

# 一次诱发山地灾害突发性暴雨 数值模拟及诊断分析<sup>①</sup>

慕建利<sup>1,2</sup> 杜继稳<sup>2</sup> 张 弘<sup>2</sup> 侯建忠<sup>2</sup> 赵奎锋<sup>2</sup>

(1. 南京信息工程大学大气科学系, 210044; 2. 陕西省气象局)

## 提 要

应用 MM5V3.5 中尺度非静力数值模式对 2003 年 7 月 14~15 日发生在陕西省一次区域性暴雨过程进行数值模拟和诊断分析, 结果发现, 西太平洋副热带高压西侧的暖湿气流和新疆冷空气是这次暴雨的主要影响系统, 充沛的水汽输送、能量的积聚和强烈的上升运动为暴雨的发生提供了充分的条件, 700hPa 低涡、切变线是暴雨形成的触发机制。模拟结果表明: 涡度场和散度场及垂直上升运动互耦; 特强辐合辐散柱的出现早于强涡度柱, 而深厚的强气旋性涡柱则几乎与暴雨最强盛时期同时出现。

**关键词:** 山地灾害 突发性暴雨 数值模拟 诊断分析

## 引 言

陕西省山区和丘陵沟壑区面积占全省总面积的 4/5 以上, 加之河流众多, 地貌类型复杂, 降雨时空分布不均, 所以, 山洪、泥石流、滑坡灾害一直比较严重, 尤其是秦巴山区山地自然灾害的活动十分频繁, 是我国著名的山地自然灾害多发区和重灾区。诱发山地灾害的因子有许多, 相对于其它条件, 降水对山地灾害的形成有着至关重要的影响。有关分析表明: 历史上这一地区的山地灾害几乎均是由暴雨、大暴雨、连阴雨等强降水天气引发的。所以, 防御洪涝灾害, 能否准确预报暴雨至关重要。

近年来, 数值模拟及诊断分析在天气分析中得到广泛应用<sup>[1~4]</sup>。就陕西暴雨来讲, 从 20 世纪 70 年代后期开始已经作了大量的研究<sup>[5]</sup>, 近年来, 采用中尺度数值分析研究已有不少<sup>[6]</sup>, 但使用非静力中尺度数值模式对暴雨的数值模拟研究较少。以下采用 MM5V3.5 非静力数值模式, 对 2003 年 7 月

诱发陕西山地灾害的一次突发性暴雨进行数值模拟和诊断分析, 试图揭示此类暴雨的成因和物理机制。

## 1 雨情及灾情

2003 年 7 月 14~15 日陕西省出现了一次突发性暴雨过程, 暴雨范围主要位于陕西南部、关中西北部和陕南西部, 暴雨时段主要集中在 14 日晚间到 15 日白天, 14 日 20 时~15 日 20 时全省出现了 14 站暴雨, 陕南宁强出现大暴雨, 强度达 184.6mm。这次降水强度大、历时短、突发性强, 特别是宁强的大暴雨诱发了严重的山地灾害, 使 21 个乡镇 184 个村的 17.52 万人不同程度地受灾, 冲毁农田 30.1hm<sup>2</sup>, 多处山体滑坡, 高速公路及 108 国道多处塌方, 造成了重大经济损失。

