frac{v_i}{Ye} \quad (19)$$

式中: v_i 表示气候变量(年降水或平均气温); Ye 是气候生产潜力; Ye_i 则是气候生产潜力对某一气候变量的敏感系数, 表示当某一气候变量发生变化时引起的气候生产潜力的变化程度。

2 结果与分析

2.1 关中地区多年气候时空变化特征

图 2 为 1983—2016 年关中地区逐年平均气温、降水量、最高气温、最低气温、年积温 (≥ 10 的日平均气温之和) 以及日照时数序列的距平变化特征以及根据 MK 方法计算得到的突变情况。表 3 为上述气候要素的逐年变化趋势。

由图 2 和表 3 能够看出, 近 34 年来关中地区年平均气温上升显著(均通过 0.01 显著性检验), 地区降水呈不显著的下降趋势, 下降速率约为 $1 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$; 平均气温的上升趋势在最高气温、最低气温和积温等多个方面均有体现, 且主要突变点在 1995 年左右。表 3 中的气温变化趋势大小表明最高气温的上升对平均气温和积温的升高起着主要贡献作用。多年来, 关中地区的日照时数表现为不显著的上升趋势, 增加速率约为 $1 \text{ h} \cdot \text{a}^{-1}$ 。降水和日照时数产生突变的时间较气温滞后, 大约在 2009 年左右。此外关中地区年降水量和日照时数的波动较为剧烈, 1990—2005 年关中地区年降水量持续小于多年平均值 100~200 mm, 而该时段日照时数则较多年平均值高 100~200 h, 在 2000 年之后, 二者波动出现相反状态。可见降水与日照间存在一定负相关, 降水较少时, 全年的阴天天数明显降低, 从而日照时数大大增加。

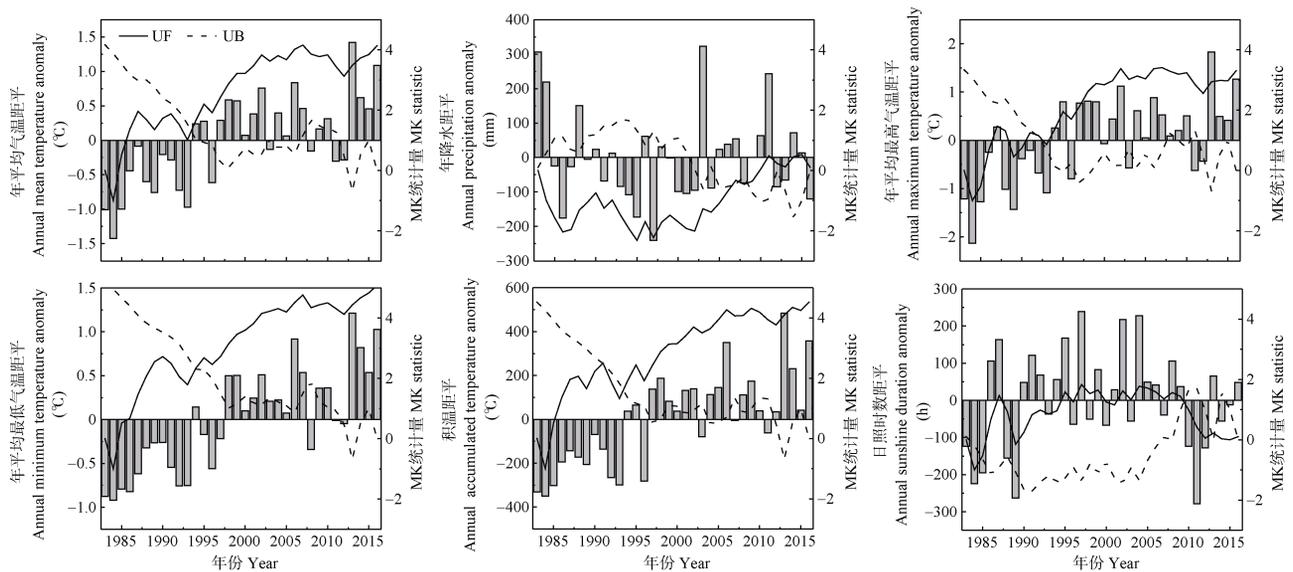


图 2 1983—2016 年关中地区气候要素随时间变化特征
Fig. 2 Changes of climate variables of Guanzhong region from 1983 to 2016

表 3 1983—2016 年关中地区各气象要素的变化趋势及显著性

Table 3 Trends and significance of climate variables of Guanzhong region from 1983 to 2016

	平均气温 Mean temperature ($\cdot a^{-1}$)	降水 Precipitation ($mm \cdot a^{-1}$)	最高气温 Maximum temperature ($\cdot a^{-1}$)	最低气温 Minimum temperature ($\cdot a^{-1}$)	日照时数 Sunshine duration ($h \cdot a^{-1}$)	积温(≥ 10) Accumulated temperature (≥ 10) ($\cdot a^{-1}$)
趋势 Trend	0.046**	-1.011	0.055**	0.048**	1.14	16.00**

**表示通过 $P < 0.01$ 显著性检验。 ** represents significance at $P < 0.01$

年平均气温、降水量和日照时数在局部地区随时间的变化趋势与区域整体相一致(表 4): 5 个市的年平均气温和日照时数呈现增加趋势, 而降水量呈现下降趋势; 平均气温的突变时间集中在 1995 年前后, 降水量和日照时数的波动使得突变时间较气温相对滞后。要素的大小分布存在一定的空间差异:

相比于东部而言, 关中西部平均气温和日照时数偏低, 而降水偏多。在相对较暖的渭南市, 其平均气温的上升速率最高, 达 $0.07 \cdot a^{-1}$; 而在铜川和渭南等较干旱的地区, 年降水量的下降速率也偏大。可见 1983—2016 年期间关中地区的气候正在向“暖干”趋势发展。

