

张小玲, 余蓉, 杜牧云. 2014. 梅雨锋上短时强降水系统的发展模态 [J]. 大气科学, 38 (4): 770–781, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1401.13249. Zhang Xiaoling, Yu Rong, Du Muyun. 2014. Evolution pattern of short-time intense precipitation-producing systems associated with Meiyu front [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 38 (4): 770–781.

梅雨锋上短时强降水系统的发展模态

张小玲¹ 余蓉² 杜牧云³

¹ 国家气象中心, 北京 100081

² 湖北省防雷中心, 武汉 430074

³ 武汉中心气象台, 武汉 430074

摘 要 利用 2010、2011 年 5~7 月我国东部地区梅雨锋盛行期的 58 次强降水个例, 对产生短时强降水的中尺度对流系统回波演变模态及其系统特征进行了统计分析。本文中短时强降水特指小时降水超过 30 mm。结果表明, 与梅雨锋相伴的短时强降水系统回波演变模态主要为纬向型、经向型、转向型和合并型四类。纬向型、经向型和 70% 的转向型发展模态中中尺度对流系统 (MCS) 呈线状, 合并型则主要为卵状。纬向型、转向型和合并型 MCS 以后向传播为主, 但它们的生命史、移速和产生强降水持续时间有很大差别: 纬向型生命史最长, 强降水持续时间比转向型短; 三类发展模态中转向型移速最快, 生命史较纬向型短, 但强降水持续时间最长; 合并型移动最慢, 生命史最短, 强降水持续时间也最短。经向型 MCS 前向传播为主, 移动最快, 系统持续史短, 约为纬向型的一半, 30 mm h⁻¹、50 mm h⁻¹ 以上强降水持续时间约为转向型的 1/3 和 1/5。纬向型 MCS 可向东或向南移动, 经向型 MCS 通常向东或向西运动, 合并型 MCS 可往任意方向移动, 并且只有该发展模态中 MCS 会向北运动。虽然转向型 MCS 带来的短时强降水 (尤其 50 mm h⁻¹ 以上) 持续时间最长, 经向型和合并型 MCS 产生短时强降水持续时间短, 但四类发展模态中 MCS 的回波强度和回波高度的统计特征无明显区别。推测强降水持续时间可能与 MCS 的传播关系更加密切: 经向型和合并型 MCS 前向传播占很大比重, 生命史和产生的强降水更短; 转向型和纬向型 MCS 的后向传播比重大, 尤其转向型中不存在前向传播, 对应短时强降水持续时间最长。

关键词 短时强降水 发展模态 传播

文章编号 1006-9895(2014)04-0770-12

中图分类号 P445

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1401.13249

Evolution Pattern of Short-Time Intense Precipitation-Producing Systems Associated with Meiyu Front

ZHANG Xiaoling¹, YU Rong², and DU Muyun³

¹ National Meteorological Center, Beijing 100081

² Hubei Provincial Lightning Protection Center, Wuhan 430074

³ Wuhan Central Meteorological Observatory, Wuhan 430074

Abstract In this paper, we study the radar echo evolution patterns and other features of short-term intense precipitation-producing mesoscale convective systems (MCSs) by examining 58 heavy rainfall events associated with the Meiyu front in East China during May to July in 2010 and 2011. Short-term intense precipitation events are deemed as such when the 1-h precipitation total exceeds 30 mm. The results show that the four most common radar echo evolution patterns of MCSs leading to short-term intense precipitation are the zonal, meridional, turning (from zonal to meridional),

收稿日期 2013-08-21, 2013-12-30 收修定稿

资助项目 公益性行业 (气象) 科研专项 GYHY200906004, 国家重点基础研究发展计划项目 (973 计划) 2013CB430100

作者简介 张小玲, 女, 1972 年出生, 正研级高工, 主要从事暴雨和强对流预报方法和机理研究。E-mail: zhangxl@cma.gov.cn.

and combined patterns. MCSs are linear in the zonal and meridional patterns and in 70% of the turning pattern, whereas the combined pattern is oval. Although MCSs in the zonal pattern, turning pattern, and combined patterns commonly propagate backward, the characteristics of their lifetimes, movement, and durations differ significantly. In the zonal pattern, the lifetime is longest, and the intense precipitation duration is shorter than that in the turning pattern in which MCS movement is fastest and the intense precipitation duration is longest. In the combined pattern, MCS movement is slowest and the lifetime and duration are shortest. Conversely, MCSs in the meridional pattern commonly propagate forward and move more quickly than those in the other three patterns. Their lifetime is approximately half that of the zonal pattern, and their duration with more than 30 and 50 mm h^{-1} precipitation approximately are one-third and one-fifth of those in the turning patterns, respectively. MCSs move eastward or southward in the zonal pattern, eastward or westward in the meridional pattern, and toward all directions in the combined pattern. That is, MCSs can move northward only in the combined pattern. Although the intense precipitation persistence is long- or short-term in the four patterns, differences in radar echo intensity and radar echo depth are rare. It is deduced that the intense precipitation duration is closely related to propagation type. A larger proportion of forward propagation corresponds to a shorter lifetime and shorter duration in the meridional and combined patterns; similarly, a larger proportion of backward propagation corresponds to longer duration in the turning and zonal patterns. Forward propagation associated with the longest intense precipitation in the turning pattern is rare.

Keywords Short-term intense precipitation, Evolution pattern, Propagation

1 引言

梅雨锋降水一直是国内外的研究热点。1950 年代以来, 陶诗言等从行星尺度的欧亚长波型式研究梅雨期降水的持续性(陶诗言等, 1958; 2008)。1970 年代以来, 陶诗言等从梅雨锋暴雨的不均一性, 天气尺度为中尺度运动提供背景, 局地不稳定层结促进对流发展的角度研究梅雨锋暴雨的机制和预报要点(陶诗言, 1977, 1980; 张小玲等, 2010)。2000 年代以来, 陶诗言等从多尺度角度, 对梅雨锋上的暴雨及中尺度对流系统(MCS)发生发展环境场进行更加系统的分析研究(陶诗言等, 2003; 张顺利等, 2002; 张小玲等, 2004; 孙建华等, 2004)。

研究表明, 在暴雨过程中导致灾害的往往是某个或某几个时段的极端降水(Doswell, 1994; Doswell et al., 1996)。诸多研究(Bluestein and Michael, 1985; Houze et al., 1990; Schiesser et al., 1995; Loehrer and Johnson, 1995; Parker and Johnson, 2000, 2004; Schumacher and Johnson, 2005, 2006; Gallus et al., 2008)指出受不同环境场条件影响, MCS 呈现不同组织类型, 并造成不同类型剧烈的天气和不同强度的降水。因此, 对中尺度对流系统(MCS)组织形态的认识对其发生发展具有理论意义和预报意义。

早期, MCS 组织形态分类主要属于静态分类。Houze et al. (1990) 首次提出线状 MCS 比非线状的 MCSs 更易产生暴雨。他们的研究得到众多学者的

认同, 引导学者将暴雨的研究发展到主要对线状 MCSs 的研究。Parker and Johnson (2000; 2004a; 2004b) 描述了常发生在美国中部的三种线状 MCSs 模式: 尾随层状云(TS)降水、前导层状云(LS)降水、平行层状云(PS)降水; 他们发现 LS 的 MCSs 比其他类型移动更缓慢, 更易造成极端强降水和暴雨。Gallus et al. (2008) 更在此基础上, 把对流性风暴分成了 9 种类型, 并总结了每种系统所发生的天气现象, 同时进一步证实线状 MCSs 更易造成洪灾。

静态分类没有考虑 MCS 中单体的移动和传播。近年, 以 Schumacher 和 Johnson 为首的学者提供了认识 MCS 的组织、演变和结构特征新思路, Schumacher and Johnson (2005; 2006) 挑选了 1999~2003 年期间发生在美国东部的 184 个强降水个例, 不仅证实 65% 的极端降水是由 MCS 造成的, 同时也发现了三种产生极端降水的主要类型: 一种是邻接层状单向发展(TL/AS)线状 MCS, 其特征是一个典型的東西向对流线平行于准静止锋边界, 在边界的冷侧伴随由西向东的对流单体, 层状云在对流线北侧移动; TL/AS 的单体几乎没有垂直于对流线方向的运动, 这也明显区别于 TS、LS 型 MCS; 这种运动特性常造成沿线状对流系统方向产生持续性的强对流降水。第二种是准静止后向建立(BB) MCS, 其层状云在下游, 新单体常在上游流出边界同一地方反复产生, 从而造成很大的局地降水, 其单体运动方向与传播方向相反。他与 Parker and

