

# 山东半岛低空冷流降雪分析研究

李建华<sup>1</sup> 崔宜少<sup>1,2</sup> 单宝臣<sup>1</sup>

(1. 山东省威海市气象局, 264200; 2. 兰州大学)

**提 要:** 山东半岛的冷流天气和其他降水过程有不同的特征,对 2005 年 12 月山东半岛北部地区的连续 2 场暴雪天气过程进行了分析。常规的雷达资料表明回波顶最高高度为 3km,体现了冷流过程的低空性。WRF 中尺度数值模式的模拟结果表明:冷流过程与低层大气层结的结构特征有着密切的关系;850hPa 冷平流与地面降水量有着较好的正相关关系;云水含量、云中霰含量和上升速度的垂直分布进一步证实了冷流降水的低空性。

**关键词:** 冷流天气 低层 WRF 中尺度数值模拟

## Characteristics of Low Level Cold Airstream Snowfall in Shandong Peninsula

Li Jianhua<sup>1</sup> Cui Yishao<sup>1,2</sup> Shan Baochen<sup>1</sup>

(1. Weihai Meteorological Bureau, Shandong Province, 264200; 2. Lanzhou University)

**Abstract:** The cold airstream snowfall weather events occurring in Shandong Peninsula have different characteristics from other precipitation processes. Two continuous heavy snowfall courses in northern Shandong Peninsula in December 2005 were analyzed. It can be seen from the conventional radar data that the top layer of echo is 3 km, which reflects the low level characteristics of cold airstream courses. The simulation results by WRF meso-scale numerical model show that the cold airstream weather has a close relationship with the structure of low level atmosphere. The cold airstream of 850hPa layer has a positive correlation with ground precipitation. Vertical distributions of cloud water, cloud graupel water and vertical velocity further approved the low level characteristics of cold airstream precipitation.

**Key Words:** cold airstream snowfall low level WRF mesoscale numerical model

山东省“山东半岛冷流天气形成机理的模式研究”重点课题资助。

收稿日期:2006 年 10 月 30 日; 修定稿日期:2007 年 1 月 10 日

## 引 言

冷流降雪是在特定的季节、天气形势和地理条件下形成的一种地方性天气。冬季,当高空低槽过境后,上游各地天气迅速转晴,而山东半岛,特别是半岛北部的蓬莱到成山头一带沿海地区,在强劲的西北风吹送下,块状乌云从北部沿海涌来,随之开始出现阵雪,直至冷平流结束<sup>[1]</sup>。

山东半岛的冷流天气已经得到越来越多气象学者的重视,郑丽娜<sup>[2]</sup>等研究了海岸线及其周围的特殊地形对冬季冷流降雪的贡献;于志良<sup>[3]</sup>研究了胶东半岛冷流降雪与海气湍流感热输送的关系;李洪业<sup>[4]</sup>等认为适宜的环流形势、海-气相互作用、低层稳定性、低层风切变及地形的抬升作用是冷流低云形成并产生降雪的主要原因。2005年12月烟台、威海地区持续半个多月的强降雪,给当地居民的生活带来了极大的不便,罕见的暴雪过程和其局地性的特点引起公众和气象学者的极大关注,被列为“2005年我国10大主要天气气候事件”之一。以冷流降雪的独特性为主,分析了冷流过程是发生在低层的一种特殊的天气现象,利用WRF数值模式结果对2005年12月3日和6日威海地区两次不同的暴雪过程进行某些特征的对比分析,并通过一些物理量数据的输出量来分析冷流过程的物理成因,进一步阐明了冷流过程的低空性。

## 1 天气实况介绍

2005年12月3日,高空500hPa东北地区处于涡后横槽的控制中,随着横槽的转竖南摆,冷空气大举南下,较强的冷空气造成北方大部分地区出现降雪天气,威海地区也出现了强度较大的降雪过程。随着高空冷涡的东移,5日之后华北高空都转入西北气流的控制中,北方大部分地区都相继转晴,但是山

