doi:10.11676/qxxb2019.040 气象学报

中亚低涡背景下阿克苏地区一次强降水天气分析*

郭楠楠[1,2] 周玉淑[1,2] 邓 国[3]
GUO Nannan[1,2] ZHOU Yushu[1,2] DENG Guo[3]

1. 中国科学院大气物理研究所云降水物理与强风暴实验室,北京,100029
2. 中国科学院大学,北京,100049
3. 国家气象中心,北京,100081
1. *Key Laboratory of Cloud-Precipitation Physics and Severe Storms*, *Institute of Atmospheric Physics*, *Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100029, *China*
2. *University of Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100049, *China*
3. *National Meteorological Center*, *Beijing* 100081, *China*
2018-10-9 收稿,2019-1-5 改回.

郭楠楠,周玉淑,邓国. 2019. 中亚低涡背景下阿克苏地区一次强降水天气分析. 气象学报, 77(4):686-700
Guo Nannan, Zhou Yushu, Deng Guo. 2019. Analysis of a severe precipitation process in Aksu area under the background of the Central Asian Vortex. *Acta Meteorologica Sinica*, 77(4):686-700

Abstract In order to deepen our understanding of the development mechanism for mesoscale systems that are conductive to torrential rain in Xinjiang Uygur Autonomous Region, this paper analyzes a rainstorm process occurred over the Aksu region in the western Tianshan Mountains during 17 – 18 June 2013. Various data including the FNL analysis of the U. S. Environmental Prediction Center, the global reanalysis data from the European Center for Medium-range Weather Forecast, the ground automatic weather station data provided by the China Meteorological Administration, the satellite equivalent blackbody brightness temperature data and the WRF high-resolution numerical simulation data are used in the present study. The results show that the precipitation occurred under the background of synoptic circulation with "two-ridge and one-trough" pattern over the middle and high latitudes, and the Central Asian Vortex provided favorable synoptic-scale dynamical and water vapor conditions for this heavy rain event. The convergence line was the most important mesoscale system for this heavy rainfall event, which was formed by the superposition of the Central Asian Vortex circulation and the flow around the special topography of the western Tianshan Mountains. Due to the thermal contrast between the mountains and valley, the downslope wind drove the convergence line to move and strong convection developed along the convergence line, triggering heavy precipitation in Aksu region. The WRF model is able to well simulate not only the location and intensity of the heavy rain, but also the evolution of the wind field. Preliminary analysis of observations and simulation data show that due to the blocking effect of the western Tianshan Mountains, southerly winds converged near the valley. As a result, a local convergence line formed. Meanwhile, following the adjustment of large-scale circulation, especially after the Central Asian Vortex moved to the vicinity of Aksu area, part of the westerly flow in the south of the vortex crossed the western Tianshan Mountains and turned to northwesterly flow, while the remaining part of the westerly flow passed through the Yili Valley and turned to northeasterly winds. These two flows further aggravated northerly winds in Aksu region, and subsequently promoted the formation of mesoscale convergence line. Water vapor brought in by easterly winds in the east of the convergence line accumulated in front of the southern foothill of the Tianshan

* 资助课题:国家自然科学基金项目(41661144024)、国家重点研发计划项目(2018YFC1507104)、中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所专项资金项目(IDM2019007)。
作者简介:郭楠楠,主要从事暴雨诊断和数值模拟研究。E-mail:guonannan@mail.iap.ac.cn
通信作者:周玉淑,主要从事中尺度动力诊断分析及数值模拟研究。E-mail:zys@mail.iap.ac.cn

Mountains. As the valley wind enhanced in the nighttime, the convergence line moved southeastward and continued to intensify. Accompanied with the uplifting of airmass and accumulation of water vapor at the foothill of the mountains, unstable energy was released and heavy precipitation occurred in Aksu region.

Key words Rainstorm, Central Asian Vortex, Terrain, Numerical simulation, Convergence line

摘 要 为了加强对新疆暴雨过程的中尺度系统发展机理的认识,利用美国环境预测中心的FNL、欧洲中期数值预报中心的全球再分析资料、中国气象局提供的地面自动气象站观测资料、中国国家卫星气象中心提供的卫星辐射亮温(TBB)资料及WRF高分辨率数值模拟对2013年6月17—18日发生在新疆阿克苏地区的一次暴雨天气过程进行分析。结果表明,此次降水过程是发生在中高纬度"两脊一槽"的环流形势下,中亚低涡为这次暴雨的发生提供了有利的天气尺度动力及水汽条件;中亚低涡环流与天山南脉特殊地形造成的气流绕流叠加生成的中尺度辐合线是此次强降水的重要中尺度影响系统,山谷地形热力性质差异造成的下坡风推动辐合线移动,辐合线上发展的强对流引发了阿克苏地区的强降水。WRF模拟结果能够基本再现本次天气过程的降水落区、强度以及风场演变等。结合观测以及模拟资料进行的初步分析显示,西天山的阻挡导致偏南风在西天山南坡山谷附近产生堆积和辐合,山谷附近有局地的地形辐合线形成。同时,随着大尺度环流形势的调整,中亚低涡移动至阿克苏地区附近后,低涡南部的偏西气流一部分直接越过西天山变为西北风,另一部分穿过伊犁河谷转为东北风,这两支气流共同加剧了天山南脉阿克苏地区的偏北气流,促进了西天山南坡山谷附近中尺度辐合线的加强。辐合线以东的偏东气流带来的水汽在天山南脉前堆积,随着夜间山谷下坡风的增强作用,中尺度辐合线在向东南方向推进过程中不断发展加强,配合山脚堆积的水汽和辐合抬升,不稳定能量释放,对流发展,为阿克苏地区带来强降水天气。

关键词 暴雨,中亚低涡,地形,数值模拟,辐合线

中图法分类号 P445

1 引 言

位于中国最西端的南疆西部,气候干旱,地形复杂,属于内陆性沙漠气候区。由于其独特的地理位置,大降水天气过程出现的频率和强度偏少,且成因复杂,预报难度大(江远安等,2001;张云惠等,2013,2015;曾勇等,2017)。在全球变暖背景下,中国西部干旱半干旱地区极端降水事件频发(丁一汇等,2006;施雅风等,2002;戴新刚等,2007;Wang,et al,2013),南疆西部暴雨灾害在近10年也呈明显增多趋势(杨霞等,2011;黄艳等,2012;谢泽明等,2018),给当地人民生命财产和经济建设造成极大损失。

大量研究表明,咸海以东至新疆的一个天气尺度涡旋是造成南疆西部大降水的主要影响系统(庄薇等,2006;蒋军等,2005;孔期等,2011)。因此,该涡旋系统也是新疆气象研究者的研究热点之一,张家宝等(1987)将里海以东至新疆一带常出现的与乌拉尔高压脊联系的天气尺度冷性涡旋系统明确定义为中亚低涡。后来,张云惠等(2012)在已有研究的基础上又修订了中亚低涡的定义,并根据其结构特征将其分为深厚型和浅薄型两类。江远安等(2001)统计分析了1970—1999年新疆西南部116次强降水天气事件,指出其中最强的两次暴雨、61%的强降水、72%的中强降水均是在中亚低涡影响下产生。杨莲梅等(2015)对近年来中亚低涡的研究进展进行了总结,得到了中亚低涡造成强降水天气的环流配置和水汽特征,并对中亚低涡的动、热力结构进行了简单的概括,指出其在暴雨过程中存在明显的能量转换和频散特征。李曼等(2015)对南疆西部一次暴雨过程进行分析,探讨了中亚低涡的发生、发展机理,指出对流层中高层冷空气的下沉有助于低涡的发展加强。

南疆西部地区地处三面环山一面向东部塔里木盆地开口的特殊地形,为降水的预报增加了难度(王江等,2015;张俊兰等,2016;曾勇等,2018)。多年来,中外气象学者就地形对暴雨的影响进行了大量研究(Hobbs,et al,1973;陈明等,1995;Gallus,et al,2006;余贞寿等,2007;葛晶晶等,2008;Stoelinga,et al,2013),廖菲等(2007)回顾了这些进展并指出,地形对天气、气候的影响主要有动力、热力两个方面的作用,其中动力作用可以分为动力阻挡作用和摩擦作用,热力作用主要体现在不同高度地形下垫面加热和气流抬升引起的大气潜热释放。中尺度地形主要是通过对动力场和水汽场的扰动来影响降水的落区和强度(臧增亮等,2004)。许多研究均表明,中尺度辐合线对于局地强对流有触发、组织和增

强的作用(王华等,2008;代刊等,2010;郭英莲等,2012;周玉淑等,2014),王丽荣等(2013)研究也指出,受太行山地形的影响,河北省中南部存在一条定常的地面辐合线,在有利的天气形势下,常常会产生强对流天气。

通过以上的回顾可知,气象学者们对中亚低涡影响下南疆地形复杂地区暴雨的形成机理已经开展了一些有意义的研究,对暴雨形成的天气尺度的环流特征等有了较为深入的认识,但受该地区观测资料稀少的制约,对其中的中尺度系统的结构以及发生、发展机理的认识相对不足。由于阿克苏市地处南疆西部,塔里木盆地的西北边缘,天山南麓,是南疆洪灾频次最多的城市,也是新疆强对流天气的高发区之一(杨莲梅等,2005;买合皮热提·吾拉木等,2015)。由于目前对该地区暴雨过程的动力机理等的认识不足,使得该地区的暴雨预报难度很大。因此,本研究选取 2013 年 6 月 17—18 日中亚低涡背景下发生在阿克苏地区的一次暴雨过程,利用高分辨率的数值模拟,探讨中尺度系统的发生、发展及其对暴雨的影响机制,以期加深对南疆暴雨中尺度系统的理解,从而为当地降水预报提供一些有意义的参考。

