

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.
GAO Liuxi, YANG Chengfang, LIU Chang. Study on snow cover characteristics and model verification of an extreme rain-snow event over Shandong[J]. Journal of Marine Meteorology, 2022, 42(4): 58-66. DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2022.04.006. (in Chinese)

山东一次极端雨雪过程积雪特征分析及模式产品检验

高留喜^{1,2},杨成芳²,刘畅²

(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)

摘要:利用地面自动气象站资料、人工加密积雪深度逐时观测资料和 ERA5 再分析资料,对山东 2021 年 11 月 6—8 日极端雨雪过程积雪特征进行分析。结果表明:(1)降水量突破同期历史极值导致此次雨雪过程成为极端天气事件,积雪深度是预报难点。(2)暴雪和积雪集中分布在山东的中北部地区,有量积雪的范围与降雪量 $R \geq 5$ mm 的分布范围基本一致。积雪深度具有明显的时间变化特征。(3)在山东典型回流暴雪天气形势下,有利的水汽、动力条件和冷空气降温作用,造成山东出现极端雨雪。低层的强冷平流降温导致降水发生相态转换,山东中北部出现暴雪及严重积雪。(4)积雪区降雪含水比差异大,平均降雪含水比为 $0.53 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$,比历史平均值偏低。积雪深度与高空温度、相对湿度和垂直速度的配置有关,低的温度有利于降雪和积雪。地理位置、鲁中山地地形和地面风速对积雪深度有影响,海陆差异较纬度差异影响大,海拔高度影响较小。(5)欧洲中期天气预报中心业务预报模式积雪产品对山东积雪有较好的预报能力,时效近、误差小,但存在预报总体偏弱、北部偏小和中南部偏大的特点。

关键词:暴雪;积雪深度;降雪含水比;温度平流;模式产品检验

中图分类号: P426.635;P456.7 文献标志码: A 文章编号: 2096-3599(2022)04-0058-09
DOI:10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2022.04.006

Study on snow cover characteristics and model verification of an extreme rain-snow event over Shandong

GAO Liuxi^{1,2}, YANG Chengfang², LIU Chang²

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

Abstract Diagnostic analysis is performed to study the snow cover characteristics of an extreme rain-snow event over Shandong from 6 to 8 November 2021 by using data of automatic weather stations, artificial densified hourly snow depth observations, and ERA5 reanalysis data. Main results are as follows. (1) The rain-snow process is an extreme weather event for its precipitation higher than the extremum of the same period in history, and snow depth poses a challenge to forecasters. (2) Snowstorm and snow cover area are concentrated in the central and northern parts of Shandong, the range of quantitative snow cover is basically consistent with that of snowfall $R \geq 5$ mm, and the snow depth has obvious temporal variations. (3) The extreme rain-snow event is caused by cold air under favorable water vapor and dynamic conditions and typical backflow snowstorm weather situation. The low-level strong cold advection

收稿日期:2022-02-18; 修订日期:2022-07-06

基金项目:国家自然科学基金项目(41975055);山东省气象局科研项目(2021sdqxz10)

通信作者:高留喜,男,正高级工程师,主要从事天气气候研究,glx1000@sohu.com。

leads to the precipitation phase transformation, and snowstorm and severe snow cover occur in the central and northern parts of Shandong. (4) The snow-to-liquid ratio differs greatly in snow-covered area and the mean value is $0.53 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$, which is lower than the historical average. Snow depth is related to the configuration of temperature, relative humidity, and vertical velocity in the upper level; low temperature is conducive to snowfall and snow cover. The geographical location of Shandong, mountainous topography of central Shandong, and surface wind speed have influence on snow depth. The sea-land difference has greater influence on snow depth than latitude difference does, while altitude has less influence. (5) The snow cover products of ECMWF weather model perform better in forecasting the snow cover in Shandong with small errors, though the forecast is overall weaker in that the snow cover is less in the northern part and more in the central-southern part than the observational data.

Key words snowstorm; snow depth; snow-to-liquid ratio; temperature advection; model verification

引言

极端雨雪是较严重的灾害性天气,对生产生活影响较大,如2008年中国南方持续低温雨雪天气造成23个省份公路交通出现中断,43%的省级电网受影响,受灾人口达1亿多人^[1]。预报人员对雨雪过程认识存在不足,其中液态和固态的转换预报是预报难点,相态转换的预报结果也直接影响到应急和决策服务的开展,并暴露预报能力不足问题,因此降水相态转换的机制研究成为关注点之一。

近些年针对降水相态的研究明显增多。漆梁波和张瑛^[2]分析总结出中国东部地区冬季降水相态的识别判据;杨成芳等^[3]研究山东冬半年的降水相态,发现降水相态与影响系统有关,强降雪存在雨雪转换;还有人进行积雪深度的预报研究^[4-7],山东冬季降雪成因等也有较多研究成果^[8-9]。这些研究成果一定程度上为预报员降雪预报提供了参考依据。降雪往往会产生积雪,积雪深度的大小对交通、棚架等的影响及相应的防御有很大差异。因而积雪深度成为降雪过程的关注点之一。由于冬半年观测资料的局限性,积雪深度方面的研究较为初步。预报员对降雪过程积雪深度的特征、影响因子及预报技术认识还有不足,实际业务中常有明显预报偏差^[10-11],积雪深度成为冬半年降水预报新难点。

2021年11月6—8日,山东出现一次极端雨雪天气过程,对人民生产生活和交通产生重大影响。山东省气象台对这次雨雪过程预报准确,但积雪深度预报出现较大偏差,需要进一步分析研究。

1 资料和方法

所用资料包括常规观测资料,2021年11月6—8日山东122个国家地面气象观测站逐时观测资

料,降水现象仪识别出的逐时雨、雨夹雪和雪等降水相态,逐时人工加密积雪深度观测资料和ERA5再分析资料等。采用统计和天气动力学诊断相结合的方法分析这次极端雨雪天气过程。

