

近 56 年京津冀区域降水量变化特征分析

于占江^{1,2}, 金钊³, 张艳品²

(1. 南京信息工程大学, 江苏南京 210044; 2. 河北省石家庄市气象局, 河北石家庄 050081; 3. 安徽省合肥市气象局, 安徽合肥 230041)

摘要 按照自然地理条件和气候的地理分布特征把京津冀分为 5 个不同的气候子区域, 选取资料序列完整且具有较长时间序列较为均匀分布的 87 个地面气象站, 运用线性回归、Mann-Kendall 突变检验、滑动 t 检验、Morlet 小波函数等统计方法, 选用 1960—2015 年逐日降水观测数据, 分别对 5 个子区域及全区的降水量进行时空变化特征分析。结果表明, 近 56 年来京津冀全区及 5 个分气候区年平均降水量变化呈现整体的一致性, 均呈波动下降趋势, 冀东平原区下降趋势显著, 但均未发生明显突变现象; 存在较为显著的季节性, 全区夏季降水量下降趋势显著, 并于 1996 年发生突变, 总降水量中以 7 月和 8 月贡献最大, 降水量减少速率也最快; 除太行山区外, 其他分气候区夏季降水量均呈减少趋势, 且冀东平原区减少幅度最大, 燕山丘陵在 1996 年发生了明显突变; 全区及各分气候区年、季降水量呈现显著的年际和年代或多年代际变化, 主要存在 4 个周期变化, 大致分为 3~4、6~10、12~18 和 20 年以上。

关键词 京津冀; 气候区; 降水量; 变化特征; 突变检验; 周期特征

中图分类号 S 161.6 **文献标识码** A

文章编号 0517-6611(2019)02-0215-07

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2019.02.064



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Analysis on the Change Characteristics of Precipitation in Beijing-Tianjin-Hebei Region in Recent 56 Years

YU Zhan-jiang^{1,2}, JIN Zhao³, ZHANG Yan-pin² (1. Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210044; 2. Shijiazhuang City Meteorological Bureau, Shijiazhuang, Hebei 050081; 3. Hefei City Meteorological Bureau, Hefei, Anhui 230041)

Abstract Beijing, Tianjin and Hebei were divided into five different climatic sub-regions according to their natural geographical conditions and climatic geographical distribution characteristics. 87 meteorological stations with complete data series and relatively long time series were selected, and linear regression, Mann-Kendall mutation test, sliding t test and Morlet wavelet function were used. Statistical method was used to analyze the temporal and spatial variation characteristics of precipitation in five sub-regions and the whole region, using daily precipitation data from 1960 to 2015. The results showed that in the past 56 years, the annual average precipitation of Beijing-Tianjin-Hebei region and its five sub-climatic zones had shown a whole consistency, both showing a downward trend of fluctuations, and the downward trend in the eastern Hebei plain region was significant, but there was no obvious mutation; there was a more significant seasonal, the downward trend of summer precipitation in the region was obvious. Besides the Taihang Mountains, the summer precipitation in other climatic regions showed a decreasing trend, and the eastern Hebei Plain had the largest reduction range, and the Yanshan Hills had a significant abrupt change in 1996. All the climatic regions and sub-climatic regions had the fastest reduction rate. The annual and seasonal precipitation showed significant interannual and interdecadal or interdecadal variations. There were four main periodic variations, which were roughly divided into 3-4 years, 6-10 years, 12-18 years and more than 20 years.

Key words Beijing-Tianjin-Hebei region; Climate zone; Precipitation; Change characteristics; Mutation test; Cycle characteristics

在全球气候变暖的大背景下^[1], 干旱已成为人类面对的重大环境问题之一。干旱的发生会影响农业的生产, 进而造成一系列的社会问题, 而与干旱相关的最重要的气象要素便是气温、降水与潜在蒸散量, 降水影响更直接^[2]。京津冀地处中纬度欧亚大陆东岸, 为沿海和内陆交接地带, 属于温带半湿润半干旱大陆性季风气候, 地势西北高、东南低, 地形包含平原、盆地、丘陵、山地及高原等^[3], 是我国重要的农业生产区域。近些年, 受全球气候变暖的影响, 中国京津冀地区气温明显升高, 降水量不断减少, 导致干旱问题日益严重^[3-4]。针对京津冀区域降水变化的研究很多, 如向亮等^[5]利用正交函数分解、最大熵谱分析及 Mann-Kendall 突变性检验等方法分析了 1961—2011 年河北省降水时空分布及变化特征; 李春强等^[6]分析了河北省 1965—2005 年不同时间尺度下降水序列的主要周期变化过程及其空间分布特征; 李月英等^[7]分析了石家庄地区的降水量和气温的变化特征; 李鹏飞等^[2]对京津冀区域近 50 年气温、降水与潜在蒸散量的变化分析。但之前的研究更多的是以行政分区分析河北、北

京、天津的气候变化特征, 分析京津冀整体区域的很少, 而按气候的地理分布特征进行分区来研究降水变化特征鲜见报道。因此, 笔者在前人工作的基础上, 采用线性趋势分析法、滑动 t 检验、M-K 突变检验及小波分析等方法对近 56 年来京津冀 5 个分区及全区降水量的时空变化特征进行更详细分析, 以期在区域层面上深化对京津冀区域降水变化的认识, 进而为京津冀区域的降水预测、农业生产及水资源利用提供参考, 对指导京津冀农业生产和水资源调控的可持续发展均具有重要意义。

