

计舒怀. 1961—2020年河南省气候变化及其对气候生产力的影响[J]. 陕西气象, 2022(6): 42-47.

文章编号: 1006-4354(2022)06-0042-06

# 1961—2020年河南省气候变化 及其对气候生产力的影响

计舒怀<sup>1,2</sup>

(1. 信阳市气象局, 河南信阳 464000; 2. 信阳市茶叶气象重点实验室, 河南信阳 464000)

**摘要:**根据1961—2020年河南省15个气象站点逐月平均气温和降水量资料,基于Thornthwaite Memorial模型估算了1961年以来年河南省逐年气候生产潜力。采用数理统计、反距离加权插值、R/S分析等方法,分析了过去60 a河南省年平均气温、年降水量和气候生产力的时空变化特征,并定量评估了气候变化对气候生产力的影响。研究表明:(1)近60 a河南省气候总体趋于暖干。其中,年平均气温的气候倾向率为 $0.23\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$  ( $p < 0.05$ ),东北部增温明显;年降水量气候倾向率为 $-2.98\text{ mm}/10\text{ a}$  ( $p > 0.05$ ),南部降水减少较多。(2)在气候暖干化背景下,近60 a河南省气候生产潜力气候倾向率为 $72.8\text{ kg}/(\text{hm}^2 \times 10\text{ a})$  ( $p > 0.05$ ),呈不显著上升趋势,东部地区增速较快。(3)河南省气候生产潜力变化主要受气温和降水的双重影响,气温和降水贡献率分别为21.4%和78.6%,降水是影响该区域气候生产潜力变化的主要因素。在现有温度的条件下,降水的增加有利于降低该区域内降水贡献率。空间上,河南省降水贡献率总体上呈由西北向东南递减的趋势,其中新乡降水贡献率最大,为95.1%。(4)1961—2020年河南省年平均气温、年降水量和气候生产力的Hurst指数分别为1.00、0.43和0.58,未来气候可能趋于暖湿,气候生产潜力未来可能继续呈上升趋势。

**关键词:**气候生产潜力;气温;降水量;时空变化;贡献率;河南省

**中图分类号:** S162.3

**文献标识码:** A

IPCC第六次评估报告指出,21世纪前20 a(2001—2020年)的全球表面温度比1850—1900年高 $0.99\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。2011—2020年的全球表面温度比1850—1900年高 $1.09\text{ }^{\circ}\text{C}$ <sup>[1]</sup>。在中国,近百年来陆地区域平均增温 $0.9\sim 1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ <sup>[2]</sup>。气候变化改变了农业生产过程中的水热状况组合,从而直接影响农作物的气候生产潜力<sup>[3]</sup>。目前,有关气候生产力的时空变化及其影响的研究,已有不少成果出现。有学者利用气象数据,研究了中国区域植物生产潜力变化特征、时空变化、突变及周期特征<sup>[4-6]</sup>。区域尺度上,陕西省气候生产潜力均呈现微弱下降的趋势<sup>[7]</sup>;而黑龙江省和上海市等地区气

候生产潜力却呈现升高的趋势<sup>[8-9]</sup>。有学者研究了气候变化对气候生产力的影响,结果显示降水量是影响西北和东北地区气候生产力的主导因素<sup>[7-11]</sup>,气温是三江源地区、长江中下游地区及福州地区气候生产潜力变化的主要限制因素<sup>[12-15]</sup>。还有学者分析了未来气候变化对气候生产力的影响,结果显示:未来的“暖湿型”气候有利于气候生产潜力升高,“冷干型”气候不利于气候生产潜力升高<sup>[16-17]</sup>。前人已对气候生产力的时空变化特征及其影响因素进行了大量的研究,这些研究大多定性评估了气候变化对气候生产力的影响。因此,本文利用1961—2020年河南省逐月平均气温与

**收稿日期:** 2021-08-24

**作者简介:** 计舒怀(1980—),男,汉族,河南泌阳人,学士,工程师,主要从事专业气象服务。

**基金项目:** 中国气象局农业气象保障与应用技术重点开放实验室开放研究基金(AMF202002)

降水量资料,分析近 60 a 来河南省气候生产力的时空变化,并定量评估气候变化对气候生产力的影响及其区域差异,以期为河南省合理开发和充分利用气候资源,挖掘作物生产潜力等提供科学依据。

