

1981~2020 年华南地区区域性极端降水事件研究

杨雯婷^{1,2}, 孙建华^{1,2,3*}, 傅慎明⁴, 赵黎京⁵

¹ 中国科学院大气物理研究所云降水物理与强风暴实验室 北京 100029

² 中国科学院大学 北京 100049

³ 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 广东珠海 510275

⁴ 中国科学院大气物理研究所国际气候与环境科学中心 北京 100029

⁵ 河北建投新能源有限公司 石家庄 050000

摘要 基于华南地区 176 个国家级自动气象站资料以及 1981~2020 年 ECMWF ERA5 再分析资料, 采用区域性极端事件的客观识别方法 (objective identification technique for regional extreme events, OITREE)、合成分析等方法, 本文研究了华南地区区域性极端降水事件的时空分布特征, 并分析了事件偏多年及偏少年的大尺度环流特征。主要结论如下: 区域性极端降水事件的频次在年际尺度上的周期变化较为明显, 并具有较明显的月变化特征, 高发时段为 5~6 月; 在极端强度及影响范围上, 华南地区大部分区域性极端降水事件强度约 130 mm/d, 较少事件强度超出 320 mm/d, 且区域性极端降水事件的影响范围呈显著上升趋势 (~310 km²/yr); 在事件的综合强度上, 综合指数 Z 呈现显著的上升趋势 (0.05/10 yr), 表明事件强度呈现显著增加的趋势; 在大湾区及广东北部, 区域性极端降水事件的累积降水及其对总降水的贡献呈显著上升趋势, 而在广西南部地区, 两者呈下降趋势; 在事件偏多年, 华南地区存在显著的西南风水汽输送及整层水汽通量强辐合的特征, 而在事件偏少年, 华南地区具有整层水汽通量辐合偏弱的特征; 一般降水日, 850 hPa 上华南地区位于弱偏东南风区, REPEs 降水日, 华南地区位于气旋性环流的东南部, 受到明显的西南风风速大值带影响。

关键词 华南; 区域性极端降水; 客观识别方法; 大尺度环流

作者简介 杨雯婷, 女, 1997 年出生, 博士研究生, 主要从事中尺度气象学研究。Email: yangwenting@mail.iap.ac.cn
通信作者 孙建华, E-mail: sjh@mail.iap.ac.cn

资助项目 国家重点研发项目 2019YFC1510400, 国家自然科学基金项目 42075002

Funded by National Key Research and Development Program of China (Grant 2019YFC1510400), National Natural Science Foundation of China (Grant 42075002).

Study on regional extreme precipitation events over mainland of the South China during 1981-2020

Yang Wen-Ting^{1,2}, Sun Jian-Hua^{1,2,3}, Fu Shen-Ming⁴, Zhao Li-Jing⁵

¹ Key Laboratory of Cloud-Precipitation Physics and Severe Storms, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

³ Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai), Zhuhai, Guangdong Province 510275

⁴ International Center for Climate and Environment Sciences, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

⁵ HCIG New-energy Co., Ltd, Shijiazhuang 050000

Abstract Based on 176 meteorological hourly precipitation data over mainland of the South China (Guangdong and Guangxi) and monthly reanalysis data from ERA5 (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) fifth reanalysis) from 1981-2020, and applying the objective identification technique for regional extreme events (OITREE) and synthetic analysis, this study focused on the temporal and spatial characteristics of regional extreme precipitation event (REPE) over mainland of the South China, and further analyzed circulations in the years with high and low REPE frequency. The main conclusions are as follows. In frequency, the periodic variation of REPE frequency on the interannual scale is obvious, and it has obvious monthly distribution characteristics with the peak period from May to June. In extreme intensity and impacted area, the intensity of most REPEs in Guangdong and Guangxi is about 130 mm/d, and that of few events exceeds 320 mm/d, and the impacted area of REPEs shows a significant upward trend ($\sim 310 \text{ km}^2/\text{yr}$). In comprehensive intensity, comprehensive index Z shows a significant upward trend (0.05/10 yr), which indicates intensity of REPE has a significant increasing trend. In the Greater Bay Area and northern Guangdong, the annual accumulated precipitation of REPEs and their contribution to annual total precipitation both show a significant upward trend, while in southern Guangxi, they show a downward trend. For years with high REPE frequency, there is significant water vapor transportation and the intensive convergence of whole layer moisture flux over the South China, while for years with low REPE frequency, there is relatively weak convergence of the whole layer moisture flux divergence. At days of normal precipitation events, South China is mainly

dominated by weak southeasterlies at 850 hPa, while at days of REPEs, South China is located in the southeast of the cyclonic circulation, and is affected by strong southwesterlies.

Keywords: South China, Regional extreme precipitation, Objective identification technique for regional extreme events, Large-scale circulation

1 引言

在全球变暖的背景下, 极端降水事件的强度和频次均呈现出增加的趋势, 常引发山洪、泥石流、城市内涝等灾害, 对自然环境、人类社会和经济构成巨大威胁 (IPCC 2013; Cheng et al., 2018)。据统计, 中国每年因极端降水而造成的经济损失高达 1000 亿元人民币 (China Meteorological Administration 2017; Kong et al. 2017)。因此, 加强对极端降水事件的研究具有重要的显示意义。有研究指出, 近年来, 中国极端降水事件的频次呈现上升趋势 (Pan, 2002; Wang and Zhou, 2005; Zhai et al., 2005; Cui et al., 2018; Wu et al., 2018; Yin et al., 2019), 且极端降水事件频数的变化趋势具有明显的区域差异 (邹用昌等, 2009; Li et al., 2016)。

在极端降水事件中, 区域性极端降水事件 (Regional extreme precipitation events, REPEs) 是覆盖面积大、持续时间长的降水事件, 会导致大范围洪涝和泥石流等自然灾害的发生, 例如, 1998 年与 2020 年的长江流域特大洪灾 (闵岫和钱永甫, 2008; Fu et al., 2022)。已有研究表明, 自 1950 年以来, 中国区域性极端气候事件发生频次增加 (王伟光和郑国光, 2012)。国内外学者也基于空间和时间连续性提出了多种区域性极端降水事件识别方法, 并分析了 REPEs 的空间和时间连续性。汪汇洁等 (2014) 定义区域持续性暴雨事件为连续 5 天或 5 天以上不小于 10 个格点的日降水量超过 50mm, 且相邻两天雨带重合率超过 20% 的事件。该方法考虑了时间连续性, 但空间连续性考虑欠缺。Chen and Zhai (2013) 提出区域持续性极端降水事件识别方法 (Regional persistent extreme precipitation events, RPEPEs), 先找出单站日降水量超过 50mm, 且时间至少重合一天的单站降水事件, 再满足至少有 3 个站点满足相互间距离小于 5° 的降水事件。该方法有效考虑了空间和时间连续性, 但识别过程较为复杂, 且参数只适用于作者所研究的区域。Ren et al. (2012) 提出一种基于日降水数据区域性极端事件的客观

识别方法(Objective identification technique for regional extreme events, OITREE), 并成功将其运用于识别中国地区的 REPEs (Zou and Ren, 2015)。该方法不仅有效地考虑了空间紧邻性和时间连续性,且可以适用于不同区域的极端降水事件识别。

华南地区作为我国三大雨区(华南地区、华北地区及长江流域)之一,西侧为云贵高原,东南两侧为热带洋面,受季风系统影响,该地区强降水频发,常受暴雨灾害侵袭(陶诗言,1980;赵思雄等,2004;谈哲敏等,2013)。目前,尽管对于华南地区极端降水事件的研究已取得了不少进展,但已有的研究主要是针对华南海域极端降水事件的长期趋势(Huang et al., 2009; Li et al., 2010; Chen and Zhai, 2013; Wu et al., 2016)或个例研究(孙建华和赵思雄,2000;林晓霞等,2017;张亚妮等,2019)。汪汇洁等(2014)研究 1981~2011 年华南地区区域持续性暴雨事件时,发现该地区区域非台风持续性暴雨事件主要分为 E 型(雨带位于云贵高原以东)和 F 型(雨带位于云贵高原和广西)。Liu et al. (2016)将 1981~2014 年华南地区持续性暴雨事件分为 3 类(SC-A 型:雨带在广东沿海和东北部;SC-B 型:雨带在广东和广西省交界;SC-C 型:雨带在广西北部地区)。孙婧超(2018)发现 1981~2016 年华南汛期区域性极端日降水事件的发生频次明显增加。由上可知,目前针对华南地区 REPEs 的研究大多存在考虑单一因素的问题,没有全面考虑各种因素来定义 REPEs,因此对于该地区 REPEs 综合特征的表征能力有限。为此,本文基于 Ren et al. (2012)提出的多要素 REPEs 识别方法 OITREE,利用 1981~2020 年共 40 年的暖季(5~9 月)逐小时降水数据,识别了华南地区该时段的 REPEs,并由此较系统地揭示了此类事件的各项指标的主要统计特征,以及 REPEs 偏多年与偏少年的水汽输送特征。这不仅在一定程度上深化了对华南地区 REPEs 变化规律的认识,也为更好地应对华南地区的暴雨灾害、有效地防洪救灾提供了科学支撑。

2 资料和方法

本文所用资料为广西、广东地区 176 个国家级自动气象站 1981~2020 年 5~9 月逐小时降水资料及欧洲中期天气预报中心(ECWMF)的 ERA5 再分析日平均 850 hPa 水平风场、850 hPa 位势高度场、地面气压资料、垂直方向上 20 层纬向风、经向风及比湿资料(300 hPa-1000 hPa)和月平均再分析 850 hPa 水平风场

资料，水平分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 。

参考 Fu et al.(2016)对华南区域的界定方法,本文主要采用两广地区($20^{\circ}\text{N} \sim 27^{\circ}\text{N}$, $104.5^{\circ}\text{E} \sim 118^{\circ}\text{E}$, 图 1)的站点来研究华南地区的 REPEs 时空变化特征。在利用 Ren et al.(2012)提出的 OITREE 方法来识别 REPEs 时,将小时降水资料处理成逐日降水资料(世界时 00~24 时),以下的计算和分析都是基于逐日资料展开的,具体的识别方法如下。

本文参考 Ren et al.(2012)提出的 OITREE 方法,在识别华南地区 REPEs 时,考虑如下三个条件:

(1) 判断单站降水是否为极端降水(日降水量 $\geq R95$)。将各站 1981~2020 年 5~9 月日降水资料($\geq 0.1 \text{ mm}$)从小到大排序,选取序列的第 95 百分位值($R95$)为极端降水阈值(图 1),若某站的某日降水量超过该站点的阈值,则被认定为一次极端降水事件。从图中可以看出,华南地区所有站点阈值都超过 41 mm,且区域所有站点阈值的平均值为 55.8 mm,达到了国家气象局定义的暴雨事件的标准。

(2) 确定相对的雨区中心和区域性雨带。当单站周围 200 km 范围内至少五站出现满足条件(1)的极端降水,且单站的异常比(以出现极端降水的站点为中心,找出其 200 km 范围内出现极端降水的站点数,然后除以 200 km 范围内总站点数) ≥ 0.2 时,确立以该站为中心的雨区,且将中心站周围 200 km 范围内不同中心的雨区合并,并进一步将同一天内站点重合率 ≥ 0.4 的雨区合并。

(3) 事件的时间连续性的定义。针对满足条件(1)和(2)的站点,相邻两日站点重合率大于 0.1 判定为连续。持续时间大于等于两天的事件定义为 RPEPEs,未达到两天以上的事件为非持续性降水事件。

