

周淑玲,王科,杨成芳,等. 2016. 一次基于综合探测资料的山东半岛冷流暴雪特征分析. 气象, 42(10):1213-1222.

一次基于综合探测资料的山东半岛 冷流暴雪特征分析^{*}

周淑玲¹ 王科² 杨成芳³ 周艺¹

¹ 威海市气象局, 威海 264200

² 南京信息工程大学, 南京 210044

³ 山东省气象台, 济南 250031

提 要: 利用多普勒天气雷达、风廓线雷达、加密自动站、浮标站、常规探空和地面等多种观测资料, 对2014年12月山东半岛东部一次冷流暴雪的发生、演变特征进行了分析。结果表明: (1) 此次冷流暴雪发生时渤海上空500 hPa气温在 -36°C 左右, 850 hPa气温在 -18°C ~ -16°C , 海面西北风 $>12\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。700 hPa以下为混合层, 1000~700 hPa混合层内近乎饱和。浮标站资料显示海表面到850 hPa的较大海气温差和山东半岛较强海岸锋是产生暴雪的重要原因。(2) 暴雪发生时雷达回波的PPI在30~45 dBz; 每6 min雷达回波垂直剖面显示1个较强降雪回波单体持续时间可达到1h。雷达资料反演0.8 km以上风场表明: 强降雪回波位于NE与NW风辐合区的东侧, 冷流暴雪的水平风辐合主要在3 km以下。风廓线雷达资料表明: 暴雪发生前在100 m以下有弱西风存在, 暴雪发生时150~700 m弱的西北风($<6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)和低层切变线辐合的共同存在, 有利于降雪对流的加强; 当这种弱西北风层消失后, 降雪即停止。

关键词: 山东半岛冷流暴雪, 中尺度特征, 综合探测资料, 多普勒雷达反演风场

中图分类号: P458

文献标志码: A

doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2016.10.005

Characteristics Analysis on a Snowstorm in Shandong Peninsula by Using Multiple Observation Data

ZHOU Shuling¹ WANG Ke² YANG Chengfang³ ZHOU Yi¹

¹ Weihai Meteorological Office of Shandong, Weihai 264200

² Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

³ Shandong Meteorological Observatory, Jinan 250031

Abstract: Using multiple data of Doppler weather radar, wind-profiling radar, automatic station, buoy station, conventional sounding and surface observation, the characteristics of occurrence and evolution of one snowstorm event in the east of Shandong Peninsula in December 2014 are analyzed. The results show that firstly, over the Bohai Sea, the 500 hPa temperature is -36°C or so, the 850 hPa temperature is in the range of -18°C ~ -16°C , the direction of the Bohai Sea surface wind is northwest and its velocity is more than $12\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ when the snowstorm occurred. The conventional sounding data show that the mixing layer is below 700 hPa and the atmosphere in the 1000~700 hPa mixing layer is almost saturated. The buoy station shows that the larger air-sea temperature difference between the Bohai Sea surface and 850 hPa, and the stronger coastal front in Shandong Peninsula are the critical causes for the snowstorm. Secondly, during the snowstorm, the radar reflectivity is between 30 and 45 dBz. The analysis on the radar echo vertical

^{*} 中国气象局预报员专项(CMAYBY2015-041)、国家自然科学基金项目(41175044和41475038)及山东省气象局预报员专项(SDY-BY2014-06)共同资助

2015年9月29日收稿; 2016年8月9日收修定稿

第一作者: 周淑玲, 主要从事短期天气预报和暴雨雪的分析研究. Email: zhoushul@sohu.com

section of the reflectivity every 6 min reveals that a strong snow echo cell can maintain for one hour. The velocity of Doppler data shows that the distribution of heavy snow cells occurs in the east area of the convergence zone between NE and NW winds. The horizontal wind convergence of cold-flow snowstorm mainly exists below 3 km. The wind profile radar data show that there is a low-level western breeze under 100 m before the formation of the snowband. The existence of weak northwestern wind in 150—700 m height and the convergence of low-level shear line are beneficial to strengthening the convection of snowstorm. When such weak northwestern wind layer disappears, the snowstorm ends.

Key words: cold-flow snowstorm in Shandong Peninsula, mesoscale features, multiple observation data, retrieved wind fields by Doppler radar

引 言

山东半岛冷流降雪是冬季(11月至次年2月)冷空气爆发南下时发生在山东半岛的一种地方性天气,在一定的天气形势下会出现暴雪,2005年12月3—22日山东半岛出现历史罕见的持续性冷流暴雪,给当地的交通、社会生产和人们生活造成严重影响。山东半岛冷流暴雪和日本西海岸的暴雪天气有相似之处,都是冬季欧亚冷空气爆发经过暖的下垫面造成的,日本冬季冷流暴雪呈强、弱两条雪带分布,海上降雪回波生成后在移向内陆时发展,平均回波强度大于28 dBz(Ohigashi et al, 2005);暴雪发生前300 m以下边界层为小于 $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的东南风,降雪带形成后边界层东南风消失(Eito et al, 2005)。国内研究表明,山东半岛的降雪事件与高层干冷空气紧密相连(乔林等, 2008);渤海海面温度与850 hPa 温度 $> 20^\circ\text{C}$ 利于暴雪发生(周淑玲等, 2008);冷流暴雪的云中水凝微粒子最大出现在850~900 hPa,与浅对流结构对应(于晓晶等, 2013);多普勒雷达反演风场证实逆风区实际是风场切变在径向速度图上的反映,切变线的位置决定暴雪落区(杨成芳等, 2009);冷流暴雪期间雷达径向速度图上可分析出明显的中尺度系统——海岸锋(刁秀广等, 2011);由于海陆温差较大和风场的非地转性切变,在山东半岛北海岸形成海岸锋,其增加了半岛的降雪量(朱先德等, 2007);海岸锋锋生是山东半岛北岸降雪云团的移动原因,在冷流降雪的中尺度结构中起了重要组织作用(苏博等, 2007);强降雪落区位于海岸锋及其冷区一侧,海洋热通量是海岸锋形成的关键因子(孙建华等, 2011);冷涡暴雪区的西侧在低空1.5 km附近有低空急流(周淑玲等, 2009)。以上研究表明山东半岛冷流暴雪与冬季冷空气强度、海

