

山东半岛2023年12月暴雪水汽来源与水汽条件分析

胡万亭, 郭建英

(河南大学 濮阳工学院, 河南 濮阳 457001)

摘要: 2023年12月15—22日, 山东半岛东北部出现极端海效应暴雪, 多个气象站点积雪深度突破记录, 严重影响了交通出行。利用卫星数据和气象站点数据分析了此次降水的空间分布和时间变化, 通过WAM2layers模型追踪了烟台、威海地区降雪的水汽来源并统计了各个水汽源的贡献率, 最后利用ERA5数据对暴雪产生的水汽条件进行了分析。结果表明: 渤海和黄海西北部区域是主要的水汽来源地, 其为烟台、威海地区的降雪贡献了近50%的水汽; 高纬度地区南下的强冷空气为水汽传输提供了动力条件, 温暖的海面提供了水汽和水汽上升的热力条件, 半岛地形抬升加剧了水汽辐合上升; 暴雪时段, 山东半岛东北部气流有显著异常的下层辐合上层辐散的特征。

关键词: 山东半岛; 海效应暴雪; 水汽来源; 水汽通量; 散度

中图分类号: P458 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2025)01-0098-09

0 引言

强冷空气经过温暖海(湖)面时, 海气温差会导致低层大气层结不稳定, 产生强烈的热量交换和水汽输送, 在一定的机制下会形成上升气流并引发降雪, 这种降雪通常被称为海(湖)效应降雪^[1]。在中国, 因其常发生在强冷平流影响下, 又被称为冷流降雪^[2]。山东半岛地处渤海东南部沿海, 受暖湿海面影响, 加上半岛丘陵地形, 在强冷空气影响下会产生海效应降雪, 因此成为著名的“雪窝子”^[3]。

我国学者对山东半岛海效应降雪的成因和特征进行了广泛研究。江羽西等^[4]研究发现, 降雪多发生在东北高空冷涡配合对流层低层西北冷平流以及地面气压场气旋式弯曲的天气背景下。杨成芳等^[5]通过多普勒雷达资料分析发现, 对流层中层有西北风、东北风和西南风3股气流, 而冷流降雪是不同气流辐合的效果。杨成芳等^[6]还指出, 在强冷流影响下山东北部近海海域的海气温差通常在22 K以上, 较大的海气温差是强降雪出现的直接原因。李鹏远等^[7]研究发现在2005年山东半岛暴雪过程

中, 山脉地形对水汽的阻滞作用使得降雪“北多南少”。周雪松等^[8]应用天气研究预报模式(Weather Research and Forecasting Model, WRF)对山东半岛的一次降雪过程进行了地形敏感性对比试验, 发现山脉地形使得降雪强度明显增大, 降雪中心发生在山脉北部。郑怡等^[9]对山东半岛一次暴雪过程的研究发现强降雪时段半岛西部存在不稳定层结, 前期水汽积累和后期水汽辐合提供了充分的水汽条件, 下层辐合区长期维持是导致暴雪产生的主要原因。

国内对山东半岛海效应暴雪的成因和特征研究较多, 而对海效应降雪水汽来源和贡献率的研究极少, 所以本文着重研究这一内容。国内外常用的水汽追踪模式包括欧拉方法和拉格朗日方法。欧拉法包括WAM(Water Accounting Model)和WVT(Water-Vapor Tracing)模型等, 拉格朗日方法包括HYSPLIT(Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory)和FLEXPART(Flexible Particle Dispersion)模型等^[10]。拉格朗日方法可以定量解释水分来源以及沿轨迹的水分损失或增加^[11], 但是无法确定水汽蒸发源地, 其追踪的是伴随气团的水

收稿日期: 2024-02-15。

基金项目: 河南省高等学校重点科研项目计划(24B510011)。

作者简介: 胡万亭(1988-), 男, 讲师, 硕士, 主要从事智能信息处理研究。E-mail: huwanting@aliyun.com

汽,而欧拉方法可以确定水汽的蒸发源地^[12]。近年来,拉格朗日轨迹模型 HYSPLIT 被广泛用于研究极端降雨事件的水汽源。LIU 等^[13]使用 HYSPLIT 模型追踪了郑州 7.21 极端降雨的水汽来源和轨迹;LI 等^[14]分析了中国东南部 3 种类型的暴雨(副热带高压西伸、热带风暴和强冷空气活动)的水汽输送轨迹和来源。同样,欧拉方法也被广泛用于研究降水的水汽来源。张弛等^[15]使用 WAM2layers 模型研究了我国西南地区夏季极端降水的水汽来源;GUO 等^[16]通过 WAM2layers 模型研究了东亚降水的水分来源及其年际变化。这些方法也被应用在海(湖)效应降雪的水汽来源分析上。INSUA-COSTA 等^[17]使用 WRF-WVT 工具对北美五大湖地区 2014 年 11 月的一次暴雪进行了研究,计算了湖泊蒸发的总可降水量占研究区域总降水量的比值,结果表明在五大湖所有顺风地区,湖泊水蒸气对降水的贡献比在 30% 以上,而休伦湖、伊利湖和安大略湖的背风处这一贡献比在 50% 以上。

