

冬奥赛期及同期北京两次雨雪过程的微物理特征及其积雪效率差异

杜佳¹ 于波^{2,1} 符娇兰³ 戴翼¹ 李桑¹ 徐路扬¹ 李林⁴ 荆浩¹

1 北京市气象台, 北京 100097
2 首都关键区域气象服务保障中心, 北京 100097
3 国家气象中心, 北京 100081
4 北京市气象探测中心, 北京 100089

摘要 利用粒子谱观测、人工加密积雪观测和显微镜雪花观测, 分析冬奥赛期及同期2月北京两次雨雪过程的微物理特征及积雪效率差异发现: 粒子平均谱均呈单峰型, 峰值浓度雪花谱最大, 雨滴谱最小, 而同一降雪过程中板状或柱状雪花峰值浓度高于辐枝状雪花。粒子平均下落速度降至 $2\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以下可以作为转雪的指标, 干雪的平均粒子下落速度不足 $1\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。2020年2月13-14日雨转雪过程的环境温度相对较高, 雨夹雪阶段的雪花增长主要来源于雪花淞附; 随着低层温度降低至 $-8\sim-4^{\circ}\text{C}$, $-18\sim-12^{\circ}\text{C}$ 温度层明显增湿, 降水相态转为雪, 雪花淞附现象依旧存在, 雪花淞附和粘连聚并机制并存使得粒子最大直径达到 19mm ; 此次过程以淞附的湿雪为主, 积雪效率较小, 仅 $0.6\text{cm} \cdot \text{mm}^{-1}$ 。2022年2月13日冬奥赛期降雪过程中, 温度更低, 低层云区始终维持在 $-18\sim-12^{\circ}\text{C}$, 雪花下落速度接近未淞附雪花的经典下落速度, 整个过程均为未淞附的干雪, 凝华增长、贝吉龙过程和攀附钩连的聚并机制共同发挥作用, 粒子最大直径为 11mm ; 冬奥现场观测发现雪花形态由辐枝状变为板状或柱状, 辐枝状雪花的积雪效率高, 加密观测积雪效率最高可达 $4\text{cm} \cdot \text{mm}^{-1}$, 随着雪花形态改变, 对应的粒子数浓度极值增大而粒子谱宽明显减小, 积雪效率也急剧下降。

关键词 粒子谱, 微物理特征量, 积雪效率, 雪花形态

文章编号 中图分类号 P426 文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2407.23157

Analysis of Microphysical Characteristics and SLR of Two Rain and Snow Weather Processes in the Same Period of Winter Olympics

DU Jia¹, YU Bo^{2,1}, FU Jiaolan², DAI Yi¹, LI Sang¹, XU Luyang¹, LI Lin³, JING Hao¹

1 Beijing Weather Forecast Center, Beijing, 100097
2 Meteorological Service Center for the Core Areas of the Capital, 100097
3 National Meteorological Center, Beijing, 100081
4 Beijing Municipal Meteorological Observation Center, Beijing 100089

Abstract The microphysical characteristics and different snow liquid ratios (SLR) of rain to snow and snowfall processes during the same period of Beijing Winter Olympics were analyzed based on Parsivel data, densely artificial snow-depth measurement and microscopic snowflake shape observation. The average particle spectrum showed a unimodal pattern, with snowflake spectrum having the highest peak number concentration and raindrop spectrum having the lowest.

收稿日期 2023-11-28; 网络预出版日期

作者简介 杜佳, 女, 1988年生, 硕士, 高工, 主要从事天气预报与分析研究工作。E-mail: dj007@163.com

通讯作者 于波, 女, 1979年生, 博士, 正高工, 主要从事降雪机理和预报技术研究。E-mail: Yubo_0@126.com

资助项目 北京市自然科学基金项目 8214058、8192019, 国家重点研发计划 2018YFF0300104

Funded by Beijing Natural Science Foundation (Grants 8214058, 8192019), National Key Research and Development Program (Grant 2018YFF0300104)

37 During the same snowfall process, the peak number concentration of plate or column ice crystals
38 was higher than that of dendritic snowflakes. The average falling speed of particles falling below 2
39 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ can be used as an indicator of phase transfer. The average falling speed of dry snow
40 particles was less than $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. The ambient air temperature during the rain to snow process on
41 February 13-14, 2020 was relatively high. The growth of snowflakes in the sleet stage mainly
42 came from the riming process. With the decrease in temperature at lower levels and the significant
43 increase in humidity at $-18 \sim -12 \text{ }^\circ\text{C}$ layer, precipitation phase turned to snow and the riming
44 process still existed. Under the joint action of riming and adhesive aggregation processes, the
45 maximum crystal diameter reached 19 μm , but the snow liquid ratio was low to $0.6 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$. In
46 the snow process during the Winter Olympics, the temperature was lower with low level cloud
47 region between -18 and $-12 \text{ }^\circ\text{C}$, and the falling velocity was close to the classical curve of the
48 unrimed ice crystals, so the snowflakes were all unrimed. The combined action of sublimation,
49 Bergeron process, and hook aggregation made the particle diameter grow to 11 μm . But the
50 snowflakes' shape changing to plate or column was observed at Shougang Venue, resulting in the
51 increase of the number concentration and reduction of particle spectrum width, while the
52 corresponding SLR sharply reduced.

53 **Keywords** Particle size distribution, Microphysical characteristic quantities, SLR, Ice crystal
54 morphology

55 1 引言

56 2022年2月第24届冬季奥林匹克运动会成功举办,北京地区承办了大跳台滑雪、高山
57 滑雪室外竞赛项目。降雪天气不仅对赛事安排、交通运输等造成重大影响(于波等, 2013),
58 自然雪性质还会影响造雪管理、赛道雪面条件、选手成绩以及安全性(Almqvist et al., 2022)。

59 针对北京地区降雪天气,冬奥服务团队成员从不同角度开展了相关研究,荆浩等(2022)
60 基于云顶温度和 0°C 层高度,建立了冬季降水相态的判别指标;于波等(2016, 2019, 2022)
61 着重探讨了北京复杂地形下,不同温湿特性、不同发展高度的边界层东风对降雪的作用机制。
62 此外,积雪深度也是冬奥会赛事中特别值得关注的影响要素。在降水相态为雪的前提下,新
63 增积雪深度取决于降水量和雪密度,而雪密度与积雪效率(新增积雪深度与降雪量的比值)
64 相当(Roebber et al., 2003)。从以往的研究来看,积雪效率差异很大(Gray and Male, 1981),
65 变化范围甚至能从 $0.3 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$ 到 $10 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$ (Roebber et al., 2003)。受气候差异影响,
66 不同站点积雪效率的气候值不同(Currie, 1947; Baxter et al., 2005; Ware et al., 2006)。
67 国内积雪研究起步较晚,杨琨和薛建军(2013)指出我国冬季积雪效率大约为 $0.75 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$,
68 并随着气温上升明显减小。积雪效率的区域差异较大,山东地区多年平均积雪效率为 0.9 cm
69 $\cdot \text{mm}^{-1}$ (杨成芳和朱晓青, 2020),东北的沈阳站积雪效率的平均值为 $1.14 \text{ cm} \cdot \text{mm}^{-1}$ (崔
70 锦等, 2015),并且积雪效率具有明显的月际变化。受大气温湿垂直结构的影响,同一地区
71 不同的降雪过程以及同一降雪过程的不同地区也会带来不同的积雪效率,高温、高湿条件下,

72 积雪效率较低，低温、干燥条件下，积雪效率较高（陈双和符娇兰，2021；韩汶君等，2023），
73 近地层温度较高时的融雪作用也会影响积雪效率（杨成芳和刘畅，2019；张亚妮等，2022）。

74 根据 Roebber et al. (2003) 的研究，雪密度的不同本质源于冰晶结构的不同，它是由空
75 气和晶体所占体积的相对比例决定的，受三个因素影响：影响冰晶形状和大小云内过程、
76 冰晶下落时改变冰晶结构的云下过程以及由天气条件导致的地面压实和积雪变质作用。

77 Power et al. (1964) 曾提出，纯辐枝状雪花积雪效率最高，但变化范围很大。Roebber et al.
78 (2003) 指出由于观测难度，云微物理过程对雪密度的影响研究是非常困难的，常通过参考
79 云内或地表空气温度来确定雪密度（Judson and Doesken, 2000；杨成芳和赵宇，2021）。
80 以往对于降水粒子谱特征的研究，一方面针对于提高雷达定量降水估测的精度（王俊等，
81 2023；杨涛等，2023）、改进模式中的降水参数化方案（舒未希等，2023）等；一方面研究
82 分析降雨或降雪的微物理特征（李遥等，2019；范思睿和王维佳，2022）。贾星灿等（2018）
83 利用降水粒子谱参量拟合了不同相态降水粒子浓度相对于其直径和速度的分布，Wang et al.
84 (2022) 通过对比发现青藏高原两个典型区域的不同雨滴谱特征，Radhakrishna and Narayana
85 (2010) 认为受南亚不同季风影响下的气旋降水的雨滴谱表现出明显的季节特征。

86 精细准确的实况监测是精细化气象预报服务业务和科研的基础。虽然积雪的自动识别已
87 经取得了一些进展（黄小玉等，2019），但目前对积雪深度的观测主要依赖于人工，国内积
88 雪深度观测资料较少、观测频率较低（崔锦等，2017），因此缺乏观测资料是积雪效率研究
89 中的一个难点。基于重大活动保障和大城市气象服务的精细化需求，2017 年至今，北京市
90 气象局共布设 20 部 Parsivel 粒子谱仪，这为雨雪的微物理特征及积雪效率差异研究奠定了
91 基础；同时，北京地区在降雪过程中启动 1h 间隔或 3h 间隔的降水相态、积雪深度的加密观
92 测，为积雪效率的精细化研究提供了必要条件。

93 本文结合 Parsivel 降水粒子谱资料、冬奥现场的显微镜雪花观测和人工加密观测分析了
94 2022 年冬奥会降雪及同期 2 月雨转雪过程的微物理特征、积雪效率的差异，提升了北京地
95 区降雪微物理特征的科学认知，填补了新资料在积雪深度方面应用的研究空白。

96 2 观测仪器和数据处理

97 2.1 采样仪器和观测数据

98 采用 Parsivel 粒子谱仪对降水粒子谱进行观测，粒子谱仪利用激光系统测量降水粒子的
99 下落速度和直径，观测原理为：仪器发射波长稳定的激光带，降水粒子通过激光带时，光信

100 号会发生改变,从而使由光信号转变得到的电压产生衰减,通过测量这种衰减强度和持续时
101 间来反演粒子尺度和下落速度,得到降水粒子谱资料(李林等,2022)。北京市气象局布设
102 的粒子谱仪共有32个粒径通道和32个速度通道,实测范围分别为0.25-25mm和0.2-20m·
103 s⁻¹,可以测量逐分钟的降水粒子谱数据,每分钟得到一个对应32个粒径通道和32个速度通
104 道的粒子数分布矩阵。

105 2.2 数据预处理

106 粒子谱仪观测数据处理包括四方面的质量控制(Chen et al., 2013; Tokay et al., 2013):
107 (1)剔除最小的两个尺度档(直径 $D < 0.3\text{mm}$);(2)剔除下落速度大于 $10\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的速度
108 档;(3)剔除粒子总数 < 10 个的采样时刻;(4)如果测得的有粒子通过的最大粒径通道
109 粒子数仅为1,且次大粒径通道没有测得降水粒子,则剔除该最大粒径通道粒子。经过质量
110 控制,2020年2月13-14日雨转雪过程中共得到5998个时次的样本,其中降雨时次2021
111 个,雨夹雪时次587个,降雪时次3390个;2022年2月13日降雪过程中,针对平原地区
112 代表站观象台的降雪粒子进行分析,得到降雪时次314个,其中14时之前大尺寸辐枝状雪
113 花时次218个,14时之后小尺寸板状或柱状降雪粒子时次96个。

