暴雨雨团中β尺度流场结构的数值模拟

吴庆丽 陈 敏 王洪庆 陶祖钰

(北京大学物理学院大气科学系暴雨监测和预测国家重点实验室, 北京 100871. E-mail: wql@water.pku.edu.cn)

摘要 用高分辨率的中尺度模式对 1998 华南暴雨试验期间的一次大暴雨个例进行了数值模拟, 用模式输出的高分辨率资料对雨团的中β尺度流场结构进行了分析. 结果表明, 在雨团中, 高、中、低空都存在明显的中β尺度环流系统, 而且高空的高度场和风场之间具有非常强烈的非地转性. 54 km 粗网格和 18 km 细网格剖面图都显示出中尺度垂直环流, 并存在上升的低空前方入流和下沉的中空后方入流. 在细网格的模拟结果中还进一步发现, 由于降雨伴随的拖曳下沉气流产生了位于 900 hPa 以下行星边界层中的浅薄的垂直环流.

关键词 暴雨 数值模拟 中尺度

暴雨是我国主要的灾害性天气之一, 直接产生降雨的雨团非常小, 通常不到一二百公里(即所谓中β尺度). 由于常规气象观测网无法分辨, 因此对雨团的科学认识还很少. 1998 年 5 月 23~24 日在广东中部和沿海发生了一次特大暴雨, 这是 1998 华南暴雨试验(HUAEMX)强化观测期间一次典型的暴雨个例, 简称 IOP523. 仪清菊等人[1]指出, 这是一次西路冷空气南下和梅雨锋经过华南引起的暴雨过程. 但 Chen[2]在台湾梅雨中尺度试验中发现, 梅雨锋所带来的暴雨却主要是由中尺度对流系统造成的. 王立琨等人[3]对这次特大暴雨的卫星云图分析表明, 这次特大暴雨确实也是由中尺度对流云团造成的. 陈敏[1)]对这次暴雨过程进行了数值模拟, 成功地模拟出了与梅雨锋相伴随的中尺度对流系统, 并对其中的中尺度涡旋进行了涡度收支计算. 但是由于受探测手段的限制, 外场观测取得的资料仍不足以揭示雨团的中β结构的全貌, 因此有必要借助中尺度数值模式. 由于中尺度数值模式具有 10 km 的水平分辨率, 并可输出即使在科学试验的气象观测中也无法获得的一些大气变量(如云水、雨水含量等), 这就为深入了解这次特大暴雨的雨团的中尺度结构提供了可能性. 本文的目的就是在上述数值模拟的基础上, 利用中尺度数值模式 MM5 的高分辨率的模式输出资料, 来分析雨团的中尺度三维结构. 在分析中使用了针对模式输出的 5 维数据集的可视化软件 LiveView[4], 以获得雨团的中尺度结构图像.

1 数值模式及实验方案简述

本文使用了美国宾州大学和美国国家大气科学研究中心开发的中尺度非静力模式 MM5(v2). 模式作了两重嵌套网格, 以 23° N, 113° E 为中心. 粗网格格距为 54 km, 格点数为 41×61; 细网格格距为 18 km, 格点数为 31×37; 垂直方向上采用了 σ 坐标, 从 1 到 0 不等距分为 19 层. 模拟的初始场以南海季风试验资料同化系统每 6 小时一次的输出场为背景, 用常规资料和高空探测资料客观分析后对背景场进行了订正, 并加入了华南暴雨试验期间广东、福建两省的部分测站在 0600 UTC 和 1800 UTC 的高空加密观测资料. 两重网格的模拟时间都是 1998 年 5 月 23 日 0000UTC 至 5 月 24 日 1200UTC, 共积分 36 小时. 所采用的物理方案为: Reisner 多相显式水汽方案、Grell 积云参数化方案、改进的 Blackadar 边界层参数化方案、土壤模式、云辐射方案和浅水对流方案.

2 水平流场的中β尺度结构

陈敏[1)]对该例模式输出结果的验证表明, 模拟雨量和实况符合较好, 模式中冰水含量的分布和卫星红外云图上暴雨云团冷云盖的形状也相当接近. 本文在此不再重复, 而侧重于分析模拟雨团的中尺度结构.

