刘瑞鑫，孙建华，陈鲍发. 2019. 华南暖区暴雨事件的筛选与分类研究 [J]. 大气科学, 43 (1): 119–130. Liu Ruixin, Sun Jianhua, Chen Baofa. 2019. Selection and classification of warm-sector heavy rainfall events over South China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 43 (1): 119–130, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1803.17245.

华南暖区暴雨事件的筛选与分类研究

刘瑞鑫[1, 3] 孙建华[1, 2, 3] 陈鲍发[4]

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 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室，北京 100081
3 中国科学院大学，北京 100049
4 江西省景德镇市气象局，江西省景德镇 333000

摘 要 利用逐小时降水资料，采用客观方法对 1982～2015 年华南地区暖区暴雨进行了筛选和分类研究。主要结果如下：华南区域暖区暴雨事件共计 177 例，暖区暴雨占筛选的暴雨事件的 16.86%，表明暖区暴雨是华南非常重要的降水过程。暖区暴雨主要出现在 4～7 月，6 月份最多，平均持续 11.58 h。暖区暴雨事件发生位置主要集中在广东、广西的沿海地区和粤北山区，有四个降雨中心。产生华南暖区暴雨的天气形势主要有四类，切变线型、低涡型、南风型和回流型，不同类型的暖区暴雨对华南地区的内陆和沿海的作用不同，且南风影响下的暖区暴雨发生频率较高，影响较大，是一类较为重要的暖区暴雨。

关键词 华南暖区暴雨 空间滤波 切变线 低涡
文章编号 1006-9895(2019)01-0119-12 **中图分类号** P445 **文献标识码** A
doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1803.17245

Selection and Classification of Warm-Sector Heavy Rainfall Events over South China

LIU Ruixin[1, 3], SUN Jianhua[1, 2, 3], and CHEN Baofa[4]

1 *Key Laboratory of Cloud–Precipitation Physics and Severe Storms* (*LACS*), *Institute of Atmospheric Physics*, *Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100029
2 *State Key Laboratory of Severe Weather*, *Chinese Academy of Meteorological Sciences*, *Beijing* 100081
3 *University of Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100049
4 *Jingdezhen Meteorological Bureau of Jiangxi Province*, *Jingdezhen*, *Jiangxi* 333000

Abstract Based on hourly precipitation data, warm-sector heavy rainfall events are selected and classified using an objective method over South China during 1982–2015. The main results are as follows. There are a total of 177 warm-sector heavy rainfall events in South China during the study period. Warm-sector heavy rainfall events account for 16.86% of the selected severe heavy rainfall events, indicating that the warm-sector rainfall is a very important precipitation process in South China. Most of warm-sector rainfall events occur from April to July, and a majority occurs in June. The average duration of all events is 11.58 h. There are four centers of warm-sector rainfall events, which are mainly concentrated in the coastal regions of Guangdong, Guangxi, and the northern mountainous areas of Guangdong Province. According to the

收稿日期 2017-09-29；**网络预出版日期** 2018-03-23
作者简介 刘瑞鑫，女，1990 年出生，博士研究生，主要从事中尺度天气分析和模拟研究。E-mail: liuruixin.123@163.com
通讯作者 孙建华，E-mail: sjh@mail.iap.ac.cn
资助项目 国家自然科学基金项目 41675045、41575080，灾害天气国家重点实验室基金项目 2016LASW-B05，江西省重点研发计划项目 20171BBG70005
Funded by National Natural Science Foundation of China (Grants 41675045, 41575080), Fund of National Key Laboratory of Disaster Weather (Grant 2016LASW-B05), Key Research Program of Jiangxi Province (Grant 20171BBG70005)

weather systems that affect rainfall events, the selected warm-sector rainfall events are divided into four types, i.e., shear line, vortex, southerly wind, and backflow. The result shows that different types of warm-sector rainfall events have different effects on the inland and coastal areas of South China, and the occurrence frequency of southerly wind type event is the highest among the four types. Generally, the southerly wind type is an important type of warm-sector rainfall.

Keywords Warm-sector heavy rainfall, Spatial filtering, Shear line, Vortex

1 引言

华南地区是我国夏季风最早到达的地区，也是我国汛期开始最早的地区，受到热带与中纬度天气系统的共同影响，是我国雨量最充沛、雨季最长、暴雨最频繁的地区之一。加之地形复杂，下垫面条件以及海陆热力差异等外强迫作用，其暴雨洪涝发生的频数居全国之冠（陶诗言, 1980；陈红和赵思雄，2000；赵思雄等, 2004；Zhou et al., 2008; 赵玉春和王叶红，2009）。

20 世纪 80 年代，Atkinson and Smithson（1972）研究了一次发生在英格兰和威尔士的暖锋降水过程，指出该次降水主要分布在暖锋附近以及距离暖锋有一定距离的暖区内，但研究中均没有明确提出暖区降水的概念（Oliver and Shaw, 1956；Bader and Roach, 1977）。之前的研究者通过大量的观测研究表明，华南暴雨与传统的挪威学派气旋理论迥异，华南地区的强降水通常情况下并不是都出现在锋上或者锋后，有一些是位于锋前的暖区，说明暖区暴雨是华南暴雨较显著的特点（Ninomiya and Akiyama, 1971；陶诗言，1980；Ninomiya et al., 1988；蒙伟光等，2004；赵玉春等，2008；何立富等，2016）。暖区暴雨具有明显的中尺度特征，其发生时伴有强对流天气以及强降水，容易引发洪涝灾害，给人民安全造成重大威胁。其产生的危害已经引起了研究者的重视，并且多次开展华南暴雨外场试验，在此基础上进行了一系列卓有成效的研究（陶诗言，1980；黄士松，1986；陈红和赵思雄，2000；周秀骥等，2003；夏茹娣等，2006；Zhao et al., 2007；夏茹娣和赵思雄，2009；Zhang et al., 2011；倪允琪等, 2013；Luo et al., 2017）。

暖区暴雨的定义由黄士松（1986）针对华南前汛期提出，一般是指发生在距地面锋面 200～300 km 的暖区一侧的暴雨，或者是发生在西南风和东南风汇合气流中，甚至无切变的西南气流里的暴雨过程，但是不受台风等热带系统控制。林良勋（2006）指出暖区暴雨具有以下特点：暖区暴雨是在高温、高湿和不稳定的情况下产生的，降水强度较大，一般是冷锋暴雨强度的 3～5 倍；降水范围比锋面暴雨小，且多呈块状，尺度一般为 β 中尺度，只有几十到几百公里。

由于暖区暴雨具有降水强度大，且相对集中的特点，所以以往研究者主要是根据这一特点对暖区暴雨进行挑选。赵玉春等（2008）对于华南锋面与暖区暴雨进行了对比分析，主要对单站逐小时降水演变和降水峰值变化进行分析，将处于大于 348 K 高假相当位温环境下的暴雨事件记为暖区暴雨。丁治英等（2011）对暖区暴雨事件重新进行了定义，考虑降水的强度、持续时间、单站累计降水等，主要统计 6 h 降水量大于或等于 30 mm 的站点，对 2005～2008 年 5、6 月份暖区暴雨进行筛选，并且依据假相当位温（θ_{se}）与降水的垂直分布情况进行分类。陈翔翔等（2012）在丁治英等（2011）定义的基础上，将 θ_{se} 的密集带作为锋区指示，对 2000～2009 年 5～6 月华南暖区暴雨事件进行普查，将华南暖区暴雨的影响系统分为切变线型、低涡型、偏南风风速切变辐合型三类，并给出了华南暖区暴雨各影响系统的特征。

关于华南暖区暴雨的分类，何立富等（2016）根据已有的研究成果及中央气象台预报实践经验，总结了边界层辐合型、偏南风风速辐合型和强西南急流型三类典型华南暖区暴雨，同时对三类暖区暴雨的环流形势进行了分析。另外，华南地区 4 月初到 5 月中旬会发生一类特殊的暖区暴雨事件，为回流型暖区暴雨，由于在这段时间内，陆地开始回暖海面相对较冷，变性高压出海以后由于下垫面较冷而在东海加强，广东沿海容易出现回流东风，产生回流型暖区暴雨（林良勋，2006；叶朗明和苗峻峰，2014；林确略等，2015），但这类暖区暴雨相对其他类型的暖区暴雨发生次数较少。

除了华南地区暖区暴雨普查研究，国内很多学者也对华南暖区暴雨个例进行了研究。韦统建（1994）研究了三次较为典型的华南暖区暴雨的流场结构特征，探究发生暖区暴雨中低层配置。华南 2005 年 6 月暖区暴雨的中尺度环境特征的研究中指出华南地区喇叭口地形有利于 β 中尺度系统的触发