## 2 环流形势及影响系统

这次暴雨主要受西太平洋副热带高压和新疆冷空气影响, 新疆附近的冷空气东南移与副高西侧的西南暖湿气流交汇, 激发该区域内中、小尺度对流系统的异常活跃而引起

<sup>①</sup> 本文由科技部“陕西省干旱遥感监测与突发性暴雨监测预警系统研究”(2001DIB20095)项目资助

的一次突发性暴雨。

东亚中纬度地区,暴雨发生前及发生期间大环流形势基本稳定少动,40°N以北,在500hPa图上维持两槽一脊型,乌拉尔山东部为一低槽,贝加尔湖至蒙古为一高脊,我国东北到日本为一低槽区;35~45°N,巴尔喀什湖东南部至新疆有一冷槽;西太平洋副热带高压脊线稳定在27°N附近,西脊点在105°E左右,陕西省处于西太平洋副热带高压外圈的西南暖湿气流之中。但是,在30~40°N,暴雨发生前和发生期间环流形势是不同的。暴雨发生前12~24h,500hPa和700hPa高空图上,高原东侧到陕西省属于高脊控制之中,临近暴雨时的14日20时,形势突然发生变化,500hPa图上有高原槽发展东移,700hPa高空图上,高原东部形成一个强大的暖涡,随着新疆冷空气的南下和副高的加强,15日08时,低涡东移至兰州到陕西西南部,河套中部有一横切变线,在河套到四川形成一个“人字”型切变,切变东南侧的南风急流向陕西省输送暖湿气流,为暴雨的产生提供了充足的水汽条件。地面形势为鞍型场分布,陕西省处于鞍型场的辐合区内。

### 3 数值模拟设计及降水分析

#### 3.1 数值模拟方案设计

在这次暴雨数值模拟中,采用全物理过程模拟方案,水平方向用双向套网格系统,模式以西安为中心(35°N、108°E),粗网格区域

格距为45km,格点数为66×76;细网格区域格距为15km,格点数为79×79;垂直方向为 $\sigma$ 坐标,模拟中 $\sigma$ 为不等距的23层。模拟分析以7月14日20时作为初始场,积分时间24h,积分步长120s。初始场和侧边界用国家气象中心全球模式T213的分析场资料,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。地形资料按2层网格距大小,分别为30'、10'的实际地形资料。侧边界用时变出入流方案,张弛逼近方法将模式预报场向由间隔6h客观分析的大尺度场逼近。地面物理过程包括有非均一地表的热通量和动量;地面温度由浅层模式和有云效应的能量收支预报获得;积云参数化:粗网格采用Grell方案,细网格采用Kain-Fritsch方案;显式水汽方案:粗网格采用Simple-Ice,细网格采用Mixed-Phase。

#### 3.2 降水模拟结果与实况对比分析

图1为2003年7月14日20时~15日20时实况和模拟降水量图。比较分析发现,对于暴雨的落区而言,除关中西部偏南约0.5个纬度外,其余两个暴雨区与实况吻合;降水量级:粗网格模拟出陕北南部50mm,陕南西部70mm的降水中心,细网格模拟出陕北70mm,陕南2个150mm的降水中心;从暴雨出现的时间来看,粗网格晚于实况约5

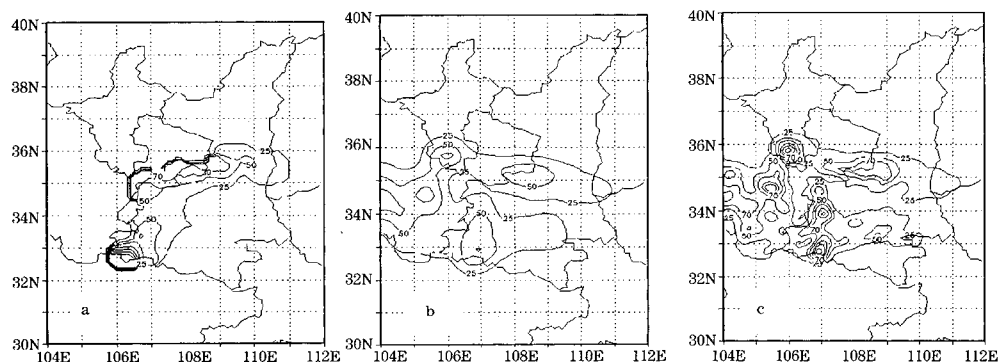


图1 2003年7月14日20时~15日20时降水量(单位:mm)

