

盛杰, 张小雯, 孙军, 等. 三种不同天气系统强降水过程中分钟雨量的对比分析[J]. 气象, 2012, 38(10): 1161-1169.

三种不同天气系统强降水过程中 分钟雨量的对比分析^{*1}

盛 杰 张小雯 孙 军 毛冬艳 谌 芸 朱文剑

国家气象中心, 北京 100081

提 要: 通过使用高时间分辨率的分钟级雨量资料并结合雷达回波, 对比分析了近年来飑线、梅雨锋和热带系统影响下的三次强降水过程, 并通过降水率、降水持续时间和降水变率的统计, 探讨三次强降水过程的特征, 最后给出强降水时段对应所有站点最初 1 小时降水的平均状态。结果表明: 用分钟雨量资料辨识出的强降水时段降水序列, 结合雷达回波和小波分析发现其可以很好地表现 γ 中尺度对流系统的降水特征, 弥补了小时雨量时间分辨率低的缺陷。分析三个过程中强降水时段的样本发现华北飑线的强降水过程单站只有一次强降水时段, 累计雨量基本在 50 mm 以下, 具有降水率大, 持续时间短, 突变性强的特点, 预报难度较大; 在热带对流系统的影响下, 单站降水由多次强降水时段构成, 且强降水时段样本累计雨量可达 100 mm 以上, 降水率较其他系统偏小, 但持续时间最长, 降水均匀稳定; 梅雨锋对应的降水持续时间以 1~2 h 为主, 但降水率高于热带系统, 强降水时段样本累计雨量基本在 100 mm 以下, 降水性质的特点是介于飑线和热带强降水系统之间, 预报最为复杂。

关键词: 强降雨过程, 分钟级雨量, 小波变换方法, 端须图

The Comparative Analysis of Minute-Class Rainfall on Three Different Heavy Rain Processes

SHENG Jie ZHANG Xiaowen SUN Jun MAO Dongyan CHEN Yun ZHU Wenjian

National Meteorological Centre, Beijing 100081

Abstract: The minute's rainfall data and radar echoes in three heavy rain processes, which are chosen from Meiyu-front, squall line and tropical system respectively in recent years, were used to analyze features of minute-class rainfall distribution. The statistical features of three heavy rainfall processes were discussed through the precipitation rate, duration of precipitation and precipitation change's rate. Finally, the average state of first one-hour precipitation in strong precipitation periods was given. The results showed that minute's precipitation series could be a very good performance of precipitation features in meso- γ scale convective system. If combined with the radar echo and wavelet analysis, it could make up for the low time resolution of hour precipitation series. Analysis of samples in three heavy rain processes found that in the squall line, one single station only had once strong precipitation period, and the accumulative rainfall was less than 50 mm almost. It had high precipitation rate, but short duration periods and high variability, therefore, the prediction was difficult. However, under the influence of tropical convective systems, the single station precipitation was composed of many strong precipitation periods, and its accumulated rainfall up to 100 mm. Its precipitation rate was small, but had the longest duration time, and precipitation was more even. For the third heavy rain process, strong precipitation period in Meiyu front system corresponded to duration of 1-2 h, higher rate of precipitation than tropical convective systems, and the accumulative

* 国家气象中心预报员专项(220008011012003)、国家自然科学基金(41175048)和公益性行业(气象)科研专项(GYHY201006005)共同资助
2012 年 2 月 20 日收稿; 2012 年 5 月 2 日收修定稿

第一作者: 盛杰, 主要从事中小尺度强对流天气研究. Email: shengjie@cma.gov.cn

rainfall less than 100 mm. The precipitation nature was between squall line and tropical system, thus the prediction was the most complicated.

Key words: strong precipitation, minute rainfall, wavelet transform, box-whisker plot

引 言

暴雨是中国气象灾害中最严重、最常发生的灾害之一,每年都会对国民经济造成很大的财产损失^[1]。致灾性暴雨的直接原因往往是短时强降水过程,它主要是由强对流系统(如积雨云单体或中尺度对流系统)造成,雨强大、地区集中,致灾性最强。高频次、高分辨率的监测是做好短时强降水临近预报的基础,我国目前对降水监测最基本的手段是通过气象站、水文站和全国 2 万多个雨量站的观测。随着中国气象局气象自动站的建设,分钟雨量计使降水数据的时空分辨率得到显著提高,监测能力得到很大改善。使用分钟雨量计对短时强降水进行监测和分析在业务中已经有了初步的应用,部分地方台站尝试着用其进行实况监测^[2],当任意时段的降水累积量超过暴雨标准时发暴雨预警。但是由于分钟雨量计正式投入业务运行的时间还不长,目前对其的研究和统计工作很少,国内几乎还是空白,只有少数文章有涉及使用分钟雨量,但也是作为分析中尺度对流系统演变的辅助手段^[3-5],而没有探讨暴雨本身的分钟级演变特征。此外,国内外对梅雨锋、飑线以及热带降水机制研究成果很多^[6-8],但也鲜有分析它们三者之间降水特征的区别。本文使用分钟级雨量资料,结合相应的天气形势对近两年我国的强降水典型个例进行统计分析,尝试从更小的时间尺度上揭示不同天气系统的降水特点。另外,通过使用分钟级雨量资料,以全新的角度对短时强降水的特点进行初步探讨,旨在为业务中短时临近预报提供一定的依据。