Johnson (2000) 提出的 PS 型 MCS 的区别是对流线几乎原地不动, 整个系统 (包括对流单体和层状云) 常呈东西向。第三种是 TS 型 MCS, 对流线南部变为东西向, 几乎与整个中尺度对流系统的运动方向一致, 导致新单体和强降水都在南端尾部产生。

上述三种产生极端降水的 MCS (TL/AS、BB、TS) 的组织结构在世界其他地区, 包括亚洲季风区均存在, BB 型 MCS 常造成东亚的极端降水 (Kato and Goda, 2001; Shin and Lee, 2005; Chi and Chen, 1988)。TS、LS、PS 型 MCS 也常导致东亚夏季风期间的强降水 (Wang, 2004; Schumacher and Johnson, 2005)。Zheng et al. (2012) 对我国东部地区产生冰雹、雷暴大风和短时强降水等强对流天气的 MCS 组织类型进行了干湿环境下的统计分析, 王晓芳和崔春光 (2012) 则在分析长江中下游地区梅雨期 MCS 的类型和活动特征时不仅发现了 TS、LS、PS、BB、TL/AS、BL 型 MCS, 还发现了两种新形态: 镶嵌线状 MCS (EL)、长带层状云降水 MCS (LL)。EL 在雷达回波拼图上, 表现为几条 (一般为 3 条或以上) 间隔距离几乎相等、模态相似的短带回波平行排列成一条对流线。EL 形成后移动较慢, 几乎是静止的, 一般持续 5~6 h, 常给所经地域带来大范围的短时强降水天气。LL 在雷达回波拼图上呈现为一条长长的几乎都为强度小于 40 dBZ 的层状回波带, 回波组织性好。LL 是梅雨期长江流域常见的 MCS, 尽管逐时降水强度不强, 但因移动缓慢, 持续时间长, 所经之地累计降水量大。

上述组织形态分类主要基于系统生命期中最主要的形态。在对流天气系统发生发展过程中, 其形态和结构是不断演变的, 如 Loehrer and Johnson (1995) 在研究中发现, 无组织型、线型、后向发展型和交叉对流带型都会发展为不对称 TS 结构。Hilgendorf and Johnson (1998) 则认为, TS 型系统虽然通常在整个生命期间都将保持 TS 结构, 但在后期其结构会由对称向反对称转变。Parker and Johnson (2000) 也提到他们对暴雨的分类主要基于系统生命史中表现出的主要组织形式进行分类, 而许多系统在其生命期间频繁地从一种模态转变成另一种模态。在他们研究的线型 MCS 中, 50% 个例最初具有 TS 结构并在生命期保持, 而最初具有 LS 特征的 MCS 约有 30% 演变成了 TS 结构, 而有 58% 的 PS 结构会演变成 TS 结构。为此, 本文主要

利用雷达回波资料, 根据产生强降水过程中 MCS 的主要发展演变特征, 统计分析我国东部地区 (具体研究区域参见图 1) 梅雨锋降水期间产生短时强降水的 MCS 演变类型和活动特征, 以求获取这类 MCS 的雷达回波形态演变规律, 为短时强降水的短时临近分析预报提供参考。

2 资料与方法

2.1 资料

本文使用的 2010~2011 年 5~7 月资料包括: 国家气象信息中心提供的全国逐小时降水资料, 用于强降水个例的选取和降水特征统计; 中国气象局大气探测中心提供的逐 10 min 水平分辨率 $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ 的雷达组合反射率拼图产品, 用于强降水个例的筛选; 国家气象信息中心提供的逐 6 min 新一代多普勒天气雷达基数据资料, 用于 MCS 的发展模态及特征统计分析。

2.2 方法

梅雨锋雨带通常横跨几百到上千公里, 但雨带中降水分布非常不均匀, 强降水尤其短时强降水通常局限在 β 中尺度范围内。本文选取 2010、2011 年 5~7 月我国东部梅雨锋盛行区域的短时强降水个例, 参考 Schumacher and Johnson (2005; 2006)、Gallus et al. (2008) 对产生极端强降水和对流风暴的 MCS 的分类研究, 利用雷达组合反射率因子资料, 根据产生短时强降水的 MCS 发生发展期间回波形态的演变特征, 对 MCS 进行分类研究, 并对不同类型的 MCS 的发生、移动、强度、生命史及其导致的短时强降水的强度和持续时间进行统计分析。

降水强度大于 20 mm h^{-1} 是国家气象中心短时强降水的业务标准。我国梅雨锋盛行期间, 降水强度大。为了使样本更具代表性, 本文选取的 2010、2011 年 5~7 月短时强降水个例中, 降水强度超过 30 mm h^{-1} , 且降水率大于 20 mm h^{-1} 的雨区呈团状出现。短时强降水个例均伴随梅雨锋的发生发展, 位于我国东部梅雨锋盛行区域 (图 1)。在这个区域, 由于雷达站的分布不均一, 雷达型号也不相同, 本文中均采用单部雷达资料进行分析。因此, 在选取个例时, 同时要求在降水区域内, 至少有一个雷达站点具有完整的雷达基数据。也就是说, 由于山地的遮挡作用使某些雷达组合反射率失真严重, 强降水位于雷达探测有效范围外, 单站雷达资料难以

完整、真实地反映系统发生发展的过程、雨量站资料与雷达回波无法匹配且无其他文档资料能确认该区域发生强降水的个例均不作为本文的研究样本。因此, 最终本文选取了 58 个位于华南、江南和江淮流域的短时强降水个例进行统计分析 (图 1)。

在对 MCS 发展阶段的演变特征进行统计分析前, 首先需要挑选强降水个例发生期间资料完整、形态结构清晰的 MCS 的雷达回波形态样本。产生强降水的雷达回波形态复杂多样, 且随着系统的发展不断演变。为了便于分析, 本文仅对组织化发展的强降水系统进行分析研究。参考国内外的研究 (Parker and Johnson, 2000; Schumacher and Johnson, 2005, 2006; Gallus et al., 2008, 王晓芳和崔春光, 2012), 中尺度对流系统回波样本选取标准为: 组合反射率因子大于 30 dBZ, 且雷达回波面积超过 100 km²; 最大回波强度 45 dBZ 以上; 系统持续时间 3 h 以上。在这些 MCS 的回波样本中, 本文重点分析了线状、卵状、涡旋状形态的 MCS 的发展演变模态。综合参考国外关于线状、卵状、涡旋状的已有定义标准 (Parker and Johnson, 2000; Gallus et al., 2008), 并结合降水个例的实际情况, 本研究中组合反射率因子大于 40 dBZ 的雷达回波连接成线状、长度在 70 km 以上、且长度至少是宽度的 3 倍并能持续 2 h 以上的系统定义为线状 MCS (图 2a); 雷达回波非线状, 或线状长度在 70 km 以下, 最强回波以分离或孤立形式存在的为卵状 MCS (图 2b); 雷达回波呈现为涡状结构的则为涡状 MCS (图 2c)。回波形态的分类采用单站雷达的组合反射率因子图像进行主观分析。雷达基数据处理软件 (包括必要的质量控制和组合反射率图

象显示) 由南京大学提供。利用该套软件, 已开展一系列的中尺度对流系统发生发展研究 (魏超等, 2010; Pan et al., 2010; Wang et al., 2011)。

3 梅雨锋上短时强降水系统发展模态

根据 MCS 发生发展阶段回波形态演变特征, 与梅雨锋相伴的 58 个短时强降水个例中, 线状、卵状和涡旋状 MCS 的发展模态主要有四类: 纬向型、转向型、经向型和合并型。所有样本中有 2 例难以判断的强降水系统归为其他型, 不作为本文的研究内容。图 3 为 MCS 的四类演变过程示意图。图 4 则为四类发展模态中线状、卵状和涡旋状 MCS 回波形态所占比例分布图。纬向型、经向型和 70% 的转向型发展模态出现在线状 MCS 中。涡旋状 MCS 主要发展模态为转向型; 而 81.8% 的合并型发展模态出现在卵状 MCS 中, 另外 18.2% 则出现在线状对流中。合并发展模态中线状对流长度一般不超过 80 km, 比其他发展模态的线形更窄 (图略)。

