

鲁南一次锋面附近局地特大暴雨成因分析

周雪松

(山东省气象台, 济南 250031)

摘要 利用美国新一代中尺度数值模式 WRF 对 2005 年 9 月 2 日发生在鲁南的一次局地特大暴雨过程进行了数值模拟,着重对此次暴雨的产生机制进行了分析。研究表明,台风倒槽顶部的高湿区是暴雨主要水汽来源;对流层低层辐合线在暴雨发生发展过程中起重要作用;锋面附近的小尺度扰动是造成暴雨的直接系统;对流层低层地形造成的绕流是暴雨重要的触发机制;南北两系统的相互对峙是造成特大暴雨的重要原因。

关键词 局地暴雨 数值模拟 地形 锋面 中小尺度涡旋

引言

近年来,局地暴雨的研究正逐渐展开,毛冬艳^[1]、郭虎^[2]、孙继松^[3]分别从中尺度系统、波动、城市边界层过程等不同方面对 2004 年 7 月发生在北京的一次局地暴雨进行分析。王凤娇等^[4]应用多普勒雷达数据分析了一次鲁北前倾槽局地暴雨。于希里等^[5]分析了山东半岛北部沿海局地暴雨的环境特征。黄兵等^[6]进行了卫星资料变分同化在中尺度强暴雨模拟中的应用研究。周晓平等^[7]分析了北京 1998 年 7 月的一次局地特大暴雨的红外云图特征。尽管如此,相对于对区域性暴雨的认识程度而言,我们对局地暴雨特征等的认识仍然非常有限。

2005 年 9 月 2 日山东省鲁南地区出现了一次局地特大暴雨过程,济宁市汶上县郭楼镇 20 个村突遭特大暴雨袭击,7 h 降水量达 438 mm,而周围其它乡镇降水不足 10 mm。这次降水局地性强、强度大,为济宁市历史上百年不遇。受其影响,村庄、房屋和农田都浸泡在水中,最深处达 1.7 m,淹死家禽数千只,郭楼镇 20 个村内涝严重,花生、大豆、棉花等农作物损失严重,有的几乎绝产,据估计农田受损总面积达 333.33 hm² 左右。本次特大暴雨局地性强,产生、发展突然,高强度降水时间长。因此,深入研究本次罕见的局地特大暴雨过程,对科学认识局

地暴雨的结构、环境条件及发生、发展过程等很有意义。本文通过对此次局地暴雨过程的数值模拟和分析,试图从水汽条件、动力条件、锋面影响、地形作用等几个方面分析本次局地暴雨过程的成因。

1 过程概述

降水实况及特点:本次局地特大暴雨强降水发生的时间主要在 9 月 2 日 04:00~11:00,7 h 降水量最大的郭楼达到 438 mm,其他降水量较大的还有戴村坝站达到 185 mm,章逢站达到 100 mm,主要降水都集中在几十平方公里范围内。从降水实况分析中,可以看到本次局地暴雨具有两个较明显的特点:首先,本次局地暴雨的降水强度非常大;其次,其连续强降水持续时间非常长,最长达 7 h 之久。

天气背景场分析:在暴雨发生前,亚欧大陆中高纬度为两槽一脊形势,在 50°N 附近有一冷涡存在,其后部有冷空气分裂南下。1 日 20:00,500 hPa 槽线位于河北省南部,850 hPa 槽线位于山东省北部,地面锋面在 2 日 02:00 移过山东中部。0513 号台风“泰利”于 1 日 14:30 在福建莆田平海镇登陆。登陆后继续向西移动,1 日 20:00,台风倒槽已深入大陆内部,850 hPa 台风倒槽顶端位于山东南部,其后部的东南气流源源不断向北输送水汽。2 日 02:00 左右地面冷锋移过鲁中后,强降水开始,并一直持续

中国气象局项目“山东半岛冷流暴雪的中尺度特征研究”(CMATG2007Y08)和山东省气象局项目“山东省精细化数值预报系统的开发”(2006sdxz08)共同资助

