

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, doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2013.13143. 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.

近 30 年我国南方区域持续性暴雨过程的分类研究

汪汇洁^{1,2,3} 孙建华¹ 卫捷¹ 赵思雄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 中国科学院大学, 北京 100049

3 95968 部队气象台, 北京 100097

4 中国科学院大气物理研究所国际气候与环境中心, 北京 100029

摘要 利用中国站点日降水资料对 1981~2011 年我国南方地区区域持续性暴雨 (PHREs) 进行了分类研究。按照区域内至少连续 5 d 或 5 d 以上有不小于 10 个格点[分辨率 0.25° (纬度) $\times 0.25^\circ$ (经度)]出现大于等于 50 mm 降水且相邻两日雨带重合率不小于 20% 的标准, 采用客观分析的方法分别挑选出我国江淮区域和华南区域 PHREs。江淮区域非台风影响的 PHREs 31 例, 集中发生在 6 月中旬到 7 月中旬, 平均持续 8.29 d, 华南非台风影响的 PHREs 34 例, 集中发生在 6~7 月, 平均持续 6.24 d, 这两类事件的发生频次和强度均呈年代际增长。江淮区域受台风影响的 PHREs 4 例, 集中发生在 7 月中下旬到 8 月初。华南受台风系统影响的 PHREs 31 例, 集中发生在 7~9 月, 此类事件的发生频次和系统强度在 2000 年以后均明显上升。采用场相关的客观分类方法对非台风影响的 PHREs 进行较为细致的分类, 将江淮区域持续性暴雨事件分为 A 型 (主雨带在长江以南)、B 型 (主雨带在长江以北) 和 C 型 (主雨带在长江沿江地区), 将华南区域持续性暴雨事件分为 E 型 (主雨带在云贵高原以东) 和 F 型 (主雨带位于云贵高原和广西), 该分类将为下一步的机制研究提供帮助。

关键词 持续性暴雨 客观方法 江淮 华南

文章编号 1006-9585 (2014) 06-0713-13

中图分类号 P466

文献标识码 A

doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2013.13143

Classification of Persistent Heavy Rainfall Events over Southern China during Recent 30 Years

WANG Huijie^{1,2,3}, SUN Jianhua¹, WEI Jie¹, and ZHAO Sixiong⁴

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 Meteorological Observatory, Unit 95968, Beijing 100097

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

Abstract The persistent heavy rainfall events (PHREs) over southern China during 1981–2011 are classified by utilizing the daily precipitation data at 752 stations in China. PHREs in the Yangtze and Huaihe River Valley (YHRV) and PHREs in South China (SC) during 1981–2011 are selected on the basis of the following criteria: More than 10 grids [0.25° (latitude) $\times 0.25^\circ$ (longitude)] in the area with daily precipitation of more than 50 mm lasting more than five days and rainband coincidence degree greater than 20%. The statistics reveal that 31 PHREs in the YHRV were concentrated

收稿日期 2013-08-23 收到, 2013-11-11 收到修定稿

资助项目 国家重点基础研究规划项目 2012CB417201, 国家自然科学基金项目 41375053、41205027

作者简介 汪汇洁, 女, 1983 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: wanghuijie@mail.iap.ac.cn

通讯作者 孙建华, E-mail: sjh@mail.iap.ac.cn

between mid-June to mid-July with an average duration of 8.29 days, whereas 34 non-typhoon PHREs in SC were concentrated in June and July with an average duration of 6.24 days. Moreover, the frequency and intensity of these two types changed in decadal growth. PHREs affected by the typhoon systems in the YHRV were concentrated between mid-July and early August. Those occurring in SC were concentrated from July to September, and their frequency and intensity have increased since 2000. Objective pattern correlation statistics are used to classify and discuss the non-typhoon PHREs in detail. PHREs in the YHRV are divided into three types: (A) main rainbelt to the south of the Yangtze River (YR), (B) main rainbelt to the north of the YR, (C) main rainbelt along the YR, and PHREs in SC are classified into two types: (E) main rain belt to the east of the Yunnan–Guizhou Plateau and (F) main rainbelt located over the Yunnan–Guizhou Plateau and Guangxi Province. On the basis of such classification, the mechanisms of PHREs will be discussed in future studies.

Keywords Persistent heavy rainfall, Objective method, Yangtze and Huaihe River valley, South China

1 引言

持续性暴雨事件 (Persistent Heavy Rainfall Events, PHREs) 造成的灾害天气对经济和生命财产造成的损失较大, 例如, 1993 年夏季上密西西比河流域的持续性强降水引发的洪水造成逾 150 亿美元的损失 (Kunkel et al., 1994; Bell and Janowiak, 1995), 2002 年夏季中欧因持续性强降水引发的洪涝导致 200 多万人受灾, 经济损失达 300 亿欧元 (Grazzini and van der Grijn, 2003), 2007 年 6~7 月美国大平原南部的持续性暴雨引发的洪水导致 4 人死亡和 350 亿美元的损失 (Schumacher, 2011), 2010 年 7 月席卷俄罗斯的持续高温以及同期巴基斯坦北部的持续降水 (Houze et al., 2011; Galarneau et al., 2012) 使超过 2000 万民众受灾。我国更是经常遭受持续性强降水影响的国家之一, 尤其近年来频繁发生的特大洪水均是由持续性强降水事件引起的, 给社会生产和人民生活带来极为严重的后果, 如 1998 年和 1999 年的长江流域洪涝 (陶诗言等, 2001, 2004; 赵思雄等, 2004), 1991 年、2003 年和 2007 年的淮河流域洪涝 (丁一汇, 1993; 张庆云等, 2004)。2013 年夏季我国的四川地区出现了持续强降水, 同时我国南方地区遭受大范围、持续性高温少雨天气。Kunkel and Andsager (1999) 指出从 1931~1996 年间美国地区持续 1~7 d 的极端降水事件以 3% 的速率增长, 同样, 亚洲 (Iwashima and Yamamoto, 1993) 和澳大利亚 (Suppiah and Hennessy, 1996) 的极端降水事件降水率也在持续增长。在此气候背景下, 持续性暴雨受到越来越多的国外内学者的关注和研究。

陶诗言和徐淑英 (1962) 在研究夏季江淮流域

持久性旱涝的环流特征时, 强调了持久性旱涝要求具有环流的稳定性。陶诗言 (1980) 定义“连续三天或三天以上的暴雨过程, 总降水量大于 200 mm, 也有定义五天或五天以上的暴雨过程为连续性暴雨”, 并且提出当 3~10 d 的暴雨极值出现时, 行星尺度的大形势必出现某种调整或者持续某种形势。在这种大形势下, 在某个特定地点不断有水汽供应, 并造成天气尺度系统停滞少动, 或者一个接一个的扰动发展并过境, 加之有利的地形条件, 便可以引起持续几天的暴雨; 他们还给出了经向型和纬向型两类持续性大暴雨的模型。丁一汇 (1994) 指出, 持续性暴雨常出现在环流系统稳定时期, 天气尺度和中尺度系统有可能在同一地区反复出现或沿同一路径移动, 以致造成很大的累积雨量。

Tang et al. (2006) 对持续性暴雨过程重新进行了定义, 考虑降雨的强度、持续时间、单站累积降雨量等, 并对 1951~2004 年间我国夏季 (4~8 月) 持续性暴雨事件进行普查, 从多种角度进行分类, 并探讨各类持续性暴雨的时空分布及强度特征。鲍名 (2007) 分别给出局地持续性暴雨和区域持续性暴雨的定义, 对 1951~2005 年间我国持续性暴雨事件进行挑选, 研究发现近 50 年中国局地持续性暴雨事件主要发生在江南和华南地区, 6 月发生频次最多。许艳峰 (2008) 在鲍名 (2007) 定义的基础上对 1956~2005 年间我国南方夏季 (JJA) 持续性暴雨事件进行挑选, 利用经验正交函数 (EOF) 方法, 将我国南方夏季持续性暴雨分为东西一致型、东西相间型、南北相反型 3 类, 并将对应的环流特征进行合成分析, 给出各型位势高度异常的分布特征和鄂霍次克海阻塞高压的活动特征。

