

许新田,刘瑞芳,郭大梅,等. 陕西一次持续性强对流天气过程的成因分析[J]. 气象,2012,38(5):533-542.

# 陕西一次持续性强对流天气过程的成因分析<sup>\*</sup>

许新田 刘瑞芳 郭大梅 李萍云 侯建忠 陶建玲

陕西省气象台,西安 710015

**提 要:** 利用常规资料、地面加密资料、TBB 和 NCEP 再分析等资料,对 2006 年 6 月 23—25 日陕西一次持续性的强对流天气过程进行了天气动力学诊断和中尺度特征分析。结果表明:(1)这次持续性的强对流天气发生在蒙古冷涡的大尺度环流背景下,从冷涡底部分裂的下滑冷槽是强对流天气的影响系统;中高层冷槽和低层暖温度脊、湿舌的上下叠置,有利于对流不稳定的建立和发展。(2)对流层低层 850 hPa 附近的逆温层所形成的干暖盖,更有利于深厚对流活动的发生;大气温度直减率越大越有利于雷暴大风的发生,对流有效位能(CAPE)和垂直风切变的大小与对流性天气的强弱有很好的对应关系。(3)23 和 24 日的强对流天气是由生命史达 6 小时左右的  $\beta$  中尺度雹暴云团造成,而 25 日的剧烈天气是由生命史达 10 小时左右的  $\alpha$  中尺度飚线云团造成。(4)地面辐合线或干线是触发强对流天气的因子之一,对流单体一般生成于地面辐合线附近,在地面辐合线与干线结合处易于对流单体或云团的新生和发展。

**关键词:** 强对流, 环境场, 中尺度分析, TBB, 地面辐合线, 干线

## Cause Analysis of a Continuous Severe Convective Weather in Shaanxi

XU Xintian LIU Ruifang GUO Damei LI Pingyun HOU Jianzhong TAO Jianling

Shaanxi Meteorological Observatory, Xi'an 710015

**Abstract:** Using the observational data, intensive surface observation data, TBB data and NCEP reanalysis data, the synoptic and dynamic diagnosis and mesoscale characteristics of a continued strong convection weather process are analyzed. The results show that: (1) the Continuous downslide cold troughs, from Mongolia cold vortex, are its impact systems. High cold trough, low-level warm temperature ridge, and wet tongue overlapping are conducive to the establishment and development of convective instability. (2) The warm dry lid formed by the inversion layer near 850 hPa at the lower troposphere is more conducive to the occurrence of deep convective activity. The larger the air temperature lapse rate is, the easier the occurrence of thunderstorm and gale is. And there is a good correspondence between magnitude of the CAPE, vertical wind shear and the strength of convection weather. (3) The strong convection weather process in 23—24 June 2006 is caused by meso- $\beta$  scale hailstorm cloud with a 6 h life time, but the violent weather in the 25th is caused by meso- $\alpha$  scale squall line cloud with a 10 h life time. (4) The surface convergence line or dry line is one of the factors which trigger the strong convection; and the convective cells or cloud cluster are generally generated close to the surface convergence line.

**Key words:** severe convection, environmental field, mesoscale analysis, TBB, surface convergence line, dry line

\* 国家自然科学基金项目(40505010)和 2011 年中国气象局预报员专项(CMAYB2011-50)共同资助  
2011 年 3 月 16 日收稿; 2011 年 9 月 29 日收修定稿  
第一作者: 许新田,主要从事天气预报及预报技术研究工作. Email:xtxu331@163.com

## 引 言

强对流天气具有影响范围小、发展速度快、持续时间短等特点。它的发生伴有雷暴、短时暴雨、冰雹、强风(龙卷风)等灾害性天气。强对流天气虽然是一种局部的灾害性天气,但往往也是最严重的自然灾害之一。陕西省处于中国西北地区东部,中北部处于干旱和半干旱区域,地形复杂,自然条件差,每年春、夏两季冰雹、大风等强对流诱发的气象灾害给陕西的工农业生产和人民生命财产造成极大危害。例如,2005年5月30日下午到晚上陕西出现了一次大范围强对流冰雹大风天气,30日15:00(北京时,下同)强对流天气从陕北西北部发展起来,并快速南下东移,横扫陕西大部,生命史长达9个多小时,部分地区产生了雷雨大风、冰雹和短时强降水天气,其中榆林市的定边县15:00最大风速达 $28\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,咸阳市的旬邑县最大冰雹直径达60 mm,据不完全统计,这次过程造成了近20万 $\text{hm}^2$ 农田受灾或绝收,直接经济损失近5个亿。

强对流天气的发生、发展主要依赖大气的热力及动力条件,其中最重要的是中层有干空气或中低层有逆温层(干暖盖)和强垂直风切变<sup>[1-3]</sup>。近几年,随着探测、数值模拟等技术手段的提高以及理论水平的完善,对强对流天气的预测水平有了较大的提高。同时,一些气象条件和物理参数诸如CAPE、水汽条件、风向风速切变、大气能量等被证明和强对流天气有密切关系<sup>[1-5]</sup>。廖晓农等<sup>[6]</sup>对1969年8月29日出现在北京的一次罕见大雹事件分析认为,华北东部的降雹区位于高能带中,北京在高能带的中心并且对流有效位能(CAPE)和抬升指数(LI)均达到了一个较高的水平,特别是在 $-30\sim-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 层内有高的CAPE值,使大冰雹的出现成为可能。此外,对流层中下层较强的环境风垂直切变有利于多单体风暴或超级单体等强风暴云的发展,从而增加了冰雹出现的几率。盛日锋等<sup>[7]</sup>通过对2005年7月山东一次飚线过程的中尺度分析认为,低涡后部的横槽转竖是飚线发生的大尺度环流背景,横槽转竖过程中引导高空冷空气下泻,形成上干下暖的不稳定层结,不稳定层结主要是通过高低空的温度差动效应来实现的。张霞等<sup>[8]</sup>对2002年7月19日郑州一次强对流天气过程分析认为,大的环境风垂直切变有利于强风暴云发展,强风暴云持续维持,有利于降

雹持续较长时间。王华等<sup>[9]</sup>对2005年北京城区两次强冰雹天气的对比分析认为,雹云的演变、冰雹的落区与地面中尺度系统有较好的对应。从陕西对此类天气的研究来看,武麦凤等<sup>[10]</sup>对2005年5月30日发生在陕西省境内的飚线过程进行分析认为,地面到500 hPa各层影响系统的前倾结构,使前倾结构控制区内地区的不稳定度迅速加强,加之蒙古冷涡旋转分裂冷空气触发形成 $\beta$ 中尺度对流系统,为飚线形成提供了前期动力和热力条件。

