文章编号:1006 - 7639(2004) - 01 - 0038 - 06

2003 年 7 月 31 日固原暴雨天气数值模拟

丁建军[1],胡文东[1],陈晓娟[2],穆建华[2]

(1. 宁夏气象防灾减灾重点实验室;2. 宁夏气象台,宁夏 银川 750002)

摘 要:利用中尺度数值模式 MM5,对 2003 年 7 月 31 日宁夏固原暴雨天气过程进行了数值模拟,结果表明:模式能较好地模拟出这次天气过程的影响系统及其演变,揭示了常规观测中无法分析到的中小尺度天气系统。模式输出产品导出的螺旋度、对称不稳定、湿焓、非地转湿 Q 矢量等物理量,对本次强降水天气具有较好的描述能力和预报指导意义。

关键词:暴雨;中尺度数值模式;数值模拟

中图分类号:P458.1 文献标识码:B

引 言

宁夏地处西北内陆,大陆性气候显著。区内地形地貌复杂,变化大,易形成局地性的中尺度灾害性天气,如暴雨、冰雹等强对流天气。而这类天气突发性强、强度高、时空分布不均匀、难以监测,往往给人民生命财产带来巨大的损失。利用常规天气资料预报这类天气,往往是"疏网捞小鱼",预报效果很难令人满意。

近年来,MM5 模式被广泛应用在我国各级气象部门,很多气象科技工作者应用该模式对重大灾害性天气进行模拟,取得了较好的预报效果[1~3]。2002 年汛期,有限区域的中尺度天气预报模式 NCAR - PSU/MM5V3 开始在宁夏业务试运行。该模式主要技术参数如表 1 所示。

宁夏有限区域的中尺度天气预报模式以地面、高空观测场做为初始场,使用 T213L31 资料做模式侧边界值,预报时效为 48h,预报结果每小时输出一次。同时,宁夏区气象科研人员依据 MM5 模式基本产品,经过计算,导出 100 多个有明确物理意义的物理量。该计算程序同时为 MOS 预报提供产品,为了提高有效输出精度,同时也为业务应用 MICAPS 系统显示方便,将各种量值统一扩大了一定倍数。

表 1 模式模拟系统参数

Tab. 1 Parameters of model

项目	方案
动力过程	非静力平衡过程
分辨率	水平格距 $D=20$km,模式顶气压 $Pt=10$hPa,垂直分辨率 $k\sigma=23$ 层,
范围	46×61
资料	T213 分析资料 + 常规资料
物理过程	Reisner 混合相显式水汽方案 Grell 积云参数化方案 MRF 边界层参数化方案 CCM2 辐射方案
侧边界	流入流出方案,与 T213 模式预报进行嵌套
地形和下垫面	用 5′全球地形资料和下垫面分类资料,通过中尺度客观分析方法得到 20km 的格点地形和下垫面分类特征
时间积分步长	120s

在一年多的业务运行中,该模式能在一定程度上模拟、揭示了中尺度天气发生、发展的物理机理,对宁夏强对流、沙尘暴等灾害性天气具有一定的预报能力。本文采用该模式预报结果,选取预报对流性强降水天气具有较好指示性意义的物理量场[4~9],对 2003 年 7 月 31 日~8 月 1 日宁夏固原暴雨天气进行分析,结果表明:该模式能较好地预报本次强降水过程。

1 雨情概况

2003 年 7 月 30 日 20 时~8 月 1 日 15 时,受高

收稿日期:2004 - 02 - 17;改回日期:2004 - 03 - 16

基金项目:受中国气象局《中尺度预报数值模式和预报产品在宁夏新一代天气预报业务技术中的推广应用》和宁夏青年基金《宁夏暴雨中尺度系统发生发展机理的数值试验研究》项目共同资助。

作者简介:丁建军,(1973 -),本科,工程师,主要从事短期天气预报及预报方法研究。E - mail:dingjjding@sina.com.

