

苏永玲, 李生辰, 胡焱, 等, 2022. 低涡切变影响下河湟谷地两类强降水环境条件及成因对比[J]. 气象, 48(1): 44-60. Su Y L, Li S C, Hu Y, et al, 2022. Comparison of environmental conditions and causes of two types of severe precipitation affected by low vortex shear in Hehuang Valley[J]. Meteor Mon, 48(1): 44-60(in Chinese).

低涡切变影响下河湟谷地两类强降水 环境条件及成因对比^{*}

苏永玲^{1,2} 李生辰³ 胡 焱¹ 张雪琦¹ 梅成红¹

1 青海省气象台, 西宁 810001

2 高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室, 成都 610072

3 青海省气象科学研究所, 西宁 810001

提 要: 利用 2018—2020 近三年青海河湟谷地低涡切变影响下强降水天气个例地面观测、NCEP $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 再分析、FY-2G 云图相当黑体亮温温度、模式及雷达拼图等资料, 对比分析相同环流背景影响下不同类型强降水环境条件和成因差异, 以及初步评估模式预报能力。结果表明: 伴有雷暴、冰雹、雷暴大风等混合性强降水天气称为强降水 I 型, 以纯短时强降水为主的强降水天气称为强降水 II 型。低涡切变是两种类型强降水的影响系统, 强降水 I 型 400~300 hPa 高空冷平流入侵促使低涡切变系统加强东移, 地面冷锋发展在河湟谷地形成锢囚锋。强降水 II 型受副热带高压西进阻挡, 低涡切变系统和地面冷锋减弱消失; 强降水 I 型主要具有较强的高空干冷急流、高的下沉对流有效位能, 较高的 700 hPa 和 400 hPa 温差以及强的垂直风切变均为强对流发生提供动力条件, 产生的强天气以风雹类为主, 而强降水 II 型具有较高的 0°C 层和 -20°C 层高度、较高的抬升凝结高度, 产生的强天气以短时强降水为主; 强降水 I 型云图特征主要表现为午后发展起来组织化程度高的冷涡云系, 相当黑体亮温(TBB)初始中心数值在 $-45^{\circ}\text{C} \sim -35^{\circ}\text{C}$, 发展阶段 TBB 下降至 $-75^{\circ}\text{C} \sim -40^{\circ}\text{C}$, 强降水 II 型云图特征主要表现为分散的块状对流云系, TBB 初始中心数值在 -35°C 左右, 发展阶段 TBB 下降至 $-70^{\circ}\text{C} \sim -50^{\circ}\text{C}$; 地面辐合线是两类强降水的触发系统, 强降水 II 型假相当位温数值大于强降水 I 型, 以热力强迫为主, 强降水 I 型垂直速度大于强降水 II 型, 以动力强迫为主; 全球同化预报系统相比中尺度天气数值预报系统更具优势, ECMWF 和 CMA-MESO 两种模式对 500 hPa 低涡切变有较好的刻画, ECMWF 模式能较好地模拟出对流有效位能, 三家模式降水量级预报明显偏大、降水中心位置偏北偏西, 而中国气象局中尺度天气数值预报系统 CMA-MESO 模式在降水预报方面略具有优势。

关键词: 河湟谷地, 低涡切变, 短时强降水, 环境条件, 成因对比

中图分类号: P458

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2021.061801

Comparison of Environmental Conditions and Causes of Two Types of Severe Precipitation Affected by Low Vortex Shear in Hehuang Valley

SU Yongling^{1,2} LI Shengchen³ HU Yao¹ ZHANG Xueqi¹ MEI Chenghong¹

1 Qinghai Meteorological Observatory, Xining 810001

2 Heavy Rain and Drought-Flood Disasters in Plateau and Basin Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610072

3 Qinghai Institute of Meteorological Sciences, Xining 810001

Abstract: Based on the ground observation, NCEP $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ reanalysis, FY-2G TBB, model data and radar mosaic data of two type severe precipitations under the influence of low vortex shear in the Qinghai

^{*} 国家自然科学基金项目(91337109)、青海省科技厅基础研究计划项目(2021-ZJ-753)、青海省气象台强天气预报预警创新团队、高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室开放研究基金项目(SZKT202109)和公益性行业(气象)科研专项(GYHY201306006)共同资助

2020 年 4 月 3 日收稿; 2021 年 6 月 18 日收修定稿

第一作者: 苏永玲, 主要从事高原强对流预报研究. E-mail: 15209785065@163.com

通讯作者: 李生辰, 主要从事高原灾害性天气研究. E-mail: 2176794346@qq.com

Hehuang Valley in the past three years, the comparative analysis is conducted about the environmental conditions and causes of different types of severe precipitation under the influence of the same circulation background, and also about the preliminary assessment of the model's forecasting capabilities. The results show that the mixed severe precipitation weather with thunderstorm, hail, thunderstorm and gale is called severe precipitation type I, and the severe precipitation weather dominated by pure short-term severe precipitation is called severe precipitation type II. The low vortex shear was the impact system of the two types of severe precipitation. The severe precipitation type I 400—300 hPa high-altitude cold advection intrusion promoted the eastward movement of the low vortex shear system, and the development of the ground cold front formed an occluded front in the Hehuang Valley. The severe precipitation type II was blocked by the westward advance of the subtropical high, and the low vortex shear system and the ground cold front weakened and disappeared. Severe precipitation type I mainly had strong high-altitude dry-cold jets, high sinking convective effective potential energy, high temperature difference between 700 hPa and 400 hPa, and strong vertical wind shear all provided power conditions for the occurrence of severe convection, and the severe weather produced was mainly gale and hail. The severe precipitation type II had a higher height of 0℃ layer and -20℃ layer, a higher uplift and condensation height, and the severe weather produced was dominated by short-term severe precipitation. The characteristics of the severe precipitation type I cloud map were mainly manifested in the cold vortex cloud system with a high degree of organization developed in the afternoon. The initial center value of TBB was between -45℃ and -35℃, and the TBB dropped to -75℃ to -40℃ in the developing stage. In the meantime, the type II cloud image of severe precipitation was mainly characterized by scattered massive convective cloud system. The initial center value of TBB was around -35℃, and TBB dropped to -70℃ to -50℃ in the developing stage. Ground convergence lines were two types of severe precipitation trigger systems. The pseudo-equivalent potential temperature value of the severe precipitation type II was greater than that of the severe precipitation type I, and was dominated by thermal forcing. The vertical velocity of the severe precipitation type I was greater than that of the severe precipitation type II, which was dominated by dynamic forcing. The global model assimilation forecast system had more advantages than the mesoscale weather numerical forecast system. The two models of ECMWF and CMA-MESO could better characterize the 500 hPa low vortex shear. The ECMWF model could better simulate the effective convective potential energy, and the three models could predict precipitation magnitude obviously larger and the center of precipitation was more northward and westward, and the mesoscale weather numerical forecast system of China Meteorological Administration CMA-MESO had a slight advantage in precipitation forecasting.

Key words: Hehuang Valley, low vortex shear, short-term severe precipitation, environmental condition, cause comparison

引 言

青海河湟(黄河与湟水河)谷地,位于青海省东部农业区,是青海省重要的农业基地。地形复杂,地质环境极其脆弱,年平均降水量不足 500 mm。马晓玲等(2020)统计了近 31 年来青海地区的雷暴和冰雹天气变化趋势,表明青海东部雷暴天气过程的

平均持续时间在缓慢增加,雷暴过程带来的潜在危害在增加。王田寿和李生辰(2007)指出青海短时强降水具有局地性、夜雨性等特征。近十几年,河湟谷地夏季短时强降水频发,引发重大人员伤亡和财产损失(朱平等,2019),给预报服务、防灾减灾工作造成了巨大压力,尤其近三年出现在河湟谷地低涡切变影响下的强降水过程,造成河湟谷地严重的洪涝灾害和人员伤亡,直接经济损失均在 200 万元以上。

青藏高原(简称高原)低涡切变线系统是高原地区主要的降水系统。本文研究的天气个例均是在高原低涡切变影响下的强降水天气过程,但过程出现时强天气类型、降水范围、降水强度等有明显的差异。研究表明高原的低涡切变系统移出一般有三种路径:东北、偏东和东南路径,其中东北路径相较其他两类路径个例偏少(师锐和何光碧,2018),高原低涡切变能否移出高原,不仅与高原上的热力、动力作用有关,同时与周边天气尺度系统的热力、动力作用有关(顾清源等,2010;郁淑华和高文良,2019)。

Doswell III(1987)认为对流不稳定、水汽和抬升是对流天气发生满足的基本条件,对由这些条件构成的环境参数特征进行研究有助于了解强对流天气发生的物理过程(王迪等,2020;黄艳等,2018;杨新林等,2017;田付友等,2017)。樊李苗和俞小鼎(2013)指出不同类型的强对流天气环境条件有明显差异,短时强降水天气与强冰雹、雷暴大风天气相比,主要表现在较小的700~500 hPa和850~500 hPa温差、弱的垂直风切变、较高的0℃层和-20℃层高度和平衡高度、较大的地面和地面以上1.5 km处的露点温度,而混合型强对流天气和强冰雹天气、雷暴大风天气的对流层中层存在明显干层、较大的对流有效位能和0~6 km垂直风切变。

强对流天气的产生有很多触发机制。方翀等(2012)认为低层切变线和地面辐合线相交的地区,是对流单体产生和强烈发展的区域。低层垂直风切变、低空急流和地形抬升在对流触发和维持中具有重要作用(王宝鉴等,2016)。地面热力不均匀导致的局地升温是地面中尺度辐合系统生成的主要原因,而地面中尺度辐合系统的发生发展触发了中小尺度对流系统的形成,导致了局部大暴雨的产生(喻谦花等,2016)。弱冷锋是触发高原东部强对流天气的主要地面系统,河湟谷地的喇叭型地形明显地影响着对流移动和传播路径(朱平和张国庆,2015;朱平和俞小鼎,2019)。天气尺度系统的动力和热力条件能够对中尺度对流系统的组织化程度起重要作用(Corfidi et al,1996;孙继松等,2013)。相当黑体亮温(TBB)梯度最大的地方容易造成强对流天气(曲晓黎等,2011), $TBB < 230$ K为强降水高发区域(马素艳等,2019)。逗点云型、冷锋尾部与南亚高压东侧叠置型主要受高低空冷暖平流强烈交汇影响。狄

潇泓等(2018)指出冷涡后部型是高空冷平流强迫下形成的。目前对短时强降水天气预报准确率仍然较低,中央气象台对短时强降水的6 h和24 h时效预报的TS评分分别为0.18和0.24(唐文苑等,2017),究其原因是对短时强降水天气发生机理认识不足。

当代的天气预报,是以数值预报为基础的天气预报,强对流天气的预报水平,一定程度上依赖于中尺度数值模式的准确性。Anthes(1990)提出假设使用天气尺度的常规资料作为初值条件,可能预报出与暴雨、冰雹、龙卷、大风、下击暴流等有关的中尺度天气系统和现象。蔡雪薇等(2018)通过数值模拟发现,有利的环境条件对对流单体的组织化发展是有益的。在短时临近时效内,上游关键区域降水信息对下游地区降水预报具有指示意义,降水概率预报具有更高的预报准确率(赵渊明和漆梁波,2021)。

