

Climate Drought Characters in Beijing-Tianjin-Hebei Region during 1958-2017

Miao Liu¹, Yuanyuan Zhou^{2*}, Chunxia Lu^{3*}

¹Hebei Water Resource Research and Water Conservancy Technology Test and Extension Center, Shijiazhuang Hebei

²Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing

³Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing

Email: hillerman@163.com, *zhouyy.09b@igsnr.ac.cn, *lucx@igsnr.ac.cn

Received: Dec. 18th, 2019; accepted: Dec. 31st, 2019; published: Jan. 7th, 2020

Abstract

Based on the precipitation and temperature data, the trend of precipitation, temperature and drought of the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration from 1958 to 2017 was analyzed. The method of Pettitt was used to detect the abrupt change of the series of precipitation, temperature and drought. The results show that: 1) the precipitation was decreased with a rate of 1.2 mm/yr, the temperature was increased significantly with a rising rate of 0.03°C/yr, and the drought had an aggravation tendency; 2) the variation of decrease-increase-decrease-increase in seven periods was found in the series of precipitation and drought index, the temperature in seven periods showed an upward trend; 3) the twice abrupt changes had occurred in 1979 and 1996 in the series of precipitation and drought index, the abrupt change had occurred in 1988 in the series of temperature.

Keywords

Precipitation, Temperature, Drought, Beijing-Tianjin-Hebei Region

1958~2017年京津冀地区气候干旱变化特征

刘 淼¹, 周园园^{2*}, 鲁春霞^{3*}

¹河北省水资源研究与水利技术试验推广中心, 河北 石家庄

²中国科学院陆地水循环及地表过程重点实验室, 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京

³中国科学院地理科学与资源研究所, 北京

Email: hillerman@163.com, *zhouyy.09b@igsnr.ac.cn, *lucx@igsnr.ac.cn

作者简介: 周园园(1982-), 女, 河北正定人, 博士, 中国科学院地理科学与资源研究所助研。主要从事环境生态水文、河流地貌等研究。
*通讯作者。

收稿日期：2019年12月18日；录用日期：2019年12月31日；发布日期：2020年1月7日

摘要

基于降水和气温实测数据，分析了半干旱半湿润半干旱半湿润过渡区——京津冀地区1958~2017年降水、温度的变化及干旱化趋势，并采用Pettitt检验法对研究区的降水、温度和干旱化序列的突变时间进行评估，结果表明：1) 研究区降水量明显减少，减少速率为1.2 mm/yr，气温显著上升，上升速率为0.03℃/yr，干旱趋势明显；2) 7个时期降水量和干旱指数呈现减少-增加-减少-增加的波动，温度总体呈上升趋势；3) 降水量序列和干旱指数序列分别在1979年和1996年发生两次显著突变，温度序列在1988年发生显著突变。

关键词

降水量，气温，干旱，京津冀地区

Copyright © 2020 by author(s) and Wuhan University.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

全球气候变化及其影响已经引起社会各界的高度关注。近百年，全球气候变化以升温为主，2013年IPCC第五次评估报告显示，近100年(1906~2005年)全球地表平均温度升高0.85℃。全球增温背景下频发的极端天气事件，如洪水、干旱、海啸、沙尘暴对生命安全、生态系统及社会经济发展等造成极大危害。干旱由于影响范围广、持续时间长，是影响最严重的极端气候事件。2001年IPCC第三次评估报告指出，全球干湿区域两极分化严重，干旱地区干旱化趋势，湿润地区却越来越湿润。在全球气候变暖背景下，干旱造成粮食产量下降，干旱缺水日益严重，沙漠化和生态退化加剧。据统计，中国平均每年受旱耕地面积约2231.6万公顷，每年损失粮食约0.1亿吨[1]。因此研究气候干旱变化，能够为相关部分制定应对措施提供科学基础，有效促进自然环境和人类社会的可持续协调发展。

目前世界上对干旱尚未有统一的定义，学术界通常采用干旱指数评估区域干旱化趋势和程度。降水和气温是干旱指数考虑最多的两个气象因子。由于气候变化的不确定性，全球不同地区的气温、降水呈现的波动和趋势存在差异(NOAA, 2017) [2]，因此干旱趋势和程度也存在差异。IPCC第三次报告指出，全球干旱趋势增加，干旱半干旱区表现尤为显著(IPCC, 2003) [3]。中亚、东南亚、非洲、北美、欧洲南部、澳大利亚东部等均有明显的干旱化趋势(Magadza 2000; Cook等2004; Zarghami等2011; Dai 2012) [4] [5] [6] [7]。Peter等(2014) [8]发现在东亚、西地中海、澳大利亚东部小部分地区和非洲等地的干湿过渡地带，气候也有干旱化趋势；王菱等(2004) [9]、刘波等(2007) [10]也发现在中国北方干湿过渡地带，半干旱区面积扩大，半湿润区面积缩小，气候趋向干旱化。然而，程善俊等(2018) [11]却发现全球整体呈现干旱化趋势，半湿润区干旱化最为显著，其次为极端干旱区、湿润区和半干旱区，而干旱区表现为变湿趋势；姜江等(2017) [12]发现中国湿润区和极端干旱区逐渐缩小，半湿润区、半干旱区和干旱区则显著扩大，气候敏感区域在扩张。

