

中国西北冰雹研究

张 强 康凤琴 主编

气象出版社

责任编辑：陈 红 汪勤模 封面设计：王 伟

ZHONGGUO XIBEI BINGBAO YANJIU

ISBN 7-5029-4075-8



9 787502 940751 >

ISBN 7-5029-4075-8/P·1476

定价：98.00元

中国西北冰雹研究

张 强 康凤琴 主编

气象出版社

PDG

内 容 提 要

本书涵盖了中国科技部科研院所社会公益研究项目(2002DIB10046)对西北冰雹研究的最新成果。包括了冰雹天气监测方法研究;冰雹云的数值模拟研究;冰雹天气特征分析;冰雹的气候规律研究;冰雹预报、预测技术;人工防雹技术与效果评估和冰雹研究综述共七部分 75 篇文章,既有理论探讨,又注重实际应用,可为在校研究生和大中专院校师生以及相关科研人员 and 业务人员使用参考。

图书在版编目(CIP)数据

中国西北冰雹研究/张强等主编. —北京:气象出版社,
2005. 12

ISBN 7-5029-4075-8

I. 中... II. 张... III. 雹-研究-西北地区
IV. P426. 64

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 140282 号

气象出版社出版

(北京中关村南大街 46 号 邮编: 100081)

总编室: 010-68407112 发行部: 010-62175925

网址: <http://cmp.cma.gov.cn> E-mail: qxcbs@263.net

责任编辑: 陈红 汪勤模 终审: 黄润恒

封面设计: 王伟 版式设计: 陈红 责任校对: 宋春香

*

北京燕龙印刷有限公司印刷

气象出版社发行

*

开本: 787×1092 1/16 印张: 36.75 字数: 940.8 千字

2005 年 12 月第一版 2005 年 12 月第一次印刷

定价: 98.00 元

本书如存在文字不清、漏印以及缺页、倒页、脱页等, 请与本社发行部联系调换

前 言

中国是世界上冰雹灾害最严重的国家之一，每年平均雹灾面积 173 万 hm^2 ，重灾年达 400 万 hm^2 ，因冰雹所造成的经济损失约为数亿元至十余亿元。中国西北地区是我国主要的干旱和半干旱区，地形地貌复杂，地理景观各异，下垫面的状况复杂。有祁连山、天山、阿尔泰山、昆仑山等高大山脉，地形对局地气候的影响十分明显，在高山迎风坡，当地面加热条件满足，垂直对流发展强烈时，当地的积雨云就会发展成为冰雹云，造成冰雹灾害，冰雹灾害在该地区具有明显的地域特征。由于它形成和发展快，雹粒动能大，常常会给一些地区的农业生产造成严重的损失，有时甚至会导致果品绝产，粮食颗粒无收。

防灾减灾一直受到公众的关注，联合国将 20 世纪最后 10 年（1990—2000 年）定为“国际减轻自然灾害十年”，在防灾减灾方面做了大量工作，取得了很大的成绩。如今，在国家西北大开发战略下，中国西北地区社会、经济的发展，对防灾减灾工作的需求更迫切、要求更高，防雹消雹工作遇到了良好的发展机遇，同时也面临着提高防雹消雹技术和效果的严峻压力。要提高防灾减灾成效、准确评估人工防雹消雹的效果，关键问题是人工防雹消雹技术水平的提高。准确评估人工防雹消雹的效果，有利于防雹减灾工程的统筹计划和安排，也有利于国家民政部门的救灾方案的制定和保险救济工作的开展。

人工防雹消雹技术，是集气候学、天气学、大气物理学和大气探测等大气科学中一些先进理论研究成果为一体的综合性应用科学，而且在具体实施过程中，在防雹、消雹、预警、预测的信息和资料的获取、收集、传输、分析以及作业和效果评估等各个环节都离不开高科技的开发和应用。由于新的理论和探测技术的发展，目前人工防雹消雹技术仍然是一个发展中的科学。

本书是近 3 年来我们在中国科技部科研院所社会公益研究项目（2002DIB10046）的资助下，对西北冰雹研究的最新研究成果，包括了冰雹天气监测方法，冰雹云的数值模拟研究，冰雹天气特征分析，冰雹的气候规律研究，冰雹预报、预测技术，人工防雹技术与效果评估和冰雹研究综述共七部分 75 篇文章，该书在兼顾理论性的同时，特别注重了对应用技术的探讨，希望能为在校研究生和大中专院校师生以及相关科研和业务人员在从事该领域研究工作时有所帮助。

本项工作受到中国科技部科研院所社会公益研究项目（2002DIB10046）资助。本书的问世受到甘肃省气象局、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、兰州区域气象中心、甘肃省人工影响天气办公室等单位的领导和同志们的关心和支持。最后感谢项目组全体成员和本书编辑为本书的出版所付出的努力。

