

张杰, 彭丽霞, 史培军. 区域性暴雨的数值模拟和诊断分析的对比研究——以北京2012年7月21日暴雨为例[J]. 灾害学, 2017, 32(3): 191–196, 215. [ZHANG Jie, PENG Lixia and SHI Peijun. Numerical Simulation and Diagnostic Analysis on a Rainstorm in Beijing 7·21 Rainfall Case [J]. Journal of Catastrophology, 2017, 32(3): 191–196, 215. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2017.03.032.]

区域性暴雨的数值模拟和诊断分析的对比研究 ——以北京2012年7月21日暴雨为例*

张 杰^{1 2 3}, 彭丽霞², 史培军^{1 3 4}

(1. 北京师范大学 地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875; 2. 南京信息工程大学 大气科学学院, 江苏 南京 210044; 3. 北京师范大学 民政部-教育部减灾与应急管理研究院, 北京 100875; 4. 北京师范大学 地理科学学部, 北京 100875)

摘 要: 2012年7月21–22日, 北京地区出现了有气象记录以来一次罕见的特大暴雨天气过程, 对当地人民的生命财产造成了严重损失。该文采用新一代中尺度数值预报模式 WRFV3.7, 对这次极端降水天气过程进行了数值模拟研究, 通过模式输出结果对其发生、发展机制进行了对比研究。研究结果表明 WRF 模式能够较好地模拟出这次暴雨的落区、暴雨演变过程和 24h 累积降水; 本次暴雨过程的大尺度环流背景是典型的华北暴雨环流形势, 暴雨过程主要由低空中尺度系统造成, 暴雨的落区和强度是由中尺度系统随时间的移动而决定。

关键词: 区域性暴雨; WRF; 诊断分析; 数值模拟; 对比分析; 北京“7·21”暴雨

中图分类号: X43; P446 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000–811X(2017)03–0191–07

doi: 10.3969/j.issn.1000–811X.2017.03.032

全球变暖背景下的降水变化是目前气候学界关注的热点话题。全球气候变暖, 从而使得地表蒸发加剧, 大气持有水的能力增加, 全球尺度和区域尺度的水循环加快^[1]。根据克拉伯龙–克劳修斯方程, 气温每上升 1℃, 饱和水汽压约增大 7%。因为全球平均降水量与全球地表和大气能量平衡有关^[2], 所以全球平均降水量的增加取决于大气净能量平衡的变化^[3–4]。气候模式预测估计结果显示, 在温室气体增加导致的变暖背景下, 全球平均降水的增加速率为 1%~3% K⁻¹^[5–7]。然而, 卫星观测资料显示, 在过去 20 年(1987–2006), 全球平均降水对增暖的响应速率约为 6% K⁻¹, 与水汽响应速率相当。自然因素和人为因素在全球气候变化所引起的全球降水变化中的作用有所不同。刘建等人的研究表明^[8], 自然因素(太阳辐射和火山活动, SV)和人为因素(温室气体, GHG)所造成的全球气候增暖都会使全球平均降水量增加, 但全球降水量增加的幅度差异明显。全球平均降水对增暖的响应速率, 在 SV 强迫下为 2.1% K⁻¹, 而在 GHG 强迫下仅为 1.2% K⁻¹; 在自然因素的外强迫下, 热带陆地区域平均降水量

增加幅度为 5.5% K⁻¹, 而在人为因素外强迫下增幅只有 2.4% K⁻¹, 二者差异很大。研究表明自然因素增暖的主要机制是海洋恒温机制, 而人为因素增暖的主要机制是大气稳定机制^[8]。二者的主要机理不同, 从而造成了以上的巨大差异。降水过程可以分为两种, 过程雨和对流雨。通过观测资料和模式模拟对比, 分析这两种降水类型的降雨在降水过程中所占的比重, 从而对区域性降水进行机理分析, 可进一步探索区域性降水增多的原因。

在全球气候变暖的背景下, 区域极端性、对流性降水不断增加。突发性的暴雨过程难以预报, 从而造成了灾害; 又因为时间短, 降水落区集中, 在大中城市设防不够的情况下造成较为严重的损失。因此, 探寻极端暴雨降水形成的机理很有必要。

本文以 2012 年 7 月 21–22 日北京区域性暴雨为例, 对一次强降水过程进行观测分析和模式模拟的对比研究, 探寻区域性大暴雨发生的原因, 重点从环流形势场和中小尺度天气系统分析此次降水的成因。

* 收稿日期: 2017–02–03 修回日期: 2017–03–21

基金项目: 国家自然科学基金创新研究群体资助项目(41321001)

第一作者简介: 张杰(1993–), 男, 甘肃天水人, 硕士研究生, 主要从事区域性暴雨研究及数值模拟。E-mail: luck0213@foxmail.com

通讯作者: 史培军(1959–), 男, 陕西靖边人, 教授, 主要从事环境演变与自然灾害研究。E-mail: spj@bnu.edu.cn

1 资料和方法

本文主要使用了 MICAPS(Meteorological Information Comprehensive Analysis and Processing System) 系统的站点实测数据、中国自动站与 CMORPH(Climate Prediction Center Morphing Technique) 降水产品融合的逐时降水量产品和 NCEP/NCAR(National Centers for Environmental Prediction/ National Center for Atmospheric Research) 每 6 h 一次的 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 的 FNL(Final Operational Global Analysis Data) 资料。利用 MICAPS 系统站点实测数据、中国自动站与 CMORPH 降水产品融合的逐时降水量产品, 分析此次暴雨过程的天气形势、降水实况; 利用 NCEP/NCAR 每 6 h 一次的 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 的 FNL(Final Operational Global Analysis Data) 资料为 WRF(Weather Research and Forecasting Model) 模式模拟提供初始条件及边界条件; 最后利用 WRF 模式输出的物理量, 基于 GrADS 对此次暴雨过程数据进行分析。

