

曾勇, 周玉淑, 杨莲梅. 2019. 新疆西部一次大暴雨形成机理的数值模拟初步分析 [J]. 大气科学, 43 (2): 372–388. Zeng Yong, Zhou Yushu, Yang Lianmei. 2019. A preliminary analysis of the formation mechanism for a heavy rainstorm in western Xinjiang by numerical simulation [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 43 (2): 372–388, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1804.18106.

新疆西部一次大暴雨形成机理的数值模拟初步分析

曾勇^{1,2} 周玉淑^{3,4} 杨莲梅^{1,2}

1 中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所, 乌鲁木齐 830002

2 中亚大气科学研究中心, 乌鲁木齐 830002

3 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

4 中国科学院大学地球科学学院, 北京 100049

摘 要 2016 年 7 月 31 日至 8 月 1 日新疆西部发生了一次罕见的大暴雨过程, 利用常规观测资料、FY-2G 卫星 TBB (Black-Body Temperature) 资料和 NCEP/NCAR ($1^\circ \times 1^\circ$) 再分析资料, 在天气尺度环流背景和中尺度系统分析的基础上, 利用 WRF (Weather Research and Forecasting) 模式对此次大暴雨过程进行了高分辨率数值模拟, 利用模拟资料对大暴雨的形成进行了分析。结果表明: 此次暴雨发生在稳定维持的“两脊一槽”环流形势下, 巴尔喀什湖低槽、高空偏西急流、低空偏东急流和近地面辐合线是造成此次大暴雨过程的主要天气系统。中尺度云团沿近地面的辐合线在天山迎风坡附近不断生成, 云团生成后, 在向东北方向移动过程中, 经过伊犁地区上空时, 受天山地形抬升影响不断发展增强, 造成伊犁地区出现持续性较强降水。天山迎风坡附近持续较长时间的辐合线是造成此次新疆西部大暴雨的直接中尺度系统, 其生成与低层风场辐合、低空急流和地形均有关系。低层辐合引发的垂直运动在地形迎风坡附近加强, 风场辐合及地形抬升共同导致强垂直运动发展并维持, 类似于“列车效应”, 不断生成的尺度更小的对流系统沿着辐合线持续移过新疆西部的伊犁地区, 是该次暴雨持续的重要原因。

关键词 暴雨 数值模拟 新疆西部 列车效应 天山地形

文章编号 1006-9895(2019)02-0372-17

中图分类号 P435

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1804.18106

A Preliminary Analysis of the Formation Mechanism for a Heavy Rainstorm in Western Xinjiang by Numerical Simulation

ZENG Yong^{1,2}, ZHOU Yushu^{3,4}, and YANG Lianmei^{1,2}

1 Institute of Desert and Meteorology, China Meteorological Administration, Ürümqi 830002

2 Center for Central Asia Atmosphere Science Research, Ürümqi 830002

3 Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

4 College of Earth Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

Abstract Synoptic circulation pattern and mesoscale system associated with the torrential rain occurring in western Xinjiang from 31 July to 1 June 2016 are analyzed based on conventional observational data, TBB (Black-Body Temperature) data of FY-2G satellite and the NCEP/NCAR reanalysis data at $1.0^\circ \times 1.0^\circ$ spatial resolution. By using the

收稿日期 2018-01-12; 网络预出版日期 2018-05-21

作者简介 曾勇, 男, 1990 年出生, 助理研究员, 主要从事灾害性天气诊断和数值模拟研究。E-mail: 15099610397@163.com

通讯作者 周玉淑, E-mail: zys@mail.iap.ac.cn

资助项目 国家自然科学基金项目 41661144024、41565003、41475054, 公益性行业(气象)科研专项 GYHY201506009

Funded by National Natural Science Foundation of China (NSFC) (Grants 41661144024, 41565003, 41475054), Special Scientific Research Fund of Meteorological Public Welfare Profession of China (Grant GYHY201506009)

WRF (Weather Research and Forecasting) model, the torrential rain is simulated with high resolution, and the simulation results are used to make a preliminary diagnosis of this rainfall formation. The results are as follows. A stable circulation pattern of "two ridges one trough" was the background of the rainstorm. The Balkh Lake trough, the upper level westerly jet, the lower level easterly jet and the surface convergence line were the main weather systems conducive to the heavy rain. Mesoscale clouds continually formed in the windward slope of Tianshan, and moved to the northeast after their formation. Mesoscale convective clouds continually developed as the clouds passed over the Ili area, leading to strong continuous precipitation there. The mesoscale convergence line caused by continuous wind field convergences at the low-level near the windward slope of Tianshan was the system that directly caused this heavy rainstorm in western Xinjiang, which was related to low-level wind convergence, low-level jet and terrain effect. The vertical motion caused by the low-level convergence was further enhanced by the orographic lifting, and both the wind field convergence and terrain elevation contributed to the strong updraft development and maintenance. Similar to the "train effect", mesoscale systems that constantly moved across western Xinjiang along the convergence line also contributed to the persistence of the heavy rain.

Keywords Torrential rain, Numerical simulation, West of Xinjiang, Train effect, Tianshan terrain

1 引言

暴雨及强降水是我国夏季最主要的气象灾害天气(陶诗言, 1980), 强降水引发的洪涝常给人民生命财产和国民经济带来巨大损失。因此, 暴雨研究一直是国内外气象工作者关注的重点和热点。我国暴雨频发, 有关暴雨成因、机理和预报等已经有大量的研究成果(丁一汇, 1993; 陶诗言等, 2001; 赵思雄等, 2004)。近年来, 随着观测手段的不断改进和气象资料的不断丰富, 从天气形势(赵思雄, 2011; 王东海等, 2011; 俞小鼎, 2012; 孙建华等, 2013; 陶祖钰和郑永光, 2013)、暴雨系统(倪允琪和周秀骥, 2004; 孙继松, 2005; 杨帅和高守亭, 2007; 沈杭锋等, 2015)、水汽输送特征(周玉淑等, 2005; 江志红等, 2013; 孙建华等, 2016)、观测试验(Zhang et al., 2011; Luo and Chen, 2015; Jiang et al., 2017; Huang and Luo, 2017)和中尺度系统研究进展(陆汉城, 2000; 孙淑清和周玉淑, 2007; 王东海和杨帅, 2009; 冉令坤等, 2009; 高守亭等, 2013; 孙继松等, 2013; 张迎新等, 2015; 赵庆云等, 2017)等方面对暴雨过程进行了多角度分析研究。同时, 利用高分辨数值模拟对暴雨中尺度系统结构和演变过程、暴雨发生的不稳定条件、斜压涡度发展和地形作用、集合预报方法等各个方面展开的大量研究(翟国庆和高坤, 1997; 翟国庆等, 2003; 高守亭等, 2008; 李娜等, 2013; 冉令坤等, 2013, 2014; 周玉淑等, 2014; Yang et al., 2015, 2017; 张哲等, 2016), 增进了我们对暴雨发生发展的动力过程和中尺度结构的认识。但是, 相对于我国中东部大规模的暴雨观测试验、机理研

究和预报系统建设取得的大量成果, 对新疆地区暴雨的研究则少得多。

新疆位于中国西北部, 幅员辽阔, 占到中国国土面积约 1/6, 是我国很多天气系统的上游, 气候不受季风系统直接影响, 是典型的大陆性干旱、半干旱气候。北部的阿勒泰山, 南部的昆仑山和中部的天山将新疆分为北疆和南疆, 并形成“三山夹两盆”的独特地形, 南、北疆气候差异显著。不同的气候背景和独特的地形决定了新疆暴雨过程与中东部必然存在差异, 有其特殊性。对新疆暴雨统计研究(《新疆短期天气预报指导手册》编写组, 1986; 张家宝和邓子凤, 1987; 马淑红和席元伟, 1997; 江远安等, 2001; 杨莲梅等, 2011; 曾勇和杨莲梅, 2016)表明, 影响新疆暴雨的主要天气系统, 分别为西西伯利亚低槽、南支大槽、副热带大槽、中亚低涡和北槽东移(叠加破坏型), 其中, 中亚低涡(低槽)是最主要的影响系统, 低空偏东急流在暴雨过程中起重要作用; 有关新疆暴雨天气形势及暴雨系统研究(杨莲梅, 2003; 陈春艳等, 2012; 张云惠等, 2013, 2015; 王江等, 2015)指出, 暴雨过程高、中及低空三支气流有利配合有利于暴雨产生, 高空强烈辐散与低空辐合之间的耦合不仅增加了低层水汽在暴雨区汇集, 也通过增强垂直速度将更多的潮湿空气向上输送, 使高层大气湿度增加, 同时, 天山地形有利于系统性的强上升运动发生发展; 对新疆暴雨水汽输送研究(肖开提·多莱特等, 1997; 杨莲梅, 2003; 杨莲梅等, 2011, 2012; 张俊兰等, 2016)表明, 阿拉伯海和孟加拉湾的水汽通过接力方式可以影响到南疆造成暴雨, 且新疆典型暴雨过程的水汽输送路径存在明显差异, 这种差

异与天气系统异常关系密切,同时,暴雨过程水汽集中迅速,主要集中于 700 hPa 以下;对中尺度系统研究(庄薇等,2006;孔期等,2011;杨霞等,2014;李如琦等,2016;曾勇和杨莲梅,2017a,2017b;曾勇等,2018)表明,低空风场辐合线、云图上快速生成、发展、移动的中尺度对流云团和多普勒天气雷达上特征明显的中尺度对流系统是造成新疆暴雨强降水的直接系统。

以上有关新疆暴雨的研究,主要是利用统计分析、天气学分析和动力学诊断等方法对大尺度环流背景、暴雨系统天气尺度的动热力结构、水汽输送、中尺度特征及发生机理等进行分析,取得了一系列有益成果,增强了我们对新疆暴雨发生的天气背景及系统结构等的认识。目前,由于新疆西部地形极其复杂且观测站点稀少,针对暴雨过程的中尺度系统结构、演变特征以及动力学机制等方面还缺乏清晰的认识。伊犁地区是新疆的强降水中心之一,无论暖季还是冷季,该区域都极易发生灾害性降水天气过程。为了增进对该区域暴雨天气过程中,中尺度系统结构演变与强降水过程之间关系的科学认识,本文选取了 2016 年 7 月 31 日至 8 月 1 日新疆西部出现的破极值的罕见大暴雨天气过程,以实测降水资料、风云卫星资料和 NCEP/NCAR ($1^\circ \times 1^\circ$)再分析资料的分析为基础,利用 WRF (Weather Research and Forecasting) 模式进行高分辨数值模拟,在保证模拟结果基本可信的基础上,利用模拟资料对此次罕见大暴雨过程的成因进行分析,以期揭示伊犁河谷暴雨形成的物理机制。

2 资料和方法

本文分析和模拟诊断所用资料包括: NCEP/NCAR 的逐 6 h 空间分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$ 再分析资料,新疆信息中心提供的新疆 6 h 和 24 h 实况降雨量,国家卫星中心提供的 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 相当黑体亮温 (Black-Body Temperature, TBB) 资料及 WRF 模式高分辨率模拟输出资料。在实况与模拟对比基础上,利用模拟资料对大暴雨过程进行初步诊断,分析造成该次新疆西部暴雨的中尺度系统发展过程及结构演变。

3 暴雨过程观测分析

3.1 降水实况

2016 年 7 月 31 日 12 时至 8 月 1 日 12 时(协

调世界时,下同),新疆西部出现了一次罕见大暴雨天气过程(新疆暴雨标准:日降雨量 > 24 mm),大暴雨中心伊犁地区的部分区域出现降雨量 > 48 mm 大暴雨,局地出现 > 96 mm 特大暴雨(图 1)。伊犁地区 10 个国家气象站的日平均降雨量达到 46.8 mm,突破伊犁地区有气象记录以来 10 站日平均最大记录,伊犁地区的特克斯(51.7 mm)、昭苏(52.8 mm)、新源(66.1 mm)、尼勒克(74.6 mm)均破历史日极值,最强日降水发生在巩留库尔德宁,达 100.1 mm。同时,伊犁地区南侧的阿克苏地区北部、北侧的博州地区东部和塔城地区南部也出现大暴雨。此次大暴雨天气过程具有局地性强、极端性强、累计雨量大等特点,空间和时间上都具有明显的中尺度特征。

