

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. 气象, 40(4): 400-411.

# 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<sup>\* 1</sup>

许爱华<sup>1</sup> 孙继松<sup>2</sup> 许东蓓<sup>3</sup> 万雪丽<sup>4</sup> 郭 艳<sup>1</sup>

1 江西省气象台, 南昌 330046

2 北京气象台, 北京 100081

3 甘肃省气象台, 兰州 730020

4 贵州省气象台, 贵阳 550002

**提 要:** 本文通过对 2000 年以来中国近百次强对流天气个例的环境场进行分析, 并查阅大量文献资料, 综合考虑强对流天气形成的热力不稳定、动力抬升和水汽这三个基本条件出发, 从强对流的不稳定条件和主要触发条件的角度, 提出中国强对流天气 5 种基本类别: 冷平流强迫类、暖平流强迫类、斜压锋生类、准正压类、高架对流类, 并给出了基本解释。高空冷平流强迫类的典型特征是 500hPa 以上的中高层强干冷平流加强并移到边界层内暖性的辐合带中。暖平流强迫类的主要特征则是不稳定发展主要源于低层强烈的暖湿平流。斜压锋生类的特征是中低层冷暖空气强烈交汇产生的深厚对流, 即斜压锋生造成的强对流往往表现为高空干冷平流和低空暖湿平流都很强烈。准正压类多发生在夏季副热带高压外侧或内部、温度梯度较弱的地区, 流场上的动力强迫和和地面局地受热不均起主要作用。高架对流类的特征是 700~500 hPa 强的西南急流在边界层内的冷垫上被抬升, 不稳定能量是来自 700 hPa 以上。通过从形成机制的差异性进行分类, 有助于更好地把握各种强对流过程中不同的天气特征、系统配置、动力热力特征及其短期潜势分析重点, 为进一步提高该类天气的预报预警水平提供更多的技术支持。

**关键词:** 强对流天气, 形势配置, 平流, 锋生, 高架对流

**中图分类号:** P456

**文献标志码:** A

**doi:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2014.04.002

## Basic Synoptic Situation Classification and Element Character of Severe Convection in China

XU Aihua<sup>1</sup> SUN Jisong<sup>2</sup> XU Dongbei<sup>3</sup> WAN Xueli<sup>4</sup> GUO Yan<sup>1</sup>

1 Jiangxi Meteorological Observatory, Nanchang 330046

2 Beijing Meteorological Observatory, Beijing 100081

3 Gansu Meteorological Observatory, Lanzhou 730020

4 Guizhou Meteorological Observatory, Guiyang 550002

**Abstract:** Based on the synoptic environment analysis of about 100 severe convection cases in China since 2000 and the reference of related literatures, from the perspectives of the three essential conditions for the development of severe convection, namely the thermal instability, lift and moisture, five basic synoptic situation configurations of severe convection in China are proposed and expounded. They are cold advection forcing category, warm advection forcing category, baroclinic frontogenesis category, quasi-barotropic category and elevated thunderstorm category. The typical characteristics of the upper cold advection forcing

\* 国家科技部十二五科技支撑计划项目(2012BAK09B04)、公益性行业(气象)科研专项(GYHY201006002)和全国强对流预报专家团队共同资助

2013 年 10 月 9 日收稿; 2014 年 1 月 13 日收修定稿

第一作者: 许爱华, 主要从事天气预报和预报技术研究. Email: 767634540@qq.com

category is that the mid-upper strong cold advection above 500 hPa strengthens and reaches the boundary warm convergence zone. The warm advection forcing category is characterized by trough with special structure moving over low-level strong warm and moist advection. The deep convection produced by the mid-lower layer convergence of cold and warm air features the baroclinic frontogenesis category. The quasi-barotropic category mostly occurs at the northern and the southern edges or the interior of summer subtropical high and the area with weak baroclinicity, where the dynamic forcing and the surface inhomogeneous local heating play major roles. The features of elevated thunderstorms are the southwest jet in 700–500 hPa lifted by boundary cold wedge and the instable energy is from above 700 hPa. The classification based on the difference of the formation mechanisms can grasp accurately the synoptic characteristics, the situation configurations, the dynamic and thermal properties and the key points in analyzing short-term potential forecast, providing more technical support to further enhance the level of weather prediction.

**Key words:** severe convection, synoptic situation configuration, advection, frontogenesis, elevated convection

## 引言

冰雹、雷雨大风、短时强降水、龙卷等强对流天气是直接由中尺度天气系统所产生的天气现象,但天气尺度系统的演变和基本要素的配置结构制约着中尺度对流系统发生、发展与消亡的物理过程。这是因为天气尺度系统的演变在很大程度上改变了局地的热力层结不稳定、垂直切变不稳定、上升运动的强弱以及水汽输送,因此,天气系统配置分析是做好强对流预报的前提。然而,不同的强对流天气过程,环流形势和天气系统配置会有不同,例如,某地对流不稳定性加大,可以由中高层冷平流加强而产生,也可以由低层暖平流加强产生;动力不稳定可以由水平风切变而产生,也可以由垂直风切变产生。强对流天气可以发生在强的动力条件和强热力条件下,也可以发生在强热力条件下和弱动力条件下以及弱热力条件和强动力条件下。这些由环流形势和天气系统配置所导致的对流条件的差异性,直接影响到强对流过程的具体天气现象和强度。

中国地域辽阔,地形复杂,强对流发生的天气尺度形势具有多样性的特点,半个多世纪来我国各地气象工作者做了大量的总结和归纳。例如:丁一汇等(1982)研究了飚线发生的天气背景和触发条件,提出了四种天气形势类型槽后型、槽前型、高压后部型、台风倒槽型或东风波型。陈立祥等(1989)在强对流天气发生时根据对流层中低层水平风的垂直切变把广州地区强对流天气分为二类四型:强切变类(风速切变型和风向切变型)和弱切变类(台风外围

型、副高边缘型)。郑媛媛等(2011)将安徽省强对流的天气形势分为冷涡槽后类和槽前类,并给出了两类物理量的对比分析,张一平等(2011)研究了东北低涡槽后形势下其强对流天气的相关物理量特征和参考阈值。许爱华等(2011)把天气形势和典型云型特征结合分析,更有助于判识强对流潜势。许爱华等(2013)对中国南方春季冷锋北侧中冰雹天气的环境场特征做了较详细的分析,指出700 hPa强西南气流在强锋区上强迫抬升和400~700 hPa上的对流不稳定以及对称不稳定是这类高架对流的主要机制。张涛等(2012)、伍志方等(2011)、王锡稳等(2004)、许新田等(2010)、张延亭(2000)、刘勇(2006)和王毅等(2012)分析了我国多个强对流个例的天气形势的配置。这些研究工作大多是针对本地天气系统来分析和分类的。曹志强等(2013)分析了近年来一些高影响强对流天气过程的卫星云图特征,并分成了4种类型:冷气团内部型、西风槽或冷涡云系尾部型、梅雨锋或切变线云系上嵌入型和高原东移高空槽云系型。樊李苗等(2013)研究了中国短时强降水、强冰雹、雷暴大风以及混合型强对流天气的环境参数特征,有助于预报员判别典型强对流天气潜势和类型。就全国而言,提炼中国强对流主要形势配置方面的工作很少,且难度较大。

本文主要是从强对流发展条件的相对重要性或者说显著特征对强对流天气形势进行分类,并给出在不同形势下导致不同类型强对流天气的机理,目的是加深对各类强对流天气发展条件的理解,有助于把握各类强对流天气分析、短期和短时预报的重点。

