

文章编号: 1006-4354 (2013) 01-0001-04

# 一次高空槽降水过程的数值模拟分析

朱 刚<sup>1</sup>, 沈新勇<sup>1</sup>, 高守亭<sup>2</sup>

(1. 南京信息工程大学气象灾害省部共建教育部重点实验室, 南京 210044;

2. 中国科学院大气物理研究所云降水物理与强风暴实验室 (LACS), 北京 100029)

**摘 要:** 2009年8月18日夜间到19日凌晨, 陕西及山西发生了一次暴雨过程, 对这次暴雨过程的环流形势进行了分析, 结果表明: 这次暴雨过程对应有高空浅槽和低空涡旋, 低空环流基本为经向型, 暴雨过程发生在低空涡旋附近。利用 WRF 中尺度非静力模式对这次暴雨过程进行了模拟。通过模式输出的高分辨率资料进行了广义位温及动力学涡度矢量 ( $\mathbf{V}_{DV}$ ) 的诊断分析。主要结果有: 山西附近暴雨对应有明显的中尺度涡旋和中尺度强风速中心, 模拟的 3 km 高度三个方向的  $\mathbf{V}_{DV}$  分量中,  $x$  和  $z$  方向分量的负值区与降水区域对应, 而  $y$  方向分量的正值区与降水区域对应。 $z$  方向分量虽然量级较大, 但用来对暴雨落区的诊断并不十分完美。 $\mathbf{V}_{DV}$  水平方向两个分量均为垂直涡度与水平速度相乘的分量起主要作用。

**关键词:** 高空槽; 中尺度涡旋; 动力学涡度矢量

**中图分类号:** P456.7

**文献标识码:** A

山陕地区位于我国北部及西北部, 地形较为复杂, 东部有太行山, 地形为南部低北部高, 呈阶梯状抬升。降水季节分布很不均匀, 夏季 6 月至 8 月降水高度集中且多暴雨, 降水量约占全年的 60% 以上。近些年来国内气象工作者对这一地区高空槽及低涡暴雨有很多研究。崔粉娥等<sup>[1]</sup> 分析了一次山西地区的低涡暴雨, 结果表明这次暴雨中心附近的对流不稳定性远大于湿斜压性。井喜等<sup>[2]</sup> 对黄河中下游一次暴雨过程进行了分析, 认为它是 MCC 和  $\beta$  中尺度云团合并引起的, 地面切变线及中低压的生成等对 MCC 和  $\beta$  中尺度云团的生成和发展有指示作用。

Rossby<sup>[3]</sup> 在 20 世纪 30 年代末提出了绝对涡度的垂直分量与流体柱的高度之比是守恒的这一结论。在 1942 年, Ertel<sup>[4]</sup> 提出了位涡的概念及公式, 即  $\zeta_a \cdot \nabla\theta/\rho$ , 并指出在绝热无摩擦的干空气中位涡是严格守恒的。Hoskins 等<sup>[5]</sup> 在 1985 年系统分析了位涡在天气诊断分析中的应用价值。吴

国雄等<sup>[6]</sup> 证明了在绝热无摩擦的条件下, 饱和湿位温具有守恒性, 并在此基础上研究了湿斜压过程中的垂直涡度的发展。如今位涡在爆发性气旋及分析天气系统移动方面都有重要的应用。在尺度较大的对流性天气系统中, 绝对涡度的垂直分量较大, 且位温的垂直方向的梯度最大, 故两者的点积明显, 因此位涡是一个十分有效的热力动力示踪物。Gao 等<sup>[7-9]</sup> 将位涡定义广义化, 引入了对流涡度矢量、湿涡度矢量、动力学涡度矢量 ( $\mathbf{V}_{DV} = \zeta_a \times \mathbf{v}/\rho$ ) 等。动力学涡度矢量去除了热力学的的作用而只保留了动力学作用, 包含了大气旋转的作用及旋转中所具有的速度的影响。这个矢量对中纬度一般性的降水天气的示踪中可能也有较好的效果。本文选择一次快速东移的经过山陕的降水过程作为天气实例, 对  $\mathbf{V}_{DV}$  的示踪效果及引起其局地变化的原因进行分析。

