



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

Physics of Clouds
and Precipitation

云降水物理学

◎ 杨 军 陈宝君 银 燕 等 编著



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

云降水物理学

杨 军 陈宝君 银 燕 等 编著

内容简介

全书共分 16 章,全面系统地介绍了云降水物理学的基础理论知识,包括大气中水的基本性质、云雾降水宏微观特征、核化过程与扩散增长、液相和冰相降水的形成、雷暴起电机制、云物理实验与探测,还简要介绍了云的数值模拟、人工影响天气及云降水化学方面的基础知识。各章均附有习题及主要参考文献,便于读者加深理解和延伸阅读。

本书力求概念清晰、论述严谨、深入浅出,既可作为高等学校大气科学专业本科生的专业课教材,也可供研究生和相关科技工作者和业务人员阅读、参考。

图书在版编目(CIP)数据

云降水物理学/杨军等编著. —北京:气象出版社,2011.6

ISBN 978-7-5029-5245-7

I. ①云… II. ①杨… III. ①降水-大气物理学

IV. ①P426.61

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 122756 号

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

总 编 室:010-68407112

网 址:<http://www.cmp.cma.gov.cn>

责任编辑:李太宇

封面设计:博雅思企划

印 刷:北京京科印刷有限公司

开 本:720 mm×960 mm 1/16

字 数:460 千字

版 次:2011 年 6 月第 1 版

定 价:46.00 元

邮政编码:100081

发 行 部:010-68409198

E-mail: qxcbs@cma.gov.cn

终 审:周诗健

责任技编:吴庭芳

印 张:23.5

印 次:2011 年 6 月第 1 次印刷

前 言

云降水物理学是大气科学的重要分支,主要研究自然界云、雾和降水的形成、发展和消散过程,传统上分为研究云降水粒子形成、增长的云微物理学和研究云降水发展宏观过程、云系结构的云动力学,同时还包括雷暴电学、云雾光学、云的辐射气候效应、云降水化学等广泛的内容。

大气中绝大多数天气现象都和云、雾、降水过程密切相关,而且云、雾、降水本身就是主要的天气现象。云降水过程是全球水分循环中的重要环节,水汽输送和潜热释放在大气热量收支和大气动力过程中占有很重要的地位。其他如大气辐射、大气污染均与云降水密切相关。天气预报中对云和降水的预报需要对云降水物理有深刻的理解,数值天气预报要求提出正确描述云降水过程的计算方案。人工影响天气则是直接建立在云降水物理学基础上的一门应用科学技术。云降水物理学是一门具有现实意义、富有生命力的重要学科。

新世纪以来,云降水物理过程在天气、气候系统中的关键作用进一步成为学术界关注的焦点。同时,社会经济发展对人工影响天气提出了更为迫切的需求。国内外出现了新一轮云降水物理研究热潮,并取得了大量新的研究成果。特别在成云致雨的大气气溶胶粒子、云雾形成过程、云向降水的转化、云的辐射气候效应、云降水实验探测技术以及数值模拟等方面取得到了新的进展,进一步加深了我们对大气基本物理过程的理解,直接推动了云降水物理学的快速发展。

云降水物理学作为大气科学的一门独立分支学科已有近百年历史。我国系统性的云降水物理研究是从1958年开始的,并随即在大学开设了云降水物理学专业课程,从最初的讲义到《云雾降水物理基础》(顾震潮,1980)、《云物理学基础》(北京大学,1981)、《微观云物理学》(王鹏飞和李子华,1989)、《云和降水物理学》(王明康,1991)、《云和降水物理》(黄美元和徐华英,1999)、《云物理学》(王宝贯,1997)的编写和《雨云物理学》(程纯枢译,1966)、《云物理学》(中国科学院大气物理研究所译,1978)、《云物理简明教程》(周文贤和章澄昌译,1983)、《云物理

学简编》(王鹏飞译,1983)的引进,逐步形成了较为系统完善的课程知识结构体系,在我国大气科学的人才培养中发挥了重要作用。

目前,我国高等教育迅速发展,已进入全面提升质量、加强内涵建设的新阶段。教材是体现教学内容和教学要求的知识载体,是保障教学质量的关键,更是提高教学质量、培养优秀人才的重要保证。新的高等教育形式对教材建设提出了新的需求。按照普通高等教育“十一五”国家级教材规划要求,我们在国内外已有教材和研究成果的基础上,根据学科发展、社会对人才的需求和人才培养实践编写了这本教科书。

