

江淮梅雨季节强降雨过程特征分析*

李勇 金荣花 周宁芳 蔡芎宁 鲍媛媛

LI Yong JIN Ronghua ZHOU Ningfang CAI Xiangning BAO Yuanyuan

国家气象中心, 北京, 100081

National Meteorological Center, Beijing 100081, China

2017-03-07 收稿, 2017-05-10 改回.

李勇, 金荣花, 周宁芳, 蔡芎宁, 鲍媛媛. 2017. 江淮梅雨季节强降雨过程特征分析. 气象学报, 75(5):717-728

Li Yong, Jin Ronghua, Zhou Ningfang, Cai Xiangning, Bao Yuanyuan. 2017. An analysis on characteristics of heavy rainfall processes during the Meiyu season in Jianghuai region. *Acta Meteorologica Sinica*, 75(5):717-728

Abstract In order to facilitate the identification of heavy rainfall during the rainy season in the Yangtze River valley, an objective method to classify strong rainfall processes during the rainy season in Yangtze-Huaihe region is proposed, and the characteristics of heavy rainfall processes during the rainy season in Yangtze-Huaihe are analyzed. The results show that the method can effectively classify heavy rainfall processes during the rainy season in Yangtze-Huaihe, and the results are in good agreement with the existing results from operational forecasts. The method proposed in the present study is convenient for operational application. There exist obvious inter-annual variations in heavy rainfall process during the Meiyu period in the Yangtze-Huaihe region, which are closely related to the intensity of the Meiyu front in Yangtze-Huaihe region. There are more heavy rainfall processes and rainy days and shorter intervals between rainfall events in strong Meiyu years. Persistent, repetitive, heavy and frequent rainfall events are usually presented in strong Meiyu years in Yangtze-Huaihe region. The situations are opposite in weak Meiyu years. In the past 56 years, accumulative amount of heavy rainfall during the Meiyu period demonstrates a linear increasing trend in the entire Yangtze-Huaihe region, and the area of most obvious increase is located in southern Jiangsu and northern Zhejiang. Spatial distribution of accumulative rainfall is consistent with that of accumulated heavy rainfall days during the Meiyu period. The largest regional centers are located in southwestern Anhui, northeastern Jiangxi and eastern Hubei. According to results of the objective method proposed in this paper, the accumulated rainfall caused by heavy rainfall processes and the total precipitation in the Meiyu period have similar spatial and temporal variations.

Key words Yangtze-Huaihe region, Rainy season, Meiyu period, Heavy rainfall processes, Characteristics

摘要 为了便于识别梅雨季节江淮地区的强降雨过程,促进汛期强降雨过程的预报方法研究,使用中国国家级地面气象站逐日观测资料,提出了一种划分江淮梅雨季节强降雨过程的客观方法,并对江淮梅雨季节内强降雨过程的特征进行了分析。结果表明:该方法能有效划分出江淮梅雨季节的强降雨过程,划分结果与预报业务中的划分结果具有较高的一致性,便于在业务中应用。在江淮梅雨季节内,梅雨期的强降雨过程存在明显的年际变化且与梅雨强、弱密切相关,强梅雨年具有较多的强降雨过程以及过程累积强降雨日,强梅雨年的强降雨过程具有持续性、反复性和频发性的特征。弱梅雨年则相反。近56年来梅雨期强降雨过程累积雨量在整个江淮地区有线性增加的趋势,且江苏南部至浙江北部地区雨量增大的趋势最为显著。梅雨期强降雨过程累积雨量及雨日的空间分布是一致的,最大区域中心均位于安徽西南部、江西东北部及湖北东部等地。按照此客观划分方法确定的梅雨期的强降雨过程累积雨量与梅雨期总雨量具有较为相似的时空变化特征。

关键词 江淮, 梅雨季节, 梅雨期, 强降雨过程, 特征分析

中图法分类号 P458

* 资助课题:国家科技支撑项目(2015BAC03B04、2015BAC03B07)和国家自然科学基金项目(41575066)。

作者简介:李勇,主要从事中短期预报技术研究。E-mail: liy@cma.gov.cn

1 引言

洪涝灾害的形成原因是多方面的,包括天气气候条件、地理地质环境及人类活动因素等,其中与天气气候条件密切相关的强降雨是造成洪涝最直接、最重要的原因之一。江淮流域位于世界上最大的亚洲季风区,受东亚夏季风向北推进影响,梅雨季节强降雨事件频繁发生,其中最典型的是大范围持续性强降雨过程,因其强度大、范围广、持续时间长,往往造成严重的洪涝灾害(张德二等,1990)。梅雨季节江淮流域出现的强降雨过程是该地区洪涝及其他次生地质灾害发生的重要致灾性因子。强降雨过程不仅可以造成严重的洪涝灾害,还是众多次生地质灾害发生的重要诱因,地质灾害分布主要受到典型强降雨过程的落区控制,地质灾害发生随着典型降雨过程出现而群集发生(刘艳辉等,2011)。

随着社会需求及现代天气预报技术的发展,梅雨期内强降雨过程的精细化预报、预测越来越受到重视。事实上,对于江淮梅雨期的划分方法已有很多研究(于达人,1980;李小泉,1981;周曾奎,2006;陈兴芳等,2000;周后福,2005;胡娅敏等,2008;梁萍等,2010),预报业务单位也有相应的勘定标准,而针对梅雨季节内强降雨过程的划分由于受到降雨空间范围、影响系统等限制仍然较为困难。目前在学术界还没有形成较为统一的强降雨过程客观划分方法。对强降雨过程进行科学划分是开展强降雨过程预报方法研究及业务应用的前提,本文试图提出一种针对江淮地区梅雨季节强降雨过程的客观划分方法,并以此为基础讨论梅雨强降雨过程的基本特征。

王莉萍等(2015)基于降水影响对降水过程进行定义,分析给出了降水强度、覆盖范围、降水持续时间等综合强度的评估指标。张端禹等(2015)利用逐日降水资料确定了华南前汛期持续暴雨过程,并对其按照环流进行了分型。魏晓雯等(2015a,2015b)采用百分位数法确定大范围持续性强降水过程并分析其与低频降水的联系。覃卫坚等(2014)分析了近50年广西大范围暴雨过程的大气环流异常特征。陶云等(2003)分析了云南地区强降水过程的年代际变化及其环流特征。刘凑华等(2013)将基于目标的降水识别方法应用于主要暴雨过程的客观确定。这

些研究从不同角度对强降雨过程进行了客观界定,一定程度上反映了不同地区强降雨过程的特点,而目前针对江淮梅雨季节内强降雨过程特征的研究还较少。

此外,根据现有的部分强降雨过程划分方法得到的划分结果各异,还没有与预报业务单位勘定的强降雨过程在过程起止时间、过程强度等方面较一致的客观方法,这就为强降雨过程的精细化预报方法研究带来困难和挑战。实际业务中急需寻找一种能够划定江淮梅雨强降雨过程的客观方法,利用该方法划定的强降雨过程既能够反映出梅雨季节强降雨的基本特征,同时与预报业务人员主观勘定的强降雨过程具有较高的一致性。

针对梅雨季节强降雨过程进行客观划分方法及气候学研究,既有利于科学合理地划分江淮梅雨季节强降雨过程,加深对中国夏季典型雨季江淮梅雨强降水过程时、空特征的认识,又有助于做好梅雨强降雨过程的预报服务工作,对提高江淮梅雨强降雨过程的科学认识水平、促进江淮梅雨强降雨过程的预报业务及技术发展有重要的意义。本研究将对江淮梅雨季节强降雨过程的客观划定方法及特征进行系统分析和讨论。