作者简介:周雪松,男,1977 年生,学士,工程师,主要从事天气预报和中尺度天气分析和研究,Email:cedarzhou2005@163.com

收稿日期:2007 年 4 月 2 日;定稿日期:2007 年 9 月 7 日

近 7 h。随着冷空气整体南压,降水结束。

2 数值模拟

2.1 方案设计

运用美国新一代的中尺度大气数值模式 WRF 对本次过程进行数值模拟。为了模拟本次局地特大暴雨的中小尺度特征,模式区域采用两层嵌套(图略),格距分别为 12 km 和 4 km,采用质量坐标动力框架,在垂直方向采用 ETAP 坐标,分为 31 个不等距的层次。采用分辨率为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 、时间间隔为 6 h 的 NCEP 最终分析资料作为背景输入场,模式模拟的初始时间为 9 月 1 日 20:00,9 月 2 日 14:00 结束。

2.2 物理过程选择

本次过程是一次非常局地的中小尺度系统引起的特大暴雨。因此,为了更好地模拟本次局地降水过程,在模式模拟过程中选择使用了较为复杂和准确的物理过程。特别是在微物理过程方案中使用了 Lin 等的方案,该方案是一个包含了冰、雪、软雹等过程的复杂微物理过程方案,详细的参数化方案如

表 1 所示。

表 1 模式参数化方案

参数化方案	
微物理过程方案	Lin 等的方案
长波辐射方案	Rrtm 方案
短波辐射方案	Dudhia 方案
近地面层方案	Monin-Obukhov 方案
陆面过程方案	Noah 陆面过程方案
边界层方案	YSU 方案
积云参数化方案	浅对流 Kain-Fritsch (new Eta) 方案

2.3 数值模拟结果

对模式模拟结果和实况结果进行对比,发现本次模拟非常符合实际情况。地面、850、700、500 hPa 形势场基本与实况一致,模式预报的降水和降水落区与位置比较准确(图 1)。模拟的过程总降水量最大为 200 mm,主要在汶上县北部,与实况位置误差较小。模拟结果较真实地再现了这一局地暴雨天气过程,可以使用 WRF 模拟结果进一步探讨这一特大暴雨过程的成因。

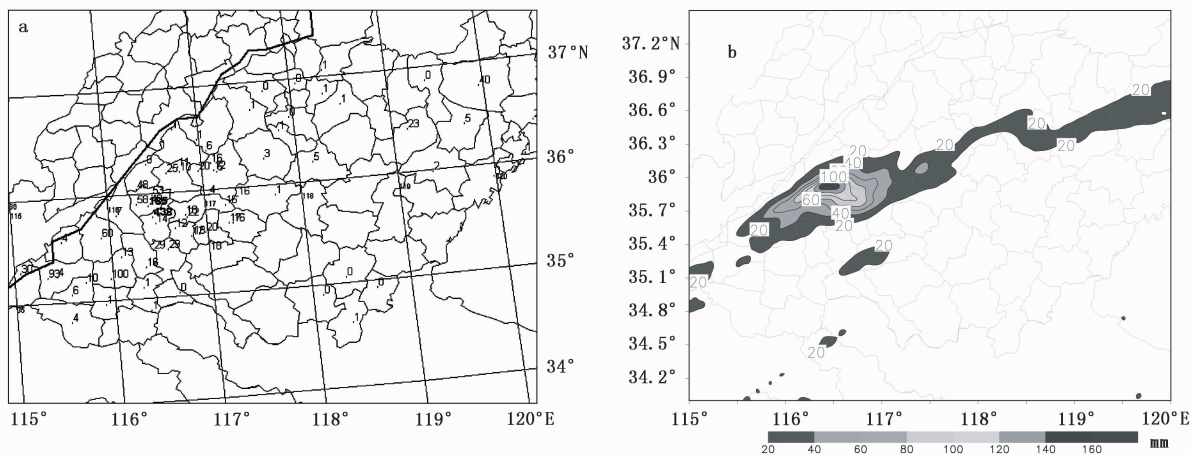


图 1 2005 年 9 月 2 日降水实况(a)和模拟总降水量(b)(单位:mm)