3.1 纬向型

在 58 次短时强降水过程中, 纬向型发展模态为 10 例, 占 17.3%, 其 MCS 回波形态均为线状 (图 4)。该发展模态中对流线一般呈东西向分布, 层状云主要位于对流线北部 (图 3)。2010 年 6 月 19 日午后至夜间发生在贵州东南部—广西中北部的降水过程即受典型的纬向型短时强降水系统影响。

2010 年 6 月 19 日 16:00 (北京时, 下同), 在贵州东南部—湖北西南部有对流系统生成, 系统生命史长达 20 h。其中, 连续 18 h 的降水率超过了 30 mm h⁻¹, 且降水率大于 50 mm h⁻¹ 的持续时间也达到了 8 h, 20 日 00:00~01:00 时段更是产生了 84 mm 的极强降水。图 5 为 19 日 17:59、20 日 00:10 和 03:03 柳州雷达组合反射率因子图。19 日 16:30, 贵州东南部有几个小对流单体生成 (图略), 随后发展、合并, 并向南移动, 于 17:59 形成一条东西向的对流线 (图 5a); 系统继续南移并不断发展, 对流线西端和南侧不断有新单体生成, 即同时存在前向和后向传播, 系统移动速度为 45 km h⁻¹。20 日 00:10 对流线北部开始出现层状云 (图 5b), 84 mm h⁻¹ 的极强降水就发生在这期间的对流线上。03:03, 雷达回波形态表现出清晰的 TL/AS 型特征 (图 5c)。此形态特征持续了 12 h, 极端降水沿对流线产生, 并随锋面继续南移。

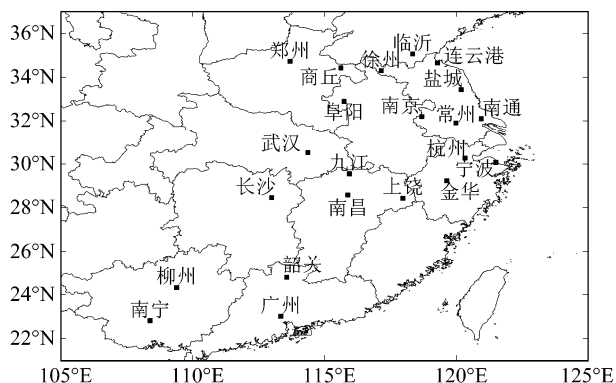


图 1 本文选取的 58 个短时强降水个例发生区域及雷达站点分布

Fig. 1 The region of the 58 short-time heavy rainfall events and the distribution of radar stations

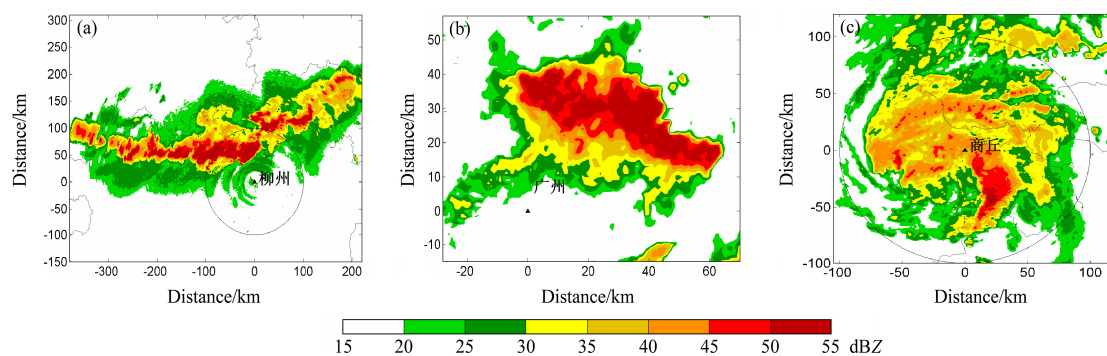


图2 MCS回波形态: (a) 线状; (b) 卵状; (c) 涡旋状。黑色圆圈表示雷达直径 100 km 范围, 下同

Fig. 2 Morphologies of the MCSs (mesoscale convective systems): (a) Linear type; (b) oval type; (c) vortex type. The black circles cover the regions about 100 km from the radar sites

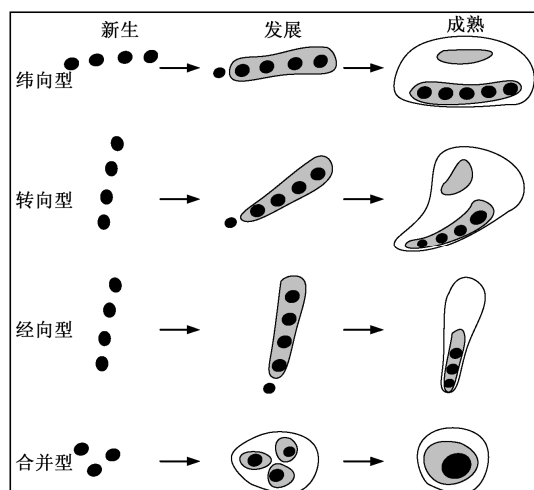


图3 梅雨锋上引发短时强降水的MCS四类演变过程示意图。阴影由浅到深表示雷达回波强度由小到大

Fig. 3 Schematic reflectivity drawing of idealized life cycles for four short-time heavy rainfall-producing MCSs. The shadings from light to deep imply radar echo intensity from small to large

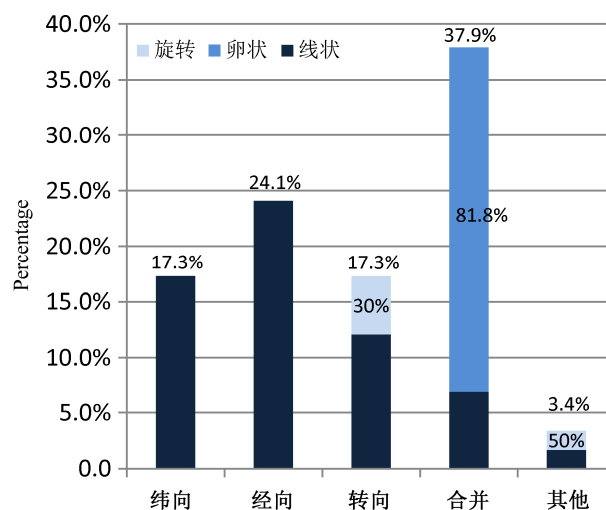


图4 纬向型、经向型、转向型、合并型发展模式及MCS回波形态占比分布图。其中柱形顶端标值表示各发展模式所占比率, 柱形中标值为不同形态在各发展模式中的比率

Fig. 4 The percentage histogram of the zonal, meridional, meridional-turning-zonal, and combined developing modes and the probability of the MCSs echo morphologies in the four modes. The values marked over and in the bars are percentages of the four modes and the three echo morphologies

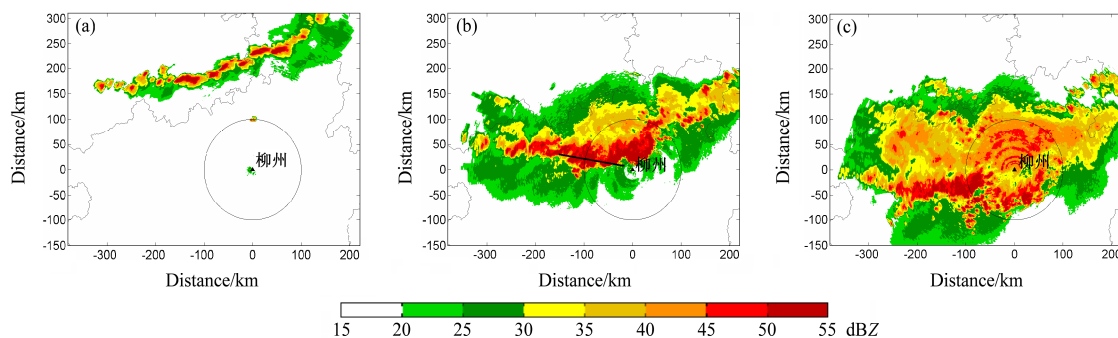


图5 2010年6月(a)19日17:59、(b)20日00:10、(c)20日03:03柳州雷达组合反射率因子(单位: dBZ)

