

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2018.0078

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 Z W, XU L G, HAN H L. Climate evolution characteristics of Beijing Tianjin Hebei Region for the last 55 years[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(3): 125-134. (in Chinese)

京津冀地区近55年气候演变特征分析

苗正伟¹, 徐利岗², 韩会玲¹

(1. 河北水利电力学院, 河北 沧州 061001; 2. 宁夏水利科学研究院, 银川 750021)

摘要: 基于京津冀地区22个气象站1961–2015年的逐月气候资料, 采用气候倾向率、Mann-Kendall突变检测、Morlet小波分析、反距离权重插值(IDW)等方法, 研究了近55年来京津冀地区气象要素的时空演变规律。结果表明: (1) 京津冀地区整体呈现出降水减少、气温上升、日照减少、相对湿度降低、风速下降的趋势。(2) 各气候要素都在1979–1989年间发生了突变, 年降水在1996年发生了第二次突变。(3) 各气候要素均表现出多时间尺度耦合的复杂特性, 其第一主周期尺度介于8~25a之间。(4) 年均温由南向北递减, 中、西部为升温速率的高值区; 降水及其变率均自东向西递减; 日照时数由南向北递增, 而其变率则与之相反; 相对湿度由东南向西北递减, 其变率则由西南向东北递减; 平均风速及其变率的高值中心均为张北和塘沽。

关键词: 气候变化; 气温; 降水; 日照时数; 相对湿度; 风速; 京津冀

中图分类号: P467 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2018)03-0125-10

Climate evolution characteristics of Beijing Tianjin Hebei Region for the last 55 years

MIAO Zhengwei¹, XU Ligang², HAN Huiling¹

(1. Hebei University of Water Resources and Electric Engineering, Cangzhou 061001, China;

2. Ningxia Institute of Water Resources Research, Yinchuan 750021, China)

Abstract: Based on the climatic data of 22 meteorological stations in Beijing Tianjin Hebei region from 1961 to 2015, by means of the climate tendency rate, Mann-Kendall mutation test, Morlet wavelet analysis, and inverse distance weighting (IDW), we systematically studied the temporal spatial variations of climatic variables over the Beijing Tianjin Hebei region in the recent 55 years. The results showed that: 1) In the past 55 years, the Beijing Tianjin Hebei region underwent an increase of temperature and a decrease of sunshine, precipitation, wind speed, and average relative humidity. 2) The climatic variables all went through a sudden change in 1979–1989, and the annual precipitation went through a second sudden change in 1996. 3) The climatic variables all showed a complex characteristic of coupling at multiple time scales, and their first main period scales ranged from 8 to 25 years. 4) In Beijing Tianjin Hebei region, the average air temperature showed a decreasing trend from south to north, with the change rate peaking in the central and western area. Both precipitation and its change rate showed a decreasing trend from east to west. Sunshine hours showed an increasing trend from south to north, while its change rate showed the opposite trend. Relative humidity showed a decreasing trend from southeast to northwest, while its change rate showed a decreasing trend from southwest to northeast. The peaks of wind speed and its change rate both appeared in Zhangbei and Tanggu area.

Key words: climate change; air temperature; precipitation; sunshine hours; relative humidity; wind speed; Beijing Tianjin Hebei

收稿日期: 2017-09-12 修回日期: 2017-12-09 网络出版时间: 2018-03-29

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20180328.1730.004.html>

基金项目: 河北省教育厅青年基金项目(QN2017096)

Fund: The Youth Fund Project of the Hebei Provincial Education Department (QN2017096)

作者简介: 苗正伟(1981-), 男, 山东聊城人, 讲师, 主要从事水文水资源方面的研究。E-mail: newstart2017@sina.com

在全球升温的背景下,气候变化具有显著的区域差异,认识区域气候变化特征,对于区域农业生产、防灾减灾等具有重要意义。京津冀地区历来气象灾害多发,对人们的生产生活造成重大影响,甚至制约了社会、经济的可持续发展。在京津冀协同发展的国家战略之下,更有必要对其气候变化特征进行探讨。近几年,对于京津冀地区的气候变化已经有了一些研究。许颖等^[1]基于怀来县 1954–2012 年的月气象数据研究了气温、降水的变化特征及其与水库来水、粮食单产的关系。李鹏飞等^[2]研究了京津冀地区 1960–2010 年气温、降水及潜在蒸散量的时空变化特征。刘芳圆等^[3]分析了京津冀地区 1956–2007 年气温、降水的变化趋势及其对农业的影响。张国华等^[4]利用 5 月–8 月的日最高气温数据研究了京津冀地区城市高温的气候特征及城市化效应。段丽瑶等^[5]分析了天津 1921–2010 年降水和气温的多尺度特征。胡保昆等^[6]研究了北京城区的气温变化特征。向亮等^[7]研究了 1961–2011 河北省降水的演变情况。总的来看,这些研究都取得了一定的成果,但也存在一些局限:或者没有探讨气候要素的周期性或突变性,或者在所分析气候要素上各有侧重,主要集中于对气温、降水的研究,或者资料不是最新,或者没有对空间特征进行分析,等等,因此,本文对京津冀地区的降水、气温、日照时数、湿度、风速的趋势性、突变性、周期性及空间分布特征进行研究,旨在进一步探究京津冀地区气候变化特征,以期为合理利用气候资源、区域产业结构调整、生态环境保护等提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 数据来源

选取北京、天津、河北三地作为研究对象,从中国气象科学数据共享服务网获取京津冀地区连续性较好的 22 个站的 1961–2015 年的逐月观测资料,包括气温、降水、日照时数、相对湿度、平均风速 5 个气候要素,站点分布见图 1,个别缺测数据利用邻近站点线性回归方法进行插补。

1.2 研究方法

将逐月观测资料整理成各站年均值,基于 ArcGIS10.2 中的泰森多边形法计算气象要素的区域均值,用气候倾向率法^[8]估算各气候要素的长期变化趋势;Mann-Kendall 突变检测与滑动 t 检验、累积距平相结合进行突变分析,原则是至少通过两种方法检验的才可能被认定为突变点,三种方法的原理及具体步骤参见文献^[9]。

Mann-Kendall 突变检测中, UF 曲线为时间正序统计量曲线,其值小于 0 表示序列呈减小(少)趋势,大于 0 表示序列呈增大(多)趋势,当超过 0.05 的显著性水平(临界线为 ± 1.96 ,下称信度线)时,表示变化趋势显著, UB 曲线为时间逆序统计量曲线, UF 、 UB 曲线在信度线内的交点即为可能的突变点。

