

长江流域雨季中尺度对流系统研究

——国家自然科学基金重点项目(40930951)成果简介

王晓芳¹ 许小峰² 崔春光¹ 赵玉春¹ 孙建华³ 陈忠明⁴ 傅慎明³

(1 中国气象局武汉暴雨研究所 暴雨监测预警湖北省重点实验室, 武汉 430074 2 中国气象局, 北京 100081

3 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029 4 中国气象局成都高原气象研究所, 成都 610072)

摘要: 长江流域产生暴雨的中尺度对流系统(Mesoscale convective systems, MCS)是雨季强降水的重要影响系统, 深入研究它的组织结构、活动规律及其发生发展机制, 对提高暴雨的预报能力有重大意义。近3年来依托国家自然科学基金重点项目对中尺度对流系统展开了一系列研究, 包括对长江流域产生暴雨的MCS进行组织形态分类、分析了不同线状MCS的结构特征、合成分析了各线状MCS产生的环境条件; 我国三阶地形对降水的影响, 尤其是山地—平原环流对梅雨锋夜间降水的影响; 中尺度地形对对流降水的影响; 湿斜压热动力耦合强迫激发MCS发生发展的影响; 最后总结了长江流域产生暴雨的MCS的物理概念模型。

关键词: 中尺度对流系统, 组织结构, 环境条件, 地形, 概念模型

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2014.02.002

An Introduction to the Results of the Research on Mesoscale Convective Systems during the Rainy Season in the Yangtze River: A Key Project of the National Natural Science Foundation of China (40930951)

Wang Xiaofang¹, Xu Xiaofeng², Cui Chunguang¹, Zhao Yuchun¹, Sun Jianhua³, Chen Zhongming⁴, Fu Shenming³

(1 Hubei Key Laboratory for Heavy Rain Monitoring and Warning Research, Institute of Heavy Rain, China

Meteorological Administration, Wuhan 430074 2 China Meteorological Administration, Beijing 100081

3 Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

4 Institute of Plateau Meteorology, China Meteorological Administration, Chengdu 610072)

Abstract: The mesoscale convective system producing heavy rainfall is an important system during the rainy season. The research on its organizational structure, activity patterns and the development of mechanisms is of great significance to improve the storm forecasting ability. In the past three years, based on the project from the National Natural Science Foundation of China, we have been carrying out a series of studies on MCSs, including organizational model, structure characteristics, environmental conditions, and topographic effects on precipitation, especially the mountain-plain stream and meso-scale terrain. The coupling force of wet baroclinic thermal power leads to the development of MCSs. Finally, the physical conceptual model of mesoscale convective systems producing heavy rainfall in the Yangtze River valley is summarized.

Keywords: MCS, organizational model, structure characteristics, environmental conditions, terrain, conceptual model

1 引言

长江流域产生暴雨的中尺度对流系统是由多积云单体组成的深对流与层状云混合降水的系统。国外对MCS做了许多深入的研究工作, 与产生暴雨的机理有密切关系。众多观测表明, 对流组织化与环境风铅直

切变存在密切的关系, 并且许多数值模拟分析逐渐对此做出了定量表述^[1-6]。现在已基本公认是由降水蒸发作用产生的地面冷出流与环境切变的相互作用经由前沿新单体的再生促成了对流系统的组织化和维持^[5]。然而其他许多因子, 例如中层和高层的风切变, 自由大气中的相对湿度和静力稳定度, 对流有效位能(CAPE), MCS引起的重力波和天气尺度作用等都可能对重要影响。再者, 在没有低层环境切变的时候也能观测到MCS, 数值模拟也表明由冷丘与中高层切

收稿日期: 2013年9月30日; 修回日期: 2014年1月2日
第一作者: 王晓芳(1972—), Email: wxf.xiaofang@gmail.com
资助信息: 国家自然科学基金项目(40930951; 41375057)

变间、冷丘与低层平均风之间、冷丘与对流自身产生的低层切变之间^[7]的相互作用以及重力波机制都能激发MCS。Schumacher等^[8]最新研究表明,在相当湿的环境里,即使没有近地面冷堆,低空急流与深对流加热相互作用激发的低层重力波可使对流组织成一个移动缓慢的MCS。

以往多用卫星资料来展现产生暴雨的MCS的活动,或者用数值模拟或再分析资料诊断产生暴雨MCS的基本环境特征等^[9-10],近年来随着我国观测技术的提高,结合中尺度再分析系统研究MCS的可获取数据越来越多^[11],在理论上也得到了有一些有意义的结果^[12]。这里主要以观测分析结合高分辨率数值模拟介绍近3年关于长江流域MCS研究的一些成果。

2 长江流域产生暴雨的MCS的分类研究

由线状MCS的组织形态、单体相对系统的移动方向和系统的移动特征,将线状MCS分为8个确定的类型:尾随层状降水MCS(Trailing Stratiform MCS,简称TS)、准静止后向建立MCS(Backbuilding/Quasi-Stationary MCS,简称BB)、邻接层状单向发展MCS(Training Line/Adjoining Stratiform MCS,简称TL/AS)、前导层状降水MCS(Leading Stratiform MCS,简称LS)、平行层状降水MCS(Parallel Stratiform MCS,简称PS)、断裂线状MCS(Broken Line MCS,简称BL)、镶嵌线状MCS(Embedded Line MCS,简称EL)、长带层状降水MCS(Long Line MCS,简称LL)。在8类确定类型中前6类MCS的组织形式、单体发展、系统移动和国外已有MCS分类有共性,故沿用已有的类型名称,后两类MCS尚未有文献提及,特别是长带层状降水MCS,它们是分析长江流域梅雨期MCS类型特征时新统计的两种线状MCS类型,这里仅根据它们的模态特征命名。

