

文章编号: 2096-1618(2017)05-0537-07

新疆昌吉州一次极端暴雨天气过程分析及数值模拟

彭 敏^{1,2}, 巩远发¹, 纪 策³, 谭政华^{1,4}

(1. 成都信息工程大学大气科学学院, 四川 成都 610225; 2. 新疆昌吉回族自治州气象局, 新疆 昌吉 831100; 3. 新疆奇台县气象局, 新疆 昌吉 831800; 4. 辽宁省本溪市气象局, 辽宁 本溪 117000)

摘要:利用国家气象信息中心和新疆昌吉州的降水资料、FNL 再分析资料、卫星资料以及多普勒雷达资料, 并使用 WRF 模式, 针对 2015 年 6 月 9–10 日新疆昌吉州地区一次大暴雨过程进行了天气动力学诊断和中尺度分析。结果表明: (1) 伊朗高压向北伸展和西太平洋副高西移北伸是有利于暴雨产生的天气尺度系统配置; 对流层低层中尺度低压和水汽辐合等中尺度天气系统与大暴雨的形成和分布关系密切。 (2) 暴雨中心区双湾村地形独特, 有利于水汽辐合抬升, 配合有弱冷空气翻越天山, 激发重力内波, 对造成暴雨的强对流天气起到了关键作用。 (3) 暴雨发生在云顶亮温小于 $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的冷云西部, 在雷法回波图像上有“V”型缺口且稳定少动, 是产生短时暴雨的关键原因。 (4) 地形是决定暴雨强度和落区的重要条件。

关键词: 大气科学; 数值模拟; 地形作用

中图分类号: P458.1+21.1

文献标志码: A

doi: 10.16836/j.cnki.jcuit.2017.05.012

0 引言

2015 年 6 月 9 日午后至 10 日 08 时新疆昌吉回族自治州发生了一次强降水事件, 在木垒县双湾村 9 日 22 时至 10 日 10 时过程最强降水中心降雨量达 100 mm 以上, 是新疆非常少见极端降水天气过程。利用多种综合观测资料、再分析资料及卫星云图资料对新疆暴雨天气进行了深入的研究^[1-2], 高空深厚低槽的东移造成北疆西部和北部的强降水; 新疆暴雨天气水汽按“接力”方式从源地输送到暴雨区, 导致中低层增湿明显, 高层也有水汽增湿; 高空强西南急流形成高层强辐散区, 为特大暴雨的持续和发展供应了一定的动力条件; 卫星云图上的暗区表明干冷空气侵入, 与低层暖湿空气形成对流云, 而对流云尾部断裂后, 冷空气加速南下^[3-7]。近年对于天山地区的暴雨研究也取得一定进展, 刘春风等^[8-11]研究指出冷锋暴雨云团中的中尺度雨团导致短时强降水; 南亚高压呈现双体型、正位涡出现异常等对暴雨发生有一定影响; 高空急流向下游伸展, 动量下传, 锋区加强为暴雨提供动力条件。通过对中尺度特征分析, 发现中尺度气旋造成中高空强的水汽辐散, 使低层大面积水汽向暴雨区辐合, 使整层的空气接近饱和, 为暴雨天气提供了充沛的水汽; 地形的抬升作用对暴雨起到了关键作用; 冷暖空气汇合是造成暴雨的根本原因^[12-18]。

目前, 对于昌吉州南部这一特殊地形条件下产生

的暴雨研究还比较少, 因此本文借鉴已有暴雨的研究成果, 发现发生此次暴雨天气的影响系统及演变与之前气象学者分析暴雨天气有所不同, 并且细致分析了风场的演变和独特地形的影响, 特别分析双湾村既处于天山北坡的迎风坡水汽辐合抬升, 又处于东坡的背风坡当冷空气翻越天山易产生对流天气。

1 资料和方法

所用资料为: (1) FNL 逐 6 小时再分析逐资料, 所选要素包括风场、气温场、垂直速度场等, 资料时间为 2015 年 6 月 8 日 20 时至 11 日 08 时, 资料的水平分辨率为 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$, 分析范围为 $40^{\circ}\text{E}\sim 150^{\circ}\text{E}$ 、 $20^{\circ}\text{N}\sim 80^{\circ}\text{N}$, 垂直方向相对湿度、风场和垂直速度从 1000 hPa 到 100 hPa 共 26 层。 (2) 国家气象信息中心逐日降水资料。 (3) 自动气象观测站逐小时降水资料。 (4) 石河子新一代雷达资料及 VWP 产品, 风云 2D 间隔 1 小时卫星云图资料, 资料时间为 6 月 9 日 16 时 15 分到 10 日 4 时 15 分。利用这些资料计算, 并分析了动力因子、水汽条件、不稳定条件等中尺度系统的物理量。

