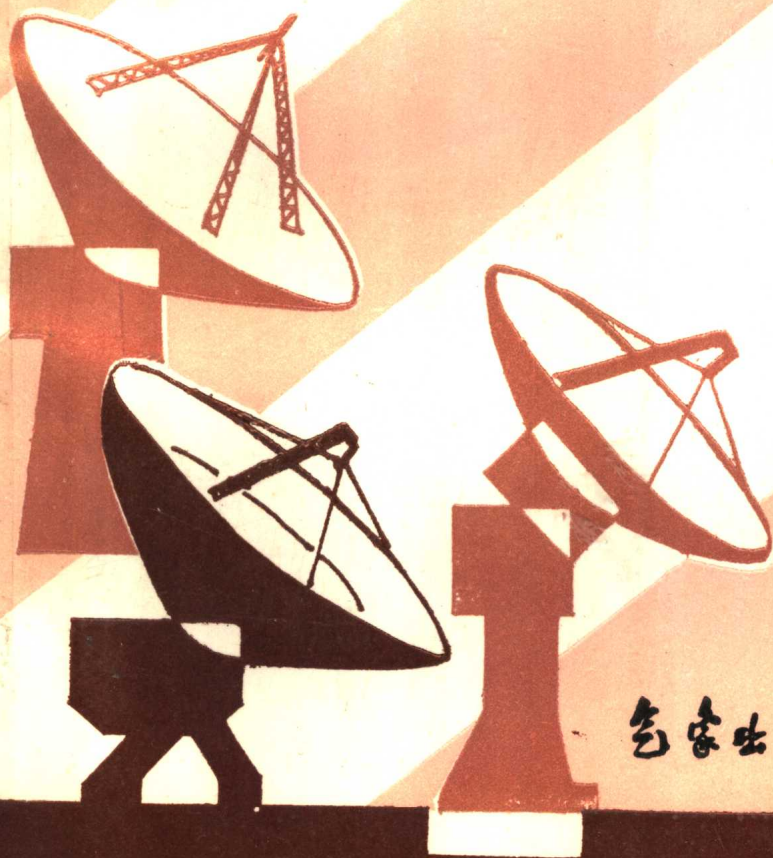


雷达气候学

戴铁丕 张培昌 詹煜 编著



气象出版社

雷 达 气 候 学

戴铁丕 张培昌 编著
詹 煜

(京)新登字046号

内 容 简 介

本书介绍雷达气候资料在多学科中的应用。全书共分六章。第一章重点论述雷达气候学的研究对象、任务和经济效益。第二章介绍雷达气候学常用的概率统计知识和谱分析方法,是雷达气候学的数学基础。第三章至第六章是本书的重点,分别介绍强对流天气、微波辐射、零度层亮带及暴雨、大气折射等雷达气候学问题。各章均提供了大量实测和分析资料,便于应用。

本书可作为大专院校大气科学类教材或参考书,也可供气象、航空、水文、军事、电波传播、环境科学等部门从事雷达气候、无线电气象、短时天气预报、气候分析和预测的科研和业务人员阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

雷达气候学/戴铁丕等编著. - 北京:气象出版社, 1995.11
ISBN 7-5029-1964-3

I.雷… II.戴… III.气象雷达-应用-气候学-研究 IV
.P46

中国版本图书馆CIP数据核字(95)第17182号

*

气象出版社出版

(北京西郊白石桥路46号 邮编100081)

责任编辑:韩履英 终审:周诗健

封面设计:严瑜仲 责任技编:席大光 责任校对:白凌燕

北京昌平环球印刷厂印刷

新华书店总店科技发行所发行 全国各地新华书店经销

开本:850×1168 1/32 印张:11.625 字数:300千字

1995年10月第一版 1995年10月第一次印刷

印数:1-71000

ISBN 7-5029-1964-3/P·0750

定价:15.50元

前 言

雷达气候学这个气象术语在国内外有关的文献中已经提到，并且有一些雷达气候方面的论文、小册子，但是雷达气候学作为一门学科，迄今为止还没有一本系统论述的著作。实际上，随着雷达气象探测资料的大量积累和气候学定义的拓宽，天气雷达在灾害性天气监测、预报、警报中的广泛应用，以及国防、军事、国民经济各部门实际工作的需要，编著一本较系统的雷达气候学教材显然很有必要。

