

Temporal Variation of Precipitation Characteristics in Haihe Basin during Recent 60 Years

Yingshan Sun^{1,2}, Qiang Liu^{1*}, Qingguo Li², Xiaomin Yuan¹

¹State Key Laboratory of Water Environment Simulation, School of Environment, Beijing Normal University, Beijing

²School of Water Resources and Environment, University of Jinan, Jinan Shandong

Email: 496663514@qq.com, *qiang.liu@bnu.edu.cn

Received: Jan. 25th, 2019; accepted: Mar. 22nd, 2019; published: Apr. 12th, 2019

Abstract

According to the precipitation data of 57 meteorological stations in Haihe basin during 1957-2016, temporal variation of precipitation characteristics was explored used the least-squares linear model, Mann-Kendall method, and Morlet wavelet. The results showed that: 1) annual precipitation in Haihe basin decreased with an average slope of -0.57 mm a^{-2} ; 2) precipitation decreased from the rainy region in the northern plains to northwest and southeast region; 3) no abrupt changes were detected for annual precipitation; and 4) two significant periods (at a 95% confident level) of 2.5 and 4.9 years and three non-significant periods of 9.8, 16.5 and 23.4 years were detected on a basin scale, and the significant periods mainly detected during 1959-1976 and 1986-2005. Furthermore, all of the results indicated that annual precipitation is less than normal period from 2005 to 2016, and rainy periods (more than normal period) will come in the recent years.

Keywords

Precipitation, Temporal Trends, Abrupt Changes, Periods, Haihe Basin

近60年海河流域降水量变化特征分析

孙荧杉^{1,2}, 刘 强^{1*}, 李庆国², 袁晓敏¹

¹北京师范大学环境学院, 水环境模拟国家重点实验室, 北京

²济南大学水利与环境学院, 山东 济南

Email: 496663514@qq.com, *qiang.liu@bnu.edu.cn

收稿日期: 2019年1月25日; 录用日期: 2019年3月22日; 发布日期: 2019年4月12日

作者简介: 孙荧杉(1994-), 山东人, 硕士研究生。

*通讯作者。

文章引用: 孙荧杉, 刘强, 李庆国, 袁晓敏. 近 60 年海河流域降水量变化特征分析[J]. 水资源研究, 2019, 8(2): 117-124.

DOI: 10.12677/jwrr.2019.82014

摘要

利用 1959~2016 年海河流域 57 个站点的降水资料, 采用最小二乘趋势拟合、Mann-Kendall 非参数检验和 Morlet 小波等方法, 分析了海河流域降水的趋势、突变及周期特征。结果表明: 近 60 年来, 海河流域降水总体呈减少趋势, 线性倾向率为 -0.57 mm a^{-2} ; 海河流域降水空间的总趋势是由中北部平原区分别向西北和东南两侧减少; 没有检测到明显的突变过程; 海河流域降水量存在 2.5 年、4.9 年显著周期 ($P < 0.05$), 以及 9.8 年、16.5 年和 23.4 年非显著性周期。显著性周期主要发生在 1959~1976 年和 1986~2005 年。根据近 60 年降雨规律, 2005~2016 年海河流域处于降水偏少期, 预测未来几年很有可能向降水充沛期过渡。

关键词

降水量, 时间趋势, 突变, 周期, 海河流域

Copyright © 2019 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

以气温升高和降水减少为主要特征的气候变化成为影响地表生态系统的主要因素之一[1]。认识降水在时间序列上的演变趋势、突变特征, 并进行周期检测成为当前认识气候变化及其区域响应的重要环节, 也为分析气候变化对区域水生态系统的影响提供重要证据[1] [2] [3] [4]。例如, Liqiao Liang 等[5]通过线性拟合模型、M-K 检验、移动 t 检验、Morlet 小波和克里格插值方法, 研究了 1961~2008 年东北地区降水的时间变化和空间分布, 讨论了其对生态系统和农业的影响及其对气候变化的响应。而面对全球变化引起的极端水文事件的增多, 学者们也加强了流域尺度降水时空演变规律的分析, 以应对旱涝灾害风险, 为水资源配置与管理提供支持。如邵晓梅[6]对黄河流域近 40a 来降水的季节变化和年际变化时间序列进行了小波分析, 揭示了黄河流域降水变化的多时间尺度变化特征, 讨论了流域尺度上降水的时空演变规律; 徐志龙[7]分析了 1951~2005 年海河流域降水序列, 对海河流域全区性洪涝和干旱的变化进行规律总结; 陈阿娇[8]基于长江流域 115 个雨量站 1963~2013 年的日降雨数据, 利用 M-K 检验等方法, 总结长江流域的降水时空演变特征, 为洪涝灾害预防提供决策支持。总体而言, 降水的时空演变规律成为认识流域或区域尺度上气候变化对流域水资源影响的重要证据, 可为应对气候变化对流域水资源影响, 制定切实流域水资源管理目标提供数据支撑。