目前针对高原地区有关强降水产生的环境条件以及触发机制方面的研究工作少,本文通过统计近三年低涡切变影响下青海河湟谷地强降水天气典型个例,试图寻找产生不同类型强对流天气的原因、环境条件及成因差异,归纳和凝练低涡切变这类影响系统下的强降水预报预警指标,并初步对典型强降水个例数值模式的预报能力进行评估,做好模式解释应用,指导预报员研判低涡切变环流背景下产生强对流天气的类型、范围、具体落区等并给出参考依据。

1 资料与方法

研究区域河湟谷地,位于青海省东部农业区,由东往西依次为湟水流域的民和县、乐都县、平安区、互助县、西宁市、大通县、湟中区、湟源县、海晏县,及黄河流域的循化县、化隆县、尖扎县、贵德县,平均海拔2000 m以上(图1)。所用资料包括:6次天气过程高空、地面实况资料,利用天气学方法对比分析两类强降水过程实况特征、环流特征以及环境场特征和成因;对应时段NCEP $1^\circ \times 1^\circ$ 再分析资料,FY-2G云图TBB资料、地面自动站、雷达拼图产品、欧洲中期数值预报中心细网格模式(ECMWF)、中国气象局全球同化预报系统(CMA-GFS)和中国气象局中尺度天气数值预报系统(CMA-MESO)等资料。

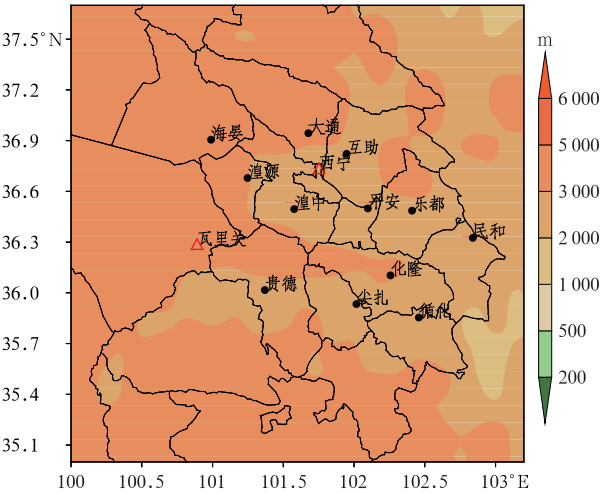


图 1 青海省河湟谷地观测站位置(圆点), 西宁、瓦里关雷达站位置(三角形)及地形高度(填色)

Fig. 1 Locations of Huhuang Valley Observation Station (solid dot), Xining and Waliguan Radar Stations (triangular) as well as terrain height (colored) in Qinghai Province

2 强降水天气分类

选取 2018—2020 年河湟谷地受低涡切变影响、有暴雨洪涝灾害、直接经济损失在 200 万元以上的短时强降水个例 6 例(表 1),强降水天气主要发生在 6—8 月,大部分个例发生在午后到傍晚。下文研究按照短时强降水天气发生时是否伴随其他强天气,分为强降水 I 型(伴随雷暴大风、冰雹等混合型强对流天气)和强降水 II 型(纯短时强降水为主)两类展开。I 型有 4 例,最多出现 13 站次短时强降水,最大小时雨量为 42 mm,最多伴有 5 站次雷暴大风,最大风速为 $22.7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,产生暴雨洪涝、雹灾、泥石流等灾害。II 型有 2 例,最多出现 15 站次强降水,最大小时雨量为 37.4 mm,主要以暴雨洪涝灾害为主。以 2018 年 7 月 18 日和 8 月 2 日天气过程,以下简称“7·18”和“8·2”天气过程,其灾情重,直接经济损失均在 5000 万元以上,伤亡人数最

表 1 2018—2020 年低涡切变影响下分型典型短时强降水个例实况与灾情

Table 1 Cases and disasters of typical short-term heavy precipitation under the influence of low vortex shear from 2018 to 2020

类型	个例/ 年.月.日	时间 /BT	短时强降 水站次	最大小时 雨量/mm, 发生时间/BT	冰雹/ 站次	雷暴大风站 次,最大风速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	灾害	受灾面积/ hm^2	直接经济 损失/万元	伤亡人数 /人
I 型 (混合型)	2018.7.18	16—20	12	42.0.20	1	5.22.7	暴雨洪涝、雹灾、 泥石流	743.83	9000	伤 3 死 2
	2019.6.21	06—07	2	30.7.07	1		暴雨洪涝	171.34	854.6	无
	2019.7.28	16—20	13	29.8.19	1	3.18.7	暴雨洪涝、雹灾	94.8	245.5	无
	2020.8.5	18—08	8	32.7.21		2.20.5	暴雨洪涝	440.43	446.4	死 1
II 型(纯短 时强降水)	2018.8.2	20—22	3	31.4.21			暴雨洪涝	76	5129	伤 3 死 1
	2019.8.19	16—00	15	37.4.18			暴雨洪涝	6957.38	2272	无

严重,因此将这两次天气过程作为典型研究个例。

强降水 I 型典型代表为“7·18”天气过程,强对流天气集中在午后(16—20 时,图 2a),落区位于河湟谷地的循化、尖扎、民和、化隆等地区域站,伴有 12 站次短时强降水($\geq 20\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$),5 站次雷暴大风($\geq 17.2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 且伴有雷电)以及冰雹天气(冰雹没有出现在测站,但有雹灾),雷暴大风与冰雹天气先于短时强降水发生,其中 1 站次出现 40 mm 以上小时雨量,1 站次达 30 mm 以上,造成循化多个乡镇泥石流和冰雹灾害,经济损失达 9000 万元,因灾死亡 2 人。强降水 II 型典型代表为“8·2”天气过

程,强对流天气出现在夜间(20—22 时,图 2b),落区位于河湟谷地的化隆、循化、尖扎等地区域站,伴有 3 站次短时强降水和雷电天气,其中小时雨量 30 mm 以上的为 1 站次。两次天气过程均具有雨强较强,短历时,局地性等对流性特征。

3 强降水环流形势和关键环境参数

3.1 两类强对流天气环流形势

500 hPa 低涡切变是强降水 I 型和 II 型的影响

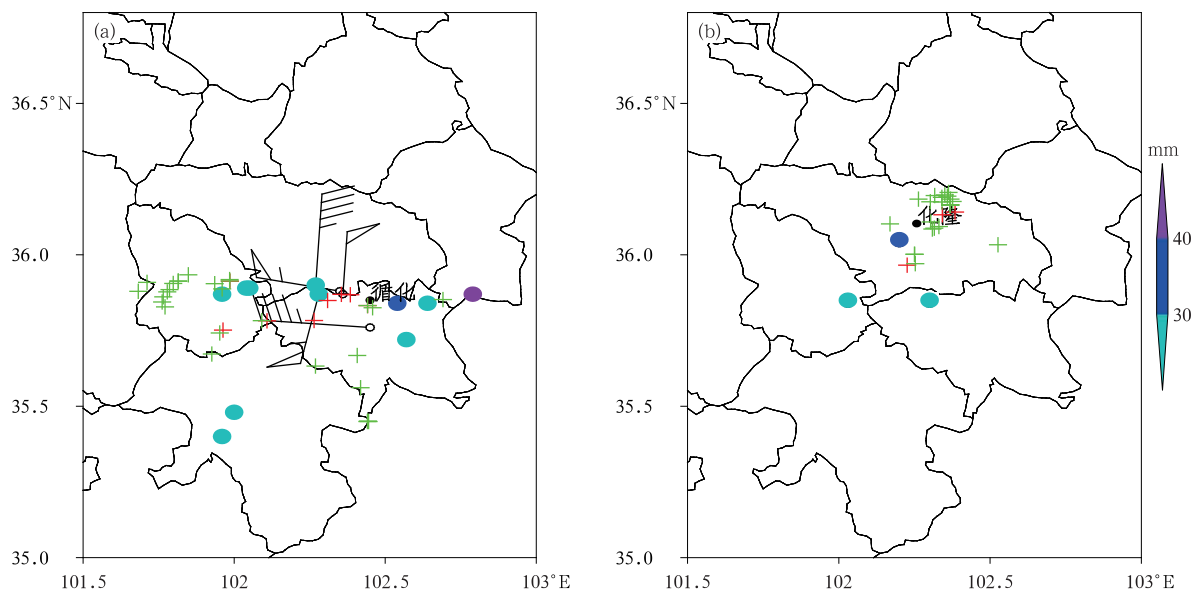


图 2 2018 年(a)7 月 18 日 16—20 时,(b)8 月 2 日 20—22 时闪电观测实况(红加号:正地闪,绿加号:负地闪)和短时强降水(彩色圆点:小时降水量)、雷暴大风(黑色风向杆: $\geq 17 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig. 2 Lightning observations (a) from 16:00 BT to 20:00 BT 18 July and (b) from 20:00 BT to 22:00 BT 2 August 2018 (red plus sign: positive ground flash, green plus sign: negative ground flash) and short-term severe precipitation (color dots: hourly precipitation amount), thunderstorm and gale ($\geq 17 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)

系统,环流形势是西低东高型。河湟谷地湿度条件:I 型 500 hPa 为西南气流($8 \sim 20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$),比湿为 $2 \sim 7 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,700 hPa 上为一致东南风($4 \sim 12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$),比湿为 $9 \sim 12 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。II 型 500 hPa 上为东北气流或者偏南气流($4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$),比湿为 $0 \sim 1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,700 hPa 上西北风或者偏南风($2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$),比湿为 $13 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。两种类型强降水 700 hPa 比湿是关键,产生短时强降水,700 hPa 比湿至少在 $9 \sim 13 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。地面辐合线、地面干线或者地面冷锋对低涡切变类强对流天气起触发和组织作用(表 2)。

强降水 I 型“7·18”天气过程,受副热带高压(以下简称副高)东撤和西南气流的共同影响,500 hPa 低涡切变线移出青海并向东北方向发展,给下游地区造成强降水。强降水 II 型“8·2”天气过程受副高西伸阻挡,低涡切变线没有移出河湟谷地,造成局地短时强降水天气后减弱消失。同样是低涡切变,“7·18”天气过程 12 小时间隔低涡移动趋势(图 3a,3b)可见,副高东撤,高空 400~300 hPa 西北干冷急流是关键,不断补充到低涡北部,引导低涡发展东北行,地面冷锋加强为青海湖锢囚锋,加强了低涡切变的发展。强降水 II 型“8·2”天气过程 12 小时间隔低涡移动趋势图(图 3c,3d)可见,副高西

进,阻挡低涡发展东移,地面冷锋消失,减弱低涡切变的发展(青海河湟谷地平均海拔为 2 300 m,700 hPa 相当于平原边界层 925 hPa,600 hPa 相当于平原 850 hPa,500 hPa 相当于平原 700 hPa)。

