

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.

# 高原边坡复杂地形下短时强降水的云型特征分类<sup>\*</sup>

狄潇泓<sup>1</sup> 王小勇<sup>2</sup> 肖 玮<sup>1</sup> 赵庆云<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 兰州中心气象台,兰州 730020

<sup>2</sup> 甘肃省公共气象服务中心,兰州 730020

**提 要:** 利用逐时雨量资料、常规高低空观测资料及FY-2卫星云图,对2010—2015年5—9月甘肃省高原边坡复杂地形下76次短时强降水过程个例的天气形势配置及卫星云图演变特征进行统计分析。结果表明,与甘肃省短时强降水过程相关的特征云型共有6类:副热带高压边沿型、逗点云型、冷锋前部型、冷锋尾部与南亚高压东侧叠置型、冷涡后部型、弱冷锋前部椭圆形M $\alpha$ CS型。其中,副热带高压边沿型、冷锋前部型、弱冷锋前部椭圆形M $\alpha$ CS型与低层暖平流强迫有关。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。冷涡后部型是高空冷平流强迫下形成。冷锋尾部与南亚高压东侧叠置型具有较好的预报指示意义。

**关键词:** 短时强降水,云型特征,分类

**中图分类号:** P458, P466

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2018.11.007

## Cloud Features Classification of Short-Time Heavy Rainfall in Complex Topography of Plateau Slope

DI Xiaohong<sup>1</sup> WANG Xiaoyong<sup>2</sup> XIAO Wei<sup>1</sup> ZHAO Qingyun<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Lanzhou Central Meteorological Observatory, Lanzhou 730020

<sup>2</sup> Gansu Meteorological Service Centre, Lanzhou 730020

**Abstract:** Based on the observation data and FY-2 satellite cloud image, statistical analysis is carried out on the configuration of weather situation and the evolution of satellite cloud images of 76 short-time heavy rainfall processes in Gansu Province during May and September of 2010—2015. The results show that there are six kinds of characteristic cloud types, which are related to the short-term heavy rainfall in Gansu Province, including subtropical high edge, comma cloud, front of the cold front, overlay of cold front tail and South Asia high, the back of the cold vortex, elliptic cloud front of the weak cold front. The subtropical high edge, front of the cold front and elliptic cloud front of the weak cold front types, are related to the low level warm advection forcing. The comma cloud and the overlay of cold front tail and east of South Asia types, are mainly affected by strong convergence of warm and cold advectations of high and low levels. The back of the cold vortex type is formed by high altitude cold advection. The overlay of cold front tail and east of South Asia type has better predictive indication.

**Key words:** short-time heavy rainfall, cloud features, classification

<sup>\*</sup> 中国气象局预报员专项(CMAYBY2017-078)和公益性行业(气象)科研专项(GYHY201506006)共同资助

2017年5月17日收稿; 2018年7月5日收修定稿

第一作者:狄潇泓,主要从事西北干旱半干旱地区灾害性天气预报研究. Email: xhdi@sohu.com

## 引言

短时强降水是大气强烈对流产生的灾害性天气中的一类,是在一定的天气尺度环流背景下,各种物理量有利配置,由中尺度天气系统发生发展造成的(丁一汇,2005)。甘肃省处于青藏高原东北侧边坡,是青藏高原向黄土高原的过渡地带,地形复杂,春、夏季节容易产生短时强降水、冰雹等强对流天气,继而引发山洪、泥石流等次生地质灾害,给人民生活带来严重影响。目前天气预报业务中,短时强降水是十分重要、却又十分困难的一个预报对象。长期以来,国内外气象预报和科研人员对短时强降水预报、监测等方面做了许多深入研究,取得了大量成果。张涛等(2013)、蓝渝等(2013)从中尺度对流天气环境场分析,中尺度对流天气过程分析方面介绍了国家气象中心对流天气过程分析规范和支撑技术。许爱华等(2014)从强对流天气形成的三个基本条件出发提出中国中东部强对流天气的五种基本类型。俞小鼎(2013)对短时强降水主观临近预报的主要思路和方法进行综述。许爱华等(2011)对江西省的强对流天气从天气形势和卫星云图演变上提炼出 8 种典型云型特征。韦惠红等(2010)根据湖北省不同季节暴雨发生的天气形势,结合卫星云图上典型暴雨中尺度对流云团的演变特征,建立短时暴雨预报的 5 种卫星云图模型。方翀等(2014)对产生雷暴大风的强对流做了云型分类的工作;苏爱芳等(2013)对河南的短时强降水做了云型分类的工作。近年来,西北地区的学者对短时强降水等强对流天气进行了一些研究,许东蓓等(2015)将西北地区强对流天气的环流形势配置分为高空冷平流强迫、低层暖平流强迫和斜压锋生 3 种类型,并指出 3 种类型均有短时强降水出现,低层暖平流强迫类以短时强降水为主。张之贤等(2013)对西北地区东部短时强降水的时空分布特征进行了分析;付双喜和何金梅(2015)对甘肃短时强降水环境参数特征进行了分析;刘新伟等(2017)对甘肃东部两次短时强降水过程热动力条件进行对比分析。

