

刘瑞翔,丁治英,王一颀.2007—2013年夏季江淮地区 MCS 和 MCV 与暴雨关系的统计特征.气象科学,2016,36(2):236-243.
LIU Ruixiang, DING Zhiying, WANG Yijie. Statistical Characteristics of Relations of Rainstorms with MCSs and MCVs in Yangtze-Huaihe Basin during Summer from 2007 to 2013. Journal of the Meteorological Sciences, 2016, 36(2): 236-243. doi: 10.3969/2014jms.0106

2007—2013年夏季江淮地区 MCS 和 MCV 与暴雨关系的统计特征

刘瑞翔^{1,2} 丁治英^{1,2} 王一颀^{1,2}

(1 南京信息工程大学 气象灾害教育部重点实验室,南京 210044; 2 南京信息工程大学 大气科学学院,南京 210044)

摘要 利用 FY-2D 逐时 T_{bb} 资料和 NCEP/NCAR 再分析资料,对 2007—2013 年夏季(6—8 月)江淮地区暴雨和大暴雨日的 MCS 和 MCV 进行普查,将 MCS 分为圆状的 MCC 和 M β CCS 以及带状的 PECS 和 M β ECs,并根据 MCV 能否激发新的对流将其分为发展型和不发展型。结果表明:夏季江淮地区由 MCS 造成的暴雨和大暴雨日占总天数的 74.3%。追踪产生暴雨的 65 次 MCS 过程中,带状 MCS 所占比例明显大于圆状 MCS; MCS 多生成于江淮中东部的陆地上,以向东—东北和南—东南移动为主,其移动距离集中在 1~5 个经纬距。暴雨和大暴雨日中出现的 MCV 主要位于对流层中低层,且多出现在 MCS 的西侧和北侧;PECS 和 M β ECs 比 MCC 更易衍生 MCV 过程,未出现 M β CCS 伴随的 MCV 个例。不同类型 MCS 衍生出的 MCV 厚度差异很小,MCV 的厚度与其类型、对应暴雨日的等级无明显关系。6—8 月,MCV 发生的次数递减,MCV 多发生于午后 14 时左右,夜间到凌晨很少生成。由 MCS 引发的大暴雨日中,有 MCV 出现的天数占 61.5%,明显较暴雨日高,大暴雨日中出现的 MCV 多数都能引发“二次对流”。

关键词 暴雨;中尺度对流系统;中尺度对流涡旋;二次对流

分类号: P458.121.1

doi: 10.3969/2014jms.0106

文献标识码: A

Statistical Characteristics of Relations of Rainstorms with MCSs and MCVs in Yangtze-Huaihe Basin during Summer from 2007 to 2013

LIU Ruixiang DING Zhiying WANG Yijie

(1 Key Laboratory of Meteorological Disaster of Ministry of Education, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China;

2 College of Atmospheric Sciences, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract Based on the FY-2D geostationary satellite black body temperature data and NCEP/NCAR reanalysis data, the mesoscale convective systems (MCSs) over Yangtze-Huaihe basin were classified into MCC, PECS, M β CCS and M β ECs during rainstorm and heavy rainstorm days in summer (June-August) from 2007—2013. The mesoscale convective vortex (MCVs) derived from MCSs were divided into two kinds: developed MCVs and non-developed MCVs. The results show that the percentage of rainstorm and heavy rainstorm days caused by MCSs was 74.3%. PECS and M β ECs occurred more frequently than MCC and M β CCS among the 65 MCS cases in those rainstorm days. Most MCS cases appeared in the middle and eastern part of Yangtze-Huaihe basin however, there are very few on the sea. The MCS ex-

收稿日期 (Received): 2014-08-29; 修改稿日期 (Revised): 2014-12-28; 网络出版日期 (Published on-line): 2016-05-24

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1243.P.20160524.1021.006.html>

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2013CB430103); 国家自然科学基金资助项目(41375058); 江苏省优秀科技创新团队基金; 江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD)

通信作者 (Corresponding author): 丁治英 (DING Zhiying). dingzhiying@nuist.edu.cn

tended east-northeast ward and its moving path is mainly limited to 1—5 latitude and longitude degrees. MCVs mainly occurred in the middle and low troposphere and spreaded along Yangtze river, and half of the 24 cases of MCV were located in the western and northern parts of MCSs. The percentage of both PECS and M β ECs leading to MCVs was about 41%, and 25% for MCC while no MCV case could be found in M β CCS. The thickness distinction between MCV caused by different kinds of MCSs was quite modest, and it seemed to be independent on its origin MCS type and the grade of rainstorm days. The number of MCV cases declined from June to August and the peak time for MCV initiation was around 14:00 BJT. In the 13 heavy rainstorm days, 8 cases of MCV could be found, most of them could lead to new MCSs or contribute to their original MCSs.

Key words Rainstorm; MCS; MCV; Secondary convection

引 言

中尺度对流系统(Mesoscale Convective System, MCS)泛指水平尺度为 2~2 000 km 左右,具有旺盛对流运动的天气系统,是造成我国夏季暴雨和洪涝灾害的主要影响系统之一。

针对 MCS 的空间分布和结构特征,国内外已经有了大量的研究。中尺度对流复合体(Mesoscale Convective Complex, MCC)作为 MCS 的一种重要类型,其定义最早由 Maddox^[1]给出,关于 MCS 的研究也是从 MCC 开始的^[2-5]。实际上, MCC 发生的频次远小于带状的 MCS,后来学者在普查时引入了持续拉伸型对流系统(Persistent Elongated Convective System, PECS)的概念^[6]。Jirak, et al^[7]在此基础上给出了 β 中尺度对流复合体(Meso- β Circular Convective System, M β CCS)和 β 中尺度持续拉伸型对流系统(Meso- β Elongated Convective System, M β ECs)的定义。马禹等^[8]和郑永光等^[9]分别对夏季我国及周边地区 MCS 进行了统计,指出黄河和长江中下游是 MCS 活跃区,但其研究都未考虑 MCS 的形状,即偏心率。后来学者在 Jirak 分类标准的基础上,对我国不同地区 MCS 的气候特征做了普查^[10-12]。此外,也有不少学者对 MCS 个例进行了研究^[13-17]。

