

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2022.04.009

粤港澳大湾区 1961—2014 年降水时空演变特征分析

付铁文^{1,2}, 徐宗学^{1,2}, 陈浩^{1,2}, 黄亦轩^{1,2}, 叶陈雷^{1,2}

(1. 城市水循环与海绵城市技术北京市重点实验室, 北京 100875; 2. 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875)

摘要:利用粤港澳大湾区 31 个气象站点 1961—2014 年逐日降水资料,采用 Mann-Kendall 非参数检验法、Hurst 指数、小波分析法、经验正交函数(EOF)分解法等方法,分析区域年、季节降水时空演变规律。结果表明:1961—2014 粤港澳大湾区降水波动较大,时空分布不均,年、冬季、春季降水量呈不显著上升趋势,秋季呈不显著下降趋势;春夏两季降水分别在 1964—1965 年和 1965—1966 年发生突变;降水变化的整体方向将继承过去的趋势,系统的平均循环长度分别为 4 a、6 a、8 a、10 a 和 11 a;年降水量变化以 28 a 为主周期,以 18 a、13 a 和 6 a 为次周期;年降水量总体上从东南至西北呈现递减趋势;大湾区降水主要是全区一致的变化,其次为东部沿海地区及西北部封开、怀集地区与内陆地区反位向分布。

关键词:降水;时空分布;Hurst 指数;经验正交函数;粤港澳大湾区

中图分类号:TV125 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2022)04-0056-10

Analysis on spatiotemporal evolution characteristics of precipitation in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area from 1961 to 2014 // FU Tiewen^{1,2}, XU Zongxue^{1,2}, CHEN Hao^{1,2}, HUANG Yixuan^{1,2}, YE Chenlei^{1,2} (1. Beijing Key Laboratory of Urban Hydrological Cycle and Sponge City Technology, Beijing 100875, China; 2. College of Water Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: Based on daily precipitation data of 31 meteorological stations in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area (GBA) from 1961 to 2014, the Mann-Kendall nonparametric test method, Hurst exponent, wavelet analysis method, empirical orthogonal function (EOF) decomposition method and other methods were adopted to analyze the spatiotemporal evolution of annual and seasonal precipitation in the area. The results showed that the precipitation in the GBA fluctuated greatly from 1961 to 2014, and the spatiotemporal distribution was uneven. Annual, winter and spring precipitation showed insignificant upward trend, while autumn seasonal precipitation showed insignificant downward trend. Abrupt changes of spring and summer precipitation occurred during 1964-1965 and 1965-1966. The overall trend of precipitation will keep the same as the past. The average period length of the system is 4 a, 6 a, 8 a, 10 a, and 11 a. The annual precipitation change has a main period of 28 a and secondary periods of 18 a, 13 a and 6 a. In general, the annual precipitation showed a decreasing trend from southeast to northwest. The evolution of precipitation in the GBA is basically consistent across the whole region. Secondly, precipitation in the eastern coastal area (including the northwestern Fengkai and Huaiji) and the inland area are inversely distributed.

Key words: precipitation; spatiotemporal distribution; Hurst exponent; EOF; Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area

粤港澳大湾区是我国开放程度最高、经济活力最强的区域之一,在国家发展大局中具有重要战略地位。大湾区濒临南海,属于亚热带海洋性气候,水系交错复杂,河网密度达 0.72 km/km²,降水丰沛但时空分布不均,入境水量丰富,水灾频发,洪潮叠加,

防灾形势严峻。

目前,众多学者对降水特性开展了深入研究。伍红雨等^[1]对粤港澳大湾区 1961—2018 年气候变化特征研究发现,大湾区气温、降水量和日照时数呈一致性变化,年降水量变化趋势不明显。其中,广州

基金项目:国家自然科学基金(52079005);广东省基础与应用研究基金(2022A1515010898)

作者简介:付铁文(1999—),男,硕士研究生,主要从事城市水文学研究。E-mail:tiewenfu@mail.bnu.edu.cn

通信作者:徐宗学(1962—),男,教授,博士,主要从事水文水资源研究。E-mail:zxu@bnu.edu.cn

年降水量明显增加,香港、澳门变化不明显。白盛楠^[2]分析了大湾区的极端气候变化、成因及影响,研究发现大湾区极端降水指标变化趋势及突变不明显,年降水量、降水强度在 2000 年前后开始突变。李慧^[3]通过对比分析不同类型东亚-太平洋事件,分析了东亚-太平洋遥相关的关键系统在月内尺度上的形成、发展、移动和维持的机制,并揭示了其对中国东部地区降水的影响。Li 等^[4]分析了 1966—2005 年中国东部 7—8 月降水的年代际变化特征,研究发现长历时降水事件减少是我国华北地区降水量减少的主要原因,不同历时降水事件共同增加造成南方地区降水量增加。褚曲诚^[5]利用统计方法和混合单粒子拉格朗日轨迹追踪模式综合分析了我中国东部地区(华南、长江流域、华北)汛期降水的水汽来源。徐碧裕等^[6]研究发现,1968—2017 年广东汛期降水可分为 5 种类型,各个空间降水型突变时间点及特征不同,降水的主要周期和周期变化特征也各不相同。郑腾飞等^[7]探讨了 1961—2010 年广东省不同等级降水空间分布及随时间变化特征,研究发现小雨和中雨的贡献率呈减小趋势,大雨及大雨以上贡献率增大,使年均降水量呈增多趋势。蒲义良等^[8]研究表明,2001—2018 年广东省汛期降水事件以短历时为主,年均小时降水强度从南部沿海向北部内陆呈减弱趋势。张润润^[9]研究发现香港地区 1947—2006 年降水量呈不显著上升趋势。赵彦军等^[10]基于 Mann-Kendall (M-K) 非参数检验法、Sen's 坡度法、Morlet 复小波分析法并结合极端降水指标,分析发现深圳市 1979—2015 年降水量呈现不显著减小趋势,空间分布表现出西多东少、南多北少的特征。卢晓雄等^[11]分析发现 2008—2017 年深圳市大部分地区降水量和降雨日数呈不显著 ($p = 0.05$) 上升趋势,年内各月降雨分配不均,6 月降雨最多。锥翠等^[12]从趋势变化、突变特征和周期波动等方面研究了深圳市年降水量时程演变特征,发现 1960—2016 年深圳市年降水量空间上具有较明显的两种分布形态,时程上不存在显著的趋势变化。陈申鹏^[13]利用深圳及周边城市的降水、气温等数据,分析发现主要是云凝结核浓度变化导致降水年际波动,城市化和地形共同决定了深圳的雨岛分布格局。

本文基于粤港澳大湾区 31 个气象站 1961—2014 年逐日降水数据识别区域降水事件,采用 M-K 非参数检验法、小波分析法、经验正交函数 (EOF) 分解法等方法,分析区域降水事件特征及时空分布规律,以期为区域水资源规划、防灾减灾和推动区域协调发展等提供参考。

1 研究区概况

粤港澳大湾区位于珠江流域下游(图 1),介于 $111^{\circ}21'E \sim 115^{\circ}28'E$ 、 $21^{\circ}27'N \sim 24^{\circ}24'N$ 之间,包括香港特别行政区、澳门特别行政区和广东省广州市、深圳市、珠海市、佛山市、惠州市、东莞市、中山市、江门市和肇庆市,总面积 5.6 万 km^2 。粤港澳大湾区总体地势北高南低,东、北、西三面环山,南临南海,三角洲和河谷平原内残丘、台地棋盘状散布^[14]。以亚热带季风气候为主,降水丰沛,雨热同期,区内河网密布,纵横交错,海潮频繁,海陆水体联系密切^[15]。

