

珠江三角洲地区暴雨事件驱动因子研究*

宋金帛 张强[†] 王港 吴文欢

(北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室, 地理科学学部, 100875, 北京)

摘要 利用 CMORPH 降水数据、ERA5 气象数据、欧空局土地利用数据、热带气旋灾害资料等多源异构数据, 运用相关分析、M-K 检验、合成分析、Student's *t*-test 等多种统计方法辨识珠江三角洲地区暴雨关键驱动因子。研究发现: 不同时间尺度上暴雨事件年际变化趋势均不显著; 净水汽通量、强热带风暴、气压变化等是研究区暴雨事件的主要驱动因子, 夏季西北太平洋副高位置及强度对研究区暴雨的发生也有影响, 城市化程度、厄尔尼诺/拉尼娜现象等对研究区暴雨事件影响不显著。研究结果可为珠三角暴雨事件、暴雨致洪及城市内涝的预测与灾害风险评估提供理论支撑和决策依据。

关键词 暴雨事件; 珠江三角洲; 驱动因子; 相关分析; M-K 检验; Student's *t*-test

中图分类号 P933

DOI: 10.12202/j.0476-0301.2021134

在全球变化和人类活动共同影响下, 不同时空尺度水循环过程加剧、极端降水增多、洪旱灾害频发, 严重影响了经济社会可持续发展^[1-3]。气候模式结果发现, 未来我国将会有更多人口和土地暴露在极端降水事件下^[4]。珠江三角洲(以下简称珠三角)是我国城市涝灾多发区^[5], 也是我国经济最发达、城市化程度最高的区域之一^[6], 人口增长、经济发展和城市化进程导致珠三角地区对灾害的敏感性与脆弱性增加^[7]。暴雨是引发该区域洪涝灾害的主要因子, 因此, 辨识该区域暴雨事件发生的主要驱动因子, 对于预测该区域暴雨灾害风险、提升应对暴雨灾害能力具有重要理论与现实意义。

近年来, 已经大量开展对于极端降水事件的研究^[8], 研究方法主要包括 Mann-Kendall(M-K) 检验^[9]、变异分析、趋势分析^[10]、热点分析^[11]、EOF 分析^[12]等; 对于极端降水事件驱动因子研究方法主要有奇异值分解方法^[13]、高空图分析^[11]、合成分析^[12]、相关分析、小波相干分析^[14]等。目前对极端降水事件驱动因素的研究, 大多针对较大空间尺度及单一驱动因素展开, 常见的空间尺度有国家、省、流域等, 影响因子包括水汽、气温、ENSO 等自然因子及温室气体排放、气溶胶排放、城市化进程等人文因子^[15], 针对小空间尺度、多潜在影响因子的研究相对较少。因此, 本文利用 CMORPH 卫星降水产品、土地利用数据、气象

数据、热带气旋资料等, 采用 M-K 趋势检验等方法探究各降水参数的时间演变规律, 应用相关分析、合成分析等方法探究珠三角地区暴雨事件的影响因子。研究结果可为珠三角地区暴雨灾害风险评估与防范提供重要决策依据。

1 数据与方法

1.1 数据来源及处理

1) CMORPH 数据(1998—2018 年, 下同), 该数据集是 NOAA 研制的高时空分辨率卫星降水产品^[16]。研究采用的 CMORPH 数据空间分辨率为 0.25°, 时间分辨率为 3 h, 来自于 ftp://ftp.cpc.ncep.noaa.gov/precip/CMORPH_V1.0/, 用于降水参数提取(详见 1.2.1)。

2) 土地利用数据, 空间分辨率为 300 m, 来自于欧空局土地利用产品(<http://maps.elie.ucl.ac.be/CCI/viewer/>), 裁剪历年欧空局土地利用数据到研究区, 统计研究区内建设用地面积占比, 用来反映研究区城市化程度。

3) 不同等压面上的温度、比湿、风速、位势高度等气象数据, 空间分辨率为 0.25°, 时间分辨率为月平均值; 地表温度数据, 空间分辨率为 0.1°, 时间分辨率为月平均值, 均来自于第五代 ECMWF 大气再分析全球气候数据(ERA5, <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/search?type=dataset&text=ERA5>)。比湿、风速等数据用来计算水汽通量(详见 1.2.2), 温度及位势

* 国家自然科学基金资助项目(41771536); 国家重点研发计划资助项目(2019YFA0606900)

[†] 通信作者: 张强(1974—), 博士, 教授。研究方向: 水文气象学研究、洪旱灾害机理、水循环过程及其对气候变化的响应机制与机理。E-mail: zhangq68@bnu.edu.cn

