

郑丽娜,王坚红,杨成芳,等. 2014. 莱州湾西北与山东半岛北部强海效应降雪个例分析. 气象, 40(5): 605-611.

莱州湾西北与山东半岛北部强海效应 降雪个例分析^{* 1}

郑丽娜^{1,2} 王坚红¹ 杨成芳³ 吴 珂³

1 南京信息工程大学大气科学学院, 南京 210044

2 山东省东营市气象局, 东营 257091

3 山东省气象局, 济南 250031

提 要: 利用常规资料、NCEP 再分析资料和加密自动站资料对 2011 年 12 月 8 日莱州湾西岸一次强海效应降雪过程进行了诊断分析。结果表明: 此地的海效应降雪与山东半岛北部的海效应降雪都是在适宜的背景场、有利的海气温差及较强的低空冷平流等基本条件下发生的。但是具体到风场配置、海气温差强度、水汽分布及动力、热力条件等方面存在着差异。在这次过程中, 900 hPa 以上为西北风, 以下维持持续的东北风, 是造成此次强海效应降雪的主要原因, 这种风场结构与半岛北部的高、低空均要求西北风不同。结合物理量场的诊断分析认为, 莱州湾西岸的海效应降雪与山东半岛北部的同属于浅对流降雪。本次过程中 900 hPa 以下存在上升运动、水汽辐合中心、不稳定层结和大的海气温差, 近地层的切变线触发了不稳定能量的释放。强降雪区出现在 1000 hPa 相当位温暖舌的区域, 暖舌的位置与山东半岛北部发生强海效应降雪时的不同, 前者在莱州湾, 后者在半岛北部沿海。从云图上看, 冷流低云在海面上表现为一条条顺气流方向的云线, 云的个体呈细胞状, 接近陆地时, 由于海陆下垫面的差异使得云层加厚, 云的走向发生偏转, 降雪加大。

关键词: 莱州湾, 海效应降雪, 不稳定层结, 云线

中图分类号: P458

文献标志码: A

doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2014.05.011

Case Analysis of Marine Effect Snowstorm in Northwestern Laizhou Bay and Northern Shandong Peninsula

ZHENG Lina^{1,2} WANG Jianhong¹ YANG Chengfang³ Wu Ke³

1 Department of Atmospheric Science, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

2 Dongying Meteorological Office of Shandong Province, Dongying 257091

3 Shandong Provincial Meteorological Bureau, Jinan 250031

Abstract: Based on the conventional observational data, NCEP reanalysis data and automatic weather station data, the marine effect snowstorm which happened in the west of Laizhou Bay on 8 December 2011 was analyzed diagnostically. The findings show that snowfall occurs in appropriate ambient field, favorable air-sea temperature difference and more intensive cold advection. However, differences exist in wind field configuration, air-sea temperature difference range, water vapor distribution dynamic conditions and thermal conditions. During this snowfall process, northwest winds blow above 900 hPa while under the level, it maintains sustained northeasterly which is the main reason for this marine effect snowstorm process. This wind field is different from the northern peninsula where northwest winds blow in both upper and low airs. By analyzing the physical field, the marine effect snowfall belongs to shallow convective snowfall. There is upward motion, moisture convergence center, unstable stratification and large air-sea temperature

* 国家自然科学基金项目(41175044) 资助

2013 年 1 月 7 日收稿; 2013 年 4 月 25 日收修定稿

第一作者: 郑丽娜, 主要从事短期天气预报业务. Email: dongyingzln@163.com

difference under 900 hPa in the west of Laizhou Bay, and the shear line of near surface triggers the release of unstable energy in the process. The heavy snowfall area is the warm tongue of equivalent potential temperature at 1000 hPa. The position of warm tongue here is different from that in the north of Shandong Peninsula. The former is in Laizhou Bay, while the latter is in the northern coast of the peninsula. From the cloud images, the cold airflow clouds on the sea show a streamwise cloud line, and the cloud is individual cells. When nearing the land, the clouds get thickened, cloud line deflects and the intensity of snowfall increases.