海河流域($35^{\circ}\text{N}\sim 43^{\circ}\text{N}$, $112^{\circ}\text{E}\sim 120^{\circ}\text{E}$), 东临渤海、西倚太行、南界黄河、北接蒙古高原, 全流域地势呈西北高东南低, 大致分高原、山地及平原 3 种地貌类型, 属温带季风气候。海河流域包括七大水系, 分别为滦河系、北三河系、永定河系、大清河系、子牙河系、漳卫河系和徒骇马颊河系。其行政区划涉及京、津、冀、晋、蒙、辽、鲁、豫等 8 个省(自治区、直辖市), 总面积 31.82 万 km^2 [9], 近年来, 气候变化加上高强度人类活动, 海河流域径流过程发生显著变化, 该区域面临十分严重的水资源危机。海河流域资源型缺水严重, 人均、亩均水资源占有量远低于国际公认的严重缺水警戒线[10]。本研究选择海河流域为研究区域, 利用最小二乘趋势拟合、Mann-Kendall 非参数检验(以下简称 M-K 法)和 Morlet 小波变换等方法, 分析了海河流域降水的变化特征, 为海河流域水资源管理以及应对气候变化对流域水资源影响提供一定的理论参考和实践指导。

2. 数据来源与研究方法

2.1. 数据来源

选取海河流域 1959~2016 年 57 个气象站点的逐日降水资料(所用资料来源于中国气象科学数据共享服务网, <http://cdc.cma.gov.cn>), 个别缺测站资料进行了插补订正, 采用累加求和获得年降水序列。