气温差、海岸锋生、暖湿的下垫面、中尺度辐合线等有重要关系,是中尺度的浅对流天气。这些研究都是基于12或24 h降雪量进行分析的,对6 min的雷达资料与10 min和1 h的冷流降雪量结合分析,而对海岸锋和海气温差的详细观测特征分析等工作都还没有做过,对风廓线雷达资料在冷流暴雪中的应用研究得也比较少。随着气象现代化观测水平的提高,精细化的观测资料可以获得,如从2014年冬季开始,山东省冬季固态降水观测开始在气象业务中应用,结束了以往只测量12 h降雪量的历史,可以获取1 h或10 min的精细降雪量资料;烟台和威海的浮标资料、烟台风廓线雷达资料、加密自动气象站观测资料等都可以被获取,这些新资料和常规观测资料的结合应用,为山东半岛冷流暴雪的精细化研究提供了可靠依据。2014年12月山东半岛出现3次暴雪天气过程,杨成芳等(2015)对12月7—8日气旋造成山东半岛暴雪的成因观测进行了细致分析,揭示了发生在黄河气旋后部,由渤海海峡和黄海影响产生的山东半岛海效应降雪,其风场结构、雷达回波移向、降雪落区与风场的关系及降水相态等同常见的典型渤海海效应降雪有明显差异。本文的目的是利用卫星、多普勒天气雷达、风廓线雷达、固态降水观测仪、浮标站等获取的高时空分辨率资料,分析2014年12月16日典型冷流暴雪个例的10 min、1 h降雪量对应的对流单体特征,进一步揭示冷流暴雪发生、发展及减弱的演变特征和精细的中尺度结构特征,为暴雪精细化预报提供科学依据。

1 资料和天气实况

1.1 资料

本文选用资料包括:烟台多普勒天气雷达资料、

风廓线雷达观测资料、山东加密自动站观测资料、威海浮标站观测资料、固态降雪量加密观测资料、常规探空和地面观测资料,其中风廓线雷达资料、浮标站观测资料和固态降雪量观测资料为近几年新增加的观测资料。

1.2 降雪量的分布及 1 h 和 10 min 降雪量的变化特点

2014 年 12 月 15 日 20 时至 16 日 20 时,山东半岛东部出现较大范围的暴雪天气(饶晓琴等,2015),烟台和威海 4 个国家气象观测站出现暴雪,4 个国家气象观测站出现大雪,强降雪分布呈近东西向分布,位于山东半岛东北部(图 1a)。

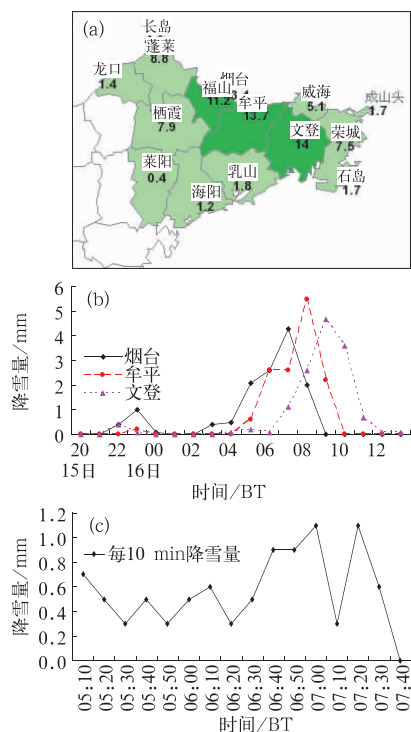


图 1 2014 年 12 月 15 日 20 时至 16 日 20 时山东半岛降雪量分布(a),烟台、牟平、文登 1 h 降雪量随时间的变化(b),烟台 16 日 05:10—07:40 每 10 min 降雪量(c)

Fig. 1 The 24 h accumulative precipitation in Shandong Peninsula from 20:00 BT 15 to 20:00 BT 16 December 2014 (a), hourly precipitation at Yantai, Muping and Wendeng Stations (b), and precipitation every 10 min at Yantai Station during 05:10—07:40 BT 16 December 2014 (c)

分析烟台、牟平、文登 3 个强降雪站点的 1 h 降雪量(图 1b),可以看出,降雪从 15 日 21 时开始,16

日 00—02 时降雪暂停,16 日 02 时再次出现降雪,烟台 04 时后降雪强度增强,06—07 时最强,1 h 降雪量为 4.3 mm;牟平强降雪比烟台延后 1 h,1 h 最强降雪出现在 07—08 时,为 5.5 mm;文登强降雪比牟平延后 1 h,1 h 最强降雪出现在 08—09 时,为 4.7 mm。可见,16 日 04—10 时是这次暴雪天气发生的主要时间段。

分析烟台 16 日 05:10—07:40 每 10 min 的降雪量(图 1c)发现,烟台 10 min 降雪量呈现波动型,最大发生在 06:40—07:30,其中 07:10 和 07:30 的 10 min 降雪量达到 1.1 mm。

2 大尺度天气形势背景

在 500 hPa 图上,15 日 20 时在 $50^{\circ}\sim 55^{\circ}\text{N}$ 、 $120^{\circ}\sim 130^{\circ}\text{E}$ 有一低涡,该低涡稳定少动,至 16 日 08 时,贝加尔湖到山东半岛为涡后脊前的西北气流,渤海上空的冷空气气温在 -36°C 左右,山东半岛北部为偏西风(图 2a);在 850 hPa 图上,16 日 08 时渤海到山东半岛等压线近乎垂直于等温线,渤海上空 850 hPa 气温在 $-18\sim -16^{\circ}\text{C}$,山东半岛为大于 $12\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的西北风(图 2b)。这表明暴雪发生时,有强冷平流影响山东半岛,强降雪发生在 500 hPa 横槽转竖和 850 hPa 锋区经过山东半岛的过程中。

地面图上,日本海为较深的低压气旋,山东半岛处于低压气旋后部,等压线呈近 NNW—SSE 走向,大连到山东半岛为北风与西北偏西风的风辐合带,渤海海峡到山东半岛温度线稀疏、风向由于地形作用由西北风变为偏西风。例如 16 日 08 时,长岛地面风向为 NW,风速为 $14\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,而牟平的地面风向为 WSW,风速为 $4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (图 2c)。这类地面等压线的走向和风场特征在山东半岛冬季强降雪过程中经常出现。

