

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.
YANG Chengfang, ZHU Xiaoqing. Analysis on statistical characteristics of snow-to-liquid ratio in Shandong[J]. Journal of Marine Meteorology, 2020, 40(1): 47-56. DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2020.01.005. (in Chinese)

山东降雪含水比统计特征分析

杨成芳,朱晓清

(山东省气象台,山东 济南 250031)

摘要:降雪含水比(snow-to-liquid ratio, SLR)是指积雪深度与降雪融化后等量液体深度(降雪量)的比值,可用来计算积雪深度。山东有两种产生机制不同的降雪,冷流降雪主要分布在山东半岛北部沿海地区,其他类降雪在全省范围均可发生,二者的降雪含水比有明显差异。利用山东122个国家气象观测站自建站以来至2018年12月的逐12h降水量、日积雪深度、降水性质、日最高气温及1999—2018年的MICAPS高空、地面图资料,通过限定条件进行质量控制,统计分析了山东不同地区的降雪含水比气候特征,为积雪深度预报提供参考。结果表明:1)山东降雪含水比的变化范围为 $0.1\sim 3.0\text{ cm}\cdot\text{mm}^{-1}$,全省大部地区多年平均降雪含水比为 $0.9\text{ cm}\cdot\text{mm}^{-1}$,主要集中在 $0.3\sim 1.1\text{ cm}\cdot\text{mm}^{-1}$ 之间;山东半岛北部沿海地区(强冷流降雪区域)的多年平均降雪含水比为 $1.3\text{ cm}\cdot\text{mm}^{-1}$,主要集中在 $0.9\sim 2.0\text{ cm}\cdot\text{mm}^{-1}$ 之间。2)降雪含水比的大小与降雪量等级有关,且存在明显月变化。全省大部地区从中雪至暴雪随着降雪量等级的增大,降雪含水比依次减小;各等级的降雪含水比月最大值均出现在1月或12月,最小值出现在11月或2月;山东半岛北部沿海地区的降雪含水比表现出更为复杂的特征,在以冷流降雪为主的11月—次年1月,中雪、大雪和暴雪的降雪含水比基本相当;2月和3月冷流降雪不明显,降雪含水比表现出与其他地区降雪类似的特征。3)不同天气系统暴雪的降雪含水比有差异。江淮气旋暴雪过程平均降雪含水比为 $0.69\text{ cm}\cdot\text{mm}^{-1}$,总体上呈现“北大南小,山区大沿海小”分布,中雪、大雪和暴雪的降雪含水比中位数分别为 0.8 、 0.7 和 $0.5\text{ cm}\cdot\text{mm}^{-1}$;回流形势暴雪过程的全省平均降雪含水比为 $0.67\text{ cm}\cdot\text{mm}^{-1}$,中雪的降雪含水比中位数为 $0.8\text{ cm}\cdot\text{mm}^{-1}$,大雪和暴雪均为 $0.6\text{ cm}\cdot\text{mm}^{-1}$;冷流暴雪的降雪含水比明显大于其他两类暴雪,中位数在 $1.1\sim 1.6\text{ cm}\cdot\text{mm}^{-1}$ 之间变化,中雪、大雪和暴雪的降雪含水比中位数分别为 1.4 、 1.6 和 $1.3\text{ cm}\cdot\text{mm}^{-1}$ 。

关键词:降雪含水比;积雪深度;统计特征;降雪量等级

中图分类号: P426.6; P457.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-3599(2020)01-0047-10

DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2020.01.005

Analysis on statistical characteristics of snow-to-liquid ratio in Shandong

YANG Chengfang, ZHU Xiaoqing

(Shandong Meteorological Observatory, Jinan 250031, China)

Abstract The snow-to-liquid ratio (SLR) is the ratio of the depth of snow to the depth of liquid water contained in that snow (if it were to be melted), which is used for calculating snow depth. There are two types of snowfall with different mechanisms in Shandong. The ocean-effect snow mainly occurs in the northern coastal areas of Shandong Peninsula, while the other type can occur over the whole province,

收稿日期:2020-02-12; 修订日期:2020-02-27

基金项目:国家自然科学基金项目(41475038,41975055);中国气象局预报员专项(CMAYBY2018-042)

作者简介:杨成芳,女,博士,研究员级高级工程师,主要从事天气预报业务及降雪研究,cf_yang70@hotmail.com。

and there are remarkable differences in their SLR. Based on the data of 12-h precipitation, daily snow depth, precipitation type, and daily maximum temperature from 122 national meteorological stations in Shandong from their establishment to December 2018 and MICAPS synoptic charts from 1999 to 2018, this study statistically analyzes climatic characteristics of SLR in different areas of Shandong, providing reference for forecasting snow depth. To eliminate errors, some quantitative calculation rules are brought forward. The results are as follows. 1) The SLR in Shandong ranges between $0.1 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$ and $3.0 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$ (mainly between $0.3 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$ and $1.1 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$) and the average value over many years is $0.9 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$ in most areas; in the northern coastal areas of Shandong Peninsula (areas of heavy ocean-effect snow), the SLR is mainly between $0.9 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$ and $2.0 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$ and the average value over many years is $1.3 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$. 2) SLR is relevant to grade of snow with obvious monthly variation. SLR decreases with the grade of snow rising from moderate snow to snowstorm for most areas of Shandong; the monthly maximum SLR of each grade of snow appears in January or December, while the minimum appears in November or February; in the northern coastal areas of Shandong Peninsula, SLR presents more complicated characteristics in that SLRs of moderate snow, heavy snow, and snowstorm are roughly equivalent from November to the next January when ocean-effect snow prevails, while SLR shows similar characteristics as in other areas in February and March when ocean-effect is not that obvious. 3) SLRs of snowstorms produced by different synoptic systems exhibit diversity. SLR of snowstorm produced by Changjiang-Huaihe cyclone is higher (lower) in the northern (southern) areas and mountainous (coastal) areas as a whole, the process-averaged value is $0.69 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$, and the median SLRs of moderate snow, heavy snow, and snowstorm are $0.8 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$, $0.7 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$, and $0.5 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$, respectively; the average SLR of backflow snowstorm in the whole province is $0.67 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$, and the median SLRs of moderate snow, heavy snow, and snowstorm are $0.8 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$, $0.6 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$, and $0.6 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$, respectively; SLR of ocean-effect snowstorm, whose median value ranges between $1.1 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$ and $1.6 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$, is remarkably higher than that of the other two types of snowstorms mentioned above, and the median SLRs of moderate snow, heavy snow, and snowstorm are $1.4 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$, $1.6 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$, and $1.3 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$, respectively.