收稿日期: 2021-05-22

高度数据分别用于计算 1998—2018 年研究区范围内各季节地表平均温度和各季节、各等压面的平均位势高度。

4) 热带气旋资料, 来自于中国台风网的 CMA 最佳路径数据集^[17] (tcdata.typhoon.org.cn)。研究以 200 km 为半径对热带气旋路径点做缓冲区, 作为热带气旋的影响范围^[18], 进而计算 1998—2018 年各季节研究区受不同等级热带气旋的影响频次。

5) 海洋尼诺指数 (ONI), 是用来判定厄尔尼诺/拉尼娜现象发生及强度的重要指标^[19], 来自 <https://www.ggweather.com/enso/oni.htm>。用于厄尔尼诺/拉尼娜年(季)的判定。

在研究中, 年份的各季节定义如下: 春季对应该年份的 3—5 月, 夏季对应该年份的 6—8 月, 秋季对应该年份的 9—11 月, 冬季对应该年份的 12 月和次年 1、2 月。

1.2 数据提取及处理

1.2.1 降水参数提取及驱动因子介绍 裁剪数据到研究区, 按 CMORPH 数据像元位置采用 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 格网对研究区进行空间采样并划分为 114 个降水单元 (图 1)。提取暴雨时间 (日降水量 ≥ 50 mm)、大暴雨 (日降水量 ≥ 100 mm) 时间、特大暴雨 (日降水量 ≥ 200 mm) 时间、暴雨降水量 (暴雨日的平均降水量, 用来反映暴雨发生时的降水强度)、短时强降水 (满足 3 h 内降水量达 50 mm) 时间等指标。值得说明的是, 大暴雨日、特大暴雨日也将被计入暴雨时间指标, 同理特大暴雨日也将被计入大暴雨时间指标。以暴雨时间为例, 若某日研究区内任一降水单元日降水量 ≥ 50 mm, 则将该日计入暴雨时间, 同理可对其他指标进行统计。

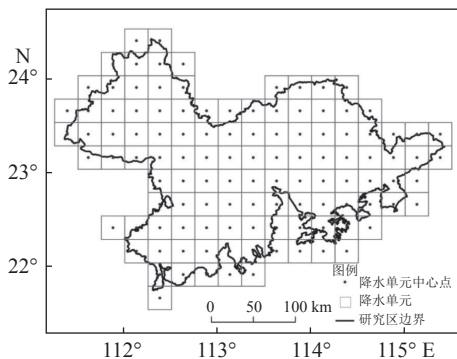


图 1 研究区范围及降水单元划分

考虑到热带气旋活动、城市化进程、水汽输送、厄尔尼诺/拉尼娜现象、地表温度上升造成对流增强等事件均可能导致暴雨事件的发生或年际变化, 因此研究选取了研究区地表温度、净水汽通量、强热带风

暴及以上等级的热带气旋影响频次、气压、城市化程度、厄尔尼诺/拉尼娜现象等潜在驱动因子, 探究其对暴雨事件发生的影响。

1.2.2 水汽通量计算 水汽通量是指某一时间内流经某一面积的水汽量^[20], 研究所采用的水汽通量是指水平方向的水汽通量, 计算式为

$$E = 1/g qv, \quad (1)$$

式中: E 指水平方向的水汽通量; q 为比湿; v 为风速; g 为重力加速度。由于水汽主要集中在对流层中下部, 研究计算 1 000~300 hPa 气压范围内的整层水汽通量, 可得 1998—2018 年各季节进出研究区的水汽通量。则净流入研究区的水汽通量为

$$\Delta E = E_1 - E_2, \quad (2)$$

式中: ΔE 为净流入研究区的水汽通量; E_1 为流入研究区的水汽通量; E_2 为流出研究区的水汽通量。

1.3 相关分析 对提取的降水参数 (暴雨时间、大暴雨时间等) 与各潜在影响因子 (净水汽通量、温度等) 进行相关分析。相关系数计算式为^[21]

$$r = \frac{\sum (x_i - \bar{x}_i)(y_i - \bar{y}_i)}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x}_i)^2} \sqrt{\sum (y_i - \bar{y}_i)^2}}, \quad (3)$$

式中: x 、 y 分别指潜在影响因子和降水参数的时间序列; y_i 为第 i 年的降水参数; x_i 为第 i 年的各潜在影响因子; r 为相关系数。

1.4 M-K 趋势检验、合成分析和 Student's t -test 采用 M-K 趋势检验的方法探究各降水参数时间序列的变化趋势^[22]。合成分析法可用于探究某些特定年份的气候要素场之间的差异, Student's t -test 方法可用来检验 2 个变量差异的显著性^[23]。研究采用合成分析和 Student's t -test 方法探究厄尔尼诺和拉尼娜现象对暴雨事件的影响。