分析渤海上空风场变化,从地面到 850 hPa 为西北风,500 hPa 为西风,风随高度为逆时针旋转,表明在渤海上空为冷平流影响。

在 16 日 08 时的红外卫星云图上,大连—渤海海峡—烟台有西北—东南向的灰暗色对流云带,积云对流在渤海海峡生成、发展,并从海上伸展至山东半岛内陆;在 09 时高分辨率的可见光卫星云图上,从渤海海峡到山东半岛东部的云带上可以清晰地分析出从西南到东北走向的多条紧邻排列的云线,这些云线与 850 hPa 的西北风近乎垂直(图 2d)。这类积云云线是山东半岛冬季冷流暴雪的云图特征。

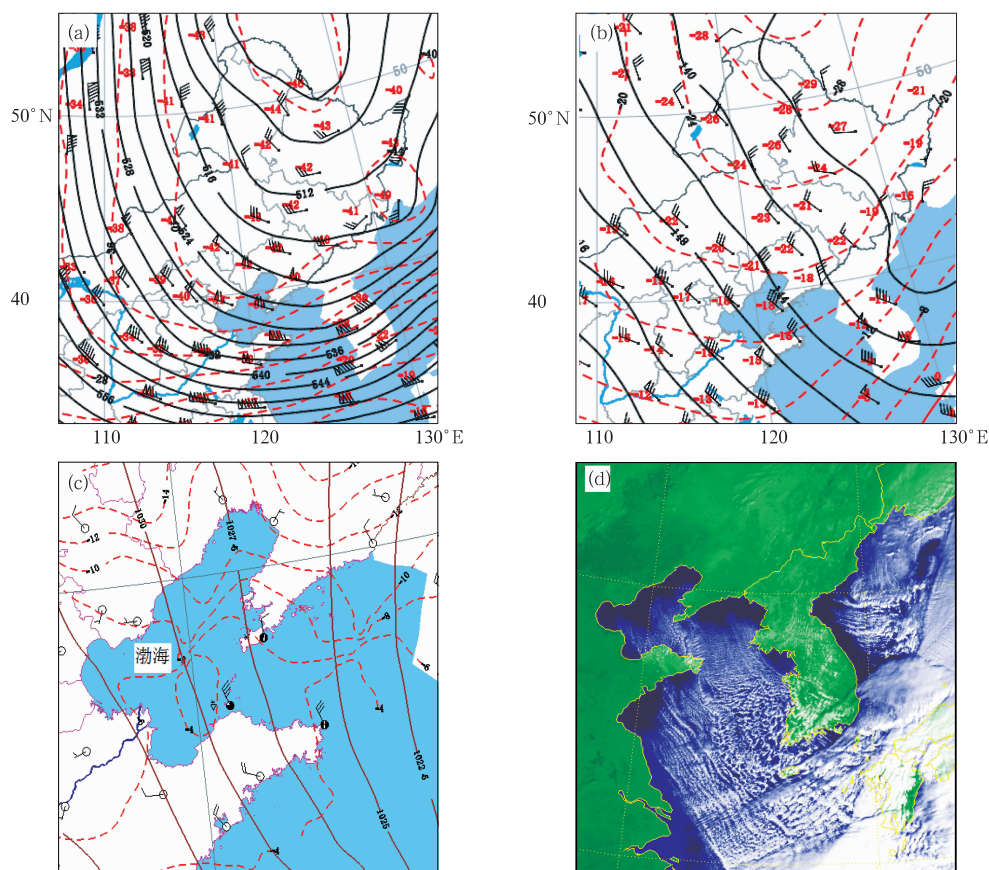


图 2 2014 年 12 月 16 日 08 时 500 hPa(a)和 850 hPa(b)位势高度场、
及(c)地面形势场、09 时 MTSAT-2 可见光卫星云图(d)

(图 a 和图 b 中实线:等高线,单位:dagpm;虚线:等温线,单位:℃。

图 c 中实线:等压线,单位:hPa;虚线:等温线,单位:℃)

Fig. 2 The 500 hPa (a) and 850 hPa (b) geopotential height fields, (c) surface situation
at 08:00 BT 16 December 2014, and MTSAT-2 VIS satellite image (d) at 09:00 BT 16 December 2014

(In Figs. a and b, solid line is contour lines, unit: dagpm; dashed line is isotherm, unit: ℃.

In Fig. c solid line is isobar, unit: hPa; dashed line is isotherm, unit: ℃)

3 大气层结特征

选取 2014 年 12 月 15 日 20 时至 16 日 20 时荣成站的探空资料,在 $T-\ln p$ 图上,700 hPa 以下湿度近于饱和,饱和层上有很薄的逆温层。从风的垂直变化表明,15 日 20 时,暴雪开始前 1000 hPa 为 $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的西北风,700 hPa 为 $18 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的西风急流;16 日 08 时暴雪发生时,1000 hPa 为 $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的西北偏北风,700 hPa 为 $24 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的西北偏西急流,低空到中层风速辐合增大,风向为逆时针旋转表明有冷平流影响(图 3)。16 日 20 时暴雪停止时,700 hPa 为 $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的西北偏北风急流,从地面到 700 hPa 的风向变为顺时针旋转,1000 hPa 的风速

为 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,比暴雪发生时增大,风速辐合减弱。分析表明,700 hPa 以下的饱和暖湿层、冷平流和风速辐合的共同存在是暴雪发生的原因之一。

为了进一步分析强冷空气经过暖的渤海海面时,下垫面提供的感热和潜热对暴雪的作用,分析 16 日 08 时荣成探空资料计算的位温、相当位温和饱和相当位温,表明:混合层位于 700 hPa 以下,相当位温和饱和相当位温重合,1000~700 hPa 混合层内近乎饱和(图 4)。由图 3 可知,16 日 08 时 850 hPa 以下为偏北风,700 hPa 以上为西北偏西风,风向逆时针旋转,表明有冷平流,同时 925 hPa 以下风速小于 $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。以上分析特征与 Ohigashi 等(2005)分析的日本一次冷流暴雪特征类似,不同的是该个例 900 hPa 以下为不饱和层结,本文分析的