雷达气候学，作为雷达气象学中一个重要分支，是雷达学、气象学、气候学、电磁场理论、地理学、统计学相结合而产生的一门新兴边缘学科。它是以雷达作为主要工具，把多年来探测得到的定性和定量的回波信息及其它有关资料进行统计分析，研究其时空变化规律，并进行气候背景分析的一门学科。它的研究内容和范围很广，涉及到强对流天气、降水和暴雨、微波辐射以及电波在大气中折射等雷达气候学问题。近年来雷达气候学研究日趋活跃。它以大气微波遥感和气候学相结合作为生长点必将得到迅速发展。

全书共分六章。第一章为概论，具体讨论了雷达气候学的产生、研究对象、任务和经济效益。第二章对雷达气候学中常用的概率统计和有关谱分析方面的知识作一简要介绍，以备查阅和使用。它是雷达气候学的数学基础。第三章研究强对流天气雷达气候学，立足于国内资料，系统地叙述了强对流天气，特别是冰雹回波的时空分布、产生源地和移动路径。最后介绍用统计学方法作冰雹等强对流天气判断和临近预报的一些方法。第四章探讨微波辐射气候学，简单地介绍了晴空大气微波辐射特征，重点论述

云、雨微波辐射特征的理论计算方法,实测雨滴谱微波辐射特征量和雨滴谱本身特征量之间统计模式的研究和应用,最后介绍作者新近的一些研究成果。第五章研究降水、暴雨的一些雷达气候学问题,简要叙述了零度层亮带一些回波统计特征,着重论述了暴雨临近预报中所用到的一些概念模式,利用雷达-雨量计联合探测系统测定区域降水量的技术和精度,雷达测定降水统计学方法。第六章系统地阐述了雷达波折射气候学的概念、大气折射指数 N 单位的全球分布和时空变化,以及对它的预报与其应用问题。

本书除第二章和第六章的部分内容以外,其余几章均为戴铁丕完成,张培昌教授完成了第二章的编写,并对全书各章统一进行了审校,詹煜参加了第六章部分内容编写和有关章节计算及分析工作。在本书编写过程中,许多测雨雷达站特别是华东地区一些雷达站提供了资料,对此深表谢意。

由于我们水平有限,资料也受到了一定限制,加上这是编著的第一本雷达气候学,可能尚有一些问题未列入,有些问题也未充分展开讨论,欢迎读者提出宝贵意见。

本书可作为大专院校大气科学类教材或参考书,也可供气象、水文、航空、军事、电波传播、环境科学、大地测量等部门从事雷达气候、无线电气象、短时天气预报、气候分析和预测的科研和业务人员阅读参考。

编著者

1994年4月

目 录

前言

第一章 概论	(1)
第一节 气候的概念和定义	(1)
第二节 气候学研究领域及分类	(2)
第三节 雷达气候学的研究对象和任务	(8)
第四节 雷达气候学的经济效益	(10)
第二章 雷达气候学常用的概率统计与谱分析知识	(13)
第一节 概率论	(13)
第二节 数理统计方法	(28)
第三节 随机过程	(58)
第四节 随机信号的功率谱估计	(71)
参考文献	(88)
第三章 强对流天气雷达气候学	(89)
第一节 概述	(89)
第二节 产生强对流天气回波的大尺度 天气背景分型	(93)
第三节 强对流天气及其回波时、空分布	(94)
第四节 强对流天气回波源地和移动路径	(107)
第五节 强对流回波单体和系统移动规律 及其与高空风的关系	(109)
第六节 降雹回波系统	(115)
第七节 天气形势、地形、下垫面对强对流天气 回波生成、发展和移动的影响	(119)
第八节 雷雨、阵雨回波统计分析比较	(124)
第九节 利用强对流回波主要参数及有关气象因子 作冰雹等强对流天气判别和临近预报方法	(128)
参考文献	(148)

