

气候变化对河南省冬小麦产量影响的定量研究

邓贵铭¹ 田智慧² 魏海涛²

(1 郑州大学水利科学与工程学院, 郑州 450001; 2 郑州大学地球科学与技术学院, 郑州 450052)

摘要: 以冬小麦为研究对象, 基于河南省1979—2018年的气象站点逐日观测数据, 结合遥相关因子PDO (太平洋年代际震荡)、ENSO (厄尔尼诺-南方涛动) 等, 研究河南省冬小麦生育期内降水、气温、日照时数、相对湿度、PDO、ENSO等对冬小麦产量的影响。结果表明: 河南省冬小麦生育期降水量、平均气温、最高气温、最低气温都呈上升趋势, 日照时数和相对湿度呈下降趋势, 其中平均气温和最低气温上升趋势显著, 相对湿度下降趋势显著; H-P滤波法分离的气候产量随周期的增加, 其周期内波幅在减小; 利用残差趋势法分析气候变化和人类活动对冬小麦产量的相对贡献率, 分别为30.15%和69.85%。河南省冬小麦产量的波动在减小, 气候变化并不是引起冬小麦产量变化的主导因素。

关键词: 冬小麦, 产量, 气候变化, H-P滤波, 相对贡献率

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2022.04.005

Quantitative Analysis of the Impact of Climate Change on Winter Wheat Yield in Henan Province

Deng Guiming¹, Tian Zhihui², Wei Haitao²

(1 School of Water Conservancy and Environment, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001 2 College of Earth Science and Technology, Zhengzhou University, Zhengzhou 450052)

Abstract: The daily observation data of meteorological stations in Henan Province from 1979 to 2018 are utilized, together with the teleconnection factors such as PDO (Pacific Decadal Oscillation) and ENSO (El Niño Southern Oscillation), to analyze the impact of precipitation, temperature, sunshine hours, relative humidity, PDO and ENSO on the winter wheat yield in Henan Province during its growth period. The research results exhibit the upward trend of the precipitation, the average temperature, the maximum temperature and the minimum temperature as well as the downward trend of sunshine hours and relative humidity. Moreover, the average temperature and the minimum temperature have increased significantly, while the relative humidity has decreased dramatically. The climate output separated by the H-P filtering method increases with the increase of the period, and the amplitude of the volatility within the period decreases; the residual trend method is used to analyze the relative contribution rates of climate change and human activities to winter wheat yield, which are 30.15% and 69.85% respectively. The fluctuation of winter wheat yield in Henan Province is lessening, and climate change is not the leading factor causing yield variation of winter wheat.

Keywords: winter wheat, yield, climate change, H-P filter, relative contribution rate

0 引言

2014年IPCC的第五次评估报告(AR5)显示, 1880—2012年全球(包括陆地和海洋)表面平均温度上升0.85℃, 而1983—2012年是北半球最暖的30年。中国的日照时数呈现下降趋势, 主要以华北平原降幅最大^[1]。赵彦茜等研究发现小麦生育期内的气温升高和辐射变化会使北方小麦产量增加, 南方小麦产量减少^[2]。普宗朝等研究表明春夏气温升高对冬小麦产生不利影响, 降水量略增对冬小麦产量有提升作用, 而

日照时数的变化则对冬小麦产量无显著影响^[3]。冯琳等发现年均降水量对湖南省低产区小麦的气候产量有显著负效应, 年均日照时数则为显著正效应^[4]。还有学者研究指出河南省小麦利用效率综合指数受气候变化而提升, 且豫北的农业气候资源利用率潜力大^[5]。熊淑萍等研究表明河南省冬小麦主要受到降水和日照时数的影响^[6]。郑冬晓等认为在ENSO(厄尔尼诺-南方涛动)的影响下, 全球水稻、小麦和玉米均以减产为主^[7]。厄尔尼诺现象重创中国东北地区水稻生产, 并影响中国未来的粮食安全^[8]。在国外的研究中, Phillips等研究发现ENSO活跃导致津巴布韦地区玉米产量减产^[9]。有学者研究发现PDO(太平洋年代际振荡)与美国密苏里河流域降水和地表气温的年际变化显著相关, 从而影响密苏里河流域小麦和玉米产量^[10]。

收稿日期: 2021年2月20日; 修回日期: 2021年3月10日
第一作者: 邓贵铭(1996—), Email: dgm0612@163.com
通信作者: 田智慧(1965—), Email: iczhtian@zzu.edu.cn
资助信息: 国家重点研发计划资助(2018YFB0505004-03)