滑动 t 检验是通过比较两组相邻子样本均值差异是否显著来确定突变点,两子样本长度的选择具有很大主观性,但一般二者取相同长度,本文取两子序列等长为 10,且认为 $P \leq 0.05$ 时即为通过了假设检验。累积距平曲线既可以用来描述序列的变化趋势,还可以根据其升降转折判断大概的突变点。

小波分析是进行水文气象要素周期性研究时的常用方法,且复数小波比实数小波效果更优^[10]。复数小波系数的实部大小可表征气候要素的高低多少,正(负)表偏多(少)或偏高(低),为零则表示突变,绝对值越大,表示变幅越大。因此由实部等值线图可判读不同时间尺度下信号在时域中的周期性变化及其位相。小波方差图显示了波动能量随时间尺度的变化情况,可用来判读气候序列的主周期尺度^[11]。本文利用 MATLAB 的小波分析工具箱采用复 Morlet 小波进行周期性分析;借助 ArcGIS10.2 的反距离权重插值(IDW)获取气候要素及其气候倾向率的空间分布特征。

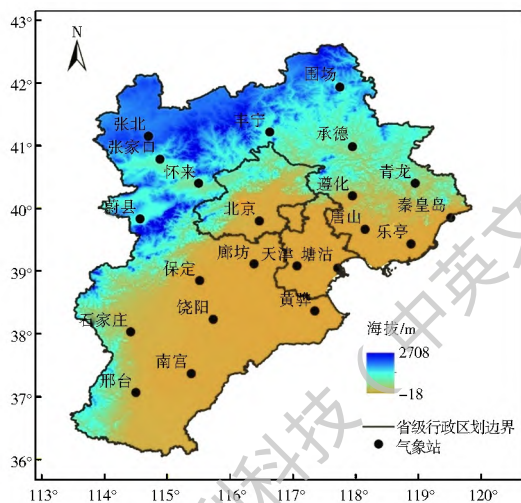


图 1 京津冀地区 DEM 及气象站点分布

Fig. 1 DEM and the distribution of meteorological stations in Beijing-Tianjin-Hebei region

2 结果与分析

2.1 气候要素的年际变化

1961–2015 年,京津冀地区年均温、年降水、年日照时数、年相对湿度、年平均风速的均值分别为: 10.43 °C、508.81 mm、2 635.68 h、58.48%、2.29

m/s。其中,年均气温最低为 8.75 °C,发生于 1969 年,最高达 11.73 °C,发生于 1998 年;1999 年降水量最少,仅 346.26 mm,1964 年最多,为 789.35 mm;1965 年日照时数最多,高达 3 068.7 h,2003 年最少,仅 2 262.7 h;相对湿度在 1964 年取得最大值为 68.50%,在 2005 年取得最小值为 54.08%;1969 年平均风速取得最大值,为 2.94 m/s,2003 年取得最小值,为 1.80 m/s。可见降水、日照、湿度、风速等 4 要素的最大值都出现在 20 世纪 60 年代,最小值都出现在 2000 年前后,而年均气温正与之相反。各要素变差系数由大到小排序为:降水(0.182) > 风速(0.116) > 日照时数(0.067) > 年均温(0.066) > 相对湿度(0.043),可见,降水的年际变化

最剧烈,相对湿度的最小。

图 2 表明,近 55 a 来,京津冀地区年均气温(图 2(a))呈明显上升趋势,气候倾向率为 0.29 °C/10a,通过了 $P < 0.01$ 的显著性检验;日照时数(图 2(c))、相对湿度(图 2(d))、平均风速(图 2(e))均呈明显下降趋势,气候倾向率分别为: -0.906 h/(10a)、-0.58%/(10a)、-0.12[(m/s)/(10a)],且均通过了 0.01 的显著性检验;年降水(图 2(b))减少趋势不明显,气候倾向率为 -11.76 mm/(10a),未通过 0.1 的显著性检验。图 2 还显示:年降水和风速的波动性变化很强烈,且平均风速在 2003 年后呈现明显的上升趋势,日照时数和气温的波动变化相对较弱,这与变差系数的结果基本一致。

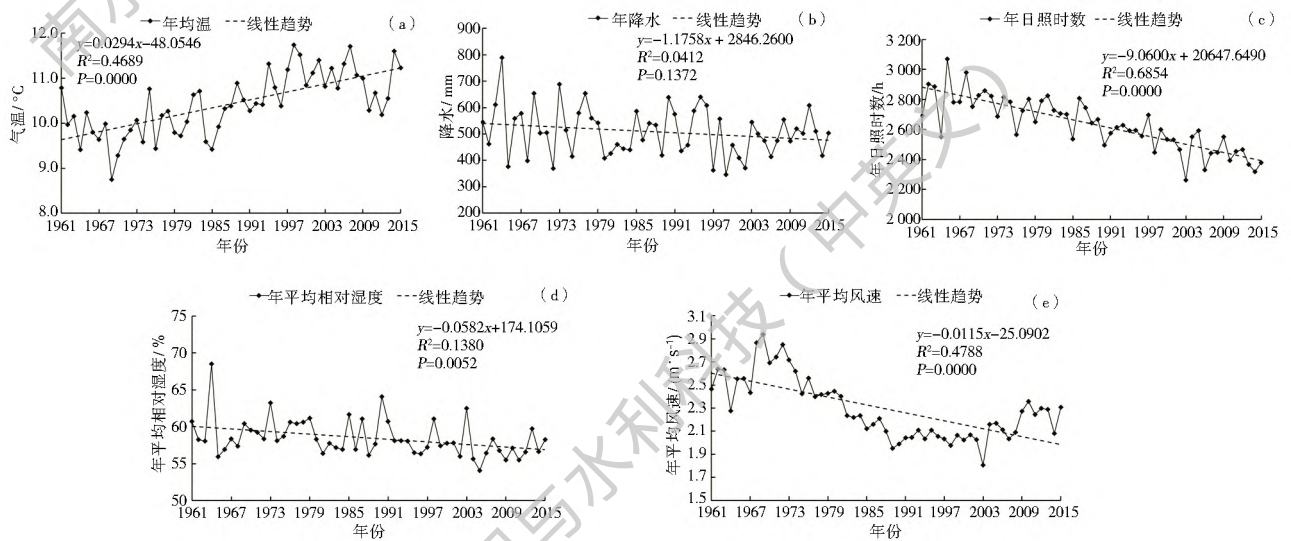


图 2 近 55 年京津冀地区各气候要素变化趋势

Fig. 2 Trends of climatic variables over the Beijing-Tianjin-Hebei region in recent 55 years

