

云物理学

[英] B. J. 梅森 著

科学出版社

云 物 理 学

〔英〕B. J. 梅森 著

中国科学院大气物理研究所 译

科 学 出 版 社

1 9 7 8

内 容 简 介

本书比较全面地介绍了云物理学领域的各个方面，全书共分九章，附录两篇。前六章主要阐述云雾微观物理学的基本知识和现状，从理论上和实验上把最近一、二十年来欧美国家关于水汽凝结的核化过程、大气凝结核、云(雾)滴的增长、云中冰相的生成、雪晶的形成和自然降水过程物理学作了系统的总结。后三章专题介绍云和降水的人工影响、云和降水的雷达研究以及云的起电。两篇附录给出了在理论和实际工作中经常用到的水滴在空气中下落时的碰撞与碰并以及雨滴自由下落的物理特性等内容。书末附有近千篇参考文献。

本书可供从事云雾物理和人工影响天气方面工作的专业人员、大专院校气象或大气物理专业的师生阅读。对于从事大气物理、大气探测、大气电学、雷达气象和航空气象等工作的人员来说，也是一本有用的参考书籍。

B. J. Mason

THE PHYSICS OF CLOUDS

Oxford University Press 1971

云 物 理 学

[英] B. J. 梅森 著

中国科学院大气物理研究所 译

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1978年4月第一版 开本：850×1168 1/32

1978年4月第一次印刷 印张：21 3/4

印数： 报精：1—2,250 插页：精
报平：1—1,870 字数：569,000

统一书号：13031·607

本社书号：884·13—15

定 价： 精装本：3.05 元
平装本：2.60 元

译者的话

云物理学是近代气象学的一个重要分支。由于它与经济建设、人民生活以及国防事业密切相关,所以受到了世界各国的普遍重视。第二次世界大战以后,人工影响局部天气有了显著进展,使人类从消极地预报天气走向积极影响天气成为可能,这就赋予了云物理学新的生命力,促使它更迅速地发展。

我们遵照毛主席关于“洋为中用”的教导,把英国气象局局长,云物理学家 B. J. 梅森所著的《云物理学》1971 年第二版本译出,介绍给国内从事云雾物理和人工影响天气等方面的同志参考。就国外现有的云雾物理方面的多本专著来说,这本书介绍的基本知识较为系统、全面,除了叙述云雾微观物理学外,书中有益地编入了对云和降水的人工影响、云和降水的雷达研究以及云的起电等内容。书中收集的现代重要研究成果,基本上能够反映欧美国家在这个领域的当前水平。这对我们了解这门学科的最新情况是有帮助的。

但是,这本书也是有缺陷的。除了作者自己承认的没有把对云的微观物理过程起制约作用的宏观动力学过程包括进去外,我们还应当看到,作者对云雾物理研究成果的分析和取舍并非都是客观的、科学的。例如,在云雾降水过程中各种因素(宏观和微观过程)相互影响,相互制约的观点甚少,对人工影响局部天气的前景比较悲观等。特别应该指出的是,由于作者的偏见,书中对包括我国在内的广大第三世界国家在云雾物理方面的贡献几乎没有介绍,这就不能不降低本书的科学价值。希望读者阅读时,取其精华,去其糟粕。

我国自 1958 年大跃进以来由于生产实践的需要,开展了人工影响云雾的新工作。二十多年来,特别是无产阶级文化大革命以

来,通过群众运动和专业人员的努力,收集并揭露了我国云雾降水的一些重要特征,大规模地开展了人工降水和人工防雷等实验研究并作出了自己的贡献,在云雾物理研究方面也取得了一定的成绩。这些,读者可以从国内的有关出版物和资料中找到,这里不另介绍了。