王晓芳等^[13]用雷达组合反射率因子拼图资料统计

得到2010—2012年6—7月长江流域MCS个例大约379个,其中有组织的线状MCS为195个,占51.5%;非线状区域MCS有184个,占48.5%,有组织的线状MCS发生数略占优势(图1)。线状MCS中最大百分数是TS类,为22.6%,大于1/5,其次是BB类,为19.4%,其他线状MCS的百分率从14.4%到3.1%不等。

综合各个类型的大量个例并参考国内外已有的研究,图2给出了长江流域梅雨期成熟阶段MCS的组织类型示意图。非线状MCS(None Linear MCS,简称NL)主要是大片回波中嵌有或多或少的无组织强对流回波,其运动情形很复杂,有快速移动的、有缓慢移动的、有静止的。线状MCS中TS、LS、PS、BL四类是快速移动的,TL/AS、BB、EB、LL则移动缓慢,几乎是静止少动的。移动快的MCS在发展初期产生的降水量一般较小,强降水主要发生在成熟期,由它们发展初期的移动方向和移动速度,可外推未来3~4h内强降水的大致落区;准静止MCS根据其雷达回波特征可预测未来强降水的落区,特别是极端降水天气的预警。显然非线状MCS较线状MCS的组织结构复杂。

此外,Zheng等^[14]依据回波形态将MCS分为7类,回波形态基本包含在图2各类型中,其中将TS MCS类中的易造成大风剧烈天气的弓状回波单独分为一类,称之为弓状回波。

3 长江流域产生暴雨的线状MCS的环境条件

在雨季,暴雨天气往往发生在有利的天气尺度条件下,如副热带高压、中高纬度冷空气活动、高原中尺度系统东移、南海季风涌等多尺度天气系统的协同作用。在这些系统处于活跃期时,梅雨锋上出现暴雨,但并不是整个梅雨锋带上普降强降水,降水存在不均匀性,这说明降水强弱还与局地的气象条件密切相关。王晓芳等^[15]诊断分析了2010年长江中游梅雨期 β 中尺度系统的环境特征,强调了局地大气层结的变

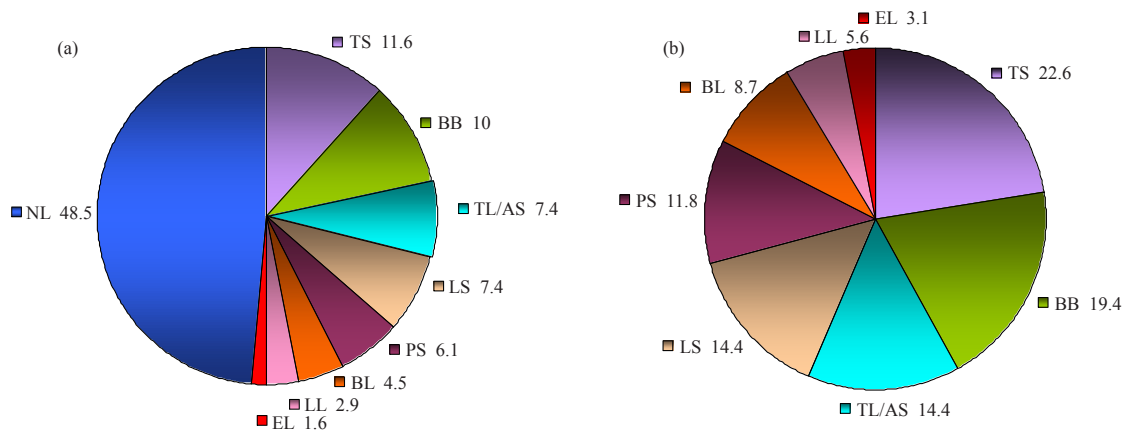


图1 各类MCS百分比分布
(a) 所有类型MCS百分比; (b) 不同线状MCS百分比

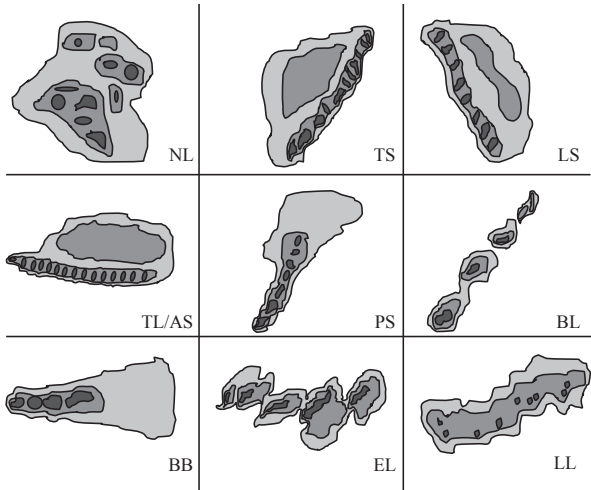


图2 长江流域梅雨期MCS成熟阶段组织类型的雷达反射率因子示意图(阴影由浅到深对应反射率因子值分别为20、30和40dBz)

化特征和锋生作用。

利用探空资料合成5类线状MCS的环境风特征(图3)^[16],如TS MCS和TL/AS MCS在对流层随高度都存在较大从前向后的垂直对流线的风分量;LS MCS在对流层随高度首先展示从前向后的垂直对流线的风分量,到中高层就转为从后向前的垂直对流线的风分量;平行对流线的风分量这3类MCS随高度都明显增加;风垂直切变在对流层中层TS MCS和LS MCS都是垂直对流线方向,而TL/AS MCS则表现为平行于对流线方向。PS MCS和BB MCS在对流层平行于对流线的风分量随高度增大,且PS MCS增大得更显著;风垂直切变方向是平行于对流线方向为主,但风垂直切变大小较弱,PS MCS风垂直切变大小比BB MCS略大些。