冬小麦作为河南省最重要的粮食作物之一, 深入研究冬小麦产量受气候变化等因素的影响程度对科学认识气候变化的响应机理及其利弊, 为冬小麦生长指定适应性措施有着重要意义。Asseng等研究发现, 如果考虑CO₂的肥效作用, 气候变暖其实是有利于小麦增产的, 在这个前提下, 全球气温增加1.5 °C, 则小麦总产量增加约1.9%^[11]。赵红飞等通过开放式增温系统试验发现, 增温使生长在风沙土和红壤上的冬小麦产量分别增加44.7%和43.2%^[12]。柴达木盆地的小麦产量与年均气温、年降水量显著相关, 年均气温每升高1 °C, 小麦产量增加800 kg/hm²以上; 年降水量每增加10 mm, 小麦产量则增加近140 kg/hm²^[13]。陈帅等研究发现气候变化总体使小麦减产, 主要因日照减少以及降水时空分布不均的加剧导致小麦减产, 气候变化对黄淮海地区小麦产量的影响约为每10年减产0.68%^[14]。综上, 以往的研究多聚焦于单个气象因子对作物产量影响的定量分析, 且作物产量往往也受到人类因素的影响, 本研究将影响作物产量的因素划分为气候变化和人类活动两方面, 定量分析这两种因素对河南省冬小麦产量的影响。本文将分析河南省1979—2018年气候变化情况, 并从波动性角度分析气候变化对河南省冬小麦产量的影响, 最后对冬小麦产量的影响因素进行定量分析。

1 材料和方法

1.1 数据来源

研究区域内的气象数据主要为: 河南省17个典型地面气象观测站台的逐日降水量、平均气温、平均最高气温、平均最低气温、日照时数、相对湿度等数据, 来源于国家气象科学数据中心 (<http://data.cma.cn/>)。17个典型地面气象观测站分布如图1。遥相关因子选取与北半球气候变化关系密切的PDO (太

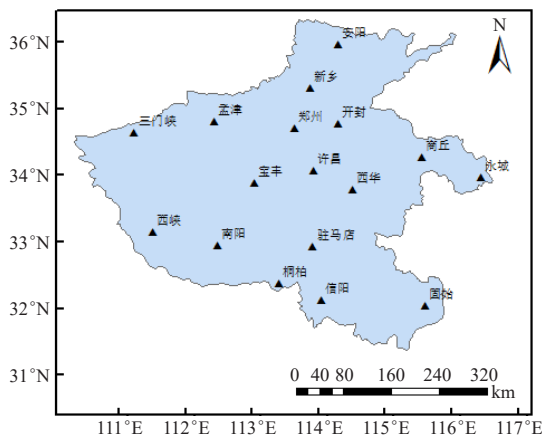


图1 气象站点分布图

Fig. 1 Distribution map of meteorological stations

平洋年代际震荡)、ENSO (厄尔尼诺—南方涛动) 及太阳黑子, 数据来源于美国国家海洋和大气管理局 (NOAA)。数据选取的时间序列长度均为1979—2018年。

1979—2018年河南省冬小麦总产量数据和化肥施用量数据来源于国家统计局 (<http://data.stats.gov.cn/>)。

由于冬小麦生育期较长, 为跨年度的生长作物, 其生育期为上一年10月初到当年的6月初左右, 本文采用从上一年10月1日至当年5月31日的气象资料来研究冬小麦的生育期气候变化^[15]。

1.2 Mann-Kendall法

Mann-Kendall法作为一种非参数统计检验的方法, 其优点在于所使用的样本没有遵循某一分布类型的要求, 检测范围更广, 计算简便, 定量化程度高。其方法概述如下:

假设气象因子序列 x_1, x_2, \dots, x_n 分布相同互相独立且具有随机性, 秩序列 s_k 表示第 i 时刻 x_i 值大于 j 时刻数值的累计个数, 其中 i 和 j 的关系符合 $i \geq j \geq 0$ 。秩序列 s_k 表示为:

$$s_k = \sum_{i=1}^k r_i, \quad (1)$$

其中 k 和 r_i 的取值如下:

$$k=2, 3, \dots, n,$$

$$r_i = \begin{cases} +1, & x_i > x_j \\ 0, & x_i \leq x_j \end{cases}, \text{ 其中 } j=1, 2, \dots, i.$$

因此可以定义统计量 UF_k :

$$UF_k = \frac{|s_k - E(s_k)|}{\sqrt{\text{var}(s_k)}}, \quad (2)$$

式中: $k=1, 2, \dots, n$; $E(s_k)$ 为 s_k 的均值, $E(s_k) = \frac{n(n+1)}{4}$;

$\text{var}(s_k)$ 为 s_k 的方差, $\text{var}(s_k) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{72}$; $UK_1=0$,

UF_k 符合标准正态分布。然后按气象因子序列逆序 x_n, x_{n-1}, \dots, x_1 , 重复以上过程, 使得统计量 $UB_k = -UF_k$, 其中 $k=n, n-1, \dots, 1$ 。给定显著水平 α , 假定 $\alpha=0.05$, 临界值 $u_{0.05} = \pm 1.96$, 将 UF_k 和 UB_k 两个统计量序列绘制到以 ± 1.96 水平线为临界线的图中。突变点即为 ± 1.96 临界线内 UF_k 和 UB_k 线的交点, 交点即为突变开始点。

