

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.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2018.07.070

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

李颜颜,康国华,张鹏岩,何坚坚,闫宇航

(河南大学环境与规划学院,河南开封 475004)

摘要:利用河南省 1961—2014 年近 54 年的 19 个气象站逐月逐日气象资料,基于 ArcGIS 10.1 软件平台,采用气候倾向率、反距离加权插值(简称 IDW)、Mann-Kendall 检验等方法对降水和气温的时空变化进行分析;同时运用 Thornthwaite Memorial 模型对农业气候生产力时空特征进行研究,利用 SPSS 软件分析农业气候生产力对降水量和气温的敏感性。结果表明:(1)河南省近 54 年的降水量呈波动减少态势,减少幅度为 8.92 mm/10 年;河南省大部分地区的降水倾向率是负值,主要分布在豫东、豫南和豫北地区;(2)河南省近 54 年的气温整体呈上升趋势,上升速率为 0.157 °C/10 年,纬度较低的南部地区气温较高,气温较低的地区主要在西部山区,且气温倾向率均为正值;(3)河南省近 54 年的农业气候生产力总体上呈微弱的上升趋势,农业气候生产力距平变化明显,正距平年份比负距平年份多,呈现由南向北递减的特征,南部农业气候生产力较大,西部的农业气候生产力较小,但大部分地区的农业气候生产力呈下降趋势,豫东和豫南地区农业气候生产力上升速率较快,豫西和豫北地区的则下降;(4)河南省农业气候生产力与降水量相关性显著,但与气温的相关性不显著,气候生产力受降水和气温的双重影响,降水量是影响农业气候生产力的主导因素,气候变暖对气候生产力的提高是有利的。随着降水量的逐渐减小,气温的逐渐增加,对农业气候生产力的影响也在进一步加大,要合理利用水资源,兴修水利来保障农业用水,加强稳固河南省在全国的农业地位。

关键词:气候变化;农业气候生产力;时空特征;河南省;Thornthwaite Memorial 模型

中图分类号: S164 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2018)07-0287-07

气候变化作为全球广泛关注的问题之一,对全世界的生态环境、城市规划和农业生产等产生了巨大的影响。自工业革命以来,由人类活动排放的大量 CO₂ 所引起的温室效应导致全球气候出现了明显的变暖趋势^[1-4]。根据最新的研究结果,1880—2012 年,全球的平均地表气温升高了 0.85 °C^[5-6]。联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)第 5 次评估报告指出,全球变暖和气候异常比过去 100 年来更加严重^[7],在全球变暖的背景下,我国的气候波动越来越大,平均地表温度增加了 1.1 °C,高于全球的增温速率^[8]。全球气候变化所引起的问题对人类社会生存、经济发展和生态环境构成了严重威胁,尤其是对农业的影响是最大和最直接的,从而对作物气候生产力产生重要影响^[9-10]。气候生产力可以用来表达一个地区的气候资源状况,掌握其变化规律对于合理利用气候资源有重要的现实意义,对保障农业生产的稳定性具有促进作用^[11-12]。

河南省是我国的人口大省、农业大省、经济大省,粮食产量占全国粮食总产量的 1/10,气候变化对河南省农业安全的影响尤为重要。目前,国内外学者对气候生产力方面进行了大量研究^[13-16]。国内的一些学者对河南省农业气候生产力状况做了一些探讨,如王晓喆等利用河南省 7 个站点的气象资料和 13 个站点的气候生产力资料对气候生产力的时空变化特征进行了研究,并预测了未来 12 年的粮食产量^[17];孙卫国等运用交叉小波分析方法对河南省的气候变化进行了分析^[18];燕玉超等根据河南省 1960—2013 年 21 个气象站点的气象资料探讨了气候变化特征及其对旱涝的影响^[19]。综上所述,大多是对河南省气候变化的时空特征进行研究,较少有涉及到研究气候变化对气候生产力的影响。因此,本研究以河南省为研究区,利用近 54 年的气象数据资料,运用 Thornthwaite Memorial 模型、Mann-Kendall 检验法、反距离加权插值(inverse distance weighted,简称 IDW)法法等分析农业气候生产力时空变化特征,以期揭示气候变化对农业气候生产力影响的时空规律,为河南省积极应对气候变化给农业带来的不利影响、提高作物气候生产力和充分利用气候资源提供理论依据。

1 研究区概况和数据来源

1.1 研究区概况

河南省地处我国中东部,黄河中下游地区,是我国重要的粮食生产基地。地理坐标为 31°23′~36°22′N,110°21′~

收稿日期:2017-10-25

基金项目:国家自然科学基金(编号:41601175);河南省哲学社会科学规划项目(编号:2014CJJ016);河南省科技攻关计划(编号:152102310303);河南省高校科技创新团队支持计划(编号:16IRTSTHN012)。

作者简介:李颜颜(1991—),男,河南开封人,硕士研究生,研究方向为农业气候资源利用。E-mail:yyli1109@163.com。

通信作者:张鹏岩,博士,副教授,研究方向为资源利用与保护。E-mail:pengyanzh@126.com。

116°31'E, 土地总面积为 16.7 万 km², 总人口约 1.07 亿人。该省属温带大陆性季风气候, 四季分明, 雨热同期, 光照充足, 地形平坦, 适宜农作物的生长发育^[20]。

1.2 数据来源

本研究选取河南省境内时间序列较长和分布均匀的 19 个地区的(郑州市、开封市、新乡市、安阳市、三门峡市、信阳市、南阳市、驻马店市、商丘市、许昌市、孟津县、栾川县、卢氏县、西峡县、宝丰县、永城市、西华县、桐柏县、固始县)气象站 1961—2014 年逐月的气温和降水资料, 气象站点分布见图 1, 数据来源于中国气象科学数据共享服务网(<http://data.cma.cn/>)。