在对全国范围的持续性暴雨研究以外, 国内很多学者也对不同气候区的持续性暴雨进行了细致

研究。黄忠等（2005）研究了 1981~2002 年间广东省持续 3 d 以上由季风槽引发的大面积暴雨个例，发现广东后汛期季风槽引发的持续性暴雨多数发生在西太平洋副高位置偏东或偏南的情况下，并与中纬西风槽或热带辐合带（Intertropical Convergence Zone, ITCZ）有直接联系。丁治英等（2008）在给出连续性降水定义的基础上对发生于 1958~2000 年 6 月的持续性暴雨事件进行挑选，指出 1990 年代以后连续性暴雨事件激增，通过对 3 次 6 月连续性暴雨的分析指出，连续性暴雨时在江南与华南多有两支雨带存在，南亚高压与高空急流的稳定维持是双雨带产生的主要原因。此外，孙凤华等（2007）、Yin et al.（2009）分别就东北地区和贵州等地的持续性强降雨事件进行了气候特征方面的统计分析。

综上所述，尽管已经有很多针对持续性暴雨过程的研究，但对于我国“持续性暴雨”尚无统一的定义，因而，以往的研究工作多从各自的研究目的出发先对持续性暴雨进行定义，从而总结持续性暴雨事件的气候变化特征或对典型个例进行分析。这些研究大多针对全国的暴雨事件或局地的影响，主要研究持续性降雨的气候特征，对我国主要发生持续性暴雨的南方雨区的分类不够细致，因而难于从天气过程的角度展开深入研究。鉴于我国不同区域的雨季和影响天气系统差别较大，天气预报业务也提出了针对持续性暴雨过程的需求，因此，本文拟首先对近 30 年我国南方的持续性暴雨事件进行定

义和挑选，并从天气学角度进行较细的分类，得到的各类区域持续性暴雨事件将为下一步对持续性暴雨的多尺度物理模型和机理分析研究打下基础，从而进一步探讨持续性暴雨过程的预报方法，改进预报水平。

2 资料和方法

本文采用中国气象局国家气象中心提供的 1981~2011 年间中国 752 站日降水资料，由于我国的站点分布不均、地域降水特征差别较大，因而，本文首先通过 Cressman 客观分析方法将站点资料插值到 0.25° （纬度） $\times 0.25^\circ$ （经度）格点上，再基于格点降水资料进行 PHREs 的客观挑选。研究的关键区是我国江淮区域（ $26^\circ\text{N}\sim 35^\circ\text{N}$ ， $112^\circ\text{E}\sim 122.5^\circ\text{E}$ ，图 1 中红色虚线方框所示）和华南区域（ $18^\circ\text{N}\sim 26^\circ\text{N}$ ， $105^\circ\text{E}\sim 120^\circ\text{E}$ ，图 1 中紫色虚线方框所示）。此外，本研究还参考了国家气象中心提供的历年典型梅雨时段和联合台风警报中心（Joint Typhoon Warning Center, JTWC）历年的最佳台风路径资料。

3 持续性暴雨事件的定义和挑选

针对持续性暴雨，不同的研究者有不同的定义，根据侧重点的不同，可分为针对单站定义和针

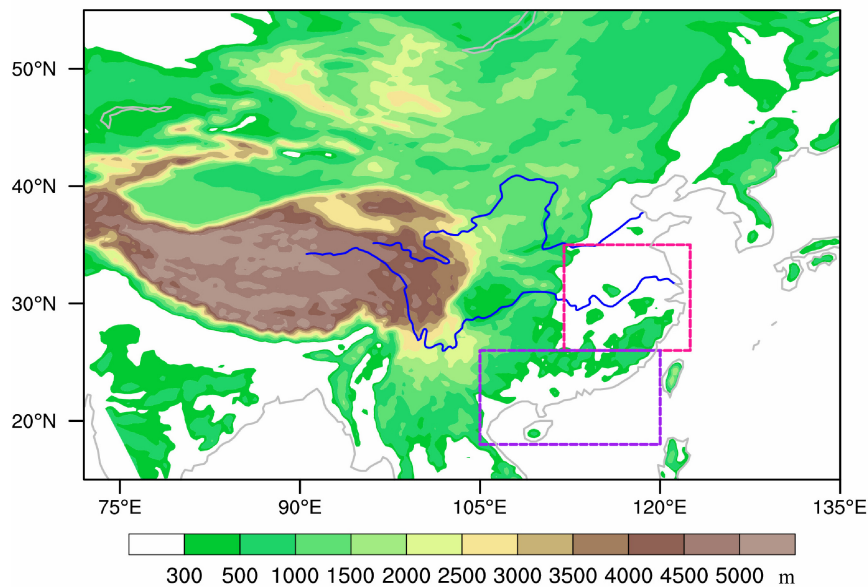


图 1 东亚地形高度分布（红色虚线框注为本文选取的江淮区域，紫色矩形框注为本文选取的华南区域）
Fig. 1 Distribution of topography (red dashed rectangle and purple rectangle represent the Yangtze-Huai River basin and South China regions)

对区域定义两大类。若单站连续 3 d 或 3 d 以上均有 50 mm 以上暴雨发生则可认定是一次持续性暴雨(陶诗言, 1980)。在此基础上, 鲍名(2007)将标准放宽至中间某一日降水可小于 50 mm, 分别给出局地持续性暴雨(单站逐日降水量连续 3 d 或 3 d 以上均大于等于 50 mm 或单站连续 5 d 除中间一日降水量小于 50 mm 其余 4 d 均大于等于 50 mm)和区域持续性暴雨[在 1° (纬度) \times 1° (经度)网格下不超过 50 个网格的矩形区域内, 相同时间上至少有 N 个网格中有测站满足连续 3 d 总降水量 ≥ 100 mm, 且每日该区域内至少有 N 个网格中有测站日降水量 ≥ 25 mm, 其中 N 在中国北方地区为 8, 在华南为 12, 在中部地区为 14]。在此基础上许艳峰(2008)又加上了单站总降水量在 200 mm 以上和日均降水量在 50 mm 以上的约束, 但除了开始日外其余各日的降水量标准放宽至 30 mm, 二者挑选出的 50 年夏季(6~8 月)我国南方单站持续性暴雨均达到 500 站次左右。这样的挑选结果具有数量多、局地性强的特点, 如广西东兴站在 50 年间发生了 35 次持续性暴雨(鲍名, 2007)。

我国夏季持续性暴雨事件发生于东亚夏季风背景下, 随着季风的发展演变, 主雨带先从华南北推至江淮, 在季风南退之时, 再次回到华南。因此我国持续性暴雨事件具备鲜明的地域和季节特征, 目前对我国区域持续性暴雨的研究大体都对集中发生持续性暴雨较多的江淮、华南两个区域分别进行研究。不同区域的持续性暴雨定义各有差别, 但都是通过降水持续时间和持续雨强这两个指标进行定义。持续时间一般定为连续 3 d(黄忠等, 2005; 谢炯光等, 2006; 鲍名, 2007; 丁治英等, 2008; 许艳峰, 2008; 钱维宏, 2011)或连续 4 d(Tang et al., 2006), 或连续 5 d 但允许中断一天(吴丽姬等, 2007; 赵璐, 2007; Bao, 2008)。其中定义为连续 3~4 d 的研究大都立足于全国持续性降水事件的排查, 我国东北的持续性暴雨事件的 50 a 平均持续时长为 3.5 d, 而我国南方持续性暴雨的平均时长均在 6.86 d 以上(赵璐, 2007), 因此, 将我国南方持续性暴雨事件的时间尺度定义为 5 d 及 5 d 以上较为合理。持续雨强的条件一般通过定义总降水量或平均日降水量加以实现, 其目的是要保证持续性事件中每天的降水都达到一定的强度。然而, 一次持续性暴雨事件不太可能在某一区域长时间维持不移动, 而是随着天气系统的发展出现缓慢移动或短时

停滞。因此持续雨强的判别问题实质是怎样将中断期前后的两小段连续暴雨过程判定为一次持续性过程的问题。Tang et al. (2006)通过对雨量分级并规定各级的出现时间进行细致的判定, 后有研究在其基础上给出雨带日摆动在 2 个(赵璐, 2007)或 5 个经纬度(钱维宏, 2011)范围的定义, 但由于雨带并不总成规则的几何形状, 因而辨识度存在局限。在此基础上, 本文提出基于格点降水资料的雨带重合度(Rainband Coincidence Degree, C_{RB})的概念, 定义如下:

$$C_{RB} = N_{12} / \min(N_1, N_2), \quad (1)$$

其中, N_{12} 为相邻两天降水量均 ≥ 25 mm 的格点数, N_1 和 N_2 分别为相邻两天中第一天和第二天降水量 ≥ 25 mm 的格点数。公式(1)定义的雨带重合度即前后两天降雨量均 ≥ 25 mm 的格点数与这两天 ≥ 25 mm 的格点数的最小值的比值, 对于持续多日的区域暴雨事件, 有可能一日出现多个并不独立的不规则雨带, 这些雨带与前后天的雨带的重合度, 可以反映雨带的分裂与合并过程。

