

冰雹云探测技术研究进展 ——基于巴彦淖尔人工防雹技术研究试验

杨宁^{1,2,3} 苏德斌^{1,3} 苏立娟^{4,7} 毕力格^{4,7} 孙晓光^{1,3} 方晓红⁵ 高博⁶ 史金丽^{4,7} 于水燕^{4,7} 刘继东⁵

(1 成都信息工程大学, 成都 610225; 2 中国气象局云雾物理环境重点开放实验室, 北京 100081;

3 中国气象局大气探测重点开放实验室, 成都 610225; 4 内蒙古自治区气象科学研究所, 呼和浩特 010051;

5 巴彦淖尔市气象局, 巴彦淖尔 015006; 6 首都师范大学, 北京 100089;

7 内蒙古自治区人工影响天气重点实验室, 呼和浩特 010051)

摘要: “西北人工影响天气能力建设项目巴彦淖尔人工防雹技术研究试验”于2018—2021年在内蒙古巴彦淖尔地区开展, 本试验在该地区已有探测设备基础上增加X波段双偏振雷达、二维雨滴谱仪、测雹板等特种观测设备, 以科学合理的设备布局及观测方式为基础开展外场研究试验, 研究建立适宜于内蒙古自治区巴彦淖尔人工防雹作业特点的技术体系。利用C波段多普勒雷达、地面降雹资料研究分析了巴彦淖尔地区降雹时空分布特征、冰雹云移动路径, 得出巴彦淖尔地区降雹天气主要发生在每年6—8月、12—20时的河套地区, 主要冰雹云移动路径是自西北向东南(46.7%), 其次是自西南向东北(26.2%); 研究分析了2019年测雹板观测地面降雹特征, 根据测雹板反演出的冰雹粒子最大直径为19.9 mm, 最小为3 mm, 总体能较好反映降雹区域的降雹实况, 降雹粒子数分布近似于指数分布, 拟合的指数分布系数为 $N_0=6349$ 、 $\theta=0.4153$, 且在粒子直径为5 mm时存在“左截断”现象(3~5 mm直径区间粒子数少), 误差产生的主要原因有凹坑重叠、人工数据读取等因素。

关键词: 冰雹云, 观测方式, 测雹板, 巴彦淖尔

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2021.05.021

Research Progress of Hail Cloud Observation Technology —Based on Field Campaigns in Bayannur

Yang Ning^{1,2,3}, Su Debin^{1,3}, Su Lijuan^{4,7}, Bi Lige^{4,7}, Sun Xiaoguang^{1,3},
Fang Xiaohong⁵, Gao Bo⁶, Shi Jinli^{4,7}, Yu Shuiyan^{4,7}, Liu Jidong⁵

(1 Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225 2 Key Laboratory of Cloud Physics, CMA, Beijing 100081 3 Key Laboratory of Atmospheric Sounding, CMA, Chengdu 610225 4 Research Institute of Meteorological Science of Inner Mongolia Autonomous Region, Hohhot 010051 5 Meteorological Bureau of Bayannur, Bayannur 015006 6 Capital Normal University, Beijing 100089 7 Key Laboratory of Weather Modification in Inner Mongolia Autonomous Region, Hohhot 010051)

Abstract: The project of “Weather Modification Capacity Construction Project of Northwest China—Hail Suppression Research and Field Campaigns in Bayannur” has been implemented in Bayannur area of Inner Mongolia from December 2018 to December 2021. The team built ground-based instruments including dual-polarization weather radar, 2DVD, hail pad etc.. This experiment carried out field research test based on scientific and reasonable equipment layout and observation methods, and established a technical system suitable for the characteristics of artificial hail suppression operations in Bayannur of Inner Mongolia, China. The project adopted C-band Doppler radar and ground hail data to analyze the temporal and spatial distribution characteristics of hail in Bayannur area and the movement path of hail cloud. The results showed that hail weather of Bayannur area mainly occurs from June to August, at 12–20 o’clock in the Hetao area. The main hail cloud movement path is from northwest to southeast (43%), followed by west to east (28%). The study analyzed the characteristics of hail on the ground observed based on the hailpad in 2019. According to the collected data, the diameter of hail particles ranges from 19.9 mm to 3 mm. The overall situation could be well described in the hail area, and the distribution of the number of hail particles is similar to the index. The fitted exponential distribution coefficient is $N_0=6349$, $\theta=0.4153$, and there is a “left truncation” phenomenon when the particle diameter is 5 mm (the number of particles in the 3–5 mm diameter interval is small), and the main causes of the errors are the overlap of pits, manual data reading and other factors.

Keywords: hail cloud, observation methods, hailpad, Bayannur

收稿日期: 2020年11月5日; 修回日期: 2021年9月2日

第一作者: 杨宁(1995—), Email: 1043678219@qq.com

通信作者: 苏德斌(1966—), Email: debin.su@hotmail.com

资助信息: 西北区域人工影响天气能力建设项(ZQC-R18217)

0 引言

冰雹是一种短时小范围的灾害天气现象，我国冰雹天气主要发生在华北、西北和西南地区，通常山区多于平原，内陆多于沿海。内蒙古自治区巴彦淖尔市地处内蒙古高原西部，东西长为378 km，南北宽为238 km，面积为6.4万 km²；境内河套灌区有“塞上江南”美誉，是亚洲最大自流灌区，全市有机奶产量占全国一半以上，农畜产品出口位居内蒙古第一，为全国最大羊毛绒生产基地，据2017年资料统计巴彦淖尔地区农作物总播种面积约为1100万亩（1亩=666.7 m²），农业产值占据总产值的51.32%^[1]。

阴山山脉狼山段位于巴彦淖尔市中部，最高海拔约2800 m，山南边为富饶的河套平原，山北边为荒漠化草原（图1），受此特殊地理环境影响，冰雹天气成为巴彦淖尔市河套平原夏季主要气象灾害之一，据统计，巴彦淖尔市年平均降雹日约为15 d，成灾日约为7 d^[2]。

