

# 暴雨云团的卫星监测和研究进展\*

方宗义<sup>1)</sup> 覃丹宇<sup>1)2)</sup>

<sup>1)</sup>(国家卫星气象中心,北京 100081)

<sup>2)</sup>(中国气象局中国遥感卫星辐射测量和定标重点开放实验室,北京 100081)

## 摘 要

该文对卫星监测、分析和研究暴雨云团的国内外若干研究结果和进展给予了简要综述。主要涉及卫星遥感监测和分析暴雨云团的适宜尺度,中尺度对流复合体,东亚梅雨锋暴雨云团的监测和分析,卫星资料同化和数值模拟及问题与展望等方面的内容。

关键词:卫星监测;暴雨云团;中尺度对流复合体

## 引 言

暴雨及其造成的洪涝是我国主要自然灾害之一。中尺度对流系统是暴雨的直接制造者,致洪暴雨往往由于中尺度对流系统持续影响而造成。自20世纪“75.8”河南暴雨以来,对其基本形成条件、大尺度环流分析和中尺度系统的活动都有较完整的总结和提及<sup>[1-2]</sup>。由于我国的降雨受季风影响,对梅雨暴雨的研究尤其重要<sup>[3-4]</sup>。迄今为止,“973”项目“我国重大天气灾害的形成机理和预测理论研究”<sup>[5]</sup>及其后续项目“我国南方致洪暴雨监测与预测的理论和研究方法研究”仍致力于中尺度暴雨系统的研究。“973”项目通过开展大规模野外试验,组织气象站网进行加密观测,结合运用气象卫星、多普勒天气雷达、风廓线仪、边界层观测、地基GPS和无人遥测飞机等多种先进的观测手段,获取大量的观测资料,并在此基础上对暴雨形成机理和预测理论展开全面研究,取得了明显进展。

卫星在中尺度对流系统的监测和研究方面具有得天独厚的优势,高时空分辨率的静止卫星可以用作识别大气中正在发生的动力和热力过程的有效指示<sup>[6]</sup>,可以监测小到单个对流云团、大到行星尺度天气系统的发生、发展和演变。另外,在人烟稀少和地面气象资料缺乏地区,卫星资料能提供唯一的预报

依据。

对于不同轨道的气象卫星而言,尽管极轨卫星搭载有较高空间分辨率的光谱成像仪、扫描辐射计和大气垂直探测器,但由于时间分辨率低,每天过境两次,很难满足中尺度监测和分析的要求;静止卫星如FY-2C可以提供每小时一次(汛期观测模式可以提供30 min一次)的可见光、红外和水汽图像,以及导出的云导风、TBB(相当黑体亮温)等产品,可以满足中尺度监测和分析的要求。风云二号业务卫星的主要遥感仪器是五通道(0.55~0.9,10.3~11.3,11.5~12.5,6.3~7.6  $\mu\text{m}$ 和3.5~4.0  $\mu\text{m}$ )的成像仪,成像仪空间分辨率:红外和水汽通道为5 km,可见光通道为1.25 km。根据Olanski<sup>[7]</sup>的尺度划分,卫星云图上的暴雨云团可以涵盖 $\gamma$ 到 $\alpha$ 中尺度的对流云团,即水平尺度在2~2000 km、生命史从几十分钟到十几小时,显然,依据星载仪器观测的时空分辨率,卫星对暴雨云团适宜的监测对象应该是 $\beta$ 中尺度(或尺度更大,如 $\alpha$ 中尺度)的对流云团,即空间尺度在20 km以上,生命史在几小时以上的对流云团。这些对流云团不同于一般的对流单体,也有别于Browning等<sup>[8]</sup>描述的多单体和超级单体,它们是有组织的中尺度对流系统(mesoscale convective system,简称MCS)。在卫星红外云图上,有组织的中尺度对流系统表现为大的冷卷云盖,通常可根据它们的形状、大小和持续时间划分为不同的类型,包括

\* 国家重点基础研究发展规划项目“我国南方致洪暴雨监测与预测的理论和研究方法研究”(2004CB418305)和中国气象局气象新技术推广项目(CMATG2006 M03)共同资助。

2006-06-14收到,2006-07-21收到修改稿。

胞线、中尺度对流复合体(mesoscale convective complex, 简称 MCC)和对流风暴群,它们经常产生暴雨、冰雹、强风、龙卷等灾害天气,但很多时候由于其尺度较小,仅依靠常规的观测网难以对其进行追踪、分析和预报。

我国气象卫星资料应用研究从 20 世纪 70 年代以后逐渐展开<sup>[9]</sup>,在暴雨云团发生的大尺度环流背景的研究方面,方宗义<sup>[10]</sup>、李玉兰等<sup>[11]</sup>、江吉喜等<sup>[12]</sup>先后指出这些中尺度对流系统经常发生在静止锋或低层切变线西端、西南急流的左前端和 500 hPa 短波槽的前方。此外还概括了暴雨云团发生发展的大尺度云型模式<sup>[12-13]</sup>和水汽型模式<sup>[14]</sup>,并尝试利用 OLR 对暴雨云团进行短期预报<sup>[15]</sup>。在 1991、1998 年长江流域特大洪水之后,暴雨云团的活动特征及大尺度云型特征又得到进一步分析<sup>[16-18]</sup>。另外,对于和暴雨云团类似的强对流云团的特征和发生的大尺度环流背景方面,也有了初步的研究<sup>[19-20]</sup>。

本文将对卫星监测、分析和研究暴雨云团的国内外若干研究结果和进展给予简要综述。

## 1 中尺度对流复合体

### 1.1 中尺度对流复合体的定义及其生命史

利用卫星云图监测和研究暴雨云团最成功的先例就是发现了 MCC。在静止卫星出现之前,人们对这种造成 80% 以上灾害天气事件的高度有组织的中尺度对流系统基本上没有认识。20 世纪 80 年代到 90 年代是研究 MCC 的鼎盛时期。MCC 的定义首先由 Maddox<sup>[21]</sup>提出,指的是一种近椭圆形、生命史较长的  $\alpha$  中尺度对流系统,这是根据卫星红外云图给出的形态上的定义(表 1)。在以后的研究中,逐渐认为红外亮温  $\leq -32$  °C 面积或最大范围时偏心率  $\geq 0.7$  的条件限制不是必需的<sup>[22-26]</sup>。

表 1 MCC 的定义

	物理特征
尺度	① 红外亮温 $\leq -32$ °C 的冷云盖面积 $\geq 10^6$ km <sup>2</sup> ② 红外亮温 $\leq -52$ °C 的冷云盖面积 $\geq 5 \times 10^4$ km <sup>2</sup>
开始时间	条件 ①和 ②满足的时间
生命史	同时满足条件 ①和 ②的时间 $\geq 6$ h
最大范围	连续的冷云盖(红外亮温 $\leq -32$ °C)达到最大时的面积
外形	椭圆形,在最大范围时刻偏心率 $\geq 0.7$
结束时间	条件 ①和 ②不再满足的时间