针对满足以上条件的 REPEs,本研究将某事件过程中降水量超过 25 mm 的并集定义为该次事件的影响面积(Chen et al., 2012)。相比于站点数据计算得到的影响面积,采用格点数据进行计算更为合理。为了减小数据插值过程中的不确定性,本文利用 Cressman 客观分析方法,将 176 个站点的降水数据插值到 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 的格点上(Mastylo, 2013)。利用插值得到的格点数据,计算 $\geq 25 \text{ mm}$ 的范围公式如下:

$$I_k = \bigcap_t I_{kt} \quad (1)$$

k 和 t 分别代表事件的序号和日数, I_k 为事件的影响面积, I_{kt} 为事件过程中每天的影响面积, 整个事件的影响面积为日影响面积的并集。

REPEs 强度的定义: 将事件过程中的单站最大降水量定义为极端强度, 详见公式 (2)。此外, 本研究定义两个指数, 包括 REPEs 的单站暖季累积降水量及其占暖季总降水量的比值, 详见公式 (3) 和 (4)。利用这两个指数分析 1981~2020 年各个地区 REPEs 的变化趋势。需要注意的是, 我们更关注地区的极端降水变化趋势, 且考虑不同 REPEs 对比的公平性, 选取中国气象局定义暴雨事件的标准 (日降水量 ≥ 50 mm), 利用格点数据, 计算在 REPEs 影响下的日降水量超过 50 mm 的单点暖季累积降水量 (即暴雨累积降水量) 及其占暖季总降水量的比值。

$$E_k = \text{Max}_{ij}(T_{ij}) \quad (2)$$

$$A_i = \sum_k \sum_t T_{kt} \quad (3)$$

$$R_i = A_i / T_i \quad (4)$$

E_k 代表事件的极端强度; T_{ij} 为事件过程中单站日降水量; A_i 指事件影响下的日降水量超过 50 mm 的单点暖季累积降水量; T_{kt} 为事件影响下的日降水量超过 50 mm 的单点日降水量; k 、 t 和 j 分别代表事件的序号、持续时间和站点, i 代表格点; T_i 为格点 i 上的暖季总累积降水量; R_i 为 A_i 占 T_i 的比重。

在以上分析的基础上, 为了分析事件的综合强度, 本文引入综合指数 Z , 详见公式 (6), 该指数涉及三个参数, 包括持续时间、极端强度及影响面积。相比于 Ren et al. (2012) 提出的综合指数 (参数涉及持续时间、极端强度、累积强度、最大面积和累积影响面积), 本文定义的综合指数简化了参数量, 但能抓住最重要的特征。采用李韵婕等 (2014) 客观计算综合指数的方法, 具体计算步骤如下: 首先, 分别计算三项参数前 10% (从大到小排序) 事件的数值和占总事件数值和的比重。其次, 采用最大-最小标准化的方法 (公式 (5)), 将三个比重值分别进行归一化处理, 得到系数 0.53, 0.13 和 0.1。最后, 对三项参数加权求和得到综合指数 Z 。

$$x' = (x - \min A) / (\max A - \min A) \quad (5)$$

$$Z = 0.53D + 0.13E + 0.1I \quad (6)$$

x 代表参数前 10%事件的数值和占总事件数值和的比重; x' 为 x 通过最大-最小标准化映射到区间[0,1]的值; $minA$ 代表参数 10%事件的数值和占总事件数值和的比重; $maxA$ 代表参数 10%事件的数值和占总事件数值和的比重的最大值; D 、 E 、 I 分别代表标准化后的事件持续时间、极端强度和影响面积。

本文还采用了集合经验模态分解 (Ensemble empirical mode decomposition, EEMD) (Wu and Huang, 2011) 方法来分析事件频次的变化特征。该方法主要是通过通过在原始信号序列中加入白噪声序列, 再利用经验模态分解方法 (Huang et al. 1998) 分离出不同的时间尺度, 对经验模态分解方法做了改进, 避免了模态混叠现象 (Wu and Huang, 2011)。此外, 本文还采用重现期来研究某一强度的区域性极端降水事件发生的概率。极端降水事件重现期是指大于或者等于某一个阈值出现一次的平均间隔时间, 即为某一强度的区域性极端降水事件发生频率的倒数, 俗称 N 年一遇 (Reces, 2004)。在计算重现期时, 采用 Weibull 极值分布函数对事件强度进行拟合(陈兴旺, 2008)。在环流分析中, 为了对比华南地区暖季 REPEs 与一般类型降水事件的环流差异, 本文定义华南地区一般类型降水事件为至少有 1 个站点的单站日降水量大于等于 0.1 mm 且小于 50 mm 的降水事件。该定义参考了中国气象局定义暴雨事件的标准 (日降水量 ≥ 50 mm), 剔除了暴雨事件。

3 结果分析

3.1 持续时间与频次

基于上述 REPEs 定义, 得到华南地区 1981~2020 年 5~9 月共 672 次 REPEs。其中, 非持续性事件有 520 次, 持续性事件有 152 次 (占总事件比 23%)。持续性事件的持续时间一般在 2~5 天, 且频次较高的是持续 2~3 天的事件 (表 1), 约占全部持续性事件的 91%。图 2 给出华南地区 1981~2020 年 5~9 月 REPEs 频次的历年变化。发生频次排名前三位的年份为 2001 年 (28 次)、2002 年 (27 次) 和 2015 年 (25 次)。1981~2020 年 REPEs 频次总体呈上升趋势, 但并不显著, 上升速率为 0.34 次/10 yr。为了研究该频次时间变化的主要模态, 采用 EEMD 方法对频次时间序列进行了分解, 并进行红噪声检验, 得到两个固有模态函数

(Intrinsic mode functions, IMFS) 和相应的红噪声检验图 (图 3)。IMFS 是具有不同振幅和频率的变化序列, 是通过在原始信号序列中加入白噪声序列之后, 利用经验模态分解将信号中不同尺度的波动和趋势逐级分解, 从而得到的不同尺度的数据序列, 可以反映不同时间尺度的波动特征。从图 3 可以看出, IMF 分量呈现出从高频到低频, 围绕 0 值振荡的分布形态。其中, IMF 第一分量为最高频分量, 方差贡献率为 60%, 在所有分量中振幅最大, 并且在 2000 年以后, 有较大波动; IMF 第二分量的振荡周期相对变大, 方差贡献率为 20%, 振幅相对较小, 20 世纪 90 年代以前波动较大, 而后波动减弱。从噪声检验可以看出, 前两个 IMF 分量具有不同的显著性 (通过 95% 的信度检验) 的波动周期 (IMF 第一和第二分量分别呈现出准 4yr 和准 8yr 的周期性特征), 表明事件频次在年际尺度上的周期变化较为明显, 且变化主要是由第一个高频分量所决定的。

图 1 1981~2020 年 5~9 月华南地区站点日降水量 (≥ 0.1 mm) 第 95 百分位空间分布 (mm) (紫色轮廓为粤港澳大湾区)
Fig.1 Spatial distribution of the 95th percentile of daily precipitation (above 0.1 mm) from May to September over mainland of the South China during 1981-2020 (units: mm). The Greater Bay Area was outlined in purple.

图 2 1981~2020 年 5~9 月华南地区 REPEs (Regional extreme precipitation events) 频次的逐年变化 (实线) 及其线性趋势 (虚线) (图中公式为线性趋势公式)
Fig.2 Temporal variation of the annual frequencies for the total Regional extreme precipitation events (REPEs) from May to September over mainland of the South China during 1981-2020. The dashed line represented linear trend and its formula was shown.

图 3 (a-b) 基于 EEMD 分解总 REPEs 频次时间序列得到的前两个 IMF 分量及 (c-d) 相应的红噪声检验 (蓝虚线和绿虚线分别代表 95% 和 5% 信度水平; 红实线代表添加的红噪声; 黑实线代表频次的频谱)
Fig.3 (a-b) The first two IMF (Intrinsic Modal Function) components of the decomposition of frequency for the total REPEs based on ensemble empirical mode decomposition (EEMD) method. (c-d) Red noise test for the IMF1-2. The blue (green) dashed line was 95% (5%) confidence level. The red solid line indicated the added red noise. The black solid line indicated the spectrum for frequency.

表 1 1981~2020 年 5~9 月华南地区不同持续时间 REPEs 频次

Table .1 Frequency of REPEs with different duration from May to September over mainland of the South China during 1981-2020.

	非持续性	RPEPEs			
	REPEs	2 天	3 天	4 天	5 天
频次	520	109	30	10	3

图 4 为 1981~2020 年华南地区不同持续时间的区域性极端事件频次 5~9 月分布。可以看出，事件的月变化较明显，高发时段为 5~6 月。非持续性事件与总事件的分布特征相似，华南地区 REPEs 主要是非持续性事件占主导地位。对于持续性事件，由于持续时间长，因此频次较少，频次峰值出现在 6 月，共 52 次，持续性时间在 5 天以上的事件只有 3 次，出现在 6 月和 8 月，而非持续性事件的峰值出现在 5 月，共 155 次。

图 4 1981~2020 年 5~9 月华南地区不同持续时间 REPEs 的月频次
Fig.4 Monthly frequency of REPEs with different durations from May to September over mainland of the South China during 1981-2020.

3.2 极端强度和累积强度

为了分析降水事件的强度，基于公式（2），本文计算了每个事件的极端强度。图 5 给出 1981~2020 年华南地区 5~9 月区域性极端事件不同极端强度区间的频次分布。发生频次最多的强度区间为[120,140)（103 次），[100,120)（87 次），和[140,160)（85 次），而强度在 320 mm 以上的事件频次较少，极端强度范围为 60~640 mm。

图 6a 为 1981~2020 年华南地区 5~9 月不同持续时间的区域性极端事件的极端强度分布。2 天以上的 REPEs 极端强度的中位数都超过 200 mm，其中，4 天以下的 REPEs，持续时间越长，强度的中位数越强，这可能与大尺度天气系统的较强强迫有关，且部分事件强度达到 570 mm，最大强度为 636 mm。对于非持续性事件，尽管总体降水强度偏弱，大尺度天气系统的强迫可能较弱，但降水的异常值频次较高，表明一些极端降水事件仍可在天气尺度强迫较弱的情况下发生，例如暖区暴雨（黄士松等，1986；伍志方等，2018）。从月尺度上看（图 6b），5~9 月各月事件和总事件的盒须图分布相似，最大值为 636 mm 出现在 5 月，异常大值多出现在 5 月和 6 月，其中超过 500mm 的强度均在 5-6 月，说明华南前

汛期 5-6 月份是极端 REPEs 出现的重要阶段。就中位数而言, REPEs 在 7-8 月的强度最大(图 6b), 但频次相比于 5、6 月份较少(图 4)。为了综合考虑事件的持续时间与强度, 图 7 给出各月不同持续时间的区域性极端事件的最大极端强度分布。具有最大极端强度的持续两天的事件和非持续性事件发生在 5 月份; 具有最大极端强度的持续 3、4、5 天的事件分别发生在 6 月份、7 月份和 8 月份。可以看出, 5 月份大部分事件持续 1~3 天(图 4), 且发生了极端强度最大值为 636 mm 事件(持续 2 天事件)(图 7), 即 5 月份大部分事件持续时间虽然偏短, 但极端强度偏强, 5 月处于华南前汛期, 这可能与南海夏季风有关, 有研究表明南海夏季风一般建立在 5 月, 且在季风活跃期, 降水系统频繁发生, 华南地区降水强度强(Wang et al. 2004; Luo et al., 2013); 8 月份持续 1-2 天的最大极端强度也比较强, 这可能与热带气旋有关, 有研究表明热带气旋引起的华南持续性暴雨主要发生在 8 月(李春晖等, 2017)。

图 5 1981~2020 年 5~9 月华南地区 REPEs 在不同极端强度区间的频次分布
Fig.5 Distributions of the frequency of extreme intensity for the total REPEs from May to September over mainland of the South China during 1981-2020.

