

何钰, 陈小华, 杨素雨, 等, 2018. 基于“配料法”的云南短时强降水预报概念模型建立[J]. 气象, 44(12): 1542-1554.

基于“配料法”的云南短时强降水预报 概念模型建立^{*}

何 钰 陈小华 杨素雨 杨倩媛 孙绩华

云南省气象台, 昆明 650100

提 要: 本文利用云南省 125 个国家自动气象站及 3400 个区域站统计并选取了 2012—2016 年 5—10 月的典型短时强降水个例, 基于“配料法”的基本思路对其进行中尺度特征分析, 最终得出适用于云南省的五类短时强降水概念模型。分析结果表明: 云南省短时强降水集中出现在 6—8 月, 且一天中存在两个明显的峰值; 高空强烈的干冷平流及大风天气是判别高空冷平流类的重要依据, 冷空气主要通过两条路径影响云南; 分析低层暖平流类的关键系统为季风槽及孟加拉湾低压, 主要影响滇中及以南地区; 地面锋面是斜压类的重要特征, 此类强降水主要位于 700 hPa 切变线及 850 hPa 温度锋区前侧, 地面锋面附近; 准正压 A 类短时强降水主要受西风槽及副热带高压的相互作用影响, 其强降水落区分散, 预报难度大; 准正压 B 类受台风登陆后减弱的低压及其外围云系的影响, 强降水位于 700 hPa 湿舌、850 hPa 暖脊及地面辐合线共同影响的区域(一般位于滇中以南地区)。

关键词: 配料法, 短时强降水, 中尺度分析, 概念模型

中图分类号: P456

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2018.12.004

Forecast Conceptual Model Establishment of Short-Time Severe Rainfall on Yunnan Based on the “Ingredients”

HE Yu CHEN Xiaohua YANG Suyu YANG Qianyuan SUN Jihua

Yunnan Meteorological Observatory, Kunming 650100

Abstract: Using the short-time severe rainfall data collected by 125 national automatic weather stations and 3400 regional stations in Yunnan Province, and based on the basic idea of “ingredients”, the analysis of mesoscale characteristics was done by choosing typical short-time severe rainfall cases from May to October in 2012—2016. Then, five types of short-time severe rainfall conceptual models suitable to Yunnan Province were worked out. The results show that the short-time severe rainfall in Yunnan concentrates from June to August and there are two obvious peaks a day. The strong dry and cold advection and windy weather at high altitude are important bases to discriminate the upper cold advection category. Cold airs affect Yunnan mainly through two routes. Critical systems for the low-level warm advection category are monsoon trough and low pressure at the Bay of Bengal, which mainly affects the central and south areas of Yunnan. The surface front has the feature of baroclinic frontogenesis category. This kind of heavy rain is mainly located in the front of 700 hPa shear and 850 hPa temperature fronts and near the surface front. The quasi-barotropic A category short-time severe rainfall is mainly influenced by the interaction between the westerly trough and subtropical high. Its precipitation areas are scattered and very difficult to forecast.

^{*} 国家自然科学基金项目(41565002)、云南省科技厅项目(2014FB165)和中国气象局预报员专项(CMAYBY2015-071)共同资助

2017 年 7 月 26 日收稿; 2018 年 3 月 1 日收修定稿

第一作者: 何钰, 主要从事天气预报和分析研究. Email: 527661402@qq.com

The quasi-barotropic B category is affected by the reduced low pressure after the typhoon landing and peripheral structures, and the severe rainfall is located in the area influenced by the 700 hPa wet tongue, 850 hPa warm ridge and the surface convergence line (usually located in the south area of central Yunnan).

Key words: ingredients, short-time severe rainfall, mesoscale analysis, conceptual model

引 言

“配料法”是指依据强对流系统发生发展的三个基本因子:水汽、热动力不稳定和抬升条件,对造成强对流天气的高影响天气系统中尺度分析,并根据各要素的配置关系判断强对流天气落区的一种基于构成要素的新型预报方法。Maddox et al (1979)最先提出了通过典型的流型辨识预报强对流降水的方法,但由于此方法在实际强降水天气预报中的空报和漏报率都较高,经过改进后,Doswell III et al(1996)最终得出了“配料法”的基本概念。这种方法给预报员分析强对流天气提供了清晰的预报思路,使得预报员在大量的观测资料面前有理可循、有法可依。如今国内已有不少研究提出了利用“配料法”预报我国强对流天气的思路和方法(张小玲等,2010;俞小鼎,2011;吴蓁等,2011)。基于此,也有不少学者建立了适合本省的强对流天气概念模型(郑媛媛等,2011;郝莹等,2012;张一平等,2013;刘国忠等,2013;许爱华等,2014;白晓平等,2016)。结果表明:概念模型的建立及其与各类模式输出产品、雷达及卫星等多源资料之间的综合分析,再结合预报员自身的预报经验和最新实况资料,可以提前约 3 h 对强对流天气落区做出较正确的预报,对于提高强对流天气的短时临近预报水平具有非常重要的意义。

短时强降水是指发生时间短、降水效率高的对流性降水,其 1 h 降水量达到或超过 20 mm,能在较短的时间内形成局地洪水,甚至引发山洪、滑坡和泥石流等次生地质灾害(孙继松等,2014)。且西南地区(四川盆地、云贵高原)的短时强降水时段主要发生在夜间(20 时至次日 08 时),夜雨特征明显,致灾性强。同时,短时强降水的发生还经常伴有雷暴大风等灾害性天气。而由于云南特殊的地形地貌,导致强降水的局地性强、预报难度大。加上观测站点稀疏,给预报员分析和预报强降水天气带来困难。许美玲等(2011)将造成云南暴雨的主要天气系统大致分为六种类型:切变冷锋型、两高辐合型、西南涡

型、西行台风型、孟加拉湾风暴型和南支槽型,并分别讨论了不同类型天气系统对应的环流场和物理量特征及其影响下暴雨的分布特征。许宏波等(2016)研究了滇西地区短时强降水的时空分布特征,指出该地区存在五种环流概念模型:西行台风低压型、两高辐合型、南支槽型、西北气流型及孟加拉湾低压型,并分别讨论了各类型的大气环流特征。

而目前应用“配料法”对云南省强对流天气的研究还较少,因此本文选取了云南省强对流天气中的短时强降水类型,主要从强天气的中尺度特征分析方面,参考孙继松等(2014)对西南区域强对流天气的分型讨论及各类天气的概念模型,同时基于许爱华等(2014)对五类强对流天气形势配置的分析思路,将其中的五种天气形势在云南的具体表现形式和一些要素的大小进一步做具体分析,建立了云南省短时强降水预报的中尺度概念模型,并通过对比分析,总结出具有较好指示意义的大气不稳定指数指标,进一步补充和细化了各类型的特征,也为今后预报短时强降水等灾害性天气积累经验(何立富等,2011)。

1 资料选取及各类短时强降水的分布特征

本研究利用 2012—2016 年 125 个国家级自动站及 3400 个区域站统计的小时雨强 $\geq 20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的降水数据,以 20 时至次日 20 时时段内,短时强降水发生站次累计国家站 ≥ 3 站,同时区域站 ≥ 70 站为一次全省性短时强降水天气过程作为选取标准,统计得出了 2012—2016 年主汛期(5—10 月)的短时强降水个例共计 157 个。并通过 MICAPS 4.0 系统显示分析常规观测的高空和地面资料及探空资料,利用中尺度分析工具箱分别对每个短时强降水个例进行了中尺度特征分析,最终参考孙继松等(2014)对西南地区的强对流分型特征将其分为四大类并建立了相应的中尺度概念模型:其中发生在云南省最多的为准正压类,共计 78 个个例;斜压锋生类次之,共计 45 个个例;而高空冷平流类和低层暖

