

易笑园,李泽椿,李云,等. 长生命史冷涡影响下持续对流性天气的环境条件[J]. 气象,2010,36(1):17-25.

# 长生命史冷涡影响下持续 对流性天气的环境条件<sup>\*1</sup>

易笑园<sup>1,2,3</sup> 李泽椿<sup>3</sup> 李 云<sup>4</sup> 朱磊磊<sup>2</sup> 于莉莉<sup>2</sup> 余文韬<sup>2</sup>

1 南京信息工程大学大气科学学院,南京 210044

2 天津市气象台,天津 300074

3 国家气象中心,北京 100081

4 国家卫星气象中心,北京 100081

**提 要:** 利用云图和 NCEP  $1^\circ \times 1^\circ$  再分析资料,对生命史长达 9 天的冷涡系统的云图形态、移动轨迹、强度变化及其长久维持的原因进行了分析;并对比分析该冷涡影响下的持续对流性天气与冷涡分裂的冷空气、湿度层结及水汽条件的关系,探讨对流性天气的预报着眼点和不稳定参数阈值。主要结论:(1)连续 9 天对流性天气分别出现在冷涡涡旋云系头部的南部或东南部。强的对流过程时,云顶 TBB 温度在  $-40 \sim -72^\circ\text{C}$ ;弱的对流过程时,云顶 TBB 温度在  $-40^\circ\text{C}$  以上。(2)东亚阻塞高压两侧高涡度区的正涡度平流交替补充冷涡对正涡度的损耗,是冷涡长久滞留维持的主要原因。(3)冷涡在长生命期中是动态的,冷涡中心距研究代表点的距离与对流性天气的强弱有关;对流层中层  $V$  分量能敏感地反映冷涡分裂的冷空气活动情况。(4)随着对流性天气的持续,低空湿度层逐渐增厚,而  $850 \sim 700$  hPa 相对湿度  $\leq 60\%$  的相对干区始终存在;975 hPa 水汽通量的大小和方向反映来自渤海的水汽输送状况。(5)强天气威胁指数 SWEAT 和风暴相对环境螺旋度 SREH 在判断对流性天气的强度方面比常用的不稳定参数效果好。

**关键词:** 冷涡,长生命史,持续对流性天气,环境条件,参数阈值

## Analysis of Environmental Conditions of Continuous Severe Convective Weather Events Caused by Long-Life Cold Vortex

YI Xiaoyuan<sup>1,2,3</sup> LI Zechun<sup>3</sup> LI Yun<sup>4</sup> ZHU Leilei<sup>2</sup> YU Lili<sup>2</sup> YU Wentao<sup>2</sup>

1 School of Atmospheric Sciences, NUIST, Nanjing 210044

2 Tianjin Meteorological Observatory, Tianjin 300074

3 National Meteorological Center, Beijing 100081

4 National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081

**Abstract:** Using the data of satellite images and NCEP/NCAR  $1^\circ \times 1^\circ$  reanalysis data, the characteristics on cloud images, track, intensity and the subsisting reason for a 9-day long-life cold vortex are studied, and the cold air activity, humidity vertical structure, water vapor condition and the change of thermodynamic, dynamic convective instability parameters related to continuous severe convective weather events over the western coast of the Bohai Bay are analyzed. In addition, the key of forecast and the threshold of severe convective weather events are approached. The main results show that, firstly, during 9-day period the convective weather events appeared at south or southeast of cold vortex and their TBB values were between  $-40^\circ\text{C}$  to  $-72^\circ\text{C}$  in the severe convective process, and above  $-40^\circ\text{C}$  in the weak convective process. Sec-

\* 公益性行业(气象)科研专项(GYHY200706042)、中国气象局新技术推广项目预报员专项(CMATG2009YB04)和天津市气象局 2008 年科研培育项目共同资助

2009 年 1 月 16 日收稿; 2009 年 8 月 24 日收修定稿

第一作者: 易笑园,从事天气预报和中尺度灾害性天气研究. Email:yixy123@sina.com

ondly, the reason for cold vortex subsisting is due to the transport of vorticity advection from two sides of blocking high in eastern Asia. Thirdly, the cold vortex was dynamic during long-life cycle and the distance from the center of cold vortex to the areas studied was related to the intensity of severe convective activity. The  $V$  vector at 700-500hPa responded sensitively to the change of shallow trough or cold air activity. Fourthly, humidity layer at low levels becomes thicker as persistence of severe convective events, and the water vapor flux at 975hPa plays an important role in transporting water vapor from the Bohai Bay. Fifthly, indices SWEAT and SREH are better parameters than others used in the current forecast.

**Key words:** cold vortex, long-life, continuous convective weather events, environmental conditions, threshold

## 引 言

冷涡,即冷性涡旋是造成北方地区雷电、暴雨、大风、冰雹等强对流天气的主要大尺度环流系统。其诱发的强对流天气时常间歇性地重复出现,一般维持3~4天。然而,2008年6月下旬,冷涡长时间滞留,造成渤海西岸持续9天出现对流性天气。冷涡系统维持时间之长、强对流天气持续之久为近30年罕见。一直以来,强对流天气的准确预报是预报业务的重点和难点。9天中,在灾害性天气的落区预报和降雨量的预报上均出现空报和漏报。可见,加强冷涡维持机制的研究、探讨强对流天气出现的环境条件、总结预报指标对提高预报准确率具有积极的意义。

卫星云图提供了高时空分辨率的冷涡动态图像。早在1989年,斯公望<sup>[1]</sup>就指出:在冷涡云系附近或后部都有可能不同程度地出现对流云的发展,尤其是冷涡后部的晴空区;杨红梅等<sup>[2]</sup>根据卫星云图特征将强天气冷涡云系分为锢囚气旋结构和单纯冷涡结构两类,并对各组成部分(涡旋云区、不稳定云区、正涡度平流区、冷涡云区及暖云区)与物理量配置进行了讨论;陈进强等<sup>[3]</sup>指出:内蒙古中西部地