第四章 微波辐射气候学	(149)
第一节 概述	(149)
第二节 晴空大气微波辐射特性	(150)
第三节 云、雨微波辐射特性概述	(158)
第四节 实际雨滴谱辐射特性的理论计算	(161)
第五节 实际雨滴谱微波辐射特性的计算结果及其 Z-I关系式建立与讨论	(164)
第六节 实际雨滴谱微波辐射特性的计算结果及其 k_z-I 、 k_e-I 关系的建立	(173)
第七节 实际雨滴谱其它微波辐射特征量及其有 关统计关系式的讨论	(182)
第八节 双因子法确定雨强 I 的方法	(183)
第九节 最优Z-I关系的求得	(187)
第十节 非线性Z-I关系	(191)
第十一节 用微波辐射特征量Z和雨滴谱本身特征量 I确定雨滴在静止大气中的平均多普勒速度 $\overline{W}$	(196)
第十二节 用微波辐射特征量Z和雨滴谱本身特征 量I确定雨滴在静止大气中的多普勒速 度标准差	(200)
第十三节 消光系数 σ 与雨强I统计关系式 的研究	(204)
参考文献	(207)
第五章 零度层亮带及暴雨雷达气候学	(209)
第一节 概述	(209)
第二节 零度层亮带一些雷达回波统计特征及其对 定量测定降水的影响	(210)
第三节 国内外研究暴雨概况	(226)
第四节 带状回波形成暴雨	(230)

第五节	雷暴群和单块回波形成暴雨·····	(241)
第六节	积、层混合性降水形成暴雨·····	(244)
第七节	雨暴和雹暴的区别·····	(249)
第八节	脉冲多普勒天气雷达探测资料在分析 暴雨中的应用·····	(252)
第九节	雷达-雨量计联合探测系统定量 探测降水·····	(257)
第十节	模式法定量测定降水·····	(271)
第十一节	用概率配对法——气候统计 $Z-I$ 关 系测量降水·····	(277)
第十二节	用时间面积积分法 ATI 估测区域 降水量·····	(283)
	参考文献·····	(284)
第六章	大气折射气候学 ·····	(286)
第一节	概述·····	(286)
第二节	全球和我国 N 单位值的地理分布和季节 变化·····	(287)
第三节	地面 N 单位值气候学分类·····	(296)
第四节	N 单位值的周期振动·····	(298)
第五节	N 单位值的交叉谱和时空谱分析·····	(303)
第六节	逐步回归多重分析时变模式在长期 N 单 位预报中的应用·····	(315)
第七节	我国折射指数 N 单位垂直分布统计模式··	(318)
第八节	地面无线电“波导”气候学和 N 单位 表示法·····	(330)
第九节	大气水平非均一对射线折射的影响和锋面 附近大气折射场结构·····	(342)
第十节	折射气候学的应用·····	(348)
	参考文献·····	(362)

第一章 概 论

第一节 气候的概念和定义

气候有着各种定义，但大体说来，可分为两大类。一类认为一地的气候就是该地长时期内天气状态的综合反映，另一类认为一地的气候就是该地在多年时期内的大气平均状态。

在前一类定义中，必须明确什么是天气。所谓天气就是大气过程的短时（或瞬时）状态，而气候是长时段的大气状态，故天气是气候背景上的振动，气候则是天气的综合表现。这个定义既说明了天气和气候有机的相互联系，又说明了两者的区别，在奠定气候学的基础中有着重大意义。