2 天气形势分析和诊断

2.1 暴雨过程概述

北京“7·21”暴雨过程中强降水发生在 2012 年 7 月 21 日 16 时至 22 日 02 时, 北京大部地区出现了降水, 而在北京西南部房山区为强降水的中心。图 1 给出利用中国自动站与 CMORPH 降水产品融合资料所绘制的 24 h 累积降水量分布图。根据图 1 可知, 从强暴雨中心和较强暴雨中心位置来看, 暴雨落区大致呈东北—西南向分布; 从降水量上来看, 北京市从西北到东南, 降水量不断的增多, 大部分地区降水量超过 100 mm, 南部地区降水量超过 200 mm, 暴雨中心降水量超过 300 mm; 北京市各个观测站中, 降水强度最大的是房山霞云岭台站, 所测到的降水值达到 338 mm^[9-13]。此次暴雨过程降水强度大, 降水持续时间长, 强降水时段为 7 月 21 日 16 时至 22 日 02 时, 这些时次的逐小时降水都在 30 mm 以上, 均超过了小时降水大暴雨标准。此次暴雨降水强度大, 降水时间长, 强降水时段集中, 其复杂的形成原因让预报本次暴雨过程存在困难, 使预报结果并没有很好的给出准确落区, 从而导致北京、河北等地 100 多人死亡, 几十人失踪, 给人民生命和财产带来极其严重的损失。此次特大暴雨洪涝灾害造成北京市大面积受灾, 受灾人口约 77.76 万人, 死亡 79 人, 紧急转移安置 9.59 万人; 倒塌房屋 7 828 间、严重损坏房屋 4.4 万间、一般损坏房屋 12.19 万间; 农作物受灾面积 5.75 万 hm^2 ; 直接经济损失 159.86 亿。

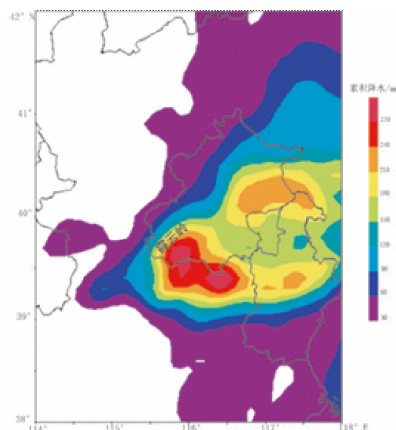
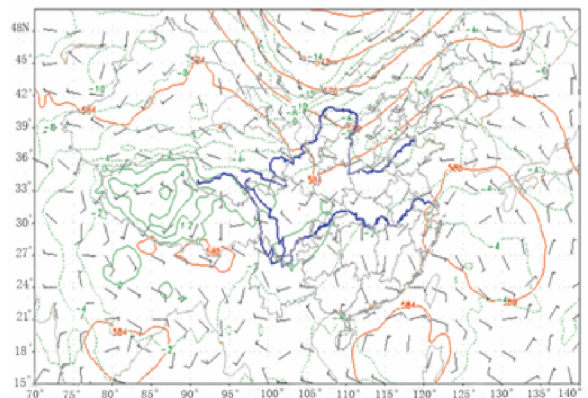


图 1 2012 年 7 月 21 日 08 时至 22 日 08 时 24 h 累积降水图



实线: 500hPa 位势高度; 虚线: 等温线; 风向标: 风矢量场

图 2 2012 年 7 月 21 日 06 时 500hPa 天气环流场

2.2 环流背景分析

图 2 为 2012 年 7 月 21 日 06 时 500 hPa 天气环流场, 是此次暴雨过程发生前的高空环流形式场。从 500 hPa 位势等高线来看, 在贝加尔湖地区附近存在低压, 从等温线来看, 为深厚的冷系统, 且温度场滞后于高度场, 系统有加强的趋势。相对应的高空槽线位于贝加尔湖、蒙古、我国宁夏西北部区域; 正值 7 月, 副热带高压北抬升, 副热带高压下沉气流控制华北地区, 刚好北京地区处于副热带高压西北部边缘地区, 并且受高压西北部西南气流控制, 西南气流带有大量的水汽, 为暴雨的发生提供了充足的水汽条件; 位于宁夏地区的高空低压槽线前, 有很强的正涡度平流, 从而为暴雨的发生提供了必要的动力条件。从 500 hPa 温度场配置来看, 槽线处温度场落后于高度场, 这样高空槽就会有加强趋势。同时低压槽系统在受到地形(高山)影响的作用下, 也会加强。华北地区受到副热带高压的控制, 高空低压槽的移动被副热带高压阻碍, 低压槽向东移动缓慢, 同时副热带高压西北部的西南气流不断向北京地区输送水汽, 从而在北京地区造成了持续时间长、降水强度大的一次暴雨过程。

