

文章编号: 1001-8166(2005)09-1029-08

# 我国西北地区降雹气候特征及若干研究进展\*

周 嵬<sup>1,2</sup>, 张 强<sup>1</sup>, 康凤琴<sup>1</sup>

(1. 中国气象局兰州干旱气象研究所, 甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室, 甘肃 兰州 730020;  
2. 中国气象科学研究院, 北京 100081)

**摘 要:** 归纳了西北冰雹的天气特征、气候规律, 概括了产生冰雹天气的环流形势和诱发冰雹天气的局地因素, 综合分析了雷达观测、卫星观测、闪电定位和数值模拟等手段在西北地区冰雹研究领域的新进展, 最后指出了西北冰雹研究领域急需解决的科学问题和需要进一步发展的研究手段。

**关 键 词:** 西北 冰雹; 天气特征; 气候规律; 环流形势特征; 研究手段

**中图分类号:** P426.64 **文献标识码:** A

## 0 引 言

冰雹是西北地区常见的气象灾害之一。仅就甘肃一个省的历史雹灾资料, 就可以统计到这样的结果: 1954—1977年, 每年平均受灾农田 134 667 hm<sup>2</sup>, 1973年最多为 260 667 hm<sup>2</sup>, 占总耕地的 7.3%。从 2004年5月15日至9月10日的短短几个月时间里, 甘肃省兰州市三县的大部分乡镇 6次遭受到洪雹袭击。冰雹直径平均约 4~10 mm, 持续时间在 2~90 min 之间。据不完全统计, 受灾面积合计约 8 533 hm<sup>2</sup>, 直接经济损失近 5 200 万元。冰雹给当地的工农业生产和人民生活带来了严重的损失, 早就引起了当地政府和科学家们的广泛关注, 对西北冰雹的研究已经做了大量的工作, 取得了很多有益的成绩, 本文试图就这方面的工作做一概述。

## 1 西北冰雹之气候规律、天气特点

西北气候区包含西风带气候区、高原气候区、东南亚季风区及季风区的边缘区域<sup>[3]</sup>, 气候变化非常复杂。地处世界最高高原(青藏高原)的北部, 境内有天山和帕米尔高原、南疆盆地、河西走廊和黄土高

原等复杂地形, 使得边界层内平均环流出现了次天气尺度系统。由于青藏高原面积大、海拔很高, 这种次天气尺度的平均环流系统, 甚至在 500 hPa 高度都有清楚的反映, 并且对西北地区的天气特征、气候规律具有十分重要的影响<sup>[1]</sup>。另外, 西北地区的高原、高山、冰川、河流、沙漠、绿洲等复杂的特殊地形、地貌, 也是造成西北地区天气中局地性天气现象的重要原因, 冰雹就是这类局地中尺度天气过程的产物之一。在这种气候和地理背景条件下, 西北冰雹有如下气候规律:

### 1.1 空间分布

西北降雹的空间分布与海拔高度、地形和下垫面性质等关系密切, 具有明显的局地性和分散性, 总的分布特征是高原和高山多, 河谷、盆地、沙漠和平川少<sup>[1]</sup>, 西北地区年平均冰雹日数最高可达 22 天。青藏高原东南部、甘南高原、祁连山东段均为多冰雹区, 年平均雹日在 5~18 天, 中心的曲麻莱为 19.6 天, 这个多雹区是青藏高原中部的多冰雹区向东延伸的部分, 是仅次于西藏高原多雹区的全国第二个多雹区。由于处在夏季高原切变线、低涡等天气系统活动频率最大的地区, 加之这一带又是地形复杂

\* 收稿日期 2005-05-11; 修回日期 2005-07-07。

\* 基金项目 科技部社会公益性研究课题项目“西北地区防雹消雹技术”(编号 2002DB10046)资助。

作者简介 周嵬(1979-), 男, 重庆潼南人, 硕士研究生, 主要从事冰雹天气过程的数值模拟研究。E-mail: cq\_zhouwei@126.com

的高原和高海拔的山区,所以冰雹天气出现比较频繁。另一个多雹地区在新疆天山和南疆西部山区及阿尔泰、昆仑山等山区,一般年平均冰雹为 $1 \sim 11$ 天,个别地方(如昭苏)高达 $22$ 天。甘肃的河东、宁夏、陕西中北部为 $1 \sim 2$ 天。冰雹最少的地区是准噶尔盆地和塔里木盆地、柴达木盆地、甘肃的河西走廊、陕西的关中和陕南,特别是这些地区的沙漠、盆地和大的河谷中,年降雹日数在 $1$ 天以下。

冰雹的分布不但与海拔高度有关,还与山脉的走向及不同坡向有关<sup>[3]</sup>。多雹中心一般多位于东—西向的山脉的南坡,南—北向的山脉的东坡。如新疆的天山、甘肃与青海交界的祁连山,其南坡的冰雹日数比北坡多,而甘肃陇东的子午岭、通渭县的家岭南段和六盘山南段,东坡的冰雹日数均比西坡多。这与该地区气流一般为西北气流有关,在山区生成的降雹系统随高空风向东南移动,造成山脉的东坡或南坡降雹频数往往较西坡或北坡大。然而,对于天气影响系统比较复杂的地区,冰雹分布与坡向的关系则比较复杂。如秦岭西段北坡是西北风气流的迎风坡,东段南坡是东南气流的迎风坡,所以秦岭西段北坡比南坡多,东段南坡比北坡多。同时,向东南开口的喇叭口盆地和谷地,特别是西北方若有较高的山峰,由于谷地受辐射增温,容易产生强烈对流,再加以夏季西风气流的引导作用,特别有利于降雹系统的生成,也是多雹中心,并且降大雹的频率比较大<sup>[3]</sup>。如新疆的博乐谷地、托托干河谷冰雹比较多(3天左右),甘肃通渭县的家岭(6.5天)就是这种情况。另外,地形产生的重力波也是形成冰雹天气重要因素之一。如在甘肃省天祝县的毛毛山、通渭县的家岭和六盘山等山脉的背风坡均有2条顺山脉走向的多雹带和少雹带交替出现<sup>[22]</sup>。这很可能就是越山气流激发出的重力波在背风坡下游的波形分布所决定的,重力波比较容易在波峰处促成对流活动,从而会形成准定常的多雹带。