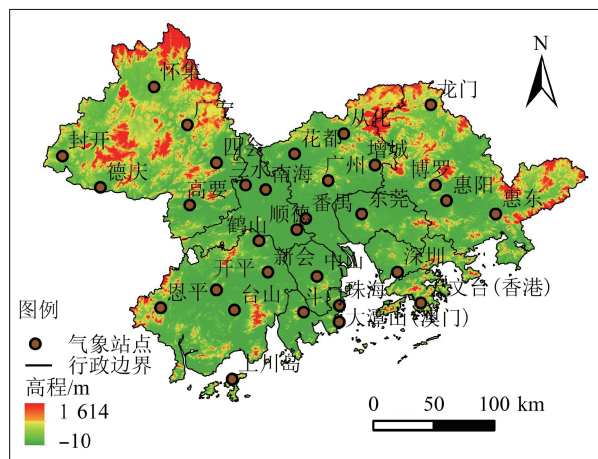


图 1 研究区域示意图

Fig. 1 Schematic diagram of study area

2 研究数据与方法

研究数据为 1961—2014 年香港天文台和澳门地球物理暨气象局的逐日降水量数据,以及国家青藏高原科学数据中心中国国家级地面气象站基本气象要素日值数据集提供的 31 个国家气象观测站(图 1)的逐日降水量资料。其中,珠海站 1961 年、斗门站 1961—1966 年、惠东站 1961—1966 年、东莞站 1967—1969 年数据缺测,缺测数据由周边站点降水序列插补得到。

采用 M-K 非参数检验法和 Sen's slope 法检验 1961—2014 年粤港澳大湾区降水变化趋势及其显著性。M-K 趋势检验统计量为 Z ,选择置信水平 $\alpha = 0.05$,并确定临界值 $Z_{1-\frac{\alpha}{2}} = 1.96$; Sen's slope 法计算结果 β 为粤港澳大湾区降水变化速率, β_U 、 β_L 为给定置信水平 α 时,置信区间的上下限。通过重标极差 (R/S) 分析法计算 Hurst 指数 (H 值) 预测未来粤港澳大湾区降水的变化趋势。采用 Morlet 小波分析降水序列的周期性,降水量的时空分布特征采用 EOF 分解法进行分析^[16-24]。

3 结果与分析

3.1 降水量时间变化特征

3.1.1 年际变化趋势及突变分析

粤港澳大湾区年降水量年际变化如图 2 所示,范围在 1 141.34 ~ 2 386.58 mm 之间,1963 年和 1975 年分别达到最小值和最大值。多年平均降水量为 1 850.74 mm,其余各年大多围绕多年平均降水量上下波动。由降水距平百分率可知,1961—2014 年年降水量丰枯交替出现,旱涝特征不明显,1990—1991 年和 2003—2004 年发生连续轻旱现象。

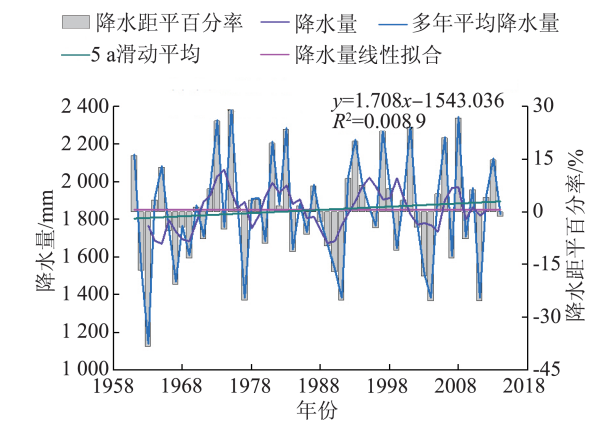


图 2 1961—2014 年年降水量年际变化
Fig. 2 Interannual variation of annual precipitation from 1961 to 2014

大湾区 1961—2014 年降水量统计值如表 1 所示,年降水量增幅每 10 a 为 17.08 mm,M-K 趋势检验统计量 Z 值以及 Sen's slope 计算结果分别为 0.58 和 1.35,均未通过 0.05 显著性检验,表明大湾区年降水量存在不显著的上升趋势。郑腾飞等^[7]研究表明,广东省大雨及大雨以上 (≥ 25 mm/d) 降水贡献率随时间增大,使年降水量呈增多趋势。从 5 a 滑动平均曲线可以看出,年降水量存在较明显的年代际振荡周期,阶段变化周期为 10 ~ 15 a。虽然存在波动,但整体呈现增大的趋势。由年降水量 M-K 突变检验结果(图 3)可知,1972—1990 年和 1992—2014 年 UF 统计量大于 0,年降水量呈上升趋势,其他时段年降水量呈下降趋势。UF 统计量序列和 UB

表 1 粤港澳大湾区年度和四季降水量统计值

Table 1 Statistics of annual and seasonal precipitation in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area					
时间尺度	气候倾向率/ (mm · da ⁻¹)	Z	β	变化趋势	显著性
年	17.08	0.58	1.35	上升	不显著
冬季	0.65	0.16	0.14	上升	不显著
春季	6.61	0.55	0.69	上升	不显著
夏季	21.91	1.07	1.73	上升	不显著
秋季	-12.84	-1.10	-1.26	下降	不显著

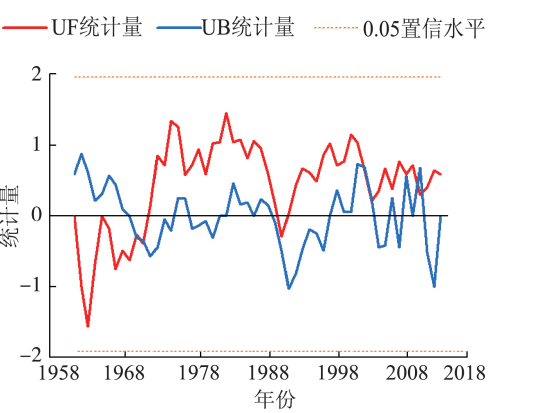


图 3 1961—2014 年年降水量 M-K 突变检验
Fig. 3 Mann-Kendall mutation test of annual precipitation from 1961 to 2014

统计量序列在置信区间内存在多个交点,但都未超过临界线,表明大湾区年降水量无突变特征。这一结果和其他研究^[1,25]基本一致。

由图 4 四季降水量年际变化可知,四季降水量及各季节年际间具有明显差异,冬季(12 月至次年 2 月)、春季(3—5 月)、夏季(6—8 月)和秋季(9—11 月)多年平均降水量分别为 133.96 mm、581.62 mm、838.77 mm 和 296.27 mm,分别占年降水量的 7.24%、31.43%、45.32% 和 16.01%。超过 70% 的降水发生在春夏两季,夏季降水量贡献率最为显著,表明大湾区降水存在一定的季节性,褚曲诚^[5]的研究表明,印度洋源地水汽输送对于华南地区与长江中下游地区夏季峰值期降水量的年际变化有着决定性的影响,这可能是导致大湾区夏季降水充沛的重要原因。

冬季降水量多数年份在平均值上下波动,1983 年出现极大值 518.13 mm,远高于平均值。1961—2014 年,冬季降水距平百分率正负交替变化,有连续的偏丰或偏枯现象。由表 1 可知,各统计值均未通过 0.05 显著性检验,上升趋势不显著。图 5(a)可以看出,冬季降水量正序列曲线 UF 正负交替出现,1961—1966 年、1980—1989 年以及 1991 年、2009 年、2013 年 UF 统计量小于 0,降水量呈下降趋势,其他时段呈上升趋势。UF、UB 曲线在 1961—2014 年出现多个交点,但均在 0.05 置信水平临界线内,表明冬季降水量无突变特征。

春季降水量年际间变化较大,1961—1989 年春季降水量有明显的连续偏丰或偏枯现象。由表 1 可知,各统计值均未通过 0.05 显著性检验,上升趋势不显著。由图 5(b)可以看出,春季降水量 UF 曲线除 1962—1964 年、1967 年、2003—2005 年以及 2011—2012 年外均大于 0,降水量呈上升趋势,其中 1985 年、1983 年、1987 年、1989 年和 1984 年 UF 曲线

