

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. 气象, 40(5):612-618.

# 鄂西北两次强降雪的滴谱特征和积雪深度预估方法<sup>\*</sup>

李德俊<sup>1,2</sup> 熊守权<sup>2</sup> 柳草<sup>3</sup> 万霞<sup>1</sup> 袁正腾<sup>2</sup> 王慧娟<sup>2</sup>

1 湖北省暴雨监测预警研究中心中国气象局武汉暴雨研究所, 武汉 430074

2 湖北省气象服务中心, 武汉 430074

3 武汉中心气象台, 武汉 430074

**提 要:** 利用丹江口站 Thies Clima 激光雨滴谱仪(TCLPM)和地面人工加密观测资料对 2010 年 12 月 14—15 日和 2012 年 1 月 20—22 日两次强降雪天气滴谱演变特征及预估积雪深度方法进行了分析探讨, 结果表明: (1) 激光雨滴谱仪能自动识别降水相态, 结合地面人工加密观测结果, 气温高于 0.7℃, 降水相态为雨, 低于 0.7℃ 为雨夹雪, 低于 -0.5℃ 为纯雪, 同时发现地面温度低于 0.5℃, 地面开始有积雪, 且这两次过程地面风速比较低有利于地面积雪; (2) 激光雨滴谱仪还可以很好地监测强降雪天气滴谱特征演变规律, 回波强度( $Z$ )、平均直径( $D_m$ )、降雪粒子水含量( $W$ )、数浓度( $N$ )随降雪强度增强而增大, 且两次过程中  $D_m$ 、 $Z$ 、 $N$ 、 $W$  均与地面积雪速率( $VSD$ )均有不同程度的正相关性,  $W$  与  $VSD$  相关性更好, 分别达到了 0.844 和 0.926; (3) 选取降雪粒子水含量  $W$  与地面积雪速率进行一阶拟合, 得出地面积雪速率预估方程, 通过纯雪阶段地面积雪速率预估值( $VSD_F$ )和地面积雪深度预估值( $SDF$ )与利用雨滴谱仪实测资料反演的  $VSD$ 、 $SD$  两者进行比较, 发现它们两者非常接近, 说明通过这种方法可以较好地预估地面积雪速率和积雪深度, 其结果可以再现地面积雪跃增的主要时段。

**关键词:** Thies Clima 激光雨滴谱(TCLPM), 强降雪天气, 积雪速率, 积雪速率预估

中图分类号: P415

文献标志码: A

doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2014.05.012

## Droplet Spectrum Characteristics and Depth Forecast Method of Two Snowstorms in Northwest of Hubei

LI Dejun<sup>1,2</sup> XIONG Shouquan<sup>2</sup> LIU Cao<sup>3</sup> WAN Xia<sup>1</sup> YUAN Zhengteng<sup>2</sup> WANG Huijuan<sup>2</sup>

1 Hubei Key Laboratory for Heavy Rain Monitoring and Warning Research, Institute of Heavy Rain,  
China Meteorological Administration, Wuhan 430074

2 Hubei Meteorological Service Centre, Wuhan 430074

3 Wuhan Central Meteorological Observatory, Wuhan 430074

**Abstract:** The droplet spectrum variation characteristics and snow depth forecast of the two snowstorms in 14—15 December 2010 and 20—22 January 2012 are studied by using Thies Clima laser precipitation monitor (TCLPM) and artificial observation data from Danjiangkou Station. The results show that: (1) the TCLPM can automatically identify the precipitation phase state. Combined with surface artificial dense observations, the temperature higher than 0.7℃ is for precipitation phase state, less than 0.7℃ is for sleet, below -0.5℃ is for pure snow. At the same time, when the surface temperature is below 0.5℃, snow begins to accumulate. The surface wind speeds in the two processes are relatively slow, conducive to snow accumulation on the ground; (2) the TCLPM can monitor the variation of droplet spectrum characteristics of heavy snowfall weather, the echo intensity ( $Z$ ), average diameter ( $D_m$ ), water content ( $W$ ), snowfall particle number concentration ( $N$ ) which increases with the enhancement of snowfall intensity. During the

\* 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201306040-05 和 GYHY201206025)、湖北省气象局科技发展基金项目(2011Y06 和 2013Z04)及湖北省气象服务中心自立课题(201201)共同资助

