

庄晓翠,李如琦,李博渊,等,2017. 中亚低涡造成新疆北部区域暴雨成因分析[J]. 气象,43(8):924-935.

中亚低涡造成新疆北部区域暴雨成因分析^{*}

庄晓翠^{1,2} 李如琦³ 李博渊² 李健丽² 孙智娟⁴

1 中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所,乌鲁木齐 830002

2 新疆阿勒泰气象局,阿勒泰 836500

3 新疆气象台,乌鲁木齐 830002

4 新疆富蕴县气象局,富蕴 836100

提 要: 利用区域自动站、常规观测、EC 细网格、卫星云图 TBB 及 FNL 资料,对新疆北部 2013 年 6 月 20—21 日区域性暴雨天气成因进行分析,并与前期南疆暴雨进行对比。结果表明,中亚低涡是该过程主要影响系统,暴雨由对流层中低层及地面中尺度系统直接造成,云图及自动站风场均监测到 γ 中尺度系统。受阿尔泰山脉西北段高东南段低及沙尔巴斯套北高南低的地形作用,中尺度低涡及 850 hPa 沿山前西北上的气旋性涡旋在暴雨区旋转、滞留、增强,使散度低层辐合、高层辐散结构与垂直上升运动在同一时次达最强,助推暴雨增幅。此次暴雨过程与南疆发生的暴雨存在一些差异。

关键词: 区域性暴雨,中亚低涡,中小尺度特征,概念模型

中图分类号: P456

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2017.08.003

Analysis on Rainstorm Caused by Central Asian Vortex in Northern Xinjiang

ZHUANG Xiaocui^{1,2} LI Ruqi³ LI Boyuan² LI Jianli² SUN Zhijuan⁴

1 Institute of Desert Meteorology, CMA, Urumqi 830002

2 Xinjiang of Aletai Meteorological Office, Aletai 83650

3 Xinjiang Meteorological Observatory, Urumqi 830002

4 Xinjiang of Fuyun Meteorological Station, Fuyun 83610

Abstract: Using conventional observation data, automatic weather station data, the high resolution model of ECMWF data, and FY-2E TBB data, 1 km and FNL data, the reason for regional rainstorm in Northern Xinjiang in 20—21 June 2013 was analyzed and compared with the early analysis of rainstorm that had happened in Southern Xinjiang. The results showed that the Central Asian vortex was the main influencing system. The rainstorm was directly caused by in the middle and lower troposphere and the ground meso-scale system. Meso- γ convection system was monitored by both the cloud image and the automatic station wind field. Affected by the terrain of the Altai Mountains and Sharbasitao, the mesoscale low vortex and the cyclonic vortex along the piedmont from the southeast to the northwest at 850 hPa rotated, stranded and enhanced, making the divergence structure of low-level convergence and high-level divergence formed and the strongest vertical upward movement at the same time enhanced rainstorm to increase. This heavy rain process was different from the heavy rain in Southern Xinjiang.

Key words: regional rainstorm, Central Asian vortex, small and medium scale features, concept model

^{*} 中国气象局预报员专项(CMAYBY2017-083)、中央级公益性科研院所基本科研业务费(IDM2016001)、新疆维吾尔自治区人民政府项目科技支撑课题(TUHA201511)、中国沙漠气象科学研究基金(SQJ2015001)和中亚大气科学研究基金(CASS201707)项目共同资助

2016 年 5 月 29 日收稿; 2017 年 6 月 26 日收修定稿

第一作者:庄晓翠,从事灾害天气研究工作. Email:zxcxjalt@163.com

通信作者:李如琦,主要从事灾害性天气预报及研究. Email:liruqi@sohu.com

引 言

受中亚低涡影响 2013 年 6 月 20—21 日(以下简称 6·21)新疆北部阿勒泰地区东部(以下简称阿勒泰地区东部)出现了一次罕见暴雨、大暴雨天气。日降水量沙尔巴斯套村、富蕴机场、塔克斯肯口岸突破自 2009 年建站以来的降水极值, 青河居 1961 年来历史第二位。研究表明(张家宝和邓子风, 1987; 杨莲梅等, 2011; 2015; 张云惠等, 2012), 中亚低涡是造成新疆夏季暴雨的主要天气尺度系统之一; 江远安等(2001)、蒋军等(2005)、黄艳等(2012)、刘海涛等(2013)、张云惠等(2013)、王江等(2015)指出, 中亚低涡是造成南疆西部强降水的主要影响系统, 低空偏东急流起重要作用, 高、中、低空三支气流的有利配置, 中小尺度辐合与对流是暴雨产生的直接原因; 张云惠等(2015)对南疆西部持续性暴雨的研究表明, 中亚低值系统的活跃及南伸使得南疆西部一直处于低槽活动区, 暴雨产生在大气异常潮湿的环境中, 充沛的水汽在持续增大的偏南气流作用下, 从阿拉伯海和孟加拉湾不断向北输送, 低空偏东急流在南疆西部产生强的水汽辐合; 李曼等(2015)对造成新疆西南部一次暴雨过程中亚低涡热力结构进行了较详细的研究; 杨莲梅等(2012)、杨莲梅和张庆云(2014)研究指出, 由中亚低涡引发的暴雨, 其水汽主要有四条路径, 西方、南方、北方及偏东路径, 暴雨落区不同其路径有较大的差异, 并对中亚低涡中期过程的能量学特征进行了较详细的分析; 陈春艳等(2012)指出, 天山北坡特大暴雨发生在 100 hPa 南亚高压双体型、500 hPa 中亚低值系统在天山北坡东段稳定维持环流背景下, 由天山北坡强东西风切变及向北开口喇叭口地形产生的辐合上升运动, 在有利的高、低空配置和来自孟加拉湾的水汽共同作用下产生; 孔期等(2011)指出, 暴雨是一次大尺度斜压过程, 中亚低涡是该暴雨过程的主要影响系统, 干冷空气侵入加强了大气对流性不稳定, 对暴雨的加强和发展起重要作用; 卢冰和史永强(2014)指出, 克拉玛依罕见强对流天气也是产生在中亚低涡稳定维持的环流背景下。可见诸多的研究主要针对中亚低涡造成南疆及北疆沿天山一带暴雨和大暴雨天气, 而对新疆最北部阿勒泰地区造成罕见暴雨天气, 实属罕见。因此, 本文分析中亚低涡引发阿勒泰地区一次区域暴雨成因, 深入探讨中亚低涡造成新疆暴

雨发生、发展机制, 并与 6·21 前期南疆暴雨(张云惠等, 2015)进行对比, 揭示中亚低涡引发阿勒泰地区暴雨过程的物理机制和预报着眼点, 从而进一步提高对此类暴雨落区的预报能力和预警水平, 为减少暴雨灾害损失提供参考依据。

1 资料及方法

这次区域暴雨天气水平尺度较小, 稀疏的观测网很难分析出该次过程的天气结构和发展演变。高时空分辨率 EC 细网格($0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$)模式形势场及物理量场(表 1)能否反映此次过程的演变呢? 为

表 1 EC 细网格形势场和部分物理量
12 h 预报时效内统计误差
Table 1 Statistical error of forecast claims within
12 h from EC fine grid situation and part of
the physical quantity