1 资料方法介绍

1.1 资料来源及统计方法

本文使用的资料包括:(1)国家信息中心提供的中国两万多个地面加密自动站 1 分钟降水资料。(2)高空常规观测资料、多普勒雷达资料。

由于数据存在观测误差、仪器误差和随机误差,统计数据之前要进行质量控制。根据观测员的实际

经验,将 1 分钟降水量大于 10 mm 的降水视为异常值进行人工剔除,对剔除异常值后的降水样本进行序列的平稳性和独立性检验^[9],这里运用游程检验法对分钟降水样本进行了平稳性检验。

数据统计过程中,采用的主要方法有滑动平均、Morlet 小波变换^[10]。为了直观地看到所有数据的分布以及多个数据集的统计差异,本文使用了端须图的表现形式^[11]。

1.2 强降水时段的定义

对于强降水特别是对流降水,数值模式预报能力较差,因此对其的监测和预报成为业务中重点和难点。目前强天气监测业务中使用小时雨量来监测短时强降水,由于时间分辨率较低,无法精确辨识雨势的变化,另外单站的强降水过程还可能由多次强降水时段构成,如果相邻强降水时段间隔时间较短,小时雨量资料也是无法分辨的。本文以降水过程中的强降水时段作为研究对象,结合目前强天气预报中心短时强降水的标准($20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$),将强降水时段定义为:任意连续 60 分钟的滑动累积雨量都大于 20 mm,将 10 分钟雨量大于和小于 1 mm 作为降水开始和结束的标准,且同一站点新的一次强降水时段必须在前一个强降水时段结束后开始。本文将以此标准选出的样本为基础,分析三次不同系统下的降水特征。

为方便讨论,按照累积雨量的大小将强降水时段分成 3 个强度等级,分别称之为 Low-Strong Precipitation[简称 L-SP, $20 \text{ mm} < P < 50 \text{ mm}$], Medium-Strong Precipitation[M-SP, $50 \text{ mm} < P < 100 \text{ mm}$], 记为 $20 \sim 50 \text{ mm}$], High-Strong Precipitation[H-SP, $P > 100 \text{ mm}$], 记为 $> 100 \text{ mm}$], 后文将以英文简称代替这三个级别的强降水时段强度。

2 个例筛选及雷达回波特点

2.1 个例筛选

由于中国各地暴雨时空分布具有明显地域差异。本文选取华北、江淮以及海南三个地区(表 1)

近年来三次典型的强降水过程,并将强降水时段作为分析统计的样本。

表 1 三次不同天气系统下所选取的区域范围、时间、站点和样本数

Table 1 The regional coverage, time scope and numbers of station and sample in three different weather systems

天气系统	华北飑线	江淮梅雨	海南热带系统
选取时段/年.月.日	2011.7.26	2011.7.11	2010.10.5
选取范围	35°~39°N,110°~120°E	25°~35°N,115°~125°E	15°~25°N,105°~115°E
强降水过程站点数/个	41	188	65
强降水时段样本数/个	41	195	102

