沈杭锋, 翟国庆, 尹金方, 等. 2013. 长江下游梅汛期中尺度涡旋特征分析 [J]. 大气科学, 37 (4): 923–932, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12075. Shen Hangfeng, Zhai Guoqing, Yin Jinfang, et al. 2013. Feature analysis of mesoscale vortex over lower reaches of Yangtze River during Meiyu period [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 37 (4): 923–932.

长江下游梅汛期中尺度涡旋特征分析

沈杭锋^{1,2} 翟国庆² 尹金方² 张文滨^{2,3} 查贲¹

1 浙江省杭州市气象局,杭州 310051 2 浙江大学地球科学系,杭州 310027 3 太原卫星发射中心,太原 036301

摘 要 利用 2006~2009 年日本再分析资料对长江下游地区梅汛期间(5~7月)边界层内中尺度涡旋进行普查, 并分类统计分析了边界层内中尺度涡旋与暴雨、低空急流的关系。研究结果表明:每年的 5~7 月该地区经常在对 流层低层或(和)边界层内出现中尺度扰动涡旋,根据中尺度涡旋最初生成的高度不同,可划分为边界层中尺度 涡旋、对流层低层中尺度涡旋和对流层低层一边界层中尺度涡旋三类。边界层中尺度涡旋中与暴雨有密切关系的 中尺度涡旋称为边界层中尺度扰动涡旋(PMDV),根据涡旋前或后 6 小时累积雨量,可以进一步将其分成两类: 第一类是暴雨的直接制造者中尺度对流系统(MCS)先于边界层中尺度扰动涡旋发生(MCS-PMDV);第二类是 边界层中尺度涡旋产生后,激发了中尺度对流,造成了暴雨过程(PMDV-MCS)。PMDV-MCS 类涡旋暴雨的特点 是在对流层低层 850 hPa 是一条切变线,其南侧有一支西南低空急流,边界层 925 hPa 则是一个闭合的涡旋,暴雨 区主要落在涡旋的东北面和东南面。

关键词 梅雨期暴雨 中尺度涡旋 分析统计 PMDV
文章编号 1006-9895(2013)04-0923-10
中图分类号 P445
文献标志码 A
doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12075

Feature Analysis of Mesoscale Vortex over Lower Reaches of Yangtze River during Meiyu Period

SHEN Hangfeng^{1, 2}, ZHAI Guoqing², YIN Jinfang², ZHANG Wenbin³, and ZHA Ben¹

1 Hangzhou Meteorology Bureau, Hangzhou 310051

2 Department of Earth Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310027

3 Taiyuan Satellite Launch Center, Taiyuan 036301

Abstract A procedure designed for sorting mesoscale vortices is used to sort mesoscale vortices over the lower reaches of the Yangtze River during the periods May–July 2006–2009 by using the Japan reanalysis data with high spatial resolution. The results show that mesoscale vortices (disturbances) are often generated in the lower troposphere and planetary boundary layer (PBL). Thus, the mesoscale vortices in this area during the meiyu period could be divided into three types: PBL mesoscale vortices, lower troposphere mesoscale vortices, and lower troposphere-PBL mesoscale vortices. Some of the PBL mesoscale vortices, called PBL mesoscale disturbance vortices (PMDVs), are closely related to rainstorms. Within this group, two distinct patterns of precipitation organization have been identified. One is classified as the MCS-PMDV, which means a mesoscale convection system (MCS) formed before the PMDV. The other is the PMDV-MCS, which is a rainstorm caused by a PMDV. The features of PMDV-MCSs could be identified as follows: a

收稿日期 2012-05-11, 2013-01-06 收修定稿

资助项目 国家自然科学基金资助项目 41175047,浙江省气象局青年科技项目 2012QN02

作者简介 沈杭锋,男,1983年出生,博士,主要研究方向为中尺度数值模拟研究。E-mail: orangeboy@zju.edu.cn

shear line and a low-level jet at 850 hPa, a closed vortex at 925 hPa, and a rainstorm center lying southeast and northeast of the vortex.

Keywords Meiyu rainstorm, Mesoscale vortex, Statistical analysis, PBL mesoscale disturbance vortex (PMDV)