平流类分别为 16 和 18 个个例。

从图 1 可以看出云南省各类型短时强降水的时间分布特征:短时强降水集中出现在 6—8 月,其中 6 月以斜压锋生类短时强降水为主,7、8 月准正压类短时强降水发生次数最多;而高空冷平流类主要出现在 8 月,低层暖平流类主要出现在 7 月,且各类短时强降水的时段存在两个明显的峰值(02—05 和 16—18 时,北京时,下同),午后降水及夜雨特征明显。与前期的研究结论基本一致(许美玲等,2011;陈炯等,2013)。同时,通过统计得出(图略),无论哪一类型的短时强降水,其降水强度分布特征基本一致: $20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1} \leq \text{区域站小时雨强} < 30 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的站次占总次数的 70%, $30 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1} \leq \text{区域站小时雨强} < 40 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的站次占总次数的 20%, $40 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1} \leq \text{区域站小时雨强} < 50 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的站次占总次数的 7%,区域站小时雨强 $\geq 50 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的站次占总次数的 3%,即云南省短时强降水的小时降水量级主要位于 20~30 mm 的区间内。

2 中尺度概念模型建立及典型个例分析

2.1 高空冷平流类

2.1.1 概念模型

高空冷平流类短时强降水在统计时段内有 16 次过程,占到总过程数的 10%。对个例的分析表明此类短时强降水的发生基本都伴随雷暴大风天气。区域站极端降水不明显,同时高空强烈的干冷平流起到了主导作用。天气系统稳定、极端降水不明显、降水落区相对集中且伴随有明显大风天气是这类型

短时强降水的主要特点。

通过分析其中尺度发生条件可以进一步发现(图 2):强降水发生前,云南省 200 hPa 上受东北风或偏东风气(急)流控制[5—10 月南亚高压脊线自 23°N 逐渐北抬至青藏高原,8 月位于 33°N ,之后又逐渐南退,因而云南省主汛期主要受南亚高压脊线南侧偏东气流影响(朱乾根等,2007)],短时强降水位于大风区(急流)下方或位于其南侧,该地区气流呈反气旋性弯曲,且风速及风向基本为辐散状,高层的辐散抽吸作用有利于低层辐合上升运动的加强。500 hPa 上,冷空气主要通过两条路径影响云南省:一条来自新疆地区或高原北侧,一条来自我国东北部地区的冷涡后部。对应 500 hPa 高层存在一个冷高压中心,高压前偏北气流引导冷空气南下。同时高空低槽明显,槽后一般对应温度槽及干舌($T - T_d \geq 10^{\circ}\text{C}$),槽前存在弱的负变高($-2 \sim -1 \text{ dagpm}$)及负变温($-2 \sim -1^{\circ}\text{C}$)。700 hPa 上存在明显的切变线系统,强对流天气区往往位于切变南侧或其附近地区,切变前也存在弱的负变高($-2 \sim -1 \text{ dagpm}$)。由于云南省海拔较高,用 850 与 500 hPa 的温差来表征大气稳定度已经不适用,因此用 700 与 500 hPa 的温差代替,而统计表明 $T_{700} - T_{500} \geq 15^{\circ}\text{C}$ 的区域与地面雷暴、大风区对应较好(之后的分析用 T_{75} 代表 700 与 500 hPa 的温差)。850 hPa 上暖区与短时强降水相对应,并且在降水发生前暖中心强度增强约 $4 \sim 5^{\circ}\text{C}$;有时存在切变线及温度锋区,850 hPa 上冷暖中心强度相差 5°C 左右;同时强降水区低层均为西南气流(平均风速约为 $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)。由于影响云南省的冷暖空气势力整体都不如我国中东部地区的强,所以偏北风及偏南风的平均风速基本都小于中东部地区)。强对流发生前地面为热低压或均压

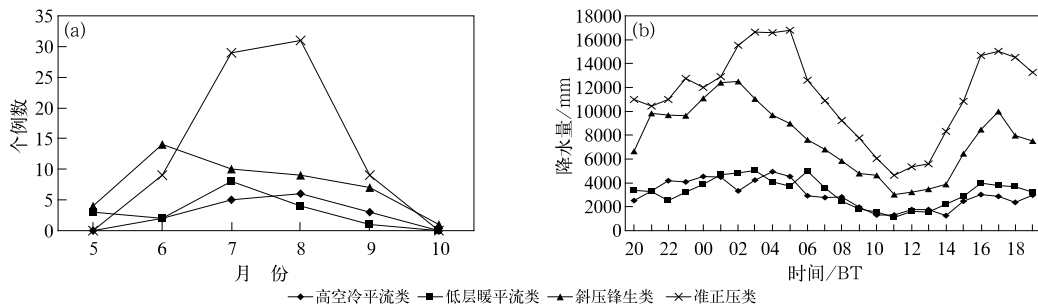


图 1 2012—2016 年 5—10 月各类型短时强降水的逐月累计出现次数(a)及逐小时累计降水量(b)分布
Fig. 1 Monthly number of occurring rainfall (a) and hourly accumulated rainfall (b) distributions of various types of short-time severe rainfall from May to October in 2012—2016

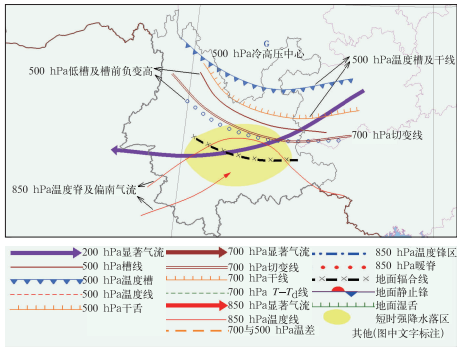


图 2 高空冷平流类概念模型
Fig. 2 The upper cold advection category conceptual model

场控制, $T_d \geq 18^\circ\text{C}$, 降水区存在明显的辐合线, 表明水汽及上升运动条件都较好; 部分个例的地面图上存在冷锋并南压, 强降水位于冷锋前侧。

2.1.2 典型个例

2014 年 8 月 18 日夜间开始, 滇南地区出现中到大雨局部暴雨。其中文山、红河、普洱南部及西双

版纳地区出现了明显的短时强降水并伴有局地的雷暴天气。这次强对流天气过程冷空气来源于我国东北地区的冷涡后部(图略), 高空冷平流明显, 属于典型的高空冷平流强迫类天气过程。从图 3 各层的中尺度发生条件分析中可以看出(若图中没有特殊标注或文中没有特殊说明, 则图中显示的均为当日 08 时的天气形势及中分析, 即强降水发生前 12 h 的天气形势, 下同): 强降水发生前, 200 hPa 上滇南地区受南亚高压南侧偏东气流控制, 大风区位于短时强降水上空。500 hPa 上 18 日 08 时低槽位于昭通北部, 槽后存在明显的温度槽; 随后低槽及温度槽快速下滑, 并于 18 日 20 时南压至楚雄北部—曲靖南部一带; 至 19 日 08 时, 低槽位于大理南部—文山中部一线。此次过程槽后冷平流强, 推动低槽快速南移。19 日 08 时干舌明显, 其后部 $T_d \leq -29^\circ\text{C}$, $T - T_d \geq 30^\circ\text{C}$, 前后露点值相差近 20°C , 表明槽后干冷平流明显。700 hPa 上低压及切变线逐渐南移。19 日 08 时, 切变线呈东西向位于滇南地区, 强降水