MCC 在美洲主要产生龙卷、冰雹、暴雨、下击暴

流,我国多产生暴雨和冰雹;项续康等<sup>[23]</sup>研究我国南方地区 MCC 认为, MCC 所产生的天气和各发展阶段密切相关。在发生、发展阶段,降水量相对小一点,但强对流天气主要发生在这两个阶段内。美国的 MCC 在此阶段内经常产生龙卷,我国的 MCC 在此两阶段内多产生强雷暴和冰雹,暴雨主要发生在 MCC 的成熟阶段。

MCC 生命史分为发生、发展、成熟和消散阶段。Maddox 总结了美国中部 MCC 的生命史,综合成概念模式。

**发生** MCC 的发生往往与对流层中部一个向东传播的短波槽相联系,槽的东南方相当大的区域大气呈条件不稳定。初期风暴出现在对流层下部暖平流所强迫的  $\alpha$  中尺度的上升运动区域中。地形和局地热源的小尺度效应使一些雷暴发展,随着中层暖区的形成,  $\beta$  中尺度系统将产生。

**发展** 在地面两条不连续线(胞线或槽线)交叉点上,单个风暴往往合并使  $\beta$  中尺度云团迅速加强,在浅边界层中产生一个中高压和冷空气的出流边界。夜间边界层顶风速加强,低层风向明显顺转,暖平流和湿不稳定空气的入流增强,使 MCC 在夜间快速增长。最强的对流单体发生在出流边界和低层入流之间的辐合带上。高空暖区出现后大尺度环境开始响应,在对流层中层(750 ~ 400 hPa)形成  $\alpha$  中尺度暖低压,使中层空气辐合到平均的中尺度上升气流中心区域。最后这个区域变成饱和、湿绝热递减率相对于环境为暖心的结构。

**成熟** 成熟阶段低层的暖湿空气入流给系统提供不稳定能量,使强对流单体不断产生合并。直到 MCC 达到最强时,  $\beta$  中尺度对流体都有合并的趋势。MCC 浓密云罩下 Cb 云 and 周围晴空区辐射冷却的差异可增强中尺度环流并延长系统生命。按流体静力学,在对流层中下部中低压增强的同时其上面对流层顶附近有一个大的中高压出现。

**消亡** 强的对流单体不再发展,系统能量供应被切断且失去中尺度结构。在红外云图上云结构混乱,这是 MCC 消亡的标志。系统下部冷空气圆丘变强,使地面辐合带脱离平均中尺度上升区进入中、高层下沉区。MCC 逐渐移入一个层结较稳定不利于对流发生的大尺度环境。潜在的冷空气进入系统后,一股深厚的中尺度下沉气流发展,于是 MCC 消亡。

项续康等<sup>[23]</sup>研究表明,我国南方 MCC 生命史和持续时间大体与美洲的相近,它们前期的对流单

体绝大多数在下午后期至傍晚前后生成并出现典型发展,夜间发展成 MCC,次日上午消散,平均生命史 18 h 左右,比美洲(10 h 左右)的略长。

石定朴等<sup>[24]</sup>认为中国相当多的 MCS 是在午夜甚至在凌晨才形成,而北美大多在傍晚形成。她利用红外亮温等值线分析方法,较细致地揭示出 MCS 的形成过程,指出冷云盖周围红外亮温等值线疏密程度所反映的云顶温度梯度对 MCS 的发展有很好的指示意义。边缘红外亮温等值线密集的对流体未来都是发展的,而且密集处都是未来冷云盖的扩展方向。说明发展中的 MCS 都具有陡峭的云体边界。

### 1.2 MCC 的分布

MCC 在世界上许多地方都可以观测到<sup>[27-31]</sup>,

Velasco 等<sup>[27]</sup>指出南美洲 30° S 附近和北美洲 40° N 附近都有 MCC 集中区,它们和中国位于 30° ~ 40° N 的第 3 个集中区纬度比较接近,而且都是大山脉东侧广阔的平原地区。Miller 等<sup>[28]</sup>在统计了西太平洋地区的 MCC 时空分布后,指出澳大利亚北部、新几内亚岛、环孟加拉湾地区和我国西南地区到南海地区这 4 个地方为 MCC 活动中心,显然这个统计结果与我国的实际情况不符<sup>[32]</sup>。我国的 MCC 多发于青藏高原东侧的四川盆地及其周围<sup>[33]</sup>;华南西部和北部湾附近<sup>[23]</sup>;黄河和长江中下游地区<sup>[25]</sup>。马禹等<sup>[34]</sup>将 MCC 的普查扩大到 MaCS 和 MbCS,通过对 1993—1995 年 3 年夏季的普查,共获得 234 个 MaCS 和 584 个 MbCS,其时空分布如图 1。

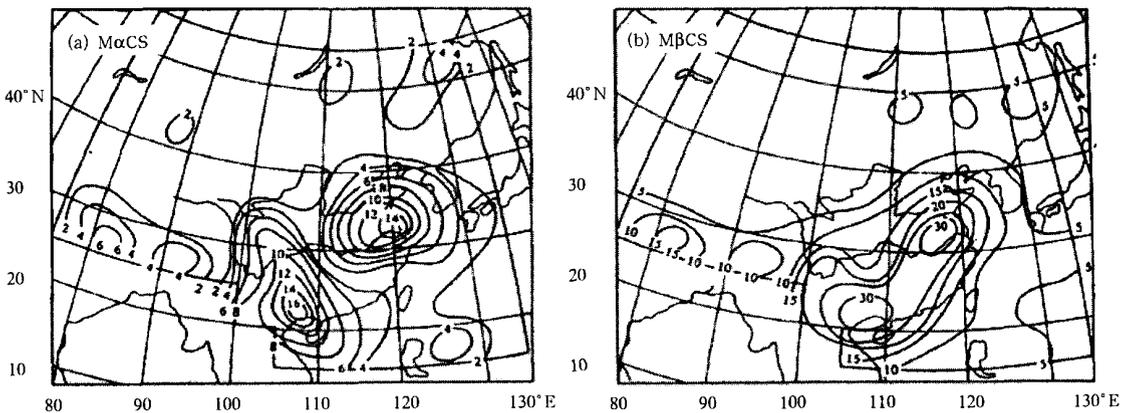


图 1 1993—1995 年夏季 8 个半月的 MCS 分布  
(图中数字表示每 5 个经纬度范围内 MaCS 或 MbCS 的个数,按成熟时的位置统计)

### 1.3 MCC 的结构

一个成熟的 MCC 的  $\alpha$  中尺度环流的基本结构可以概括为:对流层高层为冷心的反气旋;对流层中上层具有暖心的中尺度气旋式涡旋;低层到中层的辐合提供强的上升质量通量,中上层的暖心使高层产生中尺度反气旋和强外流<sup>[35-37]</sup>。MCC 最重要的特征是对流层中部辐合区和平均中尺度上升气流,它反映了  $\alpha$  中尺度的有组织对流活动。