还利用 WRF3.7 模式对此次天气进行了高分辨率模拟, 模拟时段为 2015 年 6 月 9 日 20 时至 10 日 08 时。模拟初始场和边界条件由 FNL ($1^{\circ}\times 1^{\circ}$) 的格点资料 (间隔 6 小时) 形成, 模拟区域中心为 (43.44°N , 90.16°E) 采用 3 层双向嵌套, 由外到内各区域格点数分别为 120×115 , 112×118 , 109×109 , 水平分辨率分别

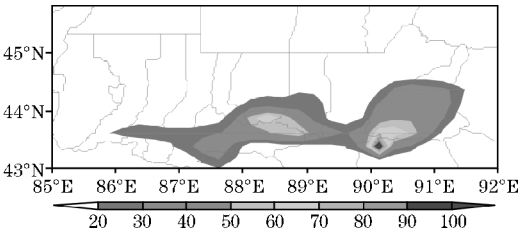
收稿日期: 2016-12-29

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划资助项目 (91537214), 国家自然科学基金资助项目 (41775079, 41275080)

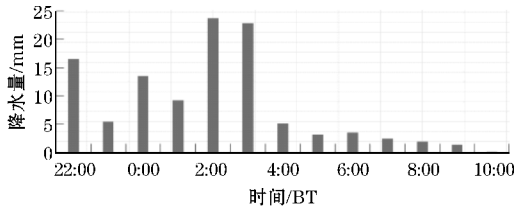
为27 km,9 km,3 km,垂直方向为30个层,3层嵌套分别采用分辨率为10 m、2 m和30 s地形数据,时间步长分别为81 s、27 s、9 s,模式层顶为100 hPa。模拟区域采用WSM 3类简单冰方案、RRTM长波辐射方案、Noah陆面过程方案、浅对流Kain-Fritsch (new Eta)方案以及YSU方案,Monin-Obukhov方案,考虑地面通量、云的影响和雪盖效应。

2 天气概况

图1是2015年6月9-10日昌吉州地区一次强降水过程的降水量和双湾村的逐小时降水量。由图1(a)可以看到,昌吉州大部地区出现中雨以上的降水,局部山区达到大暴雨的量级。9日08时-10日13时,昌吉州自动站中有7个站出现了大暴雨,34个站出现了暴雨,其中暴雨中心木垒县双湾村(图1b)从9日22时到10日3时出现了持续的强降水,10日02时最强,达到23.7 mm,过程累计降水量达108.8 mm;最大1 h降水量出现在玛纳斯县包家店为28.6 mm。木垒县日降水量达62.7 mm,突破历史同期极值。根据当地民政部门统计,此次极端的暴雨天气造成昌吉地区直接经济损失3053万元,全州受灾人口19512人,开展对此次昌吉暴雨天气分析研究对于应对气候变化和防灾减灾有一定的参考意义。



(a) 6月9日08时至10日13时昌吉州降雨过程降水量



(b) 6月9日22时至10日10时双湾村逐小时降水量

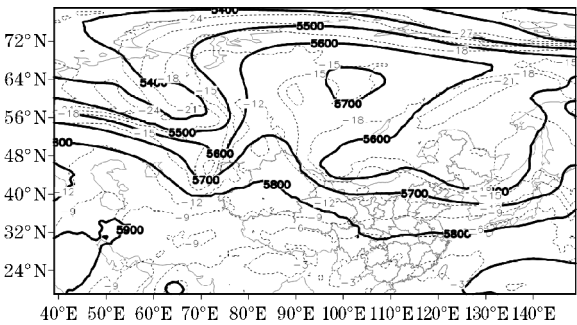
图1 2015年6月9日至10日昌吉州、双湾村的降水量演变

3 大尺度环流背景

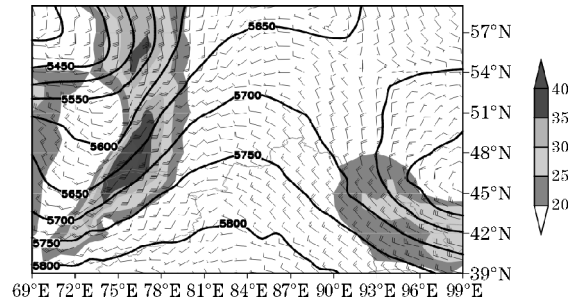
肖开提等^[19]认为伊朗副高南北振荡,西太平洋副高西伸北进,缓慢东移的副热大槽内的中亚低涡稳定,以及高原低压等天气系统的共同作用,为新疆暴雨过程中的水汽从源地向暴雨区输送并集中提供了根本的

