

# 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\*

倪允琪 周秀骥

(中国气象科学研究院, 中国气象局灾害天气重点开放实验室, 北京, 100081)

## 摘 要

国家重点基础研究发展规划项目“我国重大天气灾害形成机理与预测理论研究”经过项目全体科学家的 5 a 研究,取得了一系列重要的研究成果:(1)提出了基于多种实时观测资料的梅雨锋暴雨的多尺度物理模型;(2)建立了梅雨锋暴雨的天气学模型;(3)梅雨锋是由多个不同尺度系统构成的梅雨锋系,它具有介于温带锋系结构与热带辐合带结构之间的副热带锋系结构,在长江中下游有时可表现为双锋结构。锋前的湿物理过程与锋上强对流系统发展形成的正反馈过程以及梅雨锋系的不同尺度系统的相互作用是梅雨锋维持与发展的重要机制;(4)提出了多种中尺度暴雨的定量卫星遥感反演理论和方法,并形成一系列新的反演产品;(5)成功地研究了双多普勒雷达同步探测和反演中尺度暴雨三维结构的理论和方法;(6)发展了配有三维变分同化系统的中尺度暴雨数值预报模式系统,在 2003 年淮河抗洪救灾中发挥了积极作用。上述研究成果表明该项目已经圆满地完成了预定的目标与任务。

关键词:梅雨锋,机理,预测理论。

## 1 引 言

中国长江中下游梅雨锋暴雨引发的江淮流域洪涝灾害是中国重要的气象灾害之一,提高暴雨的监测、预测能力是国家减灾防灾的急需。由于暴雨的持续性与突发性,给暴雨研究带来很大的难度,因此,暴雨研究对中国气象工作者也是重大的挑战。针对长江中下游梅雨锋暴雨研究的国家重点基础研究发展规划项目“我国重大天气灾害形成机理与预测理论研究”于 1999 年正式立项启动。该项目由中国气象科学研究院牵头,组织了由中国科学院大气物理研究所、北京大学、南京大学等十多家科研院所和高等学校的暴雨研究领域的优秀专家研究队伍,通过实施 2001/2002 年长江中下游暴雨野外科学试验,运用气象卫星、多普勒雷达、GPS 等多种先进的探测手段和常规的加密观测,获取了暴雨的三维空间结构资料,对其形成机理和监测、预测理论展开全面研究。经过 5 a 研究,在中国长江中下游梅雨锋暴雨形成机理、监测与预测理论和方法研究方面均取得了重要的进展,取得了一批具有创新意义和应

用前景的成果,其中有的已经在业务上得到了应用并发挥了很好的效益,有的在经过与业务结合并进一步改进提高之后,有望在气象业务现代化中得到应用。

## 2 长江中下游梅雨锋暴雨的多尺度物理模型

### 2.1 利用野外科学试验资料,发展了梅雨锋暴雨的多尺度结构模型

该模型包括从天气尺度到  $\gamma$  中尺度对流体模型<sup>[1]</sup>:涉及到天气尺度概念模型、 $\alpha$  中尺度天气系统模型、 $\beta$  中尺度对流系统和  $\beta$  中尺度对流线模型以及  $\gamma$  中尺度对流单体模型。

#### 2.1.1 天气尺度概念模型

同梅雨锋相关的天气尺度系统主要包括:对流层低层的西南季风、东南季风、梅雨锋、切变线;中层的西太平洋副热带高压;中低层的梅雨锋气旋或低涡;中层的东移低槽;高层的南亚高压以及高空副热带西风急流、热带东风急流等系统。以上系统的配置及各个系统的关系分别见图 1 和 2。

\* 初稿时间:2004 年 8 月 27 日;修改稿时间:2004 年 9 月 13 日。

资助课题:国家重点基础研究发展规划项目:我国重大天气灾害形成机理与预测理论研究(G1998040906-12)

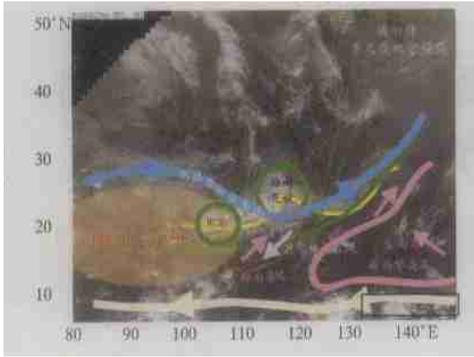


图1 梅雨锋多尺度物理模型与天气尺度模型<sup>[1]</sup>

Fig. 1 Multi-scales synoptic model of Meiyu front<sup>[1]</sup>

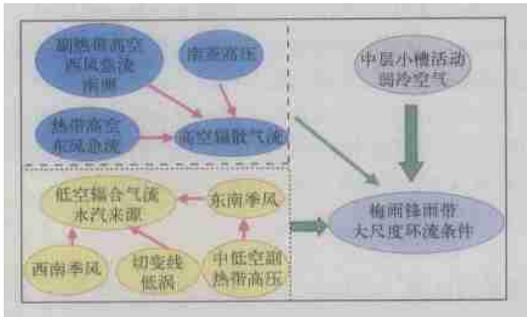


图2 梅雨锋暴雨天气尺度物理模型中各天气尺度系统的关系示意图<sup>[1]</sup>

Fig. 2 Relationship of all the synoptic systems in the Meiyu front multi-scales synoptic model<sup>[1]</sup>

梅雨锋暴雨发生时, 一般有沿副热带高压边缘的东南季风和来自孟加拉湾的西南季风向长江中下游地区输送水汽。分析表明, 降雨发生前有中尺度急流核造成的风速脉动, 使未来降雨区的可降水量增加。中低层的中纬度小槽活动有利于弱冷空气的南下, 弱冷空气与西南暖湿气流在长江流域的交汇形成了梅雨锋和切变线, 这是有利于对流发生发展的环境条件。高层西风急流(位于南亚高压的北侧)的南侧和热带东风急流形成高空辐散。以上高空、中低纬系统的配合是最有利于梅雨锋暴雨产生的天气尺度条件。

产生梅雨锋降雨的中尺度对流系统(MCS)一般发生发展于梅雨锋前, 梅雨锋上发生发展的MCS从 $\gamma$ 中尺度到 $\alpha$ 中尺度, 有的与 $\alpha$ 中尺度梅雨锋低涡或气旋相联系, 有的是局地发生的MCS。

### 2.1.2 $\alpha$ 中尺度天气系统模型

#### (1) 梅雨锋上的两类 $\alpha$ 中尺度低压扰动

在梅雨锋上存在着两类中尺度低压的发生发展过程, 一类是时间和空间尺度比较小的中尺度低压, 其水平尺度大约为500~1000 km, 生命史大约1 d, 它们与梅雨锋上的暴雨中心有密切关系。对于另一类(这里称它为第二类)气旋, 它们开始在梅雨锋上发生时为一小的扰动, 而在有利环境下, 扰动增大发展为一低压(气旋), 水平尺度达1000 km以上, 生命史可达数日, 常在较大范围内引发暴雨。通过研究发现: 从北方来的冷空气及弱斜压性对此类低压的发展有重要的作用。从能量转换的观点看, 在此类气旋(低压)发展过程中, 在对流层低层有明显的涡旋动能产生, 表明有一定的有效位能转化为动能以维持辐散风。

梅雨锋上的气旋(低压)与经典的温带气旋的模式不同, 是一种接近低纬度和副热带地区的低压系统。

#### (2) $\alpha$ 中尺度雨团模型

与梅雨锋气旋或低涡无关的MaCS一般在梅雨期发生发展, 其尺度为200~500 km, 通过卫星和雷达回波的分析可发现, 在MaCS中有一些20~200 km的 $\beta$ 中尺度对流体和对流线, MaCS一般是由一些 $\beta$ 中尺度系统合并发展到 $\alpha$ 中尺度或由一个 $\beta$ 中尺度对流系统在有利的环境条件下发展成 $\alpha$ 中尺度对流系统。

### 2.1.3 $\beta$ 中尺度强对流系统

#### (1) $\beta$ 中尺度强对流系统的三维结构

研究表明, $\beta$ 中尺度强对流系统的三维结构可综述如下: (1)地面有一条接近东西向的梅雨锋(或切变线); (2)边界层内有大量暖湿空气输送至未来 $\beta$ 中尺度低压形成的地区, 同时那里也存在里查森数的小值区(即不稳定区); (3)700 hPa上, $\beta$ 中尺度低压发生于西南低涡东侧, $\beta$ 中尺度低压的西南和东南侧是强劲的西南低空急流, 其中靠近 $\beta$ 中尺度低压的中尺度低空急流有可能与 $\beta$ 中尺度低压的形成有关; (4)从高原向东移动的500 hPa上的短波槽, 尤其是槽前的辐合区, 有利于 $\beta$ 中尺度与强对流系统的发生发展; (5) $\beta$ 中尺度低压所在的区域有很强的上升运动, 上升运动的极值中心为400~300 hPa, 上升气流到250 hPa以上后开始向周围辐散, 并形成相应的中尺度高压, 辐散气流主要向东南偏东和东北偏东方向流出。这种高空强烈辐散区的汇合, 使得对流层中的垂直运动进一步加强。上述多

