

“8.19”西北东部大到暴雨 诊断分析和数值模拟

李晓霞^{1,2} 寿绍文¹ 张铁军² 奚立宗² 张新荣²

(1. 南京信息工程大学大气科学系, 210044; 2. 甘肃省气象局)

提 要: 利用 MICAPS 系统 T213 资料、NCEP 再分析资料及实况观测资料, 对 2004 年 8 月 19 日发生在西北地区东部的暴雨天气过程的大尺度环流背景和物理量场进行分析发现: 这次暴雨天气过程中西太平洋副热带高压有一次明显的西伸, 是一次较典型的副高西北侧西南气流型暴雨。降水水汽主要来自南海和孟加拉湾, 中低层的水汽输送十分充沛, 并在甘肃河东和宁夏形成辐合。运用三重嵌套的中尺度数值预报模式 MM5, 对这次暴雨过程进行了两种方案的高分辨率数值模拟, 结果表明, 运用四维资料同化后的方案在形势和降水预报方面优于未进行资料同化的方案。

关键词: 暴雨 中尺度系统 数值模拟 四维资料同化

Diagnosis and Numerical Simulation of “8.19” Heavy Rain in the East of Northwest China

Li Xiaoxia^{1,2} Shou Shaowen¹ Zhang Tiejun²
Xi Lizong² Zhang Xinrong²

(1. Nanjing University of Information Science & Technology 210044;
2. Gansu Province Meteorological Bureau)

Abstract: Based on T213, NCEP/NCAR reanalyzed and conventional observation data, the general circulation and the physical field of the heavy precipitation on August 19 are analyzed at first. The result shows that this event is a typical southwest flow type caused by West Pa-

cific subtropical high extending westward. The moisture mainly moved from the Bay of Bengal and the South China Sea. The moisture transport in low-and medium-level is very strong and the convergence occurs in Ningxia and east of Gansu Province. Second, with the three-way nested high resolution mesoscale NWP model MM5 to simulate this event by two methods, the four-dimensional data assimilation model is proved to be of quite good quality in circulation and precipitation forecasts.

Key Words: heavy rain mesoscale weather system numerical simulation four-dimensional data assimilation

引言

西北东部处于我国季风降雨向内陆急剧骤减的过渡带,冷暖空气经常在此交汇,是西北区暴雨最多地区^[1]。由于特殊的地理环境和常年少雨的状态,使得该地区各种设施和自然物的防雨能力较差,一旦发生暴雨往往会造成山洪爆发、泥石流等灾害,所以对这一地区暴雨的分析研究显得十分重要。关于西北地区暴雨的研究人们已经做过不少工作^[2~5]。对西北地区东部暴雨的环流特征以及暴雨发展的环境物理条件作了较系统的总结;运用数值预报模式的高分辨率输出结果初步探讨了暴雨的形成发展机理等工作,为西北区东部暴雨的预报、研究打下了良好的基础。“8.19”暴雨是甘肃省自1981年以来最强的一次暴雨天气过程,造成了较严重的经济损失,对其进行细致的分析诊断十分必要;同时利用MM5中尺度数值模式,运用不同的方案对其进行模拟分析,从而对本次暴雨的认识更加深入,这对进一步改进提高暴雨的数值模拟效果及预报将有一定的帮助。

1 天气过程概述和环流形势演变

2004年8月19~20日08时,受北方冷空气和西南暖湿气流的共同影响,西北区东部出现了明显的降水天气过程(图1)。宁夏的固原地区4个站出现暴雨,最大降水

中心位于西吉和泾源,降水量分别为67.9mm和65.7mm;陕西省有3个站出现暴雨天气,其中,最大中心是宝鸡的陇县,降水量达85.1mm。甘肃省河东各地普降中到大雨,有21个站出现大雨或大到暴雨,共计有13个县(区)达到暴雨,最大降雨量出现在庆城,为82.5mm。这次降水是2004年甘肃省河东入汛以来最强的一次降水,也是甘肃省自1981年以来最强的一次。近50年来,也仅有1970年8月29日(18站暴雨)和1981年7月13日(15站暴雨)降水强度大于这次。伴随着这次暴雨天气过程,庆阳市环县的环城、演武、樊家川、吴城子等乡镇还遭受冰雹灾害袭击,降雹20多分钟,最大直径约3cm,农作物受灾面积1460hm²,成灾面积1190hm²,绝收640hm²;直接经济损失346.8万元,其中农业直接经济损失261.8万元。

