

1961—2021年粤港澳大湾区暴雨气候变化特征*

张柳红¹, 伍红雨¹, 向昆仑², 杨小佳¹, 史丽¹

1. 广东省气候中心, 广东 广州 510640

2. 广东省生态气象中心, 广东 广州 510640

摘要: 基于1961—2021年粤港澳大湾区31个国家气象观测站逐日降水资料, 采用线性趋势分析、趋势系数计算、Mann-Kendall突变检验等方法分析了大湾区年及前、后汛期暴雨日数、暴雨量、暴雨强度和暴雨贡献率的气候特征及变化。结果表明, 近61 a大湾区平均年暴雨日数和大暴雨日数分别为8.3 d和1.8 d, 有87%的暴雨发生在汛期, 其中前、后汛期各占47%和40%。近61 a大湾区31个站平均的年及前、后汛期暴雨日数、暴雨量、暴雨贡献率、暴雨强度的变化趋势均不明显, 但广州、怀集、斗门等6个站暴雨量变化趋势显著。大湾区年及前、后汛期暴雨日数及其变化速率均高于广东省同期。香港、澳门和广州的暴雨特征对比分析显示, 香港近61 a平均暴雨量、暴雨日数、暴雨强度和暴雨贡献率均为最大, 澳门次之, 广州最小, 但广州年和前汛期暴雨量、暴雨日数及前汛期暴雨贡献率的变化速率最大。

关键词: 暴雨; 气候特征; 气候变化; 粤港澳大湾区

中图分类号: P467 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-0137(2023)04-0032-13

Climate change characteristics of rainstorm in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area from 1961 to 2021

ZHANG Liuhong¹, WU Hongyu¹, XIANG Kunlun², YANG Xiaojia¹, SHI Li¹

1. Climate Center of Guangdong Province, Guangzhou 510640, China

2. Guangdong Ecological Meteorology Center, Guangzhou 510640, China

Abstract: Based on the daily precipitation data of 31 meteorological monitoring stations from 1961 to 2021 in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area, the annual and seasonal (in the early and later flood seasons, respectively) characteristics and variation of torrential rain days, storm rainfall, rainstorm intensity, and contributions are analyzed by a combination of multi-methods, such as linear regression analysis, computation of trend coefficients and Mann-Kendall test. The results show that the annual mean torrential rain days and extremely heavy rainstorm days during 1961–2021 in the Greater Bay Area are separately 8.3 days and 1.8 days. About 87% of the total torrential rain days occur in the flood seasons with about 47% in the first season and 40% in the second season. The mean torrential rain days, storm rainfall, rainstorm intensity, and the rainstorm contribution of 31 meteorological monitoring stations of a year, the early flood season, and the later flood season in recent 61 years tend to change faintly, while the mean storm rainfall of six stations, such as Guangzhou,

* 收稿日期: 2022-10-17 录用日期: 2022-12-08 网络首发日期: 2023-05-06

基金项目: 广东省自然科学基金(2020A1515110423); 国家自然科学基金气象联合基金(U2142205);
2022年度省级灾害防治及应急管理专项; 广东省气象局科研项目(GRMC2019Z01, GRMC2020M10,
GRMC2020Q05, GRMC2022M07); 广东省气象局科技创新团队项目(GRMCTD202005)

作者简介: 张柳红(1991年生), 女; 研究方向: 应用气象; E-mail: zhanglh@gd121.cn

通信作者: 伍红雨(1969年生), 女; 研究方向: 气候特征、变化及机理; E-mail: wuhy_gz@gd121.cn

Huaiji and Doumen, show significant variations. The mean torrential rain days and their change rates of a year, the early flood season, and the later flood season in the Greater Bay Area are higher than that of Guangdong Province. After comparing the characteristics of storm rainfall in Hong Kong, Macao, and Guangzhou from 1961 to 2021, the values of mean torrential rain days, storm rainfall, rainstorm intensity and contribution are the largest in Hong Kong, followed by Macau and Guangzhou. However, Guangzhou shows maximum rates of change of annual storm rainfall and torrential rain days and rainstorm contribution in the early flood season.

Key words: rainstorm; climate change; climate characteristics; Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area

联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)第六次气候变化评估报告指出, 气候正在迅速变暖且全球性发生, 严重破坏了陆地、淡水、沿海和远洋海洋生态系统(IPCC, 2022)。在此背景下, 我国极端天气气候事件频发, 极端天气气候事件变化与人类活动范围扩大和社会经济系统发展叠加导致气候风险加剧、灾害事件影响加大(王玉洁等, 2016; 中国气象局气候变化中心, 2022), 例如2012年的7·21北京特大暴雨、2021年的7·20郑州特大暴雨、2022年6月粤北特大洪灾等极端暴雨洪涝灾害事件影响巨大。因此, 对不同区域的强降水事件变化、暴雨气候特征及成因分析等研究备受关注且成果颇丰。研究者(李红梅等, 2008; 贺冰蕊和翟盘茂, 2018; 陈星任等, 2020)对中国及其夏季持续极端降水进行趋势分析, 指出强降水频率和强度在中国大部地区均有所增加, 且我国东部地区盛夏降水有60%与暴雨强度降水变化有关。有些研究成果(Chen et al., 2013; 陈少勇等, 2015; 陈思等, 2017)指出华南地区属于中国暴雨频发区和强致灾区; 在变化趋势方面, 吴丽姬等(2007)、张婷和魏凤英(2009)、伍红雨等(2011)研究认为华南年降水量和前汛期持续性暴雨在1992年从偏少转为偏多, 1961—2005年间的华南前汛期持续性暴雨频数在季风爆发前和爆发后年代际变化近乎相反, 1961—2008年间华南地区平均的年、前汛期和后汛期暴雨日数均呈不明显增加趋势, 年和前汛期暴雨强度微弱增加、后汛期微弱减少, 年暴雨贡献率显著增加但前汛期和后汛期增加不明显; 在地域分布和发生时间差异方面, 肖伟军等(2009)指出1960—2004年间华南夏季降水的气候变异区主要出现在华南中部和西北部, 中部以年代际变化为主, 西北部主要表现为年际变化特征; 彭丽英等(2006)指出1958—

2000年间华南近50%暴雨发生在前汛期, 华南前汛期暴雨降水量和频次均呈略减少趋势。黄茂栋等(2008)、董国业等(2010)、谢龙生等(2011)、张金玲等(2011)、李晓娟等(2012)、蒋鹏等(2015)、伍红雨等(2017, 2020)也对广东极端强降水、暴雨等开展了气候特征及成因分析。

