

京津冀地区 1957—2017 年气温变化时空格局

者 萌¹, 张雪芹², 沈鹏珂³, 侯文娟²

(1.天津师范大学 教育学部, 天津 300387; 2.中国科学院 地理科学与资源研究所 陆地表层格局与模拟重点实验室, 北京 100101; 3.北京大学 城市与环境学院 地表过程分析与模拟教育部重点实验室, 北京 100871)

摘 要:京津冀地区是我国政治、经济及文化发展的核心区域,气温是影响该地区生态环境和社会经济可持续发展的关键气候要素。基于京津冀地区及周边 52 个气象台站 1957—2017 年逐月气温数据,采用 ANUSPLIN 空间插值、线性回归、Mann-Kendall 检验、滑动 T 检验、Morlet 小波及 R/S 等方法,系统分析了京津冀地区 1957—2017 年气温变化的时空格局。结果表明:京津冀地区近 61 a 来气温呈显著上升趋势,且具有明显的年代际周期性振荡。年均最低气温升温速率($0.43^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$)分别为平均气温、最高气温的 1.3 倍、1.7 倍,其首次升温突变时间(1975 年)较平均气温、最高气温分别提前 6, 14 a。四季气温均显著升高,其中冬季升温对全年气温上升贡献最大。本区气温空间上自东南向西北逐渐降低,多呈升温趋势,升温速率东、西高,南、北低。气温 Hurst 指数大于 0.5,其中最低气温及冬季气温 Hurst 指数均接近 1,本区将持续升温,且低气温的升高仍是未来区域变暖的主要力量。

关键词:气温; 突变检验; 小波分析; Hurst 指数; 京津冀地区

中图分类号:P467

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2020)05-0194-08

Spatial-temporal Pattern of Temperature Variation in Beijing-Tianjin-Hebei Region Over the Period 1957—2017

ZHE Meng¹, ZHANG Xueqin², SHEN Pengke³, HOU Wenjuan²

(1.Faculty of Education, Tianjin Normal University, Tianjin 300387, China;

2.Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Institute of Geographic Sciences and

Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 3.Key Laboratory for Earth Surface Processes of the Ministry of Education, College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: The Beijing-Tianjin-Hebei Region is the political, economic and cultural center of China. Temperature is the key meteorological element that affects the sustainable development of ecological environment and social economy in this region. Based on the monthly temperature data from 52 meteorological stations in and around Beijing-Tianjin-Hebei Region from 1957 to 2017, the spatial-temporal variability of temperature in this region was analyzed by utilizing ANUSPLIN spatial interpolation, linear regression, Mann-Kendall test, moving T-test, Morlet wavelet, and R/S method. The results revealed that temperature in Beijing-Tianjin-Hebei Region had increased significantly in recent 61 years, showing distinct inter-decadal circles. The warming rate of annual minimum temperature ($0.43^{\circ}\text{C}/\text{decade}$) was 1.3 times and 1.7 times of the level of annual average temperature and maximum temperature, respectively. The mutation of annual minimum temperature was firstly detected in 1975, which was 14 and 22 years earlier than that of annual average temperature and maximum temperature, respectively. Seasonal temperatures showed evident upward trends, and the average temperature rise in winter contributed the most to the annual temperature rise. Temperatures overall declined gradually from southeast to northwest in terms of the spatial distribution. Warming trends were observed in most areas, with high rates in the eastern and western regions, and low rates in the southern and northern regions. The Hurst indexes of annual and seasonal temperatures were all greater than 0.5, and those

收稿日期:2019-05-23

修回日期:2019-11-13

资助项目:国家自然科学基金(41807168);中国科学院战略性先导科技专项(A类)(XDA23090302)

第一作者:者萌(1989—),女(回族),河北秦皇岛人,讲师,博士,主要从事气候变化及其影响研究。E-mail:zhem.14b@igsrr.ac.cn

of minimum temperature and winter temperature were close to 1. It is therefore reasonable to infer that a persistently rising trend of temperature will prevail in the future, and the increase of low temperature will continue to be the main contributor to climate warming in this region.

Keywords: temperature; mutation test; wavelet analysis; Hurst index; Beijing-Tianjin-Hebei Region

全球气候系统正在经历着以变暖为主要特征的显著变化。据 IPCC 第五次报告^[1], 1951—2012 年, 全球平均地表温度以 $0.12\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 的速率升高。全球气温持续攀升, 过去 5 a 成为有记录以来的最热时段^[2], 且未来 4 a 或将异常温暖^[3]。中国升温率高于全球平均水平, 变化特征具有明显的区域差异^[4]。气温为最基本的气候要素, 其变化影响着区域生态环境和社会经济系统的诸多领域^[5-6], 准确掌握其变化规律是应对气候变化行动的基础和前提^[4], 也是构建环境友好型社会的保障。随着京津冀一体化协同发展这一国家重大战略的不断深入, 以及雄安新区的设立与规划发展, 气候变暖及其生态环境响应给该区可持续发展带来的掣肘和挑战日渐显现^[7]。京津冀地区雾霾严重程度达全国之最^[8-9], 水资源脆弱性远高于全国平均水平^[10]。如何从这些生态困境中突围, 建设天蓝地绿水净的“美丽中国”, 离不开对气温这一关键要素的深入探析。近年来, 关于京津冀地区的气候变化研究充分证实了本区气温升高、降水量减少, 导致干旱问题突出的事实^[11-12]。这些研究多直接利用气象台站观测资料分析区域气象要素变化特征, 然而本区涵盖高原、山地及平原等多种地貌类型, 亟需更为准确的时空尺度数据分析和最新气象资料补充。此外, 研究者集中关注本区平均气温, 但最低和最高气温的变化对陆地生态环境有着更为重要的作用^[13]。因此, 本文基于京津冀地区及周边 52 个气象台站近 61 a 平均气温、最低气温及最高气温数据进行空间插值, 提取插值结果的面平均值。在此基础上, 采用线性回归、累积距平、Mann-Kendall 检验、滑动 T 检验、Morlet 小波及 R/S 方法, 系统分析京津冀地区气温的变化趋势、突变性、周期性、空间格局及趋势持续性, 以期深化对本区气温变化的科学认识, 为区域可持续发展和“美丽中国”建设中的各项决策和计划提供气候背景和依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