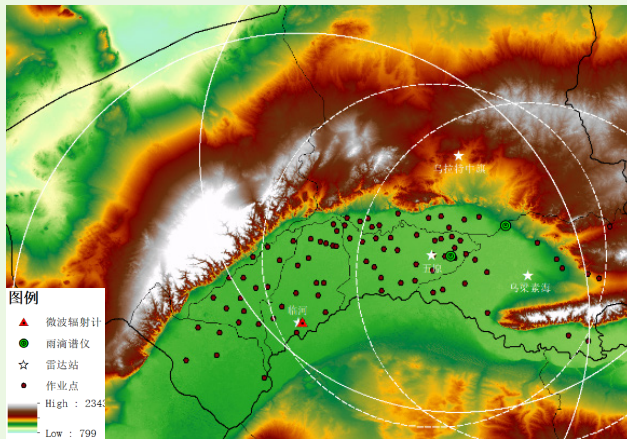


图1 2019年观测设备布局

Fig. 1 Layout of observation equipment in 2019

中国气象科学研究院组织实施西北地区人工影响天气研究试验项目，在巴彦淖尔地区开展防雹技术研究试验（起止时间：2018年12月—2021年12月），目的在于加强对该地区冰雹发生的时空分布、形成机理及防雹作业效果等研究，形成适宜于巴彦淖尔市人工防雹的关键技术体系，达到利用人工影响天气手段避免趋利提高防雹作业科技支撑的目的，其研究成果可服务于人工防雹工程建设。

1 项目试验概况

“西北区域人工影响天气工程巴彦淖尔人工防雹技术研究试验”项目基于前期西北区域人工影响天气工程建设的专业探测设备、巴彦淖尔试验区现有的气象探测设备、作业装备及前期研究成果，增加针对冰雹天气过程的专业观测设备，形成以2部X波段双偏振雷达（五原县布设X波段全固态双偏振雷达，乌梁素

海布设移动式X波段双偏振雷达（速调管），图1）、1部C波段多普勒雷达（单偏振）为核心，配合以探空站、区域地面自动观测站网、雨滴谱仪、微波辐射计、地面测雹观测网、GNSS/MET水汽探测、天气现象仪等的冰雹观测针对性试验网络。

根据巴彦淖尔现有站点分布、地貌特征及已有研究结果^[2]，在巴彦淖尔地区设立三个防雹试验区（图2）：杭锦后旗试验区、五原县试验区、乌拉特中旗试验区，各区之间建立缓冲区，避免相互影响。

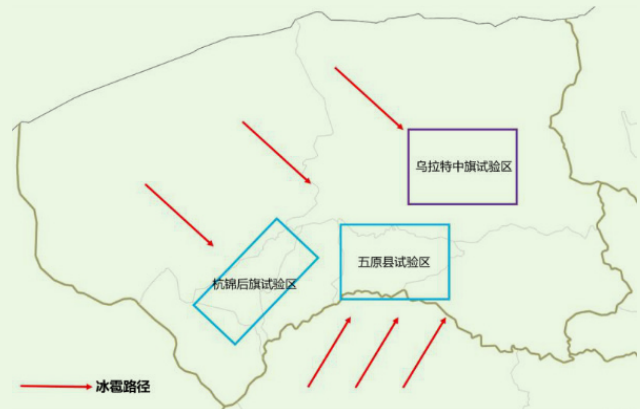


图2 内蒙古巴彦淖尔市冰雹外场试验区示意图

Fig.2 Schematic diagram of the hail field test areas in Bayannur City, Inner Mongolia

2 初步研究成果

截止到2020年底，研究成果主要有：1）利用1979年1月—2018年12月ERA5月平均0.25°×0.25°经纬度网格再分析资料对巴彦淖尔地区汛期（5—9月）850 hPa、750 hPa、500 hPa及300 hPa高空天气形势场（高度、温度、风、湿度等）进行研究分析，揭示了该地区环流年际演变特征；2）利用近50年地面防雹站、气象站资料，采用数理统计分析方法得到降雹日变化、月变化、年际变化及空间分布特征；3）利用2009—2019年临河C波段多普勒雷达资料统计分析了雷达回波顶高、垂直积分液态水产品特点，并分析了冰雹云主要移动路径；4）基于GPM卫星对巴彦淖尔地区降水时空分布特征进行研究分析；5）利用试验期间地面测雹板获得的降雹信息，研究分析了地面降雹特征；6）建立了基于探空和C波段雷达资料的冰雹识别、最大直径估测算法；7）建立了基于天气雷达及天气尺度的冰雹云识别指标体系；8）完成了两部X波段偏振雷达探测能力对比分析；9）建立了C波段多普勒雷达数据质控算法，并将质控后的雷达数据同化到WRF模式中，对冰雹天气进行模拟分析。

本文将对巴彦淖尔地区降雹时空分布特征、冰雹云移动路径及测雹板观测分析做出详细阐述。

2.1 降雹时空分布特征

在时间方面，巴彦淖尔地区降雹主要出现在12—20时（北京时，图3a），频率为83.45%，15—16时降雹频率最高；冰雹具有季节性强且随季节变化迅速等特点，冰雹天气主要集中在5—9月（图3b），占总雹日的95.36%，7月降雹概率最大；20世纪80年代

降雹日数最多（22.8 d），90年代为19.6 d，20世纪降雹日明显减少，平均约为10 d（图3c）。在降雹空间分布图上，巴彦淖尔北部降雹日数偏多，40年总雹日都大于35 d，降雹中心出现在巴彦淖尔市北部海流图镇，40年总降雹日数达110 d，巴彦淖尔市南部出现了多雹带，并有5个大于40 d多雹中心。

