

李建华,肖明静,孙倩倩,等.2023年和2005年山东两次极端海效应暴雪的对比[J].海洋气象学报,2024,44(2):15-26.  
LI Jianhua, XIAO Mingjing, SUN Qianqian, et al. Comparative analysis on two extreme sea-effect snowstorms in Shandong in 2023 and 2005[J]. Journal of Marine Meteorology, 2024, 44(2): 15-26. DOI: 10.19513/j.cnki.hyqxxb.20240219003. (in Chinese)

## 2023年和2005年山东两次极端海效应暴雪的对比

李建华<sup>1,2</sup>, 肖明静<sup>3</sup>, 孙倩倩<sup>2</sup>, 姜俊玲<sup>4</sup>, 王洪<sup>1</sup>

(1.山东省气象防灾减灾重点实验室, 山东 济南 250031; 2.威海市气象局, 山东 威海 264200; 3.山东省气象科学研究所, 山东 济南 250031; 4.烟台市气象局, 山东 烟台 264003)

**摘要** 利用常规气象观测资料、降水天气现象仪资料、美国国家海洋和大气管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)资料、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)资料等对2023年12月山东半岛的海效应特大暴雪和2005年12月持续性海效应强降雪过程的高空形势、海气温差、低层切变线、大气水凝物等进行了综合分析。结果表明:(1)亚欧大陆强大的经向高压脊和脊前冷涡环流是发生海效应暴雪的大尺度环流背景。2005年高压脊宽广、稳定少动是海效应强降雪持续时间长的主要原因,2023年高压脊、冷涡的经向特征更加显著,冷空气爆发力强。(2)2005、2023年渤海海面温度较常年偏高;2023年偏高2.5℃的范围更广,12月20—21日海气温差超过30℃。(3)出现暴雪时,山东半岛北部存在偏西风和北—东北风之间的风场辐合;荣成站出现暴雪时,低层需要更强劲的引导气流。(4)2023年12月20—21日,云体主要由冰晶和雪晶构成,较多雪晶位于上升气流上方,与冰粒子分布区域重叠,说明除了水汽凝华外,冰雪晶粒子之间的聚合作用对雪粒子的增长有很大帮助,聚合产生的枝状雪粒子有利于积雪深度增大,文登站雨滴谱也表明,21—22日雪粒子直径偏大的特征更明显。

**关键词** 海效应降雪;极端暴雪;山东半岛;海气温差

中图分类号: P458.3; P468.0+25 文献标志码: A 文章编号: 2096-3599(2024)02-0015-12  
DOI: 10.19513/j.cnki.hyqxxb.20240219003

## Comparative analysis on two extreme sea-effect snowstorms in Shandong in 2023 and 2005

LI Jianhua<sup>1,2</sup>, XIAO Mingjing<sup>3</sup>, SUN Qianqian<sup>2</sup>, JIANG Junling<sup>4</sup>, WANG Hong<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory for Meteorological Disaster Prevention and Mitigation of Shandong, Jinan 250031, China; 2. Weihai Meteorological Bureau, Weihai 264200, China; 3. Shandong Institute of Meteorological Sciences, Jinan 250031, China; 4. Yantai Meteorological Bureau, Yantai 264003, China)

**Abstract** Based on the data of conventional meteorological observation, precipitation weather phenomenon instrument, NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration), and ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) Reanalysis v5 (ERA5), the upper-level

收稿日期: 2024-02-19; 修回日期: 2024-04-24

基金项目: 山东省自然科学基金项目(ZR202211060028); 山东省气象局科研项目(2022sdqxm04, 2023SDYD26); 中国气象局创新发展专项(CXFZ2023J084)

第一作者简介: 李建华, 女, 硕士, 正高级工程师, 研究方向为短期预报, jianhua80@126.com。

通信作者简介: 肖明静, 女, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为灾害性天气分析和数值模式研究, mjshaw0218@sina.com。

synoptic situations, air-sea temperature difference, low-level shear lines, and atmospheric hydrometeors of the heavy sea-effect snowstorm in December 2023 and the continuous sea-effect heavy snowfall in December 2005 over Shandong Peninsula are comprehensively analyzed. The results are shown below. (1) The strong meridional ridge in Eurasia and the cold vortex circulation in front of the ridge are the large-scale circulation background of sea-effect snowstorm. The broad and stable ridge is the main reason for the long duration of the strong sea-effect snowfall in 2005. The meridional characteristics of ridge and cold vortex are more significant in 2023, so the cold air is stronger. (2) The SST (sea surface temperature) of the Bohai Sea in 2005 and 2023 is higher than that in the normal years. In 2023, the range of temperature 2.5 °C higher than the normal years is wider, and the air-sea temperature difference exceeds 30 °C from 21 to 22 December. (3) When a snowstorm occurs, there is wind field convergence between westerly and northerly-northeasterly in the north of Shandong Peninsula; the snowstorm at Rongcheng station requires stronger steering flow in the low level. (4) The cloud body is mainly composed of ice crystals and snow crystals, and more snow crystals above the updraft overlap with ice particles from 20 to 21 December 2023, which indicates that the aggregation of snow-ice crystals contributes to the growth of snow particles besides water vapor deposition. The dendritic snow particles produced by the aggregation are conducive to the increase of snow depth. The raindrop size distribution at Wendeng station also shows that the diameter of the snow particles is larger from 21 to 22 December.

**Keywords** sea-effect snowfall; extreme snowstorm; Shandong Peninsula; air-sea temperature difference

## 引言

2023年冬季以来山东半岛接二连三地出现海效应强降雪,12月16日山东威海文登观测站日降雪量为27.5 mm,刷新了该站的最大日降雪量纪录,21日该站降雪量达33.5 mm,再次打破纪录,且74 cm的积雪深度刷新山东积雪深度极值,强降雪引起了社会各界的极大关注。自2005年12月烟台和威海出现持续性海效应强降雪以来,气象学者已经进行了较多的研究,并取得许多有价值的成果。秋冬季节,大气环流形势造成的强冷空气经过渤海暖海面时形成较大的海气温差,在暖湿海面上经过感热交换形成海效应降水,根据低层和地面温度的不同配置,降水相态可以分为雨、雨夹雪和雪<sup>[1-2]</sup>。山东半岛地形的抬升和北海岸的风场辐合对海效应降水起到加强的作用,海效应降水对流不稳定主要发生在700 hPa以下的对流层低层<sup>[3-7]</sup>,高层干冷空气的侵入触发了不稳定能量的释放<sup>[8]</sup>,低层辐合区的长期维持使海效应云带强烈发展并产生“列车效应”,是产生暴雪的主要原因之一<sup>[9]</sup>。与江淮气旋暴雪和回流形势暴雪相比,山东半岛海效应暴雪的降雪含水比明显增大<sup>[10]</sup>。

近年来,极端灾害天气频发,大范围持续性暴雪天气常造成交通瘫痪,同时给农业和畜牧业带来破坏等很大影响,对社会经济造成极大损失。研究人员对山东极端雨雪的相态转换特征、严重积雪形成

原因进行了分析,认为雪深与降雪量、降雪含水比、低温和地形等要素密切相关<sup>[11-13]</sup>。在新疆<sup>[14-15]</sup>和山东<sup>[16]</sup>极端暴雪分析中,低空急流和特殊地形对暴雪作用明显。何立富等<sup>[17]</sup>对一次东北极端暴雪分析发现,黄渤海气旋爆发性发展阶段为极端暴雪过程的最强时段。刘红武等<sup>[18]</sup>在2018年湖南北极低温暴雪分析中发现,乌拉尔山阻塞高压异常偏强,副热带高压较常年偏北,大尺度环流系统的异常为极端暴雪低温天气提供了有利的背景场。李刚等<sup>[19]</sup>分析了2018年1月山东半岛极端海效应暴雪,认为1月产生暴雪需要的冷空气强度较12月偏强。2023年12月的海效应暴雪极端特征更明显,文中利用多种资料对2023年12月山东半岛的海效应极端特大暴雪和2005年12月持续性海效应强降雪过程的高空形势、低层气温、海面温度(sea surface temperature, SST;以下简称“海温”)、云中水凝物等进行综合分析对比,试图找到两次典型12月海效应强降雪天气过程的异同点。