综上所述, 本文将站点日降水资料插值到 0.25° (纬度) \times 0.25° (经度)网格, 并将江淮区域持续性暴雨事件定义为: 至少连续 5 d 或 5 d 以上有不小于 10 个格点出现 ≥ 50 mm 的降水, 且相邻两日雨带重合率 $C_{RB} \geq 20\%$ (中间允许 1 d 中断)。这个分类标准可综合考虑影响降雨过程的天气系统的持续性和移动性。其中, 对江淮区域 PHREs 的挑选时段为 1981~2011 每年的 5 月 1 日至 8 月 31 日, 对华南区域的挑选时段为 1981~2011 每年的 4 月 1 日至 10 月 31 日。

按照上述定义, 挑选出江淮区域 PHREs 共计 35 例, 根据 JTWC 的台风路径资料分出如表 1 所示的 31 例非台风系统影响的 PHREs, 和表 2 所示的 4 例受台风系统影响的事件。本方法挑选出的 1982~2005 年的江淮区域 PHREs 基本涵盖了鲍名(2007)文中同区域的事件, 且数量略多, 可能是由于本方法的网格分辨率较之鲍名(2007)文中的 1° (纬度) \times 1° (经度)网格分辨率更高, 可将强降水中心尺度较小的事件挑出。在挑选出的 31 例非台风系统影响的 PHREs 中, 事件平均持续时长为 8.29 d, 其中持续时间最长的事件出现在 1998 年 6 月 12~27 日, 共计 16 d, 其次为 2007 年 6 月 30 日至 7 月 14 日, 共计 15 d, 其后为 1991 年 6 月 29 日至 7 月 12 日和 1994 年 6 月 9~21 日, 分别持续了 14 d 和 13 d。这

几个个例都是出现在江淮流域典型的洪涝年(丁一汇, 1993; 陶诗言等, 2001; 赵思雄等, 2004), 并与丁洽英等(2008)挑选出的 50 年间 6 月我国东部最强和次强的持续性暴雨结果一致。出现两次 PHREs 的有 9 年: 1982 年、1983 年、1991 年、1996 年、1998 年、2000 年、2002 年、2006 年和 2010 年。相较于非台风影响的 PHREs, 江淮区域受台风系统影响的 PHREs 明显偏少, 31 年间仅出现 4 例(表 2)。这 4 例事件基本发生在 7 月中下旬至 8 月初, 平均持续时长为 5.6 d, 比非台风影响的事件时长短了 3 d, 且均发生在 1990 年以后。其中, 事件 2 和 3 受登陆台风影响, 事件 1 的影响系统为登陆的热带风暴, 而事件 4, 即 2010 年 7 月 23~27 日的事件主要受东风波系统影响, 由于系统移向相近, 在此将其归入受台风系统影响的类别中(见表 2)。

表 1 1981~2011 年江淮区域非台风影响的 PHREs 列表
Table 1 Persistent Heavy Rainfall Events (PHREs) without effects of typhoons over the Yangtze-Huai River valley during 1981-2011

序号	年份	开始日	结束日	序号	年份	开始日	结束日
1	1982	6月12日	6月22日	16	1998	6月12日	6月27日
2	1982	7月18日	7月24日	17	1998	7月21日	7月26日
3	1983	6月23日	7月1日	18	1999	6月24日	7月1日
4	1983	7月18日	7月23日	19	2000	6月06日	6月12日
5	1987	7月2日	7月6日	20	2000	6月19日	6月28日
6	1988	6月17日	6月22日	21	2002	6月19日	6月23日
7	1989	6月28日	7月4日	22	2002	7月21日	7月27日
8	1991	6月12日	6月16日	23	2003	6月24日	7月1日
9	1991	6月29日	7月12日	24	2005	6月17日	6月23日
10	1992	7月3日	7月7日	25	2006	6月4日	6月8日
11	1994	6月9日	6月21日	26	2006	6月29日	7月9日
12	1995	6月20日	6月28日	27	2007	6月30日	7月14日
13	1996	5月31日	6月5日	28	2009	7月22日	7月29日
14	1996	6月28日	7月4日	29	2010	6月17日	6月25日
15	1997	7月6日	7月12日	30	2010	7月11日	7月19日
				31	2011	6月4日	6月12日

图 2 给出了江淮梅雨期和 PHREs 的分布, 江淮区域 PHREs 集中发生于 6~7 月, 31 例中有 20 例(约 2/3)发生在梅雨期或梅雨期部分重合, 且 6 月 15 日至 7 月 15 日为高发期, 即大部分江淮区域的 PHREs 发生在典型梅雨期(国家气象中心的定义)内。在经典的二度梅年份, 如 1991 年和 1998 年, 江淮区域在 6~7 月均也分别出现两例 PHREs。但在 2000 年、2002 年、2009 年这 3 个空梅年, 亦有 PHREs 发生, 且在 2000 年和 2002 年分别出现两例。此外, 有 9 年(1981 年、1984 年、1985 年、

1986 年、1990 年、1993 年、2001 年、2004 年和 2008 年)未出现非台风系统影响的 PHREs。综合分析说明夏季江淮区域的 PHREs 可以反映部分梅雨期暴雨的特征, 但也有其他类型的降雨造成的 PHREs。

表 2 1981~2011 年江淮区域受台风影响的 PHREs 列表
Table 2 PHREs produced by typhoons over Yangtze-Huai River valley during 1981-2011

序号	年份	开始日	结束日	序号	年份	开始日	结束日
1	1990	7月31日	8月4日	3	2008	7月28日	8月2日
2	1994	7月11日	7月17日	4	2010	7月23日	7月27日

按照相同的 PHREs 定义, 挑选出华南地区非台风系统影响的 PHREs 共计 34 例(表 3), 这些事件的平均持续时间为 6.24 d, 比江淮区域持续性暴雨事件的平均时长短了约 2 d。华南区域持续时间最长的暴雨事件发生于 2001 年 6 月 1~13 日, 共计 13 日, 其次为 1998 年 6 月 16~26 日, 持续 11 d, 其次为 1994 年 7 月 17~25 日, 持续 9 d, 1994 年和 1998 年华南地区都发生了严重的洪涝灾害(孙建华和赵思雄, 2000; Zhao et al., 2007)。由于华南地区的个例挑选时间是 4~9 月, 一年中出现 2 次 PHREs 的有 9 年, 其中 2001 年还出现了 3 次。在单年出现 2 次或 2 次以上的 PHREs 中, 除 2001 年和 2005 年前汛期(4~6 月)出现了 2 次持续性暴雨外, 其余均有 1 次出现在后汛期(7~9 月)。大部分 PHREs 个例都出现在 6~7 月, 其中 6 月最多, 这与谢炯光等(2006)的研究结果一致。出现于 5 月的事件只有 4 例, 其中有 2 例出现在 1984~1989 年间, 还有 2 例出现在 2008 年和 2011 年。出现在 8~9 月的持续性暴雨有 4 例, 其中有 3 例出现在 1988 年以前, 1 例出现于 1997 年的 8 月上旬。

图 3 给出了华南地区的所有非台风和台风影响的 PHREs, 这些事件基本涵盖了谢炯光等(2006)和吴丽姬等(2007)总结的前汛期持续性暴雨个例, 并包含黄忠等(2005)总结的部分后汛期受季风槽影响的持续性暴雨个例。在 20 世纪 80 年代, 华南区域非台风系统影响的 PHREs 出现时期集中于 5 月和 8~9 月, 而 20 世纪 90 年代却与之相反, 事件集中出现于 6~7 月, 2000 年以后, PHREs 事件的发生时间略有提前的趋势。华南地区的 PHREs 发生的时间有明显的年代际变化, 而江淮地区的 PHREs 没有明显的年代际变化。华南地区的 PHREs 发生年代际变化的原因不是本文的研究目标, 有待