原低涡和东移冷空气的共同影响,宁夏全区出现了一次降水天气,宁南山区普降中到大雨,其中,固原站 24h 降水量级达到暴雨。在整个降水过程中,固原站降水量为 73.5mm,部分地区出现了洪涝灾害。

这次降水天气在时空上明显表现出不均匀分布(图 1),从空间上看,南多北少,除固原出现暴雨外,其它站的降水量并不大,特别是银川、石嘴山两市的

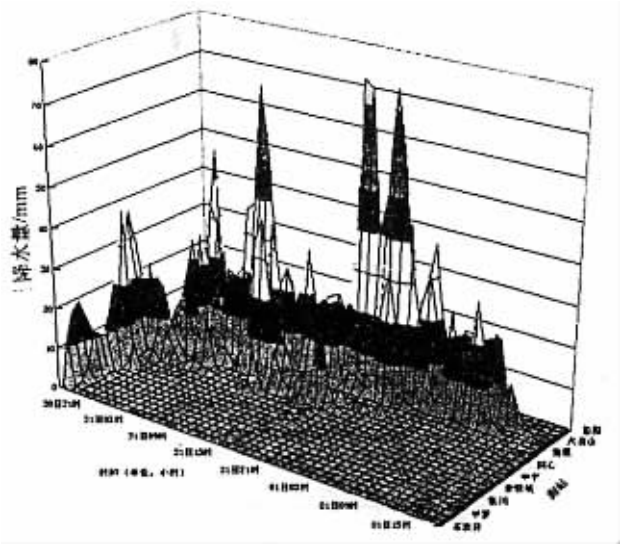

图 1　2003 年 7 月 30 日 20 时～8 月 1 日 20 时宁夏全区各测站逐小时降水量时空分布图

Fig.1　The hourly precipitation spatial and temporal distribution in Ningxia from 20:00 July 7 to 20:00 August 1,2003

降水量都在 1mm 以下;从时间上看,强降水时间短,降水强度大。强降水时段出现在 7 月 31 日 15 时～8 月 1 日 05 时,其中固原站降水量为 57.1mm,占过程降水量的 77.7%。

2　影响系统实况和预报场对比分析

2.1　环流背景

500hPa 形势图上,这次强降水的主要天气形势背景是:乌拉尔山西侧为高压脊,贝加尔湖到巴尔喀什湖维持一闭合冷低压。随着冷低压的东移南压,高原上的高度场逐渐降低,同时,孟加拉湾有热带低气压发展,从孟加拉湾到宁夏为一致的西南气流,西太平洋高压维持在秦岭以南地区,固原市和吴忠市的南部处于 5 840～5 880gpm 之间的不稳定区中。沿副热带高压(简称副高)边缘的偏南气流将南海的水汽源源不断地向宁夏输送,并和贝加尔湖低压中分裂的冷空气在宁夏上空交汇,激发副高边缘不稳定能量释放,出现强降水天气。到 8 月 2 日 08 时,冷低压东移到东北地区,宁夏降水结束。

本次降水最强的阶段是 31 日 15 时～1 日 08 时,因此,下面对 31 日 20 时的实况图和 31 日 08 时 MM5 模式预报 20 时的预报场进行对比分析。

2.2　500hPa 形势场对比

由 31 日 20 时 500hPa 实况图(图 2a)可知,宁夏处于西南气流中,宁夏中部有一槽线,冷暖空气在宁夏中南部交汇。5 840gpm 线位于固原市南部,副高边缘不稳定能量被激发,产生强降水天气。31 日 20 时 500hPa 预报图(图略)上,宁夏上空为西南气流,5840gpm 线位置较实况更偏南。1 日 1 时预报