3.2 天气形势分析

大暴雨前期(30 日 12 时至 31 日 06 时),500 hPa 高空图(图略)中高纬度呈现“两脊一槽”的环流形势,伊朗副热带高压与乌拉尔山高压脊同相位叠加,西太平洋副热带高压西伸北挺发展强盛,588 dagpm 线伸展到新疆东部地区,巴尔喀什湖至新疆西部为低槽区,槽前大范围垂直上升运动为此次大暴雨天气提供了非常有利的背景条件。31 日 12 时(图 2a),伊朗副热带高压与乌拉尔山高压脊进一步发展,巴尔喀什湖低槽发展加深,西太平洋副热带高压北抬后稳定维持,阻挡了巴尔喀什湖低槽的西移,使高空槽系统在新疆西部地区滞留较长时间,为此次大暴雨的发生提供了良好的天气背景。同时,200 hPa 高空急流核位于新疆北部,新疆西部处于高空急流入口区右侧辐散区。700 hPa 图(图 2b)上,新疆西部存在明显辐合线(图中黑实线),且伊犁地区及其以南的阿克苏地区为辐合中心。同时,存在一支经河西走廊进入阿克苏地区北部的偏东风急流,与高空急流相互配合,造成了高空辐散低空辐合的形势,在伊犁附近产生较强的上升运动,为此次大暴雨中尺度对流系统的发生发展提供了有利的动力条件。1 日 12 时(图略),随着环流的调整,500 hPa 低槽变平直,使得槽前偏南风明显减弱,700 hPa 切变线和偏东急流也减弱消失,大暴雨减弱并结束。

曾勇和杨莲梅(2018)对此次暴雨过程水汽的研究发现:此次暴雨期间有三支水汽输送路径,第一支为槽前西南气流导致的西南路径,第二支为低空急流导致的偏东路径,第三支为孟加拉湾低值系

统和低槽接力输送的偏南路径；进一步分析此次过程暴雨区水汽收支发现：此次暴雨期间，西、东、南边界水汽输入均起着重要作用，尤其是西边界和东边界，占水汽输入总量的 78.4%，与水汽通量分析显示的槽前西南气流导致的西南路径和低空急流导致的偏东路径输送为主是一致的。

3.3 云图演变特征

一般来讲，暴雨都是在有利的大尺度形势下由中小尺度系统直接造成的。新疆西部地形极其复杂，特别是暴雨中心伊犁地区，其南北地区均为天

山，海拔多在 3000 m 以上，常规观测稀少且分布不均，这就使抓住中小尺度系统及其演变过程变得十分困难，因而在该地区利用卫星观测进行分析变得很有必要，下面利用 FY-2G 逐时 TBB 资料分析此次大暴雨期间中尺度系统的活动及演变过程。TBB 资料显示（图 3），2016 年 7 月 31 日 14 时，伊犁地区和阿克苏地区北部分别存在较弱的中尺度云团 A 和 B；15 时，云团 A 和 B 向东北方向移动发展，在云团 B 西南方的阿克苏地区北部新生 -40°C 的中尺度云团 C，随后云团 A、B 和 C 在向东北方向移动过程中不断发展；17 时，云团 A、B 和 C 西南方的阿克苏地区北部又新生云团 D，此后在阿克苏地区北部又有云团 E 和 F 新生并向东北方向移动，在移动过程中范围不断增大、强度增强；8 月 1 日 00 时后，云团 E 和 F 合并发展为范围较大的云团 G，伊犁地区及其南北主要受云团 G 控制。云团连续移过的区域出现了持续的较强对流性降水，其中巩留库尔德宁分别于 31 日 16~17 时、17~18 时、19~20 时出现 8.9 mm、8 mm、7.8 mm 的较强降水，较强持续降水导致该站 24 h 累计降水达 100.1 mm。可见，对流云团不断在阿克苏北部产生，云团生成后，在向东北方向移动过程中不断发展加强并经过新疆西部，类似于“列车效应”，造成了伊犁河谷持续产生较强降水。期间不同云团新生发展过程可能与低层辐合线和有利地形配合有关，相关内容分析将在后面章节展开。

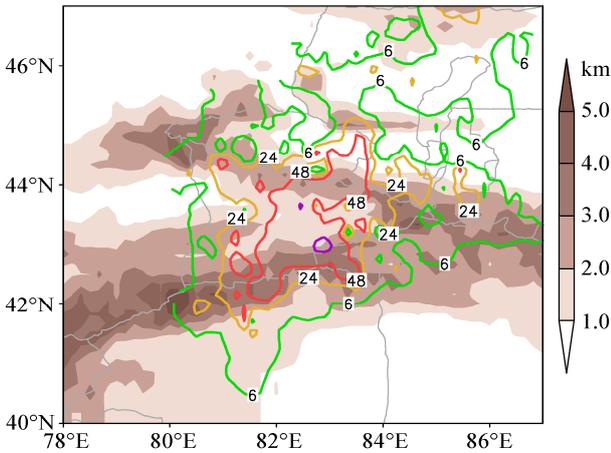


图 1 2016 年 7 月 31 日 12 时（协调世界时，下同）至 8 月 1 日 12 时的 24 h 累积降水量分布（实线，单位：mm），阴影为地形高度
Fig. 1 4-h accumulated precipitation from 1200 UTC 31 July to 1200 UTC 1 August 2016 (solid lines, units: mm), shaded areas represent terrain height

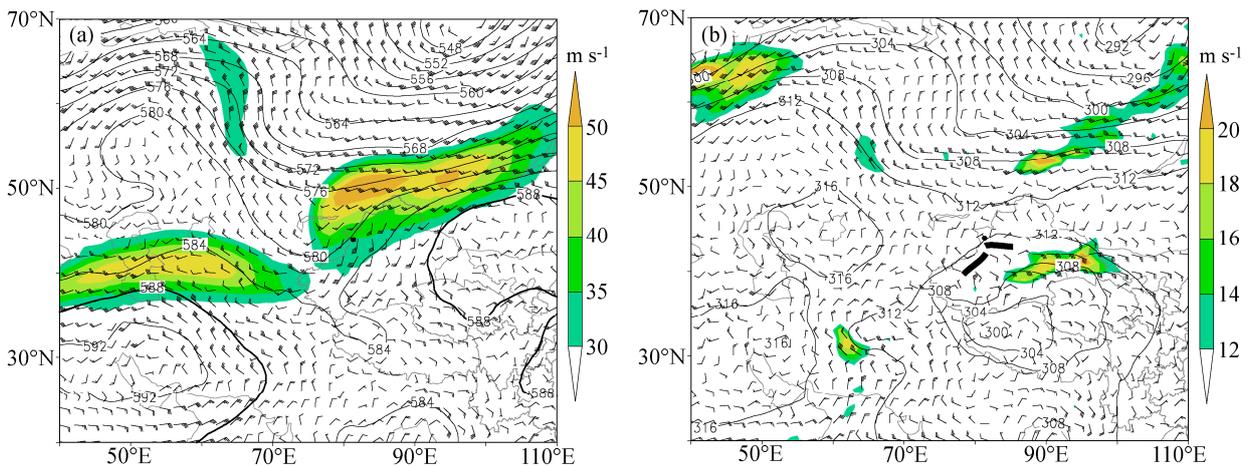


图 2 2016 年 7 月 31 日 12 时 (a) 500 hPa 位势高度（实线，单位：dagpm）、风场（风羽，单位：m s⁻¹）、200 hPa 高空急流（阴影，单位：m s⁻¹）和 (b) 700 hPa 位势高度（实线，单位：dagpm）、风场（风羽，单位：m s⁻¹）、低空急流（阴影，单位：m s⁻¹）。黑点代表伊宁站
Fig. 2 (a) Geopotential height (solid line, units: dagpm) and wind field (wind barb, units: m s⁻¹) at 500 hPa, upper level jet at 200 hPa (shaded areas, units: m s⁻¹) and (b) geopotential height (solid lines, units: dagpm) and wind field (units: m s⁻¹) at 700 hPa and low level jet (shaded areas) at 1200 UTC 31 July 2016. The black circle indicates Yining station of Xinjiang

4 中尺度数值模拟方案及模拟结果验证

4.1 模拟方案设计

本文模拟采用 WRF 模式, 模拟中心点在 (42°N , 81°E), 三层双向嵌套, 区域 1 水平分辨率 27 km, 水平方向格点数 280×210 ; 区域 2 水平分辨率 9 km, 水平方向格点数 535×391 ; 区域 3 水平分辨率 3 km, 水平方向格点数 442×325 , 垂直层数取 50 层, 积分步长为 60 s。微物理过程采用 Single-Moment 6-class 方案, 边界层采用 YSU 方案, 长波辐射采用 RRTM 方案, 短波辐射为 Dudhia 方案, 积云参数化采用 Kain-Fritsch 方案 (区域 3 关闭积云参数化方案), 积分时间从 7 月 31 日 00 时至 8 月 1 日 12 时, 共积分 36 h, 每 30 min 输出一次资料。

4.2 模拟降水与实况对比

图 4 为新疆西部 2016 年 7 月 31 日 12 时至 8 月 1 日 12 时 24 小时累计降水量对比, 可以看到模式模拟的雨带走向、落区、范围等与实况较为一致, 强度与观测有较好对应, 基本模拟出了伊犁及其南、北的大暴雨区, 但是细节上仍存在一些不足, 例如虽然模拟的大于 24 mm 的降水落区与实况有较为一致的西南—东北走向, 但是落区范围较实况略偏大, 尤其在雨带两端的 (42°N , 81°E) 和 (45°N , 84°E) 附近。此外, 模拟出了 42.5°N 附近特大暴雨中心 (紫色区域), 这在观测上并不存在, 这些偏差与模拟初始时刻的选取、模式地形精度与实际地形的差异以及观测站点分布不均等因素有关, 特别是伊犁地区的南、北部较宽广的天山地区, 地形极其复杂, 海拔基本在 3000 m 以上, 降水测站稀少, 没有观测数据, 实况降水是否遗漏了真正的大暴雨中心还有待考察。

图 5b、d、f 给出了新疆西部 7 月 31 日 18 时、8 月 1 日 00 时、06 时每 6 小时的累计降水量分布, 与实况 (图 5a、c、e) 对比可见, 模拟结果能够较好地反映出此次大暴雨过程的雨带移动和强度变化过程, 模拟雨带能基本再现实况降水的范围和走向, 且比实况更能反映出降水的精细化分布。但是, 我们也注意到, 虽然模式模拟出了大暴雨雨带位置和西南—东北走向特征, 但是细节上仍有一些差异, 如图 5b 相较于图 5a, 模拟出的大暴雨区 (紫色区域) 较实况位置偏南, 范围偏大, 图 5d 模拟

出了实况中在 (42.5°N , 81.5°E) 附近不存在的大暴雨中心, 而图 5f 模拟的暴雨区域较实况偏小, 以上模拟和实况的偏差除了受模式自身精度的限制外, 主要是由于研究区域地形极其复杂、测站稀疏且分布不均, 在山区发生的强降水, 现有观测站很难真实再现实际降水的量级和中心。虽然模拟和实况存在一些偏差, 但是模拟降水的整体变化趋势和持续时间及雨带走向与实况基本一致。因此, 该模拟能基本表征这次大暴雨过程的结构特征变化, 可以利用模式输出的高时空分辨率资料对这次大暴雨的中尺度结构进行研究。

4.3 模拟风场与实况对比

图 6 为模拟风场与实况验证, 由于暴雨区只有 1 个探空站——伊宁探空站, 所以利用伊宁探空站模拟水平风场廓线与实测水平风场廓线进行对比, 由图 6a、b 可见, 虽然存在一些细节的差异, 但是大体上模拟结果可以反映实况的基本特征。除了 1 个探空站外, 暴雨区可用的实测资料还有地面风场资料, 由暴雨区地面风场实况 (图 6c) 与地面风场模拟 (图 6d) 对比可以看到, 受复杂地形影响, 虽然模拟与实况在地面风场的细节上存在一些差异, 但是模拟结果与实况已较为接近, 可以用该模拟进行进一步分析。结合降水对比分析可见, 虽然模拟和实况存在一些偏差, 但是模拟降水的整体变化趋势和持续时间及雨带走向与实况基本一致。因此, 该模拟能基本表征这次大暴雨过程的结构特征变化, 可以利用模式输出的高时空分辨率资料对这次大暴雨的中尺度结构进行研究。

