

崔晶, 张丰启, 钱永甫, 等. 2005 年 12 月威海连续性暴雪的气候背景 [J]. 南京气象学院学报, 2008, 31 (6): 844-851

2005 年 12 月威海连续性暴雪的气候背景

崔晶^{1,2}, 张丰启², 钱永甫¹, 李建华², 李宏江²

(1. 南京大学大气科学系, 江苏南京 210093; 2 威海市气象局, 山东威海 264200)

摘要: 利用 1966—2005 年 NCEP/NCAR 再分析资料和威海冬季降雪资料, 对威海冬季降雪的时空分布特征以及 2005 年 12 月威海连续性暴雪的气候背景进行分析。结果表明: 威海冬季降雪量呈明显的北多南少分布, 12 月降雪量和暴雪日数明显多于其他月份。威海市 2005 年 12 月的气候特征与威海 12 月降雪偏多年的气候特征非常相似, 表现为东北亚大气环流经向型, 中国东北、黄渤海到日本海一带 500 hPa 位势高度距平和 850 hPa 温度距平均为显著的负值中心, 1 000 hPa 风场距平为气旋性弯曲; 2005 年 12 月的要素距平明显大于降雪偏多年。此外, 2005 年 11 月下旬黄渤海海温较常年显著偏高, 为大气提供了充足能量, 并造成边界层大气极不稳定; 山东半岛地形抬升及其北岸的海陆风与环境风辐合, 直接导致不稳定能量释放而形成威海连续性暴雪。

关键词: 暴雪; 气候背景; 降雪异常; 冷流暴雪

中图分类号: P461 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-2022(2008)06-0844-08

Climate Background of Heavy Snow in Weihai City in December 2005

CUI Jing^{1,2}, ZHANG Feng-qi², QIAN Yong-fu¹, LI Jian-hua², LI Hong-jiang²

(1. Department of Atmospheric Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, China

2. Weather Bureau of Weihai, Weihai 264200, China)

Abstract Based on the observed winter snow fall data of Weihai, Shandong Province and NCEP/NCAR re-analysis data during 1966—2005, this paper studies the spatial and temporal distributions of winter snow-fall and the climate background of persistence snow storm event in Weihai City in December 2005. The results reveal that the winter snow fall is excessive in North and few in South Weihai City, and the snow fall and the day numbers of snow storm in December are significantly more than those in other months. The climate background in December 2005 is closely similar to that in the more snow fall years of Weihai in December. In the more snow fall years, the meridional circulation lies in northeast Asia with obvious negative centers of 500 hPa height and 850 hPa temperature anomalies locating in Northeast China, Yellow Sea and sea areas from Bohai Sea to Japan Sea where there are cyclonic wind anomalies at 1 000 hPa. In the above mentioned areas, the element anomalies in December 2005 are much more robust than those in heavy snow fall years. Moreover, Yellow Sea and Bohai Sea in the last ten-day period of November 2005 is much warmer than the normal, which provides sufficient energy for the atmosphere and results in the instability of atmospheric boundary layer. The terrain uplifting in Shandong Peninsula and the convergence of land-sea breeze and environmental wind in the northern coast directly result in the unstable energy release and the continuous heavy snow fall in Weihai city.

Key words heavy snow; climate background; snow fall anomaly; cold airflow; snow storm

0 引言

2005 年 12 月威海市出现了历史罕见的连续

20 d 的强降雪天气过程, 月降雪量达到 93.6 mm, 是威海市多年 12 月平均降雪量的八倍多, 远远超过威海市有气象记录以来的历史极值, 更是在 1 月内

收稿日期: 2008-07-18 改回日期: 2008-10-17

基金项目: 山东省气象局气象科学研究重点项目 (2004sdqxjl0)

作者简介: 崔晶 (1970—), 女, 山东莱阳人, 硕士, 高工, 研究方向为极端气候事件, shanjia@163.com.

3 次出现日降雪量超过历史极值的暴雪天气。这次连续性的暴雪过程在威海市造成近 4 亿元人民币的经济损失和 2 人死亡, 被列为 2005 年全国十大气候事件之一, 因此弄清这次极端天气出现的气候背景非常重要。

