

中 β 尺度系统造成的大暴雨过程 数值模拟与诊断分析

慕建利¹ 杜继稳² 梁生俊¹ 宁志谦¹

(1. 陕西省气象台, 西安 710015; 2. 陕西省气象局)

提 要: 利用 T106 资料和 MM5V3.5 中尺度非静力模式对 2002 年 6 月 8—9 日发生在陕西和四川东北部的一次突发大暴雨过程进行了数值模拟与诊断分析。模拟结果表明: 在有利的大尺度环流形势下, 中 α 尺度切变激发的中 β 尺度系统是本次暴雨的直接引导系统。进一步诊断分析揭示了中 β 尺度系统的动力场和热力场之间具有一种强耦合机制: 中 β 尺度系统是在低空急流带上发展起来的, 垂直上升运动与近饱和湿空气柱及涡散柱互耦, 低空对流不稳定层结的发展触发了强烈的垂直上升运动。模拟结果表明模式能很好地模拟中尺度对流系统的整个发展过程和降水雨带, 细网格模拟的降水量与实况比较接近, 分析结果可为中尺度暴雨预报提供参考依据。

关键词: 大暴雨 中 β 尺度系统 数值模拟 诊断分析

Numerical Simulation and Diagnostic Analysis of a Heavy Rainfall Caused by Mesoscale- β System

Mu Jianli¹ Du Jiwen² Liang Shengjun¹ Ning Zhiqian¹

(1. Shannxi Meteorological Observatory, Xi'an 710015; 2. Shannxi Meteorological Bureau)

Abstract: Using MM5V3.5 mesoscale non-hydrostatic model, torrential rain occurring in the Shannxi Province during 8 to 9 June, 2002 was simulated and analyzed. The main results are as follows: (1) Under the advantageous macroscale weather situation, the mesoscale- β system by developing along low-level-jet triggered by mesoscale-shear is the main influence system causing the heavy rainfall. (2) Furthermore, there are obvious dynamic-thermodynam-

ic structural features in the developing phase of the mesoscale- β system. That is, strong divergence column and intensive vorticity column are coupling developed, the intensive ascendant motion is intercoupled with saturated air column, there is a lot of accumulation of instable energy during the development of ascendant motion. MM5 model has the better performance to simulate the mesoscale systems and the torrential rainfall. So these conclusions will be helpful and provide references for the forecast of mesoscale storm rainfall.

Key Words: heavy rainfall mesoscale- β system numerical simulation diagnostic analyses

引 言

由于观测资料时空分辨率的局限性,使暴雨研究主要集中在大尺度环流和中 α 尺度天气系统^[1-4]。近年来开始对中 β 尺度系统进行研究,程麟生等^[5]在研究沿低涡切变线上的中 β 尺度对流系统时指出,强烈上升运动与饱和气柱互耦。王智等^[6]对长江中下游一次中 β 尺度低涡研究中提出,东移的中 α 尺度低涡的东南部边界层激发出一个中 β 尺度的涡旋与强暴雨区相伴移动。张玉玲^[7]曾对 MCC 的中 β 尺度特征作了详细研究。2002 年 6 月 8—9 日(以下简称“6.8”),西南低涡前低空急流带上产生的中 α 尺度切变激发了中 β 尺度系统的发展,使陕西及四川东北部出现了一次历时短、强度大、面积广的突发性大暴雨天气过程,造成陕西 44 个县(市)暴雨,其中,陕南 4 个县站达大暴雨,佛坪最大降水量达 206.5mm,导致了严重山洪并诱发滑坡和泥石流灾害。为了揭示这次暴雨形成的物理机制,利用 MM5V3.5 中尺度非静力模式模拟分析了暴雨过程中中 β 尺度系统发展的动力和热力结构的相互作用及其配置。

