

2018–2023 年云南红河地区冰雹天气及其谱分布特征

郑皎¹ 郭欣² 付丹红³ 李英发¹ 郭学良³

1 云南省红河州气象局, 蒙自 661199

2 北京市人工影响天气中心, 北京 100089

3 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

摘要 云贵高原是我国冰雹天气的高发区,但冰雹特征的相关研究比较少。利用 2018–2023 年云南南部红河州 13 个国家气象站观测的 60 个冰雹日的 93 份分钟级降水粒子谱数据,研究了该地区冰雹日数、大小、持续时间、类型及谱分布的年、季节、日变化和地理分布特征。研究表明,云南红河地区 6 年平均冰雹日数为 10 d, 最多日数为 24 d, 最少日数仅为 3 d。年均最大冰雹直径范围为 9–16 mm, 平均降雹持续时间为 2–5 min; 冰雹日数存在明显的季节、日变化特征, 春季冰雹最多, 6 年总计达到 33 天, 占总冰雹日数的 50 % 以上, 秋季最少。冰雹主要发生在午后和傍晚; 冰雹谱总体呈单峰分布, 最大冰雹粒径达到 19 mm, 且以高密度冰雹为主, 低密度冰雹和霰粒子均很少; 冰雹存在明显的地理分布特征, 红河州西部、南部冰雹日数最多, 且以高密度冰雹为主, 霰粒子和低密度雹少。由此可见, 云南红河地区冰雹主要发生在春季, 午后和傍晚最多, 持续时间短, 以高密度小冰雹粒子为主, 低密度冰雹和霰粒子少。

关键词 冰雹天气 时空分布 谱分布 云南红河

文章编号 2024007C

中图分类号 P482

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2407.24007

收稿日期 2024-1-8, **网络预出版日期**

作者简介 郑皎, 女, 1973 年出生, 高级工程师, 主要从事人工影响天气研究工作。E-mail: hhmzj@126.com

通讯作者 郭学良, E-mail: guoxl@mail.iap.ac.cn

资助项目 国家自然科学基金(42105173), 第二次青藏高原科学考察-极端天气气候事件与灾害风险(2019QZKK0104), 云南省科技厅重点研发计划(202203AC100006), 中国气象局/农村农业部烤烟气象服务中心开放式研究基金项目(KYZX2024-05), 云南省气象局科研项目(YZ202423)

Funded by Natural Science Foundation (42105173), the Second Tibetan Plateau Scientific Expedition (Grant 2019QZKK0104), the Key Research and Development Project of Yunnan Science and Technology Agency (202203AC100006), Open Research Fund Project of Tobacco Meteorological Service Center of China Meteorological Administration and Ministry of Agriculture and Rural Affairs (KYZX2024-05), Research Project of Yunnan Meteorological Bureau (YZ202423)

21 **Properties of Hail Events and Spectrum Distribution**
22 **during 2018–2023 in Honghe, Yunnan**

23
24 ZHENG Jiao¹, GUO Xin², FU Danhong³, LI Yingfa¹, and GUO Xueliang³

25 *1 Honghe Meteorological Bureau, Mengzi 661199*

26 *2 Beijing Weather Modification Center, Beijing 100089*

27 *3 Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*

28
29 **Abstract** The Yunnan-Kweichow Plateau is one of regions with high frequent hail
30 events in China, however, the relevant studies on hail properties are few. On basis of
31 93 minus-level spectrum data collected from 60 hail events by 13 national
32 meteorological stations in Honghe, southern Yunnan during 2018–2023, the annual,
33 seasonal, daily and geographic distributions of the number of hail days, hail size and
34 hailfall duration, as well as hail type and spectrum distribution are investigated in
35 this study. Results show that the annual mean number of hail days was 10 d, with a
36 maximum number of 24 d and minimum number of 3 d. The annual mean maximum
37 hail size was 9–16 mm, and hailfall duration was 2–5 min. The number of hail days
38 had apparent seasonal and diurnal variations. The number of hail days was 33 d in
39 spring for six years, which accounted for more than 50 % in 60 d in total during this
40 period, and least in autumn. The number of hail days mainly occurred in the
41 afternoon and evening. The overall hail spectrum distribution was unimodal. There
42 were higher hail number concentrations in spring and summer seasons with the
43 maximum hail size of 19 mm in diameter, and was dominated by high-density hail.
44 There was very low amount of low-density hail and graupel. Hail events had
45 apparent geographic distribution properties. The western and southern subregions
46 had the highest number of hail days, which was dominated by high-density hail and
47 graupel and low-density hail were few. Therefore, hail events in the honghe region,
48 Yunnan primarily occurred in spring and in the afternoon and evening. Hail events
49 had short duration and were dominated by high-density small-sized hail. There was

50 very low concentration in low-density hail and graupel.

51 **Keywords** Hail events, Temporospatial distribution, Spectrum distribution, Honghe

52 Yunnan

53

54 1 引言

55 冰雹天气常常给农业生产和生命财产造成重大损失,是我国主要气象灾害
56 之一,在冰雹天气的气候地理分布、形成的天气、大气层结特征,以及人工防
57 雹等方面开展了大量研究,并取得了重要研究成果(Xu,1983;黄美元等,2000,
58 2003;Guo et al., 2015)。刘全根和汤懋苍(1966)是最早开展我国冰雹气候分
59 布研究的学者,利用1951–1962年全国气象站数据,对我国降雹日数的地理分
60 布、季节分布、日变化、冰雹大小、持续时间等冰雹气候分布特征进行了统计
61 分析研究,得出青藏高原地区冰雹最多,云贵高原到浙闽丘陵地带、内蒙东部
62 也是多雹带,同时在冰雹日变化、冰雹大小和持续时间等特征方面得出了很有
63 价值的结果。Xie et al. (2010)对1980–2005年期间我国新疆、内蒙、贵州和河
64 北四个区域地面观测的最大冰雹尺度分布特征进行了研究,得到四个区域的最
65 大冰雹尺度在10 mm左右,其中贵州是产生大于15 mm冰雹比例最大的地区。
66 赵文慧等(2019)利用1961–2015年我国577个地面观测站冰雹数据,得到降
67 雹累积持续时间空间分布特征与海拔高度、地形等关系密切,高原、高山多,
68 而平原、河谷少,平均单次降雹持续时间呈上升趋势。Tang et al. (2021)利用
69 1979–2016青藏高原地面观测数据,研究了青藏高原冰雹天气的分布、变化趋
70 势,得到高原冰雹分布与高大山脉密切相关,并且在气候变暖背景下冰雹日数
71 出现了显著减小趋势。罗喜平等(2022)利用1961–2020年贵州省84个气象
72 站的冰雹天气观测资料,分析贵州冰雹的时空分布,得到降雹日数与海拔高度
73 呈正相关。

74 冰雹灾害程度与冰雹动能、数密度密切相关,取决于冰雹质量、冰雹下落
75 末速度和数浓度。但因缺乏有效的观测手段,对冰雹大小、数浓度和下落末速
76 度等参数的观测非常困难。冰雹下落速度可通过室内实验进行模拟测量,
77 如,Macklin and Ludlam (1961)测量了不同尺度和密度的人造冰雹从2 km高空下
78 落的末速度。Lozowski and Strong (1978)采用不同直径的钢球模拟落地冰雹,建

79 立不同钢球的直径与其在测雹板上下落碰撞痕迹之间的关系。Dieling et al.
80 (2020) 在实验室测试了冰雹密度、拖拽系数、冰雹形状、空气密度和大风对冰
81 雹下落速度的影响。常用的野外地面冰雹谱测量方法主要包括对冰雹大小、质
82 量进行直接测量或使用测雹板进行间接测量。Auer (1972) 在北美高原海拔 2.1
83 km 高度开展了对球形和锥形软雹、冰雹的下落末速度的测量试验,提出了雹胚、
84 小冰雹和下落末速度的近似关系。牛生杰等(1999)对 1987–1990 年宁夏固原地
85 区测雹板收集的 62 份雹谱数据分析的结果表明,该地区雹谱为单峰谱。

86 最近几年,随着降水粒子谱仪(天气现象仪,二维视频雨滴谱仪)的广泛应
87 用,国内外开展了大量雨滴谱特征的研究 (Schuur et al., 2001; Ulbrich et al.,
88 2007; Jaffrain et al., 2011; Chen et al., 2013; Friedrich et al., 2013; Tokay et al., 2014;
89 Wen et al., 2016), 但针对冰雹谱的研究比较少, 已有的大部分研究是针对一次
90 冰雹过程的降水粒子谱的分析研究, 冰雹年、季节和地理分布特征的研究较少。
91 岳治国和梁谷(2018)利用 2013 年 5 月 22 日陕西渭北一次降雹过程降水粒子谱
92 仪观测数据, 对直径在 5.5–11mm 的冰雹谱和平均冰雹末速度与冰雹直径的经
93 验关系进行了拟合, 得出冰雹数浓度占总降水粒子数浓度的 0.3%, 但冰雹对总
94 降水的贡献达到 37%。王俊等(2021)对山东北部一次冰雹过程降水粒子谱仪
95 观测的粒子谱进行了分析研究, 比较了雨滴、雹、霰粒子下落速度-直径的关系。
96 何清芳等(2022)分析了闽西南地区一次春季降雹过程, 发现降雹前强对流云
97 体前部雨滴谱增宽时大滴端先增加, 呈现双峰或多峰结构, 靠近云体强中心小
98 滴端(直径 ≤ 1 mm)数浓度呈量级增多, 但没有单独进行冰雹谱的分析。刘彦
99 等(2023)基于二维雨滴谱仪观测数据, 对内蒙巴彦淖尔地区观测到的一次含雹
100 混合降水过程的冰雹谱进行了分析。