1 引言

梅汛期暴雨是夏季影响中国长江中下游地区 的主要气象灾害之一(孙晶, 2011)。梅汛期暴雨 (主要指梅雨锋暴雨)是多尺度系统相互作用的结 果,经过多年研究,在梅汛期及梅雨锋降水特征、机 理、结构、性质和大尺度环流形势等方面取得了很 大进展(Hoskins, 1974; 陶诗言, 1980; Ninomiya, 1984; Akiyama, 1989; Zhao and Li, 1990; Ding, 1992)。陶诗言(1980)指出,阻塞高压和低纬地 区稳定的西太平洋副热带高压是造成梅雨带上大 范围持续性降水的重要天气尺度系统,而中纬度地 区的西风槽和梅雨带上的中低层切变线及切变线 上的中尺度系统(低涡和气旋波波动)是梅雨暴雨 的直接影响系统。张小玲等(2004)根据 1980~1999 年梅雨锋上暴雨活跃区域、性质和尺度的不同,把 我国的梅雨锋暴雨概括为主要的三种类型,即β中 尺度的对流性暴雨、梅雨锋东部(115°E 以东)的 初生气旋引起的暴雨、梅雨锋西端深厚高空低压槽 前的持续性暴雨;随后,李鲲等(2005)对三类暴 雨进行了数值模拟和分析,总结出了三类暴雨各自 的异同点。中尺度对流系统(mesoscale convection system, 简称 MCS) 往往是梅雨暴雨的直接制造者, 中尺度低压 (扰动)则是梅雨暴雨的主要中尺度天 气系统之一,它与中尺度对流系统的发生发展有密 切的关系 (Chen et al., 1997; 陶诗言等, 2001; 贝耐 芳和赵思雄, 2002; 孙建华等, 2004; Moteki et al., 2004;赵思雄等,2004)。

胡伯威和潘鄂芬(1996)、高坤和徐亚梅(2001) 等研究指出,有时候存在一些中尺度涡旋,对梅雨 暴雨具有直接作用,这些涡旋可以分为两类,一类 是东移的西南涡,另一类则是梅雨锋上局地新生的 涡旋。谷文龙(2008)指出,长江下游地区中尺度 涡旋的源地在大别山地区,水平尺度为 100~400 km,其中 200~300 km 尺度范围内的个数最多,垂 直尺度一般在 1000~700 hPa 的高度层内。约 有 70%的低涡会激发一次或多次强中尺度对流系 统,从而产生强降水。然而,这些研究梅雨锋上涡 旋的尺度一般都较大,关注点更多在对流层中低 层,对于发生在边界层内的中小尺度涡旋的研究并 不多。翟国庆等(2003)、Zhai et al.(2007)等研 究发现,梅雨期有时在边界层内可近乎同时产生数 个γ中尺度涡旋扰动,组成一个涡旋族,它们初生 时位于边界层内,生命期一般为几小时,在对流层 低层的 850 hPa 等压面上尚不能及时反映出,即使 在边界层内涡旋环流的清晰度也不尽相同。

每年的 5~7 月份,长江下游地区处于梅汛期间,多受西风带锋面、切变线、低涡和台风等系统影响,为了集中探讨西风带中的中尺度涡旋及暴雨,本文略去台风等天气系统。在西风带中,梅雨锋暴雨是造成严重灾害的系统之一,一些研究发现有些涡旋生成于对流层低层 850 hPa上,而有些涡旋则最先起源于边界层内。因此,本文对 2006~2009 年期间,每年 5~7 月发生在长江下游地区的中尺度涡旋进行分类统计,并讨论中尺度涡旋与暴雨、低空急流(LLJ)的关系以及不同类别涡旋的特征和结构。

2 资料和方法

本文统计分析中所用到的资料是日本再分析 中尺度数据,这是由日本气象商业中心把地面观 测、高空观测和卫星观测所得资料经区域谱模式融 合后生成的再分析数据,该数据的东一西和南—北 的水平分辨率分别为 0.25°和 0.2°,垂直方向为 20 层,时间间隔为 6 h。此外,降水资料采用的是国 家信息中心下发的地面报文资料。

在长江下游地区(26°~34°N, 112°~122°E) (参见图 5)850 hPa 或(和)925 hPa 高度场上, 将出现直径(或等效直径)在50~200 km的闭合 涡旋定义为中尺度涡旋。挑选的方法是利用程序自 动识别850 hPa 和925 hPa 高度场上是否存在中尺 度涡旋,然后再根据850 hPa 和925 hPa 流场进一 步人工对比分析,从而确定筛选出中尺度涡旋。程 序自动识别具体方法为:(1)在区域内先选择高度 场的低值中心,然后判断该低值中心周围的25个 格点中是否有20个以上的格点低于某个阈值(850 hPa 为1450 gpm;925 hPa 为740 gpm),如果满足 则视为一个中尺度涡旋;(2)对选出的涡旋进行人 工比对分析,通过与 850 hPa 和 925 hPa 流场的对比,剔除没有形成闭合涡旋的个例和热带低压个例。

针对以上方法筛选出的中尺度涡旋,根据中尺 度涡旋在不同高度层上闭合与否,将这些涡旋分 成三类:第 I 类,在 850 hPa 流场上没有闭合涡 旋,而在 925 hPa 流场上存在闭合涡旋,即边界层 中尺度涡旋;第 II 类,在 850 hPa 流场上有闭合涡 旋,而 925 hPa 流场上没有出现闭合涡旋,即对流 层低层中尺度涡旋;第 III 类,850 hPa 和 925 hPa 流场上都有闭合涡旋,即对流层低层—边界层中尺 度涡旋。针对上述三类涡旋,分别讨论了涡旋与暴 雨、低空急流之间的相互关系。