从目前研究成果看[13]-[18]，研究者较多关注干旱地区的干旱变化趋势，对位于半湿润半干旱地区的过渡地带关注较少。然而，半湿润半干旱地区的过渡地带是生态脆弱区域之一，生态环境对气候变化敏感，是生态保护的重点关注区域。气候干旱化将导致或者加重这部分区域荒漠化程度，对生态环境造成不可逆转的影响。京津冀地区位于半湿润半干旱的过渡地带，降水年际变化较大，20世纪50年代以来，降水量呈下降趋势，温度呈升高趋势[19] [20] [21]。20世纪80年代以来，气象灾害给河北造成巨大经济损失，90年代以来，平均每年的

损失达上百亿[22], 而气候干旱造成的损失占到一半[1]。以京津冀地区为研究对象, 在分析降水、温度变化的基础上, 对研究区干旱化趋势进行评估, 并对研究区气候突变进行分析, 研究成果能够为相关规划、管理部门提供参考, 有利于降低气候灾害在研究区的风险。

2. 数据与方法

2.1. 研究区概况

京津冀地区位于东北亚中国地区环渤海心脏地带(36°01'~42°37'N, 113°04'~119°53'E)(见图 1), 是中国的“首都经济圈”, 行政范围包括北京市、天津市及河北省。京津冀地区是中国北方经济规模最大、最具活力的地区, 是国家发展战略的重要指向区, 也是北方生态文明建设先行区和生态环境治理重点区。区域人口约 1.1 亿, 总面积 21.8 万 km²。该区位于温带半湿润半干旱大陆性气候区, 多年平均降水量 522 mm, 多年平均气温 10℃, 降水量自东南向西北递减地势由西北向东南倾斜, 地貌类型多样, 以平原为主, 根据 2015 年土地利用图, 该地区耕地约 20.6 万 km², 林地约 8.99 万 km², 草地约 6.7 万 km², 水域约 1.23 万 km²。

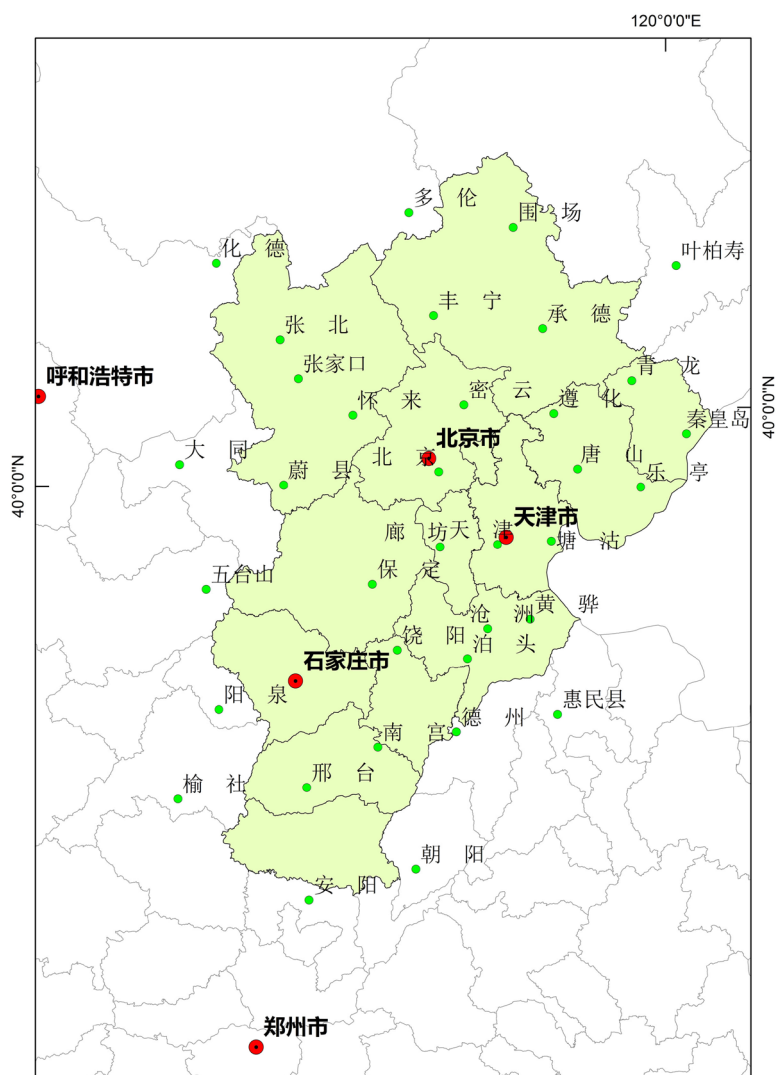


Figure 1. The meteorology station location inside and around of the study area
图 1. 研究区及周边气象站点