114 为了便于计算粒子谱特征量,将直接输出的采样时间间隔内粒子数分布矩阵转换为单位
115 体积内的粒子数浓度 $N(D_i)$ (单位: m^{-3}):

$$116 \quad N(D_i) = \sum_{j=1}^{26} \frac{n_{ij}}{A \cdot \Delta t \cdot V_j} \quad (1)$$

117 其中, n_{ij} 表示第*i*个尺度通道、第*j*个速度通道中测得的粒子个数, A 是仪器的采样面
118 积,为 0.0054m^2 (李林等,2022), Δt 为采样时间间隔(单位: s), V_j 是第*j*个速度通道
119 对应的下落速度(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)。

120 2.3 粒子谱微物理特征量计算

121 参照Boudala et al. (2014)的反演算法,降水强度 R (单位: $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$)的计算公式为:

$$122 \quad R = 3.6 \sum_{i=3}^{32} \sum_{j=1}^{26} M(D_i) V_j N(D_i, V_j) \quad (2)$$

123 其中, $N(D_i, V_j)$ 表示第*i*个直径通道、第*j*个下落速度通道的粒子数浓度, $M(D_i)$ 是直径属于
124 第*i*档的粒子质量,其中,对于降雨粒子:

$$125 \quad M(D_i) = \frac{\pi}{6} D_i^3 \rho_w \quad (3)$$

126 式中 ρ_w 是水的密度(单位: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)。

127 雪花为非球体，而且下落过程中会出现翻转，Parsivel 仪器测量时假设其为椭球体，观
 128 测得到的是雪花的最大水平维度。采用 Battaglia et al. (2010) 的轴比 (a_r) 订正法对长、短
 129 轴进行订正，从而得到相对合理的雪花直径：粒子直径 $D \leq 1\text{mm}$ 时，不存在形变，轴比 a_r
 130 为 1； $1\text{mm} < D \leq 5\text{mm}$ 时， a_r 在 0.7-1.0 之间线性变化； $D > 5\text{mm}$ 时，轴比为 0.7。因此，计
 131 算降雪强度 R 时，式 (3) 中：

$$132 \quad M(D_i) = \rho_s V \quad (4)$$

133 并且，利用粒子密度订正公式 (Boudala et al., 2014) 订正雪花密度 ρ_s ： $\rho_s = 0.17D^{-1}$ ；计算雪
 134 花体积 V 时，其长轴 A 和短轴 B 符合轴比订正关系： $B = a_r A$ ，因此 A 、 B 可以由下式得到：

$$135 \quad D = 2Aa_r^{1/3} = 2Ba_r^{-2/3} \quad (5)$$

136 同时，利用下式计算雷达反射率因子 Z (单位： $\text{mm}^6 \cdot \text{m}^{-3}$)：

$$137 \quad Z = \sum_{i=3}^{32} D_i^6 N(D_i) \quad (6)$$

138 为了比较降水相态转变过程及不同积雪效率下降水粒子的微物理特征变化，需对粒子谱
 139 的总数浓度 N_t (单位： m^{-3}) 以及各种特征尺度 (单位： mm) 进行分析，具体计算公式及简
 140 要说明见表 1 (陈聪等, 2015; 程鹏等, 2021)。

141 表 1 总数浓度及各种特征尺度物理量符号、含义及表达式

142 Table 1 Symbols, meanings and expressions for total number concentration and various
 143 characteristic diameters

物理量	符号	含义	表达式
总数浓度	N_t	单位体积内的数浓度	$N_t = \sum_{i=3}^{32} N(D_i)$
平均直径	\bar{D}	粒子直径总和除以 粒子总数	$\bar{D} = \frac{\sum_{i=3}^{32} N_i(D_i) \times D_i}{\sum_{i=3}^{32} N_i(D_i)}$
中值直径	D_{mid}	半数粒子的直径小于此值	$2 \sum_{i=3}^{D_{mid}} N_i(D_i) = \sum_{i=3}^{32} N_i(D_i)$
最大直径	D_{max}	最大降水粒子的直径	

144 降雪的粒子下落速度分布曲线随着雪花形状和凇附情况差别很大，雪花凇附是指云中雪
 145 晶与过冷水滴碰撞冻结的微物理过程 (Nakaya and Terada, 1935)，分析降雪下落速度曲线
 146 有助于云中微物理过程的研究。总体来说，粒子下落速度和粒子直径呈指数关系，即 $V = aD^b$ ，
 147 根据 Garrett and Yuter (2014) 的研究，参数 a 、 b 与降水类型、粒子形态等有关。本文采用

148 Jia et al. (2019) 文中的雨滴 (公式 7)、霰粒 (公式 8)、聚并的密淞附的辐枝状雪花 (公
149 式 9) 和未淞附的辐枝状雪花 (公式 10) 的下落速度理论公式, 以及 Rasmussen et al. (1999)
150 总结的未淞附未融化的干雪 (公式 11) 的下落速度公式:

$$151 \quad V = 1.14^{0.5} (9.65 - 10.3e^{-0.6D}) \quad (7)$$

$$152 \quad V = 1.14^{0.5} (1.3D^{0.66}) \quad (8)$$

$$153 \quad V = 1.14^{0.5} (0.79D^{0.27}) \quad (9)$$

$$154 \quad V = 1.14^{0.5} (0.8D^{0.16}) \quad (10)$$

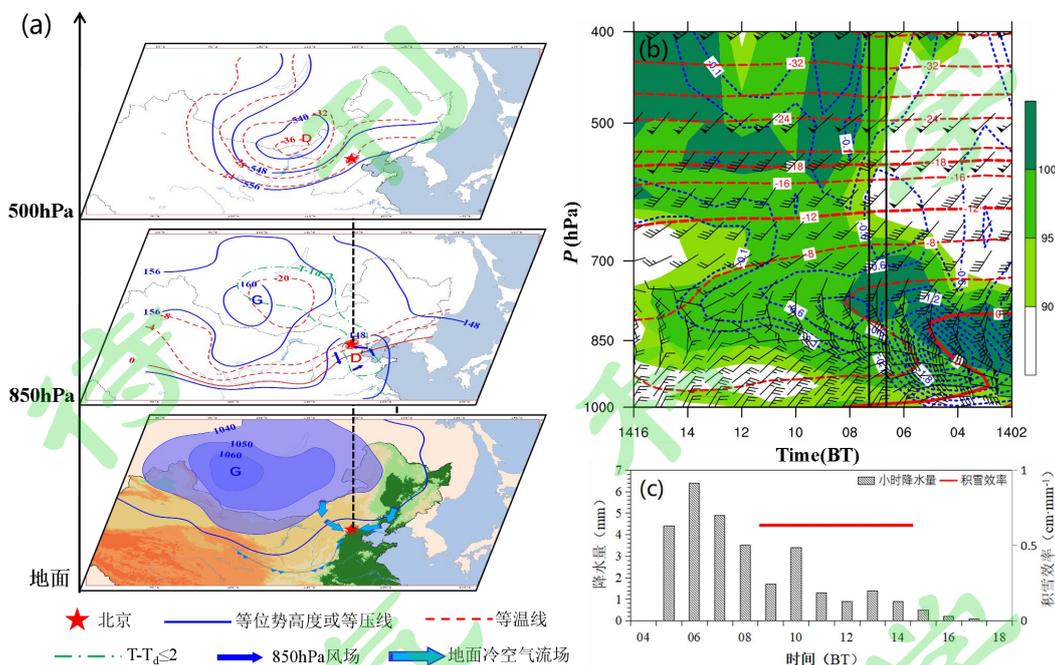
$$155 \quad V = 1.07(0.1D)^{0.2} \quad (11)$$

156 3 天气实况

157 2020 年 2 月 13-14 日 (下文简称“200214”), 北京出现中雨转中-大雪、东部暴雪的
158 天气, 此次过程是北京粒子谱仪建成以来赛期同期唯一一次雨转雪过程。在冬奥会赛期同期
159 (2 月) 出现相态转换天气已属少见, 北京 20 个国家级气象观测站中有 14 个站日降水量突
160 破赛期同期 (2 月) 降水量历史极值, 属于一次极端天气事件 (翟亮等, 2022)。目前雨夹
161 雪阶段的微物理特征讨论较少, 是因为此临界时段维持时间较短, 难于明确提取这一时段资
162 料信息造成的, 而此次过程从相态变化来看, 维持较长时间的雨夹雪时段, 有利于雨夹雪这
163 一特殊阶段的微物理特征分析, 同一个例不同降水相态均有足够的样本量, 有较高的研究价
164 值。从转雪后的积雪效率来看, 全市大部分地区不足 $1\text{cm} \cdot \text{mm}^{-1}$, 平均为 $0.6\text{cm} \cdot \text{mm}^{-1}$, 为
165 典型的积雪效率较低的过程。

166 2 月 13 日 20 时 500hPa 低槽位于河套西部, 温度槽落后于高度槽, 高空槽东移发展;
167 冷暖平流的作用同时加强, 导致强锋区位于华北北部, 呈东西走向, 并缓慢自北向南压, 北
168 京地区处于强暖平流中, 地面倒槽发展 (图略)。2 月 14 日 08 时 (图 1a), 500hPa 槽在
169 内蒙古西部发展为完整的大尺度低涡环流; 850hPa 切变线也在河北中部发展为中尺度涡旋,
170 北京位于低涡顶端偏东风和西北风的强辐合区中; 近地层冷空气受地形影响, 从两个方向影
171 响北京, 一支自北京东部回流至平原地区, 另一支从北京西部越山, 两支冷空气相遇, 形成
172 华北锢囚锋。在这个过程中, 随着锋区南压, 850hPa 温度自 0°C 以上下降到 -4°C 以下, 北京
173 地区各个站点先后出现雨转雨夹雪转雪。以北京观象台为例, 该站 04 时以后出现降雨, 06:53
174 转为雨夹雪, 07:14 转为雪; 从垂直温湿结构来看 (图 1b), 低层温度明显下降, 07 时开始,
175 低层云区温度维持在 $-8^{\circ}\text{C} \sim -4^{\circ}\text{C}$; 从降水强度和积雪效率来看 (图 1c), 上升运动中心与大

176 湿度区配合最好的时段对应逐时降水量最大，转雪后降水强度逐渐减弱，积雪效率低，维持
 177 在 $0.6\text{cm} \cdot \text{mm}^{-1}$ 。

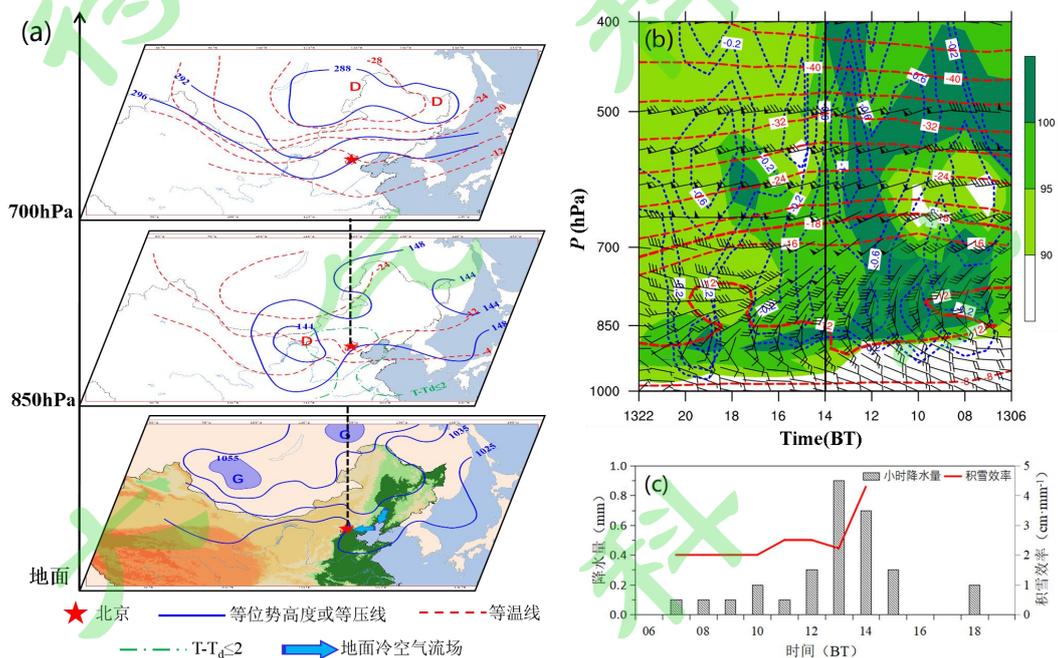


178
 179 图 1 (a) 2020 年 2 月 14 日 08 时天气形势，(b) 14 日 02 时至 16 时北京观象台 1000-400
 180 hPa 温度（红色等值线，单位： $^{\circ}\text{C}$ ）、相对湿度（阴影，单位： $\%$ ）、上升速度（蓝色虚线，
 181 单位： $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ ）和风向（风向杆，单位： $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ；黑色实线为不同降水阶段的分隔线），
 182 (c) 14 日 04 时至 18 时北京观象台逐时降水量（单位： mm ）和积雪效率（单位： $\text{cm} \cdot \text{mm}^{-1}$ ）
 183 Fig.1 (a) the synoptic diagram at 08:00 on Feb 14, 2020, (b) the temperature (red line, unit: $^{\circ}\text{C}$),
 184 relative humidity (shaded, unit: $\%$), ascending velocity (blue dotted line, unit: $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$) and wind
 185 (wind barb, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) of Guanxiangtai station in Beijing from 02:00 to 16:00 of Feb 14 (solid
 186 black lines divide the different precipitation stages), (c) hourly precipitation (unit: mm) and SLR
 187 (unit: $\text{cm} \cdot \text{mm}^{-1}$) of Guangxiangtai station in Beijing from 04:00 to 18:00 of Feb 14