3.2 探空形态和关键环境参数

强降水 I 型“7·18”天气过程(图 4a),08 时温湿廓线呈上下开口的“X”型,上干特征与中高层干冷急流卷入有关,整层湿层比较浅薄。强降水 II 型“8·2”天气过程(图 4b),08 时温湿廓线呈上开口的“V”型,上干下湿特征明显,下湿特征主要与中低层暖湿平流对应。

强降水 I 型西宁探空关键参数(表 3),600 hPa 下沉对流有效位能(DCAPE,平均为 $285.5 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$)比强降水 II 型 DCAPE(平均为 $166.3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$)大,说明混合型强天气需要更高的下沉对流有效位能,更容易产生雷暴大风。700 hPa 和 500 hPa 温差($T_{700-500}$)以及 700 hPa 和 400 hPa 温差($T_{700-400}$)能表征静力稳定度,其平均值分别为 16.4°C 和 26.4°C ,明显比强降水 II 型(分别为 14.5°C 和 23.8°C)大,表明强降水 I 型主要反映的是垂直方向温度差动平流造成的热力不稳定,而强降水 II 型反映的是中低层暖平流

表 2 2018—2020 年分型典型短时强降水个例环流形势及影响系统

Table 2 Circulation situation and impact system of typical short-term severe precipitation cases from 2018 to 2020					
类型	个例/ 年.月.日	环流形势	高空系统	地面系统	比湿/($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), 风向,风速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
I 型 (混合型)	2018.7.18	巴尔喀什湖冷涡(5660 gpm, -17°C), 四川、陕西一线副高	低涡切变、 干冷急流	河西走廊冷锋、 地面辐合线、干线	500 hPa:2,SW,12 700 hPa:9,E,4
	2019.6.21	巴尔喀什湖冷槽、青海 北部低压、江南副高	低涡切变	地面辐合线、干线	500 hPa:4,SW,12 700 hPa:9,SE,4
	2019.7.28	贝加尔湖冷涡(5600 gpm, -12°C), 西藏、四川一线副高	低涡切变、西北干冷 急流、西南暖湿急流	地面辐合线、干线	500 hPa:5,SW,20 700 hPa:10,SE,4
	2020.8.5	中西伯利亚冷涡(5680 gpm, -28°C), 青海南部副高	低涡切变	地面辐合线、干线	500 hPa:7,SW,8 700 hPa:12,SE,12
II 型 (纯短时 强降水)	2018.8.2	东西伯利亚低涡(5360 gpm, -28°C)、 副高位于河套以东	500 hPa 低涡切变、 700 hPa 暖低压	冷锋、地面辐合线、干线	500 hPa:0,NE,4 700 hPa:13,NW,2
	2019.8.19	贝加尔湖冷涡(5600 gpm, -20°C)、 新疆横槽、青海南部副高	低涡切变	地面辐合线、干线	500 hPa:1,S,4 700 hPa:13,S,2

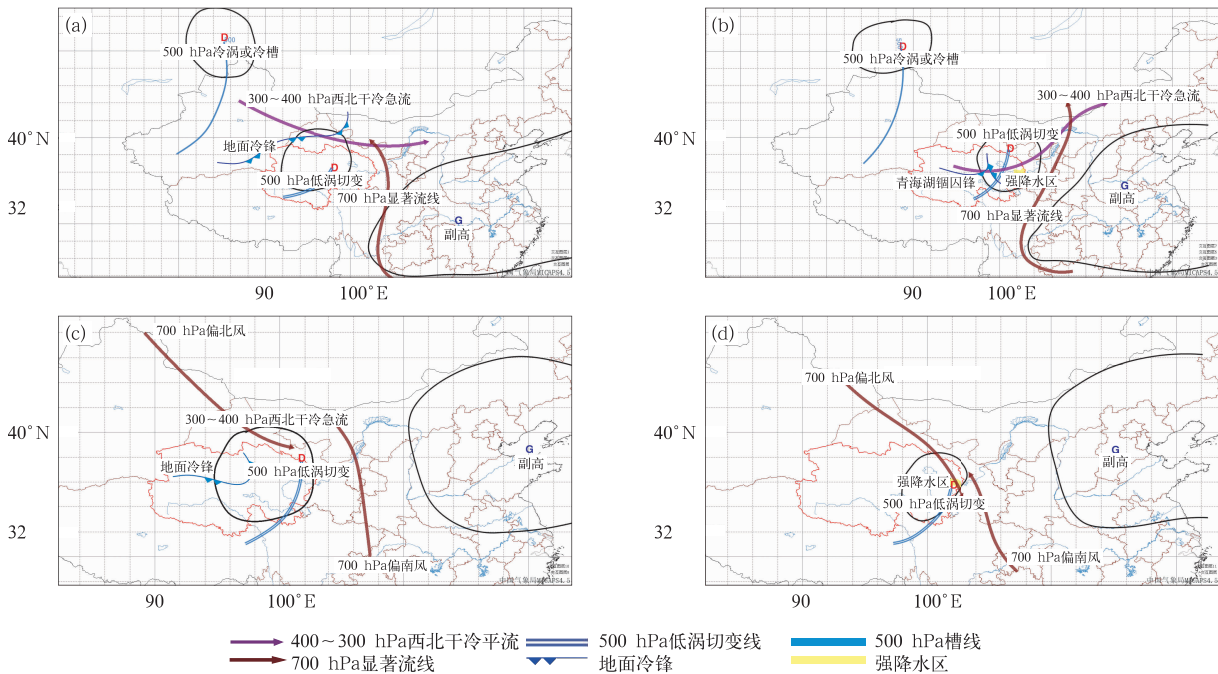


图 3 2018 年 7 月 18 日(a)08 时、(b)20 时, 8 月 2 日(c)08 时、(d)20 时低涡、副高及地面冷锋移动趋势

Fig. 3 The movement trend graphs of low vortex, subtropical high and ground cold front at
(a) 08:00 BT and (b) 20:00 BT 18 July, (c) 08:00 BT and (d) 20:00 BT 2 August 2018

造成的位势不稳定。对流有效位能(CAPE)和垂直风切变是表征雷暴发展强弱,探空形态以及组织化程度的重要参数。0~6 km 垂直风切变(实际减去海拔 2 km,即为 4 km 风切变),强降水 I 型(平均为 $17.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)明显高于强降水 II 型(平均为 $7.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$),另外,强降水 I 型由于高空强冷平流的作用使得 0°C 层和 -20°C 层高度(平均分别为 5689.5 m 和 8876.7 m)比强降水 II 型(平均分别为 5797.5 m 和 9091.0 m)偏低,所以更容易产生冰雹

等混合型强对流天气。强降水 I 型的抬升凝结高度(平均为 686.3 m)比强降水 II 型(平均为 723.0 m)偏低。

总之,强降水 I 型具有较强的高空干冷急流、高的下沉对流有效位能、较高 700 hPa 和 400 hPa 温差以及强的垂直风切变,这些都为强对流发生提供了动力条件,产生的强天气以风雹类为主。而强对流 II 型具有较高的 0°C 层和 -20°C 层高度、较高的抬升凝结高度,产生的强天气以短时强降水为主。

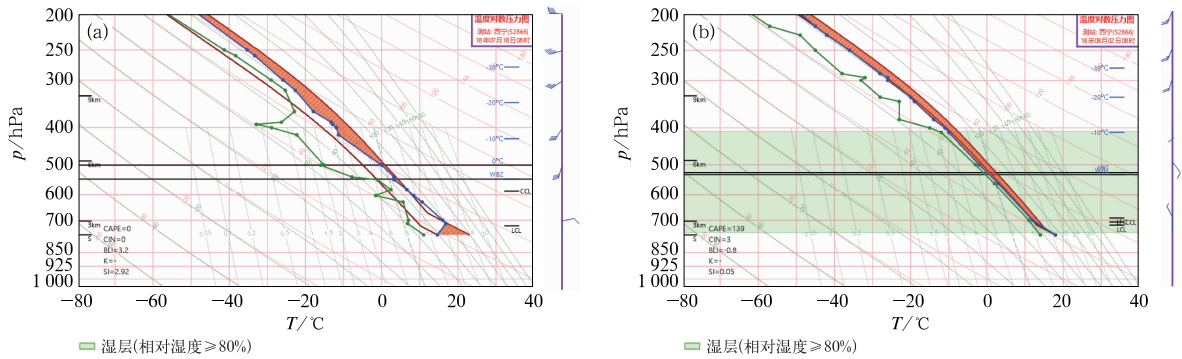


图 4 (a)“7·18”天气过程 08 时(14 时温度 23℃和露点温度 14℃订正)与
(b)“8·2”天气过程 08 时(14 时温度 18℃和露点温度 16℃订正)西宁站探空形态
(红线:温度廓线,绿线:等比湿线,蓝线:湿绝热线)

Fig. 4 The sounding patterns at Xining Station for (a) the 18 July 2018 weather process at 08:00 BT (correction of the 14:00 BT temperature 23℃ and dew point temperature 14℃) and (b) the 2 August 2018 weather process at 08:00 BT (correction of the 14:00 BT temperature 18℃ and dew point temperature 16℃) (red line: temperature profile, green line: isotropic wet line, blue line: wet adiabatic line)

表 3 河湟谷地分型典型天气形势个例发生前西宁站关键对流参数值

Table 3 Values of key convective parameters at Xining Station before the occurrence of two types of typical weather conditions in Hehuang Valley

类型	个例/ 年.月.日	600 hPa 起始下沉 对流有效位能 (J·kg ⁻¹)	温差 T ₇₀₀₋₅₀₀ /℃	温差 T ₇₀₀₋₄₀₀ /℃	对流有效位能 (J·kg ⁻¹)	0~6 km 垂直风切变 (m·s ⁻¹)	抬升凝结 高度/m	0℃层高 度/m	-20℃层 高度/m
	2018.7.18	393.0	16.3	27.9	1082 (14 时订正)	12.4	724.0	5778	8808
强降水Ⅰ型 (混合型)	2019.6.21	314.1	18.5	26.3	900.2 (前一日 20 时)	20.9	642.6	5418	8527
	2019.7.28	97.0	13.3	24.3	889 (14 时订正)	13.6	724.5	5663	8861
	2020.8.5	337.9	17.6	27.2	728(20 时)	23.0	654.3	5899	9311
平均		285.5	16.4	26.4	899.8	17.5	686.3	5689.5	8876.7
强降水Ⅱ型 (纯短时强降水)	2018.8.2	188.0	15.3	23.5	870(20 时)	3.9	711.0	5559	9063
	2019.8.19	144.6	13.6	24.1	1777(14 时订正)	10.1	735.0	6036	9119
	平均	166.3	14.5	23.8	1323	7.0	723.0	5797.5	9091.0