图 6 1981~2020 年 5~9 月华南地区 (a) 不同持续时间和 (b) 各月 REPEs 极端强度的盒须图(框体上下分别代表第 75 (Q3)和第 25 (Q1)百分位值; 红线代表中位数; 须代表 $[Q1-1.5 \times (Q3-Q1)]$ 和 $[Q3+1.5 \times (Q3-Q1)]$ 覆盖范围; 须外围的红十字符号代表异常值)
Fig.6 Boxplot of extreme intensity of REPEs for (a) different durations and (b) different months from May to September over mainland of the South China during the 40-yr period. The boxes indicate the 25th (Q1) to 75th (Q3) percentiles and the red line indicates the median value. The whiskers indicate the range of $[Q1-1.5 \times (Q3-Q1)]$ and $[Q3+1.5 \times (Q3-Q1)]$. The red crosses indicate the outliers which are outside the range of whiskers.

图7 不同持续时间REPEs最大极端强度的月份分布
Fig.7 Monthly distributions of maximum extreme intensity of REPEs with different durations.

由于 RPEPEs 的影响在华南地区也具有区域性差异, 基于 Cressman 客观分析方法插值得到的格点资料及公式(3~4), 本文计算了每个格点的事件累积降水及总降水量, 并进一步分析其变化趋势在区域上的差异。图 8a 为 1981~2020 年华南地区 5~9 月区域性极端事件的累积降水趋势分布。可以看出, 上升趋势通过 90%信度检验的区域主要是粤港澳大湾区中北部、广东省北部地区和广西

省北部，下降趋势通过 90%信度检验的区域主要是广西南部 and 雷州半岛的北部地区，表明 1981~2020 年这些地区的区域性极端事件累积降水在不同的区域变化趋势是有显著差异的，且上升趋势最高值在粤港澳大湾区中北部，可达到 7mm/yr。为了进一步分析 REPEs 的降水对总降水量的占比变化情况，本文计算了 1981~2020 年 REPEs 累积降水占总降水的比例趋势（图 8b）。分布特征与图 8a 类似，上升趋势通过信度水平 90%的 t 检验的区域主要是粤港澳大湾区中北部、广东省北部地区和广西省北部，最高值可达到 0.05/10 yr；下降趋势通过 90%信度检验的区域主要是广西南部地区和和雷州半岛的北部，最高值可达到 0.04/10 yr。此外，图 8b 表明了区域极端降水事件对总降水量存在明显的直接影响。总体上，除了广西南部地区外，华南大部分地区区域性极端事件降水对总降水的贡献是增大的。

图 8 1981~2020 年 5~9 月华南地区区域性极端事件的 (a) 累积降水趋势 (单位: mm) 和 (b) 事件降水占年总降水比例趋势 (单位: /10yr) 分布 (紫色轮廓为粤港澳大湾区; 蓝菱形代表趋势通过信度水平 90%的 t 检验)

Fig.8 Spatial distribution of trends of (a) the annual accumulated REPEs precipitation (units: mm) and (b) the ratio of that to annual accumulated precipitation (units: /10yr) from May to September over mainland of the South China during 1981-2020. The Greater Bay Area was outlined in purple. The blue diamond mark represented the trend can reach the significance level

3.3 影响范围和综合指数 Z

为了分析 REPEs 的影响范围，基于公式 (1)，本文计算了每次事件日降水量超过 25 mm 的最大影响范围。图 9a 为 1981~2020 年华南地区 5~9 月区域性极端事件的逐年平均影响面积变化。1981~2020 年总事件的平均影响面积为 170800 km²。在时间分布上，影响面积较大的事件发生在 20 世纪 80 年代早期、90 年代早期、21 世纪 00 年代末期和 10 年代早期；影响面积较小的发生在 20 世纪 80 年代末期。具体地，影响面积最大的 3 次事件分别发生在 2008 年 (~230500 km²)、2013 年 (~219700 km²) 和 1981 年 (~215000 km²)，最小的事件发生在 1991 年 (107600 km²)。从变化趋势来看，1981~2020 年区域性极端事件的影响面积呈现显著的上升趋势 (~310 km²/yr, 通过 t 检验 95%信度检验)。

为了分析 REPEs 极端强度和影响范围之间的关系，图 9b 给出事件极端强度和影响面积的散点密度分布。密度核心分布在极端强度~120mm，影响面积

~90000 km² 的位置，表明 REPEs 主要集中在极端强度较低、影响面积较小的事件。从线性拟合结果来看（图 9b），两者具有较强的线性关系（线性趋势通过信度水平 95%的 t 检验），表明事件极端强度越强，影响面积越大。

图9 1981~2020年5~9月华南地区REPEs (a) 影响范围的变化(实线)及其线性趋势(虚线) (图中公式为线性趋势公式)和 (b) 极端强度和影响范围的散点密度分布(颜色代表频次)
Fig.9 (a) Temporal variation (solid line) of the annual impacted area for the total REPEs from May to September over mainland of the South China during 1981-2020. The dashed line in (a) represented linear trend and its formula was shown. (b) Extreme intensity and impacted area of REPEs scatter density map. Colors represented frequency. Colors represented frequency.

由于事件具有持续时间、极端强度及影响范围等多个指标，为了分析事件的综合强度，本文给出了综合指数 Z （公式（6））。图 10a 为 1981~2020 年华南地区 5~9 月区域性极端事件的逐年平均综合指数 Z 变化。事件的逐年 Z 指数主要变化范围为-0.4~0.6。在事件分布上， Z 指数较大的年份为 1994 年、2008 年和 2013 年。从变化趋势来看，1981~2020 年区域性极端事件的综合指数 Z 呈现显著的上升趋势（0.05/10 yr，通过 t 检验 95%信度检验）。

为了分析 REPEs 的历史重现期（即大于或等于某指数强度可能出现一次的平均间隔时间），绘制 Z 指数较大的前 40 次事件年月分布图（图 10b）。综合指数较强的 REPEs 事件主要发生在 6 月和 7 月。表 2 给出利用前 40 次事件计算得出的历史重现期。其中，5 年一遇的区域性极端事件的 Z 指数达到 1.73，10 年一遇则达到 2.83，40 年一遇则达到 3.32。

表 2 REPEs 的 Z 指数的气候重现期

Table.2 Index Z for climate return periods of REPEs.

	气候重现期				
	2 年	5 年	10 年	20 年	40 年
Z	1.7341	2.5098	2.8326	3.2319	3.3178

图10 (a) 1981~2020年5~9月华南地区REPEs的Z指数变化(虚线代表线性趋势)(图中公式为线性趋势公式), (b) REPEs的Z指数从大到小排序后的前40次事件的时间分布(颜色代表Z指数; 矩形格中的数字代表频次; 其余没有数字的矩形格中频次默认为1)
Fig.10 (a) Temporal variation of the index Z for the total REPEs from May to September over mainland of the South China during 1981-2020. The dashed line represented linear trend and its formula was shown. (b) First 40 events in the ranking of index Z based on total samples of REPE. Color indicated the index Z. The number in the rectangle indicated the frequency, and the default frequency for those rectangles with no numbers was 1.

3.4 REPEs 事件水汽输送与环流背景

为进一步了解华南地区 REPEs 主要环流特征, 针对所有 REPEs, 定义标准化后 REPEs 频次大于(小于)1 的年份为偏多(少)年, 据此挑选出的偏多年为 1993、2001、2002、2008 与 2015 年; 偏少年为 1988、2000、2004 与 2012 年。根据事件频次的偏多年与偏少年, 利用 ECMWF ERA5 再分析暖季(5-9月)的资料, 针对多个与降水相关的要素场做合成, 再并计算偏多年与偏少年的差值场。

850 hPa 的风场分析表明, 相比于 REPEs 事件偏少年, 在事件偏多年的西南风更强, 且华南地区的北部处于北风区, 说明北方也冷空气活跃(图略), 可以南下影响到华南地区, 与西南暖湿气流共同作用, 造成极端降水事件偏多。进一步分析水汽通量及其散度的距平(原始场减去 40 年的气候态)(图 11), 可以看出, 在事件偏多年, 华南大部分地区为西南风水汽输送大值区(图略), 且为明显的水汽通量辐合距平(图 11a)。在事件偏少年, 华南大部分地区虽然也处于西南风水汽输送大值区, 但水汽通量值较偏多年小, 且水汽通量散度是正距平, 即相对气候平均偏弱(图 11b), 水汽输送偏少。在偏多年和偏少年的整层水汽通量和其散度的差值场上(图 11c), 华南大部分地区处于水汽通量辐合区及较强的西南风水汽输送区(通过 0.1 显著性检验), 表明相比于事件偏少年, 该地区在事件偏多年具有更强的西南风水汽输送及整层水汽通量辐合。分析也发现在 REPEs 偏少年, 西太平洋副热带高压偏弱, 不利于西南风水汽输送(图略)。

图 11 暖季 REPEs (a) 偏多和 (b) 偏少年整层水汽通量距平 (箭头; 单位: $\text{kg}/(\text{m}^*\text{s})$) 和水汽通量散度距平 (阴影; 单位: $\text{kg}/(100000*\text{m}^2*\text{s})$) 合成分布, (c) 偏多和偏少年整层水汽通量 (箭头; 单位: $\text{kg}/(\text{m}^*\text{s})$) 和水汽通量散度 (阴影部分; 单位: $\text{kg}/(100000*\text{m}^2*\text{s})$) 差值场分布。打点部分指通过 0.1 显著性检验。

Fig.11 Composite of the water vapor flux (vector; units: $\text{kg}/(\text{m}^*\text{s})$) anomalies and divergence of water vapor flux anomalies (shaded; units: $\text{kg}/(100000*\text{m}^2*\text{s})$) at years of (a) high and (b) low frequency of REPEs during warm season. (c) The water vapor flux (vector; units: $\text{kg}/(\text{m}^*\text{s})$) and water vapor flux divergence (shaded; units: $\text{kg}/(100000*\text{m}^2*\text{s})$) difference in the whole layer between years of high and low frequency of REPEs during warm season. Dot areas denote passing the significance test at 0.1 level.