188 冬奥赛期 2022 年 2 月 13 日（下文简称“220213”）北京地区出现大雪、局地暴雪。观
 189 象台自 13 日 07 时开始出现降雪，积雪深度随之增加，积雪效率相对较高，在中午前后达到
 190 最大，为 $4.29\text{cm} \cdot \text{mm}^{-1}$ ；但 13 日 14 时-20 时，观象台仍旧有 0.5mm 降雪，却再无新增积
 191 雪（图 2c）。冬奥北京赛区首钢大跳台的积雪效率也呈现类似观象台的阶段性特征。按照
 192 积雪效率突变的时间节点，将“220213”过程分为两个阶段：14 时之前为阶段 I，14 时之
 193 后为阶段 II。

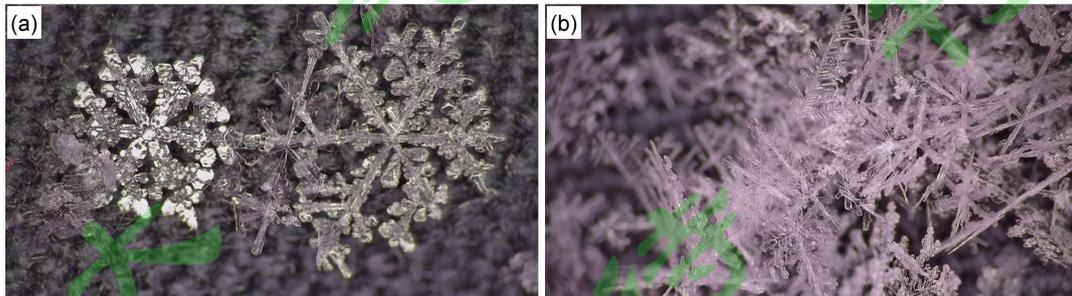
194 “220213”降雪天气过程由东移低槽前部的暖湿气流配合低层偏东风形成（图 2a）。
 195 500hPa 至 700hPa 低槽东移发展，对应地面京津冀大部处于冷高压底部，850hPa 以下均为偏
 196 东风，引导低层冷空气自东北方向进入北京。从层结条件来看（图 2b），整层温度在 0°C 以
 197 下，13 日 08 时 850hPa 附近存在明显逆温层，低层干冷空气形成明显的冷垫，槽前加强的

198 偏南气流及山前地形对偏东风的抬升作用加强了上升运动。降水强度在整层上升运动与相对
 199 湿度最强的时段达到最大,处于阶段 I (图 2c)。阶段 I,低层云区温度始终维持在-18~-12℃,
 200 该温度区内相对湿度达到 100%, 具有良好的水汽条件; 阶段 II, 该温度区间仍配合有上升
 201 运动, 但相对湿度下降。作者作为冬奥现场气象保障工作人员, 在首钢大跳台赛区利用显微
 202 镜观测到在两个阶段降雪粒子形态发生突变: 2 月 13 日 10-11 时雪花维持辐枝状(图 3a、b),
 203 尺寸较大, 接近 4mm, 由积雪加密观测得到的平均积雪效率约为 $2\text{cm} \cdot \text{mm}^{-1}$, 13:30 以后,
 204 雪花形态转为板状或柱状(图 3c、d), 此时由于积雪效率太低, 积雪观测又以厘米为单位,
 205 14 时以后几乎观测不到新增积雪。

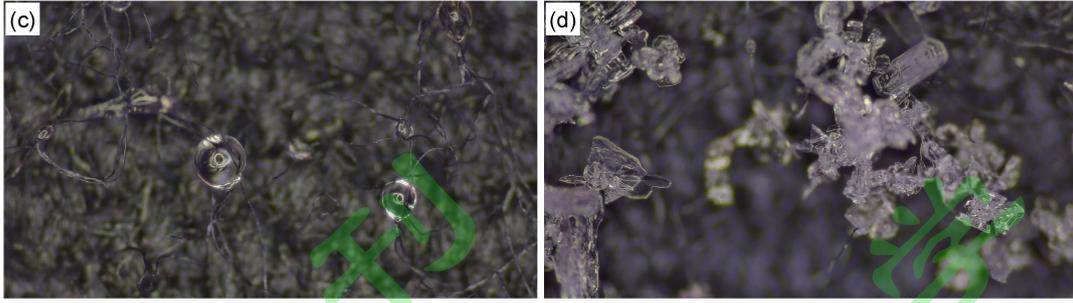


206
 207 图 2 同图 1, 但为 2022 年 2 月 13 日 08 时 (a), 13 日 06 时至 22 时 (b) 和 13 日 06 时
 208 至 19 时 (c)

209 Fig.2 Same as Fig. 1, but for 08:00 of Feb 13, 2022 (a), 06:00 to 22:00 of Feb 13 (b), and 06:00
 210 to 19:00 of Feb 13 (c)



211



212
213 图3 2022年2月13日10:30 (a)、11:07 (b)、13:33 (c)、13:37 (d)首钢大跳台现场
214 显微镜雪花观测(注:图3c环状的粒子状态是由于板状雪花尺寸太小,快速融化造成的)

215 Fig.3 10:30 (a), 11:07 (b), 13:33 (c), and 13:37 (d) on Feb 13, 2022, the observation of
216 snowflakes at Shougang Venue under a microscope (note: the circular particle in Fig. 3c is caused
217 by the rapid melting of plate snowflakes because of their small sizes)

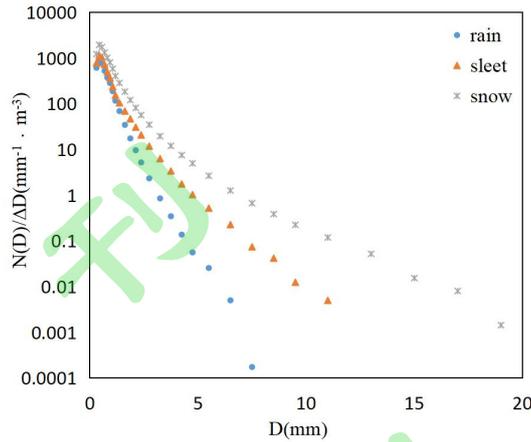
218 两次过程均是在低槽东移发展过程中引导冷空气南下形成的,低层均受到偏东风和地形
219 影响,但冷空气路径及温度垂直分布有较大差异。“200214”过程冷空气从两个方向共同影
220 响北京,低层出现大幅降温,但温度相对较高,850hPa以下处于 $-8^{\circ}\text{C}\sim 0^{\circ}\text{C}$;“220213”过
221 程冷空气以偏东路径影响北京,整层温度较低,维持在 -8°C 以下。考虑到极端性以及相态、
222 雪花形态和积雪效率的多样性,对以上两次典型过程中降水粒子的微物理特征和形成机理进
223 行分析总结。

224 4 冬奥赛期同期雨转雪过程的微物理特征分析

225 基于人工观测将“200214”过程按照相态转换时间分为降雨阶段、雨夹雪阶段和降雪阶
226 段,利用粒子谱数据分析平均谱并计算微物理特征量。

227 4.1 平均谱分布

228 利用平均粒子谱分析降水粒子的分布情况。值得注意的是,降雨阶段的最大粒子直径达
229 到了 9.5mm ,超过已有研究中降雨粒子直径的上限(8mm) (Beard et al., 1986),这是由
230 于人工监测对相态转换时间的察觉具有短时滞后造成的。因此,粒子谱特征的客观化应用也
231 有助于弥补人工监测的不足。对人工监测中降雨阶段出现粒子直径大于 8mm 的时刻进行修
232 正后,结果表明(图4):降雨、雨夹雪和降雪三种降水相态下平均谱均呈单峰型,且峰值
233 直径均为 0.437mm 。但从峰值浓度和最大粒子直径来看,雪花谱最高(峰值浓度 1939.01mm^{-1}
234 $\cdot \text{m}^{-3}$,最大粒子直径 19mm),雨夹雪粒子谱次之(峰值浓度 $1138.22\text{mm}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$,最大粒子
235 直径 11mm),雨滴谱最小(峰值浓度 $884.44\text{mm}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$,最大粒子直径 7.5mm)。Cha and Yum
236 (2021)、李慧等(2021)在对比呼和浩特、韩国地区的降雨和降雪的粒子谱特征中也得到
237 了同样的结论。



238
239 图4 “200214”过程中不同降水相态下的平均粒子谱（●代表降雨，▲代表雨夹雪，*代表雪）
240 Fig.4 Average particle spectra under different precipitation phases during process "200214" (●
241 represents rainfall, ▲ represents sleet, * represents snow)

242 4.2 不同相态对应的粒子特征

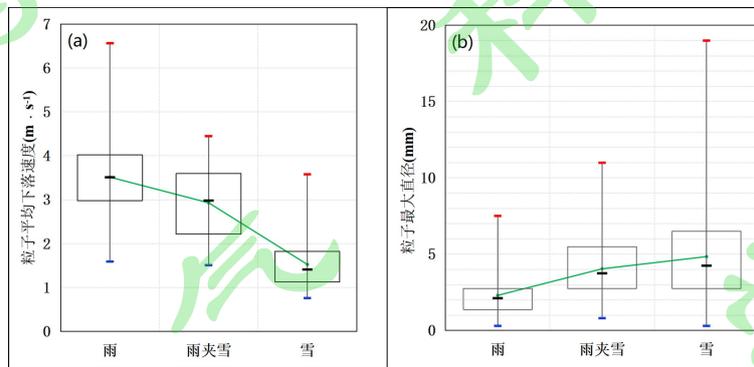
243 降水过程的微物理量能够反映降水的粒子特性和变化特征，表2为此次过程降雨、雨夹
244 雪和降雪阶段的降水强度（ R ）、总数浓度（ N_t ）、粒子平均下落速度（ \bar{V} ）以及3种尺度
245 参数（平均直径 \bar{D} 、中值直径 D_{mid} 以及最大直径 D_{max} ）。可以发现，雨夹雪阶段得到的粒
246 子反演降水强度最大，总数浓度、平均直径、最大直径都随着雨、雨夹雪向雪的转换而逐渐
247 增大，其中雨夹雪粒子的总数浓度较降雨阶段增加38.5%，降雪的粒子数浓度约为降雨的
248 2.7倍。虽然平均直径也表现出随相态转雪增大的特征，但相差并不大，在同一过程中雨雪
249 平均粒子直径相差不足0.2mm，降雨到降雪平均最大直径则增加超过1倍，从2.30mm增加
250 到4.84mm。粒子平均下落速度则呈现相反的特征，降雨为最大，降雪最小，降雪的粒子平
251 均下落速度明显小于降雨，不足降雨的1/2。中值直径来看三种降水相态非常接近。