本文使用 WAM2layers 计算了 2023 年 12 月中下旬暴雪的水汽来源和贡献比,确定了渤海、黄海对于暴雪水汽来源的绝对贡献,并通过欧洲中期天气预报中心发布的全球气候和天气的第五代再分析数据集(ERA5)对暴雪产生的水汽条件做了分析,以期对山东半岛海效应暴雪的研究提供更多参考。

1 资料与方法

1.1 降水数据

降水数据来自全球卫星降水计划(Global Precipitation Measurement, GPM)和中国地面基本气象观测数据。GPM 数据是新一代全球卫星降水产品,其中综合多卫星降水联合反演 IMERGE(Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM)产品提供了高时空分辨率的降水数据。本文使用 V06 版本的 0.5 h 降水数据,空间分辨率为 0.1°,数据产生于观测后的 14 h。IMERGE 降水数据在全国不同地区、不同地形甚至不同季节的精度都有差异,与实测数据有误差,但是整体上与观测数据的相关性较高,一定程度上可以反映降水的时间变化规律和空间分布格局^[18-20]。本文使用 IMERGE 数据绘制了此次烟台、威海地区暴雪的降水空间分布。中国地

面基本气象观测逐 3 h 数据来自国家气象信息中心,包括气温、气压、湿度、风、降水等要素,降水量为 3 h 累计降水量。本文研究了福山、烟台、成山头、文登、乳山等 20 多个山东半岛气象台站的实测降水数据,并选取了代表性的文登、烟台两个站点(位置见图 1a),分析降水量的时间变化。

1.2 再分析数据

ERA5 利用数据同化技术,将模型数据与观测数据结合成全球完整一致的数据集,提供大气、陆地和海洋气候变量的逐小时估计值,空间分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 。从 1000~1 hPa 分为 37 个压力层,气压层数据主要包括比湿、温度、风的 u 分量和 v 分量、垂直速度、位势等。地面数据包括海平面温度、表面压强和降水量等。

1.3 WAM2layers

WAM 是基于大气水量守恒原理开发的大气水汽追踪模型,是一种欧拉模型,能够精确地模拟大气环境中的水汽传输和演变过程。WAM2layers 在 WAM 的基础上,将单个大气柱分为上层和下层,下层水汽的传输和变化主要受地形、地表过程和边界层动态等因素的影响,上层则主要受大气热力和动力过程的影响,这种分层结构使得模型能够更准确地模拟和解析水汽在不同层次大气层中的行为。相较于基于整层水汽通量的水汽追踪方法,考虑了两层水平水汽输送及两层之间垂直交换的方法更真实^[21]。

WAM2layers 模型采用了先进的微物理过程参数化方案,考虑了云形成和降水等过程中水汽的微观物理过程,提高了模型对云微物理过程的模拟能力。模型还具有强大的可扩展性和灵活性,可以应用于不同尺度的大气过程研究,科学家可以更深入地理解水汽在大气环境中的行为和作用,为应对气候变化、灾害防治等重要问题提供科学依据和技术支持。本文利用 WAM2layers 模型将目标区域的降水作为标记水汽返回到大气中,并逆着水汽输送方向进行回溯,用以追踪水汽的来源。

1.4 极端性分析方法

通过 2001—2022 年的 ERA5 再分析资料,利用

式1计算22年内该时次的样本标准差并将其作为气候态,某时刻的变量异常度计算方法为:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (1)$$

$$N = \frac{X - \bar{x}}{\sigma} \quad (2)$$

式中: x 是某时刻的变量值; \bar{x} 是变量22年的样本均值; σ 是变量样本标准差; N 是变量异常度。异常度是变量值与均值的差值相对于标准差的倍数,表示变量值与气候态的差异程度。当该值的绝对值超过2.5时,可视为该现象为历史少有,该事件具有极端性。

2 降雪情况

2023年12月中下旬,山东半岛连续出现两场降

雪,降雪强度近年罕见,截至12月22日,威海地区的积雪深度超过70 cm,严重影响了交通出行。强降雪主要出现在烟台东部和威海中北部,特别是威海市文登区北部和环翠区南部(见图1b)。多地出现破纪录的积雪深度,例如文登站积雪深度达74 cm,打破了建站以来的纪录。本文统计了山东半岛主要气象站点的降水数据,选取了具有代表性的烟台气象站和文登气象站,绘制了3 h降水量的折线图(见图1c),来分析降雪核心区域的降水时间变化情况。第一场降雪出现在12月15—17日,第二场降雪从12月19日持续到22日,两站第二场降雪的持续时间和总降水量都大于第一场降雪。文登站降雪高峰分别出现在15日21时(北京时,下同)—16日12时、20日15时—21日06时,对比可见文登站的降水量明显大于烟台站,但是烟台站20日21时的3 h降水量峰值超过了文登站。

