

一次入海气旋局地暴雪的结构演变及成因观测分析^{*1}

杨成芳¹ 周淑玲² 刘畅¹ 郭俊建¹ 杨璐瑛³

YANG Chengfang¹ ZHOU Shuling² LIU Chang¹ GUO Junjian¹ YANG Luying³

1. 山东省气象台, 济南, 250031

2. 山东省威海市气象局, 威海, 264200

3. 山东省气象局, 济南, 250031

1. *Shandong Meteorological Observatory, Ji'nan 250031, China*

2. *Weihai Meteorological Bureau, Shandong Province, Weihai 264200, China*

3. *Shandong Meteorological Bureau, Ji'nan 250031, China*

2015-04-21 收稿, 2015-09-15 改回.

杨成芳, 周淑玲, 刘畅, 郭俊建, 杨璐瑛. 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
Yang Chengfang, Zhou Shuling, Liu Chang, Guo Junjian, Yang Luying. 2015. Case study of the cause and the dynamic structure for a small-scale snowstorm event associated with a cyclone. *Acta Meteorologica Sinica*, 73 (6):1039-1051

Abstract This study investigates the cause and the dynamic structure on a small-scale snowstorm event occurred in the Shandong peninsula with the Doppler radar, profile, automatic station, routine sounding and surface observation data. the results are as follows: (1) Precipitation occurred in the two stages: the first weak precipitation one was typical snowstorm caused by the Huanghe cyclone with the characteristic of weak snowfall and north-east radar echo, and the second strong precipitation one behind the cyclone was ocean-effect snowstorm with the characteristic of strong snowfall and south-west radar echo. (2) Favorable synoptic situation led to the occurrence of the first stage snow, such as the obvious trough, cyclonic circulation, southwestern low-level jet and surface cyclone. Its vapor came from the South China Sea. The snowfall was distributed to ahead of southwestern low-level jet on the right and eastern side of the surface cyclone. (3) By contrast, the second precipitation stage occurred after the trough passed the Shandong peninsula and the cyclone passed through the Bohai straight to the Huanghai Sea. Cold air intruded into the Shandong peninsula from the Bohai straight and the Huanghai Sea. North-east wind was prevailing and its speed was stronger than the north-west wind, which brought rich water vapor and heat. Snowfall distributed within north-east wind. And, (4) the structure of wind field in the lower troposphere was different during the ocean-effect snowstorm. At the beginning, there was a mid- γ scale low circulation beside the north coastal area in the Shandong peninsula, and radar radial velocity shows a meso- β vortex in low level. Meanwhile, there was a shear between the south-east wind and north-west wind near the east coastal area. During the strong snowfall, a shear between the north-east and north-west wind was found in the boundary layer. Both the low circulation and shear are the favorable dynamic factors. As a result, the case implies that remarkable difference between the Bohai strait/Huanghai Sea and the Bohai Sea ocean-effect snowstorm, the former is behind the Huanghe cyclone, and the latter is common and typical, in terms of the wind field structure, motion of radar echo and precipitation distribution.

Key words Huanghe River cyclone, Snowstorm, Ocean-effect, Analysis of observation data

摘 要 利用多普勒天气雷达、风廓线雷达、加密自动站、常规探空和地面等多种观测资料,对山东半岛东部地区一次局地暴

* 资助课题: 国家自然科学基金(41175044、41475038)、中国气象局关键技术集成与应用项目(CMAGJ2015M34)、中国气象局预报员专项(CMAYBY2015-041)、山东省气象局重点课题(2013sdqxz02)。

作者简介: 杨成芳,主要从事天气预报业务、降雪和新资料应用研究。E-mail: cf_yang70@hotmail.com

雪过程的成因及动力结构演变特征进行了分析。结果表明:(1)此次局地暴雪过程分为两个阶段,第1阶段为典型的黄河气旋槽前降雪,降雪强度弱,雷达回波自西南向东北传播;第2阶段降雪为气旋后部的海效应降雪,降雪强度大,1 h降雪量可达到大雪量级,雷达回波自东北向西南移动,较为少见。(2)第1阶段降雪发生在对流层中层有明显低槽、低层有气旋性环流和西南低空急流及地面有气旋的天气系统配置下,水汽来源于中国南海,降雪落区位于高空槽前西南低空气流的右前方和地面气旋的东侧。(3)第2阶段降雪发生在高空槽过后,冷空气自渤海海峡和黄海北部入侵,降雪区域低层的主导风向为东北风,东北风强于西北风,降雪的水汽和热量来源于渤海海峡和黄海,雷达回波自东北向西南移动,降雪落区位于低层的东北风中。(4)海效应降雪各时段对流层低层风场结构不同。降雪初期,山东半岛北部沿海地面存在 γ 中尺度低压环流,雷达径向速度上表现为低层有 β 中尺度涡旋,东部沿海有东南风与西北风辐合;强降雪时段,边界层内存在东北风和西北风的切变线,低压环流和切变线是造成强降雪的有利动力条件。该个例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和常见的典型渤海海效应降雪有明显差异。

关键词 黄河气旋, 暴雪, 海效应, 观测数据分析

中图法分类号 P458.2

1 引言

中国北方地区有两类降雪,一类为有西南气流参与的降雪,通常由回流形势、温带气旋、切变线、低槽冷锋等天气系统造成,各地均可出现;另一类为强冷空气流经暖海面时产生的海效应降雪,主要发生在中高纬度的沿海地区,以山东半岛最为显著。黄河气旋是降雪天气系统之一。据统计,1999—2010年,黄河气旋影响山东的暴雪过程均出现在1—3月,12月未曾出现过(阎丽凤等,2014)。因12月是黄河气旋发生频率较低的月份,仅占全年的5%,且通常造成山东地区弱降雪或无降水。然而,2014年12月7—8日,山东东部地区发生了一次特殊的暴雪天气。该过程在24 h内出现了两个阶段,第1阶段为典型的黄河气旋槽前降雪,第2阶段为黄河气旋后部的海效应降雪,其表现出的特征异于常见暴雪天气,具有一定的预报难度,因此有必要对此次暴雪过程进行深入研究。

北方内陆地区降雪的研究绝大多数针对大范围暴雪过程。华北地区冬季较大的降雪多与回流形势有关,人们对其产生机理(易笑园等,2010;周雪松等,2008)、天气尺度和中尺度结构特征(张迎新等,2006;赵桂香,2014;王丽荣等,2013)认识较为清楚,如水汽来自南方,降水起止时间与中高层暖湿气流和低层干冷空气的风向相关较好,降雪过程中存在次级环流等。江淮气旋暴雪发生频率也较高,能够产生大范围的暴雪天气(孙艳辉等,2012;杨晓霞等,2012;秦华锋等,2008),南北槽合并、明显北上的低涡、地面气旋、西南低空急流强盛是其共性特征。关于黄河气旋暴雪的研究相对较少,王东海等(2013)

研究了一次历史罕见的11月黄河气旋雨雪过程的成因,认为上游环流场的调整导致西风槽移速缓慢、西风槽下游的“阻塞效应”、强冷空气的南侵、充足的水汽条件以及有利的大气层结和对称不稳定是降水强度异常偏大的主要原因。但是,到了冬季,黄河气旋降雪过程通常具有发展迅速、生命史短、降雪范围小等特点,预报难度较大。黄河气旋多从山东进入渤海或黄海,气旋入海前后对陆地降雪的影响,过去由于受到观测资料的限制研究较少,导致缺乏对此类降雪过程的深入认识。

对于沿海地区的海效应降雪(中国常称之为冷流降雪),近年来随着探测资料和技术手段的发展,研究成果也越来越丰富。渤海海效应暴雪过程存在多尺度作用机制(杨成芳,2010),现在已基本达成共识。乔林等(2008)强调高层冷空气在冷流降雪中的作用,认为干冷空气的侵入是锋生和不稳定能量释放的触发机制。山东半岛冷流暴雪发生在西北冷平流下,持续性冷流暴雪由欧亚中高纬度地区的阻塞形势造成(杨成芳等,2009)。北海岸中尺度海岸锋的形成与维持,是冷流暴雪发生的中尺度系统(周淑玲等,2008)。冷流暴雪的微物理过程也得到初步揭示,冷流暴雪云中水凝物粒子的高度在600 hPa以下,最大值出现在900—850 hPa与浅对流结构相对应,各水凝物粒子中以雪和霰含量最高(于晓晶等,2013)。就渤海海效应暴雪的落区而言,研究者从不同的角度给出了一些观测事实,如周淑玲等(2009)认为暴雪位于雷达径向速度0线附近;而孙建华等(2011)指出强降雪落区位于海岸锋及其冷区一侧,且海岸锋的来回摆动决定了陆地上暴雪的落区(刁秀广等,2011);杨成芳等(2010)用单部多普勒