以上是从气候背景的角度研究 REPEs 偏多年和偏少年的水汽输送差异, 初步分析了水汽对 REPEs 暖季发生频次的影响。为了对比华南地区暖季 REPEs 与一般类型降水事件的环流差异, 本文根据 REPEs 所有个例和一般降水事件个例 (即至少有 1 个站点的单站日降水量大于等于 0.1 mm 且小于 50 mm 的降水事件), 利用 ECMWF ERA5 再分析 5-9 月的日平均 850 hPa 风场、位势高度场资料分别做 REPEs 日和一般降水日的合成。

图 12 给出了华南地区暖季 REPEs、普通降水事件 850 hPa 的风场、位势高度场和两者差值场的合成分布图。在一般降水日, 南海北部为弱的横槽, 华南地区位于该横槽的北侧, 被弱高压脊控制, 但又偏东南风影响沿海地区 (图 12a)。对于 REPEs 降水日, 从广西到长江流域为一西南-东北向的低压槽, 华南地区处于低压槽的南部, 被较强的偏南风 (大于 8 m/s) 控制, 这有利于华南地区的西南风水汽输送, 从而造成降水偏多 (图 12b)。REPEs 与一般降水日 850 hPa 风场、高度场的差值显示, 长江以南地区都被气旋性异常环流控制, 华南地区处于该气旋性环流的南部, 被异常西南风影响 (通过 0.1 显著性检验) (图 12c)。以上表明相比于一般类型降水事件, 华南地区 REPEs 位于气旋性环流的东南部, 受到明显的西南风风速大值带影响。

图 12 暖季 (a) 普通降水事件和 (b) REPEs 850 hPa 风场 (风向杆; 单位: m/s)、高度场 (蓝线; 单位: dagpm) 合成分布 (蓝色阴影区中的风速均为 8 m/s 以上), 及 (c) REPEs 与普通降水事件 850 hPa 风场、高度场差值场分布 (黄色阴影区指纬向风通过 0.1 显著性检验; 打点部分指经向风通过 0.1 显著性检验; 高度场均未通过 0.1 显著性检验)

Fig.12 Composite distribution of wind field (wind barb; m/s) and geopotential height (blue line; dagpm) at 850 hPa between days of (a) normal precipitation event and (b) REPEs during warm season. The wind speed in blue shaded area is above 8 m/s. (c) The wind field (wind barb; m/s) and geopotential height (blue line; dagpm) difference in the whole layer between days of normal precipitation event and REPEs during warm season (yellow shaded areas denote zonal wind passing the significance test at 0.1 level; dot areas denote meridional wind passing the significance test at 0.1 level; The geopotential height failed to pass the significance test at 0.1 level)

4 总结与讨论

本文基于两广地区 176 个国家级自动气象站资料以及 1981~2020 年 ECMWF ERA5 再分析月平均分析资料, 采用 OITREE、合成等方法, 研究了华南地区 REPEs 的时空分布特征, 并分析了事件偏多及偏少年的环流特征, 深化了对华南地区区域性极端降水事件发生频次、强度和范围变化规律的认识(例如, 在强度指标上, 本文指出较少事件强度超出 320mm/d, 这为当地开展抗洪减灾工作提供一定的参考; 此外, 本文引入简化的 Z 指数, 可用于判别区域性极端事件综合强度), 对提高我国华南地区对极端降水事件的预测与预警能力具有借鉴意义。

通过 OITREE 方法共筛选出 520 次非持续性事件和 152 次持续性事件。研究表明, 持续性事件的持续时间一般在 2~5 天, 且频次较高的是 2~3 天的事件, 且事件频次在年际尺度上的周期变化较为明显(这可能与南海夏季风的年际变化有关, 夏季风建立偏早(晚)年, 华南极端降水日数偏多(少))(何慧和陆虹, 2011; 张莉萍, 2014), 高发时段为 5~6 月。华南地区大部分 REPEs 强度约 130 mm, 较少事件强度超出 320 mm。在所有不同持续时间的事件里, 非持续性事件及持续两天的事件在各月强度都较强, 持续 4 天以上的事件在各月强度较弱。从影响范围来看, REPEs 的影响范围呈显著上升趋势($\sim 310 \text{ km}^2/\text{yr}$)。但并非所有的事件影响范围大且强度高, 华南地区的 REPEs 主要是受极端强度较低、影响面积较小的事件主导。REPEs 对华南地区造成的影响有明显的区域性差异,

在大湾区及广东北部，REPEs 的累积降水及其对总降水的贡献呈显著上升趋势，而在广西南部地区，两者呈下降趋势。

在研究华南地区 REPEs 的持续时间、强度、影响范围的基础上，本文引入综合指数 Z 来评估事件的综合强度。研究发现 1981~2020 年区域性极端事件的综合指数 Z 呈现显著的上升趋势 ($0.05/10\text{ yr}$)，其中，5 年一遇的区域性极端事件的 Z 指数达到 2.51；10 年一遇则达到 2.83；40 年一遇达到 3.32。

稳定、有利的环流背景及水汽输送对于极端降水事件的发生十分重要(陶诗言, 1980; 丁一汇, 1993; 曹晓岗等, 2009; 廖移山等, 2009)。从事件偏多年与偏少年整层水汽通量和水汽通量散度特征来看, 华南地区在事件偏多年为显著的西南风水汽输送及整层水汽通量辐合, 而在事件偏少年整层水汽通量散度是正距平, 即相对气候平均偏弱。从华南地区 REPEs 与一般降水事件 850 hPa 主要环流特征来看, 在一般降水日, 华南地区位于弱东南风区, 而在 REPEs 降水日, 华南地区位于气旋性环流的东南部, 受到明显的西南风风速大值带影响。然而华南地区极端降水事件受到地形因素和不同天气系统的影响, 过程较为复杂(陶诗言, 1980; Liu et al., 2016), 本文只是初步分析了影响华南地区 REPEs 的主要环流因子的特征, 但因为影响因子有很多, 具体的影响机制也还需要进一步深入研究。此外, 针对 REPEs, 尤其是持续性暴雨事件(持续时间长, 总雨量大), 其维持机理还有待进一步开展研究。前人的研究表明, 能量是主导各种天气系统演变的关键因子(Markowski and Richardson, 2010), 从能量角度定量地研究持续性暴雨的演变机理是深化对其认识的有效手段。Fu et al. (2022) 研究了华南地区持续性暴雨维持的三维能量路径, 发现华南地区的持续性暴雨是一种由热带向中纬度降水的过渡型, 其斜压能量转换与降尺度能量级串(即背景场能量向扰动场能量转换)特征鲜明。在本文已筛选出个例的基础上, 将进一步从能量角度分析华南地区极端降水的维持机理, 从而获得对此类事件的更全面认识。

378 参考文献 (References)

- 379 曹晓岗, 张吉, 王慧, 等. 2009. "080825"上海大暴雨综合分析[J]. 气象, 35: 51-58. Cao X G,
380 Zhang J, Wang H, et al., 2009. Analysis on a severe convective rainstorm hitting shanghai on
381 25 August 2008[J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 35: 51-58.
- 382 陈兴旺. 2008. 广义极值分布理论在重现期计算的应用[J]. 气象与减灾研究, 31(4): 3. Chen X
383 W. 2008. Application of generalized extreme value distribution theory in calculating return
384 periods[J]. Meteorology and Disaster Reduction Research (in Chinese), 31(4): 3.
- 385 Chen H P, Sun J, Fan K. 2012. Decadal features of heavy rainfall events in eastern China[J]. Acta
386 Meteorologica Sinica, 26(3): 289 – 303.
- 387 Chen Y, Zhai P. 2013. Persistent extreme precipitation events in China during 1951-2010[J]. Clim.
388 Res., 57: 143-155.
- 389 Cheng S, Xu L, Wei Q, et al., 2018. Temporal and spatial variation of extreme precipitation in the
390 longchuan river basin in 1978-2015 years[J]. IOP Conference Series Earth and Environmental
391 Science, 208(1): 012026.
- 392 China Meteorological Administration, 2017. Yearbook of meteorological disasters in China. China
393 Meteorological Press, Beijing
- 394 Cui D, Wang C, Santisirisomboon J. 2018. Characteristics of extreme precipitation over eastern Asia
395 and its possible connections with Asian summer monsoon activity[J]. International Journal of
396 Climatology, 2: 711-723, doi: 10.1002/joc.5837.
- 397 丁一汇. 1993. 1991 年江淮流域持续性特大暴雨研究[M]. 北京, 气象出版社, 255 pp. Ding Y
398 H. 1993. Study on persistent heavy rainfall in 1991 over the Jianghuai River Basin[M].
399 Beijing: China Meteorological Press (in Chinese), 255pp.
- 400 Fu S M, Li D S, Sun J H, et al., 2016. A 31-year trend of the hourly precipitation over South China
401 and the associated mechanisms[J]. Atmos. Sci. Lett., 17: 216-222.
- 402 Fu S M, Zhang J P, Luo Y L, et al., 2022. Energy paths that sustain the warm-sector torrential rainfall
403 over South China and their contrasts to the frontal rainfall: A case study. Adv. Atmos. Sci.
- 404 Fu S M, Tang H, Sun J H, et al., 2022. Historical rankings and vortices' activities of the extreme
405 Mei-yu seasons: Contrast 2020 to previous Mei-yu seasons[J]. Geophysical Research
406 Letters, 49.
- 407 何慧, 陆虹. 2011. 华南夏季极端降水日数与南海夏季风建立期的关系[C]. 中国气象学会区
408 域气候变化监测与检测学术研讨会. He H, Lu H. 2011. Relationship between the number
409 of summer extreme precipitation days in South China and the onset date of south China Sea
410 Summer Monsoon[C]. Symposium on regional climate change monitoring and detection of
411 Chinese Meteorological Society (in Chinese).
- 412 黄士松, 李真光, 包澄澜, 等. 1986. 华南前汛期暴雨[M]. 广州: 广东科技出版社, 55-100.
413 Huang S S, Li Z G, Bao C L, et al., 1986. Rainstorms during pre-rainy season in South
414 China[M]. Guangzhou: Guangdong Science and Technology Press (in Chinese), 55-100.
- 415 Huang N E, Shen Z, Long S R, et al., 1998. The empirical mode decomposition and the Hilbert
416 spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis[J]. Proceedings of the Royal
417 Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 454: 903-995.
- 418 Huang X Y, Tan H B, Li F. 2009. Changes of flood-season severe precipitation over South China in
419 2071-2100[J]. Meteor Sci Technol, 4: 009.
- 420 IPCC, 2013: Climate Change 2013. The Physical Science Basis. Contribution of working group I to
17

the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change (2013)

Kong F, Shi P, Fang J, et al., 2017. Advances and prospects of spatiotemporal pattern variation of extreme precipitation and its affecting factors under the background of global climate change[J]. *Journal of Catastrophology*, 32: 165-174.

李韵婕, 任福民, 李忆平, 等. 2014. 1960—2010 年中国西南地区区域性气象干旱事件的特征分析[J]. *气象学报*, 72(2): 266-276. Li Y J, Ren F M, Li Y P, et al., 2014. A study of the characteristics of the southwestern China regional meteorological drought events during 1960-2010[J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 72(2): 266-276.

Li L P, Zhang K M, Wang C, et al., 2010. Temporal and spatial variations of extreme precipitation in the pre-flood of South China in recent 40 years[J]. *Climate Environ Res*, 15(4): 443-450.

Li D S, Sun J H, Fu S M, et al., 2016. Spatiotemporal characteristics of hourly precipitation over central eastern China during the warm season of 1982–2012[J]. *International Journal of Climatology*, 36: 3148-3160.

李春晖, 吴志伟, 蒙伟光, 等. 2017. 影响华南后汛期季风持续性暴雨和热带气旋持续性暴雨的大尺度环流背景分析[J]. *热带气象学报*, 33(1): 10. Li C H, Wu Z W, Meng W G, et al., 2017. Compared analysis characteristics of impact of large scale circulation on the persistent heavy rains in post-flood season in South China association with monsoon and tropical cyclone[J]. *Journal of Tropical Meteorology (in Chinese)*, 33(1): 10.

