

杨成芳,刘畅,2019. 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,45(2):191-202. Yang C F, Liu C, 2019. Study on snow cover and its meteorological influence factors of Jianghuai cyclone snowstorm[J]. Meteor Mon,45(2):191-202 (in Chinese).

# 一次江淮气旋暴雪的积雪特征及气象影响因子分析\*

杨成芳 刘 畅

山东省气象台,济南 250031

**提 要:** 利用自动站、人工加密观测及常规观测资料,通过对 2017 年 2 月 21—22 日一次江淮气旋暴雪过程积雪特征的分析,揭示了近地面气象要素对积雪深度的复杂影响。结果表明:(1)江淮气旋系统特有的空间结构导致山东南、北地区的降雪量和积雪深度不均衡分布。(2)积雪深度具有时效性,在降雪结束时达到峰值,因温度的变化导致峰值不一定维持到次日 08 时。(3)积雪深度是近地面多气象要素共同作用的结果,降水相态、降雪量、降雪强度、气温、地温和风速均有影响。主要表现为:雨夹雪在转为纯雪之前可产生不超过 1 cm 的积雪,如果不转雪则不会产生有量积雪;各地降雪含水比差异较大,全省平均为  $0.5 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$ ,低于全国平均值;在降雪不融化的情况下,降雪量、降雪强度越大则积雪越深,降雪强度大是气温和地温都高于  $0^\circ\text{C}$  时产生积雪的必要条件;地温和气温越低对积雪形成越有利,积雪开始产生时的地温最高阈值多在  $0^\circ\text{C}$  左右,地温先突降后缓升是积雪产生前后的共性特征,积雪产生后 1~2 h 内地温略有上升并逐渐趋于稳定;积雪产生时气温一般低于  $0^\circ\text{C}$ ,气温高于  $0^\circ\text{C}$  时大部分降雪融化;有利于产生积雪的平均风力多不超过 2 级,极大风则在 3~4 级以下。

**关键词:** 江淮气旋,暴雪,积雪,影响因子

中图分类号: P426

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2019.02.005

## Study on Snow Cover and Its Meteorological Influence Factors of Jianghuai Cyclone Snowstorm

YANG Chengfang LIU Chang

Shandong Meteorological Observatory, Jinan 250031

**Abstract:** Based on automatic weather station, dense and routine observation data, this study analyzes the characteristics of snow cover and its meteorological impact factors on a case of Jianghuai cyclone snowstorm that occurred from 21 to 22 February 2017. The results show that the typical spatial structure of Jianghuai cyclone led to the different snowfall amounts and depths in Shandong. The snow cover peaked when the snow ended and its persistence depended on temperature, so snow depth was of timeliness. Commonly, snow depth is affected by multiple meteorological factors of surface, including precipitation type, snowfall amount, snowfall intensity, temperature, soil temperature and wind speed. Sleet can produce snow cover below 1 cm if it turns to pure snow. Average snow-to-liquid ratio in Shandong is  $0.5 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$ , lower than the value for the whole country. Large snowfall, strong snowfall intensity, low air and soil temperatures are beneficial to snow depth. Enough snow intensity is necessary for obvious snow cover when air and soil temperatures are both higher than  $0^\circ\text{C}$ . It's common that soil temperature drops quickly before visible snow cover and rises stably within 1 to 2 hours. Air temperature is usually below  $0^\circ\text{C}$  when snow cover forms. Weak wind speed under Grade 2 is good for snow cover to form.

**Key words:** Jianghuai cyclone, snowstorm, snow cover, influence factor

\* 国家自然科学基金项目(41475038)和中国气象局预报员专项(CMAYBY2018-042)共同资助

2018 年 4 月 15 日收稿; 2018 年 8 月 4 日收修定稿

第一作者:杨成芳,主要从事天气预报业务及降雪研究. Email:cf\_yang70@hotmail.com

## 引 言

积雪是降雪积聚在地表面所形成的一层固体覆盖物,从积雪表面到地面的垂直深度即为积雪深度,它可以是一次或多次降雪过程降雪深度的累积量(《大气科学辞典》编委会,1994)。积雪是我国重要的水资源之一,对全球气候变化都有影响,同时强积雪也可造成严重危害,使得城市道路、高速公路、乡间公路湿滑,导致交通运输中断受阻,还会压塌蔬菜大棚和树木,带来农业经济损失。因此,积雪在生态、天气、气候领域都占据着不可替代的位置。

在气候领域,针对青藏高原、东北和新疆等稳定性积雪地区,在积雪特性、时空分布特征及其对气候影响等方面开展了广泛研究,取得了较为系统的认识(张人禾等,2016;王建等,2018;除多等,2018)。通过利用卫星遥感、雪特性分析仪和积雪人工观测等资料,对不同下垫面雪层温度、雪水当量、积雪深度、积雪密度等积雪特性进行观测与分析,认识了积雪的物理学和热力学性质,以此掌握积雪的消融变化特征(沙依然和王茂新,2004;陆恒等,2011)。中国各区域积雪分布有明显空间差异,年平均雪深和雪水当量均表现为波动增加趋势(马丽娟和秦大河,2012;胡列群等,2013)。积雪通过反照率改变土壤湿度、表面温度和辐射分布,引起大气环流异常,进而对中国及全球气候产生影响,如青藏高原冬、春积雪不仅影响了后期高原的热状况,而且影响了后期东亚大气环流的季节变化和南亚与东亚的夏季风环流(陈丽娟等,1996;吴统文和钱正安,2000);欧亚冬季积雪的异常分布可能改变大气 EUP 遥相关型和东亚冬季风活动,进而对中国春、夏季降水等产生影响(陈海山和孙照渤,2003;左志燕和张人禾,2012)。

在天气领域,关注的是短期时段内积雪深度的变化,主要包括一次降雪天气过程能否产生积雪,及积雪深度的大小。我国现行的天气预报业务中,积雪深度并非规定的预报要素,其预报质量也不参与考核。由于不同的积雪深度对城市运行和农业产生的影响有明显差异,相应地,管理部门和公众的防御措施也有不同,人们同时还需要了解积雪深度预报,气象部门单纯的降雪量预报已不能满足需求。因而,近年来一些气象台站开始尝试发布积雪深度预报(翟亮等,2018)。需求倒逼对天气预报业务和研究都提出了新的挑战,深入开展降雪和积雪的关系、

积雪的影响因子等基础研究,并研发积雪客观预报技术将成为未来的发展方向。

如何将常规业务中的降雪量预报与积雪深度预报联系起来?通常采用降雪含水比(也有的称为降雪比)为量度,其定义为新增降雪深度与融化后等量液体深度之比,该参数等价于液态水密度与平均雪密度之比(Alcott and Steenburgh, 2010; Milbrandt et al, 2012)。从 19 世纪至今,北美国家通过观测资料、数值模拟等对降雪含水比的变化特征、影响因子及预报技术开展了广泛而深入的研究,为积雪深度预报和雪崩预报提供了科学依据。研究表明,积雪深度与降雪量的关系非常复杂,空间分布、季节差异很大(Roebber et al, 2003; Ware et al, 2006);积雪深度的影响因子众多,既有气象因素又有太阳短波辐射和下垫面因素。与气候领域及国外在天气领域的丰硕成果相比,我国在积雪天气方面的研究较少(崔锦等,2017)。近年来,新探测仪器开始初步在积雪的监测和预报中发挥作用,如:利用激光雨滴谱仪分析鄂西北强降雪的滴谱演变特征并预估积雪深度(李德俊等,2014);浙江布设的自动雪深观测仪(每分钟输出 1 个积雪深度值,观测精度达到 mm)可全面连续地反映积雪的变化过程(吴书成等,2017)。对于积雪深度和降雪量的关系,日常预报业务中,中国的预报员通常使用 Potter(1965)提出的 10 : 1 的比值标准。然而,近年来有研究认为中国冬季积雪深度变化值和相应降雪量的比值大体为  $0.75 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$ ,该比值随气温上升呈明显减小趋势,且有明显的地区差异(杨琨和薛建军,2013);而沈阳地区降雪含水比的平均值为 11.4(崔锦等,2015)。在积雪深度预报技术方面,有的采用径向基神经网络算法为基础建立雪深模型并预报东北地区季节性雪深(付强等,2017),也有采用天气学方法预报积雪深度(谢静芳等,2001;马吉晖和李玉香,2012)。总体来说,我国对积雪形成机理、影响因子和预报技术等的认识和研发还处于起步阶段,难以作为预报业务提供有效科技支撑。