### 1.2 时间分布

西北降雹具有季节性强、雹日高度集中的特征。 $11 \sim 2$ 月为无雹时段,冰雹一般出现在 $4 \sim 9$ 月,少数地方3月也见初雹。西北大部分地区属于夏雹区,以 $5 \sim 9$ 月雹日最多,冰雹年变化大致有2种类型<sup>[3]</sup>。多数地方为单峰型,6月是雹日增长最快的月份,6月份较之5月份成 $10$ 倍左右猛增,各地冰雹日数的高峰分别出现在 $5、6、7$ 月, $10$ 月是雹日数减少最快的月份, $10$ 月以后冰雹很少出现,家岭、曲麻莱、托托河属此类。但也有少量的双峰型,第一

峰值出现在 $5、6$ 月,第二峰值出现在 $7、8、9$ 月, $10$ 月是减少最快的月份, $10$ 月以后冰雹很少出现,兰州、杂多、久治就属此类。新疆雹日分布则比较复杂,多达5种类型<sup>[3]</sup>。春季类( $2 \sim 5$ 月)多居于南疆南部和西部地区,如和田、莎车一带年平均雹日很少,在近 $30$ 年中不足 $0.2$ 天;春夏类( $3 \sim 7$ 月),在伊犁河谷下游区,如察布查尔、伊宁等地;夏季类( $6 \sim 8$ 月),一般出现在干旱区,如托克逊、康西瓦、托云等地;夏秋类( $6 \sim 10$ 月),这种类型的地方较少,如阿尔泰山顶山,四季类除 $1$ 月和 $12$ 月外,其它月份均可出现,多出现在南疆地区,如喀什、叶城。

每天降雹天气发生有很明显的时段特征,一般主要发生在 $12 \sim 20$ 时,占总冰雹次数的 $75\% \sim 90\%$ <sup>[3]</sup>。尤其在午后至傍晚( $14 \sim 18$ 时)因地表受热对流最旺盛,所以降雹最多,占总冰雹次数的 $50\% \sim 70\%$ 。夜间和早晨很少降雹,仅占总冰雹次数的 $3\% \sim 10\%$ 。但由于受当地的海拔高度与地形的影响,各地降雹的峰值时段也各有差异,按其日变化大致分为3个类型<sup>[1]</sup>:午后型,降雹峰值时段在 $13 \sim 15$ 时,如野马街、乌鞘岭和刚察是本类的典型;傍晚型,降雹峰值时段在 $16 \sim 19$ 时,临夏和循化属于此种类型;午后傍晚双峰型,这实质上是两类冰雹的迭加。第一峰在当地最高温度出现时,是局地雹暴,第二个峰系由外来有组织的雹暴<sup>[1]</sup>,即上游地形激发的重力波传递到当地的波峰所产生的冰雹,所以较局地冰雹发生的迟,并且距离重力波激发源地越远的测站其第二个峰值出现的时间越迟。一般,地形重力波源地下游约 $100$  km内,午后6小时降雹次数占全天降雹的 $60\%$ 以上,而距离地形重力波源地较远的地方,傍晚6小时降雹次数占全天的 $40\%$ 以上。

### 1.3 降雹持续时间和大雹落区

降雹过程平均持续时间,高原比平川、盆地长,高山比河谷长。西北地区平均持续降雹时间为 $5 \sim 53$  min。西北地区冰雹过程持续时间随地区变化很大,依据平均持续时间长短可以粗略分为4个类型<sup>[3]</sup>。第一类是青海南部山区降雹过程,其持续时间平均为 $30 \sim 53$  min,是降雹过程持续时间最长的地区。其次是新疆的天山西段、南疆的西部和南部、青海中部、祁连山东段的乌鞘岭、甘肃的甘南高原的冰雹过程,一般为 $20 \sim 30$  min。第三类是新疆大部、甘肃大部、宁夏和陕北的冰雹过程,其持续时间一般为 $10 \sim 20$  min。最后一类是北疆和南疆的东部、甘肃的河西走廊西段、陕西大部的冰雹过程,其平均持续降雹时间

在 10 min 以下,是持续降雹时间最短的地区。

从降大雹(直径大于 5 mm)概率来看,一般山区比川区少,海拔高处比低处少,迎风坡比背风坡少。大雹均降在海拔 1 000 ~1 700 m 的山脉背风坡,如平凉、太白镇和陇西都在南北向山脉的东坡。降大雹概率低于 5% 的都在高原上<sup>[3]</sup>,如祁连山区海拔最高的木里(4 092 m)为 3%,昆仑山的托托河(4 533 m)为 5%,这可能是由于高海拔地区气温普遍较低,云滴容易形成冰雹,所以在尺度较小的时候就降下来了,而较低海拔地区云滴上升到相当的高度才有可能形成冰雹,所以一般在尺度较大的时候才降下来。