随着对 MCS 了解的深入,越来越多的学者指出 MCS 层状云降水区有 MCV 的存在。Johnston^[18]从一系列的可见光卫星云图的胶片中最早识别出了气旋性涡旋。Bartels, et al^[19]指出 MCV 多发生于尺度较大的 α 中尺度对流系统中,能直接观测到 MCV 的个例只占 MCS 的 5%。Trier, et al^[20]的研究表明,12%的 MCS 中可以识别出 MCV,且 MCV 一般出现在 MCS 减弱阶段,并能引起“二次对流”的发展。关于 MCV 的形成机制,主要有以下几种观点:

ZHANG, et al^[22]指出中低层辐合向上发展对 MCV 生成起重要作用;而 Raymond, et al^[22]则认为层云区非绝热加热能促进 MCV 生成;Verlinde, et al^[23]更强调涡度倾斜,即水平涡度向垂直涡度的转化作用。目前,国内学者对 MCV 的研究工作还较少,且现有工作主要是利用数值模拟等方法,着眼于对某个个例的分析^[24,25],但针对 MCV 统计特征的研究还较少。王金鑫等^[26]对近 30 a 来国内外 MCV 的研究进展作了总结。王微等^[27]用计算机自动识别的方法对夏季我国东部地区对流系统和对流涡旋进行了普查。

可以看出,目前我国关于 MCS 统计特征的研究较多,但已有的统计工作所用资料时间跨度较短,且大多研究只针对 MCS 本身,就 MCS 和 MCV 以及暴雨关系的探讨还较少;另一方面,国内外学者对 MCV 形成机制观点的差异也从侧面说明不同 MCV 的成因有很大区别,因而有必要对 MCV 按照一定标准进行分类研究。江淮地区降水时间集中,强度大,极易发生致洪暴雨,这种持续性强降水过程与 MCS 及其衍生的 MCV 有何联系?不同类型 MCS 和 MCV 对暴雨的贡献有何差异?针对这些问题,本文在前人研究基础上,使用更新时间序列的资料,对 2007—2013 夏季暴雨日 MCS 及其衍生 MCV 的生成、发展和移动特征进行普查分析,初步探讨 MCS 和 MCV 与暴雨的关系,以期对今后针对 MCS 和 MCV 的研究提供部分事实依据。

1 资料和方法

本文使用的资料包括:国家卫星气象中心提供的 FY-2D 逐时 T_{BB} 资料(2007—2013 年 6—8 月,空间分辨率 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$)、NCEP/NCAR 垂直 26 层的多要素逐 6 h 客观分析资料(水平分辨率 $1.0^\circ \times 1.0^\circ$)以及用于普查暴雨日的全国 753 站逐日降水资料。

我国中东部地区站点分布较均匀(图略),选取江淮地区 2007—2013 年夏季降水资料完整的 92 个站点,根据各站 20 时逐日降水量资料作出如下定义:同一区域或相近区域内 5 个以上站点日降水量 ≥ 10 mm 为一个中雨日, ≥ 25 mm 为一个大雨日, ≥ 50 mm 为一个暴雨日, ≥ 100 mm 为一个大暴雨日,普查中发现,夏季江淮地区同一天出现降水量 ≥ 200 mm 的站点不会超过两个,因此本文不对特大暴雨日作定义。在此基础上,分别追踪造成暴雨和大暴雨日的 MCS 过程,对暴雨和大暴雨日中的 MCS 整个生命史期间环流进行普查,得到 MCS 衍生的 MCV 个例,通过分析 MCS 和 MCV 的位置、类型,初步探究 MCS 和 MCV 与暴雨的关系。

关于 MCS 的标准一直存在较大的不一致性。2003 年 Jirak, et al^[7] 在前人分类研究基础上,给出了具有广泛代表性的分类标准,即先根据 MCS 生命史和 $T_{BB} \leq -52$ °C 冷云盖面积将其分为 $M\alpha CS$ 和 $M\beta CS$,再根据其成熟时偏心率分别将 $M\alpha CS$ 分为 MCC 和 PECS,将 $M\beta CS$ 分为 $M\beta CCS$ 和 $M\beta ECS$,这种分类标准既考虑了 MCS 的尺度,同时又兼顾其持续时间和形状。统计表明,对流云团 $T_{BB} \leq -52$ °C 廓线面积达到 30 000 km² 标准而最大尺度未达到 50 000 km² 时,也能造成暴雨等灾害性天气过程,因此本文在使用 Jirak 分类标准时,去掉了 β 尺度对流系统中 $T_{BB} \leq -52$ °C 最大面积大于 50 000 km² 的限制条件,即当满足表 1 所示的标准,且低于 -52 °C 的 T_{BB} 线经过江淮地区并造成降水,即定义为一次 MCS 过程。MCS 的面积使用 MeteoInfo 气象软件测量,该软件能够清晰识别出 -52 °C T_{BB} 线并计算逐小时冷云盖面积,本文用最小二乘法计算 MCS 面积最大时刻 -52 °C 轮廓的拟合椭圆方程,利用拟合所得短轴和长轴的比值确定 MCS 的偏心率。