Key words snow-to-liquid ratio (SLR); snow depth; statistical characteristics; grade of snow

引言

我国日常降雪预报业务中,过去通常只预报降雪量,以小雪、中雪、大雪、暴雪等分等级或者以定量表示。随着精细化预报服务需求的发展,积雪深度预报近年来也逐渐纳入一些地区的预报业务中,以便人们根据地面上的积雪大小采取适度防御措施,更有针对性地对道路、棚架积雪进行清除,如播撒多少融雪剂、出动多少清雪车等。为了定量预报积雪深度,首先要考虑天气系统能够产生多少降雪量,然后再把降雪量转化为积雪深度。由此引入了降雪含水比的概念^[1-3](有文献^[4]称为降雪比, snow ratio),以建立二者之间的转化关系。降雪含水比 (snow-to-liquid ratio, SLR) 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,其单位有的文献采用 $\text{cm} \cdot \text{mm}^{-1}$, 也有的文献采用 $\text{mm} \cdot \text{mm}^{-1}$

(将积雪深度乘以 10 转为 mm,再计算降雪含水比, SLR 因此不带单位)。这样,只要确定了降雪量和降雪含水比,就可以计算出积雪深度。

对于 SLR 的研究主要集中在三个方面:SLR 的影响因子、气候变化特征和预报技术^[5]。更多的研究聚焦于 SLR 的微物理过程,研究 SLR 的影响因子。归结起来,温度、相对湿度、风、垂直运动、气压等气象条件对 SLR 都有影响。ROEBBER et al.^[4]认为,云内的冰晶结构、云下的过程以及地面的压实度都要考虑。初始冰晶状态取决于温度和过饱和度,与高空的冰及液态水有关^[6]。温度会导致不同的基本冰晶形态^[7],冰晶为树枝状的降雪 SLR 值最大。冰晶形成以后,周围的环境条件将决定冰晶增长,湿度是云内影响第二重要因素^[4]。冰晶增长的过程很复杂,它在下落的过程可能会遭遇不同的环境温度及饱和度,导致产生不同相态^[7],经历了沉

积增长或融化过程之后冰晶结构会进一步改变,进而影响到 SLR。例如,融化时会影响到截获的冰晶内的气体数量,减小空隙,使得雪密度更大,SLR 降低;雪降落到地面 24 h 内冰晶会发生形变和结构变化,使得冰晶密化,均会导致 SLR 减小。温度、水汽、风都会导致冰晶结构变化,如果地面温度高冰晶会融化,强风可导致冰晶解体或移动^[4,8],SLR 随着风速增大而减小^[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,进而会影响到降雪含水比^[9]。

以上基于微物理的研究从机理上揭示气象条件对 SLR 的影响,预报员熟悉了影响因子进行综合判断有助于做出更为准确的积雪深度预报。但是,在日常业务中,因为缺乏精细的高空观测资料,分析云中和云下的微物理过程是比较困难的。因此,需要利用多年历史资料开展某个地区的 SLR 气候特征和基本变化规律研究,帮助预报员对 SLR 做初始估测。早在 1875 年,美国天气局就提供 $SLR = 10 \text{ mm} \cdot \text{mm}^{-1}$,给预报员作为参考。我国传统预报业务中,一些预报员也以此为参考值估测积雪深度。HENRY^[1]指出 $10 \text{ mm} \cdot \text{mm}^{-1}$ 只是一个近似值,对于很多地区和天气形势下不够精确。后来许多研究^[2,10-12]表明 SLR 有相当大的变化,它取决于降雪落区、不同的气象环境参数。BAXTER et al.^[2]利用美国 1971—2000 年 7 760 个站点的降雪资料统计表明,大部分地区的 SLR 年平均值为 $12 \sim 14 \text{ mm} \cdot \text{mm}^{-1}$,总体大于经验值 $10 \text{ mm} \cdot \text{mm}^{-1}$;SLR 存在空间差异,北部大南部小,北部为 $15 \sim 18 \text{ mm} \cdot \text{mm}^{-1}$,南部多在 $9 \sim 11 \text{ mm} \cdot \text{mm}^{-1}$;另外各月 SLR 也有不同。杨琨和薛建军^[13]利用我国 2009—2011 年冬季的降雪加密观测资料并采用线性拟合方法,分析得出我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显著减小趋势,且有明显的地区差异。崔锦等^[14-15]首先分析了沈阳站 32 a 降雪含水比的变化特征,发现沈阳站降雪含水比的平均值为 $11.4 \text{ mm} \cdot \text{mm}^{-1}$,主要集中在 $6 \sim 12 \text{ mm} \cdot \text{mm}^{-1}$ 区间变化,进而提出了辽宁省小时 SLR 的平均值为 $11 \text{ mm} \cdot \text{mm}^{-1}$ 。杨成芳和刘畅^[9]利用加密观测资料得到山东一次江淮气旋暴雪过程的降雪含水比,全省平均值为 $0.5 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$,但各地差异较大。总体而言,以上研究均表明降雪含水比具有明显的空间和时间变化特征,积雪深度预报应谨慎使用 $SLR = 10 \text{ mm} \cdot \text{mm}^{-1}$

的经验值,各地应深入研究降雪量和积雪深度的关系。本文利用山东各地建站以来的历史资料进行统计分析,给出山东范围内的 SLR 气候值,为预报员主观预报及客观预报技术研发提供参考。

1 资料与方法

1.1 所用资料

本文使用了山东 122 个国家级地面气象观测站(以下简称“122 站”)自建站以来至 2018 年 12 月的地面观测及 1999—2018 年的 MICAPS 高空、地面图资料。其中,地面观测资料包括 08—20 时、20 时—次日 08 时的 12 h 降水量、日积雪深度、降水性质、日最高气温。资料来源于山东省气象信息中心。

