

一次由海岸锋引发山东半岛暴雪过程的研究

黄翠银¹ 沈新勇¹ 孙建华² 齐琳琳³

1 南京信息工程大学大气科学学院, 南京 210044

2 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

3 空军装备研究院航空气象防化研究所, 北京 100085

摘要 2005年12月3~21日山东半岛发生了持续性强降雪。对降雪期间持续最长一次降雪过程(12月11~15日)的发生、发展机制进行了分析,结果表明:降雪前后从东北到山东对流层中层分别有冷涡和横槽存在。此次过程中对流层低层有冷空气入侵,属于层云降雪。700 hPa低槽是降雪的主要触发机制。中尺度海岸锋形成并维持较长时间,与海岸锋环流相伴随的上升运动对于降雪的局地增强有重要作用。渤海海面是降雪期间水汽的主要源地,冷锋后部的强偏北风有利于将渤海的水汽输送到山东半岛上空。另外,对此次山东半岛海岸锋暴雪天气与2008年初南方准静止锋雨雪、冰冻天气的特点作了比较。

关键词 暴雪 冷涡 海岸锋 水汽来源

文章编号 1006-9585 (2008) 04-0567-17 **中图分类号** P448 **文献标识码** A

Analysis of Coastal Front Heavy Snowfall in Shandong Peninsula

HUANG Cui-Yin¹, SHEN Xin-Yong¹, SUN Jian-Hua², and QI Lin-Lin³

1 School of Atmospheric Sciences, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

2 Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

3 Institute of Aviation Weather, Air Force Academy of Arming, Beijing 100085

Abstract Five snowfall processes occurred in Shandong Peninsula during 3 - 21 December 2005, the third snowfall process (from 11 to 15 December) was the longest and relatively stronger than the others. For better understanding of the snowfall process, the circulations and weather systems have been investigated. The conclusions are as follows: 1) The cold vortex and northeast-southwest oriented trough in middle troposphere influenced the Shandong Peninsula before and during the snowfall, respectively. The snowfall occurred when the cold air in lower troposphere invaded to Shandong peninsula, and the trough at 700 hPa approached. 2) The value of TBB in satellite image was quite high, and there was stratus. The mesoscale coastal front formed and maintained for quite a long time during cold air invading to Shandong Peninsula, the ascending motion of coastal front produced mesoscale cloud systems, which caused local severe snowfall. 3) The calculation of moisture budget indicates that the water vapor was transported to the snowfall area from Bohai Sea in the lower troposphere and boundary layer. The strong northerly wind ahead the cold high pressure also transported the moisture in Bohai Sea to Shandong Peninsula after cold air invading. Finally, the comparison between the coastal front heavy rainfall in this case and quasi-stationary front heavy snowfall has been conducted.

Key words heavy snowfall, cold vortex, coastal front, water vapor source

收稿日期 2008-04-20 收到, 2008-05-19 收到修定稿

资助项目 国家自然科学基金资助项目 40605016、40620120437 和中国科学院大气物理研究所创新基金领域前沿重点项目 IAP07120

作者简介 黄翠银, 女, 1977年出生, 硕士研究生, 主要从事中尺度气象学和数值模拟研究。E-mail: njhcy7708@sina.com

1 引言

近年来, 极端天气气候事件频发, 对国民经济发展和人民生命财产安全构成严重威胁, 严重挑战现有的预报技术。2008 年初, 我国南方出现了持续性的低温、雨雪、冰冻灾害, 不少作者已对此作了研究^[1-5], 取得了新的认识。该次灾害主要集中在我国南方, 然而, 近年来我国北方的降雪, 尤其是暴雪也时有发生。它们与南方的雪灾有何不同, 应加以对比分析, 这不但对弄清北方暴雪灾害有帮助, 同时对于更深入地认识 2008 年初的南方雨雪冰冻灾害也是很有意义的。被列为 2005 年的十大天气气候事件之一的山东半岛有历史记录以来最强烈的连续暴风雪, 仅烟台、威海两市的过程累计降水量 (指纯雪融化为水后的降水量, 下同) 分别达到 80.3 和 88.5 mm, 是烟台市自 1961 年、威海市自 1959 年建站以来同期持续时间最长、降雪量最大的一次降雪过程。由于降雪持续时间长, 强度大, 且伴有剧烈降温和大风, 造成了城市交通状况恶化, 短途客车停运, 高速公路、机场关闭, 中小学多次停课, 给人民生活 and 工农业生产造成了严重影响。据统计, 雪灾共造成威海、烟台两市直接经济损失达 5 亿元左右。由于此次持续性降雪影响时间长, 受灾面积广。因此, 分析山东半岛异常强降雪的成因, 不仅对于提高持续性降雪的预报技术具有重要意义, 同时还可以为防灾减灾提供重要依据。

国外对于冬季暴风雪的天气学方面研究起步较早, 在暴风雪的触发、维持、加强和消亡机制等研究中取得了一定成果。研究认为, 欧美的暴风雪多与温带气旋发展登陆有关^[6-8], 日本降雪则多与低压系统的发展有关^[9]。而在与山东半岛有着相似地理位置的海岸、湖岸降雪研究中, Sanders^[10]的分析表明, 大尺度锋生强迫和湿对称不稳定是造成新英格兰 1981 年 12 月 5~6 日暴雪的主要原因。而高层锋生强迫则是触发 1989 年 1 月法戈地区暴雪产生的主要原因^[11]。北美大湖地区降雪的研究表明, 冬天冷空气经过暖水面时, 水温和气温之间的明显差距导致了大湖地区降雪量增加, 这种降雪产生在一定的水气温差、风向

风速和稳定度条件下^[12-14], 而且湖面的水汽通量输送对暴雪的产生至关重要^[15]。

我国对于降雪尤其是持续性降雪的研究则相对薄弱。20 世纪 70 年代末, 王文辉等^[16]对内蒙古自治区锡蒙“77·10”暴雪进行了天气学分析。朱爱民和寿绍文^[17]利用 Sawyer-Eliassen 锋面横向往次级环流方程计算诊断次级环流及其对暴雪的影响。王建忠和丁一汇^[18]讨论了湿对称不稳定在华北“86·11”暴雪雪带形成中的可能作用。2000 年后, 邓远平等^[19]和王文等^[20]对“96·1”高原暴雪进行了一系列研究。除暴雪外, 赵思雄和孙建华等^[21,22]还对“12·7”北京小雪大灾过程进行过研究, 揭示出降雪期间的边界层特征, 指出, 当华北地区大气中可降水量达 7 mm 以上就有产生降雪的可能。山东半岛 (图 1) 西部与内陆接壤, 其余三面环海, 北面为渤海, 东面和南面则毗邻黄海, 半岛 37.2°N 附近为东西走向的低山丘陵地带, 有 11 座山海拔高度在 500 m 以上, 其中最高者为昆嵛峰, 海拔为 922.8 m, 丘陵地带常成为降雪的分水岭。陆海温的差异、特殊的地理位置和地形地势等使得山东半岛降雪的时空分布不均匀。尽管针对山东半岛降雪也开展过一些气候统计和天气学分析等研究^[23-26], 但对山东半岛特殊的海岸锋降雪过程的研究不多。

相比于国外海岸附近降雪研究而言, 我们还有一定差距, 因此, 有必要加强海岸降雪的机理研究, 以便更有效地防范强降雪尤其是长时间强降雪造成的重大灾害。为了弄清本次山东半岛暴雪的成因, 其中的一些科学问题值得探讨, 包括为何强降雪只发生在山东半岛北部较小的范围内, 其附近地区为何只有微量降雪甚至无降雪? 为何降雪前期强中心位于烟台而中后期转移到文登? 为何降雪得以长时间维持? 以及本次降雪与 2008 年初我国南方雨雪冰冻灾害天气过程的异同等。本文将从以下几方面进行分析: 1) 降雪期间的环流形势和环境特征; 2) 降雪的水汽来源; 3) 影响降雪产生和维持的主要机制。考虑到文中所用资料的时空分辨率不高, 还难于对中小尺度系统进行详细分析, 因此, 以后还将结合数值模拟的结果进行深入分析。

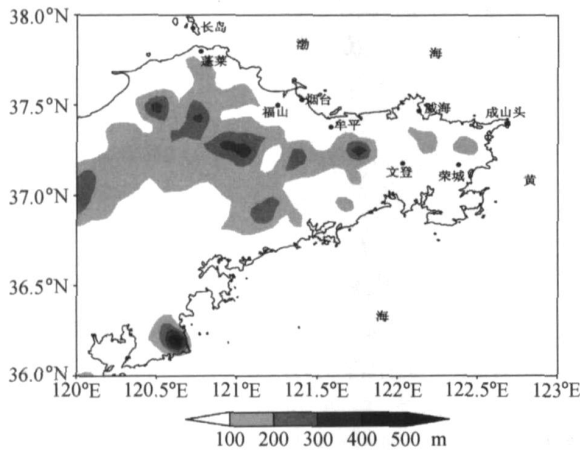


图1 山东半岛地形(阴影)和站点分布
Fig.1 The terrain (shaded) and distribution of stations on Shandong Peninsula

2 2005年12月山东半岛持续性降雪 的环流形势

2005年12月3~21日山东半岛的持续性降雪可以划分为5次明显降雪过程,分别为3~5日、6~7日、11~15日、16~17日和20~21日。按照24h降雪量级划分标准,降水量在7.5~15.0mm之间为大到暴雪,10.0mm以上(含10.0mm)为暴雪。5次降雪过程中(表1),除第4次降雪过程稍弱,最大量级为大到暴雪外,其余4次均出现了2站次以上的暴雪,且以11~15日的第3次降雪过程持续时间最长。

第1次降雪过程从12月3日白天持续到5日夜间。3日0时(世界时,下同),500hPa东亚地区环流为两槽一脊的形势,高压脊不断发展,原先处于蒙古国东部和我国东北地区的横槽转竖,槽后堆积的强冷空气开始向南爆发,影响我国东部地区,山东半岛开始出现降水。3日12时,500