廖移山, 李俊, 闵爱荣, 等. 2009. 一次暴雨过程的数值模拟分析[J]. *高原气象*, 27(3): 558-566. Liao Y S, Li J, Min A R, et al., 2009. Numerical simulation and analysis of a heavy rain process[J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 27(3): 558-566.

林晓霞, 冯业荣, 张诚忠, 等. 2017. 华南一次暴雨过程热力和动力特征的诊断分析[J]. *热带气象学报*, 33(6): 10. Lin X X, Feng Y R, Zhang C Z, et al., 2017. Diagnostic analysis of thermal and dynamic characteristics of a rainstorm process in southern China[J]. *Journal of Tropical Meteorology (in Chinese)*, 33(6): 10.

Liu R X, Sun J H, Wei J, et al., 2016. Classification of persistent heavy rainfall events over South China and associated moisture source analysis[J]. *J. Meteor. Res.*, 30(5): 678 – 693.

Luo Y, Wang H, Zhang R, et al., 2013. Comparison of rainfall characteristics and convective properties of monsoon precipitation systems over South China and the Yangtze and Huai River basin[J]. *J. Climate*, 26: 110-132.

Markowski P, Richardson Y, 2010. *Mesoscale Meteorology in Midlatitudes*[M]. Wiley-Blackwell, 407.

Mastylo M. 2013. Bilinear interpolation theorems and applications[J]. *Journal of Functional Analysis*, 265: 185-207, doi: 10.1016/j.jfa.2013.05.001.

闵岫, 钱永甫. 2008. 中国极端降水事件的区域性和持续性研究[J]. *水科学进展*, 19(6): 765-771. Min S, Qian Y F. 2008. Regionality and persistence of extreme precipitation events in China[J]. *Advances in Water Science (in Chinese)*, 19(6): 765-771.

Raes D. 2004: *Frequency Analysis of Rainfall Data*[M]. ICTP (International Center for Theoretical Physics (2444-10).

Ren F, Cui D, Gong Z, et al., 2012. An objective identification technique for regional extreme events[J]. *Journal of Climate*, 25(20): 7015-7027.

孙建华, 赵思雄. 2000. 一次罕见的华南大暴雨过程的诊断与数值模拟研究[J]. *大气科学*, 24(003): 381-392. Sun J H, Zhao S X. 2000. A diagnosis and simulation study of a strong heavy rainfall in South China[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*,

24(003): 381-392.

孙婧超. 2018. 华南汛期区域性极端降水事件的变化特征及成因研究[D]. 南京信息工程大学.

Sun J C. 2018. Variations and causes of regional daily precipitation extremes during the flood season in South China[D]. Nanjing University of information science and technology (in Chinese).

谈哲敏, 赵思雄, 孙建华, 等. 2013. 中国华南地区中 β 尺度强对流系统结构与机理研究[M]. 北京, 气象出版社, 266 pp. Tan Z M, Zhao S X, Sun J H, et al., 2013. Study on structure and mechanism of meso – β scale severe convection system over South China[M]. Beijing: China Meteorological Press (in Chinese), 266 pp.

陶诗言. 1980. 中国之暴雨[M]. 北京, 科学出版社, 225 pp. Tao S Y. 1980. Torrential Rain in China[M]. Beijing: Science Press (in Chinese), 225 pp.

Wang B, LinHo, Zhang Y, et al., 2004. Definition of South China Sea monsoon onset and commencement of the East Asia summer monsoon[J]. J. Climate, 17: 699-710.

Wang Y, Zhou L. 2005. Observed trends in extreme precipitation events in China during 1961-2001 and the associated changes in large-scale circulation[J]. Geophysical Research Letters, 32.

王伟光, 郑国光. 2012. 应对气候变化报告. 2012, 气候融资与低碳发展[M]. 社会科学文献出版社. Wang W G, Zheng G G, 2021. Annual report on actions to address climate change (2012), climate finance and low carbon development[M]. Social Sciences Academic Press (in Chinese).

汪汇洁, 孙建华, 卫捷, 等. 2014. 近 30 年我国南方区域持续性暴雨过程的分类研究[J]. 气候与环境研究, 19(6): 713-725. Wang H J, Sun J H, Wei J, et al., 2014. Classification of persistent heavy rainfall events over Southern China during recent 30 years[J]. Climate and Environmental Research (in Chinese), 19(6): 713-725.

Wu Z, Huang N E. 2011. Ensemble empirical mode decomposition: a noise-assisted data analysis method[J]. Advances in Adaptive Data Analysis, 1(01).

Wu H, Zhai P, Chen Y. 2016. A comprehensive classification of anomalous circulation patterns responsible for persistent precipitation extremes in South China[J]. J. Meteor. Res., 30(4): 483-495.

伍志方, 蔡景就, 林良勋, 等. 2018. 2017 年广州"5·7"暖区特大暴雨的中尺度系统和可预报性[J]. 气象, 044(004): 485-499. Wu Z F, Cai J J, Lin L X, et al., 2018. Analysis of mesoscale systems and predictability of the torrential rain process in Guangzhou on 7 May 2017[J]. Meteorological Monthly (in Chinese). 044(004): 485-499.

Wu Y J, Ji H X, Wen J H, et al., 2018. The characteristics of regional heavy precipitation events over eastern monsoon China during 1960 – 2013[J]. Global and Planetary Change, 172.

Yin Y, Chen H S, Zhai P M, et al., 2019. Characteristics of summer extreme precipitation in the huai river basin and their relationship with east Asia summer monsoon during 1960 – 2014[J]. International Journal of Climatology, 39: 1555-1570.

张亚妮, 姚秀萍, 于超. 2019. 高层动力强迫对回流型华南暖区暴雨影响的个例研究[J]. 热带气象学报, 35(2): 11. Zhang Y N, Yao X P, Yu C. 2019. A case study on the effect of upper dynamics forcing on warm vector rainstorm over the south of China[J]. Journal of Tropical Meteorology(in Chinese), 35(2): 11.

Zhai P, Zhang X, Hui W, et al., 2005. Trends in total precipitation and frequency of daily precipitation extremes over China[J]. Journal of Climate, 18: 1096-1108.

赵思雄, 陶祖钰, 孙建华, 等. 2004. 长江流域梅雨锋暴雨机理的分析研究[M]. 北京, 气象出

509 版社, 281 pp. Zhao S X, Tao Z Y, Sun J H, et al., 2004. Analysis study on mechanism of Meiyu
510 Front rainstorm in Yangtze River Basin[M]. Beijing: China Meteorological Press (in Chinese),
511 281 pp.

512 邹用昌, 杨修群, 孙旭光, 等. 2009. 我国极端降水过程频数时空变化的季节差异. 南京大学
513 学报: 自然科学版, 45(1): 12. Zou Y C, Yang X Q, Sun X G, et al., 2009. Seasonal difference
514 of the spatio-temporal variation of the number of the extreme precipitation processes in
515 China[J]. Journal of Nanjing University (Natural Sciences), 45(1): 12.

516 Zou X, Ren F. 2015. Changes in regional heavy rainfall events in china during 1961 – 2012[J].
517 Advances in Atmospheric Sciences, 32: 130-140.

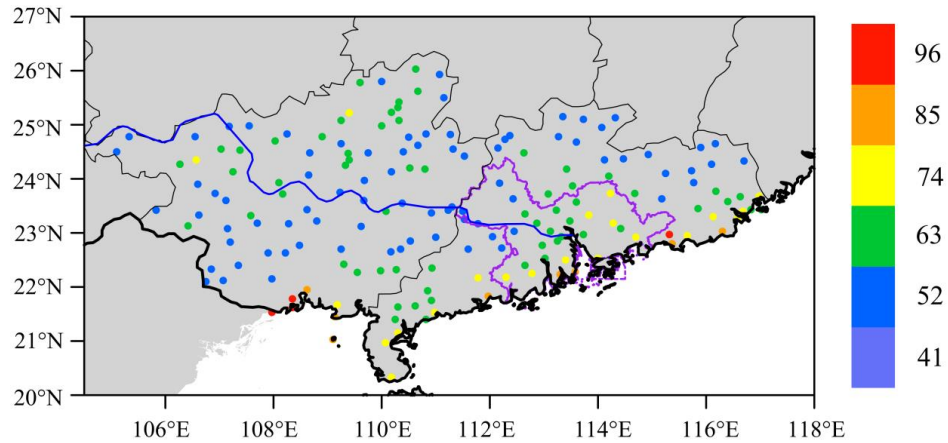


图 1 1981~2020 年 5~9 月华南地区站点日降水量 (≥ 0.1 mm) 第 95 百分位空间分布 (mm)
(紫色轮廓为粤港澳大湾区)

Figure 1. Spatial distribution of the 95th percentile of daily precipitation (above 0.1 mm) from May to September over mainland of the South China during 1981-2020 (units: mm). The Greater Bay Area was outlined in purple.

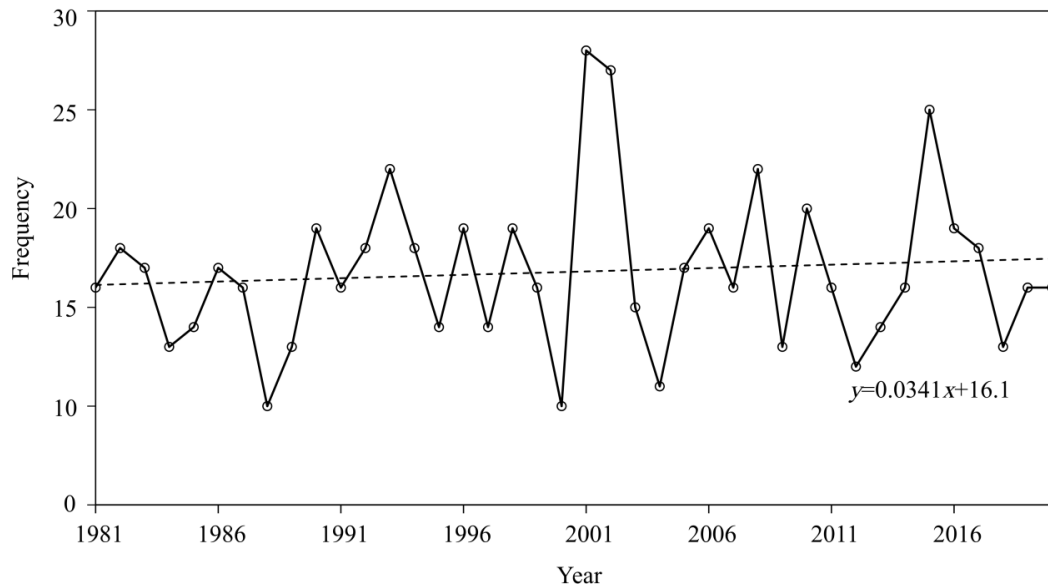


图 2 1981~2020 年 5~9 月华南地区 REPEs (Regional extreme precipitation events) 频次的逐年变化 (实线) 及其线性趋势 (虚线) (图中公式为线性趋势公式)

Fig.2 Temporal variation of the annual frequencies for the total Regional extreme precipitation events (REPEs) from May to September over mainland of the South China during 1981-2020. The dashed line represented linear trend and its formula was shown.