预报业务实践中发现,不同的天气系统或地域,即使有同样的降雪量,产生的积雪深度却可能有很大差异,有的积雪深厚,有的积雪却不明显。作为黄淮和东北地区高影响天气系统之一,江淮气旋暴雪过程降水相态复杂,降雪强度、降雪量等时空分布差异大(杨成芳等,2013;2017;刘畅等,2016;孙莎莎等,2015;孙欣等,2011)。2017 年 2 月 21—22 日,

山东出现了一次江淮气旋暴雪过程。期间,全省开展了加密观测,获得了精细的降水相态和积雪观测资料,同时,还具有称重式降水自动站的降水量、气温、地温、风向风速和湿度等观测资料。本文将主要利用这些近地面气象加密观测资料,剖析此次暴雪过程的积雪特征及其影响因子,以期今后的积雪深度预报提供参考依据。

## 1 资料与方法

本文采用的资料有:2017年2月21—22日山东120个资料齐全的大气监测站人工加密观测、地面自动站及常规高空、地面观测资料。其中,自动站的资料包括分钟降水量、逐时气温、0 cm地温、风向和风速,降水资料由称重式固态降水自动气象站观测。人工加密观测有21日14、15、16、17、18、19、20、23时及22日02、05和08时共11个观测时次,观测要素包括降水相态和积雪深度。120个代表站中,全程只有降雪的站点有71个,有雨雪转换的49个。

本文主要使用了统计分析的方法。数据处理时,首先根据降水相态加密观测资料统计各站的降雨、雨夹雪和纯降雪时间段,然后利用称重式自动站的分钟降水量分别计算出各站降雨量、雨夹雪和纯雪量。将雨夹雪和纯雪量之和称为总降雪量。根据降雪含水比的定义,即新增积雪深度与融化后等量液体深度的比值,计算各站相应时段的降雪含水比。

## 2 降雪特点

此次暴雪过程发生在2017年12月21日08时

至22日11时,其中除了山东半岛主要降雪出现在22日00—08时以外,其他地区降雪多集中于21日14—23时。以鲁东南地区为强降水中心,过程降水量普遍在10 mm以上,微山最大为17.7 mm,威海以10.1 mm成为次降水中心(图1)。雨夹雪最大小时降水量为4.9 mm(21日18—19时出现在山东最南端的郯城站);纯雪最大小时降水量为4.3 mm(21日17—18时出现在微山)。由于22日08时以后只有山东半岛的几个测站有微量降雪,故本文的分析中把21日08时至22日08时作为一个完整的降雪过程。

从降水相态来看,鲁西北、鲁中和半岛的大部分地区为直接降雪;鲁南地区存在相态转换,以雨夹雪转雪为主。鲁东南的临沭和郯城经历了短暂的降雨后转为雨夹雪,雨夹雪的降水量分别达到了15.5和13.9 mm;沿海站日照则以降雨为主,转雪后的降水量只有1.1 mm。10 mm以上的降雪量主要分布在菏泽、枣庄、临沂、青岛和威海一带。相态转换主要发生在21日傍晚前后。

## 3 环流背景

此次降雪过程的影响系统,地面为江淮气旋,850 hPa为低涡,700~500 hPa为低槽。气旋于21日23时在安徽东南部形成,22日02时经江苏东部沿海进入黄海,并继续向东北方向移动(图2a)。强降雪位于气旋头部的东北风一侧。

20日08时开始,位于河套西部的500 hPa高原槽在东移过程中与南支槽合并发展。21日20时,700 hPa低槽位于112°E附近,槽前为强盛的西南低空急流,24~26 m·s<sup>-1</sup>的急流轴到达辽东半

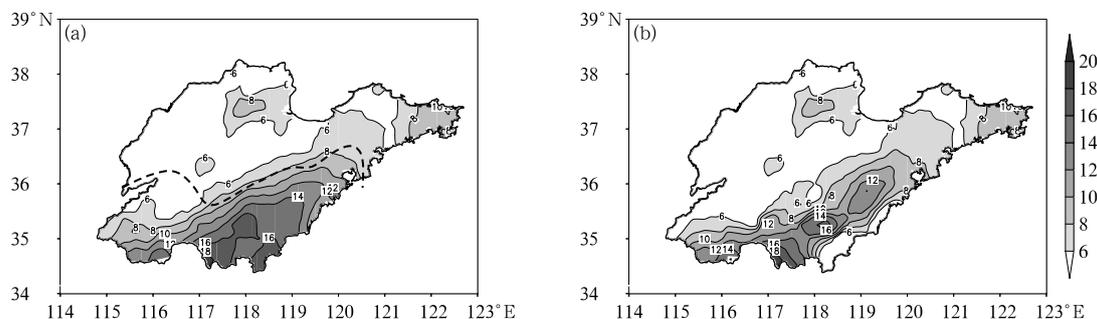


图1 2017年2月21日08时至22日08时降水量(a)和降雪量(b)分布(阴影,单位:mm)

(图1a中虚线为雨雪转换分界线,北侧为纯雪,南侧为雨转雨夹雪或雨夹雪转雪)

Fig. 1 Precipitation (a) and snowfall (b) from 08:00 BT 21 to 08:00 BT 22 February 2017 (shaded area, unit: mm)

(In Fig. 1a snow is to the north of the dotted line and rain to sleet or sleet to snow is to the south of the line)

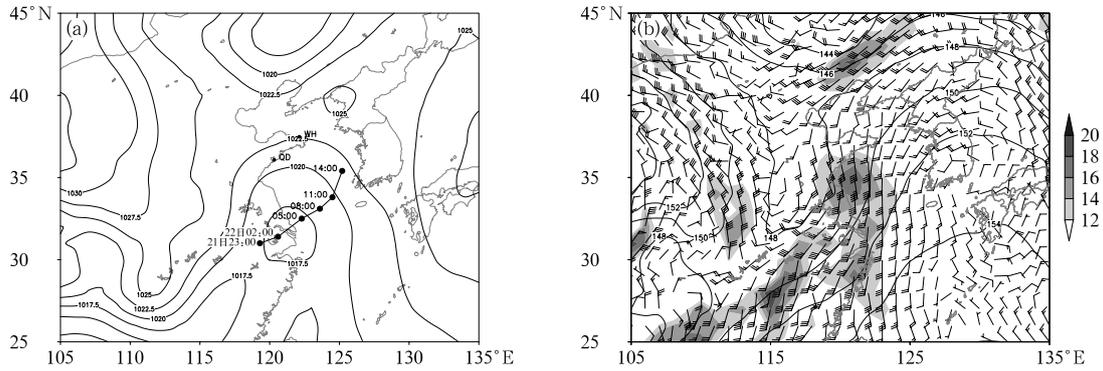


图 2 2017 年 2 月 22 日 02 时地面图及江淮气旋路径动态图(a)和 21 日 20 时 850 hPa 天气图(b)

(图 2a 中圆点连线为气旋路径;实线为气压场,单位:hPa;图 2b 中等值线为高度场,单位:dagpm;阴影为急流区,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )

Fig. 2 Surface and Jianghuai Cycle path at 02:00 BT 22 (a) and synoptic chart at 850 hPa at 20:00 BT 21 (b) February 2017

(Dotted line in Fig. 2a denotes the cyclone path; solide line: sea level pressure, unit: hPa; in Fig. 2b, isoline: height, unit: dagpm; shaded: jet stream, unit:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )

岛,有利于将充足的水汽输送到淮河以北地区,使得山东的比湿达到了  $4 \sim 5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。在 850 hPa 等压面上,20 日至 21 日 08 时在长江附近维持暖切变线,至 21 日 20 时暖切变线减弱,并在其东侧形成了一个低涡,低涡中心位于河南东部,山东为东南风控制,青岛站东南低空急流风速达  $16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,而济南和徐州只有  $8 \sim 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,因此在鲁东南一带形成了明显的风速辐合(图 2b)。在 925 hPa 等压面上,在上海至青岛等东部沿海地区有一支强劲的超低空急流,东南风风速最大达  $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,输送来自东海的水汽,且该东南低空急流与山东内陆的东北风在鲁东南一带形成了风向风速的辐合。在低槽和低涡的共同作用下,近地面减压,倒槽发展,并于 21 日 23 时在江苏南部地区形成了地面气旋。可见,对流层低层的两支急流输送水汽,且在山东东南部形成明显辐合上升运动,有利于在该地区产生强降水。

由于在 20 日已有一股冷空气影响山东,造成了此次降雪过程前期温度较低。21 日 08 时,山东 3 个探空站及徐州探空站的 1000 hPa 均为  $-3^\circ\text{C}$ 。至 21 日 20 时,济南、荣成和徐州的 1000 hPa 温度仍在  $-3 \sim -1^\circ\text{C}$ ;地面图上(图略),降水区域的气温均在  $2^\circ\text{C}$  以下。鲁西北、鲁中和半岛的大部分地区 1000 hPa 和气温均达到了降雪的温度阈值,故这些地区在整个降雪过程为纯降雪。而在鲁东南地区,因强东南低空急流的暖平流导致 21 日 20 时青岛探

空站 1000 hPa 的温度升至  $1^\circ\text{C}$ ,郯城至日照等地的气温达  $2 \sim 3^\circ\text{C}$ ,因此该地区强降水时段以雨夹雪为主,23 时以后转雪。

## 4 积雪深度的变化特征

### 4.1 积雪深度的空间分布

从过程最大积雪深度分布来看(图 3a),全省 120 个测站中只有鲁东南地区的 4 个站没有积雪。5 cm 以上的积雪分布在鲁西北、鲁中山区和半岛的部分地区,其中,威海和荣成最大为 9 cm,其他地区的积雪深度在  $2 \sim 4 \text{ cm}$ 。与降雪量的空间分布对比分析发现,此次降雪过程降雪量最大的鲁东南地区,积雪普遍较小,不足 3 cm;而威海和荣成的降雪量小于鲁东南地区,但积雪深度却最大。可见,降雪量与积雪深度不一定成正比。

### 4.2 积雪深度的时间变化

因降雪时间的不同,此次降雪过程各地产生积雪的时间也有差异:中西部地区降雪较早,最早产生积雪的时次是 21 日 17 时,20 时之前产生积雪的测站占全省的 70%;潍坊以东地区在 20 日夜间降雪并产生积雪。

选取了武城、菏泽、淄川、台儿庄和威海 5 个代

表站,分别位于山东西北部、西南部、中部、东南部和半岛北部地区。图3b给出了21日15时至22日08时5个站各时次的积雪深度。武城站自21日17时首先开始出现有量积雪,此后积雪深度逐渐增大,于23时降雪结束时达到峰值5 cm,并以该峰值维持到22日08时。威海的积雪深度为持续增长,至22日08时达到最大。武城和威海均为22日08时保持过程最大积雪深度值。菏泽、台儿庄和淄川的积雪深度峰值分别出现在21日18、19时和22日02时,此后积雪深度有不同程度的减小,尤其是台儿庄站,21日23时以后积雪完全融化,积雪深度为0 cm。

进一步分析全省所有站点的积雪深度变化情况。发现119个有量积雪站中,从21日18时至22日08时每个时次均有峰值出现,其中,峰值在21日20时至22日05时出现但此后积雪深度减小的共有37站,占总站数的31%;出现峰值后维持至22日08时的有82站,占总站数的69%。由此可见,此次降雪过程中绝大多数站点在夜间降雪结束后,最大积雪深度会维持至次日08时,但部分站点积雪深度随着时间的推移而变化,在降雪结束时积雪深度达到峰值后,即使在夜间,也可出现积雪融化、积雪深度减小的情况,积雪深度不一定在次日08时达到最大值。降雪过程中积雪深度的变化情况,各地有所不同。

在我国的地面观测业务中,08时为人工雪深观测时间,只有在应急响应期间可临时启动加密观测,加密时次可达到1 h。本次降雪加密观测分析说明了积雪深度具有时效性,在降雪后会明显变化,常规观测的08时积雪深度数据不一定能够代表一次降雪过程的最大值,也难以反映出积雪的连续演变过程。今后有必要开展积雪人工加密观测或自动观测。

## 5 积雪深度的影响因子

降雪量、温度、相对湿度、垂直运动、气压和风等气象条件是影响积雪深度的主要气象因子(Molthan et al, 2010; Pruppacher and Klett, 2010; Roebber et al, 2003; Judson and Doesken, 2000; Alcott and Steenburgh, 2010; Baker et al, 1991)。降雪量的大小直接影响到积雪深度。积雪与冰晶结构有关,冰晶的形状和大小决定了积雪层的压实程度,

例如树枝状冰晶具有较大的体积可占用更多的空间,而球状小冰晶形成密集的聚合体占用空间较小。大气环境温度是冰晶结构的首要影响因子,其次是决定冰水饱和度的相对湿度。冰晶在高空形成、增长之后降落到地面,经历了高空、低空和地面不同的热力和湿度条件,导致刚开始形成时的晶体结构又会发生改变,形成新的结构特性。因此,不同高度的环境温度和湿度都会对积雪深度产生影响。冰晶在下落过程中,当周围大气的温度高于 $0^{\circ}\text{C}$ 时,冰晶会融化。冰晶降落到地面后,与之接触的地面温度也会影响到冰晶是否融化及产生形变。垂直运动对降雪的影响体现在两个方面,一是对降雪量的影响,二是对冰晶增长的影响,冰晶的最大增长率发生在上升运动最大层附近,该层附近的温度和相对湿度决定了冰晶结构。气压对积雪的影响表现在不同的气压层冰晶的增长率有差异。风对地面积雪的影响表现在强风会导致冰晶解体,使得大冰晶变成小冰晶,压实积雪,同时强风还可移动冰晶,这两个作用均可导致积雪深度减小。

由此可见,冰晶降落到地面后,能否形成积雪主要取决于与之接触的近地面气象要素的影响。下面从加密观测时次中选取了各测站的积雪深度、降水相态、1 h降雪量、累积降雪量、0 cm地温、气温、极大风速和10 min平均风速等观测资料,主要通过分析积雪产生前后的地面气象要素变化特征,研究积雪深度的影响因子。

### 5.1 雨夹雪对积雪的贡献

自2014年以来,我国地面气象观测取消了霰、米雪、冰粒、吹雪、雪暴、冰针等天气现象,出现雪暴、霰、米雪、冰粒时记为雪,这四种天气现象与雨同时出现时,记为雨夹雪。因而现有的观测记录中只有雪和雨夹雪两种降雪天气现象。在此次降雪过程中,观测到有37个站出现过雨夹雪,主要集中在鲁南地区。其中,大部分站点为雨夹雪转雪并以雪为主,有少数站点为雨转雨夹雪并以雨夹雪为主。那么,雨夹雪能否产生积雪?下文对所有出现过雨夹雪的站点(以下称为雨夹雪站)逐时降水量和积雪深度进行分析。

(1) 37个雨夹雪站中,在雨夹雪时段共有5个测站出现了积雪,最大积雪深度为1 cm(表1)。21日17时之前,所有测站雨夹雪时段均未出现积雪。18时开始,平邑站出现微量积雪。19时,8个仍有