3 中尺度涡旋特征分析

3.1 中尺度涡旋的年平均特征

经过分类和统计分析,可以看到(表 1),这 四年的 5~7月,在指定的区域内对流层低层和边 界层内总共出现了 74个中尺度涡旋过程,每年中 尺度涡旋出现个数多少不一,但都在 15个以 上,2008年最多,一共出现了 23个。在这四年中, 平均每年出现 18个,即 5~7月这三个月中(共 92 天),大约 5天左右会有一个中尺度涡旋过程,出 现的频率较高。

表 1 2006~2009 年长江下游地区 5~7 月中尺度涡旋统计 Table 1 The statistical analysis of mesoscale vortexes over lower reaches of the Yangtze River from May to July during the period of 2006-2009

年份	I类(个)	Ⅱ类(个)	Ⅲ类(个)	总计
2006	10	2	4	16
2007	7	3	5	15
2008	8	5	10	23
2009	9	3	8	20
总计	34	13	27	74
比例	45.9%	17.6%	36.5%	100%

注:表中的比例指的是各类中尺度涡旋的 4 年的总计值占总数的 比例

在这 74 个涡旋中,边界层中尺度涡旋(即 I 类)有 34 个,占据了总涡旋个数的 45.9%;对流层 低层一边界层中尺度涡旋(即第 III 类)出现了 27 个,占据了 36.5%;对流层低层中尺度涡旋(即第 II 类)则有 13 个,占了 17.6%。结合第 I 类和第 III 类来看,82.4%的涡旋在 925 hPa 出现了闭合涡旋, 这表明 925 hPa 高度层是梅汛期中尺度涡旋的显著 表现层。因此,对边界层中尺度涡旋进行分析和总结,就能够很好地了解和掌握这一类涡旋的发生发展状况,从而为梅汛期中尺度涡旋导致的强降水预 报提供合理的依据。

3.2 中尺度涡旋与暴雨、低空急流的关系

过去对这一地区中尺度涡旋暴雨的研究中表 明,涡旋的发生发展往往与暴雨关系密切(胡伯威 和潘鄂芬, 1996; 高坤和徐亚梅, 2001; 张凤和赵 思雄, 2003; 董佩明和赵思雄, 2004a; Zhai et al., 2007; 谷文龙, 2008), 当然, 这并不意味着出现 了涡旋之后,都会出现暴雨。在对这 74 个涡旋统 计后发现(图1),去除没有降水和降水强度没有达 到暴雨级别的中尺度涡旋,还有 57 个中尺度涡旋 过程伴随有暴雨,比例达到了77%,因此,中尺度 涡旋的发生发展跟暴雨的关系是非常紧密的,正确 分析和了解中尺度涡旋的特征和结构,对于暴雨预 报具有重要作用。从边界层率先发展起来的 34 个 中尺度涡旋中(即第I类),有24个过程出现了暴 雨,在第 I 类中占据了 70.6%; 第 II 类中,出现暴 雨和没有出现暴雨的中尺度涡旋个数分别有 7 个 和 6 个,出现暴雨与没有出现暴雨的比率基本接 近;在第 III 类涡旋中,总共 27 个个例中出现暴雨 的中尺度涡旋个数有26个,几乎达到了100%。同 时,还可以发现在边界层出现中尺度涡旋的所有61 个个例中(即第 I 类和第 III 类),有暴雨的总共是 50个,比例为82%,可见,边界层出现的中尺度涡 旋与暴雨关系是十分紧密的。

涡旋的发生发展过程中常常有低空急流相伴随,暴雨大都出现在低空急流轴线左侧 200 km 之内(孙淑清和翟国庆,1980;高守亭和孙淑清,1984;



图 1 中尺度涡旋与暴雨的关系

Fig. 1 The relationship between mesoscale vortexes and rainstorms

孙淑清,1990;朱乾根等,2000;隆霄和程麟生, 2004),这里的低空急流是指位于 850 hPa 高度的水 平动量集中气流带,中心风速在 12 m/s 以上,一般 为西南或偏西风,低空急流可以为涡旋源源不断地 输送水汽、热量,并提供动力条件。为了查看中尺 度涡旋的发生发展是否与低空急流有重要关系,本 文对中尺度涡旋发生过程中距离其 200 km 之内的 低空急流也进行了分析和统计。从中尺度涡旋统计 结果来看(图 2),区域内 57 个出现暴雨的中尺度 涡旋中,有 45 个过程出现了低空急流,出现的比