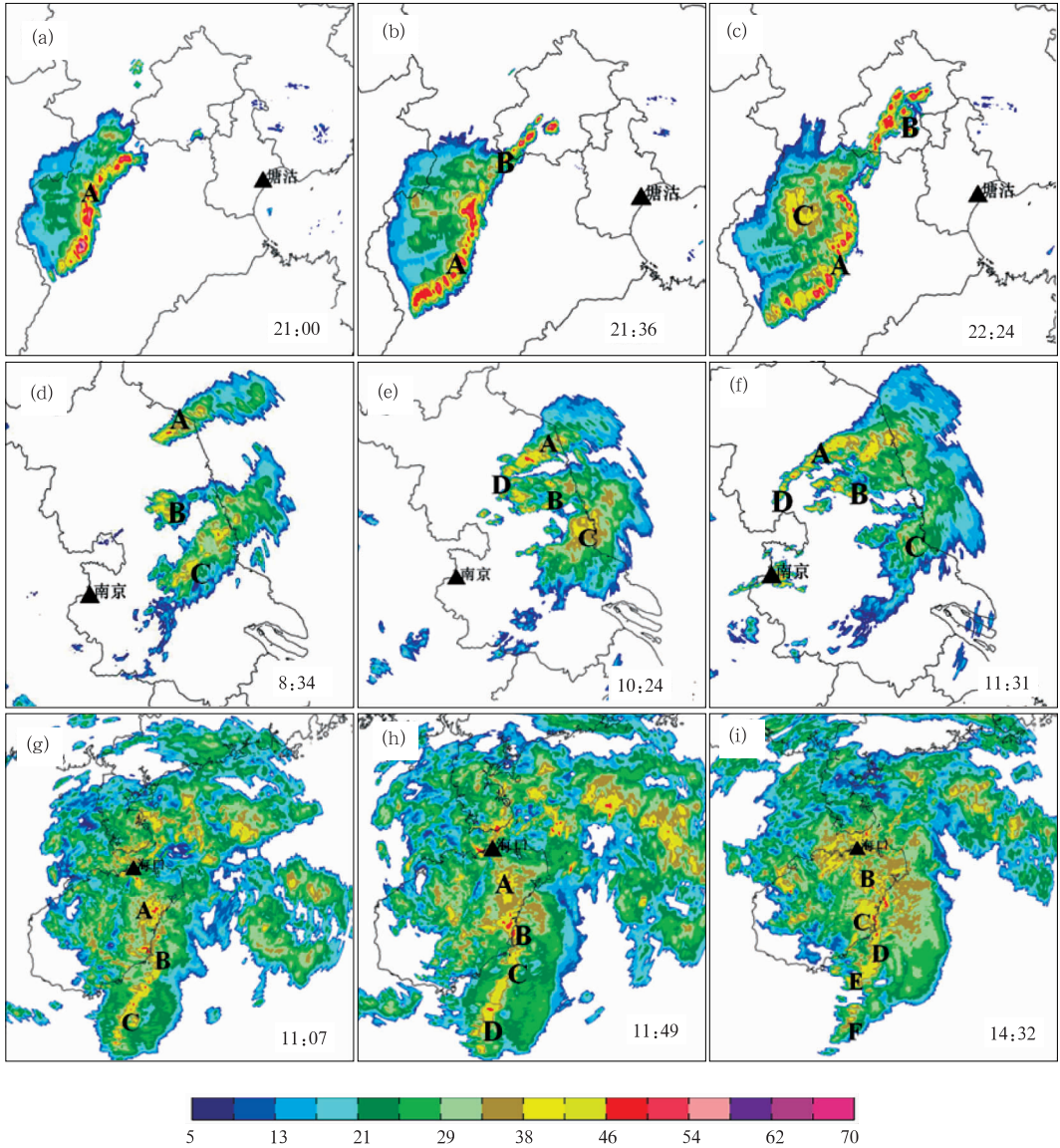


图 1 三次过程雷达基本反射率演变图(0.5°仰角,单位:dBz)

(a)~(c) 2011年7月26日华北飑线,(d)~(f) 2011年7月11日江淮梅雨过程,
(g)~(i) 2010年10月5日海南热带降水过程

Fig. 1 The evolution of radar base reflectivity in three weather processes (0.5°elevation, unit: dBz)

(a)~(c) squall line process in North China on July 26, 2011,
(d)~(f) Meiyu process in Jiang-Huai area on July 11, 2011,
(g)~(i) tropical precipitation in Hainan on October 5, 2010

2.2 强降水过程雷达回波特征

分钟雨量变化与中小尺度系统发展相联系,雷达是监测中小尺度对流系统的有力工具,下面结合雷达资料对不同系统影响下的强降水中小尺度天气特征进行分析。

2.2.1 华北飊线过程

2011年7月26日,华北大部出现强对流天气。26日下午太行山附近的对流系统进入华北平原开始明显加强,并快速发展为飊线系统。雷达回波图上可以看到一条明显的南北向弓状回波(图 1a~1c)。从回波来看,河北境内的飊线过程非常典型,但此次北京地区降水是否是飊线系统造成尚有争议,所以本文所选取范围不包括北京地区。

华北选定区域内有 41 站有强降水过程,筛选出 41 个强降水时段样本(表 1),说明这些站点均只包含一次强降水时段。从图 2 看到,九成以上的强降水时段累积雨量都介于 20~50 mm 之间,属于 L-SP 强度,没有 M-SP、H-SP 强度的降水样本,后文飊线系统的分钟雨量分析仅限于 20~50 mm 区间。

2.2.2 江淮梅雨过程

2011年7月11—13日,受中低层切变线和地

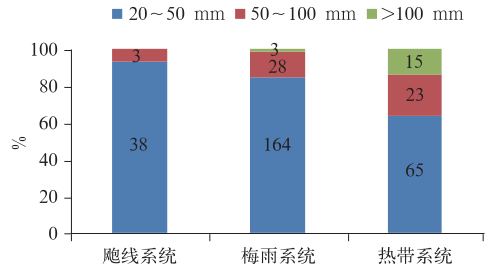


图 2 三次过程中不同级别强降水时段样本数分布情况(单位:个)

Fig. 2 Distributions of samples of strong precipitation period in three processes

面梅雨锋的影响,江淮地区出现了一次较强的梅雨降水过程。此处选取了 11 日的强降水时段作为分析样本。

从雷达回波(图 1d~1f)可以看到单体 A 西南侧有新单体 D 生成和发展,并且与旧的单体 A 合并,具有后向传播的特点。当两个对流单体合并时,在降水效率上会成倍增长,有时可以比合并前各单体降水量总和大一个量级^[12],因此降水单体在测站上空长时间的维持与合并,是引起大暴雨的原因之一。

