

卢冰, 史永强. 2014. 2012 年 7 月中旬克拉玛依罕见强对流天气的数值模拟分析. 气象, 40(8): 948-956.

# 2012 年 7 月中旬克拉玛依罕见强对流天气 的数值模拟分析<sup>\*</sup>

卢 冰<sup>1</sup> 史永强<sup>2</sup>

1 中国气象局北京市城市气象研究所, 北京 100089

2 新疆维吾尔自治区克拉玛依市气象局, 克拉玛依 834000

**提 要:** 本文利用 NCEP-FNL 分析资料、自动站观测资料、卫星云图、天气雷达探测资料以及 WRF 模式的模拟结果, 对 2012 年 7 月 14 日新疆克拉玛依罕见的短时强降雨和冰雹强对流天气的机理进行了诊断分析, 结果表明: 在大尺度湿性不稳定层结的环境场中, 冷空气的入侵在山区地形配合下, 在背风坡侧造成强烈的水平温度梯度和地面辐合线, 利于强对流的发生。WRF 模拟结果显示, 高低空风速大值区的配置, 环境风场的垂直切变, 垂直方向上假相当位温的鞍形配置给垂直上升运动的加强提供基础, 使最大上升速度达到  $6.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 上升高度达 9 km, 同时也看到, 由于中层湿中性层结较薄, 难以长时间维持上升运动的发展, 上升运动区较为窄小, 强降雨发生区域仅为二十几千米。山区地形对强对流发展的作用较为复杂但也很明显, 地形阻挡加强了地面风场的切变辐合, 同时气流过山引发正负位势涡度带的生成和传播, 激发垂直环流的形成, 为强对流发展提供动力条件。

**关键词:** 干旱地区, 强对流, 数值模拟, 地形作用

**中图分类号:** P458

**文献标志码:** A

**doi:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2014.08.005

## Numerical Simulation on a Rare Severe Convective Event in Karamay City in July 2012

LU Bing<sup>1</sup> SHI Yongqiang<sup>2</sup>

1 Institute of Urban Meteorology, China Meteorological Administration, Beijing 100089

2 Karamay Meteorological Office of Xinjiang, Karamay 834000

**Abstract:** One severe convective weather event which is so rarely seen in arid areas, occurred in Karamay City of Xinjiang on 14 July 2012. The convective event lasted for more than an hour, accompanied by short-time severe downpour and hail. The process of convection is studied with composite dataset including NCEP-FNL analyses, automatic weather station observations, satellite cloud image, Doppler weather radar and simulations of mesoscale numerical model WRF. The results show that, in the background of large-scale instable moist stratification and complex mountain terrain, horizontal temperature gradient and topographic convergence shear get enhanced on the lee side of mountain where convective weather develops easily. The numerical simulation results of WRF model indicate that the configuration of high- and low-level wind, vertical shear of horizontal wind and saddle type of vertical pseudo-equivalent potential temperature provides power for the ascending motion, driving the *W*-wind speed rapidly to the maximum  $6.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  and top level of ascending up to 9 km. The thin layer of moist neutral stratification limits the growing of vertical ascending motion so that the area of ascending motion is narrow and small, causing the severe

\* 中国沙漠气象科学研究基金(SQJ2012014)、公益性行业(气象)科研专项(GYHY201406012)和中央级公益性科研院所专项(IUMKY201312PP0402)共同资助

2013 年 7 月 8 日收稿; 2014 年 4 月 18 日收修定稿

第一作者: 卢冰, 从事数值预报及资料同化方面的研究和工作. Email: blu@ium.cn

precipitation to happen only in a local area. Mountainous terrain plays an obvious and complicated role in developing strong convection. The convergence of ground wind is enhanced by orographic effect, and the nonlinear disturbance of airflow over mountain prompts the rapid development of severe convection.

**Key words:** arid area, severe convective weather, numerical simulation, effect of terrain

## 引言

新疆维吾尔自治区远离海洋,深居内陆,是明显的干旱半干旱地区,石油工业城市克拉玛依市位于准葛尔盆地西北边缘,西有加依尔山,中部、东部处于开阔平坦的戈壁滩。克拉玛依市辖区处于加依尔山脉的背风坡沿,干燥少雨,近50年的年平均降水量仅为110 mm,在五十多年的气象历史记录上日降水量大于25 mm的日数只有4 d(周建荣等,2010)。2012年7月14日17—18时(北京时,下同)克拉玛依市区发生强对流天气过程,市区小时降雨量达38.3 mm,且伴有雷暴、大风及冰雹发生,造成了较为严重的经济损失,是克拉玛依市罕见的一次强对流天气。强对流天气由于空间尺度小、生命史短,天气变化剧烈,尽管对它的研究有了很大发展,但目前仍然是国内外天气预报中的一大难题。特别是在新疆干旱地区,强对流冰雹天气发生频次较少,主要发生在天山山脉,很少影响平原、盆地和河谷地区(马禹等,2004),因此对此次克拉玛依强雷暴天气过程的发生发展机制及物理过程还缺乏有效的认识。除了卫星云图、天气雷达回波以及较稀疏的地面观测站能够提供不同尺度、不同特征的大气观测信息外,缺乏多源探测手段对本次过程的观测描述,难以分

析捕获系统发生发展过程的关键细节。中尺度数值模式的快速发展,已经成为研究中尺度天气系统和中小尺度天气过程的重要工具(龚佃利等,2005;慕熙显等,2007;毛冬艳等,2008;张德林等,2010;刘冀彦等,2013;肖递祥等,2013),在充分分析现有观测资料基础上,本文通过以NCEP-FNL分析资料为初始场的WRF高分辨率数值模拟结果,进一步研究此次强对流天气的发生机制和空间结构特征,分析加依尔山山区地形在强对流天气中所起的作用和影响,为今后预报克拉玛依类似突发性强对流天气提供参考。