3 过程分析

3.1 水汽条件分析

暴雨发生前,0513 号台风倒槽已经深入大陆内部,850 hPa 台风倒槽已伸到山东南部,其后部丰富的水汽为特大暴雨提供了源源不断的水汽来源。从汶上附近相对湿度演变(图 2a)可以看到,暴雨发生前在对流层低层的 850 hPa 到 950 hPa 之间水汽已经相当充足,在暴雨开始后,湿度大值区从地面一直

延伸到高层 400 hPa 左右。

暴雨降水强度最大出现在 2 日 07:00,分析此时 850 hPa 湿度可知,在地面锋面南侧的台风倒槽东南风气流内,有丰富的水汽供应,伴随着强劲的东风,为暴雨源源不断地输送水汽(图 2b)。

3.2 动力条件分析

从位于济南的多普勒天气雷达的组合反射率产品(图略)可以清楚地发现,2 日 04:00 开始在汶上附近有强回波出现,强度超过 50 dBz,并且一直持

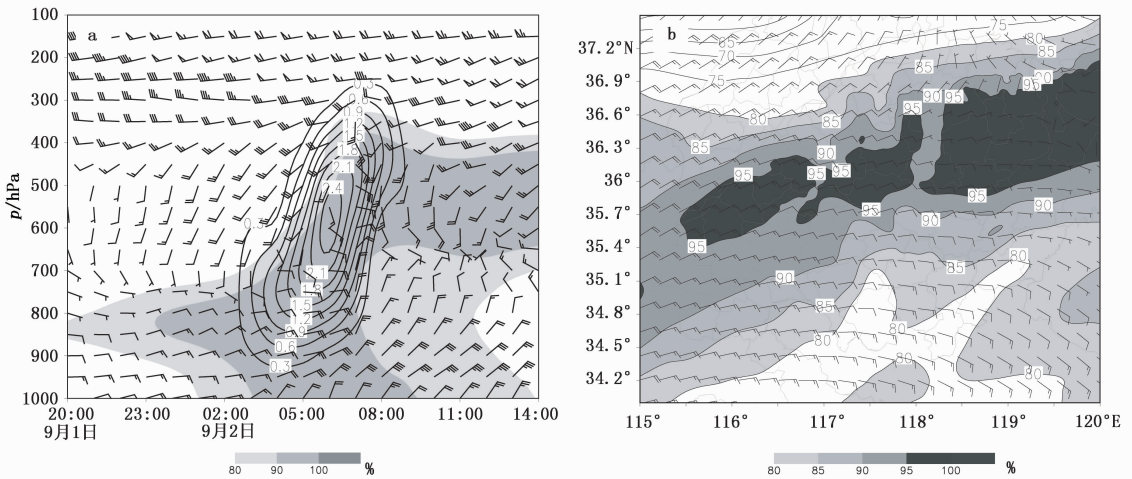


图2 2005年9月2日07:00经过汶上县的相对湿度演变图(a)和850 hPa相对湿度场(b)与水平风场(阴影区为相对湿度 $>80\%$, a中实线为垂直速度, 单位: m/s)

续到11:00。从雷达径向速度图(图略)可以看到, 在此期间汶上附近一直维持有比较强的正负速度中心, 表明有中小尺度涡旋存在。本次局地暴雨与次中小尺度涡旋有关。

从模拟的2日07:00汶上附近经向和纬向剖面

图(图3)可以看到, 在对流层有明显的上升速度最大区, 最大上升速度达到5 m/s以上, 南北宽度大约15 km, 东西宽度大约20 km。强上升区与对流层中低层的湿度区相配合, 造成本次特大暴雨。