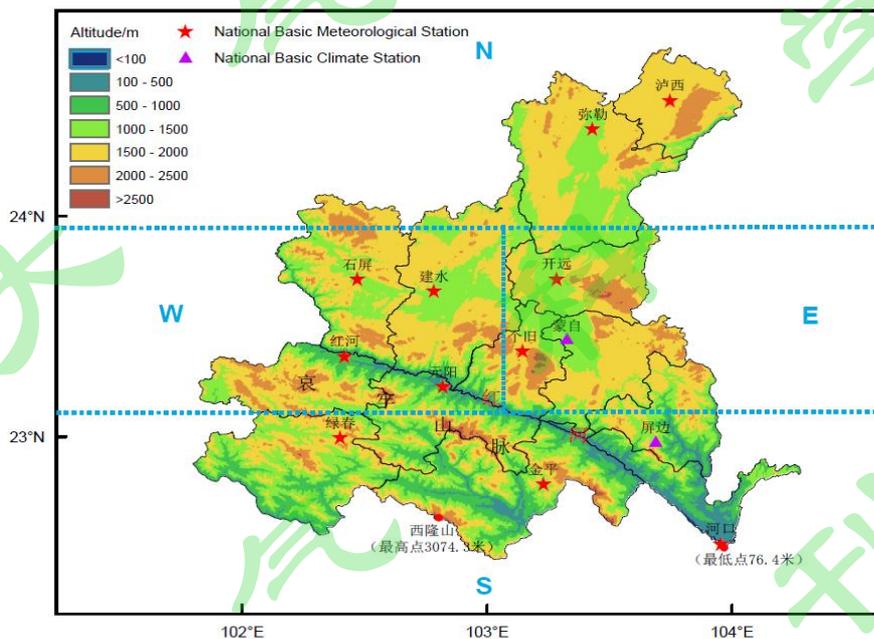
101 西南地区的云贵高原是冰雹高发区之一, 但相关的研究比较少(杨静等,
102 2023)。前期大部分冰雹谱的研究主要是针对一次冰雹过程, 无法获得年、季节
103 冰雹日数和谱分布特征。本研究的主要目的是利用 2018–2023 年云南红河地区
104 13 个国家气象观测站观测的 60 个冰雹日的 93 份降水粒子谱数据, 分析冰雹天
105 气的年、季节、日变化和地理分布, 以及冰雹类型及谱分布特征, 本研究结果
106 对于了解该地区冰雹特征, 提高冰雹预报和人工防雹技术水平具有重要参考价
107 值。

108

109 2 数据及处理

110 2.1 数据

111 所使用的数据来源于2018–2023年红河州13个国家气象站降水天气现象仪
 112 （降水粒子谱仪）的观测数据。图1给出了13个降水粒子谱仪的站点分布，为德
 113 国OTT公司生产的Parsivel激光降水粒子谱仪，型号为DSG1型，是一种基于降水粒
 114 子对激光光束的遮挡衰减原理的降水粒子自动观测仪器，可以对3 cm×18 cm的采
 115 样面积内降水粒子大小和下落速度进行测量，根据降水粒子对激光信号的遮挡衰
 116 减，测量和计算降水粒子的直径（D）和下落末速度（V）。降水粒子谱仪分为32
 117 个数据通道，对应降水粒子直径测量范围为0.062–24.5 mm，下落末速度测量范围
 118 为0.050–20.8 m s⁻¹，仪器采样时间间隔为1 min，可获得分钟级降水粒子下落末速
 119 度、大小和谱分布观测数据。



120

121 图1 云南红河州13个国家气象观测站的地理分布。填色图为地形高度(单位:m)。冰雹地理
 122 分布划分为东(E)，西(W)部，南(S)部和北(N)四个区域。

123 Fig.1 Geographical distribution of 13 national meteorological stations in Honghe, Yunnan.
 124 Shaded color is the terrain height (unit: m). Geographical distribution of hail events is classified
 125 as four subregions of east (E), west(W), south (S) and north (N).

126 2.2 数据处理

127 2018–2023年期间云南红河13个国家气象观测站记录的冰雹日数为60 d。按
128 《地面气象观测规范》，研究区域观测站一日内只要观测到一次及以上降雹过程，
129 按一个冰雹日计算。首先按照气象站的冰雹日记录，确定冰雹发生的具体时间，
130 再依据天气现象仪记录的冰雹时段，选取对应时段的降水粒子谱数据。每个观测
131 站的天气现象仪只要观测到一次冰雹过程即视为一份粒子谱数据，由此得到，60
132 d 冰雹日总计有93份分钟级降水粒子谱数据。天气现象仪观测的降水粒子谱数据
133 间隔是1 min，据此可计算每次降水过程的小时数据。由于降雹过程一般伴随降
134 雨过程，因此，该谱数据同时包含了雨滴和冰雹谱。由于大雨滴粒子易破碎，雨
135 滴直径一般小于5 mm。为保证观测数据质量，首先对观测数据进行了严格的质量
136 控制，剔除了受低信噪比影响，数据可靠性较差的仪器前两个通道的粒子。对于
137 小于5 mm 雨滴粒子，剔除受强风影响、溅落粒子和设备边缘等影响，产生严重
138 偏离GK1949曲线（Gunn and Kinzer, 1949）的部分雨滴粒子（Chen et al., 2013）。

139 冰雹日的季节按春（3–5月）、夏（6–8月）、秋（9–11月）、冬（12–次年2月）划分。
140 为了研究该区域冰雹地理分布特征，按地理和气候特点，将研究区域划分为四个
141 分区域（图1），分别为东（E）部，包括开远、个旧、蒙自站点。南（S）部，包括
142 绿春、金平、屏边、河口站点。西（W）部，包括石屏、建水、红河、元阳站点。
143 北（N）部，包括弥勒、泸西站点。

144 从降水粒子谱观测数据可计算单位体积内每分钟不同直径通道的雨滴、冰
145 雹谱分布 $N(D)$ （单位： $\text{m}^{-3} \text{mm}^{-1}$ ）：

146
$$N(D_i) = \sum_{j=1}^{32} \frac{n_{ij}}{S \cdot \Delta t \cdot v_j \cdot \Delta D_i} \quad (1)$$

147 其中， n_{ij} 代表粒径在第*i*级尺度区间同时下落速度介于第*j*级速度区间的降水粒
148 子数， S 为采样面积（单位： m^2 ）， Δt 为采样时间间隔（单位： s ）， v_j 为第*j*级
149 速度通道的平均速度（单位： m s^{-1} ）， D_i 为第*i*级尺度区间的平均直径（单位：
150 mm ）， ΔD_i 为第*i*级区间尺度间隔（单位： mm ）。

151 由于降水粒子谱数据同时包含了雨滴、冰雹和霰粒子，为区分降落到地面
152 的雨滴、冰雹和霰粒子，在降水粒子浓度的V-D分布图中同时给出了雨滴、冰
153 雹和霰粒子的V-D关系经验曲线，这些曲线对应的经验公式见表1。雨滴经验

154 关系为 GK1949 (Gunn and Kinzer, 1949) 和 A1973 (Atlas et al., 1973)。霰粒子
 155 的经验关系为 LH1974 (Locatelli and Hobbs, 1974)。霰粒子的 V-D 经验关系是
 156 指在 $2 \leq D \leq 5$ 范围内, 不同密度的块状(lump)、锥状(Conical)和六角板状
 157 (Hexagonal)霰粒子。高、低密度冰雹粒子的区分主要是依据 KH1983 (Knight and
 158 Heymsfield, 1983)给出的 2 类 V-D 经验关系, 其中高密度冰雹是指冰雹密度值为
 159 0.82 g cm^{-3} , V-D 经验关系为 $V = 10.58(0.1D)^{0.267}$, 而低密度冰雹是指密度范围
 160 为 $0.31\text{--}0.61 \text{ g cm}^{-3}$ 的冰雹粒子, 对应的 V-D 经验关系为 $V = 8.445(0.1D)^{0.553}$,
 161 这里称为低密度冰雹I, 高、低密度冰雹的 V-D 关系均为野外收集的冰雹样品,
 162 在实验室直接测量得到。由于直径范围为 $5\text{--}8 \text{ mm}$ 大雨滴和低密度小冰雹具有
 163 相似的 V-D 关系, 依据 Friedrich et al.(2013) (F2013)的处理方法, 将雨滴和低密
 164 度冰雹I的 V-D 关系平均, 从而得到直径范围为 $5\text{--}8 \text{ mm}$ 低密度冰雹的另一个 V-D
 165 关系 $V = 12.43(0.1D)^{0.5}$, 这里称为低密度冰雹II, 用于判别 $5\text{--}8 \text{ mm}$ 尺度范围
 166 是否有低密度冰雹的参考。

167 依据实际测量的降水粒子谱浓度围绕对应的 V-D 经验曲线的分布情况, 可
 168 定性判定降水粒子类型。判别高、低密度冰雹类型主要依据围绕高密度和低密
 169 度I冰雹经验曲线的分布情况。需要说明的是, 低密度冰雹II仅作为 $5\text{--}8 \text{ mm}$ 尺
 170 度范围的低密度冰雹和雨滴的识别, 但如果分布在低密度冰雹I经验曲线附近的
 171 降水粒子浓度值很低, 作为雨滴和低密度冰雹I平均得到的低密度冰雹II的经验
 172 曲线则无实际参考价值, 因此高、低密度冰雹类型的判别主要依据高密度冰雹
 173 和低密度冰雹I的经验曲线。