表 1 基于静止卫星红外云图的 MCS 分类标准

Table 1 Classification criterion based on geostationary satellite infrared imagery

MCS 类型	$T_{BB} \leq -52$ °C 的 满足尺度		形状
	连续冷云面积 /km ²	标准的时间 /h	
MCC	$\geq 5 \times 10^4$	≥ 6	最大尺度偏心率 ≥ 0.7
PECS	$\geq 5 \times 10^4$	≥ 6	$0.2 \leq$ 最大尺度偏心率 ≤ 0.7
$M\beta CCS$	$\geq 3 \times 10^4$	≥ 3	最大尺度偏心率 ≥ 0.7
$M\beta ECS$	$\geq 3 \times 10^4$	≥ 3	$0.2 \leq$ 最大尺度偏心率 ≤ 0.7

2 MCS 的时间分布特征

按照前文定义,共得到 2007—2013 年夏季中雨及以上降水日 349 d,其中中雨日 147 d,大雨日 132 d,暴雨日 55 d,大暴雨日 15 d。为探究暴雨发生与 MCS 的关系,本文重点对这 55 个暴雨日和 15 个大暴雨日中的 MCS 进行追踪,结果表明:有 39 个暴雨日是由 MCS 造成的,占 55 个暴雨日总数的 70.9%,与黄河下游地区和美国地区相当;15 个大暴雨日中,有 13 个由 MCS 引发,占大暴雨日的 86.7%,这一比例较黄河下游地区和美国地区大^[7,11]。可以看出,江淮地区暴雨,尤其是大暴雨的发生和 MCS 的活动关系密切。通常把日降水量 ≥ 200 mm 作为特大暴雨标准,由 MCS 造成的江淮地区 39 个暴雨日和 13 个大暴雨日中,有特大暴雨站点出现的天数分别为 7 d 和 3 d。分析 18 个非 MCS 引发的暴雨日,发现这些天中的强降水大都是由台风和高于 -52 °C 云团造成,且多发生在副高外围的强水汽通道上,由于水汽充足,云团云顶温度不用达到很低也能产生强降水;此外,还有一部分云团云顶温度也很低,造成了短时强降水,但面积或持续时间没达到表 1 标准,因此没有被统计到。

为方便表述,下文将 MCS 造成的 39 个暴雨日和 13 个大暴雨日统称为暴雨日,从这些暴雨日中,共追踪到 65 个 MCS 过程,由于各年份暴雨日出现的频次不同,因此对应造成江淮暴雨日的 MCS 个例数年际差异也较大,2012 年共有 14 个,为最多年份,2013 年最少,各暴雨日中只追踪到 4 个 MCS。从夏季各月 MCS 分布上看(表 2):6 月和 7 月, MCS 总个例数相差不大,8 月最少;每年 6 月末到 7 月初为江淮梅雨期,冷暖空气交汇频繁,利于 MCS 生成和发展,8 月副热带高压发展,西伸影响江淮地区,抑制 MCS 生成。从类型上看,和暴雨日相联系的 MCS 中,PECS 和 $M\beta ECS$ 比 MCC 和 $M\beta CCS$ 出现频次明显偏多,与 Jirak, et al^[7] 在统计美国 1996—1998 年 4—8 月 MCS 时得到的结论是相似的,即相同尺度下,带状 MCS 对暴雨日的贡献更大。

表 2 2007—2013 年夏季江淮地区暴雨日的 MCS 个数

Table 2 MCSs number over Yangtze-Huaihe basin during rainstorm days in summer from 2007 to 2013

	MCC	PECS	$M\beta CCS$	$M\beta ECS$	MCS
6 月	8	13	2	6	29
7 月	6	9	2	8	25
8 月	2	5	1	3	11
总计	16	27	5	17	65

表 3 是江淮地区 MCS 成熟时的平均面积、偏心率和生命史特征。6—8 月, MCC 和 PECS 的平均面积是逐月减小的; M β CCS 的面积先减小、后增大; 7 月和 8 月 M β ECS 的面积相当, 6 月最小。夏季平均看, MCC 平均面积大于 PECS, 而 M β CCS 平均面积则略小于 M β ECS。之前学者指出^[11,12], 相同尺度下, 带

状 MCS 平均面积要大于圆状, 因为相当一部分带状 MCS 是由不同较大尺度云团合并而成的, 本文追踪的是暴雨日的 MCS 个例, 并未对整个夏季江淮地区所有 MCS 个例进行讨论, 因而表 3 中的平均面积很大程度上由个别成熟期面积超大的 MCS 个例决定。

表 3 2007—2013 年夏季江淮地区暴雨日 MCS 成熟时的平均面积(单位: 10^4 km^2)、偏心率和生命史(单位: h) 特征
Table 3 Statistics of mean areas(unit: 10^4 km^2), eccentricity for each mature MCS and mean life time(unit: h) over Yangtze-Huaihe basin during rainstorm days in summer from 2007 to 2013

	MCC			PECS			M β CCS			M β ECS		
	面积	偏心率	生命史	面积	偏心率	生命史	面积	偏心率	生命史	面积	偏心率	生命史
6 月	55.51	0.77	18.0	31.90	0.46	14.5	7.46	0.86	9.0	6.86	0.41	6.8
7 月	11.92	0.78	11.0	30.63	0.43	16.6	5.17	0.88	4.5	6.86	0.54	5.1
8 月	8.08	0.78	9.0	14.75	0.51	11.0	7.54	0.78	4.0	6.42	0.63	5.7
夏季	33.24	0.77	13.5	28.30	0.46	14.6	6.56	0.85	6.2	6.78	0.51	5.8