1.3 H-P滤波法

H-P滤波法就是将时间序列里的所有不同频率的成分分离出频率较高的成分, 然后滤除频率较低的成分。H-P滤波法可以将产量 y 分解为趋势产量 (长期趋势成分) y_t 、气候产量 (短期波动成分) y_w 和随机产量 Δy , 其公式为:

$$y = y_t + y_w + \Delta y, \quad (3)$$

式中的随机产量 Δy 对粮食产量的影响微小且难以采用某一种固定的函数表达式定量估计,因此此项不予计入。

1.4 残差趋势法

由Evans and Geerken提出的残差趋势法,用于研究区分导致植被覆盖变化的人类和气候因素,通过计算残差得到实际的且不受另一因素影响的残差趋势模型,进而准确计算二者的贡献率^[16]。本文计算冬小麦实际产量 Y_r 与气候影响下的冬小麦产量模拟值 Y_c 和人类活动影响下的冬小麦产量模拟值 Y_h 的差值 Y_{res}^c 和 Y_{res}^h :

$$Y_{res}^c = Y_r - Y_h, \quad (4)$$

$$Y_{res}^h = Y_r - Y_c. \quad (5)$$

通过计算平均值从而尽量减少气候变化和人类活动间的相互作用,使预测结果更加合理。以下将 Y_{res}^c 和 Y_c 以及 Y_{res}^h 和 Y_h 以及求平均,如下:

$$\overline{Y_{res}^c} = \frac{Y_{res}^c + Y_c}{2}, \quad (6)$$

$$\overline{Y_{res}^h} = \frac{Y_{res}^h + Y_h}{2}, \quad (7)$$

式中, $\overline{Y_{res}^c}$ 和 $\overline{Y_{res}^h}$ 分别为气候变化和人类活动影响下的冬小麦产量值。基于上述公式对 $\overline{Y_{res}^c}$ 和 $\overline{Y_{res}^h}$ 列与年份进行线性回归,分别得到在气候变化和人类活动影响下的河南省冬小麦产量变化趋势 $S(\overline{Y_{res}^c})$ 和 $S(\overline{Y_{res}^h})$ 。如果趋势为正,代表气候变化和人类活动使冬小麦增产;趋势为负,代表气候变化和人类活动使冬小麦减产。

2 结果与分析

2.1 生育期气候变化特征

2.1.1 降水

1979—2018年河南省冬小麦生育期降水量的气候倾向率为2.528 mm/10 a,研究区间内呈上升趋势。图2为河南省冬小麦生育期降水量M-K检验图, UF 与 UB 线有多个交点均位于临界区域($u_{0.05} = \pm 1.96$)内,说明降水量在样本区间内发生了多次突变。1983—1995年 UF 的值大于0,说明这段时间降水量呈上升状态;此后直到2017年前, UF 值大部分小于0,说明这个阶段降水量基本呈下降趋势;而2017年之后, UF 值大于0,说明河南省冬小麦生育期降水量未来呈现上升趋势。但 UF 线始终没有越过0.05显著性水平线,不能确定河南省冬小麦生育期降水量存在显著的上升趋势。

2.1.2 气温

研究区间近40年生育期平均气温呈平稳波动上升趋势,平均值为10.22 °C,气候倾向率为

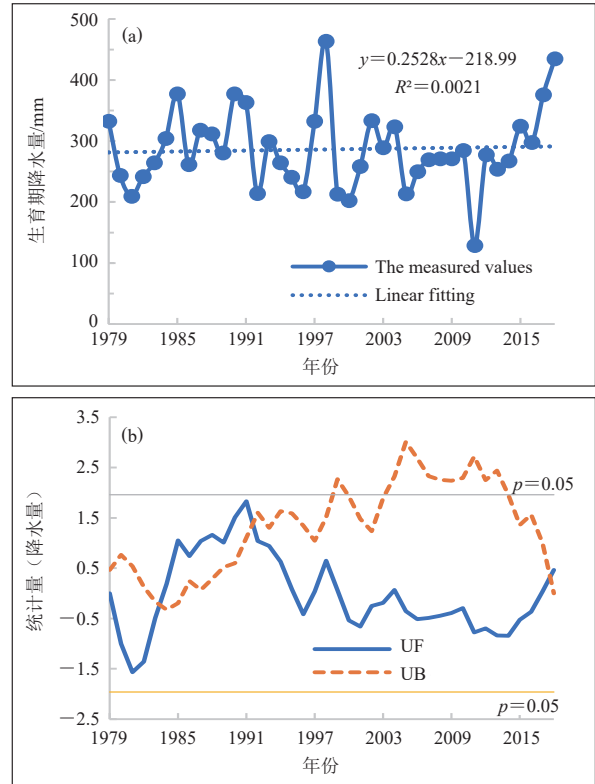


图2 河南省冬小麦生育期降水量变化趋势(a)和M-K检验(b)
Fig. 2 Variation trend of precipitation during the growth period of winter wheat in Henan Province (a) and M-K test (b)

0.07 °C/10 a; 最高气温整体呈下降趋势,气候倾向率为-0.30 °C/10 a;最低气温近40年线性拟合回归方程的拟合度为0.35,超过了5%显著性水平,说明最低气温显著上升,气候倾向率为0.44 °C/10 a。采用Mann-kendall法对1979—2018年河南省冬小麦生育期气温进行突变检验,结果如图3。平均气温的M-K检验结果显示, UF 和 UB 线之间有多个交点且都位于临界区域内,说明平均气温在样本区间内发生了多次突变; UF 线在2011年之后便越过0.05显著性水平线,所以2011年之后的河南省冬小麦生育期平均气温存在显著的上升趋势。