## 1 天气形势分类依据、资料和方法

强对流天气发生的三个基本要素是热力不稳定、动力抬升和一定的水汽条件,强垂直风切变也是强风暴特别是长生命史风暴维持的重要条件。因此,我们从高低空冷暖平流强弱(相对强弱)、水平强烈锋生(大气的斜压性强弱)等条件出发,对中国强对流天气基本天气形势配置进行分类,也就是基于产生强对流天气潜势条件的相对重要性,把中国强对流天气的形势背景分成五类:高空冷平流强迫、低层暖平流强迫、斜压锋生类、准正压类、高架对流。这五类天气尺度的环境场有着各自的显著特征,这些特征在中尺度强对流系统发展过程中所起的作用不同。

本文选取了2000年以来我国中东部近100个强对流天气过程,用中尺度天气(图)分析方法(张小玲等,2010)对每个强对流天气过程进行天气形势配置的综合分析,同时也查阅了各省预报员手册和相关文献,总结提炼出我国中东部地区五种基本配置,并给出在不同形势下导致不同类型强对流天气的主要成因。

## 2 五类强对流天气形势配置

### 2.1 高空冷平流强迫类

高空冷平流强迫类是指强对流的不稳定机制和触发系统主要是对流层中高层存在强烈发展的干冷平流,表现形式一般对应500 hPa高空(对流层中高层)西北气流或冷涡形势下,强对流产生的主要机制是垂直方向上温度差动平流形成的强热力不稳定和强风垂直切变形成的动力不稳定,这种动力不稳定主要指开尔文-亥姆霍茨不稳定,存在于高空急流的下方和对流层中低层,垂直切变不稳定强度是风暴发展高度、倾斜程度或者是否存在悬垂结构的决定性因子。在这类型中高空强干冷平流起着主导作用,一是产生强烈的静力不稳定层结,二是高空急流和高空锋区紧密联系在一起,三是高空急流是形成强风速垂直切变主要因素,四是高空强冷平流使得 $0^{\circ}\text{C}$ 和 $-20^{\circ}\text{C}$ 层较低,易出现冰雹天气。在该类型中高空西北风(或偏北风)急流、低空风水平切变、露点锋(干线)或冷锋对强对流系统起到触发和组织作

用,常常诱发飑线这类中尺度天气系统。这类强对流天气的形势配置如图1。

#### 2.1.1 热力条件

从图1中可以看到产生这类强对流天气的有利的热力条件:中高层较强干冷空气叠加在低层相对暖(湿)气流上,使得大气温度垂直递减率大,造成低层空气负浮力加大,有利于地面强对流天气特别是冰雹、大风类的强对流天气出现。同时,强对流发生前地面天气晴好,边界层有增温增湿,为强对流天气发生提供了极好的热力不稳定和能量条件。业务上常用的850与500 hPa温度之差 $\Delta T_{850-500}$ 的值,中国 $30^{\circ}\text{N}$ 以北地区多在 $28^{\circ}\text{C}$ 以上,以南地区多在 $26^{\circ}\text{C}$ 以上;郑媛媛等(2011)、张一平等(2011)、仇娟娟等(2013)研究的冰雹、大风等强对流天气的个例平均值分别达到了28.8、31.1和 $30.1^{\circ}\text{C}$ 。

#### 2.1.2 动力条件

强对流发生前,在强对流相对应的区域,中低层(925~700 hPa)有切变线和干线,少数情况在强对流发生时或发生后,可分析出新生切变线或干线,可能原因探空资料时间间隔太长,业务预报中可以借助数值预报来判识边界层(925~1000 hPa)辐合线。

地面图上,强对流天气区处于热低压倒槽或少数均压区,在其北侧一般有东西向弱冷锋和露点锋(干线)。在强对流发生前大多都有地面辐合线形成。冰雹、雷雨大风主要出现在午后至上半夜中高层冷空气经过的地区,常常在热低压、均压区东南象限内。

这类过程还具备了对流向强对流的转换条件:通常没有低空急流,但中高层有西(西北)风急流存在,垂直风切变很大,风向或风速的变化都可以很显著,850~500 hPa风向顺转可达 $90^{\circ}$ ;高空200~300 hPa急流常常通过强对流天气发生的区域上空。

#### 2.1.3 湿度条件

这类整层湿度偏干,湿层浅薄。在850 hPa以上大气层湿度条件都较差,500 hPa图上还常常有干舌(多 $T - T_d \geq 20^{\circ}\text{C}$ ),925 hPa以下甚至到近地面的湿度相对湿度大一些(高原地区湿层高度会高一些,850或700 hPa)。张一平等(2011)指出850 hPa比湿 $\geq 7 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,地面露点温度达 $16^{\circ}\text{C}$ 以上。等露点廓线与温度廓线形成“V”型,或有时在850~400 hPa某层湿度大,表现为“X”型。王秀明等(2013)对2009年6月3日研究表明:在对流层中低层强风垂直切变配置下,低层湿度成为风暴结构的

决定因素:中-高湿度环境下形成高度组织化的飏线,且其单体具有较强中层旋转;低湿度环境下产生组织程度差的一般单体和脉冲风暴。

2009 年 6 月 5 和 14 日下午到晚上江淮地区出现了大范围雷雨大风、冰雹等强对流天气,强对流天气主要发生在安徽、江苏、河南、山东南部、山西南部及浙江北部等地。图 1b 和 1c 中 6 月 5 日徐州和 6

月 14 日阜阳站探空体现了上述这类强对流的温湿场和动力场特征。这种特征决定了这类强对流天气类型是以冰雹、大风为主,有时伴有少量短时强降水。这类强对流天气首先在低层辐合系统附近发展起来,沿高空西北或偏北气流向东南移动。

高空冷平流加强过程表现形式主要有三种:横槽转竖,显著的温度槽东南移,阶梯槽补充南下。这类在中国北方地区出现较多,江南、西南、华南相对较少,由于北方冷空气南下到南方后变性显著,尤其是冷平流比较弱,500 hPa 常常处低槽底部的偏 W-WNW 气流中,或处南支槽的槽后,表现为较明显的降温和干冷空气入侵。

### 2.2 低层暖平流强迫类

低层暖平流强迫类是发生在低层 700 hPa 以下强烈发展的暖湿平流中,并加上动力扰动,低层强烈暖湿平流对建立热力不稳定起了主导作用。这种低层强暖湿平流往往和低空急流密切相关,低空急流对中尺度天气系统发展的作用主要体现在有利于热力不稳定增长、水汽输送和低空垂直切变的维持,以及启动不稳定能量释放的抬升运动。这类过程动力扰动表现为高空低槽、低空急流(急流核)、中低层切变线、地面辐合线(或海陆锋)、静止锋、地面强烈发展的低压倒槽等。有时在 300~200 hPa 存在西南(偏西)高空急流,形成较强的风垂直切变,高低空急流耦合造成强烈的垂直上升运动。因此,上述天气系统都可以是这类强对流天气的触发和组织者。这类天气形势配置如图 2。

#### 2.2.1 热力条件

这类形势配置中有利的热力条件是:700 hPa 以下有强盛西南暖湿急流,等温线与风向交角较大,暖(湿)平流显著,有利于热力不稳定层结的建立。500 hPa 以上的对流层中上部有时是弱的暖平流;有时随着高空槽发展,槽后冷平流加强并且能扩散到槽前,形成 500 hPa 温度槽超前高度槽情况;或者是高层的温度槽东移慢,低层暖脊建立快;而地面表现为高温和高湿。这些情况都会加强槽前对流不稳定层结。

#### 2.2.2 动力条件

从图 2 中和多个个例分析,我们总结出这类形势配置中的产生强对流的有利动力条件有:

- (1) 这类强对流天气发生高空槽前(700~400 hPa),低槽常常有特殊的结构:一种是前倾槽(垂直槽)或 700~500 hPa 温度槽超前高度槽,产生强的

