

Physics of Clouds and Precipitation

云和降水物理学

周筠珺 赵鹏国 达选芳
伍 魏 李晓敏 翟 丽

编著

云和降水物理学

周筠珺 赵鹏国 达选芳 编著
伍 魏 李晓敏 翟 丽



 **气象出版社**
China Meteorological Press

内容简介

本书针对云和降水物理学中的基本概念、关键科学问题及解决问题的核心技术方法,进行了较为系统和全面的介绍。全书分为7章:第1章介绍了云和降水的基本概念;第2章介绍了云和降水微物理学物征;第3章介绍了云和降水的动力学特征;第4章介绍了降水的主要过程;第5章介绍了云和降水过程的探测;第6章则介绍了云和降水过程的数值模拟;第7章介绍了人工影响天气的技术和方法。

本书内容丰富翔实、介绍简明扼要、方法明确实用,可作为大气科学类本科生及研究生的专业教材或参考资料,也可供广大人工影响天气科技工作者参考。

图书在版编目(CIP)数据

云和降水物理学 / 周筠珺等编著. — 北京:气象出版社, 2016.8

ISBN 978-7-5029-6376-7

I. ①云… II. ①周… III. ①降水-大气物理学
IV. ①P426.61

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第179293号

Yun he Jiangshui Wulixue

云和降水物理学

出版发行:气象出版社

地址:北京市海淀区中关村南大街46号

电话:010-68407112(总编室) 010-68409198(发行部)

网址: <http://www.qxcbs.com>

责任编辑:李太宇

责任校对:王丽梅

封面设计:博雅思企划

印刷:北京中新伟业印刷有限公司

开本:787 mm×1092 mm 1/16

字数:290千字

版次:2016年8月第1版

定价:40.00元

邮政编码:100081

E-mail: qxcbs@cma.gov.cn

终审:邵俊年

责任技编:赵相宁

印张:11

印次:2016年8月第1次印刷

前 言

众所周知,几乎所有的人类活动都会或多或少地受到天气的影响,因此天气的干湿状态就会备受人们的关注;而云与天气干湿状态则有着直接的联系。云的物理过程,特别是其中的微物理过程,在特定的气象条件下决定着是否会产生有效的降水。

自然界的云和降水总是会唤起诗人对它们的关注。我国唐代诗人杜甫所写的《春夜喜雨》就是一个很好的例证:

好雨知时节,当春乃发生。
随风潜入夜,润物细无声。
野径云俱黑,江船火独明。
晓看红湿处,花重锦官城。

英国诗人雪莱也写了以《云》为题的诗:

我是大地和水的儿女,
我是天空的孩子;
我穿越了大海和岸边的每一条缝隙;
我虽时常在变化,但我却不曾消失;
大雨过后,清风徐徐,阳光普照,碧空如洗;
我暗自得意于自己的伟大;
我走出滂沱的大雨,
如初生的婴儿,似飘荡的幽灵;
我悄然离去,了无踪迹。

云和降水与人类的生活息息相关,人们在想方设法地去了解云和降水变化规律的同时,也想通过设计精巧的方法去影响云,有望可以趋利避害地“改变”天气;此外,人类在工农业生产活动中所产生的大气污染物,通过云的微物理过程对天气又产生了诸多的负面影响。如果人们想要尽可能地避免产生这些不利的影响,还需要对产生这些影响的原因做充分的了解。

本书共包括七章,主要内容分别是云和降水的基本概念、云和降水微物理学特征、云和降水的动力学特征、降水的主要过程、云和降水过程的探测、云和降水过程的数值模拟,以及人工影响天气的技术和方法。本书在编写过程中力求反映学科发展基本历程,同时兼顾介绍云和降水研究中所取得的新进展,旨在较为全面地介绍云和降水物理学中的关键科学问题及解决问题的基本方法。

本书是在国家“973”项目(项目编号:2014CB441401)、北京市自然科学基金重点项目(项

目编号:8141002)、四川省教育厅科技成果转化重大培育项目(项目编号:16CZ0021)、2015 年成都信息工程大学本科教材建设项目以及南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心的共同资助下完成的,在此一并表示感谢。