2.3 物理量诊断分析

2.3.1 水汽条件分析

暴雨形成的必要条件之一便是充足的水汽供应^[14-17], 只有在充足的水汽供应的前提下, 才能够产生大量的降水。这就需要暴雨落区上空大气饱含大量的水汽, 饱和层较厚, 而且暴雨的维持也需要不断的水汽输送。分析此次暴雨发生前、后的低层大气的比湿发现, 降水前, 从 850 hPa 比湿场来看, 图 3a 为 2012 年 7 月 20 日 18 时湿区分布, 北京东南部为主要的湿区; 图 3b 为 2012 年 7 月 21 日 06 时湿区分布, 华北地区有一伸向北京南部地区的湿舌, 为 21 日的降水提供了充足的水汽条件; 图 3c 为 2012 年 7 月 21 日 18 时湿区分布, 北京东南部地区还处于较湿的区域; 图 3d 为 2012 年 7 月 22 日 06 时湿区分布, 850 hPa 层水汽含量较少, 大气的含水量也较少, 北京地区的降水过程基本结束。

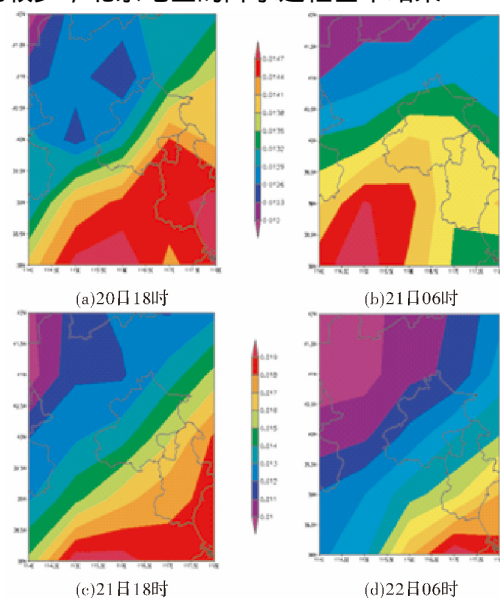


图3 850hPa 比湿场(单位: kg/kg)

水汽通量散度表示水汽的辐合、辐散, 从图 4 中的四个图来分析暴雨过程, 可以看出: 700 hPa 水汽通量散度, 由辐散转变为辐合再转变回辐散。图 4b 是 2012 年 7 月 21 日 06 时水汽通量散度图, 从图中可知道整个北京地区有强的水汽辐合, 为暴雨提供了充足的动力和水汽条件; 图 4c 为 2012 年 7 月 21 日 18 时的水汽通量散度图, 北京地区的水汽辐合有所减弱, 但表现为较强的辐合, 为暴雨的持续发展提供必要的条件; 图 4d 为 2012 年 7 月 22 日 06 时的水汽通量散度图, 辐合区域在北京东南方向, 北京地区表现为辐散, 从降水方面看, 此次暴雨过程也基本结束, 所以在散度场也较为匹配。

2.3.2 动力条件分析

形成暴雨必须要有充足的水汽供应外, 还需要有较强的动力抬升作用^[18]。下面用涡度来分析暴雨发生区域的动力抬升条件。北半球, 涡度的正值表示气旋运动, 有辐合上升运动, 从图 5 来分析暴雨过程可以看出: 图 5a 是 2012 年 7 月 20 日

18 时的 700 hPa 涡度场, 北京地区并没有处在涡度正值区域, 北京东南部有较弱的正涡度; 图 5b 为 2012 年 7 月 21 日 06 时的 700 hPa 涡度场, 北京南部区域位于正值区域, 有向上抬升运动, 这就为暴雨的发生提供了动力条件; 图 5c 为 2012 年 7 月 21 日 18 时的 700 hPa 涡度场, 北京的南部和西南部有一个强的涡度正值中心, 表示强的上升抬升运动, 从而有力的促成了暴雨的发生和发展。

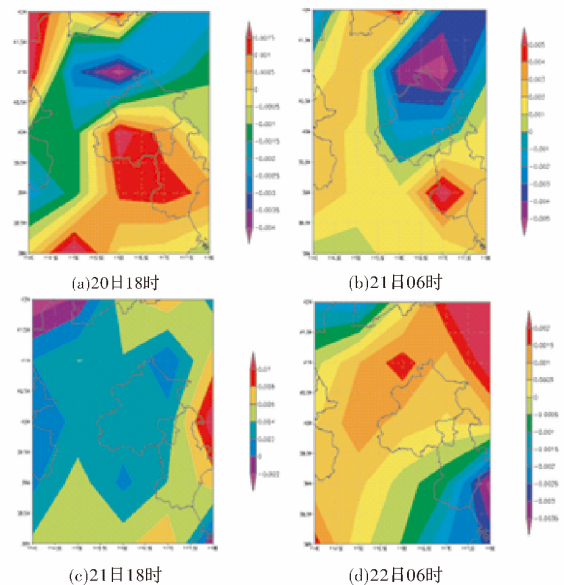


图4 700hPa 水汽通量散度(单位: g/hPa/cm³/s)