1 大尺度环流特征及影响系统

“6.8”大暴雨发生在大尺度环流形势从纬向环流向经向环流调整的过程中。500hPa 图上,暴雨发生前,欧亚大陆整个

中纬度为平直西风气流,60°N 以北为低值区,暴雨发生时,中高纬度环流形势调整为稳定的两脊一槽,两脊分别位于乌拉尔山和我国东北至华北一带,巴尔喀什湖至贝加尔湖为一低槽区,高原东部到河套为西南暖湿气流。这种环流形势有利于低值区分裂小槽东南移,引导冷空气南下,与低空急流输送的暖湿气流交汇。700hPa 图上,8 日 08 时,在 38~41°N、103~106°E 有一中尺度低压环流,四川西南部有西南涡缓慢东北移,涡前有一支东西宽约 2 个经度,平均风速 $13\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的强西南急流,30~40°N、105°E 有 NNE—SSW 向的切变线,该切变线 20 时分裂为南北两段,形成西北与西南风及东北与西南风的中 α 尺度切变线,雨区主要发生在中 α 尺度切变线右侧的西南急流的左前方。850hPa 图上,8 日 08 时,成都、重庆、汉中一带形成中 α 尺度低涡,涡前南风将南海暖湿气流经云贵高原向北输送,在高原东部与华北冷高压底部偏东气流和来自高原西北路冷空气交汇。地面形势为典型的鞍型场结构,高原东侧处于两高之间的地面倒槽中,西部冷锋进入鞍型场后加强,移速减缓,与华北高压底部回流冷空气相遇形成锢囚锋。

2 模拟方案设计与数值模拟

2.1 模拟方案设计

采用双向三重嵌套网格,取大暴雨中心

佛坪为模拟区域中心, 三重区域水平格点数分别为 95×120 (下称区域 1)、 91×91 (下称区域 2)、 82×91 (下称区域 3), 相应的水平格距分别为 45km、15km、5km。利用国家气象中心全球模式 $1.125^\circ \times 1.125^\circ$ 的 T106 分析场资料, 用 16 点复合相关双抛物线拟合法插值到模式的正方形网格点上, 构成初估场, 每隔 6h 输入一次新的侧边界值。模式的初始时间为 2002 年 6 月 8 日 08 时 (北京时, 下同), 积分 36 小时。模式物理过程采用了非静力平衡方案, 模式层顶利用上层辐射条件, 侧边界条件利用时变流入流出方案, 地表温度方案使用 5 层土壤模式, 区域 1、2、3 大气辐射方案均考虑云辐射, 行星边界层方案为 MRF 方案, 显式湿物理过程区域 1、2 为简冰方案, 区域 3 为混合相方案, 积云参数化方案区域 1、2 分别用

Grell、Kain-Fritsch, 区域 3 不采用参数化方案。

2.2 降水模拟与实况对比分析

实况降水 (图 1a) 有两条雨带, 呈东北—西南走向。一条位于陕北, 有 2 个暴雨中心, 雨量分别为陕北长城沿线 110mm, 延安 94.6mm; 另一条雨带位于秦巴山区, 有 3 个暴雨中心, 最大降水量分别为宁强 145.9mm, 佛坪 206.5mm, 柞水 100.6mm。区域 1、2 模拟雨带走向与实况基本一致, 但区域 1 (图 1b) 降水量明显偏小。区域 2 模拟出陕西境内 6 个暴雨中心 (图 1c), 佛坪暴雨区与实况吻合, 陕北和柞水降水中心较实况偏东偏南 20~50km, 宁强暴雨中心偏东偏南约 20~100km; 降水量陕北北部偏大, 陕北南部吻合, 陕南均偏小。区域 3

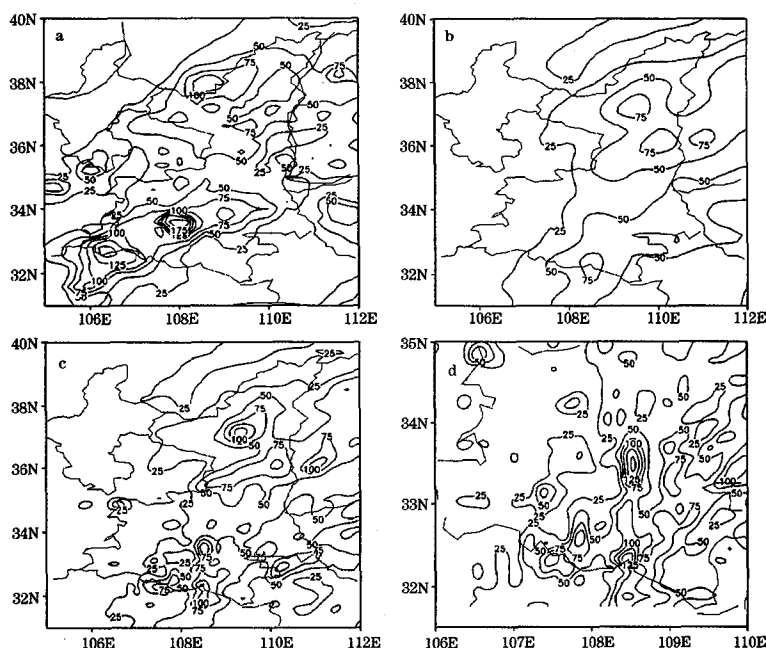


图 1 2002 年 6 月 8 日 08 时—9 日 14 时累计降水量图 (单位: mm)