表 4 1983—2016 年关中地区各市气候要素变化特征

Table 4 Spatial characteristics of climate variables in each city of Guanzhong region from 1983 to 2016

城市 City	平均气温 Mean temperature			降水 Precipitation			日照时数 Sunshine duration		
	平均值 Mean ()	趋势 Trend ($\cdot a^{-1}$)	突变年份 Abrupt year	平均值 Mean (mm)	趋势 Trend ($mm \cdot a^{-1}$)	突变年份 Abrupt year	平均值 Mean (h)	趋势 Trend ($h \cdot a^{-1}$)	突变年份 Abrupt year
西安 Xi'an	13.57	0.03**	1992	589.65	-0.58	2005	1 744.94	-1.32	1997
铜川 Tongchuan	12.83	0.04**	1993	537.68	-1.11	2006	2 203.12	0.68	
宝鸡 Baoji	10.47	0.05**	1995	626.61	-0.42	2003	1 925.53	1.07	1999
咸阳 Xianyang	11.94	0.04**	1994	563.57	-0.59	2009	2 011.74	4.00	1990
渭南 Weinan	14.02	0.07**	1995	511.58	-2.35		2 199.82	1.27	

**表示通过 $P < 0.01$ 显著性检验。 ** represents significance at $P < 0.01$

2.2 气候产量及粮食产量时空变化特征

关中地区多年平均粮食单产 $3 599 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 1983—2016 年呈逐年显著增加趋势(通过 0.01 置信度检验), 增加速率为 $57.17 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ (图 3)。西安、铜川、宝鸡、咸阳、渭南 5 个局部市区的粮食产量

变化趋势与关中区域相一致, 均表现为显著上升趋势(表 5); 铜川市粮食单产的上升速率最快, 达 $69.21 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。关中地区整体上气候产量同样呈现上升趋势但不显著, 且速率较慢, 仅有 $0.85 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 但其峰谷波动变化与粮食单产的

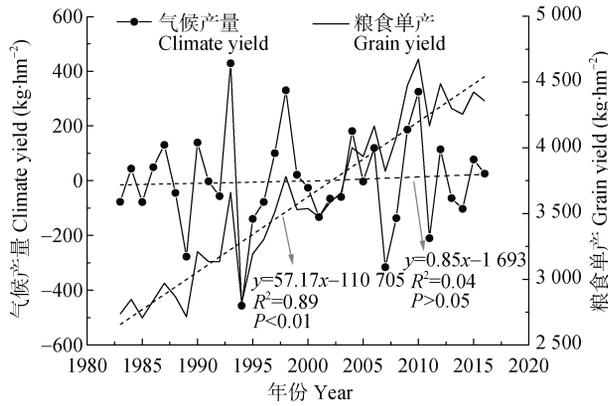


图 3 1983—2016 年关中地区粮食单产及气候产量随时间变化曲线

Fig. 3 Variation curves of grain yield and climate yield in Guanzhong region from 1983 to 2016

表 5 1983—2016 年关中地区各市的作物产量变化趋势
Table 5 Trend of grain yield in each city of Guanzhong region from 1983 to 2016

城市 City	粮食单产 Grain yield		气候产量 Climate yield	
	均值 Mean (kg·hm ⁻²)	趋势 Trend (kg·hm ⁻² ·a ⁻¹)	均值 Mean (kg·hm ⁻²)	趋势 Trend (kg·hm ⁻² ·a ⁻¹)
西安 Xi'an	4 217	63.15***	7.32	1.67
铜川 Tongchuan	2 961	69.21***	321.97	8.98*
宝鸡 Baoji	3 505	65.84***	-13.98	1.60
咸阳 Xianyang	3 949	65.82***	428.88	9.51*
渭南 Weinan	3 372	53.99***	166.62	5.81

*和***分别表示趋势在 $P < 0.05$ 和 $P < 0.001$ 水平显著。* and *** represent significant trends at $P < 0.05$ and $P < 0.001$ levels, respectively.

峰谷波动相吻合。图 4 显示关中地区不同气候要素与气候产量的相关性在空间上存在差异性, 说明气候产量的变化是受多种气候要素综合影响的结果。该地区 4 个市区的气候产量与气温存在正相关, 表明气温有助于关中地区气候产量的提升。空间上看, 铜川、咸阳和渭南 3 市的平均气候产量较大且增加趋势也较高(其中铜川、咸阳的变化趋势通过 0.05 显著性检验), 说明当地的气候条件比较好, 利于作物的生长。而宝鸡市灌区面积较少, 且多年平均气温相对而言低于其他市区, 低温不利于作物生物量的累积, 导致气候产量偏低, 这可能是引起关中地区的区域气候产量多年以来在-0.48(近乎 0 值的水平线)附近上下波动的主要原因之一。

2.3 气候生产潜力及敏感性

多年来关中地区区域气候生产潜力在 7 000~12 000 kg·hm⁻² 间波动(图 5), 且 1996—2016 年的平均气候生产潜力高于 1995 年之前, 这在关中地区的 5 个市中均有体现(表 6)。1983—1995 年, 关中地区整体气候生产潜力呈下降趋势, 宝鸡市趋势最小

(-68.68 kg·hm⁻²·a⁻¹), 西安市最大(-199.87 kg·hm⁻²·a⁻¹)。1995 年之后, 随着气温的升高及降水的增加(图 2), 尽管关中气候生产潜力均表现为不显著的增加趋势, 但其决定了整个研究时段(1983—2016 年)的气候生产潜力发展趋势。

