

1978—2017 年河南省气候生产潜力时空演变及趋势分析

张志高¹, 耿益新¹, 蔡茂堂², 张秀丽¹, 孙梓欣¹, 尹纪媛¹

(1. 安阳师范学院 资源环境与旅游学院, 河南 安阳 455000; 2. 中国地质科学院 地质力学研究所, 北京 100081)

摘 要:为研究近 40 年来河南省气候生产潜力变化特征及未来趋势, 基于 1978—2017 年河南省 17 个气象站点的逐日降水和气温等气象资料, 运用 Miami 模型和 Thornthwaite Memorial 模型对河南省温度、降水和气候生产潜力进行了测算, 运用一元线性回归、相关分析和 R/S 分析等方法对河南省气候生产潜力时空变化特征及未来趋势进行了分析与评估。结果表明: (1) 1978—2017 年河南省多年平均气温为 14.62℃, 并以 0.34℃/10 a 的倾向率呈增加趋势, 多年平均降水为 744.14 mm, 以 -2.51 mm/10 a 的速率减少; (2) 近 40 年来河南省温度和气候生产潜力均呈上升趋势, 增长速率分别为 28.78 kg/(hm² · 10 a) 和 10.80 kg/(hm² · 10 a), 降水生产潜力以 -2.29 kg/(hm² · 10 a) 的速率呈减小趋势; (3) 在空间分布上, 河南省温度生产潜力大体上呈南高北低、东高西低的分布特征, 降水和气候生产潜力均呈东南往西北方向递减的变化趋势; (4) 相关分析表明, 河南省气候生产潜力和降水相关系数达 0.956, 降水是气候生产潜力的主要限制因子; (5) R/S 分析表明, 河南省气候生产潜力的 Hurst 指数平均值为 0.59, 未来气候生产潜力可能继续保持增长趋势。河南省气候生产潜力受温度的影响较小, 受降水的影响相对更大。

关键词:气候生产潜力; Thornthwaite Memorial 模型; 时空演变; 河南省

中图分类号: S162.5

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2020)06-0247-07

Spatial-Temporal Evolution and Trend Analysis of Climatic Potential Productivity in Henan Province During 1978—2017

ZHANG Zhigao¹, GENG Yixin¹, CAI Maotang², ZHANG Xiuli¹, SUN Zixin¹, YIN Jiyuan¹

(1. School of Resource Environment and Tourism, Anyang Normal University, Anyang, Henan 455000, China; 2. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: In order to explore the characteristics and future trends of climatic potential productivity in Henan Province in recent 40 years, based on daily temperature and precipitation meteorological data of 17 meteorological stations in Henan Province from 1978 to 2017, we calculated the temperature, precipitation and climatic potential productivity of Henan by using the Miami model and Thornthwaite Memorial model, analyzed and estimated the temporal and spatial variation characteristics and future trends of climatic potential productivity of Henan by using the methods of univariate linear regression, correlation analysis and R/S analysis. The results showed that: (1) during 1978—2017, the annual average temperature of Henan was 14.62℃, and the temperature showed the increasing trend with a rate of 0.34℃/decade; the annual average precipitation was 744.14 mm, and decreased at a rate of -2.51 mm/decade; (2) during the latest 40 years, the temperature and climatic potential productivity of Henan had kept increasing, with a tendency rates of 28.78 kg/(hm² · decade) and 10.80 kg/(hm² · decade), respectively; the precipitation potential productivity kept a downward trend at a rate of -2.29 kg/(hm² · decade); (3) from the perspective of spatial distribution, the temperature potential productivity slightly decreased from south to north, and from east to west; the precipitation and climatic potential productivity showed the decreasing trend from southeast to northwest; (4) the correlation analysis showed that the correlation coefficient of climatic potential productivity

收稿日期: 2019-12-29

修回日期: 2020-01-09

资助项目: 国家自然科学基金(41602366); 河南省教育厅人文社会科学研究项目(2021-ZDJH-016); 河南省高等学校重点科研项目(20A170001)

第一作者: 张志高(1986—), 男, 河南许昌人, 博士, 副教授, 主要从事气候变化研究。E-mail: Zhangzhg06@163.com

通信作者: 蔡茂堂(1981—), 男, 山东淄博人, 博士, 助理研究员, 主要从事气候变化研究。E-mail: Caimaotang@126.com

and precipitation in Henan was 0.956, and precipitation was the main limiting factor on climatic potential productivity; (5) R/S analysis showed that the average value of Hurst index of climatic potential productivity in Henan was 0.59, and the climatic potential productivity may continue to grow in the future. The climatic potential productivity of Henan was less affected by temperature and more affected by precipitation.