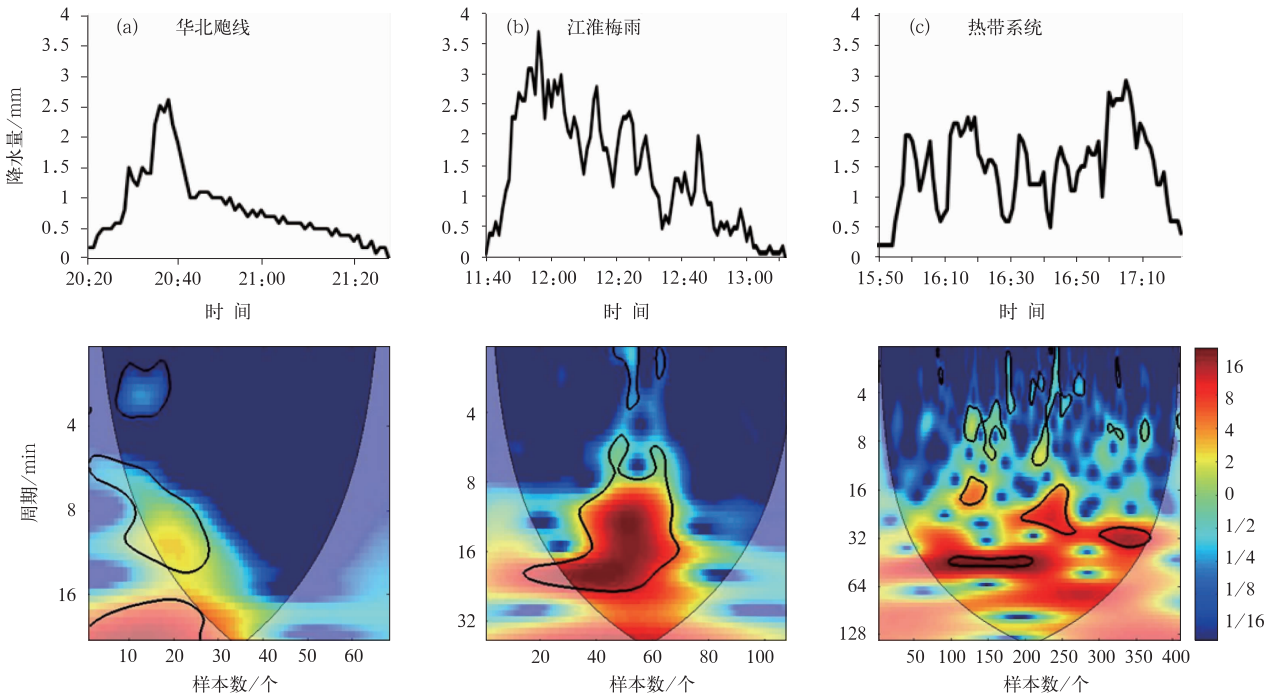


图 3 典型测站的分钟降水序列(单位:mm)及其小波变换图(单位:min)

(a) 华北飊线过程(站号:661103), (b) 江淮梅雨过程(站号:774738), (c) 海南热带降水过程(站号:771117)

Fig. 3 Minute's precipitation series of typical station (unit: mm) and wavelet transform (unit: min)

(a) squall line process in North China (Station No: 661103), (b) Meiyu process in Jiang-Huai area (Station No: 774738), (c) tropical precipitation in Hainan (Station No: 771117)

梅雨锋强降水不同于飑线系统,有 7 个站是由两次强降水时段构成(表 1),说明同一测站在一次过程中受到了多个对流系统影响,与雷暴单体的后向传播有关。样本中有三个站点雨量超过 100 mm(图 2),但由于该量级样本数较少,下文的梅雨分钟雨量分析并不包含 H-SP 强度的样本。

2.2.3 海南强降水过程

2010 年 9 月 30 日至 10 月 8 日,受热带低压系统和冷空气共同影响,海南经历了持续性大暴雨。

从雷达回波来看,大面积的层状云中分布着南北走向的 γ 中尺度对流单体,单体结构较为松散,组织性不强。发生暴雨的海南岛东部地区,不断有对流单体由南海北上,列车效应非常明显(图 1g~1i),从而造成了海南持续性的暴雨,15 个强降水时段样本累积雨量达到 100 mm。同样列车效应使大多数测站经历了多次强降水时段,海南 65 个测站共筛选出 102 个样本(表 1)。进一步分析可知,测站强降水累积雨量随着强降水时段的次数有增多的趋势,累积雨量在 200 mm 以上的大多由多于两次的降水时段构成,而累积雨量大于 300 mm 的测站均经历了三次以上的强降水时段。

从雷达回波特点上可以看到,三种天气系统下,由于中小尺度天气系统的分布和传播特点不同,分钟降水呈现出完全不同的特征。下面通过分钟雨量资料详细分析强降水过程的特征。

3 强降水时段的特征分析

3.1 分钟降水的时间尺度分析

三个地区的典型测站 1 分钟降水时间序列分布可见(图 3),梅雨和热带系统中单站降水时间序列在两小时内并非呈现出线性的增长或者减弱,而是呈现多峰型特征,存在明显的周期变化,周期小于 1 小时。而飑线的降水序列无明显周期,且近乎单峰型结构。对应同时段的雷达资料清楚看到在中尺度系统的组织下, γ 中尺度强回波单体在测站上方的演变发展造成了该地区的短时强降水的变化,雨峰可能是由分钟时间尺度的 γ 中尺度对流单体造成的。下面定量分析 1 分钟降水序列自身的时间尺度。