174
 175

表 1 雨滴、冰雹下落末速度 (V) 与直径 (D) 的经验关系

粒径范围 (D, mm)	V-D 关系	文献来源
雨 $D < 8$	$V = 9.65 - 10.3e^{-0.6D}$	GK1949, A1973
霰 $2 \leq D \leq 5$	Lump I: $\rho = 0.1\text{--}0.2 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$: $V = 1.3D^{0.66}$	LH1974
	Lump II: $\rho = 0.2\text{--}0.45 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$: $V = 1.5D^{0.37}$	
	Conical: $V = 1.2D^{0.65}$	
	Hexagonal: $V = 1.1D^{0.57}$	
$D > 5$	$\rho = 0.31\text{--}0.61 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$:	

$$(I) V = 8.445(0.1D)^{0.553} \quad \text{KH1983}$$

$$(II) V = 12.43(0.1D)^{0.5} \quad \text{F2013}$$

$$\rho = 0.82 \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}:$$

$$V = 10.58(0.1D)^{0.267} \quad \text{KH1983}$$

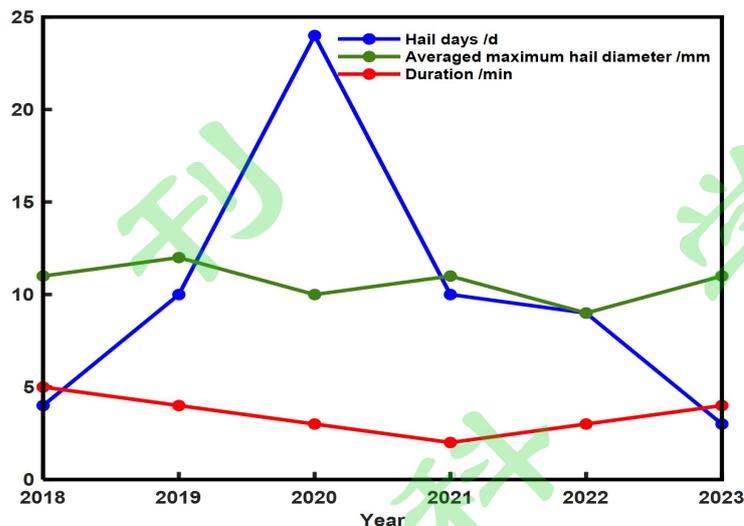
176

177 3 结果分析

178 3.1 冰雹日数、大小和持续时间分布特征

179 2018–2023 年期间,红河州 13 个国家气象观测站总计观测到冰雹日数为 60
180 d, 年均冰雹日数为 10 d, 平均最大冰雹直径为 11 mm, 最大冰雹直径为 19 mm,
181 平均冰雹持续时间 3 min, 最长持续时间为 12 min。注: 观测站观测的冰雹持
182 续时间是指观测站降雹过程的持续时间, 并不是实际冰雹天气的持续时间。

183 图 2 为 2018–2023 期间冰雹日数、平均最大直径和平均持续时间的年际分
184 布和变化。可以看到, 冰雹日数从 2018 年仅有 4 d 降雹, 到 2020 年的 24 d,
185 随后冰雹日数开始逐年下降, 2023 年为 3 d。为什么 2020 年该地区冰雹发生日
186 数异常偏高呢? 代谭龙等 (2021) 对 2020 年中国气候主要特征和天气气候事件
187 的研究表明, 2020 年我国整体偏暖, 强对流天气频次高, 极端性强, 仅 4 月 21–26
188 日, 在云南文山、红河、德宏等 6 市(州)23 个县(市)产生强冰雹天气。西南地
189 区冰雹天气的形成与青藏高原冬春季盛行的南支槽波动、南亚副热带高压环流,
190 以及夏季高原反气旋环流和南亚季风环流等密切相关 (郑皎等, 2024a, b)。西
191 太平洋副热带高压异常偏强、偏西, 以及冬春季节印缅槽活跃导致的印度洋水
192 汽向西南地区的输送加强 (赵俊虎等, 2020), 应与 2020 年西南冰雹天气显著
193 增加存在密切关系。年平均最大冰雹直径范围为 9–16 mm, 从 2018 年开始, 略
194 有减小, 但年际变化并不明显。测站观测的降雹平均持续时间为 2–5 min, 年际
195 变化也不明显。



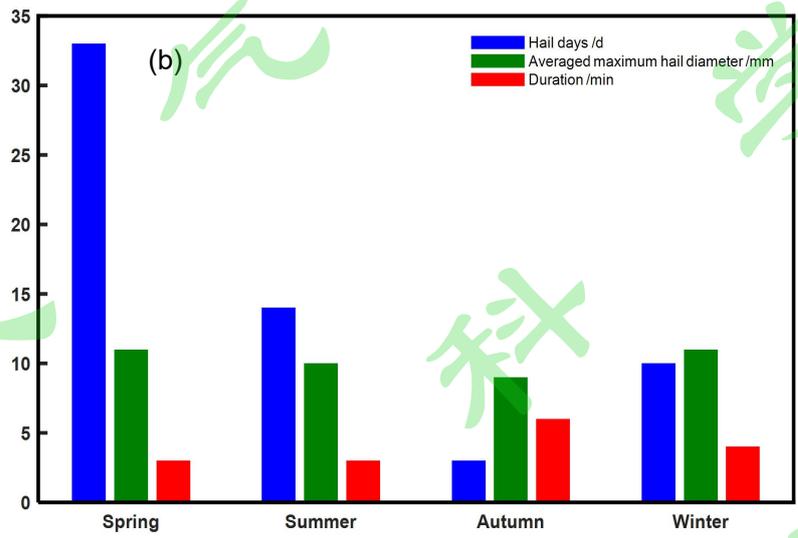
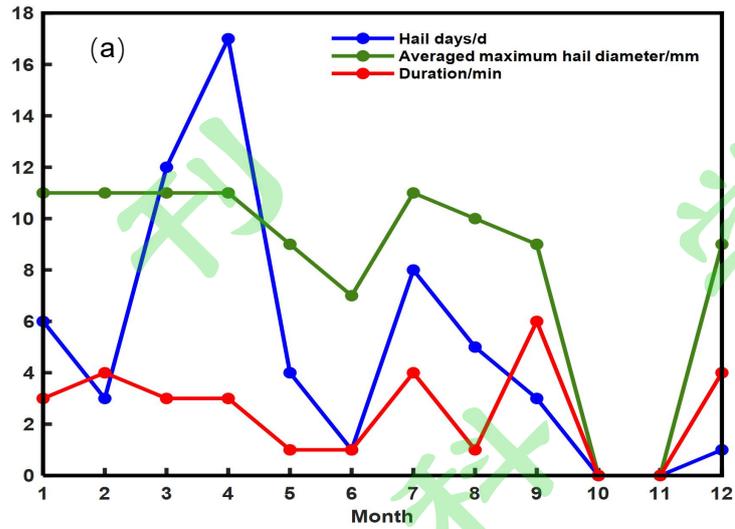
196

197 图 2 2018–2023 年云南红河冰雹日数(单位: d)、平均最大直径(单位: mm)和平均持续时间
198 (单位: min)分布

199 Fig.2 Annual distribution of hail days (unit: d), averaged maximum hail diameter (unit: mm) and
200 hail duration (unit: min) during 2018-2023 in Honghe, Yunnan

201

202 图 3 给出了 2018–2023 年期间的冰雹日数、平均最大直径和持续时间的月、
203 季节累计分布。2018–2023 年期间总计发生冰雹日数为 60 d, 可以看到, 冰雹
204 日主要分布在春季 3–4 月, 4 月冰雹日数最多, 达到 17 d (图 3a)。6 年期间
205 春季冰雹日数最多, 总计为 33 d, 占 60 d 总冰雹日数的 50 %以上, 年均春季
206 冰雹日数为 5.5 d (图 3b)。其次为夏季 6–8 月, 总计冰雹日数为 14 d, 年均
207 2.3 d。冬季也有冰雹天气发生, 总计冰雹日数为 10 d, 年均均为 1.7 d。秋季是
208 冰雹日数最少的季节, 总计仅有 3 d, 年均 0.5 d, 特别在 10–11 月冰雹天气很
209 少。平均最大冰雹直径为 10–11 mm, 平均冰雹持续时间 3–5 min, 两者的季节
210 差异并不明显。这种明显的冰雹日数季节变化, 与该地区局地大气环流的季节
211 性特征存在密切关系, 冬春季主要受高原活跃的西风环流南支槽波动和地形抬
212 升的作用, 易促发对流天气, 南亚高压西侧边缘的暖湿气流提供了水汽输送,
213 而夏季主要受高原高空反气旋环流形成的东北风与盛行的西南季风的作用促发
214 对流(郑皎等, 2024a, b)。



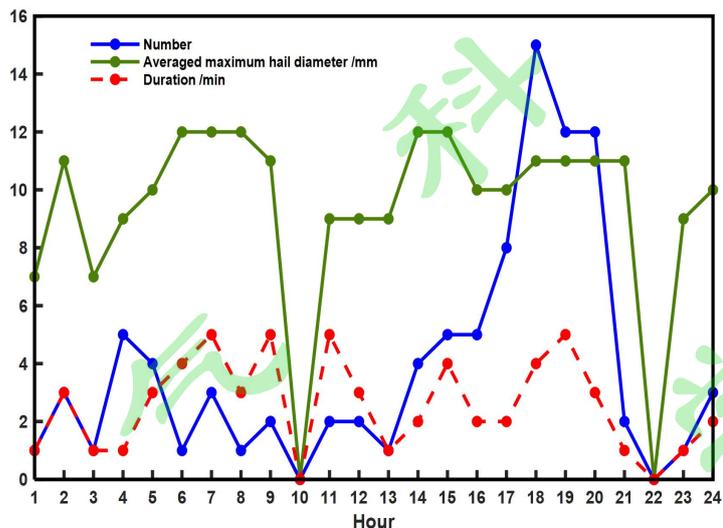
215
216
217

218
219
220
221
222
223
224
225
226

图 3 2018–2023 年期间云南红河冰雹日数 (单位: d), 平均最大直径 (单位: mm) 和持续时间 (单位: min) 的 (a) 月和 (b) 季节分布。图 3b 中的蓝色表示冰雹日数, 绿色表示冰雹平均最大粒径, 红色表示冰雹平均持续时间