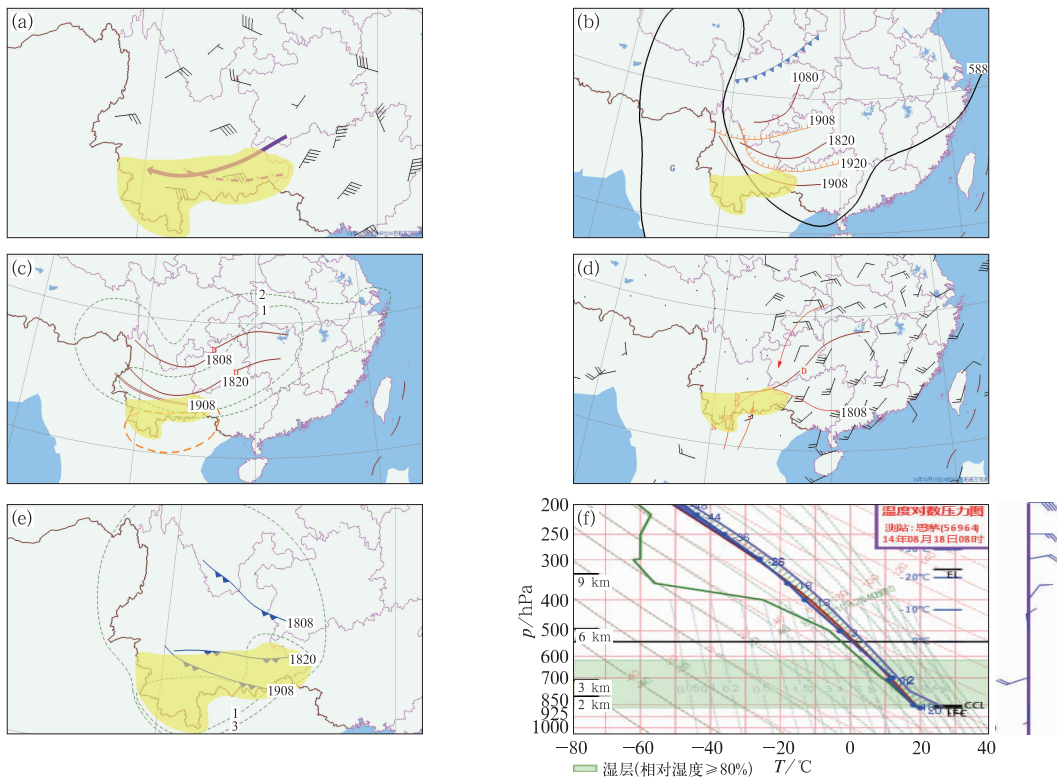


图 3 2014 年 8 月 18—19 日中尺度分析及普洱站探空

(a) 200 hPa, (b) 500 hPa, (c) 700 hPa, (d) 850 hPa, (e) 地面, (f) 普洱站 18 日 08 时探空

Fig. 3 Mesoscale analysis and sounding at Puer Station in 18—19 August 2014

(a) 200 hPa, (b) 500 hPa, (c) 700 hPa, (d) 850 hPa, (e) surface,

(f) Puer sounding at 08:00 BT 18 August

落区位于切变附近及其南侧。且从水汽条件看,滇中及以南地区 $T - T_d \leq 1^\circ\text{C}$,有利于该地区强降水天气的发生。同时 $T_{75} \geq 15^\circ\text{C}$ 区域位于滇南地区,较好地指示了该地区雷暴天气的发生。850 hPa 上,18 日 08 时低涡及切变线位于滇南地区,同时该地区存在明显的温度脊及偏南气流。至 18 日 20 时,普洱东部出现低涡中心,同时有暖中心相配合(中心强度达 24°C)。地面图上,全省 $T - T_d \leq 3^\circ\text{C}$ (滇南地区 $T - T_d \leq 1^\circ\text{C}$),且伴有冷锋南下,强降水区位于冷锋前沿。从普洱站的探空图分析上也可以看出,高层偏北风、低层偏南风及“上干下湿”的层结特征明显,湿层从地面到 600 hPa 附近;0~6 km 垂直风切变大,风向顺转达 180° 。同时,通过 14 时地面温度订正后的 $CAPE = 1332 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$, $CIN = 0$, $SI = -0.36^\circ\text{C}$, $K = 36^\circ\text{C}$, $LI = -3.2^\circ\text{C}$,具备强对流发生的能量及不稳定条件。

2.2 低层暖平流类

2.2.1 概念模型

低层暖平流类在统计时段内有 18 次过程,占到总过程数的 11%,该类短时强降水的水汽主要来源于孟加拉湾及南海地区,绝大部分个例的探空图显示湿层高达 400 hPa 及以上(图略),少数个例达 700 hPa,说明此类个例的湿层深厚,水汽条件充沛。季风槽、孟加拉湾低压及地面辐合线是引发该类短时强降水的重要天气系统。前两者为强降水的发生发展提供了热动力及水汽输送条件,后者为触发强降水的关键因子。强降水主要影响滇中及以南地区,同时伴随有明显的大范围雷暴天气,30% 的个例伴有大风天气,而 20% 的个例伴有冰雹天气。进一步分析其中尺度发生条件可以发现(图4):强对流

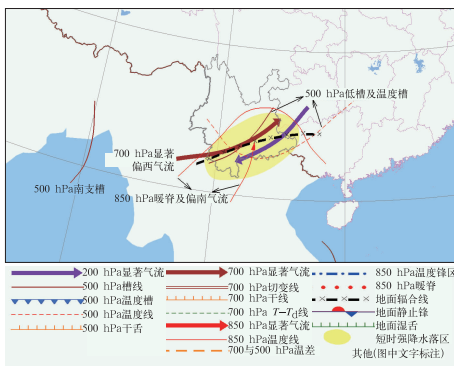


图 4 低层暖平流类概念模型
Fig. 4 Low-level warm advection category conceptual model

天气区往往受 200 hPa 偏东大风控制:气流呈反气旋式弯曲且风速辐散。500 hPa 上, 90°E 附近有时存在季风槽,有时为孟加拉湾低压系统。槽前一般有短波槽东移,温度槽超前于高度槽,具有强的位势不稳定条件。若孟加拉湾低压中心偏西(位于 90°E 以西),则受其东侧西南气流的影响,降水一般位于滇南地区;若孟加拉湾低压中心偏东(位于 100°E 以东),则滇中以东以南易受其北侧的偏东气流影响产生降水。部分个例槽后存在干舌,往往对应有关雷暴大风天气。700 hPa 上强降水区存在显著的偏西或西南气流(平均风速为 $7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$),较高层冷平流类平均风速增强,说明水汽输送条件相对更好,因此湿度场上表现为一个向东及向北伸展的湿舌。据统计,降水区 $T - T_d \leq 2^\circ\text{C}$, $T_d \geq 10^\circ\text{C}$,水汽条件充沛;等温线与风场存在明显夹角(有时达 90°),暖平流输送特征明显。同时, $T_{75} \geq 15^\circ\text{C}$ 的区域对雷暴的发生具有较好指示意义。850 hPa 上降水区与暖区相对应,存在明显的暖中心或暖脊,且均表现为偏南气流(平均风速为 $3.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)。降水前地面露点平均为 18°C ,所有个例均能分析出连续且明显的地面辐合线,强降水均由地面辐合线触发产生,即地面辐合线对此类强降水的落区具有明显的指示意义。

2.2.2 典型个例

2015 年 8 月 25 日,滇中大部及以东以南地区出现中到大雨局部暴雨或大暴雨天气,并伴有明显的短时强降水,部分地区伴有雷暴。此次过程孟加拉湾低压位置稳定,低压中心在 $85^\circ \sim 90^\circ\text{E}$ 摆动,从 850~500 hPa 上结构一致、特征清晰、强度较强。对应地面上孟加拉湾北部也一直维持为低值区。受其东侧西南气流输送暖湿水汽的影响,滇中及以东以南地区短时强降水特征明显:区域站累计出现 316 站次短时强降水,最大小时降水为 $80.9 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ (文山州富宁县)。此次短时强降水不仅小时雨强强,且累计站次多、覆盖范围广。从各层分析可以看出(图 5):200 hPa 上全省位于高空急流右侧气流辐散区,滇东南风向辐散特征明显。500 hPa 上,低槽位于滇东北,槽后西北气流及温度槽带下冷平流影响云南。700 hPa 上孟加拉湾低压中心在 $85^\circ \sim 90^\circ\text{E}$ 摆动,滇中及以南地区存在明显的西南气流(最大风速为 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$),全省 $T - T_d \leq 2^\circ\text{C}$,滇中地区 $T - T_d \leq 1^\circ\text{C}$ 。对应明显的湿舌从孟加拉湾低压东侧向北延伸至重庆北部。强降水位于受孟加拉湾低压东侧西南气流影响的区域。