在写作的指导思想,本书力求遵循国际先进的教学理念、方法与中国高等教育特色相结合,理论知识、应用技能与创新思维相结合的原则。在本书材料组织上,希望做到基本原理和最新研究进展相结合,云微物理学和云动力学相结合,物理意义和数学描述相结合。每章均精选了典型习题并给出了部分参考答案,供读者学习中巩固基础知识、加深对内容的理解,同时对形成云降水物理知识体系的重要文献和书中用到的素材来源均注明参考文献,便于读者延伸阅读。

全书共分16章,内容包括大气中水的基本性质、云雾降水宏微观特征、核化过程与扩散增长、液相和冰相降水形成理论、雷暴起电机制、云物理实验与探测。考虑到内容的完整性,书中还简要介绍了云的数值模拟、人工影响天气及云降水化学方面的基础知识。本书第1、5、8、9、11、12、13章由杨军编写,第2、3、10、14章由陈宝君编写,第7、15、16章分别由银燕、刘晓莉、朱彬编写,第4章由金莲姬和银燕编写,第6章由杨素英和银燕编写。杨军负责全书统稿,对各章节文字和插图作了适当的补充和修改。

书中很多插图来源于相关教材、专著、论文,均标注了文献,对原作者表示感谢。在本书写作过程中,很多同行、专家提出了宝贵意见,同时参加本课程学习的同学们也对书稿提出了大量修改建议,在此致以深深的谢意。南京信息工程大学和气象出版社给予了教材出版经费资助。李太宇编审从选题提出到出版一直给予我们热情的鼓励和耐心的帮助,并做了认真细致的编辑、润色工作,深表谢意。

本书力求全面系统地介绍云降水物理学的基础理论知识和近年来的研究成果,但由于云降水物理学涉及面很广,发展迅速,加之编著者的学识水平有限,错误、疏漏之处在所难免,衷心希望各位读者批评指正。

编著者

2011年5月

目 录

前 言

第 1 章 绪 论	(1)
1.1 云降水物理学的性质和研究对象	(1)
1.2 研究目的和意义	(3)
1.3 研究方法体系	(6)
1.4 发展简史	(9)
习题	(14)
参考文献	(15)
第 2 章 水的热力学性质	(16)
2.1 水的物质结构	(16)
2.2 水的基本特征	(20)
2.3 大气热力学基础	(23)
2.4 水的多相热力学系统	(28)
习题	(40)
参考文献	(40)
第 3 章 云雾形成的宏观条件	(41)
3.1 大气中的水分收支	(43)
3.2 大气降温机制	(48)
习题	(60)
参考文献	(61)

第 4 章 云雾的宏观特征	(62)
4.1 全球云和降水的分布	(63)
4.2 积状云	(67)
4.3 层状云	(74)
4.4 卷云	(75)
4.5 雾	(76)
习题	(83)
参考文献	(83)
第 5 章 云降水微观特征	(86)
5.1 空中水凝物粒子的相态分布	(87)
5.2 微观特征的描述	(88)
5.3 云滴和雾滴	(92)
5.4 雨滴	(97)
5.5 液滴的下落末速度	(100)
5.6 冰晶和雪晶	(103)
5.7 霰和冰雹	(110)
习题	(115)
参考文献	(117)
第 6 章 云的核化理论	(119)
6.1 同质核化	(119)
6.2 异质核化	(126)
6.3 云凝结核与冰核	(138)
习题	(147)
参考文献	(148)
第 7 章 水滴与冰晶的扩散增长	(150)
7.1 水汽和热量的扩散规律	(150)
7.2 单个液滴的扩散增长	(152)
7.3 云滴群的扩散增长	(157)
7.4 单个雪晶的扩散增长	(158)