这次连续性强降雪主要是由冷流降雪造成的。冷流降雪是指在冬季冷空气经过暖的水面时, 下垫面的能量交换导致大气低层的层结不稳定而形成的降水天气。形成这类降雪需要满足 3 个基本条件: 一是暖海面的作用; 二是较强的低空冷平流; 三是适宜的地面流场^[1-4]。郑丽娜等^[5]指出, 渤海与黄海相连, 有利于渤海上空大气的增温、增湿; 当冷空气流经海面时, 海—气之间的热量交换易产生局地小尺度系统。李洪业等^[6]指出, 适宜的环流形势、海—气相互作用、低层稳定度、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。于志良^[7]利用海—气接口感热通量密度计算认为, 海—气温差及冷气团在陆上时的稳定度是影响输送热量的多少、进而能否形成冷流降雪的重要因素。苏博等^[8]对发生在山东半岛的一次强冷流降雪进行了数值模拟, 发现山东半岛东部的低风速区的少动对暴雪区的水汽与能量的辐合堆积及对流云带的形成创造了有利条件; 海岸锋生是山东半岛北岸降雪云团移动的原因, 且海岸锋在冷流降雪的中尺度结构的形成中起了重要的组织作用。张勇等^[9]对 2005 年 12 月 3 日山东半岛的一次强降雪过程进行数值模拟发现, 这次过程中的中尺度重力波符合波导条件和 Wave-CISK 理论框架, 波动能够从环境场中得到足够的能量而维持相当长时间, 从而造成罕见的连续性强降雪过程。杨成芳等^[10]对 2005 年发生在渤海南部山东半岛北部沿海的一次冷流暴雪过程进行了中尺度特征分析, 发现在西北气流、较大海气温差和半岛的丘陵地形特殊条件下, 冷流暴雪在多普勒天气雷达径向速度图上, 表现为长生命史的逆风区。此外, 冷流降雪的形成机制与大湖效应降雪十分相似。Peter 等^[11]和 Steenburgh 等^[12]认为, 这种降雪产生在一定的湖气温差、风向风速、稳定性和温度递减率条件下, 其中湖气温差是最重要的条件。Lavoie^[13]和 Mark^[14]通过三维中尺度数值敏感试验证实了以上条件的必要性。

国内对暴雪也做过不少的研究, 多集中于大尺度分析, 如刘宁微等^[15]利用数值模拟研究了春季江淮暴雪的中尺度特征; 杨柳等^[16]对 2003 年春季江淮一次暴雪过程进行了模拟研究; 潘晓滨等^[17]利用

中尺度模式模拟了北京降雪的云场结构特征; 余志豪等^[18]和赵鸣^[19]则对积雪进行了研究。

上述研究多是个例分析, 对冷流降雪和暴雪的气候背景很少涉及。威海市连续性暴雪属于极端气候事件, 有着特殊的气候背景, 因此从气候的角度对威海市连续性暴雪进行研究非常必要。

1 资料和方法

采用威海台站常规观测资料, 即威海市区、文登和乳山共 3 个站的 1966—2005 年降雪量实况资料。降雪量均指纯粹的降雪或以雪为主的雨夹雪的降水量, 日降雪量是指前一日 20 时到当日 20 时的降雪量。采用 NCEP/NCAR 提供的全球再分析 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 逐月格点值、逐日格点值资料, 序列长度为 1966—2005 年。

首先分析威海市 12 月降雪偏多年、偏少年的气候特征, 然后比较 2005 年 12 月威海连续性暴雪气候特征与降雪偏多年气候特征的差异, 结合黄渤海海温和山东半岛区域的海—陆—气相互作用, 分析 2005 年 12 月威海连续性暴雪的成因及气候背景对连续性暴雪的作用。

文中“平均”是指将每个时间段 (例如年、月) 的逐日值 (例如高度、温度) 累加后除以该时段的总天数得到的值; 距平值是指减去 1966—2004 年气候平均值的值。

2 威海市冬季降雪的时空分布特征

1966—2005 年, 山东半岛北部的威海市降雪总量为 1 218.3 mm, 中部的文登市为 1 375.7 mm, 西南部的乳山市仅为 381.5 mm。这明显表现为南部少、北部多的分布。根据在威海气象局多年预报实践, 威海市的降雪主要是冷流降雪, 而乳山市冷流降雪量相对威海区域的其他台站小很多, 几乎可以忽略。2005 年 12 月威海市月降雪量为 93.6 mm, 文登市为 69.0 mm, 乳山市仅为 7.1 mm, 其中乳山市降雪主要由大尺度系统造成, 冷流降雪很少。

威海市冷流降雪开始日期最早始于 10 月 19 日, 最晚始于 12 月 7 日, 大部分始于 11 月; 终止日期最早为 2 月 10 日, 最晚为 4 月 25 日, 终雪日以 3 月下旬到 4 月上旬居多。威海市区年均降雪日数为 42.3 d, 年均降雪量为 30.5 mm。月均降雪量最大月份是 12 月, 平均降雪量为 11.7 mm, 占年总降雪量的 38.4%。月均降雪量次大月份是 1 月, 为 7.3 mm, 第三大为 11 月, 有 5.0 mm。1966—2005

年间出现在 11 月、1 月、2 月和 3 月的暴雪日每月只有 1 个,而出现在 12 月的暴雪日多达 8 个。由此可见,12 月是威海市降雪量最多,出现暴雪日数最多的月份。2005 年 12 月 4 日、7 日和 21 日分别出现了 18.4 mm、24.4 mm 和 18.3 mm 的暴雪,均突破 16.9 mm 的历史极值。

3 威海市 12 月降雪偏多、偏少年的气候背景

3.1 威海市区降雪偏多、偏少年的确定

威海市这次罕见连续性暴雪发生在 12 月,因此选择 12 月的天气气候背景进行研究。利用威海市区 1966—2005 年 12 月降雪资料,对逐年 12 月降雪量进行距平标准化,标准化距平为 A_i 。根据 A_i 的分布情况,同时考虑降雪偏多年和偏少年的年数相差不多,并参考逐年 12 月降雪量(表 1),将 $A_i > 0.3$ 的年份定义为降雪偏多年, $A_i < -0.4$ 的年份定义为降雪偏少年。降雪偏多年有 10 a 分别为 1967、1969、1980、1983、1984、1985、1988、1990、1999 和 2005 年;降雪偏少年有 14 a 分别是 1968、1970、1972、1977、1978、1987、1989、1991、1992、1993、1995、1998、2001 和 2004 年。