结果 900 hPa 以下为饱和层结(图 4)。

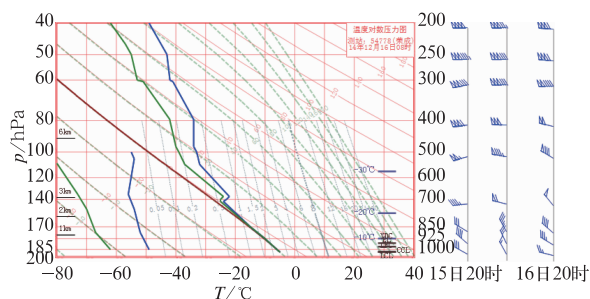


图 3 2014 年 12 月 16 日 08 时荣成探空站的 T - $\ln p$ 图

Fig. 3 T - $\ln p$ diagram at Rongcheng

Sounding Station at 08:00 BT 16 December 2014

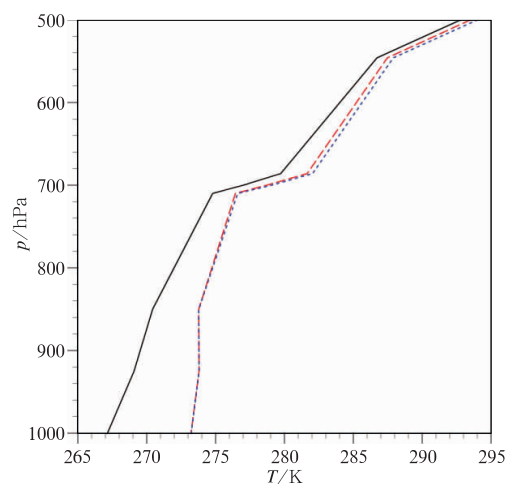


图 4 2014 年 12 月 16 日 08 时荣成站的位温(实线)、相当位温(虚线)、饱和相当位温(点线)的垂直剖面

Fig. 4 Vertical profiles of potential temperature (solid line), equivalent potential temperature (dashed line), saturated equivalent potential temperature (dotted line) at Rongcheng Station at 08:00 BT 16 December 2014

4 海效应的观测特征分析

山东半岛冷流暴雪的发生与渤海的热力作用有很大关系,为了分析冷空气南下经过渤海时的海气、海陆的作用特征,利用威海北部海上浮标站观测资料、探空资料和地面站观测资料进行海气、海陆温差的时空特征分析。

4.1 海气温差垂直特征

由图 2b 可知,16 日 08 时渤海上空 850 hPa 的气温为 $-18 \sim -16^\circ\text{C}$, 500 hPa 的气温为 -36°C , 此时由威海北部近海的浮标站测的海表温度为 6.5°C ,

海表面到 850 hPa 的温差为 $22.5 \sim 24.5^\circ\text{C}$, 大于 20°C , 利于暴雪发生(周淑玲等, 2008), 海表面到 500 hPa 的温差为 42.5°C 。这一温差的存在, 有利于海气在垂直方向上的热量和能量的交换和暴雪的产生。

4.2 海陆温差随时间的演变

图 5 为威海浮标站观测的渤海海温分别与烟台、文登地面气温之差的时间变化。由图 5 分析可以看出: 15 日 20 时后渤海与烟台的海陆温差明显加大, 海温稍有下降, 但陆上气温下降更明显; 16 日 03 时以后, 渤海海面与烟台气温之差在 $6 \sim 8^\circ\text{C}$, 最大出现在 09 时, 之后开始减少; 与文登气温之差在 $9 \sim 12^\circ\text{C}$, 最大出现在 10 时, 之后开始减少。结合图 1b 可知, 较大温差与强降雪时间相对应, 最大温差之后, 降雪开始减弱。

分析海温和烟台、文登气温随时间的变化(图略)可以看出, 在降雪开始前, 3 个站点的温度线靠近, 说明温差小; 强降雪开始前 5~6 h, 三条线距离拉大, 说明温差加大, 等温线密度增大, 较大温差一直维持到 16 日 11 时。由于冷空气影响造成平流降温, 烟台最低气温出现在 16 日 04—09 时, 文登最低气温出现在 16 日 06—10 时, 说明强降雪发生时, 在山东半岛近海到内陆存在一等温线密集带, 即海岸锋, 该锋区与西北风存在大的交角, 是暴雪产生的一个重要原因。当气温不再下降并开始缓慢回升时, 降雪强度开始减弱。

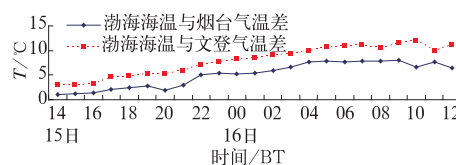


图 5 2014 年 12 月 15 日 14 时至 16 日 12 时渤海海温与烟台、文登气温之差

Fig. 5 The difference between SST on the Bohai Sea and station temperatures at Yantai and Wendeng Stations from 14:00 BT 15 December to 12:00 BT 16 December 2014

5 雷达回波特征

5.1 地面风辐合与强降雪回波分布的特征

分析烟台、牟平、文登 3 个站点暴雪雷达回波的

PPI, 降雪强时 PPI 在 30~45 dBz。

由图 1 分析可知, 这次暴雪烟台强降雪时段是 16 日 04—09 时, 10 min 最大降雪量发生在 06:50—07:20, 为揭示暴雪发生时中尺度天气时间和空间的精细结构特征, 本文重点分析烟台 07—09 时强降雪发生时雷达回波分布和地面风场之间的关系。07 时, 在烟台北部沿海西北风为 $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 烟台西北风为 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 牟平、文登的西北风为 $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 内陆风速明显小于渤海上的风速; 在雷达 PPI 图上, 烟台西北方向海上有一西北—东南向的强降雪回波带从海上伸向陆地到达福山, 回波带上有多回波