Fig.3 (a) Monthly and (b) seasonal distributions of the number of hail days (unit: d), averaged maximum hail diameter (unit: mm) and hail duration (unit: min) during 2018–2023 in Honghe, Yunnan. In Fig.3b, blue color is hail days, green is averaged maximum hail diameter, and red is mean duration of hail

227 为揭示冰雹的日变化特征，图 4 给出了 2018–2023 年期间冰雹发生次数、
 228 平均最大冰雹直径和持续时间的日变化分布。这里的冰雹发生次数是指观测站
 229 每小时观测到的冰雹次数，是通过分钟级天气现象仪观测数据得到。可以看到，
 230 降雹时段主要集中在午后 (13:00–17:00) 和傍晚 (18:00–22:00)，平均最大冰雹直径
 231 径 11 mm，平均持续时间 3 min。其次是凌晨 (00:00–06:00)，平均最大冰雹直径
 232 为 10 mm，平均冰雹持续时间 3 min。



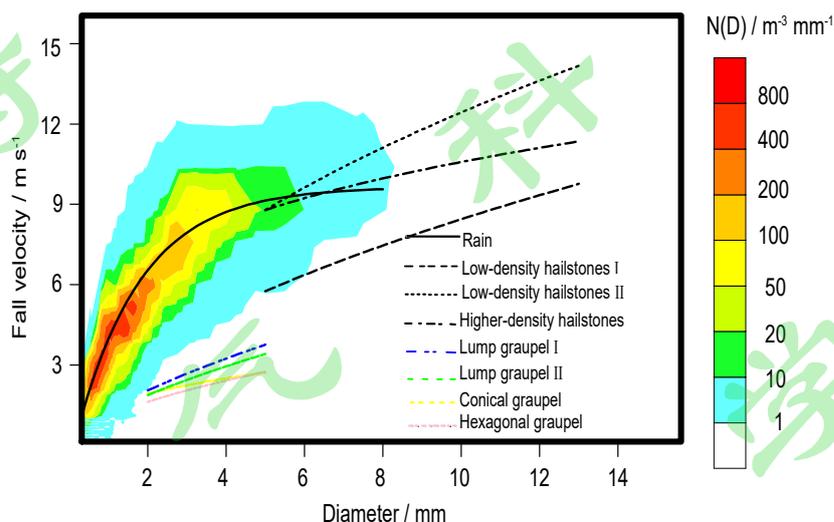
233
 234 图 4 2018–2023 年云南红河气象站观测的冰雹发生次数、平均最大直径(单位: mm)和持续
 235 时间 (单位: min) 的日变化

236 Fig.4 Daily variations of hail occurrence number, averaged maximum diameter (unit: mm) and
 237 duration (unit: min) observed at meteorological stations during 2018–2023 in Honghe, Yunnan

239 3.2 冰雹类型及谱分布特征

240 图 5 为 2018–2023 年 60 d 冰雹日的 93 份降水粒子 (雨滴、冰雹) 谱数浓
 241 度平均的 V-D 分布。由图可见, $D < 5$ mm 的降水粒子与雨滴的经验关系曲线较
 242 为一致, 降水粒子均匀分布在雨滴经验分布曲线的两侧, 而且数浓度高, 说明
 243 该尺度档的降水粒子主要由雨滴组成。粒径在 $2 \leq D \leq 5$ mm 的块状(lump) 霰I、
 244 霰II, 圆锥形 (conical) 霰和六角板状 (hexagonal) 霰的经验曲线附近的粒子数
 245 浓度均小于 $1 \text{ m}^{-3} \text{ mm}^{-1}$, 表明霰粒子很少。对于粒径 $D \geq 5$ mm 的情况, 粒子数
 246 少, 且其分布已偏离了雨滴经验曲线。尽管 Friedrich et al (2013)认为, 低密度

247 雹II线和高密度雹线在粒子直径 5–8 mm 仍有可能以大雨滴为主，但低密度雹I
 248 线附近粒子浓度基本小于 $1 \text{ m}^{-3} \text{ mm}^{-1}$ ，而高密度雹线两侧分布的粒子浓度比较
 249 大，说明这一区间以高密度冰雹为主，其粒径在 10 mm 左右。由此可见，60 d
 250 冰雹日过程中，主要为雨夹雹的混合相态降水过程，93 份平均降水粒子谱分布
 251 显示，冰雹以直径 9–10 mm 高密度冰雹为主，低密度冰雹和霰粒子很少。
 252



253
 254 图 5 2018–2023 年冰雹日 93 份平均降水粒子谱数浓度 (彩色阴影, 单位: $\text{m}^{-3} \text{ mm}^{-1}$) 的 V-D
 255 分布。纵坐标为降水粒子末速度 (V, 单位: m s^{-1}), 横坐标为粒子直径 (D, 单位: mm)。
 256 图中的线条表示不同降水粒子的经验曲线, 对应的经验公式见表 1。黑色实线为雨滴, 黑
 257 色短线为低密度冰雹 I, 黑色点线为低密度冰雹 II, 黑色点画线表示高密度冰雹, 蓝色点画
 258 线为块状 (lump) 霰 I, 绿色短线是块状霰 II, 黄色短线为锥状 (conical) 霰, 紫色点画线为六
 259 角板状 (hexagonal) 霰

260 Fig.5 V-D diagram of mean number concentration (color shaded, unit: $\text{m}^{-3} \text{ mm}^{-1}$) of 93
 261 precipitating particle spectra for hail days during 2018–2023. The vertical axis is the fall velocity
 262 (V, unit: m s^{-1}) and horizontal axis is the diameter (D, unit: mm) for precipitating particles. The
 263 various lines denote different empirical curves of precipitating particles and corresponding
 264 empirical equations are given in Table 1. Black solid line is rain drops, Black short-dashed line is
 265 low-density hail I, black dotted line is low-density hail II, black dash-dotted line is high-density
 266 hail. Blue dash-dotted line is lump graupel I, green dashed line is lump graupel II, yellow dashed

267 line is conical graupel and purple dash-dotted line is hexagonal graupel

268

269 图 6 分别给出了春、夏、秋、冬季冰雹日平均降水粒子谱数浓度的 V-D 分
270 布。从图 6a 可知，春季， $D \leq 5$ mm 的降水粒子数浓度较高，与雨滴谱的 V-D 经
271 验曲线分布也较为一致，说明春季降雹过程也伴随着降雨过程，为混合相态降
272 水过程，而且雨滴占主要部分。在 $2 \leq D \leq 5$ mm 范围，分布在各种形状的霰粒子
273 经验曲线附近的数浓度均小于 $1 \text{ m}^{-3} \text{ mm}^{-1}$ ，说明霰粒子少。 $D > 5$ mm 时，分布在
274 低密度冰雹 I 经验曲线的粒子浓度很少，说明低密度冰雹数量很少，此时，低
275 密度冰雹 II 曲线无参考意义。而分布在高密度冰雹经验曲线附近的浓度最大值
276 可达到 $10 \text{ m}^{-3} \text{ mm}^{-1}$ 以上，说明该尺度范围的粒子主要为高密度冰雹粒子。最大
277 冰雹尺度达到 8 mm 及以上。

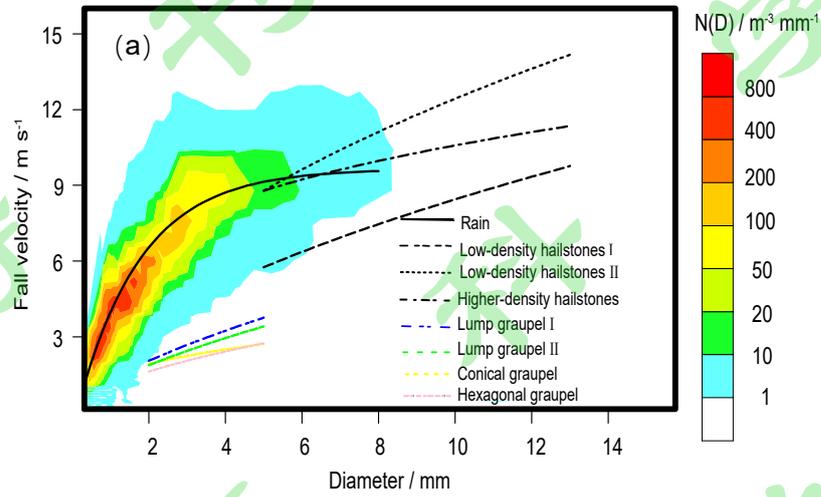
278 从图 6b 可知，夏季，对于 $D \leq 5$ mm 的降水粒子，与雨滴的经验曲线分布比
279 较一致，说明夏季也为雨滴和冰雹的混合相态降水，而且雨滴也占主要部分。
280 在 $2 \leq D \leq 5$ mm，在霰经验曲线附近几乎无明显粒子分布，说明夏季冰雹过程的
281 霰粒子也很少。 $D > 5$ mm 时，在低密度雹 I 经验曲线附近的粒子很少，而在高密
282 度冰雹经验曲线附近分布的粒子较多，说明夏季地面仍然以高密度冰雹为主。
283 平均最大冰雹尺度在 8 mm 左右。