后一类定义具有更强的生命力，这是因为这类定义和前一类相比，具有一定的优点，没有先决条件，即可得出气候定义。同时，也指出了如何表示气候的方法。这里所指的平均状态或统计状态是用气候要素（温度、降水等）的平均值或统计量来表现的。但是气候学发展至今，这个定义出现了明显的局限性。因为在气候史中并不存在着不变的平均状态或统计状态，大量事实证明，气候是一个具有两重性的概念，它既有稳定性也有流动性。因此，具体的气候是与一定的时段相联系的，而不存在绝对的气候概念。为适应这一特点，就出现了气候变化的概念。这样所谓气候应该理解为在一段较长时间阶段中大气的统计状态，它一般用气候要素的统计量表示。但是，这种统计量往往随着阶段的转换，而发生明显的变化，这就是气候变化。为此，在作气候分析和预报时，必须注意到阶段性。

总之，必须承认气候理论在本质上是概率的，详细的天气振

动都作为多元随机过程来处理，而这些过程的统计特性，则是气候研究的课题。

若从大气过程的尺度谱分析，超过一年以上的的时间尺度，才进入气候尺度范围。因此像天气尺度中的短波、长波为常见的周期振动一样，气候尺度的振动，最重要的是2—5年周期，此外20—40年周期以及尺度更长的周期振动也属于气候尺度的自然阶段。从这个意义上讲，气候就是以气候尺度内各种振动的位相为自然阶段的大气统计状态。由于气候是用气候要素表示的，故也就是用自然时段的气候要素的统计量表现。按此定义，存在着多种尺度的气候。冰河期气候、间冰期气候是长尺度的，自然时段几年、几十年的气候则是短尺度的。世界气象组织规定三十年为整编气候资料的时段长度，它反映了当前气候的主要特点。最近三十年的气候可以认为是现代气候。

20世纪70年代以来，气候学中出现了气候系统的概念。所谓气候系统就是一个由大气、海洋、大陆、冰雪、生物圈所组成的庞大系统。这一概念的出现是与气候的尺度有关。由于气候的时间尺度长，大气必需有外部的能量提供，才能维持运动。因此，气候与天气不同，不能把大气看作一个绝热系统，而是与其它环境同时处于频繁而复杂的相互作用中，必须从现代系统分析观点出发，将其纳入一个统一的系统进行观察，以便弄清其规律性。因此，气候学应当是在系统科学原理指导下，建立在气象科学和其它环境科学的边界上，所以具有很强的综合性、实用性和理论性。

第二节 气候学研究领域及分类

一、气候学研究内容

气候学的内容是极为广泛的。大体上由下列几方面的基本内容所组成。

(1) 气候要素的统计、整理，气候图的绘制和气候表的编写等。一般将这一类工作归结为“古典”气候学。

(2) 气候的评价、区划和气候资源的分析，其中包括气候分类和区划，各种应用气候学的内容等。

(3) 大气环流，包括各种环流型，天气系统的频率、路径、天气现象的统计和分析等，即天气气候学的内容。

(4) 气候变化及预报，包括过去时期气候状况的恢复、气候演变规律性的研究及其气候预报等。

(5) 气候及其变化原因的研究，包括采用水、热、辐射、角动量，污染物质等平衡的计算，数值模式及模拟实验等经验方法、统计方法、动力方法所作的气候形成原因的探讨。

(6) 气候与人类的关系，这是内容极其广泛的一个方面。包括气候对人类的影响，人类对气候的影响以及如何把这两方面的影响纳入一个统一的系统，探讨利用气候资源以及减轻或避免气候灾害的最优方案。

为了阐明研究雷达气候学的重要性，有必要先了解气候学本身的性质和特点。气候学可按照研究的专题和尺度来进行分类。

二、气候学按研究的专题分类

(1) 区域气候学 区域气候学是指对地球表面特定区域（一般是大范围）气候的描述。在过去，区域气候学主要依据地面气象要素的多年常规观测资料进行统计，统计的量主要是日平均值和年平均值。近年来人们采用更先进的统计量（例如：中数、众数、标准差、调和函数和特征向量等）对各气候站进行比较。目前，人们不仅在地气交界面上，而且还在高层大气中，一直在寻找能更好地代表天气特征的气候统计量。