粤港澳大湾区(以下简称大湾区)是由广州、深圳、珠海、佛山、江门、东莞、中山、惠州、肇庆内地九市和香港、澳门两个特别行政区组成的区域, 地处南亚热带季风气候区, 光、热、水资源丰富, 但台风、暴雨、雷电、大风、高温等灾害性天气多发, 独特气候优势与气候风险并存, 尤其是气候变化背景下极端降水强度进一步增强, 暴雨洪涝灾害风险不断增加, 导致大湾区将可能面临巨大损失(谢伏瞻和刘雅鸣, 2019; 贾朋群等, 2020)。以往研究大多分析了大湾区降水和温度等气候要素不同时间尺度的变化特征(白盛楠, 2019; 伍红雨等, 2019; 李佰和和龚建周, 2021; 李家叶等, 2021; 付铁文等, 2022; 郭珊等, 2022)。也有部分研究分析了大湾区城市暴雨洪涝灾害成因和防治(陈浩等, 2021; 胡鑫伟等, 2021)。至今, 利用站点资料全面细致地分析最近几十年大湾区暴雨气候特征及其变化的研究仍存在不足, 大湾区在汛期又频遭暴雨侵袭并由此导致内涝、洪灾、山体滑坡等衍生灾害, 十分有必要对大湾区暴雨变化规律进行研究。因此, 本文以1961—2021年大湾区31个国家气象观测站(以下简称站)逐日降水数据为基础, 结合大湾区气候特点, 统计分析年及前、后汛期暴雨量、暴雨日数、暴雨强度和暴雨贡献率等暴雨要素变化特征, 以期研究大湾区暴雨变化规律、开展气候变化归因和评估、制定适应气候变化措施等提供资料基础, 并为地方防灾减灾救灾、科学利用水资源等提供科学参考。

1 资料和方法

1.1 资料来源

考虑降水资料完整性和站点分布均匀性,采用 1961—2021 年大湾区的珠三角 9 市 29 站,香港天文台本站(简称香港)和澳门地球物理暨气象局主站(简称澳门)共计 31 个站降水资料。珠三角 29 个站降水资料来源于广东省气象局,港澳资料分别来源于香港天文台(<https://www.hko.gov.hk/sc/cis/climat.htm>)和澳门地球物理暨气象局(https://www.smg.gov.mo/zh/subpage/345/embed-path/p/query-weather-c_panel)。

1.2 数据处理

本文资料来源 31 个站中有 7 个站存在降水缺失数据,分别是珠海、恩平和封开缺 1961 年,龙

门缺 1961—1962 年,斗门和惠东缺 1961—1966 年,东莞缺 1967—1969 年。考虑资料时间长度、站点距离和气候特征相似性等原则,选取参证站对上述站点缺测资料进行推算(伍红雨等, 2019),年尺度缺测资料推算的相关分析结果见表 1。

以推算 1961 年珠海站年降水量资料为例进行数据处理说明。首先将珠海站历年降水量与大湾区其余 30 个站历年降水量进行相关分析,得到两者相关系数最大的站点为澳门站(相关系数 0.884,通过 0.05 显著性水平检验),然后建立珠海站和澳门站降水序列的线性回归方程($R_{\text{珠海}} = 474.908 + 0.780R_{\text{澳门}}$),再将澳门站 1961 年降水量代入方程即可推算得到珠海站 1961 年降水量。

表 1 参证站选取及相关系数¹⁾

Table 1 Selection and correlation coefficients of reference stations

项目		东莞	斗门	恩平	封开	惠东	龙门	珠海
年降水量	参证站	增城	珠海	新会	怀集	惠阳	从化	澳门
	相关系数	0.82	0.83	0.81	0.75	0.81	0.78	0.88
年暴雨日数	参证站	博罗	珠海	斗门	恩平	惠阳	从化	澳门
	相关系数	0.55	0.74	0.60	0.46	0.63	0.54	0.70
年大暴雨日数	参证站	博罗	珠海	台山	龙门	上川岛	增城	恩平
	相关系数	0.60	0.54	0.59	0.41	0.27	0.32	0.56
年暴雨量	参证站	南海	珠海	台山	澳门	惠阳	从化	澳门
	相关系数	0.63	0.69	0.67	0.43	0.60	0.56	0.81

1) 相关系数均通过 0.05 显著性水平检验。

1.3 气候变化趋势和突变分析方法

采用线性趋势分析、多项式拟合、计算趋势系数等方法(施能等, 1995; 魏凤英, 1999)分析大湾区暴雨要素的特征及变化趋势,采用 Mann-Kendall 方法(符淙斌和王强, 1992)检验突变特征,利用 t 检验(魏凤英, 1999)进行显著性检验。多项式拟合方法利用多项式找到 2 个变量之间的函数关系式,可对研究年限内已有的暴雨数据进行拟合后表征暴雨要素的年代际波动情况,在已有的相关研究中多有应用(李晓娟等, 2012; 伍红雨等, 2011 和 2017)。趋势系数(r)是研究年限的气候要素序列与自然数序列的相关系数,其正、负分别表征气候要素在研究年限内有线性增加、降低趋势(施能等, 1995),其计算公式为

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(i - \bar{i})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (i - \bar{i})^2}}$$

式中 x_i 为第 i 的气候要素值; \bar{x} 为研究年限内气候要素平均值; n 为年数; $\bar{i} = (n + 1)/2$ 。

1.4 相关定义

中国气象局规定,日降水量(20:00~20:00) ≥ 50 mm 称为暴雨,可进一步划分为暴雨(50~99.9 mm)、大暴雨(100~249.9 mm)和特大暴雨(≥ 250 mm)等 3 个等级。本文所指暴雨为 24 h 降水量 ≥ 50 mm 的强降雨,日降水量 ≥ 50 mm 记为一个暴雨日。暴雨强度是某时段内的暴雨量与同期暴雨日数的比值,代表某时段内暴雨的强弱,比值越大说明暴雨强度越大。暴雨贡献率是某时段内暴雨量与同期降水量的比值,比值越大说明暴雨贡献越多。

2 结果与分析

2.1 大湾区暴雨量的变化特征

2.1.1 年际、年代际变化及其突变分析 近61 a大湾区31个站平均的暴雨量标准化距平及其变化(图1a)显示, 期间年平均暴雨量为698.3 mm, 其中2008年最多, 1963年最少; 并以6.69 mm/(10a)的速率增加(趋势系数为0.07), 但增加趋势不显著, 没有通过0.05显著性水平检验。从多项式曲线可见, 平均年暴雨量存在明显的年代际变化, 1960年代中期至1980年代初、2000—2016年暴雨量偏多, 其余时段偏少。

根据平均的前、后汛期暴雨量的标准化距平及其变化(图1(b-c))可见, 前、后汛期暴雨量分别以4.07和2.01 mm/(10a)的速率呈增加趋势(趋势系数分别为0.05和0.03), 均未通过0.05显著性水平检验, 增加趋势不显著。暴雨量变化幅度前汛期较后汛期大, 其中前汛期暴雨量2008年最多, 1963年最少; 后汛期暴雨量最多和最少分别出现在2001年和1998年。平均前汛期和后汛期暴雨量分别为334.2和279.3 mm, 对全年暴雨量的贡献率分别为47.9%和40.0%, 前汛期暴雨量较后汛期多了54.9 mm, 这与董国业等(2010)得出的广东省1952—2002年间平均前汛期暴雨量略大于后汛期暴雨量的结论相符。从多项式曲线可见, 前、后汛期暴雨量都有明显的年代际变化, 其中前汛期暴雨量在1960年代中期至1980年代初、1990年代末至2010年偏多, 其余时段偏少; 而后汛期暴雨量主要在1990年代和2000年代偏多, 其余大部时段偏少, 尤其是2014年以来后汛期暴雨量减少明显。由此可见, 年和前汛期暴雨量的极端值出现年份、年代际变化分界点较为一致, 两者均在1960年代中期和2000年前后由负距平变为正距平, 两者的相关系数(0.73)高于年和后汛期暴雨量的相关系数(0.55)也印证了年和前汛期暴雨量的变化更相似; 前汛期贡献了将近一半的全年暴雨量, 与彭丽英等(2006)发现的华南近50%的暴雨集中在前汛期的研究结论一致。