表 1 1966—2005 年的 12 月降雪量

Table 1 December snow fall from 1966 to 2005

年份	降雪量 /mm	年份	降雪量 /mm	年份	降雪量 /mm
1966	8.9	1980	27.7	1994	7.8
1967	21.7	1981	8.0	1995	3.8
1968	2.1	1982	8.4	1996	10.7
1969	16.7	1983	17.3	1997	12.7
1970	2.0	1984	28.7	1998	1.1
1971	10.3	1985	32	1999	17.5
1972	1.6	1986	6.5	2000	6.6
1973	5.9	1987	4.8	2001	4.4
1974	8.2	1988	16.6	2002	7.8
1975	12.3	1989	4.2	2003	7.4
1976	10.6	1990	23.5	2004	1.1
1977	0	1991	3.6	2005	93.6
1978	2.8	1992	3.3		
1979	5.7	1993	1.7		

3.2 威海市区降雪偏多、偏少年 500 hPa 高度距平场

由图 1a 可以看出,12 月 500 hPa 东亚沿海是一宽广的槽区,青藏高原到西伯利亚是一个宽广的高

脊。降雪偏多年(图 1c)与偏少年(图 1d)的位势高度距平呈反位相分布。降雪偏多年,100°E~180°、30~50°N 为负距平区,负距平中心位于渤海、黄海北部到日本海,说明 500 hPa 东亚沿海的槽区加深,有东北低涡存在,且位置偏东、偏南。由图 1b 可见,该区域确有低涡存在。普查降雪偏多的 9 a 中 10 次日降雪量超过 5 mm 的当日 500 hPa 高空形势图可以发现,8 次在渤海、黄海北部到日本海之间的区域中出现了东北低涡。由此可见,东北低涡与威海出现较强降雪的关系较密切。70~130°E、55~80°N 是明显的正距平区,正距平中心位于西伯利亚地区,表明这一区域长波脊较强。上述高度距平分布表明:威海 12 月降雪偏多年份,500 hPa 环流经向度较大,东亚沿海槽区加深,有利于冷空气沿槽后西北气流南下,形成东北冷涡,且位置偏南、偏东。威海市受低涡、低涡横槽、低涡后冷空气的连续影响,有利于冷流降雪天气的发生和维持。此外,500 hPa 东北冷涡的存在和维持,也有利于地面辐合流场的形成,地面辐合对冷流降雪量有增幅作用,从而导致威海 12 月降雪量明显偏多。降雪偏少年,100~150°E、30~50°N 区域是明显的正距平区,正距平中心位于中国华北、东北到日本海,说明 500 hPa 东亚沿海槽区减弱,且位置偏北、偏东;55~100°E、50~75°N 区域是明显负距平区,负距平中心位于西西伯利亚地区,表明该区域长波脊较弱。这种高度场距平分布表明,威海 12 月降雪偏少年,500 hPa 环流经向度较小,东亚沿海槽区较弱、偏北,不利于冷空气南下,因此不利于威海冷流降雪的形成,导致降雪量偏少。

3.3 降雪偏多年、偏少年 850 hPa 温度距平场

由图 2a 可见,降雪偏多年 100~140°E、30~50°N 区域,是大片温度负距平区,负距平中心位于黄渤海以及中国东北和朝鲜半岛,中心距平值约为 -1.5℃,表明冷空气活动势力较常年偏强,影响持续;蒙古到贝加尔湖地区为大片正距平区。由图 2b 可见,其分布形势与图 2a 完全相反,100°E~180°、30~50°N 区域是大片正距平区,最大正距平值为 1.2℃,表明该区域冷空气活动势力偏弱,活动次数少且路径偏北,导致黄渤海、中国东北和朝鲜半岛气温较常年异常偏高;60~140°E、50~80°N 区域则为负距平区。温度距平场的分布(图 2)与 500 hPa 高度距平场的分布(图 1)基本吻合。降雪偏多年和偏少年温度场分布特征表明,威海 12 月降雪量与 850 hPa 温度场分布关系密切。