与维持（夏茹娣等，2006；夏茹娣和赵思雄，2009）。叶朗明和苗峻峰（2014）对一次回流型暖区暴雨的研究指出，高空辐散、低空急流、喇叭口地形作用以及充足的水汽条件是该次中尺度对流系统连续生成，东移发展的主要原因。

综上可见，尽管已经有很多针对华南暖区暴雨的研究，也提出了一些暖区暴雨的定义，但目前对于“暖区暴雨”的挑选尚无统一的标准。以往的研究工作还存在以下三个方面的不足：研究时段较短，不能充分说明华南暖区暴雨的气候特征，并且对华南暖区暴雨的分类中较少考虑中尺度系统的影响；主要研究典型个例，得到暖区暴雨个例的触发和维持机理不能说明一类华南暖区暴雨的发生发展机制；研究主要集中在前汛期的暴雨，而近年来，后汛期暴雨频发，雨量惊人，损失惨重。鉴于暖区暴雨预报的诸多困难，以及业务上对于暖区暴雨的预报需求，为了系统研究华南暖区暴雨的天气学特征以及中尺度对流系统的形成和发展机制，本文对 1982～2015 年 4～9 月份华南暖区暴雨进行挑选，并从中尺度天气学角度进行分类，得到各类暖区暴雨的分布特征，为下一步研究不同类型华南暖区暴雨发生和维持机理打下基础，从而进一步探究华南暖区暴雨的预报方法，改进预报水平。

2 资料与方法

本文采用中国气象局国家气象信息中心提供的 1982～2012 年汛期（大部分地区为 5～9 月，华南地区为 4～9 月）国家级地面气象站逐小时降水数据集中的 2420 站降水（20～20 时，北京时，下同）资料，该数据经过严格质量控制，并进行了内部一致性检查、时间一致性检查等（Yu et al., 2007; Li et al., 2011）。此外，本文还采用国家气象中心提供的 2013～2015 年站点逐小时降水资料。在进行华南暖区暴雨分析时采用了欧洲中心 1982～2015 年水平分辨率 0.75°×0.75°，垂直 24 层，每 6 小时格点再分析资料（Simmons et al., 2007）。同时参考了国家气象中心提供的 JTWC（Joint Typhoon Warning Center）历年最佳台风路径资料，剔除台风和热带低压导致的华南强降水事件。

一般而言，一个降水日中的实际降水时段往往仅有几个小时，与逐日降水相比，逐小时数据能反映出更为精细的特征（Trenberth，1998；Trenberth et al.，2003；Westra et al.，2014）。由于部分站点存在缺测，考虑到数据的连续性，对所有站点进行了进一步的质量控制，要求一年中 4～9 月逐小时降水记录数不小于该年时段总时数的 98%，且无缺测年份。全国筛选出 1141 个站点（占总站点数的 47.1%），总体而言东密西疏。并且利用同样的资料筛选和处理方法，将两组逐小时站点数据经过质量控制统一整合成 1982～2015 年 1141 站逐小时（0～23 时）降水资料。Li et al.（2016）指出旋转 EOF（Rotated Empirical Orthogonal Function, REOF）可以较好地反映不同空间的差异，不同子区域之间的相关性特征。REOF 是基于 EOF 方法，对载荷向量场做方差极大旋转的过程（陈豫英等，2010）。基本思路是：EOF 分析得到前 K 个特征向量及空间型，保证单个载荷向量尽量反映原变量场的局部相关结构前提下，对 K 个 EOF 再做调整的过程。REOF 分析得到的空间模态式旋转因子的载荷向量表示的是空间相关性分布结构（魏凤英，2007），若某一空间分布型的各分量均为同一符号，代表该地区的变量随时间变化一致，反之则代表两区域变化趋势呈反位相结构。REOF 方法是一种气候分型区划方法，在气象中有广泛应用（丁裕国等，2007；翟颖佳等，2013）。研究中对挑选出来的完整率达到 98%以上的 1141 站降水资料进行 REOF 分析，得到华南区域的 124 个站点（图 1），这些站点的逐小时降水资料是挑选及统计华南暖区暴雨特征的主要依据。

文中还采用傅里叶变换方法对影响暖区暴雨的环流形势场进行空间滤波分析。这种方法是数据信号分析中常用的一种方法，其利用频率、幅值和相位来描述时域中的振动波形，进而分析数据的规律和特征，并在气象领域得到广泛的应用（Askelson et al., 2000; Trapp and Doswell, 2000）。由于暖区暴雨的尺度一般只有几十到几百公里的 β 中尺度。为了研究暖区暴雨产生的主要影响系统，采用傅里叶变换方法对原始场进行空间滤波，保留波长 2000 km 以下的波动，主要保留中尺度及其以下系统，剔除行星尺度和天气尺度，探究中尺度系统对于暖区暴雨的作用。

3 华南暖区暴雨的定义和筛选

华南地区汛期开始早，强降水发生频次多、持续时间长，研究表明暖区暴雨是华南一个独特的天气现象（林良勋，2006）。前人关于华南暖区暴雨的研究主要集中于华南前汛期 4～6 月份，这一时

段西太平洋副热带高压北移，西南季风开始活跃，将西太平洋洋面上大量暖湿空气输送到华南地区，同时冷空气对华南的影响减弱，所以华南前汛期暴雨中有一部分暴雨是发生在冷锋前的暖区中（何立富等，2016）。华南后汛期 7～9 月也有这样的情况存在，华南地区水汽含量较为充足，若出现有利的触发机制，加上华南地区复杂地形以及海陆热力差异，便可出现中尺度对流系统，产生降水，因此，本文研究华南地区 4～9 月的暖区暴雨。

针对华南暖区暴雨的挑选，不同的研究者有不同的具体标准，但是大部分都是依据华南暖区暴雨降水量大，且降水时间相对较为集中的特点，筛选暖区暴雨事件，主要采用的资料是华南地区站点日降水资料或逐小时降水资料（赵玉春等，2008；丁治英等，2011；陈翔翔等，2012）。大多数研究采用日降水资料进行个例的筛选，但是只考虑单站日降水不能体现华南暖区暴雨降水较为集中的特点，因此，本文主要结合日降雨量和逐小时降水对华南暖区暴雨进行挑选。

为了挑选出降水强度较强且持续时间较长的暖区暴雨个例，本文首先挑选出华南的强降水事件，参考汪汇洁等（2014）挑选持续型暴雨过程的方法，并基于 1982～2015 年 4～9 月降水资料完整率达到 98%以上的华南 124 个站点的逐小时降水资料，挑选出同时满足以下条件的强降水事件（剔除受台风和热带低压扰动影响的个例）：相邻 3 站或 3 站以上（站点之间的距离不超过 100 km）日降水量大于或等于 50 mm 的事件；其单站连续三小时总降水量大于或等于 30 mm；这三个小时的逐小时降水量都要大于或等于 5 mm。

基于以上的标准挑选出强降水事件，在这些事件中挑选华南暖区暴雨，暖区暴雨的挑选主要参考黄士松（1986）暖区暴雨的定义。根据挑选个例的日降水分布，选择降水中心日降水量较强且满足连续三小时降水量大于或等于 30 mm，单小时大于或等于 5 mm 的站点，在同一片降水区，满足以上条件的降水量最大站为代表站。如果同时有多个降水区域出现，每个降水区选择一个代表站点，沿着每个代表站点所在的经度，做相关物理量（θ_{se}、温度平流、站点降水）的垂直剖面分析，确定锋面（θ_{se}密集区）、冷平流与降水的位置，挑选暖区暴雨事件（图 2）：（1）垂直剖面图上没有明显锋面系统控制的降水过程，需要满足降水区域对应中低空为南风控制，且与地面北风（$v<0$）距离要大于 200 km（图 2a）；（2）当代表站垂直剖面上明显有锋面系统，降水区域与锋面的距离要大于 200 km（图 2b）。满足以上标准的降水区就确定为暖区降水，而不满足的就去掉此个例。如果一天出现多个暖区暴雨，则按照降水强、面积大的降水区域选取个例。

在个例的挑选完成后，对暖区降水的一些特征量，包括降水的中心位置、开始和结束时间、持续时间等进行了统计。降水的中心位置定义为选取的代表站点的经纬度位置。暖区暴雨的开始时间为一次过程中同一系统影响的站点（距离代表站点不超过 150 km）的单站降水量超过 5 mm 的第一个时次，而结束时间为暖区暴雨持续过程中单站降水小于 5 mm 的第一个时次。降水的持续时间定义为一次过程的开始时间到结束时间。降水过程单站最强降水量为距离代表站点不超过 150 km，暴雨持续时间段内站点累计降水量的最大值。