天气雷达探测资料反演的水平风场证实了西北风与东北风的中尺度切变线位置决定暴雪的落区。以上研究的山东半岛冷流暴雪都着眼于渤海海效应过程,发生在强冷空气自渤海入侵山东半岛的背景下,这与冬季的强冷空气以西北路占绝对优势有关。实际上,除了山东以外,海效应降雪在中国其他沿海地区也存在,分布于渤海东部的辽东半岛和东海沿岸的上海等地(张黎红,2004;陈雷等,2012),只是其发生次数少,降雪持续时间短,降雪强度弱,受到的关注度低。

不同风向的冷空气对海效应降雪会产生怎样的影响呢?从与海效应降雪发生机制类似的北美大湖效应降雪研究成果可以看到,风向对密执安湖的降雪影响非常显著,不同路径的冷空气导致降雪落区和降雪量的差异很大,主要是由于风向不同造成的(Hjelmfelt,1990)。风向和风速对不同形状湖的降雪分布和强度都有影响(Neil, et al,2003)。Sousounis(1993)和 Laird(1999)的数值敏感性试验也证实了该规律。从本质上来说,风向的不同主要是由于冷空气路径的差异造成的。影响中国的冷空气路径也很复杂。山东半岛三面环海,濒临渤海、渤海海峡和黄海,在冬季,黑潮的分支对马暖流把外海的暖水输送到黄海和渤海,使海表水温表现为由黄海伸向渤海的高温水舌,既然黄海和渤海海峡的海水温度更高,那么在合适路径的冷空气入侵时,是否也能够使山东半岛产生海效应降雪呢?2014年,山东半岛地区增设了自动称重式降水传感器和荣成多普勒天气雷达,为捕捉各类降雪过程的细致特征提供了有利条件。文中将充分利用多种观测资料,分析一次入海黄河气旋诱发的两类暴雪的产生机制和动力结构,以期拓展对东部沿海地区暴雪天气的认识,进一步提高降雪的精细化预报能力。

2 降雪特点

降雪过程发生在2014年12月7日04时—8日04时(北京时,下同),强降雪主要集中在威海地区,累积降雪量威海最大为19.5 mm,其次为荣成15.4 mm,其他地区降雪量多不足2.0 mm(图1a),表明此次暴雪分布具有显著的中尺度特征。此外,还具有以下特点:

(1)存在两个降雪阶段,第1阶段降雪强度弱,第2阶段强。威海自动站的逐10 min和逐时降水

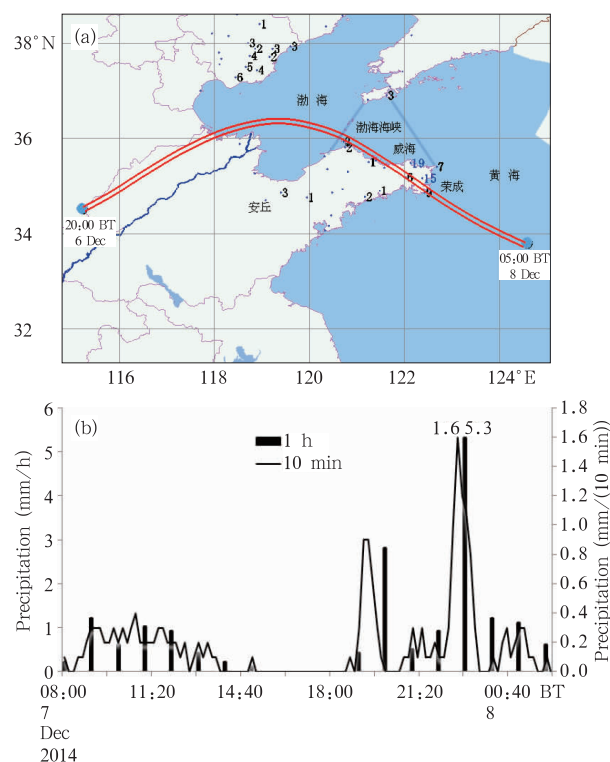


图1 2014年12月7日04时—8日04时总降雪量(单位:mm)、气旋路径(a,红双条曲线为路径)和威海站降雪量演变(b)

Fig. 1 Accumulative precipitation from 04:00 BT 7 to 04:00 BT 8 December 2014(unit: mm) and the best track of the cyclone (a, double red curve denotes the track) and precipitation changes in Weihai Station (b)

量(图1b)显示,第1阶段降雪发生在7日07时50分—15时,最大1 h降水量为1.6 mm,10 min降水量为0.4 mm;第2阶段发生在7日傍晚至夜间,威海出现在7日18时—8日02时,其中,7日22—23时为最强降雪时段,1 h降水量为5.3 mm,22时30—40分降水量为1.6 mm,为本次过程最大10 min降水量;22时20分—23时短短的40 min内降水量达到了5.1 mm。这是自动称重式降水传感器布设以来,首次观测到山东半岛地区40 min内降雪量超过5.0 mm,达到大雪量级。这表明暴雪过程的强降雪时段也可出现在短时间内,与暴雨过程类似,这为今后降雪强度的预报提供了重要参考依据。荣成第2阶段降雪发生的时间相对较晚,7日21时开始降雪持续至8日04时,其最强降雪时段与威海相同,也在7日22—23时,1 h降水量为4.2 mm,最大10 min降水量为1.3 mm。从降雪落区

来看,第1阶段降雪分布在鲁中的东部和山东半岛地区,降雪中心威海的降水量为6.7 mm;第2阶段降雪主要集中在威海地区,降水量为12.8 mm,其次为荣成10.8 mm。由此可见,第2阶段的降水强度明显大于第1阶段,且强降雪仅集中于威海地区。

(2)两个阶段降雪雷达回波移动方向相反。通过逐6 min荣成多普勒天气雷达反射率因子(图略)来分析两个阶段降水的精细演变过程。可以看出,第1阶段雷达回波7日04时自潍坊的安丘一带开始形成,自西南向东北方向移动,回波分布广但强度弱,最大反射率因子强度为43 dBz。第2阶段,从16时25分开始,在威海的北部沿海(渤海海峡海域)有大于20 dBz的雷达回波形成,此后回波不断新生并形成近纬向分布的强回波带自东北向西南传播。回波带在22时前后发展为最强,最大反射率因子强度达到了53 dBz,由此造成22—23时威海和荣成的最强降雪。两个阶段的降雪雷达回波不仅在强度和形态有明显差异,第2阶段强度明显大于第1阶段,而且二者的传播方向完全相反,说明两个阶段降雪的发生机制可能存在差异。

(3)降水相态复杂。7日上午各地均为降雪,下午降水相态开始发生改变。地面天气图显示,威海市区14和20时为雨夹雪,荣成14时为降雨。根据当天的值班员观测,威海市区在21时31分—22时10分有雷电,21时30分许为降雨,后转为雨夹雪和雪。荣成在7日夜间经历了雨—雨夹雪—雪的相态改变。

3 环流特征

3.1 高空形势

7日08时,500 hPa短波槽位于山东中部(图2a₁);对流层中低层各层均有明显低槽(图2b₁),山东半岛处在槽前西南气流中,850—700 hPa有低空急流,降雪区域的上游青岛站探空的850 hPa西南风风速达到16 m/s,而下游荣成站的风速为12 m/s,存在风速的辐合,有利于水汽的输送和在山东半岛东北部的辐合。925及1000 hPa有明显气旋性环流,辽东半岛南部为东北风,山东半岛东北部沿海地区处在气旋性环流东侧强西南风与偏东风的汇合处。

