

周黎明, 王俊, 龚佃利, 等. 2014. 2009 年初冬山东一次暴雪过程粒子谱特征分析. 气象, 40(1): 59-65.

# 2009 年初冬山东一次暴雪过程粒子谱特征分析<sup>\* 1</sup>

周黎明 王 俊 龚佃利 张洪生

山东省人民政府人工影响天气办公室, 济南 250031

**提 要:** 为了研究降雪过程中粒子微物理特征, 利用架设在济南南部山区的一台 THIES 激光降水粒子谱仪获取的 2009 年 11 月 11—12 日强降雪过程中降水粒子谱资料, 对降雪粒子微物理参量演变特征、粒子谱及速度谱分布特征进行了分析。结果表明, (1) 此次降雪天气过程中降水强度与数浓度、最大直径和雷达反射率因子间均具有一定的正相关性; 降水强度与最大直径的关系极为密切, 粒子的大小直接决定降水强度的大小。(2) 降雪过程中谱型分布以单峰型和指数型为主, 各粒径档内数浓度分布存在不均匀性, 但数浓度峰值直径主要集中在 0.5 mm 处。(3) 粒子速度谱均以单峰结构分布, 下落末速基本位于  $0.375 \sim 2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  之间, 随直径的增大几乎没有变化。

**关键词:** 暴雪, 微物理参量, 粒子谱, 速度谱

**中图分类号:** P458

**文献标志码:** A

**doi:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2014.01.007

## Characteristics of Particle Spectrum During the Snowstorm Process in Early Winter 2009 in Shandong Province

ZHOU Liming WANG Jun GONG Dianli ZHANG Hongsheng

Shandong Weather Modification Office, Jinan 250031

**Abstract:** To better study microphysical characteristics during snowfall process, drop size spectra were collected with an optical disdrometer during the snowstorm event in 11—12 November 2009 in the southern mountainous area of Jinan. The characteristics of the microphysical parameters, the drop size distribution and speed spectral distribution are investigated. It is found that: (1) during the snowstorm, precipitation intensity and number concentration, maximum diameter, and the radar reflectivity factor have positive linear correlations; the precipitation intensity and the maximum diameter has a close relationship; precipitation intensity is decided by the maximum diameter. (2) In the snow process, the spectrum-type distributions are of unimodal and index distributions, and the peak value of number concentration is focuses around 0.5 mm. The concentration distribution of each particle-size file is inhomogeneous. (3) The velocity-spectra are mainly single-peak distributions, and the terminal velocity essentially lies in the range of  $0.375 - 2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , which almost has no change with the increase of diameter.

**Key words:** snowstorm, microphysical parameter, particle spectrum, velocity spectrum

## 引 言

山东地处中纬度地区, 属于暖温带大陆性季风

气候, 冬季当青藏高原上有较深的低槽移出, 西南气流较强时, 南方气旋也会北上影响山东, 造成大风和雨雪天气。2009 年 11 月 11—12 日, 受冷空气和西南暖湿气流共同影响, 山东出现大范围暴雪天气。

\* 山东省气象局课题(2013sdqx19、2012sdqxz07 和 2012sdqx12)共同资助

2012 年 10 月 8 日收稿; 2013 年 6 月 24 日收修定稿

第一作者: 周黎明, 主要从事云物理和人工影响天气工作. Email: zlmlove@163.com

此次降雪过程波及全省大部分地区,严重积雪导致部分居民住房及蔬菜大棚等损毁,极大地影响交通运输、电力通讯和工农业生产,给人民生命财产带来巨大损失。此次暴雪天气过程范围之广、强度之大,属历史同期罕见。通过深入分析强降雪过程中粒子的微观物理特征,可以更清楚地认识降雪的发展演变过程,揭示云中降水机制,并将在提高降水预报能力和云降水物理研究等方面起到一定作用。