284 图 6c 显示，秋季，在 $2 \leq D \leq 5$ mm 范围，在霰粒子经验曲线附近也没有浓
285 度大于 $1 \text{ m}^{-3} \text{ mm}^{-1}$ 的粒子分布，说明霰粒子浓度低。而在 $D > 5$ mm 时，在低密
286 度冰雹 I 经验曲线附近，存在较低浓度的粒子分布，说明秋季存在少量的低密度
287 冰雹粒子，最大尺度可达到 8 mm 以上。但在高密度冰雹经验曲线附近分布的粒
288 子数量较多，说明仍然以高密度冰雹为主，其浓度相对春、夏季较低，最大冰
289 雹尺度在 7 mm 左右。

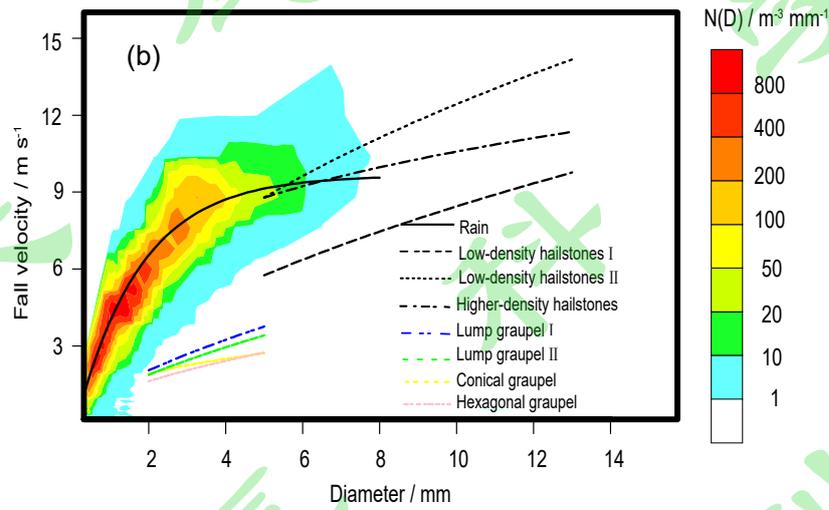
290 从图 6d 可看出，冬季，雨滴浓度比较低，说明冰雹过程伴随着弱降雨过程。
291 在 $2 \leq D \leq 5$ mm 范围，围绕霰粒子经验曲线附近的粒子浓度大于 $1 \text{ m}^{-3} \text{ mm}^{-1}$ 的粒
292 子几乎没有，说明霰粒子浓度低。 $D > 5$ mm 时，在低密度冰雹 I 经验曲线附近分
293 布的粒子数量也很少，而围绕高密度冰雹经验曲线的粒子数量比较高，说明冬
294 季以高密度雹粒子为主，最大冰雹尺度可达到 8 mm 左右。

295 由此可见，除冬季外，该地区降雹过程往往伴随着明显降雨过程，而且雨

296 滴粒子占主要部分。冰雹粒子谱数浓度的V-D分布具有较为明显的季节变化特
297 征，春、夏季冰雹浓度和尺度均比较大，以高密度冰雹为主，低密度冰雹和霰
298 粒子浓度均比较低。



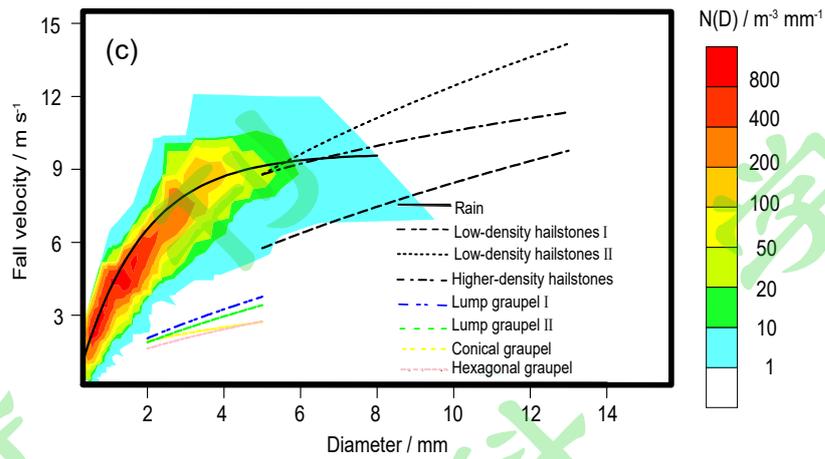
299



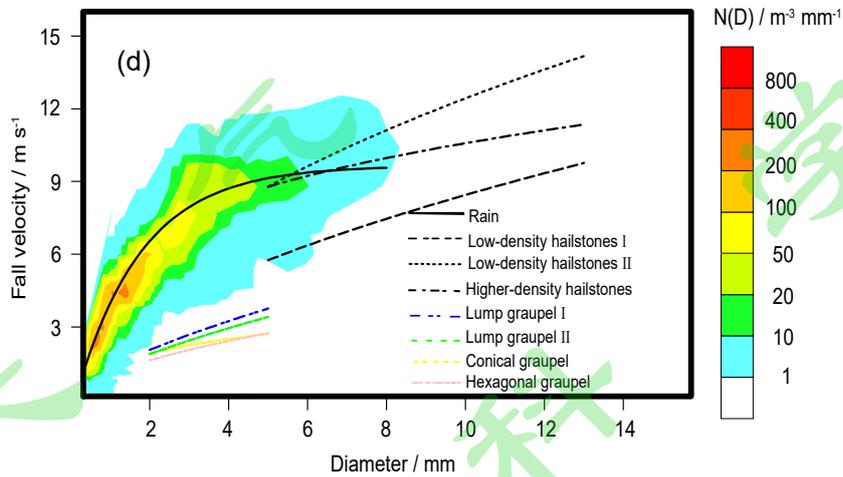
300

301

302



303



304

305 图6 同图5, 但为季节分布, (a)春季, (b)夏季, (c)秋季, (d)冬季

306 Fig.6 Same as in Fig.5, but for seasonal distribution, (a) spring, (b) summer, (c) autumn, (d)

307 winter

308

309 图7 为2018–2023年云南红河冰雹日的降水粒子总散点和平均谱、季节平

310 均谱分布。图7a的总散点和平均谱分布显示, 降水粒子谱为单峰谱, 谱宽较宽,

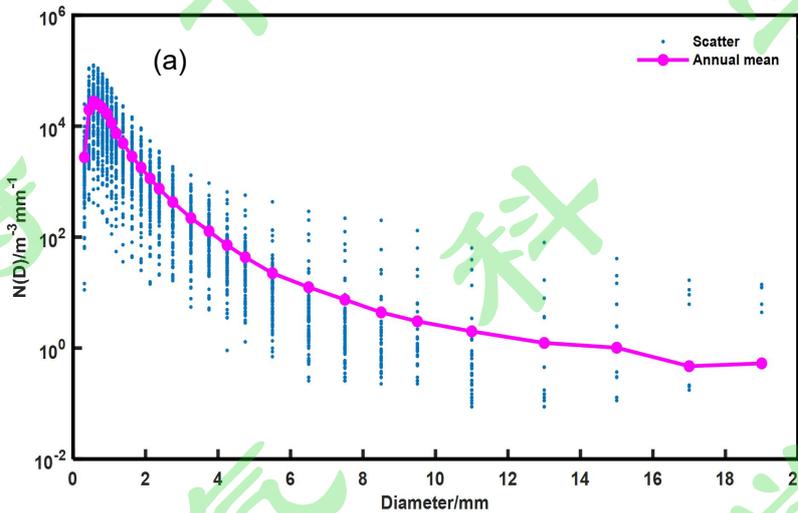
311 为0.312–19 mm, 峰值位于0.562 mm处, 峰值后 $N(D)$ 随着 D 增大而减小。对于

312 $D > 5$ mm的降水粒子(冰雹和大雨滴), $N(D)$ 从 $10^2 \text{ m}^{-3} \text{ mm}^{-1}$ 开始, 呈数量级减

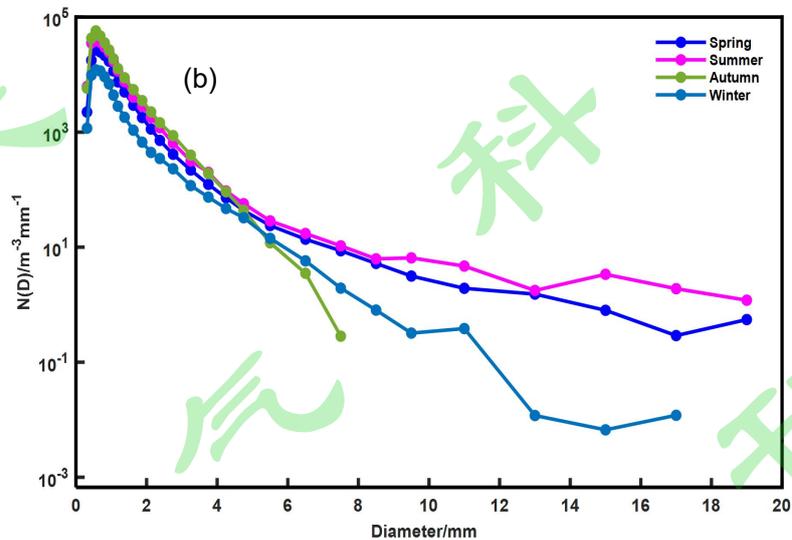
313 少, 峰值直径范围为5.5–11.0 mm, 峰值后 $N(D)$ 随着 D 增大而显著减小, 最大

314 粒径以11.0 mm以下为主。

315 图 7b 的季节平均分布显示，降水粒子谱均为单峰谱。春、夏季谱宽明显大
 316 于秋、冬季，均为 0.312–19 mm。秋季最窄，为 0.312–7.5 mm。冬季为 0.312–17
 317 mm。D>5 mm 时，春、夏季最大冰雹粒径达到 19 mm，而且浓度也比较高。虽
 318 然冬季最大粒径达到 17 mm，但浓度小。秋季最大粒径仅为 7.5 mm。