最高气温的M-K检验结果显示, UF 和 UB 线之间有多个交点且都位于临界区域内,说明平均气温在样本区间内发生了多次突变; UF 值在1994年后便始终大于0,表明1994年后最高气温呈上升趋势;但 UF 除了在1985—1987年短暂越过0.05显著性水平线外, UF 线处于临界区间内,因此河南省最高气温没有显著上升或者下降趋势。

最低气温的 UF 和 UB 线在2004—2005年重合,但这段重合部分均位于临界区间外,因此最低气温并没有发生突变。 UF 线在2003年后越过0.05显著性水平线,

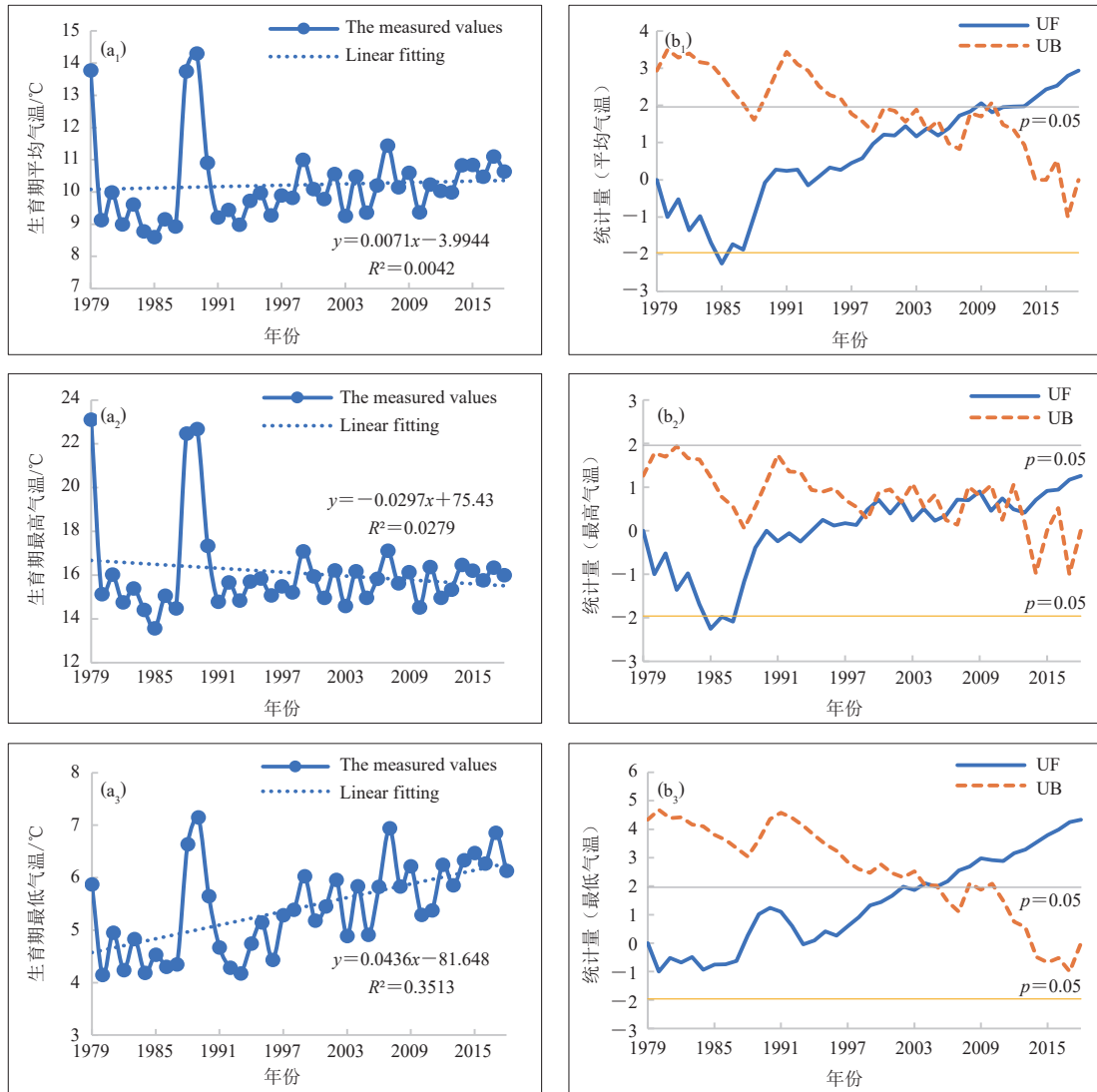


图3 河南省冬小麦生育期气温变化趋势 (a₁, a₂, a₃) 和M-K检验 (b₁, b₂, b₃)
 Fig. 3 Variation trend of temperature during the growth period of winter wheat in Henan Province (a₁, a₂, a₃) and M-K test (b₁, b₂, b₃)