因此, 近61 a大湾区年及前、后汛期暴雨量均表现为不明显的增加趋势, 前汛期对年暴雨量贡献度大于后汛期。采用Mann-Kendall方法分析对近61 a大湾区年、前汛期和后汛期暴雨量序列进行突变分析, 均没有发生突变(图略)。

2.1.2 趋势系数分布 考虑到降水地域分布差异, 对大湾区31个站近61 a的年、前汛期和后汛

期暴雨量变化进行趋势系数分析。根据大湾区近61 a暴雨量趋势系数分布(图2(a)), 有21个站为正趋势(占比67.7%), 其中广州最大(趋势系数0.27), 通过0.05显著性水平检验, 增加趋势显著; 有10个站为负趋势(占比32.3%), 其中怀集最小(趋势系数为-0.28), 通过0.05显著性水平检验, 减少趋势明显; 除广州和怀集外的其余29个站趋势系数均未通过0.05显著性水平检验。说明大湾区将近7成区域的暴雨量表现为增加趋势, 约3成区域为减少趋势, 但变化趋势大都不明显。

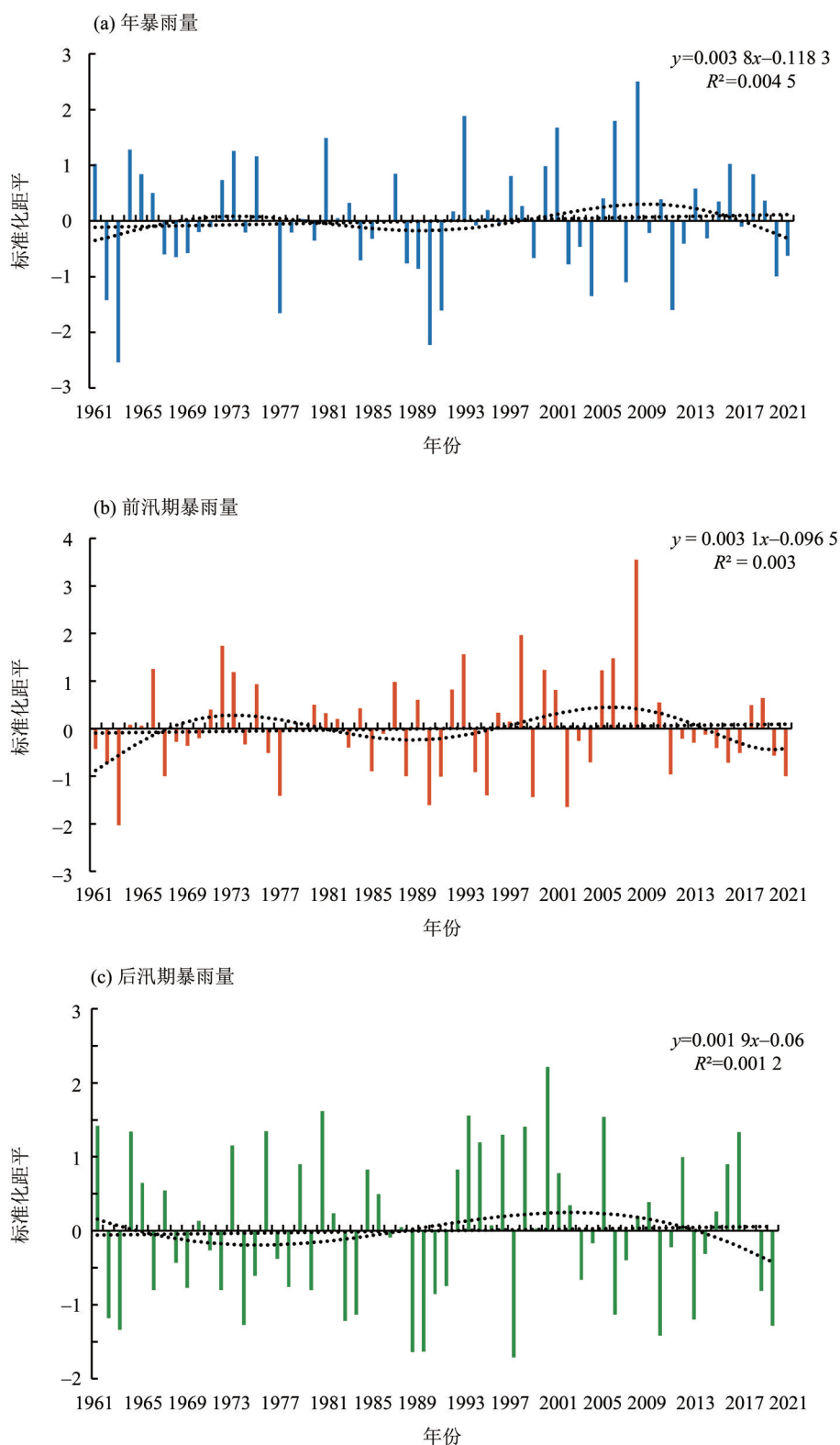
根据前汛期暴雨量趋势系数分布(图2(b)), 有17个站前汛期暴雨量表现为正趋势(占比54.8%), 前2位分别是广州(0.33)和惠东(0.30), 均通过0.05显著性水平检验, 增加趋势显著; 有14个站表现为负趋势(占比45.2%), 后两位分别是怀集(-0.37)和封开(-0.27), 分别通过0.01和0.05显著性水平检验, 减少趋势明显; 其余27个站变化趋势系数介于-0.16~0.23, 均未通过0.05显著性水平检验, 说明大湾区除广州、惠东、怀集和封开4个站外的其余地区前汛期暴雨量变化趋势不明显。

后汛期暴雨量趋势系数分布(图2(c))表明, 分别有13和18个站表现为正趋势(占比41.9%)和负趋势(占比58.1%), 斗门和德庆分别出现最大正趋势(0.37)和负趋势(-0.29), 分别通过0.01和0.05显著性水平检验, 变化趋势显著; 其余站变化趋势系数介于-0.21~0.20, 均未通过0.05显著性水平检验, 说明除斗门和德庆2个站外的其余地区后汛期暴雨量变化趋势不显著。

可见, 大部地区年暴雨量呈增加趋势, 前汛期暴雨量有所增加的地区略多于减少趋势区域, 后汛期有将近6成区域表现为减少趋势、约4成成为增加趋势, 广州、怀集、惠东、封开、斗门和德庆等6个站暴雨量变化趋势显著, 其中怀集前汛期暴雨量和斗门后汛期暴雨量变化趋势尤为明显, 通过0.01显著性水平检验; 广州出现大湾区年和前汛期暴雨量最大正趋势系数, 原因可能是广州的快速城市化发展破坏了原有下垫面和生态系统, 由此产生“热岛效应”进而引发“雨岛效应”, 导致暴雨增多; 加之不透水层面积快速扩张造成对流活动强度和频次加剧, 暴雨愈演愈烈(谭畅等, 2018; 李超超等, 2019; 黄国如等, 2021)。

2.2 大湾区暴雨日数的变化特征

根据1961—2021年大湾区31个站的平均暴雨



直虚线和曲虚线分别为线性趋势和多项式拟合，下同。

图1 1961—2021年大湾区年(a)、前汛期(b)和后汛期(c)暴雨量的标准化距平及其变化趋势拟合
Fig. 1 The standard anomaly value and change trend fitting of rainstorm in the Greater Bay Area (GBA) from 1961 to 2021 for (a) annual, (b) the first flood season, and (c) the second flood season