a. 实况; b. 区域 1; c. 区域 2; d. 区域 3

(图 1d) 分辨率较高, 模拟范围小, 从图中清楚地看到降水不均匀分布结构, 有 3 个降水中心大于 100mm, 一个位于宁强东南侧 20~60km 处, 降水量为 120mm, 一个在佛坪, 雨量达 155mm, 另一个位于柞水东南侧 10km 处, 雨量为 110mm。另外模拟结果中在 32.3°N、108.5°E 附近有一大暴雨中心, 而实况降水由于缺乏观测资料未能分析出此暴雨中心。从时间演变来看, 模拟结果 8 日 11 时降水开始, 8 日 19 时降水突然增大, 21—24 时达鼎盛时期, 9 日 01 时后降水快速减弱, 可见强降水的开始提前实况 2h, 降水最强时期比实况降水强盛期约早 3h。

2.3 不同天气尺度系统模拟分析

模式对这次大暴雨发生的背景场和天气尺度系统的模拟比较成功, 模拟 500hPa 温压场(图略)基本上再现了真实的温压场。700hPa 位势场和风场实况和区域 1 模拟结果比较(图略)发现, 110°E 以东均为高脊, 蒙古有一低涡, 四川北部有一低涡, 兰州至陕西东部为一低压。风场上在 110°E 附

近存在一支约 $16\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的偏南风, 形成了偏南急流。可见, 模式对大尺度背景场和天气尺度系统有较强的模拟能力。下面用区域 2 模拟流场来探讨中 β 尺度低涡的形成和发展过程。

分析模拟结果发现, 这次暴雨过程包含着变化多样的时间和空间中 β 尺度结构。积分 3h (8 日 11 时, 图略), 对流层低层在 105.5°E、37°N 和 30°N 附近有西北涡和西南涡生成, 系统比较浅薄 (800hPa 以下), 几小时后减弱, 但在这期间一直有生命史较短的中 β 尺度对流系统在西南涡前的西南低空急流带上生消。8 日 18 时(图略), 有一中 β 尺度低涡在 30°N、104.7°E 附近开始发展, 此涡已伸展到 750hPa, 而后东北上, 其东侧的西南急流也迅速发展加强, 22 时(图 2a) 偏北气流与偏东南气流在 35°N 附近形成一东西向横切变线; 9 日 01 时(图 2b) 发展为中 β 尺度低涡, 南北两低涡东移至陕西境内, 低涡前西南急流发展达到最强时期, 在暴雨区上空形成很强的辐合, 随着低涡减弱消失, 涡后的西北气流完全控制陕西, 陕西境内降水彻底结束。

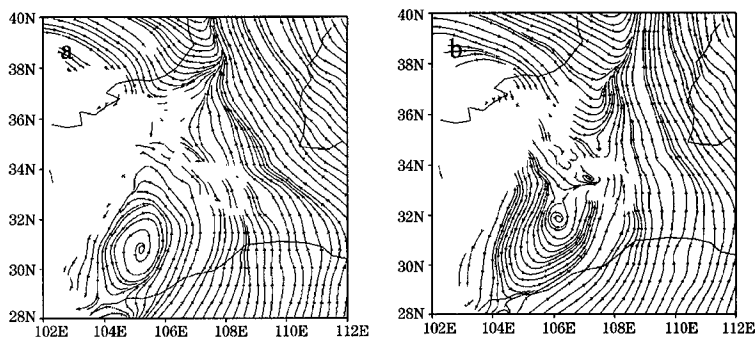


图 2 2002 年 6 月 8 日 22 时 (a) 和 9 日 01 时 (b) 模拟 800hPa 流场图

通过以上分析, 可以认为模式能够成功地模拟各种天气尺度系统和降水。因此可以

利用模拟结果来探讨暴雨形成的物理机制(以下用区域 2 模拟结果)。

3 物理量诊断分析

3.1 强上升运动和水汽条件的耦合发展

垂直速度剖面图上, 8日15时, 垂直上升运动较弱, 19时突然增强, 21时(图3a)发展到最强盛时期, 强上升速度达 $1.5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, 强速度核位于500hPa。与此对应的相对湿度剖面图上(图略)是接近饱和的湿空气柱, 8日14时, 500hPa以下相对湿度达90%, 8日21时, 450hPa以下接近饱和(达99%), 92%的相对湿度等值线高达350hPa。从700hPa水汽通量矢量图(图略)可见, 西南急流、南风 and 台风外围的东风将孟加拉湾、南海和东海水汽源源不断地