2 结果与分析

2.1 暴雨事件的年际变化 不同时间尺度上暴雨时间的年际变化如图 2 所示, 经 M-K 趋势检验可知, 不同时间尺度上暴雨时间变化趋势均不显著, 没有呈现明显的上升或下降趋势。分析其他降水指标, 在 1998—2018 年, 不同时间尺度上暴雨事件的发生均没有呈现明显的增加或减少趋势。

2.2 水汽通量对暴雨事件的影响 不同时间尺度上各降水参数与净水汽通量的相关系数如表 1 所示。在不同时间尺度上, 暴雨时间与净水汽通量均呈现显著正相关, 在夏秋 2 季, 短时强降水时间与净水汽通量

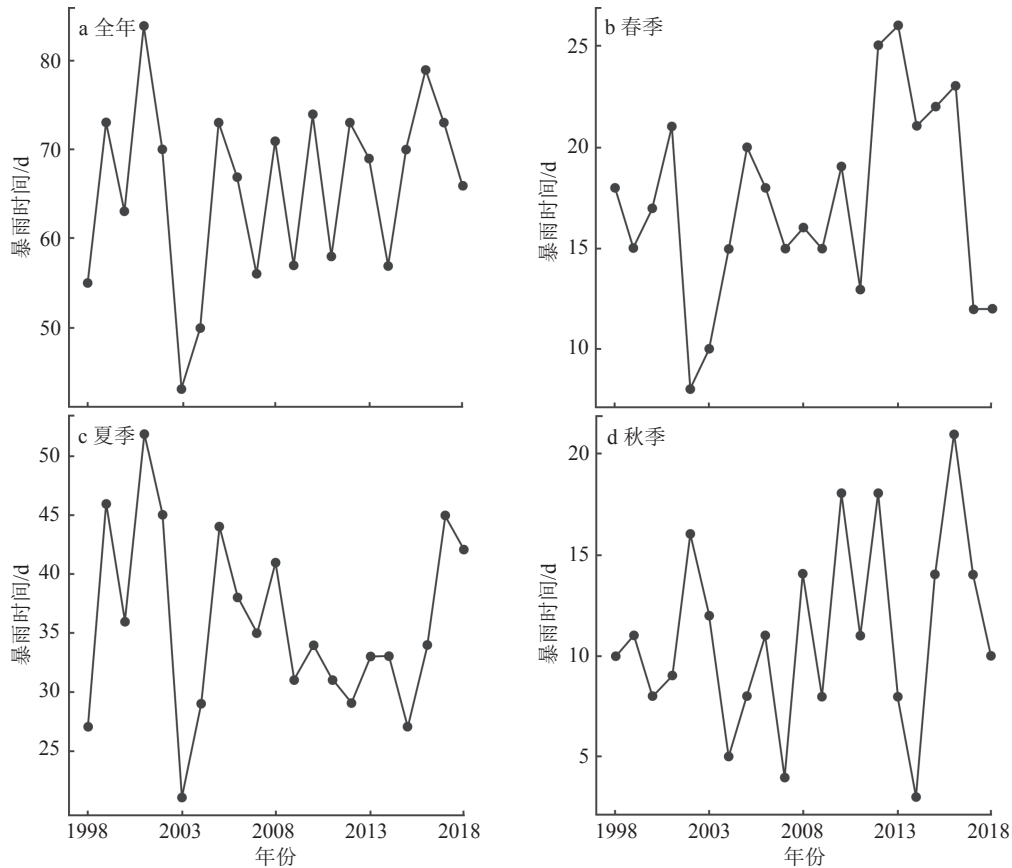


图 2 不同时间尺度上暴雨时间演变规律

呈现显著正相关. 这是由于水汽在降水形成及暴雨事件发生过程中扮演着极其重要的角色^[24], 研究区净流入水汽越多, 则大气中水汽含量增加, 增加降水的概率及强度, 导致暴雨事件发生的概率变大.

表 1 不同时间尺度上降水参数与净水汽通量间相关性

时间尺度	暴雨时间	大暴雨时间	特大暴雨时间	暴雨降水量	短时强降水时间
全年	0.622*	0.291	0.314	0.470**	0.362
春季	0.499**	0.072	-0.095	-0.196	0.156
夏季	0.510**	0.315	0.412	0.327	0.536**
秋季	0.712*	0.618*	0.293	0.141	0.504**

注: *表示通过99%置信水平下的显著性检验; **表示通过95%置信水平下的显著性检验.