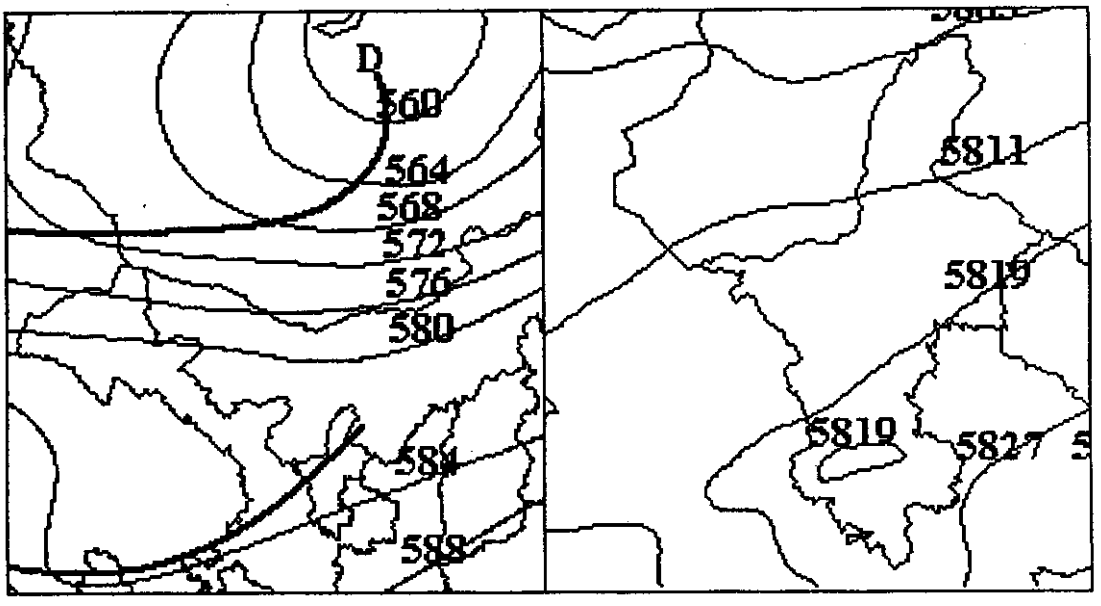

图 2a　7 月 31 日 20 时 500hPa 实况高度场　　图 2b　7 月 31 日 08 时 MM5 预报 1 日 1 时 500hPa 形势场

Fig.2a　The geopotential height at 500hPa observed at 20:00 on July 31,2003;Fig.2b　The geopotential height at 500hPa at 01:00 on August 1 forecasted by MM5 at 08:00 on July 31,2003

场(图 2b)中,预报固原、西吉上空有一中心值为 5 819gpm 的中尺度低涡,与该地区此时降水量较大相一致。而从实际预报的角度出发,依据图 2b 预报固原、西吉强降水天气更为有利。

2.3 700hPa 形势场对比

在 700hPa 实况和预报图上,甘肃兰州到平凉为一中尺度低涡,这是造成固原暴雨天气的影响系统。31 日 08 时 MM5 模式预报 18 时该低涡开始影响固原市,并不断加强,中心高度场持续降低,低涡激发前部不稳定能量释放,22 时在固原上空生成一个不足 100km、中心值为 3 050gpm 的中 β 尺度低压,与此时固原雨强达到最大相一致(21~22 时、22~23 时降水量分别为 7.6mm、7.4mm)。该中 β 低压在 1 日 00 时移出固原,固原雨强明显下降(23 时~1 日 0 时降水量 3.9mm/h)。8 月 1 日 04 时低涡主体移到固原,但固原第 2 个降水峰值出现在 2~4 时,两者并不重合。1 日 14 时,MM5 预报低涡完全移出宁夏,宁夏处于中心值为 3 120gpm 的小高压控制,全区降水结束。

实况图上水汽沿南海-四川盆地-陇东的风速 ≥8m/s 的低空急流向宁夏输送。由于预报场的范围较小,不能清楚地看到水汽输送路线,但从 700hPa 相对湿度预报图(图略)上可以看出:湿舌呈东南-西北向维持在宁夏上空,宁夏南部地区 700hPa 上的相对湿度达到了 95% 以上,说明水汽条件很好,且相对湿度从南向北逐渐降低,与实况降水量南多北少相一致。

MM5 模式预报的形势场与实况场很接近,而且,由于预报场网格点更细、时间分辨率更高,更能有效地模拟出较大空间尺度、较大时间间隔的实况场中无法表述的中小尺度系统,对强降水天气,尤其是强降水落区预报具有重要的意义。

3 物理量预报场分析

3.1 螺旋度分析

螺旋度是一个描述环境风场气流沿运动方向的旋转程度和运动强弱的物理参数,它反映了大气的动力场特征,能够很好地描述大气运动的性质和特点。杨晓霞等发现[10]:暴雨区上空 700hPa 以下都为正螺旋度,300hPa 以上都为较强的负螺旋度,500hP~400hPa 之间为'模糊'层。螺旋度的水平分布特征与天气系统密切相关,气旋向 700hPa 正螺旋度长轴方向的右侧移动,暴雨产生在气旋中心的东北部。