2013 年 1 月 7 日收稿; 2013 年 5 月 20 日收修定稿

第一作者: 李德俊, 主要从事大气物理、雷达和卫星资料分析应用研究. Email: esldj@163.com

two snowstorm events, there are different levels of positive correlations among  $D_m$ ,  $Z$ ,  $N$ ,  $W$  and  $VSD$ , better correlation between  $W$  and  $VSD$ , respectively reaching 0.844 and 0.926; (3) Selecting the first-order fitting snow particles in water content  $W$  and surface snow rate, the snow rate forecast equation is derived compare surface snow rate forecast ( $VSDf$ ) in the pure snow stage and the surface snow depth forecasts ( $SDF$ ) to  $VSD$ ,  $SD$  retrieved with the observation data by  $TCLPM$  it is found that they are very close, indicating this method can be used to estimate  $VSD$  and  $SD$  on the surface snow rate and snow depth, which can reflect the main time period with quick increase of surface snow.

**Key words:** Thies Clima laser precipitation monitor ( $TCLPM$ ), snowstorm, rate of snowfall, forecast rate of snowfall

## 引言

强降雪天气是鄂西北冬春季节的主要气象灾害性天气之一,不仅降雪发生时造成的恶劣能见度对公路、铁路交通运输甚至飞行都有明显影响,而且在降雪天气过后地面形成的积雪还会更长时间的阻碍交通运输,影响交通安全。如从2010年12月14日08时到15日08时,鄂西北出现大到暴雪和冰冻天气,竹山县12h降雪量达到8.4mm,丹江口等地积雪深度均超过8mm,受此雨雪天气影响,上述大部地区交通全面受阻,导致汉十、随岳等多条高速公路关闭,由于这场雪大而且急道路积雪较多,城区交通受到较大影响,行人顶着风,身上被染成白色艰难前行,机动车移动缓慢,部分离单位近的职工采用步行上班。

近年来愈来愈多的学者从数值模式模拟结果到诊断分析方面入手来关注强降雪天气成因的研究,成果颇丰(段丽等,2011;侯瑞钦等,2011;吴伟等,2011;孙欣等,2011;姚蓉等,2012;苏德斌等,2012;罗俊颀等,2012;孟雪峰等,2012;于晓晶等,2013;余政等,2013)。然而,目前积雪研究工作大都集中在观测资料的统计分析工作上(陈光宇等,2011;蔡菊珍等,2010;臧海佳等,2009;孙林海等,2001;沙依然等,2004;吴杨等,2007),但我国北部有些省(区、市)根据用户的需要,为铁路、交通运输和民航部门提供的专项预报服务中,开始分析和预报积雪深度,也主要是定性分析预报为主(谢静芳等,2001),由于监测手段限制,加上实际经验和客观依据不足,预报服务水平还十分有限。

激光雨滴谱仪可以用来说明降水过程的一些特征,各类降水可以有不同类型的雨滴大小分布,分析

其微物理结构特征,可以研究成雨机制为人工增雨和数值模拟等提供科学依据,有着重要的实用价值。国内外许多专家先后利用各种雨滴谱仪多次进行了雨滴谱观测和研究,并取得了许多重要成果(King et al,2010;Battaglia et al,2010;李德俊等,2012),但利用激光雨滴谱仪对强降雪天气过程中的降雪粒子滴谱特征及预估积雪深度的研究还不多见。

本文利用丹江口 Thies Clima 激光雨滴谱仪、加密观测资料对2010年12月14—15日和2012年1月20—22日两次强降雪天气进行了连续跟踪监测,并详细分析了这两次强降雪过程中滴谱变化演变特征及对地面积雪速率和地面积雪深度预估方法进行了一些初步分析探讨,以期更好地跟踪监测强降雪过程滴谱特征演变规律,找出相关度高的因子来预估地面积雪速率、积雪深度,为各级政府部门提供科学的决策服务,减少灾害损失。