2 资料和方法

使用的降水资料来自中国气象局最新整编的1960—2015年中国2472个国家级地面气象站逐日(20时—20时,北京时,下同)观测资料。梅雨资料来自中国国家气候中心勘定的梅雨数据集。

采用统计方法对逐日降雨量资料进行分析,在讨论梅雨期强降雨过程累积雨量的时空分布特征时采用了趋势分析、相关分析和经验正交函数分解等分析方法,其中气候变化趋势采用了线性趋势分析和5年移动平均分析方法,并对各相关系数使用 t 检验方法进行了显著性水平检验。

3 江淮梅雨季节强降雨过程的确定

3.1 江淮梅雨季节及梅雨站点的选取

每年的江淮梅雨都有不同的梅雨期。江淮梅雨最早于5月底开始,最晚于8月初结束,一般处于每年6—7月的两个月(丁一汇等,2007)。江淮梅雨季

节是一个气候概念,此处将江淮梅雨期主要出现的6—7月作为江淮梅雨季节。

在有关江淮梅雨期的研究中得到广泛认可并且使用最多的是徐群等(2001)和杨义文等(2001)根据江淮5个指标站的日降雨量以及西太平洋副热带高压西部脊线位置等确定的梅雨期划分结果。使用上述5站可以客观地划分江淮梅雨期,但在划分强降雨过程时还存在显著不足,这主要是因为强降雨过程通常涵盖的空间范围较大,5个指标站不能很好

地反映强降雨过程的空间精细化特征,因此需要增加指标站数量。中国国家气候中心制定的中国梅雨监测业务标准选取了江淮及长江中下游地区277个指标站作为梅雨雨量监测站(图1),这些站点涵盖了出现梅雨的几乎所有地区,空间分布比较均匀,降雨资料也较为完整,且根据该标准回算的历年江淮梅雨期与原5站标准确定的江淮梅雨期具有较高的一致性,用这些监测站作为研究江淮梅雨季节强降雨过程的指标站具有较高的代表性。

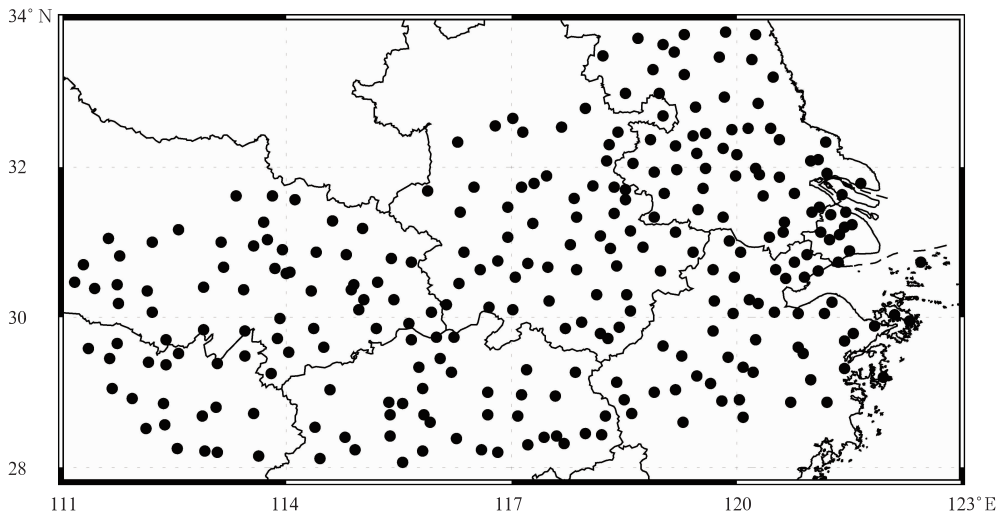


图1 江淮梅雨雨量监测站(277站)空间分布

Fig.1 Spatial distribution of Meiyu rainfall monitoring stations (277 stations)

3.2 江淮梅雨季节降雨气候特征

降雨发生时观测到的降雨站点数可以反映降雨

空间范围的大小。从江淮梅雨季节不同量级降雨气候平均站点数的逐日序列(图2)可以看到,不同量

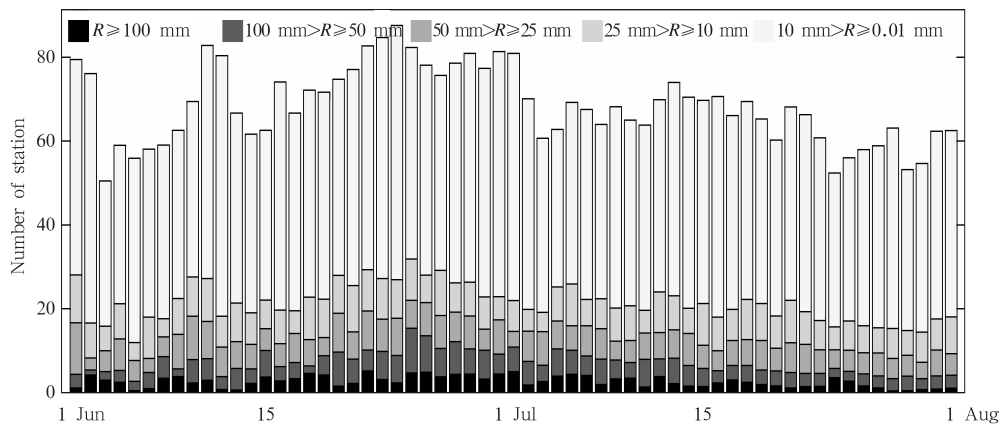


图2 江淮梅雨季节不同量级降雨气候平均(1960—2015年)站点数逐日序列

Fig.2 Daily sequences of station numbers with climatic averages (1960-2015) at different rainfall levels during the Meiyu season

级降雨站点数具有相似的变化趋势。6月中旬至7月上旬是各个量级降雨站点数最大的时段,表明该时段是江淮梅雨季节中降雨范围最大、雨强最强的时段。进一步计算可知,小雨、中雨、大雨、暴雨及大暴雨以上量级站点数分别约占降雨总站数的60.9%、18.9%、11.8%、6.1%及2.3%,表明江淮梅雨季节不同量级降雨站点数存在明显差异,随着降雨量级增大,降雨站点数显著减小。此外,平均降雨最强的时段在6月中旬至7月上旬,而多年平均梅雨期也处于这一时期(金荣花等,2008;毛文书等,2008a)。

为了更加客观地反映江淮梅雨降雨的特点,根

据图2中的各量级逐日气候平均降雨站点数,计算不同降雨强度(≥ 100 、 ≥ 50 、 ≥ 25 、 ≥ 10 及 ≥ 0.1 mm)下的逐日站点数,再按照江淮梅雨季节(6月1日至7月31日)及多年平均梅雨期(6月17日至7月7日)(金荣花等,2008)两个时段分别统计最大值 N_{\max} 、最小值 N_{\min} 及平均值 N_{ave} (表1)。从表1可以看到,无论哪个强度的降雨,江淮梅雨季节和平均梅雨期的最大站点数是一致的,而江淮梅雨季节最小站点数和平均站点数均小于平均梅雨期的相应站点数,进一步说明平均梅雨期正是江淮梅雨季节中降雨强度和范围最大的一个时段。