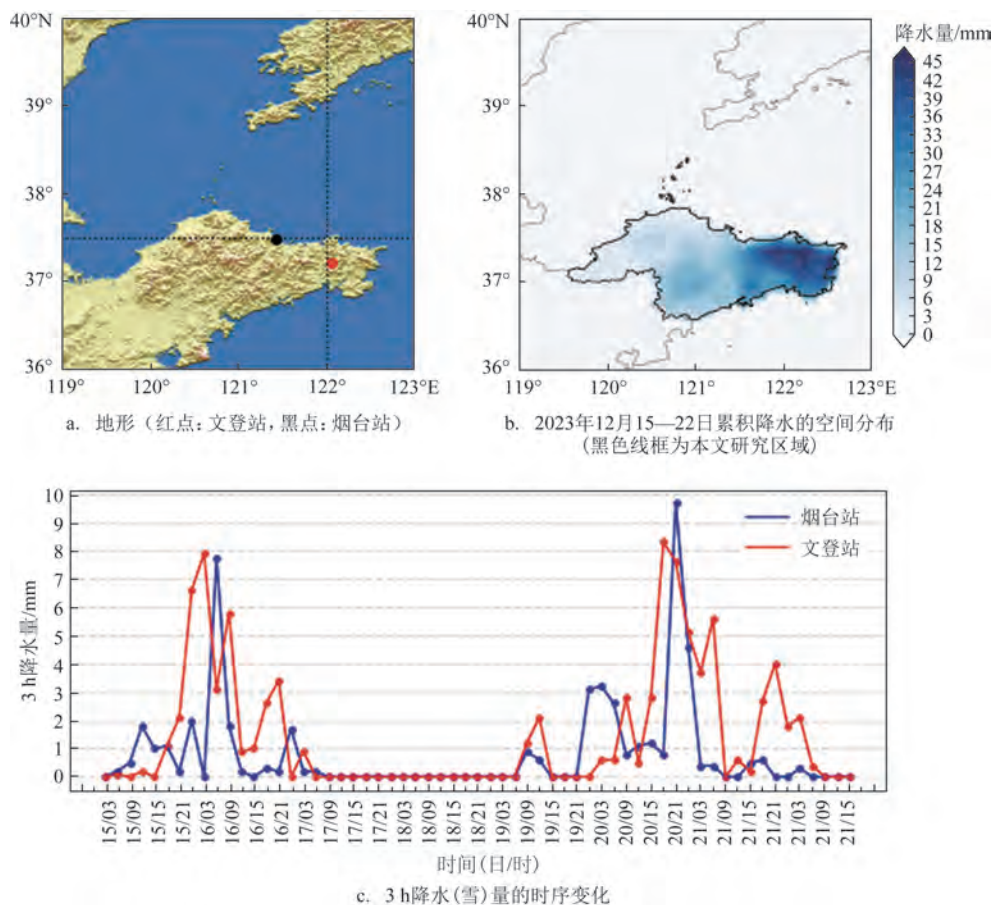


图1 地形和降水(雪)信息

Fig.1 Information of topography and precipitation

3 水汽来源

为了确定造成此次极端降雪的水汽来源,使用WAM2layers模型进行水汽追踪,追踪的降水区域是山东半岛西北部的烟台、威海地区(见图1b黑色线框),降水时间为2023年12月15—22日,水汽来源追踪的时间范围是11月22日—12月22日。降水贡献最大的区域为山东半岛北部海洋,包括整个渤海以及黄海西北部,其他地区的蒸散发作用对目标区域的降水贡献较少,但是分布范围却极为广泛(见图2a)。为了进一步计算水汽来源地的贡献比率,本文将水汽来源地大致分成4个区域(见图2b)。需要注意的是,计算贡献率时增加了区域5和烟台、威海本地。其中区域5包含在区域1中,可以用来验证海水蒸散发作用对降雪的贡献。烟台、威海地区,可以用来计算本地蒸散发的降水贡献率。

从图2c可以看到,东亚区域水汽的降水贡献率为62.8%,对于本次降雪有决定性的贡献,更精确地来说是渤海及黄海西北部的水汽决定了本次降雪,水汽贡献率达到48.2%,也是定性本次半岛地区降雪为海效应降雪的重要原因。该区域去掉黄渤海贡献后,占比为14.6%,其中烟台、威海的本地降水贡献率为4.4%。虽然西伯利亚寒流南下是山东

半岛降雪的动力来源,但是包含西伯利亚地区的区域3对于降雪水汽来源的贡献率为13.1%,远低于区域5的贡献。受限于追踪时间、区域以及模型软件的计算性能,追踪的水汽之和占比未达到100%,各区域的实际贡献率还要更高。

在黄渤海以外的其他区域,海洋和湖泊的蒸散发作用对此次降雪的水汽贡献明显高于陆地。举例来说,东欧和西西伯利亚的北部海域是重要的水汽来源,一方面受北大西洋暖流等因素的影响,该区域虽然毗邻北冰洋,但是海水温度相对较高,水汽充足;另一方面由于该区域是我国北方地区冷空气的重要发源地,水汽可随着气流源源不断地南下。此外,里海、地中海和红海等海洋及湖泊也是明显的水汽来源地,而陆地水汽来源主要集中在西亚、中亚和蒙古高原一带。

在黄渤海及周边区域,水汽在短时间内被西北风或偏北风带到山东半岛上空,而其他来自更遥远水汽源地的水汽传输路径则相对复杂。WAM2layers模型将大气分为上下两层,图3展示了水汽追踪期间,两层的平均水汽通量流场图。具体来看,俄罗斯北部海域的水汽主要通过西伯利亚不断南下的寒流抵达我国北方地区(见图3a);里海、地中海、红海及周边地区的水汽传输大致为两个通