## 1 资料说明

所用资料包括常规气象观测资料、降水天气现象仪资料、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,以及美国国家海洋和大气管理局(National Oceanic

and Atmospheric Administration, NOAA)资料,具体资料使用情况说明如下。

(1)常规气象观测资料。选取烟台地区的烟台站和牟平站以及威海地区的威海站、文登站和荣成站共5个海效应降雪明显的国家级地面气象观测站2005、2023年12月逐日(20:00—次日20:00;北京时间,下同)降水量;2005年国家级地面气象观测站逐时风场,2023年国家级地面气象观测站和区域气象观测站逐时风场;文登站降水天气现象仪资料用于分析降雪的微物理特征。

(2)NOAA资料用于计算海温、海温距平,空间分辨率为 $0.25^{\circ}\times 0.25^{\circ}$ ,时间分辨率为1d。用ERA5资料对各气压层天气形势、气温、比湿、上升速度、水凝物含量和低层风场、风场散度进行计算,分辨率为 $0.25^{\circ}\times 0.25^{\circ}$ ,时间分辨率为1h。

## 2 过程实况

2005年山东半岛烟台和威海出现持续性海效

应强降雪,12月3—21日烟台、牟平、威海、文登和荣成5个国家级地面气象观测站共出现16个降雪日(至少一个站点日降雪量 $p\geq 0.1$ mm),7个暴雪日(至少一个站点日降雪量 $p\geq 10.0$ mm),最大累计降雪量为98.5mm,出现在威海站,最大日降雪量为27.0mm(文中所有日降雪量的统计时间均为20:00—次日20:00),出现在威海的荣成站,最大积雪深度为54cm,出现在文登站(表1)。

2023年12月,山东出现极端暖冷气温转换,上旬山东平均气温为 $6.1^{\circ}\text{C}$ ,较常年同期偏高 $3.7^{\circ}\text{C}$ ,为1969年以来历史同期最暖;11—25日平均气温为 $-4.6^{\circ}\text{C}$ ,较常年偏低 $5.2^{\circ}\text{C}$ ,为1951年有气象记录以来历史同期最冷。极端暖冷转换,为海效应强降雪的发生提供了有利的大气降温和海气温差条件。15日白天,冷涡南下,山东半岛由前期的回流降水转为海效应降雪,15日下午至22日最大累计降雪量为88.3mm,最大日降雪量为33.7mm,最大积雪深度为74cm,均出现在文登站,如表1所示。

表1 2005年12月和2023年12月山东半岛两次海效应降雪过程  
Table 1 Sea-effect snowfall in Shandong Peninsula in December 2005/2023

降雪过程	降雪日数/d	最大累计降雪量/mm (出现站点)	暴雪日数/d	最大日降雪量/mm (出现日期和站点)	最大观测雪深/cm (出现日期和站点)
2005年12月3—21日	16	98.5(威海)	7	27.0(12月4日荣成)	54(12月13日文登)
2023年12月15—22日	8	88.3(文登)	4	33.7(12月22日文登)	74(12月22日文登)

2023年12月文登站单日降雪量和文登、荣成、烟台、牟平站积雪深度均刷新2005年纪录,日降雪强度更强,但持续时间较2005年短。文中所选取的烟台、牟平、威海、文登和荣成5个国家级地面气象观测站分别在2005年12月4日、6—7日、11—13日、21日和2023年12月16日、20—22日出现暴雪。

## 3 极端暴雪影响因子分析

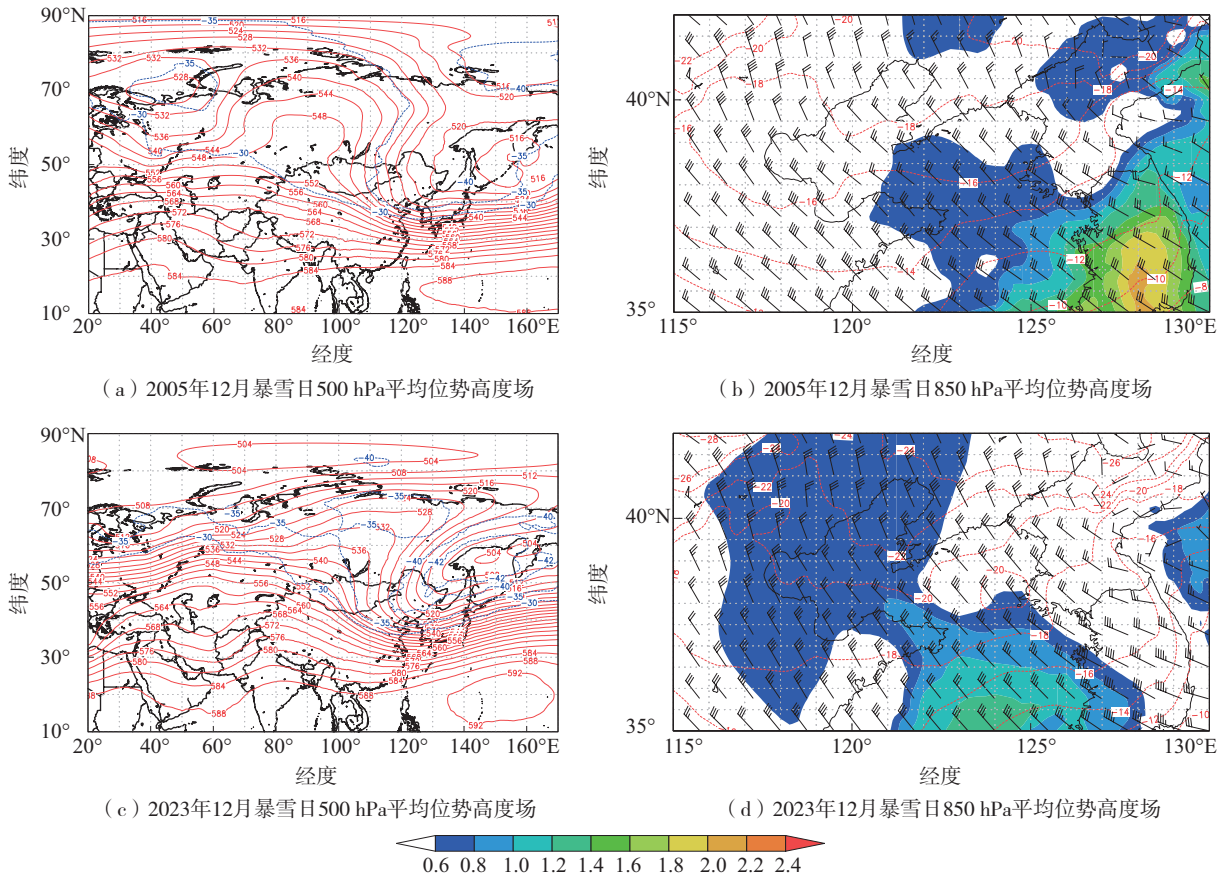
### 3.1 天气形势特征

有利的大尺度环流背景是山东半岛产生海效应强降雪的必要条件,对2005年7个暴雪日和2023年4个暴雪日逐日08:00平均天气形势场进行了计算。2005年12月暴雪日500hPa平均等高线和等温线(图1a)显示,欧亚大陆呈“ $\Omega$ ”形状,为经典的寒潮流型,乌拉尔山和鄂霍次克海2个地区高压脊向极区强烈发展,并在北冰洋形成反气旋打通而成。高压脊宽广,东西向为 $60^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E}$ ,南北向为 $35^{\circ}\sim 80^{\circ}\text{N}$ ,呈南北略偏东北—西南向。脊前和脊后