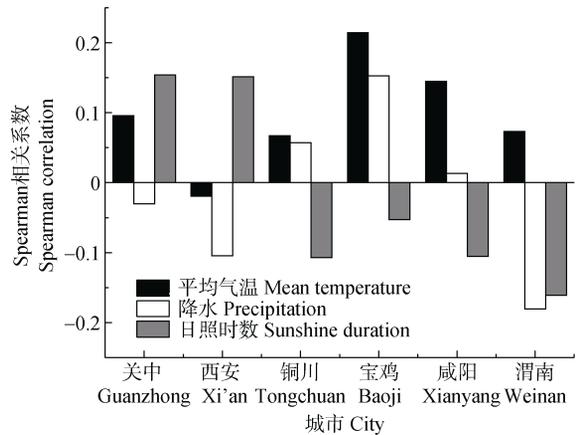


图 4 关中地区各市气候要素与气候产量的相关性
Fig. 4 Correlation between climate variables and climate yield in each city of Guanzhong region

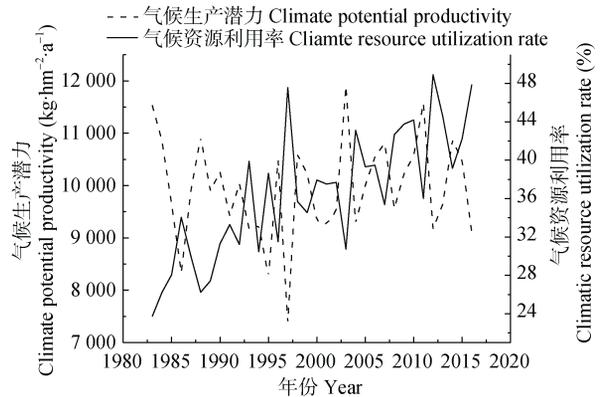


图 5 1983—2016 年关中气候生产潜力及气候资源利用率的变化

Fig. 5 Changes of climate potential productivity and climate resource utilization rate in Guanzhong region from 1983 to 2016

虽然关中地区的气候资源处于波动状态, 但在其他条件的辅助之下, 作物对气候资源的利用率(粮食产量占气候生产潜力的比例)在逐年上升, 从 1983 年的 23.7% 逐渐波动上升到 2016 年的 47.9%。此外, 图 5 能够明显看出, 在气候生产潜力较低时, 气候资源利用率较大; 而在气候生产潜力较高时, 气候资源利用率则处于波谷状态, 这说明在水热条件较差时, 通过农业管理等措施的实施能够促进作物对气候资源的利用, 从而提升粮食增产空间。气候资源利用率在 1997 年左右波动较为剧烈, 这与当时的气候状态有很大关系: 1997 年关中地区的年平均气温处于上升的突变阶段, 而年降水量却为研究时段的历史最低值。

表 6 1983—2016 年关中地区各市气候生产潜力在不同时间段的变化趋势及显著性
Table 6 Trend and significance of climate potential productivity in each city of Guanzhong region at different periods from 1983 to 2016

城市 City	1983—1995		1996—2016		1983—2016	
	均值	趋势	均值	趋势	均值	趋势
	Mean (kg·hm ⁻²)	Trend (kg·hm ⁻² ·a ⁻¹)	Mean (kg·hm ⁻²)	Trend (kg·hm ⁻² ·a ⁻¹)	Mean (kg·hm ⁻²)	Trend (kg·hm ⁻² ·a ⁻¹)
关中 Guanzhong	9 809	-143.38*	10 025	30.42	9 942	8.16
西安 Xi'an	10 036	-199.87*	10 231	53.21	10 156	9.55
铜川 Tongchuan	9 769	-156.28	9 956	8.45	9 884	1.11
宝鸡 Baoji	9 932	-68.68	10 140	30.11	10 060	11.94
咸阳 Xianyang	9 753	-173.33*	10 019	39.68	9 917	10.78
渭南 Weinan	9 830	-160.07	9 887	15.97	9 865	-2.80

表示趋势在 $P < 0.05$ 水平显著。 represents significant trend at $P < 0.05$ level.

关中地区气候生产潜力对降水和气温的敏感性均为正向(图 6a), 其中对降水的敏感性(0.50)高于气温(0.28), 也就是说, 若降水变化 10%, 气候生产潜力将会变化 5%, 而气温变化 10%时, 生产潜力仅会变化 2.8%。就局部地区而言, 西安、铜川和渭南地区的气候生产潜力对降水的敏感性高于区域平均值; 相比降水而言, 5 个市的气候生产潜力对气温的敏感性差异不大, 基本接近区域平均, 而宝鸡市的气候生产潜力对降水的敏感性低于其余 4 市, 这是由于宝鸡市的平均降水量偏高而气温较低, 所以气候生产潜力对其降水量的敏感性较低, 反而对气温的敏感性略高于其他地区。统计各市气候生产潜力对降水和气温的敏感系数后发现, 生产潜力对降水的敏感性与对气温的敏感性呈显著负相关(图 6b), 其中宝鸡市的气候生产潜力对降水和气温敏感性的对立性更为明显(斜率绝对值最大)。综上可知, 全球变暖的背景之下, 关中地区气候生产潜力的波动对降水更为敏感。

2.4 未来气候生产潜力对气候变化的响应

为了确保气候模式对未来时期模拟结果的可靠性, 提取关中气象站点附近的格点数据, 根据其 1983—2005 年的历史模拟序列与关中地区相应时间段的实测气象数据进行比较, 最终选择二者较为接近的模式来分析未来 2021—2050 年关中气候生产潜力的变化情况。当站点附近已有格点时, 如图 1 中 S1 和 S6 站点临近处便有格点, 即采用格点本身数据序列进行比较; 当站点与邻近格点的位置相差较远时, 则对站点附近 4 个格点数据求取平均再进行比较, 最终采用一元线性拟合系数和均方根误差(Root Mean Squared Error, RMSE)方法来比较不同模式模拟结果的适用性。4 个不同模式在历史阶段 1983—2005 年的年平均气温和降水量与 8 个气象站点的实测数据对比结果如图 7 所示。