大尺度环境条件。本次暴雨过程中也存在伊朗副高南北振荡,西太平洋副高西伸北进的形式,是典型的昌吉州暴雨环流形式。暴雨发生前期,6月4日至6日,500 hPa欧洲为低槽,贝加尔湖地区为低涡系统,里海-咸海至巴尔喀什湖为高压脊。乌拉尔低槽的环流经向度明显小于里海-咸海至巴尔喀什湖高压脊与贝加尔湖低涡,受强而稳定的贝加尔湖低涡的影响,乌拉尔低槽移动缓慢。暴雨发生前,9日08时(如图2a所示),环流经向度逐渐加大,乌拉尔低槽得到脊前北风带上冷平流的补充加深为540 gpm的低涡,在北疆北部有一个-15℃的冷中心,9日20时等高线明显北抬,位势高度580 gpm进入昌吉州,且有温度槽配合,10日08时槽脊东移天气结束。

从环流形势上看,暴雨前期出现了有利于昌吉州大降水的环流形势。分析风场变化发现(图2b),9日08时昌吉主要受高压脊前偏北气流控制,上游地区高空西南急流中心强度达44 m/s,将水汽输送进昌吉州,但8-10日无明显的风向切变和风速辐合。如此强度的暴雨是由中尺度系统直接作用形成,以下从物理机制、雷达及云图上分析暴雨的形成原因。



(a) 位势高度和温度场



(b) 位势高度和风场

图2 2015年6月9日08时500 hPa位势高度、温度场和风场

4 影响暴雨的物理因子

4.1 中小尺度风场和动力因子

李园园等^[20]研究指出中低层尤其是700 hPa的水汽辐合与垂直运动为强降水的形成提供了重要的动

力。从700 hPa的风场和垂直速度场可以看出(图3),昌吉州主要受西北气流影响,在奇台到木垒一带有一个弱的中尺度气旋及辐合线,有利于低层气流的辐合上升。双湾村(标记为SWC)有垂直速度负值中心,上升运动强烈有利于水汽低层辐合。

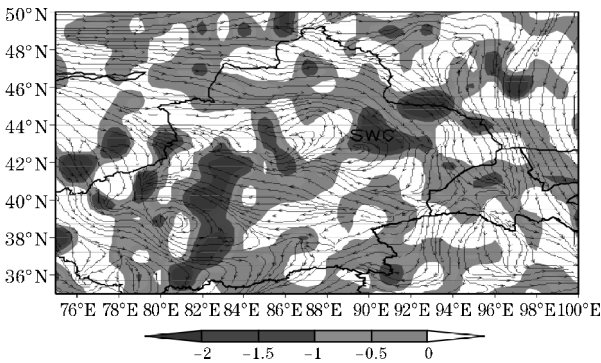
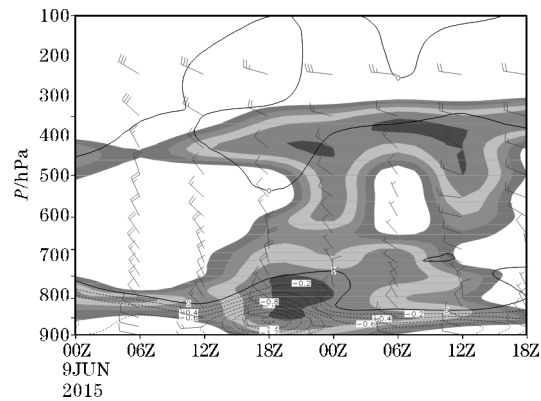
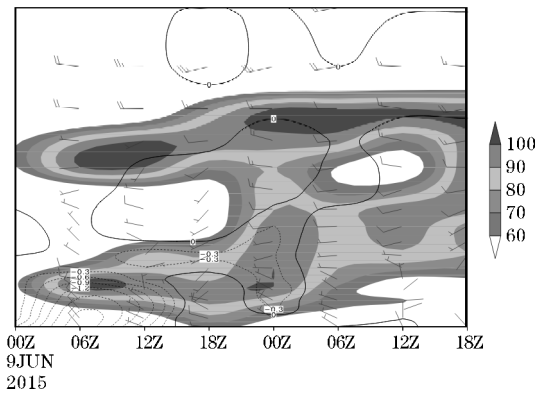