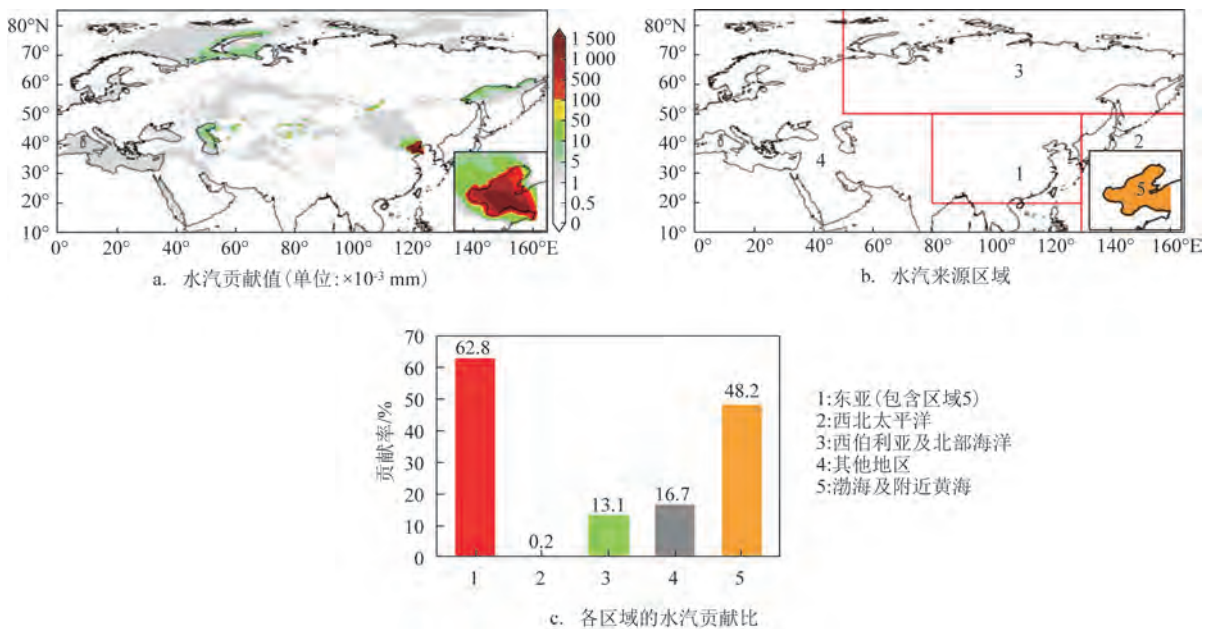


图2 降雪的水汽来源和各地区贡献比

Fig.2 Moisture sources and contribution ratios of snowfall in different regions

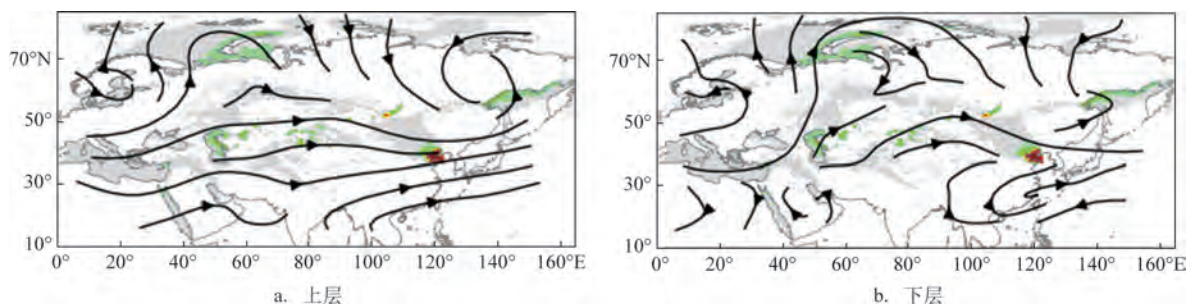


图3 水汽追踪期间平均水分通量的流场

Fig.3 Flow field of average moisture flux during moisture tracking

道,一部分水汽随西风直达我国,另一部分水汽先随西南气流北上到达北冰洋,再随西北寒流到达我国北方地区(见图3b)。

4 水汽条件

4.1 有利的条件

两次降雪期间,山东半岛西北风或偏北风强劲。在第一次强降雪的12月16日06时,半岛及北部邻近海域850 hPa的风速超过16 m/s,甚至达到18 m/s以上(见图4a);在第二次强降雪的12月22日18

时,半岛及北部邻近海域850 hPa的风速超过14 m/s,甚至超过16 m/s。强冷气流从高纬度地区而来,气温迅速下降,但是海温几乎不变,因此海气温差迅速增大。海面温度和850 hPa气温之差(Sea Surface Temperature-850 hPa Temperature, SST-T850)是一个重要的海效应降雪指标。12月16日06时(见图4b),区域5的SST-T850在24℃以上,局地可达29℃;12月22日18时,区域5的SST-T850在24℃以上,局地可达31℃。海平面水温较高,温暖的水蒸汽上升后进入到经过海面的强冷气流中,不断地为其提供湿气和热能,而强冷气流穿过渤海和黄海