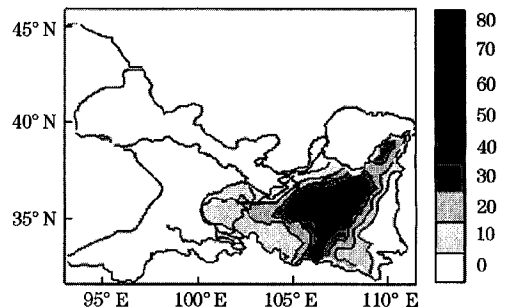


图1 2004年8月19日08~20时西北地区东部降水实况(单位:mm)

这次暴雨天气过程中,西太平洋副热带

高压有一次明显的西伸，是一次较典型的副高西北侧西南气流型^[3]，西北地区东部暴雨多出现在此流型中。8月18日08~20时，500hPa西北区上空没有明显的天气系统，甘肃省河西西部有弱冷空气影响，青藏高原上为弱脊控制，西太平洋副热带高压588外围线在130°E附近，700hPa图上南风不明显。8月19日08时，500hPa形势发生了变化，沿新疆脊前有冷空气下滑，西太平洋副热带高压西伸（588外围线在112°E附近）。冷空气与副高边缘的西南暖湿气流在青藏高原东部汇合，自内蒙古中部至青藏高原中部有一条明显的西北风与西南风的NE—SW向切变线，高原东部至内蒙古中部的西南风发展十分旺盛且在甘肃中部和宁夏北部形成辐合，有利于水汽在此聚集；700hPa自南海经云贵高原、四川盆地、甘肃河东至宁夏北部有一支南风带，在甘肃河东和宁夏形成辐合，辐合中心在甘肃中部和宁夏南部。暴雨就发生在500hPa西南风和700hPa南风重叠处。

2 物理量场分析

通过对暴雨形成的基本条件（水汽条件、不稳定能量条件、上升运动和有利的流场等）的诊断分析，有助于判断暴雨发生的可能性^[6]。西北地区在暴雨期间，环境物理量场特征受高原特殊地形影响，其表现形式有一定的特征。

2.1 水汽输送和汇集过程

分析这次暴雨过程的水汽通量和水汽通量散度，19日08时850hPa水汽通量（图略），自南海经云贵高原、四川盆地、甘肃河东至宁夏北部是水汽通量高值区，且在甘肃庆阳和陕西中西部有一个 $6\text{g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ 的水汽通量高值中心。在700hPa水汽通量图上（见图2），水汽通量高值区与850hPa走向基本一致，但水汽输

送总体高于850hPa，在甘肃陇东同样有 $8\text{g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ 的高值中心。在700hPa和850hPa水汽通量图上，云南、贵州和四川的交界处都有水汽通量高值中心。说明“8.19”暴雨天气过程中低层的水汽输送十分充沛，水汽主要来自南海，低空南风将暖湿空气向北输送到青藏高原东侧，同时又以700hPa水汽输送最大。

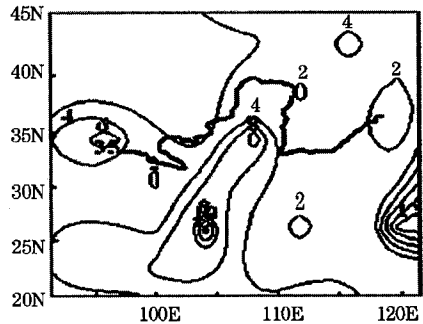


图2 2004年8月19日08时700hPa水汽通量图
(单位： $\text{g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$)

在500hPa和400hPa水汽通量图上（图略），水汽通量高值区在青藏高原东南部，说明在中高层仍有水汽输送，水汽主要来自孟加拉湾，高空西南风将充沛的水汽带到青藏高原东侧。

在19日08时850hPa水汽通量散度图上（图略），可以很清楚地看到在甘肃河东地区，有一个水汽辐合中心。低层水汽在此聚集辐合，为这次降水提供了较为理想的水汽条件。