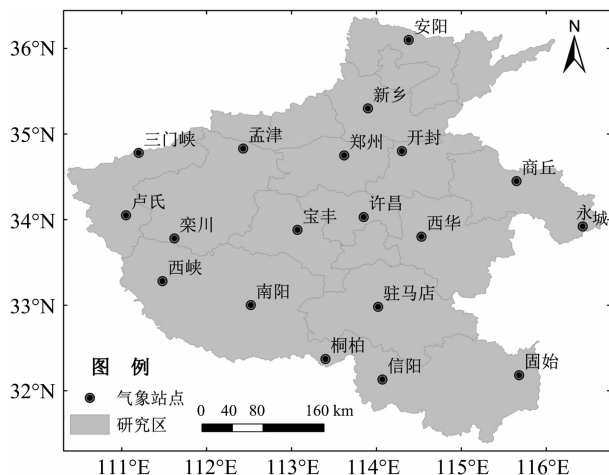


图1 河南省气象站点分布

2 研究方法

2.1 气候生产力模型

气候、品种、土壤、作物群体结构和栽培技术等都会影响农作物的产量和质量。当其他因素处于最适宜状态时, 因气候因素所决定的在单位面积土地上可能获得的最高生物学产量被称为气候生产力^[21]。气候生产力的计算方法有很多, 但考虑到数据既要易于获取, 又能有效说明气候变化的影响, 并参照以往学者的研究^[22-23], 选用 Lieth 等在 1972 年提出的 Thornthwaite Memorial 模型^[24]。计算公式如下:

$$P_v = 30\,000 [1 - e^{-0.000\,969\,5(V-20)}]; \quad (1)$$

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

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

式中: P_v 表示气候生产力 [$\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{年})$]; V 表示年平均蒸散量 (mm); R 为年降水量 (mm); L 为平均蒸发量 (mm); T 为年平均气温 ($^{\circ}\text{C}$)。

2.2 气候倾向率

气候倾向率是指气象要素的趋势变化, 本研究中的气候倾向率主要是指气温和降水随着时间的推移变化而得出的一种表示气候变化的速率, 用线性方程表示^[25]:

$$y_t = at + b (t = 1, 2, 3, \dots, n). \quad (4)$$

式中: y_t 表示要素值; t 表示时间; a 表示气候倾向率; b 为常数。其中, 气温倾向率和降水倾向率的单位分别取 $^{\circ}\text{C}/10$ 年、 $\text{mm}/10$ 年。

2.3 气候变率

气候变率与洪涝、干旱和寒暑等极端天气事件的频率及

强度有着密切的关系, 因此, 本研究采用气候变率(绝对变率和相对变率)来表示河南省内气候变化幅度的大小。其中, 绝对变率的公式为

$$V_a = \frac{1}{n} \sum |x_i - \bar{x}|; \quad (5)$$

相对变率的公式为

$$V_r = \frac{\frac{1}{n} \sum |x_i - \bar{x}|}{\bar{x}}. \quad (6)$$

式中: V_a 表示绝对变率, V_r 表示相对变率, x_i 表示某站逐年的降水量, \bar{x} 表示某站的年平均降水量, n 为研究年数。

2.4 反距离加权插值法

反距离加权插值法是一种常用而简单的空间插值方法, 它是根据地理第一定律来进行插值, 即插值点越近(2 个物体的距离越近, 相似性越大), 样本赋予的权重越大, 此种方法不仅能直观地看出插值结果, 而且效率也很高、简单易行, 这种方法的插值结果处在数据的最大值和最小值之间, 且已知点分布均匀的情况下插值效果好, 但缺点是易受极值的影响。

2.5 突变检测

本研究对气温和降水的时序分析采用的是一种非参数的统计检验方法, 即 Mann-Kendall 检验法, 被世界气象组织推荐并广泛应用于气温、降水、径流、水质等领域^[26]。Mann-Kendall 检验法的优点在于不受少数异常值的干扰, 且不要样本遵从一定的分布。

假设 n 个独立的、随机分布的时间序列数据样本 ($X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$), 对于所有的 i 和 j 均小于或等于 n , 且 $i \neq j$, 则构造统计变量 S :

$$S = \sum_{i=2}^n \sum_{j=1}^{i-1} \text{sign}(X_i - X_j); \quad (7)$$

式中: $\text{sign}()$ 为符号函数,

$$\text{sign} = \begin{cases} 1 & X_i - X_j > 0 \\ 0 & X_i - X_j = 0 \\ -1 & X_i - X_j < 0 \end{cases}.$$

当 $n \geq 10$ 时, S 为正态分布, 均值 $E(S)$ 为 0, 方差 $\text{Var}(S) = n(n-1)(2n+5)/18$ 。

Mann-Kendall 统计量 Z 为

$$\begin{cases} Z = (s-1)/\sqrt{\text{Var}(S)}, S > 0 \\ Z = 0, S = 0 \\ Z = (S+1)/\sqrt{\text{Var}(S)}, S < 0 \end{cases}. \quad (8)$$

在趋势检验中, 给定置信水平 α , 如果 $|Z| \geq Z_{1-\alpha/2}$, 则原假设是不能被接受的, 即在 α 水平上, 时间序列数据存在明显的上升或下降趋势。 Z 值为正, 表示增加的趋势; Z 值为负, 则表示减少趋势。 Z 的绝对值 $\geq 1.28, 1.64, 2.32$ 时, 表明分别通过了信度 90%、95%、99% 置信水平的显著性检验。

