

杨成芳, 戈瑶, 刘畅, 等. “23·12”山东半岛特大海效应暴雪特征及成因[J]. 海洋气象学报, 2024, 44(2): 1-14.
YANG Chengfang, GE Yao, LIU Chang, et al. Characteristics and causes of “23·12” extremely severe sea-effect snowstorm in Shandong Peninsula [J]. Journal of Marine Meteorology, 2024, 44(2): 1-14. DOI: 10.19513/j.cnki.hyqxxb.20240213001. (in Chinese)

“23·12”山东半岛特大海效应暴雪特征及成因

杨成芳^{1,2}, 戈瑶², 刘畅², 周成², 冯桂力³

(1. 山东省气象防灾减灾重点实验室, 山东 济南 250031; 2. 山东省气象台, 山东 济南 250031; 3. 山东省气象科学研究所, 山东 济南 250031)

摘要 采用地面气象观测站、多普勒天气雷达、闪电、积雪深度人工加密观测资料、常规观测及欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)第五代大气再分析(ECMWF Reanalysis v5, ERA5)资料, 对2023年12月15—22日山东半岛特大海效应暴雪过程的降雪特征及极端性成因进行了分析。结果表明:(1)此次过程有4站积雪深度突破本站历史极值, 有1站2d的日降雪量为山东半岛海效应降雪有气象记录以来的最大值, 文登积雪深度达74 cm, 超过山东所有国家级地面气象观测站纪录, 是一次极端海效应暴雪事件。(2)欧亚中高纬度阻塞形势下两次异常强冷空气持续影响渤海和山东半岛地区, 850 hPa温度最低降至-21~-20℃, 冷空气强度明显强于往年12月海效应暴雪过程, 造成降雪持续时间长、累计降雪量大。异常强冷空气是此次极端暴雪过程产生的关键因素, 渤海海面温度(简称“海温”)异常偏高是有利的海温背景。(3)冷空气强、海温偏高造成海气温差偏大, 700 hPa以下产生对流不稳定, 使得降雪强度大; 强降雪发生在海气温差快速增大阶段。(4)925 hPa以下存在来自渤海的北—东北风与内陆地区的西北风构成的切变线, 产生强上升运动, 切变线长时间维持形成“列车效应”。(5)主要降雪时段强垂直上升运动、高相对湿度层的温度为-20~-12℃, 适宜树枝状冰晶形成和维持, 有利于产生大的积雪和降雪含水比; 2 m气温持续低于-5℃, 0 cm地温在降雪开始时即降至0℃以下, 且两次强降雪过程仅间隔1d, 均有利于降雪累积产生极端积雪深度。

关键词 特大海效应暴雪; 强冷空气; 海温异常; 积雪深度

中图分类号: P426.631; P468.0+25 文献标志码: A 文章编号: 2096-3599(2024)02-0001-14
DOI: 10.19513/j.cnki.hyqxxb.20240213001

Characteristics and causes of “23·12” extremely severe sea-effect snowstorm in Shandong Peninsula

YANG Chengfang^{1,2}, GE Yao², LIU Chang², ZHOU Cheng², FENG Guili³

(1. Key Laboratory for Meteorological Disaster Prevention and Mitigation of Shandong, Jinan 250031, China; 2. Shandong Meteorological Observatory, Jinan 250031, China; 3. Shandong Institute of Meteorological Sciences, Jinan 250031, China)

Abstract Based on the data of meteorological observation stations and Doppler weather radars, lighting data, artificial intensive snow depth observations, conventional observations, and ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) Reanalysis v5 (ERA5), the characteristics and causes of the extremely severe sea-effect snowstorm over Shandong Peninsula from 15 to 22 December 2023 are

收稿日期: 2024-02-13; 修回日期: 2024-04-20

基金项目: 山东省自然科学基金项目(ZR2022MD095, ZR2023MD025); 山东省气象局大城市气象服务关键技术创新团队项目(SDCXTD2023-1)

第一作者简介: 杨成芳, 女, 博士, 正高级工程师, 主要从事天气预报业务及降雪研究, cf_yang70@hotmail.com.

analyzed. The main results are as follows. (1) The snow depth of 4 stations exceeds historical records and the daily snowfall of one station in 2 d tops the records of sea-effect snowfall over Shandong Peninsula. The snow depth of 74 cm in Wendeng exceeds the records of all meteorological observation stations in Shandong, so it is an extreme sea-effect snowstorm event. (2) The two abnormally strong cold air processes under the blocked circulation in middle and high latitudes over Eurasia continuously affect the Bohai Sea and Shandong Peninsula, and the temperature of 850 hPa drops to the range between -21 and -20 $^{\circ}\text{C}$. The cold air is significantly stronger than that of the sea-effect snowstorms in December of previous years, resulting in a long duration of snowfall and a large amount of accumulated snowfall. The abnormally strong cold air is the fundamental reason for the extreme snowfall process, and the abnormally high SST (sea surface temperature) over the Bohai Sea is a favorable background. (3) The strong cold air and higher SST lead to larger air-sea temperature difference and unstable convection below 700 hPa, which causes high snowfall intensity, and the heavy snowfall occurs in the stage when the air-sea temperature difference increases rapidly. (4) There is a shear line composed of northerly-northeasterly from the Bohai Sea and northwesterly from inland areas below 925 hPa, which produces a strong ascending motion, and the shear line's maintaining contributes to the formation of train effect. (5) During the main snowfall period, the temperature in the layer of strong vertical ascending motion and high relative humidity lies between -20 and -12 $^{\circ}\text{C}$, which is suitable for the formation and maintenance of dendritic ice crystals and conducive to the generation of large snow cover and snow-to-liquid ratio. The air temperature at 2 m is continuously lower than -5 $^{\circ}\text{C}$, the ground temperature at 0 cm has dropped below 0 $^{\circ}\text{C}$ since the beginning of snowfall, and the interval between the two heavy snowfall processes is only 1 d, which are all conducive to the extreme snow depth.

Keywords extremely severe sea-effect snowstorm; strong cold air; sea surface temperature anomaly; snow depth

引言

海效应降雪在中国常被称为冷流降雪。山东半岛北临渤海,11月—次年3月,每当强冷空气入侵渤海暖海面,可产生海效应降雪,占当地全年降雪的70%以上。海效应暴雪出现在半岛北部沿海的烟台和威海地区,一般在11月下旬—1月产生,12月是形成关键期^[1]。烟台和威海因此被称为“雪窝子”。

渤海海效应降雪与暖海流密切相关。在冬季,太平洋西部的黑潮北上,其西分支从黄海进入渤海,海面温度(以下简称“海温”)从黄海至渤海出现暖舌,山东半岛处在暖舌的西北风下风向。当强冷空气入侵渤海,渤海暖海面向上输送感热,形成“上干冷下暖湿”的不稳定层结,产生降雪。中国海效应降雪的研究主要集中在2005年以后,随着中国气象综合探测业务网的建设和预报技术的快速发展,涌现出大量研究成果,对海效应降雪的认识取得了明显进步,预报准确率得以提升^[2-20]。研究表明,渤海海效应暴雪存在大尺度、天气尺度、中尺度和云尺度的多尺度共同作用,是动力、热力和微物理过程相结合的产物^[3]。

在天气尺度特征方面,辽东半岛、山东、长江口等地区海效应降雪的环流形势基本类似,只是在冷涡、低槽位置、冷空气强度等方面略有差异^[4-9]。作为一种低云降雪,浅层对流是海效应暴雪的重要热力特征^[10-11]。海效应暴雪具有显著的中尺度特征,低层切变线决定强降雪位置,强降雪落区还与海岸锋有关,发生在海岸锋及其冷区一侧^[12-13]。地形对渤海海效应暴雪有重要影响,山东半岛低山丘陵的抬升导致北部沿海地区的降雪增多^[14-15]。对于海效应暴雪的极端性,有研究^[16]认为阻塞形势可导致出现持续性暴雪,如2005年12月的山东半岛持续性强降雪;天气尺度系统产生的动力强迫与海效应两种作用相结合,是造成2008年12月4—6日异常强降雪的重要原因^[17]。近年来,积雪深度逐步受到关注,统计分析表明,海效应暴雪的降雪含水比大于内陆地区的回流形势和江淮气旋暴雪,意味着在相同的降雪量下,海效应暴雪的积雪深度更大^[18-20]。形成机制与海效应降雪类似的大湖效应降雪研究中,还提到微物理过程的影响,主要包括冰相过程和“播种-反馈”机制两个方面,在适宜的天气形势配置和温度条件下,大湖效应降雪会出

现树枝状冰晶,高空云的冰晶下落到低空的湖效应云中,使得低层冰晶快速增长,均有利于降雪增幅^[21-22]。以上这些研究加深了人们对海效应降雪的认识。

2023年12月15—22日,威海和烟台出现极端持续强海效应暴雪,5个国家级地面气象观测站累计降雪量超过45 mm,文登积雪深度达74 cm,被列为2023年中国十大天气气候事件之一,这是继2005年12月罕见持续性降雪第一次入选后,海效应暴雪过程再次入选。此次降雪过程,降雪量和积雪深度为什么如此极端?其与以前的海效应暴雪相比有何特殊之处?本文主要针对极端性成因开展分析,以期海效应暴雪预报预警提供参考。