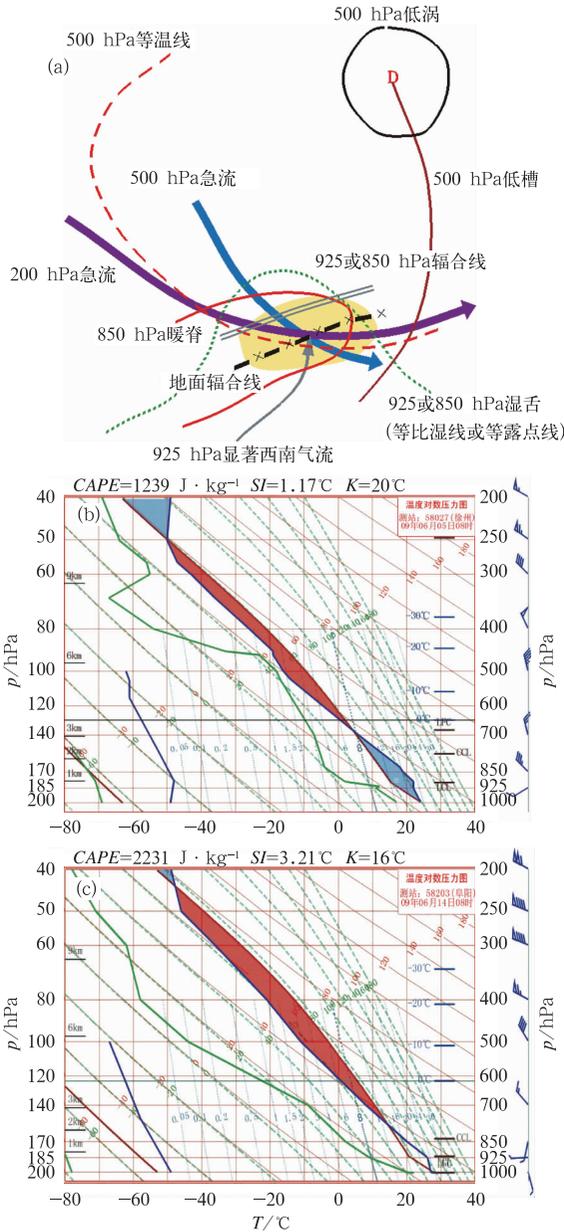


图 1 高空冷平流强迫类天气形势配置(a) (阴影区为强对流区,下同),2009 年 6 月 5 日徐州站(b)和 6 月 14 日阜阳站(c)08 时探空  
 Fig. 1 (a) Synoptic situation configuration of the upper cold advection forcing category (the shaded is severe convective zone), 08:00 BT, (b) Xuzhou Sounding on 5 June 2009 and (c) Fuyang Sounding on 14 June 2009

对流不稳定;第二种是低槽前后冷暖平流显著,东移过程中往往会发展,在云图上表现为“S”型后边界或清晰后边界,斜压性动力不稳定加大;第三种是,当500 hPa有径向度较大低槽(10个纬度以上)时,槽前有低于 $-3 \text{ dagpm}$ 的负变高,槽前较大的正涡度平流导致低层低压系统的发展,出现飏线概率更大一些。另外,丁一汇等(1982)指出有时大槽停滞或移动缓慢,槽前西南气流中有短波分裂东移,这对飏线等中尺度系统生成也有触发作用。

(2) 925~700 hPa 至少有一层存在切变线,少数情况下表现为风速辐合,切变南侧均为强盛西南

暖湿急流,低层切变线和急流构成了低层辐合系统,特别是低层急流左前侧的交汇处会形成强的上升运动。另外,在强西南急流中的大风速核向北传播也是重要的触发条件。

(3) 地面图上,强天气发生前,处于暖低压(槽)控制下,低压槽内有中尺度辐合线(静止锋)或小闭合低压,还常常伴有低于日变化的3 h 变压低值中心(多数为负值),这些都可以作为强对流的地面触发系统。尤其是低空干线附近的地面辐合系统会对中尺度对流系统发展更有利。

(4) 在高层多数有分流式辐散区或高空急流穿过低空辐合区上空。这种低层辐合、高层辐散以及短波槽前的正涡度平流产生的强上升运动都为强对流发展提供动力条件。

### 2.2.3 湿度条件

这类形势配置中,由于西南急流强,水汽充沛,温度露点差通常小于 $5^\circ\text{C}$ 的湿层能到达700 hPa以上,并在低层有明显的湿度锋区,强对流天气出现在其南缘。

2005年4月30日和2012年4月10日是长江流域到江南地区大范围的雷雨大风和局地冰雹天气过程,2005年4月30日强对流天气发生在江西北部、浙江、安徽南部,2012年4月10日强对流天气发生在湖南东部、江西、福建北部等地。从4月30日08时南昌探空(图2b)和4月10日南昌探空(图2c)可以看到对流层中下层强的暖平流以及上干下湿的特征,湿层厚度达到700 hPa以上,明显比高空冷平流类的湿层厚度高。

这类强对流类型多以雷雨大风、短时强降水、冰雹等混合性对流天气。当中层500 hPa有明显干舌时(图2b和2c),强对流天气以雷雨大风、冰雹为主,而当湿层较深厚时,在湿度大值一侧常常同时伴有短时强降水和雷雨大风。由于这类天气形势下,整层暖平流使得 $0$ 和 $-20^\circ\text{C}$ 层高度比较高,所以出现直径大于 $20 \text{ mm}$ 以上大冰雹概率相对高空冷平流类低。由于低层偏南风或西南风强盛,850 hPa以下风垂直较大,特别是 $1 \text{ km}$ 以下风垂直切变大,有利于在产生强降水的同时产生龙卷。龙卷多发生于中国东部的一些平原地区。

这类强对流天气的落区可能与低层的辐合区域关系更密切,易发生在中低层急流交汇处、或地面辐合线、或小低压附近、中低层湿度锋区南侧湿度大值区发展,并沿槽前西南气流向东北移动。当有前倾槽时或槽后冷平流较强时,强对流天气整体有南移

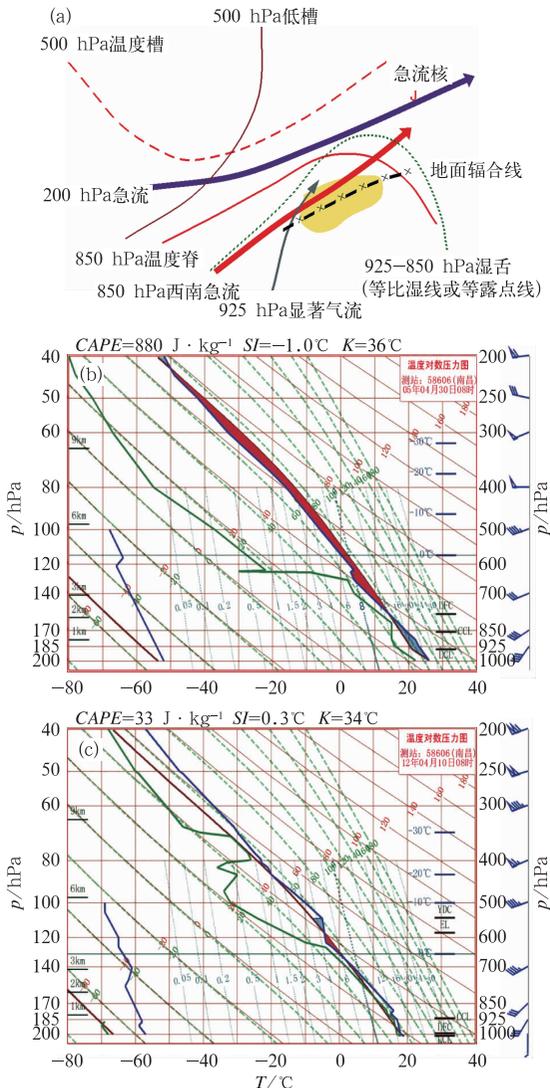


图2 低空暖平流强迫类天气形势配置(a), 2005年4月30日08时南昌站(b)和 2012年4月10日08时南昌站探空(c)