## 1 资料和方法

### 1.1 资料

本文使用了丹江口 Thies Clima 激光雨滴谱仪数据,以及两次强降雪过程的人工加密观测降雪量与积雪深度数据。Thies Clima 激光雨滴谱仪是德国制造的新一代、可靠、高性能精密探测地面降水粒子的仪器,其测量粒径范围为0.16~8.0mm共22档,粒子速度范围为0.2~20.0m·s<sup>-1</sup>共20档,测量降水强度范围为0.005mm·h<sup>-1</sup>(毛毛雨)至250mm·h<sup>-1</sup>(短时强降水),而且以时间间隔1min连续观测方式监测下落中的毛毛雨、大雨、冰雹、雪花、雪球以及各种介于雪花和冰雹之间的各类降水。

## 1.2 方法

目前,阶距法估计谱分布参数被广泛的应用于雨滴谱方法的研究中,其优点在于直接阐明 Gamma 分布参数  $N, \mu, \lambda$  的物理关系,各阶距量与雨滴谱参数有一定的对应关系。第  $n$  阶距定义(Chen et al, 2012)为:

$$M_n = \int_{D_{\min}}^{D_{\max}} D^n N(D) dD \quad (1)$$

利用 Thies Clima 激光雨滴谱仪探测数据来计算空间数浓度  $N(D_i)$ (单位:个 $\cdot$ m $^{-3}$ ),质量加权平均直径  $D_m$ (单位:mm)、降雨(雪)粒子含水量  $W$ (单位:g $\cdot$ m $^{-3}$ )、反射率因子  $Z$ (单位:dBz)和降雨(雪)强度  $R$ (单位:mm $\cdot$ h $^{-1}$ ),公式分别如下:

$$D_m = \frac{M_4}{M_3} \quad (2)$$

$$W = \frac{\pi}{6} \rho_w M_3 \quad (3)$$

$$Z = \sum_{i=1}^{22} N(D_i) D_i^6 \Delta D_i \quad (4)$$

$$R = \frac{6\pi}{10^4} \sum_{i=1}^{22} \sum_{j=1}^{20} V_j N(D_i) D_i^3 \Delta D_i \quad (5)$$

式中,  $\Delta D_i$  为直径间隔(单位:mm),  $\rho_w$  为水汽密度,取值 1.0 g $\cdot$ m $^{-3}$ ,  $V_j$  为第  $j$  列粒子下落速度(单位:mm $\cdot$ h $^{-1}$ )。

当地面温度较低时,降雪不会融化,于是开始有积雪,当风速小于 4 m $\cdot$ s $^{-1}$ ,地面积雪不会被风吹起,有利于地面积雪。假定在上述条件下,地面积雪速率与降雪强度成正比关系,可以将人工加密观测的积雪深度进行插值为每个时刻对应的地面积雪速率  $VSD_t$ ,并与降雪粒子谱一一对应。

$$VSD_t = P_t S_t \quad (6)$$

$$P_t = \frac{\sum_{i=1}^t SD_i}{\sum_{i=1}^t S_i} \quad (7)$$

式中,  $S_t$  为  $t$  时刻降雪强度,  $P_t$  为 0— $t$  时刻雪深系数(人工加密观测的雪深与降雪量比值),  $\sum_{i=1}^t SD_i$  为 0— $t$  时刻的地面积雪深度,  $\sum_{i=1}^t S_i$  为 0— $t$  时刻的降雪量。

## 2 强降雪过程概述

利用丹江口 Thies Clima 激光雨滴谱仪连续监测到了 2010 年 12 月 14—15 日和 2012 年 1 月 20—22 日两次强降雪天气过程,分别记为“10·12”过程和“12·01”过程。“10·12”过程主要受高空低槽和地面冷锋影响,2010 年 12 月 14 日 20 时至 15 时 08 时,12 h 降雪量为 7.1 mm,达到了暴雪标准。“12·01”过程主要受中低层切变线和地面冷锋影响,2012 年 1 月 20 日 20 时至 21 日 20 时,24 h 降雪量为 4.1 mm。降雨(雪)时段、降雨(雪)量和积雪深度分别见表 1。两次过程激光雨滴谱仪测量的总降雨量与人工观测相差仅为 0.01~0.041 mm。结合地面人工加密观测结果,从图 1 这两次过程气温、地面风速和地面温度变化趋势可以看到,气温大于 0.7℃,降水相态为雨,低于 0.7℃为雨夹雪,低于 -0.5℃为纯雪。同时发现地面温度低于 0.5℃时,地面开始积雪,且这两次过程地面风速较小有利于地面积雪。