按照上述定义，挑选出 1982～2015 年 4～9 月华南暖区暴雨共计 177 例，本方法挑选出的暖区暴雨基本涵盖了之前学者对于华南降水较强的暖区暴雨个例研究（夏茹娣等，2006；赵玉春等，2008；夏茹娣和赵思雄，2009；林确略和寿绍文，2012；叶朗明和苗峻峰，2014；叶朗明和徐碧裕，2014；林确略等，2015），由于本方法在挑选暖区暴雨时，除了要求降水强度和持续时间要达到一定的强度，还需要判断锋面和降水的分布情况，所以挑选出的暖区暴雨的数量要比丁治英等（2011）、陈翔翔等（2012）得到的同时期暖区暴雨数量少。在挑选出的 177 例华南暖区暴雨中，事件平均持续时长为 11.58 h，其中持续时间最长的事件出现在 2006 年 7 月 16～17 日和 2008 年 6 月 12～13 日，达到了 25 h，前一例与刘雨佳等（2017）挑选出的华南典型暴雨事件时间重合，后一例处于华南地区出现大范围持续性强降水过程的时间段（王东海等，2011）。持续时间为 24 h 的有 3 例，1985 年 5 月 1～2 日，1987 年 5 月 20 日，2001 年 6 月 17～18 日。图 3 给出 1982～2015 年强降水事件和暖区暴雨事件每年的数量以及暖区暴雨在强降水事件中所占比例。从表 1 中可以看到挑选出强降水事件较多的 1993 年和 1994 年，都为 38 例，但是从暖区暴雨数目看，1993 年有 11 例，1994 年只有 2 例。从每年暖区暴雨占强降水事件的比例的变化中可以看到，20 世纪 80 年代暖区暴雨所占的比例较小仅为 9.72%，90 年代

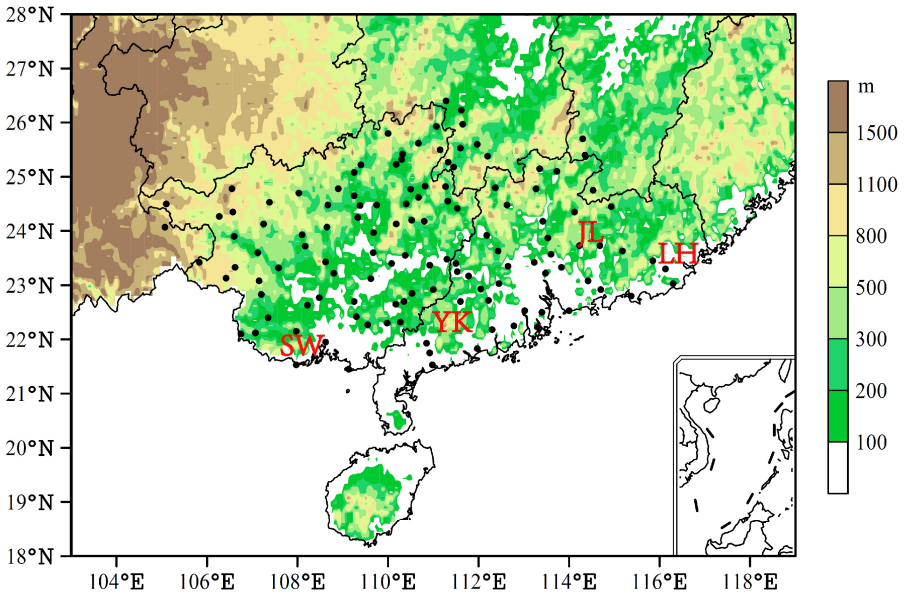

图 1　华南 124 个站点（黑点）和地形高度（阴影，单位：m）分布。SW、YK、LH、JL 代表十万山、云开山、莲花山、九连山

Fig. 1　Distribution of stations (black dots) and topography (shadings, units: m) in South China. SW, YK, LH, JL represent the Shiwan Mountain, the Yunkai Mountain, the Lianhua Mountain, the Jiulian Mountain, respectively

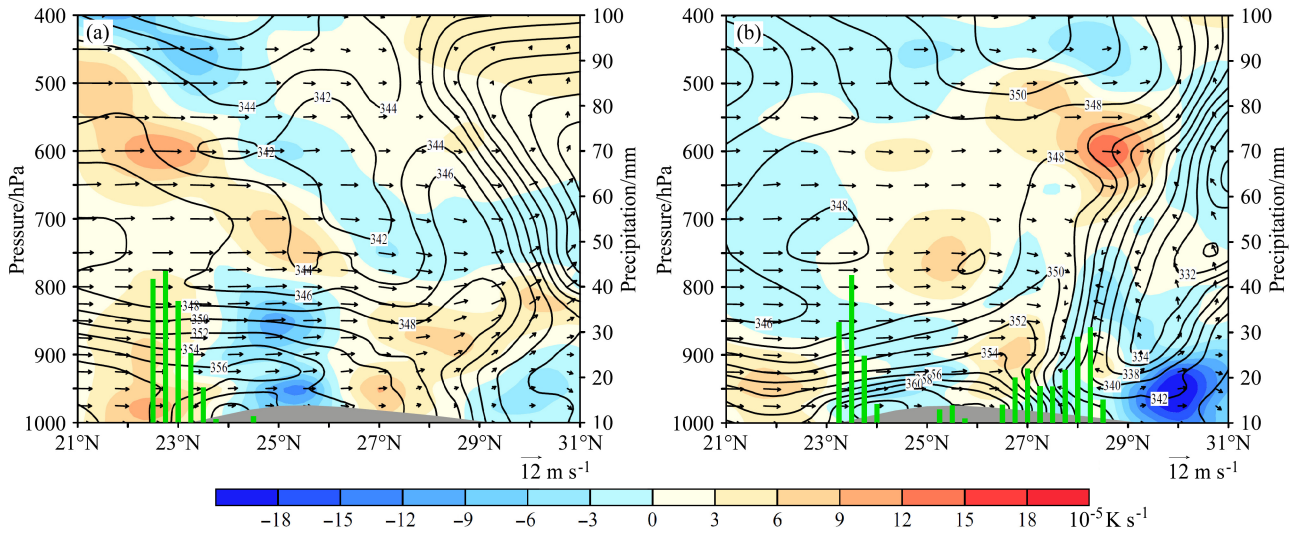

图 2　两例暖区暴雨事件沿代表站点（115.85°E）的经向剖面：(a) 2011 年 6 月 16 日 08 时（北京时，下同），无锋面系统类型；(b) 2012 年 6 月 22 日 08 时，有锋面系统类型。黑色实线：θ_{se}（单位：K）；彩色阴影：温度平流场（单位：10^{-5} K s^{-1}）；黑色箭头：风场（单位：m s^{-1}）；绿色柱：前 6 h 累计雨区的配置（单位：mm）；灰色阴影：地形

Fig. 2　Meridional–vertical cross sections along the longitude (115.85°E) of representative station for two warm-sector heavy rainfall events: (a) 0800 BJT (Beijing time) 16 June 2011, the type without frontal system; (b) 0800 BJT 22 June 2012, the type with frontal system. Black solid lines: potential pseudo-equivalent temperature (θ_{se}, units: K); color shadings: temperature advection (units: 10^{-5} K s^{-1}); vectors: wind (units: m s^{-1}); green bars: 6-hour accumulative precipitation (units: mm) before the study time; grey shadings: terrain

暖区暴雨所占比例有所增加，为 20.90%，2000 年以后比例趋向于稳定，基本在 17.74%附近上下波动，研究的 34 年暖区暴雨占所有强降水事件的比例为 16.86%，说明华南暖区暴雨是一类比较重要的降水事件。

4　暖区暴雨时空分布特征

4.1　暖区暴雨时间变化特征

1982～2015 年华南暖区暴雨过程，按照其降水的中心位置将其分为发生在广东和广西的事件，暖

表 1 1982～2015 年华南强降水事件和暖区暴雨事件

Table 1 Severe heavy rainfall events and warm-sector heavy rainfall events over South China during 1982–2015

年份	强降水事件/个	暖区事件/个	所占百分比	年份	强降水事件/个	暖区事件/个	所占百分比
1982	24	5	20.8%	2000	31	5	16.1%
1983	33	4	12.1%	2001	36	10	27.8%
1984	26	1	3.8%	2002	33	3	9.1%
1985	21	2	9.5%	2003	31	6	19.4%
1986	36	1	2.8%	2004	32	8	25%
1987	32	4	12.5%	2005	34	9	26.5%
1988	25	2	8%	2006	31	6	19.4%
1989	19	2	10.5%	2007	36	2	5.6%
1990	20	3	15%	2008	34	7	20.6%
1991	17	7	41.2%	2009	26	3	11.5%
1992	27	3	11.1%	2010	36	5	13.9%
1993	38	11	28.9%	2011	21	6	28.6%
1994	38	2	5.3%	2012	33	6	18.2%
1995	23	5	21.7%	2013	32	6	18.8%
1996	35	6	17.1%	2014	32	4	12.5%
1997	43	12	27.9%	2015	45	5	11.1%
1998	43	12	27.9%	总计	1050	177	16.86%
1999	27	4	14.8%				