张 强

2005 年 11 月

目 录

前言

冰雹天气监测方法研究

西北地区冰雹云的 MODIS 光学特征反演与分析	张杰	张强	康凤琴等(3)
西北地区东部冰雹云的卫星光谱特征和暴雨指数分析研究	张杰	张强	康凤琴等(11)
冰雹云的 EOS-MODIS 卫星监测模型	张杰	张强	付双喜等(19)
一次冰雹云演变过程的卫星遥感监测与分析	张杰	李文莉	康凤琴等(26)
甘肃中部强对流天气多普勒雷达和闪电特征个例研究	端木礼寅	李照荣	张强等(34)
一例 β 中尺度对流系统的 CINRAD/CC 产品分析	刘治国	邱崇践	王锡穗等(44)
“5.30”强对流风暴的 CINRAD/CC 特征分析	李晓霞	王有生	朱拥军等(56)
兰州新一代天气雷达降水估计的误差来源	刘治国	何香莲	王锡穗等(65)
“8.28”过程的多普勒雷达回波与水汽输送特征分析	黄玉霞	王宝鉴	王锡穗等(69)
VIL 在识别冰雹云中的应用及估测误差分析	付双喜	安林	康凤琴等(76)
甘肃永登强对流云回波的雷达气候学特征分析	渠永兴	张强	康凤琴(83)
甘肃永登雹云回波群体特性分析	渠永兴		康凤琴(93)
711 雷达测定雹云回波的一种经验强度指数	吴爱敏	王位泰	王璠等(98)
冰雹云中闪电特征观测研究	李照荣	付双喜	李宝梓等(102)
地形影响的冰雹和暴雨天气的闪电特征	李照荣	张强	陈添宇等(111)
兰州周边地区闪电分布特征	李照荣	陈添宇	康凤琴等(122)
一次冰雹过程的雷达回波及其闪电特征分析	孙旭映	李照荣	渠永兴等(130)
东亚闪电产生的 NO _x 的时空分布特征	周筠珺	郝秀书	袁铁(134)

冰雹云的数值模拟研究

青藏高原东北边缘冰雹云形成的中尺度环境模拟研究	周崑	张强	康凤琴(143)
青藏高原东北边缘冰雹形成机理探索	康凤琴	张强	马胜萍等(155)
青藏高原东北边缘冰雹微物理过程模拟研究	康凤琴	张强	渠永兴等(163)
黄土高原一次冷涡飑线天气的综合分析与数值模拟	侯建忠	王繁强	方建刚等(172)
高原地区冰雹云数值模拟研究——冰相微物理过程的作用	孙安平	康凤琴	洪延超(179)
青藏高原东北部一次强对流天气过程的模拟研究	叶燕华	王平鲁	康凤琴(186)
三维对流云冰粒子分档人工影响天气模式详解	赵建华	康凤琴	郭学良(197)

冰雹天气特征分析

- 一次区域性冰雹天气过程分析..... 张新荣 王锡稳 程鹏等(229)
- 2005年5月30日甘肃罕见冰雹天气过程分析..... 樊晓春 董安祥(236)
- 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
..... 马禹 王旭 郭江勇(243)
- 一次连续性冰雹天气过程的诊断分析..... 王璠 董安祥 沈治广(253)
- 平凉地区冰雹气候特征及500hPa环流形势分析..... 樊晓春(259)
- 塔里木盆地周边地区冰雹云特征分析..... 王旭 马禹 郭江勇(263)
- 河西走廊东部冰雹天气分析和初步探讨..... 杨晓玲 丁文魁 谢万银(268)
- 新疆降雹云团卫星云图特征的分类研究..... 陈春艳 马禹 王旭等(273)
- 一类影响陕西的强飑线天气云图特征分析..... 张列锐 侯建忠(279)
- 一次强对流性天气的发生条件及云图演变特征..... 樊晓春 董彦雄 王若安(284)
- “5·26”甘肃局地强对流天气过程综合分析..... 王锡稳 陶健红 刘治国等(290)
- 一次强对流天气综合分析..... 吉惠敏 冀兰芝 王锡稳等(297)
- “5·13”强对流天气分析与思考..... 刘治国 王锡稳 程鹏等(307)

冰雹的气候规律研究

- 中国西北地区冰雹的气候特征分析..... 郭江勇 张强 薛景轩(317)
- 中国西北地区冰雹的气候特征及异常研究..... 刘德祥 白虎志 董安祥(322)
- 西北地区夏季冰雹异常变化的成因诊断..... 刘德祥 杨苏华 董安祥等(334)
- 西北地区冰雹分布及与地温场的相关分析..... 赵红岩 汤懋苍 杨瑜峰等(346)
- 西北地区年冰雹次数与海拔高度、气温的相关分析..... 郭江勇 张强 杨民(353)
- 西北地区冰雹分布特征分析..... 李照荣 丁瑞津 董安祥等(359)
- 西北地区冰雹的气候特征..... 赵红岩 董安祥(364)
- 对西北地区冰雹影响因子的探讨..... 郭江勇 张强 杨民(371)
- 西北地区初夏冰雹的气候背景研究..... 林纾 陆登荣(377)
- 祁连山东部冰雹气候特征及防雹实例分析..... 杨晓玲 丁文魁 钱莉(385)
- 永登县冰雹气候特征统计分析..... 孙旭映 李宝梓(391)
- 甘肃省区域性冰雹的源地及其移动路径..... 丁瑞津 董安祥 李荣庆等(394)
- 西北地区雷暴气候特征分析..... 李照荣 康凤琴 马胜萍(397)

冰雹预报、预测技术

- 溃变理论在西北地区冰雹天气预报中的应用..... 王若升 樊晓春 董安祥等(407)
- 支持向量机方法在冰雹预报中的应用..... 吴爱敏 郭江勇 路亚奇等(414)
- 西北区冰雹气候分析及预测方法研究..... 赵红岩 董安祥 康凤琴(422)
- 冰雹天气定量预报判别指标分析..... 王繁强 侯建忠 郭大梅(431)
- 中国西北区冰雹与地震的相关分析..... 赵红岩 汤懋苍 杨瑜峰等(437)
- T213资料在冰雹短期预报中的释用..... 樊晓春 董彦雄 董安祥等(445)