表1 降雪过程降水量

Table 1 The precipitation amount of snowfall processes mm

降雪过程	福山	烟台	牟平	威海	成山头	文登	荣城
3~5日	11	12	12	24	12	27	33
6~7日	18	28	24	31	34	3	
11~15日	2	29	24	17	15	32	16
16~17日	3	5	4	8	4	3	4
20~21日	5	6	6	19	3	4	16

hPa 高空槽从东北地区中部经渤海西岸到冀鲁交界一带,而850hPa 高压前部切变线移过山东半岛,较地面冷锋过境晚6h左右。4日0时,500hPa 高空槽经山东半岛东移入海,辽宁省东部有低涡生成,低涡后有横槽,受高空槽和低涡东移影响,山东半岛北部地区出现了暴雪。5日早上,低涡东移到日本海上,横槽随之转竖东移,降雪结束。

第2次降雪过程从6日凌晨持续到7日晚上结束。5日12时,500hPa 上东亚地区仍维持两槽一脊的形势,脊的位置比第1次过程偏东,700hPa 低槽从河北省移进山东省境内后,降雪开始。6日12时,东北北部地区为低涡,850hPa 有短波槽东移,山东半岛东北部的成山头与大连之间存在明显风切变,受高空短波槽影响,降雪持续。7日0时,中纬低槽移至东北冷涡南侧,在山东半岛西部维持,7日18时,东北冷涡原地发展,中纬低槽移出山东半岛,降雪过程结束。此外,降雪过程中,地面始终受强冷高压脊控制,冷高逐渐减弱变性。第3次降雪过程从11日凌晨烟台开始,至15日才停止。此次过程是本文重点研究的天气过程,具体的天气形势将在下节中讨论。

第4次降雪过程从16日白天开始,17日下午完全停止。15日12时,东亚大槽在我国东部到日本一带,我国北方大部分地区处在槽后冷平流之中。降雪过程中山东省中部有小槽生成随低涡东移,低涡从对流层低层到高层向西倾斜,从16日12时至17日6时顺次移出山东半岛。此外,降雪开始之前地面已受冷空气控制,17日6时,有副冷锋过境。

第5次降雪过程从20日下午起持续到21日晚上停止。20日0时,500hPa 东亚地区环流为一槽一脊的形势。贝加尔湖东南侧到内蒙东部有冷涡存在,高空冷涡中心位于内蒙古东部。20日12时,冷涡东移南压,850hPa 槽线移到渤海和山东半岛一带,且冷锋过境,从而使得山东半岛再次出现较长时间的降雪。21日12时,中纬度低槽随冷涡移出山东半岛,降雪停止。

通过上述降雪过程的环流形势分析可以看出,2005年12月山东半岛持续性强降雪与大尺度环流形势密切相关。暴雪过程都伴随着高空槽和低涡东移,也有地面冷锋过境的影响,有利的环流

形势是造成持续性暴雪的关键。降雪过程中有一个共同的影响系统，就是低涡。另外，降雪过程中还有一个非常重要的中尺度影响系统——海岸锋，在 5 次降雪过程中，除了第 4 次过程未出现外，其余 4 次过程都有海岸锋生成并维持一段较长时间。本文由于篇幅所限，没有对每次过程中的海岸锋给出详细分析。由于第 3 次降雪过程在整个降雪期间具有一定代表性，下面将着重分析该降雪过程的环境特征及降雪相关机制，特别是着重讨论海岸锋的特征以及它和降雪的关系。

3 12 月 11~15 日降雪实况和环境特征分析

3.1 天气特征和降雪实况

图 2 是 2005 年 12 月 10~15 日山东半岛降雪过程日降水量分布，可以看出，降雪发生在烟台、牟平和文登一线以东地区，总降水量均大于 15 mm，强降雪区呈狭窄的西北—东南走向带状分布，烟台、牟平和文登总降水量分别达到 29、24 和 32 mm，降雪区的其他地区总降水量均 > 15 mm。12 日 0 时之前降雪中心位于烟台，而 12 日

0 时~14 日 0 时降雪中心位于文登，且降雪中心日降水量都达到了暴雪量级，14 日之后降雪中心再次位于烟台和牟平一带，但降雪强度已经明显减弱。

500 hPa 上 (图 3)，10 日 12 时，高压脊位于乌拉尔山一带，巴尔喀什湖以东到新疆北部有 5 360 gpm、-40 冷涡，东北地区北部有 5 160 gpm、-40 范围较小的冷涡，西风槽位于西北地区东部。11 日 0 时，500 hPa 上从我国内蒙古东北部到蒙古国中部为横槽。12 日 0 时，东北冷涡加强东南移动，横槽转竖，与西风槽叠加处于东北冷涡南侧，并随之东移出海，槽后冷空气从东北、西北两条路径迅速南下，使得山东半岛的降雪持续时间相对较长，降雪强度相对较强。13 日 0 时，西北冷涡减弱，在蒙古国中部至新疆中部有横槽生成。14 日 12 时，横槽南压东移出山东半岛，高压脊由东北西南向转成近似南北向，东亚大槽建立。850 hPa 上，10 日 12 时后山东半岛一直受冷高压控制。地面上，10 日 12 时，冷高压控制全国大部，冷高中心位于西伯利亚。11 日 18 时，冷高中心加强到最强，之后逐渐减弱。12 日 0 时，副冷锋在河北省北部—陕西省南部—甘肃

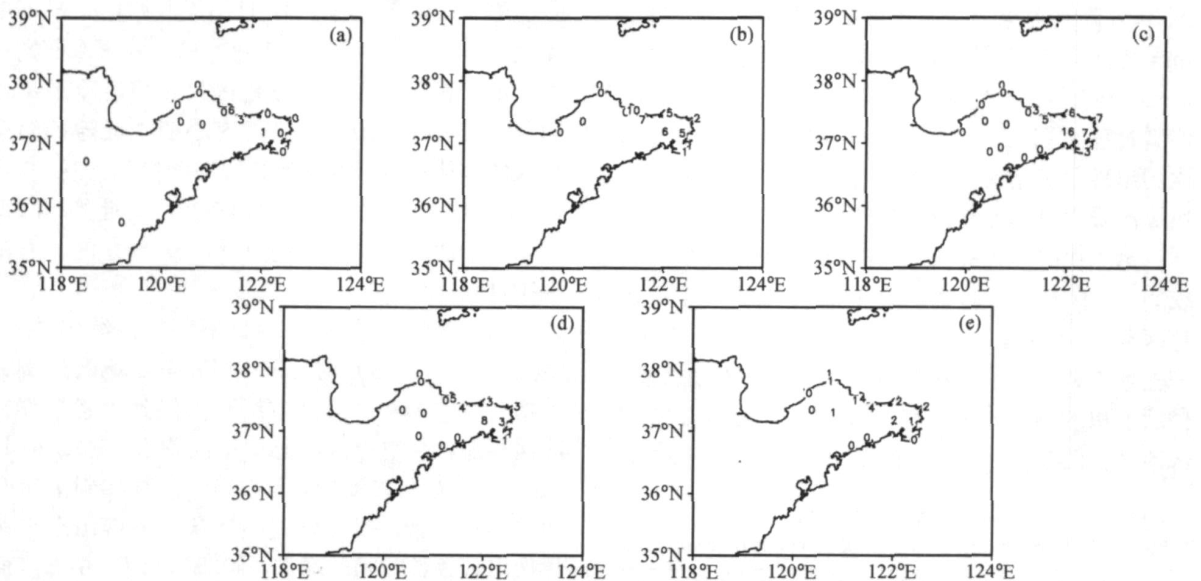


图 2 2005 年 12 月 10~15 日 24 h 降水量 (单位: mm): (a) 10 日 0 时~11 日 0 时; (b) 11 日 0 时~12 日 0 时; (c) 12 日 0 时~13 日 0 时; (d) 13 日 0 时~14 日 0 时; (e) 14 日 0 时~15 日 0 时

Fig. 2 The daily precipitation amount (units: mm) of 10—15 December, 2005: (a) 0000 UTC 10—0000 UTC 11 Dec; (b) 0000 UTC 11—0000 UTC 12 Dec; (c) 0000 UTC 12—0000 UTC 13 Dec; (d) 0000 UTC 13—0000 UTC 14 Dec; (e) 0000 UTC 14—0000 UTC 15 Dec

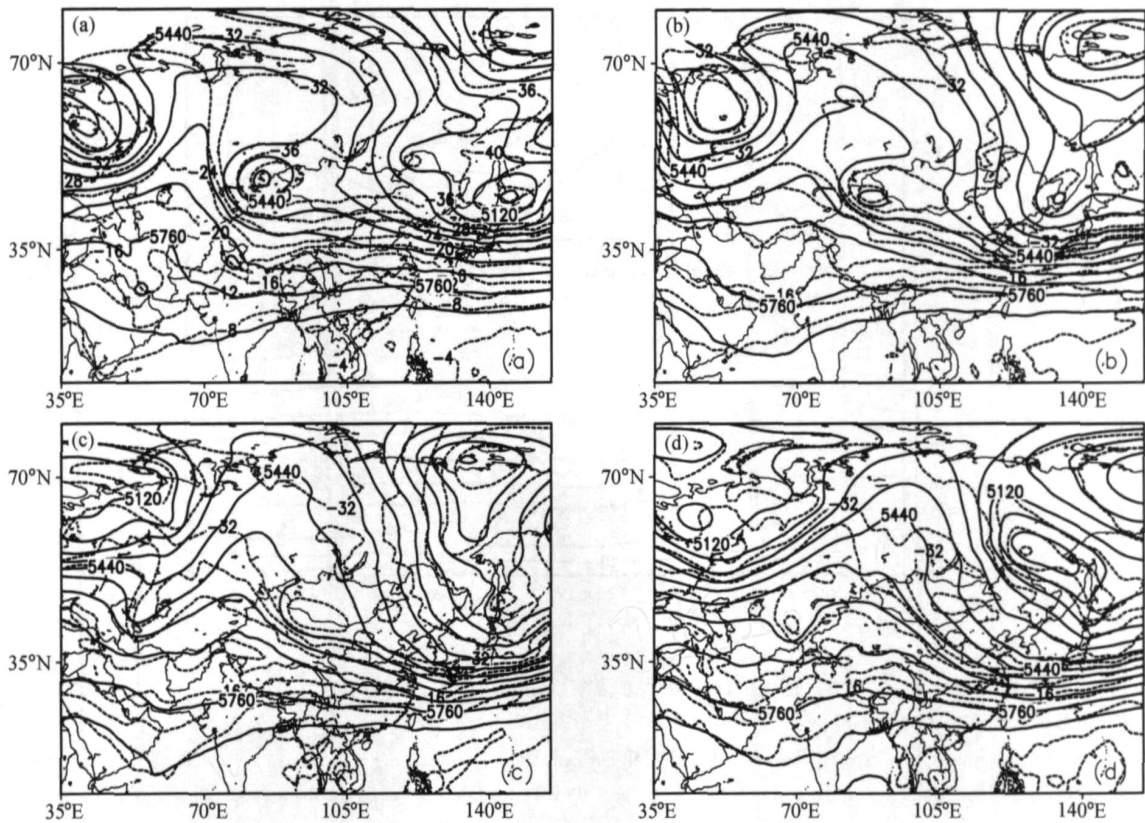


图3 2005年12月500 hPa高度场(实线,单位:gpm)和温度场(虚线,单位:):(a)10日12时;(b)12日0时;(c)13日0时;(d)14日12时