为研究降水的微物理特性,我国最早从 20 世纪 60 年代开始在南岳(詹丽珊等,1965)、泰山(何珍珠,1965)等地开展地面雨滴谱观测和研究;80 年代以来,利用滤纸色斑法、机载二维降水粒子探头 2D-P、GBPP-100 型地面雨滴谱仪和 DISDROMETER 测雨仪等观测手段分别在安徽(蒋年冲等,1986)、陕西(陈万奎等,1988;罗俊颀等,2012)、辽宁(陈宝君等,1998)、宁夏(牛生杰等,2002)、河南(石爱丽等,2004)、北京(刘红燕等,2006)等地对空中和地面雨滴谱进行大量观测,使得雨滴谱研究工作不断深入和发展。近年来,随着光电子技术的发展,以激光为基础的激光粒子探测系统——激光降水粒子谱仪逐渐被用于雨滴谱资料的观测中。史晋森等(2008)利用 2006 年夏季在祁连山北坡进行人工影响天气综合科学试验期间的激光雨滴谱仪观测资料,通过分析该地区夏季不同云系降水的雨滴谱特征为祁连山实施人工增雨(雪)提供了一定的科学依据。蒋年冲等(2010)利用 Parsivel 激光降水粒子测量系统获取的 2008 年 1 月 26—28 日强降雨天气过程的 2540 份资料,对不同降水类型的粒子数浓度及其谱分布、下落速度及其谱分布进行了特征分析。濮江平等(2010)利用 Parsivel 激光降水粒子谱仪 2009 年 3—6 月在南京观测获取的雨滴谱资料,分类对各次降水过程雨滴谱进行了 Gamma 分布拟合,对比分析了南京地区不同云系降水的雨滴谱分布特征和 Gamma 分布参数相关特性,讨论了“标准化”Gamma 分布参数随雨强及雷达反射率因子的变化关系。廖菲等(2011)为研究珠江三角洲地区夏季典型雷电天气系统影响下降水微物理特征,选取 2008 年两次台风登陆过程所引起的降水为研究对象,利用激光降水粒子谱测量系统获取的雨滴尺度谱和速度谱信息,对两次降水的雨滴谱特征进行了较深入分析。张昊等(2011)利用架设在庐山的 OTT-Parsivel 激光雨滴谱仪收集到的一次对流云降水雨滴谱资料,对不同海拔高度的降水微物理参量进行了比较分

析,探讨了降水微物理特征在垂直高度上的差异。Chen 等(2011)利用激光雨滴谱仪获取的 2008 年 1 月 27 日安徽一次冻雨过程资料,研究了粒子谱分布特征、Gamma 分布中各参数间的关系和雷达反射率因子与雨强之间的关系。

半个世纪以来,我国在雨滴谱特征研究方面做了大量工作,取得了一些重要成果,但针对降雪过程中粒子谱特性进行的分析还很少。本文主要利用 THIES 激光降水粒子探测系统获取得到的 2009 年 11 月 11—12 日暴雪过程中济南地区一套完整数据资料,对降雪粒子特征进行了较详细地分析,深入认识暴雪过程中降水微物理特征。

## 1 仪器与资料

降水过程中粒子谱资料由德国 THIES 激光降水粒子谱仪通过连续采样观测获取。该仪器可以监测区分下落中的毛毛雨、大雨、冰雹、雪花、雪球以及各种介于雪花和冰雹之间的降水。激光降水粒子谱仪把采样粒子的粒径和速度分别分为 22 和 20 个档,测量粒径范围为 0.16~8 mm,粒子速度范围在  $0.2\sim 20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  之间(周黎明等,2010)。

观测点位于济南南部山区——三岔村人工增雨作业点(海拔高度 318 m,地理位置  $36^{\circ}24'08''\text{ N}$ 、 $117^{\circ}09'57''\text{ E}$ )。探测仪器取样时间间隔为 1 min 一次,此次降雪过程持续时间较长,观测点处降雪从 2009 年 11 月 11 日 19:59 开始至 12 日 19:18 结束(北京时间),历时近 24 h,共获取到 1400 个连续样本资料。

## 2 天气背景

影响此次山东暴雪的天气系统为 500 hPa 西风槽、700 hPa 槽前暖切变和 850 hPa 切变线。11 日 08 时 500 hPa 不断有短波槽分裂,主槽位于新疆东部,济南位于短波槽前西南气流中;700 hPa 西风槽位于河套西部,四川—陕西—河南—山东一带西南气流建立且风速加大;850 hPa 由东北风转为偏东风。20 时,500 hPa 河套地区中支槽加深向南扩展,槽后冷平流明显;700 hPa 西南急流建立,济南此时处于急流轴右侧;850 hPa 济南为偏东风,位于东风和东南风之间的辐合区,辐合条件好;本区降雪开始。12 日 08 时 500 hPa 中支槽加强;700 hPa 槽线