5 对模拟中尺度系统结构及发展过程的初步分析

从上文 TBB 资料可知, 中尺度云团不断产生于阿克苏地区北部, 在向东北方向移动过程中不断发展加强, 那么为什么中尺度系统能够不断产生于阿克苏地区北部并向东北方向移动? 众所周知, 暴雨的产生离不开强烈的上升运动, 从模拟的此次暴雨过程暴雨区雷达组合反射率和 700 hPa 风矢叠加图可以看到, 暴雨发生前的 31 日 02 时 (图 7a), 阿克苏地区北部有明显偏东南风遇到天山地形后产生的辐合线存在, 阿克苏地区西北部还有较弱的偏西南风, 同样, 在伊犁地区南部有偏北气流遇到天山地形后产生的辐合线, 但风速较小, 此时大于 45 dBZ 的强回波区位于天山 3 km 以上地形区。31

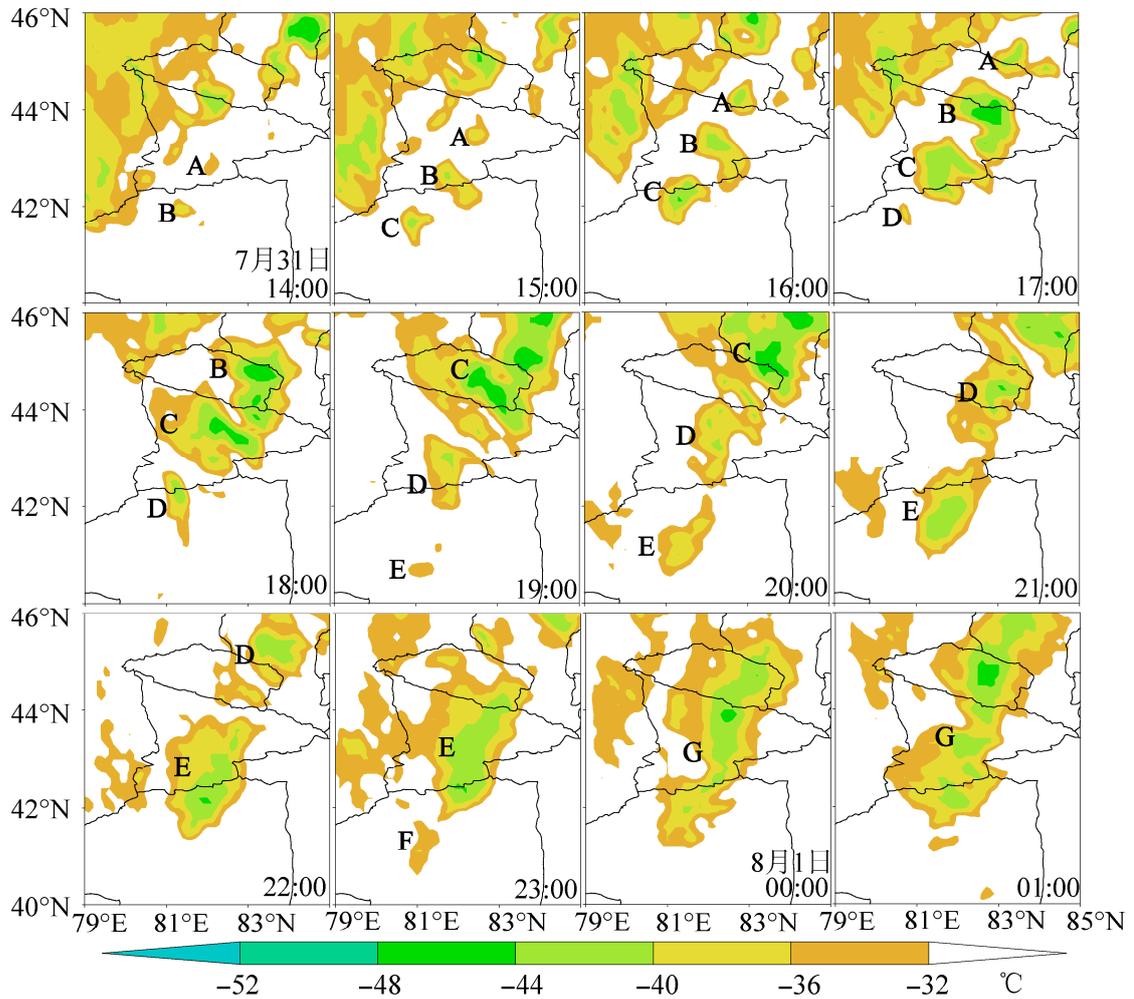


图3 2016年7月31日14时至8月1日01时新疆西部地区FY-2G卫星逐小时TBB (Black-Body Temperature) (单位: °C, 分辨率 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$)
 Fig. 3 Hourly changes of TBB (Black-Body Temperature) from FY-2G satellite (units: °C, resolution: $0.1^\circ \times 0.1^\circ$) from 1400 UTC 31 July to 0100 UTC 1 August 2016 in western Xinjiang

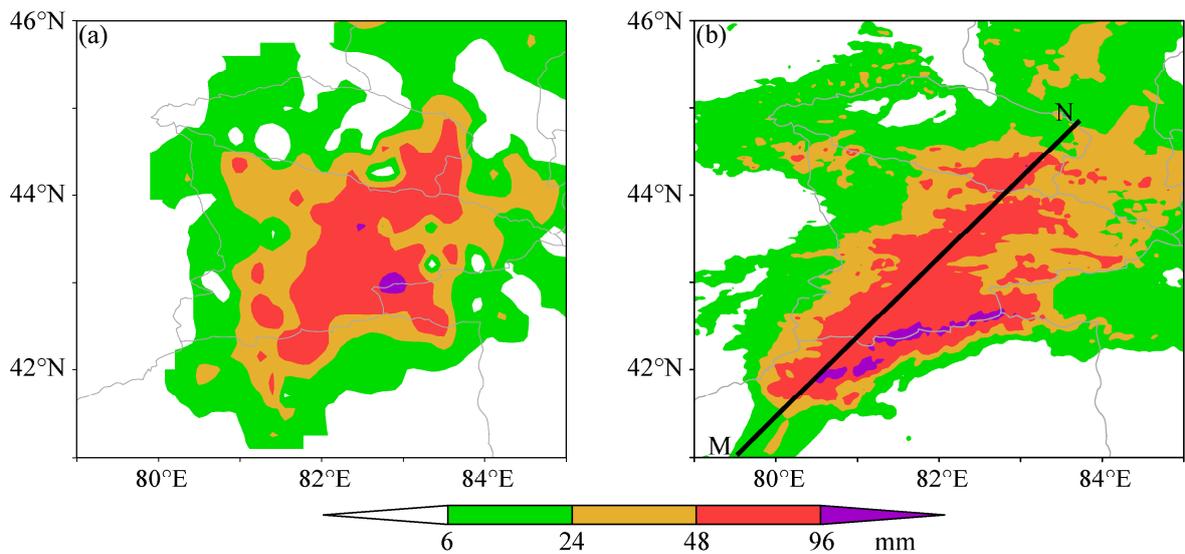


图4 2016年7月31日12时至8月1日12时24小时累计降水量(单位: mm) (a) 观测和 (b) 模拟
 Fig. 4 4-h accumulated precipitation (units: mm) from (a) observations and (b) simulation from 1200 UTC 31 July to 1200 UTC 1 August 2016

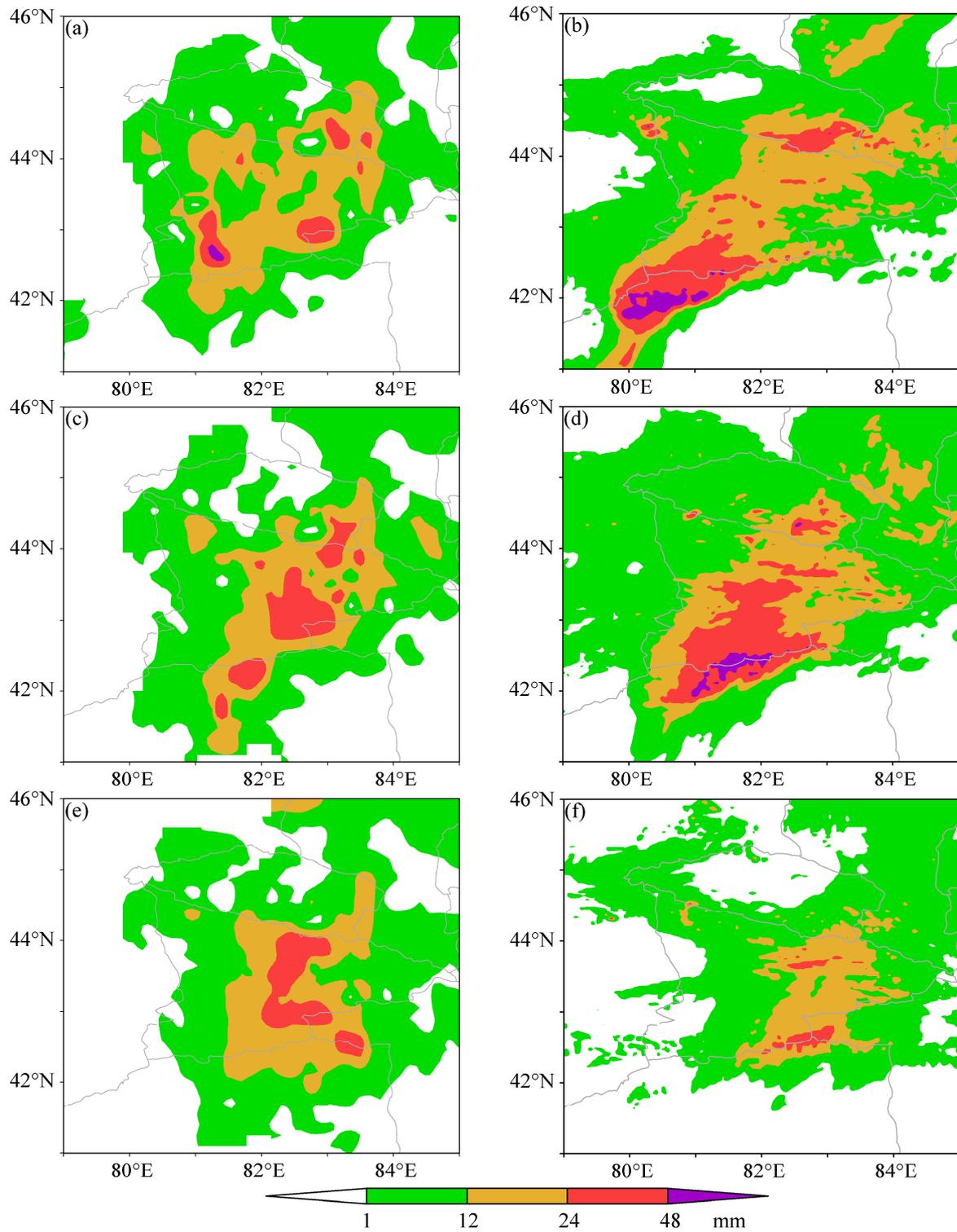


图5 2016年7月31日12时至8月1日06时新疆西部地区6h累计降水量分布(单位:mm):(a)7月31日12~18时观测;(b)7月31日12~18时模拟;(c)7月31日18时至8月1日00时观测;(d)7月31日18时至8月1日00时模拟;(e)8月1日00~06时观测;(f)8月1日00~06模拟

Fig. 5 6-h accumulated precipitation (units: mm) from 1200 UTC 31 July to 0600 UTC 1 August 2016: (a) Observations from 1200 UTC to 1800 UTC 31 July; (b) simulation from 1200 UTC to 1800 UTC 31 July; (c) observations from 1800 UTC 31 July to 0000 UTC 1 August; (d) simulation from 1800 UTC 31 July to 0000 UTC 1 August; (e) observations from 0000 UTC to 0600 UTC 1 August; (f) simulation from 0000 UTC to 0600 UTC 1 August 2016