图 2 中尺度涡旋与低空急流 (LLJ) 的关系

Fig. 2 The relationship between mesoscale vortexes and low level jets (LLJs)

例为 78.9%,并且急流都为西南或偏西急流。可见 大部分与暴雨相联系的中尺度涡旋在发生发展过 程中,都会出现低空急流。另一方面,17 个没有出 现暴雨的中尺度涡旋中,有 12 个过程是没有出现 低空急流的,没有出现低空急流的比例为 70.6%, 这也从统计学的角度表明了低空急流对于暴雨和 涡旋的发生发展具有重要作用。

3.3 中尺度暴雨涡旋的特征

过去对中尺度涡旋的研究比较多地集中在对 流层 850 hPa 或更高层面上,对于对流层更低层和 边界层则关注较少,而从上面的分析可以看到,边 界层中尺度涡旋(第 I 类)在涡旋统计中占据了 较大的比例,这类涡旋本身与暴雨的联系也很紧 密。为了能更好地了解这类涡旋的一些特征,同时 了解边界层中尺度涡旋与其他两类涡旋之间的一 些特征区别,本文将出现暴雨的三类中尺度涡旋分 别进行了进一步的统计分析和动态合成分析。在动 态合成分析中,是以每个涡旋的涡旋中心为合成中 心,东西各 3.5 个经度,南北各 4.5 个纬度。

图 3 是边界层中尺度涡旋动态合成之后的风场 图,在 925 hPa 高度上(图 3a),此时已经表现为 一个完整清晰的闭合涡旋系统,合成中心即为涡旋 中心(图中以"C"标注),涡旋的直径大约在 100~200 km;而 850 hPa 高度上(图 3b)是一条



「13 第1天中八尺風間に刻意へ切合成: (a) 925 hra; (b) 850 hra。 C 衣木間鹿中心; 相前天衣木 (加方向; 租庫支衣木)(支衣) Fig. 3 Wind field dynamic synthesis of mesoscale vortexes for Class I on (a) 925 hPa and (b) 850 hPa. The mark "C" indicates the center of the vortex; the thick solid lines with arrows indicate the vortex features on 925 hPa; the thick dashed line represents the shear line





由西南风和东北风构成的风向切变线(图中粗虚 线),切变线呈东北一西南走向,虽然切变线的形 势非常清晰,但是气旋式旋转还没有达到闭合的程 度,还没有真正形成中尺度涡旋。可见,在边界层 中尺度暴雨涡旋低层的风场结构中,扰动在边界层 内率先发生发展,然后形成了闭合中尺度涡旋,而 在对流层低层是一条切变线。因此,把这一类扰动 在边界层内率先发生发展,尺度在 100 km 左右, 与暴雨有密切关系的中尺度涡旋称为边界层中尺 度扰动涡旋(PBL mesoscale disturbance vortex, 简称 PMDV)(Shen et al., 2012)。

PMDV 与另外两类涡旋在风场结构上有明显的区别,对流层低层中尺度涡旋(即第 II 类)在 925 hPa 尚未形成闭合涡旋,还是一条切变线时(图 4a),在 850 hPa 高度上,风场已经出现了闭合涡旋(图 4b),这与第 I 类的情况正好相反;而当对流层低层—边界层中尺度涡旋在 925 hPa 高度出现闭合涡旋时(图 4c),在 850 hPa 高度也同样出现了

一个闭合的涡旋(图 4d)。因此,这三类涡旋在风场结构上表现出了显著不同的特点。

过去对于对流层低层,特别是 850 hPa 出现闭 合涡旋的情况进行了大量的研究,并取得了很多 的成果,而对于边界层中尺度涡旋关注度相对较



MDV 力和和地形向反图(例象,平包:III)。实心图表 PMDV-MCS 类,空心圆表示 MCS-PMDV 类

Fig. 5 Distribution of PMDV and terrain (shaded, m). Solid dots indicate the center of the PMDV-MCS vortexes and the hollow dots indicate the center of the MCS-PMDV vortexes

低。为了进一步了解 PMDV 与暴雨之间的关系,利 用地面报文资料对涡旋前后6小时的雨量进行了统 计(由于历史自动站资料难以获取,而且涡旋统计 中的时间间隔也是6小时,所以雨量也用6小时的 间隔来考察;对于个别缺失6小时雨量的个例,用 24 小时雨量来填补)。结果发现这 24 个边界层中尺 度涡旋中,有些暴雨发生在涡旋形成之前,而在涡 旋形成之后,不再产生暴雨甚至没有了降水,因此 这一类边界层中尺度涡旋可以称为 MCS-PMDV, 即暴雨的直接制造者中尺度对流系统先于边界层 中尺度扰动涡旋发生。还有一些边界层中尺度涡旋 在形成之后,会带来短时强降水,或者使降水急剧 增强,可以把这一类边界层中尺度涡旋称为 PMDV-MCS,即边界层中尺度涡旋产生后,激发了 中尺度对流,造成了暴雨过程。事实上,在这类涡 旋中,还有一部分涡旋在形成之前,MCS 内已经 出现了降水,而在涡旋形成之后,会进一步增强对 流,从而造成降水的突然增强,这一类其实可以归 结为 MCS-PMDV-MCS 类, 但是由于缺乏更高时间 精度的观测资料,因此对于这类涡旋不再细分和讨 论,也将 MCS-PMDV-MCS 这一类也归为 PMDV-MCS 类。