## 1 资料和方法

### 1.1 资料来源

所用资料为河南省分布相对均匀的 15 个站点 1961—2020 年逐月平均气温和降水量数据。该资料来源于中国气象数据网中国地面气候资料月值数据集 (<http://data.cma.cn/>)。经检查后发现河南省 15 个站点的气象数据不存在缺失,连续性和整体性较好。

### 1.2 方法

1.2.1 气候生产力模型 气候生产力是指在最适宜的环境下,单位面积、单位时间由气候因素所决定的植物上限产量。考虑到资料易得和计算简便,采用 Thornthwaite Memorial 模型来估算该地气候生产力<sup>[18]</sup>。计算方法如下:

$$P_v = 3\ 000[1 - e^{-0.000\ 960\ 5(v-20)}], \quad (1)$$

$$v = 1.05R/[1 + (1.05R/L)^2]^{1/2}, \quad (2)$$

$$L = 300 + 25T + 0.05T^2. \quad (3)$$

其中, $P_v$  为植物的气候生产潜力 ( $\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ), $T$  为年平均气温 ( $^{\circ}\text{C}$ ), $L$  为年平均蒸发量 ( $\text{mm}$ ), $v$  为年平均蒸散量 ( $\text{mm}$ ), $R$  为年平均降雨量 ( $\text{mm}$ )。

1.2.2 气温和降水贡献率计算 通过多元线性回归模型估算气温和降水对气候生产力变化的相对贡献率,具体做法是:首先对原始数据进行标准化处理;其次以气温和降水为自变量,气候生产力为因变量,对标准化后的序列进行回归分析,并计算回归系数;最后按照公式(4)~(6)计算气温、降水变化对气候生产力变化的贡献率<sup>[19]</sup>。

$$Y_s = aX_{1s} + bX_{2s} + c, \quad (4)$$

$$\eta_1 = |a| / (|a| + |b|), \quad (5)$$

$$\eta_2 = |b| / (|a| + |b|). \quad (6)$$

式中, $X_{1s}$ 、 $X_{2s}$  分别为气温和降水标准化序列, $Y_s$  为气候生产力标准化值, $a$ 、 $b$  分别为气温和降水回归系数, $\eta_1$  和  $\eta_2$  分别为气温和降水变化对气候生产力变化的相对贡献率, $c$  为常数。

1.2.3 R/S 分析法 利用 R/S 分析法对河南省气温、降水及气候生产力变化进行预测。基本方法是,设置时间序列  $\{x(t)\}$ ,  $t=1,2,\dots$ , 对于任意正整数  $\tau \geq 1$ ,

$$\langle \xi \rangle_{\tau} = \frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} \xi(t) \quad (\tau=1,2,\dots), \quad (7)$$

$$X(t, \tau) = \sum_{\mu=1}^{\tau} (\xi(\mu) - \langle \xi \rangle_{\tau}) \quad 1 \leq t \leq \tau, \quad (8)$$

$$R(\tau) = \max_{1 \leq t \leq \tau} (t, \tau) - \min_{1 \leq t \leq \tau} (t, \tau), \quad (9)$$

$$S(\tau) = \sqrt{\frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} [x(t) - x_{\tau}]^2}. \quad (10)$$

如果计算得出的比值  $R(\tau)/S(\tau) \propto \tau^H$ , 则说明时间序列  $\{x(t)\}$ ,  $t=1,2,\dots$ , 存在着 Hurst 现象,其中  $H$  称为 Hurst 指数,可以根据  $H$  来判断气温、降水和气候生产力变化趋势的持续性与反持续性。若  $0 < H < 0.5$ , 表明该时间序列的变化前后负相关,变化趋势是反持续性,过去的一个增量(减量)意味着未来的一个减量(增量);若  $0.5 < H < 1$ , 表明该序列的变化前后正相关,变化趋势为持续性,过去的一个增量(减量)意味着未来的一个增量(减量);若  $H = 0.5$ , 则表明该序列前后变化无相关性<sup>[20-21]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 气候变化特征