4 中尺度对流云发展演变

4.1 云图特征

强降水Ⅰ型云图特征主要表现为午后发展起来组织化程度高的冷涡云系,TBB 初始中心数值在-45~-35℃,发展阶段 TBB 下降至-75~-40℃。“7·18”强对流天气过程 09 时,水汽图像(略)表现为“T”型“逗点”云系,干涌明显,对应下沉运动,归因于中高层干侵入,与高空西北急流对应,12 时头边界清晰,干冷西北气流对着头边界吹,16 时,

“逗点”云系逐渐发展为“S”型斜压叶状云系,对流云团位于低层西南气流一侧。14 时强降水发生前 500 hPa,青海中部存在低涡切变线(图 5a),切变线北侧 300 hPa 西北气流干侵入(大于 20 m·s⁻¹黑色风向杆)持续补充到低涡北部,南侧为 700hPa 西南气流(大于 16 m·s⁻¹红色风向杆),300 hPa 西北干冷气流和 700 hPa 西南暖湿气流共同持续补充到云系中,维持并加强对流系统发展,河湟谷地 TBB 中心数值在-40℃左右。20 时(图 5b),TBB 中心数值明显下降,云团面积不断扩大,有多个单体组织合并加强,中尺度对流系统沿着西南气流发展成一条线状对流云带,尺度较大,长约为 600 km,宽约为 200 km,

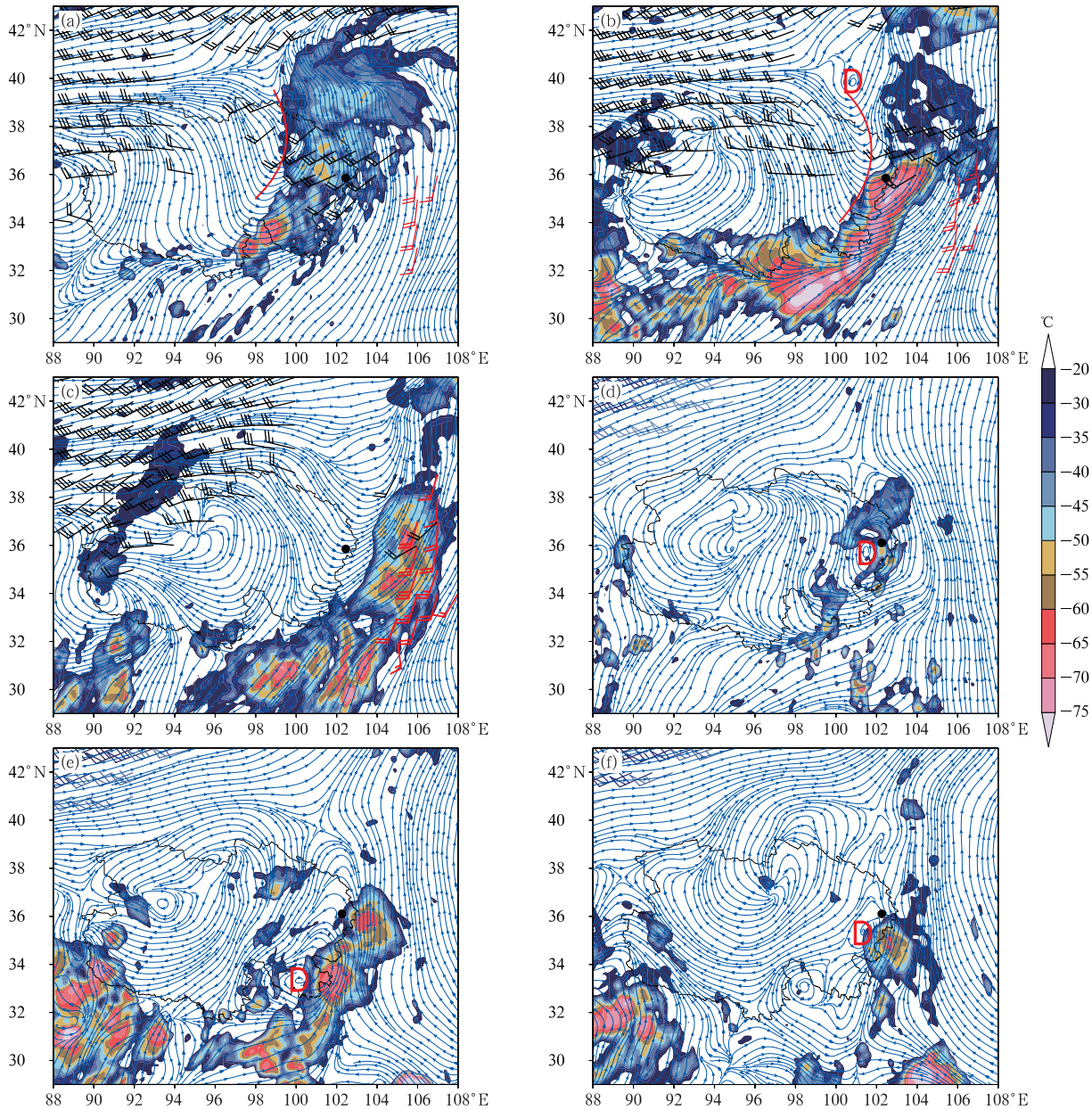


图 5 2018 年 7 月(a)18 日 14 时(初始)、(b)18 日 20 时(发展)、(c)19 日 02 时(消亡),2018 年 8 月 (d)2 日 14 时(初始)、(e)2 日 20 时(发展)、(f)3 日 02 时(消亡)500 hPa 流场及 300 hPa $\geq 20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 大风(黑色风向杆)及 700 hPa $\geq 16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 大风(红色风向杆)与卫星云图分布(填色) (“D”为 500 hPa 低涡中心)

Fig. 5 The 500 hPa flow field and 300 hPa $\geq 20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ wind direction rod (black) and 700 hPa $\geq 16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ wind direction rod (red) and satellite cloud image (colored) distribution at (a) 14:00 BT (initial) and (b) 20:00 BT (developing) 18 July, (c) 02:00 BT (dying) 19 July, and at (d) 14:00 BT (initial) and (e) 20:00 BT (developing) 2 August, (f) 02:00 BT (dying) 3 August 2018 (D: the 500 hPa low vortex center)

属于 α 中尺度对流系统,这一时段对流发展旺盛, TBB 中心数值约在 -75°C ,低涡切变线、高空干侵入以及中低层西南气流三者不断触发 α 中尺度对流系统发展,促使 α 中尺度对流系统组织化程度加强,

给循化地区(黑点)造成短时强降水、冰雹、雷暴大风等剧烈的强对流天气。随后对流单体移速加快,云系东移出境(图 5c),宣告河湟谷地降水结束。
强降水 II 型云图特征主要表现为分散的块状对

流云系, TBB 初始中心数值在 -35°C 左右, 发展阶段 TBB 下降至 $-70\sim-50^{\circ}\text{C}$ 。“8·2”强对流天气过程 14 时强降水发生前 500 hPa(图 5d), 青海河湟谷地受低涡切变影响, 出现分散的 γ 中尺度对流系统, 中心 TBB 达到 -50°C 左右, 20 时, 强降水发生前 1 小时(图 5e), 中尺度对流系统位于西南气流转东南气流暖式切变线且气旋性曲率最大一侧, 偏南气流数值约为 $4\sim 8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 较“7·18”过程明显偏弱, 云团面积较小, 近似圆形, 尺度大约为 200 km, 属于 β 中尺度对流系统, 低涡切变线以及冷暖空气交汇形成的温度锋区和锋生不断触发 β 中尺度对流系统发展, TBB 约在 -60°C 左右, 对流组织化程度较弱, 给化隆地区(黑点)造成短时强降水天气。降水发生后 500 hPa(图 5f), β 中尺度对流系统明显减弱南压, 预示降水减弱。

4.2 中尺度对流触发系统

4.2.1 地面辐合线

在高温、高湿和对流不稳定的环境层结下, 地面辐合线有利于触发对流产生降水(易笑园等, 2011)。图 6 给出了地面风场、35 dBz 初始对流回波轮廓、1 小时降水量以及地形高度叠加。“7·18”过程中, 17 时尖扎地区出现短时强降水($\geq 20\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$, 绿点), 尖扎地区位于山谷迎风坡一侧且地面具有高温高湿条件($T=20^{\circ}\text{C}$, $T_d=13^{\circ}\text{C}$), 大于 35 dBz 初始对流在尖扎西侧发展起来, 吹向尖扎地区的西北风和河谷倒灌的偏东风形成清晰的中尺度地面辐合线(图 6a), 强对流天气首先在地面中尺度辐合线附近发展起来, 并沿着高空西北气流或偏北气流向东南移动。追踪短时强降水的强度和位置演变可以发现, 17—18 时(图 6b), 它们随着中尺度地面辐合线的移动而移动, 二者对应较好, 大于 35 dBz 对流东移加强发展, 回波面积增大, 强降水产生。18—19 时(图 6c), 短时强降水范围扩大, 大于 35 dBz 对流加强合并发展, 组织化程度较强, 降水强度显著增大(2 站次雨强 $\geq 30\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$, 蓝点), 形成一条东西向雨带, 南风加大, 使得中尺度辐合线西段北抬, 整体呈东西向, 形成一条 α 中尺度线状对流系统。19—20 时, 短时强降水随着中尺度辐合线东移(图 6d), 大于 35 dBz 对流分散开, 较强回波中心给下游民和地区造成短时强降水。短时强降水生命史为 4~6 h, 具有短历时特征。“8·2”过程有类似特征, 21 时, 化隆地区出现短时强降水(1 站次雨强

$\geq 30\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$, 蓝点)(图 6e), 化隆地面相对暖湿($T=17^{\circ}\text{C}$, $T_d=13^{\circ}\text{C}$), 大于 35 dBz 对流首先位于山谷迎风坡一侧地面中尺度辐合线南侧发展起来, 随着河谷偏东风倒灌略加强, 中尺度辐合线西进南压影响尖扎地区(图 6f), 造成尖扎地区短时强降水天气, 大于 35 dBz 对流脱离强降水东移减弱。短时强降水生命史为 2~3 h。可见, 地面辐合线与降水中心、降水回波有很好的对应关系, 地面辐合线是造成两次对流降水的主要触发系统。

4.2.2 对流的维持和发展

强降水 I 型 500 hPa 假相当位温在 $344\sim 356\text{ K}$, 垂直速度在 $-0.6\times 10^{-2}\sim 0\text{ hPa}\cdot\text{s}^{-1}$, 700 hPa 假相当位温在 $352\sim 360\text{ K}$, 垂直速度在 $-0.8\times 10^{-2}\sim 0\text{ hPa}\cdot\text{s}^{-1}$ 。图 7a 展示了沿 102.45°E 的假相当位温和垂直速度随高度剖面, 强降水 I 型“7·18”过程 14 时, 强对流天气区循化(35.8538°N , 102.45°E)南侧有假相当位温等值线密集带, 温度锋区明显, 倾斜度大, 垂直伸展到 550 hPa 以上, 假相当位温随高度减少则对流不稳定, 中低层 700 hPa 以下暖中心, 与西南气流造成的暖平流有关, 加之配合强垂直风切变等动力条件触发了循化地区短时强降水、冰雹、雷暴大风等混合型对流天气。