参与本书编著的主要有周筠珩、赵鹏国、达选芳、伍魏、李晓敏、翟丽。郭旭审校了全书。此外,张元龙、刘恒、成鹏伟、徐燕参加了书稿的校订工作。由于编著者水平有限,加之编著时间局促,书中遗漏及错误之处在所难免,敬请读者不吝赐正。

编著者
2016 年春于成都

目 录

前言

第 1 章 云和降水的基本概念	(1)
1.1 人类对云和降水的研究历史	(2)
1.1.1 对云的研究	(2)
1.1.2 对降水的研究	(5)
1.1.3 我国对云和降水物理过程研究的开拓性工作	(7)
1.2 云的基本特征	(8)
1.2.1 云的形成	(9)
1.2.2 对于云基本特征的观测	(11)
1.2.3 云粒子形成的主要物理过程	(11)
1.3 降水的基本类型	(22)
1.3.1 产生降水的动力及热力条件	(22)
1.3.2 液态降水	(23)
1.3.3 固态降水	(24)
1.3.4 降水的区域性特征	(26)
1.3.5 降水按时间分类的特征	(26)
1.3.6 按产生机制对降水主要的分类	(28)
习题	(28)
参考文献	(29)
第 2 章 云和降水微物理学特征	(30)
2.1 云凝结核的核化过程	(30)
2.1.1 云滴均质核化的相变热力学	(30)
2.1.2 云滴的异质核化过程	(32)
2.1.3 云凝结核	(35)
2.2 冰核的核化过程	(36)
2.2.1 冰晶均质核化	(36)
2.2.2 冰晶异质核化	(37)
2.2.3 大气冰核	(39)
2.3 水成物粒子的增长	(40)
2.3.1 云滴的凝结增长	(40)

2.3.2 冰晶的凝华增长	(44)
习题	(46)
参考文献	(46)
第3章 云和降水的动力学特征	(47)
3.1 大尺度云与降水系统的动力学特征	(47)
3.1.1 层状云形成过程及其动力学	(47)
3.1.2 锋面云系及其动力学特征	(50)
3.2 中、小尺度天气系统的动力学特征	(59)
3.2.1 雷暴	(59)
3.2.2 雷暴的生命史和动力学特征	(61)
3.2.3 飑线及其动力学特征	(64)
习题	(74)
参考文献	(74)
第4章 降水的主要过程	(76)
4.1 暖云降水机制	(76)
4.1.1 碰并增长	(76)
4.1.2 雨滴谱	(80)
4.1.3 雨滴的繁生	(80)
4.2 冷云降水机制	(83)
4.2.1 固态降水粒子特征	(83)
4.2.2 固态降水粒子的增长	(85)
4.2.3 冰质粒的繁生过程	(87)
4.2.4 降水率与云的降水效率	(88)
4.3 冰雹的形成过程	(89)
4.3.1 冰雹的结构特征	(89)
4.3.2 冰雹的干、湿增长机制	(91)
习题	(92)
参考文献	(92)
第5章 云和降水过程的探测	(93)
5.1 气溶胶粒子的测量	(93)
5.1.1 气溶胶	(93)
5.1.2 测量方法	(95)
5.2 云凝结核的测量	(97)
5.2.1 云凝结核	(97)
5.2.2 测量方法	(98)
5.2.3 基于云凝结核测量的研究	(100)