注：所占百分比是指暖区事件占强降水事件的百分比。

区暴雨事件平均每年 5.06 次，最多的年份为 1997 年和 1998 年（图 4a），都有 12 例，最少的年份为 1984 年和 1986 年，各有 1 例。20 世纪 80 年代到 90 年代暖区暴雨出现的频率变化不大，在 1～5 次之间。进入 90 年代之后，暖区暴雨事件出现的次数明显增多，且年变化大，其中 1993、1997、1998 年这三年的暖区暴雨次数都超过了 10 次。2000 年以后个例变化仍然较大，2001、2004 和 2005 年暖区暴雨为 8～10 次。2010 年以后暖区暴雨数目趋于平稳，基本稳定在 5 次左右。多数年份广东省个例数占每年总数的比例都超过 50%，甚至某些年份暖区暴雨只发生在广东省，如 1984、1985、1986、1989 和 2002 年，说明广东的暖区暴雨发生次数要高于广西地区。华南暖区暴雨次数月总值分布具有明显的“单峰型”特征（图 4b），峰值出现在 6 月份，为 66 次，占总数的 37.29%，7 月份次之，占 26.55%，5 月份位于第 3 位，占到 20.34%。9 月份发生暖区暴雨的次数最少，只有 1 次。且华南暖区暴雨主要发生在前汛期（4～6 月份），占到总数的 68.54%，这与之前研究中提到暖区暴雨主要发生在华南前汛期一致（黄士松，1986；丁治英等，2011；陈翔翔等，2012）。从每月发生位置上来看，4～6 月暖区暴雨主要在广东省，所占比例大于 50%，而后汛期（7～9 月）广西发生的暖区暴雨偏多，8 月和 9 月暖区暴雨个数较少且主要发生在广西。

根据前面对于华南暖区暴雨开始时间的定义，分析 177 例暖区暴雨的开始时间的日变化特征（图 5a），暖区暴雨发生时间的日变化呈现显著的单峰型，峰值出现在 05 时，清晨的发生次数明显高于午后，夜间 22 时开始暖区暴雨次数明显增加，后半夜至清晨的发生次数远远大于前半夜，00～05 时发生的次数共为 93 次，占总数的 52.54%。挑选出的 177 例暖区暴雨中持续时间为 10 h 的事件最多（图 5b），持续时间达到 20 h 以上的事件较少。由于在挑选暖区暴雨前要求持续时间要大于 3 h，所以持续时间最短的时段为 3 h。

4.2 暖区暴雨落区分布特征

图 6a 为 1982～2015 年华南暖区暴雨代表站出现暴雨次数，华南暖区暴雨事件内陆地区明显要比沿海地区偏少，内陆地区的发生次数一般都在 1～5 次，个别区域由于受到当地地形影响，降水次数偏多一些，如位于九连山的龙门站，暖区暴雨出现次数大于 5 次，暴雨发生次数在 6～10 次的主要分布在广东省珠江口以及东部沿海汕尾附近，超过 10 次的站点主要分布在广西沿海地区以及广东沿海（阳江附近），尤其是位于广西沿海的钦州站发生暖区暴雨次数多达 16 次。图 6b 为暖区暴雨单站过程最大降水量，广西内陆地区暖区暴雨发生次数少且过程降水量不大，一次过程的降水量一般小于 200 mm，个别站点降水在 50 mm 到 100 mm 之间。广西沿海地区单站最大降水量比内陆地区大，有三个站点达到 300 mm 以上。广东内陆地区降水量一般都在 100～300 mm，明显比广西内陆地区降水强，龙门站单站最大降水量大于 300 mm，并且广东沿海地区有六个站点的降水量都大于 300 mm。由此可见，虽然广东东部沿海地区的暖区暴雨次数较少，但单站最大降水量都较大，说明华南暖区暴雨在广东地区降水量较强，值得后面深入研究。华南暖区暴雨的落区主要有四个：（1）以钦州为中心的广西沿海多雨区；（2）以龙门为中心的粤北山地多雨区；（3）以阳江、恩平为中心的粤南沿海多雨区；（4）以汕尾市为中心的粤东南沿海多雨区。

5 暖区暴雨天气型的分类

黄士松（1986）总结了四类华南暖区暴雨：暖切变暴雨、沿海急流暴雨、锋前急流暴雨、冷锋（静

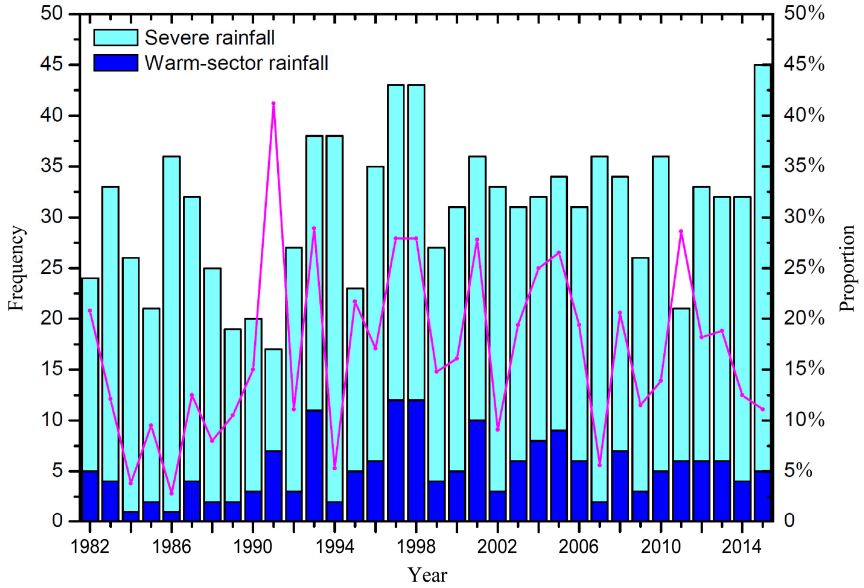

图 3　1982～2015 年挑选出的华南强降水事件（浅蓝色柱+深蓝色柱）和暖区暴雨时间（深蓝色柱）统计。粉色实线表示暖区暴雨占强降水事件的比例

Fig. 3　Severe heavy rainfall events (light blue and dark blue bars) and warm-sector heavy rainfall events (dark blue bars) over South China during 1982–2015. The pink solid line shows the proportion of warm-sector heavy rainfall events in total severe heavy rainfall events

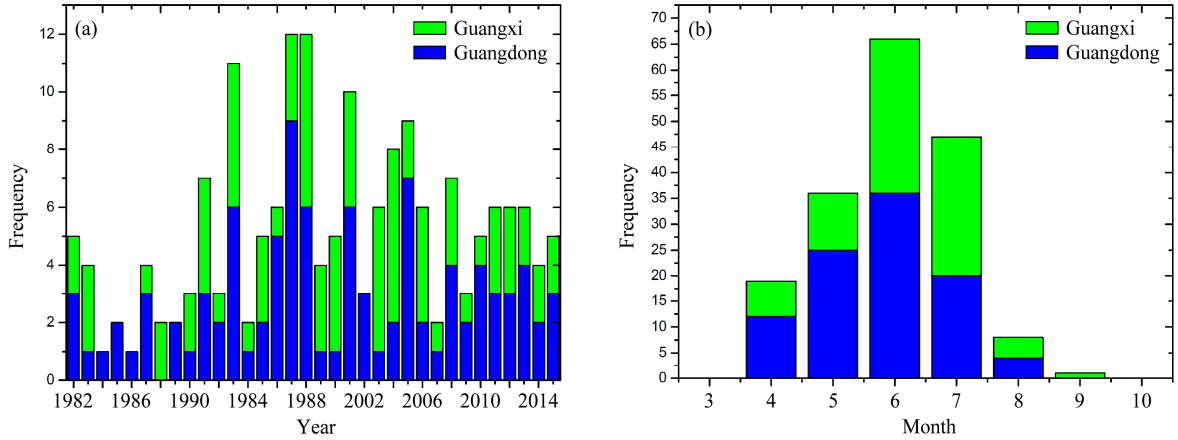

图 4　1982～2015 年暖区暴雨过程（a）年变化分布、（b）月变化分布。蓝色柱为代表站点位于广东省的个例数，绿色柱为代表站位于广西壮族自治区的个例数

Fig. 4　(a) Interannual variation and (b) monthly change of warm-sector heavy rainfall events during 1982–2015. Blue and green bars show the results at representative stations in Guangdong Province and Guangxi Autonomous region, respectively

