

许成成, 陆垂裕, 王建华. 京津冀地区近 60 年来气候变化特征分析[J]. 水利水电技术(中英文), 2021, 52(6): 12-20.

XU Chengcheng, LU Chuiyu, WANG Jianhua. Characteristics of climate change in Beijing-Tianjin-Hebei Region in recent 60 years [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2021, 52(6): 12-20.

# 京津冀地区近 60 年来气候变化特征分析

许成成<sup>1,2</sup>, 陆垂裕<sup>2</sup>, 王建华<sup>2</sup>

(1. 安徽理工大学 地球与环境学院, 安徽 淮南 232001; 2. 中国水利水电科学研究院  
流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038)

**摘要:** 京津冀地区作为我国的一个重要经济圈, 其经济发展和生态环境治理是当前主要关注问题。作为影响生态环境的一个重要因素, 对气候变化研究显得尤为重要。基于京津冀地区 60 a(1960—2019 年) 来 197 个气象站点的逐日平均气温、降雨资料, 运用线性回归、Mann-Kendall 检验法、小波函数等方法对京津冀地区气温、降雨进行特征分析, 并对京津冀地区山区与平原的气候变化特征进行对比。结果显示: 京津冀地区近 60 a 来, 降雨量呈现降低的趋势, 气温总体呈现上升趋势, 并且存在一定周期性; 京津冀地区平原与山区气候特征存在较大差异, 对比多年降雨量平均值, 山区较于平原区减少了 100 mm 左右, 对比多年气温平均值, 山区较于平原区气温偏低 5 °C 左右, 表明近 60 a 来城市发展与降雨量的减少、气温的升高密切相关, 人类活动对气候变化的影响较为明显, 为后期研究城市化、人类活动对气候变化的影响提供一定的借鉴。

**关键词:** 气候变化; 趋势分析; Mann-Kendall 检验; 小波分析; 京津冀地区

doi: 10.13928/j.cnki.wrahe.2021.06.002

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: TV213.4

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2021)06-0012-09



听语音  
聊科研

## Characteristics of climate change in Beijing-Tianjin-Hebei region in recent 60 years

XU Chengcheng<sup>1,2</sup>, LU Chuiyu<sup>2</sup>, WANG Jianhua<sup>2</sup>

(1. School of Earth and Environment, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, Anhui, China;

2. State Key Laboratory of Water Cycle Simulation and Regulation, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

**Abstract:** As an important economic circle in China, the ecological environment of Beijing-Tianjin-Hebei has received extensive attention. And it is particularly important for climate change research. This paper uses linear regression, Mann-Kendall test, wavelet function and other methods to analyze the characteristics of temperature and rainfall in the Beijing-Tianjin-Hebei region, and compares the characteristics of climate change in the mountainous and plains of the Beijing-Tianjin-Hebei region. The results show that the rainfall in the Beijing-Tianjin-Hebei region has shown a decreasing trend in the past 60 years, and the temperature has shown an overall upward trend, and there is a certain periodicity. Compared with the plain area, the mountain area is reduced by about 100 mm. Compared with the average temperature for many years, the temperature in the mountain area is about 5 °C lower than that in the plain area. This indicates that urban development in the past 60 years is closely related to the decrease in

收稿日期: 2020-11-28

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0401404, 2016YFC0401300); 国家杰出青年科学基金(51625904); 黑龙江省应用技术与开发计

(C)划项目(2020YFC05005) Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

作者简介: 许成成(1994—), 女, 博士研究生, 主要从事水文水资源研究。E-mail: 1647203047@qq.com

rainfall and the increase in temperature. The impact of activities on climate change is relatively obvious, providing a reference for later research on the impact of urbanization and human activities on climate change.

**Keywords:** climate change; trend analysis; Mann-Kendall test; wavelet analysis; Beijing-Tianjin-Hebei region

## 0 引言

在全球气候变暖的大环境下,世界各国相关研究领域的学者都投身于气候变化研究<sup>[1]</sup>。在21世纪,全球降水和极端降水呈上升趋势<sup>[2-3]</sup>;在北半球中纬度以及高纬度地带,降水极端事件发生概率不断增加,部分地区降水强度也显著增加<sup>[4]</sup>。许多学者已投入资金研究极端气候<sup>[5-8]</sup>。为了应对不同的地理位置,不同的温度区域,选择的方法也不同<sup>[9-10]</sup>。在方法的应用中,模型模拟分析和预测受到许多研究人员的青睐。牛纪苹等<sup>[11]</sup>利用模型对石羊河流域的气候变化做了相关模拟与预测,其研究结果对该流域农作物种植具有一定指导意义,但模型预测的可靠性仍值得进一步探究;周锁铨等<sup>[12]</sup>基于遥感资料进行了地表水循环模拟,并做了检验分析,但误差仍旧存在。对于北半球的夏季,当降雨量显著增加时,采用有针对性的统计方法是合适的,但是对于分析全年的多个季节,此方法有很多缺点。许多学者在数学统计中使用频率发生率来解决这个问题<sup>[13-14]</sup>。邵月红等<sup>[13]</sup>基于海河流域,统计分析了流域降雨极值频率分布特征,对该区防洪应对等问题具有一定帮助。丁凯熙等<sup>[14]</sup>通过统计北京地区的汛期降雨频率,得出了城市化对汛期降雨具有较大影响。1970年,Mann-Kendall方法被引入水文学和水资源领域<sup>[15]</sup>,其中包括季节分析和非季节分析。邹磊等<sup>[15]</sup>通过对近58a的气象数据,分析了海河流域降雨变化特征,并使用Mann-Kendall方法进行了检验。对于气候的周期性变化,小波分析非常流行<sup>[16]</sup>。WANG等<sup>[17]</sup>基于关中盆地气候变化数据,通过小波分析获得了关中盆地气候变化的周期性特征。对于京津冀地区,毕彦杰等<sup>[18]</sup>分析该区域的潜在蒸散发分布规律,研究得出相对湿度与其相关性最大,苗正伟等<sup>[19]</sup>分析了京津冀地区近55a的气候变化特征,于占江等<sup>[20]</sup>研究了京津冀地区气候变化对土壤湿度的影响,他们的研究为后续学者对京津冀地区的气候研究提供了指导方向,但在气候变化特征和趋势方面分析存在不足,例如未考虑数据连续性。基于客观存在的数据缺失问题,本文采用克里格插值法对京津冀地区近60a来的数据进行了改进,获得了连续的日变化数据。利用上面提供的连续数据,本文使用非季节性的Mann-Kendall方法