整个夏季, 造成江淮暴雨日的 α 尺度 MCS 偏心率小于相同形状的 β 尺度, 除 M β CCS 外, 其它三类 MCS 偏心率较黄河下游和北美地区小^[7,11]; 相同尺度下, MCC 平均生命史小于 PECS, 而 M β CCS 的平均生命史略大于 M β ECS。此外, 江淮暴雨日的 MCS 发生—成熟平均时间比成熟—消亡时间长, 即表现出发展慢、消亡快的特征(表略), 而黄河下游 MCS 则有发展快、消亡慢的特点^[11], 可见, 不同地区 MCS 的偏心率和生命史特征有很大的差异。

3 MCS 的空间分布及移动特征

图 1 是江淮暴雨日各类型 MCS 的生成地地理分布图。可以看出, 造成江淮区域性暴雨的 MCS 大部分形成于江淮本地, 安徽南部、江西西北部和湖北东部为 MCS 生成相对密集区, 山脉地形抬升作用是触发对流云的重要机制之一, 江淮地区 MCS 在该地区发生相对密集, 与气团受大别山和黄山山脉阻碍爬升、垂直速度增大有直接关系。从各类型看, 从四川、云贵高原东移并影响江淮地区的多为 PECS, 而总体上, PECS 多发生于江淮中部; 相同尺度下, MCC 生成地明显较 PECS 偏东, 主要集中在江淮地区中东部; 各暴雨日中追踪到的 M β CCS 都发生于长江以南; M β ECS 生成位置有明显沿长江分布特征。

梁巧倩等^[10]统计得到自西向东是华南前汛期各类 MCS 主要移动路径的结论, 曾波等^[12]则指出, 夏季我国中东部地区圆状 MCS 有由西北向东南的移动趋势, 而带状 MCS 主要路径为西南向东北。为进一步研究夏季江淮暴雨日的 MCS 移动特征, 本文

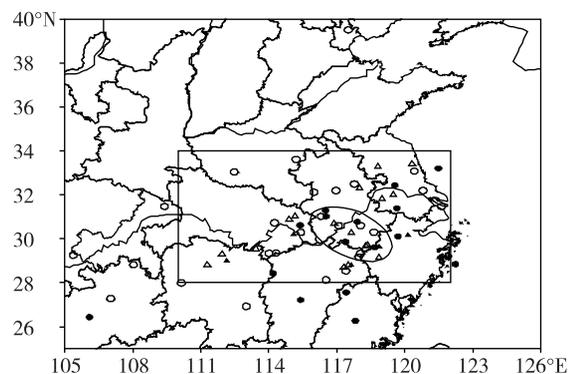


图 1 2007—2013 年夏季江淮地区暴雨日 MCS 生成地理分布(矩形区域为江淮地区(28~34 °N, 110~122 °E); 椭圆区域为 MCS 生成相对集中地; ●、○、▲、△ 分别代表 MCC、PECS、M β CCS、M β ECS)

Fig.1 Geographical distribution of generation for MCSs during rainstorm days in summer from 2007 to 2013 (Rectangular region is Yangtze-Huaihe basin; Elliptic region is the place where MCS cases happen frequently; ●, ○, ▲, △ represent MCC, PECS, M β CCS, M β ECS respectively)

根据 MCS 消亡时刻中心位置相对生成时刻所在的象限, 将其移动路径分为 4 类: 东—东北向、北—西北向、西—西南向和南—东南向, 并根据 MCS 生成—成熟—消亡 3 个时段中心点连成的折线段长度表示其移动距离, 表 4 和表 5 给出了不同方向和移动距离 MCS 出现个数。

可以看出, 四类 MCS 都以东—东北向移向居多, 这与夏季江淮地区相对副高位置有关, 夏季江淮位于副高西北部, 西南气流旺盛, 而我国中纬度为西风带天气系统, 二者共同主导了 MCS 的移动方向。此外, 南—东南移向也是 MCS 主要移动路径, 而北—西北和西—西南移向的 MCS 所占比例分别只

有 6.2% 和 10.8%, 对这部分 MCS 进行追踪, 发现其偏西路径大多和台风的移动以及追踪过程中云团后部新的冷云注入有关。

表 4 2007—2013 年夏季江淮暴雨日不同移向 MCS 个数

Table 4 MCSs number with different moving direction over Yangtze-Huaihe basin during rainstorm days in summer from 2007 to 2013

	东—东北	北—西北	西—西南	南—东南
MCC	10	0	1	5
PECS	12	1	5	9
M β CCS	4	1	0	0
M β ECS	7	2	1	7
总数	33	4	7	21

表 5 2007—2013 年夏季江淮暴雨日移动不同经纬距(单位:°) MCS 个数

Table 5 MCSs number of with different moving distance over Yangtze-Huaihe basin during rainstorm days in summer from 2007 to 2013

	0~1	1~5	5~10	≥ 10
MCC	2	6	2	6
PECS	2	13	4	8
M β CCS	1	4	0	0
M β ECS	5	11	0	1
总数	10	34	6	15

MCS 的移动距离多集中在 1~5 个经纬距, 占暴雨日 MCS 总数的 52.3%, 10 个经纬距以上的远距离路径几乎都出现在 α 尺度的 MCC 和 PECS 中。值得注意的是, 除 1~5 个经纬距外, 相当一部分 MCC 和 PECS 移动 10 个经纬距以上, 而移动 5~10 个经纬距的却很少, 即 α 尺度两类 MCS 移动距离呈跳跃式分布。本文普查的对象是夏季江淮暴雨日中的 MCS 个例, 并未就夏季所有 MCS 进行讨论, 这种跳跃式分布可能和样本数较少有关。统计表明, MCS 的移动范围与其生命史关系密切, 而新的云团并入是 MCS 不断发展的重要原因, 移动 10 个经纬距以上的 MCS, 在其发展过程中几乎都有新的冷云注入。 β 尺度 MCS 的移动距离受其生命史限制, 因而明显较 α 尺度小, 只有 1 次 β 尺度 MCS 过程移动达 10 个经纬距以上。把移动距离小于 1 个经纬距的 MCS 定义为准静止型, 准静止型 MCS 占暴雨日 MCS 样本总数的 15.4%。