Fig. 5 Combined reflectivity from the Liuzhou radar at (a) 1759 BT on 19 June, (b) 0010 BT on 20 June, and (c) 0303 BT on 20 June in 2010 (unit: dBZ)

沿图 5b 中黑色实线所在对流线的反射率因子垂直剖面(图 6a)可见,在中尺度强降水系统中,内嵌了多个 γ 中尺度对流。强回波呈直立的柱状分布,50 dBZ 回波顶高最高可达 9 km,最强回波也达到了 60 dBZ,其顶高为 5.5 km,3~8 km 的高度区间内均有强回波,表明该系统内部上升运动非常强烈。

3.2 经向型

在 58 次短时强降水过程中,经向型发展模态 14 例,占 24.1%(图 4)。这类发展模态中,MCS 也均为线状对流,但对流线一般呈南北向分布,层状云通常出现在对流线的西北部或北部,有时没有层状云(图 3)。2010 年 7 月 1 日午后至夜间发生在郑州中南部的降水过程即受典型经向型发展的短时强降水系统影响。

2010 年 7 月 1 日,在河南东部有对流系统生成,系统生命史为 9 h。其中,降水率在 30 mm h^{-1} 、 50 mm h^{-1} 以上的持续时长分别为 2 h、1 h,峰值降水出现在 17:00~18:00,为 65 mm。从 7 月 1 日午后郑州雷达组合反射率因子图(图 7)可见,14:12 河南中部开始有多个对流单体生成(图 7a);2 小时内对流单体发展合并成一条对流线,整体上呈南北纵向分布,并继续东移(图 7b);17:28 对流线西南侧和东侧不断有新单体生成,表明系统同时存在前向和后向传播,且在对流线北部产生了 65 mm h^{-1} 的最强降水率。1 h 后系统开始迅速消散。该系统移速较快,约 55 km h^{-1} ,因此强降水持续时间并不长。

沿图 7c 中黑色实线所在对流线反射率因子的垂直剖面(图 6c)可见, γ 中尺度系统内嵌在该强降水系统中。系统的垂直运动比较旺盛,30 dBZ 的雷达回波顶高延伸到 14 km,最强回波为 57 dBZ,其回波顶高为 7 km,强回波出现在 2~9 km 的高度范围内。与 2010 年 6 月 19 日发生在贵州东南部—广西北部的强降水系统相比,此次降水系统的回波顶高更低,强回波的强度也相对较弱,其小时降水量也更小。

3.3 转向型

在 58 次短时强降水过程中,转向型发展模态也有 10 例,占 17.3%;这类模态中 70% MCS 呈线状,30%呈涡旋状(图 4)。在系统初生阶段对流线呈经向型(纬向型)分布,随系统发展,在系统成熟阶段纬向型(经向型)分布(图 3)。本文 10 个

转向型发展的 MCS 中,9 个为经向转纬向。2010 年 5 月 30 日傍晚至次日凌晨发生在广西中北部的降水过程即受典型转向型短时强降水系统影响。

2010 年 5 月 31 日至 6 月 1 日,在广西北部发生了一次极端降水过程。该过程降水持续时间长达 21 h。其中,降水率在 30 mm h^{-1} 以上的持续时间为 17 h,而 50 mm h^{-1} 以上的降水时长也达到了 11 h,并在 6 月 1 日 09:00~10:00 产生了 76 mm 的最强降水。图 8 为这期间柳州雷达组合反射率因子图。31 日 22:03,广西西北部有多个孤立对流单体发展(图 8a)。随着锋面南移(图略),对流单体合并为西北—东南走向的对流线,对流线的东北部有层状云出现,并伴随短时强降水的发生(图 8b)。由于该过程中锋面上伴随有中尺度低涡在广西发展,强降水系统中的对流线由准南北向转为东西向,并向南移动。这期间,新单体不断在系统的西北部生成。到 09:30,对流线已呈现出明显的纬向型特征(图 8c)。这时也出现了该过程的最强降水,此后系统向偏东方向移动。此过程中,对流系统为后向传播,移动速度为 40 km h^{-1} 。

沿图 8c 中黑色实线所在的对流线反射率因子的垂直剖面(图 6b)可见,此次强降水过程系统垂直结构与 2010 年 6 月 19 日广西北部的强降水过程相类似,即多个 γ 中尺度系统内嵌在 β 中尺度降水系统中。 76 mm h^{-1} 的最强降水发生时,50 dBZ 的回波顶高伸展到了 9 km 的高度,最强回波也达到了 60 dBZ,但相较于 6 月 19 日的强降水系统,30 dBZ 的回波高度不超过 12 km,而前者则高达 18 km,系统上升运动不如前者强烈。

3.4 合并型

在 58 次短时强降水过程中,合并发展的强降水系统最多,为 22 例,占 37.9%(图 4)。该模态中,81.8%的 MCS 呈卵状结构,另外 18.2%为线性对流。这些对流线比较窄,长宽比大于 4:1(图略)。合并发展型是由多个小对流单体合并发展成具有统一上升气流的卵状或狭窄对流带的云团(图 3)。此类系统较少移动,且新单体一般在其后部生成。2011 年 7 月 8 日午后发生在浙江东部的降水过程即受典型的合并发展型短时强降水系统影响。

2011 年 7 月 8 日,浙江大部地区出现了短时强降水,其中,14:00~15:00 在浙江省东部的宁海地区产生了 94 mm 的最强降水。该降水系统的生命史并不长,约 3 个小时,但在整个生命史内都产生了