1961—2020 年河南省多年平均气温为  $14.8^{\circ}\text{C}$ , 最高值出现在 2019 年,为  $15.9^{\circ}\text{C}$ , 最低值出现在 1984 年,为  $13.6^{\circ}\text{C}$ 。空间上,河南省多年平均气温呈北低南高的特征。气温高值区出现在河南东南部地区,其中固始地区最高,为  $15.6^{\circ}\text{C}$ ;河南中部地区次之,气温多在  $14.5 \sim 15.0^{\circ}\text{C}$  之间;北部地区气温相对较低,其中安阳多年平均气温最低,为  $14.1^{\circ}\text{C}$ 。

从图 1 可知,1961—2020 年河南省年平均气温在波动中呈明显上升趋势,气候倾向率为  $0.23^{\circ}\text{C}/10 \text{ a}$  (95% 的置信水平,下同),回归方程通过 0.05 的显著性水平检验。空间上,河南省 15 个站年平均温均呈上升趋势,其中 93.3% 的站点气候倾向率通过 0.05 显著性水平检验。由图 2 可看出,北部地区增温较明显,气候倾向率一般在  $0.3^{\circ}\text{C}/10 \text{ a}$  以上,其中郑州最大为  $0.39^{\circ}\text{C}/10 \text{ a}$ ,

通过了 0.05 的显著性水平检验;其次为西南部和东南部地区;中部较小,多在 0.19 °C/10 a 以下,气候倾向率最小的站为许昌(0.04 °C/10 a,未通过 0.05 显著性水平检验)。

最小值差值高达 644.5 mm,降水的年际振荡剧烈。空间上,河南省年降水量大体上由东南向西北逐渐递减。东南部年降水量较多,其中信阳年降水量值最多,为 1 095.0 mm;其次为河南中部地区,降水多在 700~800 mm;河南西部、北部地区年降水量相对较少,其中三门峡地区最少,为 553.8 mm。

近 60 a 河南省降水量在强烈波动中呈现出微弱下降的趋势,气候倾向率为 -2.98 mm/10 a,未通过 0.05 的显著性水平检验。如图 2 所示,空间上,河南省年降水量变化呈显著的区域差异。86.7% 站点的降水量呈减少趋势,多分布在西部和南部地区。其中西峡变化最大,气候倾向率为 -17.31 mm/10 a;其次是信阳,气候倾向率为 -16.37 mm/10 a;三门峡变化最小,气候倾向率为 -0.81 mm/10 a。均未通过 0.05 的显著性水平检验。13.3% 的站点呈增多趋势,多分布在河南东部地区,如西华和商丘,其中商丘的上升幅度最大,气候倾向率为 15.27 mm/10 a,未通过 0.05 的显著水平检验。

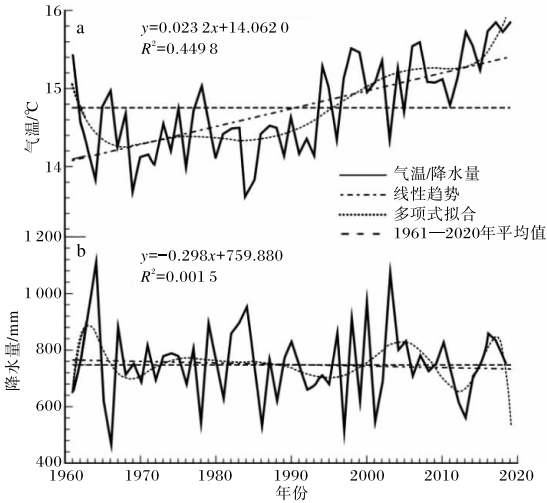


图 1 1961—2020 年河南省气温(a)和降水(b)变化趋势  
1961—2020 年河南省年降水量平均值为 750.8 mm,最大值出现在 1964 年,为 1 111.2 mm;最小值出现在 1966 年,仅为 466.7 mm。最大值