表1 江淮梅雨季节与平均梅雨期不同降雨强度对应的最大(N_{\max})、最小(N_{\min})及平均(N_{ave})站点数

Table 1 Maximum, minimum, and average numbers of stations with different rainfall intensity during Meiyu season

| 降雨强度 | N_{\max} | | N_{\min} | | N_{ave} | |
|---------------|------------|-------|------------|------------|------------------|-------|
| | 江淮梅雨季节 | 平均梅雨期 | 江淮梅雨季节 | 平均梅雨期 | 江淮梅雨季节 | 平均梅雨期 |
| ≥ 100 mm | 5.2 | 5.2 | 0.4 | 1.6 | 2.6 | 3.7 |
| ≥ 50 mm | 20.1 | 20.1 | 3.2 | 8.9 | 9.5 | 13.4 |
| ≥ 25 mm | 42.1 | 42.1 | 10.9 | 23.7 | 23.3 | 30.3 |
| ≥ 10 mm | 73.9 | 73.9 | 22.8 | 42.9 | 44.7 | 55.4 |
| ≥ 0.1 mm | 156.3 | 156.3 | 78.8 | 103.6 | 113.1 | 130.6 |

3.3 强降雨过程的划分依据

强降雨过程在强度、时间及空间上都与普通降雨存在显著差异。首先,强降雨过程是单日或者多日连续降雨,过程发生期间都或多或少包含若干强降雨日(天气预报业务中强降雨日通常指日雨量达到暴雨及以上量级)。其次,强降雨过程在空间上具有一定的区域特征,单个站点出现暴雨及以上量级的降雨并不能很好地代表强降雨过程。此外,江淮梅雨季节暴雨过程发生时,强降雨站点的空间分布通常都是成片的。

从上述分析可知,强降雨过程与降雨强度、降雨日及降雨站点等特征量密切相关,可以根据这些降雨特征量划分江淮梅雨季节的强降雨过程,划分时重点考虑以下3个方面:(1)强降雨过程需具有一定的强度,要反映出梅雨季节强降雨的特点;(2)强降雨过程要具有一定的空间范围,反映降雨过程的区域性特征;(3)强降雨过程中的强降雨站点需要具有一定的空间集中性特征。

3.4 江淮梅雨季节强降雨过程的确定

根据3.3节中的划分依据,为了划分出江淮梅

雨季节强降雨过程,需重点考虑暴雨及以上量级降雨站点的气候特征。从表1可以看到,江淮梅雨季节该地区平均每日有9.5个站会出现强降雨(日雨量50 mm(含)以上),而在平均梅雨期平均每日最少有8.9个站点出现强降雨。选取最接近江淮梅雨季节平均站点数(9.5个)且不小于平均梅雨期最小站点数(8.9个)的整数作为确定强降雨日的站点数是较为合理的,即若某日有至少9个站出现50 mm(含)以上量级的降雨,则视该日为强降雨日。

为了能够更加客观地反映强降雨站点空间分布的集中程度,需要知道在研究区域内,地理上空间最近的9个站点分布在多大的区域内。为此,以某站点为中心,分别计算该站点与周围最近的8个站点的空间距离,不妨将8个距离中最大的距离称作该站的集中半径(即以该站为中心包含距离该站最近的8个站点的空间圆半径)。计算所有277个站点的集中半径可以发现,最大集中半径为113.79 km。因此,可以将该集中半径作为强降雨日站点空间分布的扫描半径,若在此半径范围内某强降雨日有9个以上(含9个)的站点出现了50 mm以上的降雨,

表明该强降雨日具有较好的空间集中性特征。

根据上述划分原则,可以从1960—2015年每年江淮梅雨季节中挑选出江淮区域强降雨日,然后根据强降雨日划分出强降雨过程,最后将不满足空间集中性的过程(过程期间没有满足空间集中性的强降雨日)剔除即可得到江淮梅雨季节强降雨过程。

4 江淮梅雨季节强降雨过程特征分析

4.1 江淮梅雨期强降雨过程统计特征

从1960—2015年江淮梅雨季节总共可挑选出325次(平均每年5.8次)强降雨过程(表略),统计发现,其中有163次(平均每年2.9次)出现在梅雨期(表2)。值得注意的是,并非所有强降雨过程都会产生较为严重的次生灾害。通常情况下,灾害性较为严重的强降雨过程都具有一定持续性特征,江淮流域持续性暴雨过程是造成大范围洪涝的高影响天气事件(甘晶晶等,2009)。从表2可以看到,强降雨过程的发生次数随着过程持续时间的增加而减少,持续时间最短的强降雨过程为1 d,最长的可达14 d。进一步分析表2可知,对于不同持续时间的强降雨过程,江淮梅雨季节与梅雨期存在显著差异。具体来讲,持续时间较短(1—2 d)的强降雨过程总数为213次,其中86次(约40.4%)出现在梅雨期。持续时间在3 d及以上的强降雨过程总数为112

表2 1960—2015年江淮地区梅雨季节的强降雨过程发生次数

Table 2 The number of heavy rainfall processes occurred during Meiyu season in the Jianghuai region in 1960 - 2015

| 强降雨过程 持续时间(d) | 梅雨季节过程 (次) | 梅雨期过程 (次) |
|------------------|---------------|--------------|
| 1 | 104 | 32 |
| 2 | 109 | 54 |
| 3 | 52 | 30 |
| 4 | 26 | 20 |
| 5 | 16 | 12 |
| 6 | 6 | 4 |
| 7 | 2 | 1 |
| 8 | 5 | 5 |
| 9 | 3 | 3 |
| 10 | 1 | 1 |
| 11 | 1 | 1 |
| 14 | 1 | 1 |
| 合计 | 325 | 163 |

次,其中77次(约68.8%)出现在梅雨期,而持续时间在8 d及以上的强降雨过程总共有10次,全部出现在梅雨期。可见,大多数持续时间较长的强降雨过程都出现在梅雨期,这也反映了梅雨期是江淮地区持续时间较长的强降雨过程出现的主要时段。

中国气象局中央气象台从2010年起开始对发生在中国的暴雨过程进行勘定,由预报员根据暴雨过程期间区域内日雨量达到暴雨(含)以上站点数,结合暴雨过程造成的影响确定。可以看到,中国气象局中央气象台业务中使用的方法是一种主、客观相结合的方法,其客观性体现在对暴雨站点数目(区域内至少5站)的要求上,而最为关键的暴雨过程起止时间则是预报员参考上述客观标准,再结合实际降雨影响主观划定的(表3括号中的过程),这使得预报员需要花费大量的时间用于勘定已经出现的暴雨过程,而本研究提出的方法则是在统计分析的基础上给出的完全客观的判别方法。

从表3可以看到,上述梅雨期的77次持续时间在3 d及以上的强降雨过程与中央气象台勘定的江淮地区暴雨过程(表3括号中的过程)起止时段高度一致,表明本研究提出的划分江淮地区梅雨季节强降雨过程的客观方法具有较高的业务适用性。

4.2 江淮梅雨期强降雨过程时、空分布特征

为了更好地说明江淮梅雨期强降雨过程发生与梅雨强、弱的关系,绘制了强降雨过程累积降雨量及梅雨期总降雨量的逐年变化柱状图(图3a),可以看到,两者具有非常一致的变化趋势(相关系数高达0.96,通过0.01的信度检验)。过程累积雨量较大的年份分别出现在1969、1983、1991、1996、1998、2003、2011和2015年,这些年份都是历史上典型的强梅雨年。而1963、1971、1978、1985、2001及2012年是弱梅雨年,这些年的过程累积雨量均较小。这与文献(胡娅敏等,2008;毛文书等,2008b;钱永甫等,2007)的结论较为一致。平均而言,梅雨期强降雨过程累积雨量占梅雨期总雨量的78.6%(其中1965、2000、2002及2009年等4个空梅年未参与计算)。这表明梅雨期降雨主要是由这些强降雨过程造成的,两者具有协同一致变化的基本特征,同时也表明本研究划定的强降雨过程具有较高的代表性。另外,近56年来强降雨过程累积雨量整体上有线性