京津冀地区 ($113^{\circ}04'\text{E}$ — $119^{\circ}53'\text{E}$, $36^{\circ}01'\text{N}$ — $42^{\circ}37'\text{N}$) 位于我国华北平原北端, 地貌单元自西北向东南依次为坝上高原、燕山—太行山区、河北平原, 地势呈半环状逐级下降(图 1)。属于温带大陆性季风气候, 夏季

高温多雨、冬季寒冷干燥。本区包含北京、天津两个直辖市及河北省 11 个地级市, 面积约 21.8 万 km^2 , 为我国三大城市群之一, 在经济发展中的地位举足轻重^[14]。本区主要自然植被为落叶阔叶林、灌木及草本植被, 主要粮食作物为小麦和玉米, 经济作物包括棉花、果林及油料作物等^[15]。

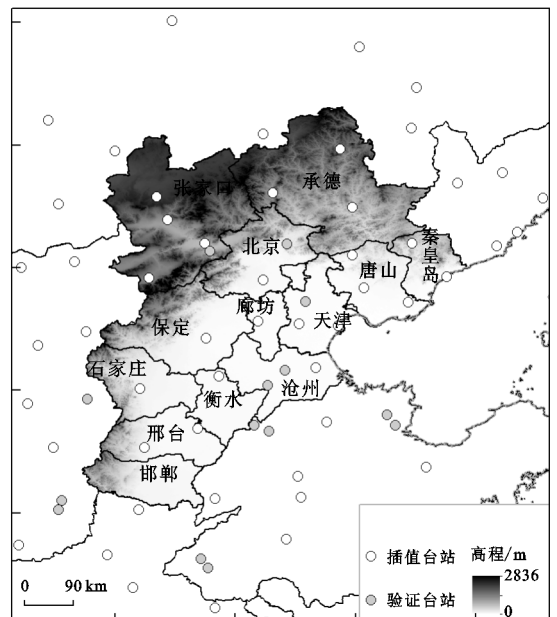


图 1 京津冀地区地形及气象台站分布

1.2 数据来源与处理

本文基础数据来自中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>)提供的《中国地面气候资料月值数据集》, 该套资料经过严格的完整性、要素一致性和极值等检验, 质量良好。选取 1957—2017 年京津冀地区及周边省份资料较完整的 52 个气象台站(图 1)气温观测数据, 应用 ANUSPLIN^[16] 模型进行空间插值, 获得分辨率为 $0.05^{\circ}\times 0.05^{\circ}$ 的空间气温数据。以插值空间范围内观测时长相对较短或缺测较多的 14 个气象台站作为验证台站, 计算得到平均气温、最低气温及最高气温实测值与插值模拟结果的线性回归决定系数分别为 0.999, 0.998 及 0.999, 说明 ANUSPLIN 方法在本区气温数据的空间插值应用效果良好。利用 ArcGIS 10.2 空间分析功能, 以京津冀区域范围掩膜提取气温空间插值结果, 获得本区 1957—2017 年逐月和四季(春季 3—5 月、夏季 6—8 月、秋季 9—11 月、冬季 12 月—翌年 2 月)气温的空间分布, 以面平均值表征区域气温情况, 分析结果更为准确。

1.3 分析方法

本文选取 ANUSPLIN 模型进行京津冀地区气温数据的空间插值。该模型是基于薄盘平滑样条函数插值理论,利用 FORTRAN 语言开发的空間异相关曲面拟合模型。其插值过程允许引入多元协变量,能充分考虑高程、坡度等因子对气候要素的影响,兼顾插值曲面的平滑度和精确度^[17],已被广泛应用于气象数据的插值分析中。

利用线性回归法描述京津冀地区气温的变化趋势。该方法所得趋势系数和变化速率分别表示其变化趋势的性质和幅度,原理见文献^[18]。利用 ArcGIS 10.2 软件,结合 ANUSPLIN 插值,对栅格点气温进行线性回归分析,获得区域气温变化的空间格局。

综合 Mann-Kendall (M-K) 检验^[19]、滑动 T 检验^[19]及累积距平法^[18],分析本区气温突变。M-K 检验为非参数突变检验法,可明确序列的突变开始时间和区域。滑动 T 检验通过考察两个子序列均值是否超过显著性水平来判断突变,为避免子序列长度单一造成突变点失真,本文选取 5, 10, 15 共 3 个子序列长度。累积距平曲线可显示序列长期显著趋势、持续性变化及突变发生时间。

采用 Morlet 小波分析本区气温变化的周期规律。Morlet 小波在时域、频域上具局部辨识力,反映尺度变化过程中波动能量的分布。利用小波方差图可提取多结构时间尺度的主要振荡周期及其强弱程度,详见文献^[18]。

基于 R/S (重标极差) 计算的 Hurst 指数 (H) 判断本区气温变化趋势的持续性。给定时间序列 $\xi(1), \xi(2), \dots$ 。对于任意整数 $T \geq 1$, 定义以下序列^[20]:

均值序列:

$$\xi_T = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \xi(t) \tag{1}$$

累计离差:

$$X(t, T) = \sum_{i=1}^t (\xi(i) - \xi_T), t = 1, 2, \dots, T \tag{2}$$

极差:

$$R(T) = \max_{1 \leq t \leq T} X(t, T) - \min_{1 \leq t \leq T} X(t, T) \tag{3}$$