2 资料与方法

所用资料包括:时间间隔均为 6 h 的美国环境预测中心(NCEP)的 1°× 1° FNL 全球再分析资料和欧洲中期数值预报中心(ECMWF)的 0.25°× 0.25° ERA-Interim(Dee,et al,2011)全球再分析资料,中国气象局提供的地面自动气象站观测资料,中国国家卫星气象中心提供的卫星(FY-2E)辐射亮温(TBB)及 WRF(Weather Research and Forecast Model)模式高分辨率模拟输出资料。利用 WRF 模式对此次暴雨过程进行高分辨率的数值模拟,在实况与模拟对比的基础上,用模拟资料结合再分析资料对造成阿克苏地区暴雨的中尺度系统发展过程及结构演变进行分析。

3 暴雨过程的观测分析

3.1 降水实况

2013 年 6 月 17—18 日,天山南脉阿克苏地区多县、市出现强降水天气,降水主要集中在 6 月 17 日 12 时—18 日 06 时(世界时,下同),文中研究也围绕该时段的降水变化展开。从这一时段的累计降水分布(图 1)可见,降雨落区主要位于山前一带(乌什、温宿、柯坪、阿克苏市),降水空间分布不均匀,具有很强的局地性,暴雨中心位于阿克苏地区西部的乌什县内的英阿瓦提乡附近。根据新疆降水量等级标准(肖开提·多莱特,2005;陈春艳等,2012),24 h 降水量达到 24 mm 即已达到暴雨级别,观测显示,该暴雨中心 18 h 累计降水量高达 70.7 mm,已远超过新疆暴雨定义的阈值。从暴雨中心附近站点的逐时雨量观测(图 2)可以看出,观测到的暴雨中心的降水强度高达 24 mm/h,降水增幅最大出现在 17 日 15—16 时,此次降水过程局地性强、短时降水强度大,有明显的中尺度特征。

3.2 大尺度天气形势

2013 年 6 月 17—18 日暴雨期间,200 hPa 南亚高压始终保持双体型(图略),中心分别位于伊朗高原和青藏高原的东部,副热带大槽从西西伯利亚平原经新疆西部并伸至30°N附近,暴雨区位于该高

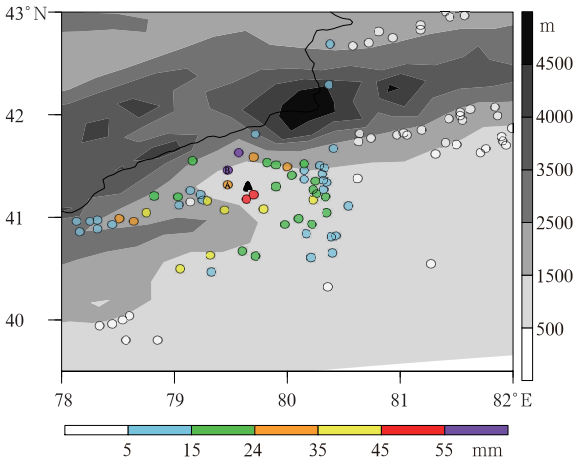

图 1 2013 年 6 月 17 日 12 时—18 日 06 时阿克苏地区自动气象站 18 h 累计降水(彩色打点)和地形高度(灰阶)
(A、B 分别为地面自动气象站 895943、895939,黑色三角代表英阿瓦提乡的位置)

Fig. 1 18 h accumulative precipitation in Aksu area from automatic surface weather stations observations from 12:00 UTC 17 to 06:00 UTC 18 June 2013 (colored spots), and terrain height (monochrome shaded)
(A and B denote the locations of automatic surface weather observation stations 895943 and 895939, and the black triangle indicates the location of Inawati County)

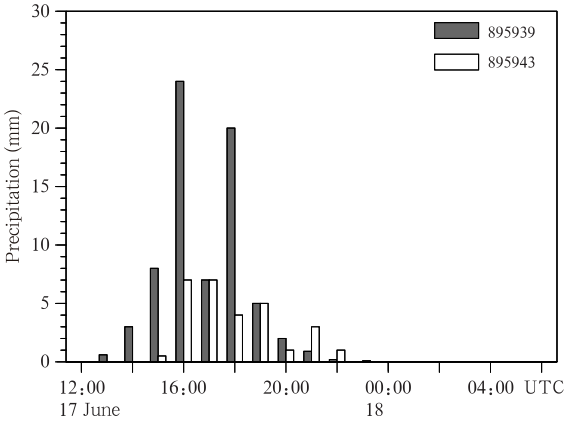

图 2 2013 年 6 月 17 日 12 时—18 日 06 时地面自动气象站 895939、895943 观测的逐时雨量

Fig. 2 hourly precipitation at 895939 and 895943 automatic weather stations from 12:00 UTC 17 to 06:00 UTC 18 June 2013

空槽前,同时注意到在塔里木盆地附近有一支强盛的高空西南急流带,但在降水期间该急流位置与暴雨区距离较远,对暴雨的影响较小。从 500 hPa 天气尺度环流背景场(图 3)来看,2013 年 6 月 16 日 00 时(图 3a),在西西伯利亚平原存在一个较大范围的低涡,中心强度为 556 dagpm,乌拉尔山以及蒙古高原存在两个高压脊,其中,乌拉尔山附近的高压脊强度明显大于蒙古高原上的高压脊,中纬度主要表现为"两脊一槽"的环流形势,这与已有的中亚低涡造成强降水天气的环流配置类似(黄艳等,2012;张云惠等,2013)。6 月 16 日 18 时(图 3b)蒙古高原附近的高压脊不断发展增强,使得两脊之间的副热带大槽加深,低涡的经向发展不断增强。17 日 00 时(图略)低压中心分裂为南北两个,与此同时副热带大槽也分裂为南北两段,其中南段的槽随着中亚低涡不断东移南压。17 日 06 时(图 3c),中亚低涡移动至哈萨克斯坦与吉尔吉斯斯坦交界处,在这个过

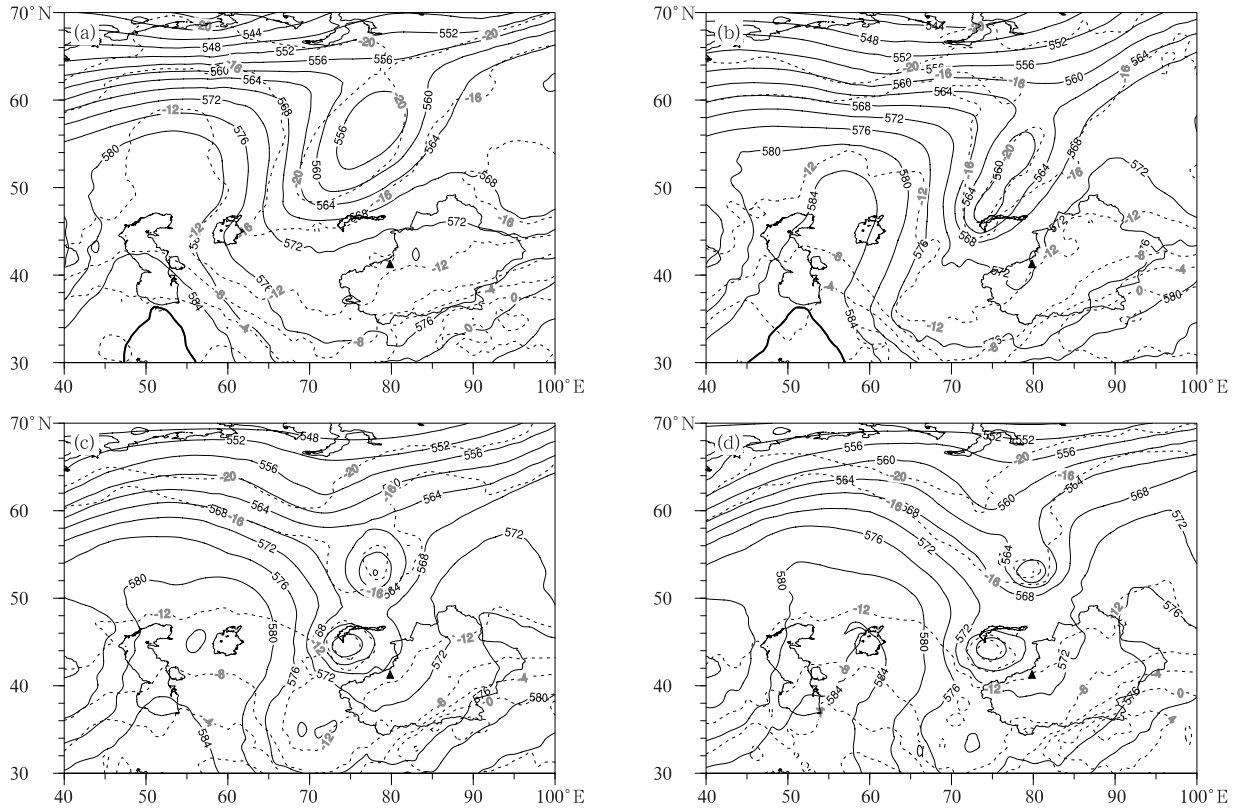

图 3 2013 年 6 月 16—17 日 FNL 再分析资料 500 hPa 位势高度(黑色实线,单位:dagpm)、温度(灰色虚线,单位:℃)

(a. 16 日 00 时, b. 16 日 18 时, c. 17 日 06 时, d. 17 日 12 时;黑色三角为阿克苏的位置)

Fig. 3 Geopotential height (black solid lines, unit: dagpm), temperature (gray dashed lines, unit: ℃) at 500 hPa derived from FNL during 16 - 17 June 2013

(a. 00:00 UTC 16 June, b. 18:00 UTC 16 June, c. 06:00 UTC 17 June, d. 12:00 UTC 17 June; The black triangle indicates the location of Aksu)