输送到高原东部, 使整个暴雨期有充沛的水汽供应。水汽通量散度垂直剖面图上, 与强上升速度相对应的是中低层为强水汽辐合, 8日15时, 低层出现水汽辐合, 8日19时, 低层水汽辐合加强, 水汽辐合上升至600hPa, 以上为辐散层, 8日21时, 水汽辐合达最大, 800hPa附近辐合最强达 $-60\times 10^{-5}\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$, 辐散中心在400hPa为 $10\times 10^{-5}\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ (图3b)。此后随着垂直上升速度的减小而减小。

由以上分析可见, 强上升运动和水汽垂直输送与凝结耦合发展, 垂直上升运动促使空气块上升冷却凝结, 形成近饱和湿空气柱, 产生暴雨, 凝结潜热释放后, 相对湿度和水汽辐合逐渐减小, 暴雨也随之结束。

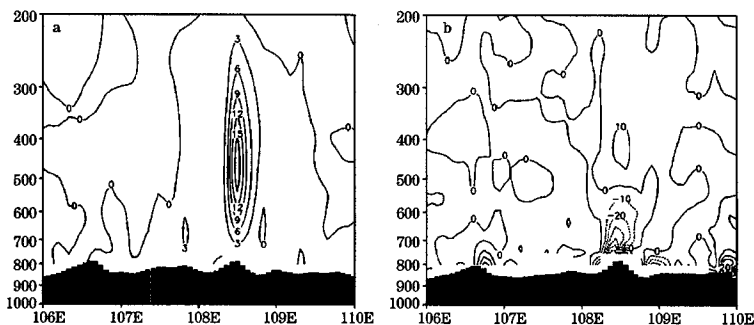


图3 2002年6月8日21时过佛坪纬向垂直剖面图

a. 垂直速度 ($0.1\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$); b. 水汽通量散度 ($\times 10^{-5}\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$)

3.2 上升运动与位势不稳定的耦合发展

分析相当位温场 θ_e 垂直剖面发现, 强降水发生前已经集聚了大量的不稳定能量, θ_e 场形成了典型的“鞍型”场结构。8日10时, 600hPa以下为位势不稳定层($\partial\theta_e/\partial p > 0$), 在佛坪上空形成倒“V”型, 600~450hPa为中性层($\partial\theta_e/\partial p \approx 0$),

500hPa以上大气是对流稳定的($\partial\theta_e/\partial p < 0$)。8日14时不稳定层结向高层扩展到520hPa, 倒“V”型加深, 中性层被倒“V”型不稳定层分为两块, 稳定层略向高层收缩至450hPa(图4a), 20时, 750hPa以下和500hPa以上转为稳定层结, 中间为中性层结(图4b), 这种结构一直维持到23时。

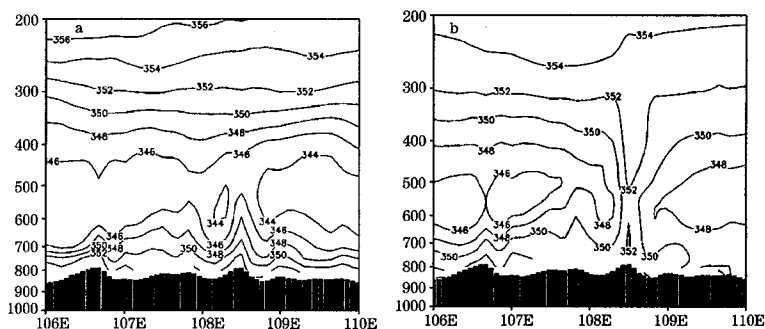


图4 2002年6月8日14时(a)和20时(b)过佛坪纬向相当位温垂直剖面图(单位: K)

可见,在暴雨发生前,暴雨区上空存在深厚的位势不稳定层结,上升运动的发展,使携带大量不稳定能量的空气块抬升,使得位势不稳定层结向高空伸展,几乎在整层大气中积累了大量的位势不稳定能量,在暴雨区上空形成倒“V”型结构,不稳定能量的释放,促使上升运动进一步发展加强,使得暖湿空气块进一步抬升,释放出大量的潜热,改变大气不稳定结构,此时降水达到鼎盛时期,随着大降水的出现,这种能量场结构被破坏,强降水结束。