东移,西南急流维持,西南暖湿气流强盛,济南处于强风速辐合区中;850 hPa 福建—安徽—山东一带东南急流建立;降雪持续并加强(图 1)。12 日 20 时,700 和 500 hPa 西风槽东移至山东中部,济南地

区降雪基本结束。这次过程由于西风槽移动缓慢,低层风速风向强辐合,导致该地区降雪持续时间长且强度大。

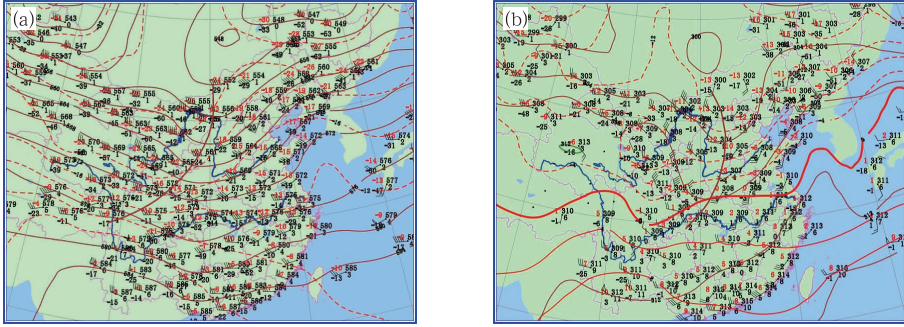


图 1 2009 年 11 月 12 日 08 时 500 和 700 hPa 高空形势

(实线:等位势高度线,单位:dagpm;虚线:等温线,单位:℃)

Fig. 1 The 500 hPa pattern (a) and 700 hPa pattern (b) at 08:00 BT 12 November 2009

(Solid lines show geopotential height line, unit: dagpm; dotted lines denote isotherm, unit: ℃)

### 3 降雪粒子谱特征分析

#### 3.1 微物理特征参量及其演变

THIES 激光降水粒子谱探测系统观测得到的是 1 min 内降落在测量面积上、直径介于  $D$  与  $D + dD$  间降水粒子个数(单位:  $\text{个} \cdot \text{min}^{-1}$ ),将其进行如下换算:

$$N = \sum_{i=1, j=1}^{22, 20} \frac{N_{ij}}{StV_j}$$

式中,  $i, j$  分别是降水粒子的粒径和速度分档,  $N_{ij}$  是直径  $i$  档上速度为  $j$  档的粒子个数,  $S$  是测量面积,  $t$  是采样时间,  $V_j$  是速度  $j$  档所对应的降水粒子下落末速度,由此得到每分钟采集到的降水粒子空间数浓度  $N$ (单位:  $\text{个} \cdot \text{m}^{-3}$ )。

降水微物理特征参量可以反映出降水的一些基本特性。图 2 给出了此次降雪过程中各微物理特征参量(粒子空间数浓度  $N$ 、最大直径  $D_{\max}$  和降水强度  $I$ )随时间的变化。可以看出,整个降雪过程分为 3 个主要时段:降水开始初期(370 min 之前)、发展旺盛时期(370~900 min)和降水减弱结束期(900 min 之后)。总体来说,粒子数浓度、最大直径和降水强度随时间演变趋势大体相同,三者峰区和谷区的出现时间有时一致,有时则不相同。从图中可以看到,例如在 550 min 处降水强度和最大直径均为

