

DOI: 10.11829/j.issn.1001-0629.2020-0072

刘淼, 周园园, 鲁春霞. 气候变化背景下张家口地区干旱化趋势. 草业科学, 2020, 37(7): 1416-1423.

LIU M, ZHOU Y Y, LU C X. Changes in drought trends in Zhangjiakou due to global climate change. Pratacultural Science, 2020, 37(7): 1416-1423.

气候变化背景下张家口地区干旱化趋势

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 050061; 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 100101; 3. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘要: 本研究利用 1959–2017 年逐月的降水和平均气温数据, 计算了张家口地区干旱化定量指标, 分析了该地区年均、四季、植被生长期及非植被生长期的干湿状况。结果表明: 1) 年均降水量和温度均呈显著上升趋势, 干旱化趋势加重; 2) 植被生长期和非植被生长期降水量和温度呈上升趋势, 但趋势不显著, 植被生长期干旱化趋势加重, 非植被生长期干旱化趋势减缓; 3) 春季和秋季降水量上升趋势不显著, 温度显著上升, 干旱化趋势加重, 而夏季和冬季降水量显著上升, 夏季温度显著上升, 冬季温度上升不显著, 干旱化趋势减缓; 4) 年均、四季、植被生长期和非植被生长期的降水量、温度、干旱化序列均无明显突变; 5) 冬季降水量、温度的变化对干旱化趋势影响最大; 6) 尽管研究区降水量在不同研究时段均呈上升趋势, 但是同时段的温度也呈上升趋势, 温度升高导致蒸发量增加, 完全抵销了降水量增加, 以致干旱化程度加剧; 由于不同研究时段降水和温度的变化程度不同, 干旱化程度在不同研究时段表现也不同。

关键词: 干旱; 降水量; 气温; 张家口地区; 季节变化

文献标志码: A **文章编号:** 1001-0629(2020)07-1416-08

Changes in drought trends in Zhangjiakou due to global climate change

LIU Miao¹, ZHOU Yuanyuan², LU Chunxia³

(1. Hebei Water Resource Research and Water Conservancy Technology Test and Extension Center, Shijiazhuang 050061, Hebei, China; 2. Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes / Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 3. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: Based on monthly precipitation and temperature data of Zhangjiakou from 1959 to 2017, drought index was determined and used to estimate annual and seasonal drought trends as well as trends within vegetative and non-vegetation growth periods. The results were as follows. 1) Annual average precipitation and precipitation in summer and winter significantly increased. Precipitation in spring, autumn, and vegetative and non-vegetative growth periods increased, although the trend of change was not significant. 2) Annual average temperature and temperature in spring, summer, and autumn showed a significant increasing trend, while that in winter as well as vegetative and non-vegetative growth periods showed a non-significant increasing trend. 3) Annual average drought index and drought index in spring, autumn, and vegetative growth period showed a non-significant increasing trend. 4) Overall precipitation, temperature, and drought index did not show a significant change across different timescales, including annual average and values in spring, summer,

收稿日期: 2020-02-24 接受日期: 2020-06-18

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2017ZX07101001); 国家自然科学基金 (41790424)

第一作者: 刘淼 (1983-), 男, 北京崇文人, 高级工程师, 博士, 主要从事农业水资源管理。E-mail: hillerman@163.com

通信作者: 周园园 (1982-), 女, 河北正定人, 助理研究员, 博士, 主要从事环境生态水文、河流地貌等研究。E-mail: zhouyy.09b@igsnrr.ac.cn

鲁春霞 (1965-), 女, 陕西宝鸡人, 副研究员, 博士, 主要从事资源生态等研究。E-mail: lucx@igsnrr.ac.cn

autumn, and winter. 5) The greatest effect of precipitation and temperature on drought trend was observed in winter. 6) Drought in summer, winter, and non-vegetative growth period showed a non-significant decreasing trend. Although precipitation and temperature in the study area showed increasing trends across different timescales, drought showed an overall increasing trend, because increasing temperature led to excess evapotranspiration, ultimately increasing precipitation. The degree of change in precipitation and temperature varied across different periods, resulting in diverse degrees of drought.