7.5 冰水共存时冰晶的凝华生长	(159)
习题	(162)
参考文献	(164)
第8章 液相降水形成理论	(165)
8.1 液滴碰撞模型	(165)
8.2 连续碰并增长	(170)
8.3 随机碰并增长	(174)
8.4 云滴凝结增长向碰并增长的过渡	(178)
8.5 雨滴的繁生	(180)
习题	(184)
参考文献	(185)
第9章 冰相降水形成理论	(187)
9.1 淞附增长——霰的形成	(187)
9.2 聚并增长——雪花的形成	(193)
9.3 冰晶的繁生	(195)
9.4 冰质粒的融化	(200)
9.5 降水微物理过程小结	(205)
习题	(207)
参考文献	(208)
第10章 强风暴系统与冰雹物理学	(211)
10.1 雷暴单体的生命史	(211)
10.2 强雷暴	(212)
10.3 冰雹的增长	(215)
习题	(219)
参考文献	(221)
第11章 降水过程与结构特征	(223)
11.1 层状云降水	(224)
11.2 阵雨	(227)
11.3 降水形成的简化理论	(229)

11.4	降水的中尺度结构·····	(230)
11.5	降水产生率与降水效率·····	(239)
	习题·····	(241)
	参考文献·····	(243)
第 12 章	云中电结构与起电机制 ·····	(244)
12.1	晴天电场与全球电路·····	(244)
12.2	云中电结构·····	(246)
12.3	对流起电机制·····	(251)
12.4	降水起电机制·····	(253)
12.5	云中雷电过程的观测验证·····	(268)
	习题·····	(272)
	参考文献·····	(274)
第 13 章	云物理实验与直接探测 ·····	(280)
13.1	云物理实验·····	(281)
13.2	云降水粒子探测·····	(295)
13.3	机载探测·····	(307)
	习题·····	(313)
	参考文献·····	(314)
第 14 章	云降水数值模拟简介 ·····	(317)
14.1	一维云模式·····	(317)
14.2	二维云模式·····	(318)
14.3	三维云模式·····	(319)
14.4	微物理过程的处理·····	(321)
	习题·····	(324)
	参考文献·····	(324)
第 15 章	人工影响天气基本原理 ·····	(326)
15.1	人工增雨·····	(326)
15.2	人工抑制冰雹·····	(330)
15.3	人工消雾、消云 ·····	(334)

15.4 人工影响天气的其他方面.....	(337)
15.5 无意识人工影响天气.....	(339)
习题.....	(341)
参考文献.....	(342)
第 16 章 云降水化学过程	(344)
16.1 气体在云滴中的溶解.....	(344)
16.2 液相化学反应.....	(349)
16.3 云与气溶胶的相互作用.....	(358)
16.4 云降水化学成分.....	(360)
习题.....	(362)
参考文献.....	(363)

第1章 绪论

从太空遥望地球,60%~70%的地球表面被云覆盖(Quante,2004),仅露出小片陆地。从地面仰望天空,云则千姿百态、千变万化。云为我们提供淡水、清洁大气、调节天气与气候,决定了我们赖以生存的地球环境状态,是地球系统的重要组成部分。

在云的美丽形态背后是各种有趣的物理、化学特征和规律,涉及动力学、微物理学、热力学、湍流、辐射传输、非均相化学等宽广的领域,是我们深入探索自然的又一广阔空间。

1.1 云降水物理学的性质和研究对象

云、雾、降水物理过程是大气水循环的核心组成部分,是地球大气的热量、水分和动量平衡的关键因素,它不仅影响局地 and 短期天气过程,也影响大气环流和全球气候变化。此外,云和降水还会影响大气污染、大气雷电和电磁波传播等过程。

云降水物理学,简称云物理学,广义上可定义为大气中云和降水的科学,或者说是大气中水的科学,包括云和降水的分类、形成、演变,以及从云中辐射传输、云中光电现象一直到云降水化学等广泛内容。

通常讨论的云降水物理学是以大气热力学和大气动力学为基础,研究大气中水分在不同阶段所经历的物理过程,具体而言就是研究云、雾和降水的形成、发展和消散过程,是大气科学中最为重要的分支学科之一。

根据研究对象尺度的大小,云物理学可分为宏观云物理学和微观云物理学。宏观云物理学以水平、垂直尺度大于10 m的云或云系为对象,以热力学、大气动力学为基础,将云作为一个整体,研究其形成、发展和衰亡的热力—动力过程及其演变规律。而微观云物理学则以云体的组成元素——云粒子(云滴、冰晶)和降水粒子(雨、雪、霰和冰雹等)为对象,尺度仅为 $0.1\text{ }\mu\text{m}\sim 1\text{ cm}$,以水汽的相变热力学和气溶胶力学为基础,从微观角度研究云和降水粒子的形成、增长和转化等物理过程,所涉及的基础知识为热力学原理、扩散理论和物理化学等。