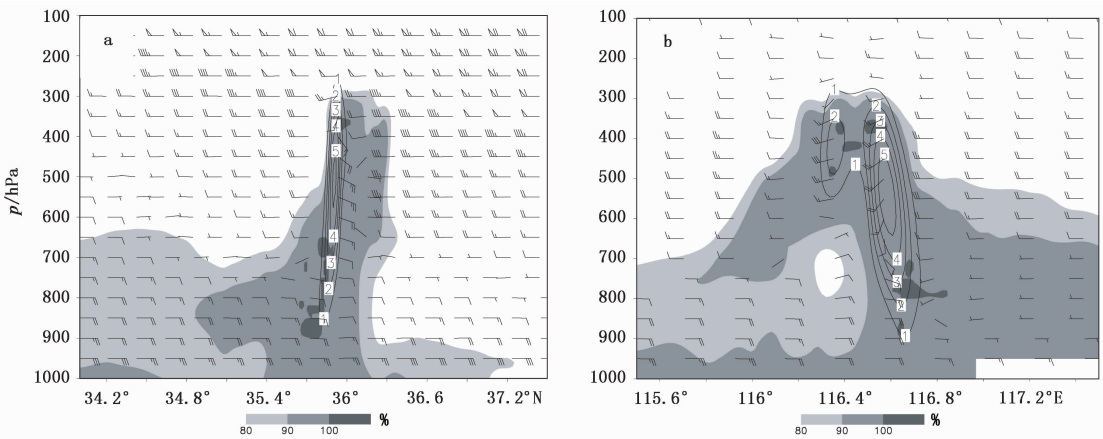


图3 2005年9月2日07:00经过汶上县的经向与纬向剖面图(a. 经向剖面, b. 纬向剖面, 阴影为相对湿度大值区, 实线为垂直速度, 单位: m/s)

3.3 锋面的影响

在本次局地暴雨中, 强降水产生的同时, 伴随着冷锋锋面过境。冷锋锋面附近, 对流层低层强风速辐合提供了较有利的环流场, 对流层中层小尺度涡旋是造成降水的直接系统。

9月2日02:00, 地面冷锋经过鲁中。此时, 850 hPa等压面上可以看到很明显的辐合, 表现为沿锋面东西向辐合线(图4a)。在600 hPa等压面上有一系列的小尺度涡旋产生(图4b), 而这些小尺度涡旋

正好对应于强降水落区。

3.4 地形的作用

非均匀下垫面的热力、动力作用形成的地形性环流对于环流天气的形成、发展有明显影响^[8]。王其伟等^[9]对我国不同尺度地形定常流进行研究, 表明地形对流场有很大的影响。汶上位于鲁中丘陵的西南部, 正好处于本次局地暴雨过程低层东北风的下风向。因此, 地形在本次暴雨中可能发挥了重要作用。

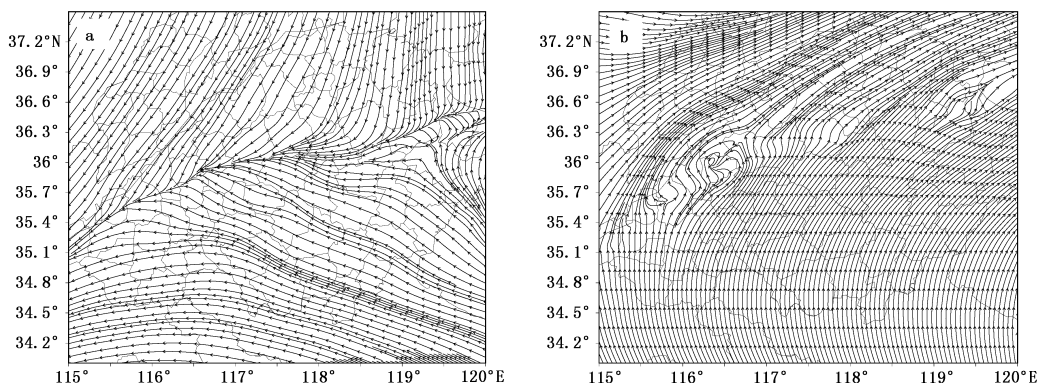


图 4 2005 年 9 月 2 日 07:00 850 hPa(a)和 600 hPa(b)水平流场

研究发现,由于地形的作用,对流层低层环境风场产生绕流。由于 02:00 地面锋面过境前后东北风加大,在较大的东北风中产生绕流并不断加大。从 2 日 07:00 地面 10 m 风场分布上可以清楚看到,东北风在绕过鲁中山区后在汶上附近产生明显辐合