本文利用常规资料、地面加密资料、FY-2C卫星TBB和NCEP再分析等资料,采用天气动力学诊断方法和强天气分析技术,对这次持续性的强对流天气过程的大尺度环境背景、物理量场进行分析和研究,试图揭示造成陕西强对流天气的中小尺度天气系统发生、发展的环境场条件,探讨这次强对流天气过程的中小尺度天气系统演变特征及触发机制,特别是找出了25日的强对流天气明显强于前2天的一些原因,提高了对此类强对流天气发生发展机理的认识水平,为今后此类强对流天气预报提供可参考的依据。

## 1 强对流天气概况

2006年6月23—25日下午到傍晚,陕西中北部地区连续3天出现历史上罕见的强雷雨天气,部分地区出现了冰雹、大风天气,这次强对流天气涉及到陕北、关中、陕南秦岭山区共三十多个县(市)区,分布范围广,强度大。

23日13:00—17:00陕北榆林市出现雷暴、大风,其中4个县(区)伴有短时大风( $\geq 17\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,下同),风速最大为榆林市的横山县,达 $24\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

24日15:00—20:00陕西北部的4个地市先后出现雷暴、冰雹、大风天气,其中佳县、米脂、子洲、宜川、铜川、耀州、太白7站下了冰雹,佳县最大冰雹直径达11 mm,7个县(区)伴有短时大风,风速最大为关中地区的富平县,达 $24\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

25日15:00—21:00陕北、关中和陕南秦岭山区先后出现雷暴、冰雹、大风天气,其中安塞、延安、甘泉、洛川、黄龙、彬县、韩城、合阳、大荔、凤县、商州区、城固等12个县(区)出现冰雹天气,安塞最大冰雹直径18 mm,全省14个县(区)出现大风,特别是大荔县25日19:04出现有气象记录以来的最大风速,达 $32.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

这次连续性的强对流天气特点如下:(1)连续3天出现强对流天气,且强度和范围一日比一日强,逐渐向南缓慢扩展;每日持续6小时左右。(2)大风站次多,风力大:全省共25县(区)出现短时大风,大荔县瞬时极大风速达 $32.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。(3)冰雹站数多:全省共出现19县(区)出现冰雹。(4)损失严重:这次灾害涉及面积广,全省共10县的84.2万人受灾,直接经济损失1.8亿元,特别是25日的损失尤为惨重,共造成8人死亡,50多人受伤。

## 2 环流形势特征

### 2.1 500 hPa 形势分析

在500 hPa图上,6月22—24日,西西伯利亚和贝加尔湖西部有高压脊发展,并很快发展为阻塞高压,从我国东北到蒙古国一带为东西向的低压带,其低压中心缓慢向东移动并发展成冷涡,副热带高压主体明显的偏南偏东,588 dagpm的副高脊线位于 $20^{\circ}\text{N}$ 左右,我国范围内为明显的西高东低形势。23—25日高空冷涡的位置逐渐向东移,23日在蒙古国中部(图略),24日在蒙古国东南部(图略),25日东移到蒙古国东部到华北北部(图1),由于稳定维持的阻塞形势,高压脊前不断有冷空气下沉,使其前部的低压带对应深厚的冷性气团,并稳定维持,构成了蒙古冷涡天气形势,河套地区处于副高与蒙古低压带之间的西风带锋区之中,随着冷性低压带分裂

冷空气的南下,斜压不稳定使西风带锋区不断激发波动,提供了优越的动力和中层冷空气条件,而从蒙古冷涡底部不断分裂的下滑冷槽是造成陕西中北部连续3天出现强对流天气的影响天气系统。

### 2.2 强天气综合分析

目前,中尺度天气的天气图分析已经成为强对流天气潜势预报的重要依据<sup>[11]</sup>。图2a是23日08:00强天气综合分析图。图上可见,200 hPa高空存在着两支西风急流,即西部急流和东部急流,西部急流大致在新疆—河西—宁夏一带,东部急流在山西北部、北京经渤海到朝鲜半岛;500 hPa在乌兰巴托、磴口、银川一线和济南、郑州、南阳、达州一线分别有一低槽,前倾槽特征不明显,温度槽在蒙古国南部经宁夏到甘南一带;700 hPa低槽位置大致在内蒙古河套—陕北西部—陇东附近,陕西处于槽前偏南风及暖脊中;850 hPa陕北北部有一切变,暖温度脊在内蒙古西部,河套到陕西北部有一条干线,陕西北部处于显著湿区的(湿舌)前端。

24日200 hPa东部急流的中段、西段南压明显(图2b),在山西中部经河北南部、山东半岛到朝鲜半岛一带;500 hPa低槽东移到我国东部地区,在北京、徐州、汉口一线,为明显的前倾槽特征;850 hPa陕西上空分析不出切变,只在陇南有一切变,暖脊在河西到内蒙古河套地区,陕西从北到南能够分析出一条干线。而24日的200 hPa西部急流、500 hPa温度槽、700 hPa的低槽和850 hPa显著湿区的位置与23日比较变化不大。

25日200 hPa西部急流的东段有所南压(图2c),大致在新疆—河西—陇东一带,东部急流的西段继续南压,在山西南部经河北南部过渤海到朝鲜半岛一带;500 hPa低槽更偏东,在锦州、青岛、徐州、汉口一线,温度槽正处于内蒙古中部、山西北部到陕西中南部上空;700 hPa低槽仍在内蒙古河套—陇东—甘南;850 hPa从北京—山西北部—陕北中部有一切变,关中中北部到陕西南部仍有一切变,暖脊贯穿陕西南北,从干线分析看,25日在陕西及周围地区可以分析出两条干线,一条在山西北部、陕北、陇东、陕西南部到四川东北部,另一条在关中东、陕南东部到湖北西部,陕西基本处于显著湿区中(湿舌)。

可以看出,23—25日200 hPa高空急流位置逐渐向南压,而陕西中北部恰好处于西部急流轴左前

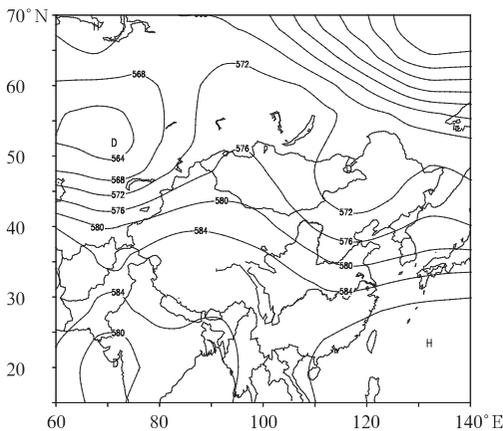


图1 2006年6月25日08时500 hPa位势高度场(单位: dagpm)

