

窦以文, 丹利, 严中伟, 等. 2018. 基于均一化观测序列的京津冀地区气候变化格局分析 [J]. 气候与环境研究, 23 (5): 524–532. Dou Yiwen, Dan Li, Yan Zhongwei, et al. 2018. Analysis of climate change in Beijing–Tianjin–Hebei region based on homogenized observations [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 23 (5): 524–532, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2018.17054.

基于均一化观测序列的京津冀地区气候变化格局分析

窦以文^{1,2} 丹利² 严中伟² 李珍² 胡保昆¹ 史君卿³

¹ 北京市气象信息中心, 北京 100089

² 中国科学院大气物理研究所中国科学院东亚区域气候—环境重点实验室, 北京 100029

³ 北京农业职业学院, 北京 100093

摘要 利用 1960~2015 年京津冀地区 88 个国家级气象站观测资料 (包括日平均气温、日最高气温、日最低气温、日降水、日平均风速等), 使用 MASH (Multiple Analysis of Series for Homogenization) 方法剔除台站迁址、仪器变更等因素所致偏差后, 生成均一化的观测资料集。基于新资料集计算了各站气温、降水和风速序列的线性趋势和 Morlet 小波等统计特征, 分析了京津冀地区气候变化格局。结果表明: MASH 方法能较准确地检测并校订观测序列中迁站、仪器变更等因素所导致的非均一性; 1960~2015 年期间京津冀年平均气温显著上升, 上升幅度为 0.261 °C/10 a; 降水减少, 平均减少 11.27 mm/10 a; 风速显著减小, 平均减小 0.193 m s⁻¹(10 a)⁻¹。

关键词 均一化 气温 降水 风速

文章编号 1006-9585 (2018) 05-0524-09

中图分类号 P456

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2018.17054

Analysis of Climate Change in Beijing–Tianjin–Hebei Region Based on Homogenized Observations

DOU Yiwen^{1,2}, DAN Li², YAN Zhongwei², LI Zhen², HU Baokun¹, and SHI Junqing³

¹ Beijing Meteorological Information Centre, Beijing 100089

² Key Laboratory of Regional Climate–Environment Research for Temperate East Asia, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

³ Beijing Vocational College of Agriculture, Beijing 100093

Abstract Based on MASH-generated homogenized observation series of daily mean, maximum, and minimum temperatures and daily precipitation and wind speed from 88 national meteorological stations in Beijing–Tianjin–Hebei region (BTH) during 1960–2015, we calculate the linear trends and Morlet wavelets of the time series at each station to analyze the climate change in BTH. The results suggest that the MASH method can detect and adjust discontinuities in association with changes in the locations of stations, observation instruments and surrounding environs. The annual mean temperature over the region on average has risen by 0.26 °C/10 a, precipitation has decreased by 11.3 mm/10 a, and wind speed has decreased by 0.19 m s⁻¹(10 a)⁻¹.

Keywords Homogenization, Surface air temperature, Precipitation, Wind speed

收稿日期 2017-03-29; 网络预出版日期 2018-04-04

作者简介 窦以文, 男, 1970 年出生, 硕士, 高级工程师, 主要从事气象信息处理和数据分析。E-mail: douyw@bjmb.gov.cn

通讯作者 丹利, E-mail: danli@tea.ac.cn

资助项目 国家重点研发计划项目 2016YFA0602501, 国家自然科学基金项目 41630532, 北京市气象局科技项目 BMBKJ201401004

Funded by National Key Research and Development Program of China (Grant 2016YFA0602501), National Natural Science Foundation of China (NSFC, Grant 41630532), Beijing Meteorological Bureau Science and Technology Project (Grant BMBKJ201401004)

1 引言

IPCC 第五次评估报告表明, 过去一百多年 (1880~2012 年), 全球地表平均气温大约升高了 0.85°C 。我国气候近百年来也显著升温, 大约达 $1.56^{\circ}\text{C}/100\text{ a}$ (Cao et al., 2017), 近 50 年气温增暖尤其明显, 达 $0.27^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ (Cao et al., 2016), 年平均气温、年平均最低气温、年平均最高气温、年极端最低气温、年极端最高气温均呈显著上升趋势, 尤其是在 1961~2010 年平均气温上升了约 $1.35^{\circ}\text{C}/50\text{ a}$ (周丹等, 2014), 比全球同期平均增温速率明显偏高。近 55 年来中国大陆地区年降水量趋于减少, 趋势为 $-3\text{ mm}/10\text{ a}$ (向辽元等, 2007)。京津冀是我国政治、经济、文化中心的所在地, 近年来国家实施京津冀一体化战略, 这一地区的经济发展加速, 随着全球和我国的气候变暖, 京津冀气候如何变化, 日益受到社会各界的广泛关注。

国内外学者对京津冀一带的气候变化做了很多的研究, 他们发现 1961~2008 年华北地区降水日数减少, 降水总量也减少 (Wang et al., 2010; Tu et al., 2010; 郝立生等, 2010); 北京的年降水量从 20 世纪 50 年代至 80 年代持续下降, 平均下降 $12.2\%/10\text{ a}$, 而年气温平均增温 $0.2^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ (谢庄和王桂田, 1994)。河北省年平均气温升高 $0.3\sim 0.4^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$, 降水则下降十几 $\text{mm}/10\text{ a}$ (邵爱军等, 2008)。1961~2008 年北京城区、郊区平均气温分别增加 2.2°C 和 0.8°C , 增温速率分别为 $0.45^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 和 $0.17^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$, 最高气温的增加速率分别为 $0.33^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 和 $0.29^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$, 最低气温变化的城郊增温速率的差异比最高气温显著, 城区增温速率为 $0.57^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$, 郊区为 $0.19^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$; 降水变化趋势分别为 $-17.28\text{ mm}/10\text{ a}$ 、 $-20.95\text{ mm}/10\text{ a}$ 。北京城区、郊区平均风速均呈减小趋势, 减小速率分别为 $-0.19\text{ m s}^{-1}/10\text{ a}$ 和 $-0.1\text{ m s}^{-1}/10\text{ a}$ (赵娜等, 2011); 基于均一化的风速观测估算 1961~2008 年北京市区的风速下降速率比郊区快约 20%, 可能反映了城市化的气候效应 (Li et al., 2011)。石家庄站 1962~2009 年地面气温序列中年平均、最低和最高气温的城市化影响分别为 $0.19^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 、 $0.30^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 和 $0.09^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 。京津冀地区城市化对最低气温的影响比最高气温的影响更加明显 (卞韬等, 2012; Wang et al., 2013)。从以上研究可以看到, 华北区域年