(a)实况;(b)粗网格模拟结果;(c)细网格模拟结果

~7h,细网格早于实况约2~3h。由此可见,模式对这次暴雨模拟效果较好,且细网格模拟结果更接近实况。

#### 4 物理量模拟结果分析

##### 4.1 水汽条件分析

分析逐时沿陕南暴雨中心的比湿垂直结构图(图略)可知,15日02时,即暴雨发生前等比湿线是平缓的,且 $12\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 等比湿线在700hPa以下,15日03时开始,等比湿线在暴雨区上空逐渐向高层伸展,15日04时达最强, $12\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 等比湿线已伸展到600hPa,而 $4\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 等比湿线高达350hPa高度层,15日10时,等比湿线又转为平缓, $12\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 等比湿线下降到750hPa。由此可见,在临近暴雨发生时,从低层到400hPa,有一个明显的高湿区和暴雨区相对应,且从暴雨发生前到发生时比湿逐渐增强,低层湿度大于高层,这说明暴雨发生时具备了充足的水汽条件。从相对湿度的垂直分布来看,15日01时,700hPa以下,在 $106.5\sim 108^\circ\text{E}$ 为一宽广的96%相对湿度线,15日03时,98%线在 $107.2^\circ\text{E}$ 附近突然转为狭窄的柱状结构,且向高空伸展,15日04时,相对湿度达最大,98%线已伸展到300hPa(图2a),05时

后,这种狭窄的湿空气柱减弱,湿层逐渐下降,15日10时,96%相对湿度线下降到650hPa,15日11时,湿空气柱完全消失。这说明暴雨临近时,中低层空气接近饱和,随后逐渐向高层伸展,到暴雨强盛期间形成了低层饱和,中高层接近饱和的湿空气柱,随着大降水的减弱结束,湿空气柱也随之消失。分析700hPa水汽通量散度发现,水汽辐合中心与降水区基本吻合,且出现的时间与降水发生时间也基本一致。从过宁强大暴雨中心水汽通量散度的垂直剖面图可见,15日03时,650hPa以下为水汽辐合层,以上为弱水汽辐散层,但辐合中心强度是辐散中心的4倍,15日04时水汽的辐合剧增达最强,辐合层上升到450hPa,最大辐合中心在700~850hPa,强度达 $-100\times 10^{-7}\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ ,450hPa以上为弱辐散(图2b)。此后,随着垂直上升速度的减小而减小,15日11时,整层转为水汽辐散层。这说明了暴雨临近时,水汽迅速聚集,在暴雨发生时,450hPa以下有大量的水汽在中尺度范围内有效集中,随着强降水的减弱,水汽聚集减少,随后逐渐消失。

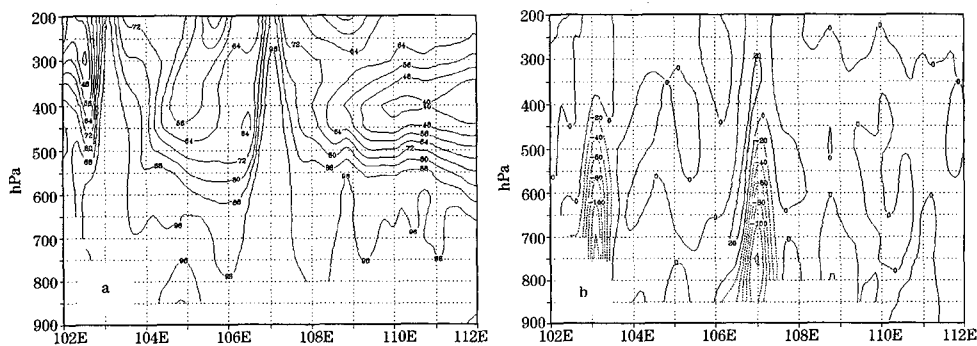


图2 2003年7月15日04时过宁强细网格垂直剖面图  
(a)相对湿度(%);(b)水汽通量散度( $\times 10^{-7}\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ )

##### 4.2 动力条件分析

从垂直速度剖面图可以看到,15日03时,垂直上升运动很弱,15日04时,垂直上升运动突然强烈发展为整层上升运动,强上升速度核位于500~300hPa之间,强度达

$4.8\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ (图3a),15日06时垂直上升运动开始逐渐减弱。说明暴雨发生时具有强烈的上升运动,与图2b结合起来分析可以看出,强烈的上升运动携带大量的水汽迅速上升凝结,形成大降水。

