

刘奇奇,杨成芳,吴雪旭,等.“12·14”山东暴雪过程积雪深度特征及成因[J].海洋气象学报,2024,44(2):55-64.
LIU Qiqi, YANG Chengfang, WU Xuexu, et al. Characteristics and causes of snow cover of “12·14” snowstorm process in Shandong[J]. Journal of Marine Meteorology, 2024, 44(2): 55-64. DOI: 10.19513/j.cnki.hyqxxb.20240218001. (in Chinese)

“12·14”山东暴雪过程积雪深度特征及成因

刘奇奇^{1,2}, 杨成芳³, 吴雪旭³, 王健²

(1.山东省气象防灾减灾重点实验室, 山东 济南 250031; 2.聊城市气象局, 山东 聊城 252000; 3.山东省气象台, 山东 济南 250031)

摘要 利用常规观测、积雪深度逐时加密观测资料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,对2023年12月13—15日山东一次极端暴雪天气过程积雪特征及其成因进行分析,得到以下结论:(1)此次过程是一次江淮气旋暴雪天气过程,具有持续时间长、降水相态复杂、基础温度低、降温幅度大和积雪深度厚等特征。(2)最大小时新增积雪深度可达8 cm;过程平均雪水比为 $0.7 \text{ cm}\cdot\text{mm}^{-1}$,呈“西大东小”的分布特征。(3)有积雪的站近地面温度从开始降雪到地面产生积雪,气温和雪面温度均呈下降趋势,0 cm地温在降雪前期降温明显,积雪形成后地温不再明显变化。无积雪的站在整个降雪时段内近地面温度可分为4种情况。(4)雪水比随气温变化最明显;积雪形成之后地温对雪水比大小影响不大;当雪水比小于 $0.75 \text{ cm}\cdot\text{mm}^{-1}$ 时,雪水比随雪面温度降低而增大,当雪水比大于 $0.76 \text{ cm}\cdot\text{mm}^{-1}$ 后,雪面温度不再有明显变化。

关键词 暴雪;积雪深度;雪水比;温度

中图分类号: P426.63; P458.3; P457.6 文献标志码: A 文章编号: 2096-3599(2024)02-0055-10
DOI: 10.19513/j.cnki.hyqxxb.20240218001

Characteristics and causes of snow cover of “12·14” snowstorm process in Shandong

LIU Qiqi^{1,2}, YANG Chengfang³, WU Xuexu³, WANG Jian²

(1. Key Laboratory for Meteorological Disaster Prevention and Mitigation of Shandong, Jinan 250031, China; 2. Liaocheng Meteorological Bureau, Liaocheng 252000, China; 3. Shandong Meteorological Observatory, Jinan 250031, China)

Abstract Diagnostic analysis is performed to study the characteristics and causes of snow cover in an extreme snowstorm process over Shandong from 13 to 15 December 2023 by using routine observation data, hourly intensive observation data of snow depth, and ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) Reanalysis v5 (ERA5). The results are as follows. (1) This snowstorm is caused by a Jianghuai cyclone with the characteristics of long duration, complex precipitation phase, low basic temperature, large cooling range, and thick snow depth. (2) The maximum newly increased hourly snow depth is 8 cm; the average SLR (snow-to-liquid ratio) in Shandong is $0.7 \text{ cm}\cdot\text{mm}^{-1}$, exhibiting a pattern of larger snowfall amount in the western region and smaller amount in the eastern region. (3) For the meteorological stations with snow cover, the 2-m temperature and snow surface temperature show a

收稿日期: 2024-02-18; 修回日期: 2024-04-21

基金项目: 山东省自然科学基金项目(ZR2022MD095); 山东省气象局科研项目(2021SDYD28); 聊城市气象局科研项目(2024LCQX06)

第一作者简介: 刘奇奇,女,硕士,工程师,主要从事中短期天气预报和技术研究, lqqi1990@163.com。

通信作者简介: 杨成芳,女,博士,正高级工程师,主要从事天气预报业务和降雪研究, cf_yang70@hotmail.com。

downward trend from the beginning of snowfall to the forming of snow cover; the 0-cm ground temperature drops in the early stage of snowfall, but no longer changes significantly after the forming of snow cover. For the meteorological stations without snow cover, the characteristics of the near-surface temperature can be divided into 4 conditions during the whole snowfall period. (4) The SLR changes obviously with the 2-m temperature, while the ground temperature has little effect on the SLR after the forming of snow cover. The SLR rises as the snow surface temperature decreases when the SLR is below $0.75 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$; however, when the SLR exceeds $0.76 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$, the snow surface temperature no longer shows significant changes.

Keywords snowstorm; snow depth; snow-to-liquid ratio (SLR); temperature

引言

暴雪是山东冬季灾害性天气之一,其产生的积雪能对交通运输、农业生产和居民生活等带来较大影响。目前,由于积雪观测资料和数值模拟的局限性,积雪深度的精确预报一直是业务中的重点和难点。积雪是衡量暴雪灾害严重程度的重要指标,也是雪灾的主要致灾因子^[1-3]。为进一步提升雪灾的防灾减灾救灾能力,减少极端暴雪天气造成的损失,需对积雪的形成机制和影响因子进行更深入的研究。

在积雪研究方面,杨成芳等^[4-5]用加密资料分析一次极端雨雪天气积雪特征,指出积雪深度的预报需考虑高低空气象条件的影响,并对江淮气旋的积雪特征进行研究,得出产生积雪的近地面气象要素特征和影响因子。高留喜等^[6]研究得出在暴雪过程下山东不同积雪区的雪水比差异较大,并对各数值预报模式对积雪的预报能力进行检验。魏凌翔等^[7]研究发现平均气温小于 $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,积雪密度随气温升高而增大,平均气温大于 $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,积雪密度随气温升高而增大的幅度减小。在青藏高原和新疆地区,有研究构建了 FY-4A(风云卫星4号A星)在青藏高原地区积雪判识方法和雪深监测模型,给出了 $0 \sim 10 \text{ cm}$ 积雪等级划分指标;发现了青藏高原地形、融积时间和季风等因素会导致该区域雪深与气象要素的相关性出现时空特异性;建立了新疆特重雪灾区域县域径向基函数(radial basis function, RBF)网络模型用以预测 2021—2050 年的年最大积雪深度^[8-10]。我国对于积雪方面的研究大都是关于青藏高原和新疆等地区的积雪特征和时空分布变化,对于业务中关注的强降雪天气过程产生的积雪深度特征和变化研究相对较少。