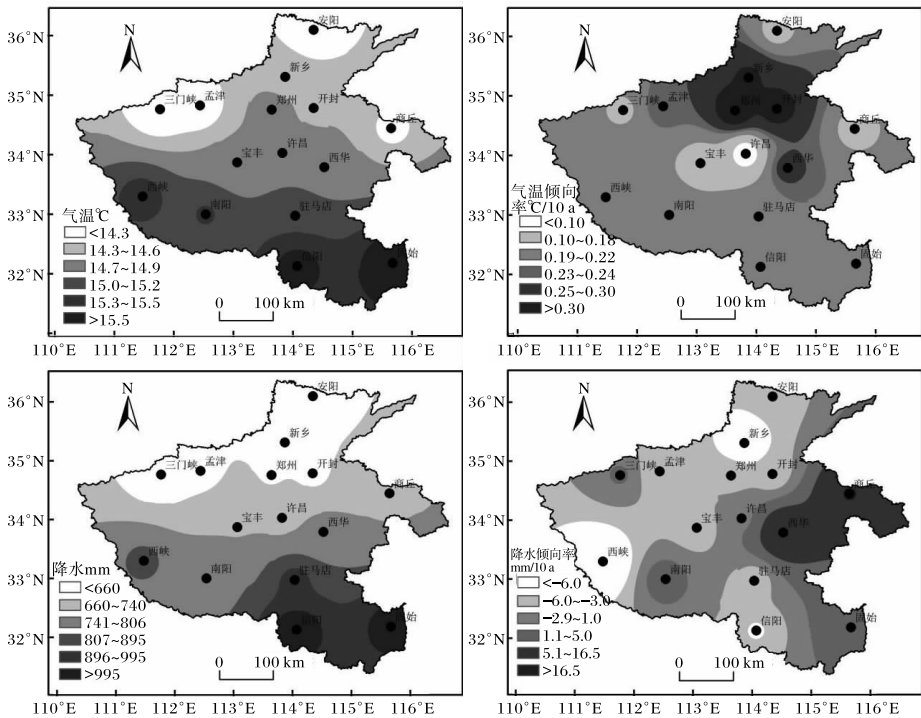


图 2 1961—2020 年河南省气候(气温、降水)及气候倾向率空间分布

(审图号为 GS(2021)5448 号)

由图3可知,河南省气候生产力变化呈显著的区域差异。80%的站点的气候生产力呈上升趋势,多分布在河南省东部和南部。其中河南省气候生产力气候倾向率最大为 $209.73 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \times 10 \text{ a})$ ,出现在商丘地区,通过了0.05的显著性水平检验;其次在西华地区,气候倾向率是 $158.57 \text{ kg}/$

$(\text{hm}^2 \times 10 \text{ a})$ ,通过了0.05的显著性水平检验;许昌的气候生产力气候倾向最小,为 $2.35 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \times 10 \text{ a})$ ,未通过0.05的显著性水平检验。20%的站点呈微弱下降趋势,多分布在西北地区,其中下降趋势变化最大的的站点是孟津,气候倾向率为 $-87.41 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \times 10 \text{ a})$ 。

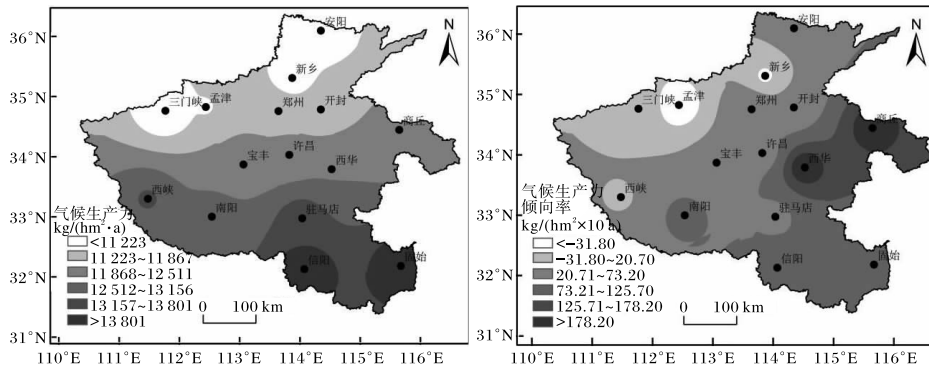


图3 1961—2020年河南省气候生产力及其气候倾向率空间分布

(审图号为GS(2021)5448号)