	平均误差	均方根 误差	标准差	平均绝对 误差
500 hPa 高度 场/dagpm	-0.254	0.424	0.327	0.347
海平面气 压场/hPa	-0.419	0.652	0.499	0.510
850 hPa 温 度场/ $^{\circ}\text{C}$	0.088	0.594	0.567	0.458
2 m 温 度场/ $^{\circ}\text{C}$	0.106	0.751	0.726	0.537
2 m 露 点场/ $^{\circ}\text{C}$	-0.053	0.848	0.817	0.614
10 m u 风 场/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	0.050	0.829	0.806	0.570
10 m v 风 场/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	0.097	0.808	0.800	0.557
850 hPa 比湿 场/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	-0.008	0.336	0.329	0.249
500 hPa u 风 场/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	0.430	1.759	1.635	1.315
700 hPa u 风 场/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	0.149	1.247	1.209	0.901
850 hPa u 风 场/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	0.113	0.990	0.956	0.689
500 hPa v 风 场/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	-0.221	1.575	1.538	1.240
700 hPa v 风 场/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	0.069	1.220	1.205	0.886
850 hPa v 风 场/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	0.130	0.831	0.818	0.602
700 hPa 垂直速 度场/ $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$	0.005	0.415	0.415	0.278
850 hPa 垂直速 度场/ $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$	0.007	0.409	0.409	0.274

此首先对该模式 2013 年 6 月 19 日 20 时、20 日 08 和 20 时的形势场及影响暴雨的主要物理量场(以下简称物理量)12 h 时效内的预报效果进行统计和天气学检验。检验范围选取 $42^{\circ}\sim 50^{\circ}\text{N}$ 、 $79^{\circ}\sim 92^{\circ}\text{E}$ 。

根据孔玉寿和章东华(2000)、毛冬艳等(2014)、庄晓翠等(2015)统计检验理论,选用平均误差、平均绝对误差、均方根误差和标准差等统计量进行检验,若平均误差在 ± 1.5 个单位内、平均绝对误差 < 3 个单位、均方根误差和标准差分别小于 4.5 个单位、相关系数 > 0.60 ,则模式具有一定的参考价值(庄晓翠等,2015)。由表 1 可知,EC 细网格形势场及物理量 12 h 预报时效内误差均较小。图 1 是 EC 细网格 500 hPa 高度场(图 1a 和 1b)和风场(图 1c 和 1d)12 h 预报叠加同时次 EC 细网格分析场,可见,两者基本吻合。同样对其他要素和物理量进行天气学检验,得到相同的结论,即 EC 细网格形势场及物理量场 12 h 内与实况基本一致。因此,运用该模式逐 3

h、常规观测、NCEP FNL ($1^{\circ}\times 1^{\circ}$)逐 6 h 分析资料、国家卫星气象中心提供的 1 km 高分辨率 FY-2E 卫星云图 TBB 及区域自动站逐小时资料,对本次过程成因进行分析。

2 降水实况与天气背景

2.1 降水概况

6·21 暴雨是中亚低涡减弱北上造成阿勒泰地区东部区域性暴雨。统计自动站雨量,该次过程具有降水强度大,强降水范围集中的特点(图 2a),11 个站为大暴雨、19 个站为暴雨[新疆降水量级标准(张家宝和邓子凤,1987)],暴雨中心出现在青河县沙尔巴斯套村(85.0 mm),为大暴雨;最大降水强度达 $27.8\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$,出现在富蕴机场。对暴雨中心附近沙尔巴斯套村、富蕴机场、塔克斯肯口岸、青河

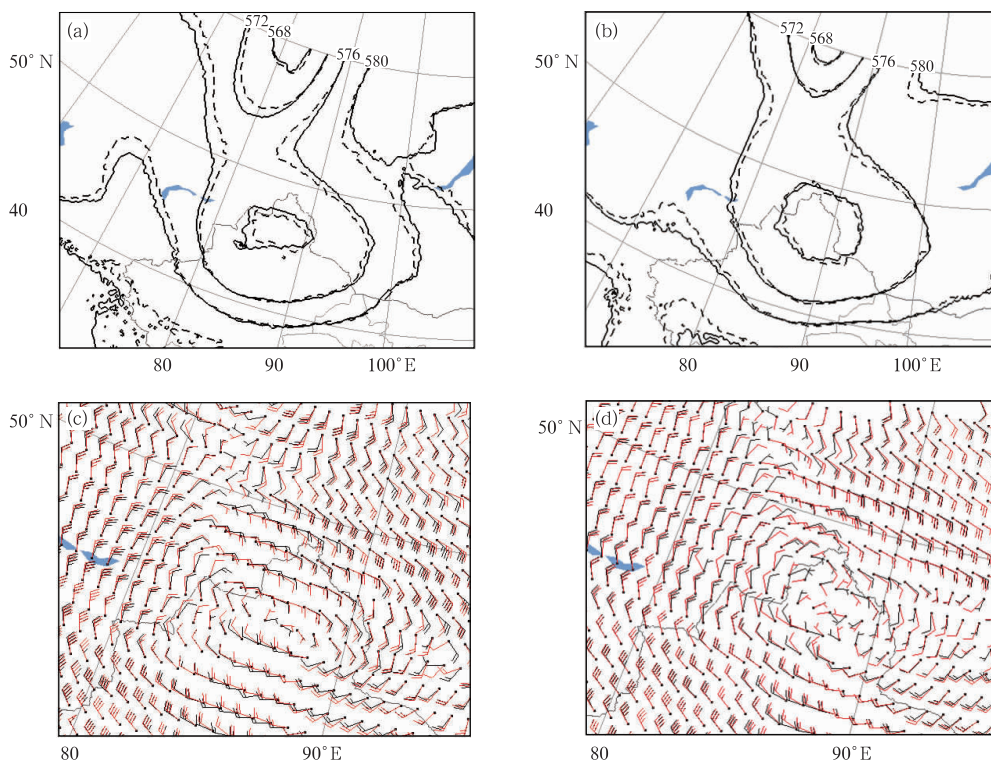


图 1 2013 年 6 月 20 日 EC 细网络 500 hPa 高度场(a,b,实线,单位: dagpm)和风场 12 h 预报(c,d,黑色)叠加同时次分析场(虚线、红色)

(a,c)08 时 12 h 预报与 20 时分析场,(b,d)20 时 12 h 预报与 21 日 08 时分析场

Fig. 1 The 12 h forecast height (a, b; unit: dagpm) and wind (c, d; black solid line) and analysis field at the same time (red dashed line) at 500 hPa from ECMWF fine grid

(a, c) the 12 h forecast at 08:00 BT and 20:00 BT 20 June 2013 analysis field,

(b, d) the 12 h forecast at 20:00 BT 20 and 08:00 BT 21 June 2013 analysis field

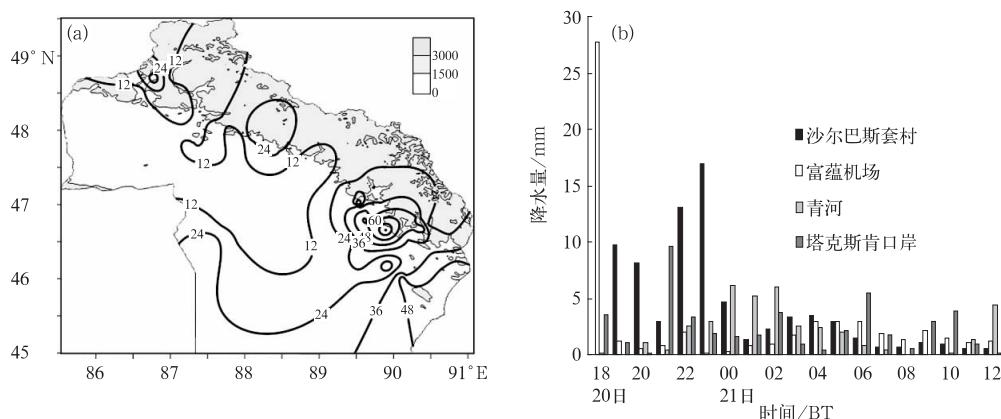


图2 2013年(a)6月20—21日累计降水量分布图(等值线,阴影为 >1500 m的地形高度),

(b)6月20日18时至21日12时4站逐时降水量

Fig. 2 (a) The total precipitation in 20—21 June 2013 (contour line, shadow: terrain height >1500 m), (b) hourly precipitation at 4 stations from 18:00 BT 20 to 12:00 BT 21 June 2013