与 MCC 有关的中层中尺度涡旋也逐渐受到关注,并且认为中层涡旋可能是 MCC 的主要组织特征,由于对流潜热释放形成了暖心结构<sup>[38-42]</sup>。Menard 等<sup>[40]</sup>对北美大量 MCC 的环流结构分析表明,一个成熟的 MCC 的中尺度环流的基本结构可以概括为:一个对流层高层反气旋;一个对流层中层具有暖心的中尺度气旋式涡旋;对流层低层的外流,有时还伴有一个尾部低压。陶祖钰等<sup>[42]</sup>用常规地面和高空资料考

察了 1992 年 7 月 23—24 日在河北省发生的一个个体相当大的 MCC 的环流结构,同时给出了 MCC 环流的概念模式,其中特别强调了对流层下部的后方入流。即在一个对流层高层(300 hPa 以上)为一个带有辐散的反气旋环流;在一个对流层的下部为一个带有辐合的气旋环流;在地面为一对正、负涡度系统(北负南正)。热力结构表现为中、高对流层有一个暖心,在 850 hPa 以下有一个冷堆。在 500 hPa 上没有发现北美 MCC 所具有的中层涡旋。石定朴等<sup>[24]</sup>给出一个发生在副热带高压内部,环境风场非常弱的 MCS 个例,在消散阶段显示出涡旋状结构,可能是凝结加热所产生的对流层高层 200 hPa 中尺度高压的反映,不同于北美的中层中尺度气旋(MCV 是一种产生在惯性不稳定大气中的中层 500 hPa 附近气旋性涡旋)。

#### 1.4 有利于 MCC 发生发展的大尺度环境条件

MCC 容易发生在特定的大尺度环境条件下,即在弱的地面锋或 850 hPa 切变线南侧有明显的偏南风低空急流输送暖湿空气的区域生成,有时候与对流层中层向东移动的短波槽相联系,槽的东南方相当大的区域中大气呈条件不稳定状态,主要的强迫因子是对流层低层的暖湿平流,高层则位于西风急流的反气旋一侧<sup>[35-36,43-47]</sup>。覃丹宇等<sup>[48]</sup>指出,梅雨期 MCC 发生在较弱的斜压环境里,对高温高湿能量的需求比一般暴雨云团更高,动力强迫主要在低层。

陶诗言等<sup>[9]</sup>、方宗义<sup>[10]</sup>指出华南前汛期暴雨和长江流域梅雨期间的中尺度云团,常出现在连续的锋面切变云系的西端,活跃的西南季风云系和高原东移的中纬度短波槽逗点云系的相交区内。诊断表明云团常发生在低空辐合高空辐散的有利环境条件下,并不总是与切变线上的低涡或其某一象限对应。

江吉喜等<sup>[13]</sup>概括了华南中尺度云团发生发展的两种类型。郑新江等<sup>[14]</sup>提出长江中下游梅雨期暴雨的一种概念模型,强调了与西南季风槽联系的热带水汽羽和与西风带高空槽联系的中纬度水汽羽的相互作用。

有许多观测资料分析表明, MCC 容易产生于弱的惯性稳定或惯性不稳定区域<sup>[36]</sup>,在 MCC 的发展过程中,人们最想了解的是在对流发展初期,它如何从  $\gamma$ -中尺度发展到  $\beta$ -中尺度直至  $\alpha$ -中尺度对流系统<sup>[49-53]</sup>,即所谓的尺度增长(Upscale developing)。Blanchard 等<sup>[54]</sup>的研究表明,惯性不稳定在中尺度对流云团的尺度增长过程中起到了很重要的作用。

Lain 等<sup>[55]</sup>对全球 MCC 的大尺度环境条件进行了分析,结果表明它们的动力和热力条件都和美国的相似。特别是 MCC 初生在斜压区内,该区以对流层低层垂直风速强切变和高值对流有效位能为特征。典型情况是,一支静力稳定度低而相当位温高的低空急流,沿几乎与斜压区垂直的方向切入 MCC 生成区域,被迫沿相对较浅的地面冷气层抬升。叠置在地面冷气层上的明显暖平流在对流层低空伴有强的顺转,局地绝对湿度最大和静力稳定度最小成为适宜对流系统生成的标志。低空辐合、高空辐散和中层涡度趋于最大并与弱短波槽相伴都是典型的生成环境特征。

#### 1.5 MCC 的移动和传播

方宗义<sup>[10]</sup>指出,作为气候平均,无论哪一种中

纬度天气背景条件下发生的暴雨云团都取偏东方向移动。随着季节和类型不同,平均路径也有差异。前汛期(5—6月)趋向东—东南方向;7—8月以东—东北方向为主;8月下旬—9月初又以向东和东南方向为主。就类别而言,冷锋低槽类以东南方向为主;北槽南涡类移动方向差异很大,如果冷空气较强,属冷切变性质,则向东偏南方向;冷空气不强,属暖切变性质则向东偏北方向移动。作为个别暴雨云团的移动,尤其是短期移动则受多种因素的制约,既有对流单体的新陈代谢所表现出来的传播特征,也有在环境风场、大尺度天气系统作用下的平均单体移动,传播本身又与风暴大小、低层水汽供给的方向等因素有关。李玉兰等<sup>[11]</sup>分析梅雨锋上对流云团在长江中上游地区生成后自西向东移动。项续康等<sup>[23]</sup>统计了我国南方 10 个 MCC 特征,指出它们的移动方向大体与 700~500 hPa 之间的平均气流方向相近。主要原因是春末夏初西南季风活跃,我国南方对流层低层盛行西南气流;对流层中层不断有短波槽经青藏高原后向东传播。在两种系统的共同作用下, MCC 及其前期的小对流云团经历一段时间向东南方向移动后转向偏东方向移动。

卫星观测的中尺度对流系统传播特征可以归纳为连续传播和跳跃性传播两类,其中又都可以有向前和向后传播的行为,仔细分析其环境条件可以对其进行传播预报<sup>[56]</sup>。

## 2 东亚梅雨锋暴雨云团的监测和分析

我国和日本对梅雨锋上各种尺度云雨系统一直都比较关注。陶诗言<sup>[1]</sup>早在 20 世纪 70 年代就明确给出了梅雨锋的概念,指出梅雨雨带常出现在梅雨锋偏南一侧,雨带内降雨量分布不均匀,嵌有一个个中尺度暴雨雨团。

日本很多研究揭示了中尺度对流系统及其相关的天气尺度和  $\alpha$ -中尺度环流系统,强调中尺度云团的发展演变过程及其结构特征,这些云系和气旋环流(低压)相关,在中国大陆地区和日本/太平洋地区具有不同的属性<sup>[57-58]</sup>。