Fig. 2 (a) Synoptic situation configuration of low-level warm advection forcing category, 08:00 BT Nanchang Sounding on (b) 30 April 2005 and (c) 10 April 2012

分量。丁一汇等(1982)在分析槽前类飏线时指出,高空槽前形成一支 $\geq 20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 强风速,飏线发生强风速轴与高空槽线之间。

### 2.3 斜压锋生类

斜压锋生类是发生在中低层冷暖空气强烈交汇,并伴有明显温度锋区和锋生,地面有明显的冷锋或气旋波活动形势下,这种配置结构往往表现为高空干冷平流和低空暖湿平流都很强烈,冷暖平流不是呈上下垂直叠置,而是向冷空气一侧倾斜。显著的冷暖平流导致斜压锋生和强烈辐合抬升形成的动力强迫是这类强对流天气发生的重要条件。朱乾根等(1992)指出冷暖平流在中国境内的锋生区,集中在华南到长江流域和河西走廊到东北这些地区,常称为南方锋生带和北方锋生带。这里的斜压锋生是指较强冷暖空气共同作用,一是高空有冷性低槽发展,槽后较强冷平流促使低层温度梯度加大,二是低层西南急流形成强烈的暖湿平流也使温度梯度加大。这两支冷暖平流造成了强烈的锋生、锋面、气旋波和中低层切变线、低涡;这些天气系统是这类强对流天气触发和组织者,常常诱发飏线等中尺度天气系统。

斜压锋生类在天气图上主要有两种形式:第一种,出现紧贴冷锋的冷空气大风与雷雨大风的混合性大风,混合性大风是由强冷空气进入强烈发展的低压倒槽中引发的,低层冷暖平流都很强,表现为南风 and 北风对吹,925~850 hPa 低涡后部北风一般有 $8 \sim 12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,大风核可达 $14 \sim 20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,南侧西南风急流可达到 $12 \sim 16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,大风核达 $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上。这类对流指数可能不高,斜压锋生和锋面的动力强迫作用起了关键作用。其形势配置见图 3。这类强对流天气多自北向南(东南)移动。

2002 年 4 月 15 日下午到晚上山东、河南、安徽、湖北、江苏等地出现大范围的雷雨大风(多为偏北风)和局地冰雹天气,从 4 月 15 日 20 时安庆站探空(图 3b)显示了深厚的西南气流和暖平流,和暖平流强迫类的不同是,在低层暖低压的西北侧有很强的冷锋系统(图略),冷暖空气的强烈交汇,提供了大尺度动力强迫抬升条件,雷雨大风和冷空气大风是混合出现,暖平流强迫类中没有明显的冷空气(冷锋)活动。

第二种是在 925~850 hPa 存在冷式和暖式切变组合成“人”字型切变,高空槽前有低涡和地面气旋波形成,冷切变北侧和南侧也有较强冷暖平流,但

低层冷空气强度要较前一类弱一些。其形势配置如图 4。这类强对流天气多出现在气旋波的暖区,自西南向东北移动。

2002 年 4 月 5 日下午到晚上湖南、江西、安徽南部、浙江北部出现大范围雷雨大风和局地冰雹天气,从卫星云图和地面图上显示出长江中下游地区气旋波发展(图略),强对流天气出现在气旋波暖区,雷雨大风的风向多为南到西南。从 2002 年 4 月 5 日 08 时长沙站探空(图 4)也可以看到深厚的西南气流和暖平流。

#### 2.3.1 动力条件

从图 3 和图 4 中和多个个例的分析结果表明,这类强对流天气形势配置中的产生强对流的有利动力条件:

(1) 中纬度 500 hPa 低槽东移,多数情况下伴随大的经向度低槽(有时表现为阶梯槽),槽后有明显的冷平流,低槽东移引导地面冷空气南下。在槽前正涡度平流、暖平流作用下,使地面低值系统发展,气压下降明显。

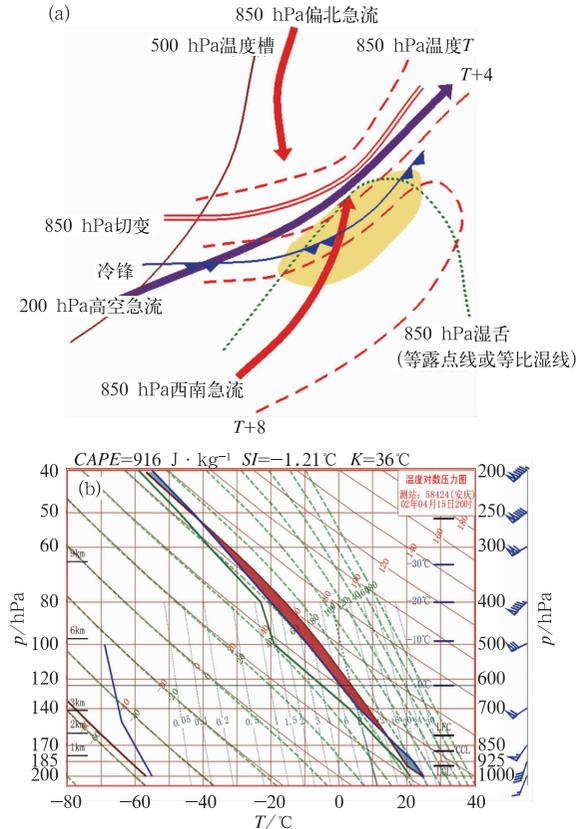


图 3 斜压锋生类天气形势配置 I (a) 和 2002 年 4 月 15 日 20 时安庆站探空 (b)

Fig. 3 (a) Synoptic situation configuration I of baroclinic frontogenesis category and (b) 20:00 BT Anqing Sounding on 15 April 2002

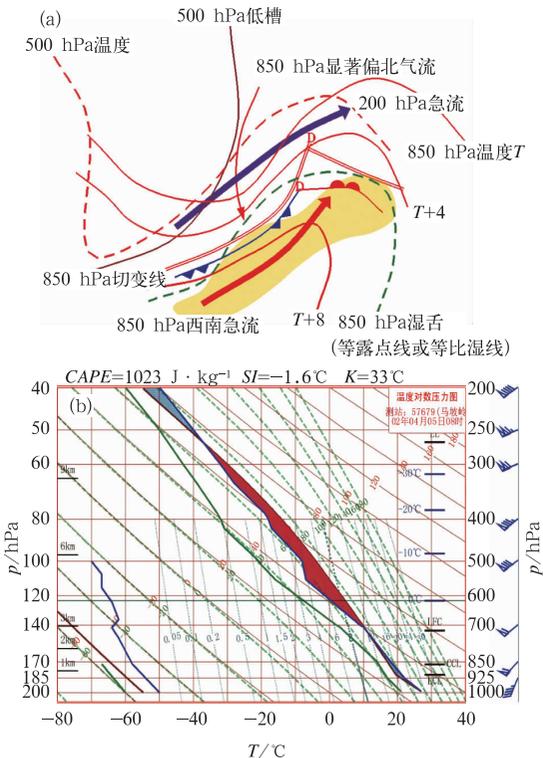


图4 斜压锋生类天气形势配置Ⅱ(a)和2002年4月5日08时长沙站探空(b)

Fig. 4 (a) Synoptic situation configuration II of baroclinic frontogenesis category and (b) 08:00 BT Changsha Sounding on 5 April 2002