表明河南省冬小麦生育期最低气温在2003年后存在显著的上升趋势。

2.1.3 日照时数和相对湿度

河南省冬小麦生育期日照时数的气候倾向率约为-13 h/10 a, 日照时数最多和最少的年份分别出现在1997年和2003年, 分别为1502 h和1084 h。河南省冬小麦生育期日照时数的M-K检验如图4右上, UF值在样本区间内基本小于0, 说明日照时数呈下降趋势。UF线在1989—1993年低于0.05显著性水平线, 说明这段时间内日照时数下降趋势较为显著。

冬小麦生育期相对湿度的气候倾向率为-1.53%/10 a, 呈明显下降趋势。相对湿度最大和最小的年份分别出现在1990年和2011年, 为65.60%和51.00%。图4右下可以看出UF值在2004年后便一直小

于0, 呈现下降态势; 在2010年后UF线越过0.05显著性水平线, 说明河南省冬小麦生育期日照时数存在显著下降趋势。

2.2 气候变化对冬小麦产量的影响

假设冬小麦产量序列为 $\{g_t\}$ ($t=1, 2, \dots, n$, n 为样本容量), 其包含长期趋势成分和短期波动成分, 其中 h_t 表示长期趋势成分, l_t 表示短期波动成分, 用H-P滤波分离 g_t 为:

$$g_t = h_t + l_t. \quad (8)$$

采用H-P滤波法就是要将 h_t 从 g_t 中分离出来, 需要对 h_t 被定义的以下最小化问题求解, 即:

$$\min \left\{ \sum_{t=1}^n (g_t - h_t)^2 + \lambda \sum_{t=1}^n [(h_{t+1} - h_t) - (h_t - h_{t-1})]^2 \right\}. \quad (9)$$

对上式的 g_1, g_2, \dots, g_n 进行一阶求导, 同时令导数

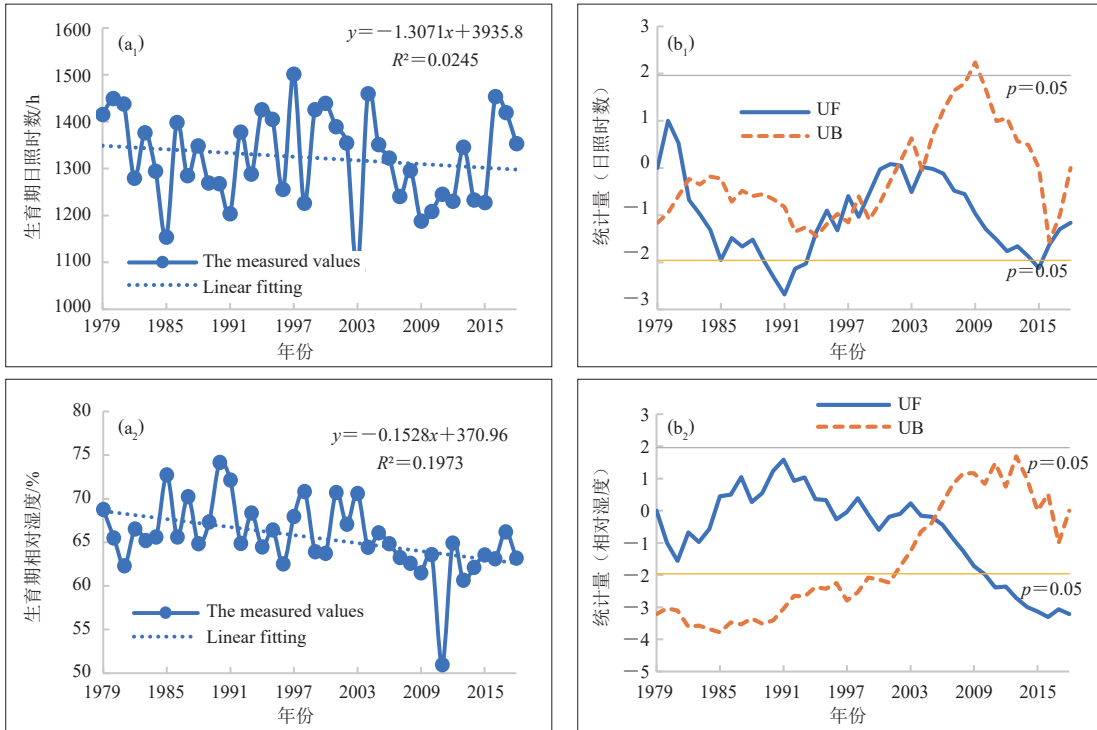


图4 河南省冬小麦生育期日照时数和相对湿度的变化趋势 (a₁, a₂) 和M-K检验 (b₁, b₂)

Fig. 4 Variation trends of sunlight hours and relative humidity during the growth period of winter wheat in Henan Province (a₁, a₂) and M-K test (b₁, b₂)