种因素相互有利结合, 是形成暴雨特别强烈的重要原因(图3)。

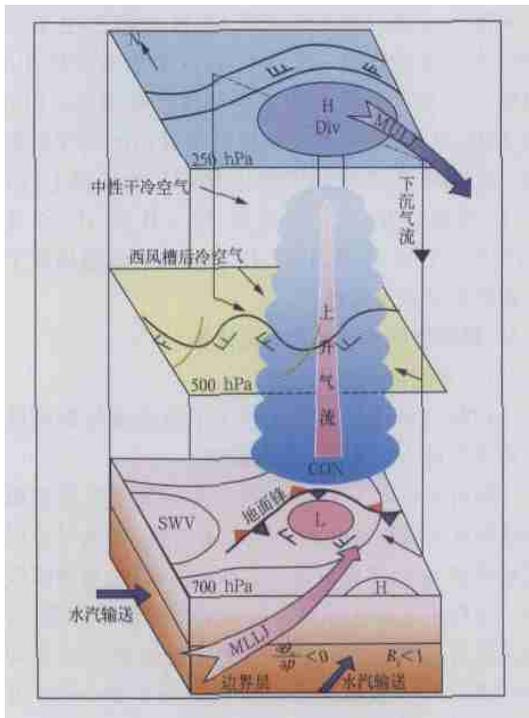


图3 中尺度暴雨系统的三维结构模型<sup>[1]</sup>  
Fig. 3 Three dimensional structure of the meso-scale heavy rainfall system

(2)  $\beta$ 中尺度对流线模型

在 $\alpha$ 中尺度对流系统中有时有一些对流线发展, 一般由一些 $\gamma$ 中尺度对流单体呈线状排列构成, 对流线一般形成于边界层的辐合线上。

图4给出了一条对流线发展后形成的边界层辐合线触发另一条对流线的过程。开始时, $\gamma$ 中尺度对流单体分散发展, 当地面有风场辐合线形成时, 原来散乱分布的对流单体就会沿辐合线分布形成对流线。当第1条对流线发展到强盛时, 由于降雨产生下沉拖曳气流会形成向外的边界层流出气流, 边界层流出气流与原来的流入气流会形成新的边界层辐合线, 导致新的对流线的形成。整条对流线的移动主要是由对流层中下层的盛行风向控制, 但对流线上的对流单体一般沿辐合线移动。

(3) 中尺度高、低空急流与梅雨锋上中尺度对流系统的发展

应用高分辨率(6 km)数值模式研究江淮流域和华南梅雨锋上的MCS。首次发现与MCS相联系的低空中尺度低压和高空中尺度高压中存在中尺度低空急流(mLLJ)和中尺度高空急流(mULJ), 并从高空观测和对流层上层水汽风分析中得到证实。mLLJ不仅输送水汽而且是产生水汽中尺度强辐合的主要环流系统。mULJ是MCS的高空流出机制。

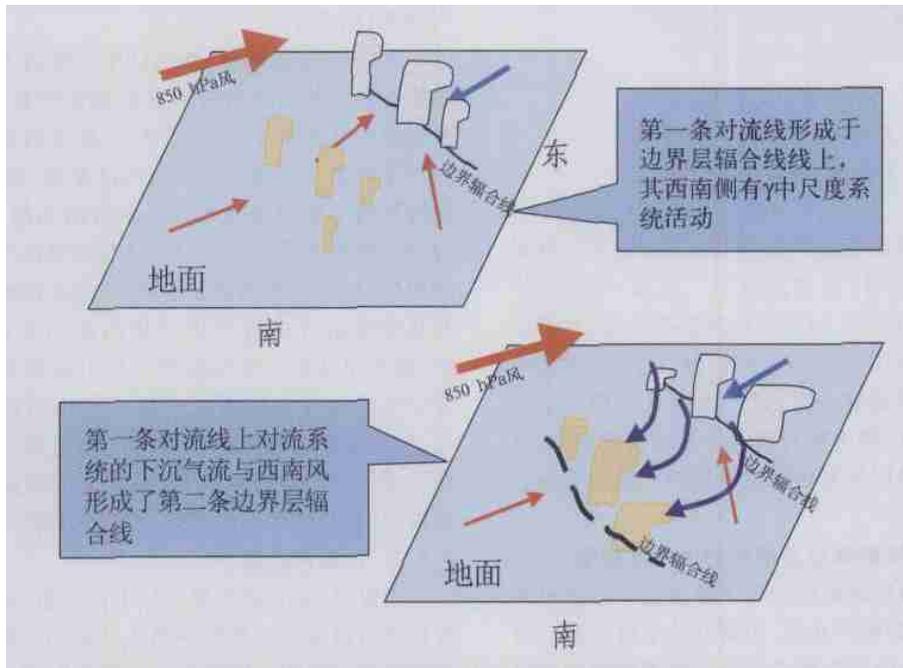


图4 梅雨锋多尺度物理模型的 $\beta$ 中尺度对流线模型<sup>[1]</sup>  
Fig. 4 Convective line model with the meso- $\beta$  scale<sup>[1]</sup>

研究了 mLLJ 和 mULJ 的动量平衡, 积云对流的动量垂直向上输送是这两种中尺度急流的汇合机理。另一方面, 潜热释放加强了 mLLJ 和 mULJ。在中尺度基础上说明了一种产生暴雨的机理。

#### 2.1.4 $\gamma$ 中尺度对流模型

$\beta$  中尺度对流系统或对流线是由一些  $\gamma$  中尺度对流单体组成,  $\gamma$  中尺度对流单体的结构特征见图 5。其入流主要来自西南或东南暖湿气流, 高层是出流, 整个对流单体的强回波在对流层中下层。根据模拟结果云中各种粒子的分布如下: 雨水主要位于中下层, 雪和霰在对流层中层, 而在对流层上层主要是冰晶。

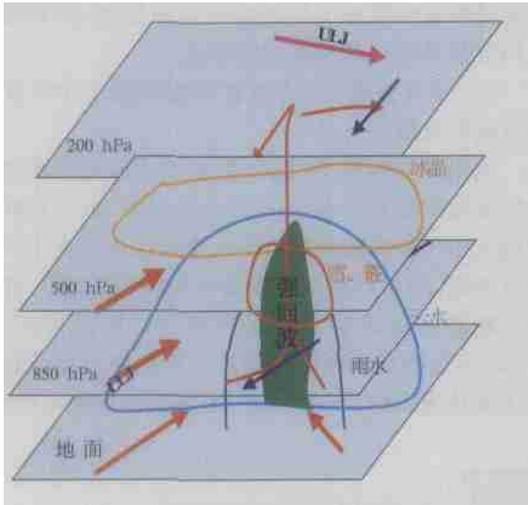


图 5  $\gamma$  中尺度对流单体模型<sup>[1]</sup>

Fig. 5 Convective cloud cluster model with the meso- $\gamma$  scale<sup>[1]</sup>

上述对外场试验资料的分析研究, 使多尺度暴雨模型进一步完善, 更加细致<sup>[1]</sup>。然而, 考虑到中国暴雨, 尤其是长江流域暴雨的情况很复杂, 对暴雨物理模型的研究还有许多工作要做。今后, 应进一步开展新的观测试验研究, 进行更深入的动力学理论和模拟研究, 以提出更为精细的暴雨物理模型, 从而为最终解决暴雨的客观和定量预报问题奠定可靠的科学基础。

#### 2.2 江淮流域梅雨锋致洪暴雨的天气学模型

长江流域致洪暴雨的天气学模型反映出南海季风涌、西太平洋副热带高压、中高纬冷空气的活动以及高原东侧的  $\alpha$  中尺度扰动对长江中下游的梅雨锋降水有重要影响。当这 4 个多尺度系统协同作用(锁相, Phase Lock) 时, 梅雨锋上便出现强暴雨<sup>[2]</sup>。

异常年份梅雨期的严重暴雨洪涝灾害(如 1954, 1998, 1991, 1996, 1999 年) 上述这几个因子都出现了异常。例如, 2003 年 7 月, 淮河流域发生了继 1991 年以来最强的一次洪水, 这次洪水主要是由 6 月底、7 月初的 3 次集中性强暴雨过程引起。图 6 是 2003 年 5~8 月淮河流域致洪暴雨的天气学模型。这期间, 有 3 次高空槽东移到达梅雨锋上(图 6c, f), 加强了梅雨锋上的扰动, 使 6 月 29 日~7 月 1 日、7 月 3~5 日、7 月 8~10 日在淮河流域出现了大面积的强降水过程。

#### 2.3 梅雨锋结构及其形成与维持

##### 2.3.1 弱梅雨锋结构

1998 年汛期活跃在长江中下游流域的梅雨锋是历史上最为典型的一类梅雨锋。

分析表明<sup>[3,4]</sup>: 1998 年梅雨暴雨发生时期梅雨锋结构既具有梅雨锋的一些普遍特征, 如在对流层低层表现为  $\theta_{se}$  锋而不是温度的强烈对比; 梅雨锋区是一个低层正涡度带以及风和水汽的辐合带等, 同时又具有其典型特征, 即锋区从近地面可伸展到 600 hPa 层(一般认为梅雨锋只存在于 800 hPa 以下), 近乎垂直、略向北倾; 锋区 900 hPa 以下是一个大气弱对流不稳定区, 向上气层变为潮湿中性直至 400 hPa, 等  $\theta_{se}$  线基本上呈垂直分布; 锋区斜压性相当弱等(图 7)。

1998 年梅雨期间, 在长江中下游西太平洋副高边缘存在一条与梅雨锋对称的副热带锋, 这条锋主要表现为北湿南干的湿度对比, 是湿的西南季风与相对干的副高边缘下沉气流的过渡带, 为“无脚锋”。此锋和梅雨锋分别位于大降水带南北两侧, 构成汇合的双锋梅雨锋系。综合上述梅雨锋的水平和垂直结构可以看到, 梅雨锋是由  $\theta_{se}$  密集带构成的锋区以及其前缘由许多深对流云塔构成的对流云带(图 8)、锋前中低层的季风涌和锋后中高层不断输送干冷空气的天气尺度系统所组成的梅雨锋系<sup>[3]</sup>。而且, 出现强降水时梅雨锋结构已经变性或者说它是介于温带锋面结构和 ITCZ 结构之间的副热带锋系结构; 且在长江中下游表现为双锋梅雨锋系<sup>[4]</sup>。