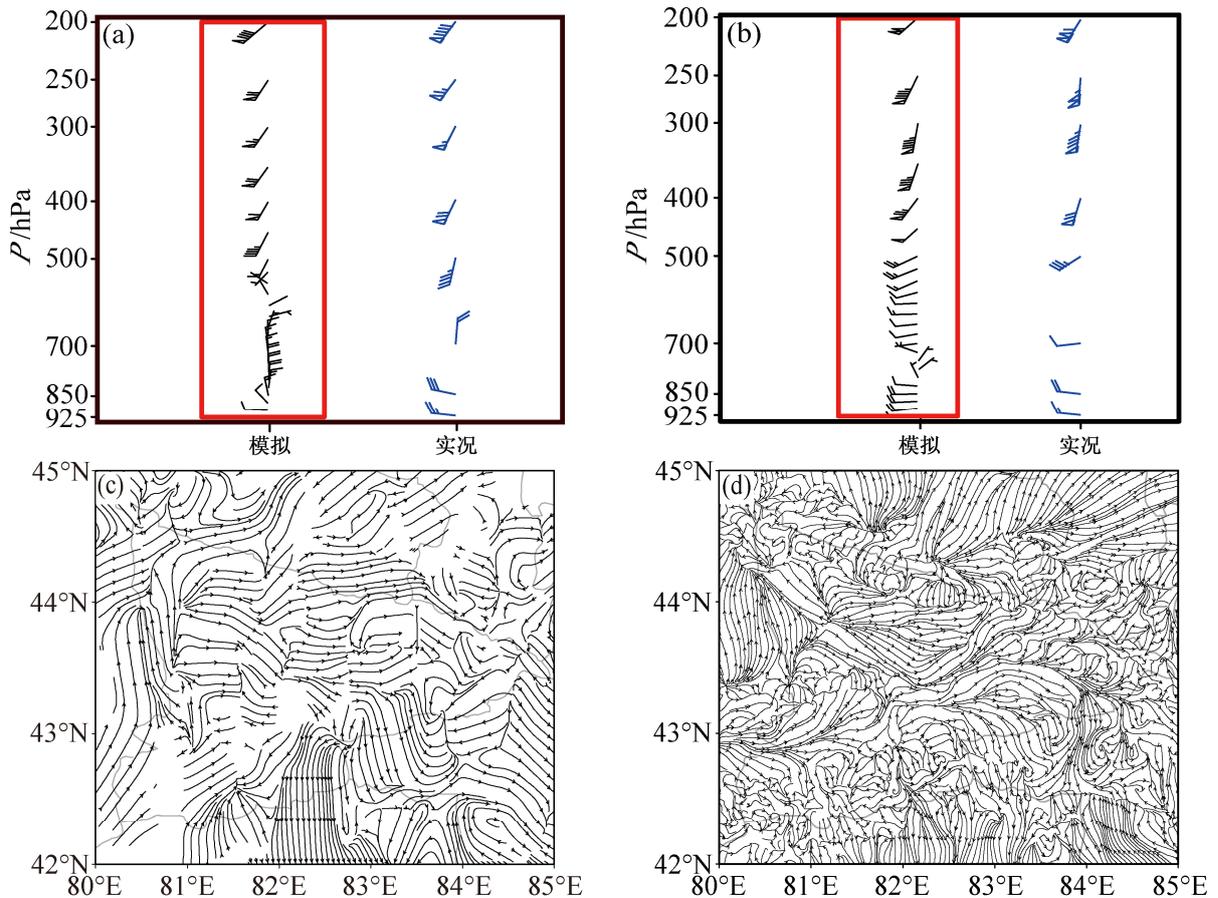


图6 (a) 2016年7月31日12时和(b)8月1日00时伊宁站水平风场廓线(红色矩形框内风场为模拟,蓝色风场为实测,单位: $m s^{-1}$)及7月31日12时新疆西部地面风场(c)实测和(d)模拟

Fig. 6 Horizontal wind field profiles at Yining station in Xinjiang (the wind field in the red rectangle is from simulation, and the blue wind field is from observations, units: $m s^{-1}$) at (a) 1200 UTC 31 July and (b) 0000 UTC 1 August 2016. Surface wind fields from (c) observations and (d) simulation at 1200 UTC 31 July 2016 in western Xinjiang

日08时(图7b),偏东南风和偏北风均有所加强,地形辐合线持续维持。31日17时(图7c),大于45 dBZ的回波范围进一步扩大,阿克苏地区北部偏东南风和偏西南风不但有与天山地形作用的地形辐合线,还在(41.5°N, 80.5°E)附近相遇产生了更为明显的风场的辐合,正是这几条持续存在的地形辐合线和风场辐合线为辐合线上中尺度系统的产生提供了极为有利的中尺度环境条件。此时,偏东南风和偏西南风已经发展达到低空急流强度(黑色箭头所示),Chen(1982)指出低空急流除了在急流左前方产生涡度外,其与高空急流的耦合能加强垂直次级环流的发展和雨带中对流的增强,并通过潜热释放进一步加强低空急流,形成有利于强降水产生和维持的正反馈机制。孙继松(2005)研究表明中尺度强降水改变了对流层中层和近地面层的温度梯度特征,形成了对流层中层和边界层符

号相反的水平温度梯度,从而造成中尺度急流的发展。同时,中尺度急流的形成又促进了急流核前方的动力辐合,有利于强降水在急流核前方产生。这些特征在本次降水过程中都有所体现,从图中可见此时急流前部动力辐合明显加强,对流系统强度显著增强(对应了图3中云团C和D的生成和发展),且降水强度也有所增强(图略)。可见,低空急流增强引起的动力辐合增强,急流左前侧局地涡度和散度都增强,导致垂直运动加速发展(图7e, f)引发了沿辐合线生成的对流系统(对应图3中云团D和E的生成和发展)。此外,伊犁地区的偏东气流在将强回波向东推动的过程中也起到了重要作用。31日21时(图7d),偏东南急流和偏西南急流转为两支偏南急流,位置向东有所移动,强回波区也向东北方向移动,这与TBB上同时刻中尺度云团E的发展密切相关,同时也对应了暴雨区向东

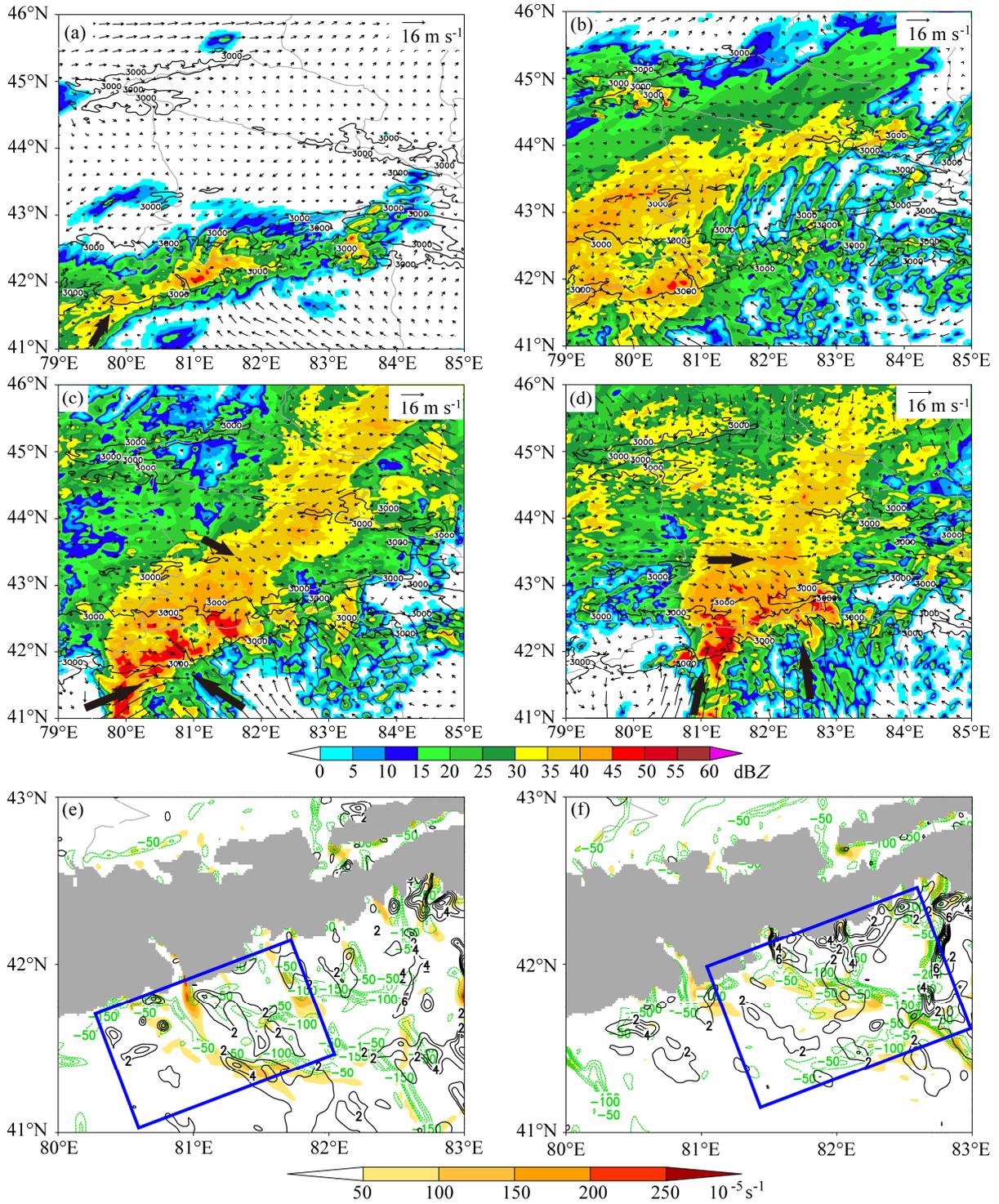


图7 2016年7月31日新疆西部模拟的 (a) 02时、(b) 08时、(c) 17时和 (d) 21时雷达组合反射率 (阴影, 单位: dBZ) 和700 hPa 风场 (黑实线为天山3 km地形) 以及 (e) 18时和 (f) 21时700 hPa 相对涡度 (彩色阴影, 单位: 10^{-5} s^{-1})、散度 (绿色虚线, 单位: 10^{-5} s^{-1}) 和垂直速度 (黑色实线, 单位: 10^{-1} m s^{-1}) (灰色阴影为天山3 km以上地形)

Fig. 7 Simulated radar composite reflectivity (shaded area, units: dBZ) and wind filed (units: m s^{-1}) (black solid line shows the 3 km terrain height of Tianshan) at (a) 0200 UTC, (b) 0800 UTC, (c) 1700 UTC, (d) 2100 UTC, and relative vorticity (color shaded areas, units: 10^{-5} s^{-1}), divergence (green dashed lines, units: 10^{-5} s^{-1}), and vertical velocity (black solid lines, units: 10^{-1} m s^{-1}) at 700 hPa at (e) 1800 UTC, (f) 2100 UTC on 31 July 2016 in western Xinjiang (the area shaded in grey indicates terrain height of Tianshan above 3 km elevation)

北方向移动的趋势,进一步分析可见,30 dBZ 以上强回波的位置及移动与暴雨区的位置及移动基本吻合。

过图 4b 中西南—东北走向的大暴雨区(自 M 向 N 的黑色实线,下文剖面位置同此处)做垂直速度和流线的垂直剖面(图 8),可以看到,7 月 31 日 02 时(图 8a),伊犁地区(43.5°N, 82°E)附近 650 hPa 高度上为一个反气旋式垂直环流中心,其上为西南气流,其下为东北气流,垂直环流上升支位于(43°N, 81.5°E)附近的迎风坡,同时,阿克苏地区北部西南气流遇天山地形在(41.5°N, 80°E)附近 500 hPa 高度存在 0.4 m s^{-1} 的垂直上升运动中心。08 时(图 8b),反气旋式垂直环流发生倾斜,环流中心上升到 550 hPa 高度,上升支和下沉支气流变得更加倾斜,阿克苏地区北部天山迎风坡出现