区强对流天气大多存在于由涡旋云系东南或西南象限内的云线、小云带或云团和单体发展成的对流云带或冷锋云带之中。另外,冷涡的演变与大尺度环流之间有着密切的关系,孙力等<sup>[4-5]</sup>统计表明:大约77%的东北冷涡(500 hPa上在 $35^{\circ}\sim 60^{\circ}\text{N}$ 、 $115^{\circ}\sim 145^{\circ}\text{E}$ 有闭合环流)与东亚地区阻塞高压的发展变化有关,而且这类冷涡的持续时间比一般冷涡生命周期平均长2.1天。多年来,以冷涡为天气背景的强对流天气研究已经很多<sup>[6-9]</sup>,然而,在以往的研究中,对冷涡的气候统计研究较为深刻,而对冷涡维持的热力、动力过程研究较肤浅;对冷涡定性的分析较多,而对强对流天气的落区、强度与大尺度天气系统的定量关系认识较少;可用于对流性天气短时预报的指标不多。2008年6月下旬渤海西岸持续出现的对流性天气具有同一个冷涡背景,这为研究上述问题提供了难得的事实例据。

## 1 天气概况

从2008年6月22日夜开始至7月1日早晨,渤海西岸连续9天多次遭受强对流天气的袭击,造成暴雨、强风、冰雹及强雷电活动。表1列出天津地区9天对流天气出现的时间,由于上述天气过程

表 1 2008 年 6 月 22 日至 7 月 1 日天津地区对流性天气概况

Table 1 Overview of convective weather in Tianjin from June 22 to July 1 in 2008

序号	灾害天气开始时间(北京时间)	暴雨(观测站)	体积降水量/ $10^4\text{m}^3$	自动站 6 小时降水极值/mm	大风	雷电	分类
1	22 日 22 时	无	3,594.8	41.5	无	一般	弱
2	23 日 17 时	无	19,372.1	68.1	1 个站	较强	强
3	24 日 19 时	无	112.2	4.9	无	无	弱
4	25 日 11/21 时	蓟县、塘沽、汉沽、大港	36,963.7	75.2/93.6	无	较强	强
5	26 日 22 时	无	7,576.3	39.0	11 个站	强	强
6	27 日 19 时	北辰、武清、静海	33,911.0	177.8	9 个站	强	强
7	28 日 21 时	宝坻	11,610.2	69.5	1 个站	一般	强
8	29 日 13/22 时	宁河	955.3	14.6	无	一般	弱
9	30 日 20 时	无	1,534.0	30.0	无	一般	弱

均是西来加强的对流系统,“开始时间”是指天津地区人工监测到的时间。暴雨以天津 13 个气象观测站 24 小时累计雨量大于 50 mm 为准。“自动站 6 小时降水极值”是自动雨量站所记录的降水量极值,25 日出现两次强对流天气过程,自动站降水量极值分别出现在塘沽开发区泰达一中站,为 75.2 mm;蓟县白庄子站,93.6 mm。为了全面考虑过程降水,避免由于对流性降水不均的局限性,因此以天津地区体积降水(单位为  $10^4 \text{ m}^3$ )来表征降水程度。“大风”以危险报文为准,瞬时风速达到  $17.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  (8 级)。“雷电”强度采取人工观测和大气电场仪记录电场放电电压为准。根据以上几项和雷达回波的跟踪监测情况,将 9 天天气过程分为强的对流过程和弱的对流过程 2 类,其中强的对流过程分别为 23 日、25 日、26 日、27 日和 28 日。

## 2 冷涡的卫星云图特征

FY-2C 卫星红外云图图像,为预报员提供了冷涡动态和高空气流的信息。图 1 记录了冷涡系统 9 天的演变过程,风为云导风(红色代表 100~300hPa 的平均风)。22 日夜间,即 23 日 01:30 时(图 1a)的云图表明:蒙古国上空,有一典型的锢囚气旋涡旋云系,其头部为圆形气旋性气流形成的涡旋云区(C 区)、尾部为南北向云带;晴空区呈“斧头”状,为干冷空气所在地(N 区),晴空区前部白色区域为暖湿气流输送带,是高空反气旋性急流卷云区(W 区),“人”字形云的交汇点是冷暖气流汇合的地方(V 区)。此时,渤海西岸上空云很白,强对流发生时,代表点( $40^\circ\text{N}$ 、 $117^\circ\text{E}$ ,下同)上空 TBB 为  $-40^\circ\text{C}$ ,对流