日数逐年变化(图 3(a)), 近 61 a 大湾区平均年暴雨日数为 8.3 d, 2008 年最多为 12.1 d, 1963 年最少为 3.4 d, 日数均以 0.10 d/(10a) 的速率增加(趋势系数为 0.10), 没有通过 0.05 显著性水平检验, 增加趋势不明显。从多项式曲线看, 大湾区平均年暴雨日数年代际波动明显, 1960 年代早期、1980 年代、2017 年以来处于少暴雨时段, 1960 年代中期至 1970 年代末期、1990 年代、2000—2016 年处于多暴雨时段, 与大湾区平均年降水量的年代际变化较为相似(伍红雨等, 2019; 付铁文等, 2022)。近 61 a 大湾区平均大暴雨日数年际变化(图 3(b))与暴雨日数较为相似, 平均年大暴雨日数为 1.8 d, 最大值仍然出现在 2008 年(3.5 d), 最小值则出现在 1963 年和 1990 年(均为 0.5 d), 近 61 a 以 0.01 d/(10a) 的速率微弱增加但增加趋势不显著(趋势系数为 0.03), 2000 年以来尤其是 2000 年代普遍处于多大暴雨阶段, 这与伍红雨等(2019)认为大湾区极端降水量在 2000 年以来更加突出的结论相符。

从大湾区 31 个站平均的前汛期(图 3(c))和后汛期暴雨日数(3(d))的逐年变化可见, 大湾区前、后汛期暴雨日数均呈增加趋势, 前、后汛期平均暴雨日数合计为 7.2 d, 占年平均暴雨日数的 86.7%, 即大湾区近 87% 的暴雨集中发生在汛期, 其中前汛期暴雨日数多于后汛期: 前汛期平均暴

雨日数为 3.9 d, 占年平均暴雨日数的 47.0%, 即大湾区将近一半的暴雨发生在前汛期, 2008 年最多为 7.7 d, 1963 年最少仅 1 d, 近 61 a 以 0.02 d/(10a) 的速率增加(趋势系数为 0.03); 后汛期平均暴雨日数为 3.3 d, 占年平均暴雨日数的 39.8%, 2001 年最多为 6.2 d, 1989 年和 1990 年最少为 1.4 d, 近 61 a 以 0.06 d/(10a) 的速率增加(趋势系数为 0.09), 较前汛期增幅大, 但前、后汛期暴雨日数增加趋势均不显著, 未通过 0.05 显著性水平检验。根据多项式曲线拟合结果, 大湾区前汛期暴雨日数年代际变化非常明显, 1960 年代中期至 1970 年代末、1990 年代中期至 2000 年代偏多, 其余时段偏少; 后汛期暴雨日数在 1990 年代至 2000 年代偏多, 其余时段偏少; 前、后汛期暴雨日数在 1990 年代中期至 2000 年代偏多、2013 年以来偏少, 但前汛期年际变化速率大于后汛期。

1961—2021 年, 广东省年、前汛期和后汛期平均暴雨日数分别为 7.3、3.5 和 2.8 d, 年和后汛期分别以 0.09 和 0.01 d/(10a) 的速率增加, 前汛期以 0.01 d/(10a) 的速率减少(图略)。大湾区年、前汛期和后汛期平均暴雨日数分别较广东省同期多 1.0、0.4 和 0.5 d, 变化速率也较广东省同期更大, 且大湾区前汛期暴雨日数为增加趋势但广东省同期为减少趋势, 说明大湾区暴雨日数特征与广东省存在数量、变化速率和变化趋势的差别。

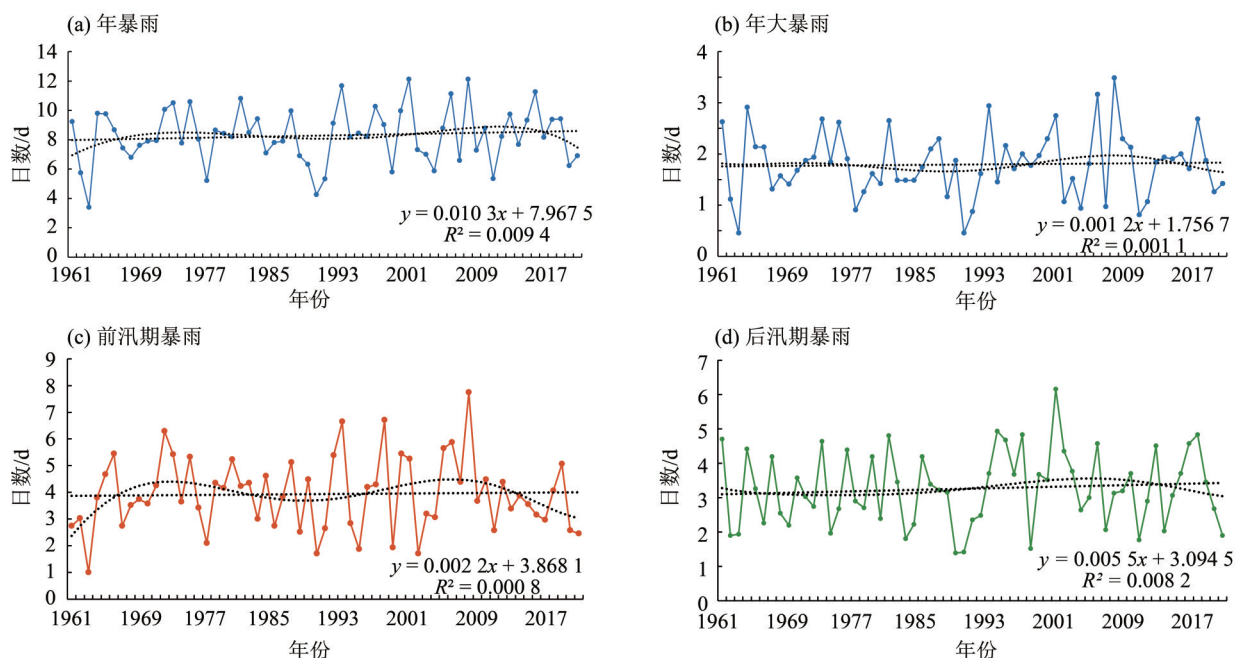


图 3 1961—2021 年大湾区年(a、b)、前汛期(c)和后汛期(d)暴雨日数随时间的变化

Fig. 3 Time series of torrential rain days in the GBA from 1961 to 2021

for (a) annual, (b) annual extremely heavy rainstorm, (c) the first flood season, and (d) the second flood season

采用Mann-Kendall方法分析大湾区在近61 a的年、前汛期和后汛期平均暴雨日数突变特征,发现三者的Mann-Kendall统计量曲线均出现多次交点,没有发生突变(图略)。