Keywords: climatic potential productivity; Thornthwaite Memorial model; spatial-temporal evolution; Henan Province

20 世纪以来,全球气候显著变暖,政府间气候变化专门委员会(IPCC)第 5 次全球气候变化评估报告(AR5)指出,1880—2012 年全球表面平均温度已升高 0.85℃^[1],当前仍处于百年来气温最高阶段^[2]。全球变暖将改变气温、辐射以及降水等要素的地理分布,进而改变农作物的生长条件,对农业生产和粮食安全影响深远^[3-4]。气候生产潜力是一种估算作物潜在产量的指标,对指导农业生产具有重大实际意义,在全球变暖背景下,国内外对气候生产潜力的研究取得了一系列成果。在模型方法方面,研究者分别采用 Thornthwaite Memorial 模型^[5]、Miami 模型^[6]、AEZ 模型^[7]、DSSAT 模型^[8]和 GAEZ 模型^[9]等不同模型和方法进行气候生产潜力的估算和分析;在空间尺度方面,赵俊芳等^[10]对全球主要农区气候生产潜力进行了定量评估,郭小芹等^[11]对河西走廊的气候生产潜力进行了估算,并运用 EOF 经验正交函数和敏感性分析等方法对其时空变化特征进行了分析,张波等^[12]估算并预测分析了贵州省的气候生产潜力;也有学者针对具体的农作物如玉米^[13]、小麦^[14-15]、水稻^[16-17]以及青稞^[18]等进行气候生产潜力的研究,来反映气候资源与作物之间的协调程度。

河南省作为农业大省和国家粮食生产核心区,被誉为“中原粮仓”,在我国农业生产中占有举足轻重的地位,2018 年,河南省粮食总产量达到 1 330 亿斤,为中国粮食供应和粮食安全做出了巨大贡献。然而由于河南省地处南北气候过渡带和山区到平原的过渡带,对气候变化的适应能力较弱,加之农业基础条件薄弱,受气候变化和气象灾害影响较为严重^[19-20]。因此,本文基于 1978—2017 年河南省气象资料,运用 Miami 模型、Thornthwaite Memorial 模型、Mann-Kendall 统计检验和 GIS 空间插值等方法对河南省气候生产潜力进行测算,并分析其时空演变特征,运用 R/S 分析法预测河南省气候生产潜力未来变化趋势,以期揭示河南省气候生产潜力与气温和降水资源的匹配程度,为河南省充分利用气候资源,提高粮食产量,应对全球变暖及农业可持续发展提供科学依据。

1 研究区概况与方法

1.1 研究区概况

河南省(31°23′—36°22′N,110°21′—116°39′E)位于中国中东部、黄河中下游地区,全省总面积 16.7 万 km²,全省南、西、北三面环山,东部为平原,平原约占全省总面积的 55.7%,西高东低的地势有利于携带湿润水汽的东南季风深入,带来丰沛降水。河南省气候自南向北由亚热带向暖温带气候逐渐过渡,气候温和,四季分明,全省年平均气温 13.26~15.69℃,年均降水 533.39~1 095.77 mm,无霜期为 190~230 d,日照时数 1 740~2 310 h。全省地跨海河、黄河、淮河和长江 4 大水系,大小河流 1 500 多条,水资源总量年均达 430 亿 m³。充足的光、热气候条件、丰富的水资源以及肥沃的土地,为河南省农业发展奠定了良好基础,农业用地占全省总面积的 74.25%,粮食、水果和蔬菜等产量位居全国前列,是麦、棉、油等农产品的重要优质生产基地。

1.2 数据来源

河南省 17 个气象站点 1978—2017 年逐日气温和降水量数据来源于中国气象科学数据共享服务网(<http://cdc.Cma.Gov.cn>),年平均气温为当年 12 个月气温的算术平均值。本文将 1978—2017 年的年平均气温平均值作为河南省多年平均气温值,将 1978—2017 年的年降水量平均值作为河南省多年平均降水量。研究区域及站点分布如图 1 所示。

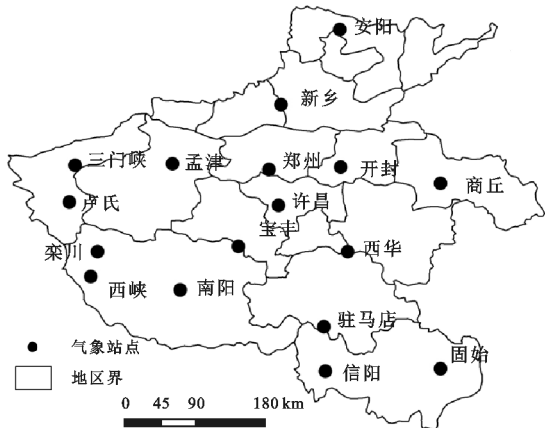


图 1 河南省气象站点分布

1.3 气候生产潜力模型

Miami 模型^[21]:

$$Y_t = \frac{3000}{1 + e^{1.315 - 0.119r}} \tag{1}$$
$$Y_r = 3000 \times (1 - e^{-0.000664r}) \tag{2}$$

式中: t 为年平均温度($^{\circ}\text{C}$); r 为年降水量(mm); $e = 2.718\ 3$; Y_t 为温度生产潜力(kg/hm^2); Y_r 为降水生产潜力(kg/hm^2)。