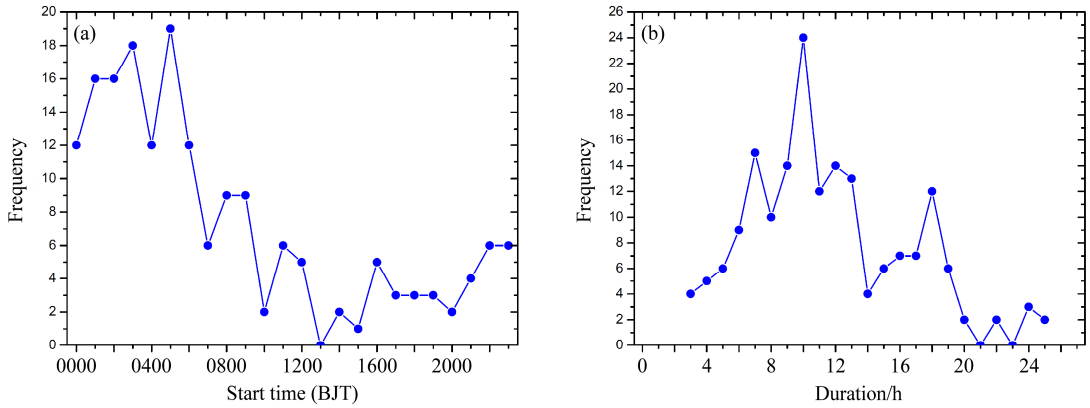

图 5　1982～2015 年挑选出的华南暖区暴雨的时间统计：（a）事件的起始时间；（b）持续时间。纵坐标为发生的次数（单位：次）

Fig. 5　Statistical characteristics for (a) the start times and (b) durations of the selected warm-sector heavy rainfall events in South China during 1982–2015. *y*-axis indicates numbers of warm-sector heavy rainfall events

止锋）暴雨。林良勋（2006）根据天气系统划分，将华南暖区暴雨分为变性高压脊后部气流辐合或出现暖切变产生的暴雨、强西南季风爆发或强西南急流产生的暴雨以及高空槽前和副热带急流共同作用产生的暖区暴雨。陈翔翔等（2012）将暖区暴雨分成三类：切变线型暖区暴雨、低涡型暖区暴雨以及南风型暖区暴雨。

暖区暴雨的尺度一般只有几十到几百公里，为 β 中尺度，所以在进行分类前，将对应的环流形势场进行空间滤波处理，保留 2000 km 以下系统。再参考陈翔翔等（2012）以及林良勋（2006）得到四类暖区暴雨：切变线型、低涡型、南风型以及回流型，对挑选出的 177 例华南暖区暴雨进行分类。主要分析华南暖区暴雨起始时刻对应的 850 hPa 保留 2000 km 以下的滤波形势场与暖区暴雨发生时间段内降水场的分布（图 7）。第一类切变线型暖区暴雨（图 7a）：降水位置处于 850 hPa 切变线以南，沿切变线至少存在两个涡度中心，降水中心距离该切变线的正涡度 2×10^{-5} s^{-1} 等值线 200 km 以内。第二类低涡型暖区暴雨（图 7b）：降水发生在 850 hPa 低涡环流内，离低涡中心较近，降水处于低涡涡度值 2×10^{-5} s^{-1} 等值线 200 km 以内。第三类南风型暖区暴雨（图 7c）：850 hPa 环流形势场中不受切变线及低涡直接控制，处于广阔偏南气流中的暖区暴雨。第四类回流型暖区暴雨（图 7d）：回流型是由变性冷高压后部气流辐合或暖湿切变引起的暴雨，一般出现在 4 月初到 5 月中旬，该段时间内陆地开始回暖，而海面相对较冷，变性高压出海后由于下垫面较冷而在东海加强，广东沿海容易出现回流东风（林良勋，2006）。挑选此类个例的标准是 850 hPa 和 975 hPa 滤波后的形势场上有变性高压东移出海，且降水区域主要受到海上回流东风影响。

按照上面的分类方法，177 例华南暖区暴雨事件分为 4 类：切变线型暖区暴雨有 37 例，低涡型 46 例，南风型 86 例，回流型 8 例，其中 8 例回流型暴雨中包含了叶朗明和苗俊峰（2014）、叶朗明和徐碧裕（2014）和林确略等（2015）研究的三例回流型暖区暴雨。

根据以上的分类结果，分析不同类型暖区暴雨的统计特征。华南区域四种类型暖区暴雨的月变化特征如图 8 所示，四种类型的暖区暴雨表现出不同的月变化。切变线型暖区暴雨的发生时间为 4～8 月，主要集中于 6、7 月。低涡型暖区暴雨是唯一一类发生时间从 4 月到 9 月的暖区暴雨，集中于 6、7 月。南风型暖区暴雨个例数目较多，且 4～7 月中每个月的发生的数目较为均匀。回流型暖区暴雨由于定义中要求是发生在 4 月至 5 月中旬，所以该类暖区暴雨主要集中在这两个月发生。

按照降水中心位置将华南暖区暴雨划分为四个不同区域，即广东沿海（GDC）、广东内陆（GDL）、广西沿海（GXC）、广西内陆（GXL），得到华南区域四种类型的暖区暴雨的地区分布特征如图 9 所示，在两广的内陆和沿海不同类型的暖区暴雨分布是不同的。只有广东沿海受到回流型暖区暴雨的影响，并且在该区域暖区暴雨发生数目最多。影响广东内陆地区主要为南风型和切变线型暖区暴雨。广西沿海主要是低涡型暖区暴雨，且低涡型暖区暴雨多于南风型主导的暖区暴雨，这可能与北部湾海上产生的低涡比较频繁有关。广西内陆地区主要为南风型与切变线型暖区暴雨，与广东内陆地区的暖区暴雨相比，发生在广西内陆切变线型暖区暴雨的数量较多。

华南区域四种类型的暖区暴雨的起始时间和持续时间的变化特征如图 10 所示，起始时间的日变化特征显示（图 10a），从 18 时至 23 时没有回流型暖区暴雨发生，切变线型主要集中在从夜间 21 时到清晨 05 时，低涡型最高发的时间在 00～02 时，03～05 时次之，而南风型暖区暴雨起始时刻分布的较为分散，但也是清晨 03～08 时时间段内较为集中，从凌晨到早上较多，而下午最少。四类华南暖区暴雨持续时间主要集中在 9～11 h（图 10b），回流型暖区暴雨的持续时间主要集中在 6～17 h，低涡型和南风型一些个例表现出持续时间较长的特征。

6 结论与讨论

为了深入研究华南暖区暴雨的统计特征和发生机理，本文在对前人工作进行归纳和总结的基础上，提出更为定量化的暖区暴雨的定义，并对 1982～2015 年华南暖区暴雨事件进行挑选和分类研究，得到如下结论：

（1）1982～2015 年华南暖区暴雨共有 177 例，大部分事件发生 4～7 月，6 月发生最多，事件平均持续时长为 11.58 h，平均每年 5.06 次，最多的年份为 1997 和 1998 年，多达 12 次，筛选出的暴雨事件中暖区暴雨占 16.86%，表明华南暖区暴雨是一

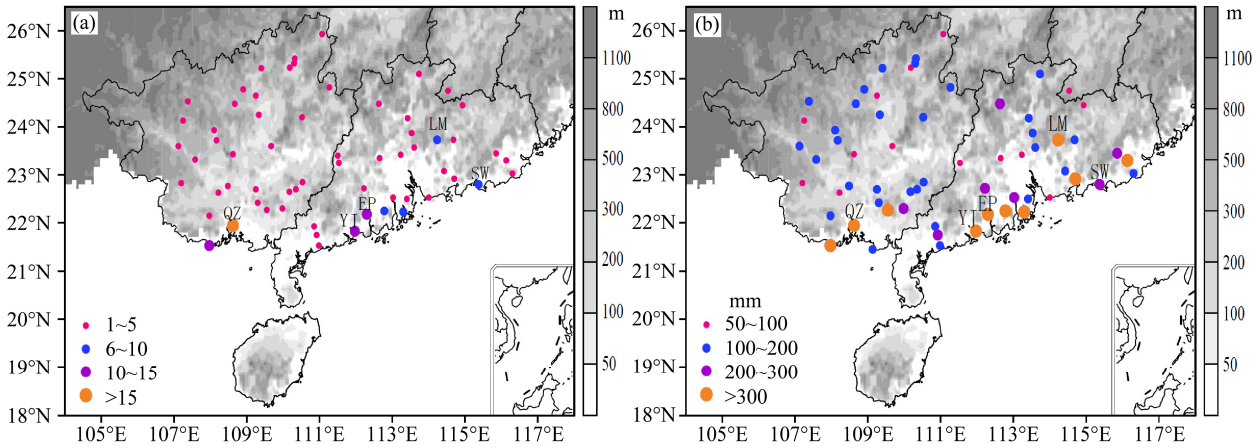

图 6　1982～2015 年华南暖区暴雨过程在代表站点的（a）发生次数，（b）单站过程最大降水量（单位：mm）分布。阴影表示地形（单位：m），QZ、YJ、EP、LM、SW 为钦州站、阳江站、恩平站、龙门站、汕尾站