标准差:

$$S(T) = \left\{ \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T [\xi(t) - \xi_T]^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \tag{4}$$

定义 $R/S = R(T)/S(T)$, 若 $R/S \propto T^H$, 则说明该时间序列存在 Hurst 现象。 H 值能定量描述时间序列信息的长期依赖性,揭示要素在时间序列上是否

存在趋势性成分。 $0.5 < H < 1$, 序列具持续性, 未来与过去变化趋势一致, 且 H 越接近 1, 持续性越强; $H = 0.5$, 序列具随机性, 未来与过去趋势无关; $0 < H < 0.5$, 序列具反持续性, 未来与过去趋势相反, 且 H 越接近 0, 反持续性越强。

2 结果与分析

2.1 气温变化趋势

1957—2017 年, 京津冀地区多年平均气温、最低气温、最高气温分别为 9.2, 3.9, 15.3 $^{\circ}\text{C}$, 三者均呈显著 ($p < 0.01$) 升温趋势 (图 2)。其中, 平均气温升温速率为 0.34 $^{\circ}\text{C}/10 \text{ a}$, 明显高于本区周边的河南 (0.19 $^{\circ}\text{C}/10 \text{ a}$)^[21]、辽宁 (0.20 $^{\circ}\text{C}/10 \text{ a}$)^[22]、山东 (0.20 $^{\circ}\text{C}/10 \text{ a}$)^[23] 及山西 (0.30 $^{\circ}\text{C}/10 \text{ a}$)^[24], 低于内蒙古中部地区 (0.40 $^{\circ}\text{C}/10 \text{ a}$)^[25]。最低气温升温率高达 0.43 $^{\circ}\text{C}/10 \text{ a}$, 约为最高气温 (0.26 $^{\circ}\text{C}/10 \text{ a}$) 的 1.7 倍, 即夜间气温较白天气温升高幅度更大, 导致气温日较差减小。平均气温和最低气温的变化规律大致相似, 分别以 1957—1993, 1957—1988 年为偏冷阶段, 期间气温多为负距平, 累积距平呈下降趋势, 谷值出现在 1957 年, 分别为 7.4, 1.9 $^{\circ}\text{C}$; 偏暖阶段分别为 1994—2017 年, 1989—2017 年, 期间气温多为正距平, 累积距平呈上升趋势, 并于 1998 年达到峰值, 分别为 10.6, 5.7 $^{\circ}\text{C}$, 该年份同样是辽宁^[22]、山西^[24]及内蒙古^[25]等周边省份有观测记录以来最暖的一年。最高气温年际波动相对较强, 距平值及累积距平曲线斜率正负更替频繁, 1992 年为其偏冷、偏暖阶段的转折年, 谷值 (13.6 $^{\circ}\text{C}$) 和峰值 (16.8 $^{\circ}\text{C}$) 则分别出现在 1969 年、2017 年。京津冀地区于 20 世纪 90 年代大幅升温, 平均气温、最低气温及最高气温相比 80 年代分别升高约 0.8, 1.0 及 0.6 $^{\circ}\text{C}$ (表 1), 符合 IPCC 报告^[1]指出的全球变暖幅度自 20 世纪 90 年代以来明显加大。

四季气温与全年气温变化趋势相同, 且均以最低气温升高最为明显。其中, 冬季最低气温、平均气温分别以高达 0.58, 0.44 $^{\circ}\text{C}/10 \text{ a}$ 的速度显著 ($p < 0.01$) 上升, 春季升温速率次之, 夏季升温最缓; 最高气温升温率自高至低依次为春季 > 冬季 > 夏季 > 秋季。从年代际尺度来看, 夏、秋、冬季大幅增温发生在 20 世纪 90 年代 (表 1), 春季大幅增温则发生在 21 世纪初。2011 年以来, 冬季气温相比上一年代平均值有明显降低, 最冷与最暖季气温差异缩小的趋势有所缓和, 这可能与我国“气代煤”、“电代煤”及“风电供暖”等冬季清洁取暖工程的持续推动有一定关系^[9]。