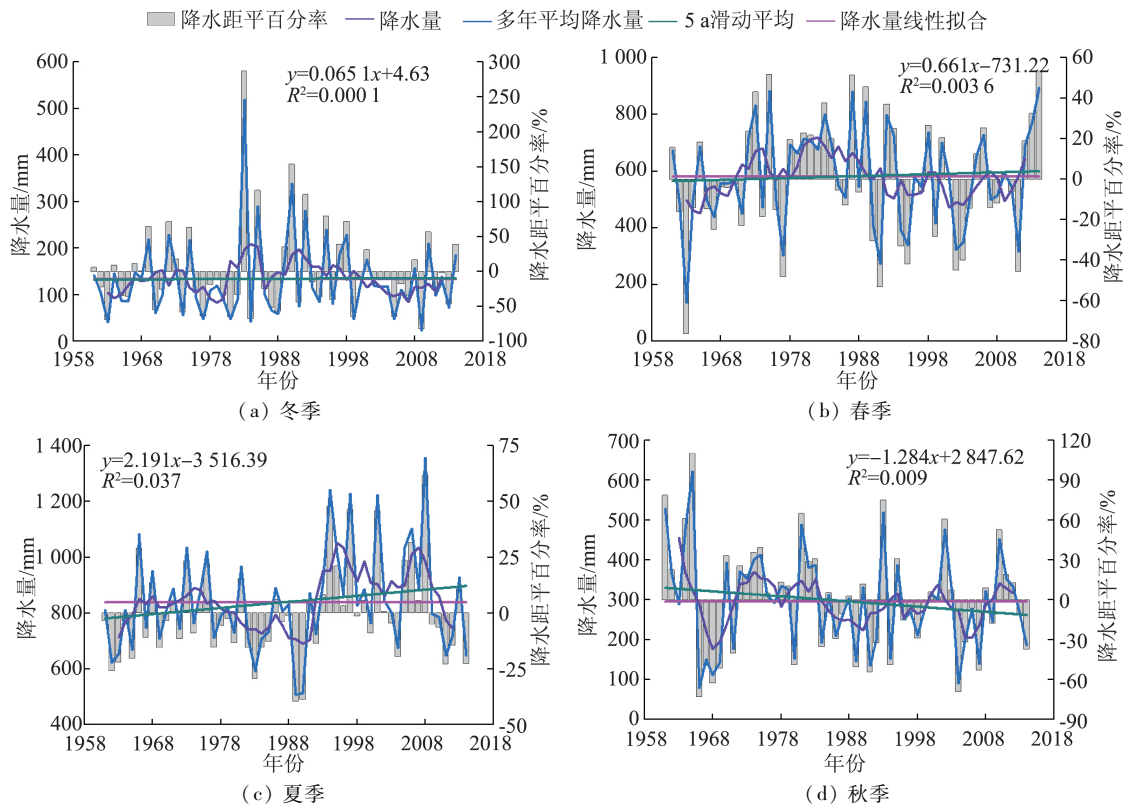


图 4 1961—2014 年四季降水量年际变化

Fig. 4 Interannual variation of seasonal precipitation from 1961 to 2014

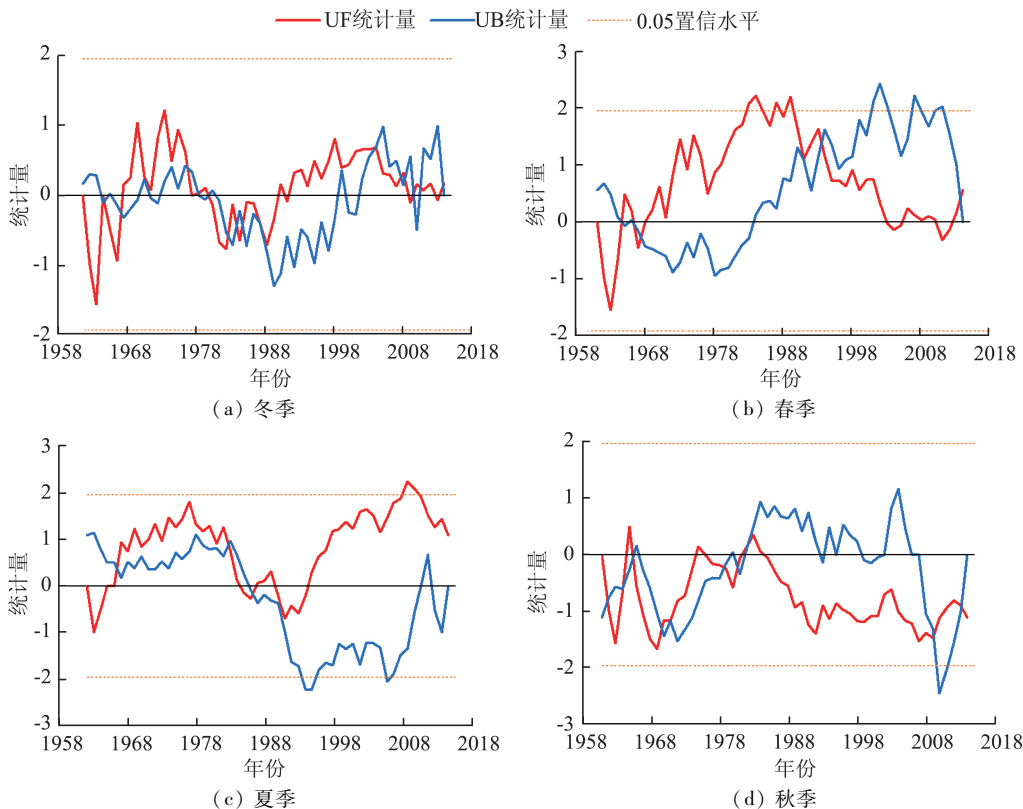


图 5 1961—2014 年四季降水量 M-K 突变检验

Fig. 5 Mann-Kendall mutation test of seasonal precipitation from 1961 to 2014

超出置信区间,增加趋势显著。UF、UB 曲线在 1961—2014 年这一时间段存在多个交点,第一个交点发生在 1964—1965 年,表明降水在此期间发生了突变。

夏季降水量年际波动较大,丰枯交替频繁,总体呈不显著上升趋势,由图 5(c)可知,夏季 UF 统计值在 1962—1963 年、1984—1985 年和 1989—1993 年

3 个时间段内小于 0, 降水量呈下降趋势, 其他时间段内 UF 统计值大于零, 降水量呈上升趋势, 且在 2008 年和 2009 年超过了 0.05 置信水平临界线, 降水量趋势变化显著, UF、UB 曲线在 1965—1966 年之间相交, 降水发生突变。

由表 1 和图 4(d) 可知, 秋季降水量总体呈不显著下降趋势, 存在较明显的年代际振荡周期, 从 5 a 滑动平均曲线可以看出, 阶段变化周期为 15 ~ 18 a。其中存在两段变化, 分界点大致在 1990 年前后, 1961—1990 年秋季降水量呈现出波动增加的趋势, 1990—2010 年有波动减少的趋势。由图 5(d) 可知, UF 曲线均在 0.05 置信水平临界线内, 降水量无突变点。UF 统计值在 1965 年、1975—1976 年和 1982—1984 年大于 0, 多数年份小于 0, 降水量呈不显著下降趋势。

3.1.2 降水持续性分析

根据 Hurst 指数值大小可判断趋势性成分的持续性或者反持续性强度^[18], 统计量 $V_n = \frac{(R/S)_n}{\sqrt{n}}$ (n 为时间长度) 可以度量时间序列的平均循环长度^[23]。当 $H=0.5$ 时, $V_n \sim \ln n$ 图形为水平线, 时间序列为独立的随机过程; 当 $0.5 < H < 1$ 时, 表明未来的变化趋势与过去一致, $V_n \sim \ln n$ 图形将会向上倾斜, H 值越接近 1, 持续性越强; 当 $0 < H < 0.5$ 时, 表明未来的总趋势与过去相反, $V_n \sim \ln n$ 图形将会向下倾斜, H 值越接近 0, 反持续性越强。当 $V_n \sim \ln n$ 图形由向上倾斜变为水平或向下倾斜时, 表明原有的记忆在此时消失^[24], 此时对应的时间长度 n 就是系统的平均循环长度^[23]。