(图 5a)。这种绕流一直向上延伸,在 850 hPa 等压面上还可以清楚地看到,与绕流相配合的在汶上附近产生强的辐合区(图 5b)。正是低层这种地形绕流造成的辐合抬升是本次局地暴雨的触发机制。

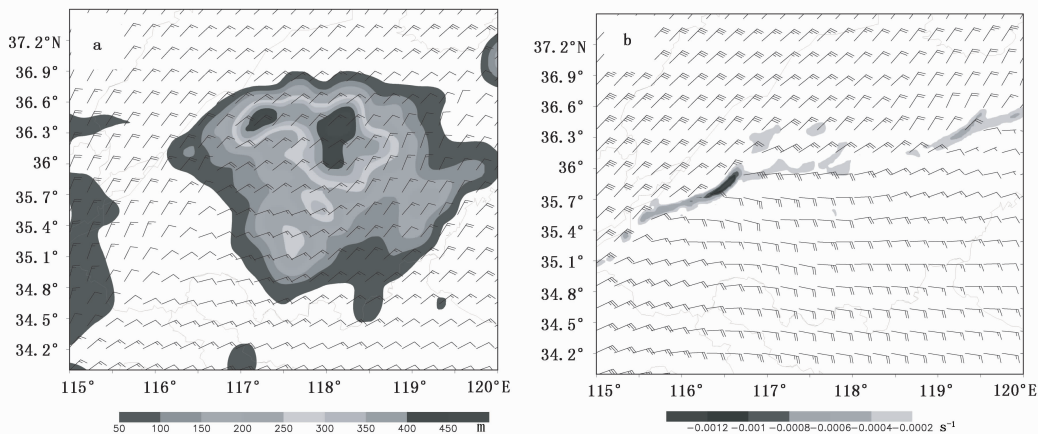


图 5 2005 年 9 月 2 日 07:00 风场:(a)地面 10 m(阴影区为地形),(b)850 hPa(阴影区为辐合大值区)

3.5 南北系统相互作用分析

本次局地暴雨过程强降水持续较长的时间,而造成罕见的局地特大暴雨。在环流场上,本次局地暴雨过程受南边台风倒槽和北边冷锋两个系统影响,正是这南北两个系统相互影响,稳定少动,造成强降水如此之大。

在 850 hPa 等压面上从通过汶上分别做南北和东西方向比湿随时间演变图(图 6),分析南湿北干两个系统的移动情况。可以看到,850 hPa 水汽随时间变化非常有规律,高湿区先向西北推进,后又向南退,这意味着南方暖湿气团北进和后期冷空气南下的先后过程。正是由于南北两个系统的相互作

用,造成了降水系统移动缓慢或基本不移动,从而造成强降水系统长时间维持,产生本次局地暴雨。

4 结语

采用 WRF 对局地特大暴雨进行模拟,并运用天气学理论,初步对发生在锋面附近的局地特大暴雨成因进行分析,得出如下结论:

- (1)WRF 较好地模拟了本次局地特大暴雨,表明其对于中小尺度局地暴雨有一定的模拟能力,可以应用于中小尺度强对流天气。
- (2)本次局地特大暴雨,台风倒槽发挥了重要作用,其顶部的高湿区不断向暴雨区输送水汽,是暴雨