线状MCS发生在条件不稳定的环境气团中,TS类环境不稳定性最大,其后依次是TL/AS类、LS类、BB类,而PS类则发生在条件不稳定性最小的空气团中。长

江流域梅雨期环境空气的稳定程度与大气中可降水量大小没有明显的对应关系。合成计算它们热力学参数的平均值,不同类MCS发生的环境物理量有明显的差异。

对非线性状MCS,回波组织紊乱,规律性不强。崔春光等^[17]利用多源探测资料分析了一次非线性状MCS发生发展机理,对流层中低层切变线的维持、冷空气入侵、地面小涡旋流场是对流触发抬升的主要机制,边界层风垂直切变的多样化表明非线性状MCS发展环境的复杂性。郑淋淋等^[18]对2007—2010年暖季(6—9月)发生在江淮流域46个对流天气过程的环流背景和地面特征进行了统计研究。根据整层可降水量小于或大于等于50mm将这些个例发生的环境分成干环境(10个个例)和湿环境(36个个例)。干环境下发生强对流的天气形势可以分为槽后型和副高边缘型,湿环境下的天气形势可分为槽前型、副高边缘型和槽后型,湿环境下有明显的暖湿区配合。湿环境下槽前型发生的概率最高,地面系统较为复杂,有静止锋、倒槽、冷锋和暖锋,而干环境下在本研究的个例中无槽前型发生。干、湿环境下副高边缘型的对流从地面到500hPa都发生在副高后部的“S”流型的拐弯处,但部分湿环境个例低层有切变线。干环境下槽后型的发生概率较高,而湿环境下发生概率则相对较少。干、湿环境下强对流系统的触发和维持机制存在明显的差异。

4 两个不同类型线状MCS的结构特征

4.1 TS MCS 结构特征

雷达回波显示TS MCS由系统移动前向后依次是强而窄的回波带、过渡带、后方宽广的次强层状回波区;新单体在对流区前沿产生,成熟单体减弱为后方的弱回波区,在不断的生消交替过程中系统向前移动。

由观测分析和模拟结果总结TS类的概念模型^[19-20],如图4a所示。TS MCS由对流区和层状区组成,新单体在对流带前方生成,旧单体在强回波带中

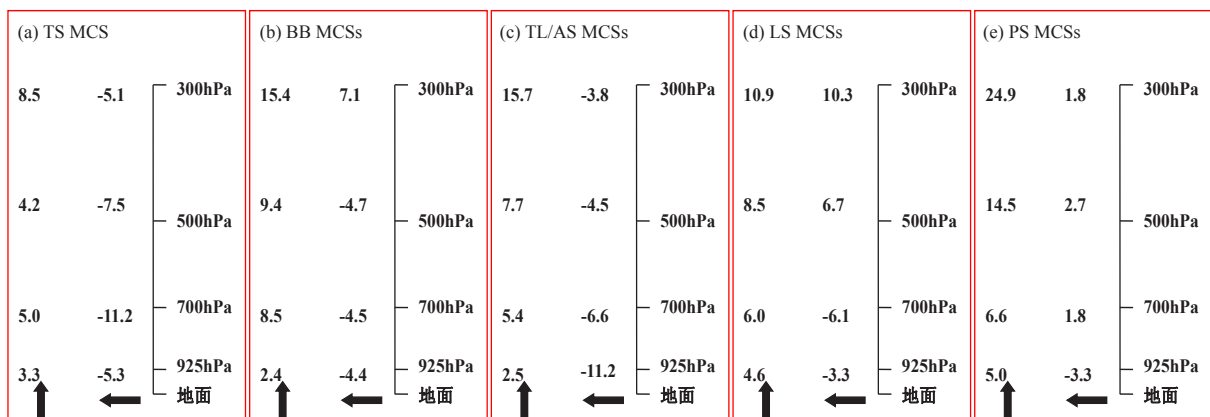


图3 各类线状MCS相对对流线垂直和平行的平均风分量的垂直剖面分布图(竖箭头代表平行对流线的平均风分量,横箭头代表垂直对流线的平均风分量)

减弱为后面的弱回波区；TS MCS内低层南北入流区都为高 θ_{se} （相当位温）值，气流沿着窄的高湿高 θ_{se} 值区上升，到对流层高层高 θ_{se} 值气流分别向北、向南形成系统的出流，向北的倾斜上升支构成了层状区域高层的宽阔上升运动区；层状区中层低 θ_{se} 值区的下沉气流和近地层北风一起构成系统的北侧入流，对流区前方（南侧）中层低 θ_{se} 值区的下沉气流和近地南风一起构成系统的南侧入流。低层风切变和TS MCS后部冷池的相互作用是造成TS MCS垂直结构的主要原因。图4b是TS MCS移动的示意图，对流线整体向东南移动，回波单体由东南向东北移动，则新单体主要向南传播。

4.2 LS MCS 结构特征

系统在雷达回波上主要分两部分（图5）：后方回波强而窄的对流带和前方回波相对弱的宽层状降水区，在对流带和层状降水区之间有一条回波更弱的转换带。对流单体有时朝着对流线垂直方向拉长和倾斜。流场上RFLS系统主要由四种气流组成：在层状降水区前方中低层有一个由上而下转为从前向后的入流、对流层低层从后向前的入流、朝前倾斜的上升气流和中上层由后向前的气流。系统在组织阶段开始产生前导层状降水区，到成熟阶段垂直气流发展旺盛，前方的层状降水区变宽。中低层垂直对流线的垂直风切变随时间增大，以及地面冷丘随时间变化减弱或者不变是18日RFLS系统上升气流向前倾斜的主要原因^[21]。

5 长江流域MCS发生发展机理研究

5.1 线状 MCS 的试验

(1) 通过理想风垂直廓线和梅雨期典型温湿廓线的数值模拟，研究了风垂直切变对线性中尺度对流系统组织模态的影响，风垂直切变对线性中尺度对流系统不同组织模态的形成有重要作用，基本气流、风垂直切变、地面冷池和重力波及其相互作用等是决定中尺度对流系统中单体再生、移动和传播以及对流系