粤港澳大湾区四季和年降水序列 Hurst 指数计算结果分别为 0.677、0.649、0.754、0.686 和 0.595, 均在 0.5 ~ 1 之间, 降水序列存在明显的分形结构, 表明过去的增量与未来的增量呈正相关关系。即未来的趋势和过去的趋势相同, 降水变化的整体方向将继续过去的趋势, 冬季、春季、夏季和年降水量在未来很可能继续呈上升趋势, 秋季降水量继续呈减少趋势, 该过程变化趋势具有持续性特征, 其中, 冬季降水和春季降水变化趋势持续性强度较弱, 年降水及秋季降水变化趋势持续性强度较强, 夏季 Hurst 指数值在 0.75 以上, 持续性强度强。

年度和四季降水序列 V_n 统计量变化曲线如图 6 所示, 四季和年降水序列 V_n 统计量曲线均向上倾斜, 表明变化趋势具有持续性, 这与重标极差分析结果一致。其中, 第一个拐点分别出现在 $\ln n = 1.39$ 、1.79、2.08、2.30、2.40, 即 $n = 4$ 、6、8、10、11 时, 表明此时历史状态对未来状态的影响消失, 系统的平均

循环长度分别为 4 a、6 a、8 a、10 a 和 11 a。冬季和春季降水序列的记忆长度较短, 系统原有的记忆分别在 4 a、6 a 之后耗散消失, 表现出随机独立性, 冬季和春季降水序列的 Hurst 指数值只有 0.595 和 0.649 也可以印证这一点, 其持续性强度很弱, 记忆长度较短。

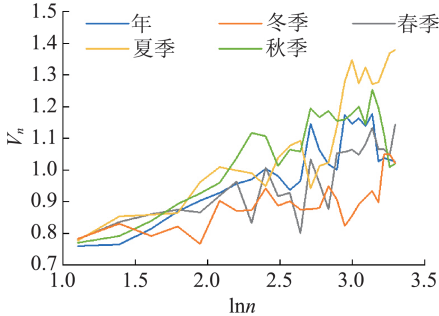
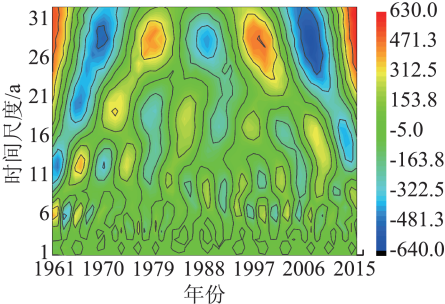


图 6 年度和四季降水序列 V_n 统计量变化曲线

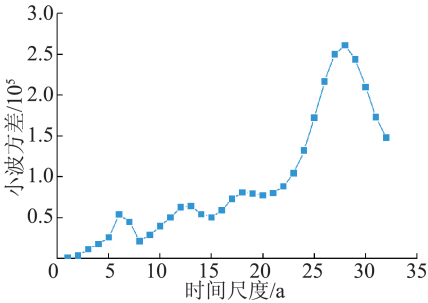
Fig. 4 Variation curve of annual and seasonal precipitation series V_n statistics

3.1.3 降水周期分析

基于 Morlet 小波函数对大湾区年降水序列做连续小波变换。小波系数实部等值线图能够反映降水在不同时间尺度上的周期震荡, 小波系数实部为正时, 代表降水偏多; 小波系数实部为负时, 代表降水偏少; 小波系数实部为 0 表示降水发生突变。小波方差图反映了降水序列的波动能量随时间尺度的分布, 对应峰值处的尺度称为该序列的主要时间尺度, 用以反映时间序列的主要周期^[26]。小波分析结果如图 7 所示, 由图 7(a) 可知, 降水序列存在 3 ~ 8 a、



(a) Morlet 小波实部



(b) Morlet 小波方差

图 7 小波系数实部等值线及小波方差

Fig. 7 Real part contour map of wavelet coefficients and wavelet variance

10~15 a、17~23 a、24~32 a 的 4 类尺度周期变化,其中年降水以 24~32 a 尺度的周期震荡信号最明显,在整个分析时段表现比较稳定,具有全域性。降水震荡信号正负相位交替往复,表示年降水量大约出现了 3 个丰枯交替循环。小波方差(图 7(b))存在 4 个极值,其中 28 a 周期尺度峰值最大,对应年降水量的第一主周期。此外,18 a 为降水量的第二主周期,13 a 为降水量的第三主周期,6 a 为降水量的第四主周期。

3.2 降水空间变化特征

3.2.1 降水量空间变化特征分析

粤港澳大湾区 1961—2014 年年均降水量和四季平均降水量空间分布如图 8 和图 9 所示,可以看出,大湾区年均降水量在空间上分布不均,呈自东南到西北递减的趋势。年均降水量均在 1 400 mm 以上,高值中心出现在恩平、上川岛、香港和龙门地区,降水量范围在 2 116.01~2 533.09 mm 之间,年均降水量低值中心出现在封开、德庆和高要地区,低于 1 644.56 mm。年均降水量高值区始于恩平地区,向东北延伸经香港地区至龙门地区,总体上低值区面积较大。降水量空间分布格局主要与水汽和地形有关,受印度洋西南季风暖湿气流影响,距离海洋越近,降水越多。另外,大湾区地形比较复杂,山岭众多,基本上呈东北—西南走向,所以降水总体上呈现沿海多山区少、东部多西部少、南部多北部少的特点。例如恩平地区年均降水量最大,达到 2 533.09 mm,其主要受地形影响,恩平处于天露山脉东南面,西南被山岭环绕,非常有利于水汽聚集形成降水^[27]。

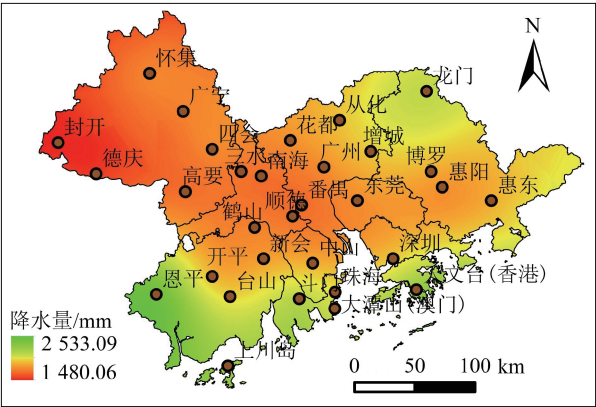
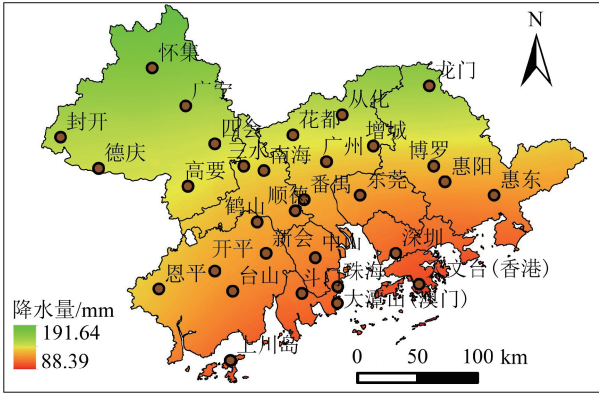
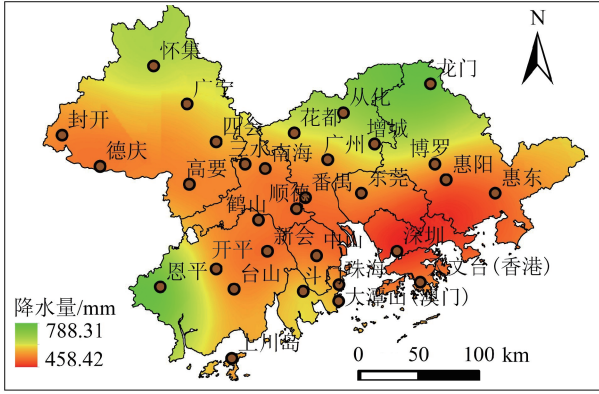