## 1 环流背景特征和影响系统

本次克拉玛依市强对流暴雨过程发生在中亚低涡的天气形势中,从2012年7月11日开始,克拉玛依市上游一直维持着深厚的中亚低涡,低涡在垂直方向延伸至100 hPa,且稳定少动。不断受到中亚低涡分裂的短波槽影响,克拉玛依市区持续出现阴有阵雨的天气,中低层湿度不断积累,潜在不稳定能量增大。7月14日,伊朗脊加强并略东移,同时中亚低涡开始减弱北收东移,进一步影响克拉玛依。7月14日08时美国NCEP-FNL分析资料(图1)显示,在500 hPa等压面上,受伊朗脊的东移影响,

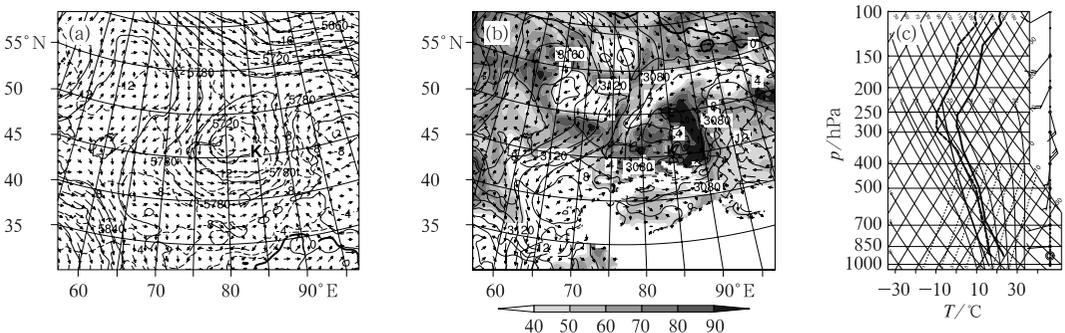


图1 2012年7月14日08时的天气形势场和实况探空曲线

(a) 500 hPa 高度场(单位: gpm)、温度场(单位:  $^{\circ}\text{C}$ )以及风场(单位:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ), (b) 700 hPa 高度场、温度场、风场及相对湿度场(填色, 单位: %), (c) 克拉玛依(图1a中K所示位置)探空曲线

Fig. 1 Synoptic weather situation at 08:00 BT 14 July 2012

(a) geopotential height (unit: gpm), temperature (unit:  $^{\circ}\text{C}$ ), and wind (unit:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) at 500 hPa; (b) geopotential height, temperature, wind and relative humidity (shaded, unit: %) at 700 hPa; (c) radiosounding in Karamay

中亚低涡在南北方向分裂成北槽南涡的形势,克拉玛依位于冷低涡东部,高空风场以西、西南风为主,处于正涡度区域;700 hPa 等压面上槽脊及温度场也表现出明显冷平流结构,北疆大范围处于高湿区,相对湿度达 80% 以上,水汽条件丰富,同时在国境线外有一弱槽,该弱系统东移遇到加依尔山的地形阻挡,触发了对流天气系统的发展。由实况探空资料看,700~400 hPa 为深厚的高湿区,700 hPa 以下则是相对干层;从低层到高空逐渐由西风转为东南风,有风场的垂直切变;同时看到,从 850~300 hPa 存在不稳定能量。FNL 分析资料在克拉玛依站点的探空曲线与实况观测一致。

卫星云图(图 2)显示,7月14日上午,克拉玛依及周边区域以晴空为主;下午16时,随着冷空气的东移,云团在山前开始生成,在山地地形的影响下快速加强,并发展成为强对流云团,造成克拉玛依市区的雷暴天气。该对流云团尺度较小,但发展迅速,与马禹等(2004)对新疆降雹云团的普查结果一致,即新疆降雹云团的尺度比较小,形状不规则的较多。

图 3 显示强对流发生时多普勒雷达探测的组合反射率,16:30,雷达回波沿着山脉成带状分布并开始从山中移出,17:03,雷达回波由西南—东北带状演变成两个强中心,最强中心逐渐靠近克拉玛依市区,该雷达回波中心的加强与山区复杂地形密不可分;另一个回波中心仍滞留在山中。由反射率最强中心的剖面图看(图 3c),强回波中心高度在 4~8 km,宽度在 20 km 左右,最大反射率因子为 55 dBz。相应地,克拉玛依气象站实况总降雨量达 38.5 mm,降雨过程伴有雷电及冰雹的发生。从实况观测可以看到,此次过程的雷暴云团从新生到发生仅 2 h,它的水平尺度仅为几十千米,具有显著的局地性和突发性,复杂的山区地形增加了该强对流的预报难度。

## 2 数值模拟和诊断分析

本次克拉玛依市区强对流天气水平尺度较小,稀疏的观测网难以捕获该过程的天气结构和发展变化。借助中尺度数值预报模式,模拟出与实况观测相接近的降雨结果,再利用数值模式高时空分辨率的三维模拟结果及实际观测资料对本次过程进行综合诊断分析。

本文使用美国新一代中尺度数值模式 WRF

(3.3.1版本)进行数值模拟,水平方向采用三层嵌套网格,分辨率分别为 27、9 和 3 km,垂直方向分为 38 层,模式顶气压为 50 hPa。模式初始场和侧边界条件由美国 NCEP-FNL 全球分析资料提供,起报时间为 2012 年 7 月 14 日 08 时,积分 12 h。模式选取的参数化方案分别为 WSM 6-class 微物理方案、rrtmg 长波辐射方案、rrtmg 短波辐射方案、Monin-Obukhov 近地面层方案、YSU 边界层方案以及 KF 积云参数化方案(最里层嵌套网格不使用)。