各有1个冷涡发展,我国东北地区至鄂霍次克海之间为脊前冷涡环流,冷涡中心位于日本海以东( $150^{\circ}\text{E}$ 附近),冷涡中心位势高度为516dagpm,中心温度为 $-40^{\circ}\text{C}$ ,冷涡南部低槽位于 $120^{\circ}\sim 130^{\circ}\text{E}$ 。强盛的高压脊稳定少动,脊前冷涡东移发展,冷涡后部横槽携带冷空气在西北气流引导下影响山东半岛,持续时间长,为2005年12月长时间的强降雪天气提供了大尺度天气背景。低层850hPa等温线与风场存在明显交角,冷平流明显,山东半岛北部平均气温为 $-15^{\circ}\text{C}$ 左右,渤海海峡至山东半岛上空由于海气温差作用,从而促使大量水汽凝结和凝华,形成 $0.6\sim 0.8\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的比湿舌(图1b)。2023年暴雪日平均形势场(图1c)显示,亚洲东部一槽一脊呈明显的东北—西南向,槽、脊较2005年的经向特征更加显著,造成冷空气在槽后脊前大量堆积<sup>[20]</sup>,冷涡中心位势高度为504dagpm,中心温度为 $-42^{\circ}\text{C}$ ,较2005年冷涡中心位势高度降低12dagpm,中心温度偏低 $2^{\circ}\text{C}$ 。2023年冷涡强度更强,温度更低,槽后脊前锋

区发展强烈,致使冷空气强度更加剧烈。850 hPa 在渤海海面 and 山东半岛上空风速较 2005 年偏大  $1\sim 3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,有利于冷平流的增强。850 hPa 气温整体偏低  $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,比湿值为  $0.8\sim 1.0\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ (图 1d)。

2005 年 850 hPa 引导气流略小,有利于减缓海效应云的移动,降雪持续时间长。2005 年和 2023 年的 12 月冷涡中心均位于鄂霍次克海附近,位置偏东,有利于海效应降雪出现在偏东的位置。



a、c中红色等值线—位势高度(单位: dagpm), 蓝色虚等值线—等温线(单位:  $^{\circ}\text{C}$ );  
b、d中色阶—比湿(单位:  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ), 红色虚等值线—等温线(单位:  $^{\circ}\text{C}$ )。

图1 2005年12月和2023年12月海效应暴雪日500、850 hPa平均天气形势场

Fig.1 Mean synoptic situation at 500/850 hPa on sea-effect snowstorm days in December 2005/2023

### 3.2 温度特征

研究表明,11—12月850 hPa气温低于 $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ 是山东半岛产生海效应暴雪的必要条件,但不是充分条件<sup>[4,21]</sup>,暴雪日渤海附近海温与850 hPa温度差大于 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ <sup>[22]</sup>。海温变化缓慢,850 hPa温度便作为一个很好的预报指标被用于海效应降雪的预报中。在2005、2023年的12月海效应暴雪中850 hPa温度、海温及海气温差表现如何,下文将分别进行分析。

#### 3.2.1 850 hPa温度与降雪量的关系

通过常规气象观测资料,对山东半岛荣成探空站2005、2023年这2个年份中12月逐日08:00的850 hPa温度和烟台、牟平、威海、文登、荣成5站逐日降雪量进行分析。为了更好地体现海效应降雪与

低层850 hPa温度的相关性,只保留研究的2005年12月3—21日、2023年12月16—22日降雪量,其他降水过程进行了屏蔽。2005年12月1日850 hPa气温为 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,之后气温持续下降,4日降至 $-14\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,在4、6、7、11、12、13、21日7个暴雪日中,850 hPa气温均降至 $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下,日最大降温幅度为 $8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,850 hPa最低气温为 $-16\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,均出现在21日,单日暴雪站数为1~3个(图2a)。2023年12月15日之前的10日850 hPa气温均在 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之上,15日开始气温持续下降,16日较15日的降温幅度达 $17\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,在16、20、21、22日4个暴雪日中,850 hPa气温均低于 $-16\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,且20—21日气温进一步下降至 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下,16日和21日单日暴雪站数为4个(图2b)。

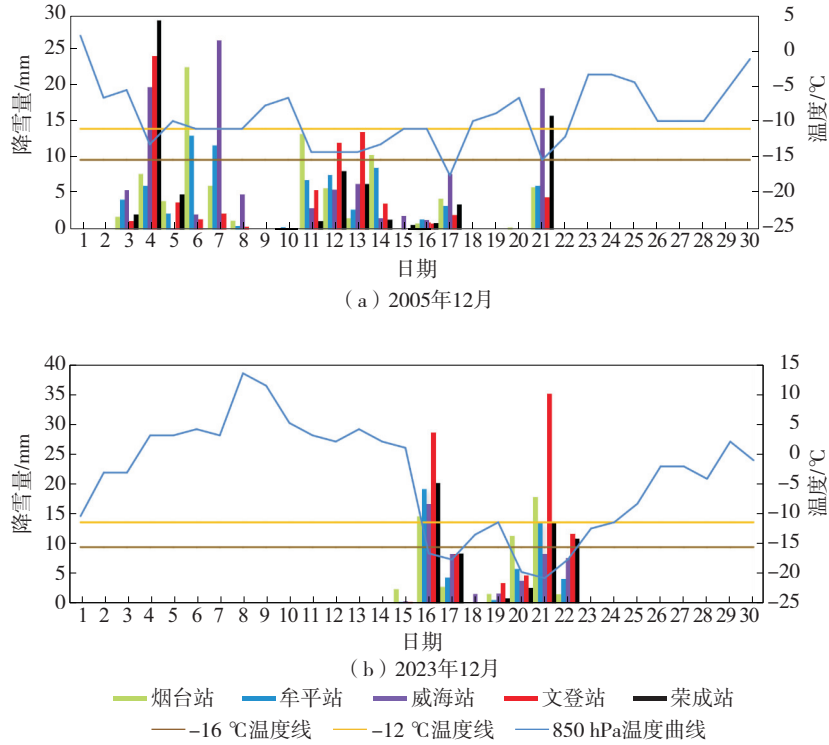


图 2 2005 年 12 月和 2023 年 12 月荣成站 850 hPa 气温及烟台、牟平、威海、文登、荣成各站日降雪量  
 Fig.2 Temperature at 850 hPa at Rongcheng station and daily snowfall at Yantai, Muping, Weihai, Wendeng, and Rongcheng stations in December 2005/2023

### 3.2.2 海温及其温度距平

利用 NOAA 资料计算了 2005 年和 2023 年的 12 月 1 日黄渤海海温和海温距平,温度距平对比的常年值为 1971—2000 年海温平均值(图 3)。可以看出,渤海湾存在一个暖中心,与之前研究<sup>[23]</sup>一致,2005、2023 年的海温暖中心为 13 °C,2023 年海温 13 °C 的范围更大,与历年相比,这两年海温偏高,海温距平偏高为这两年的海效应暴雪提供了有利的海温条件。2005 年 12 月辽东半岛南部的海区,海温距平最大为 2.5 °C,外围海温距平为 1.0 °C;2023 年 12 月初在辽东半岛南部和渤海湾中心位置存在 2 个海温距平大值中心,均为 2.5 °C,其范围较 2005 年更大,同时发现 2.0 °C 海温距平等值线的范围也较 2005 年明显偏大,低层西北风经过这片暖海面时,经过相同面积的区域,冷暖空气的相互作用更加充分,获取的感热通量更多。面对同样的冷空气强度,海温较常年偏高会产生更大的海气温差和更强的海效应降雪强度,这是 2005 年 12 月和 2023 年 12 月海效应降雪极端的重要原因之一,相比之下,2023 年 12 月海

温较常年偏高更明显。

### 3.2.3 850 hPa 温度与海温之差

选取蓬莱北部渤海海面上一点(121.0°E、38.0°N,图 3 中黑色圆点位置)作为渤海海面代表来进行该点上空 850 hPa 温度与海面之间的海气温差分析,该位置位于西北风流场中烟台、威海的上游海面,上空能量交换为下游的海效应降雪提供了部分水汽和热量,具有一定的代表性。图 4 显示,2005 年海温由月初的 12.67 °C 降至月末的 7.70 °C,2023 年海温由月初的 12.80 °C 降至月末的 7.10 °C。2005 年海气温差最大值出现在 12 月 4 日,为 28.4 °C,其余暴雪日均在 24.5 °C 以上;2023 年 12 月 16 日海气温差为 28.2 °C,20—22 日海气温差分别为 31.0、30.4、26.4 °C,随着海气温差逐渐减小,22 日暴雪强度较前期有所减弱,21 日文登站最大小时降雪量为 4.3 mm,22 日 08:00 之后最大小时降雪量为 0.9 mm。同时发现,海气温差大于 23.0 °C 时,2005 年 12 月 17 日出现大雪,2023 年 12 月 1 日出现暴雪;海气温差小于 23.0 °C 时,均未出现海效应暴雪。