5.3 冰核的测量	(101)
5.3.1 大气冰核	(101)
5.3.2 测量方法	(102)
5.3.3 基于冰核观测的研究	(105)
5.4 雨滴谱及雹谱的测量	(106)
5.4.1 雨滴谱和雹谱	(106)
5.4.2 测量方法	(109)
5.4.3 基于雨滴谱和雹谱的研究	(111)
5.5 降水过程的探测	(113)
5.5.1 卫星监测	(114)
5.5.2 机载监测	(116)
5.5.3 雷达探测	(119)
5.5.4 雨量计	(124)
5.5.5 水汽探测	(125)
5.5.6 雷电监测	(127)
5.6 小结	(128)
习题	(128)
参考文献	(129)
第6章 云和降水过程的数值模拟	(133)
6.1 云模式	(133)
6.1.1 一维积云模式	(133)
6.1.2 二维模式	(134)
6.1.3 三维模式	(135)
6.2 中尺度模式	(136)
6.3 宏微观观测资料在模式中的应用	(138)
6.3.1 观测资料作为模式的初始场	(138)
6.3.2 观测资料在模式中的同化应用	(139)
6.3.3 微物理观测资料在模式中的应用	(139)
习题	(140)
参考文献	(140)
第7章 人工影响天气的技术和方法	(142)
7.1 人工增加降水	(143)
7.1.1 人工增加降水原理	(144)
7.1.2 人工增加降水技术与方法	(147)
7.2 人工防雹	(156)
7.2.1 冰雹概念	(156)
7.2.2 人工防雹原理	(158)

7.2.3 人工防雹技术与方法	(160)
7.3 人工影响天气的效果检验	(162)
7.3.1 基本方法介绍	(163)
7.3.2 综合检验技术方法	(165)
7.4 小结	(166)
习题	(167)
参考文献	(167)

第1章 云和降水的基本概念

云是由大量的液态水滴,或者水滴冻结成的冰晶以及各种化学物质组成的气溶胶,这些滴或者粒子悬浮在地球表面之上的大气中。在地球上的大气层中,当空气冷却、水汽凝结时,云就会因饱和空气形成而出现。

在最靠近地球表面的大气层(即:对流层)中,云的各类型的命名都沿用了英国人卢克·霍华德(Luke Howard)在1802年12月所提出的方法。该方法于次年得以发表公布,其已成为现代国际划分或命名不同高度或形状的云及云系的基础。

简而言之,如果云的形状是非对流性水平分层的,且较为稳定,就可命名为层状云(stratiform);如果空气块部分轻微不稳定,或存在有限的对流性特征,则为层积云(stratocumuliform);以上两种类型的云都存在于不同的高度,即:低、中、高云。当云的高度较高,在云的名称前面分别可加两个前缀,即:alto(高)及cirro(卷)。薄的丝状卷云(部分偶尔较厚),通常在对流层较高的部位稳定或部分不稳定的大气中出现。而较不稳定的大气中通过自由对流更易形成高度较低的及多层的块状积云。较强的不稳定气块或因气旋造成抬升而形成的雷暴云,其垂直方向可发展到较高的高度。当需要表示云复杂的物理结构及其变化时,就可以加上诸如:cumulo(积状,如高度不稳定的雷暴云)、cumulonimbiform(积雨云,高度不稳定的雷暴云)及nimbo(Nimbostratus 雨层云,稳定且多层的,具有足够的垂直高度,可产生中到大雨)。这些类型间还存在交叉的分类,最终形成具体的云的分类。

在气象上,对于降水的定义是大气中的水汽凝结后在自身重力的作用下,以不同的形式降落到地面上的水物质。降水的形式主要有:毛毛雨,雨,雨夹雪,雪,霰和冰雹。当含有水汽的一部分大气达到饱和后,水汽凝结而降落,便形成降水。因此对于同样是水汽凝结而形成的雾,因为没有降落到地面上,就不是降水,而是水汽凝结(华)悬浮物。空气的冷却和空气中增加水汽,这两个过程相互影响可导致空气中的水汽饱和。降水是在雨滴在云内与云滴、小雨滴或者冰晶碰并而形成的。

