

一次新疆伊犁河谷特大暴雨过程的环境场及不稳定条件分析

黄昕^{1, 2} 周玉淑^{1, 2, 3} 冉令坤^{1, 2} Kalim Ullah⁴ 曾勇³

1 云降水物理与强风暴院重点实验室, 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

2 中国科学院大学, 北京 100029

3 中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所, 乌鲁木齐 830002

4 Department of Meteorology, COMSATS Institute of Information Technology, Islamabad, Pakistan

摘 要 伊犁河谷是新疆地区暴雨多发且暴雨强度最强的地区。本文以该地区的一次特大暴雨过程为例, 利用观测资料以及 WRF 高分辨率数值模拟结果对该次暴雨过程的环流背景及不稳定条件进行了分析。结果表明: (1) 此次降水过程发生在对流层高层南亚高压“双体型”, 中层中高纬度“两脊一槽”以及两个中亚低涡发展移动的环流形势下。在伊犁河谷特殊的向西开口的喇叭口地形作用下, 中心位于哈萨克斯坦的中亚低涡导致伊犁河谷低层为偏西风, 中心位于塔里木盆地的中亚低涡使得伊犁河谷中层为偏东风, 导致伊犁河谷内中低层水平风的垂直切变增强; 伊犁河谷内, 地形及哈萨克斯坦中亚低涡环流的共同作用形成了低空辐合线, 辐合线附近形成的辐合区正好与高空急流辐散区垂直叠加, 引发河谷内的上升运动增强。低层西风将水汽输送进河谷, 并在河谷内迎风坡附近堆积, 上升运动增强后导致河谷内堆积的水汽得以抬升。(2) WRF 模拟结果分析显示, 散度分布、垂直风切变、水汽及热力层结分布等对降水产生均有重要贡献。通过对湿位涡垂直及水平分量的分析得出热力层结影响的对流不稳定对前期降水的产生有影响, 同时, 垂直风切变影响的对称不稳定对降水增强维持有重要作用。位势散度分析进一步指示出整个降水区低层的对流不稳定主要是由于位势散度的垂直切变部分造成, 而位势散度的散度部分能加强河谷内小地形背风坡处的对流不稳定, 说明整个降水演变过程中, 动热力因子的相互作用共同影响了降水强度和落区。

关键词 新疆 伊犁河谷 不稳定 位势散度

文章编号

doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1912.19219

Analysis of environment field and unstable condition on a rainstorm event in Ili Valley of Xinjiang

Xin Huang^{1, 2}, Yushu Zhou^{1, 2, 3}, Lingkun Ran^{1, 2}, Kalim Ullah⁴, Yong Zeng³

¹ Key Laboratory of Cloud-Precipitation Physics and Severe Storms, Institute of Atmospheric Physics,

收稿日期 2019-09-24; **网络预出版日期**

作者简介 黄昕, 女, 1993 年出生, 博士研究生, 主要从事暴雨中尺度过程机理和诊断分析。E-mail: huangxin@mail.iap.ac.cn

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), 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), 巴基斯坦自然科学基金项目(PSF/NSFC-Earth/C-COMSATS-lsb (07)), 新疆维吾尔自治区引进高层次人才天池计划项目(2019)

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grant 41661144024), National Key Research and Development Program (Grant 2018YFC1507104), Special Fund Project of Urumqi Institute of Desert Meteorology (Grant IDM2019007), Pakistan Science Foundation (PSF/NSFC-Earth/C-COMSATS-lsb (07)), Xinjiang Uygur Autonomous Region Tianchi Project for Introducing High-level Talents(2019)

Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

³ Institute of Desert Meteorology, China Meteorological Administration, Urumqi 830002, China

⁴ Department of Meteorology, COMSATS Institute of Information Technology, Islamabad, Pakistan

Abstract Taking a torrential rainfall occurring at Ili Valley of Xinjiang on June 26, 2015 as an example, the circulation background and unstable conditions of this rainstorm process were analyzed by using observation data and high-resolution numerical simulation results of WRF. Some results are drawn as following: (1) The precipitation occurs under the background of synoptic circulation with the “two-ridge and one-trough” pattern over the middle and high latitudes in middle troposphere and “double highs” pattern of the South Asia high in upper troposphere. Under the effect of the particular terrain of the Ili Valley, which is westward opening trumpet-shaped, the Central Asian vortex located in Kazakhstan causes westerly wind in the low layer of the Ili Valley, and the Central Asian vortex located in the Tarim basin causes easterly wind in the middle layer of the Ili Valley. The vertical shear of horizontal wind in the Ili Valley is enhanced by the interaction of two Central Asian vortices. In the Ili Valley, affected by the topography and the Central Asia vortices, the low-layer convergence line is formed and coupled with divergence area caused by the upper jet, which enhances the upward motion. The low-layer westerly wind transports water vapor into Ili Valley and the water vapor accumulates in the valley. The enhancement of the upward motion causes the water vapor to be lift in the Ili Valley. (2) The simulation results of WRF can basically reproduce the location, intensity and evolution process of the precipitation during this weather process, and provide data with high spatial and temporal resolution for analyzing the evolution of rainstorm process. The analysis of the simulation results shows that the divergence distribution, water vapor, vertical shear of horizontal wind and thermal stratification distribution over the precipitation area have important contributions to the generation of precipitation. Through the analysis of vertical and horizontal components of moist potential vorticity, it is concluded that the convective instability affected by the thermal stratification influences the generation of precipitation, and the symmetric instability affected by the vertical shear of horizontal wind influences the enhancement and maintenance of precipitation. The analysis of potential divergence further indicates that the convective instability in the lower layer of the whole precipitation area is mainly caused by the vertical shear part of potential divergence, while the divergence part of the potential divergence can strengthen the convective instability in the leeward slope of the small terrain. It indicates that the dynamic and thermodynamic factors are coupled with each other in the whole precipitation evolution process, which affects the precipitation intensity and area.

Keywords Xinjiang, Ili Valley, Instability, Potential divergence

1 引言

新疆位于中国的西北部,属大陆性干旱半干旱气候,以往的研究主要关注了其干旱的灾害性,而对降水尤其是暴雨机理的研究并不深入。实际上,新疆地区夏季也常出现暴雨洪涝等气象灾害及其衍生的地质灾害,给当地人民生命财产、

农牧业生产、交通运输、基础设施等造成不利影响和严重损失。如 1996 年 7 月发生了一次中亚低涡影响下的新疆境内大范围、长时间的大暴雨过程，造成了新中国成立以来新疆最严重的洪水灾害，引发了对新疆暴雨的关注，对这次暴雨过程的分析相对较多（陈亚宁等，1997；陈勇航和徐希慧，1997；徐羹慧，1997；马禹等，1998；王旭等，1999；杨莲梅和李曼，2015）。此外，许多研究也表明，近年来西北干旱半干旱区降水增加，极端降水频发（丁一汇等，2006；戴新刚等，2007；杨霞等，2011；Wang et al., 2013；Wang et al., 2017；谢泽明等，2018）。新疆暴雨降水特征与中国东部、南部地区的情况有较大不同，表现出更强的局地性，且其地形、下垫面与其它地区明显不同，水汽来源与东部季风区也有很大差异，预报难度很大，因此新疆暴雨亟需更有针对性的研究。

威海以东至新疆一带常出现的与乌拉尔脊联系的天气尺度冷性涡旋系统被定义为中亚低涡（张家宝和邓子风，1987），中亚低涡常是造成新疆强天气的关键系统之一（江远安等，2001；杨莲梅和李曼，2015；曾勇和杨莲梅，2016）。江远安等（2001）根据 1970—1999 年新疆西南部 116 次强降水天气事件统计指出新疆地区 61% 的强降水天气、72% 的中强降水均是在中亚低涡影响下产生。除了受天气系统影响以外，新疆暴雨也多发于山区和山前的迎风坡地带，如伊犁河谷地区（张家宝和邓子风，1987；马淑红，1994）。位于新疆西北角的伊犁河谷北、东、南三面环山，形成了开口向西、呈三角形区域的喇叭口地形，是新疆三大雨区之一。地形易使得低层大气存在辐合及水汽热量集中，从而产生层结不稳定能量进而有利于对流发展（高坤等，1994；刘蕾等，2015）。除了对热力不稳定有影响以外，地形对大气动力不稳定的影响也很重要，如地形阻滞作用使得山前风速降低，而其上气流加速，加强水平风的垂直切变，使得山区易激发出强对流单体（孙继松和陶祖钰，2012）。伊犁河谷地区暴雨多发，地形复杂，地形如何影响该地区暴雨过程，目前还缺乏类似于我国东部地区地形暴雨的研究，亟需加强。

暴雨发生常常需要不稳定层结配合，热力不稳定的形成与温度和湿度的垂直廓线分布有关，而动力不稳定则与密度不连续性、水平风切变和垂直风切变有关，因此，地形通过影响热力不稳定与动力不稳定进而影响强对流天气的发生发展也是地形影响降水非常重要的一种方式。其中，热力不稳定又称为静力不稳定、层

结不稳定、位势不稳定或者对流不稳定；动力不稳定又称为切变不稳定，包括惯性不稳定、对称不稳定以及条件性对称不稳定等。孙继松和陶祖钰（2012）强调热力不稳定是快速释放，只影响对流的初始强度，无法影响对流的发展和持续，而动力不稳定是对流能否发展和维持的关键因素；刘璐等（2015）也发现强降水期间大气可从对流不稳定状态转变为对称不稳定状态。除此之外，分析热力不稳定对对流发生发展影响的研究较多（陶诗言等，1979；李长青和丁一汇，1989；高坤等，1994；周玉淑等，2003；毕宝贵等，2004；何立富等，2007；赵玉春等，2008；徐文慧等，2010；孙继松和陶祖钰，2012；刘蕾等，2015；刘璐等，2015），但对热力不稳定产生原因的研究相对较少，周围等（2018）通过相当位温垂直梯度的倾向方程分析后认为，位势散度能够综合表征降水区上空垂直风切变、大气湿斜压性、水平辐合辐散和大气位势稳定度变化的情况，是引起位势稳定度局地变化的主要强迫项。因此，利用位势散度可以将热力不稳定与动力过程建立关系，诊断出热力层结分布及变化的原因，对强对流降水的研究有重要意义，张景等（2019）在分析一次京津冀极端降水过程中也利用位势散度对大气稳定度变化进行了诊断，指出位势散度对降水落区有指示意义。他们的研究都是基于华北地区的暴雨过程，位势散度及其演变在新疆强降水过程中是否也能提供有益信息还需要进一步分析验证。

由已有研究可见，对影响新疆的天气尺度系统、地形等已经有一些统计分析和个例分析工作，但是相对东部地区的暴雨研究成果，西北干旱半干旱的暴雨研究明显落后，伊犁河谷地形和中亚低涡如何配合造成动热力不稳定以及动热力不稳定条件与强降水的发生发展有何关系尚不明确。2015年6月26日，伊犁河谷出现日降水量24毫米以上降水（达到新疆暴雨量级），部分地区达40毫米以上，伊犁河谷内的巩留县（经纬度范围大约为 42.9°N - 43.6°N ， 81.6°E - 83.5°E ）是此次强天气过程中全疆降雨量最大的地方，雨量突破当地历史极值，是一次明显的极端降水过程。本文选取此次伊犁河谷的特大暴雨过程，探讨暴雨发生的有利环流背景与伊犁河谷地形影响，利用高分辨率数值模拟资料分析动热力不稳定如何影响热力层结分布从而影响降水，以期加深对影响伊犁河谷内强降水产生机理的理解，能为当地降水预报提供有意义的参考。

