

DOI: 10.19797/j.cnki.1000-0852.20220122

广东省东江流域降雨时空变化特征分析

李宁宁^{1,2,3,4}, 邱静^{1,3,4}, 陈晓宏², 李泽君^{1,3,4}, 陈颖毅^{1,3,4}

1. 广东省水利水电科学研究院, 广东 广州 510635;
2. 中山大学 水资源与环境研究中心, 广东 广州 510275;
3. 河口水利技术国家地方联合工程实验室, 广东 广州 510635;
4. 广东省水安全科技协同创新中心, 广东 广州 510635)

摘要:在人类活动和气候变化的复杂影响下,广东省东江流域的降雨特征发生了明显改变,为精准识别其时空变化特征,基于流域34个雨量站1956—2021年逐月长序列降雨数据,采用集中度、集中期、Ordinary Least Square回归法、Mann-Kendall检验法、滑动t检验法、一维连续小波等多种方法,对广东省东江流域上下游降雨的年内分布特征,年际变化的趋势性、突变性和周期性特征以及空间变化规律开展多角度分析。结果表明:广东省东江流域降雨量从东北向西南递减;从上游到下游,年内降雨集中期从6月延迟到7月份,降雨由减少过渡到弱增长趋势;下游突变性较上游显著,上游周期性强于下游;上下游降雨主周期一致,均为17 a。研究成果可为广东省东江流域降雨预报及水资源开发利用等提供支撑。

关键词:东江流域;降雨;时空变化特征;集中期;小波分析

中图分类号:P333;P426

文献标识码:A

文章编号:1000-0852(2023)04-0074-07

0 引言

降雨是大气中水汽冷凝降落到地面的一种大气现象,也是实现水资源更新和利用的重要保证^[1]。降雨可以被视为一种随机事件,但受到地理位置、气旋台风、地形以及人类活动等众多因素的影响,往往表现出明显的时空差异,并随着长期观测显现出规律性特征。厘清流域、区域降雨的时空分布规律,对于提高水资源开发利用效率,促进经济社会可持续发展具有重要意义。

目前,国内外的学者针对降雨的时空变化规律开展了大量研究^[2-5]。倪楠等^[6]对全国各地夏、秋季降水进行了线性分析、Mann-Kendall检验法(M-K检验)和滑动t检验,其中广东省近几年降雨强度显著提高;HARKA等^[7]的研究采用变异系数(CV)、降水集中指数

(PCI)和标准化异常指数(SAI)评估降雨变异性,还利用M-K检验和一种创新趋势分析(ITA)方法分析了不同降水聚类水平的降雨时空变化趋势;史君慧^[8]采用M-K非参数检验、小波分析及经验正交函数等方法研究了广东省内六个区域降雨量的时空分布特征。

广东省东江流域(以下简称东江流域)是广东省境内五大流域之一,对于世界级的城市群——粤港澳大湾区的水资源供给和保障至关重要^[9]。谢毅文^[3]等通过降雨量折线图定性分析出东江流域降雨月最大半小时降雨量均值与月均降雨量分布基本一致,但未对降雨特征年内分布规律进行定量说明;刘金凤^[10]从降雨趋势变化和周期性规律两方面研究东江流域降雨时间变化规律,对降雨空间分布特征的研究有所欠缺;吕乐婷等^[11-13]分别在不同时期、从不同角度对东江流域降雨的变化规律开展研究。随着近年来全球气

收稿日期:2022-04-06

网络首发地址:https://link.cnki.net/urlid/11.1814.p.20230818.1606.012

基金项目:粤港水安全保障联合实验室项目(2020B1212030005);广东省水利科技创新项目(2021-01、2017-13);省属科研机构稳定性支持专项资金院自设课题(2021L027);广东省基础与应用基础研究基金(2022A1515010898)

作者简介:李宁宁(1994—),女,博士,主要研究方向为水文水资源。E-mail:465956539@qq.com

通信作者:邱静(1962—),女,本科,教授级高级工程师,主要研究方向为水文水资源。E-mail:410540718@qq.com

网络首发日期:2023-08-21

候变化加剧和城市高速发展,极端性天气事件频繁发生,水旱灾害交替出现,给流域水安全保障带来极大挑战。在近几年东江流域水资源开发利用矛盾愈加突出的背景下,利用时效性最强的水文数据,耦合定性分析和定量分析,多角度地识别时间序列变化的趋势性、突变性、周期性,并在时间维度中兼顾空间维度的系统性分析研究并不多见,从全面把握流域降雨规律的角度出发,开展相关研究是必要且具有实际意义的。