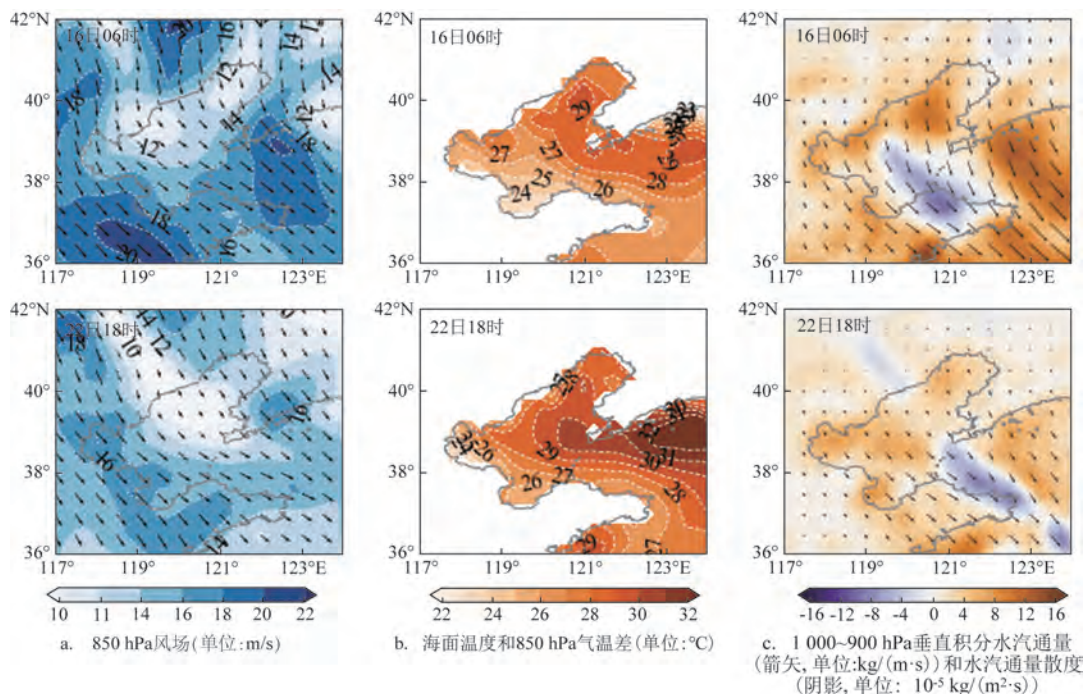


图4 风场、海气温差和垂直积分水汽通量和水汽通量散度

Fig.4 Wind field, the difference between sea surface temperature and 850 hPa temperature, and vertical integrated moisture flux divergence

上空后,低空的垂直积分水汽通量沿风向不断变大,湿度随之增加(见图4c)。从水汽通量散度图(见图4c)中还可以看出,烟台和威海及其西北海面上空均形成了强辐合中心,说明了强降雪与水汽强辐合是伴随而生的。

总之,水汽在半岛北部的海洋上辐合上升,登陆后辐合上升加剧。偏北风成为水汽辐合的动力条件,海气温差则构成热力条件,而水汽登陆后辐合加剧是地面摩擦和地形抬升作用的共同结果。

4.2 降雪时的辐合特征

图5清晰地展示了地形对于气流上升所起的关键作用。垂直风场和散度的高度-经度剖面(见图5a)的纬度对应图1a中横向虚线,垂直风场和散度的高度-纬度剖面图(见图5b)的经度对应图1a中竖向虚线。在两次强降雪时刻,风场的经向分量在低空自西向东流动,遇到地形抬升后,垂直风速急剧增加,上升气流明显,并伴随显著的下层辐合上层

辐散现象,但两个时刻最强辐合区域的位置和强度均有差异。风场的纬向分量在低空由北向南推进,随地形抬升后,垂直风速急剧增加,上升气流明显,并伴随着显著的下层辐合上层辐散现象。然而,在文登站以北的陆地和海洋上空,20日18时观测到的垂直风速和辐合强度更大,对应时刻前后3h的累积降水量也更大。16日06时,122°E、37.5°N地区在925 hPa以下呈辐合状态,925 hPa以上辐散;20日18时,此地区在900 hPa以下辐合,900~650 hPa之间辐散。因此,这两个时刻半岛北部地区下层辐合上层辐散的特征,是强降雪产生的关键因素。

图5在经向和纬向上表明了强降雪时风的辐合特征,接下来从时间纬度验证风的辐合与降雪的相关性。从文登站(122.06°E,37.21°N)上空散度和降水量的时序变化图中发现(见图6),降雪期间存在明显的下层气流辐合上升的特征,下层辐合上层辐散的强度越大,降水(雪)的强度也越大,两者的变化趋势基本一致。12月15日15时以后,下层辐合