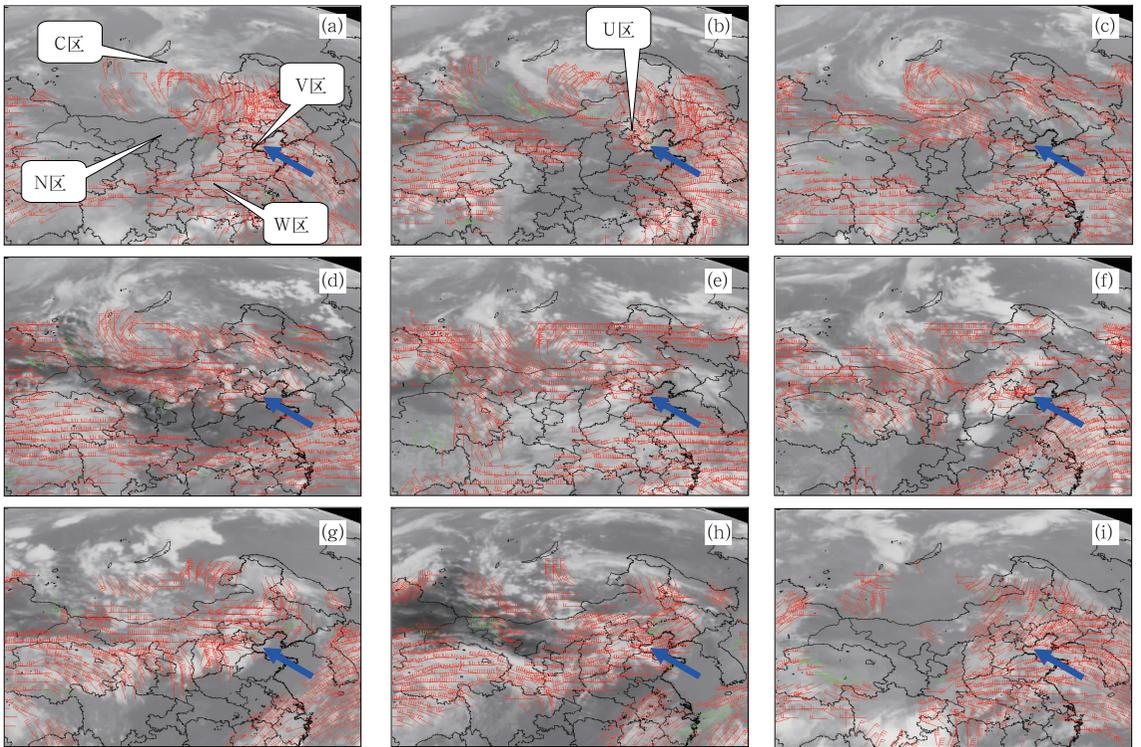


图 1 2008 年 6 月 22—30 日强对流天气出现时冷涡云系演变过程的 FY-2C 红外卫星图像  
(风为 100~300 hPa 厚度内的云导风,→所指研究区)

(a) 23 日 01:30 时, (b) 23 日 19:30 时, (c) 25 日 01:30 时, (d) 25 日 13:30 时, (e) 26 日 19:30 时,  
(f) 27 日 19:30 时, (g) 28 日 19:30 时, (h) 30 日 01:30 时, (i) 31 日 01:30 时

Fig. 1 Satellite images (IR) of cold vortex system at time of convective weather events during 22—30 June 2008

(wind fields are retrieval wind at height of 100—300 hPa, arrow pointed position of studied areas).

(a) 0130 BT 23, (b) 1930 BT 23, (c) 0130 BT 25, (d) 1330 BT 25, (e) 1930 BT 26,

(f) 1930 BT 27, (g) 1930 BT 28, (h) 0130 BT 30, (i) 0130 BT 31 Jun 2008

天气出现在 V 区。23 日 19:30 时(图 1b)的云图表明:涡旋云区(C 区)位置向东南掉,进入我国内蒙古上空,强对流天气过程出现在晴空区(N 区)白色对流性积云区(U 区)。这一区域是高空冷空气偏西急流下方,风速垂直切变强,里查森数  $Ri$  减小,大气不稳定性加强,加之午后地面增温,不断有积云单体形成,合并发展成强对流云团。23 日傍晚天津地区出现典型的飏线中尺度系统,强对流天气发生时, TBB 为  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。24 日夜间,即 25 日 01:30 时(图 1c)的云图表明:涡旋云区明显向西北移动,重新回到蒙古国内上空。此时涡旋云系断裂为首尾两段,渤海西岸上空云零散,24 日 TBB 高于  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。25 日 13:30 时(图 1d)的云图表明:涡旋云区扩散,圆形边界模糊,云导风环绕的气旋性环流中心略向西移动,涡旋云区以南有东西向带状暗区,表明西风急流将干空气向东运送,干冷空气使不稳定层结加强。在不稳定背景下,25 日两次强对流天气均出现在涡旋云区东南部, TBB 分别为  $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$  和  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。26 日 19:30 时(图 1e)的云图表明:涡旋云区轮廓又清晰起来,气旋中心东移,再次进入内蒙古上空。此时 TBB 为  $-62\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。27 日 19:30 时(图 1f)的云图表明:云系为单纯的冷涡云系,由散布的对流云块组成,从云块的排列上可看出明显的涡旋特征,螺旋结构清晰,中心明显,位置变化不大。此时渤海西岸位于涡旋云系东南部,云团呈团状、颜色白, TBB 达到全过程的最低值,为  $-72\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。28 日 19:30 时(图 1g)的云图表明:涡旋云系中心向东北移至内蒙古东部。29 日夜间是弱对流过程,即 30 日 01:30 时(图 1h)表明:涡旋云系中心向西北移动,圆形螺旋结构明显,其西南部有暗区存在,表明干冷空气随西北气流南下,对流天气发生在高空西南气流之下。30 日夜间的对流过程,即 31 日 01:30 时(图 1i)表明:涡旋结构消散,渤海西岸上空为西南暖湿气流输送带,其后是无云区,西北气流与西南气流之间为高空槽的位置,此时冷涡演变为冷槽。29 日、30 日 2 天对流天气发生时, TBB 均为  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  以上。

冷涡在长生命期中,其中心位置、云系形态不断变化,强对流过程时, TBB 均小于  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;弱的对流过程时, TBB 均大于  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  以上。