(2) 低层切变线南北两侧存在强西南急流和偏北风急流(或显著的偏北气流),附近有近东西向强温度锋区(锋生),地面有明显的冷锋、气旋波活动,具有深厚的锋面大尺度的动力强迫抬升条件。

(3) 高、低空急流位置常常在5个纬度内,它们之间的耦合作用会加强锋面附近的上升运动;有时高层200~300 hPa分流式辐散场也会加强锋面附近的上升运动,此时强对流天气更为剧烈。

(4) 造成这类强对流的锋面系统较深厚,环境场的风垂直切变能达到中等以上。

### 2.3.2 热力不稳定条件和水汽条件

这类配置中有利的热力不稳定条件是:这类热力不稳定建立的机制和低空暖平流相似,低层西偏南急流形成很强的暖平流,而中高空为弱的暖平流,有时槽后冷平流扩散到槽前,有利于热力不稳定的建立。中低层强西南急流建立为强对流发展提供了很好的水汽条件。

这类强对流天气范围大、种类多,常常发展出高度组织化对线状流云带(飚线),造成雷雨大风、短时强降水、冰雹等混合性湿对流天气类型,以雷雨大风天气最多,短时强降水次之。当中层700~400 hPa

湿度较干时,则以雷雨大风天气为主。这类天气形势下,是否出现冰雹、冰雹范围大小与0℃层、-20℃高度、风垂直切变以及中层空气的湿度等有关。强对流天气伴随锋面移动。

## 2.4 准正压类

准正压类是发生在大气斜压性弱的地区和季节,冷暖平流不及高空冷平流类、低层暖平流类、斜压锋生类的显著,流场上的动力强迫和地面局地受热不均起主要作用。强对流主要发生在6—9月副热带高压(简称副高)边缘地区,例如,梅雨期的强对流往往为准正压结构。流场强迫系统主要有西风带短波槽、东风波、台风及台风倒槽、季风槽、东风急流、热带高空冷涡(或向北伸展的倒槽)、地面辐合线;有时在特定流型下,地形也是一种强迫条件。强对流发生前期,在垂直方向上往往具备了一定的热力不稳定或“中低层湿、上层相对干”的不稳定条件。在夏季中国南方,区域性强对流天气常常发生在500 hPa中心温度 $\leq -5^\circ\text{C}$ 的冷槽中。连续高温天气也是一个不可忽视的重要条件。这类天气形势配置相对复杂一些。强对流类型多为雷雨大风和短时强降水相伴出现,特别是有热带气旋活动时,有时会出现龙卷。由于这类影响系统复杂,以下讨论这类强对流天气常见的三种天气形势配置。

### 2.4.1 西风带低槽进到副高边缘

当副高位置有明显西进或东退,副高西北侧有高空低槽活动时,容易出现强对流天气,常见的形势配置如图5。

#### 2.4.1.1 热力不稳定条件

这类配置中有利的热力不稳定条件是:前期副高控制,地面气温高,强对流天气发生前最高气温一般在 $33^\circ\text{C}$ 以上;925~850 hPa有暖脊,中高层700~500 hPa有弱的变温,或者高空有温度槽移入副高边缘的低层暖脊上方,有时冷温度槽可以达到400~200 hPa,这种配置有利于热力不稳定建立。

2007年6月24日江西中北部、浙江东部地方出现了明显的雷雨大风和 $30\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 以上短时强降水天气;江西境内监测到落雷102360个,平均密度 $0.613\text{ 个}\cdot\text{km}^{-2}$ ,雷击死亡35人。强对流天气发生在588 dagpm控制范围内的。图5显示了这类强对流天气的探空特征,其风垂直切变较前三类明显要小。

#### 2.4.1.2 动力条件

这类天气形势配置中有利动力条件是:(1)强对

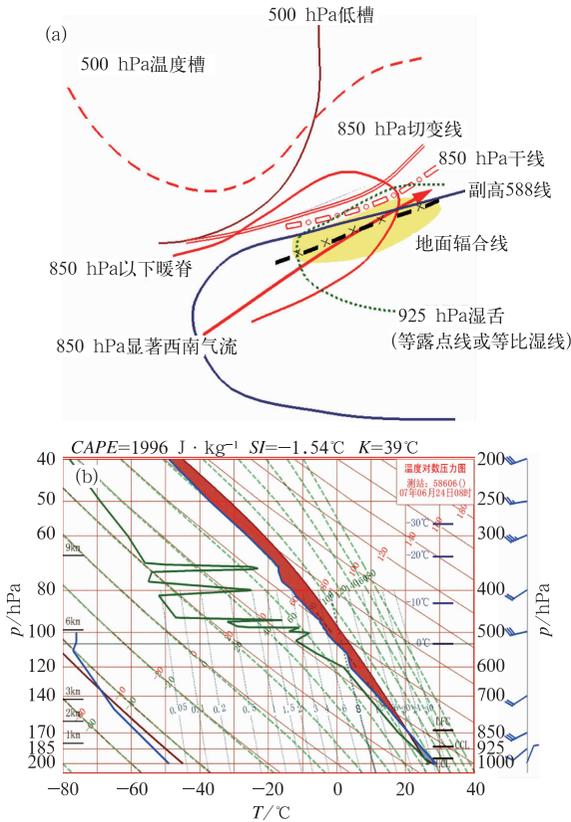


图 5 准正压类-副高边缘强对流天气形势配置(a)和 2007 年 6 月 24 日 08 时南昌站探空(b)  
 Fig. 5 (a) Synoptic situation configuration of quasi-barotropic category severe convection at the edge of subtropical high and (b) 08:00 BT Nanchang Sounding on 24 June 2007

流发生前,大多地面有明显的辐合线,辐合线是重要的触发条件之一。辐合线附近有时由于太阳辐射加热的不均匀,形成明显的温度锋区,100 km 温差常常达到 6~10℃,强对流发生就发生在辐合线附近。  
 (2)低槽前部的上升运动。(3)925~700 hPa 有槽线或切变线或风速辐合线。(4)高空 200~300 hPa 具有辐散式分流区,或是高空脊(夏季南亚高压)脊线附近,高空辐散抽吸作用有利于强对流发生。

2.4.1.3 湿度条件

在副高边缘,低层西南气流的水汽输送形成湿舌,比湿是这五类强对流配置中最大的一类,且湿舌有时能到达 500 hPa。在副高边缘,若低层有露点锋活动时,强对流的范围更大,强度会更强。

丁一汇等(1982)指出,如果高原地区康藏高压(西部副热带大陆高压)存在,两高之间形成一深厚的南北向切变时,对流天气可能维持较长时间,在这种情况下 500 hPa 上也常有强风速存在。

2.4.2 东风波西移

7—9 月,青藏高压位置偏东,副高脊线偏北,对流层中高层基本气流转为偏东风,在这些偏东气流中有时会发展东风扰动。梁必骥等(1990)研究表明,当西太平洋上空基本气流出现水平切变,且切变足够明显;副高加强,副高边缘风速加大,初始扰动便在东风气流中生成发展,亦即基本气流的水平切变造成正压不稳定,使扰动获得动能发展成东风波。这种环流中形成的东风波,是典型东风波。另外还有季风槽、热带气旋倒槽西移,形成类似东风波的一种扰动(以下简称东风扰动)。热带东风波或东风扰动主要影响中国 30°N 以南地区。东风波或东风扰动结构复杂,林确略等(2010)研究表明东风波可以出现在 850~200 hPa 厚度中任何高度上。中高层东风波容易产生强对流性天气,中低层东风波更容易造成强降水。肖文俊(1990)指出东风波主要天气区与基本气流的垂直切变有关,在热带东风波区域中,若东风随高度增强的地区,基本气流的垂直切变为东风,则坏天气区在槽线以西。若东风随高度减弱的地区,基本气流的垂直切变为西风,则坏天气区在槽线以东。夏秋萍等(2011)在分析东风波引起的特大暴雨天气过程指出,东风风速随高度增加减小,强降水发生在槽(波)后。梁必骥等(1990)指出影响华南的东风波,降水大部分分布在槽前及槽线附近,大约占总数的 66%。