Keywords: drought; precipitation; temperature; Zhangjiakou region; season variation

Corresponding author: ZHOU Yuanyuan E-mail: zhouyy.09b@igsnr.ac.cn

LU Chunxia E-mail: lucx@igsnr.ac.cn

随着全球气候变化加剧, 极端气候(如干旱、洪水、风暴等)更加频繁。气候变化直接或间接地影响自然生态系统和人类经济社会, 自20世纪70年代全球变化的区域响应引起国际社会的广泛关注。干旱不仅影响范围广, 而且危害大, 如干旱引起水资源短缺、饥荒、疾病等一系列社会问题, 因此被认为是影响最严重的极端气候, 也越来越受到社会各界的重视^[1]。

尽管目前干旱尚没有统一定义, 但是干旱指数是常用的衡量干旱趋势和程度的重要指标。目前对全球气候被干旱化趋势判断主要存在两个争论, 一是全球干旱趋势增加, 尤其是在干旱和半干旱地区^[2], 例如Cook等^[3]、Dai^[4]、Peter等^[5]发现中亚、东南亚、非洲、北美、欧洲及澳大利亚部分地区有明显的干旱化趋势, 程善俊和梁苏洁^[6]发现在评估的全球干旱化趋势的环境下, 半湿润区表现最显著; 而另一种观点认为目前过度评估了气候的干旱化趋势, 例如Greve等^[7]认为全球9.5%的区域存在干旱区有湿润化趋势而湿润区有干旱化趋势, Feng和Zhang^[8]发现全球约30%的地区有湿润化趋势。

张家口地处半湿润到半干旱的农业和农牧交错区, 属于生态环境脆弱地带, 同时也对气候变化具有敏感性的特征。张家口位于温带大陆性季风气候区, 四季气候差异显著, 再加上人类活动相对频繁, 因此是旱灾、土壤侵蚀等自然灾害多发区。气候干旱化将加重张家口地区的生态退化。张家口是京津冀的生态屏障和重要水源地, 张家口的生态安全对京津冀的生态环境发展具有重要作用。本研究对张家口的气候干旱化进行分析, 不仅对张家口的生态工程建设具有指导作用, 而且对京津冀的生态安全具有重要意义。

1 研究区概况

张家口位于113°50′–116°30′E, 39°30′–42°10′N。东靠河北省承德市, 东南毗连北京市, 南邻河北省保定市, 西、西南与山西省接壤, 北、西北与内蒙古自治区交界。张家口市南北长289.2 km, 东西宽216.2 km, 总面积 $3.68 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。

受温带大陆性季风气候影响, 张家口四季分明, 雨热同季, 年际气温变化大。冬季寒冷而漫长, 春季干燥多风沙, 夏季炎热, 秋季晴朗冷暖适中。据1959–2017年气象数据统计, 张家口多年平均降水量为360 mm, 降水集中在6月–8月, 约占全年降水量的70%, 空间分布极不均匀。区域地势西北高、东南低, 阴山山脉横贯中部, 将全市划分为坝上、坝下两个自然地理区域。坝头、崇礼东部、赤城东北部及小五台山一带较湿润, 年降水量500 mm以上, 坝上和桑干河、洋河河谷地带较干旱, 年降水量不超过420 mm, 丘陵地带降水量约为400 mm。

张家口属于典型的生态脆弱区。农业用地和“四荒”地比例高, 林草比例相对较低, 造成土壤沙化, 水土流失严重, 土地的生产能力差异较大。坝下地区气候、土壤条件相对较好, 土地生产能力远高于坝上地区。坝上地区气温低、风沙严重、土壤多为沙壤土, 有机质含量很低, 因此农作物产量低, 地表植被以草和灌木生态林为主。

2 资料来源与研究方法

本研究所用的降水量、温度数据来自于中国气象数据共享网(<http://data.cma.cn/>)。采用张家口地区及周边11个国家气象站点1959年以来逐月降水量和温度数据, 分析研究区降水量、温度及干旱化

变化趋势，气象站点包括：延庆、北京、张北、蔚县、丰宁、张家口、怀来、化德、多伦、天镇、灵丘等(图 1)。

2.1 干旱指数

利用 ArcGIS 软件泰森多边形法及克里格插值法，计算了研究区 1959 – 2017 年共 59 年逐月面平均降水量、面平均温度。采用 De Martonne(DE)^[9] 干旱指数对研究区气候干旱化趋势进行分析，DE 干旱指数计算公式为：

$$I = P / (T + 10)。$$
(1)

式中：*I* 为干旱指数；*P* 为降水量，单位为 mm；*T* 为温度，单位为℃。

基于研究区逐月平均降水量、温度及干旱化指数，对研究区年均、春季(2 月 – 4 月)、夏季(5 – 7 月)、秋季(8 月 – 10 月)、冬季(11 月 – 次年 1 月)及植被生长期(5 月 – 10 月)、植被非生长季(11 月 – 次年 4 月)等不同时间尺度的降水量、温度及干旱指数进行统计。