降水下降, 平均气温上升, 平均风速减少, 但是很少有文献分析京津冀地区的整体变化趋势具体情况。

由于原始资料包含了很多需要校正的偏差, 如台站地址变更、仪器类型更换等因素所导致的误差, 不能完全反映真实的气候变化, 因此必须首先对原观测序列作均一化处理, 剔除台站迁址等的误差后得到均一化数据, 在此基础上才能分析出更加合理的气候变化格局 (严中伟等, 2014a)。通过天津 1891 年以来器测气温序列的均一化研究, 可以发现均一化序列与“多地点”、“多来源”参证序列的相关性明显提高 (任雨和郭军, 2014)。对北京 1977~2006 年期间站点迁移和城市化对气温序列的影响研究中, 北京多年平均季节温度异常与邻近站群平均值的比较, 将站点变化引起的偏差量化为 0.43°C 和 0.95°C 之间, 也发现均一化数据比原始数据更能合理地反映气候变化特征 (Yan et al., 2010)。针对 1960~2006 年北京逐日气温序列的均一化研究表明, 时间序列均一性的多元分析方法 (Multiple Analysis of Series for Homogenization, MASH) 能确切地检测并校订原始数据存在的非均一性 (Li and Yan, 2010)。为了保持长期气候序列的均一性, 有必要对原始数据进行均一化校订 (Yan et al., 2001)。很多区域气候变化的分析中都体现了均一化数据的重要性 (李庆祥等, 2003, 2012; 严中伟等, 2014b; Zhang et al., 2014; Li et al., 2015)。然而, 迄今尚少见到利用均一化气候资料集分析京津冀全区的气候变化格局的工作。

本文首先利用 MASH 方法 (Szentimrey, 1999) 对京津冀地区 1960~2015 年的年平均气温、降水、风速等观测资料进行了均一化处理, 进而揭示出近几十年来的京津冀气候变化格局, 结果可为京津冀地区适应气候变化和可持续发展提供科学参考。

2 数据与方法

原始资料来自北京市气象信息中心提供的京津冀地区 88 个国家级观测站, 资料时段为从建站到 2015 年 12 月 31 日。气象要素为日平均气温、日最高气温、日最低气温、日降水总量、日平均风速。1960 年前建设站点较少, 北部和西部稀疏, 东部和南部分布较密集。本文所用资料选取时间为 1960~2015 年。图 1 为选用的 88 站分布, 选取标

准为 5 要素均有观测且缺测较少的台站, 其中日平均气温、日最高气温、日最低气温、日降水总量、日平均风速缺测数分别小于等于 124 次、126 次、126 次、29 次、177 次。

由于受到台站迁移、观测仪器更新和地面观测规则变更等影响, 长期气象观测序列往往具有非均一性, 不能完全代表真实气候变化(Yan et al., 2001; 李庆祥, 2011)。MASH 方法是匈牙利气象局开发完成的相对均一性测试程序, 该方法假设所有序列都是潜在不均一的, 通过相同气候区域各站之间相互比较即可检测和校订非均一断点。针对不同的气候要素, 应用加法模式或乘法模式进行校订, 乘法模式也可以通过取对数转化为加法模式。针对待检序列和若干待加权的参考序列, 通过最大限度地减少差值序列的方差来确定最佳的权重, 以提高统计检验的效率。根据传统统计学中一类错误和二类错误假设检验, 得到断点和变化值以及变化范围, 进而调整具有显著非均一断点的序列。

利用 MASH3.3 软件对本文所用气候资料进行均一化处理, 生成均一化的观测序列集。采用一元线性方程拟合线性趋势, 并用 t 检验其显著性 (p 值与显著性水平作比较来判断是否拒绝原假设, 当 p 小于显著性水平时, 拒绝原假设, 否则接受原假设); 采用 Morlet 小波等方法分析各要素序列, 籍此了解京津冀地区近几十年来的气候变化格局。

3 结果分析

3.1 非均一性结果分析

一般情况下, 均一化气温资料与原始资料之差有明显的断点, 而且差值较大, 都是由于台站迁移距离较大引起的, 使用 MASH 方法能有效检测到站点元数据记录的间断点。

从图 2 中看到, 怀柔站 1995~1997 年原始值和均一化资料气温差值达到 0.82 °C, 平谷站气温原始和均一化差值 1977 年和 2006 年有 2 次较大的变化分别为 0.32 °C 和 0.35 °C, 通过查询历史台站信息可知该变化是由于怀柔和平谷站从北京城区迁移到郊外。怀柔站从城区迁移到郊外 4 km 的地方, 平谷站 1977 年向北迁移了 2000 m; 2006 年则向东北方向迁移了 2100 m, 海拔也增高了。

从表 1 可以看出, 很多台站的风速、平均气温和最低气温观测年序列中存在非均一化的间断点。

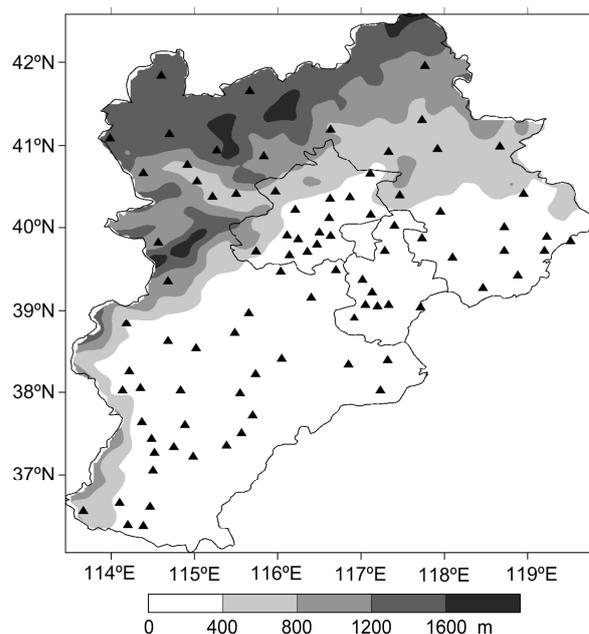


图 1 京津冀地区海拔高度及 88 站点的空间分布
Fig. 1 Altitude and geographic distribution of the 88 stations in BTH (Beijing-Tianjin-Hebei region)