通过散度场的垂直结构分析发现,15日03时,600hPa以下各层形成了低层辐合,350hPa以上为辐散层,但辐合辐散中心强度较小,15日04时,强辐合层突然伸展至450hPa,最大辐合中心强度为 $-80 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ,位于750~600hPa,450hPa以上为辐散层,辐散中心在250hPa附近为 $120 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ,这时形成了特强辐合辐散柱(图3b)。根据大气补偿原理,正是这种低层强辐合,高层强辐散使垂直上升运动强烈发展。15日05时后,这种低层辐合和高层辐散逐渐减

弱。

从涡度垂直剖面图可见,15日03时,350hPa以下为负涡度,中高层为正涡度,15日04时,突然发展为整层正涡度,且强度也很大,15日05时已发展为强大的正涡度柱(图3c),中心强度高达 $72 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ,位于500hPa附近,形成了特强正涡度柱。15日09时,500hPa以下突然转为负涡度。显然,这种涡度场的垂直分布同一般暴雨的分析结论是不同的,这也说明突发性暴雨具有特殊性。

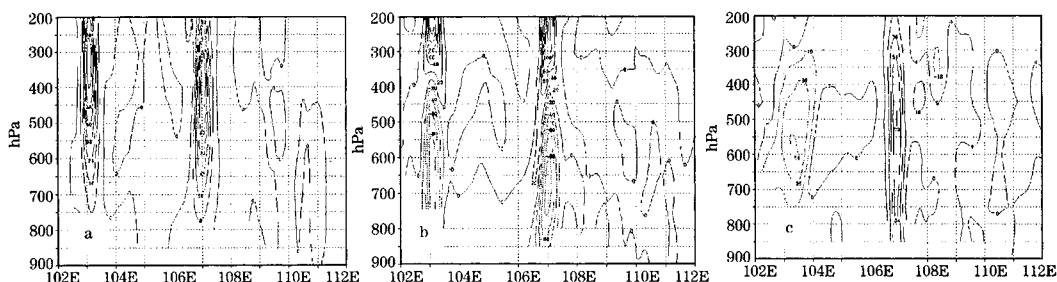


图3 2003年7月15日过宁强次网格垂直剖面图

(a)04时垂直速度(单位: $0.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ );(b)04时散度(单位: $\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ );(c)05时涡度(单位: $\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ )

### 4.3 能量场分析

强对流一般发生在强烈的位势不稳定区。相当位温是温度场和湿度场的热力综合场,为了揭示本次暴雨过程的热力结构和强垂直上升运动的耦合作用,我们分析相当位温 $\theta_e$ 的垂直结构并和垂直上升速度作对比分析。

15日01时,在104~109°E的宽广范围内,600hPa以下为位势不稳定层,450hPa以

上为位势稳定层。15日03时(图4a),在暴雨区附近,等 $\theta_e$ 线呈倒“V”型,500hPa以下为位势不稳定层,即 $\partial\theta_e/\partial p > 0$ ,350hPa以上是稳定层,即 $\partial\theta_e/\partial p < 0$ ,500~350hPa为中性层,即 $\partial\theta_e/\partial p \approx 0$ 。这种低层不稳定,高层稳定的能量场结构对垂直上升运动及暴雨的发生发展是有利的。事实上,倒“V”字的中心区恰恰对应图3a的强上升运动区。到了暴雨发生时刻的15日05时(图4b),能量场