1998—2018 年净水汽通量与暴雨时间的关系如图 3 所示, 可知历年研究区水汽通量与暴雨时间呈现相近的变化趋势, 特别是 1998—2004、2006—2015 年内水汽通量与暴雨时间变化趋势尤为相似. 这表明研究区净水汽通量的变化是导致历年暴雨事件发生频次变化的重要影响因素. 而水汽通量是由较大空间尺度上的大气环流控制的, 说明较大空间尺度上的大气环流将影响研究区暴雨事件的发生.

2.3 热带气旋对暴雨事件的影响 通过分析不同等

级热带气旋影响频次与降水参数间相关性可知, 在不同等级的热带气旋中, 强热带风暴及以上等级的热带气旋影响频次与研究区暴雨事件间关系最为密切. 不同时间尺度上降水参数与研究区受强热带风暴级及以上等级热带气旋影响频次(下文简称热带气旋影响频次)间的相关系数如表 2 所示. 由表 2 可看出, 在全年、夏、秋季等季节尺度上, 暴雨时间与热带气旋影响频次呈显著正相关, 这是由于热带气旋活动往往能对其影响区域造成充沛的降水. 在夏季尺度上, 暴雨时间、大暴雨时间、特大暴雨时间、暴雨降水量均

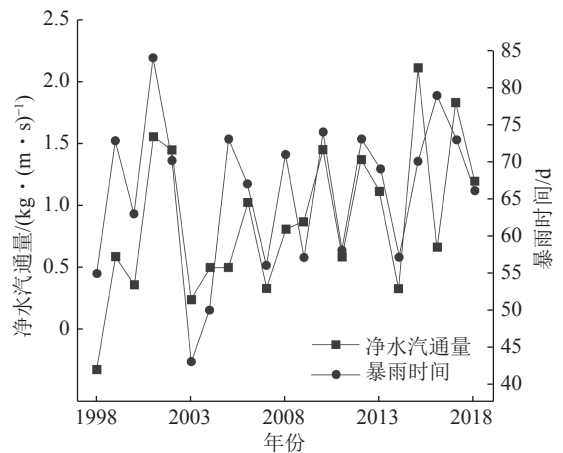


图 3 1998—2018 年净水汽通量与暴雨时间

与热带气旋影响频次呈现显著的正相关关系。热带气旋作为暴雨天气系统,能在短时间内为地面带来大量的极端强降水,导致城市内涝、耕地流失,以及泥石流、滑坡、水土流失等次生灾害的发生^[25]。暴雨事件的发生是热带气旋致灾的主要部分^[26],因此,应重视热带气旋对暴雨事件的影响,其对人类生产生活及生命财产安全带来了极大威胁^[27]。

表 2 不同时间尺度上降水参数与强热带风暴及以上等级的热带气旋影响频次相关性

时间尺度	暴雨时间	大暴雨时间	特大暴雨时间	暴雨降水量	短时强降水时间
全年	0.600*	0.458**	0.198	0.219	0.176
春季	-0.048	-0.059	-0.191	-0.196	-0.217
夏季	0.564*	0.625*	0.439**	0.613*	0.377
秋季	0.463**	0.343	0.059	0.102	0.565*

注: *表示通过99%置信水平下的显著性检验; **表示通过95%置信水平下的显著性检验。

1998—2018年暴雨时间与热带气旋影响频次的关系如图4所示。由图4可见,历年暴雨时间与热带气旋影响频次间存在着相似的变化趋势。当热带气旋影响次数超过常年平均影响次数时,该年内暴雨时间也往往超过多年平均暴雨时间。这表明热带气旋影响频次是导致历年暴雨事件发生频次变化的重要影响因素。

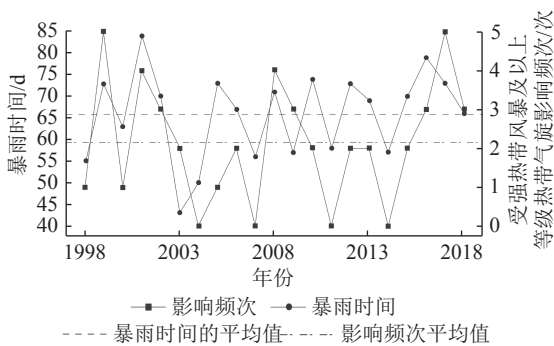


图 4 1998—2018年暴雨时间、强热带风暴及以上等级的热带气旋影响频次统计

2.4 气压对暴雨事件的影响 通过 500 hPa 平均位势高度反映研究区气压。不同时间尺度上降水参数与 500 hPa 平均位势高度间相关系数见表 3。由表 3 可知,在夏季尺度上,大暴雨天时间、特大暴雨时间、暴雨降水量、短时强降水时间均与 500 hPa 平均位势高度呈显著负相关关系,这是由于位势高度越高,气压越高,越不利于大气的辐合上升运动和暴雨的形成,因此在位势高度较高的夏季,暴雨事件发生频次较低。同时,夏季西北太平洋副高气压位置及强度也对

