华南地区 7—10 月两类区域性极端降水事件特征 及环流异常对比*

1. 南京信息工程大学气象灾害教育部重点实验室/气候与气象灾害协同创新中心,南京,210044

2. 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室,北京,100081

3. 成都信息工程大学大气科学学院,成都,610225

1. Key Laboratory of Ministry of Education for Meteorological Disaster/Climate and Weather Disasters Collaborative Innovation Center, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China

2. State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China

3. School of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China 2017-12-25 收稿, 2018-05-13 改回.

孙婧超,管兆勇,李明刚,于亚鑫. 2019. 华南地区 7—10 月两类区域性极端降水事件特征及环流异常对比. 气象学报,77 (1):43-57

Sun Jingchao, Guan Zhaoyong, Li Minggang, Yu Yaxin. 2019. Anomalous circulation patterns in association with two types of regional daily precipitation extremes over South China from July to October. *Acta Meteorologica Sinica*, 77(1):43-57

Abstract Using daily precipitation data collected at 753 stations in China and from the Meteorological Information Comprehensive Analysis and Process System (MICAPS), the Southwest Pacific Ocean Tropical Cyclone (TC) optimal path data from the Tokyo Typhoon Center in Japan, and the National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research (NCEP/NCAR) reanalysis, the statistical characteristics of regional mean daily precipitation extreme (RDPE) events and circulation anomalies in South China were studied. Depending on whether the occurrence of a given RDPE event is affected by TC, the RDPEs are classified into two categories, i.e., TCfree-RDPE and TCaff-RDPE events. The TCaff-RDPE events account for about 42% of the total RDPEs and mainly occur in late August, while the TCfree-RDPE events frequently occur in July. When TCfree-RDPE events occur, South China is controlled by abnormal cyclonic circulations, and the warm and moist airflow from the western Pacific region and the South China Sea merge with the cold air from the north in this region, inducing a long narrow zone of water vapor convergence and significant and strong ascending motion, which are responsible for the occurrence and maintenance of TCfree-RDPE events. Simultaneously, the wave energy propagates from the northeastern side of the Tibetan Plateau and the Hexi Corridor region to South China and converges in this area, which favors the development and maintenance of perturbation over South China. When TCaff-RDPE events occur, the southern part of China is dominated by TC-related strong anomalous cyclonic circulations. The warm, moist air mass is transported into this area from the Bay of Bengal, the western Pacific and the South China Sea, leading to large amounts of latent heat release and strong ascending motion over South China. These results are helpful for better understanding and predicting the occurrence of regional extreme precipitation events in South China.

作者简介:孙婧超,主要研究方向为气候动力学。E-mail: yy_jingchaosun@126.com

通信作者:管兆勇,主要从事气候动力学研究。E-mail: guanzy@nuist.edu.cn

^{*} 资助课题:公益性行业(气象)科研专项(GYHY201406024)、灾害天气国家重点实验室课题(2015LASW-A03)、江苏省优势学科建设项目 (PAPAD)。

Key words South China, Regional mean daily precipitation extremes (RDPE), Circulation pattern, Tropical cyclones

摘 要 利用 1981—2016 年 7—10 月中国 753 站逐日降水资料、气象信息综合分析处理系统(MICAPS)逐日站点降水资料、 日本东京台风中心西北太平洋热带气旋(TC)最佳路径资料和 NCEP/NCAR 再分析资料集,分析了华南地区区域性日降水极 端事件(RDPE 事件)的统计特征及环流异常。根据华南地区 RDPE 事件的发生是否受热带气旋影响将其分为 TCfree-RDPE 和 TCaff-RDPE 两类事件,其中 TCaff-RDPE 事件占 42% 且集中发生在 8 月 4—5 候;TCfree-RDPE 事件以 7 月发生频数最 多,占其总频次的 1/2 以上。TCfree-RDPE 事件发生时,华南地区受异常气旋性环流控制,来自西太平洋和中国南海的暖湿 气流与北方冷气团在此汇合并形成一条狭长的水汽辐合带,低层辐合、高层辐散,显著强烈的上升运动为 TCfree-RDPE 事件 的发生与维持提供了有利条件;与此同时,波扰动能量由高原东北侧及河西走廊地区向华南一带传播并在华南显著辐合,有 利于华南上空扰动的发展和维持。TCaff-RDPE 事件发生时,华南上空由低层到高层的斜压环流结构更为明显,异常上升运 动更加强烈,热带气旋在其运动过程中携带了大量源自孟加拉湾、中国南海和西太平洋地区的水汽并输送至华南地区,水汽 辐合气流更为强盛。同时,波扰动能量由高纬度地区沿河西走廊向下游传播,但在华南地区辐合不甚明显。两类极端事件发 生时,加热场上的差异亦明显。华南及邻近地区上空的大气净加热及其南侧大范围区域的净冷却所形成的加热场梯度对 TCfree-RDPE 事件的发生有利。而 TCaff-RDPE 事件发生时,(Q₁)和(Q₂)在经向上由 18°N 以南、华南及其邻近地区、32°N 以北 呈负一正一负的异常分布型,正距平值更高,加热场梯度更大,有利于 TCaff-RDPE 事件的维持。这些结果有利于人们认识和 预测华南区域性日降水极端事件的发生。

关键词 华南地区,区域性日降水极端事件,环流异常,热带气旋 中图法分类号 P426.6

1 引 言

在气候变暖背景下,全球大部分陆地地区的强 降水在总雨量中所占比例或强降水事件的发生频率 可能增大(Goswami, et al, 2006),这种现象在加拿 大、美国、日本及中国等区域降水的研究中均得到了 证实(Karl, et al, 1998; Yamamoto, et al, 1999; Stone, et al, 2000; Zhai, et al, 2005)。在中国华 南地区,年降水量峰值分别出现在4—6月(前汛期) 和7—10月(后汛期),后汛期主要以台风降水为主, 强降水事件主要由各类热带天气系统引起(鹿世瑾, 1990)。在近几十年中,强降水所引发的暴雨和洪涝 灾害严重威胁人民的生命财产安全,并造成严重的 国民经济损失(赵玉春等, 2009)。

华南地区极端降水的气候特征及其形成机理一 直是气象工作者关注的焦点和难点。研究表明,华 南降水量在 20 世纪 80 年代呈显著减少的趋势,在 90 年代初经历了一次由减少到增多的突变,突变后 华南后汛期强降水量明显增强,极端降水事件多发 (黄荣辉等,1999;鲍名,2007;Chen, et al, 2013; Wu, et al, 2016)。这种降水异常毫无疑问与大气 环流异常密切相关。据研究,华南地区极端降水受 到东亚季风(Wang, et al, 2001;陈际龙等,2008) 包括西太平洋副热带高压(Wang, et al, 2001;鲍