2.2 突变性分析

首先以降水为例,阐明本文确定突变点的过程,其余各要素突变点的确定与之类似。图 3(b1) 显示年降水的 UF 曲线全程都在信度线之内,因此其增减趋势都不显著,这与降水气候倾向率的检验结果一致。 UF 、 UB 曲线在信度线内存在包括 1979 在内的多个交点,说明 1979 等可能是突变点。由图 3(b2) 知,降水累积距平曲线总体上表现出了先升后降的趋势,但曲线波动频繁、形状不规则,表明降水存在剧烈的年际变化,整体的下降趋势并不明显。曲线在 1979 年、1996 年存在两个明显的峰值,1961-1979 年以上升趋势为主,1979-1996 年波动中略有上升,1996-2015 年呈急剧下降趋势,因此 1979 年、1996 年是两个可能的突变点。滑动 t 检验结果显示只有 1996 年通过了 0.05 的显著性检验。根据三种方法的结果可判断:京津冀地区年降水存在

1979 年、1996 年两个突变点,而且都是由增加突变为减少。

图 3 显示:年均温 UF 、 UB 曲线(图 3(a1))在信度线内交于 1988 年,其累积距平曲线(图 3(a2))在 1988 年取得最小值,且滑动 t 检验表明 1988 年通过了 0.01 的显著性检验,因此,年均温在 1988 年发生了由升温到显著升温的突变。日照时数 UF 、 UB 曲线(c1)在信度线内没有交点,其累积距平曲线(图 3(c2))在 1989 年取得最大值,且 1989 年通过了显著性水平为 0.01 的滑动 t 检验,因此,日照时数在 1989 年发生了由减少到显著减少的突变。相对湿度 UF 、 UB 曲线(图 3(d1))在信度线内交于 1994 年,其累积距平曲线(图 3(d2))存在 1979 年和 1991 年两个明显峰值,仅 1979 年通过了 0.05 显著性水平的滑动 t 检验,因此,相对湿度在 1979 年发生了由增加到减少的突变。平均风速 UF 、 UB 曲线(e1)在信度线内交于 1978-1979 年,其累积距平曲线(图

3(e2)) 最大值发生于 1981 年, 滑动 t 检验显示, 1978-1981 年 4 个年份均通过了 0.01 的显著性检验, 进一步考虑到: 滑动 t 检验时无论子序列取 5、10

还是 12, 只有 1981 年都通过了 0.01 的显著性检验, 因此判断, 年均风速在 1981 年发生了由减小到显著减小的突变。

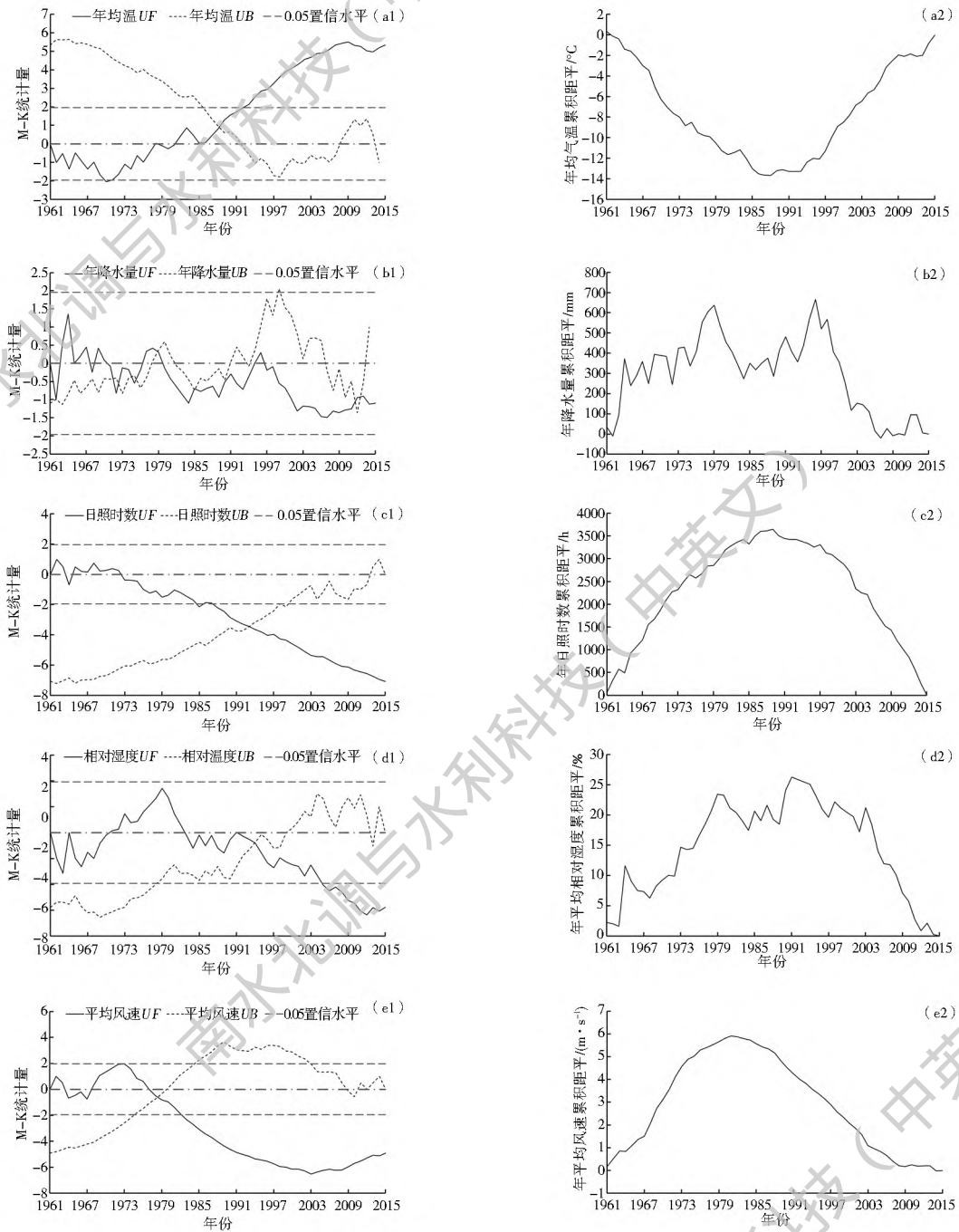


图 3 近 55 a 京津冀地区各气候要素 M annr Kendall 检测及累积距平曲线

Fig. 3 Man-r Kendall test and cumulative anomaly of climatic variables over the Beijing-Tianjin-Hebei region in recent 55 years

2.3 周期性分析

由图 4(a2) 知: 年均温的第 1、2、3、4 主周期尺度分别是 21 a、14 a、10 a、6 a。图 4(a1) 显示: 在 6 a 左右的尺度上, 信号振荡相对较强, 影响范围主要是 1961 年到 20 世纪 70 年代中后期。从 1961-1973 年气温存在相对比较规律的 5 次降升的准周期变化, 平均周期为 3 a 左右。在 10 a 左右的尺度上, 主要是在 20 世纪 70 年代中后期至 21 世纪初存在显