东半岛北部地区的降雪却没有停止,6日威海地区出现了24.4mm的暴雪天气,经分析此次暴雪过程为典型的冷流过程。

## 2 模式资料与方法

用WRF模式进行模拟,模拟的初始时间为2005年12月6日14时,模拟时间长度为24小时。模式采用考虑水汽、雨、雪、云水、冰、冰雹过程的Lin微物理过程和5分钟调用一次的浅对流Kain-Fritsch积云参数化方案。研究表明,当模式网格距大于10km时,显示方案和隐式方案相耦合的方法,模式最有可能成功复制出中尺度对流系统的结构及其发展演变过程。短波辐射采用Dudhia方案,长波辐射采用rrtm方案,边界层采用YSU方案,陆面过程采用Noah方案。垂直方向分为19个高度层,模式结果20分钟输出一次。网格中心为37.39°N、121.89°E,网格格距为10.2km,格点数是101×86。采用的初始场资料是6小时一次的1°×1°的NCEP再分析资料。

## 3 模拟降水量分析

为了更好地分析模拟结果的准确性,对降水强中心随时间的演变与实况进行对比验证。通过MICAPS资料得到实况降水图,由于海上没有观测点,故海上降水量为缺测。图1a是6日14时到20时的降水实况与模拟6小时后的累积降水量的对比,可以看出此时间段内实际降水量最大观测站烟台站为9mm,其附近牟平观测站为6mm,福山观测站为5mm。而模拟的降水量中心值为9mm,5mm的强降水中心基本上也是出现在烟台东北部地区,同时威海地区的累积降水量也开始逐渐增大。图1b为6日14时到7日14时的降水实况与模拟24小时的最终累积降水量的对比,整个降水区呈西北—东南向的狭长带状分布,出现在烟台地区东北部

经威海北部到石岛东南部海面,暴雪的强中心在威海地区的北部和烟台地区的东北部。具体降雪量为:威海本站为 24.4mm,南部地区为小雪天气,降雪量都小于 1mm,最南部乳山地区则出现微量降雪。与模拟的累积降