## 2 冰雹天气形成的条件

### 2.1 一般大气环流形势的统计特征

尽管降雹是一个区域或局地性的中小尺度天气事件,但其发生和发展在特定的大尺度环流背景下。将大尺度环境和雹暴天气结合,区域降雹过程的环流形势大致分为以下几个类型:

(1)冷平流型。500 hPa 长波脊在 80 °E,长波槽在 110 °E 附近,自地面直到对流层上部均为西北气

流,副热带西风急流轴经过降雹区南缘,急流中心在其西侧。由于对流层中、上部冷平流随高度增强导致不稳定的形成和维持,风的垂直切变在高空急流下方达最强。本类过程可连续数天出现区域性降雹,但均系小雹。甘肃省本类雹暴最多,占 44%。

(2)暖平流型。长波槽在蒙古国西北至新疆,青藏高原多低值系统活动。西北地区东部处于副热带高压西侧,自地面到对流层上部为深厚的偏南风,高温高湿,组织雹暴的系统一般为高原低涡或切变线,在对流不稳定区中形成中尺度对流云团,产生雨暴并伴随降大雹,雨强大。主要出现于盛夏,是青藏高原最常见的降雹类型。

(3)双层平流型。蒙古国中部有一冷低压停滞,河套以东为副热带长波槽,降雹区位于高空急流中心西北侧。西北地区东部 500 hPa 为西北气流,700 hPa 为偏南气流,高温高湿区沿高原东缘北伸。哈密至酒泉附近有一深厚的短波槽,地面有冷锋或切变线自河西走廊向东南移动,强雹暴在锋前或锋际跑线上形成。多降大雹,中心雨量可达中到大雨,约 70% 的灾害性冰雹属于此类。表 1 给出了这 3 种类型冰雹的统计特征。

表 1 三类区域雹暴天气的主要特征  
Table 1 General characters of three kinds of regional hailstorms

类型	冷平流型	双层平流型	暖平流型
雹粒大小	小雹	大雹	大雹
天气尺度影响系统	不明显	西北方有短波槽向东南移	高原切变浅低涡
低空气流	偏北	西南或东南	西南或东南
高空气流	西北	西北或西风	西南
风垂直切变	很大	大	小
层结	6 km 以下为对流不稳定	午后潜在不稳定加强	12 km 以下为潜在不稳定
涡度	深厚的前倾正涡度中心	深厚的后倾强正涡度中心	浅薄的正涡度、高空为负涡度
散度	低空辐散高空辐合但变化迅速	低空辐合高空辐散	垂直方向上多层辐合辐散交替出现
垂直速度	大尺度下沉中尺度雹暴内短期上升	上升速度最大值在对流层中部	强上升气流分别在对流层上部和中部
水汽	仅在边界层内辐合,整个对流层中辐散并蒸发,局地水汽少且减少	7 km 以下辐合,整个对流层中有凝结但仅为暴雨的 1/4,局地水汽较多并增加	9 km 以下辐合,整个对流层中水汽很多且增加,有大量凝结数值与暴雨相当

### 2.2 形成冰雹天气的局地条件

#### 2.2.1 地形强迫和重力波效应

复杂的地形使得边界层内的各参量水平分布不均,从而产生许多热力、动力性质的局地环流,如山谷和湖陆环流、气流过山的动力扰动等。这些局地环流使水汽和热量重新分布,地形通过对近地面气象要素日变化的影响,使得局部地区具有热力聚能、

动力触发雹暴的作用<sup>[1]</sup>。特别是高大山脉,其对气流的抬升作用及其产生的重力波激发的对流活动尤其容易触发不稳定能量而造成冰雹天气。

在高空西北气流冷平流型和西南气流暖平流型下,地形的动力和热力作用会造成迥然不同的中小尺度系统,冷平流下,山脉约束和阻碍冷空气活动,使山外地面气压升高比山区大,形成系统性谷风,暖

平流下则相反,形成系统性山风。在这两种环流背景下,地面高低压活动地区正好相反<sup>[1]</sup>。在西北地区,冷平流型下,祁连山、六盘山和秦岭等地出现低压活动的高频中心,而河西走廊、柴达木盆地以及黄河、渭河河谷则为高压活动区。暖平流型下,祁连山、昆仑山等地为高压活动区,而河西走廊、柴达木盆地以及高原中部的横切变线附近和黄河、渭河谷地为低压活动区。以祁连山区为例,在高空西北气流冷平流时,以祁连山区中心形成系统性谷风辐合,午后山区近地面增温增湿比四周同高度自由大气大,从而形成高温高湿区,高空冷平流的入侵使祁连山区具备的不稳定能量释放产生强雹暴。在高空西南气流暖平流时,以祁连山为中心形成系统性山风,夜间山风增强与盛行气流(东南风)相互作用,使祁连山系东南部辐合和能量锋最强,如有柴达木低涡东移,该地也易形成冰雹<sup>[1]</sup>。

#### 2.2.2 水平风的垂直切变和高中低空急流

适当的水平风垂直切变是雹暴发展加强的重要条件<sup>[2]</sup>,水平风垂直切变主要有下列作用:

(1) 高空风急流轴附近存在强的风速垂直切变,可引起动力湍流,使垂直速度加强,同时促进云顶的抽风效应。

(2) 对流层中下部的风垂直切变,不仅有利于建立不稳定层结,还可以促进对流的组织化,使得云体维持较长时间。

(3) 风的垂直切变,尤其是风向随高度偏转可加强云内上升气流,并产生水平涡度<sup>[1]</sup>。

降雪前高、中、低三层强切变分别与高、中、低急流相联系:高空急流对雹暴的作用主要是抽风效应和高空辐散,使雹云内、外气流畅通,加强雹云前部的上升气流;中空强风带的作用,常常是与中层冷空气爆发相关联,促使层结趋于不稳定,同时加强中层风的垂直切变;低空急流的作用主要是输送热量和水汽,在强风中心前方低空出现辐合上升和水汽汇,从而为雹云发展提供高能入流空气<sup>[1]</sup>。