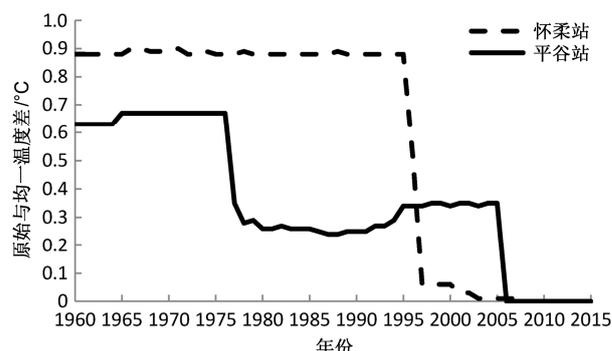


图 2 怀柔和平谷站年平均气温均一化资料与原始资料差值
Fig. 2 Difference between the homogenized data and raw data of annual average temperature at Huairou and Pingguo weather station

88 个台站的风速、气温和最低气温资料中分别检测到断点为 52、55 和 113 次。从表 2 中可以看到, 台站迁移引起风速、平均气温、最低气温数据的间断分别为 29 次、34 次、57 次。由于降水变化范围较大, 断点值不明显, 需要和周围站点联系起来分

表 1 京津冀站点的断点统计

Table 1 The detected breakpoints and the causes for the changes at the BTH stations

	站数	平均风速	平均气温	最低气温
		断点数	断点数	断点数
北京	15	13	14	27
天津	9	13	7	14
河北	64	26	34	72

析比较好，需要单独研究。台站沿革数据变化对最高气温影响也较小，上表没有列出着两个变量的检测断点统计结果。

表 2 与检测断点关联的台站元数据变更次数统计
Table 2 Statistics of times of station metadata changes associated with detection breakpoints

台站位置	观测仪 变动	观测时 器变更	人工观测 间变更	观测次 改自动	周围障碍 数变更	观测记 物变更	观测记 录变更
北京	8/9/5	2/1/5	0/0/1	1/0/1	1/3/3	1/0/0	0/1/0
天津	6/4/4	5/1/4	1/1/3	0/1/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0
河北	15/21/38	3/3/8	0/0/1	1/2/3	0/3/3	0/0/0	0/0/0

注：表格中的数据分别为平均风速、平均气温、最低气温变更次数，其中 0 表示没有此变更。

3.2 气温变化特征分析

从图 3 可知，1960 年以来京津冀气温平均每十年上升 0.261 °C。通过了 $\alpha=0.001$ 的显著性水平检验；1988 年前主要为负距平，即年平均气温低于多年平均气温；1988 年后主体为正距平，即高于多年平均气温，表明京津冀气候呈逐步增暖趋势。

从图 4 可见，平均气温增长有两个大值中心，一个位于廊坊到天津之间；另一个在河北西北部。其中心气温增速都达到了 0.33 °C/10 a。气温增速较快的原因可能与局部的能源和地形情况有关：廊坊—天津一带工矿企业发展迅速，造成能源集中消耗积累；河北西北部的阳原县一带处于太行山脉西侧，容易受蒙古高原内陆增暖的影响。气温增速较缓的地区也有两个，一个位于京津冀东北部滦平县；另一个为于平山县西部。气温增速仅为 0.08 °C/10 a，远低于京津冀平均增速。增速较缓的原因或许与其地处山区并存在局地环流效应有关。其他地区气温增速大都在 0.23~0.28 °C/10 a，和全国平均增暖速率相当，上述气温区域分布格局在均一化的

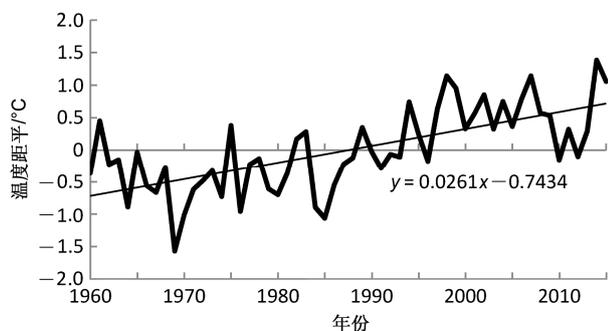


图 3 1960~2015 年京津冀年平均气温距平
Fig. 3 Time series of annual average temperature anomaly in BTH during 1960-2015

数据计算结果中比原始气温分布表现得更为明显。

最高气温增温趋势空间分布图中，北京和天津及京津冀北部增温明显，增速在 0.23~0.32 °C/10 a；天津增速最大达 0.32 °C/10 a。均一化和原始数据计算的结果基本一致，但均一化的结果在南部增温相对更弱。

最低气温增温趋势空间分布与平均气温的趋势分布格局类似，说明最低气温变化对平均气温起主导作用。北京和天津及京津冀东北部增温明显，增速在 0.45~0.85 °C/10 a；北京增速最大为 0.85 °C/10 a。京津冀均一化数据最高气温增温趋势空间分布图中，最低气温增温趋势以北京和天津及京津冀东北部增温明显，这与原始数据最低气温增温趋势空间分布相一致，原始资料和均一化数据的最低气温增温趋势强于最高气温。

图 5 是京津冀年平均气温的 Morlet 小波分析结果。可见，1961~2014 年京津冀年平均气温呈现出一定的周期振荡特征：存在 5~7 年的短期振荡，2014 年后处于暖位相；同时还存在 10~15 年和 28~32 年的中长期振荡，2013 年前处于冷位相，2015 年变暖位相。图 5b 小波方差图中可以看出，在 6 年、13 年、19 年和 28 年处呈现峰值，表明京津冀年平均气温主要存在 6 年、13 年、19 年和 28 年等准周期性的变化。综上所述，京津冀年平均气温存在着多种时间尺度振荡，其叠加效应表明经短暂的相对冷位相后气温仍将呈现增高趋势。