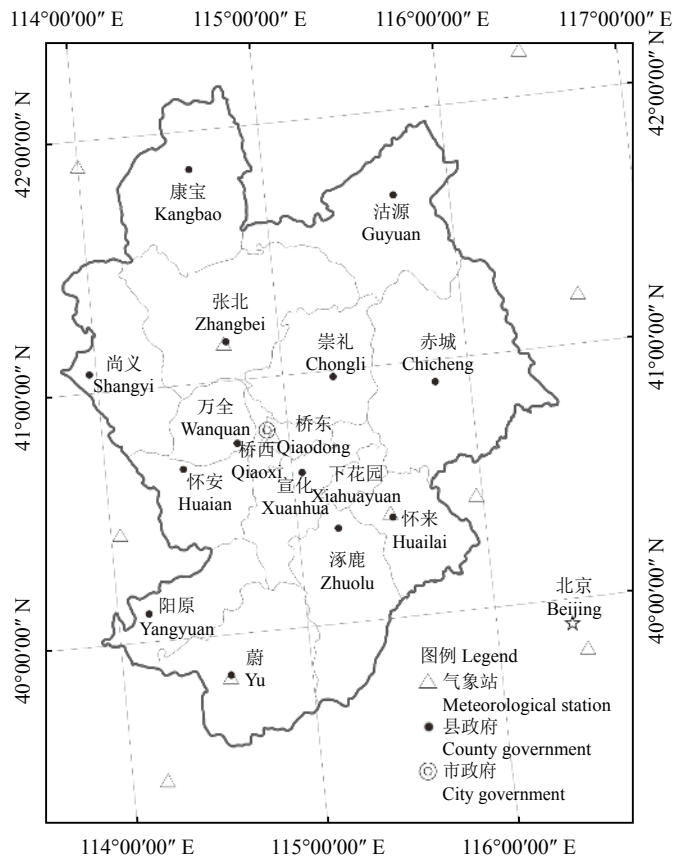


图 1 研究区位置及气象站点图

Figure 1 location of study area and meteorological station

2.2 Pettitt 检验

Pettitt 检验法最先由 Pettitt 用于检验突变点，是一种非参数检验方法，前提是序列存在趋势性变化，其核心是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。该检验使用 Mann-Whitney 的统计量 *U_{t,N}* 来检验同一个总体 *x(t)* 的两个样本，统计量 *U_{t,N}* 的计算公式为^[10-11]：

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

若 *x_t – x_j > 0*，则 *sgn(x_t – x_j) = 1*，若 *x_t – x_j = 0*，则 *sgn(x_t – x_j) = 0*，若 *x_t – x_j < 0*，则 *sgn(x_t – x_j) = -1*。

Pettitt 检验的零假设为序列无变异点，其统计量 *K_N* 和相关概率的显著性检验公式为：

$$K_{t,N} = \text{Max}|U_{t,N}|, (1 \leq t \leq N);$$
$$P \approx 2\exp\{-6(K_{t,N})^2 / (N^3 + N^2)\}。$$
(3)

若 *P < 0.5*，则认为 *t* 点为显著变异点。

3 结果分析

3.1 降水变化趋势

采用趋势线法分析 1959 – 2017 年研究区年均、四季、植被生长期及非植被生长期降水量变化趋势，并采用 T 检验法进行显著性检验，各因子的变化趋势如图 2 和图 3 所示。

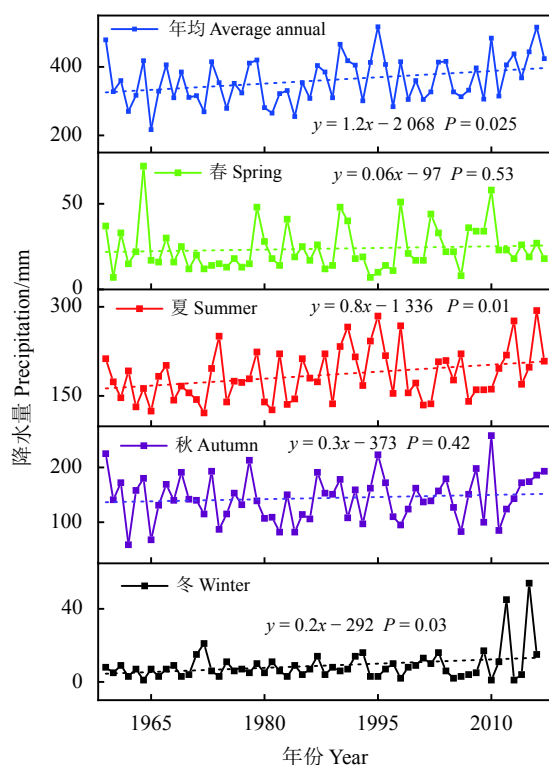


图 2 1959 – 2017 年年均及四季降水量变化趋势

Figure 2 Trend of precipitation in annual and seasonal variation from 1959 to 2017