2.2. 数据来源与处理

本文所用的降水量、温度数据来自于中国气象数据共享网。采用张家口、北京、天津地区及周边的 32 个国家气象站点 1958 年以来年平均降水量和温度数据,分析研究区降水量、温度变化趋势,气象站点位置及名称如图 1。利用 ArcGIS 软件泰森多边形法及克里格插值法,计算了研究区 1958~2017 年共 60 年面平均降水量、面平均温度。

2.3. 研究方法

通过绘制降水量、温度、干旱指数的趋势线,分析了 1958~2017 年降水量、温度、干旱指数等 3 个因子趋势变化,并采用 T 检验法检验趋势变化的显著性。采用 Pettitt 检验法,对研究区 1958~2017 年降水量、温度、干旱指数等序列进行突变分析。

1) De Martonne (DE)干旱指数

采用 De Martonne (DE)干旱指数[23]对研究区气候干旱化趋势进行分析,De Martonne 干旱指数公式为:

$$I = P / (T + 10) \quad (1)$$

式中: I 为干旱指数; P 为降水量, mm; T 为温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

2) Pettitt 检验法

Pettitt 检验法是 A. N. Pettitt 提出的用于检验时间序列突变点的非参数检验方法[24],该检验法通过检验时间序列要素均值变化的时间,来确定序列跃变时间,假设序列无变异点,使用 Mann-Whitney 的统计量 U_t , N 来检验同一个总体 $x(t)$ 的两个样本,并使用统计量 KN 检验突变点的显著性,统计量 U_t , N , KN 和相关概率的显著性检验公式如下:

$$U_{t,N} = U_{t-1,N} + \sum_{j=1}^N \text{sgn}(x_t - x_j), t = 2, 3, \dots, N \quad (2)$$

$$K_{t,N} = \text{Max} |U_{t,N}|, (1 \leq t \leq N) \quad (3)$$

$$p \cong 2 \exp \left\{ -6 (K_{t,N})^2 / (N^3 + N^2) \right\} \quad (4)$$

若 $x_t - x_j > 0$, 则 $\text{sgn}(x_t - x_j) = 1$, 若 $x_t - x_j = 0$, 则 $\text{sgn}(x_t - x_j) = 0$, 若 $x_t - x_j < 0$, 则 $\text{sgn}(x_t - x_j) = -1$ 。

若 $p \leq 0.5$, 则认为 t 点为显著变异点。由此检验出序列的一级变点,后以变点为界将原系列分为两个序列,继续检测新的变点,由此可检验出多级变点,最后根据具体成因分析,确定序列 $x(t)$ 变异点。

3. 结果与讨论

3.1. 干旱化趋势

采用趋势线法分析 1958~2017 年降水量、温度及干旱指数的变化趋势,各因子的变化趋势见图 2。

1958~2017 年研究区降水量总体呈下降趋势,下降速率为 1.2 mm/yr,表明研究区降水量平均每年减少 1.2 mm, T 检验 $p = 0.078 > 0.05$,说明趋势变化不显著。在 1958 年以来的 60 年中,1964 年年均降水量最大,为 801 mm,1999 年年均降水量最小,为 345 mm。1958~2017 年研究区温度总体呈上升趋势,上升速率为 0.03 $^{\circ}\text{C}$ /yr,表明研究区温度平均每年上升 0.03 $^{\circ}\text{C}$, T 检验 $p = 0 < 0.05$,说明温度上升趋势显著。60 年来,1998 年年均降水量最大,为 11.4 $^{\circ}\text{C}$,1969 年年均降水量最小,为 8.3 $^{\circ}\text{C}$ 。1958~2017 年研究区干旱指数总体呈下降趋势,下降速率为 0.1/yr, T 检验 $p = 0.07 > 0.05$,说明干旱趋势不显著。