3.3 降水变化特征分析

从图 6a 年降水距平序列可知，京津冀区域平均降水呈微弱减少趋势，平均每十年减少 11.27 mm，但未能通过 95%显著性检验，说明年降水量没有显著性变化趋势。1961~1980 年降水振幅较大，在-170 到 260 mm 之间。1990~2015 年降水距平下降趋势明显，基本维持在-100 到-170 mm 之间，形成了京津冀近 30 年降水减少、气温增加的气候特征。通过年降水趋势分布（图 6b）可见，京津冀东部和南部年降水呈负增长：黄骅地区达-3.0 mm/10 a，保定-1.8 mm/10 a，南部及西南部边缘达-2.6 mm/10 a。而京津冀北部、西北及中南部呈正增长，其中姜家店乡达 0.2 mm/10 a。总体可见京津冀年降水趋势呈现出从西北往东南阶梯式递减的分布格局。

由图 7a 京津冀年降水的 Morlet 小波分析结果可见，1961~2014 年京津冀年降水显现出周期振荡

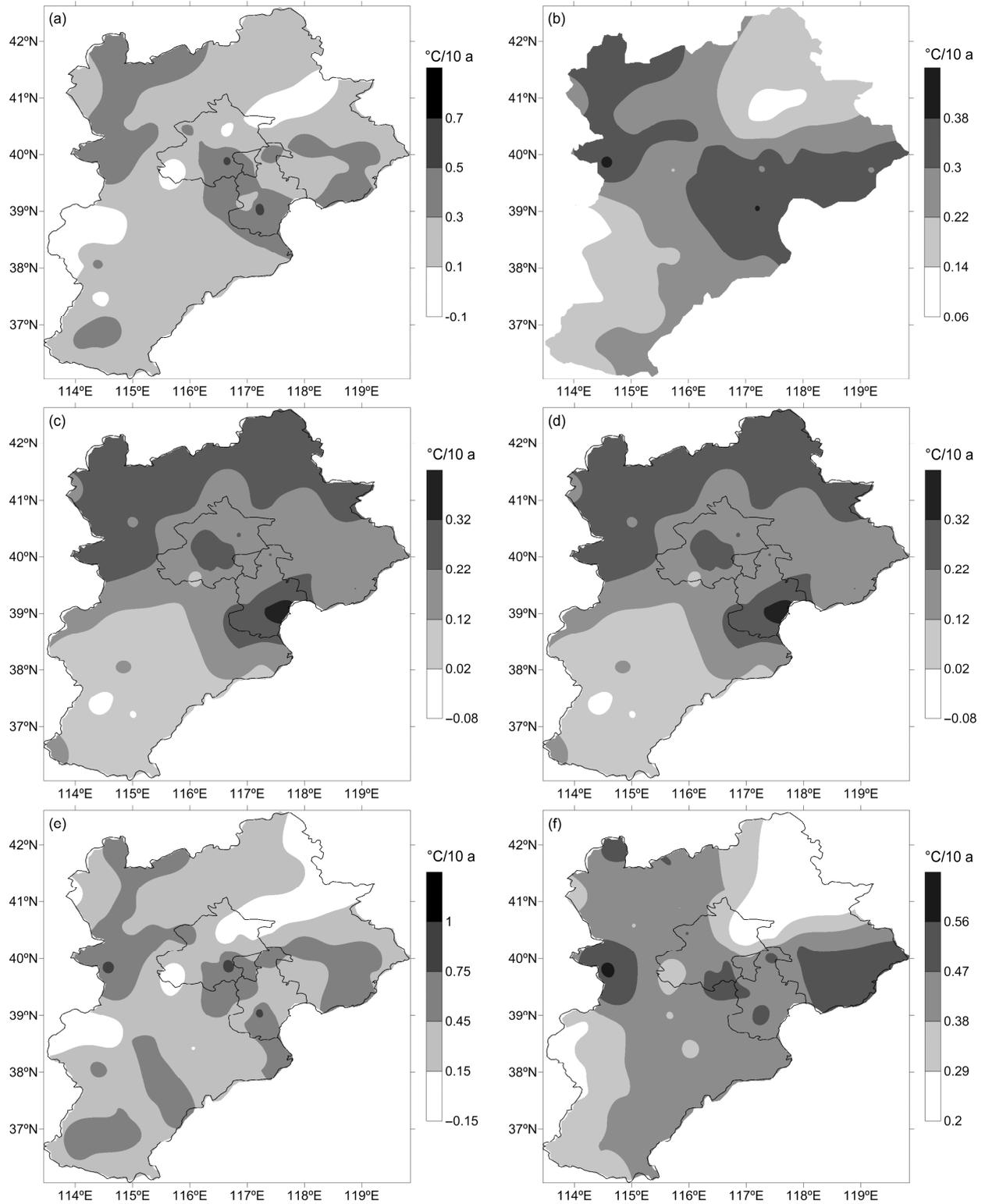


图4 京津冀年平均气温增温趋势空间分布: (a) 原始平均气温; (b) 均一化平均气温; (c) 原始日最高气温; (d) 均一化日最高气温; (e) 原始日最低气温; (f) 均一化日最低气温

Fig. 4 Distributions of annual mean temperature trends in BTH: (a) Original mean temperature; (b) homogenized mean temperature; (c) original daily maximum temperature; (d) homogenized daily maximum temperature; (e) original daily minimum temperature; (f) homogenized daily minimum temperature