程中,乌拉尔山高压脊以及蒙古高原高压脊靠近,等压线加密,造成两个高压脊之间的非地转运动加强,促进了两脊间低涡的发展和增强,低涡中心闭合,等值线加密,由一条增加为两条,根据中亚低涡的定义(杨莲梅等,2015),此时低涡已经发展成为深厚型的中亚低涡。6 月 17 日 12 时(图 3d),蒙古高原上高压脊不断发展增强,阻碍了上游低涡的移动使得西天山附近的中亚低涡稳定少动,阿克苏地区位于槽前的西南气流中。降水发生期间,阿克苏西部天山南脉附近的 700、850 hPa 对流层中低层存在微弱的偏北风与偏南风的辐合线(图略)。

综上所述,此次暴雨是高低空天气系统共同配合作用的结果,虽然高空急流引起的辐散区不在暴雨区附近上空,但是低层和中层的大尺度环流仍然为此次暴雨的发生、发展提供了有利的动力条件。

3.3 水汽输送特征

暴雨的发生离不开水汽输送。新疆地处中国西北内陆,不受季风系统的直接影响,其水汽输送也与中国东部地区不同,戴新刚等(2006)指出,新疆的水汽源地主要是其以西的湖泊或海洋。从 2013 年 6 月 16—17 日逐 6 h 的整层水汽通量分布及 700 hPa 风场(图 4)可以看出,在中亚低涡形成之前(图 4a),阿克苏地区的水汽输送为偏东路径,水汽主要由沿甘肃河西走廊吹向新疆盆地的东风气流输送而来;中亚低涡形成并从槽中分裂出来之后(图 4b、c、d),在不断东移南压过程中,低涡环流也在不断增强,位于中亚低涡东南部的阿克苏地区受涡前的偏西气流的影响也越来越大,水汽输送由偏东路径变

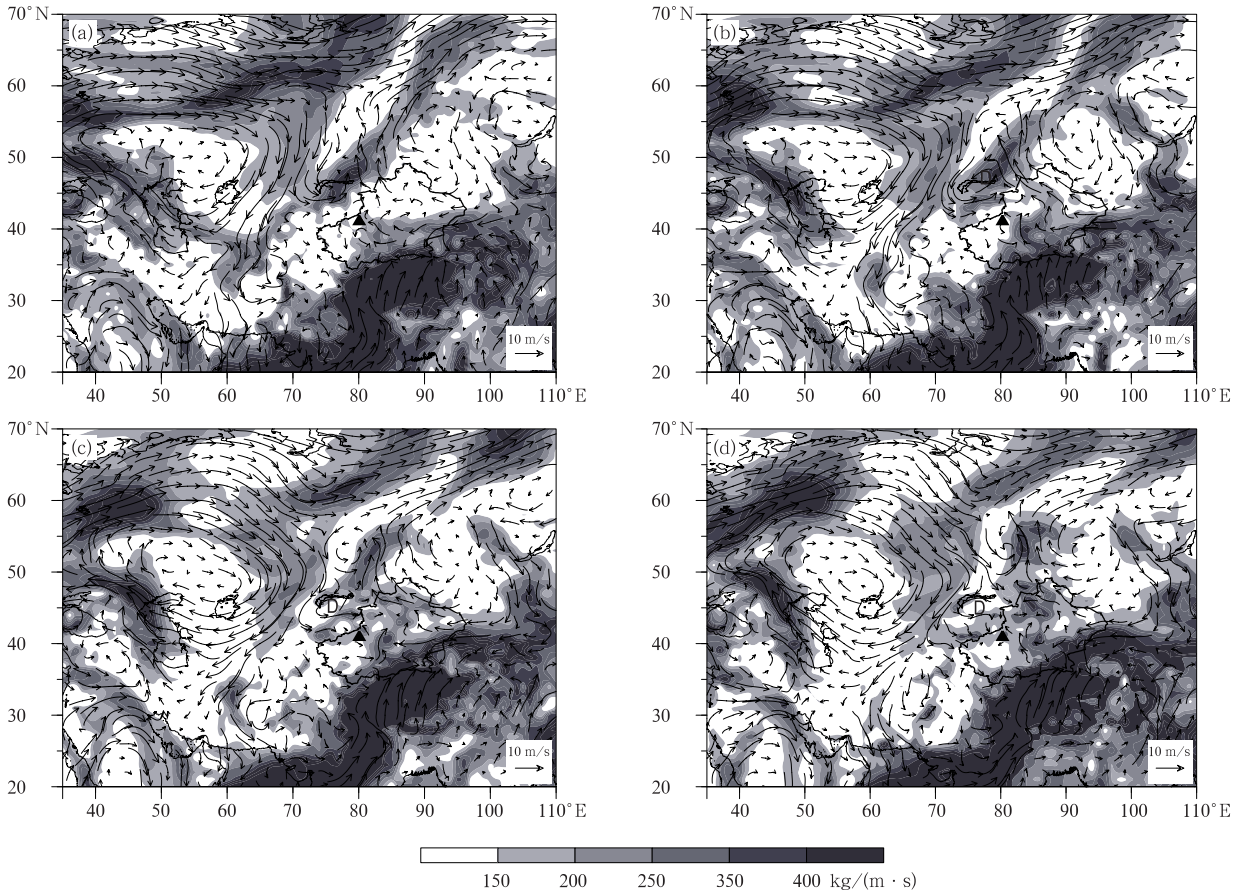

图 4 2013 年 6 月 16—17 日 FNL 再分析资料整层水汽通量(灰阶)与 700 hPa 风场(矢线)

(a. 16 日 18 时, b. 17 日 00 时, c. 17 日 06 时, d. 17 日 12 时;黑色三角为阿克苏的位置,D 为中亚低涡的位置)

Fig. 4 The whole layer water vapor flux (monochrome shaded) and wind fields at 700 hPa (vector) derived from FNL during 16 - 17 June 2013

(a. 18:00 UTC 16 June, b. 00:00 UTC 17 June, c. 06:00 UTC 17 June, d. 12:00 UTC 17 June; The black triangle indicates the location of Aksu, D indicates the location of the Central Asian Vortex)

为偏东和偏西两条路径。其中,偏西路径的水汽主要是沿着中亚低涡南部的偏西气流输送至阿克苏地区。源自里海的水汽先是沿着乌拉尔山附近的高压脊顺时针输送,在经过欧亚内陆以及巴尔喀什湖后,下垫面蒸发使得空气中水汽得到补充,并沿着下游的中亚低涡环流逆时针向东输送至暴雨区。而偏东路径中沿河西走廊输送而来的偏东风气流在中亚低涡带来的偏西气流的作用下转为东南气流,继续输送水汽至阿克苏地区。

因此,随着中亚低涡的形成以及不断向东移动,水汽通道由一支变为两支,在这两支水汽通道的共同作用下,阿克苏地区的整层水汽通量不断增大,为这次暴雨的发生提供了充足的水汽条件。

4 造成暴雨的中尺度云团演变

暴雨是各种尺度天气系统相互作用的产物,在一定的大尺度环流形势下,中尺度系统是造成暴雨的直接天气系统(陶诗言,1980)。阿克苏地区西部地形复杂,常规观测站稀少且分布不均,不能很好抓住中、小尺度系统及其演变过程,因此,卫星观测成为该地区进行中、小尺度分析的有力工具。下面根据马禹等(1997)对中尺度对流系统的判别方法和标准,利用中国国家卫星气象中心提供的 FY-2E 逐时 TBB 资料(水平分辨率 0.1°×0.1°)分析此次暴雨期间中尺度系统的活动和演变。TBB 分布及演变显示,6 月 17 日 12 时(图略),阿克苏地区西部山前地区存在一个微弱的较为狭长的东北—西南走向的中尺度对流云带;17 日 15 时(图 5a),对流云带逐渐增强,在该对流云带上嵌有 3 个中尺度对流云团分别为 A1、A2、B,其中 A1、B 云团相对较强,中心强度在 −43℃以下;17 日 16 时(图 5b),对流云带进一步发展,同时其上的对流云团的强度也随之加强,其