4 MCV 的时空分布特征

之前有研究表明^[25,27], 与美国相比, 我国东部中尺度对流涡旋主要位于较低层次, 大多分布在

850 hPa 上, 从位置上看, MCV 多发生于 MCS 发展至减弱时段的层状云降水区。本文对 MCV 定义如下: 造成江淮暴雨日的 MCS 在成熟到消亡过程中, 其冷云盖范围和周围(主要为层状云降水区) 700 或 850 hPa 上有闭合涡旋出现, 即为一次 MCV 过程。按照这一标准, 对表 2 中造成江淮地区暴雨日的 65 个 MCS 整个生命史阶段的环流进行普查, 发现有 22 个 MCS 个例伴随 24 次 MCV 过程出现(表 6), 其中有两个 MCS 在其发展过程中分别衍生出两个涡旋。衍生出 MCV 的 MCS 占 MCS 样本总数的 33.8%, 本文普查的是夏季江淮暴雨日的 MCV 过程, 这一比例比 Trier, et al^[20]、王微等^[27] 分别统计得到的 12% 和 18.65% 高很多, 这也表明伴随 MCV 出现的 MCS 与暴雨的关系更为密切。

表 6 2007—2013 年夏季江淮暴雨日 MCV 个例

Table 6 MCV cases over Yangtze-Huaihe basin during rainstorm days in summer from 2007 to 2013

序号	MCV 出现时间(北京时间)	对应 MCS 类型	MCV 厚度/hPa	暴雨日等级	MCV 类型
1	2007 年 6 月 11 日 14 时	MCC	300	暴雨	不发展
2	2007 年 7 月 7 日 20 时	PECS	200	暴雨	发展
3	2007 年 7 月 9 日 08 时	PECS	300	大暴雨	发展
4	2008 年 6 月 10 日 14 时	M β ECS	250	大暴雨	不发展
5	2008 年 6 月 21 日 20 时	PECS	300	暴雨	发展
6	2008 年 8 月 16 日 14 时	M β ECS	100	大暴雨	发展
7	2009 年 6 月 2 日 14 时	PECS	100	暴雨	发展
8	2009 年 6 月 29 日 14 时	PECS	250	暴雨	不发展
9	2009 年 6 月 30 日 14 时	M β ECS	200	大暴雨	发展
10	2009 年 7 月 27 日 14 时	MCC	150	暴雨	发展
11	2010 年 6 月 19 日 08 时	PECS	200	大暴雨	发展
12	2010 年 6 月 20 日 02 时	PECS	350	暴雨	发展
13	2010 年 7 月 12 日 08 时	M β ECS	250	大暴雨	发展
14	2010 年 7 月 14 日 14 时	PECS	350	暴雨	不发展
15	2011 年 6 月 5 日 08 时	PECS	250	暴雨	不发展
16	2011 年 6 月 10 日 20 时	MCC	150	暴雨	不发展
17	2011 年 6 月 14 日 14 时	PECS	400	暴雨	发展
18	2011 年 6 月 18 日 14 时	M β ECS	350	大暴雨	不发展
19	2012 年 6 月 26 日 14 时	MCC	500	暴雨	不发展
20	2012 年 6 月 27 日 02 时	PECS	250	暴雨	发展
21	2012 年 7 月 13 日 14 时	M β ECS	250	大暴雨	发展
22	2012 年 7 月 13 日 14 时	M β ECS	300	大暴雨	发展
23	2013 年 7 月 5 日 08 时	M β ECS	200	暴雨	不发展
24	2013 年 8 月 24 日 20 时	PECS	150	暴雨	发展

6 月各暴雨日中 MCV 出现的频次最高,共 14 个个例,7 月份有 8 个,而 8 月最少,仅有两例。6—7 月暴雨过程多与梅雨锋活动有关,梅雨锋中低层切边线上易形成气旋性扰动,利于 MCV 发展,而 8 月副高西伸北抬,抑制涡旋生成。从 MCV 首次被追踪到的时间上看,有 13 次 MCV 过程发生于午后 14 时,占 MCV 样本数的一半以上,08 时和 18 时出现的个例数分别为 5 例、4 例,而夜间到凌晨时段 MCV 较少发生。需要说明的是,本文普查流场时使用的是时间分辨率为 6 h 的 FNL 资料,受分辨率限制,可能会有部分生命史较短的 MCV 未被统计到。

把 2007—2013 年夏季江淮暴雨日 MCV 第一次在流场中被普查到的位置定义为 MCV 生成地。由图 2 可知,大部分 MCV 过程在陆地生成,海上和海陆交界位置出现的只有 4 次。MCV 生成地存在两个集中区,分别为安徽中部—江西北部一带以及湖北中部—湖南东北部地区。对 MCV 发生前 12 h 的环流背景进行普查(图略),可将 500 hPa 上 MCV 发生的环流形势分为槽前和槽后两种类型,共得到槽前型 15 例,槽后型 9 例。无论对于槽前型还是槽后型发生环境,所有 MCV 个例几乎都形成于副高边缘的强西南气流中,副高外围水汽通道中的暖湿输送强,有利于强降水的发生,降水发生时释放的大量凝结潜热,为 MCV 生成提供了热力条件。此外,副高外围强的西南气流本身也存在热量和扰动的输送,有利于 MCV 生成和发展。