由图4可知,河南省气候生产力在1961—2020年之间呈现微弱上升的趋势,气候倾向率为 $72.8 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \times 10 \text{ a})$ ,未通过0.05的显著性水平检验。与前人研究结果相比,总体趋势基本一致,但变化速率较前人研究偏高<sup>[22]</sup>,研究时段不一致可能是气候生产力变化速率不同的原因。

基本一致。由图5可以看出,河南省降水对气候生产力的贡献率存在区域差异,降水贡献率总体上呈由西北向东南递减的趋势。降水贡献率较大的地区为北部和西北部,大致在 $89\% \sim 95\%$ 之间,其中降水贡献率最大值出现在新乡,达 $95.1\%$ ,其次是安阳和三门峡,降水贡献率均为 $91.4\%$ ;中部地区降水贡献率大多在 $86\% \sim 89\%$ 之间;降水贡献率较小的地区为东南部,大多在 $84\%$ 以下,其中信阳降水贡献率最小,仅为 $82\%$ 。由于东南部处于暖温带,降水充足,年降水量多在

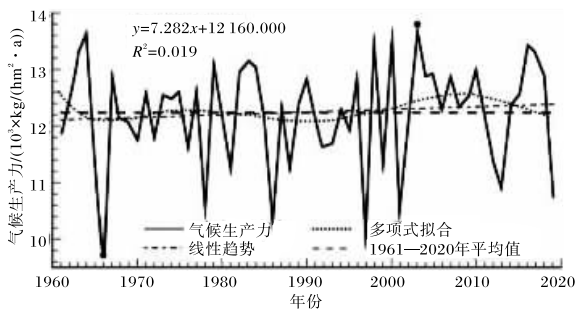


图4 河南省1961—2019年气候生产力年际变化趋势

## 2.2 气候变化对气候生产力的影响

气候生产力变化主要受气温和降水的双重影响,降水对气候生产力的贡献率达到 $78.6\%$ ,气温为 $21.4\%$ ,降水贡献率远高于气温贡献率。前人研究指出,河南省气候生产力的空间分布与降水量的空间分布特征基本一致<sup>[23]</sup>,降水量是影响气候生产力变化的主要因子<sup>[22-23]</sup>,与本文的结论

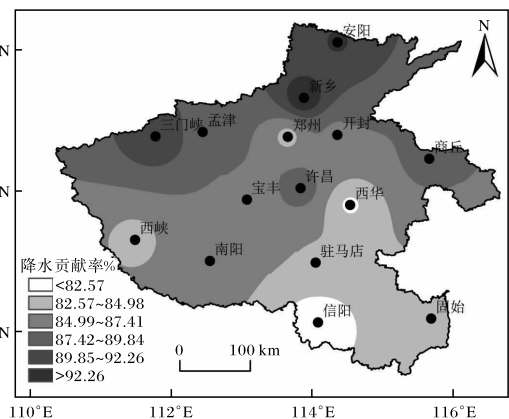


图5 1961—2020年河南省降水贡献率的空间分布

(审图号为GS(2021)5448号)

900 mm 以上,因而降水并没有成为农业气候生产力的限制性因素,此时河南东南地区气温相对较高,气温贡献率较大,降水贡献率相对较小。

为进一步定量分析河南省气候变化对气候生产力的影响,以河南省 15 个站点 1961—2020 年的年平均气温(降水量)为自变量,以气温(降水)贡献率为因变量,采用一元线性回归法分析气温(降水)变化对气温(降水)贡献率的影响,结果见图 6 和图 7。由图可见:在降水量不变的前提下,气温每升高 1 °C,气温贡献率就增加 0.52%,通过 0.05 的显著性水平检验;在气温不变的前提下,降水每增加 100 mm,降水贡献率就减少 1.52%,回归方程通过 0.05 的显著性水平检验。上述分析表明,在河南现有情况下,越是年平均气温高的地方,气温对气候生产力的贡献率越大;越是年降水量大的地方,降水对气候生产力的贡献率越小。