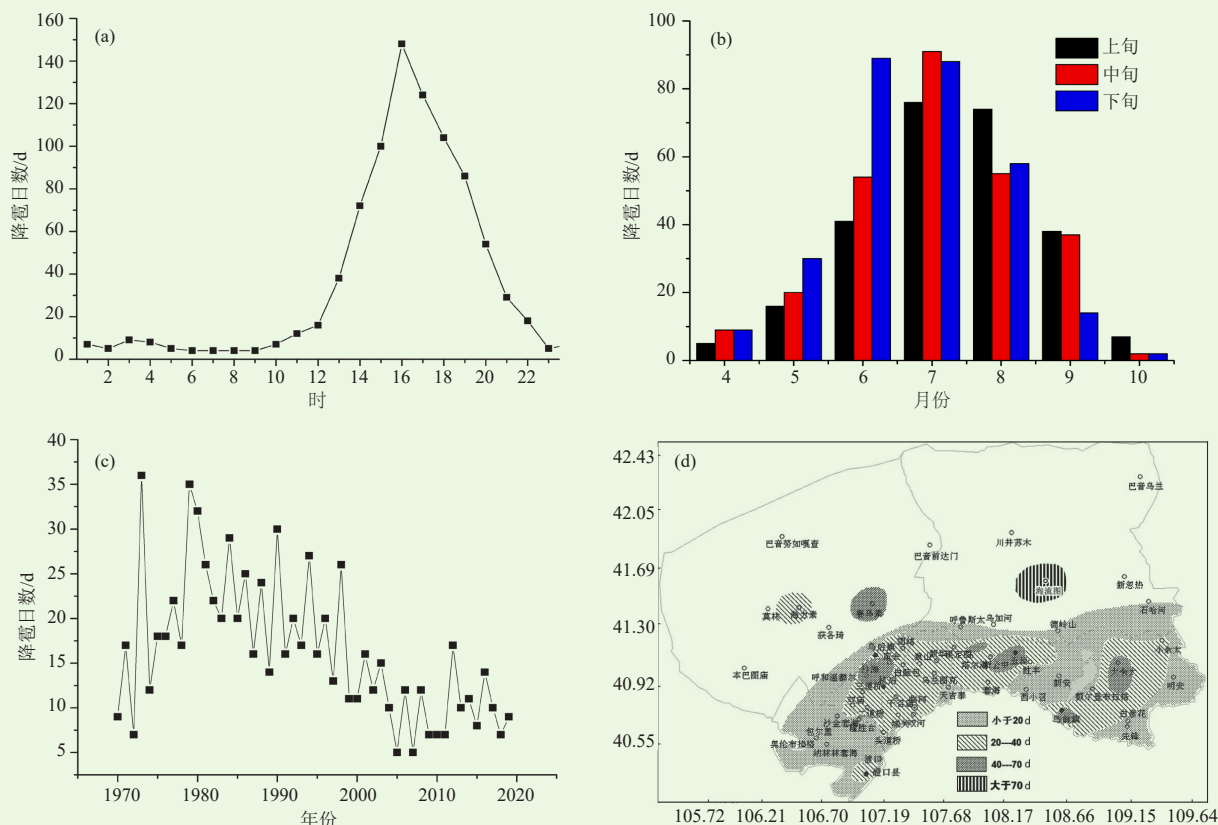


图3 巴彦淖尔地区降雹时空分布特征
(a) 日分布; (b) 月分布; (c) 年际分布; (d) 空间分布

Fig. 3 Temporal and spatial distribution characteristics of hail in Bayannur area
(a) daily distribution, (b) monthly distribution, (c) interannual distribution, (d) spatial distribution

2.2 冰雹云移动路径

利用2009—2019年巴彦淖尔市268个降雹个例，根据降雹点及降雹时间，依照一定的筛选规则，结合C波段多普勒雷达数据资料，共筛选出有效降雹个例107个。筛选时，剔除161个例，其剔除情况可分为8种情况（表1）。在此基础上，对筛选出的107个有效个例进行分类（表2），其中有悬垂结构的个例为56个，出现V型缺口的个例为5个。

利用雷达资料，统计冰雹云生成、发展、降雹及减弱的时间和位置（由于雷达覆盖范围有限，因此没有统计消散点时间和位置），初步得到了巴彦淖尔市冰雹云的移动路径，其大致可分为五个方向：西北路径（46.7%）、西南路径（26.2%）、偏

表1 2009—2019年巴彦淖尔市冰雹个例中无效个例分类统计（161个）

Table 1 Classification statistics of invalid cases of hail in Bayannur City from 2009 to 2019 (161 cases)

序号	剔除的个例分类	数量/个
1	无雷达数据	38
2	无降雹时间	61
3	降雹点无明显的降雹回波	30
4	降雹时段内记录的降雹点无有效回波	13
5	降雹点位于雷达中心位置，回波盲区	1
6	降雹点位于雷达覆盖边界，无法追踪	9
7	带状回波或者回波较为分散，无法追踪	4
8	降雹点与回波位置有偏移，猜测其他位置降雹。	5

西路径（21.5%）、偏北路径（3.7%）、东北路径（1.9%）。

表2 2009—2019年巴彦淖尔市有效的冰雹个例分类统计 (107个)

Table 2 Classification statistics of effective hail cases in Bayannur City from 2009 to 2019 (107 cases)

序号	降雹个例分类	数量/个
1	好	27
2	较好	40
3	一般	40

2.3 测雹板校准及观测分析

地面冰雹谱是研究冰雹云结构的重要参量之一。目前在国内外反演冰雹谱的方法有很多（如测雹板、雨滴谱仪、雹谱仪等），由于测雹板具有成本低、易制作、雹块资料易获取等特点，已成为地面降雹数据收集的主要载体。测雹板（Hailpad）是由Schleusener和Jennings^[3]提出的一种简易冰雹测量装置，冰雹下落至测雹板上会留下凹坑，通过测量泡沫板上的凹坑可获得冰雹粒子的直径、密度及下落至地面的动能等信息。自从测雹板概念和设计提出以来，已经成为地面降雹数据收集的主要载体，并在美国、西班牙、意大利、法国等地得到了广泛使用^[4-7]，我国对于测雹板的应用分析较少，虽然周兰^[8]、郁青^[9]、韩根夫^[10]等对测雹板的标定、应用及分析做了研究，但近20年国内对于测雹板的应用研究处于相对空白阶段。