为了从分钟雨量时间序列中提取不同特征尺度

的相关信息,使用小波变换方法。由图 3 可见,小波分析图显示梅雨和热带过程的降水序列里 10~20 分钟的周期震荡最为显著,海南还有一个 40 分钟左右的显著周期,与 γ 中尺度对流单体的时间尺度相当,表明降水序列的波动可能与 γ 中尺度对流单体的强度变化密切相关。华北飑线由于系统移速较快,即使其中的 γ 中尺度对流单体有生消发展,但对于局地测站影响时间较短,无显著周期。

可见除飑线外, γ 中尺度的降水存在大于 10 分钟的周期,10 分钟降水序列能够基本保留其降水特征,下文也将应用 10 分钟累加雨量研究三个地区分钟级降水的特点。

3.2 强降水时段 10 分钟雨量统计分析

图 4 是三个不同影响系统产生的强降水时段 10 分钟雨量端须图。从整体分布来看,小于 20 mm 的弱降水时段样本分布三个过程较类似,热带系统离散度稍大;L-SP 强度的飑线比梅雨系统离散度稍大一些,但中分位点均为 5 mm,海南 L-SP 强度的离散度相对最小,中分位点不到 5 mm;M-SP 强度的梅雨系统离散度明显大于热带系统,中分位点值达到了 8 mm 以上,而同等量级的热带系统中分位点值仅为 5 mm。对于 H-SP 强度的降水时段,只有热带系统有样本,虽然累积雨量很大,但整体分布却与 L-SP 强度的飑线系统较为接近。

10 mm 是值得关注的阈值,三种类型降水大于 $10 \text{ mm} \cdot (10 \text{ min})^{-1}$ 的样本数均小于 25%,其中 L-SP 强度的梅雨降水含有较少的 10 mm 以上的样本,而在 H-SP 强度中含有将近一半的 10 mm 以上的样本,说明在梅雨系统中出现 $10 \text{ mm} \cdot (10 \text{ min})^{-1}$ 时,时段降水累积量达到暴雨甚至大暴雨以上的可能性较大。

$5 \text{ mm} \cdot (10 \text{ min})^{-1}$ 的标准线对于所有过程区分非强降水和强降水有很好的指示意义。在梅雨系统里,大于 5 mm 的累积雨量在小于 20 mm 的降水时段中几乎都是异常值,而在飑线和热带系统中也只是少量分布,所以当 10 分钟雨量监测到 5 mm 时,很大概率上此站就会出现强降水,其在实际监测中的实用价值应值得关注。

由此可见,不同系统影响下的分钟雨量值的分布是有差异的,以下通过持续时间、降水率和降水变率进一步研究不同天气系统下分钟级降水的性质。

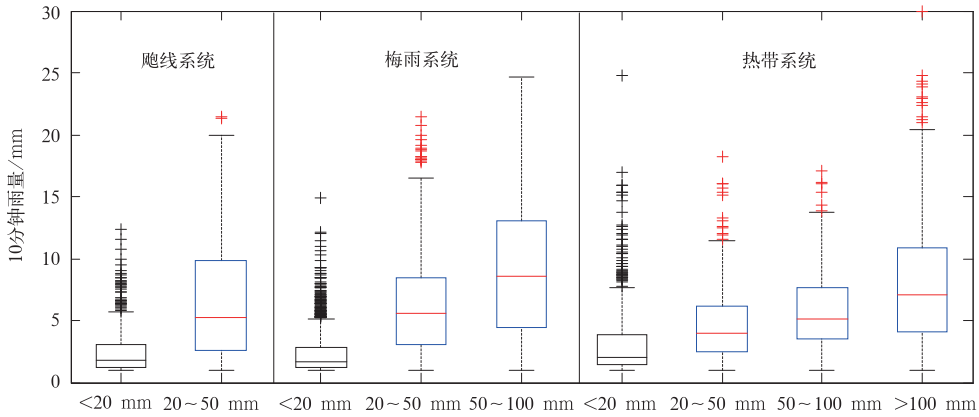


图 4 三个不同影响系统产生的强降水时段 10 分钟雨量端须图

(X 轴为累计雨量, Y 轴为 10 分钟雨量; 单位: mm)

Fig. 4 The box-whisker plots of 10-min rainfall in three different weather systems

(X-axis refers to accumulative precipitation, Y-axis refers to 10-min rainfall; unit: mm)

3.3 强降水时段持续时间

$$P = R \times D \quad (1)$$

从公式(1)可以看到^[13],总降水量 P 取决于两方面的条件:一个是降水率(R),另外一个为持续时间(D)。从某一测站强降水过程来讲,降水持续时间决定于中小尺度系统在该地区的影响时间,如系统停滞少动或移动较慢,就会产生较长的降水时间。除了系统移动速度外,雨团的列车效应、后向传播等也是系统长时间停滞的原因。