在强对流,尤其是短时强降水监测预报预警中,卫星云图资料有明显优势(任素玲等,2014;蒋建莹和汪悦国,2014)。汛期,FY-2 卫星双星加密观测模式能提供时间分辨率为 15 min 的云图资料,这对雷达多盲区的高原边坡复杂地形区域意义非凡。本文

根据 2010—2015 年 5—9 月,甘肃省 76 次短时强降水天气个例,根据天气形势系统配置,结合卫星云图云型演变特征,总结提炼出 6 种典型云型特征,为甘肃短时强降水天气的短时预报、预警提供依据。

## 1 资料 and 标准

利用 2010—2015 年 5—9 月,甘肃省 80 个地面观测站和区域站逐小时降水资料,按以下标准定义短时强降水过程。

短时强降水标准:气象站或区域雨量站整点 1 h 雨量  $\geq 20$  mm。

短时强降水天气过程标准:在同一天内(08 至次日 08 时),甘肃省境内出现短时强降水天气现象的站数或次数累积达到 10 站次以上。

2010—2015 年 5—9 月共有 74 次过程符合这一标准,这 74 次过程均发生在高原东北侧边坡地带,即甘肃河东地区;另外有 2 次高原北部边坡;河西走廊干旱区的短时强降水过程,总站数不够 10 站,但发生的地域极端干旱,短时强降水十分罕见,且造成的灾害和影响较大,故也入选短时强降水过程;共计 76 次过程。

文中使用这 76 次短时强降水天气过程的常规高空、地面观测资料、加密区域站逐小时降水资料、地面特殊天气报和 FY-2 卫星云图资料进行分析。

## 2 短时强降水及云图统计特征

在对 76 次短时强降水天气过程卫星云图云型、图像特征进行统计分析的基础上,结合短时强降水的大尺度环流背景,以及与强对流相关的水汽、不稳定条件等因子,将甘肃短时强降水天气云图分为 6 种典型云型特征(表 1)。各种云型出现的时间、落区,与低压槽、切变线、冷锋、副热带高压(以下简称副高)、南亚高压、低空急流等天气系统的位置、强弱和结构,密切相关。

分析地面观测和闪电定位仪资料,发现短时强降水过程一般伴有大范围雷暴出现,少数个例只在降水强中心附近有雷暴。2012 年 6 月 5 日河西西部短时强降水过程比较特殊:没有雷暴和闪电出现,原因分析估计和闪电定位仪位置较远有关。

由表 1 可见,副高边沿型是甘肃省高原边坡最常见的类型,这与我国中东部其他地方类似(王宗敏

等,2014)。它与副高的季节变化有直接关系,在副高西脊点最西最北的 7、8 月间出现。逗点云型是次多的类型,与西风带斜压不稳定发展有关,影响范围可达全省。冷涡后部型是高空冷平流造成的,一般与冰雹、雷暴大风相伴出现,站数不多。另外,冷锋

尾部与南亚高压东侧叠置型与南亚高压有直接关系,在南亚高压西部型时会出现。冷锋前部型与低层暖湿平流强烈发展有关,这种类型在甘肃省较少出现。弱冷锋前椭圆形  $M_{\alpha}CS$  型与弱冷锋前低层低涡强烈发展有关,此类在甘肃省最少出现。

表 1 甘肃省短时强降水典型云型

Table 1 Typical cloud types of short-time heavy rainfall in Gansu

分类	副高边沿型	逗点云型	冷锋尾部与南亚高压东侧叠置型	冷锋前部型	冷涡后部型	弱冷锋前椭圆形 $M_{\alpha}CS$ 型
次数/次	24	14	12	8	14	4
比例/%	31.6	18.4	15.8	10.5	18.4	5.3
月份	7—8 月	5—9 月	7—8 月	5—8 月	6—8 月	7—8 月
落区	陇东南	全省	河东	河东	河东	河东

### 3 短时强降水典型云型特征

#### 3.1 副高边沿型

##### 3.1.1 概念模型

天气形势特征:主要发生在 7—8 月副高最强盛,西脊点最西、最北之时。一般情况,当副高西伸北抬,西脊点达到  $32^{\circ}N$ 、 $110^{\circ}E$  以西以北时,500 hPa 有高空槽东移,槽前到副高西北侧为一致的西南暖湿气流,中低层 700 hPa 切变线更接近副高,切变线前西南风往往能达到低空急流标准,与中低层西南风相伴的是一条由四川盆地伸向甘肃河东的湿舌,中心比湿为  $10 g \cdot kg^{-1}$  以上。垂直结构上,湿层厚度大,湿层往往能达到整个对流层高度,暖云层高度高,自由对流高度(LFC)低,中低层对流不稳定。中低层的暖湿平流有利于对流不稳定能量的释放,并启动抬升运动,是此类的主导因素。