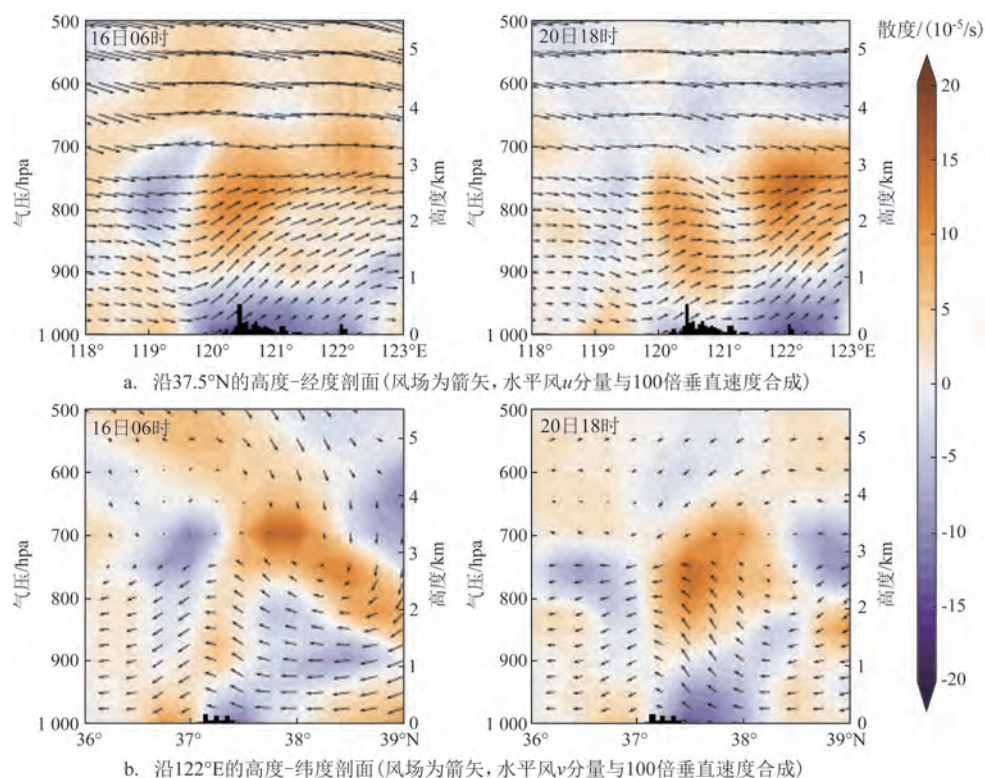


图5 垂直风场、散度和地形

Fig.5 Vertical wind field, divergence and topography

不断增强,对应的降雪量也不断增大;16日21时后,下层辐合上层辐散不断减弱,降雪量也呈现降低趋势;17日09时—19日06时,下层辐合基本消失,降雪也随之消失;19日09时之后的变化趋势与之前基本一致,不再赘述。在两次降雪过程中都存在降雪量低值时段,如16日12—15时和21日09—15时,对应时段的低层也出现浅白色竖直条带,说明下层辐合上层辐散程度也较弱。

4.3 极端性分析

从降水(雪)量来看,暴雪具有明显的极端性。为了进一步分析气象因素的极端程度,利用式2计算各因素的标准化异常值。本节以975 hPa层散度

的异常值为例,验证暴雪时段下层辐合特征的极端性。12月20日18时,在山东半岛东北部的陆地和海面上空,975 hPa层呈现出明显的风辐合特征,散度非常小,散度与气候态均值的差值在 -6σ 以下,说明辐合存在显著异常。相比之下,在山东半岛南部的陆地和海面上空,975 hPa层的散度较大,标准化偏差超过 2σ ,辐散明显(见图7a)。选取12月15日12时—22日00时,对文登站北侧区域内的散度异常值求均值。在该站点的强降雪时段,异常值普遍在 -3 以下,20日18时前后甚至低于 -6 ,这种显著性异常说明了下层辐合特征的极端性(见图7b)。结合上节分析可以得出,具有极端性的下层辐合特征是造成此次极端性暴雪事件的重要因素。

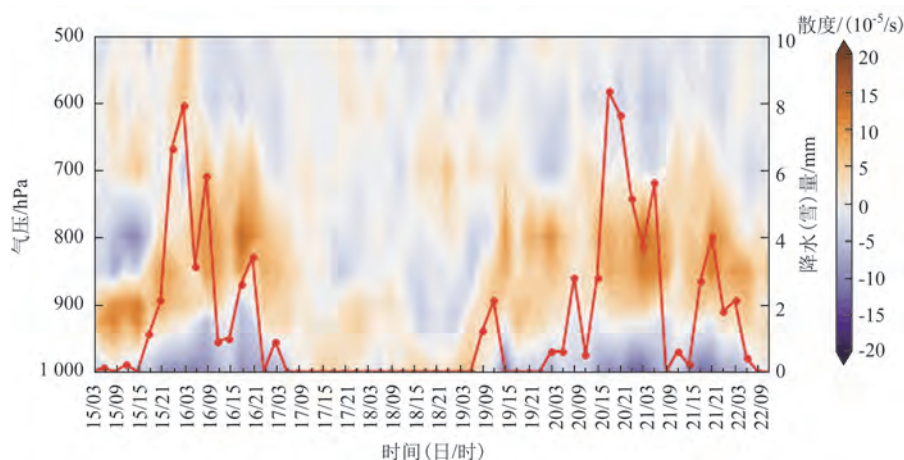


图6 文登站上空散度与降水(雪)量(圆点)的时序变化

Fig.6 Time series of divergence and precipitation amount (dots) at Wendeng station

