

1981—2015 年中国 95°E 以东区域性暴雨过程时、空分布特征^{*}

牛若芸¹ 刘凑华¹ 刘为一² 赵晓琳¹

NIU Ruoyun¹ Liu Couhua¹ LIU Weiyl² ZHAO Xiaolin¹

1. 中国气象局国家气象中心, 北京, 100081

2. 中国气象局观测司, 北京, 100081

1. *National Meteorological Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China*

2. *Department of Integrated Observations, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China*

2017-04-25 收稿, 2017-09-18 改回.

牛若芸, 刘凑华, 刘为一, 赵晓琳. 2018. 1981—2015 年中国 95°E 以东区域性暴雨过程时、空分布特征. 气象学报, 76(2): 182-195

Niu Ruoyun, Liu Couhua, Liu Weiyl, Zhao Xiaolin. 2018. Characteristics of temporal and spatial distribution of regional rainstorm processes to the east of 95°E in China during 1981—2015. *Acta Meteorologica Sinica*, 76(2): 182-195

Abstract The events of the regional rainstorm processes (RRP) to the east of 95°E in China over 1981—2015 are constructed based on intensive daily observations of precipitation in China and NCEP/NCAR reanalysis data by means of subjective and objective analyses. Temporal and spatial characteristic distribution of RRP in China are further investigated using the methods of wavelet power spectrum, nine-point binomial smoothing and Ward cluster analysis. The main conclusions are as follows. (1) The annual average number of RRP to the east of 95°E in China is nearly 30. RRP in the Yangtze-Huaihe River valley occur most frequently among the six subareas with an annual average number of about 19, followed by that in South China and eastern part of Southwest China with annual average numbers of 10.5 and 5.8 times respectively. Annual average number of RRP is only about 1—3 in other subareas. (2) The inter-annual and inter-decadal variations of the annual number of RRP exhibit distinct fluctuation characteristics. The inter-annual and inter-decadal fluctuating variation in the Yangtze-Huaihe River valley is the most consistent with that to the east of 95°E in China. Moreover, the fluctuating variations have a significant positive correlation between South China and eastern part of Southwest China, and also between Northeast China and North China. The annual number of RRP over the east of 95°E in China and its subareas demonstrates a periodic variation of 2—4 a, and also a periodic variation of 6—10 a in the Yangtze-Huaihe River valley, South China and eastern part of Northwest China, while a 13—17 a oscillation can be found in North China. (3) On the whole, the occurrence frequency of RRP to the east of 95°E in China is the most in summer (especially in July), the least in winter, and higher in spring than in autumn. The months when RRP occur most frequently are June and July in the Yangtze-Huaihe River valley and eastern part of Southwest China, and May and June in South China. RRP mainly appear in July and August in other subareas. (4) The distribution pattern of RRP to the east of 95°E in China are divided into 7 types. The heavy precipitation areas for pattern I—IV migrate northward step by step from South China and southern part of Yangtze River valley to Huanghuai Basin and eastern part of Sichuan Basin. The heavy precipitation areas of pattern V—VII all are located at the coastal region of Southeast China, moreover precipitation of pattern V are concentrated from the eastern part of South China to Huaihe River, and precipitation of pattern VI are located from the northern part of Huanghuai Basin to central-southern part of Northeast China, precipitation of pattern VII are concentrated over the western part of Huanghuai Basin and central-southern part of North China.

^{*} 资助课题: 国家科技支撑计划课题(2015BAC03B02)。

作者简介: 牛若芸, 主要从事中期延伸期预报技术及灾害性天气形成机制研究。E-mail: niury@cma.gov.cn

Key words Regional rainstorm processes, Method for distinguishing, Temporal and spatial distribution, Patterns of extremely regional rainstorm processes

摘 要 基于 1981—2015 年中国逐日降水量加密观测资料和 NCEP/NCAR 再分析资料,采用主、客观相结合的方法,以天气过程为单元建立了中国 95°E 以东地区及其 6 个子区的区域性暴雨过程个例谱,进一步使用小波功率谱、9 点二项式平滑及离差平方和聚类等方法剖析了中国 95°E 以东区域性暴雨过程的时、空分布统计特征。结果表明:(1)中国 95°E 以东区域性暴雨过程平均年总次数接近 30 次;其中,江淮流域是出现区域性暴雨过程最多的子区,平均为 19 次/a;其次为华南和西南地区东部,平均为 10.5 和 5.8 次/a;东北地区、华北和西北地区东部平均仅为 1—3 次/a。(2)中国 95°E 以东及各子区区域性暴雨过程次数的年及年代际变化主要表现为波动特征,各子区中江淮流域与中国 95°E 以东地区的年及年代际波动变化最为一致;华南与西南地区、东北地区与华北的波动变化互为显著的正相关。中国 95°E 以东及各子区区域性暴雨过程年总次数都表现出 2—4 a 的周期变化,此外,江淮流域、华南和西南地区东部还表现出 6—10 a 的周期变化,华北表现出 13—17 a 的周期变化。(3)中国 95°E 以东区域性暴雨过程总体呈夏季最多、冬季最少、春季多于秋季的分布特征,其中以 7 月出现次数最多。各子区中,江淮流域和西南地区东部区域性暴雨过程以 6、7 月最多,华南以 5、6 月最多;东北地区、华北、西北地区东部集中出现在 7、8 月。(4)中国 95°E 以东地区的极端区域性暴雨过程可划分为 7 种分布类型。第 I—IV 型强降雨区从江南南部和华南呈阶梯状逐步北抬至黄淮和四川盆地东部一带,第 V—VII 型除在东南沿海均有强降雨区外,第 V 型在华南东部至江淮、第 VI 型在黄淮北部至东北地区中南部、第 VII 型在黄淮西部和华北中南部还分布有强降雨区。

关键词 区域性暴雨过程, 判别方法, 时、空分布特征, 极端区域性暴雨过程分型

中图法分类号 P458

1 引 言

暴雨可引发严重的洪涝、滑坡、泥石流等多种灾害,常常给社会经济发展和人们生命财产造成较大损失,为此关于暴雨的研究一直是中国气象科学研究的重要课题(陶诗言,1980;丁一汇,2015)。相对于局地暴雨,区域性暴雨过程所造成的自然灾害影响范围更大、损失也更重。据历史资料分析,中国中东部大部分地区都会遭遇区域性暴雨袭击并导致惨重灾害,例如,1954 和 1998 年夏季频发的区域性暴雨过程引发了最为严重的长江全流域性大洪水(郁淑华,2000;周自江等,2000);2010(王钦等,2012)和 2016 年长江流域又因区域性暴雨过程频发而出现了严重的洪涝灾害。再如,2012 年 7 月 21 日京津冀地区发生了历史罕见的区域性大暴雨过程,2016 年 7 月 18—20 日华北地区再次出现了区域性极端暴雨一大暴雨过程,两次过程均造成了严重的人员和经济损失。此外,由 1311 号台风“尤特”(程正泉等,2014)、1621 号台风“莎莉嘉”给华南地区带来的区域性强风暴雨致灾也相当严重。因此,对区域性暴雨过程的研究一直是气象防灾、减灾研究的热点和重点。纵观区域性暴雨过程的研究历程,许多学者都选定强度强、致灾严重的暴雨或大暴雨过程,开展天气学和动/热力诊断分析,探讨强降雨形成的有

利条件和机理,以进一步提高对区域性暴雨过程的认知能力和预报水平,如:孙力等(2015)探讨了 1215 号“布拉万”台风暴雨的形成演变及降水非对称性分布的物理机制;蒙伟光等(2014)研究了华南沿海 2011 年 7 月 15—18 日持续暴雨过程中季风槽与中尺度对流系统的相互作用;俞小鼎(2012)、孙继松等(2012)、赵洋洋等(2013)多角度详尽分析了“7·21”北京大暴雨过程成因及极端性特征;宗志平等(2013)、陈红专等(2013)各选取了四川盆地和湖南的两次暴雨过程,对比分析了暴雨过程期间的大尺度环流形势及中尺度对流系统演变特征。也有一些学者针对某种类型的暴雨序列开展相关研究工作。如袁慧敏等(2012)、邹燕等(2014)利用客观识别方法,先后构建了长江中下游地区和福建省的区域性暴雨过程序列以及综合强度评估模型;鲍名(2007)采用 1951—2005 年中国 730 站逐日降水资料及客观定义,初步统计了中国区域持续性暴雨事件,讨论了其大尺度环流背景;Chen 等(2013a,2013b)统计了区域性持续性极端降水事件,按照发生时间、区域、影响因子将其分成北方型、江淮-江南型、华南型及台风型,并将江淮-江南性持续性极端降水事件环流异常分为双阻型和单阻型。