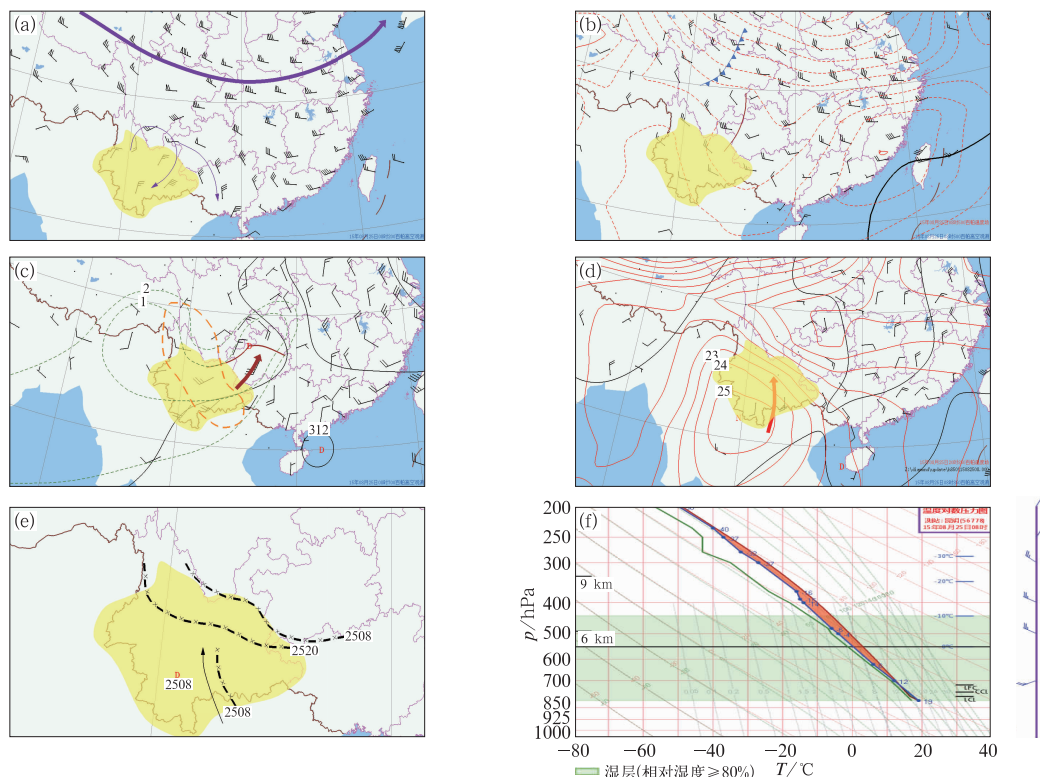


图 5 同图 3, 但为 2015 年 8 月 25—26 日中尺度分析及 08 时昆明站探空

Fig. 5 As in Fig. 3, but for mesoscale analysis in 25—26 August and sounding at Kunming Station at 08:00 BT 25 August 2015

同时 $T_{75} \geq 15^{\circ}\text{C}$ 的区域与强雷暴区对应关系较好。850 hPa 上滇中及以南地区受显著偏南气流影响, 25 日 08 时南风风速达 $8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 20 时滇中及以南出现暖中心, 中心强度达 25°C , 同时等温线与风向夹角接近 90° , 存在明显的暖平流。地面图上 25 日 08 时, 滇西南存在暖低压中心, 强降水区存在明显的辐合线, 且 14 时滇中出现偏南急流, 低层存在有利的辐合上升及水汽条件。25 日 08 时昆明站的探空图上: $\text{CAPE} = 879.2 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$, $\text{CIN} = 16.3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$, $\text{SI} = -1.95^{\circ}\text{C}$, $\text{LI} = -3.22^{\circ}\text{C}$, 具备一定的对流不稳定能量及条件。同时中低层风随高度顺转, 湿层深厚, 从地面伸展至 400 hPa 附近。总体来说, 此次过程 200 hPa 提供有力的高层辐散场, 500 hPa 高层有弱冷空气配合增强位势不稳定, 同时孟加拉湾低压系统稳定, 为中低层的西南暖湿气流输送水汽及热量提供了有利的环境场, 是导致此次过程滇中及以东以南大部地区出现短时强降水及雷暴天气的重要原因。

2.3 斜压锋生类

2.3.1 概念模型

从天气形势配置来看, 该类短时强降水高层的冷空气及低层的暖湿空气强度势力相当, 地面图上经常伴随有冷锋或静止锋稳定并西推南压, 主要影响滇中及以北以东地区。此类短时强降水占统计总个例数的 29%, 伴随的其他强对流天气有雷暴(占总个例数的 100%)、大风(24%)及冰雹(4%)。进一步分析其中尺度发生条件可以发现(图 6): 强对流天气发生前 200 hPa 上全省几乎为东北气流控制, 强降水区存在明显的高空风速辐散及分流式辐散场的特征, 为强降水区提供了高层辐散的有利条件。500 hPa 上几乎都能分析出低槽系统, 且多数情况下低槽经向度大。有时低槽呈阶梯槽形势东移南下, 槽后对应明显的温度槽; 槽前存在弱的负变高 ($-2 \sim -1 \text{ dagpm}$) 及负变温 ($-2 \sim -1^{\circ}\text{C}$)。700 hPa 上, 强降水发生前其北侧或东侧存在明显的切变

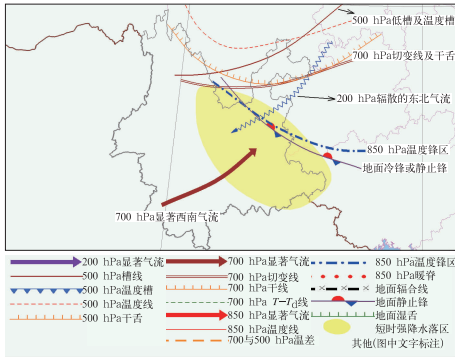


图 6 斜压锋生类概念模型
Fig. 6 Baroclinic frontogenesis category conceptual model

线系统,切变线后部为偏北风气流,切变线南侧为显著的西南气流(有时可达低空急流标准);同时切变线后部一般伴有显著的干舌及温度槽;强对流区位于切变线前水汽条件充沛($T - T_d \leq 5^\circ\text{C}$,多数 $T - T_d \leq 2^\circ\text{C}$, $T_d \geq 10^\circ\text{C}$)、 $T_{75} \geq 15^\circ\text{C}$ 的区域内。850 hPa 上强降水区北侧存在明显的温度锋区,温度锋区南北两侧的冷、暖中心强度08时分别平均为17和

21℃,至20时冷、暖中心强度分别平均增大到16和25℃,冷暖中心温差加大,锋区加强;同时,强降水区位于温度锋区前侧暖中心或暖脊控制区域,对应地面上冷锋或静止锋西推南压。

2.3.2 典型个例

2013年6月1日夜间开始,滇中及以南地区自东北向西南相继出现了中到大雨局部暴雨的天气,其中昆明大部、玉溪、文山西部、红河、普洱东部和南部出现了明显的短时强降水并伴有雷暴天气,区域站累计出现162站次短时强降水,最大小时降水为63.9 mm(普洱市镇沅县那洛村)。同时滇西北的德钦站出现了冰雹天气(冰雹直径5 cm)。从图7的分析可以看出,此次过程高层冷平流及低层暖平流都比较明显,中低层存在强烈的冷暖空气交汇且低层伴有明显的温度锋区和锋生过程。200 hPa上滇中以北存在一个小高压系统,滇中及以南地区受高压南侧偏东气流控制,风向呈反气旋性弯曲且风速辐散,为强降水区域提供了有利的高层辐散场条件。中层500 hPa上高原槽后对应明显的温度槽,且低