### 3 冷涡长久维持的原因

通常以 500 hPa 闭合低压,并有冷中心或冷槽配合来表征冷涡系统,冷涡的演变与大尺度环流之

间有着密切的关系。图 2 给出了 500 hPa 等压面上的高度场、温度场以及涡度平流(阴影区)。6 月 22 日 14 时(图 2a),东亚阻塞高压(简称阻高)位于鄂霍次克海以西、贝加尔湖以东,  $45^{\circ}\sim 65^{\circ}\text{N}$  的位置,高压中心为 576 dagpm,有  $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$  暖脊配合。阻高西侧,蒙古国上空有一中心气压值为 564 dagpm 的切断低压,有  $-16\text{ }^{\circ}\text{C}$  冷中心与之对应,称为西部冷涡;阻高东侧,有正涡度平流大值中心。6 月 23 日 14 时(图 2b)西部冷涡获得正涡度加强,低压中心降至 560 dagpm;东部新的切断低压形成,并有冷槽配合,称东部冷涡。24 日 14 时(图 2c)与阻高配合的暖脊向西伸展,并由南北向转为西北—东南向。此时西部冷涡向西北移动。25 日 20 时(图 2d)阻高加强,高压中心值升到 580 dagpm。西部冷涡不断消耗正涡度,范围缩小、强度减弱。26 日 14 时(图 2e),中心位置向东南移动。而在阻高东部,正涡度平流大值区向西伸展,并在其西南侧分裂出正涡度高值区。西部冷涡向东移,有靠近涡度平流大值区之势。27 日 20 时(图 2f)阻高为东北—西南向,其南部,冷涡东移明显,阻高东南部存在  $40\times 10^{-5}\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$  涡度平流高值,并向西延伸。28 日 14 时(图 2g)西部冷涡获得正涡度,迅速发展加强,中心降至 568 dagpm,其北部涡度平流为  $30\times 10^{-5}\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ 。29 日 14 时(图 2h)获得正涡度的冷涡向西北移动,同时阻高开始减弱,中心降至 576 dagpm。此时,来自鄂霍次克海附近的涡度平流输送带断裂,冷涡不能获得正涡度的补充。30 日 14 时(图 2i)冷涡在原地滞留,获得的涡度几乎耗尽,正涡度平流范围急剧缩小,冷涡即将减弱。31 日冷涡减弱为冷槽。

可见,冷涡之所以维持,是因为冷涡在消耗掉原有的正涡度后又获得了来自阻塞高压东侧向西侧输送的正涡度,当正涡度输送带断裂、冷涡耗尽正涡度后,减弱为槽。冷涡的移动方向是朝着正涡度平流高值中心的方向移动,正涡度平流的变化趋势预示着冷涡未来的发展。冷涡路径首先向东南掉,加强西退之后减弱,接着呈带状、断裂为低涡,然后驻留维持,在获得来自东北部的涡度平流后,东北跳加强,接着向西南移动,随后西北进,最后停留原地减弱。

### 4 冷涡与强对流天气的关系

由于温度中心与冷涡中心不对称,冷涡在旋转、

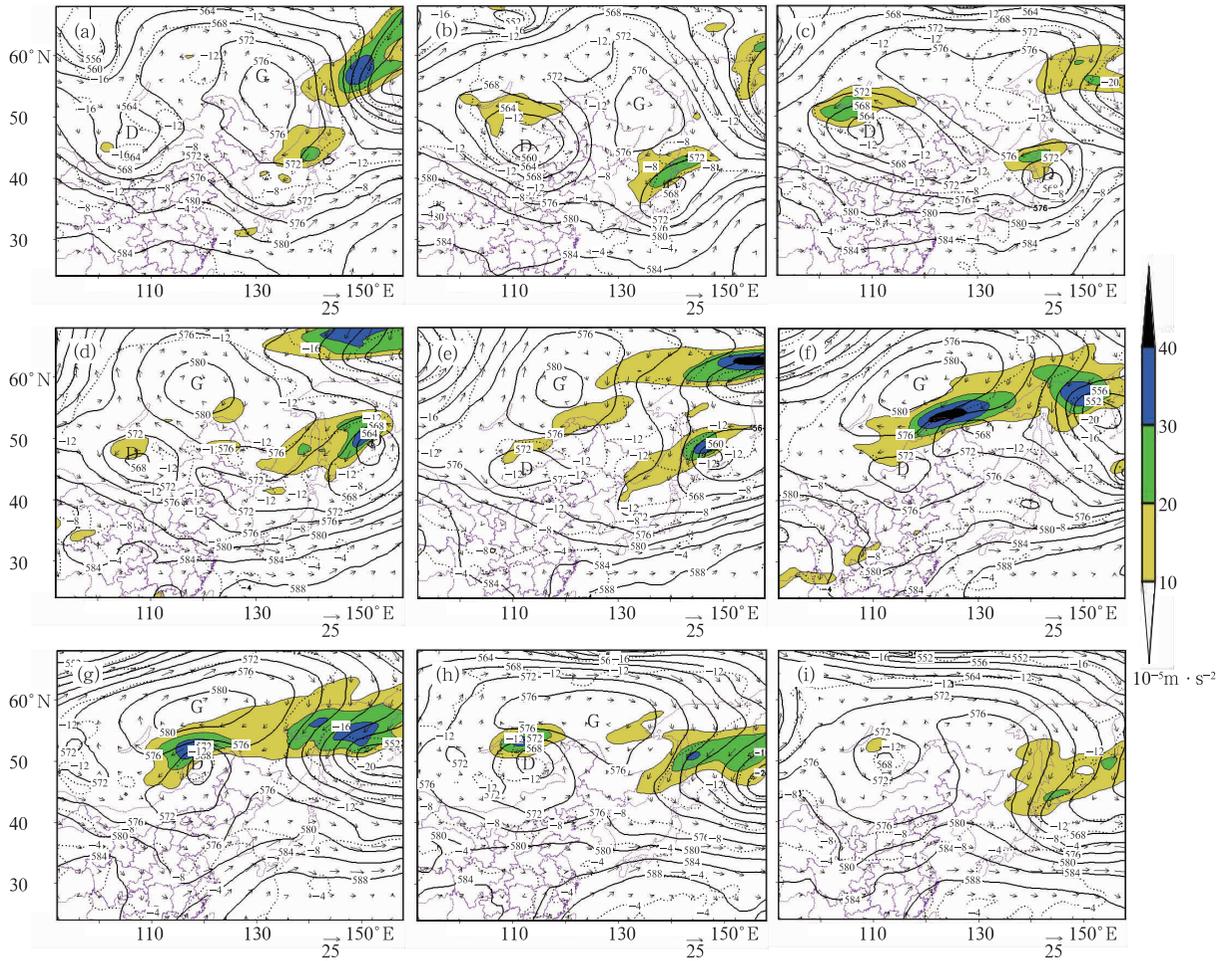


图 2 2008 年 6 月 22—30 日 500 hPa 高度场(粗线,单位:dagpm)、  
 涡度平流(阴影 $\geq 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ )和温度场(单位:  $^{\circ}\text{C}$ )分布图

