

# 基于粒子成像测速技术的降雪微物理特性研究\*

刘西川<sup>1)</sup> 高太长<sup>1)†</sup> 刘磊<sup>1)</sup> 翟东力<sup>2)</sup>

1)(解放军理工大学气象海洋学院, 南京 211101)

2)(南京英恩特环境技术有限公司, 南京 211101)

(2014年3月27日收到; 2014年6月3日收到修改稿)

为了获取自然环境条件下的降雪的微物理特性, 本文利用自主研发的降水微物理特征测量仪, 研究基于雪花速度的完整俘获概率和空间谱反演算法, 并通过外场观测试验研究了雪花的形状、尺度、速度、轴比、空间取向及其谱分布等微观物理特性. 结果表明, 雪花形状呈现针状、片状、粘连状、扁球状等多种形状, 雪花速度随直径的增大而略有增大, 轴比随直径的增大略有增大, 空间取向易受环境风的影响, 倾斜角的平均值在 $0.9^\circ$ 左右, 标准偏差为 $13.2^\circ$ ; 基于实测数据拟合了雪花速度和轴比随直径的变化关系, 与国外已有模型相比, 本文进一步得出了具有本地化特征的降雪微物理特性. 所得到的结论对于云降水物理学研究、天气雷达地面定标、降水导致微波衰减评估等方面的应用有着重要意义.

**关键词:** 成像测速, 自然环境, 降雪, 微物理特性

**PACS:** 92.60.Jf, 42.79.Pw, 42.30.-d

**DOI:** 10.7498/aps.63.199201

## 1 引言

降雪是冬季降水的主要类型, 实际雪花在空中下落时, 并非呈现六角形、六棱柱、针状等规则的冰晶形状, 而是经过多次碰并黏附, 呈现聚合物<sup>[1]</sup>. 尤其是雪花的组成、密度、速度和空间谱分布等呈现复杂的特性, 这些特性在云降水物理学研究<sup>[2,3]</sup>、天气雷达地面定标<sup>[4,5]</sup>、降水导致微波衰减评估<sup>[6,7]</sup>等方面有重要作用. 但是由于测量困难, 目前在这些领域中的应用往往采用经验假设, 但与实际情况并不完全符合, 造成一定的误差, 尤其受到多种复杂自然条件的影响, 因此降雪的微物理特性成为气象与相关应用领域研究的重点和难点<sup>[8-11]</sup>.

目前气象观测业务中加装了加热装置的称重式雨量计仅能够测量液态降水量和降水强度, 无法测量微观特征<sup>[12]</sup>; 基于撞击法的 Joss-Waldvogel 雨滴谱仪只能测量雨滴, 无法测量雪花<sup>[13,14]</sup>; 基于线阵扫描法的 OTT PARSIVEL 激光雨滴谱仪<sup>[15]</sup>

只能基于雨滴形状的经验轴比关系来测量降水粒子的速度, 因此给雪花的测量带来极大误差; 2D-VD<sup>[16]</sup>等可以获取降水粒子的剖面信息, 但是降水粒子穿过测量区域存在水平位移时会导致粒子图像的变形<sup>[17]</sup>; 基于直接成像法的雪花成像仪<sup>[18]</sup>可以直接获取雪花图像, 但是无法测量速度, 而且存在景深效应; 高速摄像机可以测量垂直风洞内的雨滴形状、摆动和内部环流等参数, 但是仅限于实验室内研究, 无法得到自然条件下的雪花特性<sup>[19]</sup>. 目前来看, 自然条件下雪花的微物理特性尚未得到准确揭示, 国内外多个研究机构仍在开展这方面的研究工作.

随着粒子成像测速 (PIV) 技术<sup>[20]</sup>成功应用于自然环境下降水的测量, 自主研发的自然降水成像测速系统的成功研制<sup>[21]</sup>, 实现了在野外条件下对降水微观物理特征的长期测量, 从而为揭示降雪微物理特征提供了可能. 本文利用改进型的自然降水成像测速系统, 即降水微物理特征测量仪, 在南京地区进行降雪观测, 在研究雪花速度和相应俘获概

\* 国家自然科学基金 (批准号: 41327003, 41205125) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: 2009gaotc@gmail.com

率的基础上, 分别分析了雪花的形状、轴比、速度、空间取向及其谱分布等微物理特性, 以进一步揭示相关规律.

## 2 仪器组成与测量原理

降水微物理特征测量仪 (precipitation micro-physical characteristics sensor, PMCS) 由光学单元、成像单元、采集与控制单元、数据处理单元和防护单元组成, 如图 1 所示. 其中, 光学单元为成像单元提供稳定而均匀的平行光; 成像单元将接收到的光强信号转换为数字图像信号; 采集与控制单元进行图像数据的实时采集、预处理与传输控制等; 数据处理单元进行图像数据的进一步处理、降水信息的提取和存储等, 通过终端计算机和应用软件来实现.