表3 实际梅雨期的持续性(3 d及以上)强降雨过程

Table 3 List of persistence (3 days or more) heavy rainfall processes in actual Meiyu period

| 年份 | 梅雨期 (月.日) | 强降雨过程 | | 年份 | 梅雨期 (月.日) | 强降雨过程 | |
|------|--------------|-------|-----------|------|--------------|-------|-------------|
| | | 序号 | 起止日期(月.日) | | | 序号 | 起止日期(月.日) |
| 1960 | 6.8—6.25 | 1 | 6.8—6.10 | 1991 | 6.2—6.19 | 40 | 6.12—6.16 |
| | | 2 | 6.19—6.21 | | | 41 | 6.29—7.12 |
| | | 3 | 6.24—6.26 | | | 42 | 7.2—7.5 |
| 1961 | 6.6—6.15 | 4 | 6.7—6.10 | 1992 | 6.20—7.3 | 43 | 6.29—7.1 |
| 1962 | 6.17—7.8 | 5 | 6.17—6.19 | 1993 | 6.29—7.8 | 44 | 7.3—7.5 |
| | | 6 | 7.4—7.7 | | | 45 | 6.8—6.10 |
| 1964 | 6.23—6.29 | 7 | 6.23—6.28 | 1994 | 6.7—6.13 | 46 | 6.19—6.26 |
| 1966 | 6.25—7.12 | 8 | 6.27—6.30 | 1995 | 6.12—7.9 | 47 | 6.30—7.3 |
| | | 9 | 7.6—7.10 | | | 48 | 7.6—7.8 |
| | | 10 | 6.27—6.29 | | | 1996 | 6.2—7.21 |
| 11 | 7.13—7.16 | 50 | 6.29—7.6 | | | | |
| 1968 | 6.24—7.1 | 12 | 6.23—6.26 | 1997 | 6.23—7.15 | 51 | 7.9—7.12 |
| | 7.9—7.19 | 13 | 7.1—7.8 | | | 52 | 7.14—7.17 |
| 1969 | 6.23—7.20 | 14 | 7.14—7.17 | 1998 | 6.24—7.5 | 53 | 7.7—7.11 |
| | | 15 | 6.27—6.29 | | | 54 | 6.23—6.27 |
| 1970 | 6.18—7.3 | 16 | 7.12—7.14 | 1999 | 6.23—7.1 | 55 | 7.20—7.26 |
| | 7.12—7.21 | 17 | 6.26—6.29 | | | 56 | 6.23—7.1 |
| 1972 | 6.20—6.29 | 18 | 6.21—6.25 | 2001 | 6.17—6.25 | 57 | 6.23—6.26 |
| 1973 | 6.16—6.25 | 19 | 7.9—7.13 | 2003 | 6.21—6.29 | 58 | 6.23—7.2 |
| | | | | | | 20 | 7.15—7.18 |
| 1974 | 6.10—6.20 | 21 | 6.22—6.24 | 2004 | 6.14—6.25 | 60 | 7.8—7.11 |
| | | 22 | 7.11—7.13 | | | 61 | 6.23—6.26 |
| 1976 | 6.21—7.15 | 23 | 6.13—6.17 | 2005 | 7.5—7.14 | 62 | 7.10—7.12 |
| | | 24 | 6.23—6.27 | | | 63 | 7.5—7.7 |
| 1977 | 6.9—6.17 | 25 | 7.16—7.20 | 2006 | 7.5—7.11 | 64 | 7.1—7.5 |
| 1979 | 6.19—7.4 | 26 | 6.26—7.1 | 2007 | 6.19—7.14 | 65 | 7.7—7.14 |
| | 7.14—7.22 | 27 | 7.18—7.20 | | | 66 | 6.21—6.23 |
| 1980 | 6.9—7.21 | 28 | 6.24—7.1 | 2008 | 6.7—6.23 | 67 | 7.4—7.6 |
| 1981 | 6.25—7.1 | 29 | 7.4—7.12 | | | 68 | (7.3—7.6) |
| 1982 | 7.9—7.25 | 30 | 7.3—7.6 | 2010 | 7.3—7.17 | 69 | 7.8—7.16 |
| | | | | | | 70 | (7.8—7.15) |
| 1983 | 6.19—7.18 | 31 | 6.20—6.23 | 2011 | 6.9—6.25 | 69 | 6.9—6.11 |
| | | | | | | 71 | (6.9—6.11) |
| 1985 | 6.22—7.6 | 32 | 6.28—6.30 | 2012 | 6.26—7.4 | 70 | 6.13—6.15 |
| | | | | | | 71 | (6.13—6.15) |
| | | | | | | 72 | 6.17—6.19 |
| 1986 | 6.20—7.7 | 33 | 7.4—7.6 | 2013 | 6.23—6.29 | 72 | (6.17—6.19) |
| | | | | | | 73 | 7.3—7.5 |
| 1987 | 7.1—7.31 | 34 | 7.2—7.7 | 2014 | 6.21—7.6 | 73 | (7.2—7.5) |
| | | | | | | 74 | 6.25—6.29 |
| 1988 | 6.10—6.22 | 35 | 7.22—7.24 | 2015 | 6.14—7.26 | 74 | (6.25—6.30) |
| | | | | | | 75 | 6.20—6.23 |
| 1989 | 6.14—6.22 | 36 | 6.19—6.22 | 2016 | 6.14—7.26 | 75 | 6.16—6.18 |
| | | | | | | 76 | (6.16—6.18) |
| 1990 | 6.19—7.2 | 37 | 6.15—6.17 | 2017 | 6.14—7.26 | 76 | 6.27—7.1 |
| | | | | | | 77 | (6.26—6.29) |
| 1990 | 6.19—7.2 | 38 | 7.1—7.6 | 2018 | 6.14—7.26 | 77 | 7.15—7.17 |
| | | | | | | 39 | 6.30—7.2 |