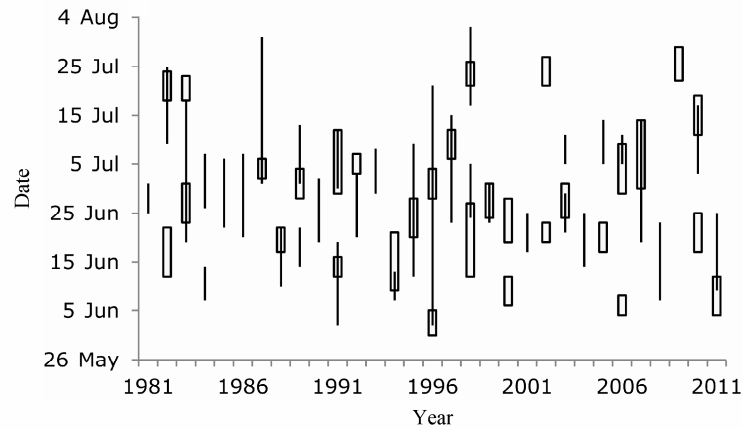


图2 1981~2011年江淮区域PHREs(空心柱)及相应年份典型梅雨期(实线)的时间分布
Fig. 2 Distribution of PHREs over the Yangtze-Huai River valley (hollow rectangles) and typical Meiyu periods (solid lines) during 1981-2011

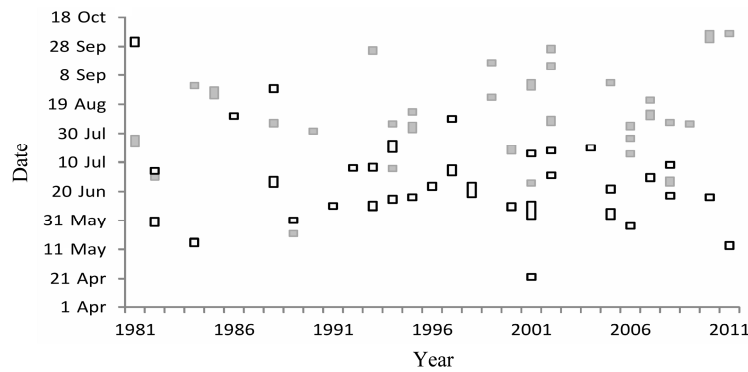


图3 1981~2011年华南区域非台风PHREs(黑色空心柱)和台风引起的PHREs(灰色实心柱)的时间分布
Fig. 3 PHREs without effects of typhoons (black hollow rectangles) and produced by typhoons (gray solid rectangles) over South China during 1981-2011

表3 1981~2011年华南地区非台风影响的PHREs列表
Table 3 PHREs without effects of typhoons over South China during 1981-2011

序号	年份	开始日	结束日	序号	年份	开始日	结束日
1	1981	9月28日	10月4日	18	1997	8月7日	8月11日
2	1982	5月27日	6月2日	19	1998	6月16日	6月26日
3	1982	7月2日	7月6日	20	2000	6月7日	6月12日
4	1984	5月13日	5月18日	21	2001	4月20日	4月24日
5	1986	8月9日	8月13日	22	2001	6月1日	6月13日
6	1988	6月23日	6月30日	23	2001	7月14日	7月18日
7	1988	8月27日	9月1日	24	2002	6月29日	7月3日
8	1989	5月29日	6月2日	25	2002	7月16日	7月20日
9	1991	6月8日	6月12日	26	2004	7月18日	7月22日
10	1992	7月4日	7月8日	27	2005	6月1日	6月8日
11	1993	6月7日	6月13日	28	2005	6月19日	6月24日
12	1993	7月4日	7月9日	29	2006	5月25日	5月29日
13	1994	6月12日	6月17日	30	2007	6月27日	7月2日
14	1994	7月17日	7月25日	31	2008	6月15日	6月19日
15	1995	6月14日	6月18日	32	2008	7月6日	7月10日
16	1996	6月21日	6月26日	33	2010	6月14日	6月18日
17	1997	7月1日	7月8日	34	2011	5月11日	5月16日

表4 1981~2011年华南地区受台风影响的PHREs列表
Table 4 PHREs produced by typhoons over South China during 1981-2011

序号	年份	开始日	结束日	序号	年份	开始日	结束日
1	1981	7月21日	7月29日	16	2001	6月24日	6月28日
2	1982	6月28日	7月2日	17	2001	8月29日	9月5日
3	1984	8月30日	9月3日	18	2002	8月5日	8月11日
4	1985	8月23日	8月31日	19	2002	9月12日	9月17日
5	1988	8月4日	8月9日	20	2002	9月24日	9月29日
6	1989	5月20日	5月24日	21	2005	9月1日	9月5日
7	1990	7月30日	8月3日	22	2006	7月14日	7月18日
8	1993	9月23日	9月28日	23	2006	7月25日	7月29日
9	1994	7月4日	7月8日	24	2006	8月2日	8月7日
10	1994	8月4日	8月8日	25	2007	8月9日	8月15日
11	1995	7月31日	8月7日	26	2007	8月20日	8月24日
12	1995	8月12日	8月16日	27	2008	6月24日	6月30日
13	1999	8月22日	8月26日	28	2008	8月5日	8月9日
14	1999	9月15日	9月19日	29	2009	8月4日	8月8日
15	2000	7月16日	7月22日	30	2010	10月1日	10月9日
				31	2011	10月5日	10月9日

将来开展研究。

相较之下,华南地区受台风影响的PHREs(表4)

出现时间较为稳定，集中于 7~9 月，其中 8 月最多，出现 13 例，与华南后汛期台风系统的活跃期较为一致。事件中出现时间最早的是 1989 年 5 月 20 日，最晚的是 10 月，发生在 2010 年和 2011 年的 10 月上旬。31 例受台风系统影响的 PHREs 的平均持续时间为 6 d，其中最长的为 9 d，分别出现在 1981 年 7 月 21~29 日，1985 年 8 月 23~31 日和 2010 年 10 月 1~9 日。2000 年以后华南区域受台风影响的 PHREs 发生频次明显增多(图 3)，在 2006 年的 7 月中旬到 8 月初出现了 3 例台风系统造成的 PHREs。这些事件中有 80% (25 例) 的事件受登陆的台风或热带风暴影响，受热带低压和超强台风影响的事件各有 3 例，其中 3 例超强台风登陆影响的事件均出现在 2000 年以后，分别为 2005 年、2007

年和 2011 年。

4 非台风系统影响的 PHREs 分类

如前所述，我国区域持续性暴雨多发，以前也对全国持续性暴雨进行分类研究，Tang et al.(2006) 对全国 193 例持续性暴雨依降水强度划分为 5 个等级，从地理分布的角度划分为东北、华北、淮河流域、江淮流域、长江沿江、江南、东南沿海和西南 8 个区域并按 500 hPa 平均环流特征分为西风型、东风型和东西风汇合型 3 种类型。鲍名(2007) 依据天气形势的差异将全国 PHREs 大体分为渤海辽西型、北方经向型、南方锋面型和华南低压型 4 大类，并将南方锋面型根据发生的区域细分为江淮