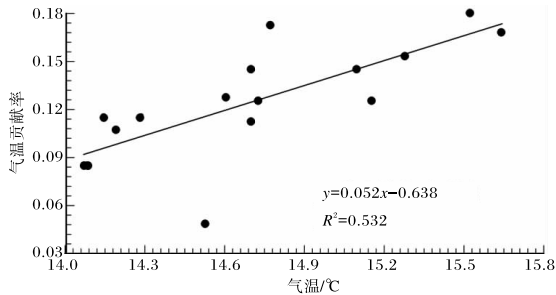


图 6 1961—2020 年河南省气温变化对气温贡献率变化散点图(直线为拟合线,下同)

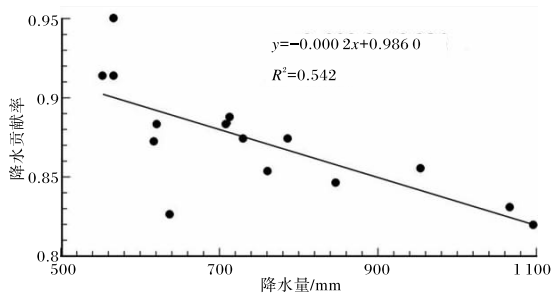


图 7 1961—2020 年河南省降水变化对降水贡献率变化散点图

### 2.3 未来气候变化对气候生产力的影响

为了更直观地了解未来气候变化对河南省气候生产力的影响,利用 R/S 分析法对河南省气候和气候生产力变化进行预测。R/S 分析结果表

明:1961—2020 年河南省年平均气温的 Hurst 指数为 1.00,表明年平均气温变化具有很强的持续性,未来变化趋势可能会持续上升;年降水量的 Hurst 指数为 0.43,接近 0.5,不确定性大,表明了该地区近 60 a 来年降水量具有较弱的反持续性,未来变化趋势可能为增多趋势;气候生产力的 Hurst 指数为 0.58,表明了未来气候可能趋于暖湿,气候生产力未来可能继续呈上升趋势。1971—2020 年,河南省年平均气温和气候生产力的 Hurst 指数为 1.00 和 0.59,与 1961—2020 年河南省 Hurst 指数基本一致,说明了未来河南省年平均气温和气候生产力的持续性不变。1991—2020 年河南省年平均气温和气候生产力的 Hurst 指数为 0.74 和 0.57,年降水量的 Hurst 指数则为 0.49,说明从 30 年尺度看,未来河南省年平均气温的持续性减弱,降水量的不确定性增大。由上述分析可知河南省年平均气温和气候生产力的 Hurst 指数在不同时间尺度内均呈上升趋势,其中年平均气温的变化具有很强的持续性,而年降水量和气候生产力的变化不确定性较大。河南省未来可能会向“暖湿型”气候演变,气候生产力也可能会提高。

### 3 结论与讨论

分析了过去 60 a 河南省年平均气温、年降水量和气候生产力的时空变化特征,并定量评估了气候变化对气候生产力的影响。并利用了 R/S 分析法预测河南省未来气候和气候生产力的变化。主要得出以下结论。

(1)近 60 a 河南省气候呈“暖干”趋势,年平均气温呈显著上升趋势,气候倾向率为 0.23 °C/10 a,东北地区增温明显;降水量在剧烈波动中呈微弱减少趋势,气候倾向率为 -2.98 mm/10 a,东部地区降水变动较大。

(2)1961—2020 年河南省的气候生产力的气候倾向率为 72.8 kg/(hm<sup>2</sup> × 10 a),上升趋势微弱。河南省 80% 地区的气候生产力呈增加趋势,其中上升较快的地区主要分布在东部。

(3)河南省气候生产力变化主要受气温和降水的影响,降水贡献率远大于气温贡献率,是影响河南省气候生产力变化的主导因素。空间上,河

南省东南部降水充足,气温相对较高导致该区域内降水贡献率较小。

(4)在现有降水的条件下,气温升高对气温贡献率的影响起到正效应;在现有温度的条件下,降水增加会导致该区域内降水贡献率减弱。在水分适宜的情形下,气温的升高有利于农业生产,也将会提升区域农业气候生产力。

(5)1961—2020年河南省年平均气温、年降水量和气候生产力的 Hurst 指数分别为 1.00、0.43 和 0.58。在过去的 60 a 中,河南省年平均气温和气候生产力呈现出上升趋势,年降水量则呈现出显著减少趋势,未来气候可能趋于暖湿,气候生产力可能继续呈上升趋势,年降水量和气候生产力不确定性较大。