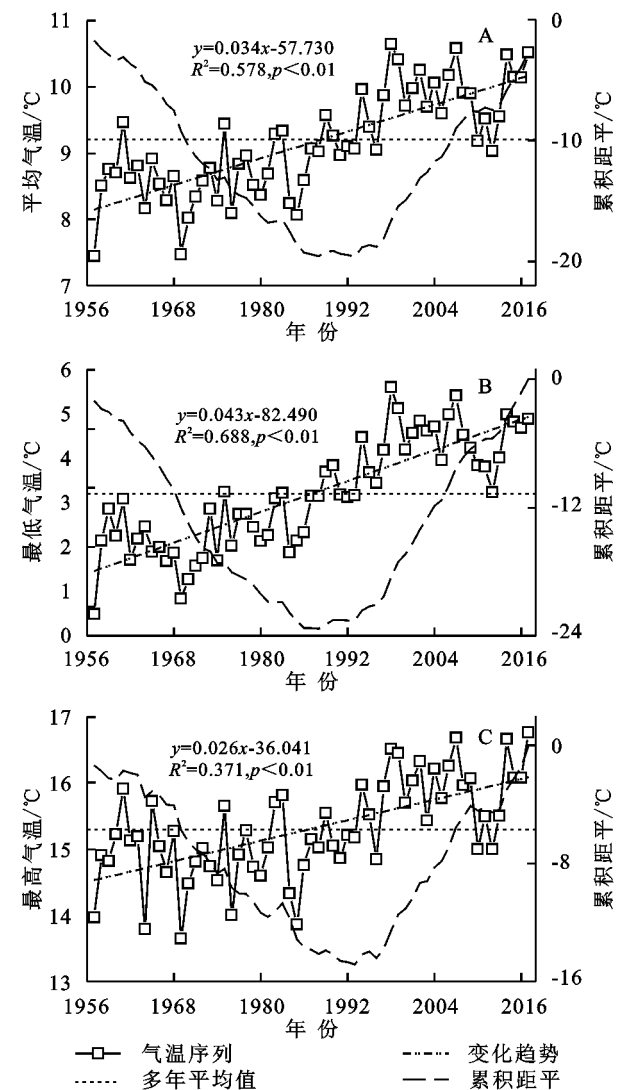


图 2 1957—2017 年京津冀地区气温序列变化、线性趋势及累积距平

2.2 气温突变检验

累积距平曲线显示近 61 a 京津冀地区气温呈先

降后升的“V”字型趋势,年最低气温以 1988 年为转折点最先转暖(图 2B),年平均气温及最高气温的转暖则发生在 1993 年(图 2A,C)。根据 M-K 检验,京津冀地区年平均气温、最高气温的正序列 UF 曲线与反序列 UB 曲线分别在 1990 年、1994 年相交于 0.05 显著性水平范围内(图 3A,C),为可能突变点;最低气温 UF,UB 曲线在 1989 年出现交点(图 3B),但其位于信度线之外,需进一步检验其是否为突变年份。选取 5,10,15 a 滑动步长进行滑动 *T* 检验(图 4),结果表明全年最低气温最早(1970s 中期)发生转暖突变,且突变次数最多;平均气温和最高气温突变分别开始于 1980s 初和 1980s 末。此外,由 M-K 检验及累积距平检测到的突变年份,均通过了滑动 *T* 检验 0.01 显著性水平。

综合 M-K 检验、累积距平及滑动 *T* 检验结果,规定每一气候阶段时间不少于 5 a,并选择时段内的最强突变年。梁珑腾等^[26]研究表明,我国北方最低气温、平均气温、最高气温突变依次变晚,这在京津冀地区的气温突变中有很好的体现。1957 年以来,京津冀地区年平均最低气温于 1975 年前后发生首次突变,突变后多年平均最低气温升高 0.5 °C。1989 年、1997 年,最低气温和平均气温均出现突变,突变后多年平均值均提升 0.7 °C。最高气温于 1994 年发生突变,随后其多年平均值升高 1.0 °C。四季气温突变按发生先后顺序,分别为冬、秋、春及夏季,同样均以最低气温突变发生最早、次数最多,突变后升温幅度最大(表 2)。除秋季最高气温在 1987 年转暖突变后,于 2009 年发生转冷突变外,其他季节气温突变前后均呈上升趋势。

表 1 1957—2017 年京津冀地区气温年代际平均值

气温/°C	1957—1969 年					1970—1979 年				
	年	春	夏	秋	冬	年	春	夏	秋	冬
平均气温	8.5	9.6	22.3	9.0	−6.9	8.6	9.6	22.0	9.2	−6.4
最低气温	3.0	3.3	17.2	3.6	−12.1	3.2	3.3	17.0	3.8	−11.4
最高气温	14.9	16.5	27.9	15.5	−0.2	14.8	16.2	27.4	15.6	0.1

气温/°C	1980—1989 年					1990—1999 年				
	年	春	夏	秋	冬	年	春	夏	秋	冬
平均气温	8.8	10.2	22.3	9.4	−6.1	9.6	10.6	22.9	9.8	−4.9
最低气温	3.5	3.9	17.4	4.1	−11.2	4.6	4.6	18.0	4.9	−9.7
最高气温	15.0	16.6	27.8	15.6	−0.1	15.6	16.7	28.1	16.1	1.3

气温/°C	2000—2009 年					2010—2017 年				
	年	春	夏	秋	冬	年	春	夏	秋	冬
平均气温	10.0	11.2	23.1	10.2	−4.8	9.8	11.6	23.1	10.1	−5.0
最低气温	5.0	5.6	18.4	5.2	−9.3	4.7	5.2	18.4	5.3	−9.9
最高气温	16.0	16.7	28.1	16.1	1.3	15.8	17.9	28.7	16.0	0.8