对于具有 n 个样本量的时间序列 x_1, x_2, \dots, x_n , 定义一个统计量 S_k , 表示第 i 个样本 $x_i > x_j$ ($1 \leq j \leq i$) 的累计数, 则

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

其中, $r_i = \begin{cases} 1 & x_i > x_j (j = 1, 2, 3, \dots, i) \\ 0 & x_i \leq x_j \end{cases}$

在时间序列随机独立的假定下, S_k 的均值和方差分别为

$$E[S_k] = k(k-1)/4, Var[S_k] = k(k-1)(2k+5)/72, 1 \leq k \leq n. \tag{10}$$

将 S_k 标准化:

$$UF_k = \frac{(S_k - E[S_k])}{\sqrt{Var[S_k]}}. \tag{11}$$

式中: $UF_1 = 0$ 。给定显著水平 α , 如果 $U_\alpha < |UF_k|$, 则表明序列存在明显的变化趋势。同样, 将以上方法应用到逆序列, 则逆序列 UB_k 为

$$UB_k = -UF_k. \tag{12}$$

给定显著性水平 $\alpha = 0.05$ 或 0.01 , 则临界值 $U_{0.05} = \pm 1.96$ 或 $U_{0.01} = \pm 2.58$; 将所有的 UF 和 UB 组成一条曲线, 并与临界值绘制到一张图上, 如果 UF 或 UB 的值大于 0 , 则表明序列是上升的, 否则则是下降的; 当超过临界值时, 表明上升或者下降趋势显著, 如果两者出现相交的情况, 则对应的交点的时刻即为突变开始的时间。

3 结果与分析

3.1 降水的时空变化特征

3.1.1 降水的时间变化特征 降水的变化趋势是研究气象要素的重要指标之一。从图 2 可以看出, 河南省在 1961—2014 年的年总降水量的年际变化较大, 在波动中减少, 但降幅并不大, 倾向率为 $-8.92 \text{ mm}/10 \text{ 年}$ 。其中, 最大年总降水量出现在 1964 年, 为 $1\,135.64 \text{ mm}$, 最小年总降水量出现在 1966 年, 为 492.89 mm , 两者年总降水量相差 642.75 mm , 由此可见, 研究区丰水年和枯水年的年总降水量相差较大, 且二者年份也很接近, 表明在 1964—1966 年间, 研究区的降水量波动很大, 易出现洪灾和旱灾。由 Mann-Kendall 检验可知, 河南省降水量在 1961—2014 年间并没有通过显著性检验, 在 2011—2012 年之间发生了突变, 突变前, 年总降水量比平均降水量多 7.96 mm , 突变后, 年总降水量比平均降水量少 106.82 mm , 可见, 在突变前后, 河南省的年总降水量经历了由多到少的突变, 且突变后, 年总降水量发生了较为明显的减少。由于时间序列较长, 降水在不同时段会有不同的变化, 因此将河南省 1961—2014 年 54 年时间, 共划分为 1961—1970 年、1971—1980 年、1981—1990 年、1991—2000 年、2001—2010 年、2011—2014 年等 6 个时段, 根据气候变率公式, 计算出各个时段降水量的绝对变率和相对变率。由表 1 可知, 除 2011—2014 年间外河南省平均降水量在这 6 个阶段的平均降水量变化并不明显, 但是气候变率变化较大, 尤其是绝对变率变化幅度较为明显。2011—2014 年间, 平均降水量为 671.22 mm , 比 54 年间平均降水量少 99.51 mm , 这一时期干旱灾害发生频率较大。对于气候变率来说, 1961—1970 年间降水绝对变率和相对变率均最大, 分别为 131.15 mm 、 0.166 , 说明这一时期降水量不稳定, 使得旱涝灾害的频率增大, 会造成农业气候生产力产生不稳定的变化。进入 21 世纪后, 河南省降水量减少速度较快, 这一时期干旱灾害时常发生。而这一时期的降水变率波动并不是很大, 说明 21 世纪以来, 河南省存在较为稳定的降水趋势, 但是年总降水量呈现减少趋势。

3.1.2 降水的空间变化特征 通过运用 ArcGIS 10.1 的插值工具中的 IDW 法, 得出河南省 1961—2014 年近 54 年的年均降水量和降水倾向率分布。从图 3-a 可以看出, 河南省降

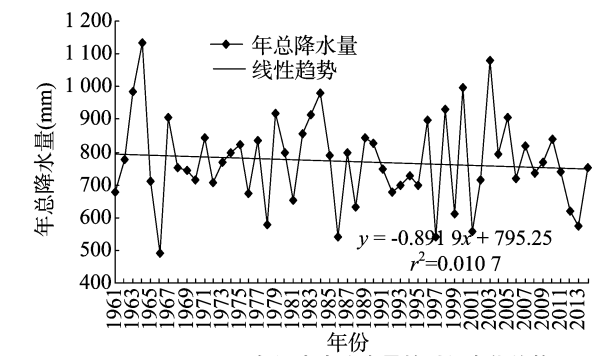


图2 1961—2014 年河南省降水量的时间变化趋势

表 1 1961—2011 年河南省不同时段平均降水量及其变率

时段	平均降水量 (mm)	绝对变率 (mm)	相对变率
1961—1970 年	789.51	131.15	0.166
1971—1980 年	774.74	73.74	0.095
1981—1990 年	783.33	105.16	0.134
1991—2000 年	753.00	113.41	0.151
2001—2010 年	792.86	93.51	0.118
2011—2014 年	671.22	30.11	0.045
1961—2014 年	770.73	104.37	0.135