图3 2015年6月10日02时700 hPa流场和垂直速度(阴影区为垂直速度0 hPa/s)



(a) 双湾村



(b) 包家店

图4 相对湿度、风场和垂直速度的时间垂直剖面图

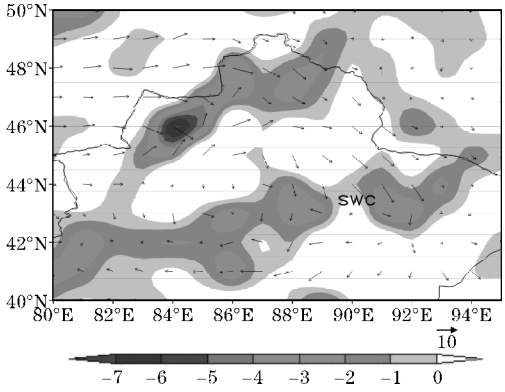
从相对湿度、垂直速度和风的时间垂直剖面,在双湾村(图4a)在10日02-08时从200 hPa以下相对湿度在60 %以上,600~900 hPa相对湿度在100 %,存在一个较强的深厚湿层;在500 hPa以下有负值的垂直速度,强度明显加强。而在包家店(图4b)从9日14-20时在300 hPa达到100 %的相对湿度区明显比双湾村

的范围大,600 hPa以下上升运动,以上下沉运动,易产生对流天气;而且垂直速度负值带呈现细长状,有利于时间短,强度强的强对流天气,这与包家店的短时强降雨时间相对应。

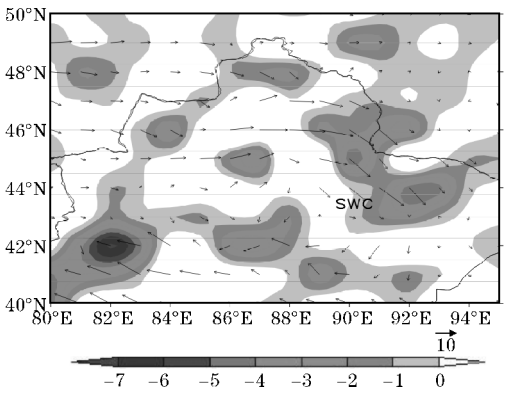
4.2 水汽条件

根据前面的大尺度环流及中小尺度天气系统的分析,500 hPa强的西南急流和中低层西北气流及天山山区的中尺度切变线辐合中心等构成了中天山暴雨的三维动力风场结构。从降雨发生前的水汽空间分布来看,第一波降雨发生前2 h,在9日20时(图5a)水汽通量散度的分布从南至北为“- + -”的形式,双湾村位于水汽通量散度负值带上,低层水汽有较好的辐合上升,水汽通量沿着负正负的水汽通量散度自北向南增大,在双湾村附近既是水汽辐合区又是水汽通量大值区,在22时带来16.5 mm的降水,第一波降雨也给第二波的暴雨提供了湿润的大气环境。第二波降雨发生在10日02时(图5b)暴雨区上空存在一个较第一波降雨更大的水汽通量,水汽通量散度负值区面积增大,在双湾村水汽通量散度负值带从东西向变为西北-东南向,再次引发了中天山山区的局地暴雨。

4.3 不稳定条件



(a) 9日20时



(b) 10日02时

图5 2015年06月9日20时和10日02时850 hPa水汽通量和水汽通量散度分布(SWC为暴雨中心双湾村)

表 1 包家店、双湾村时间插值探空物理量参数

站名	9 日 08 时		9 日 14 时		9 日 20 时		10 日 02 时	
物理量	<i>K</i>	<i>Cape</i>	<i>K</i>	<i>Cape</i>	<i>K</i>	<i>Cape</i>	<i>K</i>	<i>Cape</i>
单位	℃	J · kg ⁻¹	℃	J · kg ⁻¹	℃	J · kg ⁻¹	℃	J · kg ⁻¹
包家店	26	0	35	259	29	0	24	0
双湾村	26	0	27	0	29	9	32	270