对收集的降雨数据进行数学处理,以分析北京过去60a的降雨和温度变化特征,并进行趋势分析在理论上可进一步完善气候变化影响的评价体系和方法,而且对进一步研究京津冀地区城市化进展对气候的影响、依据气候变化规律科学应对极端天气、保证京津冀地区社会经济可持续发展、维持水资源开发平衡等方面具有重要参考价值。

## 1 研究区概况

京津冀地区是由北京市、天津市和河北省三个地区组成的中国核心经济圈,西面与太行山脉相接,东面连接渤海湾,成为区域最终汇水口。由于太行山脉位于京津冀西面,使得本区域西北地形相对较高,从西至东,地势逐渐降低,东面地势较为平坦,经济发展集中<sup>[22]</sup>。

近60a来,京津冀地区经济发展迅速,经济发展对生态环境造成的影响也日趋严重,用水问题已成为当前最受关注的问题之一,京津冀地区水资源承载力衰变严重。气候变化作为影响水资源的一个重要因素,在京津冀地区也越来越受重视,明确气候变化规律是研究水资源的一个重要途径。

## 2 数据与分析方法

### 2.1 数据

所用资料包括气象数据和地理信息数据,其中气象数据利用1960—2019年60a的京津冀水文资料,通过克里格插值方法得到京津冀197个站点60年连续完整的降雨、气温基础数据,以此为基础对京津冀降雨、气温做了相关趋势分析并利用Mann-Kendall检验法来检测长期变化趋势。

### 2.2 数据质量控制

**Kriging插值。**Kriging插值又称空间局部插值法,在一定区域范围内,对研究变量进行无偏估计,其理论基础是基于变异函数,Kriging插值方法适合范围限定,并且所要进行插值的数据具有一定相关性,通过已知数据的特点,对未知数据进行拓展估计<sup>[23]</sup>。

**泰森多边形。**泰森多边形因为其独特的空间分析能力,在水文领域受到广泛运用。其特点是在一个任意多边形内任何位置离这个多边形所控制的水文站点距离最近,与邻近的任意多边形所控制的水文站



图 1 研究区行政区划

Fig. 1 Administrative division of the study area

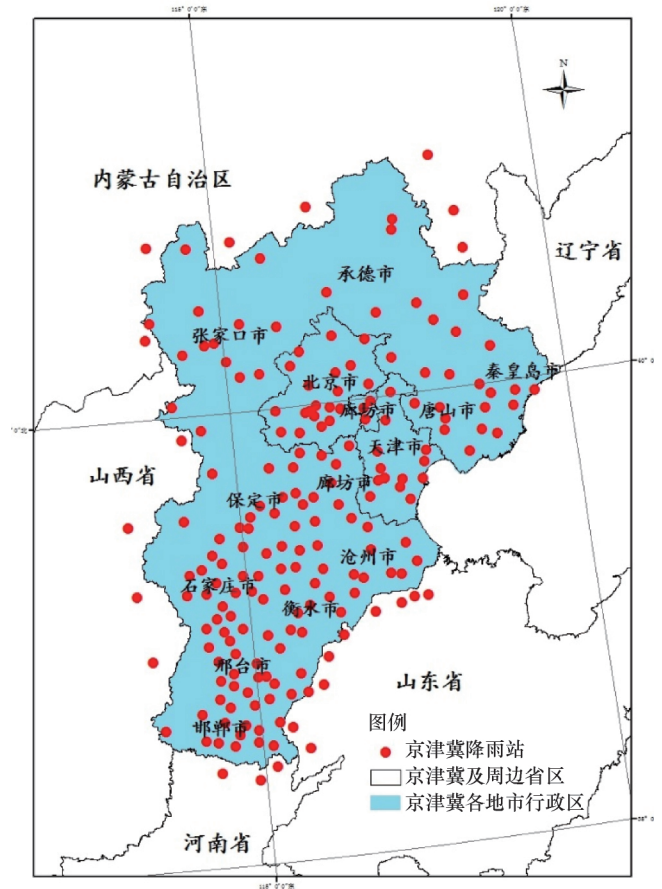


图 2 京津冀地区气象站点分布

Fig. 2 Distribution of meteorological stations in the Beijing-Tianjin-Hebei region

点远<sup>[24]</sup>。

### 2.3 计算方法

水文分析的过程包括确定性数据分析和随机性数据分析, 其中确定性数据分析, 本文包括变化趋势分析和周期性分析。对于气候变化趋势, 本文利用 Mann-Kendall 检验法分析京津冀 60 a 降水量和气温系列的整体变化趋势; 对于周期性分析, 本文利用小波函数, 对数据进行变换进而实现对研究区的周期性分析。