4站逐小时降水量连续演变(图2b)进行分析表明,降水主要发生在20日17:01至21日06:00。沙尔巴斯套村降水主要集中在20日18:01—24:00,6 h累积降水量达55.6 mm,最大降水强度为 $16.9 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ (图2b),青河和塔克斯肯口岸雨强相对较小。因此,此次降水过程既有连续性又有局地强对流特征。暴雨和强对流天气引发山洪、泥石流、局地冰雹等气象和地质灾害,给该区农牧业、交通、居民生活等造成不利影响。

2.2 环流背景及影响系统

6·21暴雨前期,14—18日中亚低涡造成南疆西部强降水期间,200 hPa南压高压为双体型,中心分别位于伊朗高原和青藏高原东部,副热带大槽位于中亚到新疆西部,并伸至 30°N 附近;南压高压由西强东弱转为东强西弱,有利于长波槽前西南急流建立、维持及南伸(张云惠等,2015)。19日伊朗高压减弱消失,南亚高压由双体型转为东部型。20—21日阿勒泰地区东部强降水期间,南亚高压维持东部型。由200 hPa风场可知,20日08时在 40°N 附近南疆盆地经哈密有一支大于 $30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的西南急流带,到20时急流带南压(图略),因此,高空急流对此次暴雨天气作用较小。北疆暴雨期间南亚高压为东部型,而南疆为双体型。

18日08时500 hPa伊朗副热带高压明显发展与中高纬地区乌拉尔山高压脊同位相叠加(以下简称上游脊),脊北伸至 70°N 附近。下游贝加尔湖阻塞高压脊北伸到 70°N 以北,比上游脊强盛。两脊

之间的西西伯利亚到中亚南部的高、中、低纬存在3个低槽活动,西西伯利亚、巴尔喀什湖南部为低涡,而印度半岛低槽前 $22 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 偏南气流北伸至南疆,有利于阿拉伯海水汽向新疆输送(张云惠等,2015)。20日08时(图略)上游脊向东南衰退,迫使伊朗副热带高压南撤,而西太平洋副热带高压西伸北进与下游阻高同位相叠加,阻塞形势维持增强;西西伯利亚低涡和印度半岛低槽减弱,中亚低槽略有东移,形成水平尺度 $<200 \text{ km}$ 的 β 中尺度冷涡(569 dagpm),温度槽落后于高度槽,阿勒泰地区处于该冷涡前东南气流的高湿区中($T - T_d \leq 2^\circ\text{C}$)。20日20时(图略)伊朗副热带高压明显增强北进,与向东南衰退的乌拉尔山脊叠加形成西西伯利亚高压脊,西太平洋副热带高压继续西伸北进(西脊点位于 34°N 、 110°E),使下游脊稳定维持; β 中尺度冷涡得到上游脊前南下弱冷空的补充维持,阿勒泰地区东部位于该低涡前偏西与偏东气流的强切变线中。21日08时伊朗副热带高压有些南退,下游阻塞高压维持, β 中尺度低涡东移控制阿勒泰地区;21日20时低涡移出新疆。

3 低涡流场演变特征

从暴雨发生前6月20日08时500 hPa风场可见,中亚低涡中心位于阿拉山口附近,其上、下游分别有 $10 \sim 16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的偏北、偏南及东南气流,维持了该低涡的斜压性(图略)。20时该涡东移至塔城东北部,在其前部形成准东西向的横槽;阿勒泰地区

东部位于其前部,暴雨即产生在中亚低涡前部的槽线附近及偏南气流中(图3a)。20日20—23时该低涡在塔城地区东北部、阿勒泰地区西南部旋转滞留,造成阿勒泰地区东部暴雨天气。之后,该低涡逐渐减弱,至21日08时(图3b)分裂形成3个弱中尺度涡旋,阿勒泰地区东部仍为偏南气流控制,但风速减小、辐合减弱,对应降水明显减弱。

低空急流是暴雨水平动量集中的气流带(徐珺等,2014;李进等,2015;刘璐等,2015;吴庆梅等,2015;王宁等,2016),为中尺度低涡提供源源不断的水汽、热动力。而新疆海拔高度较高,700 hPa集中了80%的水汽(张家宝和邓子风,1987),因此分析700 hPa风场对预报暴雨的发生有重要指示意义。20日08时暴雨发生前蒙古西南部沿国境线到阿勒泰地区东部边境有 $\geq 16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 东南低空急流,该区位于低空急流出口区前部辐合区(图略),有利于水汽的辐合上升;对应的850 hPa上也存在着明显的气旋式辐合区(图略)。20日17时(图4a)700 hPa在暴雨区西南部生成2个 β 中尺度低涡,至20时(图略)合并增强,该涡比500 hPa低涡略偏东,其前部为西南风与东南风的暖式切变线,并在23时(图4b)达最强,位置最偏北,之后逐渐减弱。与此同时在 β 中尺度低涡略偏东的位置上850 hPa(17时)也为明显中尺度低涡和气旋性辐合区(图4c),暴雨中心出现在中低涡北部和西北风与东南风辐合线上;20日20时至21日02时850 hPa中低涡和辐合区由暴雨中心东南部移动到东部,之后逐渐减弱为切变线。可见,对流层低层中尺度低涡、辐合线、切变线及气旋性辐合是造成20日18:01—23:00沙尔巴

斯套大暴雨的直接影响系统,其最强降水时段发生在700 hPa中尺度低涡与850 hPa中尺度低涡及辐合线之间(图4b和4d)。

分析EC细网格地面气压场、10 m流场及2 m温度和露点温度可知,暴雨发生前6月20日08时(图略)阿勒泰地区大部为热低压控制,低压中心为1012 hPa(图略),并配合有 $12 \sim 14^\circ\text{C}$ 暖区,在该地区中、东部有 14°C 暖舌或暖中心,在沿山一带有风向的辐合带并存在着中尺度锋区。在流场上阿勒泰地区北部、东部有风向的辐合,该辐合与850 hPa的辐合基本重叠,有利于低层暖湿空气抬升。14时在暴雨区西部形成西北风和东南风的辐合切变。20日17时(图5a)该辐合东移至暴雨区附近,演变为西风 and 东风的切变;未来6 h暴雨就产生在辐合线附近。20时(图5b)该辐合区略有东移,加强为气旋性辐合和辐合线。20日23:00至21日02:00气旋性辐合东移到暴雨中心东部,之后逐渐减弱。综上所述,此次暴雨产生在500 hPa中亚低涡前部和700 hPa β 中尺度低涡前偏南和东南气流中、低空急流出口区前部辐合区,850 hPa和地面辐合线附近及 β 中尺度低涡及地面中尺度锋区附近及其西南侧的重叠区域内;即暴雨主要是由对流层中低层及地面上 β 中尺度系统造成。

4 中尺度对流云团特征

20日17时(图略)有一水平尺度约33 km的 β 中尺度对流云团, $TBB < -44^\circ\text{C}$,沿对流层低层中尺度低涡前部东南气流方向旋转西北上;18时该云