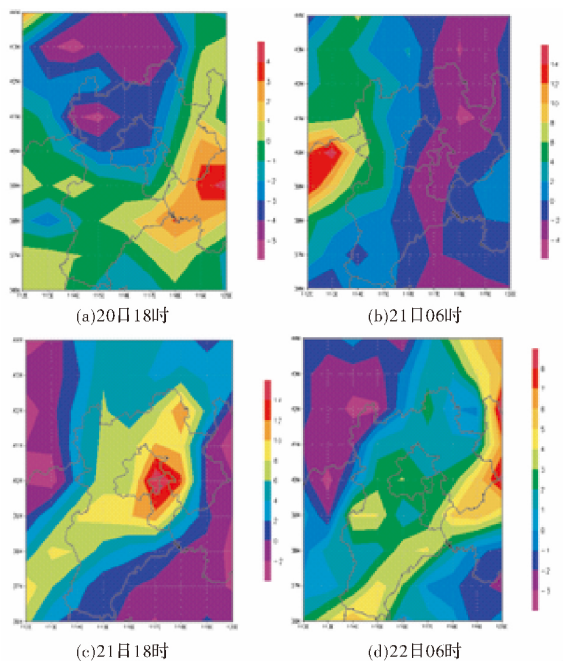


图5 700 hPa 涡度场(单位: 10⁻⁵ × s⁻¹)

垂直速度作为反映大气垂直上升速度的物理量^[19-20], 在 p 坐标系中通常用 dP/dt 表示, 负值表示上升运动, 正值表示下沉运动, 单位为 Pa/s。沿 115°E 做经向剖面图, 分别从四个时次分析暴雨过程中的垂直速度的变化情况。图 6a 为 2012 年 7 月 20 日 18 时的经向剖面图, 在 40°N 处大气低层

有强的上升运动,一直延申到高层;图 6b 为 2012 年 7 月 21 日 06 时至 22 日 06 时的经向剖面图,在 41°N 有强烈的上升运动,为暴雨的发生和发展提供了必要的上升运动和动力抬升作用。

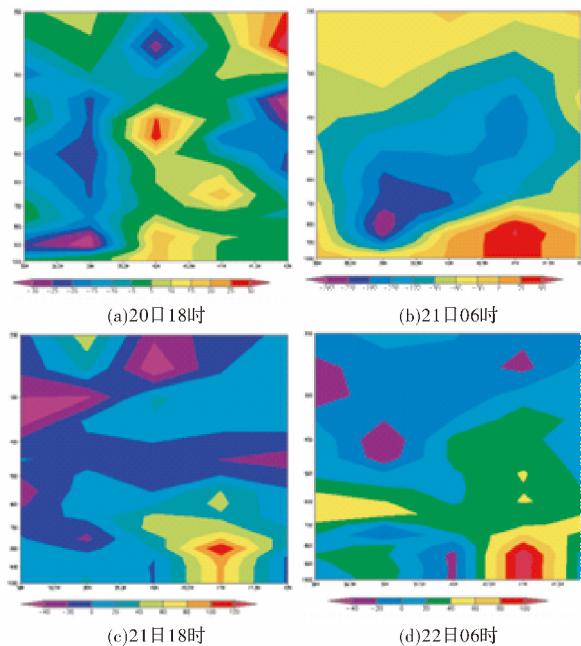


图 6 沿 115°E 垂直速度剖面图(单位: $\text{m/s} \times 10^{-2}$)

20 日,暴雨过程还未发生,北京地区上层大气饱含大量的水汽,大气不稳定性高,不稳定能量也很大,这些因素为暴雨的发生和发展奠定了基础;21 日,暴雨发生过程中,700 hPa 和 850 hPa 等中低层来自南方的部分暖湿气流,含有大量的水汽和不稳定能量,与冷空气相遇,暖湿气流辐合上升运动更加剧烈,这对暴雨的发生和发展,维持都及其有利。从之前的分析来看,散度场,涡度场和垂直速度这三者的良好配置,使得中低层大气(200 hPa 以下)产生了大范围的深厚上升运动,从而为此次暴雨的发生提供了必要的动力条件。暴雨时空分布极不均匀,降水主要出现在北京市房山区,强降水集中在 7 月 21 日 18 时至 22 日 0 时,由于其短时间内小范围的降水,造成了此区域的大暴雨,形成严重的洪涝灾害。

3 数值模拟试验

3.1 WRF 模式简介

WRF 模式是中尺度数值模式 The Weather Research and Forecasting Model。与以前版本的中尺度模式,比如 MM4、MM5 相比较,WRF 模式模拟的结果与实况更接近,模拟的结果更为理想;其次 WRF 模式常用的水平分辨率为 $1 \sim 10 \text{ km}^{[13]}$,而在时间尺度上,模式模拟通常确定在 $60 \text{ h}^{[13]}$ 时间尺度范围内一定区域范围的天气系统预报的模拟问题。因此,可以将 WRF 模式应用于局地特征明显、降水过程强度大、中小尺度特征明显的暴雨