在面对长时间序列数据处理时, Mann-Kendall 检验无需数据样本符合特定分布, 对于大量异常数据, 其最终检验结果不受干扰。由于水文、气象数据属于非正态分布数据, 利用 Mann-Kendall 方法分析降雨、气温等要素变化趋势, 计算方便合理。在双边的趋势检验中, 在给定的置信水平上, 对于统计量, 大于 0 时是上升趋势; 小于 0 时是下降趋势。统计量的绝对值在大于等于 1.28、1.64 和 2.32 时, 分别表示通过了信度 90%、95%、99% 的显著性检验<sup>[25-26]</sup>

流域的降水和气温由于受到气候、地形和下垫面

等多种因素的影响, 其实际的时间序列中隐含的周期分量往往并非是确定性的周期振动, 而是一种瞬时变化的准周期, 因此传统的谐波分析方法并不能真实反映时间序列的频谱结构及其随时间的变化, 而小波函数是指具有震荡特性, 在远离原点处函数值迅速衰减到零的一类函数, 具有时、频同时局部化的优点<sup>[27-28]</sup>。

### 3 结果分析

降雨、气温数据由表 1 可知, 部分站点的数据存在缺失情况, 但总缺失量占比小于 5%, 本文统计了 1960—2019 年 197 个站点的缺测数据, 考虑时间跨度长, 站点数量多, 将研究区自 1978 年以来单日缺测雨量站超过 36% 的列出, 其余缺测数据仅在数量上进行统计, 如表 1 所列。对于有缺失数据的站点, 通过克里金插值方法得到, 最后利用泰森多边形划分的每个站点控制的区域如图 3 所示, 每个区域均包含 3 个完整序列的站点, 且不同区域内气象站点代表性

较强, 因此, 数据可以用来分析京津冀地区降雨、气温变化情况。

表 1 降雨数据完整度说明

Table 1 Completeness of the precipitation data

单日站点 缺失数 数据数目	1978— 2012 年缺 失天总数	缺失站 点比例	缺失时间
[0, 10)	994	0.00	—
[10, 20)	818	0.05	—
[20, 30)	567	0.10	—
[30, 40)	370	0.15	—
[40, 50)	168	0.20	—
[50, 60)	89	0.25	—
[60, 70)	66	0.30	—
[70, 80)	26	0.36	1978-06-13, 1978-07-14, 1979-06-04, 1979-07-07, 1980-07-31, 1983-06-24, 1984-06-20, 1986-06-13, 1988-06-27, 1988-07-08, 1988-07-30, 1997-06-02, 1993—1994-06-05, 1994-06-28, 1995-08-31, 2001-06-11—12, 2002-08-30, 2006-06-19
[80, 90)	15	0.41	1979-06-01, 1997-06-10, 1980-07-03, 1982-07-10, 1983—1984-06-04, 1984-07-19, 1984-07-31, 1987-06-25, 1988-08-31, 2004-06-04, 2008-08-31
[90, 100)	11	0.46	1978-06-05, 1983-06-11, 1990-06-17, 1990-08-18, 1992-06-11, 1995-07-31, 2002-07-30, 2003-07-31, 2009-08-31
[100, 197)	4	0.51	1982-08-31, 1983-06-16, 1993-06-21, 2002-06-30

### 3.1 降雨-温度变化特征分析

#### 3.1.1 降雨变化分析

对京津冀地区各年(1960—2019年)降雨量进行统计, 分析结果如图4所示。从图4中可知, 京津冀地区年降雨量总体呈显著减少趋势, 而且年际之间存在一定波动, 比如1960年代, 1980年代, 其中上个世纪波动较大, 2000年至2019年波动较小。在1960—1970年, 降雨量最大年份为1964年, 年降雨量为876.48 mm, 降雨量最小年份为1965年, 年降雨量为412.25 mm; 在1970—1980年, 降雨量最大年份为1973年, 年降雨量为755.95 mm, 降雨量最小年份为1972年, 年降雨量为422.28 mm; 在1980—1990年, 降雨量最大年份为1985年, 年降雨量为609.81 mm, 降雨量最小年份为1980年, 年降雨量为449.54 mm; 在1990—2000年, 降雨量最大年份为1990年, 年降雨量为698.31 mm, 降雨量最