2 资料、降水实况

2.1 资料

本文采用空间分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 、时间间隔 6 h 的欧洲中心 (the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF) 的 ERA-Interim 再分析资料 (Dee et al., 2011) 对暴雨发生的背景环流进行分析。此外, 使用的资料还包括中国气象局提供的国家级地面气象站逐小时降水资料和探空资料, 中国国家卫星中心提供的卫星 (FY-2E) 相当黑体亮温 (TBB) 以及基于全国自动站观测降水量资料、CMORPH 卫星反演降水资料、FY2 反演降水资料和雷达定量估测降水产品, 采用 PDF+BMA+OI 三步融合方法生成的中国区域空间分辨率为 $0.05^{\circ} \times 0.05^{\circ}$ 的逐小时降水量融合产品 APCP (沈艳等, 2013)。

2.2 降水实况

2015 年 6 月 26 日-27 日, 地处西天山的伊犁河谷地区多地出现强降水天气。图 1a 为 26 日 12:00-27 日 00:00 (世界协调时, 下同) 期间伊犁河谷及其附近区域 12 h 累积降水情况, 可以看出强降水主要集中在伊犁河谷内, 图 1a 中黑框所示区域为强降水发生的主要区域。黑框区域内降水相较于其他地区强度明显较大, 为本文研究的主要区域, 其中巩留站 12 小时累积降水量为 84.2 mm, 因此此次降水过程具有降水强度强、降水时段集中、局地性强的特点。新疆预报员从多年预报的实际出发, 正确认识到新疆地区的降水情况与我国东、南部降水情况的不同, 重新定义了与中国其他区域不同的新疆降水标准 (张家宝和邓子风, 1987; 马淑红, 1994), 根据新疆降水量等级标准, 研究区内有三个站也达到甚至超过了大雨量级 ($10.1 \text{ mm} \leq 12 \text{ h PRE} \leq 20.0 \text{ mm}$), 其中巩留站更是达到特大暴雨量级 ($12 \text{ h PRE} \geq 80.0 \text{ mm}$)。根据图 1b, 巩留站强降水主要集中在 26 日 17:00-27 日 00:00, 26 日 17:00 开始出现较强降水后降水迅速增强, 19:00 强降水强度达到最强, 1 h 累积降水量高达近 20 mm。以上站点降水资料均为国家级观测站观测资料。

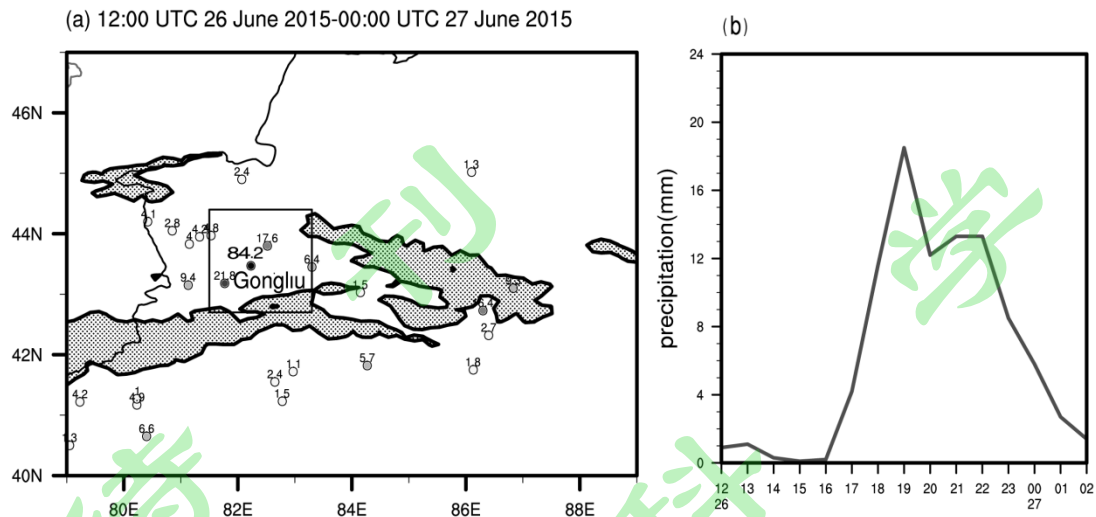


图 1 (a) 2015 年 6 月 26 日 12:00 UTC-27 日 00:00 UTC 12 h 国家级地面站累积降水量（圆点，单位：mm），加粗实线内打点区域表示地形高度大于 3000 m；（b）2015 年 6 月 26 日 12:00 UTC-27 日 02:00 UTC 国家级地面站巩留站观测逐时雨量（单位：mm）

Fig. 1 (a) 12-h accumulated precipitation from national surface weather stations observations from 12: 00 UTC 26 to 00: 00 UTC 27 Jun 2015 (spots; units: mm). The black dot shading denotes terrain (units: m); (b) hourly precipitation from national surface weather stations observations from 12: 00 UTC 26 to 02: 00 UTC 27 Jun 2015 (units: mm).

3 大尺度天气形势背景分析

图 2a-b 为 26 日 12:00 ERA-Interim 再分析资料显示的 500 hPa 环流形势场，右图 2b 的位置即左图 2a 中黑框表示研究区域即伊犁河谷地区。图 2a 中，26 日 12:00，哈萨克斯坦地区存在一个中亚低涡环流，配合有冷中心，塔里木盆地也存在一个中亚低涡；低涡西侧的伊朗地区附近以及低涡东侧的新疆以东地区各存在一个高压脊，温度脊位相与高压脊基本一致，说明此时高压脊已经发展至成熟阶段，这也使得两个中亚低涡稳定少动，有利于低涡系统持续影响伊犁河谷地区，此时中纬度环流形势呈现“两脊一槽”的“倒 Ω ”形势，这也是强降水天气发生的有利环流形势（黄艳等，2012；张云惠等，2013）；图 2b 可见，伊犁河谷受塔里木盆地低涡北侧的东南风气流控制，且处于大风速带，大部分都达到 10 m s^{-1} 。26 日 18:00 的 500 hPa 环流形势与 12:00 的基本一致（图略）。

图 2c-d 为 26 日 12:00 ERA-Interim 再分析资料显示的 700 hPa 环流形势场，右图 2d 的位置即图 2c 中黑框表示研究区域，即伊犁河谷地区。图 2c 中，26 日 12:00，哈萨克斯坦地区和塔里木盆地各存在一个中亚低涡，两低涡中心与 500 hPa 上的低涡位置基本对应，低涡中心附近温度较低；图 2d 显示，受地形影响，伊犁河谷内风场较复杂，河谷中部和南部主要受西风气流控制，其北部有明显的北风气流通过北天山地势较低处进入河谷内，与谷内西风相遇，偏北风与谷内西风共同作用下，在伊犁河谷低层大气中形成明显辐合线。除此之外，入谷西风进入伊犁河谷后风速明显加强，说明伊犁河谷自西向东收缩的地形有利于入谷西风在河谷内加速。26 日 18:00 的 700 hPa 环流形势与 12:00 的基本一致（图略）。

图 2e 为 26 日 12:00 ERA-Interim 再分析资料显示的 200 hPa 环流形势场，根据钱永甫等（2002）对南亚高压双体型的定义（有两个高压中心且分别在 75°E 两侧），此时南亚高压呈现双体型。夏季南亚高压双体型是新疆夏季降水偏多的主要环流形势（刘惠云，2001；王前等，2017），南亚高压呈现双体型时若副热带槽位置合适或者南亚高压两主体脊北伸，易于低纬暖湿气流北上以及水汽进入新疆，有利于新疆产生并维持大降水。此外，中低层塔里木盆地中亚低涡中心没有延伸至 200 hPa，而中低层哈萨克斯坦中亚低涡中心延伸至 200 hPa。哈萨克斯坦中亚低涡与南亚高压之间形成强气压梯度，使得亚洲西风急流正处于新疆上空，伊犁河谷地区对应高空急流入口区左侧高空辐散区，正位于低空辐合线上空，有利于垂直运动的生成。

水汽是暴雨的产生、维持中不可缺少的要素。已有研究发现本次暴雨的水汽来源为大西洋、新疆以西各湖泊和海域、孟加拉湾北岸、新疆以北、新疆以东及其周边区域，水汽通道主要为西南方向以及东北方向（谢泽明等，2018）。根据前文分析，中亚低涡是影响此次降水的重要系统，因此，下文重点关注中亚低涡影响区域内的水汽分布情况。图 2f 阴影表示 26 日 12:00 ERA-Interim 再分析资料显示的 850 hPa 比湿分布，可以明显看出，水汽分布与塔里木盆地低涡、哈萨克斯坦的低涡以及伊犁河谷地形关系密切。其中，低涡附近大于 8 g kg^{-1} 的较强水汽主要分布在低涡南侧及北侧，同时伊犁河谷内有非常强的水汽，比湿整体达到 10 g kg^{-1} 以上，河谷中部至河谷北部附近比湿可达 12 g kg^{-1} 以上。根据 850 hPa 风场以及地形分布可以看出，哈萨克斯坦附近的低涡加强的西风使得大量水汽能

够通过伊犁河谷“喇叭口”地形的西侧开口直接输送至河谷内并且在河谷内迎风坡附近大量堆积,而其他路径的低层水汽输送都被伊犁河谷三面环绕的高大山脉所阻碍,对伊犁河谷内的影响明显较小。26日 18:00 水汽分布与 12:00 差别不大(图略)。