### 2.1 梅雨锋云系成员

对梅雨锋的各种尺度特征进行分析,发现其具有包含天气尺度、 $\alpha$ -中尺度、 $\beta$ -中尺度、 $\gamma$ -中尺度相互依存的多尺度结构,即梅雨锋上的大尺度云系是由尺度约为 1000~2000 km 的  $\alpha$ -中尺度云系组成,而

$\alpha$  中尺度云系又是由尺度约为 100 ~ 200 km 的  $\beta$  中尺度云系组成,在  $\beta$  中尺度云系中又嵌套着直径约 30 ~ 70 km 的  $\gamma$  中尺度云团<sup>[59-63]</sup>。

Ninomiya 等<sup>[64]</sup>研究了 1991 年的梅雨锋云系成员结构,指出梅雨锋云带是由一些约 2000 km 长的云系成员排列而成的,这些云系成员又是由次天气尺度的云系和位于其尾部的一些  $\alpha$  中尺度云系构成, $\alpha$  中尺度云系只有当伴随有大的对流层中低层正涡度时,才可以发展和持续超过 1 d 时间。

## 2.2 多尺度特征及其相互作用

早在 1990 年,张丙辰等<sup>[3]</sup>在华东中尺度天气试验结果总结中给出了梅雨锋暴雨的天气学物理图像,包括大尺度概念模式和  $\alpha$  中尺度雨带及  $\beta$  中尺度雨带概念模式和边界层中尺度概念模式,并指出,在梅雨锋有一条东西走向长达数千公里、南北宽为几百公里的云雨带,在这条云雨带中镶嵌着东西走向水平尺度为几百公里的  $\alpha$  中尺度降水带,有时为一条,有时为近乎平行的两条。

到目前为止,梅雨暴雨过程的多尺度相互作用问题仍然是研究的热点之一,如 Shibagaki 等<sup>[65-66]</sup>利用 MU(middle and upper atmosphere) 雷达资料研究了梅雨锋的多尺度特征。项续康等<sup>[67]</sup>分析了 1991 年江淮梅雨期第三段梅雨锋云系的特征,包括梅雨锋云系的建立和重建过程、走向、分布特征、日变化特征以及它和其他云系之间的关系等。指出梅雨锋云系的建立是来自高原东北部的华西盾状云系和西南季风云系相互作用的结果。外围不同性质云系之间的相互作用是导致梅雨锋云系强烈发展,继而产生暴雨天气的重要原因之一。张顺利等<sup>[68]</sup>研究了长江中下游致洪暴雨的多尺度特征后指出,造成长江中下游持续性强降水的环流条件是太平洋副热带高压、南海季风涌、中高纬度冷空气和青藏高原  $\alpha$  中尺度对流系统的最佳组配(或锁定)。当这 4 个系统同时处于活跃阶段时,容易形成大范围、长时间的暴雨,并引发严重洪涝灾害。

Shibagaki 等<sup>[69]</sup>研究了梅雨锋次天气尺度低压发展与对流层中、低层涡度中心和  $\alpha$  中尺度云系的关系,说明了低压发展过程中复杂的多尺度相互作用关系,并给出了相应的概念模型。

## 2.3 中尺度暴雨云团的降水特征及其环境特征

MCC 的降水特征表明,最大降水率出现在增长最快阶段的前期,之后就稳定地减少,在衰弱阶段降水率比较平稳<sup>[70-71]</sup>,这与梅雨暴雨云团的降水特征

相似,并且云顶的最低 TBB 有周期性变化<sup>[57,72]</sup>。

卢乃锰等<sup>[73]</sup>认为到一定程度后云顶温度越低降水量越大;弱降水时,云顶温度梯度越大降水越大,但强降水时云顶温度梯度却减小,表明卷云砧覆盖使得云团云顶纹理平滑,云顶温度梯度减小,但最强降水却发生在那里;云团的膨胀与降水强度有某种正相关,但相当数量的快速膨胀云团不产生强降水,而一些不膨胀甚至萎缩的云团却产生超乎常值的强降水。

覃丹宇等<sup>[74-75]</sup>利用水汽图像研究了暴雨云团的中上部水汽环境特征,表明梅雨暴雨云团和来自孟加拉湾和南海的热带水汽羽有密切关系,对流层中上部的上升运动和水汽环境有利于暴雨云团的发生发展。另外,刘启汉等<sup>[76]</sup>分析了梅雨锋云带内  $\alpha$  中尺度对流系统的水汽风特征,结果表明梅雨锋云带内 MCS 有二类流出通道。一类 MCS 在对流层上层呈现为一个中尺度反气旋, MCS 的东部有一支中尺度高空急流,这支中尺度高空急流向东流出后转向南,流入 20° N 附近的南亚东风急流内,是 MCS 在对流层上层的主要流出通道;另一类 MCS 发生在中纬度西风急流的南侧,中纬度西风与 MCS 南部的偏东北风构成一个反气旋环流带。

## 3 卫星资料同化和数值模拟

利用卫星遥感资料对暴雨云团的分析和研究可以分成两个大的方向:一是利用卫星的定性和定量图像资料,直接进行中尺度暴雨的分析研究和监测;二是利用卫星资料中含有的反映中尺度特征的定量资料(包括反演的产品和各种辐射量信息),合理地与其他气象资料进行同化后,用于中尺度数值预报模式中进行暴雨预报。

数值预报模式中的卫星资料同化有反演同化和直接同化两种方式<sup>[77]</sup>。卫星资料反演同化首先解决反演问题,用卫星的辐射率探测资料确定温度和湿度等大气参数的垂直廓线,然后同化反演结果,其反演过程与数据同化过程是相互独立、分别进行的。卫星资料的直接同化实际就是在观测算子中包含大气辐射传输正演模式,并用变分法等有效的同化方案同化卫星辐射率的过程。至于反演同化和直接同化两种方式孰优孰劣尚有争议,但根据美国国家环境预测中心(NCEP)和欧洲中期数值预报中心(ECMWF)的经验,更倾向于直接同化卫星辐射率

资料<sup>[78]</sup>。

### 3.1 中尺度模式的卫星资料同化和数值模拟

从同化技术来说,变分法是目前资料同化的主流方法<sup>[79]</sup>,变分法可应用复杂的观测算子,使与模式变量非线性相关的观测量的同化更容易,适用于卫星辐射率的数据同化。不论是区域的或全球的三维变分同化系统(R-3DVAR和G-3DVAR)都已进入了实时业务应用阶段。

很多卫星资料都可以同化到中尺度模式中,并改进暴雨的模拟和预报效果。如孟智勇等<sup>[80]</sup>将云顶亮温(TBB)资料直接用于中尺度模式MM5的牛顿张弛逼近(nudging)四维同化过程中。周兵等<sup>[81]</sup>对长江中下游一次暴雨强降水进行了数值模拟及云迹风资料同化试验研究。潘宁等<sup>[82]</sup>采用增量三维变分(3D-Var)同化方法,对先进的微波探测装置(AMSU-A)探测的辐射亮温资料与常规探空资料在MM5中尺度数值预报模式中的直接同化和预报进行对比试验研究。结果表明,同化AMSU-A辐射亮温资料对中高层温度分析场的影响最明显,对MM5模式的温度和水汽混合比预报有总体上的正效应。