2.3 大湾区暴雨强度的变化特征

根据1961—2021年大湾区31个站平均的暴雨强度距平年际变化(图4(a)),大湾区年平均暴雨强度为82.2 mm/d,最大值出现在1999年,距平为

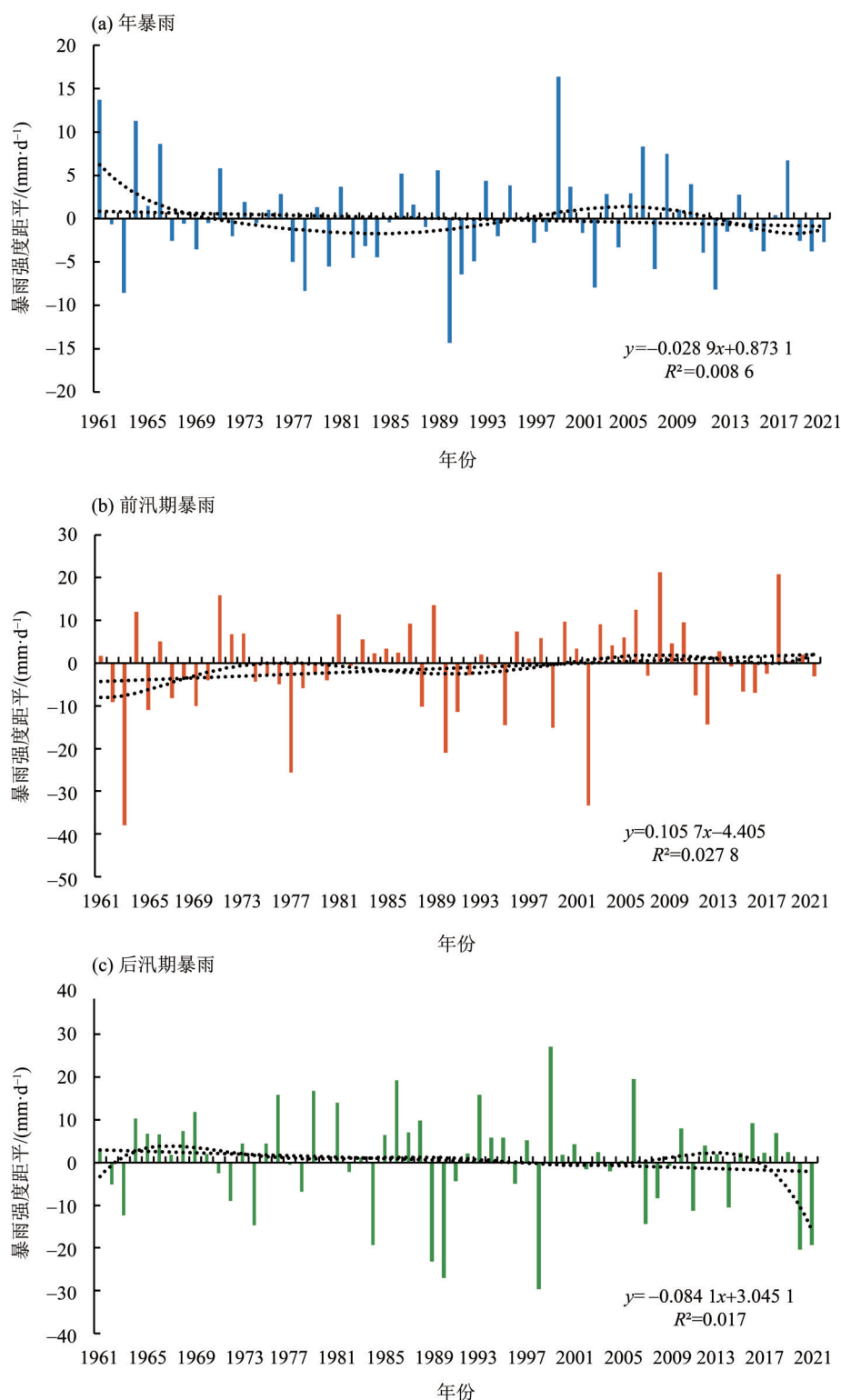


图4 1961—2021年大湾区年(a)、前汛期(b)和后汛期(c)暴雨强度距平随时间的变化

Fig. 4 Time series of rainstorm intensity anomaly in the GBA from 1961 to 2021 for (a) annual, (b) the first flood season, and (c) the second flood season

16.4 mm/d; 最小值出现在 1990 年, 距平为 -14.3 mm/d。61 a 来, 大湾区平均暴雨强度距平以 0.29 mm/(10a·d) 的速率减少(趋势系数为 -0.09), 未通过 0.05 显著性水平检验, 减少趋势不显著。根据多项式拟合曲线, 大湾区在 1960 年代、1990 年代末期至 2000 年代处于暴雨强度偏强时段, 1970 年代至 1990 年代中期、2010 年代暴雨强度偏弱。

根据近 61 a 大湾区平均前汛期暴雨强度距平的逐年变化(图 4(b)), 大湾区近 61 a 平均前汛期暴雨强度为 78.4 mm/d, 最大值出现在 2008 年, 距平达 21.2 mm/d; 最小值出现在 1963 年, 距平达 -37.9 mm/d。61 a 来, 大湾区前汛期暴雨强度距平以 1.06 mm/(10a·d) 的速率呈增加趋势(趋势系数为 0.17), 未通过 0.05 显著性水平检验, 增加趋势不明显。从多项式曲线可见, 大湾区前汛期暴雨强度年代际波动大, 尤其是进入 21 世纪以来的强度明显偏强, 高于多年平均值。

根据近 61 a 大湾区平均后汛期暴雨强度距平的时间演变(图 4(c)), 大湾区近 61 a 平均后汛期暴雨强度为 77.4 mm/d, 最大值出现在 1999 年, 距平达 27.2 mm/d; 最小值出现在 1998 年, 距平达 -29.7 mm/d。近 61 a, 大湾区汛期暴雨强度距平以 0.84 mm/(10a·d) 的速率呈减少趋势(趋势系数为 -0.13), 未通过 0.05 显著性水平检验, 减少趋势不明显。从多项式曲线可见, 大湾区后汛期暴雨强度在 2017 年之前大多属于偏强时段, 但 2017 年之后暴雨强度明显减弱, 尤其是近两年暴雨强度距平分别达 -20.3 和 -19.4 mm/d, 排名历史第 4 和第 5 少(前 3 少分别出现在 1998、1990 和 1989 年)。

可见, 大湾区暴雨强度在年和后汛期呈下降趋势、前汛期呈升高趋势, 但变化趋势均不明显。暴雨强度是暴雨量与暴雨日数之比, 而大湾区年、前汛期和后汛期的平均暴雨日数和暴雨量均呈增加趋势, 说明大湾区年和后汛期暴雨量增幅低于暴雨日数。对大湾区平均年、前汛期和后汛期暴雨强度距平进行 Mann-Kendall 突变检验, 结果表明在近 61 a 未发生突变(图略)。

2.4 大湾区平均暴雨贡献率的变化特征

根据近 61 a 大湾区 31 个站平均的年暴雨贡献率时间演变(图 5(a)), 大湾区 1961—2021 年平均暴雨贡献率为 35.3%, 即超过 3 成的年降水量是由暴雨贡献的; 最高值和次高值分别出现在 1964 年和 2008 年, 暴雨贡献率分别为 46.2% 和 45.3%; 最小值和次低值分别出现在 1990 年和 1963 年, 暴雨

贡献率分别为 19.0% 和 21.7%。近 61 a 来, 大湾区年暴雨贡献率以 0.02 %/(10a) 的速率增加(趋势系数为 0.01), 未通过 0.05 显著性水平检验, 增加趋势不明显。从多项式曲线来看, 大湾区在 1960 年代中期 1970 年代中期、2000 年代处于暴雨贡献率高值时段, 高于多年平均值; 其余时段偏低。