云型特征:对流初生阶段,在副高控制晴空区西北侧,有宽阔的东北—西南向云带东移,云带亮温较高,在 240 K 以上。对流旺盛阶段,在主云带中接近副高晴空区边缘,有形状为团块状或涡度逗点状、尺度为 50~300 km 不等的  $M_{\beta}CS$ 、 $M_{\alpha}CS$  发展、合并,云顶亮温迅速下降,一般在 3~4 h 降至 230 K 以下,短时强降水出现,造成短时强降水的 MCS 生命史较长,持续 4 h 以上。消亡阶段,团块状、逗点状中尺度云团边缘开始模糊,亮温迅速增大至 240 K 以上。

降水特征:7、8 月间在甘肃河东造成大范围短

时强降水,站数一般大于 20 站;雨强强,通常在  $30 mm \cdot h^{-1}$  以上,有时能达到  $60 \sim 70 mm \cdot h^{-1}$ ;持续时间较长,一般在 12 h 以上,当副高较稳定时,短时强降水过程能持续 30 h 以上。

##### 3.1.2 典型个例

2011 年 7 月 28 日短时强降水过程,陇东南和陇中共出现 79 站次短时强降水。28 日 08 时副高西伸、北抬,甘肃河东处在副高西北侧西南气流中,高温高湿,500 hPa 冷槽自西向东移动;700 hPa 上河东比湿在  $8 g \cdot kg^{-1}$  以上,并且有低涡切变形成(图 1a)。同时刻平凉站探空图(略)上可见,大气层结具有对流不稳定性,K 指数为  $35^{\circ}C$ ,沙氏指数(SI)为  $-2.78^{\circ}C$ ,CAPE 为  $137.8 J \cdot kg^{-1}$ 。此次过程 500 hPa 以下偏南风强烈,带来南方暖湿气流,500 hPa 以上为偏西风,将西北方向冷空气向甘肃河东输送,这种结构有利于对流不稳定的加深和持续。良好的水汽、热力条件加上动力辐合抬升,对流强烈发展,形成大范围短时强降水。

在 28 日 05—07 时红外卫星云图上,有一条东北—西南向云带自西向东移至位于陕西到川东的副高控制下晴空区边缘,云带中镶嵌多个块状、带状  $M_{\beta}CS$ 、 $M_{\alpha}CS$ 。08 时(图 1b),云团发展、合并,尤其是平凉西部的云团尺度加大,云顶亮温迅速降低,从 TBB 图上可见与强降水对应的云团 TBB 为 230 K,短时强降水出现在 TBB 小值区的北侧。09 时,云团进一步发展,从川东到平凉西部形成 TBB 的低值带,短时强降水出现在 230 K 线西北段。10—12 时,TBB 的低值带缓慢东移,短时强降水仍出现在其西北侧 230 K 线附近。

### 3.2 逗点云型

#### 3.2.1 概念模型

天气形势特征:大气中低层冷暖空气势均力敌,大气具有明显的斜压性特征,此类常和高空低槽、低涡或气旋联系在一起,是冷暖平流共同作用、锋生的结果。500 hPa 河西走廊有低压槽东移,与之配合的温度槽落后于高度槽,槽后西北风速较大,有时风速 $\geq 20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,冷平流明显。700 hPa 上锋区在 $33^{\circ} \sim 38^{\circ} \text{N}$ ,并和500 hPa 同样具有温度槽落后于高度槽的特点,等温线与等高线的交角更大,槽前西南风带来暖平流自西南向东北输送,700 hPa 比湿一般能达到 $8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,冷暖平流交汇之处,锋生作用加强,锋生作用产生的强烈动力抬升作用在此种类型中最为重要。垂直方向,湿层一般在500 hPa 以下,垂直风切变较大,特别是0~6 km 的风切变是五种类型中最大的。这种类型5—9月均可发生。

云型特征:带来短时强降水的云型特征为大尺度涡度逗点云系的形成、发展。逗点云涡旋中心与低层低涡中心重合,随着低涡的发展移动而变化。云系后部为下沉的西北气流对应的无云区,前部为槽前西南气流,逗点云系处,高空风与等涡度线几乎垂直,为强正平流涡度区,对应强的上升运动,云系稠密。初始阶段逗点云系刚形成,云系各处 TBB 值较大。对流发展旺盛阶段,在正涡度平流最大处,云系强烈发展,形成逗点云系,TBB 在3~4 h 内下降到220 K,短时强降水随之发生。此类云型云顶亮温较低,但持续时间较短,一般持续2~3 h 即减弱消亡。河西走廊干旱区发生的两次极端性短时强降水过程均为这种类型。

降水特征:5—9月可在全省造成范围很大的短时强降水,短时强降水具有持续时间短、强度较大、落区分散的特点,一般持续2~3 h,雨强在 $20 \sim 50 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ,并且一般会伴有冰雹、雷暴大风等其他强对流天气。

#### 3.2.2 典型个例

2013年5月23日午后到夜间,甘肃河东出现大范围强对流天气,多地出现雷暴大风,短时强降水57站,局部地方出现冰雹。500 hPa 蒙古西部有较深低压槽东移,温度槽落后于高度槽,槽后冷平流明显(图2a)。700 hPa 上配合有“人”字型切变,“人”型切变东南侧为偏南风低空急流,暖湿平流显著,湿度较大,比湿在 $8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以上。从武都站探空分