研究区暴雨事件的发生造成影响,通过影响水汽通量、夏季风强度及热带气旋移动方向^[28-29],进而影响研究区暴雨事件。

表 3 不同时间尺度上降水参数与 500 hPa 平均位势高度间相关性

时间尺度	暴雨时间	大暴雨时间	特大暴雨时间	暴雨降水量	短时强降水时间
全年	0.049	-0.155	-0.187	-0.233	0.023
春季	0.159	0.296	0.208	0.153	0.118
夏季	-0.375	-0.518*	-0.444*	-0.530*	-0.443*
秋季	0.244	-0.020	-0.251	-0.254	0.138

注: *表示通过95%置信水平下的显著性检验。

1998—2018年,大暴雨时间和 500 hPa 平均位势高度的关系见图 5。由图 5 可知,500 hPa 位势高度与大暴雨时间呈现明显的反向变化特征。1999—2002年 500 hPa 位势高度处于低值时,大暴雨时间呈现高值;2014—2017年 500 hPa 位势高度处于高值时,大暴雨时间呈现低值;表明气压是影响历年暴雨事件发生频次变化的重要影响因素。

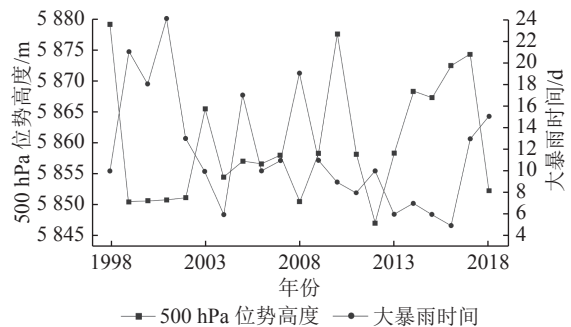


图 5 1998—2018年研究区大暴雨时间和 500 hPa 平均位势高度统计

2.5 温度与暴雨事件间的关系 不同时间尺度上降水参数与平均地表温度相关系数见表 4。由表 4 可知,在夏季尺度上,暴雨时间、大暴雨时间、特大暴雨时间,暴雨降水量等均与温度呈现显著的负相关性。暴雨发生时段,天空云量增大,导致到达地表的太阳

表 4 不同时间尺度上降水参数与平均地表温度相关性

时间尺度	暴雨时间	大暴雨时间	特大暴雨时间	暴雨降水量	短时强降水时间
全年	-0.073	0.087	0.016	-0.340	0.252
春季	-0.219	0.081	-0.119	-0.007	-0.163
夏季	-0.506**	-0.643*	-0.575*	-0.672*	-0.399
秋季	-0.184	-0.409	-0.272	-0.275	-0.472**

注: *表示通过99%置信水平下的显著性检验; **表示通过95%置信水平下的显著性检验。

辐射减少, 地表温度降低。

对 1998—2018 年夏季暴雨事件与地表温度间的关系做进一步探究. 按降水量峰值出现的时刻, 将 1998—2018 年夏季所有暴雨事件分类, 并绘制不同类型暴雨事件降水过程及降温过程线(图 6). 其中, 降温过程线代表某类暴雨事件发生时各时刻平均温度相比无暴雨事件发生时各时刻平均温度的减少量. 由图 6 可知, 对于任何类型的暴雨事件, 每天 14: 00 时的降温幅度均为最大; 若暴雨事件中降水量峰值出现的时间越早, 即一天中暴雨事件发生得越早, 则该日降温将更加明显. 据此, 研究认为暴雨事件会导致地表温度的降低, 而非地表温度降低导致暴雨事件的发生. 地表温度的变化并非造成暴雨事件年际波动的主要原因.

2.6 厄尔尼诺/拉尼娜现象与暴雨事件间的关系 根据 ONI 统计每次厄尔尼诺/拉尼娜现象发生的起止日期, 并以此作为判别厄尔尼诺/拉尼娜年(季)的依据. 若某一时间尺度(年、春季、夏季或秋季)内有厄尔尼诺/拉尼娜现象发生, 则将其判定为厄尔尼诺/拉尼娜年(季); 若某一年(季)内既有厄尔尼诺现象发生, 又有拉尼娜现象发生, 则根据持续时间较长的现象进行判定; 若某一年内厄尔尼诺和拉尼娜现象均有发生且

持续相同时间, 则分别统计厄尔尼诺和拉尼娜现象发生时的 ONI 峰值, 若厄尔尼诺(拉尼娜)现象发生时 ONI 峰值更大, 则判定为厄尔尼诺(拉尼娜)年. 厄尔尼诺/拉尼娜年(季)的判别如表 5 所示.