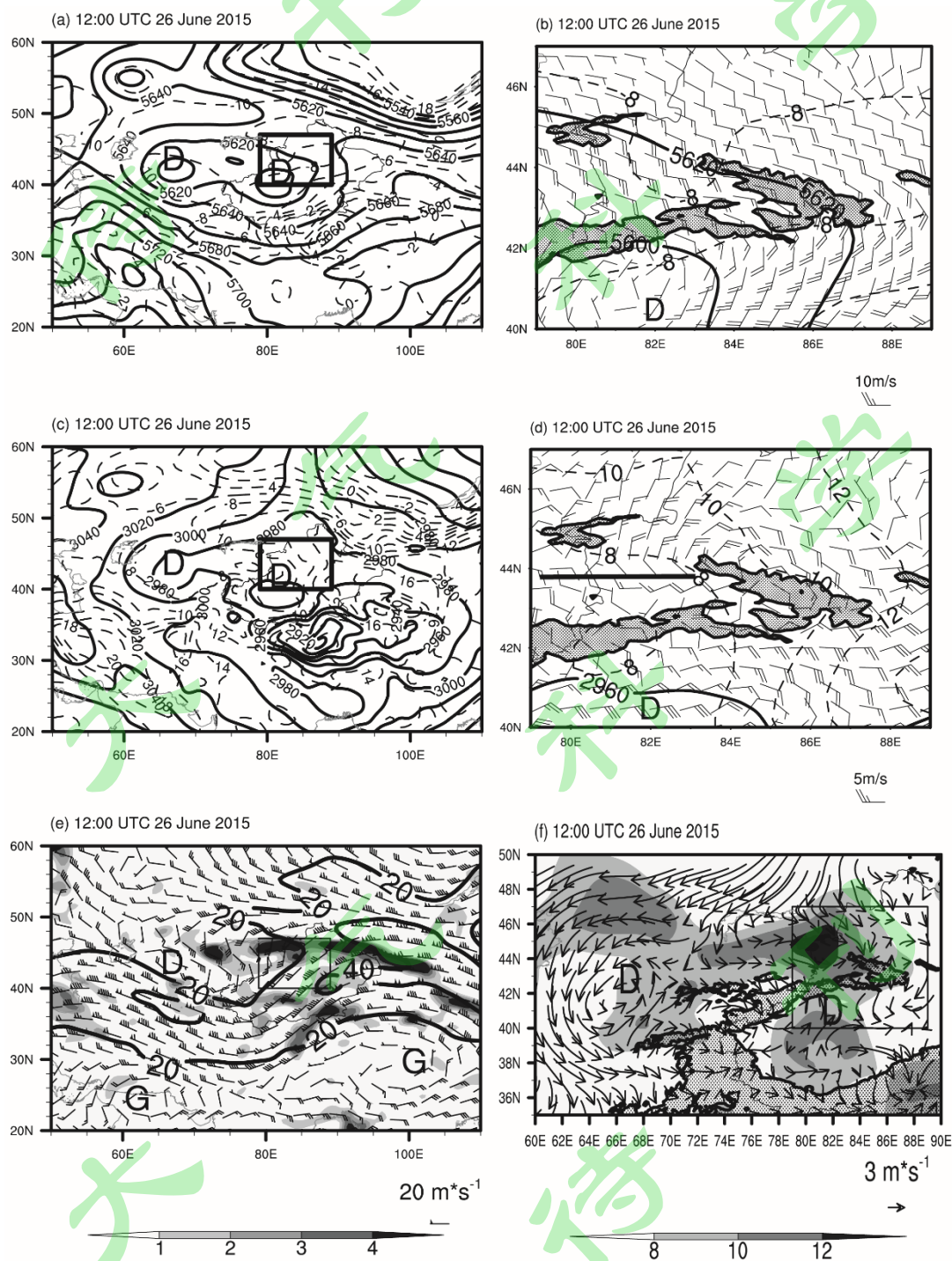


图 2 2015 年 6 月 26 日 12:00 UTC (a) EC 再分析资料 500 hPa 位势高度 (实线, 单位: gpm)、温度 (虚线, 单位: $^{\circ}\text{C}$) ; (b) 图 (a) 黑框区域内 EC 再分析资料 500 hPa 位势高度 (实线, 单位: gpm)、温度 (虚线, 单位: $^{\circ}\text{C}$)、风场 (风向标, 单位: m s^{-1}) ; (c) EC 再分析资料 700 hPa 位势高度 (实线, 单位: gpm)、温度 (虚线, 单位: $^{\circ}\text{C}$) ; (d) 图 (c) 黑框区域内 EC 再分析资料 700 hPa 位势高度 (实线, 单位: gpm)、温度 (虚线, 单位: $^{\circ}\text{C}$)、风场 (风向标, 单位: m s^{-1}) ; (e) EC 再分析资料 200 hPa 辐散场 (阴影, 单位: 10^{-5} s^{-1})、风场 (风向标, 单位: m s^{-1})、风速 (实线, 单位: m s^{-1}) ; (f) EC 再分析资料 850 hPa 风场 (矢量箭头, 单位: m s^{-1})、比湿 (阴影, 单位: g kg^{-1})。图中黑框区域表示研究区域, D 代表中亚低涡的位置, G 代表南亚高压位置, 黑色粗线内的打点区域表示高于 3000 m 的地形。

Fig. 2 (a) Geopotential height (solid lines, unit: gpm), temperature (dashed lines, unit: $^{\circ}\text{C}$) at 500 hPa derived from EC; (b) Geopotential height (solid lines, unit: gpm), temperature (dashed lines, unit: $^{\circ}\text{C}$) and wind bars (units: m s^{-1}) at 500 hPa; (c) Geopotential height (solid lines, unit: gpm), temperature (dashed lines, unit: $^{\circ}\text{C}$) at 700 hPa derived from EC; (d) Geopotential height (solid lines, unit: gpm), temperature (dashed lines, unit: $^{\circ}\text{C}$) and wind bars (units: m s^{-1}) at 700 hPa; (e) Divergence (shaded, unit: 10^{-5} s^{-1}), wind bars (units: m s^{-1}) and wind speed (solid lines, units: m s^{-1}) at 200 hPa; (f) wind vectors (units: m s^{-1}) and specific humidity (shaded, units: g kg^{-1}) at 850 hPa; derived from EC at 12: 00 UTC 26 Jun 2015. The black boxes indicate the location of the study area. The 'D' labels indicate the locations of the Central Asian vortexes, and the 'G' labels indicate the locations of the South Asia High. The dotted area inside the black thick lines indicate terrain above 3000 m.

4 中尺度数值模式 (WRF) 试验设计及模拟结果验证

由于本文重点关注伊犁河谷地区附近中亚低涡与地形对该地区暴雨的作用, 仅使用再分析资料分析系统演变的过程时空分辨率不足, 故进一步利用中尺度数值模拟模式 WRF (Weather Research and Forecasting Model) 对此次伊犁河谷地区的暴雨过程进行了高时空分辨率的数值模拟, 对模拟结果进行验证后即可利用

模拟得到的高时空分辨率资料对此次暴雨过程中不稳定层结的演变过程进行分析。

4.1 WRF 数值模拟实验设计

对此次新疆伊犁河谷地区暴雨过程进行的高时空分辨率 WRF 模式数值模拟采用两层双向嵌套,其中区域 1(Dom1)水平分辨率为 12 km,格点数为 555×463,垂直分辨率为 51 层,积云对流参数化方案为 Kain-Fritsch (new Eta) 方案;区域 2 (Dom2) 水平分辨率为 4 km,格点数为 835×694,垂直分辨率为 51 层,两层网格所用微物理参数化方案均为 Morrison 2-moment 方案。模拟区域如图 3 所示,五角星表示伊犁河谷的位置,阴影为地形高度。模式初始时刻为 2015 年 6 月 26 日 12:00,积分 24 h,模式初始条件和边界条件由分辨率为 0.25°×0.25°,时间间隔为 6 h 的 ERA-Interim 再分析资料 (Dee et al., 2011) 提供。

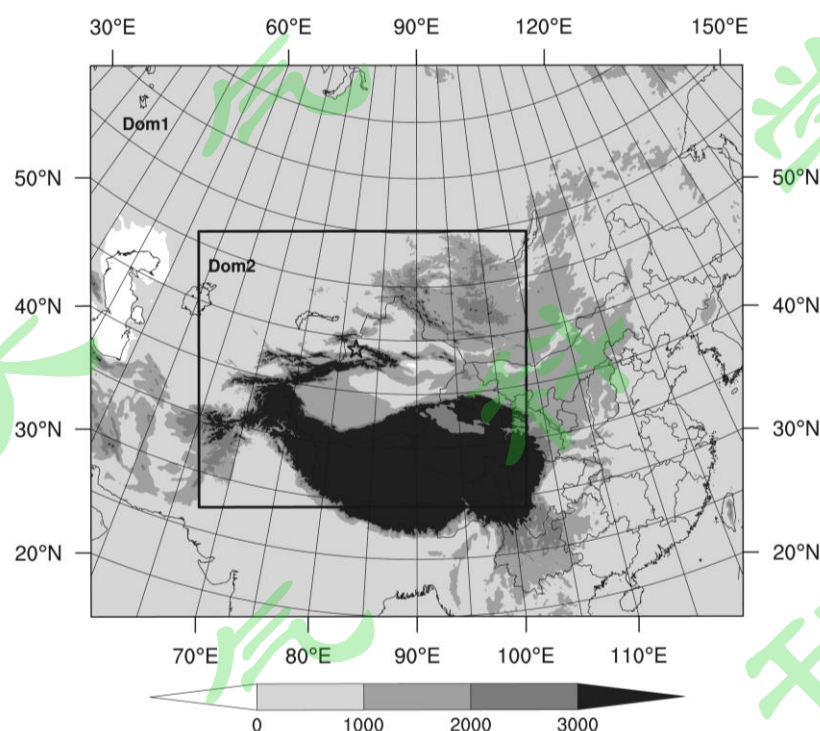


图 3 模式模拟区域 (阴影表示地形高度, 单位: m), 五角星表示伊犁河谷的位置

Fig. 3 Model domains. The shading denotes the terrain (units: m), the star denotes the location of the Ili Valley.

4.2 WRF 模拟结果验证

从 WRF 模拟（图 4b）与 APCP 降水资料（图 4a）6 小时累积降水量的对比情况来看，模式结果基本再现了本文主要关注的巩留县附近的暴雨中心（即图 4 黑框内的暴雨中心），模拟的强降水研究区（图 4b 中黑色方框区域）内的最强降水中心位置与实况（图 4a 中黑色方框区域）接近，仅略微向西偏移约 0.2 个纬度，模拟的降水强度也与实况接近。但模拟的强降水研究区北部降水较实况稍强，在强降水研究区外的北天山附近降水较实况也稍强。为了进一步验证模式模拟结果的可靠性，选取 2015 年 6 月 26 日 19:00 UTC，即降水最强的时刻，将 WRF 模拟的逐小时累积降水（图 4d）与实况（图 4c）进行对比。强降水研究区内，模拟的降水中心位置（图 4d 中黑色方框区域）与实况（图 4c 中黑色方框区域）基本一致，略微向西偏移约 0.2 个纬度，模拟的降水强度也与实况接近，这与 6 小时累积降水对比情况类似；该时刻模拟的强降水中心北部也较实况稍强，但通过 FY-2D 逐时 TBB 资料可以看出，该时刻模拟的强降水中心形态与 TBB 显示的强对流区域形态基本一致，并且强降水研究区内模拟的 6 h 累积降水中心也与该最强降水时刻 TBB 显示的强对流区域形态基本一致。通过 TBB 资料也可看出研究区外的北天山附近也存在较强的对流，TBB 显示的对流形态与模拟的北天山一带降水形态基本一致，且通过图 2f 可以得知，北天山附近水汽含量充足，因此北天山附近也很有可能产生较大的降水，但是由于北天山附近地势复杂，观测站点稀疏，可能导致了靠近北天山区域实况降水表现较弱。通过上述对比，可以看出模式对强降水研究区以及研究区外的北天山附近的降水落区、强度的模拟结果都是较为可信的，尤其是模式结果成功地再现了本文主要关注的强对流研究区内的巩留县附近的强降水中心的情况，且降水落区分布与 TBB 显示的强对流区域分布也较为相似。