单体, 最强回波 $\geq 30 \text{ dBz}$ (图 6a 和 6c)。08 时, 烟台北部沿海西北风为 $14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 烟台、牟平、文登的风力都为 $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 在牟平附近有 NW 和 SW 的风辐合; 在雷达图上, 烟台整条降雪回波带有所东移, 强回波区位于牟平 (图 6b 和 6d)。09 时, 烟台北部沿海西北风为 $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 整条降雪回波带继续东移, 且海上回波强度有所减弱, 强降雪区移到文登。暴雪发生时地面一直存在明显的风向和风速辐合。可见, 海上的降雪回波移到陆地后由于近地层的辐合使其强度加强, 随着地面风辐合的变化, 陆地上强降雪回波带位置也在变化。

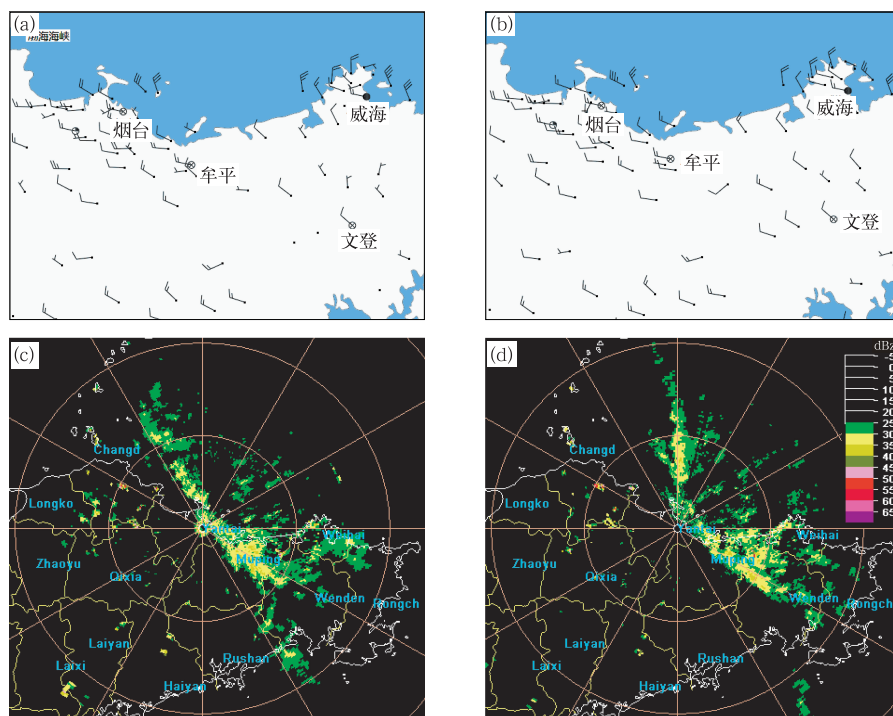


图 6 2014 年 12 月 16 日 07 时(a,c)和 08 时(b,d)山东半岛加密地面风场(a,b) 和对应的多普勒雷达 0.5°仰角 PPI 强度图(c,d,单位: dBz)

Fig. 6 Surface wind field (wind barb) distribution (a,b) and the reflectivity at 0.5° elevation angle at Yantai (c,d) at 07:00 BT (a,c) and 08:00 BT (b,d) 16 December 2014 (unit: dBz)

5.2 暴雪回波的垂直结构特征

为了分析山东半岛强降雪发生时对流单体的维持、发展和移动特征, 选取烟台多普勒雷达每 6 min 雷达回波强度图的垂直剖面进行详细分析。

图 7a 和 7b 分别为 16 日 06:52 的 PPI 强度图和径向速度图, 烟台位于雷达站中心。在图 7a 上, 沿 AB 线为一强度大于 30 dBz 的西北—东南向的降雪回波带, 在图 7b 径向速度图上, 在雷达站的东

北方向为一零速度线, 在 50 km 的圆圈范围内, 移向雷达的负径向速度面积大于离开雷达正径向速度面积, 低层辐合利于强降雪的维持。

图 7c 是 16 日 06:29—07:34 沿图 7a 中 AB 线的每 6 min 雷达回波强度图的垂直剖面, 由以上分析可知, 强降雪的回波强度大于 30 dBz, 所以定义回波单体的强度值以 30 dBz 为基准, 图中粗线椭圆圈 (简称第一个单体) 和细线矩形 (简称第二个单体) 分别代表两个对流单体。▲位置为烟台雷达站附近

的位置,由于是以雷达站为中心向西北、东南做的剖面,且剖面范围在 50 km 的圆圈内,所以垂直剖面内的回波均及地。分析图中回波特征,发现,30 dBz 以上的降雪回波在 2 km 以下,强的降雪回波位于

雷达站的西北和东南方向。16 日 06:29,第一个单体比较强,第二个单体刚生成,之后,第一个单体缓慢向东南方向移动,强度不断增强,一直持续到 07:28;第二个单体生成后稳定少动,且很快在其附