Key words: Laizhou Bay, sea effect snowstorm, unstable stratification, cloud line

引 言

海效应降雪在我国通常称为冷流降雪,它是在特定的季节,天气形势和地理条件下形成的一种地方性天气。针对渤海的冷流降雪一般出现在山东半岛北部,特别是半岛北半部的蓬莱到成山头一带的沿海地区,特别容易发生(曹钢锋等,1988)。因而此处的冷流降雪被人们熟知并广泛研究(杨晓霞等,2012;于晓晶等)。杨成芳等(2008)指出,半岛北部的冷流降雪以西北气流下的降雪为主,有利的水汽和动力条件,加上特殊的地形是产生这类天气的主要原因。林曲凤等(2006)指出,海岸锋及沿岸辐合线是山东半岛产生冷流降雪的主要原因。于志良(1997)则从海洋的角度出发,探讨了海气感热输送对冷流降雪的作用。所有的这些研究,对了解山东半岛北部的冷流降雪都提供了很多有益的帮助。

近年来,随着高时空分辨率卫星云图和雷达资料的应用,在业务中发现,渤海海效应降雪分布广泛,渤海中东部、渤海海峡、山东半岛和莱州湾均可发生。统计了1999—2012年冬季莱州湾西岸海效应降雪过程共有12次,单站最大降雪量小于2 mm的过程占83.3%,大于5 mm的过程占16.7%,也即有2次过程单站最大降雪量达到大雪量级。雪量均是河口最大,其余的站点偏小。2011年12月8日,河口的降雪量达8 mm,其他沿岸各站也都在2 mm以上,这是十几年来最强的一次海效应降雪过程。但是由于多年来此地的海效应降雪发生频率低,降雪量小,在研究和预报业务中常被人们忽视,所以对于此类天气的形成机制尚不清楚,预报员对于这类天气预报能力较低,此次过程漏报了。本文将以此过程为例,探讨产生此类强海效应降雪天气的形成机制,试图为当地预报此类天气提供一些有用的参考依据。

1 降雪实况

2011年12月6—7日,受华南倒槽北上影响,山东出现了一次全省性的降水天气,其中莱州湾西部降水量级为小到中雨。7日23时,随着冷锋携带的强冷空气南压,倒槽东移南退,全省降水过程结束,继而鲁西北的大部地区天空状况转晴。8日05时,潍坊、昌邑首先出现降雪,随后莱州湾沿岸、鲁中北部和山东半岛西部产生降雪,降雪一直持续到8日14时。雪量最大的区域集中在莱州湾西岸(图1a),其中河口最大8 mm。8日14时之后,莱州湾西岸的降雪结束,降雪区逐渐转移到山东半岛。截止到9日08时,半岛绝大部分地区雪量不足1 mm,只有烟台的福山雪量最大,达5.8 mm(图1b)。

从图1中可以清楚地看出此次海效应降雪过程的特点:从范围上看,分布广,具有显著的地域性特征。降雪区分布在莱州湾沿岸100 km的范围内,以及整个山东半岛,山东省的其他地区多晴好天气,这是海效应降雪的典型分布特征;从时段上看,降雪存在着明显的阶段性。8日05—14时,降雪发生在莱州湾沿岸,其中以其西岸降雪最明显。8日14时至9日08时,降雪区转移到山东半岛,但从整个过程来看,前一时段雪量最大,为这次过程的强降雪中心;从雪量的大小来看,绝大部分站点的降雪量级是小雪,仅有小数站点可达中雪以上量级,且离渤海海面越近,雪量越大。

2 大尺度环流背景

2011年12月7日,500 hPa位于中西伯利亚的阻塞高压后部开始有冷槽移动,携带冷平流促使阻塞高压崩溃。12月8日08时(图2a),横槽后部的

风已转为北至西北风,变高梯度指向东南,预示着横槽转竖或南压(朱乾根等,2007)。冷空气自贝加尔湖随着横槽的下摆大举南下,莱州湾西部的温度由 7 日 08 时的 -19°C 下降为 8 日 08 时的 -29°C 。渤海上游的风与等温线夹角很大,预示着冷平流很强。850 hPa 图上(图 2c)24 h 变温更加明显,达 -10°C ,莱州湾及半岛北部的温度在 $-13\sim-12^{\circ}\text{C}$,风场上为北到西北风,风速在 6 级以上。925 hPa(图 2a)渤海沿岸的风为东北风,且自辽宁经渤海到山东,形成