著的信号波动, 1975-2003 年间共存在 7 次比较规律的降温-升温的准周期变化, 平均周期为 4 a 左右。在 14 a 左右的尺度上, 信号的强烈振荡主要存在于 1961 年到 21 世纪初, 该信号比较稳定, 存续时间也较长, 在 1961-1994 年间经历了 6 次降温-升温的准周期性变化, 平均周期为 6 a 左右。在 21 a 左右的时间尺度上, 周期性波动自 1961 年开始逐渐增强, 20 世纪 90 年代后, 尤其进入 21 世纪后, 振荡

变得极为显著, 整个研究时域内共经历了 6~7 次气温升降的准周期性变化, 平均周期为 9 a 左右。

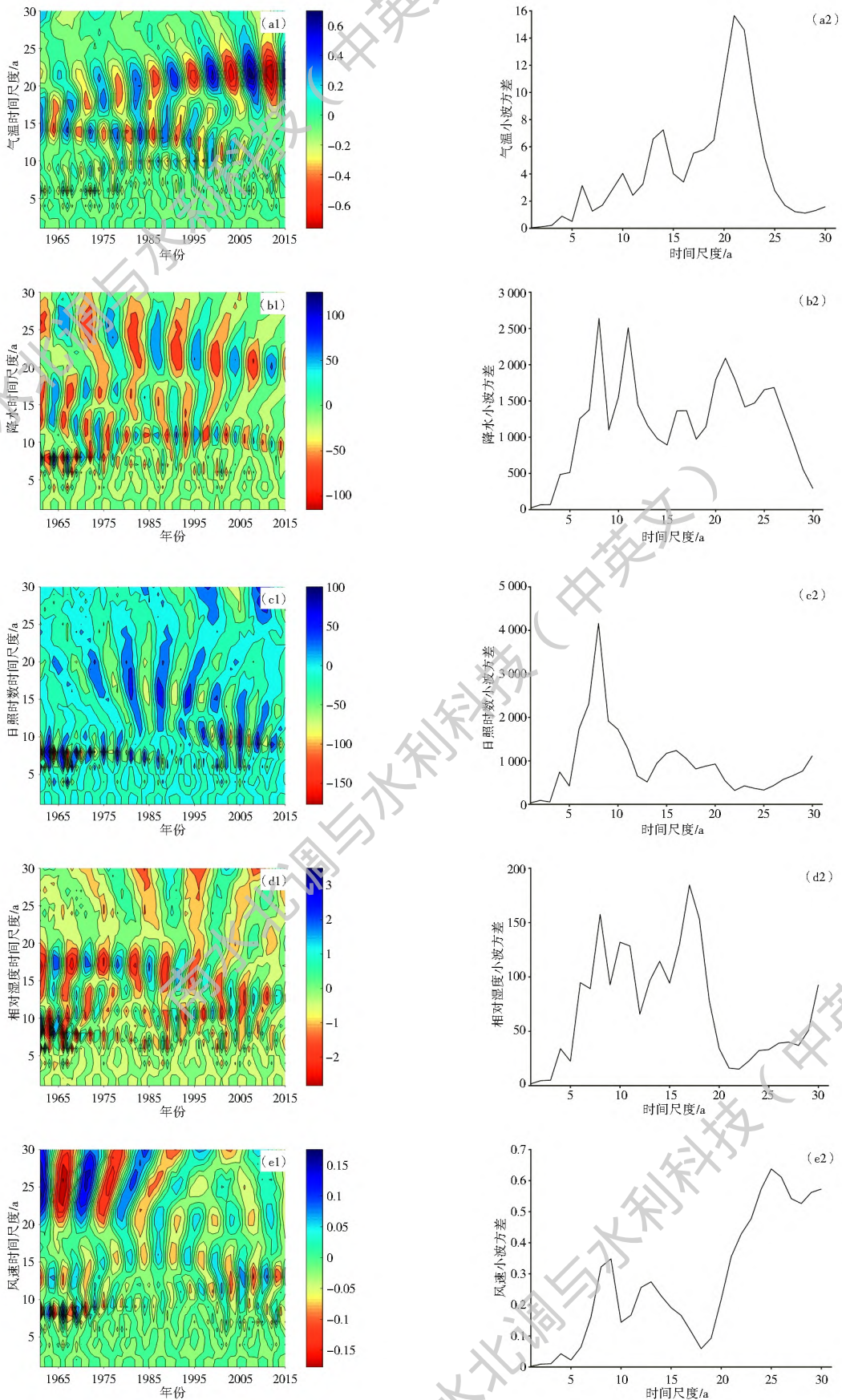


图 4 近 55 a 京津冀地区各气候要素小波分析结果

Fig. 4 Morlet wavelet analysis of climatic variables over the Beijing-Tianjin-Hebei region in recent 55 years

以上分析表明: 京津冀地区年均温的年内变化中存在的典型周期包括 9 a、6 a、4 a、3 a。

由图4(b2)知:年降水的第1、2、3、4主周期尺度分别是8 a、11 a、21 a、26 a。图4(b2)表明:在8 a左右的尺度上,振荡最剧烈,但衰减很快,主要影响1961年到20世纪70年代中期,该时间尺度下,年降水量在1961-1977年经历了5次减-增的准周期性变化,平均周期为3 a左右。在11 a左右的尺度上,振荡强烈、稳定、且基本贯穿全研究时域,1972-2006年存在8次降水增-减的准周期性变化,平均周期为4 a左右。在21 a左右的尺度上,显著的信号振荡始于20世纪80年代,其后渐强,直到2015年,1982-2015年间信号的周期性变化很明显,共有4次增-减的准周期变化,平均周期为8 a左右,从该尺度上看,2015年时,负值等值线未闭合,表示在该尺度上将来一段时间京津冀地区年降水处于偏少阶段。在26 a左右的尺度上,振荡强烈,但衰减趋势明显,尤其是进入21世纪后,信号变得很微弱,1961-1991年共有3次降水增-减的准周期变化,平均周期为10 a左右。以上分析表明:年降水的年际变化中存在的典型周期包括3 a、4 a、8 a、10 a。