本文通过对 2023 年 12 月 13—15 日山东一次极端暴雪天气过程进行分析,研究该过程积雪深度及其成因,以加深对强降雪天气积雪形成机制和影响因子的认识,提高积雪深度预报能力。

1 资料与方法

所用资料为 2023 年 12 月 13—15 日山东国家级地面气象观测站常规观测资料、加密地面观测资料、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;分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$)逐小时资料和 12 月 14 日积雪深度人工逐时加密观测资料。

常用来衡量积雪深度和降雪量关系的参数称为降雪含水比(snow-to-liquid ratio, SLR;以下简称“雪水比”),可定义为新增积雪深度与降雪融化后等量液体深度(降雪量)的比值^[11-13]。其计算公式为 $V_{\text{SLR}} = V_{\text{SD}} / V_{\text{SL}}$, 式中 V_{SD} 为积雪深度(单位:cm,下同), V_{SL} 为降雪量(单位:mm,下同)。通常一次降雪过程的最大积雪深度出现在降雪结束时段,降雪开始至结束的降雪量为过程累计降雪量,因此文中利用逐时加密观测获得的最大积雪深度和逐时降雪量得到的过程累计降雪量,计算整个过程的雪水比,称为过程雪水比。雪水比体现了降落雪花或地面积雪的干湿与蓬松程度^[14],在我国仅有 4%左右的雪水比满足 $10:1$ ^[15-16]。在此次降雪过程中,共有 51 个站的积雪深度观测样本。

2 降雪实况

2023 年 12 月 14 日 00:00—15 日 08:00(北京时间,下同),山东出现一次大范围极端暴雪天气,过程持续时间长,降雪强度大,积雪深度厚,鲁西北

和鲁南地区出现明显的“雷打雪”现象。此次过程全省平均降雪量为 8.5 mm, 123 个国家级地面气象观测站中有 33 站降雪量达到暴雪及以上级别, 过程最大降雪量为 26.6 mm, 出现在平原站(图 1a)。菏泽局部、鲁西北和鲁中等地出现积雪(图

1b), 有 5 站积雪深度达到或突破历史极值, 过程最大积雪深度为 23 cm, 出现在平原站和夏津站。此次暴雪过程还伴随强降温, 冠县站、阳信站等 27 站最低气温突破 12 月中旬历史极值, 属于一次极端天气事件。

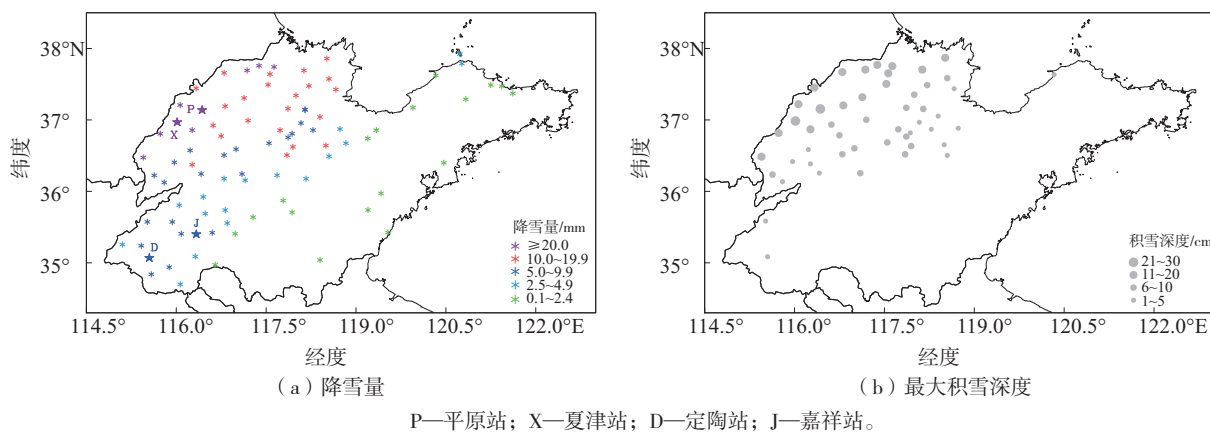


图 1 2023 年 12 月 14—15 日山东降雪过程气象要素分布

Fig.1 Distribution of meteorological elements in the snowfall process over Shandong from 14 to 15 December 2023

3 环流背景

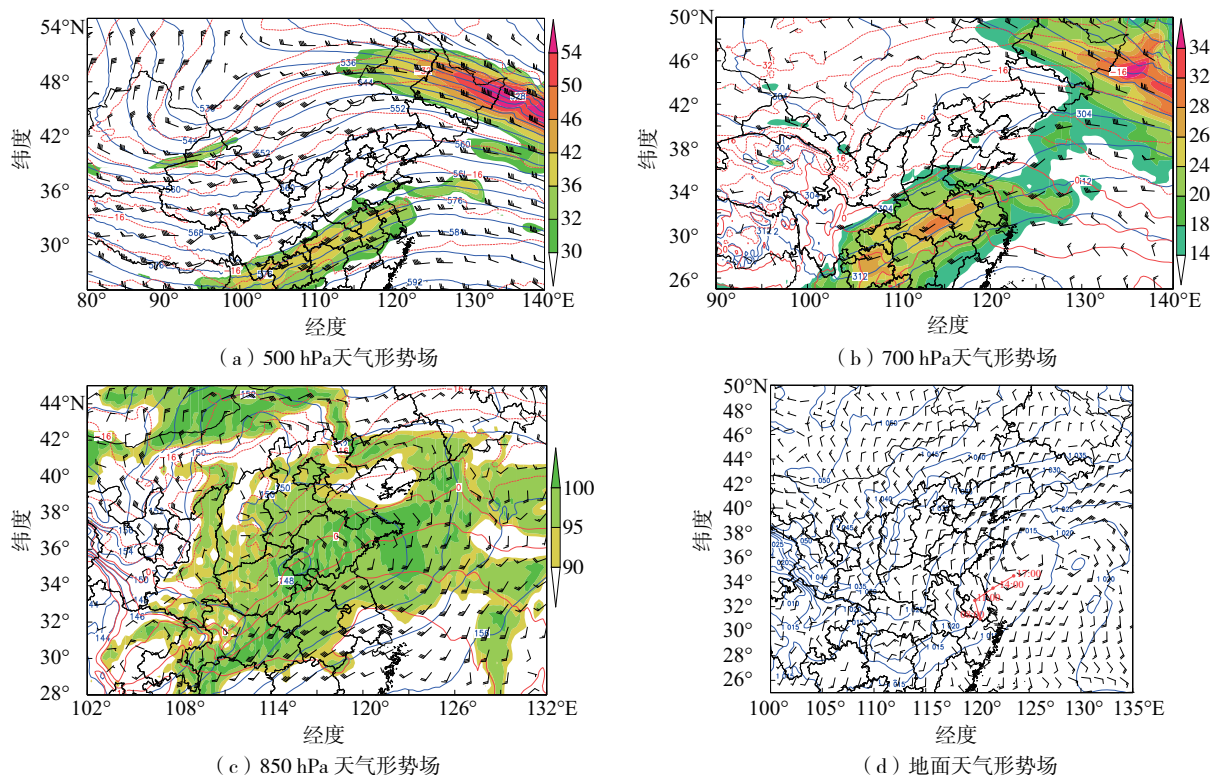
此次极端暴雪过程主要影响系统有: 500 hPa 高空槽、700 hPa 低槽和西南急流、850 hPa 切变线和江淮气旋。