Fig. 1 The 500 hPa geopotential height (unit: dagpm) at 08:00 BT 25 June 2006

部和东部急流轴的右后部,这种高空辐散配置非常有利于低层对流的发展,同时,在陕西上空基本形成了上冷下暖,低层暖平流、中高层冷平流的“前倾槽”天气形势,高空低槽不断引导冷空气南下,前倾槽特征更有利于对流性天气的发生,由于低层切变线、干线触发了不稳定能量的释放,陕西持续 3 天出现了

强对流天气。特别是 25 日 500 hPa 冷槽、700 和 850 hPa 暖脊、湿舌正好在陕西中北部上空上下叠置,更有利于对流不稳定的建立和发展,850 hPa 在陕西的切变线更明显,当中尺度对流系统(MCS)东移与陕西东部的干线相交时,使得系统增强,因而,25 日的天气更剧烈。

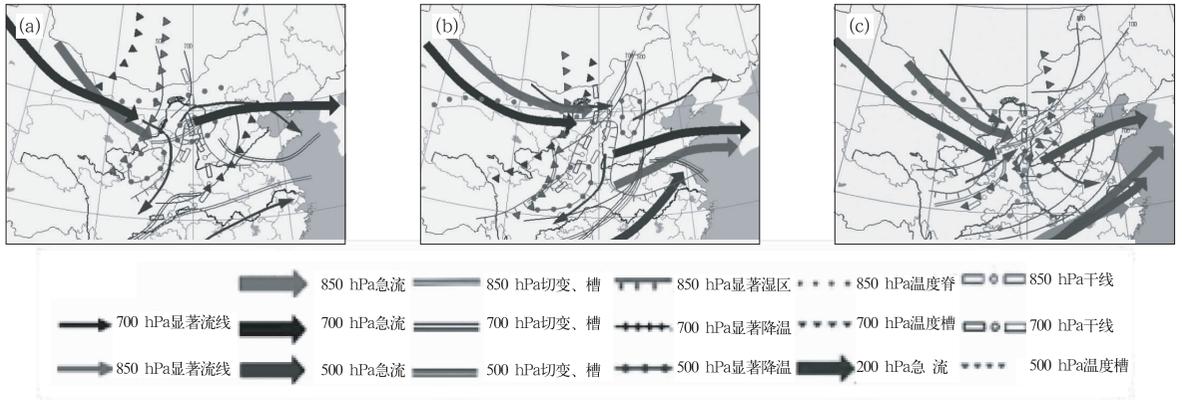


图 2 2006 年 6 月 23 日 08:00(a)、24 日 08:00(b)、25 日 08:00(c)强天气综合分析

Fig. 2 Comprehensive analysis of severe weather

(a) 08:00 BT 23 June, (b) 08:00 BT 24 June and (c) 08:00 BT 25 June 2006

### 3 对流环境条件分析

#### 3.1 温度平流分布

温度平流不仅可以造成大气层结不稳定,而且可形成风垂直切变以及建立逆温层<sup>[1-2]</sup>。23 日沿 38°N、24 日沿 36°N 做温度平流纬向剖面图(图略),

在陕西北部(23 日)、中部(24 日)107°~111°E 低层 850 hPa 有弱的暖平流,中高层分别有一上下对应的冷、暖平流强中心,即在 109°E 400 hPa 有一个  $-10 \times 10^{-5} \text{ K} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  的冷平流中心,在其上空的 200~300 hPa 为一同量级的暖平流中心。而 25 日在陕西中部(107°~111°E)近地面层(850 hPa 以下)有弱的冷平流存在(图 3a),700~800 hPa 为较显著的暖平流,而暖平流中心在陕西以东(114°~116°E)

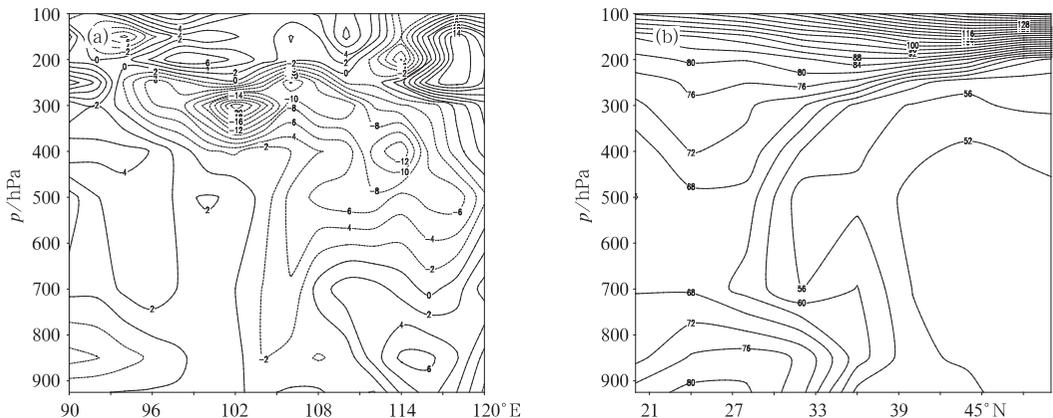


图 3 2006 年 6 月 25 日 08:00 沿 35°N 温度平流(单位:  $10^{-5} \text{ K} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) 纬向剖面图(a) 和沿 109°E  $\theta_{sc}$ (单位: °C) 经向剖面图(b)

Fig. 3 The longitude-time cross section of temperature advection along 35°N (a, unit:  $10^{-5} \text{ K} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) and the latitude-time cross section of temperature advection along 109°E (b, units: °C) at 08:00 BT 25 June 2006

的 850 hPa 附近,达  $12 \times 10^{-5} \text{ K} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 200~600 hPa 中高层为显著的冷平流,冷平流中心在 250 hPa, 200 hPa 以上又为暖平流。从温度平流的垂直分布看, 23 和 24 日从低到高依次呈暖—强冷—强暖分布,说明前 2 天中低层存在不稳定,而 25 日从低到高依次呈弱冷—暖—强冷—强暖分布,中高层分别有一上下对应的冷暖平流强中心,即 25 日中高层不稳定,而低层稳定,与这一区域低层存在的逆温层有关,而随着上午地面的辐射加热,使得低层空气迅速变暖,逆温层消除,大气变得更不稳定。根据以上分析, 3 天的强对流天气发生区正处于中高层冷暖平流强中心和低层暖平流相叠置区域,但由于 25 日冷平流厚度明显大于 23 和 24 日,且低层的暖平流明显强于 23 和 24 日,因而造成天气也剧烈。