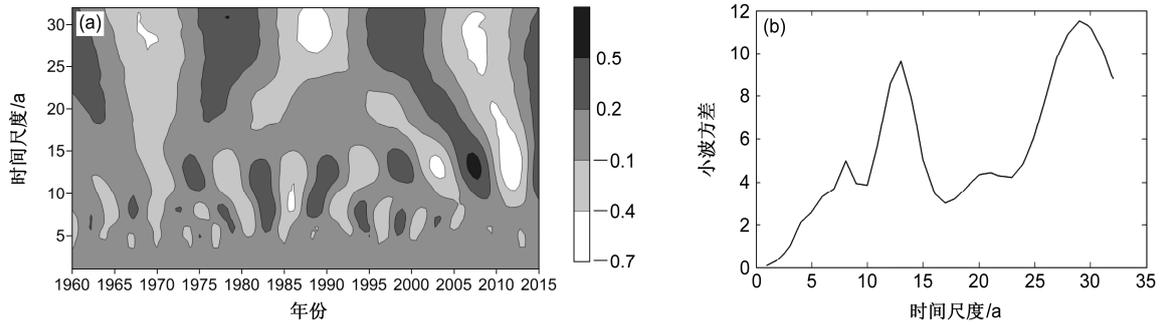


图 5 京津冀年平均气温的 Morlet 小波变化：(a) 小波实部；(b) 小波方差
Fig. 5 Morlet wavelets of the annual mean temperature in BTH: (a) The real part ; (b) wavelet variance

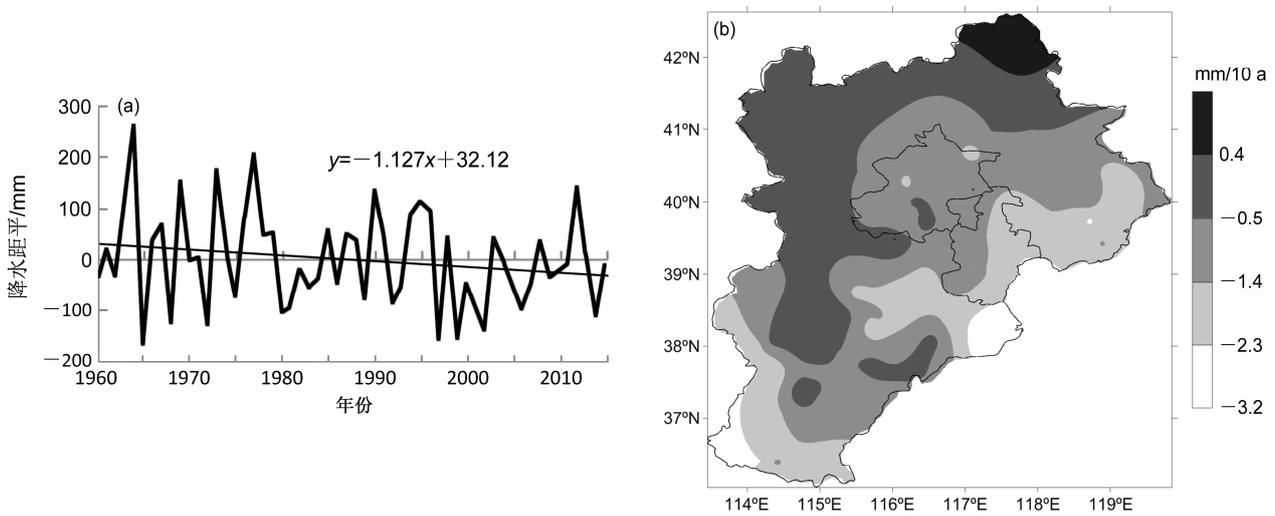


图 6 京津冀 (a) 年平均降水量距平及其 (b) 变化趋势空间分布
Fig. 6 (a) Regional average annual precipitation anomalies and (b) the spatial pattern of trend in BTH

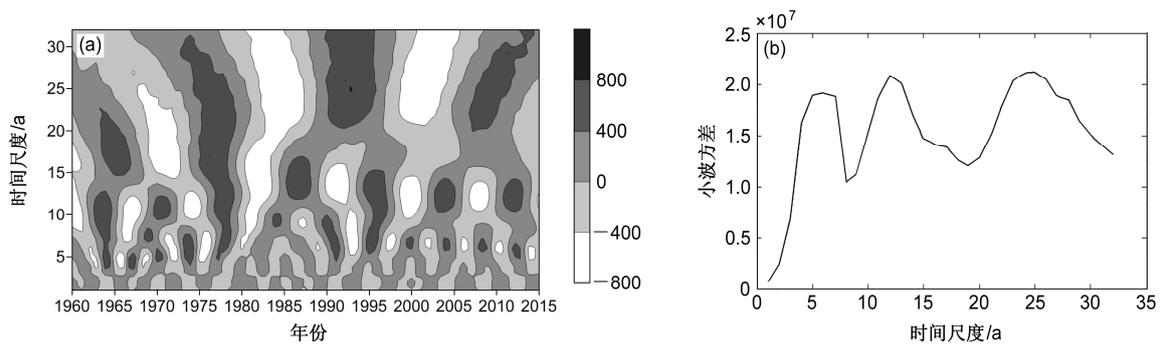


图 7 京津冀年降水量 Morlet 小波变化：(a) 小波实部；(b) 小波方差
Fig. 7 Morlet wavelets of the annual precipitation in BTH: (a) The real part; (b) wavelet variance

的特点，主要存在 4~7 年的短期振荡，与匡正等 (2000) 对华北 100 余年降水分解出的 6~7 年振荡周期一致，2015 年后处于少雨位相期；10~16 年的中期振荡；25~30 年的长期振荡，2015 年处于多雨位相的边缘，即降水变化趋势开始向少雨变