##### 2.3.2 梅雨锋的维持

通过对 1998 年汛期实际个例分析, 可以清楚地看到梅雨锋维持有两种不同的机制<sup>[4]</sup>, 第一种机制是湿物理过程产生的梅雨锋的锋生作用与锋前中尺度对流系统的发展形成的一种正反馈过程。同时, 梅雨锋北面的支持系统的作用不仅是不断给梅雨锋

北侧补充冷空气, 而且通过正涡度平流直接向梅雨锋前中尺度对流系统的中低层正涡度柱输送正涡度。由此可见, 天气尺度低涡系统—梅雨锋—梅雨锋上的中尺度对流系统的相互作用对梅雨锋的发展

和维持起了至关重要的作用。必须强调的是在梅雨锋发展前期第一种机制起主要作用, 在梅雨锋发展盛期上述两种机制都是重要的。

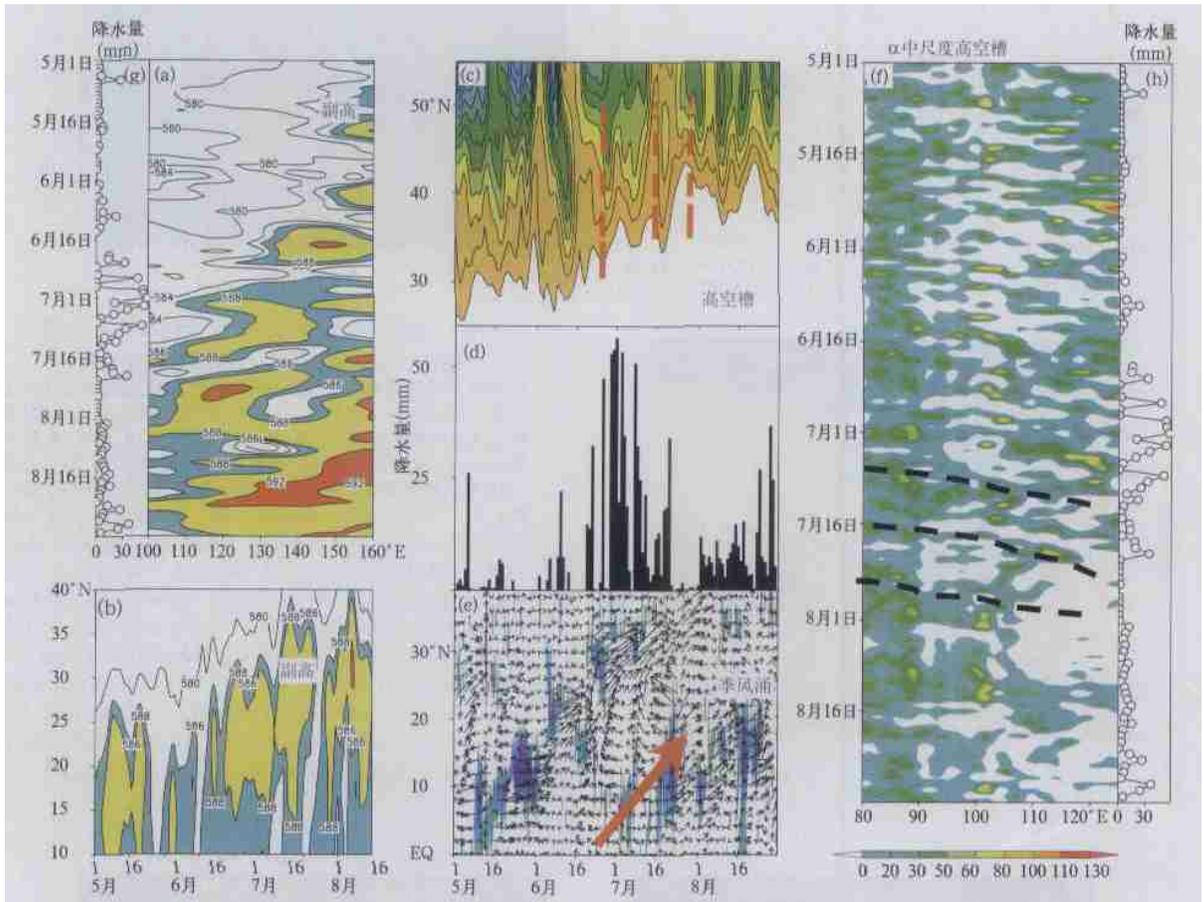


图6 2003年淮河流域致洪暴雨的天气学模型<sup>[2]</sup>

(a, b 分别为 500 hPa 位势高度(单位: dgpm) 27.5~ 32.5°N 平均的经度-时间剖面 and 110~ 130°E 平均的时间-纬度剖面; c 为 110~ 120°E 平均的 500 hPa 位势高度, 阴影区表示位势高度  $\leq 580$  dgpm; d, g, h 为淮河流域(32~ 34°N, 115~ 120°E) 17 站 6~ 8 月逐日降水量(单位: mm); e 表示 110~ 120°E 平均的季风涌随时间的演变, 箭头表示整层(地面~ 300 hPa) 积分的水汽通量( $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$ ), 阴影区表示  $\text{OLR} \leq 330 \text{ W}/\text{m}^2$ ; f 为沿 32~ 34°N 的 500 hPa 涡度( $\geq 0 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ) 经度-时间剖面)

Fig. 6 Synoptic model for Huaihe valley heavy rainfall causing flood in 2003 (a), (b) represent longitude-time cross-section of potential heights (unit: dgpm) at 500 hPa along the averaged 27.5~ 32.5°N and latitude-time cross-section along the averaged 110~ 130°E; (c) is averaged potential heights at 500 hPa from 110°E to 120°E. Shade area represents potential heights  $\leq 580$  dgpm; (d), (g), (h) daily precipitation in June~ Aug. at 17 observation stations in Huaihe valley (32~ 34°N, 115~ 120°E). Arrow represents the integrated moisture flux (unit:  $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$ ) from ground to 300 hPa, shaded area shows  $\text{OLR} \leq 330 \text{ W}/\text{m}^2$ ; (f) is longitude-time cross-section of vorticity at 500 hPa ( $\geq 0 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ )<sup>[2]</sup>

## 2.4 中尺度暴雨系统发生发展机理和动力学研究

### 2.4.1 锋面与锋生动力学研究

建立地转适应锋生理论<sup>[5]</sup>。该理论进一步完善了适应锋生理论, 指出在实际大气中并不是所有

的不平衡扰动都可以通过地转适应过程达到地转平衡状态, 这取决于初始不平衡流的位涡分布特征。对于非均匀位涡流来说, 不平衡流往往不可能达到完全的地转平衡状态, 这时要讨论适应锋生问题就

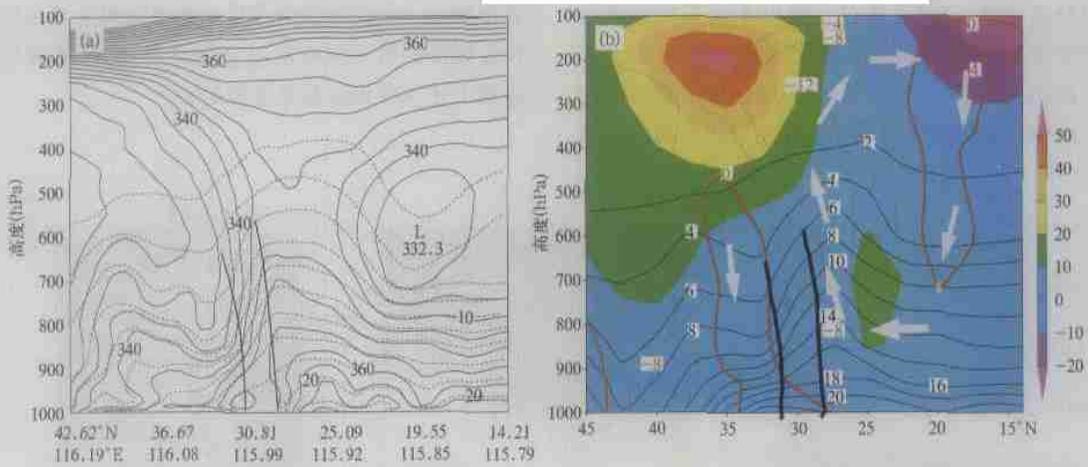


图7 1998年6月中旬的 $\theta_w$ (实线,K)和比湿

(虚线,g/kg)沿116°E的的经向垂直分布<sup>[3]</sup>

(a)中粗实线和粗虚线分别为梅雨锋区和副高边缘与锋区的上下界,1998年6月中旬(b)东西风(彩色区域,m/s),比湿(蓝线,g/kg)和垂直速度(红线, $10^{-4}$ hPa/s), (c)南北风(彩色区域,m/s),温度(蓝线,°C)和垂直速度(红线, $10^{-4}$ hPa/s)沿116°E的经向垂直分布,图中的粗实线为梅雨锋区上/下界。  
 Fig.7 Longitude-vertical cross-section of  $\theta_w$  (Solid line, K) and specific humidity (dash line, g/kg) along 116°E. (a) the solid line and dash line is upper and lower boundaries between Meiyu frontal region and subtropical frontal region respectively; (b) easterly and westerly (color area, m/s), specific humidity (blue line, g/kg) and vertical motion (red line,  $10^{-4}$ hPa/s); (c) southerly and northerly (color area, m/s), temperature (blue line, °C) and vertical motion (red line,  $10^{-4}$ hPa/s). (Solid line is upper and lower boundary of the Meiyu front)<sup>[3]</sup>.