## 1 暴雨过程概况及天气形势

2009年8月17日至20日, 西北及华北地区

收稿日期: 2012-03-30

基金项目: 基金委面上基金 (41075043, 41075039)

作者简介: 朱刚 (1986—), 男, 内蒙古乌兰察布市人, 硕士, 主要从事暴雨研究。

经历了一次暴雨过程。降水从8月18日06时(UTC, 以下时间均为世界时)一直持续到8月19日00时。这次降水过程有降水强度大、移动速度快的特点。从8月19日00时的24 h降水量来看, 山西共有14站超过25 mm, 其中兴县和五寨县降水量均超过50 mm。8月18日12时至18时的6 h是这次暴雨最强时期。兴县、五寨县、原平市在这6 h内的降水量均超过30 mm。19日00时以后, 降水强度减弱且雨带继续快速东移,

影响了河北及京津地区。

图1a为18日20时的500 hPa风场及位势高度场。从图中可以看到, 在35°N以北的西风气流中, 在山西和陕西的交界处及其北侧内蒙境内有一浅槽, 山西及河北处于槽前的西南气流中。渤海及中国东北部有一高压脊, 该高压脊并不是很强, 故对上游短波槽的阻挡作用有限。图1b为18日20时的850 hPa风场及等位势高度线。可以看到, 在山西北部, 有一西北涡移来产生的低压

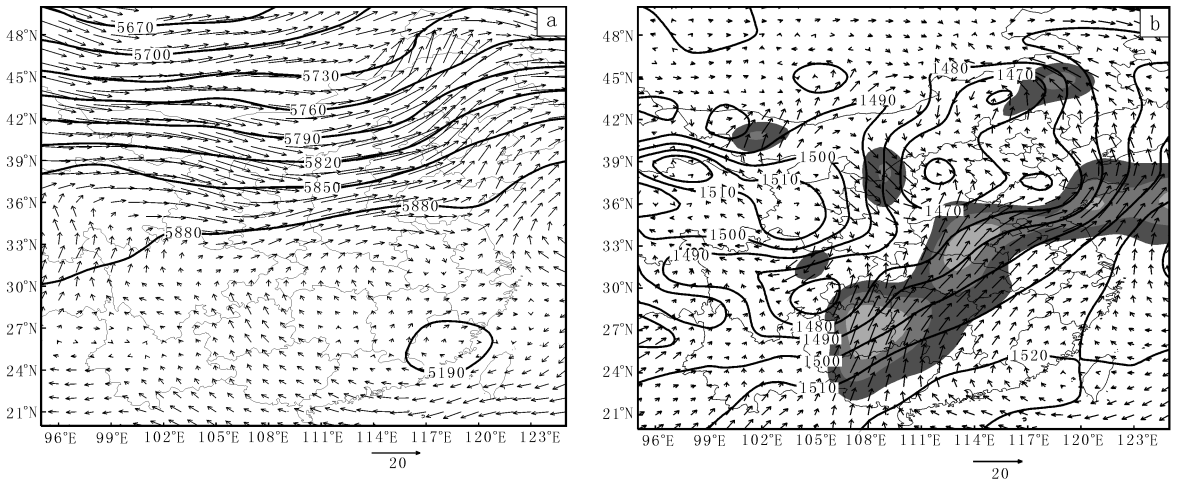


图1 2009-08-18T20 位势高度(单位: gpm)场及风场(a. 500 hPa; b. 850 hPa)

中心, 风场明显的气旋性环流。该涡产生于甘肃南部, 并随着西风气流不断向东移动, 与高空槽配合, 从而产生较强的降水。

## 2 模拟方案及模拟结果验证

为了验证数值模式对这次强降水过程的预报效果并进一步分析这次暴雨的中尺度系统, 利用WRF中尺度模式进行模拟。模式积分时间为30 h, 从17日18时至19日00时。采用三层嵌套: 水平分辨率分别为30 km, 10 km, 3.3 km, 水平格点数分别为 $180 \times 150$ ,  $181 \times 151$ ,  $181 \times 151$ ; 垂直分辨率为37层; 模式顶气压为50 hPa。模拟区域的中心定于(35°N, 108°E)。模式内、外网格均采用YSU边界层方案、RRTM长波辐射方案、Dudhia短波辐射方案及Thompson微物理过程方案。第一、二层采用Kain-Fritsch积云参数化方案, 最内层不使用积云参数化方案。