图4(c2)显示:年日照时数的第1、2、3、4主周期尺度分别是8 a、16 a、20 a、4 a。由图4(c1)可见:在8 a左右的时间尺度上,波动最强烈,主要影响范围大致是1961年到80年代末期,1961-1988年日照时数经历了9次增多-减少的准周期性变化,平均周期为3 a左右。10 a时间尺度尽管不是主周期尺度,但该尺度上从20世纪90年代中后期开始出现一个强震荡区,直到2015年,1995-2014年存在5次日照时数增多-减少的准周期变化,平均周期为4 a左右。在16~20 a的尺度上,信号的强烈振荡主要存在于20世纪70年代初到21世纪初,1973-2005年日照时数经历了5次比较强烈的减少-增多的准周期性变化,平均周期为7 a左右。以上分析表明:日照时数的年际变化中存在的典型周期包括3 a、4 a、7 a。

图4(d2)表明:年均相对湿度的第1、2、3、4主周期尺度分别是17 a、8 a、10 a、14 a。图4(d1)显示:在8 a左右的尺度上,振荡能量非常强,但持续时间短,影响范围主要是在1970年以前,1961-1970年,存在3次减小-增加的准周期性变化,平均周期为3 a左右。在10 a左右的尺度上,波动能量也比较强,主要影响范围是20世纪80年代末到2005年前后,该时域内有4次减小-增加的准周期性变化,平均周期为4 a左右。在10 a左右的尺度上,振荡偏弱,但存在于全时域,1961-2015年都具

有比较明显的周期波动,平均周期为6 a左右。在17 a左右的尺度上,振荡强烈且比较持久,在1961-1990年间经历了4次增加-减小的准周期性变化,平均周期为7 a。以上分析表明:相对湿度的年际变化中存在的典型周期包括7 a、6 a、4 a、3 a。

图4(e2)可见:年均风速的第1、2、3、4主周期尺度分别是25 a、9 a、13 a、4 a。由图4(e1)可知:在9 a左右的尺度上,1973年之前信号波动很强烈,但衰减迅速,1987年之后变得极其微弱,进入21世纪后才稍有回升,1961-1975年存在4次风速增大-减小的准周期性变化,平均周期为4 a左右。在13 a左右的尺度上,信号在1961-1971年和2001-2011两个时域内振荡较强,其中,1961-1971年间存在2次增大-减小的周期变化,在2001-2011年间存在2次减小-增大的周期变化,平均周期为6 a左右。在25 a左右的尺度上,波动非常强烈,但衰减快,1961-1991年间风速经历了3次减小-增加的准周期性变化,平均周期为10 a左右,从该尺度上看,2015年时负值等值线尚未闭合,这表示在25 a时间尺度上京津冀地区的年均风速在未来一段时间仍会偏小。以上分析表明:京津冀地区年均风速的年际变化中存在的典型周期包括10 a、6 a、4 a。

2.4 气候要素的空间分布特征

普通克里金插值法与反距离权重法(IDW)是分析水文气象要素空间分布特征时常用的方法,对两者的适用性,学者们意见不一^[12-15]。本文经对比发现, IDW更适于描述京津冀地区气象要素的空间分布特征,因此本文借助ArcGIS软件,通过IDW插值法分析京津冀地区气候要素的空间特征。

图5(a1)显示多年平均气温基本呈现由南向北、由东向西递减的趋势,高温区位于京津冀地区南部,低温区位于西北部。其中,多年平均气温最高的是邢台,达13.93℃,次之为石家庄,达13.57℃;多年平均气温最低的是张北,仅有3.34℃,次之是围场,为5.26℃。由图5(a2)可见京津冀地区存在一横一纵两个明显的高幅增温带,其中横贯京津冀地区的蔚县-北京-遵化-乐亭一带增温最明显,它们占据了全区域增温幅度的前四位,其中,增幅最大的是蔚县,达到了0.50℃/(10a),其次是北京,达0.45℃/(10a);另外一个增幅明显的地带为张北-蔚县-石家庄-邢台一线,其中邢台的气温倾向率达到了0.40℃/10a,石家庄为0.37℃/(10a),多年平均气温最低的张北地区其倾向率也达到了0.35℃/(10a)。京津冀地区北部增温趋势缓慢,其中,承德表现出了微弱的降温趋势。