1 资料与方法

1.1 研究区概况 选取河北、北京、天津 3 个省(市)作为研究区域, 位于 113°29'~119°58'E、36°01'~42°35'N, 地域十分广阔, 南北跨越约 6.5 个纬距, 南北长约 730 km, 东西宽约 560 km, 近 600 km 的海岸线, 有高原、山地及平原, 地理条件复杂。

参照河北省气候分区^[8], 按北京、天津自然地理条件和气候特征, 将京津冀也分为 5 个气候区(图 1): ①冀北高原气候区, 包括张家口和承德二地区的北部高原地带, 该区冬季严寒, 积雪期长; ②燕山丘陵气候区, 包括除冀北高原以外的张家口地区、承德地区和北京北部山区, 该区绝大部分地区晴天多, 云雾少, 夏季凉爽, 多局部暴雨、山洪、雷暴和冰雹; ③太行山气候区, 包括保定、石家庄、邢台和邯郸 4 个地

基金项目 国家自然科学基金面上项目(41475054)。

作者简介 于占江(1968—), 男, 河北宽城人, 高级工程师, 在读博士, 从事气候变化研究。

收稿日期 2018-10-16

区的西部地带,全区降雨较多,夏季酷热,闷热天气较多;④山前平原气候区,包括保定、石家庄、邢台和邯郸4个地区的京广线以东地带,以及衡水地区和沧州地区,春季少雨干旱;⑤冀东平原气候区,包括北京中南部、天津、廊坊及唐山地区中南部和秦皇岛地区南部,该区夏季多雨,春季多东北大风。



图1 京津冀区域气候区划

Fig.1 Climate zoning of Beijing-Tianjin-Hebei

1.2 资料选取 该研究所用气象数据由国家气象科学数据共享服务平台 (<http://data.cma.cn/>) 提供,在京津冀区域200多个气象站中选择资料序列完整且具有较长时间序列、测站环境评分都在70分以上(按照中国气象局对测站探测环境评分标准评分)、均匀分布的87个气象站,每个站点包含1960—2015年逐日降水资料,利用这些资料对近56年京津冀区域降水的时空变化特征进行分析。对气象资料进行质量控制,对错误数据以及缺测较为严重的台站数据进行剔除处理^[9]。对每个站点的气象资料进行整理,获取年和季节序列。其中,季节划分标准为春季(3—5月)、夏季(6—8月)、秋季(9—11月)、冬季(12月—次年2月)。

1.3 研究方法

1.3.1 线性倾向分析。采用一元线性回归分析,即 $y = ax + b$,其中, b 是常数项, a 是回归系数, $a \times 10$ 为气候倾向率,表示气象要素每10年的变化率, $a > 0$ 表示呈上升趋势, $a < 0$ 时表示呈下降趋势^[10]。

1.3.2 Mann-Kendall 趋势检验方法。它是一种非参数检验方法,在水文、气象方面应用广泛。其优点是不需要样本遵从一定的分布,也不受少数异常值的干扰,非常适用于分析气象温度、降水等类型变量,计算简单方便。具体原理参考文献[11-12]。

1.3.3 滑动 t 检验法 (MTT)。它的原理是将气候序列分为两子序列,检验其均值有无显著差异,以此来判断是否存在突变,在水文、气象被广泛应用。具体原理参考文献[13]。

1.3.4 小波分析 (wavelet analysis)。也称为多分辨率分析 (multiresolution analysis),被认为是 Fourier 变换的突破性进展,可获得气候序列变化的尺度和变化的时间位置。由于小波分析在时域和频域上同时具有良好的局部特性,可以分析出时间序列周期变化的局部特征,从而能更清楚地看到各周期随时间变化情况,因而该研究选用小波分析法来分析京津冀降水量在时频两域的变化特征^[6,14-15],小波母函数为 Morlet 小波。

2 结果与分析

2.1 降水量变化趋势

2.1.1 降水量空间分布。从图2可以看出,燕山丘陵气候区年平均降水量最多,年均降水量达600 mm以上,冀北高原气候区年平均降水最少,年均降水量在400 mm以下。太行山气候区与山前平原气候区年均降水量相当,相差不足30 mm。降水量从大到小依次为冀东平原区、太行山区、山前平原区、燕山丘陵区、冀北高原区。可见,近56年来京津冀区域年平均降水量在空间由东南向西北方向逐渐递减,这与李鹏飞^[2]等分析的结论一致。