换。从图 7b 的小波方差图也可见，京津冀年降水存在着 5 年、13 年、26 年的准周期变化。这些变化叠加的效应是 2015 年后京津冀年降水将呈减少趋势。

3.4 风速变化特征分析

从图 8a 年风速距平序列可见明显的下降趋势，

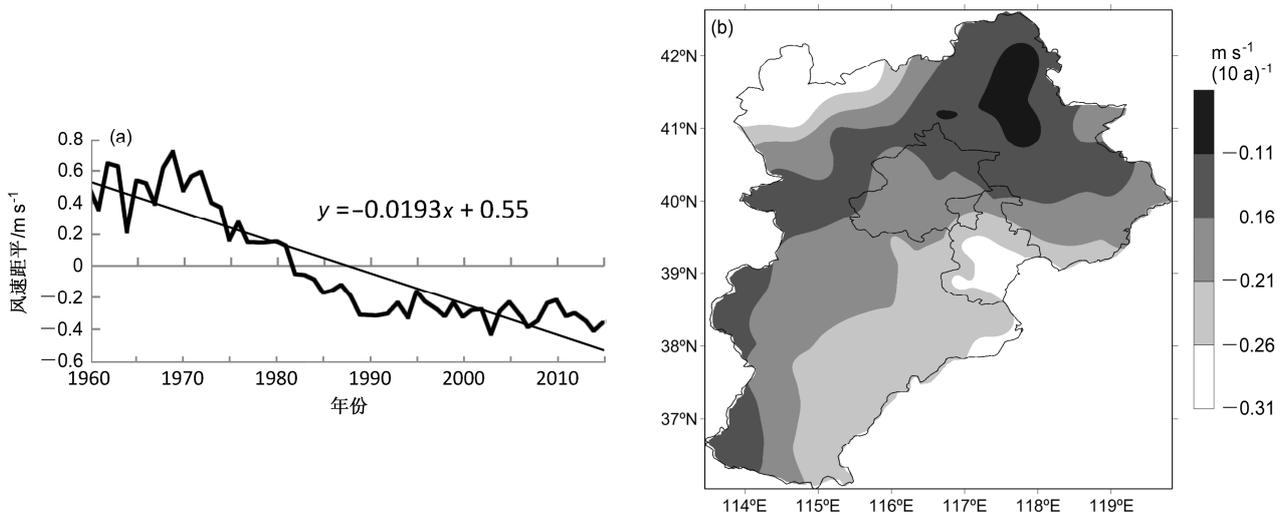


图8 京津冀 (a) 年平均风速距平及其 (b) 变化趋势空间分布
Fig. 8 (a) Annual wind speed anomalies and (b) the spatial pattern of trend in BTH

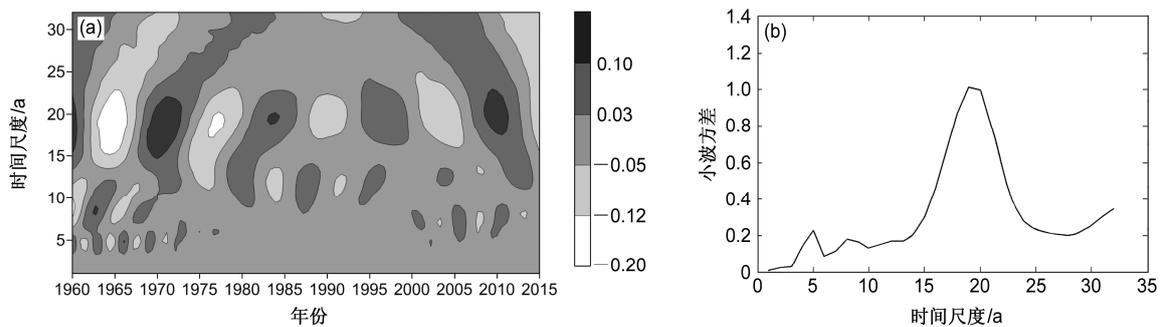


图9 京津冀年平均风速 Morlet 小波变化: (a) 小波实部; (b) 小波方差
Fig. 9 Morlet wavelets of the annual mean wind speed in BTH: (a) The real part; (b) wavelet variance

平均每十年减小 0.193 m s^{-1} , 通过了 $\alpha=0.001$ 的显著性水平检验。1961~1981 年为正距平, 1982~2014 年为负距平。图 8b 趋势分布图可以看到, 京津冀以东北—西南走向为轴, 两侧风速减少大于轴部。即东南、西北部减少迅速, 其中东南地区的天津东南部达 $-0.28 \text{ m s}^{-1}/10 \text{ a}$ 、西北部达 $-0.3 \text{ m s}^{-1}/10 \text{ a}$; 东北区趋势值为 $-0.13 \text{ m s}^{-1}/10 \text{ a}$ 。总之, 京津冀地区风速递减明显, 不利于污染物的扩散, 可能是近年来雾霾较为严重的气候变化背景条件之一。城市化发展或许加剧了该结果 (Li et al., 2011)。

对图 9a 京津冀年平均风速 Morlet 小波分析结果可知, 1961~2014 年京津冀年平均风速显现出多重尺度变化, 存在着 5~7 年 (2015 年后处于偏小位相)、15~20 年 (2015 年后处于渐小阶段) 等振荡。从图 9b 的小波方差图中也可见在 7 年和 19 年呈现出峰值。说明京津冀年平均风速存在 7 年和 19 年的准周期变化。其叠加效应为 2015 年后风速仍

将呈减少趋势。

4 结论与讨论

通过分析 1960~2015 年京津冀地区 88 个国家级气象站观测资料 (包括日平均气温、日最高气温、日最低气温、日降水、日平均风速等), 利用 MASH 方法剔除台站迁址、仪器变更等因素导致的偏差后, 生成了均一化的观测资料数据集。基于均一化的观测资料集计算了各站要素的线性趋势和 Morlet 小波等统计特征, 得出如下结论:

(1) 基于 MASH 方法不依赖于台站元数据信息, 研制了京津冀区域 1960~2015 年均一化的多个气候要素数据集, 所校订的非均一偏差大都与迁站、仪器变更等台站沿革变化记录相一致。

(2) 京津冀年平均气温呈显著增加趋势, 平均上升 $0.261 \text{ }^{\circ}\text{C}/10 \text{ a}$ 。大部分站点气温增速较快, 东

北部和西南部部分站点气温增速较缓,可能反映了一些山地局地气候变化特点。最低气温的变化格局也如此,说明了地形起主导作用。最高气温则主要表现为北部区域增暖较大,但总体而言趋势较小。

(3) 京津冀年降水主要呈现从西北往东南降水增长率阶梯式递减的分布格局。年降水平均减少 11.3 mm/10 a。形成了近 30 年暖干化的气候特征。

(4) 京津冀年平均风速变化呈显著减小趋势,平均减小 0.193 m s⁻¹/10 a。以东北—西南为轴,两侧风速减少更甚于轴部。风速减小不利于污染物扩散,形成了近年雾霾现象较为严重的背景气候条件之一。