名等,2008)和南海季风(胡娅敏等,2014;王东海等, 2011)等的重要影响;而中尺度环流系统(夏茹娣等, 2006; 倪允琪等, 2006) 也会在华南极端降水的强度 和持续时间方面产生不同程度的作用。同时,极端 降水事件还与对流层上层斜压波包(梅士龙等, 2008; 陈丹萍等, 2016)、青藏高原冬季积雪(Zhang, et al, 2004; 郑益群等, 2000)和大气低频振荡 (Jones, et al, 2004; 刘冬晴等, 2010)等影响因子 有关。另外,源于印度洋、孟加拉湾、西太平洋、中国 南海以及热带海洋的低空越赤道气流的水汽输送都 会在不同程度上影响中国华南汛期强降水事件的发 生(李秀珍等,2010)。还有大量相关工作探究了华 南极端降水与非绝热加热强迫及海温距平(SSTA) 的联系。研究发现,ENSO事件、印度洋及前期黑潮 海温距平等是华南强降水的重要影响因子(陶诗言 等,1998;陈烈庭,1977;Wang, et al, 2000;陈文, 2002;陈艺敏等, 2005)。中国南海上空的海气热交 换与华南汛期降水也有较好的关系,即海气热交换 值较大的年份,华南降水量也较多(陈锦年等,1987; 何有海等,1998)。

尽管对于华南极端降水事件的研究已取得不少 进展,但研究成果多侧重于其长期趋势(李丽平等, 2010;黄晓莹等,2009)或针对某些特大暴雨、洪涝 等异常个例分析,而对于华南区域性极端日降水事 件(Regional Daily Precipitation Extremes, RDPE) 的研究并不多见。华南地区同时受西风带系统(特 别是低层系统如低层切变线等)和热带天气系统的 共同影响,极端事件特征极为复杂,这也为探究其极 端降水的物理机制增加了难度。此外,两广地区是 中国热带气旋活动最为频繁、影响个数最多的沿海 省份。因此,弄清华南区域性极端降水事件的发生 规律及形成机制是气象工作者所面对的重要科学问 题。本研究将 1981—2016 年华南地区 7—10 月极 端降水事件根据其是否受热带气旋影响分为两类, 对比其大尺度环流异常的异同特征,探讨其与非绝 热加热及波能传播之间的联系,以此揭示不同类型 的极端日降水事件形成的机理并为寻找预报因子提 供线索。

2 资料与方法

2.1 资料和站点的选取

采用的资料包括:(1)1981—2014 年中国 753 站逐日降水资料(中国气象局国家气象信息中心提 供);2015—2016 年气象信息综合分析处理系统 (MICAPS)逐日站点降水资料;华南区域的选取沿 用 Jin 等(2015)的定义方法,即[22°—27°N,106°— 115°E],并剔除降水资料长度不足 36 年的站点,最 后选取 47 个测站代表华南地区(图 1)。(2)1981— 2016 年美国 NCEP/NCAR 再分析逐日资料集 (Kistler, et al, 2001),水平分辨率为2.5°×2.5°。



图 1 华南地区 47 个站点分布及其 7—10 月 平均日降水量(单位:mm/d)

Fig. 1 Distribution of 47 stations in South China and daily rainfall averaged over the period from July to October (unit: mm/d)

(3)1981—2016年日本气象厅(JMA)东京台风中心 西北太平洋热带气旋最佳路径资料 http://www. jma.go.jp/jma/jma-eng/jma-center/rsmc-hp-pubeg/trackarchives.html),时间分辨率为 3—6 h。

2.2 方 法

(1) 区域性极端日降水事件的定义:以经验公 式百分位法(Bonsal, et al, 2001; Li, et al, 2016; Guan, et al, 2011; Ke, et al, 2014)为基础,将 1981—2016年7—10月所选47站的日降水量进行 区域平均,去掉日降水量小于1mm的天数后按升 序排列,取95百分位上的值作为阈值,区域平均日 降水量大于该阈值(21.00mm)的降水日定义为 RDPE事件。

(2) 判别华南区域是否受热带气旋影响的标准 定义为:每一次 RDPE 事件发生当日,华南地区是 否有测站处于距离热带气旋中心 500 km 的半径范 围内(Lau, et al, 2008; Nogueira, et al, 2010; Dare, et al, 2012)。要说明的是,文中不将因热带 气旋残留云系与南下冷空气交汇而引发的 RDPE 事件作单独处理。

基于上述方法(先求取 RDPE 事件,再判定该 事件是否受热带气旋过境影响),将华南 7—10 月总 计 133 次 RDPE 事件分为两类:77 次剔除热带气旋 影响 的 区域性 日 降水极端事件(记为 TCfree-RDPE,附录附表 1)和 56 次受热带气旋影响的区域 性日降水极端事件(记为 TCaff-RDPE,附录附表 2)。影响持续不少于 2 d 的 RDPE 事件的热带气旋 数有 11 个,其中,1311 号热带气旋造成了持续 4 d 的 RDPE 事件。

另外注意到,133次 RDPE 事件中,除了 2次事件,其余 131次事件发生时 47站中至少有 12站 (25%)日降水量超过 21.00 mm,而 133次事件平 均超过 21.00 mm 日降水量的观测站达到 19个,占 到 47站的 40%以上。

(3) 非绝热加热场计算:根据 Luo 等(1984)的 方法计算了大气视热源(Q₁)和视水汽汇(Q₂)

$$\begin{cases} Q_1 = c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + V \cdot \nabla T + \left(\frac{p}{p_0} \right)^* \omega \ \frac{\partial \theta}{\partial p} \right) \\ Q_2 = -L \left(\frac{\partial q}{\partial t} + V \cdot \nabla q + \omega \ \frac{\partial q}{\partial p} \right) \end{cases}$$
(1)

两者均包括3项,分别为局地变化项、水平平流

项和垂直输送项,记〈
$$Q_1$$
〉= $\frac{1}{g}\int_{P_T}^{P_s} Q_1 dp$,〈 Q_2 〉=
 $\frac{1}{g}\int_{P_T}^{P_s} Q_2 dp$ 。对上两式分别进行垂直积分得
〈 Q_1 〉= ($LP_r + LC - LE$) + Q_s +〈 Q_R 〉 (2)
〈 Q_2 〉= ($LP_r + LC - LE$) - LE_s (3)

且.

$$\Delta \langle Q \rangle = \langle Q_1 \rangle - \langle Q_2 \rangle$$
$$= \langle Q_R \rangle + (Q_S + LE_S) \qquad (4)$$

式中,L为凝结潜热,P,为降水量,C为气柱中扣除 已形成降水的水汽凝结所致的液态水生成量, Q_s 为 地面感热输送, $\langle Q_R \rangle$ 为辐射加热(冷却)的垂直积 分,E为气柱中云滴的蒸发量, E_s 为地表蒸发, P_s 为地面气压, P_T 取 300 hPa。

(4) T-N 通量计算:采用 Takaya 等(2001)推导 出的包含纬向非均匀基本流的计算公式来描述定常 罗斯贝波的能量传播特征。该通量(简称 T-N 通 量)在 WKB 近似假定下与波位相无关,且与定常罗 斯贝波列的局地群速度方向一致,反映了群波能量 的频散方向。水平分量在对数气压坐标中的计算式 为

$$\boldsymbol{W} = \boldsymbol{W}_r + \boldsymbol{C}_{\boldsymbol{U}} \boldsymbol{M} \tag{5}$$

$$\mathbf{W}_{r} = \frac{1}{2 |\mathbf{U}|} \begin{bmatrix} U(\phi_{x}^{'2} - \phi_{y}^{'}\phi_{xx}^{'}) + V(\phi_{x}^{'}\phi_{y}^{'} - \phi_{y}^{'}\phi_{xy}^{'}) \\ U(\phi_{x}^{'}\phi_{y}^{'} - \phi_{y}^{'}\phi_{xy}^{'}) + V(\phi_{y}^{'2} - \phi_{y}^{'}\phi_{yy}^{'}) \end{bmatrix}$$
(6)