峰值,但此处数浓度峰值并不明显;在 900 min 处,降水强度和最大直径处于谷值,而此处数浓度并非谷值。降水粒子数浓度变化范围在  $13 \sim 12084 \text{ 个} \cdot \text{m}^{-3}$ ,但多数情况为  $10^3$  量级;最大直径主要在 1.5~8 mm 之间起伏,其中在个别时刻最大直径曲线出现饱和现象,这与观测仪器的测量上限有关,可能会造成某些大雪花探测不到,但由图可见,整体来说,降雪粒子基本都是小于 8 mm 的;降水强度最大值为  $6.276 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。具体而言,在降水开始初期,降水强度和数浓度瞬时变化可达 2 个量级以上;特别是在前 100 min 内,三者均表现为一致的快速增长之势,粒子数浓度从  $10^1$  迅速增长到  $10^3 \text{ 个} \cdot \text{m}^{-3}$ ,最大直径由 0.375 mm 急剧变化到 7.75 mm,降水强度由  $10^{-3} \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$  剧烈增长到  $10^0 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ;之后一段时间(100~370 min)各微物理特征参量起伏变化缓慢,降水粒子数浓度维持在  $10^3$  量级,最大直径主要在 4~6 mm 之间振荡。降水发展旺盛时期,降水强度与最大直径的变化趋势吻合,降水强度的峰区与最大直径的峰区位置相同,谷区位置也对应的一致;但与数浓度的变化趋势有时表现出不一致性,降水强度和最大直径出现峰值区时,数浓度的峰值不明显,通常数浓度的峰值区要滞后一些。590~840 min 是本次暴雪过程的主要降水时段,降水强度基本都在  $1 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$  以上起伏变化,这一时段中最大直径也一直处于大值区,而数浓度值在此期间并非本次降水的高值区。在降水减弱阶段,

降水强度和最大直径均呈逐渐减小趋势,而降水粒子数浓度则先表现为高浓度值起伏变化,后呈下降递减状态,此阶段数浓度达到整个降水过程的最大

浓度值  $10^4$  量级。由此可见,在本次暴雪过程中,降水强度与最大直径的关系极为密切,粒子的大小直接决定降水强度的大小。

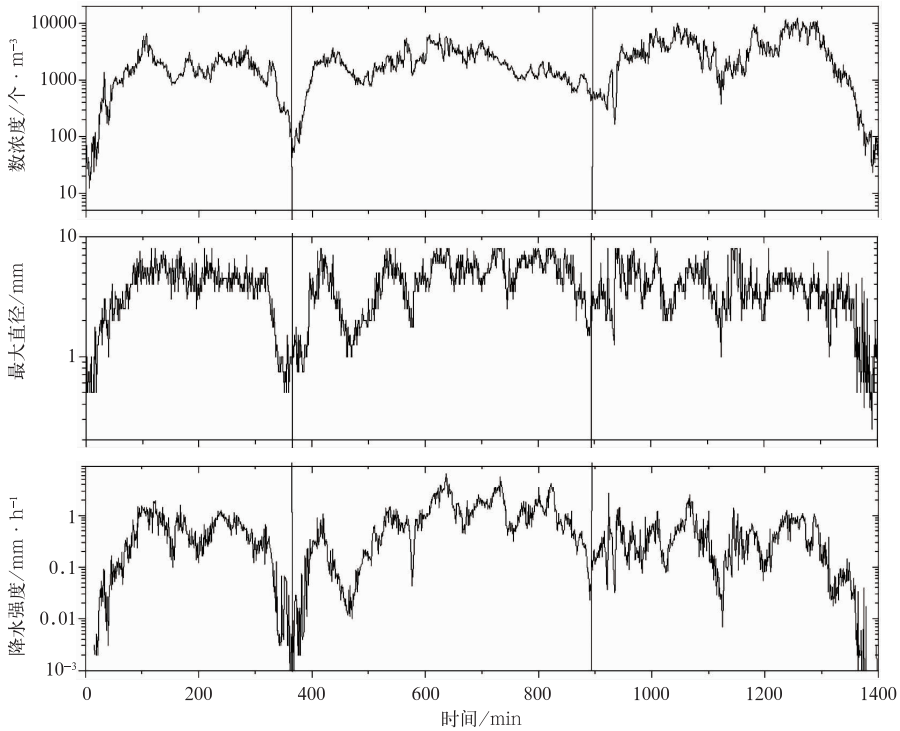


图2 2009年11月11—12日降水过程中各微物理特征参量随时间的变化

Fig. 2 Temporal evolution of microphysical parameters during the precipitation

### 3.2 谱特征参量与降雪强度的关系

为揭示降雪强度对粒子谱的影响,本文利用获取的雪滴谱资料研究了不同谱特征参量与降雪强度的关系。图3给出了降水强度  $I$  与数浓度  $N$ 、最大直径  $D_{\max}$  和雷达反射率因子  $Z$  的分布特征关系。结果显示,在对数坐标系上降水强度与各谱特征参量具有较好的线性相关性,其中降雪强度与最大直径、雷达反射率因子间的关系点分布较为集中,相关系数分别为 85.4% 和 84.8%;而数浓度与降水强度的关系点分布比较分散,相关系数仅为 67.7%,相关性稍差一些。综上所述,各谱特征参量与降水强度间均呈正相关,即都随雨强的增大而增大。