1 资料与方法

采用的资料包括国家级和省级地面气象观测站逐时降雪量、极大风、闪电、积雪深度加密观测资料、逐6 min 雷达拼图和欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)第五代大气再分析(ECMWF Reanalysis v5, ERA5)资料(时间分辨率为1 h,空间分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$)。

降雪期间,除了常规业务观测外,烟台和威海地区的16个国家级地面气象观测站还根据服务需要开展了积雪深度人工加密观测。利用这些观测资料,通过某观测时段内的新增积雪深度与降雪量之比计算降雪含水比,以分析积雪特征。为减小降雪含水比误差,参考文献[18]的做法,剔除了小雪(24 h降雪量 $p \leq 2.4$ mm)。全文主要采用统计和诊断方法开展分析。

2 降雪特点及预报难点

2.1 降雪特点

受强冷空气持续影响,2023年12月15日14时—22日17时(北京时,除了特别说明外,下同),山东半岛地区出现持续性强海效应暴雪,威海文登出现特大暴雪,烟台市区、威海市区、威海荣成、烟台牟平连续出现暴雪。图1和表1给出了此次降雪过程降雪量排在前5位国家级地面气象观测站的降雪量、大雪以上降雪日数、积雪深度及其与历史值的对比,可以看出此次降雪过程具有显著极端性。

(1)降雪强度大。5个观测站累计降雪量超过

45.0 mm,为当地历年12月平均降雪量的2~3倍,文登累计降雪量最大,为88.4 mm,超过了著名的2005年12月3—21日极端持续性海效应降雪过程。文登16日降雪量为27.5 mm、21日降雪量为33.7 mm,先后两次突破山东半岛海效应降雪日降雪量历史极值(27.0 mm,2005年12月4日出现在荣成)。牟平、文登和烟台市区的最大小时降雪量分别达到5.6 mm(21日08时)、5.5 mm(16日10时)和5.4 mm(21日05时)。

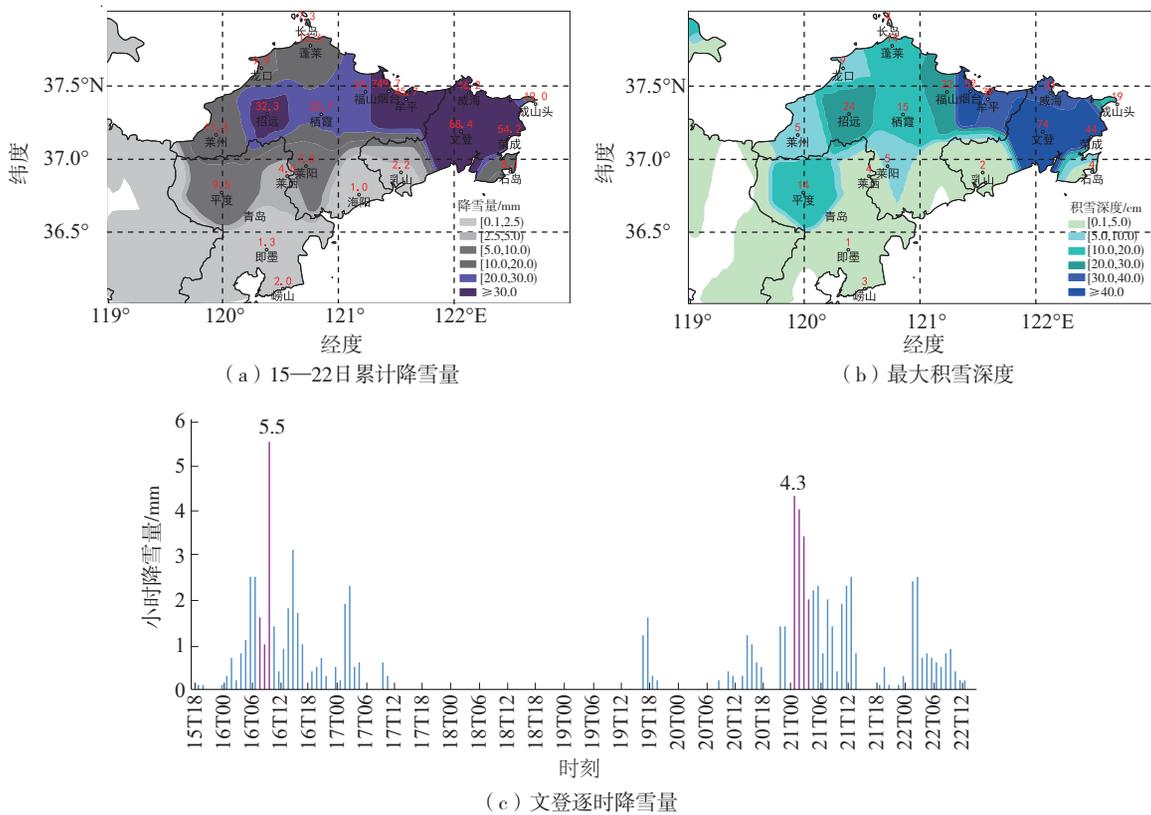
(2)积雪深。文登(74 cm)、烟台市区(52 cm)、荣成(44 cm)和牟平(39 cm)等4站积雪深度突破本站历史极值。其中,文登22日08时积雪深度达74 cm,突破文登54 cm的历史纪录(2005年12月13日),创山东所有国家级地面气象观测站积雪深度历史新高。

(3)降雪持续时间长。15—22日期间,除18日以外,其他时段烟台和威海每天均有降雪,文登和荣成大雪以上日数与2005年12月持续性降雪过程齐平。其间出现了两次降雪过程。第一次降雪发生在15日下午—17日白天,强降雪时段在16日白天;第二次降雪发生在19—22日,最强降雪时段主要在21日,其中,文登站21日00—13时有9个小时的小时降雪量超过2 mm。

(4)最强降雪中心出现“雷打雪”。两次降雪过程均出现了雷电。16日07—09时,文登附近共观测到4次闪电;21日00—04时,文登再次出现7次正闪。雷电发生前后,降雪强度大。

2.2 预报难点

极端降雪量和积雪深度是此次暴雪过程的预报难点。ECMWF在14日20时的起报场预报15日20时—16日20时威海沿海一带降雪量为10 mm,文登附近为4 mm,而降雪实况文登为27.5 mm;对于21日的降雪量预报偏差更大,强降雪中心文登附近的预报值为5 mm左右,实况为33.7 mm;相比较而言,中尺度数值模式(如CMA-SH9模式)预报降雪量大,更接近于实况,有一定预报可参考性。对于积雪深度的预报,目前主流业务数值模式中,只有全球模式有积雪深度预报,中尺度数值模式尚无此类预报产品。因此,预报员无法获得有参考价值的积雪深度模式预报产品,主要依靠经验进行预报,给海效应暴雪预报服务带来相当大的挑战。



a中红色数字—累计降雪量, 单位: mm; b中红色数字—最大积雪深度, 单位: cm; c中紫色时段—出现雷电时刻。

图1 2023年12月15—22日山东半岛累计降雪量、最大积雪深度和文登逐时降雪量演变

Fig.1 Accumulated snowfall and maximum snow depth in Shandong Peninsula and hourly snowfall in Wendeng from 15 to 22 December 2023

表1 2023年12月15—22日海效应暴雪过程与历史过程对比

Table 1 Comparison between sea-effect snowstorm from 15 to 22 December 2023 and antecedent snowfall events

类别	统计时段	威海市区	文登	荣成	烟台市市区	牟平
降雪量/mm	此次过程累计	46.1	88.3	54.2	49.7	45.7
	2005年12月过程累计	98.5	70.1	71.4	80.0	69.5
	历年12月平均	26.4	27.3	24.4	24.4	23.6
	此次最大日降雪量	16.0	33.7	19.4	17.1	18.4
	日降雪量历史极值	24.4	23.9	27.0	23.3	26.5
最大积雪深度/cm	此次过程	31	74	44	52	39
	历史极值	46	54	41	39	34
大雪以上日数/d	此次过程	5	4	4	4	3
	2005年12月过程	7	4	4	7	7

注:降雪量和降雪日统计时段均为20时—次日20时;“此次过程”指2023年12月15—22日降雪过程,“2005年12月过程”指2005年12月3—21日降雪过程;“历年”指观测站建站年至2022年。