了一股强劲的东北风急流。对应地面图上(图 2b),整个亚洲被一个中心位于蒙古境内,中心强度达 1060 hPa 的冷高压所控制,它与东部海上中心强度为 1010 hPa 的低压形成鲜明的对比,二者之间气压梯度很大且等压线呈东北—西南走向,风沿等压线吹,受地面摩擦的影响,基本为偏北风,但是渤海北岸自 7 日 14 时开始一直吹东北风,7 日 20 时营口、旅顺的东北风更是加大到 $8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

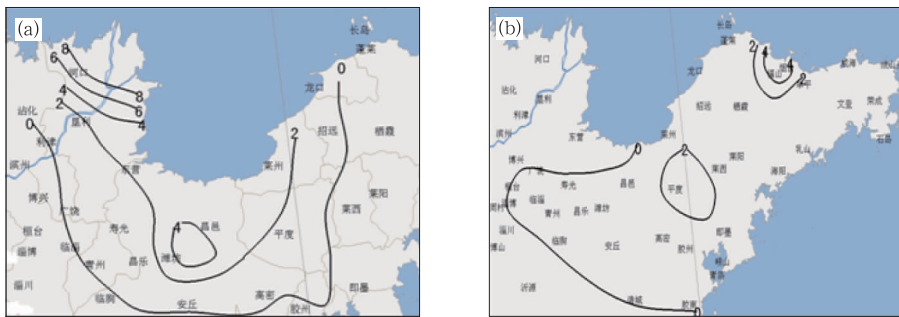


图 1 2011 年 12 月 8 日 05—14 时(a)与 8 日 14 时至 9 日 08 时(b)山东省各站降雪量分布(单位:mm)

Fig. 1 Snowfall distribution in Shandong Province at 05:00—14:00 BT 8 (a) and at 14:00 BT 8 to 08:00 BT 9 (b) December 2011(unit:mm)

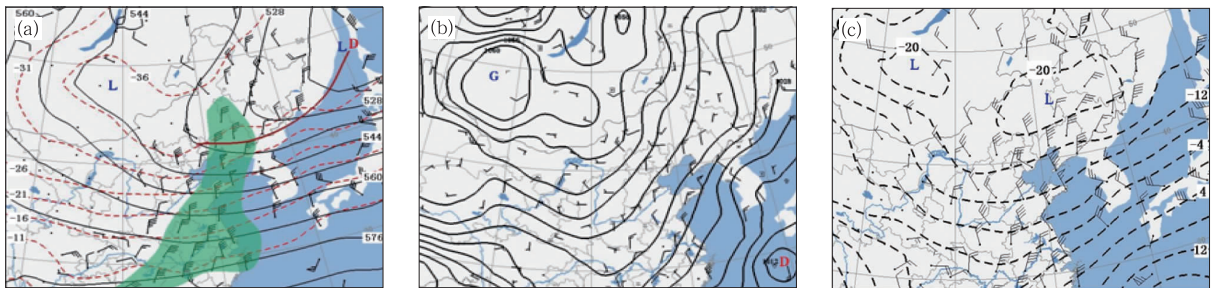


图 2 2011 年 12 月 8 日 08 时 500 hPa 形势场及 925 hPa 风场(a)、地面形势场(b)和 850 hPa 温度场、风场(c)

(a 实线:等高线,单位,dagpm;虚线:等温线,单位: $^{\circ}\text{C}$;阴影区:风速 $\geq 12\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; b 实线:等压线,单位:hPa)

Fig. 2 Synoptic situation at 500 hPa and wind field at 925 hPa (a), surface situation (b), temperature field and wind field at 850 hPa (c) at 08:00 BT 8 December 2011

(In a solid line is contour line, unit: dagpm; dashed line is isotherm, unit: $^{\circ}\text{C}$; shaded areas for wind velocity $\geq 12\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; in b solid line is isobar, unit: hPa)

3 卫星云图分析

产生冷流降雪的云一般较低,叫冷流低云(李建华等,2007;陈雷等,2012)。一般的卫星云图只能看到云模糊的轮廓,所以选取 MODIS 云图来研究这种低云的特征。从图 3 中可以清楚地看到,12 月 8 日 08 时,产生此次海效应降雪的云分布很有规律,渤海三分之二的北部区域,出现了顺着东北气流方