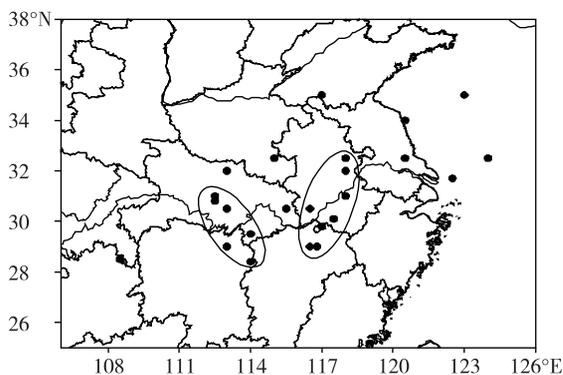


图 2 2007—2013 年夏季江淮暴雨日 MCV 生成地理分布 (椭圆区域为 MCV 生成相对集中地)

Fig.2 Geographical distribution of generation for MCVs over Yangtze-Huaihe basin during rainstorm days in summer from 2007 to 2013 (Elliptic region is the place where MCV cases happen frequently)

由于所用资料分辨率限制,无法对 MCV 整个生命史阶段的轨迹进行追踪,但就其和 MCS 的相对位置而言,仍有一定的统计意义(图 3)。MCV 多形成于 MCS 的北部和西部,其次为西北和东北,这与王微等^[27]的结论是相似的。夏季江淮地区主要位于

副高西北部, MCS 西南侧生成的 MCV 只有两例,而东部仅有 1 例, MCS 南部和东南没有 MCV 生成,这可能和副热带高压的抑制有关。

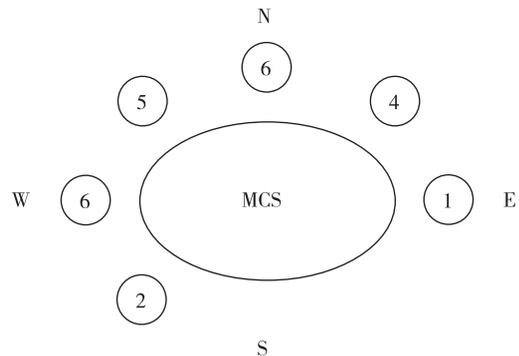


图 3 2007—2013 年夏季江淮暴雨日 MCV 与 MCS 相对位置分布 (图中数字表示该相对位置 MCV 发生个数)

Fig.3 Relative position distribution of MCVs responding to MCSs over Yangtze-Huaihe basin during rainstorm days in summer from 2007 to 2013 (Data in the circle represent the number of MCV cases which appear in this relative position)

5 MCS 和 MCV 与暴雨的关系

表 6 中,从衍生 MCV 的 MCS 类型上看,伴随 MCV 出现的 PECS 和 M β ECs 分别为 12 例和 8 例,分别占表 2 中各自样本总数的 44% 和 47%,有 4 次 MCC 过程伴随 MCV 生成,占暴雨日 MCC 样本数的 25%,未有 M β CCS 衍生出的 MCV 个例,即带状 MCS 在成熟-消亡过程中比圆状 MCS 更易伴随 MCV 出现; MCV 在移动发展中常激发出新的对流,从而造成持续性强降水过程,这也与前文中带状 MCS 更易造成暴雨过程的结论是相互印证的。

前文得到,夏季江淮地区由 MCS 造成的暴雨日和大暴雨日分别为 39 d 和 13 d,结合表 6 可知,13 个大暴雨日中有 MCV 生成的共 8 d,占 61.5%,39 个暴雨日中出现 MCV 共有 15 d,占 38.5%,即 MCV 在大暴雨日中出现的比例明显较暴雨日高。

总结前人研究结论^[22,25],可以将 MCS、MCV 和暴雨的关系概括为:造成强降水过程的 MCS 在成熟-消亡阶段,在其层状云降水区内由于降水潜热释放,易发生气旋性扰动并发展成为 MCV, MCV 的形成对 MCS 内的强上升气流起维持作用,并能激发新的对流或加强原有对流,从而引发持续性强降水过程,这是一种正反馈机制。本文在对 MCV 普查时发现,并不是所有的 MCV 都能激发出新的对流。为了进一步探讨 MCV 与 MCS、特别是与“二次对流”的关系,参照张元春等^[25]的标准对 MCV 进行分类,即根据 MCV 能否激发新的对流或加强原有对流将其分为两类:发展型和不发展型。按照这一标准可将

夏季江淮暴雨日的 MCV 分为 15 个发展型和 9 个不发展型,具体如表 6 所示,即大部分 MCV 都能激发出新的对流或加强原有对流;其中,大暴雨日中发生的 MCV 共 9 例,只有 2 例为不发展型,可以看出, MCS 和 MCV 的这种正反馈机制对暴雨、尤其是特大暴雨的发生起重要的作用。

把 MCV 在流场中闭合环流出现的最低层和最高层的差值定义为 MCV 的厚度。统计得到 2007—2013 年夏季暴雨日中 MCV 厚度多集中在 200—350 hPa,平均厚度约为 250 hPa,属较浅薄系统。各类型 MCS 衍生出 MCV 的厚度无明显差别,且 MCV 厚度与其是否为发展型、对应暴雨日的等级关系都不大。

由于资料分辨率限制,本文只能对 MCV 源地、生成时段、对应 MCS 类型等进行讨论,并通过 MCV 能否激发新的对流,进而造成持续性强降水初步探讨 MCV 和暴雨的关系,至于 MCS 和 MCV 相互作用的具体机制、发生暴雨前后各物理量如何变化等问题,将在今后的研究中通过选取典型个例进行数值模拟,利用模式输出的高分辨率资料进行深入探讨。