析可以看到,08时环境场特征是“上干下湿”,风垂直切变大,K指数只有 $24^{\circ} \text{C}$ ,SI为 $1.53^{\circ} \text{C}$ ;CAPE也只有 $12 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;20时,高层湿度增大,强风垂直切变持续并增大,K指数增大到 $42^{\circ} \text{C}$ ,SI减小为 $-3.16^{\circ} \text{C}$ ,CAPE增加到 $852 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。冷暖平流势均力敌,冷暖平流交汇之处,锋生作用加强,产生强烈的动力抬升。

23日14时,在红外卫星云图(图2b)上,涡度逗点云系已形成完整的形态,逗点云系出现在500 hPa 较深低压槽前,正涡度平流最大的区域。在涡度逗点云形成后、东移过程中,随着低层涡度增大,逗点云处正涡度平流加大,云系变得稠密,短时强降水正是出现在与逗点云型相对应的正涡度中心附近,正涡度平流最大处。从逐时 TBB 图(略)与短时强降水叠加图可以看到,强降水出现在220 K 线包围区域的西北部。

### 3.3 冷锋前强对流云带

#### 3.3.1 概念模型

天气形势特征:500 hPa 低压槽位置偏北,温度槽落后于高度槽,且比高度槽略深,甘肃省处于冷锋的中部到尾部,对应槽前位置,700 hPa 上西南风强盛,暖平流强且范围较大,甘肃河东大部比湿在 $8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以上,水汽轴处比湿能达 $12 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。强降水主要出现在冷锋前部的暖区中。垂直方向上,强降水区湿层在地面向上2 km 内,大气层结为条件不稳定, $0^{\circ} \text{C}$ 层高度较高,在500 hPa 以上。

云型特征:对流初始阶段,地面冷锋南移时,在低层暖平流区域,冷锋云系的前部晴空区或附近明显的降压中心地方形成较有组织排列的点状、带状,尺度为 $\beta$ 中尺度的对流云系。对流旺盛阶段,上述 $M\beta$ CS 快速发展,约2 h 左右,TBB 即降至220 K 左右,短时强降水出现。此类对流发展迅速,但持续时间较短,2~3 h 即减弱消亡。

降水特征:这一类出现次数最少,在5—8月出现,落区多数在陇中,陇东南偶尔也会出现,站数一般不大于20站,雨强较大,最大在 $40 \sim 50 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ,持续时间较短,一般在12 h 以内。

#### 3.3.2 典型个例

以2013年7月26日为例,陇东、陇南及甘南午后到傍晚有26站出现短时强降水。在26日08时500 hPa 上(图3a),低压槽在河西西部到青海西部,槽前甘肃河东西南风较强,700 hPa 陇中到甘南有

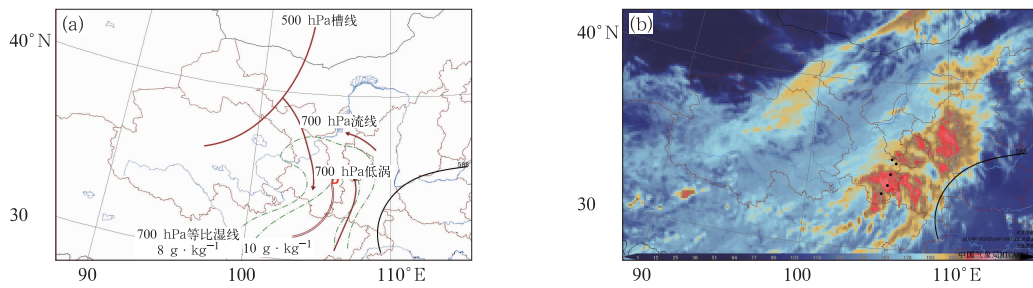


图 1 2011 年 7 月 28 日 08 时天气系统配置(a)及红外云图与短时强降水(b,黑点为短时强降水)

Fig. 1 Weather system configuration (a) and infrared cloud image and short-time heavy rainfall (b, black point; the short-time heavy rainfall) at 08:00 BT 28 July 2011