2.2 不稳定层结条件分析

暴雨期间需要向暴雨区源源不断地补充不稳定能量。从K指数场分析可见（图略），18~19日，甘肃省河东各地、宁夏自治区、陕西省均处于K指数高值区，18日08时，兰州附近有一个大于 32°C 的高值中心；19日08时，甘肃省武威以东及宁夏自治区出现了一个K指数大于 36°C 的高值中

心。KY 指数是判断降水能否下大的一个较重要的物理量。从 KY 指数场分析可见 (图略), 18 日 08 时, 甘肃陇东附近有一个 $KY > 2$ 的大值中心, 这与当天甘肃庆阳、环县出现的暴雨中心几乎完全吻合。19 日 08 时, 甘肃陇东东部, 青海中东部有两个 $KY > 2$ 的大值中心, 青海省的兴海、河卡附近有 $KY > 4$ 的中心。在沙氏指数图上 (图略), 18 日 08 时, 甘肃陇东有 $SI < -2^{\circ}\text{C}$ 的中心, 20 时, 庆阳附近 $SI < -4^{\circ}\text{C}$, 当天环县、庆阳降突发性暴雨, 6 小时降水量达 61.1mm 和 51.3mm。19 日 08 时, 西北地区东部仍有大范围的负值中心。说明在暴雨发生前一天, 西北地区东部已聚集了大量不稳定能量。

2.3 动力条件分析

从散度场分析可见, 在 8 月 19 日 08 时, 低层 700hPa 和 500hPa (见图 3) 青海中南部、甘肃中部有较强的辐合区; 400hPa 为无辐散区, 无辐散层高于西北区东部暴雨盛期平均无辐散层 (500 hPa 附近)。300hPa 到 100hPa, 青海中南部及甘肃大部有强烈的辐散下沉运动, 200hPa 辐散达到最强, 中心值为 $3.1 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$, 辐散强于低层辐合 (中心值 $-2.5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$), 散度场高低空的这种配置有利于上升运动的持续发展, 降水主要发生在 500hPa 辐合区

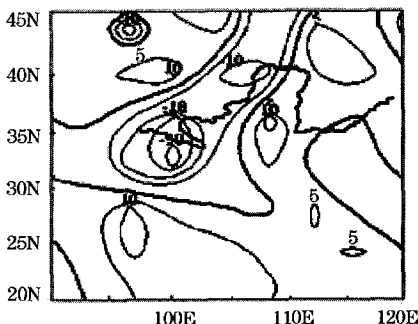


图 3 2004 年 8 月 19 日 08 时 500hPa 散度图
单位: 10^{-5} s^{-1}

及其右侧。从垂直速度场分析 (图略) 可见, 在 8 月 19 日 08 时, 自 700hPa 向上到 100hPa, 陕、甘、宁、青四省区均处在垂直运动上升区, 最大上升在 400hPa 层, 在青海中部 (35°N 、 100°E 附近), 中心值为 $-4.2 \times 10^{-3} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-1}$ 。这种高低空配置是较典型的西北区东部暴雨天气的垂直运动场垂直分布, 暴雨一般发生在垂直上升运动区的右侧。

3 数值模拟

3.1 模式简介, 资料处理

运用非静力原始方程中尺度数值模式 MM5 (v3) 进行了数值模拟。模式采用三重嵌套方式 (图 4), 模式中心点为 39°N 、 100°E , 粗网格区域格距为 45km, 格点数为 133×133 ; 细网格区域格距为 15km, 格点数为 151×151 ; 更细网格区域格距为 5km, 格点数为 151×151 ; 垂直方向为 σ 坐标, 模拟中取 σ 为不等距的 23 层。

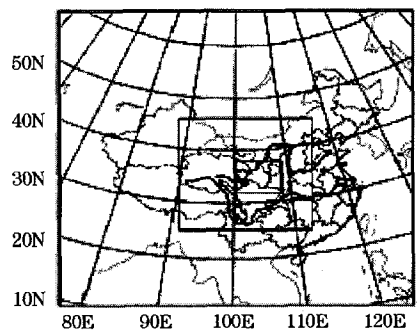


图 4 三重嵌套网格套示意图

模拟过程以 8 月 18 日 20 时作为初始场, 积分 48h。每隔 24h 输入一次新的侧边界值。初始场和侧边界值均取自中国气象局 T213 ($1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 经/纬网格点) 实况资料, 预报结果每隔 6h 输出一次。