为了分析各年代降水量、温度、干旱指数的变化情况,对 1958~2017 年的序列分为 7 个时期进行统计分析,见表 1。

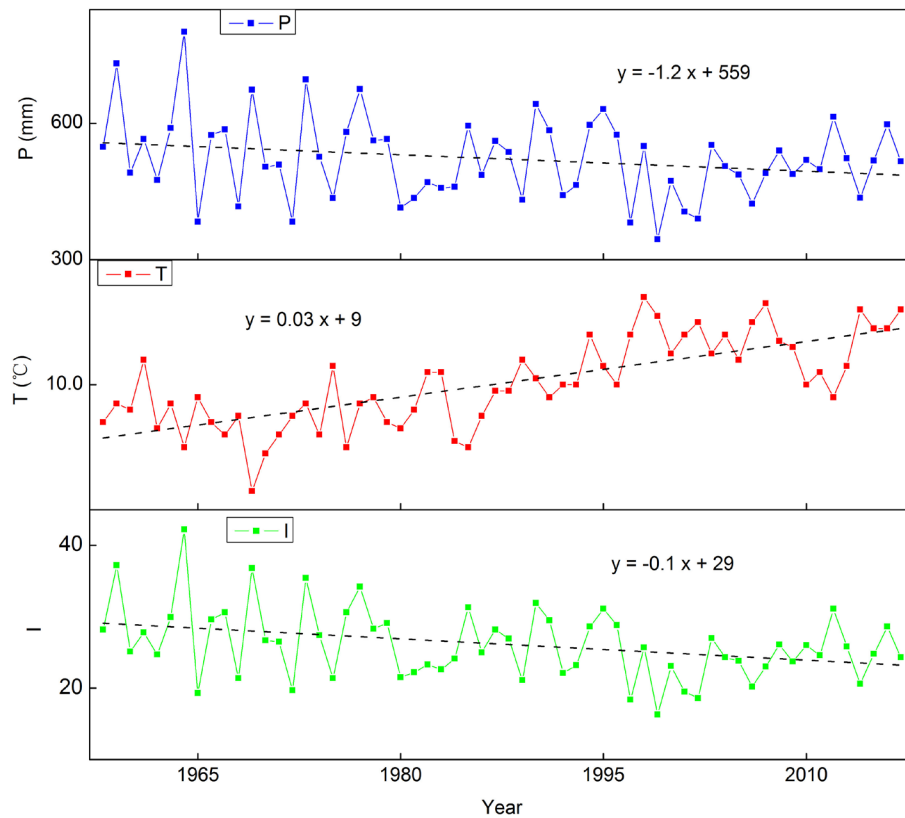


Figure 2. Trend of precipitation, temperature and aridity index in 1958-2017
图 2. 1958~2017 降水量、温度、干旱指数变化趋势

Table 1. The variation of precipitation, temperature and aridity index in different periods
表 1. 各年代降水量、温度、干旱指数的变化

时期	降水量(mm)	温度(°C)	干旱指数
20 世纪 50 年代	639.7	9.5	32.7
20 世纪 60 年代	555.7	9.4	28.7
20 世纪 70 年代	543.7	9.5	27.9
20 世纪 80 年代	484.9	9.7	24.6
20 世纪 90 年代	521.0	10.4	25.6
21 世纪 00 年代	475.5	10.8	22.9
21 世纪 10 年代	527.8	10.6	25.7
多年平均	521.8	10.0	26.2

从表 1 中各年代数据可见：7 个时期降水量呈现减少 - 增加 - 减少 - 增加的波动，90 年代的降水量最接近 60 年的平均值，80 年代和 00 年代的降水量均小于 60 年的多年平均降水量，降水量 50 年代~80 年代呈下降趋势，90 年代降水量突然增加，后再减少至 7 个时期多年平均最近值 475.5 mm，10 年代降水量又增加至 527.8 mm，50 年代降水量最高，00 年代降水量最低；7 个时期温度总体呈上升趋势，50 年代~80 年代的多年平均温度均小于 60 年的多年平均温度，90 年代以来的 3 个时期，多年平均温度均高于 60 年的多年平均温度，60 年代的多年平均温度最低，00 年代的多年平均温度最高；与降水量的波动趋势相同，干旱指数在 7 个时期也呈现减少 - 增

加 - 减少 - 增加的波动, 50 年代干旱指数最大, 00 年代干旱指数最小, 50 年代~80 年代, 干旱指数呈下降趋势, 90 年代干旱指数突然增加, 后迅速下降, 至 7 个时期多年平均最低值, 10 年代多年平均干旱指数又增加至 25.7。

综上可见研究区降水量呈明显减少趋势, 气温上升趋势显著, 干旱趋势明显。

3.2. 突变特征分析

从上文分析可以看出, 降水量、温度和干旱指数在 90 年代均存在突然变化, 因此采用 Pettitt 检验法对研究区 1958~2017 年共 60 年的降水量、温度和干旱指数长时间序列进行检测, 分析结果见图 3。