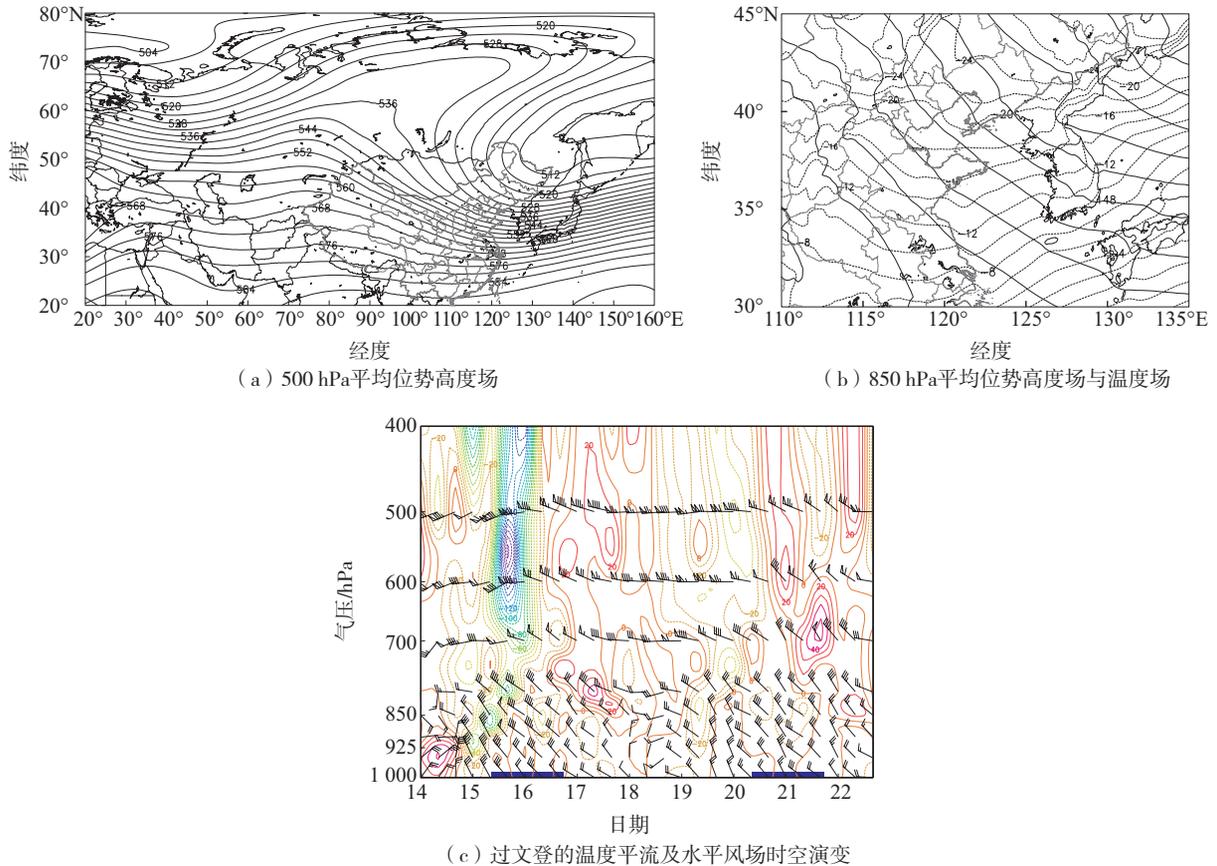
3 环流形势

此次海效应暴雪过程发生在持续寒潮低温背景下(图2)。12月13—22日,欧亚中高纬度地区经历了阻塞形势建立、维持到崩溃的过程,导致寒潮爆发,先后有两次强冷空气影响中国,北方地区出现持续低温天气。500 hPa(图2a)上,自12日起欧洲低

槽加深向东南发展为冷涡,其下游的高压脊东移至乌拉尔山地区,高压脊不断加强北伸,16日在高压脊的东北侧形成阻塞高压,阻塞形势从此建立,在欧亚中高纬度地区形成“ Ω ”形经向环流形势。与此同时,在高压脊的下游,贝加尔湖至中国东北地区有低槽发展为冷涡,导致第一次强冷空气爆发,14—16日文登上空均有明显冷平流(图2b),16日

850 hPa上下冷平流中心为 $-30 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$ (图2c),其间山东半岛出现第一次海效应暴雪。19日起,随着欧洲新生低槽发展东移,乌拉尔山地区的高压脊逐渐减弱,北侧高压中心消失,阻塞高压崩溃。

高压脊自西南向东北伸展并东移,其东侧的东北涡中心也随之东移,在贝加尔湖至东北地区形成明显的横槽,19—22日横槽转竖,强冷空气再次向南入侵,山东半岛维持冷平流,产生第二次强降雪。



a、b中黑色实等值线—位势高度场(单位: dagpm); b中黑色虚等值线—温度场(单位: $^\circ\text{C}$); c中等值线—温度平流(单位: $10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$), 风矢—水平风场(风速单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), 蓝色框对应时段—强降雪时段。

图2 2023年12月15—22日天气形势和过文登的温度平流及水平风场的时空演变

Fig.2 Synoptic situation and spatio-temporal evolution of temperature advection and horizontal wind in Wendeng from 15 to 22 December 2023

4 热力特征

海效应降雪能否形成,主要取决于热力条件,与冷空气、海气温差的强度有关。当强冷空气流经渤海暖海面时,暖海面通过湍流交换向上方的冷空气输送感热,在冷空气经过一段暖海面之后,近水面的气温升高、相对湿度增大,与上空的冷空气形成“上干冷下暖湿”的大气不稳定层结。根据海气感热通量公式^[23],冷空气越强、海温越高,则暖海面输送的感热就越多,大气层结越不稳定,越有利于产生海效应降雪。因海效应降雪云的高度一般不超过 $2 \text{ km}^{[1]}$,850 hPa高度上的温度受暖海面的影响较

小,故预报业务中通常以850 hPa的温度代表冷空气强度,海温与850 hPa的温度之差称为海气温差。下文依据上述业务习惯来分析海效应降雪过程的热力特征。

4.1 冷空气强度与历年12月海效应暴雪过程对比

1999—2023年历年12月山东半岛共发生19次海效应暴雪过程。对比分析每次暴雪过程最强降雪时段临近时次(08时或20时)山东半岛东部荣成探空站的850 hPa温度(图3),可见1999—2022年历年12月和2023年12月海效应暴雪过程的850 hPa温度差异较大。在1999—2022年历年12月的暴雪过程中,最强降雪时段850 hPa的温度最高为

-11℃,最低为-18℃,中位数为-15℃;2023年,最强降雪时段850 hPa的温度为-21~-17℃,中位数为-19.5℃,其中12月20日20时温度为-20℃,21日08时为-21℃,排在1999—2023年12月所有暴雪过程的第一位,可见2023年12月海效应暴雪过程的冷空气强度明显强于往年。

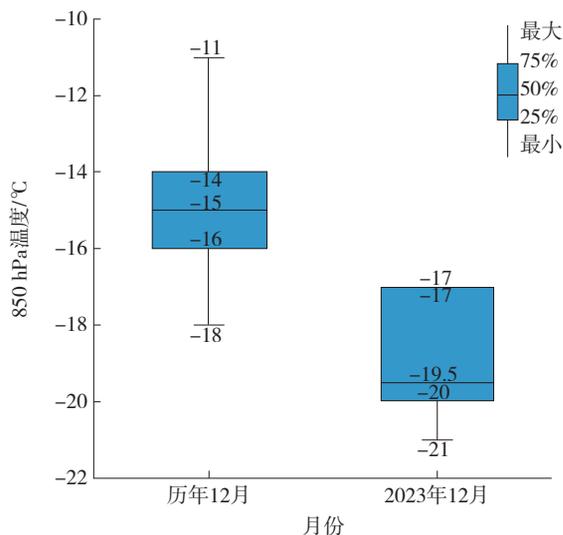


图3 1999—2022年历年12月与2023年12月海效应暴雪过程最强降雪时段的850 hPa温度对比

Fig.3 Comparison of temperature at 850 hPa during the heaviest sea-effect snowfall period in December 1999–2022 and 2023

4.2 前一个月渤海海温背景

由于海温的变化滞后于气温的变化,海效应降雪发生前期的渤海海温对海效应降雪有影响。杨成芳等^[24]研究发现,1965—2005年,80%的海效应降雪多雪年11月渤海至渤海海峡的海温为正距平,11月的渤海海温可作为山东半岛冬季冷流降雪量预报的前兆信号,当海温偏高时降雪偏多的可能性较大,反之则偏少。为此分析2023年12月极端海效应暴雪的前一个月海温背景情况。取2023年11月11日—12月10日渤海和黄海的日子平均海温,将1993—2022年同期海温作为常年值,计算二者之间的偏差,如图4所示。2023年11月11日—12月10日,黄海至渤海出现海温暖舌,黄海中海部的海温为13~16℃,在山东半岛的上游海域,渤海中北部的海温为10~13℃(图4a)。渤海海温较常年偏高0.6℃以上,海温距平中心值高达1.5℃;黄海中部海温为正距平(图4b)。2005年11月渤海北部的海温距平中心值达到了1.4℃,成为2005年之前历

年11月渤海海温偏高最大的年份^[24]。与2005年12月极端持续海效应降雪事件相比,2023年12月中旬强降雪前期的渤海海温距平更高,有利于产生持续性海效应降雪。

4.3 海气温差与2005年12月海效应暴雪过程对比

上文提到,文登2023年12月16日和21日的降雪量均打破了荣成2005年12月4日的海效应降雪气象观测历史纪录。下面对2023年和2005年相应时段的海气温差做对比分析。首先来看渤海海气温差的水平分布(基于ERA5资料计算)。2023年12月16日08时,在山东半岛北部沿海的上游海域,渤海和黄海北部的海气温差超过25℃,渤海中部大部海域的海气温差为27~29℃(图5a);21日08时,渤海中部的海气温差为29~31℃(图5b);2005年12月4日08时,海气温差大值区在渤海西部海域,为28~29℃,渤海中部海气温差为27~28℃(图5c)。由此可见,2023年12月21日的海气温差高于2005年12月4日。