#### 2.2.3 不稳定能量

不稳定能量积聚的条件主要有 2 个<sup>[1]</sup>:一是地形聚能作用,在高原或高大山脉背风坡的喇叭口谷地,处于死水区盛行气流弱,午后谷风向山区或高原辐合,暖湿空气易于在这些地区集中,致使高原东侧边坡某些特殊地形区常出现一些准定常的次天气尺度和中尺度系统。如甘肃天祝县南部和临夏回族自治州午后出现的高能中心就属此类。二是较大范围内一定厚度的逆温层,抑制了低层对流的发展,使热

量和水汽积存在逆温层下。西北地区绝大多数冷气团雹暴逆温层接近地面,随着地面气温的增高将自动破坏,而释放不稳定能量造成午后降雪。

不稳定能量的释放即能量转换需要一定的触发条件。现有的研究认为中高层冷平流、中尺度系统,尤其是地形强迫产生的中尺度系统都对雹暴的触发有一定的作用,发生在行星边界层中的过程是启动雹暴的重要条件。渠永兴等<sup>[10]</sup>指出:在山区(海拔多在 2 500 m 以上的), $\theta$  层与地面相对距离较近,对流系统比川区容易穿过  $\theta$  层,有利于中尺度系统生成发展和产生强对流运动。由于地势比较复杂,造成上升气流分布不均,更有利于冰晶反复上升下降,易使降雪系统的能量消耗和释放。降雪系统发展速度很快,在近地面地形作用下扰动量加大,促使不稳定能量剧烈发展,易造成强对流天气急剧形成,地形起了触发性的主导作用。

#### 2.2.4 大气不稳定层结

大气不稳定层结往往是冰雹天气发生的重要条件。地面太阳辐射加热是边界层特别是近地层大气不稳定主要原因,它对冰雹形成影响很大,它造成了冰雹天气多发生在下午至傍晚的时段特征。高空大气不稳定往往与气团活动有关,冷气团由于上部气温和露点显著偏低而会造成大气不稳定层结。在冷气团降雪日,600 ~250 hPa 温度、露点明显低于同月平均值,500 hPa 以下有不稳定层结<sup>[1]</sup>。暖气团由于下部高温高湿,上部干燥而造成的对流不稳定。在暖气团降雪日,400 hPa 以下温度偏高,以 700 ~600 hPa 偏高最多,200 ~100 hPa 温度略偏低。600 hPa 附近有一干暖盖,因而 600 hPa 以下露点为正距平,以上为负距平,致使 400 hPa 以下为对流不稳定。

### 3 雷达、卫星、闪电定位、数值模拟在冰雹研究中的应用

人们生活水平的提高和社会经济的发展对冰雹等灾害性天气的防御能力和水平提出了越来越高的要求。随着科技进步,许多新技术已被广泛的应用在冰雹灾害的预警预测和科学研究中,多普勒雷达、卫星遥感、闪电定位等观测监测技术和数值模拟方法就是其中发展最为突出的一类,现就近年来的主要成果做一归纳。

#### 3.1 雷达资料的应用

目前,雷达已成为研究雹暴的主要工具。结合天气形势、高空气象条件和回波状态对雹云进行分

类,了解各类雹云的生成条件及其演变,推断雹云内的气流和温度结构最终找到雹云判别的指标是工作的重点。一般使用单一的回波信息从混合云中区别不同相态例子是困难的。张鸿发等<sup>[16]</sup>用C波段双线偏振雷达分析雹云在不同浓度阶段的回波量和偏振特性的关系,发现 $Z_H$ 和 $Z_{DR}$ 双参量对判别降雹具有明显优势。付双喜等<sup>[13]</sup>使用兰州CINRAD/CC(3830)多普勒雷达体扫描资料中的 $V_{IL}$ (垂直累计液态水含量)产品的生成技术及其估测误差分析,并结合甘肃中部地区降雨和降雹实测资料,提出 $V_{IL}$ 识别冰雹云的判别指标。 $V_{IL}$ 值的大小在中雨、大雨、暴雨中一般不超过 $3 \text{ kg/m}^2$ ,当 $V_{IL}$ 值大于 $7 \text{ kg/m}^2$ 时就预示着强对流天气特别是雹暴天气的出现。王伟等<sup>[20]</sup>从天津市的雷达分析中指出,当 $V_{IL}$ 数值大于 $20 \text{ kg/m}^2$ 时,出现冰雹天气的可能性极大。国外的研究表明,在层状云降水中, $V_{IL}$ 值很少超过 $10 \text{ kg/m}^2$ 。在有组织的对流系统中,在活跃的上升气流区, $V_{IL}$ 值常常超过 $10 \text{ kg/m}^2$ 。可见,虽然 $V_{IL}$ 是比较容易识别冰雹云的判别指标,但由于地域和地形的差异,往往使判识冰雹云的 $V_{IL}$ 临界值也有很大的差别,尤其是西北地区地形更加复杂多变,用 $V_{IL}$ 判别冰雹云还需要做更深入的工作,以获得 $V_{IL}$ 临界值与局地某种或某几种要素的关系式。另外,双线偏振多普勒雷达为冰雹云的识别带来了某些希望,由于它同时具有的双线偏振和多普勒功能,既可以获取云内部粒子相态特征,又可以获取云内的气流结构,它作为一种多参数雷达,对雹云的监测识别效果会有较大改进。