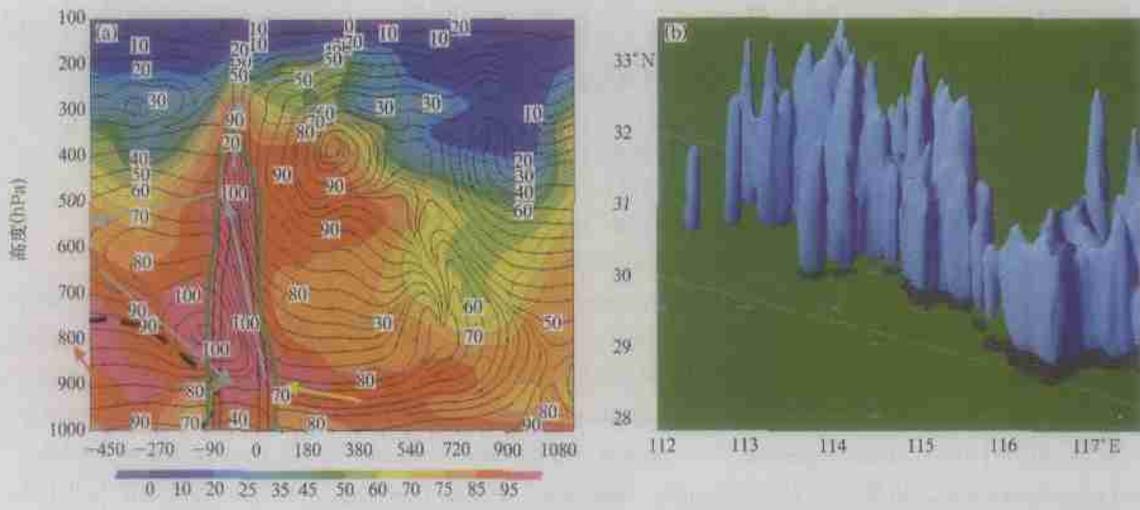


图8 观测资料分析的梅雨锋结构(a)<sup>[3]</sup>和TRMM资料分析的梅雨锋结构(b)<sup>[8]</sup>

Fig.8 (a) Meiyu front structure analyzed by observed data<sup>[3]</sup> and (b) Meiyu Front precipitation structure analyzed by TRMM data<sup>[8]</sup>

必须采用新的平衡关系而不是简单的热成风关系。

发现锋生与锋消相互交替进行, 垂直运动、速度和位温梯度存在明显的振荡现象, 这主要是与适应过程中的重力波振荡与频散作用有关, 这种振荡现象与梅雨锋强度与降水变化有一定的联系。

同时, 还从理论上研究了地形对地转适应和锋生的影响。结果表明: 初始位温场的水平分布特征

及其相对于地形的位置, 对地转适应过程及锋生条件有重要影响。

进一步考虑了非绝热过程对锋生的影响, 同时还进一步研究了非绝热过程与锋生的共同作用, 这些作用是导致梅雨锋附近中尺度双雨带的一种可能的形成机制(图 9)。

#### 2. 4. 2 云物理过程研究

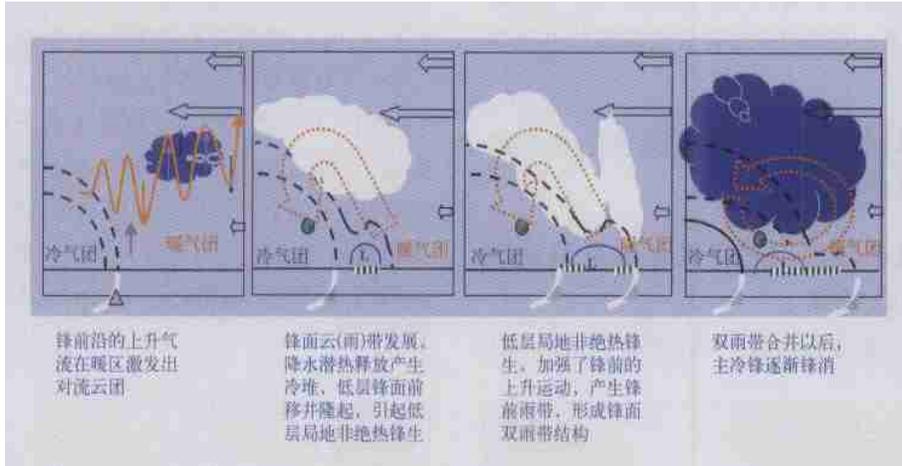


图 9 湿物理过程与非绝热锋生反馈概念模型<sup>[5]</sup>

Fig. 9 Feedback conceptual model of moist physical process and diabatic frontal genesis<sup>[5]</sup>

通过对长江流域梅雨锋暴雨过程的大量观测与分析及中尺度数值模拟, 特别是云物理结构及其对于强降水影响分析表明, 梅雨锋暴雨主要由雨带中嵌套的水平尺度 10 km、云顶高度大约为 8~ 10 km 的中尺度对流性雨团(MCS)造成, 其中中尺度强降水系统中的云物理过程具有非常鲜明的特点, 某些过程与华南暴雨相类似。主要结果为:

(1) 由对流形成的汽、水、冰三相共存并相互作用的混合冷云物理过程是梅雨锋暴雨形成与发展的主要云物理过程。当云中冰相和液相同时存在时, 才产生较大的雨水; 最大雨水区随着‘冰水相共存区’的移动而移动; 冰相变弱乃至消失后雨也减弱或停止。数值模拟的结果也发现梅雨锋强降水也可以由暖云过程形成, 其中又以雨水和云水的碰并过程为主。

(2) 强降水系统中的雨水主要由霰和雪融化而成。在零度层之下, 雨水与云水碰并、融化的霰与云水碰并对雨水增强也起很大作用。

(3) 云内的微物理过程对降水的动力热力过程有很强的反馈作用。水凝物下落时产生的拖曳作用可在很大程度上削弱上升运动, 从而抑制了云内云

物理过程的发展, 使降水量减少; 水凝物相变潜热释放使对流层中部大气层结更不稳定, 使降水量增加。

(4) 从 1998 年武汉梅雨锋对流性强降水个例研究中, 发现在梅雨锋对流性强降水云的发展过程中, 雨水主要是由暖水自动转化过程而来, 并通过与云水碰并而使其快速增加, 而冰相微物理过程对强降水的发展和演变有重要的促进作用。

#### 2. 4. 3 提出了水平切变线上涡层不稳定理论

打破了传统的 Kelvin-Helmholtz 研究切变不稳定的观点, 考察了强涡度切变存在时切变线已构成了一个涡层, 这时切变线的不稳定问题就变为涡层的不稳定问题<sup>[5]</sup>。同时考虑由涡层所产生的诱导速度, 从理论上得到了水平切变线上涡层不稳定必要条件的判据, 即必须满足  $(1 - R_v + R_{id} > 0)$ , 且有  $U(y, t) > U(A(t))$  与之相配合。这表明环境场的配置制约着切变线上扰动的发展, 这种中尺度发展同环境场存在着相互作用。

#### 2. 4. 4 湿位涡异常及不可渗透性的理论及应用

从动力学上推导了热力、质量强迫下的湿位涡方程, 并证明了湿位涡物质具有不可渗透性原理<sup>[5]</sup>。阐明了在暴雨系统中引起的强降水会造成

热力、质量强迫下的湿位涡异常。分析结果表明湿位涡异常高度主要出现在 700~500 hPa, 中心最大值可超过 1.4 PVU。

#### 2.4.5 非线性亚临界对称不稳定理论研究

当线性对称不稳定与非线性对称不稳定判据同时满足时, 可能出现超临界对称不稳定<sup>[5]</sup>。亚临界不稳定判据, 约束了初始扰动振幅, 实际上反映了 Boussinesq 方程组中非线性项的关键作用。当初始扰动振幅大于某一临界值时, 容易出现非线性亚临界对称不稳定。

### 3 中尺度暴雨的定量遥感反演理论和方法研究取得重要进展

#### 3.1 中尺度暴雨的卫星定量遥感反演的理论和方法研究

利用卫星定量遥感反演中尺度系统的结构特征

的理论和方法在国际上越来越受到重视, 它是大气探测发展的重要方向。国家 973 项目利用卫星遥感资料研究了云导风、多层中尺度动力、热力场的反演、云分类、云内相态分布以及降水参数和下垫面特征等多种探测中尺度暴雨的卫星遥感反演理论和方法<sup>[6]</sup>, 实现了利用卫星遥感反演出从大尺度到云尺度的多种卫星遥感产品, 并在此基础上, 已经集成为有应用前景的中尺度暴雨卫星遥感产品应用集成系统。

##### 3.1.1 中尺度暴雨系统的大气与地表特征参数的卫星遥感反演方法研究

(1) 卫星反演中尺度强暴雨系统环境风场参数提出了示踪云追踪的简算法, 改进指定云迹风高度的算法, 实施了云迹风推导的全过程质量控制, 研究了云迹风产品在天气分析和预报中的应用(图 10)。其中前三项研究成果, 受到了国际云导风界的高度评价<sup>[7]</sup>。