2.3.1 材料及制作

试验所用测雹板采用锡纸包裹泡沫板方式制作。聚苯乙烯泡沫（Expanded Polystyrene, EPS）板若长时间暴露在阳光下会发生崩解（表面由白色变为黄色），EPS板崩解对于降雹直径估计具有较大影响。通过在泡沫板覆盖一层锡（铝）箔纸或涂一层漆可有效解决EPS板崩解问题。表面涂一层不透明乳胶漆虽可达到EPS板不崩解的效果，但由于乳胶漆具有弹性，漆层越厚凹坑会越不明显，且最佳水漆比例不易确定，在实际测雹板制作中比较繁琐，因此放弃了该种测雹板制作方式。

EPS板本身的吸水率小于6%，若在EPS板表面覆盖一层光滑锡箔纸或铝箔纸不仅可以再次降低EPS板的吸水性，还可以增大EPS板的灵敏度使得凹坑更加清晰。锡箔纸厚度有多种，如15 μm、18 μm、20 μm和25 μm等，不同厚度的锡箔纸对冰雹粒子在同高度下落造成的凹坑会有不同。为确定锡箔纸厚度，进行了同类型泡沫板不同锡箔纸厚度的撞击对比实验，实验中采用长宽为30 cm、厚为3 cm的EPS板，15 μm、20 μm和25 μm厚度的锡箔纸及多种直径不锈钢钢球，并利用胶带将锡箔纸与EPS板粘连在一起制成测雹板。对比发现：15 μm厚度的锡箔纸最容易发生形变

和破裂，对于大冰雹粒子容易造成凹坑的高估，同时对于冰雹粒子的二次撞击会造成小粒子数的增加；25 μm厚度的锡箔纸对小冰雹粒子最不敏感，并且已有的凹痕更易因邻近凹坑的出现而发生拉伸形变，造成凹坑的“变异”；20 μm厚度相较其余两种最为合适，能够减少因钢珠反弹产生的凹坑并最大限度的保留实验坑痕。该实验结果与Long^[12]有所不同，主要是因为他们制作测雹板用的是铝箔纸，其实验测得的最佳铝箔纸厚度为25 μm。

2.3.2 测雹板校准

测雹板校准是反演冰雹粒子谱的基础。本试验采用“能量匹配技术”^[3]原理对测雹板进行校准，即：将不同直径钢球从一定高度掉落在测雹板上，以使钢球的撞击动能与相同直径的球型冰雹的动能相等。根据Lozowski和Strong^[11]从经验上证明的对于相同直径冰、玻璃和钢球，当具有相等冲击动能时会在测雹板上产生同等的凹坑短轴。因此本校准实验选取市面上易购买到的不同直径钢球来模拟冰雹下落。钢球下落高度 H_s 表达式为^[12]：

$$H_s = \frac{2g(1)\rho_h^2 D}{3g(2)\rho_s \rho_a(1)C_{dh}} \left[1 + \frac{3W^2 \rho_a(1)C_{dh}}{4g(1)\rho_h D} \right], \quad (1)$$

式中： $g(1)$ 为测雹板处的重力加速度， ρ_h 为冰雹密度， D 为钢球直径（冰雹直径）， $g(2)$ 为实验处的重力加速度， ρ_s 为钢球密度， $\rho_a(1)$ 为测雹板处的空气密度， C_{dh} 为冰雹阻力系数， W 为水平风速。式（1）考虑了不同风速情况下粒子的下落高度问题，同时对于水平风速达到10 m/s的3 cm冰雹粒子直径其模拟下落高度不高于6 m，这在实验中是易实现的。

因市面上不同材质钢球直径限制，因此选用了304不锈钢和碳钢235两种材质钢球，式（1）中各参数取值如表3。

表3 钢球下落高度各参数取值
Table 3 The parameters at the falling height of the steel ball

参数	取值	备注
$g(1)$	979.86 cm/s ²	包头市的重力加速度
ρ_h	0.9 g/cm ³	参考Schleusener ^[3]
$g(2)$	979.88 cm/s ²	济南市的重力加速度
ρ_s	7.93 g/cm ³ 、7.85 g/cm ³	不锈钢密度、碳钢密度
$\rho_a(1)$	1.226×10 ⁻³ g/cm ³	根据实验处温度所得
C_{dh}	0.6	参考Schleusener ^[3]
W	0 cm/s	无风环境

将各参数值带入上式，可得不同材质钢球的下落高度与钢球直径关系式，304不锈钢钢球下落高度： $H_{ss}=92.57D$ ，碳钢235钢球下落高度： $H_{sc}=93.51D$ 。

在实验中，将同一直径钢球下落10次并测量凹坑大小，在求取凹坑直径平均值前去掉最值，以减小误差。随后进行曲线拟合及参数评估（表4），根据凹

表4 模型统计及参数评估

Table 4 Statistics models and parameters evaluation

方程式	模型摘要				参数评估			
	R^2	F	df1	df2	b_0	b_1	b_2	b_3
线性	0.993	2440.121	1	16	0.570	1.330	0.000	0.000
二次曲线模型	0.994	1353.322	2	15	-0.089	1.527	-0.012	0.000
三次曲线模型	0.995	969.766	3	14	0.877	1.026	0.058	-0.003

坑直径及粒子直径的分布在拟合时仅考虑了线性及二次、三次曲线模型。由表4可知三种模型中三次曲线模型的 R^2 值最大， F 值最小，即拟合的最优模型为三次曲线模型，将凹坑直径定义为 x ，粒子直径定义为 y 。二者关系可表示为：

$$y = b_3x^3 + b_2x^2 + b_1x + b_0 \quad 3 \text{ mm} \leq x \leq 20 \text{ mm}, \quad (2)$$

其中： b_0 为常数， b_1 、 b_2 、 b_3 均为幂次方的系数。当考虑风速时，即 W 不为零，此时钢球下落高度发生改变，采用同样的方式即可得出不同风速下冰雹粒子直径反演公式（表5）。