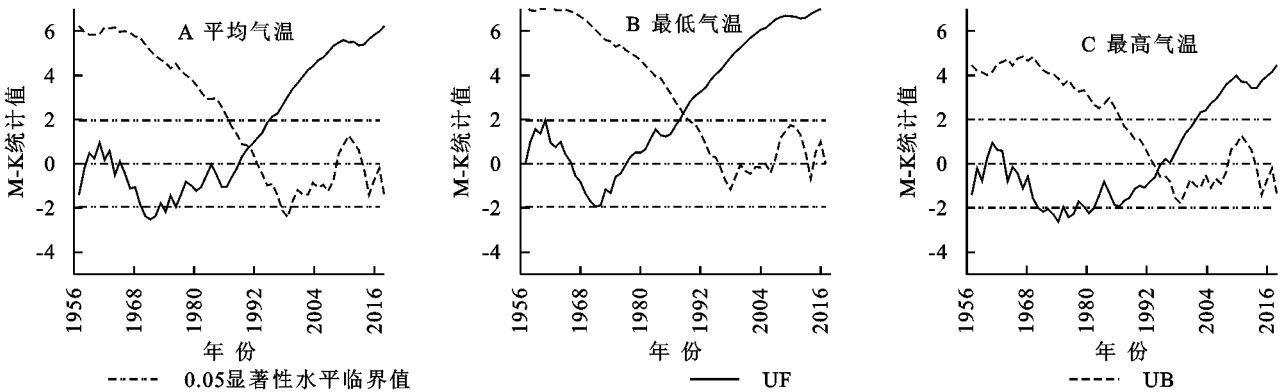


图 3 1957—2017 年京津冀地区气温 M-K 统计曲线

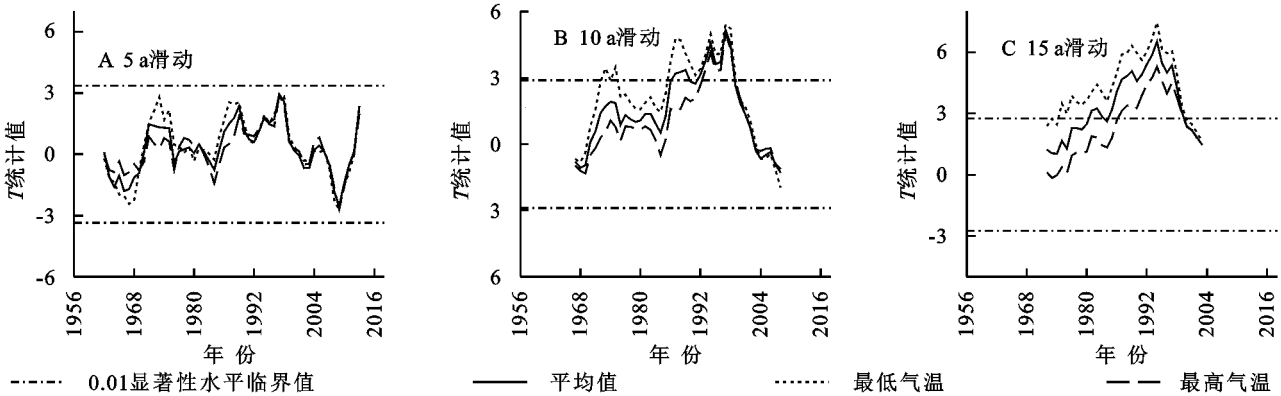


图 4 1957—2017 年京津冀地区气温滑动 T 统计量曲线

表 2 京津冀地区四季气温突变结果

气温	季节	累积 距平	M-K 检验	滑动 T 检验			综合分析 结果
				$n=5$	$n=10$	$n=15$	
平均气温	春	1996	1996	1997	1994,1997	1989,1994,1998	1997(+1.5℃)
	夏	1996	1993	—	1994,1997	1994,1997	1997(+1.0℃)
	秋	1986	1988	—	—	1994	1987(+0.6℃),1994(+0.5℃)
	冬	1985	1986	1986	1986,1988	1986,1988	1986(+1.7℃)
最低气温	春	1996	—	1997	1997	1981,1989,1997	1981(+0.8℃),1997(+1.3℃)
	夏	1994	1990	—	1994,1997	1988,1994,1997	1994(+1.2℃)
	秋	1986	1989	—	—	1987,1994	1987(+0.7℃),1994(+0.8℃)
	冬	1985	1986	1986	1986,1988	1977,1986,1988	1977(+0.5℃),1986(+1.9℃)
最高气温	春	1996	1998	—	1994,1997	1994,1998,2000	1997(+1.4℃)
	夏	1994	1996	—	1997	1994,1997,1999	1997(+1.1℃)
	秋	1986	1988	2009	—	—	1987(+0.7℃),2009(−0.3℃)
	冬	1985	1987	—	1986,1988	1986	1986(+1.2℃)

注：—为未检测到突变；括号内为突变后多年气温相比前一时段的变化值，—为降低，+为升高。

2.3 气温周期分析

近 61 a 来,京津冀地区气温的相位变化周期具有多尺度、多层次的结构特征。其年际尺度周期不具全时域性;3 类气温均存在 6 a 左右的振荡周期,但该周期仅在 20 世纪 70 年代至 20 世纪初较明显(图 5);平均气温和最高气温还存在 8 a 左右的振荡周期,该周期逐渐转向高频(14 a)。气温变化的年代际尺度周期冷暖交替较清晰:平均气温和最低气温均以 20 a 为第一主周期,该周期在小波方差图中峰值最明显,在小波等值线图中振荡较强烈,并具全时域性,气

温在该尺度上经历了近 5 组的“负—正”相位(对应“冷—暖”)交替变化;第二、三主周期均分别为 14,28 a。最高气温以 28 a 为第一主周期,经历了近 4 组“冷—暖”交替变化;第二主周期为 14 a。14 a 周期均由 8 a 左右周期转变形成,振荡强度逐渐增加。四季气温的显著相位变化均为年代际尺度,3 类气温振荡周期较一致,春、夏、秋、冬季分别以 27,26,14,21 a 为第一主周期(图略)。