图 5 给出了不同降水时段累积雨量持续时间的概率密度图。对于 L-SP(图 5a) 飑线系统持续时间

较短,40 min 处有一个峰值,样本序列中近半数持续时间小于 1 小时,和飑线移速快的特征是相符的。梅雨和热带系统的持续时间则较相似,海南降水样本 70%集中在 50~70 min,梅雨则有六成以上的样本持续时间集中在 40~60 min。

对于 M-SP 强度的样本(图 5b),热带系统降水的持续时间大于梅雨系统,梅雨主要在 1~2 小时之间,而热带系统则大于 2 小时。H-SP 强度降水里梅雨系统只有三个样本(图略),持续时间在 200 min 以下;热带系统有 15 个样本,其持续时间在 120~590 min 之间,远远长于梅雨中的样本。

通过以上分析可知,不同系统下降水的持续时

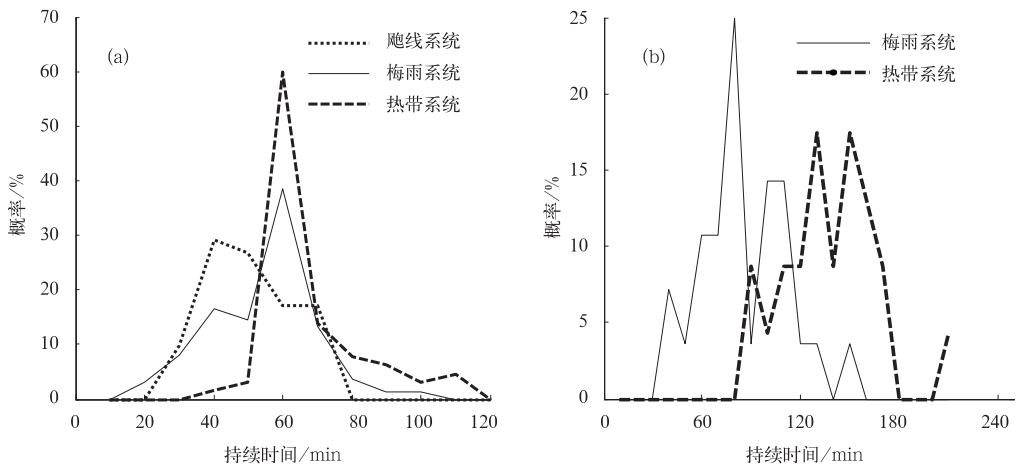


图 5 强降水时段的持续时间概率密度图

(a) L-SP, (b) M-SP

Fig. 5 Graph of probability density for strong precipitation period's duration

(a) L-SP, (b) M-SP

间差异非常大。结合雷达回波特点,飊线系统移速快,故持续时间短;梅雨回波移动较慢且具有后向传播的特点,所以持续时间较长;而列车效应则直接导致了热带系统具有很长的强降水持续时间。

3.4 强降水时段平均降水率

$$R = E \omega q \quad (2)$$

决定总降水量的另一个要素是降水率 $R^{[13]}$,而降水效率(E)、比湿(q)和垂直速度(ω)都是降水率的影响因子[公式(2)]。飊线系统的对流最为强烈,垂直速度也最大;而梅雨和热带系统中的湿度条件都非常好。将每个强降水时段样本的时间序列逐 10 分钟雨量累加起来求其平均,由此得到每个时段样本的平均降水率。同时,为了能够在一张图上清楚地对比三类不同系统降水率的性质,对降水率曲

线做了 5 点滑动平均,具体值的分布给出了端须图。

整体来看,在同等累积雨量的情况下,飊线系统强降水时段平均降水率是最高的(图 6a),基本在 $5 \sim 11 \text{ mm} \cdot (10 \text{ min})^{-1}$ 之间(图 6b)。陶诗言^[13]指出,对暴雨来说垂直速度是更为关键的量,飊线系统即使是在水汽条件不是非常好的情况下,强的上升运动仍然能产生较高的降水率,因此其平均降水率在三个系统中最高。热带系统降水率最低,值基本在 $2 \sim 6 \text{ mm} \cdot (10 \text{ min})^{-1}$ 左右,而梅雨系统降水率离散度较大,强度介于飊线和热带系统之间,在 $2 \sim 10 \text{ mm} \cdot (10 \text{ min})^{-1}$ 左右。