### 3.3 降雪粒子谱的时间演变特征

THIES 激光降水粒子谱仪能够获取高时空分辨率的粒子谱观测资料,通过粒子谱随时间的连续变化可以发现降雪过程中的一些微物理特征。图4给出了利用 1 min 分辨率的观测资料获得的此次暴

雪过程中雪粒子谱随时间的演变分布情况。可以看到,整个降雪过程中谱型分布以单峰型和指数型为主,各粒径档内数浓度分布存在不均匀性,但数浓度峰值直径主要集中在 0.5 mm 处。

在降水开始初期,降水粒子谱宽从 1 mm 逐渐增大到 4 mm,粒子数浓度也在不断增加,特别是直径小于 1 mm 的粒子数浓度增长速度很快,降水进行到 100 min 时小粒子数浓度达到  $10^3$  量级,此时出现本次降雪过程的第一个降水强度峰值区。之后一段时间,谱宽出现起伏变化,小粒子数浓度有所减少。

当进入降水发展旺盛阶段时,起初谱型向小粒子端偏移,峰值直径偏向 0.3 mm 附近,滴谱变窄。随着降水的发展,进入降水主要时段时,滴谱逐渐拓宽,粒径小于 1 mm 的雪粒子再次增多;同时大粒子数浓度也明显增多,特别是大于 2 mm 的雪粒子,其数浓度大部分在  $10^2$  量级。这里,大粒子的增多与粒子间聚集碰撞过冷水滴和捕获、碰并小粒子有关,而小粒子的数目增加可能是由于下落过程中冰雪晶

粒子破碎造成。

在降水减弱结束阶段,雪粒子谱峰值明显向小滴端靠拢,峰值直径由 0.5 mm 偏向到 0.25 mm,甚至更小处;谱型由单峰型转变为指数型,谱宽逐渐变窄。而直径小于 0.5 mm 的小粒子数浓度明显增多,瞬时大值区超过 2000 个 · m<sup>-3</sup>,粒径在 1 mm 以下的雪粒子占绝大多数。降水持续到 1300 min 时,谱宽明显变窄,小粒子端数浓度也急剧减少,降水趋于结束。

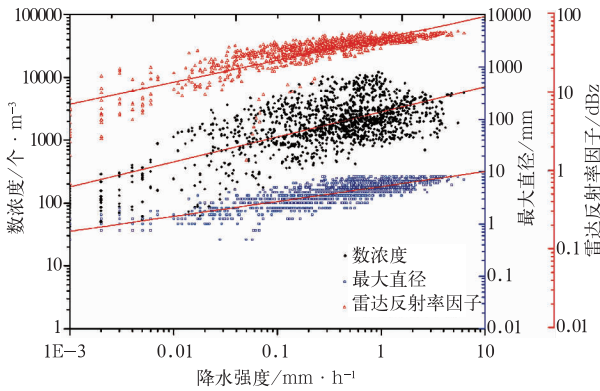


图 3 降雪过程中谱特征参量随降水强度的分布  
Fig. 3 Distribution of microphysical parameter and precipitation intensity during the snowfall

