伍红雨,郭尧,吴遥.2024.近62 a华南“龙舟水”气候特征及变化[J].暴雨灾害,43(1):84-92. WU Hongyu, GUO Yao, WU Yao. 2024. Climate characteristics and variation of the Dragon-boat Precipitation in South China in the past 62 years [J]. Torrential Rain and Disasters,43(1):84-92 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023-099

近62 a华南“龙舟水”气候特征及变化

伍红雨[1,2],郭尧[3],吴遥[4]

(1. 广东省气候中心,广州 510641;2. 中国气象局广州热带海洋气象研究所/广东省区域数值天气预报重点实验室,广州 510641;3. 南方电网数字电网集团有限责任公司,广州 510663;4. 重庆市气候中心,重庆 401147)

摘　要:每年端午节前后龙舟竞渡之时,是华南前汛期降水最多、最为集中的时段,容易引发严重洪涝灾害,并对早稻生产造成严重影响,称之为“龙舟水”。对华南“龙舟水”期间暴雨过程的频次和强度进行研究是当前防灾减灾的迫切需求。利用1961—2022年华南192个国家气象观测站逐日降水资料,采用EOF、线性趋势、M-K突变等方法,分析了华南“龙舟水”期间降水量的时空特征及变化;构建了一个表征华南“龙舟水”暴雨过程的综合强度指数,由此分析华南近62 a“龙舟水”期间暴雨过程频次、强度以及“龙舟水”强度年景指数的特征和变化。结果表明,华南“龙舟水”一致性变化是其最主要的特点。1961—2022年“龙舟水”期间,华南共出现229次暴雨过程,平均每年3.7次。近62 a来华南区域平均“龙舟水”降水量和暴雨过程频次变化趋势不显著,但“龙舟水”强度年景指数以1.2·(10 a)$^{-1}$的速率显著上升。评估得到近62 a华南“龙舟水”最强暴雨过程出现在2022年6月4—21日,华南“龙舟水”强年有4 a,分别出现在2022年、2020年、2008年和2006年。

关键词:龙舟水;暴雨过程;综合强度指数;气候特征;华南

中图法分类号:P468.0+24　　**文献标识码**:A　　**DOI:** 10.12406/byzh.2023-099

Climate characteristics and variation of the Dragon-boat Precipitation in South China in the past 62 years

WU Hongyu[1,2], GUO Yao[3], WU Yao[4]

(1. *Climate Center of Guangdong Province, Guangzhou* 510641; 2. *Institute of Tropical and Marine Meteorology, China Meteorological Administration/Guangdong Provincial Key Laboratory of Regional Numerical Weather Prediction, Guangzhou* 510641; 3. *China Southern Power Grid Digital Group Institute Co., Ltd, Guangzhou* 510663; 4. *Climate Center of Chongqing Province, Chongqing* 401147)

Abstract: The precipitation reaches its maximum and is most concentrated during the period of the first flood season in South China around the Dragon Boat Festival every year, which is usually referred to as “Dragon-boat Precipitation”. The Dragon-boat Precipitation causes serious floods and exerts a serious impact on the production of early rice. It is urgent to study the frequency and intensity of rainstorms during the Dragon-boat Precipitation in South China for disaster prevention and reduction. Using daily precipitation data from 192 national meteorological observation stations in South China from 1961 to 2022, the spatiotemporal characteristics and variation of precipitation during the Dragon-boat Precipitation period in South China were analyzed with different methods, such as EOF analysis, linear trend analysis, and M-K mutation analysis. A comprehensive index representing the intensity of the Dragon-boat Precipitation rainstorm events in South China is constructed. Then, it is used to analyze the characteristics and variations of the number and intensity of the rainstorm events during the Dragon-boat Precipitation period in South China in the recent 62 years, as well as the annual index of the Dragon-boat Precipitation intensity. The results indicate that the consistent increase of the annual intensity index is the main characteristic of the Dragon-boat Precipitation in South China. During the Dragon-boat Precipitation period in the recent 62 years, there were 229 rainstorm events in South China, with an average of 3.7 times per year. In South China, the average precipitation and the number of rainstorm events did not change significantly, but the annual intensity index of Dragon-boat precipitation increased significantly at a rate of 1.2·(10 a)$^{-1}$. The assessment showed that the strongest Dragon-boat precipitation rainstorm event in South China in the past 62 years would occur during June 4-21, 2022. The annual variation shows that there are four peaks of Dragon-boat Precipitation in South China, which occurred in 2022, 2020, 2008, and 2006.

Key words: Dragon-boat Precipitation; rainstorm event; comprehensive intensity index; climate characteristics; South China

收稿日期: 2023-06-26;**定稿日期**:2023-08-25

资助项目: 国家自然科学基金项目(41930972);2022年广东省灾害防治及应急管理专项(粤财环〔2022〕16号);广东省气象局科技创新团队(GRMCTD202101)

第一作者: 伍红雨,主要从事气候特征及变化研究。E-mail: 492019784@qq.com

引　言

华南地处低纬，南临南海，是我国降水最多的地区之一。每年5月下旬到6月中旬端午节前后龙舟竞渡之时，由于受南海夏季风爆发带来的季风对流降水以及冷暖气流交汇的锋面降水影响，是华南前汛期(4—6月)降水最多且最为集中的时段，常出现持续的暴雨、大暴雨、特大暴雨天气过程，极易引发严重洪涝灾害并对早稻等农作物产生严重影响，传统称之为“龙舟水”(林良勋，2006；郑彬等，2006；钱光明，2008)。华南区域常年平均降水量前汛期为686.6 mm，“龙舟水”期间(5月21日—6月20日，下同)为307.3 mm，占前汛期总降水量的44.8%，是前汛期降水最为集中的时期，也是极端短时强降水的集中期(廖胜石等，2022)，有必要进行专门研究。