水大致与纬线平行, 纬度越高, 降水越少, 总体上呈南多北少的空间分布特征, 年均降水量的地区差异还是比较明显的。降水较多的地区主要集中在河南省南部地区, 如驻马店、信阳、南阳的桐柏等地区, 年均降水量均在 900 mm 以上, 其中桐柏是河南省年均降水量最高的地区, 年均降水量达 $1\,135.48 \text{ mm}$ 。另外, 河南省东部永城、西部栾川和西峡等地区降水也较多, 均在 800 mm 以上。随着纬度的升高, 河南北部地区降水较少, 如安阳、新乡等地的年均降水量在 600 mm 以下, 河南省降水最少的地区是西部的三门峡, 年均降水量为 548.30 mm 。河南省南部多山区, 由于海拔较高, 阻挡了夏季风对北部的进一步影响, 因此会造成河南省降水南多北少的现象, 也表明了降水和纬度有着密切关系, 尤其是 1975 年 8 月在河南省中南部更是形成了历史上罕见的特大暴雨。

从图 3-b 可以看出, 不同站点所处的地理位置、下垫面和环境不同, 各站的年均降水量存在着较为明显的差异, 这也就引起了各站点的降水倾向率也存在着较大差异, 变化范围在 $-26.33 \sim 13.61 \text{ mm}/10 \text{ 年}$ 之间。从总体上看, 河南省大部分地区的降水倾向率是负值, 即大部分地区的降水是逐渐减少的。河南省西部的卢氏和南阳地区, 降水量减少的幅度不大, 尤其是卢氏地区, 其降水倾向率为 $-0.355 \text{ mm}/10 \text{ 年}$, 而永城、桐柏和新乡等地区的降水幅度减少较大, 但是河南省东部的商丘和西华地区的降水是逐渐增加的, 其降水倾向率分别为 12.78 、 $13.61 \text{ mm}/10 \text{ 年}$ 。

3.2 气温的时空变化特征

3.2.1 气温的时间趋势变化分析 通过对河南省 1961—2014 年间气温长期变化趋势分析, 由图 4 可知, 河南省近 54 年气温整体上呈现波动上升的趋势, 上升速率为 $0.157 \text{ }^\circ\text{C}/10 \text{ 年}$, 与赵路伟等的研究结果^[27]相似, 不仅低于华北地区的气温倾向率 ($0.216 \text{ }^\circ\text{C}/10 \text{ 年}$), 更低于全国的气温倾向率 ($0.22 \text{ }^\circ\text{C}/10 \text{ 年}$)^[28-29]。1961—2014 年间, 河南省的平均气温为 $14.515 \text{ }^\circ\text{C}$,

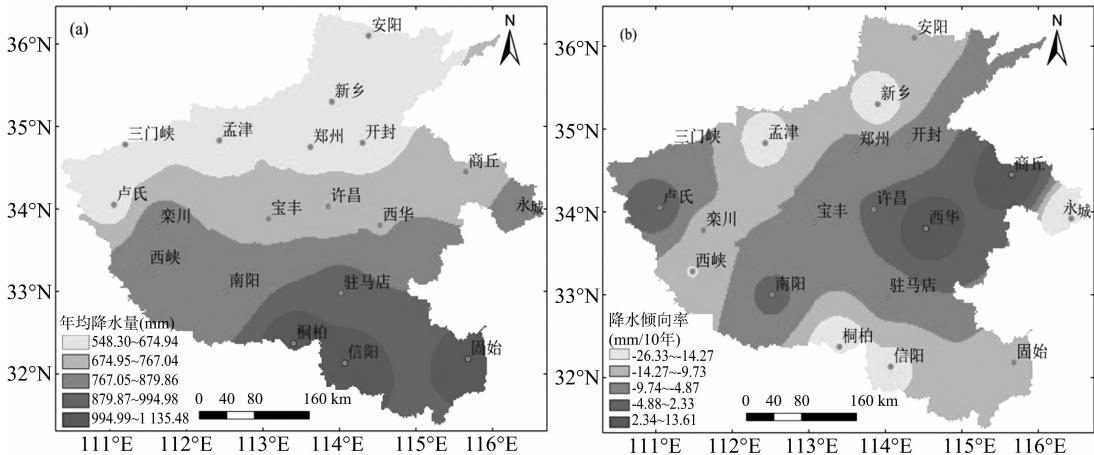


图3 河南省 1961—2014 年年均降水量(a)和降水倾向率(b)的空间分布

气温最大值出现在 1961 年,为 15.666 ℃,最小值出现在 1985 年,为 13.055 ℃,两者相差 2.611 ℃。在 1961—1985 年间,河南省的气温倾向率为 0.295 ℃,说明在这一时期河南省降温较为明显。根据 Mann - Kendall 检验可知,河南省气温在 1961—2014 年间通过了 99% 显著性检验,并在 2000—2001 年相交,说明在 2000 年附近河南省气温发生了突变,突变前河南省气温较低,即 1961—1999 年为相对低温期,平均气温为 14.344 ℃,比 54 年平均气温低了 0.171 ℃,突变后河南省气温升高,即 2000—2014 年为相对高温期,平均气温为 14.959 ℃,比 54 年平均气温高了 0.444 ℃。说明在 2000 年前后,河南省的气温经历了由低到高的突变。