总的来说,以往对中国区域性暴雨过程的研究大多集中在天气、气候机理以及预报方法方面,并取

得丰硕成果。但由于对观测资料应用的局限,已有的为数不多的中国区域性暴雨事件的普查分析,均没有充分考虑气象资料统计日界,如降水量的统计日界为20时(北京时,下同)对暴雨过程的切割效应,也没有结合暴雨过程天气系统的时、空演变历程,因而针对中国区域性暴雨的时、空分布讨论分析还不够详实。因此,本研究拟以天气过程为单元,采用长序列的加密观测的降水量资料 and 主、客观结合的方法,综合考虑降水量的统计日界,建立中国95°E以东地区及其各子区内的区域性暴雨过程个例谱,全面分析区域性暴雨过程的地域分布及月际、年际变化情况。以期对中国区域性暴雨过程时、空分布特征有更详尽、更全面的认识,也为今后开展区域性暴雨过程的分析研究、预报预测和防灾、减灾提供参考依据。

2 资料和方法

2.1 资料

(1) 中国2407个国家级气象站的降水量资料,全部来自中国气象局国家气象信息中心数据库,资料时段为1981—2015年(其中序列长度达到35 a的台站约占98%)。资料经过严格质量控制,并最大限度消除台站迁移的影响。为提高对暴雨过程分析判断的精准度,选用逐12 h累计降水量观测值作为数据元,先使用变分法(刘凑华等,2013)生成中国 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 的逐12 h累计降水量格点资料,再使用连续2个12 h累计降水量格点资料的累加生成中国逐日(即逐24 h)累计降水量格点资料。遵循气象观测规范将12 h时段的分割点设定为每天08和20时,每天得到08—(次日)08时和20—(次日)20时2个时次逐日累计降水量格点资料。这样在判识区域性暴雨过程时可实现以12 h为时间位移的滚动分析,不仅可以减小日界对暴雨过程判断的影响,而且可以有效解决天气分析和气候分析因常用日界的不同(前者多用08时,后者多用20时)而产生的认识分歧。

(2) 在主观分析引发区域性暴雨过程的天气系统演变历程时,使用美国国家环境预报中心/大气研究中心(NCEP/NCAR)的再分析资料。资料时段也为1981—2015年,每日2个时次(08和20时),水平分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$;使用变量包括位势高度场、风场、相对湿度和地面气压场等。

2.2 方法

2.2.1 中国95°E以东地区及其各子区区域性暴雨过程判识方法

鉴于中国暴雨主要出现在中东部地区(林建等,2014),加之西部地区气象站点相对稀疏和分布不均,因此,将研究区域限定在中国95°E以东的中部和东部地区。

首先,基于逐日累计降水量格点资料,逐时次客观识别出中国95°E以东日降水量场上出现成片暴雨或大雨的降水区。其中,成片暴雨区的判断标准为日累计降水量达到暴雨以上量级(≥ 50 mm)的格点数 ≥ 15 个,且相连成片;成片大雨区的判断标准为日累计降水量达到大雨以上量级(≥ 25 mm)的格点数 ≥ 15 个,且相连成片。此处“相连成片”是指该区域内的每一格点都至少有另外一个格点与之相连(含对角相连)。

继而以成片暴雨区的出现时间为基点,绘制前后邻近时段(各3—7 d)每日2个时次(08和20时)的不同层次位势高度、风场、相对湿度及地面气压场等天气分析图,图上叠加对应时刻的日累计降水量和成片暴雨(大雨)区;依据天气学原理,主观考察、分析此次暴雨过程及其影响系统的发生、发展、减弱、消亡的演变历程,以“同一次天气过程中,任一时次出现成片暴雨区即可记为一次区域性暴雨过程”为指标来判识区域性暴雨过程。在一次区域性暴雨过程中,以“首次出现成片大雨区的日累计降水量起始时刻”为该次过程的起始时刻,以“末次出现成片大雨区的日累计降水量终止时刻”为该次过程的终止时刻。由于中国95°E以东地域范围非常宽阔,在同一时次可能会出现由不同天气系统在不同地区引发的暴雨过程,凡此情况皆依据天气过程的异同对区域性暴雨过程进行分割。从而实现以天气过程为单元并采用主、客观相结合的方式逐一判识区域性暴雨过程的研究目标。下面选一实例来简要说明判识区域性暴雨过程的具体步骤及方法。由图1c可见,在2014年7月3日08时—4日08时的日累计降水量场上识别出贵州和湖南有成片暴雨区,此成片暴雨区主要是受四川东部500 hPa低槽和贵州—湖南北部850 hPa切变线的影响所致。进一步查阅邻近时段的天气分析图可知,该低槽于2日20时在四川西部形成(图1a),6日08时东移入海(图1h),

低层有低涡切变线发展东移。在此次天气过程中(2日20时—6日08时)有连续4个时段出现了成片暴雨区(图1c—f),符合区域性暴雨过程判识指标,可记为一次区域性暴雨过程。在此次区域性暴雨的发展过程中,2日20时—3日20时日累计降水量场上首次识别出成片大雨区(图1b),此次暴雨过程的起始时刻即记为2日20时;5日08时—6日08时日累计降水量场上最后一次识别出成片大雨区(图1g),此次暴雨过程的终止时刻记为6日08时。综

上所述,以天气过程为单元并通过主、客观相结合的方式判识出2014年7月2日20时—6日08时发生了一次区域性暴雨过程。

此外,还统计了每次区域性暴雨过程的过程累计降水量、过程最大日降水量、过程综合强度指数等过程属性量,具体统计方法如下:

- (1) 过程累计降水量:一次区域性暴雨过程起始至终止时刻期间的累计降水量。
- (2) 过程最大日降水量:一次区域性暴雨过程

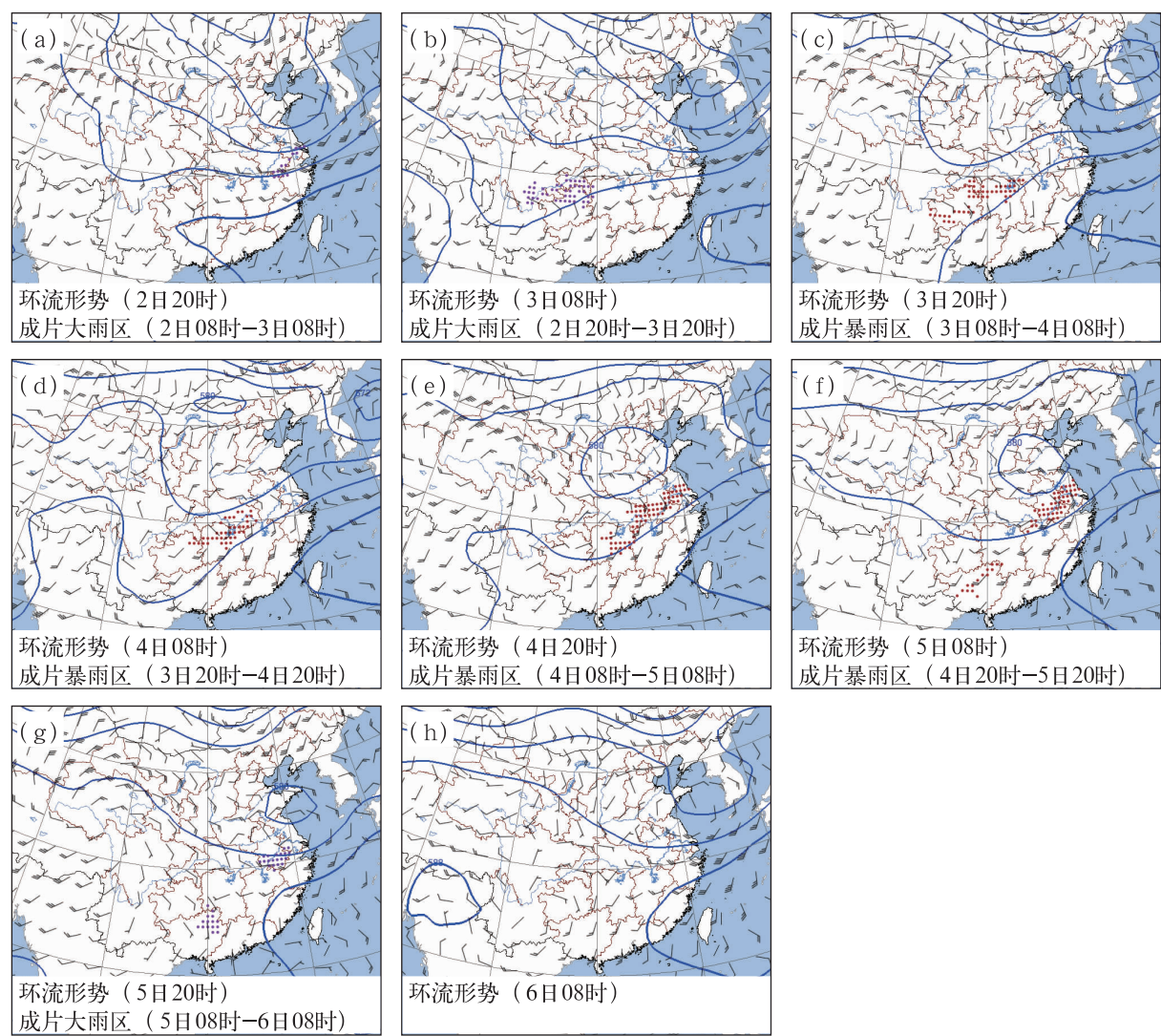


图1 2014年7月2日20时—6日08时区域性暴雨过程高低空环流形势(500 hPa位势高度(等值线, 单位:dagpm)和850 hPa风场(风矢))及成片暴雨区(褐色圆点)和成片大雨区(紫色圆点)