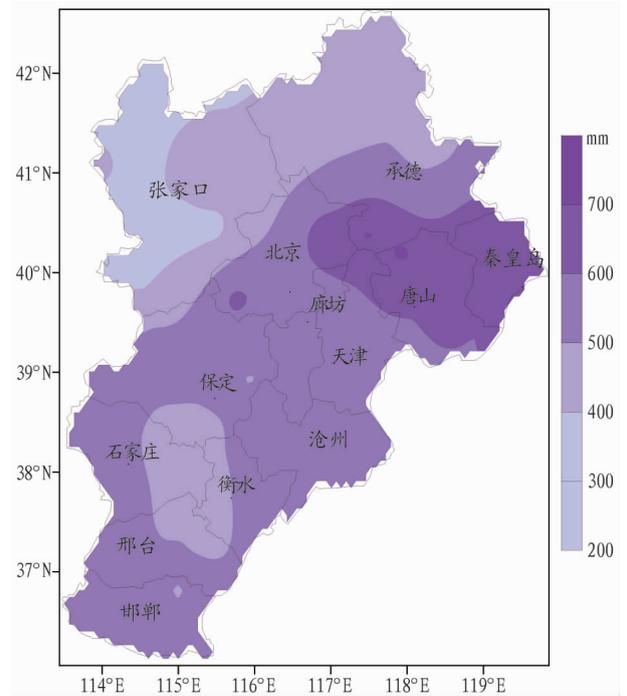
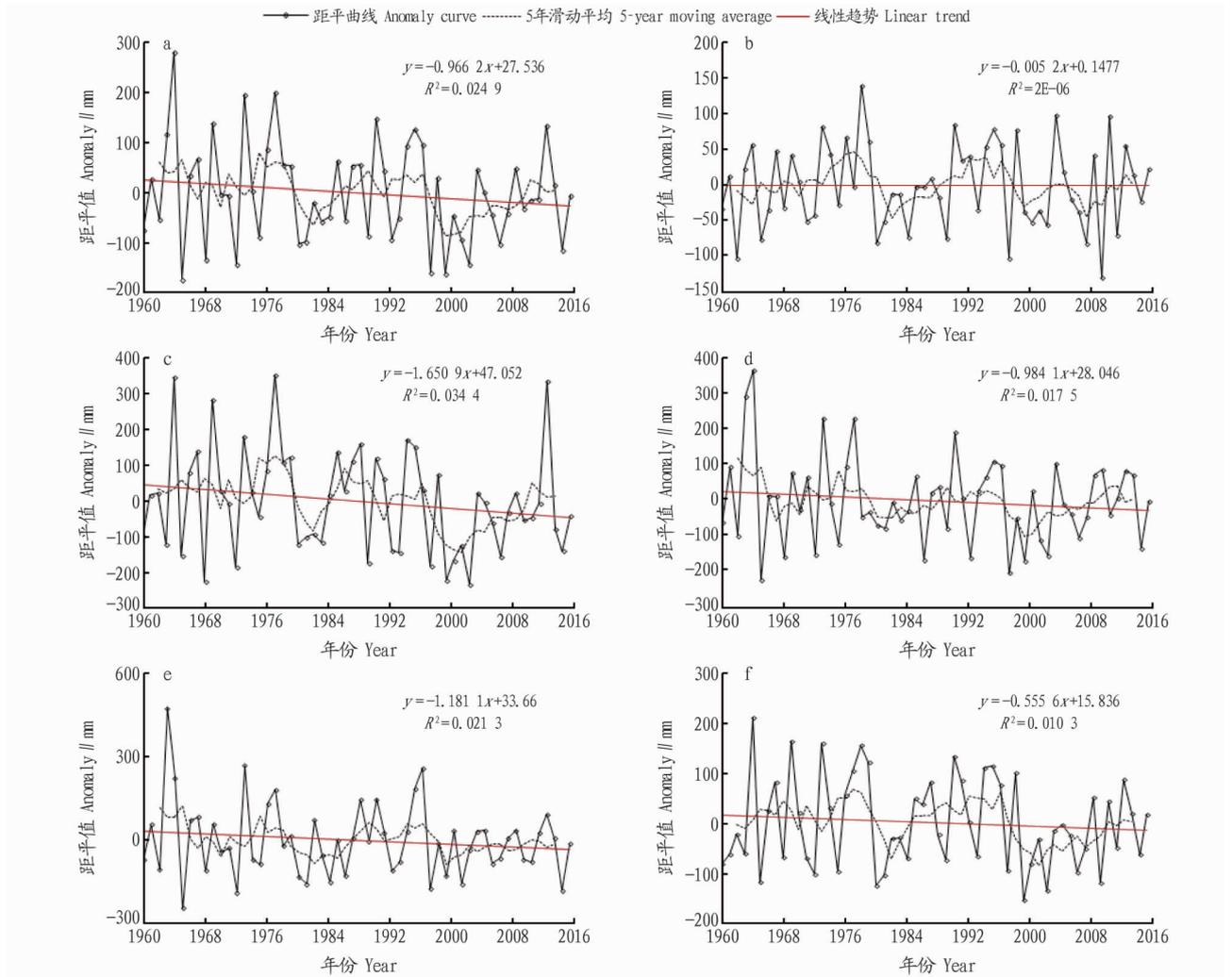


图2 1960—2015年京津冀区域年平均降水量空间分布

Fig.2 Spatial distribution of annual average precipitation in the Beijing-Tianjin-Hebei region from 1960 to 2015

2.1.2 年降水量趋势。由图3可知,近56年京津冀全区及各分区年平均降水量均处于减少趋势,但差异较为明显,全区年均降水量气候倾向率为 $-9.6 \text{ mm}/10 \text{ a}$ (未能通过 $\alpha = 0.05$ 显著性检验),下降趋势不显著;冀东平原区气候倾向率 ($-16.5 \text{ mm}/10 \text{ a}$) 明显低于京津冀区域气候倾向率,平均降水量下降趋势明显;冀北高原区几乎没有变化;降水量减少的速率从大到小依次为冀东平原区、太行山区、山前平原区、全区、燕山丘陵区、冀北高原区,说明京津冀区域年平均降水量减少速度沿海地区大于平原地区、平原地区大于高原地区。



注: a~f 分别代表京津冀全区、冀北高原区、冀东平原区、山前平原区、太行山区、燕山丘陵区

Note: a~f represent the whole area of Beijing-Tianjin-Hebei, Hebei north plateau, Hebei east plain, Piedmontplain, Taihang mountain, Yanshan hills

图 3 1960—2015 年京津冀区域年平均降水量距平变化

Fig.3 Change of annual average precipitation anomaly in Beijing-Tianjin-Hebei region from 1960 to 2015