从一元线性回归系数 a 的大小来看(图 7a 和 7c), GFDL-ESM2M 模式在历史时期的平均气温序列与关中地区 8 个站点的实测数据之间的拟合效果(平均拟合系数接近 0.5)明显好于其他 3 种模式, 其年降水量的拟合结果也高于其余 3 种气候模式。就 RMSE 的评估结果来看(图 7b 和 7d), 4 个模式中平均气温与实测气温的均方根误差在 0.6~1.5 波动, 模式间没有明显的差别, 但 GFDL-ESM2M 模式的年降水量与实测降水量间的 RMSE 最小, 平均在 160 mm。由此可见, GFDL-ESM2M 模式相比于其他 3 种模式能够更好地展示关中地区历史阶段的气温和降水变化, 所以本文主要选用该模式未来 30 年(2021—2050 年)在 RCP2.6 和 RCP6.0 情景下的年降水及平均气温分析关中地区气候生产潜力对气候变化的响应情况。

RCP2.6 情景下, 关中地区 2021—2050 年的平均气候生产潜力为 11 000 kg·hm⁻², 略高于 RCP6.0 情景(10 780 kg·hm⁻²), 差异主要体现在关中中部的灌区地带(图 8)。RCP2.6 情景下关中大部分区域的气候生产潜力集中在 10 997~11 636 kg·hm⁻²; 而在 RCP6.0 情景下, 中部灌区的气候生产潜力缩减到 10 678~10 993 kg·hm⁻², 南北两侧也出现气候生产潜力降低的情况。2 种情景下, 关中地区的气候生产潜力高值区均集中在东部渭南市。

受地理位置及气候要素的影响, 关中地区的 5 个市区气候生产潜力在空间上的变化趋势较为一致, 故此处仅考虑关中区域上未来气候生产潜力随时间的变化情况。图 9 显示, 在 2021—2050 年期间, 关中地区的气候生产潜力在 RCP2.6 情景下呈现轻微下降趋势, 下降速率为 8 kg·hm⁻²·a⁻¹; 并且在 2020s、2030s 和 2040s 气候生产潜力均呈现下降趋势, 其中 2030s 的下降速率最大, 为 146 kg·hm⁻²·a⁻¹($P < 0.05$)。而在 RCP6.0 情景下关中地区的气候生产潜力则表现为上

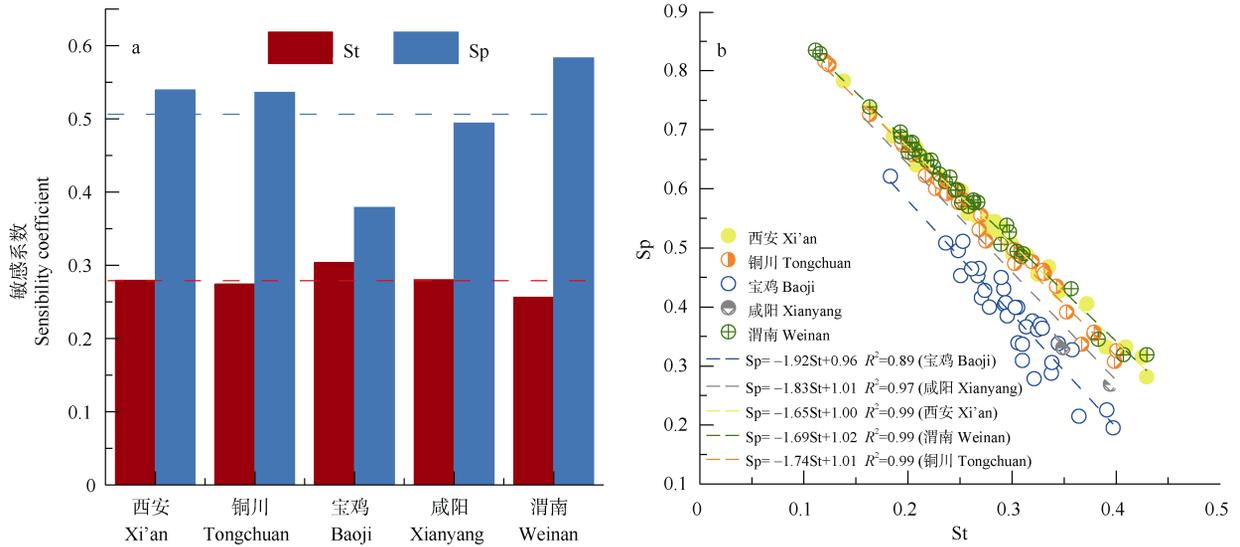


图 6 关中地区各市气候生产潜力对气温和降雨的敏感性及其相互关系

Fig. 6 Sensitivity of climate potential productivity to temperature and precipitation and their correlation in each city of Guanzhong region

St: 对气温的敏感系数; Sp: 对降雨的敏感系数。St: sensitivity coefficient to temperature; Sp: sensitivity coefficient to precipitation.