向的一条条云线,云的个体很清楚,呈球型的细胞状云型,这与低层层结不稳定、高层层结稳定的大气条件密切相关(陈渭民,2010)。当细胞状云系的细胞由大变小,并逐渐改变为对流云系的过程表示风力由小逐渐加大,相反,则风力由大变小。靠近渤海南岸,由于海陆下垫面的差异,此处的云层厚度增加,云顶变得很白很亮,云的走向转为东北—西南向,特别是环渤海南岸的云,从云顶看几乎连成一片。而远离岸边的云层明显厚度降低,高度变薄。

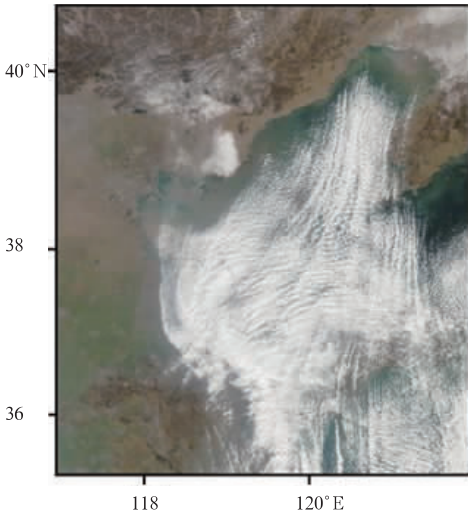


图3 2011年12月8日08时MODIS云图
Fig. 3 MODIS satellite image at 08:00 BT
8 December 2011

按地面的观测记录,此时云型为积云性层积云,云高在1000 m左右。

4 产生机制分析

4.1 水汽条件分析

从图4a 925 hPa水汽通量图上可以看出,水汽通量的大值区在黄海海面上,渤海被 $2 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 的水汽通量所覆盖。但结合其矢量场发现都是由北向南的输送,不存在水汽的输送通道,说明这次冷流降雪的水汽来源,不像通常内陆的降雪一样,后者多来自孟加拉湾或南海的暖湿气流输送,而这次却是来自渤海暖海面本身。

从1000 hPa的水汽通量散度(图4b)图上看

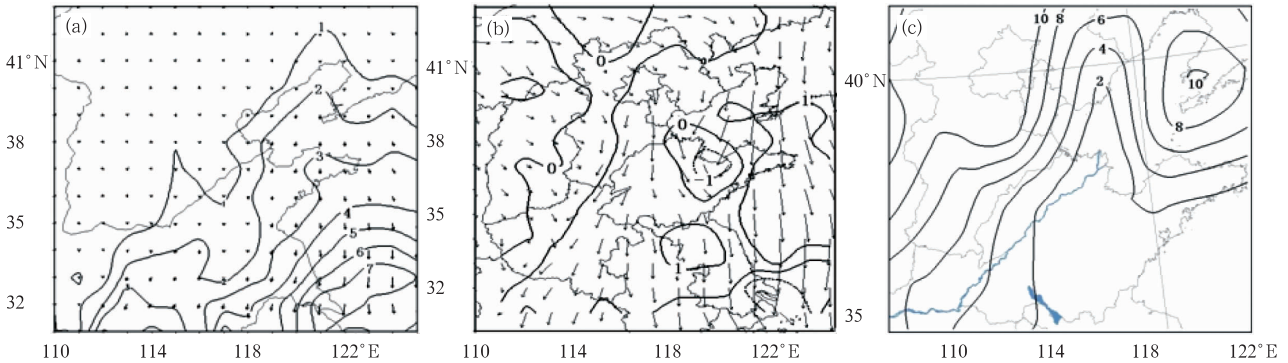


图4 2011年12月8日08时925 hPa水汽通量(a,单位: $\text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)、1000 hPa水汽通量散度(b,单位: $10^{-7} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)与12月7日20时925 hPa温度露点差(c,单位: $^{\circ}\text{C}$)

Fig. 4 Water vapor flux (unit: $\text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) at 925 hPa and water vapor flux divergence (b, unit: $10^{-7} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) at 1000 hPa at 08:00 BT 8 December and depression of dew point (c, unit: $^{\circ}\text{C}$) at 925 hPa at 20:00 BT 7 December 2011