### 3.2 卫星资料的应用

应用卫星资料虽然不易掌握雹云的内部结构,但能识别早期对流云系及先兆性的卷云等。所以,由于卫星监测的范围广,它对大范围雹暴云的监测仍然有重要价值。张杰等<sup>[7]</sup>应用AVHRR资料对冰雹云和其他云的光谱特征进行对比分析,认为冰雹云的热红外亮温的变化基本在 $245 \text{ K}$ 以下,中红外波段反射率基本在 $0.4$ 及以下范围,可见光和近红外波段反射率大于 $0.6$ 。从卫星资料反演的冰雹云宏观物理参数看,高的云光学厚度和大的云粒子有效半径是冰雹产生的2个重要条件,这2个条件同时出现的区域一般容易出现冰雹天气。西北地区冰雹发生的云顶高度基本在 $4.5 \sim 7 \text{ km}$ 之间,并根据雹云光谱特征定义了雹暴指数。张杰等<sup>[9]</sup>利用NOAA卫星数据分析了区域强对流冰雹天气过程的云团特性发现:上冷下暖、上干下湿的对流运动特征,

是区域性冰雹天气过程形成的根本原因,西南暖舌提供的大量水汽以及午后地面受热增温产生强烈的上升运动促进了冰雹对流天气的爆发性发展。马禹等<sup>[11]</sup>研究了新疆系统性冰雹天气过程的卫星云图特征,指出新疆降雹云团的尺度小、形状不规则、云顶温度较高,强对流云团是冰雹云的主体。张水平等<sup>[25]</sup>给出了一种利用高分辨率红外云图的估算模式,得到中尺度对流云团内垂直上升速度,可定量地揭示中尺度对流发展演变特征。应该说应用卫星遥感技术监测冰雹天气过程的研究工作仍处在初步阶段,卫星资料的时间和空间分辨率均影响到它在这个领域的有效发挥。可能有发展前景的是:首先,卫星与多普勒雷达可以配合使用,发挥各自的特点,卫星监测手段着眼于冰雹云的宏观分布和运动,多普勒雷达的监测手段着眼于冰雹云个体的结构和演变。其次,应该将卫星资料与用多普勒雷达资料对照分析,建立比较可靠的冰雹云卫星遥感监测方法。

### 3.3 闪电定位的应用

冰雹云一般都伴有强烈的雷电活动。冰雹云产生发展的同时,也是云体内电荷产生和积累较快的时候,雷电信息对雹暴的研究有很大的潜力<sup>[19]</sup>。黄彦彬等<sup>[26]</sup>分析了青海省西宁市和互助县两地的闪电频数资料,指出使用SD型闪电计数器可以识别周围 $40 \text{ km}$ 的冰雹云,当雷暴由山区向平地移动时, $5 \text{ min}$ 闪电频数大于 $40$ 次时,就有可能产生冰雹天气,而雷暴从平地向山区移动时, $5 \text{ min}$ 闪电频数大于 $30$ 次时,就有可能产生冰雹天气。雷暴云闪电频数的升度大于 $10 \text{ 次}/(5 \text{ min})$ 也可能有雷雨云和冰雹云,但时效较短。负地闪的空间位置对应风暴上升气流区和风辐合汇聚区,而正地闪多发生在风暴初始发生和消散阶段。利用闪电频数还能对雷雨云和冰雹云进行有效区分,当云闪电频数达到 $100 \text{ 次}/(5 \text{ min})$ 以上一般是冰雹云。一般降雹时间和闪电频数最大时间有近 $10 \text{ min}$ 的滞后性。周筠君<sup>[17]</sup>等利用闪电定位系统和双线偏振雷达资料更加细致地分析了该地区冰雹云发展演变及与地闪的关系,指出降雹前 $30 \text{ min}$ 左右,每 $5 \text{ min}$ 地闪频数陡然上升,降雹前 $18 \text{ min}$ ,每 $5 \text{ min}$ 地闪频数平均上升 $3.5$ ;每 $5 \text{ min}$ 地闪频数最大值出现在降雹前 $16 \sim 6 \text{ min}$ 之间,负地闪数量在雹云的发展、成熟和消亡3阶段中远大于正地闪数量,并且起着主导作用。从闪电对冰雹云的监测效果看,利用闪电频数识别高原雷雨云和冰雹云是一种简便、经济实用的手段,有助于没有雷达等观测设备的偏僻山区进行冰雹监测。

### 3.4 数值模拟的应用

冰雹云的发生发展受制于不同尺度的天气变化影响。空间尺度上千公里、时间尺度几天的“天气尺度系统”和空间尺度数十到数百千米、时间尺度几小时的“中小尺度系统”相互作用,可以造成各种强度、生命期的单体雹暴、多单体雹暴、超级单体雹暴和飑线系统,它涉及到各个不同尺度之间的作用。于是,科学家们将各种数值模式运用于雹暴过程的研究之中,从雹云微物理过程和中小尺度过程即环境动力热力条件两方面入手,来获取对降雹过程的细致描述。