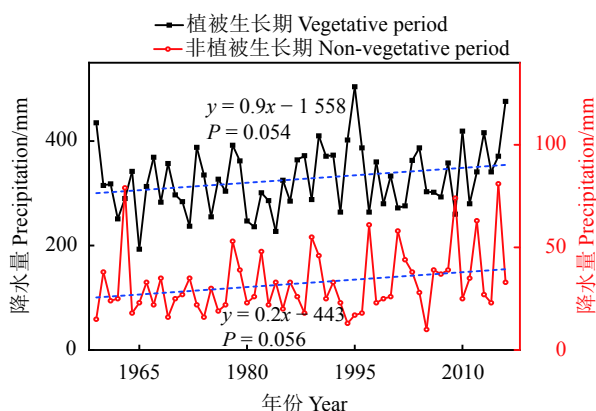


图 3 1959 – 2017 年植被生长期及非植被生长期降水量变化趋势

Figure 3 Trend of precipitation in vegetation growing period and non-vegetation growing period from 1959 to 2017

1959–2017 年研究区年均降水量总体呈上升趋势，速率为 $1.2 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ ， T 检验 $p = 0.025$ ，小于 0.05，说明降水量增加趋势显著 (图 2)。年均降水量最大值出现在 1995 年，为 517 mm，最小值出现在 1965 年，为 217 mm。春、夏、秋、冬四季降水量均呈增加趋势，增长率分别为 0.06、0.8、0.3 和 $0.2 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ ， T 检验 p 分别为 0.53、0.01、0.42、0.03，说明夏季和冬季降水量增加趋势显著，春季和秋季降水量增加趋势不显著。其中，春季降水量增长率最小，夏季降水量增长率最大。植被生长期、非植被生长期降水量均呈上升趋势，速率分别为 0.9 和 $0.2 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ ，植被生长期降水量序列 T 检验 $p = 0.054$ ，小于 0.05，非植被生长期降水量序列 T 检验 $p = 0.056$ ，大于 0.05，说明植被生长期和非植被生长期降水量增加趋势不显著 (图 3)。植被生长季降水量最高出现在 1995 年，为 504 mm，最低出现在 1964 年，为 17.9 mm。非植被生长期降水量最高、最低值分别为 1963 年 79.1 mm、2005 年 9.8 mm。年均、四季、植被生长期及非植被生长期降水量序列 Pettitt 检验的统计量 p 均为 2，说明年均、四季、植被生长期及非植被生长期降水量序列无明显突变。

综上所述，研究区年均及夏季、冬季降水量均呈显著上升趋势，春季、秋季、植被生长期和非植被生长期降水量呈上升趋势，但趋势不显著。

3.2 温度变化趋势

采用趋势线法分析 1959–2017 年研究区年均、四季、植被生长期及非植被生长期温度的变化趋势，并采用 T 检验法进行显著性检验，各因子的变化趋势如图 4 和图 5 所示。

1959–2017 年研究区年均温度总体呈明显的上升趋势，上升速率为 $0.06 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{a}^{-1}$ ， T 检验 $p = 0$ ，小于 0.05，说明温度上升趋势显著 (图 4)。春、夏、秋、冬四季温度均呈增加趋势，增长率分别为 0.05、0.9、0.8、 $0.02 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{a}^{-1}$ ， T 检验 p 分别为 0、0、0、0.09，说明春、夏和秋三季温度增加趋势显著，冬季温度增加趋势不显著。其中，夏季温度增长率最大，冬季温度增长率从最小，夏季和秋季的增长率均超过多年平均温度的增长率。植被生长期和非植被生长期温度均呈上升趋势，上升速率分别为 0.09 、 $0.04 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{a}^{-1}$ (图 5)。植被生长期温

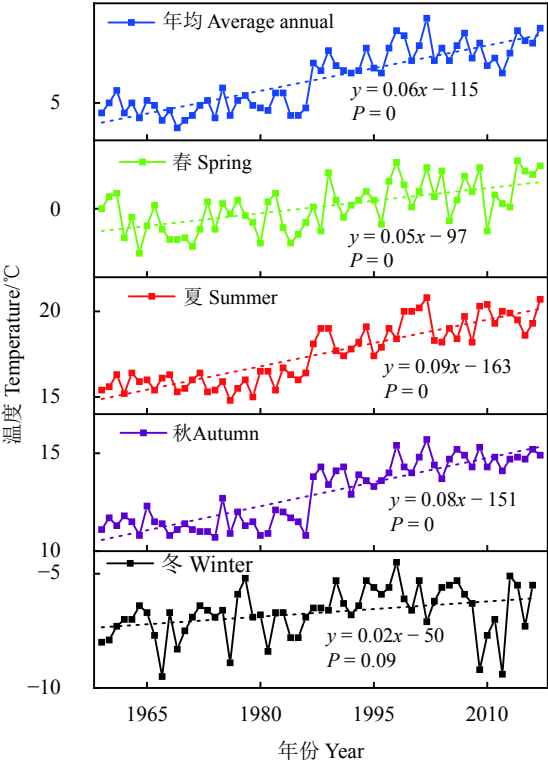


图 4 1959–2017 年年均及四季温度变化趋势
Figure 4 trend of temperature in annual and seasonal variation from 1959 to 2017