雪量对比,认为陆地上模拟的强降雪中心位置和量值基本上与实况基本吻合。通过红外冷流云(图 3a,见彩页)与海上降水的对比可以看出模拟结果比较正确。

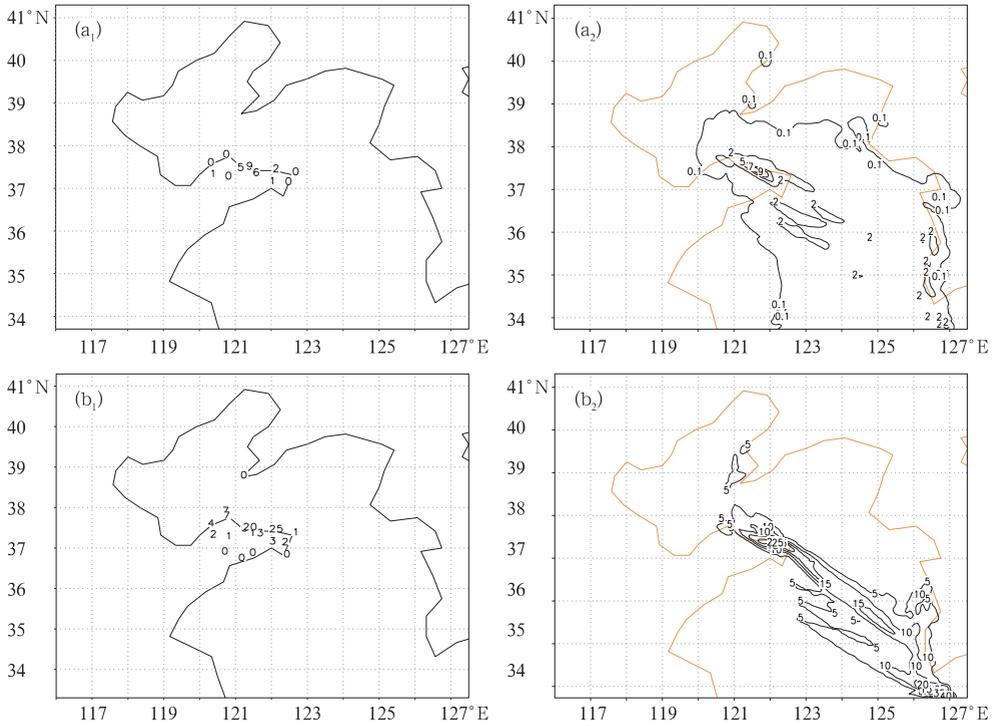


图 1 实况降水量与模拟的累积降水量(单位:mm)

(a) 模拟 6 小时的累积降水量与实况对比;(b)模拟 24 小时的累积降水量与实况对比

#### 4 850hPa 冷平流与降水的关系

较强的低空冷平流是冷流降雪形成的一个基本条件。但并不是每一次冷空气影响都能产生冷流降水,主要看冷空气能否使低层造成较大的海气温差,由于海水温度变化幅度小,所以在某一段时期内,可以把海水温度近似地看成一个常数。因此,海气温差的大小,主要决定于冷空气的强度。对 850hPa 温度冷平流进行了分析(图 2),发现前期温度冷平流较强,半岛北部为  $-15 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$  (图 2a),积分 1020min 后明显减弱(图

2b)。从地面累积降水量来看,850hPa 冷平流只在能形成冷流天气的山东半岛北部地区和东部海上产生降水,强冷平流处地面都对应较强降水量,积分 1020min 后山东半岛北部强冷平流东移到海上之后,可以明显看出强降水中心也随之东移到海上,说明低空冷平流与地面降水量有着较好的正相关关系。但是由于低空温度已经降下来,故地面仍然有一定的冷流降水。