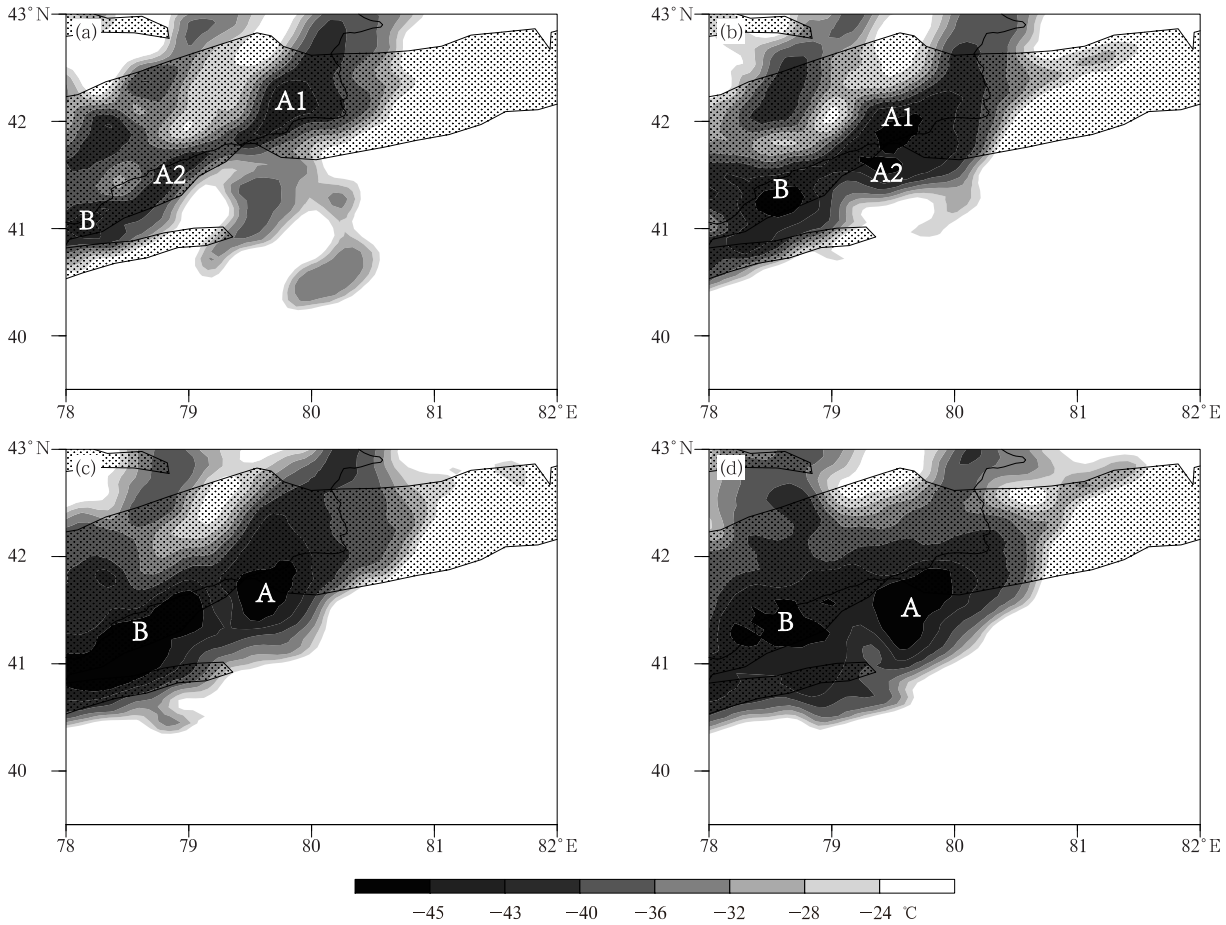

图 5 2013 年 6 月 17 日 15—18 时(a—d)阿克苏地区 FY-2E 卫星辐射亮温逐时分布

(灰阶:加粗实线内打点区域表示地形高度大于 2500 m)

Fig. 5 Hourly change of TBB from FY-2E satellite (monochrome shaded) from 15:00 UTC to 18:00 UTC 17 June 2013 (a − d) in Aksu area

(Spotted area indicates elevation≥2500 m)

中 A2 云团的发展、移动最为明显,中心强度由前一时刻的 -40℃迅速增强至 -45℃以下,并且向东南方向移至英阿瓦提乡附近,受其影响,英阿瓦提乡附近出现了强度较大的对流性降水,其中 895939 站 15—16 时的降水量高达 24 mm(图 2);17 日 17 时(图 5c),A1、A2 云团合并为对流云团 A,合并后的对流云团 A 虽然强度没有明显变化,但是范围有所扩大,继续影响英阿瓦提乡附近的降水,同时其西南侧的对流云团 B 在这个过程中也不断发展,范围迅速扩大;17 日 18 时(图 5d),合并后的对流云团 A 进一步向东南方向发展,范围扩大,而对流云团 B 逐渐减弱,15—18 时,云团 B 的强度、范围有一定的改变,但是由于南侧山脉的阻挡并没有发生明显移动,而对流云带北端的云团 A 向东南方向移动,因此,对流云带的走向也由原来的东北—西南变为近乎东西向;之后(图略),对流云带继续向东南方向移动并逐渐消散,与之相伴的降水活动也趋于结束。

5 中尺度数值模拟及验证

5.1 模式及方案简介

鉴于新疆地区现有观测资料时、空分辨率均较低,不利于对此次强降水过程机理的细致分析,文中利用中尺度模式 WRFv3.9.1 对此次暴雨过程开展高分辨率数值模拟。模式背景场采用 NCEP 1°×1° FNL 全球分析资料,模拟时段为 2013 年 6 月 17 日 12 时—18 日 06 时,共 18 h。模拟采用两层双向嵌套,区域如图 6 所示,垂直分为 51 层,主要模式参数及方案见表 1。

5.2 模拟结果验证

5.2.1 降水的模拟验证

从 18 h 累计降水量的对比(图 7)来看,模式结果基本再现了乌什县英阿瓦提乡附近的暴雨中心(图 7 中黑色方框区域),对于该区域,模拟的降水强度与观测基本一致,但是模式模拟的最强降水中心位置与实况略有不同,与实况相比,向北偏移约 0.2 个纬度,而且强降水落区的范围较实况大,并且有一部分位于山区,由于山区观测站点的缺失,仅从自动气象站观测的地面降水资料无法判知其是否真实,因此,可以借助卫星观测的云顶辐射亮温资料来验证。通过云顶辐射亮温(图 5a、b、c)可以看出,在形成该暴雨中心的主要降水时段(6月17日15—17 时),山地附近始终存在一个云顶辐射亮温低值中心,说明该时段该区域始终有强对流存在,这一位置也与模式模拟的强降水落区基本一致,因此,模式对该区域降水落区以及强度的模拟结果较为可信。此外,模式还模拟出了 C、D 两个降雨中心,通过该过程各时刻的云顶辐射亮温图(图略)来看,在这两个区域并没有发现显著的强对流存在,因此这两个降雨中心的模拟结果存在一定偏差,这可能与模拟初始时间的选取以及地面实测站点有限且分布不均匀等因素有关。此次过程中,乌什县英阿瓦提乡附近的暴雨强度最大,带来的灾害也最为严重,因此,英阿瓦提乡附近的暴雨成因是文中研究的重点,从这个角度而言,模式对降水的模拟较成功。

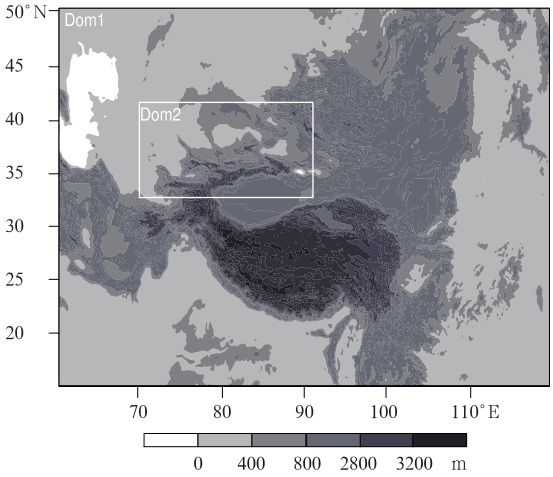

图 6 数值模拟区域与地形(灰阶)

Fig. 6 Model domain and terrain height (monochrome shaded) in numerical simulation

表 1 主要参数列表

Table 1 Model configuration for simulation

	模拟区域 1	模拟区域 2
分辨率	12 km	4 km
格点数	555×370	589×280
微物理方案	Morrison 2-moment	Morrison 2-moment
长波辐射方案	RRTM	RRTM
短波辐射方案	Goddard shortwave	Goddard shortwave
边界层方案	ACM2	ACM2

5.2.2 风场的模拟验证

从风场对比来看,模式模拟的英阿瓦提乡附近地面风的风向与观测基本一致,但风速略小于观测。从模式模拟结果(图 8d、e、f)来看,6 月 17 日 15 时,山前附近存在一条辐合线,17日16时,辐合线分裂

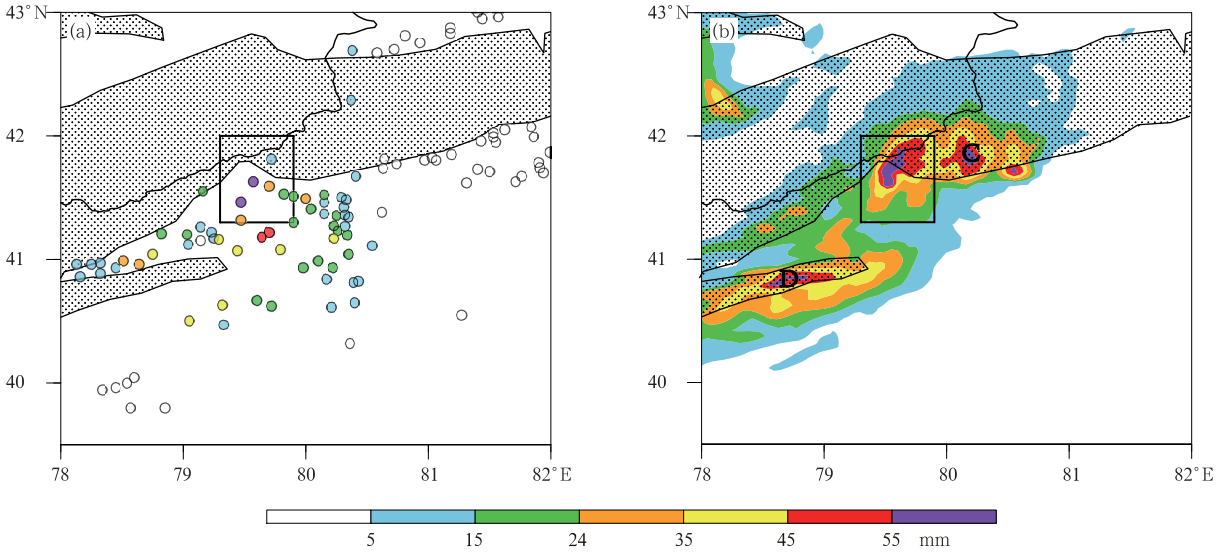

图 7　2013 年 6 月 17 日 12 时—18 日 06 时 18 h 累计降水量(色阶)

(a. 观测, b. 模拟;加粗实线内打点区域表示地形高度大于 2500 m)