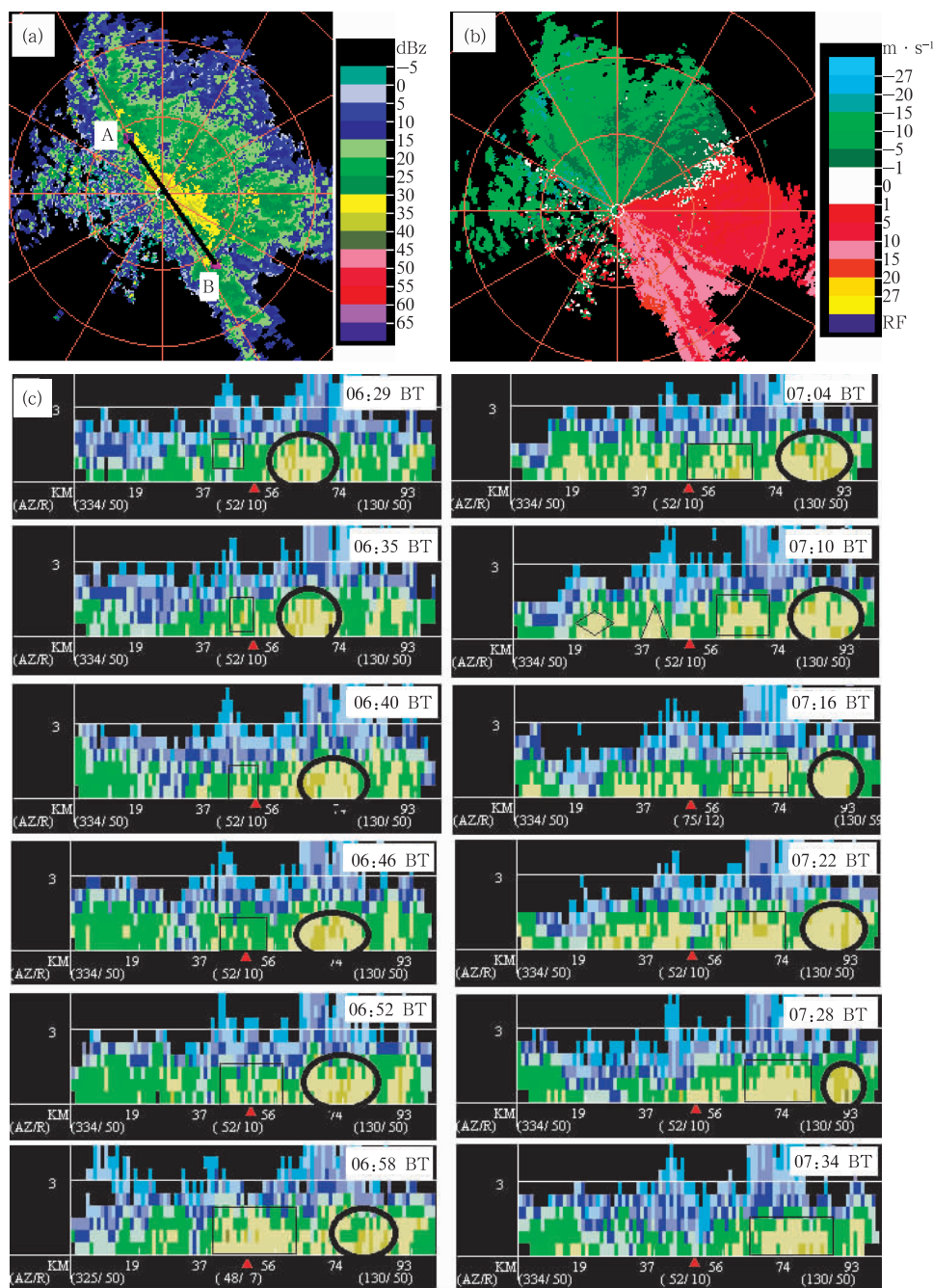


图 7 2014 年 12 月 16 日 06:52 烟台多普勒雷达 0.5° 仰角的 PPI 强度(a,单位: dBz)和径向速度(b,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), 06:29—07:34 烟台雷达 PPI 强度每 6 min 的时间垂直剖面(c,沿图 7a 中 AB 线,▲为烟台雷达站的位置,单位: dBz)

Fig. 7 The reflectivity (a, unit: dBz) and radial velocity (b, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) at 0.5° elevation at Yantai at 06:52 BT 16 December 2014; time-series of vertical cross section of the reflectivity every 6 min from 06:29 BT to 07:34 BT 16 December 2014 (c, from A to B in Fig. 7a, ▲ represents Yantai Station, unit: dBz)

近又有多个小单体生成、发展,至 06:58 发展成较强对流单体,该单体西北侧又有新单体生成,07:04 沿 AB 线有 4 个较强降雪单体,并不断从西北向东南方向移动(见图 7c 中 07:10 菱形、三角形、矩形、椭圆形中的单体)。这种降雪对流单体列车式传播与图 1 中 10 min 降雪量的分布相对应,1 个较强降雪回波单体持续时间可达到 1 h。可见,渤海上的降雪对流回波不断生成、发展,并沿低空西北气流从海上移到陆上,由于海陆风向、风速的辐合使降雪对流单体发展。

6 动力结构特征分析

利用风廓线雷达资料、多普勒雷达反演水平风场资料,分析暴雪发生时的动力特征。由于烟台的多普勒雷达高度为 411 m,因而结合分析风廓线雷达资料和多普勒雷达反演水平风场资料,可以很好地反映暴雪发生时中、低层风场的分布特征。

6.1 单站风场的垂直结构特征

分析烟台 16 日的风廓线雷达资料,200 m 以下 00—01 时为小于 $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的西风,01—02 时逐渐变为小于 $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的西北风,当边界层由西风转为西北风后冷流降雪开始,02 时以后小于 $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的北风的高度在 100 m 以下,这些现象一直维持到 06:12,03—05 时降雪强度比较弱。05 时之后边界层弱风消失,弱风消失后强降雪开始。这表明边界层弱风是在强降雪发生前存在的。

在 06:12,150 m 以下为大于 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的西北风,300 m 以上为大于 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的西北风,150~300 m 存在小于 $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的西北风,表明在 300 m 以下有风速辐合,以上有风速辐散;06:30 以前,小于 $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的西北风在 700 m 以下不连续出现,表明弱对流使热量和能量上下交换,但不大,此时降雪强度不大。06:40—07:00 在 150~700 m 出现一致的小于 $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的西北风(图 8 中圆圈区域),其上到 2100 m 为大于 $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的西北风,表明强降雪过程中在 150~700 m 辐合比较强,对流发展较盛;07:06 开始,弱风高度开始降低(图 8 中矩形区域)这段时间降雪强度最大。07:36 以后,100 m 以上的弱风消失,且以下出现偏西风,大于 $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的

西北急流维持在 400~2000 m,大于 $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的西北急流厚度逐渐变薄,400 m 以下 07:30 以后由西北风转为偏西风,说明冷空气影响逐渐减弱,烟台的降雪在 07:40 以后停止(图 8)。可见,06:30—07:30 烟台上空 150~700 m 弱的西北风和低层切变线的辐合共同存在,有利于降雪对流的加强。当这种弱西北风层消失后,降雪即停止。