1.2 资料处理和计算方法

降雪含水比的计算公式:

$$SLR = \frac{SD}{SL} \quad (1)$$

其中,SLR 为降雪含水比,单位为 $\text{cm} \cdot \text{mm}^{-1}$;SD 为 08 时—次日 08 时的新增积雪深度(即次日 08 时积雪深度与当日 08 时积雪深度之差),单位为 cm;SL 为 08 时—次日 08 时 24 h 降雪量,单位为 mm,与新增积雪深度同一时段。

考虑到山东降雪的复杂性和观测资料的特点,做出以下限定。

1) 山东降雪相态复杂^[16-17],研究表明,300 个降雪日中山东降雪时地面气温不会超过 $3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (取整数),94%的降雪日降雪时的地面气温 $t < 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$;其中 40 个有雨雪转换的降雪日中,降雨时有 74%的个例地面气温 $t \geq 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$,而常规观测资料只能判别出一日当中有无降雪出现(有为 1,无为 0),12 h 和 24 h 降水量观测资料中均无法区分详细的雨雪相态。因此,挑选纯降雪日时,规定满足两个条件:降水日的降水性质为 1;降水日的最高气温 $t_{\text{max}} < 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$,从而可基本剔除含有降雨的降雪日。

2) 按照我国的地面气象观测规范,积雪深度的单位为 cm,测量时雪深不足 0.5 cm 记为 0,超过时读取雪深的厘米整数,小数四舍五入。在此观测规范下,降雪量越小,则降雪含水比误差可能越大。例如,假设某日降雪量为 0.6 mm,积雪深度的观测记录为 1 cm,根据观测规范实际的积雪深度可能为 0.5~1.4 cm 之间的任意数,由此计算出的降雪含水比分别是 $1.6 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$ 、 $0.8 \sim 2.3 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$,差异较大。为了减小可能的误差,并保留尽可能多的降雪样本,本文在计算降雪含水比时剔除了小雪等级

(日降雪量不大于 2.4 mm)的降雪日。

3) 山东有两类降雪:一类是各种天气系统均可产生的降雪(预报员常称为系统性降雪),与西南暖湿气流有关,分布于全省各地;另一类是冷流降雪(又称海效应降雪),发生在冬季强冷空气影响下,我国渤海中东部、黄海、东海海面及其沿海地区均可产生冷流降雪,以山东半岛北部沿海地区的烟台和威海地区最为显著,冷流降雪日数可达该地区总降雪日数的 70%以上^[18]。本文在分析全省降雪含水比建站以来的气候特征时,考虑到两类降雪产生机制完全不同,发生频率、影响区域、降雪量和积雪深度等均有很大差异,为避免全省所有站点数据取平均会产生混淆,将全省 122 个国家气象观测站分为 A 类和 B 类。其中, A 类站点有 115 个,分布在山东内陆地区和 B 类站点之外的沿海地区; B 类站点包括山东半岛北部沿海地区的烟台、福山、牟平、威海、文登、荣成和成山头 7 个站,为强冷流降雪易发区,易产生日降水量 5 mm 以上的强降雪。故 A 类站点代表山东的大部分地区,表征各类天气系统均可产生的降雪; B 类站点代表山东半岛北部沿海地区,包含了冷流降雪和系统性降雪。在分析各类天气系统暴雪过程的降雪含水比特征时,采用资料齐全的 1999—2018 年 MICAPS 高空、地面图普查各暴雪过程的天气系统,有江淮气旋、回流形势、黄河气旋、低槽冷锋、暖切变线暴雪和冷流暴雪,其中冷流暴雪过程仅发生在山东半岛北部沿海地区(B 类站点),其他天气系统的暴雪在全省范围内均可发生。

1.3 降雪样本

满足上述限定条件的测站出现一个降雪日称为一个站次,作为一个样本。从全省 122 站自建站至 2018 年 12 月的降雪日中共筛选出 7 428 个有效样本,其中, A 类站点样本数为 6 704 个, B 类站点样本数为 724 个。A 类样本主要集中在 1—2 月, B 类样本则以 12 月和 1 月居多(表 1)。由全省降雪样本数分布(图 1)可以看出,样本数最多的是山东半岛北部沿海地区,超过了 100 个,文登最多,为 129 个;样本数最少的是崂山站,为 19 个,其次是河口和峰城,均为 23 个。样本数的多少与建站早晚有关,也与降雪频次有关;山东半岛北部沿海地区的样本数多,与冷流降雪频次高有关,河口样本数少则是由于建站晚(1992 年建站)造成的。

表 1 全省 122 站自建站至 2018 年降雪样本数

Table 1 The number of snow samples from 122 meteorological stations in Shandong from their establishment to 2018

站点类型	降雪样本数						全年
	11 月	12 月	1 月	2 月	3 月	4 月	
A 类	396	1 583	2 186	1 948	584	7	6 704
B 类	65	290	227	105	37	0	724

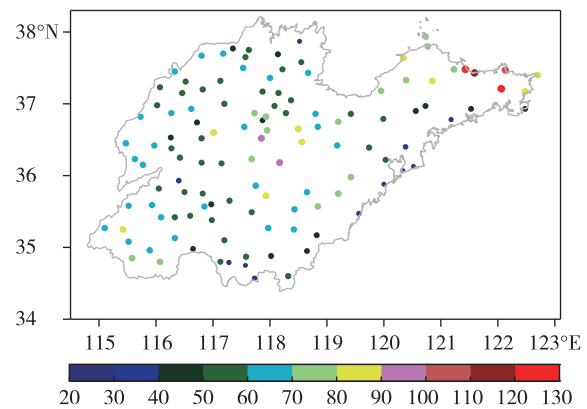


图 1 山东 122 站降雪样本数分布(单位:个)

Fig.1 Distribution of the number of snow samples from 122 meteorological stations in Shandong

2 降雪量与积雪深度的关系

对山东 122 站的 7 428 个降雪样本的降雪量和新增积雪深度进行相关性分析。二者的相关系数为 0.74,达到 0.01 显著性水平。利用最小二乘法对其进行线性拟合(图 2),得到的拟合关系式为:

$$y = 0.80x + 1.0 \quad (2)$$

式中, y 为 08 时一次日 08 时新增积雪深度(单位: cm), x 为 08 时一次日 08 时降雪量(单位: mm)。

以上结果表明,总体而言,山东的新增积雪深度与降雪量存在显著的正相关,二者的比值为 $0.80 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$ 。