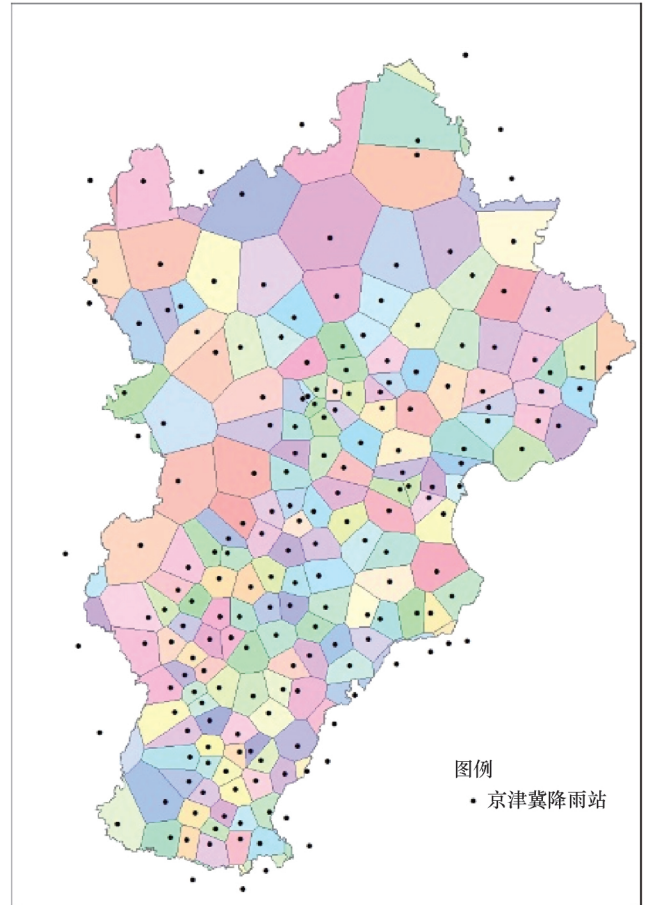


图3 京津冀地区泰森多边形划分

Fig. 3 Tyson polygon division of the Beijing-Tianjin-Hebei region

小年份为1997年, 年降雨量为391.15 mm; 20世纪初, 降雨最大年份为2003年, 年降雨量为580.44 mm, 降雨量最小年份为2002年, 年降雨量为403.73 mm。年际降雨量最大值与最小值比值为2.24。

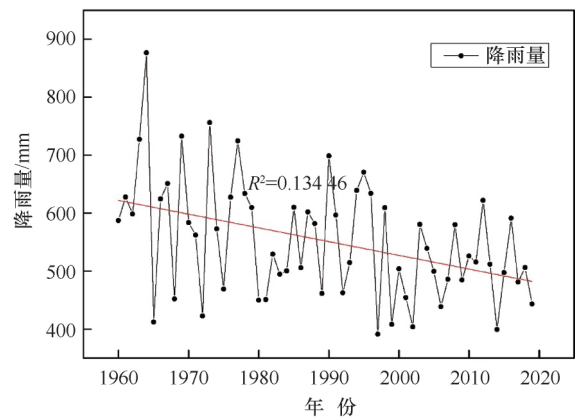


图4 京津冀地区年降雨量变化趋势线

Fig. 4 The trend line of annual rainfall in the Beijing-Tianjin-Hebei region

为了更准确地判断降雨量的年际变化趋势, 采用 Mann-Kendall 检验法来检测降雨的长期变化趋势(见表 2、图 5)。在降雨分析中, 计算结果为 -2.48, 绝对值大于 2.32, 通过了置信度 99% 的显著性检验, 表明京津冀地区降雨呈显著减少趋势。

表 2 Mann-Kendall 检验方法统计

Table 2 Mann-Kendall test method statistics table

置信水平	置信度 / %	显著水平	趋势线
-2.48	99	0.05	显著

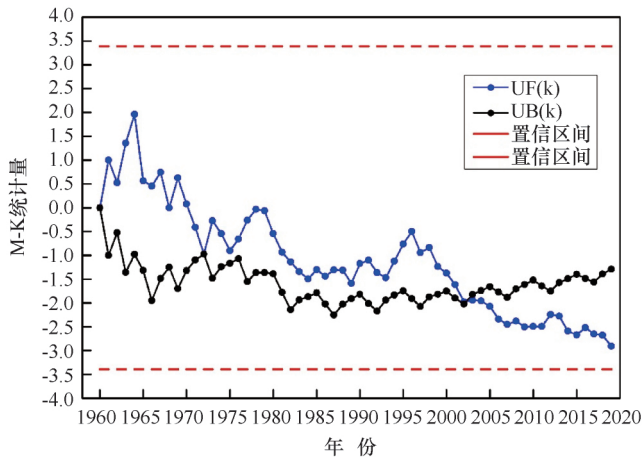


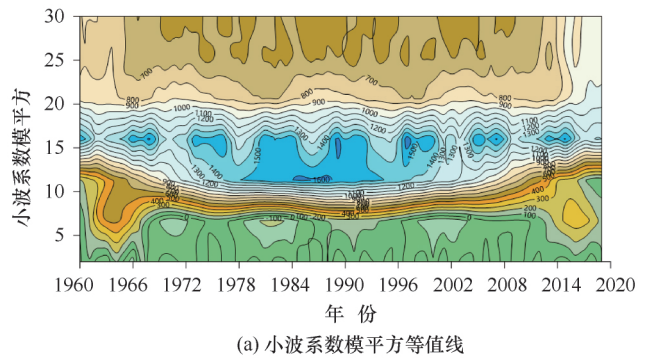
图 5 京津冀地区年降雨量 Mann-Kendall 检验  
Fig. 5 Mann-Kendall test of annual rainfall in the Beijing-Tianjin-Hebei region

根据图 6 京津冀地区近 60 a 降水量小波变换系数模平方时频分布可以看到不同时段各时间尺度的强弱变化分布, 其年际变化(小于 10 a)和年代际变化(大于 10 a)尺度局部化特征明显。年际变化周期以 5~6a 时间尺度信号最强, 主要发生在 1962—1967 年、1970—1975 年、1984—1990 年以及 1996—2002 年, 振荡中心分别为 1963 年、1974 年、1990 年以及 2012 年。另外, 5~6 a 周期在 2002—2012 年期间信号较强。年代际变化周期以 10~15a 左右为主, 主要发生在 1972—2012 年, 振荡中心为 1997 年。