在 31 日 08 时~13 时,500hPa 以下各层的螺旋度在宁夏区内基本上为负值或 $<100\times10^{-9}\mathrm{m\cdot s^{-2}}$,螺旋度的高值区位于兰州附近,与 700hPa 低涡位置相对应。14 时开始,宁夏南部地区螺旋度急剧增大,北部地区仍处于负值区内,在 1 日 01 时达到最大,为 60 943.5$\times10^{-9}\mathrm{m\cdot s^{-2}}$。而在 700hPa 上,螺旋度正值区的位置与 500hPa 基本一致。呈西南向东北向的带状分布,中心区位于甘肃平凉地区到宁夏固原南部。分析 700hPa 低涡逐小时位置,发现低涡自西南向东北向移动,基本上是沿正螺旋度长轴方向的左侧移动,与理论移动方向出现了偏差。低涡在移动过程中,螺旋度中心强度不断加强,1 日 04 时达到最大值 60 185.810$^{-9}\mathrm{m\cdot s^{-2}}$。从模式模拟的逐小时降水量上看,降水中心基本上与正螺旋度中心位置重合,但略偏北一些,与 700hPa 低涡有很好的对应关系。700hPa 螺旋度正值区在 1 日 06 时移出宁夏,较模式模拟降水出现的时间早了 2h(图 3)。

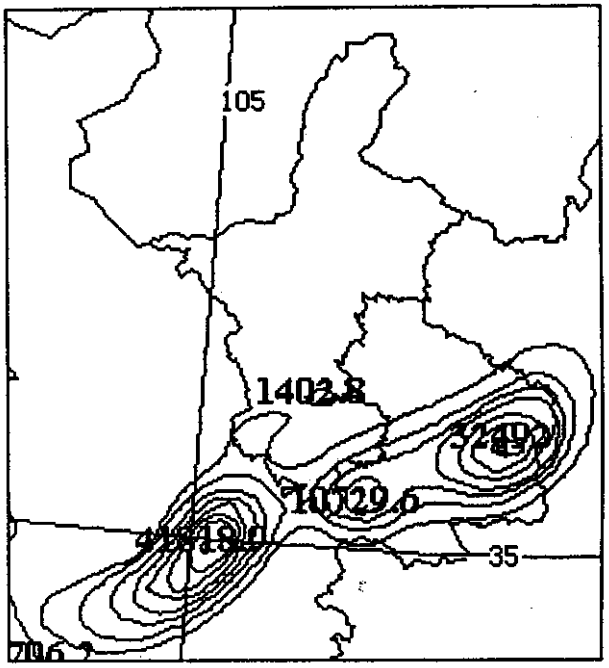

图 3 7 月 31 日 08 时 MM5 预报 8 月 1 日 1 时 700hPa 螺旋度

Fig.3 Helicity at 700hPa at 01:00 August 1 forecasted by MM5 at 08:00 on July 31

3.2 对称不稳定分析

分析平凉站 31 日 20 时 TLnP 图,K 指数为 39.8℃,SI 沙氏指数为 -1.7℃,表明降水时,有不稳定能量聚积,降水属于混合性降水天气。

分析模式输出的对称不稳定判据 S 的水平分

布，31 日 20 时 500hPa 图上，宁夏全区的 $S<0$，最大负值区在甘肃平凉地区，且自南向北逐渐增加，表明宁夏全区都处于不稳定大气中，南部不稳定能量高于北部。在 700hPa 上也呈现相似分布，此时全区大部分地区都有降水天气出现。1 日 02 时，500hPa 图上，位于北部的银川、石嘴山两市的 $S>0$，南部的 $S<0$，说明北部两市高层大气逐渐趋于稳定，而南部地区随着降水的出现，不稳定能量释放，大气的稳定度在增加。在 700hPa，尽管大气的稳定度在增加，但宁夏全区仍处于 $S<0$ 的区域中，负值中心位于固原北部，说明北部地区的不稳定能量主要存在于 700hPa 以下浅薄的行星边界层中，而南部地区的不稳定能量则存在于比较深厚的大气中。此时，低涡激发不稳定能量，在南部地区出现较大的降水天气，与固原出现较大降水一致。1 日 15 时，500hPa，$S>0$ 区域南压到宁夏中部，南部的 S 仍 <0，700hPa，宁夏全区的 $S<0$，但此时低涡已完全移出宁夏，因此，尽管宁夏上空大气中仍有不稳定能量，但缺少激发机制，全区降水结束。