(a) 22 日 14 时, (b) 23 日 14 时, (c) 24 日 14 时, (d) 25 日 20 时, (e) 26 日 14 时,  
 (f) 27 日 14 时, (g) 28 日 14 时, (h) 29 日 14 时, (i) 30 日 14 时

Fig. 2 Distribution of geopotential height field (solid lines, unit: dagpm), vortex advection  
 (shaded areas) and temperature(dotted lines, unit:  $^{\circ}\text{C}$ ) at 500hPa during 22—30 June 2008

(a) 14 BT 22, (b) 14 BT 23, (c) 14 BT 24, (d) 20 BT 25, (e) 14 BT 26,  
 (f) 20 BT 27, (g) 14 BT 28, (h) 14 BT 29, (i) 14 BT 30 June 2008

东移过程中不断有冷空气分离南下,冷涡分裂的冷空气一方面是对流天气的触发机制,另一方面是促进层结不稳定的因素。图 3a 表示的冷涡中心距渤海西岸代表点( $40^{\circ}\text{N}, 117^{\circ}\text{E}$ )的距离  $L$  (1.3 约代表 1100 km) 随时间变化曲线。可以看到  $L$  在变化,说明冷涡是动态的。4 次弱的对流过程即 22 日、24 日、29 日、30 日  $L$  均大于 1.5 (约代表 1260 km; 而 5 次强对流过程中的 3 次(23 日、26 日、27 日)  $L$  均小于 1 (约代表 836 km), 分别为 680 km、806 km、705 km。孙力等<sup>[5]</sup>曾对暴雨类东北冷涡统计时得到:暴雨发生地在距冷涡中心以南 300~400 km 和 700~800 km 的位置。两结果非常接近,因此,冷涡的位置影响着渤海西岸对流性的强弱。

$V$  分量(即风向的南北分量)可以较好地反映冷空气活动。 $V$  分量为正,表明是南风分量, $V$  分量为负,表明是北风分量。正值转为负值的波动被看作是一次槽过境过程,或者是冷空气的一次活动。图 3b 表示在 500 hPa(实线)、700 hPa(虚线)和 850 hPa(点线)上代表点  $V$  分量的演变曲线。由 850 hPa 上  $V$  分量的变化曲线看到:在 9 天的天气演变过程中,除有 1 次南风转北风的过程,其它时间全为正值,说明低层持续偏南风。而在 700 hPa 和 500 hPa 上, $V$  分量的变化曲线波动较大,说明偏北风(冷空气)更多地在对流层中层活动。22 日 20 时至 23 日 02 时,850 hPa 上  $V$  分量从正值转为负值,短暂的偏南风转为偏北风,但 500 hPa 和 700 hPa  $V$

分量均为正值,偏南风,说明短波槽扰动层很薄,槽很浅。这次波动正好对应着22日夜间弱对流天气过程。23日傍晚,500 hPa和700 hPa  $V$ 分量同时由正转负,即南风分量转北风分量,说明这次短波槽较深,活动明显。这次波动正好对应23日下午至傍晚出现的强飑线天气过程。23日20时以后,500 hPa维持偏北风72小时之久,但风速急剧变化,一度达到最大值  $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  (25日02时前后),表明干冷空气有加强过程。500 hPa北风分量叠加在850 hPa南风分量之上,形成有利于不稳定天气发生的环场配置。这期间,出现3次对流天气过程:即24日夜间、25日下午、25日夜间。从500 hPa和700 hPa看:26日20时至27日02时、27日20时至28日02时、28日14—20时有3次偏南风转偏北风,700 hPa更明显,对应三次强的对流过程。29日至7月1日,850 hPa至500 hPa  $V$ 分量均为正值——偏南风,无明显冷空气活动。对应29日夜

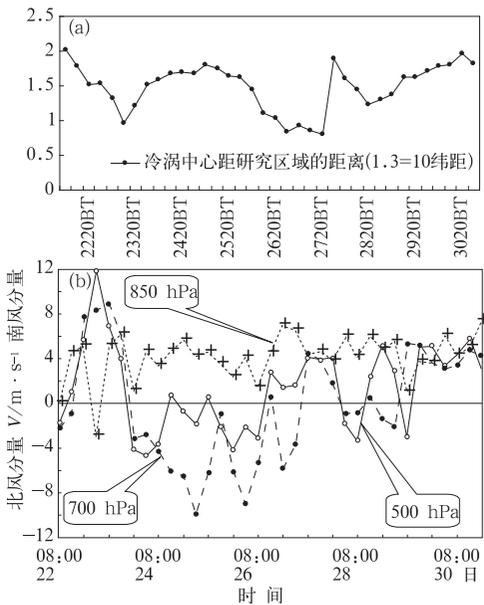


图3 (a) 长生命史冷涡中心距渤海西岸代表点 ( $40^{\circ}\text{N}$ 、 $117^{\circ}\text{E}$ ) 的距离 (1.3 代表 10 纬距);  
(b) 代表点分别在 500 hPa (实线)  
700 hPa (虚线) 和 850 hPa  $V$  分量  
的时间序列 (单位均为  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )

Fig. 3 (a) The distance from the center of cold vortex to represent point ( $117^{\circ}\text{E}$ ,  $40^{\circ}\text{N}$ ) on west coast of Bohai Bay; (b) Time series of  $V$  vector (unit:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) at 500 hPa (solid lines), 700 hPa (dashed lines) and 850 hPa (dotted lines), respectively

间、30日傍晚的弱过程。

总之,9天对流天气与冷涡分裂的冷空气有直接关系,850 hPa与500 hPa  $V$ 分量配置有2种类型:850 hPa南风分量+500 hPa北风分量型;850 hPa南风分量+500 hPa南风分量型。500 hPa和700 hPa  $V$ 分量敏感地反映弱冷空气活动。这些结论提示预报员,在运用高时空分辨率的数值产品进行预报时,要关注对流层中层上南北风分量的转变。

## 5 水汽条件和湿度层结

水汽条件是对流天气发生的内因。强对流天气与区域暴雨天气不同的是,湿层不深厚<sup>[9]</sup>。从  $U$  分量的垂直分布看到 (图略) 东风气流只存在于 850 hPa 以下,也就是说,来自渤海的水汽层虽然很浅,但在渤海西岸对流性暴雨中却充当着重要的角色。从9天对流性天气出现前 975 hPa 高度上的水汽通量分布 (图略) 可见:9天水汽分布的共同特征是水汽通量大值中心均在渤海,表明渤海为一个湿气团,持续的偏东气流将海洋中的水汽源源不断向渤海西岸输送,水汽通量湿舌 (大于  $6 \times 10^{-3} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$  区域) 由渤海伸向西岸。不同的是:水汽通量值不同,湿舌覆盖的地点不同。3次体积降水量较多的强对流过程 (23—24日、25—26日和27—28日) 水汽通量值较高,23日傍晚和27日夜间体积降水量大的强对流过程,水汽通量中心值分别达到了  $14 \times 10^{-3} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$  和  $12 \times 10^{-3} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ,湿舌覆盖了京津地区。湿舌西伸的位置和数值大小对强降水落区和降水量有一定的指示意义。

图4给出了9天湿度垂直分布随时间的变化。阴影代表相对湿度  $\leq 60\%$  的相对干区。从空间分布看到:22日弱对流的天气过程时,400 hPa以下空气干,低空几乎没有湿层;从23日夜间02时开始至7月1日08时,850 hPa以下相对湿度维持在60%以上,说明对流层低层湿度大,这与来自渤海的低层水汽输送关系密切。特别是27日20时以后,湿度层逐渐加厚,发展到对流层中层。中低层较好的湿度条件为强对流天气的产生非常有利。另外,23—28日,在850 hPa至700 hPa始终有干空气 (相对湿度  $\leq 60\%$ ) 存在,对流层中低层干空气与冷空气活动相联系。而500 hPa高度以上基本是干区。

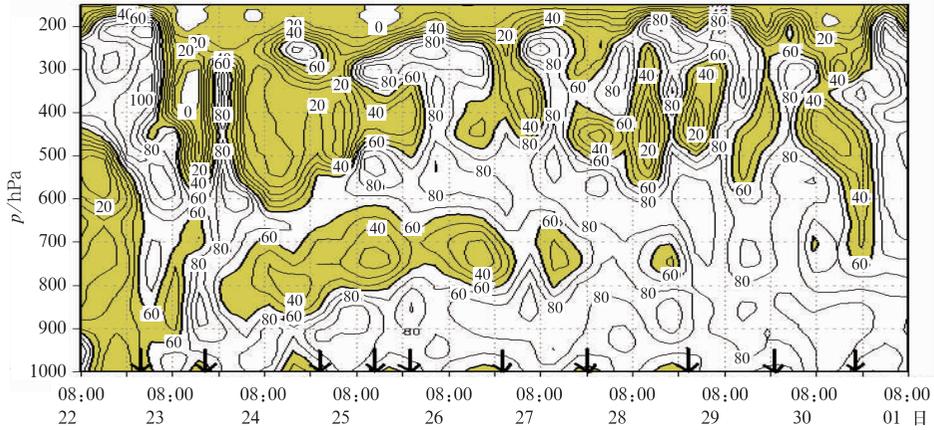


图 4 9 天相对湿度垂直分布的序列

阴影为相对湿度  $\le 60\%$  相对干区;箭头指对流天气的开始时间

Fig. 4 Time series of vertical distribution of relative humidity (shaded areas indicate relative dry areas of relative humidity under 60%; arrow points beginning time for convective weather) for 9 days

## 6 大气环境的不稳定参数

较强的热力不稳定和适宜的动力环境是强对流发展的基础,在对流活动中,热力不稳定决定了对流发展的强度,而动力作用对触发对流及决定风暴类型起着重要作用。在描述环境条件方面,物理意义明确的热力和动力稳定度参数以其直观性、可操作性等优势成为日常预报业务的重要指标。在美国、瑞士等国家,强对流参数的应用比较普遍<sup>[11]</sup>。我国与美国的强对流天气在类型和强度上有差别<sup>[12-13]</sup>,那么,渤海西岸对流性天气中,参数阈值是多少?