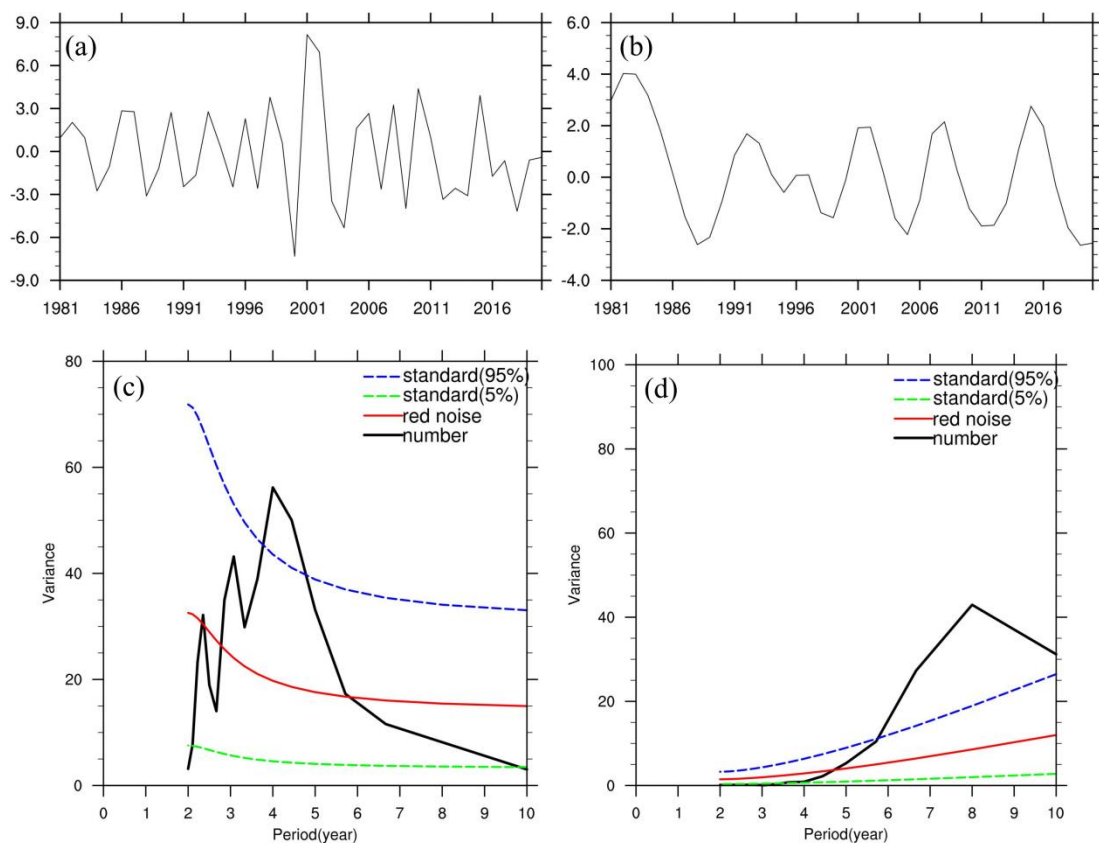


图 3 (a-b)基于 EEMD 分解总 REPEs 频次时间序列得到的前两个 IMF 分量及 (c-d) 相应的红噪声检验 (蓝虚线和绿虚线分别代表 95%和 5%信度水平; 红实线代表添加的红噪声; 黑实线代表频次的频谱)

Fig.3 (a-b) The first two IMF (Intrinsic Modal Function) components of the decomposition of frequency for the total REPEs based on ensemble empirical mode decomposition (EEMD) method. (c-d) Red noise test for the IMF1-2. The blue (green) dashed line was 95% (5%) confidence level. The red solid line indicated the added red noise. The black solid line indicated the spectrum for frequency.

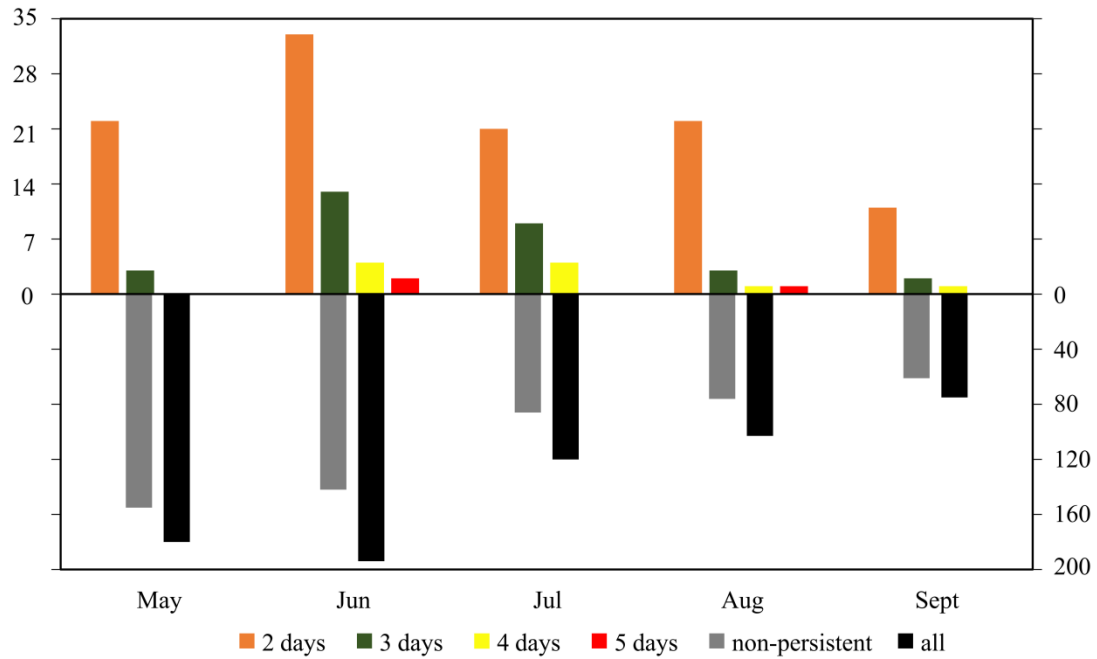


图4 1981~2020年5~9月华南地区不同持续时间REPEs的月频次
Fig.4 Monthly frequency of REPEs with different durations from May to September over mainland of the South China during 1981-2020.

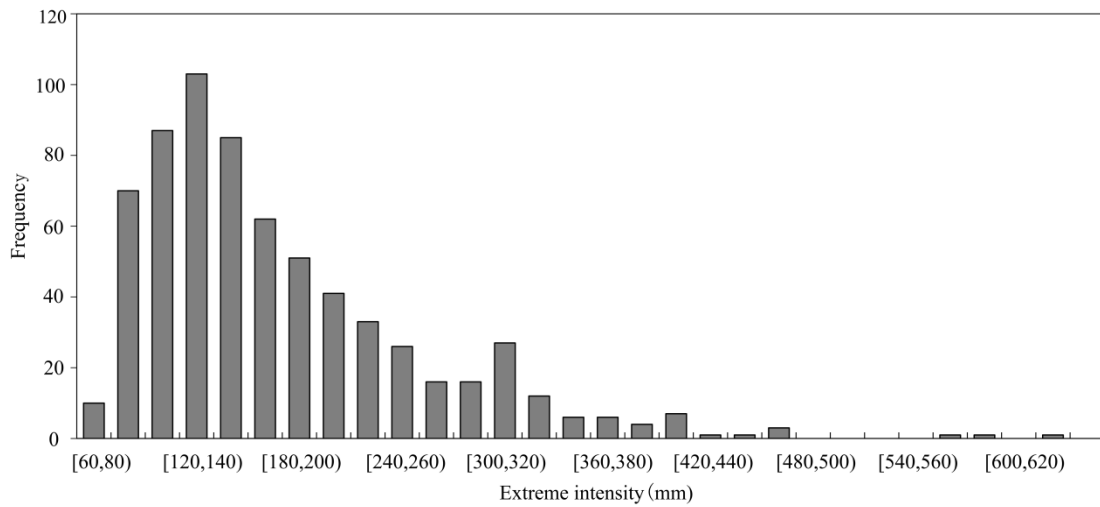


图5 1981~2020年5~9月华南地区REPEs在不同极端强度区间的频次分布
Fig.5 Distributions of the frequency of extreme intensity for the total REPEs from May to September over mainland of the South China during 1981-2020.

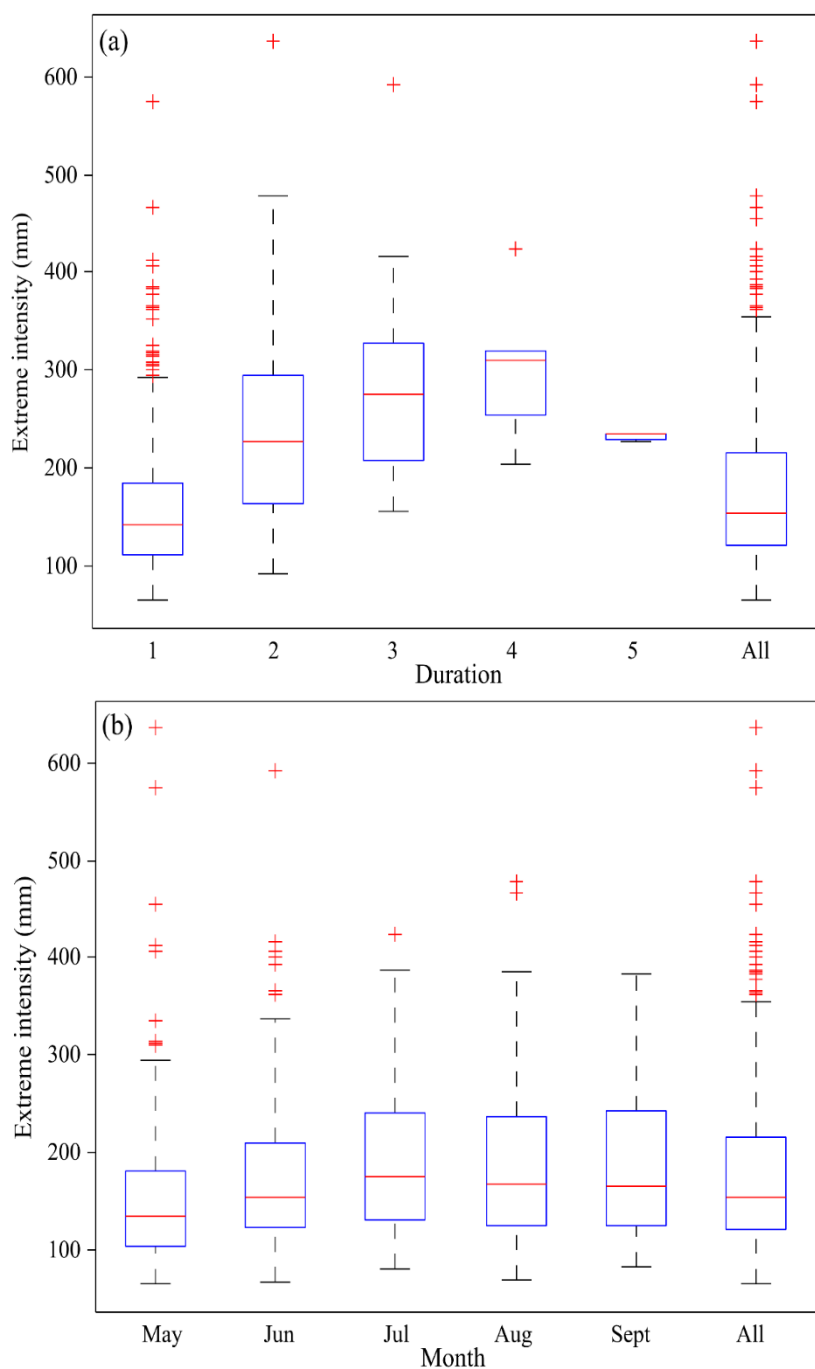


图 6 1981~2020 年 5~9 月华南地区 (a) 不同持续时间和 (b) 各月 REPEs 极端强度的盒须图 (框体上下分别代表第 75 (Q3) 和第 25 (Q1) 百分位值; 红线代表中位数; 须代表 $[Q1 - 1.5 \times (Q3 - Q1)]$ 和 $[Q3 + 1.5 \times (Q3 - Q1)]$ 覆盖范围; 须外围的红十字符号代表异常值)

Fig.6 Boxplot of extreme intensity of REPEs for (a) different durations and (b) different months from May to September over mainland of the South China during the 40-yr period. The boxes indicate the 25th (Q1) to 75th (Q3) percentiles and the red line indicates the median value. The whiskers indicate the range of $[Q1 - 1.5 \times (Q3 - Q1)]$ and $[Q3 + 1.5 \times (Q3 - Q1)]$. The red crosses indicate the outliers which are outside the range of whiskers.