3.3　湿焓分析

显热能与潜热能之和称为湿空气的焓，简称湿焓，是大气能量参量。大部分暴雨常常与等湿焓线密集带有一定的联系，这个密集带实际上就是低空急流和锋区。在暴雨发生前一般有强的正湿焓平流，暴雨一般出现在湿焓平流最强的区域。

从 31 日 08 时模式模拟的预报图（图 4）分析，31 日 20 时 500hPa，兰州以东有一个湿焓高值中心，与 700hPa 上低涡中心位置基本重合，湿焓场的分布是从南向北递减，湿焓舌从兰州向东北方向伸展到陕西定边地区，与 500hPa 高度场上的偏南气流位置是一致的。在 700hPa 图上，湿焓舌自甘肃天水地区伸展到陕西定边地区，与 700hPa 上低空急流位置基本一致。高湿焓区和高湿焓舌代表了暖湿气流的堆积和通道。随后，湿焓中心值进一步增强，在固原地区的梯度也在增大，到 1 日 2 时，700hPa 高湿焓舌左侧的固原到泾源不足 100km 的区域里，湿焓差达到 7℃，呈一个等值线密集带，而高湿焓舌右侧相对很稀疏，说明固原到泾源的密集带区是暖湿气流堆积和输送的最强区，大量的暖湿空气在这里堆积，为强降水天气提供充沛的水汽和能量。1 日 8 时，湿焓密集区移出宁夏，全区降水减弱，700hPa 湿焓干舌不断地自北向南延伸，到 1 日 15 时，湿焓干舌南端到达泾源，宁夏降水天气结束。

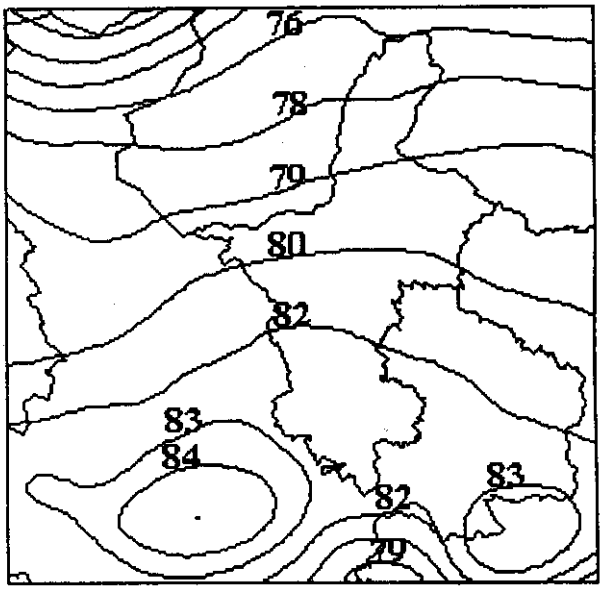

图 4　31 日 08 时 MM5 预报 31 日 20 时 500hPa 湿焓场

Fig. 4　Moisture enthalpy at 500hPa at 20:00 on July 31 forecasted by MM5 at 08:00 on July 31

3.4　非地转湿 Q 矢量分析

非地转湿 Q 矢量反映的物理意义如下，当非地转湿 Q 矢量场辐合时，垂直运动向上，当非地转湿 Q 矢量场辐散时，垂直运动向下。如果天气系统很深厚，伸展到整个对流层，那么非地转湿 Q 矢量表示了对流层低层的非地转运动的方向，并指向上升区。在对流层高层，地转运动的方向与非地转湿 Q 矢量反向。

31 日 08 时 MM5 模式模拟的非地转湿 Q 矢量 500hPa 流线分布图（图 5）上，固原市处于非地转湿 Q 矢量流场的汇区，在此区中，500hPa 有较强的上升运动，而宁夏中部及以北地区则处于非地转湿 Q 矢量流场的辐散区，说明此时宁夏中部及以北地区高层为下沉气流。非地转湿 Q 矢量 700hPa 流线图上，宁夏都处于非地转湿 Q 矢量流线的汇区，说明宁夏南部地区 500hPa 以下都处于上升气流中，对流发展强烈，有利于大降水的产生，而北部地区只在 700hPa 以下的低层存在着对流。但此时非地转湿 Q 矢量流线螺旋状辐合区位于宁夏兴仁西部，较 700hPa 上低涡的位置偏北约 2 个纬度。此辐合中心于 8 日 02 时到达宁夏南部，1 日 7 时移出宁夏，与固原 02～04 时出现第 2 个降水峰值是较符合的。1 日 14 时，宁夏全区 500hPa 上的非地转湿 Q 矢量流线呈辐散分布，而 700hPa 上，则到 1 日 15 时才全