12 月 13 日, 500 hPa 我国新疆和蒙古国接壤地区存在西南—东北向高空槽, 槽发展加深。14 日, 槽内出现闭合等高线, 槽前西南急流最大风速超过 $32 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 鲁西北地区存在辐合区(图 2a), 地面倒槽位于高空槽前, 槽前正涡度平流使地面减压, 利于地面江淮气旋生成。700 hPa 槽前西南急流强盛(图 2b), 急流中心最大风速超过 $28 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 西南急流北上影响山东, 形成水汽输送带; 山东位于急流出口左侧正涡度区, 在最大风速前方形成辐合, 利于水汽汇聚和抬升, 为降水云系发展提供有利的条件。850 hPa 切变线位于湖北、河南和山东一带, 12:00 发展为低涡环流, 低涡中心位于河南与山东交界, 为暴雪提供了有利的动力条件; 低层西南急流和东南暖湿气流带来充足水汽, 全省相对湿度达到 95% 及以上(图 2c)。地面偏北风形成冷垫, 中高层暖湿气流在冷垫上爬升形成降雪。由气旋移动路径(图 2d)可以看出, 地面气旋向东北方向移动, 强降水发生在地面气

旋的发展阶段。随着高空槽和地面气旋东移, 强冷空气南下, 15 日 08:00 山东受西北气流控制, 此次降雪过程结束。

4 积雪深度与降水相态

此次暴雪过程降水相态复杂, 出现雨、冻雨、雨夹雪和雪等多种降水相态。由 8 个代表站经历的降水相态演变(表 1)来看: 夏津、临邑等积雪较深的站, 仅经历了 1 次降水相态转换; 青州、定陶等积雪较浅的站, 经历了多次复杂降水相态转换; 平原和鄄城均经历了雪—雨夹雪—雪的降水相态转换, 雨夹雪持续时间不同, 积雪深度也差别较大。由代表站逐时降水量和降水相态变化(图 3)可看出, 夏津 14 日 07:00 开始降水, 共经历了雨转雪 1 次降水相态演变。该站总降雪量为 26.4 mm, 最大小时降雪量为 4.1 mm, 最大积雪深度为 23 cm。青州 14 日主要降水时段内共经历了 4 次降水相态演变, 总降雪量为 10.8 mm, 最大小时降雪量为 2.9 mm, 最大积雪深度仅为 3 cm。总体来看, 积雪较深的站经历的降水相态演变较为简单, 积雪较浅的站经历的降水相态演变较为复杂; 降雪持续时间也对积雪有一定影响, 在降水相态复杂多变和降雪量较小的地区没有出现较深积雪。



a、b、c中蓝色等值线—位势高度(单位: dagpm), 红色等值线—温度(单位: $^{\circ}\text{C}$); 风矢—风场(风速单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$);
a、b中色阶—急流(单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$); c中色阶—相对湿度(单位: %); d中红色线段—气旋移动路径,
红色字—时刻, 蓝色等值线—气压(单位: hPa)。

图2 2023年12月14日12:00高空天气形势场和17:00地面天气形势场
Fig.2 Upper-level synoptic situation at 12:00 BJT and surface synoptic situation
at 17:00 BJT 14 December 2023

表1 8个代表站的降水相态、降雪量、最大积雪深度和雪水比
Table 1 Precipitation phase, snowfall, the maximum snow depth, and SLR at 8 representative stations

站点	降水相态	降雪量 (纯雪) /mm	积雪深度 /cm	雪水比 (积雪效率) /($\text{cm}\cdot\text{mm}^{-1}$)
平原	雪—雨夹雪—雪	26.6	23	0.9
夏津	雨—雪	26.3	23	0.9
临邑	雨—雪	14.5	17	1.2
德州	雨—雪	14.2	13	0.9
青州	雨—雨夹雪—雪— 雨夹雪—雪	10.8	3	0.3
定陶	雪—冻雨—雨夹 雪—雪	8.9	2	0.2
鄄城	雪—雨夹雪—雪	5.4	1	0.2
嘉祥	雪—雨—雨夹雪— 雨—雨夹雪—雪	7.4	0	0

5 积雪深度与降雪量

5.1 积雪深度演变特征

对此次暴雪过程最大小时新增积雪深度进行分析,积雪样本中有82%的站最大小时新增积雪

深度大于或等于2 cm,37%的站大于或等于4 cm。积雪样本中,有73%的站在降雪开始4 h之内小时新增积雪深度达到最大,分别在降雪开始第2小时和第4小时;有92%的站在开始产生积雪3 h之内小时新增积雪深度达到最大,分别在积雪产生第1小时和第3小时。小时新增积雪深度排在前三位的分别为庆云(8 cm)、平原(7 cm)和冠县(6 cm),偏北和偏西地区小时最大积雪深度普遍大于偏南和偏东地区(图4a)。由平原新增积雪逐时变化(图4b)可看出,该站在降雪第5小时产生积雪,小时新增积雪深度随着降雪量变化呈先增大后减小的变化;14:00新增积雪达到最大,为7 cm;过程最大积雪深度为23 cm。