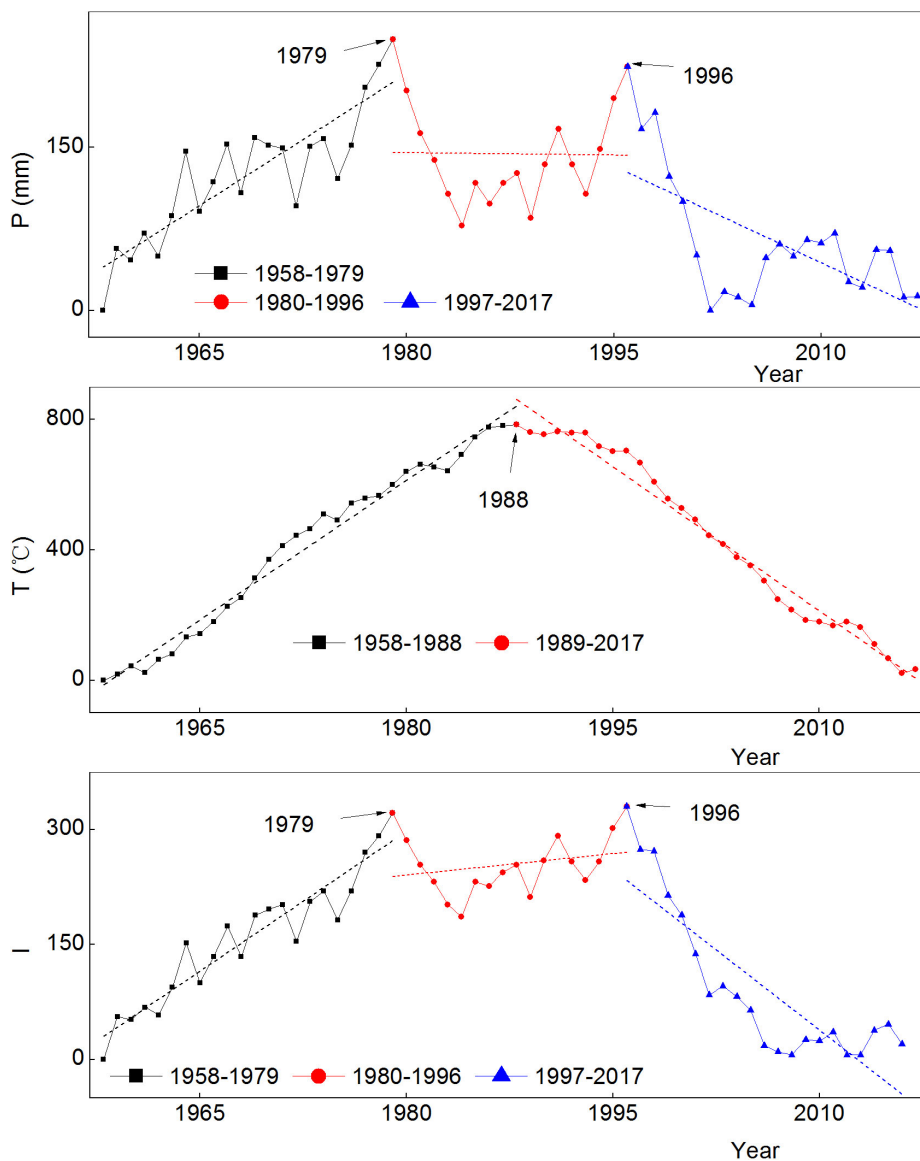


Figure 3. Statistical results of the runoff abrupt change in 1958-2017

图 3. 1958~2017 年降水量、温度、干旱指数突变分析结果

Pettitt 检验法是通过检验时间序列要素均值变化的时间, 分别构造变异点前后两个样本的统计量, 根据统计量 U 及 K 的变化及 p 值显著性水平检验, 确定序列跃变时间, 若 $p(\tau) \leq 0.5$, 则认为 τ 点为显著变异点。计算 K 值见图 3。

由图 3 可见, 降水量 K 值曲线在 1979 年和 1996 年有转折, 同样可看出序列明显被分为 3 段, 1958~1979 年、1980~1996 年、1997~2017 年, 经显著性水平检验, 1979 年显著性检验 $\rho = 0.34 < 0.5$, 1997 年显著性检验 $\rho = 0.47 < 0.5$, 因此 1971 年和 1997 年为降水量序列的显著变异点。温度 K 值曲线在 1988 年有转折, 序列明显被分为 2 段, 1958~1988 年、1989~2017 年, 经显著性水平检验, 1988 年显著性检验 $\rho = 4.29 \times 10^{-8} \ll 0.5$, 因此 1988 年为温度序列的显著变异点。干旱指数 K 值曲线在 1979 年和 1996 年有转折, 与降水量序列突变点相同, 序列明显被分为 3 段, 1958~1979 年、1980~1996 年、1997~2017 年, 经显著性水平检验, 1979 年显著性检验 $\rho = 0.1 < 0.5$, 1997 年显著性检验 $\rho = 0.08 < 0.5$, 因此 1979 年和 1996 年为干旱指数序列的显著变异点。