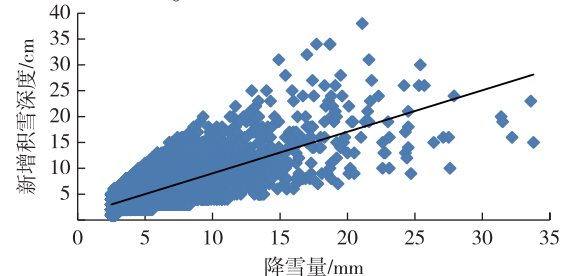


图 2 山东 24 h 降雪量和新增积雪深度的关系

Fig.2 Relationship between 24-h snowfall amount and depth of newly fallen snow in Shandong

3 全省降雪含水比的总体变化特征

3.1 空间分布特征

图 3 给出了全省 122 站自建站至 2018 年的平均降雪含水比,从中可以看出山东降雪含水比总体上呈现北高南低的分布规律。山东半岛的北部沿海地区平均降雪含水比最大,在 $1.1 \sim 1.5 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$ 之间,文登站和荣成站以 $1.5 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$ 居全省之首;其次是德州、滨州、济南北部至淄博北部地区,平均降雪含水比在 $1.0 \sim 1.1 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$ 之间;东营、枣庄、临沂南部、日照的沿海地区降雪含水比最小,多低于 $0.8 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$,河口和东营均为 $0.7 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$,是全省最低值;其他地区的降雪含水比一般在 $0.8 \sim 0.9 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$ 之间。由多年平均来看,全省大部地区的年平均降雪含水比为 $0.9 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$,半岛北部沿海地区的年平均降雪含水比为 $1.3 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$,可见以强冷流降雪为主的降雪含水比明显大于系统性降雪。

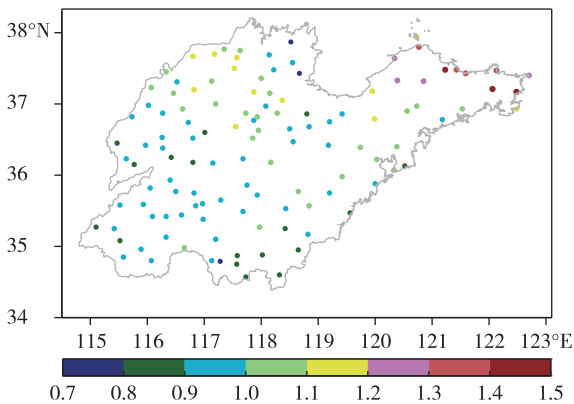


图 3 山东 122 站建站至 2018 年平均降雪含水比 (单位: $\text{cm} \cdot \text{mm}^{-1}$)

Fig.3 Average SLR from 122 meteorological stations in Shandong from their establishment to 2018 (units: $\text{cm} \cdot \text{mm}^{-1}$)

3.2 降雪含水比分等级特征

为了分析山东降雪含水比的变化范围及集中程度,对 A 类站点和 B 类站点所有样本的降雪含水比按照 $0.1 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$ 间隔进行分级,统计每个等级出现的站次数,然后再计算每个等级站次占其所在类总站次的百分比,所得结果如图 4 所示。

从图 4 中可以看出,无论 A 类站点还是 B 类站点,降雪含水比都在 $0.1 \sim 3.0 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$ 之间变化。对于 A 类站点,降雪含水比主要集中在 $0.3 \sim 1.1 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$ 之间,每个等级占比超过 6%,占比合计达到 64%,其中以 $0.8 \sim 1.0 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$ 的占比最高,每

个等级各为 8% ~ 9%;降雪含水比大于 $2.0 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$ 的占比合计为 5%。由此可见,对于 A 类站点,出现高降雪含水比的概率较小。相比之下,B 类站点的降雪含水比相对较高,多集中在 $0.9 \sim 2.0 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$ 之间,合计占比为 63%;小于 $0.2 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$ 和大于 $2.5 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$ 的占比均在 2% 以下,合计占比为 6%。这表明 B 类站点出现极小和极大降雪含水比的概率很低。

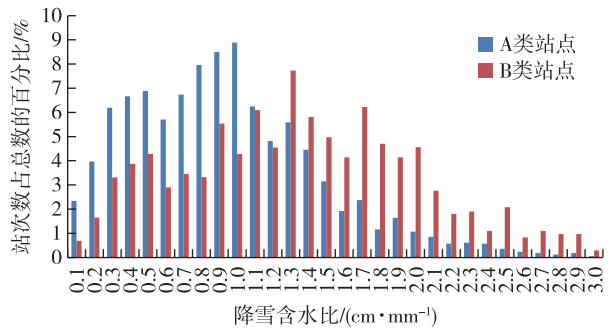


图 4 山东 122 站建站至 2018 年降雪含水比各等级占比

Fig.4 Percentage of each grade of SLR (interval: $0.1 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$) from 122 meteorological stations in Shandong from their establishment to 2018

3.3 月变化特征

图 5 给出了两类降雪各月降雪含水比的箱须图,以此分析各地降雪含水比的月变化特征。

A 类站点降雪的降雪含水比特征(图 5a)总体表现为:1 月最大,12 月、2 月、3 月、11 月、4 月依次减小。在冬季(12 月—次年 2 月),1 月和 12 月的降雪含水比基本接近,25% ~ 75% 分位的降雪含水比都在 $0.6 \sim 1.3 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$ 之间,中位数(50% 分位,下同)1 月最大,为 $1.0 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$,12 月为 $0.9 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$;2 月的降雪含水比总体比 1 月和 12 月稍低一些,25% ~ 75% 分位的降雪含水比为 $0.5 \sim 1.2 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$ 之间,中位数为 $0.9 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$ 。11 月和 3 月是冬季的过渡月份,二者的降雪含水比特征也基本类似,中位数均为 $0.7 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$,25% ~ 75% 分位的降雪含水比分别为 $0.4 \sim 1.0 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$ 和 $0.4 \sim 1.1 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$ 。4 月的降雪含水比最小,只有 $0.1 \sim 0.2 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$ 。因 4 月的气温高,降雪日少,符合计算条件的样本只有 7 个,且均发生在 1964 年 4 月 6 日,故获得的计算结果虽然可以说明 4 月降雪含水比低,但样本太少不具备代表性。