雨夹雪的测站中,新增 1 站(沂南)微量积雪和 1 站(兰陵)1 cm 积雪,其他 6 站无积雪。至 20 时,有雨夹雪的站点中,平邑、沂南、兰陵和东营积雪深度各 1 cm,临沭为微量积雪。从表中还可以看出,产生有量积雪的 4 个站,均为雨夹雪转雪,在转雪之前,雨夹雪产生了积雪。

(2) 此次过程中有的站点以雨夹雪为主,降水量大但不产生积雪。如,郯城站 21 日 17:07 之前为降雨,降雨量 1.5 mm;17:08 开始转为雨夹雪,并以雨夹雪维持至 22 日 01 时降雪过程结束,雨夹雪的折合降水量为 14.5 mm。在整个降雪过程中,该站

始终未出现积雪。其相邻测站临沭,累计雨夹雪的折合降水量达 16.5 mm,仅在 21 日 20 时短暂出现了微量积雪,22 日 00 时雨夹雪转雪,纯雪量为 0.2 mm,但整个降雪过程中没有出现有量积雪。

以上分析表明,雨夹雪多数情况下不产生积雪,但在条件合适的情况下也能够产生积雪,只是雨夹雪产生的积雪深度较小,最大只有 1 cm。雨夹雪产生积雪的条件为后期转纯雪,在转雪之前可产生有量积雪。如果没有转雪过程,雨夹雪一般不产生有量积雪。

表 1 5 个雨夹雪站 2017 年 2 月 21 日 17—20 时降水量及积雪情况

Table 1 Precipitation and snow depth at 5 sleet stations from 17:00 BT to 20:00 BT 21 February 2017

站点	17 时			18 时			19 时			20 时			21—23 时		
	R/mm	T	D/cm	R/mm	T	D/cm									
平邑	0.6	雨夹雪	0	3.4	雨夹雪	微量	2.6	雪	微量	1.7	雪	1	3.1	雪	3
沂南	0.2	雨夹雪	0	1.5	雪	0	3	雨夹雪	微量	3.6	雨夹雪	1	5.5	雪	0
兰陵	2.6	雨夹雪	0	3.3	雨夹雪	0	4.3	雨夹雪	1	2.5	雪	1	2.4	雪	1
东营	0	—	0	0	—	0	0	—	0	1.5	雨夹雪	1	5.5	雪	6
临沭	0.3	雨	0	2.1	雨夹雪	0	4.1	雨夹雪	0	3.9	雨夹雪	微量	4.9	雨夹雪	0

注:R—降水量,T—相态,D—积雪深度

Note: R: precipitation, T: phase, D: snow depth.

## 5.2 降雪量和积雪深度的关系

### 5.2.1 降雪含水比的变化特征

根据上文分析,在有雨夹雪转雪的情况下,雨夹雪也会产生积雪。因此,在计算降雪含水比时,对于产生有量积雪的雨夹雪时次,雨夹雪的降水量计入累积降雪量,否则雨夹雪不参与计算。取各时次的积雪深度与截止本时次的累积降雪量计算降雪比。按照这个规则,共有 119 个测站有降雪含水比。

计算 119 站 21 日 08 时至 22 日 08 时各观测时次的降雪含水比,并给出各时次的平均值(图 4)。全省各站的降雪含水比平均值为  $0.5 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$ ,该数值明显低于全国平均值(杨琨和薛建军,2013)。从空间分布来看(图 4a),各地差异较大。其中,山东中北部和半岛北部的降雪含水比在  $0.5 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$  以上;山东南部半岛南部地区降雪含水比较小,多低于  $0.4 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$ 。全省最大值为鲁中山区的沂源( $1.0 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$ ),最小值为鲁东南地区的台儿庄( $0.1 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$ )。

从全省各区域选择 6 个代表站,分析其各时次的降雪含水比演变情况(图 4b)。可以看出不同站点的降雪含水比均有时间变化,且变化各不相同。6

个代表站中,只有青州的降雪含水比在 22 日 08 时维持最大值,而其他 5 站的降雪含水比最大值均出现在 22 日 08 时之前。其中,处在山东西部的武城和菏泽的最大值出现最早(21 日 17 时),此后减小,到 21 日 23 时达到峰值并维持至 22 日 08 时;威海和烟台在 22 日 05 时达到峰值,08 时反而减小。淄川站的表现与其他站不同,降雪含水比出现了起伏,21 日 23 时增大后,在 22 日 02 时却减小了,05 时又增大,这与积雪深度表现出了不同(该站积雪深度在 22 日 02 时达到最大值)。

分析全省各站最大降雪含水比出现时间,统计每个时次出现最大降雪含水比的站数(图 4b)。从中可以看出其表现出了与积雪深度不同步的变化规律。每个时次出现最大降雪含水比的站数在 21 日 16 时至 22 日 08 时时间有两个峰值,最多站数在 22 日 08 时,为 35 站(占总数的 29%),其次是 21 日 20 时,为 26 站(占总数的 22%),两个峰值均未超过 1/3 且差异不大。这说明各地降雪含水比差异较大,在时间上也没有明显的规律,与最大积雪深度多集中在 08 时的规律差异较大,进一步表明了降雪量与积雪关系的复杂性,积雪深度可能还受到其他关键因素的影响。

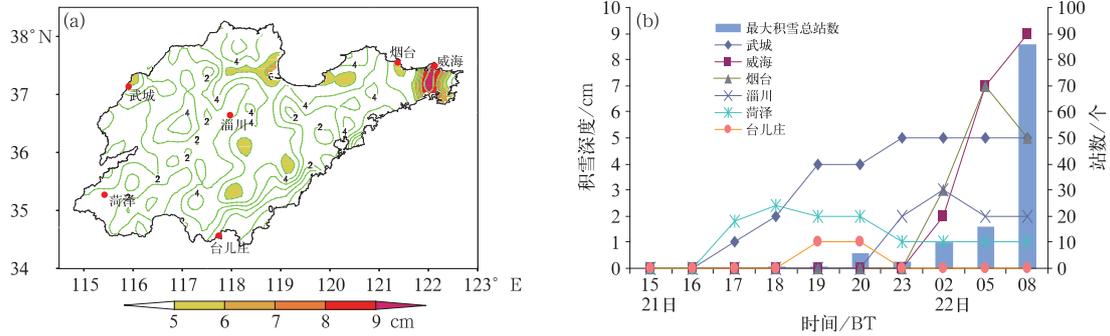


图 3 2017 年 2 月 21 日 08 时至 22 日 08 时全省过程最大积雪深度分布(a) 及代表站各时次积雪深度变化(b) (图 3a 中阴影表示积雪深度 5 cm 以上)

Fig. 3 Distribution of maximum snow depth (a) at all stations and temporal evolution (b) of representative stations from 08:00 BT 21 to 08:00 BT 22 February 2017 (Shaded in Fig. 3a denotes snow depth greater than 5 cm)

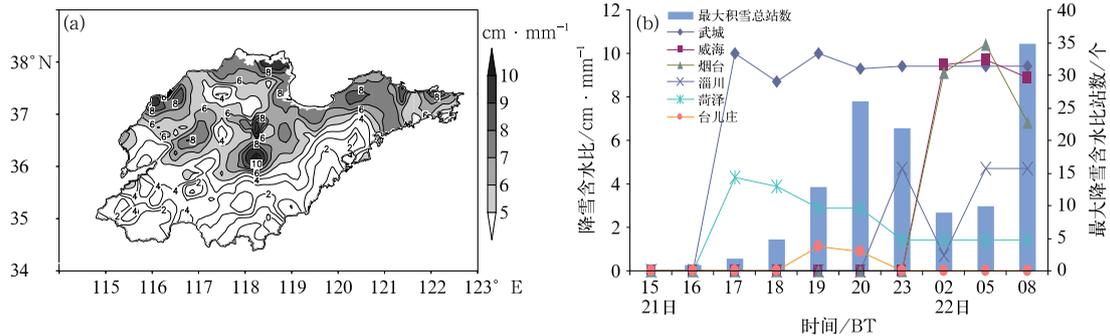


图 4 同图 3, 但为平均降雪含水比 (原值扩大 10 倍)

Fig. 4 Same as Fig. 3, but for snow-to-liquid ratio (ten times amplified)

### 5.2.2 总降雪量与积雪深度

图 5 给出了 2 月 21 日 08 时至 22 日 08 时全省各站总降雪量与最大积雪深度关系。可以看出,最大积雪深度与总降雪量关系在不同的数值区间表现出差异性。较为集中的是降雪量在 4~8 mm, 积雪深度在 2~4 cm, 基本表现出了降雪量越大积雪深度越大的特点。随着降雪量和积雪深度的增大,两者之间的离散度也逐渐增大,总降雪量最大时积雪深度反而小,最大积雪深度出现在中等降雪量值中。可见降雪量的大小与积雪深度并非成正比关系。

### 5.2.3 降雪强度对积雪深度的影响

降水强度是指单位时间内的降水量。这里采用 1 h 降雪量代表降雪强度。在不融化的情况下,积雪深度会随着降雪量的增加而增大,降雪量越大则积雪越深。当存在融化的情况时,降雪强度对积雪

会产生怎样的影响?