319
 320



321

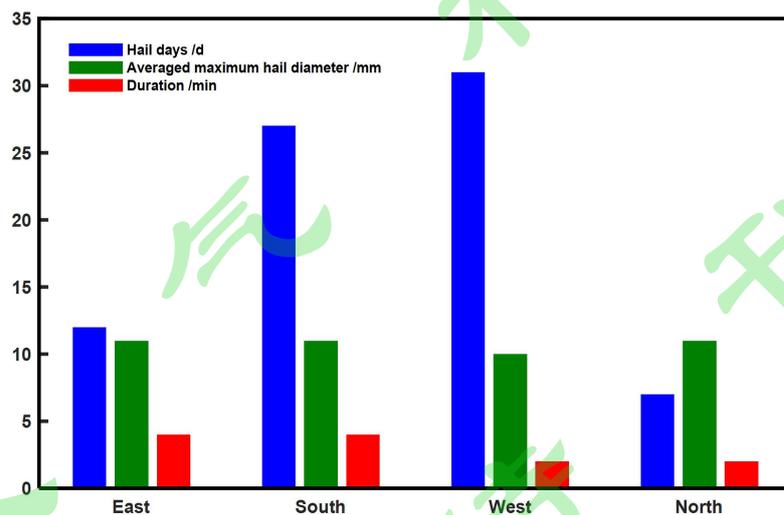
322 图 7 2018–2023 年云南红河州冰雹日降水粒子的 (a) 总散点和平均谱，(b) 季节平均谱
 323 Fig.7 (a) total scattered and mean spectra, (b) seasonal mean spectra of precipitating particles for
 324 hail days during 2018–2023 in Honghe Yunnan

325

326 3.3 冰雹地理分布特征

327 红河州地处云贵高原，地势总体呈西北高、东南低的走势，境内高山、河
328 谷、盆地相间分布（图 1）。红河自西向东横穿全境，横断山纵谷的哀牢山沿
329 红河南岸蜿蜒伸展到越南境内，为州内的主要山脉，境内最高海拔高差近 3000
330 米，区域气候特征明显。红河州是东亚季风与西南季风的交汇区，也是昆明准静
331 止锋影响较大的地区，在大气环流与复杂的地形条件影响下，造成冰雹的地理
332 空间分布差异较大。

333 从 2018–2023 期间冰雹日数空间分布可知(图 8)，西部山区冰雹日数最多，
334 达到 31 d, 其次为南部，冰雹日数为 27 d。而北部和东部冰雹日数较少，分别
335 为 7 d 和 12 d。平均最大冰雹粒径在 10–11 mm，区域变化不明显。平均冰雹
336 持续为 2–4 min，空间变化也不明显。西部、南部地区冰雹日数偏多与该区域独
337 特的地形、天气系统有密切的关系。该区域是青藏高原南支西风槽波动东移影
338 响最大的地区，造成冰雹出现概率较大。同时，西部、南部也是西南暖湿气流
339 的迎风坡，易促使对流形成和发展(郑皎等，2024a, b)。另外，该地区多为山地
340 且地形复杂，海拔高差大，午后强烈的辐射加强易造成局地冰雹天气。北部和
341 东部大部为丘陵和坝子，地形相对简单，造成局地冰雹天气的概率较小。北部
342 和东部形成冰雹的天气系统多为影响较大的冷锋切变，且有深厚的不稳定能量
343 配合才能产生冰雹天气。



344 图 8 2018–2023 年云南红河不同区域的冰雹日数（单位：d）、冰雹平均最大直径（单位：
345 mm）和冰雹持续时间（单位：min）的分布。蓝色表示冰雹日数，绿色表示平均最大冰雹粒
346

347 径, 红色表示平均冰雹持续时间

348 Fig.8 Distributions of hail days (unit: d), averaged maximum diameter (unit: mm) and duration
349 (unit: min) during 2018–2023 in the different regions of Honghe, Yunnan. Blue is hail days,
350 green is averaged maximum diameter, and red is mean duration

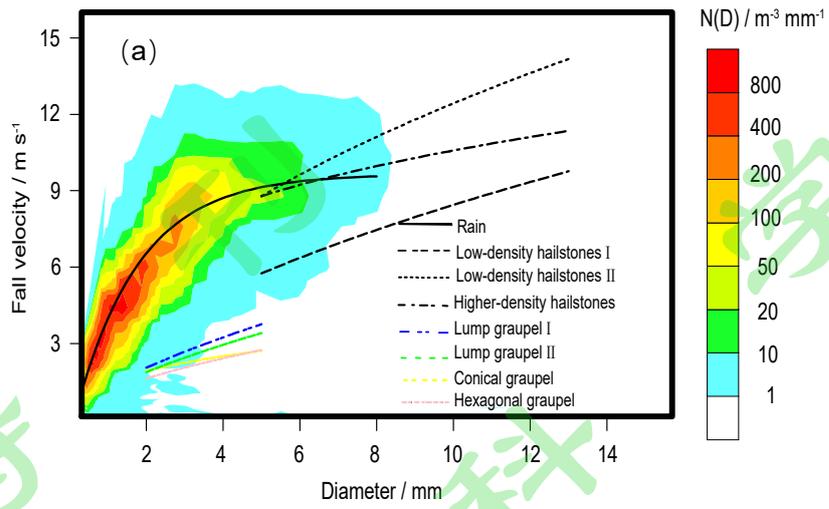
351

352 图 9 给出了红河州东、南、西、北区域平均降水粒子浓度的 V-D 分布。可
353 以看到, 不同区域主要为雨滴和冰雹的混合相态降水过程, 雨滴占主要部分。
354 图 9a 显示, 东部冰雹过程在 $2 \leq D \leq 5$ mm 时, 有少量的霰粒子。 $D > 5$ mm 时,
355 以高密度冰雹为主, 浓度大于 $1 \text{ m}^{-3} \text{ mm}^{-1}$ 的冰雹最大平均粒径在 8 mm 左右。图
356 9b 显示, 南部在 $2 \leq D \leq 5$ mm 范围, 浓度大于 $1 \text{ m}^{-3} \text{ mm}^{-1}$ 的霰粒子基本没有。
357 在 $D > 5$ mm 时, 以高密度雹为主, 但也存在数量较少的低密度冰雹粒子。浓度
358 大于 $1 \text{ m}^{-3} \text{ mm}^{-1}$ 的冰雹最大平均粒径达到 8 mm 以上。图 9c 显示, 西部以高密
359 度雹为主, 霰粒子和低密度雹很少。浓度大于 $1 \text{ m}^{-3} \text{ mm}^{-1}$ 的冰雹最大平均粒径
360 在 7 mm 左右。图 9d 显示, 北部是降水粒子数浓度和尺度最小的一个区域, 也
361 没有浓度大于 $1 \text{ m}^{-3} \text{ mm}^{-1}$ 霰粒子出现。以高密度雹为主, 浓度大于 $1 \text{ m}^{-3} \text{ mm}^{-1}$
362 的冰雹最大平均粒径小于 7 mm。

363 图 10 为 2018~2023 年各区域平均 $N(D) - D$ 谱分布。各区域平均降水粒子
364 谱均为单峰谱, 南、西、北部峰值均位于 0.562 mm 处, 东部峰值则位于 0.687
365 mm 处。西部谱宽为 0.312–17.0 mm, 但 $D > 5$ mm 的粒子数浓度下降明显, 说明
366 西部虽然冰雹发生频率较高, 但大粒径冰雹少。东、南、北部谱宽均为 0.312–19.0
367 mm, 但东、北部大冰雹粒子数浓度明显高于南部。造成各区域冰雹谱差异的原
368 因与冰雹产生的机制不同密切相关, 西部冰雹主要与地形热对流天气有关, 冰
369 雹天气发生频率高, 但冰雹云整体偏弱。而其他区域的冰雹与系统性天气密切
370 相关, 冰雹云整体偏强, 产生的冰雹尺度较大。

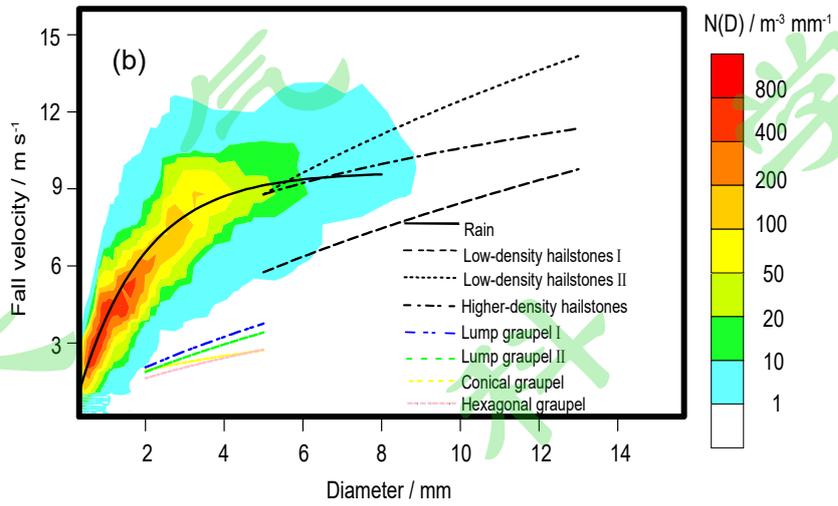
371 由此可见, 云南南部冰雹天气存在明显的地理分布差异。西部和南部冰雹
372 日数最多, 而北部和东部冰雹日数较少。平均最大冰雹粒径和持续时间均无明
373 显区域变化特征。不同区域冰雹谱型均为单峰谱。西部虽然冰雹发生频率较高,
374 但大粒径冰雹少, 且以高密度冰雹为主, 霰粒子和低密度雹较少。