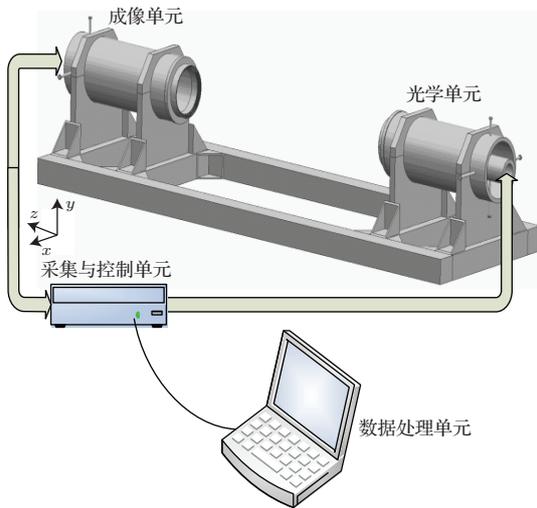


图 1 降水微物理特征测量仪的组成示意图

降水粒子在穿过采样空间时, 面阵 CCD 图像传感器以 50 帧/秒的采样速率对降水粒子进行快速扫描成像, 在光阑和快门的控制下实现单帧图像内的 2 次曝光, 2 次曝光的间隔时间为 2 ms. 在单帧图像内, 雪花完整曝光 2 次的概率与雪花的速度有关系, 在垂直方向上, 雪花的完整俘获概率为

$$\text{Prob}_{\text{vertical}} = \frac{H - D_V - V(D_{\text{eq}}) \cdot 2\text{ms}}{V(D_{\text{eq}}) \cdot 20\text{ms}}, \quad (1)$$

其中,  $H$  为采样空间的高度,  $D_V$  为雪花在垂直方向上的高度, 2 ms 为曝光间隔时间, 20 ms 为单帧曝光时间,  $V(D_{\text{eq}})$  为雪花的降落末速度,  $D_{\text{eq}}$  为雪花

的等效直径, 如图 2 所示. 干雪的速度为 [22]

$$1.5D_{\text{eq}}^{0.11} < v < 3.6D_{\text{eq}}^{0.16}. \quad (2)$$

湿雪的降落速度更快, 其速度为 [23]

$$3.5D_{\text{eq}}^{0.2} < v < 82.0D_{\text{eq}}^{0.6}. \quad (3)$$

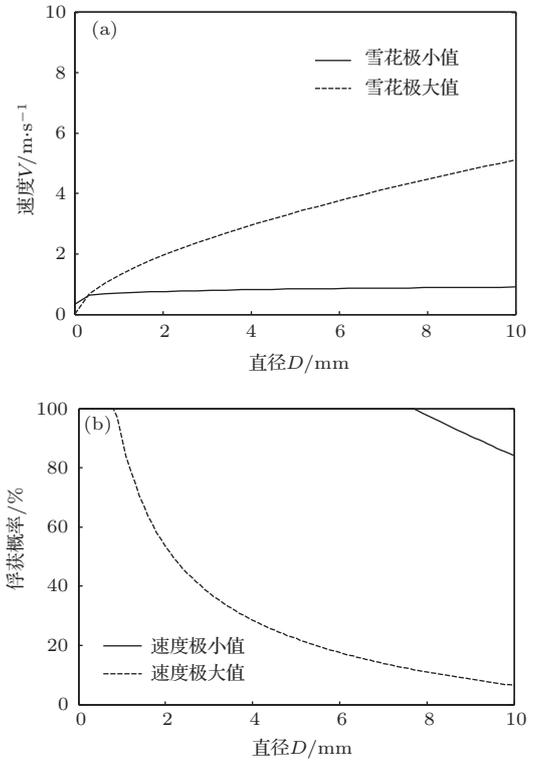


图 2 雪花的速度及相应俘获概率

由于雪花易受风速的影响, 往往存在横向运动, 因此在水平方向上完整俘获一对雪花图像也存在一定的俘获概率. 研究发现 [24], 降水粒子在风场作用下, 其水平移动速度可以与风速保持一致, 因此本文将粒子的水平速度等同于风速. 水平风导致的完整俘获概率为

$$\text{Prob}_{\text{horizontal}} = \frac{W - D_H - V_{\text{wind}} \cdot 2 \text{ms}}{V_{\text{wind}} \cdot 20 \text{ms}}, \quad (4)$$

其中,  $W$  为采样空间的宽度,  $D_H$  为粒子在水平方向上的宽度,  $V_{\text{wind}}$  为风速. 如图 3 所示, 当风速小于  $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  左右时, 俘获概率保持 100%, 即完全保证一对粒子的完整俘获; 当风速大于  $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  时, 俘获概率随风速的增大显著降低, 到风速为  $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  时, 降低为 5%—10%.

在直接采用得到雪花谱分布  $\text{Num}(D)$  的基础上, 经过俘获概率的修正即可得到真实的谱分布:

$$N(D) = \frac{\text{Num}(D)}{A_{\text{sampling}} \cdot dD \cdot \text{Prob}_{\text{vertical}} \cdot \text{Prob}_{\text{horizontal}}}, \quad (5)$$

其中,  $A_{\text{sampling}}$  为有效采样空间, 考虑到降水粒子水平尺度  $D_H$  和垂直尺度  $D_V$  的影响, 其取值为  $300 \text{ mm} \times (40 \text{ mm} - D_H) \times (30 \text{ mm} - D_V)$ ;  $dD$  为粒子的尺度宽度;  $\text{Prob}_{\text{vertical}}$  和  $\text{Prob}_{\text{horizontal}}$  分别为垂直方向和水平方向上的完整俘获概率, 在实际中是根据降水粒子的实测速度来计算的。