降雪含水比是指新增积雪深度与降雪融化后等量液体深度(降雪量)的比值,是为定量预报积雪深度而引入的概念^[12-13],以建立降雪量和积雪深度的转化关系。确定了降雪量和降雪含水比,便可以计算出积雪深度。本文取积雪各站过程最大积雪深度,累加降雪开始至最大积雪深度产生时的逐时降雪量得到总降雪量,计算最大积雪深度与总降雪量的比值,即降雪含水比。模式预报积雪深度误差指模式预报输出的积雪深度与对应站点的积雪深度之差,正误差表示模式积雪预报高于观测值,反之,低于观测值。当积雪预报误差大于20%时,为明显偏多;当其小于-20%时,为明显偏少;若介于二者之间,视为误差不明显或接近于观测值。雪深均采用整数。

2 天气实况及预报难点

2.1 雨雪实况

2021年11月6日17时—8日16时,受寒潮影响,山东出现一次大范围雨雪过程。全省过程平均降水量为35.0 mm,接近11月常年平均降水量(18.5 mm)的两倍,垦利降水量最大,为76.6 mm。多站降水量突破同期历史极值,是一次极端天气事件。雨雪主要出现在7日,有20站降水量 $R \geq 50 \text{ mm}$,主要分布在鲁西北地区;31站日降水量突破本站11月历史极值,占全省总站数的25%;鲁中的东部和半岛地区降水相对较小(图1a)。47站出现暴雪($R \geq 10 \text{ mm}$),平原、聊城和济南出现特大暴雪,暴雪和积雪集中分布在鲁西北和鲁中的北部地区(图

1b、c), 4 站积雪深度达到或突破本站极值。另外, 7 日鲁西北和鲁中北部地区出现能见度不足 500 m

的浓雾天气, 浓雾区(图 1d)和暴雪区(图 1b)、积雪区(图 1c)有很好的对应关系。

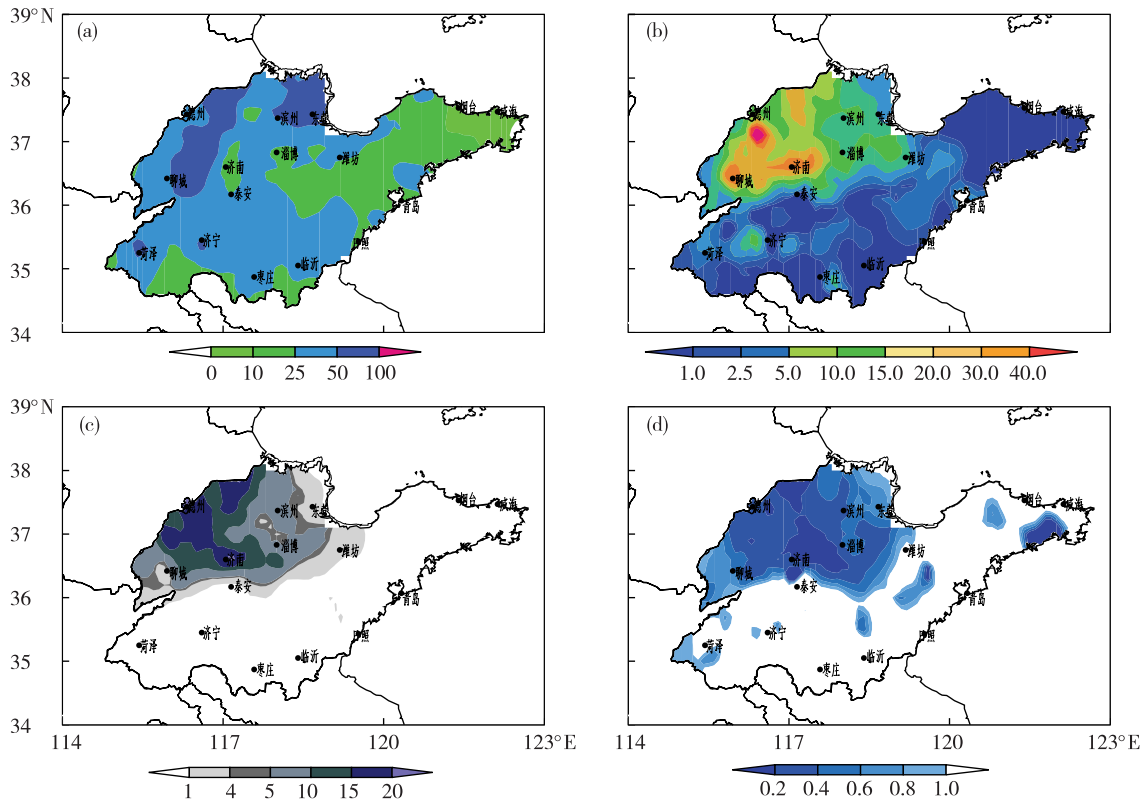


图 1 2021 年 11 月 7 日降水量(a, 色标, 单位: mm)、降雪量(b, 色标, 单位: mm)、最大积雪深度(c, 色标, 单位: cm)和最低能见度(d, 色标, 单位: km)

Fig.1 Precipitation (a, color scale, units: mm), snowfall (b, color scale, units: mm), maximum snow depth (c, color scale, units: cm), and minimum visibility (d, color scale, units: km) on 7 November 2021

2.2 相态变化

全省除鲁南和半岛南部地区有 13 站没出现降雪, 其余 109 站均出现雨雪转换。7 日 01 时, 莘县开始出现雨夹雪, 随着冷空气影响, 降雪的地方逐渐增多; 05 时, 德州、聊城、滨州、济南和菏泽等地有 15 县(市)转为降雪, 之后山东自北向南陆续转雪或雨夹雪。鲁西北和鲁中北部地区主要为雨转雪; 鲁南和鲁中的南部地区有的站点出现多次相态转换, 邹城 7 日 06 时由雨转雨夹雪, 08 时转雨, 09 时转雪, 10 时转雨, 12 时转雨夹雪, 13 时转雨。半岛地区经历雨—雨夹雪—雪的转换。综上, 此次过程降水相态复杂。