2.1.3 季降水量趋势。由表 1 可知,近 56 年来京津冀各分区及全区春季和秋季降水量均呈增加趋势,冀北高原区春秋季节和冀东平原区秋季通过 0.05 的显著性检验,其他区均未通过,春季降水量增加幅度最大的为燕山丘陵气候区,气候倾向率为 3.79 mm/10 a,秋季降水量增加幅度最大的为冀东平原气候区,气候倾向率为 6.73 mm/10 a;各分区及全区夏季

降水量均呈减少趋势,除太行山区外其他区均通过 0.05 的显著性检验,减少幅度最大的为冀东平原气候区,气候倾向率为 -26.07 mm/10 a,由大到小依次为冀东平原区、太行山区、全区、山前平原区、燕山丘陵区、冀北高原区,山前平原区与燕山丘陵区几乎相同;冬季降水量变化趋势均不明显,冀北高原和燕山丘陵气候区呈弱增加趋势,其他分气候区为弱减

表 1 不同气候分区四季降水量均值和气候倾向率

Table 1 The mean value and the climate tendency rate of seasonal precipitation in different climate zones

气候分区 Climate zones	春季 Spring		夏季 Summer		秋季 Autumn		冬季 Winter	
	均值 Mean value value mm	倾向率 Tendency rate rate mm/10 a						
冀北高原区 Hebei north plateau	58.14	3.38*	266.77	-8.53*	73.68	4.75*	7.18	0.36
冀东平原区 Hebei east plain	69.23	2.79	420.49	-26.07*	89.48	6.73*	11.05	-0.01
山前平原区 Piedmontplain	67.38	3.01	348.23	-16.07*	89.29	0.31	12.71	-0.16
太行山区 Taihang mountain	69.16	2.61	373.03	-16.97	97.05	2.15	11.63	-0.11
燕山丘陵区 Yanshan hills	67.16	3.79	347.56	-16.02*	86.63	5.24	8.28	0.12
京津冀全区 Whole area of Beijing-Tianjin-Hebei	67.20	3.23	359.51	-16.76*	88.11	3.92	10.68	-0.02

注: * 表示通过 0.05 显著性检验

Note: * indicates a significant test by 0.05

少趋势。

2.1.4 月降水量趋势。分区月降水量平均值及气候倾向率变化趋势与全区变化趋势基本一致(表2),降水量较多的月份为7和8月,降水量减少幅度较显著的月份也为7和8月,其中7月减少最大为冀东平原气候区(-15.33 mm/10 a),最

小的为冀北高原气候区(-3.47 mm/10 a),减少幅度由大到小依次为冀东平原区、全区、山前平原区、燕山丘陵区、太行山区、冀北高原区;8月减少最大的为太行山气候区(-15.53 mm/10 a),减少幅度由大到小依次为太行山区、冀东平原区、燕山丘陵区、全区、山前平原区、冀北高原区。

表2 不同气候分区月降水量均值和气候倾向率

Table 2 The mean value and the climate tendency rate of seasonal precipitation in different climate zones

气候分区 Climate zones	1月		2月		3月		4月		5月		6月	
	均值 Mean value mm	倾向率 Tendency rate mm/10 a										
冀北高原区 Hebei north plateau	1.83	0.01	3.39	0.02	7.07	0.06	16.82	1.38	34.25	1.94	67.54	2.95
冀东平原区 Hebei east plain	2.71	-0.11	4.90	-0.01	8.35	0.26	23.91	-0.14	36.97	2.67	81.96	4.10
山前平原区 Pied- montplain	2.83	-0.20	6.30	0.21	9.52	0.18	23.91	-0.51	33.76	3.52	59.94	3.38
太行山区 Taihang mountain	2.66	-0.07	5.98	-0.01	10.18	-0.01	22.34	-0.42	36.61	3.07	66.64	5.40
燕山丘陵区 Yans- han hills	2.10	-0.02	3.94	-0.14	8.91	0.48	20.37	0.71	37.81	2.69*	76.57	4.14
京津冀全区 Whole area of Beijing- Tianjin-Hebei	2.52	-0.10	5.14	0.03	9.03	0.24	22.28	0.03	35.89	2.96*	70.26	3.96

气候分区 Climate zones	7月		8月		9月		10月		11月		12月	
	均值 Mean value mm	倾向率 Tendency rate mm/10 a										
冀北高原区 Hebei north plateau	109.82	-3.47	89.41	-8.01	47.75	2.87	19.70	0.79	6.23	1.09	2.00	0.33*
冀东平原区 Hebei east plain	186.39	-15.33	152.02	-14.71	52.43	3.43	26.06	1.89	10.95	1.44	3.44	0.01
山前平原区 Pied- montplain	157.23	-8.40	129.01	-9.13	48.56	2.12	26.04	-1.16	13.80	0.32	3.47	-0.16
太行山区 Taihang mountain	159.53	-6.53	146.45	-15.53	58.67	3.95	24.95	-1.76	13.15	0.17	2.98	-0.06
燕山丘陵区 Yans- han hills	149.00	-7.40	121.04	-11.80	54.21	3.04	23.79	0.87	8.34	1.63*	2.26	0.23
京津冀全区 Whole area of Beijing- Tianjin-Hebei	158.11	-8.99	131.14	-11.72	52.07	2.92	24.87	0.07	11.16	0.93	2.98	0.02

注: *表示通过0.05显著性检验

Note: * indicates a significant test by 0.05

2.2 降水量的突变性及周期性分析

2.2.1 突变性。对各分区和全区年平均降水量做突变分析,结果发现,各分区域年平均降水量均未出现显著性上升、下降及明显突变现象,且降水量均表现为前期增加、后期减少的变化态势。冀北高原、冀东平原及燕山丘陵气候区均在2000年之前以上升趋势为主,之后以下降趋势为主;山前平原和太行山气候区变化趋势相似,山前平原在20世纪60年代中前期表现为上升趋势,其余时期则基本为下降趋势,太行山区则在20世纪70年代之前为上升趋势,之后以下降趋势为主。京津冀全区降水量减少趋势并不显著,也没有突变发生,除1972和1975年外,降水量在20世纪80年代之前呈上升趋势,之后至2015年总体表现为下降趋势,但在20世纪90年代初期和中期有短暂上升趋势(图4)。