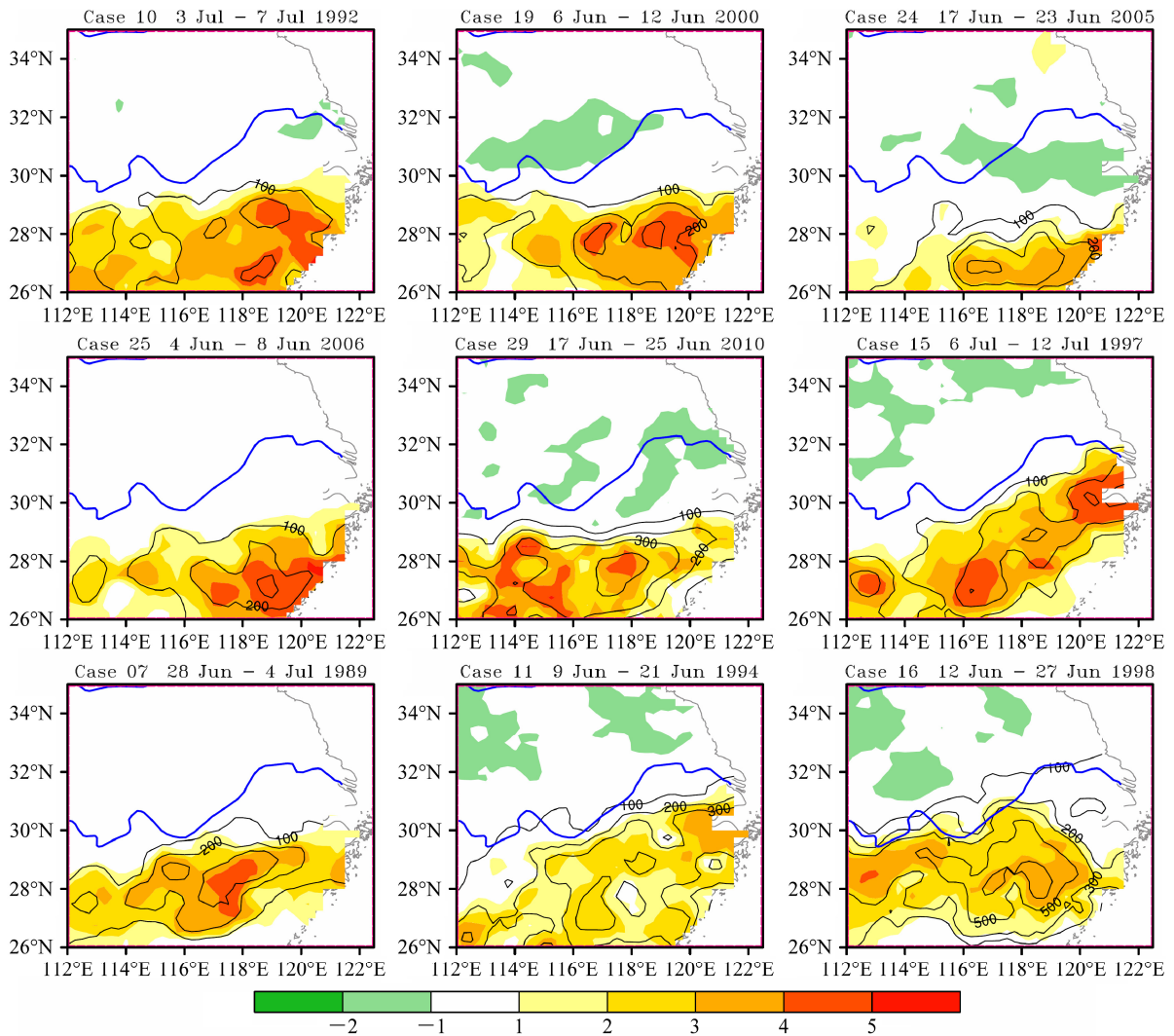


图 4 A 型 PHREs 中各例事件的平均日降水量标准化距平 (阴影) 和累积降水量 (黑色等值线, 间隔依次为 100、200、300、500、700, 单位: mm)
 Fig. 4 Normalized mean daily precipitation anomalies (shadings) and accumulated precipitation (contours, values are 100, 200, 300, 500, and 700 sequentially, units: mm) of PHREs belong to type A

型、江南型和华南型，在此基础上总结出 6 类区域 PHREs 的大尺度环流背景特征，然而这种人工的归类方法带有一定的主观性，尤其在面对大样本资料时工作量巨大，因而本文尝试用客观方法对江淮区域的 PHREs 进行分类。

本研究虽然定义了 PHREs 的最短时长为 5 d，但由于不同事件的持续时间不尽相同，并直接影响累积降水量的大小和分布，因而对过程平均日降水量进行标准化距平处理，即

$$N = (X - \mu) / \sigma, \quad (2)$$

其中， X 是格点上的物理量（此处为过程平均日降水量）， μ 是相应物理量的 30 年气候平均值（1981~2010 年）， σ 是标准差。江淮区域 31 例 PHREs 均出现 +3.0 以上的降水正异常中心（图 4~6），足可见这些持续性暴雨事件有别于梅雨期的季节性降水，具有较显著的极端性。在 20 例出现 +4.0 以上降水正异常中心的 PHREs 中，有 2 例发生于 20 世纪 80 年代，7 例发生于 20 世纪 90 年代，11 例发生于 2000 年以后，其中 2006 年 6 月 4~8 日和 2010 年 6 月 17~25 日的事件中均出现了 +5.0 以上的异常中心。同样，华南区域 34 例中有 32 例出现 +3.0 以上的正异常中心（图 7 和图 8），18 例出现 +4.0 以上的正异常中心，其中有 4 例发生于 20 世纪 80 年代，5 例发生于 20 世纪 90 年代，9 例发生于 2000 年以后。综上可见江淮和华南区域 PHREs 的发生频次和强度均呈增长趋势，因而，有必要对这些极端性的 PHREs 进行分类并深入分析其产生和维持机理。参考 Santer et al. (1993) 对空间场相似的计算，本文定义空间场 X 和 Y 之间的相关系数为

$$R_{X,Y} = \langle XY' \rangle / (\sigma_X \sigma_Y), \quad (3)$$

其中， $X' = X - \langle X \rangle$ ， $Y' = Y - \langle Y \rangle$ ， $\sigma_X^2 = \langle X'^2 \rangle$ ， $\sigma_Y^2 = \langle Y'^2 \rangle$ ， $\langle \rangle$ 为空间平均运算，通过公式 (3) 计算任意两次事件平均日降水量的标准化距平场之间的相关系数。由于江淮区域地形相对简单，因而可以在 31 例 PHREs 中选出互为相关系数负极大值 (-0.80) 的两例事件，分别将与这两例事件相关系数大于等于 0.60 的事件归为同一类，再将未归入上述两类的事件中两两相关系数均大于等于 0.60 的事件归为一类，由此得到如表 5 所示的 3 类，并根据雨带的空间分布特征分别定义为 A 型（图 4，主雨带在长江以南）、B 型（图 5，主雨带在长江以北）和 C 型（图 6，主雨带在长江沿江地区）。本文中的 B 型与鲍名 (2007) 结果中的江淮型 PHREs

较为一致，但客观方法分出的 C 型 PHREs 大都出现在鲍名 (2007) 归纳的江南型中，可见主观方法对雨带分布的区分度不够高。A、B、C 型的 PHREs 分类特征与梅雨期降水的经向非均匀分布特征（宗海峰等，2006）一致，由此导致的江淮区域内的南北旱涝差异显著（牛若芸等，2011），因此后续工作将对各型 PHREs 分别展开研究。

表 5 江淮区域非台风影响的 PHREs 分类列表

Table 5 Classification of PHREs without effect of typhoon over Yangtze-Huai River basin

	年份	开始日	结束日	序号
A 型	1989	6 月 28 日	7 月 4 日	7
	1992	7 月 3 日	7 月 7 日	10
	1994	6 月 9 日	6 月 21 日	11
	1997	7 月 6 日	7 月 12 日	15
	1998	6 月 12 日	6 月 27 日	16
	2000	6 月 6 日	6 月 12 日	19
	2005	6 月 17 日	6 月 23 日	24
	2006	6 月 4 日	6 月 8 日	25
	2010	6 月 17 日	6 月 25 日	29
	B 型	1982	7 月 18 日	7 月 24 日
1983		6 月 23 日	7 月 1 日	3
1987		7 月 2 日	7 月 6 日	5
1991		6 月 12 日	6 月 16 日	8
1991		6 月 29 日	7 月 12 日	9
1996		6 月 28 日	7 月 4 日	14
2000		6 月 19 日	6 月 28 日	20
2002		6 月 19 日	6 月 23 日	21
2007		6 月 30 日	7 月 14 日	27
C 型		1988	6 月 17 日	6 月 22 日
	1995	6 月 20 日	6 月 28 日	12
	1996	5 月 31 日	6 月 5 日	13
	1998	7 月 21 日	7 月 26 日	17
	1999	6 月 24 日	7 月 1 日	18
	2010	7 月 11 日	7 月 19 日	30
	2011	6 月 4 日	6 月 12 日	31

由于华南区域的西侧为云贵高原，东南两个方向均为热带洋面，该区域受地形因素和不同天气系统的影响更为复杂，因而华南 PHREs 之间的场相关系数总体不如江淮区域的高，系数的极大值也偏小。其中互为相关系数负极大值 (-0.59) 的两例事件中的一例事件与其余 PHREs 的相关性均未超过 0.48，因而选取互为相关系数次极大值 (-0.56) 的两例事件，分别将与这两例事件相关系数大于等于 0.55 的事件归为同一类，由此得到如表 6 所示的