赵广洁(2004)研究表明由东风波单一系统多造成强降水天气和一些局地雷雨大风和雷电灾害,产生大范围雷雨大风等强对流天气较少,但当东风波或倒槽系统和西风带低槽(温度槽)或其他热带系统相遇(靠近)时,各天气系统相互作用,会造成较明显的强对流天气(许爱华等,2011),概念模型如图 6。这类强对流天气类型以短时强降水、雷雨大风为主,偶尔出现冰雹。东风波或低压倒槽系统与季风槽结合则是以强降水为主。

2.4.2.1 热力不稳定条件

这类形势配置中有利的热力不稳定、动力、湿度条件是:500 hPa 有冷槽位于槽前,多数冷槽中有低于 ≤-5℃ 的中心,并叠加在低层暖脊上,有利于产生对流不稳定,850 与 500 hPa 温度差 ΔT<sub>850-500</sub> 往往能达到 25℃ 以上。

2.4.2.2 动力条件

低槽、东风波两者相向移动形成的上升运动叠加以及边界层的辐合线系统是这类强对流过程发展

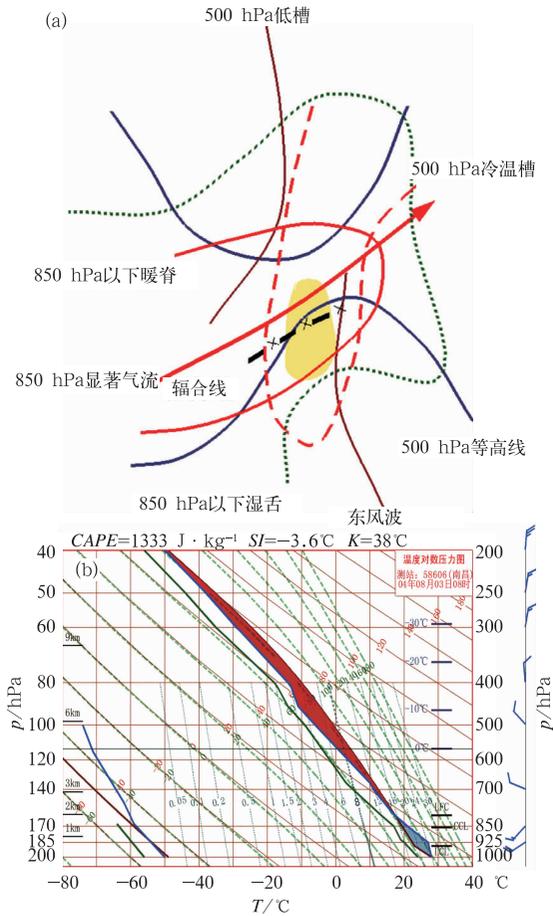


图6 东风波与低槽相互作用形成强对流天气的天气形势配置(a)和2004年8月3日08时南昌站探空(b)

Fig. 6 (a) Synoptic situation configuration of severe convection induced by the interaction between easterly wave and trough and (b) 08:00 BT Nanchang Sounding on 3 August 2004

的动力抬升条件。强对流常常发生在两个系统之间和500 hPa的冷槽中。

#### 2.4.2.3 水汽条件

这类形势配置中水汽来源有两支：主要是一支东风波西侧的东南风从海上输送水汽到大陆；有时在低层还会有一支西南气流输送水汽。

#### 2.4.3 热带气旋外围

热带气旋(以下简称台风)经常引起局地性强对流天气,陈联寿等(1979)指出台风中的雷暴主要集中在两个部位,一个在台风边缘或外围的孤立积雨云团或台前飚线中,另一个在台风眼壁的强对流云环中。对台风眼壁云环中的强对流多为强降水。这里讨论台风外围螺旋云带或外围环流中发生的强对流。

热带气旋外围强对流主要以雷雨大风为主,有时伴有短时强降水;有时还会出现龙卷,台风环流及其外围是中国南方地区出现龙卷风的一种主要天气背景之一。这类强对流天气多发生在台风北侧到西侧。陈联寿等(1979)对台风龙卷生成的机制作了推测,台风龙卷与低层风的强垂直切变有密切关系,到达沿岸和正在填塞的台风可迅速出现地面冷心,这导致建立低层风的强垂直切变,最后生成龙卷。沈树勤(1990)研究指出:龙卷产生在台风的一定部位,一般在台风运动方向的右前象限,分析台风前部龙卷风萌发的原因时指出台风前部的强对流云团中,涡度方程倾斜项(风垂直切变和中尺度垂直速度梯度正相关)的作用是龙卷涡旋萌发的重要条件之一。黄忠等(2007)对2004年台风云娜向西北移动的过程中产生的大范围强对流天气综合分析表明:华南上空的副高和下沉气流减弱,在其外围弱低压槽、海风辐合和干线共同作用下触发了强对流。李彩玲等(2009)分析指出台风外围强对流天气发生在地面切变线南侧、中低空强偏东风急流出口处,即偏东风辐合最强烈的区域。由此可见,热带气旋外围强对流的形成与台风外围弱低压槽、边界层 $\alpha$ 中尺度的辐合线(海风辐合)、干线、中低层的辐合区(水平风向切变和风速切变)和较大的风垂直切变有关,流场强迫起了重要作用。台风外围热力不稳定条件也是不可忽视的。

#### 2.4.3.1 热力不稳定条件

热带气旋外围强对流天气的形势配置见图7,从图中可以看到这类形势配置中有利的热力条件是:台风登陆前期,一般地区有前连续高温天气,地面有较高的能量积蓄。低层有暖舌发展,而中高层有温度冷槽存在,冷槽温度常常低于 $-4^{\circ}\text{C}$ (中心 $\leq -5^{\circ}\text{C}$ )。

#### 2.4.3.2 动力条件

这类形势配置下有利的动力条件是:(1)地面为低压倒槽,强对流发生前有辐合线生成,辐合线走向常常与螺旋云带走向近于平行。(2)中低层有辐合系统重叠:台风倒槽两侧不仅有风向辐合,还有明显的风速辐合。在台风倒槽的东南侧850~500 hPa有东南急流,强对流生成于急流出口区,风垂直切变大或有增大的过程。