Fig. 3 Geopotential height (solid lines, units: gpm) and temperature (dashed lines, units:) at 500hPa on Dec 2005: (a) 1200 UTC 10; (b) 0000 UTC 12; (c) 0000 UTC 13; (d) 1200 UTC 14

省南部生成。14日18时,冷高中心位置少动,有小高压分裂南压到内蒙古自治区西部,受高空槽引导,副冷锋逐渐东南移出山东半岛,降雪逐渐停止。降雪过程中冷高中心强度一直很强,西北气流源源不断地为山东半岛输送冷空气,强冷平流使陆地温度持续比海洋偏低,海岸锋得以长时间维持。

3.2 局地环流特征

山东半岛降雪的形成及分布除与大尺度环流形势密切相关外,局地环境特征演变更值得关注。尽管成山头在这次降雪过程中的总降水量仅有15 mm,但作为降雪区唯一的一个探空站,对它的分析可以有助于我们了解降雪期间局地天气的演变情况。图4是12月10日0时~15日0时成山头风场和温度场随时间的演变分布。从图中可以看出,地面到850 hPa基本维持偏北风或西北风,这表明低层处于冷空气控制中。以-15

等温线的活动作参考,发现对流层低层不仅有两次明显的降温过程,而且还存在着风切变。第一次降温是在11日12时之后,风向从地面到850 hPa依次由西北风转为偏北风,-15等温线的活动跨度较大,13日0时之后温度有所回升。14日0时之后的第2次降温,虽然降温幅度没有第一次的强,但足以说明低层有冷空气的不断补充。此外,700 hPa风向由10日12时偏西风转变为11日0时西北风,这表明这个时间段内有低槽过境。结合降雪开始时段和天气形势演变可以认为,700 hPa低槽槽前的上升运动是引发了此次降雪的直接原因。500 hPa上风向变化表现为多次性。11日0时风向由西西北风变成偏西风,12日0时后转为西北风,13日0时后风向由强西北风转为西西北风,14日12时再次转成西北风。结合环流形势的分析可知,第1次风向转变对应着东北低涡冷槽和中纬度西风槽的叠加过境,第2次风向转

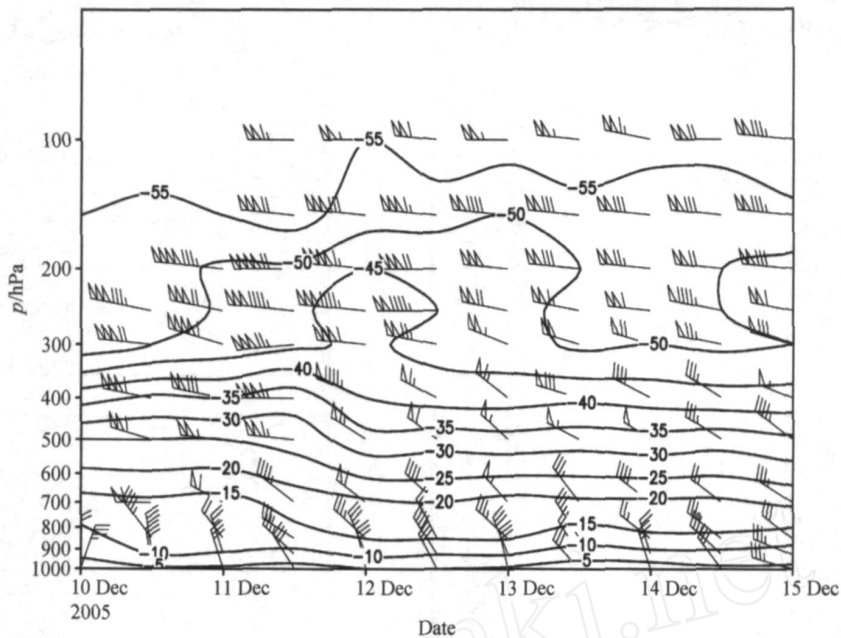


图4 2005年12月10日0时~15日0时成山头(54776)探空站的风场(风羽:满杆和半杆分别为4和2 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, 旗子为20 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)和温度(实线, 单位: $^{\circ}\text{C}$)的时间-高度变化

Fig. 4 Time-height cross section of wind (barb: half-barb, full barb and flag represent 2 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, 4 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ and 20 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, respectively) and temperature (solid line, units: $^{\circ}\text{C}$) from 0000 UTC 10 to 0000 UTC 15 Dec 2005 at Chengshantou sounding station (54776)

变则对应着横槽过境。对流层高层温度场的演变显示, 200 hPa上11日0时~13日12时山东半岛处于暖脊控制中, 而13日12时之后则处于槽区内, 这说明有冷空气的入侵。

此外, 成山头的探空曲线分布可以看到(图5), 10日12时降雪之前, 850~800 hPa间有强逆温区, 且地面到700 hPa风随高度逆转, 冷平流控制700 hPa以下高度。11日0时降雪开始后, 不仅逆温层底抬高, 厚度加深, 位于800~700 hPa间, 而且低层的温度露点差减小, 冷平流扩展到500 hPa附近。降雪期间探空曲线基本保持以上特征。14日12时, 整层高度上风向均随高度逆转, 仍处于冷平流控制中, 但降雪强度明显减弱; 15日0时降雪结束后, 逆温层消失, 低层温度露点差加大, 低层风向由偏北风转为西北风, 地面到500 hPa风随高度顺转, 转为暖平流控制。这说明, 降雪期间冷空气的势力范围逐渐扩展, 尽管只有较小的不稳定能量存在于对流层低层, 但由于逆温层的持续存在, 有利于不稳定能量的积累和缓慢释放, 使得降雪维持一定时间。对流层中低层转为暖平流控制后, 逆温层消失, 不稳定能量完全释放, 降雪结束。

从以上形势分析表明, 降雪开始前, 地面至对流层低层850 hPa已受南下的冷空气影响, 高空低槽从低层到高层逐渐东移, 降雪从700 hPa低槽的过境引起, 500 hPa东北冷涡和西北冷涡东移减弱形成的横槽对降雪的维持起重要作用。逆温层的持续使得降雪得以维持一定时间。

3.3 中尺度海岸锋分析

海岸锋是边界层内的一种中尺度锋, 常发生在海岸线附近, 和海岸线近似平行。海岸锋的形成既可以与天气尺度形势场有关, 还可以和海洋对冷空气爆发的非绝热加热以及海陆之间不同的摩擦效应相联系。同时, 沿海地区的地形和海岸线的形状等, 也可以对海岸锋的形成有一定的影响。考虑到山东半岛独特的地理位置可使得该地区常有海岸锋出现, 为此, 我们利用地面自动观测站资料对降雪期间山东半岛是否有海岸锋形成进行了分析。由于海上没有观测站, 而山东半岛东部的威海和成山头以及西部的长岛和蓬莱位于半岛北部海岸边, 在很大程度上可以反映海洋的影响, 所以我们重点关注了这4个站点和半岛内陆站点地面图中各气象要素的演变。

从图6中看到, 10日19时, 山东半岛西端海

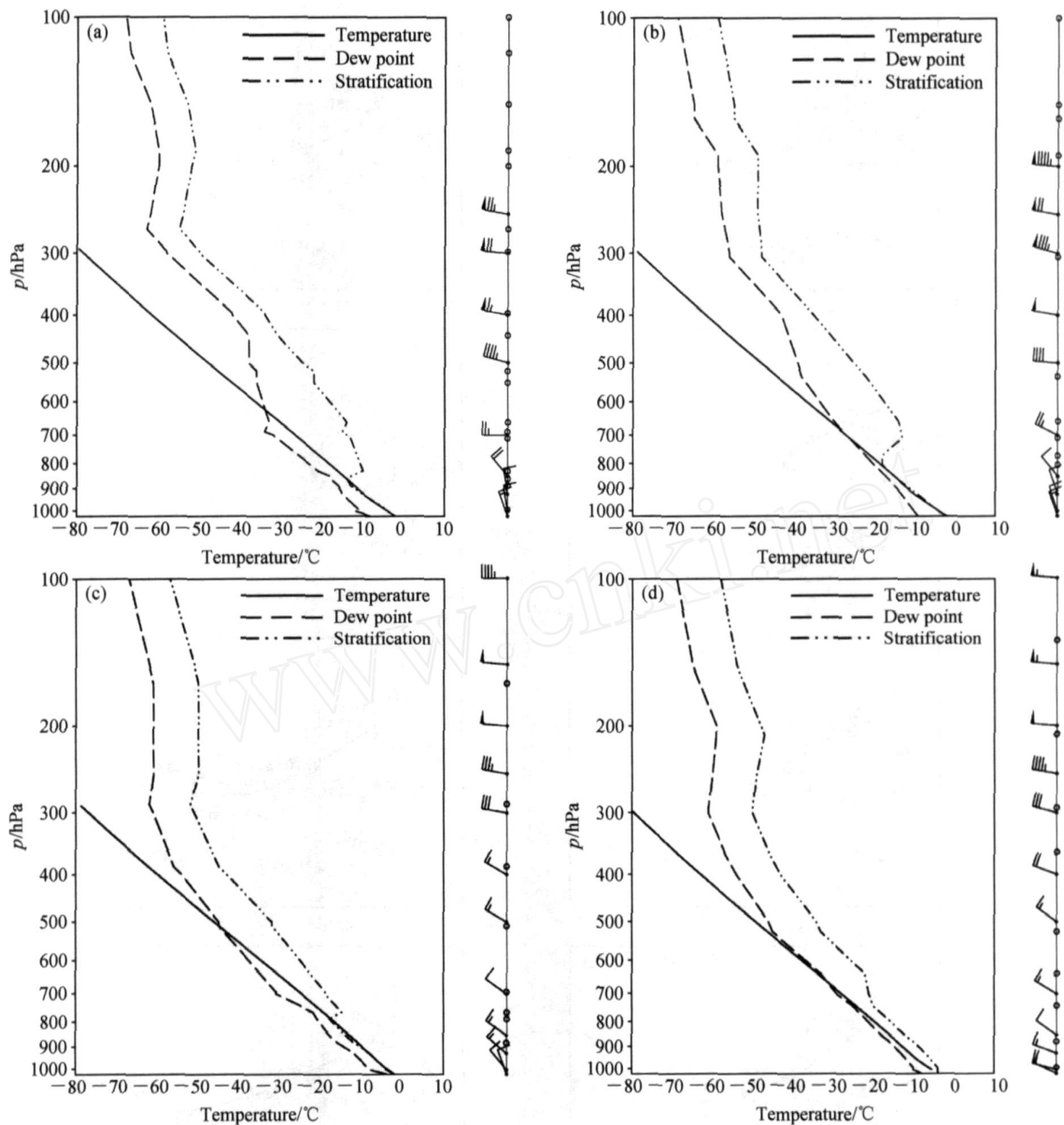


图5 2005年12月成山头探空曲线：(a) 10日12时；(b) 11日0时；(c) 14日12时；(d) 15日0时

Fig. 5 Composite sounding on T -log P diagrams on Dec 2005 at Chengshantou station: (a) 1200 UTC 10; (b) 0000 UTC 11; (c) 1200 UTC 14; (d) 0000 UTC 15