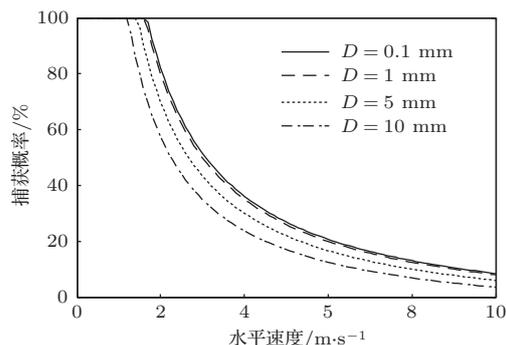


图3 雪花的横向运动对应的俘获概率

### 3 降雪微物理特征分析

在 PMCS 研制成功的基础上, 于 2014 年 2 月在南京地区进行了降雪观测实验, 试验场景如图 4 所示. 2014 年 2 月 4 号至 2 月 12 号之间, 在多次寒潮

的影响下, 南京地区出现了多次降雪. 其中, 在西南暖湿气流的影响下, 2 月 12 号 20:00 开始, 南京先后出现了雨夹雪、小雪和大雪, 当时天气状况为气温  $0^\circ\text{C} - 4^\circ\text{C}$ , 东北风 3—4 级. 通过对这一降雪过程的观测, 分别统计雪花的形状、取向、速度、尺度谱等微物理特征, 进一步得出了降雪微物理特征的相关规律.



图4 降水微物理特征测量仪的外场试验

#### 3.1 雪花的形状和取向

图 5 列出了 PMCS 采集到的典型雪花图像, 分别呈现针状、片状、粘连状、扁球状等多种形状. 由于当时环境温度介于  $-5^\circ\text{C} - 1^\circ\text{C}$  之间, 实际观测发现, 雪花在边缘可能会出现部分融化, 从而导致多个雪花在降落过程中会出现碰并和粘连<sup>[25]</sup>, 这不仅会导致降落到地面处的雪花直径增大, 而且雪

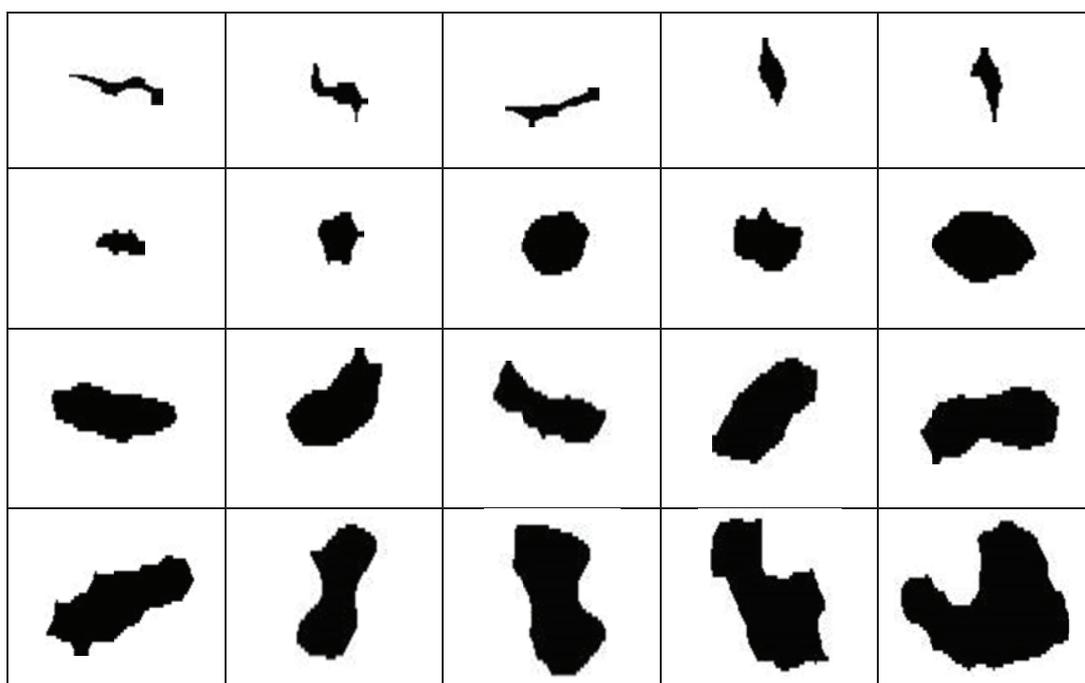


图5 雪花的典型图像

花会呈现复杂的形状. 要强调的是, 冰晶的六角形、粒子枝状、柱状、板状等理想形状大多是利用显微镜在实验室条件下拍摄得到的, PMCS 的尺度分辨率有限 (0.1 mm), 而且雪花较大, 因此雪花的实际图像并未呈现理想的冰晶形状.