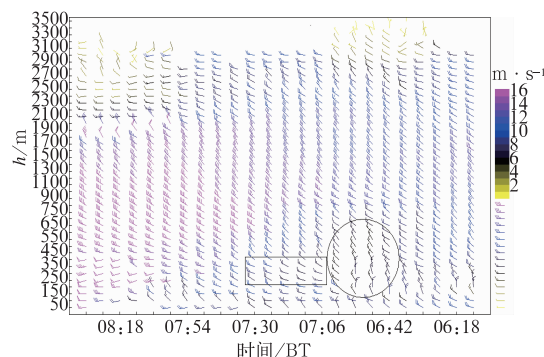


图 8 2014 年 12 月 16 日 06:12—08:30

烟台风廓线雷达每 6 min 观测的水平风垂直剖面随时间的变化(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig. 8 Time-series of the wind every 6 min observed by profiling radar at Yantai Station from 06:12 BT to 08:30 BT 16 December 2014 (unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

6.2 水平风场的结构特征

杨成芳等(2009)利用烟台单部多普勒雷达资料反演的风场分析了 2005 年 12 月山东半岛一次冷流暴雪的动力特征,表明:强降雪产生时对流层中层有西北风、西南风和东北风三股气流辐合。本文利用烟台的多普勒雷达反演的风场和雷达反射率因子叠加分析 16 日暴雪发生时的动力特征。

该雷达位于 37.500°N 、 121.388°E ,海拔高度 0.41 km,位于烟台站(37.53°N 、 121.40°E)西南方向 3.6 km 处,其扫描时间间隔为 6 min 一次,每个体扫含 9 个仰角,最低仰角为 0.5° ,方位角分辨率为 1° ;径向速度和反射率因子分辨率为 1.0 km,探测半径为 230 km。反演风场采用 EVAP(extended velocity azimuth processing)方法(王俊,2004),该方法是在忽略上升速度而考虑粒子下落速度影响的条件下导出不同高度上的水平径向速度计算公式,然后利用 VAP 方法来反演等高面上二维水平风

场。与传统的 VAP 方法仅利用最低仰角的 PPI 资料反演出在同一锥面上的不同高度二维风场相比,该方法充分利用了多普勒雷达的多个仰角径向速度资料并能反演出不同等高面上的风场。本文反演的格距为 0.0096° , X、Y 方向各为 351 个格点,垂直分层间隔 0.2 km。由于烟台天气雷达海拔高度为 0.41 km, 0.7 km 以下风场特征已在 6.1 节详细分

析过,这里重点分析 0.8 km 以上风场特征。

风场的时间变化。图 9a 和 9b 分别是 16 日 06:29 和 06:46 反演的 1 km 高度上水平风和雷达反射率因子的叠加,图中黑点为烟台站,06:29 在烟台站的北侧为北到东北风,烟台站的西南侧为西北风,到 06:46 这种结构更突出,强降雪回波位于东北风与西北风辐合区的东侧。

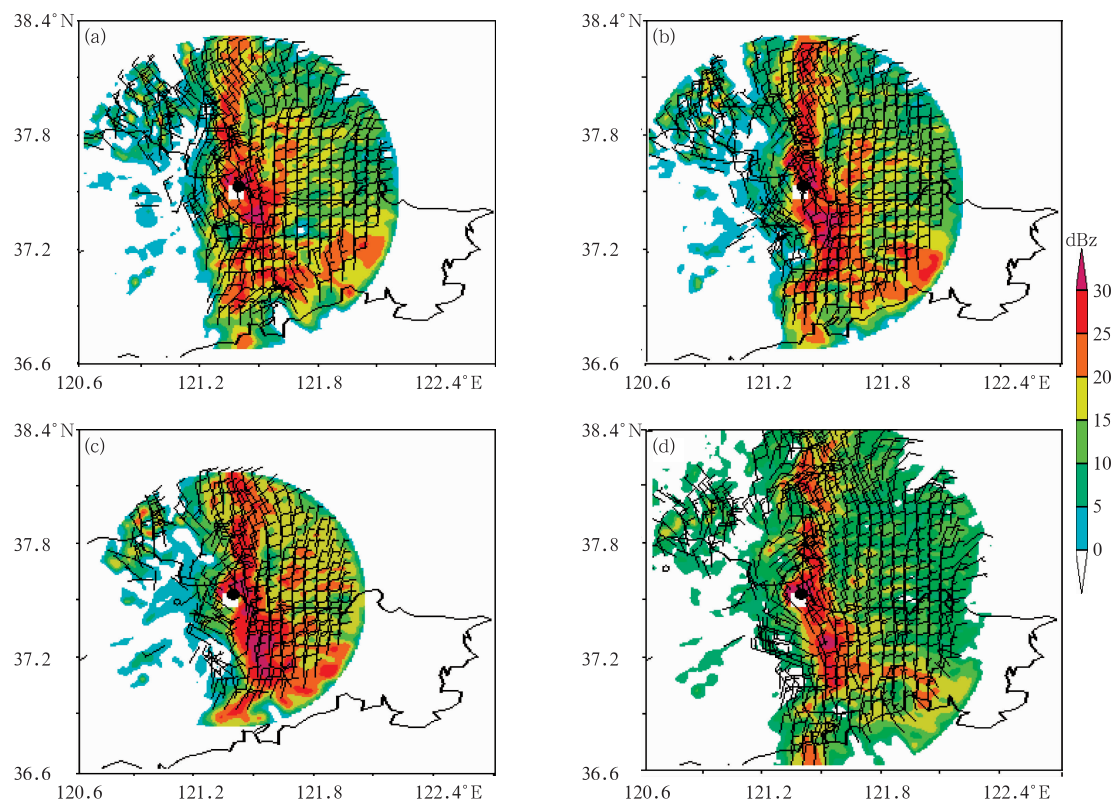


图 9 2014 年 12 月 16 日 06:29(a)和 06:46(b)烟台多普勒雷达资料反演的 1 km 高度上水平风场(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)和雷达反射率因子(单位: dBZ)的叠加;06:58 反演的 0.8 km(c)和 1.4 km(d)高度上水平风场(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)和雷达反射率因子(单位: dBZ)的叠加
Fig. 9 Retrieved wind fields at 1.0 km (a, b), at 0.8 km (c), at 1.4 km (d) by single radar (unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) overlaid with reflectivity (shaded area, unit: dBZ) at Yantai at 06:29 BT (a), 06:46 BT (b), 06:58 BT (c, d) 16 December 2014