从研究对象的空间尺度(表1.1)来看,云降水的微观物理过程涉及的大气粒子

尺度范围非常广,从气溶胶粒子中的 Aitken 核(约 $10^{-2} \mu\text{m}$)、大核(约 $10^0 \mu\text{m}$)、巨核和云滴(约 $10^1 \mu\text{m}$)、毛毛雨和雪晶(约 $10^2 \mu\text{m}$)、雨、雪团和霰(约 $10^3 \mu\text{m}$)到冰雹(约 $10^4 \sim 10^5 \mu\text{m}$),跨度约达 7 个数量级。对于云形成的宏观动力过程,同样存在巨大的尺度差异,如小旋风(约 10^1 m)、尘卷风(约 $10^0 \sim 10^1 \text{ m}$)、初生积云(约 $10^2 \sim 10^3 \text{ m}$)、雷暴(约 $10^3 \sim 10^4 \text{ m}$)、多单体风暴和台风等中尺度云系(约 10^5 m)、罗斯贝波等天气尺度云系(约 10^6 m)。

表 1.1 云降水物理学的研究对象

分类		研究对象	尺度范围
微观尺度		气体分子、离子	$0.1 \text{ nm} \sim 1 \mu\text{m}$
		气溶胶粒子、云降水粒子	$1 \mu\text{m} \sim 1 \text{ cm}$
		雹胚、雹块、微涡	$1 \text{ cm} \sim 10 \text{ cm}$
		小涡、墙角风	$10 \text{ cm} \sim 1 \text{ m}$
		热泡、尘卷风、碎云、亮带宽	$1 \text{ m} \sim 100 \text{ m}$
宏观尺度	小尺度 (结构尺度)	初生云	$100 \text{ m} \sim 5 \text{ km}$
		弧状云、龙卷漏斗、悬球云、云塔宽、降水幡等	
		雷达回波结构(弱回波区、回波墙、高悬回波等)	
	中小尺度	阵风锋	$2 \sim 25 \text{ km}$
		雷暴云、积云单体	
		龙卷风	
		中尺度高压及低压	
		雨团	
	大中尺度 (天气尺度)	飚线、云团、细胞状云	$25 \sim 500 \text{ km}$
		雨带	
		台风、气旋、锋面及辐合带云系	$> 500 \text{ km}$
		盾状云、螺旋云带、逗点云	

云物理学的微观和宏观两个方面虽然在研究对象尺度上存在巨大差异,但不同尺度的粒子、云系(云体)之间是相互联系、相互作用的。一方面,云和降水的微物理过程在相当大的程度上受到云中大气运动的制约。云发展和降水形成的宏观动力过程提供了微物理过程进行的背景,决定性地影响了云粒子的数密度、初始大小分布及其物理性质,限定了微物理过程进行的速率和持续时间,以及最终降水量的大小,而且只有研究了云动力学过程,才能知道微物理过程中哪些是重要的,所以云动力学在云和降水物理学的研究中具有基本的意义。另一方面,微物理过程对于宏观动力过程又有重要的反馈作用。云和降水粒子的凝结和凝华、蒸发和升华改变了水汽密度,伴随着相变潜热的释放和吸收,又提供了一种重要的热源和热汇,它极大地影响了云体内外空气的运动,而降水粒子的拖曳作用又常常是促使云体消散、崩溃的一个重要

因素。近年来,越来越多的人致力于研究云的宏观动力学与微物理学的相互作用。

1.2 研究目的和意义

云、雾和降水是在一定的天气形势条件下产生和发展的,大部分重要的天气现象,如雷暴、冰雹、龙卷以及暴雨、梅雨、台风、连阴雨等,都与云和降水有关。所以云和降水物理学与天气学有密切的关系。同时,云和降水过程是地球大气的热量、水分和动量平衡的关键因素,它不仅影响局地 and 短期天气过程,也影响大气环流和全球气候变化。此外,云和降水还会影响大气污染、大气雷电和电磁波的传播。因此,云和降水物理学与气候学、动力气象学、大气物理学、大气探测和大气化学等分支学科及其应用技术都有密切的联系。下面以天气、气候和大气化学为例简要讨论云降水物理学的研究目的和在大气科学中的作用。