Fig. 6　(a) Occurrence frequency and (b) locations of maximum precipitation (units: mm) at selected warm-sector heavy rainfall stations in South China. Shadings indicate terrain (units: m). QZ, YJ, EP, LM, SW represent Qinzhou station, Yangjiang station, Enping station, Longmen station, Shanwei station, respectively

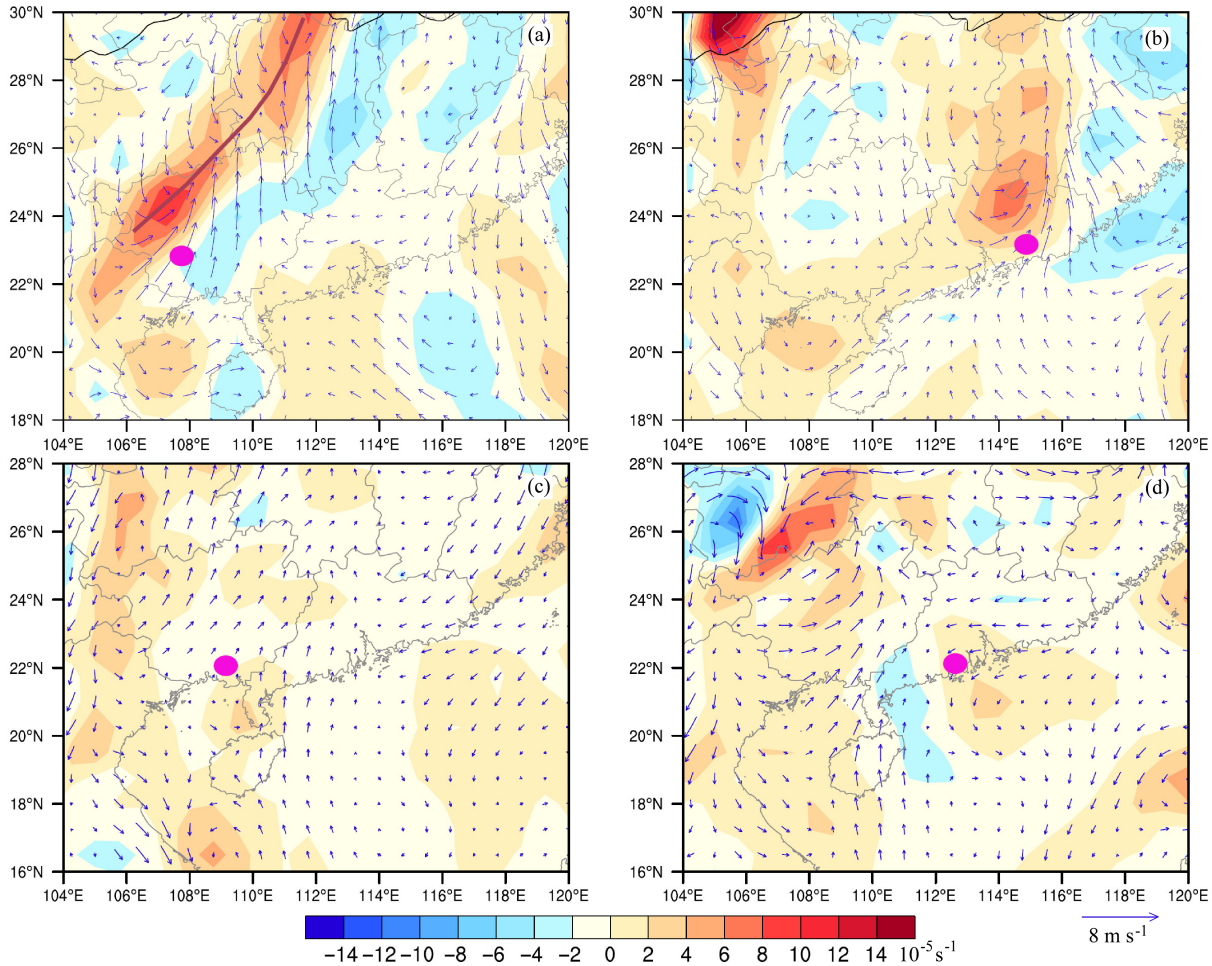

图 7　华南 4 类暖区暴雨（粉色圆点代表降水位置）空间滤波后涡度（阴影，单位：10^{-5} s^{-1}）和风场（箭头，单位：m s^{-1}）分布：（a）切变线型暖区暴雨（2004 年 7 月 20 日），粗棕色线为切变线；（b）低涡型暖区暴雨（2008 年 6 月 7 日）；（c）南风型暖区暴雨（2013 年 4 月 29 日）；（d）回流型暖区暴雨（2014 年 5 月 8 日）

Fig. 7　Distributions of spatially filtered vorticity (shadings, units: 10^{-5} s^{-1}) and wind field (vectors, units: m s^{-1}) for four types of warm-sector heavy rainfall (the pink dots represent precipitation locations): (a) The shear line type of warm-sector rainfall (20 July 2004), the thick brown line shows the shear line; (b) the low vortex type of warm-sector rainfall (7 June 2008); (c) the southerly wind type of warm-sector rainfall (29 April 2013); (d) the backflow type of warm-sector rainfall (8 May 2014)

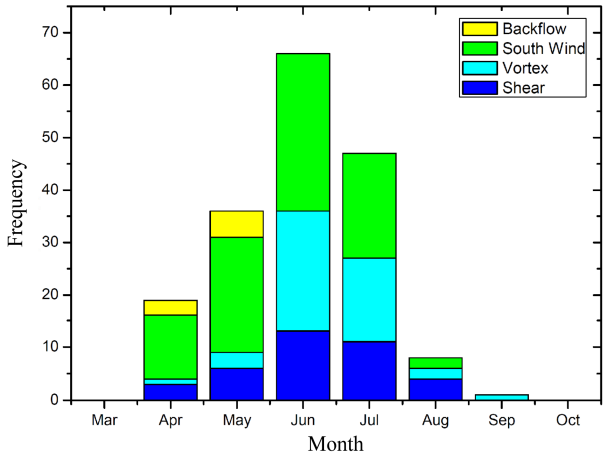

图 8 华南 4 类暖区暴雨事件月变化特征。蓝色为切变线型、浅蓝色为低涡型、绿色为南风型、黄色为回流型暖区暴雨

Fig. 8 Monthly variation of four types of warm-sector rainfall events in South China. Blue bars indicate the shear line type, light blue bars indicate the low vortex type, green bars indicate the southerly wind type, yellow bars indicate the backflow type

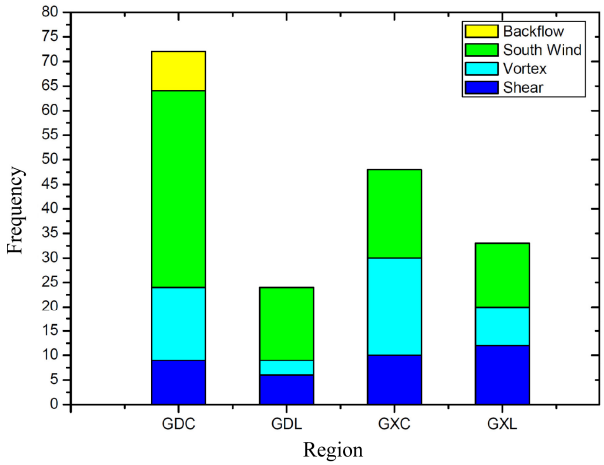

图 9 华南 4 类暖区暴雨事件地区分布特征

Fig. 9 Geographic distribution features of four types of warm-sector rainfall events in South China. GDC, GDL, GXC, and GXL represent Guangdong coastal region, Guangdong inland, Guangxi coastal region, and Guangxi inland, respectively