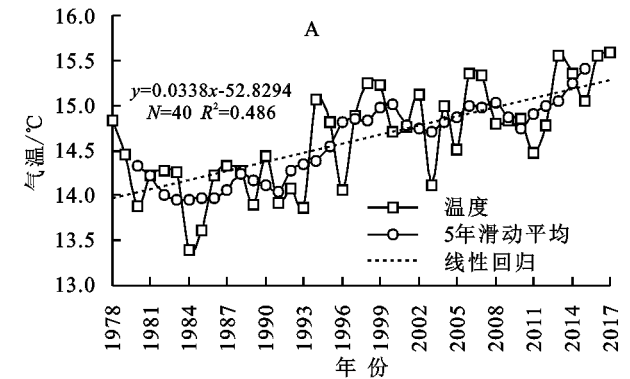
Thornthwaite Memorial 模型^[22]:

$$Y_e = 3000 \times [1 - e^{-0.0009695(V-20)}] \tag{3}$$
$$V = 1.05 \times \frac{R}{[1 + (1.05 \times \frac{R}{L})^2]^{\frac{1}{2}}} \tag{4}$$
$$L = 300 + 25T + 0.05T^3 \tag{5}$$

式中: Y_e 为气候生产潜力(kg/hm^2); V 为年平均蒸散量(mm); R 为年平均降水量(mm); L 为年平均最大蒸散量(mm); T 为年平均温度($^{\circ}\text{C}$)。

1.4 R/S 分析

R/S 分析法最初由英国科学家赫斯特提出用于分析尼罗河水库流量和储蓄能力^[23],之后逐步发展为研究时间序列的分形理论。R/S 分析法用气候要素时间序列计算出 Hurst 指数来揭示气候要素时间序列的趋势,如果 $0 < \text{Hurst} < 0.5$,表明未来时间序列与过去的变化趋势有着相反的关系,且 H 值越接近 0,相反关系就越强; $0.5 < \text{Hurst} < 1$,表明时间序列与过去的变化趋势存在正向相关, H 值越接近 1,正相关就越强;当 $\text{Hurst} = 0.5$,表明其未来变化趋势与过去没有关系,时间序列不存在趋势性。



此外,采用一元线性回归法分析气温、降水和气候生产潜力的变化趋势,运用 Mann-Kendall 检验法^[24]、信噪比检验法^[25]对河南省气候生产潜力进行突变性检验,使用 SPSS 软件进行相关关系分析。

2 结果与分析

2.1 河南省年平均气温和降水量变化特征

2.1.1 年平均气温和降水量时间变化特征 由河南省近 40 a 平均气温变化曲线(图 2A)可知,1978—2017 年,河南省多年平均气温为 14.62°C ,最低为 1984 年的 13.39°C ,最高为 2017 年的 15.59°C ,相差 2.2°C 。从变化趋势来看,近 40 a 来河南省年平均气温呈波动上升趋势,线性拟合表明其倾向率为 $0.34^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$,快于中国近 50 a 来平均增温速率^[26]。从年代际变化趋势来看,1981—1990 年、1991—2000 年、2001—2010 年以及 2011—2017 年河南省平均温度分别以 $0.2, 1.28, 0.25, 1.75^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 的速率递增。

由河南省近 40 a 降水量变化曲线(图 2B)可知,1978—2017 年,河南省多年平均降水量为 744.14 mm ,最小值为 1997 年的 510.76 mm ,最高值为 2003 年的 $1\ 063.05\text{ mm}$,二者相差为 552.29 mm 。从变化趋势来看,近 40 a 来河南省年降水量波动幅度较大,整体呈小幅下降趋势,线性拟合表明其倾向率为 $-2.51\text{ mm}/10\text{ a}$ 。从年代际变化趋势来看,1981—1990 年降水量以 $-63.93\text{ mm}/10\text{ a}$ 的速率递减,1991—2000 年、2001—2010 年以及 2011—2017 年河南省年降水量分别以 $151.96, 48.51, 315.09\text{ mm}/10\text{ a}$ 的速率递增。

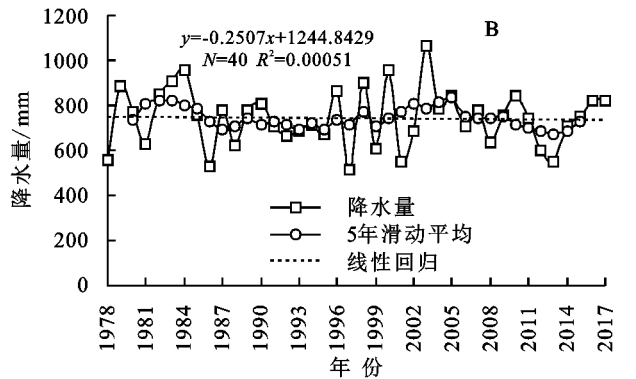


图 2 1978—2017 年河南省年平均温度和降水量变化

2.1.2 年平均气温和降水量空间变化特征 由图 3A 可知,河南省年均温为 $13.26 \sim 15.69^{\circ}\text{C}$,大体上呈南高北低,东高西低的分布特征,这表明河南省年均气温变化主要受纬度的影响。由图 3B 可知,河南省年平均降水量为 $533.39 \sim 1\ 095.77\text{ mm}$,南部信阳最高为 $1\ 090.00 \sim 1\ 095.77\text{ mm}$,北部新乡最少为 $533.39 \sim 544.00\text{ mm}$,呈由南向北递减趋势。