2.3 积雪深度特征分析

此次过程中, 55 站出现有量积雪, 23 站积雪深度在 10 cm 以上, 16 站为 5~10 cm, 济南和德州最大(20 cm)。积雪主要分布在鲁西北和鲁中的北部地区, 积雪深度呈现自北向南减小的特点, 有明显的纬度差异(图 1c)。降雪期间温度也呈北低南高

的分布, 积雪严重的地区与低的温度区吻合较好(图略), 说明纬度高温度低的区域有利于积雪形成。比较图 1c 和图 1b 发现有量积雪的范围与降雪量 $R \geq 5$ mm 的分布范围基本一致, 鲁西北和鲁中北部降雪量大、积雪深度大, 没有积雪的地方降雪量小。对 7 日有积雪站的最大雪深和最大降雪量进行相关分析, 两者的相关系数为 0.73, 通过信度 0.01 的显著性检验, 呈显著的正相关。利用最小二乘法对其进行线性拟合, 拟合关系式为:

$$y = 0.50x + 0.18. \quad (1)$$

式(1)中: y 为最大积雪深度(单位: cm), x 为总降雪量(单位: mm)。积雪深度随降雪量增加, 1 mm 降雪量可使积雪深度增加 0.5 cm。积雪深度与降雪量有密切关系, 这与已有研究^[14]是一致的。

山东降雪主要发生在 7 日白天, 90% 以上的站积雪深度随降雪量的增加而增大, 最大积雪深度出现在降雪结束时, 聊城、河口等少数站积雪深度峰值没有出现在降雪结束时。7 日白天出现积雪峰值

的53个有量积雪站,在20时积雪深度减小的有26站,占49%,最大减小5 cm,平均减小2 cm;维持峰值的有27站,占51%。夜间积雪深度继续减小的有39站,占74%,最大减小5 cm,平均减小2 cm,维持不变的有14站,占26%。夜间融化的站数比白天的占比高,融化程度相当。积雪深度峰值维持至8日08时的仅有6站,占11%。由此可见,白天和夜间都可出现积雪融化、积雪深度减小的情况,夜间融化程度不一定比白天低,积雪深度不一定在次日08时达到最大值,积雪深度具有明显的时间变化特征。常规观测的08时积雪深度数据很难代表降雪过程的最大值,有必要进行积雪加密观测。

2.4 预报难点

针对此次极端雨雪过程,山东省气象台于11月5日发布雨雪重要天气预报,预报全省平均过程降水量为20~30 mm,6—7日鲁西北地区中到大雨转中雪。此后将预报量级调大。对比主观预报与实况,预报员对过程降水量、暴雪范围、降水起止和相

态转换时间的预报基本准确,但积雪深度预报存在较大偏差,积雪预报是难点。

3 极端积雪影响因子分析

3.1 大气环流背景和环境场分析

500 hPa天气图上,11月3—4日乌拉尔山到北冰洋出现东北—西南向阻塞高压,其前部形成宽广的大横槽,4日20时横槽南压到贝加尔湖至巴尔喀什湖、新疆北部一带。5日08时阻塞高压减弱崩溃,横槽转成竖槽,后发展东移过程中与南支槽叠加,使100°E以东的环流经向度加大,出现低涡深槽,110°~130°E发展为较强的沿海高压脊,7日08时高压脊延伸至东北地区,山东处于脊后槽前旺盛的西南暖湿气流中(图2a)。6日夜间北路和西路两路冷空气自北向南入侵山东(图2b、c),形成“下东北上西南”的山东典型回流暴雪天气形势^[15]。降水主要影响系统有:500 hPa低涡深槽、850 hPa切变线、冷锋和地面倒槽(图2)。

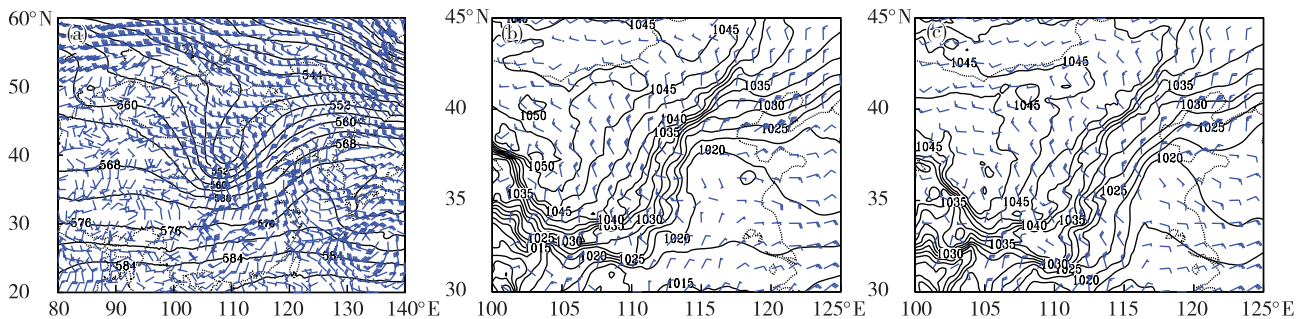


图2 2021年11月7日08时500 hPa高度场、850 hPa风场(a)和6日20时(b)、7日02时(c)地面形势场(等值线:位势高度,单位:dagpm;风矢:风速,单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)

Fig.2 Geopotential height at 500 hPa and wind at 850 hPa at 08:00 BST 7 (a) and surface synoptic situation at 20:00 BST 6 (b) and 02:00 BST 7 (c) November 2021 (isoline for geopotential height, units: dagpm; wind barb for wind speed, units: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)

6日20时—7日14时的1000~850 hPa水汽通量散度图(图略)上,鲁西北长时间存在明显的水汽辐合中心。7日08时,700 hPa济南出现 $20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的西南低空急流,850 hPa徐州出现 $14\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的东南低空急流。由于沿海高压脊的稳定存在,脊后低槽移动缓慢,有利于槽前低空急流向山东输送充足水汽,7日08时鲁西北地区850 hPa比湿达到 $4\sim 6\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,显著高于山东发生暴雪时低层平均比湿^[15]。7日08时,850 hPa济南到东营切变线南侧为 $12\sim 14\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的东南风,北侧是超过 $10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的东北风,有风向风速的强辐合,动力条件好。7日08时章丘探空显示0~3 km和0~6 km风切变分别为 27.6 、 $31.9\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,