式中,**U** 为基本流场(U = Ui + Vj); C_v 为沿基流方 向的相速度($C_v = c_p \frac{U}{|U|}$);M 为描写小振幅准地转 涡动的广义假动量; ϕ' 为准地转扰动流函数;W 为 T-N 通量; W_r 为波扰动能量通量,其散度为负时,表 示波作用能量因能量通量辐合而增大,反之(散度为 正)表示扰动减弱。

3 华南地区 7—10 月 RDPE 事件的统计特征

根据上述 RDPE 事件的定义,得到华南地区 7—10月133次 RDPE 事件的区域平均降水量(图 2a)和发生频次(图 2b、c)的年际变化。从图 2a可 见,华南地区 7—10月 RDPE 事件的区域平均降水 量多集中在 25—30 mm/d,其 95 百分位阈值为 21.00 mm/d,99 百分位阈值为 30.07 mm/d。TCfree-RDPE 事件和 TCaff-RDPE 事件的最高区域降 水量分别出现在 1996 年(63.93 mm/d)和 2006 年 (55.97 mm/d)。从图2b、c来看,华南地区 RDPE



图 2 华南地区 7—10月133次 RDPE 事件的区域平均降水量的年际变化(a,单位:mm/d; 黑色实心点表示 TCfree-RDPE 事件,红色空心圆表示 TCaff-RDPE 事件,绿色点划线表示 99百分位阈值) 和区域平均发生总频次(b)和分频次(c)的年际变化(红色实线为总 RDPE 事件发生频次, 深灰柱形代表 TCfree-RDPE 事件,浅蓝柱形代表 TCaff-RDPE 事件)

Fig. 2 (a) Interannual variation of regional average precipitation in the 133 RDPEs (unit; mm/d; the black solid dots are for TCfree-RDPEs, the red open circles are for TCaff-RDPEs, and the green dashed line denotes the 99th percentile threshold value of rainfall);

(b) Interannual variation of the total occurrences of RDPEs (red solid lines) averaged over South China;

(c) Annual average occurrences of the TCfree-RDPEs (dark-gray columns)

and the TCaff-RDPEs (light-blue columns)

事件的发生频次具有明显的年际变化特征,总 RDPE事件发生频次以1994年(10次)最多,该年 也为 TCfree-RDPE 事件发生频次的极值(8次), 1981—2016年每年至少发生一次 TCfree-RDPE 或 TCaff-RDPE 事件。

华南地区 7—10 月两类 RDPE 事件发生频次 具有明显的候际和月际变化特征。由表 1 可知,7 月为华南地区 TCfree-RDPE 事件发生频数最多的 月份,占 TCfree-RDPE 事件总频次的 1/2 以上; TCaff-RDPE事件则多发生在 8 月,且多集中在 8 月4—5 候(第46—47 候,图 3),以 10 月最少,这是 因为 8 月西太平洋副热带高压位置偏北,有利于热 带气旋沿其西南侧北上,在华南至华东一带登陆并 对该地区造成影响。7—10 月 TCaff-RDPE 事件约 占总 RDPE 事件的 42%,其中包括 11 个热带气旋 分别造成的持续两天以上的 RDPE 事件,这与西北 太平洋热带气旋活动盛期在 7—9 月有关(程正泉 等,2007)。

表 1	华南地区 7—10 月两类 RDPE 事件发生次数的逐月统计

Table 1	Monthly froquency	statistics of two	types of RDPF	from July to	October in South China
1 able 1	wioning nequency	statistics of two	types of RDI E	fioni july to	October in South China

月份	TCfree-RDPE(>R95t)	TCaff-RDPE(>R95t)	TCfree-RDPE(>R99t)	TCaff-RDPE(>R99t)
7—10 月	77	56	24	16
7 月	45	15	15	5
8 月	20	21	6	6
9 月	5	13	1	2
10 月	7	7	2	3





分别对华南地区 7—10 月 133 个 RDPE 事件、 77 个 TCfree-RDPE 事件和 56 个 TCaff-RDPE 事件发生当日华南地区各站降水量进行合成,发现其 空间分布与华南 7—10 月平均日降水量的空间分布 (图 1)存在一定差异。当 RDPE 事件发生时(图 4a),合成降水量的最大区域位于广东深圳、珠海、阳 江及港澳一带,最高可超过 42 mm/d,降水量由东 南沿海向西北内陆递减的空间分布形势与图 1 相 似;当 TCfree-RDPE 事件发生时(图 4b),最大值则 位于广西柳州、来宾及贵港市,即华南中部地区;而 当 TCaff-RDPE 事件发生时(图 4c),大值区集中分 布在东南沿海一带,最高可达 65 mm/d。影响华南 地区 7—10 月 TCaff-RDPE 事件的热带气旋数为 43 个(附录附表 2),其中 9、10 月的热带气旋移动路 径偏西南,7、8 月热带气旋移动路径则偏东北,且基 本为登陆热带气旋,生成地大多位于 13°N 以南、菲 律宾萨马岛以东的西太平洋一带,登陆后多向北或 西北方向移动,对包括华南地区在内的中国东南沿 海一带造成了较大的影响(图 4d)。

4 华南地区 7—10 月两类 RDPE 事件的环 流异常对比

RDPE事件的发生、发展与大尺度环流异常、局 地环流异常密切相关(Wang, et al, 2005; Yao, et al, 2008; You, et al, 2011; Guan, et al, 2013)。 RDPE事件由某日区域内多数站点的日降水极端事 件引起,往往对应着该区域某一强降水(暴雨)日或 某一降水过程中的一个强降水位相。考虑到热带气 旋对局地性环流的特殊影响以及为了体现华南地区 7—10月两类 RDPE 事件发生时的不同环流特征, 分别对 TCfree-RDPE 事件和 TCaff-RDPE 事件发 生时的大尺度环流异常、波作用通量及外强迫作用 进行分析。



图 4 华南地区(红色方框)7—10 月 133 次 RDPE 事件(a)、77 次 TCfree-RDPE 事件(b)和 56 次 TCaff-RDPE 事件(c)分别合成的降水量的空间分布(单位:mm)以及影响 华南 7—10 月 TCaff-RDPE 事件的热带气旋移动路径(d) Fig. 4 Distributions of precipitation amount (unit: mm) averaged over 133 RDPEs (a),

over 77 TCfree-RDPEs (b) and over 56 TCaff-RDPEs (c) during the period from July to October in South China (red rectangle), and the moving paths of TCs that affect the RDPEs (d)

4.1 环流异常

区域性极端降水的形成由局地环流异常导致 (图 5、6)。当 TCfree-RDPE 事件发生时,在对流层 低层(图 5a),华南至长江中下游地区受显著的异常 气旋性环流控制,气旋南侧的西南气流有利于该地 区上空槽的加深,而菲律宾岛东侧的西太平洋上存 在的异常反气旋性环流有利于其西侧的异常偏南气 流将低纬度的暖湿水汽送往华南及东南沿海一带。 气流异常辐合中心位于 26°N 左右,水汽异常辐合 亦有利于 RDPE 事件的形成。在对流层中层(图 5c),华南地区异常气旋式环流依然存在,表明低压 系统较为深厚。在对流层上层(图 5b),反气旋性异 常环流位于华南以北地区,与气候平均环流(图 5f) 叠加,造成实际的南亚高压位置偏北、强度偏强;同 时,辐散气流补偿了下层的辐合,这种低层至高层的 斜压环流结构有利于 RDPE 事件的发生。由于 200 hPa 上为异常辐散,低层异常辐合,22°-27°N 附近呈显著的强上升运动(图 5d),其中心垂直速度