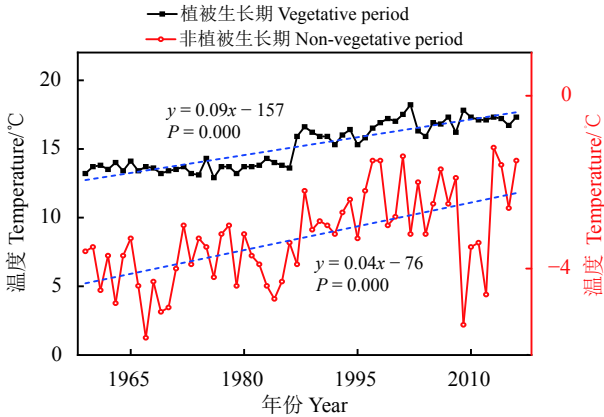


图 5 1959–2017 年植被生长期及非植被生长期
温度变化趋势

Figure 5 trend of temperature in vegetation growing period and non-vegetation growing period from 1959 to 2017

度序列 T 检验 $p=0$, 小于 0.05, 非植被生长期温度序列 T 检验 $p=0$, 小于 0.05, 说明植被生长期和非植被生长期温度上升趋势显著。2002 年研究区年平均温度最高, 达到 $8.2\text{ }^{\circ}\text{C}$, 1969 年年均温度最低, 为 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。植被生长季温度最高出现在 2002 年, $18.2\text{ }^{\circ}\text{C}$, 最低出现在 1976 年, 为 $12.9\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{a}^{-1}$ 。

非植被生长期 2013 年温度最高, 为 $-1.2\text{ }^{\circ}\text{C}$, 1967 年温度最低, 为 $-5.6\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{a}^{-1}$ 。年均、四季、植被生长期及非植被生长期温度序列 Pettitt 检验的统计量 p 均为 2, 说明年均、四季、植被生长期及非植被生长期温度序列无明显突变。

综上可知, 研究区年均、春季、夏季、和秋季的温度均呈显著上升趋势, 冬季、植被生长期和非植被生长期温度上升趋势不显著。

3.3 干旱化趋势

采用 De Martonne(DE) 干旱指数分别对研究区 1959–2017 年年均、四季、植被生长期、非植被生长期的干旱化趋势进行分析, 并采用 T 检验法进行评估, 变化趋势见图 6、图 7。

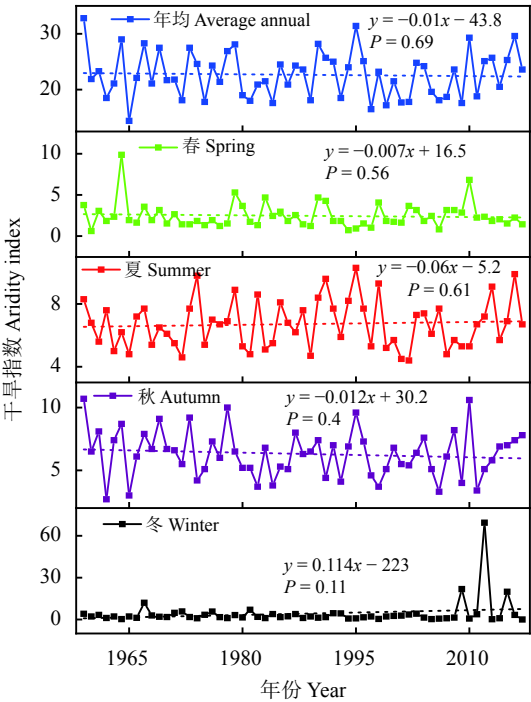


图 6 1959–2017 年年均及四季的干旱指数变化趋势
Figure 6 trend of aridity index in annual and seasonal variation from 1959 to 2017

1959–2017 年研究区干旱指数呈明显下降趋势, 植被生长期干旱指数呈下降趋势, 而非植被生长期干旱化指数呈上升趋势。说明研究区干旱化趋势明显, 植被生长期研究区气候呈干旱化趋势, 非植被生长期气候呈湿润趋势。年均干旱指数和植被生长期干旱指数分别以 0.06 和 $0.001\cdot\text{a}^{-1}$ 的速率下降, T 检验 p 分别为 0.69 和 0.71, 均大于 0.05, 说明年均干旱指数和植被生长期干旱指数下