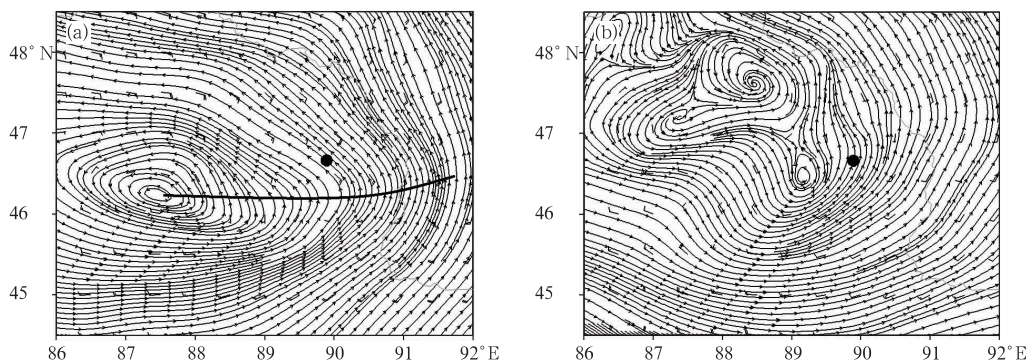


图3 2013年6月20日20时(a)、21日08时(b)EC细网格500 hPa风场(流线,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
(粗线为槽线,黑●为暴雨中心沙尔巴斯套)

Fig. 3 ECMWF fine grid 500 hPa wind field (streamline, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) at (a) 20:00 BT 20 and
(b) 08:00 BT 21 June 2013
(Line is trough line, ● is Sharbashitao)

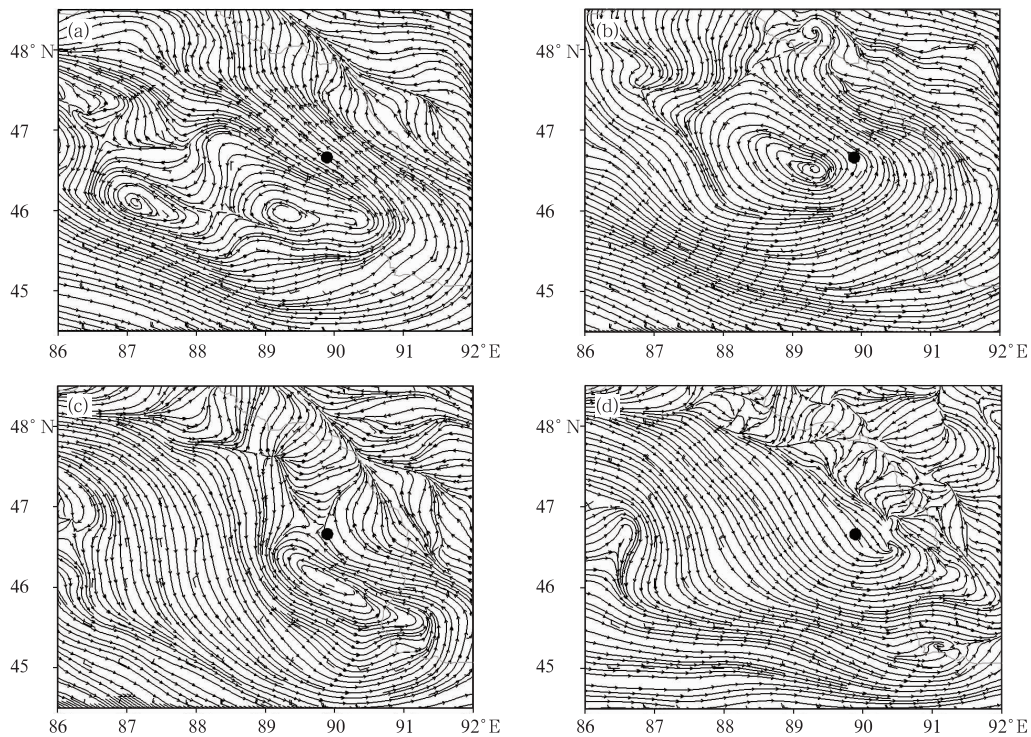


图 4 2013 年 6 月 20 日 17 时(a, c)和 23 时(b, d)EC 细网格 700 hPa(a, b)和 850 hPa(c, d)风场(流线,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
(●为暴雨中心沙尔巴斯套)

Fig. 4 Wind field of ECMWF fine grid model at 700 hPa (a, b) and 850 hPa (c, d) (streamline, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
at (a, c) 17:00 BT and (b, d) 23:00 BT 20 June 2013
(● is Sharbashitao)

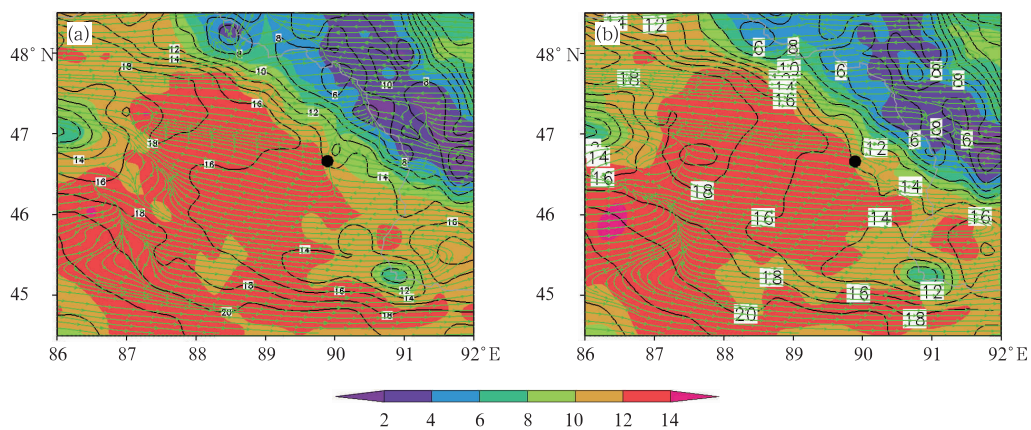


图 5 2013 年 6 月 20 日 17 时(a)和 20 时(b)EC 细网格 10 m 风场(流线,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)、
2 m 温度场(黑色实线,单位:°C)和 2 m 露点温度场(填色,单位:°C)
(●为暴雨中心沙尔巴斯套)

Fig. 5 ECMWF fine grid the 10 m wind field (streamline, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), 2 m temperature
(black line, unit: °C), and 2 m dew point temperature (shaded area, unit: °C)
at (a) 17:00 BT and (b) 20:00 BT 20 June 2013
(● is Sharbashitao)

团迅速减弱为 $TBB < -36^{\circ}\text{C}$ 的 γ 尺度对流云团(图 6a),至 19 时(图 6b)范围扩大形成 β 中尺度对流云团,造成沙尔巴斯套 $9.8 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的降水量;

20 时(图 6c)该云团范围减小,降水强度减弱($8.2 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$);21 时(图 6d)对流云团减弱为 $TBB < -32^{\circ}\text{C}$,降水强度明显减小($2.9 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$)。22 时