由于雪花的形状复杂多变, 描述其形状的参数也有很多, 为了便于与雨滴的形状特征相比, 本文取单个雪花的最大尺度为长轴, 最小尺度为短轴, 取短轴与长轴之比为轴比, 取长轴与水平方向的夹角为倾斜角. 雪花的轴比如图 6 所示, 图中实线为利用线性拟合得到的经验关系

$$\frac{b}{a} = 0.75 + 0.013D_{eq}. \quad (6)$$

由图 6 可知, 雪花轴比的分散范围较大, 经统计发现雪花轴比的平均值为 0.78, 标准偏差为 0.16. 轴比随直径的增大略有增大, 其原因是当雪花直径较小时, 可能存在针状等小轴比的雪花, 导致小雪花的轴比分散度较大, 介于 0.2—1 之间; 而雪花直径较大时, 以雪片和雪球为主, 轴比介于 0.7—0.8 之间.

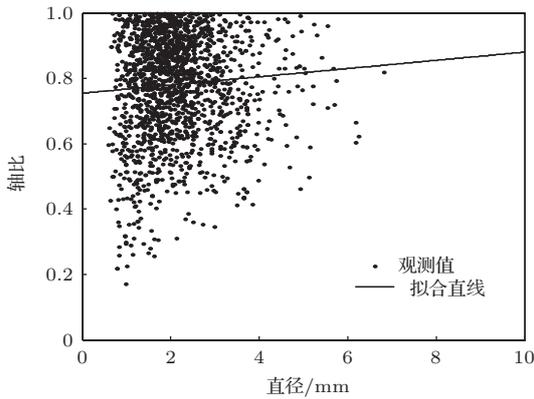


图 6 雪花的轴比分布

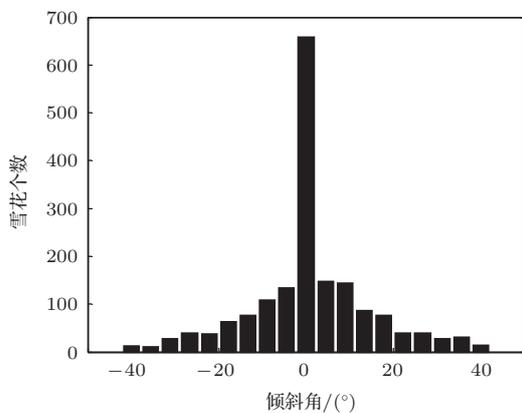


图 7 雪花的倾斜角分布

图 7 列出了雪花的倾斜角分布, 经统计得到雪花倾斜角的平均值为  $0.9^\circ$ , 标准偏差为  $13.2^\circ$ , 大于文献 [21] 中雨滴倾斜角的标准偏差. 其原因是雪花的密度较小, 即使在小风条件下也会存在倾斜, 从而导致其空间取向存在较大的变化范围.

### 3.2 雪花的速度

PMCS 通过在单帧内两次曝光得到逐个雪花前后两次曝光的图像, 根据曝光的间隔和图像的位移就可以计算雪花的下落末速度和水平运动速度, 并不存在理想或经验假设, 因此 PMCS 可以得到真实的雪花速度. 图 8 分别列出了雨夹雪、小雪和大雪的雪花速度, 其中实线分别为雨滴、湿雪和干雪的速度经验关系.

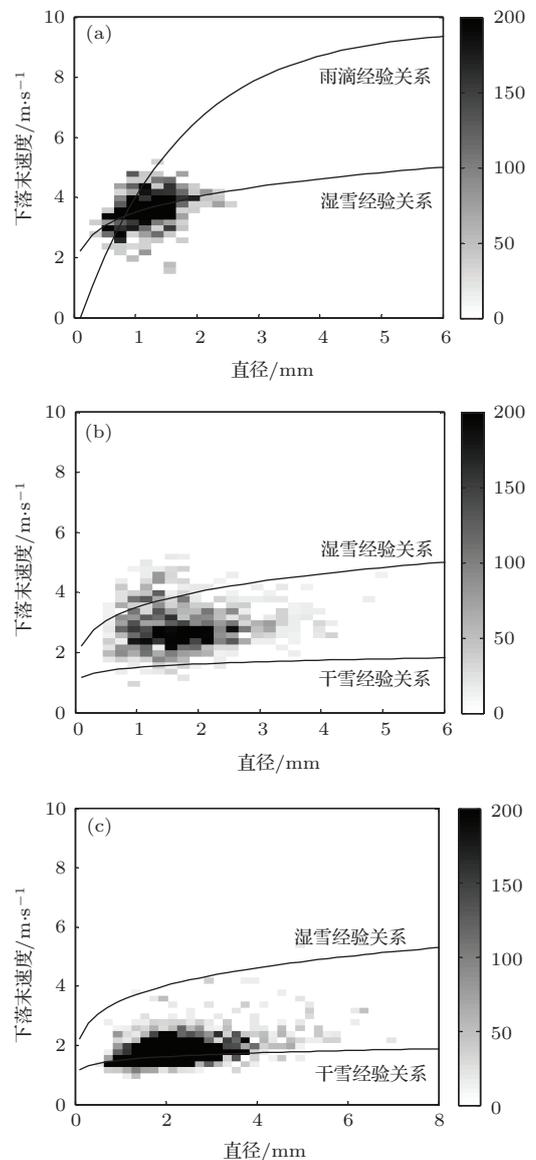


图 8 雪花的降落速度 (a) 雨夹雪; (b) 小雪; (c) 大雪

由图可知, 雨夹雪的粒子大小介于0.2—2.5 mm, 速度介于1.6—5.5 m·s<sup>-1</sup>, 粒子速度集中在湿雪和雨滴的经验关系附近; 小雪的雪花大小介于0.2—5 mm, 速度介于0.8—5.8 m·s<sup>-1</sup>, 雪花速度出现在湿雪和干雪的经验关系之间, 雪花的速度不随其尺度显著增大; 大雪的雪花大小介于0.4—8 mm, 速度介于1.4—4.5 m·s<sup>-1</sup>, 雪花速度出现在湿雪和干雪的经验关系之间, 集中出现在干雪曲线附近, 大雪花的速度明显很小, 并且不随尺度的增大而增大.