全球气候变暖背景下极端事件频发，降水极端性特征更加突出。2022年“龙舟水”期间，华南平均降雨量472.5 mm，较常年同期偏多52.7%，为有气象记录以来历史同期第二多。受其影响，珠江流域出现流域性洪水，北江流域出现1915年以来最大洪水，造成广东直接经济损失95.03亿元、广西114.5亿元(覃卫坚等，2023)。由于华南人口密集，经济发展快，并正在加快建设粤港澳大湾区，一旦发生重大洪涝灾害，会对国民经济和社会发展产生严重影响。因此，气象学者对华南、广东“龙舟水”降水分型(胡娅敏等，2013；郭圳勉等，2016)，广东“龙舟水”特征和异常气候成因进行了分析(范伶俐和郭品文，2009；伍红雨等，2017；王娟怀等，2018)；对2008年广东最强“龙舟水”的成因(林良勋等，2009；谷德军和纪忠萍，2011)、2020年广东典型“龙舟水”(钱维宏等，2020)、2022年广西极端“龙舟水”(刘国忠等，2023)的成因进行了分析，得到有意义的成果。这些研究主要针对华南或广东、广西在“龙舟水”期间的降水量或典型暴雨过程进行成因分析，目前还没有一个客观定量的方法或指数来评估华南“龙舟水”的暴雨过程强度以及“龙舟水”强度的年景指数。因此，还不能回答1961—2022年“龙舟水”期间华南发生了多少次暴雨过程，哪次是最强暴雨过程，华南“龙舟水”强度变化趋势和降水量变化是否一致。而研究这些科学问题是当前防灾减灾和“龙舟水”预报业务和服务的迫切需求。因此本文利用华南192个国家气象观测站逐日降水资料，分析1961—2022年华南“龙舟水”期间降水量的时空特征及变化，同时定义“龙舟水”暴雨过程的划分标准，识别并客观定量评估所有华南“龙舟水”期间暴雨过程，分析华南“龙舟水”期间暴雨过程的频次、强度等以及“龙舟水”强度年景指数的特征和变化，以期为华南“龙舟水”的预报业务和服务以及防灾减灾提供技术支撑。

1 资料和方法

1.1 资料说明

本文使用的资料包括：华南(广东、广西、海南)195个国家气象观测站逐日降水资料，该资料经过国家气象信息中心质量控制和均一化处理，考虑资料的完整性，选取的资料时段为1961年1月1日—2022年12月31日，同时剔除资料长度不足50 a的站，最后选取192个站的降水资料进行“龙舟水”过程判别和强度分析；相应时段的灾情数据，来自《广东省防灾减灾年鉴》(1995年卷—2022年卷)、《广东省志：自然灾害志》、《中国气象灾害大典：广东卷》、《中国气象灾害年鉴(2020)》，2004—2022年《广东省气候公报》等，用于与强“龙舟水”过程及“龙舟水”强弱年的对比检验。

1.2 研究方法

1.2.1 “龙舟水”的定义

“龙舟水”是指端午节(农历五月初五)前后的降水。而端午节对应的公历时间每年都不一样，统计2000—2022年的端午节，对应公历时间最早5月28日，最晚6月25日。为统计方便，气象部门一般将5月下旬—6月中旬(5月21日—6月20日)期间降水量统计为“龙舟水”期间降水量。

1.2.2 华南区域性暴雨过程的划分

单站日降水量≥50 mm为暴雨，而暴雨过程的划分存在差异(伍静等，2021)，参考伍红雨等(2021)对华南区域性暴雨过程的划分标准，华南192个站中有9站及以上出现暴雨则定义为华南区域性暴雨日；华南区域性暴雨日持续时间1 d及以上或间断日有1个及以上站出现暴雨的过程就定义为华南区域性暴雨过程(以下简称暴雨过程)。暴雨过程的开始日(结束日)就是暴雨过程的第一个(最后一个)暴雨日。暴雨过程的持续时间为开始日与结束日的日数。最大过程降水量为暴雨过程中单站总降水量的最大值；最大日降水量为暴雨过程中单站日降水量的最大值；暴雨范围为暴雨过程中出现暴雨的总站数，单站出现一次及以上暴雨均只算为1站。

华南“龙舟水”时段是5月21日—6月20日，由于有的“龙舟水”暴雨过程早于5月21日开始或晚于6月20日结束，本文以识别出的暴雨过程的实际起止日期来统计华南“龙舟水”期间的暴雨过程，这样更能客观体现华南“龙舟水”的变化，而非人为确定5月下旬—6月上旬，造成暴雨过程中断。

1.2.3 华南“龙舟水”暴雨过程强度指数及等级划分

参考邹燕等(2014)、伍红雨等(2019，2021)的暴雨

过程综合强度指数评估方法，选取暴雨过程的最大过程降水量、最大日降水量、暴雨范围和持续时间这4个因子作为华南暴雨过程综合强度评估指标，计算公式如下

$$I_R = A \times G_p \times R_p + B \times G_d \times R_d + C \times G_c \times R_c + D \times G_t \times R_t \quad (1)$$

式(1)中，I_R是某场暴雨过程的综合强度指数；G_p、G_d、G_c和G_t分别是最大过程降水量、最大日降水量、暴雨范围和暴雨持续时间评估等级；R_p、R_d、R_c和R_t分别是标准化后的4个指标；A、B、C和D为权重系数。以某一指标序列与其余3个指标序列之间相关系数的平均值占所有指标间相关系数平均值总和的比值作为该指标的权重系数，通过计算分别得到持续日数、暴雨范围、最大日降水量、最大过程降水量的权重系数分别为0.241、0.244、0.238、0.277。从式(1)可见，当暴雨过程的日最大降水量、累积雨量越大，持续时间越长，暴雨范围越大，暴雨过程的综合强度指数I_R越大，暴雨就越强。

按定义对1961—2022年华南“龙舟水”暴雨过程进行识别得到，近62 a华南在“龙舟水”期间共发生了229次暴雨过程，计算229次暴雨过程综合强度指数，采用百分位法对其强度指数序列按60%、80%、90%、95%及以上把暴雨过程划分为弱、较弱、中等、较强、强5个等级。

1.2.4 华南“龙舟水”强度年景指数及年景等级划分

华南“龙舟水”强度年景指数为累加一年内“龙舟水”期间发生的所有暴雨过程综合强度指数，由此得到1961—2022年华南“龙舟水”强度年景指数序列，采用百分位法以10%、30%、70%和90%对应的百分位数作为临界阈值划分为弱、较弱、中等、较强、强5个等级(表1)。邹燕等(2014)、伍红雨等(2019，2021)采用此区域暴雨过程相关指标及定义对福建、广东、华南的区域性暴雨过程进行识别并对其强度进行客观定量评估，得到客观和符合实际的结果，故本文采用此方法对华南“龙舟水”暴雨过程进行识别并对其综合强度指数进行客观定量评估。