B 类站点各月的降雪含水比特征(图 5b)总体表现为:12 月最大,11 月、1 月、2 月、3 月依次减小。

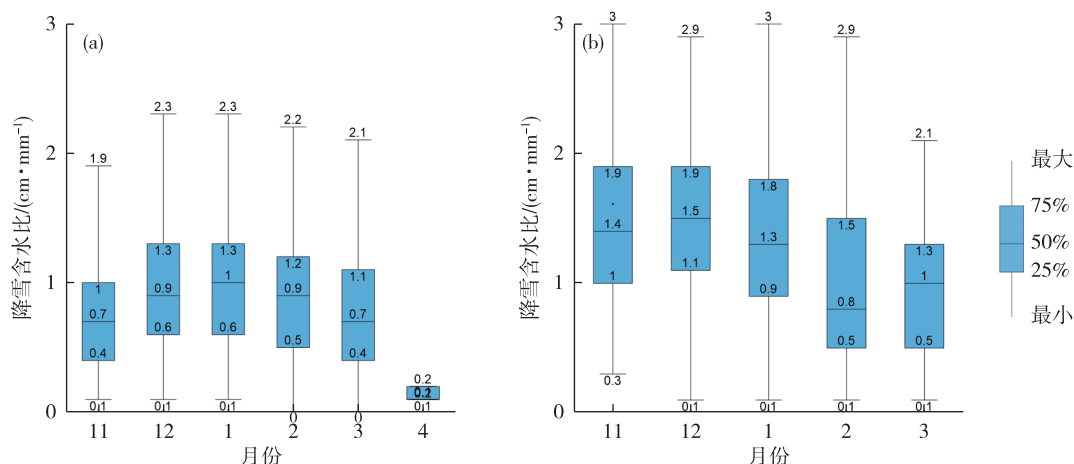


图5 山东122建站至2018年各月降雪含水比(a. A类站点, b. B类站点)

Fig.5 Monthly SLR from 122 meteorological stations in Shandong from their establishment to 2018 (a. A type stations, b. B type stations)

12月25%~75%分位的降雪含水比在 $1.1 \sim 1.9 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$ 之间,中位数最大为 $1.5 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$;11月和1月均较12月略低,中位数分别为 $1.4 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$ 和 $1.3 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$,25%~75%分位分别在 $1.0 \sim 1.9 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$ 和 $0.9 \sim 1.8 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$ 之间。2月和3月的中位数分别为 $0.8 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$ 和 $1.0 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$ 。

综上所述,山东各地的降雪含水比具有明显的月变化特征。山东大部地区降雪的月变化与辽宁类似^[15],相同点是1月降雪含水比最大,12月次之,不同点在于其他月份。山东半岛北部沿海地区的降雪含水比则是12月最大,11月次之,与内陆地区的降雪差异较大。

3.4 不同降雪量等级的降雪含水比特征

以上分析表明了各月降雪含水比的总体变化特征。为进一步分析不同降雪量等级的降雪含水比特征,分别计算了中雪(24 h降雪量为 $2.5 \sim 4.9 \text{ mm}$)、大雪(24 h降雪量为 $5.0 \sim 9.9 \text{ mm}$)和暴雪(24 h降雪量大于或等于 10.0 mm)的各月降雪含水比。

A类站点各等级降雪的降雪含水比如图6a所示。对于中雪,1月的降雪含水比最大,中位数为 $1.1 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$,25%~75%分位在 $0.7 \sim 1.4 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$ 之间;12月和2月的中位数和75%分位相同,分别为 $0.9 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$ 和 $1.3 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$;11月和3月的降雪含水比最低,中位数和75%分位分别为 $0.8 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$ 和 $1.1 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$ 。大雪冬季各月的降雪含水比基本相当,中位数均为 $0.8 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$,25%分位均为 $0.5 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$,75%分位在 $1.1 \sim 1.2 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$ 之间;3月的降雪含水比略低

于冬季,其中位数和75%分位分别为 $0.7 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$ 和 $1.0 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$;11月最低,中位数和75%分位分别为 $0.6 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$ 和 $0.9 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$ 。暴雪的降雪含水比在三个降雪量等级中最小,12月和1月的降雪含水比中位数在 $0.7 \sim 0.8 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$ 之间,75%分位为 $1.0 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$;11月和3月的中位数在 $0.5 \sim 0.6 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$ 之间;2月的中位数最小,为 $0.3 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$ 。由此可见,对于A类站点降雪,从中雪至暴雪随着降雪量等级的增大降雪含水比依次减小;各降雪量等级的降雪含水比最大值均出现在1月(中雪)或12月(大雪、暴雪),最小值出现在11月(中雪、大雪)或2月(暴雪);相比较而言,大雪的各月含水比基本相当,月中位数最大差为 $0.2 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$,而暴雪各月差异较大,最大月与最小月的降雪含水比中位数相差 $0.5 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$ 。

B类站点各等级各月的降雪含水比如图6b所示,表现出与A类站点降雪明显不同的规律。B类站点的中雪11月和12月的降雪含水比最大,中位数在 $1.5 \sim 1.6 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$ 之间,25%~75%分位在 $1.0 \sim 2.0 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$ 之间;1月和3月的中位数均为 $1.2 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$,2月中位数最小,为 $1.0 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$ 。对于大雪,12月的降雪含水比最大,中位数达 $1.6 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$,11月次之,中位数为 $1.4 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$;1月和3月的中位数均为 $1.1 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$,2月中位数最小,为 $0.7 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$ 。暴雪的降雪含水比最大仍然是1月,中位数为 $1.5 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$,11月和1月紧随其后,在 $1.3 \sim 1.4 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$ 之间;2月最小,为 $0.6 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$ 。由此可见,对于B类站点,在降雪分等级、分月后表现出复杂的特征。11月、12月和