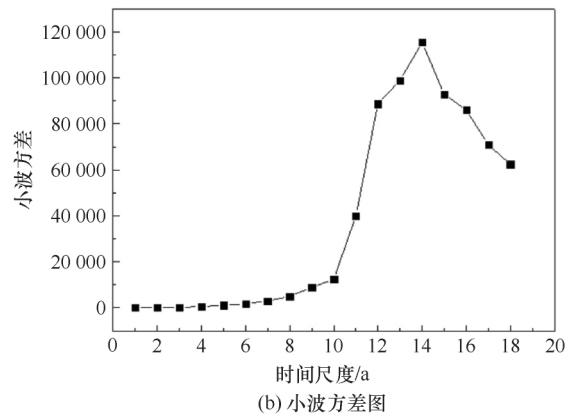
### 3.1.2 气温变化分析

对京津冀地区各年(1960—2019 年)气温数据进行统计, 分析结果如图 7 所示。从图 7 中可知, 京津冀地区年平均气温总体呈显著上升趋势, 而且年际之间存在一定波动, 统计年内最高平均气温 11.76 °C (1998 年), 最低平均气温 9.12 °C (1969 年)。

为了更准确地判断平均气温的年际变化趋势, 采用 Mann-Kendall 检验法来检测平均气温的长期变化趋势(见表 3、图 8)。在平均气温分析中, 置信水平



(a) 小波系数模平方等值线



(b) 小波方差图

图 6 京津冀地区 1960—2019 年降雨小波变换分析  
Fig. 6 Wavelet transform analysis of rainfall in the Beijing-Tianjin-Hebei region from 1960 to 2019

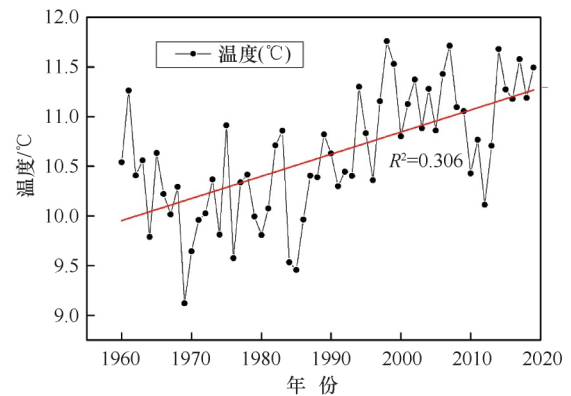


图 7 京津冀地区年平均气温变化趋势线  
Fig. 7 Trend line of annual average temperature in the Beijing-Tianjin-Hebei region

值计算结果为 4.07, 绝对值大于 2.32, 通过了置信度 99% 的显著性检验, 表明京津冀地区气温呈显著上升趋势。

表 3 Mann-Kendall 检验方法统计

Table 3 Mann-Kendall test method statistics table

置信水平	置信度 / %	显著水平	趋势线
4.07	99	0.05	显著

由图 9 京津冀地区近 60 a 平均气温小波变换系

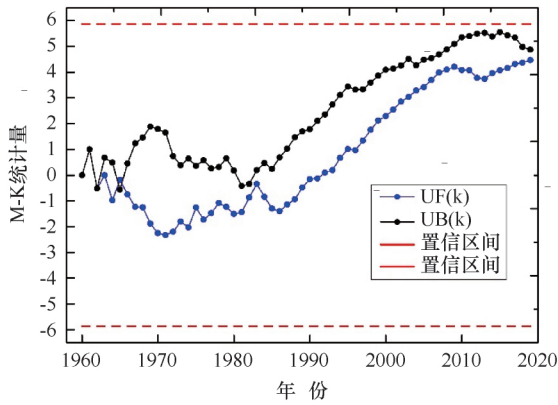
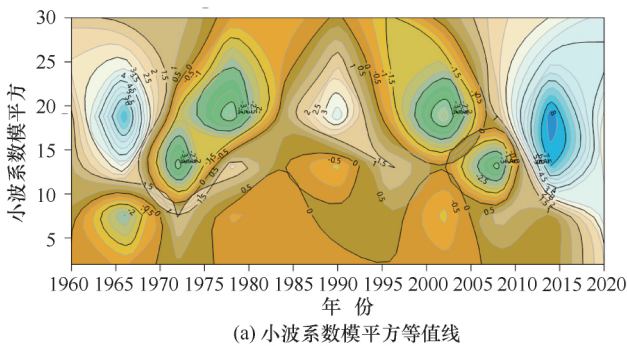


图 8 京津冀地区年平均气温 Mann-Kendall 检验  
Fig. 8 Mann-Kendall test of annual average temperature in Beijing-Tianjin-Hebei region

数模平方时频分布可以得到不同时段各时间尺度的强弱变化分布, 京津冀年平均气温系列中的周期信号强度较弱, 只有 1963—1970 年的 7~10 a 尺度以及 2005—2015 年的 10~15 a 尺度较为明显。



(a) 小波系数模平方等值线

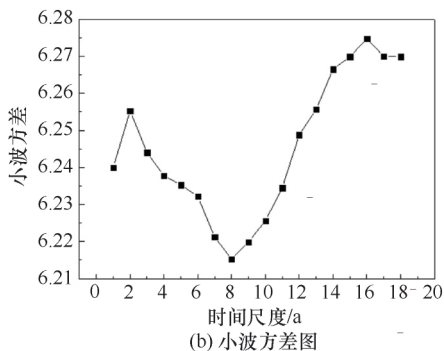


图 9 京津冀地区 1960—2019 年气温小波变换分析  
Fig. 9 Wavelet transform analysis of temperature in the Beijing-Tianjin-Hebei region from 1960 to 2019