对各分区和全区季平均降水量做突变分析,结果发现(图5),除燕山丘陵区夏季平均降水量在1996年发生了明显

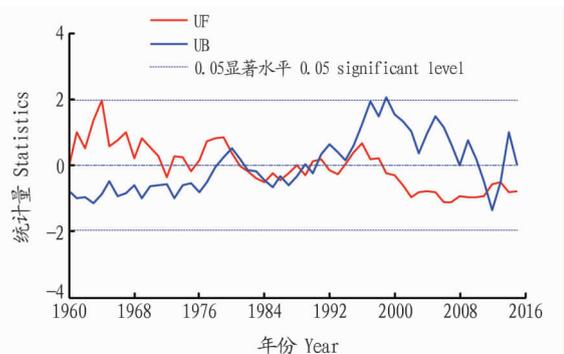


图4 1960—2015年京津冀全区年平均降水量Mann-Kendall突变检验

Fig.4 Mann-Kendall mutation test of annual average precipitation in Beijing-Tianjin-Hebei region from 1960 to 2015

突变,冀北高原区冬季平均降水量在1970年发生突变外,其他分区及在其他季节均未发生突变;而京津冀全区结合滑动

t 检验(图 6),春季平均降水量在 1982 年发生了突变,夏季在结合全区夏季降水量累积距平曲线(图 7),夏季平均降水量

的突变时间为 1996 年。秋季和冬季平均降水没有发生突变。

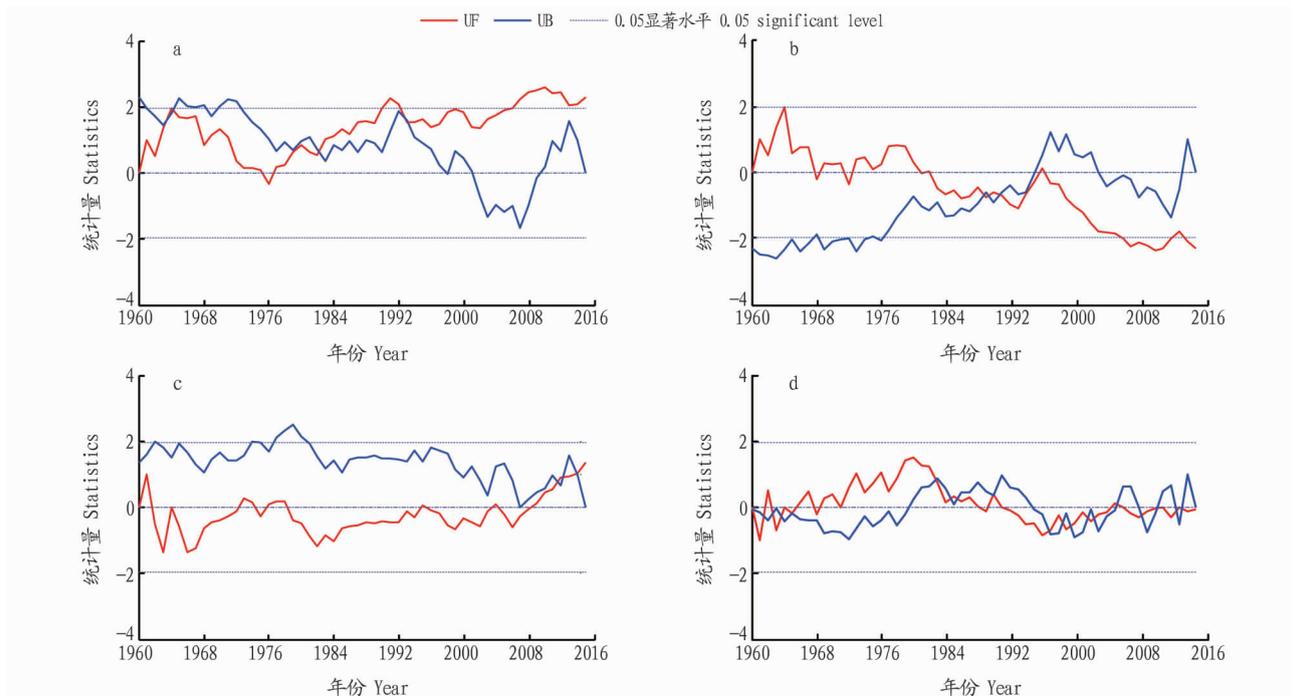


图 5 1960—2015 年京津冀全区春季(a)、夏季(b)、秋季(c)和冬季(d)降水量 Mann-Kendall 突变检验

Fig.5 Mann-Kendall mutation test for spring (a), summer (b), autumn (c) and winter (d) precipitation in Beijing-Tianjin-Hebei region from 1960 to 2015