张掖市降雹特征及短期预报..... 殷雪莲 董安祥 丁荣(451)

陇东黄土高原冰雹的气候特征及预报..... 吴爱敏 张天锋 白爱军(459)

兰州市冰雹预报方法研究及系统介绍..... 王学良 付朝 乔艳君等(465)

华亭县冰雹的天气气候特征分析及预报..... 周志鹏 张亚刚 曹天堂等(473)

人工防雹技术与效果评估

西北地区冰雹监测、预警和作业指挥、效果检验业务支持系统设计概述
..... 王遂镗 陈旭辉 俞亚勤等(481)

业务性防雹作业实时决策指挥系统的设计..... 安林 康凤琴 陈艳华等(486)

甘肃省冰雹云雷达预警指标与作业方法研究..... 渠永兴 马胜萍(493)

人工防雹消雹业务技术问题的讨论..... 安林 张强 康凤琴等(499)

甘肃冰雹灾害对农业的影响及其防御对策研究..... 孙旭映 俞亚勤 闫敬泽等(504)

祁连山东部人工防雹消雹效果评估..... 钱莉 杨永龙 杨晓玲(510)

冰雹天气的短时监测预报及消雹作业评估..... 樊晓春 王若升 董彦雄等(517)

一次人工催化雹云的效果分析..... 孙旭映 俞亚勤 渠永兴等(523)

兰州市防雹效果评估..... 吴红 王学良(527)

近 30 年新疆天山山区人影防雹效果检验——以昭苏、巴音布鲁克为例
..... 瓦黑提 毛炜峰 俞亚勤(534)

冰雹研究综述

我国西北地区降雹气候特征及若干研究进展..... 周崑 张强 康凤琴(543)

中国冰雹研究的新进展和主要科学问题..... 董安祥 张强(552)

甘肃省冰雹云研究综述..... 渠永兴(565)

中纬度中尺度对流系统的动力学研究进展..... 叶燕华 康凤琴(573)



西北地区冰雹云的 MODIS 光学特征反演与分析

张 杰¹ 张 强¹ 康凤琴¹ 付双喜²

(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, 兰州 730020;

2 甘肃省气象局人工影响天气办公室, 兰州 730020)

摘 要: 云的光学厚度、云滴有效半径以及云相态等光学特征是决定云反射和辐射特性的重要参数, 本文采用 MODIS 传感器 0.65 μm 、2.1 μm 波段的辐射量资料, 应用 6S 辐射传输模式和 Mie 模式, 反演云的光学厚度和有效粒子半径; 另外, 结合 MODIS 的 [波段 29 (8.55 μm)、波段 31 (11 μm)、波段 32 (12 μm)] 资料对云的相态特征进行了判识, 并与地面观测资料进行了对比分析。结果表明, 冰雹产生在高的云粒子有效半径和高的云光学厚度同时发生的区域, 本次冰雹过程的云光学厚度和云粒子有效半径在 25~29, 13~16 μm 范围内, 并且较大部分降水云的光谱特征略大; 云相态的光谱特征是 MODIS 资料区分冰雹云的一个有效的必不可少的参数。

关键词: MODIS 强对流冰雹云 云光学厚度 云粒子有效半径 云相态 反演 西北地区

云的反射和辐射特征不仅严重地影响着长期气候变化^[1,2], 而且也反映了中尺度天气过程的特征^[3~8]。云的光学厚度、云滴有效半径以及云相态等光学特征是决定云辐射特性的重要参数, 近年来, 应用卫星对云特征的观测和研究一直是国际上关注的热点问题^[9~11]。美国 NASA EOS 计划的一个主要的任务就是从太空监测大气特征, Terra 卫星上载的中分辨率光谱仪 (MODIS) 具有 36 个波段, 其中有 21 个波段为研究云特征提供每日信息, 分辨率有 250m、500m、1000m 等 3 个不同的波段范围, 其中 500m、250m 的波段范围可以为云参数的反演提供参考^[4,5], 为研究云的特征提供了方便。

冰雹灾害是西北仅次于干旱的一种灾害性天气, 并且地域性强, 卫星观测能够提供大范围云分布特征, 通过卫星了解强对流冰雹云的光学特征等参数及其在云演变过程中的变化, 为大范围的雹云发生区域的监测、演变规律分析和灾害评估等方面起到重要作用。本研究主要应用 MODIS 观测数据, 选取分辨率为 500m 波段 [波段 1 (0.65 μm)、波段 7 (2.1 μm)], 采用 6S 辐射传输模式和 Mie 模式, 反演云的光学厚度和云粒子的有效半径, 应用 MODIS 的 [波段 29 (8.55 μm)、波段 31 (11 μm)、波段 32 (12 μm)] 数据分析云的相态特征; 试图分析冰雹云与其它强对流云团的异同, 及其空间分布特征, 为冰雹云的监测提供量化指标。