表 1 丹江口人工加密观测和雨滴谱仪探测降雨(雪)时段、降雨(雪)量和积雪深度  
Table 1 Rain (snow) stage, rainfall and snow depth between Thies Clima laser precipitation monitor (TCLPM) and artificial observation data

降雪过程	降雨时段		雨夹雪时段		纯雪时段		积雪深度 /cm	
	时段	雨量/mm	时段	雨量/mm	时段	雪量/mm		
“10·12”过程	人工	/	/	/	14 日 19:18 至 15 日 10:30	7.5	8.0	
	雨滴谱	/	/	14 日 19:00—19:04	0.025	14 日 19:05 至 15 日 13:35	7.485	/
“12·01”过程	人工	20 日 18:00—18:35	0.1	20 日 18:36—20:00	0.4	20 日 20:01 至 22 日 09:01	5.3	4.0
	雨滴谱	20 日 18:00—18:35	0.115	20 日 18:36 至 21 日 00:33	0.676	21 日 00:34 至 22 日 10:57	5.05	/

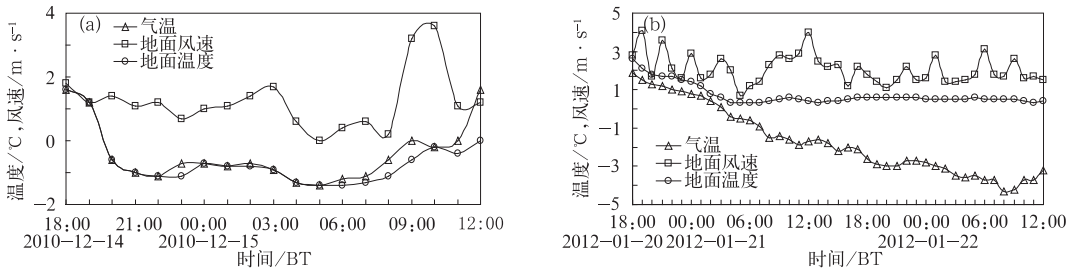


图 1 气温、地面风速与地面温度随时间演变趋势

(a) 2010 年 12 月 14 日 18 时至 15 日 12 时, (b) 2012 年 1 月 20 日 18 时至 22 日 12 时

Fig. 1 Monitor information of temperature, surface wind speed and ground temperature during the passage of two snowstorms

(a) “10·12” snowstorm passage, (b) “12·01” snowstorm passage

### 3 滴谱演变特征监测分析

#### 3.1 “10·12”过程监测分析

这次过程雨夹雪阶段仅持续 4 min, 降雨量很小, 零星量级, 仅为 0.025 mm。纯降雪时间较长持续时间 14~15 h, 属连续性降雪, 降雪强度为 0.01~3.1281 mm·h<sup>-1</sup>, 呈现多峰, 有两个主要降雪时段, 2010 年 12 月 14 日 19:25 至 15 日 00:16, 2010 年 12 月 15 日 02:27—08:20, 降雪量分别为 3.5 和 3.63 mm, 分别占整个降雪量的 46.7% 和 48.4%。

从图 2 可以看出,  $Z$ 、 $D_m$ 、 $W$  随降雪强度增强而增大。而降雪粒子数浓度  $N$  随降雪强度变化时而增大, 时而减小, 但在两个主要降雪强度时段, 降雪粒子平均数浓度维持比较高的水平, 峰值分别为 439 和 228 m<sup>-3</sup>。降雪粒子平均落速有变化, 但变化不大, 一般维持在 3.0~4.1 m·s<sup>-1</sup> 之间。从图 1a 看到冷空气有两次集中扩散南下, 导致气温下降并抬升西南暖湿气流到中高层, 由此产生的垂直方向上水汽凝结成雪花和冰晶降落下来, 产生两个主要降雪时段, 与此对应的地面积雪速率大值区也有两个主要时段, 相应的地面积雪深度有两个跃增阶段。