Fig.1 Upper and lower circulations (500 hPa geopotential heights (contours, unit: dagpm), 850 hPa wind field (barbed arrow)) corresponding to the regional rainstorm process during 20:00 BT 2 to 08:00 BT 6 July 2014, and contiguous areas of rainstorm (brown dots) and contiguous areas of heavy rain (purple dots)

起始至终止时刻期间的最大日降水量。

(3) 过程综合强度指数: 一次区域性暴雨过程中, 凡出现过程最大日降水量达到暴雨以上量级的格点, 即用其过程累计降水量超过 50 mm 以上部分的总和(I)来度量此次区域性暴雨过程的综合强度

$$I = \sum_{i=1}^m \delta_i \quad \delta_i = \begin{cases} 0 & 0 < d_i < 50 \text{ mm} \\ r_i - 50 & d_i \geq 50 \text{ mm} \end{cases} \quad (1)$$

式中, I 为过程综合强度指数, δ_i 为第 i 格点的强度指数, d_i 为第 i 格点的过程最大日降水量, r_i 为第 i 格点的过程累计降水量, m 为一次区域性暴雨过程中出现降水的格点总数。

采用上述方法判识出 1981—2015 年中国 95°E 以东地区共出现区域性暴雨过程 1049 次, 以此构成了中国 95°E 以东地区的区域性暴雨过程个例谱。进一步在综合考虑各地自然地理和行政区划以及天气、气候特征基础上, 将中国 95°E 以东地区划分为 6 个子区(图 2)。基于中国 95°E 以东区域性暴雨过程历史个例谱, 以“一次区域性暴雨过程中的任一时次在某子区范围内出现成片暴雨区即可记为该子区的一次区域性暴雨过程”为指标分别建立各子区的

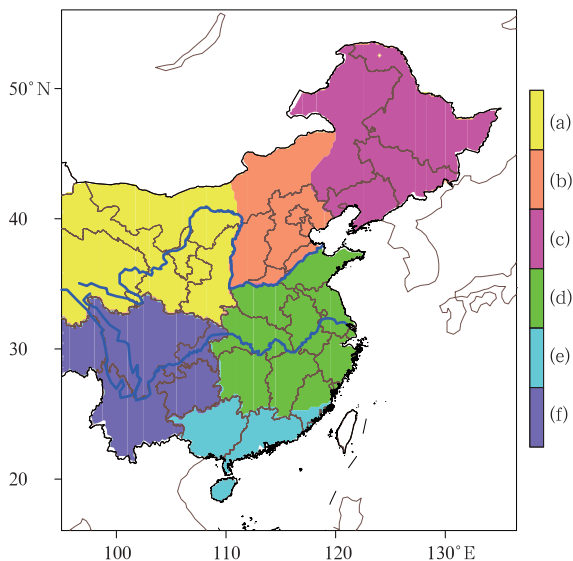


图 2 中国 95°E 以东地区的子区示意

(a. 西北地区东部, b. 华北, c. 东北地区, d. 江淮流域, e. 华南, f. 西南地区东部)

Fig. 2 Schematic diagram showing subareas over the area to the east of 95°E in China

(a. eastern part of Northwest China, b. North China, c. Northeast China, d. the Yangtze-Huaihe River valley, e. South China, f. eastern part of Southwest China)

区域性暴雨过程历史个例谱。其中江淮流域是出现区域性暴雨过程最多的子区, 650 次; 华南次之, 363 次; 西南地区东部和东北地区分别为 198 和 116 次, 华北和西北地区东部出现次数最少, 分别为 72 和 46 次。

2.2.2 中国 95°E 以东地区极端区域性暴雨过程认定标准

采用国际上定义极端事件最常用的百分位法(Folland, et al, 2002; 景丞等, 2016), 将中国 95°E 以东区域性暴雨过程个例谱过程综合强度指数(I)按升序排列, 以第 95 个百分位的指数值作为极端过程阈值, 认定综合强度指数超过极端阈值的过程为极端区域性暴雨过程, 据此建立了中国 95°E 以东极端区域性暴雨过程个例谱, 共包含 53 次极端暴雨过程。

2.2.3 其他统计方法

采用 Mann-Kendall 非参数统计检验方法分析 1981—2015 年区域性暴雨过程次数的年际(线性)变化趋势, 当倾斜度大于 0 时呈上升趋势, 反之则呈下降趋势(Yue, et al, 2002; Niu, et al, 2012)。采用 9 点二项式平滑对 1981—2015 年区域性暴雨过程次数进行滤波, 揭示其位相变化。采用 Morlet 小波功率谱(Torrence, et al, 1998)揭示其不同尺度周期变化特征。采用 Ward(离差平方和)聚类分析方法分析极端区域性暴雨过程强降雨分布的主要类型。

3 中国 95°E 以东地区及其各子区区域性暴雨过程

3.1 年际和年代际分布特征

1981—2015 年逐年区域性暴雨过程累计次数统计结果(图 3)显示, 中国 95°E 以东区域性暴雨过程次数(图 3a)多为 25—35 次/a, 平均年总次数接近 30 次, 其中以 1983 年出现的区域性暴雨过程次数最多(41 次), 其次为 2015 年(38 次)和 1998 年(36 次), 这很可能与 3 次超强厄尔尼诺事件(任宏利等, 2017)有关; 1982 和 1993 年出现次数最少(21 次)。由 Mann-Kendall 斜率估计量得出的中国 95°E 以东区域性暴雨过程次数平均变化幅度仅为 0.53 次/(10 a), 且没能通过 $\alpha = 0.05$ 的显著性水平 t 检验(表 1), 说明中国 95°E 以东地区年区域性暴雨过程次数线性增加趋势并不明显, 其年及年代际

变化主要表现为波动特征。经 9 点二项式平滑滤波后的变化曲线可见,中国 95°E 以东区域性暴雨过程年总次数在 20 世纪 80 年代前期、90 年代后期以及 2008—2015 年偏多,20 世纪 80 年代后期至 90 年代前期以及 2001—2007 年偏少。为进一步揭示区域性暴雨过程年及年代际变化特征,图 4 给出了区域性暴雨过程年总次数的小波功率谱。由图 4a 可知,中国 95°E 以东区域性暴雨过程年总次数在 20 世纪 80 年代前中期、2014 年前后主要表现为 2—3 a 的周期变化;20 世纪 90 年代中期则主要为 4—5 a 的周期变化。

6 个子区的区域性暴雨过程次数增多或减少的趋势均不显著(西南地区东部除外)。江淮流域是出现区域性暴雨过程次数最多的子区(图 3b),多为 15—23 次/a,平均为 19 次/a,其中 1996、1998、2015

年高达 26 次,并居 35 年之首;相应地江淮流域区域性暴雨过程次数的年及年代际波动变化与中国 95°E 以东全局关联也最为紧密,两者相关系数达到 0.71,通过了 $\alpha=0.01$ 的显著性水平 t 检验(表 2)。年际变化曲线显示,在 20 世纪 80 年代末至 90 年代初、90 年代后期以及 2005—2010 年区域性暴雨过程次数偏多,其余年代偏少;区域性暴雨过程年总计次数在 20 世纪 80 年代后期至 21 世纪初主要表现为 6—10 a 的周期变化(图 4b),其中 20 世纪 90 年代后期还叠加了 3—4 a 的周期变化。华南和西南地区东部区域性暴雨过程次数少于江淮流域(图 3d、f),年平均分别为 10.5 和 5.8 次,这两个子区的区域性暴雨过程次数年际变化呈显著正相关(相关系数为 0.34),年代际波动也多保持一致,如在 20 世纪 80 年代前期和 2006 年以后偏多、20 世纪 80