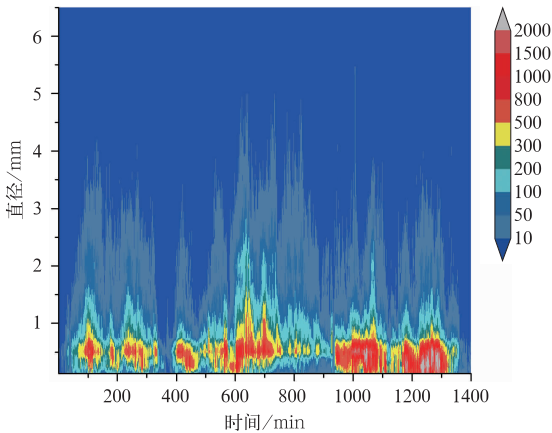


图 4 降雪过程中粒子谱随时间的演变  
Fig. 4 Time series of particle spectrum during the snowfall

### 3.4 降雪粒子速度谱分布分析

#### 3.4.1 速度谱的时间演变特征

THIES 激光降水粒子谱仪在测量降水粒子直径和数浓度分布的同时,还能探测到粒子在垂直方向的下落速度。降雪过程中粒子的下落速度不仅与

湍流、上升气流等气象因素有关,更是与粒子本身的结构、形状等分布特征密不可分。图 5 给出了此次降雪过程中粒子速度谱随时间的变化情况,结果表明,本次降雪过程中粒子速度谱都是单峰型,下落末速多数介于 0.375~2 m · s<sup>-1</sup> 之间。降水开始和发展旺盛阶段,速度谱宽变化不明显,基本在 2 m · s<sup>-1</sup> 上下浮动,数浓度峰值速度区位于 0.5~1.5 m · s<sup>-1</sup> 之间,这与蒋年冲等(2010)观测到安徽一次强降雨天气过程中雪粒子速度峰值在 1.6~1.8 m · s<sup>-1</sup> 相差不大。在降水减弱结束时,速度谱宽主要维持在 2 m · s<sup>-1</sup> 左右,但有时速度谱有所拓宽,甚至出现最大下落末速超过 5 m · s<sup>-1</sup> 的现象,这可能是由仪器本身的原因所致。观测发现,激光降水粒子谱仪在测量粒子下落速度和粒径时,个别时刻出现小粒子速度明显偏大现象,特别是降水粒子浓度较高时,这种现象出现的概率越大。例如图 6 给出了本次降雪过程进行到第 1284 min(2009 年 11 月 12 日 17:22 分)时粒子数浓度随直径和下落末速的频数分布,可以看出,粒径小于 0.5 mm 时,下落末速异常偏大,最大达 8.2 m · s<sup>-1</sup>,这与实际情况不相符。激光降水粒子谱仪是通过降水粒子穿过激光束时产生接收信号,由减小信号的持续时间测得粒子的下落速度。由于小于 0.5 mm 的粒子粒径过小,其散射吸收能力很弱,有时仪器缩短甚至忽略了激光束接收信号的时间,造成仪器识别小粒子时遇到困难,从而造成粒径较小的粒子下落速度偏大现象。此外,由于小粒子本身质量小,在下落过程中受环境气流影响很大,这可能也是引起小粒子速度偏大的一个原因。

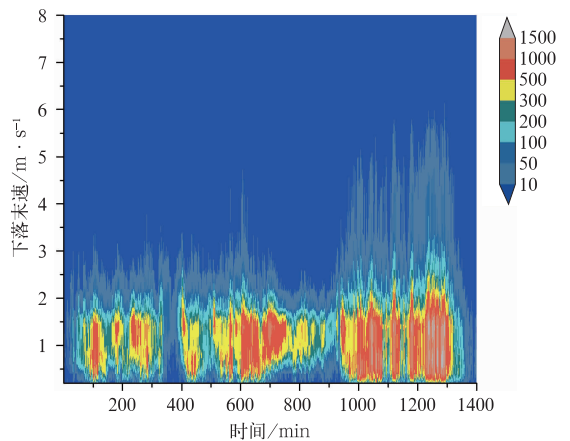


图 5 降雪粒子速度谱随时间的演变  
Fig. 5 Time series of snow particle velocity during the snowfall

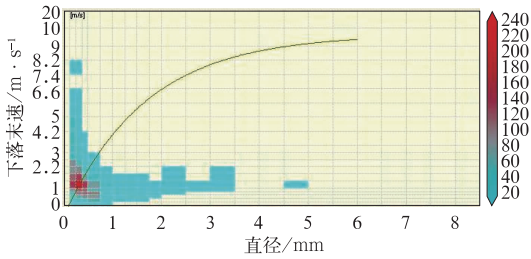


图6 2009年11月12日17:22粒子浓度随直径和下落末速的频数分布

Fig. 6 The frequency distribution of particle concentration with the diameter and terminal fall velocity at 17:22 BT 12 November 2009

### 3.4.2 速度谱拟合分布

在研究雪片末速度近似理论表达式方面, Magono(1953)认为雪片的空气动力学阻力由两部分组成:一部分由雪花周围气流造成的阻力,它正比于雪花半径的平方;另一部分由于气流通过雪花外部结构而产生的阻力,它正比于半径的立方。两者都正比于 $v^2$ ,从而导出包含两个阻力系数的末速表达式。