7日20时,高空低槽减弱东移。主要表现为500 hPa(图2a₂)和700 hPa(图略)等压面上,低槽

均位于黄海上空,山东半岛处在低槽尾部的偏西气流中,其中,荣成探空站500 hPa为偏西风,700 hPa为西西南风,风速为10 m/s,较08时的西南风风速18 m/s显著减小。850 hPa(图2b₂)及以下各层次低槽也东移至黄海上空,槽后西北风显著增强,而槽前西南风减弱,山东半岛转为受槽后西北气流控制,青岛探空站的西北风风速达到了20 m/s,但荣成站的西北风很弱,只有8 m/s,说明有冷空气自西北向东南方向入侵。值得注意的是,辽东半岛南部的大连站探空925 hPa的东北风风速由08时的4 m/s增强至20时的12 m/s,表明低层同时有来自东北地区的冷空气南下。

3.2 地面气旋的演变及其与降雪的关系

气旋于6日20时在河北与山东的交界处生成(图1a)。此后,在山东境内沿着黄河北侧向东北方向移动,7日08时,气旋进入渤海,气旋中心气压为1023 hPa(图2c₁)。气旋在海面上自西向东移动,7日14时以后在渤海的东南部海面上减弱。17时,从地面气压场难以分析出明显的气旋,但通过风场可以看出渤海南部仍然存在气旋性环流,同时在山东半岛东部的黄海海面上也可以看到有气旋性环流存在。分析10 min间隔的环渤海加密自动站风场,通过位于渤海海峡内的大钦岛、老黑山和长岛3个海岛自动站风场的风向转变,可以判断出气旋中心在18时10—30分移过长岛(图略)。20时,黄海海面上可分析出气旋(图2c₂),气旋呈扁平状,东西长,南北短。在气旋的北部,有强盛的东北风,位于渤海海峡的长岛和山东半岛东部沿海的成山头气象站的东北风风速分别达到了10和14 m/s,但同时气旋西侧的西北风却较弱,只有4—8 m/s。这表明,高空低槽东移过程中,对流层中低层冷平流增强而暖平流减弱,低层东北风增强,导致黄河气旋在7日白天东移过程中减弱,改变了原来的移动路径,傍晚转为南下穿过山东半岛东部在夜间进入黄海。

从气旋生成源地、移动路径、生命史及高低空天气形势配置来看,这是一个典型的黄河气旋。第1阶段山东东部地区的降雪即由其影响产生。从降雪落区来看,降雪发生在高空槽前西南低空气流的右前方、黄河气旋的东侧,该区域是水汽输送与动力抬升相叠加的区域,有利于降雪的发生。7日14时,各层低槽移过山东半岛的东部(图略),第1阶段降雪结束。

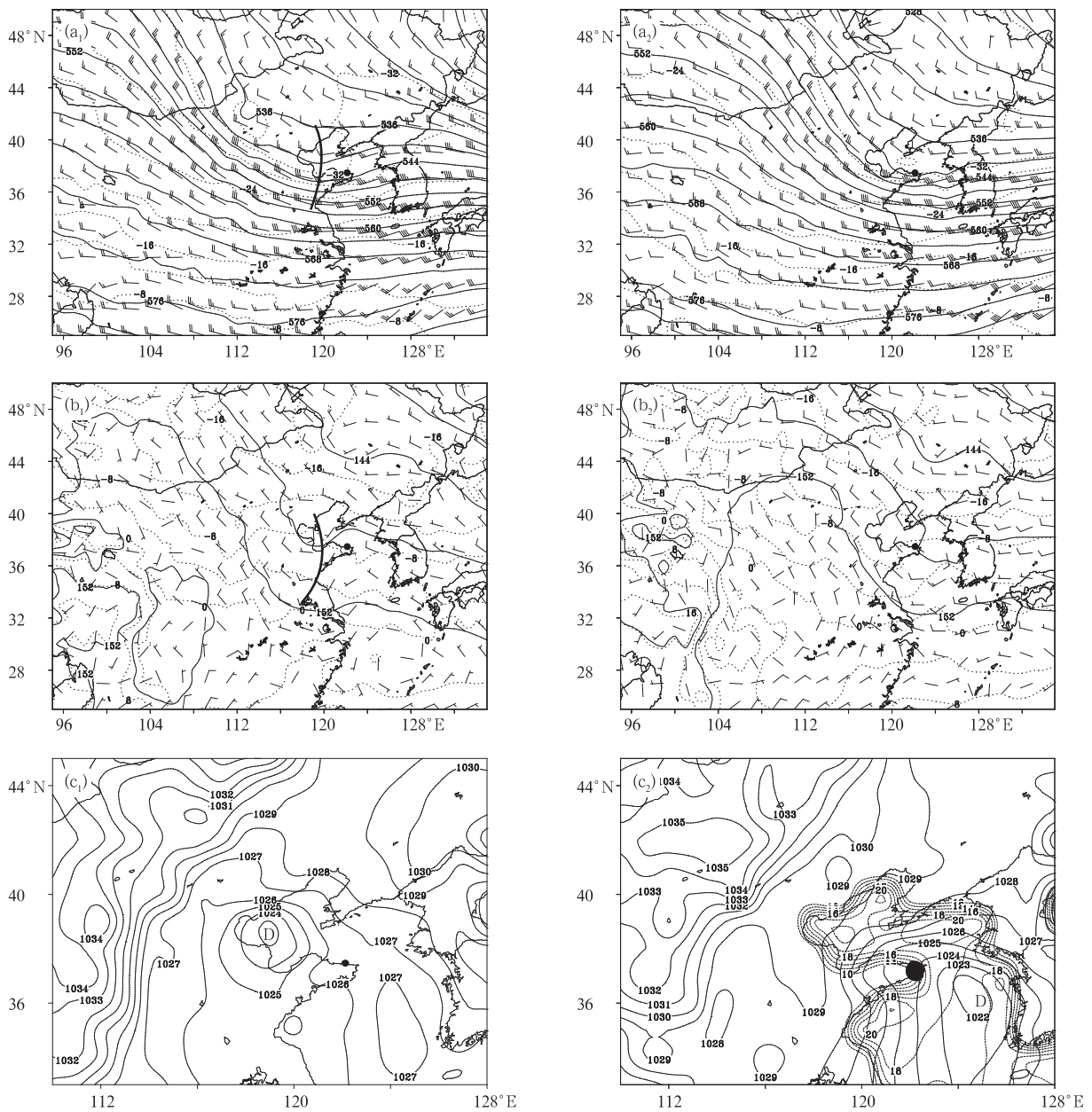


图2 2014年12月7日08时(a₁、b₁、c₁)和20时(a₂、b₂、c₂)天气形势

(a₁、a₂和b₁、b₂分别为500和850 hPa位势高度(实线,单位:dagpm)、温度(虚线,单位:℃)、风场,粗线为槽线;
c₁、c₂实线为地面气压场(单位:hPa),c₂中虚线为850 hPa温度与海表温差(单位:℃),黑圆点为第2阶段暴雪落区)

Fig.2 Synoptic chart at 08:00 BT (a₁, b₁, c₁) and 20:00 BT (a₂, b₂, c₂) 7 December 2014
(geopotential height, solid, unit: dagpm; temperature, dashed, unit: °C and wind at 500 hPa (a₁, a₂) and 850 hPa (b₁, b₂), thick line denotes trough; solid line denotes surface pressure (c₁, c₂, unit: hPa), dotted line denotes the difference between sea surface and 850 hPa temperature (c₂, unit: °C), and the shaded denotes the snowstorm distribution in the second stage)

第2阶段降雪16时25分自渤海海峡开始,烟台、威海等沿海地区则始于18时,并于8日04时全部结束。7日20时,冷空气已入侵渤海海峡,威海北部海域的海、气温差(海表温度与850 hPa的温度之差)为18—20℃(图2c₂),达到了海效应降雪产生

的温度条件。随着冷空气影响,8日02时海、气温差增大至20—22℃。第2阶段暴雪位于气旋的后部偏东北风与西北风的交汇处。从以上分析的高低空天气形势配置来看,第2阶段降雪符合海效应降雪的特征。这种降雪分布和形势配置较为少见,因