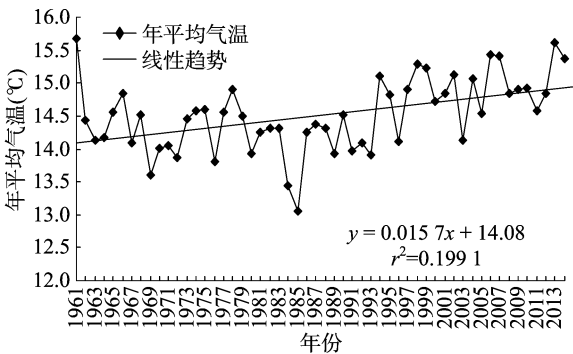


图4 1961—2011 年河南省年平均气温的时间变化趋势

由于时间序列较长,将河南省 1961—2014 年 54 年间每 10 年为 1 个时段,来分析每个时段的气候变率。从表 2 可以看出,20 世纪 90 年代,河南省气温出现较快升温,尤其是进入 21 世纪后,升温速率更加明显,平均气温为各时段最高,达到了 15.098 ℃,比 54 年平均气温高了 0.583 ℃,这与人口的增加、城市化迅速发展有很大关系。气候变率对于气候变化有着重要影响,河南省在 54 年间各个时段的气温变率有着不同的变化,1991—2000 年,气温的绝对变率和相对变率均最大,而其他时段的气温变率均小于 54 年时段的气温变率,说明 1991—2000 年这一时期气温变化较大,异常天气出现的频率较高,对农业气候生产力产生的影响也较大。

3.2.2 气温的空间变化特征分析 根据各站点多年平均逐月逐日气温数据,得出河南省平均气温和气温倾向率的空间

表 2 1961—2014 年河南省不同时段平均气温及其变率

时段	平均气温 (℃)	绝对变率 (℃)	相对变率
1961—1970 年	14.399	0.400	0.028
1971—1980 年	14.325	0.328	0.023
1981—1990 年	14.075	0.358	0.025
1991—2000 年	14.615	0.478	0.033
2001—2010 年	14.926	0.269	0.018
2011—2014 年	15.098	0.391	0.026
1961—2014 年	14.515	0.441	0.03

分布情况。从图 5 - a 可以看出,平均气温总体上呈现南高北低、东高西低的分布特征。平均气温较高的地区主要集中在纬度较低的南部山区,如固始、信阳、桐柏、西峡、驻马店等地区,平均气温均在 15 ℃ 以上,其中固始地区平均气温最高,达 15.61 ℃。而最低平均气温出现在河南省的西部地区,如卢氏和栾川地区,平均气温低于 13 ℃,栾川地区的平均气温最低,为 12.3 ℃。河南省各站点的平均气温受纬度和地形的影响较大,南高北低的空间特征主要是受纬度因素的影响,纬度越低,辐射就越多,反之,则越少,因此南部气温偏高;而东高西低的气温分异主要是受地形影响,东部为平原地区,西部多山地,山地海拔高,空气密度相对较小,大气的保温效应较差,因此,河南省西部山地气温要低于东部平原地区。

从图 5 - b 可以看出,河南省的气温倾向率均为正值,说明各站气温均呈上升的趋势,但是各站点在增温速率上有地区差异,主要表现为西部增速小于东部、沿黄河地区增温快的空间分布特征,气温倾向率主要在 0.019 ~ 0.294 ℃/10 年之间变化。气温倾向率较高的地区主要有郑州、开封、新乡、永城、驻马店等地区,气温倾向率大于 0.200 ℃/10 年,其中气温倾向率最大的是郑州,达 0.294 ℃/10 年,而气温倾向率较低的地区为许昌和卢氏等地区,倾向率均低于 0.030 ℃/10 年,倾向率最低的是许昌,为 0.019 ℃/10 年。

3.3 农业气候生产力的时空变化特征

3.3.1 农业气候生产力时间变化趋势分析 根据气候生产力模型,计算出河南省 1961—2014 年间的农业气候生产力。从图 6 可以看出,河南省 54 年间农业气候生产力总体上呈微弱

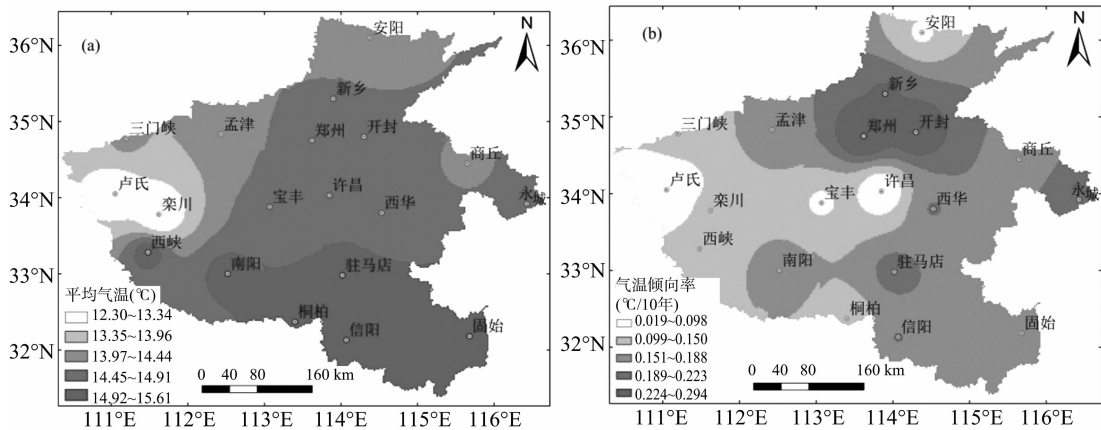


图5 河南省 1961—2014 年平均气温(a)和气温倾向率(b)的空间分布

上升趋势,上升速率为 0.228 4 kg/(hm²·年)。农业气候生产力大于 13 000 kg/(hm²·年)的年份有 13 个,其中最高的年份是 1964 年,其农业气候生产力为 13 902.42 kg/(hm²·年);农业气候生产力小于 11 000 kg/(hm²·年)的年份有 1966 年、1986 年、1997 年和 2001 年,其中最小的年份是 1966 年,其农业气候生产力值为 10 029.88 kg/(hm²·年)。