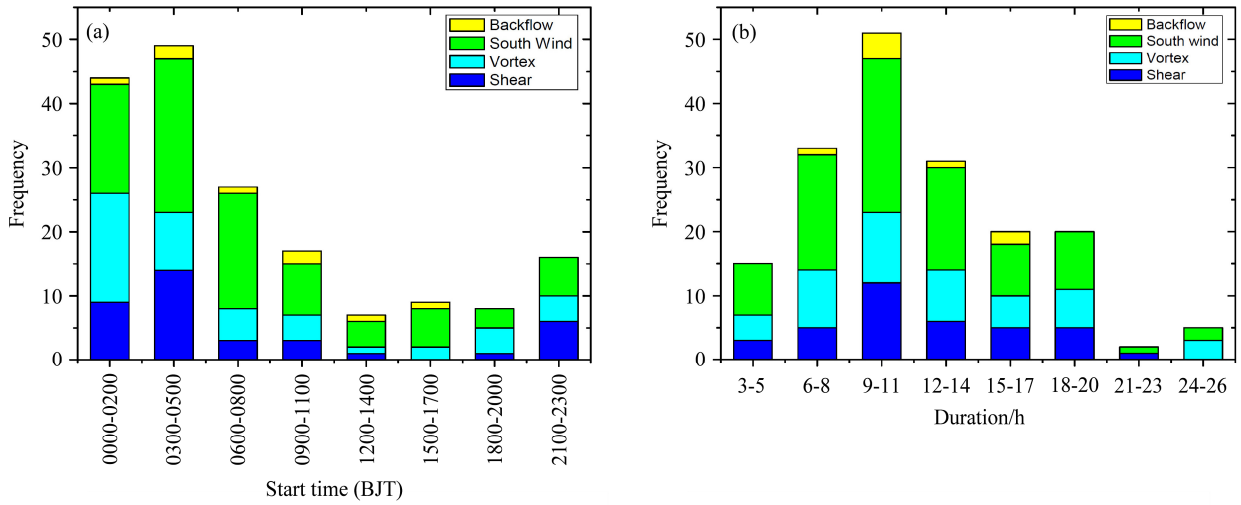

图 10 华南 4 类暖区暴雨（a）起始时间、（b）持续时间的变化特征

Fig.10 (a) Start times and (b) durations of the four types of warm-sector rainfall events in South China

类较为重要的降水事件。

（2）华南暖区暴雨有四个区域：以钦州为中心的广西沿海多雨区；以龙门为中心的粤北山地多雨区；以阳江、恩平为中心的粤南沿海多雨区；以汕尾市为中心的粤东南沿海多雨区。

（3）华南暖区暴雨形成的主要天气类型有四类：切变线型、低涡型、南风型和回流型。南风型数量最多，切变线型和低涡型频次大体相当，回流型数量较少。研究表明南风影响下的暖区暴雨发生频率较高，影响较大，该类暖区暴雨需要给予高度关注。

（4）四类暖区暴雨对于两广地区沿海和内陆的影响不同，广东沿海受到四类暖区暴雨影响，且南风型暖区暴雨发生数目最多；广东内陆地区南风型和切变线型是两类较为重要的暖区暴雨形式。影响广西沿海地区的主要是低涡型暖区暴雨；影响广西内陆地区，切变线型暖区暴雨是一类较为重要的暴雨形式。

虽然华南地区大部分暖区暴雨的大尺度环流特征存在一定的相似之处，但不同类别暖区暴雨的

中尺度系统以及分布特征存在显著差异。参考陈翔翔等（2012）研究的切变线型、低涡型、南风型暖区暴雨分布特征与季风、500 hPa 低空槽的关系。以后的研究将在目前已完成的华南暖区暴雨分类基础上，通过对各类暖区暴雨的合成分析和理想模拟，深入研究暖区暴雨的发生机制和演变特征，解释不同类型暖区暴雨主要影响系统的差异以及对于不同地区的作用，通过这些研究提高对各类华南暖区暴雨的预报准确率。

参考文献（References）

Askelson M A, Aubagnac J P, Straka J M. 2000. An adaptation of the Barnes filter applied to the objective analysis of radar data [J]. Mon. Wea. Rev., 128 (9): 3050–3082, doi:10.1175/1520-0493(2000)128<3050:AAOTBF>2.0.CO;2.

Atkinson B W, Smithson P A. 1972. An investigation into meso-scale precipitation distributions in a warm sector depression [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 98 (416): 353–368, doi:10.1002/qj.49709841608.

Bader M J, Roach W T. 1977. Orographic rainfall in warm sectors of depressions [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 103 (436): 269–280, doi:10.1002/qj.49710343605.

陈红, 赵思雄. 2000. 第一次全球大气研究计划试验期间华南前汛期暴雨过程及其环流特征的诊断研究 [J]. 大气科学, 24 (2): 238–252. Chen Hong, Zhao Sixiong. 2000. Heavy rainfalls in South China and related circulation during first GARP global experiment period [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 24 (2): 238–252, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2000.02.12.

陈翔翔, 丁治英, 刘彩虹, 等. 2012. 2000～2009 年 5、6 月华南暖区暴雨形成系统统计分析 [J]. 热带气象学报, 28 (5): 707–718. Chen Xiangxiang, Ding Zhiying, Liu Caihong, et al. 2012. Statistic analysis on the formation system of warm-sector heavy rainfall in May and June from 2000–2009 [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 28 (5): 707–718, doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2012.05.010.

陈豫英, 陈楠, 王式功, 等. 2010. 中蒙干旱半干旱区降水的时空变化特征 I: 年降水特征及 5～9 月降水的 REOF 分析 [J]. 高原气象, 29 (1): 33–43. Chen Yuying, Chen Nan, Wang Shigong, et al. 2010. Temporal and spatial change features of precipitation over China–Mongolia arid- and semiarid-areas. Part I: Annual rainfall feature and May–September one REOF analyses [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 29 (1): 33–43.

丁裕国, 张耀存, 刘吉峰. 2007. 一种新的气候分型区划方法 [J]. 大气科学, 31 (1): 129–136. Ding Yuguo, Zhang Yaocun, Liu Jifeng. 2007. A new cluster method for climatic classification and compartment using the conjunction between CAST and REOF [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 31 (1): 129–136, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2007.01.13.

丁治英, 刘彩虹, 沈新勇. 2011. 2005～2008 年 5、6 月华南暖区暴雨与高、低空急流和南亚高压关系的统计分析 [J]. 热带气象学报, 27 (3): 307–316. Ding Zhiying, Liu Caihong, Shen Xinyong. 2011. Statistical analysis of the relationship among warm sector heavy rainfall, upper and lower tropospheric jet stream and South Asia high in May and June from 2005 to 2008 [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 27 (3): 307–316, doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2011.03.003.

何立富, 陈涛, 孔期. 2016. 华南暖区暴雨研究进展 [J]. 应用气象学报, 27 (5): 559–569. He Lifu, Chen Tao, Kong Qi. 2016. A review of studies on prefrontal torrential rain in South China [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 27 (5): 559–569, doi:10.11898/1001-7313.20160505.

黄士松. 1986. 华南前汛期暴雨 [M]. 广州: 广东科技出版社, 1–7. Huang Shisong. 1986. Rainstorms of the First Rainy Season in South China (in Chinese) [M]. Guangzhou: Guangdong Science & Technology Press, 1–7.

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]. Int. J. Climatol., 36 (8): 3148–3160, doi:10.1002/joc.4543.

Li J, Yu R C, Yuan W H, et al. 2011. Changes in duration-related characteristics of late-summer precipitation over eastern China in the past 40 years [J]. J. Climate, 24 (21): 5683–5690, doi:10.1175/JCLI-D-11-00009.1.

林良勋. 2006. 广东省天气预报技术手册 [M]. 北京: 气象出版社, 145–150. Lin Liangxun. 2006. Technical Guidance on Weather Forecasting in Guangdong Province (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 145–150.

林确略, 寿绍文. 2012. 广西锋面、暖区及高压后部暴雨个例对比研究 [J]. 气象研究与应用, 33 (2): 11–18. Lin Quelue, Shou Shaowen. 2012. Comparison analysis on rainstorm cases of frontal, warm-sector and high-pressure rear in Guangxi [J]. Journal of Meteorological Research and Application (in Chinese), 33 (2): 11–18, doi:10.3969/j.issn.1673-8411.2012.02.004.

林确略, 寿绍文, 杨华. 2015. 基于数值模拟对一次广西前汛期回流暴雨形成机制的分析 [J]. 气象, 41 (7): 852–862. Lin Quelue, Shou Shaowen, Yang Hua. 2015. Analysis on formation mechanism of the backflow rainstorm occurring in first rainy season of Guangxi based on numerical simulation [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 41 (7): 852– 862, doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2015.07.007.