#### 2.4.3.3 水汽条件

这类形势配置下有利的水汽条件是850 hPa以下有湿舌建立。探空图上显示了很低的抬升凝结高

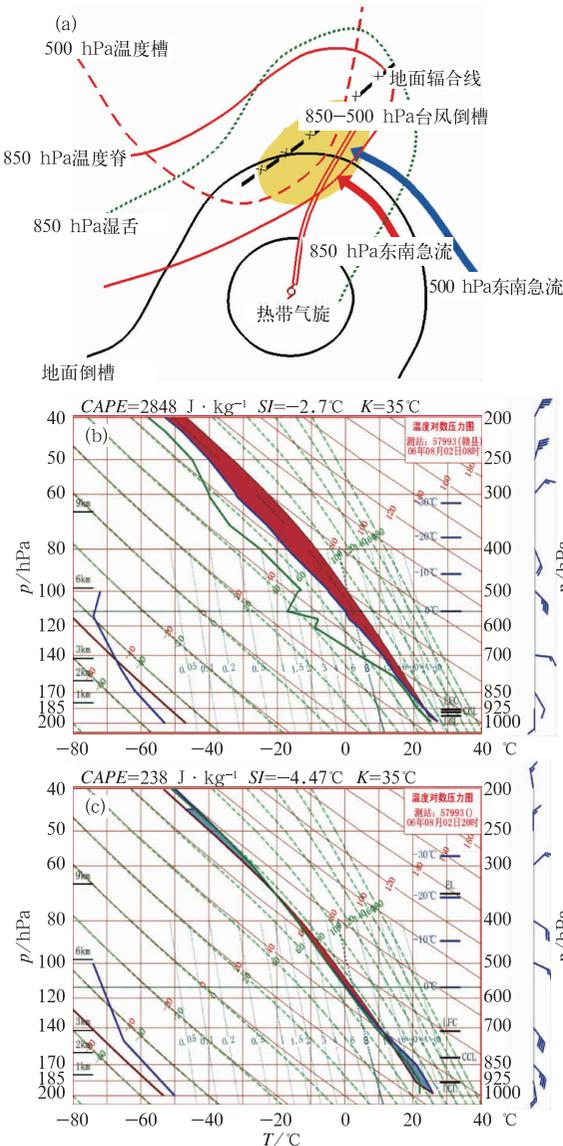


图 7 台风外围强对流天气的概念模型(a), 2006年8月2日08时(飏线发生前)(b)和 20时(飏线发生后)(c)赣州站探空

Fig. 7 (a) Conception pattern of severe convection outside typhoon, (b) 08:00 BT (before squall) and (c) 20:00 BT (after squall) Ganzhou Sounding on 2 August 2006

度、自由对流高度(图 7b),十分有利于强对流天气形成。

2006年8月2日江西、湖南、广东、广西、福建等省出现了大范围的雷雨大风、短时强降水等强对流天气,其中江西中南部到湖南东部先后受到飏线系统影响,雷雨大风区域较集中,时间也多发生20时以前。从2006年8月2日08和20时赣州探空(图7)对比分析可以看到,08时偏东风随高度增加,

上干下湿,具有较高的CAPE(对流不稳定),20时随着台风环流的靠近,700 hPa以下东南风明显加大,低层垂直切变加大,中到大雨的范围扩大。

关于副高南缘东风急流和季风槽影响下的强对流形势主要出现在华南地区,强对流的类型是以短时强降水为主,由于篇幅有限这里不作讨论。

### 2.5 高架对流类

有一部分雷暴是从大气边界层之上被触发的,称为高架雷暴或高架对流。高架雷暴是发生在地面锋面北侧冷气团中一种雷暴,此时地面附近通常为稳定的冷空气,低层有明显的逆温,来自地面的气块很难穿透逆温层而获得浮力,而是逆温层之上的气块绝热上升获得浮力。俞小鼎等(2012)指出高架雷暴的触发机制不少情况下是900~600 hPa的中尺度辐合切变线触发的。许爱华等(2013)分析了2009年2月24日至3月4日中国南方春季锋后冷区连续性雹暴天气,指出其不稳定建立主要是来自中层700~500 hPa层。雹暴发生前期有较强冷空气南下,925 hPa以下为偏东风到东北风,是一个强冷垫;850 hPa上有冷式气旋性切变和锋区;700 hPa强暖湿气流沿锋面(强冷垫)做斜升运动,对流层中层700~500 hPa对流不稳定以及中中层强风垂直切变与水平温度梯度共同作用使得中层湿对称不稳定发展;当低槽在强锋面上移过时,局地湿度增加,锋面坡度变陡,上升运动加强,非常有利于形成“高架雷暴”和雹暴。这种强对流天气类型以冰雹为主,冰雹直径大多在10 mm以下,少数可达20 mm以上,很少出现8级以上大风和龙卷。这类过程多出现在2—4月中国南方地区。形势配置如图8。

#### 2.5.1 热力不稳定条件

这类形势配置下产生冰雹热力不稳定条件是:(1)850 hPa以下处在锋后温度较低的冷气团中;700 hPa存在 $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上西南急流形成的暖脊,导致700 hPa以下形成逆温、逆湿,500 hPa常常是温度槽略超前高度槽(有时重合)并伴有24 h负变温,500 hPa温度槽叠加在700 hPa暖脊(正变温)上,形成对流不稳定。因此,一些对流参数或能量指数只有在逆温层顶开始计算才有指示性。(2)许爱华等(2013)分析,较弱对流不稳定情况下,700 hPa强暖湿气流沿锋面做斜升运动时,湿位涡中的斜压项 $MPV_2$ ,在冰雹发生前后负值变大,斜压性增强,有利于产生对称不稳定,垂直涡度发展。

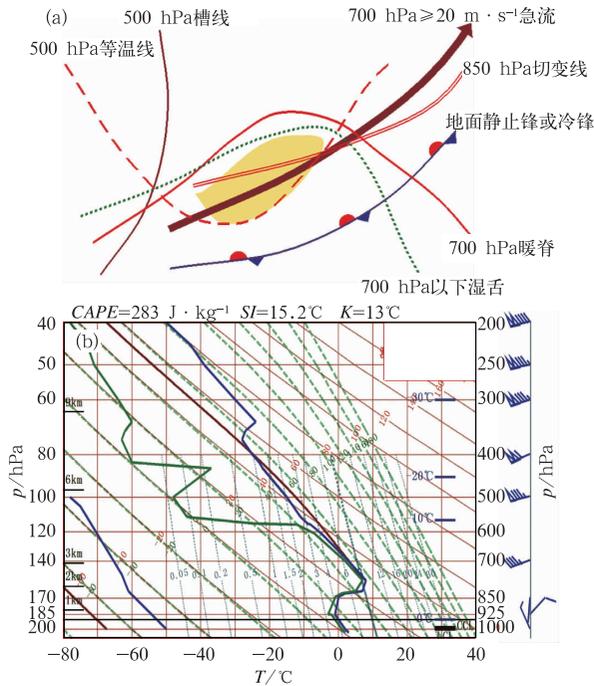


图8 高架雷暴概念模型(a)及

2009年2月27日20时长沙站探空(b)

Fig. 8 (a) Conception pattern of elevated thunderstorm and (b) 20:00 BT Changsha Sounding on 27 February 2009

### 2.5.2 动力条件

这类形势配置下产生冰雹有利的动力抬升条件是:(1)低层850 hPa有强锋区,700 hPa强暖湿气流沿强锋区做斜升运动;(2)500 hPa短波槽前的上升运动;(3)850 hPa多数有切变线(少数为偏东风)辐合形成上升运动。

### 2.5.3 湿度条件

这类形势配置下产生冰雹天气的湿度条件是:在湿度垂直分布呈上干下湿的特征,700 hPa以下水平相对湿度80%以上,但由于气温低,水汽的绝对含量比较低,比湿低于 $10 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,且925~700 hPa比湿 $q$ 相近,甚至700 hPa比湿 $q$ 还高于850和925 hPa,这与700 hPa强西南急流水汽输送有关。

另外,这类形势配置中存在很强的风垂直切变,700与850 hPa风矢量差可达 $16 \sim 20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,垂直切变达到 $(10 \sim 13) \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 。抬升凝结高度TCL,自由对流高度LFC,对流凝结高度CCL,0和 $-20^\circ\text{C}$ 层高度都很低, $0^\circ\text{C}$ 高度往往低于3.0 km,加上对流有效位能较小(从逆温层顶上计算),垂直运动发展高度不高(可以从雷达回波顶高度在7 km以下来佐证),这些可能是多数情况下,冰雹直径小

的主要原因。

2009年2月24日至3月5日贵州、湖南、湖北、江西四省出现了连续降雹天气,是一次我国南方锋面北侧冷气团中典型的高架对流天气。2月27日20时长沙站探空(图8)显示了这类高架对流的特征:700 hPa以下强锋面逆温,850 hPa以上强风垂直切变,很低的0和 $-20^\circ\text{C}$ 高度,对流层中层弱的CAPE。