强上升运动,中心达到 1.2 m s^{-1} 以上,位于 500 hPa 高度附近,这是由 500 hPa 槽前强上升运动叠加地形上升运动的结果。暴雨开始后的 17 时(图 8c),反气旋式垂直环流中心在向东北方向移动过程中下降到 650 hPa 高度,(41.5°N, 80°E)附近至(42.5°N, 81°E)附近上空为 1.2 m s^{-1} 以上的大面积强上升运动区, 1.2 m s^{-1} 以上强上升运动自 650 hPa 伸展到 250 hPa 高度,其他地区上空垂直运动也发展加强,从大于 0.4 m s^{-1} 的上升运动区来看,上升运动自西南向东北方向倾斜向上分布,此时较强降水正在发生,受降水粒子的拖曳作用,600 hPa 以下基本为下沉气流;此后,在天山迎风坡附近不断有强的上升运动大值中心新生并在向东北方向移动过程中向上倾斜发展。21 时(图 8d),强上升运动向东北方向传播,伊犁地区上空强上升运动加

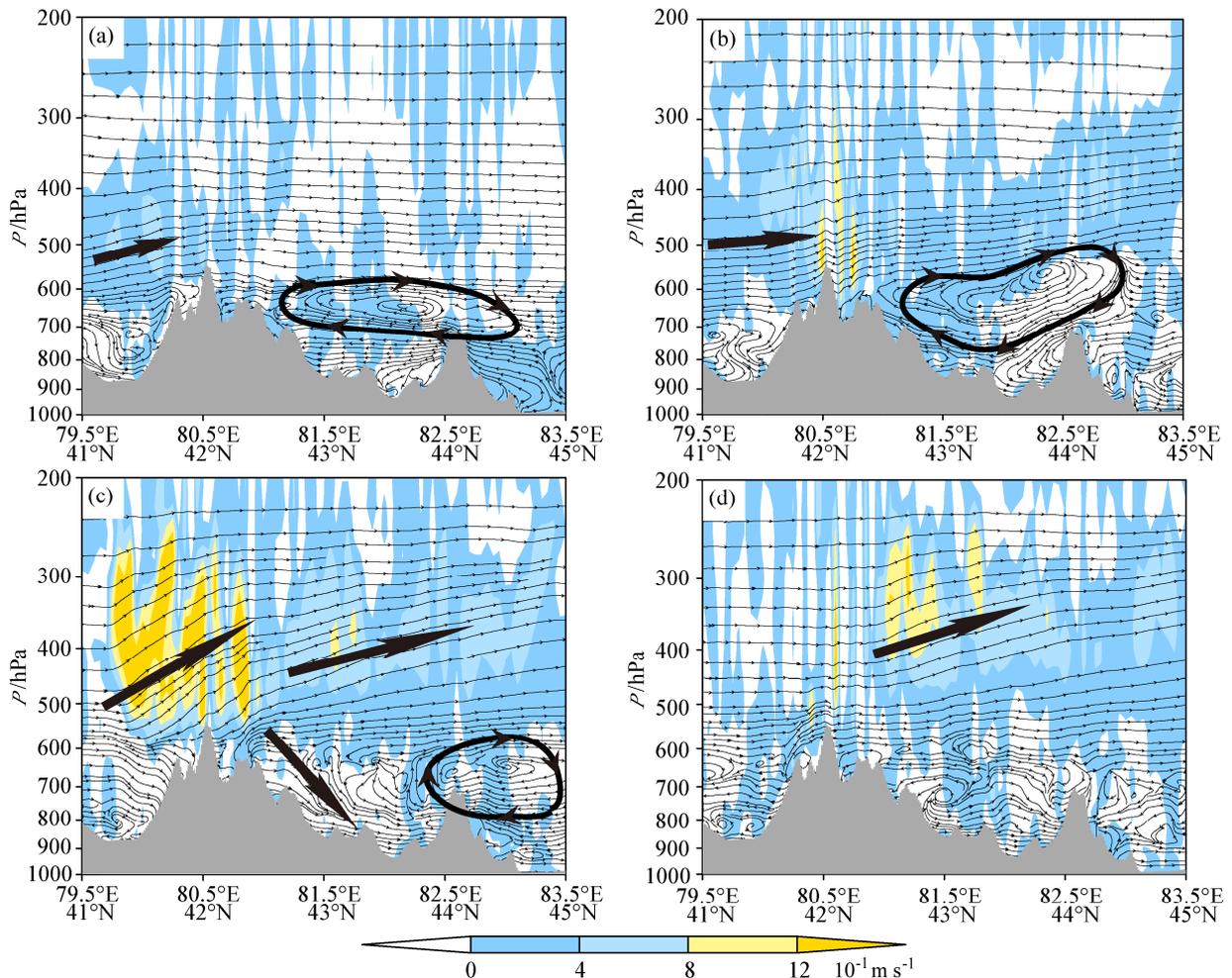


图 8 2016 年 7 月 31 日模拟的沿图 4b 中黑实线垂直速度(阴影,单位: 10^{-1} m s^{-1})和流线(为分析方便,流场中垂直速度 $w \times 100$)的垂直剖面(灰色阴影为天山地形,下同): (a) 02 时; (b) 08 时; (c) 17 时; (d) 21 时

Fig. 8 Simulated vertical cross sections of vertical velocity (shaded areas, units: 10^{-1} m s^{-1}) and streamline field (for the convenience of analysis, the vertical velocity is multiplied by 100 in the streamline field) along the black solid line shown in Fig. 4b (the gray shadings indicate the topography of Tianshan, the same hereafter) at (a) 0200 UTC, (b) 0800 UTC, (c) 1700 UTC, (d) 2100 UTC 31 July 2016

强,最强上升运动中心位于 300 hPa 附近,达 1.2 m s^{-1} 以上,随后强上升运动中心进一步向东北方向移动(图略)。

从以上分析可见,有利的地形产生的地形迎风坡上升运动叠加在槽前强上升运动作用上,为暴雨的产生提供了有利的动力条件,而迎风坡附近不断加强的强上升运动中心向东北方向移动是暴雨持续较长时间的关键。此外,暴雨过程前伊犁地区上空存在的反气旋式环流的上升支一方面使伊犁地区南部上升运动加强,另一方面使阿克苏北部过天山的气流不易产生下沉分支,有利于降水产生和维持。

图 9 为 7 月 31 日沿图 4b 中黑实线模拟的雷达反射率和风矢量场垂直剖面,31 日 02 时(图 9a),阿克苏地区北部天山上空出现最强反射率达 30 dBZ 的回波区,回波顶平均高度达 350 hPa,强回波区依地形起伏在迎风坡和背风坡出现若干回波中心,风场自地面向高层呈增强趋势。08 时(图 9b),阿克苏地区北部天山上空反射率高值区同时向上、向下发展,范围增大,强反射率中心增强为 40 dBZ,风速较 02 时也明显增大,同时,伊犁地区北部天山上空也出现最强反射率达 35 dBZ 的大片强回波区。12 时(图略),伊犁及其南、北天山地区上空出现至少 5 个明显强回波中心,随后强回波区域不断在阿克苏地区北部天山的迎风坡附近新生,在向东北方向移动过程中不断发展加强。在此过程中伴随着图 3 中阿克苏地区北部中尺度云团的生成、发展加强和东北向移动,较明显降水开始产生。17 时(图 9c),强降水发生过程中,伊犁地区及其南、北天山附近自地面到 300 hPa 高度均为强回波区,30 dBZ 以上强回波区自地面伸展到 400 hPa 高度,出现至少 7 个明显强回波中心,最强回波中心自西南向东北由 45 dBZ 减弱为 35 dBZ,都位于 600 hPa 高度附近。此时迎风坡为极强的大风速区,随着强回波区的发展加强及向东北移动,图 3 中中尺度云团 A、B 和 C 在向东北方向移动过程中范围进一步扩大、强度进一步加强,强降雨带也发展加强并呈西南—东北向分布于伊犁地区及其南、北区域。21 时(图 9d),反射率区域在西南气流的作用下向东北方向推进,回波主体位于 (42.5°N , 81°E) 及其以北地区,该区域回波强度较 17 时变化不大,17 时位于 (42°N , 81°E) 的阿克苏北部新生的中尺度对流云团 D 此时发展移动到 (44.5°N ,

83°E) 的伊犁地区北部天山区域。随后强反射率区域伴随着中尺度云团的东北移进一步东北移(图略)。

从模拟的反射率和风矢量场来看,在地形迎风坡附近不断生成的对流单体具有强反射率特征,强回波中心高度位于 600 hPa 附近,回波顶高度达到 300 hPa 以上,迎风坡附近为大风速区,上升运动极强,在迎风坡附近不断生成的对流单体沿着辐合线向东北方向移动,造成了此次新疆西部罕见的持续性大暴雨。

图 10 为 7 月 31 日沿图 4b 中黑实线的相对湿度(阴影)、比湿(黑线)和温度(红线)垂直剖面,02 时(图 10a),相对湿度表征的大气湿度表现出西南部相对湿度大、东北部相对湿度小、西南部 700~300 hPa 的相对湿度大值区自低层向高层向东北方向倾斜分布的特征,比湿在低层达到 8 g kg^{-1} 以上,且低层比湿梯度较大,从相对湿度和比湿表征的大气湿度条件看,伊犁地区中空为明显干区,温度场南北分布差异不大;08 时(图 10b),整个区域 700~400 hPa 为 90% 以上相对饱和区,伊犁地区中低层比湿明显增大、温度降低,以 8°C 温度线为特征线,阿克苏地区北部 8°C 温度线位于 650 hPa,而伊犁地区 8°C 温度线位于 750 hPa,说明此时阿克苏地区北部低层温度较伊犁地区低层温度更高,对流系统生成的天山迎风坡附近具有更强的高温高湿和高能特性。暴雨过程中的 17 时(图 10c),阿克苏地区北部天山迎风坡附近为向上凸起的比湿大值区,而背风坡 (43°N , 81.5°E) 附近比湿波谷是由于暴雨在下落过程中将水汽带向低层造成,此处上空相对湿度达 90% 以上,且反射率达 35 dBZ,可见 (43°N , 81.5°E) 附近依然有很好的水汽条件,同时降水粒子在下落过程中蒸发吸热,使 0°C 温度线下降到 650 hPa 附近高度,天山迎风坡附近气团依然具有高温高湿高能特性。21 时(图 10d),随着新的对流系统在天山迎风坡附近生成,天山迎风坡附近比湿和相对湿度持续保持为向上凸起的高湿区,随着系统东北移,此后的相对湿度和比湿大值区也进一步向东北方向移动。

从湿度和温度条件可见,水汽相对饱和区自西南部、自中高层逐渐向东北部、向低层推进,上升气流在迎风坡不断将水汽和能量向上输送形成湿度和温度向上凸起的大值区,使不断在迎风坡生成的对流系统具有高温高湿高能特性,为暴雨产生提