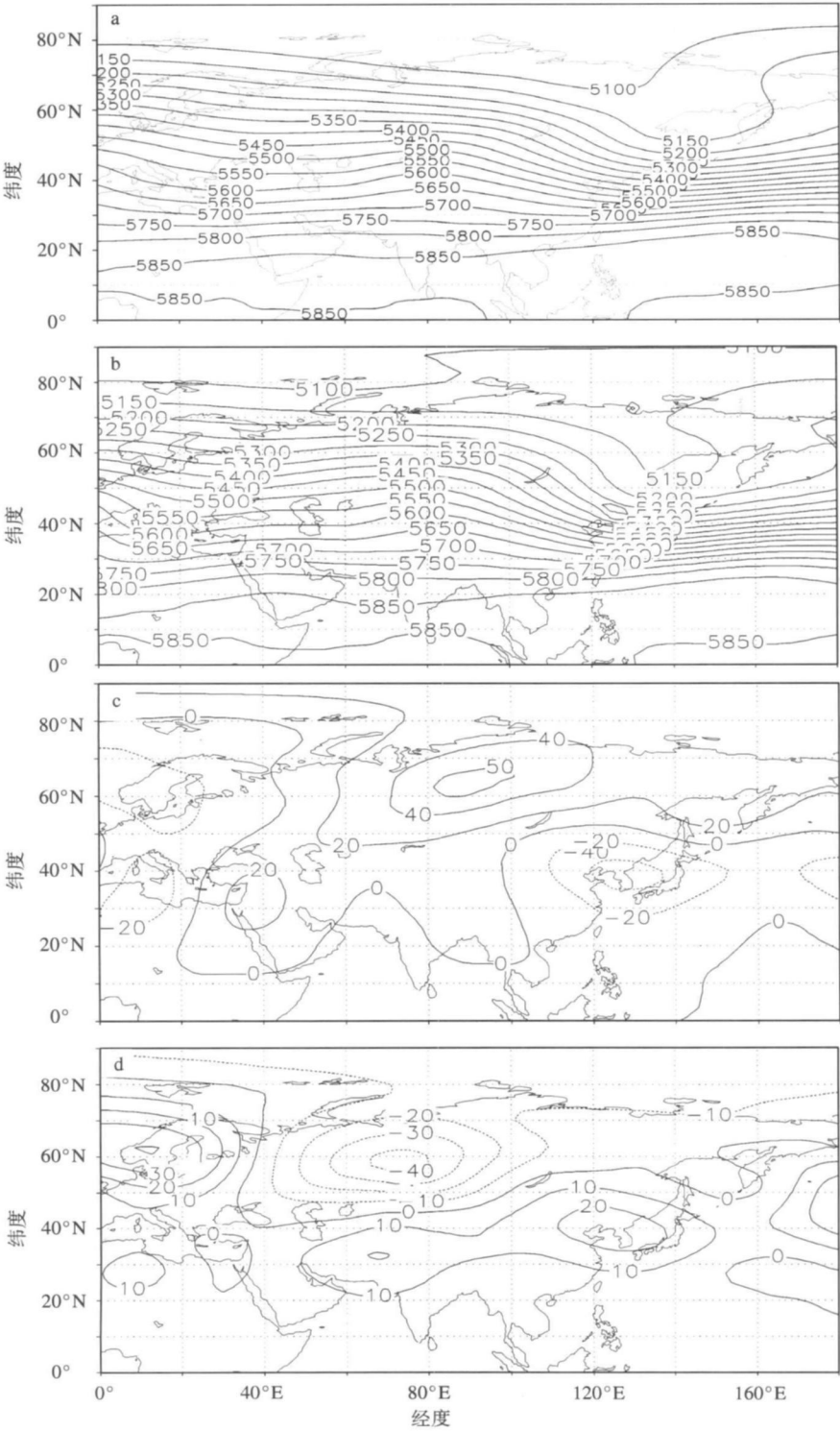


图 1 1966—2004 年 (a) 和降雪偏多年 (b) 的 12 月平均环流形势以及降雪偏多年 (c)、偏少年 (d) 500 hPa 高度距平场 (单位: gpm)

Fig. 1 December mean circulation situations at 500 hPa in (a) 1966—2004 and (b) heavy snow fall years during 1966—2004 and December 500 hPa height anomalies in (c) more and (d) less snow fall years (units: gpm)