注:表中的梅雨期选自中国国家气候中心梅雨统计数据,该数据集集中的梅雨期是根据江淮地区5个指标站降雨结合西太平洋副热带高压西部脊线位置等确定。

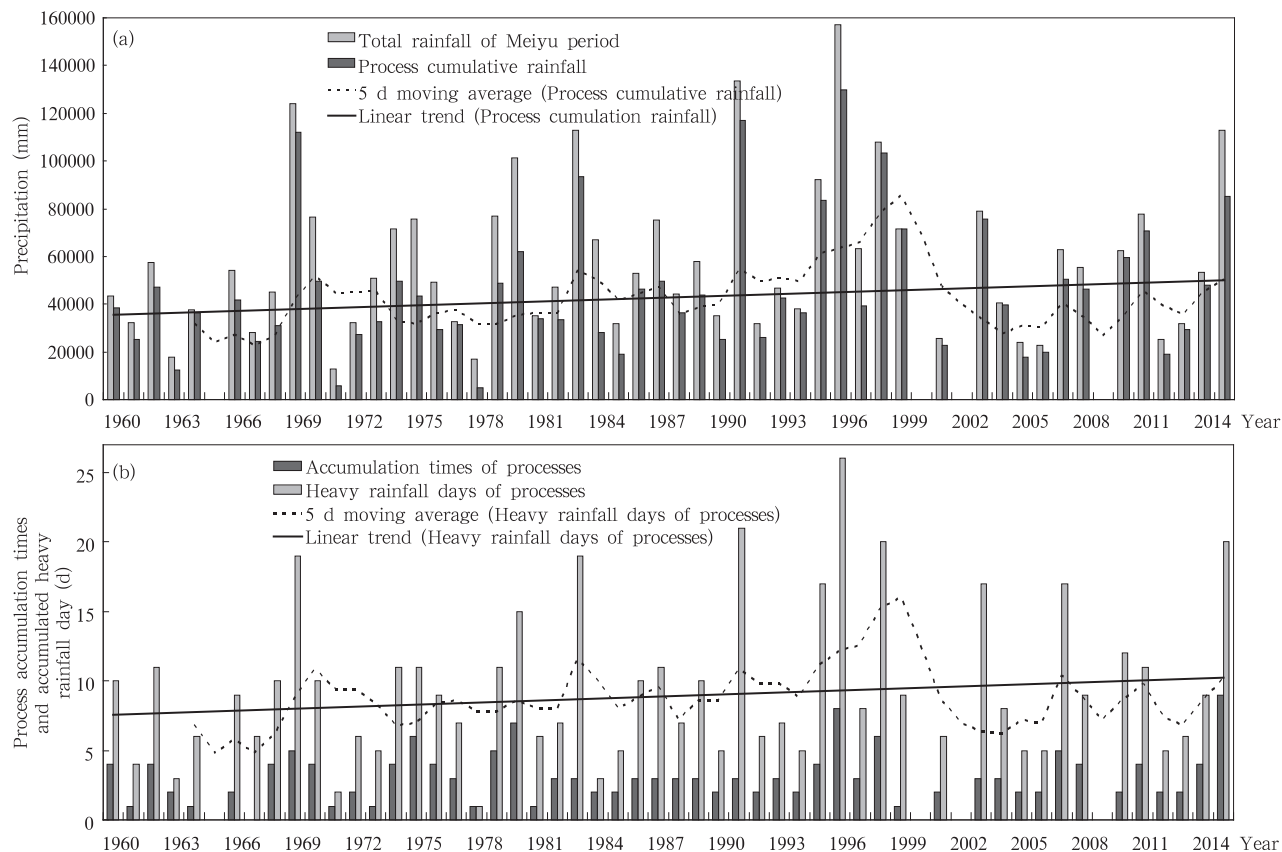


图3 1960—2015年梅雨期强降雨过程累积雨量、总雨量(a)(单位:mm)及过程次数(单位:次)与过程累积雨日(b)(单位:d)

Fig. 3 Interannual variability of accumulated heavy rainfall and total rainfall during Meiyu period (a) (unit: mm) and the number of processes and accumulated rainy days (b) (unit: d)

增加的趋势($R = 0.071$, 增加趋势并不显著),同时具有一定的阶段性变化特征,其中20世纪60、70年代较弱,90年代明显加强,进入2000年后又明显减弱,近几年又有加强的趋势。从整个趋势看,从20世纪60年代至90年代后期强降雨过程累积雨量是增加的(线性趋势明显),2000年之后减弱,这与季风主雨带南退到长江及长江以南,以后又北推到黄淮地区的年代际变化有关。

上文指出梅雨期的梅雨强、弱与强降雨过程累积雨量具有显著的正相关关系,那么梅雨强、弱与强降雨过程发生的频次有无联系?从梅雨期强降雨过程次数与过程累积强降雨日的逐年时间序列(图3b)可以看到,强降雨过程次数在5次(含5次)以上的年份有8年,分别出现在1969、1975、1979、1980、1996、1998、2007和2015年。这些年份均为梅雨偏强年份,表明强梅雨年的强降雨过程也呈现频发性

特征。值得注意的是,1983和1991年的强降雨过程次数较少,但依然是典型的强梅雨年,部分原因是这两年的单次过程持续时间较长,累积强降雨日数依然很大,如1991年出现了持续时间达14 d的强降雨过程,累积强降雨日达到21 d。总体而言,强梅雨年具有较多的强降雨过程及过程累积强降雨日。过程累积雨量与过程累积雨日变化特征基本一致,刘明丽等(2006)在研究江淮梅雨期极端降水的气候特征时也得到相同结果。

以上分析了近56年来强降雨过程的时间变化特征,指出每年梅雨期降雨量主要来自梅雨期的若干次强降雨过程。那么这些强降雨过程的雨量在空间上有什么特征?从1960—2015年梅雨期雨量及线性趋势的空间分布(图4)可知,强降雨过程累积雨量最大的区域位于安徽的西南部、江西东北部及湖北东部一带(图4a),基本上属于江淮区域中心地

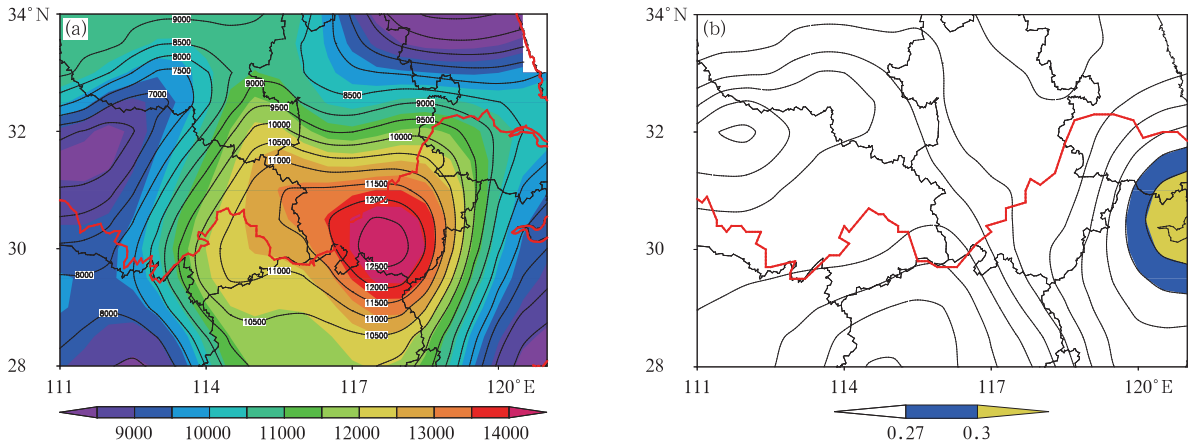


图4 1960—2015年梅雨期(a)163次强降雨过程累积雨量(等值线,单位:mm)及梅雨期总雨量(色阶,单位:mm)及(b)强降雨过程累积雨量年际变化的趋势系数

Fig. 4 Accumulated rainfall (a, unit: mm) and trend coefficient of interannual variability of rainfall (b) of 163 heavy precipitation processes during the Meiyu periods in the Jianghuai region from 1960 to 2015
(The contours indicate the accumulative rainfall, and the shaded area indicate the total rainfall in Fig. 4a)