用线性最小二乘的方法拟合计算各站点年降水的线性变化趋势; 用 M-K 法检测年降水的突变性特征; 用 Morlet 小波检测年降水量周期性变化。

海河流域气象站点分布, 见图 1。

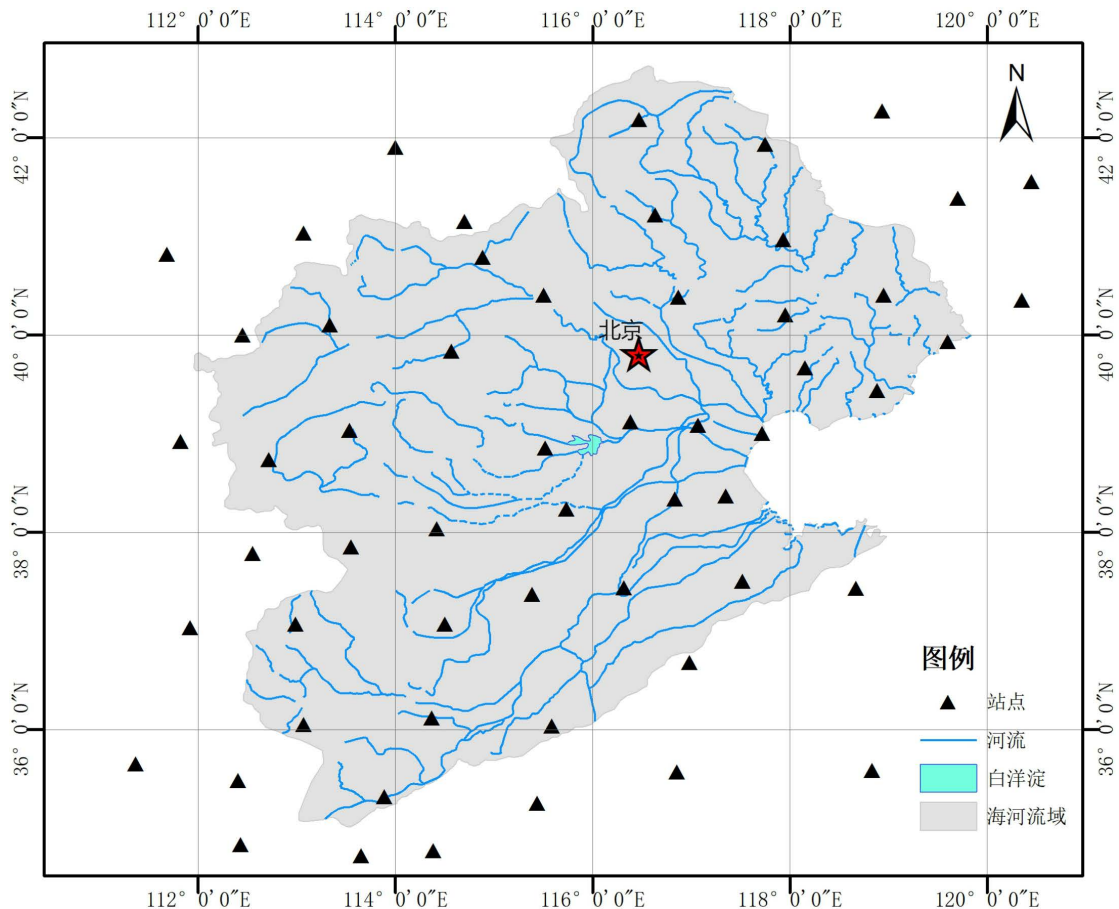


Figure 1. Distribution map of meteorological stations in Haihe basin

图 1. 海河流域气象站点分布图

2.2. 研究方法

2.2.1. 趋势分析

累积距平法是一种常用的、由曲线直观判断变化趋势的方法。累积距平曲线呈上升趋势, 表示距平值增加, 反之减小[11]。对于序列 x_i 其某一时刻 t 的累积距平表示为:

$$x = \sum_{i=1}^t (x_i - \bar{x}) \quad (1)$$

其中: $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$ 。 n 表示年份; x_i 表示该时刻对应的降水量数值(mm); \bar{x} 表示多年平均降水量(mm)。

2.2.2. Mann-Kendall 非参数检验法

Mann-Kendall 非参数检验法可用于突变检验[12]。对于具有 n 个样本量的时间序列 x_1, x_2, \dots, x_n ，构建秩序列：

$$S_k = \sum_{i=1}^k r_i \quad (k=2,3,\dots,n) \quad (2)$$

式中：当 $x_i > x_j$ 时， $r_i = 1$ ，当 $x_i < x_j$ 时， $r_i = 0$ ($j=1,2,\dots,i$)

在时间序列随机独立的假定下，定义统计量为：

$$UF_k = \frac{[S_k - \bar{S}_k]}{\sqrt{Var(S_k)}} \quad (k=1,2,\dots,n) \quad (3)$$

式中： $UF_k = 0$ ， $Var(S_k)$ 、 \bar{S}_k 是累计量 S_k 的方差和均值，在 x_1, x_2, \dots, x_n 相互独立，且有相同连续分布时，可由下式算出：

$$\bar{S}_k = \frac{n(n+1)}{4} \quad (4)$$

$$Var(S_k) = \frac{n(n-1)(2n-5)}{2} \quad (5)$$

UF_i 为标准正态分布，是按时间序列 x_1, x_2, \dots, x_n 计算出的统计量序列，给定 $\alpha = 0.05$ 的显著性水平，即临界值 $U_\alpha = \pm 1.96$ 。若 $|UF_i| > \alpha$ ，则表明序列有明显的趋势变化。按时间序列 x 逆序列 x_n, \dots, x_2, x_1 ，再重复上述过程，同时使 $UF_k = UB_k$ ($k=n, n-1, \dots, 1$)， $B_1 = 0$ 。分析绘出的 UF_k 、 UB_k 曲线，当 UF_k 或 UB_k 的值大于 0，则表明序列呈上升趋势，小于 0 则表明呈下降趋势。当 UF_k 或 UB_k 的值超过临界线时，表明上升或下降趋势显著。如果 UF_k ， UB_k 两条曲线出现交点，且交点在临界线之间，那么交点对应的时刻便是突变开始的时间[13]。

2.2.3. Morlet 小波

小波分析(Wavelet Analysis)具有时频多分辨功能，可以更好地研究时间序列相关的问题，能清晰地揭示出隐藏在时间序列中多种时间尺度的不同变化周期，充分反映出降雨量在不同时间尺度中的变化趋势，并能对降雨量未来的发展趋势进行定性估计[14]。小波变换(小波系数)的公式为：

$$W_f(a,b) = |a|^{-\frac{1}{2}} \int_R f(t) \bar{\psi} \left(\frac{t-b}{a} \right) dt \quad (6)$$