距平值可超过 8 Pa/s,这种大尺度垂直运动为降水的形成提供了有利条件。

与 TCfree-RDPE 事件不同的是,当 TCaff-RDPE事件发生时,在对流层低层(图 6a),华南地 区仍存在一个异常显著的气旋性环流,低纬度异常 反气旋移至菲律宾岛西侧的南海上空;对流层中层 (图 6c)的高纬度反气旋环流中心南移至朝鲜、韩国 及中国黄海一带;高层(图 6b),华南上空受显著的 异常反气旋环流控制,其中心位于内蒙古至吉林、辽 宁一带,异常辐散气流更为强盛,低层到高层的斜压 环流结构更为明显,有利于 TCaff-RDPE 事件的发 生。此外,22°—27°N 附近异常上升运动更加强烈 (图 6d),其中心垂直速度距平值超过 10 Pa/s。

水汽是极端降水发生的重要条件。整层(地面 至 300 hPa)积分的水汽通量距平的流函数及其辐 散分量分布(图 7)显示,水汽通量距平的流函数分 布与 850 hPa 的环流距平形势基本一致。TCfree-RDPE事件发生时,华南地区至日本岛西南部洋面



图 5 华南地区(黄色方框)7—10月 77 次 TCfree-RDPE 事件合成的无辐散风流场距平(流线) 和辐散风场距平(箭矢,单位;m/s)在 850 hPa(a)、200 hPa(b)、500 hPa(c)的空间分布
和(d)沿 106°—115°E 的经向环流距平的垂直剖面(ω已放大 100 倍,灰色阴影区为青藏高原,彩色阴影区 均表示通过信度为 0.05 的显著性 t 检验,矢量风场均通过 0.1 的显著性 t 检验)以及 TCfree-RDPE 事件合成的 无辐散风平均流场(流线)和平均辐散风场(箭矢,单位;m/s)在 850 hPa(e)和 200 hPa(f)的分布 (红色虚线表示 TCfree-RDPE 事件发生时的南亚高压脊线位置,蓝色虚线表示 7—10 月气候平均状态下的南亚高压脊线)
Fig. 5 Distributions of rotational wind anomalies (stream lines) and divergent wind anomalies (arrows, unit; m/s) for
77 TCfree-RDPEs from July to October in South China (yellow rectangle) at 850 hPa (a), 200 hPa (b) and 500 hPa (c), and the vertical cross-section of meridional circulation averaged over [106° - 115°E] (d) with ω amplified arbitrarily by 100 times (The yellow rectangle indicates South China, the gray shaded areas denote the Tibetan Plateau. The shaded areas in are for values at/above the confidence level of 95%. All vectors are above the confidence level of 90%); Distributions of rotational mean flows (flow lines) and mean divergent-wind (arrows, unit; m/s) are composited for 77 TCfree-RDPEs at 850 hPa (e) and 200 hPa (f, the ridge line of South Asia High (f) averaged over the period from July to October (blue dashed line) and composited for 77 TCfree-RDPEs (red dashed line))

上存在一条东北一西南走向的狭长水汽辐合带,源 自南海和西太平洋的暖湿气流沿异常反气旋性距平 环流外围的偏南气流输送至极端降水区,水汽辐合 异常增强,为华南地区 RDPE 事件的发生提供了充 足的水汽条件。而在 TCaff-RDPE 事件发生时,热 带气旋在其运动过程中携带了大量的来自孟加拉 湾、南海和西太平洋地区的水汽并输送至华南强降 水区,水汽辐合气流更为强盛,有利于 TCaff-RDPE 事件的发生和维持。

4.2 波能传播

斜压波组织成波包向下游传播可使下游系统迅速发展,西风带中东传的波包会给所经地区带来不同程度的天气影响。研究表明,热带气旋与中纬度环流系统也存在着相互作用(Cheng, et al, 1999; 雷小途等,2001)。在向极移动过程中,热带气旋携带了大量的低纬度暖湿气流和热带扰动能量,其动

力和热力作用可成为中纬度地区能量频散的强瞬变 扰源。在假设无环境风场的条件下,β效应能使得 热带气旋环流的能量散布到热带气旋区域外,在热 带气旋中心以东方向形成低一高一低型的波列,波 列中的高值系统因热带气旋环流的能量而生成,反 过来又能对热带气旋的移动路径和结构产生显著的 影响(罗哲贤,1994)。

根据 Takaya 等(2001)提出的 T-N 通量,以 1981—2016年7—10月平均流场作为基本场,对两 类 RDPE 事件分别进行日平均地转风场合成平均, 而后计算出 T-N 通量水平分量(图 8)。当 TCfree-RDPE 事件发生时,在对流层低层,华南大部分地区 波扰动能量辐合,其东南侧即闽赣区至海南一带表 现为辐散;在对流层上层,扰动能量由高原东北侧及 河西走廊地区向华南一带传播,并在华南地区辐合, 这种波能在华南区域的积累十分有利于扰动在华南



图 6 华南地区(黄色方框)7—10月 56次 TCaff-RDPE 事件合成的无辐散风流场距平(流线)和辐散风场距平(箭线)和辐散风场距平(箭关,单位:m/s)在 850 hPa(a)、200 hPa(b)、500 hPa(c)的空间分布和(d)沿 106°—115°E
 的经向环流距平的垂直剖面(ω已放大 100倍,灰色阴影区为青藏高原,彩色阴影区均表示通过信度为 0.05 的显著性 t 检验,矢量风场均通过 0.1 的显著性 t 检验)以及 TCaff-RDPE 事件合成的无辐散风平均流场(流线)和平均辐散风场(箭矢,单位:m/s)在 850 hPa(e)和 200 hPa(f)的分布(红色虚线表示 TCaff-RDPE事件发生时的南亚高压脊线位置,蓝色虚线表示 7—10 月气候平均状态下的南亚高压脊线)







Fig. 7 The stream function (contours, unit: 10⁶ kg/s) and divergent component (vectors, unit: kg/(m • s)) of the vertically integrated water vapor flux anomaly (from the ground to 300 hPa) for 77 TCfree-RDPEs (a) and 56 TCaff-RDPEs (b) during the period from July to October in South China (red rectangle)

(the shaded areas are for values significant at the 95% confidence level, and the vectors are for winds above the 90% confidence level)



图 8 华南地区(红色方框)7—10 月 77 次 TCfree-RDPE 事件(a、b、c)和 56 次 TCaff-RDPE 事件(d、e、f)分别 合成的平均波作用通量(箭矢,单位:m²/s²)及波作用通量散度(色标,单位:10⁻⁶ m/s²)在 850 hPa(a、d)、500 hPa(b、e)及 200 hPa(c、f)上的分布

(灰色阴影区为青藏高原)

Fig. 8 Distributions of mean wave-activity fluxes (arrows, unit: m²/s²) for 77 TCfree-RDPEs (a, b, c) and 56 TCaff-RDPEs (d, e, f) over the period from July to October in South China (red rectangle) and wave-activity flux divergence (shaded, unit: 10⁻⁶ m/s²)

at 850 hPa (a, d), 500 hPa (b, e) and 200 hPa (c, f) (the areas shaded in gray indicate the Tibetan Plateau)