2.2 河南省气候生产潜力变化特征

2.2.1 气候生产潜力时间变化 基于 Miami 模型和 Memorial 模型分别计算河南省温度、降水和气候生产潜力,结果如图 4 所示。

由图 4A 可知,1978—2017 年河南省温度生产潜力为 $1\ 707.24 \sim 1\ 895.92\text{ kg}/\text{hm}^2$,平均值为 $1\ 813.94\text{ kg}/\text{hm}^2$,最大值出现在 2017 年,最小值出现在 1984

年,相差 188.68 kg/hm²,近 40 a 来温度生产潜力以 28.78 kg/(hm² · 10 a)的倾向率呈波动上升趋势,与温度表现出一致的变化规律。年际变化趋势表明,

1981—1990 年、1991—2000 年、2001—2010 年及 2011—2017 年河南省温度生产潜力分别以 15.28, 107.90, 21.26, 131.37 kg/(hm² · 10 a)的速率递增。

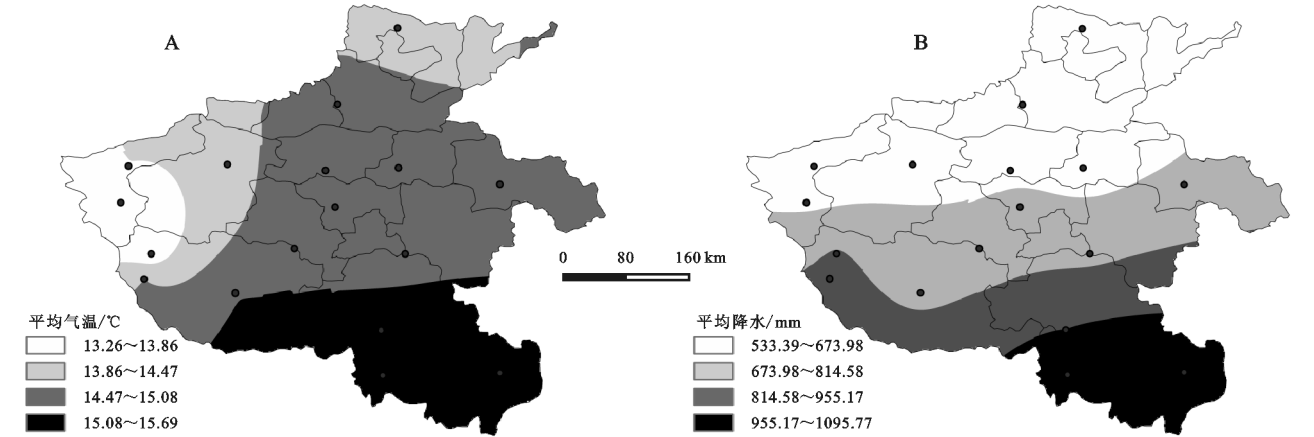


图 3 1978—2017 年河南省年均气温和降水时空变化

由图 4B 可知,1978—2017 年河南省降水生产潜力为 862.87~1 518.97 kg/hm²,平均值为 1 163.10 kg/hm²,最大值出现在 2003 年,最小值出现于 1997 年,二者相差 656.1 kg/hm²,近 40 a 来降水生产潜力以 -2.29 kg/(hm² · 10 a)的速率呈微弱波动下降趋势。年际变化趋势表明,1981—1990 年降水生产潜力以 -70.86 kg/(hm² · 10 a)的速率递减,1991—2000 年、2001—2010 年及 2011—2017 年降水生产潜力分别以 165.86, 76.70, 390.84 kg/(hm² · 10 a)的速率递增。

各个站点均呈现出增加趋势,其中郑州气温生产潜力增幅最大,北部安阳气温生产潜力增幅最小。

由河南省气候生产潜力变化曲线可知(图 4C), 1978—2017 年河南省气候生产潜力为 1 025.78 ~ 1 365.85 kg/hm²,平均值为 1 219.62 kg/hm²,最大值出现在 2003 年,最小值出现在 1997 年,相差 340.07 kg/hm²,从变化趋势来看,近 40 a 来河南省气候生产潜力波动幅度较大,上升趋势不明显,倾向率为 10.80 kg/(hm² · 10 a)。年际变化趋势表明,1981—1990 年气候生产潜力以 -23.67 kg/(hm² · 10 a)的速率递减,1991—2000 年、2001—2010 年和 2011—2017 年气候生产潜力均呈递增趋势,倾向率分别为 105.57, 78.52, 294.90 kg/(hm² · 10 a)。