0~6 km风切变不小于 $20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,属于强的垂直风切变^[16],所以大气有强的动力不稳定。850~450 hPa有明显的风向随高度顺转且增大,且有较厚的近饱和层,雷达回波拼图和卫星云图图像显示有多条平行于热层风的云带和雨带(图略),根据章丽娜等^[17]研究的判据,说明有条件对称不稳定。925 hPa山东北部出现 $22\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的东北急流,一方面从渤海输送湿冷水汽,另一方面使强盛的西南暖湿气流在强冷空气垫上爬升,起到明显动力抬升作用。强风切变、对流不稳定、充沛的水汽供应和适当的抬升条件有利于强对流的发生发展。地面图上鲁西北处于倒槽顶端,辐合条件好。鲁西北地区降水期间

有强的上升运动,900~800 hPa 低层上升速度最大为 $-360 \times 10^{-2} \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$,超过山东暴雨指标垂直速度阈值。对流层低层3支急流输送水汽,且在山东北部形成明显辐合上升运动,有利于该地区产生强降水。在温度比较低的情况下,强降水可以变成强降雪。

由6日20时—7日20时温度平流演变看,6日23时之前山东上空对流层均为不太强的暖平流,7日01时,随着低层冷空气的入侵,1000~850 hPa存在强冷平流,1000 hPa聊城附近冷平流中心值为 $-70 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$ (图略)。在强冷平流的作用下,鲁西北925 hPa以下温度迅速下降至 $0 \text{ } ^\circ\text{C}$ 以下,为雨雪相态的转换奠定了基础,7日早晨开始强降水转为强降雪。鲁西北主要降雪时段,低层一直存在冷平流,温度持续下降,强降雪降落至地面不易融化,出现严重积雪。

综上所述,在山东典型回流暴雪天气形势下,充足的水汽供应、有利的动力抬升条件和冷空气降温共同作用,导致山东出现极端雨雪天气。冷空气和强冷平流降温导致山东降水发生相态转换,强降水转为强降雪,山东中北部出现暴雪和严重积雪。

3.2 降雪含水比分析

图3显示山东出现积雪各站过程降雪含水比为 $0.15 \sim 0.99 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$,10站在 $0.8 \sim 1.0 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$ 之间,30站在 $0.4 \sim 0.8 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$ 之间,15站小于 $0.4 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$,德州最大($0.99 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$),聊城最小($0.15 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$),平均降雪含水比为 $0.53 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$,比历史统计的 $0.8 \sim 1.1 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$ [5]明显偏小,说明这次严重积雪是降雪量大造成的。各站降雪含水比差异大,呈“北大南小”分布,德州和聊城的西部地区含水比值大。对比图1c发现,德州到济南积雪严重的地区和降雪含水比高的地区对应很好,说明高降雪含水比有利于积雪形成。

3.3 温度对积雪深度的影响

从微物理学角度分析,积雪深度受到高低空环境气象条件的影响,积雪深度及降雪含水比与冰晶结构有关,决定冰晶特性的最重要影响因子是环境温度。冰晶从生成到降落至地面的过程中,云内、云下和地面3个阶段的环境温度是积雪深度最大的影响因子。在云内,环境温度在 $-4 \sim 0 \text{ } ^\circ\text{C}$ 时冰晶主要是片状, $-10 \sim -4 \text{ } ^\circ\text{C}$ 主要是针状、柱状, $-20 \sim -10 \text{ } ^\circ\text{C}$ 主要是树枝状、盘状、扇状、厚片状,低于 $-20 \text{ } ^\circ\text{C}$ 则主要是空心柱状[18-19],其中树枝状冰晶的积雪深度最大,相应的降雪含水比也大,其次是针状冰晶,最小

的是柱状冰晶和片状冰晶。云内相对湿度会影响冰晶的形状和大小,周围空气呈高度过饱和状态,冰晶会快速增长[20]。在离开云体、下落过程中,周围大气的温度大于 $0 \text{ } ^\circ\text{C}$ 时冰晶会融化[21]。雪降落至地面,地面温度主要决定冰晶的变化。

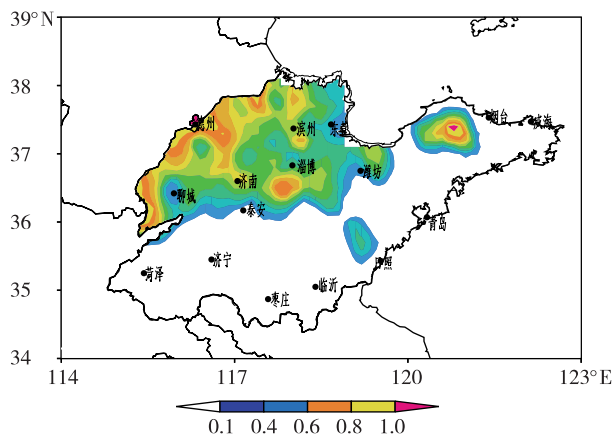


图3 2021年11月7—8日山东积雪站点降雪含水比(色标,单位: $\text{cm} \cdot \text{mm}^{-1}$)分布

Fig.3 Distribution of snow-to-liquid ratio (color scale, units: $\text{cm} \cdot \text{mm}^{-1}$) at stations of snow cover in Shandong from 7 to 8 November 2021

山东各地降雪量、积雪深度和降雪含水比存在明显差异,选取积雪深度和降雪含水比大的德州($20 \text{ cm}, 0.99 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$)、济南($20 \text{ cm}, 0.62 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$)及积雪深度和降雪含水比小的聊城($4 \text{ cm}, 0.15 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$),分析温度对降雪的影响。