5.2 雪水比特征

根据全省过程雪水比分布情况(图5a)可以看出,过程雪水比总体呈“西大东小”的分布特征,偏西地区的雪水比大于偏东地区,最大位于陵城,约为 $1.5\text{ cm}\cdot\text{mm}^{-1}$,最小位于菏泽,约为 $0.2\text{ cm}\cdot\text{mm}^{-1}$ 。

过程雪水比约为 $0.7 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$, 较大的雪水比使鲁西北、鲁中等地出现明显积雪。14 日全省启动积雪深度加密观测, 从西往东分别选取 7 个代表站分析雪水比的逐时变化情况。由代表站雪水比逐时变化(图 5b) 来看, 各站雪水比随降雪时间增加先明显增大, 后缓慢增大, 部分站略有减小。刚产

生积雪时代表站平均雪水比为 $0.4 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$, 随着降雪增强, 积雪效率增大, 在降雪中后期代表站平均雪水比达到 $0.7 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$, 这说明从开始产生积雪到降雪过程结束, 雪水比变化整体呈增大趋势, 积雪发生前雪花的密度最大, 随着降雪时间增长, 雪花密度减小。

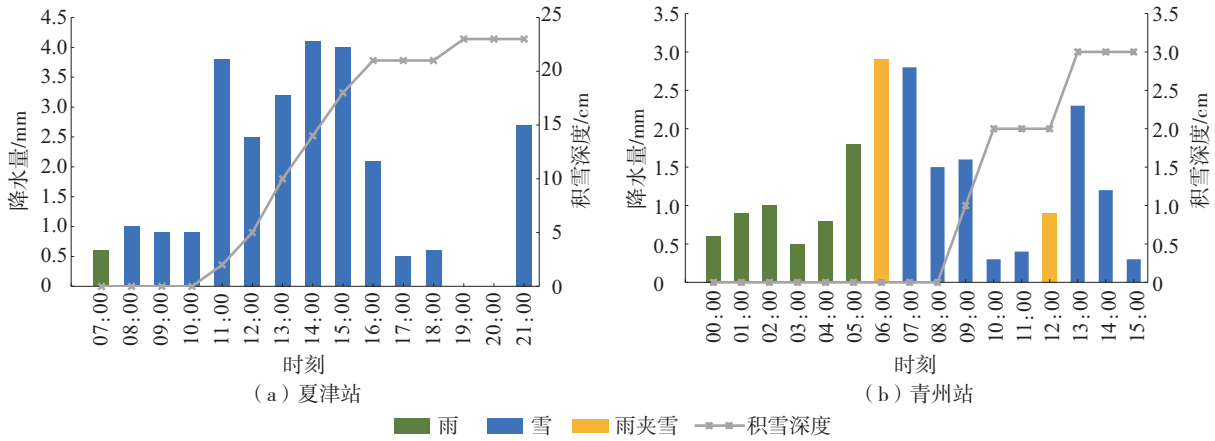


图 3 2023 年 12 月 14 日代表站降雪量、积雪深度和降水相态演变

Fig.3 Hourly variation of snowfall, snow depth, and precipitation phase at representative stations on 14 December 2023

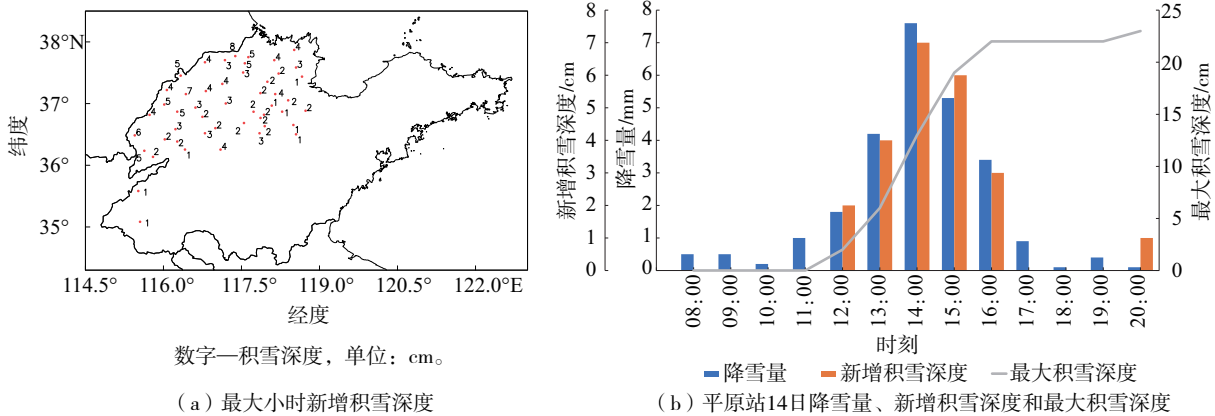


图 4 2023 年 12 月 13—15 日山东最大小时新增积雪深度和代表站气象要素逐时变化

Fig.4 The maximum newly increased hourly snow depth and hourly variation of meteorological elements at representative stations over Shandong from 13 to 15 December 2023

6 积雪深度与高空气象条件

高空环境对云内冰晶类型、增长情况以及雪花下落过程的变化起到决定作用, 尤其是环境大气温度、湿度、垂直运动条件和冰水饱和度^[17-21]。而冰晶结构和形态影响积雪的蓬松程度, 在降雪量相同的情况下, 大结构的雪花易形成蓬松、较深的积雪; 小结构的雪花易形成较密实、较浅的积雪。

平原和定陶积雪深度分别为 23 cm 和 2 cm, 由温度、湿度和垂直运动随时间分布(图 6) 来看, 13—14 日, 2 站 700 hPa 以下都存在相对湿度大于 90% 的高湿区, 降雪时段内高湿区伸展至 300 hPa 附近。平原 700 hPa 以下温度为 $-5 \sim -2 \text{ }^\circ\text{C}$, 定陶低空温度为 $-2 \sim 0 \text{ }^\circ\text{C}$ 。低空温度较低时, 能减少融化对雪花带来的变化, 维持雪花形态; 低空温度较高时, 雪花下落过程中易发生形变和融化。高饱和

湿度区配合的垂直运动中心强度影响冰晶增长
率。由垂直运动分布情况来看,降雪时段内平原
垂直运动与高空饱和高湿区配合较好,强上升运
动中心对应的温度场为 $-25 \sim -12 \text{ }^\circ\text{C}$,在与高湿区
高度配合的情况下,利于树枝状等大结构冰晶的