#### 5 卫星云图分析

产生冷流降雪的低云,习惯上称为冷流

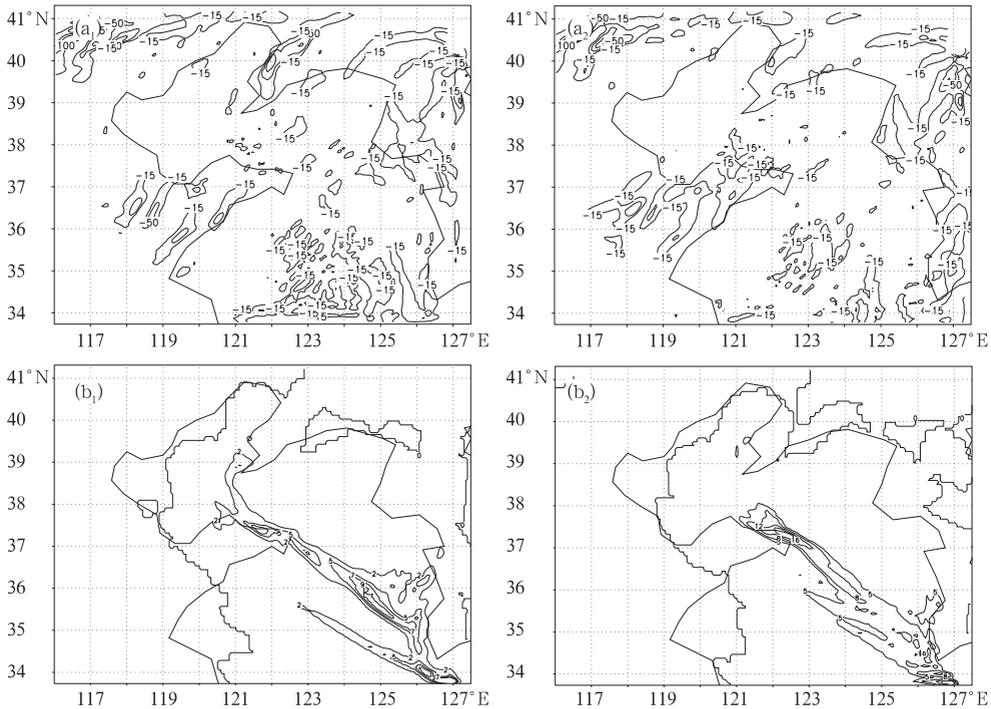


图 2 850hPa 温度冷平流(单位  $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ )与地面降水量随时间的演变关系

(a)积分 17 小时前后 850hPa 冷平流;(b)积分 17 小时前后累积降水量

低云。由于冷流过程是冷空气经过暖湿的海面时,使得低层大气层结变得不稳定而形成的一种低云,冷流低云属于积云性层积云,云底高度一般在  $600\sim 1000\text{m}$ ,云顶高度一般在  $3000\text{m}$  以下<sup>[2]</sup>。所以低空性是冷流过程一个比较明显的特征。从图 3a(见彩页)的卫星云图上看,在渤海湾至山东半岛至黄海东南部有一大片低云,冷流低云颜色灰白,边缘模糊,不像对流性低云那样轮廓清晰。正是这一片低云使得山东半岛北部地区普降暴雪,从几次冷流降雪过程的卫星云图发现,产生冷流过程的云系均为低云。图 3b(见彩页)是从烟台接收的雷达 19 号产品,可以看出最强回波强度为  $30\text{dBz}$  左右,大部分回波强度在  $10\sim 20\text{dBz}$  之间。结合雷达回波的云顶高度产品来看,云顶高度大部分在  $2\text{km}$  以下,小部分在  $3\text{km}$  以下(图略)。

## 6 物理要素分析

### 6.1 水平风场分布

对 2005 年 12 月 6 日这次过程各层水平风场进行分析,发现  $800\text{hPa}$  高度层以下风场存在明显的风向辐合。从  $850\text{hPa}$  层来看(图 4a),西北气流在从京津地区经过暖湿的渤海湾到达山东半岛北部地区时,由于地形和海岸线的摩擦作用发生风向辐合。海岸对垂直于海岸线的风,一般有风向风速的辐合作用;对平行于海岸线的风,则有摩擦辐散的作用<sup>[3]</sup>。正是这种辐合触发了这次暴雪过程。从不同时次的风场来看,在半岛北部地区的风向辐合一直维持着。而从图 4b 来看,在  $700\text{hPa}$  高度层流场则转为一致的西北风,是典型的高压脊环流;同时  $700\text{hPa}$  以上高度也是一致的西北气流。这种高空高压脊的环流