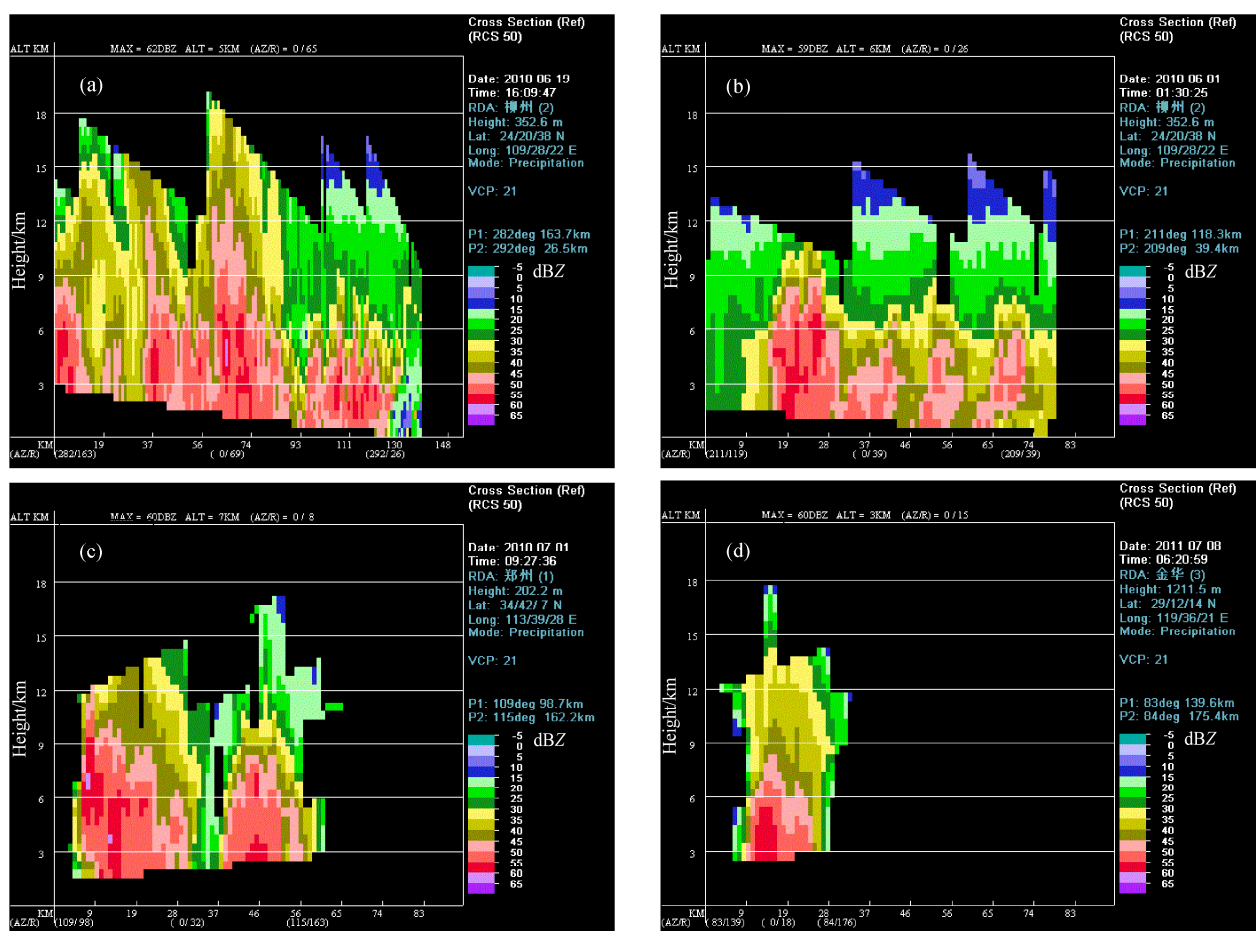


图6 (a) 2010年6月20日00:10柳州站、(b) 2010年6月1日09:30柳州站、(c) 2010年7月1日17:28郑州站和(d) 2011年7月8日14:21金华站雷达反射率因子(单位: dBZ)垂直剖面

Fig. 6 The vertical profiles of the reflectivity from (a) the Liuzhou radar at 0010 BT 20 June 2010, (b) the Liuzhou radar at 0930 BT 1 June 2010, (c) the Zhengzhou radar at 1728 BT 1 July 2010, and (d) the Jinhua radar at 1421 BT 8 July 2011 (unit: dBZ)

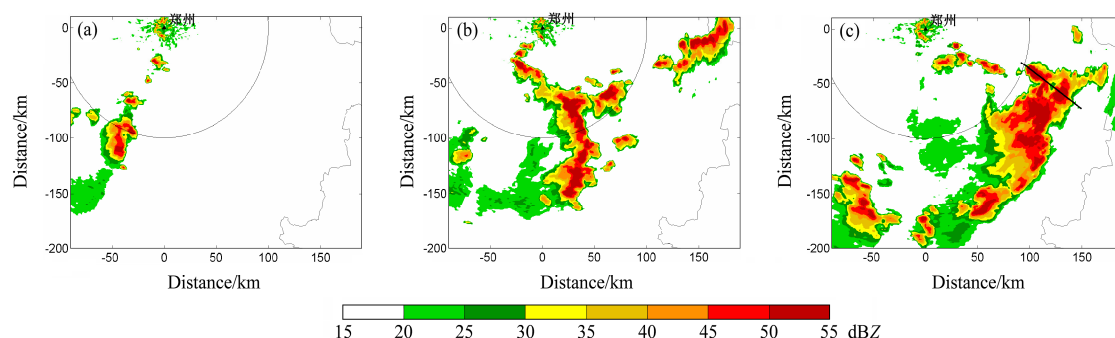


图7 2010年7月1日(a) 14:12、(b) 16:02、(c) 17:28郑州雷达组合反射率因子(单位: dBZ)

Fig. 7 Combined reflectivity from the Zhengzhou radar at (a) 1412 BT, (b) 1602 BT, and (c) 1728 BT on 1 July 2011 (unit: dBZ)

大于 30 mm h^{-1} 的强降水。7月8日13:15, 在浙江东部开始有对流单体生成(图9a); 随后半小时不断有单体在同一地区生消, 36分钟后, 部分对流单体合并, 并一起缓慢向东北移动(图9b); 在移动的过程中对流系统迅速发展、北扩伸, 形成了具有统一上升气流的卵状系统, 并在浙江省宁海地区产

生了极端强降水(图9c)。

沿图9c中黑色实线所在对流线反射率因子的垂直剖面(图6d)可见, 该系统中30 dBZ回波顶高可伸展到13 km, 强回波出现在6 km以下, 并呈柱状分布, 说明该系统垂直结构发展旺盛, 上升运动非常强烈。与其他三类发展模态相比, 该类模态

中 MCS 的质心最低, 加之系统较少移动, 导致该过程中降水强度最大, 最强达到 94 mm h^{-1} 。

4 短时强降水系统发展模态的统计特征

在 58 个短时强降水个例中, MCS 的传播方式以后向传播为主, 占总数的 48.3%; 其次是前后向传播 (即同时存在前向和后向传播), 占 27.6%; 前向传播约为 20.7% (图略)。此外, 有 2 例 MCS 传播特征不明显, 以单体合并的方式发展, 不作为四类发展模态的传播方式统计样本。图 10 是四类发展模态中对流单体传播方向统计特征。除经向发展的 MCS 以前向传播为主 (占 42.8%), 其余三种发展模态中 MCS 均以后向传播为主, 纬向发展和转向发展的 MCS 后向传播特征更为明显, 分别高达 60% 和 70%。四类发展模态中, 20%~30% 的 MCS 存在前后向传播并存特征。值得注意的是转向型发展模态中 MCS 没有前向传播方式。

由于我国处于盛行西风带, MCS 的移动方向主要以自西向东移动为主。约有 57% 的系统向偏东方向移动; 在偏东方向移动的系统中, 约 43% 向正东方向移动, 33% 向东南方向移动, 剩余 24% 则向东北方向移动。除此以外, 向偏西、偏南、偏北方向移动的 MCS 分别占 25.8%、8.6% 和 8.6% (图略)。图 11 为各发展模态中 MCS 移动方向的统计特征。除合并发展的 MCS 偏西移动为主 (占 40.9%), 其余均以偏东移动为主。纬向型和转向型发展的 MCS 中东移的概率分别是 70% 和 90%, 其余则为向南运动。经向型 MCS 东移 (占 57.1%) 略多于西移 (占 42.9%)。只有合并发展的 MCS 会向北运动。

图 12 是四类发展模态中 MCS 的移速、持续时间、强度及产生的短时强降水持续时间统计特征。从图 12a 可见, 合并发展的 MCS 移动最缓慢, 平均移速为 23.7 km h^{-1} , 90% 在 35 km h^{-1} 以下。其次是纬向型 MCS, 75% 移速在 33.5 km h^{-1} 以下, 平均速度为 29 km h^{-1} 。经向型 MCS 移速最快, 50% 移速超过 40 km h^{-1} , 最小 (最大) 移速 33 km h^{-1} (58 km h^{-1}), 这可能与以前向传播、东移为主有关系。

四类发展模态的 MCS 系统持续时间差别很大 (图 12b)。纬向型和转向型 MCS 生命史更长。前者系统持续时间均超过 10 h, 平均持续史最长 (15.1 h), 50% 持续时间超过 15 h; 后者平均持续时间 14.6 h, 50% 持续时间超过 15 h, 特别是有 10%

持续时间大于 21.4 h。经向型和合并型的 MCS 持续时间都很短, 约为纬向型和转向型的一半。90% 经向型持续时间不超过 10 h, 50% 在 5 h 内。合并型的生命史最短, 没有出现 10 h 以上的长生命史 MCS, 90% 的系统持续史为 3~6 h。

虽然纬向型 MCS 平均持续时间最长, 但产生的 30 mm h^{-1} 以上短时强降水持续时间却小于转向型 MCS, 尤其 50 mm h^{-1} 更加明显 (图 12c 和 d)。90% 的纬向型 MCS 带来的 30 mm h^{-1} 的强降水时长大于 7 h, 均值为 10.3 h; 而 50 mm h^{-1} 以上降水时长均值为 4 h, 50% 在 5.75 h 以上。转向型 MCS 产生 30 mm h^{-1} (50 mm h^{-1}) 以上降水的平均持续时间为 11.7 h (5.6 h), 50% 的系统带来 30 mm h^{-1} (50 mm h^{-1}) 以上降水的时长超过 10 h (4.2 h)。经向型和合并发展型 MCS 带来的 30 mm h^{-1} 和 50 mm h^{-1} 以上的强降水持续时间明显缩短, 最长不超过 5 h, 其中 90% 的 MCS 带来的 50 mm h^{-1} 以上降水在 2 h 内。这与经向型和合并发展型的 MCS 的生命史短相对应。