本书由中国科学院大气物理研究所集体译出。参加翻译的同志有:阮忠家(序言),黄美元(第一章),吕达仁(第二章),何珍珍(第三章),孙景群、黄润恒(第四章),王昂生(第五章),沈志来、徐华英、凌砥中(第六章),陈英仪(第七章),刘锦丽、马振骅(第八章),周诗健(第九章),陈章昭(附录)。全书由黄美元和阮忠家同志总校,王昂生同志进行了组织和整理工作,周秀骥、巢纪平、陈瑞荣和赵燕曾同志参加了部分章节的校阅工作。限于我们的水平,谬误之处难免,欢迎读者批评指正。

1974年4月,北京

第二版序言*

这本书与第一版的结构和范围相同，只是为了适应十多年来的重大进展，而把原文全部重写、订正和增补了一下。本书力图把1969年底以前的所有重要研究成果作一比较全面和评述性的总结，同时包括了1970年发表的某些重要著作。

本书的重点仍然放在从水汽凝结到形成小水滴的种种微观物理过程；水滴的过冷却作用、核化作用和冻结作用；雪晶的增长和聚合；雨滴、雪花和冰雹形成的各种机制；降水元的雷达探测以及云中起电的各种过程，并以足够的云系结构和动力学背景资料来对微粒子物理学作实际的讨论。然而，在十三年以前写的那篇序言里，提到过云内和云周围的空气运动与这些微观物理过程之间存在强烈的相互作用，也提到过更深入一步地了解云动力学对整个云物理学科发展的重要性。因此笔者曾希望在云的动力学方面能投入更大的力量、取得更多的进步，并希望能出一本以云动力学为主题的专著，这两个希望都有待于实现，但是现在对于这种需要有了更进一步的认识。其理由是，虽然我们在确立控制微粒核化作用、增长和聚合的物理规律方面取得了重大进展，但由于我们对云动力学的了解是如此地肤浅，因此，把实验室可控条件下得到的结果外推到极为复杂的自然云环境中微粒子群的演变时，需要十分谨慎。在对微观物理过程从动力学角度进行概括，以及用观测、测量和预报的结果进行检验之前，要鉴别我们现在对微观物理过程了解的重要差距的确是有困难的。最近几年来，由于各种新的雷达技术（特别是多普勒雷达技术），现代化的数据处理方法以及数值模式等成果的应用，在这方面已给这个学科以新的推动。我希

* 序言略有删节。——译者注

望在未来的十年内，将取得与五十年代和六十年代在实验室中取得的可相比拟的进展，而以往那段时间取得的成果正是本书的编写基础。

B. J. 梅森

1971 年 1 月

第一版序言*

云物理学是研究有关云的形成和产生降水过程的一门学科。近十年来,这门学科发展很快,现在是气象物理学中最欣欣向荣的分支学科之一。在这短短的时期内,云物理学从少数几位科学家用有限的手段和方法从事研究,发展到需设有精密观测仪器的飞机、雷达以及大量实验室设备的集体活动。这种沿着一条宽广战线的快速发展已经产生了大量的、各式各样的文献,其结果使研究工作者要跟上形势增添愈来愈多的困难,对学生来说简直是不可能的。因此,似乎对本学科的现状作一个说明可能是有益的,虽然在云物理学处于迅速发展时期来写一本书的缺点是太显而易见了。在这本书中,我试图把最近的研究成果,包括核化作用、凝结、小滴增长、冰晶的产生和增长以及降水释放机制的各种微观物理过程,从理论上和实验上都作一比较全面的说明。书中也讨论了对基础研究有很大推动作用的人工降水试验的现况;还讨论了降水云的雷达研究以及云的起电。关于云的起电,我觉得应该把它看作云物理学中一个有机的组成部分。

虽然本书的重点是放在微观物理过程,但认识到下述一点是重要的,即微观物理过程在很大程度上受云中明显存在的大气运动的制约。这种关于云形成和增长的宏观物理特征,或更确切地称为动力学,它为制约微观物理过程的速率和持续时间的环境条件提供一个框架。例如,云滴的增长或冻结伴有大量潜热的释放,强烈地影响云团的运动,而这种最终使得云蒸发的运动能决定云的生存时间,并确定云中粒子能够达到的大小的限度。阻碍云物理学进步的原因是,我们对小至分子尺度的核化作用,大至几百或

