

刘晓春, 范水勇, 毛节泰. 2012. 云顶参数与降水间关系的统计分析和数值模拟 [J]. 气候与环境研究, 17 (2): 125–138, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2011.10120. Liu Xiaochun, Fan Shuiyong, Mao Jietai. 2012. Statistic analysis and numerical simulation on the relationship between cloud top parameters and precipitation [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 17 (2): 125–138.

云顶参数与降水间关系的统计分析和数值模拟

刘晓春^{1, 2} 范水勇³ 毛节泰²

1 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

2 北京大学物理学院大气科学系, 北京 100871

3 中国气象局北京城市气象研究所, 北京 100089

摘要 利用 FY-2C 静止卫星云顶物理参数及地面加密雨量观测等, 结合 MM5 中尺度非静力数值预报模式, 综合分析了典型层状云降水过程的云系演变和结构特征, 揭示了云顶参数与单站雨强之间并不是简单的量化统计关系: 即降水大, 每小时降水量与云顶高度、有效粒子半径是较好的正相关, 与云顶温度是较好的负相关; 反之则不尽然, 云顶高度高、云顶温度低、有效粒子半径大却不一定降水大。并用模拟结果分析解释了形成这种现象的机理。

关键词 层状云系 云顶参数 降水 MM5

文章编号 1006-9585 (2012) 02-0125-14 **中图分类号** P405 **文献标识码** A
doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2011.10120

Statistic Analysis and Numerical Simulation on the Relationship between Cloud Top Parameters and Precipitation

LIU Xiaochun^{1, 2}, FAN Shuiyong³, and MAO Jietai²

1 *Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*

2 *Department of Atmospheric Sciences, School of Physic, Peking University, Beijing 100871*

3 *Institute of Urban Meteorology, China Meteorological Administration, Beijing 100089*

Abstract Using cloud top physical properties of geostationary satellite, ground rainfall observation, and MM5 numerical simulation, the authors analyse the evolvement and structure of typical stratiform cloud. It shows that the relationship between cloud top physical properties and rainfall intensity at single station is not simply statistic. If rainfall is large, a good positive relationship between rainfall per hour and cloud top height, effective particle radius, and a good negative relationship between rainfall per hour and cloud top temperature are found. Whereas, higher cloud top height, lower cloud top temperature, and larger effective particle radius cannot always guarantee the larger rainfall. The mechanism of this phenomenon has been explained by numerical simulation.

Key words stratiform cloud, cloud top parameter, precipitation, MM5

收稿日期 2010-09-16 收到, 2011-12-29 收到修定稿

资助项目 公益性行业(气象)科研专项 GYHY200806003

作者简介 刘晓春, 女, 1976 年出生, 博士, 研究方向为大气辐射与遥感。E-mail: liuxiaochun@126.com

1 引言

云在天气和气候系统中的重要性已被众多的观测事实和模式模拟研究所证实 (Ramanathan et al., 2001)。云对大气起着重要的动力和热力作用, 云形成的降水对人类的生命和日常活动具有重要作用和影响。中纬度地区的层状云系是一种主要的大范围降水云系, 是开展人工增雨的主要作业对象。为了进行更有效的人工影响作业, 首先必须对作为作业对象的云和降水有更进一步的认识 (毛节泰和郑国光, 2006)。认识和掌握层状云降水形成机制和演变特征无疑具有重要的现实意义。决定云系结构的主导因素是支撑云生成、演变、移动、维持的大气动力和热力条件, 而云的微结构又依赖于具体的动力、热力框架下的云—降水微物理过程; 反过来微观过程在一定条件下对背景尺度动力、热力状态又有反馈作用 (许焕斌, 1995)。分析云顶高度、云粒子有效半径等这些云参数与地面降水的关系, 可以总结出一些普遍规律, 根据这些规律通过分析云参数的变化, 也可对提高降水预报精度做出贡献。

由于地面雨量计和天气雷达在陆地上分布不均, 海洋上更加稀少, 从而在很大程度上限制了根据这些手段获得的全球以及局地降水资料的使用效果。静止气象卫星可以提供可见光以及红外通道的卫星云图, 其优点是时间分辨率高, 是连续监测云系变化最直接的工具, 可以抓住一些生命史较短的降水云系统。利用气象卫星资料估测地面降水, 国内外研究者已经进行了许多理论和方法研究 (Barrett and Martin, 1981; 刘晓阳等, 2005; 刘健等, 2007), 采用的资料主要包括可见光 (Visible) 波段、红外 (Infrared, IR) 波段和微波 (Microwave, MV) 波段的观测资料。卢乃锰和吴蓉璋 (1997) 对 1992~1994 年夏季四川、湖北、河南 3 省 333 个地面雨量站观测数据以及与之相应的 GMS-4 红外云图资料进行了分析, 认为云顶温度、温度梯度、云团的膨胀、穿透性云顶的存在、云体相对于云团中心的偏离量与云的降水强度有着明显的对应关系。王立志等 (1998) 运用动态分类方法对 GMS-5 四通道卫星云图进行分类, 并由分类结果根据一维云模式得到的对流

云对流核心云顶温度与降水之间的关系, 对层云和对流云进行了定量降水估算。2004 年 10 月我国 FY-2C 静止气象卫星进入轨道并正常运行后, 为我们提供了更加强有力的探测手段和极为丰富的地球大气信息 (方宗义, 2000; 苏爱芳等, 2007)。

近年来中尺度数值模式已日趋成熟, 成为中尺度气象一个重要的研究和应用手段。美国国家大气研究中心和宾西法尼亚州立大学共同研制的中尺度数值模式 MM5 目前已发展到第三版 (PSU/NCAR, 2005), 为三维、可考虑非静力平衡的有限区域数值模式, 对于不同尺度间相互作用时有较好的分辨水平和模拟能力。对于复杂的中尺度天气系统而言, 借助 MM5 的模拟可以弥补因观测资料不足而无法充分掌握其在时间与空间上演变的缺憾。

虽然前人分别应用卫星、中尺度数值模式对层状云系结构及降水已经作了很多观测、模拟分析研究 (李宏宇等, 2006; 洪延超和周非非, 2006; 雷蕾等, 2007; 翟菁等, 2007), 但多集中在分析云系的宏微观结构特征、水分循环收支、增雨潜力等方面; 或是进行了一些卫星估测降水分别与地面观测、模拟结果的对比 (Xie and Arkin, 1997; Xie et al., 2003; Kästner et al., 2006; Ebert et al., 2007), 很少看到结合两者来研究云系演变中卫星云顶参数与降水对应关系机理的工作, 本文将在这方面做一些初步工作。利用 FY-2C 静止卫星反演的云顶物理参数及地面加密雨量观测 (河南境内) 等, 结合 MM5 中尺度非静力数值预报模式, 综合分析 2005 年 9 月下旬河南省一次典型的层状云降水过程的云系演变过程、机理和微物理结构, 揭示层状云系降水和云微物理特征的关系。

2 所用资料及数据处理

FY-2C 卫星反演的云顶参数产品由国家气象中心提供, 其反演范围 ($0^{\circ}\sim 60^{\circ}\text{N}$, $70^{\circ}\text{E}\sim 150^{\circ}\text{E}$), 空间分辨率为 0.1° (纬度) $\times 0.1^{\circ}$ (经度)。这里卫星产品的时间用整点表示, 如 04 时 (北京时间, 下同) 实际代表的观测时间是 04 时 30 分。

河南的地面每小时降水资料有 119 个站点,

与静止卫星云顶参数对比时取地理经纬度对应的点(因FY-2C云产品分辨率为10 km,故以其格点为中心、搜索半径为5 km,此范围内的点视为经纬对应),时间则对应卫星产品时间,如卫星产品时间为04时,则地面每小时雨量取05时,05时降水量是指04时至05时1小时累积降水量。

3 天气形势概况

中国气象局制定的天气预报标准规定:24小时内的降雨量称为日降雨量,凡日雨量在10 mm以下称为小雨,10.0~24.9 mm为中雨,25.0~49.9 mm为大雨,50.0~99.9 mm为暴雨。受东

移低槽和低空切变线的共同作用,9月24~25日,河南出现了一次全省范围的降水过程,有5站24小时降水量(24日08时至25日08时)超过50 mm,大雨以上量级的降水带呈东西向带状分布在河南境内33°N到34°N的范围内(图略),其中栾川站日降水量为58.7 mm。利用高空形势演变和6小时雨量图做对比分析发现,24日08时在高原东部有一长约15个纬度的带状雨区位于槽前5到6个经度的范围内,降水量以小雨和零星小雨为主。另外,长江上游有西南涡降水,其前部有一条较弱的带状雨区伸向长江上游,为弱的切变线降水。到14时低槽雨区东移,其前部与切变线雨区叠加,整个降水带呈“人”字型,降水略有加