在所有天气系统中锋面是主要的产生降水的系统之一。如果水汽充足且有上升运动存在,降水便会从对流云(如积雨云)中降落下来,且会形成一条狭长的雨带。当冬季较冷的气旋移动到较暖的水体(如湖面)上方,也会形成降雪,有时甚至会形成局地的暴风雪。在山区,降水往往在迎风坡处形成,而背风坡却往往较为干燥,常有沙漠形成。季风槽及热带辐合带的移动常会造成大范围的雨季的到来。降水是全球水分循环中的重要一环,通过降水淡水又重新储存到地球上。地球上每年的降水量约为 $505\,000\text{ km}^3$,其中约有 $398\,000\text{ km}^3$ 降落在海面上, $107\,000\text{ km}^3$ 降落在陆地上。全球的平均年降水量为 990 mm ,其中陆地上平均年降水量为 715 mm 。在气候分类系统上降水量是重要的参考因素之一。即便是时至今日,准确地确定全球的平均降水量也是十分困难的,降水并不像温度这样的状态量,它是变化明显的通量,具有较大的不确定性。

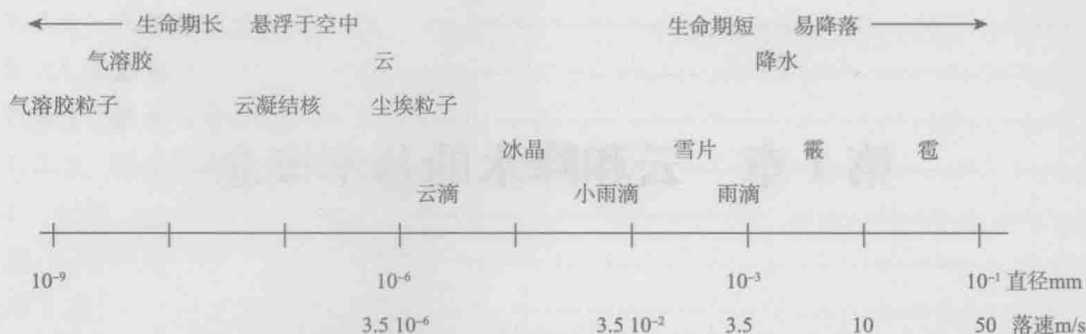


图 1.1 大气中不同类型粒子的尺度分布

云粒子为各类水成物粒子,云粒子的一部分最终形成了降水。由图 1.1 可知大气中存在着多种类型的粒子,其中最小的气溶胶粒子直径是纳米量级,而最大冰雹的直径可达到几十厘米。因此大气中粒子尺度变化范围为 8 个数量级,其质量变化范围为 20 个数量级,而它们的下落末速度与其直径的平方成正比。非常小的粒子不会降落下来,只有通过较大粒子的碰撞才有可能降落。通常大粒子较少,但一旦形成降水便会快速出现。

1.1 人类对云和降水的研究历史

1.1.1 对云的研究

从现有的气象学的文献上看,云和降水物理学是其中的新兴分支学科。对于云和降水过程的定量研究是从 1940 年以后才真正开始的。但是我们已有理论的起源实际上可以追溯到更早的研究上去。

古时候,人们对于云的研究从来都不是孤立进行的,一般是与天气的基本状态或者现象,甚至是其他自然科学相结合而进行研究的。公元前 11 世纪周朝的《诗经·小雅·信南山》中有“上天同云,雨雪雰雰”,已经将降水与云的形状联系起来了。公元前 475 年战国时的《管子·侈靡篇》“云平而雨不甚。无委云,雨则遽已。”则进一步说明了从云到降水的机制。而公元前 239 年《吕氏春秋》中对云也有了较为详细的记述,其中“山云草莽,水云鱼鳞,旱云烟火,雨云水波”对云已经开始分类。西汉(公元前 202 年)帛书《天文气象杂占》和唐代(618 年)的《占云气书》还绘制了初步的云图。