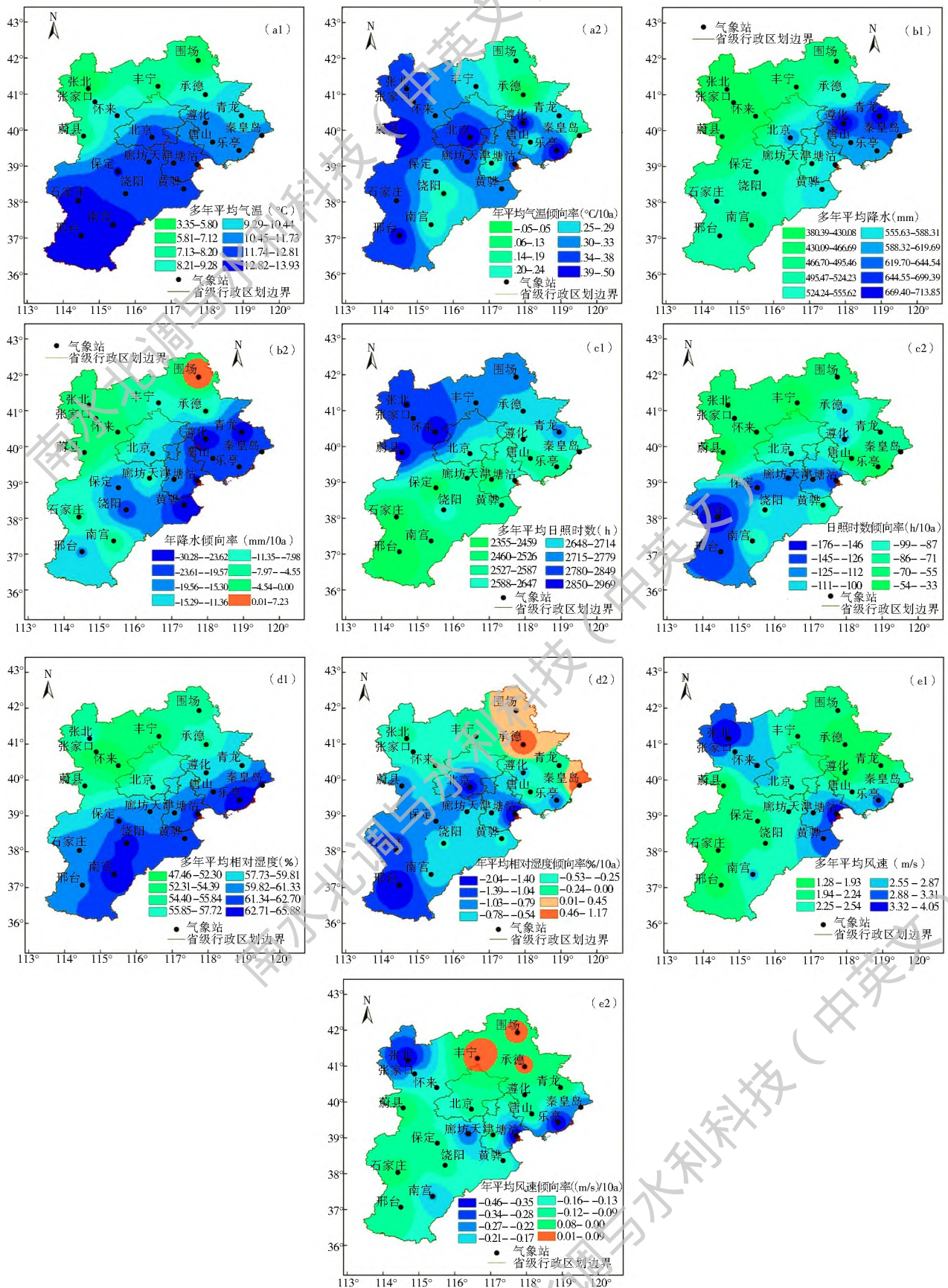


图 5 近 55 a 京津冀地区各气候要素及其气候倾向率的空间分布

Fig. 5 The spatial distribution of climatic variables and their climate tendency rate over the Beijing Tianjin Hebei region in recent 55 years

图 5(b1) 表明, 多年平均降水量基本呈现由东向西递减的趋势, 相对来说, 京津冀地区东北一隅降水比较丰沛, 其中多年平均降水量最大的是遵化, 达到了 713.92 mm, 其次是青龙, 为 691.44 mm, 整个

京津冀地区只有遵化多年平均降水量在 700 mm 以上,在 600 mm 以上的除青龙外,还包括秦皇岛、北京、唐山、乐亭四地。京津冀地区西部降水普遍相对较少,其中最少的是怀来,仅有 380.32 mm,次之是张北,也只有 382.42 mm;在廊坊以南,除南宫多年平均降水量为 476.50 mm 以外,其他地区都在 500~600 mm 之间。图 5(b2) 显示除围场(图中蓝色部分)以 7.23 mm/(10a) 的增幅呈现一定的降水增加趋势外,其他地区均为减少趋势,东部地区减幅最大,南部次之,西北部减幅最小。全区域减幅最大的是遵化,达到 30.28 mm/(10a),次之是黄骅,为 27.97 mm/(10a),青龙地区减幅为 -25.79 mm/(10a);蔚县、怀来、张家口、张北一带减幅极其微弱。

图 5(c1) 显示,多年平均日照时数基本呈现以怀来-蔚县两地为峰向周围递减的趋势,其中,怀来地区的多年平均日照时数最多,达 2970 h/a,次之是蔚县,为 2888 h/a,最少的是邢台地区,只有 2355 h/a,其次为石家庄,仅 2424 h/a。渐变过程中也存在波动,由北向南递减的过程中,饶阳地区的日照时数是 2631 h/a,比其周围保定、南宫、廊坊等地的都要高;由西向东递减的过程中,塘沽的日照时数却达到一个小高峰,为 2644 h/a。由图 5(c2) 知全区域日照时数均呈减少趋势,减幅以邢台-石家庄-保定-廊坊-塘沽一线为岭,向两侧地区逐渐变缓,其中减幅最大的是石家庄,达 176 h/(10a),其次是塘沽,达 149 h/(10a),再其次是邢台,为 139 h/(10a)。而在北京以北,除承德、遵化两地外,其他地区减幅都在 100 h/(10a) 以下,全区域减幅最小的是丰宁,为 32.84 h/(10a),其次是蔚县,为 34.40 h/(10a)。

由图 5(d1) 可见京津冀地区多年平均相对湿度由南向北、由东向西逐渐降低。全区域最高的是乐亭地区,高达 65.88%,南宫稍低,为 64.04%,最低的是张家口,仅 47.45%,次低是怀来,为 50.49%。图 5(d2) 中蓝色表示相对湿度呈增加趋势,可见,围场-承德-秦皇岛一带相对湿度基本呈递增趋势,其中增幅最大的是秦皇岛,达 1.18%/(10a),其次为承德,增幅为 1.05%/(10a),围场增幅最小,为 0.23%/(10a)。除该三地之外,其他均呈减少趋势,由北向南减少速率越来越快,至北京达到第一个峰值,减幅为 1.61%/(10a),到塘沽达到全区域减幅最大值,为 2.04%/(10a),由北京-塘沽一线向西南部基本呈减幅先降后增的趋势,到石家庄、邢台,年平均相对湿度减幅又形成两个峰值,其中,石家庄减幅 1.23%/(10a),邢台减幅为 1.84%/(10a)。

图 5(e1) 显示多年平均风速在京津冀地区的空

间分布呈马鞍型,有两个峰值,一个是坝上张北,多年平均风速达 4.05 m/s,一个是沿海的塘沽,多年平均风速达 4.01 m/s,除此二者,其他地区多年平均风速均在 3.1 m/s 以下。张北到北京、塘沽到北京均呈递减趋势,北京多年平均风速为 2.45 m/s,由张北-北京-塘沽一线分向西南、东北方向递减,全区域风速最小的是承德,为 1.28 m/s,次之是青龙,为 1.27 m/s。北京以南,多年平均风速最低的是石家庄,为 1.69 m/s。由图 5(e2) 可见除围场、丰宁、承德三地年平均风速呈微弱递增趋势之外,其他地区年均呈递减趋势,其中减幅最大的是坝上张北,达 0.46[(m/s)/(10a)],仅次于张北的是沿海的塘沽,为 0.44[(m/s)/(10a)],年平均风速减幅由此二地区均向北京方向递减,北京年均风速倾向率为 -0.09[(m/s)/(10a)]。年平均风速减幅由张北-北京-塘沽一线向西南、东北方向基本均呈递减趋势,全区域减幅最小的是蔚县,仅 0.01[(m/s)/(10a)],其次是青龙,减幅为 0.02[(m/s)/(10a)],围场、丰宁、承德三地年平均风速的增幅均低于 0.09[(m/s)/(10a)]。

3 讨论

(1) 研究发现,近 55 a 来京津冀地区日照时数的变化具有一定的特殊性,首先是其减少速率高达 90.60 h/(10a) ($P < 0.01$),明显高于全国 1961-2007 年 39.7 h/(10a) 的减少速率^[16];再者,有研究表明中国地区日照时数减少趋势在 20 世纪 90 年代后基本停止^[16,17],而图 3(c1) 显示京津冀地区 20 世纪 90 年代后日照时数减少趋势依然非常明显,直到 2015 年也没有变缓的倾向。本文认为京津冀地区严重的大气污染和风速的显著下降是导致该现象的重要原因。不少学者的研究成果^[16,18,19] 表明:除自然因素外,人类活动导致的大气污染是我国尤其是我国东部地区日照时数减少的主因,而京津冀地区大气污染是极端严重的^[20,21];另外,本文结果表明,近 55 a 来京津冀地区风速以 0.11[(m/s)/(10a)] ($P < 0.01$) 的速率减小,而风速的减小不利于大气污染物的消散,这进一步加剧了日照时数的减少趋势。