由于无 14 时探空资料,所以用 NCEP  $1^\circ \times 1^\circ$  再分析资料计算对流参数。表 2 计算的热力对流参数有抬升指数(LI)、K 指数、总温度指数(TT)、沙氏指数(SI)、对流有效位能(CAPE);动力参数有 0~6 km 厚度内平均风切变(Shear)、风暴相对环境螺旋度(SREH);强天气威胁指数(SWEAT)是动力和热量的综合指数。SREH、SWEAT 表达式如下

$$SREH = \int_0^{3km} k \cdot (\mathbf{V} - \mathbf{C}) \times \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial z} dz$$

$$SWEAT = [12T_a^{650} + 20(T^{650} + T_a^{650}) - 2T^{500} - 49] + 2V^{850} + V^{500} + 125(S + 0.2)$$

式中,SREH 描述了环境风的垂直结构,它考虑了风暴的整体移动、上升气流的旋转、风的整体效应,是研究环境风场对强风暴作用的物理量。SWEATS 包含了低高层湿度、温度及风场信息;而且考虑了环境风在垂直方向上的旋转。S 为 500

hPa,850 hPa 风向差的正旋。美国强风暴有可能出现 SWEAT 阈值为 100<sup>[12-13]</sup>。

由表 2 可见,22 日夜间(弱过程)热力和能量不稳定参数值均没有达到阈值,但风切变 Shear 值较高,这可能与当时有明显的冷空气活动有关(图 3b 表明 850 hPa 高度上有明显的北风)。说明虽然有冷空气作为触发机制;然而,层结不稳定条件不理想,因此没有出现强烈的对流活动。23 日傍晚是一次典型的爬线过程,为强的热力学不稳定和强的动力学条件下形成的强风暴。热力参数满足不稳定条件下,风切变 Shear 和 SREH 也较高,说明强大的垂直风切变是爬线产生的环境条件,这与文献[6]提及的事实一致。25 日白天强对流的形成,热力不稳定条件极好,但 Shear 和 SREH 很弱,说明该次过程是典型的强热力条件和弱动力条件下产生的强风暴,当天不但出现 5 cm 大冰雹,而且 1 小时雨量达到 75.4 mm,并伴有短时大风。强风暴指数 SWEAT 达到 550,为 9 天之首。25 日夜间虽然能量 CAPE 有所减少,但动力条件转好,再次在天津北部形成暴雨,SWEAT 为 489,强对流天气出现后,骤减到 176。26 日夜间的强的对流过程,风暴相对螺旋度很大,强对流天气发生时(26 日 20 时至 27 日 02 时)SREH 为 105~143,天津普遍遭受大风的袭击(表 1),28 日夜间的过程与 26 日相似。29 日弱过程,只有 K 指数和风切变 Shear 较好,其他指数,SREH、SWEAT 均小。30 日傍晚热力、动力条件均较好,SWEAT 为 327,接近阈值。另外,24 日弱的对流过程具有好的热力、动力条件,SWEAT 达

表 2 以 NCEP1°×1°在分析资料计算的对流参数

Table 2 The convective parameter by NCEP1°×1°. Number drawn solid line square indicated threshold of severe convective weather events

日期\参数	<i>LI</i>	<i>K</i>	<i>TT</i>	<i>SI</i>	<i>CAPE</i>	<i>Shear</i>	<i>SREH</i>	<i>SWEAT</i>	强度分类
阈值	<u>-2.0</u>	<u>33</u>	<u>50</u>	<u>-2.0</u>	<u>600</u>	<u>35</u>	<u>70</u>	<u>330</u>	
6月22日08时	-0.7	26	45	1.9	69	<u>38</u>	8	154	
6月22日14时	-0.5	27	46	1.4	77	<u>39</u>	42	288	
6月22日20时	0.5	32	48	0.1	45	30	62	237	弱
6月23日02时	-0.4	<u>35</u>	48	-0.5	153	<u>38</u>	0	179	
6月23日08时	0.5	30	44	2.6	101	<u>41</u>	31	163	
6月23日14时	<u>-2.7</u>	<u>34</u>	<u>52</u>	<u>-3.9</u>	<u>612</u>	<u>46</u>	<u>75</u>	<u>397</u>	强
6月23日20时	-1.7	<u>33</u>	49	0.3	217	30	0	131	
6月24日02时	0.3	31	47	1.4	29	30	8	275	
6月24日08时	0.1	32	<u>50</u>	-0.6	39	<u>36</u>	0	194	
6月24日14时	<u>-3.3</u>	32	<u>50</u>	-0.1	419	<u>43</u>	57	304	
6月24日20时	<u>-4.8</u>	31	<u>51</u>	-1.8	<u>924</u>	<u>42</u>	<u>82</u>	<u>377</u>	弱
6月25日02时	<u>-2.8</u>	<u>34</u>	<u>54</u>	<u>-4.1</u>	<u>632</u>	34	<u>88</u>	<u>451</u>	
6月25日08时	<u>-4.9</u>	31	<u>58</u>	<u>-6.6</u>	<u>1000</u>	20	50	<u>550</u>	强
6月25日14时	<u>-5.4</u>	28	<u>55</u>	<u>-4.3</u>	<u>1274</u>	30	60	<u>404</u>	
6月25日20时	<u>-3.6</u>	<u>33</u>	<u>56</u>	<u>-5.5</u>	<u>652</u>	32	<u>105</u>	<u>489</u>	强
6月26日02时	2.2	30	49	-0.6	0	30	<u>102</u>	176	
6月26日08时	2.5	26	<u>50</u>	-1.6	0	24	28	198	
6月26日14时	-1.7	21	<u>50</u>	-1.3	137	27	<u>88</u>	<u>342</u>	
6月26日20时	-0.4	32	<u>51</u>	<u>-2.5</u>	32	33	<u>105</u>	<u>394</u>	强
6月27日02时	0.7	<u>35</u>	<u>51</u>	<u>-2.4</u>	0	28	<u>143</u>	<u>387</u>	
6月27日08时	0.8	28	47	0.3	0	25	19	229	
6月27日14时	-0.7	31	47	0.2	38	30	<u>82</u>	317	
6月27日20时	0.2	<u>33</u>	47	0.5	0	29	<u>72</u>	254	强
6月28日02时	3.4	32	44	2.1	0	21	29	287	
6月28日08时	2.3	31	46	0.9	0	21	60	290	
6月28日14时	<u>-2.3</u>	32	49	-1.7	333	30	<u>73</u>	<u>346</u>	
6月28日20时	-1.4	<u>36</u>	<u>50</u>	-1.7	79	28	<u>104</u>	<u>336</u>	强
6月29日02时	1.7	<u>35</u>	46	0.7	0	22	<u>113</u>	315	
6月29日08时	3.1	<u>33</u>	45	0.7	0	29	0	193	
6月29日14时	0.2	<u>35</u>	45	-0.1	19	<u>36</u>	51	329	弱
6月29日20时	0	<u>38</u>	48	-1.7	0	<u>37</u>	2	314	
6月30日02时	-0.6	<u>33</u>	47	-0.8	152	<u>43</u>	66	330	
6月30日08时	<u>-2.1</u>	<u>35</u>	49	<u>-2.4</u>	573	<u>35</u>	<u>79</u>	311	
6月30日14时	<u>-3.8</u>	<u>34</u>	<u>50</u>	<u>-2.8</u>	<u>713</u>	31	<u>121</u>	327	弱
6月30日20时	-1.1	<u>33</u>	47	-0.2	108	34	<u>84</u>	284	
7月01日02时	-1.9	<u>37</u>	48	-1.6	243	25	16	310	
7月01日08时	0.2	<u>34</u>	44	0.9	0	31	0	195	