洪廷超<sup>[18]</sup>利用三维弹性冰雹云催化模式分析了冰雹形成的物理机制和催化防雹机制。结果表明,在云体发展阶段将催化剂 AgI 送入云中上升气流极值高度催化效果最好。许焕斌等<sup>[6]</sup>使用三维雹云模式(GF)和三维粒子增长运行模式研究提出了雹粒生长的“六道”理论。康凤琴<sup>[5]</sup>通过对青藏高原东北边缘冰雹的形成过程的数值模拟发现,云中的上升气流、水平风速零线和云中各类水成物、各类冰雹质粒的空间分布满足“六道”理论描述的配置区域是冰雹形成和增长的有效区域,也是人工消雹防雹的主要区域。康凤琴<sup>[4]</sup>还用三维档模式模拟研究了冰雹形成和增长的微物理过程,发现:中尺度水分和动力条件决定了冰雹云的强度和冰雹的大小,微物理过程决定了冰雹云的消亡,潜热释放延长了降雹的时间。

冰雹天气是中小尺度过程,初值场和地形、地表植被资料对降雹系统的模拟效果都具有很重要的作用。王鹏云等<sup>[21]</sup>将我国植被资料和 NCAR 资料分别用于非静力平衡中尺度模式 MM5,对 1998 年 5 月 23~24 日华南暴雨进行数值模拟试验,结果表明:当网格格距为 45 km 时,二者差别很小,当网格格距减小到 5~15 km,模拟的降水量最大值增加了 12%~14%,更接近观测值,同时对低层大气热力动力结构也有一定影响。张义军等<sup>[27]</sup>利用三维强风暴动力—电耦合模式,数值模拟了风暴演变过程中电活动对冰雹增长及地面降雹的影响。结果表明:带电冰雹与云内强电场作用使地面降雹量增加约 50%,雹块直径增大 0.7 mm,降雹时间滞后约 3 min。提出可以通过对水成物降落速度的调制来影响冰雹微观增长过程,使冰雹数目减少、尺度增大,但降雹总量增加,更容易降落到地面。

## 4 结 语

西北地区降雹不仅与季节更迭、大气环流有关,还和境内的高原高山等特殊地形紧密联系。在这样复杂多变的地形条件下,不同的水汽、热力等条件将对边界层厚度和边界层内的能量水汽输送产生很大影响,而冰雹天气过程能量水汽的来源极大地依赖边界层过程。在西北冰雹研究中,这方面的工作还相对滞后。

另外,山脉过山气流激发出的重力波的特征以及重力波怎样触发或加强山脉背风坡的强对流过程等地形作用很少有研究,而这些过程又与冰雹形成密切相关。因此,在今后的科研工作中,地形对雹暴过程的影响应该提到一定的高度。

以雷达回波、闪电定位、卫星遥感等手段对冰雹云进行识别和监测在目前的科研和实践中都有非常多的应用,而且也提出了一些识别方法和判别指标。但将这些指标和方法运用到实践中时,往往却得不到满意的效果。就像 Thomson 等<sup>[29]</sup>的观测所研究证明的那样,在冰雹云中 100 m 范围里雷达回波功率谱(反应的是冰雹粒子的谱分布)有显著的空间变化。冰雹云的观测和实验研究有相当的困难,我们的识别方法和判别指标必须用尽量多的个例来补充和修正。

目前对西北冰雹的中尺度数值研究中还有许多方面急需改进:一是为数值模式提供的数据是否有足够的分辨率和精度,这要求在数据资料同化方面有较大的发展;二是模式中对边界层、云、云微物理过程的描述以及对辐射的描述等还与事实不尽相符;三是闪电对冰雹云的影响、不同尺度数量相态的水质粒的影响、不同粒子的运动轨迹以及微物理过程与动力过程的相互反馈机制还没有充分在模式中表示出来;四是云中冰相粒子的增值过程和转化过程以及谱宽变化必须准确描述;五是定量表达冰相粒子碰并过程中的结合溅散率。这些工作都有相当难度,但只有逐步完善这些方面,对冰雹云的模拟才能向前发展,我们的模式模拟才能准确地反映雹暴天气过程真实性。

### 参考文献(References):

- [1] Bai Zhaoye, Xu Guochang. Weather in Northwest China [M]. Beijing: Meteorological Press, 1988. 258-262, 270-271, 278, 283-292, 294, 302, 305, 309-310, 369. [白肇烨,徐国昌.中国西北天气[M].北京:气象出版社,1988.258-262,270-271,278,283-292,294,302,305,309-310,369.]