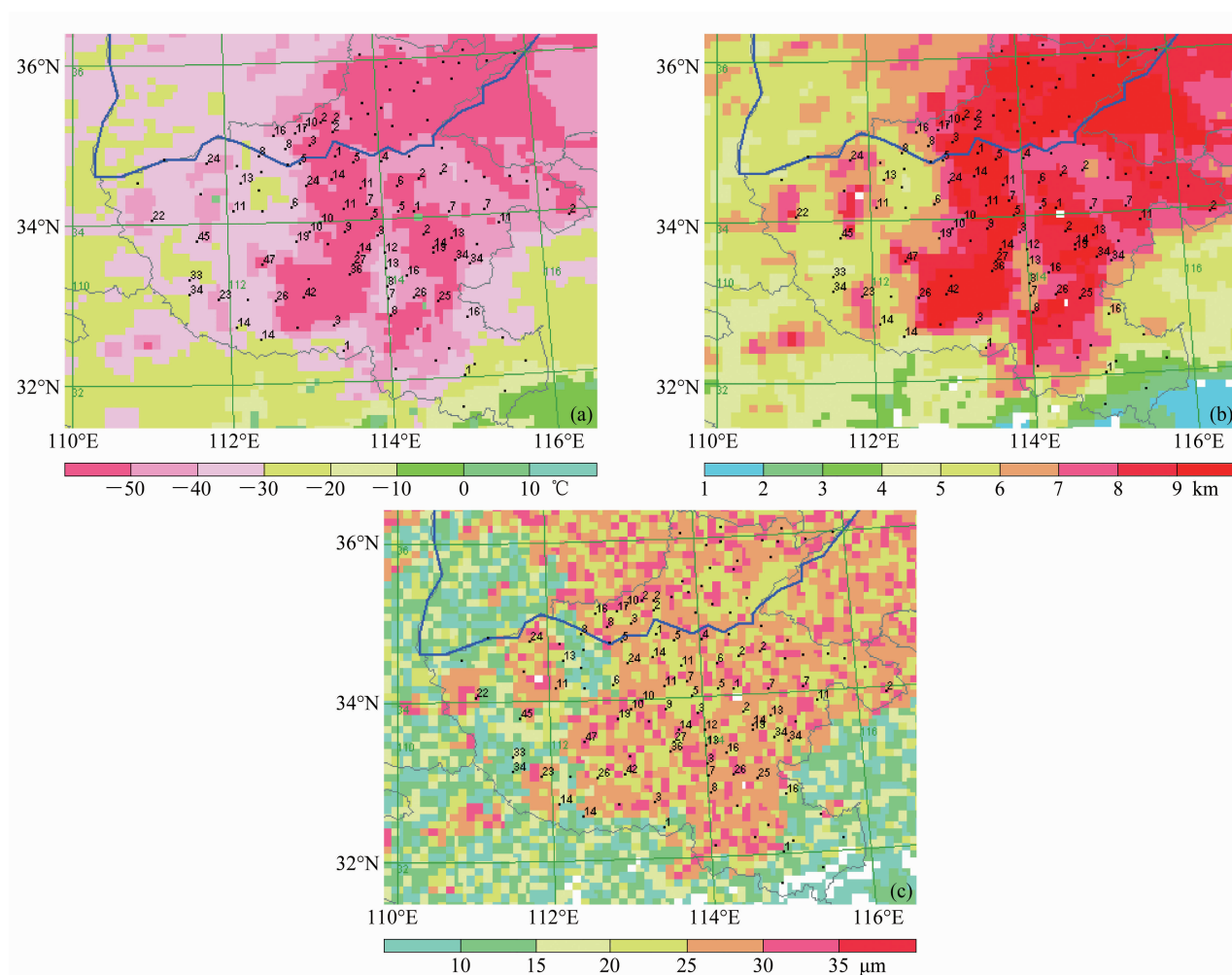


图1 河南9月24日23时1小时降水量(粗体黑字,单位: 10^{-1} mm)与22时30分云顶参数分布图(填色): (a) 云顶温度 T_{top} ; (b) 云顶高度 Z_{top} ; (c) 粒子有效半径 R_e 。

Fig. 1 Distribution of 1-h rainfall at 2300 LST (thick black numbers, units: 10^{-1} mm) and cloud top parameters (color shading) at 2230 LST 24 Sep in Henan: (a) Cloud top temperature T_{top} ; (b) cloud top height Z_{top} ; (c) effective particle radius R_e .

强,并开始影响河南,到20时已经影响到河南大部分地区,同时豫南(这里主要指河南境内 $33^{\circ}\text{N}\sim 34^{\circ}\text{N}$ 范围内)有大雨以上量级的降水发展。25日02时全省性降水,雨带呈东北至西南向,移动方向开始转向东南,这时切变线位于整个发展过程的最北部(34°N)。25日白天,切变线变为冷切,并与降水区一起移出河南。河南省的降水主要集中在24日夜间到25日早晨。降水是在低槽一切变一回流形势下产生的,雨区的形成和东移与低槽有关,降水的发展与切变线北抬有关。

4 降水与卫星云顶参数变化的关系

24日08时至25日08时24小时降水量河南有5站出现了50 mm以上的降水,依次为:栾川(33.78°N , 111.6°E), 58.7 mm; 舞阳(33.45°N ,

113.58°E), 58.6 mm; 西峡(33.3°N , 111.5°E), 55.8 mm; 南召(33.48°N , 112.43°E), 55 mm; 舞钢(33.33°N , 113.53°E), 54.8 mm。此降水过程中豫北和豫南都出现了云顶温度低、云顶高度高、有效粒子半径较大的现象,但通过对比降水发现,豫北和豫南的降水量级差别很大,例如24日22时河南省黄河以北地区出现了低于 -50°C 的云顶亮温、8 km以上的云顶高度、 $20\sim 30\mu\text{m}$ 的有效粒子半径(图1),但这些区域并没有降水产生,这说明事实上云顶参数与单站雨强之间并不是简单的量化统计关系。

根据大雨、暴雨的定义,可推知每小时降水量约在1.1~2.0 mm为大雨,2.1~4.2 mm为暴雨。通过统计分析此次降水过程(24日13时至25日14时,其中24日20时、25日00时至02时卫星资料缺失,共22小时)河南119个测站每

表1 9月24日13时至25日14时(其中24日20时、25日00时至02时卫星资料缺失)河南代表测站每小时降水量 R_{1h} 与云顶高度 Z_{top} 对应情况

Table 1 Relation between 1-h rainfall and Z_{top} from 1300 LST 24 Sep to 1400 LST 25 Sep (some satellite data missing; 2000 LST 24 Sep, 0000 - 0200 LST 25 Sep) at typical stations in Henan

		栾川		舞阳		范县		灵宝	
		Z_{top}/km	R_{1h}/mm	Z_{top}/km	R_{1h}/mm	Z_{top}/km	R_{1h}/mm	Z_{top}/km	R_{1h}/mm
24 日	13 时	5.95	0.1	1.95	0	1.2	0	4.25	0
	14 时	7.2*	1.5*	2.7	0	4.65	0	7.3	0
	15 时	7.05*	2.9*	3.9	0	6.65	0	7.95	0
	16 时	7.45*	4.1*	6.1	0.2	5.75	0	9.05	0
	17 时	9.15*	6.7*	4.75	0.8	5.55	0	8.55	0
	18 时	9.5*	4.6*	8.6*	3.5*	6.3	0	9.1	0
	19 时	8.6*	5.1*	7.5*	7.2*	9.25	0	8.7	0
	21 时	4.9*	3.3*	9.85*	4.2*	8.2	0	7	0
	22 时	5.7*	4.5*	9.4*	2.7*	9.25	0	6.95	0
	23 时	5.55*	3.4*	8.55*	6.5*	8.85	0	5.75	0
25 日	03 时	5.3*	2.6*	8.65*	4*	6.65	0	5.85	0
	04 时	6.45*	2*	5.9*	4.4*	5.3	0.1	6.45	0
	05 时	6.25*	2.7*	5.7*	5.1*	6.95	0	5.1	0
	06 时	5.6*	1.3*	6.8*	3.2*	6.75	0	3.8	0
	07 时	3.65	0.1	8.05*	4.4*	7.05	0	2.8	0
	08 时	2.95	0	6.7	1	5.7*	2.3*	2.75	0
	09 时	2.5	0	6.5	0	5.6*	2.1*	2.1	0
	10 时	2.4	0	5.1	0.1	7.25*	1.9*	1.9	0
	11 时	1.9	0	4.2	0	6.05	0.4	1.9	0
	12 时	1.95	0	3.65	0	0	0	2.1	0
	13 时	1.85	0	3.1	0	0	0	2.15	0
	14 时	1.75	0	2.5	0	1.55	0	2.1	0