3.3 涡散场及其相互耦合发展

散度垂直剖面图上,8日14时,700hPa以下形成了低层辐合,19时突然增

强,辐合层伸展到550hPa,21时达到最强(图5a),形成了强辐合辐散柱,最大辐合中心在700hPa为 $-40 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$,辐散中心强度位于400hPa为 $40 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 。这种高层辐散、低层辐合的配置有利于垂直上升运动的强烈发展。从涡度垂直演变来看,暴雨区上空,8日18时,低层出现正涡度,8日19时,正涡度发展至350hPa,23时,整层发展为正涡度柱,24时达最强(图5b),正涡度中心移至佛坪,位于500hPa,为 $30 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$,在其东侧50km附近有一 $10 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 涡度中心,其西侧为弱的正涡度,在气旋性涡柱东侧形成了反环流,这不同于高层为反气旋性环流、低层为气旋性环流的配置结构。

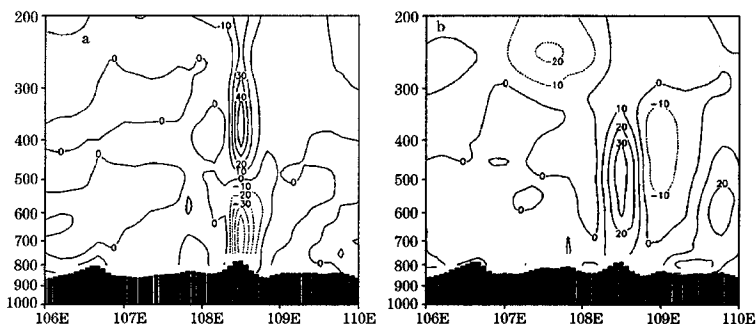


图5 2002年6月8日过佛坪东西向涡散场垂直剖面图(单位: $\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$)

a. 21时散度; b. 24时涡度

以上分析可说明,散度场和涡度场是相互反馈的,局地低空辐合和高空辐散,在动力机制约束下,必然导致低层正涡度环流的产生和维持,局地正涡度的发展也必然引起低层辐合和高层辐散的加强,从而有利于上升运动的加强。这种耦合发展结构是强垂直上升运动和大暴雨产生的动力机制。

4 讨论与结论

通过以上分析可见,8日10时,暴雨区上空大气低层已经积累了一定的水汽,低层形成位势不稳定层结,但水汽能否聚集和不安定能量能否得以释放,必须要有动力条件相耦合,8日14时,暴雨区上空700hPa以下出现辐合,高层出现辐散,这种低层辐合高层辐散使上升运动发展;垂直上升运动发展使高低层辐散、辐合加强,并携带暖湿空气整层抬升,导致了暴雨区等比湿线上凸,形成狭窄的、近饱和的湿空气柱,中低层等相当位温线呈倒“V”型;位势不稳定进一步增强,使低层气旋性涡度和高层反气旋性涡度发展,从而使对流层中低层辐合更强、高层辐散加强,这种低层强辐合高层强辐散使得垂直上升运动强烈发展,在其作用下,整层空气中聚集的大量能量得以释放,从根本上改变了能量场结构,涡度也发展到最强时期,此时雨强达到最大。

概括以上分析结果,可得出以下结论:

(1) MM5V3.5中尺度非静力模式能够很好地模拟中尺度系统的整个发展过程,细网格对降水的模拟接近实况。

(2) 通过模拟分析,揭示了暴雨过程中 α 尺度系统和中 β 尺度系统的一些特征。

(3) 低层南风急流为本次暴雨源源不断地输送暖湿气流和位势不稳定能量。

(4) 涡散场及垂直上升运动相互耦合发展是这次暴雨发生发展和维持的动力机制。

(5) 相当位温具有“鞍型场”的典型特征。

参考文献

- 1 姜学恭,孙永刚,沈建国.一次东北冷涡暴雨过程的数值模拟试验[J].气象,2001,27(1):25-30.
- 2 李天富.MM5对南海一次特大暴雨过程的模拟[J].气象,2003,29(1):3-6.
- 3 赵玉春,王叶红.“7·22”长江中游暴雨中尺度系统的数值模拟与分析[J].气象,2005,31(1):13-18.
- 4 王建捷,李泽椿.1998年一次梅雨锋暴雨中尺度对流系统的模拟与诊断分析[J].气象学报,2002,60(2):147-155.
- 5 程麟生,冯伍虎.“98·7”突发大暴雨及中尺度低涡结构的分析和数值模拟[J].大气科学,2001,25(4):465-478.
- 6 王智,翟国庆,高坤.长江中下游一次中 β 尺度低涡的数值模拟[J].气象学报,2003,61(1):66-77.
- 7 张玉玲.中尺度大气动力学引论[M].北京:气象出版社,1999:188-205.