1 原理与方法

1.1 参数的物理意义和计算原理

关于 MODIS 的云参数反演方法也比较多,其原理就是在可见光波段,云的反射函数主要依赖于云的光学厚度;在近红外或中红外波段,云的反射函数主要依赖于云滴有效半径^[12]。根据上述原理,本文建立了一种利用 MODIS 传感器的 $0.65\mu\text{m}$ 和 $2.1\mu\text{m}$ 通道测量的反射率,应用 Mie 理论模式和 6S 辐射传输模式,采用 King and Nakajima^[13] 提出的渐进理论的方法,计算云的光学厚度和云滴有效半径。

SRD (Sensor Requirement Document) 给出了云的光学厚度 τ 定义,即对于垂直大气柱的所有云层,具有消光特性的垂直光学厚度,它与透过率 t 有关,表示为:

$$t = \exp(-\tau)$$

云粒子有效半径定义为粒子大小分布的三次方积分与二次方积分的比率,可表示为:

$$r_e = \int_0^{\infty} r^3 n(r) dr / \int_0^{\infty} r^2 n(r) dr$$

式中, $n(r)$ 为粒子谱分布, r 为粒子半径。

为了反演云的光学厚度和粒子大小,首先利用辐射传输模式计算反射的辐射亮度,利用入射太阳辐射 $F_0(\lambda)$ 对反射辐射亮度 $I^{\lambda}(0, -u, \varphi)$ 进行归一化后,对于平行大气中的液态水云,反射函数可表示为^[14]:

$$R^{\lambda}(\tau, r_e; u, u_0, \varphi) = \frac{\pi I^{\lambda}(0, -u, \varphi)}{u_0 F_0(\lambda)}$$

其中, $u_0 = \cos\theta_0$, θ_0 为太阳天顶角, $u = |\cos\theta|$ 。

当大气的光学厚度很厚时,反射函数的数值与厚层的渐进理论均表明光学厚度厚的云层的反射特征由尺度化光学厚度 τ' 和 s 两个参数确定:

$$\begin{aligned}\tau' &= (1 - \omega_0 g) \tau \\ s &= \left(\frac{1 - \omega_0}{1 - \omega_0 g} \right)^{1/2}\end{aligned}$$

式中 g 是非对称因子, ω_0 是小云团的单次散射反照率, s 主要与粒子有效半径有关,由 Mie 模式模拟得到。此外,地气系统的反射特征还与下垫面的反射率 A_g 有关。所以,反射函数 $R(u, u_0, \varphi)$ 由三个角度, M 个光学厚度层 τ' , N 个有效粒子半径 r_e 和 K 个地面反射率 A_g 来描述。

1.2 云参数的反演

冰云参数的反演参照水云,水云相态的参数反演用 Mie 散射理论,对于一个单个水滴,消光系数 Q_e 和散射系数 Q_s 可以由下式获得:

$$\begin{aligned}Q_s &= \frac{2}{x^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) (|a_n|^2 + |b_n|^2) \\ Q_e &= \frac{2}{x^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) \text{Re}(a_n + b_n)\end{aligned}$$

式中 $x = 2\pi r/\lambda$ 是尺寸参数, a_n, b_n 分别为膨胀系数, 单个水滴的相功能参数为:

$$P(\Theta) = 4\pi[f_1(\Theta) + f_2(\Theta)]/2k^2\sigma_s$$

f_1, f_2 为散射率的量级的平方, k 为 $2\pi/\lambda$ 的波数, σ_s 为散射截面。

假定粒子分布为正态分布, 那么粒子分布表示为:

$$n(r) = \frac{dN(r)}{dr} = \sum_{j=1}^2 \frac{dN_j(r)}{dr}$$

$$\frac{dN_j(r)}{dr} = \frac{N_j}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left\{-\frac{1}{2\sigma^2} \left(\frac{\ln r - \ln r_m}{\ln 10}\right)^2\right\}$$

N_j 为数密度, r_m 为中值半径, σ 为 $\log r$ 的标准偏差。

将粒子谱分布和光学参数一起作为 Mie 模式的输入参数, 可得到非对称因子 g 、相函数 p 、系数 Q 以及单次散射反射率等。进而, 将所得结果带入 6S 辐射传输模式, 最后生成球面反照率、平面反照率、非均匀功能、总透过率以及常数等要素库。在模式中输入地理参数、地表反照率等, 得到关于 τ, r_e 的反射率查算表的计算值, 作为确定 τ, r_e 的参考依据之一。

计算 τ, r_e 的第二步就是进行云检测, 并对 $0.65\mu\text{m}$ 、 $2.1\mu\text{m}$ 的反射率数据进行大气订正, 作为标准的测量值, 然后通过 King^[14] 提出的渐进理论进行插值, 确定 τ, r_e 。确定 τ, r_e 的原理是根据 Nakajima and King^[15] 定义的最小化方法:

$$\chi^2 = \sum_i [\ln R_{meas}^i(\mu, \mu_0, \varphi) - \ln R_{calc}^i(\tau, r_e; \mu, \mu_0, \varphi)]^2$$