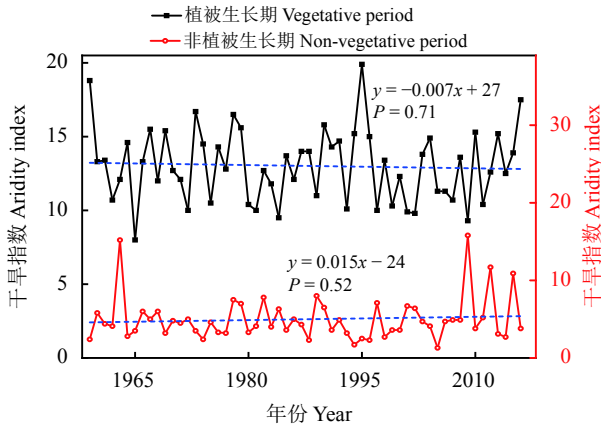


图 7 1959–2017 年植被生长期及非植被生长期的干旱指数变化趋势

Figure 7 trend of aridity index in vegetation growing period and non-vegetation growing period from 1959 to 2017

降趋势不显著。非植被生长期干旱指数以每年 0.002 的速率上升, T 检验 $p = 0.52$, 且 > 0.5 , 说明非植被生长期干旱指数上升趋势不显著。春季和秋季干旱指数均呈下降趋势, 速率分别为每年 0.007 和 0.012, T 检验 p 分别为 0.56、0.4, 说明春季和秋季干旱化增加趋势不显著。夏季和冬季干旱指数增加趋势, 速率分别为每年 0.006 和 0.114, T 检验 p 分别为 0.61、0.11, 说明夏季和冬季干旱化下降趋势不显著。年均、四季、植被生长期及非植被生长期干旱指数序列 Pettitt 检验的统计量 p 均为 2, 说明年均、四季、植被生长期及非植被生长期干旱指数序列无明显突变。

综上可知, 研究区年均、春季、秋季、植被生长期干旱化趋势增加, 但趋势不显著, 夏季、冬季和非植被生长期干旱化趋势下降, 下降趋势不显著。

3.4 降水、温度对干旱化的影响

采用 SPSS 软件建立 1959 – 2017 年年均、四季、植被生长期、非植被生长期的干旱指数与降水量、温度的关系, 分析降水量、温度对干旱化趋势的影响。

$$I_{\text{春}} = 0.11P_{\text{春}} - 0.29T_{\text{春}} - 0.13; \quad (4)$$

$$I_{\text{夏}} = 0.04P_{\text{夏}} - 0.24T_{\text{夏}} + 4.23; \quad (5)$$

$$I_{\text{秋}} = 0.04P_{\text{秋}} - 0.27T_{\text{秋}} + 3.53; \quad (6)$$

$$I_{\text{冬}} = 0.7P_{\text{冬}} - 2.72T_{\text{冬}} - 20.2; \quad (7)$$

$$I_{\text{植被}} = 0.04P_{\text{植被}} - 0.02T_{\text{植被}} + 1.59; \quad (8)$$

$$I_{\text{非植被}} = 0.16P_{\text{非植被}} - 0.87T_{\text{非植被}} - 3.14; \quad (9)$$

$$I_{\text{年均}} = 0.06P_{\text{年均}} - 1.39T_{\text{年均}} + 8.45. \quad (10)$$

式中: $I_{\text{春}}$ 、 $I_{\text{夏}}$ 、 $I_{\text{秋}}$ 、 $I_{\text{冬}}$ 、 $I_{\text{植被}}$ 、 $I_{\text{非植被}}$ 、 $I_{\text{年均}}$ 分别为春、夏、秋、冬、植被生长期、非植被生长期、多年平均的干旱指数; $P_{\text{春}}$ 、 $P_{\text{夏}}$ 、 $P_{\text{秋}}$ 、 $P_{\text{冬}}$ 、 $P_{\text{植被}}$ 、 $P_{\text{非植被}}$ 、 $P_{\text{年均}}$ 分别为春、夏、秋、冬、植被生长期、非植被生长期、多年平均的降水量; $T_{\text{春}}$ 、 $T_{\text{夏}}$ 、 $T_{\text{秋}}$ 、 $T_{\text{冬}}$ 、 $T_{\text{植被}}$ 、 $T_{\text{非植被}}$ 、 $T_{\text{年均}}$ 分别为春、夏、秋、冬、植被生长期、非植被生长期、多年平均的温度。