表1 不同百分位数(P)与华南“龙舟水”强度年景等级对应表

Table 1 Correspondence between different percentiles (P) and the annual intensity grades of Dragon-boat Precipitation in South China

百分位	年景等级
$P \leqslant 10\%$	1(弱)
$10\% < P \leqslant 30\%$	2(较弱)
$30\% < P \leqslant 70\%$	3(中等)
$70\% < P \leqslant 90\%$	4(较强)
$P > 90\%$	5(强)

1.2.5 分析方法

1) 定义华南暴雨过程的标准，识别出华南“龙舟水”期间所有暴雨过程并计算得到华南“龙舟水”期间所有的暴雨过程综合强度指数和“龙舟水”强度年景指数。

2) 采用EOF分析、线性趋势分析、M-K突变分析、多项式滑动平均等方法分析华南“龙舟水”期间降水量的时空特征及变化，暴雨过程频次、强度以及“龙舟水”强度年景指数特征和变化。

3) 常年平均指1991—2020年平均。

2 结果分析

2.1 华南“龙舟水”降水量的气候特征

2.1.1 华南“龙舟水”降水量的空间分布

分析常年华南“龙舟水”期间降水量的空间分布(图1)可知，“龙舟水”降水量分布不均，总体呈西少东多的分布特征，降水量为136.0 mm (徐闻) ~ 540.5 mm (海丰)。广东大部和广西北部、南部局地降水量为300.0 ~ 540.5 mm，雷州半岛、广西西南部和海南西部为136.0 ~ 200.0 mm，其余为200.0 ~ 300.0 mm。“龙舟水”大值区位于粤东南、西南沿海和粤北的三大暴雨中心和广西的永福、桂林、防城等地。

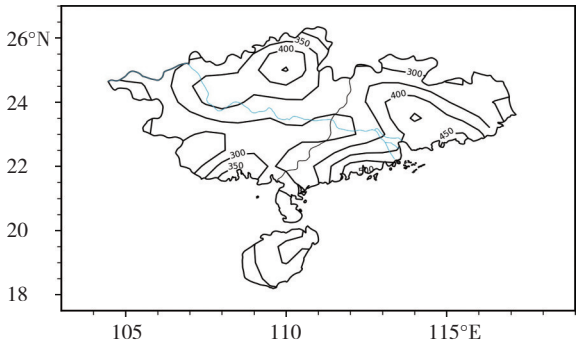


图1 1991—2020年华南“龙舟水”期间平均降水量(单位: mm)的空间分布

Fig.1 Spatial distribution of average precipitation (unit: mm) during the Dragon-boat Precipitation period from 1991 to 2020 in South China

2.1.2 华南区域平均“龙舟水”降水量年际和年代际变化

从1961—2022年“龙舟水”期间华南区域平均降水量的历年变化(图2)可见，降水量存在明显的年际和年代际变化。降水量最多3 a分别是2008年(508.3 mm)、2022年(455.8 mm)、2006年(431.7 mm)；最少3 a分别是1963年(137.2 mm)、1988年(146.1 mm)、2004年(163.5 mm)；近62 a平均降水量为285.5 mm。从多项式曲线变化看，“龙舟水”在1960年代到1990年代中期偏少，1990年代后期到2000年代偏多，2010年代偏少，2019年以来以偏多为主。近62 a来华南区域平均

“龙舟水”降水量以6.2 mm·(10 a)$^{-1}$的速率上升，但未通过0.05显著性水平检验，上升趋势不显著。

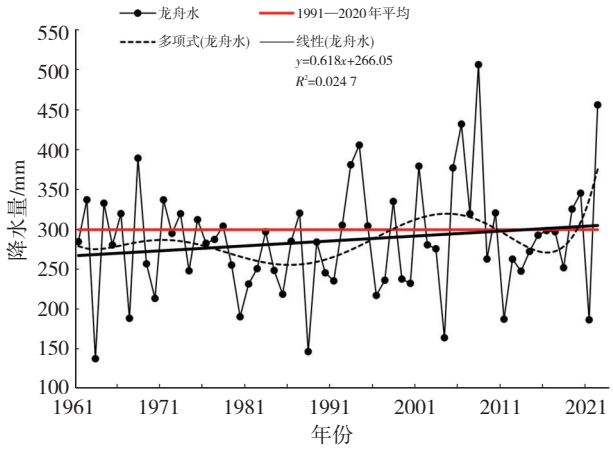


图2 1961—2022年华南“龙舟水”期间降水量的历年变化

Fig.2 lnterannual variation of Dragon-boat Precipitation in South China from 1961 to 2022

2.1.3 华南“龙舟水”的EOF分析

为了分析华南“龙舟水”的时空变化特征，对近62 a“龙舟水”期间华南192个站点降水量的标准化距平进行EOF分解，得到方差贡献率前三位模态及其对应的时间系数变化(图3)。其中第一模态的方差贡献率为30.3%，表明华南“龙舟水”除海南大部、雷州半岛外，其余地区一致性变化是华南“龙舟水”最主要的特征。与第一模态对应的时间系数PC1在近62 a以0.125·(10 a)$^{-1}$的上升，通过0.1的显著性水平检验。华南“龙舟水”期间区域平均降水量最多的3 a是2008年、2022年、2006年，最少的3 a是1963年、1988年、2004年，均对应PC1最高和最低的3 a，说明华南“龙舟水”在极端异常年份具有除海南、雷州半岛外，其余大部具有一致性变化的特点。第二模态的方差贡献率为9.2%，表明华南“龙舟水”存在东北和西南的反位相分布，代表“龙舟水”东北多(少)西南少(多)的分布特征。近62 a来PC2无明显变化趋势，PC2最大出现在1977年，对应华南“龙舟水”东北部多西南少，最小出现在2012年，对应华南“龙舟水”西南多东北少。第三模态的方差贡献率为8.4%，表明华南“龙舟水”以23°N附近为界南北的反位相分布，反映“龙舟水”北多(少)南少(多)的南北差异。近62 a来PC3以0.21·(10 a)$^{-1}$的上升，通过0.01的显著性水平检验，上升趋势显著。PC3最大出现在2002年，对应23°N以北华南“龙舟水”大部偏少，23°N以南部偏多为主；最小出现在2018年，对应海南、雷州半岛和珠三角偏多，其余偏少。前三个模态的累积方差贡献率为47.9%，基本反映了华南“龙舟水”主要的分布特征。计算近62 a来华南“龙舟水”EOF分解第一模态对应的时间系数PC1与华南区域平均“龙舟水”降水量的标准化距平序列的相关系数为0.98，PC1与华南“龙舟水”强度年景指数的标准化距平序列的相关系数为0.79。可见，华南“龙舟水”一致性变化是其最主要的特征，可把华南作为一个区域来研究其“龙舟水”特征。