到,莱州湾及其附近的海域存在着水汽辐合,且在莱州湾西岸与南岸有 $-1 \times 10^{-7} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 的辐合中心,尽管辐合的尺度小,但也说明此地水汽条件要优于其他区域,雪量自然也会更大些。没有充分的水汽供应,仅靠暖海面提供水汽,也预示着冷流降雪的量不至于太大,维持的时间不会太长。

分析此次过程的温度露点差可以发现,在7日20时925 hPa(图4c)图上,在 120°E 以西的渤海海面的大部地区温度露点差 $\leq 4^{\circ}\text{C}$,其中莱州湾西部及其北部海面的温度露点差 $\leq 2^{\circ}\text{C}$,而山东半岛北部海面上的温度露点差 $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 。说明在这次海效应降雪过程当中,莱州湾及其西部海面的水汽条件优于其

东部的。特别是莱州湾附近,水汽已达到饱和,在适时的背景场下,就会产生降水。低层水汽的充足也是此地降雪量大于其他地区的一个原因。

4.2 热力特征分析

4.2.1 冷空气强度

李刚等(2007)总结:山东半岛北部发生强冷流降雪当天850 hPa的温度12月要小于或等于 -12°C 。在这次莱州湾西部的冷流降雪中(图2c),莱州湾沿岸及山东半岛北部,12月8日08时850 hPa的温度均达到了 -12°C 的预报指标。说明在冷空气强度上,半岛北部的温度指标适用于莱州湾西

部。

4.2.2 层结特征

为了分析此次海效应降雪中的层结情况,绘制了沿河口到山东半岛北部,即沿 38°N 的垂直剖面(图 5a),从图中可以看到在 119°N 附近 850 hPa 以

下相当位温随高度减小,即在这个区域存在着层结不稳定,这个位置正是莱州湾所在区域,除此之外,其他区域均为稳定层结,可见不稳定层结的区域很窄,且高度不高,属于浅层对流。

从温度场中也可看到(图 5a),在 119°N 附近

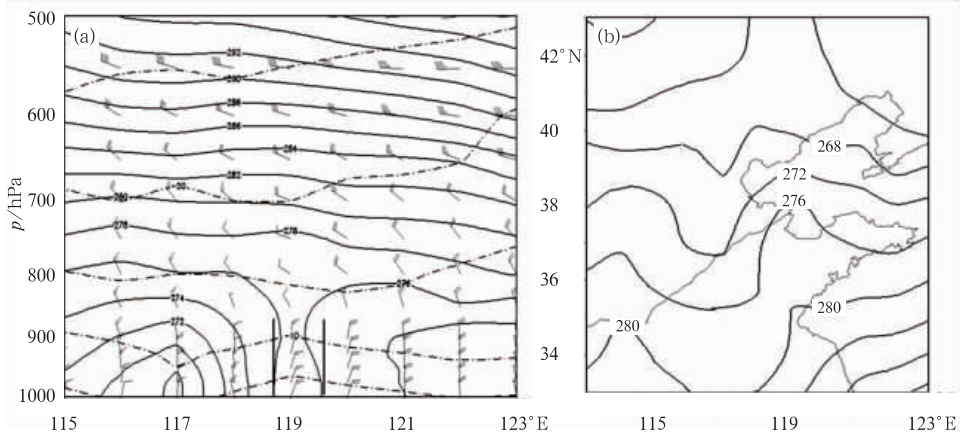


图 5 2011 年 12 月 8 日 08 时沿 38°N 垂直剖面(a)及 925 hPa 的相当位温(b,单位:K)

(a, 实线,相当位温;K;点划线,温度;°C;竖线表示层结不稳定区域)

Fig. 5 Vertical cross sections along 38°N (a) and equivalent potential temperature at 925 hPa (b) (unit:K) at 08:00 BT 8 December 2011

(a, solid line is equivalent potential temperature (unit:K) dotted line is temperature line, unit: °C; vertical line is the area of unstable stratification)

900 hPa 以下温度场为一个暖脊,其上为一冷槽,垂直结构表现为下暖上冷,而其东西两侧上下均为冷槽控制。很显然此次过程中半岛北部(120°~123°E)的层结条件不及莱州湾。