在此次降雪过程中,共有 8 站在开始产生积雪时的气温和地温都高于 0℃, 其中气温在 0.1~0.8℃,

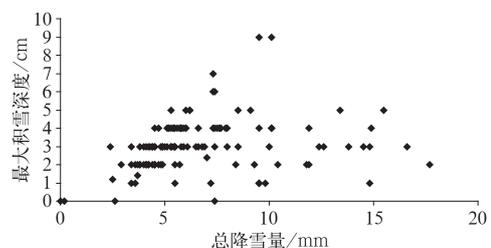


图 5 2017 年 2 月 21 日 08 时至 22 日 08 时全省各站总降雪量与最大积雪深度关系 Fig. 5 Total snowfall and maximum snow depth at all stations from 08:00 BT 21 to 08:00 BT 22 February 2017

地温在  $0.1\sim 0.7^{\circ}\text{C}$ , 积雪深度最大为  $1\text{ cm}$ 。这 8 个站点均出现在鲁东南地区(表略)。为什么气温和地温都高于  $0^{\circ}\text{C}$  时仍可以产生积雪? 分析这些站点的过去 1 h 或 2 h 的小时降雪量, 发现其共同特点是降雪强度大, 其小时降雪量均大于  $1.9\text{ mm}$ , 最大降雪强度为  $4.5\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$  (峰城, 21 日 17—18 时)。值得注意的是, 这 8 个测站中, 有 4 个站的降雪强度  $\geq 3\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ , 但初始积雪深度最大只有  $1\text{ cm}$ , 说明在气温和地温均较高的情况下, 强降雪仍会以融化为主, 产生的积雪深度不大。与以上 8 站相反的情况是日照站。该站 21 日 23 时至 22 日 00 时为雨夹雪, 22 日 01—03 时为降雪, 3 h 降雪量  $1.1\text{ mm}$ , 小时降雪量最大仅为  $0.5\text{ mm}$ , 期间气温在  $-0.6\sim -0.1^{\circ}\text{C}$ ,  $0\text{ cm}$  地温为  $0^{\circ}\text{C}$ 。虽然气温和地温低, 但日照在转雪后为弱降雪, 各时次均未产生积雪。

分析其原因, 可能是由于气温和地温都高于  $0^{\circ}\text{C}$ , 初始降雪融化, 但由于降雪强度大, 降落到地面的雪来不及全部融化, 后续降雪堆积在尚未融化的雪面上, 从而产生积雪。反之, 如果降雪强度很小, 弱降雪降落到地面上很快融化, 难以形成积雪。可见降雪强度对积雪深度有影响, 降雪强度大是气温和地温都高于  $0^{\circ}\text{C}$  时产生有量积雪的必要条件。

### 5.3 地温对积雪深度的影响

利用全省各站的  $0\text{ cm}$  地温和积雪资料, 分析积雪产生时的地温阈值、积雪产生前后的地温变化特征及其对积雪深度的影响。

#### 5.3.1 积雪产生前后的地温特征

(1) 积雪开始产生时, 全省各站的  $0\text{ cm}$  地温在  $-1.4\sim 1^{\circ}\text{C}$ , 主要集中在  $0^{\circ}\text{C}$  左右(图 6)。其中, 有 48 个站的  $0\text{ cm}$  地温  $\leq 0^{\circ}\text{C}$ , 占总数的 40%, 71 个站的地温在  $0\sim 1^{\circ}\text{C}$ , 占总数的 60%。

(2) 分析积雪产生前后的地温变化, 发现所有站点的  $0\text{ cm}$  地温都表现出了先降后升的显著特征(图 7, 仅给出了 9 个代表站数据)。在产生积雪的前一时刻, 地温都会突降, 普遍降至  $0.5^{\circ}\text{C}$  以下。积雪产生后, 地温略有上升, 并在  $1\sim 2\text{ h}$  内趋于稳定。在积雪存续期间, 地温少变, 变化幅度维持在  $0.2^{\circ}\text{C}$  以内。这说明积雪产生后, 对地温产生了影响。

#### 5.3.2 地温对积雪深度的影响

选取强降雪(降雪量  $\geq 5\text{ mm}$ )的站点作为研究对象分析地温对积雪深度的影响。将这些站点分为两类, 一类是新增降雪量  $10\text{ mm}$  以上但降雪比小于

$0.4\text{ cm}\cdot\text{mm}^{-1}$  的站点, 另一类是新增降雪量  $5\text{ mm}$  以上但降雪比大于  $0.8\text{ cm}\cdot\text{mm}^{-1}$  的站点, 两类站点各有 5 站。第一类站点分布在鲁东南地区, 降雪量大, 但积雪深度小; 第二类站点主要分布在山东半岛的北部地区, 降雪量和积雪都大。分析发现, 第一类站点积雪产生前一时刻的  $0\text{ cm}$  地温均为  $0.1^{\circ}\text{C}$ , 积雪产生时刻的地温在  $0\sim 0.5^{\circ}\text{C}$ , 产生积雪后的 6 h 内地温普遍在  $0.5\sim 0.8^{\circ}\text{C}$ ; 第二类站点中, 有 3 个站在积雪产生前一时刻地温低于  $0^{\circ}\text{C}$ , 积雪产生时刻在  $-1.4\sim 0.3^{\circ}\text{C}$ , 积雪产生后稳定在  $0.4^{\circ}\text{C}$  以下。可见第一类站点的地温明显高于第二类站点。在第二类站点中, 威海站的降雪量和积雪深度分别为  $10.1\text{ mm}$  和  $9\text{ cm}$ , 文登站相应分别为  $9.5\text{ mm}$  和  $9\text{ cm}$ , 文登的降雪比大于威海。在降雪期间, 两者的风速基本相同, 气温均低于  $0^{\circ}\text{C}$ , 两者的差异在于地温, 威海在  $0.2\sim 0.3^{\circ}\text{C}$ , 文登则在  $-0.4\sim -0.1^{\circ}\text{C}$ , 威海的地温高于文登, 有小部分降雪融化(表略)。由此分析表明, 在地温偏高的情况下, 大部分降雪融化, 而地温偏低时则易产生积雪。降雪明显融化的地温阈值在  $0.5^{\circ}\text{C}$  左右。

选取费县作为代表站进一步分析地温对积雪深度的影响(图略)。首先分析费县的风速和气温演变: 自 21 日 18 时开始产生积雪至 22 日 00 时降雪结束期间, 其 2 和 10 min 平均风速和极大风速分别为  $1.1\sim 2$ 、 $1.3\sim 2.6$ 、 $3.1\sim 4.8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 平均风力小于 2 级, 极大风力 3 级以下, 可见其风小, 不易吹散积雪; 气温在  $-1.2^{\circ}\text{C}$  (22 日 00 时)  $\sim -0.3^{\circ}\text{C}$  (21 日 18 时), 均低于  $0^{\circ}\text{C}$ , 不利于积雪融化。因此, 在强降雪期间, 费县的气温和风速均有利于产生积雪。从降水相态来看, 21 日 16—17 时为雨夹雪, 18 时转为纯雪, 地温由 17 时的  $1.8^{\circ}\text{C}$  到 18 时突降为  $0.1^{\circ}\text{C}$ ,