孙建华等人[5]和 Anthes 等人[6]提到, 虽然来源于大尺度观测网的初始场资料不具备完善的中尺度系统的信息, 但在能容纳和描述所激发的中尺度特征运动的中尺度模式 MM5 中是可能迅速呈现中尺度结

1) 陈敏. 华南暴雨科学试验 IOP523 大暴雨个例的中尺度结构数值模拟研究. 北京大学博士学位论文, 2001. 82~100

构场的. 陈敏等人[7]在对 1998 年湖北大暴雨的中尺度对流系统的数值模拟也证实了这一点. 图 1~3 分别给出积分了 22 小时的雨团及其相应的低、中、高层流场. 图中的雨团用三度空间雨水含量为 0.2 g/kg 的等值面的水平投影表示. 从图中可见, 在广东省的中部和海上各有一个雨团. 在 850 hPa 流场上(图 1)可以看到有 3 个中β尺度的气旋式涡旋, 其中两个与雨团的位置基本重合, 位于北部湾的中涡旋所对应的雨团, 由于已经减弱, 其 0.2 g/kg 的雨水等值面已不存在. 广东中部的雨团和涡旋配合得很好. 尤其值得注意的是, 在广东中部雨团的东南方有一个中尺度的辐散系统, 从它的中心向外流出的气流中有一支向西北方向流出并流入到雨团中. 这一现象表明, 在对流层的低层存在一支低空入流. 这个辐散系统和雨团的带有辐合的中涡旋的成对存在, 意味着有一个中尺度的垂直环流与雨团相配合.

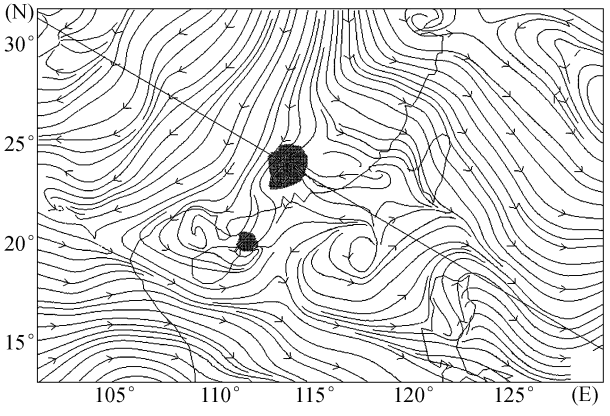


图 1 5 月 23 日 2200UTC 粗网格 850 hPa 的流线图
阴影区为雨水含量超过 0.2 g/kg 的区域, 表示雨团的位置

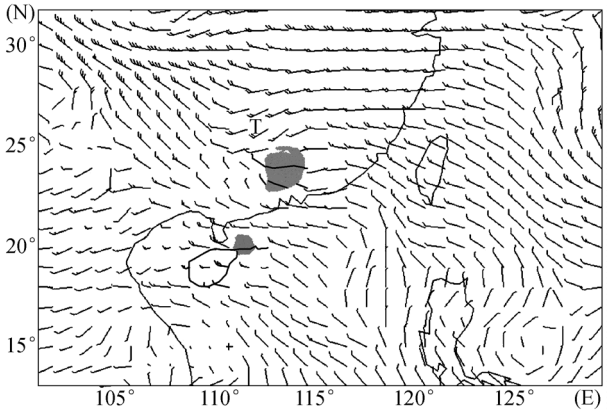


图 2 5 月 23 日 2200UTC 粗网格 500 hPa 格点风场
阴影区为雨水含量超过 0.2 g/kg 的区域, 表示雨团的位置; T 表示中尺度小槽

这种成对的中尺度环流系统在 700 hPa 流场中仍可看到, 但在 500 hPa 流场(见图 2)中, 与雨团相配合的不再是中尺度涡旋, 而是西风带中的一个中尺度小槽(图中用 T 标注). 值得指出的是, 从图中可以清楚地看到, 槽后一股较强的西北气流从后方直指雨团, 它与强风暴结构中存在一支中空后方入流非常类似.

在 200 hPa 高度上(图 3), 雨团上方对流层顶部是一个比雨团尺度大得多的中α尺度的高压和反气旋环流, 但仔细观察可以发现其中包含了多个中β尺度的高压、低压和闭合的涡旋系统. 它们最显著的特征是高度场和风场之间具有非常强烈的非地转性, 即低压(图中用 L 标注)可以和反气旋式涡旋(图中用 A 标注)相配合. 更有意义的是, 从雨团上空向外流出的气流也表现出非常强的非地转性, 即在雨团的下风方, 风向和等高线之间存在很大的夹角, 即从雨团上空向南流出的气流有明显的从高压流向低压的穿越等高线的现象(见图中用 Va 所标注的区域). 在气压梯度力的作用下, 从雨团上空流出的气流被加速, 风速向下游逐渐增大非常明显, 从 6~8 m/s 增加到接近 20 m/s, 显示出气压梯度力对雨团上空外流空气的加速作用.