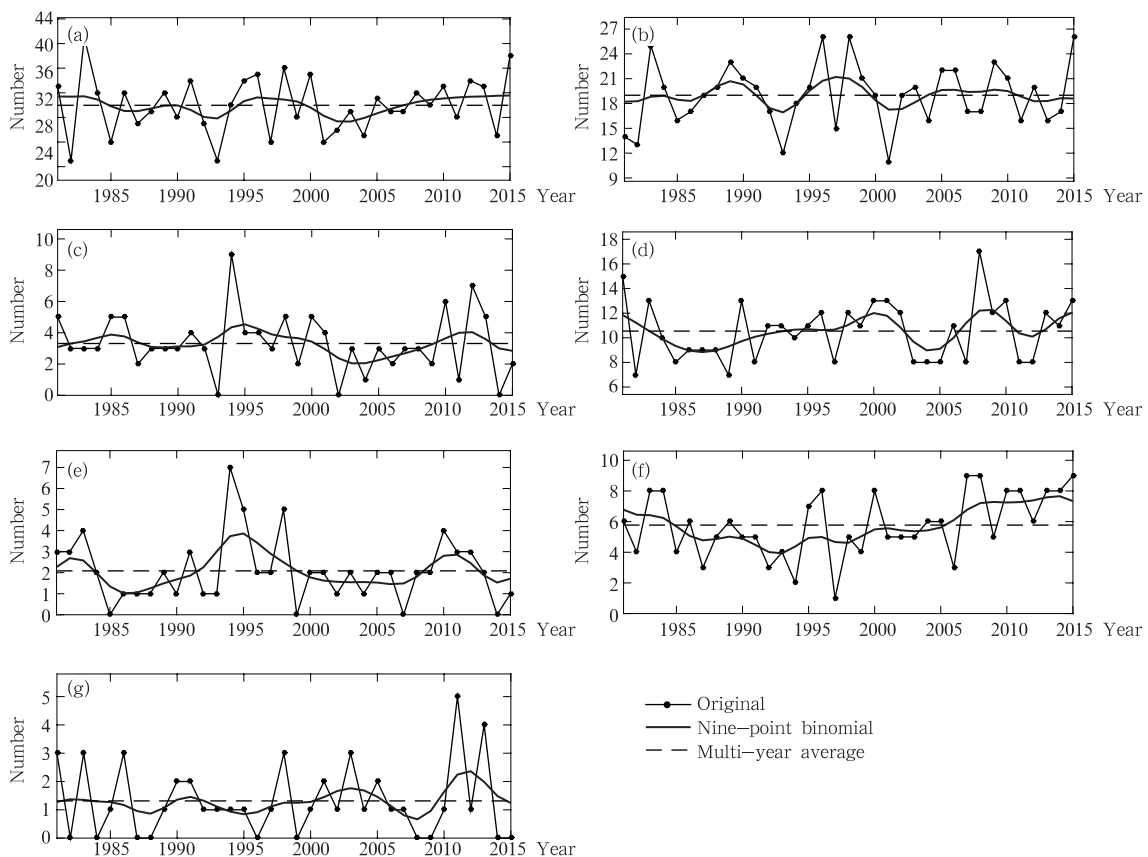


图 3 1981—2015 年区域性暴雨过程年总次数及其 9 点二项式平滑和多年平均值
(a. 中国 95°E 以东地区, b. 江淮流域, c. 东北地区, d. 华南, e. 华北, f. 西南地区东部, g. 西北地区东部)

Fig. 3 Time series of annual numbers of regional rainstorm processes from 1981 to 2015, and results of nine-point binomial smoothing and multi-year average

(a. area to the east of 95°E in China, b. the Yangtze-Huaihe River valley, c. Northeast China, d. South China, e. North China, f. eastern part of Southwest China, g. eastern part of Northwest China)

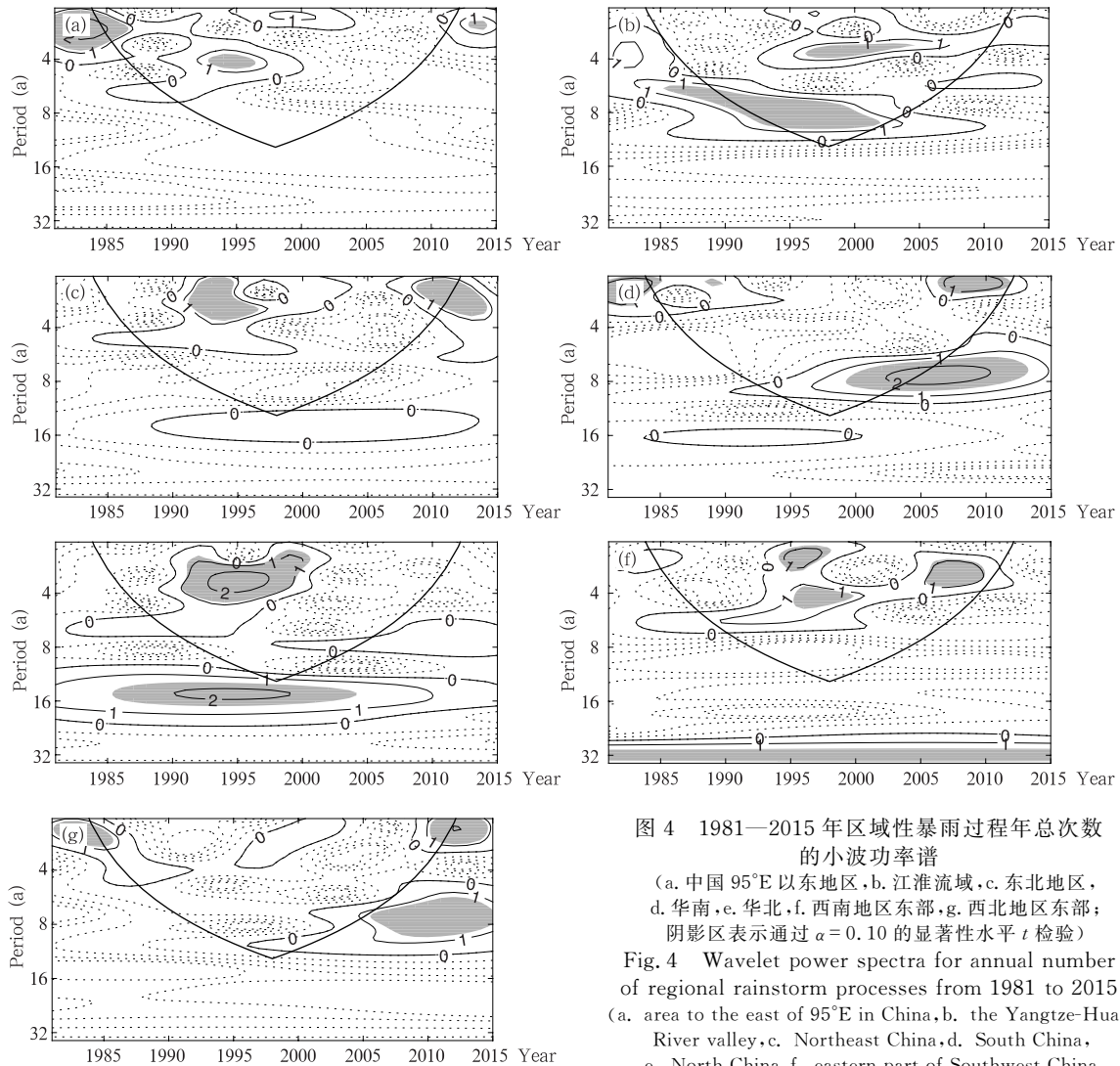


图 4 1981—2015 年区域性暴雨过程年总次数的小波功率谱

(a. 中国 95°E 以东地区, b. 江淮流域, c. 东北地区, d. 华南, e. 华北, f. 西南地区东部, g. 西北地区东部; 阴影区表示通过 $\alpha = 0.10$ 的显著性水平 t 检验)

Fig. 4 Wavelet power spectra for annual number of regional rainstorm processes from 1981 to 2015 (a. area to the east of 95°E in China, b. the Yangtze-Huaihe River valley, c. Northeast China, d. South China, e. North China, f. eastern part of Southwest China, g. eastern part of Northwest China; Shading represents the 0.10 significance level)

表 1 基于非参数 Mann-Kendall 方法斜率估计量的 1981—2015 年区域性暴雨过程年总次数线性趋势(单位: $(10\text{ a})^{-1}$)

Table 1 Linear trends of annual numbers of regional rainstorm processes from 1981 to 2015 based on the slope estimator of non-parametric Mann-Kendall (unit: $(10\text{ a})^{-1}$)

中国 95°E 以东	江淮流域	华南	西南地区东部	东北地区	华北	西北地区东部
0.53	0.38	0.00	0.71*	0.00	0.00	0.00

注: * 表示通过了 0.05 的显著性水平检验。

年代后期至 90 年代初以及 2004 年前后偏少;区域性暴雨过程年总次数也都表现出 2—4 a 的周期变化(图 4d、f),显著时段也有部分重叠,华南(西南地区东部)2—4 a 的周期变化主要表现在 20 世纪 80 年代前期和 2005—2010 年(20 世纪 90 年代后期和 2005—2012 年),华南在 2000 年以后还表现出 6—

9 a 的周期变化。东北地区和华北出现区域性暴雨过程的次数明显低于上面的 3 个子区(图 3c、e),年平均为 3.3 和 2.1 次,但这两个子区区域性暴雨过程次数的年际变化趋势高度一致,相关系数高达 0.61,通过了 $\alpha = 0.01$ 的显著性水平 t 检验;两个子区区域性暴雨过程次数的年代际波动也多保持一

表 2 1981—2015 年中国 95°E 以东地区及其各子区的区域性暴雨过程年总次数相关系数
Table 2 Correlation coefficients of annual numbers of regional rainstorm processes
between the area to the east of 95°E in China and its subareas during 1981–2015

	江淮流域	华南	西南地区东部	东北地区	华北	西北地区东部
中国 95°E 以东地区	0.71 [#]	0.34 [*]	0.55 [#]	0.41 [*]	0.42 [#]	0.22
江淮流域	/	0.12	0.25	0.06	0.19	−0.13
华南	/	/	0.34 [*]	0.04	0.11	−0.03
西南地区东部	/	/	/	−0.06	−0.06	0.12
东北地区	/	/	/	/	0.61 [#]	0.17
华北	/	/	/	/	/	0.29