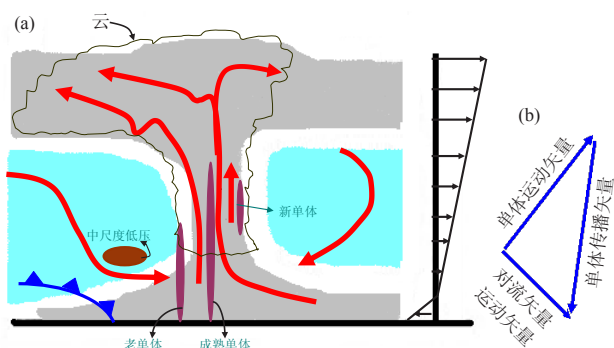


图4 TS MCS垂直剖面结构 (a) 和系统移动 (b) 示意图 (浅灰色是高 θ_{se} 区，浅蓝色是低 θ_{se} 区，风随高度演变主要显示了纬向风的变化)

统中层状云形成的重要因子。

(2) 赵玉春^[22]针对梅雨锋（湿度锋）上或附近偏南暖湿气流一侧中尺度对流系统不断发生发展和长时间维持而引发长江流域暴雨的观测事实，利用WRF模式设计了一系列三维理想数值试验，梅雨锋两侧自身水汽差异造成的质量不平衡可在梅雨锋附近激发出小振幅重力波，在梅雨锋暖湿气流一侧对流层低层产生上升运动，并与非绝热加热过程耦合激发出对流形成一条平行于梅雨锋的对流降雨带，对流系统的尺度一般为20~60km，对流雨带形成后逐渐向南传播，其中对流扰动形成后激发出振幅更大的重力波向南传播，以及对流雨带北侧干下沉气流支的低层回流对新对流系统的触发可能在对流雨带的南移中起到重要作用。基本气流的平流效应使梅雨锋移动，有利于抵消梅雨锋对流雨带南移效应，它对水汽和能量的输送在梅雨锋中尺度对流系统的发生发展中起到了重要作用。风的方向变化引起的风垂直切变有利于梅雨锋对流的启动和中尺度对流系统的组织，并影响中尺度对流系统的移动方向；而风的大小形成的风垂直切变似乎并不利于梅雨锋上对流的启动和中尺度对流系统的长时间维持。

5.2 地形对MCS发生发展的影响

5.2.1 山地-平原环流对梅雨锋上夜间降水的影响

Sun等^[23]通过对江淮流域强降水的分析发现，在第二级地形的东侧有梅雨锋的强降雨中心存在，降雨中心的日变化显著，并且有夜间降雨峰值。图6给出了梅雨锋上山地-平原环流（mountain-plain solenoid circulation, MPS）、MCS和中尺度对流涡旋（mesoscale convective vortex, MCV）发展的概念模型。梅雨期，在副热带高压和西风带系统的影响下，东西向的雨带位于我国的江淮流域，梅雨锋上的二

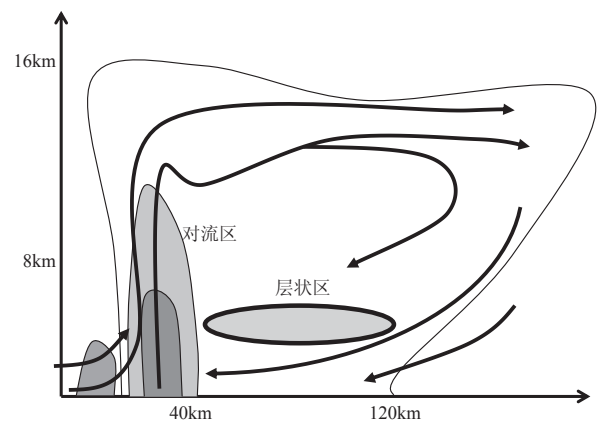


图5 LS MCS系统气流示意图 (带箭头粗线代表系统内气流构成，细实线表示回波强度大小，由外而内分别为5、20和40dBz；浅色阴影代表20dBz，深色阴影为40dBz)

级地形以东地区涡旋较为活跃。白天，在二级地形以东地区有涡旋产生，但由于山地—平原环流下沉支的影响，降雨较弱，较强的降雨发生在梅雨锋的东段，MCV东移带来较强的降雨。而晚上，MPS环流上升支加强了对流，导致了MCV的生成和东移发展，从而有利于激发长江流域MCS发生发展。

5.2.2 梅雨期青藏高原等三阶地形对 MCS 发生发展的影响

在Sun等^[23]研究的基础上，仍然选取2007年7月1—10日梅雨期降水个例做试验，主要结论如下。

我国中纬度地区从西至东三段地形台阶产生了山地—平原环流（图7），从而分别在青藏东部和四川盆地之间，太行山—巫山山脉东部和江淮流域平原间，以及我国沿海地区和其邻近海洋之间产生了白天的三个正热力环流圈（ S_n ）和夜晚的三个反热力环流圈（ AS_n ）。白天正热力环流圈的下沉支分别阻碍了四川盆地和江淮流域上升运动的发展，因此降水量在白天为低值，但是夜晚反热力环流圈的上升支促进了四川盆地和江淮流域梅雨锋上的强上升运动，使降水量达到峰值。夜间高原东部与四川盆地地区的MPS环流圈的上升支的扰动使得西南低涡有所增强，并且向其东北方向伸展，110°E以东的梅雨锋的气旋式切变增强，又由于太行山—巫山山脉东部和江淮流域平原的山地—平原环流在110°E东侧上升支的作用，触发了梅雨锋上的涡旋，同时低空急流对水汽输送和上升运动的维持又有利于梅雨锋涡旋及MCS的发展和维持。

青藏东部在午后至傍晚（06—10时，本文如无特别说明均采用世界时）由于太阳辐射产生的地面加热的积累，对流系统活跃，降水量达到峰值。四川盆地在夜晚初期到次日凌晨（12—20时），由于 AS_1 热力环流上升支的作用，降水量增强。我国东部淮河流域梅雨锋上降水的峰值出现在夜晚后期至次日清晨