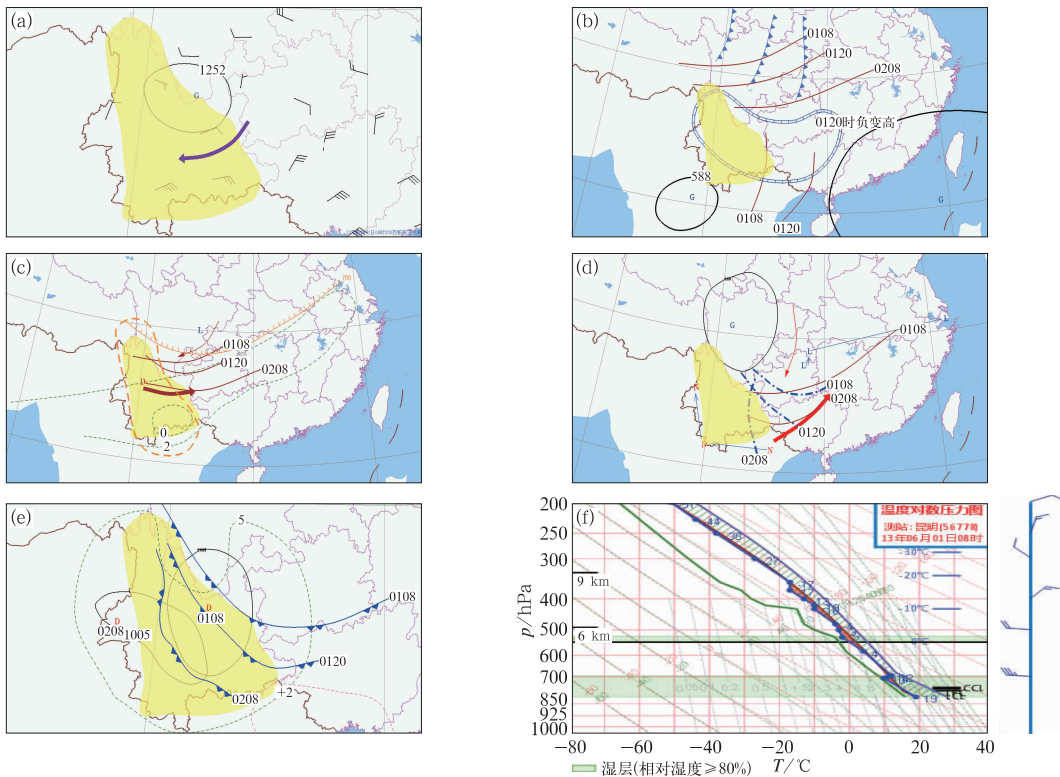


图 7 同图 3,但为 2013 年 6 月 1—2 日中尺度分析及 08 时昆明站探空
Fig. 7 As in Fig. 3, but for mesoscale analysis in 1—2 June and sounding at Kunming Station at 08:00 BT 1 June 2013

槽及温度槽逐渐东移。而滇东南的文山东部则位于两高辐合之间(滇缅高压与西太平洋副热带高压),存在一个弱的辐合区。700 hPa 上,6 月 1 日 08 时切变线位于昭通北部,切变后部对应干舌及冷中心(干舌后 $T - T_d \geq 8^\circ\text{C}$,前后露点值相差 $\geq 10^\circ\text{C}$)。同时滇中地区存在西风急流,且伴有明显的湿舌自西向东伸至华东地区。20 时,切变线略有所南压,其后部东北急流显著(最大风速达 $14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)。强对流区域的 $T_{75} \geq 15^\circ\text{C}$,且其值存在跃增(最大值从 08 时的 15°C 增大至 20 时的 22°C),表明高低层冷暖空气交汇显著,温差加大增强了强对流天气发生的不稳定条件。2 日 08 时,切变线进一步西推南压,大理东部出现了低涡中心。850 hPa 上强降水发生区域东侧存在明显的温度锋区及切变线,风与等温线的夹角接近垂直,且随着冷空气不断西推南压,温度锋区加强:1 日 08 时,冷、暖中心强度分别为 14 和 20°C ;20 时分别增强至 10 和 24°C 。地面图上,冷锋呈西北—东南向并逐渐西推南压:1 日 08 时冷锋位于曲靖中部地区;20 时冷锋西推至丽江东部—楚雄北部—昆明中部—文山北部一线;2 日 08 时冷锋越过哀牢山。同时,从 1 日 08 时至 2 日 08 时,滇中大部为冷锋前热低压控制,地面热力及抬升条件较好。从 1 日 08 时昆明站的探空图上也可以看出:低层西风急流明显,到高层转为偏北风,中高层风切变大。同时,用 14 时地面温度订正后 $CAPE$ 值从 $345 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 增大至 $2642 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$, CIN 从 $7.2 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 减弱为 0 , $SI = 0.93^\circ\text{C}$, $LI = -3.9^\circ\text{C}$,存在较大的不稳定能量及抬升条件。

2.4 准正压类

2.4.1 概念模型

准正压类是云南主汛期发生频率最多的一类,占到总个例数的 50%。与孙继松等(2014)统计的西南地区最容易发生的强对流天气类型有所不同。而根据影响系统的不同,又可以将这一类细分为副热带高压(以下简称副高)外围西风带低槽类(A 类)及台风低压外围类(B 类)。前者副高与西风带低槽相互作用是引发强降水的主要原因(支树林等,2015);后者主要受登录后减弱的台风低压及其外围云系的影响。下面就通过中尺度分析分别讨论这两种形势下短时强降水发生的环境场特征。

2.4.1.1 副高外围西风带低槽类

通过对 57 个典型个例的统计分析,可以初步得出以下结论(图 8):强降水天气区一般位于 200 hPa 南亚高压脊线南侧受东北气流影响的区域,多数个例风向风速呈辐散场特征。500 hPa 上,副高 5880/5840 gpm 线西伸明显。同时高原东侧常常伴有西风带低槽呈阶梯槽形势东移,槽后对应有明显的温度槽。强降水落区往往位于副高 5880/5840 gpm 线西侧及槽前偏南气流影响区域。还有一种情况是:副高西伸后断裂为两个高压中心,一个中心位于滇缅之间,一个中心位于西太平洋。两高之间存在明显的风速辐合,加之高原上低槽东移,强降水分别位于两高辐合区及西风带槽前受副高偏南气流影响的区域。因此这类型的强对流天气落区往往较为分散,雷暴范围常常大于短时强降水落区,且大多数时候雷暴与强降水落区并无明显对应关系,导致预报难度加大。700 hPa 上几乎都伴有明显的切变线或槽线,其后部存在温度槽,有时前部还会伴有明显的温度脊。切变线或低槽的位置与 500 hPa 基本一致或相差 2~3 个经纬度(偏东偏南)。并且从水汽条件的分析来看,700 hPa 上水汽条件充沛,存在大于强降水区域的大范围湿区: $T - T_d \leq 2^\circ\text{C}$, $T_d \geq 10^\circ\text{C}$ 。同时 $T_{75} \geq 15^\circ\text{C}$ 的区域与雷暴发生区域对应较好。850 hPa 上强对流发生当日的 08 时,滇东北常常位于低涡及槽的南侧。同时低涡以东以南地区存在自东北向西南延伸的暖脊/暖中心沿着 500 hPa 副高北侧分布;20 时暖中心及暖脊强度增强,强降水区位于其控制范围内。暖中心强度平均从 22°C 增大

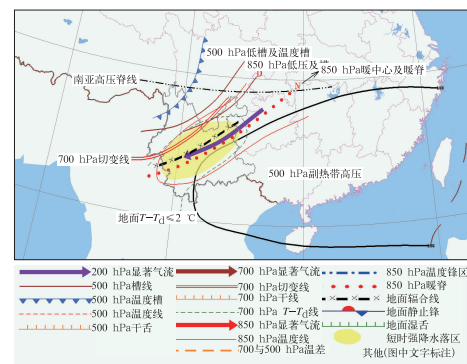


图 8 准正压 A 类概念模型

Fig. 8 Quasi-barotropic A category conceptual model

到 25°C 。有时在滇西南或滇南地区伴有相对的冷中心及冷槽,至 20 时,冷暖中心强度平均分别为 18 和 23°C ,强降水区域相应的出现温度锋区。地面上强降水区存在明显的地面辐合线,湿度条件非常好($T-T_d \leq 2^{\circ}\text{C}$)。据统计(图略),强降水发生前地面最高温度平均值在 26°C 左右,存在明显的增温增湿现象,为强降水的发生提供了有利的水汽和能量条件。

2.4.1.2 台风低压外围类

据统计,2012—2016 年 5—10 月共有 21 个台风登陆后减弱为低压西移影响云南省,对其分别进行中尺度分析后可知(图 9):200 hPa 上强对流天气区仍然受南亚高压南侧偏东气流控制。当台风低压发展较深厚时,其北侧偏东气流常常与南亚高压南侧东北气流相交汇,使得辐合上升运动加强,强对流天气往往更加剧烈。500~850 hPa 上,台风登陆后减弱的低压至少有两条约等压线,同时存在自下而上一致的东南急流和台风倒槽,500 hPa 上槽前一般伴有明显的温度槽。700 hPa 上存在自台风中心出发的湿舌($T-T_d \leq 2^{\circ}\text{C}$,部分地区 $T-T_d \leq 1^{\circ}\text{C}$)向西向北方向伸展,槽前有时存在暖脊。850 hPa 上倒槽前存在明显的暖脊,同时地面辐合线明显,强降水区即位于受 700 hPa 湿舌、850 hPa 暖脊及地面辐合线共同影响的区域,一般位于滇中以南地区,且随着台风低压西移,降水区明显西推。