本文基于东江流域 1956—2021 年长序列逐月降雨数据,考虑到流域内上下游降雨情况存在明显差异^[3],以秋香江河口作为上下游分界,采用集中度、集中中期^[14]刻画降雨的年内分布特征,运用 Ordinary Least Square 回归法(OLS 回归法)^[15]、M-K 检验^[16-17]、滑动 t 检验法^[18]分析降雨年际变化趋势和突变特征,通过一维连续小波^[19]识别降雨的周期性特征,并综合分析降雨空间分布特征,以期为东江流域的水资源合理规划、开发、利用提供参考。

1 研究区域

广东省东江流域(见图 1)位于珠江流域的东北端,南临南海并毗邻香港,西南部紧靠华南最大的经济中心广州市,西北部与粤北山区韶关和清远两市相接,东部与粤东梅汕地区为邻,北部与赣南地区的安远县相接,地理坐标为东经 113°30′~115°42′,北纬 22°36′~24°48′,东北部高,西南部低,上中游主要为山区丘陵河谷区,出沙岭峡谷后进入平原堤围区,在石龙以下是三角洲河网地带。

本文的研究数据来源于:(1)《广东省第三次水资源调查评价》收集到的东江流域及其周边地区 34 个雨量站 1956—2016 年逐月降雨数据;(2)广东省水利厅汛情发布系统 2017—2021 年 34 个雨量站逐月降雨数据;(3)国家科技基础条件平台-国家地球系统科学数据中心(<http://www.geodata.cn>)中 2020 年全国降雨逐月数据。以上数据来源可靠,通过水文资料“三性审查”,以确保其准确、可靠。面降水量采用泰森多边形法计算得到。

2 研究方法

2.1 集中度、集中中期

集中度和集中中期^[14]可以用来计算分析降雨在年内各月份的分布情况。将一年 12 个月份视为一个圆周,将每个月份对应圆周的某一角度作为向量方向(见图 2),以月降雨量作为向量长度,对年内逐月降雨按照

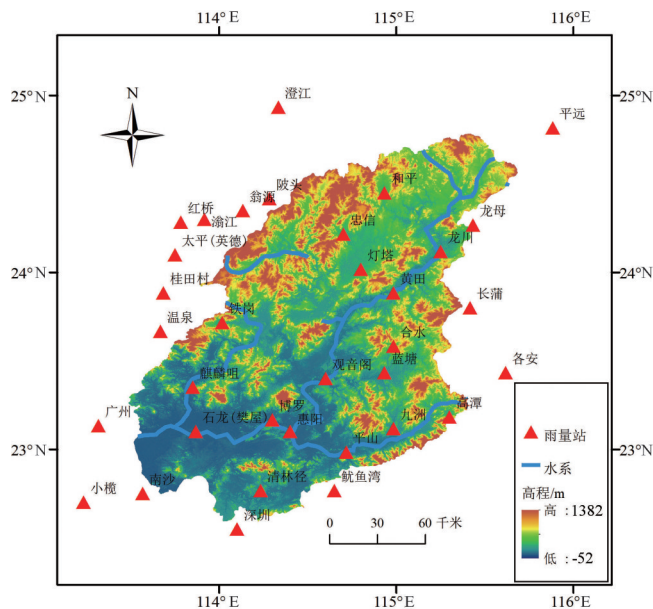


图 1 广东省东江流域示意及代表站布设
Fig.1 Schematic diagram of Dongjiang River Basin and station layout in Guangdong province

向量加法规则进行累加,从而将各月降雨聚合为一个向量,其模与年降雨量的比值为集中度(RCD),其方向(角度)为集中中期(RCP)。RCD 越大表示年内降雨过程越集中。计算见式(1)~(3)。

$$RCD_{year} = \sqrt{R_x^2 + R_y^2} / R_{year} \quad (1)$$

$$RCP_{year} = \arctan(R_x / R_y) + 180^\circ \quad (2)$$

$$R_x = \sum_{i=1}^{12} r_i \sin \theta_i, \quad R_y = \sum_{i=1}^{12} r_i \cos \theta_i \quad (3)$$

式中: R_{year} 为年降雨量, R_x 、 R_y 分别为各月降雨的水平分量之和与垂直分量之和; r_i 为第*i*月的降雨量, θ_i 为第*i*月对应的角度(如图 2 所示),*i*为月序($i=1, 2, 3, \dots, 12$)。在 RCP_{year} 的计算公式中,根据一般大量降雨发生在 4 月份之后的规律,聚合后的年降雨量对应的角度