降雪时段大气最强上升运动层与最大相对湿度叠加的区域,水汽交换最多,是冰晶最大增长率发生的区域,附近温度和相对湿度决定冰晶类型[14]。主要降雪和积雪形成时段,德州为7日05—11时,聊城为05—08时,济南为08—12时。由图4看到,3地降雪期间1000~300 hPa相对湿度都在90%以上,云顶温度低于 $-50 \text{ } ^\circ\text{C}$, $-20 \text{ } ^\circ\text{C}$ 层在550 hPa,冰晶层深厚,具有相似的温度场结构,900~700 hPa都有明显的逆温层。降雪时段大气最强上升运动层与大的相对湿度叠加的区域(紫色矩形框处),德州在600~500 hPa(图4a),温度为 $-20 \sim -12 \text{ } ^\circ\text{C}$,适宜树枝状冰晶增长,下面层次温度均低于 $0 \text{ } ^\circ\text{C}$,有利于冰晶维持原来状态,造成积雪深度大和降雪含水比高。济南在750~650 hPa(图4b),温度为 $-8 \sim -2 \text{ } ^\circ\text{C}$,主要是针状、柱状冰晶,800 hPa附近有高于 $0 \text{ } ^\circ\text{C}$ 的融化层,冰晶在空中部分融化,降雪含水比德州低。聊城在800~700 hPa(图4c),温度为 $-8 \sim 4 \text{ } ^\circ\text{C}$,以片状、柱状冰晶为主,下面高于 $0 \text{ } ^\circ\text{C}$ 的

融化层比济南深厚、温度更高,冰晶融化程度高,降雪含水比低,不利于积雪形成。900 hPa 以下低层,德州温度最低(-8~-4℃),聊城温度最高(-4~0℃),济南温度低于聊城。德州高空低的温度有利

于降雪和积雪的形成,降雪含水比大。聊城温度高,降雪含水比最低,最不利于产生大的积雪深度。高空温度、相对湿度和垂直速度的配置差异可导致积雪深度和降雪含水比的明显不同。

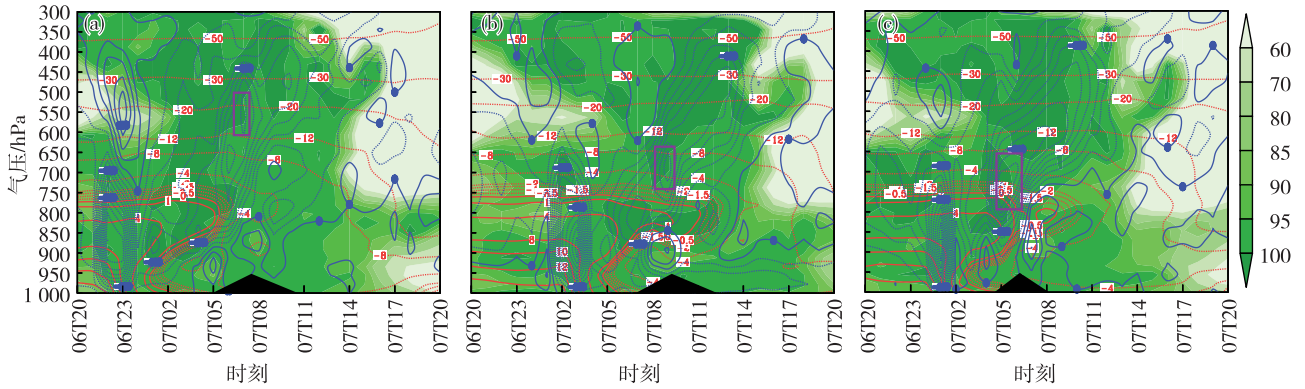


图 4 2021 年 11 月 7 日过德州(a)、济南(b)和聊城(c)的温度(红色等值线,单位:℃)、相对湿度(色标,单位:%)和垂直速度(蓝色等值线,单位: $10^{-2} \text{ Pa}\cdot\text{s}^{-1}$)的垂直剖面图(黑色三角为主要降雪时段,紫色框为最强上升运动层与大的相对湿度叠加区)

Fig.4 Vertical cross section of temperature (red isoline, units: $^{\circ}\text{C}$), relative humidity (color scale, units: %), and vertical velocity (blue isoline, units: $10^{-2} \text{ Pa}\cdot\text{s}^{-1}$) in Dezhou (a), Jinan (b), and Liaocheng (c) on 7 November 2021 (black triangle means main snowfall period, and purple rectangle is large relative humidity overlaid with layer of the strongest ascending motion)

由济南、德州和聊城的逐时气温演变(图 5)来看,山东出现降雪前,气温呈迅速下降状态,济南、德州和聊城 5~6 h 降幅超过 15°C ,德州的气温 7 日 05 时下降至 0.2°C ,7 日 08 时为 -1.5°C ,此后继续下降,降雪结束时为 -1.7°C ,纯降雪时段,气温为 $-2.0\sim-0.5^{\circ}\text{C}$ 。济南降雪时段,气温为 $-2.6\sim 0^{\circ}\text{C}$ 。德州降雪时段温度低,有利于形成积雪和高的降雪含水比。聊城温度高,降雪下落过程中融化,不利于积雪形成,从而降雪含水比低。济南降雪期间最低温度虽低于德州,但主要降雪时段比德州高 $1\sim 2^{\circ}\text{C}$,济南降雪含水比小于德州,说明低的温度有利于出现高的降雪含水比。

3.4 地面风速、地形和地理位置对积雪深度的影响

气象观测场为开阔的场地,风速太大时,可能吹走积雪,从而使得积雪深度减小。此次降雪时平均风速为 4~6 级、阵风为 7~9 级,存在风吹雪的条件,全省平均降雪含水比明显偏低可能与大风有关。积雪最深的德州 7 日 08 时前平均风力为 5 级、阵风为 7~8 级,积雪为 9 cm,降雪含水比为 $0.74 \text{ cm}\cdot\text{mm}^{-1}$,上午风力明显减弱,风力为 4 级、阵风为 6~7 级,新增积雪 11 cm,降雪含水比为 $1.36 \text{ cm}\cdot\text{mm}^{-1}$ 。济南 7 日上午风力为 4 级、阵风为 6 级,积雪为 15 cm,降雪含水比为 $0.5 \text{ cm}\cdot\text{mm}^{-1}$,