从 PMDV 的分布图来看(图 5),涡旋的形成 地一般分布在山脉之间的平原丘陵地带,有 4 个主 要涡旋源地:第一个位于武夷山、黄山、幕阜山和



图 6 边界层中尺度涡旋与暴雨落区的相对位置关系: (a) MCS-PMDV; (b) PMDV-MCS。黑色圆点:涡旋中心;虚线:涡旋范围;黑色三角形: 暴雨中心位置;粗箭头:低空急流

Fig. 6 Relative location between PMDV and rainfall for (a) MCS-PMDV and (b) PMDV-MCS. Black dot indicates the center of vortex; dashed lines are the area of vortex; black triangles indicate the center of rainstorms; thick solid line with arrow is the LLJ

罗霄山包围的江西省中东部地区;第二个位于幕阜 山、大别山和伏牛山之间的湖北省中东部地区;第 三个位于大别山东侧、黄山北面的安徽南部山区; 第四个位于伏牛山西南和大别山北面的安徽、河南 交界附近地区。

每个涡旋降水发生的位置、距离涡旋中心的位 置不尽相同。MCS-PMDV 这一类涡旋共有四次过 程(图 6a),其中两次的暴雨中心位于涡旋第一象 限最外围,一次在第二象限的最外围,一次落在涡 旋西面中间位置。这类涡旋一个显著的特征是没有 低空急流相伴, 在这4个个例中都没有出现低空急 流。因此,这类涡旋可能是在降水发生之后,由水 汽潜热释放导致的,过去的研究也表明,水汽潜热 释放是中尺度涡旋发生发展的一个关键因子(李毓 芳等, 1986; Cho and Douglas, 1991; 倪允琪和周秀 骥, 2004; 董佩明和赵思雄, 2004b)。这类涡旋在 形成之后,并没有再带来暴雨过程,这可能与低空 急流有较大的联系。由于没有低空急流,水汽、能 量输送的不及时或达不到产生暴雨的要求,导致涡 旋在发生发展过程中,不满足足以引发暴雨甚至降 水的物理条件。

PMDV-MCS 这一类涡旋总共有 20 个(图 6b), 这 20 个过程中出现的雨量大小不一,最大的在 6 小时内可以有 100 mm,最小的则 6 小时降雨只有 25~30 mm。降水主要分布在涡旋的三个象限,其 中第一象限有 8 个,第三象限 5 个,第四象限 7 个, 所以降水主要位于涡旋的南面和东北面,而且暴雨 中心一般位于涡旋中间到最外围这段范围内。在涡 旋的南面,往往是一个暖区,因此这里的降水则以 暖区暴雨为主,而在东北面,则是由于西南暖湿气 流与东北气流交汇导致的暴雨。

与前面一类涡旋形成明显对比的是,这类涡旋几乎都伴随有低空急流。在这 20 个涡旋过程中,只有一个过程没有出现低空急流,出现低空急流的比例高达 95%,这与涡旋发生之后,产生暴雨是密不可分的。

3.4 中尺度暴雨涡旋的垂直结构

通过对三类涡旋水平风场结构分析可以看到 它们之间存在着显著不同的结构特征,为了更清楚 了解它们在垂直方向的特征和结构,取经过合成涡 旋中心的经向和纬向分别做垂直剖面,来讨论这三 类涡旋在垂直方向的热力、动力状况。

在一组横切合成涡旋中心的纬向垂直剖面图

中,只要有中尺度涡旋发生,与其相对应均有强正 涡度中心。不同之处在于,边界层中尺度涡旋(第 I类)初生于边界层内,其正涡度中心在边界层顶, 并对应着高相对位温(θ_e),θ_e中心呈"Ω"型,这表 明了涡旋中心的层结不稳定,在边界层有明显的θ_e 东西向水平梯度(图 7a);在对流层低层中尺度涡 旋中(第 II 类),正涡度中心也抬升至 850 hPa 高 度,虽然与θ_e高中心对应,但明显弱于第 I 类(图 7b);从边界层到 850 hPa 高度均有流场涡旋出现 时(第 III 类),正涡度中心高度和宽度明显强于前 两类,而且在正涡度中心东侧的边界层有θ_e大值中 心(图 7c),因此,也就在正涡度的东侧具有强的 垂直不稳定层结,这一特征也比前两类强,也说明 当这类中尺度涡旋比较深厚,其发生的物理条件和 特征较前两类显著。