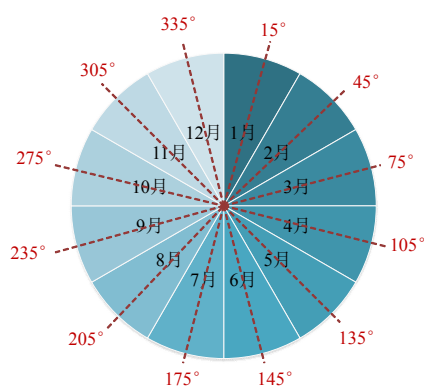


图 2 年内 12 个月份与集中中期角度的映射关系
Fig.2 Mapping relationship between 12 months in a year and the angle of concentration period

应大于 90° ,而 $\arctan()$ 函数的值域位于 $(-90^\circ, 90^\circ)$ 之间,所以为了获得和图2中一致的角度与月份映射关系,故需加上 180° 进行角度变换。

2.2 其他方法

小波分析是开展时间序列周期变化规律研究的常用方法,其基本思想是通过一系列小波函数对某一信号或函数进行逼近,这些函数分别对应不同频率(尺度),从而可以有效地提取时间序列不同尺度的变化周期。本研究采用一维连续小波中的Morlet连续复小波进行降雨序列的周期性分析,具体计算方法见参考文献[19]。

其他研究方法,如OLS回归法、M-K检验、滑动t检验法等详见文献[15-18],不再赘述。

3 结果及分析

3.1 降雨年内分布规律

从图3中点的分布情况来看,东江流域的降雨一般发生在春夏两季的5—8月,主要集中在 $150^\circ \sim 180^\circ$,即6月和7月。下游年内降雨过程更加集中,上下游降雨年内分布差异明显。

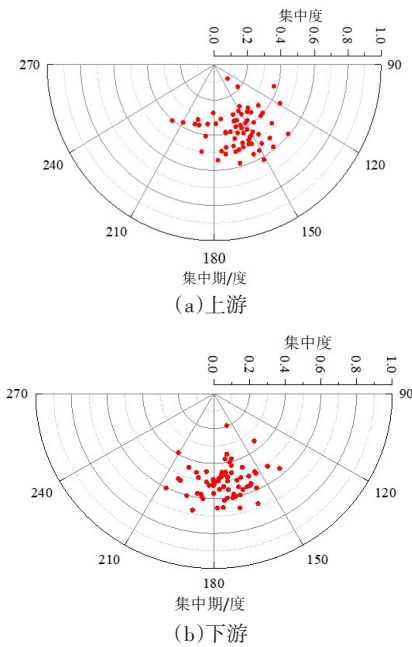


图3 RCD、RCP的极坐标示意图

Fig.3 Schematic diagram of polar coordinates of RCD and RCP

由图4可知,上游RCD均值为0.417,下游为0.505,表明下游降雨集中程度更高。上下游RCD均为弱下降趋势,降雨年内分布有离散化的趋势。上游的确定系数 R^2 大于下游的,且经过计算,上游的 p 值为0.59,下游的 p 值为0.99,说明上游RCD的下降趋势比下游明显,但二者的下降趋势并不显著。

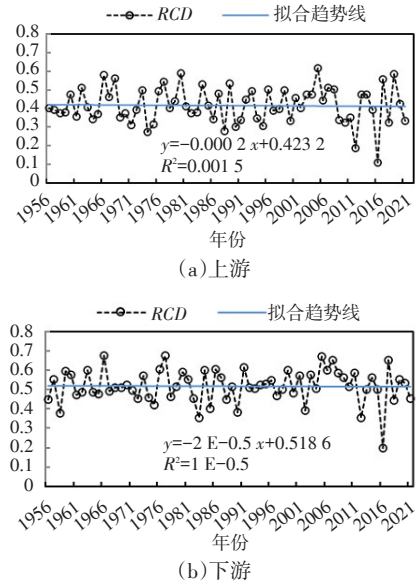


图4 逐年RCD变化趋势

Fig.4 RCD trend by year

由图5可知,上游RCP均值为 158° ,下游为 174° ,表明上游降雨平均集中在6月,而下游平均集中在7月。上游历年的RCP呈弱下降趋势,下游历年的RCP呈弱上升趋势。经过计算,上下游 p 值均接近1,说明上下游RCP的变化趋势均不显著。上游的降雨集中期有提前的趋势,而下游有延后的趋势,上下游降雨集中期的差距将进一步扩大。究其原因,上中游以山区丘陵河谷区为主,受西太平洋暖湿气流的影响多在4—6月发生锋面雨,下游以平原为主,常于7—9月由热带气旋带来台风雨^[20]。