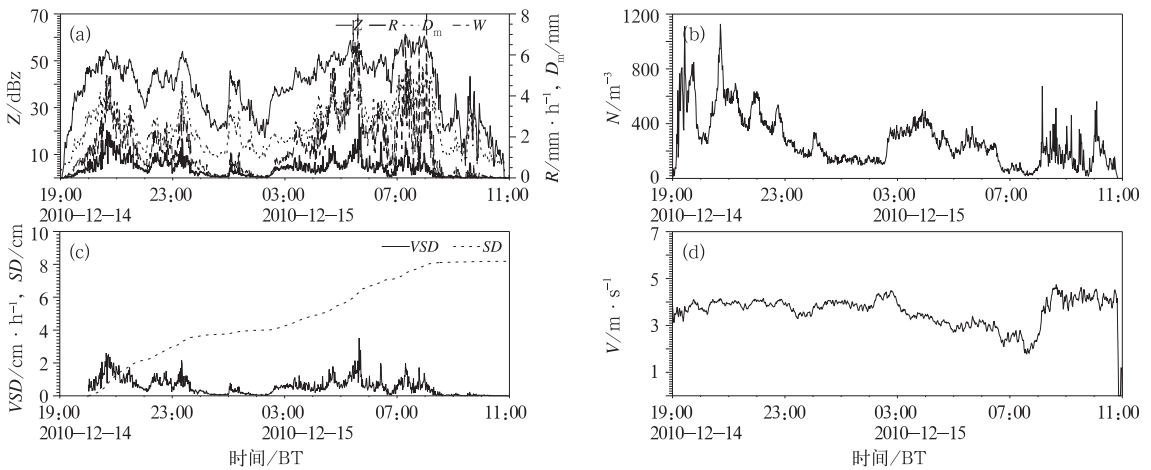


图 2 2010 年 12 月 14 日 19 时至 15 日 11 时丹江口站强降雪天气滴谱变化特征

(a) 降雨(雪)强度与  $D_m$ 、 $Z$ 、 $W$  之间关系, (b) 降雪粒子浓度 ( $N$ ),

(c) 积雪深度 ( $SD$ , 虚线) 与地面积雪速率 ( $VSD$ ) 的关系, (d) 降雪粒子平均下落速度 ( $V$ )

Fig. 2 Time-height cross section of monitor information during the passage of “10.12” snowstorm

(a) Corresponding surface rain rate ( $R$ ), reflectivity factor ( $Z$ ), the mass-weighted mean diameter ( $D_m$ ), and liquid water content ( $W$ ) estimated with disdrometer measurements, (b) snow particle concentration, (c) the rate of snow depth ( $VSD$ , solid line) and snow depth ( $SD$ , dashed line), (d) average falling speed of snow particles ( $V$ )

### 3.2 “12·01”过程监测分析

丹江口站激光雨滴谱仪监测这次过程雨夹雪阶段持续时间较长,为 357 min,有间断,降雨量很小,为 0.676 mm。纯降雪时间较长持续时间 34~35 h,属间断性降雪,有两个主要降雪时段,2012 年 1 月 21 日 05:10—18:15,2012 年 1 月 22 日 06:30—08:24,降雪强度分别为 0.013~2.1384 和 0.0158~3.621 mm·h<sup>-1</sup>,呈现多峰,降雪量分别为 3.69 和 0.95 mm,分别占整个降雪量的 73.1% 和 1.6%。从图 3 可以看出,激光雨滴谱仪监测的  $Z$ 、 $D_m$ 、 $W$ 、 $N$  随降雪强度增强而增大,且两个主要降雪强度时段,