图 8 1961—2014 年年均降水量空间分布
Fig.8 Spatial distribution of annual average precipitation from 1961 to 2014

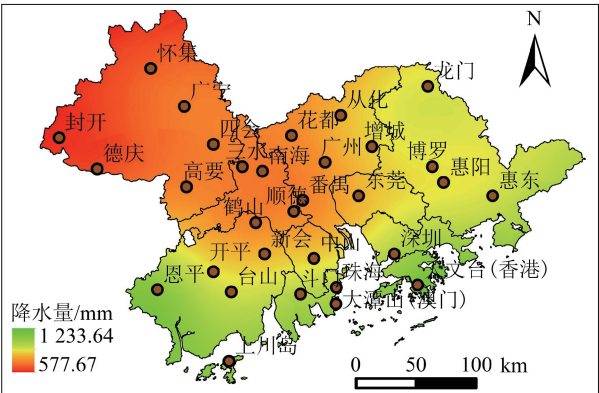
冬季降水空间上呈现出由南向北阶梯递增的趋势,低值降水量范围为 88.39~127.53 mm,主要分布在恩平、开平、鹤山、番禺、惠阳以南地区,封开、广



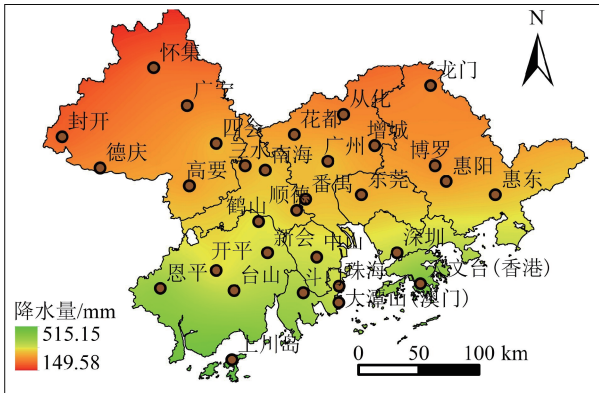
(a) 冬季



(b) 春季



(c) 夏季



(d) 秋季

图 9 1961—2014 年四季平均降水量空间分布
Fig.9 Spatial distribution of seasonal average precipitation from 1961 to 2014

宁、从化以北地区降水量在 152.50 ~ 191.64 mm 之间,较其他区域高。西南恩平地区、西北怀集地区以及东北增城、从化以北地区春季降水量较高,低值地区主要分布在中部地区,自西向东贯穿整个大湾区,大致在封开、三水、番禺、博罗以南,台山、广州以北。夏季降水空间分布特征与年降水空间分布特征较为一致,在空间上呈自东南到西北递减的趋势;高要、鹤山、增城、花都以西北地区夏季平均降水量较低,介于 577.67 ~ 740.64 mm 之间,降水量高值地区自恩平地区始,经斗门、深圳向东北地区延伸至惠东地区,降水量范围为 954.08 ~ 1 233.64 mm。秋季平均降水量空间分布带状特征明显,自南向北递减,降水量高值主要集中分布在西南恩平、斗门、上川岛以及深圳、香港地区,北部高要、四会、东莞、惠阳以北地区秋季平均降水量较少。

粤港澳大湾区 1961—2014 年年降水量和四季降水量变化趋势空间分布如图 10 和图 11 所示,年降水量 Sen's slope 计算结果 β 值介于 -1.64 ~ 7.98 之间。空间上,大湾区多数地区年降水量呈上升趋势,超过 80% 的站点 $\beta > 0$ 。年降水量呈下降趋势的地区分散分布在大湾区边界,包括西部高要、恩平、台山附近地区,南部澳门、深圳附近地区,东北龙门附近地区,其余地区年降水量呈上升趋势。广州和东莞站 $|Z| > 1.96$,且置信水平 $\alpha = 0.05$ 时,置信区间上下限 β_u, β_l 均为正值,年降水量增加趋势显著。除广州和东莞地区外,南海、增城、花都、香港地区增加趋势较大,与伍红雨等^[1]的研究结论较为一致。龙门地区年降水量减少趋势最强,其次是惠东、深圳、澳门等地区。

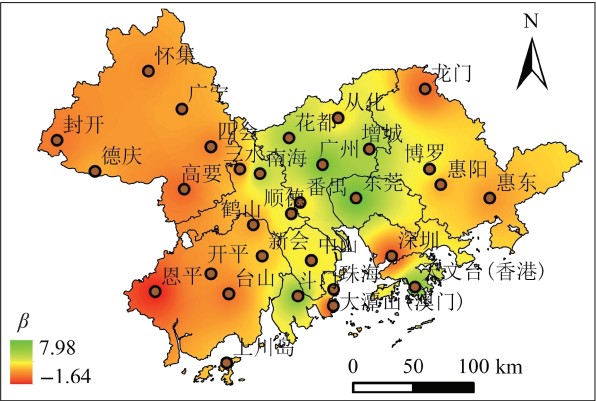
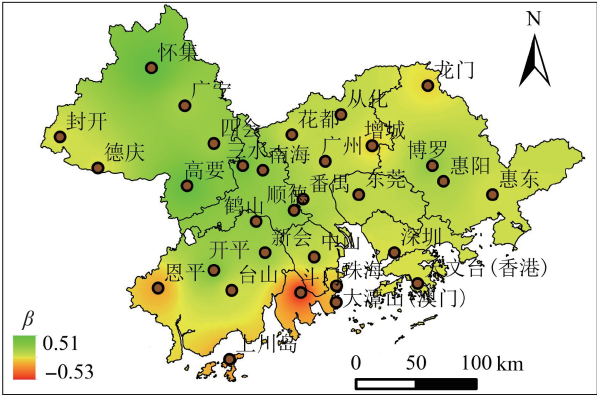
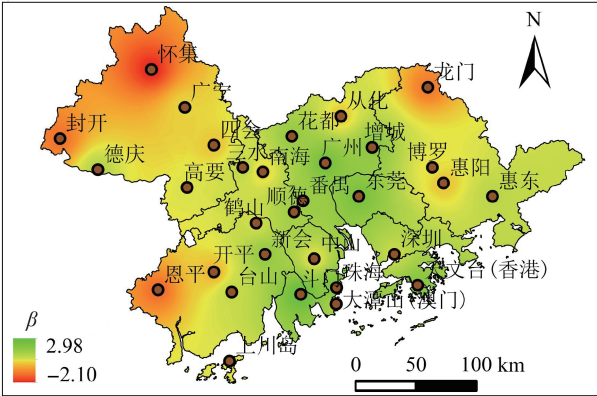


图 10 1961—2014 年年降水量变化趋势空间分布
Fig. 10 Spatial distribution of annual precipitation trends from 1961 to 2014

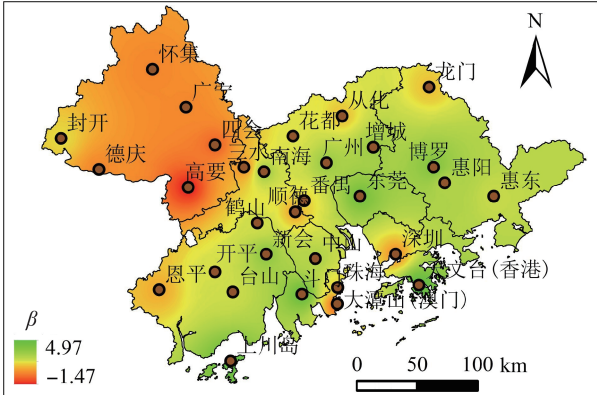
冬、春季降水量呈上升趋势的气象站点均有 24 个,占比达到 77.42%,所有气象站点降水量变化不显著($p < 0.05$)。冬季降水量呈下降趋势的站点主