同样,在垂直切过合成的涡旋中心的经向垂直 剖面图上,仅在边界层发生的中尺度涡旋(第 I 类), 辐合中心也仅位于边界层(图 7d),高层没有明显 的辐散中心(图略),可能也说明这一类型涡旋的 发生主要受边界层辐合的影响,边界层辐合中心也 完全与湿中心重合;在 850 hPa 高度出现的涡旋(第 II 类),辐合中心略高于第 I 类(图 7e);而第 III 类表明,虽然中尺度涡旋同时发生在边界层和对流 层低层,辐合区比前两类型更高、更宽(图 7f), 对应高层有明显的辐散中心(图略),垂直上升运 动也强于前两类,但最强辐合中心还是出现在边界 层,说明第三类的涡旋边界层的辐合起到重要作 用;从湿度场上看,三种类型的垂直场上形态是相 似的,在边界层均有高湿中心,垂直方向有明显的 高湿舌。

图 8 是 PMDV-MCS 类涡旋暴雨的概念模型示 意图,在对流层低层 850 hPa 是一条切变线,其南 侧是一支西南低空急流;边界层 925 hPa 则是一个 闭合的涡旋;暴雨区主要落在涡旋的东北面和东南 面。

4 结论及讨论

本文利用日本再分析资料,采用程序自动判别 涡旋和人工追踪相结合的方法,对 2006~2009 年 长江下游地区梅汛期(5~7月)的中尺度涡旋进行 了分类统计分析,并探讨了边界层内中尺度涡旋与 暴雨、低空急流的关系。得到了如下结论:

(1) 长江下游地区每年的梅汛期间, 经常会在



图 7 经过合成涡旋中心的垂直剖面图: (a, d) I 类; (b, e) II 类; (c, f) III 类。(a, b, c) 涡度(阴影,单位: $10^{-5} s^{-1}$) 和相当位温(等值线,单位: K); (d, e, f) 散度(阴影,单位: $10^{-5} s^{-1}$) 和相对湿度(等值线,单位: %)。箭矢表示垂直环流 Fig. 7 Vertical cross sections through the center of vortex: (a, d) Class I; (b, e) Class II; (c, f) Class III. (a, b, c) Vorticity (shaded, $10^{-5} s^{-1}$) and potential temperature (contour, K); (d, e, f) divergence (shaded, $10^{-5} s^{-1}$) and relative humidity (contour, %). Vectors are the wind circulation

对流层低层和边界层内出现中尺度涡旋,有些涡旋 在对流层发生发展;有些涡旋则起源于边界层,尤 其在初期,在边界层流场清晰可辨,而在对流层低 层还尚未形成闭合涡旋。因此,可以把这些中尺度



图 8 PMDV-MCS 概念模型图。粗虚线: 850 hPa 层上切变线; 粗箭头: 低空急流; 阴影区: 暴雨区 Fig. 8 Concept model of PMDV-MCS. Thick dashed line is the shear line on 850 hPa; thick solid line with arrow indicates LLJ; shading indicates the rainstorm area

涡旋分为边界层中尺度涡旋、对流层低层中尺度涡 旋和对流层低层—边界层中尺度涡旋。

(2)中尺度涡旋与暴雨有重要联系,在这些中 尺度涡旋发生发展过程中,出现暴雨的比例在 70% 以上,因此正确分析和了解中尺度涡旋的特征和结 构,对于暴雨预报是具有重要作用的;中尺度涡旋 暴雨与低空急流关系密切,在出现暴雨的中尺度涡 旋中,有接近 80%的过程中出现了低空急流,而没 有出现暴雨的中尺度涡旋,70%没有低空急流。

(3)为了区分广义的中尺度涡旋,把初始扰动 发生在边界层内,水平尺度在100 km 左右,并且 与暴雨系统有密切关系的中尺度涡旋称之为边界 层中尺度扰动涡旋,即 PMDV。通过对 PMDV 前 后 6 小时雨量的分析,可以进一步分成两类,第一 类是 MCS-PMDV,即暴雨的直接制造者中尺度对 流系统先于边界层中尺度扰动涡旋发生;第二类是 PMDV-MCS,即边界层中尺度涡旋产生后,激发了 中尺度对流,造成了暴雨过程。

(4) PMDV 的正涡度中心在边界层顶,并对应 着高相对位温,相对位温中心呈"Ω"型,表明了涡 旋中心的层结不稳定,在边界层有明显的相对位温 东西向水平梯度;辐合主要发生在边界层内,从边 界层向上有一明显高湿舌,并与辐合中心相重合。

致谢 感谢南京大学中尺度灾害性天气教育部重点实验室提供了本文 研究所用的日本再分析中尺度资料。

参考文献(References)

Akiyama T. 1989. Large, synoptic and mesoscale variations of the Baiu

front during July 1982. Part I: Cloud features [J]. J. Meteor. Soc. Japan, 67: 57-81.