(2) 京津冀地区升温显著 ($P < 0.01$),变率为 0.29 °C/(10a),这与全国 1964-2007 年 0.28 °C/(10a) 的增温速率^[22] 基本一致,略高于华北地区 1960-2013 年 0.23 °C/(10a) 的升温速率^[23]。本文认为该区域在日照时数显著减少的情况下气温却显著上升的原因之一仍然是大气污染,大气中烟、霾等微粒物质增多,导致气溶胶含量升高,大气逆辐射增

强,进而致使温度上升^[23]。

(3) 京津冀地区年降水存在1979年、1996年两个突变点,而且都是由增加突变为减少,这与张一驰等^[24]华北地区1951–2009年降水无突变的结论不一致。对此,时空差异是可能的原因之一,另外,本文用Mann-Kendall突变检测、滑动t检验、累积距平3方法相结合进行突变分析,而张一驰等^[24]利用Mann-Whitney检验法进行突变识别,不同的突变检测方法也可能导致南辕北辙的结论^[9]。

(4) 本文研究表明,承德地区气候变化与众不同,该地区涵盖承德、围场、丰宁3站,其中,承德与围场2站的风速、湿度的变化趋势与其他大多数站都背道而驰,此外,承德站的气温、围场站的降水、丰宁站的风速变化趋势也与其他多数站截然不同,可见承德地区的气候变化与京津冀其他地区的变化趋势迥异,但这其中的原因还需搜集更多的资料做进一步的分析。

4 结论

(1) 1961–2015年,京津冀地区年均气温以 $0.29\text{ }^{\circ}\text{C}/(10\text{a})$ 的速率显著上升($P < 0.01$);年降水以 $11.76\text{ mm}/(10\text{a})$ 的速率减少,但趋势不显著;日照时数、相对湿度、平均风速均呈显著下降趋势,气候倾向率分别为 $-90.60\text{ h}/(10\text{a})$ 、 $-0.58\text{ }^{\circ}\text{C}/(10\text{a})$ 、 $-0.11[(\text{m/s})/(10\text{a})]$ 。

(2) 气候要素的突变主要发生在80年代前后。最早发生突变的是降水和相对湿度,二者都在1979年由增加突变为减少,年平均风速在1981年由减小突变为显著减小,年均气温在1988年由上升突变为显著上升,年日照时数在1989年由减少突变为显著减少,年降水在1996年再次由增加突变为减少。

(3) 研究时段内不同的子时域具有不同的时间尺度结构,而同一时间尺度上的信号振荡在时域中也是不断变化的,这就决定了气候要素周期特征的复杂性,年均气温、年降水量、年日照时数、年平均相对湿度、年平均风速的第一主周期尺度分别是21a、8a、8a、17a、25a,对应的平均周期分别是9a、3a、3a、7a、10a。

(4) 空间上,年均温呈现出明显的由南向北递减的趋势,而升温速率则存在蔚县-北京-乐亭和张北-蔚县-石家庄-邢台一横一纵两个高值区;年降水及其变化率均表现为自东向西递减的总体趋势;日照时数由南向北递增,而其减少速率则由南向北递减;相对湿度由东南向西北递减,其减小速率则由西南向东北递减;平均风速及其变率均以张北和塘沽为

两个典型高值中心向其他地区递减。

参考文献(References):

- [1] 许颖,唐海萍.河北怀来盆地近60a气候变化特征及其影响[J].北京师范大学学报(自然科学版),2015,51(3):293-298. (XU Y, TANG H P. Characteristics and impacts of climate change in Huailai Basin during the past 60 years[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2015, 51(3): 293-298. (in Chinese)) Doi: 10.16360/j.cnki.jbnuns.2015.03.013.
- [2] 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. (LI P F, LIU W J, ZHAO X Y. The changes of atmospheric temperature, precipitation and potential evapotranspiration in Beijing-Tianjin-Hebei region in recent 50 years[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2015, 29(3): 137-143. (in Chinese)) Doi: 10.13448/j.cnki.jalre.2015.094.
- [3] 刘芳圆,肖嗣荣,刘寒,等.河北地区气候变化及其对农业的影响[J].地理与地理信息科学,2014,30(4):122-126. (LIU F Y, XIAO S R, LIU H, et al. Research of impacts of climate change on agriculture in Hebei Region[J]. Geography and Geo-Information Science, 2014, 30(4): 122-126. (in Chinese)) Doi: 10.3969/j.issn.1672-0504.2014.04.025.
- [4] 张国华,张江海,金晓青,等.京津冀城市高温的气候特征及城市化效应[J].生态环境学报,2012,21(3):455-463. (ZHANG G H, ZHANG J T, JIN X Q, et al. Climate characteristics and effects of urbanization of the urban high temperature of Beijing, Tianjin and Hebei, China[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2012, 21(3): 455-463. (in Chinese)) Doi: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2012.03.010.
- [5] 段丽瑶,丁一汇,任雨.1921–2010年天津气温和降水量序列的多尺度分析[J].气候与环境研究,2014,19(4):515-522. (DUAN L Y, DING Y H, REN Y. Multiscale examination on the temperature and precipitation series in Tianjin during 1921–2010[J]. Climatic and Environmental Research, 2014, 19(4): 515-522. (in Chinese)) Doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2014.13020.
- [6] 胡保昆,窦以文,储伟.北京城区气温变化特征[J].气象科技,2014,42(5):852-855. (HU B K, DOU Y W, CHU W. Characteristics of temperature variation in Beijing urban area[J]. Meteorological Science and Technology, 2014, 42(5): 852-855. (in Chinese)) [7] 向亮,郝立生,安月改,等.51a河北省降水时空分布及变化特征[J].干旱区地理,2014,37(1):56-65. (XIANG L, HAO L S, AN Y G, et al. Time-Spatial distribution and variational characteristics of rainfall in Hebei province in 51 years[J]. Arid Land Geography, 2014, 37(1): 56-65. (in Chinese)) Doi: 10.13826/j.cnki.cn65-1103/x.2014.01.008.
- [8] 芦佳玉,延军平,王鹏涛,等.全球变化背景下陕甘宁地区风速时空变化特征[J].中国沙漠,2017,37(3):554-561. (LU J Y, YAN J P, WANG P T, et al. Wind speed change characteristics of Shanxi-Gansu-Ningxia Area in 1960–2014[J]. Journal of Desert Research, 2017, 37(3): 554-561. (in Chinese)) DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2016.00114.