#### 参考文献:

- [1] IPCC. Climate change 2021: the physical science basis, contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.
- [2] 《第三次气候变化国家评估报告》编写委员会. 第三次气候变化国家评估报告[M]. 北京: 科学出版社, 2017.
- [3] 吴绍洪, 黄季焜, 刘燕华, 等. 气候变化对中国的影响利弊[J]. 中国人口·资源与环境, 2014, 24(1): 7-13.
- [4] 高素华, 潘亚茹, 郭建平. 气候变化对植物气候生产力的影响[J]. 气象, 1994, 20(1): 30-33.
- [5] 侯西勇. 1951—2000年中国气候生产潜力时空动态特征[J]. 干旱区地理, 2008, 31(5): 723-729.
- [6] 徐雨晴, 周波涛, 於琰, 等. 1961—2010年中国气候生产潜力时空格局变化及其潜在可承载人口分析[J]. 气象与环境学报, 2019, 35(2): 84-91.
- [7] 冯瑞. 1958—2013年陕西省气候生产潜力的时空变化[J]. 河南科技, 2021(24): 116-118.
- [8] 闫军辉, 刘金科, 王娟, 等. 上海市近 145 年气候变化对气候生产力的影响[J]. 信阳师范学院学报(自然科学版), 2020, 33(3): 392-397.
- [9] 魏子力. 黑龙江省气候生产力时空分布及粮食产量预测[J]. 陕西气象, 2021(2): 49-55.
- [10] 何可杰, 李恩莉. 气候变化对宝鸡市作物气候生产力的影响[J]. 陕西气象, 2011(5): 11-14.
- [11] 闫军辉, 延军平. 全球气候变化下秦岭南北气候生产力时空对比研究[J]. 农业现代化研究, 2009, 30(5): 587-590.
- [12] 郭佩佩, 杨东, 王慧, 等. 1960—2011年三江源地区气候变化及其对气候生产力的影响[J]. 生态学杂志, 2013, 32(10): 2806-2814.
- [13] 吴梦初, 延军平, 李敏敏. 长江冲积平原县域气候与气候生产力变化分析: 以湖北嘉鱼县为例[J]. 农业现代化研究, 2014, 35(2): 209-213.
- [14] 邢兰芹, 姚众众. 江苏省 1971—2010 年气候生产潜力变化特征[J]. 水土保持通报, 2018, 38(1): 252-255.
- [15] 马治国, 陈惠, 陈家金. 气候变化对福州植物气候生产力的影响分析[J]. 中国农学通报, 2009, 25(22): 320-323.
- [16] 樊纲惟, 董立凡, 樊洁馨, 等. 汉中盆地水稻气候生产潜力分析与评价[J]. 陕西气象, 2017(3): 35-38.
- [17] 李振杰, 段长春, 金莉莉, 等. 云南省气候生产潜力的时空变化[J]. 应用生态学报, 2019, 37(7): 2181-2190.
- [18] LIETH H, BOX E. Evapotranspiration and primary productivity: C W Thornthwaite Memorial model [J]. Publications in climatology, 1972, 25(2): 37-46.
- [19] 唐小萍, 闫小利, 尼玛吉, 等. 青藏高原近 40 年积雪日数变化特征分析[J]. 地理学报, 2012, 67(7): 951-959.
- [20] MANDELBROT B B, WALLIS J R. Robustness of the rescaled ranged R/S in the measurement of monocylic long-run statistical dependence [J]. Water Resource Research, 1965, 5(5): 967-988.
- [21] 周寅康, 张捷, 王腊春, 等. 长江下游地区近五百年洪涝序列的 R/S 分析[J]. 自然灾害学报, 1997, 6(2): 78-84.
- [22] 李颜颜, 康国华, 张鹏岩, 等. 基于 Thornthwaite Memorial 模型的近 54 年河南省农业气候生产力时空变化特征分析[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(7): 287-293.
- [23] 王晓喆, 延军平, 张立伟. 河南省气候生产力时空分布及粮食产量预测[J]. 农业现代化研究, 2011, 32(2): 213-216.