图2a为中央气象台2009年8月18日00时

—19日00时的24 h降雨落区预报。可以看出该预报准确报出河套地区以大雨为主的天气形势, 并预测河套北侧有暴雨中心。而同时段的24 h降水实况(图2b)显示, 河套地区确以大雨为主, 但暴雨并不在河套北部, 而是在山西、陕西北部。WRF模式模拟的该时段降水(图2c)在山西西北部以及陕西北部均达到了暴雨量级, 与观测事实更为接近。

## 3 动力学涡度矢量( $V_{DV}$ )诊断分析

因为在此次暴雨过程中高空槽及中低层涡旋为主要影响系统, 故对其涡度进行动力学诊断分析很有必要。产生降水的系统移来时, 多为垂直方向强相对涡度伴随对流系统内部强水平风速。因此利用动力学涡度矢量( $V_{DV}$ )<sup>[8]</sup>, 将绝对涡度矢量与风矢量叉乘, 以获得暴雨落区的异常信号。

$$V_{DV} = (\omega\zeta_y - v\zeta_z) \mathbf{i} + (u\zeta_z - \omega\zeta_x) \mathbf{j} + (v\zeta_x - u\zeta_y) \mathbf{k},$$

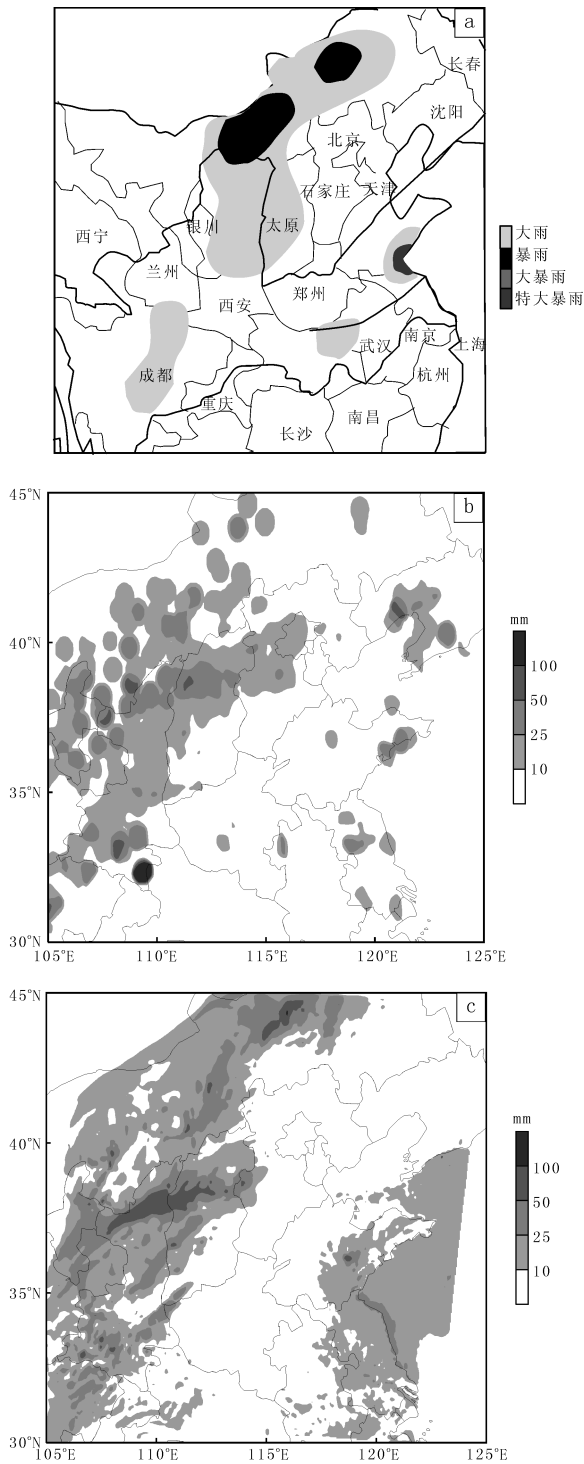


图2 2009-08-18T08—2009-08-19T08 累积降水  
(a. 24 h 预报; b. 观测; c. 模拟)

$$V_{DVx} = (w\zeta_y - v\zeta_z), V_{DVy} = (u\zeta_z - w\zeta_x), \\ V_{DVz} = (v\zeta_x - u\zeta_y)。$$