### 2.1 降雨量模拟与实况对比分析

从图 4 的实况降雨量观测和图 3 的雷达回波可以看到,在山脉背风坡面,实况降雨带沿山脉走向呈现西南—东北带状分布,从 14 日 17—19 时克拉玛依市区站点及其东南观测站点降雨总量分别为 38.5 和 21.1 mm,而其西南、东北的两个观测站点都没有发生降水,降雨量的分布具有很强的局地性。数值模式对于本次降水过程具有较好的模拟能力,降水的起始发生时间和结束时间与实况吻合,模拟降雨量的形状分布与实况接近,两大降水中心点也与雷达回波的两个强中心相对应。但 WRF 模拟的山脚处降水中心偏离克拉玛依市区 32 km,最大降雨量仅为 13.4 mm,与实况降雨量有一定的差距,模式的模拟能力还有局限性。总体而言,WRF 数值模式的降雨过程模拟与实况较为吻合,能够反映出本次过程的基本特征,可以利用数值模式的模拟结果对本次过程进行细致的空间、时间上的结构分析。

### 2.2 地面辐合线和温度对降雨作用

地面气象观测要素是天气过程的综合表现,具有很好的指示意义。图 5 和图 6 显示了地面风场和温度场的变化情况。2012 年 7 月 14 日 14 时,山区迎风坡以西,西北风为主,风速较大;山区背风坡则是以东南风为主,风速较小。17 时,受到西来冷空气过山气流的影响,迎风坡西风风速显著增强,E、F 点都已转为西风,D 点转为北风;在背风坡,K 点(克拉玛依气象站)和 C 点都已转成西北风,特别是 K 点,从 14 时的南风转成 17 时的西北风,2 min 平均风速从  $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  变成  $8.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,17:03 的瞬时风速更是达到  $18.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。而距离 K 点不远的 A、B 两点在 17 时仍维持东南风,因此,在 K、C 与 A、B 之间形成了很强的地面辐合线,利于对流的发生。

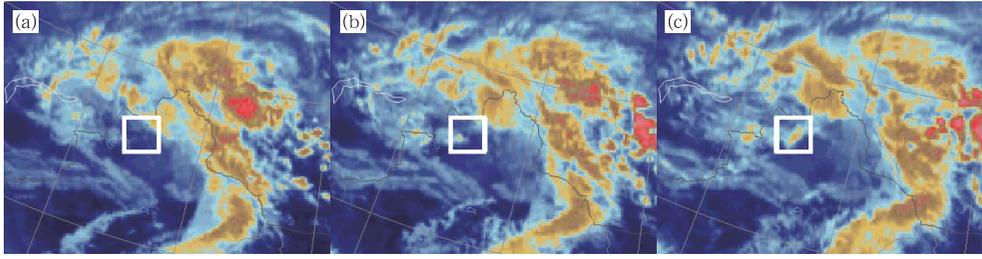


图 2 2012 年 7 月 14 日 FY2E 卫星红外云图  
 (a)14 时,(b)16 时,(c)18 时  
 (图中白框中心为克拉玛依地区)

Fig. 2 FY-2E satellite cloud image at (a) 14:00 BT, (b) 16:00 BT, (c) 18:00 BT 14 July 2012  
 (The white box refers to Karamay Region)

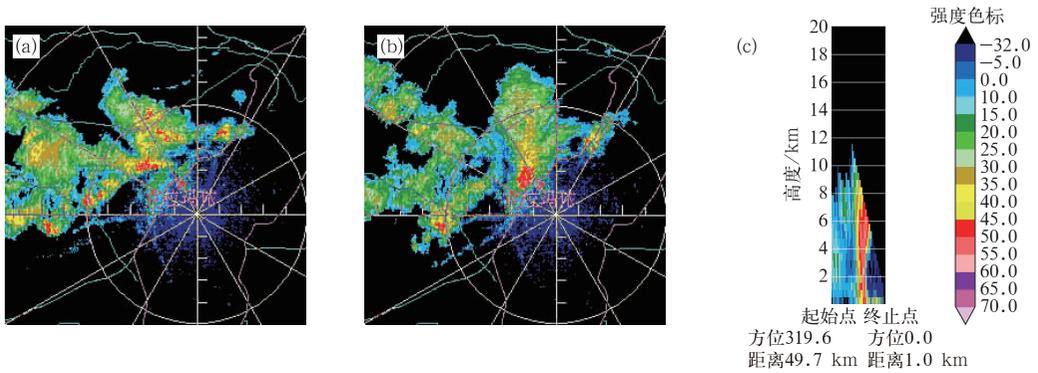


图 3 2012 年 7 月 14 日克拉玛依雷达组合反射率因子(单位: dBZ)

(a)16:30,(b)17:03,(c)17:03 时过强中心的垂直剖面反射率因子(距离刻度为 10 km)

Fig. 3 Radar composite reflectivity factor by Doppler weather radar at Karamay (unit: dBZ) on 14 July 2012  
 (a) 16:30 BT, (b) 17:03 BT, (c) cross-section plots along the strongest reflectivity at 17:03 BT