6 结论

利用 FY-2D 逐小时 T_{BB} 资料、NCEP/NCAR 再分析资料和 753 站降水资料,对江淮地区暴雨日中 MCS 进行了追踪,将 MCS 分为 MCC、PECS、 $M\beta$ CCS 和 $M\beta$ ECS 4 种类型,总结了江淮地区暴雨日 MCS 的空间分布、组织形式等特征;同时还普查了伴随 MCS 出现的 MCV 个例,将其按能否激发新的对流分为发展型和不发展型;在此基础上,对 MCS 和 MCV 与暴雨关系的气候特征进行了初步探讨。

(1) 2007—2013 年夏季江淮地区共出现 55 个暴雨日和 15 个大暴雨日。这 70 个暴雨和大暴雨日中,有 52 个是由 MCS 引发,占二者总天数的 74.3%,其中 15 个大暴雨日几乎都由 MCS 造成。追踪到产生暴雨的 MCS 个例 65 个,包括 16 个 MCC、27 个 PECS、5 个 $M\beta$ CCS 以及 17 个 $M\beta$ ECS,带状 MCS 出现的频次远多于圆状。

(2) 6—8 月, MCC 和 PECS 的平均面积是减小的, $M\beta$ CCS 的面积先减小、后增大, 7 月和 8 月 $M\beta$ ECS 的面积相当, 8 月最小。整个夏季, α 尺度 MCS 偏心率小于相同形状的 β 尺度。夏季江淮暴雨日 MCS 呈发展慢、消亡快特征。

(3) 引发江淮暴雨日的 MCS 多在江淮本地生成,海上生成的个例数极少;东—东北向和南—东南

向是 MCS 主要移动路径,大部分 MCS 移动距离都在 1~5 个经纬距范围,移动 10 个经纬距以上的几乎都为 MCC 和 PECS。

(4) MCV 主要形成于中低层 700 和 850 hPa 上,且多出现在 MCS 的西侧和北侧,其发生位置有两个相对集中区域。从时间上看,6—8 月, MCV 出现的频次随月份递减, MCV 大多发生于午后 14 时左右,夜间到凌晨很少有 MCV 生成。

(5) 带状 MCS 比圆状 MCS 更易伴随 MCV 出现,大部分 MCV 都能激发新的对流或加强原有对流,从而造成持续性强降水过程。由 MCS 引发的大暴雨日中,有 MCV 出现的天数占 61.5%,明显较暴雨日高,且大暴雨日中发生的 MCV 多数为发展型。 MCV 的厚度与其是否为发展型、对应暴雨日的等级关系都不大,不同类型 MCS 衍生出的 MCV 厚度也无明显差异。

参 考 文 献

- [1] Maddox R A. Mesoscale convective complexes. Bull. Amer. Meteor. Soc., 1980, 61(11): 1374-1387.
- [2] Augustine J A, Howard K W. Mesoscale convective complexes over the United States during 1985. Mon. Wea. Rev., 1988, 116(3): 685-701.
- [3] 李玉兰,王婧婧,郑新江,等.我国西南-华南地区中尺度对流复合体(MCC)的研究.大气科学,1989,13(4):417-422.
LI Yulan, WANG Jingrong, ZHENG Xinjiang, et al. The study of the mesoscale convective complex (MCC) over the south-west and south of China. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 1989, 13(4): 417-422.
- [4] 肖稳安,胡少校,姚洪奎.我国大陆 MCC 特征和结构的分析.南京气象学院学报,1990,13(3):434-441.
XIAO Wenan, HU Shaoxiao, YAO Hongkui. An analysis of the characteristics and structure of MCC in China. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 1990, 13(3): 434-441.
- [5] 项续康,江吉喜.我国南方地区的中尺度对流复合体.应用气象学报,1995,6(1):9-17.
XIANG Xukang, JIANG Jixi. Mesoscale convective complexes over the Southern China mainland. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 1995, 6(1): 9-17.
- [6] Anderson C J, Arritt R W. Mesoscale convective complexes and persistent elongated convective systems over the United States during 1992 and 1993. Mon. Wea. Rev., 1998, 126(3): 578-599.
- [7] Jirak I L, Cotton W R, Mcanally R L. Satellite and radar survey of mesoscale convective system development. Mon. Wea. Rev., 2003, 131(10): 2428-2449.
- [8] 马禹,王旭,陶祖钰.中国及其邻近地区中尺度对流系统的普查和时空分布特征.自然科学进展,1997,7(6):701-706.
MA Yu, WANG Xu, TAO Zuyu. Geographic distribution and life