公元前 340 年,古希腊哲学家亚里士多德(Aristotle)便著有《气象学》一书,该书是以天气和气候为主,还包含有其他自然科学知识的著作。书中较早地提到了云及降水等名词,特别是提出了气象学的概念^[1]。而在《De Mundo》(也称为《亚里士多德假说》)中,对云和降水都有较为详细的描述^[2]。过了些年,他的学生泰奥弗拉斯托斯(Theophrastus)又著了一本关于天气预报的书,命名为《征兆》,在该书中将月晕及日晕等现象纳入了天气预报的指示因子。亚里士多德和泰奥弗拉斯托斯的著作对西方天气及其预报的研究的影响持续了将近 2000 年,在这一影响的过程中,建立的关于云的形成和特性的理论多数都是建立在简单推理的基础上的。



卢克·霍华德
(1772—1864年)



让·巴普蒂斯特·拉马克
(1744—1829年)

图 1.2 云分类工作的奠基人

真正对云进行科学研究的当属英国人卢克·霍华德(Luke Howard, 1772—1864 年)和法国人让·巴普蒂斯特·拉马克(Jean Baptiste Lamarck, 1744—1829 年),而希尔德布兰德·希尔德布兰森(Hildebrand Hildebranson, 1838—1925 年),是第一个利用照片对云进行分类和研究的学者。其中霍华德是一位有条理的观察者,且有着坚实的拉丁文基础。1802 年他利用他的优势,对对流层中的各类云进行了较为明了的分类,同时他认为对于云的分类是有利于天气预报实施的基础工作。在同一年,拉马克也独立开展了云的分类工作,他使用法文对云分类,但最终其命名方法并不成功。相比较而言,霍华德使用的学术界较常用的拉丁文,他的命名方法在其于 1803 年发表后,便得到了迅速的推广。1891 年国际气象大会开始采纳“霍华德命名标准”,该标准中是以三种云为基础的,即:卷云、积云和层云,通过交叉又出现了新的云的类型。

1840 年德国气象学家路德维格·克拉格斯(Ludwig Kaemtz)在霍华德的基础上,又在“霍华德命名标准”中引入了层积云的概念,其兼具层云及积云的特征;此后,1880 年哥本哈根艺术学院的业余气象学家菲利普·沃尔巴赫(Philip Weilbach)又在该标准中增加了积雨云。

1890 年,奥托·杰西(Otto Jesse)首次在对流层之上的中间层又发现了(noctilucent clouds)夜光云。三年后,亨瑞克·莫恩(Henrik Mohn)在平流层中又发现了珠母云(nacreous clouds)。1896 年 WMO 的前身 IMO 批准开始使用云图。

人们对云和降水粒子的微物理结构进行研究经历了较长的时间,特别是对于结构较为复杂的固态粒子而言更是如此。理查德·阿斯曼(Richard Assmann, 1845—1918 年)是于 1884 年率先利用显微镜对云滴进行综合研究的学者。对云中固态粒子最早的研究实际上是在公元前 1358 年商代的中国人。罗伯特·胡克(Robert Hooke, 1635—1703 年)是第一个利用显微镜研究雪晶的人。美国的威尔逊·本特利(Wilson Bentley)与日本的中谷宇吉郎(Nakaya Ukichiro, 1900—1962)分别于 1931 年及 1954 年发表了相当完整的雪晶照片集。范·布克(von Buch, 1774—1853 年)是较早研究冰雹结构的人。



约翰·艾特肯
(1839—1919年)



阿尔伯特·卫甘德
(1882—1932年)

图 1.3 云物理研究先驱



图 1.4 阿尔伯特·卫甘德实验用的气球及吊筐^[3]

对于云中水成物粒子形成过程的研究而言,苏格兰气象学家约翰·艾特肯(John Aitken, 1839—1919 年)的工作较为突出。他通过简易的扩散云室做了大量的实验。通过实验他得到的结论是:如果大气中没有尘埃粒子,就不会有霾、雾、云,因此也就可能没有雨。霍丁·科勒(Hilding Kbler, 1888—1982 年)在艾特肯的基础上,则进一步指出了吸湿性的海盐粒子更易成为云凝结核,它的存在大大降低了云滴形成所需的饱和水汽压的阈值。阿尔伯特·卫甘德(Albert Wigand, 1882—1932 年)通过气球观测实验则指出,凝结核主要源于陆地,同时强调大气中存在大量的可供云形成的凝结核。阿尔弗雷·韦格纳(Alfred Wegener, 1880—1930 年)对冰核进行了研究,他认为冰晶是水汽在非水溶性的尘埃粒子上凝华的结果。卫甘德则认