其中 R_{meas}^i, R_{calc}^i 分别为测量值和计算参考值。

上述的技术步骤可用流程图 1 表示。

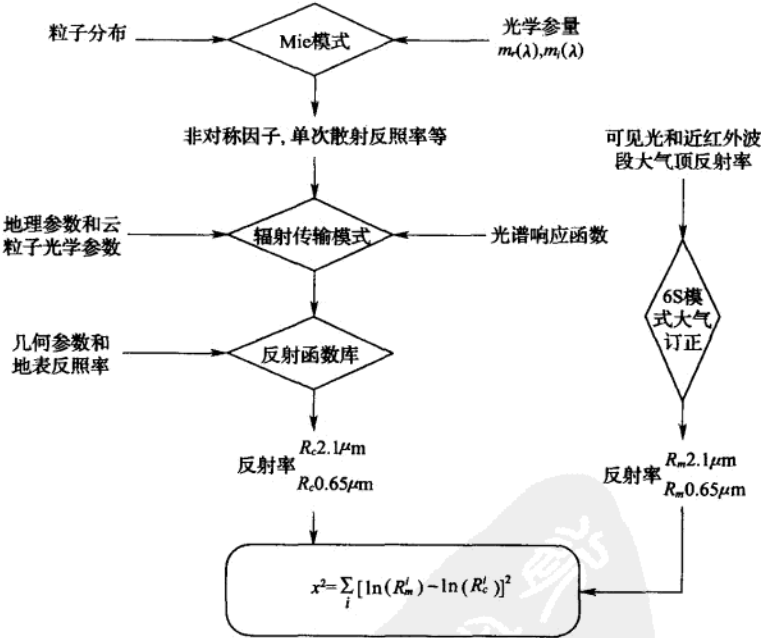


图 1 计算最佳云光学厚度和粒子有效半径的示意图

1.3 云相态的判别方法

冰云和水云在红外波段上的光谱特征有明显的不同,如图2为水和冰在大气窗区上的折射指数,他们的不同将导致了相同太阳辐射的不同反应。在8~10 μm 间有折射指数虚部的最小值,说明这是粒子的弱吸收波段。超过10 μm ,水和冰的折射指数的虚部均随波长的增大而增大,并且两者相互分离。说明在10 μm 以上,在相同含水量的情况下,冰粒子比水粒子对辐射有更强的吸收,所以冰的温度比水的低^[11]。根据这种原理,本研究采用8.55 μm 、11 μm 、12 μm 的三通道法来判别云相态。

$$k = \frac{T_{8.55\mu\text{m}} - T_{11\mu\text{m}}}{T_{11\mu\text{m}} - T_{12\mu\text{m}}}$$

式中 $T_{8.55\mu\text{m}}$ 、 $T_{11\mu\text{m}}$ 、 $T_{12\mu\text{m}}$ 分别为 8.55 μm 、11 μm 、12 μm 的亮度温度, k 为判别参数,一般考虑误差相为 0.3, 当 $k \leq 1.3$ 为水云, $1.3 < k \leq 2$ 为混合相态云, $k > 2$ 为冰云, 并且 k 值越大, 冰云特征越显著。

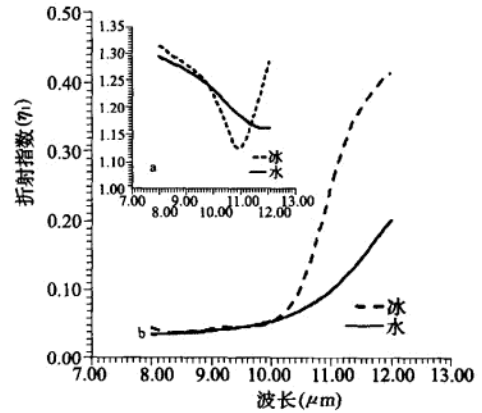


图2 冰和水在大气窗区的折射指数
(a) 实部 (b) 虚部 (Warren, 1984)

2 结果分析

2.1 云参数的反射函数分布

图3分别反映了0.65 μm 、2.1 μm 的反射率与光学厚度和有效粒子半径之间的变化。在一定范围内,0.65 μm 的反射率随粒子半径的增大而减小,当粒子半径小于4 μm 时,反射率减小的趋势较大,当粒子半径大于4 μm 时,变化趋势显著减小;随云的光学厚度的增加,反射率增大,当光学厚度增大到30之后,变化趋势明显减小。2.1 μm 的反射率随粒子半径的增大大部分是减小的,对于粒子半径大于8 μm 时,反射率随粒子半径的增大而减小,粒子半径小于8 μm 时,反射率与粒子半径的关系不明显;随云的光学厚度的增加,反射率增大,当光学厚度增大到30之后,反射率呈减小的趋势。

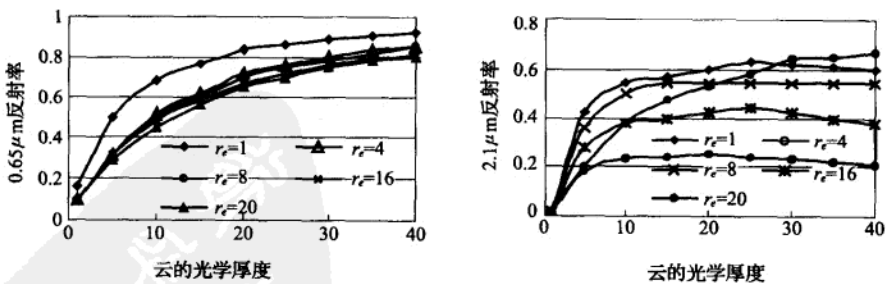


图3 云参数的反射函数分布特征

2.2 个例分析

本文选取一次发生在西北干旱区的强对流云的降雹个例，卫星过境时，正是甘肃省永登县发生降雹天气。相应雷达回波显示（图 4c），14：05 距离兰州多普勒雷达站约 90～150km，方位为 270～340°的范围内，出现了 2 个强回波区域，东部和东南部也出现两个强回波中心，最大回波强度达 55dBz，并且云物理其它参数也表明，这些区域有降雹产生。