形成和增长,冰晶增长率高。定陶与饱和高湿区
匹配的上升运动中心强度较平原更弱,在与饱和
高湿区配合的主要上升运动中心所对应的温度场
为 $-15 \sim -2 \text{ }^\circ\text{C}$,符合小结构冰晶的增长条件,冰晶
增长率相对较低。

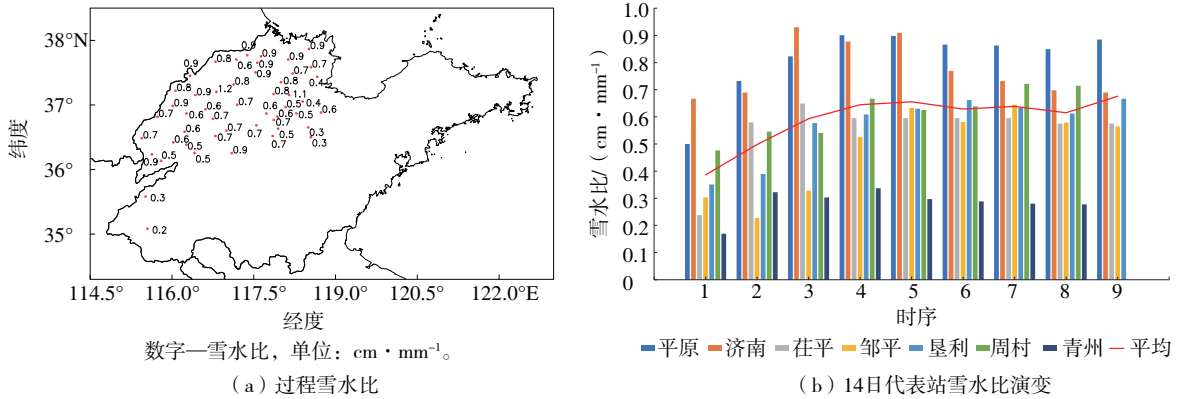


图5 2023年12月13—15日过程雪水比分布和雪水比逐时变化

Fig.5 Distribution of SLR in the snowfall process in Shandong and hourly variation of SLR from 13 to 15 December 2023

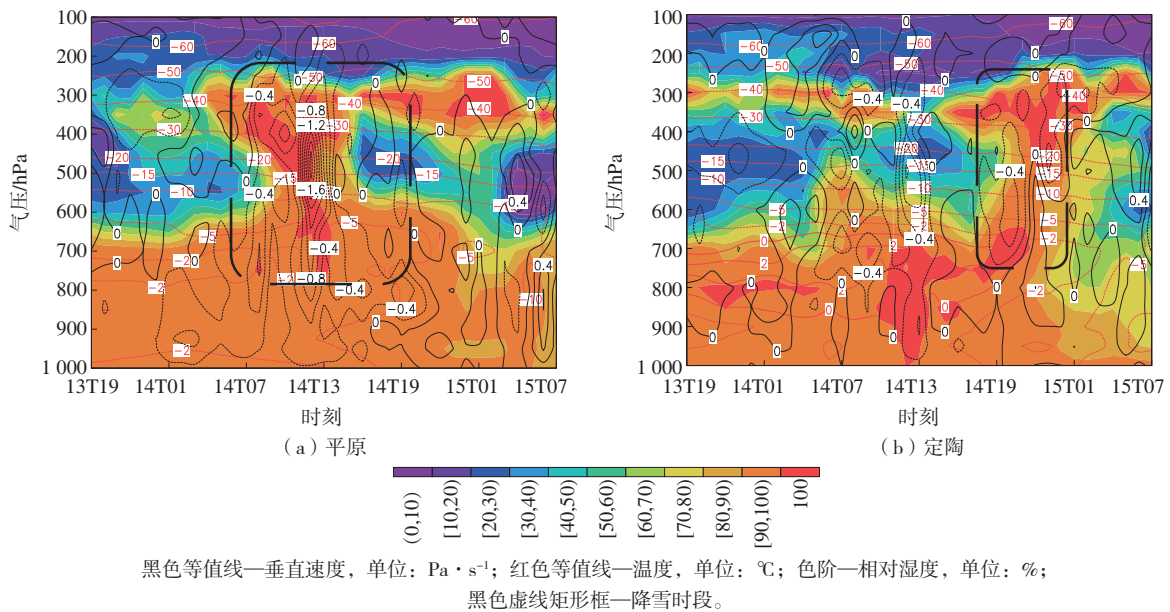


图6 垂直速度、相对湿度和温度垂直剖面

Fig.6 Vertical profile of vertical velocity, relative humidity, and temperature

7 积雪深度与近地面温度

近地面温度不仅能决定雪花降落至地面发生的
变化,还能影响地表积雪压实过程^[11,22],因此近地
面温度对积雪深度的影响至关重要。

7.1 积雪站的近地面温度

对有积雪的站逐时近地面温度进行分析(图

7a),在降雪刚开始时,各站平均气温为 $0.2 \text{ }^\circ\text{C}$,中位
数为 $0.3 \text{ }^\circ\text{C}$,75%分位为 $0.6 \text{ }^\circ\text{C}$;各站平均地温为
 $0.2 \text{ }^\circ\text{C}$,中位数为 $0 \text{ }^\circ\text{C}$,75%分位为 $0.2 \text{ }^\circ\text{C}$;各站平均雪
面温度为 $0 \text{ }^\circ\text{C}$,中位数为 $0 \text{ }^\circ\text{C}$,75%分位为 $0.2 \text{ }^\circ\text{C}$ 。气
温总体略高于 0 cm 地温和雪面温度,76%的站气温
高于 $0 \text{ }^\circ\text{C}$,94%的站气温低于 $0.9 \text{ }^\circ\text{C}$;地温普遍在 $0 \text{ }^\circ\text{C}$
以上,90%的站不超过 $1.0 \text{ }^\circ\text{C}$;雪面温度大部分在 $0 \text{ }^\circ\text{C}$

左右。随着降雪时间增加,气温、地温和雪面温度下降,气温下降最明显,雪面温度仅次于气温。产生积雪时,各站平均气温降至 $-0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$,中位数为 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$,75%分位为 $0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$;各站平均地温为 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$,中位数为 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$,75%分位为 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$;各站平均雪面温度为 $-0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$,中位数为 $-0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,75%分位为 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。96%的站气温低于 $0.4\text{ }^{\circ}\text{C}$;全站地温低于 $0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$,88%的站低于 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$;91%的站雪面温度低于 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。积雪产生之后,气温和雪面温度继续下降,地温不再出现明显变化。从开始降雪到地面产生积雪,近地面温度变化特征总体为:从降雪前期到产生积雪,气温和雪面温度均呈下降趋势;0 cm