根据近 61 a 大湾区平均的前汛期暴雨贡献率的年际变化(图 6(b)), 大湾区前汛期暴雨贡献率多年平均值为 37.2%, 略高于年暴雨贡献率; 最大暴雨贡献率高达 55.9%, 出现在 2008 年; 最小暴雨贡献率为 19.0%, 出现在 1963 年。近 61 a 来, 大湾区前汛期暴雨贡献率以 0.22 %/(10a) 的速率呈增加趋势(趋势系数为 0.05), 未通过 0.05 显著性水平检验, 增加趋势不明显。从多项式曲线可见, 前汛期暴雨贡献率年代际变化明显, 1960 年代中期至 1970 年代中期、1990 年代中期至 2000 年代偏大; 其余时段偏低, 其中 2011 年以来明显降低。

根据近 61 a 大湾区平均的后汛期暴雨贡献率的年际变化(图 6(c)), 大湾区后汛期暴雨贡献率多年平均值为 35.0%, 接近年暴雨贡献率; 最大值高达 51.0%(2006 年), 最小值仅为 18.1%(1998 年)。61 a 来, 大湾区后汛期暴雨贡献率以 0.09 %/(10a) 的速率减少(趋势系数为 -0.02), 未通过 0.05 显著性水平检验, 减少趋势不明显。从多项式曲线看, 后汛期暴雨贡献率在 1960 年代、21 世纪以来偏大, 但 2019 年以来下降明显。

可见, 大湾区年、前汛期和后汛期暴雨贡献率均高于 3 成, 与华南年降水和前汛期降水有 3 成是暴雨产生的结论(伍红雨等, 2011)相符, 但与华南后汛期降水中近 2 成是暴雨产生的结论有差别。采用 Mann-Kendall 方法进行突变分析, 发现大湾区平均年、前汛期和后汛期暴雨贡献率在近 61 a 均没有发生突变(图略)。

2.5 香港、澳门和广州的暴雨特征对比

表 2 为 1961—2021 年香港、澳门和广州的暴雨要素特征统计和比较, 可见近 61 a 来, 香港年及前、后汛期暴雨量和暴雨日数以及前汛期暴雨强度均呈增加趋势, 年及前、后汛期暴雨贡献率及年、后汛期暴雨强度呈下降趋势; 澳门除年和前汛期暴雨强度呈增加趋势外, 其余暴雨要素均呈减少趋势; 广州除后汛期暴雨强度和暴雨贡献率呈下降趋势外, 其余暴雨要素均为增加趋势。香港和广州年及前、后汛期的暴雨量和暴雨日数均呈增加趋势, 但澳门相反, 可能是因为澳门在 19

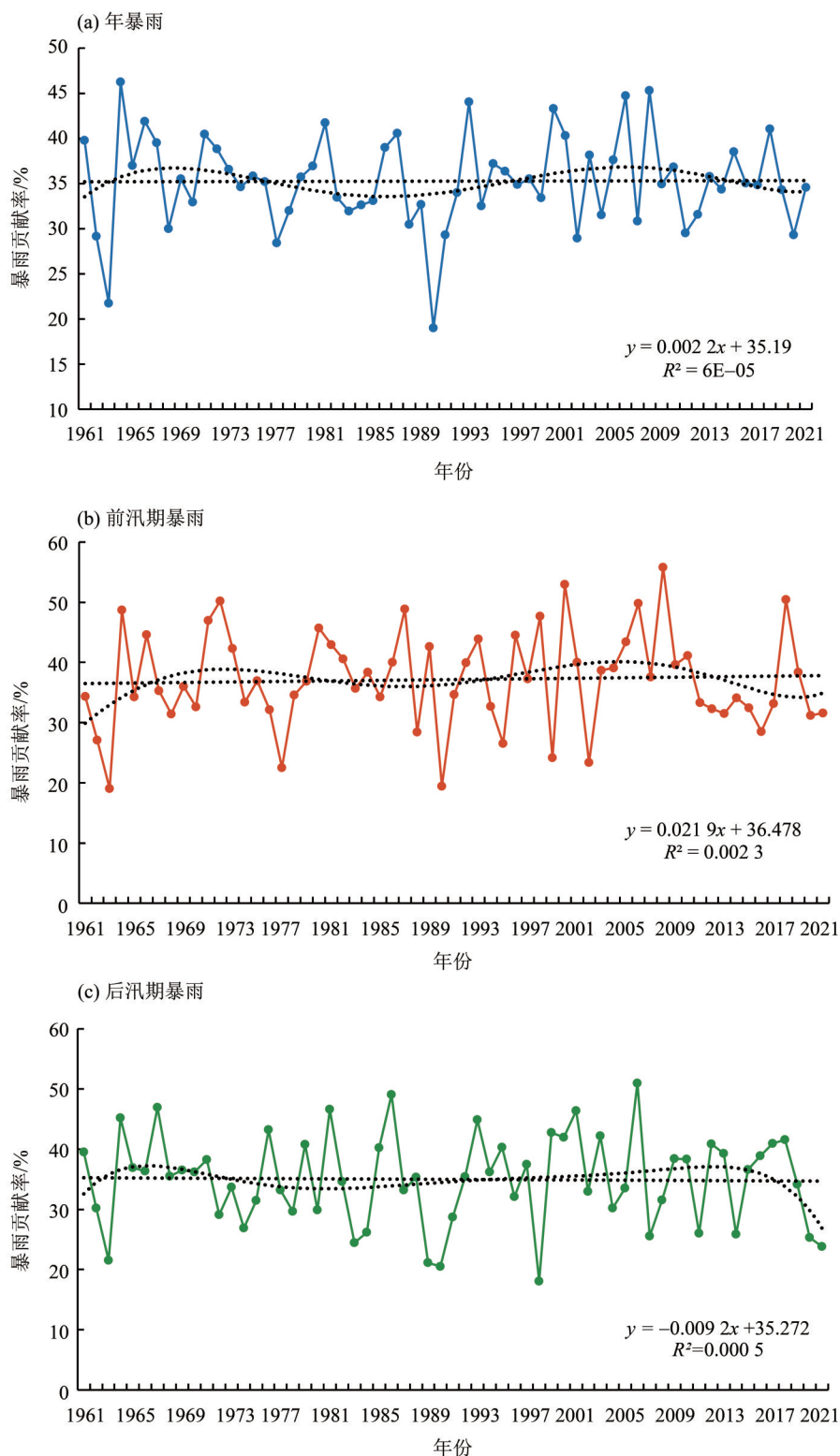


图5 1961—2021年大湾区年(a)、前汛期(b)和后汛期(c)暴雨贡献率随时间的变化
Fig. 5 Time series of rainstorm contribution to the total rainfall in the GBA from 1961 to 2021 for (a) annual, (b) the first flood season, and (c) the second flood season

世纪末就基本形成了近代都市格局, 城市化进程较为缓慢(沈敏, 2013), 并且澳门站所处地理环境特殊, 其观测记录受城市化影响程度较少(冯瑞

权等, 2009)。近61 a平均的年及前、后汛期暴雨量、暴雨日数、暴雨强度和暴雨贡献率, 香港均为最大, 其次是澳门, 广州最小。但香港、澳门

表2 1961—2021年香港、澳门和广州的暴雨特征比较

Table 2 Comparison of characteristics of rainstorm in Hong Kong, Macau and Guangzhou from 1961 to 2021