### 3.2 $\theta_{\text{se}}$ 垂直分布特征

沿  $109^\circ\text{E}$  作  $\theta_{\text{se}}$  的经向剖面图, 23 和 24 日 08:00 在陕西北部  $38^\circ\text{N}$  左右(23 日)、中部  $36^\circ\text{N}$  左右(24 日)对流层低层 850 hPa 以下  $\theta_{\text{se}}$  随高度变化幅度较小(图略),即  $\partial\theta_{\text{se}}/\partial p \approx 0$ , 基本为中性的稳定层,也反映出早上湿层浅薄,而在 850 hPa 以上  $\theta_{\text{se}}$  变化幅度较大,随高度显著减小,  $\Delta\theta_{\text{se}850-500}$  23 日为  $5.0^\circ\text{C}$ , 24 日为  $10.5^\circ\text{C}$ , 即  $\partial\theta_{\text{se}}/\partial p > 0^\circ\text{C}$ , 存在着位势不稳定。23 和 24 日由于在陕西中北部对流层中层大气为  $\theta_{\text{se}}$  低值区( $56^\circ\text{C}$ ), 对应着干冷空气,上午随着地面的辐射加热,低层空气迅速增暖,850 hPa 以下的  $\theta_{\text{se}}$  迅速增加,使得位势不稳定进一步加剧,有利于午后的强对流天气发生。

干暖盖为形成强对流所需能量积蓄及释放提供重要条件<sup>[1-2,12]</sup>。25 日 08:00(图 3b),在  $36^\circ\text{N}$  左右的陕西中部的对流层中层大气同样为  $\theta_{\text{se}}$  低值区( $56^\circ\text{C}$ ),而对流层低层 850hPa 以下  $\theta_{\text{se}}$  随高度有所增加,即高于近地面层,  $\partial\theta_{\text{se}}/\partial p < 0^\circ\text{C}$ , 说明在对流层低层出现一个逆温层,这个逆温层把低层的暖湿空气同中高层的干冷空气隔开,成为干暖盖,即有对流抑制能量(CIN)存在,上午在逆温层以下的空气通过平流和地面辐射加热而变得更暖和更湿,对流层中上层变得更冷,从而建立强的位势不稳定,下午以后通过地面加热或有组织的垂直运动消除逆温层,所以 25 日下午到傍晚陕西中北部发生了剧烈的

对流活动。

### 3.3 大气环境温度直减率和对流有效位能

通常使用 700 与 500 hPa 温度差( $T_{700} - T_{500}$ )来反映大气温度直减率情况,差值越大反映环境大气温度直减率越大,大气层结越接近不稳定状态<sup>[1,4]</sup>。表 1 是延安、西安探空站的 23—25 日 08:00 的  $T_{700} - T_{500}$  变化情况。23 日延安的  $T_{700} - T_{500}$  为  $18^\circ\text{C}$ , 明显高于西安站,因而对流性天气主要出现在陕北北部,但强度偏弱;24 日延安达到  $22^\circ\text{C}$ , 比 23 日明显强,但高于西安,强对流主要发生在陕北、关中北部,强度明显强于 23 日;到了 25 日,延安、西安两站的大气温度直减率明显高于 23 和 24 日,特别延安的  $T_{700} - T_{500}$  为  $24^\circ\text{C}$  [ $0.89^\circ\text{C} \cdot (100 \text{ m})^{-1}$ ], 接近于干绝热状态 [ $0.98^\circ\text{C} \cdot (100 \text{ m})^{-1}$ ], 说明大气层结处于较明显的不稳定状态,因而 25 日的强对流天气主要发生在陕北南部、关中,且强对流发生的范围和剧烈程度,都明显的强于前两日。

表 1 2006 年 6 月 23—25 日延安、西安探空站(08:00) 700 与 500 hPa 温度差( $T_{700} - T_{500}$ , 单位:  $^\circ\text{C}$ )

Table 1 Temperature difference between 700 and 500 hPa at Xi'an and Yan'an Stations (unit: $^\circ\text{C}$ ) during 23—25 June 2006			
	23	24	25
延安	18	22	24
西安	15	19	22

对于雷暴大风,其产生需要较强的下沉气流,目前比较认同的有利于雷暴内强烈下沉气流的背景条件之一是对流层中下层的大气环境温度直减率较大,即越接近于干绝热越有利雷暴大风的发生<sup>[1]</sup>。25 日陕西共出现 14 站的短时大风,特别是大荔县 19:04 出现有气象记录以来的最大风速( $32.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ),与对流层中下层较大的环境温度直减率有直接的关系。

衡量热力不稳定大小的物理含义最清晰的参数是对流有效位能(CAPE)<sup>[1,4,13-15]</sup>, CAPE 表示气块上升过程中所有因温度差异形成的正浮力对气块所做的功。如果用早上 08:00 探空状况判断下午和傍晚的对流潜势往往误判的可能性很大,对于这次连续 3 天的强对流天气,比较了延安、西安站 08:00 探空 CAPE 值和应用 14:00 地面温度和露点温度订正后的 CAPE 值。以 08:00 延安为例, 23 日为

$0 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 24 日为  $573 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 25 日为  $956 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 表征大气的对流不稳定并不显著, 但却出现了明显的强对流天气, 而经过 14:00 订正以后 (表 2), 23 日为  $304 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 延安以北出现雷暴大风天气, 24 日为  $1228 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 陕北、关中北部出现雷暴、大风、冰雹等天气, 而 25 日达  $2301 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 显著强于前两日, 其产生天气也很剧烈。同样, 西安站的 CAPE 值在 25 日也达到最大, 关中北部、东部出现剧烈的强对流天气。从这次过程来看, CAPE 值的大小与对流性天气的强弱有很好的对应关系, CAPE 值愈大, 产生天气越剧烈。

表 2 2006 年 6 月 23—25 日西安、延安探空站对流有效位能 CAPE(14:00 温度、露点订正, 单位:  $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ )

Table 2 Convective available potential energy (CAPE) at Xi'an and Yan'an Stations (unit:  $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) during 23—25 June 2006