表5 不同水平风速下粒子反演公式参数表

Table 5 Parameters of particle inversion formula under different wind speeds

风速	0 m/s	1 m/s	2 m/s	3 m/s	4 m/s	5 m/s	6 m/s	7 m/s	8 m/s	9 m/s	10 m/s
b_3	-0.003	-0.002	-0.002	-0.003	-0.002	-0.002	-0.002	-0.003	-0.003	-0.006	-0.004
b_2	0.058	0.034	0.048	0.070	0.056	0.053	0.049	0.06	0.075	0.165	0.111
b_1	1.026	1.118	1.098	0.903	0.944	0.989	1.026	0.918	0.826	0.043	0.454
b_0	0.877	0.549	0.597	0.911	0.894	0.565	0.454	0.601	0.540	1.987	0.915

2.3.3 观测分析

2019年防雹试验期间，在巴彦淖尔市共安装172个测雹板，分布在巴彦淖尔市60个防雹作业点，大多数作业点布设了4块测雹板，部分作业点布设了2块或1块，并在每个作业点设置了与布设数目一样的备用板；对于每块测雹板均进行了编号处理，配备了测雹板记录表，为测雹板回收、数据保存提供保障。巴彦淖尔地区在2019年8月9日经历了一次降雹过程，本次降雹天气影响到了6个旗县，造成了4000多万元的经济损失。当地防雹作业人员对降雹起始时间、地点、持续时间以及粒子直径等信息进行了记录（表6），其中大豆大小表示冰雹直径为10 mm左右，豌豆大小为5 mm左右。防雹作业人员记录的降雹直径多在5 mm左右，不过在临河地区出现了大豆大小的冰雹。防雹作业人员记录的冰雹粒子直径大小在一定程度上代表了当地降雹的实际观测，因此可为粒子反演结果

的验证提供参考。

对于此次降雹天气过程共有7个作业点的测雹板被收集起来，筛选出16块有效板（图4）。从测雹板凹坑可以较为直观看出杭后三道桥及中旗海流图降雹密度较大，巴彦套海农场三分厂及杭后团结镇永丰降雹密度较小，但三分厂降雹直径较大，永丰降雹直径小。同时将无效测雹板（以降水为主、测雹板未有明显凹坑）与有效板作对比，发现大雨滴会在测雹板上

表6 巴彦淖尔地区2019年08月09日降雹实况记录

Table 6 Overview of hailstorm in Bayannur area on 9 August 2019

旗县	降雹点	直径	持续时间
临河区	干召庙镇	开始豌豆大小，之后大豆大小	15 min左右
临河区	双河镇	大豆大小	10 min左右
临河区	白脑包镇	豌豆大小，以降雨为主	1 min左右
杭锦旗(杭后)	二、三道桥镇	豌豆大小	1 min左右
杭锦旗(杭后)	团结镇	豌豆大小，以降雨为主	不足1 min
磴口县	巴彦套海农场	豌豆大小	10 min左右
五原县	塔尔湖镇	雨中带雹，豌豆大小	10 min左右
乌拉特中旗(中旗)	海流图镇	豌豆大小	5 min左右

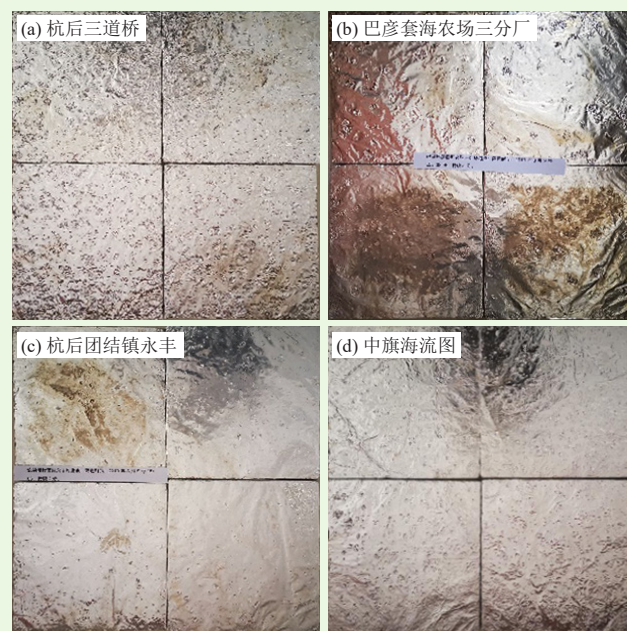


图4 降雹后的测雹板

Fig. 4 Hailpad after hailfall

留下较平滑浅坑，不会造成锡箔纸褶皱或非平滑凹坑出现，该现象对于通过雷达进行冰雹云和雷雨云识别有着一定验证支撑作用。

测雹板凹坑数据读取对于粒子直径反演有着重要影响，为降低粒子反演误差，在进行数据读取时需遵循三个原则：1) 读取凹坑短轴作为凹坑直径；

2) 对于小于3 mm凹坑及多个 (>3) 凹坑重叠的视为无效数据；3) 测雹板边缘若有明显褶皱，该范围数据视为无效数据。根据自动站测得小时最大风速及测雹板记录表记录的降雹时间信息，结合粒子反演公式(表5)即可得到每个作业点降雹粒子大小情况(表7)。

表7 降雹信息及冰雹粒子直径反演
Table 7 Hailfall information and hail particle diameter inversion

降雹作业点	降雹起始时间	降雹持续时间 /min	实际风速 / (m/s)	校准风速 / (m/s)	最小粒子直径/mm	最大粒子直径/mm	测雹板反演粒子平均直径/mm
杭后三道桥(图5a)	14: 41	2	4	4	3.0	14.5	5.9
巴彦套海农场三分厂(图5b)	15: 03	4	7.5	8	3.0	19.9	7.1
杭后团结镇永丰(图5c)	15: 06	2	2.8	3	3.2	10	5.3
中旗海流图(图5d)	17: 04	2	8.2	8	3.7	10.9	5.5