为进一步分析海气温差对降雪强度的影响,图5d以烟台和威海西北方的渤海38.0°N、121.3°E格点为代表,给出了2023年12月14—23日海温、850 hPa温度及海气温差的逐时演变。在强冷空气影响之前至降雪结束,该海域的海温从14日的9℃下降到10 d之后的6℃,海温变化缓慢。相比之下,850 hPa温度发生剧烈变化,共经历了两个阶段。第一阶段自14日20时起温度逐渐下降,15日13时即降至-12℃,17日06时降至-18℃,此后温度有所回升;与此同时,海气温差明显增大,16日05时—17日06时,海气温差为22~28℃,其间正是烟台和威海地区的强降雪时段,其中文登16日05—17时小时降雪量为1.0~5.5 mm(图1c),对应海气温差的快速增大,当海气温差减小时,降雪强度减弱。第二阶段(19—22日)的变化规律与第一阶段类似,20日22时—21日13时的强降雪时段也发生在海气温差猛烈增大期间,海气温差为22~31℃,较第一阶段强。

4.4 大气层结不稳定

强冷空气入侵产生了强海气温差,有利于暖海面的湍流交换,导致大气产生不稳定。16日09时和21日01时文登均有雷电,且分别产生文登当日的最大小时降雪量。下文选取这2个时次为代表,进一步分析大气层结不稳定特征与强降雪的关系。

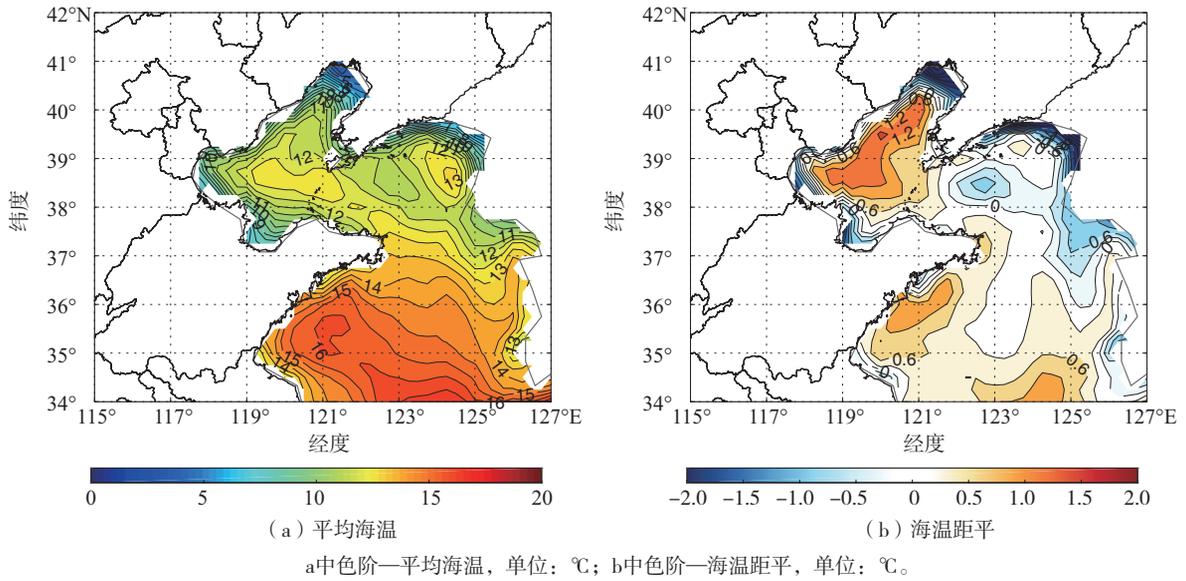
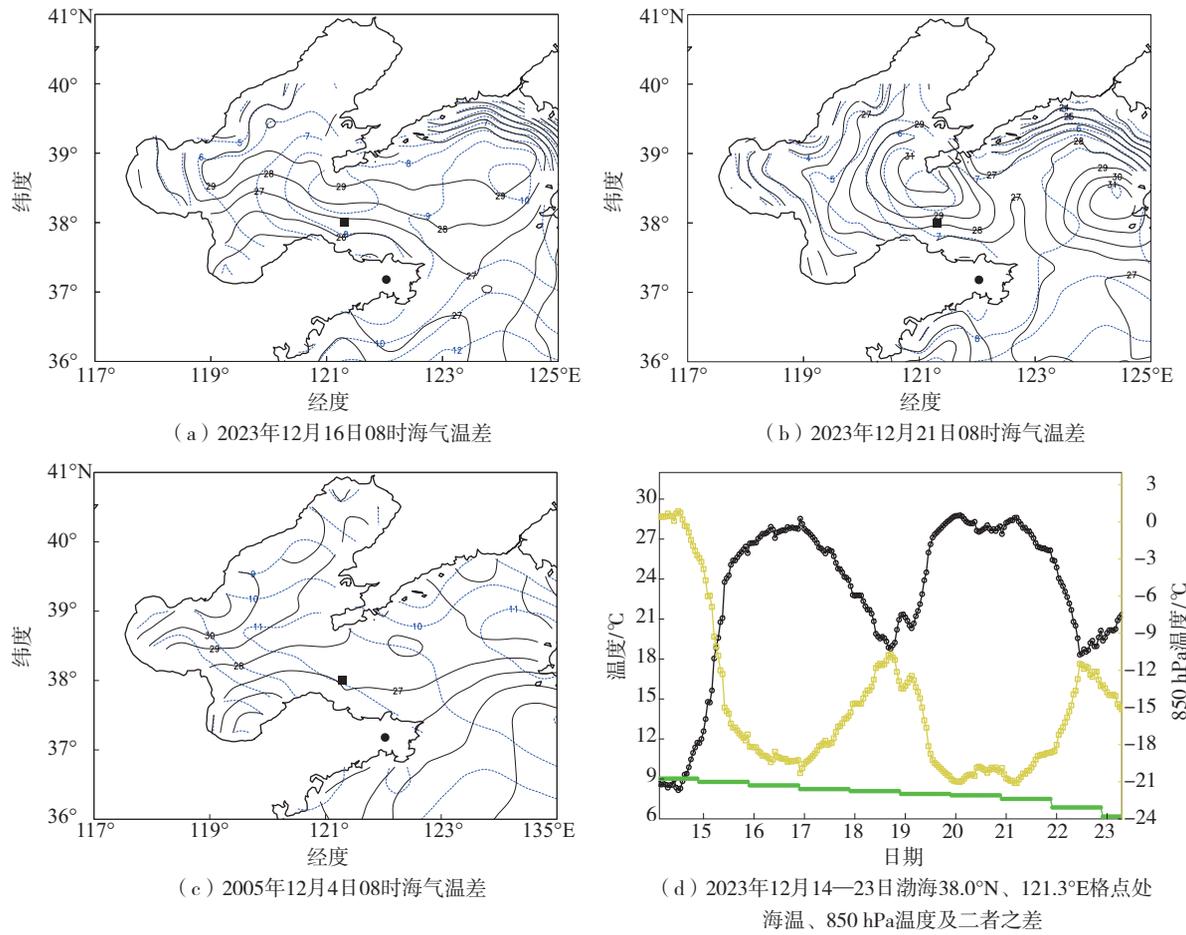


图 4 2023 年 11 月 11 日—12 月 10 日渤海和黄海平均海温及海温距平
Fig.4 Average sea surface temperature and sea surface temperature anomaly in the Bohai Sea and the Yellow Sea from 11 November to 10 December 2023



a、b、c中蓝色虚线—海温, 黑色实线—海气温差 (单位: °C), 黑色方块—d中38.0°N、121.3°E格点, 黑色圆点—文登站; d中绿色线—海温, 黄色线—850 hPa温度, 黑色线—海温与850 hPa温度之差。

图 5 2023 年 12 月 14—23 日及 2005 年 12 月 4 日渤海和黄海海气温差
Fig.5 Air-sea temperature difference in the Bohai Sea and the Yellow Sea from 14 to 23 December 2023 and on 4 December 2005

由16日09时和21日01时的1000 hPa水汽通量矢量和假相当位温分布(图6a、b)可以看出,水汽通量矢量为西北—东南向,强冷空气自大陆进入渤海,将暖海面的水汽向东南方向输送。水汽通量自暖海面到达山东半岛北部沿海时数值减小,在通过山东半岛之后,水汽通量再次增大,表明水汽在北部沿海海面辐合。暖海面的暖湿空气输送导致渤海及山东半岛的假相当位温升高,等位温线向西北延伸,而山东内陆地区温度低,等温线自西北向东南延伸,由此在山东半岛形成假相当位温脊,脊线位于烟台至威海的北部沿海地区,穿过文登—牟平一线,强降雪即发生在位温脊线附近。

文登站位于假相当位温脊线上,沿122.03°E(过文登)做假相当位温经向垂直剖面(图6c、d),以此分析假相当位温脊内垂直方向上的大气层结稳定度。可以看出,16日09时,36.0°~38.5°N 925 hPa以下假相当位温随着高度的升高而降低,表明假相当位温脊区内存在对流不稳定,925~700 hPa近乎等温,在37.5°N处不稳定层可达700 hPa。21日01时,不稳定层结与16日类似,只是范围更大,38.0°N以南都存在不稳定。大气不稳定为对流的发生奠定了有利的热力条件,16日09时和21日01时文登附近均产生了雷电,且雷电发生后降雪强度大。