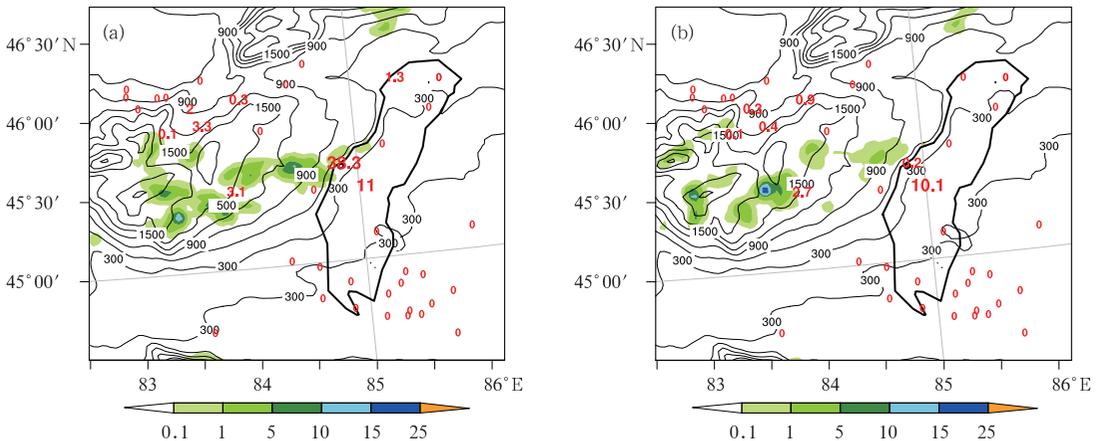


图 4 2012 年 7 月 14 日 WRF 数值模式模拟的降雨量与实况的对比(单位: mm)

(a)17—18 时,(b)18—19 时

(等值线为地形高度,单位: m;红色数值为实况降雨量)

Fig. 4 Precipitation (unit: mm) of WRF model simulation data (color shaded) and observation data (red digit) at  
 (a) 17:00—18:00 BT, (b) 18:00—19:00 BT 14 July 2012  
 (Contour line represents terrain height)

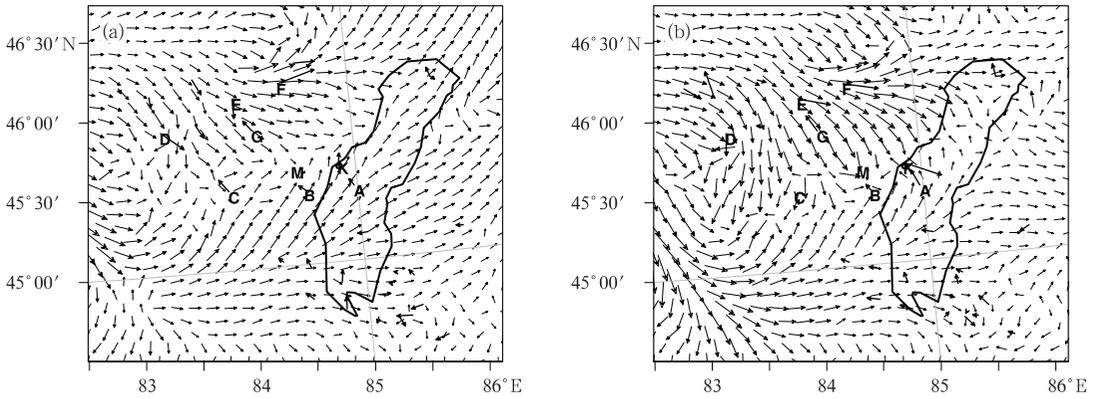


图 5 2012 年 7 月 14 日地面 10 m 风场变化(单位:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )

(a) 14 时, (b) 17 时

(细矢量为 WRF 模拟结果, 粗黑矢量为实况观测)

Fig. 5 10 m wind (unit:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) at (a) 14:00 BT and (b) 17:00 BT 14 July 2012

(Grey vectors are simulated by WRF, black vectors are observed by automatic weather stations)

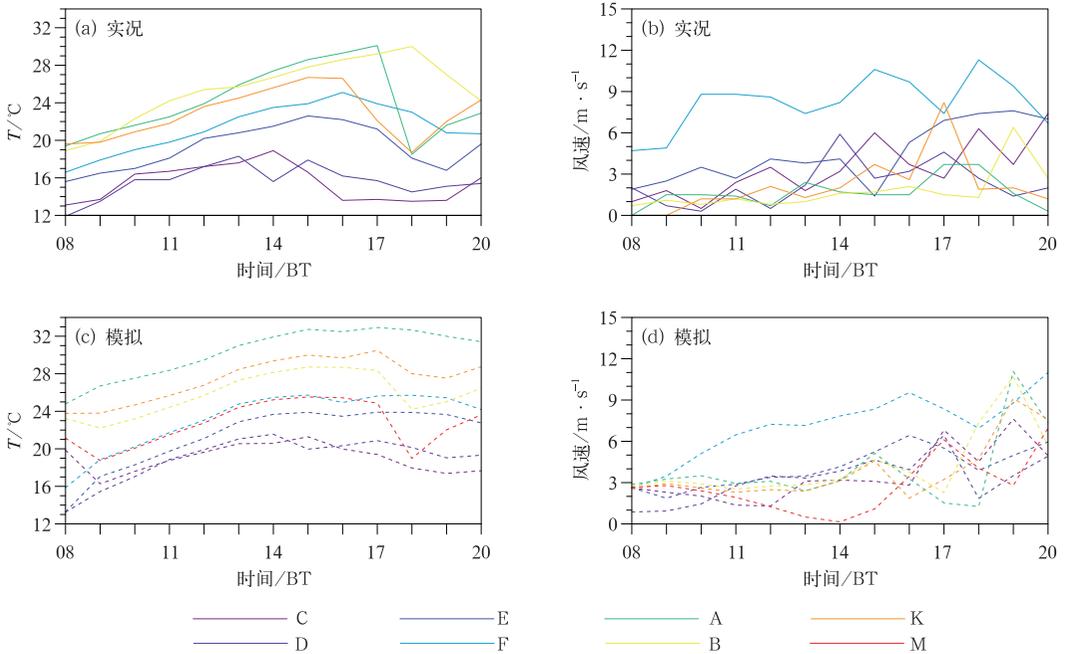


图 6 2012 年 7 月 14 日迎风坡和背风坡各个站点的 2 m 温度(a, c)和 10 m 风速(b, d)的实况(a, b)及模拟结果(c, d)的时序图