1 月 B 类站点以冷流降雪为主,中雪、大雪和暴雪的降雪含水比基本相当,各月差异也不大;2 月和 3 月的降雪含水比表现出了与 A 类站点类似的月变化

特征,即随着降雪量等级的增大,降雪含水比减小,这是因为该时期冷流降雪的发生频率和降雪量明显减小,产生的降雪性质与 A 类站点基本相同。

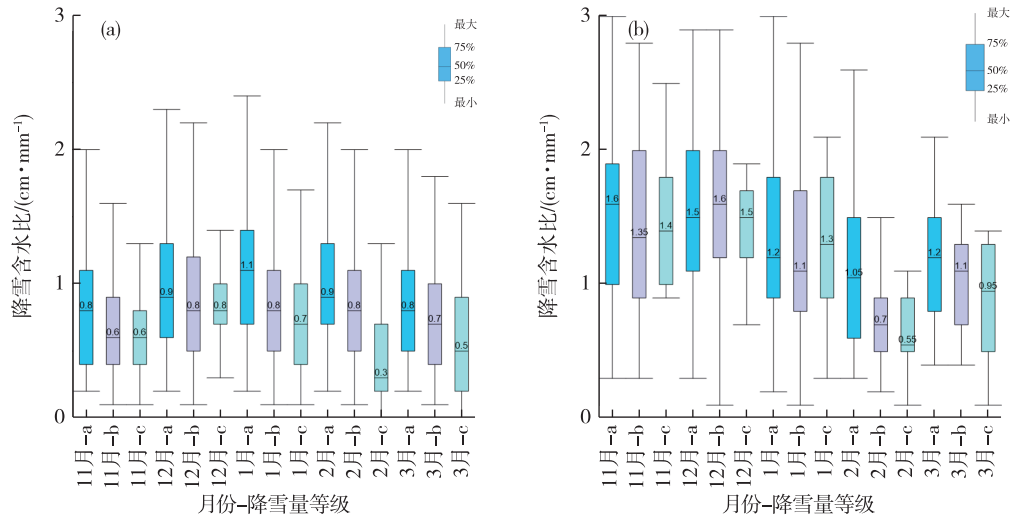


图 6 各降雪量等级的降雪含水比月变化(a. A 类站点, b. B 类站点;后缀-a、-b、-c 分别代表中雪、大雪、暴雪)

Fig.6 Monthly variation of SLR of different grade of snow (a. A type stations, b. B type stations; suffixes " a" , " b" , and " c" denote moderate snow, heavy snow, and snowstorm, respectively)

4 各类天气系统暴雪过程的降雪含水比特征

1999—2018 年山东共出现了 67 次暴雪天气过程。其中,江淮气旋暴雪 15 次、回流形势暴雪 12 次、黄河气旋暴雪 5 次、低槽冷锋暴雪 4 次、暖切变线暴雪 3 次、冷流暴雪 28 次。为了使得各类天气系统的降雪含水比气候值具有代表性,仅选取各站点符合计算条件的样本数均在 3 个以上的天气过程,由此确定江淮气旋、回流形势和冷流暴雪参与分类天气系统的气候特征分析。山东江淮气旋和回流形势暴雪一般都存在“先雨后雪”降水相态转换,在计算降雪含水比时按照给定规则剔除暴雪过程中的雨雪转换日,只保留纯雪日。

4.1 江淮气旋暴雪

江淮气旋暴雪发生次数多、范围广、强度大,是山东暴雪的主要天气系统之一,山东降雪量最大的暴雪过程均发生在江淮气旋影响下。江淮气旋暴雪过程存在复杂的降水相态转换,通常“先雨后雪,南雨北雪”,一般鲁东南和半岛南部地区始终为降雨或以降雨为主,其他地区“先雨后雪”,暴雪多发生在鲁西北、鲁西南、鲁中和半岛北部等气温较低的地区。

15 次江淮气旋暴雪过程的全省平均降雪含水比为 $0.69 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$ 。全省各站平均值的空间分布

(图 7)显示,江淮气旋暴雪过程的降雪含水比总体上呈现出“北大南小,山区大沿海小”的特征。具体表现为:山东半岛的低山丘陵地区降雪含水比最高,中心位于栖霞至招远一带,最大值为 $1.2 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$;鲁西北和鲁中山区的降雪含水比大部分在 $0.8 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$ 左右;鲁南的南部、半岛的东南沿海和潍坊的东南部地区降雪含水比均低于 $0.5 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$ 。江淮气旋暴雪过程的降雪含水比分布规律与其天气系统特点有关。江淮气旋系统影响山东时,山东的东南部地区对流层低层一般为东南

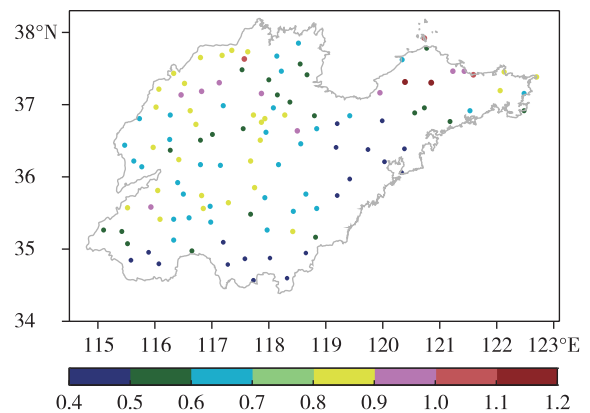


图 7 江淮气旋暴雪过程各站平均降雪含水比分布(单位: $\text{cm} \cdot \text{mm}^{-1}$)

Fig.7 Distribution of average SLR of snowstorm produced by Changjiang-Huaihe cyclone at each station (units: $\text{cm} \cdot \text{mm}^{-1}$)

风,中层为强盛的西南风,中低层温度高,雪降落到地面后易融化,积雪深度小,从而导致降雪含水比小,而山东其他地区对流层低层为东北冷平流,温度低,降雪含水比大。

一次暴雪天气过程中,全省各地的降雪量常会有明显差异,从小雪至暴雪各量级均可产生。从上文分析中得到,山东大部分地区的降雪含水比随着降雪量等级的增大而减小。那么,对于江淮气旋暴雪过程,不同等级降雪降雪含水比有什么特点?