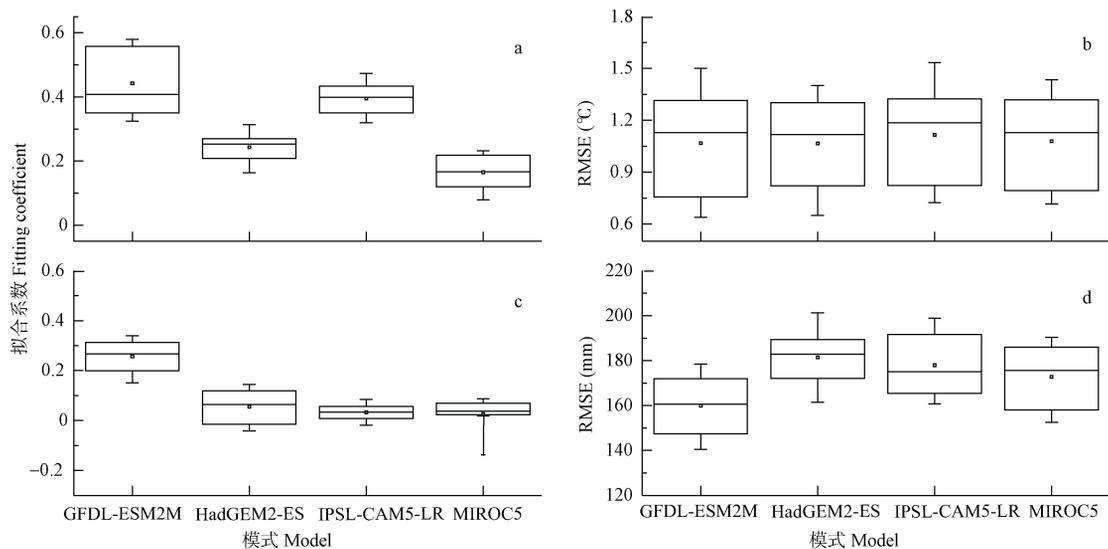


图 7 关中地区气温(a, b)和降水(c, d)的不同气候模式历史模拟序列与观测数据的比较

Fig. 7 Comparison between historical simulation results by different climate models and observed data of temperature (a, b) and precipitation (c, d) in Guanzhong region

图 a 和图 c 为一元线性回归拟合系数。Figure a and c show fitting coefficients of linear equations.

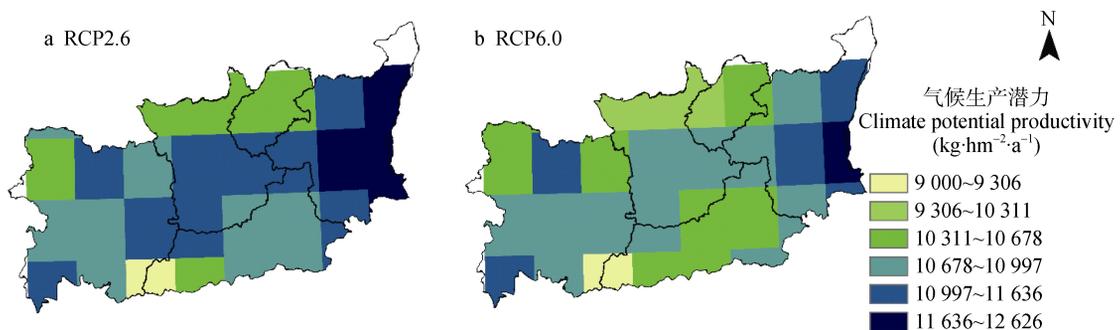


图 8 RCP2.6 和 RCP6.0 情景下关中地区未来气候生产潜力的空间分布

Fig. 8 Spatial distribution of future climate potential productivity in Guanzhong region under RCP2.6 and RCP6.0 scenarios

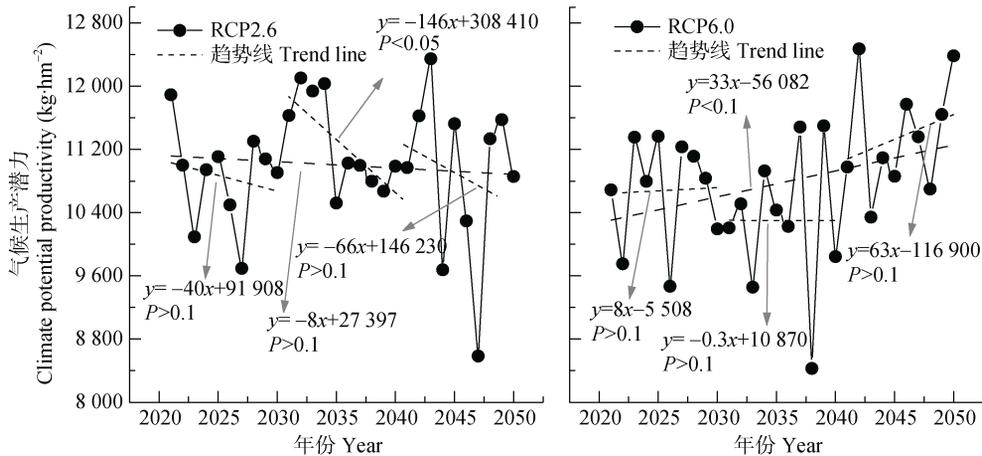


图 9 RCP2.6 和 RCP6.0 情景下关中地区未来气候生产潜力的时间变化

Fig. 9 Time variation of future climate potential productivity in Guanzhong region under RCP2.6 and RCP6.0 scenarios

升趋势, 上升速率达 $33 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, 并且该趋势通过 0.1 显著性检验。2020s 和 2040s 呈现出并不显著的上升趋势, 2040s 的上升速率超过 2021—2050 年的长期上升速率, 说明 2040s 是引起整个关中地区未来 30 年在 RCP6.0 情景下呈现上升趋势的主要时期。而在 2030s 关中地区的气候生产潜力出现轻微下降趋势, 该时期是关中生产潜力发生变化的转折点。