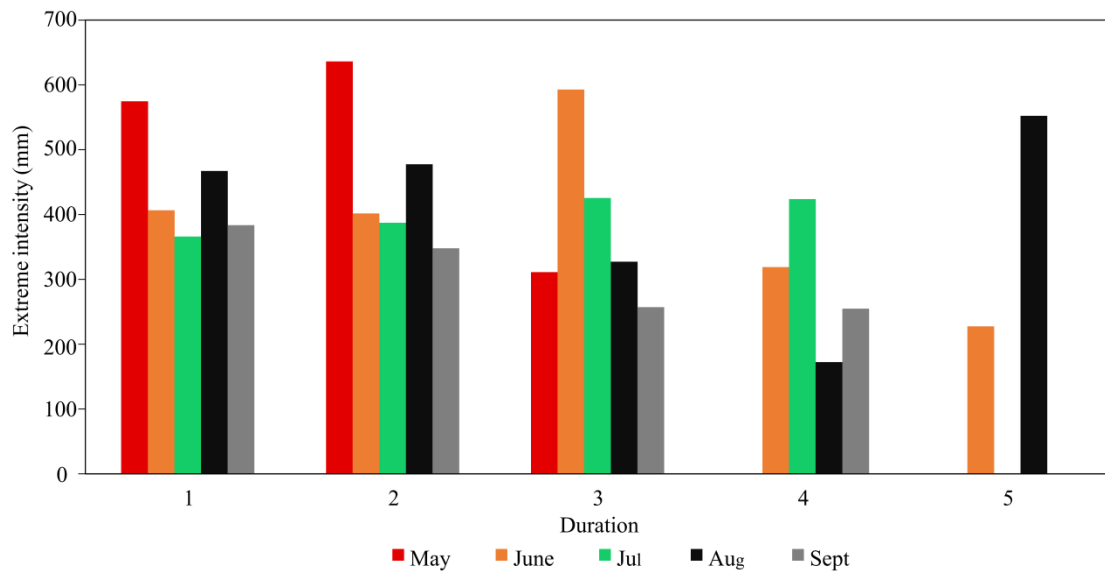


图7 不同持续时间REPEs最大极端强度的月份分布

Fig.7 Monthly distributions of maximum extreme intensity of REPEs with different durations.

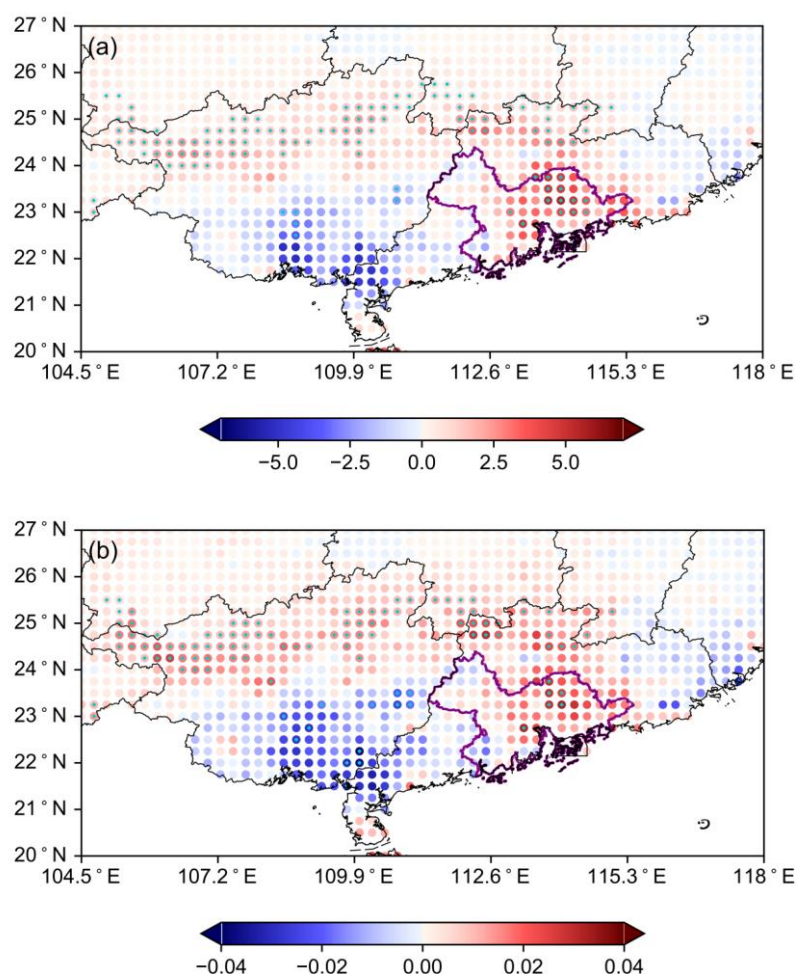


图8 1981~2020年5~9月华南地区区域性极端事件的 (a) 累积降水趋势 (单位: mm) 和 (b) 事件降水占年总降水比例趋势 (单位: /10 yr) 分布 (紫色轮廓为粤港澳大湾区; 蓝菱形代表趋势通过信度水平90%的t检验)

Fig.8 Spatial distribution of trends of (a) the annual accumulated REPEs precipitation (units: mm) and (b) the ratio of that to annual accumulated precipitation (units: /10 yr) from May to September over mainland of the South China during 1981-2020. The Greater Bay Area was outlined in purple. The blue diamond mark represented the trend can reach the significance level of 90%.

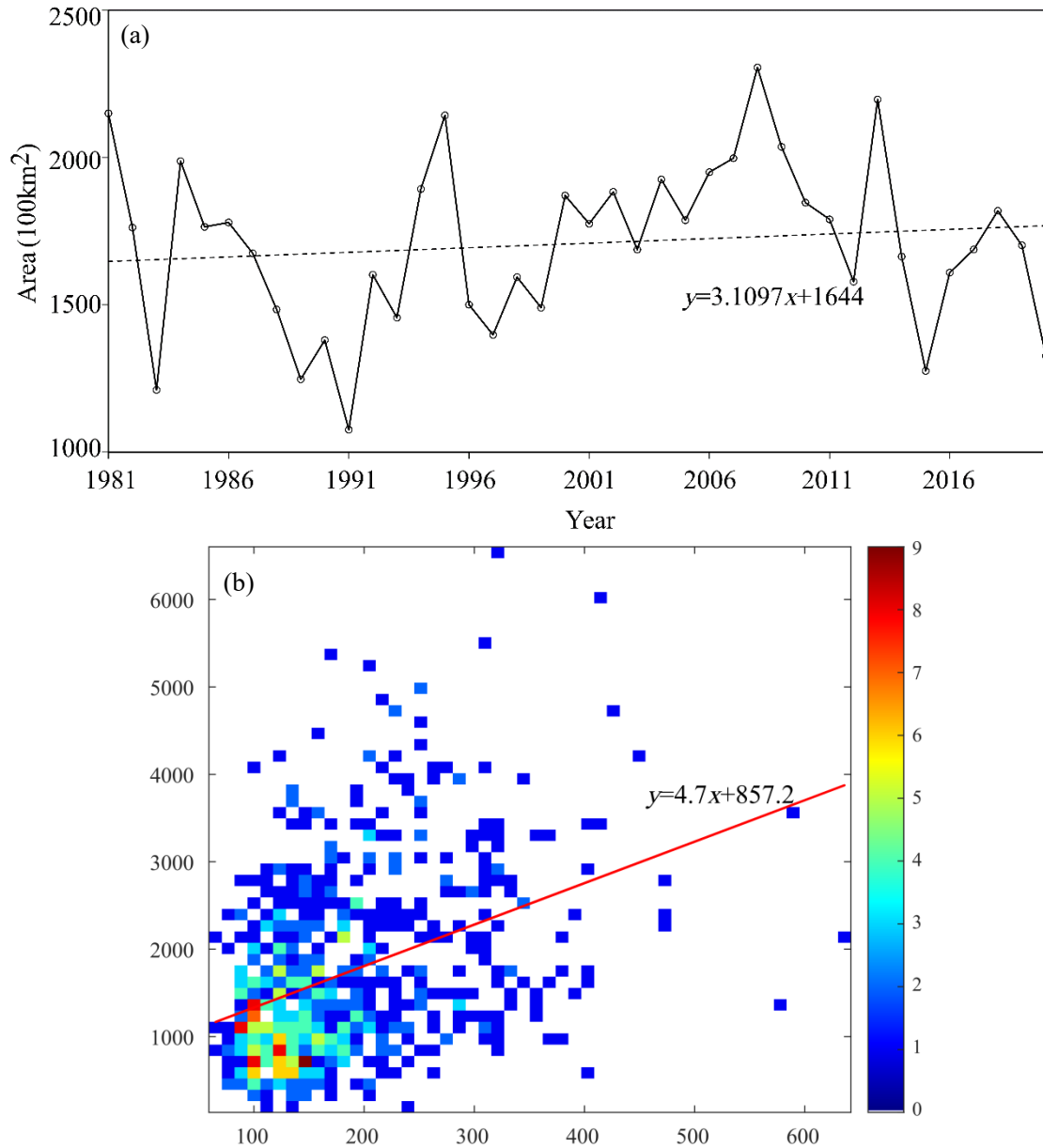


图9 1981~2020年5~9月华南地区REPEs (a) 影响范围的变化 (实线) 及其线性趋势 (虚线) (图中公式为线性趋势公式) 和 (b) 极端强度和影响范围的散点密度分布 (颜色代表频次; 红线代表线性趋势线)

Fig.9 (a) Temporal variation (solid line) of the annual impacted area for the total REPEs from May to September over mainland of the South China during 1981-2020. The dashed line in (a) represented linear trend and its formula was shown. (b) Extreme intensity and impacted area of REPEs scatter density map. Colors represented frequency. The red solid line indicates linear trend.