3 中尺度垂直环流

为了分析中尺度雨团的三维流场结构, 我们利用可视化软件 LiveView 制作了穿过位于广东中部雨团的垂直剖面图(图 4), 剖面的基线如图 1 中所示, 图中不同颜色的阴影区为经过透明化处理的雨水和雪水含量为 0.2 g/kg 的三维空间等值面在垂直剖面上的投影. 在 54 km 粗网格的垂直剖面流线图中可以清楚地看到, 雨团中的上升气流和其东南侧的下沉气流构成一个深厚的中尺度的垂直环流圈. 雨团中很强的垂直气流主要来自低空的偏南气流, 即前面提到的前方低空入流. 结合图 1 中 850 hPa 流场可知, 这个垂直环流圈是和 850 hPa 的一对中尺度辐合、辐散系统相联系的. 前面提到的 500 hPa 水平流场中雨团上方来自中尺度小槽槽后的中空后方入流在垂直剖面图上也很清楚, 而且还显示出这支中空后方入流与强风暴中一样为一支下沉的气流, 它到达近地面后与前方入流汇合, 形成雨团中的强上升气流支, 最后在高空向东南方流出, 构成了高空的前方出流. 参照 Houze[8]提出的理想化的中纬度强风暴飑线概念模

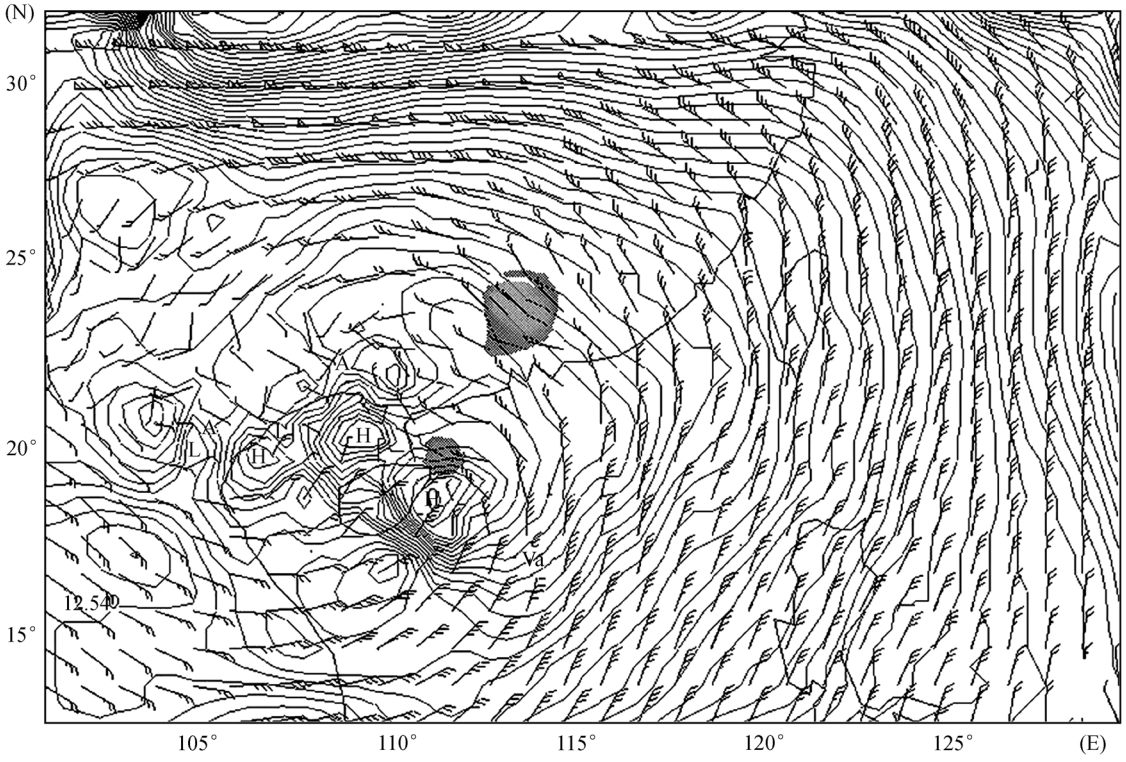


图 3 5 月 23 日 2200UTC 粗网格 200 hPa 格点风场和等高线

阴影区为雨水含量超过 0.2 g/kg 的区域, 表示雨团的位置; L 表示低压, H 表示高压, A 表示反气旋式涡旋

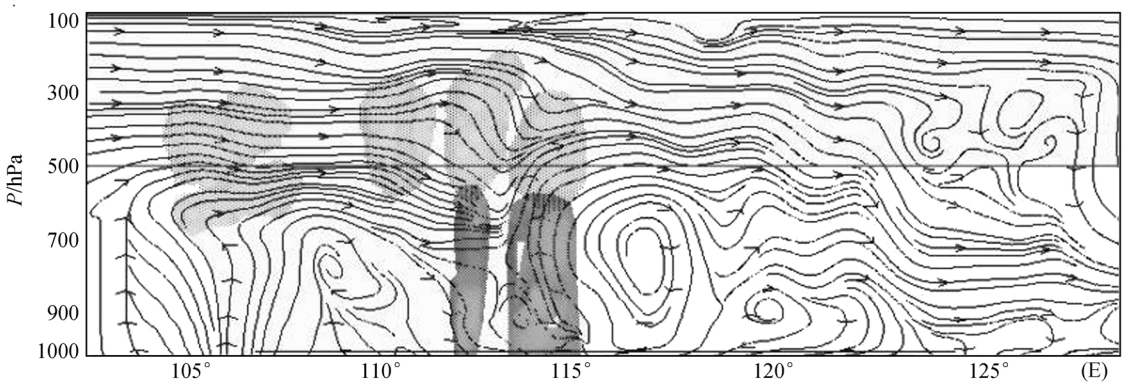


图 4 5 月 23 日 2200UTC 粗网格流场垂直剖面图

阴影区为雪水和雨水含量超过 0.2 g/kg 的区域, 表示雨团的位置; 横线表示 500 hPa 高度