Fig. 7　Observed (a) and simulated (b) 18 h accumulative precipitation (colored shaded) from 12: 00 UTC 17 to 06: 00 UTC 18 June 2013

(Spotted area indicates elevation≥2500 m)

为两段,其中北段的辐合线迅速向东南方向移至英阿瓦提乡,而南段的辐合线的位置没有大的改变,此次英阿瓦提乡附近的暴雨也主要是受北段辐合线的影响。由于观测站点的稀少,仅根据地面自动气象站的观测无法判断模拟结果是否可靠。但借助卫星云图(图 5a、b)可以看出,在模拟结果中辐合线出现的位置附近的确有一个带状的强对流区存在,因此模式的风场模拟比较可信。17 日 17 时,模拟以及实况中均存在一条位于英阿瓦提乡东南侧的西北风与东北风交汇的辐合线,这也进一步证实了地面风场的模拟与实况基本一致。

综上所述,模拟结果基本上再现了本次天气过程的地面风场和降水分布,因此,可以利用本次模拟输出的高时、空分辨率资料对此次暴雨过程的中尺度系统结构和机理进行分析。

6　地面辐合线及其对暴雨的影响作用

6.1　地面辐合线及其形成、发展机理

结合卫星云图、自动气象站观测降水以及模式模拟地面风场资料分析可见,17 日 12 时(图略),阿克苏地区西部山前一带存在一条偏东风与偏西风交汇形成的地面辐合线,呈东北—西南走向,在卫星云图上,有一个狭长的东北—西南走向的中尺度对流云带,此时辐合线周围开始出现零星降水,英阿瓦提乡位于辐合线北段的东南侧;之后辐合线逐渐增强并略微向东南方向移动,相对应的降水也逐渐增强,雨带随辐合线向东南移动;17 日 16 时,北段辐合线迅速增强并移至英阿瓦提乡(图 8e),为该地带来了 24 mm/h 的强降水(图 2),而南段辐合线由于南侧山脉的阻挡作用没有发生明显移动,但强度有所增强,卫星云图上也有相应变化;之后北段辐合线离开英阿瓦提乡,继续向东南方向移动并逐渐减弱消散,此次降水过程结束。可见,强降水中心与中尺度辐合线有较好的对应关系,所以中尺度辐合线是造成此次阿克苏地区英阿瓦提乡附近暴雨的直接影响系统。

6.1.1　辐合线的形成

从 2003—2012 年 10 a 平均的 6 月 17 日 12 时的地面风场(图 9a)可以看出,受西天山地形的影响,该时刻在阿克苏西部山前一带始终存在一条微弱的近乎水平的辐合线,它是由直接爬越西天山的偏北气流与在西天山复杂地形阻挡下气流绕流形成的偏南风汇合形成。然而大尺度环流背景的不同也会对辐合线有不同的影响,为了进一步研究本次过程中中亚低涡环流对地面辐合线的影响,用 2013 年 6 月 17 日 12 时的环流与过去 10 a 平均的该时刻的环流之差得到了这一时次的偏差风场(图 9b),可以

看出,在地面与中高层中亚低涡所在位置相应的区域有一个十分明显的气旋性偏差环流,说明此次过程中的中亚低涡是一个从高空到地面均存在的深厚低压系统,这个气旋性的偏差环流就是由中亚低涡系统从高空向下发展引起的。中亚低涡形成和发展后,低涡南部的偏西气流一部分直接越过西天山变为西北风,另一部分穿过伊犁河谷之后转为东北风,这两支气流共同加剧了辐合线北侧的偏北气流,其中辐合线西北侧的北风偏差分量最强,使得该时刻的辐合线呈东北—西南走向。同时可以注意到,在辐合线南侧存在一个微弱的东南方向的偏差风,这主要是由12时塔里木盆地南部增强的一支低空偏

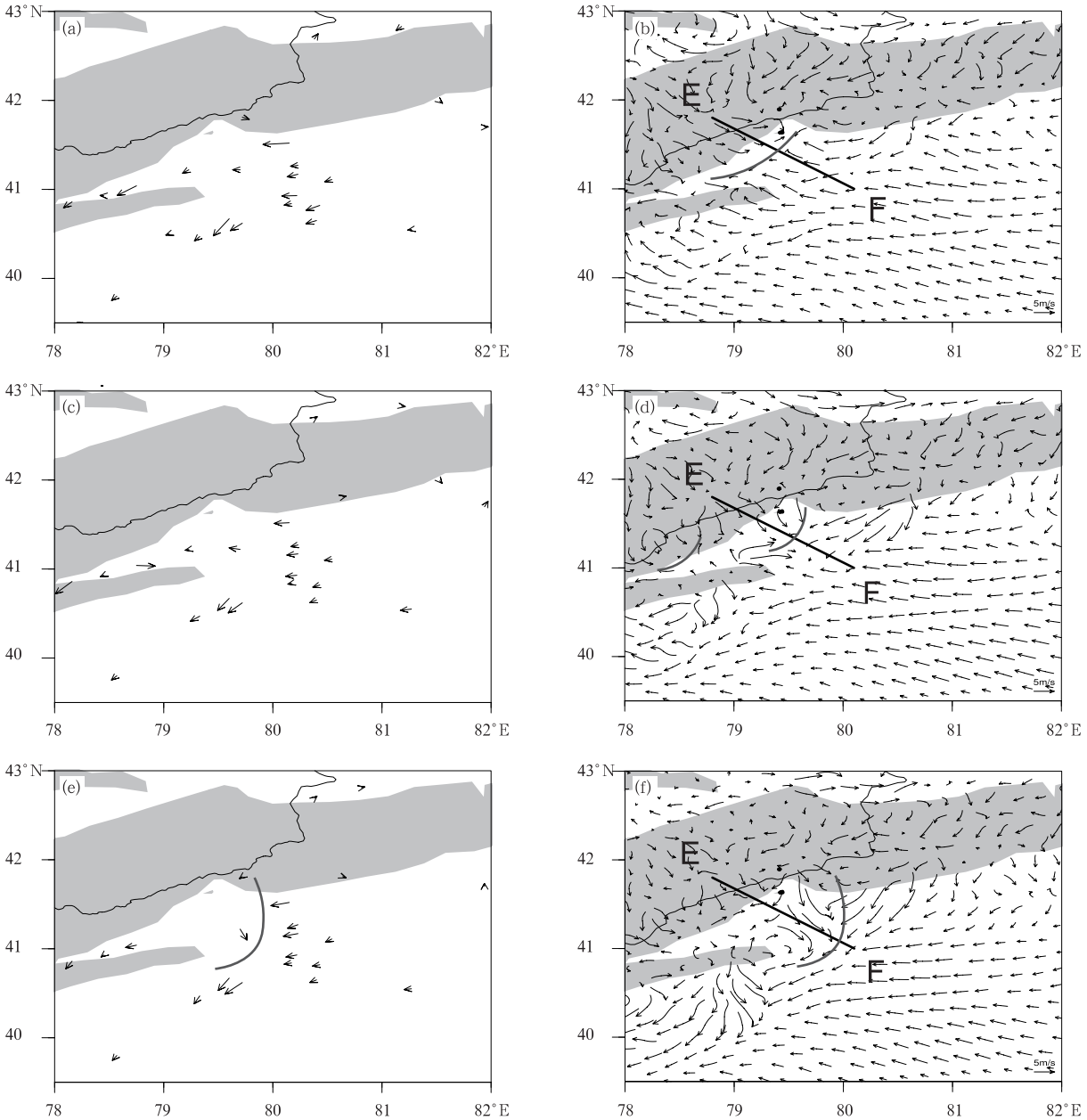

图 8 2013 年 6 月 17 日 15(a、b)、16(c、d)、17(e、f)时地面风场(矢线,单位:m/s)

(a、c、e. 观测;b、d、f. 模拟;其中阴影区域表示地形高度大于 2500 m,深灰色实线为辐合线)

Fig. 8 Observed (a, c, e) and simulated (b, d, f) surface wind fields (vectors, unit: m/s) from 15:00 (a, b), 16:00 (c, d) and 17:00 (e, f) UTC 17 June 2013

(The shaded area indicates elevation≥2500 m, the dark gray solid line indicates the convergence line)