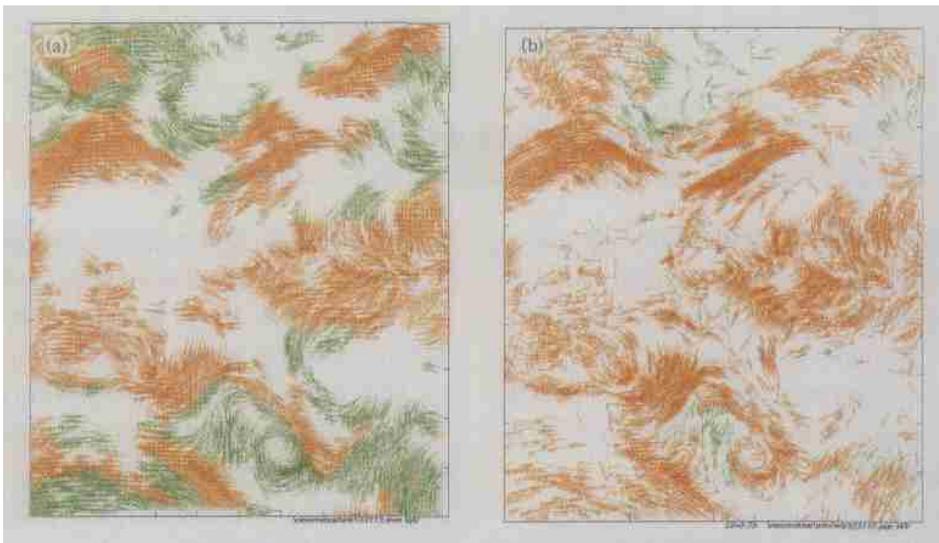


图 10 中国(a)与欧洲气象卫星组织(b)水汽风的比较<sup>[6]</sup>

Fig. 10 Comparison of moisture wind from China (a) and European Meteorological Satellite Organization (b)<sup>[6]</sup>

(2) 利用卫星遥感定量反演中尺度强暴雨系统的环境温湿场。针对中尺度暴雨系统, 建立了新的大气温、湿度廓线反演模式——非线性物理反演模式, 其生成的反演产品一定程度上能很好地反映中尺度暴雨特征(图 11)。同时还建立了 ATOVS 反演产品的真实性检验和误差分析系统。检验结果表明, 温度廓线的均方根误差(RMS)大约为 2 K, 湿度廓线的 RMS 大约 20%。解决了长期以来云天情况下无法获取大气温度、湿度三维结构的问题, 初步实

现了卫星全天候大气探测, 可以获取卫星过境时刻的中尺度系统的物理场。

(3) 卫星反演云顶微物理结构参数可以定性给出云分类和云相态的识别。

利用中国自行研制的 FY-1C/D 卫星资料, 将云相态识别方法用于中尺度强暴雨云系特征分析。并进一步对云系的垂直结构进行分析, 研制了识别上层为薄卷云, 下层为低层水云情况下的多层云识别方法。

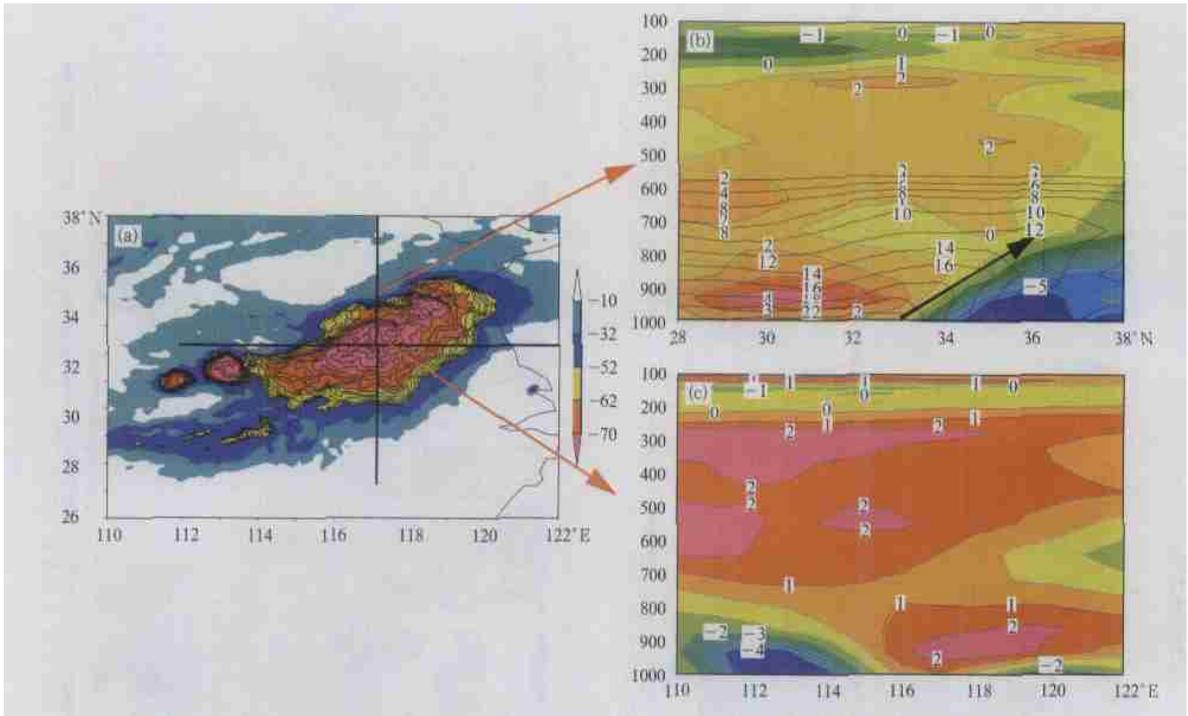


图 11 ATOVS 资料反演的中尺度云团的温、湿三维结构<sup>[6]</sup>

(a. 2002 年 6 月 22 日 TBB, b 和 c 分别为沿 117°E 与 32°N 的温度距平(K)、比湿(g/kg)的随高度(hPa)的分布)

Fig. 11 Three dimensional structure of temperature and moisture of cloud

cluster with meso-scale retrieved by ATOVS data<sup>[6]</sup>

((a), 22 June, 2002 from TBB data; (b), cross-section of  $T$  and  $q$  with heights along 117°E; (c), same as fig. 11(b) except for along 32°N)

在云顶粒子微物理性质分析的基础上, 尝试利用多通道探测数据, 研究定量化反演云光学厚度和云顶粒子有效半径的方法。

(4) 微波和光学遥感反演降水场参数研究。

集成了具有业务化水平的降水估计系统和微波降水反演系统, 填补了国内卫星降水估计业务运行的空白。其算法被国际降水工作组(IPWG)收录并通过 IPWG 网站对外发布。

(5) 卫星遥感数据反演下垫面状况参数的研究已试用于对地表湿度和洪涝的监测。

开展了利用遥感手段提取地表参数, 反演得到的区域潜热、感热通量随时间的演变特征。利用 AMSU 资料和 TMI 低频微波通道的遥感资料针对 1998 年江淮特大洪涝区和 2003 年淮河洪涝区进行分类监测分析, 结果表明 TMI 低频微波通道资料优于 AMSU 分析结果的应用效果。

(6) 利用卫星遥感资料的分析结果, 提出了梅雨锋 MCC 发生发展的一种天气尺度概念模型。

通过对 2002 年 6 月 20~ 23 日梅雨暴雨云团的

卫星观测分析得到概念模型(图 12)。对流层中上部有季风水汽羽从孟加拉湾延伸到长江中下游地区, 江淮切变线云系、高空短波槽云系和季风云涌的

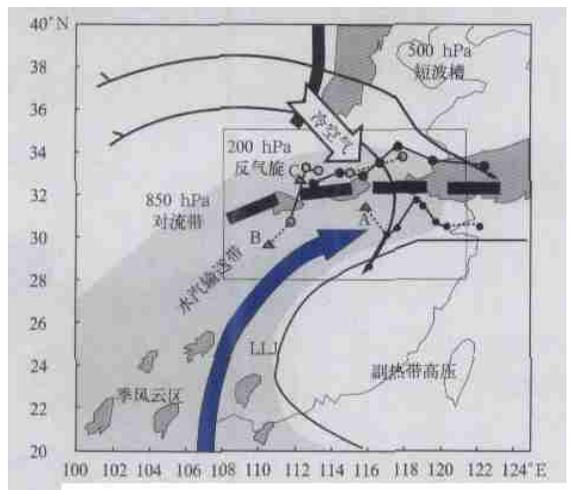


图 12 2002 年 6 月 20~ 23 日梅雨暴雨云团的卫星观测分析得到的概念模型<sup>[6]</sup>

Fig. 12 Conceptual model of heavy rainfall cloud cluster within Meiyu front on 20- 30 June, 2002 analyzed by satellite data<sup>[6]</sup>