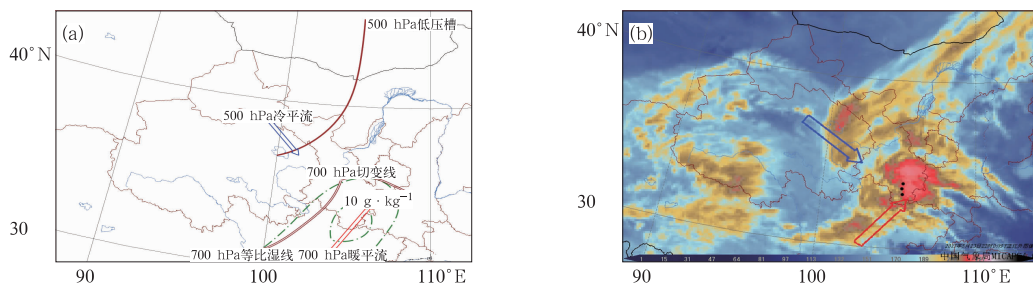


图 2 同图 1, 但为 2013 年 5 月 23 日(a)20 时,(b)14 时

Fig. 2 Same as Fig. 1, but at (a) 20:00 BT, (b) 14:00 BT 23 May 2013

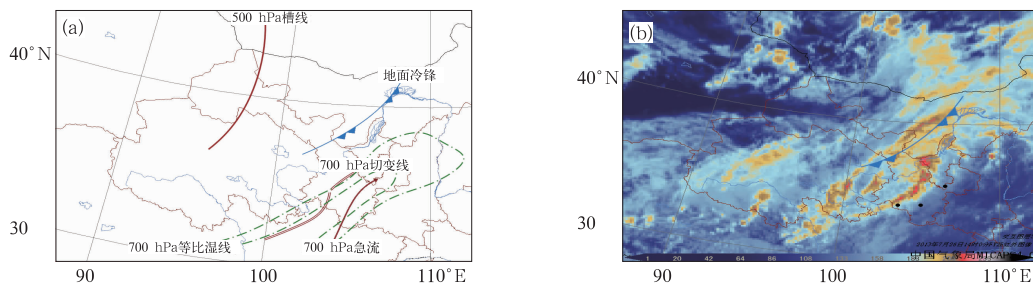


图 3 同图 1, 但为 2013 年 7 月 26 日(a)08 时,(b)14 时

Fig. 3 Same as Fig. 1, but at (a) 08:00 BT, (b) 14:00 BT 26 July 2013

“人”字型切变,其前部陇东南有一支西南风急流,沿西南风急流,有一条比湿大于  $12 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  的湿舌,并且有暖平流向北输送。地面上冷锋在河西东部,强降水区在冷锋前侧低压带中。垂直结构上,近地层具有对流不稳定。冷锋前暖区大尺度上升运动区域中,近地层西南风暖湿急流形成的中小尺度上升运动是导致此类短时强降水的关键因素。

在 26 日红外卫星云图(图 3b)上,冷锋云带东移过程中,其前部暖区中,距冷锋 300 km 处,有尺

度较小、直径为 150 km 左右、属  $M\beta CS$  的块状对流云团组织排列成带状迅速发展,造成多地分散的短时强降水。

### 3.4 冷锋云系尾部与南亚高压东北侧叠加型

#### 3.4.1 概念模型

天气形势特征:当 7—8 月南亚高压在青藏高原上空呈西部型时出现。200~100 hPa 上,南亚高压中心在  $32^{\circ}\text{N}$ 、 $90^{\circ}\text{E}$  附近,甘肃河东处于高压东侧脊

线到其以北5个纬距之内。500 hPa河西走廊有浅槽东移,700 hPa上有较明显的东北—西南向锋区由蒙古到河西,河西走廊冷平流显著。河东700 hPa比湿较大,能达到 $12 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。与高空锋区配合,地面冷锋东移过程中尾部进入南亚高压控制范围东北侧,在热力不稳定和午后热力对流共同作用下,对流发展。

云型特征:清晨至上午,整个高原为晴空或少云区,午后,对流初生,南亚高压外围的青海东部到甘肃甘南出现许多 $\gamma$ 中尺度或 $\beta$ 中尺度块状、团状或逗点状对流云团。此类云型发展迅速,3~4 h后进入对流旺盛阶段,在冷锋云带与南亚高压东北侧重叠位置,中尺度对流云系迅速发展加强,沿南亚高压外围的顺时针气流旋转、合并,形成尺度更大的云团,当云顶TBB降至220 K以下时,相应区域短时强降水开始出现。这类云型对应的TBB值最低,有时可降至200 K以下,持续时间4~5 h,形成的短时强降水日变化明显,一般午后迅速发展,入夜后迅速减弱。

降水特征:这种类型短时强降水甘肃河东各地均可出现,站数一般大于20站,雨强较大,在 $30 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 左右,但范围相对集中,如,陇中出现时,陇东南不会出现,南部出现时,中部、陇东则不出现;强降水一般下午开始,入夜后迅速结束,持续时间在12 h之内,但也有个别个例早晨就开始。

#### 3.4.2 典型个例

2013年7月7日,午后到夜间,甘南、陇南等地出现74站短时强降水。如图4a所示,在7日08时200 hPa上,南亚高压为西部型,中心在 $31^\circ\text{N}$ 、 $87^\circ\text{E}$ ,脊线在 $32^\circ\text{N}$ 附近,甘肃河东上空为西北急流出口区分流区。500 hPa上低压槽在河西中部到青海湖附近,700 hPa上锋区在河西中部,河东有暖式切变,武威以东大部分地方比湿在 $8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以上,陇东南达到 $12 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。地面图上,有一条冷锋经河套西部向甘肃河东延伸,尾部在甘南附近。在武都站08时探空图上(图略),温度曲线表现为条件不稳定,在700 hPa附近有逆温层存在,700 hPa以下为湿层, $0^\circ\text{C}$ 层高度较高,在500 hPa附近,K指数为 $38^\circ\text{C}$ ,SI指数为 $1.54^\circ\text{C}$ ,CAPE为0,6 km以下垂直风切变较小;20时,高层和低层湿度均加大,低层湿层发展到600 hPa, $0^\circ\text{C}$ 层较08时更高,K指数增大到 $42^\circ\text{C}$ ,SI指数减小为 $0.19^\circ\text{C}$ ,CAPE为 $74 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,6 km以下垂直风切变仍然较小。高层强辐