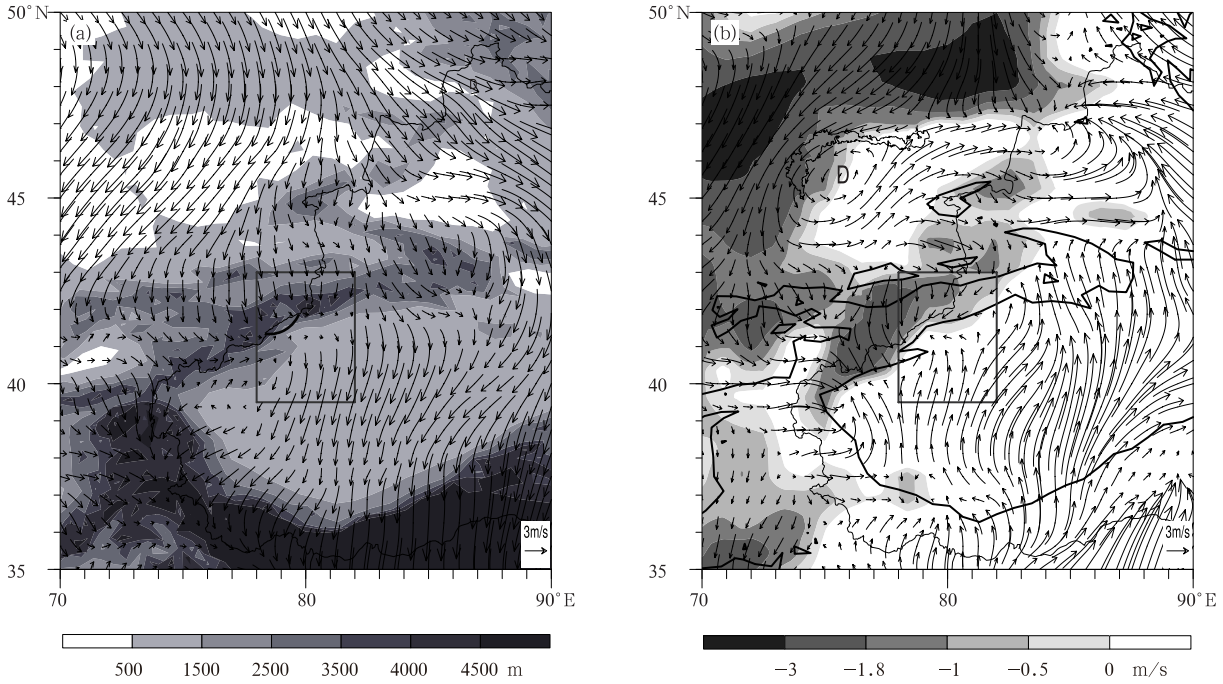

图 9 (a)2003—2012 年 6 月 17 日 12 时平均地面风场(矢线,灰阶为地形高度,黑色曲线为辐合线);(b)2013 年 6 月 17 日 12 时与过去 10 a 平均的同一时刻地面偏差风场(矢线)及北风分量(灰阶)

(黑色加粗实线为 2500 m 地形,黑色方框为此次研究的主要区域,其中 D 为气旋性偏差中心的位置)

Fig. 9 (a) Surface mean wind field (vector) at 12:00 UTC 17 June from 2003 to 2012. The monochrome shaded areas show terrain, the black curve indicates convergence line. (b) Surface wind deviations (vectors) at 12:00 UTC 17 June between 2013 and the mean value of the past ten years and the northerly wind component (monochrome shaded)

(The black thick line is for elevation = 2500 m, the black solid line is the convergence line; the area in black box is the research area, D indicates the location of the cyclonic deviation)

南急流所带来的气流穿过盆地并沿山脉绕流所致。

6.1.2 辐合线的发展演变过程

通过对逐时的卫星云图进行分析,发现夜间在地面辐合线所在位置的阿克苏地区,西天山附近对流增强并且发生明显移动,因此,可以认为地面辐合线在夜间有一定程度的发展和移动。对夜间辐合线附近的温度以及风场变化进行分析,可见温度变化与局地地形关系十分密切。阿克苏地区西部地形复杂,天山南脉主体呈东北—西南走向,在阿合奇县南部又延伸出一个支脉即喀拉铁克山,形成了两山夹一谷的特殊地貌。由于地形热力性质的差异,在地形附近会产生明显的下坡风。图 10 为 2013 年 6 月 17 日 13 时与前 1 h 作差得到的风场以及温度变化,夜间山地尤其是海拔更高的天山南脉降温明显,前后时次的温度变化最大可超过 1℃。同时从地面风场上也可以看出明显的由天山南脉山地的降温中心吹向谷地的风场变化。夜间,这样的下坡风所带来的偏北风分量叠加在辐合线北侧,一方面加剧了辐合线两侧的气流辐合,另一方面也推动辐合线向东南移动。由于其南侧喀拉铁克山的阻挡,辐合线分裂为东、西两段,其中西段辐合线并未发生明显移动,而东段辐合线不断地增强且向东移动并于 16 时移至英阿瓦提乡附近带来强降水天气。

综上,位于阿克苏西部的中尺度辐合线是造成此次暴雨的直接地面影响系统,天山南脉地形造成的气流绕流与中亚低涡系统环流叠加促进了辐合线的形成和增强,在地形热力性质差异造成的下坡风的作用下,辐合线不断发展,其中北段辐合线移经英阿瓦提乡时引发了强降水。

6.2 地面辐合线产生降水的机理

为了研究辐合线如何引起此次暴雨过程,进一步分析了地面水汽混合比的分布(图11),可以看

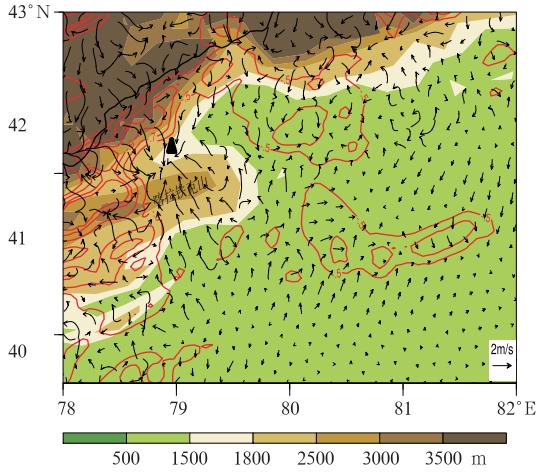

图 10 2013 年 6 月 17 日 13 时模拟的地面温度变化(红色实线,单位:℃)、地面风变化(矢线)和地形(色阶)
(黑色三角代表阿合奇县的位置)
Fig. 10 Simulated surface temperature change (red lines, unit: ℃), surface wind change (vector) at 13:00 UTC 17 June 2013 and terrain height (shaded)
(The black triangle indicates the location of Aheqi County)

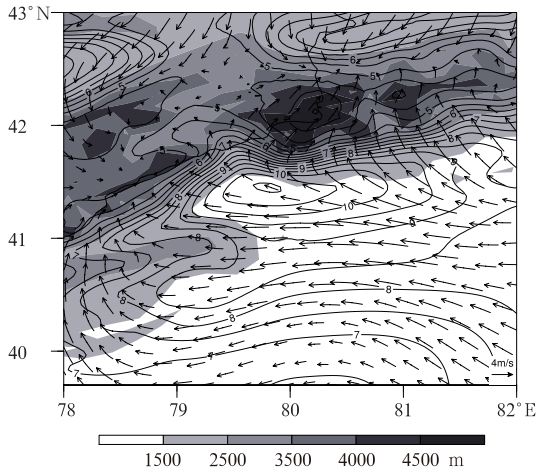

图 11 2013 年 6 月 17 日 12 时模拟地面比湿(黑色实线,单位:g/kg)、地形(灰阶)
Fig. 11 Simulated surface specific humidity (black lines, unit: g/kg) and terrain height (shaded)

出,由于天山南脉以及喀拉铁克山的阻挡作用,辐合线以东的偏东气流带来的水汽在山前堆积,在阿克苏地区西北部的英阿瓦提乡附近形成了一个明显的水汽混合比大值中心,其最高地面水汽混合比超过 11 g/kg。同时,由于喀拉铁克山的阻挡,在阿合奇县附近的山谷一带,水汽含量相对较低,这也是位于该地区北段的辐合线没有带来强降水的原因。

沿辐合线移动的方向过降水中心的垂直剖面(图 12)显示,17 日 14 时 30 分(图 12a),西北风与东南风交汇的辐合线位于天山南脉山地附近,气流辐合造成的垂直运动上升至约 200 hPa,降水落区位于该辐合线附近。降水区内相当位温线相比区外较为陡峭,为中性层结,其东南侧的盆地中水汽聚集,形成了一个水汽大值中心,其近地面水汽混合比超过 9 g/kg,5 g/kg 以上的高湿区从地面一直向上延伸到 600 hPa 附近,水汽条件良好。同时,盆地上空 500—300 hPa 为一个稳定层结,其下为显著的对流不稳定区域,不稳定层结有利于强降水的发生;15 时 30 分(图 12b),由于地形热力性质差异,夜间降温导致的西北下坡风气流叠加在辐合线西侧,使得辐合线西侧近地面的西北风不断增强,这一方面推动低层辐合线向东南方向移动,另一方面增强了辐合线两侧气流辐合的强度,使得辐合中心的上升运动不断增强,低层辐合导致的强上升运动从800 hPa 倾斜向上延伸至 300 hPa。强的上升运动把低层集聚的水汽抬升到高空,由此产生的降水也增强并向东南方向移动;16 时 30 分,在近地面下坡风的推动下,由于低空辐合线的移动加速使得低空辐合上升区的移速大于 650—300 hPa 的中高层上升运动区,原来倾斜的上升区在 650 hPa 分裂为两段,其中,800—600 hPa 的低层辐合上升区随着近地面处的辐合线迅速移至盆地中的水汽大值中心附近,且两侧气流的辐合强度增至最强,对流上升运动增强,辐合中心的上升速度达到最大,盆地中原来积聚的不稳定能量不断释放,为阿克苏地区带来短时强降水。强烈的上升运动使得暖湿空气快速向上输送,造成暴雨区上空假相当位温等值线十分陡直,大气层结逐渐变为中性,之后,随着大气中水汽消耗和不稳定能量释放,降水过程趋于结束。

7 结论与讨论

通过利用 NCEP 和 ECMWF 的再分析资料,新疆地区的多种观测资料,结合 WRF 高分辨率数值模拟输出结果,对 2013 年 6 月 17—18 日发生在新疆西天山南坡阿克苏地区的一次暴雨天气过程进行