1.2.1 云与天气

天气学是研究天气现象和天气过程的物理本质及规律,并用以制作天气预报的学科。云中潜热释放充当着一种驱动全球大气环流的“引擎”,同时将能量从低空输送到高空,改变能量在大气中的垂直分布,直接决定天气现象和过程产生的大气背景。云雾降水的发生和演变本身就是最重要的天气现象和过程,并影响天气系统的发展。如地球上很大一部分降水是从含有冰粒子的云中产生的,有时云中是否出现冰粒子甚至能决定降水是否发生以及降水强度和降水范围。

云降水发生于地球密度层结和旋转大气背景下的特定天气系统下,但同时也对天气过程的发展、演变具有反作用。例如,对于通常能够产生很大的降水量,甚至引起局地洪涝的强对流风暴系统,它能够发展到什么样的程度,所造成的结果究竟是冰雹、暴雨、还是强风,一定程度上取决于云体的结构。不同的结构可以导致系统朝不同的方向发展,从而产生不同的天气现象。同时,云体结构是大气动力学与云降水物理学相互作用的产物,没有云降水物理过程的参与,很多大气系统就无法产生和发展,但如果没有适当的动力、热力过程作为背景,导致系统发展的云降水物理过程则难以启动和加强。

云雾降水物理已经与天气预报在量的方面紧密联系、相互结合。准确和定量的天气预报必须考虑云降水物理过程,云降水物理学为定量天气预报提供了理论基础、思路和物理机制。例如,强对流天气系统的准确预报十分困难,原因之一就是控制强对流系统启动和发展的云降水物理机制还不完全清楚,因此也就不能在天气预报模式中充分地表征和准确预报,所以云降水物理过程是大气数值模式系统中不确定性的重要来源。

作为天气系统中不可分割的重要组成部分,云、雾和降水对其他天气现象和过程有着重要影响。如果对云降水物理过程把握不准确,不仅直接降低降水预报的准确性,同时由于云降水过程的影响,其他气象要素的预报也变得十分困难,如有云的阴天和无云的晴天,温度的差异将十分明显。

此外,云降水物理自身的发展也已走出环节性研究,向系统化方向发展。云降水物理学不再只包括单一的微物理内容,而是微物理与宏观动力学的结合,并不断地加深对大气中实际云体或云系的具体云降水过程的理解,这不仅需要知道天气系统的一般特征,还需要知道天气系统的精细结构。

1.2.2 云与大气辐射和气候

作为全球变化的一部分,气候变化是当今大气科学领域的一个重大问题,覆盖地球大部分天空的云与太阳短波辐射和地球大气长波辐射发生相互作用,从而成为影响地球大气辐射平衡、气候系统和气候变化的重要因素,同时也是目前认为不确定性最大的因素。

如图 1.1 所示,就全球平均而言,云对太阳辐射的反射率约为 15%,占到了地球行星反照率的一半,云反射太阳辐射产生的大气冷却效应约为 $-42 \sim -74 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。在短波辐射光谱范围,对流层中、下层的层状云比高层的卷云具有更大的光学厚度,在云的辐射气候效应中起到了主要作用。此外,相对陆地而言,洋面由于本身反射率较低及占地球表面积比例大,因此云在海洋上空的大气能量平衡过程中显得更为重要。