3.4 降雪偏多年、偏少年 1 000 hPa 风场距平

由图 3 可以看出, 降雪偏多年欧亚大陆东端的

中高纬度是气旋性环流, 环流中心位于朝鲜半岛北部, 山东半岛、渤海、黄海北部有明显距平风的横向

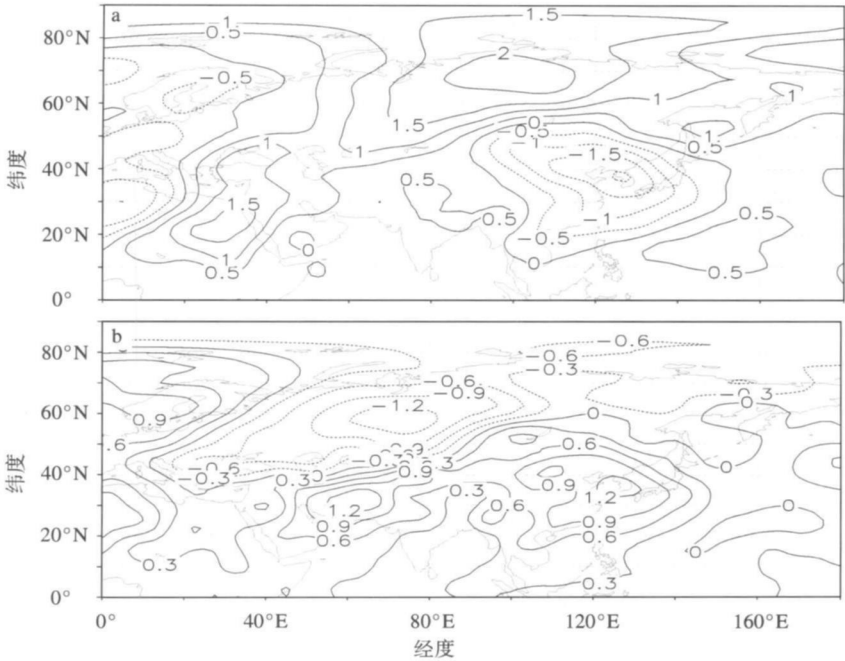


图 2 12月降雪偏多年 (a)、偏少年 (b) 850 hPa温度距平场 (单位: $^{\circ}\text{C}$)
Fig. 2 December 850 hPa temperature anomalies in (a) more and (b) less snow fall years (units $^{\circ}\text{C}$)

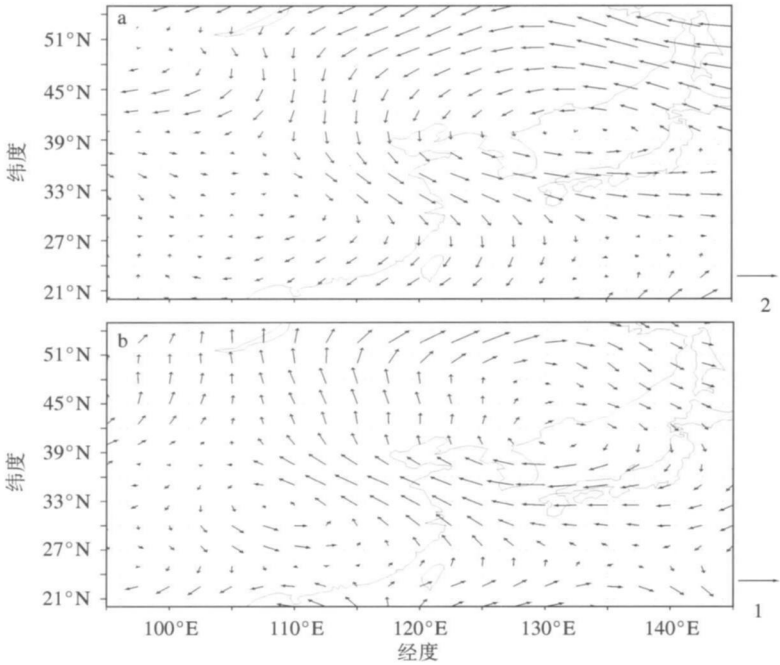


图 3 12月降雪偏多年 (a)、偏少年 (b) 1 000 hPa风场距平 (单位: m/s)
Fig. 3 December 1 000 hPa wind anomaly fields in (a) more and (b) less snow fall years (units m/s)

气旋性切变, 表明 1 000 hPa 多冷锋或横切变, 为降雪提供有利的辐合上升条件; 降雪偏少年欧亚大陆东端的中高纬度是反气旋性环流, 环流中心位于朝鲜半岛北部, 山东半岛东端靠近反气旋性环流中心,

表明 1 000 hPa 多高压导致大气辐散下沉, 不利于降雪产生。
上述分析表明, 威海市 12月降雪偏多年、偏少年的气候背景差异非常明显。威海市 12月降雪偏

多年, 500 hPa 环流经向度较大, 东亚沿海槽区加深, 冷空气沿槽后西北气流南下, 形成东北冷涡, 位置偏南、偏东。威海市受低涡、低涡横槽、低涡后冷空气的连续影响, 导致黄渤海及山东半岛东部 850 hPa 温度为显著负距平, 与冬季暖的海洋下垫面形成更大的海气温差, 海气间的感热和通量交换增强, 有利于 850 hPa 以下的大气形成不稳定层结; 山东半岛、渤海、黄海北部 1 000 hPa 上有明显的距平风横向切变, 为降雪提供辐合上升条件, 有利于冷流降雪天气的发生。威海市 12 月降雪偏少年的环流气候背景与偏多年相反, 不利于冷流降雪天气的发生。此外, 分析发现, 中国东北至黄渤海区域是影响威海市 12 月降雪的气候关键区。

4 2005 年 12 月威海暴雪的气候特征

4.1 500 hPa 环流特征

由图 4 可以看到, 2005 年 12 月 500 hPa 高度距平和 850 hPa 温度距平分布与降雪偏多年的合成距平分布非常相似, 在影响威海市 12 月降雪量的关键区域, 异常程度更加明显。中国东北至黄渤海, 山东半岛东部地区 500 hPa 高度负距平值小于 -50 gpm, 较降雪偏多年的平均负距平值 (-40 gpm) 偏低, 其中心高度负距平达 -150 gpm。山东半岛东部地区 850 hPa 温度负距平值为 -4 $^{\circ}\text{C}$, 较降雪偏多年的平均负距平值 (-1.5 $^{\circ}\text{C}$) 明显偏低。山东半岛东部地区 1 000 hPa 风场距平较降雪偏多年的风