带。最大累积雨量中心位于安徽西南部,超过12500 mm,而在湖北西部、江苏北部及浙江东南部地区雨量则相对较小。此外,图4a显示的过程累积雨量与梅雨期总雨量的空间分布非常一致,表明过程累积雨量可以很好地表示总梅雨量。从强降雨过程雨量的年际变化趋势来看(图4b),全区显示为一致的正值,表明对于整个区域而言,近56年来强降雨过程造成的降雨量呈现增多的变化趋势,这与图3中显示的区域平均的趋势变化是一致的。此外,可以看到强降雨过程雨量增大的趋势由东向西逐渐减小,靠近东部的江苏南部至浙江北部地区雨量增大的趋势最为显著(图4b中阴影区通过了0.05信度检验),这一带也是近50年梅雨期暴雨量及极端降雨日数显著增大的地区(刘明丽等,2006;毛文书等,2006)。

对梅雨期163次强降雨过程进行统计可知,这些强降雨过程总共包含498个强降雨日。从累积强降雨日的空间分布(图5)可以看到,雨日最大中心仍然位于安徽西南部一带。强降雨过程期间累积雨日的空间分布型与累积雨量(图4b)极为相似,表明50 mm以上的强降雨雨日与累积雨量密切相关。这一点可从图3中过程累积雨量曲线与过程累积强降雨日曲线变化极为相似得到进一步印证。事实上,两者相关系数高达0.95,通过0.01的信度检验。

图4a与5显示的安徽西南部、江西东北部及湖北东部是过程累积降雨量最大、累积雨日最多的地区,与这一带的下垫面状况密切相关。安徽西南部的皖南山区与浙江西部和江西东北部的低山丘陵连成一片,湖北东部则位于大别山的西南迎风坡,当低层西南暖湿气流遇到这一带山地时,暖湿气流沿山坡爬升,使对流增强,同时地形阻挡作用也使降水系统移速减慢,雨时延长。这些地形作用是影响强降雨位置的一个重要因素。

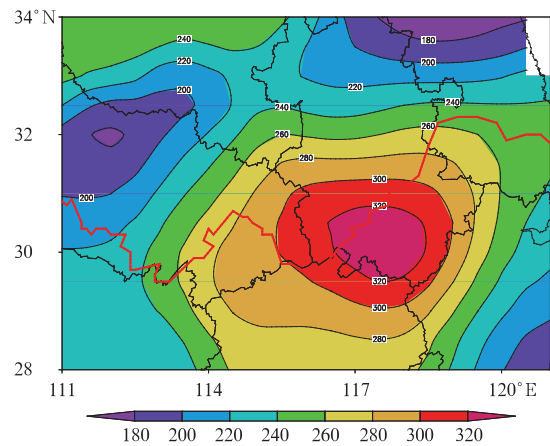


图5 1960—2015年梅雨期163次强降雨过程累积雨日(单位:d)

Fig. 5 Accumulated rainy days of 163 heavy precipitation processes during Meiyu periods in the Jianghuai region in 1960-2015 (unit: d)

江淮梅雨期强降雨过程期间,不同强度降雨雨日在空间上还存在差异。不妨将降雨强度分为暴雨及以上、大雨、中雨及小雨 4 个等级,分别计算不同等级降雨雨日与总雨日的百分比。从图 6 可以看到,上述 4 个量级的累积雨日分别约占总雨日的 15%—28%、23%—30%、26%—40% 及 15%—22%。中雨量级的雨日整体上是最大的(图 6c),强降雨的雨日并不显著占优势,即使在累积降雨最大的安徽西南部地区,强降雨的雨日也仅占到总雨日的 29%左右(图 6a)。值得注意的是,强降雨(图 6a)与小雨(图 6d)的累积雨日百分比空间分布存在相似之处,在江西东北部、安徽西南部至浙江西部一

带,这可能也与该地区下垫面状况有关。当低层西南暖湿气流异常强盛时,地形强迫抬升作用有利于产生较强的降雨,这是强降雨日较多的一个重要原因(湖北东部的强降雨日大值区与大别山地形有关)。而当暖湿气流较弱或无明显暖湿气流时,山区复杂的地形条件也可产生局地水汽的辐合,小雨的雨日也会较平原地区偏多,可见复杂的下垫面状况更容易造成暴雨以上量级和小雨量级的降雨。而大雨(图 6b)与中雨(图 6c)雨日较多的区域位于江苏东南部、浙江东部的长江下游地区,这一地区大雨和中雨的雨日明显多于强降雨及小雨的雨日。

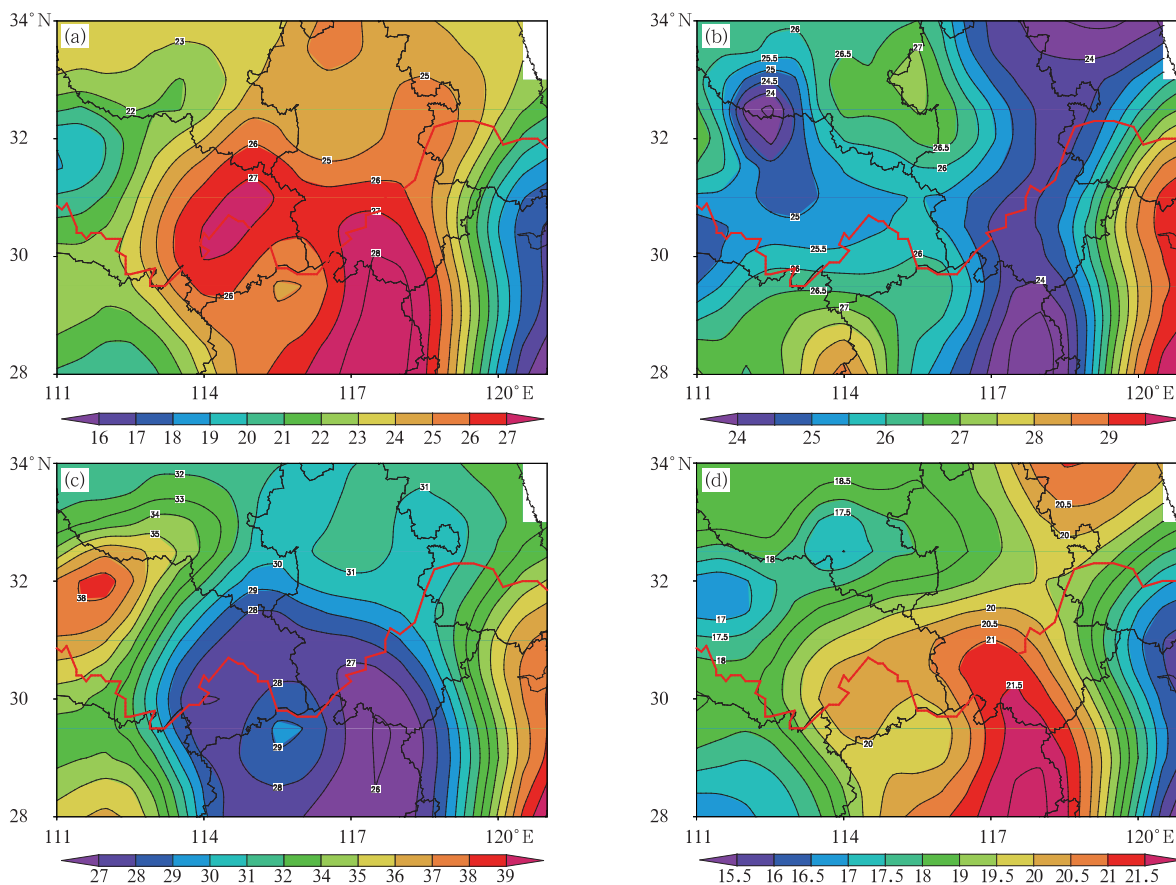


图 6 1960—2015 年梅雨期 163 次强降雨过程不同量级降雨雨日与总雨日的百分比(单位:%)