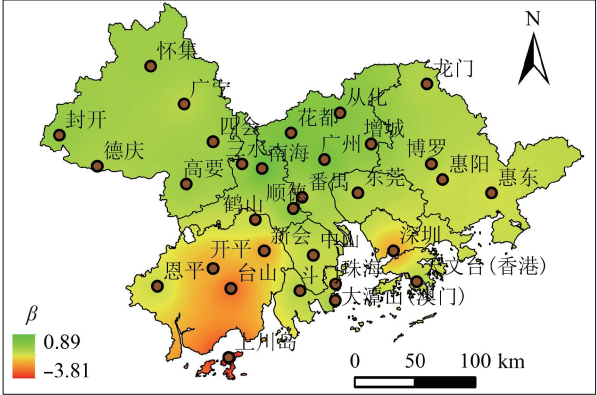
(a) 冬季



(b) 春季



(c) 夏季



(d) 秋季

图 11 1961—2014 年四季降水量变化趋势空间分布
Fig. 11 Spatial distribution of seasonal precipitation trends from 1961 to 2014

要集中分布在大湾区西南地区,大致在恩平、斗门、珠海以南,香港以西,龙门、增城附近地区有少量分布。西北部广宁和德庆以北地区、西南恩平和开平地区以及东北龙门和惠阳附近零星地区春季降水量呈下降趋势。夏季降水量仅有西部高要、四会地区以及南部澳门附近地区呈下降趋势,呈上升趋势的气象站点数达 90.32%,其中南海站和东莞站 β_U 、 β_L 均为正值,且 Z 值达到 0.05 置信水平,上升趋势显著。大湾区大部分地区秋季降水量呈不显著下降趋势,仅有位于中北部的顺德、从化、花都、广州、南海附近地区呈不显著上升趋势。

3.2.2 EOF 分析

将进行距平处理后的年降水量数据使用 EOF 进一步分析其变化特征,结果如表 2 和图 12 所示。前两个模态累计方差贡献率达到 71%,误差范围不重叠,通过 North 显著性检验,因此前两个特征向量空间分布可以很好代表大湾区降水空间分布型。其中,模态 1 特征向量的方差贡献率为 63.66%,远高于其他模态,是大湾区降水场的主要空间分布形式。

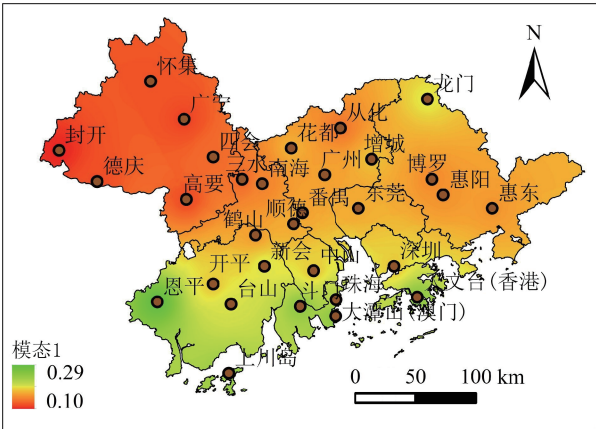
表 2 1961—2014 年降水 EOF 分解前 6 个模态方差贡献率
和累计方差贡献率

Table 2 The first 6 modal variance contribution rate and accumulated variance contribution rate of EOF decomposition on precipitation from 1961 to 2014

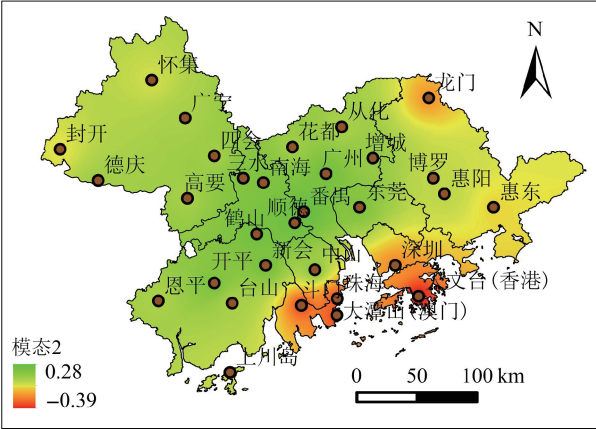
模态	特征值	方差贡献率/%	累计方差贡献率/%	特征根误差	
				下限	上限
1	2865366.7640	63.66	63.66	2137562.88	3593170.65
2	367204.6932	8.16	71.82	273934.61	460474.78
3	302699.2652	6.73	78.55	225813.57	379584.96
4	152870.5607	3.40	81.95	114041.40	191699.72
5	123674.3685	2.75	84.69	92261.05	155087.69
6	103156.2668	2.29	86.99	76954.55	129357.98

大湾区所有站点模态 1 特征值均为正值,表明 1961—2014 年大湾区降水变化趋势具有高度一致性,降水主要是受到大尺度天气系统的影响,一致的偏丰或偏枯。高值中心位于大湾区西南恩平地区,表明该区域降水变化量大,其原因可能是该地区降水主要受众多山岭影响,形成降水异常中心,年降水变化率大。低值中心位于西北部封开地区,降水变化量小,总体上高值主要分布在大湾区西南地区,低值主要分布在西北地区,中东部地区为过渡区,降水量变化程度由南向北逐渐减少。

第二特征向量场大致以博罗、惠阳、中山、上川岛为界,东部沿海地区及西北部封开、怀集地区与内陆地区反位向分布,前者为负值,后者为正值,即内陆地区(封开、怀集地区除外)降水量增多(或减少),东部沿海地区降水量减少(或增多)。这种



(a) 模态 1



(b) 模态 2

图 12 年降水场模态 1 与模态 2 特征向量分布
Fig. 12 Eigenvector distribution of mode 1 and mode 2 annual precipitation field

分布特征可能是受到小尺度的地貌类型单元及季风等因素的共同影响。特征向量高值大致分布在中西部地区,降水量变化大,低值主要分布在东南地区及东北龙门地区。正值中心出现在大湾区中部番禺地区,负值中心出现在南部香港地区。

特征向量所对应的时间系数代表了这一区域由特征向量所表征的分布模式的时间变化特征,时间系数绝对值越大,表明这一时刻这类分布模式越典型^[17]。取每年时间系数绝对值最大所对应的特征向量作为当年降水空间分布模式^[28],结果(图 13)显示,年降水场的分布模式模态 1、模态 2 以及其余不典型模态类型出现的年数分别占总年数的 62.96%、14.81% 和 22.22%。表明年降水场的分布模式以模态 1 为主,这与方差贡献率所反映的不同模态的降水场典型程度基本一致。

时间系数的正负代表场型的分布方向,正值表示与模态方向相同,负值表示与模态方向相反。模态 1 作为降水空间分布模态时,特征向量所对应的时间系数正负各有 17 年,表示大湾区全域全年多雨、全域全年少雨的降水空间分布模式各出现 17

年,时间系数最大值与最小值分别出现在1975年和1963年,与大湾区年降水量最值出现年份一致;模态2作为降水空间分布模态时,有3年内陆地区(封开、怀集地区除外)多雨,东部沿海地区少雨的分布型比较典型,1961年时间系数最大,反之有5年,时间系数最小值出现在1982年。从时间系数变化趋势上看,模态1的时间系数趋势斜率大于0,说明大湾区1961—2014年年降水量整体上有增加的趋势;模态2时间系数趋势斜率小于0,说明1961—2014年内陆地区(封开、怀集地区除外)降水量有减少的趋势,东部沿海地区有增加的趋势。