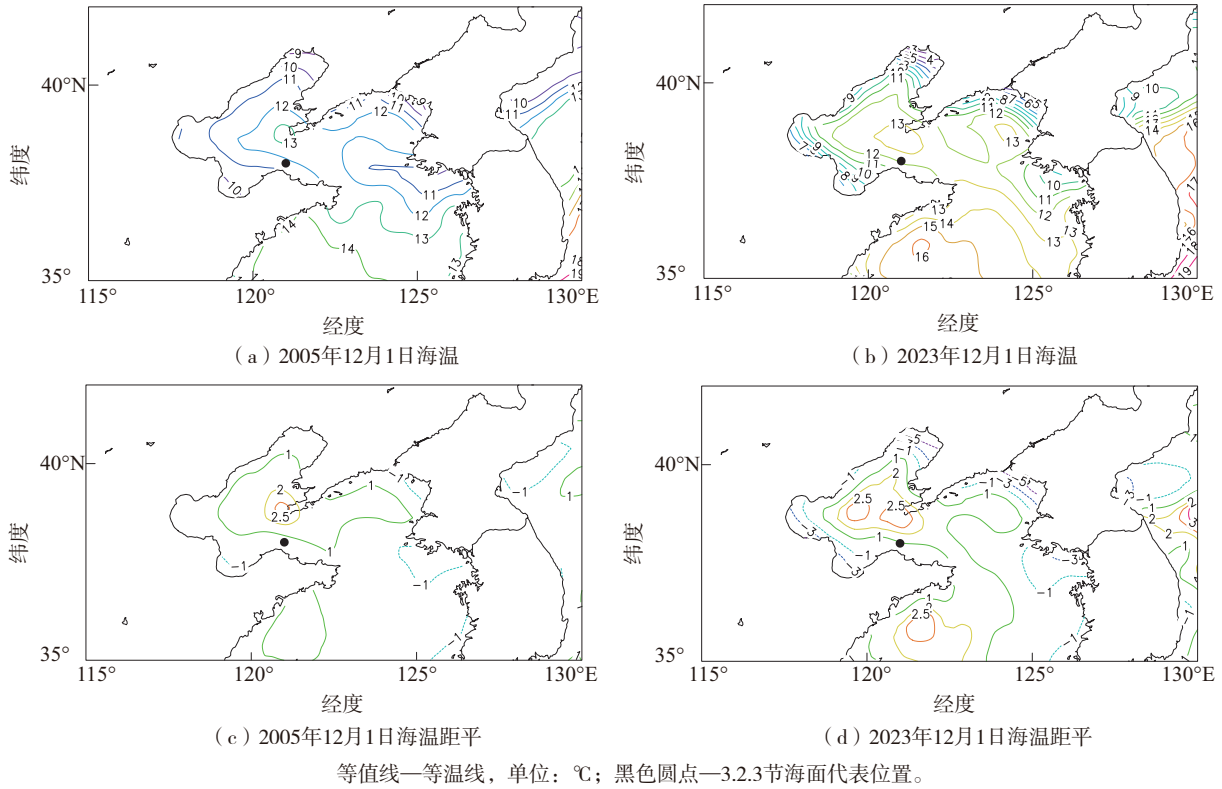


图3 2005、2023年的12月1日海温和海温距平  
Fig.3 SST and SST anomaly on 1 December 2005/2023

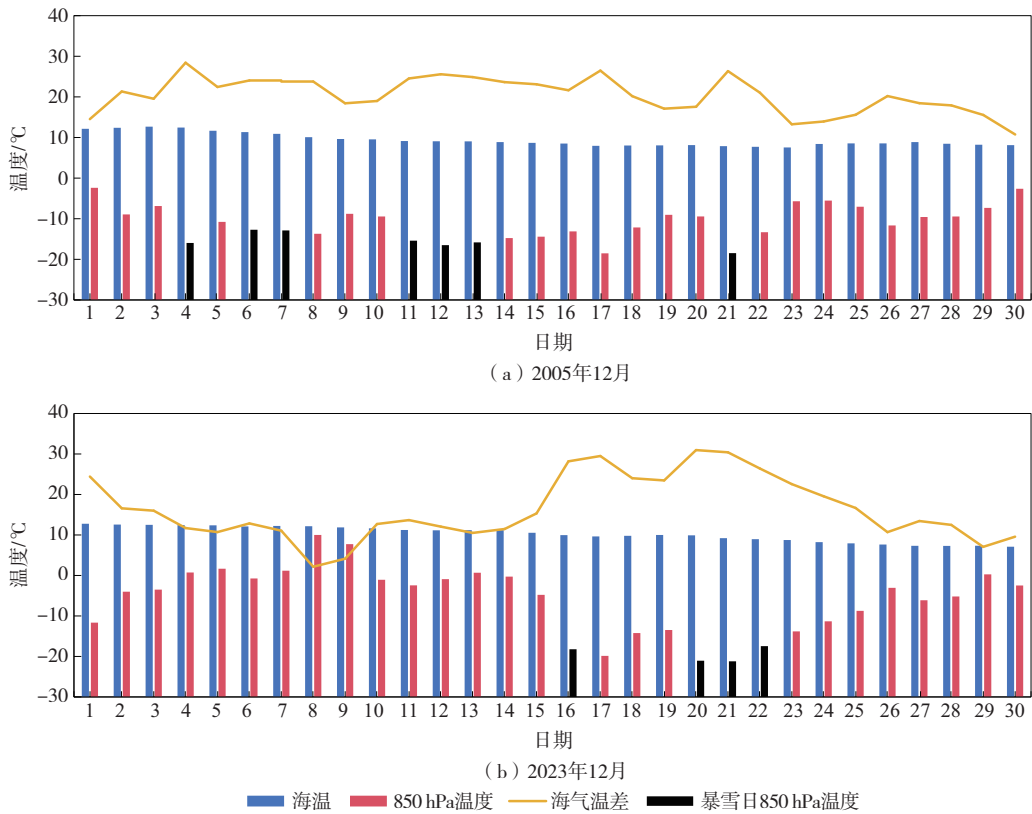


图4 海上代表点2005年12月和2023年12月逐日08:00海温、850 hPa温度和海气温差  
Fig.4 Daily SST, 850-hPa temperature, and air-sea temperature difference at sea representative position at 08:00 BJT December 2005/2023

综上所述得出,2005、2023年前期较常年偏高的海温和剧烈的降温幅度形成 $24\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上的海气温差,为极端海效应降雪提供了重要的温度条件。2023年海温距平较2005年更高,850 hPa温度更低,导致海气温差更大,最大达 $31\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;且2023年850 hPa上 $-16\text{ }^{\circ}\text{C}$ 低温在16—17日持续48 h, $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下低温在20—22日持续达72 h,低温的持续性有利于海气相互作用持续时间长,故2023年较2005年海效应降雪过程单日暴雪站数更多,日降雪量更大。