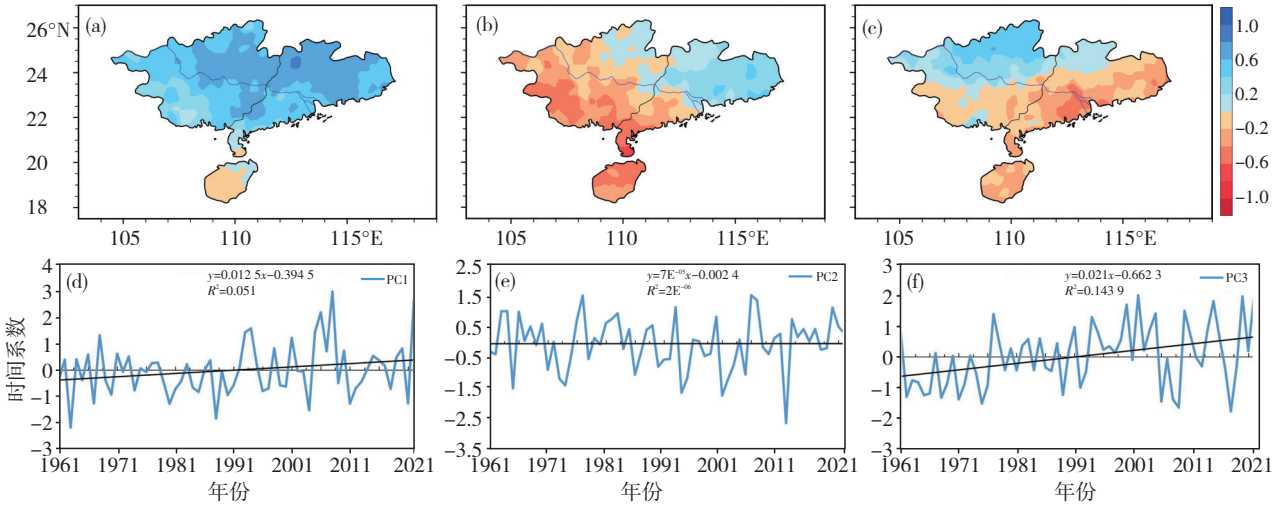


图3 1961—2022年华南“龙舟水”期间降水量标准化距平的EOF空间第一模态(a)、第二模态(b)、第三模态(c)及第一模态时间系数(PC1, d)、第二模态时间系数(PC2, e)、第二模态时间系数(PC3, f)变化

Fig.3 (a) First mode, (b) second mode, (c) third mode of EOF space and changes of first mode time coefficient (PC1, d), second mode time coefficient (PC2, e) and third mode time coefficient (PC3, f) of normalized precipitation anomalies during Dragon-boat Precipitation period in South China from 1961 to 2022

2.2 华南“龙舟水”期间暴雨过程特征

2.2.1 暴雨过程指标特征

统计得到，1961—2022年华南“龙舟水”期间共出现229次暴雨过程，平均每年3.7次。暴雨过程的持续时间为1～18 d，平均为3.3 d，最长持续时间出现在1968年6月7—24日和2022年6月4—21日，均为18 d；站点累积过程降水量为78.2～1 116.8 mm (最大值出现在2022年6月4—21日英德站)，平均为286.7 mm；

站点日最大降水量为78.2～389.3 mm (2020年5月21日,上川岛),平均为192.0 mm。暴雨范围为9～159站,平均为47站,最大范围出现在2008年6月13日,华南有159个站出现暴雨,占华南统计总站点数的82.8%。

2.2.2 暴雨过程频次的年际和年代际变化

从1961—2022年华南“龙舟水”期间暴雨过程频次序列的变化(图4)可见,其存在明显的年际和年代际变化。其中1974年、1986年、1987年、2010年最多,均为6次;1963年和1982年最少,只有1次。近62 a来,华南“龙舟水”期间的暴雨过程频次的线性趋势与平均值线几乎重合,说明无明显变化趋势。从多项式滑动曲线看,华南“龙舟水”期间的暴雨过程频次在1960年代、1990年代以及2015以来以偏少为主,而在1970年代到2010年代以正常到偏多为主。

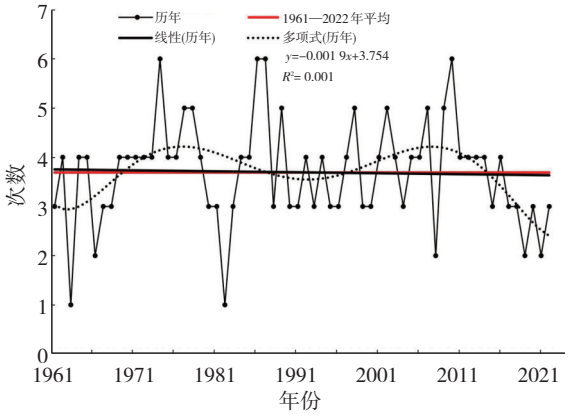


图4 1961—2022年华南“龙舟水”期间暴雨过程频次的历年变化

Fig.4 lnterannual variation of frequency of rainstorm events during the Dragon-boat Precipitation in South China from 1961 to 2022