式中： $W_f(a,b)$ 为小波变换系数； $f(t)$ 为一个信号或平方可积函数； a 为小波的周期长度； b 为时间参数，反映了在时间上的平移； $\bar{\psi} \left(\frac{t-b}{a} \right)$ 为 $\psi \left(\frac{t-b}{a} \right)$ 的复共轭函数。该研究在 Matlab 软件中对降雨资料进行边界效应的消除，进而对小波系数、小波系数实部、小波方差进行计算和绘图，以便于分析海河流域降雨序列的多时间尺度特征。

3. 研究结果与分析

3.1. 海河流域年降水量的空间趋势

海河流域降水线性趋势在空间上的分布显示(图 2)，各个站点的降雨趋势反映了不同区域降雨量的时间趋势。海河流域整体降雨减少，线性倾向率为 -0.57 mm a^{-2} ；57 个站点中，增加趋势站点 12 个，趋势为 0.67 mm a^{-2} ；其中呈显著增加的站点有辽宁叶柏寿(2.11 mm a^{-2})、山西长治(1.99 mm a^{-2})显著增加趋势为 2.05 mm a^{-2} ；呈减少趋势的站点 45 个，趋势为 -1.24 mm a^{-2} ，显著减少的站点有河北黄骅、饶阳、遵化，山西五台山、侯马，山东德州、北京密云，显著减少趋势为 -3.42 mm a^{-2} 。从空间格局来看，西北部山区、中部平原区降雨减少趋势明显；平原区北部降雨有显著增加趋势。