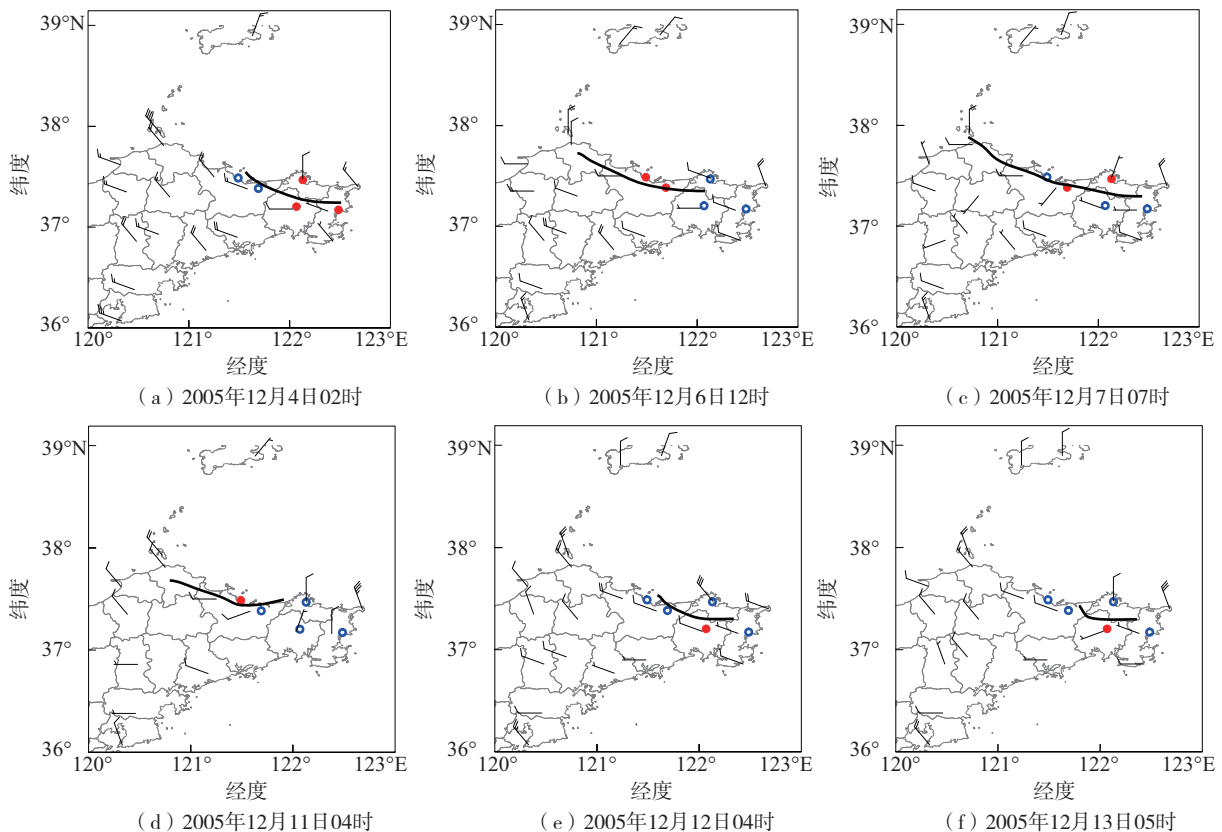
### 3.3 低层切变线

海效应降雪为低层对流过程,低层切变线为主要触发机制。分别对暴雪日地面10 m风场和上空切变线、风场散度、5个研究站点的暴雪位置之间的相关性进行分析,以此判断低层切变线在海效应暴雪中的作用。为了分析强降雪与风场的相关性,选取降雪强度最大的时段进行精准分析。2005年山东区域气象观测站还未建立,只有国家级地面气象观测站的观测资料,地面风场的观测时间间隔为1 h,降雪量的观测时间间隔为6 h或12 h。首先选取2005年7个暴雪日最强降雪量出现的6 h或12 h时间段,然后通过国家级地面气象观测站逐时风场进一步筛选出此时间

段内最大风场辐合出现的时次。2023年国家级地面气象观测站和区域气象观测站地面风场和降雪量的观测时间已经精确到1 h,选取12月16—22日出现暴雪的站点逐时降雪量最大的时次,其中16日选取09时,文登站降雪量为5.5 mm,20日选取11时,烟台站降雪量为2.0 mm,21日选取04时,烟台站降雪量为5.4 mm,22日选取02时,文登站降雪量为2.5 mm。

#### 3.3.1 地面辐合线

由于低层冷空气和暖海面之间的海气作用、山东半岛地形摩擦和丘陵抬升作用,海效应降雪发生时,在山东半岛北部形成偏西风 and 北—东北风之间的风场辐合,形成明显的上升运动,是强降雪产生的有利动力机制。2005年和2023年的11个暴雪日10 m风场(图5)显示,每一次海效应强降雪地面都伴有明显的风场辐合线,北—东北风来自北海岸,与陆地上的偏西风形成辐合,暴雪发生在辐合线附近。2023年加密观测更加验证了这一点,辽东半岛—长岛—山东半岛北海岸一带为北—东北风,暴雪发生区域存在偏西风和北—东北风的辐合线,2023年12月16、21、22日辐合线越长,暴雪范围越广,反之,暴雪范围小。这说明大范围暴雪过程与大范围的强辐合带密切相关。



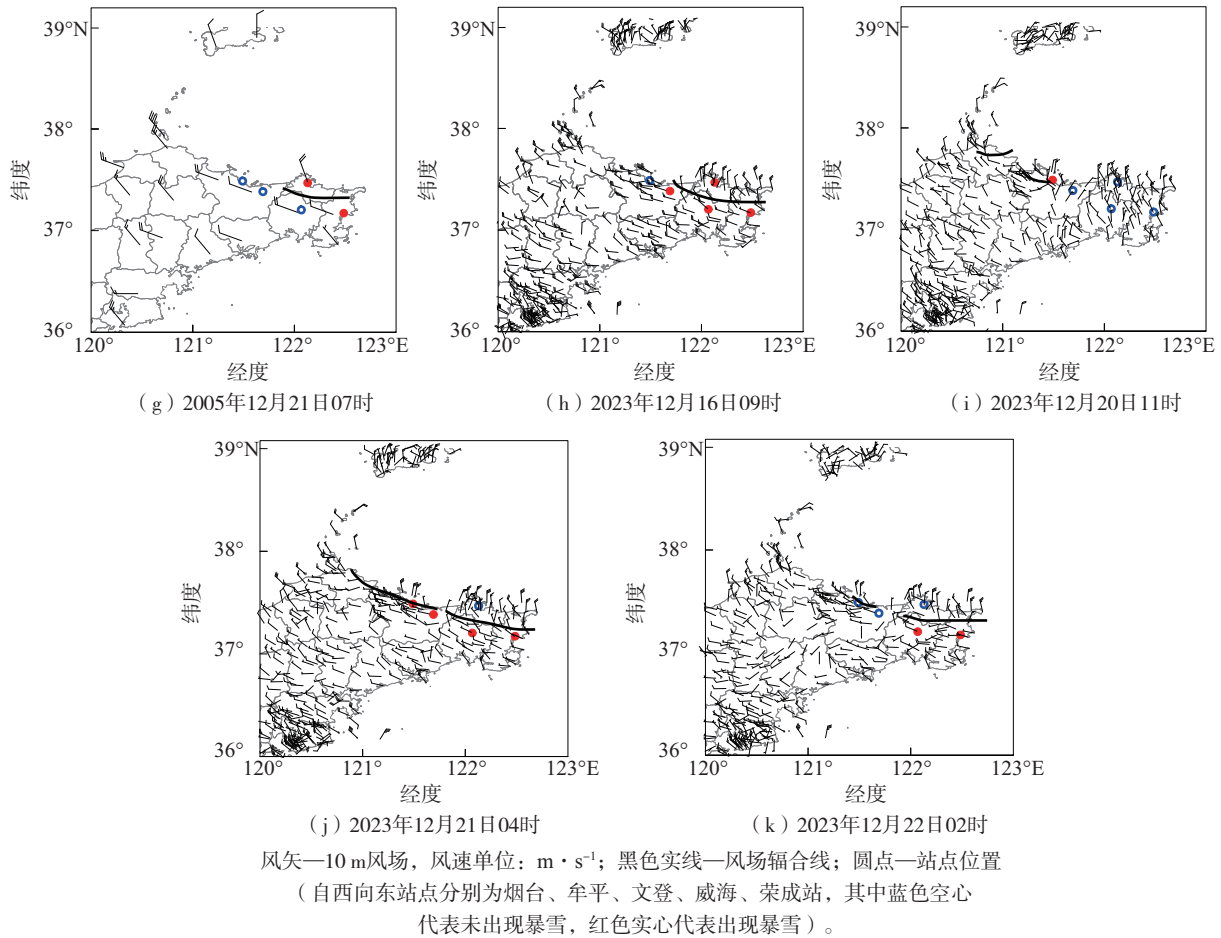


图5 2005年12月和2023年12月的11个暴雪日最强降雪时次10 m风场和出现暴雪的站点

Fig.5 Wind at 10 m at the strongest snowfall time and stations with snowstorms in 11 snowstorm days in December 2005/2023