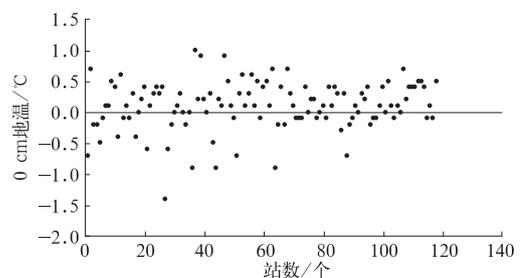


图 6 全省各站开始产生积雪时的  $0\text{ cm}$  地温

Fig. 6  $0\text{ cm}$  ground temperature at beginning of snow cover for all stations

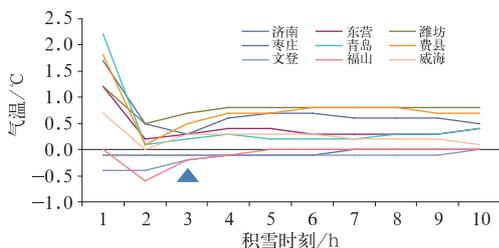


图 7 9 个代表站积雪开始前后的  
的 0 cm 地温逐时演变  
(第 3 个时刻开始积雪)

Fig. 7 Hourly evolution of 0 cm ground  
temperature around snow cover for  
9 representative stations  
(Snow begins to accumulate in the third hour)

18 时产生 1 cm 积雪。积雪产生后,地温有所回升,19 时升至  $0.7^{\circ}\text{C}$ ,此后地温趋于稳定,至 22 日 08 时始终维持在  $0.7\sim 0.8^{\circ}\text{C}$ 。21 日 19 时至 22 日 00 时降雪结束,新增降雪量 12 mm,而期间积雪仅增加了 4 cm,降雪含水比只有  $0.33\text{ cm}\cdot\text{mm}^{-1}$ ,这表明新增的强降雪并没有全部成为积雪,地温  $0.7\sim 0.8^{\circ}\text{C}$  时使得大部分降雪融化,从而导致大的降雪增量未能产生大的积雪。

## 5.4 气温对积雪深度的影响

### 5.4.1 积雪产生前后的气温特征

通过分析全省各站开始有积雪产生时的气温,发现测站气温最低值为  $-3^{\circ}\text{C}$ ,最高值为  $0.8^{\circ}\text{C}$  (图 8)。其中,有 105 站气温  $\leq 0^{\circ}\text{C}$ ,占总数的 88%,14 站气温在  $0.1\sim 0.8^{\circ}\text{C}$ ,占总数的 12%。与杨成芳等(2013)的研究结果“92%的降雪气温低于  $1^{\circ}\text{C}$ ,79%的低于  $0^{\circ}\text{C}$ ”相比,有积雪产生时气温低于  $0^{\circ}\text{C}$  的比例偏大,说明产生积雪要求的气温比产生降雪的低,绝大多数站点有积雪时气温低于  $0^{\circ}\text{C}$ 。另外,与地温相比,产生积雪时气温明显低于地温。

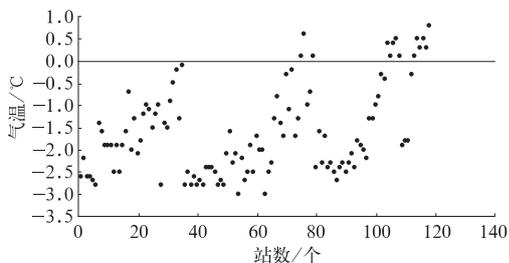


图 8 同图 6,但为气温

Fig. 8 Same as Fig. 6, but for air temperature

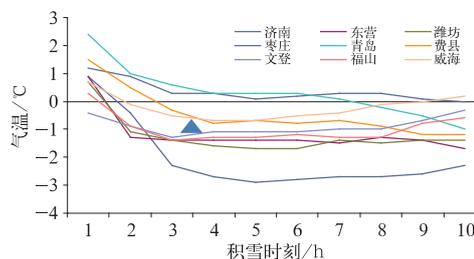


图 9 同图 7,但为气温

Fig. 9 Same as Fig. 7, but for air temperature

积雪开始产生前后的气温演变规律与地温也有所不同(图 9)。气温的变化主要受到天气系统和太阳辐射的影响。在降雪过程中,各地产生积雪的时间为 17 时以后,在气温日变化中,该时刻之后气温逐渐下降,导致大部分站点的气温在前半夜逐渐下降。由于此次暴雪过程的影响系统为江淮气旋,21 日夜间气旋过境时因对流层低层弱暖平流影响,后半夜开始气温略有升高。

### 5.4.2 气温对积雪深度的影响

降雪含水比小于  $0.4\text{ cm}\cdot\text{mm}^{-1}$  的站点中,新增降雪量在 10 mm 以上的 5 个站点气温在  $-1\sim 0.5^{\circ}\text{C}$ ;降雪量在  $5\sim 9.9\text{ mm}$  的站点中,有 4 站气温在  $0.1\sim 0.6^{\circ}\text{C}$ ,另有 4 站的气温在  $-2\sim 0^{\circ}\text{C}$ 。对于降雪含水比大于  $0.8\text{ cm}\cdot\text{mm}^{-1}$  的站点,降雪量 5 mm 以上的 16 个站点中,有 15 个站气温低于  $-1^{\circ}\text{C}$ 。这说明气温越低越有利于产生积雪,当气温在  $0^{\circ}\text{C}$  左右时,大部分降雪融化;而气温低于  $-1^{\circ}\text{C}$  时降雪融化很少,对产生积雪有利,导致降雪含水比大。

选取了降雪量相当的两个代表站威海和青岛,进一步分析气温对积雪深度的影响(图 10)。威海降雪产生较晚,降雪时间为 22 日 00—08 时,期间总降雪量为 10.1 mm,08 时积雪深度为 9 cm。青岛自 21 日 21 时开始出现降雪至 22 日 05 时结束,期间总降雪量为 10 mm,积雪深度 05—08 时最大为 3 cm。青岛和威海两站总降雪量基本接近,前者仅比后者少 0.1 mm,初始 4 h 内的小时降雪强度也接近,但两者的积雪深度却相差 6 cm。分析其原因,发现主要表现在气温的差异。青岛在降雪开始前,气温和地温均高于  $2^{\circ}\text{C}$ ,降雪时降至  $1^{\circ}\text{C}$ ,在强降雪时段(21 日 21 时至 22 日 02 时),气温在  $0.1\sim 1^{\circ}\text{C}$ ,地温在  $0.1\sim 0.3^{\circ}\text{C}$ ,因此大部分降雪融化,导致积雪较小。而威海降雪前气温和地温为  $0.7^{\circ}\text{C}$ ,降雪开

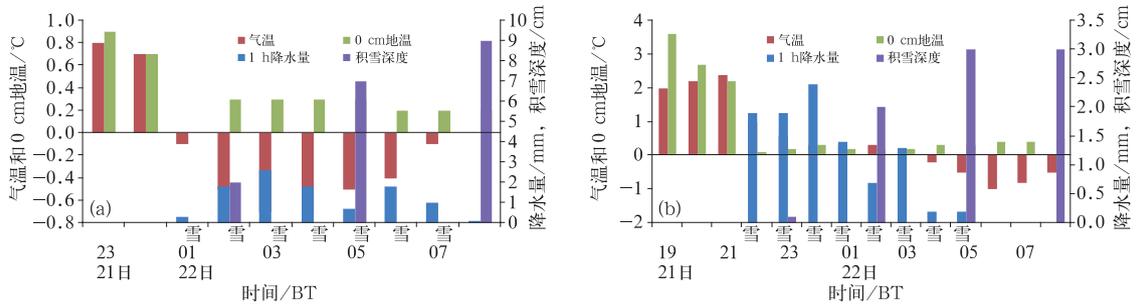


图 10 2017 年 2 月 21—22 日威海(a)和青岛(b)逐时气温、0 cm 地温、降水量和积雪深度演变

Fig. 10 Hourly evolution of temperature, 0 cm ground temperature, precipitation and snow depth in Weihai (a) and Qingdao (b) during 21–22 February 2017