* 表示大雨及以上量级降水时刻。

个站点的每小时降水量与云顶参数随时间的变化及二者的相关（样本数 119×22 ），可以分为两类：第一类是测站的每小时降水量与云顶参数呈现很

明显的相关关系；第二类是测站的每小时降水量与云顶参数在多数时刻基本不相关。表 1 为代表这两种类型的站点每小时降水量与云顶高度的对

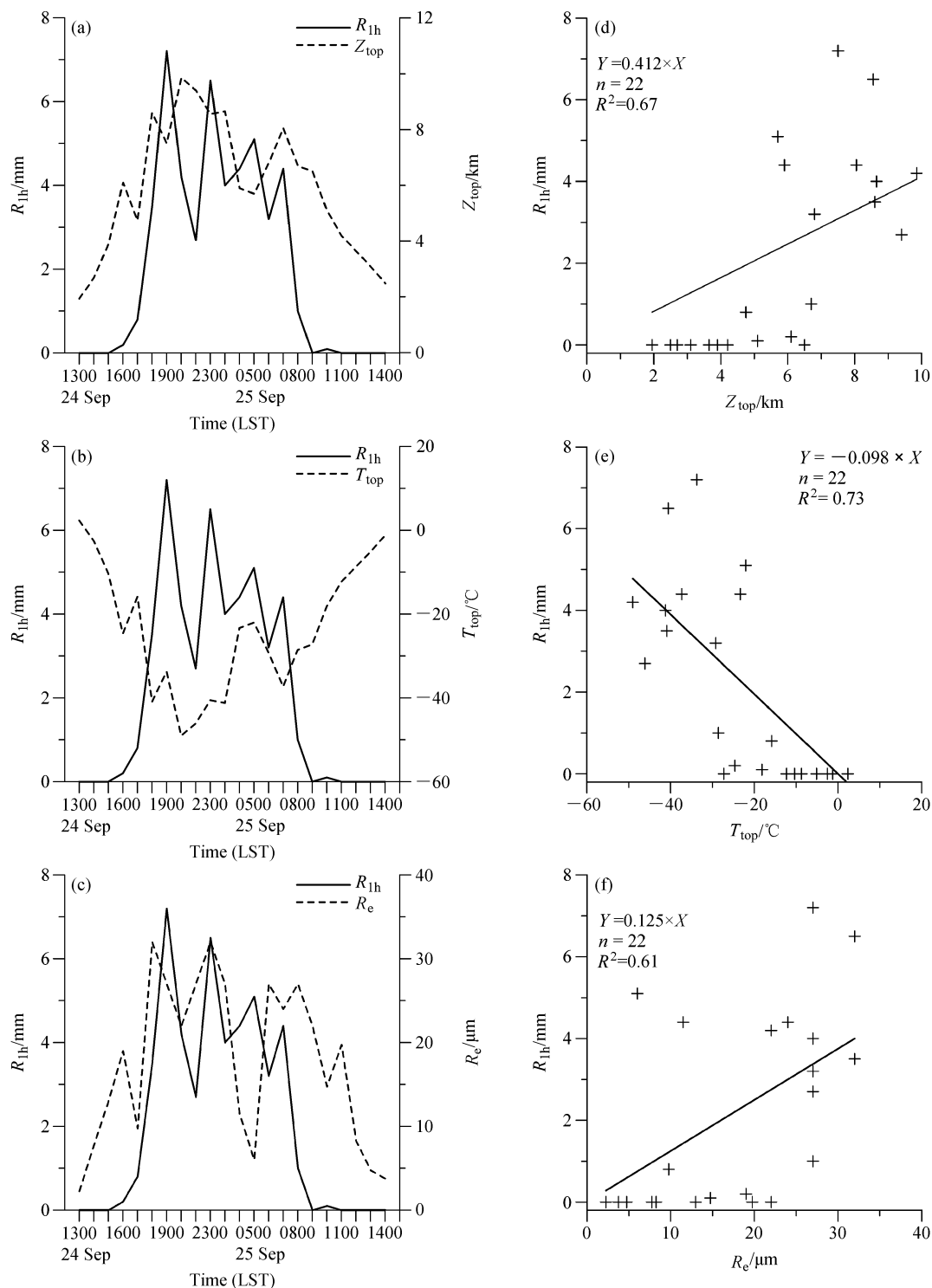


图2 舞阳 (33.45°N, 113.58°E) 1小时降水量 R_{1h} 与 (a, d) Z_{top} 、(b, e) T_{top} 和 (c, f) R_e 的 (a, b, c) 随时间的变化及 (d, e, f) 相关关系
Fig. 2 One-hour rainfall and (a, d) Z_{top} , (b, e) T_{top} , and (c, f) R_e in Wuyang (33.45°N, 113.58°E): (a, b, c) Variation with time; (d, e, f) relation

应情况。图 2 为 24 小时降水量其次的舞阳每小时降水量与云顶高度、云顶温度及有效粒子半径随时间的变化及相关关系图,属于第一类。由图中

可以发现暴雨量级的测站每小时降水量与云顶高度、有效粒子半径是较好的正相关,每小时降水量与云顶温度是较好的负相关,在多数时刻每小

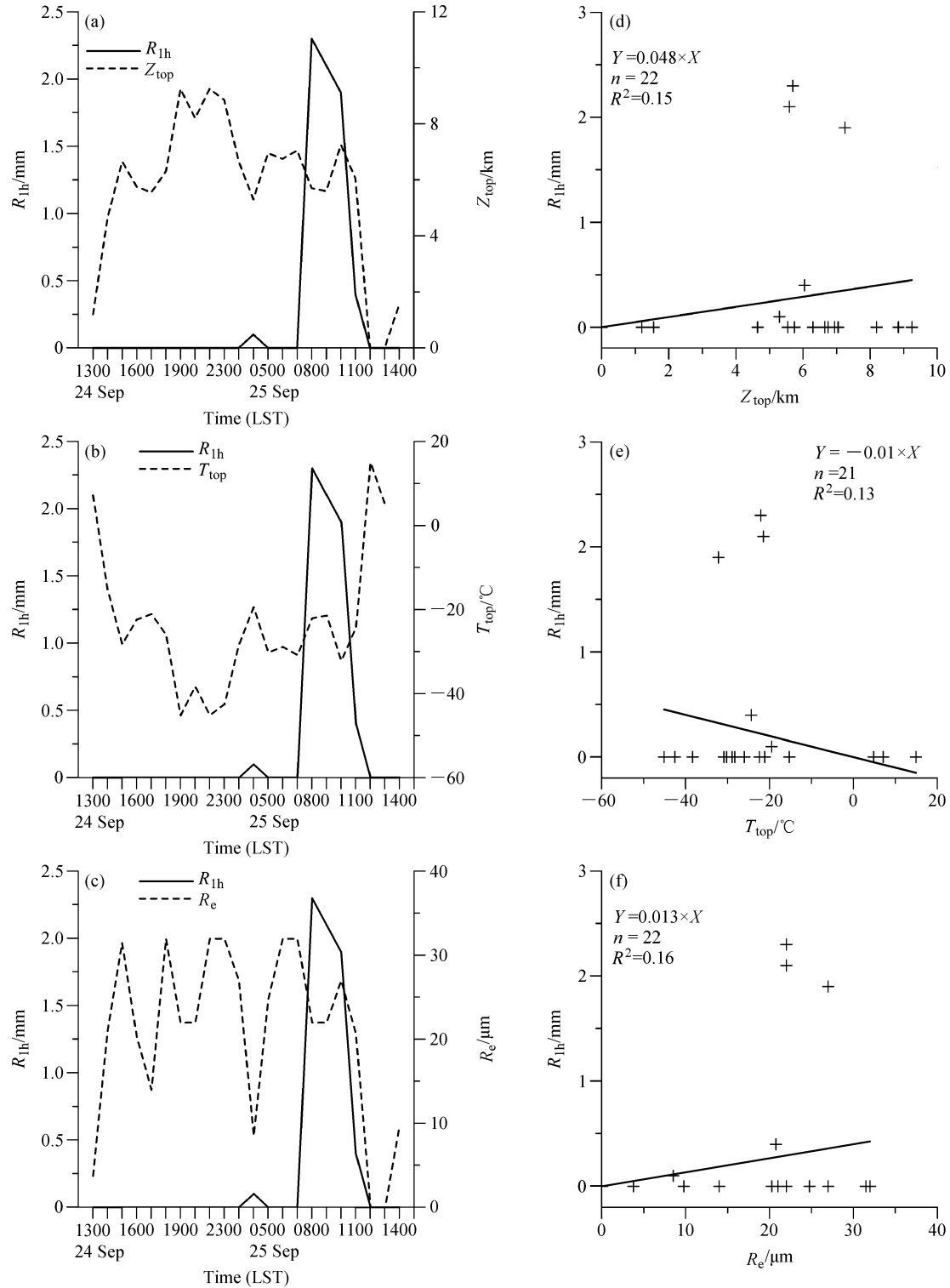


图 3 同图 2, 但为范县 (35.91°N, 115.48°E)