3 讨论

陕西渭河关中地区的气候变化主要体现在年平均气温显著上升而降水下降的趋势状态, 气温的变化尤为明显, 这点从不同学者的研究结果^[26-28]中均可得到验证。但由于时间长度不同, 二者的变化速率也有所差异, 不过总体来看, 陕西关中地区气温的显著上升与全球升温现象一致。虽然气温的升高在一定程度上促进了有机物的积累, 但该积累现象并不是无限制增加, 且气温的升高会缩短作物的生育期, 进而造成产量下降^[29]。Schlenker 等^[30]研究表明, 美国的玉米(*Zea mays*)、大豆(*Glycine max*)和棉花(*Gossypium spp.*)的产量在温度超过 29°C 、 30°C 和 32°C 之后便会急剧下降。韩智博等^[31]通过研究未来气候变化对黑河绿洲玉米产量的影响发现, 适合该地区玉米生长的年均气温为 7°C , 超过此温度产量与气温显著负相关。张延等^[32]利用气候变化背景下的不同大气环流模式结果模拟关中地区未来时期的冬小麦产量变化, 结果表明由于在生长期气温的显著升高和降水的下降趋势, 冬小麦的生育期会明显缩短, 且无论是在灌溉条件或是非灌溉条件下均会出现减产现象。可见, 气温与粮食产量之间的关系存在一定的地域差异及阈值范围。也有研究认为, 以变暖为主的全球气候变化对大部分地区粮食产量的负面影响更为普遍^[33-34]。而本文关中地区近 34 年

间的粮食单产呈现逐年波动上升的趋势, 并且在粮食单产进行趋势产量与气候产量分离后发现, 气候产量的波动与粮食产量的波动相一致, 并且气候产量呈现逐年轻微上升的现象, 说明气候变化在一定程度上影响着粮食单产的波动变化, 并且促进了粮食产量的提升, 且该变化与气温的升高有密切关联。但对于西藏地区而言, 其气候产量则逐年轻微下降, 主要原因则在于日照时数的降低^[22]。可见, 气候变化对粮食生产的影响存在地域差异。此外, 粮食的技术产量(趋势产量)并不是实际可测得的数据, 本文采用经验模态分解法得到趋势产量, 进而分析气候产量的变化, 但由于趋势产量无法得到充分验证, 故关于关中地区的气候产量变化情况的分析存在误差是不可避免的。

气候生产潜力能够体现出一个地区在其他条件都具备的情况下气候资源对产量的作用。刘新等^[17]研究表明, 内蒙古地区的气候生产潜力对降水的敏感性更大, 这与本文关中地区的气候生产潜力对降水的敏感性较高相一致。关中地区近 34 年平均年降水量约为 570 mm , 且随时间呈下降趋势, 一定程度上会导致气候生产潜力的下降, 但气温的显著上升抵消了这一趋势, 最终使得该地区的气候生产潜力呈现出缓慢增加状态, 其平均值近乎是青海省气候生产潜力($3233.9\sim 4784.8 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)^[35]的 2 倍。考虑到大气环流模式输出结果的不确定性, 本文在与历史气象数据进行比较之后选择较为可靠的模式数据, 关中地区的气温在未来时期继续明显上升, 降水也在未来时期存在增加现象, 与张延等^[32]指出未来时期关中地区降水下降结果不一致的原因可能是模式选择不同所致。相比于 1983—2016 年, 关中地区 2021—2050 年的年平均降水量在 RCP2.6 和 RCP6.0 情景下分别增加 87 mm 和 79 mm , 气温的持续上升

以及降水的增加使得关中地区的气候生产潜力在未来30年有所提升。气温和降水的增加对气候生产力起着促进作用。对比2021—2050年RCP2.6和RCP6.0两种情景下关中地区平均气温和降水发现, RCP2.6情景下的降水和气温均略高于RCP6.0情景(降水偏高8.3 mm, 气温偏高0.15 $^{\circ}\text{C}$), 故而关中地区RCP2.6情境的平均气候生产潜力略高于RCP6.0情景。

当前状态下, 关中地区作物对气候资源的利用率在1983—2016年期间虽逐年上升但依旧不足50%, 粮食产量尚未达到气候生产潜力, 其提升的空间还很大。为充分利用关中地区的气候资源, 更大程度提高气候资源利用率进而保障粮食安全, 建议在不改变土地利用性质的基础上, 充分掌握不同作物对气候要素的敏感程度, 因时制宜进行农事耕作时间的调整, 同时更要对农田灌溉等水利设施安排合理调度制度, 以应对未来降水变化不确定性对粮食产量带来的威胁。

4 结论

本文依据渭河关中地区8个气象站点在1983—2016年的气候要素及关中各市区粮食单产数据, 分析粮食产量受气候变化的影响, 最后根据未来气候情景, 分析关中地区未来气候生产潜力对气候变化的响应特征。主要得出以下结论:

1) 关中地区多年平均气温在东部(主要是咸阳市东部、西安、铜川和渭南)较高, 而年降水量在西部偏多。1983—2016年近34年来, 区域上年降水量的下降速率为 $1\text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$, 日照时数和平均气温的上升速率分别为 $1\text{ h}\cdot\text{a}^{-1}$ 和 $0.05\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{a}^{-1}$, 平均气温的突变时间在1995年左右, 且空间上具有一致性, 其升高主要以最高气温的变化为主要驱动。

2) 关中不同市区的粮食单产和气候产量均表现为呈逐年增加趋势, 其中平均气温与气候产量的相关性高于降水和日照时数与气候产量的相关性。多年来关中区域气候生产潜力在 $7\ 000\sim 12\ 000\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 波动, 虽然其对降水的敏感性较大, 但由于气温的显著持续上升, 气温突变后的气候生产潜力高于突变之前, 是1983—2016年气候生产潜力变化趋势的主要驱动来源。并且随着农业技术的发展和气候的综合影响, 关中地区作物对气候资源的利用率在逐年攀升, 近几年达50%左右。