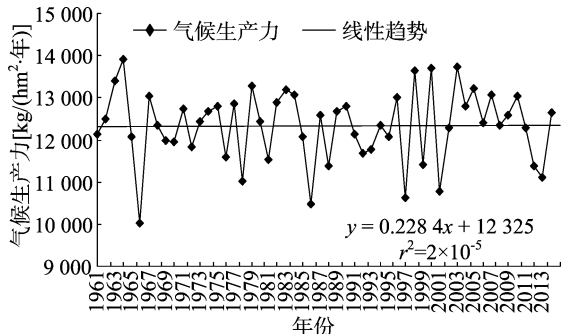


图6 河南省 1961—2014 年农业气候生产力趋势

距平是指某一个数值与平均值的差,分正距平和负距平。农业气候生产力距平可以体现农业气候生产力在某一时段的生产力变化情况。从图 7 可以看出,河南省农业气候生产力距平变化是比较明显的,正距平年份比负距平年份多,正距平年份占 57.40%,出现正距平的年份,降水量也较多,正距平最大值的年份是 1964 年,距平为 1 570.87 kg/(hm²·年),而这一年份的降水量也是近 54 年来最多的年份,这在一定程度上也说明了农业气候生产力受降水的影响很大。

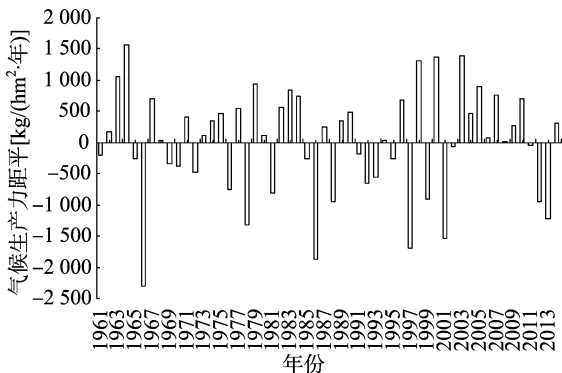


图7 河南省 1961—2014 年农业气候生产力距平值

依据每 10 年为 1 个阶段的时间分段,分析河南省不同时间段的农业气候生产力和变率。由表 3 可知,年平均农业气候生产力最低的时间段是 2011—2014 年,为 11 855.77 kg/(hm²·年),是因为这一时间段河南省的降水较少。农业气候生产力最高的时段是 2001—2010 年,为 12 626.72 kg/(hm²·年),这一时期的降水量是最大值,气温也较高,降水和气温这 2 个要素共同影响了农业气候生产力,同时,也进一步说明了降水对农业气候生产力的影响比气温大。

对变率而言,农业气候生产力相对变率出现最大值和最小值的时间段分别是 1991—2000 年、1971—1980 年与 2001—2010 年,相对变率小说明农业气候生产力波动小,反之波动就大。这 3 个时段的农业气候生产力的波动与降水、气温的波动有着密切联系。

表 3 河南省 1961—2014 年不同时段农业气候生产力及其变率

时段	年平均农业气候生产力 [kg/(hm ² ·年)]	绝对变率 [kg/(hm ² ·年)]	相对变率
1961—1970 年	12 335.30	702.13	0.057
1971—1980 年	12 369.70	533.50	0.043
1981—1990 年	12 268.48	724.83	0.059
1991—2000 年	12 247.81	748.11	0.061
2001—2010 年	12 626.72	543.76	0.043
2011—2014 年	11 855.77	607.37	0.051
1961—2014 年	12 331.54	665.78	0.053

3.3.2 农业气候生产力空间变化特征分析 从图 8-a 可以看出,河南省农业气候生产力的空间变化总体上呈由南向北递减的特征,各站点的农业气候生产力存在较大的差异。河南省南部的信阳、桐柏、固始等地的农业气候生产力较大,均在 14 000 kg/(hm²·年)以上,其中信阳地区的农业气候生产力最大,为 14 421.47 kg/(hm²·年);河南省西部的三门峡、卢氏及北部的安阳、新乡等地的农业气候生产力较低,均在 11 000 kg/(hm²·年)以下,其中西部的三门峡农业气候生产力最低,为 10 527.80 kg/(hm²·年)。

从图 8-b 可以看出,河南省气候倾向率在不同站点的差异较大,总体上呈由东向西递减的特征,倾向率在 -140.70 ~ 193.02 kg/(hm²·10 年)之间变化,大部分地区的农业气候生产力是下降的,只有 42.11% 的地区是呈上升的趋势。豫

东和豫南地区农业气候生产力上升速率较快,如商丘、西华、南阳等地区,其中商丘地区的农业气候生产力上升速率最快,为 193.02 kg/(hm²·10 年),这与商丘的降水量增加较快有关;豫西和豫北地区的倾向率大多是负值,如孟津、新乡、三门峡等地,这些地区的年降水量减少影响了农业气候生产力的减少。

从图 8 还可以看出,河南省农业气候生产力和倾向率的

空间分布特征与图 3 所示的降水量和倾向率的空间分布特征大致一样,说明农业气候生产力受降水量的影响很大。另外,一些地区降水倾向率为负值,农业气候生产力倾向率却为正值,如郑州、开封、驻马店、南阳等地区,这主要是气温的升高引起了这些现象的发生。由此可以推断出降水量和气温对农业气候生产力的影响是双重的,因此,气温对农业气候生产力的影响也要加以重视。