始时气温和地温分别降至 $-0.1$ 、 $0^{\circ}\text{C}$ ，降雪期间气温均低于 $-0.1^{\circ}\text{C}$ ，明显低于青岛，从而导致降雪融化量很小，产生深厚积雪。可见，气温越低越有利于产生积雪。

### 5.5 地面风速对积雪深度的影响

在降雪初期，地面上的积雪较为松散。气象观测场为开阔的场地，当风速太大时，可能会吹走积

雪，从而使得积雪深度减小。分析此次过程各站开始产生有量积雪时 10 m 风 1 h 内的 2、10 min 平均风速和极大风速(表 2)，可以看出，无论是 2 min 还是 10 min 的平均风速，风速 $\leq 3.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (风力 2 级)的均占 71%~72%，超过 97% 的站点平均风速 $\leq 5.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (风力 3 级)；相应地，极大风风力多在 3~4 级，占总站数的 81%。由此可见，有利于产生积雪的平均风力不超过 3 级，极大风则为 3~4 级。

表 2 全省各站积雪开始发生时的地面风速情况

Table 2 Surface wind speed at beginning of snow accumulation for all stations

风力/级	风速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	2 min 平均风		10 min 平均风		极大风	
		站数/个	占总数百分比/%	站数/个	占总数百分比/%	站数/个	占总数百分比/%
1	0.3~1.5	21	18	27	23	0	0
2	1.6~3.3	65	54	58	48	15	13
3	3.4~5.4	32	27	31	26	42	35
4	5.5~7.9	1	1	3	3	55	46
5	8.0~10.7	0	0	0	0	7	6

## 6 结论与讨论

本文利用自动站、人工加密观测及常规观测资料，对 2017 年 2 月 21—22 日由江淮气旋造成的山东暴雪过程的积雪特征进行了分析，初步揭示了江淮气旋暴雪过程近地面气象要素对积雪深度的复杂影响，发现降水相态、降雪量、降水强度、气温、地温和风速均可影响积雪的产生。

(1) 此次暴雪过程的影响系统为江淮气旋。江淮气旋特有的空间结构导致山东中北部地区降雪量小、积雪大，东南部地区降雪量大、积雪小。

(2) 积雪深度具有时效性，降雪期间积雪深度随着降雪的进行而增长，在降雪结束时达到峰值。有的地区积雪深度峰值会维持到次日 08 时，有的则

减小。

(3) 近地面气象要素在积雪产生前后主要表现为：雨夹雪一般不产生积雪，如果雨夹雪转纯雪，则在转雪之前可产生不超过 1 cm 的积雪；各地降雪含水比差异较大，温度低的地区降雪含水比高，全省平均为  $0.5 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$ ，低于全国平均值；降雪量与积雪深度不一定成正比关系，在降雪不融化的情况下，降雪量、降雪强度越大则积雪越深，降雪强度大是气温和地温都高于  $0^{\circ}\text{C}$  时产生积雪的必要条件；产生积雪的地温阈值多在  $0^{\circ}\text{C}$  左右，高于  $0.5^{\circ}\text{C}$  时大部分积雪融化，先降后升是积雪产生前后地温的共性特征，积雪产生前地温突降，积雪产生后 1~2 h 内略有上升并逐渐趋于稳定值；产生积雪的气温，有 88% 的站点气温低于  $0^{\circ}\text{C}$ ，气温越低越有利于产生积雪，当气温在  $0^{\circ}\text{C}$  左右时，大部分降雪融化，而气

温低于 $-1^{\circ}\text{C}$ 时降雪融化很少;有利于产生积雪的平均风力不超过2级,极大风在3~4级以下。

本文主要从近地面气象要素的角度进行了研究,揭示了江淮气旋暴雪过程中积雪的变化特征及其影响因子的复杂性,未涉及高空气象因素和其他非大气条件对冰晶的影响。本文的观测事实分析表明,积雪深度是近地面多气象要素共同影响的结果,预报时应综合考虑。虽然积雪深度与降雪量密切相关,但并非单纯的正比关系。即使是同一个天气系统,也会造成不同地域之间的降水相态、气温、地温和风速等的差异,进而影响降雪是否融化及融化的程度,导致降雪含水比差异较大。不同的天气系统,如低涡切变线、低槽冷锋和气旋等造成的积雪深度也可能会有差异,这些都有待于今后通过大量个例的观测事实进行深入研究。

## 参考文献

- 陈海山,孙照渤,2003.欧亚积雪异常分布对冬季大气环流的影响 I. 观测研究[J]. 大气科学,27(3):304-316. Chen H S, Sun Z B, 2003. The effects of Eurasian snow cover anomaly on winter atmospheric general circulation Part I. Observational studies[J]. Chinese J Atmos Sci,27(3):304-316(in Chinese).
- 陈丽娟,吕世华,罗四维,1996. 青藏高原春季积雪异常对亚洲季风降水影响的数值试验[J]. 高原气象,15(1):125-133. Chen L J, Lü S H, Luo S W, 1996. The numerical experiment of influence of anomalous snow cover over Qinghai-Xizang Plateau in spring on summer monsoon rainfall in Asia [J]. Plateau Meteor, 15(1): 125-133(in Chinese).
- 陈多,洛桑曲珍,林志强,等,2018. 近30年青藏高原雪深时空变化特征分析[J]. 气象,44(2):233-243. Chu D, Luosang Q Z, Lin Z Q, et al, 2018. Spatio-temporal variation of snow depth on Tibetan Plateau over the last 30 years[J]. Meteor Mon, 44(2):233-243 (in Chinese).
- 崔锦,周晓珊,阎琦,等,2015. 沈阳降雪含水比变化特征及其大气影响因子[J]. 冰川冻土,37(6):1508-1514. Cui J, Zhou X S, Yan Q, et al, 2015. Snow-to-liquid ratio variation and its atmospheric influence factors in Shenyang[J]. J Glaciol Geocryol, 37(6): 1508-1514(in Chinese).
- 崔锦,周晓珊,阎琦,等,2017. 降雪含水比研究进展[J]. 气象,43(6):735-744. Cui J, Zhou X S, Yan Q, et al, 2017. Advances in snow-to-liquid ratio[J]. Meteor Mon, 43(6):735-744(in Chinese).
- 《大气科学辞典》编委会,1994. 大气科学辞典[M]. 北京:气象出版社:980. Editorial Committee of Atmospheric Science Dictionary, 1994. Atmospheric Science Dictionary[M]. Beijing: China Meteorological Press:980(in Chinese).
- 付强,彭莉,汪恩良,等,2017. 积雪特性参数分析及雪深模型建立[J]. 东北农业大学学报,48(12):36-45. Fu Q, Peng L, Wang E L, et al, 2017. Analysis on snow characteristic parameters and construction of snow depth modeling [J]. J Northeast Agri Univ, 48(12):36-45(in Chinese).
- 胡列群,李帅,梁凤超,2013. 新疆区域近50a积雪变化特征分析[J]. 冰川冻土,35(4):793-800. Hu L Q, Li S, Liang F C, 2013. Analysis of the variation characteristic of snow covers in Xinjiang Region during recent 50 years[J]. J Glaciol Geocryol, 35(4):793-800(in Chinese).
- 李德俊,熊守权,柳草,等,2014. 鄂西北两次强降雪的滴谱特征和积雪深度预估方法[J]. 气象,40(5):612-618. Li D J, Xiong S Q, Liu C, et al, 2014. Droplet spectrum characteristics and depth forecast method of two snowstorms in Northwest of Hubei[J]. Meteor Mon, 40(5):612-618(in Chinese).
- 刘畅,杨成芳,宋嘉佳,2016. 一次江淮气旋复杂降水相态特征及成因分析[J]. 气象科学,36(3):411-417. Liu C, Yang C F, Song J J, 2016. Analysis on complex phases features and causes of a Jianghuai-cyclone precipitation[J]. J Meteor Sci, 36(3):411-417(in Chinese).
- 陆恒,魏文寿,刘明哲,等,2011. 中国天山西部季节性森林积雪雪层温度时空分布特征[J]. 地理科学,31(12):1541-1548. Lu H, Wei W S, Liu M Z, et al, 2011. Spatial and temporal distributions of snow temperature in forest of the western Tianshan Mountains, China [J]. Scientia Geographica Sinica, 31(12): 1541-1548(in Chinese).
- 马吉晖,李玉香,2012. 通化地区积雪深度预报方法研究及服务对策[J]. 吉林气象,(4):29-33. Ma J H, Li Y X, 2012. Service solutions and forecast technology of snow depth in Tonghua[J]. Jilin Meteor, (4):29-33(in Chinese).
- 马丽娟,秦大河,2012. 1957—2009年中国台站观测的关键积雪参数时空变化特征[J]. 冰川冻土,34(1):1-11. Ma L J, Qin D H, 2012. Spatial-temporal characteristics of observed key parameters for snow cover in China during 1957—2009[J]. J Glaciol Geocryol, 34(1):1-11(in Chinese).
- 沙依然,王茂新,2004. 气象卫星遥感资料在积雪监测中的应用[J]. 气象,30(4):33-36. Sha Y R, Wang M X, 2004. Monitoring of snow cover with remote sensing data from meteorological satellites[J]. Meteor Mon, 30(4):33-36(in Chinese).
- 孙莎莎,杨成芳,尹承美,等,2015. 济南地区“12.13”降水过程相态二次转换成因分析[J]. 气象与环境学报,31(4):14-19. Sun S S, Yang C F, Yin C M, et al, 2015. Forming reason study of twice conversion of precipitation phase for “12.13” weather process in Jinan Region[J]. J Meteor Environ, 31(4):14-19(in Chinese).
- 孙欣,蔡芎宁,陈传雷,等,2011. “070304”东北特大暴雪的分析[J]. 气象,37(7):863-870. Sun X, Cai X N, Chen C L, et al, 2011. Analysis of the 4 March 2007 heavy snowstorm in Northeast China[J]. Meteor Mon, 37(7):863-870(in Chinese).
- 王建,车涛,李震,等,2018. 中国积雪特性及分布调查[J]. 地球科学进展,33(1):12-26. Wang J, Che T, Li Z, et al, 2018. Investigation on snow characteristics and their distribution in China[J]. Adv Earth Sci, 33(1):12-26(in Chinese).
- 吴书成,邱杰,吴静,等,2017. 浙江省自动雪深观测数据质量分析[J]. 气象科技,45(4):616-621. Wu S C, Qiu J, Wu J, et al,