(各站点位置如图 5 所示)

Fig. 6 Time-series of observations (a, b) and simulations (c, d) of 2 m temperature (a, c), 10 m wind speed (b, d) of each observing site on the windward slope and leeward slope on 14 July 2012

(The site location is shown in Fig. 5)

随着冷空气的东移,山区迎风坡开始降温,降温幅度在  $4 \sim 6^\circ\text{C}$ 。K 点从 16—18 时,降温幅度达  $7.9^\circ\text{C}$ ,比山前迎风坡的降温幅度更大。冷空气经过附近 A、B 两点的时间则慢  $1 \sim 2 \text{ h}$ 。在 17 时,由于冷空气的前后入侵,K 与 A、B 点之间的水平温度梯

度很大,为了方便对比,将温度按照  $0.65^\circ\text{C} \cdot (100 \text{ m})^{-1}$ 的气温垂直递减率消除测站海拔高度的差异,K 和 A 之间的温度梯度大约为  $4^\circ\text{C} \cdot (10 \text{ km})^{-1}$ ,K 和 B 之间为  $2.5^\circ\text{C} \cdot (10 \text{ km})^{-1}$ 。如此强烈的低层水平温度梯度以及地面风的辐合切变,造成剧烈的

上升,有利于强对流的快速发展。通过对地面要素的详细分析可以看到,克拉玛依本次强对流过程与低层冷空气的入侵密切相关,导致冷暖空气剧烈交汇,水平风场切变显著,从而引发强对流天气,强降水发生在温度梯度密集的位置,与孙继松等(2008)和吴庆梅等(2009)对研究地形与城市环流对暴雨影响的结果一致。

对比 WRF 数值模式对各个站点的模拟结果,模式对冷空气的入侵路径有较好的模拟结果,但冷空气进入时间比实况滞后 1 h,且冷空气引起的降温幅度比实况偏弱,这与数值模式的地面温度总体比实况偏高有关系。对比模式模拟的最大降雨中心 M 点与实际最大降雨中心 K 点的温度、风场的变化,可以看到,模式结果中 M 点的降温时间与降温幅度,风速增大的时间点都与实况中的 K 点相一致。可以说, WRF 对本次过程地面各气象要素的

模拟能力较好。

### 2.3 地形对热力和动力场的影响

克拉玛依市区位于加依尔山脉东部山脚戈壁滩边缘,山脉为西南—东北走向,地势北低南高,山区北部海拔高度在 1500 m 左右,南部则高达 2400 m,山脉北端、南端分别有铁厂沟风口和阿拉山风口。此外,加依尔山脉迎风坡坡度较为陡峭,而背风坡坡度较平缓,克拉玛依市区位于山脉背风坡山脚中部,西边复杂的山区地形对克拉玛依市的天气过程产生重要影响。地形对大气运动产生了各种不同的动力、热力效应,导致了地形影响降水的动力、热力、微物理效应十分复杂。许多研究(陈潜等,2006;廖菲等,2007)都表明,迎风坡由于地形抬升容易发生降水,而背风坡侧往往是雨影区,但同时也指出(陈明等,1996;郭金兰等,2004;陈双等,2011;赵玉春