- 贝耐芳, 赵思雄. 2002. 1998 年 "二度梅"期间突发强暴雨系统的中尺 度分析 [J]. 大气科学, 26 (4): 526-540. Bei Naifang, Zhao Sixiong. 2002. Mesoscale analysis of severe local heavy rainfall during the second stage of the 1998 Meiyu season [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 26 (4): 526-540.
- Chen S J, Kuo Y H, Wang W, et al. 1997. A modeling case study of heavy rainstorms along the Meiyu front [J]. Mon. Wea. Rev., 126: 2330–2351.
- Cho H R, Chan D. 1991. Meso-β-scale potential vorticity anomalies and rainbands. Part II: Moist model simulation [J]. J. Atmos. Sci., 48 (2): 331–341.
- Ding Y H. 1992. Summer monsoon rainfall in China [J]. J. Meteor. Soc. Japan, 70: 373–396.
- 董佩明, 赵思雄. 2004a. 引发梅雨锋暴雨的频发型中尺度低压(扰动) 的诊断研究 [J]. 大气科学, 28 (6): 876-891. Dong Peiming, Zhao Sixiong. 2004a. A diagnostic study of mesoscale lows (disturbances) on Meiyu front and associated heavy rainfall [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 28 (6): 876-891.
- 董佩明,赵思雄. 2004b. 梅雨锋两类中尺度低压(扰动)及其暴雨的数 值研究 [J]. 气候与环境研究, 9 (4): 641-657. Dong Peiming, Zhao Sixiong. 2004b. A numerical study of two kinds of mesoscale low (disturbance) on Meiyu front and associated heavy rainfall [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 9 (4): 641-657.
- 高坤, 徐亚梅. 2001. 1999年6月下旬长江中下游梅雨锋低涡扰动的结构 研究 [J]. 大气科学, 25 (6): 740–755. Gao Kun, Xu Yamei. 2001. A simulation study of structure of mesovortexes along Meiyu front during 22–30 June 1999 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 25 (6): 740–755.
- 高守亭,孙淑清. 1984. 次天气尺度低空急流的形成 [J]. 大气科学, 8 (2): 178-188. Gao Shouting, Sun Shuqing. 1984. The forming of subsynoptic scale low-level jet stream [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 8 (2): 178-188.

- 谷文龙. 2008. 长江下游梅雨锋中尺度涡旋统计分析与模拟研究 [D]. 南京信息工程大学硕士论文. Gu Wenlong. 2008. Statistical and simulative analysis of mesoscale vortexes on Meiyu front over lower reaches of Yangtze River [D]. M.S. thesis (in Chinese), Nanjing University of Information Science and Technology.
- Hoskins B J. 1974. The role of potential vorticity in symmetric stability and instability [J]. Quart. J. Roy. Metor. Soc., 100: 180–182.
- 胡伯威, 潘鄂芬. 1996. 梅雨期长江流域两类气旋性扰动和暴雨 [J]. 应 用气象学报, 7 (2): 138–144. Hu Bowei, Pan Efen. 1996. Two kinds of cyclonic disturbances and their accompanied heavy rain in the Yangtze River valley during the Mei-yu period [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 7 (2): 138–144.
- 李鲲, 徐幼平, 宇如聪, 等. 2005. 梅雨锋上三类暴雨特征的数值模拟比 较研究 [J]. 大气科学, 29 (2): 236–248. Li Kun, Xu Youping, Yu Rucong, et al. 2005. Comparative studies of three types of heavy rainstorms associated with the Meiyu front by numerical simulations [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 29 (2): 236–248.
- 李毓芳, 黄安丽, 高坤, 等. 1986. 对流加热在梅雨暴雨系统中的作用 [J]. 中国科学 (B 辑), (7): 765–775. Li Yufang, Huang Anli, Gao Kun. 1986. The role of convective heating in heavy rain system during Mei-rains season [J]. Scentia Sinica (Series B) (in Chinese), (7): 765–775.
- 隆霄, 程麟生. 2004. "99-6" 梅雨锋暴雨低涡切变线的数值模拟和分析 [J]. 大气科学, 28 (3): 342–356. Long Xiao, Chen Linsheng. 2004. Numerical simulation and analysis for "99-6" Meiyu front rainstorm and the low vortex with shear line [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 28 (3): 342–356.
- Moteki Q, Uyeda H, Masesaka T, et al. 2004. Structure and development of two merged rainbands observed over the East China Sea during X-BAIU-99. Parts II: Meso-α-scale structure and build-up processes of convergence in the Baiu frontal region [J]. J. Meteor. Soc. Japan, 82 (1): 45–65.
- 倪允琪,周秀骥. 2004. 中国长江中下游梅雨锋暴雨形成机理以及监测 与预测理论和方法研究 [J]. 气象学报, 62 (5): 645-661. Ni Yunqi, Zhou Xiuji. 2004. Study for formation mechanism of heavy rainfall within the Meiyu front along the middle and downstream of Yangtze River and theories and methods of their detection and prediction [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 62 (5): 645-661.
- Ninomiya K. 1984. Characteristics of Baiu front as a predominant subtropical front in the summer Northern Hemisphere [J]. J. Meteor. Soc. Japan, 62: 880–894.
- Shen H F, Zhai G Q, Zhu Y, et al. 2012. Numerical study of a mesoscale vortex in the planetary boundary layer of the Meiyu front [J]. Acta Meteorologica Sinica, 26 (6): 788–802.
- 孙建华,张小玲,齐琳琳,等. 2004. 2002 年 6 月 20~24 日梅雨锋中尺度 对流系统发生发展分析 [J]. 气象学报, 62 (4): 423–438. Sun Jianhua, Zhang Xiaoling, Qi Linlin, et al. 2004. Analysis on MCSs in Meiyu front during 20–24 June 2002 [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 62 (4): 423–438.
- 孙晶. 2011. 梅雨锋暴雨中尺度对流系统研究若干进展 [J]. 气象科技, 39 (3): 257–265. Sun Jin. 2011. Advances in researches on meso-scale