结合 925 hPa 相当位温场(图 5b)可以看出,相当位温在莱州湾区域表现为一个 276 K 的暖舌,强降雪区正出现在这个暖舌区域。这点与杨成芳(2010)总结的在山东半岛北部发生强降雪时相当位温暖舌区在半岛北部沿海不同。

4.2.3 海气温差

研究表明(杨成芳,2010),山东半岛的冷流降雪与渤海海面向大气底层输送感热输送有密切的关系,感热越大,降雪的几率越大,而海面向大气输送感热的多少,与海气温差成正比。为了分析此次过程海气温差的情况,选取渤海平台观测站

(39.12°N、120.35°E)的实况观测温度与此点 850 hPa 高度上的温度进行对比(表 1)。从表 1 中可以看出,8 日 02 时, $T - T_{850}$ 的温差在 11°C,05 时随着冷空气的入侵,850 hPa 和海面的温度均有所下降,但是温差保持不变。08 时,850 hPa 的温度下降到 -16°C,海面的温度为 -4°C,二者的温差达到 12°C。在 05—08 时,降雪开始,并随着海气温差的加大降雪加大。这种温差维持到 11 时,而降雪也多集中在这个时段。14 时,海气温差开始缩小到 10°C,降雪也趋于停止。这也说明,渤海海面的海气温差与降雪有很好的对应关系,海气温差增大时,降雪开始,海气温差减小时,降雪趋于结束。在本次过程中,海气温差在 12°C 时产生降雪,这点与杨成芳(2010)总结的半岛北部的海效应降雪中,海气温差多在 9~11°C 不同。

表 1 2011 年 12 月 8 日 02—14 时渤海海面(39.12°N、120.35°E)的海气温差(单位:°C)

Table 1 Air-sea temperature difference on Bohai Sea at 02:00—14:00 BT 8 December 2011 (unit: °C)

	8 日 02 时	8 日 05 时	8 日 08 时	8 日 11 时	8 日 14 时
T_{850}	-12	-14	-16	-16	-15
$T_{海面}$	-1	-3	-4	-4	-5
$T - T_{850}$	11	11	12	12	10

为了定量说明渤海海面向大气输送热量的多少,利用感热通量和潜热通量的计算式(1)和(2)(Fainall et al,1996):

$$Q_s = \rho_a C_{pa} C_h (T_s - T_a) U_{10} \quad (1)$$

$$Q_l = \rho_a L_e C_e (q_s - q_a) U_{10} \quad (2)$$

式中, Q_s 为感热通量, Q_l 为潜热通量, ρ_a 为空气密度, C_{pa} 为空气定压比热, L_e 为水汽蒸发潜热, T_s 为海表温度, T_a 为气温, q_s 为海气界面处湿空气比湿, q_a 为10 m处湿空气比湿, U_{10} 为距海表面10 m层的水平风速, C_h 为热量交换系数, C_e 为水汽交换系数。将式(1)和(2)的计算结果绘制成图6。从图6中看出,在此次海效应降雪中,感热通量比潜热通量向大气输送的热量多得多,但二者变化趋势是一致的。均在7日14时开始直线上升,8日02时达到极值,此时感热通量为 $189.91 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,潜热通量为 $35.77 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,正是因为暖海面向大气输送了巨大的热通量,才造成此地大气层结的不稳定性,为强降雪的发生提供了能量。8日05时降雪开始后,能量释放,感热通量与潜热通量开始下降,下降一直持续到降雪结束。在整个过程中,感热通量比潜热通量变化剧烈。通过以上分析,说明在降雪发生之前有能量的输送与积聚过程,随着降雪的发生,能量开始释放,当热通量达到低值时,降雪结束。