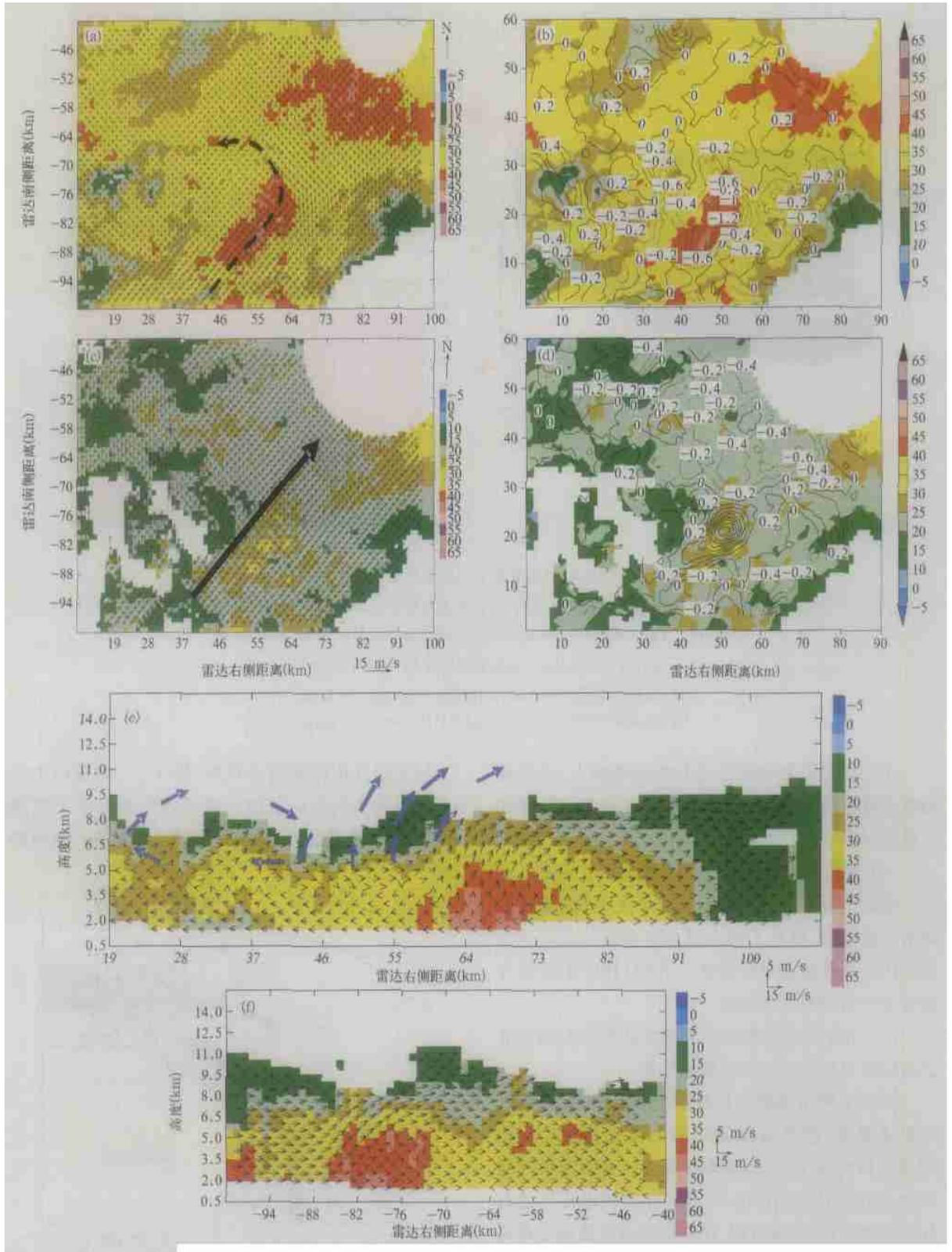


图 13 2002 年 7 月 22 日双多普勒雷达反演的中尺度暴雨系统的三维风场<sup>[8]</sup>

(a, c 分别为 4, 7 km 水平风场, 单位: m/s; b, d 分别为 4, 7 km 散度场, 单位:  $10^{-3}$ ;  
e, f 分别为 20, 50 km 风场垂直结构, 单位: m/s;)

Fig. 13 Three dimensional wind fields retrieved by radar data

(a, b, c, d) horizontal wind and divergence field at 4 and 7 km levels respectively, (e, f) vertical cross-section of wind from west to east and from south to north, respectively

相互作用, 是暴雨云团连续生成和发展的有利云型配置。

同时还发现, MCC 在大范围的水云中发展, 由多层云、密实冰云和卷云组成。降水强度最大的区域位于密实的冰云向水云过渡的冰云一侧, 那里也是对流云团高空上风方向一侧, 云顶亮温梯度最大的区域。

可降水冰云团内部冰水的范围在垂直和水平方向皆比雨水的范围大得多, 在 MCC 的总降水中, 冰水的贡献最大。云水主要分布在 10 km 以下, 云冰则分布在 8~18 km, 云顶亮温低于  $-52\text{ }^{\circ}\text{C}$  的区域是雨水、冰、云水和云冰最丰富的区域, 且在所有水凝物中可降水冰和云冰的总量较雨水和云水的总量大得多。

### 3.2 中尺度暴雨的多普勒雷达反演的理论和方法研究

多普勒雷达是暴雨监测和预警的重要手段, 尤其是暴雨的临近预报。本项目研制的多普勒雷达资料预处理、质量控制、单多普勒雷达风场反演和双多普勒雷达风场反演技术<sup>[8]</sup>将有可能在中国气象局新布设的 126 部新一代天气雷达中得到应用, 进一步提高暴雨的监测和临近预报的能力。

(1) 提出了雷达资料质量控制及分析的新方法, 使雷达资料的质量控制达到新的水平。

提出了多普勒雷达退速度模糊有效的新方法。该方法利用时间序列相近的两雷达反射图来确定每个降水区域的运动方向, 从而在速度场上是否有模糊, 并进行退模糊处理。同时, 提出了一种适用于多普勒雷达信号处理的快速中值滤波方法。该方法不仅提高了运算效率, 同时完好地保留了多普勒雷达信号和有效地滤除了随机脉冲噪声。

(2) 提出应用 TRMM 资料估算降水和提出了估算面积平均降水强度的三要素。

在研究 TRMM/PR 雷达测量降水时的非均匀分布订正中, 基于锋面降水和中国梅雨暴雨的降水强度分布服从对数正态分布的研究结果, 提出了非均匀分布订正的新方法。提出阈值方法估算面积平均降水强度的三要素: 阈值的大小、降水类型和观测资料的分辨率。

(3) 实现了双多普勒雷达反演三维风场, 在 2002 年外场试验中首次取得了  $\beta$  中尺度暴雨的三维结构实时资料(图 13), 同时对单多普勒雷达反演三维流场也做了有益的探索。

(4) 提出了风廓线仪在降水出现时对大气三维风场结构的分析处理方法, 通过雷达气象方程能够获取探测空间附近的降水回波强度垂直剖面结构、云中降水含水量以及测站上空雨滴下降的平均多普勒速度, 同时利用雨滴下降的平均多普勒速度对风廓线仪垂直观测资料进行修正, 可以得到降水云体中三维风随高度分布的演变。

(5) 提出了梅雨锋暴雨个例的中尺度结构特征, 综合利用卫星、多普勒雷达网、双多普勒雷达风场反演技术和雷达回波分析技术, 分析了暴雨的  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  中尺度特征, 通过对暴雨个例分析研究提出以下暴雨机理: 低层风切变是形成暴雨的主要原因, 回波单体的合并是形成暴雨的一个重要物理机理; 回波单体的合并是在低层辐合线或切变线的作用下形成的; 单体的合并首先从低层开始以后发展到高层。

(6) 对 GPS-IPW 在中尺度暴雨监测中的应用作了初步尝试。

GPS-IPW 资料较雷达回波强度资料对于强天气过程有着更加超前的指示性作用, 降水前 GPS/IPW 的变化对降水的预报有很强的指示性, 一般会出现降水前(1~2 d)的缓增和降水前(约 4 h)的急增的变化特点, 在降水过程中, IPW 和降水强度的变化有很强的相关性。另外, GPS/IPW 对降水的反应超前于雷达回波的反应(数小时)。GPS-IPW 资料在中小尺度强天气的预警应用中对雷达观测会起到很好的帮助作用, 提高预警效果。

## 4 发展了配有三维变分同化系统的中尺度暴雨数值预报模式系统, 在 2003 年淮河抗洪救灾中发挥了积极作用

本项目发展的三维变分同化系统与 AREM 中尺度暴雨数值预报模式集成为中尺度暴雨数值预报模式系统<sup>[9,10]</sup>(图 14)。该数值模式的特点是: 具有良好的动力框架、E 网格对涡、散度高精度的计算以及采用保形正定水汽平流差分方案; 选择  $\eta$  坐标及在该坐标下模式计算的合理处理, 使得在大气低层位势高度、温度预报较好; 良好的动力框架和极少的人为耗散、平滑使其局地中尺度系统得到较好预报。该模式系统已于 2002 和 2003 年汛期先后在湖北省气象局、安徽省气象局、上海市气象局进行业务试运行, 并在 10 多个省市进行了推广应用。试运行结果表明该模式对大到暴雨过程预报具有较强能力, 对大到暴雨的落区、落时的预报能力也有明显的提高。

从湖北、安徽省气象局的业务试运行的结果给出的反馈情况总体评价是:

① 汛期主雨带位置有较好的预报指导作用; ② 对汛期主雨带位置南北摆动预报有较高的准确性、连

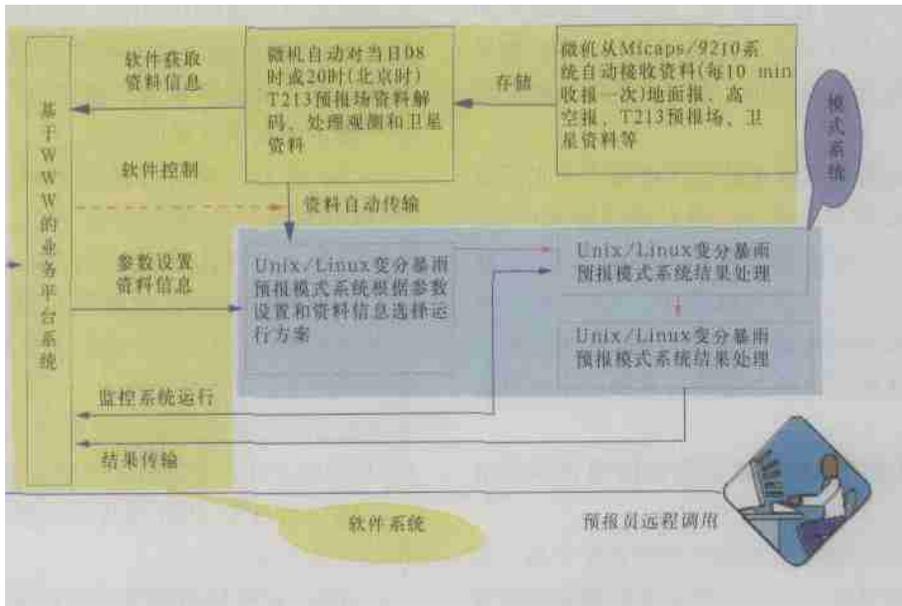


图 14 预报系统业务平台流程示意图<sup>[9]</sup>

Fig. 14 Operational flow chart of heavy rainfall prediction system

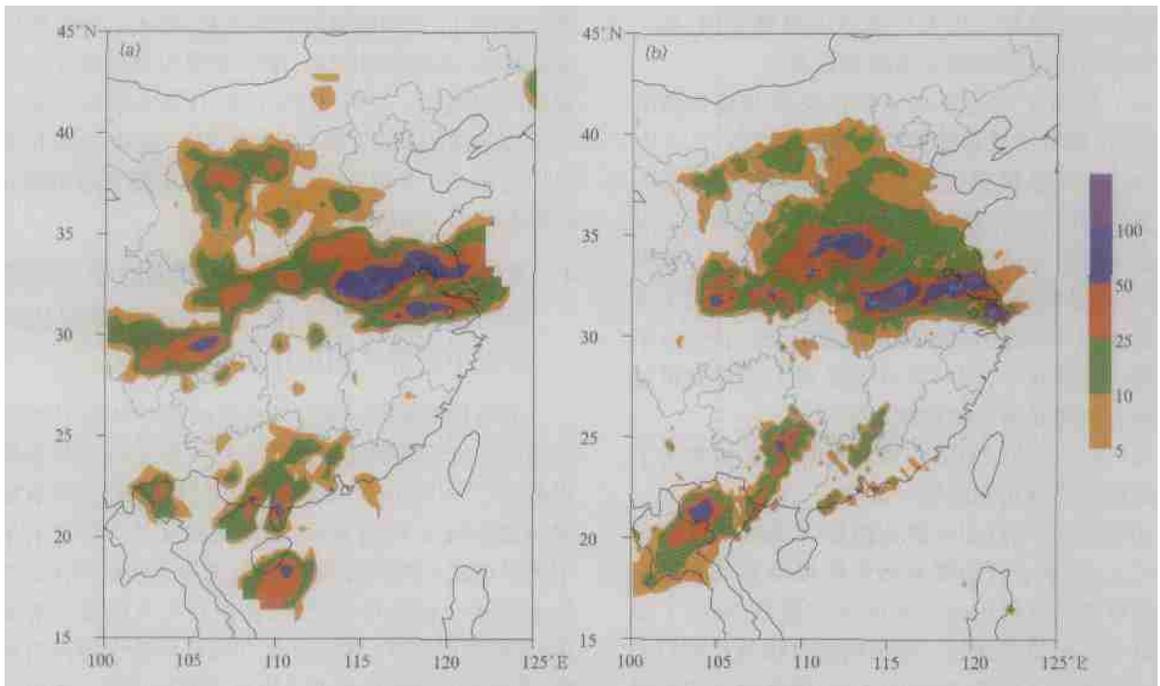


图 15 2003 年 6 月 29 日 08 时~ 30 日 08 时降水分布 (a. 实况, b. 预报)

Fig. 15 Precipitation distribution form 08Z, 29 to 08Z, 30 June, 2003 (a. observed, b. predicted)

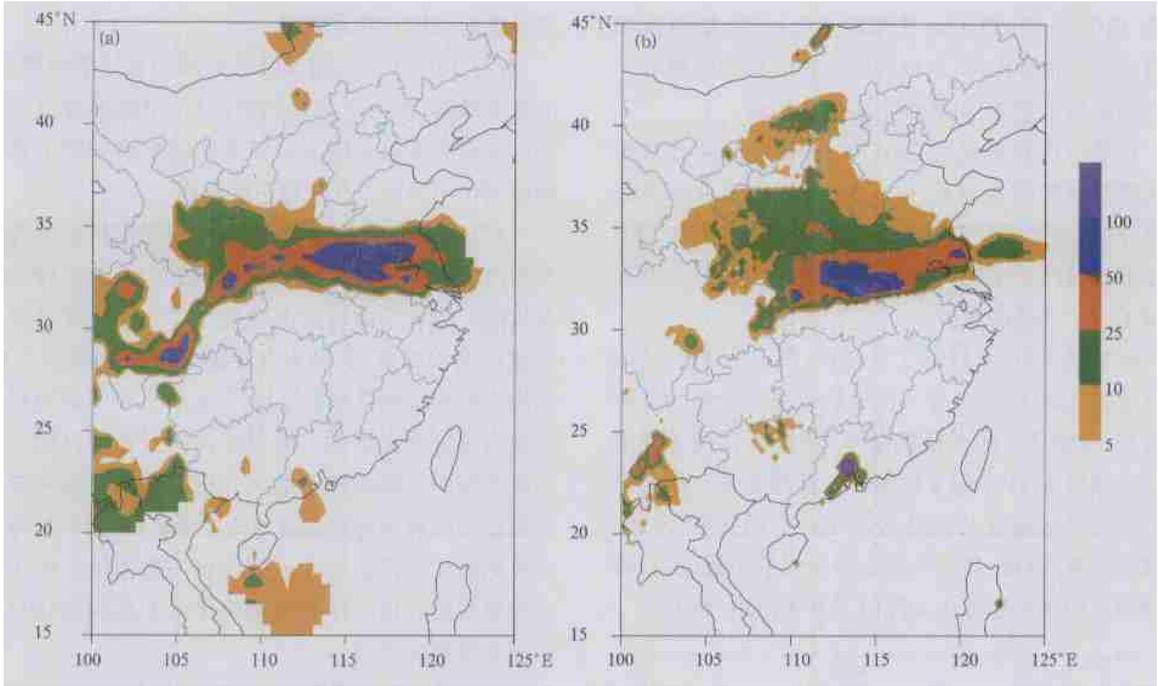


图 16 2003 年 7 月 1 日 08 时~ 2 日 08 时降水分布

(a. 实况, b. 预报)

Fig. 16 Precipitation distribution from 08Z, 1 to 08Z 2 July, 2003

(a. Observed, b. Predicted)

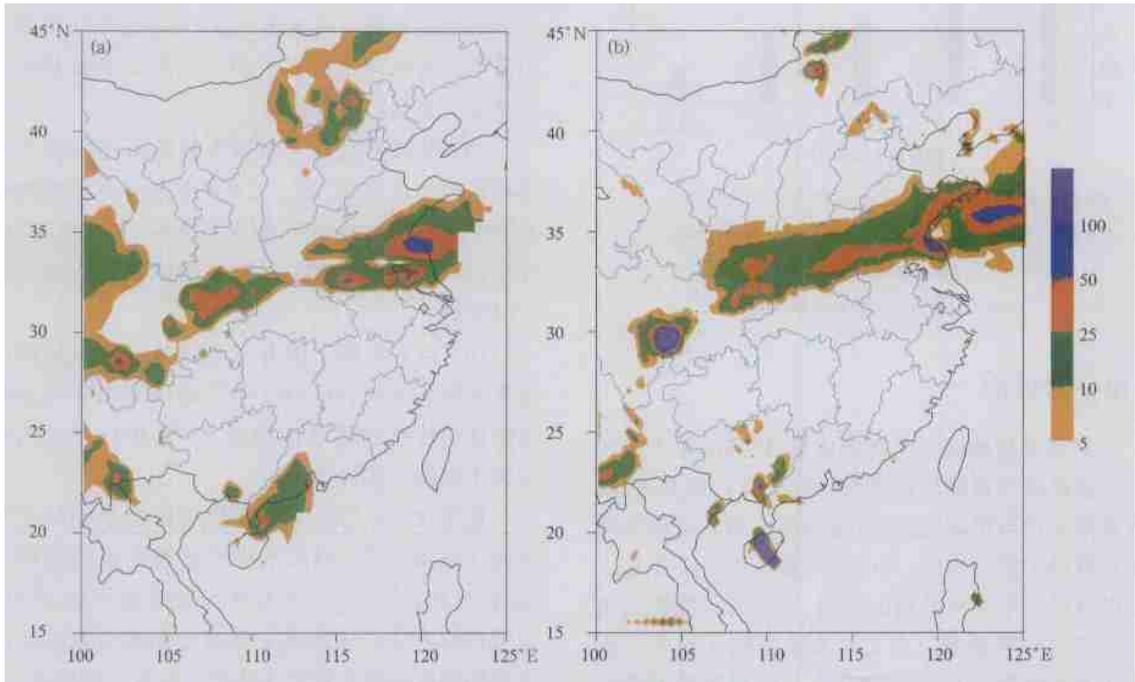


图 17 2003 年 7 月 2 日 08 时~ 3 日 08 时降水分布(a. 实况, b. 预报)

Fig. 17 Precipitation distribution from 08Z, 1 to 08Z 2 July, 2003

(a. Observed, b. Predicted)