15次江淮气旋暴雪过程中,全省中雪、大雪和暴雪的总站次数分别为133个、223个和121个。图8给出了江淮气旋暴雪过程中雪、大雪和暴雪的降雪含水比箱须图。从图中可以看出,江淮气旋暴雪过程的降雪含水比同样具有随着降雪量等级增大而减小的特点。其中,中雪的降雪含水比中位数为 $0.8 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$,25%~75%分位在 $0.6 \sim 1.1 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$ 之间;大雪的降雪含水比略低于中雪,中位数为 $0.7 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$,25%~75%分位在 $0.4 \sim 0.9 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$ 之间;暴雪的降雪含水比最小,中位数为 $0.5 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$,25%~75%分位在 $0.3 \sim 0.8 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$ 之间。

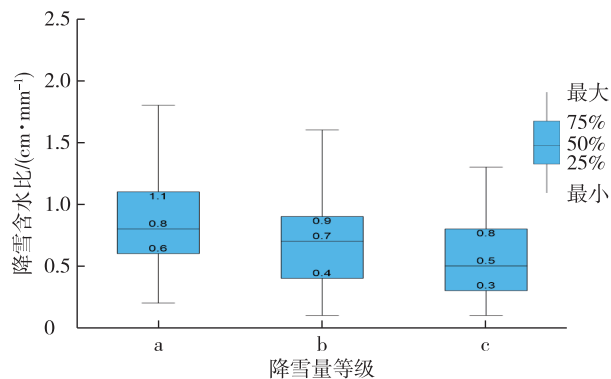


图8 江淮气旋暴雪过程各降雪量等级的降雪含水比(a、b、c分别表示中雪、大雪、暴雪)

Fig.8 SLR of different grade of snowstorm produced by Changjiang-Huaihe cyclone (a, b, and c denote moderate snow, heavy snow, and snowstorm, respectively)

4.2 回流形势暴雪

回流形势降雪是山东冬半年最常见的一类降雪。回流形势暴雪主要发生在11月一次年1月,以11月最多。大范围和区域性回流暴雪过程通常雨雪共存,局地回流暴雪多为单纯降雪。有雨雪转换的过程中,鲁西北、鲁西南、鲁中北部和半岛北部地区为回流降雪易发区,而同时鲁东南和半岛南部地区多为降雨^[19]。

12次回流形势暴雪过程的全省平均降雪含水比为 $0.67 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$,与江淮气旋暴雪过程的全省平均值相当。由空间分布(图9)来看,在回流降雪易发区内降雪含水比相对较高,鲁西南、鲁西北、鲁中北部和半岛低山丘陵地区的平均降雪含水比大部分在 $0.7 \sim 0.9 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$ 之间,中心值最大为 $1.0 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$,出现在烟台地区的栖霞至莱阳一带及德州的临邑;鲁东南地区的降雪含水比多在 $0.4 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$ 以下,日照最低,仅为 $0.3 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$ 。

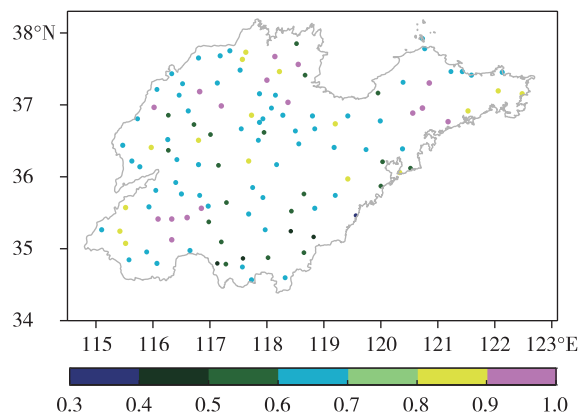


图9 回流形势暴雪过程各站平均降雪含水比分布(单位: $\text{cm} \cdot \text{mm}^{-1}$)

Fig.9 Distribution of average SLR of backflow snowstorm at each station (units: $\text{cm} \cdot \text{mm}^{-1}$)

分析各降雪量等级的降雪含水比(图10),回流形势暴雪过程中雪的降雪含水比中位数为 $0.8 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$,25%~75%分位在 $0.5 \sim 1.0 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$ 之间;大雪和暴雪的降雪含水比差异不大,中位数均为 $0.6 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$,25%分位为 $0.4 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$,75%分位为 $0.8 \sim 0.9 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$ 。

4.3 冷流暴雪

冷流暴雪仅在山东半岛北部沿海地区发生。1999—2018年共出现了28次冷流暴雪过程。分析表明,所有站点的降雪含水比在 $0.2 \sim 2.8 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$ 之间变化,中位数为 $1.4 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$,25%分位和75%分位分别为 $1.1 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$ 和 $1.7 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$ 。可见,与江淮气旋暴雪和回流形势暴雪相比,山东半岛北部沿海地区冷流暴雪的降雪含水比明显增大。

进一步分析28次暴雪过程中三个降雪量等级的降雪含水比(图11),中雪、大雪、暴雪的降雪含水比中位数分别为 $1.4 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$ 、 $1.6 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$ 和 $1.3 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$;75%分位分别为 $1.7 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$ 、 $1.8 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$ 和 $1.6 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$;25%分位分别为 1.1

$\text{cm} \cdot \text{mm}^{-1}$ 、 $1.1 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$ 和 $1.2 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$ 。这表明在冷流暴雪过程中,大雪等级的降雪含水比最大,暴雪最小。

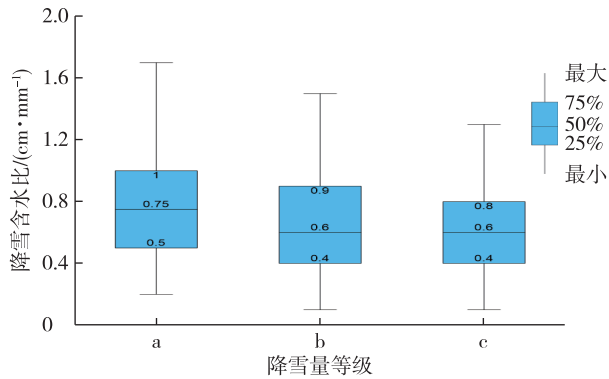


图10 回流形势暴雪过程各降雪量等级的降雪含水比(a、b、c分别表示中雪、大雪、暴雪)