过程模拟。

3.2 WRF 模拟方案及资料介绍

本文采用 WRFV3.7 中尺度模式,模拟北京“2012.7.21”暴雨过程(图 7)。模式中,使用双层嵌套,第一层粗网格中心经纬度设为 40°N 和 115°E ,网格格点数为 74×61 ,网格距为 30 km;第二层细网格格点数为 112×97 ,网格距为 10 km;两层网格垂直方向上均为 27 层,为了模式积分的稳定性,两重网格的模式积分时间步长分别设置为 180 s 和 60 s。模式选用的物理过程参数化方案如下:微物理过程采用 Ferrier(new-Eta)微物理方案,积云采用浅对流 Kain-Fritsch(new-Eta)方案,长波辐射采用 RTTM 方案,短波辐射采用 Dudhia 方案,行星边界层采用 YSU 方案,陆面过程采用 Noah 方案,近地面层采用 Monin-Obukhov 方案。模式中使用 NCEP/NCAR 提供的分辨率率为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$,使用的数据资料的时间间隔为 6 h 一次;FNL 数据资料为此次模拟所用到的模拟过程提供初始条件及边界条件,模式模拟的积分时间总共 48 h,从 2012 年 7 月 20 日 18 时开始至到 22 日 18 时结束,模式模拟的结果每 1 h 输出一次。

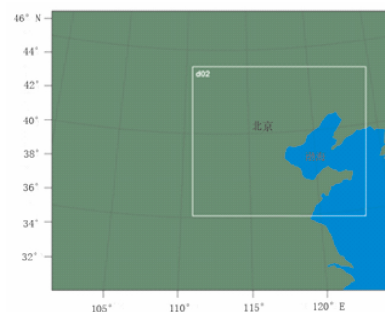


图 7 WRF 模式模拟区域

3.3 数值模拟结果分析

3.3.1 降水

图 8 第一行是 2012 年 7 月 21 日 18 时至 2012 年 7 月 22 日 00 时的逐小时降水实况图,可以看出,从 18 时开始,北京地区开始强降水过程,且北京大部分地区都出现了降水,且大部分地区的逐小时降水量都在 30 mm 以上;从 18 时逐小时降水图可以看出,这个时段,北京暴雨降水有两个强降水中心,分别位于北京西南地区 and 北京中部偏东处,两个强降水中心的雨量都超过 50 mm,到下一个时次,雨量有所减少,雨带向东方方向移动,与大尺度环流背景相适应;在 20 时,暴雨只有一个中心,暴雨量值很大,暴雨中心位于北京西南房山地区,暴雨中心降水量超过 70 mm,之后三个时次,随着时间的推移,整个天气系统向东移动,暴雨雨带也随之东移和减弱。从这个时段的逐小时降水来看,暴雨雨带呈现东北—西南走向,随着时间的推移,暴雨雨带由西北移向东南,且从 21 日 18 时降水强度不断加强,到 21 时逐小时降水强度达到最大,暴雨中心降水量超过 70 mm。之后,随着时间的推移,暴雨逐渐减弱,暴雨落区移出北京地区。

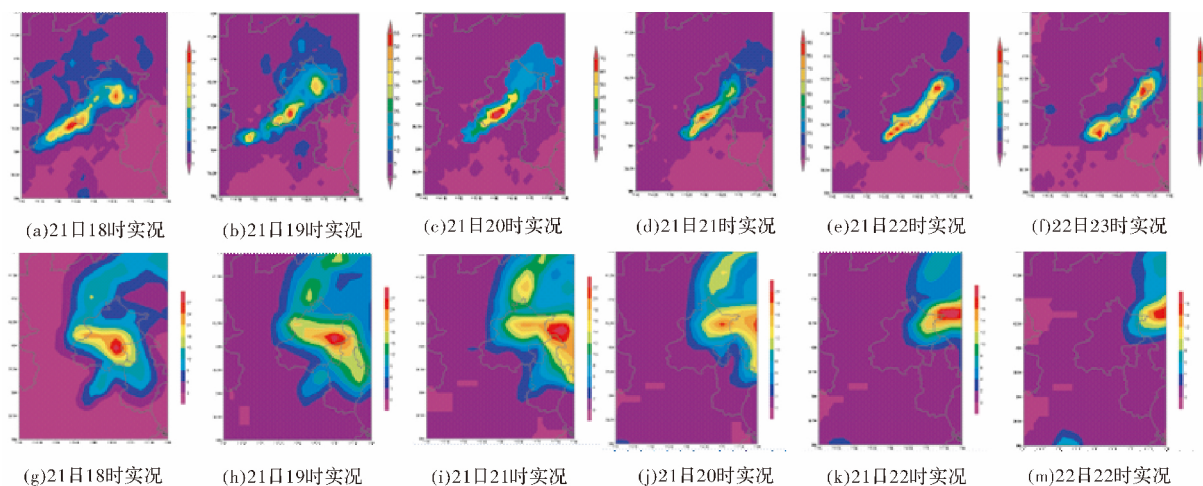


图 8 逐小时降水分布图(单位: mm)

图 8 第二行是模式模拟输出的 2012 年 7 月 21 日 18 时至 21 日 23 时的逐小时累积降水图, 与实况相对比, 可以发现, 模式输出的逐小时降水并不是很理想, 18 时, 模式输出的累积降水图, 只有一个强降水中心, 与实况相对比, 位于实况的两个强降水的中间地带, 且强降水的降水量偏小, 模式输出的强降水中心的降水量 30 mm, 随着时间的推移。从模式输出图来看, 暴雨的雨带和中心位置都随着时间向东移动, 这与实况的东南方向, 略有偏差, 模式输出的随后几个时间次序的降水中心和降水雨带的分布都与实况有所偏差。从雨带的大致分布上可以看出, 模式基本上模拟出此次暴雨过程和暴雨中心, 但从逐小时累积降水中心来看, 位置与实况相比较, 偏北; 随着时间的推移, 模式模拟的雨带也向东移动, 且雨势不断增强, 在 21 时达到最大, 但暴雨的降水量偏小。与实际情况相比较, 模式模拟的暴雨落区在前两个时次, 基本上较好的模拟出了暴雨过程, 但在之后的过程中, 实况中出现了两个降水较强的中心, 而模式模拟并没有很好的模拟出这两个降水中心, 只是模拟出较为偏北的降水中心, 且降水量值偏小。