四维资料同化是在一个动力模式中将过

去和现在的资料结合起来,从而提供时间连续和动力协调的四维资料集,是近年提高数值预报准确率的重要途径之一。为探讨四维资料同化在数值模拟中的作用,本文在资料处理方面运用了两种不同的方案。

第一种方案采用MM5数值模拟系统中的张弛逼近法四维资料同化方案,在模式前12小时积分过程中,利用已有的常规高空、地面观测和分析资料,将模式预报值与观测值或分析值作比较,根据两者的差值,在预报方程中加入一个分析张弛逼近项,用来对预报量作适当修正,使之逐渐向实测值逼近。

第二种方案不经过资料同化直接进行模拟。

3.2 模拟结果分析

3.2.1 形势模拟分析比较

(1) 500hPa 风矢量场模拟

分析模式两种方案积分12小时后(8月19日08时)输出的500hPa风矢量场与同时次的500hPa实况风场(图5)。对比发现,对引起这次暴雨天气过程的位于 $30^{\circ}\sim 40^{\circ}\text{N}$ 、 $90^{\circ}\sim 105^{\circ}\text{E}$ 的西北风与西南风的NE—SW向风场切变,两种方案均有模拟能力。但所模拟的切变线的位置和强度,显然对资料进行四维同化后的模拟方案与实况更加一致;另外,对来自孟加拉湾的西南风水汽输送带的模拟,资料四维同化后的方案优于未进行四维同化的方案。

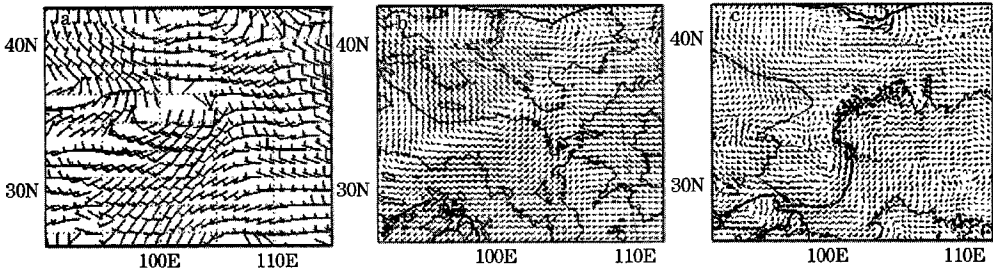


图5 2004年8月19日08时500hPa风场图

a. 实况; b. 四维同化方案风矢量模拟; c. 非四维同化方案风矢量模拟

(2) 700hPa 风矢量场模拟 (图略)

分析模式两种方案积分12小时后(8月19日08时)输出的700hPa风矢量场与同时次的700hPa实况风场。对比发现,两种方案都能很好地模拟出 35°N 、 105°E 附近即甘肃中部和宁夏南部的风场辐合中心,对来自南海至甘肃的南风输送带的模拟与实况场也很一致,但对 $30^{\circ}\sim 35^{\circ}\text{N}$ 、 $105^{\circ}\sim 110^{\circ}\text{E}$ 的辐散中心,资料四维同化后的方案优于未进行四维同化的方案。

3.2.2 降水模拟分析比较

评价一个中尺度天气模式的好坏,除了看它对降水量和降水区域的模拟和预报能力外,还要看它降水时段的模拟^[7]。图6给出

了8月19日14时6小时降水量实况和模式两种方案6小时降水量模拟场;8月19日08~14时6小时降水主要集中在甘肃中部(35°N 、 105°E 附近),最大降水量在甘肃的渭源和华家岭,分别是28mm和25mm。模拟对比发现:在模式前12小时积分过程中,对资料经过四维同化后的方案较成功地模拟了该时间段的降水:雨带范围、走向及最大降水中心的位置与实况较一致;但雨量中心值偏小(实况为大雨,模拟为中雨),另外在(27°N 、 97°E)青藏高原附近错误地模拟出降水区域。资料未经过四维同化处理的方案模拟的降水与实况相比不甚理想:降水区域过大,虽然降水中心接近实况(35°N 、