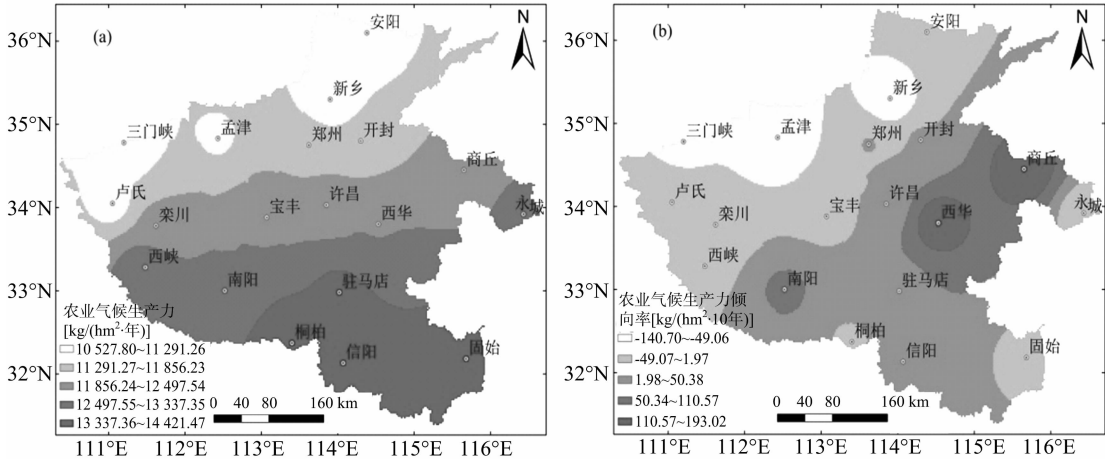


图8 河南省 1961—2014 年农业气候生产力(a)及农业气候生产力倾向率(b)的空间分布

3.4 农业气候生产力对降水和气温的敏感性分析

本研究利用 SPSS 软件的相关分析功能,对农业气候生产力与降水量和气温的关系进行了相关分析和偏相关分析。从表 4 可以看出,河南省农业气候生产力与降水量之间的相关性值 $P < 0.01$,即通过了显著性检验,但是与气温的相关性不显著,甚至相关系数小于 0,说明河南省近 54 年来气温不仅没有提高农业气候生产力,反而降低了农业气候生产力。由此可以看出,河南省农业气候生产力是随着降水量的增减而变动,降水量是农业气候生产力的主导因素。主要是由于河南省处于中温带和暖温带,温度适中,因而气温并没有成为农业气候生产力的限制性因素。但是,通过上面的降水倾向率、气温倾向率和农业气候生产力倾向率分析发现,一些地区降水倾向率为负值时,农业气候生产力倾向率是正值,这是由于气温倾向率是正值,说明气温的作用也不容忽视。在偏相关分析中,农业气候生产力与降水量和气温均通过了 0.01 水平的显著性检验;在气温因素固定下,农业气候生产力和降水量的偏相关系数达到了 0.972,在降水因素固定下,农业气候生产力与气温的偏相关系数为 0.635。由此可见,降水量和气温这 2 个气候因子都对农业气候生产力产生了影响。

表 4 河南省 1961—2014 年农业气候生产力与温度、降水量之间的相关关系

时段	相关系数		偏相关系数	
	气温	降水量	气温/降水量	降水量/气温
1961—2014 年	-0.092	0.953 **	0.635 **	0.972 **

注: ** 表示通过了置信度 99% 的显著性检验 ($P < 0.01$)。

综上所述,农业气候生产力受降水量和气温的双重作用,虽然降水量或气温的变化规律在一定程度上能反映出其变化情况,但并不能很好地对应。气温的升高虽然有利于提高河

南省的农业气候生产力,但是也只有降水充足、供水适宜的情况下,才能大幅度提高农业气候生产力。事实上,干旱是河南省比较常见的气象灾害,且持续时间长、波及面积大^[30],对于河南省的北部和西部地区,降水量比较少,且降水减少速率又较大,应该加强水利的修建,通过人为因素来保证农业灌溉用水,保障农业生产。尽管气温的升高在一定程度上能提高农业气候生产力,但是也会加剧水分蒸发,使得那些降水量少而气温又较高的地区用水更加紧张,如果这种情况长期得不到改善,有可能会改变种植农作物的种类。

4 结论与讨论

4.1 结论

通过对河南省 1961—2014 年的降水量、气温和农业气候生产力等进行时空特征分析,得到以下结论:

(1) 河南省 1961—2014 年的降水量年际变化较大,呈波动减少态势,减少幅度为 8.92 mm/10 年。在 2011 年附近发生了突变,在突变前后,河南省降水量经历了由多到少的突变。河南省降水量大致与纬线平行,即纬度越高,降水量越小,总体上呈南多北少的空间分布特征,年降水量的地区差异比较明显。降水较多的地区主要集中在河南省南部地区,而降水最少的地区是在西部。从总体上看,河南省大部分地区的降水倾向率是负值,即大多地区降水是在逐渐减少的,尤其是豫东、豫南和豫北地区。

(2) 河南省 1961—2014 年间气温整体上呈现波动上升的趋势,上升速率为 0.157 ℃/10 年,并在 2000 年附近发生了由低到高的突变。空间上,气温总体上呈现南高北低、东高西低的分布特征。气温较高的地区主要集中在纬度较低的南部山区,气温较低的地区主要在西部。河南省各地区的气温倾向率均为正值,呈现西部增速小于东部,沿黄河地区增速快

的特征,气温倾向率较高的地区主要有郑州、开封等地,气温倾向率较低的地区主要在许昌、卢氏等地区。

(3)河南省 1961—2014 年农业气候生产力总体上呈微弱上升趋势,上升速率为 $0.228\ 4\ \text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{年})$ 。年际波动大,农业气候生产力距平变化明显,正距平年份比负距平年份多,正距平年份占 57.40%,出现正距平的年份,降水量也较大。河南省农业气候生产力的空间变化总体上呈由南向北递减的特征,各站点的农业气候生产力存在较大的差异,河南省南部农业气候生产力较大,西部的农业气候生产力较小。河南气候倾向率在不同站点的差异比较大,大部分地区的农业气候生产力是下降的,豫东和豫南地区农业气候生产力上升速率较快,豫西和豫北地区的倾向率大多为负值。