为0, 计算整理可得:

$$h = (\lambda F + I)^{-1} g, \quad (10)$$

式中的 I 为单位矩阵, F 为系数矩阵, 由此得到长期趋势成分 h 。从上式明显可以看出, $\lambda=0$ 时, 长期趋势序列即为实际的冬小麦产量序列 $\{g_t\}$, 而随着 λ 值的增加, 趋势线趋于平缓, 直到 λ 值趋近于 ∞ 时, 趋势线便十分接近于直线。根据以往的研究经验, λ 因时间序列的时间单位可以取不同的参考值, 当时间序列为月度数据时取14400; 当时间序列为季度数据时取1600; 当时间序列为年度数据时取100。本文所研究的河南省冬小麦产量数据为年度数据, 因此 λ 值取100, H-P滤波法分离方程为

$$h_t = (100F + I)^{-1} g, \quad (11)$$

其中: h_t 为趋势产量, F 为系数矩阵, I 为单位矩阵, g 为实际的冬小麦产量。

图5为H-P滤波法去掉趋势产量后得到的气候产量趋势图。气候产量具有一定的周期性, 河南省1979—2018年的冬小麦气候产量可以划分为7个周期。1979—2018年河南省冬小麦气候产量序列的平均周期为5.43 a, 最长周期为11 a, 最短周期为2 a。河南省冬小麦气候产量的各个周期长度在前4个周期变化幅度较小, 后3个周期的变化幅度较大; 周期的波动幅度较大。

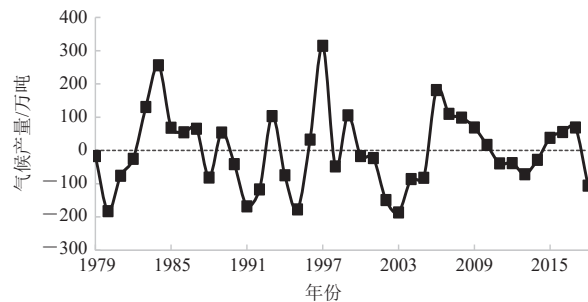


图5 河南省冬小麦气候产量

Fig. 5 Climate yield of winter wheat in Henan Province

波动幅度是指周期内产量变化起伏的程度, 其值为一个周期内波动指数的最大差值, 波动指数的计算公式如下:

$$X_1 = l_t / h_t \times 100\%, \quad (12)$$

其中: X_1 为波动指数, l_t 和 h_t 分别为气候产量和趋势产量。

波幅按照谷峰的落差程度划分为强幅(≥ 10)、中幅(5~10)、弱幅(≤ 5)这三种类型。表1为1979—2018年河南省冬小麦气候产量周期变化表, 从波幅上看, 河南省冬小麦气候产量的平均波幅为8.34%, 为中幅; 最大波动幅度是第一周期, 波幅为13.43%; 最小波幅是第七周期, 波幅为4.37%。第1、2周期为强幅,

第3、4、5、6周期为中幅，第7周期为弱幅，波幅总体上呈现递进式的弱化，说明河南省冬小麦产量周期内的波动幅度在减小，趋于稳定。

表1 1979—2018年河南省冬小麦气候产量周期变化
Table 1 The periodic change of the climate output of winter wheat in Henan Province from 1979 to 2018

周期	年份	周期长度/a	波峰/%	波谷/%	峰谷落差/%	波幅/%	波幅型
1	1979—1984	5	9.88	-16.98	26.85	13.43	强幅
2	1984—1989	5	18.34	-5.05	23.39	11.70	强幅
3	1989—1993	4	3.28	-9.74	13.01	6.51	中幅
4	1993—1997	4	5.71	-9.17	14.88	7.44	中幅
5	1997—1999	2	15.29	-2.25	17.55	8.78	中幅
6	1999—2006	7	4.83	-7.51	12.34	6.17	中幅
7	2006—2017	11	6.61	-2.13	8.73	4.37	弱幅
平均		5.43	9.13	-7.55	16.68	8.34	中幅

2.3 定量分析气候变化对冬小麦产量的影响

2.3.1 相关性分析

利用Python制作冬小麦产量和每个相关变量间的皮尔逊相关系数热力图(图6)，可以清晰的看到每个变量之间的相关程度。图中纵坐标从上到下依次为冬小麦产量(Yield)、降水量(Rain)、平均气温(Tem)、最高气温(Hightem)、最低气温(Lowtem)、相对湿度(RH)、日照时数(Sunlight)、化肥施用量(Huafei)、ENSO、PDO和太阳黑子(Sunspot)，右边的图例为相关系数。从热力图的第一列或者第一行可见冬小麦产量和各相关变量间的相关性，由图6可以发现，生育期降水量与冬小麦产量的相关性系数在0的附近，相关性极弱，说明降水量的变化与冬小麦产量基本没有关系，这可能是由于冬小麦属于抗旱性作物，对降水的依赖性不强。生育期最低气温与冬小麦产量呈较强正相关，这是由于最低气温随时间序列显著上升，最低气温升高对冬小麦产量有显著的正面影响。生育期日照时数与冬小麦产量相关性较低。生育期相对湿度与冬小麦产量呈较强负相关性，相对湿度随时间序列