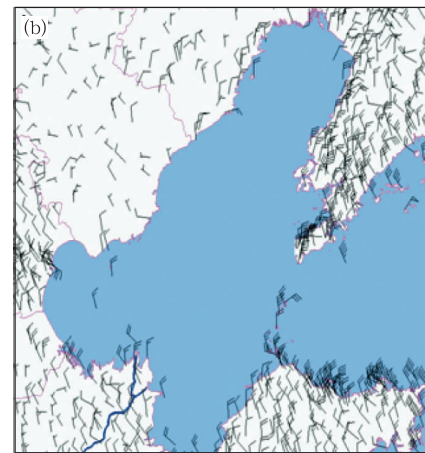
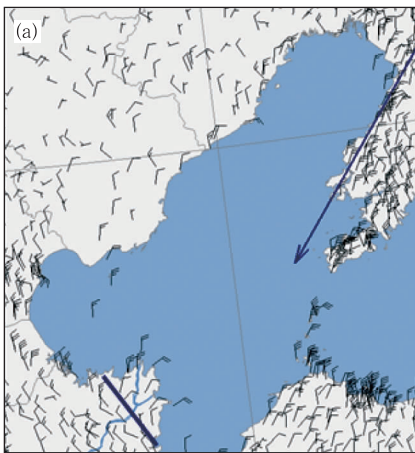


图7 2011年12月8日08时(a)与17时(b)环渤海自动站风场

(箭头:急流方向,短实线:切变线位置)

Fig. 7 Automatic weather station wind field in Bohai Sea at 08:00 (a) and at 17:00 BT (b) 8 December 2011

(arrow: jet stream direction, short solid line is shear line)

地看到岸边有一个东北风与西北风的切变线,这个切变线自8日04时就已经存在,只是随着时间的推移,越来越明显。切变线的存在对此地的不稳定层

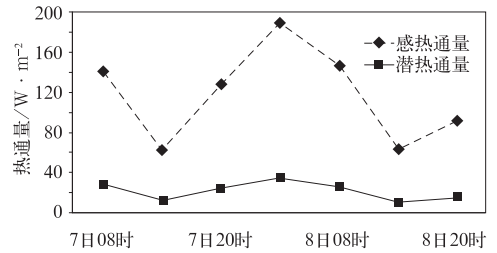


图6 渤海中部(39.12°N,120.35°E)热通量随时间的变化

Fig. 6 Simulated heat flux in the central Bohai Sea (39.12°N,120.35°E)

4.3 动力特征分析

4.3.1 水平风场

由于地面图上中心位于蒙古国的冷高压,长轴呈东西向,所以渤海附近的等压线呈东北—西南向。从加密的环渤海自动站风场中可以看出,7日白天辽宁鞍山以南到渤海北岸一直吹东北风,辽东半岛西岸也是东北风,并且随着时间的推移,东北风呈加大的趋势。8日04时,已发展成风速 $\geq 12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的东北风急流。这股强劲的东北气流经过暖湿的渤海海面正好在莱州湾西岸辐合。由于下垫面的差异,陆上风速显著减小。8日08时(图7a)可以清楚

结能量的释放起到了很好的触发作用,而此时也正是莱州湾西部大雪纷飞的时候。而山东半岛北部自8日04时开始一直吹北—北北西风,虽然风速也都

达到了6级风,但是与其产生强降雪时需要的西北风不同,这也许就是此地没有产生降雪的原因。8日14时后,莱州湾西岸的降雪结束,主降雪区转到山东半岛。从17时(图7b)的自动站风场中可以看出,莱州湾西岸已转为西北风,辽东半岛西岸东北风急流消失,且有些站点的风向也转为西北风,山东半岛北部的风也由原来的北风或北西北风转为西北风,风速增大到6~8级,这时山东半岛北部已开始降雪。综上所述可知,莱州湾西岸产生降雪时,地面为东北风,而山东半岛北部产生降雪时,地面为西北风。

4.3.2 垂直速度分析

为了分析莱州湾西岸垂直速度的分布情况,绘制了图8。从图8可以看出,40°N以北都是下沉气流,而37°~38°N之间,即莱州湾区域,750 hPa以下存在着上升运动,上升速度中心在900 hPa附近,强度达 $-1.5 \times 10^{-3} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-1}$,这种低层强的上升运动把水汽、能量向上输送,为本地降雪提供了有利的动力条件。

从风场上看,37°~38°N之间,900 hPa以下是东北风,以上为西北风,而40°N以北和37°N以南上下均为北风或西北风,可见在莱州湾西岸存在着浅层的东北风与北风或西北风的交界面。综上所述,莱州湾西岸产生冷流降雪有利的风场结构为900 hPa以下为东北风,以上为西北风,这与山东半岛北部产生冷流降雪时高低空风场均要求西北风不同(杨成芳等,2007)。