- cycle of mesoscale convective system in China and its vicinity. *Progress in Natural Science (in Chinese)*, 1997, 7(6): 701-706.
- [9] 郑永光, 陈炯, 朱佩君. 中国及周边地区夏季中尺度对流系统分布及其日变化特征. *科学通报*, 2008, 53(4): 471-481.
ZHENG Yongguang, CHEN Jiong, ZHU Peijun. The characteristic of distribution and spatial-temporal variations of deep convection over China and its vicinity during summer. *Chinese Science Bulletin (in Chinese)*, 2008, 53(4): 471-481.
- [10] 梁巧倩, 项颂翔, 林良根, 等. 华南前汛期 MCS 的活动特征及组织发展形式. *热带气象学报*, 2012, 28(4): 541-551.
LIANG Qiaoqian, XIANG Songxiang, LIN Lianggen, et al. MCS characteristics over South China during the annually first rainy season and their organization types. *Journal of Tropical Meteorology (in Chinese)*, 2012, 28(4): 541-551.
- [11] 卓鸿, 赵平, 李春虎, 等. 夏季黄河下游地区中尺度对流系统的气候特征分布. *大气科学*, 2012, 36(6): 1112-1122.
ZHUO Hong, ZHAO Ping, LI Chunhu, et al. Analysis of climatic characteristics of mesoscale convective system over the lower reaches of the Yellow River during summer. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 2012, 36(6): 1112-1122.
- [12] 曾波, 谌芸, 肖天贵. 我国中东部地区夏季 MCS 统计分析. *气象*, 2013, 39(2): 180-185.
ZENG Bo, SHEN Yun, XIAO Tianguai. Statistical analysis of MCS in summer in Central-Eastern China. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 2013, 39(2): 180-185.
- [13] 丁治英, 王小龙, 高松, 等. 青藏高原夏季带状 MCSs 的分类以及形成原因. *大气科学学报*, 2013, 36(6): 641-652.
DING Zhiying, WANG Xiaolong, GAO Song, et al. Classification and cause analysis of banded MCSs over the Tibet Plateau in summer. *Transactions of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 2013, 36(6): 641-652.
- [14] 张云, 雷恒池, 潘晓滨, 等. 一次梅雨锋上 MCS 云微物理过程及降水形成机制. *气象科学*, 2009, 29(4): 434-446.
ZHANG Yun, LEI Hengchi, PAN Xiaobin, et al. Study on cloud micro-physical processes and precipitation formative mechanisms of a mesoscale convective system in Meiyu front in June 2004. *Scientia Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 2009, 29(4): 434-446.
- [15] 刘佳颖, 魏建苏, 姚丽娜, 等. 一次 MCS 过程的特征分析. *气象科学*, 2013, 33(1): 89-94.
LIU Jiaying, WEI Jiansu, YAO Lina, et al. Characteristic analysis on a MCS process. *Journal of the Meteorological Sciences (in Chinese)*, 2013, 33(1): 89-94.
- [16] 马红, 郑翔飏, 胡勇, 等. 一次西南涡引发 MCC 暴雨的卫星云图和多普勒雷达特征分析. *大气科学学报*, 2010, 33(6): 688-696.
MA Hong, ZHENG Xiangbiao, HU Yong, et al. Analyses on satellite cloud images and Doppler radar echo features of a MCC rainstorm caused by southwest vortex. *Transactions of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 2010, 33(6): 688-696.
- [17] 井喜, 屠妮妮, 曾鹏, 等. 我国西南地区一次暴雨过程特征及成因. *大气科学学报*, 2011, 34(6): 725-736.
JING Xi, TU Nini, ZENG Peng, et al. Cause analysis and characteristics of a rainstorm in the southwest area of China. *Transactions of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 2011, 34(6): 725-736.
- [18] Johnston E C. Mesoscale vorticity centers induced by mesoscale convective complexes. // *Ninth Conference on Weather Forecasting and Analysis*. Amer Meteor Soc, Seattle, WA, 1982: 196-200.
- [19] Bartels D L, Maddox R A. Midlevel cyclonic vortices generated by mesoscale convective systems. *Mon. Wea. Rev.*, 1991, 119(1): 104-118.
- [20] Trier S B, Davis C A, Tuttle J D. Long-lived mesoconvective vortices and their environment. Part I: Observations from the central United States during the 1998 warm season. *Mon. Wea. Rev.*, 2000, 128(10): 3376-3395.
- [21] ZHANG Dalin, Fritsch J M. A numerical investigation of a convectively generated, inertially stable, extratropical warm-core mesovortex over land. Part I: Structure and evolution. *Mon. Wea. Rev.*, 1988, 116(12): 2660-2687.
- [22] Raymond D J, Jiang H. A theory for long-lived mesoscale convective systems. *J. Atmos. Sci.*, 1990, 47(24): 3067-3077.
- [23] Verlinde J, Cotton W R. A mesoscale vortex couple observed in the trailing anvil of a multicellular convective complex. *Mon. Wea. Rev.*, 1990, 118(5): 993-1010.
- [24] 朱爱军, 潘益农. 中国东部地区一个中尺度对流涡旋的涡度收支分析. *南京大学学报(自然科学版)*, 2007, 43(3): 260-269.
ZHU Aijun, PAN Yinong. A vorticity budget for a mesoscale convective vortex over East China. *Journal of Nanjing University(Natural Sciences) (in Chinese)*, 2007, 43(3): 260-269.
- [25] 张元春, 孙建华, 徐广阔, 等. 江淮流域两次中尺度对流涡旋的结构特征研究. *气候与环境研究*, 2013, 18(3): 271-287.
ZHANG Yuanchun, SUN Jianhua, XU Guangkuo, et al. Analysis on the structure of two mesoscale convective vortices over Yangtze-Huaihe River basin. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 2013, 18(3): 271-287.
- [26] 王金鑫, 潘益农, 束宇, 等. 中尺度对流涡旋(MCV)近 30a 来的研究进展. *气象科学*, 2014, 34(3): 343-354.
WANG Jinxin, PAN Yinong, SHU Yu, et al. Advance in research on MCV in recent thirty years. *Journal of the Meteorological Sciences (in Chinese)*, 2014, 34(3): 343-354.
- [27] 王微, 潘益农, 束宇. 中国东部夏季中尺度对流系统以及中尺度对流涡旋的特征. *南京大学学报(自然科学版)*, 2011: 47(6): 692-702.
WANG Wei, PAN Yinong, SHU Yu. The characteristics of mesoscale convective system and mesoscale convective vortex in summers over eastern China. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences) (in Chinese)*, 2011, 47(6): 692-702.