农孟松等(2013)、吴乃庚等(2013)通过分析2012年2月27日的高架对流产生的冰雹过程,再次验证了上述我国南方高架对流的特点和环境场的热力、动力特征,并且从多普勒雷达的风暴追踪信息中发现风暴生成高度高,质心在5~6 km,并且随着时间推移高度逐渐降低,显示了这类高架对流的特点。

## 3 结论与讨论

通过对上述中国五类强对流天气的形势配置的讨论分析,可以看到强对流天气发生的三个基本条件在不同类型的表现形式有不同,相对重要性也有所不同,因此,在强对流天气潜势条件分析中,分析的侧重点会有所不同。为此,对五类强对流天气形势的分析重点总结如下:

(1) 高空冷平流强迫类分析重点是:高空冷平流加强的时间和地区;边界层内的辐合线(干线)和暖中心以及相对湿度,边界层相对湿度是五类配置中最小的。

(2) 冷低层暖平流类分析重点是:对流层中层的低槽前后暖平流分布以及低槽云系的特殊的形态;高空冷平流或冷槽较弱,中低层急流出口交汇区,地面显著降压区、地面辐合线(静止锋);在低层湿舌上是否叠加中层干空气以及高低空急流的耦合机制。

(3) 斜压锋生类中冷暖空气强烈交汇,是预报员容易关注到的,因此,分析重点是区别冷空气大风、有利深对流发展的一些条件,如:热力不稳定是增强还是减小?当低层冷空气南下速度快而中高层冷空气南下慢,这种情况下热力不稳定就是减小的;而当引导冷空气南下的低槽前部是温度槽,不稳定就可能加大。另外值得关注的是冷锋前显异常降压区和高低空急流的耦合。

(4) 准正压类分析重点是:副高边缘的中高层

温度槽、低层湿度锋区;低纬天气系统以及中低纬度系统的相互作用;地面辐合线和持续高温。

(5) 高架雷暴类分析重点是:低层冷垫和逆温;700 hPa  $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  以上的西南急流;500 hPa 短波槽(特别是温度槽超前高度槽);700 与 500 hPa 温度差。

以上是对中国强对流天气的基本形势配置进行分类,这种分类通过从形成机制的差异性进行分类,可以帮助预报员更准确、快速地把握不同强对流过程中不同的天气特征、系统配置、动力热力特征及其短期潜势分析重点,从而提高该类天气的预报预警水平。但是这种分类一是可能难以涵盖全国各地所有的强对流天气形势配置;同时天气尺度的形势配置和产生强对流天气的中尺度天气系统两者不是一一对应的,因此,在实际业务预报中,还要注意从强对流形成的条件和机制出发,结合物理量来诊断分析天气系统的动力、热力结构,对强对流潜势做出正确的判断。二是强对流天气的基本形势配置在各地区的表现形式不尽相同,存在一些差异性,需要进一步细化和量化。三是地形对强对流天气产生的作用在本文没有涉及到。例如,对于西部地区,由于海拔高度较高,925、850 hPa 已不再适用,基本配置中多用到 700 和 500 hPa 等压面层,并且由于地形条件的特殊性,强对流天气的表现形式也有其特殊性。另一方面,我国东部地区是显著的季风控制区,伴随夏季风不断向北推进或南落,不同区域的强对流配置结构也会发生明显转化。例如,华南前汛期和江南春季强对流往往表现出很强的斜压性,盛夏季节的强对流往往表现出准正压特征;而在华北和东北地区以及黄淮一带,初夏季节的强对流往往与高空强冷平流强迫或斜压强迫有关,盛夏季节多数情况下表现为低空暖平流强迫。

## 参考文献

- 曹治强,王新. 2013. 与强对流相联系的云系特征和天气背景. 应用气象学报,24(3):365-372.
- 陈立祥,刘运策. 1989. 广州地区强对流统计特征和分类特征. 气象,5(2):170-178.
- 陈联寿,丁一汇. 1979. 西太平洋台风概论. 北京:气象出版社,463-465.
- 仇娟娟,何立富. 2013. 苏沪浙地区短时强降水与冰雹天气分布及物理量特征对比分析. 气象,39(5):577-584.
- 丁一汇,李鸿洲,章名立,等. 1982. 我国飚线发生条件研究. 大气科学,6(1):18-27.
- 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. 高原气象,32(1):156-165.
- 黄忠,张东. 2007. 台风远外围大范围强对流天气成因综合分析. 气象,33(1):25-31.
- 李彩玲,陈艺芳,蒋荣复. 2009. 热带低压远外围强对流天气的动力机制. 广东气象,31(5):506-513.
- 梁必骐,王安宇,梁经萍,等. 1990. 热带气象学. 广州:中山大学出版社,158-176.
- 林确略,彭武坚,刘金裕. 2010. 影响桂东南东风波特征及其概念模型. 气象研究与应用,31(3):5-10.
- 刘勇. 2006. 陕西一次槽前强对流风暴的诊断分析. 高原气象,25(4):687-695.
- 农孟松,赖珍权,梁俊聪,等. 2013. 2012 年早春广西高架雷暴冰雹天气过程分析. 气象,39(7):874-882.
- 沈树勤. 1990. 台风前部龙卷风的一般特征及其萌发条件的初步分析. 气象,16(1):11-15.
- 王锡稳,陶健红,刘治国,等. 2004. “5.26”甘肃局地强对流天气过程综合分析. 高原气象,23(6):815-820.
- 王秀明,周小刚,俞小鼎. 2013. 雷暴大风环境特征及其对风暴结构影响的对比研究. 气象学报,71(5):839-852.
- 王毅,郑媛媛,张晓美,等. 2012. 夏季安徽槽前形势下龙卷和非龙卷型强对流天气的环境条件对比研究. 气象,38(12):1473-1481.
- 吴乃庚,林良勋,冯业荣,等. 2013. 2012 年初春华南“高架雷暴”天气过程成因分析. 气象,39(4):410-417.
- 伍志方,曾沁,吴乃庚,等. 2011. 广州“5.7”高空槽后和“5.14”槽前大暴雨过程对比分析. 气象,37(7):838-846.
- 夏秋萍,张滨. 2011. 一次东风波引起的特大暴雨天气过程分析. 海洋预报,28(3):68-72.
- 肖文俊. 1990. 东风波天气区域分布与基本气流垂直切变关系. 北京大学学报(自然科学版),26(8):334-339.
- 许爱华,陈云辉,陈涛. 2013. 锋面北侧冷气团中连续降雹环境场及成因. 应用气象学报,24(2):197-205.
- 许爱华,马中元,叶小峰. 2011. 江西 8 种强对流天气形势与云场特征分析. 气象,37(10):1185-1196.
- 许新田,王楠,刘瑞芳,等. 2010. 2006 年陕西两次强对流冰雹天气过程的对比分析. 高原气象,29(2):447-460.
- 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. 气象学报,70(3):311-337.
- 张涛,方翀,朱文剑,等. 2012. 2011 年 4 月 17 日广东强对流天气过程分析. 气象,38(7):814-818.
- 张小玲,张涛,刘鑫华. 2010. 中尺度天气的高空地面图综合分析. 气象,36(7):143-150.
- 张延亭. 2000. 低空急流诱发地面辐合线的一种机制. 江西气象科技,23(1):14-17.
- 张一平,牛淑贞,席世平,等. 2011. 东北低涡槽后型河南强对流过程的天气学特征分析. 暴雨灾害,30(3):193-201.
- 赵广洁. 2004. 影响广西的东风波特点. 广西气象,25(2):8-9.
- 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. 气象,37(7):795-801.
- 朱乾根,林锦瑞,寿绍文,等. 1992. 天气学原理和方法. 北京:气象出版社,102-104.