252 表2 “200214”过程不同降水相态阶段对应的平均微物理特征量值
253 Table 2 The average microphysical characteristic values corresponding to different precipitation
254 phases in process "200214"

降水相态	R	N_t	\bar{D}	D_{mid}	D_{max}	\bar{V}
雨	3.10	502.48	0.80	0.69	2.30	3.51
雨夹雪	6.20	696.05	0.83	0.64	4.03	2.93
雪	0.77	1351.00	0.93	0.67	4.84	1.53

255 由前文分析，“200214”雨转雪过程中对相态变化指示意义最好的微物理特征量是粒子
256 平均下落速度和最大直径，因此利用箱线图（图5）分析这两个特征量的分布特征：雨滴的
257 粒子平均下落速度离散度最大，最大 $6.6\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，最小 $1.6\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，多集中于 $3\text{-}4\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ；雨夹

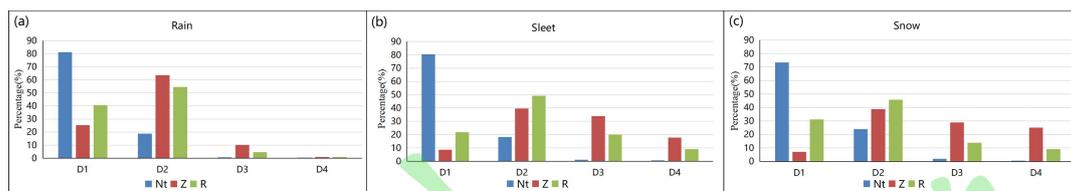
258 雪的粒子平均下落速度离散度较小，最大 $4.5\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，最小值与降雨的最小值接近，为 1.5m
 259 $\cdot \text{s}^{-1}$ ，多集中在 $2.2\text{-}3.6\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 之间；雪花的粒子平均下落速度谱宽接近雨夹雪，但分布更为
 260 集中且值明显小于雨夹雪，最大为 $3.6\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，最小 $0.8\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，多集中于 $1.1\text{-}1.8\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。从
 261 粒子最大直径来看，雨夹雪和雪明显大于降雨，而雨夹雪和雪的 25%分位数和中位数都很
 262 接近，但是降雪阶段的平均值、75%分位数以及最大值均高于雨夹雪阶段，并且降雪阶段最
 263 大直径的离散度明显增大，最大达到 19mm 。综上所述，粒子平均下落速度降至 $2\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以
 264 下可以作为转雪的参考指标，最大粒子直径大于 8mm 则可以作为降雨开始转为雨夹雪或雪
 265 的参考指标。



266
 267 图5 “200214”过程中不同降水相态下的(a)粒子平均下落速度 \bar{v} (单位： $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)和(b)
 268 最大直径 D_{max} (单位： mm)箱线图(红色和蓝色短线分别代表最大、最小值，箱体上下边
 269 缘为75%和25%分位数，黑色短线为中位数，绿色实线连接平均值)

270 Fig.5 Boxplot (the red and blue short lines represent the maximum and minimum values,
 271 respectively; the upper and lower edges of the box are 75 % and 25 % quantiles; the black short
 272 line is the median; the green solid line connects the average values) of (a) average particle falling
 273 velocity \bar{v} (unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) and (b) maximum particle diameter D_{max} (unit: mm) under different
 274 precipitation phases during process "200214"

275 为考察不同尺度的降水粒子对不同微物理参量的贡献，将降雨和降雪粒子按直径大小划
 276 分为四档(李慧等, 2021)： $0.31\text{mm} \leq D_1 \leq 0.94\text{mm}$ ， $0.94\text{mm} < D_2 \leq 2.75\text{mm}$ ， $2.75\text{mm} < D_3$
 277 $\leq 4.75\text{mm}$ 以及 $D_4 > 4.75\text{mm}$ 。图6为降雨、雨夹雪和降雪阶段各尺度档粒子对总数浓度 N_T 、
 278 反射率因子 Z 以及降水强度 R 的贡献。可以看出，三个阶段的粒子数浓度都主要来源于 1mm
 279 以下的粒子。在降雨阶段， 3mm 以上(D_3 和 D_4)的大粒子对三个变量的贡献很小，不足或
 280 接近10%， 5mm 以上(D_4)粒子对各个量的贡献几乎可以忽略。但在雨夹雪和降雪阶段，
 281 3mm 以上的粒子对 Z 的贡献分别占51.7%和54.0%，对 R 的贡献分别为29.0%和22.9%。就
 282 反射率因子 Z 而言，雨夹雪和降雪阶段大粒子的贡献相当；而对降水强度 R 而言，大粒子
 283 贡献最大的阶段为雨夹雪。



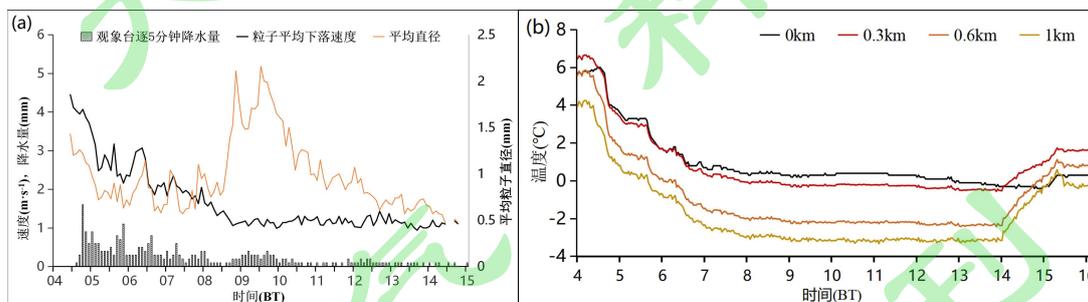
284

285 图6 “200214”过程中降雨(a)、雨夹雪(b)和降雪(c)阶段不同尺度粒子对总数浓度
286 N_t 、反射率因子 Z 以及降水强度 R 的贡献(单位: %)

287 Fig.6 The contribution of particles of different scales to total number concentration N_t ,
288 reflectivity factor Z , and precipitation intensity R during the rainfall (a), sleet (b) and snowfall (c)
289 stages of process "200214" (unit: %)

290 分析降水强度和各个微物理特征量的关系(图略),发现在降雨和降雪阶段内,降水强度
291 与粒子平均直径有较好的对应关系。降雨及雨雪转换阶段,结合云雷达和微波辐射计分析
292 (图略)表明,云层较低,云内温度呈波动式下降,随着低层温度的下降,粒子平均下落速度
293 呈波动式下降,最终转雪后稳定在 $1\sim 1.2\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。图7显示在降雨和雨雪转换阶段,低层
294 1km以下温度分别在05:00、05:50及06:30前后明显降低,对应粒子平均直径的增加,粒子
295 平均下落速度的增大和雨强的增大,云雷达的反射率因子和含水量也随之出现峰值。杜佳等
296 (2019)对于北京初春一次极端雨雪的粒子谱分析中也发现类似的特征。结合图1b发现,
297 这一时段是锋区过境的阶段(等温线密集带过境),表现为1km以下温度的快速下降,强
298 锋区带来上升运动增强。此时,粒子平均直径增大、粒子平均下落速度增强,即雨滴增大,
299 造成降水强度增大。

300



301 图7 (a)“200214”过程观象台逐5分钟降水量(单位: mm)、粒子平均下落速度 \bar{v} (单
302 位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)及平均直径 \bar{D} (单位: mm), (b)观象台微波辐射计观测0km、0.3km、0.6km
303 和1km高度温度(单位: $^{\circ}\text{C}$)时序图

304 Fig.7 (a) The 5-minute precipitation (unit: mm), average particle falling velocity (unit: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$),
305 and average particle diameter (unit: mm) of process "200214" at Guanxiangtai station (b) Time
306 series of temperature (unit: $^{\circ}\text{C}$) at altitudes of 0km, 0.3 km, 0.6 km, and 1 km observed by
307 microwave radiometer at Guanxiangtai station

308 为区分降雨和降雪的微物理特征,挑选在两个阶段中均出现相同小时降水强度的门头沟
309 站进行进一步分析。根据自动站观测,门头沟站在2月14日03-04时出现 $2.8\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 的降

310 雨，在 08-09 时出现 $2.8\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的降雪，对比这两个时段的微物理特征量平均值（表 3）发
 311 现：相同降水强度下，平均粒子直径、总数浓度非常接近，但降雪的最大粒子直径明显高于
 312 降雨，同样表征大粒子对降雪的贡献更大。从表中可以看出，相同降水强度下不同相态的降
 313 水粒子计算得到的降水强度 R 却有明显差异，这也是由降雪阶段大粒子带来的影响。

314 表 3 “200214” 过程不同降水相态下降水强度相同时对应的平均微物理特征量值
 315 Table 3 Microphysical characteristic values corresponding to the same precipitation intensity
 316 under different precipitation phases during process "200214"

站名	相态	R	\bar{D}	N_t	D_{max}
门头沟	雨	2.88	0.87	213.72	2.40
门头沟	雪	3.69	0.83	196.09	4.42

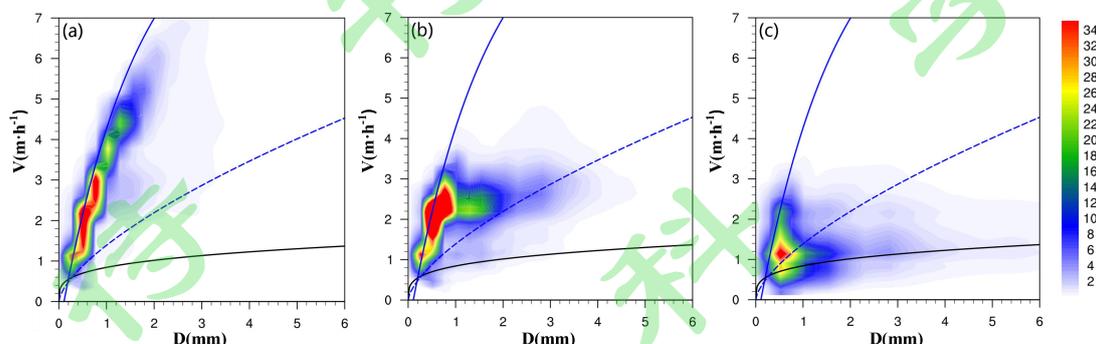
317 实际状况下，降水粒子下落速度除了与粒子大小、形状有关，还受风、粒子间相互作用
 318 等的影响，导致粒子下落速度偏离理论下落速度。以往对液态降水的研究发现，雨滴的实际
 319 下落速度分布于雨滴的理论速度曲线两侧（Niu et al., 2010），粒子下落速度理论值常常决
 320 定了粒子下落速度的平均值，而其它因子还会影响粒子下落速度的扰动量。图 8 为“200214”
 321 过程中不同降水阶段粒子数浓度相对于粒子下落速度和直径的分布特征，其中：

322 （1）降雨阶段（图 8a），粒子数浓度中心分布在雨滴的下落末速度曲线两侧，数浓度
 323 极值区下落速度略小于速度曲线，滴谱较窄。

324 （2）雨夹雪阶段（图 8b），数浓度极值区在不同粒径范围表现出不同特征，小于 1mm
 325 的小粒子峰值与降雨阶段非常接近，1~5mm 粒子的峰值则接近霰粒的经验曲线。也就是说，
 326 此次过程中雨夹雪阶段的雪花增长主要来源于雪花淞附。结合云雷达（图略）及垂直温湿结
 327 构变化（图 1b）发现，雨夹雪阶段底层云区的环境温度为 $-8\sim-4^\circ\text{C}$ ，这为过冷水滴的存在提
 328 供空间。而这种冰相粒子与过冷水滴共存的状态，有利于发生雪花淞附（Fukuta and
 329 Takahashi, 1999）。