图 4a、4b 分别为基于 2004 年 8 月 17 日 14：06 EOS/MODIS 卫星数据反演的云光学厚度和云粒子有效半径的空间分布特征，结果表明，距离兰州多普勒雷达站 90～150km 范围，方位为 290～340°出现了云光学厚度的高值中心，其值在 22 以上，最大值高达 29，其高值中心与雷达回波大于 45dB 的强中心对应得比较好，主要位置在 36.75～37.26°N，102.8～103.61°E 的范围内，东南部位于（105.14°E，35.31°N）也出现了一个很小的高值中心；并且云粒子有效半径也处于相应的高值区，其值在 12 μ m 以上，但云粒子有效半径的中心不明显，但与光学厚度大于 18 的区域对应得比较好。另外，云光学特征也表明，在所选的区域内，东北部和西南部也存在强中心，但由于雷达观测的仰角太低，无法显示这两个区域的云回波特征。

个例分析表明，此次冰雹云产生在光学厚度大于 22，且云粒子有效半径大于 12 μ m 的区域，但个例分析不具有普遍性，为了能更准确地得到冰雹多发区的西北地区东部冰雹云的宏观特征，下面收集了 5 次冰雹云 MODIS 数据，做更进一步的分析。

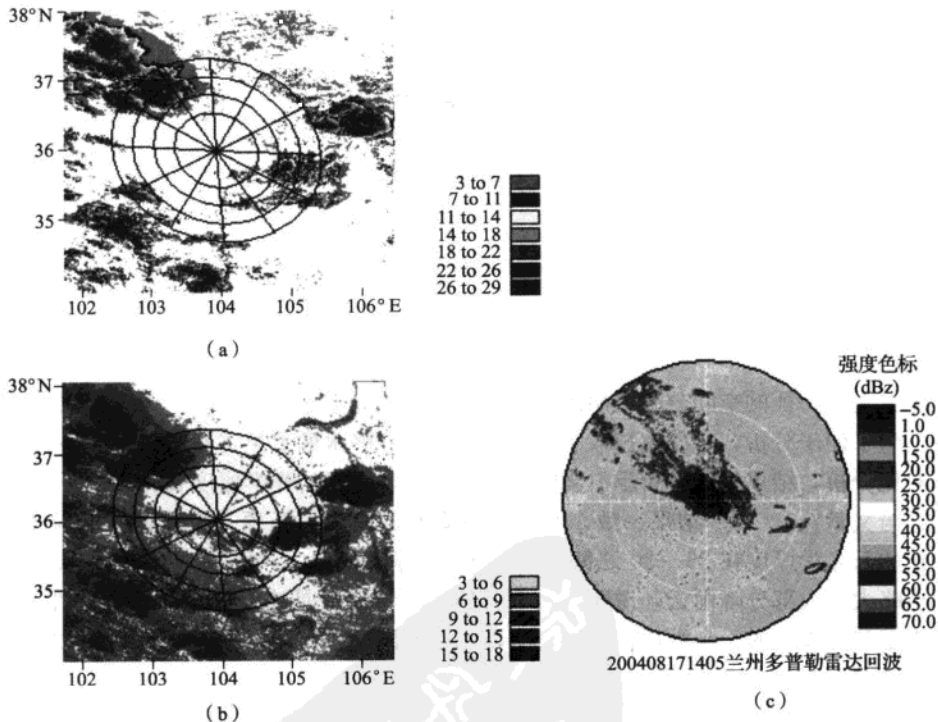


图 4 云光学厚度 (a)、云粒子有效半径 (b) 空间分布和雷达回波 (c) 的对比

2.3 冰雹云宏观特征分析

为了更进一步验证上述个例的普遍性,选取了自 MODIS 数据接收以来的 5 次冰雹云数据进行云宏观特征的分析,从而可以更多地提供冰雹云的宏观特征,或者验证和进一步解释模式的模拟结果,另外也为冰雹云的卫星监测奠定基础。云的光学厚度特征反映了垂直大气柱中水汽含量和云中液态、固态的含水量,图 5 反映了北京时间 2004 年 8 月 17 日 14:06 雹区与非雹区云的宏观特征分布,可见雹区云的光学厚度大于 20,云粒子有效半径大于 10,非雹区云的光学厚度小于 20,云粒子有效半径有部分大于 10,并与雹云十分接近,部分小于 10,说明冰雹是产生于高的云光学厚度和高的云粒子有效半径共同发生的区域,与个例分析的结果一致,另外也说明冰雹云区水汽含量和云中液态、固态的含水量比较丰富,并且云顶由尺度较大的粒子组成,这与文献 [16] 的结论相一致,原因是冷暖云团相遇,暖云团从低层抬升冷云团,上升气流加强,当水汽上升到一定高度,环境温度为负温区,水汽凝结形成云水,云有效粒子尺度加大,云粒子有效半径也增大,云水在强的上升气流的作用下,发生碰并或继续上升到一定高度形成过冷雨滴,过冷雨滴通过核化和受到冰晶等接触时冻结容易形成冻滴,冻滴通过收集过冷云水而增长,当达到一定尺度时向雹转化^[17],所以,冰雹云产生于对流较强的区域,云团光学厚度较高是由云团内部的强对流所致。也就是说,云光学厚度较厚、云粒子有效半径较大的区域容易产生降雹。