下午降雪时风力为 3 级、阵风为 5 级,新增积雪 5 cm,降雪含水比为 $1.72 \text{ cm}\cdot\text{mm}^{-1}$ 。德州、济南积雪随风的变化在一定程度上佐证了大风不利于观测站形成积雪。

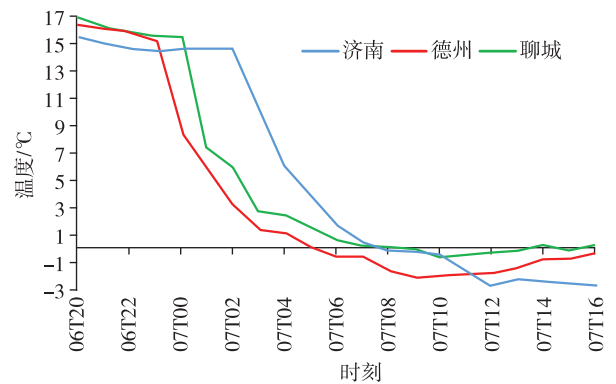


图 5 济南、德州和聊城地面 2 m 气温逐时演变(单位:℃)

Fig.5 Hourly evolution of temperature (units: $^{\circ}\text{C}$) at 2 m in Jinan, Dezhou, and Liaocheng

图 6 是山东地形、7 日最大积雪深度和 7 日 05、10 时地面风场图。山东地形呈中间高、四周低的特点,中部是海拔较高(400~800 m)的鲁中山地,泰山最高(1 545 m),北部是地势平坦且海拔较低(50 m 以下)的鲁西北平原。由图 6a 看出,积雪分布在泰

山以北的鲁西北和鲁中山地北部,泰山以南没有积雪,积雪分布除了明显的纬度差异外,可能与鲁中山地地形有关。冷空气主要从 925 hPa 以下的大气低层自北向南影响山东,与鲁中山地高度相近,受地形影响,山地北侧比南侧降温明显,7 日 14 时观测发现,过去 24 h 降温北侧比南侧约高 4 °C,导致鲁西北温度低,出现明显积雪,鲁中山地以南温度

高,没有形成积雪。泰山出现 2 cm 的积雪,泰山脚下的泰安没有积雪,济南到淄博附近明显的积雪中心与鲁中山地地形对应很好,均说明地形对积雪有影响。由地面风场(图 6a,b)看出,强的偏北风到山地北侧的济南附近风力减弱,山地北侧的济南到淄博一带出现积雪中心,某种程度上说明风和地形对积雪有影响。

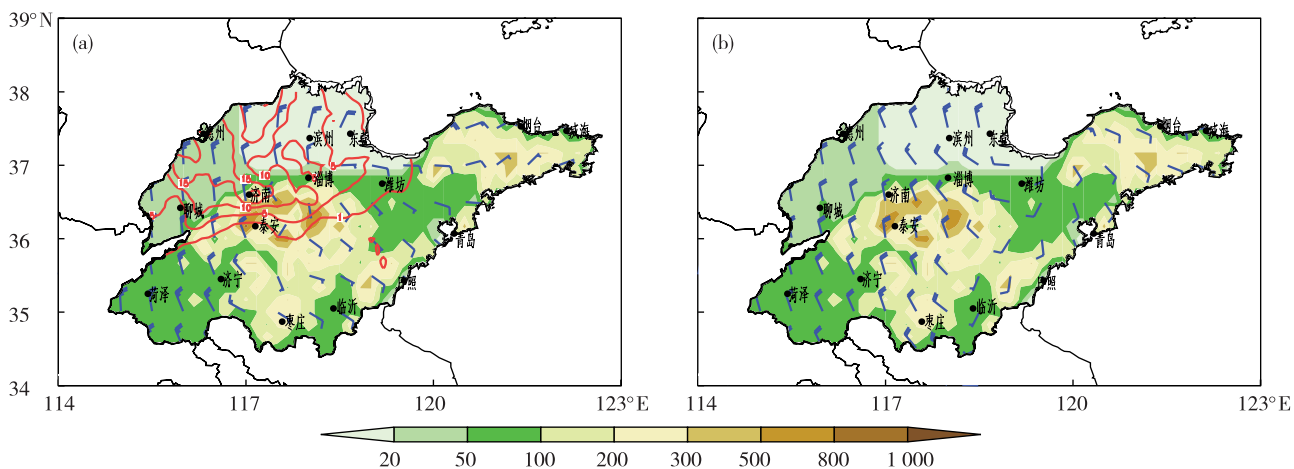


图 6 山东地形(色标为海拔高度,单位:m)、7 日最大积雪深度(红色实线,单位:cm)以及地面风场(a. 7 日 05 时, b. 7 日 10 时)

Fig.6 Topography (color scale for altitude, units: m) of Shandong, maximum snow depth (red solid line, units: cm) on 7, and surface wind field at 05:00 BST (a) and 10:00 BST (b) 7 November 2021

降雪、积雪与地理位置存在一定关系,分别计算 7 日有积雪站(不含泰山站)的最大积雪深度、最大降雪量与纬度、经度和海拔高度的关系,发现积雪深度与经度的相关性最好,纬度次之,海拔高度最差,相关系数分别为-0.74、0.40 和 0.26。最大降雪量与经度的相关性最好,纬度次之,海拔高度最差,相关系数分别为-0.72、0.36 和-0.19。计算山东全部站点发现也有类似的相关关系。山东东面是大海(热容量大),冷空气影响时,东部比西部降温幅度小、温度高,海陆差异导致东部降雪和积雪形成条件比西部差,造成降雪量和积雪深度随经度减小。除泰山站(1533 m)和沂源(305 m)外,山东其余测站海拔高度均在 230 m 以下,其中 98 站低于 100 m(近 70 站低于 50 m),山东测站海拔高度低、差别小。此次过程降雪和积雪主要出现在海拔低、地势平坦的鲁西北平原地区,海拔高度影响较小。山东积雪的纬度差最大为 1.85°,纬度变化小可能是影响不显著的原因。降雪和积雪均与经度相关性最好,呈明显的负相关,说明此次过程山东海陆差异比纬度差异、海拔高度影响大。