测雹板校准采用最小、最大钢球直径为3 mm、20 mm，即反演得到最小粒子直径均大于3 mm。对比表4、表5，杭后三道桥、团结镇永丰、中旗海流图与防雹作业人员记录的粒子直径较为一致，巴彦套海农场三分厂反演值要比作业人员记录值大，不过该降雹点测雹板观测到的凹坑比其余三个点大，分析应为作业人员记录有误，应以测雹板观测反演数据为准。

2.3.4 冰雹谱反演

地面冰雹谱是研究冰雹云结构的重要参量之一^[13]。经验上冰雹谱是服从指数分布形式的，为验证该分布形式国外进行了许多研究工作^[14-16]，在研究中发现冰雹谱分布并不完全服从指数分布形式^[17-18]；随后Fraile等^[19]对出现该现象的主要原因进行了探讨，并指出融化过程是地面冰雹粒子大小不完全服从指数分布的主要原因之一。

巴彦淖尔市地区冰雹谱未有人进行过相关研究，同时也较少有人系统阐述国内降雹冰雹谱分布情况。针对此次降雹天气过程通过测雹板反演得到的冰雹粒子直径数据，对冰雹谱分布进行分析。冰雹粒子直径区间间隔大小对于冰雹谱反演有着一定的影响，因在进行校准时采用最小钢球直径为3 mm，且此次降雹反演最大粒子直径为19.9 mm，因此将冰雹粒子直径分为7个直径区间(表7)。为扩大样本量，需对各个降雹点数据进行相关性分析，以验证不同降雹点数据特征的一致性。

Spearman相关系数又称秩相关系数，是利用单调方程评价两个统计变量的相关性，对原始变量的分布不作要求，是衡量两个变量依赖性的非参数指标^[20]。通过计算可得出其相关性均大于0.98(表8)，即将反演的4个降雹点粒子直径数据合并在一起。本次共读取凹坑数1612个，根据设置的粒子直径区间进行

计数(表9)即可得到冰雹粒子谱分布(图5)，图中直线为拟合后的指数。经验上的冰雹谱分布可近似为指数分布形式^[15-18]：

表8 不同降雹点冰雹粒子直径数据的spearman相关系数
Table 8 Spearman correlation efficient of hail particle diameter data at different hailfall points

降雹点	巴彦套海	杭后永丰	海流图	三道桥
巴彦套海	1.000	0.996	0.997	0.998
杭后永丰	0.996	1.000	0.982	0.987
海流图	0.997	0.982	1.000	0.995
三道桥	0.998	0.987	0.995	1.000

表9 粒子数统计
Table 9 Number of hail particles in each diameter interval

粒子直径区间/mm	3~5	5~7	7~9	9~11	11~13	13~15	15~20
粒子数	694	526	224	112	40	6	10

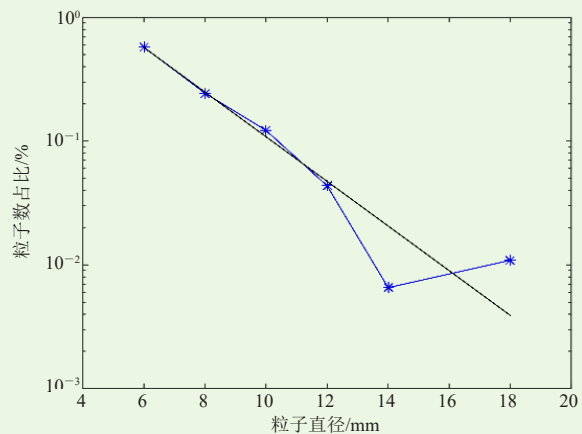


图5 冰雹粒子谱分布
Fig. 5 Hail particles spectrum distribution

$$N(D) = N_0 e^{-\theta D}, \quad D_{\min} \leq D < D_{\max}, \quad (3)$$

其中： $N(D)$ 是每尺寸间隔内的粒子数， D_{\min} 、 D_{\max} 是每个粒子直径区间的边界值， D 为冰雹直径， N_0 、 θ 为

指数函数系数。由图5得出冰雹粒子在5~7 mm直径区间有“左截断”现象（小粒子数少），“左截断”现象出现原因应是数据读取时对小凹坑产生漏读。

在进行曲线拟合时是否将3~5 mm直径区间粒子数纳入曲线拟合进行了比较（表10）。

表10 指数曲线拟合对比
Table 10 Exponential curve fitting comparison

是否考虑3~5 mm粒子数	和方差	均方根	确定系数	N_0	θ
是	16770	57.91	0.9629	2222	0.2766
否	395.1	9.939	0.998	6349	0.4153

当考虑3~5 mm直径区间的粒子数时，和方差及均方根较大，且确定系数较小，因此不将该区间粒子数纳入曲线拟合考虑范围。令最小直径区间 $D_{\min}=5$ mm，即可消除“左截断”现象，拟合得到的参数值为 $N_0=6349$ ， $\theta=0.4153$ 。

2.3.5 误差分析

当将3~5 mm直径区间粒子数纳入指数分布曲线拟合时一致性较弱，即得到的粒子谱分布不是完全符合指数分布形式。对于该现象分析原因有如下3个方面：

1) 凹坑重叠

凹坑重叠是影响通过测雹板反演粒子谱分布的一个重要因素^[21]。当降雪密度较大时会造成测雹板的“过载”，即凹坑会有重叠，凹坑重叠分为三类：一是多个小粒子产生的凹坑之间有了重合区域；二是小粒子产生的凹坑被大粒子撞击的凹坑覆盖；三是大粒子产生的凹坑被多个小粒子撞击凹坑覆盖。该三类现象的发生均会导致在数据读取时造成小凹坑数减少。为研究凹坑重叠对粒子数反演的影响程度，Palencia等^[21]利用计算机模拟了剧烈冰雹天气中测雹板出现凹坑覆盖的现象，并指出在剧烈冰雹天气过程中记录冰雹粒子数通常低于实际冰雹粒子数（可能会高达25%）。凹坑重叠现象对于剧烈降雪天气的观测是无法避免的，为减小对粒子直径的过高估计，进而制定了将多个小凹坑重叠数据置为无效数据的数据读取原则，同时也可避免当降雪密度（小冰雹）大时反演出大冰雹粒子，这对于防雹作业的评估具有重要意义。