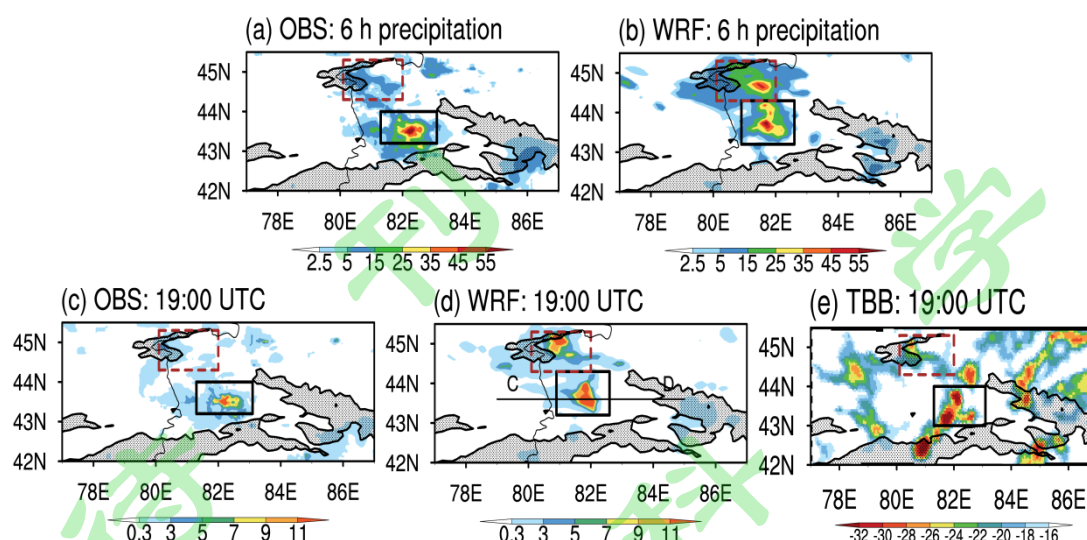


图 4 (a) APCP 资料实况与 (b) WRF 模拟的 2015 年 6 月 26 日 17:00 UTC -2015 年 6 月 26 日 22:00 UTC 6 小时累积降水分布情况 (阴影, 单位: mm) ; 2015 年 6 月 26 日 19:00 UTC (c) APCP 资料实况与 (d) WRF 模拟的 1 小时累积降水分布情况 (阴影, 单位: mm) 以及 (e) FY-2D 逐时 TBB 观测资料 (阴影, 单位: °C)

Fig. 4 17: 00 UTC 26 Jun 2015 - 22: 00 UTC 26 Jun 2015 (a) Observed from APCP data, (b) simulated 6 h accumulated precipitation (shaded, units: mm) ; (c) Observed from APCP data, (d) simulated 1 h accumulated precipitation (shaded, units: mm) and (e) Hourly change of TBB (Black-Body Temperature) from FY-2E satellite (shaded, units: °C) on 26, June 2015 19: 00 UTC 26 Jun 2015

图 5a 进一步对巩留县附近研究区域内观测降水的区域平均降水量(即图 4a、c 中黑色方框内降水区域平均)以及 WRF 模拟降水的区域平均降水量(即图 4b、d 中黑色方框内降水区域平均)进行对比, 可以看出, 在整个降水过程中, 虽然模拟的区域平均降水量整体较观测强, 但观测资料区域平均降水量整体上升的趋势以及上升过程中 26 日 13:00、16:00、19:00 三个相对的降水峰值、以及 26 日 14:00、17:00 两个相对的降水谷值在模拟资料中都得到相应的反映, 说明模拟资料的降水对强降水研究区内的整个降水过程有很好地再现。

由于模拟资料较实况略偏西偏北, 因此选取模拟资料中巩留县偏西北小区域 ($43.55\text{-}43.6^{\circ}\text{ N}$, $81.9\text{-}82.0^{\circ}\text{ E}$) 作为巩留代表区域, 将其平均降水量与实况中

巩留观测站 (43.47°N , 82.23°E) 进行比较 (图 5b), 可以看出, 虽然模拟的巩留代表区域的平均降水量较实况中极端降水的强度略低, 但基本还原了巩留县降水的过程, 尤其是降水出现的峰值, 说明模拟资料的降水对巩留县强降水过程有很好地再现。

由于伊犁河谷内仅有伊宁探空站 (43.95°N , 81.33°E), 并且该测站位于此次强降水研究区内, 因此将模拟资料的伊宁站的探空 (图 8d) 与伊宁观测站的探空资料进行对比 (图 5c), 可以看出, 虽然模拟的对流层高层偏干, 但模拟结果准确地反映出伊宁站的 450 hPa 以下的中低层接近饱和、450 hPa 以上到对流层高层逐渐转干的层结特征; 从风向上看, 虽然模拟的低层西风的层次较高, 但模拟资料准确得刻画出了伊宁探空站的低层西风中层偏东风高层西南风的特征。以上说明模式较好地反映了此次降水中伊犁河谷内层结及风场情况。

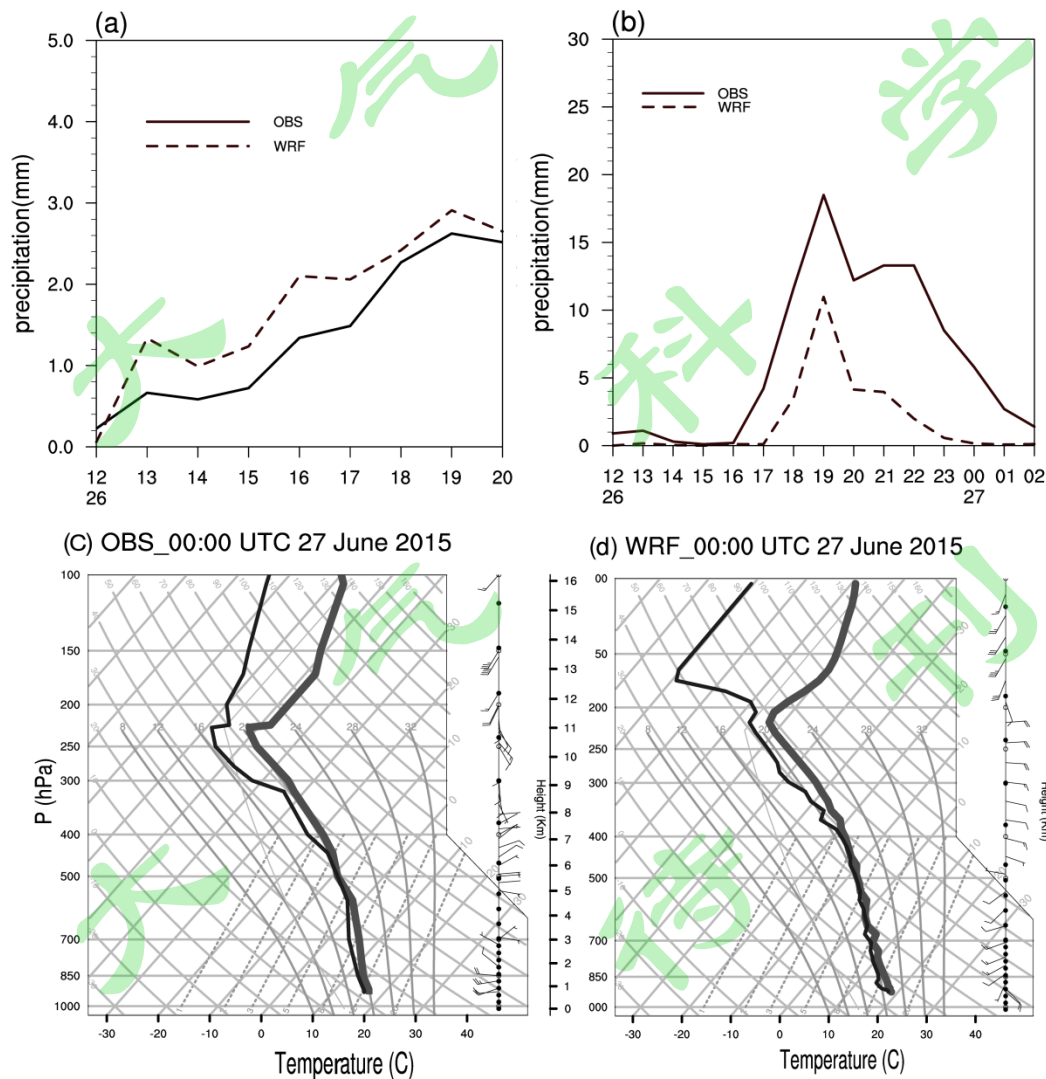


图5 (a) 2015年6月26日12:00-20:00 UTC 巩留县附近研究区域内观测降水的区域平均降水量(实线, 单位: mm)与WRF模拟降水的区域平均降水量(虚线, 单位: mm); (b) 2015年6月26日12:00 UTC -27日02:00 UTC 巩留观测站(43.47°N, 82.23°E)实况降水(实线)与巩留代表区域(43.55-43.6°N, 81.9-82.0°E)区域平均降水(虚线); 2015年6月27日00:00 UTC 伊宁站 (c) 实况与 (d) 模拟探空, 其中粗实线表示环境温度曲线, 细实线表示环境露点温度曲线

Fig.5 (a) Regional average precipitation in the study area near Gongliu County from observations from APCP data (solid line, units: mm) and regional average precipitation in the study area near Gongliu County from WRF simulation data (dotted line, units: mm) from 12: 00 UTC to 20: 00 UTC 26 Jun 2015. (b) Precipitation from Gongliu national surface weather station (solid line) and regional average precipitation in the Gongliu representative area from WRF simulation data (dotted line) from 12: 00 UTC 26 Jun 2015 to 02: 00 UTC 27 Jun 2015. (c) Observed and (d) simulated sounding at 00: 00 UTC 27 Jun 2015, where thick solid line indicates ambient temperature curve, thin solid line indicates environmental dew point temperature curve.

综合以上对WRF模拟资料与观测降水分布、观测区域平均降水及巩留县站点观测降水以及伊宁探空资料对比结果来看, 模拟结果能够基本再现本次伊犁河谷强降水过程中降水、层结以及风场情况, 因此, 可以利用模式模拟输出的高时空分辨率资料对影响此次强降水影响因素进行深入分析。

5 影响巩留县强降水产生的环境因素分析

以上验证了模拟结果对巩留附近的强降水中心有较好的再现, 因此, 本节利用上文提及的巩留代表区域高时空分辨率模拟资料的平均情况来重点研究巩留县暴雨发生发展的可能原因。

图6a为6月26日12:00-23:00模拟资料中巩留代表区域平均的降水, 散度和垂直风随时间演变情况。26日12:00-18:00, 中低层均无明显的散度中心分布, 垂直速度都很弱, 但18:00降水已经开始发生; 26日19:00, 低空出现很强的辐合中心, 中高层配合有较强的辐散中心, 低层与中高层散度中心耦合, 高层辐散低层辐合的抽吸作用导致垂直速度迅速增大, 降水发生并迅速加强; 19:00后, 低层辐合中心变为辐散中心, 中层辐散中心变为辐合中心, 低层为下沉运动为主,

中高层为强上升运动，降水逐渐减弱并停止。可以看出，散度中心及其三维配置与垂直运动有很好的对应关系。

图 6b 为 6 月 26 日 12:00-23:00 模拟资料中巩留代表区域平均的降水，水汽，水平风以及层结状况随时间演变情况。26 日 12:00-17:00 低层水汽充足，水汽最强可以达到 14 g kg^{-1} 以上，中低层有很强的不稳定层结，低层主要是北风或者西北风为主，风速不强，往中层逐渐转向为西风，4-5km 高度左右有强水平风垂直切变，中低层的偏西风转变为南风或者东南风，继而再变为强东风，风向随高度呈明显的逆时针变化，说明冷平流作用明显；26 日 17:00 降水开始发生，降水发生后，不稳定层结略减弱，中低层西风与中高层东风切变层高度向上发展，比湿略减小，26 日 19:00 降水强烈发展，能量释放后，不稳定层结减弱，中低层西风与中高层东风切变层高度发展到最高，19:00 后，降水虽然减弱，但仍维持一定的强度，中低层比湿减小，中低层西风与中高层东风切变层高度降低，层结不稳定条件逐渐消失。