4 数值模式积雪产品检验

11 月 5 日 20 时、6 日 08 时和 20 时 3 时次欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)业务预报模式(以下简称“EC 模式”)积雪产品对 7 日山东积雪都有很好的反映,TS 评分分别为 71.7、70.2 和 61.2。与实况对比,EC 模式积雪深度产品 5 日 20 时预报积雪区大部偏小 5~10 cm,局部偏小超过 10 cm(图 7a)。6 日 08 时预报积雪区大部偏小 2~5 cm,部分地区偏小 5~10 cm(图 7b)。6 日 20 时预报积雪区大部偏小 0~3 cm,局部偏小 5~10 cm(图 7c),对比图 1c,鲁中南部和鲁西南地区出现大范围空报。7 日全省平均雪深和有积雪站平均雪深分别为 4、9 cm,EC 模式 3 时次预报全省平均雪深分别为 2、3 和 4 cm(偏小 50%、25%和 0);预报有积雪站平均雪深分别为 5、7 和 9 cm(偏小 44%、22%和 0)。预报时效越近,EC 雪深产品与实况越接近,误差越小,6 日 20 时模式产品 TS 评分低主要是由于空报多造成的。由积雪区雪深的相对误差看,5 日 20 时预报

(图7d)偏北的地区雪深偏小30%以上,济南、淄博和滨州一线东南到东营和潍坊一带偏小50%~100%。6日08时预报(图7e)大部地区雪深偏小20%~50%,潍坊附近偏小50%~100%。6日20时预报(图7f)大部地区雪深偏小,但德州、滨州和济南等位置偏北的主要暴雪和积雪区预报较好,误差小(偏小20%以下),聊城、淄博和潍坊等位置

偏南的地区误差较大,偏大明显(大于50%)。EC模式3时次对山东积雪区预报总体偏弱,随着时效临近,误差越来越小。模式雪深产品存在预报山东北部偏小、中南部偏大的特点。结合温度和降雪含水比分布(图3),温度低、降雪含水比高的北部地区,模式产品预报偏小,温度高、降雪含水比低的地区,模式产品预报偏大。

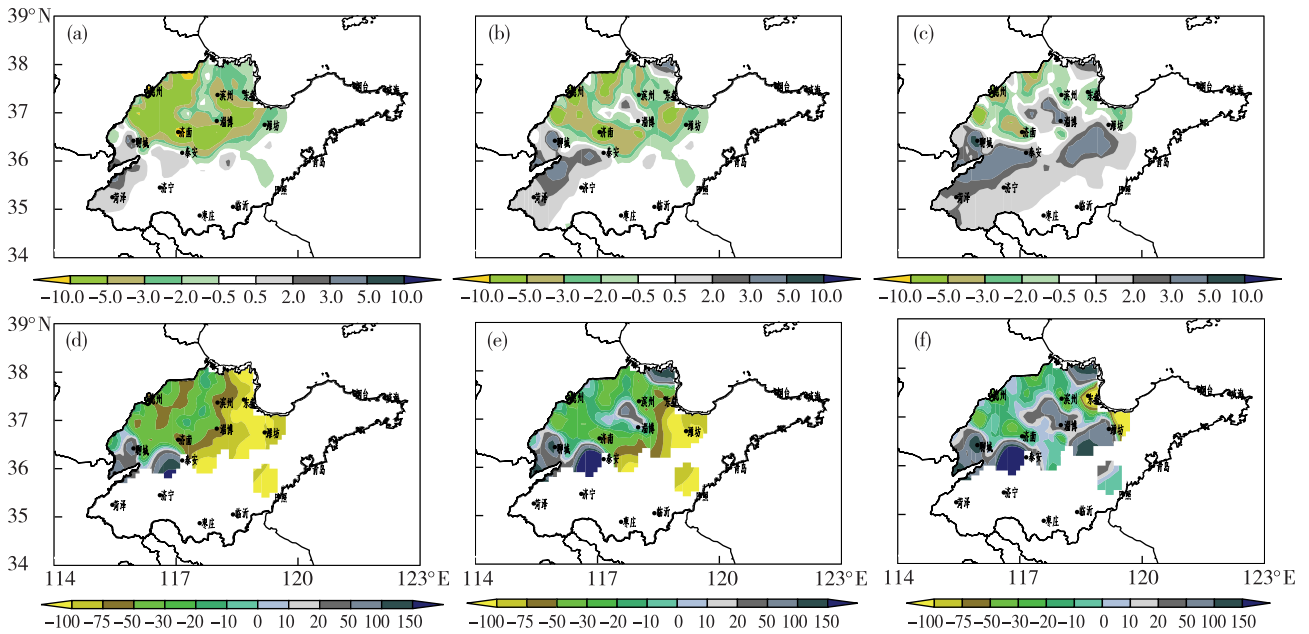


图7 2021年11月5日20时—6日20时EC模式预报11月7日积雪误差(a、b、c中色标为积雪深度误差,单位:cm;d、e、f中色标为积雪深度误差百分率,单位:%)

Fig.7 Difference of snow cover in Shandong on 7 November between observation and forecast by ECMWF weather model from 20:00 BST 5 to 20:00 BST 6 November 2021 (color scale in Fig.7a/b/c for difference of snow depth, units: cm; color scale in Fig.7d/e/f for percentage of the difference, units: %)

综上分析,EC模式积雪产品对山东此次积雪有较好的预报能力,时效近误差小,但存在预报总体偏弱、山东北部偏小和中南部偏大的特点。雪深误差与温度、降雪含水比有关。温度低、降雪含水比高,误差小;反之,误差大。