对厄尔尼诺年和拉尼娜年的降水参数分别统计, 采用 Student's *t*-test 方法检验其差异的显著性, *t* 统计量(绝对值)计算结果如表 6 所示. 可知 *t* 值均不能通过 95% 置信水平下的显著性检验, 厄尔尼诺/拉尼娜现象对暴雨事件的影响不显著.

我们同样分析了研究区城市化程度与暴雨事件间的关系, 发现不同时间尺度上各降水参数与研究区建设用地面积占比间的相关性均不能通过 99% 置信水平下的显著性检验, 对此本研究认为研究时段内城市化进程对研究区暴雨事件的影响不显著.

3 结论与讨论

研究通过提取研究区内各降水参数用以描述暴雨事件, 提取研究区净水汽通量、城市化程度、热带气旋影响频次等潜在影响因子, 采用 M-K 检验、相关分析、Student's *t*-test 等方法探究珠江三角洲地区暴雨事件的影响因素, 结果表明:

1) 不同时间尺度上暴雨事件年际变化趋势均不

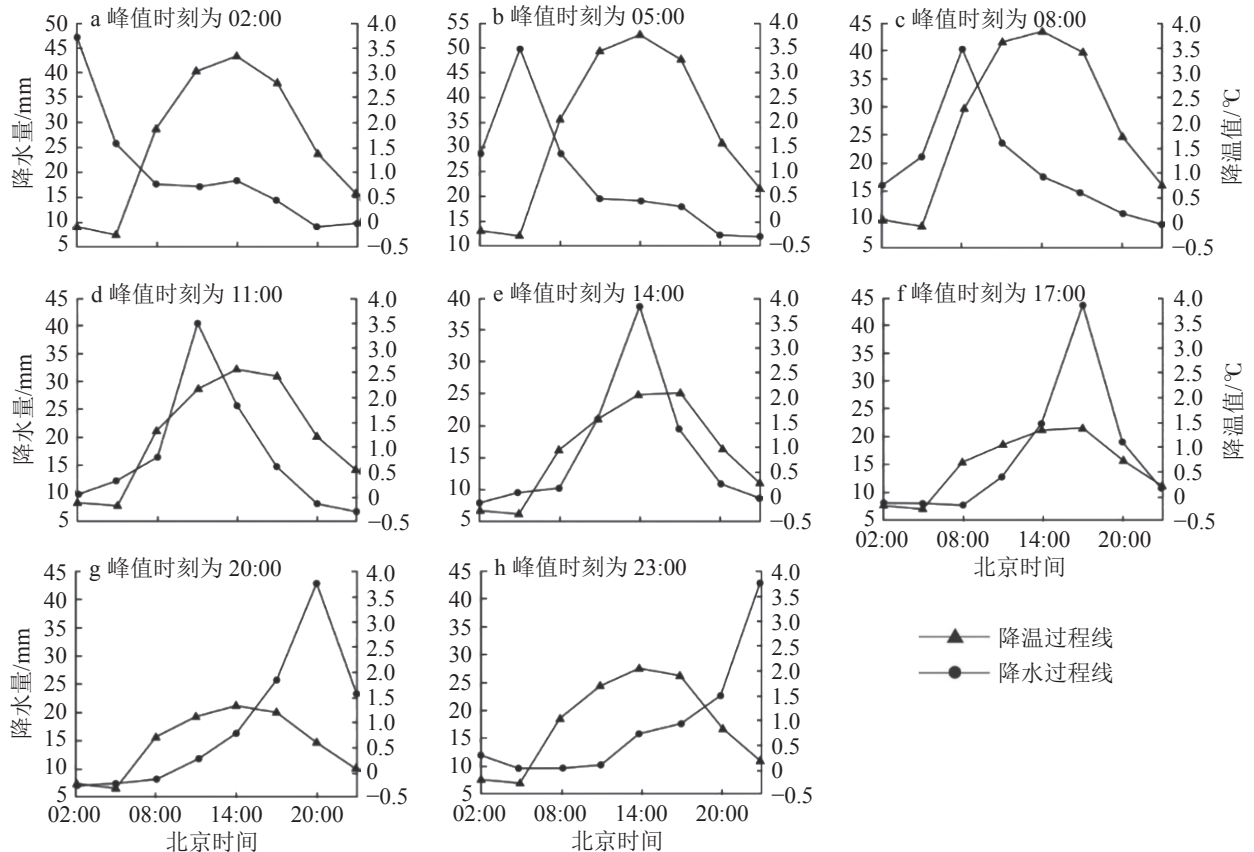


图 6 不同类型暴雨事件降水过程及降温过程线

表 5 厄尔尼诺/拉尼娜年(季)判别结果

年份	全年	春季	夏季	秋季
1998	L	E	L	L
1999	L	L	L	L
2000	L	L	L	L
2001	L	—	—	—
2002	E	—	E	E
2003	E	—	—	—
2004	E	—	E	E
2005	L	—	—	L
2006	E	L	—	E
2007	L	—	L	L
2008	L	L	L	L
2009	E	L	E	E
2010	L	E	L	L
2011	L	L	L	L
2012	L	L	—	—
2013	—	—	—	—
2014	E	—	—	E
2015	E	E	E	E
2016	E	E	L	L
2017	L	—	—	L
2018	L	L	—	E

注: E表示厄尔尼诺年(季), L表示拉尼娜年(季), —表示未被判别为厄尔尼诺或拉尼娜年(季)的时段。

表 6 不同时间尺度上各降水参数 t 统计量计算结果

时间尺度	暴雨时间	大暴雨时间	特大暴雨时间	暴雨降水量	短时强降雨时间
全年	1.436	1.829	0.750	1.114	0.178
春季	1.876	0.982	0.752	0.143	0.633
夏季	0.617	1.119	0.437	0.511	0.262
秋季	0.969	0.689	0.387	0.137	0.083

显著,未呈现明显的上升或下降趋势。研究区净水汽通量、强热带风暴及以上等级热带气旋影响频次、气压变化是导致研究区暴雨事件变化的重要原因,而研究区城市化程度、厄尔尼诺/拉尼娜现象等对暴雨事件影响不显著。

2)水汽的净流入、热带气旋活动会提高暴雨事件的发生概率,高气压控制不利于暴雨事件发生。在各时间尺度上,研究区净水汽通量都显著影响暴雨事件的发生,二者呈正相关关系,说明水汽的净流入会导致研究区大气中水汽含量增加,易造成暴雨事件;在全年、夏季、秋季时间尺度上,强热带风暴及以上等