虽然经向型和合并发展型的 MCS 生命史短, 产生短时强降水的持续时间也很短, 但四类发展模态中 MCS 在 30 dBZ 回波顶高、最强回波强度和最强回波高度的统计特征方面, 并无明显区别 (图 12e、f 和 g)。事实上, 从 58 个与梅雨锋相伴的短时强降水系统产生的 30 mm h^{-1} 和 50 mm h^{-1} 强降水与 MCS 的传播方向统计关系则有规律可行: 前向传播的 MCS 带来的短时强降水持续时间最短, 前后向传播并存的 MCS 带来的 50 mm h^{-1} 极端降水持续时间最长, 50% 在 4 h 以上 (图 13)。结合图 10 可以发现, 经向型和合并型中 MCS 前向传播占很大比重, 分别为 42.85% 和 30%, 对应短生命史和更短的强降水; 转向型和纬向型中 MCS 的前后向传播比重均很大, 但转向型中不存在前向传播, 对应短时强降水持续时间最长, 尤其 50 mm h^{-1} 以上极端降水表现明显。

5 结论

本文主要利用 2010~2011 年 5~7 月全国加密且已经过质量控制的自动站逐小时降水资料、雷达基数据和拼图资料, 挑选了发生在我国黄河以南梅雨锋盛行区域 58 个与锋面相伴的短时强降水个例, 对产生短时强降水的中尺度对流系统发展演变、传播、移动、结构和产生的强降水进行了统计分析, 得

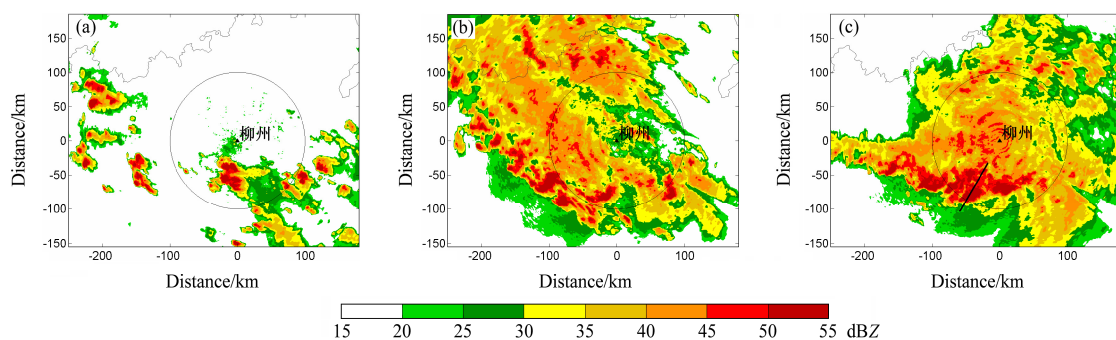


图 8 2010 年 (a) 5 月 31 日 22:03、(b) 6 月 1 日 03:20 和 (c) 6 月 1 日 09:30 柳州雷达组合反射率因子 (单位: dBZ)

Fig. 8 Combined reflectivity from the Liuzhou radar at (a) 2203 BT on 31 May, (b) 0320 BT on 1 June, and (c) 0930 BT on 1 June in 2010 (unit: dBZ)

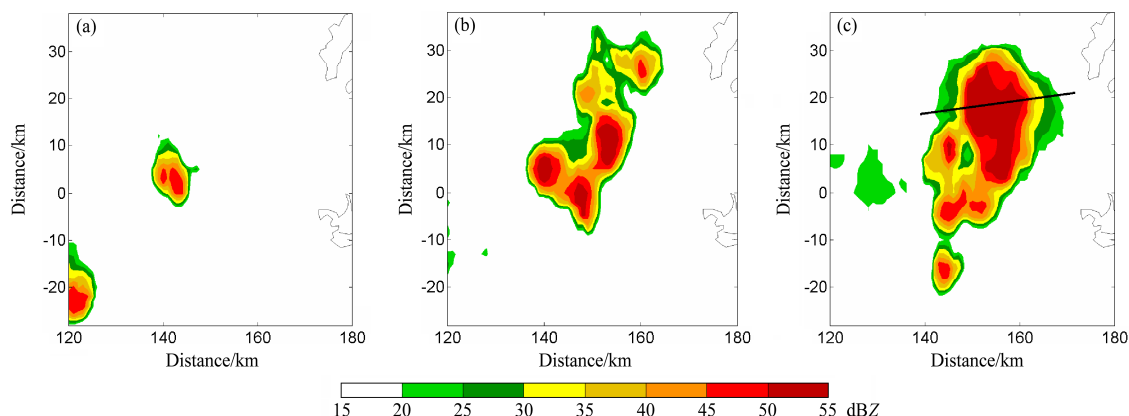


图 9 2011 年 7 月 8 日 (a) 13:15、(b) 13:51、(c) 14:21 金华雷达组合反射率因子 (单位: dBZ)

Fig. 9 Combined reflectivity from the Jinhua radar at (a) 1315 BT, (b) 1351 BT, and (c) 1421 BT on 8 July 2011 (unit: dBZ)

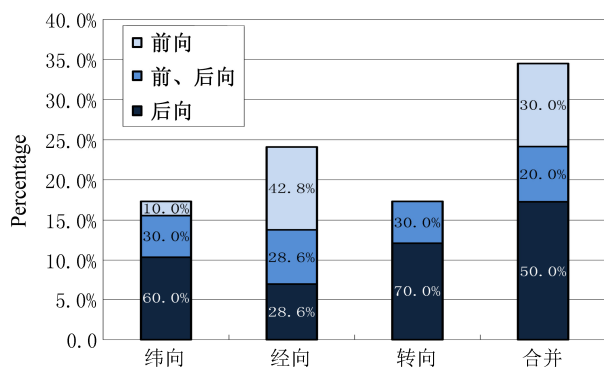


图 10 发展模态与传播方向的关系

Fig. 10 Percentage histogram of propagation direction in four developing modes

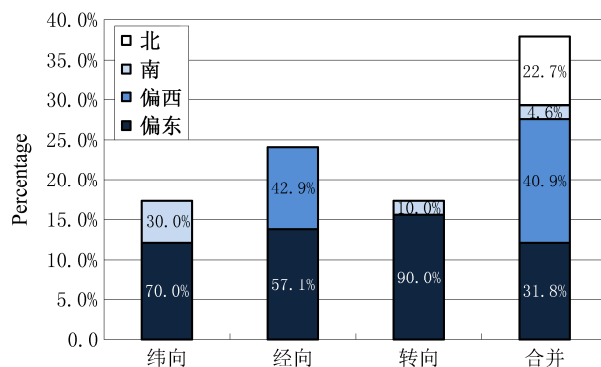


图 11 发展模态与移动方向的关系

Fig. 11 Percentage histogram of moving direction in four developing modes

到如下结论:

(1) 根据对流系统的演变特征, 梅雨锋上的线状、卵状和涡旋状短时强降水系统可分为四类发展模态: 纬向型 (17.3%)、转向型 (17.3%)、经向型 (24.1%) 和合并型 (37.9%)。纬向型、经向型和 70% 的转向型发展模态中短时强降水系统为线状中尺度对流系统, 而合并型主要为卵状 MCS。

(2) 纬向型 MCS 对流线呈东西向分布, 层状

云常位于对流线北部, 后向传播为主, 移动缓慢, 生命史最长, 但强降水持续时间比转向型 MCS 短。转向型 MCS 在系统初生阶段对流线呈准南北向分布, 系统成熟阶段转为准东西向分布, 后向传播为主, 系统移速比纬向型 MCS 快, 生命史则稍短, 但其强降水持续时间最长。经向型 MCS 的对流线一般呈南北向分布, 前向传播为主, 移动最快, 系统持续史短, 约为纬向型的一半, 30 mm h^{-1} 、 50 mm h^{-1}