### 3.3.2 1 000 hPa 切变线

由于实况探空资料稀疏,基于 ERA5 再分析资料,进行了与上文相同时次的 1 000 hPa 和 925 hPa 风场及散度计算。随着高度的上升,风场辐合范围和强度整体呈减弱趋势。随着高度升高,由于地形摩擦和抬升作用逐渐减弱,1 000 hPa 的风向与地面相比发生了变化,风向切变减弱(图 6)。925 hPa 风场切变较 1 000 hPa 更弱,基本为西北气流(图略)。但在 2005 年 12 月 4 日(图 6a)、21 日(图 6g)和 2023 年 12 月 16 日(图 6h)、21 日(图 6j)4 个暴雪日中 1 000 hPa 风场仍然出现大范围的  $-10 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  辐合带,部分区域出现  $-15 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  的中心,辐合强度强,4 个暴雪日分别出现 2~4 个暴雪站,且最大日降雪量大,分别为 27.0、18.3、27.5、33.7 mm,说明大范围极端暴雪的低空切变线辐合强度大,且可以上升到更高的高度,有利于形成更高、更强的上升速度。荣成站位于山东半岛最东端,荣成站出现暴雪

时(图 6a、g、h、j、k),1 000 hPa 上游渤海海面的风速均超过  $14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,强劲的引导气流将上游的海效应水汽和热量输送到下游较远的地方,在其他个例中,环境风速较小,荣成站则未出现暴雪。

## 4 大气水凝物分布

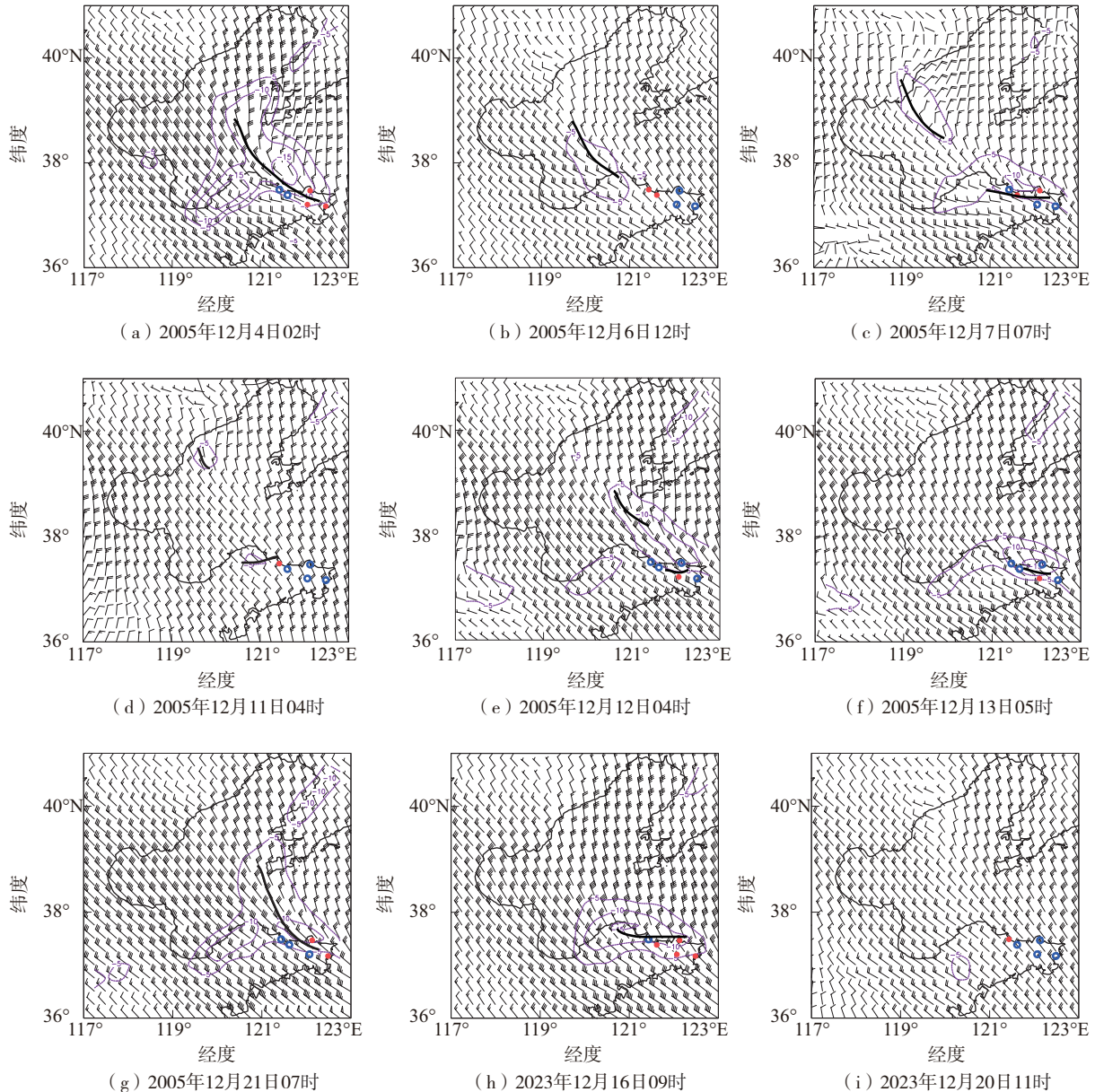
雪晶的增长过程除了水汽凝华外,还有冰晶之间的相互粘连作用,即丛集增长过程。雪花的尺度受到冰雪晶形状的影响,例如枝状冰晶容易聚合,而柱状和针状冰晶聚合则较困难,因而枝状冰晶成为降雪的主要形状<sup>[24]</sup>。研究表明,在  $-15 \sim -10 \text{ }^\circ\text{C}$  温度范围内的冰晶以树枝状为主,形成的雪花为树枝状,其枝状结构对地面积雪深度有较大的贡献<sup>[25]</sup>。

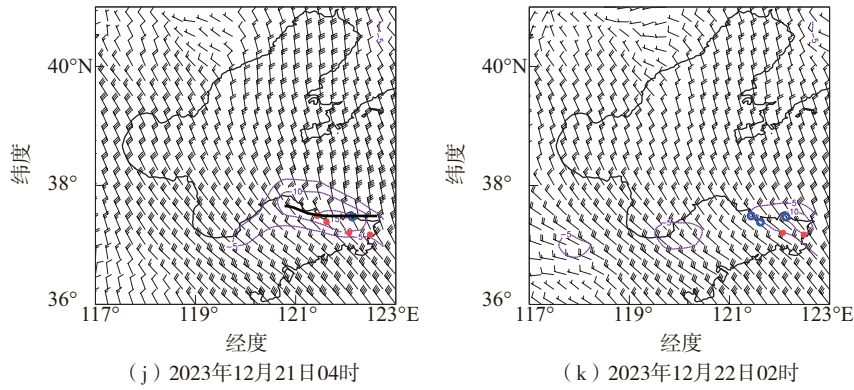
利用 ERA5 资料,在  $37.25^\circ\text{N}$ 、 $122.0^\circ\text{E}$  处(文登站附近)对大气水凝物、上升速度、气温进行相关性分析(图 7)。2005 年 12 月和 2023 年 12 月的每一个降雪日整个气层温度均在  $0 \text{ }^\circ\text{C}$  以下,没有雨水粒子