(a. 暴雨及以上, b. 大雨, c. 中雨, d. 小雨)

Fig. 6 Ratios of rainy days at different magnitudes of rainfall and total rainy days for 163 heavy precipitation processes during Meiyu periods in the Jianghuai Region in 1960 - 2015 (unit: %)

(a. extremely heavy rain and above, b. heavy rain, c. moderate rain, d. light rain)

为了进一步说明近 56 年江淮梅雨期强降雨过程与江淮梅雨的关系,对梅雨期 163 次强降雨过程

累积雨量的年际距平序列进行经验正交函数分解,结果显示分解后的前 4 个空间模态(图略)对应解释

方差分别为 54.8%、14.4%、5.8%及 4.6%，前 4 个模态的总解释方差达到了 79.6%。第 1 模态空间系数为一致的正值，说明雨量空间变化的全区一致性特征。最大中心位于安徽西南部至湖北东部地区，与过程累积雨量最大中心(图 4a)较为一致，这也是江淮梅雨气候上最主要的一个空间分布型。第 2 模态呈现出以长江为界南北反向变化的特征，第 3 模态则表现出南北三区变化特征，即中间区域与南北两侧区域反向变化特征，第 4 模态则反映了雨量的东西反向变化特征。第 2—4 模态表现出的空间非均匀性特征与江淮梅雨的空间非均匀性是较为一致的(杜银等, 2007; 毛文书等, 2006; 竺夏英等, 2007; 胡娅敏等, 2010)。这进一步说明强降雨过程与梅雨期降雨的密切关系，同时也反映出本研究识别的强降雨过程能够反映梅雨期降雨的空间特征。

5 总结与讨论

(1) 在统计分析的基础上，提出了一种客观划分江淮梅雨季节强降雨过程的方法。根据该方法划分出的梅雨期强降雨过程不仅能很好地反映出江淮梅雨的基本特征，且易于操作。识别的结果与中国气象局中央气象台实际业务中勘定的强降雨过程具有较高的一致率，便于在业务中加以应用。

(2) 平均而言，江淮梅雨期强降雨过程累积雨量占该地区梅雨期总雨量的 78.6%。强降雨过程存在明显的年际变化且与梅雨强、弱密切相关，强梅雨年具有较多的强降雨过程及过程累积强降雨日，即强梅雨年的强降雨过程具有持续性、反复性和频发性的特征。弱梅雨年则相反。近 56 年来梅雨期强降雨过程累积雨量在整个江淮地区呈线性增加的趋势，且位于东部的江苏南部至浙江北部地区雨量增大的趋势最为显著。

(3) 江淮梅雨期强降雨过程累积雨量的前 4 个经验正交函数分解空间模态可以很好地反映江淮梅雨空间变化的气候特征，进一步说明强降雨过程与梅雨期降雨的密切关系。强降雨过程累积雨量及雨日最大的区域均位于安徽的西南部、江西东北部及湖北东部，是江淮梅雨期强降雨过程雨量最集中、雨强最大的地区，这可能与该地区的下垫面状况有一定关系。

从本研究结果看，梅雨期的强降雨过程基本决定了该地区整个梅雨期降雨的时、空分布，强降雨过程的基本特征与梅雨强、弱密切相关，这为人们提供了从强降雨过程的角度研究梅雨强、弱的视角。准确预报强降雨过程有助于了解当年该地区降雨量及降雨日的总体趋势特征，可将气候预测的雨带位置及强度等内容进一步细化为强降雨过程的位置、强度和频次等更有意义的信息，提高中长期强降雨过程预报的精细化水平。但是应该看到，本研究的结果是从气候统计的角度反映强降雨过程的整体特征，个别年份仍有差异。如空梅年(1965、2000、2002 及 2009 年)并不意味着没有强降雨过程，只是不存在典型意义上的梅雨期，因此没有进行讨论。此外，仅从降雨的基本特征出发划定了江淮梅雨季节强降雨过程，没有考虑不同尺度天气系统背景下强降雨过程的强度、时空特征是否存在差异，江淮梅雨季节强降雨过程是否可以根据不同天气系统影响进行分类研究，寻找不同类型强降雨过程的形成机理还需要进一步探讨。

参考文献

- 陈兴芳, 赵振国. 2000. 中国汛期降水预测研究及应用. 北京: 气象出版社, 142-145. Chen X F, Zhao Z G. 2000. Research and Application of Rainfall Prediction during Rainy Season in China. Beijing: China Meteorological Press, 142-145 (in Chinese)
- 丁一汇, 柳俊杰, 孙颖等. 2007. 东亚梅雨系统的天气-气候学研究. 大气科学, 31(6): 1082-1101. Ding Y H, Liu J J, Sun Y, et al. 2007. A study of the synoptic-climatology of the Meiyu system in East Asia. Chinese J Atmos Sci, 31(6): 1082-1101 (in Chinese)
- 杜银, 张耀存, 谢志清等. 2007. 长江中下游梅汛期强降水过程非均匀特征. 气象科学, 27(2): 133-139. Du Y, Zhang Y C, Xie Z Q, et al. 2007. Study on heterogeneity characteristics of durative heavy precipitation during the Meiyu period in low-middle reach of Yangtze river. Scientia Meteor Sinica, 27(2): 133-139 (in Chinese)
- 甘晶晶, 汤燕冰. 2009. 江淮流域持续性暴雨过程的中期信号初析. 浙江大学学报(理学版), 36(4): 477-486. Gan J J, Tang Y B. 2009. Preliminary study on medium-range signals of persistent heavy rainfall events over Yangtze River-Huaihe River Valley. J Zhejiang Univ (Sci Ed), 36(4): 477-486 (in Chinese)
- 胡娅敏, 丁一汇, 廖菲. 2008. 江淮地区梅雨的新定义及其气候特征. 大气科学, 32(1): 101-112. Hu Y M, Ding Y H, Liao F. 2008. A study of updated definition and climatological charac-