2017. Quality analysis and control of automatic snow depth observing data in Zhejiang[J]. Meteor Sci Technol, 45(4): 616-621 (in Chinese).
- 吴统文, 钱正安, 2000. 青藏高原冬春积雪异常与中国东部地区夏季降水关系的进一步分析[J]. 气象学报, 58(5): 570-581. Wu T W, Qian Z A, 2000. Further analyses of the linkage between winter and spring snow depth anomaly over Qinghai-Xizang Plateau and summer rainfall of Eastern China[J]. Acta Meteor Sinica, 58(5): 570-581 (in Chinese).
- 谢静芳, 章娜, 冯瑶, 2001. 吉林省积雪深度的影响条件分析及预报[C]//城市气象服务科学讨论会论文集. 北京: 中国气象学会, 101-102. Xie J F, Zhang N, Feng Y, 2001. Analysis and Forecasting of Snow Depth in Jilin[C]//Proceedings of the Symposium on Urban Meteorological Service Science. Beijing: Chinese Meteorological Society: 101-102 (in Chinese).
- 杨成芳, 刘畅, 郭俊建, 等, 2017. 山东相态逆转降雪天气的特征与预报[J]. 海洋气象学报, 37(1): 73-83. Yang C F, Liu C, Guo J J, et al, 2017. Statistical study of precipitation type reversal during snowy weather process in Shandong Province[J]. J Marine Meteor, 37(1): 73-83 (in Chinese).
- 杨成芳, 姜鹏, 张少林, 等, 2013. 山东冬半年降水相态的温度特征统计分析[J]. 气象, 39(3): 355-361. Yang C F, Jiang P, Zhang S L, et al, 2013. Analysis on temperature of precipitation types in cold seasons in Shandong[J]. Meteor Mon, 39(3): 355-361 (in Chinese).
- 杨琨, 薛建军, 2013. 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, 24(3): 349-355. Yang K, Xue J J, 2013. The relationship between snowfall and snow depth using intensive snowfall observations[J]. J Appl Meteor Sci, 24(3): 349-355 (in Chinese).
- 翟亮, 郭淳薇, 马新成, 等, 2018. 北京 2016 年“11·20”初雪预报偏差分析[J]. 气象, 44(1): 151-158. Zhai L, Guo C W, Ma X C, et al, 2018. Forecast deviation analysis of the first snow in Beijing on 20 November 2016[J]. Meteor Mon, 44(1): 151-158 (in Chinese).
- 张人禾, 张若楠, 左志燕, 2016. 中国冬季积雪特征及欧亚大陆积雪对中国气候影响[J]. 应用气象学报, 27(5): 513-526. Zhang R H, Zhang R N, Zuo Z Y, 2016. An overview of wintertime snow cover characteristics over China and the impact of Eurasian snow cover on Chinese climate[J]. J Appl Meteor Sci, 27(5): 513-526 (in Chinese).
- 左志燕, 张人禾, 2012. 中国春季降水异常及其与热带太平洋海面温度和欧亚大陆积雪的联系[J]. 大气科学, 36(1): 185-194. Zuo Z Y, Zhang R H, 2012. The anomalies of spring rainfall in eastern China and its relation with tropical Pacific SST and Eurasian snow[J]. Chinese J Atmos Sci, 36(1): 185-194 (in Chinese).
- Alcott T I, Steenburgh W J, 2010. Snow-to-liquid ratio variability and prediction at a high-elevation site in Utah's Wasatch Mountains[J]. Wea Forecasting, 25(1): 323-337.
- Baker D G, Skaggs R H, Ruschy D L, 1991. Snow depth required to mask the underlying surface[J]. J Appl Meteor, 30(3): 387-392.
- Judson A, Doesken N, 2000. Density of freshly fallen snow in the central rocky mountains[J]. Bull Amer Meteor Soc, 81(7): 1577-1588.
- Milbrandt J A, Glazer A, Jacob D, 2012. Predicting the snow-to-liquid ratio of surface precipitation using a bulk microphysics scheme[J]. Mon Wea Rev, 140(8): 2461-2476.
- Molthan A L, Petersen W A, Nesbitt S W, et al, 2010. Evaluating the snow crystal size distribution and density assumptions within a single-moment microphysics scheme[J]. Mon Wea Rev, 138(11): 4254-4267.
- Potter J G, 1965. Water content of freshly fallen snow[G]. CIR-4232, TEC-569, Meteorology Branch, Dept. of Transport, Toronto, ON, Canada, 12.
- Pruppacher H R, Klett J D, 2010. Microphysics of clouds and precipitation[M]. Netherlands: Springer: 954.
- Roebber P J, Bruening S L, Schultz D M, et al, 2003. Improving snowfall forecasting by diagnosing snow density[J]. Wea Forecasting, 18(2): 264-287.
- Ware E C, Schultz D M, Brooks H E, et al, 2006. Improving snowfall forecasting by accounting for the climatological variability of snow density[J]. Wea Forecasting, 21(1): 94-103.