综上所述, 降水量序列和干旱指数序列在 1979 年和 1996 年发生显著突变, 温度序列在 1988 年发生显著突变。

研究区降水量呈明显减少趋势, 气温上升趋势显著, 干旱趋势明显, 并且降水量序列和干旱指数序列在 1979 年和 1996 年发生显著突变, 温度序列在 1988 年发生显著突变。与本文结果相似, 向辽元等[25]通过分析中国大陆 20 世纪五十年代以来降水变化, 同样发现华北地区年平均降水量明显减少, 突变时间出现在 20 世纪 70 年代中期。但是孙东磊等[26]等通过分析河北棉区自 20 世纪六十年代以来的降水、温度变化, 发现温度在 1996 年发生了突变, 降水在 1986 年前后发生突变。冯新灵等[27]认为中国北方降水量的突变主要发生在 20 世纪八十年代初和八十年代末。阿多等[28]认为华北平原气候突变发生在 1991~1994 年。另外, 赵鸣[29]认为北方降水减少和温度升高是造成北方干旱的原因, 刘剑锋等[30]也发现近 50 年河北省气候干旱化趋势加重, 谢坤[31]、杨建平[32]近 50a 华北地区干旱化趋势明显, 梁泽学[33]、胡子瑛等[34]发现 1960~2014 年中国北方地区整体呈变干趋势, 孟猛等[35]发现我国半湿润半干旱气候面积大幅增加。

4. 结论

本文以京津冀地区及周边气象站点的降水、温度数据为基础, 采用趋势分析法及 T 检验法对京津冀地区 1958~2017 年降水、温度的变化及干旱变化趋势及显著性进行分析, 并采用 Pettitt 检验法对研究区降水、温度及干旱指标序列进行突变分析。研究结果表明: 1) 过去 60 年来, 京津冀地区降水量呈现明显减少趋势, 但趋势变化不显著, 减少速率为 1.2 mm/yr; 2) 研究区气温呈现显著上升趋势, 上升速率为 0.03°C/yr; 3) 研究区干旱化程度加剧, 但趋势不显著; 4) 1958~2017 年划分的 7 个时期降水量和干旱指数波动相同, 呈现减少 - 增加 - 减少 - 增加的波动, 温度在 7 个时期总体呈上升趋势; 5) 多年平均降水量在 21 世纪前十年最低, 20 世纪 50 年代最高; 6) 多年平均温度在 20 世纪 60 年代最低, 21 世纪前十年最高; 7) 干旱指数在 20 世纪 50 年代最大, 21 世纪前十年最小; 8) 降水量序列和干旱指数序列分别在 1979 年和 1996 年发生两次显著突变, 温度序列在 1988 年发生显著突变。

基金项目

感谢国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07101001)、中国科学院 A 类战略性先导科技专项“地球大数据科学工程”(XDA19040102)、中国气象局气象数据共享网对本研究的支持。

参考文献

- [1] 秦大河. 气候变化与干旱[J]. 科技导报, 2009, 27(11): 1.
QIN Dahe. Climate change and drought. Science and Technology Review, 2009, 27(11): 1. (in Chinese)
- [2] NOAA. National Centers for Environmental Information. State of the climate: Global climate report for annual 2016. <https://www.ncdc.noaa.gov/sotc/global/201613>
- [3] IPCC. Good practice guidance for land use, land-use change and forestry, 2003.
- [4] MAGADZA, C. H. D. Climate change and human settlements in Africa: Prospects for adaptation. Environmental Monitoring and Assessment, 2000, 61(1): 193-205. <https://doi.org/10.1023/A:1006355210516>