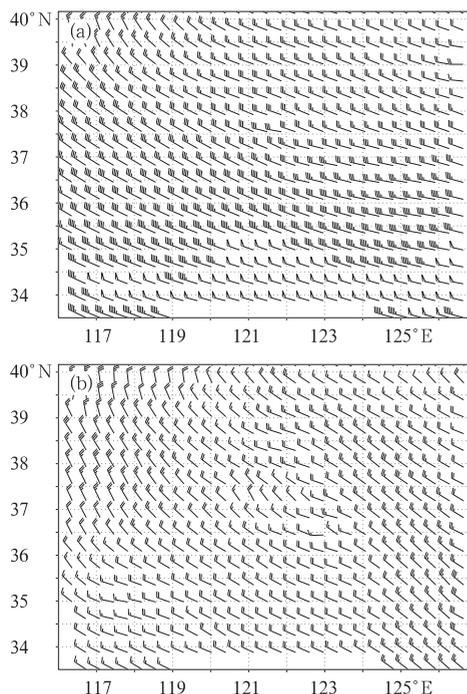


图 4 2005 年 12 月 6 日 18 时 850hPa(a) 和 700hPa(b) 高低空风场水平分布

而产生暴雪的天气过程,也成为冷流过程的一个独特之处。为了更形象地分析风场辐合的强弱,又对风场辐合辐散进行分析,取威海测站进行经向纬向两个方向的剖面(图 5),在 1000hPa 高度半岛北部的低层风场存在明显的辐合(图略),而 850hPa 高度层以上气流开始较强的辐散,地面强降水区以风场强辐散为主。而当有高空系统影响时,上升气流一直发展到 500hPa 层以上,通常在 700hPa 附近开始辐散,辐合层的降低充分说明了冷流系统的低空性。一般积雨云单体高空出流多在 300~200hPa,在 700hPa 以下是辐合<sup>[5]</sup>。

## 6.2 云水和云中霰含量的分析

取 700hPa 高度层较大云水含量的时刻分析,用 grads 从模拟结果中提取这一时刻威海观测站在高空各个高度云水和云中霰两个物理量的量值以文本文件输出,用 Grapher 制作云水含量和霰的垂直等值线图。

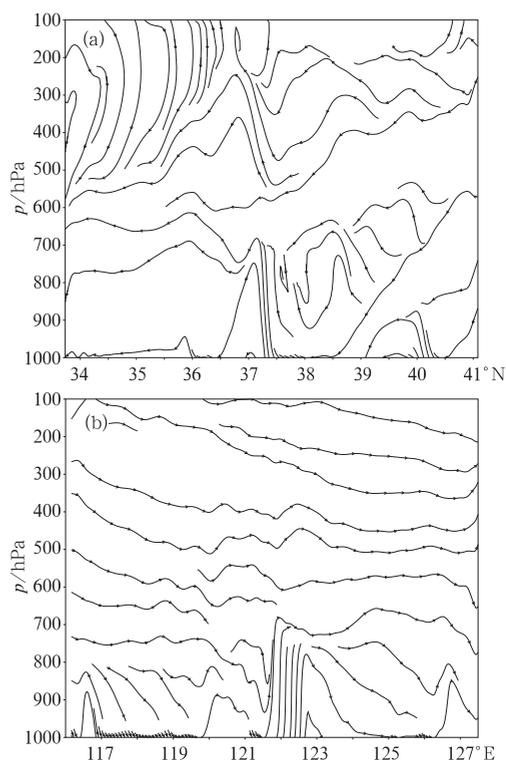


图 5 2005 年 12 月 6 日 18 时 20 分垂直流场分布  
(a) 沿 122.13°E 作剖面,  $v; w \times 50$ ;  
(b) 沿 37.46°N 作剖面  $u; w \times 50$

2005 年 12 月 3—4 日,山东半岛受高空涡后横槽的影响,从模式模拟的云水含量来看,云水含量集中在 500hPa 高度层以下,最大云水含量出现在 650hPa 左右,500hPa 以上高度没有云水含量,同样云中霰的含量也集中在 500hPa 高度层以下(图 6a)。以冷流过程为主的 12 月 6 日,模式模拟的云水含量,集中在 700hPa 高度层以下,最大云水含量出现在 750hPa 左右,700hPa 以上高度没有云水含量,同样云中霰的含量也集中在 750hPa 高度层以下通过图 6a 和图 6b 的对比,可以看出系统性降水较冷流过程降水云水和霰含量高度层明显偏高,两次不同性质的降水云水含量高度的不同,也印证了冷流云的低空性。