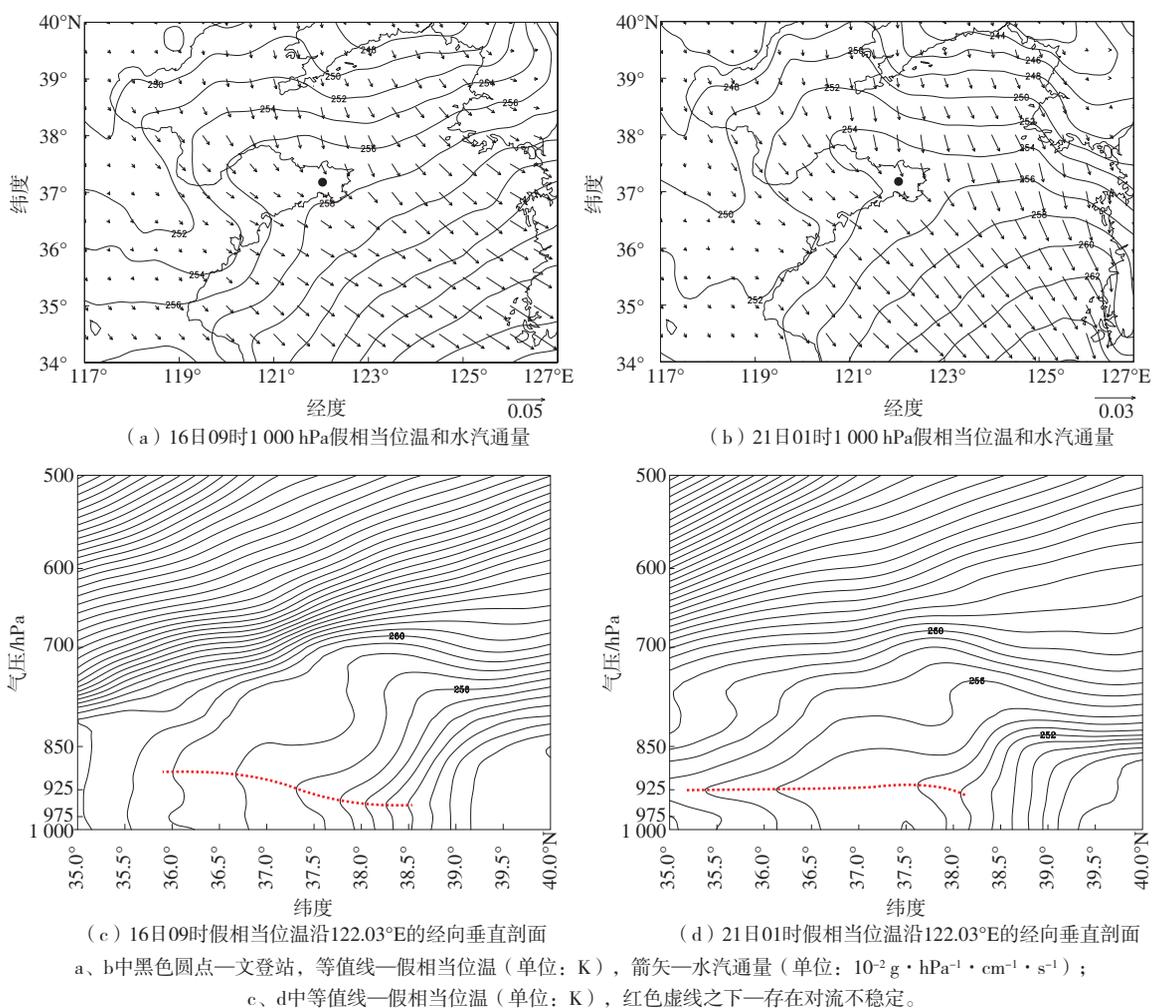


图6 2023年12月16日09时和21日01时1000 hPa假相当位温、水汽通量及过文登的假相当位温经向垂直剖面
Fig.6 Pseudo-equivalent potential temperature and water vapor flux at 1000 hPa and meridional vertical cross section of pseudo-equivalent potential temperature in Wendeng along 122.03°E at 09:00 BJT 16 and 01:00 BJT 21 December 2023

分析15—22日的假相当位温演变(图略),发现在强降雪时段,烟台—威海的北部沿海始终存在明显假相当位温脊,其间脊线在南北方向上略有摆动,其

位置决定了强降雪带的变化。当假相当位温脊减弱或变得不明显时,降雪强度也随之减弱。相应地,假相当位温在垂直方向上也略有变化,假相当位温脊存

在时,不稳定层高度高一些。此次暴雪过程展现出的不稳定特征,在过去的诸多海效应暴雪过程中都有表现^[10,12,16]。可见,强冷空气入侵渤海时在对流层低层产生大气层结不稳定,是海效应降雪产生的基本热力条件,不稳定越强,降雪强度越大。此次暴雪过程中,强冷空气持续影响时间长达8 d,不稳定层结始终存在,有利于对流的发生,导致产生持续性强降雪。

5 动力特征

海效应降雪在有利的热力条件下形成后,其降雪落区和强度主要取决于动力条件。下文从低层水平风场和垂直运动两个角度分析。

在16日和21日强降雪期间,雷达上形成明显的“列车效应”。20日21时—21日13时,带状回波宽度为10~16 km,强度为30~35 dBZ,最强为35~40 dBZ,强反射率因子带在烟台—威海自西北向东南方向传播,导致文登维持9 h的强降雪。将地面气象观测站的逐时极大风场与组合反射率拼图叠加,可见在强反射率因子带存在期间,地面风场存在明显的北—东北风与西北风之间的切变,西北风处在山东内陆至半岛的低山丘陵南侧,北—东北风来自渤海,强反射率因子带位于北—东北风和西北风之间。如16日09时(图7a),牟平—文登有30~40 dBZ的强反射率因子带,烟台—文登一线的西南方向为西北风,这是冷空气影响产生的西北风,威海—文登的风向为北—东北风,由此形成切变线,且威海北部沿海的风速大,伸向内陆接近文登的风速减小,导致文登10时的降雪量高达5.5 mm;与此同时,烟台地区为一致的西北风,没有切变线,为弱降雪。21日04时(图7b),烟台北部洋面上的担子岛站和崆峒岛站极大风均为东北风,风速达 $14 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,烟台沿海以南的内陆地区风向为西北风,处在切变线之间的强反射率因子带穿

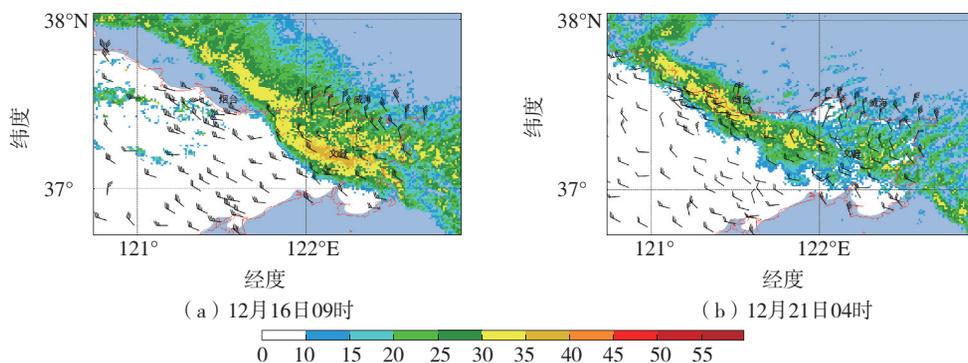
过烟台市区,烟台在05时产生5.4 mm的降雪量,而此时威海一带的雷达回波较弱,降雪强度小。可见,低层风切变产生风向辐合,同时来自海面的北风到达山东半岛陆地时,受到陆面摩擦和低山丘陵地形的影响,风速减小产生风速辐合,风向风速的辐合均有利于产生强上升运动。

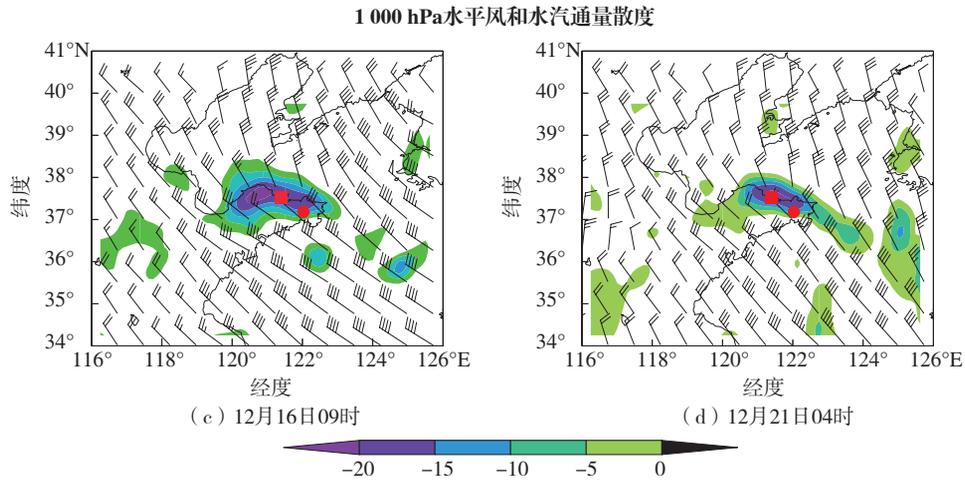
那么,低层切变线可达到什么高度?由图7c、d可看到,16日09时和21日04时,1000 hPa烟台和威海的北部沿海地区虽然东北风不明显,但仍存在西北风与北风之间的风向辐合,在辐合之间有水汽通量散度的负值区,表明水汽在此处辐合。风切变在925 hPa以下,900 hPa以上在山东半岛北部沿海地区为一致的西北风,难以看到切变线。