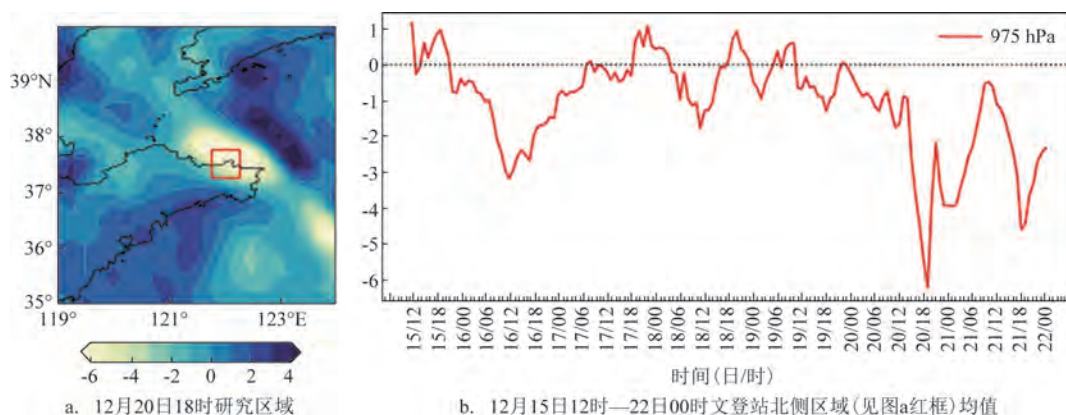


图7 散度的标准化异常

Fig.7 Standardized anomaly of divergence

5 结论

本文针对2023年12月15—22日发生在山东半岛西北部地区的海效应暴雪,利用WAM2layers软件、GPM降水数据、气象站点实测数据、ERA5再分析数据,综合分析了降雪的水汽来源和水汽条件。结论如下:

①本次暴雪的主要水汽来源是渤海及黄海西北部海域,其贡献了约48%的水汽来源,也证明此次暴雪是典型的海效应降雪;其他地区的水汽源地贡献相对较小,主要包括里海、地中海和红海等海洋湖泊以及西亚、中亚、蒙古、中国华北等陆地区域。

②西伯利亚强冷流为水汽输送提供了持续的动力条件,引起海气温差急剧增大,温暖的海面为水汽提供了热力条件,使暖湿的水汽不断进入海上气团,导致海上水汽逐渐辐合上升。水汽登陆山东半岛后,受地面摩擦和地形抬升影响,水汽辐合上升加剧。

③暴雪发生时,山东半岛东北部气流有明显的下层辐合上层辐散的特征,辐合和辐散强度与降水(雪)强度的变化趋势基本一致。通过散度的标准化异常分析发现,降雪区域北部上空的气流辐合特征有明显的极端性。

参考文献:

- [1] 王琪, 杨成芳, 张苏平, 等. 一次典型大范围冷流暴雪个例的诊断分析[J]. 中国海洋大学学报, 2014, 44(6): 18-27.
WANG Q, YANG C F, ZHANG S P, et al. A diagnosis analysis of an ocean-effect snow in Shandong Peninsula on 30 December, 2010 [J]. Periodical of Ocean University of China, 2014, 44(6): 18-27.
- [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.
YANG C F, LI Z C. Review of the research on the ocean-effect snow in China in the past decade[J]. Journal of Marine Meteorology, 2018, 38(4): 1-10.
- [3] 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.
LI G, LIU C, CAO Y Y, et al. Case study on generation mechanism of extreme ocean-effect snowstorm in the east of Shandong Peninsula in January[J]. Meteorological Monthly, 2020, 46(8): 1074-1088.
- [4] 江羽西, 张苏平, 程相坤, 等. 一次渤海海效应暴雪云团的卫星观测及成因分析[J]. 中国海洋大学学报, 2016, 46(5): 1-13.
JIANG Y X, ZHANG S P, CHENG X K, et al. Satellite observation and genetic analysis of clouds of a Bohai sea-effect snowstorm[J]. Periodical of Ocean University of China, 2016, 46(5): 1-13.
- [5] 杨成芳, 王俊. 利用单多普勒雷达资料做冷流暴雪的中尺度分析[J]. 高原气象, 2009, 28(5): 1034-1043.
YANG C F, WANG J. Analysis on mesoscale character to ocean-effect snowstorm using single-Doppler radar data[J]. Plateau Meteorology, 2009, 28(5): 1034-1043.
- [6] 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.
YANG C F, LI Z C, LI J, et al. A diagnostic analyses on peculiar persistent cold airflow snowstorm process in Shandong Peninsula [J]. Plateau Meteorology, 2008, 27(2): 442-451.
- [7] 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, 2009, 39(2): 173-180.
LI P Y, FU G, GUO J T, et al. An analysis and numerical modeling of a snowstorm event over Shandong Peninsula in December, 2005 [J]. Periodical of Ocean University of China, 2009, 39(2): 173-180.
- [8] 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.
ZHOU X S, YANG C F, ZHANG S L. Study on possible mechanism of terrain influence to cold airflow snowstorm[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2011, 39(31): 19419-19422.
- [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.
ZHENG Y, YANG C F, GUO J J, et al. Analysis on the characteristics and mechanism of a rare ocean-effect snowstorm in the western Shandong Peninsula[J]. Plateau Meteorology, 2019, 38(5): 1017-1026.
- [10] 李颖, 苏凤阁, 汤秋鸿, 等. 青藏高原主要流域的降水水汽来源[J]. 中国科学: 地球科学, 2022, 52(7): 1328-1344.
LI Y, SU F G, TANG Q H, et al. Contributions of moisture sources to precipitation in the major drainage basins in the Tibetan Plateau[J]. Science China Earth Sciences, 2022, 52(7): 1328-1344.
- [11] STOHL A, JAMES P. A Lagrangian analysis of the atmospheric branch of the global water cycle. Part I: method description, validation, and demonstration for the August 2002 flooding in Central Europe[J]. Journal of Hydrometeorology, 2004, 5(4): 656-678.
- [12] 匡坤, 汤秋鸿, 卢麾. 青藏高原降水再循环率与水汽来源辨析[J]. 中国科学: 地球科学, 2022, 52(3): 574-578.
YANG K, TANG Q H, LU H. Precipitation recycling ratio and water vapor sources on the Tibetan Plateau[J]. Science China Earth Sciences, 2022, 65(3): 584-588.
- [13] LIU X, YANG M X, WANG H, et al. Moisture sources and atmospheric circulation associated with the record-breaking rainstorm over Zhengzhou city in July 2021[J]. Natural Hazards,