存在,雪粒子及地,表明地面降水性质为纯雪,云体主要由冰晶、雪晶和液态水构成。2005年上空冰晶混合比为 $0.01\sim 0.10\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,分布在 $850\sim 600\text{ hPa}$ ,4—13日的暴雪日冰晶粒子温度为 $-20\sim -10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,21日冰晶所在的温度降至 $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;雪晶混合比为 $0.01\sim 0.04\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,分布在 $700\text{ hPa}$ 至地面之间,较冰晶的高度低,温度为 $-20\sim -5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,雪晶与上升气流的高度和中心吻合度均较好,说明上升气流对雪晶的形成起到了重要的作用;在暴雪日中,液态水分布在 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下,为过冷水,11—12日液态水丰富,中心为 $0.10\sim 0.20\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,与冰晶粒子共存,充足的过冷水有利于淞附过程的发生,形成更多霰粒子。2023年上空冰晶混合比为 $0.01\sim 0.15\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,分布

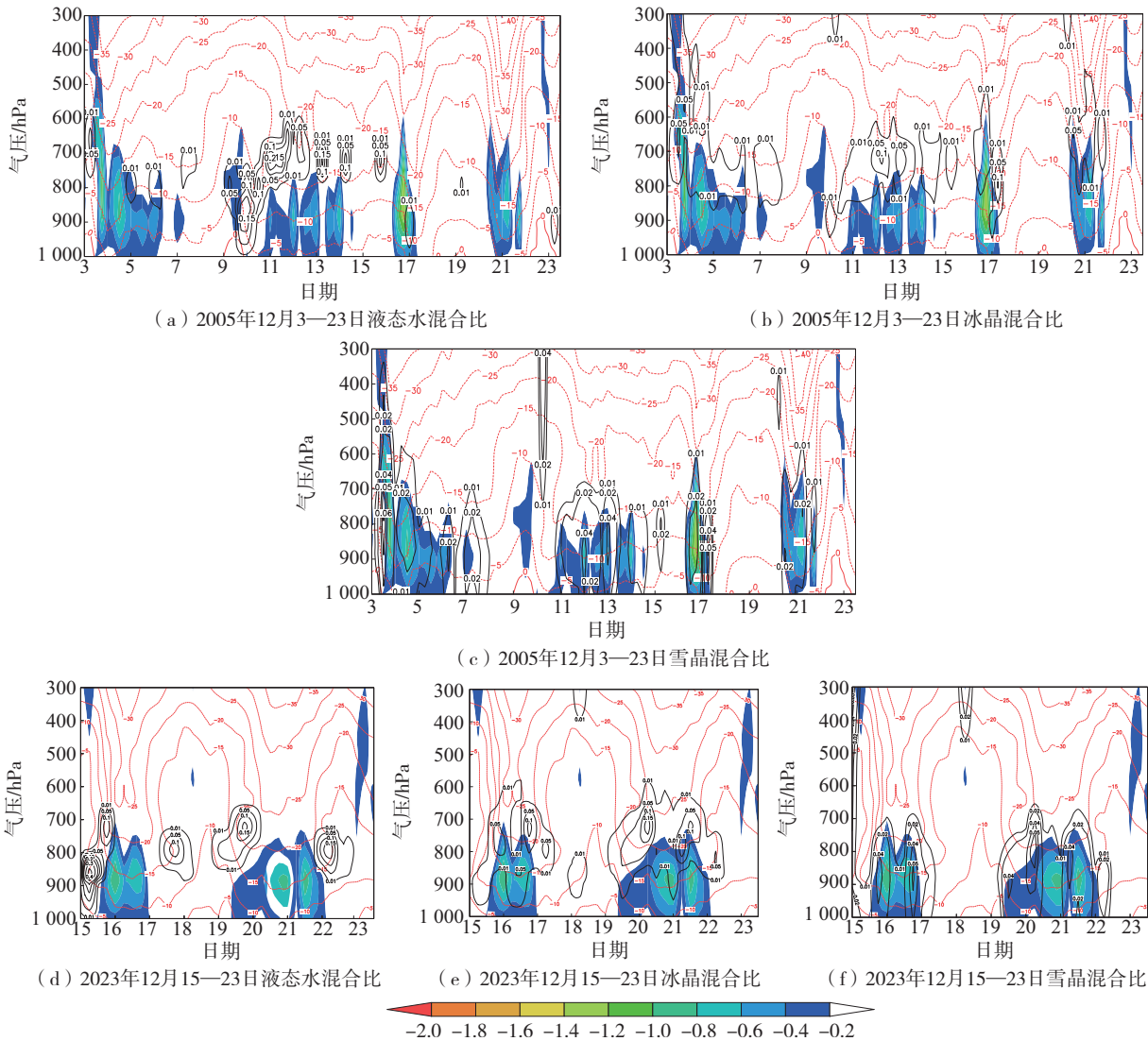
范围为 $850\sim 600\text{ hPa}$ ,温度为 $-25\sim -10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;雪晶混合比为 $0.01\sim 0.05\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,分布在 $700\text{ hPa}$ 至地面之间,温度为 $-25\sim -5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,雪晶分布在上升气流中或其上方;在强降雪主要时段,16—17日、20—21日云内基本无液态水,主要为冰晶和雪晶粒子。2023年12月16日冰雪晶分布特征和量值与2005年类似,20—21日冰雪晶含量较其他暴雪日偏大,20日白天冰晶和雪晶含量出现最大值,分别为 $0.15\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $0.05\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,为20日夜间开始出现的超级大暴雪提供了丰富的水凝物来源,21日后期至22日冰雪粒子含量减少,地面降雪强度也开始减弱;同时20—21日雪粒子中心高度明显高于上升气流中心位置,且和冰晶粒子有较大的重叠区域。





(j) 2023年12月21日04时 (k) 2023年12月22日02时  
 紫色等值线—风场散度, 单位:  $10^{-5} s^{-1}$ ; 圆点—站点位置 (自西向东分别为烟台、牟平、文登、威海、荣成站, 其中蓝色空心代表未出现暴雪, 红色实心代表出现暴雪)。

图6 2005年12月和2023年12月的11个暴雪日最强降雪时次1000 hPa风场及其散度和出现暴雪的站点  
 Fig.6 Wind at 1000 hPa and its divergence at the strongest snowfall time and stations with snowstorms in 11 snowstorm days in December 2005/2023



红色虚等值线—等温线, 单位:  $^{\circ}C$ ; 色阶—上升速度, 单位:  $Pa \cdot s^{-1}$ ; a、d中黑色等值线—液态水混合比, b、e中黑色等值线—冰晶混合比, c、f中黑色等值线—雪晶混合比, 单位:  $g \cdot kg^{-1}$ 。

图7 2005年12月和2023年12月大气水凝物随时间演变情况  
 Fig.7 Evolution of atmospheric hydrometeors in December 2005/2023

2005、2023年暴雪日上升运动基本分布在700 hPa以下,而在其他天气系统产生的降雪过程中,上升运动可以贯穿至500 hPa以上<sup>[11,14,17-18]</sup>,冰晶分布的位置也较高,冰晶分布在7~12 km处,雪晶分布在1~7 km高度上<sup>[26]</sup>。海效应降雪冰晶形成的云体高度和上升运动高度明显偏低,在浅薄的大气层中产生同样的降雪量,对低层水汽的提供和持续时间提出了更高的要求。

2005、2023年多次暴雪过程显示,上升速度与冰晶、雪晶混合比中心位置和冷空气最强时段基本吻合。低层切变线的辐合抬升产生了一定的上升气流,上升气流携带的水汽对水凝物的形成和增加起促进作用。2005年雪晶的变化与上升速度吻合度较高,说明可能是上升速度携带的水汽对雪粒子的形成起主要作用;2023年12月20—21日,较多雪

晶位于上升气流上方,与冰粒子分布区域重叠,说明除了水汽凝华外,冰雪晶粒子之间的聚合作用对雪粒子的增长有很大帮助,冰晶粒子形成的雪花以树枝状为主,那么这个时间段的雪粒子也以树枝状为主,有利于积雪深度增大,2023年12月21日威海文登站的积雪深度为55 cm,22日猛增到74 cm。