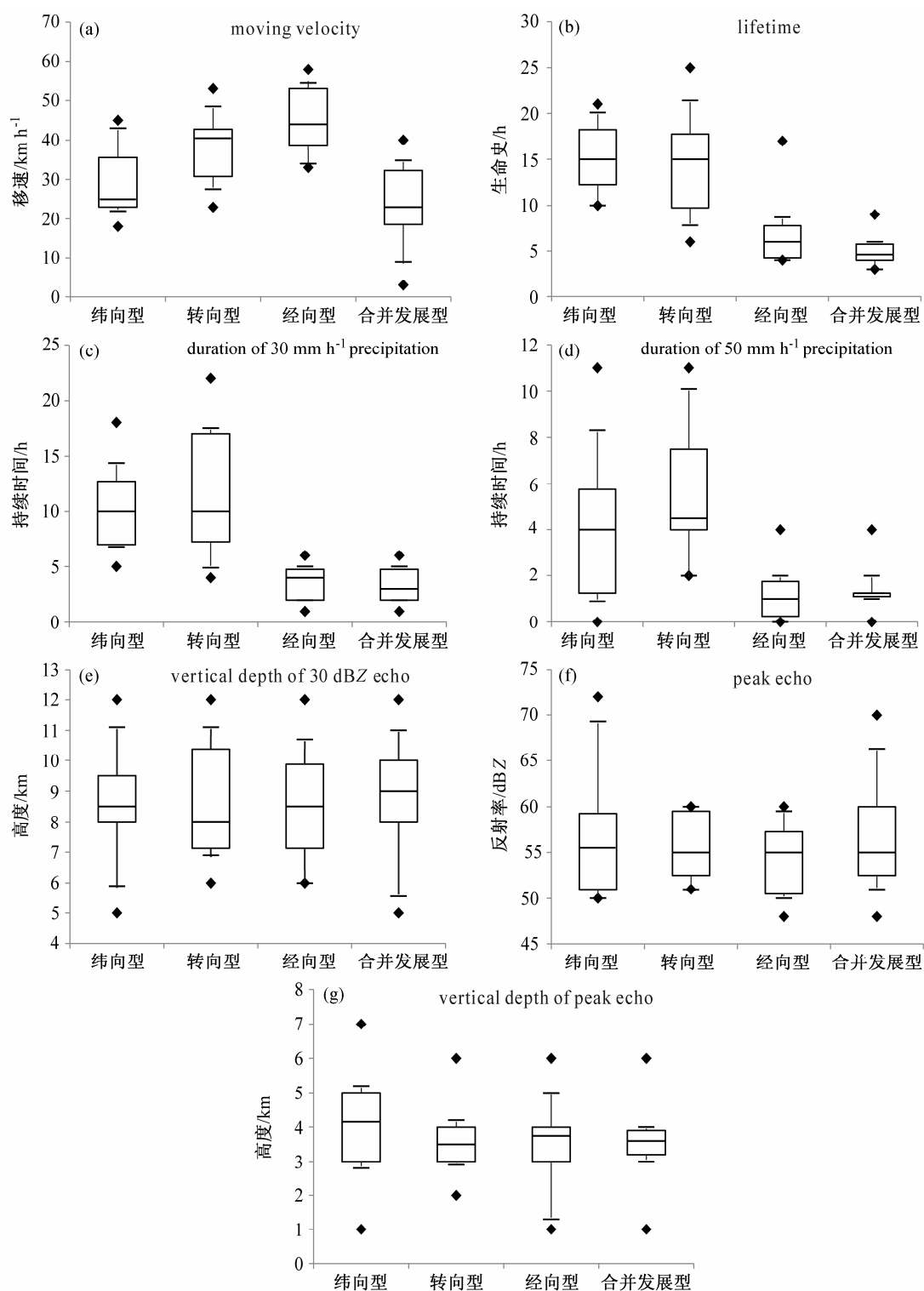


图 12 四类发展模态中 MCS (a) 移速、(b) 生命史、(c) 产生 30 mm h^{-1} 强降水持续时间、(d) 产生 50 mm h^{-1} 强降水持续时间、(e) 30 dBZ 回波顶高、(f) 最强回波、(g) 最强回波高度统计特征。◆表示最大值或最小值, 箱线顶端和底端实线表示 90% 和 10%, 箱线方框的下线、中线和上线分别表示下四分位数、中数和上四分位数

Fig. 12 MCSs statistical characters about (a) moving velocity, (b) lifetime, (c) duration of 30 mm h^{-1} precipitation, (d) duration of 50 mm h^{-1} precipitation, (e) vertical depth of 30 dBZ echo, (f) peak echo, and (g) vertical depth of peak echo in four developing modes. ◆ is the maximum and minimum values; the top and bottom solid lines represent the 90 percent and 10 percent values; the top, middle, and bottom of boxes represent the upper quartile, median, and lower quartile values

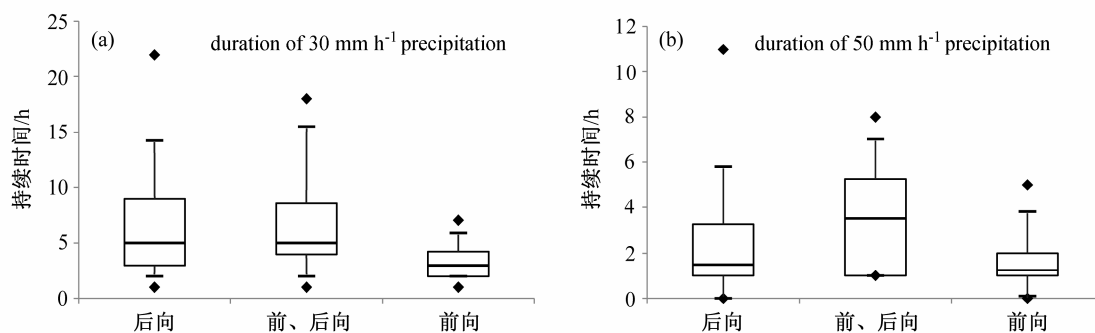


图 13 (a) 30 mm h⁻¹ 和 (b) 50 mm h⁻¹ 以上短时强降水持续时间在 MCS 前向、后向和前后向传播中的统计特征。◆表示最大值或最小值, 箱线顶端和底端表示 10% 和 90%, 箱线方框的下线、中线和上线分别表示下四分位数、中数和上四分位数

Fig. 13 The statistical characters about duration of (a) 30 mm h⁻¹ and (b) 50 mm h⁻¹ precipitation produced by back, forward and back-forward propagating MCSs. ◆ is the maximum and minimum values; the top and bottom solid lines represent the 90 percent and 10 percent values; the top, middle, and bottom of boxes represent the upper quartile, median, and lower quartile values

以上强降水持续时间约为转向型的 1/3 和 1/5。合并型 MCS 是由多个孤立对流单体合并发展成具有统一上升气流的卵状或狭窄对流带的云团, 后向传播为主, 移动最慢, 持续史最短, 产生的短时强降水持续时间最短。

(3) 纬向型 MCS 可向东或向南移动, 经向型 MCS 通常向东或向西运动, 合并型 MCS 可往任意方向移动, 并且只有该发展模态中 MCS 会向北运动。

(4) 虽然转向型 MCS 带来的短时强降水 (尤其 50 mm h⁻¹ 以上) 持续时间最长, 经向型和合并型 MCS 产生短时强降水持续时间短, 但四类发展模态中 MCS 的回波强度和回波高度的统计特征无明显区别。推测强降水持续时间可能与 MCS 的传播关系更加密切: 由于前向传播的 MCS 产生的短时强降水持续时间最短, 前后向传播并存的 MCS 带来的 50 mm h⁻¹ 极端降水持续时间最长, 而经向型和合并型中 MCS 前向传播占很大比重, 导致短生命史和更短的强降水; 转向型和纬向型中 MCS 的前后向传播比重均很大, 但转向型中不存在前向传播, 对应短时强降水持续时间最长, 尤其 50 mm h⁻¹ 以上极端降水。

上述结论仅利用梅雨锋降水的局部盛行区域 2 年的 58 个短时强降水个例统计分析获取, 未来仍需利用更多的个例以求获得更具普遍性和完整性的结论。此外, MCS 的发展模态及其运动和结构特征与他们发生发展的环境场关系也值得探究。

致谢 感谢国家气象信息中心提供雷达基数据和逐小时降水资料, 感谢南京大学提供雷达基数据处理软件。

参考文献 (References)