2.4.2 典型个例

2.4.2.1 副高外围西风带低槽类

2013 年 8 月 1 日夜开始,受副高外围西风带低槽东移的影响,云南省中部地区出现了中到大雨局部暴雨的天气。其中,滇中一带的楚雄、昆明、曲靖及玉溪出现了明显的短时强降水及雷暴天气,且

8 月 2 日 13—14 时,大理州南涧县出现了 $18 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的大风天气。从图 10 的中尺度分析来看,200 hPa 上强降水区受南亚高压南侧偏东气流控制,滇中地区风速辐散。而中层 500 hPa 上可以明显地看出强降水位于副高西侧西风带槽前西南气流影响的地区。过程时段内,中心位于蒙古中部的低涡槽后部西北气流不断引导冷空气东移南下,使得影响云南省的西风带低槽后部不断有弱的温度槽东移,至 2 日 08 时,槽后冷空气加强,温度槽加深,同时,重庆中北部出现了低压中心。因此强对流天气最强时段出现在了 2 日 08—20 时。700 hPa 上低涡中心位于四川东部,低槽位置与 500 hPa 一致,槽前存在西南急流(风速最大为 $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)。受西南急流输送暖湿水汽的影响,1 日 08 时,存在明显的自西南向东北方向延伸的暖脊,且暖脊控制区 $T-T_d \leq 2^{\circ}\text{C}$,部分地区 $T-T_d \leq 1^{\circ}\text{C}$ 。短时强降水区域正好位于水汽及热量条件充沛的高温高湿区。而对雷暴落区具有较好指示意义的 $T_{75} \geq 15^{\circ}\text{C}$ 的地区在 1 日 08 时位于滇西地区,至 20 时,范围增大到全省大部地区,且滇中地区的 $T_{75} \geq 17^{\circ}\text{C}$,较好地指示了强雷暴发生的中心。850 hPa 上强降水位于 1440 gpm 线控制范围以内。1 日 08 时,低槽偏北,位于陕西西部—四川东部一带,随后东移。槽后对应冷中心,中心强度为 18°C ,槽前存在暖中心及向西延伸的暖脊,暖中心强度为 23°C 。20 时,暖中心及暖脊加强西推,暖中心强度增大至 24°C ,强降水位于暖脊线北侧。同时,850 hPa 上也存在西南急流(最大风速达 $14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)。地面图上,1 日 08 时高压中心位于滇东南地区,且其西侧及北侧的偏西气流与四川中部高压南侧的偏北气流之间形成明显的东西向辐合线,位于滇中北部地区。至 14 时辐合线南压,且沿着高压外围分布。强降水与辐合线对应关系较好。探空图上从低层至 400 hPa 为一致的副高外围西南气流,用当天 14 时地面温度订正后的昆明站 CAPE 从 $868 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 增加至 $2562 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,CIN 从 $8.4 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 减弱为 0,SI = 0.22°C ,LI = -6.9°C ,具备较强的能量及抬升条件。

2.4.2.2 台风低压外围类

2014 年 7 月 19 日夜至 22 日夜,受第 9 号台风威马逊及其登陆后减弱的低压影响,云南省南部地区的曲靖南部、文山、红河、普洱、西双版纳、临沧、保山及德宏依次出现了大到暴雨局部大暴雨天气。其中 20 日 20 时至 21 日 20 时,降水范围广、强

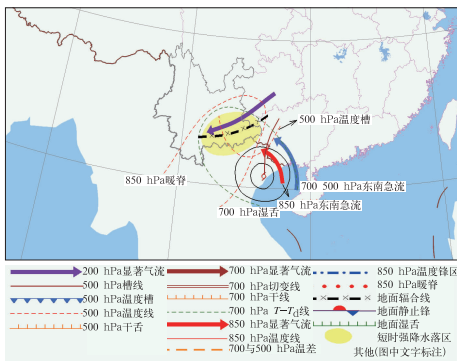


图 9 准正压 B 类概念模型

Fig. 9 Quasi-barotropic B category conceptual model

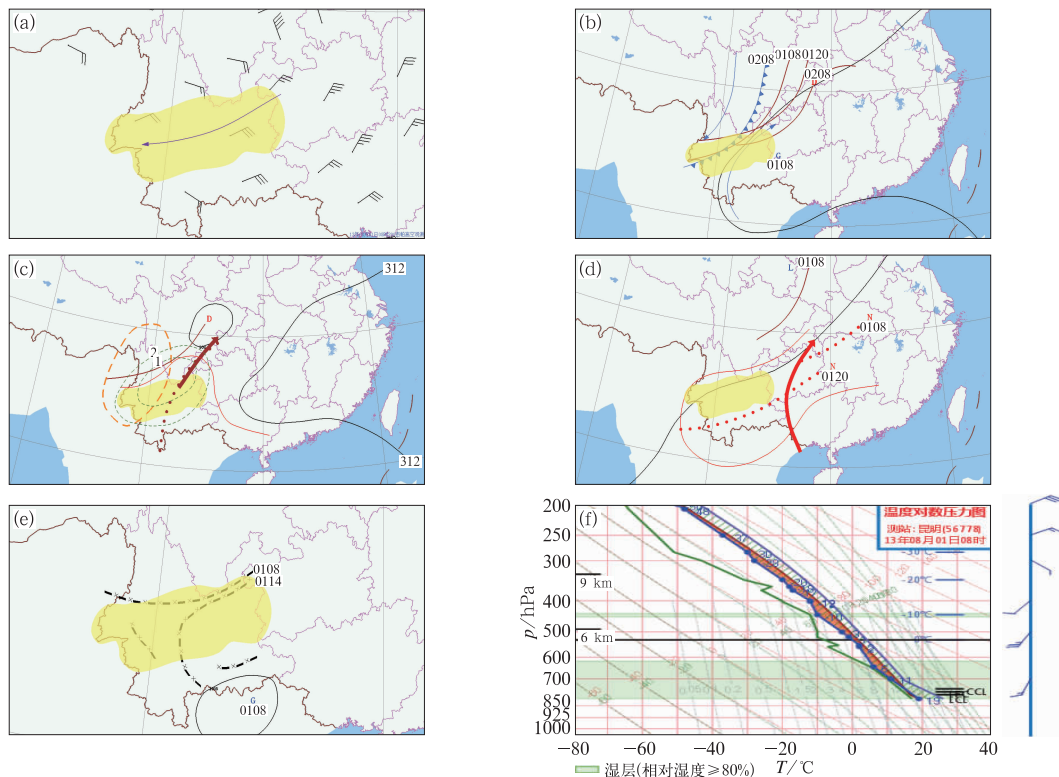


图 10 同图 3, 但为 2013 年 8 月 1—2 日中尺度分析及 08 时昆明站探空

Fig. 10 As in Fig. 3, but for mesoscale analysis in 1—2 August and sounding at Kunming Station at 08:00 BT 1 August 2013

度强, 24 h 最强降水出现在普洱市宁洱县的秀柏 (228.6 mm)。最大小时雨强为 $50.6 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ (普洱市团山村)。强降水的同时伴有局地雷暴和大风天气(红河州绿春县)。此次过程为显著受台风低压强迫的短时强降水类型。强对流发生前, 200 hPa 上云南省受三股气流控制: 南亚高压南侧偏东气流、副高西侧偏南气流及登录台风低压北侧偏东气流。其中强降水区域位于三股气流汇合的滇南地区。而从中低层 850~500 hPa 上看, 台风低压及倒槽显著, 槽后存在一致的东南急流。20 日 08 时台风低压及倒槽位于滇东南的文山地区, 随后逐渐西移至普洱、临沧一带。同时伴随此次台风低压西移, 中心位于 $25^{\circ}\text{N}, 88^{\circ}\text{E}$ 的孟加拉湾低压稳定维持, 提供了台风登陆后降水所需的水汽输送来源。从 500 hPa 上可以看出, 20 日 20 时至 21 日 20 时, 台风低压西移至普洱北部及临沧东北部, 台风环流与孟加拉湾低压西南气流相交汇, 西南地区的水汽通道被打开, 导致了该地区的降水再次加强。700 hPa 上存在自台风低压中心伸出的湿舌及两条明显的湿轴: 一条