330 （3）降雪阶段，数浓度极值区接近聚并的密淞附的辐枝状雪花（图 8c）的速度曲线，
 331 说明雪花淞附现象依旧存在。已有研究发现（Libbrecht, 2006）， $-18^\circ\text{C}\sim-12^\circ\text{C}$ 对辐枝状雪
 332 花的形成至关重要。“200214”过程随着低层温度降低和高层增湿（图 1b），在降雪阶段
 333 形成高层 $-18^\circ\text{C}\sim-12^\circ\text{C}$ 温度区与大湿度区重合，低层云区温度维持在 $-8\sim-4^\circ\text{C}$ 的垂直温湿结构。
 334 根据 Passarelli and Srivastava (1979) 提出的雪花的两种聚并模式，温度高于 -8°C 时，由于过
 335 冷水滴的存在，雪花的碰连属于粘连。碰并作用的大小在粒子谱中表现为相同直径的粒子具
 336 有不同的下落速度（牛生杰, 2012），较宽的速度谱会大大加速聚并过程。“200214”降雪

337 阶段中，直至 3~4mm 的大粒子依旧能在 $1\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $2\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 附近看到数浓度中心，并且速度
 338 谱宽很宽，能够激发碰并作用从而使降雪粒子粘连聚并形成更大的雪花。雪花凇附增长和粘
 339 连聚并增长共同作用下使粒子最大直径高于雨夹雪阶段单纯的凇附增长形成的雪花最大尺
 340 寸（图 5a）。而此时的降雪过程中，平均积雪效率仅 $0.6\text{cm} \cdot \text{mm}^{-1}$ 。



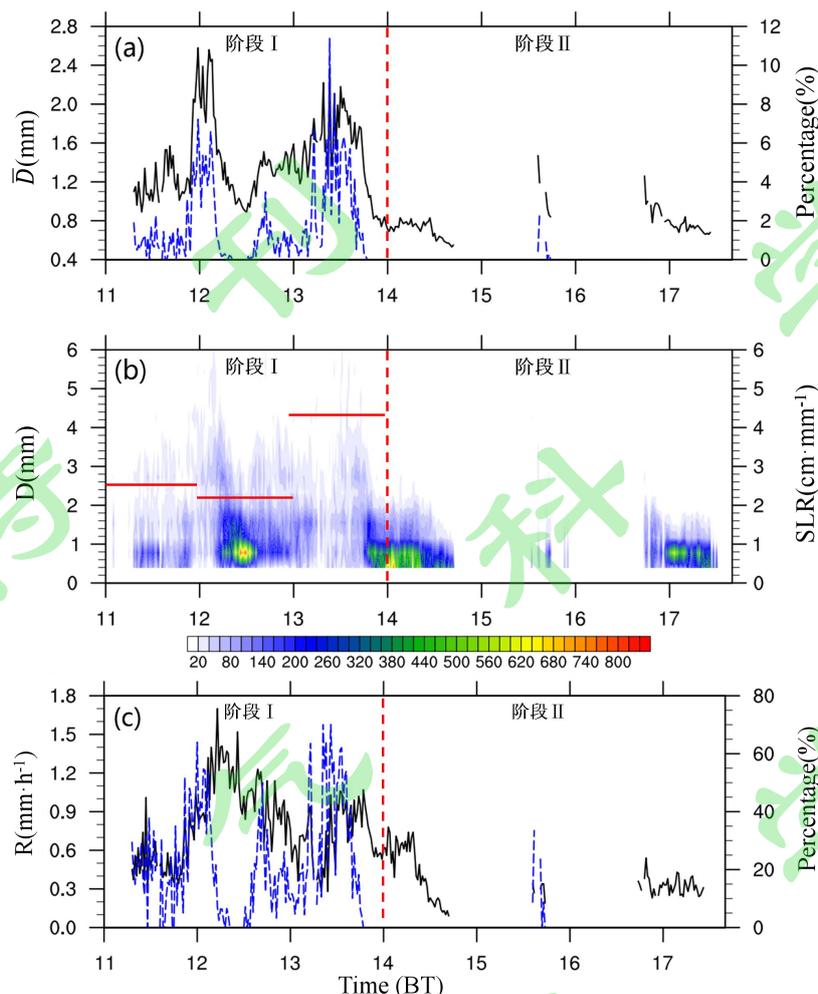
341
 342 图 8 “200214” 过程降雨 (a)、雨夹雪 (b) 和降雪 (c) 阶段不同粒子直径对应的速度谱，
 343 蓝色实线、蓝色虚线、黑色实线分别代表降雨、霰粒和聚并的密凇附的辐枝状雪花的速度曲
 344 线（填色为粒子数浓度，单位： m^{-3} ）

345 Fig.8 The velocity corresponding to different particle diameters during the rainfall (a), sleet (b)
 346 and snowfall (c) stages of process "200214". The blue solid line, blue dashed line and black solid
 347 line represent the terminal velocity of raindrop, graupel and aggregates of densely rimed radiating
 348 assemblages of dendrites, respectively (shaded for number concentration, unit: m^{-3})

349 5 冬奥赛期积雪效率突变过程的微物理特征分析

350 对“220213”降雪全过程、阶段 I 和阶段 II 的微物理特征量进行分析。

351 由粒子谱分布及其微物理特征量的时序变化可以得到降水粒子形成演变的阶段性特征，
 352 对“220213”个例中降雪粒子平均直径、数浓度、降水强度、 D_4 对总数浓度和降水强度的
 353 贡献随时间的变化情况进行分析。由图 9，随着降雪粒子形态的明显变化，平均直径、数浓
 354 度、大粒子贡献都发生了突变，而 14-15 时粒子形态转变后仍维持较高的总数浓度和降水强
 355 度。阶段 II 对应仍有 0.5mm 的降雪量观测，却没有带来明显新增积雪，对比阶段 I 中的 13-14
 356 时，0.7mm 降水量就带来 3cm 的新增积雪。从数浓度分布来看，阶段 I 辐枝状雪花造成的
 357 数浓度极值较小，但谱宽更宽，阶段 II 板状和柱状粒子在小粒子尺度产生更大数浓度极值，
 358 但谱宽很窄，不足阶段 I 的 1/2。12:30 前后，短时呈现了类似阶段 II 的粒子微物理特征，
 359 平均直径、大粒子贡献都很小，包括数浓度的分布特征也呈现板状或柱状粒子分布特征，而
 360 这种精细化的粒子形态时间变化需要更精细的温湿探测，以目前资料的精细化程度无法进一
 361 步有效分析，但可以推测是由温湿廓线短时间变化造成的。从粒子谱变化来看，对观象台来
 362 说阶段 I 和阶段 II 更精确的分界时间应为 13:45。



363

364

365 图9 “220213”过程 (a) 平均直径 (黑色实线, 单位: mm) 和 D_4 对总数浓度的贡献 (蓝色虚线, 单位: %), (b) 降雪粒子数浓度随时间和直径分布 (填色, 单位: m^{-3}) 以及逐
366 小时积雪效率 (红色实线, 单位: $cm \cdot mm^{-1}$), (c) 降水强度 (黑色实线, 单位: $mm \cdot h^{-1}$)
367 和 D_4 对降水强度的贡献 (蓝色虚线, 单位: %), 红色虚线为阶段 I 和阶段 II 的分隔线

368

369

370

371

372

373

374

Fig.9 (a) Average diameter (black solid line, unit: mm), contribution of D_4 to total number concentration (blue dashed line, unit: %), (b) variation of number concentration with time and diameter (shaded, unit m^{-3}) and hourly SLR (red solid line, unit: $cm \cdot mm^{-1}$), (c) precipitation intensity (black solid line, unit: $mm \cdot h^{-1}$), and contribution of D_4 to precipitation intensity (blue dashed line, unit: %) during process "220213", red dashed line separates stage I and stage II

374

5.1 平均谱分布

375

376

377

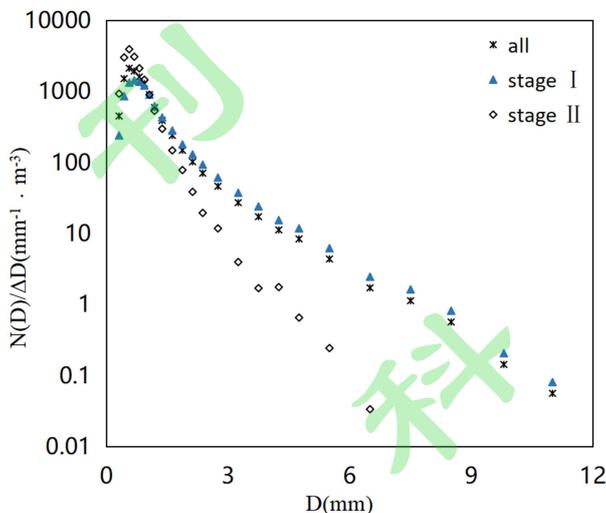
378

379

380

从降水粒子谱的分布情况 (图 10) 来看, 此次降雪过程的平均谱呈单峰型, 过程平均
粒子谱与阶段 I 的平均谱形态、谱宽更为接近。对比“200214”降雪阶段的平均谱分布来看,
“220213”过程平均谱的峰值直径更大, 并且在阶段 I 和阶段 II 表现出不同特征, 阶段 I 的
峰值直径更大, 为 0.687mm, 而阶段 II 的峰值直径与过程平均谱峰值直径一致, 为 0.562mm。
过程平均峰值浓度与“200214”的降雪阶段接近 (分别为 $2125.76mm^{-1} \cdot m^{-3}$ 和 $1939.01mm^{-1} \cdot m^{-3}$), 但阶段 II 的降雪粒子峰值明显增大, 接近阶段 I 的 3 倍, 分别为 $3930.23mm^{-1} \cdot m^{-3}$ 。

381 m^{-3} 和 $1331.13\text{mm}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$ 。从谱宽来看，阶段 I 谱宽更宽，最大粒子直径达到 11mm，阶段
 382 II 谱宽明显变窄，最大粒子直径仅 6.5mm，整个降雪过程谱宽小于“200214”的降雪阶段。



383
 384 图 10 “220213” 过程中全过程 (*)、阶段 I (▲) 及阶段 II (◇) 的平均粒子谱
 385 Fig.10 The average particle spectrum of the entire process, stage I and stage II during
 386 process "220213" (* for the entire process, ▲ for stage I, ◇ for stage II)

387 5.2 不同雪花形态对应的粒子特征

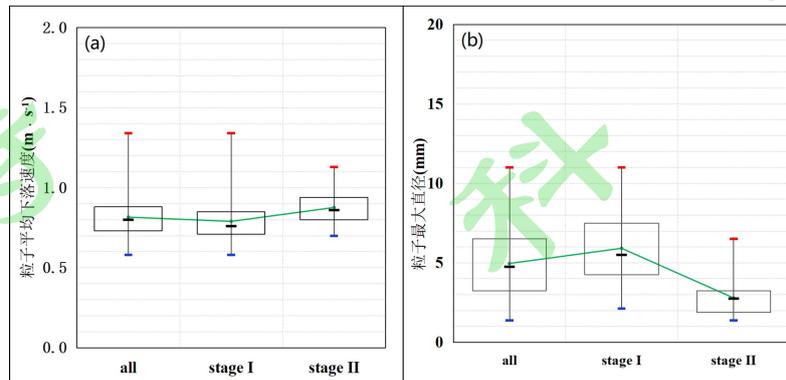
388 表 4 为“220213”全过程、阶段 I 和阶段 II 的降水强度、总数浓度、粒子平均下落速度
 389 以及 3 种尺度参数。可以看出，阶段 I 的粒子反演降水强度更大，自动站降水观测也表现出
 390 阶段 I 平均降水强度更大的特征。阶段 II 的各种尺度参数均较阶段 I 明显减小，其中平均直
 391 径由阶段 I 的 1.32mm 下降至阶段 II 的 0.77mm，这与雪花粒子形态发生明显变化有直接关
 392 系；粒子数浓度明显高于阶段 I；但从粒子平均下落速度来看，两个阶段非常接近，均不足
 393 $1\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，相对来说，阶段 II 略高于阶段 I，这可能来源于大气对不同形态降水粒子的空气
 394 阻力差异（杨军等，2011；Thériault et al., 2012）。