的发展和维持,进而促进 TCfree-RDPE 事件的发 生。不同的是,当 TCaff-RDPE 事件发生时,在对流 层高层波扰动能量由高纬度地区沿河西走廊向下游 传播,但在华南地区辐合不甚明显。

5 影响华南地区 7—10 月两类 RDPE 事件 的外强迫作用

区域强降水事件的发生与大气非绝热加热存在 相关。当 RDPE 事件发生时,地面蒸发和感热通量 较小,区域内强烈的视水汽汇造成一次或多次强降 水过程,并释放大量的凝结潜热,因而大气受到较强 的非绝热加热强迫,对温度升高具有正反馈作用。 图 9a、b 分别给出华南地区 7—10 月 77 次 TC-free-RDPE 事件和56次 TCaff-RDPE 事件合成的垂直积 分(地面至 300 hPa)的视热源 $\langle Q_1 \rangle$ 距平、视水汽汇 $\langle Q_2 \rangle$ 距平及二者差值。可见,当 TCfree-RDPE 事 件发生时, $\langle Q_1 \rangle$ 和 $\langle Q_2 \rangle$ 在华南地区及其南北两侧的 邻近地区均为强的正异常,且二者分布特征较为一 致,18°N以南为明显的负异常区。这表明极端降水 发生时,强降水区上空水汽凝结释放出大量潜热,而 在 18°N以南非绝热冷却,存在下沉运动(图 5d),有 利于对流层低层辐散,将水汽输送至华南降水区。 此外,32°N以北 $\langle Q_1 \rangle$ 和 $\langle Q_2 \rangle$ 表现为偏弱正异常,与 该区域大气在对流层低层存在上升运动而在中层为 下沉运动有关(图 5d)。相比于 TCfree-RDPE 事 件,当 TCaff-RDPE 事件发生时,华南地区 $\langle Q_1 \rangle$ 和 $\langle Q_2 \rangle$ 的距平值更高,对应着该区域更为强烈的上升 运动(图 6d)。此外, $\langle Q_1 \rangle$ 和 $\langle Q_2 \rangle$ 在32°N 以北和 18°N 以南基本为负异常,这种经向上的负一正一负 的异常分布型有利于 TCaff-RDPE 事件的维持。

降水发生时,地表感热和潜热输送较弱,且由于 云对太阳短波辐射的阻挡,在降水区 $\Delta \langle Q \rangle$ 易出现 负异常;雨带北侧云量较少使得对短波辐射的阻断 减少,地表感热输送相对较强,在降水区北侧会存在 $\Delta \langle Q \rangle$ 正异常(Guan, et al, 2011)。华南地区发生 TCaff-RDPE 事件时,此特征较为明显(图 9b),即 22°-29°N表现为负异常,30°N以北基本为正异常。然而在TCfree-RDPE事件发生时,华南地区为明显的正异常而其北侧区域在0左右摆动(图 9a),

这种异常分布可能与云系移动和长波辐射的变化有 关。以上异同体现了华南地区 7—10 月两类 RDPE 事件发生时的大气加热场上的明显差异(表 2)。





Fig. 9 Composite means of anomalous apparent diabatic heating integrated vertically from

the surface up to 300 hPa (unit: $W/m^2)$ averaged over $[106^\circ-115^\circ E]$ for

77 TCfree-RDPEs (a) and for 56 TCaff-RDPEs (b)

表 2	两类 RDPE 事件的统计特征、环流异常及外强迫作用的异同点

	Table 2	Differences and similarities between the two types of RDPE		
	异同点	TCfree-RDPEs	TCaff-RDPEs	
	多发期	7 月	8 月	
	降水最值中心	华南中部	华南沿海	
不同点	水汽来源	西太平洋、中国南海	孟加拉湾、西太平洋、中国南海	
	波能传播	波扰动能量在华南显著辐合	波扰动能量在华南辐合不甚明显	
	加热异常	华南及北侧地区大气净加热、南侧净冷却	华南地区大气净加热、南北两侧为净冷却	
相同点	①异常环流形势:华南地 ②水汽输送条件:来自俄	也区受异常气旋性环流控制,低层辐合、高层辐散, 长纬度洋面的暖湿气流与北方冷气团在华南汇合步	22°—27°N表现为显著强烈的上升运动; 并形成一条狭长的水汽辐合带。	

6 结论与讨论

1981—2016 年 7—10 月华南区域性极端日降 水事件共有 133 次,包含了 77 次剔除热带气旋影响 (TCfree-RDPE)和 56 次受热带气旋影响(TCaff-RDPE,占 42%)的极端事件,95 和 99 百分位阈值 分别为 21.00 和 30.07 mm/d。7 月为华南地区 TCfree-RDPE事件发生频数最多的月份,占TCfree-RDPE事件总频次的1/2以上;TCaff-RDPE 事件则多发生在8月,且多集中在8月4—5候,这 与此时西太平洋副热带高压位置偏北有关。7—10 月华南地区平均降水量和133次RDPE事件合成 降水量的分布均表现为由该区东南沿海向西北内陆 递减;当TCfree-RDPE事件发生时其区域性极端降 水量的均值在华南中部地区最大,最高可达 36 mm/d;TCaff-RDPE事件发生时,大值区则集中 分布在东南沿海一带,最高可至 65 mm/d。

华南地区 7-10 月 RDPE 事件的发生和维持 与大尺度环流异常密切相关。TCfree-RDPE 事件 发生时,在对流层低层,华南至长江中下游地区受显 著异常的气旋性环流控制,气流在华南区域异常辐 合;在对流层上层,南亚高压脊线位置较7-10月平 均气候态位置偏北、强度偏强,华南为异常辐散中 心,这种高低空环流相互配置和异常强烈的垂直上 升运动为极端降水提供了动力条件。而源自中国南 海和西太平洋的暖湿气流沿异常反气旋性距平环流 外围的偏南气流输送至极端降水区,水汽辐合异常 增强,为 RDPE 的形成提供了充足的水汽条件。与 此同时,在对流层上层,罗斯贝波动能量由高原东北 侧及河西走廊地区向华南一带传播,并在华南显著 辐合,这种波能在华南区域的积累亦十分有利于扰 动在华南的发展和维持。不同的是,当 TCaff-RDPE事件发生时,华南地区上空由低层到高层的 斜压环流结构更为明显,异常上升运动更加强烈,热 带气旋在其运动过程中携带了大量的来自孟加拉 湾、中国南海和西太平洋地区的水汽并输送至华南 地区,水汽辐合气流更为强盛。同时,在对流层高层 波扰动能量由高纬度地区沿河西走廊向下游传播, 但在华南地区辐合不甚明显。

形成华南地区 RDPE 事件的环流异常与外强 迫作用有关。7—10月 TCfree-RDPE 事件发生时, 华南及邻近地区上空水汽凝结释放出大量潜热,其 北侧 $\langle Q_1 \rangle$ 和 $\langle Q_2 \rangle$ 为偏弱正异常,这与该区域大气在 对流层低层存在上升运动而在中层为下沉运动有 关;而南侧非绝热冷却,对应着大气的异常下沉运 动,有利于对流层低层辐散,将水汽输送至华南降水 区。 $\Delta(Q)$ 在华南地区为明显的正异常,表明该地区 辐射、地表感热和潜热输送异常加强。TCaff-RDPE 事件发生时, $\langle Q_1 \rangle$ 和 $\langle Q_2 \rangle$ 在经向上由 18°N 以南、华 南及其邻近地区、32°N以北均呈负一正一负的异常 分布型,正距平值更高,对应大气更加强烈的上升运 动,有利于 RDPE 事件的维持。 $\Delta(Q)$ 在华南降水区 为负异常而其北侧表现为正异常,这是由于雨带北 侧云量较少使得对短波辐射的阻断减少,地表感热 输送较强。这些体现出了华南地区 7—10 月两类 RDPE 事件发生时在大气加热场上的明显差异。