### 3.1.3 山区平原对比分析

对研究区 60 年降雨量平均值分析, 随着时间推移, 山区与平原降雨量总体呈现小幅下降趋势, 但在 1962—1964 年、1969 年、1976 年、1993—1995 年、2011—2012 年降雨量存在明显增多现象, 山区多年

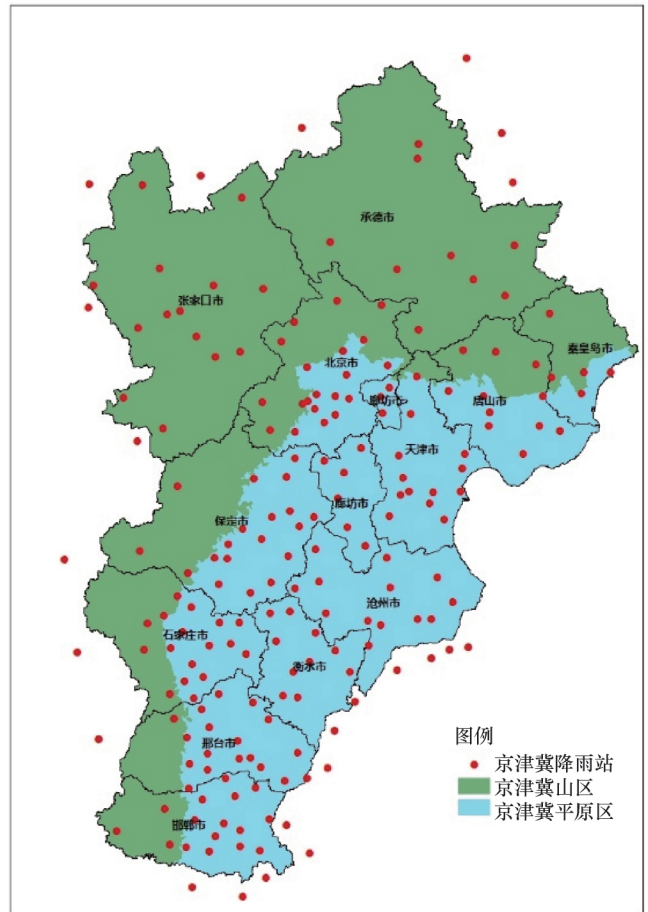


图 10 京津冀山区平原区域划分  
Fig. 10 Regional division of the Beijing-Tianjin-Hebei mountainous plains

平均降雨量较山前平原低约 100 mm, 如图 11 所示。

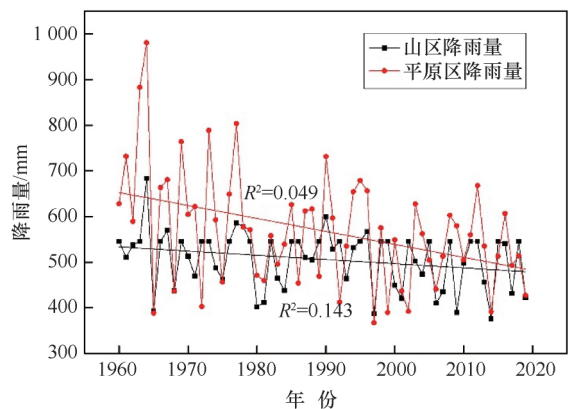


图 11 山区-平原多年平均降雨量对比  
Fig. 11 Comparison of annual average rainfall between mountain and plain

对研究区 60 年气温数据平均值分析, 随着时间推移, 山区与平原温度总体呈现上升趋势, 但在 1962—1964 年、1969 年、1976 年、1980 年、1985—

1985年、2008—2012年气温存在下降现象,山区多年平均气温较山前平原低约 $5^{\circ}\text{C}$ ,如图12所示。

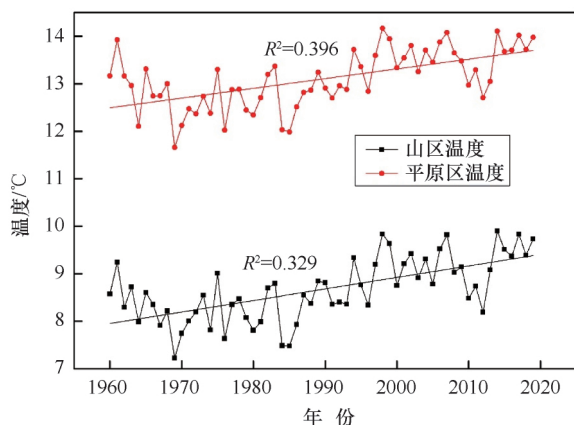


图12 山区-平原多年平均气温对比

Fig. 12 Comparison of multi-year average temperature between mountain and plain

### 3.2 讨论

(1) 京津冀地区气候不仅受到温度带大范围的气候条件控制,还受到区域范围的人类活动影响。近60 a来,京津冀地区作为中国北部一个重要经济圈,工业、农业不断发展,城市化进程加快,人类居住条件不断提高,相应的对物质装备的需求不断提高,重工业、轻工业齐头并进,从京津冀地区平原区与山区气候对比发现,平原地区更加城市化,绿化程度远低于山区,因而气温、降水存在显著差异。从京津冀周期性分析看,近些年,气温虽然仍在升高,但相比于早期1960—2000年增长速度有所减缓,这与京津冀地区近几十年以来,广泛开展生态建设和生态修复工程,持续实施了“太行山绿化”“三北防护林”以及退耕还林等措施离不开。