强降水 II 型的 500 hPa 假相当位温为 $352\sim 356\text{ K}$, 垂直速度在 $-0.2\times 10^{-2}\sim 0\text{ hPa}\cdot\text{s}^{-1}$ 。而 700 hPa 相当位温为 $352\sim 364\text{ K}$, 假相当位温远比强降水 I 型大, 垂直速度在 $-0.2\times 10^{-2}\text{ hPa}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右。图 7b 是沿化隆气象站(102.25°E)的剖面, 强降水 II 型“8·2”过程 20 时, 假相当位温密集带在强天气区南侧, 位温锋区发展到 550 hPa, 假相当位温数值较大, 与中低层暖平流对应。由于垂直运动(垂直速度为 $-0.2\times 10^{-2}\text{ hPa}\cdot\text{s}^{-1}$)等动力触发条件不如“7·18”过程显著, 所以假相当位温等热力条件较充足, 触发强降水等强对流天气。

5 数值模式预报偏差探讨

选取“7·18”过程和“8·2”过程两个典型代表个例, 利用全球同化预报系统 ECMWF 和 CMA-GFS 以及中尺度天气数值预报系统 CMA-MESO 三种模式产品的环流形势场、物理量及降水量演变与实况资料进行对比, 初步评估模式的预报能力, 以期为实际业务预报提供一定的参考。

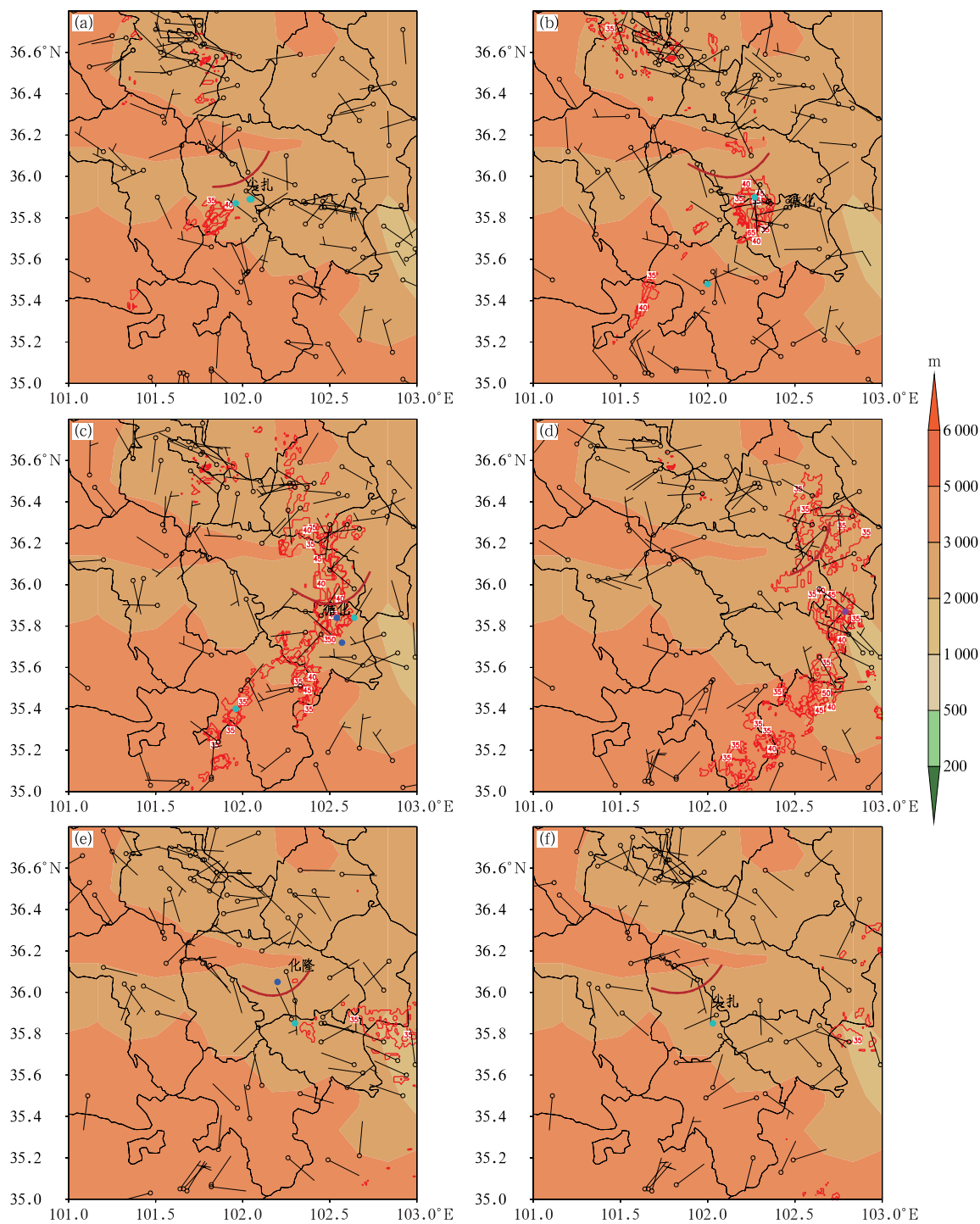


图 6 “7·18”过程(a)16—17 时,(b)17—18 时,(c)18—19 时,(d)19—20 时;“8·2”过程(e)20—21 时,(f)21—22 时地面自动站风场、小时降水量演变与雷达组合反射率拼图(红色线条 >35 dBz)以及地形海拔高度(填色阴影)叠加

(红色实线为中尺度辐合线,蓝点和绿点分别为小时降水量 ≥ 20 mm 和 ≥ 30 mm)

Fig. 6 The wind field of automatic station, the evolution of hourly rainfall and radar composite reflectivity puzzle (red line >35 dBz) and terrain altitude (colored) overlay in the 18 July process at (a) 16:00 BT—17:00 BT, (b) 17:00 BT—18:00 BT, (c) 18:00 BT—19:00 BT, (d) 19:00 BT—20:00 BT, and in the 2 August process at (e) 20:00 BT—21:00 BT, (f) 21:00 BT—22:00 BT (red solid line: mesoscale convergence line, blue dot: hourly precipitation ≥ 20 mm, green dot: hourly precipitation ≥ 30 mm)

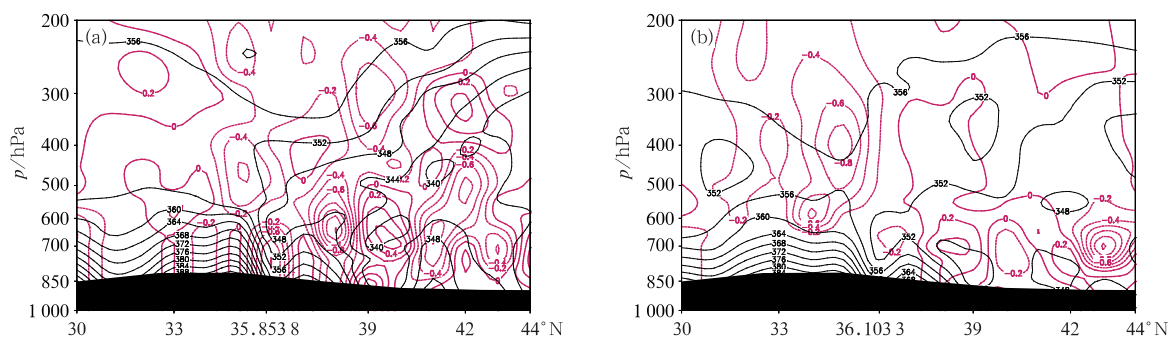


图 7 2018 年(a)7 月 18 日 14 时循化沿 102.45°E, (b)8 月 2 日 20 时化隆沿 102.25°E 的假相当位温(黑线, 单位:K)和垂直运动(红线, 单位: $10^{-2} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-1}$)垂直剖面
(阴影为地形)

Fig. 7 Vertical section of pseudo-equivalent potential temperature (black line, unit: K)
and vertical motion (red line, unit: $10^{-2} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-1}$)

(a) Xunhua along 102.45°E at 14:00 BT 18 July, (b) Hualong along 102.25°E at 20:00 BT 2 August 2018
(The shaded area is the terrain)

5.1 500 hPa 高度场预报稳定性对比检验

用三种模式预报 7 月 17 日 20 时起报 12 h 时效至 18 日 08 时 500 hPa 高度场并与实况对比(图 8a), 基本都能准确模拟出影响此次降水过程的两个重要的影响系统: 东西伯利亚冷涡和副高 5880 gpm 的位置和强度。三种模式均对青海腹地的 5800 gpm 位势高度模拟出一个闭合环流, 刻画与实况略有偏差。17 日 20 时起报 24 h 时效的 18 日 20 时(图略), 新疆北部低涡东移, 三种模式都能反映这个趋势, 副高 5880 gpm 线位置也比较一致, 但对于直接影响青海的 5840 gpm 的位置, 两家全球

模式 ECMWF 和 CMA-GFS 更接近实况, 5840 gpm 的位置直接影响青海地区暖平流及热力和水汽输送, 影响降水的强度。“8·2”过程也有类似情况, 用三种模式预报 8 月 1 日 20 时起报 24 h 时效至 2 日 20 时 500 hPa 高度场与实况对比(图 8b), 三种模式虽对 5880 gpm 副高位置与实况较接近, 但对于直接影响青海水汽、热力、能量的 5840 gpm 略有偏差。两个过程当日 08 时起报 12 h 时效相较前一日 20 时起报的形势场预报略接近实况(图略), 简言之, 模式形势场预报, 全球同化系统相比中尺度天气数值预报系统更具优势, 当日 08 时起报比前一日 20 时起报略具优势。

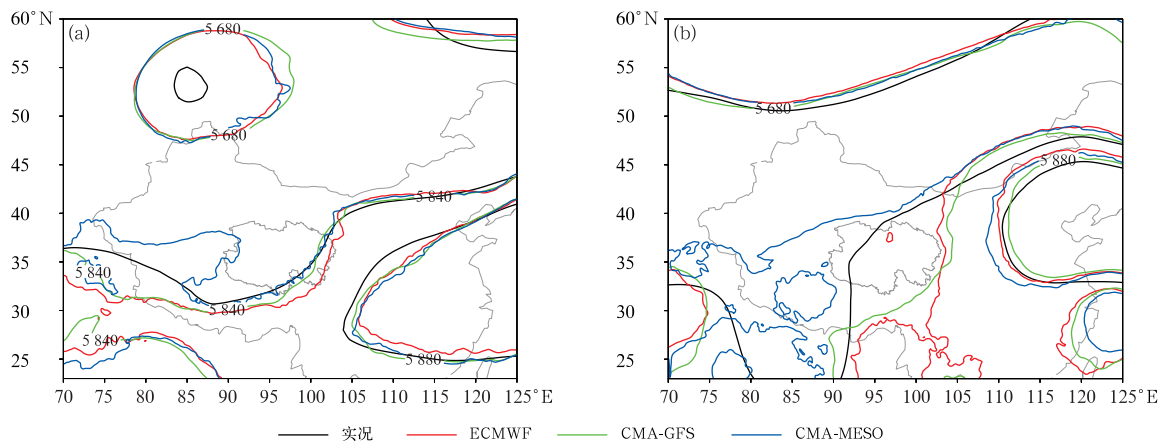


图 8 三种模式预报的 2018 年(a)7 月 18 日 08 时, (b)8 月 2 日 20 时
500 hPa 位势高度场(单位:gpm)与实况对比

Fig. 8 Comparison between the observation and the 500 hPa geopotential height field (unit: gpm) predicted
by the three models at (a) 08:00 BT 18 July and (b) 20:00 BT 2 August 2018