需要说明的是,目前与热带气旋有关的降水极 端事件是先找出极端事件后通过筛查才确定的,而 测站与热带气旋中心在 500 km 范围内时,热带气 旋未必均造成 RDPE 事件,若在所有降水日中剔除 受热带气旋影响的个例后再行定义 RDPE 事件,结 果可能会有一定程度的改变,这需要在未来作进一 步讨论。此外,在探讨两类 RDPE 事件的环流异常 对比时,仅强调了东亚附近的动力学和热力学因素、 但是,其他影响因子如 ENSO、印度洋海温距平等异 常热力强迫在 RDPE 事件的发生和维持中起何种 作用,亦有待进一步研究。

致谢:南京信息工程大学地球科学部南京大气资料 服务中心提供了资料服务;NCEP/NCAR 再分析资料取自 NOAA-CIRES Climate Diagnostics Center (http://www. cdc.noaa.gov)。

参考文献

- 鲍名. 2007. 近 50 年我国持续性暴雨的统计分析及其大尺度环流背景. 大气科学, 31(5): 779-792. Bao M. 2007. The statistical analysis of the persistent heavy rain in the last 50 years over China and their backgrounds on the large scale circulation. Chinese J Atmos Sci, 31(5): 779-792 (in Chinese)
- 鲍名. 2008. 两次华南持续性暴雨过程中热带西太平洋对流异常作 用的比较. 热带气象学报, 24(1): 27-36. Bao M. 2008. Comparison of the effects of anomalous convective activities in the tropical Western Pacific on two persistent heavy rain events in South China. J Trop Meteor, 24(1): 27-36 (in Chinese)
- 陈丹萍,管兆勇,侯俊等. 2016. 2007 年夏季江淮强降水过程中 10 ~30 d 低频变化及其与对流层上层波包活动的联系. 大气科学 学报, 39(2): 177-188. Chen D P, Guan Z Y, Hou J, et al. 2016. The 10 - 30-day intraseasonal oscillations of circulations and their associations with Rossby wave packets in the upper troposphere during persistent severe rainfall in summer 2007. Trans Atmos Sci, 39(2): 177-188 (in Chinese)
- 陈际龙,黄荣辉. 2008. 亚洲夏季风水汽输送的年际年代际变化与 中国旱涝的关系. 地球物理学报,51(2):352-359. Chen J L, Huang R H. 2008. Interannual and interdecadal variations of moisture transport by Asian summer monsoon and their association with droughts or floods in China. Chinese J Geophys, 51 (2):352-359 (in Chinese)
- 陈锦年,张淮. 1987. 南海海-气热量交换对大气环流及华南前汛期 降水影响的分析. 海洋湖沼通报,(3): 30-33. Chen J N, Zhang H. 1987. A preliminary study on the influence of Sea-Air heat exchange in the South China Sea on the atmospheric circulation and the precipitation of Huanan in earlier flood season. Trans Oceanol Limnol, (3): 30-33 (in Chinese)

陈烈庭. 1977. 东太平洋赤道地区海水温度异常对热带大气环流及

我国汛期降水的影响. 大气科学, 1(1): 1-12. Chen L T. 1977. The effects of the anomalous sea-surface temperature of the equatorial Eastern Pacific ocean on the tropical circulation and rainfall during the rainy period in China. Chinese J Atmos Sci, 1(1): 1-12 (in Chinese)

- 陈文. 2002. El Niño 和 La Niña 事件对东亚冬、夏季风循环的影响. 大气科学, 26(5): 595-610. Chen W. 2002. Impacts of El Niño and La Niña on the cycle of the East Asian winter and summer monsoon. Chinese J Atmos Sci, 26(5): 595-610 (in Chinese)
- 陈艺敏, 钱永甫. 2005. 西太平洋暖池海温对华南前汛期降水影响 的数值试验. 热带气象学报, 21(1): 13-23. Chen Y M, Qian Y F. 2005. Numerical study of influence of the SSTA in western Pacific warm pool on precipitation in the first flood period in South China. J Trop Meteor, 21(1): 13-23 (in Chinese)
- 程正泉,陈联寿,刘燕等. 2007. 1960—2003 年我国热带气旋降水 的时空分布特征. 应用气象学报,18(4):427-434. Cheng Z Q, Chen L S, Liu Y, et al. 2007. The spatial and temporal characteristics of tropical cyclone-induced rainfall in China during 1960 - 2003. J Appl Meteor Sci, 18(4): 427-434 (in Chinese)
- 何有海,关翠华,林锡贵等. 1998. 华南后汛期降雨量的振动和分 布. 热带气象学报,14(4): 359-363. He Y H, Guan C H, Lin X G, et al. 1998. Oscillation and distribution of rainfall during second rainy season in South China. J Trop Meteor, 14(4): 359-363 (in Chinese)
- 胡娅敏, 翟盘茂, 罗晓玲等. 2014. 2013 年华南前汛期持续性强降 水的大尺度环流与低频信号特征. 气象学报, 72(3): 465-477. Hu Y M, Zhai P M, Luo X L, et al. 2014. Large scale circulation and low frequency signal characteristics for the persistent extreme precipitation in the first rainy season over South China in 2013. Acta Meteor Sinica, 72(3): 465-477 (in Chinese)
- 黄荣辉,徐予红,周连童. 1999. 我国夏季降水的年代际变化及华 北干旱化趋势. 高原气象,18(4):465-476. Huang R H, Xu Y H, Zhou L T. 1999. The interdecadal variation of summer precipitations in China and the drought trend in North China. Plateau Meteor, 18(4):465-476(in Chinese)
- 黄晓莹,谭浩波,李菲等. 2009. 21 世纪末华南汛期强降水变化分 析. 气象科技, 37(4): 425-428. Huang X Y, Tan H B, Li F, et al. 2009. Changes of flood-season severe precipitation over South China in 2071 – 2100. Meteor Sci Technol, 37(4): 425-428 (in Chinese)
- 雷小途,陈联寿. 2001. 热带气旋的登陆及其与中纬度环流系统相互作用的研究. 气象学报,59(5): 602-615. Lei X T, Chen L
 S. 2001. Tropical cyclone landfalling and its interaction with mid-latitude circulation systems. Acta Meteor Sinica, 59(5): 602-615 (in Chinese)
- 李丽平,章开美,王超等. 2010. 近 40 年华南前汛期极端降水时空 演变特征. 气候与环境研究, 15(4):443-450. Li L P, Zhang K M, Wang C, et al. 2010. Temporal and spatial variations of extreme precipitation in the pre-flood period of South China in recent 40 years. Climatic Environ Res, 15(4): 443-450 (in Chi-

nese)