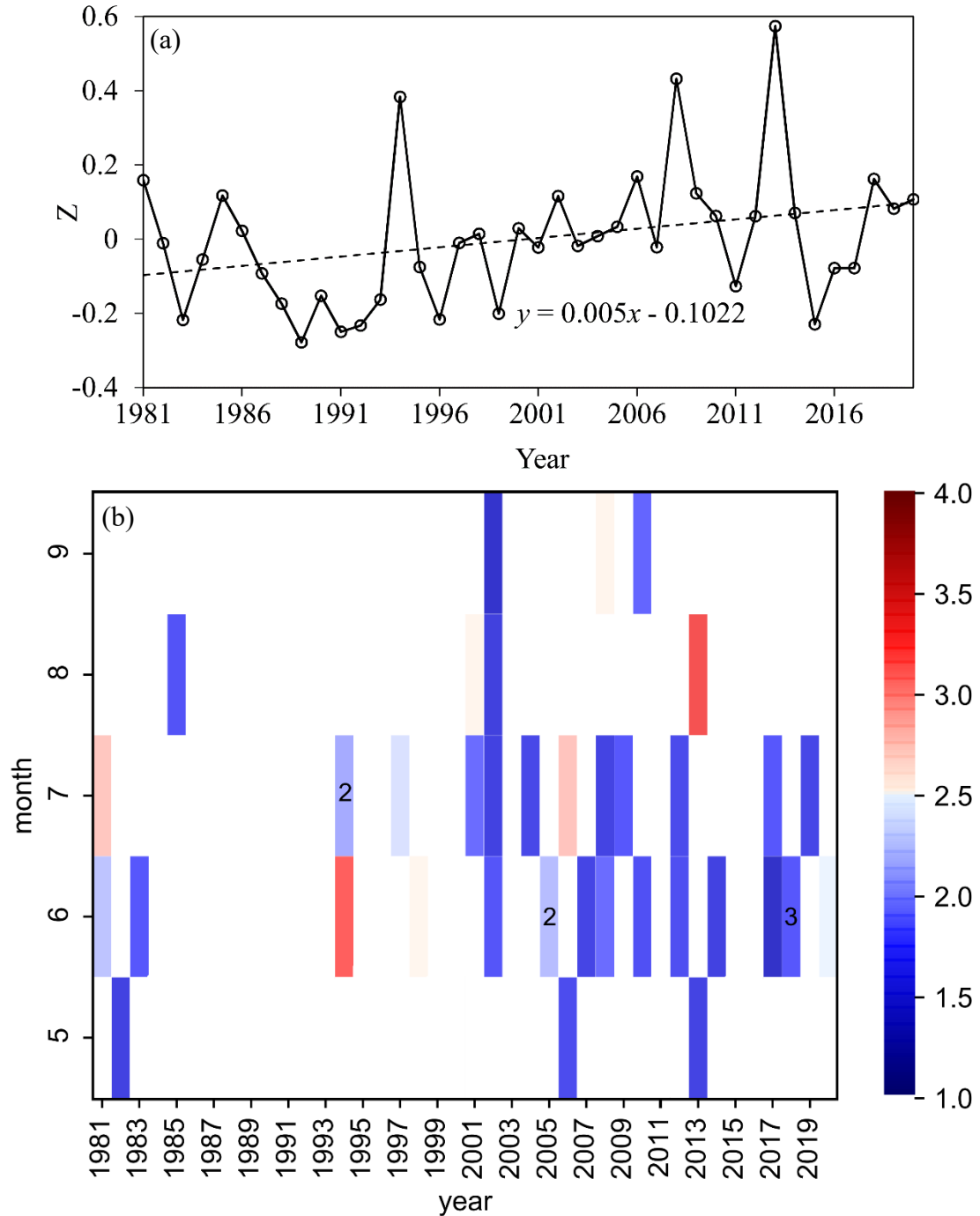


图10 (a) 1981~2020年5~9月华南地区REPEs的Z指数变化（虚线代表线性趋势）（图中公式为线性趋势公式），(b) REPEs的Z指数从大到小排序后的前40次事件的时间分布（颜色代表Z指数；矩形格中的数字代表频次；其余没有数字的矩形格中频次默认为1）

Fig.10 (a) Temporal variation of the index Z for the total REPEs from May to September over mainland of the South China during 1981-2020. The dashed line represented linear trend and its formula was shown. (b) First 40 events in the ranking of index Z based on total samples of REPE. Color indicated the index Z. The number in the rectangle indicated the frequency, and the default frequency for those rectangles with no numbers was 1.

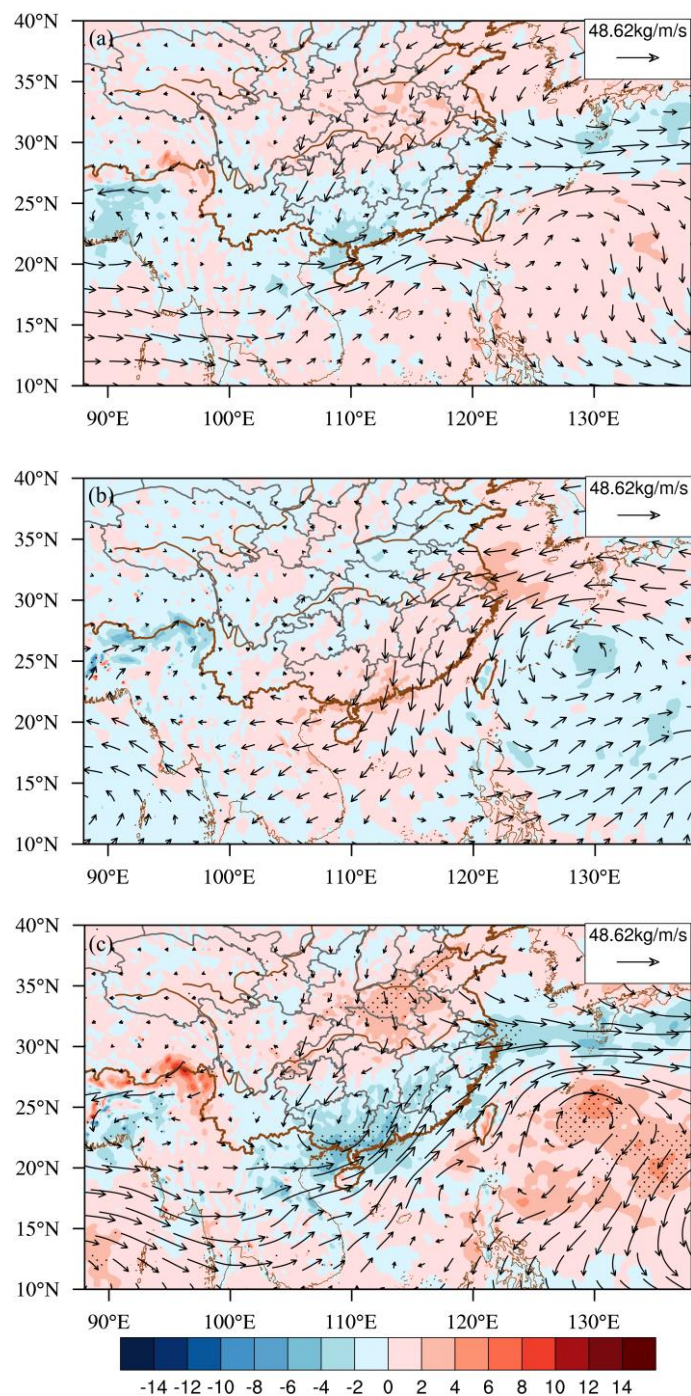


图 11 暖季 REPEs (a) 偏多和 (b) 偏少年整层水汽通量距平 (箭头; 单位: $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$) 和水汽通量散度距平 (阴影; 单位: $\text{kg}/(100000 \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s})$) 合成分布, (c) 偏多和偏少年整层水汽通量 (箭头; 单位: $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$) 和水汽通量散度 (阴影部分; 单位: $\text{kg}/(100000 \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s})$) 差值场分布。打点部分指通过 0.1 显著性检验。

Fig.11 Composite of the water vapor flux (vector; units: $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$) anomalies and divergence of water vapor flux anomalies (shaded; units: $\text{kg}/(100000 \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s})$) at years of (a) high and (b) low frequency of REPEs during warm season. (c) The water vapor flux (vector; units: $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$) and water vapor flux divergence (shaded; units: $\text{kg}/(100000 \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s})$) difference in the whole layer between years of high and low frequency of REPEs during warm season. Dot areas denote passing the significance test at 0.1 level.

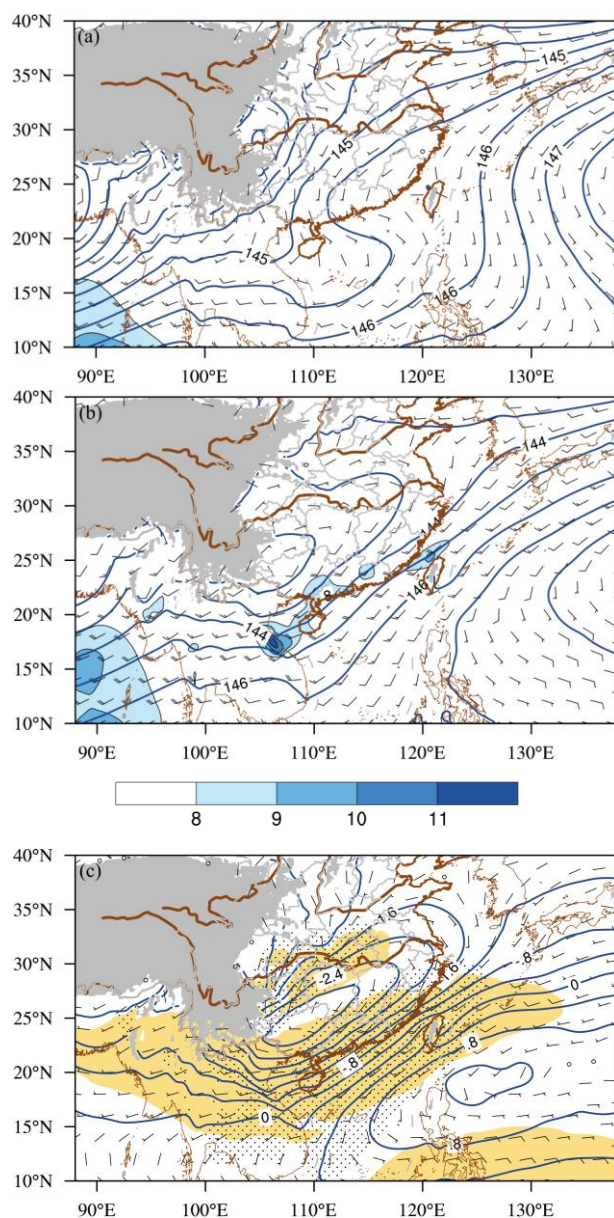


图 12 暖季 (a) 普通降水事件和 (b) REPEs 850 hPa 风场 (风向杆; 单位: m/s)、高度场 (蓝线; 单位: dagpm) 合成分布 (蓝色阴影区中的风速均为 8 m/s 以上), 及 (c) REPEs 与普通降水事件 850 hPa 风场、高度场差值场分布 (黄色阴影区指纬向风通过 0.1 显著性检验; 打点部分指经向风通过 0.1 显著性检验; 高度场均未通过 0.1 显著性检验)

Fig.12 Composite distribution of wind field (wind barb; m/s) and geopotential height (blue line; dagpm) at 850 hPa between days of (a) normal precipitation event and (b) REPEs during warm season. The wind speed in blue shaded area is above 8 m/s. (c) The wind field (wind barb; m/s) and geopotential height (blue line; dagpm) difference in the whole layer between days of normal precipitation event and REPEs during warm season (yellow shaded areas denote zonal wind passing the significance test at 0.1 level; dot areas denote meridional wind passing the significance test at 0.1 level; The geopotential height failed to pass the significance test at 0.1 level)