散,低层冷空气的扰动,十分有利于在上述两种条件叠置的区域出现短时强降水。

在7日红外卫星云图(图4b)上,与地面上冷锋对应的云带在河套西部沿黄河到青海东部一线。冷锋东移过程中,尾部进入南亚高压东侧,高空辐散区之下,高层辐散,低层辐合,沿南亚高压东侧, $\gamma$ 中尺度或 $\beta$ 中尺度的团、块状对流云团出现,并在顺时针旋转的过程中迅速加强、合并,云顶亮温降至 $200 \sim 210 \text{ K}$ ,对应低亮温区,短时强降水出现。

### 3.5 冷涡后强对流云型

#### 3.5.1 概念模型

天气形势特征:500 hPa上,河套到蒙古有冷涡打转东移时,温度槽落后于高度槽,且略深于高度槽,一般低压槽后部为西北气流,天气晴好,白天有利于地面增温,当温度槽扫过时,在高空干冷平流影响下,冷槽附近上冷下暖,有利于出现雷暴大风、冰雹、短时强降水等强对流天气。

云型特征:河套到蒙古有冷涡打转时,云图动画可以看到冷涡的涡旋结构。一般午后对流初生,在冷涡后部出现尺度小、形状不规则、分布零散的团块状云团,有规律的沿高空冷槽槽线排列,水汽图像上,高空冷槽后部可见明显的干区东移。这种类型发展最迅速,1~2 h便进入对流旺盛阶段,上述零散的云团迅速强烈发展,TBB降至230 K左右,并沿冷槽组织成对流云带,伴随有短时强降水的强对流天气出现。这类的持续时间亦最短,1~2 h云系减弱消亡。

降水特征:这一类型在6—8月出现,对应的强对流范围大,落区分散,天气多样,多以雷暴大风、冰雹为主,但也会伴随出现站数不如其他类型多的短时强降水,且有明显的日变化。

#### 3.5.2 典型个例

2013年7月31日,陇中于午后到傍晚出现17站次短时强降水,强降水时间集中,并且有冰雹、雷暴大风相伴。如图5a,在31日08时500 hPa高空图上,蒙古中部冷涡发展,低压槽抵达河西东部,温度槽落后在河西西部。700 hPa上切变线在陇东南,陇中为反气旋环流,陇南到陇中比湿为 $8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。地面上,河东为低压控制,早晨到午后增温明显。垂直结构上,大气整层垂直递减率较大,湿度较小; $0^\circ\text{C}$ 高度较低,一般在4~5 km高度;垂直风切变较大。当冷涡旋转,500 hPa河西西部的冷槽迅



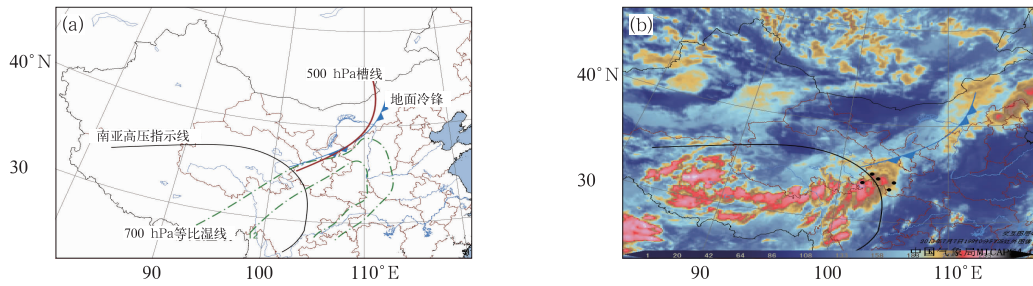


图 4 同图 1, 但为 2013 年 7 月 7 日 20 时  
 Fig. 4 Same as Fig. 1, but at 20:00 BT 7 July 2013

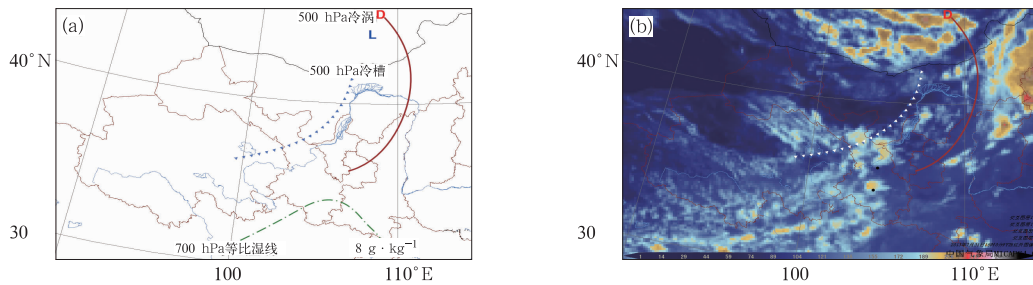


图 5 同图 1, 但为 2013 年 7 月 31 日 (a) 08 时, (b) 16 时  
 Fig. 5 Same as Fig. 1, but at (a) 08:00 BT, (b) 16:00 BT 31 July 2013