395 表 4 “220213” 过程不同降雪阶段对应的平均微物理特征量值
 396 Table 4 The average microphysical characteristic values corresponding to different stages in
 397 process "220213"

降水阶段	R	N_t	\bar{D}	D_{mid}	D_{max}	\bar{V}
全过程	0.57	1603.93	1.15	0.88	4.96	0.82
阶段 I	0.66	1362.08	1.32	0.98	5.91	0.79
阶段 II	0.36	2153.14	0.77	0.67	2.79	0.88

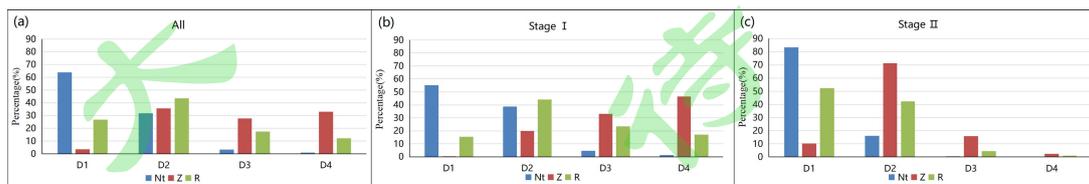
398 对比分析粒子平均下落速度和最大直径（图 11）表明，“220213”的粒子平均下落速
 399 度明显小于“200214”，离散度也更小，最大仅 $1.3\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，最小 $0.6\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，多集中于 0.7-0.9m

400 $\cdot s^{-1}$; “220213”的粒子最大直径离散度更小,平均值和中位数略高于“200214”的降雪阶
 401 段,但极大值却明显小于“200214”。对比“220213”过程的两个阶段,阶段II粒子平均下
 402 落速度和粒子最大直径的离散度都更小,粒子尺度明显减小,粒子平均下落速度略有增大,
 403 但最大不超过 $1.1m \cdot s^{-1}$ 。阶段I,粒子最大直径多集中在 4.3-7.5mm 之间,阶段II不足阶
 404 段I的 1/2,多集中在 1.9-3.3mm。



405
 406 图 11 同图 5, 但为“220213”过程中不同降雪阶段
 407 Fig.11 Same as Fig. 5, but for different stages of process "220213"

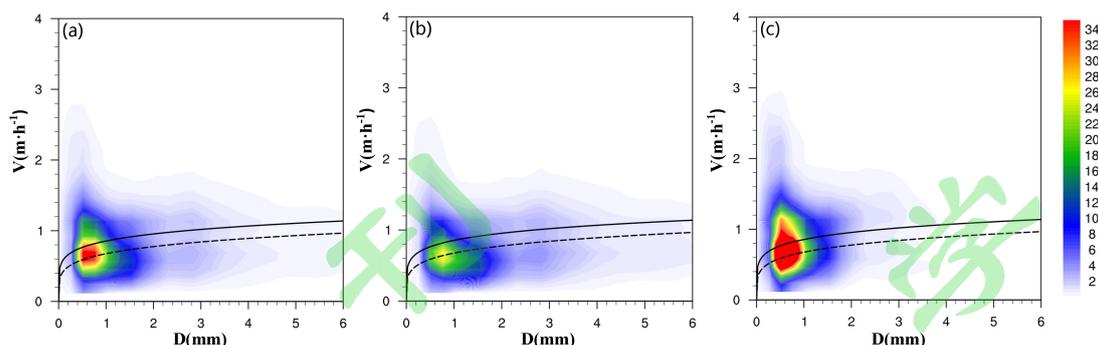
408 同样按照前文将降雪粒子按直径大小划分为四档,探讨全过程、阶段I和阶段II各尺度
 409 档粒子对总数浓度 N_t 、反射率因子 Z 以及降水强度 R 的贡献。由图 12 可见,粒子数浓度的
 410 主要来源也是 1mm 以下的粒子,但阶段I中 D_1 对数浓度的贡献为 55.24%, D_2 的贡献次之,
 411 为 38.81%; 阶段II中 D_1 对数浓度的贡献则高达 83.38%, 已经超过“200214”各个相态阶
 412 段 D_1 对数浓度的贡献。两个阶段各粒子尺度档对反射率因子、降水强度的贡献分布特征都
 413 有较大差异,阶段II的 D_4 几乎对各个变量贡献都极小。各粒子档的贡献分布在两个阶段差
 414 异最大的是对反射率因子的贡献,阶段I贡献最大的是大粒子, D_4 (5mm 及以上) 占比最
 415 高,达到 46.54%, 3mm 以上 (D_3 和 D_4) 粒子对 Z 的贡献达到 79.60%; 然而对于阶段II,
 416 贡献最大的是小粒子, D_2 档 (1-3mm) 粒子的贡献达到 71.36%。对降水强度而言,随着时
 417 间推移,贡献最大的粒子尺度也在减小,由 D_2 变为 D_1 。阶段II 3mm 以上粒子对 N_t 、 R 的贡
 418 献最大不超过 6%, 几乎可以忽略。



419
 420 图 12 同图 6, 但为“220213”全过程 (a)、阶段I (b) 和阶段II (c)
 421 Fig.12 Same as Fig. 6, but for all process (a), stage I (b), and stage II (c) of process
 422 "220213"

423 图 13 为“220213”降雪过程不同阶段粒子数浓度相对于粒子下落速度和直径的分布，
424 相较“200214”，此次过程粒子下落速度更小，整个过程雪花谱均接近未淞附的辐枝状雪花
425 或未淞附未融化的干雪的速度曲线，结合“200214”的下落速度曲线分析和层结温度变化发
426 现，环境温度低时，雪花不易淞附，李遥等（2019）在对南京降雪的粒子谱分析过程中也得
427 到同样的结论。贝吉龙过程是冷云降水的重要过程（Lamb and Verlinde, 2011），即在过冷
428 水滴、冰晶、水汽共存的云区，由于冰面饱和水汽压和水面饱和水汽压差的存在，会使水汽
429 在冰晶上凝华而使冰晶长大，水滴则会不断蒸发变小或消失，而这一过程在 $-15^{\circ}\text{C}\sim-10^{\circ}\text{C}$
430 间达到最强，此区间也是辐枝状雪花形成的关键区。结合雪花的显微镜观测（图 3）和垂直
431 温湿分布（图 2b）来看，两个阶段均未出现雪花淞附现象，低层云区温度始终维持在
432 $-18\sim-12^{\circ}\text{C}$ ，雪花的增长来自于贝吉龙过程和凝华增长。除此之外，对比“200214”的降雪
433 阶段，阶段 I 符合雪花的另一种聚并模式（Passarelli and Srivastava, 1979），即雪花的攀附
434 和钩连，图 3b 也表现出这种特征。在凝华增长、贝吉龙过程和攀附钩连聚并增长的共同作
435 用下，粒子最大直径达到 $11\mu\text{m}$ （图 11b）。两个阶段峰值速度一致，仅 $0.65\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，这在
436 一定程度上代表了北京地区干雪雪花谱的峰值速度。

437 以往对积雪预报的研究中，常用不同积雪效率来区分干湿雪（李正金等，2018），而在
438 雪花的微物理特征研究中，由于不同降雪性质造成的灾害不同（Wakahama et al., 1977; Dalle
439 and Admirat, 2011），常认为未淞附的雪花为干雪（Rasmussen et al., 1999; 李遥等，2019）。
440 “220213”降雪过程的日积雪效率达到 $2\text{cm}\cdot\text{mm}^{-1}$ ，可归为干雪（陈双和符娇兰，2021），
441 但从小时积雪效率来看，两个阶段积雪效率有明显差异。然而，两个阶段粒子谱的速度分布
442 特征并没有明显区别，说明这不是造成积雪效率差异的原因。雪花峰值速度对应的粒径在两
443 个阶段表现不同，分别为 0.81mm 和 0.56mm 。阶段 I 降雪为辐枝状雪花，小粒子带来的数
444 浓度最大不足 30m^{-3} （图 13b）， 3mm 的大粒子数浓度仍旧能够超过 2m^{-3} ，在这种粒子谱分
445 布下的干雪在平原地区积雪效率最大能达到 $4\text{cm}\cdot\text{mm}^{-1}$ ；阶段 II 降雪为板状或柱状，小粒
446 子数浓度极值达到 80m^{-3} 以上（图 13c），粒子谱几乎全部分布在 $0\sim 3\text{mm}$ ，这种粒子谱分布
447 下的干雪在平原地区积雪效率非常小。结合前文分析（图 2b），阶段 II 上升运动区与 $-18\sim-12^{\circ}\text{C}$
448 温度区的重合区域相对湿度有所下降，这可能是造成雪花形态变化的原因。



449

450 图 13 “220213” 全过程 (a)、阶段 I (b) 和阶段 II (c) 不同粒子直径对应的速度谱，
 451 黑色实线和黑色虚线分别代表聚并的未淋附的辐枝状雪花和未淋附未融化的干雪的速度曲
 452 线（填色为粒子数浓度，单位： m^{-3} ）

453 Fig.13 The velocity corresponding to different particle diameters during all process (a), stage I
 454 (b), and stage II (c) of process "220213". The black solid and dashed lines represent the terminal
 455 velocity of aggregates of unrimed radiating assemblages of dendrites and unrimed unmelted dry
 456 snow, respectively (shaded for number concentration, unit: m^{-3})

457 6 结论与讨论

458 结合积雪加密观测和冬奥现场雪花显微观测，利用粒子谱数据分析冬奥赛期同期雨转雪
 459 过程“200214”及冬奥赛期积雪效率突变过程“220213”降水粒子的微物理特征和积雪效率
 460 差异发现：

461 (1) 两次过程中降雨、雨夹雪和雪的平均谱均呈单峰型，从峰值浓度和粒子谱宽度来
 462 看，雪花谱最大，其次为雨夹雪，雨滴谱最小；同一降雪过程中板状或柱状的小粒子降雪峰
 463 值浓度更高。雨转雪过程中总数浓度、粒子平均直径、粒子最大直径都呈现随着雨、雨夹雪、
 464 雪逐渐增大。对相态变化指示意义最好的微物理特征量是粒子平均下落速度，其降至 $2\text{m} \cdot$
 465 s^{-1} 以下可以作为转雪的指标；“220213”过程中板状或柱状的小粒子降雪数浓度高于辐枝
 466 状雪花，各种尺度参数均较辐枝状雪花明显减小。

467 (2) 两个过程中粒子数浓度都主要来源于 1mm 以下的粒子。“200214”雨雪过程，
 468 3mm 以上粒子对降水强度贡献最大的阶段为雨夹雪阶段。“220213”过程，随着雪花形态
 469 由辐枝状变为板状或柱状，各粒子档的贡献分布在两个阶段差异很大：大积雪效率阶段对反
 470 射率因子 Z 贡献最大的为大粒子；小积雪效率阶段对 Z 贡献最大的为小粒子，大粒子对 N 、
 471 R 的贡献最大不超过 6% ，几乎可以忽略。

472 (3) 结合微波辐射计分析发现，“200214”雨转雪阶段低层温度的降低，对应粒子平
 473 均直径的增加，粒子平均下落速度的增大和降水强度的增大。在降雨阶段，数浓度极值区小
 474 于经典下落速度曲线；雨夹雪阶段的雪花增长主要来源于淋附增长；随着温度降低，低层温

475 度降至-8~-4℃, -18~-12℃温度层明显增湿, 在这种温湿层结下, 凇附现象依然存在, 大粒
476 径段速度谱谱宽很宽, 粘连聚并机制使其能更迅速的的形成更大的雪花, 凇附增长和粘连聚并
477 机制的共同作用使粒子最大直径达到 19mm。“200214”过程降雪以凇附的湿雪为主, 积雪
478 效率较小, 仅 0.6cm • mm⁻¹。“220213”过程整层温度更低, 低层云区温度维持在-18~-12℃,
479 降雪均为未凇附的干雪雪花, 下落速度接近未凇附的辐枝状雪花或未凇附未融化的干雪的速
480 度曲线, 两个阶段峰值速度一致, 仅 0.65m • s⁻¹, 一定程度上代表了北京地区深冬干雪雪花
481 谱的峰值速度。阶段 I 凝华增长、贝吉龙过程和攀附钩连聚并作用使粒子最大直径达到
482 11mm, 但由于没有凇附粘连现象, 粒子最大直径明显小于“200214”。两个阶段雪花形态
483 由辐枝状变为板状或柱状, 导致粒子数浓度极值的增大以及粒子谱宽、积雪效率的明显减小,
484 阶段 II 低层-18~-12℃温度关键区相对湿度的下降可能是造成雪花形态变化的原因。