由此可见,当有来自渤海的北—东北风与半岛内陆的西北风构成切变线时,可产生辐合上升运动,雷达回波的“列车效应”处在切变线上,出现强降雪,且切变线的位置决定了强降雪的落区,切变线仅存在于925 hPa以下。在19—22日的降雪过程中,切变线和强反射率因子带在文登附近的维持时间最长,导致文登累计降雪量大,成为强降雪中心。此次过程中出现的低层切变线与过去的海效应暴雪过程类似^[3,12],表明低层切变线是海效应暴雪动力场的重要特征。

进一步分析垂直上升运动情况。12月15—22日,在15、16、19、21、22日先后有5次低槽穿过渤海和山东半岛,每一次低槽过境,均有槽前正涡度增加,涡度中心在700 hPa以上,同时在850 hPa以下至近海面也存在正涡度。20日夜间低层涡度最大,为 $60\times 10^{-6}\sim 90\times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ (图8a)。这是天气尺度产生的强迫上升运动。在低槽过境前后天气尺度强迫产生的上升运动与海陆地形差异造成的辐合上升运动相叠加,可导致山东半岛北部沿海地区垂直上升运动显著增强。

地面极大风及雷达组合反射率因子





a、b中色阶—雷达组合反射率因子(单位: dBZ), 风矢—极大风场(风速单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); c、d中色阶—水汽通量散度(单位: $10^{-5} \text{g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), 风矢—水平风场(风速单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), 红色方块—烟台站, 红色圆点—文登站。

图7 2023年12月16日09时和21日04时地面极大风、雷达组合反射率因子及1000 hPa水平风、水汽通量散度

Fig.7 Surface extreme wind/composite radar reflectivity and 1 000-hPa horizontal wind/water vapor flux divergence at 09:00 BJT 16 and at 04:00 BJT 21 December 2023

由16日09时过文登的经向风垂直场和垂直速度剖面(图8b)可以看出, $37.1^{\circ} \sim 38.5^{\circ} \text{N}$, 700 hPa以上为下沉气流, 700 hPa以下为上升气流, 在 37.1°N 以南、 38.5°N 以北地区为下沉气流, 由此构成了垂直环流。 $37.1^{\circ} \sim 38.5^{\circ} \text{N}$, 700 hPa以下垂直速度为负值, 最大垂直速度位于 37.5°N 附近, 中心值达 $-100 \times 10^{-2} \text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$, 出现在975~850 hPa。可见在文登附近存在强上升运动, 由此在16日09—10时产生小时降雪量达5.5 mm的强降雪, 这是文登整个降雪过程中的最强降雪时段。上升运动集中在700 hPa以下, 再次印证了海效应暴雪为低云降雪。综合15—22日降雪期间的垂直速度, 可以看出无论是15—17日第一次降雪还是19—22日第二次降雪过程, 其垂直上升运动中心均在925 hPa上下。16日08时前后和21日04时最大垂直速度分别达 $-100 \times 10^{-2} \text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $-140 \times 10^{-2} \text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ 。在第二阶段强降雪过程中, 强上升运动在20日21时—21日13时维持时间达16 h, 相应地产生了强降雪, 导致文登20日20时—21日20时的24 h降雪量达33.7 mm, 突破历史极值。强上升运动持续时间特别长, 是此次极端暴雪过程的有利条件之一。

6 极端积雪特征

6.1 降雪含水比

降雪含水比是指积雪深度与降雪量的比值, 是

预报积雪深度的一个重要参数, 也是表征积雪深度特性的量度之一。此次暴雪过程积雪深度达到极值, 那么其降雪含水比有何特征? 为此, 利用降雪期间获得的中雪(55站次)、大雪(53站次)、暴雪(45站次)量级的积雪深度加密观测资料, 计算各等级降雪的降雪含水比。为了与11月海效应降雪的积雪特征进行比较, 同时对2023年11月的4次海效应降雪过程的降雪含水比进行计算, 11月共有27站次中雪及以上降雪, 因样本量少不做分级。

由11月和12月降雪含水比(图9)来看, 2023年12月的海效应暴雪过程中, 中雪、大雪、暴雪的降雪含水比中位数分别为 1.3 、 1.5 、 $1.3 \text{cm} \cdot \text{mm}^{-1}$, 75%分位分别为 1.6 、 1.9 、 $1.5 \text{cm} \cdot \text{mm}^{-1}$, 略高于中位数; 中雪的最大降雪含水比可达 $2.8 \text{cm} \cdot \text{mm}^{-1}$, 最小为 $0.3 \text{cm} \cdot \text{mm}^{-1}$; 暴雪的最大降雪含水比达 $1.8 \text{cm} \cdot \text{mm}^{-1}$, 最小为 $0.8 \text{cm} \cdot \text{mm}^{-1}$ 。这个结果与1999—2018年的28次海效应暴雪过程(以12月暴雪为主)的降雪含水比特征基本相同, 但明显大于内陆暴雪的降雪含水比^[18-19], 说明此次极端海效应暴雪过程积雪深度的极端性主要与降雪量异常有关, 并非由降雪含水比造成。

相比之下, 2023年11月的海效应降雪过程降雪含水比中位数仅为 $0.3 \text{cm} \cdot \text{mm}^{-1}$, 75%分位为 $0.7 \text{cm} \cdot \text{mm}^{-1}$, 其最大值为 $1.6 \text{cm} \cdot \text{mm}^{-1}$, 远小于

12月海效应暴雪过程的降雪含水比。分析二者差异的原因,11月的海效应降雪过程前期0 cm地温高,冷空气势力弱(图略),0 cm地温很难降至0.5℃

以下,导致大部分降雪融化,积雪深度小,降雪含水比低。如,11月23日,蓬莱纯降雪量为9.2 mm,积雪深度只有0.1 cm,没有形成有效积雪。

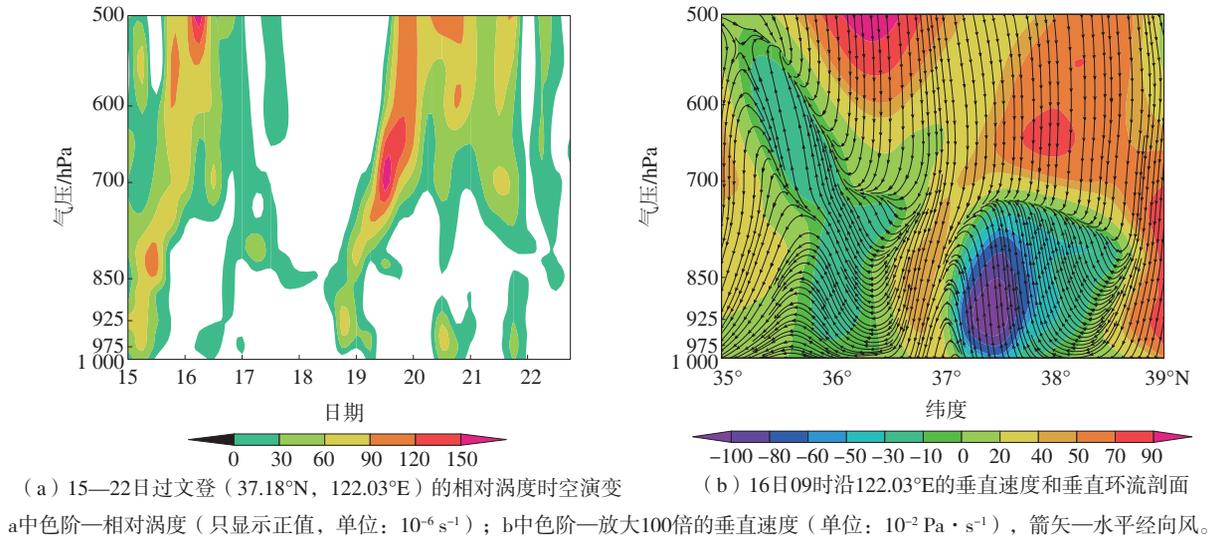


图 8 2023 年 12 月 15—22 日过文登的相对涡度时空演变和 16 日 09 时沿 122.03°E 的垂直速度和垂直环流剖面
Fig.8 Evolution of relative vorticity in Wendeng from 15 to 22 and cross section of vertical velocity and circulation along 122.03°E at 09:00 BJT 16 December 2023