岸长岛和蓬莱温度都是 -2°C ，分别为 $8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的西北偏北风，距离海岸较远的内陆，福山和牟平气温为 -4°C ，比海岸低 2°C ，福山为 $4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的西风，牟平则是 $4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的西西北风；半岛东部海岸和内陆各站气象要素相差不大，气温相差很小，风向大体一致。而半岛西部海洋和陆地间有风向风速的辐合，存在气旋性风切变，气温差别较大，具有锋面特征。由此可以认为，降雪期间中尺度海岸锋在半岛西部生成，海岸锋

介于蓬莱和福山之间，从半岛最西端延伸到牟平。10日22时，文登站气温比其北侧海岸线附近威海站的低 2°C ，且文登是 $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的西风，而威海是 $4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的北风，两地的明显差异显示海岸锋延伸到文登一带。11日2时，太阳辐射加热后，陆地气温上升加快，海陆温差减小，10日3时，随着陆地温度的进一步升高，海陆之间气温差别进一步减小，热力环流减弱导致风向凌乱，气旋性风切变消失，海岸锋也随之减弱消失。因此，

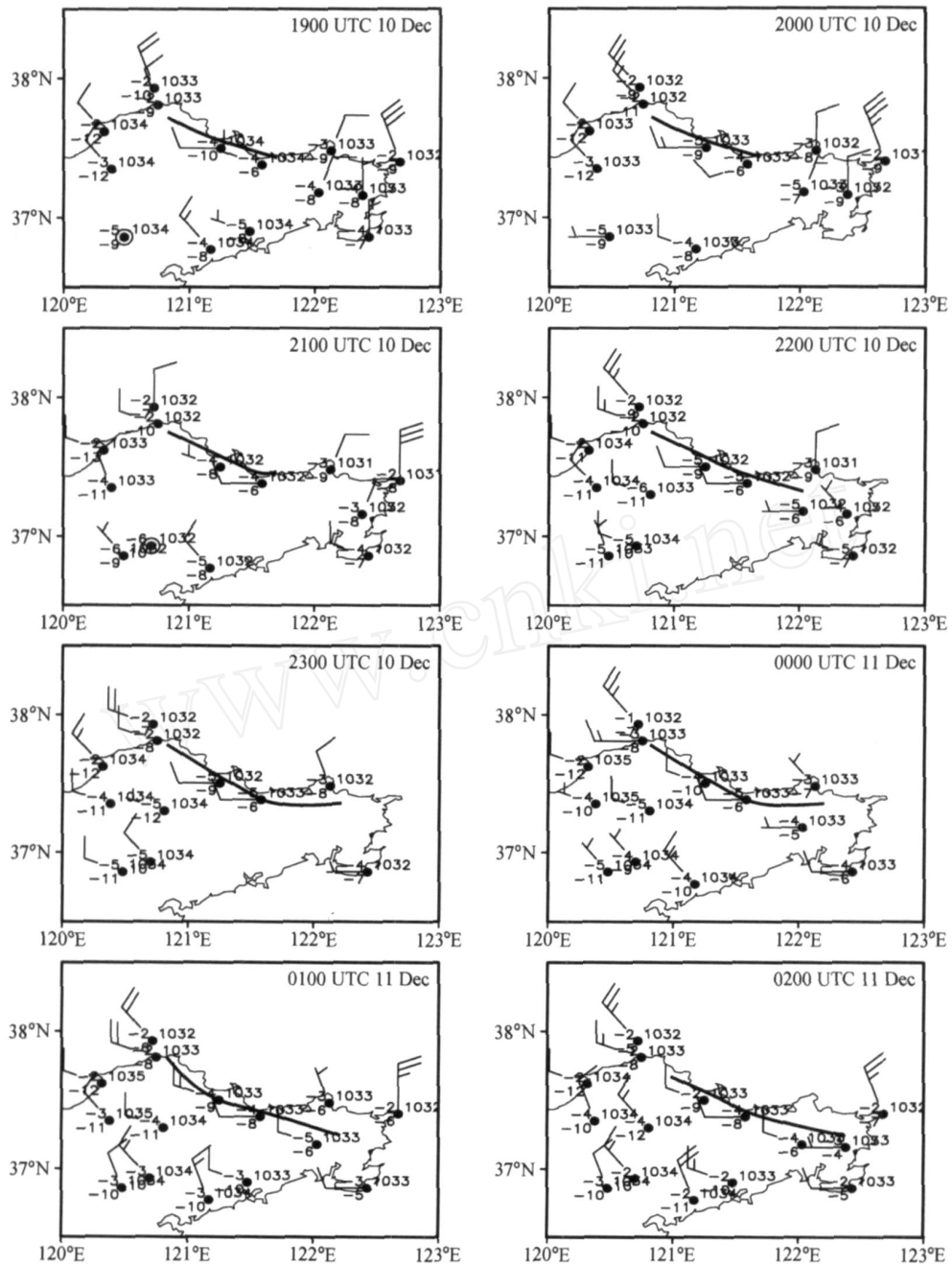


图6 2005年12月10日19时~11日2时自动观测站点气象要素的分布(温度、露点单位: $^{\circ}\text{C}$, 地面气压单位: hPa, 风速单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, 粗实线为海岸锋)

Fig. 6 The surface weather maps from the automatic meteorological stations during 1900 UTC 10—0200 UTC 11 Dec 2005. Temperature, dew-point temperature: $^{\circ}\text{C}$; surface pressure: hPa; wind speed: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, the bold solid line is coastal front

海岸锋从10日19时在半岛西部生成, 逐渐延伸到半岛中部的文登, 维持到11日2时后消失。相应时段内, 降雪仅出现在半岛中西部, 烟台降雪强度很大, 从降雪开始到11日0时的几小时内累计降水量就有6 mm, 达到12 h降雪量级中的

暴雪。

随着冷空气得以补充, 12日8时山东半岛东部再次出现锋面特征(图7), 海岸线附近的威海和成山头分别是8和 $14\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的西北风, 而内陆的文登和荣城站分别是 $5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的偏西风和2