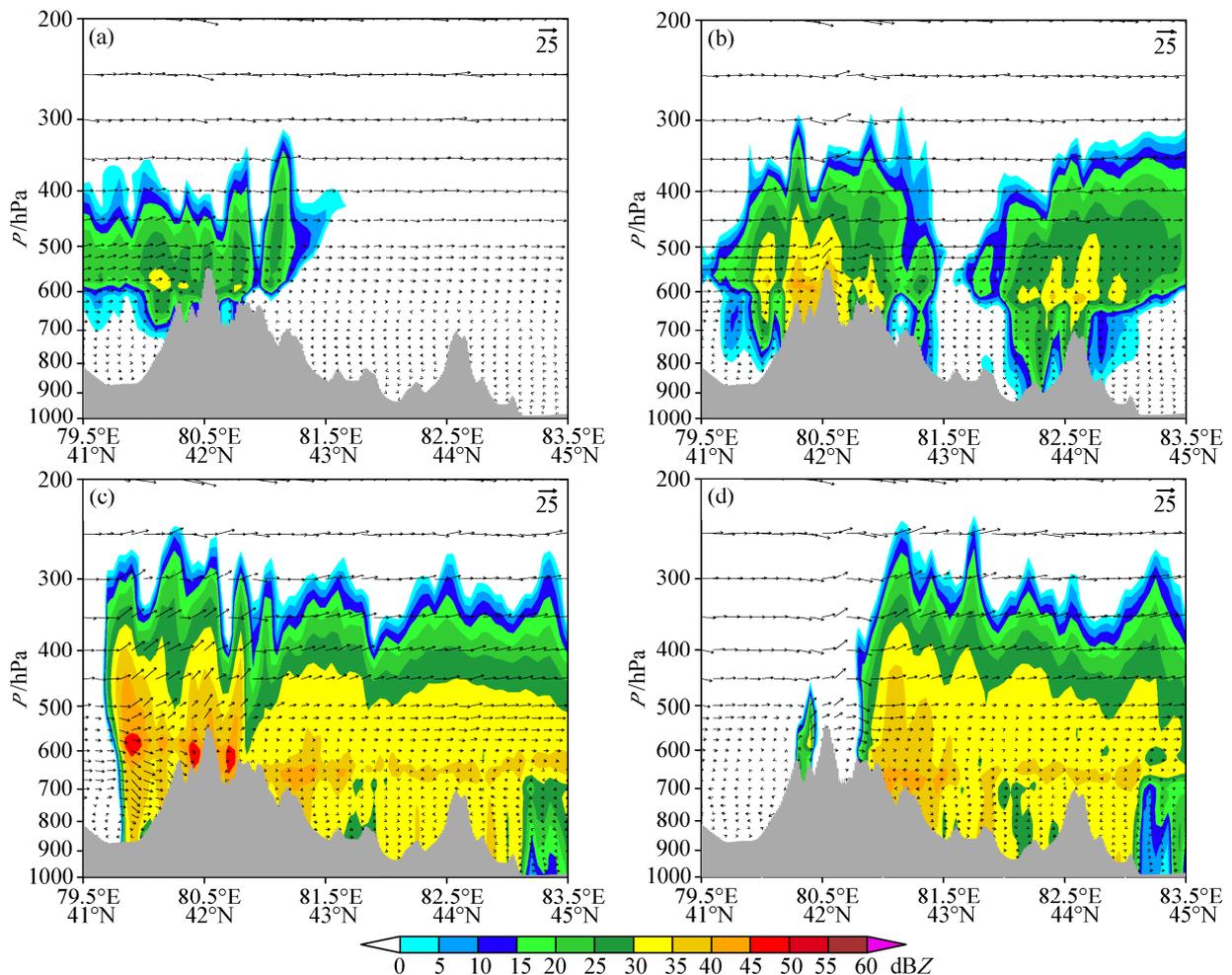


图9 2016年7月31日模拟的沿图4b中黑实线模拟的雷达反射率(阴影,单位: dBZ)和风矢量(为分析方便,垂直速度 $w \times 100$)垂直剖面:(a) 02时;(b) 08时;(c) 17时;(d) 21时

Fig. 9 Simulated vertical cross sections of simulated radar reflectivity (shaded areas, units: dBZ) and wind vectors (for the convenience of analysis, the vertical velocity is multiplied by 100) along the black solid line shown in Fig. 4b at (a) 0200 UTC, (b) 0800 UTC, (c) 1700 UTC, (d) 2100 UTC 31 July 2016

供了较好的水汽、热力和层结条件。

图11为7月31日沿图4b中黑实线相对涡度垂直剖面,02时(图11a),阿克苏地区北部天山迎风坡附近低空有正涡度大值中心,强度达 $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 。08时(图11b),强涡度中心在天山迎风坡附近生成后,在向东北方向传播过程中倾斜向上发展,正涡度大值中心自(41.5°N, 80°E)附近800 hPa高度升高到(44.5°N, 83°E)附近400 hPa高度,此后在天山迎风坡附近不断有强涡度中心新生并向上倾斜移动发展。17时(图11c),正涡度大值中心在天山迎风坡上空范围明显增大,强度明显增强, $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 的强正涡度中心自低层伸展到300 hPa高度,对应此时强上升运动中心、强反射率中心、强湿度中心,正负涡度中心在垂直方向交替出现,

在东北移动过程中倾斜向上传播。21时(图11d),强正涡度中心不断东北移,低层700 hPa、中层500 hPa、高层250 hPa均有正涡度大值中心,随后正涡度中心进一步东北移。由此可见,与风场和地形辐合产生的上升运动相配合(图8),正涡度大值中心不断在伊犁地区南部天山附近生成,在向东北移动过程中高度升高,强度增强,为暴雨的产生提供了有利的动力条件。

6 结论和讨论

通过实测降水资料、风云卫星TBB反演资料和NCEP/NCAR($1^\circ \times 1^\circ$)再分析资料对2016年7月31日至8月1日发生在新疆西部的罕见大暴雨过程进行了初步诊断,然后重点利用高分辨率数值

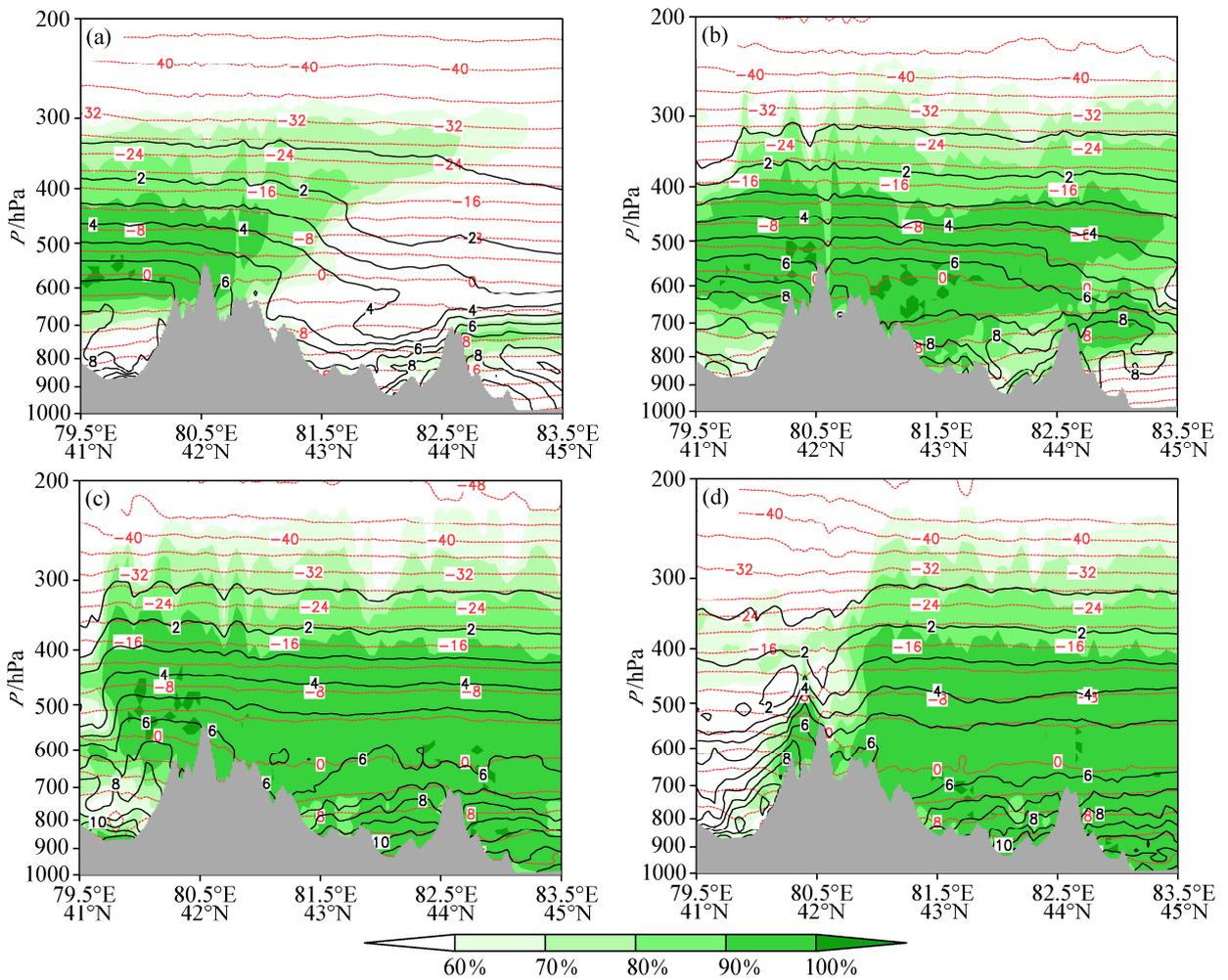


图 10 2016 年 7 月 31 日模拟的沿图 4b 中黑实线相对湿度 (阴影)、比湿 (黑线, 单位: g kg^{-1}) 和温度 (红线, 单位: $^{\circ}\text{C}$) 垂直剖面: (a) 02 时; (b) 08 时; (c) 17 时; (d) 21 时

Fig. 10 Simulated vertical cross sections of relative humidity (shaded areas), specific humidity (black lines, units: g kg^{-1}), and temperature (red lines, units: $^{\circ}\text{C}$) along the black solid line shown in Fig. 4b at (a) 0200 UTC, (b) 0800 UTC, (c) 1700 UTC, (d) 2100 UTC 31 July 2016

模拟资料, 在模拟降水与实况降水演变较为一致的基础上, 对此次新疆西部罕见的大暴雨过程的成因进行分析, 主要得到以下初步结论:

(1) 2016 年 7 月 31 至 8 月 1 日新疆西部出现的罕见大暴雨天气发生在稳定维持的“两脊一槽”环流形势下, 巴尔喀什湖低槽、高空偏西急流、低空偏东急流和辐合线是导致此次大暴雨过程的主要天气系统。中尺度低空急流的形成促进了急流核前方的动力辐合, 有利于强降水在急流核前方产生。降水增强时段与低空偏东急流形成和发展时段一致。高低空急流、低槽和辐合线持续共同作用, 促使低层辐合、高层辐散, 利于暴雨区附近大气垂直运动的发展和维持, 为暴雨天气提供较好的动力

条件。

(2) 造成伊犁地区暴雨的中尺度云团不断生成于阿克苏地区北部的天山迎风坡附近, 生成后在西南气流的引导下沿着辐合线不断向东北方向移动, 在移动过程中受天山地形抬升影响, 不断发展增强到达伊犁地区上空, 与“列车效应”类似, 造成了伊犁地区出现持续性较强降水。对模拟结果的初步分析可知, 持续较长时间的低层地形辐合线、风场辐合线和急流为暴雨中尺度系统提供了较好的动力、水汽、能量和层结不稳定条件。模式模拟资料基本再现了卫星 TBB 观测反演分析得到的中尺度云团的活动特征, 在迎风坡附近不断产生的对流单体具有强反射率、强上升运