为黄河气旋强降雪通常发生在气旋的东侧,当气旋过境后降水强度会明显减弱甚至结束。

4 第1阶段降雪的水汽和动力条件分析

4.1 水汽条件

基于 NCEP/NCAR $1^\circ \times 1^\circ$ 再分析资料计算出的物理量场,从 7 日 08 时的水汽通量、水汽通量散度、比湿和相对湿度分析第 1 阶段降雪的水汽条件(图略)。可以看到,第 1 阶段降雪的水汽来源于中国南海,由西南低空急流输送;850 hPa 等压面上,山东半岛至渤海海峡、黄海为水汽辐合区,有两个辐合中心,一个位于低槽附近的西北风与西南风交汇处的偏西南风一侧,另一个位于西南低空急流的前端,威海即处于该区域内;850 hPa 的比湿为 2 g/kg,925 hPa 的比湿为 3 g/kg,比湿最大值在鲁东南地区。7 日 08 时威海上空湿层较厚,500 hPa 以下的相对湿度均在 90% 以上。从时间演变看,山东半岛上空 7 日 02 时开始湿度增大,比湿由 0.5 g/kg 增至 2—2.5 g/kg,至 08 时湿层最厚,90% 以上的相对湿度伸展至 500 hPa,此后逐渐降低,至 14 时湿层在近地面至 700 hPa(图 3)。由此表明第 1 阶段降雪的水汽由西南低空急流输送,对流层低层比湿为 2 g/kg,水汽饱和层在 500 hPa 以下。

4.2 动力条件

850—500 hPa 的低槽、1000—925 hPa 的气旋性环流、地面气旋为降雪发生提供了良好的动力抬升条件,再加上对流层中低层西南低空急流形成的辐合,在山东半岛地区产生了较强的上升运动。垂直速度显示(图 3),7 日 02—14 时,威海上空均为上升运动。7 日 08 时,最强上升运动约出现在 850 hPa。7 日上午为最强垂直上升运动、饱和湿层和比湿的叠置时段,由此威海地区产生了第 1 阶段的较强降雪。从降雪落区来看,降雪发生在黄河气旋的东侧区域。14 时,700 hPa 以下已转为下沉运动,降雪趋于结束。

烟台的边界层风廓线雷达探测资料给出对流层低层逐 6 min 的精细风场,由此可以看出低空急流的演变(图 4)。7 日 02 时起,约在 4.0 km 高度西南风开始明显增强,3.0 km 高度上(700 hPa)的西南低空急流于 03 时形成,06—11 时为峰值阶段,14 时后转为西北风;低层转西北风时间略早,1.5 km 高度上的风在 12 时转为西北风。从降雪的时间来看,

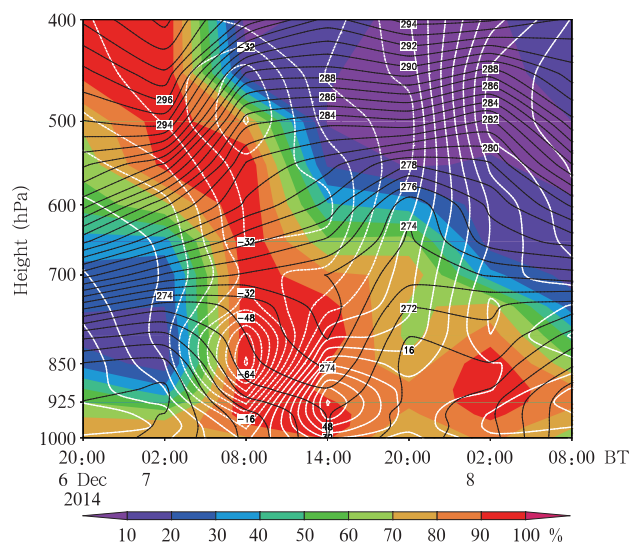


图 3 过威海的垂直速度(白色线,单位: 10^{-4} hPa/s)和相对湿度(阴影)、假相当位温(黑色线,单位:K)的时间-空间演变

Fig. 3 Temporal and spatial changes in the vertical velocity (white contours, unit: 10^{-4} hPa/s), relative humidity (shaded) and pseudo-equivalent potential temperature (black contours, unit: K) through Weihai Station

强降雪发生在西南气流最为强盛的时段,即 1.0—3.6 km 高度上均有急流的时段,此阶段西南低空急流输送的水汽强,上升运动也强,当低空急流减弱且 1.5 km 上下转为西北风时,水汽输送减弱,对流层低层转为下沉运动,相应降雪明显减弱。

总之,山东半岛第 1 阶段的降雪发生在有利的天气形势下,地面有黄河气旋形成,对流层低层存在西南低空急流和气旋性环流,有利于来自南方的水汽输送及产生辐合上升运动,从而形成了第 1 阶段的降雪。

5 第 2 阶段降雪的中尺度结构及其对降雪的影响

过威海的相对湿度和假相当位温演变显示,7 日 20 时以后,850 hPa 以下相对湿度再度出现升高,超过 90%,说明对流层低层水汽含量升高。同时,从 8 日 02 时前后可以看出 925 hPa 以下假相当位温随着高度降低,有弱的不稳定层结存在。故水汽条件和不稳定层结均有利于产生海效应降雪。从垂直速度来看,与第 1 阶段降雪明显不同的是,在 7 日 20 时以后威海上空整层的垂直速度为正值,表明

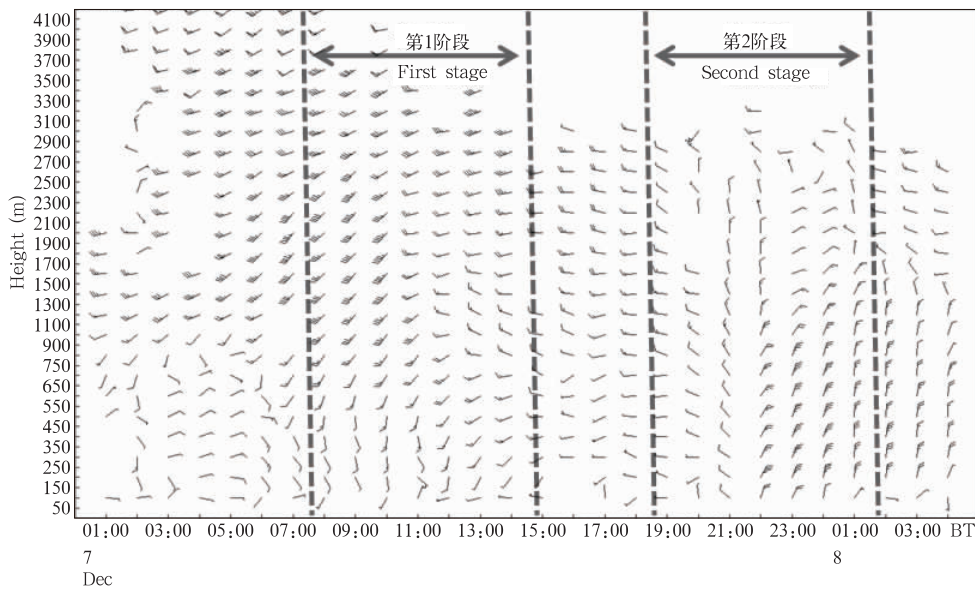


图4 烟台风廓线雷达探测的2014年12月7日01时—8日04时风场和威海降雪阶段
Fig. 4 Wind observed by the profile Radar in Yantai from 01:00 BT 7 to 04:00 BT 8 December 2014 and the two precipitation stages in Weihai

为下沉运动(图3)。显然,基于NCEP资料分析出的垂直速度难以看出有利于降雪的动力条件。由于第2阶段的暴雪仅局限于威海市区至荣成地区,水平尺度不超过50 km,且最强降雪时段发生在7日22时前后,具有显著的中尺度特征,低分辨率的资料无法显示出其真实的结构特征和发生机制。因此,下面将重点利用环渤海加密自动气象站、多普勒天气雷达径向速度和风廓线雷达探测资料进行中尺度分析,剖析强降雪开始、强盛和结束的结构特征。至于水汽和温度层结的细致分析需要借助于中尺度数值模拟来实现。