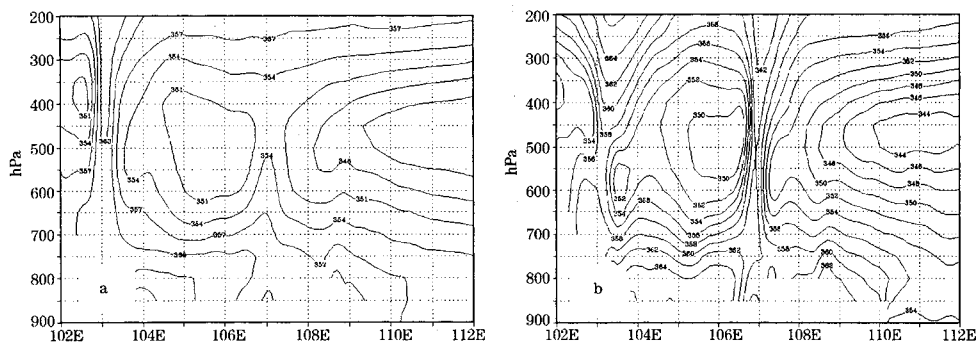


图4 2003年7月15日过宁强次网格相当位温垂直剖面图(单位:K)

(a)03时;(b)05时

发生了较大的变化,在原倒“V”型区里,已经聚集了大量的能量,且850hPa以下为不稳定层,300~850hPa是中性层,300hPa以上为稳定层。15日10时,在700hPa以下又转为宽广的不稳定层。

仔细分析图4a,在105°E以东,500hPa以下均为位势不稳定的,只是相对倒“V”型区域,在伸展高度和强度上有所不同,这种能量场结构均有利于产生暴雨,但能否产生暴雨,还要看是否有强烈的垂直上升运动与其耦合。比较图4a与图3a可以看出,正是强烈的位势不稳定同强烈的垂直上升运动的互耦作用造成了107.5°E附近的强降水,随着降水的产生,即能量的释放破坏了中低层位势不稳定的能量场的结构,形成了图4b的分布特征。同样,正是这种互耦作用,造成了图2a的整层湿空气柱效应。

## 5 小结

(1)这次突发性暴雨主要是受西太平洋副热带高压西侧的西南暖湿气流与新疆附近的冷空气东南移的共同影响,700hPa的低涡、切变是造成暴雨的触发机制。

(2)暴雨发生时,有一个高湿区与暴雨区

相对应,伴有很强水汽输送和水汽辐合,为暴雨的发生提供了充沛的水汽条件。

(3)低层强辐合、高层强辐散促进了暴雨区垂直运动的发展和维持,强烈的垂直上升运动同强烈的位势不稳定耦合,造成了突发性暴雨的发生和发展,诱发了严重的山地灾害。

(4)特强散度柱出现早于强涡度柱,而深厚的强气旋性涡柱则几乎与暴雨最强盛时期同时出现,这不同于一般暴雨特征。

## 参考文献

- 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.气象,27(1):25~30.
- 李天富.MM5对南海一次特大暴雨过程的模拟.气象,2003,29(1):3~6.
- 寿绍文,王祖锋.1991年7月上旬贵州地区暴雨过程物理机制的诊断研究.气象科学,1998,18(3):231~238.
- 王劲松,李耀辉,康风琴等.西北区东部一次暴雨的数值模拟试验.高原气象,2002,21(3):258~266.
- 侯建中,王川,杜继稳.陕西致洪性大暴雨特征分析及应对措施.陕西气象,2003,(3):10~13.
- 杜继稳,梁生俊.偏南气流翻越秦岭山脉的数值模拟试验.西北大学学报,1997,27(2):141~145.

# Numerical Simulation and Diagnostic Analysis of Abrupt Heavy Rain Event Inducing Mountainous Disaster

Mu Jianli<sup>1,2</sup> Du Jiwen<sup>2</sup> Zhang Hong<sup>2</sup> Hou Jianzhong<sup>2</sup> Zhao Kuifeng<sup>2</sup>

(1. Nanjing University of Information Science & Technology, 210044;

2. Shaanxi Meteorological Bureau)

## Abstract

A heavy rain event on 15 July 2003 in Shaanxi is simulated and diagnosed with MM5 nonhydrostatic model. It shows that there were obvious dynamic-thermodynamic structural features in the developmental phase and mature phase of the heavy rainfall; the strong divergence column and the intensive vorticity column were coupling developed, the extremely intensive ascent motion was intercoupled with saturated air column.

**Key Words:** disaster abrupt heavy rain numerical simulation diagnostic analysis