	23	24	25
延安	304	1228	2301
西安	33	898	1078

### 3.4 垂直风切变

垂直风切变是指水平风(包括大小和方向)随高度的变化, 很多文献指出<sup>[1,4-5]</sup>, 在一定的热力条件下, 环境风场的垂直切变特征对雷暴的结构、形态、生命史以及活动有着重要的影响, 垂直风切变的增强将导致风暴进一步加强和发展。通过对延安探空站 0~6 km 深层和 0~2 km 低层的垂直风切变进行分析, 23 日深层和低层分别为  $7.33$  和  $3.08 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 垂直风切变很弱, 陕北北部的对流性天气也不太剧烈, 主要以雷暴大风为主(而与陕西北部临近的内蒙古东胜站的深层切变却为  $14.11 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 强对流主要出现在这一区域); 24 日深层和低层分别为  $11.74$  和  $3.32 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 比 23 日明显增强, 接近中等垂直风切变(一般把深层风矢量小于  $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  判定为弱垂直风切变), 24 日出现的天气不但有雷暴大风, 且有区域性冰雹; 而到了 25 日深层垂直风切变达  $15.00 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 低层也达  $4.00 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 达到中等强度级别, 因而 25 日的强对流天气比 23 和 24 日要剧烈得多, 不但雷暴大风站数多, 风力大(11 级), 且冰雹站数、冰雹直径也明显强于前两日, 可以看出, 在这次连续的强对流天气中, 垂直风切变也是衡量对流性天气的一个重要参数。

## 4 中尺度分析

### 4.1 TBB 云图特征

云顶亮温(TBB)可以直接地展示对流发展的旺盛程度, 推断云团发展的强度及所处的阶段<sup>[16-17]</sup>, TBB 可以定量地反映云团中的中小尺度系统的演变过程, 反映出强对流天气与中尺度对流云团的发生发展密切相关。受蒙古冷涡影响, 23—25 日连续 3 天从早上开始, 在蒙古冷涡附近的松散云区中就有对流单体存在, 且生消旺盛, 由于低层暖平流和局地太阳加热作用, 在上午 10:00 左右, 在冷涡南侧的内蒙古河套地区到陕西北部有对流系统明显的发展并南压。

23 日上午 10:00 以前, 在高空冷涡附近的蒙古国到河套地区有松散的冷涡云系存在, 由于西太平洋副热带高压维持在我国东南沿海, 北方冷空气与低纬度的暖湿气流汇合于江淮流域一带, 从日本经黄海、江淮流域到四川盆地有一条近纬向分布的梅雨锋云带, 陕西北部处于两个云系之间的晴空区中。10:00 以后, 在河套地区就有几个对流单体迅速发展, 1 小时大约增大 1 倍左右, 到了 14:00 几个对流单体合并发展为呈指状的  $\beta$  中尺度雹暴云团, 15:00 达到最强(图 4a), 此时云团已东移南压到陕北北部, 中心在黄河沿线的府谷、神木县附近, 其长轴 200 km, 短轴 100 km, TBB 最低达 210 K。14:00—16:00 榆林市大部县(市)先后出现雷暴, 4 个县(市)伴有短时大风, 风速最大为横山县, 达  $24 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。17:00 以后, 雹暴云团明显的减弱并东移出陕西。

24 日上午, 高空冷涡云系已东移到蒙古国东部和华北北部, 梅雨锋云带略有南压, 在长江流域, 陕西仍处于晴空区。12:00 在冷涡云系南侧的陕北北部开始有孤立的对流单体发展, 经过 1 小时, 13:00 在榆林北部和延安西北部到陇东分别有一条松散的对流云带发展, 在这两条对流云带上分别有一块强的对流单体迅速发展, 分别位于榆林北部府谷县的 B1 单体和延安西北部子长县的 B2 单体。随后, 这两个对流单体面积迅速膨胀, 15:00—16:00 南北两个云团分别发展成呈椭圆状的  $\beta$  中尺度雹暴云团, 且两个云团明显地向东南方向移动发展, 其长轴呈西南—东北走向。受 B1 云团影响, 15:08 榆林市北

部的府谷县出现大风,15:24 和 15:59 黄河沿线的佳县、米脂分别下了冰雹,到 16:00,北部云团已东南移到山西北部到陕北黄河沿线的绥德附近,其长轴 100 km,短轴 50 km,这时 *TBB* 发展到最强,*TBB* 最低达 225 K。*B2* 云团发展到最强要落后于 *B1* 云团 1 小时左右,17:00—18:00 当云团东南移到延安南部和关中北部时发展到最强(图 4b),长轴

200 km 左右,短轴 50~70 km,*TBB* 最低达 215K,云团东南一侧的 *TBB* 梯度最强,16:50—17:45 *B2* 云团造成宜川、铜川、耀县三站先后出现冰雹。18:00 (图 4b)以后 *B2* 云团到了衰减期,此时云团面积扩大,云顶亮温 *TBB* 升高,云团处于塌陷阶段,往往造成地面强风<sup>[17]</sup>,17:46—19:04 渭南市的 6 县区先后出现大风。

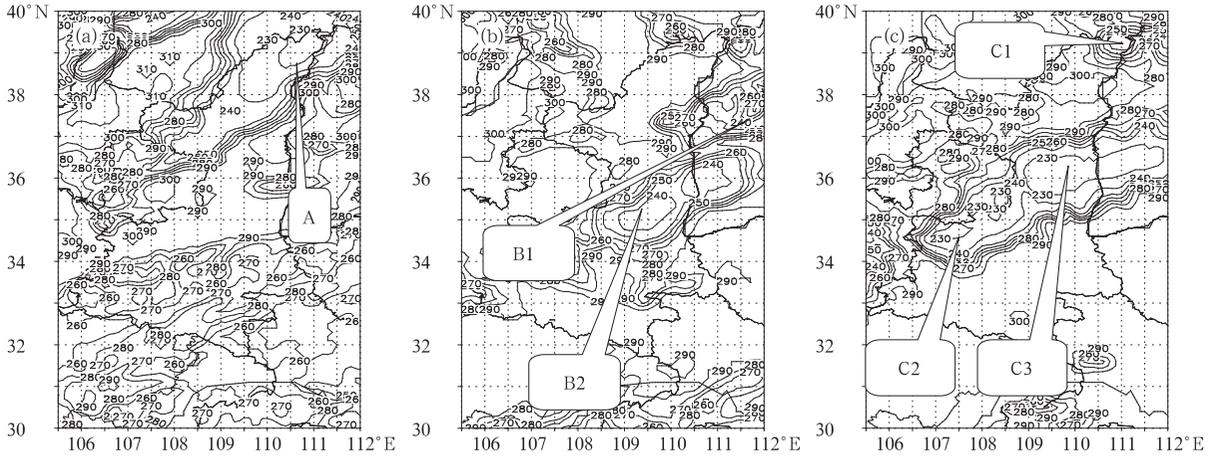


图 4 2006 年 6 月 23 日 15:00(a)、24 日 18:00(b)和 25 日 17:00(c)*TBB* 场(单位:K)