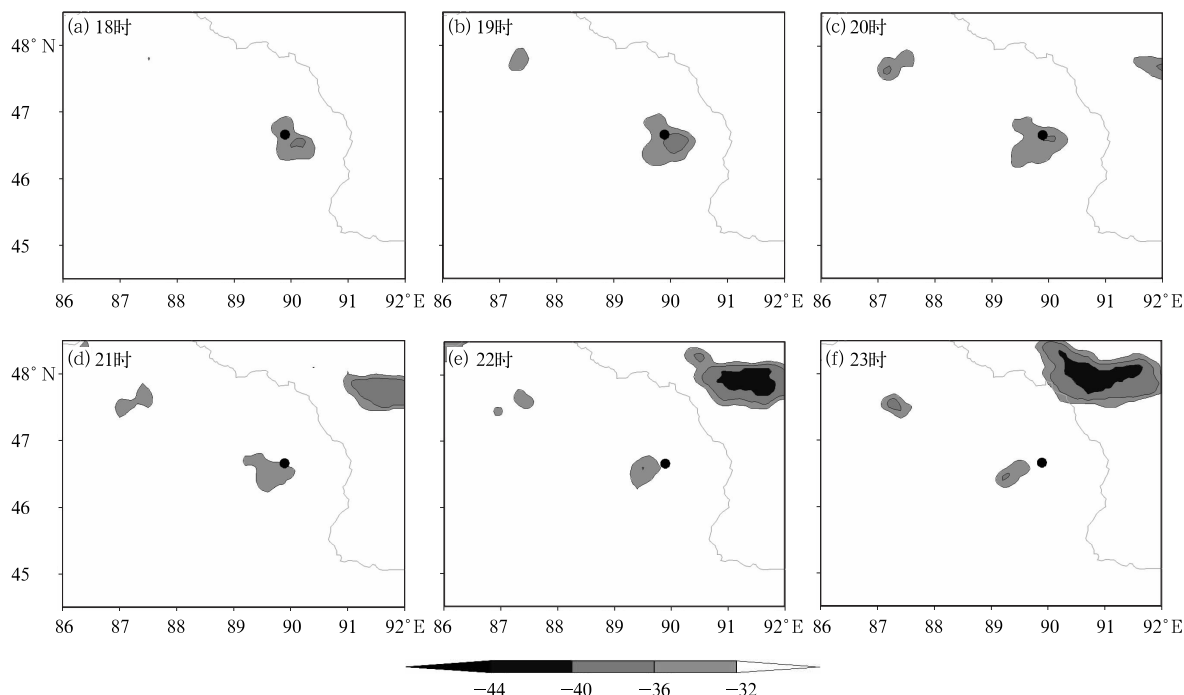


图 6 2013 年 6 月 20 日 18:00—23:00 FY-2E 卫星 TBB 演变

(●为暴雨中心沙尔巴斯套)

Fig. 6 FY-2E TBB hourly evolution from 18:00 BT to 23:00 BT 20 June 2013

(● is Sharbasitao, unit: $^{\circ}\text{C}$)

(图 6e)对流云团随对流层低层气旋性涡旋旋转到暴雨中心的西北部,其内新生 $TBB < -36^{\circ}\text{C}$ γ 中尺度对流云团,降水强度也猛增($13.1 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$),至 23 时(图 6f)该云团范围扩大西南退,降水强度达 $16.9 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$;此后对流云减弱为天气尺度云系,降水强度明显减弱。可见, β 中尺度和 γ 尺度对流云团在沙尔巴斯套站附近旋转、滞留、增强造成该站及其附近地区大暴雨或暴雨天气;暴雨中心发生在中尺度

对流云团的边缘附近, TBB 值在 $-36 \sim -32^{\circ}\text{C}$ 。

分析暴雨前、中期,阿勒泰地区逐小时区域自动站风场资料发现,20 日 14 时(图 7a),暴雨区出现气旋性环流,暴雨中心沙尔巴斯套附近有明显的 γ 中尺度风向辐合;该辐合在 18 时(图 7b)达最强,之后逐渐减弱,21 时该辐合消失,气旋性辐合存在。进一步分析发现,风场辐合比对流云团早 4 h,具有一定的预报意义。

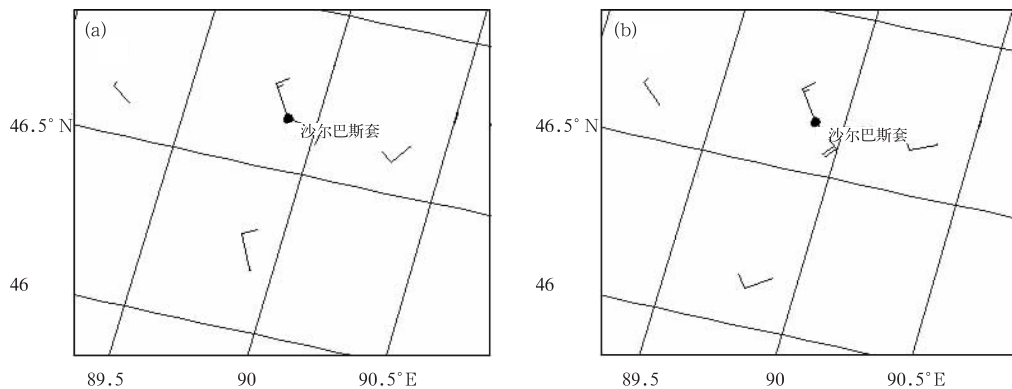


图 7 2013 年 6 月 20 日 14 时(a)和 18 时(b)自动站风场

(●为暴雨中心沙尔巴斯套)

Fig. 7 Evolution of the AWS wind field at 14:00 BT (a) and 18:00 BT (b) 20 June 2013

(● is Sharbasitao)

5 对流环境与物理量诊断分析

暴雨过程宏观物理量条件是有稳定的大尺度环流背景、对流不稳定能量释放与再生、强上升运动与水汽输送与辐合。因此,从水汽、动力和稳定度条件分析形成此次暴雨物理机制。

5.1 水汽条件与不稳定能量

分析沿 89.9°E 暴雨区上空比湿垂直剖面图可知(图略),暴雨前、中期,对流层低层为大于 $6\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 高比湿区,850 hPa 附近为 $8.5\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的高湿区,明显比此次过程前期南疆西部暴雨期间小;相对湿度(图略)垂直剖面图上对流层整层为大于 80% 的高饱和湿区,这种结构维持到暴雨结束。可见 700 hPa 低空东南急流为暴雨区提供了充沛的水汽条件,这与暴雨发生的一般条件(即湿层深厚),尤其是对流层低层湿度大一致。

新疆夏季午后太阳辐射增温较强,至傍晚前后大气层结不稳定性显著增强,易产生局地强对流天气。单站 CAPE 值、K 指数、SI 指数可以很好地预示潜在不稳定。由于阿勒泰地区只有一个探空站(阿勒泰站),因此利用 MICAPS 模式探空功能,对此次过程降水量达暴雨的站,运用 EC 细网格制作了模式探空 $T\text{-}\log p$ 及物理量参数。可知 20 日 20 时对流层为 $T-T_d<2^\circ\text{C}$ 高湿区,700 hPa 以下均出现对流不稳定层,并有较大区域的不稳定能量(图 8a)。从模式探空物理量参数可知,反映对流潜势物理量 K 指数和 CAPE 值 20 日 14—20 时均有较明

显的增大,而 SI 指数减小(表 2)。

表 2 2013 年 6 月 20 日沙尔巴斯套村 EC 细网格探空物理量参数

Table 2 Sounding physical parameters of ECMWF fine grid at Sharbasitao Village Station on 20 June 2013

时间	K 指数/ $^\circ\text{C}$	SI 指数/ $^\circ\text{C}$	CAPE/ $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$
08 时	33.9	0.75	362.1
14 时	33.0	1.51	267.8
20 时	34.4	0.79	410.3