- ters of Meiyu season in the Yangtze-Huaihe region. *Chinese J Atmos Sci*, 32(1): 101-112 (in Chinese)
- 胡娅敏, 丁一汇, 廖菲. 2010. 近 52 年江淮梅雨的降水分型. *气象学报*, 68(2): 235-247. Hu Y M, Ding Y H, Liao F. 2010. A classification of the precipitation patterns during the Yangtze-Huaihe Meiyu period for the recent 52 years. *Acta Meteor Sinica*, 68(2): 235-247 (in Chinese)
- 金荣花, 陈涛, 鲍媛媛等. 2008. 2007 年梅汛期异常降水的大尺度环流成因分析. *气象*, 34(4): 79-85. Jin R H, Chen T, Bao Y Y, et al. 2008. Causes analysis of abnormal rainfall and its large-scale circulation during 2007 Meiyu season. *Meteor Mon*, 34(4): 79-85 (in Chinese)
- 李小泉. 1981. 从整体上研究梅雨期的划分. *气象*, 7(6): 9-10. Li X Q. 1981. Studying the division of Meiyu period from the whole. *Meteor Mon*, 7(6): 9-10 (in Chinese)
- 梁萍, 丁一汇, 何金海等. 2010. 江淮区域梅雨的划分指标研究. *大气科学*, 34(2): 418-428. Liang P, Ding Y H, He J H, et al. 2010. A study of determination index of regional Meiyu over the Yangtze-Huaihe basin. *Chinese J Atmos Sci*, 34(2): 418-428 (in Chinese)
- 刘凑华, 牛若芸. 2013. 基于目标的降水检验方法及应用. *气象*, 39(6): 681-690. Liu C H, Niu R Y. 2013. Object-based precipitation verification method and its application. *Meteor Mon*, 39(6): 681-690 (in Chinese)
- 刘明丽, 王谦谦. 2006. 江淮梅雨期极端降水的气候特征. *南京气象学院学报*, 29(5): 676-681. Liu M L, Wang Q Q. 2006. Climatic characteristics of Changjiang-Huaihe River Valley extreme precipitation in Meiyu period. *J Nanjing Inst Meteor*, 29(5): 676-681 (in Chinese)
- 刘艳辉, 唐灿, 吴剑波等. 2011. 地质灾害与不同尺度降雨时空分布关系. *中国地质灾害与防治学报*, 22(3): 74-83. Liu Y H, Tang C, Wu J B, et al. 2011. Spatial and temporal distribution characteristics of geo-hazards and rainfall in different scales. *Chin J Geol Hazard Control*, 22(3): 74-83 (in Chinese)
- 毛文书, 王谦谦, 王永忠等. 2006. 近 50a 江淮梅雨期暴雨的区域特征. *南京气象学院学报*, 29(1): 33-40. Mao W S, Wang Q Q, Wang Y Z, et al. 2006. Regional features of the torrential-rain of the Meiyu period in the Changjiang-Huaihe region. *J Nanjing Inst Meteor*, 29(1): 33-40 (in Chinese)
- 毛文书, 王谦谦, 李国平. 2008a. 江淮梅雨异常的大气环流特征. *高原气象*, 27(6): 1267-1275. Mao W S, Wang Q Q, Li G P. 2008a. Analyses on the general circulation characteristics of Meiyu over the Changjiang-Huaihe Valley. *Plateau Meteor*, 27(6): 1267-1275 (in Chinese)
- 毛文书, 王谦谦, 马慧等. 2008b. 江淮梅雨的时空变化特征. *南京气象学院学报*, 31(1): 116-122. Mao W S, Wang Q Q, Ma H, et al. 2008b. Temporal evolution and spatial distribution characteristics of Meiyu in Changjiang-Huaihe River Valley. *J Nanjing Inst Meteor*, 31(1): 116-122 (in Chinese)
- 钱永甫, 王谦谦, 黄丹青. 2007. 江淮流域的旱涝研究. *大气科学*, 31(6): 1279-1289. Qian Y F, Wang Q Q, Huang D Q. 2007. Studies of floods and droughts in the Yangtze-Huaihe River Basin. *Chinese J Atmos Sci*, 31(6): 1279-1289 (in Chinese)
- 覃卫坚, 李栋梁, 王慧等. 2014. 近 50 年广西大范围暴雨的大气环流异常分析. *高原气象*, 33(2): 515-521. Qin W J, Li D L, Wang H, et al. 2014. Analysis on general circulation anomalies of the extensive heavy rains in Guangxi in last 50 years. *Plateau Meteor*, 33(2): 515-521 (in Chinese)
- 陶云, 刘瑜, 朱天禄. 2003. 云南主汛期强降水过程年代际变化及其环流特征分析. *气象科学*, 23(3): 308-313. Tao Y, Liu Y, Zhu T L. 2003. The interdecadal change of very heavy rainfall process in main flood period of Yunnan province and its circulation characteristics. *Scientia Meteor Sinica*, 23(3): 308-313 (in Chinese)
- 王莉萍, 王秀荣, 王维国. 2015. 中国区域降水过程综合强度评估方法研究及应用. *自然灾害学报*, 24(2): 186-194. Wang L P, Wang X R, Wang W G. 2015. Research and application of comprehensive intensity evaluation method for regional rainfall process in China. *J Nat Disasters*, 24(2): 186-194 (in Chinese)
- 魏晓雯, 梁萍, 何金海等. 2015a. 汛期强降水过程与月内低频降水的联系及其可能机制. *高原气象*, 34(3): 722-731. Wei X W, Liang P, He J H, et al. 2015a. Relationship between heavy rainfall process and intramonthly low-frequency rainfall in flood period and their possible mechanism. *Plateau Meteor*, 34(3): 722-731 (in Chinese)
- 魏晓雯, 梁萍, 何金海等. 2015b. 大范围持续性强降水过程与 30-60 d 低频降水的联系及其预报指数. *热带气象学报*, 31(1): 63-70. Wei X W, Liang P, He J H, et al. 2015b. The relationship between large-scale persistent heavy rainfall processes and 30-60 day low-frequency rainfall and its forecasting index. *J Trop Meteor*, 31(1): 63-70 (in Chinese)
- 徐群, 杨义文, 杨秋明. 2001. 近 116 年长江中下游的梅雨(一)//刘志澄. 暴雨·灾害(五). 北京: 气象出版社, 44-53. Xu Q, Yang Y W, Yang Q M. 2001. Nearly 116-years Meiyu in the middle and lower reaches of Yangtze River (Volume One)//Liu Z C. *Torrential Rain and Disaster (Volume 5)*. Beijing: China Meteorological Press, 44-53 (in Chinese)
- 杨义文, 徐群, 杨秋明. 2001. 近 116 年长江中下游的梅雨(二)//刘志澄. 暴雨·灾害(五). 北京: 气象出版社, 54-61. Yang Y W, Xu Q, Yang Q M. 2001. Nearly 116-years Meiyu in the middle and lower reaches of Yangtze River (Volume Two)//Liu Z C. *Torrential Rain and Disaster (Volume 5)*. Beijing: China Meteorological Press, 54-61 (in Chinese)
- 于达人. 1980. 区域梅雨季节和单站梅雨期. *气象*, 6(10): 12-13. Yu D R. 1980. Regional Meiyu season and local Meiyu period. *Meteor Mon*, 6(10): 12-13 (in Chinese)

- 张德二, 王宝贵. 1990. 18世纪长江下游梅雨活动的复原研究. 中国科学 B 辑, 20(12): 1333-1339. Zhang D E, Wang B G. 1990. A study on the reconstruction of the eighteenth century Meiyu (plum rains) activity of lower Changjiang (Yangtze) region of China. *Sci China Ser B*, 34(10): 1237-1245
- 张端禹, 郑彬, 汪小康等. 2015. 华南前汛期持续暴雨环流分型初步研究. 大气科学学报, 38(3): 310-320. Zhang D Y, Zheng B, Wang X K, et al. 2015. Preliminary research on circulation patterns in the persistent heavy rain processes during the first rainy season in South China. *Trans Atmos Sci*, 38(3): 310-320 (in Chinese)
- 周后福. 2005. 梅雨期划分方法的再提出. 成都信息工程学院学报, 20(4): 483-487. Zhou H F. 2005. Representation of demarcation method of Meiyu period. *J Chengdu Univ Inform Technol*, 20(4): 483-487 (in Chinese)
- 周曾奎. 2006. 江淮梅雨的分析 and 预报. 北京: 气象出版社. Zhou Z K. 2006. Analysis and Forecast of Meiyu in Jianghuai Region. Beijing: China Meteorological Press (in Chinese)
- 竺夏英, 何金海, 吴志伟. 2007. 江淮梅雨期降水经向非均匀分布及异常年特征分析. 科学通报, 52(8): 951-957. Zhu X Y, He J H, Wu Z W. 2007. Meridional seesaw-like distribution of the Meiyu rainfall over the Changjiang-Huaihe River Valley and characteristics in the anomalous climate years. *Chin Sci Bull*, 52(17): 2420-2428