convective systems related to Meiyu heavy rainfall [J]. Meteorological Science and Technology (in Chinese), 39 (3): 257–265.

- 孙淑清. 1990. 梅雨锋中大振幅重力波的活动及其与环境场的关系 [J]. 大气科学, 14 (2): 163–172. Sun Shuqing. 1990. Activities of inertia-gravitational waves in bai-u front and their interaction with background field [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 14 (2): 163–172.
- 孙淑清, 翟国庆. 1980. 低空急流的不稳定性及其对暴雨的触发作用 [J]. 大气科学, 4 (4): 327–337. Sun Shuqing, Zhai Guoqing. 1980. On the instability of the low level jet and its trigger function for the occurrence of heavy rain-storms [J]. Chinese Journal Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 4 (4): 327–337.
- 陶诗言. 1980. 中国之暴雨 [M]. 北京: 科学出版社, 225pp. Tao Shiyan. 1980. Heavy Rainfalls in China (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press, 225pp.
- 陶诗言, 倪允琪, 赵思雄, 等. 2001. 1998 年夏季中国暴雨的形成机理与 预报研究 [M]. 北京: 气象出版社, 184pp. Tao Shiyan, Ni Yunqi, Zhao Sixiong, et al. 2001. The Study on Formation Mechanisms and Forecasting of Heavy Rainfall in the Summer 1998 (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 184pp.
- 翟国庆,王智,何斌. 2003. 长江中下游梅雨期中小尺度涡旋族发生演 变分析 [J]. 气象学报, 61 (6): 661–671. Zhai Guo Qing, Wang Zhi, He Bin. 2003. Formation and evolution analysis of the mesoscale vortex group in the middle and lower reaches during Meiyu of the Yangtze River [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 61 (6): 661–671.
- Zhai G Q, Zhou L L, Wang Z. 2007. Analysis of a group of weak small-scale vortexes in the planetary boundary layer in the Meiyu front [J]. Adv. Atmos. Sci., 24 (3): 399–408.
- 张凤,赵思雄. 2003. 梅雨锋上引发暴雨的低压动力学研究 [J]. 气候与环境研究, 8(2): 143–156. Zhang Feng, Zhao Sixiong. 2003. A dynamic study of one kind of Meiyu front lows producing heavy rainfall [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 8 (2): 143–156.
- 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.
- Zhao S X, Li Z J. 1990. A case study on the frontogenesis and conditional symmetrical instability in China [C] // The second US–PRC Joint Mesoscale Meteorology Workshop, NCAR, Boulder, Colorado, U. S. A, 38–39.
- 赵思雄, 陶祖钰, 孙建华, 等. 2004. 长江流域梅雨锋暴雨机理的分析研究 [M]. 北京: 气象出版社, 281pp. Zhao Sixiong, Tao Zuyu, Sun Jianhua, et al. 2004. Study on the Mechanism of the Formation and Development of Heavy Rainfall on the Meiyu Front in Yangtze River (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorology Press, 281pp.
- 朱乾根,林锦瑞,寿绍文,等. 2000. 天气学原理与方法(第三版) [M]. 北京: 气象出版社, 1–649. Zhu Qianggen, Lin Jinrui, Shou Shaowen, et al. 2002. Synoptic Meteorological Analysis (3rd ed.) (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press.