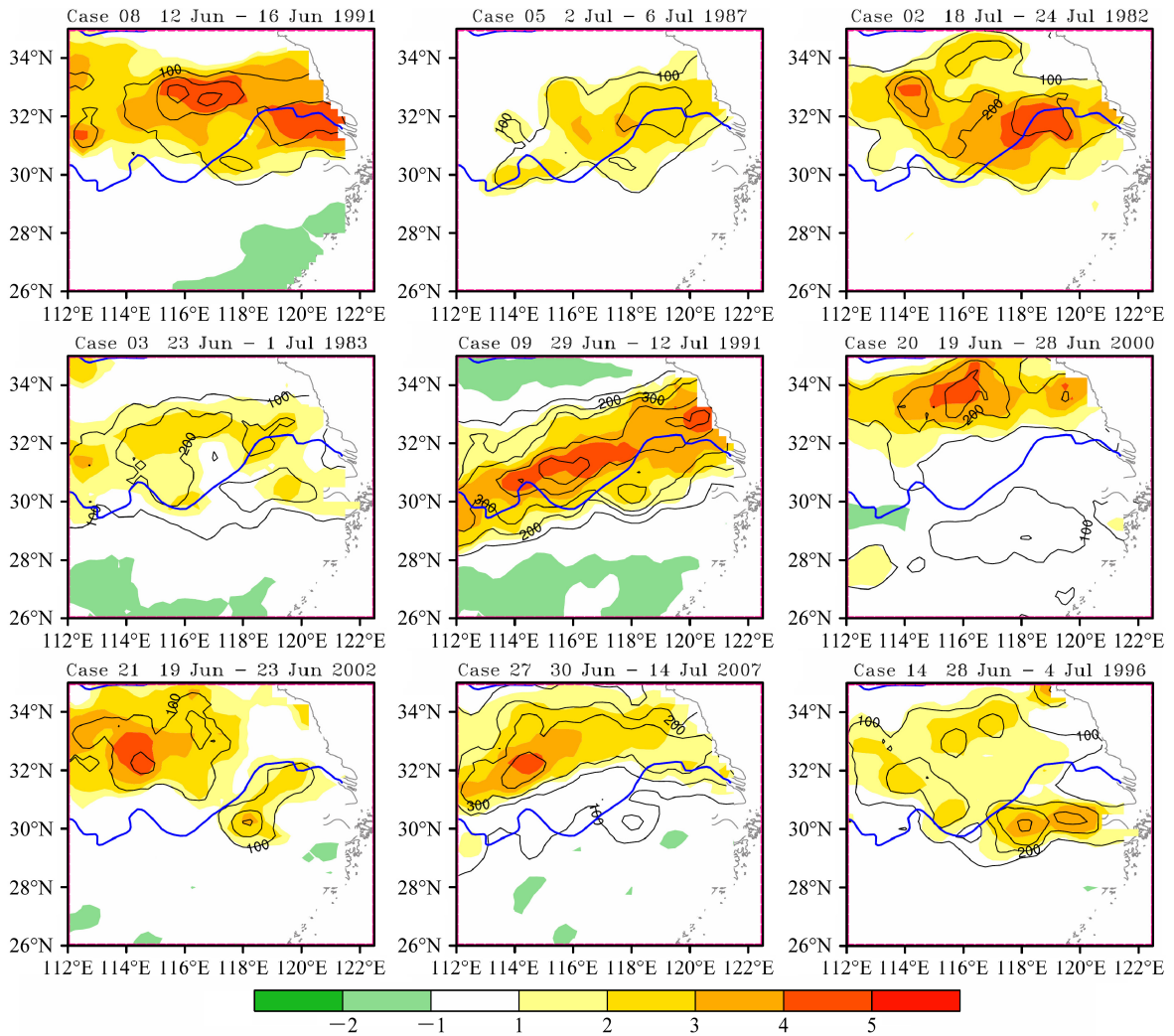


图 5 同图 4，但为 B 型
Fig. 5 Same as Fig. 4, but for type B

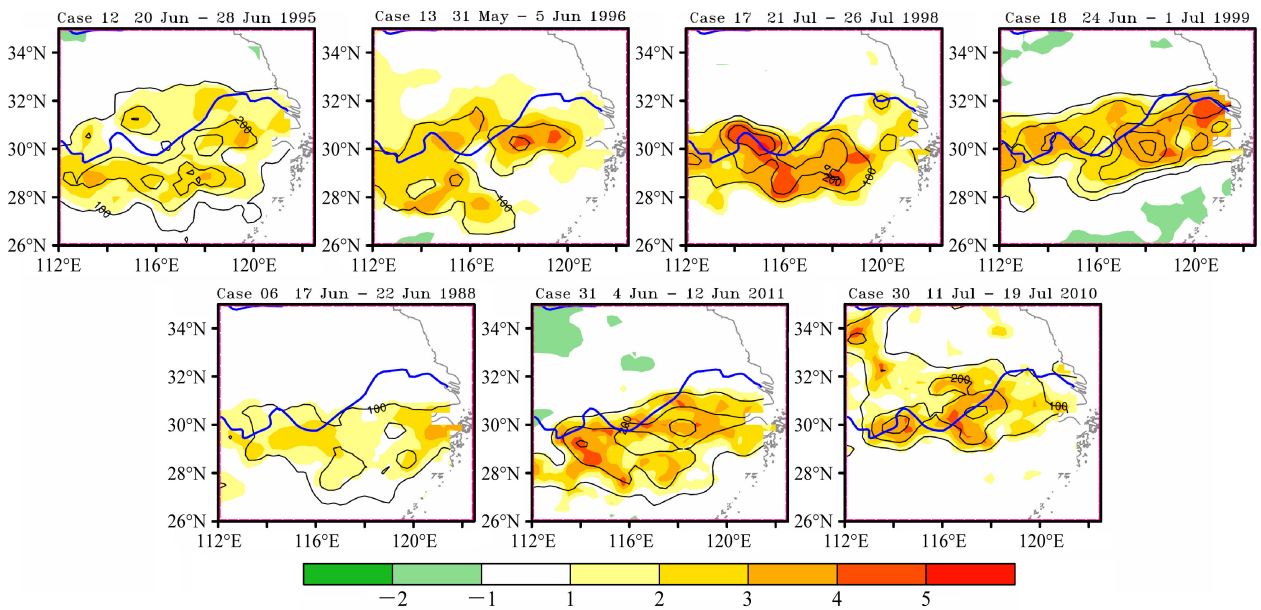


图 6 同图 4，但为 C 型
Fig. 6 Same as Fig. 4, but for type C

两类。同样可以根据雨带的空间分布特征将两类分别定义为 E 型（图 7，主雨带在云贵高原以东，主要影响华南的东南部）、F 型（图 8，主雨带位于云贵高原及广西）。由于对持续性暴雨定义的不同，鲍名（2007）在 1981~2005 年间仅挑选出 9 例华南

锋面型事件，其中有 5 例持续时间在 4 d 以上，本文涵盖了其中 4 例 PHREs。此外，从分类结果看，E 型 PHREs 共计 16 例，明显多于 F 型的 6 例，这与华南区域东部沿海降水发生频率较高的气候特征一致。F 型 PHREs 发生于青藏高原东南坡的云贵