(A 为 23 日云团;B1、B2 为 24 日云团;C1、C2、C3 为 25 日云团)

Fig. 4 *TBB* fields at (a) 15:00 BT 23 June, (b) 18:00 BT 24 June, (c) 17:00 BT 25 June (unit: K)

(A denotes cloud cluster on 23 June; B1, B2 denote cloud cluster on 24 June; C1, C2, C3 denote cloud cluster on 25 June 2006)

到了 25 日上午,高空冷涡云系已东移到华北北部、东北地区,而梅雨锋云带缓慢南压到江南地区,随着锋后冷空气的变性和冷涡后部补充冷空气南下,在发展完好的冷涡后部,从东北过华北北部、河套到青藏高原东北部有一条达数千千米的松散的带状副冷锋云系生成。11:00 左右,在副冷锋云带上,榆林北部有对流单体 C1 存在(图略),11:00—13:00 C1 没有明显的发展,只是移速较快,14:00 就东移过黄河,到山西北部以后才明显发展。13:00 在 C1 云团后侧的西南方向延安西北部和陇东分别生成对流单体 C2 和 C3,*TBB* 大约在 230 K 左右。随后 C2 和 C3 两个对流单体迅速发展,1 小时增大到 2 倍,14:00 C2 和 C3 两个单体分别发展成呈椭圆状的  $\beta$  中尺度雹暴云团,同时,在副冷锋云带上,从内蒙古东部过河北北部、北京到山西也有多个  $\beta$  中尺度雹暴云团发展生成。15:00 C2 和 C3 的 *TBB* 下降到 210 K,云团面积急剧膨胀,中心对流合并明显,其东南一侧 *TBB* 梯度也明显加强,值得注意的是 C2 云团呈明显的“V”字型(图略),即反映出对流层中上层的强风环境场及强的垂直风切

变<sup>[17]</sup>,14:00—18:00 受 C2 云团影响,延安市的安塞、宝塔区、甘泉、黄龙、洛川 5 县区先后出现冰雹,最大直径为 18 mm。到了 17:00,华北地区的多个  $\beta$  中尺度雹暴云团东南下,在山西南部 and 河北南部合并发展成一  $\alpha$  中尺度的雹暴云团,而在陕西的 C2 和 C3 两个对流云团也发生合并(图 4c),并迅速加强,240 K 的 *TBB* 闭合圈面积达到最大,发展成长达 450 km,宽达 100 km,*TBB* 最低达 205 K,呈西南—东北走向的  $\alpha$  中尺度飊线云团,云团的前沿开始呈弧状,18:00—19:00 强中心(*TBB* < 220 K)偏向于飊线云团东南部的 *TBB* 梯度最大处,弧状前沿变得整齐,弧的中部逐渐向前突出,在此期间,飊线云团的移速加快,大风和冰雹等剧烈天气出现在云团强中心略偏前区域,18:00—20:00 从关中中部到东部先后出现 9 站大风天气,特别是大荔县出现  $32.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  的最大风速。18:00 以后,在陕西的飊线云团与华北南部的对流云团合并,发展成为长轴达 800 km,短轴达 100 km,更大尺度的  $\alpha$  中尺度飊线云团,一直维持到 26 日 00:00,造成这一区域的大范围的强对流天气。

通过以上分析发现,23 和 24 日强对流天气是由生命史达 5~6 小时的  $\beta$  中尺度雹暴云团造成的,而 25 日剧烈天气是由生命史长达 10 小时的  $\alpha$  中尺度飏线云团(中尺度对流系统  $M\alpha CS$ )造成的;23 日云团生成偏早,15:00 达到最强,而 24 和 25 日云团大约在 13:00 生成,24 日在 17:00 左右达到最强,25 日在 19:00 达到最强,且 25 日云顶面积达到最大, $TBB$  也为最低,这与对流性天气的剧烈程度对应较好。冰雹主要出现在云团的初期和发展期,成熟以后,以地面大风为主。

## 4.2 地面辐合线和干线

在对流不稳定条件下,需要一定的抬升条件对流才能发生,触发对流的抬升条件大多由中尺度系统提供,如锋面、干线、对流风暴的外流边界(阵风锋)和重力波等<sup>[1,4-5,15]</sup>。分析这次过程的自动气象站每小时的流场和 25 日的露点等资料,23—25 日早上开始在内蒙古河套北部就有地面辐合线或干线存在,在上午 11:00 左右向南移动并且明显发展,地面辐合线或干线附近可以为雷暴生成提供抬升条件,因而,在午后地面辐合线或干线附近有中尺度雹暴云团加强发展,造成陕西中北部连续 3 天的强对流天气。

23 日早晨 05:00 到上午 10:00 在内蒙古河套西北部就有一条弱的准东—西向的地面辐合线存在(图略),辐合线在此时段内缓慢地向东南移动,5 小时移动不到 2 个纬距,卫星云图上,在地面辐合线附近对流单体的生消旺盛,但对流单体并没有明显的发展。10:00 以后地面辐合线移速有所加快,2 小时超过 1.5 个纬距,且辐合线明显加强,这与辐合线附近及后部的对流明显发展有直接的关系,由于雷暴出流与其前方的偏南、偏东气流相遇使得辐合线变得明显和移速加快。13:00 地面辐合线已进入陕北西北部,14:00 在辐合线附近的对流单体合并发展为一  $\beta$  中尺度雹暴云团,13:00—16:00 地面辐合线为东北—西南向,以东移为主,基本没有南压,所以主要影响陕北北部地区,榆林市大部地区出现雷暴大风天气,4 个县(市)伴有短时大风。17:00 主体移到黄河以东的山西北部。

24 日上午 08:00 左右在内蒙古河套就有一条弱的东北—西南向移动缓慢的地面辐合线存在(图略),但此时在地面辐合线附近只有零星的弱对流存在。11:00 以后辐合线移速有所加快,1 小时超过 1