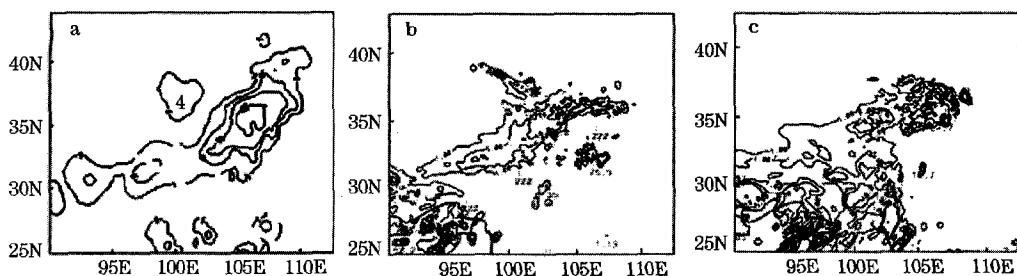


图6 2004年8月19日08~14时的6小时降水量(单位: mm)

a. 实况; b. 四维同化方案降水模拟; c. 非四维同化方案降水模拟

105°E), 但降水中心模拟值为62.7mm, 远远高于实况值, 总之, 从降水模拟来看, 四维同化方案的模拟结果较接近实况。

由上述模拟结果与实况的对比分析可以看出, 模式对这次暴雨的模拟结果比较理想。在模式前12小时积分过程中, 对常规要素的高空地面观测和分析资料进行同化, 使得预报初始场包含了更多的观测信息, 优化了初始条件, 是提高模式模拟能力的有效途径之一。但对青藏高原附近降水的模拟仍存在偏大偏强的问题, 需进一步研究解决。

4 结 语

本文利用MICAPS系统的T213资料、NCEP再分析资料及实况观测资料, 对2004年8月19日发生在西北地区东部的暴雨天气过程的大尺度环流背景和物理量场进行了分析; 运用三重嵌套的中尺度数值预报模式MM5, 对这一次暴雨过程进行了两种方案的高分辨率数值模拟, 得出如下结果:

(1) 这次暴雨天气过程中西太平洋副热带高压有一次明显的西伸, 是一次较典型的副高西北侧西南气流型暴雨。

(2) “8.19”暴雨天气过程中的水汽输送十分充沛, 低层水汽主要来自南海, 低空南风将暖湿空气向北输送到青藏高原东侧, 同时又以700hPa水汽输送最大, 并在甘肃河东和宁夏形成辐合; 中高层水汽主要来自

孟加拉湾, 高空西南风将充沛的水汽带到青藏高原东侧。

(3) 通过分析K指数和沙氏指数发现在暴雨发生前一天和当天, 西北地区东部已聚集了大量不稳定能量。

(4) 散度和垂直速度场的高低空配置有利于这次暴雨天气的发生发展。

(5) 三重嵌套的中尺度数值预报模式MM5能较好地模拟这次暴雨天气过程, 且对初始场资料进行四维同化后的方案在形势和降水预报方面优于未进行资料同化的方案, 但对青藏高原附近降水的模拟仍存在偏大偏强的问题, 需进一步研究解决。

参考文献

- 1 《西北暴雨》编写组. 西北暴雨. 北京: 气象出版社, 1992: 3~6.
- 2 陶诗言. 中国之暴雨. 北京: 科学出版社, 1980: 3~5, 144~155.
- 3 白肇烨, 徐国昌. 中国西北天气. 北京: 气象出版社, 1991: 202~254.
- 4 王劲松, 李耀辉, 康风琴等. 西北地区东部一次暴雨的数值模拟试验. 高原气象, 2002, (3): 258~266.
- 5 王川, 寿绍文. 一次青藏高原东侧大暴雨过程的诊断分析. 气象, 2003, 29 (7): 7~12.
- 6 寿绍文, 励申申, 姚秀萍等. 中尺度气象学. 北京: 气象出版社, 1991: 339~348.
- 7 张芳华, 马旭林, 杨克明等. 2003年6月24~25日江南特大暴雨数值模拟和诊断分析. 气象, 2004, 30 (1): 28~32.