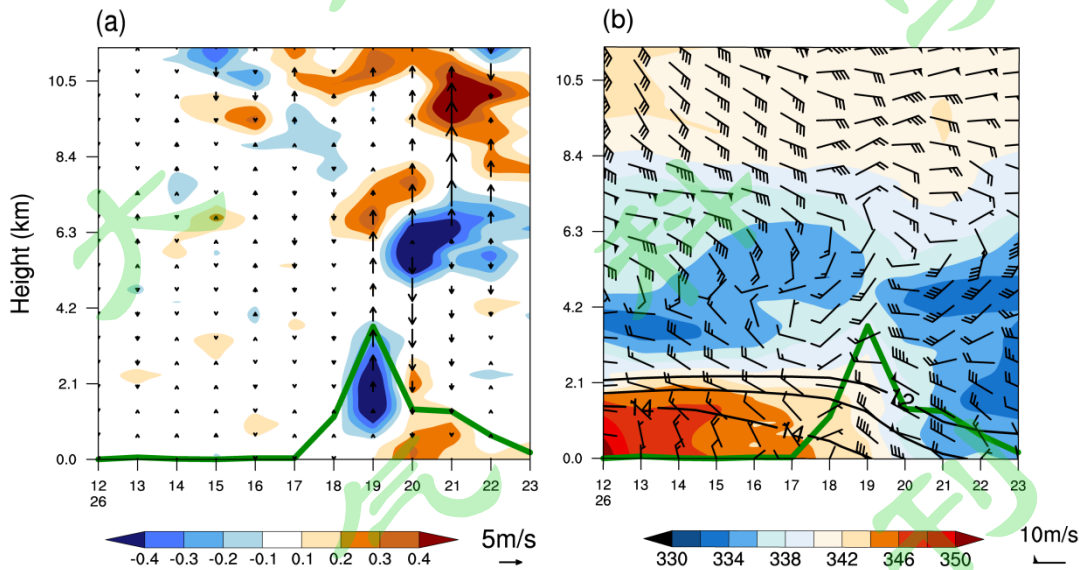


图 6 2015 年 6 月 26 日 12:00-23:00 UTC 巩留代表区域 ($43.55-43.6^{\circ} \text{ N}$, $81.9-82.0^{\circ} \text{ E}$) 区域平均 (a) 散度 (阴影, 单位: 10^{-3} s^{-1}), 垂直风速 (矢量箭头, 单位: 10 m s^{-1}) 以及 1 小时累积降水量 (绿色粗实线, 单位: mm); (b) 相当位温 (阴影, 单位: K), 比湿 (黑色实线, 单位: g kg^{-1}), 水平风速 (风向标, 单位: m s^{-1}) 以及 1 小时累积降水量 (绿色粗实线, 单位: mm)

Fig.6 Regional average (43.55-43.6° N, 81.9-82.0° E): (a) Divergence (shaded, units: 10^{-3} s^{-1}), vertical wind vector (units: m s^{-1}) and 1-h accumulated (green thick solid line); (b) Equivalent temperature (shaded, units: K), specific humidity (black solid line, units: g kg^{-1}) and 1-h accumulated (green thick solid line) from 12: 00 UTC to 23: 00 UTC 26 Jun 2015.

以上分析了巩留县附近区域的动热力和水汽环境场的演变, 这里再沿伊犁河谷的暴雨区纬向垂直剖面 (沿 43.6° N , 如图 4 中黑色细实线 CD 所示) 进行分析, 进一步讨论上述物理量对此次伊犁河谷强降水发生发展过程的综合作用。位涡理论在解释天气现象、预测天气系统变化方面具有重要作用, 目前针对不同的天气系统应用各种位涡的诊断研究工作不少, 其中湿位涡 MPV (Moist Potential Vorticity) 因为其能表现出水汽、热力、动力的综合效应, 并与强降水有很好的对应和预测关系, 在对强降水诊断分析中受到广泛应用 (周玉淑等, 2006; 陈栋等, 2007; 张建海和庞盛荣, 2011; 刘璐等, 2015; 王晨曦等, 2018; 刘赛赛等, 2019), 除了基本的环境场分析, 不稳定条件的演变也是研究暴雨过程的重要内容, 而位涡除了能反映大气动热力的作用, 还包含了不稳定的信息, 因此, 本节将湿位涡也用于此次暴雨的分析, 以期通过湿位涡分析揭示伊犁河谷此次暴雨过程中的不稳定条件的变化及其对降水的影响。

湿位涡可用于诊断惯性不稳定、对流不稳定以及条件性对称不稳定状态 ($\text{MPV} = -g(\xi_p + f) \partial \theta_e / \partial p + g(\partial v / \partial p)(\partial \theta_e / \partial x) - g(\partial u / \partial p)(\partial \theta_e / \partial y)$), MPV 出现负值意味着大气中有不稳定发生发展 (吴国雄等, 1995; 高守亭等, 2002; 邓国等, 2005; 周玉淑等, 2006; 张建海和庞盛荣, 2011; 冉令坤等, 2013; 刘赛赛等, 2019)。图 7a-d 就表明, 低层 MPV 负值区对降水区有很明显的指示预报意义, 也即动热力不稳定与降水发生和移动有很强的相关性。26 日 16:00 降水区东侧低层存在很强的动热力不稳定, 26 日 17:30 最大降水即发生在该区域, 此后, 区域东侧发展出较强的低层动热力不稳定, 虽然 16:00 到 17:30 之间, 动热力不稳定区域与当前时刻降水对应不好, 但是 18:00 以后的, 动热力不稳定区域与降水最强时刻都保持了良好的对应关系, 尤其 18:00 巩留县附近不稳定层发展

较高，降水强度也明显增强。在降水过境后，巩留县附近低层强不稳定也完全被消耗，转变为稳定状态（图 7d）。

MPV 可分为垂直分量 MPV1 ($-g(\xi_p + f) \partial \theta_e / \partial p$) 以及水平分量 MPV2 ($g(\partial v / \partial p)(\partial \theta_e / \partial x) - g(\partial u / \partial p)(\partial \theta_e / \partial y)$)，其中 MPV1 又称为湿位涡的正压项，可用于表示惯性稳定性和对流稳定性，一般北半球绝对涡度为正值，故当 MPV1 为负值时，大气是对流不稳定；MPV2 又称为湿位涡的湿斜压项，由风的垂直切变和相当位温的水平梯度决定，可用于表示条件性对称不稳定，当 MPV2 为负值时，大气是条件性对称不稳定的。通过将 MPV 分解为 MPV1 和 MPV2（图 7e-h 与图 7i-l）可以更加明确为何 MPV 对后续降水有指示意义，MPV 与当前降水有何关系以及动热力不稳定与降水发生发展分别有何作用。可以看出，各时刻降水发生前巩留县附近及其西侧小地形迎风坡及背风坡的低层 MPV 负值主要由于热力不稳定（MPV1 负值）造成，即降水主要发生在对流不稳定区域；但对流不稳定能量在降水发生时已经释放，因此在降水发生时刻，降水区转为对流稳定（MPV1 正值）。由于 26 日 16:00 与 17:30 两个时刻，降水产生时对流不稳定能量已经快速释放且并未存在条件对称不稳定，因此 MPV 表现为正值。动力不稳定（MPV2 负值）的作用主要体现在降水已经产生之后，26 日 16:00-17:30 降水区内为对称稳定，而 26 日 18:00-19:30 降水区内存在条件对称不稳定，能够在对流不稳定消耗后维持或增强降水，这可以解释为何 26 日 18:00 巩留县降水明显增幅以及 26 日 19:00 巩留县东侧区域降水较强。

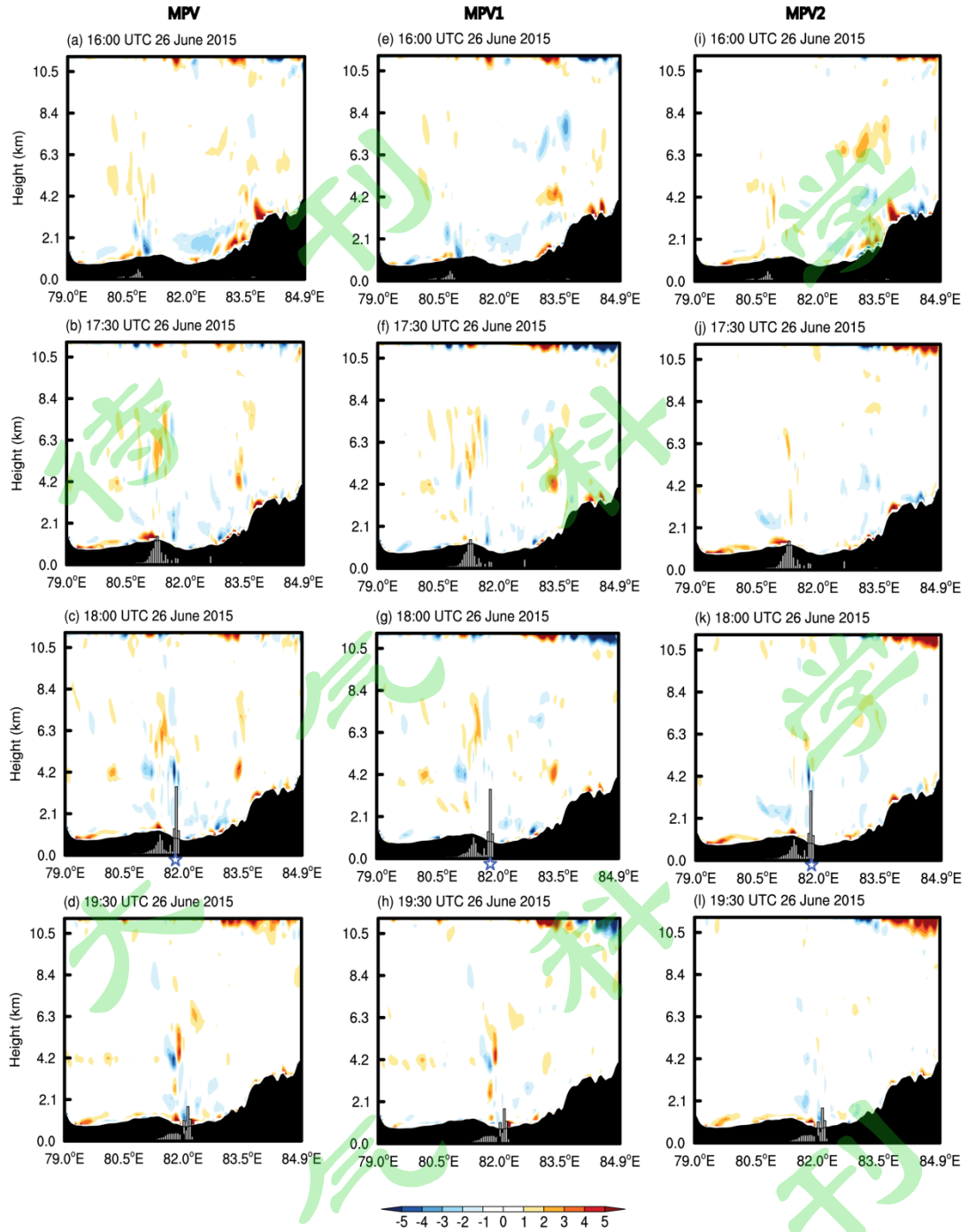


图 7 (a-d) 为沿图 4 黑色细实线 CD 湿位涡 MPV (阴影, 单位: PVU) 的纬向垂直剖面, (e-h) 为沿图 4 黑色细实线 CD 湿位涡 MPV 垂直分量 MPV1 (阴影, 单位: PVU) 的纬向垂直剖面, (i-l) 为沿图 4 黑色细实线 CD 湿位涡 MPV 水平分量 MPV2 (阴影, 单位: PVU) 的纬向垂直剖面: (a, e, i) 2015 年 6 月 26 日 16:00 UTC; (b, f, j) 2015 年 6 月 26 日 17:30 UTC; (c, g, k) 2015 年 6 月 26 日 18:00 UTC; (d, h, l) 2015 年 6 月 26 日 19:30