Fig. 3 Same as Fig. 2, but for Fanxian (35.91°N, 115.48°E)

时降水量越大, 对应的云顶高度越高、云顶温度越低及有效粒子半径较大。

但是从表 1、图 2 中同时也可以看到, 暴雨测站在某些时刻每小时降水量与云顶参数的关系并不满足以上所述。那是什么原因造成了这样的现象: 有时降水量与云顶参数相关很好, 而有时却不好? 有可能是因为: 云顶温度低, 云顶发展得高, 说明有较强的上升运动, 降水大则说明有足够的水汽, 抬升凝结释放潜热, 加剧了上升运动, 形成了良性循环, 因此降水大; 而当云顶参数具有上述相同特征但降水小时, 可能是虽然有较强的上升运动, 但没有充足的水汽补充, 因此不能形成丰沛的降水。为了验证我们的推测, 将在下一节的模拟计算中进行进一步的机理讨论。

范县 (35.91°N, 115.48°E) 的 24 小时降水量最小, 仅为 0.1 mm, 属于第二类。图 3 为范县每小时降水量与云顶高度、云顶温度及有效粒子半径随时间的变化及相关关系图, 可以看到每小时降水量与云顶参数在多数时刻基本不相关。而在 25 日 08 时至 10 时出现的降水大值却又满足了前面所述每小时降水量与云顶参数的对应关系, 这些都说明了降水量与云顶参数的关系也要在满足一定条件下才能有良好的相关。也有可能是云况不同 (单层云或多层云) 的缘故, 如果是直展云 (积云、积雨云), 应当满足相关; 如果是积层混合云则不一定相关。我们可以说降水大, 很可能云顶高度高、云顶温度低、有效粒子半径较大; 反之则不尽然, 云顶高度高、云顶温度低、有效粒子半径大却不一定降水大。云顶参数只反应了云顶部的情况, 对于云层底部究竟会出现什么样的物理过程, 仅依靠云顶参数分析还存在着局限性。但这也说明了解云顶物理参数的分布状况, 可以对定性预报降水有一定的参照作用。

5 MM5 模拟

由于卫星资料仅能反映云顶部情况的局限性, 为了更好分析此次过程的云系发展演变和降水分布, 采用中尺度非静力数值预报模式 MM5 V3.6 版对这次过程进行了模拟。

5.1 模式配置

模式的基本配置为双向两重嵌套, 外区 (D1)

水平分辨率为 27 km, 格点数为 151×151, 内区 (D2) 水平分辨率为 9 km (模式网格的水平分辨率可设为与其相比较的其他资料的水平分辨率相近, 以便于比较。所用 FY-2C 云产品分辨率为 10 km。), 格点数为 181×181, 覆盖以河南为中心的华中地区。模式垂直分辨率为不等距 σ 坐标的 37 层。主要物理过程为: Reisner2 (graupel Reisner2) 显式微物理方案, GRELL 积云对流参数化方案, MRF PBL 行星边界层方案, Dudhia 云辐射方案 (Dudhia et al., 2005), 下垫面采用 5 层土壤方案。模拟起始时间为 2005 年 9 月 23 日 20 时, 初始场和边界条件采用 1° (纬度) × 1° (经度) 的 NCEP 再分析资料插值到模式格点上得到, 模拟时长 54 小时, 至 26 日 02 时止。图 4 给出了两层嵌套的模拟域范围及 D2 的地形分布。

5.2 模拟结果与实测结果的对比

5.2.1 云区范围与位置

将云中各种水成物含水量的垂直积分之和定义为含水量厚度 (单位: mm), 模拟云的含水量厚度的水平分布可以显示云带的位置和范围 (洪延超和周非非, 2006)。将 D2 模拟域模拟的每小时水凝物总量 (云水、云冰、雪、霰及雨水的垂直积分量之和) 叠加在对应时刻的 FY-2C 红外云图上, 这里给出了 24 日 21 时、25 日 06 时两时段

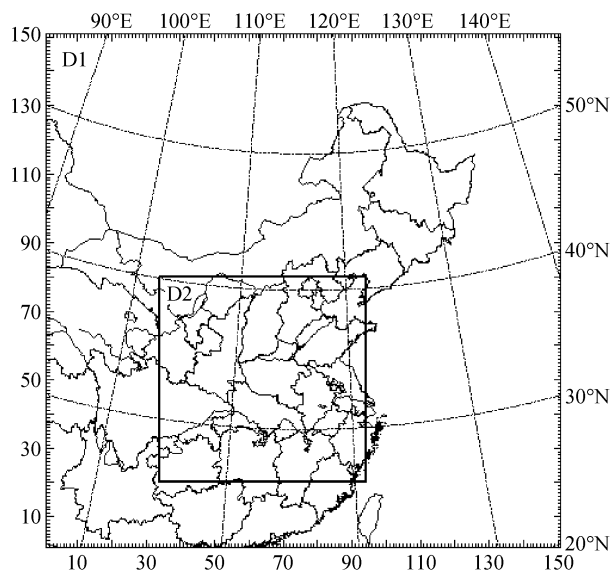


图 4 MM5 中尺度模式两层嵌套的模拟域区域

Fig. 4 Domain of simulation for MM5 mesoscale cloud numerical model

(图 5), 可以看到, 模拟的水凝物总量水平分布范围和位置与 FY-2C 红外云图显示的云区范围和位置 (图中用云顶温度分布表示) 比较一致, 模拟的云区范围略小。

5.2.2 累积降水量

从模拟的模式 D1 外区 24 日 08 时~25 日 08 时 24 小时累积降水量分布来看 (图 6), 模拟的降水落区和量级都与实况比较接近, 位于河南的东西向雨带走向和强降水中心被成功地模拟, 该强降水中心所处的纬度与实况基本一致, 位置略为偏东。

图 7 给出了模拟的模式 D2 内区 25 日 00 时、06 时两个时刻的每小时降水分布与河南实测每小时降水的对比, 从中可见模拟的降水大值中心、

量级与实况较为一致, 但模拟的雨区范围偏小, 豫北降水较小的雨区没有模拟出来。

总的来说, 模式模拟的云区与实况比较相似, 模拟的 24 小时累积降水的走向和落区与实际雨区基本一致, 模拟的 1 小时降水的降水大值中心、量级与河南实况也较为一致, 较好地反映了此次降水过程云系的发展演变过程。