5.1 水平风场的垂直分布

图5为第2阶段降雪过程荣成多普勒天气雷达

风廓线产品,风场时间间隔为30 min。可见7日17时—8日06时,强降雪区域上空经历了3次风向风速的变化。19时13—19分,3.0 km高度上由西北风转为西南风,表明有低槽移至荣成上空。但低槽持续时间较短,仅维持至21时37分。期间,3.0 km上下为西西南风,1.8 km以下为西北风,这与20时荣成站探空的风场一致,即700 hPa(3 km)为西南偏西风,850 hPa以下为西北风。21时37分起,对流层低层的风场开始改变,0.6 km高度以上转为东北风,在22时20分—23时的最强降雪时段,强东北风的最大高度达到3.7 km,低层东北风风速在8—10 m/s。23时之后,对流层低层均转为东北风。此后东北风逐渐增强,1.5 km以下最大风

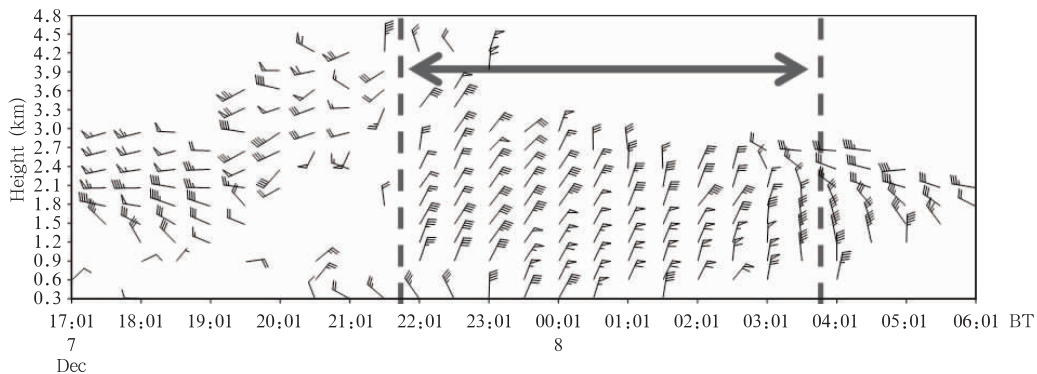


图5 荣成多普勒天气雷达VWP风场的时间演变(图中双箭头区间内为荣成降雪时段)
Fig. 5 Temporal changes in the VWP wind field from the Doppler radar in Rongcheng (the range within the double arrows denote the stage of snowing in Rongcheng)

速达到 16 m/s, 对应降雪强度明显减弱。8 日 04 时, 0.6 km 以上均转为西北风, 荣成降雪结束。通过烟台风廓线雷达(位于荣成西北方 90 km)的实测风场(图 4)也可以看到, 7 日 22 时, 烟台上空 2.4 km 高度以下由西北风转为东北风, 1.2 km 以下的东北风持续至 8 日 05 时, 而 1.2—2.4 km 的风自 8 日 01 时转为西北风。

综合以上分析可见, 威海—荣成一带第 2 阶段的降雪, 首先发生在 850 hPa(1.5 km 高度)为西北风的风场条件下, 之后转为东北风, 最强降雪就发生在东北风影响期间, 东北风的厚度最厚达 4.0 km; 当山东半岛东部均转为东北风后, 陆地降雪明显减弱, 弱降雪期间东北风厚度不足 2.7 km。因此, 来自渤海海峡和黄海北部的东北风在此次降雪过程中起到关键作用, 其重要作用之一是输送来自渤海海峡和黄海北部暖海面的水汽和热量。海温的分布实况(图略)显示黄海、渤海海峡至渤海的海温递减。当东北风携带的冷空气经过渤海海峡和黄海北部暖海面时, 通过感热交换, 使低层冷空气升温增湿, 而高层温、湿度少变, 大气层结呈现上干冷下暖湿的不稳定状态, 当上升的气块温度冷却至和环境温度相等时, 达到饱和并凝结形成低云, 从而产生海效应降雪。

5.2 低层水平风场

5.2.1 地面风场分布

伴随着气旋的东移南下, 渤海、渤海海峡至黄海的风发生了明显转变。自 16 时 50 分渤海海峡中部的大钦岛转为东北风之后, 东北风逐渐向南传播, 19 时 30 分, 东北风到达山东半岛北部沿海, 威海的刘公岛转为东北风。地面东北风仅入侵至山东半岛西部的沿海及北部至东部的沿海地区, 半岛的其他地区以西北风为主(图略)。从各时次风速来看, 强风位于北部沿海, 东北风自海面到山东半岛北部陆地上时, 有明显的风速减小。以 7 日 20 时 30 分为例(图 6a), 位于渤海海峡的长岛站东北风风速为 14 m/s, 由于风自海面吹向陆地时下垫面摩擦增大, 因而到达山东半岛北部沿海时风速迅速减小, 与之相对应的半岛北部风速为 8 m/s, 从而产生风速辐合。同时, 因近东西向的低山丘陵地形的阻挡, 减弱的东北风与半岛内陆的西北风及其他风向构成了切变线或低压环流, 二者共同作用导致在北部沿海地区形成了明显的风向风速辐合, 有利于产生较强的上升运动。

为了分析近地面风场与降雪的对对应关系, 图

6b、c 给出了地面加密自动气象站的风场与雷达反射率因子的叠加。首先来看雷达回波的演变。7 日 19—21 时, 雷达反射率因子图上有 3 块回波, 分别位于烟台与威海的北部沿海海面、威海南部地区及荣成东部沿海海面。成片反射率因子强度为 30—35 dBz, 最强的回波在烟台与威海的北部沿海海面上, 15 dBz 的反射率因子伸展到 4.2 km 高度。期间这 3 块回波先各自在原地发展, 于 21 时逐渐合并。从图 6b 可以看到, 7 日 20 时 40 分, 威海市区南部的强回波对应的是山东半岛内陆地区的西北风、西南风与来自海上的东北风构成的 γ 中尺度气旋性环流。该气旋性环流造成了较强降雪, 自动气象站逐时降雪量显示, 威海 20 时的小时降雪量达 2.8 mm, 仅次于 23 时。与形成威海附近强回波的气旋性环流不同的是, 荣成东部沿海地区回波处在来自黄海的东南风中, 风速达 10 m/s, 东南风与陆地上的弱西北风(4 m/s)形成了“对头风”, 产生明显的风向辐合。这两块回波分别自东北向西南、自东向西推进, 直至合并。22 时 30 分, 在降雪的最强盛时段, 回波的东段(荣成附近)依然维持东南风与西北风的辐合, 而西段的回波则由东北风与西北风构成辐合, 东北风风速达 10 m/s, 明显大于西北风风速, 降雪集中出现在东北风区域(图 6c)。随着东北风向南入侵, 8 日 00 时 10 分, 山东半岛东部地面风均转为东北风, 东北风风速自北向南减小, 因而存在风速辐合, 降雪强度明显减小(图 6d)。

由此可见, 气旋在经过山东半岛东移南下的过程中, 在山东半岛的沿海地区有中小尺度天气系统生成。东北风自渤海海峡入侵山东半岛北部沿海后, 因低山丘陵地形的影响, 在近地面层形成了近 γ 中尺度的低压环流及东北风与西北风、西北风与东南风的辐合线, 从而产生辐合上升运动, 导致强降雪产生。

5.2.2 雷达径向速度及对流层低层水平风场

从荣成雷达 1.5°仰角径向速度图(图 7a)上可见, 20 时 30 分, 在威海至荣成 1.1 km 高度以下正速度区被完整地包围在负速度区中, 说明在此区域有 β 中尺度涡旋存在, 该涡旋自 19 时生成, 于 20 时 55 分消失。结合上文给出的加密自动站风场, 该区域在近地面也存在东北风—西北风—西南风的低压环流。这表明不仅在近地面, 整个边界层内都有低压环流存在, 该低压环流产生辐合上升运动, 是触发威海附近强降雪产生的动力因素。