- 2023, 116(1): 817-836.
- [14] LI X Z, ZHOU W, CHEN Y D. Detecting the origins of moisture over southeast China: seasonal variation and heavy rainfall[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2016, 33(3): 319-329.
- [15] 张弛, 吴绍洪. 西南地区夏季极端降水的水汽来源分析[J]. *自然资源学报*, 2021, 36(5): 1186-1194.
- ZHANG C, WU S H. An analysis on moisture source of extreme precipitation in Southwest China in summer[J]. *Journal of Natural Resources*, 2021, 36(5): 1186-1194.
- [16] GUO L, VAN DER ENT R J, KLINGAMAN N P, et al. Moisture sources for East Asian precipitation: mean seasonal cycle and interannual variability[J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2019, 20(4): 657-672.
- [17] INSUA-COSTA D, MIGUEZ-MACHO G. A new moisture tagging capability in the Weather Research and Forecasting model: formulation, validation and application to the 2014 Great Lake-effect snowstorm[J]. *Earth System Dynamics*, 2018, 9(1): 167-185.
- [18] 金晓龙, 邵华, 张弛, 等. GPM 卫星降水数据在天山山区的适用性分析[J]. *自然资源学报*, 2016, 31(12): 2074-2085.
- JIN X L, SHAO H, ZHANG C, et al. The applicability evaluation of three satellite products in Tianshan Mountains[J]. *Journal of Natural Resources*, 2016, 31(12): 2074-2085.
- [19] 程扬, 郭燕, 齐鹏云, 等. GPM IMERGE 卫星遥感降水数据在巢湖流域的精度评价[J]. *水土保持研究*, 2020, 27(5): 188-193.
- CHENG Y, GUO Y, QI P Y, et al. Analysis of accuracy of GPM IMERGE precipitation data in Chaohu Basin[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2020, 27(5): 188-193.
- [20] 方勉, 何君涛, 符永铭, 等. GPM 卫星降水数据在沿海地区的适用性分析——以三亚市为例[J]. *气象科技*, 2020, 48(5): 622-629.
- FANG M, HE J T, FU Y M, et al. Applicability analysis of GPM satellite precipitation data in coastal areas: a case in Sanya[J]. *Meteorological Science and Technology*, 2020, 48(5): 622-629.
- [21] VAN DER ENT R J, WANG-ERLANDSSON L, KEYS P W, et al. Contrasting roles of interception and transpiration in the hydrological cycle-Part 2: moisture recycling[J]. *Earth System Dynamics Discussions*, 2014, 5: 471-489.

Moisture sources and conditions of snowstorm in Shandong Peninsula in December 2023

HU Wanting, GUO Jianying

(Puyang Institute of Technology, Henan University, Puyang 457001, China)

Abstract: From December 15th to 22nd, 2023, an extreme ocean-effect snowstorm occurred in the northwest of Shandong Peninsula, and the snow depth at multiple weather stations has broken records, seriously affecting transportation and travel. The spatial distribution and temporal variation of precipitation are analyzed using satellite data and weather station data. The moisture sources of snowfall in Yantai and Weihai areas are tracked and the contribution rates of each moisture source are calculated using the WAM2layers model. The moisture conditions that cause snowfall are analyzed using ERA5 data. The results show that the Bohai Sea and the northwest part of the Yellow Sea are the main sources of moisture, contributing nearly 50% of the moisture to snowfall in Yantai and Weihai areas. The strong cold air moving southward in high latitude areas provides dynamic conditions for water vapor transport, while the warm sea surface provides thermal conditions for water vapor and its rise. The uplift of the peninsula terrain intensifies the convergence of water vapor. During snowstorm periods, the airflow in the northeast of the peninsula exhibits significant anomalous characteristics of convergence at lower pressure levels and divergence at upper pressure levels.

Key words: Shandong Peninsula; ocean-effect snowstorm; moisture source; moisture flux; divergence