注:*Cape* 为对流有效位能;*K* 为 *K* 指数

表 1 是包家店和双湾村在强降雨发生前后的主要时间插值探空物理量参数。数据分析表明,强降雨发生前和发生期间,*K* 指数较大,略显不同的是 9 日 14 时包家店上空的 *K* 指数 35 ℃,较双湾村要高 3 ℃,说明包家店发生对流性降雨的可能性更大,而在 16 时包家店出现 28.6 mm/h,具有很好的预报意义。表征强对流天气最有意义的物理量 *Cape* 在本次局地暴雨过程中表现为包家店在 9 日 14 时 *Cape* 值从 0 J · kg⁻¹ 上升到 259 J · kg⁻¹,双湾村在 10 日 02 时 *Cape* 值从 9 J · kg⁻¹ 上升到 270 J · kg⁻¹。双湾村比包家店高 11 J · kg⁻¹,存在较强对流不稳定潜势,持续时间也比包家店长。

4.4 地形作用

本次暴雨集中在中天山山区,海拔约 2000 m 左右,多以高山草甸、林区为主,具有典型的山地气候。前面动力条件分析指出北疆偏北气流将暖空气在山前顺势抬升,给山区的降雨提供动力基础。降雨发生前后中天山山区上空存在一个中尺度辐合切变,多表现为西北风风向的切变,天山北坡到天山山区地势呈阶梯式增高,近地层西北风的侵入在山前形成辐合上升,这支上升气流与山区上空水汽辐合气柱交汇引发局地短时强降水。而特大暴雨中心的双湾村位于东坡和北坡的位置(图 6),在背风坡的东坡来说,北疆出现一次弱冷空气活动,弱冷空气翻越天山,产生重力内波而造成短暂的较强对流天气。东坡产生的重力内波与北坡的地形抬升共同作用,造成双湾村此次强对流天气。

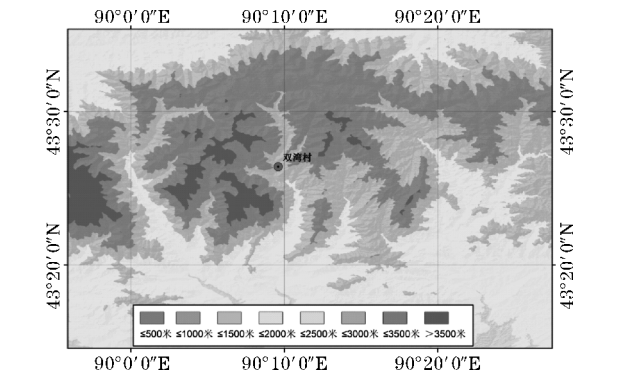


图 6 双湾村(90.16 °E, 43.44 °N)周围的地形特征图

5 多普勒雷达图像和云图特征分析

从雷达回波图可看出(图 7),此次降水回波反射率因子空间梯度较大,其强度中心的反射率因子在 45 dBZ 左右,回波顶高在 12 km 附近。前侧“V”型缺口回波表明强的入流气流进入上升气流,也是包家店雨强最强时刻。从径向速度(图略)分析,23 时 54 分 3.5 km 到 1.5 km 在玛纳斯和呼图壁的南部都是风场辐合区,有利于强降水产生。在 0 时 11 分有气旋式辐合风场,石门子水库从前 1 小时 0.4 ~ 2.4 mm,降水有所增强,而 4 时 06 分为纯辐散流场,降水结束。

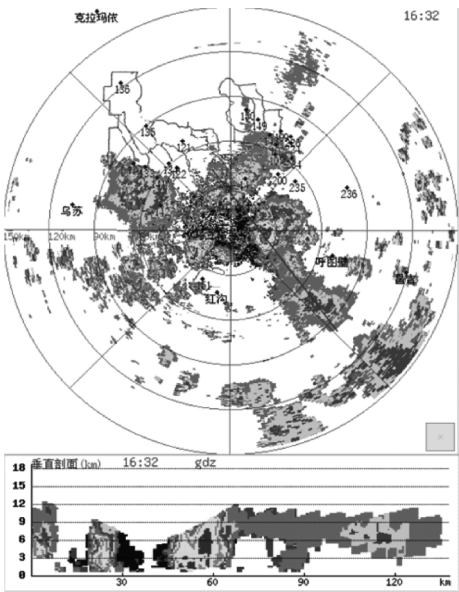


图 7 2015 年 6 月 9 日 16 时 32 分石河子雷达组合 DBZ 图

从卫星云图上看,9 日 16 时 15 分(图 8a),在玛纳斯中部有中尺度对流性云团 A,A 云团近似圆形,具有 β -MCS 特征,其中 A 云顶亮温中心为 -44.44 ℃,在这 1 小时内包家店的雨强为 28.6 mm,说明对流性云团较强。A 云团东移北上,至 18 时 15 分(图 8b)A 云团减弱东移至阜康,在 19 时 15 分(图 8c)A 云团强度减小,面积缩小。在 20 时 15 分(图 8d)A 云团分解为 B、C 云团,C 云团最大亮温中心位于阜康,至 21 时 45 分(图 8e)B、C 云团中心面积缩小并且缓慢东移。在 22 日 15 分(图 8f)B 云团消散,C 云团面积缩小;至 23 时