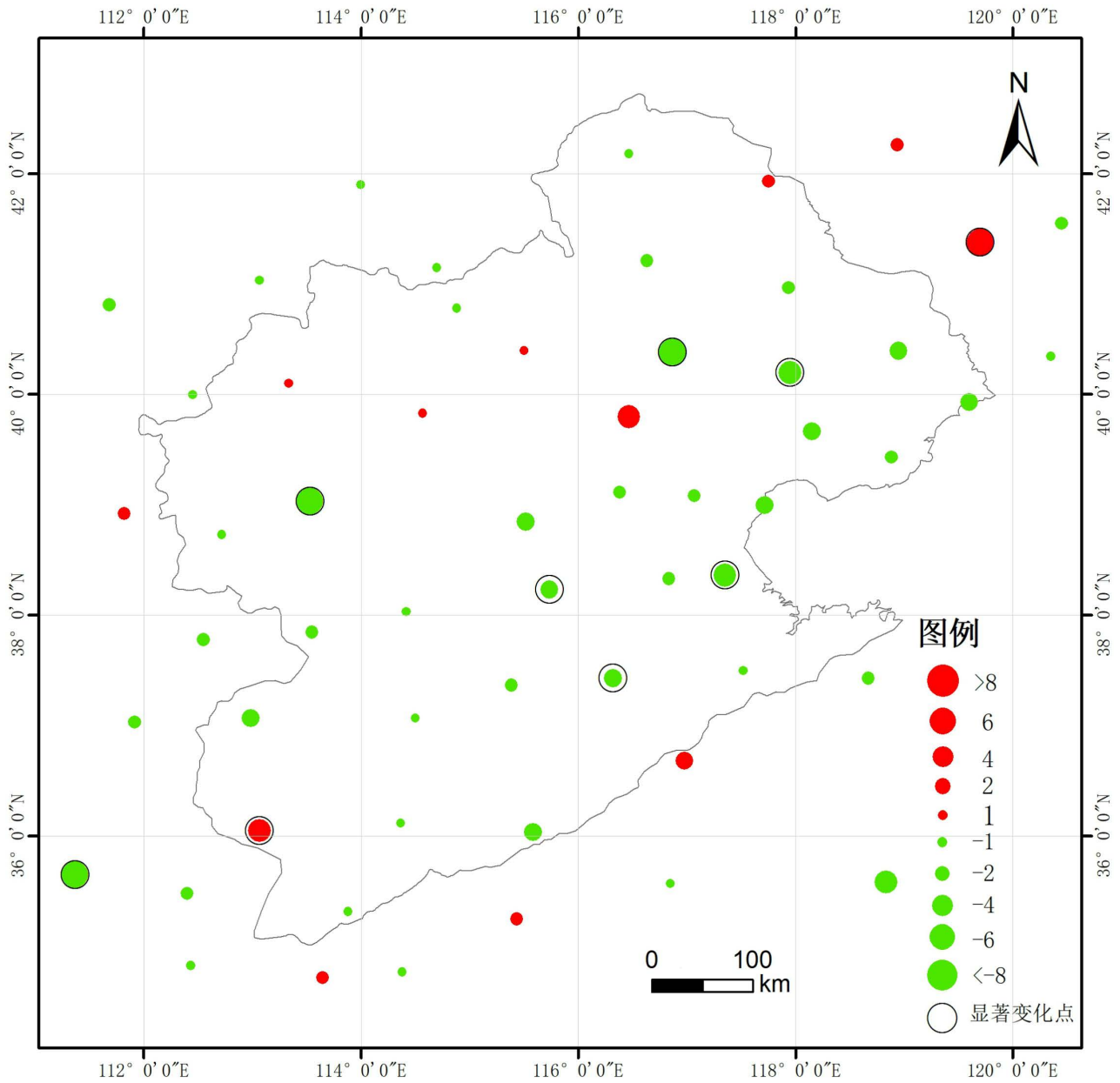


Figure 2. Spatial trend distribution
图 2. 空间趋势分布

3.2. 海河流域年降水量的突变

年降雨量距平及累计距平(图 3)研究结果显示, 1963~1965 年降雨增加显著, 随后降雨量平稳波动, 2016 年后累计距平的正向序列曲线为正方向, 说明 2016 年以后海河流域降雨量将处于一个相对多雨的时期。

如图 4 所示, M-K 法检测结果显示 1959~2016 年, UF 线与 UB 线在 95%置信区间内没有交点, 海河流域年降水量在 58 年内没有突变情况发生。从 UF 曲线可知, 从 2010 年开始, UF 线呈上升趋势, 即年降雨量从 2010 年开始出现明显的上升趋势, 该分析结果与累计距平得出的分析结果相符。该地区降雨量在 1959~1961 年增多, 1961~1999 年降雨减少, 其中 1966~1976 年降雨显著减少, 1999~2005 年降雨增多但并不显著, 随后 2005~2016 年降雨减少。

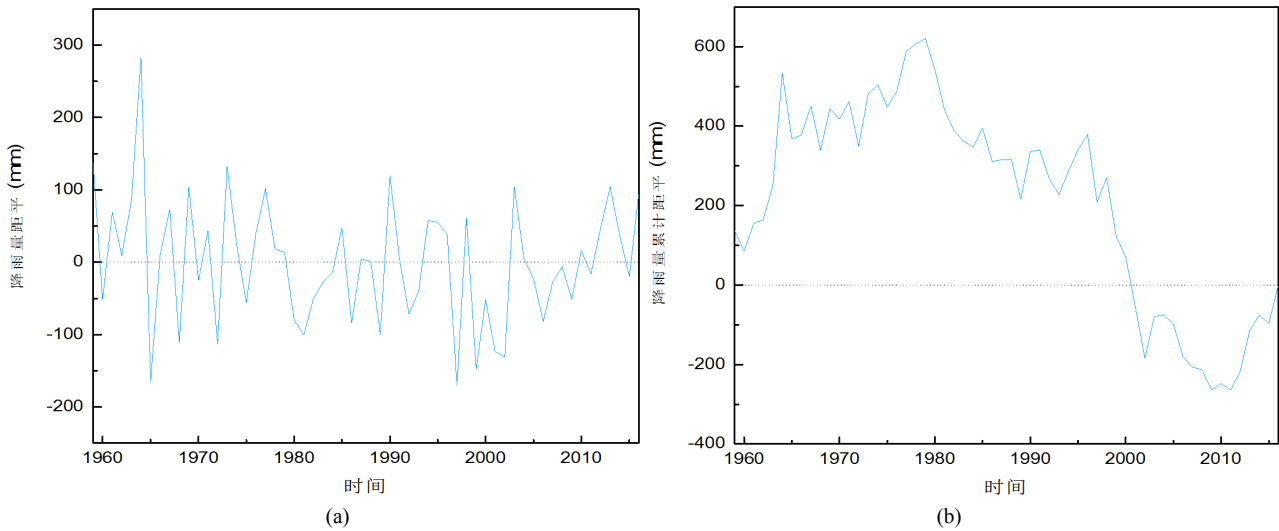


Figure 3. Annual precipitation anomaly graph (a is rainfall anomaly graph; b is cumulative rainfall anomaly graph)
图 3. 年降水量距平图(a 为降雨量距平图; b 为降雨量累计距平图)