地温在降雪前期降温明显,在积雪产生之后较为平稳,不再继续降低,说明积雪对地面有一定保温作用。

由各代表站积雪前后近地面温度变化(图7b—d)来看,各站在降雪前期近地面温度均开始下降,当气温平均下降至 $-0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$,开始产生积雪;地温和雪面温度平均下降至 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的后一个时次才开始产生积雪。德州的气温下降最明显,从降雪开始至积雪形成之后,气温最大降幅达 $4.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。虽然定陶基础气温最低,但从该站高空环境场及云下温度来看,该站有利于形成较小结构的雪花,并且雪花下降过程中会有一定融化作用。

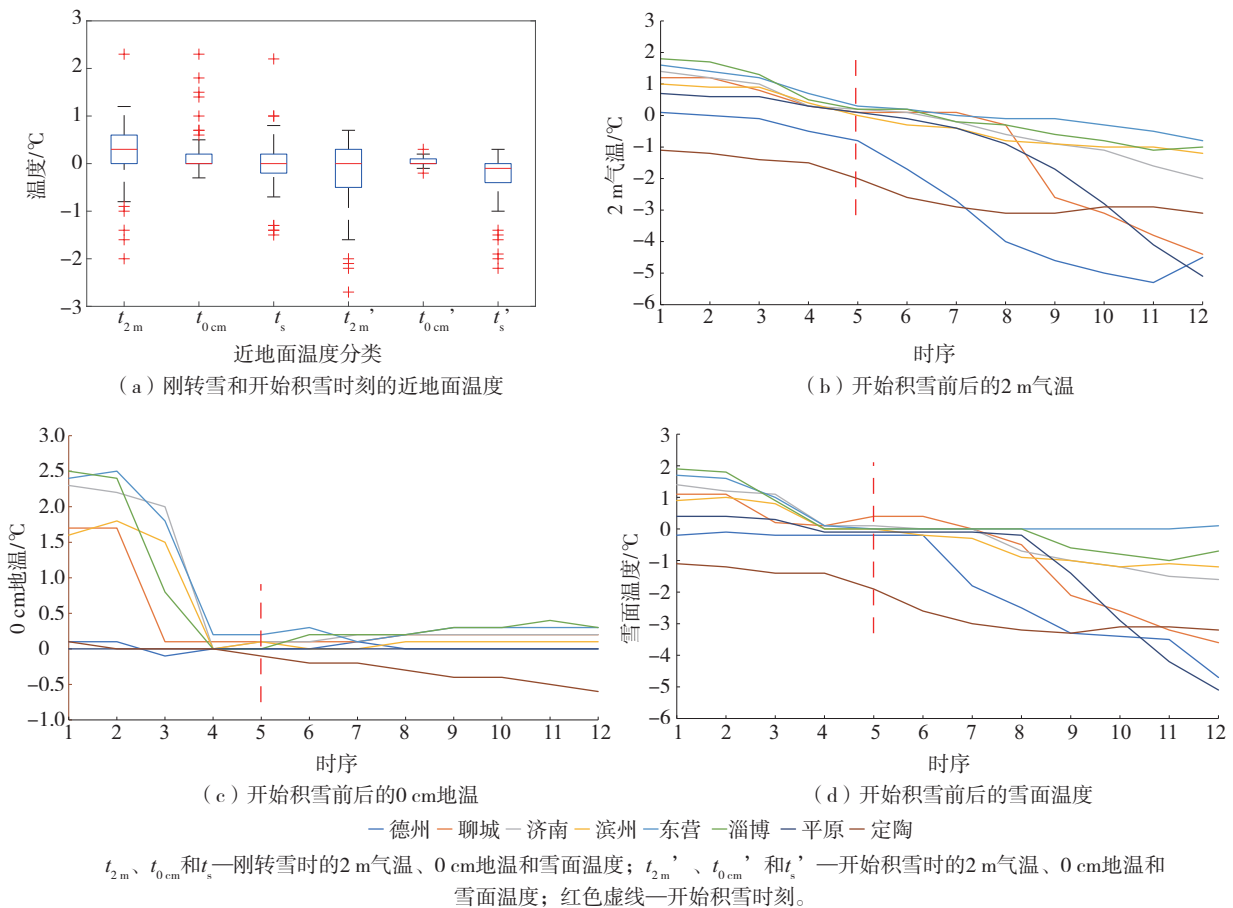


图7 有积雪站近地面温度和代表站积雪前后近地面温度
Fig.7 Near-surface temperature at stations with snow cover and near-surface temperature at representative stations before and after snow cover

7.2 无积雪站的近地面温度

此次降雪过程中有部分站出现明显降雪量,但没有明显积雪,在这些站中降雪量排前七的站分别为嘉祥、菏泽、巨野、成武、曹县、郓城和济宁。这7站降雪量均达到暴雪量级(大于或等于 5.0 mm),平均降雪量为 6.3 mm ,最大降雪量为 7.4 mm ,出现

在嘉祥。

对无积雪站逐时近地面温度进行分析(图8a),在开始降雪时,各站平均气温为 $0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$,气温中位数为 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,75%分位为 $0.7\text{ }^{\circ}\text{C}$;平均地温为 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,地温中位数为 $0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$,75%分位为 $0.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。在整个降雪时段,气温出现了明显的下降,各站平均气温下降至

-0.6 °C, 中位数下降至-0.5 °C, 75%分位下降至0.5 °C。地温下降不明显, 各站平均地温为0.3 °C, 中位数为0 °C, 75%分位为0.6 °C。相比于有积雪的站, 无积雪站降雪阶段的气温和地温均明显偏高。在降雪时段内, 无积雪站近地面温度可分为4种情况。第一种情况是降雪量足够大, 气温和地温始终偏高。如临沂降雪量达到3.8 mm, 因近地面温度下降不明显, 没有产生明显积雪。第二种情况是气温和地温均降至0 °C以下, 降雪量偏小。如梁山气温和地温分别降至-1.9 °C和-0.2 °C, 该时次降雪量仅为0.6 mm。第三种情况是气温降至0 °C以下, 地温始终高于0 °C, 出现这种情况的站最多。如东明站降雪量达到3.2 mm, 气温最低降至-2.3 °C, 但地温始终在0 °C以上。第四种情况是降雪开始之后气温和地温低于0 °C之后仍出现累计大于2.5 mm的降雪量, 但没有出现明显积雪, 如菏泽、巨野和曹县。考虑这种情况与影响雪花形成和变化的高空微物理