- 李秀珍,梁卫,温之平. 2010. 华南秋、冬、春季水汽输送特征及其 与降水异常的联系. 热带气象学报, 26(5): 626-632. Li X Z, Liang W, Wen Z P. 2010. Characteristics of the atmospheric water vapor and its relationship with rainfall in South China in northern autumn, winter and spring. J Trop Meteor, 26(5): 626-632 (in Chinese)
- 刘冬晴,杨修群. 2010. 热带低频振荡影响中国东部冬季降水的机 理. 气象科学,30(5): 684-693. Liu D Q, Yang X Q. 2010. Mechanism responsible for the impact of Madden-Julian oscillation on the wintertime rainfall over eastern China. Sci Meteor Sin, 30(5): 684-693 (in Chinese)
- 鹿世瑾. 1990. 华南气候. 北京: 气象出版杜, 189-195. Lu S J. 1990. Climate of Southern China. Beijing: China Meteor Press, 189-195 (in Chinese)
- 罗哲贤. 1994. 能量频散对台风结构和移动的作用. 气象学报, 52 (2): 149-156. Luo Z X. 1994. Effect of energy dispersion on structure and motion of tropical cyclone. Acta Meteor Sinica, 52(2): 149-156 (in Chinese)
- 梅士龙,管兆勇. 2008. 对流层上层斜压波包活动与 2003 年江淮流 域梅雨的关系. 大气科学, 32(6): 1333-1340. Mei S L, Guan Z Y. 2008. Activities of baroclinic wave packets in the upper troposphere related to Meiyu of 2003 in the Yangtze River-Huaihe River valley. Chinese J Atmos Sci, 32(6): 1333-1340 (in Chinese)
- 倪允琪,周秀骥,张人禾等. 2006. 我国南方暴雨的试验与研究. 应 用气象学报,17(6):690-704. Ni Y Q, Zhou X J, Zhang R H, et al. 2006. Experiments and studies for heavy rainfall in southern China. J Appl Meteor Sci, 17(6):690-704 (in Chinese)
- 陶诗言,张庆云. 1998. 亚洲冬夏季风对 ENSO 事件的响应. 大气 科学, 22(4): 399-407. Tao S Y, Zhang Q Y. 1998. Response of the Asian winter and summer monsoon to ENSO events. Chin J Atmos Sci, 22(4): 399-407 (in Chinese)
- 王东海,夏茹娣,刘英. 2011. 2008 年华南前汛期致洪暴雨特征及 其对比分析. 气象学报,69(1):137-148. Wang D H, Xia R D, Liu Y. 2011. A preliminary study of the flood causing rainstorm during the first rainy season in South China in 2008. Acta Meteor Sinica, 69(1):137-148 (in Chinese)
- 夏茹娣,赵思雄,孙建华. 2006. 一类华南锋前暖区暴雨 β 中尺度系 统环境特征的分析研究. 大气科学, 30(5): 988-1008. Xia R D, Zhao S X, Sun J H. 2006. A study of circumstances of Meso-β-Scale systems of strong heavy rainfall in warm sector ahead of fronts in South China. Chinese J Atmos Sci, 30(5): 988-1088 (in Chinese)
- 赵玉春, 王叶红. 2009. 近 30 年华南前汛期暴雨研究概述. 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. Torrential Rain Disaster, 28(3): 193-202, 228 (in Chinese)

郑益群, 钱永甫, 苗曼倩等. 2000. 青藏高原积雪对中国夏季风气

候的影响. 大气科学, 24(6): 761-774. Zheng Y Q, Qian Y F, Miao M Q, et al. 2000. Effect of the Tibetan Plateau snow cover on China summer monsoon climate. Chinese J Atmos Sci, 24 (6): 761-774 (in Chinese)

- Bonsal B R, Zhang X, Vincent L A, et al. 2001. Characteristics of daily and extreme temperatures over Canada. J Climate, 14(9): 1959-1976
- Chen Y, Zhai P M. 2013. Persistent extreme precipitation events in China during 1951 - 2010. Climate Res, 57(2): 143-155
- Cheng Z H, Kang D, Chen L S, et al. 1999. Interaction between tropical cyclone and Meiyu front. Acta Meteor Sinica, 13(1): 35-46
- Dare R A, Davidson N E, McBride J L. 2012. Tropical cyclone contribution to rainfall over Australia. Mon Wea Rev, 140(11): 3606-3619
- Goswami B N, Venugopal V, Sengupta D, et al. 2006. Increasing trend of extreme rain events over India in a warming environment. Science, 314(5804): 1442-1445
- Guan Z Y, Han J, Li M G. 2011. Circulation patterns of regional mean daily precipitation extremes over the middle and lower reaches of the Yangtze River during the boreal summer. Climate Res, 50(2-3): 171-185
- Guan Z Y, Jin D C. 2013. Two opposite extreme events in seasonal mean winter rainfall over East China during the past three decades. Atmos Ocean Sci Lett, 6(5): 240-247
- Jin D C, Guan Z Y, Cai J X, et al. 2015. Interannual variations of regional summer precipitation in Mainland China and their possible relationships with different teleconnections in the past five decades. J Meteor Soc Japan, 93(2): 265-283
- Jones C, Waliser D E, Lau K M, et al. 2004. Global occurrences of extreme precipitation and the Madden-Julian Oscillation: Observations and predictability. J Climate, 17(23): 4575-4589
- Karl T R, Knight R W. 1998. Secular trends of precipitation amount, frequency, and intensity in the United States. Bull Amer Meteor Soc, 79(2): 231-241
- Ke D, Guan Z Y. 2014. Variations in regional mean daily precipitation extremes and related circulation anomalies over central China during boreal summer. J Meteor Res, 28(4): 524-539
- Kistler R, Kalnay E, Collins W, et al. 2001. The NCEP-NCAR 50year reanalysis. Monthly means CD-ROM and documentation. Bull Amer Meteor Soc, 82(2): 247-267
- Lau K M, Zhou Y P, Wu H T. 2008. Have tropical cyclones been feeding more extreme rainfall? J Geophys Res, 113 (D23): D23113
- Li M G, Guan Z Y, Jin D C, et al. 2016. Anomalous circulation patterns in association with two types of daily precipitation ex-

tremes over southeastern China during boreal summer. J Meteor Res, 30(2): 183-202

- Luo H B, Yanai M. 1984. The large-scale circulation and heat sources over the Tibetan Plateau and surrounding areas during the early summer of 1979. Part II: Heat and moisture budgets. Mon Wea Rev, 112(5): 966-989
- Nogueira R C, Keim B D. 2010. Annual volume and area variations in tropical cyclone rainfall over the Eastern United States. J Climate, 23(16): 4363-4374
- Stone D A, Weaver A J, Zwiers F W. 2000. Trends in Canadian precipitation intensity. Atmos Ocean, 38(2): 321-347
- Takaya K, Nakamura H. 2001. A formulation of a phase-independent wave-activity flux for stationary and migratory quasigeostrophic eddies on a zonally varying basic flow. J Atmos Sci, 58 (6): 608-627
- Wang B, Wu R G, Fu X H. 2000. Pacific-East Asian teleconnection: How does ENSO affect East Asian climate? J Climate, 13 (9): 1517-1536
- Wang B, Wu R G, Lau K M. 2001. Interannual variability of the Asian summer monsoon: Contrasts between the Indian and the western North Pacific-East Asian monsoons. J Climate, 14 (20): 4073-4090
- Wang Y Q, Zhou L. 2005. Correction to "observed trends in extreme precipitation events in China during 1961 – 2001 and the associated changes in large-scale circulation". Geophys Res Lett, 32(17): L17708
- Wu H, Zhai P M, Chen Y. 2016. A comprehensive classification of anomalous circulation patterns responsible for persistent precipitation extremes in South China. J Meteor Res, 30(4): 483-495
- Yamamoto R, Sakurai Y. 1999. Long-term intensification of extremely heavy rainfall intensity in recent 100 years. World Resour Rev, 11: 271-281
- Yao C, Yang S, Qian W H, et al. 2008. Regional summer precipitation events in Asia and their changes in the past decades. J Geophys Res, 113(D17): D17107
- You Q L, Kang S C, Aguilar E, et al. 2011. Changes in daily climate extremes in China and their connection to the large scale atmospheric circulation during 1961 – 2003. Climate Dyn, 36 (11-12): 2399-2417
- Zhai P M, Zhang X B, Wan H, et al. 2005. Trends in total precipitation and frequency of daily precipitation extremes over China. J Climate, 18(7): 1096-1108
- Zhang Y S, Li T, Wang B. 2004. Decadal change of the spring snow depth over the Tibetan Plateau: The associated circulation and influence on the East Asian summer monsoon. J Climate, 17 (14): 2780-2793