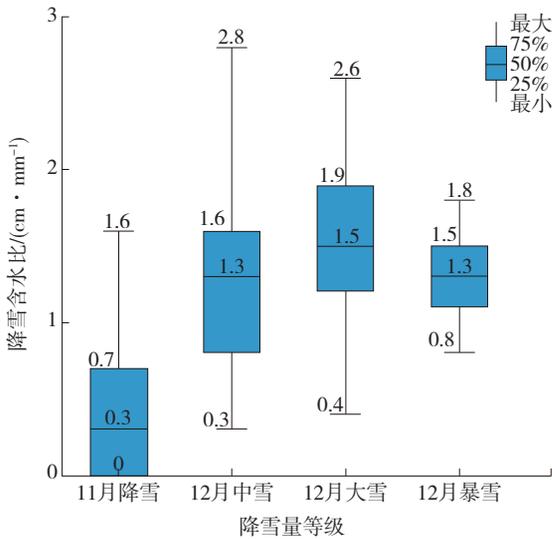


图 9 2023 年 11 月和 12 月海效应降雪过程降雪含水比箱形图
Fig.9 Box plot of snow-to-liquid ratio of sea-effect snowfall processes in November and December 2023

6.2 高空和近地面气象条件对积雪深度的影响

由上文分析可以看到,此次海效应暴雪过程的降雪含水比的中位数在 $1.3 \sim 1.5 cm \cdot mm^{-1}$,比回流形势暴雪、江淮气旋暴雪的降雪含水比明显偏高^[18]。为什么此次暴雪过程降雪含水比高?下面

从高空和近地面气象条件两方面进行分析。

首先来看高空条件。研究^[25-26]表明,新降雪的降雪含水比与冰晶结构有关,冰晶空隙内空气量所占体积的相对比例决定了新雪的蓬松程度,大的树枝状冰晶会占据更多的大气空间。决定冰晶形状最重要的环境条件是温度,环境温度在 $-20 \sim -10 \text{ }^\circ\text{C}$ 主要是树枝状、厚片状、盘状^[27], $-15 \text{ }^\circ\text{C}$ 为树枝状冰晶形成的峰值区^[28];降雪过程中上升运动最大层附近的温度和相对湿度决定了冰晶类型^[29-30]。因此,图 10a、b 给出了 12 月 15—22 日过文登和烟台市区的垂直速度、相对湿度和温度时空演变,以此考察云中冰晶形成的宏观条件。可以看出,2 个站点表现出相似的特征。16—17 日和 20—21 日的降雪时段内均出现强上升运动,在最强上升运动和高相对湿度相叠加的层次内,温度在 $-20 \sim -12 \text{ }^\circ\text{C}$,表明云内的温度有利于树枝状冰晶的增长,可使得积雪体积增大。

进一步基于 ERA5 资料分析云中冰相粒子和液相粒子的垂直分布演变(图 10c、d)。文登和烟台的云中冰(液)相粒子的垂直分布表现出相似特征。以文登为例,第一次降雪过程中,16 日 04 时之前文登弱降雪期间,850 hPa 附近同时存在冰相粒子和液相粒子,在 16 日 04 时—17 日 11 时强降雪时段,云中均为

冰相粒子,冰相粒子含量中心值为 $10 \times 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$; 第二次降雪过程中,19日—20日09时为冰相粒子和液相粒子共存,20日10时—22日05时强降雪期间则仅有冰相粒子,中心值为 $18 \times 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$,22日06时之后,再次出现了部分液相粒子。这表明在主要降雪时段内云中为纯冰相粒子,因云中温度低于 $-10 \text{ }^{\circ}\text{C}$,冰晶为聚并增长^[28],有利于形成较大雪花,

产生大的降雪含水比和积雪深度。

在最大上升运动层以下,相对湿度减小,1000 hPa的温度低于 $-8 \text{ }^{\circ}\text{C}$,冰晶在下落过程不会融化从而可保持原始的形态。可见,此次暴雪过程高空的温度、垂直速度和相对湿度的配置对云中树枝状冰晶的形成及在下落过程形态的维持都有利,为产生大的降雪含水比和积雪深度提供了有利的初始条件。

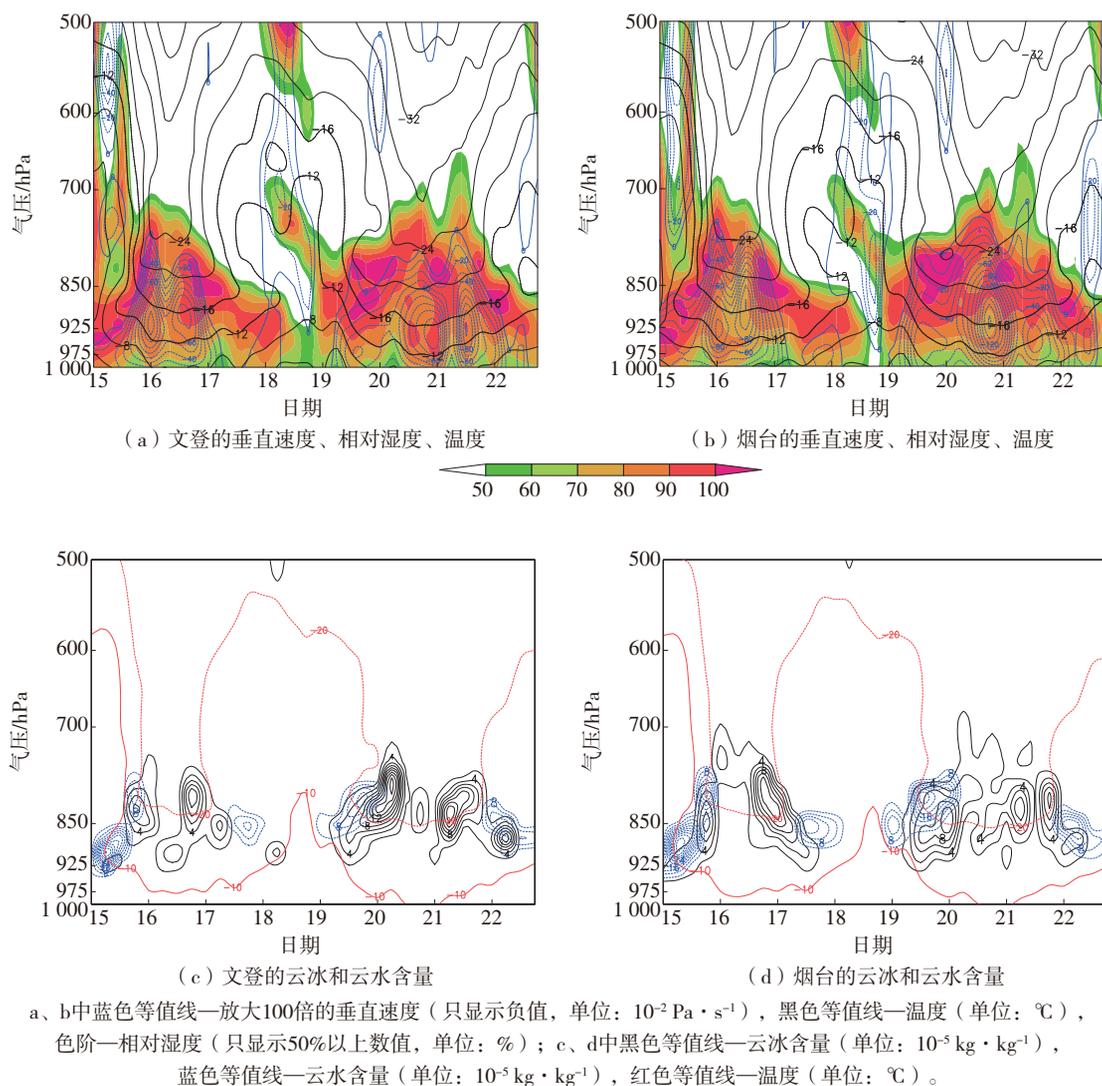


图10 2023年12月15—22日过文登和烟台的垂直速度、相对湿度、温度及云中水物质时空演变

Fig.10 Spatio-temporal evolution of vertical velocity, relative humidity, temperature, specific cloud ice water content, and specific cloud liquid water content in Wendeng and Yantai from 15 to 22 December 2023

雪花降落到近地面,影响积雪深度的主要是2 m气温和0 cm地温。由于强冷空气频繁影响,山东半岛地区持续温度较低。在海效应降雪过程前期,13—14日,冷空气影响山东半岛,温度逐渐下降,15日08时,文登2 m气温和0 cm地温均开始降

至 $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下,前期温度低为海效应降雪产生明显积雪奠定了良好的基础。随着冷空气不断影响,15日下午—22日,气温持续维持在 $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下,尤其在降雪期间气温低于 $-5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (图11)。15日18时,海效应降雪开始,小时降雪量为 0.1 mm ,0 cm地温为

-0.8℃,降雪初期0 cm地温在-1.8~-0.8℃,降雪落到地面的雪不融化,有利于积雪形成。16日01时起,降雪逐渐增强,小时降雪量超过0.3 mm,0 cm地温缓慢升高,表明地面有明显积雪产生。16日08时,0 cm地温升至-0.1℃,积雪深度达到14 cm。