5.2 500 hPa 流场预报稳定性对比检验

500 hPa 低涡切变是两类强降水过程的直接影响系统,对于低涡切变刻画的准确与否直接影响降水落区与强度。7月17日20时起报的12h时效的ECMWF(红线)和CMA-MESO(蓝线)降水发生前7月18日08时青海中部的低涡环流位置与实况较为接近(图9a),20时副高东撤,引导低涡切变东北移动发展,同理,ECMWF和CMA-MESO模式对于河湟谷地低涡切变的强度和位置刻画较为准确(图略),ECMWF相较CMA-MESO模式更接近实况。8月2日20时亦然,副高西进,阻挡低涡切变的发展东移,原地生消,ECMWF和CMA-MESO两家模式准确描述了低涡切变的生消状态(图9b),相较之下,ECMWF模式更接近实况,更具有优势,CMA-GFS模式对于低涡切变的预报效果较差(线条略)。

5.3 物理量检验

5.3.1 比湿

前面基于相似历史个例的两类强降水对应的对流潜势和对流参数进行了对比分析。700 hPa 比湿是造成青海河湟谷地短时强降水的重要条件。实况河湟谷地7月18日08时700 hPa比湿达到 $9\text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (图10a),ECMWF达到 $11\text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (图10b),CMA-GFS和CMA-MESO分别达到 $10\text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (图10c,10d),CMA-MESO位置偏南。ECMWF和CMA-GFS位置略偏北,三种模式对700 hPa比湿

预报较好。8月2日20时实况为河湟谷地700 hPa比湿达到 $12\text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (图10e),ECMWF(图10f)和CMA-MESO模式(图略)的700 hPa比湿预报较好,CMA-GFS数值略偏大(图略)。

5.3.2 对流有效位能

对流有效位能(CAPE)是反映两类强降水不同类型的参数。强降水过程也是对流有效位能消耗的过程。探空图上7月18日14时,西宁站CAPE为 $1082\text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,ECMWF模式模拟14时西宁的CAPE达 $728\text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,17时强降水开始发生时,CAPE为 $1116\text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ (图11a),20时强降水结束,CAPE消耗为 $138.25\text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ (图11b),ECMWF模式能较好模拟出强降水过程对流有效位能的积累和消耗过程,数值与实况较为接近。CMA-GFS虽对西宁站的CAPE模拟数值偏小,但对循化站CAPE模拟较好,14时达 $1448.9\text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,17时为 $1581.1\text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ (图11c),20时为 $1411.1\text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ (图11d),对强降水有较好的指示意义。而CMA-MESO对流有效位能预报不具参考性(图略)。探空图上8月2日20时,西宁CAPE为 $870\text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,ECMWF模式模拟20时西宁CAPE仅为 $193\text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ (图11e),23时强降水结束,CAPE消耗为 $86.5\text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ (图11f),ECMWF模式在此次降水过程中不能模拟出强降水过程对流有效位能的真实状态,数值严重偏低。CMA-GFS预报CAPE偏西,对河湟谷地CAPE没有模拟能力(图略),同样,CMA-MESO对流有效位能预报不具参考性。

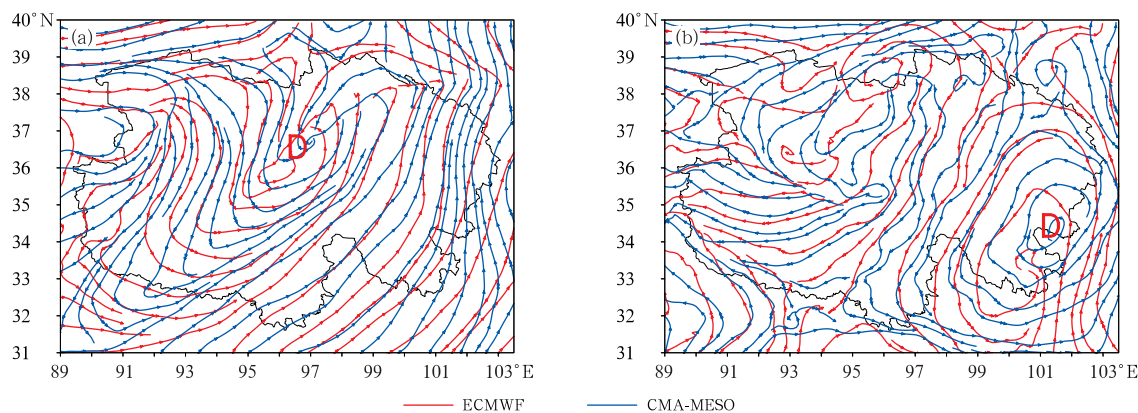


图9 两种模式预报的2018年(a)7月18日08时,(b)8月2日20时500 hPa流场
(“D”为实况低涡位置)

Fig. 9 The 500 hPa flow field predicted by the two models at (a) 08:00 BT 18 July 18
and (b) 20:00 BT 2 August 2018
(D: the actual low vortex position)

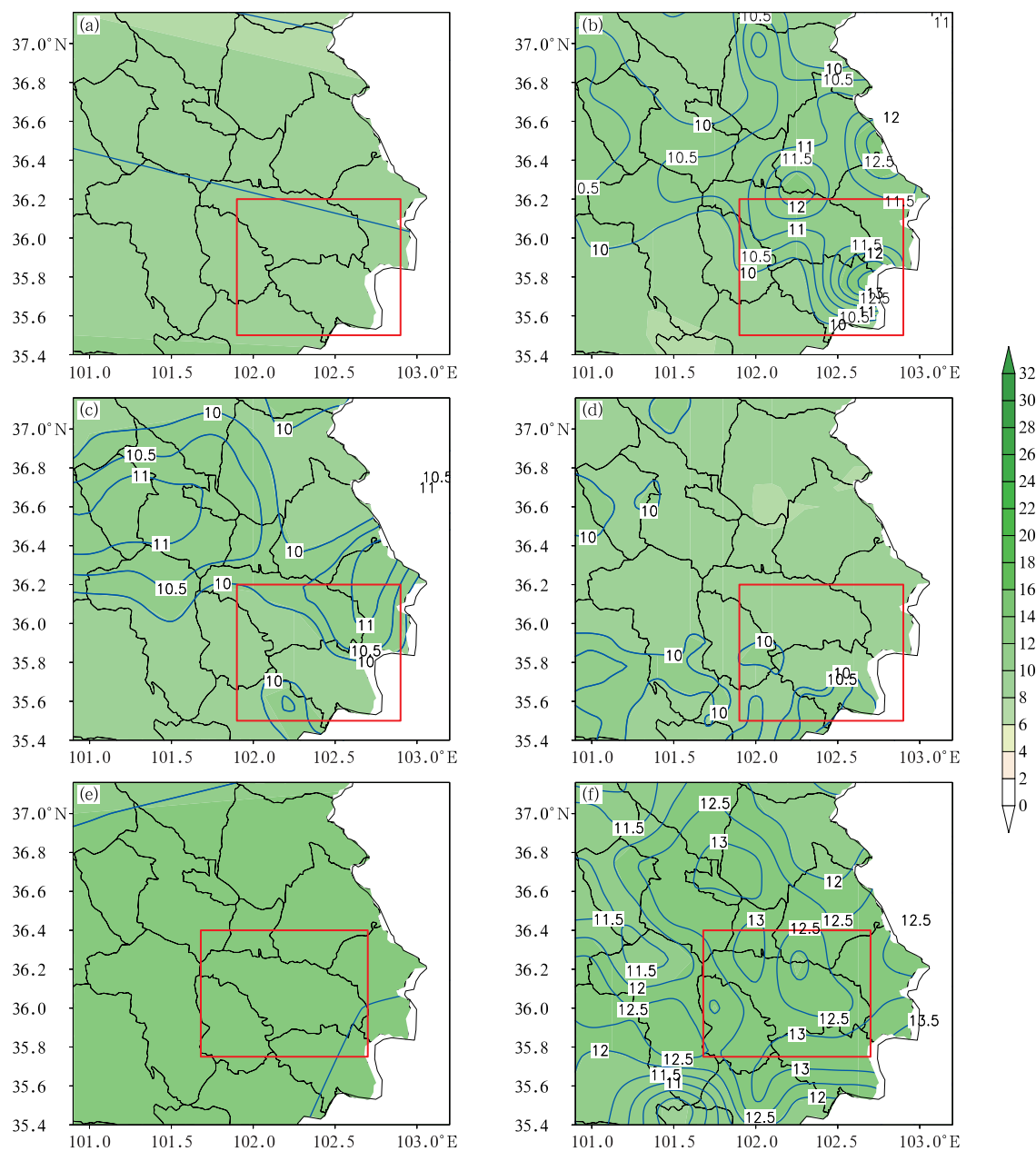


图 10 2018 年 7 月 18 日 08 时(a)实况,(b)ECMWF,(c)CMA-GFS,(d)CMA-MESO 700 hPa 比湿场,
8 月 2 日 20 时(e)实况,(f)ECMWF 700 hPa 比湿场
(等值线和填色为比湿,单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$;红框为强降水区域,下同)

Fig. 10 700 hPa specific humidity field at 08:00 BT 18 July: (a) observation, (b) ECMWF,
(c) CMA-GFS, (d) CMA-MESO; 700 hPa specific humidity field at 20:00 BT 2 August
2018: (e) observation, (f) ECMWF 700 hPa

(contour and colored: specific humidity, unit: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$; red box: severe precipitation area, the same as below)

5.4 降水不确定性检验

7 月 18 日 17—20 时,短时强降水实况降水出现在河湟谷地黄河流域(图 12a),累计降水量最大

为 42 mm,4 站次超 30 mm,11 站次超 20 mm,7 月 17 日 20 时起报,三家模式降水与实况对比,范围明显偏大,中心位置偏北偏西,河湟谷地量级偏小。对于短时强降水降水强度,中尺度天气预报系统

CMA-MESO(图 12d) 相较全球同化预报系统 EC-MWF 和 CMA-GFS 两家模式略有优势,中心略有体现。8 月 2 日 20—23 时,8 月 1 日 20 时起报 3 h 累计降水量(图 12e),1 站次超 30 mm,7 站次超