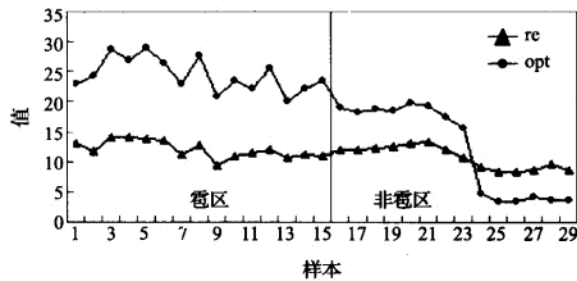


图 5 雹区和非雹区云的宏观特征对比

2.4 云相态等光学特征与地面降雨量的对比分析

上述云光学特征的空间分布说明冰雹发生在高的云光学厚度和高的云粒子有效半径发生的区域,为了便于分析,本研究选取了当时发生冰雹和降水的卫星资料与地面 6 小时的降雨量进行对比分析,结果如图 6 所示。当时,降雨云和降雹云的光学厚度和有效粒子半径都比较大,这与文献 [9, 18] 结果一致,在地面有降水的时候,云顶一直由较大的粒子组成。发生冰雹的云光学厚度在 25~30 之间,大于大部分降雨云,云粒子有效半径在 13~16 μm 之间,也略大于大部分降雨云,说明这两个云的光学特征只是冰雹产生的必要条件,但是,由于降雹云与降雨云的云参数比较接近,所以,在不同的过程中,不能很好地将冰雹云和降水云明显地区分开来。

由于发生冰雹时,云粒子处于一种冰相或冰水混合状态,或高的负温区,而降雨云基本为维持在负温区的水相状态,因此我们另外考虑云相态的光谱特征,如图 7 所示,冰雹云相

态参数都在 2 以上，而大部分降水云的相态参数小于 1 或在 1 附近变化，当然有少数降雨云的相态参数和雹云的参数很接近，说明降雨云的云顶大部分为液态水相态组成，有部分降雨云的云顶有液态水和固态冰共同存在；而冰雹云的云顶或存在液态水和固态水共存的状态，或仅有固态冰组成，云相态特征是冰雹云特征判别的一个有效方法。

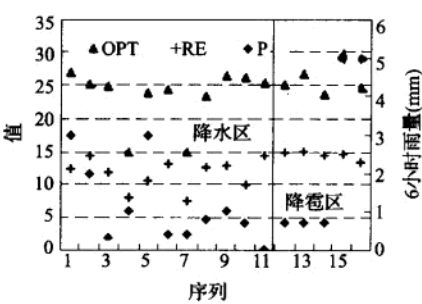


图 6 云的光学特征和 6 小时降雨量分布

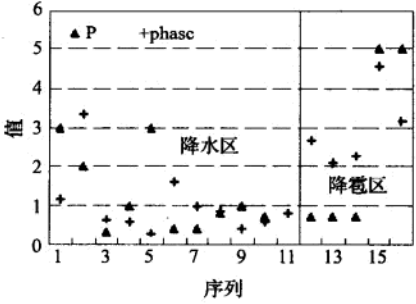


图 7 云相态特征和 6 小时降雨量的分布

3 结论

- (1) 采用 MODIS 的 $2.1\mu\text{m}$ 和 $0.65\mu\text{m}$ 波段反演云的光学厚度和云粒子有效半径，空间分辨率为 500m，提高了对冰雹云等尺度比较小的目标物的认识精度，并且目前 Terra 和 Aqua 卫星都搭载了 MODIS 传感器，每天过境当地 4 次，对于冰雹云的监测和演变也比较实用。
- (2) 冰雹发生在高的云顶光学厚度和高的云粒子有效半径存在的区域，发生冰雹的云光学厚度在 20 以上，云粒子有效半径在 $10\mu\text{m}$ 以上；云光学厚度和云粒子有效半径是用 MODIS 资料判识冰雹云的 2 个主要条件，当满足这两个条件时，冰雹云与高的云光学厚度对应得更好一些。
- (3) 由于 MODIS 资料有限，对于冰雹云的宏观特征的分析仅限于有限的一些资料分析，所以随着 MODIS 数据量的增加，采用上述方法反演和验证云的光学特征将成为可能。另外，由于缺乏云宏观特征的实际观测，所以本文主要以雷达回波等观测数据来相互验证，至于反演方法的其他验证只能在今后的工作中进行。

参考文献

[1] V. Ramanathan, The role of earth radiation budget studies in climate and general circulation research, *J, Geophys. Res.*, vol. 92, 4075~4095, 1987

[2] V. Ramanathan, R. D. Cess, and E. F. Harrison, et al, Cloud-radiative forcing and climate: Results from the Earth Radiation Budget Experiment, *Science*, vol. 243, 57~63, 1989

[3] R. A. Roebeling, D. Jolivet, A. Feijt, Cloud optical thickness and cloud liquid water path retrieval from multi-spectral NOAA-AVHRR data. Proceedings EUMETSAT data users conference. September 30~October 5, 2001, Antalya, Turkey