目前分析京津冀整体格局的文章比较少,主要分析的是单个省份年平均气温、最高气温、最低气温、年平均降水、年平均风速等趋势的文章。本文分析的京津冀年平均气温趋势上升、最低气温增温趋势强于最高气温、年平均降水和年平均风速呈下降趋势与许多学者研究结果(张素云等, 2010; 卞韬等, 2012; Wang et al., 2013)是一致的。京津冀年平均气温 10 年增加值比北京(谢庄和王桂田, 1994) 0.2 °C 小,是因为北京 1950~1980 年升温趋势比 1980 年后小。与天津(任雨和郭军, 2014)均一化后的值保持一致;比河北(史印山等, 2008) 0.38 °C 低,作者的数据可能没有考虑元数据的变化。京津冀年平均降水 10 年减小值比北京(谢庄和王桂田, 1994) 12.2 mm 略小,可能与北京市最近几年增加绿化等有关,比天津(李春等, 2010) 8.9 mm 大,与天津靠近海边降水相对较多有关,比河北(向亮等, 2014) 14.7 mm 略小,与河北地形有关;京津冀年平均风速 10 年减少值比北京(赵娜等, 2011)城区 0.19 m s⁻¹/10 a 和郊区 0.1 m s⁻¹/10 a 略大,可能与北京地形有关,与河北(付桂琴等, 2015) 0.207 m s⁻¹接近。

参考文献 (References)

卞韬, 任国玉, 张翠华, 等. 2012. 石家庄气象站记录的城市热岛效应及其趋势变化 [J]. 南京信息工程大学学报(自然科学版), 4 (5): 402-408.
Bian Tao, Ren Guoyu, Zhang Cuihua, et al. 2012. Characteristics and change of urban heat island intensity in Shijiazhuang [J]. Journal of Nanjing University of Information Science and Technology (Natural Science Edition) (in Chinese), 4 (5): 402-408, doi:10.3969/j.issn.1674-7070.2012.05.004.
Cao L J, Yan Z W, Zhao P, et al. 2017. Climatic warming in China during 1901-2015 based on an extended dataset of instrumental temperature

records [J]. Environmental Research Letters, 12 (6): 064005, doi:10.1088/1748-9326/aa68e8.
Cao L J, Zhu Y N, Tang G L, et al. 2016. Climatic warming in China according to a homogenized data set from 2419 stations [J]. International Journal of Climatology, 36 (13): 4384-4392, doi:10.1002/joc.4639.
付桂琴, 赵春生, 张杏敏, 等. 2015. 1961~2010 年河北省地面风变化特征及成因探讨 [J]. 干旱气象, 33 (5): 815-821. Fu Guiqin, Zhao Chunsheng, Zhang Xingmin, et al. 2015. Change characteristic and its forming cause of wind speed in Hebei Province during 1961-2010 [J]. Journal of Arid Meteorology (in Chinese), 33 (5): 815-821, doi:10.11755/j.issn.1006-7639(2015)-05-0815.
郝立生, 闵锦忠, 史印山. 2010. 1961~2008 年华北地区降水变化内在特征分析 [J]. 安徽农业科学, 38 (24): 13269-13274, 13324. Hao Lisheng, Min Jinzhong, Shi Yinshan. 2010. Analysis of the intrinsic characteristics of precipitation change in North China from 1961 to 2008 [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences (in Chinese), 38 (24): 13269-13274, 13324, doi:10.3969/j.issn.0517-6611.2010.24.130.
匡正, 季仲贞, 林一骅. 2000. 华北降水时间序列资料的小波分析 [J]. 气候与环境研究, 5 (3): 312-317. Kuang Zheng, Ji Zhongzhen, Lin Yihua. 2000. Wavelet analysis of rainfall data in North China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 5 (3): 312-317, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2000.03.11.
李春, 刘德义, 黄鹤. 2010. 1958-2007 年天津降水量和降水日数变化特征 [J]. 气象与环境学报, 26 (4): 8-11. Li Chun, Liu Deyi, Huang He. 2010. Characteristics of precipitation and precipitation days from 1958 to 2007 in Tianjin [J]. Journal of Meteorology and Environment (in Chinese), 26 (4): 8-11, doi:10.3969/j.issn.1673-503X.2010.04.002.
李庆祥. 2011. 气候资料均一性研究导论 [M]. 北京: 气象出版社, 1: 13.
Li Qingxiang. 2011. The Introduction of Climatic data Homogeneity (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 1: 13.
李庆祥, 刘小宁, 张洪政, 等. 2003. 定点观测气候序列的均一性研究 [J]. 气象科技, 31 (1): 3-10, 22. Li Qingxiang, Liu Xiaoning, Zhang Hongzheng, et al. 2003. Homogeneity study of in situ observational climate series [J]. Meteorological Science and Technology (in Chinese), 31 (1): 3-10, 22, doi:10.3969/j.issn.1671-6345.2003.01.001.
李庆祥, 彭嘉栋, 沈艳. 2012. 1900-2009 年中国均一化逐月降水数据集研制 [J]. 地理学报, 67 (3): 301-311. Li Qingxiang, Peng Jiadong, Shen Yan. 2012. Development of homogenized monthly precipitation dataset in China during 1900-2009 [J]. Acta Geographica Sinica (in Chinese), 67 (3): 301-311, doi:10.11821/xb201203002.
Li Z, Yan Z W. 2010. Application of multiple analysis of series for homogenization to Beijing daily temperature series (1960-2006) [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 27 (4): 777-787, doi:10.1007/s00376-009-9052-0.
Li Z, Yan Z W, Tu K, et al. 2011. Changes in wind speed and extremes in Beijing during 1960-2008 based on homogenized observations [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 28 (2): 408-420, doi:10.1007/s00376-010-0018-z.
Li Z, Yan Z W, Tu K, et al. 2015. Changes of precipitation and extremes and the possible effect of urbanization in the Beijing metropolitan region during 1960-2012 based on homogenized observations [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 32 (9): 1173-1185, doi:10.1007/s00376-015-