分析沿 89.9°E 暴雨中心上空假相当位温剖面图可知,暴雨期间 700 hPa 以下假相当位温随高度明显减小,为较强的对流不稳定层结,这种结构在 20 日 20—23 时(图 8b)最强,与对流层中低层及地面的中尺度低涡、涡旋、辐合线等变化基本一致;23 时之后,对流潜势缓慢减弱;对流不稳定区与最强降水时段基本吻合。暴雨的发生已经具备了充沛的水汽和一定的对流不稳定潜势,是否能够激发强降水的发生,触发抬升机制是非常重要的条件。

5.2 对流抬升机制

分析沿 89.9°E 暴雨区上空散度剖面图可知,暴雨前散度场上 6 月 20 日 17 时(图略)为低层辐合高层辐散结构在阿勒泰地区东部形成,750 hPa 以下为辐合区,中心位于 46.5°N 850 hPa 附近,达 $-50\times 10^{-5}\text{ s}^{-1}$,辐散中心位于 500 hPa 附近,从而形成了较强的上升运动区。该结构逐渐增强,到 21 日 02 时达最强(图 9a),中心位于暴雨中心上空 850 hPa 附近($-150\times 10^{-5}\text{ s}^{-1}$);强的辐散中心位于其上 700 hPa 附近($100\times 10^{-5}\text{ s}^{-1}$),从而形成了有利

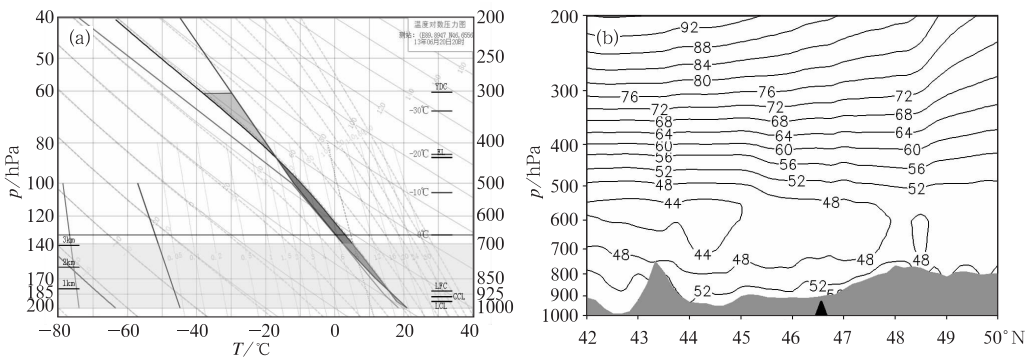


图 8 2013 年 6 月 20 日 20 时沙尔巴斯套村 EC 细网格模式探空 $T\text{-}\log p$ (a)、假相当位温沿 89.9°E 的垂直剖面图(b,单位: $^\circ\text{C}$, 阴影为地形高度,黑三角为暴雨中心)

Fig. 8 ECMWF fine grid $T\text{-}\log p$ (a) and vertical section of pseudo-equivalent potential temperature along 89.9°E (b, unit: $^\circ\text{C}$; shaded area is orography, black triangle is rainstorm center)

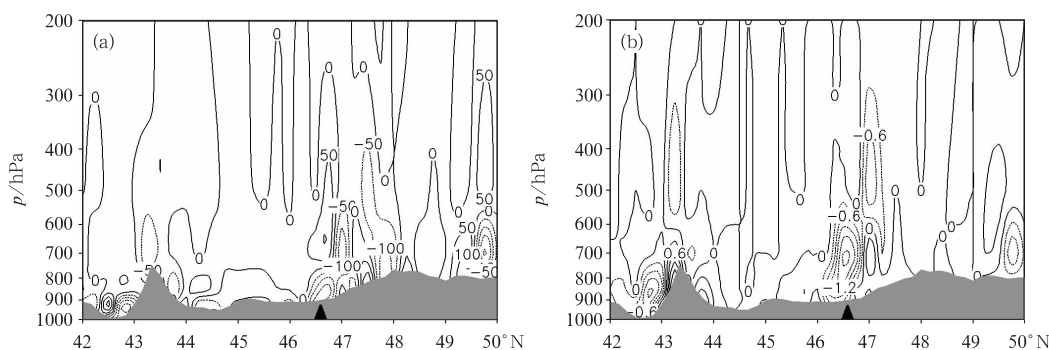


图9 2013年6月21日02时EC细网格暴雨区89.9°E垂直剖面图

(a)散度(单位: 10^{-5} s^{-1}), (b)垂直速度(单位: $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$)

(阴影为地形高度,黑三角为暴雨中心)

Fig. 9 Vertical section along 89.9°E of ECMWF fine grid model at 02:00 BT 21 June 2013

(a) divergence (unit: 10^{-5} s^{-1}), (b) vertical speed (unit: $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$)

(Shaded area is orography, black triangle is rainstorm center)

于暴雨发生的低层强辐合高层强辐散对称结构,对应的上升运动也同时达最强(图9b)。最强上升运动中心与8h降水量中心沙尔巴斯套村站(59.2 mm)一致。21日02时之后,该结构逐渐减弱消失,该站的6h降水量也减为12.7 mm。可见,散度低层辐合与高层辐散结构,对应上升气流强弱,在同一时次达最强,与最大暴雨中心基本对应;最强降水时段出现在低层辐合高层辐散及垂直速度逐渐增强的过程中。

5.3 水汽来源及输送特征

暴雨前,500 hPa水汽在中亚到印度半岛槽前偏南气流作用下,从阿拉伯海输送至青藏高原聚集,然后在合适的环流下输送至阿勒泰地区。6月18日20时水汽通量矢量图(图10a)上清楚显示,阿拉伯海的水汽在低值系统前偏南气流的引导下,翻越高原到达甘肃西部,达 $6 \times 10^{-3} \sim 8 \times 10^{-3} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$,高原上有 $14 \times 10^{-3} \sim 16 \times 10^{-3} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 的水汽通量大值中心。随着500 hPa中亚低涡的缓慢东移,涡前偏南、偏东气流建立(图10b)将甘肃的水汽接力输送至阿勒泰地区。暴雨前阿勒泰地区均为 $2 \times 10^{-3} \sim 8 \times 10^{-3} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 水汽通量。

同样,700 hPa上暴雨前存在着一支从阿拉伯海经孟加拉湾、青藏高原东部到河西走廊,再接力输送至阿勒泰地区的水汽通道。19日02时(图10c)水汽从阿拉伯海沿偏西气流到达孟加拉湾后加强,

在偏南气流的作用到达四川经河西走廊,然后随东南急流到达阿勒泰;图10c和10d还显示,贝加尔湖的水汽随偏北气流南下与河西走廊的水汽汇合。可见,北疆暴雨还有来自贝加尔湖的水汽,与南疆暴雨不同,也说明了中亚低涡在减弱北上过程中有其他水汽源补充。

5.4 暴雨区水汽收支特征

计算6·21暴雨区 $45^{\circ} \sim 49^{\circ} \text{N}$ 、 $88^{\circ} \sim 92^{\circ} \text{E}$ 逐6h各边界的水汽输入(西和南边界的正值、东和北边界的负值为输入)、输出量(西和南边界的负值、东和北边界的正值为输出),取地面至700 hPa(对流层低层)、700~500 hPa(对流层中层)、500~300 hPa(对流层高层)及整层(地面到300 hPa),分析暴雨过程水汽输送和收支特征。图11a显示,西边界对流层低层基本为输入,高层为输出;其他层暴雨前期为水汽输出,后期均转为输入。东、南边界(图11b和11c)在暴雨前期水汽输入,后期输出;对流层中、低层的水汽输送量较大。北边界(图11d)在暴雨期基本以输出为主,这与暴雨区北部为阿尔泰山脉有关。可见,暴雨前期的水汽主要来自东、南边界,后期影响系统东移也带来了部分水汽。