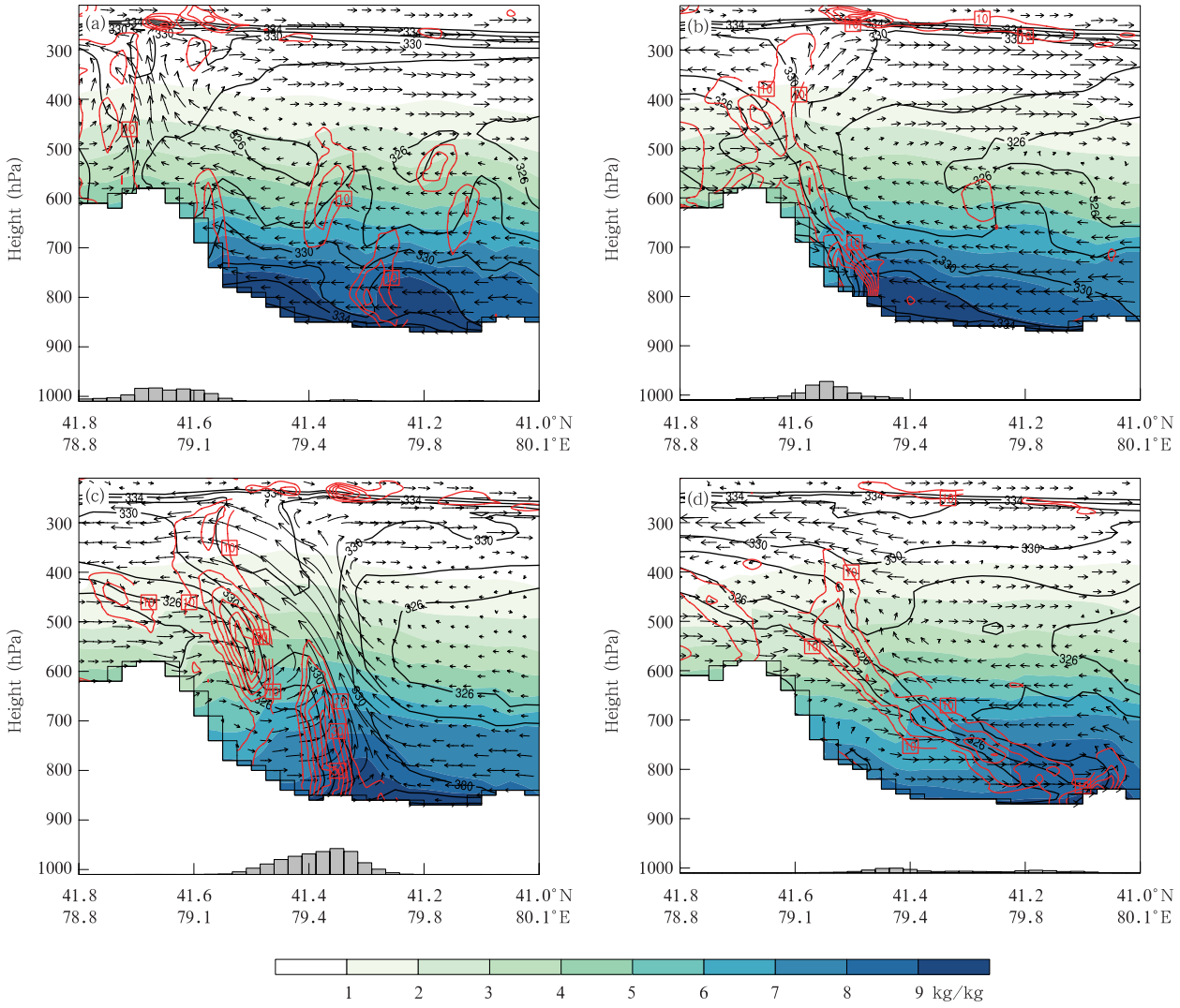

图 12 2013 年 6 月 17 日沿图 8b 中直线 EF 的垂直剖面

(a. 14 时 30 分,b. 15 时 30 分,c. 16 时 30 分,d. 17 时 30 分;色阶为比湿,黑色实线为相当位温(单位:K),矢线为风场(单位:m/s,垂直速度被放大了 10 倍),红色实线为剖面上相当位温的水平梯度(单位:K/m),灰色柱形为降水)

Fig. 12 Cross sections along the line EF showed in Fig. 8b for 17 Jun 2013

(a. 14:30 UTC, b. 15:30 UTC, c. 16:30 UTC, d. 17:30 UTC; shaded areas are for specific humidity, black lines indicate equivalent potential temperature (unit: K), vectors are wind field (unit: m/s, with vertical velocity w amplified by 10), the red solid lines show horizontal gradient of equivalent potential temperature in the cross sections (unit: K/m). gray columns indicate precipitation)

了初步研究,得到以下主要结论:

此次降水过程局地性强、短时降水强度大,有明显的中尺度特征,它发生在中高纬度"两脊一槽"的环流形势下,中亚低涡为这次暴雨的发生提供了有利的天气尺度背景条件。同时,中亚低涡东移带来的偏西路径的水汽与沿着河西走廊输送来的偏东路径的水汽在阿克苏地区汇合,水汽辐合区与暴雨落区一致。中亚低涡环流与天山南脉特殊地形造成的气流绕流叠加生成的中尺度辐合线是此次强降水的重要触发系统。中亚低涡形成并移动至阿克苏地区附近,促进了地面中尺度辐合线的生成;辐合线以东的偏东气流带来的水汽在山前堆积,为此次暴雨提供了充足的水汽条件;地形热力性质差异造成的下坡风推动辐合线向东南方向移动,促进了不稳定能

量的释放。其中,辐合线南段由于喀拉铁克山的阻挡停滞在山谷附近并逐渐消散,而北段不断发展并移动经过乌什县英阿瓦提乡,引发了该地强降水。英阿瓦提乡附近中尺度对流云团的发展、合并与暴雨发展一致,表明沿辐合线发展的暴雨过程有明显的中尺度特征。

文中虽然对新疆西部天山南脉的此次大暴雨过程进行了诊断和模拟,也得到了一些初步结论,但是还有一些问题需要进行更为深入的分析。首先,模拟结果尚存在一些不足,尤其是南段降水,还需要继续改进模拟效果,以期更加精确地重现这次暴雨过程,为揭示两个暴雨区的动力过程提供更好的资料;其次,在研究中发现,辐合线上的暴雨分布并不均匀,局地性很强,文中的分析尚不能揭示这些局地对流触发和发展的机理,这也是本工作下一步的重点研究内容。

参考文献

陈春艳,孔期,李如琦. 2012. 天山北坡一次特大暴雨过程诊断分析. 气象,38(1):72-80. Chen C Y, Kong Q, Li R Q. 2012. Analysis of a major rainstorm in the north slope of Tianshan Mountains. Meteor Mon, 38(1):72-80 (in Chinese)

陈明,傅抱璞,于强. 1995. 山区地形对暴雨的影响. 地理学报,50(3):256-263. Chen M, Fu B P, Yu Q. 1995. Influence of topography on storm rainfall. Acta Geographica Sinica, 50(3):256-263 (in Chinese)

代刊,何立富,金荣花. 2010. 加密观测资料在北京2008年9月7日雷暴过程分析中的综合应用. 气象,36(7):160-167. Dai K, He L F, Jin R H. 2010. Synthetic applications of intensive observations to analysis of the 7 September 2008 severe convective systems in Beijing. Meteor Mon, 36(7):160-167 (in Chinese)

戴新刚,李维京,马柱国. 2006. 近十几年新疆水汽源地变化特征. 自然科学进展,16(12):1651-1656. Dai X G, Li W J, Ma Z G. 2006. Characteristics of water vapor source change in Xinjiang in recent ten years. Progr Nat Sci, 16(12):1651-1656 (in Chinese)

戴新刚,任宜勇,陈洪武. 2007. 近50年新疆温度降水配置演变及其尺度特征. 气象学报,65(6):1003-1010. Dai X G, Ren Y Y, Chen H W. 2007. Multi-scale feature of climate and climate shift in Xinjiang over the past 50 years. Acta Meteor Sinica, 65(6):1003-1010 (in Chinese)

丁一汇,任国玉,石广玉等. 2006. 气候变化国家评估报告(Ⅰ):中国气候变化的历史和未来趋势. 气候变化研究进展,2(1):3-8. Ding Y H, Ren G Y, Shi G Y, et al. 2006. National Assessment report of climate change (Ⅰ): Climate change in China and its future trend. Adv Climate Change Res, 2(1):3-8 (in Chinese)

葛晶晶,钟玮,杜楠等. 2008. 地形影响下四川暴雨的数值模拟分析. 气象科技,28(2):176-183. Ge J J, Zhong W, Du N, et al. 2008. Numerical simulation and analysis of Sichuan rainstorm under terrain influence. Meteor Sci Technol, 28(2):176-183 (in Chinese)

郭英莲,吴翠红,王继竹等. 2012. "7·15"宜昌大暴雨的地形影响特征. 气象,38(1):81-89. Guo Y L, Wu C H, Wang J Z, et al. 2012. Yichang topographic effects of the 15 July 2007 heavy rain. Meteor Mon, 38(1):81-89 (in Chinese)

黄艳,刘涛,张云惠. 2012. 2010年盛夏南疆西部一次区域性暴雨天气特征. 干旱气象,30(4):615-622. Huang Y, Liu T, Zhang Y H. 2012. Features of a regional rainstorm in midsummer of 2010 in Western Xinjiang. Arid Meteor, 30(4):615-622 (in Chinese)

蒋军,谭艳梅,李如琦. 2005. 2004年7月新疆特大暴雨过程的诊断分析. 新疆气象,28(4):4-6. Jiang J, Tan Y M, Li R Q. 2005. Diagnosis analysis of a heavy rainfall process in Xinjiang during July 2004. Bimon Xinjiang Meteor, 28(4):4-6 (in Chinese)

江远安,包斌,王旭. 2001. 南疆西部大降水天气过程的统计分析. 新疆气象,24(5):19-20. Jiang Y A, Bao B, Wang X. 2001. Analysis on heavy precipitation weather process in west Nanjiang. Bimon Xinjiang Meteor, 24(5):19-20 (in Chinese)