2.2.3 暴雨过程强度的变化特征

(1) 不同等级暴雨过程。计算得到近62 a华南在“龙舟水”期间的229次暴雨过程的综合强度指数,按前面划分标准得出近62 a发生强等级暴雨过程有27次,占总频次的11.8%;较强等级有12次,占总频次的5.2%;中等等级有33次,占总频次的14.4%;较弱等级有53次,占总频次的23.1%;弱等级有104次,占总频次的45.4%。较强、强等级共出现39次,占总频次的17.0%,较强、强等级暴雨过程造成的洪涝灾害可能性大。

表2为1961—2022年华南“龙舟水”期间强暴雨过程统计情况,可见近62 a发生27次强暴雨过程,平均每年0.44次,其中在1968年和1977年分别发生2次。27次强暴雨过程中有22次发生在6月,仅有3次过程发生在5月,有2次过程发生在5月末到6月初,可见华南“龙舟水”期间强暴雨过程主要出现在6月,占88.9%。徐明等(2016)研究指出,华南前汛期持续性暴雨过程主要集中在5—6月,其中6月最多,也说明“龙舟水”时段是华南降水最为集中的时期。

华南“龙舟水”期间发生的27次强暴雨过程与1994—2022年《广东省防灾减灾年鉴》、《广东省志:自然灾害志》等记载的历史气象灾害事件灾情吻合。评估得到最强暴雨过程出现在2022年6月4—21日。这与建国以来华南最强“龙舟水”对应,珠江流域出现流域性洪水,其中北江流域出现1915年以来最大洪水,广东、广西出现严重洪涝灾害,直接经济损失209.53亿元。评估第二强的暴雨过程出现在1966年6月9—24日。1966年6月中旬初和下旬初,东江、西江、北江、韩江、增江、漠阳江洪水齐发,东江出现历史罕见的特大洪水,导致广东受灾人口136.3万,18万人被洪水围困,107人死亡,7万间房屋倒塌,21.87万公顷农作物被浸。评估第三强的暴雨过程出现在1968年6月7—24日。1968年6月中、下旬北江出现全流域性洪水,造成韶关、清远以及珠江三角洲遭受严重洪涝灾害,其中珠江三角洲受淹农田2.85×10^5 hm^2。第四强的暴雨过程出现在2008年6月3—18日。2008年6月上中旬强降水导致西江、北江水位超警戒,洪涝灾害重,其中广东直接经济损失64.5亿元,死亡33人。其他的强暴雨过程如1994年6月8—20日暴雨过程造成“94.6”西江、北江特大洪水;1998年6月17—26日暴雨过程与“98.6”珠江流域特大洪水相联系,造成巨大经济损失和人员伤亡(赵玉春和王叶红,2009)。2005年6月19—24日暴雨过程与“05.6”西江、北江、增江大洪水,2008年6月3—18日暴雨过程与2008年广东极端“龙舟水”等相对应。可见华南“龙舟水”暴雨过程强度评估与实际洪水、灾情吻合,说明能客观定量评估“龙舟水”暴雨过程的强度。

由于有的“龙舟水”暴雨过程跨统计时段(5月下旬—6月中旬),统计表明华南“龙舟水”期间发生的27次强暴雨过程中结束最晚的3次过程分别是:1974年6月18—26日、1977年6月20—27日、1998年6月17—26日,而这3 a端午节分别出现在1974年6月24日、1977年6月21日、1998年5月30日和6月28日(闰五月对应两个端午节)。可见“端午节”对应公历偏晚,“龙舟水”暴雨过程也存在结束晚的特点,进一步说明跨“龙舟水”时段统计暴雨过程更加合理。

(2) 华南“龙舟水”强度年景指数。分析1961—2022年华南“龙舟水”强度年景指数的历年变化(图5)可知,其年际和年代际变化明显,最强出现在2022年(36.0),最弱出现在1963年(1.2)。近62 a华南“龙舟水”强度年景指数以$1.2\cdot(10\ a)^{-1}$的速率上升,趋势系数为0.3,通过0.05的显著性水平检验,上升趋势显著。可

表2 1961—2022年华南“龙舟水”期间强暴雨过程统计表

Table 2 Statistics of strong rainstorm events during Dragon-boat Precipitation in South China from 1961 to 2022

序号	暴雨发生时段	持续时间/d	范围/站	最大日降水量/mm	最大过程降水量/mm	综合强度指数
1	2022年6月4—21日	18	151	294.7	1 116.8	31.90
2	1966年6月9—24日	16	142	296.5	1023.0	29.32
3	1968年6月7—24日	18	151	260.4	965.8	28.46
4	2008年6月3—18日	16	159	274.8	911.6	27.92
5	2020年5月30日—6月10日	12	91	326.4	797.7	22.69
6	1998年6月17—26日	10	125	281.5	892.1	22.40
7	1994年6月8—20日	13	158	252.3	610.1	22.06
8	2001年6月3—13日	11	134	254.4	795.7	21.48
9	2017年6月13—21日	9	108	218.4	803.5	18.14
10	1974年6月18—26日	9	90	279.1	748.3	17.91
11	1993年6月8—18日	11	116	199.1	601.4	17.69
12	1983年6月15—22日	8	96	289.3	524.1	17.07
13	2005年6月19—24日	6	114	255.4	756.2	16.34
14	1964年6月10—15日	6	101	296.0	604.5	16.29
15	1968年5月19—25日	7	85	253.1	817.5	16.10
16	2006年5月21—29日	9	118	268.7	498.4	15.85
17	1977年5月25日—6月1日	8	84	263.6	690.4	15.57
18	1977年6月20日—27日	8	95	245.7	571.7	15.46
19	1982年5月27日—6月3日	8	110	266.0	506.2	14.87
20	2019年5月25—29日	5	83	294.3	548.3	13.65
21	1991年6月7—12日	6	67	282.6	679.3	13.32
22	2016年6月8—16日	9	101	194.7	433.6	13.32
23	2003年6月6—14日	9	107	174.1	427.0	13.02
24	2018年6月4—9日	6	95	286.4	478.6	13.02
25	1996年6月20—25日	6	95	282.4	458.0	12.81
26	1972年6月13—19日	7	112	233.9	427.3	12.78
27	1995年6月5—9日	5	91	275.6	413.4	11.67