UTC（黑色阴影区为地形，灰色柱状图表示 30min 累积降水，蓝色五角星表示巩留县大致的位置）

Fig.7 Vertical cross sections along CD (shown in the Fig.4) of (a-d) MPV (Moist Potential Vorticity)(shaded, units: PVU), (e-h) MPV1 (shaded, units: PVU) and (i-l) MPV2 (shaded, units: PVU): (a, e, i) 16: 00 UTC 26 Jun 2015; (b, f, j) 17: 30 UTC 26 Jun 2015; (c, g, k) 18: 00 UTC 26 Jun 2015; (d, h, l) 19: 30 UTC 26 Jun 2015. The gray bar denotes 30-min accumulated precipitation, the black shading denotes terrain and the blue star denotes the location of Gongliu County.

综上，对流不稳定对降水落区的预报有很强的指示意义，但降水发生后这部分能量快速释放，如果没有条件对称不稳定产生，当前时刻的 MPV 可能不能反映出该区域有降水发生的情况，而条件对称不稳定对降水的维持以及降水增幅有较大作用，这也与孙继松和陶祖钰（2012）的研究结论一致。

6 对流不稳定特征及成因分析

从前文分析可以得出，对流（位势）不稳定对降水区发生的位置具有指示意义，这对暴雨研究非常有意义，本节将进一步对对流不稳定及影响对流不稳定形成的动热力因子进行讨论。

6.1 对流不稳定特征分析

图 8 中，等值线表示相当位温分布情况，阴影表示大气对流稳定度，图 8c 中五角星标示出了巩留县的位置。从相当位温分布来看，2 km 高度以下，巩留县以及其以西小地形附近为相当位温高值区，说明该区域高湿高能，从该地区向两侧有较强的水平梯度，其西侧较强水平梯度是由于东侧已经降水的区域水汽能量被消耗，东侧可能是受到地形阻挡以及地形日变化影响。从相当位温的垂直分布来看，巩留县以及其以西小地形附近相当位温高值区之上的中低层基本为中性层结，中高层基本为稳定层结，并且中高层的相当位温等值线在降水区向下伸展。

大气对流稳定度即相当位温垂直梯度 ($\partial\theta_e/\partial z$)，负的大气对流稳定度又被称为位势不稳定或对流不稳定。图 8 显示，26 日 16:00，整个河谷内存在很强的对流不稳定，但已有弱降水在小地形迎风坡产生，这也意味着有对流不稳定能量

已被弱降水消耗。26 日 17:30，对流区域移动，降水区域与对流区域对应，降水增强后，降水区内部的对流不稳定较附近明显减弱，河谷内对流不稳定强度和范围均减小。这是由于降水区对流触发后，消耗水汽，不稳定能量被释放，该区域就由对流不稳定趋向于稳定状态，而未有对流产生或经过的区域，对流不稳定仍维持，降水并未产生，但一旦对流产生或经过，配合该区域充沛的低层水汽，仍会产生很强的降水，26 日 18:00-19:30，降水区也即对流区向东移动，从图中可以看出，巩留县附近也即小地形背风坡一直维持很强的对流不稳定，并且由前文可知巩留县附近低层水汽充沛（图 6b），降水产生后，对流不稳定状态明显转为较为稳定状态。因此，对流不稳定对此次伊犁河谷降水的产生及移动有重要作用。

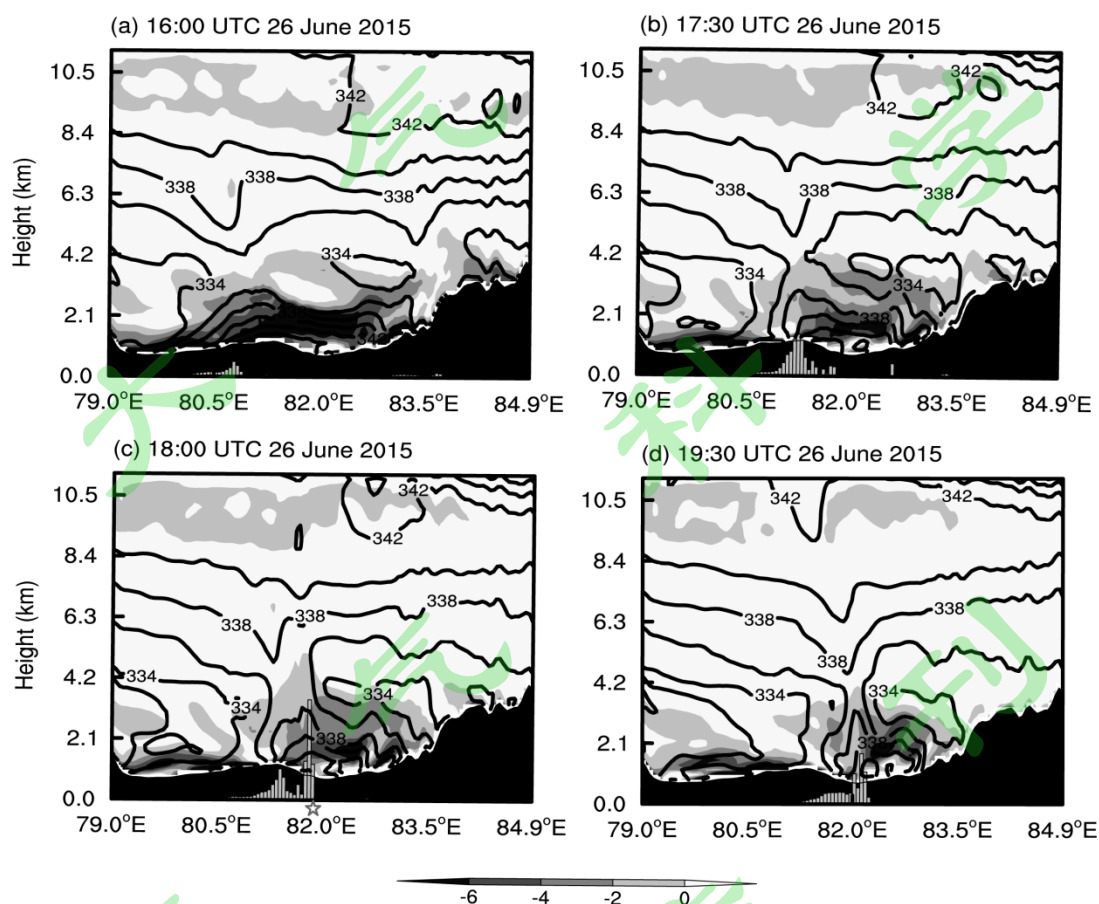


图 8 沿图 4d 黑色细实线 CD 相当位温（等值线，单位：K），相当位温垂直梯度（阴影，单位： 10^{-3}K km^{-1} ）的纬向垂直剖面：（a）2015 年 6 月 26 日 16:00 UTC；（b）2015 年 6

月 26 日 17:30 UTC; (c) 2015 年 6 月 26 日 18:00 UTC; (d) 2015 年 6 月 26 日 19:30 UTC
(地形(黑色阴影区)以及 30min 累积降水(灰色柱状图),五角星表示巩留县大致的位置)

Fig.8 Vertical cross sections along CD (shown in the Fig.4) of equivalent temperature (line, units: K) and the vertical gradient of equivalent temperature (shaded, units: 10^{-3}K km^{-1}): (a) 16: 00 UTC 26 Jun 2015; (b) 17: 30 UTC 26 Jun 2015; (c) 18: 00 UTC 26 Jun 2015; (d) 19: 30 UTC 26 Jun 2015. The gray bar denotes 30-min accumulated precipitation, the black shading denotes terrain and the star denotes the location of Gongliu County

6.2 对流不稳定成因的诊断分析

前人对对流不稳定层结的分析较多,却较少关注到对流不稳定产生的原因。为了进一步研究对流不稳定变化的可能原因,本文利用位势散度(周围等, 2018)研究大气位势(对流)稳定度发展的变化。位势散度综合垂直风切变、散度以及相当位温梯度等信息,能够很好的表征大气动、热力综合特征,并且能很好地应用于强对流系统和暴雨中尺度系统。周围等(2018)将位势散度 m 分为能代表热成风(垂直风切变)对相当位温的热力平流的 m_{bc} 项以及表征水平散度和位势稳定度的耦合效应的 m_{bt} 项,其中 $m_{bc} = -(\partial u/\partial z)(\partial \theta_e/\partial x) - (\partial v/\partial z)(\partial \theta_e/\partial y)$, $m_{bt} = (\partial u/\partial x + \partial v/\partial y)(\partial \theta_e/\partial z)$ 。

图 9 为沿着图 4d 黑色细实线 CD 的纬向垂直剖面中模拟的位势散度及其分量分布情况及其与降水的关系,图 9c、g、k 中蓝色五角星标示的位置为巩留县位置。图 9a-d 为位势散度分布情况,可以看出,26 日 16:00,弱降水区上空的低层为较强的负位势散度,其上层为较强的正位势散度,说明弱降水区低层存在较强对流不稳定,但其上存在抑制对流不稳定向上发展的对流稳定区域,这可能是该时刻该降水区较弱的原因;除此之外,该时刻降水区东侧存在很强的未被抑制的对流不稳定。26 日 17:30,降水区上空之前存在的较强的负位势散度已经消失,说明降水区消耗了大部分未被抑制的对流不稳定,降水明显发展加强;除此之外,该时刻降水区东侧的小地形背风坡处存在很强的未被抑制的对流不稳定区域。26 日 18:00,降水区上空无明显位势散度异常值,说明降水区内部的对流不稳定已经被大量消耗,此时小地形背风坡对应非常强的降水,强烈的对流不稳定能量的释放可能是该时刻该降水强烈发展的重要原因。26 日 19:30,降水区上空的低层

存在弱的负位势散度，强度明显较前一时刻弱，说明降水区内仅部分对流不稳定能量释放，这可能是该时刻降水减弱的原因。综上，降水区内对流不稳定能量释放，该区域位势趋于对流稳定，降水减小，新的强降水趋于发生在对流更不稳定的区域。

图 9e-h 与图 9i-l 分别为 m_{bc} 以及 m_{bt} 的分布，可以进一步分析影响对流不稳定的主要因素。图 9e-h 可以看出，位势散度在低层的负值区域，尤其是小地形迎风坡低层，主要是 m_{bc} 在低层的负值造成的，即说明整个降水区低层的对流不稳定主要是由于垂直风切变部分造成。图 9i-l 可以看出，小地形背风坡 m_{bt} 对该地区位势散度负值区的强度有很强的加强作用，也即该地区散度部分的作用加强了小地形背风坡处的对流不稳定。