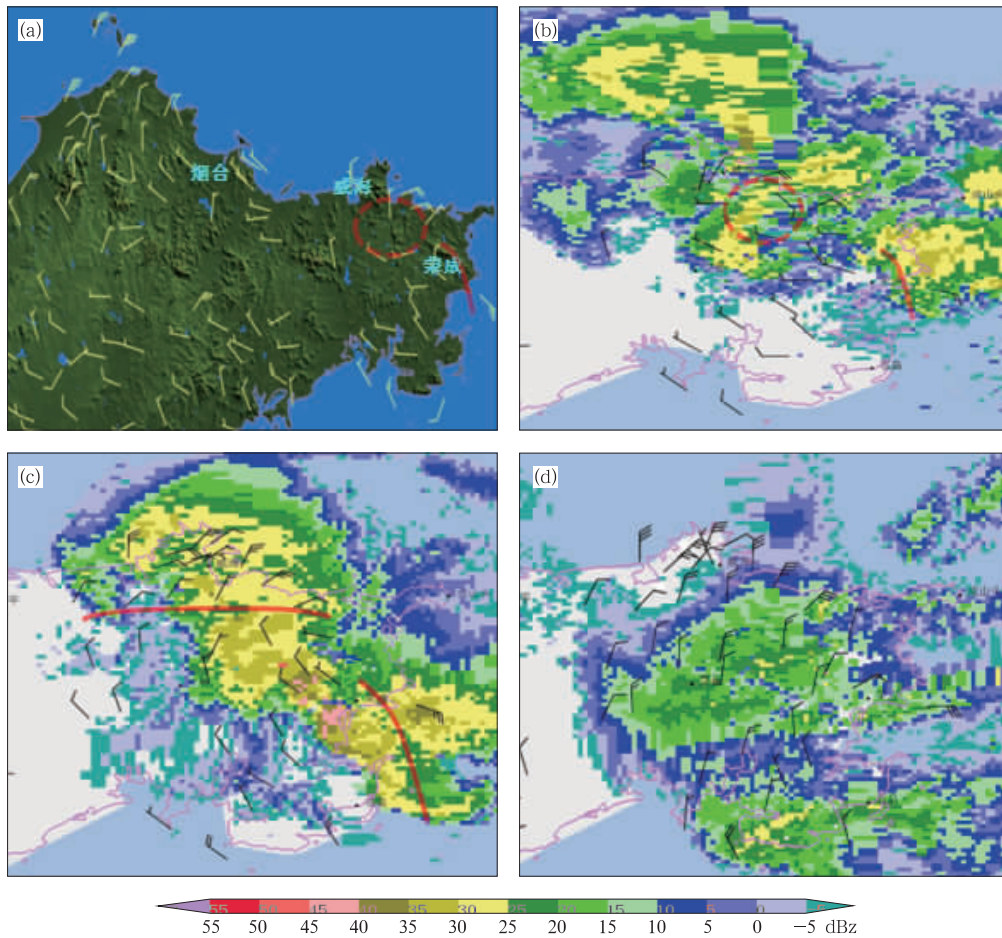


图6 加密自动站风场和烟台、荣成多普勒天气雷达 1.5°仰角反射率因子(阴影)

(a. 12月7日20时30分,图中绿色底图为高精度地形图,蓝色为海洋;b. 20时40分;c. 22时30分;
d. 自动站风场为8日00时10分,反射率因子为8日00时07分;图中椭圆表示气旋性环流,红色粗线表示辐合线)

Fig. 6 Wind field from the automatic station and the combined reflectivity from the Doppler radar in Yantai and Rongcheng (shaded)(a. 20:30 BT 7 December, green map is for the high-resolution topography and blue region is for the ocean, b. 20:40 BT, c. 22:30 BT 7, d. wind at 00:10 BT 8 December and reflectivity at 00:07 BT 8; oval denotes the cyclonic circulation and red thick line denotes the convergence line at 00:07 BT 8)

7日21时起,3块雷达回波相接合并后,成近纬向的带状自东北向西南传播,回波在南下的过程中不断增强,荣成附近的最强反射率因子为45—50 dBz,由此造成威海和荣成一带22时前后的最强降水阶段。22时31分的雷达径向速度图(图7b)上,在1.0 km以下可以分析出在文登至荣成一带有西北风,其他区域为来自渤海海峡和黄海北部的东北风,且东北风风速明显大于西北风,由此形成了东北风和西北风的辐合线,表明在对流层低层有风向的辐合存在。而更高的高度上,如图7b中黄色圆圈所示,威海北部沿海至荣成一带均为东北风控制,且东北风风速较21时之前有所增强。风场东北风逐渐增强的结果与烟台风廓线雷达的观测事实一致,均

表明了冷空气自渤海海峡及黄海北部向陆地入侵,导致陆地上的东北风逐渐增大。进一步分析21时—23时30分其他时段的山东半岛东部强降雪时段内的径向速度,发现均有上述特点,即边界层内存在明显的东北风与西北风的辐合,对流层中低层有较强东北风,降雪发生在东北风一侧。风向的辐合可产生较强上升运动,有利于强降雪的产生。

23时30分之后,随着冷空气的进一步南侵,气旋东移南下,降雪强度和落区也发生了明显变化。雷达径向速度图(图7c)上,在边界层内,0速度线近乎为直线,山东半岛东部地区为一致的东北风。由于西北风被东北风取代,该区域仅存在东北风风速辐合,上升运动减弱,导致降雪强度明显减小,主要

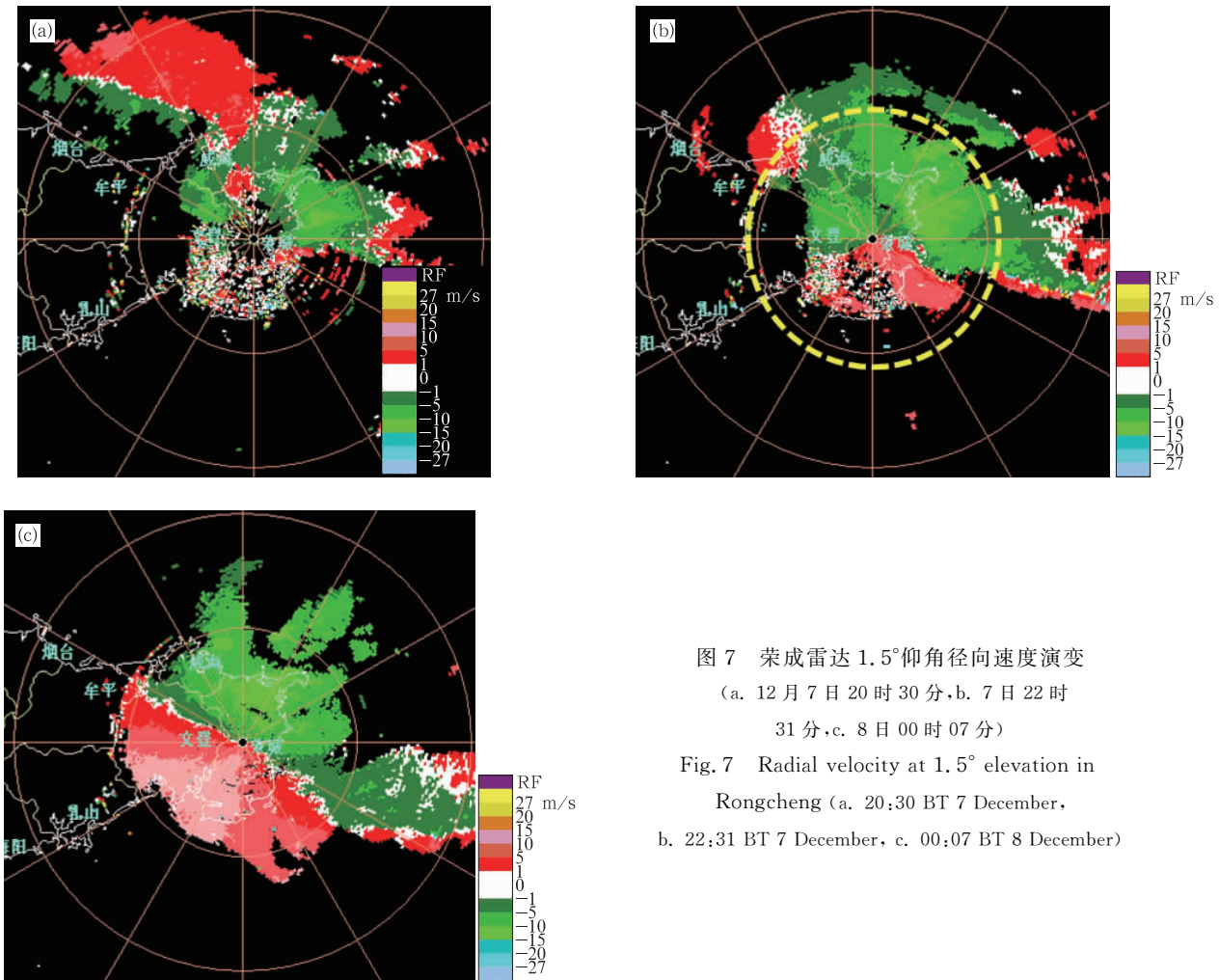


图7 荣成雷达1.5°仰角径向速度演变

(a. 12月7日20时30分, b. 7日22时

31分, c. 8日00时07分)