见近62 a华南“龙舟水”期间降水量、暴雨过程频次虽然变化不明显，但“龙舟水”强度年景指数上升明显，对应的洪涝灾害的发生也更突出。对近62 a华南“龙舟水”强度年景指数序列进行M-K突变分析(图略)表明，其没有发生突变。华南“龙舟水”强度年景指数的线性趋势和多项式趋势表明，年景指数在1990年左右从前期的偏弱转为后期的偏强。2020年以来年际变化显著，2020年偏强、2021年明显偏弱，2022年为1961年来最强。这与2020年、2022年华南“龙舟水”期间出现严重洪涝吻合。

按照前面定义的华南“龙舟水”强度年景指数的划分标准，近62 a出现“龙舟水”强年有4 a，分别为2022年、2020年、2008年、2006年，可见最强的“龙舟水”年份均出现在2006年以来。“龙舟水”较强年份有3 a，分别为1964年、1987年、2001年。“龙舟水”弱的年份有34 a，最弱的3 a出现在1963年、2004年、1999年，

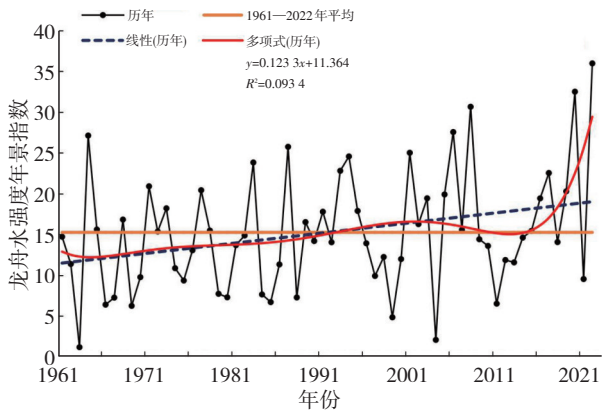


图5 1961—2022年华南“龙舟水”强度年景指数的历年变化

Fig.5 Interannual variation of the annual intensity index of Dragon-boat Precipitation in South China from 1961 to 2022

均是华南典型旱年，其中1963年、2004年是华南大旱年。

“龙舟水”强年与华南的洪涝灾害吻合。2022年

表3 1961—2022年华南“龙舟水”强度年景指数及等级

Table 3 Annual index and grade of Dragon-boat Precipitation intensity in South China from 1961 to 2022

年份	强度年景指数	等级	年份	强度年景指数	等级
1961	14.71	1(弱)	1992	14.04	1(弱)
1962	11.37	1(弱)	1993	22.80	3(中等)
1963	1.17	1(弱)	1994	24.56	3(中等)
1964	27.12	4(较强)	1995	17.88	2(较弱)
1965	15.60	2(较弱)	1996	13.91	1(弱)
1966	6.39	1(弱)	1997	9.91	1(弱)
1967	7.25	1(弱)	1998	12.23	1(弱)
1968	16.82	2(较弱)	1999	4.84	1(弱)
1969	6.24	1(弱)	2000	11.98	1(弱)
1970	9.76	1(弱)	2001	25.01	4(较强)
1971	20.90	3(中等)	2002	16.26	2(较弱)
1972	15.36	2(较弱)	2003	19.43	2(较弱)
1973	18.20	2(较弱)	2004	2.07	1(弱)
1974	10.86	1(弱)	2005	19.90	2(较弱)
1975	9.35	1(弱)	2006	27.55	5(强)
1976	13.06	1(弱)	2007	15.56	2(较弱)
1977	20.42	3(中等)	2008	30.65	5(强)
1978	15.47	2(较弱)	2009	14.41	1(弱)
1979	7.72	1(弱)	2010	13.59	1(弱)
1980	7.29	1(弱)	2011	6.51	1(弱)
1981	13.68	1(弱)	2012	11.86	1(弱)
1982	14.87	1(弱)	2013	11.57	1(弱)
1983	23.82	3(中等)	2014	14.61	1(弱)
1984	7.64	1(弱)	2015	15.43	2(较弱)
1985	6.70	1(弱)	2016	19.42	2(较弱)
1986	11.32	1(弱)	2017	22.53	3(中等)
1987	25.74	4(较强)	2018	14.06	1(弱)
1988	7.27	1(弱)	2019	20.28	2(较弱)
1989	16.51	2(较弱)	2020	32.50	5(强)
1990	14.19	1(弱)	2021	9.53	1(弱)
1991	17.78	2(较弱)	2022	35.97	5(强)

华南出现了新中国成立以来最强的“龙舟水”,珠江流域出现流域性洪水,北江流域发生超百年一遇洪水,造成广东、广西直接经济损失达209.53亿元。2020年5月21—22日、5月30日—6月10日的“龙舟水”暴雨过程导致严重洪涝灾害,造成广东直接经济损失49.03亿元,死亡失踪13人,广西直接经济损失102亿元。2008年“龙舟水”的暴雨洪涝及山体滑坡、泥石流等灾害导致华南(主要是广东、广西)151人死亡,直接经济损失204亿元(王红军和潘维玉,2009)。2006年强“龙舟水”导致华南严重洪涝灾害,造成广东21.4亿元的直接经济损失,死亡失踪21人。

2.2.4 华南“龙舟水”期间暴雨过程强度和频次的年代际变化

表4为华南“龙舟水”期间各年代出现不同等级暴雨过程统计情况,可见华南“龙舟水”期间的暴雨过程频次和强度在各年代变化明显。各年代平均强度指数2000年代最强,其次是1990年代,第三位是2010年以来(统计2010—2022年,下同),而1960—1980年代强度相对弱,其中1980年代强度最弱。

“龙舟水”期间,强等级暴雨过程出现的比率在2000年代最高(21.1%),其次是1990年代(20%),第三是2010年代以来(13.3%),而在1970年代最低(7.1%);较强等级暴雨过程出现的比率在1960年代最高(11.5%),其次是2010年代以来(6.7%),而在其他年代比率不到6%,其中2000年代未发生较强等级暴雨过程。中等等级暴雨过程出现的比率在2010年代以来最高(22.2%),其次是1970年代(16.7%),最低出现在1990年代(11.4%)。较弱等级暴雨过程出现的比率在