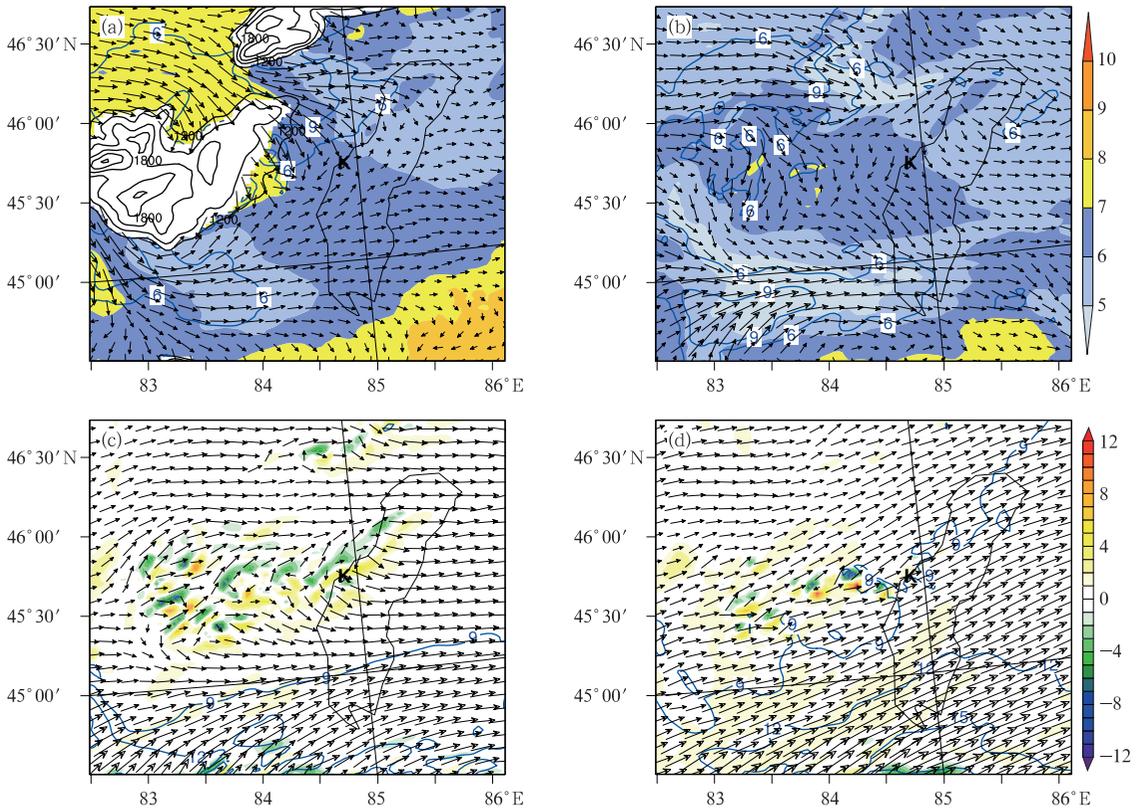


图 7 2012 年 7 月 14 日 17 时的高空风场(单位:  $m \cdot s^{-1}$ )、比湿(单位:  $g \cdot kg^{-1}$ )和位涡(单位: PVU)  
 (a)850 hPa 和(b)700 hPa 的风场、风速(蓝色等值线)及比湿(填色);  
 (c)600 hPa 和(d)500 hPa 的风场、风速及位涡(填色)  
 (黑色等值线为地形高度,单位: m)

Fig. 7 Wind, wind speed (blue contour line, unit:  $m \cdot s^{-1}$ ) and specific humidity (shaded, unit:  $g \cdot kg^{-1}$ ) at (a) 850 hPa, (b) 700 hPa; Wind, wind speed (unit:  $m \cdot s^{-1}$ ) and potential vorticity (unit: PVU) at (c) 600 hPa, (d) 500 hPa at 17:00 BT 14 July 2012

等,2012;阎丽凤等,2013),气流过山时容易产生非线性扰动,在一定条件下也会诱发暴雨、雷暴的发生。

从7月14日17时的高空图分析此次强雷暴天气的发展过程。从850 hPa的风场(图7)可以看到,低层西风气流过山时在背风坡风速增强,同时由于狭管效应的影响,在克拉玛依市区的西北部,存在风速大值区,特别是在克拉玛依市区西部,西北风风速达到  $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,低层大风利于不稳定能量的释放和雷暴的传播发展,在500 hPa等压面上,以西南风为主,大风中心位于克拉玛依南部地区。低空西北风风速大值区向东南方向挺进,高空西南风的风速大值区向西北方向延伸,高低空大风区的这种耦合配置使得在克拉玛依市低空形成水平辐合、高空形成水平辐散以及对流层中层的正涡度平流输送,有利于上升运动的发展。同时也看到,环境风场在垂直方向有较强的切变,从低层的西北风随高度顺转为西南风,也利于对流的发展。

从湿度场看,水汽主要来源于西北山区,低层的

风场配置利于水汽通量的辐合输送,同时低层冷空气的入侵,迫使暖湿空气抬升,使水汽在中层达到饱和,为降水提供基础,从而具备形成降雨、雹暴的动力和热力条件。条件不稳定湿大气过山时,受地形影响,在背风山侧形成成对的位涡带,并向下游传播,位涡是一个既包含热力因子又包含动力因子的综合物理量(寿绍文,2010),在图中位涡异常明显的地方,都是与强烈的水平散度和垂直运动相对应,可以看到,地形激发了垂直运动的发生,从而触发对流系统的发展。

成对出现的正负位势涡度带(图8a和8b)随着气流过山引起的扰动的增强而沿着背风坡向下游传播,由于低层冷空气的入侵迫使中层暖湿气流抬升,使位涡带向下游传播的同时也往高层传播,激发垂直环流的形成,为强对流的发展提供动力条件。在17时,背风坡侧最大上升速度达  $6.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,上升运动高度达9 km,同时上升区前方的中低层有明显的下沉运动,垂直环流的存在和明显垂直风切变有利于强对流的爆发。相应地,温度场(图9f)在中高

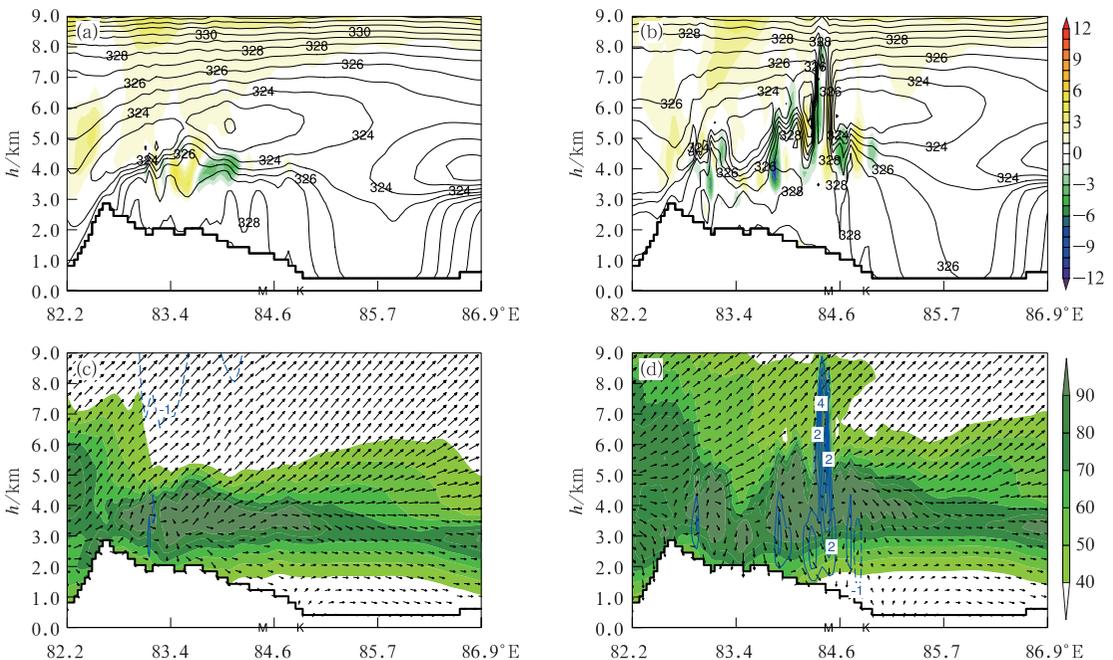


图8 2012年7月14日WRF数值模拟结果沿45.62°N的垂直剖面图

(a)16时和(b)17时的假相当位温(等值线,单位:K)和位涡(填色,单位:PVU),(c)16时和(d)17时的垂直速度(等值线,单位:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )、相对湿度(填色,单位:%)和水平风(单位:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )

Fig. 8 Vertical profile of WRF numerical simulation results along 45.62°N on 14 July 2012, pseudo-equivalent potential temperature (unit: K) and PV (unit: PVU) at (a) 16:00 BT and (b) 17:00 BT; relative humidity (shaded, unit: %), U-V wind (unit:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) and W component of wind (unit:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) at (c) 16:00 BT and (d) 17:00 BT

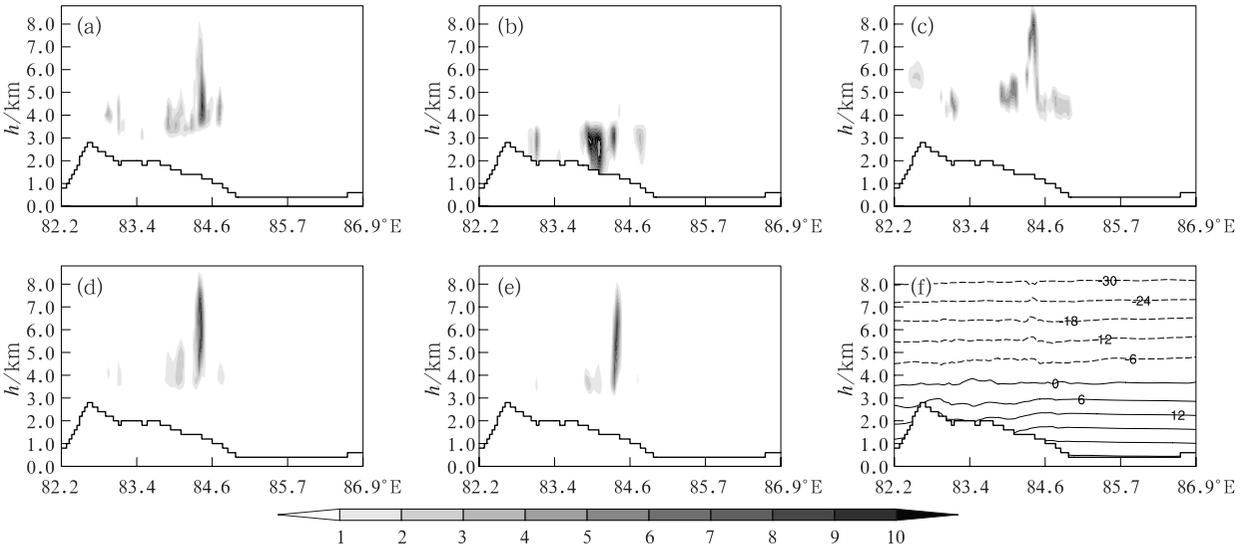


图 9 2012 年 7 月 14 日 17 时沿 45.62°N 的水物质混合比(单位:  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )和温度(单位:  $^{\circ}\text{C}$ )剖面图

(a) 云水混合比, (b) 雨水混合比, (c) 云冰混合比, (d) 雪混合比, (e) 霰混合比, (f) 温度

Fig. 9 Vertical profile of mixing ratio (unit:  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) and temperature along 45.62°N at 17:00 BT 14 July 2012

(a) cloud water, (b) rain water, (c) cloud-ice, (d) snow water, (e) graup water, and (f) temperature profile (unit:  $^{\circ}\text{C}$ )

层有弱波动,即在垂直运动上升区形成暖中心,促使低层能量快速向高层传送。在热动力场的配合下,暖湿空气抬升在中层达到饱和和形成降水。

对流的发展也与层结稳定度密切相关。16 时,在 K 点以西背风坡 4 km 以下,  $\theta_{\text{se}}$  随高度减小,即  $\partial\theta_{\text{se}}/\partial z < 0$ , 低层湿性不稳定层结较浅;中层 4 ~ 6 km 为湿中性层结,  $\theta_{\text{se}} = 324 \text{ K}$ ;高层(6 km 以上)是稳定层结。许焕斌等(2007)和李俊等(2012)的研究都说明了湿中性层结在对流天气中的重要性。在垂直剖面  $\theta_{\text{se}}$  鞍形分布的情况下,一旦低层有扰动,上升运动就会发展,低层扰动产生的上升速度在低层不稳定层结中得到加速发展,到了中层的中性层结中,垂直运动也不会受到阻尼运动的阻挡,到了高层的稳定层结,则开始减弱,与图 8d 中上升运动最大值在 5 km 附近相吻合。17 时,对流系统处于新生快速发展时期,强烈的上升运动把湿中性层结打破,等  $\theta_{\text{se}}$  线在背风侧产生明显断裂而与地形相交,相应地气流沿着垂直的等  $\theta_{\text{se}}$  线上升并在鞍形湿层结中得到快速发展,但也由于中层的中性层结厚度不够深厚,水平能量不能长时间供应,不利于上升运动的长时间维持。上升运动区深厚但窄小,与实际观测的雷达回波结构一致,具有很强的局地性。