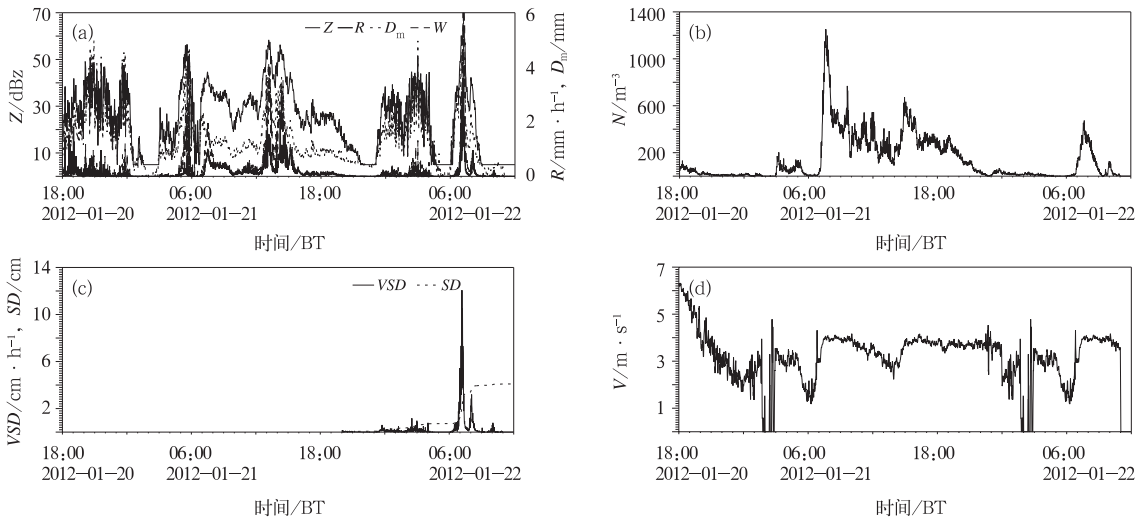


图 3 如图 2 所示,但为 2012 年 1 月 20 日 18 时至 22 日 12 时时段

Fig. 3 As in Fig. 2, but for during the passage of “12.01” snowstorm

## 4 地面积雪速率预估方法初探

### 4.1 “10·12”过程地面积雪速率预估

表 2 纯降雪阶段降雪粒子的  $D_m$ 、 $Z$ 、 $N$  以及  $W$  分别与  $VSD$  进行相关性分析,发现  $D_m$ 、 $Z$ 、 $N$ 、 $W$  均与  $VSD$  均有不同程度的正相关性, $W$  与  $VSD$  相关性更好,达到了 0.844,通过了 0.01 双侧检验。 $VSD$  与降雪强度呈正比关系,降雪强度( $R$ )与降雪粒子  $D$ 、 $Z$ 、 $N$ 、 $W$  呈正相关性,与  $N(D)D^3$  正相关性更好,这与  $W$  一样,表明  $VSD$  不仅与降雪粒子直径有关,还与粒子数浓度  $N(D)$  有关,因此选取  $W$  与  $VSD$  进行一阶拟合,得到一阶拟合关系如下:

降雪粒子平均数浓度维持比较高的水平,分别为 324 和 207 m<sup>-3</sup>。降雪粒子平均落速有变化,但变化不大,一般维持在 2.51~4.2 m·s<sup>-1</sup> 之间。从图 1b 可以看到,地面冷空气势力较强,导致气温呈现持续下降趋势。结合图 3c 还发现前一个降雪阶段地面温度较高,在 0℃ 以上,降落在地面上的雪花和冰晶很快融化,随后地面温度逐渐下降到 0℃ 附近,地面开始有积雪,可能含有一少部分湿雪阶段。与此对应的地面积雪速率大值区仅有一个主要时段,相应的地面积雪深度也仅有一个跃增阶段,为 2012 年 1 月 22 日 06:30—08:24(图 3c)。

$$VSDF_t = 0.2992W_t + 0.0761 \quad (8)$$

式中, $t$  为  $t$  时刻(间隔 1 min),式(8)的样本数为 1079,相关系数为 0.886。利用地面积雪速率  $VSDF$  即可求出  $t$  时刻积雪深度  $SDF$ 。公式如下:

$$SDF_t = \sum_{i=1}^t VSDF_i \quad (9)$$

从图 4a 可以对比看出纯降雪阶段  $VSDF$  和  $SDF$  与实测资料反演  $VSD$  及  $SD$  比较接近,有两个主要跃增阶段,与 1.3.1 节分析的两个主要降雪时段相对应,分别为 2010 年 12 月 14 日 19:25 至 15 日 00:16,2010 年 12 月 15 日 02:27—08:20。经过检验,利用式(8)计算的相对误差范围为 -1.7241~1.462 cm·h<sup>-1</sup>,平均偏差为 0.004 cm·h<sup>-1</sup>,标准差为 0.2789 cm·h<sup>-1</sup>;利用式(9)预估的  $SDF$  相对

误差范围为  $-0.0029 \sim 1.2332$  cm, 平均偏差为  $0.6714$  cm, 标准差为  $0.4211$  cm。

表 2 两次过程雨滴谱探测的几个参量与 VSD 相关系数  
Table 2 Correlation coefficients of parameters detected by TCLPM and VSD in the two processes