从8月19日02时3 km高度的 $V_{DVx}$ 及模式1

h降水量图(图3a)来看,在山西中部的降水区域有 $-0.002 \sim -0.004 \text{ m}^4 \text{ s}^{-2} \text{ kg}^{-1}$ 的负值与雨区对应。 $V_{DVx}$ 的极小值中心位于山西省西南部,达 $-0.01 \text{ m}^4 \text{ s}^{-2} \text{ kg}^{-1}$ ,与该地区大于10 mm的小时降水量相对应。该分量的负值区整体位于降水区域内,但是范围远小于降水区域,且极值中心与1 h降水大值中心没有明显的对应关系,可见该量对此次降水有一定的指示作用。从3 km高度的 $V_{DVy}$ 及模式1 h降水量图(图3b)来看, $V_{DVy}$ 值大于 $0.001 \text{ m}^4 \text{ s}^{-2} \text{ kg}^{-1}$ 的区域与降水产生的区域十分吻合,山西中部和南部分别有0.06、0.08  $\text{m}^4 \text{ s}^{-2} \text{ kg}^{-1}$ 的极大值中心与降水中心相对应,而且该量对北部内蒙古境内的降水也有较强的指示作用。从3 km高度的 $V_{DVz}$ 及模式1 h降水量图(图3c)来看,该垂直分量比水平方向的分量大一个量级。降水区域与小于 $-0.04 \text{ m}^4 \text{ s}^{-2} \text{ kg}^{-1}$ 的 $V_{DVz}$ 值相对应,山西中部和南部的降水区域对应于 $-0.08 \sim -0.12 \text{ m}^4 \text{ s}^{-2} \text{ kg}^{-1}$ 极小值中心。但是在河北及陕西北部均有大片的虚假信号,且极小值都超过 $-0.08 \text{ m}^4 \text{ s}^{-2} \text{ kg}^{-1}$ 。故本次过程中, $V_{DVz}$ 虽然量级较大,但用来对暴雨落区的诊断并不十分完美。从 $V_{DV}$ 水平方向两个分量的符号可知, $V_{DVz}$ 和 $V_{DVy}$ 中均为垂直涡度与水平速度相乘的分量起主要作用。可能原因是产生暴雨的系统垂直涡度和水平风速都有较大的异常。

#### 4 结论

利用WRF模式对2011年8月18日到19日发生在陕西及山西地区的暴雨过程进行了模拟并分析了这次暴雨过程的影响系统。对动力学涡度矢量的示踪作用进行了分析,结果表明:这次暴雨过程对应有高空浅槽和低空气旋,低空环流基本为经向型,暴雨过程发生在低空的槽区内。WRF模式对这次暴雨过程取得了比较好的模拟效果。 $V_{DVz}$ 虽然量级较大,但用来对暴雨落区的诊断并不十分完美。从 $V_{DV}$ 水平方向两个分量的符号可知, $V_{DVx}$ 和 $V_{DVy}$ 中均为垂直涡度与水平速度相乘的分量起主要作用。可能原因是产生暴雨的系统垂直涡度和水平风速都有较大的异常。