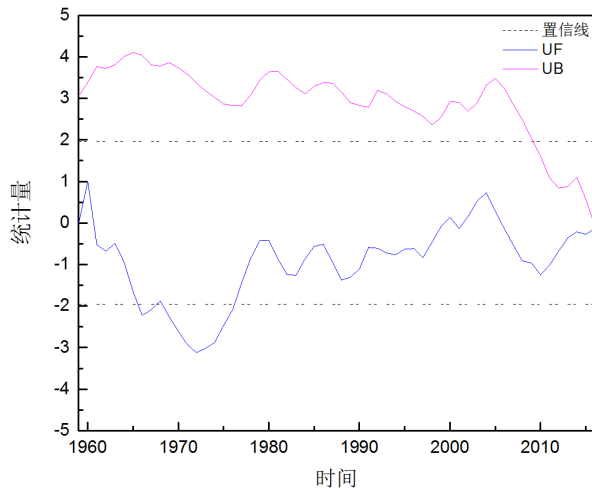


Figure 4. M-K inspection diagram
图 4. M-K 检验图

3.3. 海河流域年降雨量的周期分析

综合小波功率谱(图 5-a)、小波方差(图 5-b)、小波变换(图 5-c)结果显示: 海河流域存在 4 个较为明显的降雨量变化周期尺度中心, 海河流域降水量存在 2.5 年、4.9 年显著周期($P < 0.05$), 以及 9.8 年、16.5 年和 23.4 年非显著性周期。显著性周期主要发生在 1959~1976 年和 1986~2005 年。表明海河流域在 2.5 年的周期性震荡最强, 为流域年降雨量变化的第一主周期; 4.9 年时间尺度峰值稍低, 为流域内降水量变化的第二主周期。9.8 年、16.5 年以及 23.4 年为降雨量变化的次周期。上述 5 个时间尺度的周期性波动控制着流域降水量在 1959~2016 年这个时间域内的周期性降雨量变化特征。

4. 讨论

近 60 年来海河流域降雨量呈下降趋势, 但是海河流域总降雨量变化不明显。M-K 检测结果也没有检测到明显突变, 流域整体上降水量变化不大。小波分析表明, 存在 2.5 年、4.9 年显著周期($P < 0.05$), 以及 9.8 年、16.5