计算暴雨过程整层水汽收支可见(表3),东、南边界的水汽输入分别为 52.66×10^8 和 $20.01 \times 10^8 \text{ t}$,东边界输入最多,南边界次之,与南疆暴雨区相反;北边界以水汽的输出为主;西边界前期输出,后期输入,总量来看输出多于输入。

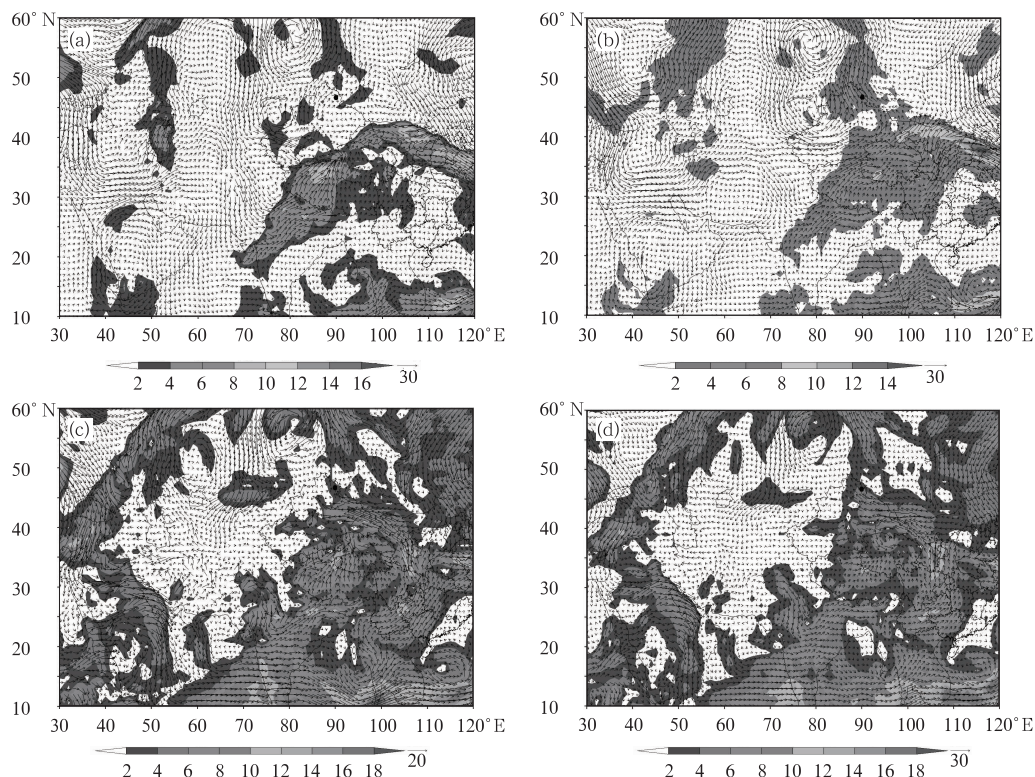


图 10 2013 年 6 月 18 日 20 时(a)和 19 日 14 时(b)500 hPa,19 日 02 时(c)和 08 时(d)

700 hPa 水汽通量(单位: $10^{-3} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)FNL 资料

(●为暴雨中心沙尔巴斯套)

Fig. 10 Vapor flux of FNL data at 500 hPa at (a) 20:00 BT 18 and (b) 14:00 BT 19 June,

at 700 hPa at (c) 02:00 BT 19 and (d) 08:00 BT 19 June 2013

(● is Sharbasitao, unit: $10^{-3} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)

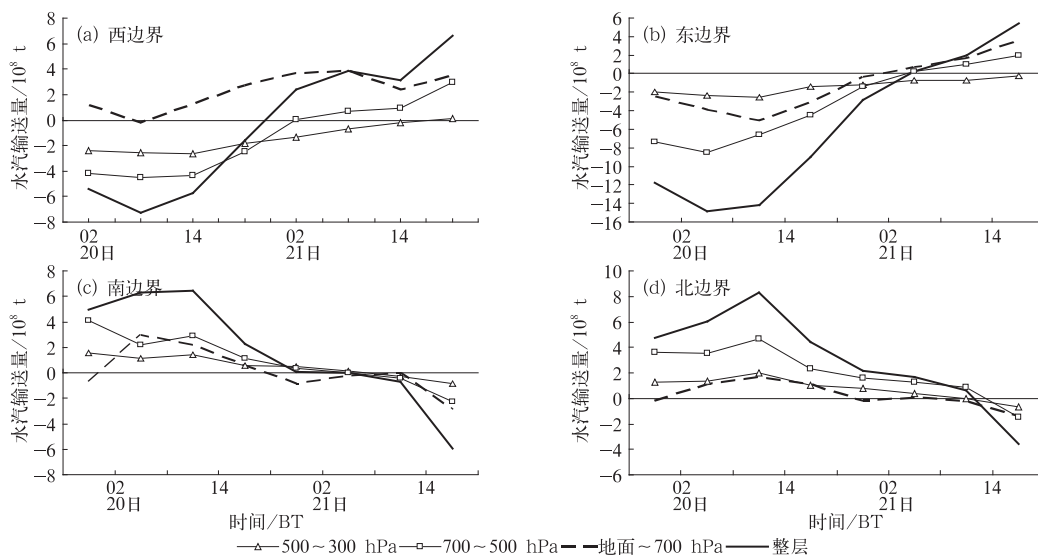


图 11 FNL 资料对流层高、中、低层及整层逐 6 h 各边界

水汽输送量(单位: 10^8 t)

Fig. 11 The 6 h vapor transportation in each border over the upper, middle, lower levels of FNL data (unit: 10^8 t)

表 3 对流层各边界 6 h 水汽输送量(单位:10⁸ t)

Table 3 The 6 h vapor transportation in each border of troposphere (unit: 10⁸ t)

时间/日-时	西边界	东边界	南边界	北边界
20-02	-5.43	-11.8	4.97	4.77
20-08	-7.28	-14.8	6.3	6.01
20-14	-5.73	-14.2	6.41	8.32
20-20	-1.6	-8.98	2.26	4.46
21-02	2.37	-2.88	0.07	2.19
21-08	3.88	0.23	-0.03	1.71
21-14	3.12	1.95	-0.71	0.64
21-20	6.61	5.43	-5.97	-3.54
输入	15.98	-52.66	20.01	-3.54
输出	-20.04	7.61	-6.71	28.10

6 地形对暴雨形成的影响

此次过程暴雨落区均出现在阿尔泰山脉南段西南坡(简称山前),沙尔巴斯套、青河等站出现了大暴雨,地形因素不容忽视。沙尔巴斯套地势为北高南低,有利于西南气流辐合抬升。受地形影响中尺度低涡在山前增强、滞留。另外,阿尔泰山脉是西北段高东南段低(图 2a),东南气流沿山前而上有利于形成辐合。850 hPa 沿山前西北上的气旋性涡旋受地形影响逐渐增强,该涡旋在沙尔巴斯套附近旋转、滞留,使该站附近的散度低层辐合、高层辐散结构与垂直上升运动在同一时次达最强(图 9),降水量增幅。