## 6.3 垂直速度分析

从威海地区高空垂直速度随时间的演变

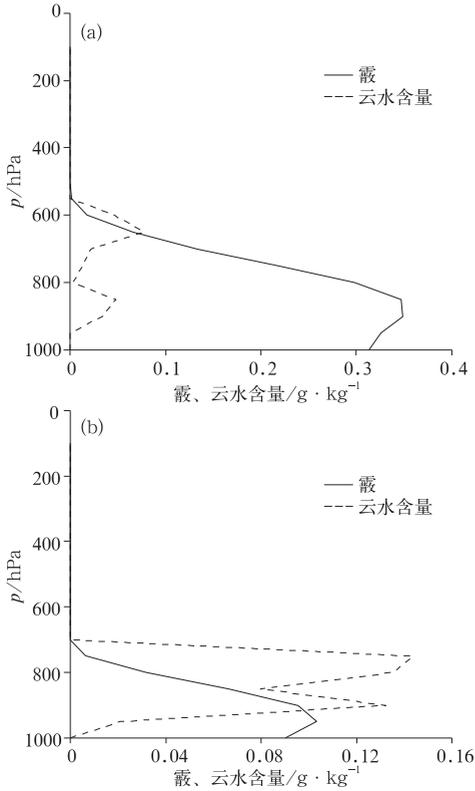


图 6 云中霰和云水含量在垂直面上的分布  
(单位:  $g \cdot kg^{-1}$ —霰,  $\cdots$ 云水含量)  
(a) 2005年12月4日4时20分  
(b) 2005年12月7日4时20分

图可以看出,在模拟的 1440min 里面上升速度都是在低层活跃,700hPa 高度层以上基本上没有或者有短时微弱的垂直方向上的动力,在 700hPa 以下的低层发展为明显的能量交换,取模拟 260min(图 7a)和 960min(图 7b)上升速度较强的时刻分析,强上升速度中心为  $0.4m \cdot s^{-1}$ ,位于 850hPa 附近。结合降水量情况来看,明显的降水量出现在低层的不稳定能量交换的过程中,说明这次降水过程是较为典型的低层不稳定的降雪过程。水平风场辐合最强上升速度小于  $1m \cdot s^{-1}$ ,较强对流天气要弱得多,上升速度强度不大,但是维持时间较长,在模拟的几次暴雪天气过程中,低层上升气流为持续的暴雪天气提供了动力机制。

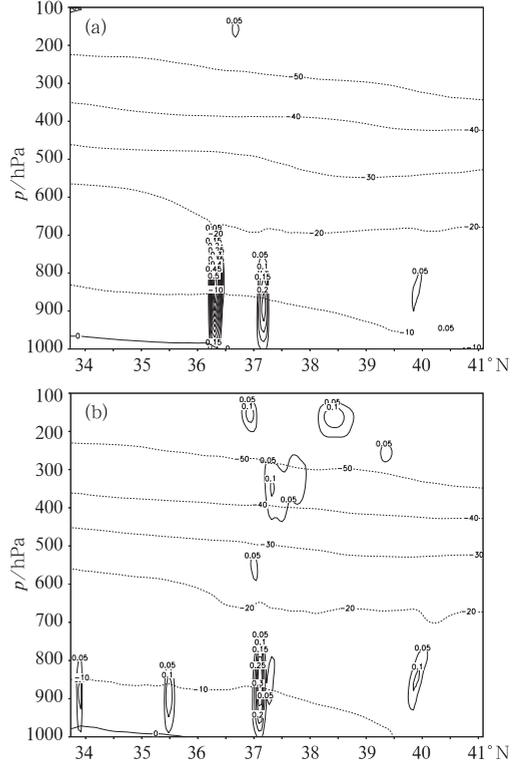


图 7 2005年12月6日模拟的上升气流剖面图(单位:  $m \cdot s^{-1}$ )  
(a) 积分 260min, (b) 积分 960min

### 6.4 大气层结分析

冬季,海水表层温度高于陆地上空气温度,当高空槽后西北气流带动干冷空气移经渤海海面时,暖海面将大量的热量和水汽输送到干冷空气低层,使其温度层结变得不稳定,形成低云降雪。海表通过湍流交换等作用向大气低层输送感热。从 12月6日14时威海观测站的温湿场高空剖面(图 8a)可以看出,在 800hPa 高度层以上温度和露点温度差较大,为干冷空气层;800hPa 高度层以下温度和露点温度曲线逐渐接近,  $T - T_d \approx 0^\circ C$ 。空气湿度非常大,为暖湿气流。从地面实况上分析,12月6日整个华北地区都处于地面冷高压控制,上游各地区天气晴朗,从模拟结果也可看出北京的高空温湿场明显反映出干冷极地大陆气团的特征。但当冷空气经