本区气温的小波等值线均未闭合,在年代际、年际尺度上分别处于负、正相位,可推测本区未来较长

时间仍将处于偏暖期,而近两年则处于偏暖期的相对较冷阶段。本区气温在 28 a 周期上振荡强烈、清晰,

但本研究时长为 61 a,因而该尺度周期有待于更长时间序列的进一步证实。

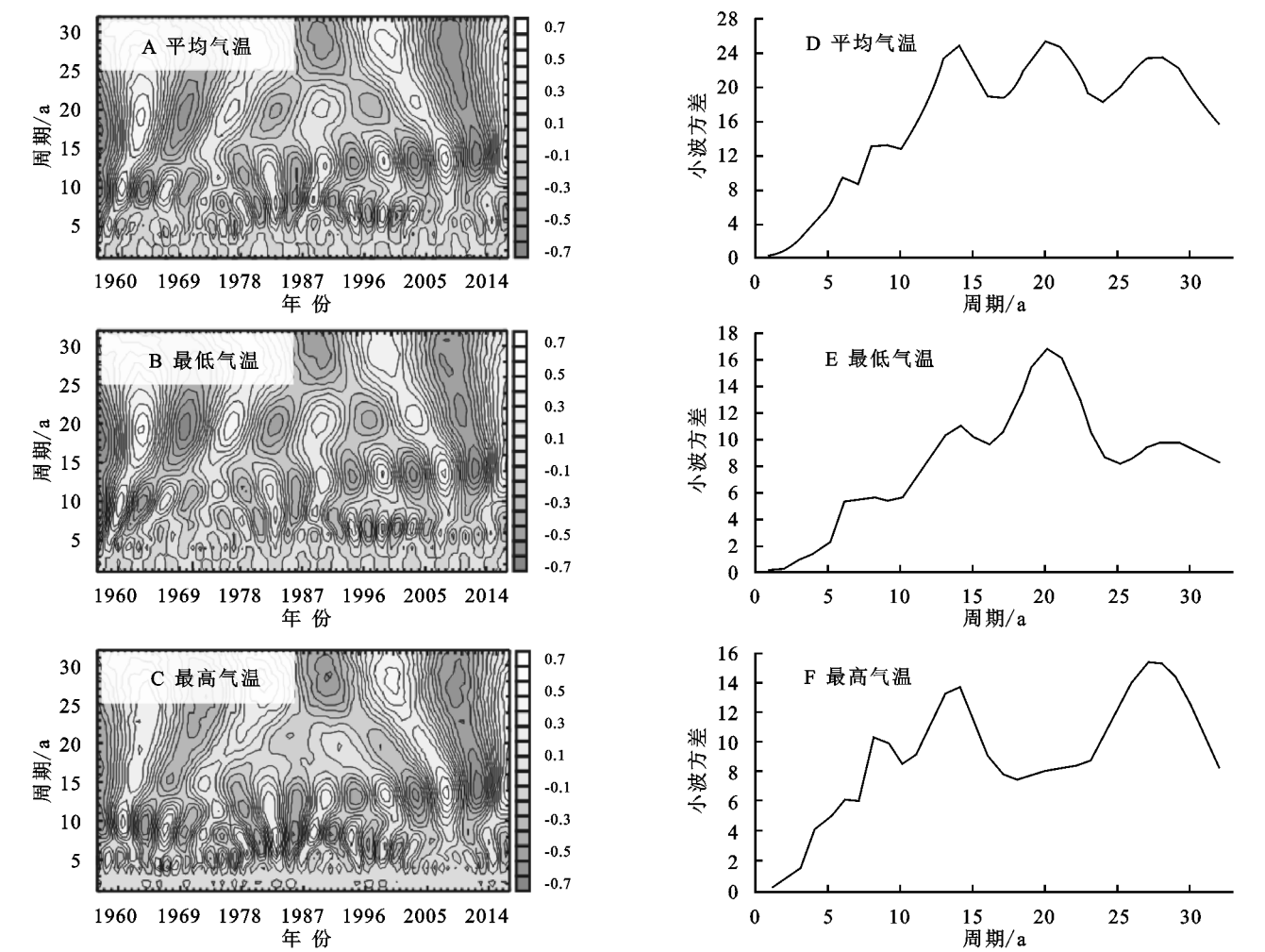


图 5 1957—2017 年京津冀地区气温小波实部等值线和小波方差

2.4 气温时空变化空间格局

京津冀地区近 61 a 平均气温、最低气温和最高气温的空间分布均呈现自东南向西北逐渐降低的趋势(图 6A—C),且内陆地区气温高于沿海,平原地区气温高于山区、丘陵。3 类气温的最高值均出现在河北省南端的太行山中段东麓,最低值出现在冀北高原区的围场和张北地区。最高气温极值相差最大(18.5℃)、平均气温次之(17.1℃)、最低气温最小(16.2℃)。京津冀地区 13 市中,衡水气温最高、其次为邯郸,张家口气温最低、其次为承德(表 3)。四季气温空间分布格局与全年相似(图略),并同样以最高气温的空间极值相差最大(春季 21.5℃、夏季 20.7℃、秋季 20.4℃、冬季 19.3℃)。

1957—2017 年,京津冀地区 3 类气温均呈上升趋势(图 6D—F),升温速率呈现随海拔升高而增加的特点。同时,在海拔较低,人口、工业相对集聚的北京、天津及唐山等地区升温较快,出现城市热岛“升温加速带”,最终形成升温率东、西高,南、北低的空间格局。本区全年最低气温升温率普遍较高,57.8% 的区域全年最低气温升温率超过 0.4℃/10 a;平均气温

次之,73.4% 的区域升温率集中在 0.20~0.40℃/10 a。最低气温及平均气温升温率在区域中西部的太行山北段最高,在东北部植被覆盖度较高的燕山丘陵区最低。最高气温升温率普遍相对较低,本区中心及南部山前平原区约 67.6% 的区域升温率低于 0.3℃/10 a,这部分气温变化多不显著。行政区划上,张家口平均气温、最高气温,以及石家庄最低气温升温率居 13 市之首;衡水平均气温、承德及邢台最低气温上升最为缓慢(表 3)。四季气温变化率空间分布规律与全年较一致(图略),冬季平均气温、最低气温升温率普遍较高,分别约 51.0%,97.5% 的区域升温率高于 0.50℃/10 a;最高气温则在春季升温率相对较高,51.9% 的区域升温率处于 0.3~0.5℃/10 a。

2.5 气温变化持续性

京津冀地区全年及四季的平均气温、最低气温及最高气温均呈现出明显的 Hurst 现象,说明本区气温变化含有较强的趋势性成分,其时间序列具有长程相关性。3 类气温 H 值均 >0.5 (表 4),其未来变化趋势将与过去变化一致,即持续升温。其中,全年及

四季最低气温的 H 值最高、均 >0.9 ,平均气温次之,最高气温最低,未来升温趋势的持续性强度依次为最低气温 $>$ 平均气温 $>$ 最高气温。四季当中,冬季 3 类