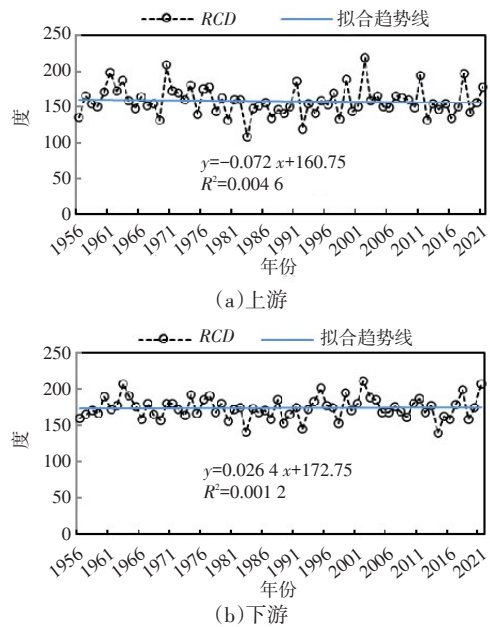


图5 逐年RCP变化趋势

Fig.5 RCP trend by year

3.2 降雨年际变化趋势及突变分析

东江流域受地形的影响,流域内多年平均降雨量由北向南递增,上游多年平均降雨量 1 580 mm,下游多年平均降雨量 1 817 mm。

从图 6~7 可以看出,上下游年际间的变化趋势大致相同。根据 OLS 回归分析的结果,上游和下游的年降雨量序列呈现相反的变化趋势,经过计算,上下游 p 值均接近 1,说明上下游年降雨量的变化趋势均不显著。根据五年滑动平均过程的结果,上游的降雨年际波动比较平稳,下游 1999 年以后降雨年际波动加剧。东江流域近 5 年的平均年降雨量低于多年平均值,上游近 5 年的平均年降雨量为历史最低,结合近 5 年 RCP 偏大的情况,说明降雨减少且多发生于汛末,流域上游水库回蓄压力大,是造成东江流域近几年连旱的主要原因之一。

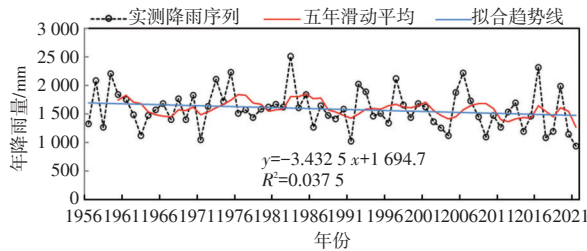


图6 上游年降雨量趋势分析

Fig.6 Trend analysis chart of annual rainfall of upstream

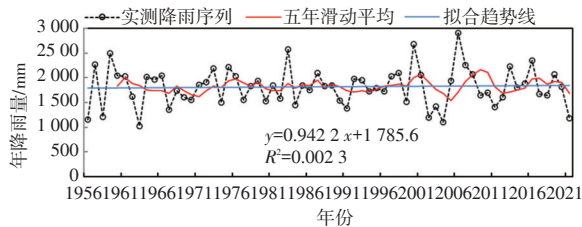
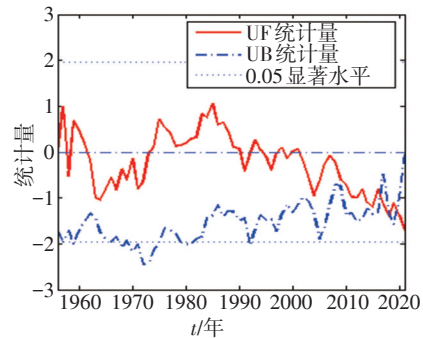


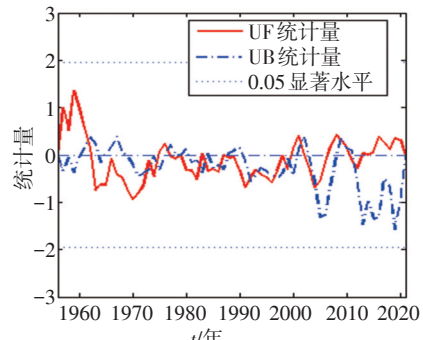
图7 下游年降雨量趋势分析

Fig.7 Trend analysis chart of annual rainfall of downstream

通过 M-K 检验进一步剖析降雨年际变化趋势及突变情况,结果见图 8。从 M-K 检验的结果来看,上下游的 UF 值在 0 附近反复震荡,且一直处于 0.05 显著水平的临界线以内,表明变化趋势均不显著。选取几个趋势特征明显的临界点,上游 UF 值在 1962、1973 和 1991 年附近接近 0,表明其年降雨过程在 1956—1962 年、1962—1973、1973—1991 年、1991—2021 年分别存在递增—递减—递增—递减的变化趋势,最后 UF 小于 0,整体为递减趋势;下游 UF 值在 1962 和 2005 年附近接近 0,表明其年降雨过程在 1956—1962 年、1962—2005 年、2005—2021 年分别存在递增—递减—递增的变化趋势,最后 UF 大于 0,整体为递增趋势。与 OLS 回归法的结论基本一致。