Fig. 7 Radial velocity at 1.5° elevation in Rongcheng (a. 20:30 BT 7 December,

b. 22:31 BT 7 December, c. 00:07 BT 8 December)

强降雪南下至荣成南部沿海区域。

6 降水相态初步分析

首先来分析第1阶段降雪的相态。5—6日有冷空气影响山东,故在此次降水过程开始之前山东半岛维持较低温度,有利于产生降雪。从探空和地面观测来看,7日08时,荣成探空站850、925和1000 hPa的温度分别为 -7 、 -4 和 0°C ,荣成地面自动气象站的气温为 -1°C ,威海的气温为 -0.1°C ,边界层内各层均达到了降雪的温度阈值(杨成芳等,2013)。11时之前,2 m气温均低于 0°C ,因此,7日上午山东半岛东部的降水相态均为雪。

对于7日夜间的降水相态变化,由于发生在两次探空观测之间,只能结合风场及自动气象站逐时要素进行初步分析。高空图显示(图略),7日08时至8日08时,850 hPa以下弱温度脊自西向东移

动,相应黄河气旋东移南下,对流层低层经历了先升温后降温的过程。威海自动气象站16时南风转为偏北风,2 m气温也经历了升温、降温、再升温降温的复杂变化(图8),应与温度平流、气温日变化及海洋的综合影响有关。7日20时,荣成850 hPa温度依然维持 -7°C (高于12月上旬海效应降雪的通常温度 -9°C),而925和1000 hPa的温度略有上升,分别为 -2 和 1°C ,威海2 m气温为 0.6°C ,导致部分雪晶在降落过程中融化,从而产生雨夹雪。7日21时开始,由于东北风显著增强,向威海沿岸输送的渤海海峡暖海面的暖湿空气加强,使得威海近地面出现升温,露点温度也明显升高,达到降水过程中的最大值,降水相态转为雨。此后,冷空气继续南侵,从荣成探空可以看出,8日08时荣成850 hPa的温度下降至 -9°C ,925和1000 hPa分别下降至 -6 和 -1°C ,表明对流层低层温度较7日20时已

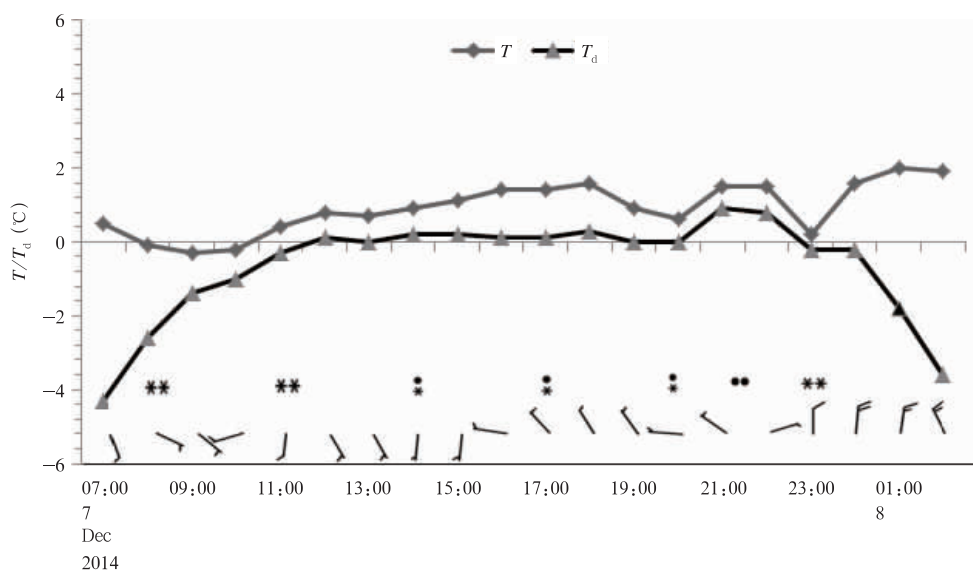


图8 威海逐时气温(T)、露点温度(T_d)、风及降水相态变化
Fig. 8 Temporal changes in the weather elements in Weihai for temperature (T), dew point temperature (T_d), wind, and the precipitation phase

下降。因此,虽然近地面 2 m 气温 23 时后约为 2°C,但对流层低层的雪晶在降落到近地面时来不及融化,故在降雪过程后期威海的降水相态又转为雪。

7 结论与讨论

利用多普勒天气雷达、风廓线雷达、加密自动站、常规探空和地面等多种观测资料,对 2014 年 12 月 7—8 日由入海气旋造成的山东半岛东部局地暴雪过程的动力结构特征及成因进行了分析,重点探讨了第 2 阶段降雪的开始、强盛和结束的中尺度结构特征。发现这次降雪过程与冬季常见暴雪过程有明显差别。主要得到以下几点结论:

(1)此次暴雪的影响系统为黄河气旋。第 1 阶段降雪为典型的黄河气旋槽前降雪,发生在对流层中层有明显低槽、地面有气旋、对流层低层有气旋性环流和西南低空急流的天气系统配置下,水汽来源于中国南海,中低层有明显的辐合上升运动,降雪落区位于高空槽前西南低空气流的右前方和黄河气旋的东侧。第 2 阶段为黄河气旋后部的海效应降雪,降雪发生在高空槽过后、气旋自渤海海峡东移南下至黄海的阶段,暴雪落区处在气旋后部的东北风与西北风交汇处。

(2)第 2 阶段的海效应降雪与山东半岛常见的渤海海效应降雪有明显差别:经典的渤海海效应降雪山东半岛对流层低层的主导风向为西北风,冷空

气自渤海入侵山东半岛,降雪的水汽和热量来源主要为渤海和渤海海峡暖海面,雷达回波的移动方向为自西北向东南,对流层低层存在西北风与东北风的切变线(有时有中尺度低压环流),西北风强于东北风,降雪主要分布在西北风一侧;而此次降雪过程山东半岛低层的主导风向为东北风,冷空气自渤海海峡和黄海北部入侵,降雪的水汽和热量来源于渤海海峡和黄海暖海面,雷达回波的移动方向为自东北向西南,对流层低层也存在西北风与东北风切变线,但东北风强于西北风,降雪落区仅位于东北风一侧。

(3)第 2 阶段的降雪初期,在威海附近地面存在 γ 中尺度低压环流,雷达径向速度上低层有 β 中尺度涡旋,而荣成东部沿海有东南风与西北风的切变线,是触发较强降雪产生的动力因素;在 22 时前后的强降雪时段,山东半岛东北部地区边界层内存在东北风和西北风的切变线;在降雪过程后期,东北风控制山东半岛,仅有东北风风速的辐合上升运动,导致降雪强度减弱。

(4)当冷空气较弱、山东半岛 850 hPa 温度略高于通常降雪阈值时,暖海面的升温和冷空气的降温共同作用可能会导致海效应降雪过程经历复杂的降水相态变化。总之,多种观测资料揭示了此次降雪过程的特殊性,在 24 h 内降雪发生了性质的转变,先由有西南气流参与的降雪后转为由冷空气流经暖