速东移,冷槽所经之处,强对流天气发生。

在红外云图(图 5b)上,31 日上午甘肃中部为晴空,12 时,祁连山区东部有多个小块云团(MγCS)生成,随后 2 h,在这些云团东移过程中,周围有许多小云块迅速发展,排列成有组织的云带,造成大范围的强对流天气。水汽图上,与高空冷槽相伴有干区东移,对流云在干区前部生成、发展。

### 3.6 弱冷锋前椭圆形 MαCS 型

#### 3.6.1 概念模型

天气形势特征:7 月下旬到 8 月上旬,500 hPa 上,有低压槽自新疆东移至甘肃河东,温度槽落后于高度槽,槽后有冷平流,槽前为暖平流,冷暖平流强度均较逗点云型类弱,有时副高西脊点达到 32°N、110°E 以西以北。700 hPa 上,河东有暖切变加强,最终形成低涡。700 hPa 比湿在低涡形成过程中有一个明显增大的过程,陇东南能达到 12 g · kg<sup>-1</sup>。强降水区的探空曲线早晨 500 hPa 以下表现为锯齿状,即多逆温层,逆温层以外为条件不稳定,上干下湿,暖云层厚度较厚。傍晚,即降水出现时,整层湿度加大,层结曲线锯齿被拉平,意味着中下层逆温层减弱、消失。

云型特征:与锋面相伴的涡度逗点云或带状云东移过程中,其前部中低层涡度持续增大,低层出现气旋式环流中心,整个对流云系合并加强,形成一个椭圆形的大型云团,云顶 TBB 在 220 K(-52℃)以下,且冷云面积能达到 5 万 km<sup>2</sup> 以上,即 TBB 和面积、偏心率能达到 MCC 标准,但持续时间略短,在 4 h 或以上,故称为椭圆形 MαCS。

降水特征:这一类型在 7—8 月出现,武威以东的大部分地方均可出现,出现次数不多,一共仅有 4 个个例,但强降水强度强、落区集中、范围大、持续时间长。每一次出现短时强降水站数均在 50 站以上,且雨强在 30 mm · h<sup>-1</sup> 以上的强降水站数多。

#### 3.6.2 典型个例

2013 年 8 月 6 日(图 6),甘肃河东除偏北的兰州、白银外,其余地方有 152 站出现短时强降水,强降水主要集中在陇南。6 日 08 时,500 hPa 低压槽东移,河东处于槽前,700 hPa 上气流辐合明显,20 时东北风和西南风形成气旋性辐合,辐合区比湿在 8 g · kg<sup>-1</sup> 以上,陇南、甘南在 10 g · kg<sup>-1</sup> 以上(图 6a)。从武都站探空可以看到,08 时环境场特征也是“上干下湿”,风垂直切变小,0℃层高度很高,接近 500 hPa, K 指数 38℃, SI 为 -0.29℃, CAPE 达

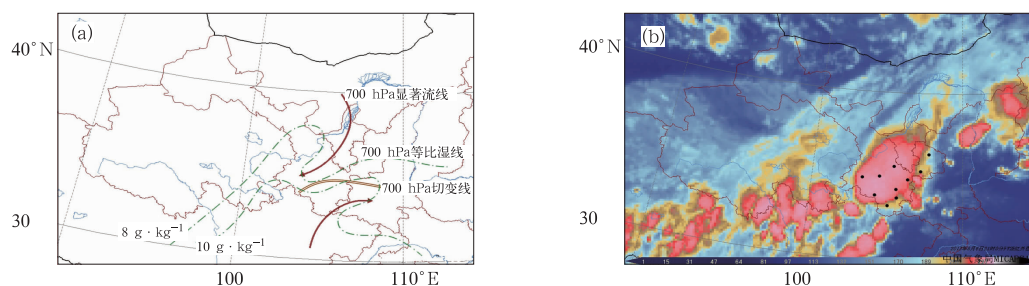


图6 同图1,但为2013年8月6日20时

Fig. 6 Same as Fig. 1, but at 20:00 BT 6 August 2013

$564 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ; 20时,  $0^\circ\text{C}$ 层高度增高到500 hPa以上,风垂直切略有增大,K指数增大到 $43^\circ\text{C}$ ,SI减小为 $-0.5^\circ\text{C}$ ,CAPE增加到 $1171 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

在红外云图(图6b)上,08时青海东部有与弱冷锋联系的松散的逗点云,在东移过程中,逗点结构瓦解,演变成松散的带状云系,到18时弱冷锋前部,低层低涡中心处发展成一个椭圆形  $M\alpha\text{CS}$ ,20时达到最强,TBB $<220 \text{ K}$ ,椭圆长轴460 km,短轴330 km,持续时间4 h,略短于MCC。