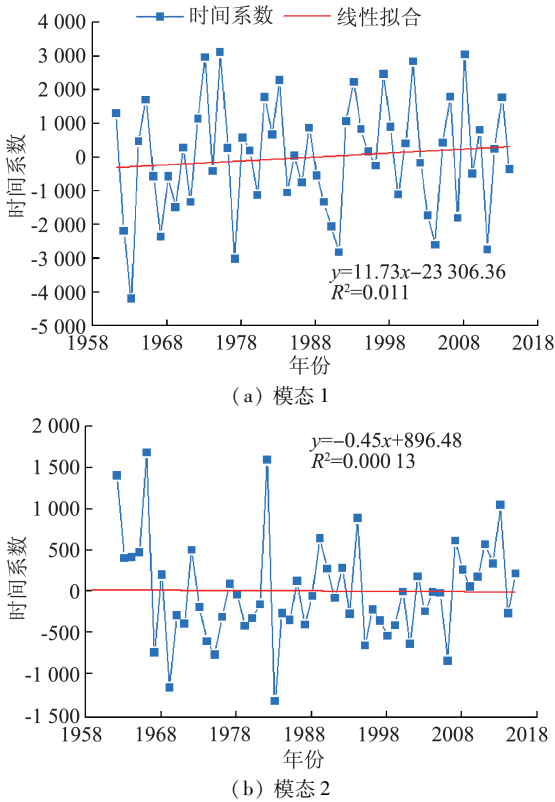


图13 年降水场模态1与模态2的时间系数

Fig.13 Time coefficients of mode 1 and mode 2 annual precipitation field

4 结 论

- a. 1961—2014年粤港澳大湾区降水时空分布不均,存在显著的季节特征,年降水量年际丰枯交替频繁。
- b. 年度、四季降水量年际波动性强,年度、冬季、春季和夏季降水量呈不显著上升趋势,秋季呈不显著减少趋势。春夏两季降水分别在1964—1965年和1965—1966年发生突变,其他时段没有突变现象。四季和年降水变化趋势具有持续性特征,冬季降水和春季降水变化趋势持续性强度较弱,年降水及秋季降水变化趋势持续性强度较强,夏季Hurst指数值在0.75以上,持续性强度强。

- c. 年降水量变化以28a为主周期,以18a、13a和6a为次周期。受水汽和地形等因素影响,降水量空间分布不均,整体呈东南向西北递减趋势,冬季降水量空间上由南向北阶梯递增,夏季降水量空间分布特征与年降水空间分布特征较为一致,自东南到西北递减,秋季降水量呈自南向北递减的带状分布。
- d. 约74%的气象站点年降水量呈上升趋势,主要分布在大湾区中部地区。大湾区西南地区冬季降水量呈不显著减少趋势;西南、西北、东北地区春季降水量呈不显著减少趋势。夏季仅有西部局部地区呈下降趋势,呈上升趋势的气象站点数达90.32%。秋季大部分地区降水量呈不显著下降趋势,中北部零星地区呈不显著上升趋势。
- e. 大湾区所有气象站点模态1特征值均为正值,降水一致的偏丰或偏枯。降水量变化程度由南向北逐渐减少。第二特征向量场大致以博罗、惠阳、中山、上川岛为界,东部沿海地区及西北部封开、怀集地区与内陆地区反位向分布。大湾区全域全年多雨、全域全年少雨各有17年;内陆地区(封开、怀集地区除外)多雨、东部沿海地区少雨的占3年,反之有5年。

参考文献:

[1] 伍红雨,翟志宏,张羽. 1961—2018年粤港澳大湾区气候变化分析[J]. 暴雨灾害,2019,38(4):303-310. (WU Hongyu, ZHAI Zhihong, ZHANG Yu. Analysis of climate change in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area from 1961 to 2018[J]. Torrential Rain and Disasters, 2019,38(4):303-310. (in Chinese))

[2] 白盛楠. 基于大数据的大湾区极端气候成因及其影响的模型研究[D]. 北京:华北电力大学(北京),2019.

[3] 李慧. 华南地区夏季持续性降水事件发生背景与机理[D]. 南京:南京信息工程大学,2017.

[4] LI J, YU R C, YUAN W H, et al. Changes in duration related characteristics of late-summer precipitation over Eastern China in the past 40 years [J]. Journal of Climate,2011,24(21):5683-5690.

[5] 褚曲诚. 中国东部汛期降水的水汽来源变化及其气候动力学研究分析[D]. 兰州:兰州大学,2020.

[6] 徐碧裕,叶朗明,胡丽华,等. 1968—2017年广东汛期降水REOF分型特征[J]. 广东气象,2020,42(6):5-9. (XU Biyu, YE Langming, HU Lihua, et al. Characteristics of precipitation as identified with REOF for raining seasons of Guangdong from 1968 to 2017[J]. Guangdong Meteorology,2020,42(6):5-9. (in Chinese))

[7] 郑鹏飞,刘显通,万齐林,等. 近50年广东省分级降水的时空分布特征及其变化趋势的研究[J]. 热带气象学报,2017,33(2):212-220. (ZHENG Tengfei, LIU

- Xiantong, WAN Qilin, et al. The characteristics of precipitation in Guangdong Province over the past 50 years: dependence on rainfall intensity [J]. Journal of Tropical Meteorology, 2017, 33(2): 212-220. (in Chinese))
- [8] 蒲义良, 郭柏成, 叶朗明, 等. 基于小时降水资料研究广东省降水分布特征[J]. 南京信息工程大学学报(自然科学版), 2020, 12(4): 495-503. (PU Yiliang, GUO Bochong, YE Langming, et al. Characteristics of precipitation distribution in Guangdong Province based on hourly rain-gauge data[J]. Journal of Nanjing University of Information Science and Technology (Natural Science Edition), 2020, 12(4): 495-503. (in Chinese))
- [9] 张润润. 香港地区降水趋势及其演变过程分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2010, 38(5): 505-510. (ZHANG Runrun. Trend and evolution of precipitation in Hong Kong [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2010, 38(5): 505-510. (in Chinese))
- [10] 赵彦军, 徐宗学, 谭秋阳, 等. 深圳市降水特征时空演变规律分析[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2019, 55(5): 564-571. (ZHAO Yanjun, XU Zongxue, TAN Qiuyang, et al. Spatiotemporal variations in precipitation in Shenzhen [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2019, 55(5): 564-571. (in Chinese))
- [11] 卢晓雄, 李晴岚, 陈申鹏, 等. 2008—2017 年深圳降水时空特征研究[J]. 气象科技进展, 2019, 9(3): 171-178. (LU Xiaoxiong, LI Qinglan, CHEN Shenpeng, et al. Temporal and spatial precipitation characteristics in Shenzhen from 2008 to 2017 [J]. Advances in Meteorological Science and Technology, 2019, 9(3): 171-178. (in Chinese))
- [12] 雒翠, 刘勇, 朱晓庆, 等. 深圳市近 57 年来降水时空演变特征分析[J]. 水利水运工程学报, 2018(3): 24-31. (LUO Cui, LIU Yong, ZHU Xiaoqing, et al. Tempo-spatial changes of precipitation of Shenzhen in last 57 years [J]. Hydro-Science and Engineering, 2018(3): 24-31. (in Chinese))
- [13] 陈申鹏. 深圳多年降水变化规律和雨岛效应分析[J]. 气象科技进展, 2019, 9(3): 166-170. (CHEN Shenpeng. Multi-year variation of precipitation and rain island effect in Shenzhen [J]. Advances in Meteorological Science and Technology, 2019, 9(3): 166-170. (in Chinese))
- [14] 曹建文, 夏日元, 唐仲华, 等. 粤港澳大湾区地下水资源特征及开发潜力[J]. 中国地质, 2021, 48(4): 1075-1093. (CAO Jianwen, XIA Riyuan, TANG Zhonghua, et al. Characteristics and development potential of groundwater resources in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area [J]. Geology in China, 2021, 48(4): 1075-1093. (in Chinese))
- [15] 董斯齐, 黄翀, 李贺, 等. 粤港澳大湾区 2015—2019 年入海河口水质变化趋势[J]. 水资源保护, 2021, 37(5): 48-55. (DONG Siqi, HUANG Chong, LI He, et al. Change trend of water quality in estuaries of Guangdong, Hong Kong and Macao Greater Bay Area from 2015 to 2019 [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(5): 48-55. (in Chinese))
- [16] 肖祖香, 朱双, 罗显刚, 等. 三江源区多尺度水文干旱特征及植被的响应[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2021, 49(6): 515-520. (XIAO Zuxiang, ZHU Shuang, LUO Xiangang, et al. Multi-scale hydrological drought characteristics and vegetation responses in the Three-River-Source Region [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49(6): 515-520. (in Chinese))
- [17] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京: 气象出版社, 2007.
- [18] 冯新灵, 罗隆诚, 邱丽丽, 等. 青藏高原至中国东部年雨日变化趋势的分形研究[J]. 地理研究, 2007(4): 835-843. (FENG Xinling, LUO Longcheng, QIU Lili, et al. Fractal research of rainy day changing trend from Tibetan Plateau to Eastern China [J]. Geographical Research, 2007(4): 835-843. (in Chinese))
- [19] 方国华, 张钰, 闻昕, 等. 基于质心分析的淮河流域降水时空分布特征[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2018, 46(5): 384-389. (FANG Guohua, ZHANG Yu, WEN Xin, et al. Spatial and temporal distribution characteristic of precipitation in the Huaihe River Basin based on centroid analysis [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2018, 46(5): 384-389. (in Chinese))
- [20] 邹磊, 夏军, 张印, 等. 海河流域降水时空演变特征及其驱动力分析[J]. 水资源保护, 2021, 37(1): 53-60. (ZOU Lei, XIA Jun, ZHANG Yin, et al. Spatial-temporal change characteristics and driving forces of precipitation in the Haihe River Basin [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(1): 53-60. (in Chinese))
- [21] 高冰, 任依清. 鄱阳湖流域 1961—2010 年极端降水变化分析[J]. 水利水电科技进展, 2016, 36(1): 31-35. (GAO Bing, REN Yiqing. Changes of extreme precipitation events in Poyang Lake Basin from 1961 to 2010 [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2016, 36(1): 31-35. (in Chinese))
- [22] 张菁, 张珂, 王晟, 等. 陕甘宁三河源区 1971—2017 年极端降水时空变化分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2021, 49(3): 288-294. (ZHANG Jing, ZHANG Ke, WANG Sheng, et al. Spatiotemporal variation analysis of extreme precipitation in the Three River Source Area of the Shaanxi-Gansu-Ningxia Contiguous Region from 1971 to 2017 [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49(3): 288-294. (in Chinese))