5.3 模拟结果分析

由于此次过程河南的降水主要集中在 24 日夜间到 25 日早上, 因此着重对此时间段的模拟结果进行分析。

5.3.1 水汽场

充足的水汽和上升气流是云生成的必要条件 (盛裴轩等, 2003)。由每小时 850 hPa 水平风场

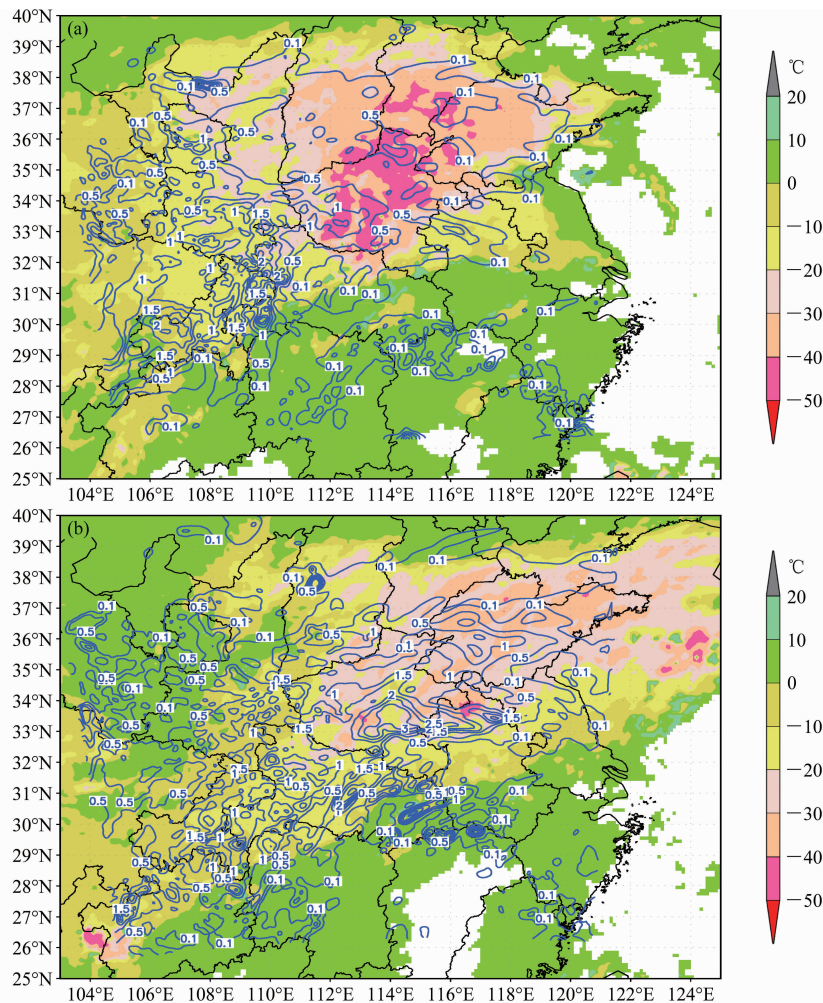


图 5 FY-2C T_{top} (填色) 与模拟水凝物总量 (等值线, 单位: mm) 分布: (a) 9 月 24 日 21 时; (b) 9 月 25 日 06 时

Fig. 5 Distribution of FY-2C T_{top} (color shading) and simulated total amount of water content (contour, units: mm): (a) 2100 LST 24 Sep; (b) 0600 LST 25 Sep

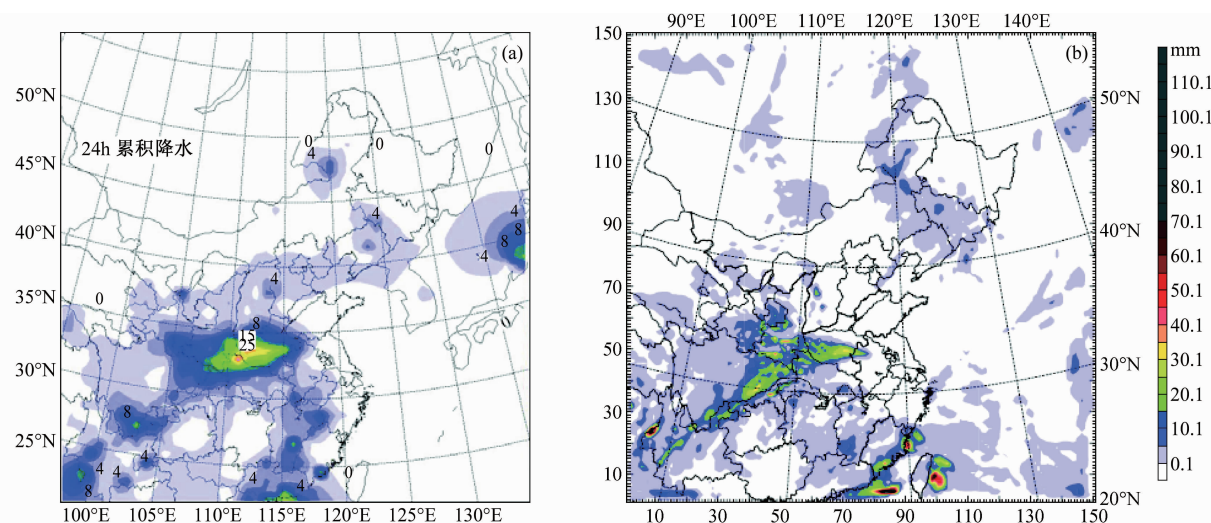


图 6 9 月 24 日 08 时至 25 日 08 时 24 小时累积降水分布：(a) 实况；(b) 模拟

Fig. 6 Distribution of 24-h cumulative rainfall from 0800 LST 24 Sep to 0800 LST 25 Sep: (a) Observation; (b) simulation

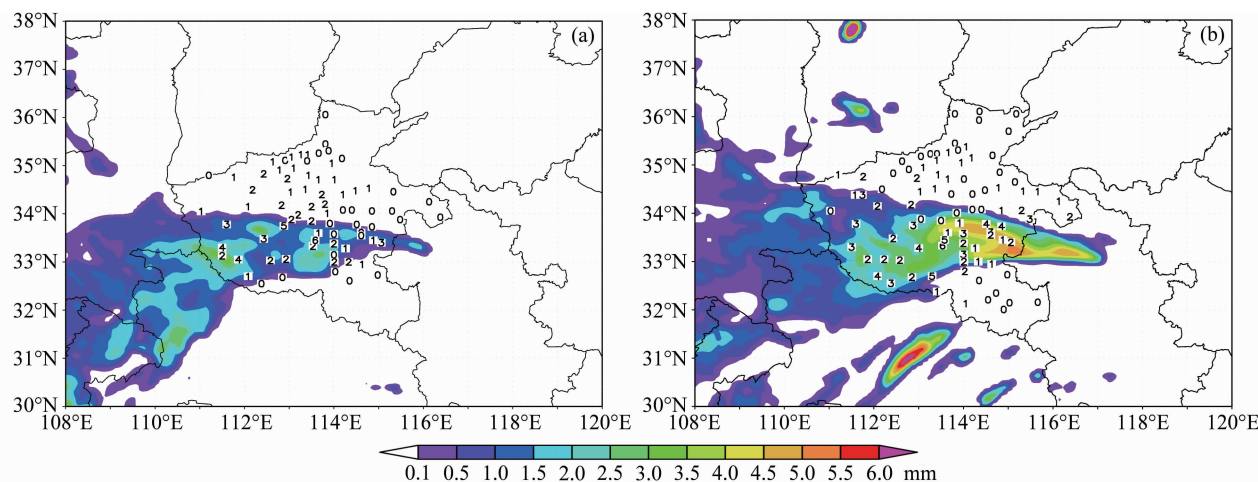


图 7 模拟（填色）和实测（填值）的 1 小时降水（单位：mm）：(a) 9 月 25 日 00 时；(b) 9 月 25 日 06 时

Fig. 7 Simulated (color shading) and observed (numbers) 1-h rainfall (mm): (a) 0000 LST 25 Sep; (b) 0600 LST 25 Sep

变化（图略）可知，24 日 23 时起，河南中、南部水平风场由较单一的东南风转变为东南气流与弱东北气流交汇，开始出现辐合线（图略），造成大气抬升；从每小时 700 hPa 水汽通量随风场的变化也可以看到，水汽来自于西南与东南两个方向；24 日 23 时，水汽随大气辐合抬升凝结，开始有比较明显的水凝物大值中心出现。至 25 日 06 时（图 8），850 hPa 水平风场已转为西南气流与强东北气流对峙，辐合加剧，此时水凝物总量出现一个最强中心。25 日 07 时（图略），850 hPa 辐合开始减弱，东北偏东气流逐渐占主导地位，水凝物总量开始减少，此后逐渐消散。

5.3.2 垂直结构场

回顾一下节 4 中提到降水与云顶参数的关系：降水大，很可能云顶高度高、云顶温度低、有效粒子半径较大；但反过来，云顶高度高、云顶温度低、有效粒子半径大，却不一定降水大。这一节分析模拟的垂直结构则正是为了解释为什么会有这样的现象。

图 9 是 25 日 06 时 FY-2C 云顶高度、有效粒子半径分别与模拟的云中水凝物总量的对应关系，可以看到，33°N~34°N 之间有很明显的两处云顶高度高值（>8 km），此两处的有效粒子半径也为 >25 μm 的大值，模拟的云中水凝物总量高值中