16日18时,0 cm地温升至0℃,此后一直稳定维持在0℃,其间偶尔有时次为0.1℃。由此可见,降雪过程前后强冷空气持续影响,2 m气温和0 cm地温低,导致降雪不融化,逐渐累积形成强积雪,是此次海效应暴雪过程积雪深度异常大的有利因素。

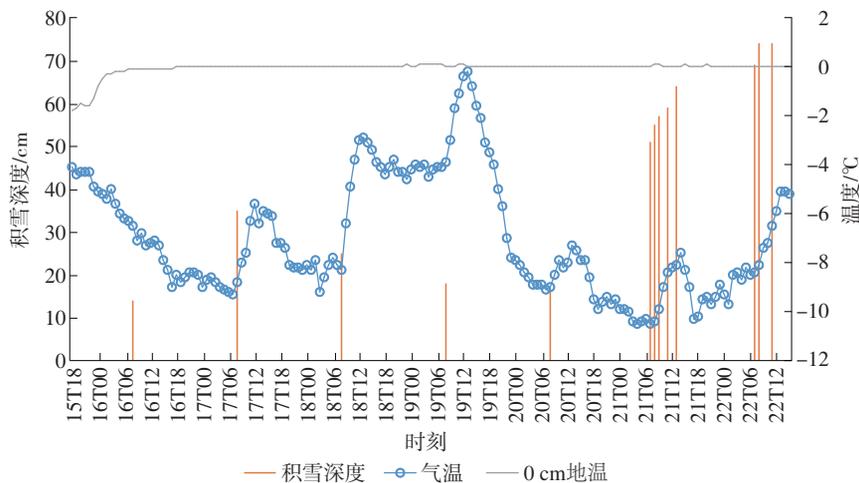


图11 2023年12月15—22日文登逐时2 m气温、0 cm地温和积雪深度演变

Fig.11 Evolution of hourly air temperature at 2 m, ground temperature at 0 cm, and snow depth in Wendeng from 15 to 22 December 2023

7 结论与讨论

利用地面气象观测站、多普勒天气雷达、闪电、积雪深度人工加密观测资料、常规观测及ERA5资料,主要聚焦环流背景、热力和动力条件探讨2023年12月15—22日山东半岛特大海效应暴雪过程降雪量和积雪深度极端的形成原因。主要结论如下:

(1)此次过程有4站积雪深度突破本站历史极值,有1站2 d的日降雪量为山东半岛海效应降雪有气象记录以来的最大值,文登积雪深度达74 cm,超过山东所有国家级地面气象观测站纪录,是一次极端海效应暴雪事件。

(2)欧亚中高纬度地区阻塞形势下两次异常强冷空气持续影响渤海和山东半岛地区,造成降雪持续时间长、累计降雪量大,是此次极端暴雪过程产生的关键因素;暴雪发生前一个月内渤海海温异常偏高,为有利海温背景。

(3)冷空气强及海温偏高造成海气温差异常偏大,700 hPa以下产生对流不稳定,对流性使得降雪强度大。强降雪发生在海气温差快速增大阶段。

(4)925 hPa以下存在来自渤海的北—东北风

与内陆地区的西北风构成的切变线,产生强上升运动,切变线附近对应雷达反射率因子图上的“列车效应”,为强降雪落区。不稳定层和上升运动局限于2 km以下,为典型低云降雪。

(5)降雪含水比大于内陆暴雪,但与一般海效应暴雪过程相当。云中强垂直上升运动、高相对湿度层的温度在-20~-12℃,适宜于树枝状冰晶形成和维持;2 m气温持续低于-5℃,0 cm地温在降雪开始时即降至0℃以下,且两次强降雪过程仅间隔1 d,均有利于降雪累积产生极端积雪深度。

除以上分析外,此次海效应暴雪过程还有很多科学问题有待深入研究,如,微物理特征和“雷打雪”现象。微物理过程是海效应暴雪的一个重要环节,与冰晶形态、降雪量、积雪深度均有密切关系,本文主要从天气尺度分析了有利于树枝状冰晶形成的物理条件,还缺乏冰晶形态的实际观测资料支持。关于“雷打雪”现象,此次雷电只是出现在文登一带,而烟台、招远、荣成等暴雪区域没有出现雷电,为什么同样是强降雪,有的会出现明显雷电,而有的却没有?这些科学问题需要借助于高时空分辨率的多源观测资料及中尺度数值模拟,再下一步深入挖掘。

参考文献:

- [1] 杨成芳.山东暴雪[M].北京:气象出版社,2023.
- [2] 杨成芳,李泽椿.近十年中国海效应降雪研究进展[J].海洋气象学报,2018,38(4):1-10.
- [3] 杨成芳,曹玥瑶.秋季渤海海效应降雨的统计特征及形成机理[J].海洋气象学报,2022,42(1):12-22.
- [4] 周淑玲,王科,杨成芳,等.一次基于综合探测资料的山东半岛冷流暴雪特征分析[J].气象,2016,42(10):1213-1222.
- [5] 李建华,崔宜少,杨成芳.不同中心位置的山东半岛冷流暴雪天气分析[J].中国海洋大学学报(自然科学版),2015,45(8):10-18.
- [6] 周雪松,杨成芳,孙兴池.基于卫星识别的渤海海效应事件基本特征分析[J].海洋气象学报,2019,39(1):26-37.
- [7] 高晓梅,杨成芳,王世杰,等.莱州湾冷流降雪的气候特征及其成因分析[J].气象科技,2017,45(1):130-138.
- [8] 梁军,张胜军,黄艇,等.辽东半岛2次高影响冷流降雪的对比如分析[J].干旱气象,2015,33(3):444-451.
- [9] 陈雷,戴建华,韩雅萍.上海地区近10年冷流降雪天气诊断分析[J].气象,2012,38(2):182-188.
- [10] 李鹏远,傅刚,郭敬天,等.2005年12月上旬山东半岛暴雪的观测与数值模拟研究[J].中国海洋大学学报(自然科学版),2009,39(2):173-180.
- [11] 郑怡,高山红,吴增茂.渤海海效应暴雪云特征的观测分析[J].应用气象学报,2014,25(1):71-82.
- [12] 李刚,刘畅,曹玥瑶,等.一次1月山东半岛东部极端海效应暴雪的发生机制分析[J].气象,2020,46(8):1074-1088.
- [13] 林曲凤,吴增茂,梁玉海,等.山东半岛一次强冷流降雪过程的中尺度特征分析[J].中国海洋大学学报(自然科学版),2006,36(6):908-914.
- [14] 周雪松,杨成芳,张少林.地形对冷流暴雪影响的可能机制研究[J].安徽农业科学,2011,39(31):19419-19422.
- [15] 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.
- [16] 杨成芳,车军辉,吕庆利,等.位涡在冷流暴雪短时预报中的应用[J].中国海洋大学学报(自然科学版),2009,39(3):361-368.
- [17] 杨成芳,高留喜,王方.一次异常强渤海海效应暴雪的三维运动研究[J].高原气象,2011,30(5):1213-1223.
- [18] 杨成芳,朱晓清.山东降雪含水比统计特征分析[J].海洋气象学报,2020,40(1):47-56.
- [19] 刘奇奇,王健,高帆,等.山东深秋一次暴雪过程雪水比影响因子分析[J].海洋气象学报,2024,44(1):88-96.
- [20] 高留喜,杨成芳,刘畅.山东一次极端雨雪过程积雪特征分析及模式产品检验[J].海洋气象学报,2022,42(4):58-66.
- [21] SCHROEDER J J, KRISTOVICH D A R, HJELMFELT M R. Boundary layer and microphysical influences of natural cloud seeding on a lake-effect snowstorm[J]. Mon Wea Rev,2006,134(7):1842-1858.
- [22] BRAHAM R R Jr. Snow particle size spectra in lake effect snows[J]. J Appl Meteor,1990,29(3):200-207.
- [23] 于志良.胶东半岛冷流降雪与海气湍流感热输送的关系[J].气象学报,1998,56(1):120-127.
- [24] 杨成芳,周雪松,王业宏.山东半岛冷流降雪的气候特征及其前兆信号[J].气象,2007,33(8):76-82.
- [25] MAGONO C, CHUNG W L. Meteorological classification of natural snow crystals[J]. J Fac Sci Hokkaido Univ Ser 7 Geophys,1966,2(4):321-335.
- [26] NAKAYA U. Snow crystals: natural and artificial[M]. Cambridge:Harvard University Press,1954.
- [27] ROEBBER P J, BRUENING S L, SCHULTZ D M, et al. Improving snowfall forecasting by diagnosing snow density[J]. Wea Forecasting,2003,18(2):264-287.
- [28] LIBBRECHT K G. Ken Libbrecht's field guide to snowflakes[M]. Minnesota:Voyageur Press,2006.
- [29] KOROLEV A, McFARQUHAR G, FIELD P R, et al. Mixed-phase clouds: progress and challenges[J]. Meteor Monogr,2017,58:5.1-5.50.
- [30] AUER A H, WHITE J M. The combined role of kinematics, thermodynamics and cloud physics associated with heavy snowfall episodes[J]. J Meteor Soc Japan,1982,60(1):500-507.