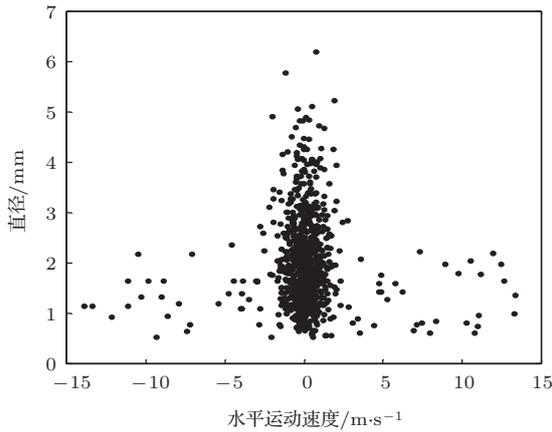


图9 雪花的水平运动速度

分别根据小雪和大雪的实测数据, 进行线性拟合, 得到湿雪和干雪的速度经验关系, 湿雪的速度与等效直径的关系为

$$v = 2.5D_{eq}^{0.2}. \tag{7}$$

干雪速度与等效直径的关系为

$$v = 1.6D_{eq}^{0.14} \tag{8}$$

图9列出了PMCS测得的雪花水平运动速度, 平均速度为0 m·s<sup>-1</sup>, 标准偏差为2.26 m·s<sup>-1</sup>; 总体上讲, 雪花的水平运动速度介于+15 m·s<sup>-1</sup>和-15 m·s<sup>-1</sup>之间, 其中大多落在± 2.5 m·s<sup>-1</sup>区间范围内. 要说明的是, 这一结论是在降雪时伴随着一定的风速条件下得出的, 当环境风速不同时, 雪花的水平运动速度的特征可能会有差异.

### 3.3 雪花的尺度谱特征

图10列出了2014年2月12日20:00—24:00期间的降雪观测记录, 分别为每分钟雪花数目、降水强度和累积降水量随时间的演变. 在此次降雪过程中, PMCS记录了116388帧图像, 其中完整的双曝光图像有5747幅, 总体的俘获概率为4.94%, 平均每分钟有24个雪花, 低于雨滴的俘获概率, 原因是雪花的速度较慢, 在单帧双曝光内可能会出现重叠. 图10(a)中每分钟雪花数目的最大值为311 min<sup>-1</sup>出现在22:16, 这与图10(b)是一致的. 要强调的是, 虽然23:00—24:00的雪花数密度较低, 但尺度较大, 因而对降水强度的贡献较大, 这一点可以由图10验证.

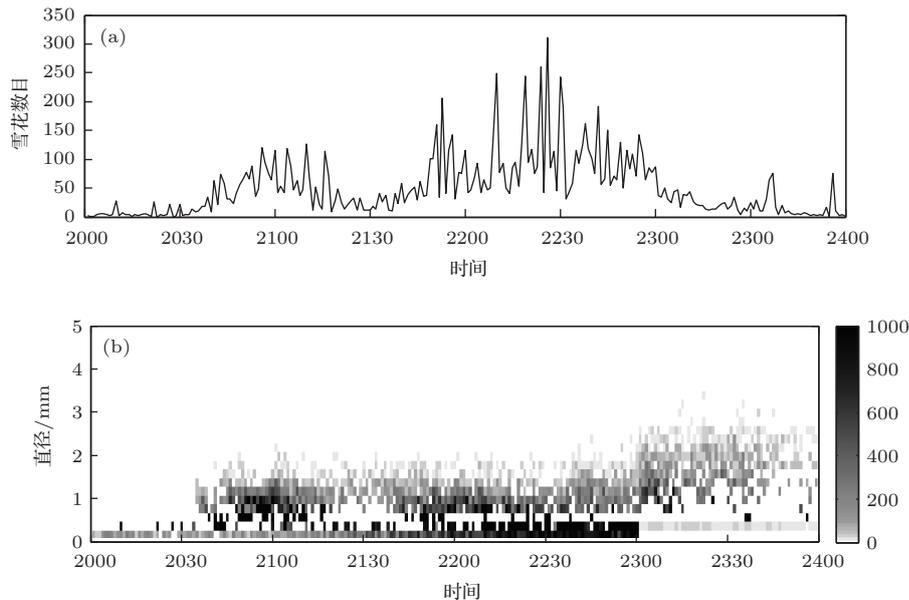


图10 降雪观测记录随时间的变化(2014年2月12日20:00—24:00) (a)雪花数目; (b)雪花谱分布

利用 Gamma 谱分布函数对实测谱分布进行拟合, 结果如图 11 所示. 拟合的 Gamma 谱分布函数为

$$N(D) = 1.864 \times 10^3 D^{1.24} \exp(-2.0D). \quad (9)$$

由图 11 可知, Gamma 函数可以精确地描述谱分布特征, 其中, PMCS 测得直径为 0.9 mm 的雪花数密度最大, 为  $283.7 \text{ m}^{-3} \cdot \text{mm}^{-1}$ , 测得雪花的最大直径为 6.9 mm, 其数密度最小, 为  $5.3 \times 10^2 \text{ m}^{-3} \cdot \text{mm}^{-1}$ .