（15—23时），与 AS_2 的上升支有关。

山地—平原环流影响梅雨锋降雨是一些天气系统配合和活跃的结果，包括青藏高原和四川盆地、二级地形和东部平原的山地—平原环流，西南涡、梅雨锋涡旋的共同影响。

5.2.3 中尺度地形影响

赵玉春等^[24]根据长江中下游中小尺度地形特征和梅雨锋上MCS发展的典型探空曲线，设计理想数值试验来研究中尺度地形对流降水模态，探讨了不同地形高度、尺度、形状（水平形态比）、环境气流以及旋转效应对降水模态和分布的影响，发现地形重力波破碎触发对流是地形对流降水的主要机制之一，地形重力波的形成、特征和传播受到环境条件制约，也受到地形自身参数的影响。当对流形成后，对流系统自身的下曳气流和降水蒸发冷却形成的向外流出的低层辐散气流可激发出新的对流，同时对流还可激发出重力波与地形重力波相互作用，使地形降水模态复杂化。不同地形高度、尺度、形状和环境气流下，地形降水存在着多种模态，其中迎风坡、背风坡、山顶附近以及地形上下游存在准静止的降水模态，地形上游、下游分别存在向上游、下游传播的降水模态，地形两翼还存在向下游传播的降水模态，对流降水、稳定层结降水以及对流与稳定层结混合的降水均可出现在这些降水模态中，这取决于对流是否触发。地形降水对地形无量纲参数 $v/N_y h$ 和 Na/v 非常敏感，单一地形无量纲参数并不能决定降水的分布。地形下游和两翼降水模态和分布的差异主要与不同地形参数和环境气流下地形激发的重力波特性不同有关（图8）。

5.3 湿斜压热动力耦合强迫激发 MCS 发生发展的动力机制探讨

陈忠明等^[25]从包含非绝热加热的原始方程出发，

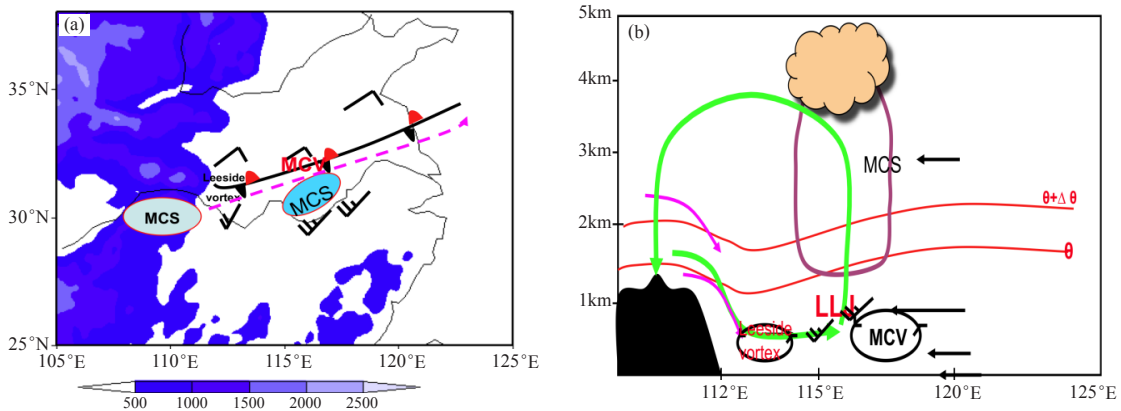


图6 梅雨锋上夜雨峰值概念模型 (a) 梅雨锋MCS、背风气旋和MCV的水平分布（粉色虚线为MCV的移动路径，蓝色阴影为500m以上地形）；(b) 与夜雨峰值相关的所有系统的垂直分布（红线：位温（ θ ），粉线：下坡风，箭头：距平风，绿线：MPS环流）