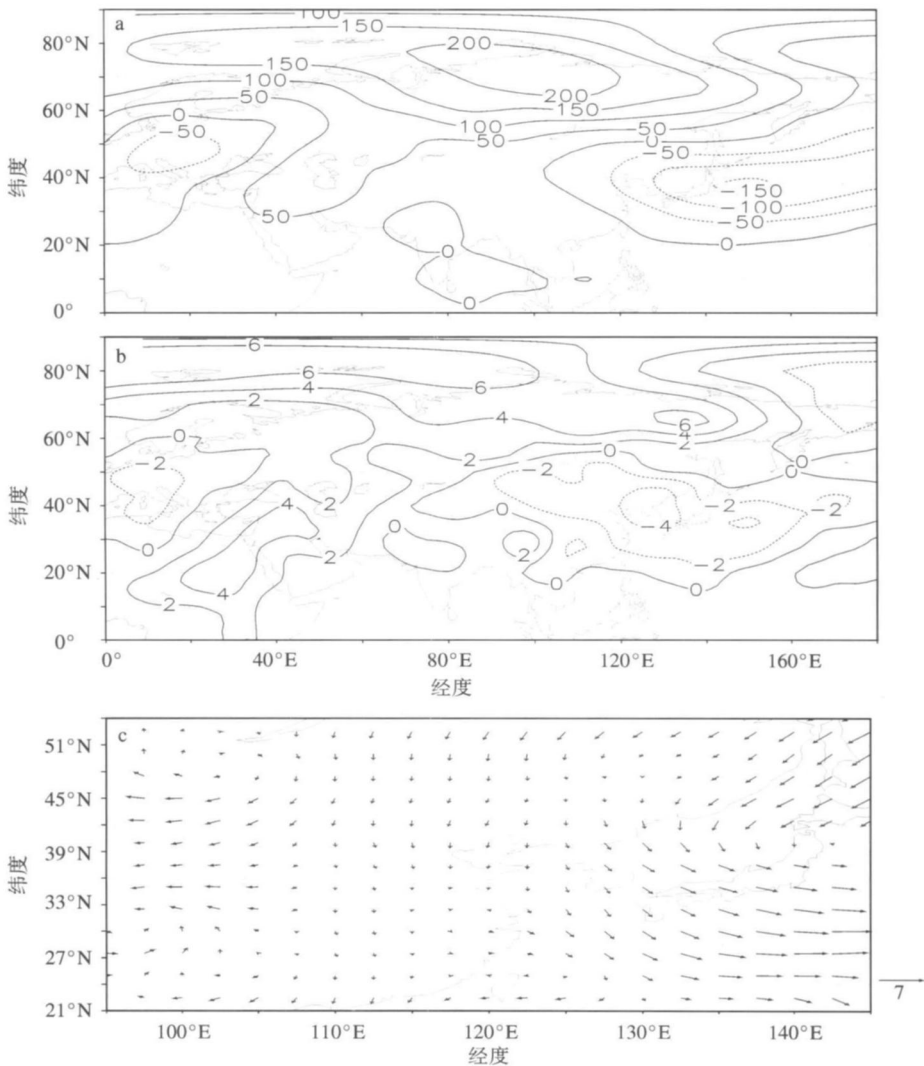


图 4 2005 年 12 月 500 hPa 高度距平 (a 单位: gpm)、850 hPa 温度距平 (b 单位: $^{\circ}\text{C}$) 和 1 000 hPa 风场距平分布 (c 单位: m/s)

Fig. 4 (a) 500 hPa height anomaly (gpm), (b) 850 hPa temperature anomaly ($^{\circ}\text{C}$) and (c) 1 000 hPa wind anomaly fields (m/s) in December 2005

场距平明显偏小,处于日本海到环渤海地区气旋性切变尾部。苏博等^[8]对发生在山东半岛的一次强冷流降雪进行模拟分析后发现,山东半岛东部的低风速区的少动对暴雪区的水汽与能量的辐合堆积及对流云带的形成创造了有利条件。英国著名的天气和气候学家迈克尔^[20]也指出,大湖效应的降雪量取决于冷气团与水面温差以及冷空气在水面的行进距离,空气与暖水面接触时间越长,气团就会携带越多水汽,降雪量就越大。因此,1 000 hPa风力较弱,冷空气相对较缓地经过暖湿海面,为海气间的热量和水汽交换提供了充足时间,使大气边界层获得更多能量,对增加山东半岛东部冷流降雪量非常有利。以上分析表明,2005年12月的环流背景与威海市12月降雪偏多年的环流形势基本是一致的,在影响威海市12月降雪量的关键区域上,各等压面要素异常程度更加显著,从而为威海市降雪量增加提供了非常有利的环流背景。

4.2 降雪量与前期气温及海温的关系

冷气团与水面的温差也是影响降雪量的一个重要因素^[20],温差较大时,水温越高,冷气团温度越低,冷凝的水汽就越多,降雪量就越大。相对山东半岛而言,黄渤海在冬季是一个稳定持久的暖区,因此,当北方冷空气从干冷的大陆流入这一暖海面后,必然会有较多的感热和水汽输入,感热交换量与海气温差成正比。冬季冷空气由内陆移入渤海暖水面上时,往往形成较大的海气温差,通过感热交换,使低层空气增温增湿,低层大气温度直减率加大,大气