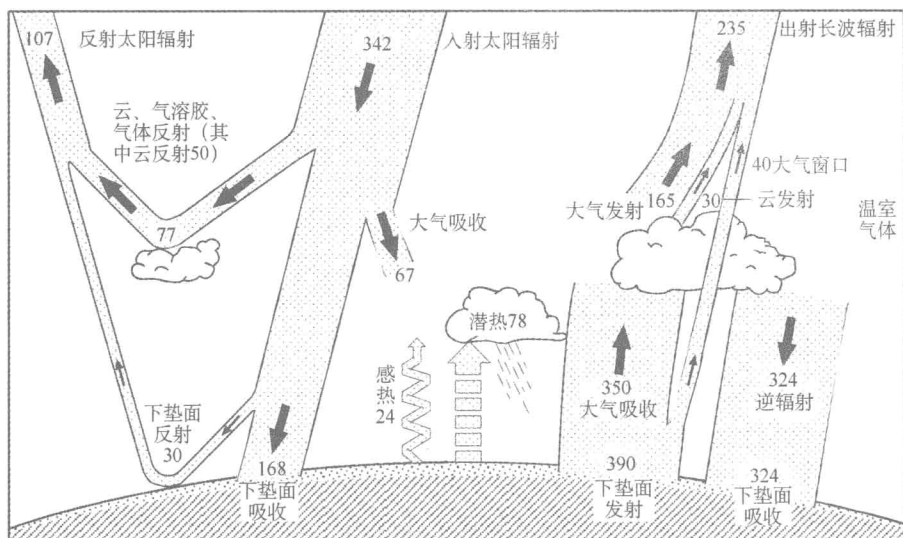


图 1.1 地球年平均能量收支(单位: $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$; Kiehl 等, 1997)

云在吸收很大一部分地面发射的长波辐射的同时,其本身也向外发射长波辐射,云吸收和发射长波辐射的规律不同于大气中的气体成分。云的发射强烈依赖于云体温度,因此云顶的温度决定了云体通过向上长波辐射造成的能量损失。云对地气系统长波辐射吸收作用很强,约在 $22 \sim 55 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,这其中卷云发挥了重要作用。对照云对短波辐射和长波辐射的不同作用,可知云对气候系统产生的净效应约为 $15 \sim 20 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。目前,人们对云的辐射气候效应的定量估计还存在很大的不确定性。在某些局部地区,云产生的净效应范围很大,既可以是增暖,也可以是冷却。

从另一个方面来看,气候变化对云的影响及变化了的云进而再对气候系统的反馈也是十分重要的,对这方面的科学认识和定量估计的准确性均远低于温室气体。全球变暖对云的范围和状态都会产生影响,其结果既可以是增温,也可以是降温,这种反馈机制对温室气体气候效应可能产生增强或减弱的作用。

在云的辐射、气候效应中,云的辐射特性强烈依赖于云粒子的微物理性质,包括尺度、形状、数浓度等。例如,无论云是由水滴还是冰晶组成,在云粒子总水量相同的条件下,大量小粒子组成的云比少量大粒子组成的云能反射更多的太阳辐射。同时,一些情况下小云滴能起到减缓降水的作用,从而使云的生命史延长,云量增多。此外,人类活动向大气排放的物质中除了气体成分外,也包括气溶胶粒子,其中一些气体成分有利于大气中形成新的气溶胶粒子。人类活动产生的气溶胶粒子中的一部分是可溶性的,它们能促进云滴的生成,并且一定程度上决定了形成的云滴数目。当可溶性气溶胶粒子增多时,能造成云滴数目增多、尺度减小,从而使云的反照率增大或生命史延长。这一“气溶胶→云→辐射→气候”的影响过程被称作气溶胶的间接气候效应。对云降水过程本身进行充分的科学认识是准确揭示云、气溶胶辐射气候效应的前提。

1.2.3 云与大气化学

云、雾、降水等水凝物粒子相当于大气化学中的湿反应器,是大气污染物和痕量气体的源和汇,云、雾、降水物理过程与大气化学、酸雨、污染物的输送和清除等密切相关。

大气湿沉降过程是空气中的粒子和可溶性气体移出大气的主要途径。例如一些大气气溶胶粒子帮助云滴和冰晶形成并同时进入云粒子中,如果这些云粒子最终形成雨滴,则这些气溶胶粒子随雨滴一起降落到地面。同时,雨滴也将在下落过程中将捕获的气溶胶粒子一起携带到地面。可溶性气体成分能够在云滴中达到溶解平衡,若通过液相化学反应在云滴中生成一些非挥发性物质则可被降水一起移出大气。

酸雨是云降水过程造成污染物沉降的典型例子。其主要原因是化石燃料燃烧等过程释放出的 SO_2 和 NO_x 进入大气后通过气相、液相化学反应产生硫酸盐和硝酸盐,这些酸性化合物随降水一起被携带到地面。

对于不产生降水的云雾过程,大气中的可溶性气体和气溶胶粒子中的可溶性成分同样可通过液相化学反应进入云雾滴,使大气中气相和粒子相的化学成分及其随粒子大小的分布发生变化,这一过程特别是在云雾滴蒸发后形成新的气溶胶粒子时最为显著。对于冰相云降水过程,冰雪晶的表面提供了非均相化学反应条件,对大气化学过程也十分重要。