- [5] COOK, E. R., WOODHOUSE, C. A., EAKIN, C. M., et al. Long-term aridity changes in the western United States. *Science*, 2004, 306(5698): 1015-1018. <https://doi.org/10.1126/science.1102586>
- [6] ZARGHAMI, M., ABDI, A., BABAEIAN, I., et al. Impacts of climate change on runoffs in east Azerbaijan, Iran. *Global Planet Change*, 2011, 78(3-4): 137-146. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2011.06.003>
- [7] DAI, A. Increasing drought under global warming in observations and models. *Nature Climate Change*, 2013, 3(1): 52-58. <https://doi.org/10.1038/nclimate1633>
- [8] PETER, G., BORIS, O., BRIGITTE, M., et al. Global assessment of trends in wetting and drying over land. *Nature Geoscience*, 2014, 7(10): 716-721. <https://doi.org/10.1038/ngeo2247>
- [9] 王菱, 谢贤群, 李运生, 等. 中国北方地区 40 年来湿润指数和气候干湿带界线的变化[J]. *地理研究*, 2004, 23(1): 45-54.
WANG Lin, XIE Xianqun, LI Yunsheng, et al. Changes of humid index and borderline of wet and dry climate zone in northern China over the past 40 years. *Geographical Research*, 2004, 23(1): 45-54. (in Chinese)
- [10] 刘波, 马柱国. 过去 45 年中国干湿气候区域变化特征[J]. *干旱区地理*, 2007, 30(1): 7-15.
LIU Bo, MA Zhuguo. Area change of dry and wet regions in China in the past 45 years. *Arid Land Geography*, 2007, 30(1): 7-15. (in Chinese)
- [11] 程善俊, 梁苏洁. 基于 3 种指数的全球干湿变化年代际特征[J]. *干旱气象*, 2018, 36(2): 23-31.
CHENG Shanjun, LIANG Sujie. Interdecadal characteristics of global dry-wet variation based on three indexes. *Journal of Arid Meteorology*, 2018, 36(2): 23-31. (in Chinese)
- [12] 姜江, 姜大膀, 林一骅. 中国干湿区变化与预估[J]. *大气科学*, 2017(1): 43-56.
JIANG Jiang, JIANG Dabang and LIN Yihua. Changes and projection of dry/wet areas over China. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2017(1): 43-56. (in Chinese)
- [13] SHEFFIELD, J., WOOD, E. F. Projected changes in drought occurrence under future global warming from multi-model, multi-scenario, IPCC AR4 simulations. *Climate Dynamics*, 2008, 31(1): 79-105. <https://doi.org/10.1007/s00382-007-0340-z>
- [14] GREVE, P., ORLOWSKY, B., MUELLER, B., et al. Global assessment of trends in wetting and drying over land. *Nature Geoscience*, 2014, 7(10): 716-721. <https://doi.org/10.1038/ngeo2247>
- [15] DAI, Z., LIU, J. T., WEI, W., et al. Detection of the three gorges dam influence on the Changjiang (Yangtze River) submerged delta. *Scientific Reports*, 2014, 4: 6600. <https://doi.org/10.1038/srep06600>
- [16] 刘玉芝, 吴楚樵, 贾瑞, 等. 大气环流对中东干旱半干旱区气候影响研究进展[J]. *中国科学: 地球科学*, 2018, 48(9): 1141-1152.
LIU Yuzhi, WU Chuqiao, JIA Rui, et al. An overview of the influence of atmospheric circulation on the climate in arid and semi-arid region of Central and East Asia. *Science China Earth Sciences*, 2018, 48(9): 1141-1152. (in Chinese)
- [17] 尹晓东, 董思言, 韩振宇, 等. 未来 50a 长江三角洲地区干旱和洪涝灾害风险预估[J]. *气象与环境学报*, 2018, 34(5): 66-75.
YIN Xiaodong, DONG Siyan, HAN Zhenyu, et al. Projected risk of drought and flood at Yangtze River Delta for the next 50 years. *Journal of Meteorology and Environment*, 2018, 34(5): 66-75. (in Chinese)
- [18] 韩兰英, 张强, 贾建英, 等. 气候变暖背景下中国干旱强度、频次和持续时间及其南北差异性[J]. *中国沙漠*, 2019, 35(5): 1-10.
HAN Lanying, ZHANG Qiang, JIA Jianying, et al. Drought severity, frequency, duration and regional differences in China. *Journal of Desert Research*, 2019, 35(5): 1-10. (in Chinese)
- [19] 张耀. 气候变化下京津冀地区温度和降水的趋势分析[D]: [硕士学位论文]. 北京: 华北电力大学, 2016.
ZHANG Yao. Trends analysis of temperature and precipitation in Beijing, Tianjin and Hebei region under climate change. Beijing: North China Electric Power University, 2016. (in Chinese)
- [20] 张健, 章新平, 王晓云, 等. 近 47 年来京津冀地区降水的变化[J]. *干旱区资源与环境*, 2010, 24(2): 74-80.
ZHANG Jian, ZHANG Xinping, WANG Xiaoyun, et al. Precipitation change in Beijing-Tianjin-Hebei Province. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2010, 24(2): 74-80. (in Chinese)
- [21] 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 and HAN Huiling. Climate evolution characteristics of Beijing-Tianjin-Hebei Region for the last 55 years. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2018, 16(3): 125-134. (in Chinese)
- [22] 张可慧. 全球气候变暖对京津冀地区极端天气气候事件的影响及防灾减灾对策[J]. *干旱区资源与环境*, 2011, 25(10): 125-128.
ZHANG Kehui. The impacts of global climate change on extreme weather events in Beijing-Tianjin-Hebei area and the countermeasures for disaster prevention. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2011, 25(10): 125-128. (in Chinese)
- [23] DE MARTONNE, E. Nouvelle carte mondiale de l'indice d'aridité. *Annales de Géographie*, 1942, 51(288): 241-250. <https://doi.org/10.3406/geo.1942.12050>