2.2.2 气候生产潜力空间变化特征 基于 ArcGIS 空间插值方法,河南省温度、降水和气候生产潜力及倾向率的空间分布特征如图 5 所示。

由图 5A 可知,河南省温度生产潜力在空间分布上与前述温度空间分布特征一致,温度较高的豫东南地区温度生产潜力较高,其中南部信阳和固始温度生产潜力可达 1 903.14 kg/hm²,气温较低的豫西地区温度生产潜力较低,其中卢氏和三门峡温度生产潜力仅有 1 696.23 kg/hm²。河南省生产潜力整体呈现出南高北低、东高西低,由东南往西北递减的分布趋势。从温度生产潜力的倾向率分布来看(图 5B),河南省

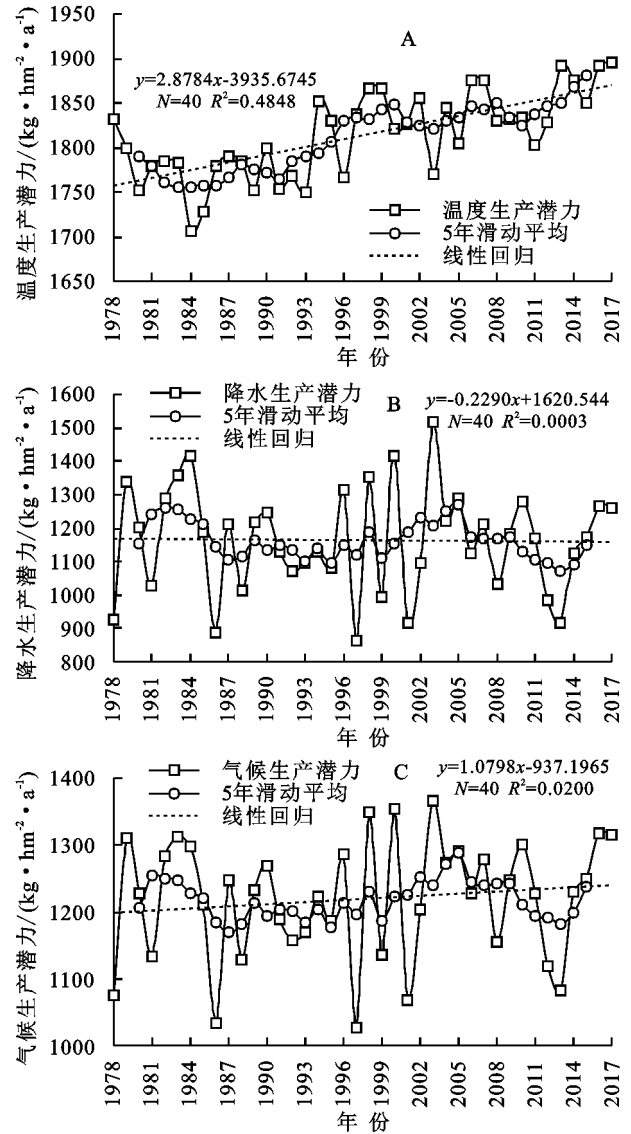


图 4 1978—2017 年河南省温度、降水和气候生产潜力变化

降水生产潜力(图 5C)空间分布表明,河南省降水生产潜力为 885.64~1 530.69 kg/hm²,降水较多的豫东南地区其降水生产潜力较高,而降水较少的豫北地区,降水生产潜力较低。降水生产潜力整体呈现出由东南往西北方向递减的变化趋势。从降水生产潜力倾向率空间分布来看(图 5D),全省 10 个站点降水生产潜力呈增加趋势,7 个站点降水生产潜力呈减小趋势,其中豫东和豫北地区增幅最大。

河南省气候生产潜力为 1 018.87~1 430.14 kg/hm²(图 5E),在空间上分布上呈现出由东南向西北递减变化趋势,南部信阳、固始气候生产潜力最高,西北安阳、新乡和三门峡最低。从气候生产潜力倾向率的空间分布来看(图 5F),河南省绝大部分地区气候生产潜力呈增加趋势,其中豫东和豫北地区增幅最大,豫西三门峡、卢氏和孟津 3 站气候生产潜力呈减小趋势。