为冰晶是过冷水在非水溶性凝结核上冻结的结果。克拉斯坦诺(Krastanow, 1908—1977年)通过理论研究也证实了卫甘德的结果。

这些研究关注的更多的是云粒子的个体特性,却没有指出云作为一个整体是如何形成的,也没有回答为什么有些云会形成降水,而有些却不行。

1.1.2 对降水的研究

最早的降水理论是由詹姆斯·胡顿(James Hutton, 1726—1797年)建立的。他认为,降水是两块不同温度的湿润空气混合后的结果。显然,该理论并不能完整地解释降水过程。因为降水过程涉及明显的水的相态变化。海因里希·鲁道夫·赫兹(Heinrich Rudolf Hertz, 1857—1894年)于1884年较完整地描述了湿空气块上升的物理过程,即:尚未饱和的“干阶段”、饱和水汽及水共存的“雨阶段”、饱和水汽、水及冰共存的“雹阶段”、只有水汽和冰共存的“雪阶段”。

雷诺(Renou, 1815—1902年)于1866年首次指出冰晶对于雨滴的形成有着重要的作用,韦格纳于1911年研究认为,低于 0°C 时冰晶与过冷水滴不可能共存。托尔·贝吉龙(Tor Bergeron, 1891—1977年)于1933年指出,由于过冷云滴与冰晶在云中呈胶性不稳定,冰晶通过消耗过冷水不断长大,最终冰晶降落形成降水,而这一降水形成的过程也被瓦尔特·芬德森(Walter Findeisen, 1909—1945年)所认可。因此,这一机制也称为“Wegener-Bergeron-Findeisen”降水机制。科勒于1927年给出了较为完整的冰雹增长理论,冰雹是冰晶达到一定的尺度阈值后碰冻过冷水滴生长而成的。



托尔·贝吉龙
(1891—1977年)



阿尔弗雷德·瓦格纳
(1880—1931年)

图 1.5 冷云主要微物理过程的发现者

菲利普·雷纳德(Philipp Lenard, 1862—1947年)认为,云滴通过碰并过程不断地增长,而云滴可能带有电荷,云滴之间的静电力还会阻止云滴之间的碰并,碰并增长超过一定尺度的云滴会破碎,而破碎后的云滴会重新通过碰并继续增长,这样也就进入了云滴的“链式反应”快速增长的过程,这对于从云滴到雨滴的变化而言是十分重要的过程。

与1940年以前云和降水物理缓慢发展形成鲜明对比的是此后该学科发展很快,这与1939—1945年军事活动对于气象研究要求越来越高有直接的关系。战时各国培养了大量的气象工作者,同时出现了大量的包括飞机、雷达在内的新的观测手段。1946年文森特·谢费尔(Vincent Schaefer)与埃尔文·朗缪尔(Irving Langmuir)开始尝试利用干冰在层云中播撒,从而引起冰晶快速增长,通过人为的方法影响云和降水。此外计算机、卫星、火箭及可控的云室和风洞的运用也极大地推动了该学科的发展。这一阶段的快速发展,并不是以基本理论突破为特征的,更多的是对原有理论的量化和实验验证研究为主的。

云和降水的物理过程实际上是包括宏观和微观两个方面,其中的云的宏观物理特征,更应称其为云的动力过程,它给云的微物理过程提供了基本环境条件,这些条件限制着微物理过程发生的速度和时间。例如,云滴的增长总是伴随着大量潜热的释放,进而影响了云体的运动,同时云中水汽会发生蒸发,这些反过来又会影响云的生命期的长短。