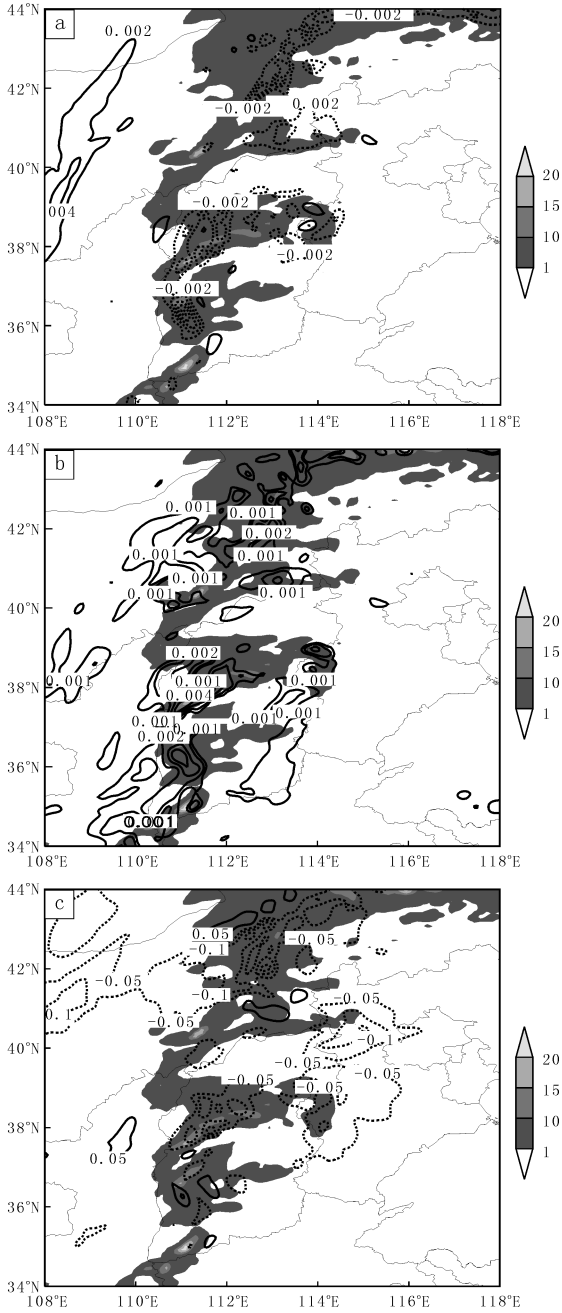


图3 2009-08-19T02 3 km 高度等高面的  
(单位为  $\text{m}^4 \text{s}^{-2} \text{kg}^{-1}$ ; a.  $V_{DV_x}$ ;  
b.  $V_{DV_y}$ ; c.  $V_{DV_z}$ )

#### 参考文献:

- [1] 崔粉娥,王咏青,狄利华. 山西一次低涡暴雨过程的成因分析[J]. 暴雨灾害,2009,28(2):241-245.
- [2] 井喜,李社宏,屠妮妮,等. 黄河中下游一次 MCC 和中- $\beta$  尺度强对流云团相互作用暴雨过程综合分析 [J]. 高原气象,2011,30(4):913-928.
- [3] Rossby C G. Relation between variations in the intensity of the zonal circulation of the atmosphere and the displacements of the semi-permanent centers of action [J]. J Marine Rev, 1939, 2(1):38-55.
- [4] Rossby C G. Planetary flow patterns in the atmosphere [J]. Quart J Roy Meteor Soc, 1940, 66 (suppl):68-67.
- [5] Hoskins B J, McIntyre M E, Robertson A W. On the use and significance of isentropic potential vorticity maps [J]. Quart J Roy Meteor Soc, 1985, 111:877-946.
- [6] 吴国雄,蔡雅萍,唐晓菁. 湿位涡和倾斜涡度发展 [J]. 气象学报,1995,53(4):387-404.
- [7] Gao Shouting, Ping Fan, Li Xiaofan, et al. A convective vorticity vector associated with tropical convection: A two dimensional cloud resolving modeling study [J]. J Geophys Res, 2004, 109: D14106.
- [8] Gao Shouting, Cui Xiaopeng, Zhou Yushu, et al. A modeling study of moist and dynamic vorticity vectors associated with two-dimensional tropical convection [J]. J Geophys Res, 2005, 110: d17104.
- [9] Gao Shouting, Li Xiaofan, Tao Weikuo, et al. Convective and moist vorticity vectors associated with tropical oceanic convection: A three dimensional cloud resolving model simulation [J]. J Geophys Res, 2007, 112: D01105.
- [10] Gao Shouting, Wang Xingrong, Zhou Yushu. Generation of generalized moist potential vorticity in a frictionless and moist adiabatic flow [J]. Geophys Res Lett, 2004, 31: L12113.