“—”下划线表示达到强对流天气时的阈值

到 377;27 日强的对流过程, *SWEAT* 只有 254。这些可能与探空站网点距离大、没有 14 时探空等诸多因素有关。

总体上看:强天气威胁指数 *SWEAT* 很好地衡量强热力加上强动力条件、强(弱)热力加上弱(强)动力条件下强对流天气的剧烈程度,有很高的实用性,风暴相对环境螺旋度 *SREH* 比 *Shear* 更好地描述了动力不稳定状态;而单纯的热力、动力不稳定参数在指示对流天气强弱时效果不够理想。

## 7 结论

(1) 9 天的对流天气分别出现在冷涡涡旋云系头部的南部或东南部,云导风场有助于确定冷涡中心位置、判断高空风场情况。强的对流过程时云顶 TBB 温度在  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  至  $-72\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;弱的对流过程时云顶 TBB 温度在  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  以上。

(2) 来自东亚阻塞高压两侧高涡度区的正涡度

平流交替补充了冷涡对正涡度的损耗是冷涡长久滞留维持的原因。

(3) 冷涡在长生命期中是动态的,冷涡中心距研究代表点的距离( $L$ )与强对流天气的强弱有关,弱的对流过程时, $L > 1260$  km,5次强的对流过程其中3次 $L$ 的最近距离分别为680 km、806 km、705 km;对流层中层 $V$ 分量敏感地反映了冷涡分裂的冷空气活动。

(4) 湿度层结的演变表明:低空湿度层随着强对流天气的持续而逐渐增厚,850~700 hPa的干空气层(相对湿度 $\leq 60\%$ 或相对干区)始终存在;“上干下湿”的特征使对流不稳定性增强,渤海西岸强对流性天气无需深厚的水汽条件,975 hPa水汽通量大小和方向反映了来自渤海的水汽输送状况,其对灾害天气的落区及降水量有一定的指示意义。

(5) 强天气威胁指数  $SWEAT$  和风暴相对环境螺旋度  $SREH$  在判断强对流天气强度方面比常用的不稳定参数效果更好。阈值分别是抬升指数( $LI$ )为-2.0、 $K$ 指数为33、沙氏指数( $SI$ )为-2.0、总温度( $TT$ )为50、 $CAPE$ 为600、0~6 km风切变为35、风暴相对环境螺旋度( $SREH$ )为70、强天气威胁指数( $SWEAT$ )为330。当渤海西岸的强对流参数超过阈值时,出现强对流天气的可能性很大。但上述参数阈值还有待于通过更多的例据来修正。

**致谢:**感谢国家气象中心的何立富博士、天津气象科学研究所的解以扬正高工给与本文的指导!

## 参考文献

- [1] 斯公望. 暴雨和强对流环境系统[M]. 气象出版社, 1989: 116.
- [2] 杨红梅, 陶祖钰. 强天气冷涡云系结构的分析和物理解释[J]. 大气科学, 1992, 16(1): 77-84.
- [3] 陈进强, 张纪淮, 单久涛, 等. 冷涡天气系统影响下内蒙古强对流天气分析[J]. 气象, 2000, 27(1): 39-47.
- [4] 孙力, 郑秀雅, 王琪, 等. 东北冷涡的时空分布特征及其东亚大型环流系统之间的关系[J]. 应用气象学报, 1994, 5(3): 297-303.
- [5] 孙力, 王琪, 唐晓玲. 暴雨类冷涡与非暴雨类冷涡的合成对比分析[J]. 气象, 1994, 21(3): 7-10.
- [6] 杨晓霞, 李春虎, 杨成芳, 等. 山东省2006年4月28日飊线天气过程分析[J]. 气象, 2007, 33(1): 74-80.
- [7] 扈忠慈, 陆长荣, 白乃英, 等. 华北平原飊线与一般对流活动发生条件的对比分析[J]. 气象, 1987, 13(8): 8-13.
- [8] 余志敏. 冷涡形势下强飊线的雷达探测和临近预报[J]. 气象, 1988, 14(7): 8-14.
- [9] 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): 10-17.
- [10] 陶诗言, 丁一汇, 周晓平. 暴雨和强对流天气的研究[J]. 大气科学, 1979, 3(3): 227-237.
- [11] 李耀东, 刘健文, 高守亭. 动力和能量参数在强对流天气预报中的应用研究[J]. 气象学报, 2004, 62(4): 401-409.
- [12] 彭治班, 刘健文, 郭虎, 等. 国外强对流天气的应用研究[M]. 北京: 气象出版社.
- [13] 许小峰, 郭虎, 廖晓农. 国外雷电监测和预报研究[M]. 北京: 气象出版社.