传统的区域气候学最终目的是作出气候分区，即将气候相似的地区合并成同一个气候区，其分类方法很多，详见有关文献。

(2) 天气气候学 天气气候学比区域气候学年轻，它不依据气候统计量，而是通过气流场型式（即环流型）与某地区天气的

关系来研究某地区一般的天气特征。 120°E 500百帕上空副热带高压脊线位置在 $22-24^{\circ}\text{N}$ 是江淮流域产生梅雨的流场形势，即为一例。

(3) 物理气候学 它是19世纪70年代以后发展起来的，其主要任务是搜集和分析气候资料，揭示气候的因果关系。具体说来，它强调对气候现象的解释，气候的物理定律以及各种相互关系，尤其是有关全球的大气能量平衡和水分平衡问题的探讨。

(4) 动力气候学 它的最终目的在于对大气环流，亦即对在时间和空间上大尺度大气运动提供一个全面的解释。由此可见，动力气候学是物理气候学的一个分支，它偏重于研究较大尺度的大气运动。另外由于大气运动中存在着湍流扰动，因此，对这种次级尺度湍流运动进行研究也是动力气候学的任务。最近出现的浑沌理论是研究动力气候学的好方法。

(5) 地理气候学 地理气候学是地理学与气候学之间的边缘学科。它既具有地理学研究各个地理要素之间相互联系、相互制约和空间分布的特点，又具有气候学研究天气现象物理属性的特征。众所周知，气候现象与其它自然现象有着密切联系。首先，气候形成受着各种地理因素的影响，其中最主要是纬度、下垫面的特性和地形的影响；其次，气候是自然地理过程的组成部分。自然地理过程就是地理景观的形成过程。地理景观是指在一个地带内，各种自然要素，包括岩石、地貌、气候、水文、土壤、植物群和动物界等等形成的一个相互联系、相互制约的统一的自然综合体。

(6) 统计气候学 在阐明这门学科的含义时，有必要把它与气候统计学区别开来，即气候统计学与统计气候学是不同的两门学科。所谓统计气候学是以气候统计学方法为工具去分析、模拟和预报气候的时空分布；而气候统计学则是统计气候学的理论基础。显然，前者是以气候学理论为基础，用各种统计学分析手段来研究气候的特征、变化和成因；而后者则是以统计学理论为指

导,研究各种统计学方法如何应用于气候学问题。

(7) 高空气候学 从狭义来讲,是研究高空大气环流特性、结构、演变及其预报的一门学科。它的基本核心是研究围绕地球的自由大气中各种气候要素的时空变化规律以及大气环流问题。从广义来讲,高空气候的形成是天文、地理(包括大气、海洋与大陆及其相互联系)与生物诸因子相互作用的结果。所以它的研究内容和范围很广,涉及到水圈、大气圈、冰雪圈、生物圈和岩石圈。它既是气候学的一个分支,也与天文学、海洋学、地理学、化学、生物学等存在广泛的联系。

(8) 生物气候学 生物气候学是研究生物圈内大气因素对生物生长和健康的影响。可以理解,生物气候学的一个重要方面就是研究人类活动同自然环境或由人类活动所造成的环境的相互关系,其中尤以人类生活和大气污染情况的关系最为重要。载人空间飞行研究计划对于研究生物气候学,特别是关于人类和其他动物的生物气候学作出了重大贡献。生物气候学的另一个重要分支是农业气候学,它是研究气候同农作物产量的关系。

(9) 历史气候学 在历史气候学中着重讲述气候随时间的变化情况,另外据实测气候要素资料,利用谱分析方法可以分解成多种尺度气候。在没有观测资料以前,较长时期的气候变化可以根据考古学、生物学及地质学的证据进行推断,这是古气候研究领域。大约17世纪上半叶开始陆续出现了气象观测仪器,而对气象学极为重要的许多物理学规律则在17世纪后半叶和18世纪相继发现,尔后气象台站网逐步发展形成。德国洪堡德(H.V.Humboldt)于1817年第一个绘制了全球等温线图,同时还做了很多其它工作,这些工作可以看作是近代气候学的开始。