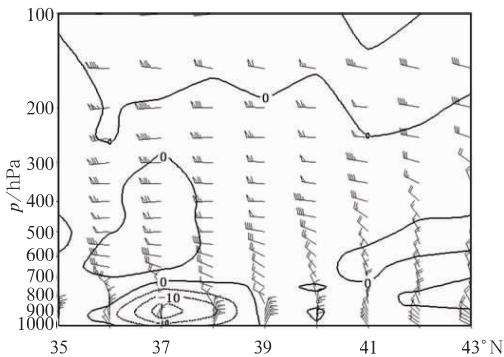


图8 2011年12月8日08时垂直速度沿119°E垂直剖面(单位: $10^{-4} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig. 8 Vertical velocity profiles along 119° E (unit: $10^{-4} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-1}$) at 08:00 BT 8 December 2011

5 结论

此次莱州湾西岸出现的强海效应降雪过程是在6 h前刚刚结束了一场暖区降雨的过程后出现的,低层的水汽条件要优于单纯的海效应降雪过程。它

主要表现为以下特征:

(1) 高空阻塞高压崩溃,横槽转竖,冷空气大举南下,地面上蒙古国境内长轴呈东西向的超强冷高压,与我国东部沿海的低压形成鲜明对比,二者之间存在强的气压梯度,等压线呈东北—西南向,致使近地层持续吹东北风且风大,冷空气势力强。

(2) 从MODIS云图中可以看出,产生海效应降雪的云较低,在海面上排列成一条条顺气流方向的云线,云的个体呈细胞状云型。靠近陆地时,云层加厚,云的走向发生偏转,多为积云性层积云。

(3) 从物理量场诊断中可以看出,发生海效应降雪时,莱州湾区域对流层低层存在着上升运动,低层水汽辐合中心、不稳定层结和较大的海气温差。低层风场切变线的存在,触发了不稳定能量的释放,产生了此次降雪过程。

(4) 本次莱州湾西岸的海效应降雪过程,无论是动力条件、热力条件还是水汽分布,有利于降雪的物理量分布都集中在900 hPa以下。这点说明其与山东半岛北部的海效应降雪同属于浅对流降雪。

参考文献

- 曹钢锋,张善军,朱官忠,等. 1988. 山东天气分析与预报. 北京:气象出版社,292-293.
- 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):182-187.
- 陈渭民. 2010. 卫星气象学. 北京:气象出版社,224-226.
- 李刚,党英娜,袁海豹. 2007. 烟台冷流强降雪天气预报指标分析. 山东气象,27(3):24-26.
- 李建华,崔宜少,单宝臣,等. 2007. 山东半岛低空冷流降雪分析研究. 气象,33(5):49-55.
- 林曲凤,吴增茂,梁玉海,等. 2006. 山东半岛一次强冷流降雪过程的中尺度特征分析. 中国海洋大学学报,36(6):908-914.
- 杨成芳. 2010. 渤海海效应暴雪的三维热力结构特征. 中国海洋大学学报,40(2):17-27.
- 杨成芳,李泽椿,李静,等. 2008. 山东半岛一次持续性强冷流降雪过程的成因分析. 高原气象,27(2):442-450.
- 杨成芳,周雪松,王业宏. 2007. 山东半岛冷流降雪的气候特征及其前兆信号. 气象,33(8):76-82.
- 杨晓霞,吴炜,王明波,等. 2012. 山东省再次暴雪天气的对比分析. 气象,38(7):868-876.
- 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以云微物理特征分析. 气象,39(8):955-964.
- 于志良. 1997. 海-气感热输送在冷流降雪形成中的作用. 海洋预报,14(1):17-24.
- 朱乾根,林锦瑞,寿绍文,等. 2007. 天气学原理和方法. 北京:气象出版社,284-285.
- Fairall C W, Bradley E F, Rogers D P et al. 1996. Bulk Parameterization of Air-Sea Fluxes for Tropical Ocean Global Atmosphere Coupled Ocean-Atmosphere Response Experiment. J Geo Research, 101:3747-3764.