NCEP从1997年起运行一个新的业务中尺度分析系统(简称为RUC),使用了大量新的资料,如VAD风廓线,边界层风廓线仪的风,由GOES卫星得到的可降水量、云迹风、云顶气压/温度,SSM/I可降水量和GPS可降水量等资料,其同化模式在1998年实现三维变分分析与每小时全美范围的三维云分析。根据初步统计,它使降水预报的技巧分数有明显提高<sup>[83]</sup>。

对于暴雨研究而言,湿度场的同化是很重要的。Godelieve等<sup>[84]</sup>应用一维变分方法同化SSM/I和GOES反演的湿度场,有效地降低了模式预报场的均方根误差,得到了较好的结果。郁凡<sup>[85]</sup>用多光谱GMS-5卫星资料实现了对各标准等压面相对湿度场的反演,将这些反演湿度场直接内插应用于中尺度模式,进行了一系列暴雨预报试验,较好地改善了中尺度模式的降水预报<sup>[86]</sup>。王华荣等<sup>[87]</sup>在应用一维变分方法对GMS-5卫星资料反演的相对湿度场进行同化分析试验的基础上,进一步分析了通过一维变分方法在MM5模式初始湿度场中融入GMS-5反演湿度场后对降水预报的影响。结果表明,运用一维变分方法融入卫星信息后,分析场不仅明显改善背景场湿区偏湿、干区偏干的现象,同时也很好地揭示出了三维湿度场的中尺度细微结构。

### 3.2 未来的展望

展望卫星资料同化的未来发展,无非涉及两个方面的因素:一是卫星探测仪器的进步带来更多更好的卫星资料,这些资料将丰富同化的内容,改善同化的质量;二是同化技术的改进和提高将有利于更好地使用卫星资料。

对于星载仪器而言,北美地区,新一代静止气象卫星GOES-R系列将装备超光谱大气垂直探测器(HES),可以提供空间和时间上都连续的大气温度场、湿度场和风场的观测。地球静止轨道成像傅立叶变换光谱仪卫星计划(Geosynchronous Imaging Fourier Transform Spectrometer,缩写为GIFTS),主要以显著的高空间分辨率、垂直分辨率和时间分辨率,实现对温度、水汽和风速这3种对中尺度暴雨都很重要的大气状态进行观测。极轨卫星方面,美国的“国家极轨业务环境卫星系统(NPOESS)”将携带有高光谱分辨率的红外大气探测器和微波大气探测器,两者相结合,可以大大提高探测全球全天候条件下大气的能力。欧洲地区,第三代静止气象卫星(MTG)的红外大气探测任务(IRS)将提供高水平分辨率(高于10 km)、高垂直分辨率和高频次观测(至少每小时一次)的大气温湿廓线和大气运动矢量等数据,更好地为全球和区域数值模式服务。目前MSG卫星上的SEVIRI仪器以及欧盟第一颗极轨卫星METOP上的ASCAT仪器和OMI仪器也将为预报精度的提高作出贡献。尤其是,像METOP上的红外大气干涉仪(IASI)这样的新一代高分辨垂直探测器为提高预报初始条件的精度进而提高预报的精度提供了重要机遇。IASI和类似的先进探测器将以水平10 km、垂直1 km的分辨率提供温度场和水汽场非常详尽的水平和垂直分布信息。由于当前数值预报一直苦于卫星探测器垂直分辨率很低这一事实,因此IASI将为提高预报精度带来巨大的机遇。在亚洲,中国计划中的第二代静止气象卫星将搭载多通道成像仪、超光谱大气探测器、闪电成像仪、高空间分辨率CCD相机、太阳X射线成像仪和空间环境监测仪等多种遥感仪器,观测能力将大大增强。另外,2008—2010年前后,我国将进入FY-3业务卫星阶段,FY-3是第二代极轨卫星,星上仪器多,光谱覆盖宽,空间分辨率高。星上将搭载9类11种探测仪器,涉及紫外、可见光、红外和微波总共99通道,其中有5个250 m的光谱通道,因此必将获得大量可利用的高质量数据。日本的MTSAT系

列卫星是美国目前 GOES 卫星的改进型,主要仪器是五通道成像仪。在 2012 年以前, FY-2 和 MT-SAT 卫星交叉覆盖区域可以综合利用观测频次,提高到每小时 4 次<sup>[88]</sup>。

对于一些卫星上成像仪和散射计等星载探测器的观测数据也是未来变分同化系统发展的方向之一。由于这些资料具有更长的时间序列,对于分析历史资料,模拟历史天气过程,分析天气系统的物理演变机制具有不可忽视的影响。而散射计等星载主动探测器,由于其固有的优点以及技术的进步,使其能够搭载在越来越多的对地观测卫星上,并且其探测数据对于模式参数化和同化的研究都是价值无可限量的宝贵资源。例如, TRMM 卫星提供了高分辨率的热带降水系统云的水平和垂直结构资料;从 MIPAS 臭氧资料(ENVISAT)中提取风场信息;利用 EOS AM1 资料改进陆面过程处理,利用 EOS AM1, EOS PM1 和 METOP 资料改进云和水循环的模拟。同时还包括未来十年中一系列业务和研究卫星的 GPS 掩星探测资料以及极轨多普勒风雷达和极轨云雷达探测资料的可能应用。

总之,未来十年中业务气象卫星的先进探测能

力使预报的初始条件和预报模式的能力有可能得到很大的改进。同时,一系列环境研究卫星和相关的研究计划也将大力促进导致中期预报中物理参数化过程的改进。

对于同化技术而言,目前仍有许多改进的尝试和试验。例如,为了充分利用散射和极化信息,解决有云大气的同化问题, Weng 等<sup>[89]</sup>发展了 VDISORT(the vector discrete ordinate radiative transfer model) 辐射传输计算模式,取得了较好的结果。未来资料同化的发展方向将是 4D Var 同化方法和 Kalman 滤波法<sup>[90-91]</sup>,而精确、快速的辐射传输计算方案将被采纳并融入到 4D Var 同化方法和 Kalman 滤波法中,最终可望实现卫星资料同化的业务化。

#### 4 暴雨云团的重新分类

实际的暴雨云团有着丰富多样的形态和尺度,因此,近年来国外已对暴雨云团重新进行分类研究,把暴雨云团分成 MCC, PECS(Permanent Elongated Convective System), M<sub>β</sub>MCC(Meso-β scale MCC)和 M<sub>β</sub>PECS(Meso-β scale PECS)4 大类(表 2)进行研究<sup>[92]</sup>。