(a) 上游



(b) 下游

图8 上下游年降雨序列 M-K 检验结果

Fig.8 M-K test results of annual rainfall series of upstream and downstream

采用滑动 t 检验法对可能的突变点两侧序列的一致性进行检验,以确定是否为显著突变点,结果见图 9~10。从步长 $n=3$ 的滑动 t 检验的结果中可以看出,上游 t 值在 2016—2021 年之间没有超过 0.05 显著性水平的置信区间,表明其年降雨序列在这些可能交点处没有明显突变发生;下游 t 值在 2005、2009 年超过置信区间,且与 M-K 检验中的 UF 、 UB 曲线交点基本一致,说明在 95% 置信度下,可以认为 2005 年和 2009 年为下游年降雨序列的突变点。从步长 $n=5$ 的滑动 t 检验的结果中可以看出,上游和下游的 t 值都没有超过置信区间,没有显著的突变发生。

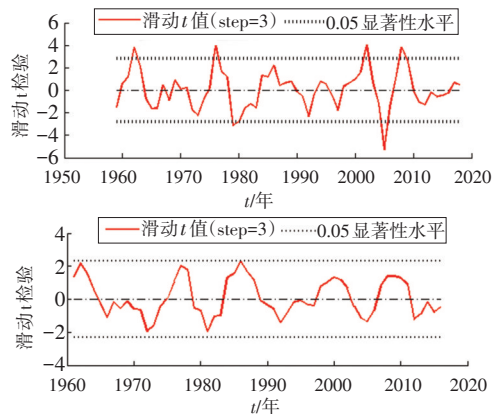


图9 上游年降雨序列滑动 t 检验结果

Fig.9 Sliding t test result of annual rainfall series of upstream

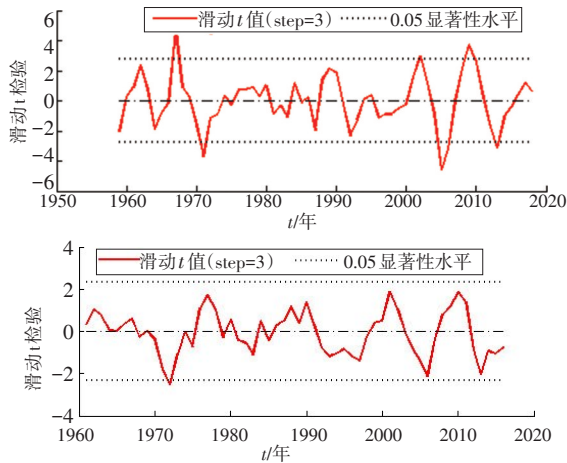


图10 下游年降雨序列滑动t检验结果

Fig.10 Sliding t test result of annual rainfall series of downstream

3.3 降雨周期性特征

图11小波系数实部三维示意图,反映了降雨时间序列在不同时间尺度上的变化情况,系数正值代表年降雨量偏多,负值表示年降雨量偏少,可以看出在近10年尺度上降雨是偏少的。

小波系数实部三维示意图在x-y轴的投影为小波系数等值线图反映年降雨时间序列在不同时间尺度上丰枯交替变化的周期性规律。上游年降雨序列大

致在5~20a的时间尺度内丰枯交替特征比较明显,下游年降雨序列大致在3~20a的时间尺度内丰枯交替特征比较明显,且随着时间尺度降低,枯-丰交替变化的次数增多,但连续性有所减弱。其中,上下游在15~20a的时间尺度上存在6个连续的枯-丰交替变化,在66a的分析时段内表现得比较稳定,具有全域性。纵观所有时间尺度,上游的枯(蓝色)-丰(红色)交替变化过程连续性和完整性更好,边界清晰,周期性变化规律更加明显。

由图12可知,上游小波系数方差示意图中存在4a、7a、12a、17a和24a共5个明显的峰值,下游小波系数方差示意图中存在4a、10a和17a共3个明显的峰值。二者均为时间尺度17a对应的系数方差最大,表明17a的信号波动能量最高,可以确定17a为东江流域降雨的主要时间尺度,即主周期。