- [4] V. Ramanathan, B. R. Barkstrom, and E. F. Harrison, et al, Climate and the earth's radiation budget, *Phys. Today*, vol. 42, 22~32, 1989
- [5] R. D. Cess, G. L. Potter, and J. P. Blanchet, et al, Interpretation of cloud-climate feedback as produced by 14 atmospheric general circulation models, *Science*, vol. 245, 513~516, 1989
- [6] Cess, R. D., G. L. Potter, and J. P. Blanchet, et al, Interpretation of climate feedback processes in 19 atmospheric general circulation models. *J. Geophysic. Res.*, 95, 16601~16615. 1990
- [7] R. T. Wetherald and S. Manabe, "Cloud feedback processes in a general circulation model," *J. Atmos. Sci.*, vol. 45, 1397~1415, 1988
- [8] 赵凤生, 丁强, 孙同明. 利用 NOAA-AVHRR 观测数据反演云辐射特性的一种迭代方法, *气象学报*, 2002, 60 (5): 594~601
- [9] 刘健, 许健民, 方宗义. 利用 NOAA 卫星的 AVHRR 资料试分析云和雾顶部粒子的尺度特征. *应用气象学报*, 1999, 10 (1): 28~33
- [10] M. D. King, Determination of the scaled optical thickness of clouds from reflected solar radiation measurements, *J. Atmos. Sci.*, vol. 44, 1734~1751, 1987
- [11] 刘玉洁, 扬忠东等. MODIS 遥感信息处理原理与方法. 北京: 科学出版社
- [12] Arking A, Childs J D. Retrieval of cloud cover parameters from multispectral satellite images. *J Atmos Sci*, 1985, 29: 937~949
- [13] H. C. van de Hulst, *Multiple Light Scattering, Tables, Formulas, and Applications*, vol. 1, New York: Academic Press, 1980, 76~82
- [14] King, M. D., 1987: Determination of the scaled optical thickness of clouds from reflected solar radiation measurements. *J. Atmos. Sci.*, 44, 1734~1751
- [15] Nakajima, T., and M. D. King, 1990: Determination of the optical thickness and effective particle radius of clouds from reflected solar radiation measurements. Part I: Theory. *J. Atmos. Sci.*, 47, 1878~1893
- [16] 刘健, 董超华. 卫星资料在云顶粒子尺度特征分析中的应用. *红外与毫米波学报*, 2002, 21 (2): 124~128
- [17] 洪延超. 冰雹形成机制和催化防雹机制研究. *气象学报*, 1999, 57 (1): 30~44
- [18] 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. *高原气象*, 2004, 23 (6): 758~765



西北地区东部冰雹云的卫星 光谱特征和暴雹指数分析研究

张 杰¹ 张 强¹ 康凤琴¹ 何金梅²

(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, 兰州 730020;

2 兰州中心气象台, 兰州 730020)

摘 要: 根据气象台站的冰雹观测记录, 针对冰雹灾害多发的西北地区东部, 选取 2001—2004 年间 14 次 NOAA 卫星过境的 AVHRR 资料, 共 88 个样本数, 对冰雹云和其他云的光谱特征进行对比分析。结果表明, 雹云的热红外亮度温度的变化基本在 245K 以下, 中红外波段反射率相对较低, 基本变化在 0.4 及以下范围, 可见光和近红外波段反射率大于 0.6, 冰雹产生的两个重要条件是高的云光学厚度和高的云粒子有效半径共同发生的区域; 西北地区冰雹发生的云顶高度基本在 4.5~7km 之间; 根据雹云的光谱特征, 确定了暴雹指数及其模型阈值大于 0.35 的冰雹监测方法, 多普勒雷达回波和气象站观测验证结果说明, 暴雹指数等多参数结合判别冰雹云效果显著。

关键词: 冰雹云 光谱特征 暴雹指数 冰雹多发区 西北地区东部

1 引言

随着气象台站和雷达站点观测数据的逐渐丰富, 人们对冰雹灾害的研究和认识逐步深入, 不仅在冰雹区域分布^[1,2]、冰雹形成机制^[3~5]、雹胚类别与云底温度、不同云底温度雹云成雹机制和引晶催化数值模拟及识别等^[6~11]方面有了许多成果, 而且在冰雹云物理特征^[12,13]、冰雹预测与预报^[14]以及人工防雹研究^[15]方面有了很大的收获, 李大山^[16]和许焕斌^[17]等将人工影响天气、冰雹特征及防雹原理等做了比较详细的概括和分析。当然冰雹云的监测、预警仍然处于探索之中。由于雷达探测的范围有限, 无法探测到大范围的云顶特征参数, 而卫星遥感能够监测到更大范围的中尺度天气过程, 并且能够提供大量反映云顶特征的基础参数, 所以也是一个监测冰雹云发生、发展的有利工具^[18]。冰雹是西北地区仅次于干旱的一种灾害性天气, 与其它自然灾害相比, 冰雹具有范围小, 持续时间短, 但突发性强, 破坏性大的特点。因此一直被政府和相关部门高度重视。

极轨卫星 NOAA-16、NOAA-17、NOAA-12 等多时相、多角度卫星观测为冰雹等强对流云的发展和特征分析提供了机会。本文针对 2001 年以来发生在西北地区东部的冰雹云, 选取了卫星过境的 14 次 AVHRR 资料, 对比分析了雹云与其他云的光谱特征, 试图为冰雹云的监测提供一定的判识和量化的指标, 以便及时为政府和公众服务。

2 资料来源和说明

本文根据雷达观测资料和气象台站观测记录, 选取了发生在西北地区东部 14 次强对