型, 雨团这种垂直流场结构和强风暴有一定的相似性. 不过图 4 显示出, 雨团在对流层的上部也存在下沉的后方入流, 而且它们在到达雨团的西侧后又转变为上升运动, 这是强风暴结构概念模型中所没有的. 强风暴模型中的高空后向出流, 在模拟雨团的垂直环流中并不存在. 上述垂直环流差异是否反映二者物理本质的不同是一个有待进一步研究的问题.

用 18 km 细网格模式输出产生的剖面上的垂直环流图(图版 I (a), 其剖面基线在图版 I (b)中, 附本刊后, 下同)进一步揭示了雨团中更细致的垂直结构. 如图版 I (a)所示, 18 km 细网格模拟出的雨团垂直环流在整体上与 54 km 的结果相似, 即雨团中的上升运动支和其东南方低空辐散系统上方的下沉支构成了一个完整而深厚的的垂直环流圈. 但不同的是, 基于细网格输出资料所产生的垂直剖面图显示出雨团前方的边界层中还有一个较小的浅薄的垂直环流圈,

它位于深厚垂直环流圈的下方, 其高度仅达到900 hPa. 这个位于边界层中的垂直环流圈的方向与深厚环流圈相反, 即雨团的前部和前方的边界层中为下沉的辐散气流, 它反映了雨团中由于大量雨滴降落所引起的拖曳下沉气流. 它在雨团前沿的近地面层中向外流出. 这一非常重要的现象在粗网格的垂直流场中是观察不到的, 它表明中尺度数值模式具有分辨中β尺度结构的能力. 由于该垂直环流的存在, 从图中可以看到它导致了前方的低空入流不是直接从底层进入雨团, 而是从边界层下沉辐散气流的上方进入雨团.

图版Ⅰ(b)给出的 950 hPa 位温分布可以证明, 边界层中的下沉辐散气流是冷性的, 在图中表现为雨团前部的等位温线向南突出. 这一现象仅存在于 850 hPa 层以下, 表明雨团的前部存在一个浅薄的冷丘, 它与雨滴降落过程中的蒸发冷却等非绝热过程有关. 在给出的平面图(图版Ⅰ(b))和与垂直面图的空间配置(图版Ⅰ(c))中可以很清楚地看到, 下沉辐散气流和前突的冷空气在空间位置上非常吻合.