气温 H 值最高,该季节气温持续显著上升的可能性将高于其他季节。可见,低气温的升高仍是未来京津冀地区气候变暖的最主要力量。

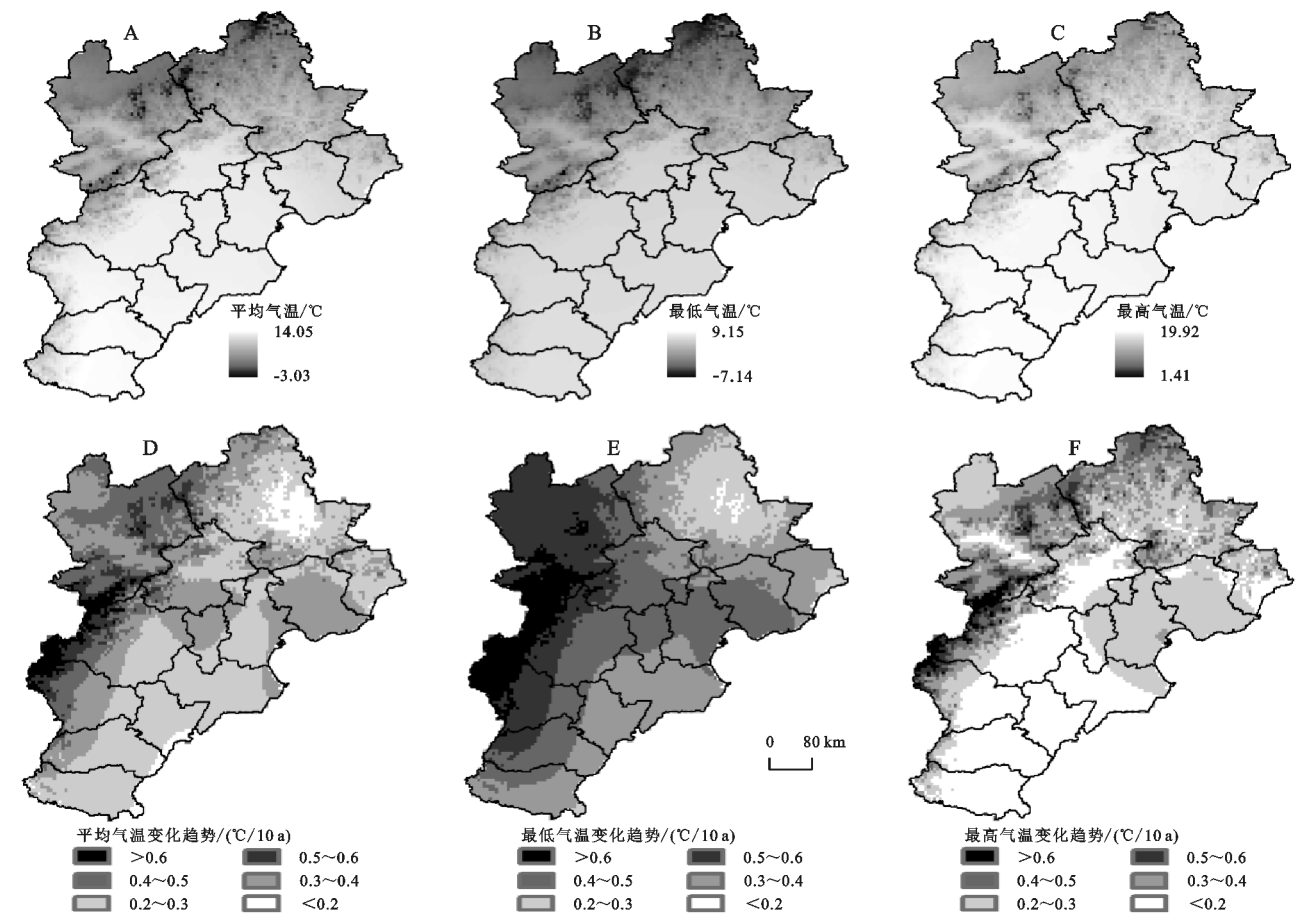


图 6 1957—2017 年京津冀地区气温多年变化空间分布格局

表 3 1957—2017 年京津冀地区 13 市多年平均气温及其变化速率

城市	平均气温		最低气温		最高气温	
	均值/℃	变化速率/(℃/10 a)	均值/℃	变化速率/(℃/10 a)	均值/℃	变化速率/(℃/10 a)
北京	9.9	0.34 **	4.4	0.44 **	16.1	0.25 **
天津	12.3	0.30 **	7.3	0.41 **	17.7	0.26 **
石家庄	12.0	0.42 **	6.8	0.57 **	18.0	0.25 **
保定	10.8	0.40 **	5.6	0.53 **	17.0	0.27 **
唐山	11.1	0.32 **	6.2	0.40 **	16.9	0.24 **
秦皇岛	9.3	0.29 **	4.4	0.33 **	15.1	0.24 **
廊坊	12.4	0.31 **	7.3	0.42 **	18.3	0.21 **
邢台	13.0	0.28 **	8.0	0.45 **	19.0	0.09 *
邯郸	12.9	0.25 **	8.0	0.38 **	18.8	0.10 *
衡水	13.1	0.22 **	8.2	0.37 **	19.2	0.08
沧州	12.8	0.26 **	8.0	0.37 **	18.6	0.16 **
张家口	4.4	0.44 **	−1.2	0.56 **	10.8	0.36 **
承德	5.0	0.30 **	−0.5	0.31 **	11.6	0.34 **

注: * 为通过 0.05 的显著性水平检验, ** 为通过 0.01 的显著性水平检验。

表 4 京津冀地区气温 Hurst 指数

气温	全年	春季	夏季	秋季	冬季
平均气温	0.946	0.807	0.835	0.833	0.934
最低气温	0.998	0.937	0.951	0.920	0.968
最高气温	0.821	0.680	0.783	0.630	0.828

3 结论与讨论

近 61 a 来,京津冀地区对全球变暖的响应敏感,气温呈显著上升趋势,且最低气温的升温贡献最为突出。年最低气温、平均气温及最高气温先后于 1975 年、1989 年、1994 年发生首次转暖突变,四季中冬季气温突变最