分析同一时间风场的垂直变化。图 9c 和 9d 分别是 16 日 06:58 强降雪发生时在 0.8 和 1.4 km 高度上反演的水平风和雷达反射率因子的叠加,图中可以看出,烟台附近东北风和西北风的风辐合非常明显。分析其他高度反演的水平风场,到 3 km 时,烟台站北部的东北风已不存在,冷流暴雪的风辐合主要在 3 km 以下的低层。

可见,这次强降雪发生在低层东北风与西北风之间的辐合区,强降雪回波位于辐合区的东侧。

7 结 论

通过利用多种观测资料及雷达风场反演结果对本次冷流暴雪的综合分析,得出如下结论:

(1)此次冷流暴雪过程发生的天气条件为渤海上空 500 hPa 气温在 -36°C 左右, 850 hPa 气温在 $-18 \sim -16^\circ\text{C}$, 海面为大于 $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的西北风, 大连到山东半岛地面为北风与西北偏西风的风向辐合

带。分析探空资料表明,700 hPa 以下的饱和暖湿层、冷平流和风速辐合的共同存在是暴雪发生的原因之一,混合层位于 700 hPa 以下,1000~700 hPa 混合层内近乎饱和。利用浮标站观测资料分析得出,本次暴雪渤海上空存在较大海气温差,这是暴雪产生的有利条件;海陆温差大小反映海岸锋的强弱,本次暴雪海陆较大温差与强降雪时间段相对应,即在山东半岛近海到内陆存在一较强锋区,该锋区与西北风存在大的交角,是暴雪产生的一个重要原因。

(2)暴雪发生时地面一直存在明显的风向和风速辐合,海上的降雪回波移到陆地后由于近地层的辐合使其强度加强,强降雪雷达回波的 PPI 在 30~45 dBz。分析雷达回波垂直剖面,发现 ≥ 30 dBz 的 1 个较强降雪回波单体持续时间可达到 1 h,渤海上的降雪对流回波不断生成,并沿低空西北气流从海上移到内陆,由于海陆风向、风速的辐合使降雪对流单体发展。

(3)风廓线雷达资料和多普勒雷达资料的综合分析,可以更精细地分析出冷流暴雪风场的垂直动力特征。风廓线雷达 6 min 风观测表明:暴雪区边界层 150~700 m 弱的西北风和低层切变线辐合的共同存在,有利于降雪对流的加强;多普勒雷达反演 0.8 km 以上的风场表明:强降雪回波分布在东北风与西北风之间辐合区的东侧,冷流暴雪的风辐合主要存在在 3 km 以下的低层。

(4)通过分析,可以得出对冷流暴雪短时临近预报有指导意义的指标。强降雪的回波强度 ≥ 30 dBz,只要海上有 ≥ 30 dBz 的降雪回波不断生成,冷流降雪就会维持;山东半岛北部近海西北风 ≥ 12 m $\cdot$ s $^{-1}$,内陆西风或西北风 ≤ 4 m $\cdot$ s $^{-1}$,利于海上降雪回波移到陆上后发展、加强;在径向速度图上,在 50 km 的圆圈范围内,移向雷达的负径向速度面积大于离开雷达正径向速度面积,强降雪将继续维持,反之降雪逐渐减弱。在风廓线雷达资料图上,在 100 m 以下由小于 5 m $\cdot$ s $^{-1}$ 的西风转为西北风后,降雪开始;当边界层弱风消失后强降雪开始;强降雪

维持期间,150~700 m 为一致的小于 6 m $\cdot$ s $^{-1}$ 弱的西北风,当这种弱西北风层消失后,降雪即停止。12 月,当渤海海面与 850 hPa 存在大于 20℃ 的较大海气温差,有利于暴雪出现;冷空气影响时,当海陆温差达到最大且开始减小时,降雪逐渐减弱停止。

致谢:衷心感谢山东省人民政府人工影响天气办公室王俊正高级工程师提供了双雷达风场反演方法。

参考文献

- 刁秀广,孙殿光,符长静,等. 2011. 山东半岛冷流暴雪雷达回波特征. 气象,37(6):677-686.
- 乔林,林建. 2008. 干冷空气侵入在 2005 年 12 月山东半岛持续性降雪中的作用. 气象,34(7):27-33.
- 饶晓琴,马学款,黄威. 2015. 2014 年 12 月大气环流和天气分析. 气象,41(3):380-387.
- 苏博,吴增茂,李刚,等. 2007. 山东半岛一次强冷流降雪的观测与数值模拟研究. 中国海洋大学学报,37(S1):1-9.
- 孙建华,黄翠银. 2011. 山东半岛一次暴雪过程的海岸锋三维结构特征. 大气科学,35(1):1-15.
- 王俊. 2004. 单多普勒天气雷达反演二维风场的方法研究. 青岛:中国海洋大学硕士论文.
- 杨成芳,王俊. 2009. 利用单多普勒雷达资料做冷流暴雪的中尺度分析. 高原气象,28(5):1034-1043.
- 杨成芳,周淑玲,刘畅,等. 2015. 一次入海气旋局地暴雪的结构演变及成因观测分析. 气象学报,73(6):1039-1051.
- 于晓晶,辜旭赞,李红莉. 2013. 山东半岛一次冷流暴雪过程的中尺度模拟与云微物理特征分析. 气象,39(8):955-964.
- 周淑玲,丛美环,吴增茂,等. 2008. 2005 年 12 月 3—21 日山东半岛持续性暴雪特征及维持机制. 应用气象学报,19(4):444-453.
- 周淑玲,朱先德,符长静,等. 2009. 山东半岛典型冷涡暴雪个例对流云及风场特征的观测与模拟. 高原气象,28(4):935-944.
- 朱先德,吴增茂,周淑玲,等. 2007. 2005 年 12 月 3—4 日山东半岛暴雪准静止对流云带演变分析. 中国海洋大学学报,37(S2):8-16.
- Eito H, Kato E, Yoshizaki M, et al. 2005. Numerical simulation of the quasi-stationary snowband observed over the southern coastal area of the sea of Japan on 16 January 2001. J Meteor Soc Japan, 83(4):551-576.
- Ohigashi T, Tsuboki K. 2005. Structure and maintenance process of stationary double snowbands along the coastal region. J Meteor Soc Japan, 83(2):331-349.