Fig.10 SLR of different grade of backflow snowstorm (a, b, and c denote moderate snow, heavy snow, and snowstorm, respectively)

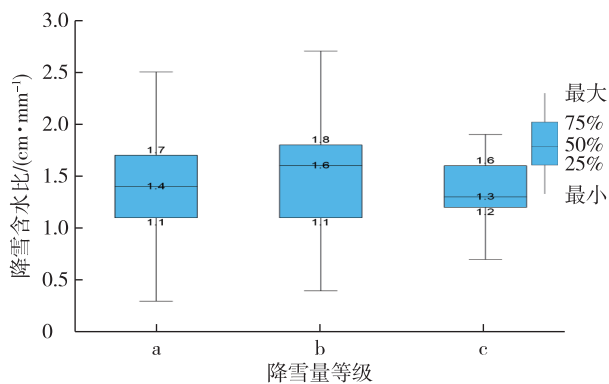


图11 冷流暴雪过程各降雪量等级的降雪含水比(a、b、c分别表示中雪、大雪、暴雪)

Fig.11 SLR of different grade of ocean-effect snowstorm (a, b, and c denote moderate snow, heavy snow, and snowstorm, respectively)

5 结论与讨论

利用山东122个国家级地面气象观测站自建站以来至2018年12月的地面观测资料及1999—2018年的MICAPS高空、地面图资料,统计分析了山东各地的降雪含水比气候特征,取得以下主要结论。

1) 山东降雪含水比的变化范围为 $0.1 \sim 3.0 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$ 。各地分布存在空间和等级差异,全省大部地区多年平均降雪含水比为 $0.9 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$,主要集中在 $0.3 \sim 1.1 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$ 之间,出现 $2.0 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$ 以上的概率低于5%;山东半岛北部沿海地区的多年平均降雪含水比为 $1.3 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$,主要

集中在 $0.9 \sim 2.0 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$ 之间,出现 $0.2 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$ 以下和 $2.5 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$ 以上的概率很小。

2) 山东降雪含水比的大小与降雪量等级有关,且存在明显月变化。全省大部地区从中雪至暴雪随着降雪量等级的增大,降雪含水比依次减小,各等级的降雪含水比月最大值均出现在1月(中雪)或12月(大雪、暴雪),最小值出现在11月(中雪、大雪)或2月(暴雪)。山东半岛北部沿海地区的降雪含水比表现出更为复杂的特征:11月一次年1月以冷流降雪为主,中雪、大雪和暴雪的降雪含水比基本相当,各月差异较小;2月和3月的降雪含水比表现出了与其他地区降雪类似的月变化特征。

3) 各天气系统暴雪的降雪含水比具有不同特征。江淮气旋暴雪过程平均降雪含水比为 $0.69 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$,总体上呈现“北大南小,山区大沿海小”分布,中雪、大雪和暴雪的降雪含水比中位数分别为 0.8 、 0.7 和 $0.5 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$ 。回流形势暴雪过程的全省平均降雪含水比为 $0.67 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$,中雪的降雪含水比中位数为 $0.8 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$,大雪和暴雪均为 $0.6 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$ 。冷流暴雪的降雪含水比明显大于其他两类暴雪,中位数在 $1.1 \sim 1.6 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$ 之间变化,中雪、大雪和暴雪的降雪含水比中位数分别为 1.4 、 1.6 和 $1.3 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$ 。

本文的研究结果给出了山东各地降雪含水比的统计值,分析了气候特征,为预报员制作积雪深度预报提供了参考依据。研究中发现,即使是同一类天气系统,不同降雪过程的降雪含水比也可能存在较大差异。这是因为虽然降雪含水比为积雪深度与降雪量之比,实际上二者并非总是简单的线性关系,积雪深度不仅受到降雪量、气温、地温、风向风速、湿度等气象因素的影响,还有太阳辐射、地形地貌等的影响,从而导致降雪含水比不可能是固定数值。因此,在实际预报业务中应用降雪含水比的统计值时要注意不同降雪量等级、不同月份及各类天气系统降雪过程降雪含水比的差异,同时还要综合考虑其他因素的影响。另外,对于一些持续时间短或者冷平流弱的降雪过程,至次日08时部分积雪可能融化或产生形变,从而导致降雪含水比较实况小,文献[9]基于加密观测资料的研究结论也证实了这一点,并非所有站点的积雪深度在08时达到最大值。由于积雪深度历史资料的局限性,本文采用08时一次日08时24h资料进行统计分析可能不一定有完全的代表性。今后,有待通过人工加密观测资料及逐渐普及的积雪深度自动观测资料进

行深入研究,获取精细的降雪含水比。

参考文献:

- [1] HENRY A J. The density of snow[J]. *Mon Wea Rev*, 1917,45(3):102.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] MAGONO C, LEE C W. Meteorological classification of natural snow crystals[J]. *J Faculty Sci Hokkaido Uni*, 1966,2(4):321-335.
- [7] PRUPPACHER H R, KLETT J D. *Microphysics of clouds and precipitation* [M]. New York, Boston, Dordrecht, London, Moscow: Kluwer Academic Publishers,1996:954.
- [8] RAUBER R M. Characteristics of cloud ice and precipitation during wintertime storms over the mountains of Northern Colorado[J]. *J Climate Appl Meteor*,1987,26(4):488-524.
- [9] 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.
- [10] MILBRANDT J A, GLAZER A, JACOB D. Predicting the snow-to-liquid ratio of surface precipitation using a bulk microphysics scheme [J]. *Mon Wea Rev*, 2012, 140(8):2461-2476.
- [11] JUDSON A, DOESKEN N. Density of freshly fallen snow in the central Rocky Mountains [J]. *Bull Amer Meteor Soc*,2000,81(7):1577-1588.
- [12] WARE E C, SCHULTZ D M, BROOKS H E, et al. Improving snowfall forecasting by accounting for the climatological variability of snow density [J]. *Wea Forecasting*,2006,21(1):94-103.
- [13] 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.
- [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] 崔锦,张爱忠,阎琦,等.2009—2017年辽宁省降雪含水比变化特征研究[J]. *冰川冻土*, 2019, 41(4):828-835.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 阎丽凤,杨成芳.山东省灾害性天气预报技术手册[M].北京:气象出版社,2014:223-227.