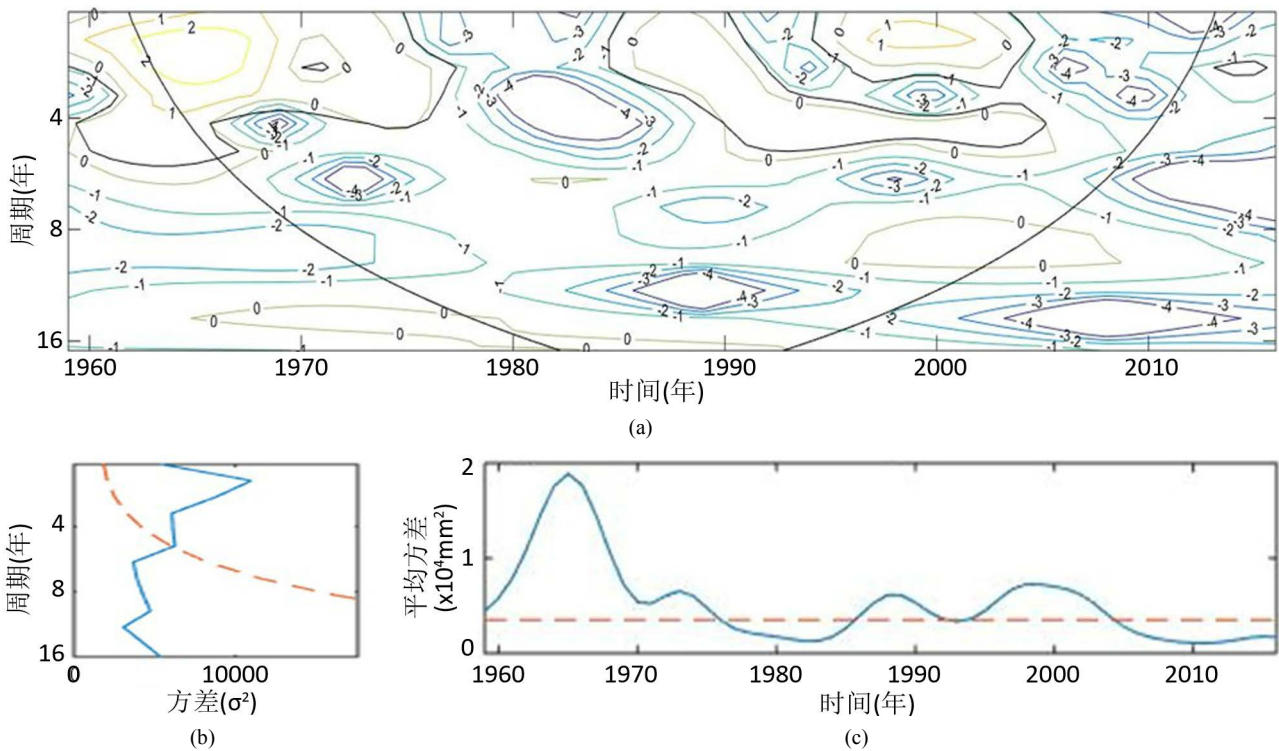


Figure 5. Morlet wavelet detection results (a is the wavelet power spectrum; b is the wavelet squared difference graph; and c is the wavelet transform graph)

图 5. Morlet 小波检测结果(a 为小波功率谱图; b 为小波方差图; c 为小波变换图)

年和 23.4 年非显著性周期。降雨量 2.5 年、4.9 年小周期很可能是受夏季东南风、冬季西北风影响[15]; 而降雨量 9.8 年周期与太阳黑子的变化周期 11 年相近, 故可推断出海河流域降雨可能是由太阳黑子以及海河流域所处的温带半干旱季风气候区影响[16]。

该流域 2.5 年的干湿周期交替变化频繁; 9.8 年的周期的时代变化特征明显, 20 世纪 60 年代、80 年代为降水偏少期, 而 70 年代、90 年代为降水充沛期; 综合各时间尺度的降水量变化, 可知海河流域目前正处于降水偏少期, 未来几年很有可能向降水充沛期过度。这与王璐璐等[17]的研究结果相吻合。

5. 结论

本研究利用 1959~2016 年海河流域 57 个站点的年降水资料, 通过线性趋势分析、M-K 法和小波变换检测等方法, 分析了海河流域降水的总体特征和变化趋势, 主要结论如下:

1) 线性趋势: 降水总体呈减少趋势, 下降的线性倾向率为 0.57 mm a^{-2} ; 降水空间的总趋势是由多雨的中北部平原区分别向西北和东南两侧减少。

2) 突变: 由于 M-K 检测结果没有交点, 说明年降雨量在时间序列范围内没有突变发生。从 2005 年开始出现下降的趋势, 从 2010 年开始降雨量逐渐增加。

3) 周期: 海河流域年降水量过程明显存在 2.5 年、4.9 年显著周期($P < 0.05$), 以及 9.8 年、16.5 年和 23.4 年非显著性周期。