	$D_m$	$Z$	$N$	$W$
“10·12”过程	0.680	0.698	0.411	0.844
“12·01”过程	0.532	0.502	0.283	0.926

### 4.2 “12·01”过程地面积雪速率预估

从表 2 的 3 个阶段降雪粒子的  $D_m$ 、 $Z$ 、 $N$  以及  $W$  分别与  $VSD$  相关性进行了详细分析, 发现  $D_m$ 、 $Z$ 、 $N$ 、 $W$  均与  $VSD$  均有不同程度的正相关性,  $W$  与  $VSD$  相关性更好, 达到了  $0.926$ 。因此选取降雪粒子水含量  $W$  与  $VSD$  进行一阶拟合, 得到一阶拟合关系如下:

$$VSDF_t = 1.1071W_t + 0.0354 \quad (10)$$

式中,  $t$  为  $t$  时刻(间隔 1 min), 式(10)的样本数为 961, 相关系数为  $0.94$ , 通过了  $\alpha=0.01$  显著性水平检验。

从图 4b 可以对比看出纯降雪阶段  $VSDF$  和  $SDF$  与实测资料反演  $VSD$ 、 $SD$  比较接近, 有一个明显主要跃增阶段。经过检验, 利用式(10)计算的地面积雪速率相对误差范围为  $-2.8991 \sim 4.1266$   $\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$ , 平均偏差为  $0.007$   $\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$ , 标准差为  $0.3439$   $\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$ , 发现预估值明显高于实测值, 其原因可能是由于地面气温在  $0^\circ\text{C}$ , 地面有积雪时下的有一部分是湿雪, 雨滴谱监测有很少部分为雨, 反演的含水量  $W$  要大一些, 导致的预估值要大于实测值。利用式(9)预估的  $SDF$  相对误差范围为  $-0.1196 \sim 0.457$  cm, 平均偏差为  $0.1518$  cm, 标准差为  $0.1905$  cm。

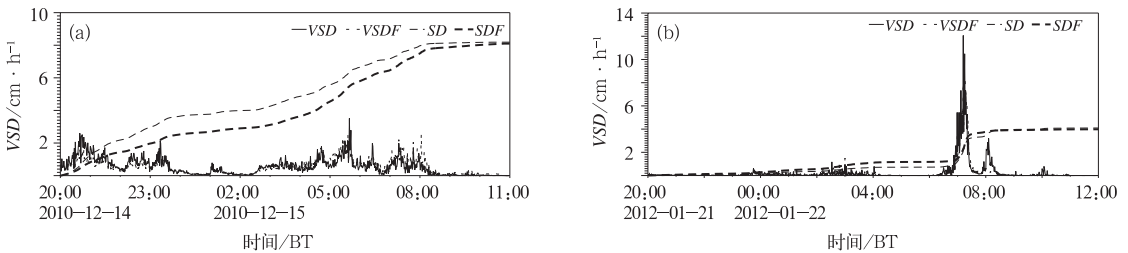


图 4 两次过程地面积雪速率和积雪深度预估值( $VSDF$ 、 $SDF$ )与实测值( $VSD$ 、 $SD$ )对比

Fig. 4 Comparison of the snow rate and snow depth on the ground between the forecasted and the measured values  
(a) “10·12” snowstorm, (b) “12·01” snowstorm

## 5 结论

利用丹江口站 Thies Clima 激光雨滴谱仪(TCLPM)和地面人工加密观测资料对丹江口这两次强降雪天气过程中的降雪粒子滴谱演变特征进行了详细的研究, 并对地面积雪速率和地面积雪深度预估方法进行了分析探讨。其主要结论如下:

(1) 激光雨滴谱仪能可自动识别降水相态, 结合地面人工加密观测结果, 气温高于  $0.7^\circ\text{C}$ , 降水相态为雨, 低于  $0.7^\circ\text{C}$  为雨夹雪, 低于  $-0.5^\circ\text{C}$  为纯雪, 同时发现地面温度低于  $0.5^\circ\text{C}$ , 地面开始有积雪, 且这两次过程地面风速比较低有利于地面积雪;