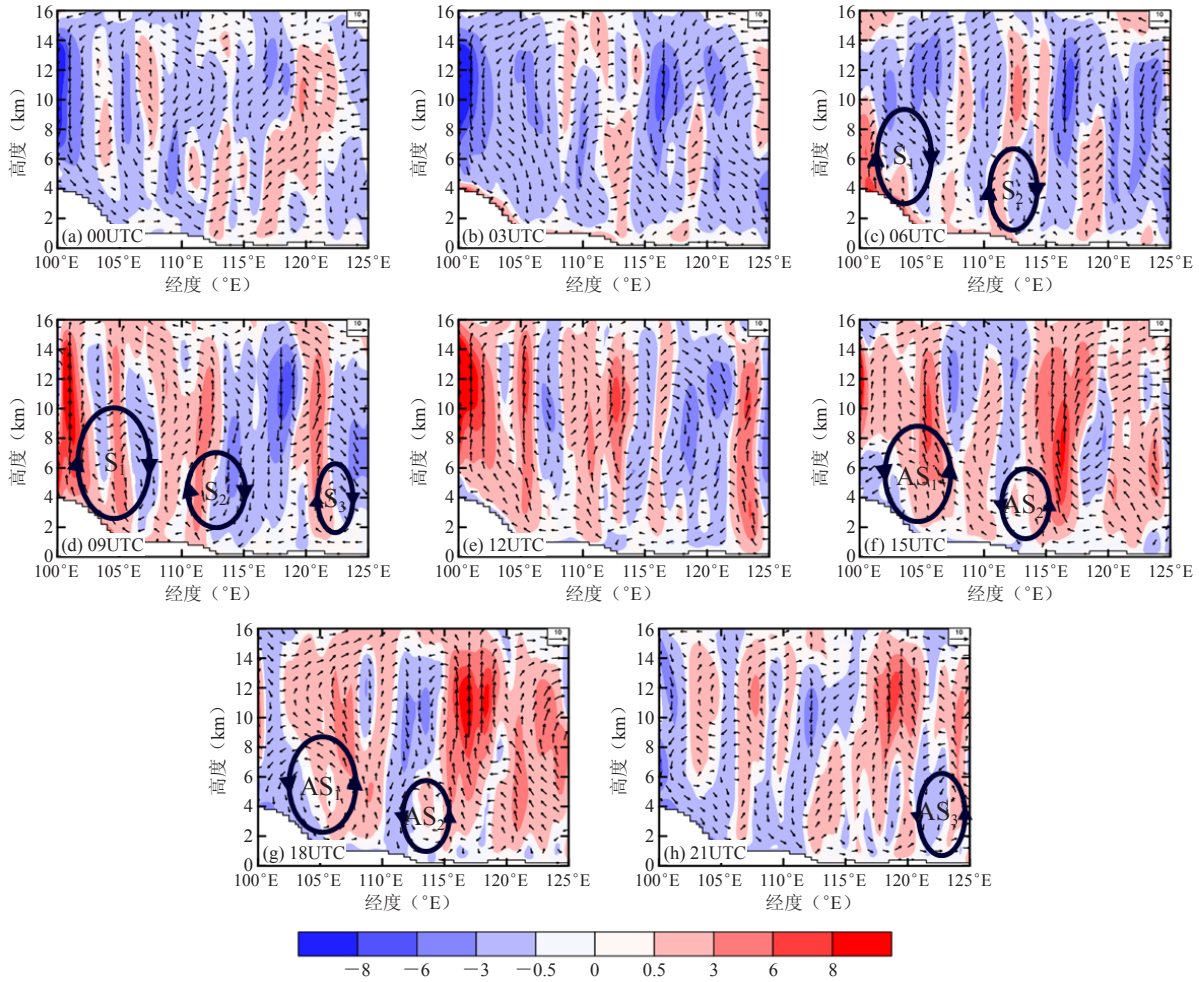


图7 扰动风场和垂直运动 (阴影, $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$) 日变化的高度—经度剖面 (黑色圆圈表示山地—平原环流)
 (a) 00时; (b) 03时; (c) 06时; (d) 09时; (e) 12时; (f) 15时; (g) 18时; (h) 21时

将大气的斜压热力作用通过热力学方程引入散度方程, 在替换平衡近似 (alternative balance) 下, 导出了显式包含非绝热加热分布与垂直风切变相互作用、斜压热动力耦合强迫影响的新型散度方程:

$$\frac{\partial D}{\partial t} = \{-\nabla^2 E + \mathbf{k} \cdot [\nabla \times (f + \zeta) \mathbf{V}]\} + \left\{ \frac{1}{\sigma} (2\mathbf{Q} - f^2 \frac{\partial \mathbf{V}_a}{\partial p}) \cdot \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial p} \right\} - \omega \frac{\partial D}{\partial p} + \frac{R}{\sigma c_p P} \nabla H \cdot \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial p} \quad (1)$$

式中, $E = \varphi + \frac{\mathbf{V} \cdot \mathbf{V}}{2}$ 为压能, \mathbf{V}_a 为地转偏差, \mathbf{V} 为非绝热加热率, 其余为常用符号。 $\mathbf{Q} = \frac{1}{2} [f(\frac{\partial v}{\partial p} \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial p} \frac{\partial v}{\partial x}) - h \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial x} \cdot \nabla \theta] \mathbf{i} + \frac{1}{2} [f(\frac{\partial v}{\partial p} \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial u}{\partial p} \frac{\partial v}{\partial y}) - h \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial y} \cdot \nabla \theta] \mathbf{j}$ 为非地转 \mathbf{Q} 矢量。为了分析简便, 先来讨论两种极端的流场结

构: (1) 纯东西风型, 没有南北风分量 ($v=0$); (2) 纯南北风型, 没有东西风分量 ($u=0$); 且大气层结为不稳定 ($\sigma=0$), 若大气层结为稳定, 则分析结果相反。

对于纯东西风型, 没有南北风分量 ($v=0$) 的情形, 则简化 (1) 为:

$$\frac{\partial D}{\partial t} = \frac{R}{\sigma c_p P} \frac{\partial H}{\partial x} \frac{\partial u}{\partial p} \quad (2)$$

由于非绝热加热非均匀分布与垂直风切变相互作用就在加热中心区的上游和下游形成一个辐散和辐合增长偶, 促进辐合中心的向东 (下游) 传播。

对于纯南北风型, 没有东西风分量 ($u=0$) 的情形, 则简化 (1) 为:

$$\frac{\partial D}{\partial t} = \frac{R}{\sigma c_p P} \frac{\partial H}{\partial y} \frac{\partial v}{\partial p} \quad (3)$$

由于非绝热加热非均匀分布与垂直风切变相互作用就在加热中心区的上游和下游形成一个辐散和辐合

增长偶，促进辐合中心的向北（下游）传播。

对于实际大气的情况，它既不是纯粹的西风，也不是纯粹的南风，通常以西南风为主，这时，非绝热加热非均匀分布与垂直风切变相互作用激发散度变化的情形也就是上述两种情况的合成，即在加热中心区的上游和下游形成一个辐散和辐合增长偶，促进辐合中心向下游传播。

对于对流层中高层的情形，由于大气层结处于稳定状态 ($\sigma > 0$)，则散度局地变率 $\frac{\partial D}{\partial t}$ 的正（负）与 $\nabla H \cdot \frac{\partial V}{\partial p}$ 的符号相反，非绝热加热非均匀分布与垂直风切变相互作用在低层激发辐合增长的区域上空激发辐散增长，而在低层激发辐散增长的区域上空激发辐合增长。这样一来，在垂直方向上，由于非绝热加热非均匀分布与垂直风切变相互作用在加热中心下游区激发低层辐合增长、高层辐散增长，加速该区域上升运动发展；而在加热中心上游区激发低层辐散增长、高层辐合增长，加速该区域下沉运动发展，从而围绕加热中心区形成一个叠加的次级环流，促进中尺度系统向下游区域传播，并得到加强。这就从理论上对潜