部转为辐散，宁夏降水天气结束。

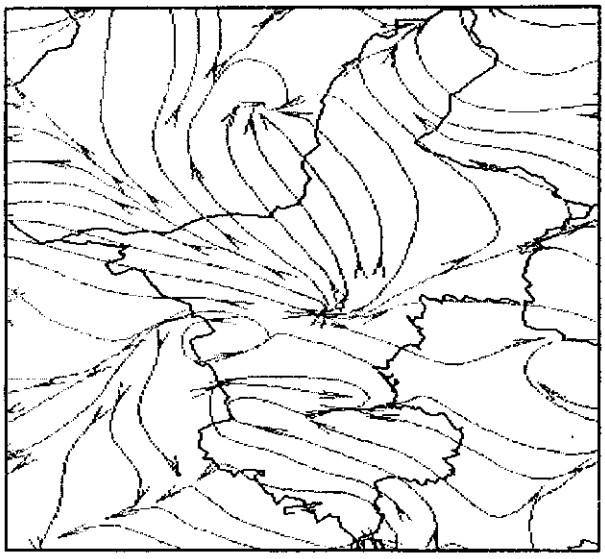

图5 31日08时MM5预报31日20时

Fig.5 Q vector at 500hPa at 20:00 on July 31 forecasted by MM5 at 08:00 on July 31

从31日08时模式预报的降水量上看，在空间上(图略)，降水区域呈东北－西南走向的一个带状，过程最大值降水出现在甘肃平凉地区，最大降水中心为26.4mm，向南向北逐渐减小。宁夏银川、石嘴山两市有微量降水天气，而固原市除海原外，降水量都>5mm。降水的范围基本上与实况一致，但宁夏南部降水量预报明显偏小，固原的暴雨中心并没有预报出来。

如图6a，6b，在时间上，预报降水出现在31日14时到1日10时。从实际暴雨中心固原站的时间序列图上可以看出，模式预报的降水出现在31日14时到1日08时，较实况降水开始的时间偏晚，而结束的时间较实况降水结束的时间偏早了7h。模式最大雨强出现在31日22时到1日2时之间，与实况最大雨强出现的时间基本一致。模式预报最大雨强为0.9mm/h，比实况最大雨强7.5mm/h明显偏小。

综上所述，模式对本次降水的预报在时间、区域

4 降水量对比分析

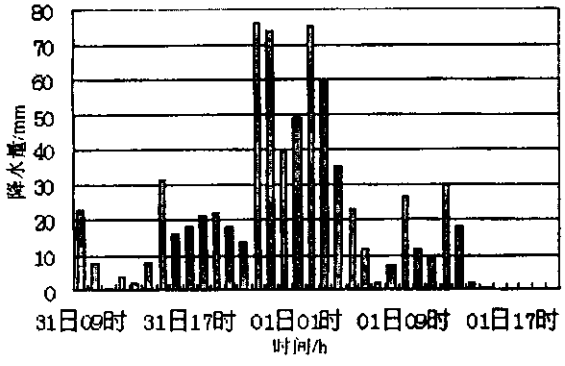

图6a 7月31日08时到8月1日20时实况降水量时间序列图

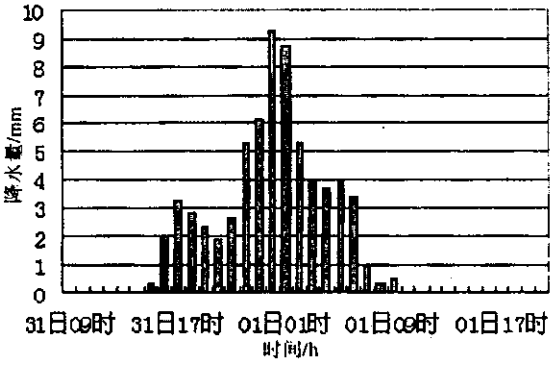

图6b 7月31日08时MM5模式预报36小时降水量时间序列图

Fig.6 Serial of precipitation from 08:00 July 31 to 20 August 1,2003. a: observed; b: forecasted by MM5