暴雨要素	香港			澳门			广州			
	年	前汛期	后汛期	年	前汛期	后汛期	年	前汛期	后汛期	
暴雨量	平均值/mm	1 211.9	499.0	585.2	945.7	458.1	385.6	601.5	305.7	234.2
	变化速率/(mm·(10a) ⁻¹)	15.36	5.51	6.50	-38.23	-18.08	-14.96	41.83	32.56	1.72
暴雨日数	平均值/d	12.6	5.1	6.2	10.4	4.9	4.3	7.6	3.9	2.8
	变化速率/(d·(10a) ⁻¹)	0.25	0.11	0.12	-0.50	-0.23	-0.14	0.57	0.38	0.12
暴雨强度	平均值/(mm·d ⁻¹)	95.7	97.8	94.4	91.1	93.5	89.7	78.4	78.4	83.6
	变化速率/(mm·(10a·d) ⁻¹)	-0.31	0.50	-0.78	0.77	1.28	-1.57	0.06	0.40	-1.43
暴雨贡献率	平均值/%	51.0	56.0	54.0	45.3	53.8	47.2	32.0	38.0	35.1
	变化速率/(%·(10a) ⁻¹)	-0.27	-0.21	-0.49	-1.72	-0.47	-2.40	0.85	1.47	-0.15

和广州在不同时段的暴雨要素变化速率方面各有大小：年和前汛期暴雨量、暴雨日数以及前汛期暴雨贡献率中，广州变化速率均为最大，澳门次之，香港最小；年和前汛期暴雨强度、后汛期暴雨量和暴雨贡献率方面，澳门最大，香港次之，广州最小；后汛期暴雨强度和年暴雨贡献率方面，则是澳门最大，广州次之，香港最小。

3 结 论

基于1961—2021年大湾区31个站逐日降水资料，结合广东前汛期和后汛期降水对全年降水贡献大的特点，采用线性趋势分析、计算趋势系数、Mann-Kendall突变检验等方法分析了近61 a大湾区在年及前、后汛期的暴雨量、暴雨日数、暴雨强度和暴雨贡献率等要素的变化特征，得到如下结论：

1) 1961—2021年，大湾区31个站空间平均的年及前、后汛期暴雨量和暴雨日数均表现为增加趋势，暴雨贡献率在年和前汛期均呈增加趋势但在后汛期呈减少趋势，暴雨强度仅在前汛期呈增加趋势，变化趋势均不显著，但广州、怀集、肇庆、封开、斗门、惠东等6个站的暴雨量变化趋势系数通过0.05显著性水平检验，变化趋势显著。对大湾区平均的年及前、后汛期各暴雨要素进行Mann-Kendall突变分析，在近61 a都没有发生突变。上述结论与华南平均年及前、后汛期暴雨日数和暴雨量以及广东平均年暴雨日数略有增多但不显著、华南平均年及前、后汛期暴雨日数没有发生年代际突变的研究成果一致(伍红雨等，2011和2017；翟志宏和何健，2011；陈少勇等，2015)，与谢龙生等(2011)认为广东大部地区前汛

期暴雨日数线性减少、后汛期线性增加的研究结果并不完全一致，原因一是采用站点和资料年限有别，二是大湾区与广东省的气候特点存在差别，同期暴雨日数的分析确实印证了两者暴雨特点的不同。

2) 大湾区近61 a平均暴雨日数为8.3 d，其中前、后汛期分别为3.9和3.3 d，占据全年暴雨日数的86.7%，其中前汛期贡献47.0%的年暴雨日数，与张焱(2007)指出华南前汛期暴雨日数占全年暴雨日数的近一半一致。大湾区近61 a平均的暴雨量为698.3 mm，其中前、后汛期分别为334.2和279.3 mm，贡献了全年暴雨量的87.9%。大湾区近61 a平均年及前、后汛期的暴雨强度分别为82.2、78.4和77.4 mm/d，暴雨贡献率分别为35.3%、37.2%和35.0%，说明大湾区全年、前汛期和后汛期降水量均有超过3成由暴雨产生。

3) 近61 a，大湾区平均年及前、后汛期各暴雨要素年代际变化明显。在年尺度上，1960年代中期至1970年代末期、2000—2016年处于多暴雨时段，期间暴雨日数和暴雨量普遍偏多；1960年代、1990年代末期至2000年代暴雨强度偏强；1960年代中期至1970年代中期、2000年代暴雨贡献率高于多年平均值。前汛期时段，1960年代中期至1970年代末、1990年代中期至2000年代是多暴雨阶段。后汛期时段，1990年代至2000年代是多暴雨阶段。由此可见，大湾区在年和前汛期的多暴雨阶段较为一致，同时印证了大湾区前汛期对全年暴雨的贡献多于后汛期，与广东前汛期极端强降水出现频率高于后汛期的研究结论相符(伍红雨等，2020)。此外，2017年以来，大湾区不同时段、不同暴雨要素大都呈现暴雨偏少、偏弱趋

势,与广东近几年干旱频发相对应,如2019年9—12月降水持续偏少导致广东气象干旱发展、2020年10月至2021年5月广东发生秋冬春连旱(伍红雨等,2022)。

4) 香港、澳门和广州3个站的暴雨要素特征对比结果显示,香港近61 a平均的年及前、后汛期暴雨量、暴雨日数、暴雨强度和暴雨贡献率均为最大,澳门次之,广州最小。广州年和前汛期暴雨量、暴雨日数以及前汛期暴雨贡献率的变化速率均为三者最大,澳门年、前汛期和后汛期暴雨强度、后汛期暴雨量、年和后汛期暴雨贡献率的变化速率均为最大。

5) 大湾区前汛期降水主要与西风带南支气流、南海高压脊北侧偏西气流和南海夏季风有关,以锋面降水和夏季风降水为主(郑彬等,2006)。近61 a大湾区平均年和前汛期暴雨日数和暴雨量、前汛期暴雨强度的最大值均出现在2008年,与2008年广东出现历史最强“龙舟水”相对应。后汛期降水主要由热带系统导致,近61 a大湾区平均后汛

期暴雨日数和暴雨量极端最大值均出现在2001年,与当年广东后汛期频繁受热带气旋登陆和影响有关:7月台风“榴莲”、“尤特”和“玉兔”先后登陆广东造成广东出现暴雨到大暴雨局部特大暴雨,8月底到9月上旬台风“菲特”给广东带来持续性强降水,9月台风“百合”登陆粤东造成广东东南部和中部出现较大范围降水。前、后汛期暴雨量年代际波型变化有别,其中前汛期暴雨在1970年代偏多与大气环流和水汽输送的年代际突变及前期中西太平洋海温由偏暖转为偏冷有关,在1990年代末至2010年偏多可能与南太平洋关键区海温出现年代际增暖有关,1980年代和近10年暴雨偏少可能与南海及附近地区对流活动和冬季NAO(North Atlantic Oscillation)的年代际变化及副高东退有关(Li et al., 2009; 顾薇和李崇银, 2010; 李宏毅等, 2012; 李丽平等, 2018); 后汛期暴雨在1990年代之前偏少、之后偏多可能与亚洲热带季风、西太副高以及登陆或影响大湾区的热带气旋频数的年代际变化有关(赵恩榕等, 2018)。

参考文献:

- 白盛楠,2019.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).
- 陈浩,徐宗学,向代峰,等,2021.以深圳河流域为例分析粤港澳大湾区城市洪涝及其成因[J].中国防汛抗旱,31(11):14-19.
- 陈少勇,张晓芬,郭俊瑞,等,2015.中国南方暴雨日数的气候变化特征[J].气候变化研究快报,(4):228-236.
- 陈思,高建芸,黄丽娜,等,2017.华南前汛期持续性暴雨年代际变化特征及成因[J].应用气象学报,28(1):86-97.
- 陈星任,杨岳,何佳男,等,2020.近60年中国持续极端降水时空变化特征及其环流因素分析[J].长江流域资源与环境,29(9):2068-2081.
- 董国业,伍淑瑜,李耀安,2010.广东省暴雨的气候特征分析[J].安徽农业科学,38(25):13876-13878.
- 冯瑞权,吴池胜,王安宇,等,2009.1901—2007年澳门地面气温变化的分析[J].气候变化研究进展,5(1):12-17.
- 符淙斌,王强,1992.气候突变的定义和检测方法[J].大气科学,16(4):482-293.
- 付铁文,徐宗学,陈浩,等,2022.粤港澳大湾区1961—2014年降水时空演变特征分析[J].水资源保护,38(4):56-65+74.
- 顾薇,李崇银,2010. IPCC AR4中海气耦合模式对中国东部夏季降水及PDO、NAO年代际变化的模拟能力分析[J].大气科学学报,33(4):401-411.
- 郭珊,张大伟,王亚迪,2022.粤港澳大湾区极端气候时空演变及其驱动因子研究[J].人民珠江,43(7):36-51.
- 贺冰蕊,翟盘茂,2018.中国1961—2016年夏季持续和非持续性极端降水的变化特征[J].气候变化研究进展,14(5):437-444.
- 胡鑫伟,陈文龙,宋利祥,等,2021.粤港澳大湾区城市暴雨洪涝防治能力现状与韧性防治对策[J].中国防汛抗旱,31(11):20-25.
- 黄国如,陈易偲,姚芝军,2021.高度城镇化背景下珠三角地区极端降雨时空演变特征[J].水科学进展,32(2):161-170.
- 黄茂栋,廖仕湘,杨立洪,2008.广东汛期降水的时空分布特征[J].广东气象,30(6):33-36.
- 贾朋群,曾智琳,周莘睿,2020.粤港澳大湾区:或将成为极端天气气候研究关注的“特区”[J].气象科技进展,10(6):149-151.
- 蒋鹏,王大刚,陈晓宏,2015.广东省近50年极端降水事件的时空特征及成因分析[J].水文,35(2):77-84+7.
- 李佰和,龚建周,2021.近60年来粤港澳大湾区气温变化规律[J].广州大学学报(自然科学版),20(1):78-86.
- 李超超,程晓陶,申若竹,等,2019.城市化背景下洪涝灾害新特点及其形成机理[J].灾害学,34(2):57-62.
- 李红梅,周天军,宇如聪,2008.近四十年我国东部盛夏日降水特性变化分析[J].大气科学,32(2):358-370.

- 李宏毅,林朝晖,陈红,2012.我国华南4、5月份降水年代际变化的特征及其与中西太平洋海温的可能关系[J].气候与环境研究,17(4):481-494.
- 李家叶,陈骥,汤新政,等,2021.粤港澳大湾区气候变化及极端天气分析[J].中国防汛抗旱,31(11):1-6+13.
- 李丽平,周林,俞子闲,2018.华南前汛期降水的年代际异常特征及其成因[J].大气科学学报,41(2):186-197.
- 李晓娟,简茂球,方一川,等,2012.广东省前汛期大到暴雨频数的时空变化特征[J].气象,38(11):1339-1347.
- 彭丽英,王谦谦,马慧,2006.华南前汛期暴雨气候特征的研究[J].南京气象学院学报,29(2):249-253.
- 沈敏,2013.澳门内港的都市化进程[J].艺术科技,26(6):217.
- 施能,陈家其,屠其璞,1995.中国近100年来4个年代际的气候变化特征[J].气象学报,53(4):431-439.
- 谭畅,孔锋,郭君,等,2018.1961—2014年中国不同城市化地区暴雨时空格局变化—以京津冀、长三角和珠三角地区为例[J].灾害学,33(3):132-140.
- 王玉洁,周波涛,任王玉,等,2016.全球气候变化对我国气候安全影响的思考[J].应用气象学报,27(6):750-758.
- 魏凤英,1999.现代气候统计诊断与预测技术[M].北京:气象出版社:18-31.
- 吴丽姬,温之平,贺海晏,等,2007.华南前汛期区域持续性暴雨的分布特征及分型[J].中山大学学报(自然科学版),46(6):108-113.
- 伍红雨,杜尧东,秦鹏,2011.华南暴雨的气候特征及变化[J].气象,37(10):1262-1269.
- 伍红雨,李春梅,刘蔚琴,2017.1961—2014年广东小时强降水的变化特征[J].气象,43(3):305-314.
- 伍红雨,翟志宏,张羽,2019.1961—2018年粤港澳大湾区气候变化分析[J].暴雨灾害,38(4):303-310.
- 伍红雨,李芷卉,李文媛,等,2020.基于区域自动站的广东极端强降水特征分析[J].气象,46(6):801-812.
- 伍红雨,吴遥,郭尧,2022.2020—2021年广东秋冬春干旱的成因分析[J].气象,48(6):783-793.
- 肖伟军,陈炳洪,刘云香,2009.近45a华南夏季降水时空演变特征[J].气象研究与应用,30(1):12-14+22.
- 谢伏瞻,刘雅鸣,2019.应对气候变化报告(2019):防范气候风险[M].北京:社会科学文献出版社.
- 谢龙生,周伟导,潘光跃,2011.广东省汛期暴雨特征分析[J].广东水利水电,(11):45-48.
- 赵恩榕,简茂球,李春晖,2018.华南降水季节演变的年代际变化[J].热带气象学报,34(3):360-370.
- 翟志宏,何健,2011.华南区域1961—2008年暴雨变化趋势统计特征[J].广东气象,33(1):305-314.
- 张金玲,王冀,邹菊香,等,2011.广东地区后汛期降水集中度 and 集中期特征[J].气象科技,39(4):401-407.
- 张婷,魏凤英,2009.华南地区汛期极端降水的概率分布特征[J].气象学报,67(3):442-451.
- 张焱,2007.华南前汛期暴雨的时空变化及其成因[D].南京:南京信息工程大学.
- 郑彬,梁建茵,林爱兰,等,2006.华南前汛期的锋面降水和夏季风降水——I.划分日期的确定[J].大气科学,30(6):1207-1216.
- 中国气象局气候变化中心,2022.中国气候变化蓝皮书(2022)[M].北京:科学出版社.
- CHEN Y, ZHAI P, 2013. Persistent extreme precipitation events in China during 1951-2010 [J]. Clim Res, 57(2): 143-155.
- LI H Y, LIN Z H, CHEN H, 2009. Interdecadal variability of spring precipitation over South China and its associated atmospheric water vapor transport [J]. Atmos Ocean Sci Lett, 2(2): 113-118.
- IPCC, 2022. Climate Change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability. Working group II: Contribution to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [R]. Cambridge, UK: Cambridge University Press.

(责任编辑 秦社彩)