续性、稳定性; ③ 对主雨带暴雨发生时间、暴雨落区预报有较好指导作用, 对按量值计算的暴雨雨量有一定的预报指示意义, 但暴雨中心强度偏弱。

该暴雨模式系统对 2003 年 6 月 22~ 24 日开始进入梅汛期的降水过程, 6 月 30 日副热带高压突然增强北抬, 导致主要雨带转入江淮流域, 并开始 2003 年江淮流域的洪水的转折性过程等几次关键性过程均做了较为准确的预报。

特别是 6 月 29 日至 7 月 3 日(图 15~ 17), 其间淮河流域出现了 2003 年入汛以后的第 3 次连续性暴雨过程, 连续 5 d 的大范围暴雨、大暴雨直接造成淮河王家坝自 1991 年以来的第一次开闸蓄洪。该暴雨模式系统对这连续几次暴雨天气过程的发生、发展, 出现的位置、时段、强度均显示出较强的预报能力, 在关键时刻的预报服务中发挥出了重要作用(图 18)。

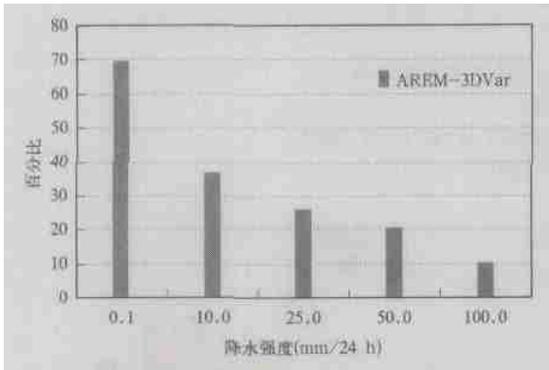


图 18 2003 年夏季长江中下游月平均 TS 评分

Fig. 18 Monthly averaged TS score for precipitation prediction in the middle and downstream of Yangtze River in summer of 2003

## 5 结论与讨论

国家重点基础研究发展规划项目“我国重大天气灾害形成机理与预测理论研究”经过 5 a 的研究, 在梅雨锋暴雨结构与机理、监测与预测理论和方法研究等方面都取得了重要进展, 为中国的暴雨的进一步深入研究以及提高中国对暴雨的监测、预测与预警能力奠定了坚实的科学基础。本文简要地总结了该项目在上述 3 方面取得的具有创新意义与应用前景的部分主要成果:

(1) 根据 2001/2002 年外场科学试验的多种实时资料分析, 提出梅雨锋暴雨的多尺度物理模型, 其中包括天气尺度、 $\alpha$  中尺度、 $\beta$  中尺度与  $\gamma$  中尺度强对

流系统的结构与发展机理。

(2) 提出了长江流域致洪暴雨的天气学模型, 即南海季风涌、西太平洋副热带高压、中高纬冷空气活动以及青藏高原东测  $\alpha$  中尺度扰动东移等的个系统的协同作用即在长江流域引起暴雨。

(3) 明确提出梅雨锋是由  $\theta_{se}$  密集带构成的锋区及其前缘由许多深对流云塔构成的对流云带、锋前的季风涌与锋后不断输送干冷空气的天气尺度系统所组成的梅雨锋系, 它具有介于温带锋面结构和 ITCZ 结构之间的副热带锋系结构, 且在长江中下游也可以表现为双锋梅雨锋系。梅雨锋前的湿物理过程产生的锋生作用与梅雨锋上的强对流系统的发展形成一种正反馈过程是梅雨锋维持的重要机制。同时, 梅雨锋后的高空的低涡系统—梅雨锋—梅雨锋上的中尺度对流系统的相互作用对梅雨锋的发展和维持也起了至关重要的作用。

(4) 利用卫星遥感资料研究了云导风、多层中尺度动力、热力场反演、云分类、云内相态分布以及降水参数和下垫面特征等多种探测中尺度暴雨的卫星遥感理论和方法, 实现了利用卫星遥感反演出从大尺度到云尺度的多种卫星遥感产品, 为中国中尺度暴雨的定量卫星遥感理论和方法的进一步发展及其业务应用奠定了坚实的科学基础。

(5) 发展和研究了多种多普勒雷达反演中尺度暴雨结构的理论和方法, 尤其是实现了双多普勒雷达反演中尺度暴雨系统三维风场结构, 首次在 2002 年外场试验中取得了  $\beta$  中尺度暴雨系统的三维风场的实时资料。

(6) 自主发展了配有三维变分同化系统的中尺度暴雨模式系统, 在 2003 年外场试验中表明该模式系统具有较强的降水预报能力, 在 2003 年淮河抗洪救灾中发挥了积极作用。

虽然这 5 a 的暴雨研究使中国在暴雨研究领域取得了重要进展, 但由于中尺度暴雨系统结构的复杂, 它又具有群发性、突发性和爆发性特点, 因此, 目前项目所取得的进展离完全满足国家对及时监测与正确的预报这类灾害天气的要求还有一段距离, 离国际先进水平也还有一段很长的路要走, 继续、深入地研究中国中尺度暴雨, 进一步提高对中尺度暴雨系统的监测水平与定量预报水平将是中国气象学家今后较长一段时间内的艰巨任务, 我们相信只要中国科

学家在国家的支持下, 发挥创新精神, 再经过 10, 20 a 的努力我们一定能实现及时监测与正确预报暴雨的  
发生、发展这一目标, 为提高中国减灾防灾和社会、经济可持续发展的总体能力做出我们应有的贡献。

## 参考文献

- 1 赵思雄, 陶祖钰, 孙建华等. 长江流域梅雨锋暴雨机理的分析研究. 见: 倪允琪, 周秀骥主编. 国家重点基础研究发展规划项目《我国重大天气灾害形成机理与预测理论研究》研究专著系列丛书之一. 北京: 气象出版社, 2004. 282pp
- 2 陶诗言, 张小玲, 张顺利. 长江流域梅雨锋暴雨灾害研究. 见: 倪允琪, 周秀骥主编. 国家重点基础研究发展规划项目《我国重大天气灾害形成机理与预测理论研究》研究专著系列丛书之二. 北京: 气象出版社, 2004. 192pp
- 3 陶诗言, 倪允琪, 赵思雄等. 1998 夏季中国暴雨形成机理与预报研究. 北京: 气象出版社, 2001. 1~ 184
- 4 Jiang Jianyin, Ni Yunqi. Diagnostic study on the structure characteristics of a typical Mei- Yu Front System and Its Maintenance Mechanism. *Adv Atmos Sci*, 2004, 21(5): 1~ 12
- 5 伍荣生, 高守亭, 谈哲敏等. 锋面过程与中尺度扰动. 见: 倪允琪, 周秀骥主编. 国家重点基础研究发展规划项目《我国重大天气灾害形成机理与预测理论研究》研究专著系列丛书之三. 北京: 气象出版社, 2004. 170pp
- 6 张文建, 许健民, 方宗义等. 暴雨系统的卫星遥感理论和方法. 见: 倪允琪, 周秀骥主编. 国家重点基础研究发展规划项目《我国重大天气灾害形成机理与预测理论研究》研究专著系列丛书之四. 北京: 气象出版社, 2004. 427pp
- 7 Xu J, Holmlund K, Zhang Q, et al. Comparison of two schemes for derivation of atmospheric motion vectors. *Geophys Res*, 2002, 107 ( 14D ): ACL 4-1~ 4-15
- 8 程明虎, 刘黎平, 张沛源等. 暴雨系统的多普勒雷达反演理论和方法. 见: 倪允琪, 周秀骥主编. 国家重点基础研究发展规划项目《我国重大天气灾害形成机理与预测理论研究》研究专著系列丛书之五. 北京: 气象出版社, 2004. 252pp
- 9 宇如聪, 薛纪善, 徐幼平等. AREMS 中尺度暴雨数值预报模式系统. 见: 倪允琪, 周秀骥主编. 国家重点基础研究发展规划项目《我国重大天气灾害形成机理与预测理论研究》研究专著系列丛书之六. 北京: 气象出版社, 2004. 232pp
- 10 倪允琪, 刘黎平, 高梅等. 长江中下游梅雨锋暴雨野外科学试验. 见: 倪允琪, 周秀骥主编. 国家重点基础研究发展规划项目《我国重大天气灾害形成机理与预测理论研究》研究专著系列丛书之八. 北京: 气象出版社, 2004. 208pp

**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**

Ni Yunqi Zhou Xiuji

(*Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing. 100081*)

**Abstract**

The project on study for formation mechanism and theories and methods of detection and prediction of severe weather disasters in China from National Key Basic Research Development Program has been studied by all the scientists of this project for five years. It has been made important progresses including six aspects related to heavy rainfall: (1) Multi-scales physical models of heavy rainfall within the Meiyu front based on the real-time observed data have been proposed; (2) It has established a synoptic model for heavy rainfall within the Meiyu front; (3) Meiyu front is Meiyu frontal system which consists of multi-synoptic systems with different space-time scales. It has structure characteristics of sub-tropical frontal system which is between structure characteristics of extra-tropical frontal system and ITCZ. However, sometime it has dual-peaks structure in the middle-downstream of Yangtze River. And its maintenance and development mechanism has also been discussed. (4) Several kinds of quantitative remote sensing retrieval theories and methods have been proposed for meso-scale heavy rainfall; (5) Dual-Doppler detecting methods and retrieval theories for meso scale heavy rainfall have successfully been studied. (6) The meso scale heavy rainfall numerical prediction model system with 3Dvar has been developed. The above progresses showed that the project on heavy rainfall study has been reached to the goals and finished the tasks in the last five years. It is substantial scientific base for advancing deeply studying of heavy rainfall in China.

**Key words:** Meiyu front, Mechanism, Prediction theories.