(10) 卫星气候学 20世纪50年代后期,空间技术发展,出现了人造卫星。尔后在1960年4月1日,美国第一颗气象卫星——泰罗斯1号发射成功,开创了人造卫星应用于探测的新纪元。30余年来积累了大量探测资料,对各专题气候学作出了许多贡

献。现代气象卫星正在起着三个重要作用：

① 作为对地球及大气的探测系统来说，大大地改善了全球资料的覆盖区。气象卫星已得到了包括地球上最荒凉、人迹罕到地区的很多全球表面连续的气象资料，而且时间尺度密。此外，所得到的资料具有统一规格化，能用同一个资料处理设备进行处理，而这一切是常规的气象台站网无法做到的。

② 作为一种极其方便的空间资料搜集站。气象卫星能够从大气内部或从地面基地搜集资料，并且把那些资料转发给专门设置的资料处理中心。

③ 作为气象资料的交换站。通过这种手段可以使相距甚远，而每天必须有大量气象资料交换的两个地面站构成通讯线路。

总之，卫星气候学是利用卫星收集到的大量资料，经过处理、分析来解决诸多的气候问题。

(11) 应用气候学 前面提到的各种专题气候学属于纯气候学，只解决一部分专题的问题，同纯气候学相对应，还有应用气候学。

应用气候学是利用气候学的基本理论，解决国民经济各部门的具体气候问题的一门实用科学，是应用气象学的核心部分。气候是自然环境的一个组成部分，它能够促进或阻碍人类活动。气候变化对人类活动可能是有利的，也可能是有害的，所以人类各个活动领域都要求得到气候资料，并研究气候对这些专业的影响。首先，要得出适当的气候指标——专业对气候的具体要求或专业与气候的定量关系；然后，利用气候资料来分析这些指标随时间变化的规律性，使各专业能充分利用有利的气候条件，预防不利的气候影响。

应用气候学研究范围很广，内容复杂。与气候关系最密切的农业、能源、水利、交通、居住环境、医疗卫生和体育等均是应用气候学的研究对象。由于该门学科是因生产实际的需要而形成

的。其研究的成果为有关部门提供有价值的规划或设计依据，促进生产力的发展，因而应用气候学有着强大的生命力。

三、气候学按研究的尺度分类

这种分类法是从大气现象的尺度方面去考虑，表 1.1 给出了气象文献中常常引用的大气运动系统的尺度。表中 4 类尺度运动对应于对流层上部西风带中的长波、中纬度移动性气旋和反气旋、地方性风系和单站风速观测中的阵性起伏。据这 4 种尺度的大气运动，可以将气候学分为以下 3 类：

(1) 大气候学 大气候学是研究地球上相当大地区的气候特点，研究大尺度大气运动系统对大地区气候特点的作用。大气候学包括由年平均、季平均和月平均统计分析得到的全球风带的研究，以及全球大气能量和水汽的平均分布与交换的研究。区域大气候学是研究大气中长波的分布和天气尺度扰动活动的一般特性。在大气候学中不仅要考虑气候分布和地球表面地理条件之间的大尺度关系，也要考虑大尺度大气环流对于能影响大气候各种较小尺度大气运动的作用。这种研究全部都应用气候学中习惯规定的时空尺度，即30年到35年。但在一些有关全球气候变化的研究中，可能还涉及到更长期内的变化。

表 1.1 天气学运动系统的尺度 (取自 Barry, 1970)

运动系统		近 似 的 特 征 尺 度			
		水平尺度 (千米)	垂直尺度 (千米)	时间尺度 (小时)	总能量*
大尺度	行星波	5×10^3	10	$2 \times 10^2 - 4 \times 10^2$	
	天气扰动	$5 \times 10^2 - 2 \times 10^3$	10	10^2	平均低压 10^{-3}
中尺度现象		$1 - 10^2$	1—10	1—10	平均雷暴 10^{-8}
小尺度现象		$< 10^{-1}$	$< 10^{-2}$	$10^{-2} - 10^{-1}$	平均阵风 10^{-17}