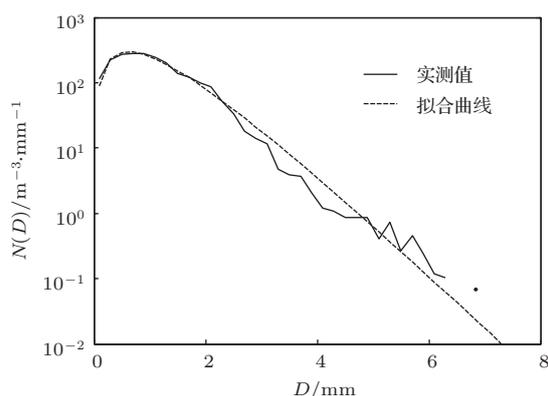


图 11 雪花的尺度谱分布及拟合 Gamma 谱分布

为了进一步分析降雪微物理变量随时间的变化特征, 将 PMCS 观测记录与 OTT 激光雨滴谱仪的同步观测记录进行对比, 基于谱分布计算降水强度、累积降水量、平均体积直径、数密度、液态水含量和雷达反射率因子, 其随时间的变化如图 12 所示. 其中, PMCS 记录的最大降水强度为  $0.761 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ , 出现在 23:03, OTT 记录的最大降水强度为  $0.826 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ , 出现在 23:15, 总体上二者的相关系数为 0.66, 标准偏差为  $0.16 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ; PMCS 测得的累积降水量为 0.607 mm, OTT 测得的累积降水量为 0.69 mm, 总体上二者的相关系数为 0.99, 标准偏差为 0.18 mm, PMCS 比 OTT 偏低 0.083 mm.

PMCS 与 OTT 测得的平均体积直径和雷达反射率因子较为接近, 而雪花的数密度和液态水含量则略有差异. 其主要原因可能是 OTT 测得的雪花偏多, 而 PMCS 对雪花俘获概率有低估, 从而导致对数密度和液态水含量的低估. 通过对实际降雪特征的观测发现, 即使在无风的时候, 雪花也并不

是垂直下落的, 而是存在一定的乱飞情况, 而有小风或者微小扰动的时候, 雪花降落就会更加复杂. 鉴于当时存在 3—4 级的风, 这在一定程度上影响了雪花的完整俘获概率, 降雪本身的不均匀性以及 PMCS 测量结果的误差, 是图 12 中个别时段内测量结果不一致的主要原因. 由于 1 min 分辨率的谱分布数据存在一定的随机性, 从而导致降水特征量的误差. 因此要提高谱分布的测量精度, 需要延长采样时间, 以时间代表性来提高空间代表性.

上述结果表明, PMCS 不仅可以同步获取雪花的形状、尺度、速度、轴比、空间取向及其谱分布等微观物理特性, 而且可以测量降水强度、累积降水量等宏观特征, 测量精度高, 环境适应性好. 目前, 同类国外仪器中, OTT 无法测量雪花形状, 而且速度测量存在较大误差; 受到风的影响和拼合效应的限制, 2DVD 无法准确获取降水粒子形状; 雪花成像仪只能获取雪花图像, 但无法测量速度. 由此可见, 与同类国外仪器相比, PMCS 拓展了自然环境条件下降水微物理特征的测量要素, 有力弥补了现有仪器的不足, 因而在实际应用中具有独特的优势.

## 4 结 论

利用自主研制的降水微物理特征测量仪, 本文研究了基于雪花速度的完整俘获概率和空间谱反演算法, 通过外场观测试验研究了雪花的形状、尺度、速度、轴比、空间取向及其谱分布等微观物理特性, 并分析了降水特征量随时间的演变特征. 实测结果表明, 雪花形状呈现针状、片状、粘连状、扁球状等多种形状, 雪花速度随直径的增大而略有增大, 轴比随直径的增大略有增大, 空间取向易受环境风的影响, 倾斜角的平均值在  $0.9^\circ$  左右, 标准偏差为  $13.2^\circ$ ; 基于实测数据拟合了雪花速度和轴比随直径的变化关系, 与国外已有模型相比, 本文进一步得出了具有本地化特征的降雪微物理特性. 所得到的结论不仅有助于加深对云降水物理学的科学认识, 而且对天气雷达地面定标、降水导致微波衰减评估等方面的应用均有着重要的意义.

感谢南京英恩特环境技术有限公司在系统硬件搭试和外场试验中的工作.