2) 数据读取时造成误差

在遵循相同数据读取准则的情况下，不同的人对于凹坑短轴数据读取仍会有不同的结果，同时数据读取时采用的是1 mm精度的度量器，读取数据保留一位小数，因此在数据读取时会存在一定的误差；同时当测雹板凹坑较密、数据读取量较大时，对于数据读取者来说会存在“视觉疲劳”“标准变化”等问题，数据读取时精度会降低，存在着不同程度的“过读”“漏读”现象。

当收集的测雹板较多时，若完全采用人工的方式去读取数据是不现实的，因此利用计算机图像识别技术开发半人工式数据读取是有必要进行的一项工作，同时也可以提高数据读取的精度，减小数据误差。

3) 其他原因

实验得出的校准曲线不经过原点，这在物理上是不符合逻辑的，说明在校准实验实际操作中产生了误差，如度量仪器精度不够、各参数选择未能采用当地实际值，理论上粒子高度确定公式中的参数取值应在每个测雹板布设点具有唯一性，这在实际中是很难获得的，不过表3中取的邻近区域参数值与实际观测区域相差不大，对于粒子直径反演影响较小。

冰雹的球度、水平和垂直风速、大冰雹粒子二次撞击以及测雹板大小等均会对冰雹粒子谱的反演造成影响；存在“互补”现象，即有些影响因素会导致粒子直径或粒子数的高估，有些则会导致低估，同时不同影响因子对反演结果的影响程度也会不同。

3 小结

巴彦淖尔人工防雹技术研究试验是“西北人工影响天气能力建设项目”的重要组成部分，通过在巴彦淖尔地区开展研究试验，形成适宜于巴彦淖尔人工防雹的关键技术体系，其研究成果可服务于人工防雹工程建设。

通过对巴彦淖尔地区降雪时空分布特征、冰雹云移动路径及地面降雪特征分析可得如下结论：

1) 巴彦淖尔地区降雪天气主要发生在每年6—8月（76.44%）、12—20时（83.45%）的河套地区，主要冰雹云移动路径是自西北向东南（43%），其次是自西向东（28%）；

2) 基于读取四个降雹点16块测雹板的1612个凹坑数据进行粒子直径反演，反演的最大冰雹粒子直径为19.9 mm，最小为3 mm；同时计算了每个降雹点平均粒子直径，与防雹作业人员记录信息作对比，结果表明测雹板能较好反映降雪区域的降雪实况，比部分防雹作业人员记录的信息（冰雹直径）更加可靠；

3) 根据自动站测得的小时最大风速及测雹板记录表记录的降雪时间信息，结合粒子反演公式即可得到此次降雪过程中各粒子直径区间的粒子数，通过其粒子数分布可以看出其谱分布近似于指数分布形式，但在5 mm处出现了“左截断”现象（3~5 mm直径区间粒子数少），进而对是否将3~5 mm直径区间的粒子数纳入拟合进行了讨论，发现当选择是的时候拟合的指数函数与实际分布误差较大，因此不将其纳入拟合范围，最终拟合的指数分布系数为 $N_0=6349$ 、

$\theta=0.4153$ 。随后对“左截断”现象出现原因进行了分析,发现主要为凹坑重叠、数据读取造成的误差。

地面降雹信息对于冰雹云微物理结构研究及雷达识别冰雹云的验证具有重要意义,测雹板观测能客观反映地面降雹概况,虽然其制作及数据获取需一定的人力去完成,但由于易制作、成本低廉可广泛使用,进而提高防雹减灾能力。

后续将会更加深入的对巴彦淖尔降雹天气进行研究,为该地区防雹减灾提供科学依据,为人工防雹工程建设贡献一份力量。

参考文献

- [1] 白婷婷. 巴彦淖尔市农业技术推广现状及发展对策研究. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2019.
- [2] 郭玉凤, 刘继东, 方晓红. 巴彦淖尔市冰雹天气. 北京: 科学普及出版社, 2011.
- [3] Schleusener R A, Jennings P C. An energy method for relative estimates of hail intensity. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1960, 41(7).
- [4] Cifelli R, Doesken N, Kennedy P, et al. The community collaborative rain, hail, and snow network: informal education for scientists and citizens. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2005, 86(8): 1069-1077.
- [5] Seino H. On the characteristics of hail size distribution related to crop damage. *Journal of Agricultural Meteorology*, 1980, 36(2): 81-88.
- [6] Manzato A. Hail in northeast Italy: climatology and bivariate analysis with the sounding-derived indices. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2012, 51(3): 449-467.
- [7] Dessens J, Berthet C, Sanchez J L. Change in hailstone size distributions with an increase in the melting level height. *Atmospheric research*, 2015, (158-159): 245-253.
- [8] 周兰, 岳耀杰, 栗健, 等. 冰雹灾害承灾个体脆弱性评估研究进展. *中国农业气象*, 2014, 35(3): 330-337.
- [9] 郁青. 测雹板标定试验研究. *气象*, 2001, 27(12): 23-25.
- [10] 韩根夫, 刘海月. 应用测雹板评估1998年涞源县防雹效果. *灾害学*, 1999, (4): 46-49.
- [11] Lozowski E P, Strong G S. On the calibration of hailpads. *Journal of Applied Meteorology*, 1978, 17(4): 521-528.
- [12] Long A B, Matson R J, Crow E L. The hailpad: materials, data reduction and calibration. *Journal of Applied Meteorology*, 1980, 19(11): 1300-1313.
- [13] 石安英, 孙玉稳, 田志熙. 冰雹谱分布特征的探讨. *高原气象*, 1989, 8(3): 279-283.
- [14] Waldvogel A, Federer B, Schmid W, et al. The kinetic energy of hailfalls. Part II: Radar and hailpads. *Journal of Applied Meteorology*, 1978, 17(11): 1680-1693.
- [15] Crow E L, Long A B, Dye J E, et al. Results of a randomized hail suppression experiment in northeast Colorado. Part III: Analysis of hailstone size distributions for seeding and yearly effects. *Journal of Applied Meteorology*, 1979, 18(12): 1559-1568.
- [16] Cheng L, English M, Wong R. Hailstone size distributions and their relationship to storm thermodynamics. *Journal of Applied Meteorology*, 1985, 24(10): 1059-1068.
- [17] Fraile R, Castro A, Sánchez J L. Analysis of hailstone size distributions from a hailpad network. *Atmospheric Research*, 1992, 28(3-4): 311-326.
- [18] Sánchez J L, Gil-Robles B, Dessens J, et al. Characterization of hailstone size spectra in hailpad networks in France, Spain, and Argentina. *Atmospheric Research*, 2009, 93(1-3): 0-654.
- [19] Fraile R, Berthet C, Dessens J, et al. Return periods of severe hailfalls computed from hailpad data. *Atmospheric research*, 2003, 67-68: 189-202.
- [20] 张宇镭, 党琰, 贺平安. 利用Pearson相关系数定量分析生物亲缘关系. *计算机工程与应用*, 2005(33): 83-86, 103.
- [21] Palencia C, Castro A, Gaiotti D, et al. Dent overlap in hailpads: error estimation and measurement correction. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2011, 50(5): 1073-1087.