表 2 中尺度对流系统分类

类别	水平范围大小/km <sup>2</sup>	持续时间/h	最大范围时偏心率
MCC	≤ - 52 °C冷云顶 ≥50000	≥6	≥0.7
PECS	同上	同上	<0.7 且 ≥0.2
M <sub>β</sub> MCC	≤ - 52 °C冷云顶 ≥30000 且最大范围必须 ≥50000	≥3	≥0.7
M <sub>β</sub> PECS	同上	同上	<0.7 且 ≥0.2

#### 5 问题和讨论

尽管对暴雨云团的研究已取得了很多成果,但由于资料和探测手段等原因,目前仍存在以下一些问题:

1) 利用卫星资料和产品研究暴雨云团,在研究方法上仍然以传统天气学和统计分析居多,针对暴雨云团进行卫星资料同化和数值模拟较少,并且在理论上和飞速发展的中尺度气象学相结合仍很薄弱,新理论、新的诊断分析方法的应用较少。未来对暴雨云团的研究应进一步结合中尺度理论,并且利用近年来兴起的资料融合<sup>[93]</sup>和大气遥感再分析场构造技术<sup>[94]</sup>,可望深入到其形成和发展的机理研究中去。

2) 以往对暴雨云团的研究重点偏向于近圆形、尺度较大的 MCC,但实际的暴雨云团有着丰富多样的形态和尺度,近年来国外已对暴雨云团重新进行分类研究。为使卫星监测和研究结果更贴近实际,也有必要根据我国暴雨云团发生演变情况重新进行分类研究。

3) 针对暴雨云团的卫星遥感特征研究过去虽有一些普查工作,但多数还是个例分析,缺乏对暴雨云团结构特征和演变等一般性规律的概括和归纳;受探测技术的限制,有关云团内部动力、热力和云微物理结构的问题涉及不多。

4) 现代卫星探测技术的发展已可以获得大量新的探测资料,未来卫星微波遥感的全天候(穿透云层和地表)和全天时(昼夜连续监测)观测能力将使对暴雨云团的分析研究和预报能力得到根本性加

强,如利用 AMSU 资料反演的云内温、湿廓线、用 TRMM/TMI 反演的云中水凝物含量及分布等。目前,这些资料还很少使用在暴雨云团研究中,所以还需进一步深化研究,以充分利用不断发展的新探测资料。

### 参考文献

- [1] 陶诗言. 中国之暴雨. 北京: 科学出版社, 1980: 1-225.
- [2] 斯戈望. 暴雨和强对流环流系统. 北京: 气象出版社, 1990: 1-350.
- [3] 张丙辰, 张震越. 长江中下游梅雨锋暴雨研究. 北京: 气象出版社, 1990: 1-272.
- [4] 丁一汇. 1991 年江淮流域持续性特大暴雨研究. 北京: 气象出版社, 1993.
- [5] 倪允琪, 周秀骥. 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. 气象学报, 2004, 62(5): 647-662.
- [6] 巴德 M J. 卫星与雷达图像在天气预报中的应用. 卢乃锰, 冉茂农, 谷松岩, 等译. 北京: 科学出版社, 1998: 1-382.
- [7] Orlanski I. A rational subdivision of scales for atmospheric processes. *Bull Amer Meteor Soc*, 1975, 56(5): 527-530.
- [8] Browning K A, Foote G B. Airflow and hail growth in supercell storms and some implications for hail suppression. *Quart J Roy Meteor Soc*, 1976, 102: 499-534.
- [9] 陶诗言, 方宗义, 李玉兰. 四年来我国气象卫星资料应用研究. 气象学报, 1983, 41(3): 263-274.
- [10] 方宗义. 夏季长江流域中尺度云团的研究. 大气科学进展, 1986, 2(3): 334-340.
- [11] 李玉兰, 陶诗言, 杜长萱. 梅雨锋上中尺度对流云团的分析. 应用气象学报, 1993, 4(3): 270-278.
- [12] 江吉喜, 项续康. “96.8”河北特大暴雨成因的中尺度分析. 应用气象学报, 1998, 9(3): 304-313.
- [13] 江吉喜, 叶惠明, 陈美珍. 华南地区中尺度对流性云团. 应用气象学报, 1990, 1(3): 232-241.
- [14] 郑新江, 李玉兰, 杜长萱. 1995 年 6 月梅雨期暴雨的水汽图像分析. 应用气象学报, 1998, 9(2): 246-250.
- [15] 江吉喜, 陈美珍, 方宗义. 气象卫星资料在长江上游地区强暴雨 3~5 天预报中的应用. 应用气象学报, 1991, 2(3): 123-456.
- [16] 叶惠明, 张凤英, 冉茂农, 等. 1991 年 6 月江淮持续暴雨的云系特征分析. 应用气象学报, 1993, 4(3): 293-300.
- [17] 许健民, 季良达, 王峰, 等. 1991 年江淮大暴雨的平均云图特征. 应用气象学报, 1993, 4(4): 123-456.
- [18] 师春香, 江吉喜, 方宗义. 1998 长江大水期间对流云团活动特征研究. 气候与环境研究, 2000, 5(3): 123-456.
- [19] 郑新江, 赵亚民. 华北强对流云团的活动及其天气特征. 应用气象学报, 1992, 3(增刊): 123-456.
- [20] 江吉喜. 华北两类灾害性云团的对比研究. 应用气象学报, 1999, 10(2): 199-206.
- [21] Maddox R A. Mesoscale convective complexes. *Bull Amer Meteor Soc*, 1980, 61(11): 1374-1387.
- [22] Augustine J A, Howard K W. Mesoscale convective complex over United States during 1986 and 1987. *Mon Wea Rev*, 1991, 119(7): 1575-1589.
- [23] 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.
- [24] 石定朴, 朱文琴, 王洪庆, 等. 中尺度对流系统红外云图云顶黑体温度的分析. 气象学报, 1996, 54(5): 600-611.
- [25] 陶祖钰, 王洪庆, 王旭, 等. 中国的中- $\alpha$  尺度对流系统. 气象学报, 1998, 56(2): 166-177.
- [26] 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.
- [27] Velasco I, Fritsch J M. Mesoscale convective complexes in the Americas. *J Geophys Res*, 1987, 92: 9591-9613.
- [28] Miller D T, Fritsch J M. Mesoscale convective complexes in the western Pacific region. *Mon Wea Rev*, 1991, 119(12): 2978-2992.
- [29] Laing A G, Fritsch J M. Mesoscale convective complexes over the Indian monsoon region. *J Climate*, 1993, 6(5): 911-919.
- [30] Laing A G, Fritsch J M. Mesoscale convective complexes in Africa. *Mon Wea Rev*, 1993, 121(8): 2254-2263.
- [31] Laing A G, Fritsch J M. The global population of mesoscale convective complexes. *Quart J Roy Meteor Soc*, 1997, 123: 389-405.
- [32] 程麟生, 冯伍虎. 中纬度中尺度对流系统研究的若干进展. 高原气象, 2002, 21(4): 337-347.
- [33] 李玉兰, 王婧容, 郑新江, 等. 中国西南—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.
- [34] 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.
- [35] Maddox R A, Perkey D J, Fritsch J M. Evolution of upper tropospheric features during the development of a mesoscale convective complex. *JAS*, 1981, 3(8): 1664-1674.
- [36] Maddox R A. Large-scale meteorological conditions associated with midlatitude mesoscale convective complexes. *Mon Wea Rev*, 1983, 111(7): 1475-1493.
- [37] Zhang Dalin, Fritsch J M. Numerical simulation of the mesoscale structure and evolution of the 1977 Johnstown flood. Part II: inertially stable warm-core vortex and the mesoscale convective complex. *J Atmos Sci*, 1987, 44(18): 2593-2612.
- [38] 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.
- [39] Brandes E A. Evolution and structure of the 6-7 May 1985 mesoscale convective system and associated vortex. *Mon Wea Rev*, 1990, 118(1): 109-127.
- [40] Menard D L, Fritsch J M. A mesoscale convective complex-generated inertially stable warm core vortex. *Mon Wea Rev*, 1989, 117(6): 1237-1261.
- [41] Barrels D L, Maddox R A. Midlevel cyclonic vortex generated by