除了三个系统下的降水率具有明显的差异外,从图 6a 中还可以看到每个系统下降水时段样本的累积雨量增大时,降水率都有增大的趋势。

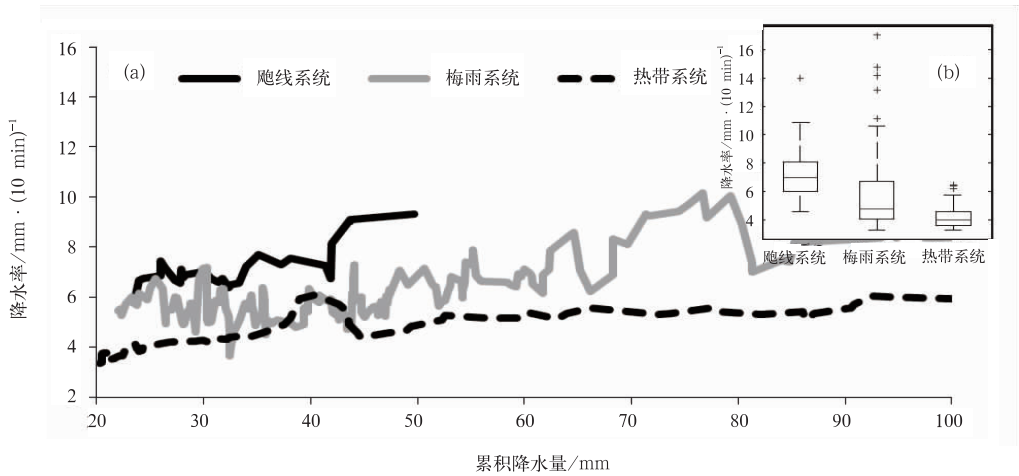


图 6 (a)三个不同系统的降水率,(b)右上角端须图为 L-SP 强度的平均降水率端须图分布[单位: $\text{mm} \cdot (10 \text{ min})^{-1}$]

Fig. 6 (a) The precipitation rate in three different weather systems. [X-axis represents the accumulation precipitation (unit: mm), Y-axis the precipitation rate (unit: $\text{mm} \cdot (10 \text{ min})^{-1}$)], (b) the average precipitation rate for L-SP displays by box-whisker plots [unit: $\text{mm} \cdot (10 \text{ min})^{-1}$]

3.5 强降水时段降水变率

降水的性质除了持续时间、降水率以外,还有一个非常重要的性质就是降水变率,通过降水变率可以了解降水的突发性和均匀性,是小时雨量资料无法准确描述的。通过计算相邻 10 分钟雨量的差,分析降水变率的变化。将降水变率分为两类,一类是正变率,表征降水增强的特征;一类是负变率,表征降水减弱的特征。

图 7 给出了三次过程降水的正负变率分布。飊

线系统的正负变率都是三个系统中最大的,超过 $\pm 5 \text{ mm} \cdot (10 \text{ min})^{-1}$ 的变率在梅雨和热带系统中的分布比较少,说明飊线过程突发性大,降水不稳定。海南降水的变率最小,H-SP 强度也仅与梅雨 L-SP 强度的降水变率相当,降水较为均匀。

另外一个显著的特征就是三个系统降水的正变率都比负变率绝对值要稍大,雨势的增长比减弱幅度要大,飊线过程这种趋势最明显,与飊线后侧的大片积云和层云降水混合回波区可能有关。

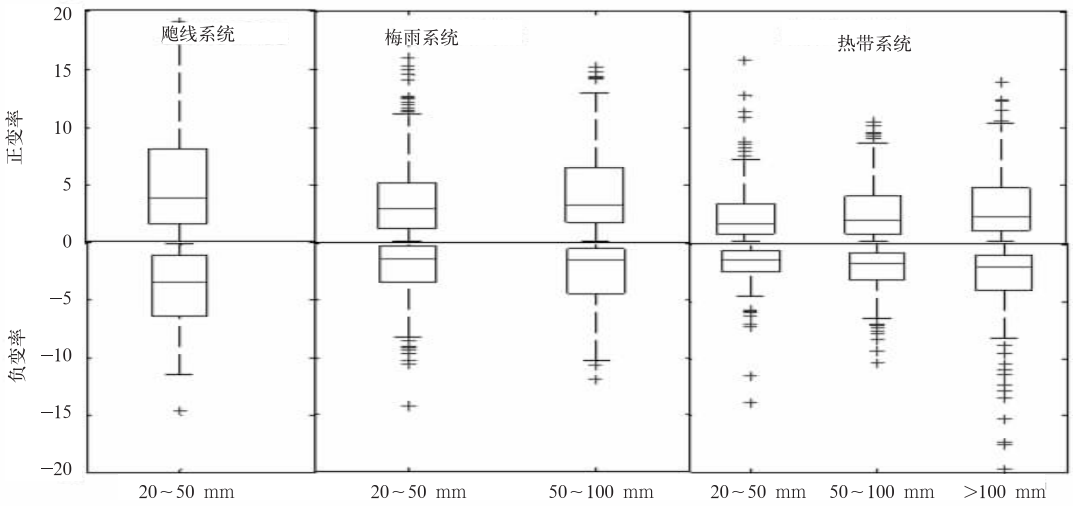


图 7 三个不同系统降水正负变率的分布端须图

Fig. 7 Box-whisker plots of positive and negative variability in three different precipitation systems

3.6 强降水开始 1 小时特征分析

分钟雨量的优势在于它能够清楚反映小时内的雨势,通过求取每个强降水时段样本最初 1 小时内逐 10 分钟平均雨量序列,分析三次强降水过程最初 1 小时的雨势。

如图 8 所示,飗线系统持续时间较短,持续时间一般在 30 分钟到 1 小时之间,强降水开始时,降水量急剧增大,在 20 分钟左右达到最强,然后又迅速减小,雨势呈现骤下急停的特点;梅雨系统初期雨势增长也较快,在 30 分钟时达到雨量峰值,然后雨势缓慢减少;热带系统在这最初的 1 小时内降水则比较均匀,增长缓慢,持续时间长,1 小时还未达到雨