3) 未来2021—2050年, 关中地区的气候生产潜力变化存在不确定性, RCP2.6情景下的气候生产潜力高于RCP6.0情景, 差距主要体现在贯穿关中中部的灌区部分。但RCP2.6情景下关中地区的气候生产

潜力呈现轻微下降趋势, RCP6.0情景下的气候生产潜力变化趋势则相反, 表现为上升趋势, 且上升速率高于RCP2.6情景的下降速率。

参考文献 References

- [1] DAI A G. Increasing drought under global warming in observations and models[J]. *Nature Climate Change*, 2013, 3: 52–58
- [2] GAY C, ESTRADA F, CONDE C, et al. Potential impacts of climate change on agriculture: A case of study of coffee production in Veracruz, Mexico[J]. *Climatic Change*, 2006, 79(3/4): 259–288
- [3] 周广胜. 气候变化对中国农业生产影响研究展望[J]. *气象与环境科学*, 2015, 38(1): 80–94
ZHOU G S. Research prospect on impact of climate change on agricultural production in China[J]. *Meteorological and Environmental Sciences*, 2015, 38(1): 80–94
- [4] 郑亚楠, 张凤荣, 谢臻, 等. 中国粮食生产时空演变规律与耕地可持续利用研究[J]. *世界地理研究*, 2019, 28(6): 120–131
ZHENG Y N, ZHANG F R, XIE Z, et al. Research on spatial-temporal evolution of grain production and sustainable use of cultivated land in China[J]. *World Regional Studies*, 2019, 28(6): 120–131
- [5] 刘立涛, 刘晓洁, 伦飞, 等. 全球气候变化下的中国粮食安全问题分析[J]. *自然资源学报*, 2018, 33(6): 927–939
LIU L T, LIU X J, LUN F, et al. Research on China's food security under global climate change background[J]. *Journal of Natural Resources*, 2018, 33(6): 927–939
- [6] HAKIM M A, HOSSAIN A, DA SILVA J A T, et al. Protein and starch content of 20 wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes exposed to high temperature under late sowing conditions[J]. *Journal of Scientific Research*, 2012, 4(2): 477–489
- [7] HOSSAIN A, LOZOVSKAYA M V, ZVOLINSKY V P, et al. Effect of soil and climatic conditions on phenology of spring wheat varieties in the northern Bangladesh[J]. *Natural Science: Journal Fund Applied Science*, 2012, 2(39): 78–86
- [8] 米娜, 张玉书, 蔡福, 等. 干旱胁迫对玉米物候及产量组成的影响及模拟研究[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2019, 27(12): 1779–1788
MI N, ZHANG Y S, CAI F, et al. Effect of drought stress on maize phenology and yield components and its simulation[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2019, 27(12): 1779–1788
- [9] 张荣荣, 宁晓菊, 秦耀辰, 等. 1980年以来河南省主要粮食作物产量对气候变化的敏感性分析[J]. *资源科学*, 2018, 40(1): 137–149
ZHANG R R, NING X J, QIN Y C, et al. Analysis of sensitivity of main grain crops yield to climate change since 1980 in Henan Province[J]. *Resources Science*, 2018, 40(1): 137–149
- [10] 张雪琪, 满苏尔·沙比提, 马国飞. 叶尔羌河平原绿洲气候变化对粮食生产的影响[J]. *干旱区研究*, 2018, 35(3): 705–712
ZHANG X Q, MANSUR SHABITI, MA G F. Effects of cli-