进一步分析17a周期对应的小波系数实部变化过程可知(见图13),从负(相位)极值到相邻的正相位极值,再到下一个相邻的负(相位)极值,为一个枯-丰转化过程。上下游降雨时间序列都在17a的时间尺度上有连续、清晰、完整的枯-丰转化过程,进一步验证了东江流域丰枯转化主周期为17a。

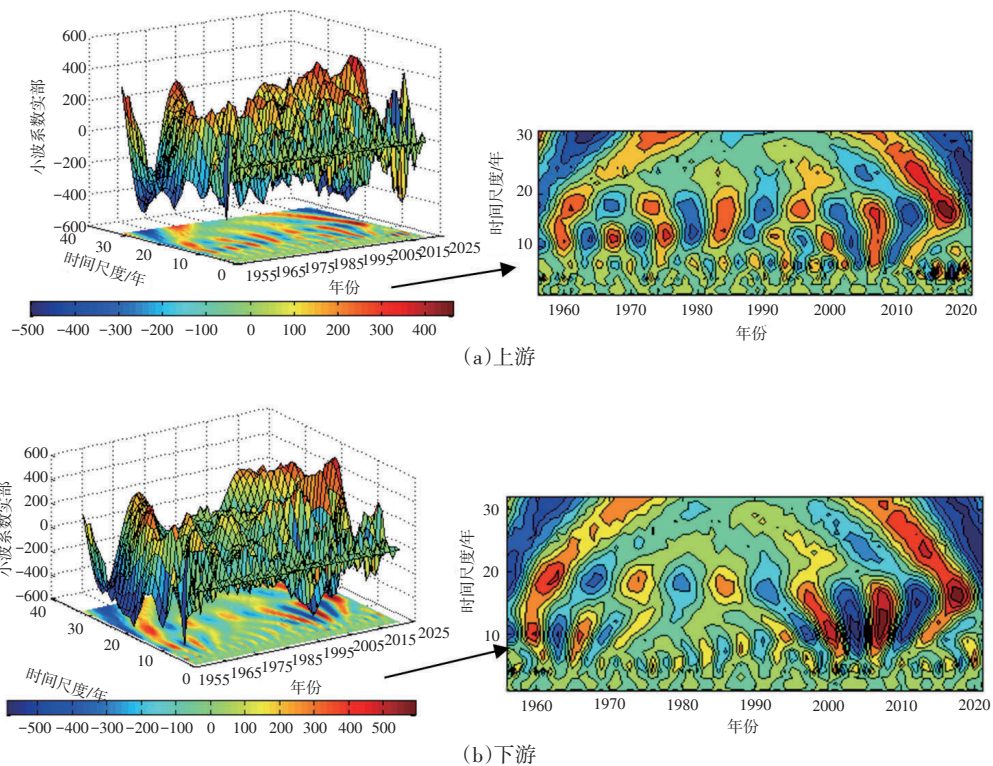


图11 上下游降雨时间序列小波系数三维示意图

Fig.11 Three-dimensional schematic diagram of wavelet coefficients of upstream and downstream rainfall time series

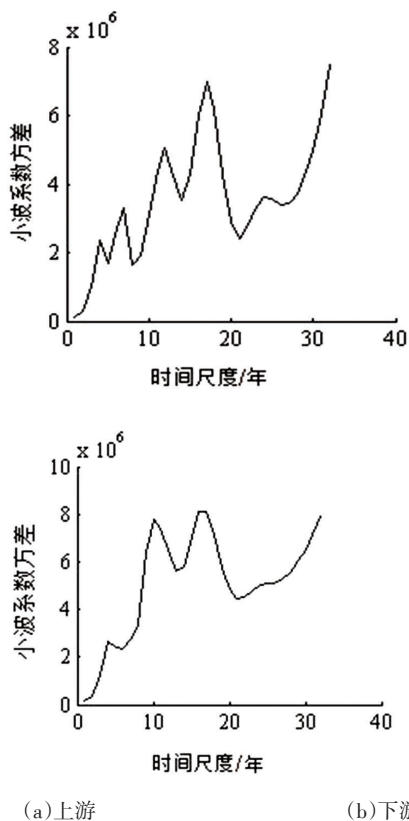


图12 上下游降雨时间序列小波系数方差图
Fig.12 Variance chart of wavelet coefficients of upstream and downstream rainfall time series