### 2.4 云物理分析

在 WRF 模式中,本次模拟采用的微物理过程为 WSM 6 方案,它含有水汽以及云水、云冰、雨、雪、霰五类水凝物粒子,把冰雹粒子归到霰的物理过程中。图 9 所示的垂直剖面图中,零度层大概位于 3.5 km 处,零度层以下主要为雨水水物质,最高层为云冰,霰类水物质主要位于 4 ~ 7 km,最大值位于 6 km 处,洪延超等(2002)研究表明,霰的极大产生率都位于 6 km 附近,是霰胚及冰雹形成的源区,强烈的垂直上升运动是冰雹循环增长的条件。在图中看到,各类水物质的分布与温度相对应,同时各类水物质含量较大,但分布宽度都很窄,雨水水物质略宽,与图 8 中垂直上升运动区域相对应,说明了此次降水过程雨强大而降水范围小,卫星云图中的云块面积及实况降水也说明了这一点。

### 3 结 论

本文通过卫星云图、雷达回波、自动站资料以及 WRF 数值模拟结果对 2012 年 7 月 14 日新疆克拉玛依市发生的一次罕见局地强雷暴天气诊断分析,结论如下:

(1) 低层冷空气的入侵是本次强对流天气发生的基础。冷空气午后到达克拉玛依市,导致冷暖空气剧烈交汇,地面温度梯度达到  $4^{\circ}\text{C} \cdot (10 \text{ km})^{-1}$ ,地面辐合线显著,在高空湿性不稳定层结的配合下,利于对流的发展。

(2) 高低空大风区的配置利于低空形成水平辐合、高空形成水平辐散和低层水汽的辐合输送,环境风场较强的垂直切变利于上升运动的发展。气流过山在背风山侧形成成对的位涡带,并向下游和高层传播,加强垂直环流的发展,为强对流的发展提供动力条件。同时,环境场中低层为湿性不稳定层结、中层为湿性中性层结、高层为稳定层结的鞍形配置为对流的发展提供热力条件。在地形非线性扰动下,垂直上升速度迅速发展,最大上升速度达  $6.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,有利于对流的发生。

(3) 山区地形对强对流的触发和发展起到了关键的作用。低层气流翻山在背风坡侧风速增强形成风速大值区,低层大风区的存在利于水汽的辐合输送和不稳定能量的触发。气流过山同时引发正负位势涡度带的生成和传播,激发垂直环流的形成,是强对流发展的动力基础。

## 参考文献

- 陈明,傅抱璞,郑维忠. 1996. 山地背风涡旋的数值研究. 地理学报, 51(6): 527-534.
- 陈潜,赵鸣. 2006. 地形对降水影响的数值试验. 气象科学, 26(5): 484-493.
- 陈双,王迎春,张文龙,等. 2011. 复杂地形下雷暴增强过程的个例研究. 气象, 37(7): 802-813.
- 龚佃利,吴增茂,傅刚. 2005. 一次华北强对流风暴的中尺度特征分析. 大气科学, 29(3): 453-464.
- 郭金兰,刘凤辉,杜辉,等. 2004. 一次地形作用产生的强降雨过程分析. 气象, 30(7): 12-17.
- 洪延超,肖辉,李宏宇,等. 2002. 冰雹云中微物理过程研究. 大气科学, 26(3): 421-432.
- 李俊,王东海,王斌. 2012. 中尺度对流系统中的湿中性层结构特征. 气候与环境研究, 17(5): 617-627.
- 廖菲,洪延超,郑国光. 2007. 地形对降水的影响研究概述. 气象科技, 35(3): 309-316.
- 刘冀彦,毛龙江,牛涛,等. 2013. 地形对 2011 年 9 月华西致灾暴雨强迫作用的数值模拟研究. 气象, 39(8): 975-987.
- 马禹,王旭,郭江勇. 2004. 新疆系统性冰雹天气过程的环流形势及卫星云图特征分析. 高原气象, 23(6): 787-794.
- 毛冬艳,乔林,陈涛,等. 2008. 2004 年 7 月 10 日北京局地暴雨数值模拟分析. 气象, 34(2): 25-32.
- 慕熙昱,党人庆,陈秋萍,等. 2007. 一次飑线过程的雷达回波分析与数值模拟. 应用气象学报, 18(1): 42-49.
- 寿绍文. 2010. 位涡理论及其应用. 气象, 36(3): 9-18.
- 孙继松,杨波. 2008. 地形与城市环流共同作用下的  $\beta$  中尺度暴雨. 大气科学, 32(6): 1352-1364.
- 吴庆梅,郭虎,杨波,等. 2009. 地形和城市热力环流对北京地区一次  $\beta$  中尺度暴雨的影响. 气象, 35(12): 58-65.
- 肖递祥,肖丹,周长春,等. 2013. 低层偏南气流对一次暴雨过程的动力作用分析和数值模拟. 气象, 39(3): 281-290.
- 许焕斌,丁正平. 2007. 湿中性垂直运动条件和  $\beta$  系统的形成. 气象学报, 55(5): 602-610.
- 阎丽风,车军辉,周雪松,孟宪贵. 2013. 泰山地形对一次局地强降水过程动力作用的数值模拟分析. 气象, 39(11): 1393-1401.
- 张德林,马雷鸣. 2010. “0730”上海强对流天气个例的中尺度观测分析及数值模拟. 气象, 36(3): 62-69.
- 赵玉春,王叶红. 2012. 风垂直切变对中尺度地形对流降水影响的研究. 地球物理学报, 55(10): 3213-3229.
- 周建荣,汪满贤,杨锐. 2010. 克拉玛依市 1959—2008 年降水变化的特征分析. 沙漠与绿洲气象, 4(4): 31-35.