1990年代以来最高(25.7%)，其次是1980年代(25.6%)，最低出现在2010年代以来(15.6%)。弱等级暴雨过程出现的比率在1970年代最高(54.8%)，其次是1980年代(48.7%)，最低出现在1990年代(37.1%)。可见，华南“龙舟水”期间发生强暴雨过程的比率在1990年以来明显增加，特别是在2000年代最突出，强度最强的5次“龙舟水”暴雨过程有3次出现在2008年以来，最强暴雨过程出现在2022年6月4—21日。

表4 1961—2022华南“龙舟水”期间各年代出现不同等级暴雨过程频次和强度

Table 4 Frequency and intensity of rainstorm events of different grades in different years during the Dragon-boat Precipitation in South China from 1961 to 2022

年份	弱		较弱		中等		较强		强		总频次	平均强度指数
	频次	比率%	频次	比率%	频次	比率%	频次	比率%	频次	比率%		
1961—1969	12	46.2	5	19.2	3	11.5	3	11.5	3	11.5	26	3.3
1970—1979	23	54.8	7	16.7	7	16.7	2	4.8	3	7.1	42	3.0
1980—1989	19	48.7	10	25.6	6	15.4	1	2.6	3	7.7	39	2.8
1990—1999	13	37.1	9	25.7	4	11.4	2	5.7	7	20.0	35	4.7
2000—2009	16	42.1	9	23.7	5	13.2	0	0.0	8	21.1	38	4.9
2010—2022	19	42.2	7	15.6	10	22.2	3	6.7	6	13.3	45	4.4
合计	102	45.2	47	21.1	35	15.1	11	5.2	30	13.4	225	3.9

3 结论与讨论

利用1961—2022年华南192个国家站逐日降水资料，首先分析了华南“龙舟水”期间降水量的时空特征及变化，构建了一个表征华南“龙舟水”暴雨过程的综合强度指数，由此分析华南近62 a“龙舟水”期间暴雨过程频次、强度以及“龙舟水”强度年景指数的特征和变化。得出主要结论如下：

(1) 华南“龙舟水”降水量空间分布不均，总体呈西少东多的分布特征。站点降水量为136 mm (徐闻) ~ 540.5 mm (海丰)。“龙舟水”大值区位于广东粤东南、西南沿海和粤北的三大暴雨中心和广西的永福、桂林、防城等地。

(2) 近62 a华南“龙舟水”除海南大部、雷州半岛外，其余地区一致性变化是华南“龙舟水”最主要的分布特征，同时还存东北多(少)西南少(多)、北多(少)南少(多)的分布差异。

(3) 近62 a华南区域平均“龙舟水”降水量的年际和年代际变化明显。降水量最多2008年，最少是1963年。“龙舟水”在1960年代到1990年代中期偏少，1990年代后期到2000年代偏多，2010年代偏少，2019年以来偏多为主。近62 a来华南区域平均“龙舟水”降水量以6.2 mm·(10 a)$^{-1}$的线性速率上升，但上升趋势不显著。

(4) 1961—2022年华南在“龙舟水”期间共出现229次暴雨过程，平均每年3.7次。1974年、1986年、1987年、2010年最多，均为6次；1963年和1982年最少，仅1次。近62 a来，华南“龙舟水”期间的暴雨过程频次变化趋势不显著。

(5) 1961—2022年，华南“龙舟水”期间发生强等级暴雨过程有27次，占“龙舟水”暴雨过程总频次的11.8%，最强暴雨过程出现在2022年6月4—21日，造成北江流域发生1915年以来最大洪水，广东、广西洪涝灾害异常严重。

(6) 华南“龙舟水”强年有4 a，分别是2022年、2020年、2008年、2006年；最弱的3 a分别是1963年、2004年、1999年。近62 a华南“龙舟水”强度年景指数以1.2·(10 a)$^{-1}$的速率显著上升，在1990年左右从前期的偏弱转为后期的偏强，特别是在2000年代最突出，最强出现在2022年。

在华南“龙舟水”期间，近62 a来的降水量、暴雨过程频次变化趋势不显著，但强度年景指数上升趋势显著，其最强的暴雨过程和最强“龙舟水”年份均出现在2022年，“龙舟水”强年有4 a均是出现在2000年以来，说明在全球气候变暖的背景下，华南“龙舟水”的强度在变强，相应带来的灾害损失也在加大。下一步有必要对近62 a来华南“龙舟水”强度异常的成因进行分析，以期更好地为华南“龙舟水”的业务和服务提供支撑。

参考文献(References)：

范伶俐,郭品文.2009.广东“龙舟水”降水量成因分析[J].广东海洋大学学报,29(6):61-67. Fan L L, Guo P W. 2009. Analysis on the cause of precipitation of Dragon-boat precipitation in Guangdong [J]. Journal of Guangdong Ocean University,29(6):61-67 (in Chinese)

谷德军,纪忠萍.2011. 2008年广东强龙舟水与准10天振荡[J].热带气象学报,27(1):11-21. Gu D J, Ji Z P. 2011. The strong Dragon-boat precipitation of Guangdong in 2008 and quasi-10-day oscillation [J]. Journal of Tropical Meteorology,27(1):11-21 (in Chinese). doi:10.3969/

j.issn.1004-4965.2011.01.002

郭圳勉,简茂球,张弘豪,等.2016.广东“龙舟水”降水分型分析[J].广东气象,38(6):6-11. Guo Z M, Jian M Q, Zhang H H, et al. 2016. Precipitation patterns and analysis during the “Dragon boat water” in Guangdong [J]. Guangdong Meteorology,38(6):6-11 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1007-6190.2016.06.002

胡娅敏,杜尧东,罗晓玲.2013.近49年华南“龙舟水”的降水分型[J].气象,39(8):1031-1041. Hu Y M, Du Y D, Luo X L. 2013. Precipitation pattern during the “Dragon-boat water” in South China for the recent 49 years [J]. Meteorological Monthly,39(8):1031-1041 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2013.08.010

廖胜石,卓健,罗建英,等. 2022.广西汛期极端短时强降水特征分析[J].暴雨灾害,41(3):308-314. Liao S S, Zhou J, Luo J Y, et al. 2022. Analysis of characteristics of the extreme short-time heavy rainfall in Guangxi in rain season [J]. Torrential Rain and Disasters,41(3):308-314 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2022.03.007