注: # 和 * 分别表示通过了 0.01 和 0.05 的显著性水平检验。

致,如在 20 世纪 90 年代中后期和 2010—2013 年偏多、在 20 世纪 80 年代末期至 90 年代初期以及 2000—2009 年偏少;两个子区年区域性暴雨过程次数在 20 世纪 90 年代均主要表现有 2—4 a 的周期变化(图 4c、e),华北在 20 世纪 80 年代后期至 2005 年还表现出 13—17 a 的周期变化,东北地区小波功率谱在 13—17 a 周期尺度上也表现出相对大值区,但没能通过 0.10 的显著性水检验。西北地区东部区域性暴雨过程次数最少(图 3g),年平均值仅有 1.3 次,在 20 世纪 80 年代前期和 2010—2015 年主要表现为 2—3 a 的周期变化(图 4g),在 2005—2015 年还存在 6—9 a 的周期变化。

综上所述,中国 95°E 以东地区和各子区区域性暴雨过程次数的年际及年代际变化主要表现为波动性特征。各子区中,江淮流域与中国 95°E 以东区域性暴雨过程次数的年际及年代际波动变化最为一致;各子区之间,华南与西南地区、东北地区与华北区域性暴雨过程次数的波动变化具有较高的一致性。中国 95°E 以东及各子区区域性暴雨过程次数除有 2—4 a 的短周期变化外,还表现出不同尺度的长周期变化,特别是在中国 95°E 以东地区及华南和东北地区两个子区还叠加有 15 a 左右的周期变化,虽然可能由于资料长度局限没有通过 $\alpha=0.10$ 的显著性水平 t 检验,但是非常值得关注和深入探讨。

为更细致地了解中国 95°E 以东各地的区域性暴雨过程分布特征,将 1049 次区域性暴雨过程的降水在 $0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$ 网格上再做如下赋值处理:一次区域性暴雨过程内,某网格点的最大日降水量达到暴雨以上量级(≥ 50 mm),则该格点赋值为 1,亦即认定该格点出现了 1 次区域性暴雨过程。根据此赋值,可以统计得出 1981—2015 年中国 95°E 以东各地的区域性暴雨过程的平均年总次数、最多年总次

数的空间分布(图 5)。可以看出,中国 95°E 以东区域性暴雨过程主要出现在 105°E 以东,以及云南和西藏东南部。区域性暴雨过程次数最多的区域位于江淮之间、江南和华南,平均年总次数为 2.5—4.5 次,最多年总次数为 7—10 次,其中,江西东北部、广东中部和沿海的部分地区平均(最多)年总次数多达 5—6 次(11—14 次);其次为黄淮、汉水流域、四川盆地以及贵州、云南东部和辽宁,平均(最多)年总次数为 1—3 次(4—7 次);华北、东北地区中北部以及陕西中北部、宁夏大部分地区、甘肃东部和云南中西部出现区域性暴雨过程次数较少,平均年总次数一般不足 1 次,最多年总次数为 1—3 次。进一步考察发现,中国 95°E 以东暴雨以成片、群发的方式出现的概率还是比较高的,实际上 105°E 以东大部分地区半数以上的暴雨都发生在区域性暴雨过程期间(图 6),尤其是黄淮西南部、江淮中西部和江南北部区域性暴雨过程期间发生的暴雨与总暴雨频次的比率甚至超过了 70%,自然也成为了每年开展防汛工作的重点区域。

3.2 季节和月际分布特征

统计结果显示,中国 95°E 以东一年四季都会有区域性暴雨过程发生,总体呈夏季最多、冬季最少、春季多于秋季的分布特征(图 7a)。7 月是中国中东部最易出现区域性暴雨过程的月份,大多为 5—10 次/月,最多可达 12 次(1991 和 2013 年),平均为 7.2 次/月;6 月和 8 月次之,多为 4—8 和 3—7 次/月,平均为 5.9 和 4.7 次/月;5 月、9 月和 4 月出现的区域性暴雨过程次数依次递减,月平均次数分别为 3.8、2.7 和 2.2 次;3 月、10 月和 11 月出现的区域性暴雨过程更少,平均约为 1 次/月,月累计次数基本不超过 3 次,35 a 中还有 30%—40% 的年份没有出现区域性暴雨过程;1 月、2 月和 12 月就只有 20%

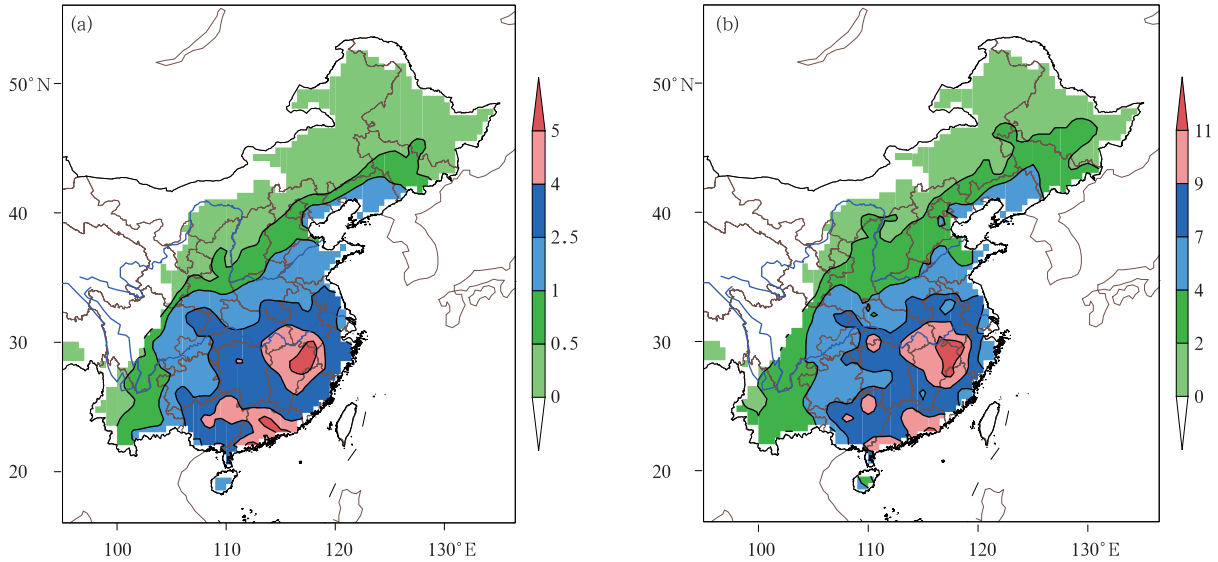


图5 1981—2015年中国95°E以东区域性暴雨过程的平均年总次数(a)和最多年总次数(b)的空间分布

Fig. 5 Distributions of annual average number and maximum number of regional rainstorm processes over the area to the east of 95°E in China during 1981–2015

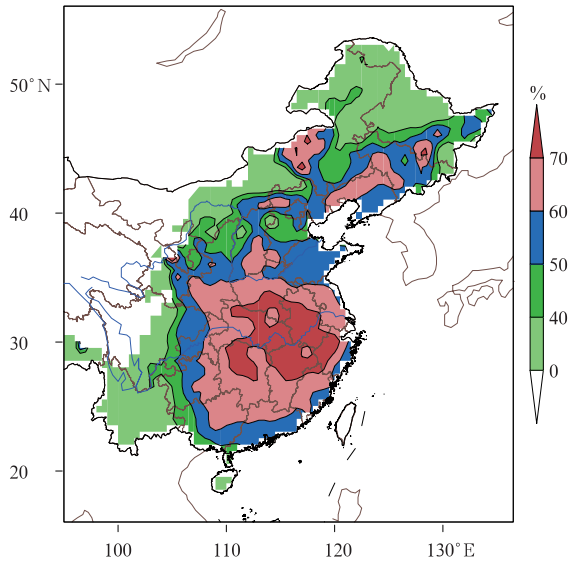


图6 1981—2015年中国95°E以东区域性暴雨过程期间发生的暴雨频次与总暴雨频次的比率

Fig. 6 Ratio of the occurrence frequency of rainstorms to the east of 95°E in China to that over the entire China during 1981–2015

—30%的年份出现过1—2次/月区域性暴雨过程。江淮流域和华南是一年四季均会有区域性暴雨

过程发生的两个子区,但过程次数的峰值分布存在差异。江淮流域以6、7月出现的区域性暴雨过程最多(图7b),大多为2—7次/月,最多出现过8次,月平均次数分别为4.7和4.0次;其次为5和8月,平均为2.7和2.2次/月;出现最少的月份为1—2月和12月,只有少数年份(5%—23%)出现过1—2次/月区域性暴雨过程。华南则以5、6月出现的区域性暴雨过程最多,多为1—4次/月,月平均为2.2次左右;其次为7月,平均为1.7次/月;出现次数最少的月份为1—2月和10—12月,只有10%—30%的年份出现过1—2次/月区域性暴雨过程。

西南地区东部区域性暴雨过程基本分布在5—12月(图7f),其中以6、7月居多,多为1—3次/月,个别月份可出现4—6次;5和8—10月大多仅为1次/月;11、12月则只会有少数年份(5%—15%)出现1次/月区域性暴雨过程。