基金项目

国家自然科学基金项目(No.51579008); 水体污染控制与治理科技重大专项(2018ZX07110001); 北京师范大学学科交叉建设项目。

参考文献

- [1] 缪驰远, 魏欣, 孙雷, 等. 嫩江、哈尔滨两地 48 年来夏季降雨特征分析[J]. 资源科学, 2007, 29(6): 25-31.
MIAO Chiyuan, WEI Xin, SUN Lei, et al. Characteristics of precipitation in summer seasons in Nenjiang and Haerbin over the past 48 years. Resources Science, 2007, 29(6): 25-31. (in Chinese)
- [2] 陈立华, 王焰, 易凯, 等. 钦州市降雨及入海河流行流演变规律与趋势分析[J]. 水文, 2016, 36(6): 89-96.
CHEN Lihua, WANG Yan, YI Kai, et al. Analysis of rainfall and river runoff change tendency in Qinzhou city. Hydrology, 2016, 36(6): 89-96. (in Chinese)
- [3] 王希娟, 唐红玉, 张景华. 近 40 年青海东部春季降水变化特征及小波分析[J]. 干旱地区农业研究, 2006, 24(3): 21-25.
WANG Xijuan, TANG Hongyu, ZHANG Jinghua. The evolvement characteristics and wavelet analysis of spring precipitation of last 40 years in east Qinghai. Agricultural Research in Arid Areas, 2006, 24(3): 21-25. (in Chinese)
- [4] 朱珊珊, 姚林, 黄辉曦. 基于时间序列的滇池流域降雨变化特征分析[J]. 水电能源科学, 2014(3): 15-18.
ZHU Shanshan, YAO Lin and HUANG Huixi. Analysis of rainfall variation in Dianchi basin based on time series. Hydropower Energy Science, 2014(3): 21-25. (in Chinese)
- [5] LIANG, L., LI, L. and LIU, Q. Precipitation variability in Northeast China from 1961 to 2008. Journal of Hydrology, 2011, 404(1): 67-76. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.04.020>
- [6] 邵晓梅, 许月卿, 严昌荣. 黄河流域降水序列变化的小波分析[J]. 北京大学学报(自然科学版)网络版(预印本), 2006, 42(1): 503-509.
SHAO Xiaomei, XU Yueqing and YAN Changrong. Wavelet analysis of rainfall variation in the Yellow River basin. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis on Line, 2006, 42(1): 503-509. (in Chinese)
- [7] 徐志龙, 曹阳, 杨敏. 1951-2005 年海河流域汛期降水量的时空变化特征分析[J]. 水文, 2009, 29(1): 85-88.
XU Zhilong, CAO Yang and YANG Min. Analysis of temporal and spatial variation characteristics of precipitation during flood season in haihe river basin from 1951 to 2005. Journal of China Hydrology, 2009, 29(1): 85-88. (in Chinese)
- [8] 陈阿娇, 贺新光, 秦建新, 等. 长江流域近 51a 来日降水时空变异的尺度特征[J]. 长江流域资源与环境, 2016, 25(5): 794-803.
CHEN Ajiao, HE Xinguang, QIN Jianxin, et al. Multiscale characteristics of spatial and temporal variability of daily precipitation in Yangtze river basin during 1963-2013. Resources and Environment of the Yangtze River Basin, 2016, 25(5): 794-803. (in Chinese)
- [9] 王哲, 只德国, 李涛涛, 等. 海河流域降雨时间序列小波分析[J]. 海河水利, 2012(3): 30-32.
WANG Zhe, ZHI Deguo, LI Taotao, et al. Wavelet analysis of rainfall time series in Haihe river basin. Haihe River Water Conservancy, 2012(3): 30-32. (in Chinese)
- [10] 束美珍, 刘丽红. 海河流域近 51 年降水量时空变化特征[J]. 南水北调与水利科技, 2015, 13(6): 1065-1068.
SHU Meizhen, LIU Lihong. Spatial and temporal variations of precipitation in Haihe River basin in recent 51 years. South-North Water Diversion and Water Conservancy Technology, 2015, 13(6): 1065-1068. (in Chinese)
- [11] YAN, Y., YANG, Z. and LIU, Q. Nonlinear trend in streamflow and its response to climate change under complex eco-hydrological patterns in the Yellow River basin, China. Ecological Modelling, 2013, 252(1): 220-227.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2012.05.022>
- [12] 刘丽娜, 刘卫林, 查思慧. 抚河临水流域降雨量变化特征及趋势分析[J]. 人民珠江, 2017(10): 30-35 + 49.
LIU Lina, LIU Weilin, ZHA Sihui. Variation characteristics and trend analysis of precipitation in Fuhe-Linshui River Basin. Pearl River, 2017(10): 30-35 + 49. (in Chinese)
- [13] ULLAH, S., YOU, Q., ULLAH, W., et al. Observed changes in precipitation in China-Pakistan economic corridor during 1980-2016. Atmospheric Research, 2018, 210: 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2018.04.007>
- [14] YANG, P., XIA, J., ZHANG, Y., et al. Temporal and spatial variations of precipitation in northwest China during 1960-2013. Atmospheric Research, 2017, 183: 283-295. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2016.09.014>
- [15] QIANG, L., Yang, Z. F. Quantitative estimation of the impact of climate change on actual evapotranspiration in the Yellow River Basin, China. Journal of Hydrology, 2010, 395(3): 226-234.
- [16] 郭汉伟, 乐贵明. 太阳黑子群周期的小波分析[J]. 自然科学进展, 2004, 14(5): 597-600.
GUO Hanwei, LE Guiming. Wavelet analysis of sunspot group periods. Progress in Natural Science, 2004, 14(5): 597-600. (in Chinese)
- [17] 王璐璐, 延军平, 王鹏涛, 等. 海河流域不同等级降水时空变化特征及其影响[J]. 资源科学, 2015, 37(4): 690-699.
WANG Lulu, YAN Junping, WANG Pengtao, et al. Spatial-temporal variation in precipitation for different categories and impacts in the Haihe River Basin. Resource Science, 2015, 37(4): 690-699. (in Chinese)