- [9] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术(第2版)[M]. 北京: 气象出版社, 2007. (WEI F Y. Modern climatic statistical diagnosis and prediction technology(2nd)[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2007. (in Chinese))
- [10] 彭俊翔, 伍永年, 胡维平, 等. 长荡湖近61a降水量演化特征[J]. 长江流域资源与环境, 2016, 25(2): 292-299. (PENG J X, WU Y N, HU X P, et al. The evolution characteristics of precipitation in the past 61 years at the lake Changdanghu[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2016, 25(2): 292-299. (in Chinese)) DOI: 10.11870/cjlyzyyhj201602.015.
- [11] 胡毅鸿, 李景保. 1951-2015年洞庭湖区旱涝演变及典型年份旱涝急转特征分析[J]. 农业工程学报, 2017, 33(7): 107-115. (HU Y H, LI J B. Analysis on evolution of drought flood and its abrupt alternation in typical year from 1951 to 2015 in Dongting Lake area[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(7): 107-115. (in Chinese)) DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.07.014.
- [12] 赵雪雁, 张钦, 王亚茹, 等. 近55a来青藏高原东部气候演变特征[J]. 干旱区研究, 2015, 32(6): 1088-1096. (ZHAO X Y, ZHANG Q, WANG Y R, et al. Climate evolution characteristics of eastern Tibetan Plateau for the last 55 years[J]. Arid Zone Research, 2015, 32(6): 1088-1096. (in Chinese)) DOI: 10.13866/j.azr.2015.06.07.
- [13] 曹永强, 刘佳佳, 高璐. 辽宁省大雨以上降水日数分布与趋势分析[J]. 地理科学进展, 2015, 34(8): 1052-1060. (CAO Y J, LIU J J, GAO L. Distribution and trend analysis of heavy precipitation days in Liaoning Province[J]. Progress in Geography, 2015, 34(8): 1052-1060. (in Chinese)) Doi: 10.18306/dlkxjz.2015.08.012.
- [14] 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. (SHI J L, WANG X R, LI S F, et al. Variation characteristics of air temperature and precipitation in Henan province in recent 50 years[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2017, 24(3): 151-156. (in Chinese)) Doi: 10.13869/j.cnki.rswc.2017.03.028.
- [15] 王理萍, 王树仿, 张刘东, 等. 1960-2013年云南省降水时空变化特征分析[J]. 水电能源科学, 2016, 34(12): 20-24. (WANG L P, WANG S F, ZHANG L D, et al. Spatial-temporal characteristics of precipitation in Yunnan province from 1960 to 2013[J]. Water Resources and Power, 2016, 34(12): 20-24. (in Chinese))
- [16] 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[J]. 资源科学, 2010, 32(4): 701-711. (ZHAO D, LUO Y, GAO G, et al. Long-Term changes and essential climatic characteristics of sunshine duration over China during 1961-2007[J]. Resources Science, 2010, 32(4): 701-711. (in Chinese))
- [17] 李慧群, 付遵涛, 闻新宇, 等. 中国地区日照时数近50年来的变化特征[J]. 气候与环境研究, 2013, 18(2): 203-209. (LI H Q, FU Z T, WEN X Y, et al. Characteristic analysis of sunshine duration change in China during the last 50 years[J]. Climatic and Environmental Research, 2013, 18(2): 203-209. (in Chinese)) Doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2012.11052.
- [18] 郑小波, 罗宇翔, 段长春, 等. 云贵高原近45年来日照及能见度变化及其成因初步分析[J]. 高原气象, 2010, 29(4): 992-998. (ZHENG X B, LUO Y X, DUAN C C, et al. Change trends and causes in sunshine duration and visibility over Yunnan-Guizhou Plateau in recent 45 years[J]. Plateau Meteorology, 2010, 29(4): 992-998. (in Chinese))
- [19] 刘玉英, 韦小丽, 李宇凡. 1961-2012年吉林省日照时数的变化特征及影响因素[J]. 自然资源学报, 2015(8): 1367-1377. (LIU Y Y, WEI X L, LI Y F. Variation of sunshine duration and related driving forces in Jilin Province during 1961-2012[J]. Journal of Natural Resources, 2015(8): 1367-1377. (in Chinese)) Doi: 10.11849/zrzyxb.2015.08.011.
- [20] 王跃思, 张军科, 王莉莉, 等. 京津冀区域大气霾污染研究意义、现状及展望[J]. 地球科学进展, 2014, 29(3): 388-396. (WANG Y S, ZHANG J K, WANG L L, et al. Researching significance, status and expectation of haze in Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. Advance in Earth Science, 2014, 29(3): 388-396. (in Chinese)) Doi: 10.11867/j.issn.1001-8166.2014.03.0388.
- [21] 赵普生, 徐晓峰, 孟伟, 等. 京津冀区域霾天气特征[J]. 中国环境科学, 2012, 32(1): 31-36. (ZHAO P S, XU X F, MENG W, et al. Characteristics of hazy days in the region of Beijing, Tianjin, and Hebei[J]. China Environmental Science, 2012, 32(1): 31-36. (in Chinese))
- [22] 范泽孟, 岳天祥, 陈传法, 等. 中国气温与降水的时空变化趋势分析[J]. 地球信息科学学报, 2011, 13(4): 526-533. (FAN Z M, YUE T X, CHEN C F, et al. Spatio-temporal change trends of temperature and precipitation in China[J]. Journal of Geographical Information Science, 2011, 13(4): 526-533. (in Chinese)) Doi: 10.3724/SP.J.1047.2011.00526.
- [23] 阿多, 熊凯, 赵文吉, 等. 1960~2013年华北平原气候变化时空特征及其对太阳活动和大气环境变化的响应[J]. 地理科学, 2016, 36(10): 1555-1564. (A D, XIONG K, ZHAO W J, et al. Temporal trend of climate change and mutation analysis of North China Plain during 1960 to 2013[J]. Scientia Geographica Sinica, 2016, 36(10): 1555-1564. (in Chinese)) Doi: 10.13249/j.cnki.sgs.2016.10.013.
- [24] 张一驰, 吴凯, 于静洁, 等. 华北地区1951-2009年气温、降水变化特征[J]. 自然资源学报, 2011, 26(11): 1930-1941. (ZHANG Y C, WU K, YU J J, et al. Characteristics of precipitation and air temperature variation during 1951-2009 in North China[J]. Journal of Natural Resources, 2011, 26(11): 1930-1941. (in Chinese))