15 分(图 8g)对流云团 C 中心主体位于阜康和吉木萨尔,C 云团东移加强,云团中心面积扩大,TBB 达到过程最强的云顶亮温 $-50.33\text{ }^{\circ}\text{C}$,此时对应四工河 1 小时雨强为 16.4 mm 。在 1 时 15 分(图 8h)C 云团呈带状在奇台木垒的沿天山一带,C 的 $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冷云中心减弱,

但是 C 云团中心在木垒以东上空长时间停留,对应双湾村 1 小时雨强为 23.7 mm ,在 4 时 15 分(图 8i)C 云团的云顶亮温中心消失,对应双湾村 1 小时雨强为 5.1 mm ,大暴雨也趋于结束。在暴雨过程中,暴雨中心并不是在云顶亮温中心下方,而是在中心的西部。

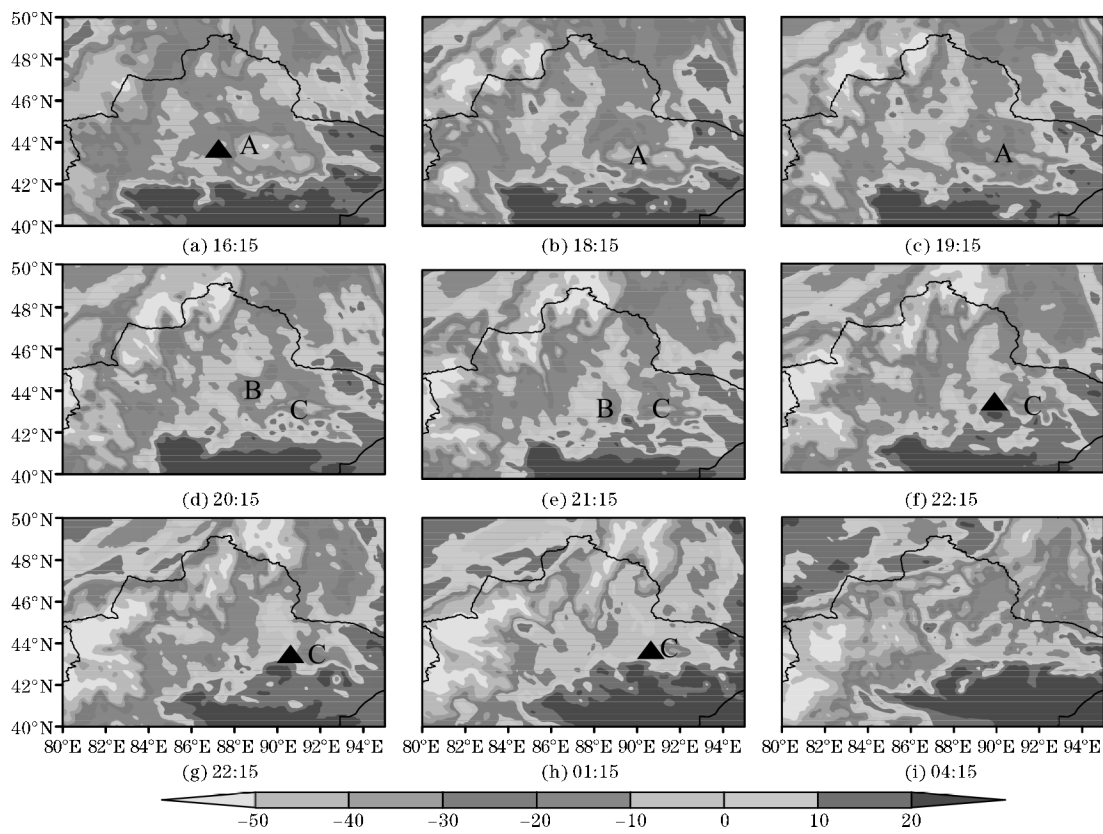


图 8 2015 年 6 月 9 日-10 日暴雨附近 FY-2D 红外云图

6 数值模拟

6.1 降水模拟结果分析

此次模拟的降水预报结果见图 9,由图 9 可知,虽能模拟出主要雨带的降水和局地暴雨的情况,但降水中心较实况偏弱。例如在木垒双湾村($90.16\text{ }^{\circ}\text{E}$, $43.44\text{ }^{\circ}\text{N}$)处,预报 9 日 22 时降水中心的雨量为 10 mm 而实况为 22 mm ,预报暴雨的位置与实况接近,降水面积偏小。WRF 模式在降水落区、特别是主雨带位置有较为准确地模拟。