过暖湿的渤海海面到达山东半岛沿海地区时,半岛北部低层的增温增湿现象非常明显,温度递减率加大。可见低层大气的层结状况已发生很大变化,正是低层大气层结的不稳定状态触发了垂直上升运动,进一步促使了此次暴雪天气的发生。

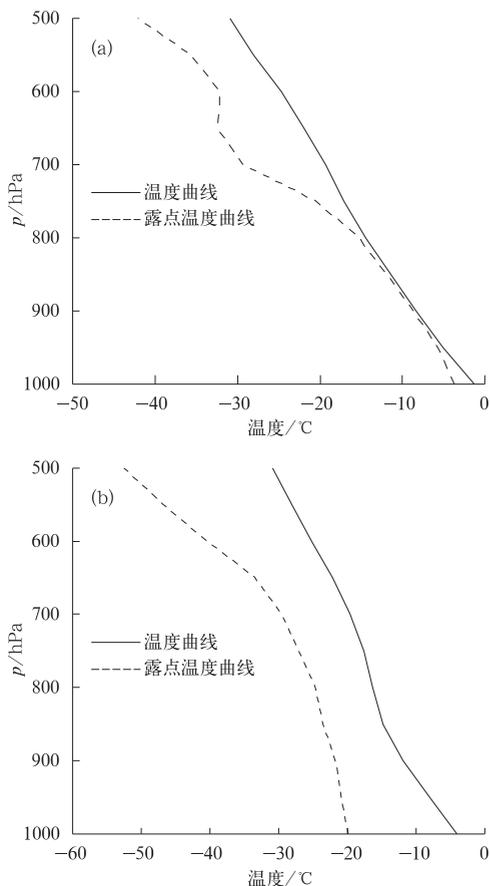


图8 2005年12月6日14时高空温湿图  
(·····:露点温度曲线;—:温度曲线)  
(a)威海站;(b)北京站

## 7 结论

以2005年12月威海地区冷流暴雪天气过程为例,从以下几个方面说明了冷流天气的低空性。

(1) 红外云图冷流低云颜色灰白,边缘模糊;雷达产品的云顶高度大部分在2km以下。

(2) 850hPa冷平流与地面冷流降水强度有较强的正相关关系。

(3) WRF模式结果中垂直方向上云水和云中霰的含量出现在700hPa高度层以下,强上升速度中心在850hPa附近,风场在800hPa层以下辐合,以上辐散。进一步说明了冷流过程在低层表现更为明显一些,

(4) 当干冷空气经过暖湿的渤海海面到达山东半岛时,半岛北部800hPa层以下的增温增湿现象非常明显,温度递减率加大。

## 参考文献

- [1] 曹钢锋,张善君,朱官忠,等. 山东天气分析与预报[M]. 北京:气象出版社,1988:292-297.
- [2] 郑丽娜,石少英,侯淑梅. 渤海的特殊地形对冬季冷流降雪的贡献[J]. 气象, 2003,1(32):19-51.
- [3] 于志良. 胶东半岛冷流降雪与海气湍流感热输送的关系[J]. 气象学报, 1998,1(56):120-125.
- [4] 李洪业. 冷流低云降雪成因的分析[J]. 气象, 1995, 21(12):21-24.
- [5] 丁一汇. 高等天气学[M]. 北京:气象出版社,2005:377.