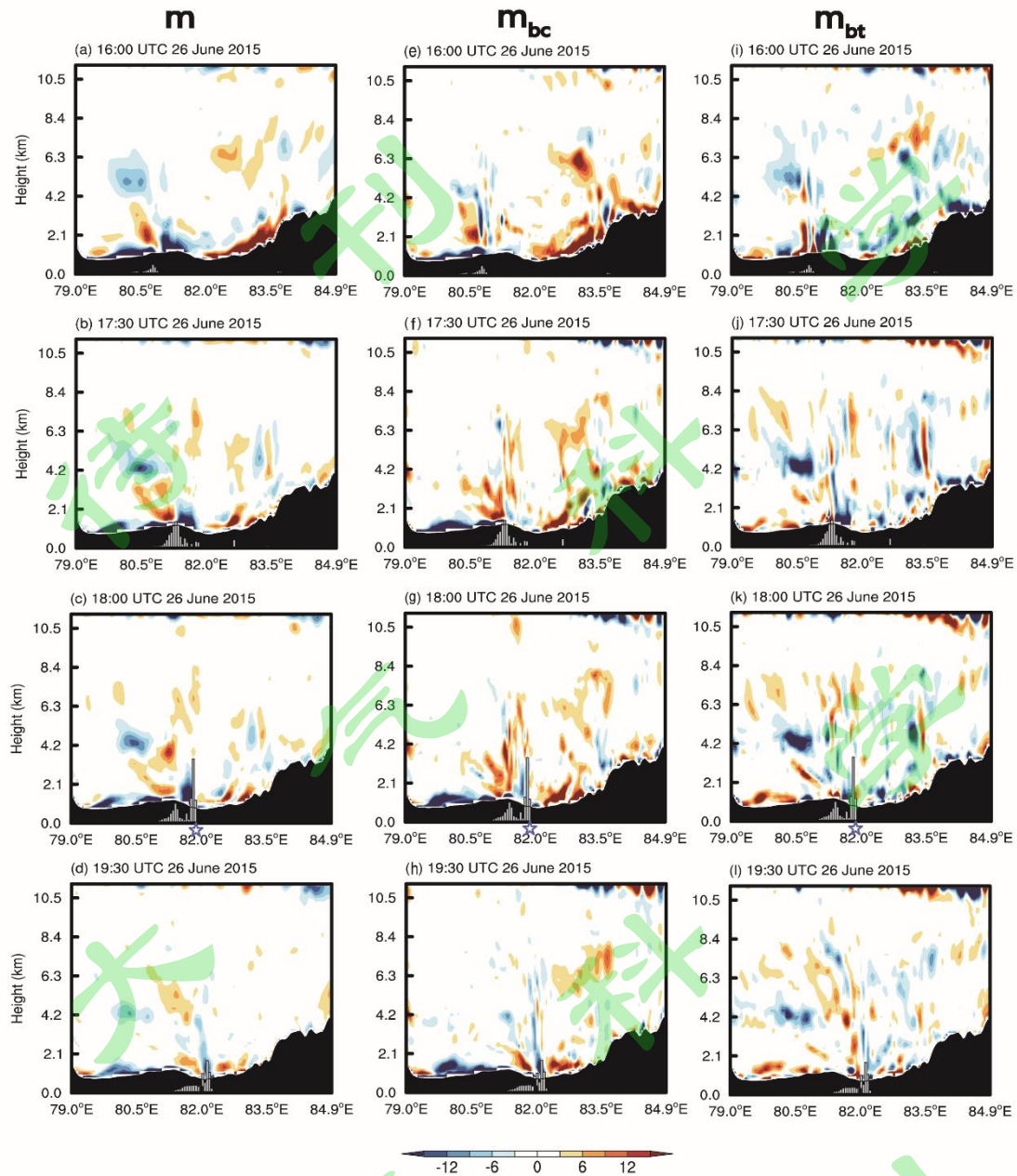


图9 (a-d) 为沿图 4d 黑色细实线 CD 位势散度 m (阴影) 的纬向垂直剖面, (e-h) 为沿图 4 黑色细实线 CD 位势散度 m 分量 m_{bc} (阴影) 的纬向垂直剖面, (i-l) 为沿图 4 黑色细实线 CD 位势散度 m 分量 m_{bt} (阴影) 的纬向垂直剖面: (a, e, i) 2015 年 6 月 26 日 16:00 UTC; (b, f, j) 2015 年 6 月 26 日 17:30 UTC; (c, g, k) 2015 年 6 月 26 日 18:00 UTC; (d, h, l) 2015 年 6 月 26 日 19:30 UTC (黑色阴影区为地形, 灰色柱状图表示 30min 累积降水, 蓝色五角星表示巩留县大致的位置)

Fig.9 Vertical cross sections along CD (shown in the Fig.4) of (a-d) m (the potential divergence) (shaded), (e-h) m_{bc} (shaded) and (i-l) m_{bt} (shaded) : (a, e, i) 16: 00 UTC 26 Jun 2015; (b, f, j) 17:

30 UTC 26 Jun 2015; (c, g, k) 18: 00 UTC 26 Jun 2015; (d, h, l) 19: 30 UTC 26 Jun 2015. The gray bar denotes 30-min accumulated precipitation, the black shading denotes terrain and the blue star denotes the location of Gongliu County

7 结论与讨论

本文基于 ERA-Interim 再分析资料、新疆地区的多种观测资料, 并利用 WRF 高时空分辨率模拟资料, 对 2015 年 6 月 26 日新疆伊犁河谷特大暴雨过程进行初步分析后, 得到以下主要结论:

(1) 此次降水过程局地性强、短时降水强度大, 降水发生时对应对流层中层中高纬度“两脊一槽”以及对流层高层南亚高压“双体型”的环流形势, 其中伊犁河谷在哈萨克斯坦中亚低涡带来的低层西风与塔里木盆地中亚低涡带来中层东风控制之下, 两低涡与伊犁河谷特殊向西开口的喇叭口地形配合形成了中低层较强的水平风垂直切变、低空辐合线、水汽输送及堆积, 从而有利于伊犁河谷内形成动热力不稳定条件, 同时伊犁河谷上空高空急流产生的高层辐散场与低层辐合线附近的辐合运动耦合, 从而有利于伊犁河谷内上升运动的产生和加强。

(2) 散度分布、水汽、垂直风切变及热力层结分布对巩留县的降水产生有重要的正贡献, 湿位涡分析表明热力层结影响的对流不稳定对降水的产生有正贡献, 垂直风切变影响的对称不稳定对降水增强维持有正贡献。

(3) 整个降水区低层的对流不稳定主要是由于位势散度的垂直风切变部分造成, 而位势散度的散度部分能加强小地形背风坡处的对流不稳定, 其中, 水平风的垂直切变强度直接影响对称不稳定从而影响降水强度, 同时也间接影响位温垂直分布; 位势散度的散度部分分布情况直接影响垂直运动分布及强度, 间接影响相当位温的分布; 相当位温的垂直分布影响对流不稳定、水平分布影响对称不稳定, 当不稳定能量释放, 配合低层充沛水汽, 最终影响强降水的产生、落区及强度。

本文虽然对此次新疆伊犁河谷特大暴雨过程进行了诊断和模拟, 也得到了一些初步结论, 但仍存在一些问题需要进一步研究分析, 如本文还未涉及到利用高分辨率模拟资料对直接触发不稳定能量释放的中尺度天气系统的演变过程以及

其如何影响降水,对地形影响降水作用的分析也还欠缺,这将在后续的工作中继续进行深入讨论。

参考文献 (References)

- 毕宝贵, 刘月巍, 李泽椿. 2004. 2002 年 6 月 8~9 日陕南大暴雨系统的中尺度分析[J]. 大气科学, 28(5): 747–761. Bi Baogui, Liu Yuewei, Li Zechun. 2004. Mesoscale System Analysis of Extremely Heavy Rainfall in the Southern Part of Shaanxi Province during 8 and 9 June 2002 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 28(5): 747–761.
- 陈栋, 李跃清, 黄荣辉. 2007. 在“鞍”型大尺度环流背景下西南低涡发展的物理过程分析及其对川东暴雨发生的作用[J]. 大气科学, 31(2): 185–201. Chen Dong, Li Yueqing, Huang Ronghui. 2007. The Physical Process Analyses of the Southwest Vortex Development and Its Effect on Heavy Rainfall in Eastern Sichuan Under the Saddle Pattern Background of Large-Scale Circulations [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 31(2): 185–201.
- 陈亚宁, 张家宝, 安鸿志, 等. 1997. 新疆 1996 年 7 月洪水灾害成因分析[J]. 自然灾害学报, 06(3): 50–57. Chen Yaning, Zhao Jiabao, An Hongzhi, et al. 1997. Analysis on the cause of flood disaster in July, 1996 in Xinjiang [J]. Journal of Natural Disasters (in Chinese), 06(3): 50–57.
- 陈勇航, 徐希慧. 1997. “96·7”新疆特大暴雨的卫星云图分析[J]. 新疆气象, 20(1): 14–16. Chen Yonghang, Xu Xihui. 1997. Satellite cloud image analysis of "96 7" large rainstorm in Xinjiang [J]. Bimonthly of Xinjiang Meteorology (in Chinese), 20(1): 14–16.
- DEE D P, UPPALA S M, SIMMONS A J, et al. 2011. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society [J], 137: 553–597.
- 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[J]. 气象学报, 65(6): 1003–1010. Dai Xingang, Ren Yiyong, Chen Hongwu. 2007. Multi-scale feature of climate and climate shift in xinjiang over the past 50 years [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 65(6): 1003–1010.
- 邓国, 周玉淑, 崔晓鹏. 2005. 2003 年梅雨期湿位涡异常诊断分析[J]. 中国科学院研究生院学报, 22: 712 – 719. Deng Guo, Zhou Yushu, Cui Xiaopeng. 2005. A diagnosis of moist potential vorticity anomaly during Meiyu period in 2003 [J]. Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Sciences (in Chinese), 22: 712 – 719.
- 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[J]. 气候变化研究进展, 02(1): 3–8. Ding Yihui, Ren Guoyu, Shi Guangyu, et al. 2006. National Assessment Report of Climate Change (I): Climate change in China and its future trend [J]. Advances In Climate Change Research (in Chinese), 02(1): 3–8.
- 高坤, 翟国庆, 俞樟孝, 等. 1994. 华东中尺度地形对浙北暴雨影响的模拟研究. 气象学报[J], 52 (2): 157–164. Gao Kun, Zhai Guoqing, Yu Zhangxiao, et al. 1994. The