(2) 京津冀地区降雨时间主要集中在夏季,夏季降雨量的减少与近些年来东亚夏季风减弱密切相关,很多学者从风、湿度、水汽输送,上升运动等方面来研究北半球降水量减少问题。在大气环流中,夏季由最先的径向环流变为纬向环流,华北气流上升运动减少,在蒙古地区高空出现降温状况,高空急流位置不断向南移动,最终使得华北地区受夏季季风影响较弱,降温使得华北对流层气压不断增高,接近地面的低压天气过程因而减少,结果使得京津冀地区降雨量出现减少趋势。

(3) 气温、降雨的变化存在很大不确定性,本文利用Mann-Kendall、小波函数等方法来分析京津冀地区的降雨、气温变化特征,理论依据较为可靠,但此类方法在计算中仍然存在一定误差;本文统计了

1960—2019年197个站点的气象数据,时间跨度长,站点数量多,由于客观存在的数据缺测,使得气温、降雨的趋势分析结果存在一定的不确定性,虽然本文所使用的数据缺失约在5%,可以进行整体趋势的分析、检验,但与实际降雨、气温数据存在误差,分析结果的准确性仍然有待进一步探究。

## 4 结论

(1) 京津冀地区年降雨量总体呈显著减少趋势,而且年际之间存在一定波动,比如1960—1970年,1980—1990年,波动较大,2000年至2019年波动较小;京津冀地区年平均气温总体呈显著上升趋势,而且年际之间存在一定波动,统计年内最高平均气温 $11.76^{\circ}\text{C}$ ,出现在1998年,最低平均气温 $9.12^{\circ}\text{C}$ ,出现在1969年。

(2) 京津冀地区山区平原气候存在较大差异,山区降雨多年平均值较平原地区少100 mm左右,山区气温多年平均值较平原地区低 $5^{\circ}\text{C}$ 左右。基于总体趋势上,山区与平原地区在降雨、温度年际波动上为正相关,即降雨增加年份气温随之减少。

### 参考文献(References):

- [1] CHI X, YIN Z, WANG X, et al. Spatiotemporal variations of precipitation extremes of China during the past 50 years (1960–2009) [J]. *Theoretical and applied climatology*, 2016, 124(3–4): 555–564.
- [2] HUO R, LI L, CHEN H, et al. Characteristics of precipitation extremes in Europe from CMIP5: Changes from the last millennium to the end of the 21st century [J]. *Geophysical Research Abstracts*, 2019, 21(1): 1.
- [3] 周莉, 兰明才, 蔡荣辉, 等. 21世纪前期长江中下游流域极端降水预估及不确定性分析[J]. *气象学报*, 2018, 76(1): 47–61. ZHOU Li, LAN Mingcai, CAI Ronghui, et al. Estimation and uncertainty analysis of extreme precipitation in the middle and lower reaches of the Yangtze River in the early 21st century [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2018, 76(1): 47–61.
- [4] LIBANDA B, NGONGA C. Projection of frequency and intensity of extreme precipitation in Zambia: A CMIP5 Study [J]. *Climate Research*, 2018, 76(59): 59–72.
- [5] DENG C, PISANI B, HERNANDEZ H, et al. Assessing the impact of climate change on water resources in a semi-arid area in central Mexico using a SWAT model [J]. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 2019, 72(2): 1–19.
- [6] COLLINS M. Extreme weather and climate events [J]. *Weather*, 2010, 59(5): 138–138.
- [7] GYEMEN, BLENKINSOP, FOWLER, H. et al. Simulating multimodal seasonality in extreme daily precipitation occurrence [J].