峰,符合其降水率和降水变率小的特点,降水变化较为平缓。

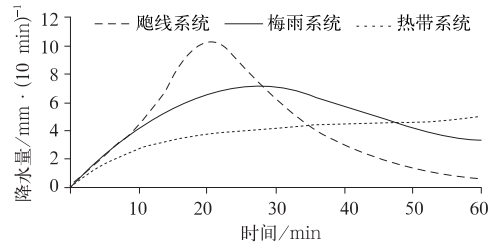


图 8 强降水时段中最初 1 小时 10 分钟平均降水量时间序列图

Fig. 8 Precipitation series of the first hour average precipitation for 10 minutes in strong precipitation period [unit: $\text{mm} \cdot (10 \text{ min})^{-1}$]

表 2 3 个不同天气系统下分钟降雨量特征表

Table 2 The minute's precipitation features in three different weather systems

	飗线	梅雨	热带系统
回波特点	线性多单体 快速移动	多条平行回波带 后向传播	多个云团北上 列车效应
单站包含的强降水时段次数/次	1	1 次少量 2 次(3.7%)	1~4
强降水时段强度/mm	20~40	20~100	20~100 以上
1 分钟雨量显著周期/min	无	10~20	10~40
10 分钟雨量/mm	5	5、10	5
持续时间/min	20~110	20~150	40~590
降水率/ $\text{mm} \cdot (10 \text{ min})^{-1}$	5~10	3~8	<5
降水变率/ $\text{mm} \cdot (10 \text{ min})^{-1}$	0~±10	0~±5	0~±4

3.7 三次强降水过程分钟雨量特征小结

三次强降水特征总结如表 2,供预报员做短时临近监测参考和使用。

4 总 结

通过对三种天气类型下分钟级雨量的分析,初

步得到以下结论:

(1)强降水过程中分钟雨量特征与直接造成强降水的中小尺度对流系统甚至是 γ 尺度对流系统紧密联系,其强度、移动速度以及变化特点造成了不同的雨势;利用其分辨出来的强降水时间序列是研究小尺度系统的有效工具,在强降水监测和预报中发挥重要作用。

(2)从分钟级雨量的统计分析可以发现,华北飑线过程的单站降水主要以一次强降水时段为主,持续时间一般不超过 1 h,具有持续时间短、降水效率高和雨势变化大以及时空分布不均匀的特点。飑线系统由于其突发性和高降水率,致灾性强,而发生时间短,预报难度较高。

(3)海南热带系统的单站降水一般包含多次强降水时段,持续时间长,降水效率相对较低,雨势变化不大且时空分布均匀,其灾害性体现在较长的维持时间,产生大量的 M-SP 以上强度的强降水,造成暴雨灾害。

(4)梅雨系统的降水特点介于飑线与热带系统之间,既有持续降水的可能性,又有降水率大的情况,其预报也最为复杂。

由于本文仅针对三次过程进行了分析,因此,一些结论尚不能代表某一类天气系统所产生的强降水的特征,今后将选取更多过程进行分析,使结论更具普遍适用性。

参考文献

- [1] 丁一汇,张建云.暴雨洪涝[M].北京:气象出版社,2009:1-209.
- [2] 邱小伟,陈柏,孙晓辉.利用自动站分钟资料实现大风暴雨重要天气的完整记录和编报[J].浙江气象,2005,26(3):34-37.
- [3] 李延江,高岑,周艳军,等.“08.8.11”河北海岸带中尺度大暴雨分析[J].气象,2009,35(4):99-101.
- [4] 王国荣,卞素芬,王令,等.用地面加密自动观测资料对北京地区一次飑线过程的分析[J].气象,2010,36(6):65-65.
- [5] 杨引明,朱雪松.一次引发强降水的热带低压对流云团的多尺度特征分析[J].热带气象学报,2011,27(4):543-549.
- [6] 陶诗言,卫捷,张小玲.2007年梅雨锋降水的大尺度特征分析[J].气象,2008,34(4):3-15.
- [7] 曲晓波,王建捷,杨晓霞,等.2009年6月淮河中下游三次飑线过程的对比分析[J].气象,2010,36(7):151-159.
- [8] 赵玉春,李泽椿,肖子牛,等.一次热带系统北上引发华南大暴雨的诊断分析和数值研究[J].气象学报,2007,65(4):562-576.
- [9] 封国林,董文杰,龚志强,等.观测数据非线性时空分布理论和方法[M].北京:气象出版社,2006:1-4.
- [10] 黄嘉佑.气象统计分析与预报方法(第三版)[M].北京:气象出版社,2004:130-134.
- [11] 杨贵名,宗志平,马学款.方框-端须图及其应用示例[J].气象,2005,31(3):53-55.
- [12] 俞小鼎.强对流天气临近预报[M].中国气象局培训中心,2010:21-31.
- [13] 陶诗言.中国之暴雨[M].北京:科学出版社,1980:87.