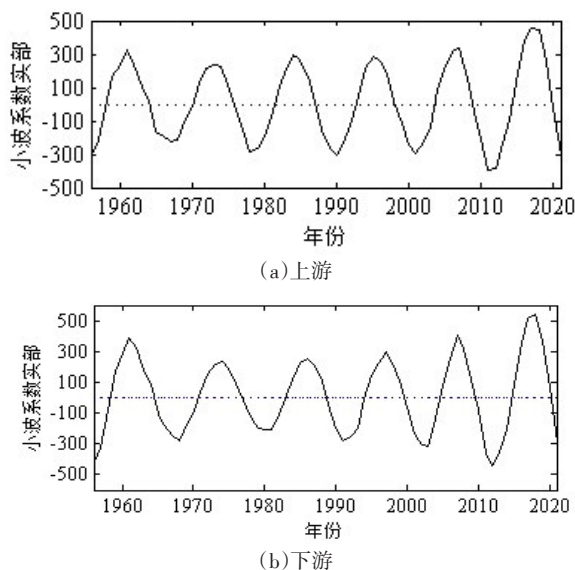


图13 上下游降雨时间序列17a周期相应的小波系数
Fig.13 Wavelet coefficient chart corresponding to the main period of upstream and downstream rainfall time series

3.4 降雨空间分布规律

为了分析现状自然地理、人文地理条件下的降雨空间分布规律,选取国家地球系统科学数据中心最近的2020年中国1 km分辨率逐月降水量数据,从中获得

东江流域逐月降雨量数据,如图14所示。从图中可以直观反映出东江流域降雨量从东北向西南递减的主要空间分布特征。综合考虑上游和下游的降雨特征,可以得到东江流域降雨空间分布的其他特征如下:(1)从年内分布的角度,下游降雨集中程度更高,上游集中期为6月,下游集中期为7月,且上游集中度有提前趋势,下游呈后延趋势;(2)从降雨数量的角度,年降雨量上游少于下游,且上游存在减少的趋势,下游存在增加的趋势;(3)从突变特征角度,上游的突变性不明显,下游经过步长 $n=3$ 的滑动t检验,识别到有2005年和2009年两个突变点;(4)从周期特征角度,上游周期性变化规律更加明显,上下游均具有17 a的主周期。

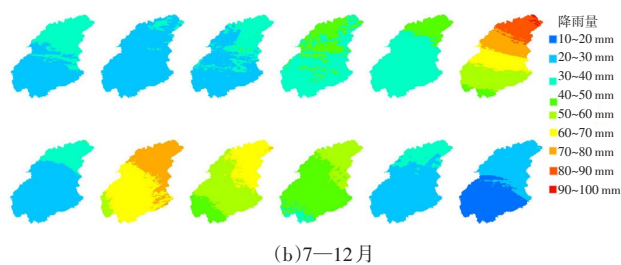


图14 2020年东江流域逐月降雨量空间分布
Fig.14 Spatial Distribution of monthly rainfall in Dongjiang River Basin in 2020

4 结论

在气候变化和人类活动的双重作用下,广东省东江流域的降雨特征在66年间发生了明显改变,受地形和地理位置的影响,东江流域上游和下游的降雨过程存在明显差异。上下游年内降雨集中期的差距有扩大的趋势,上下游暴雨遭遇的可能性将降低;上游的年降雨时间序列呈较为平稳的下降趋势,而下游呈弱上升趋势,由于下游缺少骨干水库,需重点关注下游的防洪问题;在主周期17 a的时间尺度上,上下游的丰枯变化规律均较为明显,根据周期性规律分析预测,未来几年东江流域将处在降雨量偏少的周期中,须加强水资源集约管理。

参考文献:

- [1] 徐晋轩,李一阳,潘兴瑶,等.多时空尺度协同的场次降雨水资源量评价方法[J].河海大学学报(自然科学版),2023,51(1):19-25.
- [2] LI Z ZHOU P, SHI X, et al. Forest effects on runoff under climate change in the Upper Dongjiang River Basin: insights from annual to intra-annual scales [J]. Environmental Research Letters, 2020, 16 (1):014032.
- [3] 谢毅文,陈晓宏,王兆礼,等.东江流域最大半小时降雨时空分布