375

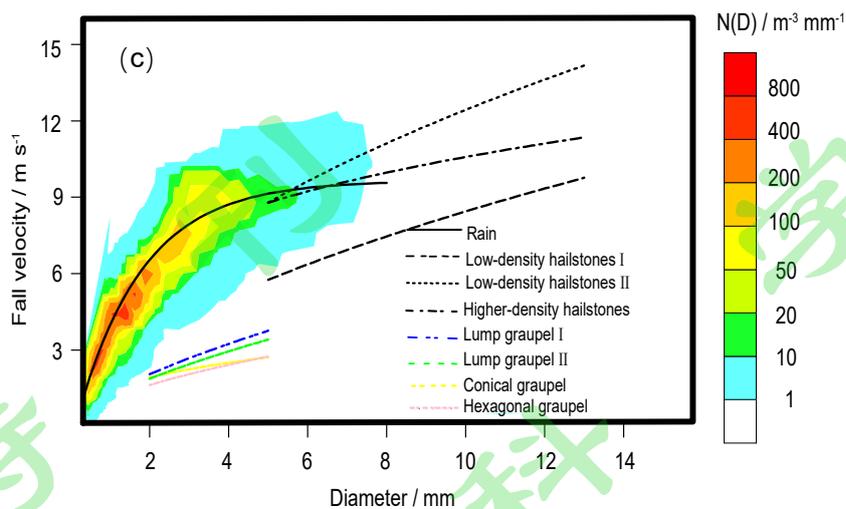


376

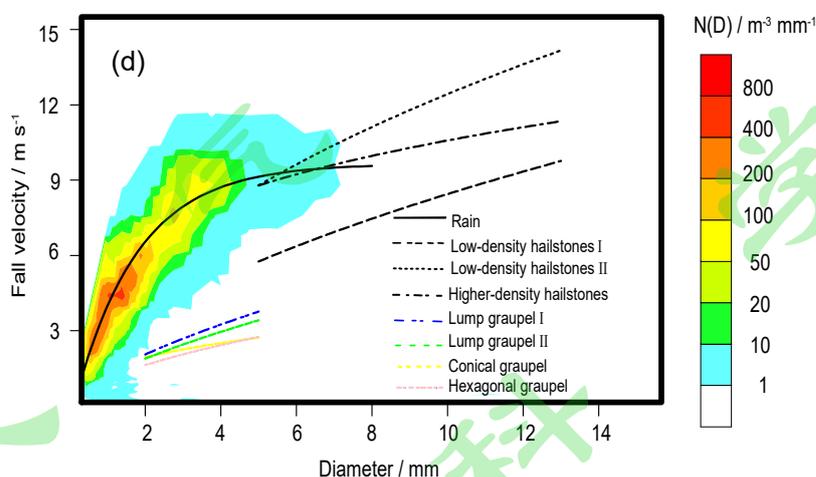
377



378



379

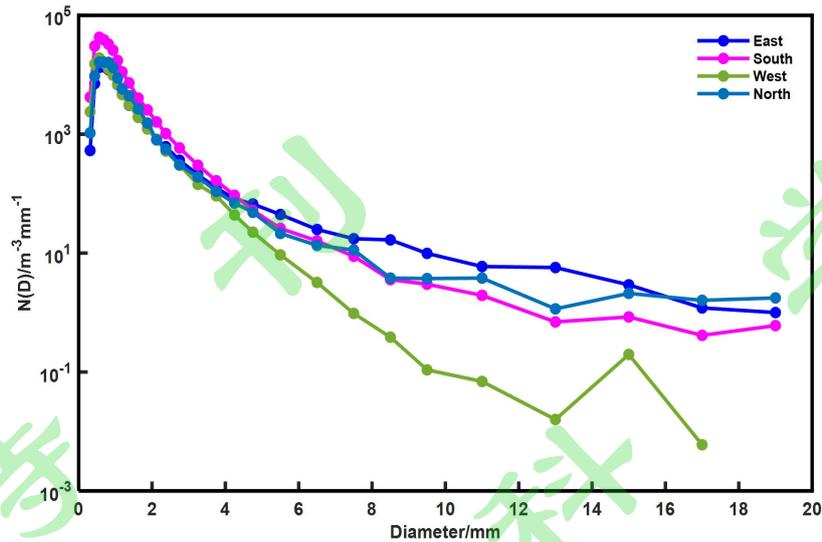


380

381 图9 2018–2023年云南红河州不同区域冰雹日平均的降水粒子谱数浓度(彩色填充,单位:
382 $\text{m}^{-3}\text{mm}^{-1}$)的V-D分布,(a)东部,(b)南部,(c)西部,(d)北部。V为降水粒子下落速度(单
383 位: m s^{-1}),D为降水粒子直径(单位: mm)

384 Fig.9 V-D diagram of mean number concentration (color shaded, unit: $\text{m}^{-3}\text{mm}^{-1}$) of precipitating
385 particle spectra for hail days in the different regions of Hongye during 2018–2023, (a) east, (b)
386 south, (c) west, (d) north. V is the fall velocity (unit: m s^{-1}), D is diameter (unit: mm)

387



388

389 图 10 2018–2023 年云南红河州东、南、西、北区域冰雹日平均降水粒子谱分布

390 Fig.10 Mean spectrum distribution of precipitating particles for hail days in the east, south, west
391 and north regions of Honghe, Yunnan during 2018–2023

392

393 4 结论与讨论

394 利用 2018–2023 年云南红河州 13 个国家气象站降水粒子谱仪(天气现象仪)
395 观测到的 60 个冰雹日的 93 份降水粒子谱数据,分析了该地区冰雹日数、大小、
396 持续时间和冰雹类型、谱分布的时空分布特征。主要结论如下:

397 (1) 2018–2023 年期间年平均冰雹日数为 10 d, 最多冰雹日数出现在 2020
398 年, 为 24 d, 与该年异常的大气环流有关; 冰雹日数存在明显的季节变化特征,
399 春季冰雹日数最多, 6 年总计达到 33 d, 占总冰雹日数 60 d 的 50 % 以上。秋
400 季最少, 总计为 3 d; 冰雹日数也存在明显的日变化特征, 冰雹主要发生在午
401 后和傍晚。

402 (2) 年均最大冰雹直径范围为 9–16 mm, 测站平均降雹持续时间为 2–5 min。
403 冰雹谱总体呈单峰分布。春、夏季最大冰雹粒径达到 19 mm, 而且浓度也比较
404 高, 且以高密度冰雹为主, 低密度冰雹和霰粒子均很少。秋季冰雹浓度、尺度
405 最小, 最大粒径仅为 7.5 mm, 以高密度冰雹为主。冬季最大粒径可达到 17 mm,
406 但浓度偏小。

407 (3) 从地理分布来看, 2018–2023 年期间, 红河州西部和南部冰雹日数最

408 多，分别为 31 d、27 d。而北部和东部冰雹日数较少，分别为 7 d 和 12 d。平
409 均最大冰雹粒径和持续时间均无明显区域变化特征。不同区域冰雹谱型均为单
410 峰谱。红河州西部虽然冰雹日数多，但大粒径冰雹数最少，且以高密度冰雹为
411 主，霰粒子和低密度冰雹很少。东、南、北部最大冰雹粒径均达到 19.0 mm。
412 南部以高密度冰雹为主，存在少量的低密度冰雹粒子。东部有少量霰粒子，北
413 部霰粒子很少。

414 本研究结果是基于 2018–2023 年期间云南南部红河州 13 个国家气象站的降
415 水粒子谱仪测量的 60 d 冰雹日过程的 93 份分钟级降水粒子谱数据得到的，具
416 有较高的代表性。但由于降水粒子谱仪测量数据同时包含了雨滴、霰、冰雹谱，
417 本文是基于国外获得的冰雹、霰粒子经验分布曲线区分不同密度的冰雹粒子，
418 尽管该经验曲线包含的密度范围较大，但由于不同地区冰雹密度存在一定的差
419 异，因此，本结果关于冰雹类型，特别是低密度冰雹、霰粒子的分类分析具有
420 一定的不确定性。另外，在 5–8 mm 之间存在大雨滴和小冰雹的重叠问题，因
421 此也具有一定的不确定性。如何更为准确合理地区分大雨滴和小冰雹粒子，需
422 要更进一步的外场观测和室内实验研究。

423
424
425
426
427
428
429
430
431
432
433
434
435
436

参考文献 (References)