- Simulation Study of Meso-Scale Orographic Effects on Heavy Rain in East China [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 52 (2): 157–164.
- 高守亭, 雷霆, 周玉淑, 等. 2002. 强暴雨系统中湿位涡异常的诊断分析[J]. *应用气象学报*, 13 (6): 662 – 669. Gao Shouting, Lei Ting, Zhou Yushu, et al. 2002. Diagnostic analysis of moist potential vorticity anomaly in tropical rain systems [J]. *Quarterly Journal of Applied Meteorology* (in Chinese), 13(6): 662 – 669.
- 何立富, 陈涛, 周庆亮, 等. 2007. 北京“7.10”暴雨 β -中尺度对流系统分析[J]. *应用气象学报*, 18(5): 655–665. He Lifu, Chen Tao, Zhou Qingliang, et al. 2007. The Meso- β Scale Convective System of a Heavy Rain Event on July 10, 2004 in Beijing [J]. *Journal of Applied Meteorological Science* (in Chinese), 18(5): 655–665.
- 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[J]. *干旱气象*, 30(4): 615–622. Huang Yan, Liu Tao, Zhang Yunhui. 2012. Features of a Regional Rainstorm in Midsummer of 2010 in Western Xinjiang [J]. *Journal of Arid Meteorology* (in Chinese), 30(4): 615–622.
- 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 Nanjing [J]. *Bimonthly of Xinjiang Meteorology* (in Chinese), 24(5): 19–20.
- 李长青, 丁一汇. 1989. 西北太平洋爆发性气旋的诊断分析[J]. *气象学报*, 47(2): 180–190. Li Changqing, Ding Yihui. 1989. A Diagnostic Study of an Explosively Deepening Oceanic Cyclone over the Northwest Pacific Ocean [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 47(2): 180–190.
- 刘惠云. 2001. 新疆夏季降水异常与 100hPa 南亚高压月平均环流特征的相关分析[J]. *新疆气象*, 24(3): 9–11. Liu Huiyun. 2001. Correlation Analysis between Anomalous Precipitation in Xinjiang and Monthly Mean Circulation Features Of South Asia High in Summer [J]. *Bimonthly of Xinjiang Meteorology* (in Chinese), 24(3): 9–11.
- 刘蕾, 张凌云, 李家文. 2015. 中尺度地形对柳州一次大暴雨过程影响的数值试验[J]. *暴雨灾害*, 34(1): 74–79. Liu Lei, Zhang Linyun, Li Jiawen. 2015. Case Study of the Impact of Mesoscale Topography on the Rainstorm over Liuzhou [J]. *Torrential Rain and Disasters* (in Chinese), 34(1): 74–79.
- 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. Liu Lu, Ran Lingkun, Zhou Yushu, et al. 2015. Analysis on the instability and trigger mechanism of torrential rainfall event in Beijing on 21 July 2012 [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 39 (3): 583–595.
- 刘赛赛, 张立凤, 赵艳玲. 2019. 不同定义的湿位涡分析及在台风中的诊断[J]. *大气科学*, 43(3): 565–576. Liu Saisai, Zhang Lifeng, Zhao Yanling. 2019. Analysis of various moist potential vorticities with different definitions and comparison of their diagnoses in a typhoon process [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 43(3): 565–576.
- 马淑红. 1994. 新疆暴雨洪水灾害分布特征[J]. *新疆气象*, 17(1): 23–27. Ma Shuhong. 1994. Distribution characteristics of storm flood disasters in Xinjiang [J]. *Bimonthly of Xinjiang Meteorology* (in Chinese), 17(1): 23–27.

- 马禹, 王旭, 陶祖钰. 1998. 新疆“96·7”特大暴雨水汽场特征综合研究[J]. 新疆气象, 21(5): 9–13. Ma Yu, Wang Xu, Tao Zuyu. 1998. Comprehensive study on water vapor field characteristics of "96 7" heavy rainstorm in Xinjiang [J]. Bimonthly of Xinjiang Meteorology(in Chinese), 21(5): 9–13.
- 钱永甫, 张琼, 张学洪. 2002. 南亚高压与我国盛夏气候异常[J]. 南京大学学报(自然科学版), 38(3): 295–307. Qian Yongfu, Zhang Qiong, Zhang Xuehong. 2002. The South Asian High and Its Effects on China's Mid-summer Climate Abnormality [J]. Journal of Nanjing University (Natural Sciences) (in Chinese), 38(3): 295–307.
- 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.
- 沈艳, 潘旸, 宇婧婧, 等. 2013. 中国区域小时降水量融合产品的质量评估[J]. 大气科学学报, 36(1): 37–46. Shen Yan, Pan Yang, Yu Jingjing, et al. 2013. Quality Assessment of Hourly Merged Precipitation Product over China [J]. Trans Atmos Sci (in Chinese), 36(1): 37–46.
- 孙继松, 陶祖钰. 2012. 强对流天气分析与预报中的若干基本问题[J]. 气象, 38(2): 164–173. Sun Jisong, Tao Zuyu. 2012. Some Essential Issues Connected with Severe Convective Weather Analysis and Forecast[J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 38(2): 164–173.
- 陶诗言, 丁一汇, 周晓平. 1979. 暴雨和强对流天气的研究[J]. 大气科学, 03(3): 227–238. Tao Shiyan, Ding Yihui, Zhou Xiaoping. 1979. The Study of Heavy Rain and Strong Convective Weather [J]. Scientia Atmospherica Sinica (in Chinese), 03(3): 227–238.
- WANG H, CHEN Y, CHEN Z. 2013. Spatial distribution and temporal trends of mean precipitation and extremes in the arid region, northwest of China, during 1960–2010. Hydrological Processes [J], 27: 1807–1818.
- WANG Y, ZHOU B, QIN D, et al. 2017. Changes in Mean and Extreme Temperature and Precipitation over the Arid Region of Northwestern China: Observation and Projection. Advances in Atmospheric Sciences [J], 34: 289–305.
- 王晨曦, 邓莲堂, 范广洲, 等. 2018. 一次华北锋面带状降水过程中的对流-对称不稳定诊断分析[J]. 气象, 44(12): 1518–1528. Wang Chenxi, Deng Liantang, Fan Guangzhou, et al. 2018. Diagnostic Analysis of Convective-System Instability during a Banded Precipitation Process in North China [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 44(12): 1518–1528.
- 王旭, 马禹, 赵兵科, 等. 1999. 新疆“96·7”特大暴雨水汽输送通道的研究[J]. 新疆气象, 22(5): 5–9. Wang Xu, Ma Yu, Zhao Bingke, et al. 1999. Study on water vapor transport channel of "96 7" heavy rainstorm in Xinjiang [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 22(5): 5–9.
- 王前, 赵勇, 陈飞, 等. 2017. 南亚高压的多模态特征及其与新疆夏季降水的联系[J]. 高原气象, 36(5): 1209–1220. Wang Qian, Zhao Yong, Chen Fei, et al. 2017. Characteristics of different patterns of South Asia High and their relationships with summer precipitation in Xinjiang. Plateau Meteorology (in Chinese), 36(5): 1209–1220.

- 吴国雄, 蔡雅萍, 唐晓菁. 1995. 湿位涡和倾斜涡度发展[J]. 气象学报, 53(3): 387–405.
- Wu Guoxiong, Cai Yaping, Tang Xiaojing. 1995. Moist potential vorticity and slantwise vorticity development [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 53(3): 387 – 405.
- 肖开提·多莱特, 汤浩, 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 Duolaite. 1997. Study on water vapor condition of "96·7" heavy rainstorm in Xinjiang [J]. Bimonthly of Xinjiang Meteorology (in Chinese), 20(1): 8–11.
- 谢泽明, 周玉淑, 杨莲梅. 2018. 新疆降水研究进展综述[J]. 暴雨灾害, 37(3): 204–212.
- Xie Zeming, Zhou Yushu, Yang Lianmei. 2018. Review of study on precipitation in Xinjiang [J]. Torrential Rain and Disasters (in Chinese), 37(3): 204–212.
- 徐羹慧. 1997. “96·7”新疆特大暴雨洪水预报服务技术研究的综述与启示[J]. 新疆气象, 20(1): 1–4. Xu Genghui. 1997. Summary and Enlightenment of "96·7" Xinjiang Extraordinary Storm Flood Forecasting Service Technology Research [J]. Bimonthly of Xinjiang Meteorology (in Chinese), 20(1): 1–4.
- 徐文慧, 倪允琪, 汪小康, 等. 2010. 登陆台风内中尺度强对流系统演变机制的湿位涡分析[J]. 气象学报, 68(1): 88–101. Xu Wenhui, Ni Yunqi, Wang Xiaokang, et al. 2010. Moist Potential Vorticity Analysis of The Evolution Mechanism of a Strong Mesoscale Convective System in a Landing Typhoon [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 68(1): 88–101.
- 杨莲梅, 李曼. 2015. “96·7”中亚低涡持续活动能量转换和频散特征[J]. 气象科技进展, 05(3): 40–48. Yang Lianmei, Li Man. 2015. Energy Conversion and Dispersion Characteristics of “96·7” Central Asian Vortex Persistent Activity [J]. Advances in Meteorological Science and Technology (in Chinese), 05(3): 40–48.
- 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[J]. 干旱区资源与环境, 25(8): 82–87. Yang Xia, Zhao Yizhou, Wang Ying, et al. 2011. Variation of precipitation and rain days in Xinjiang in recent 30 years [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment (in Chinese), 25(8): 82–87.
- 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. Introduction to Xinjiang's precipitation (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press.
- 张建海, 庞盛荣. 2011. “莫兰蒂”台风(1010)暴雨成因分析[J]. 暴雨灾害, 30(4): 305–312. Zhang Jianhai, Pang Shengrong. 2011. Analysis on the Cause of Rainstorm of the Typhoon Meranti (1010) [J]. Torrential Rain and Disasters (in Chinese), 30(4): 305–312.
- 张景, 周玉淑, 沈新勇, 等. 2019. 2016 年“7.19”京津冀极端降水系统的动热力结构及不稳定条件分析[J]. 大气科学, 43(4): 934–947. Zhang Jing, Zhou Yushu, Shen Xinyong, et al. 2019. Evolution of Dynamic and Thermal Structure and Instability Condition Analysis of the Extreme Precipitation System in Beijing-Tianjin-Hebei on July 19 2016 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 43(4): 934 – 947.
- 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. Zhao 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.
- 赵玉春, 李泽椿, 肖子牛. 2008. 华南锋面与暖区暴雨个例对比分析[J]. 气象科技, 36(1): 47–54. Zhao Yuchun, Li Zechun, Xiao Ziniu. 2008. Comparison Analysis of South China

- Front and Warm-Area Heavy Rain Systems in June 2006 [J]. Meteorological Science and Technology (in Chinese), 36(1): 47–54.
- 周围, 包云轩, 冉令坤, 等. 2018. 一次飑线过程对流稳定度演变的诊断分析[J]. 大气科学, 42(2): 339–356. Zhou Wei, Bao Yunxuan, Ran Lingkun, et al. 2018. Diagnostic Analysis of Convective Stability Evolution during a Squall Line Process [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 42 (2): 339–356.
- 周玉淑, 邓国, 黄仪虹. 2003. 长江流域一次暴雨过程中的不稳定条件分析[J]. 气象学报, 61(3): 323–333. Zhou Yushu, Dengguo, Huang Yihong. 2003. Analysis on Instability Condition during a Torrential Rain over Yangzi River Basin [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 61(3): 323–333.
- 周玉淑, 邓国, 雷霆. 2006. 湿位涡物质的保守性原理及其应用[J]. 中国科学院研究生院学报, 23(5): 692–700. Zhou Yushu, Deng Guo, Lei Ting. 2006. Impermeability of Moist Potential Vorticity Substance and its Application [J]. Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Sciences (in Chinese), 23(5): 692–700.
- 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.