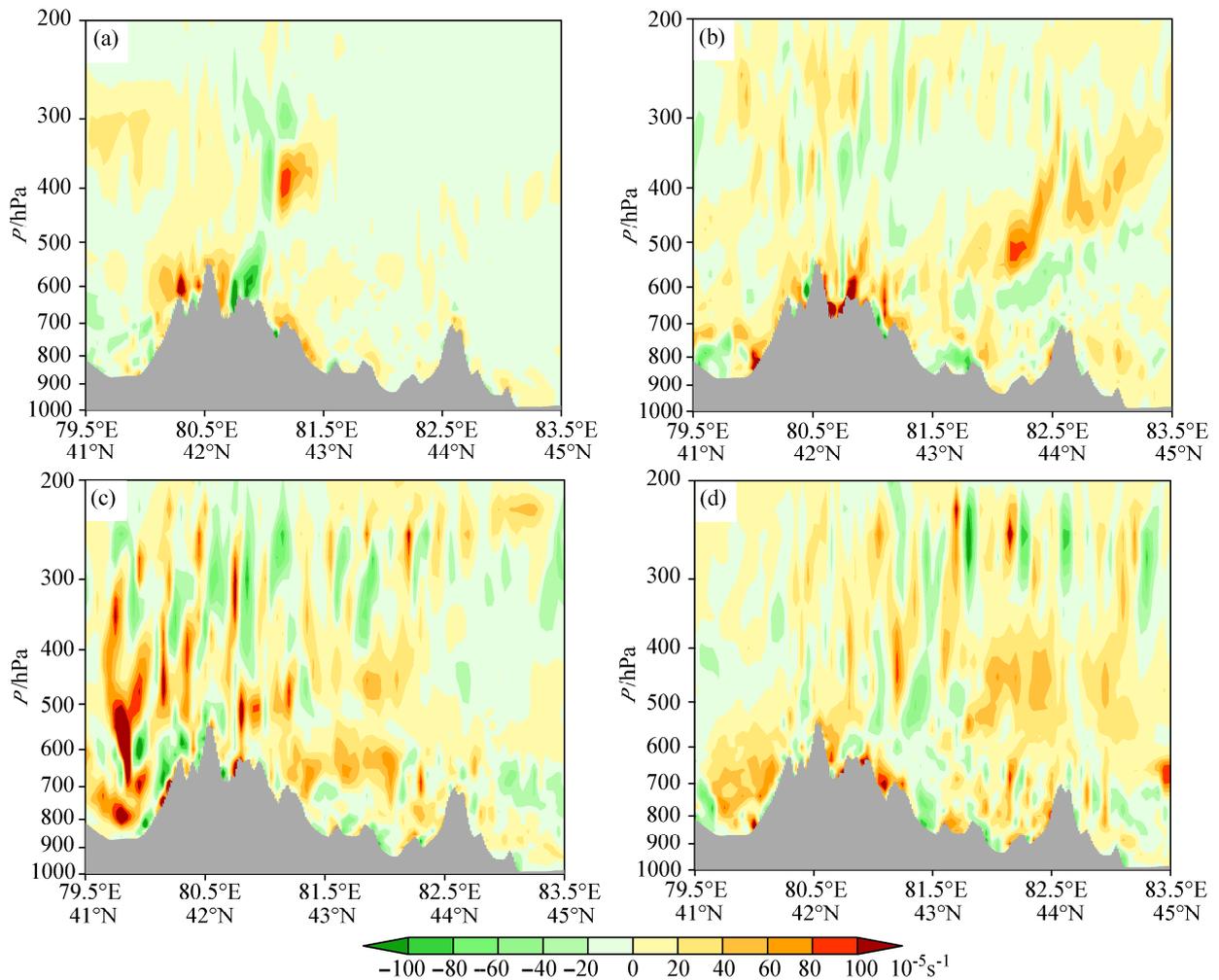


图 11 2016 年 7 月 31 日模拟的沿图 4b 中黑实线相对涡度 (阴影, 单位: 10^{-5} s^{-1}) 垂直剖面: (a) 02 时; (b) 08 时; (c) 17 时; (d) 21 时

Fig. 11 Simulated vertical cross sections of relative vorticity (shaded areas, units: 10^{-5} s^{-1}) along the black solid line shown in Fig. 4b at (a) 0200 UTC, (b) 0800 UTC, (c) 1700 UTC, (d) 2100 UTC 31 July 2016

动、强风速和强正涡度特征,在天山地形有利抬升作用下,对流系统在地形附近不断生成并沿辐合线持续向东北方向移动到达伊犁地区,是暴雨持续较长时间的关键。

本文只是针对新疆西部一次大暴雨过程进行了初步诊断和模拟,目前还只是对现象的陈述和较为简单的机理分析。目前,模拟结果还需要继续改进,对其中动力过程的研究也还需要进一步深化,特别是天山地形对暴雨的作用、列车效应、重力波和对流触发等问题,都将是本研究工作下一步的关注重点。鉴于伊犁河谷是新疆暴雨的一个频发区,未来也还需要对该区域的更多暴雨过程进行相应研究,以期找到更多有价值的规律,为该区域暴雨预报服务。

参考文献 (References)

- 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 [J]. 气象, 38 (1): 72–80. Chen Chunyan, Kong Qi, Li Ruqi. 2012. Analysis of a major rainstorm in the north slope of Tianshan Mountain [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 38 (1): 72–80.
- Chen Q, 1982. The instability of the gravity-inertia wave and its relation to low-level jet and heavy rainfall [J]. J. Meteor. Soc. Japan, 60: 1041–1057.
- 翟国庆, 高坤. 1997. 江南地面热通量对江淮气旋暴雨影响的模拟研究 [J]. 气象学报, 55 (1): 55–65. Zhai Guoqing, Gao Kun. 1997. The simulation study of the effects of upper stream surface thermal fluxes on Changjiang–Huaihe River basin cyclone accompanied with heavy rain [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 55 (1): 55–65, doi:10.11676/qxxb1997.006.
- 翟国庆, 王智, 何斌. 2003. 长江中下游梅雨期中小尺度涡旋族发生演变分析 [J]. 气象学报, 61 (6): 661–672. Zhai Guoqing, Wang Zhi, He

- Bin. 2003. Formation and evolution analysis of the mesoscale vortex group in the middle and lower reaches during Meiyu of the Yangtze River [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 61 (6): 661–672, doi:10.11676/qxxb2003.067.
- 丁一汇. 1993. 1991 年江淮流域持续性特大暴雨研究 [M]. 北京: 气象出版社, 249–254. Ding Yihui. 1993. Study of Strong Heavy Rainfall in Yangtze–Huaihe River in 1991 (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 249–254.
- 高守亭, 孙建华, 崔晓鹏. 2008. 暴雨中尺度系统数值模拟与动力诊断研究 [J]. *大气科学*, 32 (4): 854–866. Gao Shouting, Sun Jianhua, Cui Xiaopeng. 2008. Numerical simulation and dynamic analysis of mesoscale torrential rain systems [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 32 (4): 854–866, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2008.04.13.
- 高守亭, 刘璐, 李娜. 2013. 近几年中尺度动力学研究进展 [J]. *大气科学*, 37 (2): 319–330. Gao Shouting, Liu Lu, Li Na. 2013. Major advances in research on mesoscale atmospheric dynamics in recent years [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 37 (2): 319–330, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12304.
- Huang L, Luo Y L. 2017. Evaluation of quantitative precipitation forecasts by TIGGE ensembles for South China during the presummer rainy season [J]. *J. Geophys. Res.*, 122 (16): 8494–8516, doi:10.1002/2017JD026512.
- 江远安, 包斌, 王旭. 2001. 南疆西部大降水天气过程的统计分析 [J]. *新疆气象*, 24 (5): 19–20. Jiang Yuanan, Bao Bin, Wang Xu. 2001. Analysis on heavy precipitation weather process in West Nanjiang [J]. *Bimonthly of Xinjiang Meteorology* (in Chinese), 24 (5): 19–20, doi:10.3969/j.issn.1002-0799.2001.05.006.
- 江志红, 任伟, 刘征宇, 等. 2013. 基于拉格朗日方法的江淮梅雨水汽输送特征分析 [J]. *气象学报*, 71 (2): 295–304. Jiang Zhihong, Ren Wei, Liu Zhengyu, et al. 2013. Analysis of water vapor transport characteristics during the Meiyu over the Yangtze–Huaihe River valley using the Lagrangian method [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 71 (2): 295–304, doi:10.11676/qxxb2013.017.
- Jiang Z N, Zhang D L, Xia R D, et al. 2017. Diurnal variations of presummer rainfall over southern China [J]. *J. Climate*, 30 (2): 755–773, doi:10.1175/JCLI-D-15-0666.1.
- 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 [J]. *应用气象学报*, 22 (1): 12–22. Kong Qi, Zheng Yongguang, Chen Chunyan. 2011. Synoptic scale and mesoscale characteristics of 7·17 Urumqi heavy rainfall in 2007 [J]. *Journal of Applied Meteorological Science* (in Chinese), 22 (1): 12–22, doi: 10.3969/j.issn.1001-7313.2011.01.002.
- 李娜, 冉令坤, 高守亭. 2013. 华东地区一次飑线过程的数值模拟与诊断分析 [J]. *大气科学*, 37 (3): 595–608. Li Na, Ran Lingkun, Gao Shouting. 2013. Numerical simulation and diagnosis study of a squall line in eastern China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 37 (3): 595–608, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12007.
- 李如琦, 李建刚, 唐冶, 等. 2016. 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*, 34 (2): 297–304. Li Ruqi, Li Jiangan, Tang Ye, et al. 2016. Comparison analysis on the mesoscale characteristics of two rainstorms processes caused by Central Asian vortex in the west of South Xinjiang [J]. *Journal of Arid Meteorology* (in Chinese), 34 (2): 297–304, doi:10.11755/j.issn.1006-7639(2016)-02-0297.
- 陆汉城. 2000. 中尺度天气原理和预报 (第二版) [M]. 北京: 气象出版社, 1–3. Lu Hancheng. 2000. Principle and Forecast of Mesoscale Weather (2nd ed) (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 1–3.
- Luo Y L, Chen Y R X. 2015. Investigation of the predictability and physical mechanisms of an extreme-rainfall-producing mesoscale convective system along the Meiyu front in East China: An ensemble approach [J]. *J. Geophys. Res.*, 120 (20): 10593–10618, doi:10.1002/2015JD023584.
- 马淑红, 席元伟. 1997. 新疆暴雨的若干规律性 [J]. *气象学报*, 55 (2): 239–248. Ma Shuhong, Xi Yuanwei, 1997. Some regularities of storm rainfall in Xinjiang, China [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 55 (2): 239–248, doi:10.11676/qxxb1997.025.
- 倪允琪, 周秀骥. 2004. 中国长江中下游梅雨锋暴雨形成机理以及监测与预测理论和方法研究 [J]. *气象学报*, 62 (5): 647–662. Ni Yunqi, Zhou Xiujie. 2004. Study for formation mechanism of heavy rainfall within the Meiyu front along the middle and downstream of Yangtze River and theories and methods of their detection and prediction [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 62 (5): 647–662, doi:10.3321/j.issn:0577-6619.2004.05.011.
- 冉令坤, 楚艳丽, 高守亭. 2009. Energy-Casimir 方法在中尺度扰动稳定性研究中的应用 [J]. *气象学报*, 67 (4): 530–539. Ran Lingkun, Chu Yanli, Gao Shouting. 2009. Application of energy-Casimir method to the study of mesoscale disturbance stability [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 67 (4): 530–539.
- 冉令坤, 李娜, 高守亭. 2013. 华东地区强对流降水过程湿斜压涡度的诊断分析 [J]. *大气科学*, 37 (6): 1261–1273. Ran Lingkun, Li Na, Gao Shouting. 2013. Diagnostic analysis of precipitating convective process in East China with moist baroclinic vorticity parameters [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 37 (6): 1261–1273, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12110.
- 冉令坤, 齐彦斌, 郝寿昌. 2014. “7·21”暴雨过程动力因子分析和预报研究 [J]. *大气科学*, 38 (1): 83–100. Ran Lingkun, Qi Yanbin, Hao Shouchang. 2014. Analysis and forecasting of heavy rainfall case on 21 July 2012 with dynamical parameters [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 38 (1): 83–100, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2013.12160.
- 沈杭锋, 章元直, 查贲, 等. 2015. 梅雨锋上边界层中尺度扰动涡旋的个例研究 [J]. *大气科学*, 39 (5): 1025–1037. Shen Hangfeng, Zhang Yuanzhi, Zha Ben, et al. 2015. A case study of the mesoscale disturbance vortex in the boundary layer on the Meiyu front [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 39 (5): 1025–1037, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1410.14212.
- 孙建华, 赵思雄, 傅慎明, 等. 2013. 2012 年 7 月 21 日北京特大暴雨的多尺度特征 [J]. *大气科学*, 37 (3): 705–718. Sun Jianhua, Zhao Sixiong, Fu Shenming, et al. 2013. Multi-scale characteristics of record heavy rainfall over Beijing area on July 21, 2012 [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 37 (3): 705–718, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2013.12202.
- 孙建华, 汪江洁, 卫捷, 等. 2016. 江淮区域持续性暴雨过程的水汽源地和输送特征 [J]. *气象学报*, 74 (4): 542–555. Sun Jianhua, Wang