- [ 2 ] Ding Yihui. Synoptic Meteorology [ M ]. Beijing : Meteorological Press , 1991 . 407-408 . [ 丁一汇 . 高等天气学 [ M ]. 北京 : 气象出版社 , 1991 . 407-408 . ]
- [ 3 ] Liu Dexiang , Bai Huzhi , Dong Anxiang . Studies on climatic characteristic and anomaly of hail in Northwest China [ J ] . Plateau Meteorology , 2004 , 23 ( 6 ) : 795-803 . [ 刘德祥 , 白虎志 , 董安祥 . 中国西北地区冰雹的气候特征及异常研究 [ J ] . 高原气象 , 2004 , 23 ( 6 ) : 795-803 . ]
- [ 4 ] Kang Fengqin , Zhang Qiang . Simulating study on hail microphysical process on the northwestern side of Qinghai-Xizang Plateau and its neighborhood [ J ] . Plateau Meteorology , 2004 , 23 ( 6 ) : 735-742 . [ 康凤琴 , 张强 . 青藏高原东北边缘冰雹为物理过程模拟研究 [ J ] . 高原气象 , 2004 , 23 ( 6 ) : 735-742 . ]
- [ 5 ] Kang Fengqin , Zhang Qiang . Mechanism of hail formation on the northeast border of Qinghai-Xizang Plateau and its neighborhood [ J ] . Plateau Meteorology , 2004 , 23 ( 6 ) : 749-757 . [ 康凤琴 , 张强 . 青藏高原东北边缘冰雹形成机理探索 [ J ] . 高原气象 , 2004 , 23 ( 6 ) : 749-757 . ]
- [ 6 ] Xu Huanbin , Duan Ying . The mechanism of hailstone's formation and the hail-suppression hypothesis : " Beneficial Competition " [ J ] . Chinese Journal of Atmospheric Sciences , 2001 , 25 ( 2 ) : 277-288 . [ 许焕斌 , 段英 . 冰雹形成机制的研究并论人工雹胚与自然雹胚的 " 利益竞争 " 防雹假说 [ J ] . 大气科学 , 2001 , 25 ( 2 ) : 277-288 . ]
- [ 7 ] Zhang Jie , Zhang Qiang , Kang Fengqin , et al . Satellite spectrum character of hail cloud and pattern of remote sensing monitor in east of Northwest China [ J ] . Plateau Meteorology , 2004 , 23 ( 6 ) : 743-748 . [ 张杰 , 张强 , 康凤琴 , 等 . 西北地区东部冰雹云的卫星光谱特征和遥感监测模型 [ J ] . 高原气象 , 2004 , 23 ( 6 ) : 743-748 . ]
- [ 8 ] Zhang Jie , Li Wenli , Kang Fengqin , et al . Analysis and satellite monitor of a developing process of hail cloud [ J ] . Plateau Meteorology , 2004 , 23 ( 6 ) : 758-763 . [ 张杰 , 李文莉 , 康凤琴 , 等 . 一次冰雹云演变过程的卫星遥感监测与分析 [ J ] . 高原气象 , 2004 , 23 ( 6 ) : 758-763 . ]
- [ 9 ] Duanmu Liyin , Li Zhaorong , Zhang Qing , et al . A case on doppler radar and lightning characteristic of severe convective weather in central Gansu [ J ] . Plateau Meteorology , 2004 , 23 ( 6 ) : 764-771 . [ 端木礼寅 , 李照荣 , 张强 , 等 . 甘肃中部强对流天气多普勒雷达和闪电特征个例研究 [ J ] . 高原气象 , 2004 , 23 ( 6 ) : 764-771 . ]
- [ 10 ] Qu Yongxing , Zhang Qing , Kang Fengqin . Radar climatic characteristics of severe convective cloud in Yongding , Gansu [ J ] . Plateau Meteorology , 2004 , 23 ( 6 ) : 775 . [ 渠永兴 , 张强 , 康凤琴 . 甘肃永登对流云的雷达气候学特征分析 [ J ] . 高原气象 , 2004 , 23 ( 6 ) : 775 . ]
- [ 11 ] Ma Yu , Wang Xu , Guo Jiangyong . Characteristic analysis on circulation pattern of systematic hail weather processes and satellite cloud image in Xinjiang [ J ] . Plateau Meteorology , 2004 , 23 ( 6 ) : 787-794 . [ 马禹 , 王旭 , 郭江勇 . 新疆系统性冰雹天气过程的环流形势及卫星云图特征分析 [ J ] . 高原气象 , 2004 , 23 ( 6 ) : 787-794 . ]
- [ 12 ] Yin Xuellian , Dong Anxiang , Ding Rong . Features and short-term forecast of hail in Zhangye city [ J ] . Plateau Meteorology , 2004 , 23 ( 6 ) : 804-809 . [ 殷雪莲 , 董安祥 , 丁荣 . 张掖市降雹特征及短期预报 [ J ] . 高原气象 , 2004 , 23 ( 6 ) : 804-809 . ]
- [ 13 ] Fu Shuangxi , An Lin , Kang Fengqin , et al . Application of VIL in identification of hailstorms and estimation error analysis [ J ] . Plateau Meteorology , 2004 , 23 ( 6 ) : 810-814 . [ 付双喜 , 安林 , 康凤琴 , 等 . VIL 在识别冰雹云中的应用及估测误差分析 [ J ] . 高原气象 , 2004 , 23 ( 6 ) : 810-814 . ]
- [ 14 ] Dong Anxiang , Zhang Qiang . New development of hail research in China and main scientific problem [ J ] . Arid Meteorology , 2004 , 22 ( 3 ) : 68-75 . [ 董安祥 , 张强 . 中国冰雹研究的新进展和主要科学问题 [ J ] . 干旱气象 , 2004 , 22 ( 3 ) : 68-75 . ]
- [ 15 ] Wang Xueliang , Fu Zhao , Qiao Yanjun , et al . Study on forecasting methods of hail storm in Lanzhou city [ J ] . Arid Meteorology , 2004 , 22 ( 3 ) : 63-67 . [ 王学良 , 付朝 , 乔艳君 , 等 . 兰州市冰雹预报方法研究及系统介绍 [ J ] . 干旱气象 , 2004 , 22 ( 3 ) : 63-67 . ]
- [ 16 ] Zhang Hongfa , Qie Xiushu , Li Zhiyun . Polarization radar observations on hailstorms [ J ] . Chinese Journal of Atmospheric Sciences , 2001 , 25 ( 1 ) : 38-48 . [ 张鸿发 , 郗秀书 , 李致君 , 等 . 偏振雷达观测强对流雹暴云 [ J ] . 大气科学 , 2001 , 25 ( 1 ) : 38-48 . ]
- [ 17 ] Zhou Yunjun , Zhang Yijun , Qie Xiushu . The relationship between the variation of hail cloud system and its cloud to ground lightning in the east part of Gansu province [ J ] . Plateau Meteorology , 1999 , 18 ( 2 ) : 236-244 . [ 周筠君 , 张义军 , 郗秀书 . 陇东地区冰雹云系发展演变与其地闪的关系 [ J ] . 高原气象 , 1999 , 18 ( 2 ) : 236-244 . ]
- [ 18 ] Hong Yanchao . A 3-D hail cloud numerical seeding model [ J ] . Acta Meteorologica Sinica , 1998 , 56 ( 6 ) : 641-653 . [ 洪延超 . 三维冰雹云催化数值模式 [ J ] . 气象学报 , 1998 , 56 ( 6 ) : 641-653 . ]
- [ 19 ] Liu Xinsheng . Research on lightning physics and artificially triggered lightning over last decade : Progress and prospect [ J ] . Plateau Meteorology , 1999 , 18 ( 3 ) : 266-271 . [ 刘欣生 . 雷电物理及人工引发雷电研究十年进展 [ J ] . 高原气象 , 1999 , 18 ( 3 ) : 266-271 . ]
- [ 20 ] Wang Wei , Jia Huizhen . Forecasting hail with radar vertically integrated liquid data [ J ] . Meteorology Monthly , 2002 , 1 : 47-48 . [ 王伟 , 贾惠珍 . 用雷达垂直累积液态含水量资料预测冰雹 [ J ] . 气象 , 2002 , 1 : 47-48 . ]
- [ 21 ] Wang Pengyun , Xiao Qiangguang , Lin Yonghui , et al . Land vegetation retrieving from satellite remote sensing and application test in mesoscale simulation for heavy rainfall of South China [ J ] . Journal of Applied Meteorological Science , 2001 , 12 ( 3 ) : 287-295 . [ 王鹏云 , 肖乾广 , 林永辉 , 等 . 卫星遥感地表植被及其在华南暴雨中尺度数值模拟中的应用试验 [ J ] . 应用气象学报 , 2001 , 12 ( 3 ) : 287-295 . ]
- [ 22 ] Chen Qian , Zhu Yangsheng . Categorization and diagnosis analysis of hail storm in Gansu [ A ] . In : Editor Group of Corpus of Severe Storm , eds . Corpus of Severe Storm [ C ] . Beijing : Mete-