特征和云下温度条件有关, 参考本文第5节定陶站的分析, 这也说明影响积雪形成的因素是非常复杂的。

由代表站降雪前后气温和地温变化(图8b、c)来看, 整个降雪过程, 除了曹县气温和地温明显高于各站之外, 其余站转雪后气温和地温都呈下降趋势。成武站气温下降最明显, 最低气温达到-2.7 °C, 但地温始终偏高, 平均约为0.2 °C; 巨野站地温下降最明显, 气温也较低, 但从该站高空微物理特征(图略)方面分析, 该站高空环境场利于小结构冰晶的形成和增长, 这样的冰晶所形成的雪花密度较大, 降至地面不易形成积雪。

7.3 雪水比与近地面温度

在降雪量相同的情况下, 较大的雪水比能产生较深的积雪, 较小的雪水比能产生较浅的积雪。近地面温度对雪水比有重要影响, 是雪水比主要影响因素之一^[23-24]。

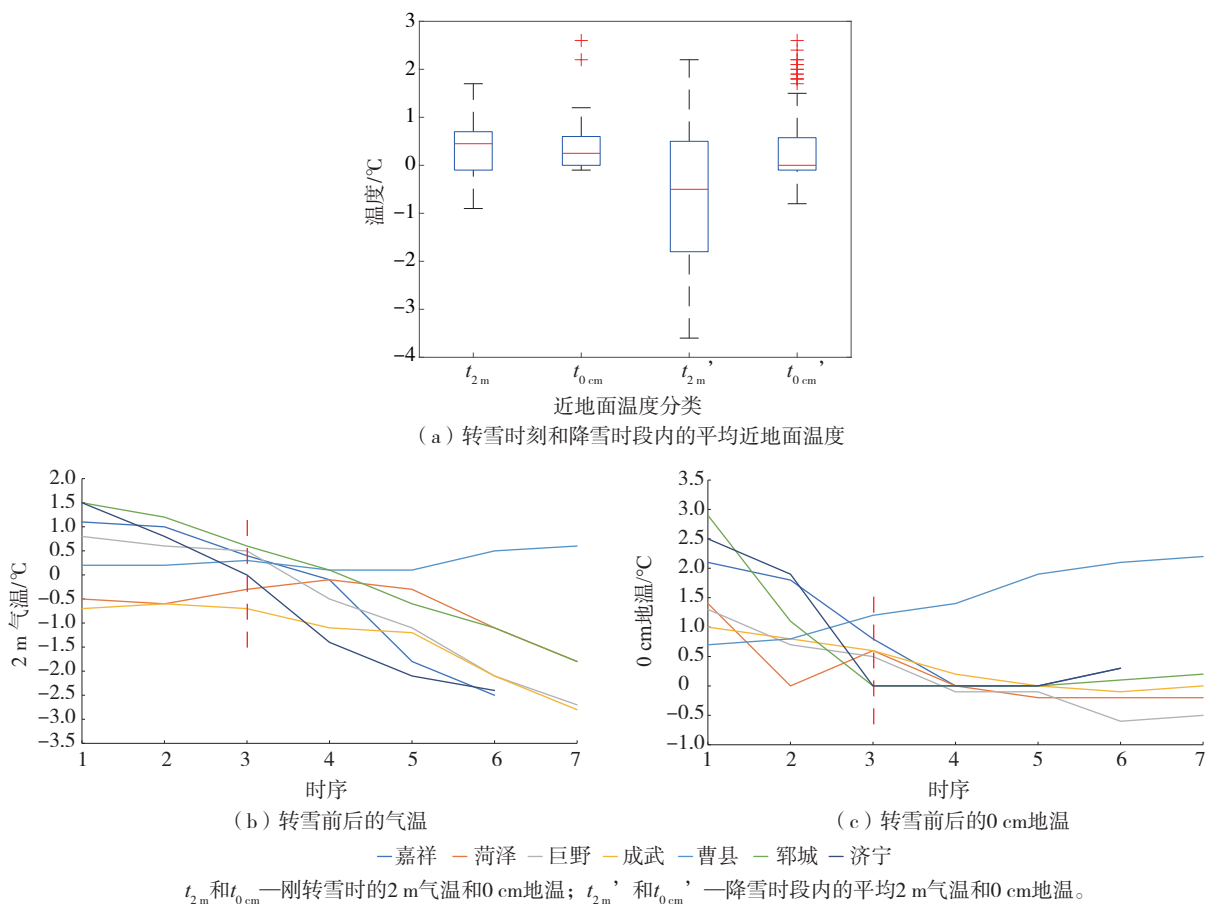


图8 无积雪站近地面温度和代表站转雪前后近地面温度

Fig.8 Near-surface temperature at stations without snow cover and near-surface temperature at representative stations before and after snowfall

对有积雪站的雪水比与逐时气温关系进行分析(图9a),当雪水比为0时,气温中位数为0.3℃,75%分位数为0.6℃,达到或高于这个气温条件时,则不易产生积雪。当雪水比为0.01~0.25 cm·mm⁻¹时,气温中位数为0℃,75%分位数为0.1℃,即降雪量至少为4.0 mm时,才能产生1 cm左右的积雪。当雪水比为0.25~1.00 cm·mm⁻¹时,气温中位数为-0.3~0.3℃,75%分位数为-1.2~0℃,即降雪量为1.0 mm时,产生的积雪小于1 cm。当雪水比大于1.00 cm·mm⁻¹时,气温中位数为-1.8℃,75%分位数为-1.1℃时,即降雪量达到1.0 mm时,能够产

生至少1 cm的积雪。将有积雪站的雪水比与地温关系进行分析(图9b),当雪水比为0时,地温中位数为0℃,75%分位数为0.1℃;随着雪水比增大,最大值明显降低,中位数和75%分位数变化不大,分别为0~0.1℃和0.1~0.2℃,最小值略有升高。分析有积雪站的雪水比与雪面温度关系(图9c),当雪水比为0时,雪面温度中位数为0℃,75%分位数为0.2℃;随着雪水比增大,雪面温度各分位数、最大值和最小值先呈下降趋势,当雪水比大于0.76 cm·mm⁻¹之后,中位数降至-1.2℃,75%分位数为-0.7~-0.5℃,雪面温度不再有明显变化。