早、夏季最晚。气温变化具有明显的年代际尺度周期,年际尺度的振荡周期不具全时域性。气温空间分布自东南向西北逐渐降低,且内陆高于沿海,平原高于山区、丘陵。各地气温多呈上升趋势,升温速率东、西高,南、北低。行政区划上,衡水气温最高、平均气温上升最缓,张家口气温最低、平均气温升温最快。气温变化呈现明显的 Hurst 现象,未来本区将持续升温,且最低气温和冬季气温的升温持续性最强。

《Nature》刊文^[27]指出,全球气候将在未来 20 a 中加速升温,京津冀地区气温 Hurst 指示了气候变暖的强持续性。在此背景下,准确掌握气温变化规律,是当前雾霾综合治理、水土污染防治等各项生态环境保护决策制定和落实的关键,助推山清水秀、环境优美的“美丽中国”建设。京津冀地区为我国重要的政治、经济、文化中心,同时作为我国城市化水平最高的地区之一,其热岛效应显著,进而加剧了地区空气污染,亟待深入探讨本区城市热岛效应。气候变化是气候系统内部变率,以及温室气体、土地利用变化(含城市化)等外强迫共同作用的结果^[28],如何定量描述各要素对京津冀地区气温变化的贡献,并在此基础上进行准确的气候预测,将是本区气候研究的重点。此外,未来工作还将系统分析京津冀地区降水、湿度及风速等气候指标,并运用风寒指数、温湿指数、着衣指数等指数研究本区气候舒适度,助力 2022 年北京冬奥会。

参考文献:

- [1] Ciais P, Sabine C, Bala G, et al. Climate change 2013: 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, 2013.
- [2] Marcelino V. Reactor shutdown, record heat and Indonesia protests[J]. Nature, 2019,566(7743):158-159.
- [3] Sévellec F, Drijfhout S S. A novel probabilistic forecast system predicting anomalously warm 2018—2022 reinforcing the long-term global warming trend[J]. Nature Communications, 2018,9(1):1-12.
- [4] 高云.巴黎气候变化大会后中国的气候变化应对形势[J].气候变化研究进展,2017,13(1):89-94.
- [5] 吴绍洪,罗勇,王浩,等.中国气候变化影响与适应:态势和展望[J].科学通报,2016,61(10):1042-1054.
- [6] Wolfram S, Maximilian A. The cost of a warming climate[J]. Nature, 2018,557(7706):498-499.
- [7] 李鹏飞,刘文军,赵昕奕.京津冀地区近 50 年气温、降水与潜在蒸散量变化分析[J].干旱区资源与环境,2015,29(3):137-143.
- [8] 刘海猛,方创琳,黄解军,等.京津冀城市群大气污染的时空特征与影响因素解析[J].地理学报,2018,73(1):177-191.
- [9] 王跃思.我国大气灰霾污染现状、治理对策建议与未来展望:王跃思研究员访谈[J].中国科学院院刊,2017,32(3):219-227.
- [10] 刘瑜洁,刘俊国,赵旭,等.京津冀水资源脆弱性评价[J].水土保持通报,2016,36(3):211-218.
- [11] 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.
- [12] Wei W, Wang B, Zhang K, et al. Temporal trends and spatial patterns of temperature and its extremes over the Beijing-Tianjin sand source region (1960—2014), China[J]. Advances in Meteorology, 2018,2018(1):1-26.
- [13] 孙风华,杨修群,路爽,等.东北地区平均、最高、最低气温时空变化特征及对比分析[J].气象科学,2006,26(2):43-49.
- [14] 张学波,于伟,张亚利,等.京津冀地区经济增长的时空分异与影响因素[J].地理学报,2018,73(10):1985-2000.
- [15] 韩宇平,李新生,黄会平,等.京津冀作物水足迹时空分布特征及影响因子分析[J].南水北调与水利科技,2018,16(4):26-34.
- [16] Hutchinson M F. ANUSPLIN version 4.3 user guide [M]. Canberra: The Australia National University, Center for Resource and Environment Studies, 2004.
- [17] 刘志红, Tim R, Li L,等.基于 ANUSPLIN 的时间序列气象要素空间插值[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2008,73(10):227-234.
- [18] 魏凤英.现代气候统计诊断与预测技术[M].北京:气象出版社,2007:99-104.
- [19] 符淙斌,王强.气候突变的定义和检测方法[J].大气科学,1992,16(4):482-493.
- [20] 曾晟轩,顾娟,贺缠生.西北农牧交错带中部气候变化特征及其持续性[J].水土保持研究,2018,25(4):356-364.
- [21] 史佳良,王秀茹,李淑芳,等.近 50 年来河南省气温和降水时空变化特征分析[J].水土保持研究,2017,24(3):151-156.
- [22] 薛双奕,杨东,马露.辽宁省近 56 年气温变化研究[J].中国农学通报,2015,31(29):221-226.
- [23] 陈永金,刘加珍,张平,等.山东省近 40 a 气候变化及其与相关因子的关系[J].人民黄河,2016,38(6):81-87.
- [24] 杨军,李高磊,丛建辉,等.近 60 年山西省气候变化趋势及其对粮食作物产量的影响[J].资源开发与市场,2018,34(10):1389-1396.
- [25] 马梓策,于红博,张巧凤,等.内蒙古地区 1960—2016 年气温和降水特征及突变[J].水土保持研究,2019,26(3):114-121.
- [26] 梁珑腾,马龙,刘廷玺,等.1951—2014 年中国北方地区季节气温突变与变暖停滞年份的时空变异性[J].自然资源学报,2018,33(12):2149-2166.
- [27] Xu Y, Ramanathan V, Victor D. Global warming will happen faster than we think[J]. Nature, 2018, 564(7734):30-32.
- [28] 丁一汇,王会军.近百年中国气候变化科学问题的新认识[J].科学通报,2016,61(10):1029-1041.