- Bluestein H B, Jain M H. 1985. Formation of mesoscale lines of precipitation: Severe squall lines in Oklahoma during the spring [J]. *J. Atmos. Sci.*, 42 (16): 1711–1732.
- Chi S S, Chen G T J. 1988. A diagnostic case study of the environmental conditions associated with mesoscale convective complexes: 27–28 May 1981 case [J]. *Atmos. Sci.*, 16: 14–30.
- Doswell C A III. 1994. Flash Flood-Producing Convective Storms: Current Understanding and Research [M]. *Proc. U.S.-Spain Workshop on Natural Hazards, Barcelona, Spain. National Science Foundation*, 97–107.
- Doswell C A III, Brooks H E, Maddox R A. 1996. Flash flood forecasting: An ingredients-based methodology [J]. *Wea. Forecasting*, 11 (4): 560–581.
- Fovell R G, Dailey P S. 1995. The temporal behavior of numerically simulated multicell-type storms. Part I: Modes of behavior [J]. *J. Atmos. Sci.*, 52 (11): 2073–2095.
- Gallus W A Jr, Snook N A, Johnson E V. 2008. Spring and summer severe weather reports over the midwest as a function of convective mode: A preliminary study [J]. *Wea. Forecasting*, 23 (1): 101–113.
- Hilgendorf E R, Johnson R H. 1998. A Study of the evolution of mesoscale convective systems using WSR-88D data. *Wea. Forecasting*, 13, 437–452.
- Houze R A Jr, Smull B F, Dodge P. 1990. Mesoscale organization of springtime rainstorms in Oklahoma [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 118 (3): 613–654.
- Johnson R H, Aves S A, Ciesielski P E, et al. 2005. Organization of oceanic convection during the onset of the 1998 East Asian Summer Monsoon. *Mon. Wea. Rev.*, 133, 131–148.
- Kato T, Goda H. 2001. Formation and maintenance processes of a stationary band-shaped heavy rainfall observed in Niigata on 4 August 1998. *J. Meteor. Soc. Japan*, 79, 899–924.
- Loehrer S M, Johnson R H. 1995. Surface pressure and precipitation life cycle characteristics of PRE-STORM mesoscale convective systems. *Mon. Wea. Rev.*, 123, 600–621.

- Pan Y J, Zhao K, Pan Y N. 2010. Single-Doppler radar observations of a high precipitation supercell accompanying the 12 April 2003 severe squall line in Fujian Province [J]. *Acta Meteor. Sinica*, 24 (1): 50–65.
- Parker M D, Johnson R H. 2000. Organizational modes of midlatitude mesoscale convective systems [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 128 (10): 3413–3436.
- Parker M D, Johnson R H. 2004a. Simulated convective lines with leading precipitation. Part I: Governing dynamics [J]. *J. Atmos. Sci.*, 61 (14): 1637–1655.
- Parker M D, Johnson R H. 2004b. Structures and dynamics of quasi-2D mesoscale convective systems [J]. *J. Atmos. Sci.*, 61 (5): 545–567.
- Schuesser H H, Houze R A Jr, Huntreiser H. 1995. The mesoscale structure of severe precipitation systems in Switzerland [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 123 (7): 2070–2097.
- Schumacher R S, Johnson R H. 2005. Organization and environmental properties of extreme-rain-producing mesoscale convective systems [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 133 (4): 961–976.
- Schumacher R S, Johnson R H. 2006. Characteristics of United States extreme rain events during 1999–2003 [J]. *Wea. Forecasting*, 21 (1): 69–85.
- Shin C S, Lee T Y. 2005. Development mechanisms for the heavy rainfalls of 6–7 August 2002 over the middle of Korean Peninsula [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 80: 1221–1245.
- 孙建华, 张小玲, 齐琳琳, 等. 2004. 2002 年中国暴雨试验期间一次低涡切变上发生发展的中尺度对流系统研究 [J]. *大气科学*, 28 (5): 675–691.
- Sun Jianhua, Zhang Xiaoling, Qi Linlin, et al. 2004. A study of vortex and its mesoscale convective system during China heavy rainfall experiment and study in 2002 [J]. *Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese)*, 28 (5): 675–691.
- 陶诗言. 1977. 有关暴雨分析预报的一些问题 [J]. *大气科学*, 1 (1): 64–72.
- Tao Shiyan. 1977. The comments about heavy rainfall analysis and forecasting [J]. *Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese)*, 1 (1): 64–72.
- 陶诗言. 1980. 中国之暴雨 [M]. 北京: 科学出版社, 66–90.
- Tao Shiyan. 1980. Heavy Rain in China (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press, 66–90.
- 陶诗言, 赵煜佳, 陈晓敏. 1958. 东亚的梅雨期与亚洲上空大气环流季节变化的关系 [J]. *气象学报*, 29 (2): 119–134.
- Tao Shiyan, Zhao Yijia, Chen Xiaomin. 1958. The relationship between Mei-yu in far east and the behavior of circulation over Asia [J]. *Acta Meteor. Sinica (in Chinese)*, 29 (2): 119–134.
- 陶诗言, 张小玲, 张顺利. 2003. 长江流域梅雨锋暴雨灾害研究 [M]. 北京: 气象出版社, 192.
- Tao Shiyan, Zhang Xiaoling, Zhang Shunli. 2003. A Study on the Disaster of Heavy Rainfalls over the Yangtze River Basin in the Meiyu Period [M] (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 192.
- 陶诗言, 卫捷, 张小玲. 2008. 2007 年梅雨锋降水的大尺度特征分析 [J]. *气象*, 34 (4): 3–15.
- Tao Shiyan, Wei Jie, Zhang Xiaoling. 2008. Large-scale features of the Mei-Yu front associated with heavy rainfall in 2007 [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 34 (4): 3–15.
- Wang J J. 2004. Evolution and structure of the mesoscale convection and its environment: A case study during the early onset of south East Asian summer monsoon [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 132 (5): 1104–1120.
- Wang M J, Zhao K, Wu D. 2011. The T-TREC technique for retrieving the winds of landfalling typhoons in China [J]. *Acta Meteor. Sinica*, 25 (1): 91–103.
- 王晓芳, 崔春光. 2012. 长江中下游地区梅雨期线状中尺度对流系统分析 I: 组织类型特征 [J]. *气象学报*, 70 (5): 909–923.
- Wang Xiaofang, Cui Chunguang. 2012. Analysis of the linear mesoscale convective systems during the Meiyu period in the middle and lower reaches of the Yangtze River. Part I: Organization mode features [J]. *Acta Meteor. Sinica (in Chinese)*, 70 (5): 909–923.
- 魏超时, 赵坤, 余晖, 等. 2011. 登陆台风卡努 (0515) 内核区环流结构特征分析 [J]. *大气科学*, 35 (1): 68–80.
- Wei Chaoshi, Zhao Kun, Yu Hui, et al. 2011. Mesoscale structure of landfall typhoon Khanun (0515) by single Doppler radar [J]. *Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese)*, 35 (1): 68–80.
- 张顺利, 陶诗言, 张庆云, 等. 2002. 长江中下游致洪暴雨的多尺度条件 [J]. *科学通报*, 47 (6): 467–473.
- Zhang Shunli, Tao Shiyan, Zhang Qingyun, et al. 2002. Large and meso- α scale characteristics of intense rainfall in the mid-and lower reaches of the Yangtze River [J]. *Chinese Sci. Bull. (in Chinese)*, 47 (6): 467–473.
- 张小玲, 陶诗言, 张顺利. 2004. 梅雨锋上的三类暴雨 [J]. *大气科学*, 28 (2): 187–205.
- Zhang Xiaoling, Tao Shiyan, Zhang Shunli. 2004. Three types of heavy rainstorms associated with the Meiyu front [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 28 (2): 187–205.
- 张小玲, 陶诗言, 孙建华. 2010. 基于“配料”的暴雨预报 [J]. *大气科学*, 34 (4): 754–756.
- Zhang X L, Tao S Y, Sun J H. 2010. Ingredients-based heavy rainfall forecasting [J]. *Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese)*, 34 (4): 754–766.
- Zheng L L, Sun J H, Zhang X L, et al. 2012. Organizational modes of mesoscale convective systems over central East China [J]. *Wea. Forecasting*, 28: 1081–1098.