20 mm,三家模式预报范围和量级严重偏大,而中尺度天气数值预报系统 CMA-MESO(图 12h)在降水预报方面略具有优势。

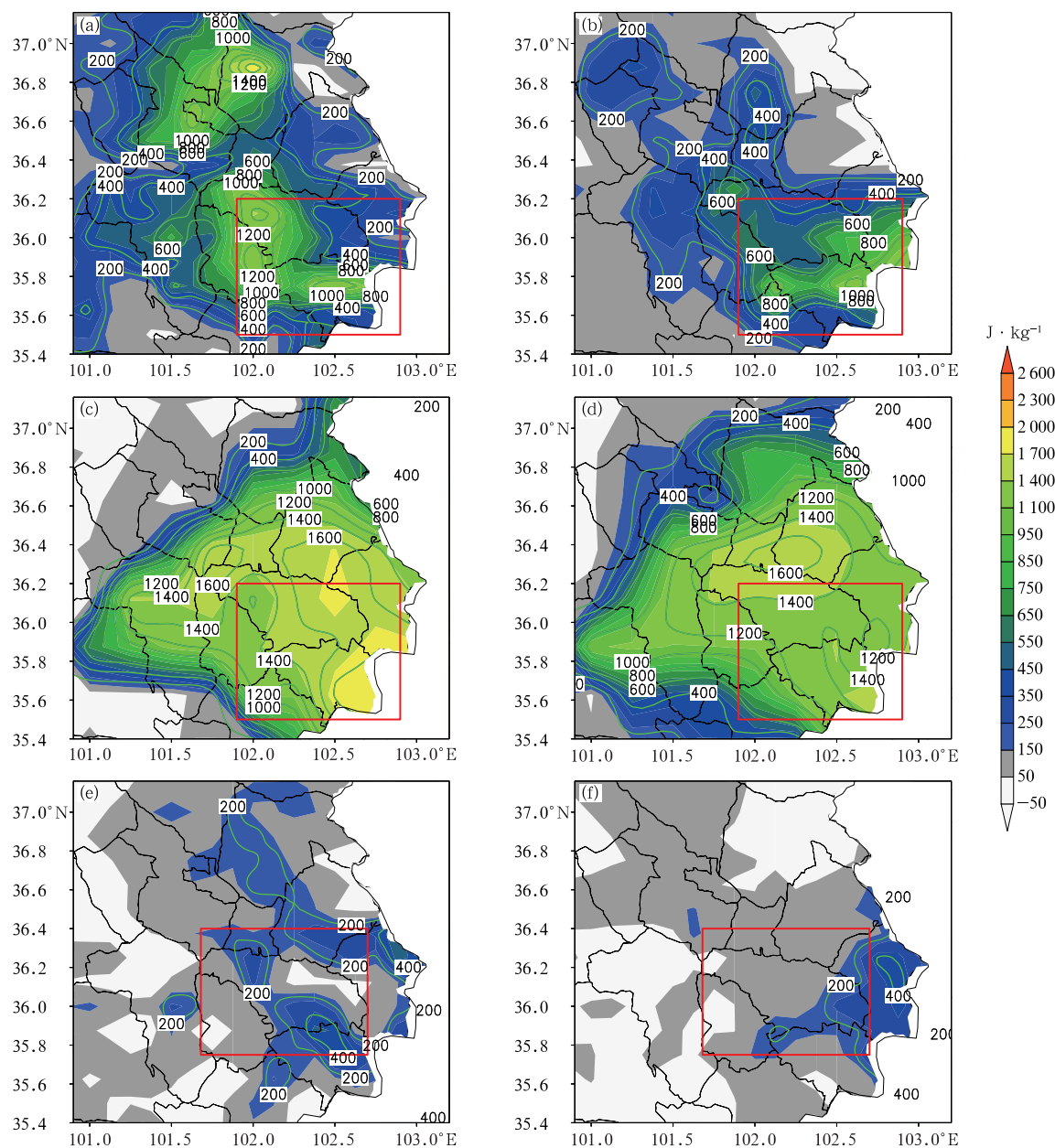


图 11 2018 年 7 月 18 日 ECMWF(a)17 时,(b)20 时,CMA-GFS(c)17 时,(d)20 时的对流有效位能,以及 8 月 2 日 ECMWF(e)20 时,(f)23 时的对流有效位能(等值线和填色)

Fig. 11 Convection effective potential energy (contour and colored) of ECMWF at (a) 17:00 BT and (b) 20:00 BT 18 July, CMA-GFS at (c) 17:00 and (d) 20:00 BT 18 July, ECMWF at (e) 20:00 BT and (f) 23:00 BT 2 August 2018

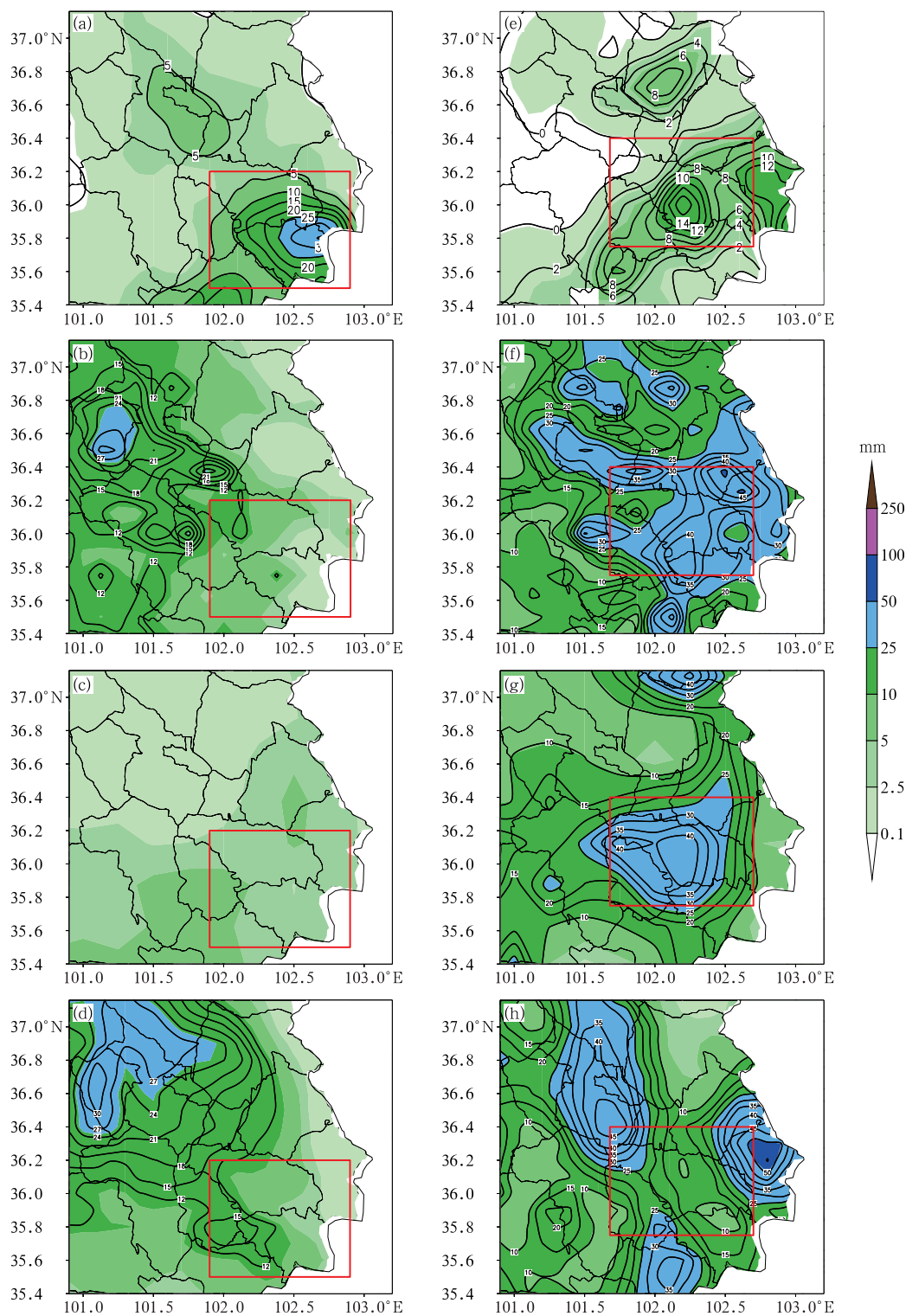


图 12 2018 年 7 月 18 日 17—20 时 (a) 实况, (b) ECMWF, (c) CMA-GFS, (d) CMA-MESO 的
3 h 累计降水量; 8 月 2 日 20—23 时 (e) 实况, (f) ECMWF, (g) CMA-GFS,
(h) CMA-MESO 的 3 h 累计降水量 (等值线和填色)

Fig. 12 The 3 h accumulated precipitation (contour and colored) from 17:00 BT to 20:00 BT 18 July 2018;
(a) observation, (b) ECMWF, (c) CMA-GFS, (d) CMA-MESO; 3 h accumulated precipitation from
20:00 BT to 23:00 BT 2 August 2018; (e) observation, (f) ECMWF, (g) CMA-GFS, (h) CMA-MESO

6 结论与讨论

对比分析近三年低涡切变影响下河湟谷地两类强降水Ⅰ型和Ⅱ型环流形势、关键环境参数、中尺度对流云发展演变特征、触发系统及模式预报偏差等方面得出以下结论:

(1)强降水Ⅰ型典型代表“7·18”过程副高东撤,400~300 hPa高空冷平流入侵促使低涡切变系统加强东移,地面冷锋发展在河湟谷地形成锢囚锋;强降水Ⅱ型典型代表“8·2”过程受副高西进阻挡,低涡切变系统和地面冷锋减弱消失影响。

(2)强降水Ⅰ型具有较强的高空干冷急流、高的下沉对流有效位能,较高的700 hPa和400 hPa温差以及强的垂直风切变均为强对流发生提供了动力条件,产生的强天气以风雹类为主。而强对流Ⅱ型具有较高的0℃层和-20℃层高度、较高的抬升凝结高度,产生的强天气以短时强降水为主。

(3)强降水Ⅰ型云图特征主要表现为午后发展起来组织化程度高的冷涡云系,TBB初始中心数值在-45~-35℃,发展阶段的TBB下降至-75~-40℃,“7·18”过程云图特征主要表现为“S”型斜压叶状云系发展为线状 α 中尺度对流系统,高空干侵入以及中低层西南气流作用下不断触发 α 中尺度对流系统发展。强降水Ⅱ型云图特征属于 β 中尺度对流系统,低涡切变线以及冷暖空气交汇形成的温度锋区和锋生不断触发 β 中尺度对流系统发展。