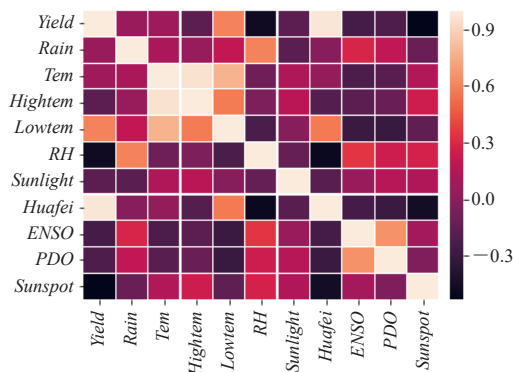


图6 相关系数热力图

Fig. 6 Heat map of correlation coefficients

呈下降趋势，说明生育期和春季相对湿度的下降对冬小麦产量有显著负面影响。

除此之外，化肥施用量与冬小麦产量有极显著的正相关性，而太阳黑子对冬小麦产量有显著负相关性，ENSO和PDO与冬小麦产量相关性低。

2.3.2 残差趋势分析

采用残差趋势法以生育期最低气温、生育期相对湿度、太阳黑子和化肥施用量为自变量，冬小麦产量数据作为因变量进行线性回归，利用线性回归模型确定回归参数。利用生育期最低气温、生育期相对湿度、太阳黑子和冬小麦产量数据计算气候变化影响下的冬小麦产量模拟值 Y_c ，利用化肥施用量和冬小麦产量数据计算人类活动影响下的冬小麦产量模拟值 Y_h ，公式如下：

$$Y_c = A \times T_1 + B \times H + C \times S + F, \quad (13)$$

$$Y_h = A_1 \times CF + B_1, \quad (14)$$

其中： T_1 为生育期最低温度； H 为生育期相对湿度； S 为太阳黑子； A 、 B 、 C 、 F 、 A_1 、 B_1 为回归系数，其中 F 和 B_1 为常数。接着由式(4)和式(5)计算冬小麦产量模拟值 Y_{res}^c 和 Y_{res}^h 。以上方式得出的气候变化与人类活动各自影响下的冬小麦产量还不够准确，需要将其各自的模拟值和残差求平均。通过计算平均值从而尽量减少气候变化和人类活动间的相互作用，使预测结果更加合理。根据式(6)和式(7)将 Y_{res}^c 和 Y_c 以及 Y_{res}^h 和 Y_h 求平均， $\overline{Y_{res}^c}$ 和 $\overline{Y_{res}^h}$ 分别为气候变化和人类活动影响下的冬小麦产量值。

以冬小麦实际产量 Y_r 、气候变化影响下的冬小麦产量 $\overline{Y_{res}^c}$ 和人类活动影响下的冬小麦产量 $\overline{Y_{res}^h}$ 与年份进行线性回归得到结果如图7，分别对三条趋势线进行拟合得到回归方程。得到 $S(Y_r)$ 、 $S(\overline{Y_{res}^c})$ 和 $S(\overline{Y_{res}^h})$ 分别为68.176、20.554和47.622，均为正值，说明气候变化和人类活动与河南省冬小麦产量均呈正相关，都会使冬小麦增产。采用Sun等在2015年提出的贡献率分类方法，气候变化和人类活动对冬小麦产量的相对贡献率 RC_c 和 RC_h 计算方式如下^[17]：

$$RC_c = \frac{S(\overline{Y_{res}^c})}{S(Y_r)} \times 100\%, \quad (15)$$

$$RC_h = \frac{S(\overline{Y_{res}^h})}{S(Y_r)} \times 100\%. \quad (16)$$

相对贡献率计算结果如表2，气候变化对河南省冬小麦产量的相对贡献率为30.15%，人类活动对河南省冬小麦产量的相对贡献率为69.85%。

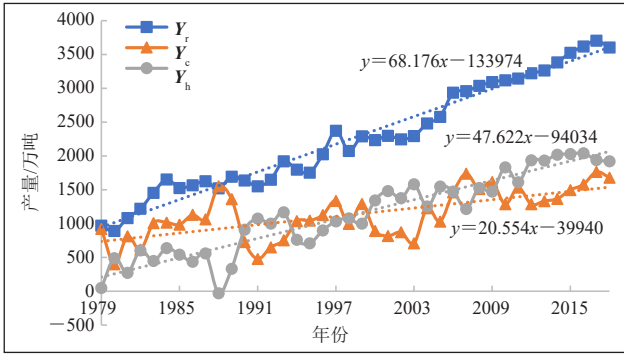


图7 冬小麦的实际产量 (Y_r)、气候变化影响下的产量 (Y_c) 和人类活动影响下的产量 (Y_h)

Fig. 7 The actual yield of winter wheat (Y_r), the yield under the influence of climate change (Y_c) and the yield under the influence of human activities (Y_h)

表2 气候变化和人类活动对冬小麦产量的相对贡献率

Table 2 Relative contribution rate of climate change and human activities to winter wheat yield

Yr趋势	$\overline{Y_{res}^c}$ 趋势	$\overline{Y_{res}^h}$ 趋势	气候变化贡献率/%	人类活动贡献率/%	含义
S(Y)上升	>0	>0	30.15	69.85	气候变化和人类活动使冬小麦产量增加