级的热带气旋显著影响暴雨事件的发生,呈正相关关系,说明热带气旋能在短时间内为地面带来大量的极端强降水,引发暴雨事件;在夏季尺度上,研究区气压(500 hPa 平均位势高度)显著影响暴雨事件的发生,二者呈负相关关系,这是由于高气压不利于大气的辐合上升运动和暴雨的形成,同时,夏季西北太平洋副高气压位置及强度也将对研究区暴雨事件的发生造成影响。

3)研究所得结果可为预测珠三角地区暴雨事件的发生,降低洪涝灾害风险提供理论支撑和决策依据。在今后的研究中应进一步探究影响珠三角地区净水汽通量、热带气旋影响频次及气压变化等的潜在原因,找出导致研究区暴雨事件发生更为根本的驱动因子。

4 参考文献

- [1] 郑江禹,张强,史培军,等. 珠江流域多尺度极端降水时空特征及影响因子研究[J]. 地理科学, 2017, 37(2): 283
- [2] 易路. 陆面水文模型TOPX的改进及其与区域气候模式WRF的耦合研究[D]. 南京: 南京大学, 2018
- [3] EASTERLING D R, MEEHL G A, PARMESAN C, et al. Climate extremes: observations, modeling, and impacts[J]. Science, 2000, 289(5487): 2068
- [4] WANG G, ZHANG Q, YU H Q, et al. Double increase in precipitation extremes across China in a 1.5 °C/2.0 °C warmer climate[J]. Science of the Total Environment, 2020, 746: 140807
- [5] 吴旭树. 变化环境下珠江三角洲地区暴雨内涝危险性时空演变研究: 以东莞市典型小区为例[D]. 广州: 华南理工大学, 2016
- [6] 黄国如,陈易愚,姚芝军. 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, 2021, 32(2): 161
- [7] 陈文方,徐伟,史培军. 长三角地区台风灾害风险评估[J]. 自然灾害学报, 2011, 20(4): 77
- [8] 李双双,杨赛霓,刘宪锋. 1960—2013年秦岭-淮河南北极端降水时空变化特征及其影响因素[J]. 地理科学进展, 2015, 34(3): 354
- [9] 杨素英,孙风华,马建中. 增暖背景下中国东北地区极端降水事件的演变特征[J]. 地理科学, 2008, 28(2): 224
- [10] 杨沛羽,张强,史培军,等. 黄河流域极端降水时空分布特征及其影响因素[J]. 武汉大学学报(理学版), 2017, 63(4): 368
- [11] 贾建辉,龙晓君. 广东省极端降水时空分布特征研究[J]. 水利水电技术, 2018, 49(12): 43
- [12] 韩翠,尹义星,黄伊涵,等. 江淮梅雨区1960—2014年夏季极端降水变化特征及影响因素[J]. 气候变化研究进展, 2018, 14(5): 445
- [13] 孙建奇,敖娟. 中国冬季降水和极端降水对变暖的响应[J]. 科学通报, 2013, 58(8): 674