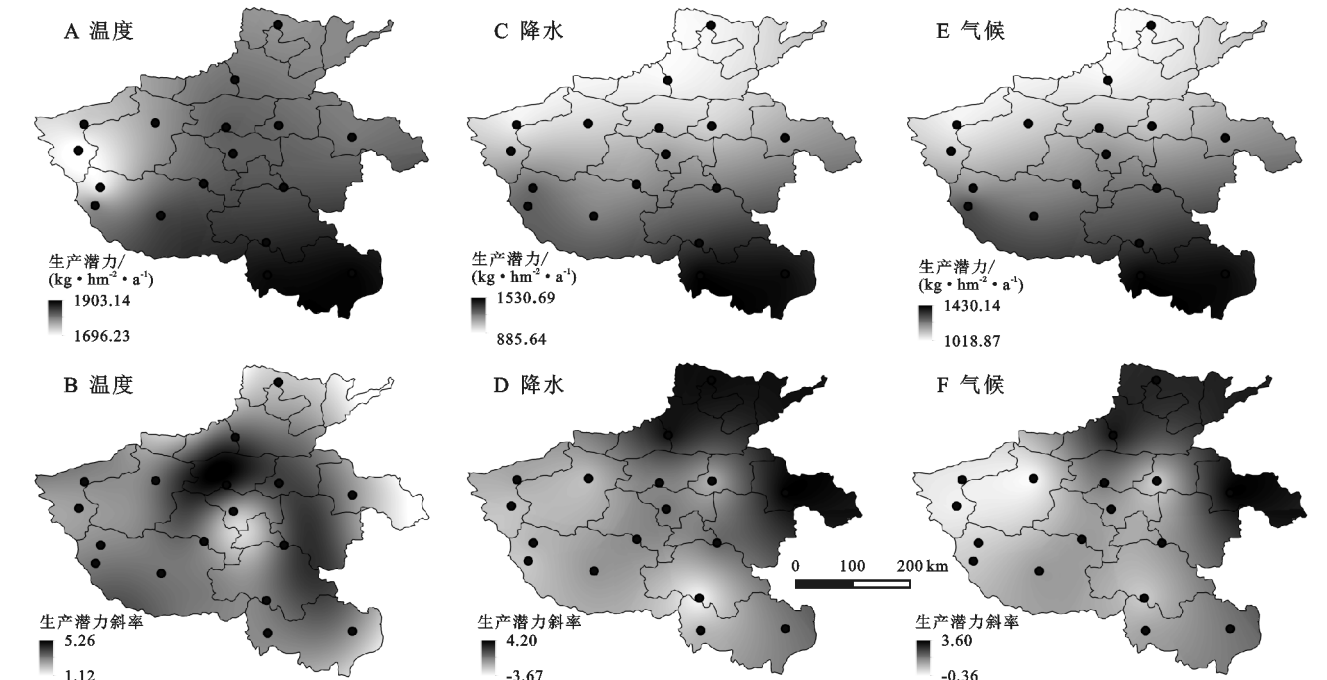


图 5 河南省生产潜力空间分布特征

2.3 河南省气候生产潜力突变检验

利用 Mann-Kendall 检验法对河南省温度、降水和气候生产潜力进行突变检验,结果如图 6 所示。由图 6A 可知,1978—2017 年河南省气温生产潜力正序列 UF 曲线整体呈上升趋势,与反序列 UB 曲线相交于 1996 年,表明 1996 年河南省气温生产潜力发生突变,突变后 1997—2017 年气温生产潜力较突变前增加 68.28 kg/hm²。

由图 6B 可知,1978—2017 年河南省降水生产潜力正序列 UF 曲线和反序列 UB 曲线变量存在多个交点,但交点 S/N<1,未通过信噪比检验,表明降水生产潜力不存在明显突变。

气候生产潜力突变检验(图 6C)表明,1978—2017 年气候生产潜力正序列 UF 曲线与反序列 UB 曲线多次相交,但仅有 2015 年的突变点通过了信噪比检验,表明河南省气候生产潜力于 2015 年发生突变,突变后气候生产潜力较突变前上升了 101.46 kg/hm²。

2.4 气候生产潜力的限制因素分析

利用 SPSS 软件对河南省气候生产潜力和气温与降水要素进行相关分析,结果表明近 40 a 来河南

省气候生产潜力与年平均温度的相关系数为 -0.005 (未通过 0.05 置信度水平检验),与年降水量的相关系数为 0.956($\alpha=0.01$)(图 7),表明降水量是河南省气候生产潜力的主要限制因子,河南省气候生产潜力主要与降水量有关。

为进一步说明河南省气候生产潜力与年平均温度和年降水量之间的关系,利用 SPSS 软件建立三者之间的线性回归模型如下:

$$Y_e = 35.179T + 0.695P + 187.919 \quad (R^2 = 0.961) \quad (6)$$

式中: Y_e 为气候生产潜力(kg/hm²); T 为年平均温度(℃); P 为年降水量(mm)。回归模型表明,河南省气候生产潜力和温度、降水均呈正向关系,温度每上升(下降)1℃,降水每递增(递减)1 mm,气候生产潜力分别提高(减少)35.179,0.695 kg/hm²。

2.5 气候生产潜力的未来趋势变化

河南省气候生产潜力未来变化特征如图 8 所示。根据 R/S 分析,河南省气候生产潜力的 Hurst 指数平均值为 0.59,82.4%的区域 Hurst 指数大于 0.5, Hurst 指数 0.58~0.74 的区域最大,占比为 64.7%,