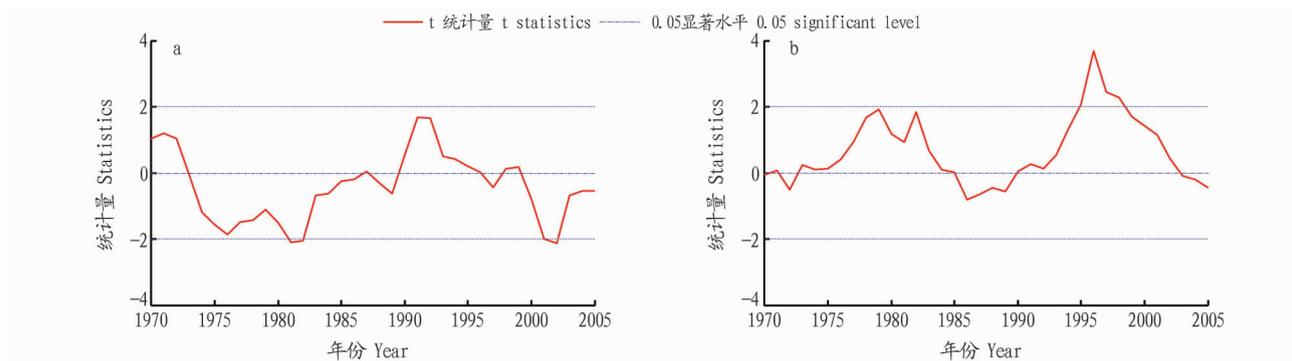


图 6 1960—2015 年京津冀全区春季(a)和夏季(b)降水量滑动 t 检验曲线

Fig.6 Sliding t statistic curve of the precipitation in spring (a) and summer (b) in Beijing-Tianjin-Hebei region

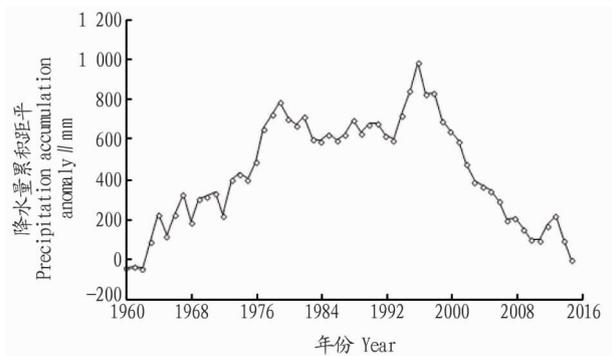


图 7 1960—2015 年京津冀全区夏季降水量累积距平

Fig.7 Precipitation accumulation anomaly in summer in Beijing-Tianjin-Hebei region from 1960 to 2015

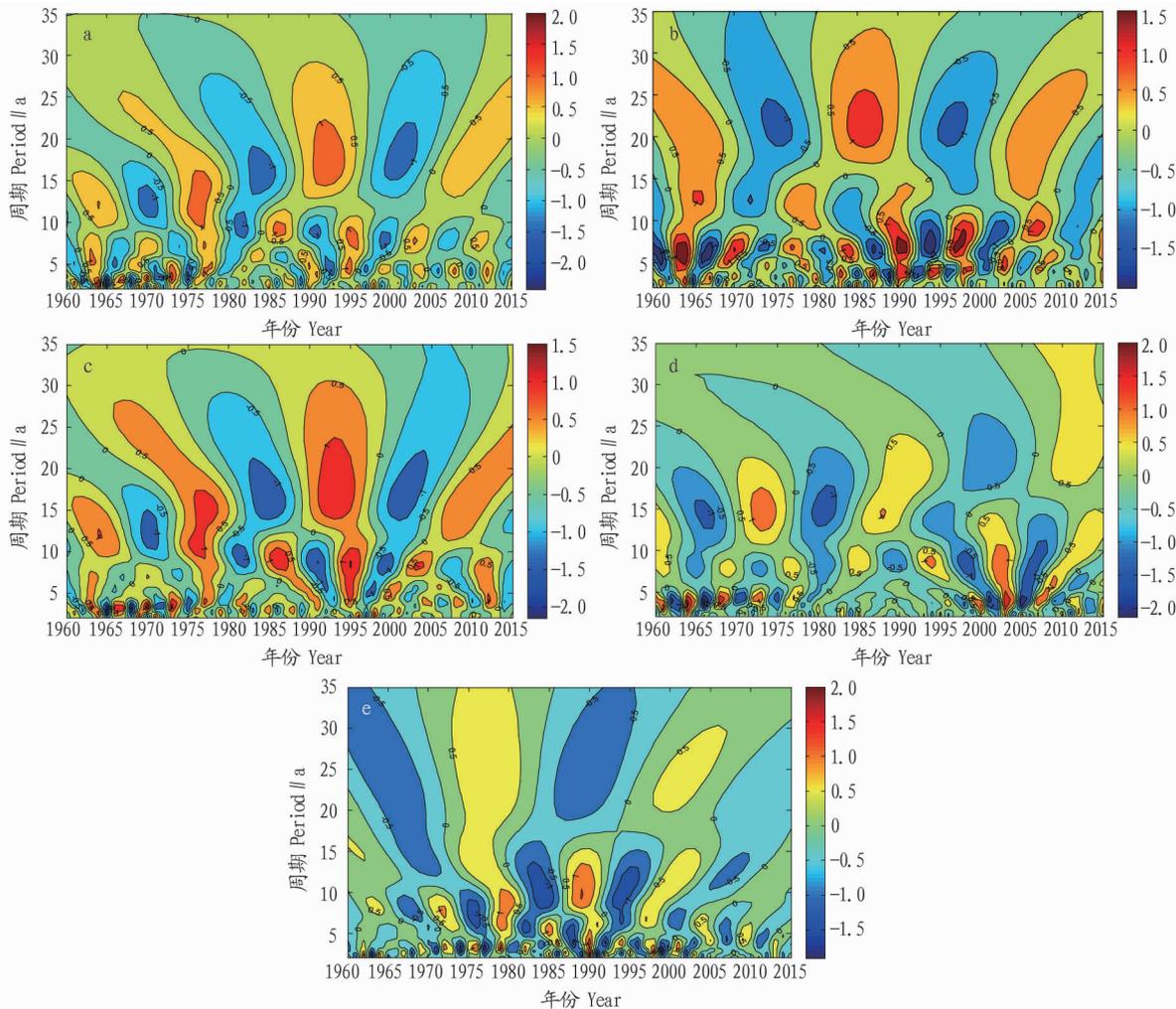
区年平均降水量进行时间周期演变分析,结果发现(图 8),5 个分区及全区年降水量具有总体一致性的特征,均存在 3 个明显的特征时间尺度振荡周期,分别为 3~4、6~8 和 12~18 年,但又有所差异。除冀东平原区年平均降水量以 8~12 年中尺度周期变化最为明显外,冀北高原区和燕山丘陵区年平均降水量以准 20 年大尺度周期为主,山前平原区年平均降水量以 12~18 年大尺度周期为主,太行山区以准 30 年大尺度周期为主,说明除冀东平原区外其他 4 个气候区降水量变化以年代际周期为主,降水相对比较稳定。对于全区 12~18 年的特征时间尺度在整个研究时域上始终存在,且进入 20 世纪 80 年代之后在特征尺度上有所增大,在整个研究时段大致存在 3 个降水偏少期和 4 个降水丰沛期;6~8 年周期在 1980—2010 年比较显著,其他时期则不太明显;3~4 年特征