- [14] 李双双, 孔锋, 韩鹭, 等. 陕北黄土高原区极端降水时空变化特征及其影响因素[J]. 地理研究, 2020, 39(1): 140
- [15] 孔锋, 史培军, 方建, 等. 全球变化背景下极端降水时空格局变化及其影响因素研究进展和展望[J]. 灾害学, 2017, 32(2): 165
- [16] 俞琳飞, 李会龙, 杨永辉, 等. 基于CMORPH CRT产品的太行山区降水时空格局[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(2): 305
- [17] YING M, ZHANG W, YU H, et al. An overview of the China meteorological administration tropical cyclone database[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2014, 31(2): 287
- [18] 张悦, 李珊珊, 陈灏, 等. 广东省台风灾害风险综合评估[J]. 热带气象学报, 2017, 33(2): 281
- [19] 谢建群, 谭飞, 翁武坤, 等. 1951—2018年汕头汛期暴雨变化趋势及与ENSO的关系[J]. 广东气象, 2019, 41(2): 24
- [20] 管华. 水文学[M]. 2版. 北京: 科学出版社, 2015
- [21] 杜文涛, 周萍, 赵萌醒, 等. CMORPH数据在吉林省降雨侵蚀力计算中的应用[J]. 中国水土保持, 2019(6): 31
- [22] 宋楚南. 开都河流域气候变化及其对全球涛动指数的响应[D]. 上海: 华东师范大学, 2013
- [23] 王素. 四类ENSO事件对东南亚降水异常的影响[D]. 杭州: 浙江大学, 2015
- [24] TRENBERTH K E, FASULLO J, SMITH L. Trends and variability in column-integrated atmospheric water vapor[J]. Climate Dynamics, 2005, 24(7/8): 741
- [25] 夏侯杰. 两广地区热带气旋极端降水特征及成因诊断[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2016
- [26] 张庆红, 韦青, 陈联寿. 登陆中国大陆台风影响力研究[J]. 中国科学: 地球科学, 2010, 40(7): 941
- [27] ZHANG Q, ZHANG W, LU X Q, et al. Landfalling tropical cyclones activities in the South China: intensifying or weakening?[J]. International Journal of Climatology, 2012, 32(12): 1815
- [28] ZHANG Q, ZHENG Y J, SINGH V P, et al. Summer extreme precipitation in Eastern China: mechanisms and impacts[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2017, 122(5): 2766
- [29] WANG H J, CHEN H P. Climate control for southeastern China moisture and precipitation: Indian or East Asian monsoon?[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2012, 117(12): 12109

Rainstorm events and driving factors in Pearl River Delta

SONG Jinbo ZHANG Qiang WANG Gang WU Wenhuan

(State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, 100875, Beijing, China)

Abstract Pearl River Delta is socioeconomically highly developed. Flash floods and urban inundation are mainly attributed to rainstorms. It is of great significance to investigate causes and driving factors behind such rainstorms. Most previous studies were done focusing on singular factors. In this study, precipitation indices were defined, potential driving factors of rainstorm events were identified, from CMORPH precipitation data, ERA5 meteorological data, ESA land use data and tropical cyclone disaster data. The driving factors of rainstorm events over Pearl River Delta were identified by correlation analysis, M-K test, synthetic analysis and Student's *t*-test. Trends in rainstorm events were found not statistically significant on varied time scales. Net water vapor flux, air pressure and frequency of tropical cyclones were identified to be important variables behind changes in rainstorm events. Location and intensity of western Pacific subtropical high in summer was found to affect occurrence of rainstorm events. Urbanization and El Nino/La Nina phenomenon had no influence on rainstorm events. Rainstorm events tended to decrease surface temperature, attributing to increased cloud coverage. Our work provides some theoretical support and decision-making basis for predicting occurrence of rainstorm events, and for human mitigation of rainstorm-related disasters.

Keywords rainstorms; Pearl River Delta; driving factor; correlation analysis; M-K test; Student's *t*-test

【责任编辑:刘先勤】