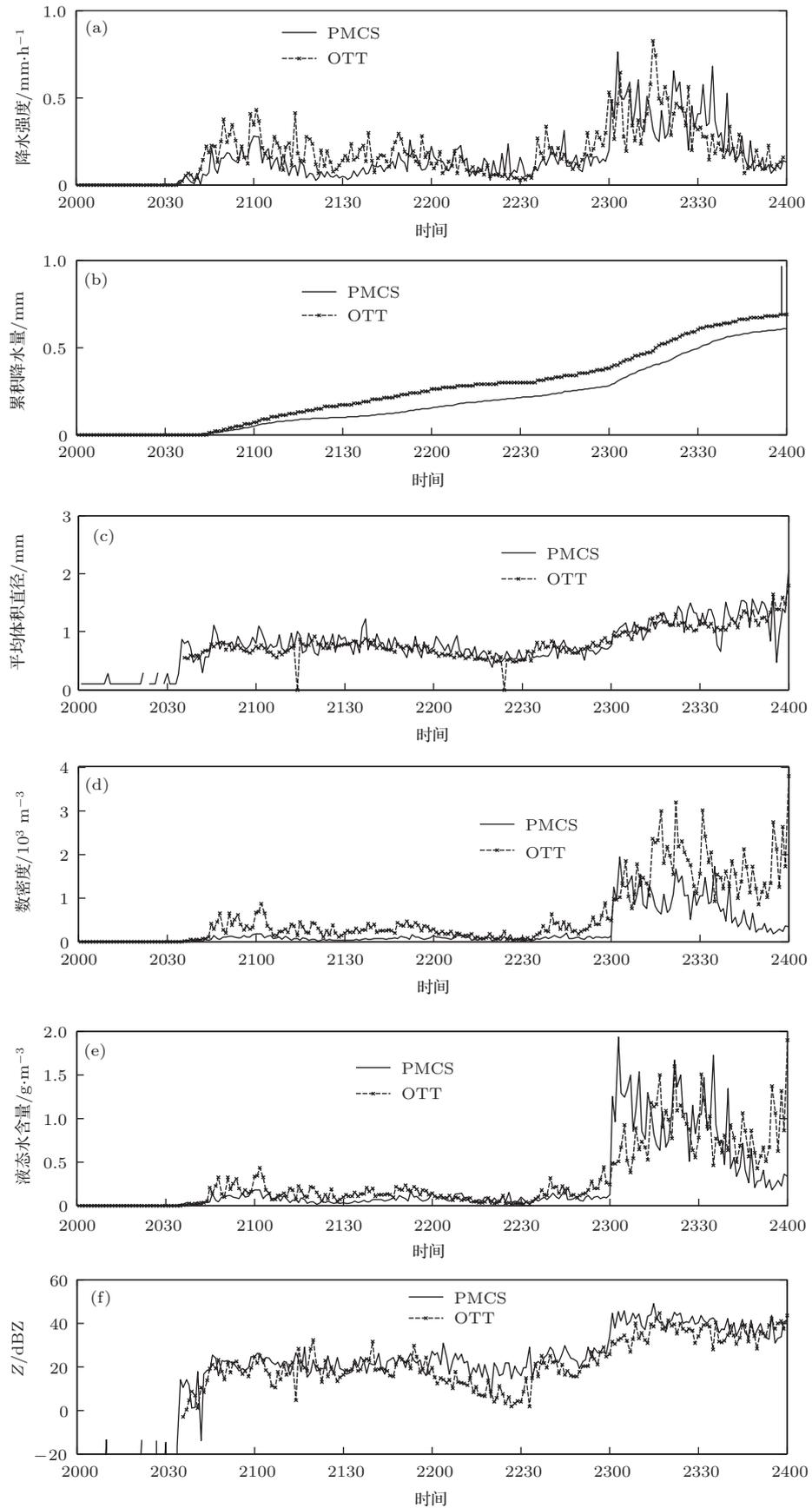


图12 降雪特征量随时间的变化(2014年2月12日20:00—24:00) (a) 降水强度; (b) 累积降水量; (c) 平均体积直径; (d) 数密度; (e) 液态水含量; (f) 雷达反射率因子