3 讨论

本文通过定量研究将影响冬小麦产量的人为因素和自然因素区分开，直观地展现二者的相对贡献率。相关分析显示，冬小麦生育期最低气温的升高对冬小麦产量有显著的正效应，这与孙新素等研究得出的结论一致；而降水量与冬小麦产量的相关性最弱，与张荣荣等的研究一致^[18-19]。气候变化对河南省冬小麦产量的影响在减弱，未来冬小麦的增产可能更依赖于农业技术。本文的不足之处：①分季节或者生长阶段气候变化特征的研究更能细致地揭示气候变化对冬小麦产量的影响，后续将会对此做更深入的研究。②由于人为因素数据序列长度的局限性，只有化肥施用量序列和冬小麦产量序列长度一致，导致人类活动对产量定量分析的结果不够准确。③本文只分析了气候变化整体对冬小麦产量的影响，而没有具体到每一个因素对冬小麦产量增产或减产的定量计算，今后会做进一步研究。

4 结论

1) 在研究区间内，河南省冬小麦生育期降水量呈上升趋势，但上升趋势不显著；平均气温在2011年后存在显著的上升趋势，最高气温呈上升趋势但不显著，最低气温在2003年后呈显著上升趋势；日照时数总体呈下降趋势，在1989—1993年下降趋势显著；相对湿度在2010年后呈现明显的下降趋势。

2) H-P滤波法分离的气候产量在研究区间内具有

7个周期，从波幅上看，河南省冬小麦气候产量的平均波幅为8.34%，为中幅；最大波动幅度是第一周期，波幅为13.43%；最小波幅是第7周期，波幅为4.37%。第1、第2周期为强幅，第3、第4、第5、第6周期为中幅，第7周期为弱幅，波幅总体上呈现递进式的弱化，说明河南省冬小麦气候产量周期内的波动幅度在减小，趋于稳定，冬小麦产量的波动在减弱。

3) 相关分析显示最低气温、相对湿度和太阳黑子对冬小麦产量的影响较为显著，利用残差趋势法对这些较为显著的因素和化肥施用量进行分析发现，气候变化和人类活动都会使冬小麦增产，其中气候变化的相对贡献率为30.15%，人类活动的相对贡献率为69.85%。

参考文献

- 赵东, 罗勇, 高歌, 等. 1961年至2007年中国日照的演变及其关键气候特征. 资源科学, 2010, 32(4): 701-711.
- 赵彦茜, 肖登攀, 唐建昭, 等. 气候变化对我国主要粮食作物产量的影响及适应措施. 水土保持研究, 2019, 26(6): 317-326.
- 普宗朝, 张山清, 宾建华, 等. 气候变化对乌鲁木齐冬小麦产量的影响. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2013, 41(3): 115-123.
- 冯琳, 庞玉亭, 钟琪多, 等. 1980—2016年气候变化对湖南省农业产量的影响. 资源科学, 2019, 41(3): 582-590.
- 徐延红, 李树岩. 气候变化对河南省小麦和玉米气候资源利用效率的影响. 干旱地区农业研究, 2019, 37(5): 218-225.
- 熊淑萍, 卢中民, 吴克远, 等. 河南省小麦和玉米产量及其有关气候因子分析. 河南农业大学学报, 2014, 48(2): 123-129.
- 郑冬晓, 杨晓光. ENSO对全球及中国农业气象灾害和粮食产量影响研究进展. 气象与环境科学, 2014, 37(4): 90-101.
- Kibue G, Liu X, Zheng J. Farmers' perceptions of climate variability and factors influencing adaptation: evidence from Anhui and Jiangsu, China. Environmental Management, 2016, 57(5): 976-986.
- Phillips J G, Cane M A, Rosenzweig C. ENSO, seasonal rainfall patterns and simulated maize yield variability in Zimbabwe. Agricultural and Forest Meteorology, 1998, 90: 39-50.
- Meht V M, Rosenberg N J, Mendoza K. Simulated impacts of three decadal climate variability phenomena on dryland corn and wheat yields in the Missouri River Basin. Agricultural and Forest Meteorology, 2012, 152(1):109-124.
- Asseng S, Martre P, Maiorano A, et al. Climate change impact and adaptation for wheat protein. Global Change Biology, 2019, 25(1): 155-173.
- 赵红飞, 潘仕球, 乔云发, 等. 增温对冬小麦产量的影响因土壤类型而不同. 中国农学通报, 2021, 37(2): 74-79.
- 王发科, 雷玉红, 都占良, 等. 气候变化对柴达木盆地主要农作物产量的影响. 中国农学通报, 2020, 36(14): 107-112.
- 陈帅. 气候变化对中国小麦生产力的影响——基于黄淮海平原的实证分析. 中国农村经济, 2015, (7): 4-16.
- 张明捷, 王运行, 赵桂芳, 等. 濮阳冬小麦生育期气候变化及其对小麦产量的影响. 中国农业气象, 2009, 30(2): 223-229.
- Evans J, Geerken R. Discrimination between climate and human induced dry land degradation. Journal of Arid Environments, 2004, 57(4): 535-554.
- Sun Y L, Yang Y L, Zhang L, et al. The relative roles of climate variations and human activities in vegetation change in North China. Physics and Chemistry of the Earth, 2015: 87-88.
- 孙新素, 龙致炜, 宋广鹏, 等. 气候变化对黄淮海地区夏玉米——冬小麦种植模式和产量的影响. 中国农业科学, 2017, 50(13): 2476-2487.
- 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. 资源科学, 2018, 40(1): 137-149.