6.2 地形在局地暴雨过程中的作用

为了比较分析地形对模式预报是否有作用,设计了一组对比试验(表 2)。

表 2 试验设计方案

试验	地形	模式地形分辨率
试验 a	将全部模拟区域加高 500 m	3 km
试验 b	将全部模拟区域降低 500 m	3 km

对比两者模拟的降水落区与强度,分析天山山脉对降水的作用:试验 a (图 10a),降水量增加,降水的分布明显呈与地形平行的带状,降水中心位置模拟较好,但降水范围偏大;试验 b (图 10b),降水量明显减少,天山前的局地暴雨消失了,降水中心位置偏东,天山地形的抬升作用减弱所引起的降水变小。可见,地形作用影响着降水区域的变化,且这种变化以暴雨区的直接减弱消失或者加强为最终结果。

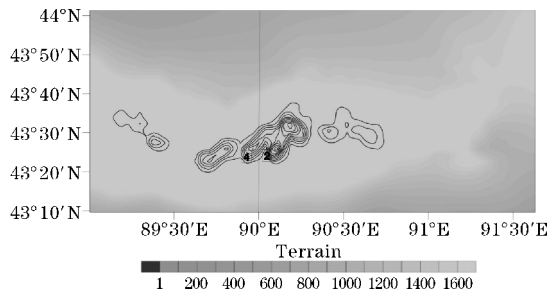


图 9 模拟 9 日 22 时的 1 小时降水量

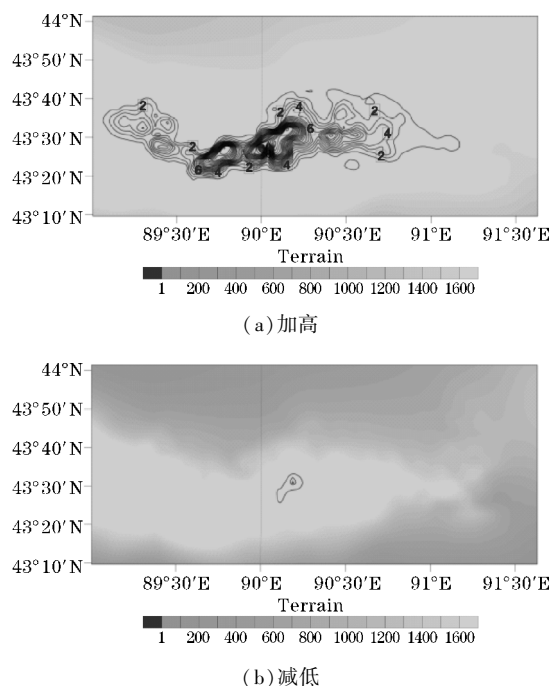


图10 加高和减低地形后模拟的9日22时的1小时降水量

7 结论与讨论

通过上述分析,得到以下结论:

(1)此次大暴雨天气有利的环流背景下,主要影响系统为中亚低槽,低槽不断有冷空气加入,使低槽加深,促进对流天气发生发展。

(2)通过物理量诊断发现,地形对暴雨的强度以及落区等起着重要作用,双湾村位于东坡和北坡的特殊位置,在背风坡,弱冷空气翻越天山,产生重力内波而造成短暂的较强对流天气。迎风坡降水多的主要原因是与地形产生的抬升运动紧密相联。

(3)云图分析发现,暴雨中心位于云顶亮温小于 -50°C 的冷云盖西部,当云团中心面积不断扩大,云团中心在暴雨中心附近上空长时间停留出现最强降水。

(4)通过地形敏感性试验结果表明,地形增高降水增大,反之地形降低降水减小,表明地形是决定暴雨强度和落区的重要条件。WRF模式在降水落区、特别是主雨带位置有较为准确地模拟。

由于新疆昌吉暴雨的复杂性,对改进降水量级预报,并通过一些资料同化开展深入研究,总结一些对预报有指示性意义的特征和指标,这将是下一步需要开展的工作。

参考文献:

- [1] 张家宝,苏起元,孙沈清,等.新疆短期天气预报指导手册[M].新疆:新疆人民出版社,1986.
- [2] 张家宝,邓子风.新疆降水概论[M].北京:气象出版社,1987.
- [3] 王旭,马禹.2009年春季北疆一次大到暴雨天气过程诊断分析[J].安徽农业科学,2009,37(29):14237-14239.
- [4] 蒋军,谭艳梅,李如琦.2004年7月新疆特大暴雨过程的诊断分析[J].沙漠与绿洲气象,2005,28(4):4-6.
- [5] 王敏仲,魏文寿,杨莲梅,等.新疆2007年“7·17”大降水天气过程诊断分析[J].中国沙漠,2011,31(1):199-206.
- [6] 孙云,刘伟,李国翠,等.2011年盛夏石家庄一次短时暴雨分析[J].干旱气象,2015,33(1):156-161.
- [7] 王旭,马禹,赵兵科,等.新疆“96.7”特大暴雨水汽输送通道的研究[J].新疆气象,1999,22(5):5-9.
- [8] 刘春风,徐欢,柳宏英,等.一次中天山暴雨天气的诊断分析[J].沙漠与绿洲气象,2009,3(4):17-21.
- [9] 陈春艳,孔期,李如琦.天山北坡一次特大暴雨过程诊断分析[J].气象,2012,38(1):72-80.
- [10] 刘正新,田惠平,赵俊荣,等.新疆天山中部一次暴雨成因分析[J].沙漠与绿洲气象,2007,1(4):22-26.
- [11] 张建伟,刘海红,阿斯玛.2007年7月17日中天山暴雨天气过程分析[J].沙漠与绿洲气象,2008,2(3):18-21.
- [12] 彭军,周雪英,赵威,等.新疆巴州“6·4”罕见大暴雨中尺度特征分析[J].沙漠与绿洲气象,2016,10(1):68-75.
- [13] 王江,李如琦,黄艳,等.2013年南疆西部一次罕见暴雨的成因[J].干旱气象,2015,33(6):910-917.
- [14] 李如琦,李建刚,唐冶,等.中亚低涡引发的两次南疆西部暴雨中尺度特征对比分析[J].干旱气象,2016,34(2):297-304.
- [15] 朱义青,胡顺起,张品竹,等.山东南部一次大暴雨过程的中尺度特征及成因分析[J].干旱气象,2015,33(1):119-127.
- [16] 李建刚,马玉英,姜彩莲,等.天山山区中部一次局地暴雨成因分析[J].干旱气象,2014,32(6):972-979.
- [17] 张婉莹,花家嘉,侯书勋,等.河北唐山一次飚线过程的中尺度天气分析[J].干旱气象,

- 2014,32(4):636-641.
- [18] 陈豫英,陈楠,谭志强,等. 2012 年 6 月 26-29 日宁夏强降水成因[J]. 干旱气象, 2014, 32(4):599-607.
- [19] 肖开提,刘惠云. “96·7”特大暴雨文选汇编[J]. 新疆气象,1997,20(1):5-30.
- [20] 李圆圆,杨霞,白惠星. 2007 年 5 月 8 日新疆大降水过程分析[J]. 沙漠与绿洲气象,2009,3(5):11-14.

Xinjiang Changji once Extreme Storm Weather Process Analysis and Numerical Simulation in June 9, 2016

PENG Min^{1,2}, GONG Yuan-fa¹, JI Ce³, TAN Zheng-hua^{1,4}

(1. College of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China; 2. Changji Meteorology Observatory, Changji 831100, China; 3. Qitai Meteorological Bureau, Changji 831800, China; 4. Benxi Meteorological Bureau, Benxi 117000, China)

Abstract: The precipitation data from National Meteorological Information Center and the Changji, FNL reanalysis data, satellite data and Doppler radar data, a major rainstorm weather process occurring on 9 to 10 June 2015 in the Xinjiang Changji was comparatively analyzed by dynamics diagnosis and mesoscale analysis. The results showed that: (1) Iran high-voltage northwards and West Pacific subtropical high westward movement of the north extension is beneficial synoptic scale rainstorm configuration; the lower troposphere mesoscale low pressure and moisture convergence and other mesoscale weather systems and heavy rain formation and distribution close. (2) The terrain of storm center in Shuangwan-cun is unique, which is conducive to lifting of water vapor convergence, with weak and cold air crossing the Tianshan Mountains, and stimulate gravity waves, causing heavy rain and strong convective weather played a key role. (3) Heavy rainfall occurred in cold cloud in the west, TBB of cold cloud was less than -50°C , while the thunder echo images have a “V” notch less dynamic and stable, and it is the key cause of short-term heavy rain. (4) The terrain are important factors to determine the intense fall intensity and area.

Keywords: atmospheric science; numerical simulation; terrain effects