## 刘爱鸣等：“碧利斯”和“格美”登陆后暴雨强度不同的天气学对比分析

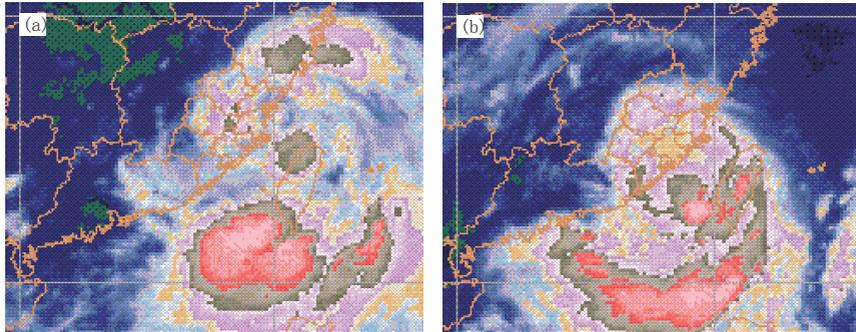


图2 2006年7月14日08时(a)、25日08时(b)FY-2C红外云图

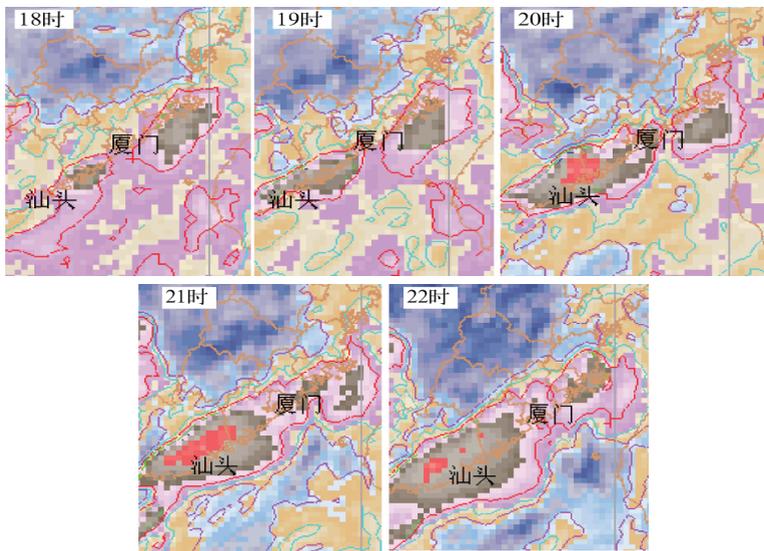


图7 2006年7月15日18-22时红外云图

## 李建华等：山东半岛低空冷流降雪分析研究

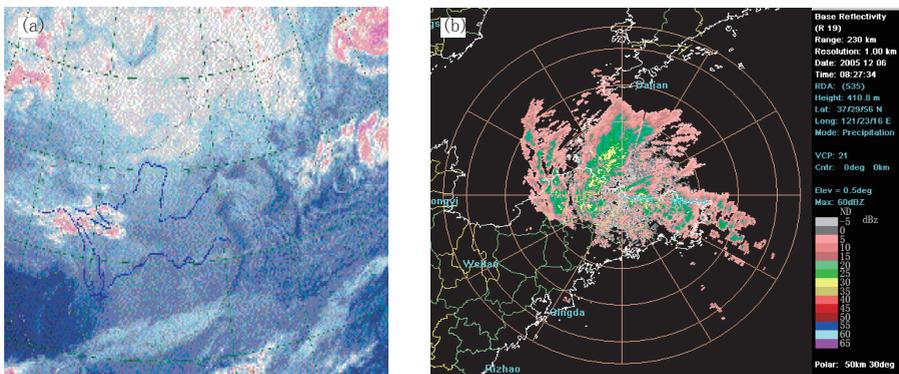


图3 2005年12月6日20时红外云图(a)与雷达回波(b)