层结呈现不稳定状态^[14]。据国家海洋局海温资料(图略)显示,2005年11月下旬黄渤海的海水温度较常年明显偏高,偏高幅度达2℃。当海洋温度偏高2℃时,它所蕴藏的能量是惊人的。2005年12月黄渤海上空850 hPa温度距平值达到-4℃,在850 hPa以下的低层,海气温差较正常年份增大6℃,大气层结处于绝对不稳定状态。

图5是用WRF模式和NCEP/NCAR资料模拟的2005年12月7日07时(北京时)的地面中尺度流场。WRF模式模拟的中心点为(121.89°E, 37.39°N),空间分辨率为10.2 km×10.2 km,格点数为101×86,所用NCEP/NCAR资料的时间分辨率为6 h,格点距为1°×1°。2005年12月6日到7日24 h内威海市出现了24.4 mm的强降雪,数值模拟的降雪中心和范围与实况接近(图6),模拟中心降雪量为25 mm,与实况较吻合,说明模拟效果较好。尺度分离采用Shum an-Shapiro方法^[21],用九点平滑的滤波方案分离出尺度为61.2 km的中尺度系统。由图5可见,山东半岛的北部存在着明显的沿海岸线的中尺度辐合带,南部沿海岸线则存在着明显的中尺度辐散,半岛北部的中尺度辐合使得低层大量的不稳定能量释放,形成暴雪,南部的中尺度辐散,不利于低层不稳定能量的释放,不利于暴雪的产生,与威海连续性暴雪的空间分布完全一致。

5 小结

(1)威海市区的降雪集中在12月,占年降雪量的

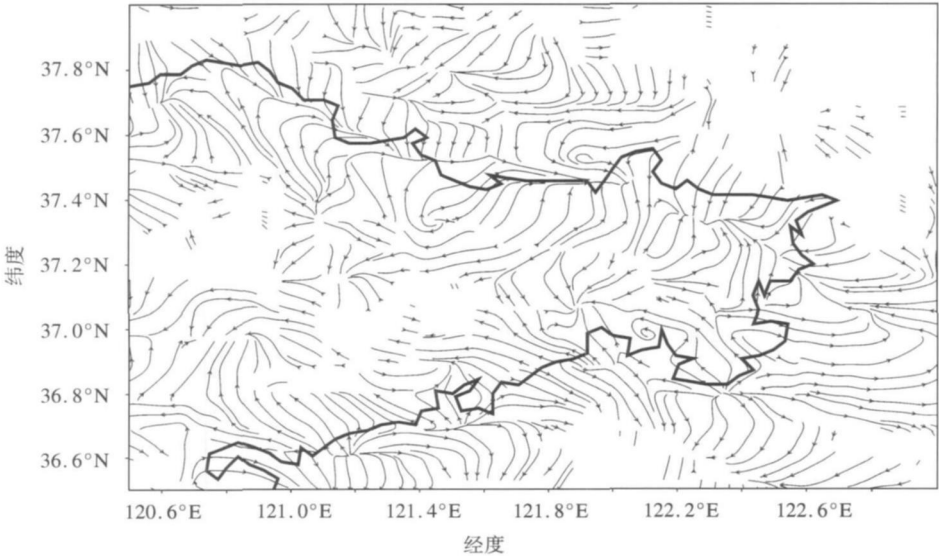


图 5 WRF模式模拟的 2005年 12月 7日 07时(北京时)地面中尺度流场
Fig 5 The ground mesoscale flow field simulated by WRF model at 07:00 BST 7th December 2005

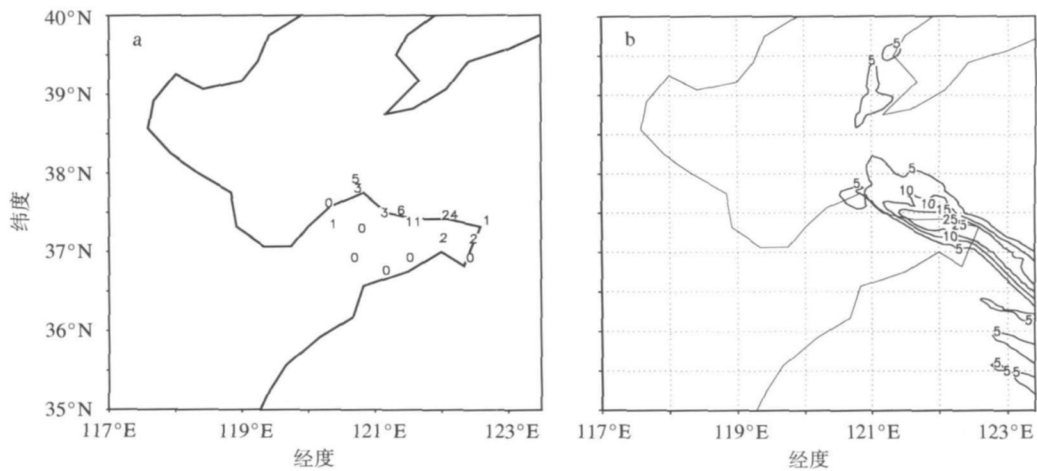


图 6 2005 年 12 月 6 日 14 时—7 日 14 时 (北京时) 实况降水量 (a) 与模拟降水量 (b) (单位: mm)