(上接134页)

英、姚展予等专家教授给予了悉心的指导。西北试验项目首席科学家雷恒池、银燕、张文煜、苏德斌、陈宝君等同仁相互交流技术方法受益匪浅,并特别向参加本文试验工作的纪晓玲、肖云清、刘建军、黄峰、常卓琳、翟涛、曹宁、孙艳桥、马思敏、戴言博、林彤、杨勇、党张利、邓佩云、柳佳俊、厚军学、包亮、贾乐、宁欣婷、杜鑫、饶彤华、贾永辉、张宏元、杨文海、景博、王博、武军军、雷学锋、龚晓丽、裴小龙、于冬梅、马霞、马兴明、温芸芸、田惠、祁菲、马兴武、罗进云、杨晨、储永伟等同志一并致谢!

参考文献

- [1] 毛节泰, 郑国光. 对人工影响天气若干问题的探讨. *应用气象学报*, 2006, 17(5): 643-646.
- [2] 郑国光, 陈跃, 陈添宇, 等. 祁连山夏季地形云综合探测试验. *地球科学进展*, 2011, 26(10): 1057-1070.
- [3] 陈添宇, 郑国光, 陈跃, 等. 祁连山夏季西南气流背景下地形云形成和演化的观测研究. *高原气象*, 2010, 29(1): 152-163.
- [4] 黄美元. 我国人工降水亟待解决的问题和发展思路. *气候与环境研究*, 2011, 16(5): 543-550.
- [5] 郑国光, 郭学良. 人工影响天气科学技术现状及发展趋势. *中国工程科学*, 2012, 14(9): 20-27.
- [6] 洪延超, 雷恒池. 云降水物理和人工影响天气研究进展和思考. *气候与环境研究*, 2012, 17(6): 951-967.
- [7] 许焕斌. 人工影响天气动力学研究(第二版). 北京: 气象出版社, 2017.
- [8] 濮江平, 赵国强, 蔡定军, 等. Parsivel激光降水粒子谱仪及其在气象领域的应用. *气象与环境科学*, 2007, 30(2): 3-8.
- [9] 濮江平, 张伟, 姜爱军, 等. 利用激光降水粒子谱仪研究雨滴谱分布特性. *气象科学*, 2010, 30(5): 701-707.
- [10] 郭欣, 郭学良, 付丹红, 等. 钟形地形动力抬升和重力波传播与地形云和降水形成关系研究. *大气科学*, 2012, 37(4): 786-800.
- [11] 许焕斌, 尹金. 方关于发展人工影响天气数值模式的一些问题. *气象学报*, 2017, 57(1): 57-66.
- [12] 马学谦, 陈跃, 张国庆, 等. X波段双偏振雷达对不同坡度地形云探测个例分析. *干旱气象*, 2015, 37(4): 675-683.
- [13] 吴香华, 牛生杰, 金德镇, 等. 自然降水变异对人工增雨效果评估的影响. *中国科学(地球科学)*, 2015, 45(7): 1011-1019.
- [14] Pu P M, Pu J P. Strategy & techniques for restoration of healthy aqua ecosystem from toxic super eutrophic water body. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 2015, 3: 55-61.
- [15] 濮培民, 濮江平, 朱政宾. 水分子结构模式及液态固态水若干特征成因探讨. *气象科学*, 2016, 36(5): 567-580.
- [16] Pu P M, Pu J P, Zhu Z B. Liquid water skin structure & its influence on atmospheric electric fields. *SCIREA Journal of Geosciences*, 2017, 2(2): 39-55.
- [17] 曹宁, 张立新, 桑建人, 等. 基于微雨雷达的六盘山区地形云降水宏观特征观测分析. *气象科学*, 2019, 39(6): 775-785.
- [18] 韩世昌, 王博, 汤效军. 固原市人工影响天气作业的现状与思考. *甘肃农业*, 2019, 33(11): 56-58.
- [19] 濮江平, 张昊, 周晓, 等. 对流性降水雨滴谱特征及其与雷达反射率因子的对比分析. *气象科学*, 2012, 32(3): 253-259.
- [20] Chen B J, Yin Y. Modeling the impact of aerosols on tropical overshooting thunderstorms and stratospheric water vapor. *Journal of Geophysical Research*, 2011, 116: D19203.
- [21] Chen B J, Hu W, Pu J P. Characteristics of the raindrop size distribution for freezing precipitation observed in southern China. *Journal of Geophysical Research*, 2011, 116: D06201.