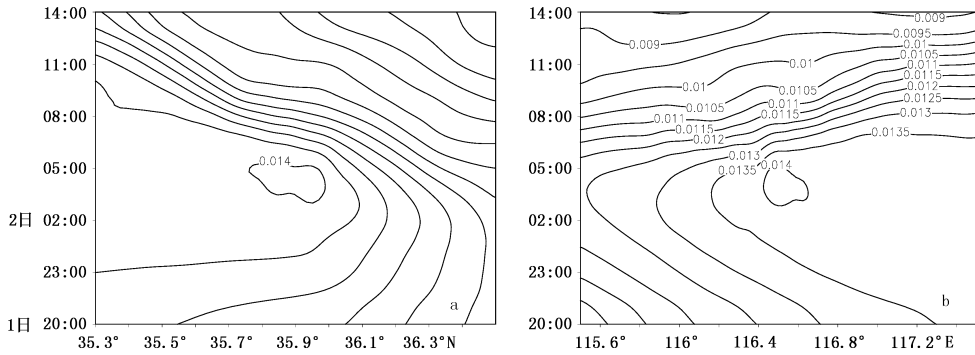


图6 9月1日20:00至2日14:00 850 hPa比湿经向(a)和纬向(b)时间变化(单位:g/kg)

主要水汽来源。

(3)在锋面附近,对流层低层有明显的辐合线存在,造成水平辐合,为锋面加强、水汽积聚创造了条件,在暴雨发生、发展过程中起重要作用。

(4)对流层中层锋面附近有中 γ 尺度涡旋发展,它们是造成本次暴雨的直接动力系统。

(5)由于鲁中山区的存在,使对流层低层大气出现绕流,在绕流的汇合区存在明显辐合,是暴雨重要的触发机制。

(6)本次暴雨过程中,同时存在南边台风倒槽和北边冷锋两个系统。南北两系统的相互对峙是造成特大暴雨的重要原因。

参考文献

[1] 毛冬艳,乔林,陈涛,等. 2004年7月10日北京暴雨的中尺度分析[J]. 气象,2005,31(5):42-46.

[2] 郭虎,季崇萍,张琳娜,等. 北京地区2004年7月10日局地暴雨过程中的波动分析[J]. 大气科学,2006,30(4):703-711.

[3] 孙继松,王华,王令,等. 城市边界层过程在北京2004年7月10日局地暴雨过程中的作用[J]. 大气科学,2006,30(2):222-234.

[4] 王凤娇,吴书君,蒋显红,等. 鲁北一次前倾槽引发的局地暴雨成因浅析[J]. 气象,2002,28(7):46-50.

[5] 于希里,闫丽凤. 山东半岛北部沿海强对流云团与局地暴雨[J]. 气象科技,2001,(29)1:39-41.

[6] 黄兵,刘健文,钟中. 卫星资料变分同化在一次中尺度强暴雨模拟中的应用[J]. 应用气象学报,2006,17(3):363-369.

[7] 周晓平,刘凤辉,崔继良. 一次局地特大暴雨的成因分析[J]. 气象,1999,25(8):43-35.

[8] 陆汉城,杨国祥. 中尺度天气原理和预报[M]. 北京:气象出版社,2004.

[9] 王其伟,谈哲敏. 我国主要地形上空理想定常流的流域分界分析地[J]. 地球物理学报,2006,49(4):971-982.

Causal Analysis of a Severe Local Heavy Rainfall near a Cold Front in Southern Shandong Province

Zhou Xuesong

(Shandong Provincial Meteorological Office, Jinan 250031)

Abstract: A severe local heavy rain occurred in the southern Shandong Province on 2 September 2004 was simulated by use of the next generation meso-scale non-hydrostatic model WRF. The causes of the heavy rain are analyzed with the reasonable simulation results. The results show that the high-humidity area in the inverted trough of a typhoon is vapor sources. The mesoscale convergence line in the lower stratosphere played a very important role. The small-scale vortex near the front is the direct cause of the heavy rain. Terrain is a trigger mechanism and the interaction between typhoon inverted trough and front enhanced the precipitation.

Key words: local heavy rain, numerical simulation, topography, front, meso-micro scale vortex