对2023年12月16、20、21、22日4次暴雪过程中文登站的雨滴谱数据进行分析(图8)。16日雪粒子下落末速度在 $4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以下,大部分雪粒子直径在6 mm以下,小部分雪粒子为6~10 mm。20—22日,雪粒子下落末速度较16日略偏小,雪粒子直径呈增大趋势,21—22日雪粒子直径偏大的特征更明显,6 mm以上的雪粒子更多。落地的雪花直径较大,进一步验证了地面雪花经过多次聚合后,以树枝状为主。

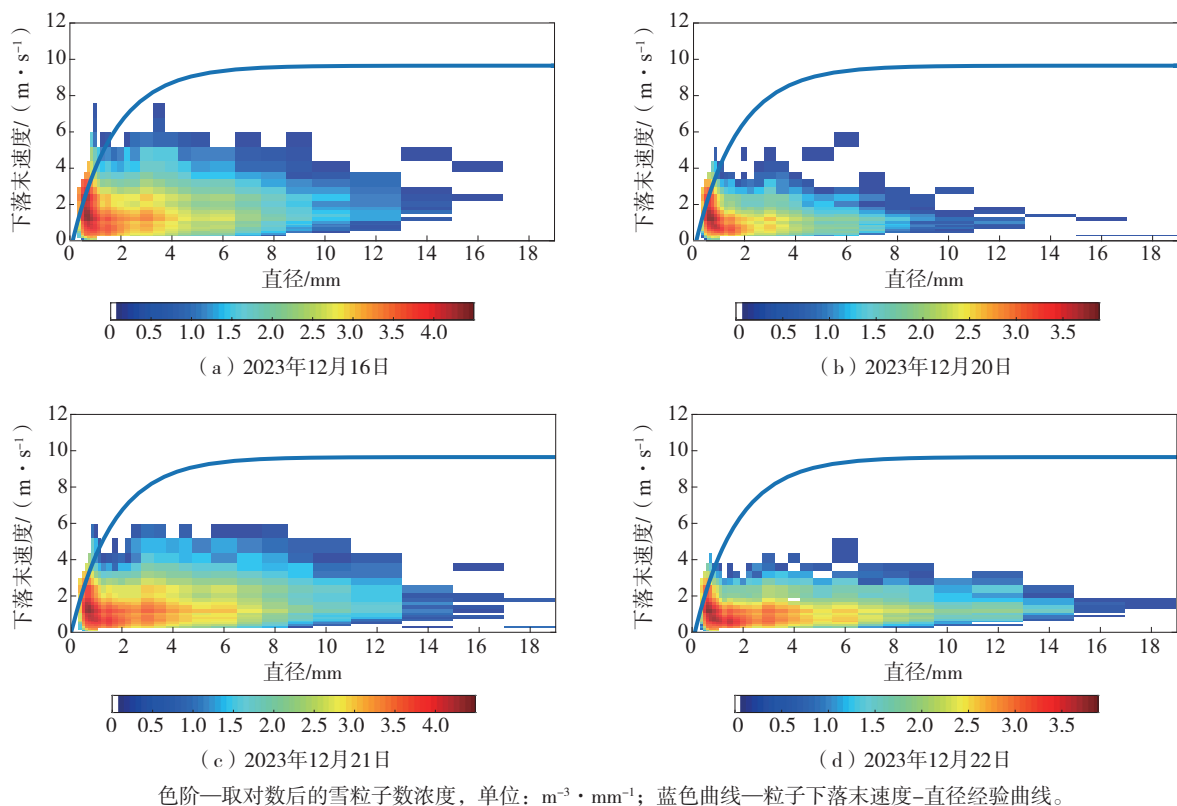


图8 2023年12月16、20—22日文登站雨滴谱分析

Fig.8 Analysis on raindrop size distribution at Wendeng station on 16 and from 20 to 22 December 2023

## 5 结论

(1)2005年12月和2023年12月海效应暴雪日亚欧东部均存在强大的经向高压脊和脊前冷涡环流。2005年欧亚大陆高压脊宽广、稳定少动,脊前

冷涡及后部横槽持续影响是海效应强降雪持续时间长的主要原因。2023年高压脊、冷涡较2005年经向特征更加显著,且前期气温异常偏暖,冷空气爆发力强,850 hPa风速较2005年偏大 $1\sim 3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,有利于冷平流的增强,850 hPa气温较2005年整体偏低

4℃,比湿值为0.8~1.0 g·kg<sup>-1</sup>,较2005年大。

(2)2005年12月海效应暴雪日850 hPa气温均低于-12℃,2023年850 hPa气温低于-16℃。2005、2023年海效应降雪前期渤海海温均较常年偏高,2023年偏高2.5℃的范围更广。2023年12月20—21日海气温差超过30℃,是产生单站33.7 mm极端海效应特大暴雪有利的温度条件。

(3)低层风场存在明显的辐合。2005年和2023年极端暴雪时,山东半岛北部存在偏西风和北—东北风之间的风场辐合;荣成站出现暴雪时,低层需要更强劲的引导气流。

(4)2005、2023年暴雪日云体主要由冰晶、雪晶和液态水所构成。2023年12月20—21日冰雪晶含量较其他暴雪日偏大;且较多雪晶位于上升气流上方,与冰粒子分布区域重叠,说明冰雪晶粒子之间的聚合作用对雪粒子的增长有很大帮助,聚合产生的枝状雪粒子有利于积雪深度增大。文登站雨滴谱也表明,20—21日雪粒子直径偏大的特征更明显,6 mm以上的雪粒子更多。

## 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 孙兴池,王文毅,闫丽凤,等.2005年山东半岛特大暴风雪分析[J].中国海洋大学学报(自然科学版),2007,37(6):879-884.
- [5] 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.
- [6] 崔宜少,张丰启,李建华,等.2005年山东半岛连续三次冷流暴雪过程的分析[J].气象科学,2008,28(4):395-401.
- [7] 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.
- [8] 乔林,林建.干冷空气侵入在2005年12月山东半岛持续性降雪中的作用[J].气象,2008,34(7):27-33.
- [9] 郑怡,杨成芳,郭俊建,等.一次罕见的山东半岛西部海效应暴雪过程的特征及机理研究[J].高原气象,2019,38(5):1017-1026.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 郑丽娜,李恬,孙骞,等.2021年2月黄河中下游两次暴雪的相态转换特征及成因[J].海洋气象学报,2022,42(3):48-56.
- [14] 张云惠,于碧馨,谭艳梅,等.乌鲁木齐一次极端暴雪事件中尺度分析[J].气象科技,2016,44(3):430-438.
- [15] 祝小梅,范宏云,乔丽盼·别肯.2022年初冬伊犁河谷一次极端暴雪过程诊断分析[J].沙漠与绿洲气象,2023,17(4):1-6.
- [16] 张芹,丁治英,杨成芳,等.山东一次历史极端降雪过程的诊断分析[J].高原气象,2015,34(4):1131-1138.
- [17] 何立富,齐道日娜,余文.引发东北极端暴雪的黄渤海气旋爆发性发展机制[J].应用气象学报,2022,33(4):385-399.
- [18] 刘红武,李振,唐林,等.2018年12月湖南极端低温暴雪环流特征及成因分析[J].暴雨灾害,2020,39(5):487-495.
- [19] 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.
- [20] 朱乾根.天气学原理和方法[M].3版.北京:气象出版社,2000:273-275.
- [21] 李刚,党英娜,袁海豹.烟台海效应强降雪天气预报指标统计分析[J].山东气象,2007,27(3):24-26.
- [22] 周淑玲,丛美环,吴增茂,等.2005年12月3—21日山东半岛持续性暴雪特征及维持机制[J].应用气象学报,2008,19(4):444-453.
- [23] 杨成芳,李泽椿,李静,等.山东半岛一次持续性强冷流降雪过程的成因分析[J].高原气象,2008,27(2):442-451.
- [24] 盛裴轩.大气物理学[M].2版.北京:北京大学出版社,2013:313-350.
- [25] 杨成芳,周雪松.渤海海效应暴雪微物理过程的数值模拟[J].中国海洋大学学报(自然科学版),2012,42(增刊):10-17.
- [26] 高茜,郭学良,刘香娥,等.北京北部山区两次降雪过程微物理形成机制的观测—模拟研究[J].大气科学,2020,44(2):407-420.