林良勋.2006.广东省天气预报技术手册[M].北京:气象出版社:103-174. Lin L X. 2006. Manual of weather forecast technique in Guangdong Province [M]. Beijing:China Meteorological Press:103-174 (in Chinese)

林良勋,吴乃庚,黄忠,等.2009.广东2008年罕见“龙舟水”特点及成因诊断分析[J].气象,35(4):43-50. Lin L X, Wu N G, Huang Z, et al. 2009. Causality analysis of the infrequent Dragon Boat Precipitation in Guangdong Province in 2008 [J]. Meteorological Monthly,35(4):43-50 (in Chinese)

刘国忠,覃月凤,覃卫坚,等.2023. 2022年广西极端“龙舟水”暴雨过程环境场特征分析[J].气象研究与应用,44(1):7-13. Liu G Z, Qin Y F, Qin W J, et al. 2023. Analysis of environmental field characteristics of an extreme dragon-boat precipitation process in Guangxi in 2022 [J]. Journal of Meteorological Research and Application,44(1):7-13 (in Chinese). doi:10.19849/j.cnki.CN45-1356/P.2023.1.02

钱光明.2008.广东省气候业务技术手册[M].北京:气象出版社:65-83. Qian G M. 2008. Guangdong Province climate business technical manual [M]. Beijing:China Meteorological Press:65-83 (in Chinese)

钱维宏,艾阳,陈绿文,等.2020.一次广东典型龙舟水暴雨过程的扰动形势分析[J].热带气象学报,36(4):433-443. Qian W H, Ai Y, Chen L W, et al. 2020. Anomalous synoptic pattern of typical dragon boat precipitation process in Guangdong province [J]. Journal of Tropical Meteorology of Meteorological,36(4):433-443 (in Chinese). doi:10.16032/j.issn.1004-4965.2020.040

覃卫坚,何莉阳,蔡悦幸,等.2023.近30年华南地区“龙舟水”暴雨研究进展[J].气象研究与应用,44(1):1-6. Qin W J, He L Y, Cai Y X, et al. 2023. Research progress of dragon-boat precipitation in South China in the past 30 years [J]. Journal of Meteorological Research and Application,44(1):1-6 (in Chinese). doi:10.19849/j.cnki.CN45-1356/P.2023.1.01

王红军,潘维玉.2009. 2008年华南前汛期异常降水的大尺度环流特征及成因分析[J]. 热带地理,29(3):219-224. Wang H J, Pan W Y. 2009. A Study on the causes and the atmospheric circulation characteristics of abnormal rainfall in South China during 2008 [J]. Tropical Geography,29(3):219-224 (in Chinese)

王娟怀,杨守懋,韦智嘉,等.2018.全球气候变暖背景下广东“龙舟水”的变化特征[J].广东气象,40(1):4-8. Wang J H, Yang S M, Wei Z J, et al. 2018. Characteristics of the variation of precipitation during “Dragon-boat racing” season of Guangdong under the background of global climate warming [J]. Guangdong Meteorology,40(1):4-8 (in Chinese). doi:10.3969 /j.issn.1007-6190.2018.01.002

伍红雨,郭尧,邹燕,等.2021.华南区域性暴雨过程的客观评估及异常机理分析[J].暴雨灾害,40(3):306-315. Wu H Y, Guo Y, Zou Y, et al. 2021. Objective assessment and analysis of abnormal causes of regional rainstorm events in South China [J]. Torrential Rain and Disasters,40(3):306-315 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2021.03.009

伍红雨,李春梅,王迪龙.2017.近55年广东“龙舟水”异常特征及成因分析[J].热带气象学报,33(6):608-616. Wu H Y, Li C M, Wang D L. 2017. Analysis on characteristics and abnormal causes of dragon-boat precipitation in Guangdong in the past 55 years [J]. Journal of Tropical Meteorology,33(5):608-616 (in Chinese). doi:10.16032 /j.issn.1004-4965.2017.05.004

伍红雨,邹燕,刘尉.2019.广东区域性暴雨过程的定量化评估及气候特征[J].应用气象学报,30(2):233-244. Wu H Y, Zou Y, Liu W. 2019. Quantitative assessment of regional heavy rainfall process in Guangdong and its climatological characteristics [J]. Journal of Applied Meteorological Science,30(2):233-244 (in Chinese). doi:10.11898/1001-7313.20190210

伍静,李向红,李海燕,等.2021.广西秋冬季暴雨天气分型及基本特征[J].沙漠与绿洲气象,15(5):41-48. Wu J, Li X H, Li H Y, et al. 2021. Classification and basic characteristics of rainstorm weather in autumn and winter in Guangxi [J]. Desert and Oasis Meteorology,15(5):41-48 (in Chinese). doi:10.12067/issn.1002-0799.2021.05 006

徐明,赵玉春,王晓芳,等.2016.华南前汛期持续性暴雨统计特征及环流分型研究[J].暴雨灾害,35(2):109-118. Xu M, Zhao Y C, Wang X F, et al. 2016. Statistical characteristics and circulation pattern of sustained torrential rain during the pre-flood season in South China for recent 53 years [J]. Torrential Rain and Disasters,35(2):109-118 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2016.02.003

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. Zheng B, Liang J Y, Lin A L, et al. 2006. Frontal rain and summer monsoon rain during pre-rainy season in South China. part Ⅰ: Determination of the division dates [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,30(6):1207-1216 (in Chinese)

赵玉春,王叶红.2009.近30年华南前汛期暴雨研究概述[J].暴雨灾害,28(3):193-202,228. Zhao Y C, Wang Y H. 2009. A Review of studies on torrential rain during pre-summer flood season in South China since the 1980's [J]. Torrential Rain and Disasters,28(3):193-202,228 (in Chinese)

邹燕,叶殿秀,林毅,等.2014.福建区域性暴雨过程综合强度定量化评估方法[J].应用气象学报,25(3):360-364. Zou Y, Ye D X, Lin Y, et al. 2014. A quantitative method for assessment of regional heavy rainfall intensity [J]. Journal of Applied Meteorological Science,25(3):360-364 (in Chinese)

（责任编辑　唐永兰）