热反馈激发中尺度系统与强降水天气维持给出了一个初步的解释。

6 长江流域梅雨锋暴雨系统物理概念模型

赵玉春等^[26]根据大量个例研究并结合前人研究成果总结了典型梅雨锋暴雨系统的物理概念模型（图9）：在对流层中低层（900~700hPa），梅雨锋辐合带主要由西太平洋副热带高压西侧外围的西南暖湿气流和东北低涡后部（或者华北高压前部）的偏北气流汇流而成^[27]。梅雨锋（ θ_e 锋）位于暖湿高 θ_e 气团和低 θ_e 气团的交接地带（即 θ_e 密集带或梯度大值区），梅雨锋正涡度带、辐合带和上升运动带位于 θ_e 密集带偏南一侧。梅雨锋辐合带恰好位于对流层高层（100hPa）南亚高压脊线附近的强辐散区的下方。梅雨锋倾斜向上伸展，梅雨锋南侧为倾斜向上伸展的高 θ_e 舌。对流层中层（500hPa）短波槽东移为梅雨锋上的MCS发展提供有利的动力和热力条件（大尺度强迫），梅雨锋南侧的西南低空急流为梅雨锋暴雨的形成提供充分的水汽和能量，同时低空急流出口区附近动力强迫在梅雨锋上MCS的发生发展中起到极为重要的作用^[28]。梅雨锋云带上有多组 α -MCS不断生消，并伴有 β 和 γ 中尺

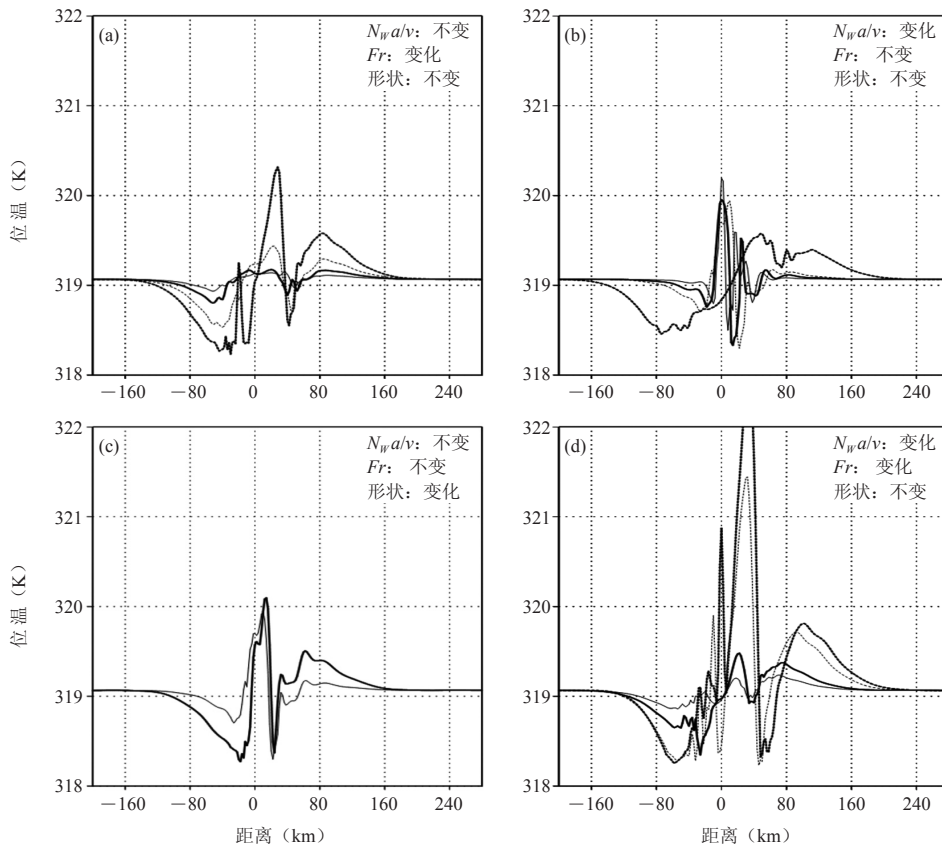


图8 山脉高度 (a)、尺度 (b)、水平形态比 (c) 和环境气流 (d) 试验组积分30min模拟的沿地形中线4km高度上的位温 (单位: K) 分布

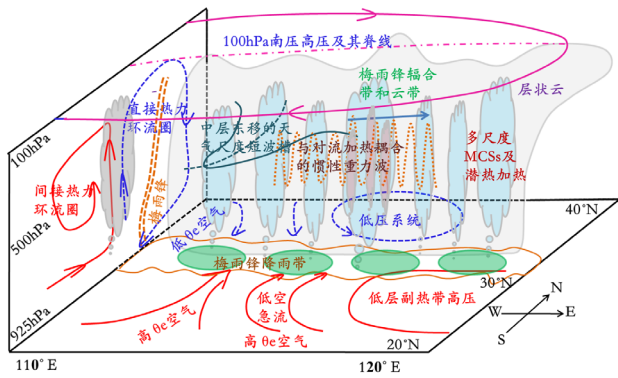


图9 典型梅雨锋暴雨系统物理概念模型示意图

度对流云团活动，这些 β 和 γ 中尺度对流云团往往嵌套在 α -MCS内，有的也在梅雨锋云带上或者南侧孤立发生发展。梅雨锋偏南暖湿气流一侧的 β 和 γ 中尺度系统在对流层中低层风场上往往表现为偏南气流中的气旋性扰动。不同尺度的对流系统活动引发的强降水凝结潜热加热对流层中层大气，使梅雨锋附近的气层变得趋于稳定，导致对流活动可能激发出惯性重力波，它在梅雨锋附近活动有利于新对流系统的形成^[29]。梅雨锋南北两侧分别存在着—热力间接和直接环流圈^[30]。