4 小结和讨论

用中尺度非静力模式 MM5 对 1998 华南暴雨试验期间5月23~24日大暴雨个例的雨团的中尺度流场结构所进行的分析表明, 在低空, 雨团为一个中尺度气旋式涡旋, 其前方有一个中尺度辐散系统与之配合, 气流从辐散系统中流出进入雨团, 形成雨团的低空前方入流. 在中空, 雨团为一西风带的中尺度扰动(槽), 气流从槽后进入雨团, 形成雨团的中层后方入流. 在高空, 雨团为具有很强的非地转性中尺度涡旋系统(中高压和中低压), 沿气压梯度方向有很强的非地转高空出流. 54 km 粗网格的垂直环流剖面显示, 500 hPa 附近中空后方入流是下沉的, 一部分到达地面, 一部分和前方入流汇合后转为上升, 一起构成雨团中很强的上升气流. 18 km 细网格垂直剖面显示, 雨团前方900 hPa以下的行星边界层中存在下沉的辐散气流, 它形成了一个浅薄的垂直环流圈. 950 hPa 温度场显示它是冷性的, 与雨滴降落过程中的蒸发冷却等非绝热过程有关, 低空暖湿空气爬越这个浅薄的冷丘进入雨团.

总之, 通过空间分辨率较高的数值模拟可以得到华南暴雨试验中比较清晰的雨团中β尺度三维流场结构, 它有助于加深对暴雨雨团的科学认识. 但是对于温度场、湿度场和气压场的三维结构, 本文涉及不多, 只给出了雨团下方边界层中冷丘的存在, 并简要讨论了它与低空入流之间的联系. 对于高空 200 hPa 等压面上存在的中β尺度高压和低压, 文中未作详细的讨论. 考察模式输出的每小时 200 hPa 资料发现, 这种中高压和中低压在积分的最初几个小时中并不存在, 它是伴随着雨团的产生后出现的, 而且它们只出现在雨团频繁发生的地区, 说明它的出现和雨团的发生有关. 中高压的出现可能是雨团中凝结潜热的释放使气柱在垂直方向上伸长所致, 而中低压可能仅是中高压之间相对低压区的表现. 但是中高压与雨团之间并不始终一一对应, 如在雨团消失后, 中高压却还继续存在. 要更确切地了解中高压和雨团之间的关系, 或许需要选择一个只有单个雨团发生的个例进行模拟研究才能做到.

致谢 本工作受攀登 95-专-03 课题、国家重点基础研究发展规划项目(G1998040907)、国家自然科学基金(批准号: 49735180)和高等学校重点实验室访问学者基金资助.