海面产生的海效应降雪。第2阶段海效应降雪的环流形势配置及风场结构与经典的山东半岛渤海海效应降雪有明显差别,使得我们认识到另一种海效应降雪,说明了中国海效应降雪的复杂性。从该暴雪过程可得到启示,山东半岛被渤海、渤海海峡和黄海环抱,冬半年的海效应降雪除了渤海以外,还要考虑渤海海峡和黄海的影响。在适宜的天气形势下,渤海海峡和黄海的暖海面也可以使得山东半岛产生海效应降雪。不同海域的海效应降雪产生的环流背景和结构配置差异,今后有待通过更多的个例进行深入研究,寻找普适规律,以提高此类降雪的精化预报能力。

参考文献

- 陈雷,戴建华,韩雅萍. 2012. 上海地区近10年冷流降雪天气诊断分析. 气象, 38(2): 182-188. Chen L, Dai J H, Han Y P. 2012. Diagnosis analysis of cold airflow snowfall events over Shanghai area in recent 10 years. Meteor Mon, 38(2): 182-188 (in Chinese)
- 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. Diao X G, Sun D G, Fu C J, et al. 2011. Doppler radar echo features of cold airflow snowstorms in Shandong Peninsula. Meteor Mon, 37(6): 677-686 (in Chinese)
- 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. Qiao L, Lin J. 2008. The roles of dry-cold air incursion on persistent snowfall in Shandong Peninsula during December of 2005. Meteor Mon, 34(7): 27-33 (in Chinese)
- 秦华锋,金荣花. 2008. “0703”东北暴雪成因的数值模拟研究. 气象, 34(4): 30-38. Qin H F, Jin R H. 2008. Numerical simulation study of the cause of snowstorm process in Northeast of China on March 2007. Meteor Mon, 34(4): 30-38 (in Chinese)
- 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. Sun J H, Huang C Y. 2011. The three-dimensional structure of coastal front producing heavy snow over the Shandong Peninsula. Chinese J Atmos Sci, 35(1): 1-15 (in Chinese)
- 孙艳辉,李泽椿,寿绍文. 2012. 2007年3月3—5日辽宁省暴雪和大风天气的中尺度分析. 气象学报, 70(5): 936-948. Sun Y H, Li Z C, Shou S W. 2012. A mesoscale analysis of the snowstorm event of 3-5 March 2007 in Liaoning Province. Acta Meteor Sinica, 70(5): 936-948 (in Chinese)
- 王东海,端义宏,刘英等. 2013. 一次秋季温带气旋的雨雪天气过程分析. 气象学报, 71(4): 606-627. Wang D H, Duan Y H, Liu Y, et al. 2013. A case study of the mixed rainfall-snowfall event associated with an extratropical cyclone in Autumn. Acta Meteor Sinica, 71(4): 606-627 (in Chinese)
- 王丽荣,刘黎平,王立荣等. 2013. “09.11.10”石家庄特大暴雪中尺度风场分析. 气象, 39(8): 1023-1030. Wang L R, Liu L P, Wang L R, et al. 2013. Analysis on mesoscale wind field of “09.11.10” blizzard in Shijiazhuang. Meteor Mon, 39(8): 1023-1030 (in Chinese)
- 阎丽凤,杨成芳. 2014. 山东省灾害性天气预报技术手册. 北京:气象出版社, 182-183. Yan L F, Yang C F. 2014. Book of Disaster Weather Forecasting Technology in Shandong Province. Beijing: China Meteorological Press, 182-183 (in Chinese)
- 杨成芳,车军辉,吕庆利等. 2009. 位涡在冷流暴雪短时预报中的应用. 中国海洋大学学报, 39(3): 361-368. Yang C F, Che J H, Lv Q L, et al. 2009. Application of potential vorticity on ocean-effect snowstorm nowcasting. Period Ocean Univ China, 39(3): 361-368 (in Chinese)
- 杨成芳. 2010. 渤海海效应暴雪的多尺度研究[D]. 南京:南京信息工程大学. Yang C F. 2010. Multiscale analysis of Bohai ocean-effect snowstorm[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology (in Chinese)
- 杨成芳,李泽椿,王俊. 2010. 用EVAP方法反演冷流暴雪的风场及检验. 气象学报, 68(4): 577-583. Yang C F, Li Z C, Wang J. 2010. Wind retrieval and its verification for the ocean-effect snowstorms using the EVAP method. Acta Meteor Sinica, 68(4): 577-583 (in Chinese)
- 杨成芳,姜鹏,张少林等. 2013. 山东冬半年降水相态的温度特征统计分析. 气象, 39(3): 355-361. Yang C F, Jiang P, Zhang S L, et al. 2013. Analysis on temperature of precipitation types in cold seasons in Shandong. Meteor Mon, 39(3): 355-361 (in Chinese)
- 杨晓霞,吴炜,万明波等. 2012. 山东省两次暴雪天气的对比分析. 气象, 38(7): 868-876. Yang X X, Wu W, Wan M B, et al. 2012. A comparative analysis of two snowstorms in Shandong Province. Meteor Mon, 38(7): 868-876 (in Chinese)
- 易笑园,李泽椿,朱磊磊等. 2010. 一次 β -中尺度暴风雪的成因及动力热力结构. 高原气象, 29(1): 175-186. Yi X Y, Li Z C, Zhu L L, et al. 2010. A case study on dynamic and thermal structures and mechanism of β -mesoscale snowstorm. Plateau Meteor, 29(1): 175-186 (in Chinese)
- 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. Yu X J, Gu X Z, Li H L. 2013. Mesoscale numerical simulation and cloud microphysical characteristics of a cold-air snowstorm in Shandong Peninsula. Meteor Mon, 39(8): 955-964 (in Chinese)
- 张黎红. 2004. 大连地方性冷流降雪成因分析. 辽宁气象, (4): 12-13. Zhang L H. 2004. Analysis of cold air snowfall in Dalian. Liaoning Meteor, (4): 12-13 (in Chinese)
- 张迎新,张守保. 2006. 华北平原回流天气的结构特征. 南京气象学院学报, 29(1): 107-113. Zhang Y X, Zhang S B. 2006. Structural feature of the backflow precipitation over North Chi-

- na. *J Nanjing Inst Meteor*, 29(1): 107-113 (in Chinese)
- 赵桂香. 2014. 诊断分析技术在山西强降雪预报中的应用. *高原气象*, 33(3): 838-847. Zhao G X. 2014. Application of diagnostic analysis on forecast of the heavy snow in Shanxi Province. *Plateau Meteor*, 33(3): 838-847 (in Chinese)
- 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. Zhou S L, Cong M H, Wu Z M, et al. 2008. Characteristics and maintaining mechanisms of sustained cold-air outbreak snowstorm processes in Shandong Peninsula during December 3-21, 2005. *J Appl Meteor Sci*, 19(4): 444-453 (in Chinese)
- 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. Zhou S L, Zhu X D, Fu C J, et al. 2009. Analyses on observational structure characteristics and numerical simulation of cold-air convective cloud and wind of a typical cold-vortex snowstorm process in Shandong Peninsula. *Plateau Meteor*, 28(4): 935-944 (in Chinese)
- 周雪松, 谈哲敏. 2008. 华北回流暴雪发展机理个例研究. *气象*, 34(1): 18-26. Zhou X S, Tan Z M. 2008. Case study on development mechanism of a snowstorm over North China. *Meteor Mon*, 34(1): 18-26 (in Chinese)
- Hjelmfelt M R. 1990. Numerical study of the influence of environmental conditions on lake-effect snowstorms over Lake Michigan. *Mon Wea Rev*, 118(1): 138-150
- Laird N F. 1999. Observation of coexisting mesoscale lake-effect vortices over the western Great Lakes. *Mon Wea Rev*, 127(6): 1137-1141
- Neil E L, John E W, David A R, et al. 2003. Model simulations examining the relationship of lake-effect morphology to lake shape, wind direction and wind speed. *Mon Wea Rev*, 131(9): 2102-2111
- Sousounis P J. 1993. A numerical investigation of wind speed effects on lake-effect storms. *Bound Layer Meteor*, 64(3): 261-290