- mesoscale convective systems. *Mon Wea Rev*, 1991, 119(1): 104-118.
- [42] 陶祖钰, 黄伟, 顾雷. 常规资料揭示的中尺度对流复合体的环流结构. *热带气象学报*, 1996, 12(4): 372-379.
- [43] Cotton W R, L McAnelly M R, Tremback C J, et al. A composite model of mesoscale convective complexes. *Mon Wea Rev*, 1989, 117(4): 765-783.
- [44] 孙力, 汪秀清, 吴基烈. 东北夏季副高后部 MCC 暴雨的诊断分析. *应用气象学报*, 1992, 3(2): 157-164.
- [45] Laing A G, Fritsch J M. The large-scale environments of the global populations of mesoscale convective complexes. *Mon Wea Rev*, 2000, 128(8): 2756-2776.
- [46] 郑永光, 陶祖钰, 王洪庆, 黄海及周边地区  $\alpha$  中尺度对流系统发生的环境条件. *气象学报*, 2002, 60(5): 613-619.
- [47] 吕艳彬, 郑永光, 李亚萍, 等. 华北平原中尺度对流复合体发生的环境和条件. *应用气象学报*, 2002, 13(4): 406-412.
- [48] 覃丹宇, 方宗义, 江吉喜. MCC 和一般暴雨云团发生发展的环境场差异. *应用气象学报*, 2004, 15(5): 590-600.
- [49] McAnelly R L, Cotton W R. Early growth of mesoscale convective complexes: a meso-scale cycle of convective precipitation. *Mon Wea Rev*, 1992, 120(9): 1851-1877.
- [50] McAnelly R L, Nachamkin J E, Cotton W R, et al. Upscale evolution of MCSs: doppler radar analysis and analytical investigation. *Mon Wea Rev*, 1997, 125(6): 1083-1110.
- [51] Nachamkin J E, McAnelly R L, Cotton W R. An observational analysis of a developing mesoscale convective complex. *Mon Wea Rev*, 1994, 122(6): 1168-1188.
- [52] Nachamkin J E, McAnelly Ray L, Cotton W R. Interactions between a developing mesoscale convective system and its environment. Part I: observational analysis. *Mon Wea Rev*, 2000, 128(5): 1205-1224.
- [53] Nachamkin J E, Cotton W R. Interactions between a developing mesoscale convective system and its environment. Part II: numerical simulation. *Mon Wea Rev*, 2000, 128(5): 1225-1244.
- [54] Blanchard David O, Cotton W R, Brown J M. Mesoscale circulation growth under conditions of weak inertial instability. *Mon Wea Rev*, 1998, 126(1): 118-140.
- [55] Laing A G, Fritsch J M. The large-scale environments of the global populations of mesoscale convective complexes. *Mon Wea Rev*, 2000, 128(8): 2756-2776.
- [56] Jiang Shi, Scofield R A. Satellite Observed Mesoscale Convective System (MCS) Propagation Characteristics and 3-12 Hour Heavy Precipitation Forecast Index. MOAA Technical Memorandum NESDIS 20, 1987: 43.
- [57] Akiyama T. A medium-scale cloud cluster in Baiu front. Part I: evolution process and fine structure. *J Meteor Soc Japan*, 1984, 62: 485-504.
- [58] Akiyama T. A medium-scale cloud cluster in Baiu front. Part II: thermal and kinematic fields and heat budget. *J Meteor Soc Japan*, 1984, 62: 505-521.
- [59] Ninomiya K, Akiyama T, Ikawa M. Evolution and fine structure of long-lived meso- $\alpha$ -scale convective system in Baiu frontal zone. Part I: evolution and meso- $\beta$ -scale characteristics. *J Meteor Soc Japan*, 1988, 66: 331-350.
- [60] Ninomiya K, Akiyama T, Ikawa M. Evolution and fine structure of long-lived meso- $\alpha$ -scale convective system in Baiu frontal zone. Part II: evolution and meso- $\gamma$ -scale characteristics. *J Meteor Soc Japan*, 1988, 66: 351-371.
- [61] Ninomiya K, Akiyama T. Multi-scale features of Baiu: the summer monsoon over Japan and the East Asia. *J Meteor Soc Japan*, 1992, 70: 467-495.
- [62] Akiyama T. Large, synoptic and meso scale variations of the Baiu front during July 1982. Part I: cloud features. *J Meteor Soc Japan*, 1989, 67: 57-80.
- [63] Akiyama T. Large, synoptic and meso scale variations of the Baiu front during July 1982. Part II: frontal structure and disturbances. *J Meteor Soc Japan*, 1990, 68: 557-574.
- [64] Ninomiya K, Shibagaki Y. Cloud system families in the Meiyu-Baiu front observed during 1-10 July 1991. *J Meteor Soc Japan*, 2003, 81: 193-209.
- [65] Shibagaki Y, Yamanaka M D, Hashiguchi H, et al. Hierarchical structures of vertical velocity variations and precipitation clouds near the Baiu frontal cyclone center observed by the MU and meteorological radars. *J Meteor Soc Japan*, 1997, 75: 569-596.
- [66] Shibagaki Y, Yamanaka M D, Shimizu S, et al. Meso- $\beta$  to  $\gamma$ -scale wind circulations associated with precipitating cloud near Baiu front observed by the MU and meteorological radars. *J Meteor Soc Japan*, 2000, 78: 69-961.
- [67] 项绩康, 马岚, 王大昌. 1991 年梅雨锋云系的中尺度分析. *应用气象学报*, 1993, 4(3): 286-292.
- [68] 张顺利, 陶诗言, 张庆云, 等. 长江中下游致洪暴雨的多尺度条件. *科学通报*, 2002, 47(6): 467-473.
- [69] Shibagaki Y, Ninomiya K. Multi-scale interaction processes associated with development of a sub-synoptic-scale depression on the meiyu-baiu frontal zone. *J Meteor Soc Japan*, 2005, 83(2): 219-236.
- [70] Kane R J, Chelius C R, Fritsch J M. Precipitation characteristics of mesoscale convective weather systems. *J Appl Meteor*, 1987, 26(10): 1345-1357.
- [71] McAnelly R L, Cotton W R. The precipitation life cycle of mesoscale convective complexes over United States. *Mon Wea Rev*, 1989, 117(4): 784-808.
- [72] Qin Danyu, Jiang Jixi, Fang Zongyi, et al. Analysis of mesoscale convective systems during 20-23 Jun 2002 by satellite observation. *Acta Meteor Sinica*, 2004, 18(1): 1-16.
- [73] 卢乃锰, 吴蓉璋. 强对流降水云团的云图特征分析. *应用气象学报*, 1997, 8(3): 269-275.
- [74] 覃丹宇, 方宗义, 江吉喜. 6月21-24日梅雨暴雨过程的水汽羽特征. *气象学报*, 2004, 62(3): 329-337.
- [75] 覃丹宇, 方宗义, 江吉喜. 2002年7月20-25日揭示的热带水汽羽和暴雨的关系. *气象学报*, 2005, 63(4): 493-503.
- [76] 刘启汉, 陈受钧. 梅雨锋云带内  $\alpha$ -中尺度对流系统周边水汽风