485 本文结合积雪深度人工加密观测、冬奥现场雪花形态显微镜观测及粒子谱数据, 对冬奥
486 赛期及同期两次雨雪过程的微物理特征和积雪效率差异进行分析, 相关研究成果可为冬季降
487 水相态和积雪深度精细化预报提供参考。本文分析过程虽然融入了积雪深度的人工加密观
488 测, 但由于积雪深度以厘米为单位进行观测, 很难实时反应积雪效率的精细变化, 随着自动
489 化观测的深入, 后续将继续开展新增积雪的精细化研究。此外, 粒子谱资料在要素预报中的
490 应用研究为时尚短, 加之近年来北京地区冬季降水较少, 研究还不够充分, 还需要积累更多
491 的降雪个例, 以求提炼精细化积雪深度预报的具体指标。

492 致 谢 感谢冬奥气象服务团队张家口赛区团队范俊红正高工在雪花观测视频显微镜
493 的优选过程中给予的建议和帮助。

494

495

参考文献 (References)

- 496 Almqvist A, Pellegrini B, Lintzén N, et al. 2022. A scientific perspective on reducing ski-snow friction to improve
497 performance in Olympic cross-country skiing, the biathlon and Nordic combined [J]. *Frontiers in Sports and*
498 *Active Living*, 4: 844883. doi: <https://doi.org/10.3389/fspor.2022.844883>
- 499 Battaglia A, Rustemeier E, Tokay A, et al. 2010. PARSIVEL snow observations: A critical assessment [J].
500 *J.Atmos.Ocean.Technol.*, 27(2): 333-344. doi: <https://doi.org/10.1175/2009JTECHA1332.1>
- 501 Baxter M A, Graves C E, Moore J T. 2005. A climatology of snow-to-liquid ratio for the contiguous United States
502 [J]. *Weather and Forecasting*, 20(5): 729-744. doi: <https://doi.org/10.1175/WAF856.1>
- 503 Beard K V, Johnson D B, Baumgardner D. 1986. Aircraft observations of large raindrops in warm, shallow,
504 convective clouds [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 13(10): 991-994. doi: <https://doi.org/10.1029/GL013i010p00991>
- 505 Boudala F S, Isaac G A, Rasmussen R, et al. 2014. Comparisons of snowfall measurements in complex terrain
506 made during the 2010 Winter Olympics in Vancouver [J]. *Pure Appl Geophys*, 171(1/2): 113-127. doi:
507 <https://doi.org/10.1007/s00024-012-0610-5>
- 508 Cha J W, Yum S S. 2021. Characteristics of precipitation particles measured by Parsivel disdrometer at a mountain

509 and a coastal site in Korea [J]. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 57: 261-276. doi:
510 <https://doi.org/10.1007/s13143-020-00190-6>

511 陈聪, 银燕, 陈宝君. 2015. 黄山不同高度雨滴谱的演变特征 [J]. *大气科学学报*, 38(3): 388-395. Chen Cong,
512 Yin Yan, Chen Bao-jun. 2015. Raindrop size distribution at different altitudes in Mt. Huang [J]. *Trans Atmos*
513 *Sci (in Chinese)*, 38(3): 388-395. doi: [10.13878/j.cnki.dqkxxb.20130223001](https://doi.org/10.13878/j.cnki.dqkxxb.20130223001)

514 陈双, 符娇兰. 2021. 华北地区雪密度不同的两次降雪过程对比分析[J]. *气象*, 47(1): 36-48. Chen Shuang, Fu
515 Jiaolan. 2021. Comparative Analysis of Two Snow Events with Different Snow Density in North China[J].
516 *Meteor Mon (in Chinese)*, 47(1): 36-48. doi: [10.7519/j.issn.1000-0526.2021.01.004](https://doi.org/10.7519/j.issn.1000-0526.2021.01.004)

517 Chen B J, Yang J, Pu J P. 2013. Statistical characteristics of raindrop size distribution in the Meiyu season
518 observed in eastern China. *J Meteor Soc Japan [J]*, 91(2): 215-227. doi:
519 <https://doi.org/10.2151/jmsj.2013-208>

520 程鹏, 常祎, 刘琴, 等. 2021. 祁连山春季一次层状云降水的雨滴谱分布及地形影响特征 [J]. *大气科学*,
521 45(6): 1232-1248. Cheng Peng, Chang Yi, Liu Qin, et al. 2021. A Case Study of Raindrop Size Distribution
522 and Orographic Impact Characteristics in Spring Stratiform Precipitation over the Qilian Mountains [J].
523 *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 45(6): 1232 - 1248. doi:
524 [10.3878/j.issn.1006-9895.2103.20231](https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.2103.20231)

525 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):
526 1508-1514. Cui Jin, Zhou Xiaoshan, Yan Qi, et al. 2015. Snow-to-liquid ratio variation and its atmospheric
527 influence factors in Shenyang [J]. *JOURNAL OF GLACIOLOGY AND GEOCRYOLOGY (in Chinese)*,
528 37(6): 1508-1514. doi: [10.7522/j.issn.1000-0240.2015.0167](https://doi.org/10.7522/j.issn.1000-0240.2015.0167)

529 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 Jin, Zhou Xiaoshan, Yan
530 Qi, et al. 2017. Advances in Snow-to-Liquid Ratio [J]. *Meteor Mon (in Chinese)*, 43(6): 735-744. doi:
531 [10.7519/j.issn.1000-0526.2017.06.010](https://doi.org/10.7519/j.issn.1000-0526.2017.06.010)

532 Currie B W. 1947. Water content of snow in cold climates [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*,
533 28(3): 150-151.

534 Dalle B, Admirat P. 2011. Wet snow accretion on overhead lines with French report of experience [J]. *Cold*
535 *Regions Science and Technology*, 65(1): 43-51. doi: <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2010.04.015>

536 杜佳, 杨成芳, 戴翼, 等. 2019. 北京地区 4 月一次罕见暴雪的形成机制分析 [J]. *气象*, 45(10): 1363-1374.
537 Du Jia, Yang Chengfang, Dai Yi, et al. 2019. Formation Mechanism of an Infrequent Blizzard in Beijing in
538 April [J]. *Meteor Mon (in Chinese)*, 45(10): 1363-1374. doi: [10.7519/j.issn.1000-0526.2019.10.003](https://doi.org/10.7519/j.issn.1000-0526.2019.10.003)

539 范思睿, 王维佳. 2022. 四川盆地秋季一次层状云弱降水过程的微物理特征观测分析 [J]. *暴雨灾害*, 41(4):
540 445-457. Fan Sirui, Wang Weijia. 2022. Analysis on the microphysical characteristics of weak precipitation
541 process observation of a stratiform cloud in Sichuan Basin in autumn [J]. *Torrential Rain and Disasters (in*
542 *Chinese)*, 41(4): 445-457. doi: [10.3969/j.issn.1004-9045.2022.04.009](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2022.04.009)

543 Fukuta N, Takahashi T. 1999. The growth of atmospheric ice crystals: A summary of findings in vertical
544 supercooled cloud tunnel studies [J]. *Journal of the atmospheric sciences (in Chinese)*, 56(12): 1963-1979.
545 doi: [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1999\)056<1963:TGOAIC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1999)056<1963:TGOAIC>2.0.CO;2)

546 Garrett T J, Yuter S E. 2014. Observed influence of riming, temperature, and turbulence on the fall speed of solid
547 precipitation [J]. *Geophys. Res. Lett. (in Chinese)*, 41(18): 6515-6522. doi:
548 <https://doi.org/10.1002/2014GL061016>

549 Gray D. M and D. H Male. 1981. *Handbook of Snow : Principles Processes Management & Use [M]*. Toronto:
550 Pergamon Press, 776pp.

551 韩汶君, 虞越越, 周雨蒙, 等. 2023. 2018 年 1 月江苏省两次暴雪过程积雪效率差异及其机理 [J]. *大气科学*,
552 47(2): 273 - 294. Han Wenjun, Yu Yueyue, Zhou Yumeng, et al. 2023. Snow Accumulation Efficiency

553 Difference and Mechanism during the Two Snowstorm Events in Jiangsu Province in January 2018 [J].
554 Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 47(2): 273 - 294. doi:
555 [10.3878/j.issn.1006-9895.2109.21065](https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.2109.21065)

556 黄小玉, 张垚, 叶成志, 等. 2019. 地面积雪天气现象人工智能观测识别研究 [J]. 气象, 45(9): 1189-1198.
557 Huang Xiaoyu, Zhang Yao, Ye Chengzhi, et al. 2019. Research on Artificial Intelligence Observation and
558 Identification of Snow Cover Weather Phenomenon on Surface [J]. Meteor Mon (in Chinese),
559 45(9):1189-1198. doi: [10.7519/j.issn.1000-0526.2019.09.001](https://doi.org/10.7519/j.issn.1000-0526.2019.09.001)

560 贾星灿, 马新成, 毕凯, 等. 2018. 北京冬季降水粒子谱及其下落速度的分布特征 [J]. 气象学报, 76(1):
561 148-159. Jia Xingcan, Ma Xincheng, Bi Kai, et al. Distributions of particle size and fall velocities of winter
562 precipitation in Beijing [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 76(1): 148-159. doi:
563 [10.11676/qxxb2017.076](https://doi.org/10.11676/qxxb2017.076)

564 Jia X C, Liu Y G, Ding D P, et al. 2019. Combining disdrometer, microscopic photography, and cloud radar to
565 study distributions of hydrometeor types, size and fall velocity [J]. Atmospheric research, 228: 176-185.
566 doi:[10.1016/j.atmosres.2019.05.025](https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2019.05.025).

567 荆浩, 于波, 张琳娜, 等. 2022. 北京及周边地区冬季降水相态的判别指标研究 [J]. 气象, 48(6): 746-759.
568 Jing Hao, Yu Bo, Zhang Linna, et al. 2022. Discrimination Criteria of Winter Precipitation Types in and
569 Around Beijing [J]. Meteor Mon (in Chinese), 48(6): 746-759. doi: [10.7519/j.issn.1000-0526.2021.122401](https://doi.org/10.7519/j.issn.1000-0526.2021.122401)

570 Judson A, Doesken N. 2000. Density of freshly fallen snow in the central Rocky Mountains [J]. Bulletin of the
571 American Meteorological Society, 81(7): 1577-1588. doi:
572 [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(2000\)081<1577:DOFFSI>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(2000)081<1577:DOFFSI>2.3.CO;2)

573 Lamb D, Verlinde J. 2011. Physics and chemistry of clouds[M]. Cambridge University Press, 462-471.

574 李慧, 苏立娟, 郑旭程, 等. 2021. 呼和浩特降雨和降雪过程粒子谱分布特征分析 [J]. 气象, 47(1): 71-81. Li
575 Hui, Su Lijuan, Zheng et al. 2021. Analysis on Characteristics of Particle Size Distribution During Rain and
576 Snow Processes in Hohhot [J]. Meteor Mon (in Chinese), 47(1): 71-81. doi:
577 [10.7519/j.issn.1000-0526.2021.01.007](https://doi.org/10.7519/j.issn.1000-0526.2021.01.007)

578 李林, 孙赫敏, 仰美霖, 等. 2022. 基于速度和数量阈值的雨滴谱质量控制方法 [J]. 气象, 48(7): 891-898. Li
579 Lin, Sun Hemin, Yang Meilin, et al. 2022. Disdrometer's Data Quality Control Method Based on Speed and
580 Quantity Threshold [J]. Meteor Mon (in Chinese), 48(7): 891-898. doi:
581 [10.7519/j.issn.1000-0526.2022.041201](https://doi.org/10.7519/j.issn.1000-0526.2022.041201)

582 李遥, 牛生杰, 吕晶晶, 等. 2019. 2018年冬季南京三次暴雪过程微物理特征分析 [J]. 大气科学, 43(5):
583 1095-1108. Li Yao, Niu Shengjie, Lv Jingjing, et al. 2019 Analysis on Microphysical Characteristics of Three
584 Blizzard Processes in Nanjing in the Winter of 2018 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in
585 Chinese), 43(5): 1095-1108. doi: [10.3878/j.issn.1006-9895.1811.18189](https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.1811.18189)

586 李正金, 李菁, 刘冬晴, 等. 2018. 南京 2018 年 1 月两次强降雪过程的对比分析 [C]. 第 35 届中国气象学会
587 年会 S1 灾害天气监测、分析与预报. 合肥: 中国气象学会, 7. Li Zhengjin, Li Jing, Liu Dongqing, et al.
588 2018. Comparative analysis of two heavy snowfalls in Nanjing in January 2018 [C]. The 35th Chinese
589 Meteorological Society S1 Disaster Weather Monitoring, Analysis and Forecast. Hefei: Chinese
590 Meteorological Society, 7.