个纬距,且辐合线明显加强,同样这与辐合线附近及后部的对流发展有直接的关系。12:00 这条地面辐合线已进入陕北北部,而此时在陕北北部辐合线的南侧相距大约 1 个纬距的延安西北部到陇东新生一条弱的地面辐合线,14:00 北部辐合线已东移到榆林东南部,对应卫星云图上,已经发展成一条  $\beta$  中尺度雹暴云团,15:00 以后北部辐合线以东移为主,主要影响榆林东南部地区,16:00 以后北部辐合线主体已东移到黄河以东的山西北部。而新生的南部辐合线 14:00—15:00 迅速发展,辐合线附近的对流单体发展旺盛,移动以南压为主,15:00—16:00 南压到延安南部和关中北部,辐合线附近的对流合并发展为一条  $\beta$  中尺度雹暴云团,16:00—18:00 雹暴云团造成延安南部、关中北部、东部 3 个县出现冰雹,6 县(市)伴有短时大风。

与 24 日类似,在 25 日上午 08:00 左右在陕北西北侧有一条弱的东北—西南向移动缓慢的地面辐合线存在(图略),在地面辐合线附近只有零星的弱对流存在,同时,发现在陕西省内能够分析出两条干线,即陕北西北部有一条东北—西南向的干线,山西运城北部到陕西渭南北部有一条准东—西向的干线(图 5a)。11:00 地面辐合线与陕北西北部的干线结合,结合以后地面辐合线变得愈加明显,且南压速度有所加快,辐合线附近的对流比前期明显加强。13:00—14:00 这条辐合线南压到延安中部(图 6a),而北部干线也南压到延安中部、关中西北部(图 5b),辐合线和干线仍呈东北—西南向,可以看出,这条辐合线主要由雷暴出流与其前方的偏南和偏东气流相遇产生的,在地面辐合线的西段还产生了涡旋(图 6a),并逐渐向东南方向推进,这与此时延安西北部的椭圆状的  $\beta$  中尺度雹暴云团对应较好,即在涡旋附近的安塞、宝塔区出现冰雹和大风等强对流天气。另外,原在山西运城北部到陕西渭南北部准东—西向的干线仍维持少动(图 5b)。15:00—16:00 地面辐合线逐步向南压,到了 17:00 移到延安南部到关中北部的铜川一线(图 6b)。而这时涡旋传播到辐合线东段,对应卫星云图上,云团已经发展成一条尺度更大的  $\alpha$  中尺度雹暴云团或飏线(图 4c)。从 08:00—17:00 山西运城北部到陕西渭南北部的准东—西向的干线一直维持,且稳定少动,17:00 北部干线南压到关中西北部,与南部干线相交于此(图 5c),几乎呈“人”字形,还有此时在西安东部到渭南中部有一条弱的地面辐合线形成

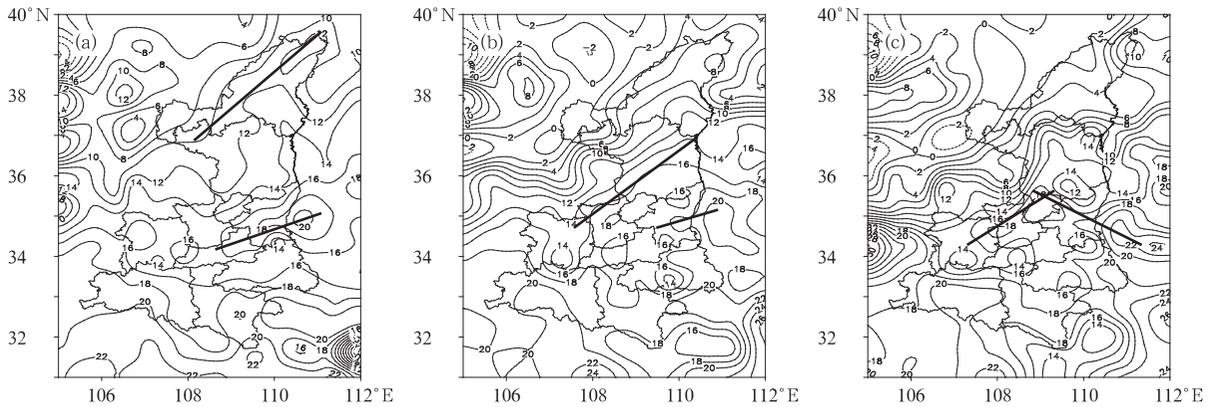


图 5 2006 年 6 月 25 日地面露点  $T_d$  分析(单位:  $^{\circ}\text{C}$ )(粗实线为干线)  
(a)08:00, (b)14:00, (c)17:00

Fig. 5 Surface dew point analyses on June 25, 2006 (thick solid line is the dry line)  
at (a) 08:00 BT, (b) 14:00 BT, and (c) 17:00 BT (unit:  $^{\circ}\text{C}$ )

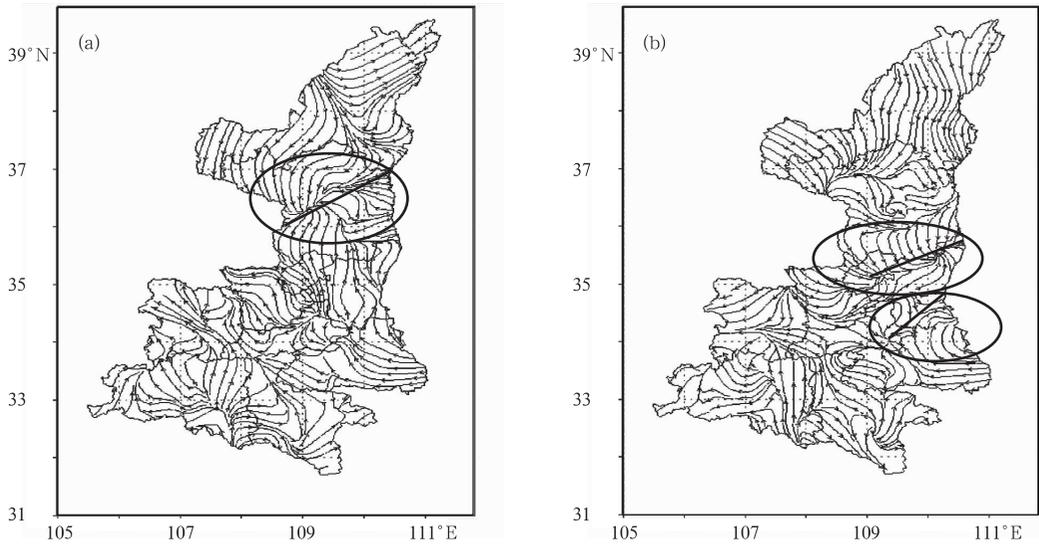


图 6 2006 年 6 月 25 日 14:00(a)和 17:00(b)地面流场  
(粗实线为地面辐合线)