除了以上非均相化学反应和沉降过程,同样重要的是云对大气成分垂直分布的贡献。云的垂直运动将气体和颗粒物从包括边界层在内的对流层低层输送到对流层中上层甚至平流层下部,从而在一定条件下可使这些被输送的成分在大气中存留更长的时间,如深对流风暴系统中的强上升气流能够将边界层中的成分快速输送到对流层顶。

此外,云降水物理学已作为理论基础直接应用到了人工影响天气的实践活动中,例如人工降水、人工消雹、人工消雾、人工防雷以及人工造云等等,尽管在方法技术上还需要进一步完善,但已对国民经济起到了很大作用。同时云雾降水物理与大气光学、大气电学也都有着紧密的联系。由此可见云雾降水物理是一门有实际意义并富有生命力的重要学科。

1.3 研究方法体系

云降水物理学的研究过程,是利用人的主观能动性不断探索和发现的过程,是不断向客观真实靠近的过程,总体上遵循由简单到复杂、由低级到高级的渐进认识规律。因此,研究云降水物理,从认识论的角度可划分为三个层次、五类方法:(1)感性认识,即观测和探测;(2)理性认识,即理化实验、理化模拟和数值模拟;(3)自然过程人为干扰,即人工影响天气。

这些方法相辅相成、不可分割、互为补充、互相促进,整体上构成了一个研究方法体系(图 1.2)。通过认知过程的不断循环,使我们实现对云降水物理过程认识的从现象到本质、从外部到内部、从偶然联系到必然联系,在广度上不断扩展,在深度上不断向前推进,不断揭示自然云降水过程的本质和规律。

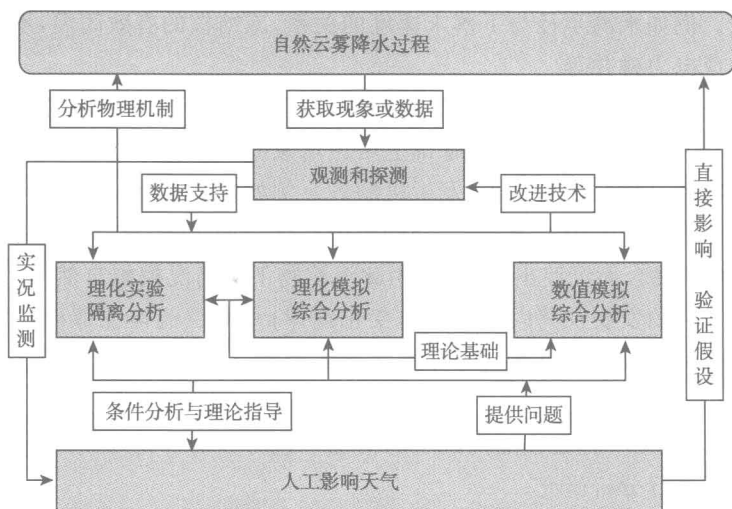


图 1.2 云降水物理学研究的方法体系(王鹏飞,1980)

1.3.1 感性认识

观测和探测是对客观自然的或人工影响后的云降水过程获得感性认识的方法。例如组织中小尺度观测网;进行云内外温、湿、压及气流分布探测,云体发展及夹卷情况探测、雷达及卫星探测;云内微物理结构及其有关参量和特征(如滴谱、含水量等)观测、降水观测等。

如 1.4 节发展简史所述,人类气象知识的积累,最早便来源于对云和天气过程的直接观测,云的观测是气象观测中最基本的项目之一。《诗经》中有“上天同云,雨雪雰雰”,古巴比伦人也在公元前 650 年开始通过云状预测天气。随着 16—18 世纪大量气象仪器的出现,促使了气象学从经验和实践到知识和理论的演化,气象学真正成为了一门独立的学科。从此开始,对云降水物理的观测经历了从目测到器测、从地面到高空以至太空、从宏观到微观的过程,已形成较为完整的观测体系,为云降水理论认识的深入奠定了科学基础,推动了云降水物理学自身的发展和对天气、气候等大气过程的深入认识。

1.3.2 理性认识

理化实验、理化模拟和数值模拟是用分析和综合的方法提高对自然云降水过程及人工影响天气的理性认识。

理化实验和理化模拟都在实验室中进行,其区别在于:

理化实验是从云雾过程的整体中隔离出一些因子,在实验室分析较为单纯的一