与试验比较,对未结霜雪花给出下落末速度公式为

$$v = 1.32 \left( \frac{10D}{0.40 + 6.3D} \right)^{1/2}$$

对结霜雪花来说,末速表达式为

$$v = 1.94 \left( \frac{10D}{0.45 + 6.0D} \right)^{1/2}$$

式中, $D$ 是降水粒子尺度,单位为mm; $v$ 是下落末速度,单位: $m \cdot s^{-1}$ 。图7是本次降雪过程中累加所有样本得到的降水粒子数浓度在不同粒径和不同下落末速度下的分布特征,图中有两条下落末速度线,实线和虚线分别是由结霜雪花和未结霜雪花末速表达式得到的曲线。可以看出,在小粒子端(粒径小于1 mm)数浓度值很高,整个降雪过程中数浓度中心在0.3~0.7 mm区间;而随着粒径的逐渐增大数浓度值趋于减小。降雪粒子的下落末速主要集中在小于 $2 m \cdot s^{-1}$ 的范围内,且基本以正态形式分布在 $1 m \cdot s^{-1}$ 落速的两侧。整体而言,下落速度随直径的增大几乎没有变化。

Nakaya等(1935)研究发现,雪花下落速度和尺度之间的关系主要取决于雪花的形状和它是否结霜。对于平板枝状、立体枝状和雪粒冰晶的速度,基本与它们的大小无关;对于各种大小的平板枝状冰晶其速度都接近于 $0.3 m \cdot s^{-1}$ ,雪粒聚集物为 $0.5$

$m \cdot s^{-1}$ ,立体枝状冰晶为 $0.57 m \cdot s^{-1}$ ,当冻滴附着在冰晶上时,下落速度增至 $1 m \cdot s^{-1}$ ,此时速度趋于随尺度而增大。

实测降雪过程中速度谱与理论曲线有较好的一致性;但在大粒子端和小粒子端出现较大偏差,粒径大于4 mm时个别出现末速偏小、而粒径小于0.5 mm时则有时出现末速远高于理论值的现象。大粒子端的测量误差可能是由粒子的重叠造成的,粒子间的垂直重叠会造成通过取样面积的时间变长,从而导致实测末速偏小。而造成小粒子端测量误差的原因在3.4.1中进行过讨论,这里不再赘述。

理论曲线只能描述单一形态雪花下落末速分布情况,而自然降雪过程中粒子形态比较复杂。本次降雪中粒子在同一直径档的实际落速分散于未结霜雪花末速曲线两侧,而与结霜雪花末速曲线偏差略大些;说明降雪过程中雪粒子以未结霜雪花为主。

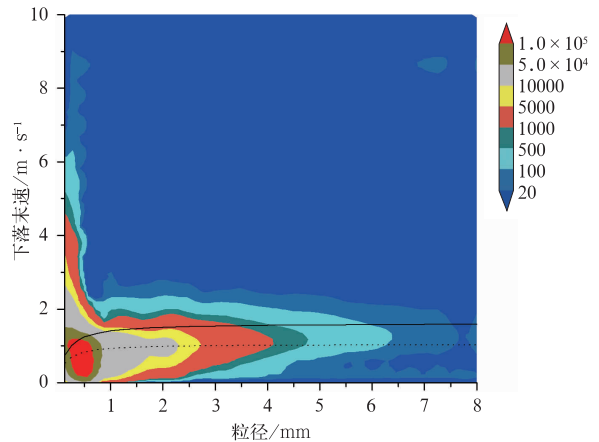


图7 降雪粒子数浓度在不同粒径和不同下落末速度下的分布

(实线和虚线分别为 Magono 提出的结霜雪花和未结霜雪花下落末速度表达式曲线)

Fig. 7 Accumulated joint size and fall speed distribution of observed snowdrops

(The solid and dashed lines respectively show the frosting snowflakes and frost snowflakes curves of the terminal fall velocity proposed by Magono)

## 4 结论与讨论

本文选取2009年初冬山东一次强降雪天气过程,利用THIES激光降水粒子谱仪采样获取的连续观测资料,分析了此次降雪过程中粒子的一些微物理特征,得出以下主要结论:

(1) 此次强降雪天气过程中粒子数浓度最大量为  $10^4$ , 但整个降水过程中多数情况在  $10^3$  量级。降水强度与数浓度、最大直径和雷达反射率因子间均具有一定的正相关性; 整体而言, 降水强度与最大直径的关系极为密切, 粒子的大小直接决定降水强度的大小。