东北地区、华北、西北地区东部的区域性暴雨过程分布(图7c、e、g)在4—10月,主要集中在7、8月,多为1—3次/月,但即使在出现次数最多的7、8月,东北地区和华北(西北地区东部)也有20%—40%(65%—70%)的年份没有出现区域性暴雨过程;4—6月和9—10月则只有少数年份(<18%)出现过1次/月区域性暴雨过程。

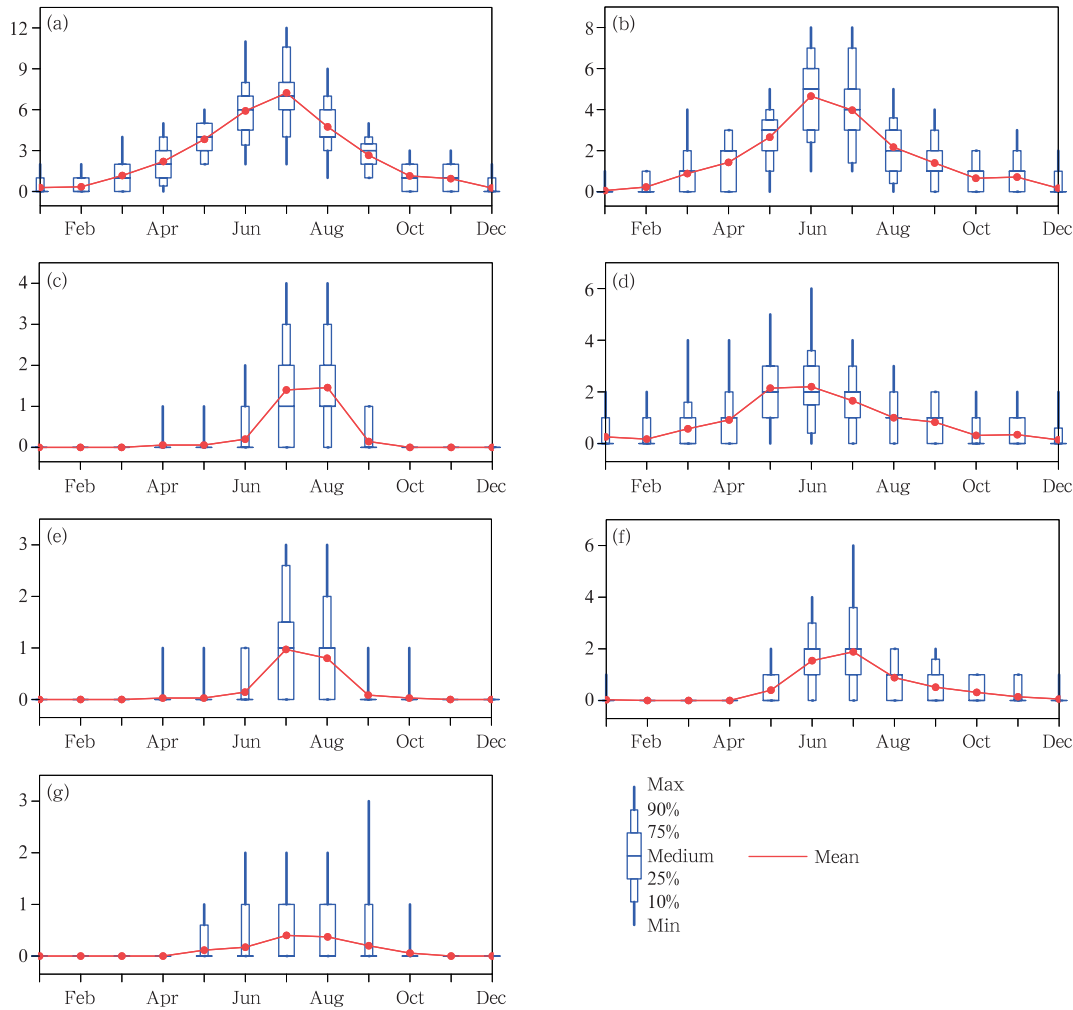


图 7 1981—2015 年区域性暴雨过程月累计次数盒须图

(a. 中国 95°E 以东地区, b. 江淮流域, c. 东北地区, d. 华南, e. 华北, f. 西南地区东部, g. 西北地区东部)

Fig. 7 Box-and-whisker plots of monthly numbers of regional rainstorm processes averaged over 1981–2015

(a. area to the east of 95°E in China, b. the Yangtze-Huaihe River valley, c. Northeast China, d. South China, e. North China, f. eastern part of Southwest China, g. eastern part of Northwest China)

4 中国 95°E 以东极端区域性暴雨过程

1981—2015 年中国 95°E 以东地区共出现极端区域性暴雨过程 53 次(表 3),其中,20 世纪 80 年代 11 次、90 年代 19 次,2000—2015 年 23 次。极端区域性暴雨过程绝大多数都出现在夏季,其中 6 月出现的极端区域性暴雨过程最多,共 25 次,占总数的 47%;7 和 8 月依次出现 14 和 11 次,占总数的 26% 和 20%。仅有 3 次极端区域性暴雨过程分别出现在 9、10、12 月。

还基于 53 次极端区域性暴雨过程累计降水量 ≥ 50 mm 的格点分布情况和 Ward 聚类方法将中国 95°E 以东极端区域性暴雨过程划分为 7 种类型(图 8)。第 I 型强降雨区位于江南南部和华南,共有 18 次,其中有 11 次(61%)是受低槽、切变线和低涡影响造成的,其余 7 次(39%)主要是受西行台风及其减弱后的低压和外围云系影响所致。第 II 型强降雨区位于江南中北部和华南西部,17 次过程中有 14 次(82%)是受低槽、切变线和低涡的影响,另外 3 次(18%)与西行台风的的活动密切相关。第 III 型强降雨

表3 1981—2015年中国95°E以东极端区域性暴雨过程及相关统计结果
 Table 3 Statistics of extremely regional rainstorm processes over the area east
 of 95°E in China during 1981 to 2015

序号	过程起止时间 (yyyy. mm. dd. hh)	分型	主要影 响系统	综合强度指数	综合强度指数 百分位(%)
1	2006. 07. 13. 20—2006. 07. 19. 08	I	C	31246	99.7
2	2002. 06. 12. 08—2002. 06. 17. 20	I	A	26137	99.3
3	1985. 08. 22. 20—1985. 08. 29. 20	I	C	25847	99.2
4	2001. 08. 28. 08—2001. 09. 05. 20	I	C	25116	99.1
5	2013. 08. 13. 20—2013. 08. 19. 20	I	C	23826	98.9
6	2008. 06. 10. 20—2008. 06. 14. 20	I	A	21830	98.6
7	1981. 07. 19. 20—1981. 07. 25. 20	I	C	20397	98.1
8	1994. 06. 15. 08—1994. 06. 18. 20	I	A	19476	98.0
9	2012. 06. 20. 20—2012. 06. 25. 08	I	A	19213	97.8
10	2005. 06. 20. 08—2005. 06. 23. 20	I	A	18322	97.5
11	1982. 08. 15. 08—1982. 08. 20. 20	I	C	16949	96.9
12	2005. 06. 16. 20—2005. 06. 20. 20	I	A	16819	96.7
13	2013. 12. 13. 08—2013. 12. 17. 20	I	B	16530	96.5
14	1992. 07. 04. 20—1992. 07. 08. 20	I	A	16205	96.3
15	2006. 06. 05. 08—2006. 06. 10. 08	I	A	15938	96.0
16	2000. 06. 09. 08—2000. 06. 13. 08	I	A	15844	95.9
17	1987. 07. 27. 20—1987. 08. 01. 08	I	A	15624	95.5
18	2002. 08. 04. 08—2002. 08. 08. 20	I	C	15038	95.0
19	1998. 06. 22. 08—1998. 06. 26. 20	II	A	32267	99.8
20	1998. 07. 20. 08—1998. 07. 25. 08	II	A	26796	99.4
21	2003. 06. 24. 08—2003. 06. 29. 08	II	A	24004	99.0
22	1994. 06. 11. 08—1994. 06. 15. 20	II	A	23627	98.8
23	2007. 08. 18. 08—2007. 08. 25. 08	II	C	23063	98.7
24	2014. 06. 19. 08—2014. 06. 24. 08	II	A	19150	97.7
25	1990. 06. 28. 08—1990. 07. 03. 08	II	A	17542	97.4
26	1999. 06. 28. 08—1999. 07. 02. 08	II	A	17356	97.3
27	2008. 06. 07. 20—2008. 06. 11. 20	II	A	17177	97.1
28	1981. 06. 26. 08—1981. 06. 29. 20	II	A	17057	97.0
29	1995. 06. 23. 20—1995. 06. 29. 08	II	A	16921	96.8
30	2008. 06. 14. 08—2008. 06. 19. 08	II	A	16211	96.4
31	1986. 07. 01. 20—1986. 07. 06. 20	II	A	15769	95.7
32	1999. 06. 21. 08—1999. 06. 25. 20	II	A	15652	95.6
33	2013. 08. 21. 08—2013. 08. 26. 08	II	C	15623	95.4
34	2011. 09. 28. 20—2011. 10. 03. 08	II	C	15180	95.2
35	2010. 06. 18. 20—2010. 06. 22. 08	II	A	15136	95.1
36	1996. 06. 30. 20—1996. 07. 05. 08	III	A	20426	98.2
37	1983. 10. 03. 08—1983. 10. 07. 20	III	A	18516	97.6
38	1999. 06. 25. 08—1999. 06. 28. 20	III	A	16685	96.6
39	1991. 07. 02. 08—1991. 07. 05. 20	III	A	15839	95.8
40	1991. 06. 28. 20—1991. 07. 02. 20	III	A	15618	95.3
41	2004. 07. 15. 08—2004. 07. 22. 08	IV	A	33198	99.9
42	1983. 07. 28. 08—1983. 08. 02. 08	IV	A	16960	96.9
43	2008. 07. 20. 08—2008. 07. 24. 08	IV	A	16116	96.2
44	2000. 06. 23. 08—2000. 06. 27. 20	IV	A	15973	96.1
45	1994. 06. 07. 20—1994. 06. 11. 20	V	C	21089	98.5
46	1984. 08. 30. 08—1984. 09. 03. 20	V	C	20597	98.3
47	1990. 07. 29. 20—1990. 08. 05. 08	V	C	19322	97.9
48	1996. 07. 31. 08—1996. 08. 07. 20	VI	C	36317	100.0