2.2.2 周期性。采用 Morlet 小波函数对京津冀各分区及全

尺度上,在 20 世纪 70 年代中期之前,周期振荡较明显,在 1990—2010 年周期振荡有所减弱,其余时段则不明显。

京津冀分区和全区春季降水量也存在 3 个特征时间尺度,分别为准 3 年、6 年和 23 年(图 8b),夏季降水量变化周

期为 3~4、6~8 和 12~18 年,秋季降水量变化周期分别为准 4 年、8 年和 14 年(图 8d),冬季分别为 2~3 年、8~10 年和准 25 年等 3 个特征时间尺度(图 8e)。



注:a~e 分别代表全年、春季、夏季、秋季、冬季

Note:a~e represent whole year, spring, summer, autumn and winter

图 8 1960—2015 年京津冀全区年、季降水量 Morlet 小波分析

Fig.8 Morlet wavelet analysis of annual and seasonal precipitation in Beijing-Tianjin-Hebei region from 1960 to 2015

2.3 夏季降水减少明显的成因分析 郝立生^[16]从北半球和区域环流变化及造成降水的主要要素风、湿度、水汽输送、上升运动等的变化详细分析了华北地区夏季降水减少的原因,结果发现,500 hPa 高度场环流由突变前的经向环流突出转变为纬向环流突出,贝加尔湖高空槽活动减少,使得华北上升运动过程减少;蒙古地区高空出现降温,一方面造成对流层中上层位势高度降低,导致高空急流位置南移,引起东亚夏季风减弱,使得水汽很难越过长江到达华北;另一方面降温还造成对流层底层气压升高,使得地面低压天气过程减少。这几个方面共同影响,结果造成华北夏季降水出现减少趋势。许多研究结果也表明,东亚夏季风减弱与华北地区夏季降水减少有密切的联系^[17-19],而京津冀区域位于华北地区东部,以上环流的变化势必影响京津冀区域夏季降水呈减少趋势。为了定量描述东亚夏季风强度变化,将 850 hPa 层区

域平均(110°~120°E, 25°~45°N)的南风风速定义为东亚夏季风指数^[18],将多个降水偏多年和偏少年夏季的 850 hPa 平均风场进行对比(图 9),可以看出,降水偏多年,京津冀区域风向多为偏南风且风力较强,夏季风表现为高强度,而相比之下偏少年份,东亚地区中纬度的偏南风减弱非常明显,京津冀区域偏南风较弱,水汽很难输送到 30°N 以北地区,夏季风表现很不突出。而京津冀区域内冀东平原气候区减少幅度明显大于其他气候分区与京津冀区域的地形影响有关,这与向亮等^[5]研究的结论相一致。

3 结论

利用京津冀地区 87 个地面气象台站 1960—2015 年的逐日降水资料,采用线性回归、M-K 突变分析和小波分析方法,对京津冀 5 个分区和京津冀全区降水变化规律进行了分析,得到如下结果:

(1) 京津冀区域年降水量呈东南向西北方向逐渐递减,

冀东平原区最多,冀北高原区最少。

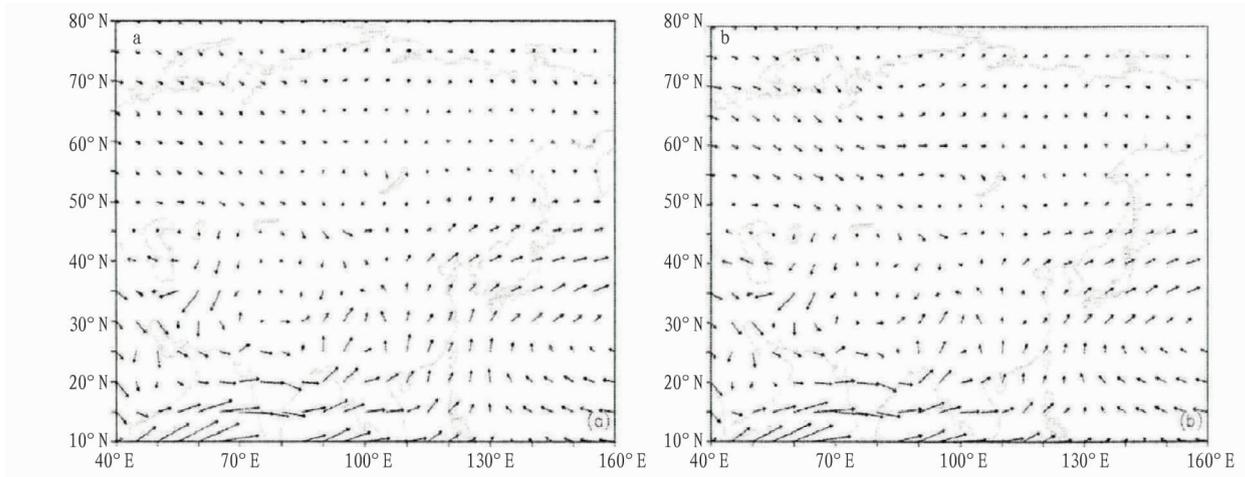


图 9 京津冀地区降水偏多年(a)和偏少年(b)6—8月东亚地区 500 hPa 平均风场

Fig.9 Precipitation more years (a) and less years (b) in the Beijing-Tianjin-Hebei region for June–August East Asia 500 hPa average wind field

(2) 京津冀全区年平均降水量呈下降趋势,不显著,冀东平原区下降趋势明显,冀北高原几乎没有变化,减少速率由大到小依次为冀东平原区、太行山区、山前平原区、全区、燕山丘陵区、冀北高原区。

(3) 京津冀各分区及全区夏季降水量呈明显减少趋势,减少幅度由大到小依次为冀东平原区、太行山区、全区、山前平原区、燕山丘陵区、冀北高原区,山前平原区与燕山丘陵区几乎相同;冬季降水量变化趋势均不明显,冀北高原和燕山丘陵气候区呈弱增加趋势,其他分气候区为弱减少趋势。

(4) 京津冀分区月降水量平均值及气候倾向率变化趋势与全区变化趋势基本一致,降水量减少幅度较显著的月份为 7 月和 8 月。

(5) 京津冀全区及各分气候区年、季平均降水量主要存在 4 个周期变化,但周期尺度大小有所不同,大致分为 3~4、6~10、12~18 及 20 年以上。其中,全区夏季降水量变化周期特征与全区年降水量周期特征相似,存在 3~4、6~8 和 12~18 年等 3 个明显的特征时间尺度振荡周期,且 12~18 年的特征时间尺度在整个研究时域始终存在。

(6) 京津冀区域夏季降水减少趋势显著的主要原因是东亚夏季风和地形影响。

参考文献

- [1] SOLOMON S, QIN D, MANNING M, et al. Climate change 2007: The physical science basis [C] // IPCC. Contribution of working group I to the fourth assessment report of intergovernmental panel on climate change. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [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.

- [3] 张健, 章新平, 王晓云, 等. 京津冀地区近 47a 降水量的变化特征[J]. 干旱气象, 2009, 27(1): 23–28.
- [4] 赵少华, 杨永辉, 邱国玉, 等. 河北平原 34 年来气候变化趋势分析[J]. 资源科学, 2007, 29(4): 109–113.
- [5] 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.
- [6] 李春强, 杜毅光, 李保国. 1965–2005 年河北省降水量变化的小波分析[J]. 地理科学进展, 2010, 29(11): 1340–1344.
- [7] 李月英, 范俊红, 于海磊, 等. 石家庄降水量和气温变化特征分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2009, 3(2): 31–34.
- [8] 宋善允. 河北气候特征及气候资源[M]. 石家庄: 河北科学技术出版社, 2016: 14–15.
- [9] 胡鲲, 赵春生, 龙晓斌, 等. 潍坊地区蒸发量的变化特征及其影响因子分析[J]. 中国农学通报, 2014, 30(29): 256–260.
- [10] 徐建新, 陈学凯, 黄鑫, 等. 贵州省近 50 年降水量时空分布及变化特征[J]. 水电能源科学, 2015, 33(2): 10–14.
- [11] 李春强, 杜毅光, 李保国, 等. 河北省近四十年(1965–2005)气温和降水变化特征分析[J]. 干旱区资源与环境, 2009, 23(7): 1–7.
- [12] 曹永强, 张亮亮, 王学风, 等. 近 50 年辽宁省气温及降水量变化趋势与突变特征分析[J]. 水电能源科学, 2016, 34(1): 6–9.
- [13] 杨萍, 王乃昂, 王翠云, 等. 1960–2007 年青海湖地区气温变化趋势和突变分析[J]. 青海大学学报(自然科学版), 2011, 29(2): 49–53.
- [14] 尤卫红, 段旭, 杞明辉, 等. 连续小波变换在云南百年气温和降水变化分析中的应用[J]. 高原气象, 1999, 18(1): 47–54.
- [15] 刘泓志, 肖长来, 张岩祥, 等. 吉林省西部 52 年降水量分布演变特征及趋势分析[J]. 水电能源科学, 2015, 33(6): 11–14.
- [16] 郝立生. 华北降水时空变化及降水量减少影响因子研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2011.
- [17] 梁平德. 印度夏季风与我国华北夏季降水量[J]. 气象学报, 1988, 46(1): 75–81.
- [18] 赵声蓉, 宋正山, 纪立人. 华北汛期降水与亚洲季风异常关系的研究[J]. 气象学报, 2002, 60(1): 68–75.
- [19] 克来木汗·买买提, 葛朝霞, 吴立君, 等. 华北地区可利用降水量特征分析[J]. 水电能源科学, 2013, 31(2): 9–11.