(2) 降水初期, 粒子谱宽从 1 mm 逐渐增大到 4 mm, 直径小于 1 mm 的粒子数浓度增长速度很快; 降水旺盛阶段, 滴谱再次拓宽, 粒子数浓度(特别是粒径大于 2 mm 的雪粒子)明显增多; 进入到降水结束阶段时, 粒子谱峰值向小滴端靠拢, 谱型由单峰型变为指数型, 谱宽越来越窄。整个降雪过程中谱型分布以单峰型和指数型为主, 各粒径档内数浓度分布存在不均匀性, 但数浓度峰值直径主要集中在 0.5 mm 处。

(3) 此次降雪过程中, 粒子速度谱均为单峰型, 下落末速基本位于  $0.375 \sim 2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  之间, 速度谱宽一般在  $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  左右, 下落速度随直径的增大几乎没有变化。

由于自然降雪过程中降水粒子形态复杂多样, 而激光降水粒子谱仪无法观测到雪粒子的具体类型, 这对于研究雪晶末速度和尺度之间的关系有一定局限性。在以后的工作中, 还需要结合显微照相技术, 利用照相方式搜集和记录降雪过程中粒子的形状和结构, 对下落末速与尺度之间的关系进行更加细致、深入的分析。

## 参考文献

陈宝君, 李子华, 刘吉成, 等. 1998. 三类降水云雨滴谱分布模式. 气象学报, 56(4): 506-512.  
陈万奎, 严采繁. 1988. 雨滴谱及其特征值水平分布的个例分析. 气

象, 14(1): 8-11.  
何珍珍. 1965. 泰山一次雷雨雨滴谱观测结果. 我国云雾降水微物理特征的研究. 北京: 科学出版社, 69-71.  
蒋年冲, 卞礼智, 邢克溥. 1986. 梅雨锋暴雨的雨滴谱分析. 气象, 12(5): 6-9.  
蒋年冲, 胡雯, 邵洋, 等. 2010. 安徽大别山一次强降雨天气过程降水粒子特征分析. 气象, 36(6): 79-84.  
刘红燕, 雷恒池. 2006. 基于地面雨滴谱资料分析层状云和对流云降水的特征. 大气科学, 30(4): 693-702.  
廖菲, 邓华, 万齐林, 等. 2011. 珠江三角洲地区两次夏季典型雷电天气系统的雨滴谱特征观测研究. 高原气象, 30(3): 798-808.  
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.  
牛生杰, 安夏兰, 桑建人. 2002. 不同天气系统宁夏夏季降雨谱分布参量特征的观测研究. 高原气象, 21(1): 37-44.  
濮江平, 张伟, 姜爱军, 等. 2010. 利用激光降水粒子谱仪研究雨滴谱分布特性. 气象科学, 30(5): 701-707.  
石爱丽, 郑国光, 黄庚, 等. 2004. 2002年秋季河南省层状云降水的雨滴谱特征. 气象, 30(8): 12-17.  
史晋森, 张武, 陈添宇, 等. 2008. 2006年夏季祁连山北坡雨滴谱特征. 兰州大学学报(自然科学版), 44(4): 55-61.  
詹丽珊, 陈万奎, 黄美元. 1965. 南岳和泰山云中微结构起伏资料的初步分析. 我国云雾降水微物理特征的研究. 北京: 科学出版社, 30-40.  
张昊, 濮江平, 李靖, 等. 2011. 庐山地区不同海拔高度降水雨滴谱特征分析. 气象与减灾研究, 34(2): 43-50.  
周黎明, 王俊, 张洪生, 等. 2010. 激光雨滴谱仪与自动气象站观测雨量对比分析. 气象科技, 38(增刊): 113-117.  
Chen B J, Hu W, Pu J P. 2011. Characteristics of the raindrop size distribution for freezing precipitation observed in southern China. Journal of Geophysical Research, 116, D06201. doi: 10.1029/2010JD015305.  
Magono C. 1953. On the growth of snowflakes and graupel. Scient. Rep Yokohama Univ Ser, 1(2): 18-40.  
Nakaya U, Terada T. 1935. Simultaneous observations of the mass, falling velocity and form of individual snow crystals. J Fac Sci. Hokkaido Univ Ser II, (1): 191-201.