- mate change on grain production in plain oasis in the Yarkant River basin[J]. *Arid Zone Research*, 2018, 35(3): 705–712
- [11] 李彩侠, 李俏, 孙天一, 等. 气候变化对黑龙江省主要农作物产量的影响[J]. *自然灾害学报*, 2014, 23(6): 200–208
LI C X, LI Q, SUN T Y, et al. Effect of climate change on major crops yield in Heilongjiang Province[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2014, 23(6): 200–208
- [12] 刘春琼, 刘萍, 吴生虎, 等. 基于 DCCA 方法分析气候变化对四川省粮食产量的影响[J]. *中国农业气象*, 2016, 37(1): 43–50
LIU C Q, LIU P, WU S H, et al. Impacts of climate change on grain output in Sichuan Based on the Detrended Cross-Correlation Analysis method[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2016, 37(1): 43–50
- [13] 刘忠, 黄峰, 李保国. 基于经验模态分解的中国粮食单产波动特征及影响因素[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(2): 7–13
LIU Z, HUANG F, LI B G. Analysis on characteristics and influential factors of grain yield fluctuation in China based on empirical mode decomposition[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(2): 7–13
- [14] 王亚飞, 廖顺宝. 气候变化对粮食产量影响的研究方法综述[J]. *中国农业资源与区划*, 2018, 39(12): 54–63
WANG Y F, LIAO S B. Impacts of climate change on grain yield: A review of research methods[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2018, 39(12): 54–63
- [15] 尹朝静, 李谷成, 葛静芳. 粮食安全: 气候变化与粮食生产率增长——基于 HP 滤波和序列 DEA 方法的实证分析[J]. *资源科学*, 2016, 38(4): 665–675
YIN C J, LI G C, GE J F. Food security, climate change and grain productivity growth based on HP filter and sequential DEA methods[J]. *Resources Science*, 2016, 38(4): 665–675
- [16] 赵俊芳, 孔祥娜, 姜月清, 等. 基于高时空分辨率的气候变化对全球主要农区气候生产潜力的影响评估[J]. *生态环境学报*, 2019, 28(1): 1–6
ZHAO J F, KONG X N, JIANG Y Q, et al. Impact assessment of climate change on climatic potential productivity in global major agricultural regions based on high spatial and temporal resolution data[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2019, 28(1): 1–6
- [17] 刘新, 刘林春, 尤莉, 等. 内蒙古地区气候生产潜力变化及其敏感性分析[J]. *中国农业气象*, 2018, 39(8): 531–537
LIU X, LIU L C, YOU L, et al. Characteristics and sensitivity analysis of climate production potential in Inner Mongolia[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2018, 39(8): 531–537
- [18] 董思, 任志远, 张翀, 等. 陕西省气候变化及其气候生产潜力的时空变化[J]. *中国农业大学学报*, 2016, 21(8): 142–149
DONG S, REN Z Y, ZHANG C, et al. Spatial-temporal changing characteristics of climate and its potential productivity in Shaanxi Province[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2016, 21(8): 142–149
- [19] 卢燕宇, 孙维, 唐为安, 等. 气候变化背景下安徽省冬小麦气候生产潜力和胁迫风险研究[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2020, 28(1): 17–30
LU Y Y, SUN W, TANG W A, et al. Climatic potential productivity and stress risk of winter wheat under the background of climate change in Anhui Province[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2020, 28(1): 17–30
- [20] FRIELER K, LANGE S, PIONTEK F, et al. Assessing the impacts of 1.5 °C global warming—Simulation protocol of the Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project (ISIMIP2b)[J]. *Geoscientific Model Development*, 2017, 10(12): 4321–4345
- [21] 王书霞, 张利平, 李意, 等. 气候变化情景下澜沧江流域极端洪水事件研究[J]. *气候变化研究进展*, 2019, 15(1): 23–32
WANG S X, ZHANG L P, LI Y, et al. Extreme flood in the Lancang River Basin under climate change[J]. *Climate Change Research*, 2019, 15(1): 23–32
- [22] 杨春艳, 沈渭寿, 李海东. 1985—2010 年西藏粮食产量对气候和耕地变化的响应[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(17): 261–269
YANG C Y, SHEN W S, LI H D. Response of grain yield in Tibet to climate and cultivated land change during 1985–2010[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(17): 261–269
- [23] LI C, WANG R H. Recent changes of precipitation in Gansu, Northwest China: An index-based analysis[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2017, 129: 397–412
- [24] CHEN J, LI Q L, NIU J, et al. Regional climate change and local urbanization effects on weather variables in Southeast China[J]. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2011, 25(4): 555–565
- [25] JIANG S Z, LIANG C, CUI N B, et al. Impacts of climatic variables on reference evapotranspiration during growing season in Southwest China[J]. *Agricultural Water Management*, 2019, 216: 365–378
- [26] 董晴晴, 王会肖. 60 年来渭河关中地区气温与降水变化及其原因[J]. *南水北调与水利科技*, 2016, 14(6): 33–38
DONG Q Q, WANG H X. Variation and reason analysis of temperature and precipitation of Weihe River in Guanzhong area in the last 60 years[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2016, 14(6): 33–38
- [27] 刘政鸿. 陕西省近 50 年来降水量时空变化特征分析[J]. *水土保持研究*, 2015, 22(2): 107–112
LIU Z H. Analysis of spatiotemporal variation characteristics of precipitation in the past five decades in Shaanxi Province[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2015, 22(2): 107–112
- [28] 宁向玲, 董婕, 延军平. 陕西省近 60a 气温时空变化特征[J]. *干旱气象*, 2011, 29(4): 455–460
NING X L, DONG J, YAN J P. Spatial and temporal variation of air temperature in recent 60 years in Shaanxi Province[J]. *Journal of Arid Meteorology*, 2011, 29(4): 455–460
- [29] 赵彦茜, 肖登攀, 柏会子, 等. 中国作物物候对气候变化的响应与适应研究进展[J]. *地理科学进展*, 2019, 38: 224–235
ZHAO Y X, XIAO D P, BAI H Z, et al. Research progress on the response and adaptation of crop phenology to climate change in China[J]. *Progress in Geography*, 2019, 38(2):

- 224–235
- [30] SCHLENKER W, ROBERTS M J. Nonlinear temperature effects indicate severe damages to U.S. crop yields under climate change[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2009, 106(37): 15594–15598
- [31] 韩智博, 张宝庆, 田杰, 等. 基于 CCSM4 气候模式的未来气候变化对黑河绿洲玉米产量影响预测[J]. *灌溉排水学报*, 2018, 37(10): 108–115
- HAN Z B, ZHANG B Q, TIAN J, et al. Yield of the maize in Heihe oasis under climate change in northwest China predicted based on the CCSM4 climate model[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2018, 37(10): 108–115
- [32] 张延, 任小川, 赵英, 等. 未来气候变化对关中地区冬小麦耗水和产量的影响模拟[J]. *干旱地区农业研究*, 2016, 34(1): 220–228
- ZHANG Y, REN X C, ZHAO Y, et al. Impact and simulation of climate change on water consumption and yield of winter-wheat in Guanzhong Region[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2016, 34(1): 220–228
- [33] 谢立勇, 李悦, 徐玉秀, 等. 气候变化对农业生产与粮食安全影响的新认知[J]. *气候变化研究进展*, 2014, 10(4): 235–239
- XIE L Y, LI Y, XU Y X, et al. Updated understanding on the impacts of climate change on food production and food security[J]. *Progressus Inquisitiones de Mutatione Climatis*, 2014, 10(4): 235–239
- [34] IPCC. *Climate change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*[M/OL]. Cambridge: Cambridge University Press, 2014 [2014-04-01]. <http://www.oalib.com/references/19903666>
- [35] 李晓东, 胡爱军, 祁栋林, 等. 近 53 年青海省气候变化与粮食产量及气候生产潜力特征[J]. *草业科学*, 2015, 32(7): 1061–1068
- LI X D, HU A J, QI D L, et al. Characteristics of climate change, grain yield and climate productivity potential during last 53 years in Qinghai Province[J]. *Pratacultural Science*, 2015, 32(7): 1061–1068