- 437
 438 Auer A H. 1972. Distribution of graupel and hail with size [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 100(5): 325–328.
 439 doi:10.1175/1520-0493-100-05-0325
 440 Atlas D, Srivastava R C, Sekhon R S. 1973. Doppler radar characteristics of precipitation at vertical incidence[J].
 441 *Reviews of Geophysics*,11(1):1–35. doi:10.1029/RG011i001p00001
 442 Chen B, Yang J, Pu J. 2013. Statistical characteristics of raindrop size distribution in the Meiyu season observed in
 443 eastern China, *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, 91(2), 215–227. doi:10.2151/jmsj.2013-208
 444 代潭龙,王秋玲,王国复,等. 2021. 2020年中国气候主要特征及主要天气气候事件[J], *气象*, 47(4): 478–487.
 445 Dai T L, Wang Q L, Wang G F, et al, 2021. Climatic characteristics and major meteorological events over China
 446 in 2020 [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 47(4): 478–487. doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2021.04.009
 447 Dieling C, Smith M, Beruvides M. 2020. Review of impact factors of the velocity of large hailstones for laboratory
 448 hail impact testing consideration [J]. *Geosciences*,10(12): 500. doi:10.3390/geosciences10120500
 449 Friedrich K, Kalina E A, Masters F J, et al. 2013. Drop size distributions in thunderstorms measured by optical
 450 disdrometers during VORTEX2 [J]. *Mon. Wea. Rev.*,141(4): 1182-1203. doi:10.1175/MWR-D-12-00116.1
 451 Gunn R, Kinzer G D. 1949.The terminal velocity of fall for water droplets in stagnant air[J]. *J. Atmos. Sci.*, 6 (4):
 452 243–248. doi:10.1175/1520-0469(1949)006<0243:TTVOFF>2.0.CO;2
 453 Guo X L, Fu D H, Li X Y, et al. 2015. Advances in cloud physics and weather modification in China[J]. *Adv.*
 454 *Atmos. Sci.*, 32(2): 230–249. doi: 10.1007/s00376-014-0006-9
 455 黄美元,徐华英,周玲. 2000. 中国人工防雹四十年[J]. *气候与环境研究*,5(3): 318–328. Huang Meiyuan, Xu
 456 Huaying, Zhou Ling. 2000. 40 year’s hail suppression in China[J]. *Climatic and Environmental Research (in*
 457 *Chinese)*, 5(3): 318–328. doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2000.03.12
 458 黄美元,沈志来,洪延超. 2003. 半个世纪的云雾、降水和人工影响天气研究进展[J]. *大气科学*, 27(4):
 459 536-551. Huang Meiyuan, Shen Zhilai, Hong Yanchao. 2003. Advance of research on cloud and precipitation
 460 and weather modification in the latest half century[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*,
 461 27(4): 536–551. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2003.04.08
 462 Jaffrain J, Berne A. 2011. Experimental quantification of the sampling uncertainty associated with measurements
 463 from PARSIVEL disdrometers. *J. Hydrometeor.*, 12(3): 352–370. doi:10.1175/2010JHM1244.1
 464 Knight N C, Heymsfield A J. 1983. Measurement and interpretation of hailstone density and terminal velocity [J]. *J.*
 465 *Atmos. Sci.*, 40 (6):1510–1516. doi:10.1175/1520-0469(1983)040<1510:MAIOHD>2.0.CO;2
 466 刘全根,汤懋苍.1966. 中国降雹的气候特征[J], *地理学报*, 32(1): 48–65. Liu Chung-Gen, Tang Mou-Tsang.
 467 1966. The climatic characteristics of hail in China [J]. *Acta Geographica Sinica (in Chinese)*, 32(1): 48–65.
 468 doi: 10.11821/xb196601004
 469 刘彦,苏德斌,杨宁,等. 2023. 基于二维雨滴谱仪的巴彦淖尔地区降雹谱个例分析[J]. *高原气象*, 42(3):
 470 748–757. Liu Yan, Su Debin, Yang Ning, et al. 2023. Case study of hail size distribution in Bayannur area based
 471 on two-dimensional video disdrometer. *Plateau Meteorology (in Chinese)*. 42(3): 748–757. doi:
 472 10.7522/j.issn.1000-0534.2022.00059
 473 Lozowski E P, Strong G S. 1978. On the calibration of hailpads [J]. *J. Appl. Meteorol. Clim.*, 17:521–528.
 474 doi:10.1175/1520-0450(1978)017<0521:OTCOH>2.0.CO;2
 475 Locatelli J D, Hobbs P V. 1974. Fall speeds and masses of solid precipitation particles. *J. Geophys. Res.*,79,
 476 2185–2197. doi:10.1029/JC079i015p02185
 477 罗喜平,廖波,张小娟,等. 2022. 1961–2020年贵州冰雹气候特征[J]. *干旱气象*, 40(6):1024–1032. Luo Xiping,
 478 Liao Bo, Zhang Xiaojuang, et al. 2022. Climatic characteristics of hail in Guizhou from 1961 to 2020 [J] *Arid*

479 Meteorology (in Chinese), 40(6): 1024–1032. doi: 10.11755/j.issn.1006-7639(2022)-06-1024

480 Macklin W C, Ludlam F H. 1961. The fallspeeds of hailstones[J]. Q. J. Roy Meteor. Soc., 87(371):72–81.

481 doi:10.1002/qj.49708737109

482 牛生杰, 马磊, 翟涛. 1999. 冰雹谱分布及 Ze-E 关系的初步分析[J]. 气象学报, 57(2):90–98. Niu Shengjie,

483 Ma Lei, Zhai Tao. 1999. Preliminary analysis of the hailstone spectra distribution and the relations between

484 Ze and E. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), (2): 217–225. doi: 10.11676/qxxb1999.020

485 Sánchez J L, Gil-Robles B, Dessens J, et al. 2009. Characterization of hailstone size spectra in hailpad networks in

486 France, Spain, and Argentina [J]. Atmos. Res., 93(1-3): 641–654. doi:10.1016/j.atmosres.2008.09.033

487 Schuur T J, Ryzhkov A V, Zrnić D S, et al. 2001. Drop size distributions measured by a 2D video disdrometer:

488 Comparison with dual-polarization radar data. J. Appl. Meteorol. Climatol., 40(6): 1019–1034.

489 doi:10.1175/1520-0450(2001)040<1019:DSDMBA>2.0.CO;2

490 Tang J, Guo X L, Chang Y, et al. 2021. Temporospatial distribution and trends of thunderstorm, hail, gale, and

491 heavy precipitation events over the Tibetan Plateau and associated mechanisms[J]. J. Climate, 9623–9644.

492 doi:10.1175/JCLI-D-21-0494.1

493 Tokay A, Wolff D B, Petersen W A. 2014. Evaluation of the new version of the laser-optical disdrometer, OTT

494 Parsivel². J. Atmos. Oceanic. Technol., 31(6): 1276–1288. doi:10.1175/JTECH-D-13-00174.1

495 Ulbrich C W, Atlas D. 2007. Microphysics of raindrop size spectra: Tropical continental and maritime storms. J.

496 Appl. Meteorol. Climatol., 46(11): 1777–1791. doi:10.1175/2007JAMC1649.1

497 王俊, 王文青, 王洪, 等. 2021. 山东北部一次夏末雹暴地面降水粒子谱特征. 应用气象学报, 32(3): 370–384.

498 Wang Jun, Wang Wenqing, Wang Hong, et al. 2021. Hydrometeor particle characteristics during a late

499 summer hailstorm in northern Shandong. J. Appl. Meteor. Sci. (in Chinese), 32(3): 370–384.

500 doi:10.11898/1001-7313.20210309

501 Wen L, Zhao K, Zhang G F, 2016. Statistical characteristics of raindrop size distributions observed in East China

502 during the Asian summer monsoon season using 2-D video disdrometer and Micro Rain Radar data, J.

503 Geophys. Res.-Atmospheres, 121(5): 2265–2282. doi:10.1002/2015JD024160

504 Xie B G, Zhang Q H, Wang Y Q. 2010. Observed characteristics of hail size in four regions in China during

505 1980–2005[J], J. Climate, 23: 4973–4982. doi:10.1175/2010JCLI3600.1

506 Xu J L. 1983. Some hail research in China. Bull. Amer. Meteor. Soc., 64: 124–132.

507 doi:10.1175/1520-0477(1983)064<0124:SHRIC>2.0.CO;2

508 杨静, 姚秀萍, 李彦霖, 等. 2023. 云贵高原东北部一次罕见冰雹超级单体结构特征与发展分析. 高原气象,

509 42(2): 374–385. Yang Jing, Yao Xiuping, Li Yanlin, et al. 2023. Structural characteristics and developmental

510 analysis of the rare hail supercell in the northeast Yunnan-Guizhou Plateau. Plateau Meteorology (in Chinese).

511 42(2): 374–385. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2021.00120

512 岳治国, 梁谷. 2018. 陕西渭北一次降雹过程的粒子谱特征分析[J]. 高原气象, 37(6):1716–1724. Yue Zhiguo,

513 Liang Gu. 2018. Characteristics of precipitation particles in a hailstorm process in Weibei area of Shaanxi

514 Province. Plateau Meteorology (in Chinese), 37(6): 1716–1724. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2018.00023

515 赵文慧, 姚展予, 贾烁, 等. 2019. 1961~2015年中国地区冰雹持续时间的时空分布特征及影响因子研究[J].

516 大气科学, 43(3): 539–551. Zhao Wenhui, Yao Zhanyu, Jia Shuo, et al. 2019. Characteristics of spatial and

517 temporal distribution of hail duration in China during 1961–2015 and its possible influence factors[J]. Chinese

518 Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 43(3): 539–551. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1808.18123

519 赵俊虎, 宋文玲, 柯宗建, 2020. 2019/2020年冬季我国暖湿气候特征及成因分析[J]. 气象, 46(7): 982–993.

520 Zhao J H, Song W L, Ke Z J, 2020. Characteristics and causes analysis of the warm and wet winter in China

521 in 2019/2020[J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 46(7): 982–993.
522 doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2020.07.010
523 郑皎, 郭欣, 付丹红, 等. 2024a. 云南春季典型冰雹天气的云微物理特征. 应用气象学报, 35(2): 182–195.
524 Zheng Jiao, Guo Xin, Fu Danhong, et al. 2024a. Cloud microphysical properties of a typical spring hail event
525 in Yunnan. J Appl Meteor Sci (in Chinese), 35(2):182-195. doi:10.11898/1001-7313.20240205.
526 郑皎, 郭欣, 付丹红, 等. 2024b. 云南南部冰雹形成的天气背景与云微物理特征[J], 气象学报,
527 doi:10.11676/qxxb2025.20240148. Zheng Jiao, Guo Xin, Fu Danhong, et al.2024b. Characteristics of
528 synoptic background and microphysics for hail events in the south Yunnan. Acta Meteorologica Sinica (in
529 Chinese). doi:10.11676/qxxb2025.20240148.