- 与年际变化特征分析[J].水文,2009,29(3):32-36.
- [4] PRIYAN K. Spatial and temporal variability of rainfall in Anand District of Gujarat State[J]. Aquatic Procedia, 2015(4): 713-720.
- [5] GU Z, DUAN X, LIU B, et al. The spatial distribution and temporal variation of rainfall erosivity in the Yunnan Plateau, Southwest China: 1960 - 2012[J]. Catena, 2016, 145: 291-300.
- [6] 倪楠. 中国降水的时空变化特征研究[D].北京:对外经济贸易大学,2020.
- [7] HARKA A E, JILO N B, BEHULU F. Spatial-temporal rainfall trend and variability assessment in the Upper Wabe Shebelle River Basin, Ethiopia: Application of innovative trend analysis method[J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2021, 37: 100915.
- [8] 史君慧. 广东省区域年降雨量的时空特征分析[J]. 广州大学学报(自然科学版), 2020, 19(5): 78-90.
- [9] 龙颖贤, 刘蕴芳, 杨昆, 等. 粤港澳大湾区饮用水水源安全保障对策研究[J]. 环境保护, 2019, 47(23): 24-28.
- [10] 刘金凤, 田兆伟, 沈雪娇. 近60年东江流域降雨径流特性分析[J]. 广东水利水电, 2018(12): 31-36, 74.
- [11] 吕乐婷, 彭秋志, 廖剑宇, 等. 近50年东江流域降雨径流变化趋势研究[J]. 资源科学, 2013, 35(3): 514-520.
- [12] 董满宇, 江源, 李俞萍, 等. 近46年来东江流域降水变化趋势分析[J]. 水文, 2010, 30(5): 85-90.
- [13] 王兆礼, 陈晓宏, 杨涛. 东江流域径流序列年内分配特征研究[J]. 人民黄河, 2011, 33(2): 37-38, 40.
- [14] 莫崇勋, 刘朋, 朱新荣, 等. 澄碧河流域径流年内分配变化规律分析[J]. 南水北调与水利科技, 2019, 17(4): 63-70.
- [15] 徐林春, 黄东, 林美兰, 等. 广东省月降雨量时空演变特性分析[J]. 广东水利水电, 2020(3): 1-7, 16.
- [16] 李宁宇. 基于风险分摊的梯级水库汛期水位动态控制及决策研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2021.
- [17] ALI R, KURIQI A, ABUBAKER S, et al. Long-term trends and seasonality detection of the observed flow in Yangtze River using Mann-Kendall and Sen's innovative trend method [J]. Water, 2019, 11(9): 1855.
- [18] 张金萍, 王宇昊. 郑州市降雨-径流关系不确定性分析[J]. 水资源保护, 2021, 37(6): 1-6.
- [19] 张平, 夏军, 邹磊, 等. 近50年来淮河蚌埠以上流域降水时空变化特征分析[J]. 中国农村水利水电, 2017(3): 1-8.
- [20] 姚章民, 杜勇, 张丽娜. 珠江流域暴雨天气系统与暴雨洪水特征分析[J]. 水文, 2015, 35(2): 85-89.

Analysis of Temporal and Spatial Variation Characteristics of Rainfall in Dongjiang River Basin within Guangdong Province

LI Ningning^{1,2,3,4}, QIU Jing^{1,3,4}, CHEN Xiaohong², LI Zejun^{1,3,4}, CHEN Yingyi^{1,3,4}

(1. Guangdong Institute of water resources and hydropower, Guangzhou 510635, China;

2. Water resources and environment research center of Sun Yat sen University, Guangzhou 510275, China;

3. National and Local Joint Engineering Laboratory of Estuary Hydropower Technology, Guangzhou 510635, China;

4. Guangdong Water Security Collaborative Innovation Center, Guangzhou 510635, China)

Abstract: Under the complex influence of human activities and climate change, the rainfall characteristics of Dongjiang River Basin have changed significantly in recent 66 years. In order to accurately identify the temporal and spatial variation characteristics of multi-year rainfall in Dongjiang River Basin, based on the monthly long-series rainfall data of Dongjiang River Basin, the annual distribution characteristics of rainfall in Dongjiang River Basin, the trend, mutation and periodic characteristics and the spatial variation law were analyzed from multiple angles by using various methods such as concentration degree, concentration period, OLS regression method, Mann-Kendall method, sliding T test method and one-dimensional continuous wavelet. The results show that the rainfall in Dongjiang River Basin decreases from northeast to southwest; From upstream to downstream, the rainfall concentration period is postponed from June to July, and the trend of rainfall changes from decreasing to weak increasing. The mutation of downstream rainfall is more significant than that of upstream, and the cycle period of upstream rainfall is stronger than that of downstream. The main cycle period of upstream and downstream rainfall is the same, and 17a is the main cycle of basin rainfall. The research results could provide support for related research such as rainfall forecast and water resources development and utilization in Dongjiang River Basin.

Keywords: Dongjiang River Basin; rainfall; temporal and spatial variation characteristics; concentration period; wavelet analysis