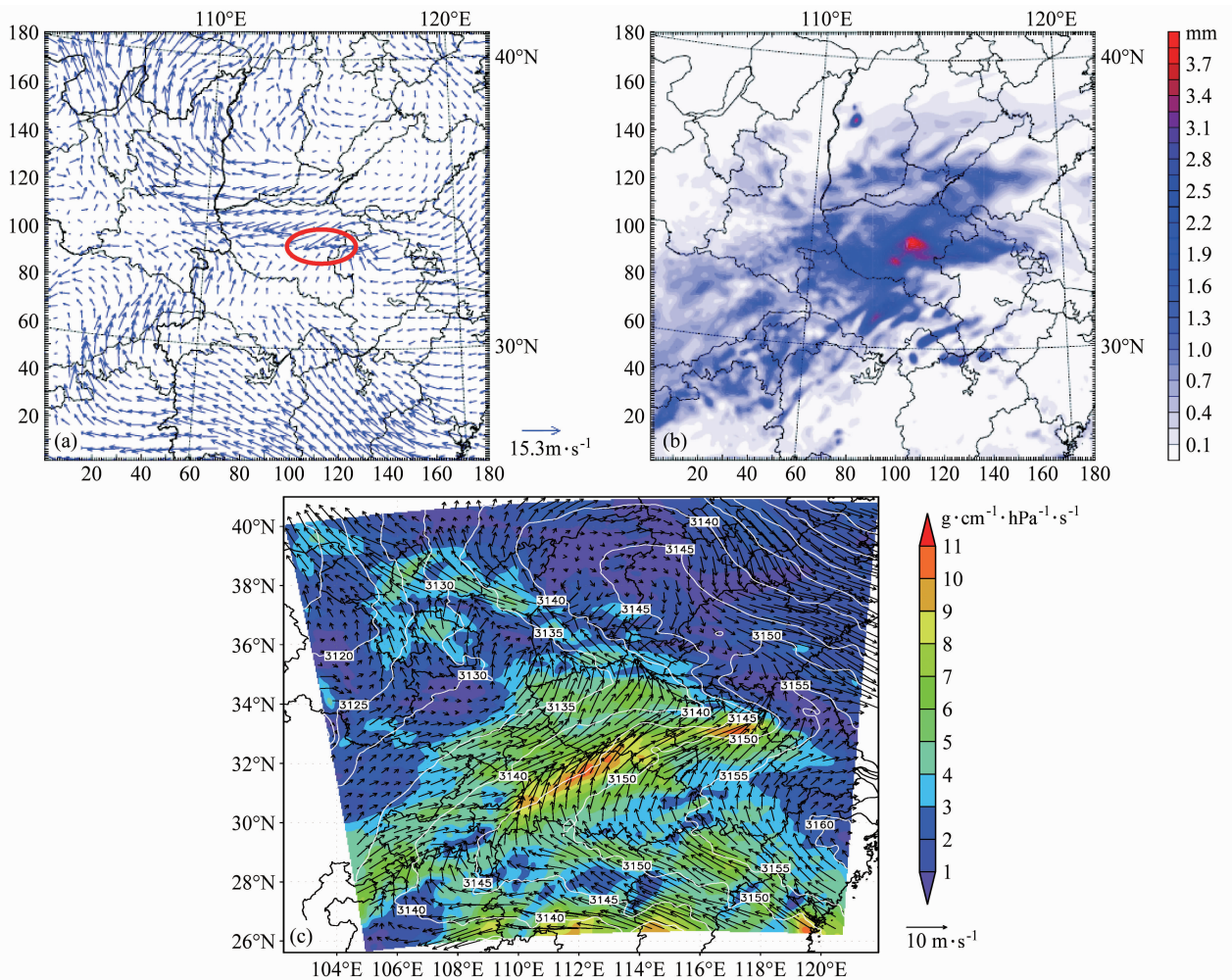


图8 9月25日06时物理量分布图：(a) 850 hPa水平风场；(b) 水凝物总量；(c) 700 hPa水汽通量（填色）、水平风场（矢量）和位势高度场（等值线，单位：m）

Fig. 8 Distribution of physical quantities at 0600 LST 25 Sep: (a) Horizontal wind field at 850 hPa; (b) water content; (c) vapor flux at 700 hPa (color shading) with horizontal wind field (vector) and geopotential height field (contour, units; m)

心 (>3 mm) 与这两处基本同纬度，位于两者之间；这与前面分析模拟的降水与实况的对应情况相符。而模拟的豫北云中水凝物总量值较小，实况降水也很少，云顶高度却较高、有效粒子半径较大。为了分析这两种不同的情况，故分别沿 33.5°N 、 114°E 作垂直剖面。

先分析 25 日 06 时沿 33.5°N 的垂直剖面（图 10a、11a、12a），剖面上还叠加了模拟的水凝物总量零值线和云顶高度。水凝物总量零值线有上下两条，高处一条表示模拟的云顶位置，低处的代表模拟的云底。此剖面穿过了降水与云顶参数相关良好的区域。

由图 10a 可见， $113^{\circ}\text{E}\sim 115^{\circ}\text{E}$ ，从地面一直

到 300 hPa 均为较大的上升速度，对应的涡度为正，辐合，350 hPa 附近开始辐散；模拟的云顶位于 200 hPa 左右，约为 11 km，卫星的云顶高度在 113°E 附近也为大于 8 km 的极大值。 $116^{\circ}\text{E}\sim 117^{\circ}\text{E}$ ，虽然地面至 850 hPa 为下沉气流，但 850 hPa 至 550 hPa 位于很强的上升速度区，最大值位于 700 hPa 附近，达到 $35\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ ，对应强正涡度带，但到了 500 hPa 附近便开始辐散；因此模拟的云顶位于 400 hPa 左右，约 7 km，对应的卫星云顶高度也约为 7~8 km 的大值。

相应地， $113^{\circ}\text{E}\sim 115^{\circ}\text{E}$ 低层水汽非常充沛（图 11a），在 $11\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 以上； $114^{\circ}\text{E}\sim 115^{\circ}\text{E}$ 水汽通量散度为负（图 12a），即水汽辐合，随着强

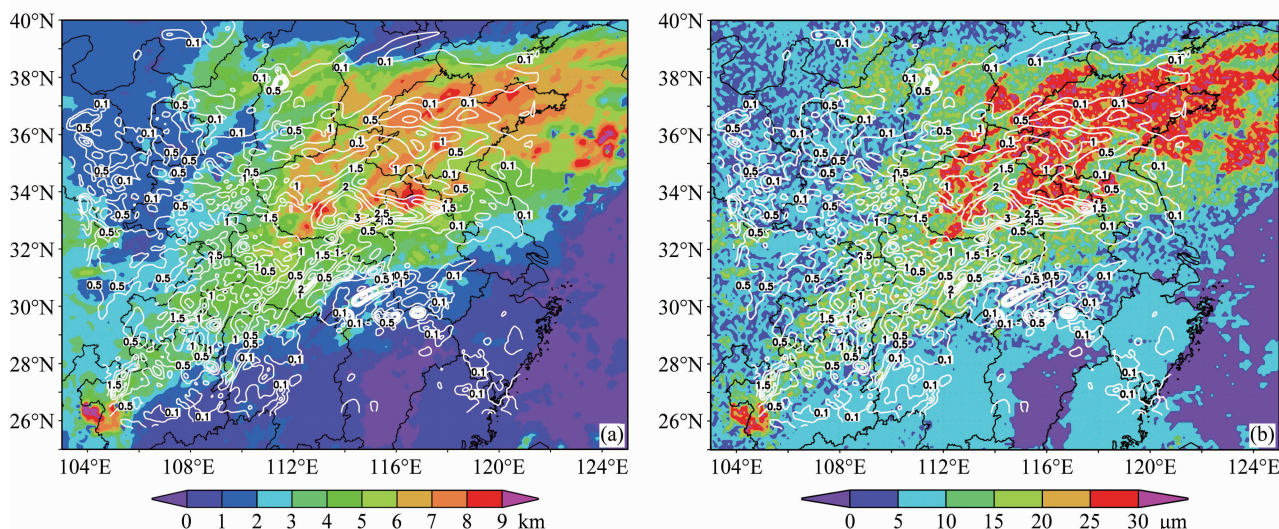


图 9 9 月 25 日 06 时 FY-2C 云顶参数 (填色) 与模拟的水凝物总量分布 (等值线, 单位: mm): (a) Z_{top} ; (b) R_e

Fig. 9 Distribution of cloud top parameters of FY-2C (color shading) and simulated water content (contour, units: mm): (a) Z_{top} ; (b) R_e