图 9 是模式模拟输出的 2012 年 7 月 21 日 08 时至 22 日 08 时模式模拟的 24 h 累积降水量, 与模式输出的逐小时降水图相比较, 24 h 累积降水图就能较好的模拟出此次暴雨过程和暴雨雨带的分布以及暴雨中心落区和暴雨强度。与降水的实况图 1 对比, 模拟与实况相比较, 可以看出, 模式模拟的 24 h 降水较为理想, 但模式模拟的降水落区偏西偏北, 降水中心降水值偏小。从 24 h 累积降水落区来看, 模式模拟的降水落区成东北—西南向分布, 与图 1 实况 24 h 累积降水相比基本一致, 从 24 h 累积降水来看, 模式基本模拟出了北京“2012·7·21”这次暴雨过程和暴雨落区, 但 24 h 累积降水中心区域的最大降水量值与实况 24 h 累积降水中心的降水量值相比较数值偏小。

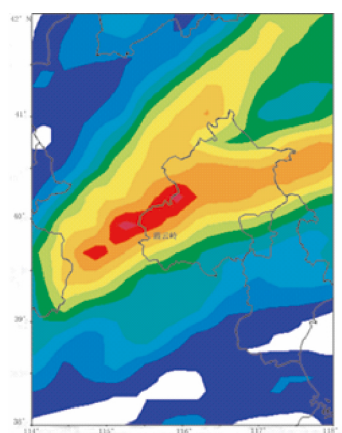
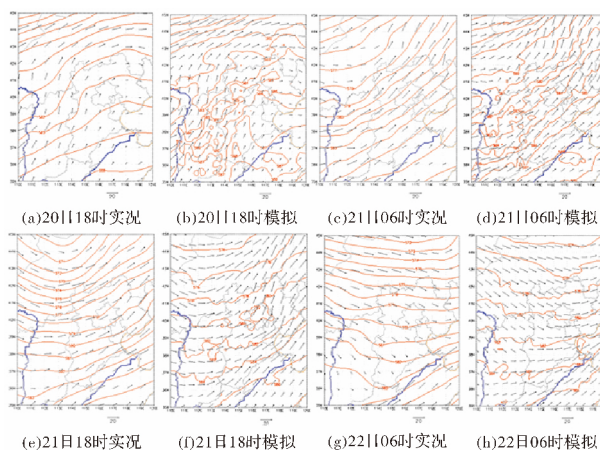


图 9 2012 年 7 月 21 日 08 时至 22 日 08 时模式模拟的 24 h 累积降水图

图 10 500hPa 高度场和风矢量场的合成图
(实线: 500hPa 位势高度; 箭头: 风矢量)

3.3.2 天气形势

本文选取模式输出的 2012 年 7 月 20 日 18 时、21 日 06 时、21 日 18 时、22 日 06 时四个时次高空环流形势场和风矢量场进行了对比分析, 发现模式模拟的输出结果和实况较为一致。图 10 显示了这四个时次的 500 hPa 等高面高空环流形势场和风场的实况和模拟输出结果。与暴雨过程相匹配, 图

10a 和图 10b 为 20 日 18 时的实况和模式输出环流形势场与风场。可以看出: 北京位于脊线上, 低压槽线位于河套地区, 模式输出也模拟出了基本的环流形势场, 风场与气压场相适应; 图 10c 和图 10d 为 2012 年 7 月 21 日 06 时, 低压槽东移, 北京位于低压槽前, 模式输出也模拟出了基本的环流形势场, 模式输出的风场和实况相比较, 风速偏小, 但基本上模拟出了环流形势场中的低压槽系统, 这也是暴雨产生的大尺度环流背景场; 图 10c 和图 10d 为 2012 年 7 月 21 日 18 时, 通过环流形势场和风矢量场分析可以看出模式输出和实况基本一致, 且北京位于槽线上, 环流形势场和风场相适应, 也是北京地区暴雨发生最为强烈的时段。大尺度环流场为北京地区的暴雨发生提供了必要的大尺度环流背景场, 从而使得北京地区的暴雨的发生和发展得到深厚的大尺度环流场的支撑; 图 10e 和图 10f 为 2012 年 7 月 22 日 06 时, 环流场平稳, 槽线移出北京地区, 从环流场上分析, 暴雨过程基本结束, 模式输出和实况相一致。

4 结论与讨论

4.1 结论

本文使用 MICAPS 系统站点实测数据、中国自动站与 CMORPH 降水产品融合的逐时降水量产品, 降水数据资料和 NCEP/NCAR(National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research) 每 6 h 一次的 $1^\circ \times 1^\circ$ 的 FNL(Final Operational Global Analysis Data) 资料对“7·21”北京特大暴雨进行了实况分析, 以及影响此次暴雨的大尺度环流背景、暴雨产生的水汽条件、动力条件进行了分析。并使用了中尺度数值模式 WRF3.7 模式, 模拟了此次暴雨过程, 其中模式使用 NCEP/NCAR(National Centers for Environmental prediction/ National Center for Atmospheric Research) 每 6 h 一次的 $1^\circ \times 1^\circ$ 的 FNL(Final Operational Global Analysis Data) 资料作为初始场和边界条件。模式输出结果与实况相比较, 分析研究得出以下结论:

(1) 此次“北京 7·21 暴雨”过程为典型的华北地区暴雨的大环流背景形势场, 从天气图来看, 在贝加尔湖附近区域有一高空冷涡, 冷涡的低空槽线南伸至我国宁夏地区, 北京东部副热带高压伸入华北, 副高西北侧的西南气流提供的水汽输送和冷空气作用共同造成了这次暴雨过程。主要的雨带随着中小尺度天气系统而移动, 暴雨的发生主要原因在于大的环流背景和中小尺度天气过程共同作用而产生。

(2) 从整体上看, WRF3.7 模式对此次暴雨的模拟, 有一定的模拟能力, 较好的模拟出 24 h 累积降水分布, 其中: 环流形势场和风矢量场的模拟较为理想, 但逐小时累积降水的模拟效果不理想。模式能够较好地模拟出暴雨的大致分布、暴雨中心, 以

及 24 h 累积降水和暴雨的整个移动过程。

4.2 讨论

本文利用暴雨过程模式模拟方法, 研究了区域性次暴雨过程, 但未对暴雨过程进行观测资料数据同化。因此, 模拟过程暴雨的逐小时降水不是很理想, 需要更进一步同化数据; 在模式模拟输出的 500 hPa 形势场中, 未平滑滤波, 与实况相比较, 环流形势场存在许多小扰动。同时, 在暴雨灾害中, 对暴雨灾害的预警尤为重要, 之后想要通过不同的气候背景和城市下垫面模式进行暴雨过程模拟的对比研究, 从气候背景角度分析暴雨灾害过程。

参考文献:

- [1] Held I M, Soden B J. Robust responses of the hydrological cycle to global warming. J Clim (accepted) [J]. Journal of Climate, 2006, 19: 5686–5699.
- [2] Trenberth K E, Stepaniak D P, Caron J M. The global monsoon as seen through the divergent atmospheric circulation [J]. Journal of Climate, 2000, 13(22): 3969–3993.
- [3] Allen M R, Stott P A. Estimating signal amplitudes in optimal fingerprinting, Part I: Theory [J]. Climate Dynamics, 2003, 21(5–6): 477–491.
- [4] Wentz F J, Ricciardulli L, Hilburn K, et al. How much more rain will global warming bring? [J]. Science, 2007, 317(5835): 233–235.
- [5] Karl T R, Knight R W. Secular trends of precipitation amount, frequency, and intensity in the United States [J]. Bulletin of the American Meteorological society, 1998, 79(2): 231–241.
- [6] Sun Y, Solomon S, Dai A, et al. How often will it rain [J]. Journal of Climate, 2007, 20(19): 4801–4818.
- [7] Climate change 2013: the physical science basis: Working Group I contribution to the Fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. Cambridge University Press, 2014.
- [8] Liu J, Wang B, Cane M A, et al. Divergent global precipitation changes induced by natural versus anthropogenic forcing [J]. Nature, 2013, 493(7434): 656–659.
- [9] 陶诗言. 中国之暴雨 [M]. 北京: 科学出版社, 1980: 3–225.
- [10] 骆凯, 李耀东, 秦丽. 一次华北暴雨过程的数值模拟及水汽过程分析 [J]. 暴雨灾害, 2010, 29(4): 307–314.
- [11] 高万泉, 周伟灿, 李玉娥. 华北一次强对流暴雨的湿位涡诊断分析 [J]. 气象与环境学报, 2011, 27(1): 1–6.
- [12] 梁丰, 陶诗言, 张小玲. 华北地区一次黄河气旋发生发展时所引起的暴雨诊断分析 [J]. 应用气象学报, 2006, 17(3): 257–265.
- [13] 宁贵财, 王式功, 马敏劲, 等. 北京一次暴雨过程数值模拟和诊断分析 [J]. 兰州大学学报 (自然科学版), 2014, 50(6): 847–852.
- [14] 毛冬艳, 乔林, 陈涛, 等. 2004 年 7 月 10 日北京局地暴雨数值模拟分析 [J]. 气象, 2008, 34(2): 25–32.
- [15] 王国荣, 王令. 北京地区夏季短时强降水时空分布特征 [J]. 暴雨灾害, 2013, 32(3): 272–279.
- [16] Barros A P, Lettenmaier D P. Dynamic modeling of orographically induced precipitation [J]. Reviews of Geophysics, 1994, 32(3): 265–284.
- [17] Sui C H, Huang C Y, Tsai Y B, et al. Meteorology-hydrology study targets Typhoon Nair and Taipei flood [J]. Eos Transactions American Geophysical Union, 2002, 83(24): 265–270.
- [18] 俞小鼎. 2012 年 7 月 21 日北京特大暴雨成因分析 [J]. 气象, 2012, 11(38): 1313–1329.
- [19] 孙军, 谌芸, 杨舒楠, 等. 北京 721 特大暴雨极端性分析及思考 (二) 极端性降水成因初探及思考 [J]. 气象, 2012, 38(10): 1267–1277.
- [20] 方翀, 毛冬艳, 张小雯, 等. 2012 年 7 月 21 日北京地区特大暴雨中尺度对流条件和特征初步分析 [J]. 气象, 2012, 38(10): 1278–1287.