(4)河南省农业气候生产力与降水相关性显著,但与气温的相关性不显著。降水量是影响农业气候生产力的主导因素,但是不能忽略气温的作用。在水分适宜的情况下,气温升高对农业生产是有利的,也将会提高农业气候生产力。

4.2 讨论

(1)河南省农业气候生产力呈逐年上升的趋势,有利于农业的发展,但是降水量作为影响气候生产的主要因素,却是逐渐减小,这势必会影响农业的发展。因此,要更加注重人为的作用,如兴修水利、发展灌溉技术、集约节约利用河水和地下水资源等来保障农业用水。

(2)本研究对河南省气候资源的研究主要是从影响农业气候生产力的 2 个气候因子(气温和降水量)来探讨的,仅从时间和空间上进行了分析,得出了一些现实结论。但是对于降水量为什么会减小以及气温为什么会持续上升的原因没有进一步深入分析,这也是未来工作的一个重要内容。

参考文献:

- [1]葛全胜,郑景云,郝志新,等. 过去 2000 年中国气候变化研究的新进展[J]. 地理学报,2014,69(9):1248—1258.
- [2]Viola F M,Paiva S L D,Savi M A. Analysis of the global warming dynamics from temperature time series[J]. Ecological Modelling, 2010,221(16):1964—1978.
- [3]Ramanathan V,Feng Y. Air pollution,greenhouse gases and climate change: global and regional perspectives [J]. Atmospheric Environment,2009,43(1):37—50.
- [4]Chaouche K,Neppel L,Dieulin C, et al. Analyses of precipitation temperature and evapotranspiration in a French mediterranean region in the context of climate change [J]. Comptes Rendus - Géoscience,2010,342(3):234—243.
- [5]秦大河. 气候变化科学与人类可持续发展[J]. 地理科学进展, 2014,33(7):874—883.
- [6]Parry M L,Canziani O F,Palutikof J P, et al. Climate change 2007: impacts, adaptation and vulnerability [M]. Cambridge: Cambridge University Press,2007.
- [7]IPCC. Climate change 2013: the physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [R]. Cambridge: Cambridge University Press,2013:1.

- [8]丁一汇,任国玉,石广玉,等. 气候变化国家评估报告(I):中国气候变化的历史和未来趋势[J]. 气候变化研究进展,2006,2(1):3—8,50.
- [9]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.
- [10]Motha R P,Baier W. Impacts of present and future climate change and climate variability on agriculture in the temperate regions:North America[J]. Climatic Change,2005,70(1/2):137—164.
- [11]韩 玮,韩永红,杨沈斌. 1961—2011 年山东气候资源及气候生产力时空变化特征[J]. 地理科学进展,2013,32(3):425—434.
- [12]唐国利,任国玉. 近百年中国地表气温变化趋势的再分析[J]. 气候与环境研究,2005,10(4):791—798.
- [13]David H,Mordechai S,Pedro B. Assessing the impact of climate change on representative field crops in Israeli agriculture: a case study of wheat and cotton[J]. Climatic Change,2008,86(3/4):425—440.
- [14]Salinger M J. Climate variability and change: past, present and future:An overview[J]. Climatic Change,2005,70(1/2):9—29.
- [15]封 珊,徐长乐. 全球气候变化及其对人类社会经济影响研究综述[J]. 中国人口·资源与环境,2014,24(5):6—10.
- [16]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.
- [17]王晓晔,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.
- [18]孙卫国,程炳岩,顾万龙. 河南省气候变化与北极涛动的多时间尺度相关[J]. 高原气象,2008,27(2):430—441.
- [19]燕玉超,张福平,刘 筱,等. 河南省气候变化特征及其对旱涝的影响[J]. 中国沙漠,2016,36(3):777—786.
- [20]姬兴杰,朱业玉,顾万龙. 河南省参考作物蒸散量变化特征及其气候影响分析[J]. 中国农业气象,2013,34(1):14—22.
- [21]宋连春. 干旱地区气象研究[M]. 北京:气象出版社,2003.
- [22]李惠梅,张安录. 三江源草地气候生产力对气候变化的响应[J]. 华中农业大学学报(社会科学版),2014,33(1):124—130.
- [23]韩 芳,牛建明,刘朋涛,等. 气候变化对内蒙古荒漠草原牧草气候生产力的影响[J]. 中国草地学报,2010,32(5):57—65.
- [24]Leith H,Box E. Evapotranspiration and primary productivity[M]. New Jersey:Climatology,1972.
- [25]施 能. 北半球冬季大气环流遥相关的长期变化及其与我国气候变化的关系[J]. 气象学报,1996,54(6):675—683.
- [26]鲁 凤,钱 鹏,胡秀芳,等. 基于小波分析与 Mann—Kendall 法的上海市近 12 年空气质量变化[J]. 长江流域资源与环境, 2013,22(12):1614—1620.
- [27]赵路伟,徐 刚. 河南省 1961—2014 年气温和降水量的时空变化特征[J]. 南水北调与水利科技,2016,14(3):17—23,54.
- [28]徐 娟,魏明建. 华北地区百年气候变化规律分析[J]. 首都师范大学学报(自然科学版),2006,27(4):79—82.
- [29]任国玉,郭 军,徐铭志,等. 近 50 年中国地面气候变化基本特征[J]. 气象学报,2005,63(6):942—956.
- [30]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.