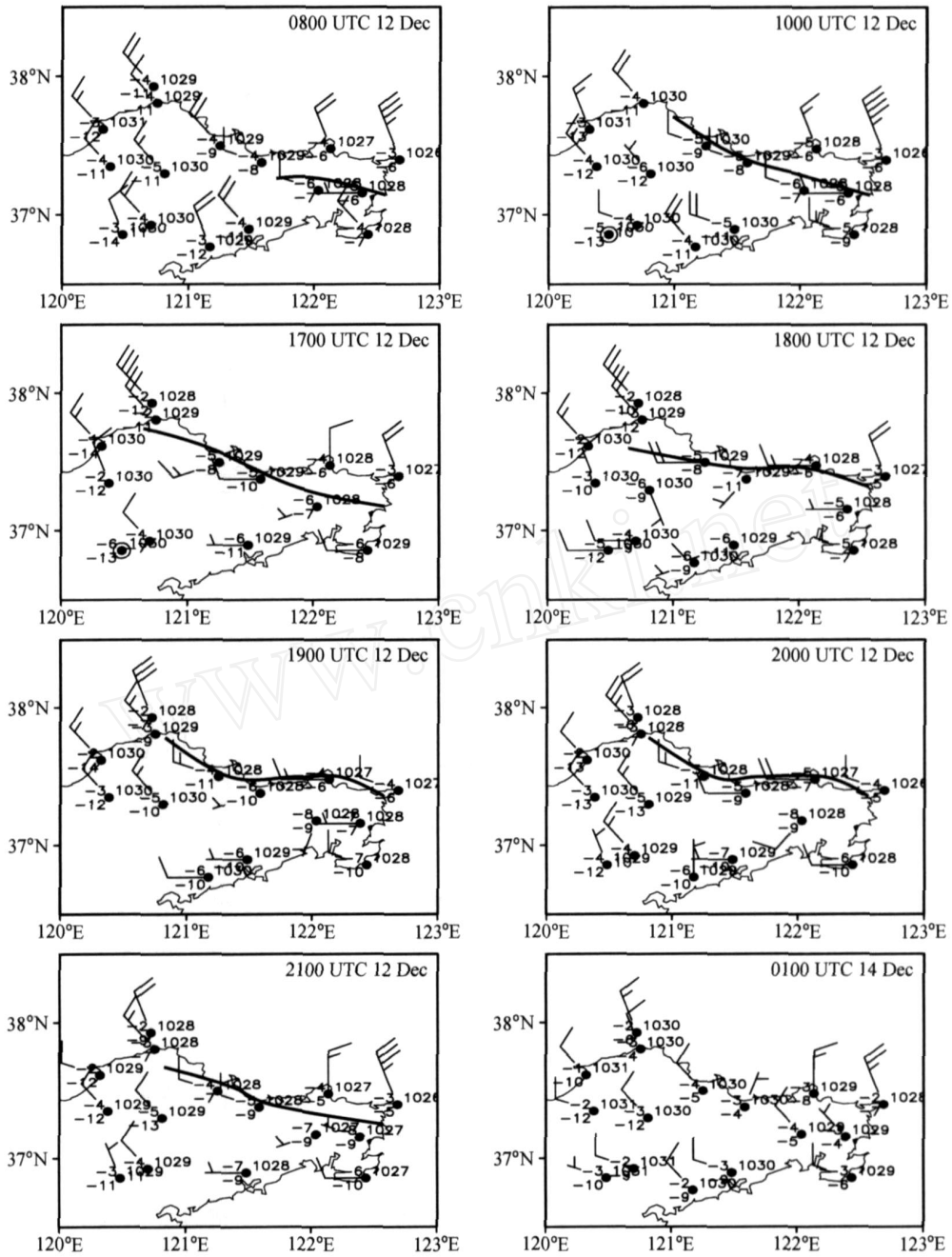


图7 同图6, 但为12日8时~14日1时

Fig. 7 Same as Fig. 6, but for 0800 UTC 12–0100 UTC 14 Dec 2005

$m \cdot s^{-1}$ 的西南风, 海岸气温平均比陆地高出 $2^{\circ}C$, 而气压则比陆地低 $1 hPa$ 左右, 由此可知海岸锋再次在半岛东岸生成。12 日 10 时, 蓬莱是 $8 m \cdot s^{-1}$ 的西北风, 福山和牟平站分别是 4 和 $5 m \cdot s^{-1}$ 的偏西风, 它们之间的温差都是 $1^{\circ}C$, 这表明海岸锋延伸到整个北岸。12 日 18 时~12 日 20 时, 威海由之前的偏北风转为偏西风, 成山头

转为西西北风, 12 日 21 时后, 两个站维持稳定的偏北风。海岸风向的变化可能与海陆非绝热加热特性不同, 与夜间陆地降温快使陆风加强有关, 由此分析, 12 日 18 时~13 日 0 时威海站出现 $6 h$ 降水量达 $4 mm$ 的强降雪, 与海岸锋在威海站之间来回摆动不无关系。把文登以东和牟平以西作为海岸锋东、西段来分析 (图略), 13 日 0 时~12

时受太阳辐射影响, 半岛西部海岸和内陆两侧温差减小, 气旋性风切变减弱, 半岛东部以上特征也稍有减弱, 但无论温差还是风的辐合都比西段明显得多, 即东段海岸锋的强度比西段的强。此时段内的降雪分布表明, 牟平仅有微量降雪, 烟台甚至几乎无降雪, 而强度相对大的海岸锋东段各站降雪明显, 尤其文登 12 h 降水量达到 7 mm, 属于 12 h 降雪量级划分的暴雪。13 日 10 时, 半岛西部风向风速辐合逐渐增强, 15 时后, 海岸和内陆间温差逐渐加大, 因而西段海岸锋强度增强, 半岛西部降雪相应明显增强, 13 日 12 时~14 日 0 时烟台、牟平 12 h 降水量分别为 6 和 4 mm。14 日 1 时后, 各地均逐渐转为偏北风, 气旋式风切变已不存在, 海陆间无明显温差, 海岸锋消失。

综上所述, 10 日 19 时~11 日 2 时, 中尺度海岸锋仅出现于在半岛西部至文登一带, 11 日 3 时后, 白天陆地的升温快使得中尺度海岸锋消失。但随着冷空气的不断补充, 12 日 8 时, 中尺度海岸锋再次生成, 并维持到 14 日 0 时。海岸锋的维持时段不仅与强降雪维持时段较为一致, 且海岸锋位置的摆动和强度的变化, 都会引起降雪落区和降雪强度的变化。这与 Marks 等^[27]的分析相一致, 即海岸锋不会产生新的降水区, 但海岸锋导致的中尺度环流可引起降水量的局地增强。

3.4 局地强降雪的中尺度云团

Marks 等^[27]的分析中还指出, 降水量局地增强机制可能是由海岸锋环流引起的低云所造成。为弄清持续性降雪期间出现的局地强降雪机制, 我们利用 FY2C 的 TBB (Temperature of Brightness Blackbody) 资料对海岸锋维持期间的云团演变进行了分析。考虑到冬季降雪和夏季降雨云系存在很大差别, 夏季对流发展强烈, TBB 最低值可达 -70 以下, 云顶伸展高度达 10 km。而冬季降雪时的 TBB 最低值很少出现 -40 以下, 云顶高度一般都在对流层中下层, 由于强降雪中心的烟台和文登所处经纬度分别为 (37.53°N , 121.40°E) 和 (37.18°N , 122.03°E), 因此, 取两站之间的 122°E 作 TBB 随时间-纬度的分布。

10 日 12 时~15 日 0 时有 5 个明显的中尺度云团发生发展 (图 8), 且云团 A 的 TBB 最低, 云团云顶高度在 11 日 0 时前后差别较大, A 系统

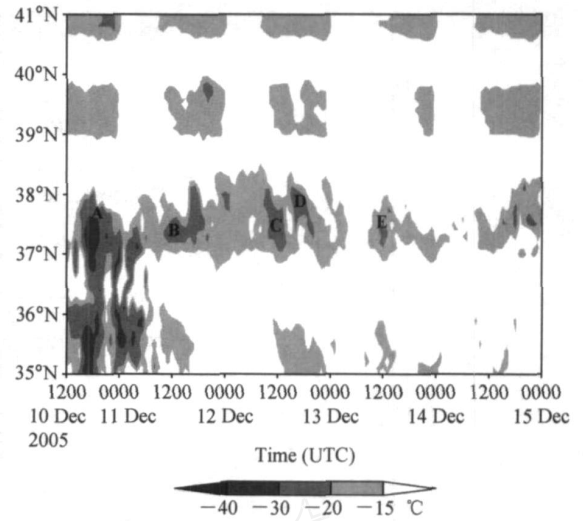


图 8 TBB 沿 122°E 的时间-纬度变化

Fig. 8 Time-latitude cross section of TBB along 122°E

的云顶高度在 450 hPa 左右。此时 700 hPa 低槽正在过境, 海岸锋处于山东半岛西端到文登一带。11 日 0 时后云系的 TBB 基本维持在 -15 左右, 云团 B、C、D、E 的 TBB 为 -20 。12 日 0 时前后云团 B 形成时, 700 hPa 低槽已经过境, 500 hPa 高空槽逐渐东移出境。12 日 0~13 日 0 时, 云团 C、D 出现在 500 hPa 东北冷涡和中纬低槽已经过境, 地面维持着中尺度海岸锋的天气形势下。13 日 0 时~14 日 0 时, 不仅 500 hPa 槽逐渐移近山东半岛, 且海岸锋西段经历了白天减弱及夜间增强的过程, 云团 E 正是出现在海岸锋西段逐渐增强的 13 日晚上。

此外, TBB 的水平分布图 (图略) 显示, 云团 A 的低值中心移动速度较快, 但结合降水量分布发现云团经过之处并无降雪, 由此说明云团 A 可能是 700 hPa 低槽过境引起的高云快速移动。11 日 12 时起, 半岛西部有南北向带状云系向东移动, 云带东部有 -21 的中尺度云团首先出现在半岛中部。11 日 13 时, 中尺度云团发展扩大, 另有两个中尺度云团在半岛西部和渤海生成, 11 日 14 时, 3 个云团发展合并成中尺度云团, 即云团 B。11 日 16 时云团发展达最强, 出现 -24 的低值中心, 其后云团慢慢减弱, 12 日 2 时, 中尺度云团消失。这一时段正是 500 hPa 冷涡与中纬度低槽合并过境时期。在此期间, 烟台处于云团内或其边缘, 牟平、文登和荣城则处于

云团南侧的 TBB 大梯度区，此时段内的降雪较强且较均匀，以上 4 个站点的降水量分别是 4、4、2 和 4 mm。

12 日 9 时，一中尺度云团位于山东半岛西岸的烟台、牟平一带，随着云团东移南压至半岛中东部，威海、文登和荣城都处于云团内；12 日 14 时后，云团先后出现北抬，发展成带状继续北抬；12 日 20 时又南压回到半岛中部。云带的摆动使得威海在 12 日 18 时位于云带南侧，而 20 时则位于云带北侧（图 9）。此阶段不仅对应着云团 C、D 的生成、发展，而且还与海岸锋在威海间南北

摆动时段相一致，所以可以说，海岸锋的摆动引起了云系的变化，并造成威海 12 日 18 时~13 日 0 时 4 mm 的降水量。

13 日 12 时，半岛东部又有一中心为 -21 的中尺度云团生成，即云团 E（图 10）。之后，云团逐渐演变成带状分布，主要位于半岛东部；13 日 17 时，近似东西向的带状云系演变成“L”形，而 -18 的低中心在缓慢西移中也合并到位于渤海至半岛西部“L”形云带中。14 日 2 时“L”形云带迅速减弱断裂。结合天气形势分析可知，13 日晚上西段海岸锋有一个逐渐增强的过