- Huijie, Wei Jie, et al. 2016. The sources and transportation of water vapor in persistent heavy rainfall events in the Yangtze-Huaihe River valley [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 74 (4): 542–555, doi:10.11676/qxxb2016.047.
- 孙继松. 2005. 北京地区夏季边界层急流的基本特征及形成机理研究 [J]. *大气科学*, 29 (3): 445–452. Sun Jisong. 2005. A study of the basic features and mechanism of boundary layer jet in Beijing area [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 29 (3): 445–452, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2005.03.12.
- 孙继松, 何娜, 郭锐, 等. 2013. 多单体雷暴的形变与列车效应传播机制 [J]. *大气科学*, 37 (1): 137–148. Sun Jisong, He Na, Guo Rui, et al. 2013. The configuration change and train effect mechanism of multi-cell storms [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 37 (1): 137–148, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12015.
- 孙淑清, 周玉淑. 2007. 近年来我国暴雨中尺度动力分析研究进展 [J]. *大气科学*, 31 (6): 1171–1188. Sun Shuqing, Zhou Yushu. 2007. Advances in meso-scale dynamical analysis of torrential rain systems in recent years in China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 36 (6): 1171–1188, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2007.06.13.
- 陶诗言. 1980. 中国之暴雨 [M]. 北京: 科学出版社, 225pp. Tao Shiyang. 1980. Heavy Rainfall in China (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press, 225pp.
- 陶诗言, 倪允琪, 赵思雄, 等. 2001. 1998 年夏季中国暴雨的形成机理与预报研究 [M]. 北京: 气象出版社, 184pp. Tao Shiyang, Ni Yunqi, Zhao Sixiong, et al. 2001. The Study on Formation Mechanism and Forecasting of Heavy Rainfall in the Summer 1998 (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 184pp.
- 陶祖钰, 郑永光. 2013. “7·21”北京特大暴雨的预报问题 [J]. *暴雨灾害*, 32 (3): 193–201. Tao Zuyuan, Zheng Yongguang. 2013. Forecasting issues of the extreme heavy rain in Beijing on 21 July 2012 [J]. *Torrential Rain and Disasters* (in Chinese), 32 (3): 193–201, doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2013.03.001.
- 王东海, 杨帅. 2009. 一个干侵入参数及其应用 [J]. *气象学报*, 67 (4): 522–529. Wang Donghai, Yang Shuai. 2009. A dry intrusion parameter and its application [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 67 (4): 522–529.
- 王东海, 夏茹娣, 刘英. 2011. 2008 年华南前汛期致洪暴雨特征及其对比分析 [J]. *气象学报*, 69 (1): 137–148. Wang Donghai, Xia Rudi, Liu Ying. 2011. A preliminary study of the flood-causing rainstorm during the first rainy season in South China in 2008 [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 69 (1): 137–148.
- 王江, 李如琦, 黄艳, 等. 2015. 2013 年南疆西部一次罕见暴雨的成因 [J]. *干旱气象*, 33 (6): 910–917. Wang Jiang, Li Ruqi, Huang Yan, et al. 2015. Cause of a rare rainstorm in the west of southern Xinjiang in 2013 [J]. *Journal of Arid Meteorology* (in Chinese), 33 (6): 910–917, doi:10.11755/j.issn.1006-7639(2015)-06-0910.
- 《新疆短期天气预报指导手册》编写组. 1986. 新疆短期天气预报指导手册 [M]. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社. Compiling Group of Xinjiang Short Range Weather Forecast Manual. 1986. Guide Handbook on Xinjiang Shortterm Weather Forecast (in Chinese) [M]. Ürümqi: Xinjiang People's Press.
- 肖开提·多莱特, 汤浩, 李霞, 等. 1997. “96·7”新疆特大暴雨的水汽条件研究 [J]. *新疆气象*, 20 (1): 8–11. XIAOKAITI Duolaitie, Tang H, Li X, et al. 1997. A study of moisture conditions of heavy rain in Xinjiang during the “96.7” [J]. *Bimonthly of Xinjiang Meteorology* (in Chinese), 20 (1): 8–11.
- 杨莲梅. 2003. 南亚高压突变引起的一次新疆暴雨天气研究 [J]. *气象*, 29 (8): 21–25. Yang Lianmei. 2003. Research on a case of heavy rain in Xinjiang from South Asia high abnormality [J]. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 29 (8): 21–25, doi:10.3969/j.issn.1000-0526.2003.08.005.
- 杨莲梅, 李霞, 张广兴. 2011. 新疆夏季强降水研究若干进展及问题 [J]. *气候与环境研究*, 16 (2): 188–198. Yang Lianmei, Li Xia, Zhang Guangxing. 2011. Some advances and problems in the study of heavy rain in Xinjiang [J]. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 16 (2): 188–198.
- 杨莲梅, 张惠惠, 汤浩. 2012. 2007 年 7 月新疆三次暴雨过程的水汽特征分析 [J]. *高原气象*, 31 (4): 963–973. Yang Lianmei, Zhang Yunhui, Tang Hao. 2012. Analyses on water vapor characteristics in three heavy rainstorm processes of Xinjiang in July 2007 [J]. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 31 (4): 963–973.
- 杨帅, 高守亭. 2007. 三维散度方程及其对暴雨系统的诊断分析 [J]. *大气科学*, 31 (1): 167–179. Yang Shuai, Gao Shouting. 2007. Three-dimensional divergence equation and its diagnosis analysis to storm rainfall system [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 31 (1): 167–179, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2007.01.17.
- Yang S, Gao S T, Lu C G. 2015. Investigation of the Mei-yu front using a new deformation frontogenesis function [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 32 (5): 635–647, doi:10.1007/s00376-014-4147-7.
- Yang S, Zuo Q J, Gao S T. 2017. Revisit to frozen-in property of vorticity [J]. *Chinese Physics B*, 26 (8): 599–606, doi:10.1088/1674-1056/26/8/089201.
- 杨霞, 李云, 赵逸舟, 等. 2014. 新疆一次深秋局地短时大暴雨的成因分析 [J]. *高原气象*, 33 (1): 162–170. Yang Xia, Li Yun, Zhao Yizhou, et al. 2014. Analysis of a brief torrential rain event in autumn in Xinjiang [J]. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 33 (1): 162–170, doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2012.00170.
- 俞小鼎. 2012. 2012 年 7 月 21 日北京特大暴雨成因分析 [J]. *气象*, 38 (11): 1313–1329. Yu Xiaoding. 2012. Investigation of Beijing extreme flooding event on 21 July 2012 [J]. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 38 (11): 1313–1329.
- 曾勇, 杨莲梅. 2016. 中亚低涡背景下新疆连续短时强降水特征分析 [J]. *沙漠与绿洲气象*, 10 (4): 67–73. Zeng Yong, Yang Lianmei. 2016. Characteristics of persistent short-time heavy rainfall causing by Central Asian vortex in Xinjiang [J]. *Desert and Oasis Meteorology* (in Chinese), 10 (4): 67–73, doi:10.3969/j.issn.1002-0799.2016.04.010.
- 曾勇, 杨莲梅. 2017a. 南疆西部一次暴雨强对流过程的中尺度特征分析 [J]. *干旱气象*, 35(3): 475–484. Zeng Yong, Yang Liamei. 2017a. Mesoscale characteristic analysis of a severe convective weather with torrential rain in the west of southern Xinjiang [J]. *Journal of Arid Meteorology* (in Chinese), 35 (3): 475–484, doi: 10.11755/j.issn.1006-7639(2017)-03-0475.
- 曾勇, 杨莲梅. 2017b. 南疆西部两次短时强降水天气中尺度特征对比分析 [J]. *暴雨灾害*, 36 (5): 410–421. Zeng Yong, Yang Lianmei. 2017b. Comparative analysis on mesoscale characteristics of two severe short-

- time precipitation events in the west of southern Xinjiang [J]. *Torrential Rain and Disasters* (in Chinese), 36 (5): 410–421, doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2017.05.003.
- 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 [J]. *干旱气象*, 36 (1): 34–43. Zeng Yong, Yang Lianmei, Zhang Yingxin. 2018. Mechanism analysis of dry intrusion during a severe convective weather process under the background of Central Asian vortex in Aksu area of Xinjiang [J]. *Journal of Arid Meteorology* (in Chinese), 36 (1): 34–43, doi:10.11755/j.issn.1006-7639(2018)-01-0034.
- 曾勇, 杨莲梅. 2018. 新疆西部一次极端暴雨事件的成因分析 [J]. *高原气象*, 37 (5): 1220–1232. Zeng Yong, Yang Lianmei. 2018. Analysis on the causes of an extreme rainfall event in the west of Xinjiang [J]. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 37 (5): 1220–1232, doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2018.00014.
- 张家宝, 邓子风. 1987. 新疆降水概论 [M]. 北京: 气象出版社. Zhang Jiabao, Deng Zifeng. 1987. A Generality of Rainfall in Xinjiang (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press.
- 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 [J]. *暴雨灾害*, 35 (6): 537–545. Zhang Junlan, Li Na, Qin He, et al. 2016. The observational analysis and water vapor characteristics of a rainstorm in Xinjiang [J]. *Torrential Rain and Disasters* (in Chinese), 35 (6): 537–545, doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2016.06.006.
- Zhang R H, Ni Y Q, Liu L P, et al. 2011. South China heavy rainfall experiments (SCHeREX) [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 89A: 153–166, doi:10.2151/jmsj.2011-A10.
- 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 [J]. *高原气象*, 32 (1): 191–200. Zhang Yunhui, Chen Chunyan, Yang Lianmei, et al. 2013. Cause analysis on rare rainstorm in west of southern Xinjiang [J]. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 32 (1): 191–200, doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2012.00019.
- 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 [J]. *气象*, 41 (7): 816–824. Zhang Yunhui, Li Haiyan, Lin Xilu, et al. 2015. Analysis of continuous rainstorm circulation background and the dynamic process of synoptic-scale in west of southern Xinjiang [J]. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 41 (7): 816–824, doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2015.07.003.
- 张迎新, 李宗涛, 姚学祥. 2015. 京津冀“7·21”暴雨过程的中尺度分析 [J]. *高原气象*, 34 (1): 202–209. Zhang Yingxin, Li Zongtao, Yao Xuexiang. 2015. Analysis on mesoscale system of torrential rain occurring over North China on 21 July 2012 [J]. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 34 (1): 202–209, doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2013.00096.
- 张哲, 周玉淑, 邓国. 2016. 2013年7月31日京津冀飚线过程的数值模拟与结构分析 [J]. *大气科学*, 40 (3): 528–540. Zhang Zhe, Zhou Yushu, Deng Guo. 2016. Numerical simulation and structural analysis of a squall line that occurred over the Beijing–Tianjin–Hebei region of China on 31 July 2013 [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 40 (3): 528–540, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1507.15127.
- 赵庆云, 傅朝, 刘新伟, 等. 2017. 西北东部暖区大暴雨中尺度系统演变特征 [J]. *高原气象*, 36 (3): 697–704. Zhao Qingyun, Fu Zhao, Liu Xinwei, et al. 2017. Characteristics of mesoscale system evolution of torrential rain in warm sector over Northwest China [J]. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 36 (3): 697–704, doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2016.00140.
- 赵思雄, 陶祖钰, 孙建华, 等. 2004. 长江流域梅雨锋暴雨机理的分析研究 [M]. 北京: 气象出版社, 282pp. Zhao Sixiong, Tao Zuyu, Sun Jianhua, et al. 2004. Study on Mechanism of Formation and Development of Heavy Rainfalls on Meiyu Front in Yangtze River (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 282pp.
- 赵思雄. 2011. 近年来江淮流域致洪暴雨特征分析 [J]. *气象与减灾研究*, 34 (1): 1–5. Zhao Sixiong. 2011. Characteristics analysis of flood-causing rainstorms over Changjiang–Huaihe River basin in recent years [J]. *Meteorology and Disaster Reduction Research* (in Chinese), 34 (1): 1–5, doi:10.3969/j.issn.1007-9033.2011.01.001.
- 周玉淑, 高守亭, 邓国. 2005. 江淮流域 2003 年强梅雨期的水汽输送特征分析 [J]. *大气科学*, 29 (2): 195–204. Zhou Yushu, Gao Shouting, Deng Guo. 2005. A diagnostic study of water vapor transport and budget during heavy precipitation over the Changjiang River and the Huaihe River basins in 2003 [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 29 (2): 195–204, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2005.02.04.
- 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 [J]. *大气科学*, 38 (5): 885–896. Zhou Yushu, Liu Lu, Zhu Kefeng, et al. 2014. Simulation and evolution characteristics of mesoscale systems occurring in Beijing on 21 July 2012 [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 38 (5): 885–896, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2013.13185.
- 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 [J]. *应用气象学报*, 17 (4): 444–451. Zhuang Wei, Liu Liping, Wang Nan. 2006. Study on three-dimensional wind fields of mesoscale convective systems in Xinjiang [J]. *Journal of Applied Meteorological Science* (in Chinese), 17 (4): 444–451, doi: 10.3969/j.issn.1001-7313.2006.04.008.