591 Libbrecht K G. 2006. Ken Libbrecht's Field Guide to Snowflakes [M]. Minnesota: Voyageur Press, 112pp.

592 Nakaya U, Terada Jr T. 1935. Simultaneous Observations of the Mass, Falling Velocity and Form of Individual
593 Snow Crystals [J]. J. Atmos. Sci., 61(614): 422-439.

594 牛生杰. 2012. 云降水物理研究[M]. 北京: 气象出版社, 175pp. Niu Shengjie. 2012. Cloud Precipitation Physics
595 Research (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 175pp.

596 Niu S J, Jia X C, Sang J R, et al. 2010. Distributions of raindrop sizes and fall velocities in a semiarid plateau

597 climate: Convective versus stratiform rains [J]. *J Appl Meteor Climatol*, 49(4): 632-645. doi:
598 <https://doi.org/10.1175/2009JAMC2208.1>

599 Passarelli R E, Srivastava R C. 1979. A new aspect of snowflake aggregation theory [J]. *Journal of the*
600 *Atmospheric Research*, 36: 484-493. doi:
601 [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1979\)036<0484:ANAOSA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1979)036<0484:ANAOSA>2.0.CO;2)

602 Power B A, Summers P W, d'Avignon J. 1964. Snow crystal forms and riming effects as related to snowfall density
603 and general storm conditions [J]. *Journal of Atmospheric Sciences*, 21(3): 300-305. doi:
604 [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1964\)021<0300:SCFARE>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1964)021<0300:SCFARE>2.0.CO;2)

605 Radhakrishna B, Narayana R T. 2010. Differences in cyclonic raindrop size distribution from southwest to
606 northeast monsoon season and from that of noncyclonic rain [J]. *Journal of Geophysical Research:*
607 *Atmospheres*, 115(D16): 751-763. doi: <https://doi.org/10.1029/2009JD013355>

608 Rasmussen R M, Vivekanandan J, Cole J, et al. 1999. The estimation of snowfall rate using visibility [J]. *Journal*
609 *of Applied Meteorology and Climatology*, 38(10): 1542-1563. doi:
610 [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1999\)038<1542:TEOSRU>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1999)038<1542:TEOSRU>2.0.CO;2)

611 Roebber P J, Bruening S L, Schultz D M, et al. 2003. Improving snowfall forecasting by diagnosing snow density
612 [J]. *Weather and forecasting*, 18(2): 264-287. doi:
613 [https://doi.org/10.1175/1520-0434\(2003\)018<0264:ISFBDS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0434(2003)018<0264:ISFBDS>2.0.CO;2)

614 舒未希, 范水勇, 黄颖, 等. 2023. 雨滴谱分布参数化对改进新疆强降水过程预报的评估 [J]. *大气科学*,
615 47(4): 1131-1150. Shu Weixi, Fan Shuiyong, Huang Ying, et al. 2023. Assessing Raindrop Size Distribution
616 Parameterization for Enhanced Prediction of Heavy Precipitation Process in Xinjiang [J]. *Chinese Journal of*
617 *Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 47(4): 1131-1150. doi: [10.3878/j.issn.1006-9895.2201.21204](https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.2201.21204)

618 Thériault J M, Rasmussen R, Ikeda K, et al. 2012. Dependence of snow gauge collection efficiency on snowflake
619 characteristics [J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 51(4): 745-762. doi:
620 <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-11-0116.1>

621 Tokay A, Petersen W A, Gatlin P, et al. 2013. Comparison of raindrop size distribution measurements by collocated
622 disdrometers [J]. *Atmos. Oceanic Technol.*, 30(8): 1672-1690. doi:[10.1175/JTECH-D-12-00163.1](https://doi.org/10.1175/JTECH-D-12-00163.1)

623 Wakahama G, Kuroiwa D, Gotō K. 1977. Snow accretion on electric wires and its prevention [J]. *Journal of*
624 *Glaciology*, 19(81): 479-487. doi: <https://doi.org/10.3189/S0022143000215682>

625 王俊, 姚展予, 侯淑梅, 等. 2023. 山东夏季两次极端雨强暴雨的滴谱特征研究 [J]. *大气科学*, 47(2): 311-
626 326. Wang Jun, Yao Zhanyu, Hou Shumei, et al. 2023. The Characteristics of Raindrop Size Distribution in
627 Two Rainstorms with Extreme Rainfall Rates in Summer in Shandong Province [J]. *Chinese Journal of*
628 *Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 47(2): 311-326. doi: [10.3878/j.issn.1006-9895.2201.21104](https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.2201.21104)

629 Wang G L, Li R, Sun J S, et al. 2022. Comparative analysis of the characteristics of rainy season raindrop size
630 distributions in two typical regions of the Tibetan Plateau [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 39(7): 1062-1078. doi:
631 <https://doi.org/10.1007/s00376-021-1135-6>

632 Ware E C, Schultz D M, Brooks H E, et al. 2006. Improving snowfall forecasting by accounting for the
633 climatological variability of snow density [J]. *Weather and forecasting*, 21(1): 94-103. doi:
634 <https://doi.org/10.1175/WAF903.1>

635 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
636 Chengfang, Liu Chang. 2019. Study on Snow Cover and Its Meteorological Influence Factors of Jianghuai
637 Cyclone Snowstorm [J]. *Meteor Mon (in Chinese)*, 45(2): 191-202. doi:
638 [10.7519/j.issn.1000-0526.2019.02.005](https://doi.org/10.7519/j.issn.1000-0526.2019.02.005)

639 杨成芳, 朱晓清. 2020. 山东降雪含水比统计特征分析 [J]. *海洋气象学报*, 40(1): 47-56. Yang Chengfang, Zhu
640 Xiaoqing. 2020. Analysis on statistical characteristics of snow-to-liquid ratio in Shandong [J]. *Journal of*

641 Marine Meteorology (in Chinese), 40(1): 47-56. doi: [10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2020.01.005](https://doi.org/10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2020.01.005)

642 杨成芳, 赵宇. 2021. 基于加密观测的一次极端雨雪过程积雪特征分析 [J]. 高原气象, 40(4): 853-865. Yang

643 Chengfang, Zhao Yu. 2021. Study on Snow Cover Characteristic of Extreme Rain-snow Event based on

644 Intensive Observation Data [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 40(4): 853-865. doi:

645 [10.7522/j.issn.1000-0534.2020.00072](https://doi.org/10.7522/j.issn.1000-0534.2020.00072)

646 杨军, 陈宝君, 银燕, 等. 2011. 云降水物理学 [M]. 北京: 气象出版社, 114-115. Yang Jun, Chen Baojun, Yin

647 Yan, et al. 2011. Physics of Clouds and Precipitation (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press,

648 114-115.

649 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.

650 Yang Kun, Xue Jianjun. 2013. The relationship between snowfall and snow depth using intensive snowfall

651 observations [J]. J Appl Meteor Sci (in Chinese), 24(3): 349-355. doi: [10.11898/1001-7313.20130311](https://doi.org/10.11898/1001-7313.20130311)

652 杨涛, 杨莲梅, 刘凡, 等. 2023. 中国西天山两次短时强降水过程雨滴谱特征研究 [J]. 大气科学, 47(5): 1495

653 -1509. Yang Tao, Yang Lianmei, Liu Fan, et al. 2023. Raindrop Size Distribution Characteristics of Two

654 Short-Term Heavy Precipitation Processes in Western Tianshan, China [J]. Chinese Journal of Atmospheric

655 Sciences (in Chinese), 47(5): 1495-1509. doi: [10.3878/j.issn.1006-9895.2303.21211](https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.2303.21211)

656 于波, 蒲维维, 冯立成, 等. 2013. 影响北京地区降雪 pH 值的天气成因分析 [J]. 高原气象, 32(2): 575-580.

657 Yu Bo, Pu Weiwei, Feng Licheng, et al. 2013. Synoptic analysis on pH value in snowfall process in Beijing

658 [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 32(2): 575-580. doi: [10.7522/j.issn.1000-0534.2012.00055](https://doi.org/10.7522/j.issn.1000-0534.2012.00055)

659 于波, 杜佳, 张琳娜. 2016. 1960-2013 年北京地区冻雨天气过程特征分析 [J]. 气象与环境学报, 32(4):

660 113-118. Yu Bo, Du Jia, Zhang Linna. 2016. Characteristics of freezing rain in Beijing from 1960 to 2013 [J].

661 Journal of Meteorology and Environment (in Chinese). 32(4): 113-118. doi:

662 [10.3969/j.issn.1673-503X.2016.04.015](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-503X.2016.04.015)

663 于波, 李桑, 黄富祥, 等. 2019. 2016 年 1 月京津冀地区连续性寒潮事件对比分析 [J]. 干旱气象, 37(6):

664 954-963. Yu Bo, Li Sang, Huang Fuxiang, et al. 2019. Comparative analysis of continuous cold wave events

665 in Beijing Tianjin-Hebei region in January 2016 [J]. Journal of Arid Meteorology (in Chinese), 37(6):

666 954-963. doi: [10.11755/j.issn.1006-7639\(2019\)-06-0954](https://doi.org/10.11755/j.issn.1006-7639(2019)-06-0954)

667 于波, 李桑, 郝翠, 等. 2022. 冬奥会延庆赛区降雪与边界层东风的关系 [J]. 大气科学, 46(1): 181-190. Yu

668 Bo, Li Sang, Hao Cui, et al. 2022. Relationship between Snowfall in the Yanqing Zone of Winter Olympic

669 Games and the Easterly Wind in the Boundary Layer [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in

670 Chinese), 46(1): 181-190. doi: [10.3878/j.issn.1006-9895.2106.21055](https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.2106.21055)

671 翟亮, 王林, 郭金兰, 等. 2022. 北京一次极端雨雪天气异常诊断分析 [J]. 沙漠与绿洲气象, 16(4): 9-13. Zhai

672 Liang, Wang Lin, Guo Jinlan, et al. 2022. Abnormal Diagnosis and Analysis of an Extreme Rain and Snow

673 Weather in Beijing [J]. Desert and Oasis Meteorology (in Chinese), 16(4): 9-13. doi:

674 [10.12057/j.issn.1002-0799.2022.04.003](https://doi.org/10.12057/j.issn.1002-0799.2022.04.003)

675 张亚妮, 符娇兰, 胡宁, 等. 2022. 华北中部平原地区一次降雪过程雪水比变化特征及成因分析 [J]. 气象,

676 48(2): 216-228. Zhang Yani, Fu Jiaolan, Hu Ning, et al. 2022. Analysis of Snow-to-Liquid Ratio

677 Characteristics and Its Mechanism of a Snowfall Event in the Plain of Central North China [J]. Meteor Mon

678 (in Chinese), 48(2): 216-228. doi: [10.7519/j.issn.1000-0526.2021.101801](https://doi.org/10.7519/j.issn.1000-0526.2021.101801)