- 的分析. 气象学报, 2004, 62(2): 237-242.
- [77] 潘宁, 董超华, 张文建, 等. 变分同化及卫星资料同化. 气象科技, 2001, 29(2): 29-36.
- [78] Errico R M, Ohring G, Derber J, et al. NOAA- NASA- DoD workshop on satellite data assimilation. *Bull Amer Meteor Soc*, 2000, 81(10): 2457-2462.
- [79] Derber J C, Wu W S. The use of TOVS cloud-cleared radiances in the NCEP SSI analysis system. *Mon Wea Rev*, 1998, 126(8): 2287-2299.
- [80] 孟智勇, 徐祥德, 陈联寿. 卫星亮温资料四维同化方案及其对“7·20”武汉特大暴雨的模拟试验. 大气科学, 2002, 26(5): 663-676.
- [81] 周兵, 徐海明, 吴国雄, 等. 云迹风资料同化对暴雨预报影响的数值模拟. 气象学报, 2002, 60(3): 309-317.
- [82] 潘宁, 董超华, 张文建. ATOVS 辐射率资料的直接变分同化试验研究. 气象学报, 2003, 61(2): 226-236.
- [83] Benjamin S G, Dezs D v nyi, Weygandt S S, et al. An hourly assimilation-forecast cycle: the RUC. *Mon Wea Rev*, 2004, 132(2): 495-518.
- [84] Godelieve D, Louis G, Pierre G, et al. Assimilation of SSM/I and GOES humidity retrievals with a one-dimensional variational analysis scheme. *J Appl Meteor*, 1995, 34(7): 1536-1550.
- [85] 郁凡. 多光谱卫星图象反演云空湿度场方法的改进. 国土资源遥感, 2003, 1: 38-42.
- [86] 朱民, 郁凡, 郑维忠, 等. 卫星反演湿度场及其在暴雨预报中的初步应用分析. 气象学报, 2000, 58(4): 470-477.
- [87] 王华荣, 郁凡. 用一维变分方法同化 GMS-5 反演湿度场及其在降水预报中的应用分析. 南京大学学报(自然科学版), 2006, 42(1): 76-87.
- [88] 张文建, 许健民, 方宗义, 等. 暴雨系统的卫星遥感理论和方法. 北京: 气象出版社, 2004: 251-257.
- [89] Weng Fuzhong, Liu Quanhua. Satellite data assimilation in numerical weather prediction models. Part I: forward radiative transfer and Jacobian modeling in cloudy atmospheres. *J Atmos Sci*, 2003, 60(21): 2633-2646.
- [90] 陈东升, 沈桐立, 马革兰, 等. 气象资料同化的研究进展. 南京气象学院学报, 2004, 27(4): 550-564.
- [91] 张爱忠, 齐琳琳, 纪飞, 等. 资料同化方法研究进展. 气象科技, 2005, 33(5): 385-393.
- [92] Jirak I L, Cotton W R, McAnelly R L. Satellite and radar survey of mesoscale convective system development. *Mon Wea Rev*, 2003, 131(10): 2428-2449.
- [93] 徐祥德, 周明煜, 翁永辉, 等. 卫星资料变分分析“98·7”武汉-黄石地区特大暴雨中尺度锋面对流特征. 大气科学, 2002, 26(6): 845-856.
- [94] 徐祥德, 许健民, 王继志, 等. 大气遥感再分析场构造技术与原理. 北京: 气象出版社, 2003: 1-230.

## A Review of Satellite Observed Heavy Rainfall Cloud Clusters

Fang Zongyi<sup>1)</sup> Qin Danyu<sup>1)2)</sup>

<sup>1)</sup> (National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081)

<sup>2)</sup> (Key Laboratory of Radiometric Calibration and Validation for Environmental Satellites, China Meteorological Administration (LRCVES/CMA), Beijing 100081)

### Abstract

Mesoscale convective systems (MCSs) which produce heavy rainfall are commonly depicted as heavy rainfall cloud clusters (HRCCs) on satellite cloud imagery. Since Maddox found the mesoscale convective complexes (MCC), which produce the bulk of the warm season rainfall over much of midwestern United States, the early studies mainly focus on these kinds of long-lived and large-scaled HRCCs.

A brief review of HRCCs including the proper and advantaged scales of HRCCs for satellite observation, the MCC, the Meiyu frontal HRCC especially in the East Asia, and the satellite data assimilation/ modeling of HRCCs are presented. Meanwhile, some prospects are discussed for future HRCCs studies.

In the past decades, most HRCCs studies are synoptic and/or statistic analyses, only a few reports are on the satellite assimilation and modeling. Also the integration with the rapid developing mesoscale theories is not enough that new theories and new diagnostic methodologies are still less documented. The future HRCCs studies should be more closely combined with mesoscale theories and remote sensing reanalysis techniques to study further into the mechanism of HRCC initiation and development.

In order to combine HRCCs studies with practice, not only oval-shaped MCCs but also other shape MCSs should be considered. In a word, new HRCCs classification should be adopted according to their cloud top shapes and scales. And the general characteristics of HRCCs in China, including their life cycle, activities etc, would be gained through a broad investigation.

Furthermore, up to date remote sensing techniques are providing a great many data, for example, the temperature/ moisture profiles from AMSU/ TOVS retrieval and the cloud hydrometers from TMI/ TRMM retrieval. These new data should be introduced to HRCC study for concerning inner cloud dynamics, thermodynamic processes and microphysics issues.

**Key words:** satellite observation; the heavy rainfall cloud cluster; mesoscale convective complexes