Fig. 6 (a) Observed and (b) simulated snow falls

from 14 00 BST 6th to 14 00 BST 7th in December 2005 (units mm)

38.7%; 强降雪以 12 月为主, 暴雪次数占全年的 2/3。威海市的降雪空间分布存在明显的地域差别, 以昆嵛山为界, 北部、中部降雪多, 南部、西部降雪少。

(2) 威海市降雪偏多、偏少年的气候背景差异非常明显, 几乎呈反位相分布。降雪偏多年, 中国东北、华北到日本附近的 500 hPa 高度为显著负距平, 850 hPa 温度为显著负距平; 乌拉尔山到西伯利亚地区 500 hPa 高度为明显正距平, 850 hPa 温度为明显正距平。降雪偏少年则反之。

(3) 中国东北到黄渤海区域是影响威海市 12 月降雪量的气候关键区。12 月该区域 500 hPa 高度偏低, 东北低涡活动频繁, 低涡维持时间较长, 低涡位置偏南; 850 hPa 温度较常年偏低; 1 000 hPa 有低压存在, 山东半岛处于低压后部, 其北部有切变南移。这样的大气环流形势配合暖海面, 导致威海 12 月降雪偏多; 反之, 威海 12 月降雪偏少。

(4) 2005 年 12 月前期黄渤海海温较常年明显偏高, 为威海的连续暴雪提供了充足的大气不稳定能量。2005 年 12 月冷空气强度较常年明显偏强, 导致边界层大气出现强不稳定层结, 这是冷流暴雪产生的重要原因之一。此外, 山东半岛北部的中尺度辐合以及山东半岛山地迎风坡的强迫抬升, 对冷流暴雪的形成也至关重要。

参考文献:

- [1] 曹钢锋, 张善君, 朱官中, 等. 山东天气分析与预报 [M]. 北京: 气象出版社, 1988 310.
- [2] 谢显泉. 渤海冬季的冷流低云 [J]. 气象, 1980 6(2): 27.
- [3] 熊新明. 山东半岛北部沿海的冷流降雪 [J]. 气象, 1983 9 (12): 4-6.
- [4] 张剑英. 冬季半岛地区“冷流低云”的云图特征 [J]. 山东气象,

- 1983(4): 22-23.
- [5] 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 29(1): 49-52.
- [6] 李洪业, 徐旭然. 冷流低云降雪成因的分析 [J]. 气象, 1995 21 (12): 21-24.
- [7] 于志良. 海—气感热输送在冷流降雪形成中的作用 [J]. 海洋预报, 1997, 14(1): 17-24.
- [8] 苏博, 吴增茂, 李刚, 等. 山东半岛一次强冷流降雪的观测与数值模拟研究 [J]. 中国海洋大学学报, 2007, 37(4): 1-9.
- [9] 张勇, 寿绍文, 王咏青, 等. 山东半岛一次强降雪过程的中尺度特征 [J]. 南京气象学院学报, 2008, 31(1): 51-60.
- [10] 杨成芳, 李泽椿, 周兵, 等. 渤海南部沿海冷流暴雪的中尺度特征 [J]. 南京气象学院学报, 2007, 30(6): 857-865.
- [11] Peter J S, Greg E M. Lake-aggregate disturbances Part V: Impacts on lake-effect precipitation [J]. Mon Wea Rev, 1985 113 (2): 728-744.
- [12] Steenburgh W J, Harekson S F. Climatology of lake-effect precipitation [J]. Mon Wea Rev, 1985 113 (2): 709-727.
- [13] Lavoie R L. A mesoscale numerical model of lake-effect storms [J]. J Atmos Sci 1972 29(3): 1025-1040.
- [14] Mark R. Numerical study of the influence of environmental conditions on lake-effect snow storms over Lake Michigan [J]. Mon Wea Rev, 1990 118(1): 138-150.
- [15] 刘宁微. 2003 年春季江淮一次暴雪过程的模拟研究 [J]. 南京气象学院学报, 2006 24(1): 225-231.
- [16] 杨柳, 苗春生, 寿绍文, 等. 2003 年春季江淮一次暴雪过程的模拟研究 [J]. 南京气象学院学报, 2006 26(3): 151-157.
- [17] 潘晓滨, 王舒畅, 李毅. 北京一次突发性降雪的云场结构特征分析 [J]. 气象科学, 2005, 25(2): 111-117.
- [18] 余志豪, 李海盛. 含雪—气相互作用的大气环流模式及其青藏高原积雪模拟 [J]. 气象科学, 2000, 20(3): 289-297.
- [19] 赵鸣. 对 RIM S 模式中陆面过程的一个改进 [J]. 气象科学, 2006, 26(2): 119-126.
- [20] 迈克尔·阿拉贝. 危险的天气·雪暴 [M]. 上海: 科技文献出版社, 2006 169.
- [21] 郑良杰. 中尺度天气系统的诊断分析和数值模拟 [M]. 北京: 气象出版社, 1989 20-30.