刘雨佳, 张强, 余予. 2017. 华南地区 1961～2014 年暴雨及典型暴雨事件统计分析 [J]. 暴雨灾害, 36 (1): 26–32. Liu Yujia, Zhang Qiang, Yu Yu. 2017. Analysis of heavy rain and typical torrential rain event in southern China during 1961–2014 [J]. Torrential Rain and Disasters (in Chinese), 36 (1): 26–32, doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2017.01.004.

Luo Y L, Zhang R H, Wan Q L, et al. 2017. The southern China monsoon rainfall experiment (SCMREX) [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 98 (5): 999–1013, doi:10.1175/BAMS-D-15-00235.1.

蒙伟光, 王安宇, 李江南, 等. 2004. 华南暴雨中尺度对流系统的形成及湿位涡分析 [J]. 大气科学, 28 (3): 330–341. Meng Weiguang, Wang Anyu, Li Jiangnan, et al. 2004. Moist potential vorticity analysis of the heavy rainfall and mesoscale convective systems in South China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 28 (3): 330–341, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2004.03.02.

倪允琪, 张人禾, 刘黎平, 等. 2013. 中国南方暴雨野外科学试验 (SCHeREX) [M]. 北京: 气象出版社, 283pp. Ni Yunqi, Zhang Renhe, Liu Liping, et al. 2013. Heavy Rainfall Field Experiment in South China (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 283pp.

Ninomiya K, Akiyama T. 1971. The development of the medium-scale disturbance in the Baiu front [J]. J. Meteor. Soc. Japan, 49A: 663–677,

doi:10.2151/jmsj1965.49A.0_663.

Ninomiya K, Akiyama T, Ikawa M. 1988. Evolution process and fine structure of a long-lived meso-α-scale convective system in Baiu front. Part 1: Evolution and meso-β-scale characteristics [J]. J. Meteor. Soc. Japan, 66: 331–350, doi:10.2151/jmsj1965.66.2_331.

Oliver V J, Shaw R F. 1956. Heavy warm-sector rains from Illinois to middle Atlantic coast, May 26–28, 1956 [J]. Mon. Wea. Rev., 84 (5): 198–204, doi:10.1175/1520-0493(1956)084<0198:HWRFIT>2.0.CO;2.

Simmons A, Uppala S, Dee D, et al. 2007. ERA-Interim: New ECMWF reanalysis products from 1989 onwards [J]. ECMWF Newsletter, 110 (110): 25–35, doi:10.21957/pocnex23c6.

陶诗言. 1980. 中国之暴雨 [M]. 北京: 科学出版社, 45–46. Tao Shiyan. 1980. Rainstorms in China (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press, 45–46.

Trapp R J, Doswell III C A. 2000. Radar data objective analysis [J]. J. Atmos. Oceanic Technol., 17 (2): 105–120, doi:10.1175/1520-0426(2000)017<0105:RDOA>2.0.CO;2.

Trenberth K E. 1998. Atmospheric moisture residence times and cycling: Implications for rainfall rates and climate change [J]. Climatic Change, 39 (4): 667–694, doi:10.1023/A:1005319109110.

Trenberth K E, Dai A G, Rasmussen R M, et al. 2003. The changing character of precipitation [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 84 (9): 1205–1218, doi:10.1175/BAMS-84-9-1205.

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 [J]. 气象学报, 69 (1): 137–148. Wang Donghai, Xia Rudi, Liu Ying. 2011. A preliminary study of the flood causing rainstorm during the first rainy season in South China in 2008 [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 69 (1): 137–148, doi:10.11676/qxxb2011.012.

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 Huijie, Sun Jianhua, Wei Jie, et al. 2014. Classification of persistent heavy rainfall events over southern China during recent 30 years [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 19 (6): 713−725, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2013.13143.

魏凤英. 2007. 现代气候统计诊断与预测技术 [M]. 北京: 气象出版社, 43–47. Wei Fengying. 2007. Modern Statistics and Prediction Technique on Climate (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 43–47.

韦统建. 1994. 华南前汛期暖区暴雨流场结构的特征 [J]. 热带气象学报, 10 (1): 37–46. Wei Tongjian. 1994. The typical structure of the flow field in warm-section heavy rain occurring in southern China [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 10 (1): 37–46, doi:10.16032/j.issn.1004-4965.1994.01.005.

Westra S, Fowler H J, Evans J P, et al. 2014. Future changes to the intensity and frequency of short-duration extreme rainfall [J]. Rev. Geophys., 52 (3): 522–555, doi:10.1002/2014RG000464.

夏茹娣, 赵思雄. 2009. 2005 年 6 月广东锋前暖区暴雨 β 中尺度系统特征的诊断与模拟研究 [J]. 大气科学, 33 (3): 468–488. Xia Rudi, Zhao Sixiong. 2009. Diagnosis and modeling of meso-β-scale systems of heavy rainfall in warm sector ahead of front in South China (middle part of Guangdong Province) in June 2005 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33 (3): 468–488, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2009.03.06.

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 [J]. 大气科学, 30 (5): 988–1008. Xia Rudi, Zhao Sixiong, Sun Jianhua. 2006. A study of circumstances of meso-β-scale systems of strong heavy rainfall in warm sector ahead of fronts in South China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 30 (5): 988–1008. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2006.05.26.

叶朗明, 苗峻峰. 2014. 华南一次典型回流暖区暴雨过程的中尺度分析 [J]. 暴雨灾害, 33 (4): 342–350. Ye Langming, Miao Junfeng. 2014. Mesoscale analysis of a typical heavy rain event caused by returning flow in the warm sector in southern China [J]. Torrential Rain and Disasters (in Chinese), 33 (4): 342–350, doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2014.04.006.

叶朗明, 徐碧裕. 2014. 两次不同类型暖区暴雨的对比分析 [J]. 气象研究与应用, 35 (4): 5–10, 52. Ye Langming, Xu Biyu. 2014. Contrastive analysis of two different type rainstorms in warm area [J]. Journal of Meteorological Research and Application (in Chinese), 35 (4): 5–10, 52, doi:10.3969/j.issn.1673-8411.2014.04.002.

Yu R C, Zhou T J, Xiong A Y, et al. 2007. Diurnal variations of summer precipitation over contiguous China [J]. Geophys. Res. Lett., 34 (1): L01704, doi:10.1029/2006GL028129.

翟颖佳, 李耀辉, 施春华. 2013. 近 50 年华北区 8 月降水异常的时空特征及其成因分析 [J]. 高原气象, 32 (3): 787–797. Zhai Yingjia, Li Yaohui, Shi Chunhua. 2013. Temporal and spatial characteristics of August precipitation in North China and its causes in last 50 years [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 32 (3): 787–797, doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2012.00073.

Zhang R H, Ni Y Q, Liu L P, et al. 2011. South China Heavy Rainfall Experiments (SCHeREX) [J]. J. Meteor. Soc. Japan, 89A (2): 153–166, doi:10.2151/jmsj.2011-A10.

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: 气象出版社, 281–282. Zhao Sixiong, Tao Zuyu, Sun Jianhua, et al. 2004. Study on Mechanism of Formation and Development of Heavy Rainfalls on Meiyu Front in Yangtze River (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 281–282.

Zhao S X, Bei N F, Sun J H. 2007. Mesoscale analysis of a heavy rainfall event over Hong Kong during a pre-rainy season in South China [J]. Adv. Atmos. Sci., 24 (4): 555–572, doi:10.1007/s00376-007-0555-2.

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 Yuchun, Wang Yehong. 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 (in Chinese), 28 (3): 193–202, 228, doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2009.03.001.

赵玉春, 李泽椿, 肖子牛. 2008. 华南锋面与暖区暴雨个例对比分析 [J]. 气象科技, 36 (1): 47–54. Zhao Yuchun, Li Zechun, Xiao Ziniu. 2008. Comparison analysis of South China front and warm-area heavy rain systems in June 2006 [J]. Meteorological Science and Technology (in Chinese), 36 (1): 47–54. doi:10.3969/j.issn.1671-6345.2008.01.009.

Zhou T J, Yu R C, Chen H M, et al. 2008. Summer precipitation frequency, intensity, and diurnal cycle over China: A comparison of satellite data with rain gauge observations [J]. J. Climate, 21 (16): 3997–4010, doi:10.1175/2008JCLI2028.1.

周秀骥, 薛纪善, 陶祖钰, 等. 2003. '98 华南暴雨科学试验研究 [M]. 北京: 气象出版社, 1–228. Zhou Xiuji, Xue Jishan, Tao Zuyu, et al. 2003. The Scientific Experimental Study of Heavy Rainfalls over South China in 1998 (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 1–228.