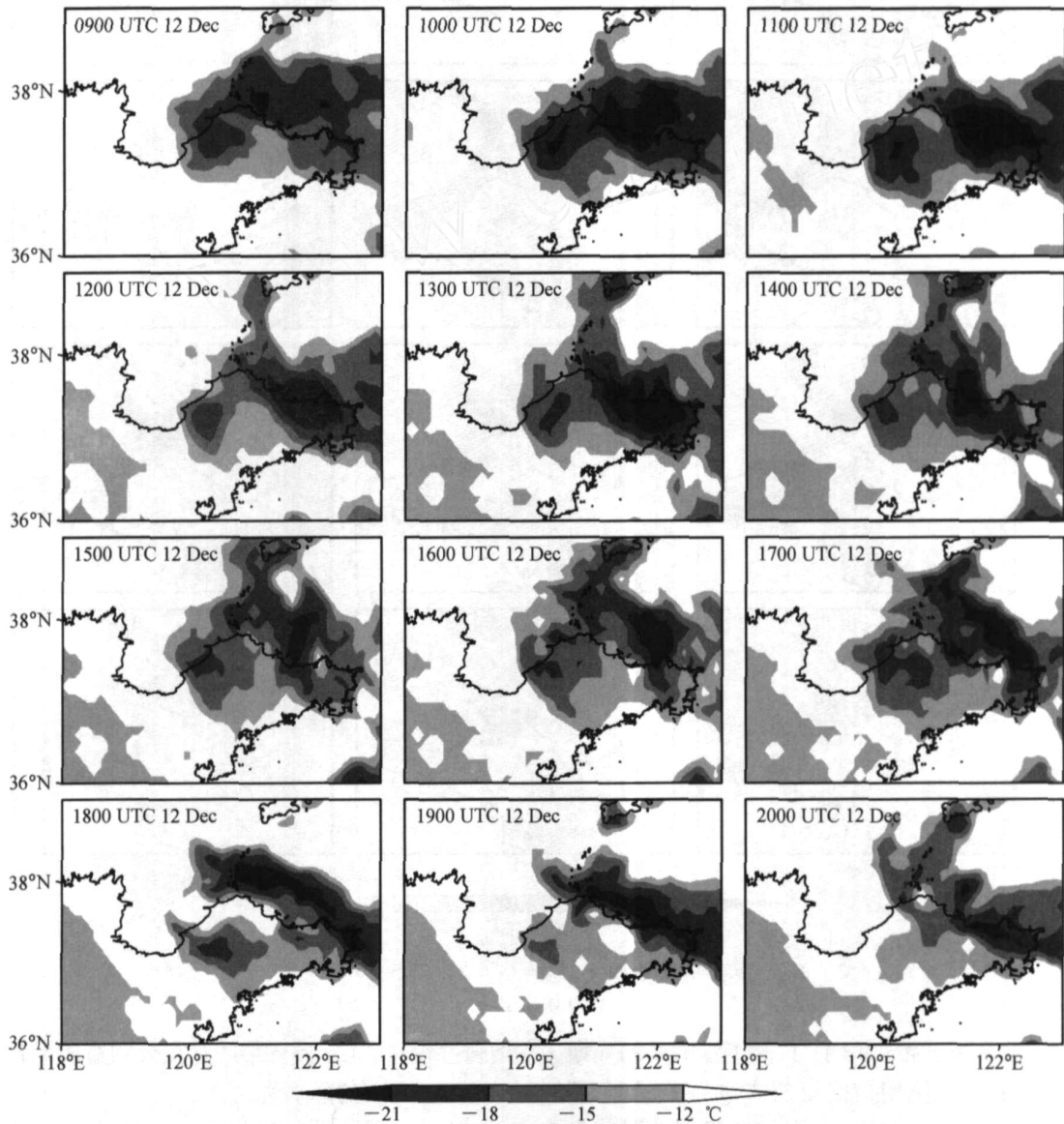


图 9 2005 年 12 月 12 日 9 时~12 日 20 时 TBB 分布

Fig. 9 The TBB from 0900 UTC 12 to 2000 UTC 12 Dec 2005

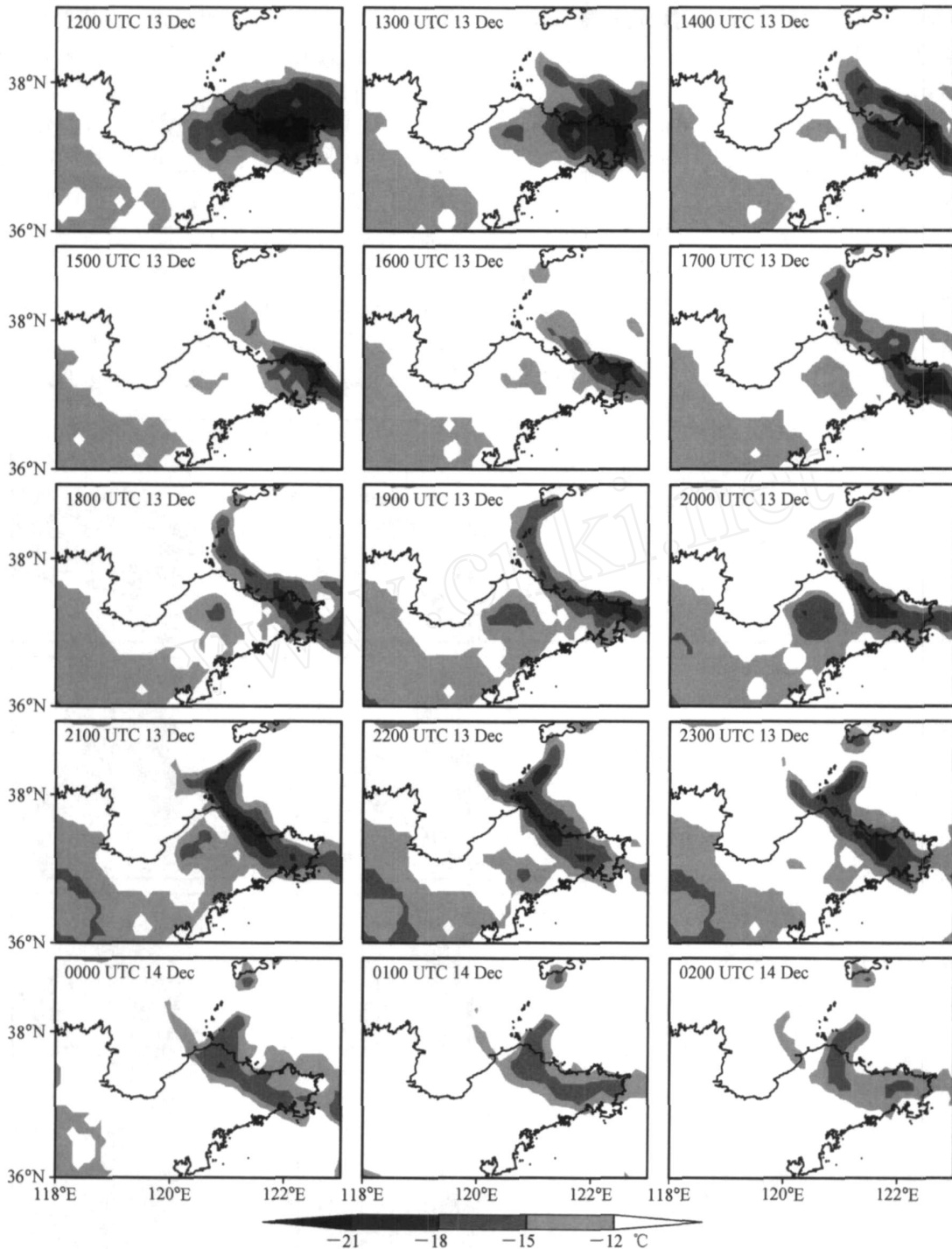


图 10 2005 年 12 月 13 日 12 时~14 日 2 时 TBB 分布

Fig. 10 The TBB from 1200 UTC 13 to 0200 UTC 14 Dec 2005

程, 云团演变为云带, 13 日 17 时后, 500 hPa 横槽与海岸锋相互作用, 使得云带加强形成“L”形, 而当海岸锋消失后, 云带维持机制减弱。由此可知, 当高低空天气系统相互配合时, 云带发展最强。13 日 12 时~14 日 0 时, 西段海岸锋的

增强过程和“L”形云带的存在分别造成烟台和牟平 6 和 4 mm 的降水量。

上述分析表明, 中尺度云团的形成、演变与中尺度海岸锋存在一定关联。海岸锋及其周围的上升、下沉垂直运动形成海岸锋环流, 引起云顶

高度较低的中尺度云系，为局地降雪增强提供了有利机制。

3.5 湿度和云水含量

山东半岛降雪范围比较小，只在 (37.17°N ~ 37.53°N, 121.40°E ~ 122.68°E) 的小范围内，而且有两个强降雪中心，12日0时之前降雪中心位于烟台，12日0时~14日0时降雪中心已经转移到文登，如果取区域的平均来分析物理量，即使经线和纬线上分别只取两三个格点，涵盖的范围仍将会过大而抹去降雪区物理量的特征。因此，本文中取 (38°N, 121°E) 格点代表烟台 (37.53°N, 121.40°E)，(37°N, 122°E) 格点代表文登 (37.18°N, 122.03°E) 来分析两个强降雪中心物理量的变化，揭示山东半岛降雪的环境特征。

图 11 为云水和相对湿度的时间-高度剖面。湿度场上，烟台和文登的共同点是：10日18时对流层中高层 400~350 hPa 有短暂的相对湿度大于 90% 的饱和区，大片的饱和区都是出现在 800 hPa 以下的对流层低层和边界层中，800 hPa 以上高度为相对湿度小于 40% 的干燥区。不同的是，降雪前的 10日12时，烟台低层饱和区已经存在，而文登接近 11日8时才出现饱和区，这与文登降雪

开始的时间一致，从这可以看出，对流层中高层的饱和区对降雪并无贡献。12日0时~14日0时，文登饱和区比烟台的深厚，而这一时期强降雪中心正在文登。

云水含量场上，对应于 10日18时对流层中高层的饱和区，文登出现大于 $5 \times 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的高值中心，而烟台的云水含量基本都是在对流层低层 800 hPa 以下，950 hPa 以上。云水含量大值中心各有 5 个（不包括文登 10日18时中高层的大值区），都是处于饱和区的顶部，最强中心文登比烟台稍小；两站大值中心出现时间一致，基本滞后于烟台散度场和垂直速度场强中心 6 h 左右（图略），出现这种情况可能的原因是，云水的形成，必须通过下层辐合上层辐散引起的上升运动把水汽从低层运送到饱和区顶部，水汽再凝结成云水需要一定的时间，所以云水含量大值区总是落后于前者。

值得探讨的是，11日0时之前降雪初期，烟台上下两个饱和区之间的 800~500 hPa 是极为干燥的区域，云水含量场上该区域数值也几乎为零，因而该区域应属于无云带，即低云和高云被无云区隔开。文登的资料显示对流层中高层的饱和区