Fig. 6 Surface flow field on June 25 2006 (Thick solid denotes the ground convergence line)  
at (a) 14:00 BT and (b) 17:00 BT

(图 6b);据研究<sup>[1]</sup>雹暴云团或飑线往往向着有利于其发展的辐合线或干线方向移动,18:00—19:00 北部的地面辐合线、干线南压与陕西渭南市北部的干线及弱的地面辐合线结合,使得中尺度对流系统  $M\alpha CS$ (飑线)迅速加强,从而演变成飑线型弓形回波<sup>[18-22]</sup>,出现弓形回波,更容易产生强烈的雷暴大风天气。

根据以上分析,地面辐合线或干线是触发强对流天气的因子之一,也是雹暴云团产生和发展的直接的地面中尺度系统。对流单体一般生成于地面辐

合线附近,在辐合线与地面干线结合处易于对流单体或云团的新生和发展,同时也可以使雹暴云团或飑线向着有利于其发展的辐合线或干线方向移动,因此以地面自动站加密观测为基础的中尺度分析在强对流天气的短时临近预警中具有一定的预报指示意义。

### 5 小 结

(1) 这次持续性强对流天气过程的主要影响系

统是蒙古冷涡底部分裂的下滑冷槽;23—25 日在陕西上空基本形成了上冷下暖,低层暖平流、中高层冷平流的“前倾槽”天气形势,由于低层切变线(干线)触发了不稳定能量的释放,陕西连续 3 天出现强对流天气,特别是 25 日 500 hPa 冷槽 700 和 850 hPa 暖温度脊、湿舌正好在陕西中北部上空上下叠置,更有利于对流不稳定的建立和发展。

(2) 北方中高层(300~600 hPa)下滑的干冷空气叠置在低层暖湿空气上,造成强不稳定层结,是产生这次强对流天气的重要原因。25 日对流层低层 850 hPa 附近的逆温层所形成的干暖盖,有利于深厚对流活动的发生;此次过程的大气温度直减率越大越有利雷暴大风的发生,对应的天气愈剧烈;CAPE 值和垂直风切变的大小与对流性天气的强弱有很好的对应关系,其值愈大,产生的天气越剧烈。

(3) TBB 演变可以清晰地看出中尺度系统的对流发展的旺盛程度。23 和 24 日强对流天气是由生命史达 5~6 小时的  $\beta$  中尺度雹暴云团造成的,而 25 日剧烈天气是由生命史更长(达 10 小时)的  $\alpha$  中尺度飑线云团造成的,冰雹主要出现在云团的初期和发展期,成熟以后,以地面大风为主。

(4) 地面辐合线或干线是触发强对流天气的因子之一,也是雹暴云团产生和发展的直接的地面中尺度影响系统;对流单体一般生成于地面辐合线附近,在辐合线与地面干线结合处易于对流单体或云团的新生和发展,同时也可以使中尺度对流系统 MCS(飑线)向有利于其发展的方向移动。

## 参考文献

- [1] 丁一汇. 高等天气学[M]. 北京:气象出版社,2005:315-326,410-411.
- [2] 陆汉城. 中尺度天气原理和预报[M]. 北京:气象出版社,2000:41-42,65-68,256-258.
- [3] 樊利强,王迎春,陈明轩. 利用雷达资料反演方法对北京地区

- 一次强对流天气过程的分析[J]. 气象,2009,35(11):9-11.
- [4] 朱乾根,林锦瑞,寿绍文,等. 天气学原理与方法[M]. 北京:气象出版社,2000:48-50,449-453.
- [5] 俞小鼎,姚秀萍,熊廷南,等. 多普勒天气雷达原理及业务应用[M]. 北京:气象出版社,2006:91-95,273-274.
- [6] 廖晓农,俞小鼎,于波. 北京盛夏一次罕见的大雹事件分析[J]. 气象,2008,34(2):10-14.
- [7] 盛日锋,王俊,龚佃利,等. 山东一次飑线过程的中尺度分析[J]. 气象,2009,35(9):91-94.
- [8] 张霞,周建群,申永辰,等. 一次强冰雹过程的物理机制分析[J]. 气象,2006,31(4):15-17.
- [9] 王华,孙继松,李津. 2005 年北京城区两次强冰雹天气的对比分析[J]. 气象,2007,33(2):52-53.
- [10] 武麦风,毛玉琴. 一次强飑线过程的卫星云图及天气雷达回波特征分析[J]. 干旱气象,2006,24(4):45-47.
- [11] 张小玲,张涛,刘鑫华,等. 中尺度天气的高空地面综合图分析[J]. 气象,2010,36(7):145-148.
- [12] 许新田,王楠,刘瑞芳,等. 2006 年陕西两次强对流冰雹天气过程的对比[J]. 高原气象,2010,29(2):448-452.
- [13] 陆忠汉,陆长荣,王婉馨. 实用气象手册[M]. 上海:上海辞书出版社,1984:320-327.
- [14] 刘健文,郭虎,李耀东,等. 天气分析预报物理量计算基础[M]. 北京:气象出版社,2005:198-200,215-217.
- [15] 刘兵,戴泽军,胡振菊,等. 张家界多个例强雹过程对比分析[J]. 气象,2009,35(7):29-30.
- [16] 董超华,章国材,邢福源,等. 气象卫星业务产品释用手册[M]. 北京:气象出版社,1999:59-62.
- [17] [英]M J 巴德,G S 福布斯,R B E 理利,等. 卫星与雷达图像在天气预报中的应用[M]. 北京:科学出版社,1998:307-316.
- [18] 毕旭,罗慧,刘勇. 陕西中部一次下击暴流的多普勒雷达回波特征[J]. 气象,2007,33(1):71-73.
- [19] 王婷婷,王迎春,陈明轩,等. 北京地区干湿雷暴形成机制的对比分析[J]. 气象,2011,37(2):145-148.
- [20] 吴蓁,俞小鼎,席世华,等. 基于配料法的“08. 6. 3”河南强对流天气分析和短时[J]. 气象,2011,37(1):51-55.
- [21] 刁秀广,赵振东,高慧君,等. 三次下击暴流雷达回波特征分析[J]. 气象,2011,37(5):524-529.
- [22] 雷蕾,孙继松,魏东. 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,2011,37(2):138-140.