附 录

附表 1 1981—2016 年华南地区 7—10 月 77 个 TCfree-RDPE 事件的发生日期、日降水量 以及 TCfree-RDPE 事件发生时所选 47 站中降水量大于 95 百分位阈值的站点数

Att. Table 1	The occurrence date and corresponding daily precipitation of 77 TCfree-RDPEs,
and the number of a	pbservation stations where precipitation is above the 95th percentile threshold value out
of 47 selected site	s when TCfree-RDPEs occur from July to October in South China during 1981 – 2016

年份	日期(日/月)	降水量(mm/d)	降水量≥21.00 mm/d 的站点数
1981	1/7, 24/7, 25/7, 27/7, 28/7	32.03, 29.55, 26.11, 27.65, 28.17	18, 20, 19, 21, 15
1982	2/7, 19/8	32.65, 30.07	17, 17
1983	23/8, 11/9	28.36, 34.96	20, 20
1984	11/8	27.65	16
1985	26/8, 27/8, 28/8	24.89, 24.59, 24.40	19, 12, 16
1986	4/7, 13/7, 11/8	30.01, 25.45, 31.65	19, 22, 16
1987	28/7, 29/7, 30/7, 25/9	28.21, 32.56, 27.02, 26.58	25, 23, 15, 19
1988	29/7, 29/8, 30/8	27.91, 26.91, 25.63	17, 17, 14
1989	27/7	22.43	18
1990	1/7,23/10	21.23,24.28	17, 18
1991	31/7	24.66	19
1992	5/7,6/7	28.69, 35.48	19,24
1993	8/7, 20/7, 27/7	22.29,27.05,32.16	15, 18, 19
1004	5/7, 6/7, 17/7, 22/7, 23/7,	28.60, 27.38, 24.91, 29.52,	20, 17, 20, 16, 13,
1994	24/7, 7/8, 16/8	23.16, 21.26, 30.40, 27.91	16,24,18
1995	3/7, 14/8	22.10, 22.41	14, 19
1996	18/8, 12/10	37.32,63.93	19,8*
1997	4/7,6/7,8/7,9/8	29.66, 28.24, 39.74, 25.16	24, 21, 20, 21
1998	24/7	55.97	19
1999	30/8	22.75	18
2000	20/7, 20/10	26.79, 25.02	22, 22
2001	14/7, 17/7, 1/8	32.32, 28.95, 28.63	19, 22, 21
2002	1/7, 29/10	43.51,37.65	20,26
2003	15/9	24.52	12
2004	5/7, 11/7, 12/7, 19/7, 20/7	25.95, 31.20, 33.84, 24.78, 27.65	19, 15, 15, 15, 19
2005	21/8	21.85	16
2006	17/7	35. 51	27
2007		_	_
2008		_	
2009	3/7, 4/7, 28/7, 16/9	44.14, 24.72, 27.24, 25.81	29, 20, 14, 17
2010	22/9	26.78	24
2011	1/10	28.88	23
2012	22/8, 30/10	27.54, 26.48	19, 19
2013		_	
2014	13/8, 19/8	33.76, 37.96	19,28
2015	6/10	26.28	18
2016			

*:表示站点数未超过12站。

附表 2 1981—2016 年华南地区 7—10 月 56 个 TCaff-RDPE 事件的发生日期、日降水量 以及 TCaff-RDPE 事件发生时所选 47 站中降水量大于 95 百分位阈值的站点数

Att. Table 2 The occurrence date and corresponding daily precipitation of 56 TCaff-RDPEs (unit: mm), and the number of observation stations where precipitation is above the 95th percentile threshold value out of 47 selected sites when TCaff-RDPEs occur from July to October in South China during 1981 – 2016

年份	日期(日/月)	热带气旋编号	降水量(mm/d)	降水量≥21.00 mm/d 的站点数
1981	21/7, 23/7	8108, 8109	21.23,24.28	16, 17
1982	17/8, 18/8	8212, 8212	27.91, 24.59	24, 16
1983	10/9	8309	32.16	20
1984				
1985	25/8, 6/9, 7/9, 23/9	8511, 8516, 8516, 8518	22.41,22.29, 28.24,26.79	15, 15, 20, 16
1986	12/7	8607	27.91	15
1987	_	_		_
1988	20/7	8806	38.09	19
1989	_	_		_
1990	_	_		_
1991	20/7	9107	30.01	22
1992	6/9	9215	27.02	20
1993	22/8, 18/9, 27/9	9309, 9316, 9318	26.91, 21.85, 23.16	19, 19, 13
1994	5/8,6/8	9412, 9412	23.42,27.95	18, 18
1995	1/9, 3/10, 4/10, 14/10, 14/10	9508,9515, 9515,9516	31.20,33.76, 32.65,26.58	24, 23, 20, 19
1996	28/7	9608	25.02	19
1997				
1998				
1999	23/8, 17/9	9910, 9915	27 19, 26 57	9*.17
2000				
2000	3/7 6/7 7/7	0103 0104 0104	22 10 24 81 37 54	19 17 33
2001	31/8, 1/9	0103, 0104, 0104, 0104, 0114	22. 75, 21, 26	12, 17, 55, 18, 16
2002	6/8, 19/8, 20/8	0212.0214.0214	23 49, 37 32, 22 43	19, 31, 19
2003				
2004		_		
2005	_	_		_
2006	15/7, 16/7, 27/7, 4/8, 5/8	0604,0604,0605, 0606,0606	42.69,55.97,27.05, 32.32,28.49	17, 27, 21, 23
2007	21/8	0708	27.65	15
2008	5/10	0817	22.17	17
2009	19/7	0906	25.53	13
2010	21/9	1011	27.24	20
2011	30/9	1117	26.40	19
2012	24/7, 25/7	1208, 1208	24.91, 24.40	14, 20
2013	15/8, 16/8, 17/8, 18/8, 23/8, 24/8	1311, 1311, 1311, 1311, 1312, 1312	30.07, 35.24, 33.84, 21.86, 27.54, 28.29	17, 21, 24, 21, 21, 23
2014	17/9	1415	24.52	12
2015	5/10	1522	39.74	21
2016	3/8, 19/10, 20/10	1604, 1621, 1622	34.96, 28.17, 28.60	23, 24, 24

*:表示站点数未超过12站。