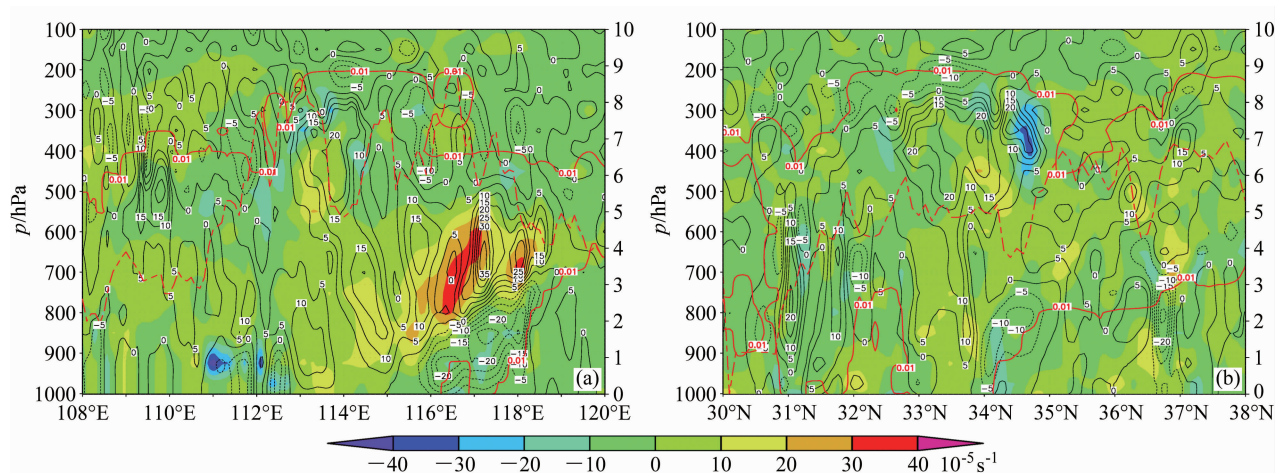


图 10 9 月 25 日 06 时涡度 (填色) 与垂直速度 w (黑线, 向上为正, 单位: $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$) 垂直剖面, 其上叠加水凝物总量零线 (红实线, 单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) 和 FY-2C Z_{top} (红虚线, 单位: km): (a) 沿 33.5°N 的剖面; (b) 沿 114°E 的剖面

Fig. 10 Vertical cross section of vorticity (color shading) and vertical velocity (black line, upward as positive, units: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) at 0600 LST 25 Sep, with zero-value of water content (red solid line, units: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) and FY-2C Z_{top} (red dashed line, units: km): (a) Cross section along 33.5°N ; (b) cross section along 114°E

大深厚的上升运动被输送到了高层。水汽被抬升发生凝结, 对应了前面分析的大值水凝物中心及降水区。

再来分析 25 日 06 时沿 114°E 的垂直剖面 (图 10b、11b、12b), 剖面上也叠加了模拟的水凝物总量零值线和云顶高度。此剖面穿过了豫北降水与云顶参数无甚相关的区域。

图 10b 中, $35^\circ\text{N} \sim 36^\circ\text{N}$, 虽然微弱的上升速度区延伸到了 200 hPa, 但低层至 600 hPa 均为负

涡度区, 即辐散; 卫星的云顶高度约 $6 \sim 7$ km, 模拟的云顶也在 450~400 hPa (约为 $6 \sim 7$ km); 但 $35^\circ\text{N} \sim 36^\circ\text{N}$ 的低层水汽比豫南少了很多 (图 11b), 35°N 偏北的 850 hPa 已经出现明显的“凹”型, 其比湿值仅为 $5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 而同等压面高度的豫南则达到了 $11 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以上; $35^\circ\text{N} \sim 36^\circ\text{N}$ 的水汽通量散度从地面至 900 hPa 既有弱辐合 (图 12b), 又有弱辐散, 而 900 hPa 之上的弱辐散区延伸到了对流层顶, 即水汽无法凝结。豫北的上

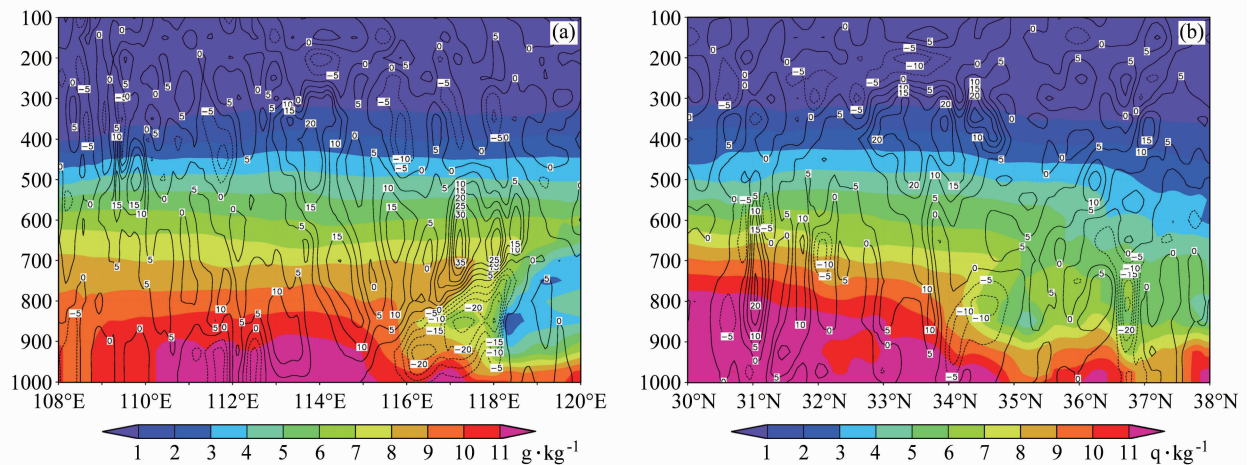


图 11 9 月 25 日 06 时比湿 q (填色) 与垂直速度 w (黑线, 向上为正, 单位: $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$) 垂直剖面: (a) 沿 33.5°N 的剖面; (b) 沿 114°E 的剖面

Fig. 11 Vertical cross section of specific humidity (color shading) and vertical velocity (black line, upward as positive, units: $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$) at 0600 LST 25 Sep: (a) Cross section along 33.5°N ; (b) cross section along 114°E

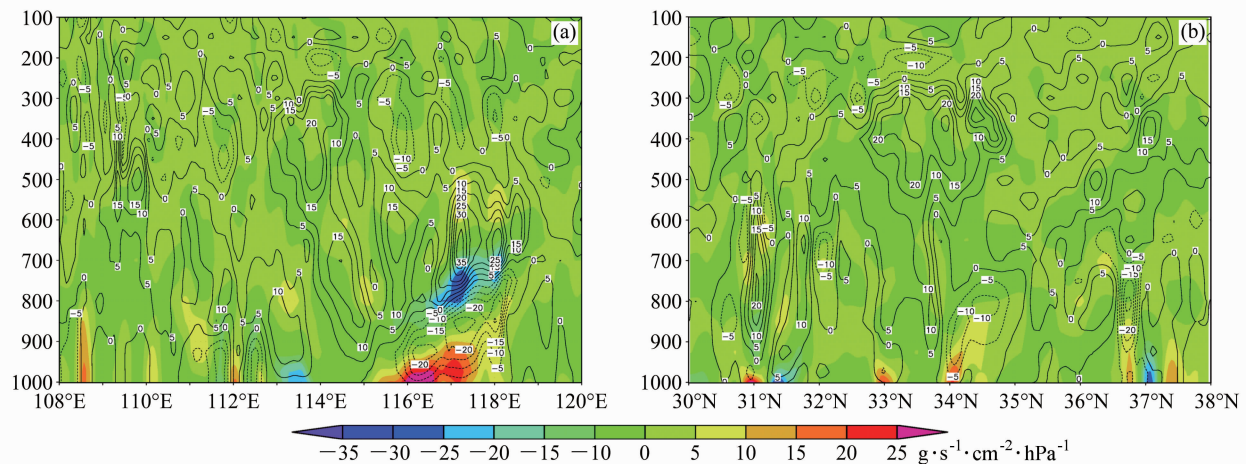


图 12 9 月 25 日 06 时水汽通量散度 (填色, 单位: $\text{g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1}$) 与垂直速度 w (黑线, 向上为正, 单位: $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$) 垂直剖面: (a) 沿 33.5°N ; (b) 沿 114°E