* 基数 1=地球每日获得的太阳能量。

(2) 中气候学 中气候学研究的是地球表面较小的区域,即大约10到100千米的范围(见表1.1),城市“热岛”效应以及飑线、雷暴、暴雨等局地强对流天气的研究均属于中气候学。这种中尺度天气系统灾情严重,对人类生产、活动带来严重的危害,因此是气候学中重点研究领域之一。

(3) 小气候学 小气候学是研究局地气候的细节,研究在相当短的时间内气候的微小差异,研究从地表面到某一高度范围内气候的细致结构。

第三节 雷达气候学的研究对象和任务

雷达气候这个气象术语在国内外有关的文献中已经提到,但是雷达气候学作为一门学科迄今为止还没有一本系统论述的书籍。实际上从第二次世界大战期间雷达诞生以后,很快出现了雷达气象学这一门崭新的学科。将近半个世纪以来,随着雷达气象学的发展,雷达气候学也相继诞生并得到了迅速发展,成为国民经济、国防建设中不可缺少的一门学科。

我国在20世纪50年代已开始应用军用雷达进行天气探测的试验。1958年开始从国外引进天气雷达进行探测,到70年代我国已能自己制造3厘米波长的711、712、715型天气雷达和5厘米波长的713型天气雷达,并迅速在各省(市)气象台、民航、盐场和部队中建立起天气雷达站。80年代以后,10厘米波长的714型天气雷达和数字化雷达也很快出现。这些雷达站至今已积累了大量雷达回波资料,为研究雷达气候学创造了条件。

由于业务工作需要,在利用雷达气象理论作短时灾害性天气预报等工作中,大量采用了统计资料建立雷达气候背景。例如在雷达识别、探测雹云和预报雹云演变、影响地区过程中,就是利用大量统计得到的资料,再应用统计理论建立判别和预报方程后做出的。最近十余年来预报冰雹准确率大大提高,应该说有雷达

气候学一份功劳。

雷达气候学作为雷达气象学中一个重要分支，它是雷达学、气象学、气候学、电磁场理论、地理学、统计学相结合而产生的一门新兴边缘学科。从狭义来讲，它是以雷达作为工具，把探测得到的多年定性和定量回波资料进行统计分析，研究其时空变化的气候规律，并进行气候背景分析的一门学科；从广义来讲，由于它研究内容较广，涉及到强对流天气的雷达气候，微波辐射雷达气候，云、降水物理、暴雨雷达气候，雷达波折射气候等。此外，还探讨大气折射指数 N 单位环流变化等问题。因此，将近半个世纪以来，随着雷达探测资料日益增加，雷达气候学正起着下述几方面的作用：

(1) 对作为大气探测主动遥感工具的雷达来讲，由于探测资料具有时、空连续分布的特点，加上目前不少地区雷达已经开始组网，因此大大改善了气象资料覆盖区，取得了气象台站网无法获得的资料。就冰雹时、空分布来说，雷达探测得到的资料频数远远超过气象台站网得到的频数。另外，由于雷达可以连续跟踪冰雹云等强对流天气，获得其发生、发展、消亡全过程回波时、空演变资料，因此得到的雷达气候资料远比由气象台站网得到的气候资料数量多且质量高。

(2) 由于雷达能迅速、准确、细致地提供在测站周围半径几百千米范围内降水区的位置、大小、强度和内部结构，以及它们随时、空演变的情况，因而是研究中、小尺度天气极为有效的工具，也是进行短时天气预报和气象保障的重要手段。随着雷达气候资料的日益增多，对雷暴、飑线、台风等灾害性天气的警戒和临近预报的准确率也迅速提高。

(3) 微波在大气中传播时，传播途中遇到云、雨、雪、雹等降水体引起的衰减是雷达气象理论的基础。因此，研究云、雨微波辐射特性不仅对雷达气象理论方面的定量计算及回波分析有指导意义，而且在电波传播、微波通讯、遥感、射电天文学中都有