注:A表示主要影响系统为低槽、切变线和低涡;B为低槽和切变线;C为台风及其减弱后的低压和外围云系及与之产生相互作用的天气系统。

续表 3

序号	过程起止时间	分型	主要影响系统	综合强度指数	综合强度指数百分位(%)
49	1994. 08. 03. 20—1994. 08. 08. 20	Ⅵ	C	29526	99.6
50	1994. 07. 10. 08—1994. 07. 14. 20	Ⅵ	C	27338	99.5
51	1997. 08. 17. 20—1997. 08. 22. 20	Ⅵ	C	20793	98.4
52	1984. 08. 07. 08—1984. 08. 11. 20	Ⅵ	C	17214	97.2
53	1982. 07. 28. 20—1982. 08. 03. 20	Ⅶ	C	24770	99.0

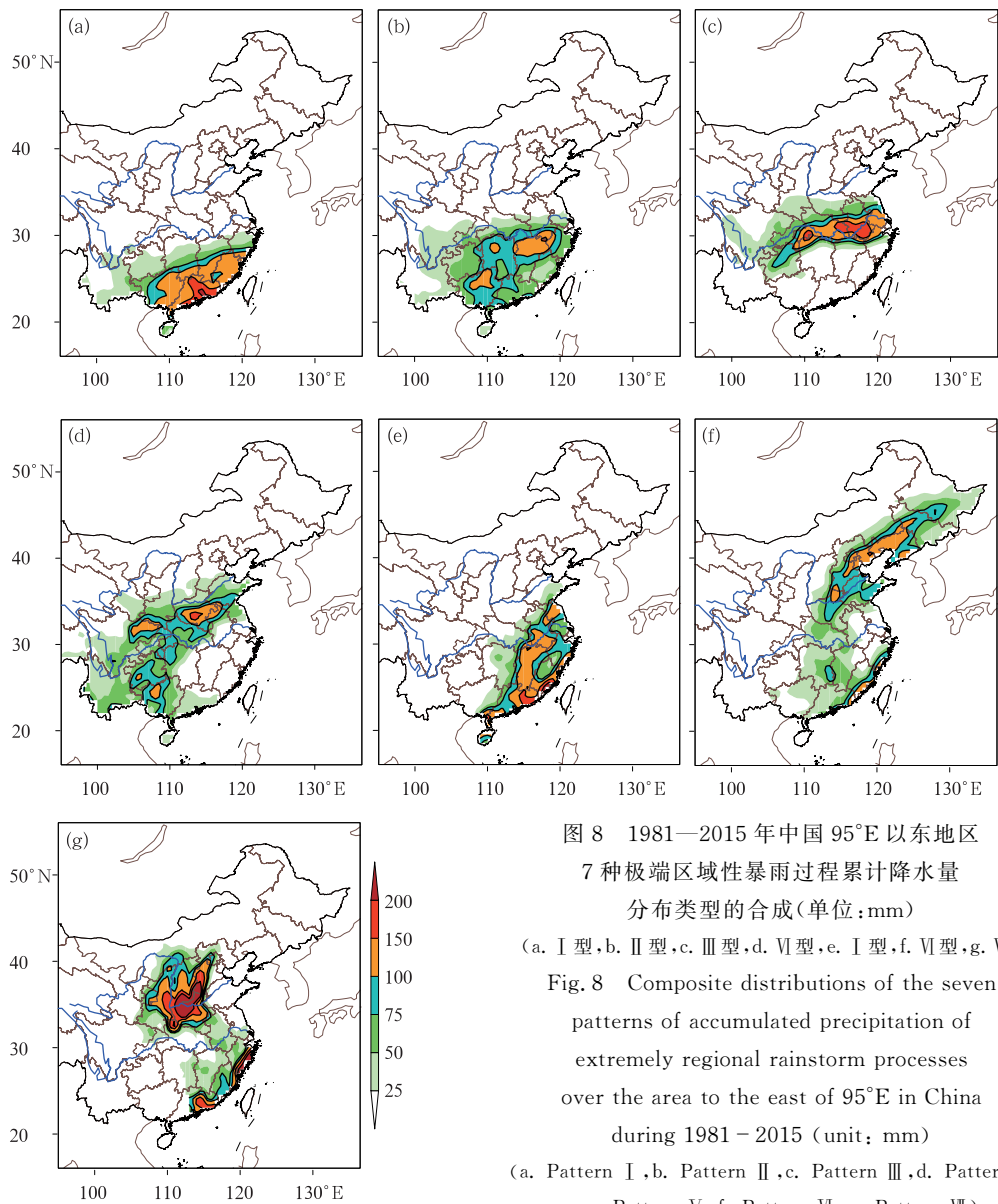


图 8 1981—2015 年中国 95°E 以东地区
7 种极端区域性暴雨过程累计降水量
分布类型的合成(单位:mm)

(a. I 型,b. II 型,c. III 型,d. IV 型,e. V 型,f. VI 型,g. VII 型)

Fig. 8 Composite distributions of the seven
patterns of accumulated precipitation of
extremely regional rainstorm processes
over the area to the east of 95°E in China
during 1981–2015 (unit: mm)
(a. Pattern I ,b. Pattern II ,c. Pattern III ,d. Pattern IV ,
e. Pattern V ,f. Pattern VI ,g. Pattern VII)

区主要位于长江中下游沿江附近地区,第Ⅳ型位于黄淮、汉水中上游、四川盆地东部、华南西部及贵州等地,这 2 种类型的主要影响系统全部为低槽、切变线和低涡。第Ⅴ型强降雨区位于东南沿海、华南东

部、江南中部及江淮;第Ⅵ型强降雨区位于东南沿海、黄淮北部、华北东部、东北地区中南部;Ⅶ型强降雨区位于东南沿海、黄淮西部、华北中南部及陕西中北部。Ⅴ、Ⅵ和Ⅶ型在东南沿海都分布有强降雨区,

是因这3种类型的极端区域性暴雨过程初期都均是受登陆广东、福建或浙江的台风影响,后因台风北上或转向路径的不同,以及台风或其减弱后的低压及外围云系与周围的天气系统产生相互作用地理位置的差异,造成了后期强降雨落区的明显不同。

5 结 论

(1) 1981—2015年,中国95°E以东区域性暴雨过程次数多为25—35次/a,平均年总次数接近30次,其中以1983年出现次数最多(41次),其次为2015(38次)和1998年(36次)。江淮流域是出现区域性暴雨过程最多的子区,平均为19次/a,最多为26次;华南和西南地区东部次之,东北地区、华北和西北地区东部相对较少。

(2) 中国95°E以东地区及各子区区域性暴雨过程年总次数的年际及年代际变化主要表现为波动特征。各子区中,江淮流域与中国95°E以东(全局)区域性暴雨过程次数的年及年代际波动变化最为一致,相关系数高达0.71(通过 $\alpha=0.01$ 的显著性水平 t 检验),华南与西南地区、东北地区与华北的波动变化互为显著的正相关关系;中国95°E以东及各子区区域性暴雨过程年总次数序列除表现有2—4a的短周期变化外,还表现出不同时间尺度的长周期变化,如江淮流域、华南和西南地区东部还表现出6—10a的周期变化,华北表现出13—17a的周期变化。

(3) 中国中东部区域性暴雨过程总体呈夏季最多、冬季最少、春季多于秋季的分布特征;各月份中,以7月出现次数最多,其次为6和8月,而1、2和12月就只有20%—30%的年份出现过1—2次/月区域性暴雨过程。江淮流域和华南是一年四季都会有区域性暴雨过程发生的两个子区,但过程次数峰值分布存在差异,江淮流域以6、7月出现的区域性暴雨过程最多,华南则以5、6月最多;西南地区东部也以6、7月居多;东北地区、华北、西北地区东部主要集中在7、8月。