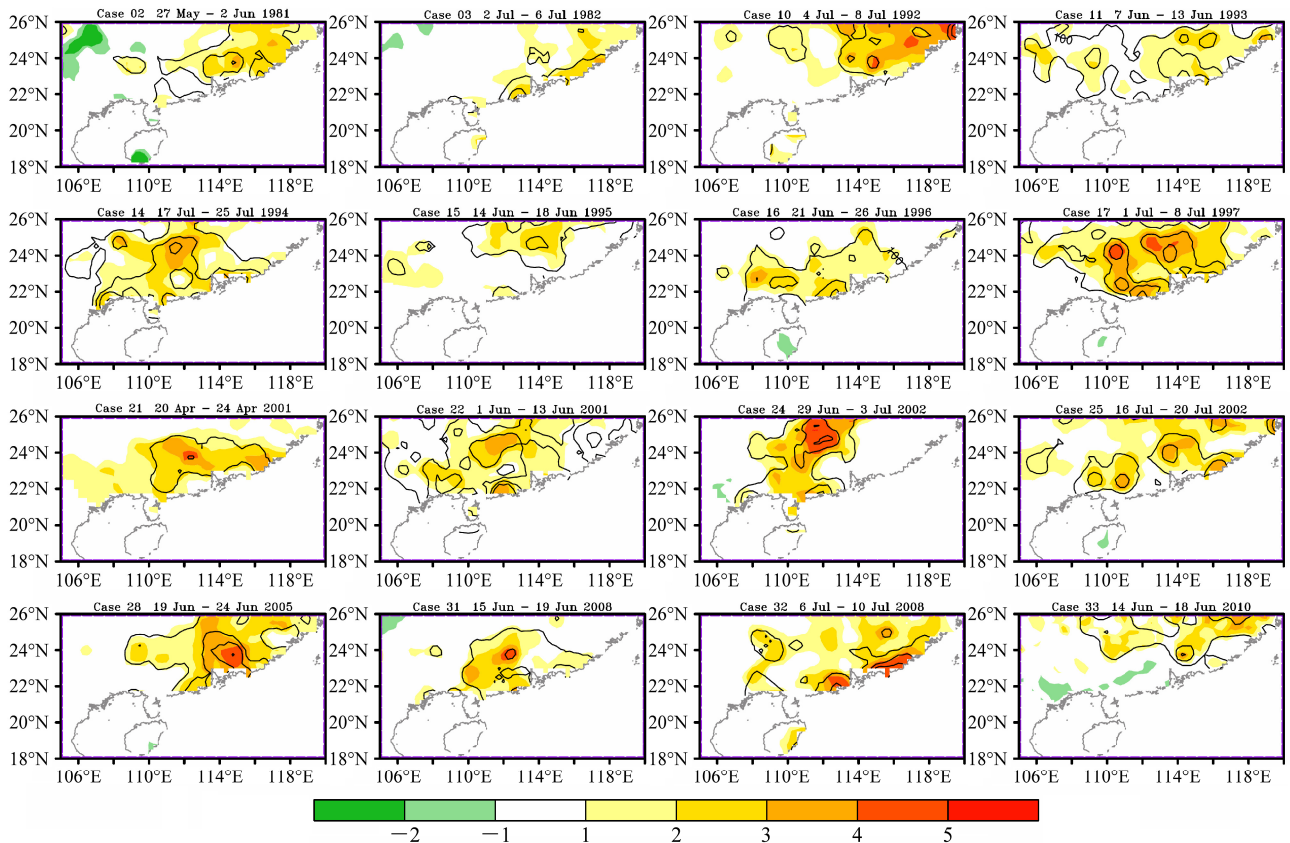


图 7 同图 4，但为 E 型
Fig. 7 Same as Fig. 4, but for type E

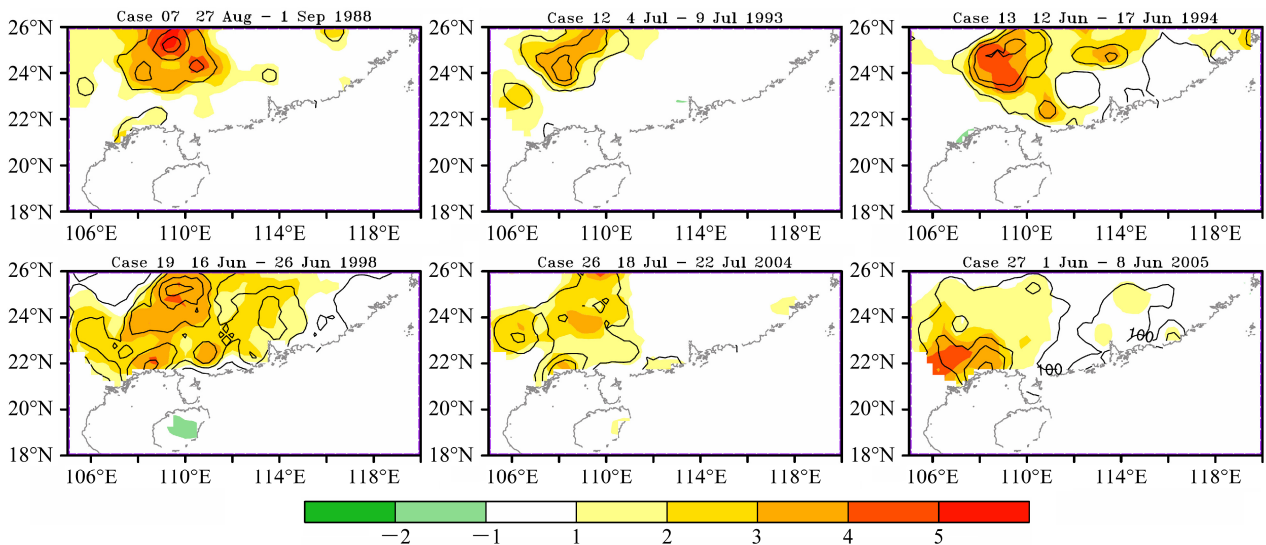


图 8 同图 4，但为 F 型
Fig. 8 Same as Fig. 4, but for type F

高原东部, 地理条件明显区别于 E 型 PHREs, 后续研究将就高原地形及高原对流系统分别对 E 型和 F 型 PHREs 的影响机制展开讨论。

表 6 华南区域非台风影响的 PHREs 分类列表

Table 6 Classification of PHREs without effect of typhoon over South China

	年份	开始日	结束日	序号
E 型	1982	5 月 27 日	6 月 2 日	2
	1982	7 月 2 日	7 月 6 日	3
	1992	7 月 4 日	7 月 8 日	10
	1993	6 月 7 日	6 月 13 日	11
	1994	7 月 17 日	7 月 25 日	14
	1995	6 月 14 日	6 月 18 日	15
	1996	6 月 21 日	6 月 26 日	16
	1997	7 月 1 日	7 月 8 日	17
	2001	4 月 20 日	4 月 24 日	21
	2001	6 月 1 日	6 月 13 日	22
	2002	6 月 29 日	7 月 3 日	24
	2002	7 月 16 日	7 月 20 日	25
	2005	6 月 19 日	6 月 24 日	28
	2008	6 月 15 日	6 月 19 日	31
	2008	7 月 6 日	7 月 10 日	32
	2010	6 月 14 日	6 月 18 日	33
	F 型	1988	8 月 27 日	9 月 1 日
1993		7 月 4 日	7 月 9 日	12
1994		6 月 12 日	6 月 17 日	13
1998		6 月 16 日	6 月 26 日	19
2004		7 月 18 日	7 月 22 日	26
	2005	6 月 1 日	6 月 8 日	27

5 结论与讨论

为了从天气尺度系统演变的角度研究我国南方的持续性强降雨过程, 本文在对前人工作进行归纳和总结的基础上, 提出更为简便且量化的持续性暴雨事件的定义, 并依此定义分别对 1981~2011 年间夏季我国南方江淮区域和华南区域的持续性暴雨事件进行挑选和分类, 得到如下结论:

(1) 江淮区域非台风系统影响的持续性暴雨事件集中发生在 6 月中旬到 7 月中旬, 一般持续 8~9 d, 这种持续性的暴雨过程约有 2/3 与梅雨期的降水有关, 但有一小部分不属于梅雨期的降水。这些个例具有较显著的极端性, 其发生频次和强度呈增长趋势。而该区域受台风系统影响的事件发生频次较小, 多发于 7 月中旬到 8 月初, 一般持续 6 d 左

右。

(2) 华南区域持续性暴雨事件的持续时间约为 6 d, 其中非台风系统影响的事件具有明显的年代际变化, 在 20 世纪 80 年代集中出现于 5 月和 8~9 月, 90 年代集中出现于 6~7 月, 2000 年以后, 事件的发生时间略有提前的趋势; 而受台风系统影响的事件集中出现在 7~9 月, 且此类事件的发生频次和系统强度均在 2000 年以后明显增加。

(3) 采用场相关的方法, 将江淮区域持续性暴雨事件分为 A 型 (主雨带在长江以南)、B 型 (主雨带在长江以北) 和 C 型 (主雨带在长江沿江地区) 3 种类型, A、B、C 3 型出现的频次大体相当。将华南区域持续性暴雨事件分为 E 型 (主雨带在云贵高原以东) 和 F 型 (主雨带位于云贵高原和广西) 两种类型, 其中 E 型明显多于 F 型, 表明华南东部降水发生频率明显偏高, 与气候特征一致。该区域经济快速发展, 需要给予高度关注。

尽管江淮地区/华南地区 PHREs 的大尺度环流特征存在一定的相似之处, 但目前正在进行的工作已发现相同地区不同类型 PHREs 间的天气系统及其演变特征存在显著的差异。下一步研究将在目前已完成的江淮和华南 PHREs 分类的基础上, 通过对每一型 PHREs 的合成分析和个例诊断, 深入研究持续性暴雨的维持机理和演变特征, 弄清不同类型个例的环流形势特点, 揭示不同类型之间主要影响天气系统的差异, 以便对不同区域不同类型的持续性暴雨预报水平的改进有所帮助。

参考文献 (References)

- 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 [J]. 大气科学, 31 (5): 779-792. Bao Ming. 2007. The statistical analysis of the persistent heavy rain in the last 50 years over China and their backgrounds on the large scale circulation [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 31 (5): 779-792.
- Bao M. 2008. Relationship between persistent heavy rain events in the Huaihe River valley and the distribution pattern of convective activities in the tropical western Pacific warm pool [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 25(2): 329-338.
- Bell G D, Janowiak J E. 1995. Atmospheric circulation associated with the midwest floods of 1993 [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 76 (5): 681-695.
- 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, 254-255. Ding Yihui. 1993. Study on the Lasting Heavy Rainfalls over the Yangtze-Huaihe River Basin in 1991 [M] (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 254-255.