(下转第 215 页)

- DEM[J]. *Geoscience & Remote Sensing IEEE Transactions on*, 2014, 52(2): 1336–1349.
- [14] Pradhan B, Jebur M N, Shafri H Z M, et al. Data fusion technique using wavelet transform and taguchi methods for automatic landslide detection from Airborne Laser Scanning Data and Quick-Bird Satellite Imagery [J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2016, 54(3): 1610–1622.
- [15] 安立强, 张景发, 赵福军. 汶川地震次生灾害提取——面向对象影像分类技术的应用[J]. *自然灾害学报*, 2011, 20(2): 160–168.
- [16] 杨文涛, 汪明, 史培军, 等. 基于地形因子分割、分类的面向对象滑坡快速识别方法[J]. *自然灾害学报*, 2015, 24(4): 1–6.
- [17] 徐张建, 林在贵, 张茂省. 中国黄土与黄土滑坡[J]. *岩石力学与工程学报*, 2007, 26(7): 1297–1312.
- [18] 马瑛, 田望学. 高分辨率遥感图像在黄土高原滑坡解译中的应用[J]. *资源环境与工程*, 2007, 21(2): 167–169.
- [19] 许领, 戴福初, 邝国麟, 等. IKONOS 影像在黑方台黄土滑坡调查中的应用[J]. *遥感学报*, 2009, 13(4): 723–734.
- [20] 朱立峰, 胡炜, 张茂省, 等. 甘肃永靖黑方台地区黄土滑坡坡土的力学性质[J]. *地质通报*, 2013, 32(6): 881–886.
- [21] Xu L, Dai F C, Gong Q M, et al. Irrigation – induced loess flow failure in Heifangtai platform, North – West China [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2012, 66(6): 1707–1713.
- [22] H – lbling D, Füreder P, Antolini F, et al. A semi – automated object – based approach for landslide detection validated by persistent scatterer interferometry measures and landslide inventories [J]. *Remote Sensing*, 2012, 4(5): 1310–1336.
- [23] 惠文华. 滑坡遥感智能解译理论与方法研究[D]. 西安: 长安大学, 2011.
- [24] Definiens. Developer 9. 1: Userguide [Z]. Definiens Imaging GmbH, 2015.
- [25] Martha T R, Kerle N, van Westen C J, et al. Segment optimization and data – driven thresholding for knowledge – based landslide detection by object – based image analysis [J]. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 2011, 49(12): 4928–4943.
- [26] 周飞. 甘肃省黑方台黄土斜坡变形特征与滑坡机理研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2015.
- [27] 许强, 彭大雷, 亢星, 等. 2015 年 4·29 甘肃黑方台党川 2# 滑坡基本特征与成因机理研究[J]. *工程地质学报*, 2016, 24(2): 167–180.

Semiautomatic Object-oriented Loose Landslide Recognition based on High Resolution Remote Sensing Images in Heifangtai, Gansu

ZHANG Qun and ZHAO Chaoying
(Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: Detection of landslide is the foundation of landslide study, is widely applied in landslide investigation and landslide mapping, hazard assessment, etc. Heifangtai in Gansu province was chosen as the study area. Recognition of landslide was conducted on the Geoeye-1 and DEM using object-oriented classification methods. In a first step, the use of multi-scale segmentation technique feature a collection of pixels into homogenous, as the object. Then, based on the spectral, spatial, texture and neighborhood characteristic of objects, we establish landslide recognition rules to extract landslide areas. The results show that the object-oriented technology can better extract loess landslide hazard information.

Key words: the Heifangtai landslide; loose landslide; object-oriented analysis; multi-scale segmentation, detection of landslide; Yongjing in Gansu

(上接第 196 页)

Numerical Simulation and Diagnostic Analysis on a Rainstorm in Beijing 7·21 Rainfall Case

ZHANG Jie^{1 2 3}, PENG Lixia² and SHI Peijun^{1 3 4}

(1. State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resources Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. College of Atmospheric Science, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 3. Key Laboratory of Environmental Change and Natural Disaster of Ministry of Education, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 4. Academy of Disaster Reduction and Emergency Management of Ministry of Civil Affairs and Ministry of Education, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: On 21 July 2012, Beijing suffered a severe rainstorm I, which caused serious damage to the local people's lives and properties. The high resolution model WRF (Weather Research and Forecast) developed by NCAR is widely used to simulate the extreme precipitation process. In addition to that, the outputs of WRF can well represent the physical mechanism of the severe rainstorm. Therefore, WRF is employed in this paper to simulate the 7·21 severe rainfall in Beijing, and the main results as follows: 1) WRF model can well locate the heavy rain fall area, and simulate the cumulative rainfall of 24-hour rainstorm evolution; 2) The general circulation of atmosphere of the rainstorm process is a typical circulation situation in north China, and the rainstorm process is mainly caused by low-level mesoscale systems, while rain fall area and intensity is determined by the mesoscale system along with the movement of time.

Key words: regional rainstorm; diagnostic analysis; WRF numerical simulation; regional comparison; Beijing 7·21 heavy rainfall