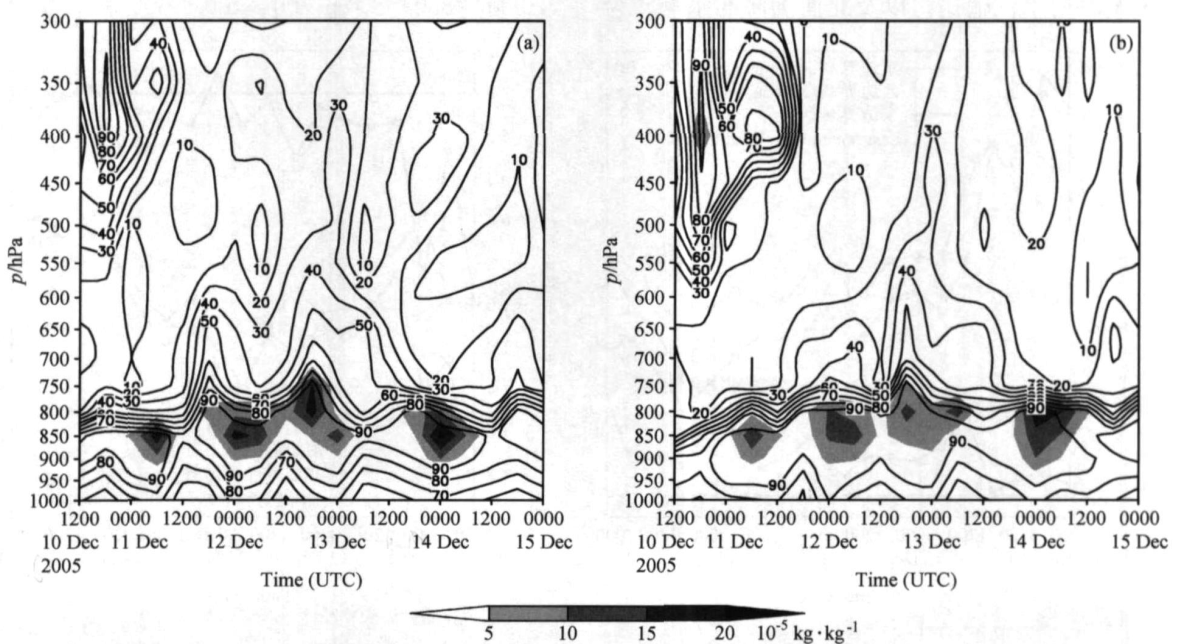


图 11 云水含量 (阴影) 和相对湿度 (实等值线, %) 的时间-高度变化: (a) (38°N, 121°E); (b) (37°N, 122°E)

Fig. 11 Time-height cross section of cloud water (shaded) and relative humidity (solid line, %) at (a) (38°N, 121°E) and (b) (37°N, 122°E)

并不产生降雪, 因此, 烟台 11 日 0 时之前的降雪可能也仅由低云产生, TBB 分析中云团 A 的云顶高度是高云的云顶高度, 实际降雪仍然和其余云团一样, 都是低云造成的。

通过以上天气形势、海岸锋和中尺度云团的分析表明, 本次过程低层冷空气已经入侵, 主要影响系统为低涡和横槽, 为冷流降雪, 在有利的天气形势下, 中尺度海岸锋及其伴随的中尺度云团加强了局地的降雪, 海岸锋环流形成的中尺度云团的云顶高度不高。

4 水汽来源及输送分析

降雪期间湿度场分析表明, 平均相对湿度在 80% 以上区域主要集中在山东半岛中东部及黄海北部一带 850 hPa 的低层, 随着高度的增加, 平均相对湿度迅速减小, 在 500 hPa 以上高层, 平均相对湿度低于 30%。这主要是半岛高层空气干冷, 而低层有水汽不断输送到山东半岛, 为山东半岛北部底层提供了较好的水汽条件。由于山东半岛三面环海, 水汽输送通道较多, 不仅可以有南方暖湿气流的远距离输送, 而且还可以有东、南面黄海的水汽输送, 以及北面渤海的水汽。为

明确降雪期间的水汽来源以及输送机制, 我们计算了涵盖整个山东半岛在内的 (36~38 N, 120~123 E) 区域的 4 个边界水汽收支情况。以向东和向北方向为正值, 所以西边界和南边界水汽通量 > 0 时为水汽输入, 东边界和北边界水汽通量 < 0 时为水汽输入, 东边界—西边界、北边界—南边界的水汽通量 < 0 为水汽辐合。图 12a 是 1 000~100 hPa 东西边界整层水汽收支, 可以看出, 西边界一直有水汽输入, 但东边界为水汽输出, 且东边界水汽输出量比西边界水汽输入量大, 即降雪过程中区域东西向为水汽辐散, 没有为降雪期间的水汽输送做贡献。图 12b 是 1 000~100 hPa 南北边界整层水汽收支, 北边界有水汽输入, 且输入量较大, 而南边界虽然毗邻黄海, 但一直都有水汽输出, 由于绝大部分时段内的水汽输出量都小于北边界的水汽输入量, 所以可以说, 区域南北向上除 13 日 0 时和 14 日 6 时为水汽弱辐散外, 均为水汽辐合。因此, 来自渤海的水汽从北边界不断地输送到降雪区域, 为降雪提供了充足的水汽。

为进一步研究水汽输送主要在哪些高度, 在明确水汽源地的基础上, 将 1 000~400 hPa 分成 1 000~850、850~700、700~500 和 500~400

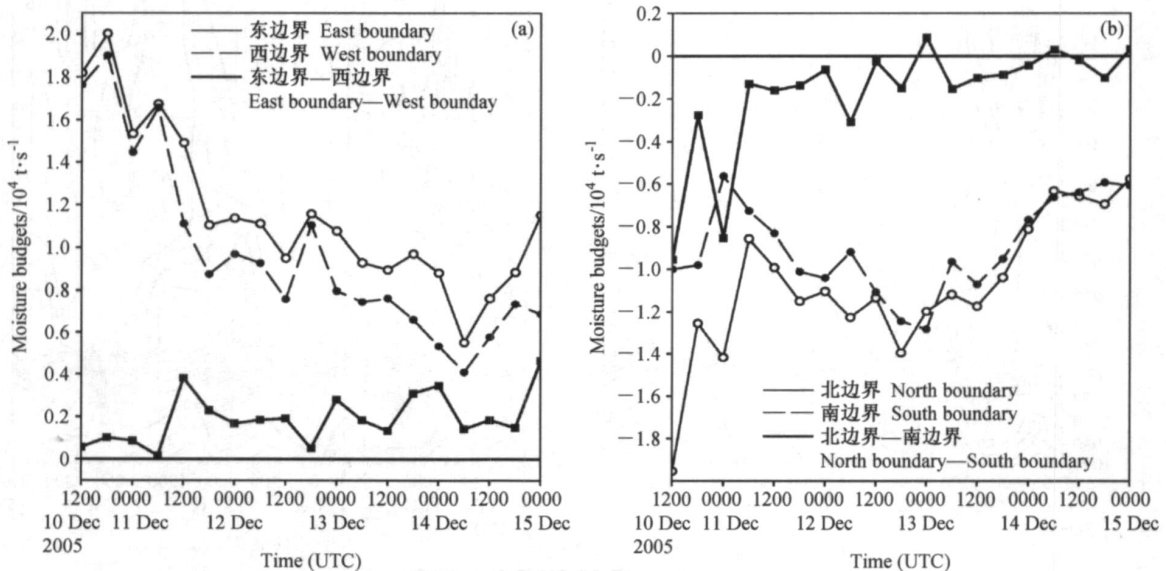


图 12 2005 年 12 月 10~15 日各边界水汽收支随时间的变化: (a) 东、西边界及东边界—西边界; (b) 南、北边界及北边界—南边界 (以向东和向北方向为正值, 单位: $10^4 \text{t} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig. 12 Moisture budgets for the whole layer during 10—15 Dec 2005: (a) from the east, west boundary and the sum (east - west); (b) from the south, north boundary and sum (north - south) (positive value means towards the east and north, units: $10^4 \text{t} \cdot \text{s}^{-1}$)

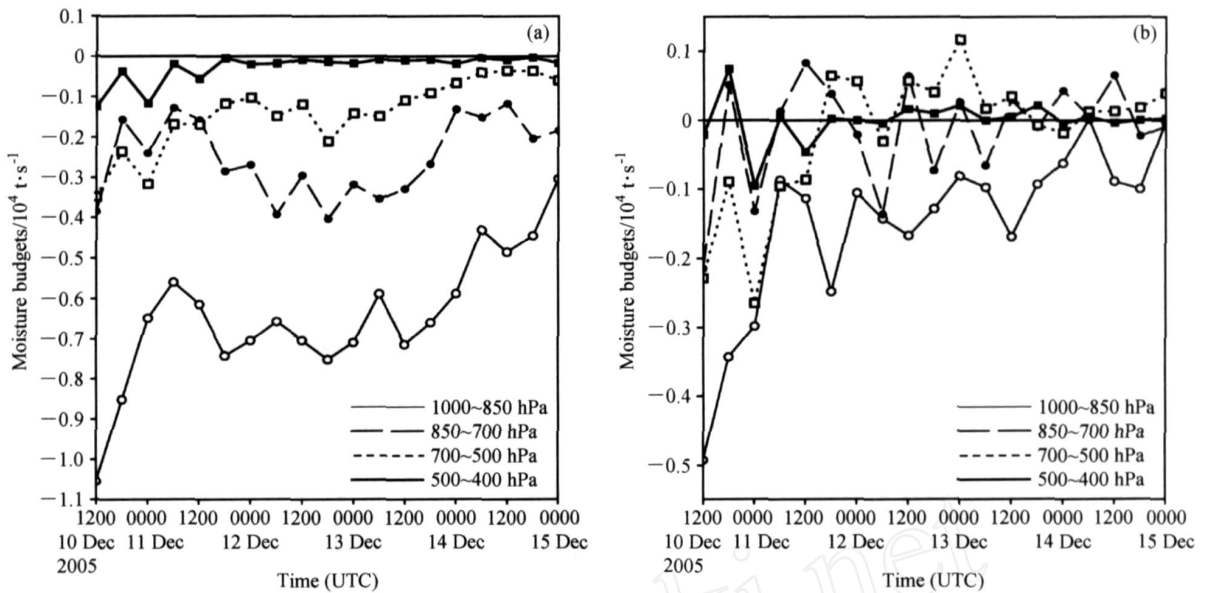


图 13 2005 年 12 月 10~15 日 1 000~850、850~700、700~500 和 500~400 hPa 4 个层次水汽收支随时间的变化：(a) 北边界；(b) 北边界 - 南边界（以向北方向为正值，单位： $10^4 t \cdot s^{-1}$ ）