## 4 结论和讨论

本文结合天气形势和高时空分辨率卫星云图云型演变、TBB特征,对2010—2015年5—9月高原边坡复杂地形下的76次短时强降水过程进行统计分析,总结了短时强降水的6类云型。可以看到,各种云型是在特定的动力和热力条件下形成的,与低压槽、切变线、冷锋、副高、南亚高压、低空急流等天气系统密切相关,这些天气系统的位置、强弱和结构决定了短时强降水的落区及天气云型的特点。从动力学结构特征(孙继松等,2014)分析,副高边缘型、冷锋前部型、弱冷锋前椭圆形  $M\alpha\text{CS}$ 型与低层暖平流强迫有关,涡度逗点云型、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,冷涡后部型是高空冷平流强迫下形成。

因此,本文对高原边坡复杂地形下的短时强降水的云型分类是符合其触发和维持机理的,清晰、直观,便于业务中对短时强降水的监测和追踪,为高原边坡复杂地形下的短时强降水预报提供了依据。主要结论如下:

(1) 副高边缘高温高湿,当有高空槽、锋面接近时,易产生锋生作用,使对流云系加强,强对流加强。此类短时强降水范围大,强度强,最大雨强可能超过

$70 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ,持续时间最长,在12 h以上。

(2) 当中低层有明显的冷暖平流,中高层低槽经向度加大,则易形成逗点云型,低层涡度平流最大处,对流加强,可在全省范围造成各种类型强对流天气。此类云型TBB低,能达到220 K。

(3) 当南亚高压在青藏高原西部稳定时,高原北侧有锋面云系或涡度逗点云系东移时,其尾部正好在南亚高压东北部,形成低层辐合、高层辐散的動力不稳定结构,产生强对流天气。此类云型日变化明显,TBB最低,一般低于220 K,具有很好的预报指示性。产生的短时强降水雨强在 $30 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 左右。

(4) 冷锋前暖湿平流中地面辐合线附近易形成短时强降水。此类云型对应短时强降水范围小,持续时间短,但雨强大,普遍达 $40\sim 50 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

(5) 河套到蒙古的冷涡后部的冷平流经过甘肃时,上干冷下暖,大气的不稳定性加强,高空低槽所经之处,容易出现强对流天气,局地伴有短时强降水。

(6) 盛夏,带状云东移过程中,低层涡度增大,对流云合并成大面积的椭圆形云团,可造成范围集中、雨强在 $30 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 以上的短时强降水。

另外,夏季甘肃省南部有时会有非常局地的、由小尺度对流云团引发的致灾性短时强降水,受本文对短时强降水过程的定义而未分析涉及,今后还需进一步研究。

## 参考文献

- 丁一汇,2005. 高等天气学:第2版[M].北京:气象出版社:309.  
方翀,郑永光,林隐静,等,2014. 导致区域性雷暴大风天气的云型分类及统计特征分析[J]. 气象,40(8):905-915.  
付双喜,何金梅,2015. 甘肃短时强降水天气若干环境参数特征分析[J]. 干旱区地理,38(3):469-477.



- 蒋建莹,汪悦国,2014. 卫星水汽图像上两次暴雨过程的干、湿特征对比分析[J]. 气象,40(6):706-714.
- 蓝渝,张涛,郑永光,等,2013. 国家级中尺度天气分析业务技术进展 II:对流天气中尺度过程分析规范和支撑技术[J]. 气象,39(7):901-910.
- 刘新伟,段海霞,杨晓军,等,2017. 甘肃东部两次短时强降水天气过程对比分析[J]. 干旱气象,35(5):868-873.
- 任素玲,蒋建莹,许健民,2014. 卫星水汽通道探测所揭示的高空流场在南亚高压东侧强降水分析中的应用[J]. 气象,40(6):697-705.
- 苏爱芳,孙景兰,谷秀杰,等,2013. 河南省对流性暴雨云系特征与概念模型[J]. 应用气象学报,24(2):219-229.
- 孙继松,戴建华,何立富,等,2014. 强对流天气预报的基本原理与技术方法[M]. 北京:气象出版社:83.
- 王宗敏,丁一汇,张迎新,等,2014. 副高外围对流雨带中的对流-对称不稳定及锋生的诊断分析[J]. 大气科学,38(1):133-145.
- 韦惠红,赵玉春,龙利民,等,2010. 湖北省卫星云图短时暴雨概念模型研究[J]. 暴雨灾害,29(1):14-19,37.
- 许爱华,马中元,叶小峰,2011. 江西 8 种强对流天气形势与云型特征分析[J]. 气象,37(10):1185-1195.
- 许爱华,孙继松,许东蓓,等,2014. 中国中东部强对流天气的天气形势分类和基本要素配置特征[J]. 气象,40(4):400-411.
- 许东蓓,许爱华,肖玮,2015. 中国西北四省区强对流天气形势配置及特殊性综合分析[J]. 高原气象,34(4):973-981.
- 俞小鼎,2013. 短时强降水临近预报的思路与方法[J]. 暴雨灾害,32(3):202-209.
- 张涛,蓝渝,毛冬艳,等,2013. 国家级中尺度天气分析业务技术进展 I:对流天气环境场分析业务技术规范改进与产品集成系统支撑技术[J]. 气象,39(7):894-900.
- 张之贤,张强,赵庆云,等,2013. 陇东南地区短历时降水特征及其分布规律[J]. 中国沙漠,33(4):1184-1190.