因此,河南省未来气候生产潜力与过去 40 a 来的变化趋势保持一致,可能仍处于增长趋势,但趋势不是十分显著。

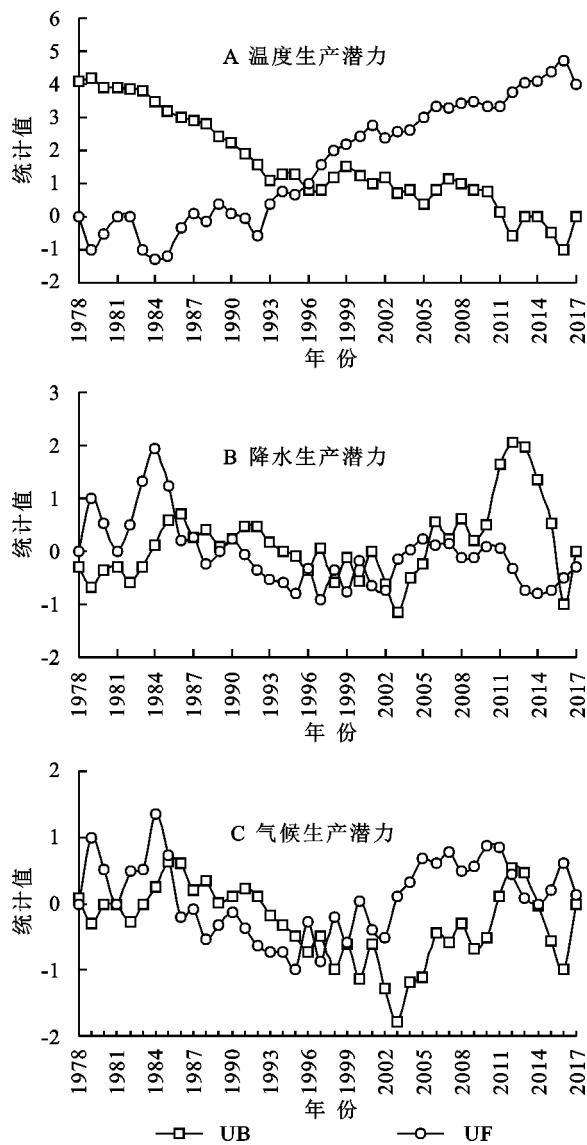


图 6 温度、降水和气候生产潜力 Mann-Kendall 检验曲线

3 结论

(1) 1978—2017 年,河南省多年平均气温为 14.62℃,以 0.34℃/10 a 的速率呈上升趋势,多年平均降水量为 744.14 mm,以 -2.51 mm/10 a 的速率呈下降趋势,空间分布上年平均气温和降水大致呈由南到北递减趋势。

(2) 1978—2017 年,河南省温度、气温和气候生产潜力均值分别为 1 813.94,1 163.10,1 219.62 kg/hm²,40 a 来河南省温度和气候生产潜力均呈上升趋势,倾向率分别为 28.78,10.80 kg/(hm² · 10 a),降水生产潜力以 -2.29 kg/(hm² · 10 a)的速率呈减小趋势。