## 参考文献

- [1] Yang J, Chen B J, Yin Y 2011 *Physics of Cloud and Precipitation*, (Beijing: Meteorological Press.) 第103–109页 (in Chinese) [杨军, 陈宝君, 银燕 2011 云降水物理学 (北京: 气象出版社) 第103–109页]
- [2] Lönert U, Kneifel S, Battaglia A, Hagen M, Hirsch L, Crewell S 2011 *Bulletin of American Meteorological Society* **92** 613
- [3] Szakall M, Mitra S K, Diehl K, Borrmann S 2010 *Atmospheric research* **97** 416
- [4] Wood N B, Ecuyer T S L, Bliven F L, Stephens G L 2013 *Atmospheric Measurement Techniques* **6** 3635
- [5] Schuur T J, Ryzhkov A V, Zrnic D S, Schöhuber M 2001 *Journal of Applied Meteorology* **40** 1019
- [6] Liu X C, Gao T C, Qin J, Liu L 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 2156 (in Chinese) [刘西川, 高太长, 秦健, 刘磊 2010 物理学报 **59** 2156]
- [7] Liu X C, Liu L, Gao T C, Ren J P 2013 *Journal of Infrared and Millimeter Waves* **32** 379 (in Chinese) [刘西川, 刘磊, 高太长, 任景鹏 2013 红外与毫米波学报 **32** 379]
- [8] Zhou X, Yang X F, Yu Y, Ma S 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 149202 (in Chinese) [周旋, 杨晓峰, 李紫薇, 于暘, 马胜 2012 物理学报 **61** 149202]
- [9] Jiang S T, Gao T C, Liu X C, Liu L, Liu Z T 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 154303 (in Chinese) [姜世泰, 高太长, 刘西川, 刘磊, 刘志田 2013 物理学报 **62** 154303]
- [10] Zhou Y S, Li X F, Gao S T 2014 *Chin. Phys. B* **23** 064210
- [11] Gao X Q, Zhang W, Zeng H L 2005 *Chin. Phys.* **14** 1265
- [12] Gao T C 2012 *Meteo. and Hydro. Equip.* **23** 1 (in Chinese) [高太长 2012 气象水文装备 **23** 1]
- [13] Joss J, Waldvogel A 1967 *Pure Applied Geophysics* **68** 240
- [14] Tokay A, Kruger A, Krajewski W F 2001 *Journal of Applied Meteorology* **40** 2083
- [15] Löffler-Mang M, Joss J 2000 *Journal of atmospheric and oceanic technology* **17** 130
- [16] Gao T C, Jiang Z D, Liu X C, Su X Y, Zhai D L 2012 *Opt. Pre. Eng.* **20** 2184 (in Chinese) [高太长, 江志东, 刘西川, 苏小勇, 翟东力 2012 光学精密工程 **20** 2184]
- [17] Nespor V, Krajewski W F, Kruger A 2000 *J. Atmos. Ocean. Technol.* **17** 1483
- [18] Saylor J R, Jones B K, Bliven L F 2002 *Review of Scientific Instruments* **73** 2422
- [19] Szakall M, Diehl K, Mitra S K, Borrmann S 2009 *Journal of Atmospheric Sciences* **66** 755
- [20] Tang Y H, Xie G Y, Liu H C, Shao J B, Ma Q, Liu H P, Ning H, Yang Y, Yang C H 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 2257 (in Chinese) [唐远河, 解光勇, 刘汉臣, 邵建斌, 马琦, 刘会平, 宁辉, 杨彧, 严成海 2006 物理学报 **55** 2257]
- [21] Liu X C, Gao T C, Liu L, Zhai D L 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 029203 (in Chinese) [刘西川, 高太长, 刘磊, 翟东力 2014 物理学报 **63** 029203]
- [22] Bohm H P 1989 *Journal of the Atmospheric Sciences* **46** 2419
- [23] Schefold R, Baschek B, Wuest M, Barthazy E 2002 *Proceedings of ERAD* 84
- [24] Su X Y, Gao T C, Liu X C, Zhao S J 2013 *Journal of the Meteorological Sciences* **33** 282 (in Chinese) [苏小勇, 高太长, 刘西川, 赵世军 2013 气象科学 **33** 282]
- [25] Sheng P X, Mao J T, Li J G, Zhang A L, Sang J G, Pan N X 2003 *Atmospheric Physics* (Beijing: Beijing University Press) p304 (in Chinese) [盛裴轩, 毛节泰, 李建国, 张霭琛, 桑建国, 潘乃先 2003 大气物理学 (北京: 北京大学出版社) 第304页]

# Research on microphysical property of snowfall based on particle imaging velocimetry technology\*

Liu Xi-Chuan<sup>1)</sup> Gao Tai-Chang<sup>1)†</sup> Liu Lei<sup>1)</sup> Zhai Dong-Li<sup>2)</sup>

1) (College of Meteorology and Oceanography, PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101, China)

2) (Ying EnTe Environment Technique Co. LTD, Nanjing 211101, China)

( Received 27 March 2014; revised manuscript received 3 June 2014 )

## Abstract

In order to obtain the microphysical features of snowflakes under the natural conditions by using the self-developed sensor, precipitation microphysical characteristics, capture probability, and space distribution retrieve algorithm based on the velocity of snowflakes are discussed; and the shape, size, velocity, axial ratio, orientation and the space distribution of snowflakes are investigated by the field observation. Results show that the snowflakes may take needles, flakes, and oblate ellipsoids shapes; the falling velocity of snowflakes will increase slightly with increasing diameter, their axial ratio may increase linearly with the diameter, and their orientations are easily influenced by the wind; the canting angle may be  $0.9^\circ$  and tends to be nearly symmetric with a standard deviation around  $13.2^\circ$ . Empirical equations of velocity and diameter, and of axial ratio and diameter are fitted by nonlinear fitting and linear fitting of observed data respectively. Compared with previous model proposed by authors abroad, this paper further provides the microphysical characteristics of snowflakes with localization features. The above conclusions can be of significance for the research on cloud precipitation physics, ground validation of weather radar, assessment of precipitation-induced microwave attenuation, etc.

**Keywords:** imaging velocimetry, natural environment, snowfall, microphysical features

**PACS:** 92.60.Jf, 42.79.Pw, 42.30.-d

**DOI:** 10.7498/aps.63.199201

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 41327003, 41205125).

† Corresponding author. E-mail: [2009gaotc@gmail.com](mailto:2009gaotc@gmail.com)