5 结论

利用地面自动气象观测站、人工加密积雪深度逐时观测资料和ERA5再分析资料,对山东2021年11月6—8日极端雨雪过程进行分析,得出的主要结论如下:

(1)此次雨雪过程相态复杂,暴雨雪站数多,积雪严重。降水量突破同期历史极值,是一次极端天气事件,积雪深度是预报难点。主要影响系统有500 hPa低涡深槽、850 hPa切变线、冷锋和地面倒槽。

(2)暴雪和积雪集中分布在山东的中北部地区,积雪深度与降雪量存在显著正相关关系,降雪量大则积雪深度大,平均1 mm降雪量可使积雪深度增加0.5 cm。有量积雪的范围与降雪量 $R \geq 5$ mm的分布范围基本一致。积雪深度具有明显的时间变化特征,白天和夜间都可出现积雪融化、积雪深度减小的情况,夜间融化程度不一定比白天低,积雪深度不一定在次日08时达到最大值。

(3)在山东典型回流暴雪天气形势下,充足的水汽供应、有利的动力抬升条件和冷空气降温共同作用,导致山东出现极端雨雪天气。冷空气和强冷平流降温导致山东降水发生相态转换,强降水转成强降雪,山东中北部出现暴雪和严重积雪。

(4)积雪区降雪含水比差异大,在 $0.15 \sim 1.0 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$ 之间,分布呈“北大南小”,高的降雪含水比有利于形成积雪。此次积雪区降雪含水比平

均为 $0.53 \text{ cm}\cdot\text{mm}^{-1}$, 比历史平均值明显偏低。积雪深度与高空温度、相对湿度和垂直速度的配置有关, 低的温度有利于降雪、积雪和出现高的降雪含水比。

(5) 此次严重积雪主要是降雪量大造成的, 地理位置、鲁中山地地形和地面风速对积雪深度有影响。纬度高、温度低的地方有利于形成积雪, 大风不利于观测站形成积雪。降雪量、积雪深度随经度变化具有很好的一致性。降雪量、积雪深度随纬度变化存在一定差异, 总体上均随纬度增加而增加。此次降雪和积雪, 海陆差异影响大于纬度影响, 海拔高度影响较小。

(6) EC 模式积雪产品对山东积雪有较好的预报能力, 时效近误差小, 但存在预报总体偏弱、北部偏小和中南部偏大的特点。温度低、降雪含水比高的地区, 模式产品预报偏小、误差小。温度高、降雪含水比低的地区, 模式产品预报偏大、误差大。EC 模式 24 h 时效积雪产品对山东北部的主要积雪区预报较好, 误差不明显 (偏小 20% 以下), 对中南部地区误差较大。

参考文献:

- [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[J]. 气候与环境研究, 2008, 13(4): 556-566.
- [2] 漆梁波, 张瑛. 中国东部地区冬季降水相态的识别判据研究[J]. 气象, 2012, 38(1): 96-102.
- [3] 杨成芳, 姜鹏, 张少林, 等. 山东冬半年降水相态的温度特征统计分析[J]. 气象, 2013, 39(3): 355-361.
- [4] 杨琨, 薛建军. 使用加密降雪资料分析降雪量和积雪深度关系[J]. 应用气象学报, 2013, 24(3): 349-355.
- [5] 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.
- [6] 姜有山, 束宇, 李力, 等. 基于湿位涡和积雪效率的降雪预报技术探讨[J]. 气象科学, 2017, 37(5): 659-665.
- [7] 王一颀, 赵桂香, 马严枝. 降水相态转换机制及积雪深度预报技术研究[J]. 干旱气象, 2019, 37(6): 964-971.
- [8] 杨璐瑛, 张芹, 郭俊建, 等. 鲁南初冬一次罕见特大暴雪的成因分析[J]. 海洋气象学报, 2018, 38(1): 100-107.
- [9] 杨成芳, 刘畅, 郭俊建, 等. 山东相态逆转降雪天气的特征与预报[J]. 海洋气象学报, 2017, 37(1): 73-83.
- [10] 翟亮, 郭淳薇, 马新成, 等. 北京 2016 年“11·20”初雪预报偏差分析[J]. 气象, 2018, 44(1): 151-158.
- [11] 杜佳, 杨成芳, 戴翼, 等. 北京地区 4 月一次罕见暴雪的形成机制分析[J]. 气象, 2019, 45(10): 1363-1374.
- [12] ALCOTT T I, STEENBURGH W J. Snow-to-liquid ratio variability and prediction at a high-elevation site in Utah's Wasatch mountains[J]. Wea Forecasting, 2010, 25(1): 323-337.
- [13] BAXTER M A, GRAVES C E, MOORE J T. A climatology of snow-to-liquid ratio for the contiguous United States[J]. Wea Forecasting, 2005, 20(5): 729-744.
- [14] 杨成芳, 赵宇. 基于加密观测的一次极端雨雪过程积雪特征分析[J]. 高原气象, 2021, 40(4): 853-865.
- [15] 阎丽凤, 杨成芳. 山东灾害性天气预报技术手册[M]. 北京: 气象出版社, 2014: 175-192.
- [16] 俞小鼎. 强对流天气的多普勒天气雷达探测和预警[J]. 气象科技进展, 2011, 1(3): 31-41.
- [17] 章丽娜, 周小刚, 夏扬. 关于业务上应用条件对称不稳定相关问题的讨论[J]. 气象学报, 2018, 76(5): 824-832.
- [18] NAKAYA U. Snow crystals: natural and artificial[M]. Harvard: Harvard University Press, 1954: 1-510.
- [19] MAGONO C, LEE C W. Meteorological classification of natural snow crystals[J]. J Faculty Sci, Hokkaido Uni, 1966, 2(4): 321-335.
- [20] FUKUTA N, TAKAHASHI T. The growth of atmospheric ice crystals: a summary of findings in vertical supercooled cloud tunnel studies[J]. J Atmos Sci, 1999, 56(12): 1963-1979.
- [21] HOUZE R A Jr. Cloud dynamics[M]. New York: Academic Press, 1993: 1-573.