从微物理的角度上看云与降水的差别更多的只是尺度和相态上的差别。但就降水研究而言需要从全球的水分循环上来加以了解该问题。

事实上,降水是全球水分循环中的重要一环。看一下地球大家就可以知道地球上的水分主要分布于海洋。地球上每年的蒸发量大约为 $500\,000\text{ km}^3$,这其中大约有86%源于海洋表面,而只有大约14%源于陆地表面^[4]。海洋表面上蒸发量的90%,会以降水的形式又回到海洋,而剩下的10%则以降水的形式回到了陆地;而后者中的2/3留在陆地上循环,而剩下的1/3则通过陆地径流回到海洋。由此也可以看到全球温度的变化会带来与之高度相关的饱和和水汽压的变化,进而会影响全球的蒸发和降水^[5]。全球的蒸发量主要与海洋、气温和输送水汽的气流等的特性有着密切的关系,而这些因素的变化会对地球上陆地的降水带来明显的影响。根据地面观测得到的降雨和降雪汇集成的降水资料对于评估全球的水资源、了解水与能量循环,以及评估气候对植被和生态系统的影响都是十分重要的。

世界上第一张全球范围的降水量分布图是20世纪初由爱德华·布鲁克纳(Eduard Bruückner)给出的。直到50年后克里斯汀·穆勒尔(Christian Möller)才绘制了全球降水量的季节变化图。又过了25年,贾格尔(Jaeger)做出了里程碑式的工作,即分月给出了全球降水量的分布图。尽管贾格尔的全球降水量的图是手绘的,但他给出了格点数据,以至于他的图被广泛地应用了很长的时间。又过了10年,被评估过的全球范围内的25000个雨量计站点气候长期平均资料,被第一次经质量控制后用于客观地分析全球降水量的分布特征。此后由世界气候研究计划(WCRP)执行的全球降水气候项目(GPCP),利用陆地上的格点化雨量计资料及海洋上的卫星反演资料,于1993年给出了数字化的全球降水量的月分布图。

降水在时间和空间的分布上均具有显著的差异性,特别是全球范围内的极端降水量可能比全球平均降水量大100倍(例如:全球年平均降水量为每天2.7 mm,而地球上曾观测到的日最大降水量为1825 mm)。因此就一个地区进行平均降水量及其时间变化的分析是十分困难的工作。表1.1给出了曾经观测到的全球范围内不同时间间隔内的最大降水量记录。

表 1.1 全球不同时间间隔最大降水量记录

时间间隔	总降水量(mm)	降水强度(mm/d)	观测时间(年.月.日)	观测地点
1 分钟	38	54 720	1972.11.26	瓜德罗普岛
3 分钟	63	30 240	1911.11.29	巴拿马
8 分钟	126	22 680	1920.5.25	德国
20 分钟	206	14 832	1889.7.7	罗马尼亚
1 小时	401	9619	1975.7.3	中国
6 小时	840	3355	1975.8.1	中国
24 小时	1825	1825	1952.3.15—16	留尼汪岛
5 天	4301	860	1980.1.23—27	留尼汪岛
31 天	9300	300	1861.7.1—31	印度

对于降水准确预报是十分困难的,这是由于云及降水的形成和发展过程都是十分复杂的。不同的因素,特别是水汽分子和水滴对云和降水的微物理和动力过程都有明显的影响,此外地球表面的水分进入大气的过程也会影响云和降水的形成,这些对于预报而言,都会存在较大的不确定性。

对降水进行预报的工作可追溯到 1904 年威廉·皮耶克尼斯(Vilhelm Bjerknes)在德国莱比锡大学大气物理学院工作时,其利用质量、能量及动量守恒的基本物理规律,对天气进行描述,并对降水做相应的预报。皮耶克尼斯建议地面和各高度层上的大气观测数据植入数值模式中,以便进行天气预报。刘易斯·弗赖伊·理查森(Lewis Fry Richardson)于 1922 年将皮耶克尼斯的提议付诸实施,但他的结果并不理想。