- [24] PETTITT, A. N. A non-parametric approach to the change-point problem. *Applied Statistics*, 1979, 28(2): 126-135.
<https://doi.org/10.2307/2346729>
- [25] 向辽元, 陈星, 黎翠红, 等. 近 55 年中国大陆地区降水突变的区域特征[J]. *暴雨灾害*, 2007, 26(2): 149-153.
XIANG Liaoyuan, CHEN Xing, LI Cuihong, et al. The regional features of abrupt precipitation change in China in recent 55 years. *Torrential Rain and Disasters*, 2007, 26(2): 149-153. (in Chinese)
- [26] 孙东磊, 李存东, 李武龙, 等. 河北省三大棉区气候周期及突变特征分析[J]. *干旱地区农业研究*, 2014, 32(5): 228-233.
SUN Donglei, LI Cuidong, LI Wulong, et al. Research on the climatic period and abrupt changing characteristics in three large cotton areas of Hebei Province. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2014, 32(5): 228-233. (in Chinese)
- [27] 冯新灵, 罗隆诚, 冯自立. 中国近 50 年降水变化趋势及突变的 Hurst 指数试验[J]. *干旱区地理*, 2009, 32(6): 859-866.
FENG Xinling, LUO Longcheng and FENG Zili. Hurst index experiment on precipitation change trend and mutation of China in the near 50 years. *Arid Land Geography*, 2009, 32(6): 859-866. (in Chinese)
- [28] 阿多, 赵文吉, 宫兆宁, 等. 1981-2013 华北平原气候时空变化及其对植被覆盖度的影响[J]. *生态学报*, 2017, 37(2): 576-592.
A Duo, ZHAO Wenji, GONG Zhaoning, et al. Temporal analysis of climate change and its relationship with vegetation cover on the north china plain from 1981 to 2013. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(2): 576-592. (in Chinese)
- [29] 赵鸣. 用一维能量平衡模式研究华北干旱化的一些问题[J]. *气象科学*, 2003, 23(2): 144-151.
ZHAO Min. Some problems of the aridification in northern China studied from one dimensional energy equilibrium model. *Scientia Meteorologica Sinica*, 2003, 23(2): 144-151. (in Chinese)
- [30] 刘学锋, 刘芳圆, 肖嗣荣. 河北省气候干湿状况变化特征分析[J]. *地理与地理信息科学*, 2007, 23(2): 83-86+96.
LIU Xuefeng, LIU Fangyuan and XIAO Sirong. Spatial temporal distribution of climate drought and wetness for Hebei. *Geography and Geo-Information Science*, 2007, 23(2): 83-86+96. (in Chinese)
- [31] 谢坤, 任雪娟. 华北夏季大气水汽输送特征及其与夏季旱涝的关系[J]. *气象科学*, 2008, 28(5): 5508-5514.
XIE Kun, REN Xuejuan. Climatological characteristics of atmospheric water vapor transport and its relation with rainfall over north China in summer. *Scientia Meteorologica Sinica*, 2008, 28(5): 508-514. (in Chinese)
- [32] 杨建平, 丁永建, 陈仁升, 等. 近 50 年来中国干湿气候界线的 10 年际波动[J]. *地理学报*, 2002, 57(6): 655-661.
YANG Jianping, DING Yongjian, CHEN Rensheng, et al. The interdecadal fluctuation of dry and wet climate boundaries in China in recent 50 years. *Acta Geographica Sinica*, 2002, 57(6): 655-661. (in Chinese)
- [33] 梁泽学, 江静. 中国北方地区 1961~2000 年干旱半干旱化趋势[J]. *气象科学*, 2005, 25(1): 9-17.
LIANG Zexue, JIANG Jing. Aridificational and semi-aridificational tendency of the northern China from 1961 to 2000. *Scientia Meteorologica Sinica*, 2005, 25(1): 9-17. (in Chinese)
- [34] 胡子瑛, 周俊菊, 张利利, 等. 中国北方气候干湿变化及干旱演变特征[J]. *生态学报*, 2018, 38(6): 1908-1919.
HU Ziyi, ZHOU Junju, ZHANG Lili, et al. Climate dry-wet change and drought evolution characteristics of different dry-wet areas in northern China. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(6): 1908-1919. (in Chinese)
- [35] 孟猛, 宗美娟. 利用 de Martonne 方法对我国 20 世纪干旱化趋势的研究[J]. *水土保持研究*, 2018, 25(3): 128-132.
MENG Meng, ZONG Meijuan. Study of aridity trend of China in 20th century by using de martonne method. *Research of Soil and Water Conservation*, 2018, 25(3): 128-132. (in Chinese)