7 小结

综上所述，项目组在产生暴雨的中尺度对流系统的组织分类、环境条件、结构特征、地形影响及其发生发展机制等方面取得了新的进展。给出了长江流域HRPMCS的统计特性，特别是组织分类，还有MCS的生命史、传播、地理分布以及相应的环境条件。通过大量个例的诊断分析揭示部分线状产生暴雨的MCS成熟阶段的三维结构特征及其形成的可能物理机制。采用高分辨率的数值模拟和设计理想试验揭示了产生暴雨的MCS发生发展的关键影响因子，以及大地形和中尺度地形对MCS发展的作用；给出梅雨锋上MCS发生发展机理的理论解释。综合模拟结果和观测结果的分析，提出了长江流域产生暴雨的MCS的物理概念模型。

参考文献

- [1] Parker M D, Johnson R H. Organizational modes of midlatitude mesoscale convective systems. *Monthly Weather Review*, 2000, 128(10): 3413-3436.
- [2] Schumacher R S, Johnson R H. Organization and environmental properties of extreme-rain-producing mesoscale convective systems. *Monthly Weather Review*, 2005, 133(4): 961-976.
- [3] Johnson R H, Aves S L, et al. Organization of oceanic convection during the onset of the 1998 East Asian summer monsoon. *Monthly Weather Review*, 2005, 133(1): 131-148.
- [4] Robe F R, Emanuel K A. The effect of vertical wind shear on radiative-convective equilibrium states. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2001, 58(11): 1427-1445.
- [5] Weisman M L, Rotunno R. "A theory for strong long-lived squall lines" revisited. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2004, 61(4): 361-382.
- [6] Weisman M L, Klemp J B, Rotunno R. Structure and evolution of numerically simulated squall lines. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1988, 45(14): 1990-2013.
- [7] LeMone M A, Zipser E J, Trier S B. The role of environmental shear and thermodynamic conditions in determining the structure and evolution of mesoscale convective systems during TOGA COARE. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1998, 55(23): 3493-3518.
- [8] Schumacher R S, Johnson R H. Mesoscale processes contributing to extreme rainfall in a midlatitude warm-season flash flood. *Monthly Weather Review*, 2008, 136: 3964-3986.
- [9] 杨康权, 陈忠明, 张琳. 一次强降水过程中尺度系统发生发展动力机制的诊断分析. *高原山地气象研究*, 2011, 31(1): 12-19.
- [10] 赵玉春, 王叶红. 高原涡诱发西南涡特大暴雨成因的个例研究. *高原气象*, 2010, 29(4): 819-831.
- [11] 崔春光, 倪允琪, 李红莉, 等. 中国南方暴雨野外试验 (SCHeREX) 中尺度气象分析场的建立及其质量评估. *气象学报*, 2011, 69(1): 27-41.
- [12] 许小峰, 高丽, Jin F F. 梅雨湿度锋上中尺度对流云团生成和发展的波捕获机制. *自然科学进展*, 2009, 19(11): 1203-1208.
- [13] 王晓芳, 崔春光. 长江中下游地区梅雨期线状中尺度对流系统分析 I: 组织类型特征. *气象学报*, 2012, 70(5): 909-923.
- [14] Zheng L L, Sun J H, Zhang X L, et al. Organizational modes of mesoscale convective systems over Central East China. *Wea Forecasting*, 2013, 28(5): 1081-1098.
- [15] 王晓芳, 汪小康, 徐桂荣. 2010年长江中游梅雨期 β 中尺度系统环境特征的分析. *高原气象*, 2013, 32(3): 750-761.
- [16] 王晓芳. 长江中下游地区梅雨期线状中尺度对流系统分析 II: 环境特征. *气象学报*, 2012, 70(5): 924-935.
- [17] 崔春光, 王晓芳, 付志康. 多源探测资料在一次非线状MCS分析中的综合应用. *气象*, 2013, 9(5): 556-566.
- [18] 郑淋淋, 孙建华. 干、湿环境下中尺度对流系统发生的环流背景和地面特征分析. *大气科学*, 2013, 37(4): 891-904.
- [19] 王晓芳, 胡伯威, 李灿. 湖北一次飑线过程的观测分析及数值模拟. *高原气象*, 2010, 29(2): 471-485.
- [20] 汪小康, 王晓芳, 崔春光, 等. 用新型探测资料分析武汉一次短时强降水过程的中尺度对流系统. *暴雨灾害*, 2012, 31(4): 321-327.
- [21] 王晓芳, 胡伯威, 李红莉, 等. 梅雨期一个伴有前导层状降水对流线的结构特征. *高原气象*, 2011, 30(4): 1052-1066.
- [22] 赵玉春. 梅雨锋对引发暴雨的中尺度对流系统发生发展影响的研究. *大气科学*, 2011, 35(1): 81-94.
- [23] Sun J, Zhang F. Impacts of mountain-plains solenoid on diurnal variations of rainfalls along the Meiyu front over the East China plains. *Monthly Weather Review*, 2012, 140(2): 379-397.
- [24] 赵玉春, 王叶红, 崔春光. 大对流有效位能和条件不稳定下地形降水的三维理想数值研究. *气象学报*, 2011, 69(5): 782-798.
- [25] 陈忠明, 杨康权. 非绝热加热、湿斜压热动力耦合强迫激发辐合增长一种机制. *热带气象学报*, 2010, 26(6): 710-715.
- [26] 赵玉春, 王叶红, 崔春光. 一次典型梅雨锋暴雨过程的多尺度结构特征. *大气科学学报*, 2011, 34(1): 14-27.
- [27] Zhao Y C, Li Z C, Xiao Z N. A case study on a quasi-stationary Meiyu front bringing about continuous rainstorms with piecewise potential vorticity inversion. *Acta Meteorologica Sinica*, 2008, 22(2): 202-223.
- [28] 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. 北京: 气象出版社, 2004.
- [29] 胡伯威. 梅雨锋上MCS的发展、传播以及与低层“湿度锋”相关联的CISK惯性重力波. *大气科学*, 2005, 29(6): 845-853.
- [30] 沈桐立, 曾瑾瑜, 朱伟军, 等. 2006年6月6-7日福建特大暴雨数值模拟和诊断分析. *大气科学学报*, 2010, 33(1): 14-24.