与云和降水物理研究发展过程类似,直到二战结束后得益于计算机技术的迅速发展,于 1948 年开始了通过计算机进行 24 小时的天气预报。但是尽管如此,对于诸如近地面气温、降水或云量等的预报依然无能为力。在上个世纪五十年代末,理查森的原始模式被进一步做了大量的修改。发展到 1975 年,欧洲中尺度天气预报中心在伦敦开始利用模式进行业务预报,其目的是增加全球天气预报的能力,且时效性一到两周以上。

随着计算机技术的发展,新的数值模式也将快速发展。而大气探测水平的进步也是十分重要的因素。正如卫星提供大量的大气观测资料,其中在热带地区尤为如此。而更重要的是将这些观测资料同化到模式中,可以大大地提高降水预报的准确率。

尽管到目前为止,人们就在云和降水物理的研究方面已经取得了长足的进步,但是云和降水物理的研究一直以来都是十分困难的,因为这里的研究不仅涉及分子尺度的核化现象,同时也有几百到几千公里的动力过程,而且二者之间的关系也是十分复杂的。

1.1.3 我国对云和降水物理过程研究的开拓性工作

我国对云和降水物理过程进行科学而严谨的研究始于 20 世纪 60 年代,逐步开始重视对于云和降水的直接观测,观测主要集中于冰核、云滴谱、雨滴谱、冰雪晶,以及冰雹等方面。例

如游来光与赵剑平等^[6,7]对我国北方冰核进行了尝试性的观测,结果发现冰核浓度与温度有近似的指数关系;顾震潮、洪钟祥及许焕斌等^[8-10]针对我国南方层积云与积云,及北方层云进行了较长时间的云滴谱的实际观测,并逐步发现了不同天气背景下云滴谱的变化特征;顾震潮等^[11]通过观测初步划分了雨滴谱的基本类型,后来阮忠家^[12]又针对不同的降水类型着重分析了雨滴谱的特征;孙可富等^[13]较早观测了降水性层状云中的冰雪晶;徐家骝等^[14]通过冰雹切片研究了雹胚的特征。而对于与云和降水有密切联系的气溶胶是在 20 世纪 70 年代,我国才逐渐开展起来的。这些开拓性的工作为我国云雾物理的研究奠定了很好的基础。

1.2 云的基本特征

云从其物理特性上可定义为气溶胶,它是由悬浮于大气中看得见的小水滴、冰晶,或者二者的混合物的聚合体。地球的大气层中(特别是其中的对流层)存在着大量微小的吸湿性粒子,这些粒子浓度会因时间和地点的变化而有所差异。当水汽在这些粒子上凝结时,云就形成了。初始的云滴很小,只有其质量增加上百万次,云滴才会降落到地面形成雨。

云滴的增长主要源于单个云滴之间的碰并;但当冰晶在较高的云中形成以后,在其下落之前运动的过程中,通过“收集”其他的冰晶和液滴而快速增长。有一些云的降水过程会通过单一的液滴碰并而形成;这种情况往往出现在产生较大降水量的海洋性降水中。另外一些云的降水,是以冰晶的增长为前提的,并在此基础上产生了明显的降水;这些云通常则出现在内陆。对于尺度较大的云而言,无论它在哪里生成,冰晶的增长都是十分重要的。而冰晶在降水中的真正作用仍需要通过切实的观测才可以确定。迄今为止,绝大多数增加降水和改变云性状的工作,都是通过影响降水中冰晶的微物理过程而完成的。这是因为冰晶的形成是降水产生的触发机制,同时其生消过程较构成云主体的液滴更易被影响。

云的形成主要依赖于大气中有充足的水汽,当空气块被抬升而冷却后,会有水汽凝结。影响云产生的这些因子主要是由地形以及大尺度的天气过程(例如高低压系统的移动及锋面过境等)。可降水的云存在不同的形式,比如其中有可产生大范围持续性中等雨强降水的云,也有范围小持续时间短但雨强较大的云。目前我国云的分类有 3 族 10 属 29 类,如表 1.2。



顾震潮
(1920—1976年)

图 1.6 我国云和降水物理
过程研究的奠基人之一