向北延伸, 一条伸向西北地区。同时, 20 日 08 时 $T_{75} \geq 15^{\circ}\text{C}$ 的分布也较好地指示了滇西北的雷暴区 (雷暴与强降水落区不一致)。温度场上, 500 hPa 台风低压倒槽前存在温度槽, 低层 850 hPa 上则存在西北—东南向伸展的温度脊, 位于滇西南地区。这样的温度场配置增大了高低层的温差, 使得大气的不稳定性增大。地面上滇南的强降水区域可以分析出明显的辐合线和低压中心。从 20 日 08 时思茅站的探空图(图 11f)上也可以看出, 湿层深厚(地面到 300 hPa 附近), 低层西北风, 中高层一致的偏北风。同时, $CAPE = 1491 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$, $CIN = 0$, $SI = -3.06^{\circ}\text{C}$, $K = 40^{\circ}\text{C}$, $LI = -11.7^{\circ}\text{C}$ 。用 14 时地面温度订正后 $CAPE$ 值增大至 $2606 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$, 较好地指示了该区域强对流天气的发生。

3 探空物理量分析

利用 MICAPS 4.0 系统, 分别对每个个例的代表站探空资料进行分析, 最终选取与短时强降水相

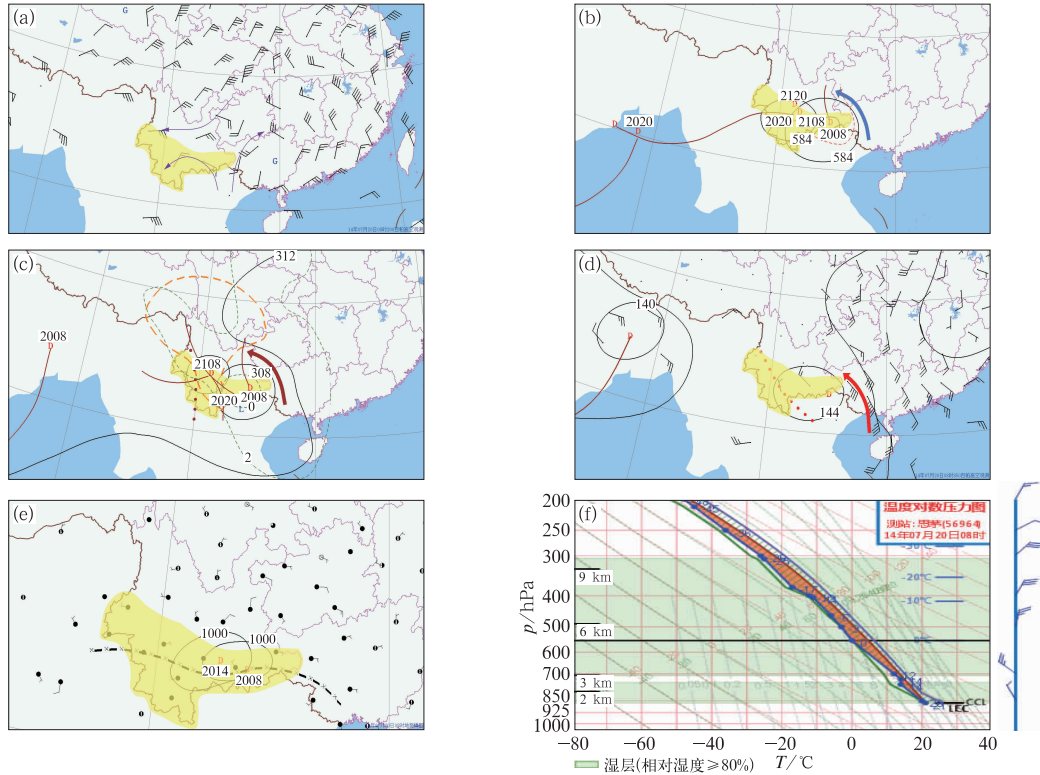


图 11 同图 3, 但为 2014 年 7 月 19—21 日中尺度分析及 08 时普洱站探空
 Fig. 11 As in Fig. 3, but for mesoscale analysis in 19–21 July 2014 and sounding at Puer Station at 08:00 BT 20 July

关性较好的一些常用对流参数(雷蕾等, 2011; 樊李苗和俞小鼎, 2013; 孙继松和陶祖钰, 2012; 魏东等, 2011), 总结出一套与概念模型相对应的较好用的物理量参数组合(表 1), 进而提高强降水落区预报的准确性。表 1 中, 高冷类代表高空冷平流类并依此类推; 湿层厚度对应表格中所填高度为湿层伸展的最大高度; 订正后的 CAPE 值为经过当日 14 时地面温度订正后的数值。0~6 km 垂直风切变中风矢量差的计算为:

$$\sqrt{(u_1 - u_2)^2 + (v_1 - v_2)^2}$$

式中, u_1 和 v_1 分别为 500 hPa 的经向和纬向风矢量, u_2 和 v_2 分别为地面的经向和纬向风矢量。

从水汽条件来看, 各类型短时强降水的湿层都较深厚, 基本能达到 500 hPa 附近。其中低暖类湿层最厚, 垂直伸展高度平均能达到 468 hPa, 而高冷类伸展高度较低, 说明中高层干冷平流起了很大的作用。同时 700 与 500 hPa 假相当位温差平均在 3.9~6.5°C, 即 θ_{sc} 随高度减小, 具有一定的对流性不稳定。从不稳定条件来看, 订正前 CAPE 值平均为 400 J·kg⁻¹ 左右, 经过 14 时地面气温订正后

表 1 各类型短时强降水常用探空参数的统计平均值

Table 1 Statistical averages of the commonly used sounding parameters for each type of short-time severe rainfall

	水汽条件		不稳定条件				抬升条件		0~6 km 垂直风切变 风矢量差 /m·s ⁻¹
	湿层厚度 /hPa	θ_{sc} 700-500 hPa /°C	CAPE/J·kg ⁻¹		CIN/ J·kg ⁻¹	K/°C	LI/°C	SI/°C	
			订正前	订正后					
高冷类	526	3.9	301	2034	73	38	-3.3	-0.5	5.2
低暖类	468	5.4	352	1005	32	41	-3.6	-0.3	5.8
斜压类	478	6.5	550	1297	42	41	-4.9	-0.7	5
准 A 类	474	4.5	466	1236	16	39	-5	-0.6	4.9
准 B 类	511	6.5	342	1191	45	39	-4.5	-1.3	6.8

约为 $1350 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$, 增幅约 $1000 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。其中高冷类超过 $2000 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$, 对流不稳定能量最强。而强对流发生前低层都具有一定的对流抑制能量且值不大, 平均为 $42 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$, 经过订正后 CIN 消失, 而合适的 CIN 也是有利于对流不稳定能量积聚的。K 指数平均为 40°C , 对暴雨预报具有较好的指示意义。其中高冷类为 38°C , 一定程度上说明中层干冷空气对 K 指数的影响, 而其与平均值相差也不大, 表明云南高冷类短时强降水中层干冷空气强度不如我国中东部地区。从抬升条件来看, $LI < -3^\circ\text{C}$, 平均为 -4°C , SI 指数基本在 0.5°C 左右, 对强对流的发生具有一定的指示意义。而 $0 \sim 6 \text{ km}$ 风矢量差平均为 $5.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 具有中等到小强度的垂直风切变。

4 结论与讨论

本文利用全省 125 个国家级自动站及 3400 个区域自动站的短时强降水观测资料, 提取出了云南省 2012—2016 年 5—10 月主汛期共 157 个典型的短时强降水个例并对其中尺度系统发生发展的环境场特征进行了分析, 最终根据统计结果得出适用于云南省的五类短时强降水中尺度概念模型。从分析结果可以初步得出以下结论:

(1) 云南省短时强降水集中出现在 6—8 月, 存在两个明显的峰值: 凌晨 (02—05 时) 及午后 (16—18 时)。同时, 云南省短时强降水的强度多为 $20 \sim 30 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

(2) 高空强烈干冷平流是判别高空冷平流类短时强降水的重要依据, 对应中尺度分析图上高空槽及槽后的温度槽和干舌明显。并且冷空气主要通过两条路径影响云南省: 一条来自新疆地区或高原北侧, 一条来自我国东北部地区的冷涡后部。影响此类短时强降水的系统稳定、极端降水不明显、降水落区相对集中且伴有明显的大风天气。