孔期,郑永光,陈春艳. 2011. 乌鲁木齐7·17暴雨的天气尺度与中尺度特征. 应用气象学报,22(1):12-22. Kong Q, Zheng Y G, Chen C Y. 2011. Synoptic scale and mesoscale characteristics of 7·17 Urumqi heavy rainfall in 2007. J Appl Meteor Sci, 22(1):12-22 (in Chinese)

李曼,杨莲梅,张云惠. 2015. 一次中亚低涡的动力热力结构及演变特征. 高原气象,34(6):1711-1720. Li M, Yang L M, Zhang Y H. 2015. Dynamic and thermal structure and evolution characteristics of a central Asian vortex. Plateau Meteor, 34(6):1711-1720 (in Chinese)

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. Liao F, Hong Y C, Zheng G G. 2007. Review of orographic influences on surface precipitation. Meteor Sci Technol, 35(3):309-316 (in Chinese)

马禹,王旭,陶祖钰. 1997. 中国及其邻近地区中尺度对流系统的普查和时空分布特征. 自然科学进展,7(6):701-706. Ma Y, Wang X, Tao Z Y. 1997. The general investigation and spatial and temporal distribution of mesoscale convective systems in China and its adjacent areas. Prog Nat Sci, 7(6):701-706 (in Chinese)

买合皮热提·吾拉木,热苏力·阿不拉,玉苏甫·买买提等. 2015. 阿克苏地区冰雹时空变化和灾害特征. 干旱区研究,32(1):108-115. Mahpiret G, Rasul A, Yusup M, et al. 2015. Spatio-temporal changes of hail and disaster characteristics in Aksu prefecture. Arid Zone Res, 32(1):108-115 (in Chinese)

施雅风,沈永平,胡汝骥. 2002. 西北气候由暖干向暖湿转型的信

号、影响和前景初步探讨. 冰川冻土，24(3)：219-226. Shi Y F，Shen Y P，Hu R J. 2002. Preliminary study on signal，impact and foreground of climatic shift from warm-dry to warm-humid in Northwest China. J Glaciol Geocryol，24(3)：219-226 (in Chinese)

陶诗言. 1980. 中国之暴雨. 北京：科学出版社，225pp. Tao S Y. 1980. Heavy Rainfall in China. Beijing：Science Press，255pp (in Chinese)

王华，孙继松. 2008. 下垫面物理过程在一次北京地区强冰雹天气中的作用. 气象，34(3)：16-21. Wang H，Sun J S. 2008. Effects of underlying surface physical process on a severe hail event occurred in Beijing area. Meteor Mon，34(3)：16-21 (in Chinese)

王江，李如琦，黄艳等. 2015. 2013 年南疆西部一次罕见暴雨的成因. 干旱气象，33(6)：910-917. Wang J，Li R Q，Huang Y，et al. Cause of a rare rainstorm in the west of southern Xinjiang in 2013. Arid Meteor，33(6)：910-917 (in Chinese)

王丽荣，刘黎平，王立荣等. 2013. 太行山东麓地面辐合线特征分析. 气象，39(11)：1445-1451. Wang L R，Liu L P，Wang L R，et al. 2013. Analysis of surface convergence line features in the eastern side of Taihang Mountain. Meteor Mon，39(11)：1445-1451 (in Chinese)

肖开提·多莱特. 2005. 新疆降水量级标准的划分. 新疆气象，28(3)：7-8. Duolaite X. 2005. Formulation of precipitation intensity standard of Xinjiang. Bimon Xinjiang Meteor，28(3)：7-8 (in Chinese)

谢泽明，周玉淑，杨莲梅. 2018. 新疆降水研究进展综述. 暴雨灾害，37(3)：204-212. Xie Z M，Zhou Y S，Yang L M. 2018. Review of study on precipitation in Xinjiang. Torrential Rain Disaster，37(3)：204-212(in Chinese)

杨莲梅，杨涛. 2005. 阿克苏北部暴雨和冰雹湿位涡对比诊断分析. 气象，31(9)：13-18. Yang L M，Yang T. 2005. Diagnostic analysis of moist potential vorticity for heavy rainfall and hail in oasis of northern Akesu. Meteor Mon，31(9)：13-18 (in Chinese)

杨莲梅，张云惠，秦贺. 2015. 中亚低涡研究若干进展及问题. 沙漠与绿洲气象，9(5)：1-8. Yang L M，Zhang Y H，Qin H. 2015. Some advances and problems of middle-Asia vortex. Desert Oasis Meteor，9(5)：1-8 (in Chinese)

杨霞，赵逸舟，王莹等. 2011. 近 30 年新疆降水量及雨日的变化特征分析. 干旱区资源与环境，25(8)：82-87. Yang X，Zhao Y Z，Wang Y，et al. 2011. Variation of precipitation and rain days in Xinjiang in recent 30 years. J Arid Land Resour Environ，25(8)：82-87 (in Chinese)

余贞寿，高守亭，任鸿翔. 2007. 台风“海棠”特大暴雨数值模拟研究. 气象学报，65(6)：864-876. Yu Z S，Gao S T，Ren H X. 2007. A numerical study of the severe heavy rainfall associated with the typhoon Haitang (0505). Acta Meteor Sinica，65(6)：864-876 (in Chinese)

曾勇，杨莲梅. 2017. 南疆西部两次短时强降水天气中尺度特征对比分析. 暴雨灾害，36(5)：410-421. Zeng Y，Yang L M. 2017. Comparative analysis on mesoscale characteristics of two severe short-time precipitation events in the west of southern Xinjiang. Torrential Rain Disaster，36(5)：410-421 (in Chinese)

曾勇，杨莲梅，张迎新. 2018. 中亚低涡背景下新疆阿克苏地区一次强对流天气形成的干侵入机制. 干旱气象，36(1)：34-43. Zeng Y，Yang L M，Zhang Y X，2018. Mechanism analysis of dry intrusion during a severe convective weather process under the background of central Asian vortex in Aksu area of Xinjiang. Arid Meteor，36(1)：34-43 (in Chinese)

张家宝，邓子风. 1987. 新疆降水概论. 北京：气象出版社，92pp. Zhang J B，Deng Z F. 1987. Introduction to Xinjiang's Precipitation. Beijing：China Meteorological Press，92pp (in Chinese)

张俊兰，李娜，秦贺等. 2016. 新疆一次暴雨过程的观测分析及水汽特征. 暴雨灾害，35(6)：537-545. Zhang J L，Li N，Qin H，et al. 2016. The observational analysis and water vapor characteristics of a rainstorm in Xinjiang. Torrential Rain Disaster，35(6)：537-545 (in Chinese)

张云惠，杨莲梅，肖开提·多莱特等. 2012. 1971—2010 年中亚低涡活动特征. 应用气象学报，23(3)：312-321. Zhang Y H，Yang L M，Duolaite X，et al. 2012. The central asian vortexes activity during 1971－2010. J Appl Meteor Sci，23(3)：312-321 (in Chinese)

张云惠，陈春艳，杨莲梅等. 2013. 南疆西部一次罕见暴雨过程的成因分析. 高原气象，32(1)：191-200. Zhang Y H，Chen C Y，Yang L M，et al. 2013. Cause analysis on rare rainstorm in west of southern Xinjiang. Plateau Meteor，32(1)：191-200 (in Chinese)

张云惠，李海燕，蔺喜禄等. 2015. 南疆西部持续性暴雨环流背景及天气尺度的动力过程分析. 气象，41(7)：816-824. Zhang Y H，Li H Y，Lin X L，et al. 2015. Analysis of continuous rainstorm circulation background and the dynamic process of synoptic-scale in west of southern Xinjiang. Meteor Mon，41(7)：816-824 (in Chinese)

周玉淑，刘璐，朱科锋等. 2014. 北京“7.21”特大暴雨过程中尺度系统的模拟及演变特征分析. 大气科学，38(5)：885-896. Zhou Y S，Liu L，Zhu K F，et al. 2014. Simulation and evolution characteristics of mesoscale systems occurring in Beijing on 21 July 2012. Chinese J Atmos Sci，38(5)：885-896 (in Chinese)

庄薇，刘黎平，王楠. 2006. 新疆地区一次对流性降水的三维中尺度风场研究. 应用气象学报，17(4)：444-451. Zhuang W，Liu L P，Wang N. 2006. Study on three-dimensional wind fields of mesoscale convective systems in Xinjiang. J Appl Meteor Sci，17(4)：444-451 (in Chinese)

臧增亮，张铭，沈洪卫等. 2004. 江淮地区中尺度地形对一次梅雨锋暴雨的敏感性试验. 气象科学，24(1)：26-34. Zang Z L，Zhang M，Shen H W，et al. 2004. Experiments on the sensitivity of meso-scale terrains in Janghuai area to a heavy mold rain.

Scientia Meteor Sinica, 24(1): 26-34 (in Chinese)

Dee D P, Uppala S M, Simmons A J, et al. 2011. The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. Quart J Roy Meteor Soc, 137(656): 553-597

Gallus W A Jr, Bresch J F, 2006. Comparison of impacts of WRF dynamic core, physics package, and initial conditions on warm season rainfall forecasts. Mon Wea Rev, 134(9): 2632-2641

Hobbs P V, Easter R C, Fraser A B. 1973. A theoretical study of the flow of air and fallout of solid precipitation over mountainous terrain: Part Ⅱ. Microphysics. J Atmos Sci, 30(5): 813-823

Stoelinga M T, Stewart R E, Thompson G, et al. 2013. Microphysical processes within winter orographic cloud and precipitation systems // Chow F K, De Wekker S F J, Snyder B J. Mountain Weather Research and Forecasting. Dordrecht: Springer: 345-408

Wang H J, Chen Y N, Chen Z S. 2013. Spatial distribution and temporal trends of mean precipitation and extremes in the arid region, northwest of China, during 1960 - 2010. Hydrol Process, 27(12): 1807-1818