从以上不同时期降水量、温度与干旱指数的关系可以看出, 冬季的降水量和温度的变化对干旱化趋势的影响最大。植被生长期降水量对干旱化趋势的影响高于温度, 而其他几个时期, 温度的变化对干旱化趋势的影响高于降水量。

4 讨论

气候干旱一般是由降水减少、气温升高所致。研究区年均降水量虽然呈现增加趋势, 但是干旱化仍然呈加重趋势。这主要是由于研究区的气温也呈升高趋势, 气温升高引起增加的蒸发量抵消甚至超过增加的降水量, 加重研究区干旱趋势^[12-13]。Gao 等^[14]发现 1960 年以来中国北方的实际蒸发量呈增加趋势, Li 等^[15]也发现 1960 年以来海河上游区域参考作物蒸散发量呈增加趋势, 可见气温升高引起蒸发量增加导致研究区干旱趋势加剧。尽管研究区降水量和温度在四季及植被生长期及非植被生长期都呈增加趋势, 但是由于干旱程度同时受降水量变化和温度的变化影响, 不同研究时段的降水量和温度的变化程度不同, 干旱化程度也不同。李玥^[16]、谭云娟^[17]同样发现全球半湿润区有明显干旱化趋势, 半湿润半干旱地区干湿变化受降水控制。马柱国和任小波^[18]、黄荣辉等^[19]研究发现北方地区处于气候干旱化的过程中, 而胡子瑛等^[20]则发现中国北方具有冬春季湿润、夏秋季干旱化趋势, 荣艳淑和屠其璞^[21]发现天津地区也存在气温升高引起蒸发量增加导致干旱加剧。造成北方气候干旱化的原因目前尚无统一论, 廉毅等^[22]认为中国气候干旱化与东亚夏季季风在 30°N 以北地区活动和太平洋区极涡强度指

数减弱有关, 黄刚^[23]则认为华北干旱加剧与北、南半球气温变化差异的减少导致亚非季风系统发生了年代际减弱和南撤有关。

5 结论

采用统计分析方法分析了张家口 1959–2017 年年均、四季、植被生长期及非植被生长期的降水量、气温变化趋势及特点, 并结合干旱指数分析了研究区年均、四季、植被生长期及非植被生长期的干旱化趋势。结果显示: 1) 1959 年来研究区年均及夏季、冬季降水量均呈显著上升趋势, 春季、秋季、植被生长期和非植被生长期降水量呈上升趋势, 但趋势不显著; 2) 年均、春季、夏季、和秋季的温度均呈显著上升趋势, 冬季、植被生长期和非植被生长期温度上升趋势不显著;

3) 年均、春季、秋季、植被生长期干旱化趋势增加, 但趋势不显著, 夏季、冬季和非植被生长期干旱化趋势下降, 下降趋势不显著; 4) 年均、四季、植被生长期及非植被生长期的降水量、气温、干旱化序列均无明显突变; 5) 冬季的降水量和温度的变化对干旱化趋势的影响最大; 6) 植被生长期降水量对干旱化趋势的影响高于温度, 而其他几个时期, 温度的变化对干旱化趋势的影响高于降水量; 7) 研究区年均降水量虽然呈现增加趋势, 但是干旱化仍然呈加重趋势, 这可能是由于同样升高的气温, 增加了研究区的蒸发量, 增加的蒸发量抵消甚至高于增加的降水量, 导致即使降水量增加干旱化趋势却没有减小, 不同研究时段的变化程度不同, 导致不同研究时段干旱化程度变化不同。

参考文献 References:

- [1] NOAA. National centers for environmental information, state of the climate: Global climate report for annual 2016. (2017-01) [2019-2-15]. <https://www.ncdc.noaa.gov/sotc/global/201613>.
- [2] IPCC. Good practice guidance for land use, land-use change and forestry. Japan: Institute for Global Environmental Strategies, Kamiyamaguchi, Hayama, Kanagawa, 2003.
- [3] COOK E R, WOODHOUSE C A, EAKIN C M, MEKO D M, STAHL D W. Long-term aridity changes in the western United States. *Science*, 2004, 306: 1015-1018.
- [4] DAI A. Increasing drought under global warming in observations and models. *Nature Climate Change*, 2013, 3(1): 52-58.
- [5] PETER G, BORIS O, BRIGITTE M, SHEFFIELD J, REICHSTEIN M, SENEVIRATNE S I. Global assessment of trends in wetting and drying over land. *Nature Geoscience*, 2014, 7(10): 716-721.
- [6] 程善俊, 梁苏洁. 基于 3 种指数的全球干湿变化年代际特征. *干旱气象*, 2018, 36(2): 23-31.
CHENG S J, LIANG S J. Interdecadal characteristics of global dry-wet variation based on three indexes. *Journal of Arid Meteorology*, 2018, 36(2): 23-31.
- [7] GREVE P, ORLOWSKY B, MULLER B, SHEFFIELD J, REICHSTEIN M, SENEVIRATNE S. Global assessment of trends in wetting and drying over land. *Nature Geoscience*, 2014, 7: 717-721.
- [8] FENG H, ZHANG M. Global land moisture trends: Drier in dry and wetter in wet over land. *Scientific Reports*, 2015, 5: 18018.
- [9] DE MARTONNE E. Aridité et indices d'aridité. *Académie des Sciences. Comptes Rendus*, 1923, 182: 1935-1938.
- [10] PETTITT A N. A non-parametric approach to the change-point problem. *Applied Statistics*, 1979, 28(2): 126-135.
- [11] 周园园, 师长兴, 范小黎, 杜俊. 国内水文序列变异点分析方法及在各流域应用研究进展. *地理科学进展*, 2011, 30(11): 1361-1369.
ZHOU Y Y, SHI C X, FAN X L, DU J. Advances in the research methods of abrupt changes of hydrologic sequences and their applications in drainage basins in China. *Progress in Geography*, 2011, 30(11): 1361-1369.
- [12] TAIKAN O, SHINJIRO K. Global hydrological cycles and world water resource. *Science*, 2005, 313: 1068-1072.

- [13] LIN L, GETTELMAN A, FENG S, FU Q. Simulated climatology and evolution of aridity in the 21st Century. *Journal of Geophysical Research. Atmospheres*, 2015, 120: 5795-5815.
- [14] GAO G, CHEN D, XU C Y, SIMELTON E. Trend of estimated actual evapotranspiration over China during 1960–2002. *Journal of Geophysical Research*, 2007, 112: D11120.
- [15] LI Z L, LI Z J, XU Z X, ZHOU X. Temporal variations of reference evapotranspiration in Heihe River basin of China. *Hydrology Research*, 2013, 44(5): 904-916.
- [16] 李玥. 全球半干旱气候变化的观测研究. 兰州: 兰州大学硕士学位论文, 2015.
LI Y. An observational study of global semi-arid climate change. Master Thesis. Lanzhou: Lanzhou University, 2015.
- [17] 谭云娟. 近 50 年来我国气候干湿区的变化规律及其成因分析. 南京: 南京信息工程大学硕士学位论文, 2016.
TAN Y J. The variation law and its causes of climate in China's wet and dry zones in recent 50 years. Master Thesis. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2016.
- [18] 马柱国, 任小波. 1951–2006 年中国区域干旱化特征. *气候变化研究进展*, 2007, 3(4): 195-201.
MA Z G, REN X B. Drying trend over China from 1951 to 2006. *Advances in Climate Change Research*, 2007, 3(4): 195-201.
- [19] 黄荣辉, 徐予红, 周连童. 我国夏季降水的年代际变化及华北干旱化趋势. *高原气象*, 1999, 18(4): 465-476.
HUANG R H, XU Y H, ZHOU L T. The interdecadal variation of summer precipitations in China and the drought in north China. *Plateau Meteorology*, 1999, 18(4): 465-476.
- [20] 胡子瑛, 周俊菊, 张利利, 魏伟, 曹建军. 中国北方气候干湿变化及干旱演变特征. *生态学报*, 2018, 38(6): 1908-1919.
HU Z Y, ZHOU J J, ZHANG L L, WEI W, CAO J J. Climate dry-wet change and drought evolution characteristics of different dry-wet areas in northern China. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(6): 1908-1919.
- [21] 荣艳淑, 屠其璞. 天津地区蒸发演变及对本地气候干旱化影响的研究. *气候与环境研究*, 2004, 9(4): 575-583.
RONG Y S, TU Q P. The research of effects of evaporation evolution on climatological drought trend in Tianjin region. *Climatic and Environmental Research*, 2004, 9(4): 575-583.
- [22] 廉毅, 沈柏竹, 高枫亭, 隋波. 中国气候过渡带干旱化发展趋势与东亚夏季风、极涡活动相关研究. *气象学报*, 2005, 63(5): 740-749.
LIAN Y, SHEN B Z, GAO Z T, SUI B. Correlation of drought development tendency on China's climate transition zone and activity of east Asia summer monsoon and polar vortex. *Acta Meteorologica Sinica*, 2005, 63(5): 740-749.
- [23] 黄刚. 与华北干旱相关联的全球尺度气候变化现象. *气候与环境研究*, 2006, 11(3): 270-279.
HUANG G. Global climate change phenomenon associated with the droughts in north China. *Climatic and Environmental Research*, 2006, 11(3): 270-279.

(执行编辑 苟燕妮)