(4) 中国95°E以东极端区域性暴雨过程可划分为7种分布类型。第Ⅰ型强降雨区位于江南南部和华南,其中有61%的过程是受低槽、切变线和低涡影响所致,39%的过程是受西行台风及其减弱后的低压及外围云系的影响。第Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ型的强降雨区呈阶梯状逐步北抬,依次位于江南中北部和华南

西部、长江中下游沿江附近地区、黄淮至四川盆地东部等地,绝大多数过程是受低槽、切变线和低涡影响所致。第Ⅴ、Ⅵ和Ⅶ型由于过程初期都受到了登陆台风影响,在东南沿海都分布有强降雨区,后因台风路径以及与周围的天气系统产生相互作用的地理位置差异,第Ⅴ型强降雨区还分布在华南东部至江淮,第Ⅵ型强降雨区还分布在黄淮北部至东北地区中南部,第Ⅶ型则位于黄淮西部、华北中南部及陕西中北部。

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)
- 陈红专, 叶成志, 唐明晖. 2013. 2011年6月湖南两次暴雨过程的中尺度特征对比分析. 气象, 39(12): 1580-1590. Chen H Z, Ye C Z, Kang M H. 2013. Comparative analysis on mesoscale characteristics of two rainstorm processes in Hunan province in June 2011. Meteor Mon, 39(12): 1580-1590 (in Chinese)
- 程正泉, 林良勋, 沙天阳等. 2014. “尤特”特大暴雨过程的热力条件分析. 气象, 40(12): 1507-1512. Cheng Z Q, Lin L X, Sha T Y, et al. 2014. Analysis of atmosphere stratification in extremely heavy rainfall event associated with severe typhoon Utor. Meteor Mon, 40(12): 1507-1512 (in Chinese)
- 丁一汇. 2015. 论河南“75.8”特大暴雨的研究: 回顾与评述. 气象学报, 73(3): 411-424. Ding Y H. 2015. On the study of the unprecedented heavy rainfall in Henan Province during 4-8 August 1975: Review and assessment. Acta Meteor Sinica, 73(3): 411-424 (in Chinese)
- 景丞, 姜彤, 王艳君等. 2016. 中国区域性极端降水事件及人口经济暴露度研究. 气象学报, 74(4): 572-582. Jing C, Jiang T, Wang Y J, et al. 2016. A study on regional extreme precipitation events and the exposure of population and economy in China. Acta Meteor Sinica, 74(4): 572-582 (in Chinese)
- 林建, 杨贵名. 2014. 近30年中国暴雨时空特征分析. 气象, 40(7): 816-826. Lin J, Yang G M. 2014. Spatio-temporal characteristics of rainstorm in China during 1981-2010. Meteor Mon, 40(7): 816-826 (in Chinese)
- 刘凑华, 曹勇, 符娇兰. 2013. 基于变分法的客观分析算法及应用. 气象学报, 71(6): 1172-1182. Liu C H, Cao Y, Fu J L. 2013. An objective analysis algorithm based on the variational method. Acta Meteor Sinica, 71(6): 1172-1182 (in Chinese)
- 蒙伟光, 张艳霞, 袁金南等. 2014. 华南沿海2011年7月15—18日持续暴雨过程中的季风槽与中尺度对流系统相互作用. 气象学报, 72(3): 508-525. Meng W G, Zhang Y X, Yuan J N, et al. 2014. Monsoon trough and MCSs interactions during the persis-

- tent torrential rainfall event of 15 – 18 July 2011 along the South China coast. *Acta Meteor Sinica*, 72(3): 508-525 (in Chinese)
- 任宏利, 王润, 翟盘茂等. 2017. 超强厄尔尼诺事件海洋学特征分析与预测回顾. *气象学报*, 75(1): 1-18. Ren H L, Wang R, Zhai P M, et al. 2017. Upper-ocean dynamical features and prediction of the super El Niño in 2015/2016: A comparison with 1982/1983 and 1997/1998. *Acta Meteor Sinica*, 75(1): 1-18 (in Chinese)
- 孙继松, 何娜, 王国荣等. 2012. “7. 21”北京大暴雨系统的结构演变特征及成因初探. *暴雨灾害*, 31(3): 218-225. Sun J S, He N, Wang G R, et al. 2012. Preliminary analysis on synoptic configuration evolvement and mechanism of a torrential rain occurring in Beijing on 21 July 2012. *Torr Rain Dis*, 31(3): 218-225 (in Chinese)
- 孙力, 董伟, 药明等. 2015. 1215 号“布拉万”台风暴雨及降水非对称性分布的成因分析. *气象学报*, 73(1): 36-49. Sun L, Dong W, Yao M, et al. 2015. A diagnostic analysis of the causes of the torrential rain and precipitation asymmetric distribution of Typhoon Bolaven (2012). *Acta Meteor Sinica*, 73(1): 36-49 (in Chinese)
- 陶诗言, 1980. 中国之暴雨. 北京: 科学出版社, 255pp. Tao S Y. 1980. Heavy Rain in China. Beijing: Science Press, 255pp (in Chinese)
- 王钦, 李双林, 付建建等. 2012. 1998 和 2010 年夏季降水异常成因的对比分析: 兼论两类不同厄尔尼诺事件的影响. *气象学报*, 70(6): 1207-1222. Wang Q, Li S L, Fu J J, et al. 2012. On the formation of anomalous summer precipitation in the years of 2010 and 1998: A comparison of the El Niño's impact between Modoki and typical El Niño cases. *Acta Meteor Sinica*, 70(6): 1207-1222 (in Chinese)
- 郁淑华. 2000. 长江上游暴雨对 1998 年长江洪峰影响的分析. *气象*, 26(1): 56-58. Yu S H. 2000. An analysis of impact of the heavy rain in upper reaches of the Yangtze River on the flood peak of the river in 1998. *Meteor Mon*, 26(1): 56-58 (in Chinese)
- 俞小鼎. 2012. 2012 年 7 月 21 日北京特大暴雨成因分析. *气象*, 38(11): 1313-1329. Yu X D. 2012. Investigation of Beijing extreme flooding event on 21 July 2012. *Meteor Mon*, 38(11): 1313-1329 (in Chinese)
- 袁慧敏, 王秀荣, 范广洲等. 2012. 长江中下游沿江地区暴雨过程综合评估模型及应用. *气象*, 38(10): 1189-1195. Yuan H M, Wang X R, Fan G Z, et al. 2012. Rainstorm process composite assessment model and application along the middle and lower reaches of Changjiang River. *Meteor Mon*, 38(10): 1189-1195 (in Chinese)
- 赵洋洋, 张庆红, 杜宇等. 2013. 北京“7. 21”特大暴雨环流形势极端性客观分析. *气象学报*, 71(5): 817-824. Zhao Y Y, Zhang Q H, Du Y, et al. 2013. Objective analysis of the extreme of circulation patterns during the 21 July 2012 torrential rain event in Beijing. *Acta Meteor Sinica*, 71(5): 817-824 (in Chinese)
- 周自江, 宋连春, 李小泉. 2000. 1998 年长江流域特大洪水的降水分析. *应用气象学报*, 11(3): 287-296. Zhou Z J, Song L C, Li X Q. 2000. Analysis of precipitation during the 1998 catastrophic deluge in the Changjiang River Basin. *J Appl Meteor Sci*, 11(3): 287-296 (in Chinese)
- 宗志平, 陈涛, 徐珺等. 2013. 2012 年初秋四川盆地两次西南涡暴雨过程的对比分析与预报检验. *气象*, 39(5): 567-576. Zong Z P, Chen T, Xu J, et al. 2013. Analysis and forecast verification of two southwest vortex torrential rain events in Sichuan Basin in early Autumn of 2012. *Meteor Mon*, 39(5): 567-576 (in Chinese)
- 邹燕, 叶殿秀, 林毅等. 2014. 福建区域性暴雨过程综合强度量化评估方法. *应用气象学报*, 25(3): 360-364. Zou Y, Ye D X, Lin Y, et al. 2014. A quantitative method for assessment of regional heavy rainfall intensity. *J Appl Meteor Sci*, 25(3): 360-364 (in Chinese)
- Chen Y, Zhai P M. 2013a. Persistent extreme precipitation events in China during 1951 – 2010. *Climate Res*, 57(2): 143-155
- Chen Y, Zhai P M. 2013b. Two types of typical circulation pattern for persistent extreme precipitation in Central-Eastern China. *Quart J Roy Meteor Soc*, 140(682): 1467-1478
- Folland C, Anderson C. 2002. Estimating changing extremes using empirical ranking methods. *J Climate*, 15(20): 2954-2960
- Niu R Y, Zhai P M. 2012. Study on forest fire danger over Northern China during recent 50 years. *Climatic Change*, 111(3-4): 723-736
- Torrence C, Compo G P. 1998. A practical guide to wavelet analysis. *Bull Amer Meteor Soc*, 1998, 79(1): 61-78
- Yue S, Pilon P, Phinney B, et al. 2002. The influence of autocorrelation on the ability to detect trend in hydrological series. *Hydrol Process*, 16(9): 1807-1829