(4)地面辐合线与降水中心、降水回波有很好的对应关系,地面辐合线是两次对流降水的主要触发系统。强降水Ⅱ型700 hPa假相当位温远比强降水Ⅰ型大。

(5)全球同化预报系统ECMWF和CMA-GFS以及中尺度天气数值预报系统CMA-MESO三种模式基本都能准确模拟出两个重要的影响系统即东西伯利亚冷涡和副高5880 gpm的位置和强度;ECMWF和CMA-MESO两家模式准确描述了低涡切变的生消演变状态,相较之下,ECMWF模式更接近实况,更具有优势;三种模式700 hPa比湿预报较好;ECMWF模式能较好模拟出“7·18”过程对流有效位能的积累和消耗过程,数值与实况较为接近。三种模式降水与实况对比,范围明显偏大,中心位置偏北偏西,河湟谷地量级偏小,而中尺度天气数值预报系统CMA-MESO在降水预报方面略具有优势。

本文选取近三年青海河湟谷地低涡切变影响下两类强降水个例,在环流形势、关键环境参数、中尺度对流云发生演变特征、触发系统以及数值预报模式偏差对比方面有了初步的认识,在相同环流背景下造成强对流天气的类型以及降水落区和强度有明显差异,但低涡切变影响下的河湟谷地强降水个例数量明显比平原少,强降水特征也不明显,因此很难选择大量的样本个例进行验证。另外由于青藏高原地形的影响,模式预报具有较大的偏差,河湟谷地低涡切变影响下强降水定点量化预报对预报员有较大的挑战性,下一步将通过对比其他环流形势如副高影响下河湟谷地强降水个例,深入研究不同环流背景产生强降水的中尺度系统的触发和维持机制等科学问题。

致谢:感谢中国气象局数值预报中心和海南省气象台提供的模式资料数据。

参考文献

- 蔡雪薇,谌芸,沈新勇,等,2018.冷涡对两类对流系统结构演变作用的个例模拟对比分析[J].气象,44(6):790-801. Cai X W, Chen Y, Shen X Y, et al, 2018. Comparative simulation analysis of the effect of cold vortex on structural evolution of two types of mesoscale convective systems[J]. Meteor Mon, 44(6): 790-801 (in Chinese).
- 狄潇泓,王小勇,肖玮,等,2018.高原边坡复杂地形下短时强降水的云型特征分类[J].气象,44(11):1445-1453. Di X H, Wang X Y, Xiao W, et al, 2018. Cloud features classification of short-time heavy rainfall in complex topography of plateau slope[J]. Meteor Mon, 44(11): 1445-1453 (in Chinese).
- 樊李苗,俞小鼎,2013.中国短时强对流天气的若干环境参数特征分析[J].高原气象,32(1):156-165. Fan L M, Yu X D, 2013. Characteristic analyses on environmental parameters in short-term severe convective weather in China[J]. Plateau Meteor, 32(1): 156-165 (in Chinese).
- 方翀,毛冬艳,张小雯,等,2012.2012年7月21日北京地区特大暴雨中尺度对流条件和特征初步分析[J].气象,38(10):1278-1287. Fang C, Mao D Y, Zhang X W, et al, 2012. Analysis on the mesoscale convective conditions and characteristics of an extreme torrential rain in Beijing on 21 July 2012[J]. Meteor Mon, 38(10): 1278-1287 (in Chinese).
- 顾清源,师锐,徐会明,2010.移出与未移出高原的两类低涡环流特征的对比分析[J].气象,36(4):7-15. Gu Q Y, Shi R, Xu H M, 2010. Comparison analysis of the circulation characteristics of Plateau vortex moving out of and not out of the Plateau[J]. Meteor Mon, 36(4): 7-15 (in Chinese).
- 黄艳,俞小鼎,陈天宇,等,2018.南疆短时强降水概念模型及环境参数分析[J].气象,44(8):1033-1041. Huang Y, Yu X D, Chen T Y, et al, 2018. Analysis of conceptual models and ambient

- parameter of short-time severe rainfall in South Xinjiang[J]. Meteor Mon, 44(8):1033-1041(in Chinese).
- 马素艳, 伊娜娜, 赵斐, 等, 2019. 阻塞形势下内蒙古东南部地区一次冷涡暴雨过程水汽特征分析[J]. 气象与环境学报, 35(2):1-8.
- Ma S Y, Yi N N, Zhao F, et al, 2019. Characteristics of water vapor during a cold-vortex rainstorm event under blocking situation in southeastern Inner Mongolia[J]. J Meteor Environ, 35(2):1-8(in Chinese).
- 马晓玲, 李德帅, 胡淑娟, 2020. 青海地区雷暴、冰雹空间分布及时间变化特征的精细化分析[J]. 气象, 46(3):301-312.
- Ma X L, Li D S, Hu S J, 2020. Refined analysis of spatio-temporal characteristics of thunderstorm and hail over Qinghai Province[J]. Meteor Mon, 46(3):301-312(in Chinese).
- 曲晓黎, 段宇辉, 秦宝国, 等, 2011. 河北省中南部一次 MCC 造成的暴雨过程分析[J]. 干旱气象, 29(1):69-74.
- Qu X L, Duan Y H, Qin B G, et al, 2011. Analysis of a rainstorm process caused by MCC in mid-south of Hebei Province[J]. J Arid Meteor, 29(1):69-74(in Chinese).
- 师锐, 何光碧, 2018. 移出高原后长生命史高原低涡在不同移动路径下的大尺度环流特征及差异[J]. 气象, 44(2):213-221.
- Shi R, He G B, 2018. Comparison analysis of circulation features of different moving tracks of long-life-cycle plateau vortexes moving out of the plateau[J]. Meteor Mon, 44(2):213-221(in Chinese).
- 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 J S, He N, Guo R, et al, 2013. The configuration change and train effect mechanism of multi-cell storms[J]. Chin J Atmos Sci, 37(1):137-148(in Chinese).
- 唐文苑, 周庆亮, 刘鑫华, 等, 2017. 国家级强对流天气分类预报检验分析[J]. 气象, 43(1):67-76.
- Tang W Y, Zhou Q L, Liu X H, et al, 2017. Analysis on verification of national severe convective weather categorical forecast[J]. Meteor Mon, 43(1):67-76(in Chinese).
- 田付友, 郑永光, 张涛, 等, 2017. 我国中东部不同级别短时强降水天气的环境物理量分布特征[J]. 暴雨灾害, 36(6):518-526.
- Tian F Y, Zheng Y G, Zhang T, et al, 2017. Characteristics of environmental parameters for multi-intensity short-duration heavy rainfalls over East China[J]. Torr Rain Dis, 36(6):518-526(in Chinese).
- 王宝鉴, 孔祥伟, 傅朝, 等, 2016. 甘肃陇东南一次大暴雨的中尺度特征分析[J]. 高原气象, 35(6):1551-1564.
- Wang B J, Kong X W, Fu Z, et al, 2016. Analysis on mesoscale characteristics of a rainstorm process in southeastern Gansu[J]. Plateau Meteor, 35(6):1551-1564(in Chinese).
- 王迪, 牛淑贞, 曾明剑, 等, 2020. 河南省分类强对流环境物理条件特征分析[J]. 气象, 46(5):618-628.
- Wang D, Niu S Z, Zeng M J, et al, 2020. Analysis on the characteristics of environmental and physical conditions for the classified severe convections in Henan Province[J]. Meteor Mon, 46(5):618-628(in Chinese).
- 王田寿, 李生辰, 2007. 青海省短时强降水(强暴雨)特征分析[J]. 青海科技, 14(4):17-20.
- Wang T S, Li S C, 2007. Analysis on characteristics of short-term heavy rainfall (heavy rainstorm) in Qinghai Province[J]. Qinghai Sci Technol, 14(4):17-20(in Chinese).
- 杨新林, 孙建华, 鲁蓉, 等, 2017. 华南雷暴大风天气的环境条件分布特征[J]. 气象, 43(7):769-780.
- Yang X L, Sun J H, Lu R, et al, 2017. Environmental characteristics of severe convective wind over South China[J]. Meteor Mon, 43(7):769-780(in Chinese).
- 易笑园, 李泽椿, 姚学祥, 等, 2011. 一个锢囚状中尺度对流系统的多尺度结构分析[J]. 气象学报, 69(2):249-262.
- Yi X Y, Li Z C, Yao X X, et al, 2011. An analysis of the multi-scale structure and evolution of a meso-scale occluding convective system[J]. Acta Meteor Sin, 69(2):249-262(in Chinese).
- 喻谦花, 郑士林, 吴蓉, 等, 2016. 局部大暴雨形成的机理与中尺度分析[J]. 气象, 42(6):686-695.
- Yu Q H, Zheng S L, Wu Z, et al, 2016. The forming mechanism and mesoscale analysis of local heavy rainfall[J]. Meteor Mon, 42(6):686-695(in Chinese).
- 郁淑华, 高文良, 2019. 移出与未移出青藏高原的高原低涡涡源区域的地面加热特征分析[J]. 高原气象, 38(2):299-313.
- Yu S H, Gao W L, 2019. Characteristics of surface land heating in the Qinghai-Tibetan Plateau vortex source regions along with the departure plateau vortex and non-departure plateau vortex[J]. Plateau Meteor, 38(2):299-313(in Chinese).
- 赵渊明, 漆梁波, 2021. 短时强降水概率预报的多模式集成技术研究[J]. 气象, 47(5):529-538.
- Zhao Y M, Qi L B, 2021. Multi-model integration technology for probabilistic forecasting of short-time severe rainfall[J]. Meteor Mon, 47(5):529-538(in Chinese).
- 朱平, 俞小鼎, 2019. 青藏高原东北部一次罕见强对流天气的中小尺度系统特征分析[J]. 高原气象, 38(1):1-13.
- Zhu P, Yu X D, 2019. Analysis of meso-small scale system characteristics of a rare severe convective weather in the northeast part of Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Plateau Meteor, 38(1):1-13(in Chinese).
- 朱平, 俞小鼎, 王振会, 等, 2019. 青海高原致灾性对流天气时空分布特征[J]. 干旱气象, 37(3):377-383.
- Zhu P, Yu X D, Wang Z H, et al, 2019. Temporal and spatial distribution characteristics of disastrous convective weather over the Qinghai Plateau[J]. J Arid Meteor, 37(3):377-383(in Chinese).
- 朱平, 张国庆, 2015. 祁连山南麓湟水河谷地形云雷达回波特征[J]. 干旱区研究, 32(3):551-564.
- Zhu P, Zhang G Q, 2015. Radar echo characteristics of orographic cloud in Huangshui River-Vale, south of Qilian Mountain[J]. Arid Zone Res, 32(3):551-564(in Chinese).
- Anthes R A, 1990. Recent applications of the Penn state/NCAR mesoscale model to synoptic, mesoscale, and climate studies[J]. Bull Am Meteor Soc, 71(11):1610-1629.
- Corfidi S F, Meritt J H, Fritsch J M, 1996. Predicting the movement of mesoscale convective complexes[J]. Wea Forecasting, 11(1):41-46.
- Doswell III C A, 1987. The distinction between large-scale and mesoscale contribution to severe convection; a case study example[J]. Wea Forecasting, 2(1):3-16.

(本文责编:王蕾)