- ological Press, 1983, 15-24. [陈乾, 朱阳生. 甘肃雷暴分类及其诊断分析[A]. 见: 强对流天气文集编辑组编. 强对流天气文集[C]. 北京: 气象出版社, 1983, 15-24.]
- [23] Zhu Min, Yu Zhihao, Lu Hancheng. The effect of meso-scale lee wave and its application [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 1999, 57(6): 705-713. [朱民, 余志豪, 陆汉城. 中尺度地形背风波的作用及其应用[J]. 气象学报, 1999, 57(6): 705-713.]
- [24] Zang Zengliang, Zhang Ming. Theoretical study on trapped lee waves on three layers model [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2004, 62(4): 395-400. [臧增亮, 张铭. 三层模式背风波的理论研究[J]. 气象学报, 2004, 62(4): 395-400.]
- [25] Zhang Shuiping, Shi Hanqing. A method of estimating vertical velocity of mesoscale convective cloud cluster with satellite imagery [J]. *Journal of PLA University of Science and Technology*, 2001, 2(5): 95-99. [张水平, 石汉青. 利用卫星资料估算中尺度对流云团上升气流的一种方法[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2001, 2(5): 95-99.]
- [26] Huang Yanbin, Wang Zhenhui. Identification of thundercloud and hailproducing cloud based on lightning counting data [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology*, 2001, 24(2): 275-279. [黄彦彬, 王振会. 利用 SD 型闪电频数识别高原雷雨云和冰雹云[J]. 南京气象学院学报, 2001, 24(2): 275-279.]
- [27] Zhang Yijun, Sun Anping, Yan Muhong, et al. Numerical modeling for effect of electric activity during thunderstorms upon the growth of hail particles [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2004, 47(1): 25-32. [张义军, 孙安平, 言穆弘, 等. 雷暴电活动对冰雹增长影响的数值模拟研究[J]. 地球物理学报, 2004, 47(1): 25-32.]
- [28] Knight N. Not two alike? [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1988, 69: 496.
- [29] Thomson A D, List R. High-resolution measurement of a hail region by vertically pointing doppler radar [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1999, 56(13): 2132-2151.
- [30] Xie Jinnan. Summary of the study of the drought predictive system in Northwest China [A]. In: Xie Jinnan, eds. *The Study of Drought Climate Change and Prediction in Northwest China* [C]. Beijing: Meteorological Press, 2001, 1-2. [谢金南. “西北地区干旱预测系统研究”专题研究成果综述[A]. 见: 谢金南编. 中国西北干旱气候变化与预测研究[C]. 北京: 气象出版社, 2001, 1-2.]

## RECENT ADVANCEMENTS OF HAIL RESEARCH IN NORTHWEST CHINA

ZHOU Wei<sup>1, 2</sup>, ZHANG Qing<sup>1</sup>, KANG Feng-qin<sup>1</sup>

(Lanzhou Institute of Arid Meteorology, China Meteorological Administration, Key Laboratory of Arid Climate Change and Reducing Disaster of Gansu Province, Lanzhou 730020, China; 2. Chinese Academy of Meteorology Sciences, Beijing 100081, China)

**Abstract:** The factors available to hail formation and development, as the climatic, the synoptic and local circulation characteristics and local factors in northwest China are summarized. The recent achievements in hail research by the radar, satellite, lightning gauge and modeling are summed up. Some key scientific problems needed to be urgently solved and research methods needed to be further developed are pointed out.

**Key words:** Hail research; Climatic and synoptic circulation characteristics; Northwest China.