- 丁一汇. 1994. 暴雨和中尺度气象学问题 [J]. 气象学报, 52 (3): 274–284.
Ding Yihui. 1994. Some aspects of rainstorm and meso-scale meteorology [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 52 (3): 274–284.
- 丁治英, 常越, 朱莉, 等. 2008. 1958~2000 年 6 月连续性暴雨的特征分析 [J]. 热带气象学报, 24 (2): 117–126. Ding Zhiying, Chang Yue, Zhu Li, et al. 2008. Research on the reason of the double rain-bands' forming in a sustaining storm rainfall of South China [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 24 (2): 117–126.
- Galarneau T J, Hamill T M, Dole R M, et al. 2012. A multiscale analysis of the extreme weather events over Western Russia and Northern Pakistan during July 2010 [J]. Mon. Wea. Rev., 140 (5): 1639–1664.
- Grazzini F, van der Grijn G. 2003. Central European floods during summer 2002 [R]. ECMWF Newsletter, 96: 18–28.
- Houze R A, Rasmussen K L, Medina S, et al. 2011. Anomalous atmospheric events leading to the summer 2010 floods in Pakistan [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 92 (3): 291–298.
- 黄忠, 张东, 林良勋. 2005. 广东后汛期季风槽暴雨天气形势特征分析 [J]. 气象, 31 (9): 19–24. Huang Zhong, Zhang Dong, Lin Liangxun. 2005. Synoptic analysis of heavy rain related to monsoon trough in the latter flood season of Guangdong [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 31 (9): 19–24.
- Iwashima T, Yamamoto R. 1993. A statistical-analysis of the extreme events: Long-term trend of heavy daily precipitation [J]. J. Meteor. Res. Japan, 71 (5): 637–640.
- Kunkel K E, Andsager K. 1999. Long-term trends in extreme precipitation events over the conterminous United States and Canada [J]. J. Climate, 12 (8): 2515–2527.
- Kunkel K E, Changnon S A, Angel J R. 1994. Climatic aspects of the 1993 upper Mississippi River basin flood [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 75 (5): 811–822.
- 牛若芸, 苏爱芳, 马杰, 等. 2011. 典型南涝(旱)北旱(涝)梅雨大气环流特征差异及动力诊断分析 [J]. 大气科学, 35 (1): 95–104. Niu Ruoyun, Su Aifang, Ma Jie, et al. 2011. The difference of the atmospheric circulation features and dynamical diagnosis about the typical Meiyu patterns of southern flood (drought) and northern drought (flood) [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 35 (1): 95–104.
- 钱维宏. 2011. 气候变化与中国极端气候事件图集 [M]. 北京: 气象出版社, 146–171. Qian Weihong. 2011. Atlas of Climate Change and China Extreme Climate Events [M] (in Chinese). Beijing: Science Press, 146–171.
- Santer B D, Wigley T M L, Jones P D. 1993. Correlation methods in fingerprint detection studies [J]. Climate Dyn., 8 (6): 265–276.
- Schumacher R S. 2011. Ensemble-based analysis of factors leading to the development of a multiday warm-season heavy rain event [J]. Mon. Wea. Rev., 139 (9): 3016–3035.
- 孙风华, 杨素英, 任国玉. 2007. 东北地区降水日数、强度和持续时间的年代际变化 [J]. 应用气象学报, 18 (5): 610–618. Sun Fenghua, Yang Suying, Ren Guoyu. 2007. Decade variations of precipitation event frequency, intensity and duration in the Northeast China [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 18 (5): 610–618.
- Suppiah R, Hennessy K J. 1996. Trends in the intensity and frequency of heavy rainfall in tropical Australia and links with the Southern Oscillation [J]. Aust. Meteor. Mag., 45 (1): 1–17.
- 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 (3): 381–392. Sun Jianhua, Zhao Sixiong. 2000. A diagnosis and simulation study of a strong Heavy rainfall in South China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 24 (3): 381–392.
- Tang Y B, Gan J J, Zhao L, et al. 2006. On the climatology of persistent heavy rainfall events in China [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 23 (5): 678–692.
- 陶诗言. 1980. 中国之暴雨 [M]. 北京: 科学出版社, 45–46. Tao Shiyan. 1980. Heavy Rainfall in China [M] (in Chinese). Beijing: Science Press, 45–46.
- 陶诗言, 徐淑英. 1962. 夏季江淮流域持久性旱涝现象的环流特征 [J]. 气象学报, 32 (1): 1–10. Tao Shiyan, Hsu Shuying. 1962. Some aspects of the circulation during the periods of the persistent drought and flood in Yantze and Hwai-ho valleys in summer [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 32 (1): 1–10.
- 陶诗言, 倪允琪, 赵思雄, 等. 2001. 1998 年夏季中国暴雨的形成机理与预报研究 [M]. 北京: 气象出版社, 183–184. Tao Shiyan, Ni Yunqi, Zhao Sixiong, et al. 2001. The Study on Formation Mechanism and Forecasting of Heavy Rainfall in the Summer 1998 [M] (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 183–184.
- 陶诗言, 张小玲, 张顺利. 2004. 长江流域梅雨锋暴雨灾害研究 [M]. 北京: 气象出版社, 1–192. Tao Shiyan, Zhang Xiaoling, Zhang Shunli. 2004. A Study on the Disaster of Heavy Rainfalls over the Yangtze River Basin in the Meiyu Period [M] (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 1–192.
- 吴丽姬, 温之平, 贺海晏, 等. 2007. 华南前汛期区域持续性暴雨的分布特征及分型 [J]. 中山大学学报 (自然科学版), 46 (6): 108–114. Wu Liji, Wen Zhiping, He Haiyan, et al. 2007. The distribution features and patterns of regional durative rainstorm during pre-rainy season over South China [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni (in Chinese), 46 (6): 108–114.
- 谢炯光, 纪忠萍, 谷德军, 等. 2006. 广东省前汛期连续暴雨的气候背景及中期环流特征 [J]. 应用气象学报, 17 (3): 355–362. Xie Jiongguang, Ji Zhongping, Gu Dejun, et al. 2006. The climatic background and medium-range circulation features of continuous torrential rain from April to June in Guangdong [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 17 (3): 355–362.
- 许艳峰. 2008. 我国南部夏季持续性暴雨的时空变化及其对应的环流特征 [D]. 南京信息工程大学硕士学位论文, 8–46. Xu Yanfeng. 2008. The spatial-temporal variation of persistent heavy rainfall in south of China in summer and its corresponding general circulation feature [D]. M. S. thesis (in Chinese), Nanjing University of Science and Technology, 8–46.
- Yin Z Y, Cai Y L, Zhao X Y, et al. 2009. An analysis of the spatial pattern of summer persistent moderate-to-heavy rainfall regime in Guizhou Province of Southwest China and the control factors [J]. Theor. Appl. Climatol., 97 (3–4): 205–218.
- 张庆云, 王会军, 林朝晖, 等. 2004. 中国天气气候异常成因研究 [M]. 北京: 气象出版社, 166–170. Zhang Qingyun, Wang Huijun, Lin

- Zhaohui, et al. 2004. The Mechanism of Abnormal Weather and Climate in China [M] (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 166–170.
- 赵璐. 2007. 我国连续性暴雨过程的时空变化特征 [C]//中国气象学会 2007 年年会天气预报预警和影响评估技术分会场论文集, 2623–2632.
- Zhao Lu. 2007. The spatial-temporal variation and features of persistent heavy rainfall in China [C]//Proceedings of Weather Forecasting and Warning and Impact Assessment Techniques Breakout of Chinese Meteorological Society Annual Meeting 2007, 2623–2632.
- 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. Study on Mechanism of Formation and Development of Heavy Rainfalls on Meiyu Front in Yangtze River [M] (in Chinese). 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 pre-rainy season in South China [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 24 (4): 555–572.
- 宗海峰, 张庆云, 陈烈庭. 2006. 梅雨期中国东部降水的时空变化及其与大气环流、海温的关系 [J]. *大气科学*, 30 (6): 1189–1197. Zong Haifeng, Zhang Qingyun, Chen Lieting. 2006. Temporal and spatial variations of precipitation in Eastern China during the Meiyu period and their relationships with circulation and sea surface temperature [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 30 (6): 1189–1197.