(2) 激光雨滴谱仪还可以很好地监测强降雪天气滴谱特征演变规律, 回波强度( $Z$ )、平均直径( $D_m$ )、降雪粒子水含量( $W$ )、数浓度( $N$ )随降雪强度增强而增大, 且两次过程中  $D_m$ 、 $Z$ 、 $N$ 、 $W$  均与地面积雪速率( $VSD$ )均有不同程度的正相关关系,  $W$  与  $VSD$  相关性更好, 分别达到了  $0.844$  和  $0.926$ ;

(3) 选取降雪粒子水含量( $W$ )与地面积雪速率进行一阶拟合, 得出地面积雪速率预估方程, 通过纯雪阶段地面积雪速率预估值( $VSDF$ )和地面积雪深度预估值( $SDF$ )与利用雨滴谱仪实测资料反演的  $VSD$ 、 $SD$  两者进行比较, 发现它们两者非常接近, 说明通过这种方法可以较好地预估地面积雪速率和积雪深度, 其结果可以再现地面积雪跃增的主要时段。

## 参考文献

- 蔡菊珍,何月,张小伟,等. 2010. 基于 GIS 的浙江省积雪遥感监测与评估研究. 气象,36(4):85-89.
- 陈光宇,李栋梁. 2011. 东北及邻近地区累积积雪深度的时空变化规律. 气象,37(5):513-521.
- 段丽,张琳娜,王国荣,等. 2011. 2009 年深秋北京大雪过程的成因分析. 气象,37(11):1343-1351.
- 侯瑞钦,张迎新,范俊红,等. 2011. 2009 年深秋河北省特大暴雪天气成因分析. 气象,37(11):1352-1359.
- 李德俊,唐仁茂,向玉春,等. 2012. 基于多种探测资料对武汉一次短时暴雪天气的监测分析. 高原气象,31(5):1386-1392.
- 罗俊颖,贺文彬,李金辉,等. 2012. 2003 年春季陕西省层状云降水的雨滴谱特征. 气象,38(9):1129-1134.
- 孟雪峰,孙永刚,姜艳丰. 2012. 内蒙古东北部一次致灾大到暴雪天气分析. 气象,38(7):877-883.
- 沙依然,王茂新. 2004. 气象卫星遥感资料在积雪监测中的应用. 气象,30(4):33-35.
- 苏德斌,焦热光,吕达仁. 2012. 一次带有雷电现象的冬季雪暴中尺度探测分析. 气象,38(2):204-209.
- 孙林海,宋文玲. 2001. 冬季积雪对我国夏季降水预测的评估分析. 气象,27(8):24-27.
- 孙欣,蔡芑宁,陈传雷,等. 2011. “070304”东北特大暴雪的分析. 气象,37(7):863-870.
- 吴伟,邓莲堂,王武功. 2011. “0911”华北暴雪的数值模拟及云微物理特征分析. 气象,37(8):991-998.
- 吴杨,张佳华,徐海明,等. 2007. 星反演积雪信息的研究进展. 气象,33(6):3-10.
- 谢静芳,章娜,冯瑶. 2001. 吉林省积雪深度的影响条件分析与预报. 城市气象服务科学讨论会学术论文文集,101-102.
- 姚蓉,叶成志,田莹,等. 2012. 2011 年初湖南暴雪过程的成因和数值模拟分析. 气象,38(7):848-857.
- 于晓晶,辜旭赞,李红莉. 2013. 山东半岛一次冷流暴雪过程的中尺度模拟与云微物理特征分析. 气象,39(8):955-964.
- 余政,邹伦硕,王秀明,等. 2013. 2011 年 1 月九江地区暴雪过程的流场特征及强回波成因分析. 气象,39(8):1014-1022.
- 臧海佳,周自江. 2009. 青藏高原区域性积雪增量序列及其变化特征. 气象,35(6):77-81.
- Battaglia A, Rustemeier E, Tokay A, et al. 2010. PARSIVEL snow observations: A critical assessment. J Atmos Ocean Technol,27(2):333-344.
- Chen Baojun, Wang Yuan, Ming Jie. 2012. Microphysical characteristics of the raindrop size distribution in Typhoon Morakot (2009). J Tropical Meteor,18(2):162-171.
- King B A, Winward T W, Bjorneberg D L. 2010. Laser precipitation monitor for measurement of drop size and velocity of moving spray - plate sprinklers. American Society of Agricultural and Biological Engineers,26(2):263-271.