- Journal of Hydrology, 2016, 537(13): 117-129.
- [8] WU H, QIAN H. Innovative trend analysis of annual and seasonal rainfall and extreme values in Shaanxi, China, since the 1950s [J]. International Journal of Climatology, 2017, 37(5): 2582-2592.
- [9] ZANDER S, BROUSSE O, ESAU I, et al. Hyperlocal mapping of urban air temperature using remote sensing and crowdsourced weather data [J]. Remote Sensing of Environment, 2020, 242: 111791.
- [10] 夏军, 刘春葵, 刘志雨, 等. 气候变化对中国东部季风区水循环及水资源影响与适应对策 [J]. 自然杂志, 2016, 38(3): 167-176.  
XIA Jun, LIU Chunzhen, LIU Zhiyu, et al. Impacts of climate change on the water cycle and water resources in the monsoon region of eastern China and adaptation strategies [J]. Nature Magazine, 2016, 38(3): 167-176.
- [11] 牛纪苹, 粟晓玲. 石羊河流域参考作物蒸发蒸腾量对气候变化的响应模拟及预测 [J]. 水利学报, 2014, 45(3): 286-295.  
NIU Jiping, SU Xiaoling. Simulation and prediction of the response of reference crop evapotranspiration to climate change in Shiyang River Basin [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(3): 286-295.
- [12] 周锁铨, 薛根元, 张翠, 等. 基于遥感资料的流域地表水循环模拟及检验 [C]. 中国气象学会年会. 2004.  
ZHOU Suoquan, XUE Genyuan, ZHANG Cui, et al. Simulation and verification of basin surface water cycle based on remote sensing data [C]. Chinese Meteorological Society Annual Meeting. 2004.
- [13] 邵月红, 刘玲, 刘俊杰等. 海河流域近 60a 降水极值的频率分析及时空分布特征 [J]. 大气科学学报, 2020, 43(2): 381-391.  
SHAO Yuehong, LIU Ling, LIU Junjie, et al. Frequency analysis and temporal and spatial distribution characteristics of precipitation extremes in the Haihe River Basin in the past 60 years [J]. Acta Atmospheric Sciences, 2020, 43(2): 381-391.
- [14] 丁凯熙, 张利平, 宋晓猛, 等. 北京地区汛期降雨时空演变特征及城市化影响研究 [J]. 地理科学进展, 2019, 38(12): 1917-1932.  
DING Kaixi, ZHANG Liping, SONG Xiaomeng, et al. Study on the characteristics of temporal and spatial evolution of rainfall during flood season and the impact of urbanization in Beijing [J]. Progress in Geographical Sciences, 2019, 38(12): 1917-1932.
- [15] KENDALL M G. Rank correlation methods [J]. British Journal of Psychology, 1990, 25(1): 86-91.
- [16] 邹磊, 夏军, 张印, 等. 海河流域降水时空演变特征及其驱动力分析 [J]. 水资源保护, 2021, 37(1): 53-60.  
ZOU Lei, XIA Jun, ZHANG Yin, et al. The characteristics of temporal and spatial evolution of precipitation in the Haihe River Basin and its driving force analysis [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(1): 53-60.
- [17] WANG W, ZHANG Z, DUAN L. Response of the groundwater system in the Guanzhong Basin (central China) to climate change and human activities [J]. Hydrogeology Journal, 2018, 26(5): 1429-1441.
- [18] 毕彦杰, 赵晶, 赵勇, 等. 京津冀地区潜在蒸散量时空演变特征及归因分析 [J]. 农业工程学报, 2020, 36(5): 130-140.  
BI Yanjie, ZHAO Jing, ZHAO Yong, et al. Spatial and temporal evolution characteristics and attribution analysis of potential evapotranspiration in the Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(5): 130-140.
- [19] 苗正伟, 徐利岗, 韩会玲. 京津冀地区近 55 年气候演变特征分析 [J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(3): 125-134.  
MIAO Zhengwei, XU Ligang, HAN Huiling. Analysis on the characteristics of climate evolution in the Beijing-Tianjin-Hebei region in the past 55 years [J]. South-to-North Water Diversion and Water Conservancy Science and Technology, 2018, 16(3): 125-134.
- [20] 于占江, 杨鹏. 近 50 年京津冀气候变化及其对土壤水分的影响 [J]. 贵州农业科学, 2019, 47(2): 144-149.  
YU Zhanjiang, YANG Peng. Climate change in Beijing-Tianjin-Hebei region in the past 50 years and its impact on soil moisture [J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2019, 47(2): 144-149.
- [21] HE Guohua, ZHAO Yong, WANG Jianhua, et al. The effects of urban water cycle on energy consumption in Beijing, China [J]. Journal of Geographical Sciences, 2019, 29(6): 959-970.
- [22] 韩静, 李琰, 吕静. 京津冀区域大气协同治理应用对策研究 [J]. 农村经济与科技, 2019, 30(10): 4-5.  
HAN Jing, LI Yan, LYU Jing. Research on Application Countermeasures of Atmospheric Cooperative Governance in Beijing-Tianjin-Hebei Region [J]. Rural Economy and Technology, 2019, 30(10): 4-5.
- [23] ABBASZADEH, MOSTAFA, DEGHAN, et al. Numerical study of three-dimensional Turing patterns using a meshless method based on moving Kriging element free Galerkin (EFG) approach [J]. Computers and Mathematics with Applications: An International Journal, 2016, 72(3): 427-454.
- [24] 李丽, 王加虎, 陈明霞, 等. 中国洪水预报系统中动态考虑雨量站列表与权重研究 [J]. 水电能源科学, 2020, 38(9): 63-66.  
LI Li, WANG Jiahu, CHEN Mingxia, et al. Research on the list and weights of dynamically considered rainfall stations in China's flood forecasting system [J]. Hydropower Energy Science, 2020, 38(9): 63-66.
- [25] 王俊骄, 张雅旋, 孙晓燕. 综合 R/S 法和 Mann-Kendall 法分析杭州市 60 年小雨降水日趋势变化 [J]. 科技通报, 2019, 35(12): 41-45.  
WANG Junjiao, ZHANG Yani, SUN Xiaoyan. Analysis of the daily trend of light rain and precipitation in Hangzhou City in 60 years with integrated R/S and Mann-Kendall methods [J]. Bulletin of Science and Technology, 2019, 35(12): 41-45.
- [26] 孙宇, 姜鑫. 基于 Mann-Kendall 法分析 1951-2010 年淮河流域降水趋势变化 [J]. 科技通报, 2019, 35(12): 41-45.  
SUN Yu, JIANG Xin. Study on the percentage of trend component in a hydrological time series based on Mann-Kendall method [J]. Jour-



许成成, 等//京津冀地区近 60 年来气候变化特征分析

nal of Natural Resources ,2011 ,26( 9) : 1585-1591.

[27] 王文圣, 丁晶, 向红莲. 小波分析在水文学中的应用研究及展望[J]. 水科学进展, 2002, 13( 4) : 515-520.

WANG Wensheng, DING Jing, XIANG Honglian. The application research and prospect of wavelet analysis in hydrology [J]. Progress in Water Science , 2002 , 13( 4) : 515-520.

[28] 张华, 李佳, 万毅. 基于离差系数和小波分析的取水量异常值

研究[J]. 水利水电技术, 2020, 51( 10) : 35-40.

ZHANG Hua , LI Jia , WAN Yi. Study on the abnormal value of water withdrawal based on dispersion coefficient and wavelet analysis [J]. Water Resources and Hydropower Technology , 2020 , 51 ( 10) : 35-40.

(责任编辑 康健)