(3) 低层暖平流类短时强降水的关键系统为季风槽及孟湾低压, 水汽主体来源于孟加拉湾, 主要影响滇中及以南地区。中尺度分析图上表现为中低层明显的西南气(急)流, 同时风场与等温线夹角大于 90° , 具有暖平流输送特征及向东向北伸展的湿舌。

(4) 地面锋面是斜压类短时强降水的重要特征。该类型强降水的冷暖空气势力相当, 对应 850 hPa 存在明显的温度锋区位于强降水区北侧,

且锋区强度 20 时较 08 时有所增大。强降水主要位于 700 hPa 切变线及 850 hPa 温度锋区前侧, 地面锋面附近的区域。

(5) 准正压类短时强降水是云南主汛期发生频率最多的一类, 根据影响系统的不同又可以将其细分为副高外围西风带低槽类(A类)及台风低压外围类(B类)。前者副高与西风带低槽相互作用是引发强降水的主要原因, 因此对两者的变化及相互作用的分析尤为重要, 同时也要关注地面是否具有明显的增温增湿现象。而这类型的强对流天气往往较为分散, 雷暴范围常常大于短时强降水, 且大多数时候雷暴与强降水落区无明显对应关系, 导致预报难度加大。后者受登陆后减弱的台风低压及其外围云系的影响, 强降水区位于受 700 hPa 湿舌、850 hPa 暖脊及地面辐合线共同影响的区域(一般位于滇中以南地区), 且随着台风低压西移降水区明显西推。

(6) 对探空物理量的统计得出各类短时强降水湿层深厚(地面到 500 hPa 附近), 层结具有对流不稳定特征。强对流发生前具有较强的 CAPE 值(平均为 $1350 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$)及一定的对流抑制能量。LI 平均为 -4°C , SI 平均为 0.5°C , 具备一定的垂直风切变及抬升条件。

(7) 几乎所有类型的短时强降水个例都伴有明显的雷暴天气, 且 $T_{75} \geq 15^\circ\text{C}$ 的指标对雷暴落区具有较好的指示意义。同时, 地面辐合线也是触发强对流天气的关键系统, 因此短时临近预报中强对流天气发生前对地面辐合线的分析至关重要。

需要说明的是, 本文通过自定义的全省性短时强降水标准选取个例, 其合理性还有待进一步的研讨。同时选取出的 157 个个例对于五类类型的短时强降水特征分析来说有点偏少, 尤其是高空冷平流类及低层暖平流类分别只有 18 和 16 个个例, 因此其结果的普适性还有待通过分析更多的天气个例来进一步验证和完善。并且强对流天气的触发还是主要靠中、小尺度天气系统, 因此将高时空分辨率的雷达及卫星资料的分析及快速同化的模式资料融合到概念模型中也是本研究下一步的工作重点(许爱华等, 2011; 郑永光等, 2010; 雷蕾等, 2012; 李华宏等, 2014; 陈永仁和李跃清, 2013; 陈英英等, 2013; 李德俊等, 2011; 俞小鼎等, 2012; 段鹤等, 2011; 2014; 张崇莉等, 2011; 黄慧君等, 2014; 许美玲等, 2013; 马红等, 2011; 金少华等, 2014)。

参考文献

- 白晓平,王式功,赵璐,等,2016.西北地区东部短时强降水概念模型[J].高原气象,35(5):1248-1256.
- 陈炯,郑永光,张小玲,等,2013.中国暖季短时强降水分布和日变化特征及其与中尺度对流系统日变化关系分析[J].气象学报,71(3):367-382.
- 陈永仁,李跃清,2013.基于SWAN产品的短时强降水雷达特征及预警分析[J].高原山地气象研究,33(1):72-79.
- 陈英英,唐仁茂,李德俊,等,2013.利用雷达和卫星资料对一次强对流天气过程的云结构特征分析[J].高原气象,32(4):1148-1156.
- 段鹤,严华生,马学文,等,2014.滇南冰雹的预报预警方法研究[J].气象,40(2):174-185.
- 段鹤,严华生,王晓君,等,2011.滇南中小尺度灾害天气的多普勒统计特征及识别研究[J].气象,37(10):1216-1227.
- 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.
- 郝莹,姚叶青,郑媛媛,等,2012.短时强降水的多尺度分析及临近预警[J].气象,38(8):903-912.
- 何立富,周庆亮,谌云,等,2011.国家级强对流潜势预报业务进展与检验评估[J].气象,37(7):777-784.
- 黄慧君,钟爱华,张健东,2014.多种探测资料在云南大理州强降水个例分析中的应用[J].暴雨灾害,33(1):50-57.
- 金少华,周泓,艾永智,等,2014.云南哀牢山东侧一次突发性暴雨过程诊断分析[J].气象,40(11):1345-1353.
- 雷蕾,孙继松,王国荣,等,2012.基于中尺度数值模式快速循环系统的强对流天气分类概率预报试验[J].气象学报,70(4):752-765.
- 雷蕾,孙继松,魏东,2011.利用探空资料判别北京地区夏季强对流的天气类别[J].气象,37(2):136-141.
- 李德俊,唐仁茂,熊守权,等,2011.强冰雹和短时强降水天气雷达特征及临近预警[J].气象,37(4):474-480.
- 李华宏,王曼,曹杰,等,2014.雷达资料在云南一次强降水过程中的三维变分同化试验[J].热带气象学报,30(5):881-893.
- 刘国忠,黄开刚,罗建英,等,2013.基于概念模型及配料法的持续性暴雨短期预报技术探究[J].气象,39(1):20-27.
- 马红,曾厅余,刘少荣,等,2011.滇东北2010年7月三次局地暴雨过程诊断分析[J].暴雨灾害,30(1):51-56.
- 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——中国强对流天气预报手册[M].北京:气象出版社:1-184.
- 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.
- 魏东,孙继松,雷蕾,等,2011.三种探空资料在各类强对流天气中的应用对比分析[J].气象,37(4):412-422.
- 吴蓁,俞小鼎,席世平,等,2011.基于配料法的“08.6.3”河南强对流天气分析和短时预报[J].气象,37(1):48-58.
- 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.
- 许宏波,谢屹然,谢银剑,2016.滇西短时强降水的时空分布特征[J].安徽农业科学,44(16):190-195.
- 许美玲,段旭,杞明辉,等,2011.云南省天气预报员手册[M].北京:气象出版社:97-153.
- 许美玲,尹丽云,金少华,等,2013.云南突发性特大暴雨过程成因分析[J].高原气象,32(4):1062-1073.
- 俞小鼎,2011.基于构成要素的预报方法——配料法[J].气象,37(8):913-918.
- 俞小鼎,周小刚,王秀明,2012.雷暴与强对流临近天气预报技术进展[J].气象学报,70(3):311-337.
- 张崇莉,向明望,赖云华,等,2011.滇西北高原冰雹、短时强降水的多普勒雷达回波特征比较[J].暴雨灾害,30(1):64-69.
- 张小玲,陶诗言,孙建华,2010.基于“配料”的暴雨预报[J].大气科学,34(4):754-766.
- 张一平,吴蓁,苏爱芳,等,2013.基于流型识别和物理量要素分析河南强对流天气特征[J].高原气象,32(5):1492-1502.
- 郑永光,张小玲,周庆亮,等,2010.强对流天气短时临近预报业务技术进展与挑战[J].气象,36(7):33-42.
- 郑媛媛,姚晨,郝莹,等,2011.不同类型大尺度环流背景下强对流天气的短时临近预报预警研究[J].气象,37(7):795-801.
- 支树林,陈娟,包慧濛,2015.一次副热带高压边缘上大暴雨的中尺度特征分析[J].气象,41(10):1203-1214.
- 朱乾根,林锦瑞,寿绍文,等,2007.天气学原理和方法:第4版[M].北京:气象出版社:320-400.
- Doswell III C A, Brooks H E, Maddox R A, 1996. Flash flood forecasting: an ingredients-based methodology[J]. Wea Forecasting, 11(4):560-581.
- Maddox R A, Chappell C F, Hoxit L R, 1979. Synoptic and meso-alpha scale aspects of flash flood events[J]. Bull Amer Meteor Soc, 60(2):115-123.