(下转第 74 页)

- Research of Soil and Water Conservation, 2020, 27 (5): 381-388. (in Chinese))
- [25] 苏春生, 吴孝情, 陈晓宏, 等. 土地覆盖类型变化对梯度发展流域的土壤侵蚀动态影响[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2018, 57(2): 32-41. (SU Chunsheng, WU Xiaoqing, CHEN Xiaohong, et al. Dynamic impacts of land-cover change on soil erosion in a gradient development basin [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2018, 57 (2): 32-41. (in Chinese))
- [26] 朱文泉, 潘耀忠, 张锦水. 中国陆地植被净初级生产力遥感估算[J]. 植物生态学报, 2007 (3): 413-424. (ZHU Wenquan, PAN Yaozhong, ZHANG Jinshui. Estimation of net primary productivity of Chinese terrestrial vegetation based on remote sensing[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2007 (3): 413-424. (in Chinese))
- [27] 王跃峰, 许有鹏, 张倩玉, 等. 太湖平原区河网结构变化对调蓄能力的影响[J]. 地理学报, 2016, 71(3): 449-458. (WANG Yuefeng, XU Youpeng, ZHANG Qianyu, et al. Influence of stream structure change on regulation capacity of river networks in Taihu Lake Basin [J]. Acta Geographica Sinica, 2016, 71 (3): 449-458. (in Chinese))
- [28] 林珍铭, 夏斌. 熵视角下的广州城市生态系统可持续发展能力分析[J]. 地理学报, 2013, 68 (1): 45-57. (LIN Zhenming, XIA Bin. Analysis of sustainable development ability of the urban ecosystem in Guangzhou City in the perspective of entropy [J]. Acta Geographica Sinica, 2013, 68 (1): 45-57. (in Chinese))
- [29] 艾亚迪, 魏传江, 马真臻. 基于 AHP-熵权法的西安市水资源开发利用程度评价[J]. 水利水电科技进展, 2020, 40 (2): 11-16. (AI Yadi, WEI Chuanjiang, MA Zhenzhen. Evaluation on water resources development and utilization degree based on AHP-entropy weight method [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020, 40 (2): 11-16. (in Chinese))
- [30] 刘永婷. 城市发展对嘉兴市水系连通影响及其与水资源耦合关系研究[D]. 芜湖: 安徽师范大学, 2018.
- [31] 张凤太, 苏维词. 贵州省水资源-经济-生态环境-社会系统耦合协调演化特征研究[J]. 灌溉排水学报, 2015, 34(6): 44-49. (ZHANG Fengtai, SU Weici. The Evolution characteristics of coupling and coordination of water resources-economy-environment-society system in Guizhou [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2015, 34 (6): 44-49. (in Chinese))

(收稿日期: 2021-06-30 编辑: 王芳)

(上接第 65 页)

- [23] 李国栋, 张俊华, 王乃昂, 等. 基于重标极差分析和非周期循环分析的气候变化趋势预测: 以兰州市为例[J]. 干旱区研究, 2013, 30 (2): 299-307. (LI Guodong, ZHANG Junhua, WANG Naiang, et al. Prediction of climate change trend based on rescaled range analysis and non-periodic cycle analysis: a case study in lanzhou city [J]. Arid Zone Research, 2013, 30 (2): 299-307. (in Chinese))
- [24] 张鑫, 蔡焕杰, 尹晓楠. 应用重标度极差分析法(R/S)分析无定河流域水沙变化[J]. 农业工程学报, 2010, 26 (增刊 2): 212-217. (ZHANG Xin, CAI Huanjie, YIN Xiaonan. Variation trends analysis of runoff and sediment time series based on R/S method in Wuding River Basin [J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26 (Sup2): 212-217. (in Chinese))
- [25] 史贵君, 郭力源, 林涛, 等. 深圳市降水变化特征及其未来变化情况预测[J]. 长江科学院院报, 2020, 37 (5): 28-33. (SHI Guijun, GUO Liyuan, LI Tao, et al. Variation characteristics and future changes of precipitation in Shenzhen [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2020, 37 (5): 28-33. (in Chinese))
- [26] 许月卿, 李双成, 蔡运龙. 基于小波分析的河北平原降水变化规律研究[J]. 中国科学: D 辑 地球科学, 2004 (12): 1176-1183. (XU Yueqing, LI Shuangcheng, CAI Yunlong. The research on precipitation change in Hebei Plain based on wavelet analysis [J]. Science in China: Series D Earth Science, 2004, 34 (12): 1176-1183. (in Chinese))
- [27] 黄奇章. 广东降水气候特征及其成因分析[J]. 热带地理, 1990 (2): 113-124. (HUANG Qizhang. The analysis of the precipitation-climate characteristics and causes of formation in Guangdong Province [J]. Tropical Geography, 1990 (2): 113-124. (in Chinese))
- [28] 赵嘉阳, 王文辉, 靳全锋, 等. 基于 EOF 的福建省降水量时空变化特征分析[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2017, 31 (2): 73-79. (ZHAO Jiayang, WANG Wenhui, JIN Quanfeng, et al. Analyzing spatial and temporal distributions of precipitation in Fujian Province using empirical orthogonal function [J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2017, 31 (2): 73-79. (in Chinese))

(收稿日期: 2021-09-03 编辑: 熊水斌)