Fig. 13 Moisture budgets in four layers of 1 000—850 hPa, 850—700 hPa, 700—500 hPa and 500—400 hPa during 10—15 Dec 2005: (a) from the north boundary; (b) from the sum (north - south) (positive value means towards the north, units: $10^4 t \cdot s^{-1}$)

hPa 4 个层次。计算表明，4 个层次上北边界均为水汽输入，且最低层输入量比其他 3 个层次输入量的总和还大，并一直为水汽辐合区。相比而言，其他 3 个层次水汽输入量小，且多以水汽辐散为主，由此可知，降雪期间水汽输送主要集中在对流层低层和边界层（图 13）。对于 11 日 18 时之前，700~500 hPa 上的水汽辐合可能与该时段山东半岛处于 500 hPa 高空槽前，且槽前偏西气流为山东半岛输送了一定水汽有关。

分析表明，此次山东半岛降雪期间的水汽输送既不同于一般降雪过程槽前暖湿气流的水汽输送，也不同于高压后部回流天气中偏东气流的水汽输送，而是通过高压前部的偏北气流将渤海水汽输送到山东半岛。在我国，偏北气流一般都被理解为干冷的，因为它代表着冷空气，但由于经过渤海吸收了水汽，偏北气流到达山东半岛时则变成了暖湿气流，这就是山东半岛特有的“冷流降雪”。

5 结论和讨论

2005 年 12 月山东半岛连续出现 5 次强降雪过

程，通过对持续时间最长的第 3 次降雪过程（11~15 日）的研究，并与 2008 年初我国南方雨雪、冰冻天气过程对比分析后，得出以下结论：

(1) 降雪开始前，地面至对流层低层冷空气前沿已经过境，700 hPa 低槽槽前触发降雪开始，对流层中层冷涡和横槽的相继影响是降雪长时间持续的原因之一。尽管本例与 2008 年初的个例均有横槽维持，但前者是“横槽转竖”，而后者是“横槽稳定少动”，因而本例为西北气流，而后者多超极地路径冷空气活动。冷空气影响后，边界层内中尺度海岸锋有两次锋生过程，对降雪的维持和增强有重要作用。

(2) TBB 分析可见与中尺度海岸锋密切相关中尺度云团的发展，正是由于海岸锋环流的上升运动产生的中尺度云系引起降雪的局地增强；高低空之间的相互作用使云带增强，降雪增加。也正因为海岸锋位置、强度的变化，引起降雪强中心的转移。降雪期间大部分时次 TBB 介于 -20~-15 之间，对应云顶高度在对流层低层。

(3) 由于逆温层的存在，相对湿度大于 90% 的饱和区基本是位于对流层低层和边界层内，饱和区烟台比文登出现时间早，与降雪开始时间和

降雪强中心对应；云水含量大值中心位于饱和区的顶部。半岛区域上空没有出现高于 0 的暖层，因而未见到 2008 年初我国南方那样的冻雨过程。

(4) 降雪的水汽来源不同于一般的降水，也不同于 2008 年初中国南方的雨雪冰冻灾害天气过程，即水汽不是来源于南方暖湿气流，也不同于回流天气中偏东气流的水汽输送，而是通过对流层低层和边界层内冷高压前部的强偏北风把渤海的水汽输送到山东半岛上空，是山东半岛特有的“冷流降雪”。

相比较而言此次过程山东半岛降雪区域不算太大，属于中尺度范围降雪，然而现有资料的时间、空间分辨率较低，很多特征未阐明，一些结论尚是初步的，还需要今后继续深入的研究。

参考文献 (References)

- [1] 赵琳娜, 马清云, 杨贵名, 等. 2008 年初我国低温雨雪冰冻对重点行业的影响及致灾成因分析. 气候与环境研究, 2008, **13** (4): 556~566
Zhao Linna, Ma Qingyun, Yang Guiming, et al. Disasters and its impact of a severe snow storm and freezing rain over southern China in January 2008. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2008, **13** (4): 556~566
- [2] 陶诗言, 卫捷. 2008 年 1 月我国南方严重冰雪灾害过程分析. 气候与环境研究, 2008, **13** (4): 337~350
Tao Shiyang, Wei Jie. Severe snow and freezing-rain in January 2008 in the southern China. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2008, **13** (4): 337~350
- [3] 卫捷, 陶诗言. 2008 年 1 月南方冰雪过程的可预报性问题分析. 气候与环境研究, 2008, **13** (4): 520~530
Wei Jie, Tao Shiyang. Predictability of snow storm and freezing rain disaster in southern China in January 2008. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2008, **13** (4): 520~530
- [4] 赵思雄, 孙建华. 2008 年初南方雨雪冰冻天气的环流场与多尺度特征. 气候与环境研究, 2008, **13** (4): 351~367
Zhao Sixiong, Sun Jianhua. Multi-scale systems and conceptual model on freezing rain and snow storm over southern China during January - February 2008. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2008, **13** (4): 351~367
- [5] 孙建华, 赵思雄. 2008 年初南方雨雪冰冻灾害天气静止锋与层结结构分析. 气候与环境研究, 2008, **13** (4): 368~384
Sun Jianhua, Zhao Sixiong. Quasi-stationary front and stratification structure of the freezing rain and snow storm over southern China in January 2008. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2008, **13** (4): 368~384
- [6] Braham R R Jr. The Midwest snow storm of 8 - 11 December 1977. *Mon. Wea. Rev.*, 1983, **111**: 253~272
- [7] Ulbrich U, Fink A H, Klawa M, et al. Three extreme storms over Europe in December 1999. *Weather*, 2001, **56** (3): 70~80
- [8] Pearce R, Lloyd D, McConnell D. The post - Christmas "French" storms of 1999. *Weather*, 2001, **56** (3): 81~90
- [9] Ninomiya K. Polar low development over the east coast of Asian continent on 9 - 11 December 1985. *J. Meteor. Soc. Japan*, 1991, **69** (6): 669~685
- [10] Sanders F. Frontogenesis and symmetric stability in a major New England snowstorm. *Mon. Wea. Rev.*, 1986, **114**: 1847~1862
- [11] Weisman R A. The Fargo snowstorm of 6 - 8 January 1989. *Wea. Forecasting*, 1996, **11**: 198~216
- [12] Sousounis P J, Mann G E. Lake-aggregate disturbances. Part V: impacts on Lake-effect precipitation. *Mon. Wea. Rev.*, 2000, **128**: 728~744
- [13] Steenburgh W J, Halvorson S F, Onton D J. Climatology of lake-effect snowstorms of the Great Salt Lake. *Mon. Wea. Rev.*, 2000, **128**: 709~727
- [14] Laird N F, Walsh J E, Kristovich D A R. Model simulations examining the relation of Lake-effect morphology to lake shape, wind direction and wind speed. *Mon. Wea. Rev.*, 2003, **131**: 2102~2111.
- [15] Onton D J, Steenburgh W J. Diagnostic and sensitivity studies of the 7 December 1998 Great Salt lake-effect snowstorm. *Mon. Wea. Rev.*, 2001, **129**: 1318~1338
- [16] 王文辉, 徐祥德. 锡盟大雪过程和“77·10”暴雪分析. 气象学报, 1979, **37** (3): 80~86
Wang Wenhui, Xu Xiangde. The heavy snow process in district Xilingele and the analysis of “77·10” snowstorm. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1979, **37** (3): 80~86
- [17] 朱爱民, 寿绍文. 一次冬季暴雪过程锋生次级环流的诊断分析. 南京气象学院学报, 1994, **17** (2): 183~187
Zhu Aimin, Shou Shaowen. Diagnosis of frontogenetical secondary circulation in a winter snowstorm event. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology* (in Chinese), 1994, **17** (2): 183~187
- [18] 王建中, 丁一汇. 一次华北地区强降雪过程的湿对称不稳定性研究. 气象学报, 1995, **53** (4): 451~459
Wang Jianzhong, Ding Yihui. Research of moist symmetric instability in a strong snowfall in north China. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1995, **53** (4): 451~459

- [19] 邓远平,程麟生,张小玲. 三相云显式降水方案和“96·1”暴雪成因的中尺度数值模拟. 高原气象, 2000, **19** (4): 401~414
Deng Yuanping, Cheng Linsheng, Zhang Xiaoling. Three-phase cloud explicit precipitation scheme and mesoscale numerical simulation for generated cause of the “96·1” snowstorm. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 2000, **19** (4): 401~414
- [20] 王文,程麟生.“96·1”高原暴雪过程湿对称不稳定的数值研究. 高原气象, 2000, **19** (2): 129~140
Wang Wen, Cheng Linsheng. Numerical study of conditional symmetric instability of “96·1” snowstorm. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 2000, **19** (2): 129~140
- [21] 赵思雄,孙建华,陈红,等. 北京“12·7”降雪过程的分析研究. 气候与环境研究, 2002, **7** (1): 7~21
Zhao Sixiong, Sun Jianhua, Chen Hong, et al. A study on snowfall in Beijing on 7 December 2001. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2002, **7** (1): 7~21
- [22] 孙建华,赵思雄. 华北地区“12·7”降雪过程的数值模拟研究. 气候与环境研究, 2003, **8** (4): 387~401
Sun Jianhua, Zhao Sixiong. A numerical simulation of snowfall in north China on 7 December 2001. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2003, **8** (4): 387~401
- [23] 周淑玲,闫淑莲. 威海市冬季暴雪的天气气候特征. 气象科技, 2003, **31** (3): 183~185
Zhou Shuling, Yan Shulian. The weather and climate characteristics of heavy snow in Weihai in winter. *Meteorological Science and Technology* (in Chinese), 2003, **31** (3): 183~185
- [24] 林曲凤,梁玉海. 一次山东半岛强降雪过程的天气学分析. 山东气象, 2004, **24** (97): 9~11
Lin Qufeng, Liang Yuhai. Synoptic analysis of a snowstorm event in Shandong peninsula. *Shandong Meteorological Quarterly* (in Chinese), 2004, **24** (97): 9~11
- [25] 盛春岩,杨晓霞. 一次罕见的山东暴雪天气的对称不稳定分析. 气象, 2002, **28** (3): 33~36
Sheng Chunyan, Yang Xiaoxia. Symmetry instability analysis of an unusual storm snow in Shandong province. *Meteorological Monthly* (in Chinese), **28** (3): 33~36
- [26] 迟竹萍,龚佃利. 山东一次连续性降雪过程云微物理参数数值模拟研究. 气象, 2006, **32** (7): 25~32
Chi Zhuping, Gong Dianli. A numerical simulation of cloud microphysics parameters for sustaining snowfall in Shandong province. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 2006, **32** (7): 25~32
- [27] Marks F D Jr, Austin P M. Effects of the New England coastal front on the distribution of precipitation. *Mon. Wea. Rev.*, 1979, **107**: 53~67