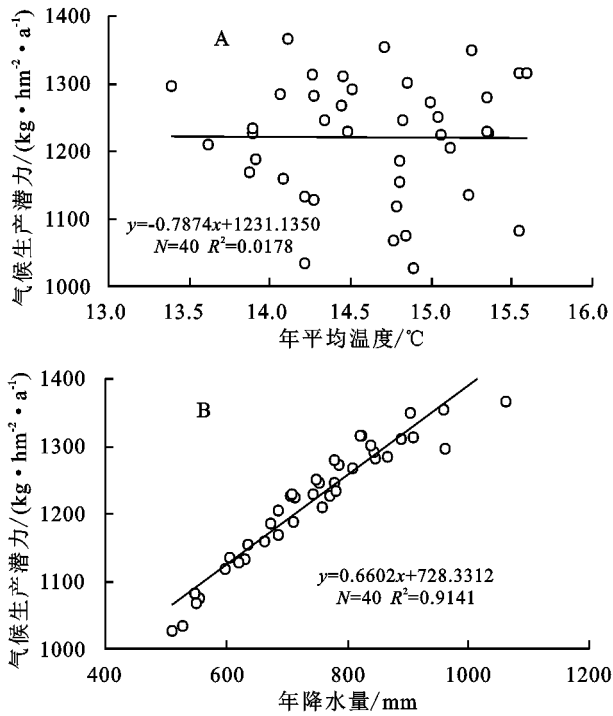


图 7 气候生产潜力与年平均温度和年降水量的相关性

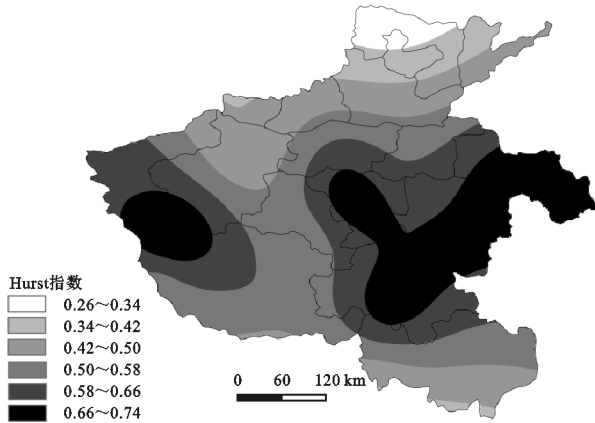


图 8 河南省气候生产潜力 Hurst 指数空间分布

(3) 在空间分布上,河南省温度生产潜力大体上呈南高北低、东高西低的分布特征,全省各站点均呈现增加趋势;降水生产潜力呈现出东南往西北方向递减的变化趋势,全省大部分地区降水生产潜力呈下降趋势;气候生产潜力总体呈现东南高西北低的分布特征,全省大部分地区气候生产潜力呈增加趋势,豫西三门峡、卢氏和孟津 3 站呈减小趋势。

(4) 相关性分析表明,降水量是河南省气候生产潜力的主要限制因子,降水量不变或增加有利于气候生产潜力的增加,而降水量减少则不利于气候生产潜力的提高。

(5) Mann-Kendall 检验表明,40 a 来河南省温度生产潜力在 1996 年发生突变,较突变前增加 68.28 kg/hm²,降水生产潜力没有明显突变,气候生产潜力在 2015 年发生突变,较突变前上升了 101.46 kg/hm²。

(6) R/S 分析表明,河南省气候生产潜力的 Hurst 指数平均值为 0.59,未来气候生产潜力与过去 40 a 来的变化趋势保持一致,可能仍保持增长趋势。

参考文献:

- [1] IPCC. Climate change 2013: The physical science basis[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2013.
- [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[R].北京:科学出版社,2015.
- [3] 郭建平.气候变化对中国农业生产的影响研究进展[J].应用气象学报,2015,26(1):1-11.
- [4] 覃志豪,唐华俊,李文娟,等.气候变化对农业和粮食生产影响的研究进展与发展方向[J].中国农业资源与区划,2013,34(5):1-7.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 王田.基于 AEZ 模型的河南省冬小麦产量差时空特征分析[J].中国生态农业学报,2018,26(4):547-558.
- [8] 李国强,陈丹丹,张建涛,等.基于 DSSAT 模型的河南省小麦生产潜力定量模拟与分析[J].麦类作物学报,2016,36(4):507-515.
- [9] 杜国明,马敬盼,张露洋,等.近 50 年气候驱动下三江平原粮食生产潜力时空演变分析[J].水土保持研究,2018,25(2):361-366.
- [10] 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.
- [11] 郭小芹,刘明春.河西走廊近 40 年气候生产潜力特征研究[J].中国沙漠,2011,31(5):1323-1329.
- [12] 张波,谷晓平,古书鸿.1961—2015 年贵州省气候生产潜力估算及趋势分析[J].中国农业资源与区划,2018,39(2):114-122.
- [13] 侯依玲,许瀚卿,杨绚,等.基于 NorESM1-M 模式的中国东北地区 2050s 玉米气候生产潜力预估[J].气象与环境学报,2019,35(4):100-105.
- [14] 张怡,史本林.气候变化对豫东冬小麦产区的综合影响[J].江苏农业科学,2015,43(2):336-339.
- [15] 商兆堂,张旭晖,商舜,等.江苏省冬小麦生产潜力气候变化趋势评估[J].江苏农业科学,2018,46(12):245-249.
- [16] 刘文茹,陈国庆,曲春红,等.RCP 情景下长江中下游麦稻二熟制气候生产潜力变化特征研究[J].生态学报,2018,38(1):156-166.
- [17] 庞艳梅,陈超,马振峰.未来气候变化对四川省水稻生育期气候资源及生产潜力的影响[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2015,43(1):58-68.
- [18] 赵雪雁,王伟军,万文玉,等.近 50 年气候变化对青藏高原青稞气候生产潜力的影响[J].中国生态农业学报,2015,23(10):1329-1338.
- [19] 苏坤慧.河南省小麦生产对气候变化响应及适应度评价[D].西安:陕西师范大学,2011.
- [20] 张竟竟,郭志富,李治国.河南水旱灾害危险性时空特征研究[J].自然资源学报,2013,28(6):957-968.
- [21] Lieth H. Modelling the primary productivity of the world[J]. Nature and Resources, 1972,8(2):5-10.
- [22] Lieth H. Box E O. Evapotranspiration and primary production: C. W. Thornthwaite memorial model[J]. Publications in Climatology, 1972,25(2):37-46.
- [23] 徐建华.现代地理学中的数学方法[M].北京:高等教育出版社,2002.
- [24] 魏凤英.现代气候统计诊断与预测技术[M].北京:气象出版社,2007.
- [25] 苗运玲,张云惠,卓世新,等.东疆地区汛期降水集中度和集中期的时空变化特征[J].干旱气象,2017,35(6):949-956.
- [26] 任国玉,初子莹,周雅清,等.中国气温变化研究最新进展[J].气候与环境研究,2005,10(4):701-716.