Fig. 12 Vertical cross section of vapor flux divergence (color shading, $\text{g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1}$) and vertical velocity (black line, upward as positive, $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$) at 0600 LST 25 Sep: (a) Cross section along 33.5°N ; (b) cross section along 114°E

升运动较弱, 向上输送的水汽较豫南少得多, 且从低层就开始辐散, 因此尽管卫星云顶高度也达到了 $6 \sim 7 \text{ km}$ 的大值, 但降水很小或无降水。

6 总结

本文利用 FY2C 静止卫星反演的云顶物理参数及地面加密雨量观测, 结合 MM5 中尺度非静力数值预报模式模拟, 综合分析了典型的层状云降水过程的云系演变和结构特征。通过这些分析

研究, 得到了如下结论:

(1) 通过对模拟的风场、涡度、水汽通量、水汽通量散度、垂直速度、水凝物总量等的分析, 结合卫星云顶参数, 我们发现降水大的区域基本满足这样的规律: 不同气流交汇, 造成在某处辐合抬升 (表现为低层辐合, 高层辐散, 垂直速度变大), 低层丰沛的水汽也随之向上输送, 产生凝结, 水凝物总量大, 对应的卫星云顶温度低、云顶高度大、有效粒子半径较大; 而降水小的区域则反之, 或是亦有较弱的上升运动, 但从低层就

开始辐散, 也无足够水汽补充, 不能凝结, 因此尽管云顶高度也能发展得比较高, 但降水很小或无降水。

(2) 降水大, 很可能云顶高度高、云顶温度低、有效粒子半径较大, 每小时降水量与云顶高度、有效粒子半径是较好的正相关, 与云顶温度是较好的负相关; 反之则不尽然, 云顶高度高、云顶温度低、有效粒子半径大却不一定降水大, 云顶参数与单站雨强之间并不是简单的量化统计关系。解释了造成这种现象的机理, 尝试为人工影响天气和降水预报提供一些云场特征量。而前人的工作多认为云顶温度低则预示地面降水大, 以云顶温度为指标来估测降水。本文的研究则拓宽了这样的认知领域。

(3) 本文的卫星结合模式分析的个例解释了一些现象的机理, 为利用卫星估测降水给出了新的思路, 但还未能给出具体的可作为预报指标的特征量, 这是今后努力的方向。比如, 某些地区云顶参数与降水并不相关, 是否能够给出一个比较具体的条件, 满足此条件的区域云顶参数与降水相关好, 不满足的区域则在预报时避开。还有, 将云顶参数与降水相关好的区域的云顶高度变化率作为预报的特征量, 例如是否达到某一比率即可指示下一、两个时刻就会出现大的降水中心? 这些设想都需要今后利用更多的观测资料进行更为深入的研究, 应该能得到很有价值的进展。

致谢: 感谢国家气象中心提供数据和河南省气象台苏爱芳高级工程师对本文中天气分析的帮助。

参考文献 (References)

- Barrett E C, Martin D W. 1981. The Use of Satellite Data in Rainfall Monitoring [M]. London: Academic Press, 331pp.
- Dudhia J, Gill D, Manning K, et al. 2005. PSU/NCAR Mesoscale Modeling System Tutorial Class Notes and User's Guide: MM5 Modeling System Version 3 [R]. 396pp.
- Ebert E E, Janowiak J E, Kidd C. 2007. Comparison of near-real-time precipitation estimates from satellite observations and numerical models [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 88 (1): 47-64.
- 方宗义. 2000. 风云二号静止气象卫星的作用和效益 [J]. 气象, 26 (9): 55-56. Fang Zongyi. 2000. Function and efficiency of FY-2 geostationary meteorological satellite [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 26 (9): 55-56.
- 洪延超, 周非非. 2006. 层状云系人工增雨潜力评估研究 [J]. 大气科学, 30 (5): 913-926. Hong Yanchao, Zhou Feifei. 2006. The study of evaluation of potential of artificial precipitation enhancement in stratiform cloud system [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 30 (5): 913-926.
- Kästner M, Torricella F, Davolio S. 2006. Intercomparison of satellite-based and model-based rainfall analyses [J]. Meteorological Applications, 13 (3): 213-223.
- 雷蕾, 朱伟军, 毕宝贵, 等. 2007. 河南一次强降水过程云和降水结构的中尺度数值模拟 [J]. 气象, 33 (4): 15-23. Lei Lei, Zhu Weijun, Bi Baogui, et al. 2007. Meso-scale numerical simulation of cloud and precipitation structure in a rainstorm in Henan province [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 33 (4): 15-23.
- 李宏宇, 王华, 洪延超. 2006. 锋面云系降水中的增雨潜力数值研究 [J]. 大气科学, 30 (2): 341-350. Li Hongyu, Wang Hua, Hong Yanchao. 2006. A numerical study of precipitation enhancement potential in frontal cloud system [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 30 (2): 341-350.
- 刘健, 张文建, 朱元竞, 等. 2007. 中尺度强暴雨云团云特征的多卫星资料综合分析 [J]. 应用气象学报, 18 (2): 158-164. Liu Jian, Zhang Wenjian, Zhu Yuanjing, et al. 2007. Case study on cloud properties of heavy rainfall based upon satellite data [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 18 (2): 158-164.
- 刘晓阳, Diallo T D, 毛节泰, 等. 2005. GMS-5 卫星估计中国西部地区月降水 [J]. 大气科学, 29 (4): 518-525. Liu Xiaoyang, Diallo T D, Mao Jietai, et al. 2005. Monthly precipitation estimation over western China using GMS satellite data [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 29 (4): 518-525.
- 卢乃锰, 吴蓉璋. 1997. 强对流降水云团的云图特征分析 [J]. 应用气象学报, 8 (3): 269-275. Lu Naimeng, Wu Rongzhang. 1997. Strong convective cloud characteristics derived from satellite cloud picture [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 8 (3): 269-275.
- 毛节泰, 郑国光. 2006. 对人工影响天气若干问题的探讨 [J]. 应用气象学报, 17 (5): 643-646. Mao Jietai, Zheng Guoguang. 2006. Discussions on weather modification issues [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 17 (5): 643-646.
- Ramanathan V, Crutzen P J, Kiehl J T, et al. 2001. Aerosols, climate, and the hydrological cycle [J]. Science, 294 (5549): 2119-2124.
- 盛裴轩, 毛节泰, 李建国, 等. 2003. 大气物理学 [M]. 北京: 北京大学出版社, 138pp. Sheng Peixuan, Mao Jietai, Li Jianguo, et al. 2003. Atmospheric Physics [M] (in Chinese). Beijing: Peking University Press, 138pp.
- 苏爱芳, 周毓荃, 吴蓁, 等. 2007. 一次典型降水层状云的结构特征和增雨潜势分析 [J]. 气象与环境科学, 30 (1): 58-65. Su Aifang, Zhou Yuquan, Wu Zhen, et al. 2007. Analysis on struc-

- tural feature and precipitation enhancement potentiality about precipitation of typical stratiform cloud [J]. Meteorological and Environmental Sciences (in Chinese), 30 (1): 58-65.
- 王立志, 李俊, 周凤仙. 1998. GMS-5 四通道云图的自动分类及其在定量降水估算中的应用 [J]. 大气科学, 22 (3): 371-378.
- Wang Lizhi, Li Jun, Zhou Fengxian. 1998. Cloud classification of GMS-5 data and its application in rainfall estimation [J]. Scientia Atmospherica Sinica (in Chinese), 22 (3): 371-378.
- Xie P P, Arkin P A. 1997. Global precipitation: a 17-year monthly analysis based on gauge observations, satellite estimates, and numerical model outputs [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 78 (11): 2539-2558.
- Xie P P, Janowiak J E, Arkin P A, et al. 2003. GPCP pentad precipitation analyses: an experimental dataset based on gauge observations and satellite estimates [J]. J. Climate, 16: 2197-2214.
- 许焕斌. 1995. 云系模式研究: 云场的宏微观结构模拟 [J]. 气象学报, 53 (3): 349-357. Xu Huanbin. 1995. A study of cloud-system model: Macro and micro structure simulation of cloud field [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 53 (3): 349-357.
- 翟菁, 周毓荃, 杜秉玉. 2007. 河南省层状降水云系中尺度结构的数值模拟 [J]. 南京气象学院学报, 30 (1): 34-42. Zhai Jing, Zhou Yuquan, Du Bingyu. 2007. Numerical simulation on the mesoscale structure and organization of a stratiform cloud system in Henan province [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 30 (1): 34-42.