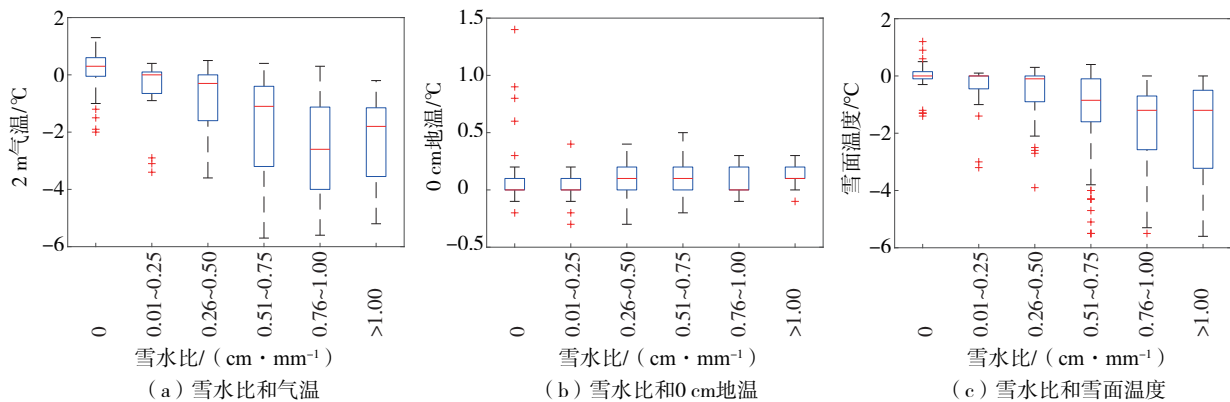


图9 雪水比与近地面温度

Fig.9 SLR and near-surface temperature

8 结论

利用常规观测、积雪深度逐时加密观测资料和ERA5资料,对2023年12月13—15日山东一次极端暴雪天气过程积雪特征及其成因进行分析,主要结论如下:

(1)此次过程具有持续时间长、降水相态复杂、基础温度低、降温幅度大和积雪深度厚等特征,部分地区降水量、积雪深度和最低气温突破了常年同期历史极值,属于一次12月极端雨雪天气事件。

(2)此次过程最大小时新增积雪深度可达8 cm。全省过程平均雪水比为0.7 cm·mm⁻¹,呈“西大东小”的分布特征;雪水比整体呈增大的变化趋势。

(3)有积雪站气温和雪面温度均呈下降趋势,0 cm地温在降雪前期降温明显,在积雪产生之后地温较为平稳。无积雪站近地面温度总体可分为4种情况:降雪量大,气温和地温始终偏高;当气温和地

温均降至0℃以下,降雪量偏小;气温降至0℃以下,但地温始终高于0℃;气温和地温低于0℃,但高空微物理特征和云下温度条件不足以产生明显积雪。

(4)气温随雪水比变化最明显,雪水比越大,对应的气温越低;地温在积雪前期离群值较多,总体呈下降趋势,积雪形成之后地温不再有明显变化,对雪水比影响不大;雪面温度在雪水比小于0.75 cm·mm⁻¹时,随雪水比增大而降低,在雪水比大于0.76 cm·mm⁻¹后,雪面温度不再出现明显变化。

参考文献:

- [1] 时兴合,王振宇,戴升,等.青海南部冬春季雪灾的气候诊断与预测[J].冰川冻土,2012,34(6):1441-1448.
- [2] 李红梅,李林,高歌,等.青海高原雪灾风险区划及对策建议[J].冰川冻土,2013,35(3):656-661.
- [3] 肖鹏峰.2022年美国雪灾应对工作分析及建议[J].中国减灾,2023(3):36-39.
- [4] 杨成芳,刘畅.一次江淮气旋暴雪的积雪特征及气象影

- 响因子分析[J].气象,2019,45(2):191-202.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 魏凌霄,童金,邱学兴.安徽省积雪效率和积雪密度特征分析[J].气象与环境科学,2021,44(3):24-30.
- [8] 王淇玉,徐维新,扎西央宗,等.FY-4卫星资料在青藏高原地区积雪判识和雪深反演中的应用[J].气象科技,2023,51(5):613-628.
- [9] 余王康,杨勤丽,王国庆,等.青藏高原雪深变化特征及其与气象要素的偏相关分析[J].水利水运工程学报,2023(6):35-45.
- [10] 杨倩,秦莉,高培,等.基于RBF网络的新疆特重雪灾区最大积雪深度预测研究[J].沙漠与绿洲气象,2024,18(1):89-95.
- [11] 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.
- [12] BAXTER M B, GRAVES C E, MOORE J T. A climatology of snow-to-liquid ratio for the contiguous United States [J]. Wea Forecasting, 2005, 20(10):729-744.
- [13] 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(2):323-337.
- [14] 崔锦,周晓珊,阎琦,等.沈阳降雪含水比变化特征及其大气影响因子[J].冰川冻土,2015,37(6):1508-1514.
- [15] 符娇兰,陈博宇,陈双,等.新增积雪深度客观预报技术研究及其应用[J].气象,2022,48(10):1230-1241.
- [16] 张亚妮,符娇兰,胡宁,等.华北中部平原地区一次降雪过程雪水比变化特征及成因分析[J].气象,2022,48(2):216-228.
- [17] 陈双,符娇兰.华北地区雪密度不同的两次降雪过程对比分析[J].气象,2021,47(1):36-48.
- [18] 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.
- [19] DUBÈ I. From mm to cm: study of snow/liquid water ratios in Quebec [EB/OL]. Quebec region: Meteorological Services of Canada, 2003. https://www.meted.ucar.edu/norlat/snowdensity/from_mm_to_cm.pdf.
- [20] LIBBRECHT K G. Ken Libbrecht's field guide to snowflakes [M]. Minnesota: Voyageur Press, 2006.
- [21] 崔锦,周晓珊,阎琦,等.降雪含水比研究进展[J].气象,2017,43(6):735-744.
- [22] PRUPPACHER H R, KLETT J D. Microphysics of clouds and precipitation [M]. Dordrecht: Springer, 1996: 954.
- [23] 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.
- [24] 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.