7 中亚低涡引发阿勒泰地区东部暴雨天气概念模型

综上分析,概括出阿勒泰地区东部暴雨天气概念模型(图 12)。200 hPa 南压高压东部型建立,中亚低值系统稳定在新疆北部;500 hPa 伊朗副热带高压北挺与中高纬系统同位相叠加,使弱冷空气补充到中亚低涡内;西太平洋副热带高压西伸北进使蒙古至贝加尔湖的高压脊增强,一方面阻止了影响系统的东移,同时使阿拉伯海和孟加拉湾的水汽在西南急流的作用下输送至河西走廊,然后在东南低空急流的作用下接力输送至暴雨区;低空东南暖湿气流的汇入增强了气团的对流不稳定。对流层中低层 β 中尺度低涡、切变线、辐合线的建立,使水汽在暴雨区产生强辐合,而高层强辐散与低层不断增强辐合的叠置,不仅增强了低空水汽的聚集,也增强了暴雨区持续稳定的辐合上升运动,利于形成深厚的

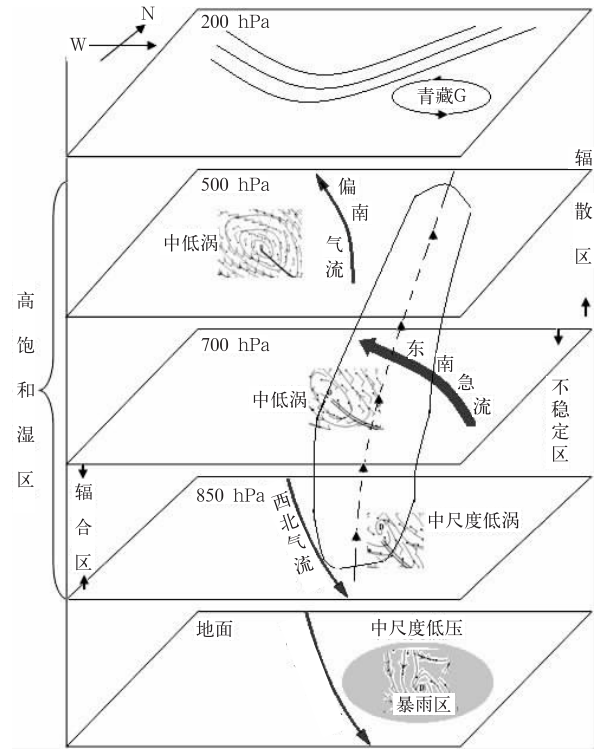


图 12 阿勒泰地区东部暴雨天气过程概念模型

Fig. 12 Concept model of rare rainstorm process in eastern part of Aletai

湿层。在 850 hPa 和地面中尺度系统的触发下释放不稳定能量,助推暴雨增幅。

8 结 论

本文主要运用 EC 细网格、卫星云图 TBB、自动站、FNL 资料对 6·21 新疆北部阿勒泰地区东部暴雨天气成因进行了分析,并与此过程前期新疆暴雨(张云惠等,2015)进行了对比,主要结论如下:

(1) 此次暴雨发生在南压高压东部型环流背景下,主要是由对流层中低层及地面中尺度系统造成;仅在暴雨发生前 700 hPa 存在低空东南急流,与此次暴雨落区位置有密切的关系。

(2) 暴雨产生在 500 和 700 hPa 中尺度低涡前部、低空急流出口区前侧辐合区、850 hPa 和地面偏西气流右侧的切变线、辐合线及中尺度低涡(压)及地面中尺度锋区附近及其西南侧的重叠区域内。

(3) 对流层低层为高比湿区及整层相对湿度 $>80\%$ 的高湿区,并存在对流不稳定;低层较强的垂直风切变及散度强辐合与中高层强辐散,增强了上升运动,在对流层低层和地面中尺度系统的触发

下,不稳定能量释放。受阿尔泰山脉西北段高东南段低及沙尔巴斯套北高南低的地形作用,中尺度低涡及850 hPa沿山前西北上的气旋性涡旋在沙尔巴斯套附近旋转、滞留、增强,使散度低层辐合、高层辐散结构与垂直上升运动在同一时次达最强,助推暴雨增幅。

(4) β 中尺度和 γ 尺度对流云团与低层及地面中尺度低涡(压)移动方向一致,是造成阿勒泰地区东部区域暴雨、大暴雨的直接影响系统;暴雨中心位于中尺度对流云团的边缘附近。云图及自动站风场均监测到 γ 中尺度系统。

(5) 此次暴雨水汽主要来自阿拉伯海和孟加拉湾,并得到来自贝加尔湖的水汽补充。分析水汽收支表明,暴雨前期的水汽主要来自东、南边界,后期影响系统东移也带来了部分水汽。

(6) 这次中亚低涡造成北疆和南疆区域暴雨(张云惠等,2015)主要不同点是:北疆南亚高压为东部型,南疆为双体型。在高低空配置上南北疆有明显区别,南疆为3支气流(急流)配置,低层700/850 hPa 偏东急流,中层偏南急流,高层西南急流;北疆为4股气流(急流)配置,即850 hPa 及以下为西北气流,700 hPa 为东南急流,500 hPa 为偏南气流,高层为西南气流。北疆有贝加尔湖作为水汽来源补充,南疆没有。水汽输入北疆东部最多,南部次之,而南疆相反。水汽输入量上南疆明显多于北疆。

(7) 在上述分析基础上给出了阿勒泰地区东部区域暴雨天气概念模型。

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[J].气象,38(1):72-80.
- 黄艳,刘涛,张云惠,等,2012.2010年盛夏南疆西部一次区域性暴雨天气特征[J].干旱气象,30(4):615-622.
- 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[J].新疆气象,28(4):4-6.
- 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.
- 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.
- 孔玉寿,章东华,2000.现代天气预报技术[M].北京:气象出版社:37-40.
- 李进,丁婷,赵思楠,等,2015.2013年6月7日浙江省中北部暴雨过程诊断分析[J].气象,41(10):1215-1221.
- 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[J].高原气象,34(6):1711-1720.
- 刘海涛,刘海红,张云惠,等,2013.南疆西部沙漠边缘汛期两次罕见暴雨过程诊断分析[J].干旱区资源与环境,27(8):90-96.
- 刘璐,冉令坤,周玉淑,等,2015.北京“7.21”暴雨的不稳定性及其触发机制分析[J].大气科学,39(3):583-595.
- 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[J].气象,40(8):948-956.
- 毛冬艳,朱文剑,樊利强,等,2014. GRAPES MESOV3.3 模式强天气预报性能的初步检验[J].气象,40(12):1429-1438.
- 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.
- 王宁,王秀娟,张硕,等,2016.吉林省一场持续性暴雨成因及MCC特征分析[J].气象,42(7):809-818.
- 吴庆梅,刘卓,王国荣,等,2015.一次华北暴雨过程中边界层东风活动及作用[J].应用气象学报,26(2):160-172.
- 徐珺,杨舒楠,孙军,等,2014.北方一次暖区大暴雨强降水成因探讨[J].气象,40(12):1455-1463.
- 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.
- 杨莲梅,张庆云,2014.一次中亚低涡中期过程的能量学特征[J].气象学报,72(1):182-190.
- 杨莲梅,张云惠,秦贺,2015.中亚低涡研究若干进展及问题[J].沙漠与绿洲气象,9(5):1-8.
- 杨莲梅,张云惠,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.
- 张家宝,邓子凤,1987.新疆降水概论[M].北京:气象出版社:92-104.
- 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.
- 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.
- 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[J].应用气象学报,23(3):312-321.
- 庄晓翠,周鸿奎,李博渊,2015. T639 模式在新疆北部暖区强降雪中的预报检验[J].干旱气象,33(6):1031-1037.