上较为成功，但降水量级明显偏小，暴雨中心没有报出来。可能是因为本次降水天气过程属于混合性降水，而在模式模拟降水量中，以固原站为例，对流性降水量仅为0.06mm，非对流性降水量为6.6mm，也就是说，模式在本次天气模拟中，对流发展造成的降水模拟效果差。具体原因还需在以后采用不同参数化方案对本次过程进行对比、研究，进一步改进。

5 小 结

5.1 MM5模式对这次降水天气形势场具有较强的预报能力，预报场与实况场很接近，而且由于预报场网格点更细、时间分辨率更高，能更有效地模拟中小尺度系统及其演变过程。

5.2 500hPa及以下低层螺旋度在有降水时正值较大。在700hPa，螺旋度正值区对预报低涡的移动有很好的指示性意义，且降水中心位于正螺旋度轴线略偏北地区。

5.3 对称不稳定判据S的水平分布图上，$S<0$说明有大气中存在不稳定能量，当受到低涡、切变、低槽等天气系统扰动时，不稳定能量被激发，造成较大的降水天气。当系统移出后，天气将转好。

5.4 高湿焓区和高湿焓舌代表了暖湿气流的聚积

和通道，强降水出现在湿焓平流最强的区域。

5.5　非地转湿 Q 矢量辐合，说明有上升运动，从低层到 500hPa 都处于一致的辐合区中，表明对流运动比较深厚，利于强降水的产生。但非地转湿 Q 矢量辐合中心并不总与低涡中心相对应。非地转湿 Q 矢量与降水具有较好的对应关系。

5.6　MM5 模式对降水时间和降水区域有较好的预报能力，对降水强度有一定的指示意义。

参考文献：

[1] 程麟生，冯伍虎."987"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.

[2] 郑维忠，余志豪. 长江中下游地区暴雨数值预报试验[J]. 气象科学，2001，21(1)：19－27.

[3] 乔林，刘月巍，崔绚."0268"陕西特大暴雨过程数值模拟分析[A]. 天气预报技术文集[C]. 北京：气象出版社，2003，23－26.

[4] 杨晓霞，谭志华，华岩. 一次特大暴雨天气的 Q 矢量分析[J]. 气象，27(2)：44－47.

[5] 刘子臣. 中尺度对称不稳定的诊断应用[J]. 南京气象学院学报，1997，20(3)：400－404.

[6] 刘子臣，张健宏，梁生俊. 中尺度对称不稳定的诊断应用[J]. 南京气象学院学报，1997，20(3)：400－404.

[7] 吴宝俊，徐晨海，刘延英，等. 螺旋度在分析一次三峡大暴雨中的应用[J]. 应用气象学报，1996，7(1)：108－111.

[8] 孙兰东，徐建. 西北地区东部三次暴雨天气的螺旋度分析[J]. 甘肃气象，2000，18(4)：20－23.

[9] 黄仪方，琚建华. 压能、湿焓场与暴雨落区的诊断分析[J]. 高原气象，2002，21(2)：154－15.

[10] 杨晓霞，华岩，黎清才，等. 螺旋度在暴雨天气分析与预报中的应用[J]. 南京气象学院学报，1997，20(4)：499－504.

Numerical Simulation of a Torrent Rain on July 31 in 2003 in Guyuan

DING Jian－jun[1]，HU Wen－dong[1]，CHEN Xiao－juan[2]，MU Jian－hua[2]

(1. Key Laboratory of Meteorological Disaster Preventing and Reducing in Ningxia，Yinchuan　750002，China；
2. Ningxia Meteorological Observatory，Yinchuan　750002，China)

Abstract：A numerical simulation of a torrent rain on July 31 in 2003 in Guyuan was conducted with MM5 and results show that：the model simulated the effecting systems and the evolution of this weather event，and revealed the meso－scale systems that were undetected by conventional observation. The derived element such as helicity，symmetric instable index，moisture entropy，ageostrophic moisture Q vector are capable to indicate the severe convection.

Keywords：torrent rain；meso－scale numerical model；numerical simulation.