- 4257-x.
- 任雨, 郭军. 2014. 天津 1891 年以来器测气温序列的均一化 [J]. 高原气象, 33 (3): 855–860. Ren Yu, Guo Jun. 2014. Homogenization of temperature observation in Tianjin since 1891 [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 33 (3): 855–860, doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2013.00041.
- 邵爱军, 左丽琼, 吴焯. 2008. 河北省近 50 年气候变化对水资源的影响 [J]. 中国农村水利水电, (2): 51–55, 58. Shao Aijun, Zuo Liqiong, Wu Ye. 2008. Impacts of climatic change on water resources of Hebei Province in recent 50 years [J]. China Rural Water and Hydropower (in Chinese), (2): 51–55, 58.
- 史印山, 王玉珍, 池俊成, 等. 2008. 河北平原气候变化对冬小麦产量的影响 [J]. 中国生态农业学报, 16 (6): 1444–1447. Shi Yinshan, Wang Yuzhen, Chi Juncheng, et al. 2008. Impact of climate change on winter wheat production in the Hebei Plain [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture (in Chinese), 16 (6): 1444–1447.
- Szentimrey T. 1999. Multiple analysis of series for homogenization (MASH) [C]// Proceedings of the Second Seminar for Homogenization of Surface Climatological Data. Budapest, Hungary: WMO, 41: 27–46.
- Tu K, Yan Z W, Dong W J. 2010. Climatic jumps in precipitation and extremes in drying North China during 1954–2006 [J]. J. Meteor. Soc. Japan, 88 (1): 29–42, doi:10.2151/jmsj.2010-103.
- Wang Y, Yan Z W, Chandler R E. 2010. An analysis of mid-summer rainfall occurrence in eastern China and its relationship with large-scale warming using generalized linear models [J]. International Journal of Climatology, 30 (12): 1826–1834, doi:10.1002/joc.2018.
- Wang J, Yan Z W, Li Z, et al. 2013. Impact of urbanization on changes in temperature extremes in Beijing during 1978–2008 [J]. Chinese Science Bulletin, 58 (36): 4679–4686, doi:10.1007/s11434-013-5976-y.
- 向亮, 郝立生, 安月改, 等. 2014. 51 a 河北省降水时空分布及变化特征 [J]. 干旱区地理, 37 (1): 56–65. Xiang Liang, Hao Lisheng, An Yuegai, et al. 2014. Time-spatial distribution and variational characteristics of rainfall in Hebei Province in 51 years [J]. Arid Land Geography (in Chinese), 37 (1): 56–65, doi:10.13826/j.cnki.cn65-1103/x.2014.01.008.
- 向辽元, 陈星, 黎翠红, 等. 2007. 近 55 年中国大陆地区降水突变的区域特征 [J]. 暴雨灾害, 26 (2): 149–153. Xiang Liaoyuan, Chen Xing, Li Cuihong, et al. 2007. The regional features of abrupt precipitation change in China in recent 55 years [J]. Torrential Rain and Disasters (in Chinese), 26 (2): 149–153, doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2007.02.010.
- 谢庄, 王桂田. 1994. 北京地区气温和降水百年变化规律的探讨 [J]. 大气科学, 18 (6): 683–690. Xie Zhuang, Wang Guitian. 1994. The changes of temperature and precipitation in Beijing during last 100 years [J]. Scientia Atmospherica Sinica (in Chinese), 18 (6): 683–690, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1994.06.05.
- Yan Z W, Li Z, Li Q X, et al. 2010. Effects of site change and urbanisation in the Beijing temperature series 1977–2006 [J]. International Journal of Climatology, 30 (8): 1226–1234, doi:10.1002/joc.1971.
- Yan Z W, Yang C, Jones P. 2001. Influence of inhomogeneity on the estimation of mean and extreme temperature trends in Beijing and Shanghai [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 18 (3): 309–322, doi:10.1007/BF02919312.
- 严中伟, 王君, 李珍, 等. 2014a. 基于均一化观测序列评估城市化的气候效应 [J]. 气象科技进展, 4 (3): 41–48. Yan Z W, Wang J, Li Z, et al. 2014. Assessing climatic effects of urbanization based on homogenized daily observations [J]. Advances in Meteorological Science and Technology (in Chinese), 4 (3): 41–48, doi:10.3969/j.issn.2095-1973.2014.03.007.
- 严中伟, 李珍, 夏江江. 2014b. 气候序列的均一化——定量评估气候变化的基础 [J]. 中国科学: 地球科学, 44 (10): 2101–2111. Yan Z W, Li Z, Xia J J. 2014. Homogenization of climate series: The basis for assessing climate changes [J]. Science China Earth Sciences, 57 (2): 2891–2900, doi:10.1007/s11430-014-4945-x.
- Zhang L, Ren G Y, Ren Y Y, et al. 2014. Effect of data homogenization on estimate of temperature trend: A case of Huairou station in Beijing municipality [J]. Theor. Appl. Climatol., 115 (3): 365–373, doi:10.1007/s00704-013-0894-0.
- 张素云, 周顺武, 郭艳岭, 等. 2010. 近 47a 河北风速季节变化特征及影响因子分析 [J]. 干旱区资源与环境, 24 (12): 93–99. Zhang Suyun, Zhou Shunwu, Guo Yanling, et al. 2010. Seasonal variation of ground wind velocity in recent 47 years in Hebei and its influence factors [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment (in Chinese), 24 (12): 93–99, doi:10.13448/j.cnki.jalre.2010.12.005.
- 赵娜, 刘树华, 虞海燕. 2011. 近 48 年城市化发展对北京区域气候的影响分析 [J]. 大气科学, 35 (2): 373–385. Zhao Na, Liu Shuhua, Yu Haiyan. 2011. Urbanization effects on local climate in Beijing in recent 48 years [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 35 (2): 373–385, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2011.02.15.
- 周丹, 张勃, 李小亚, 等. 2014. 1961–2010 年中国大陆地面气候要素变化特征分析 [J]. 长江流域资源与环境, 23 (4): 549–558. Zhou Dan, Zhang Bo, Li Xiaoya, et al. 2014. Analysis of variations of climatic elements in surface ground of mainland China during 1961–2010 [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin (in Chinese), 23 (4): 549–558, doi:10.11870/cjlyzyyhj201404015.