参 考 文 献

1 仪清菊, 刘品, 王明志. 1998 年华南暴雨试验期的暴雨过程分析, 海峡两岸及邻近地区暴雨试验研究. 北京: 气象出版社, 2000. 161~166

2 Chen G T -J. Mesoscale features observed in the Taiwan Mei-Yu season. J Metero Soc Japan, 1992, 70: 497~515

3 王立琨, 郑永光, 陶祖钰. 华南暴雨试验过程的环境场和云团特征的初步分析. 气象学报, 2001, 59: 115~119

4 王洪庆, 张焱, 陶祖钰, 等. 五维大型复杂数据集计算的可视化. 自然科学进展, 1998, 8(6): 742~747

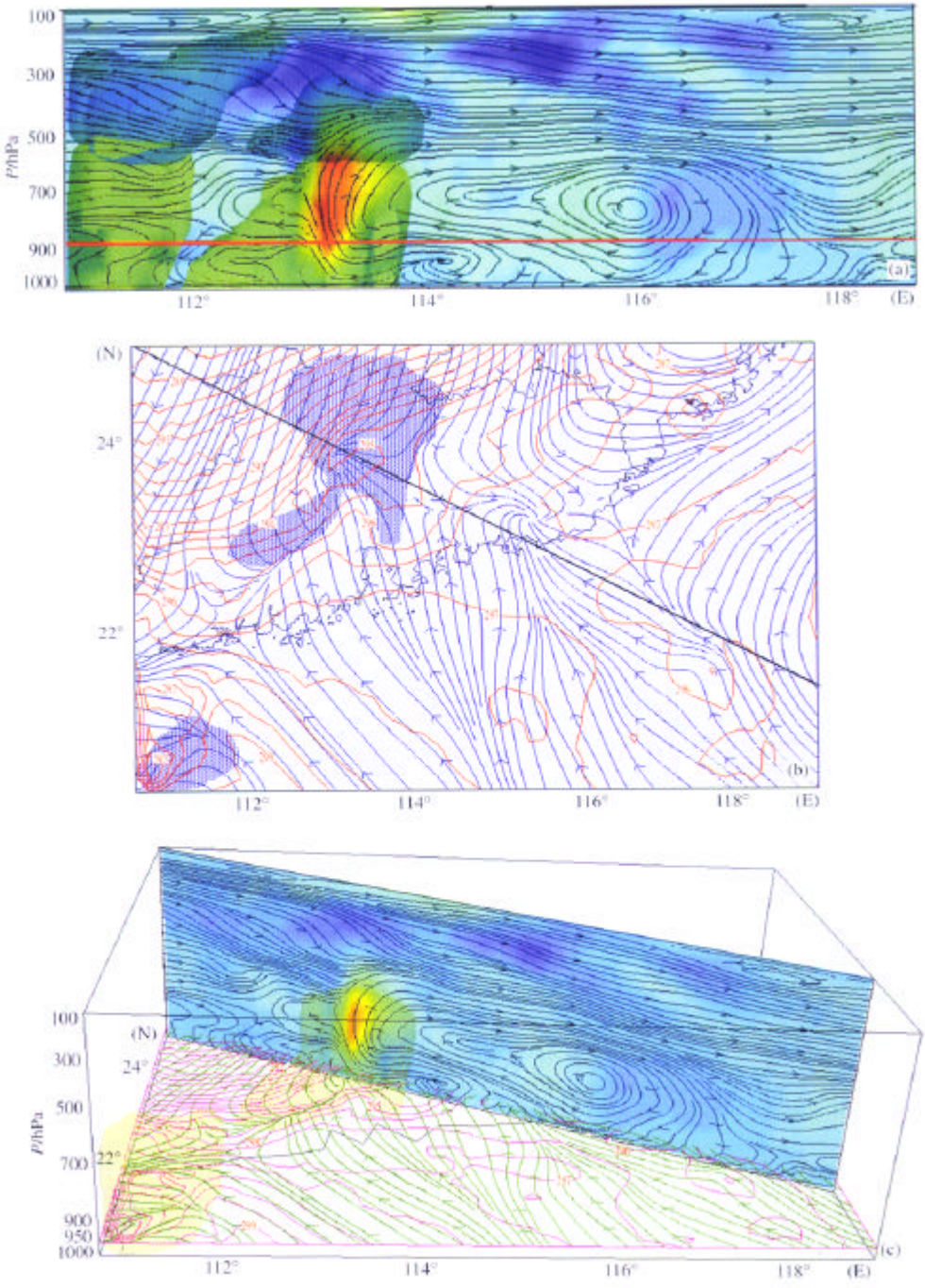
5 孙建华, 赵思雄. 一次罕见的华南大暴雨过程的诊断与数值模拟研究. 大气科学, 2000, 24: 381~391

6 Anthes R A, Huo Y H, Benjamin S G, et al. The evolution of the mesoscale environment of severe local storms: Preliminary modeling results. Mon Wea Rev, 1982, 110: 1187~1213

7 陈敏, 王洪庆, 郑永光, 等. 1998 年湖北大暴雨的中-β尺度对流系统数值模拟和可视化研究. 北京大学学报, 2000, 36: 651~658

8 Houze R A. Interpretation of Doppler weather radar displays of mid-latitude mesoscale convective systems. Bull America Meteor Soc, 1989, 70: 609~619

(2002-03-21 收稿, 2002-05-27 收修改稿)



(a) 5 月 23 日 2200UTC 细网格的垂直剖面图(红色表示上升速度最大，蓝色表示下沉速度最大，红线表示 850 hPa 高度); (b) 5 月 23 日 2200UTC 的 950 hPa 流线和位温场平面图; (c) 5 月 23 日 2200UTC 的 950 hPa 流线和位温场平面图及和细网格垂直剖面图的空间配置(阴影区为雪水和雨水含量超过 0.2 g/kg 的区域，表示雨团的位置)