* 序言略有删节。——译者注

几千公里尺度大范围云系动力学之间各种尺度过程的相互联系缺乏认识。

不幸的是,我们现在对大尺度云物理过程的了解很肤浅,其部分原因是因为这方面的工作没有受到应有的重视,但主要的是因为取得这种尺度空气运动的观测资料有困难。对实验室来说,其尺度太大,不好模拟;而对天气预报业务中所用的观测网来说,其尺度又太小,确定不了的缘故。因为我深信,将来的进步很大程度上取决于我们对云动力学的进一步了解,所以我希望在未来几年内,将看到在这方面能投入较多的力量。在现阶段,只把重点放在对讨论微观物理过程能提供足够的背景资料所必需的而又有牢固观测依据的那些工作上,似乎是适宜的。我希望,云的动力学最终将成为另一门专题性的学科来讨论。

正如我目前所认识到的,在试图把云物理学写得既连贯又完整时,我旨在批判地取舍,而不是包罗万象、面面俱到。因此,在某种程度上,这种论述反映了我个人的观点。当然,对于一门新的而且是迅速发展的学科来说,总是存在不同意见和解释余地的;在激烈的学术论战中要保持不偏不倚是困难的,或许是不太好的。无论如何,我尽了最大努力对这门学科作出最新的评述,并指出我们的现有知识中有哪些空白需要迫切地填补。如果它能对我同行的研究人员有些用处,如果它能把学生的兴趣吸引到广阔的领域中去,在这里可以用理论的方法对自由大气中和实验室里发生的许许多多现象作研究,那我将十分高兴。我也希望能够表达出在最近几年内,我在这个领域中工作时所感受到的那么一点愉快和令人兴奋的心情。

在编写这本书的过程中,我得到了许多人的帮助,在此向他们表示衷心的感谢。

B. J. 梅森

1957年2月

目 录

译者的话	i
第二版序言	iii
第一版序言	v
第一章 水汽凝结的核化过程	1
1.1. 均质凝结	1
1.1.1. 相变热力学	2
1.1.2. 开尔文公式的热力学推导	3
1.1.3. 与水汽处于统计平衡时的胚胎滴	5
1.1.4. 不同大小胚胎间的统计平衡	6
1.1.5. 在过饱和系统中的亚稳状态	7
1.1.6. 定常流——水滴形成的速率	9
1.1.7. 达到定常状态的时间	11
1.1.8. 理论的进一步推广	12
1.1.9. 理论和实验的比较	13
1.2. 在离子上的凝结	17
1.3. 不可溶粒子的核化	20
1.4. 可溶粒子上的凝结	24
1.5. 混合核上的凝结	29
1.6. 结束语	30
第二章 大气凝结核	31
2.1. 大气凝结核的收集、测量和识别	32
2.1.1. 对埃根核的检测和计数技术(5×10^{-7} 厘米 $< r < 0.1$ 微米)	32
2.1.2. 大核和巨核的取样和检测(0.1 微米 $< r < 10$ 微米)	39
2.2. 大气凝结核的浓度、大小和大小分布	51
2.2.1. 埃根核的浓度及其随地点、时间及气象因子的变化	52
2.2.2. 大核和巨核的浓度和谱分布	56
2.3. 大气气溶胶的化学成分	63

2.4. 自然气溶胶的产生66

2.4.1. 由燃烧和化学反应产生的核67

2.4.2. 海盐核的产生74

2.4.3. 大陆上空核的产生79

2.4.4. 核的碰并增长80

2.5. 参与云形成的核82

2.6. 气溶胶从对流层的消逸86

第三章 云雾中水滴的增长92

3.1. 云滴的大小分布92

3.1.1. 实验技术92

3.1.2. 结果97

3.1.3. 小结 110

3.2. 云的液态含水量 113

3.2.1. 方法 113

3.2.2. 结果 118

3.3. 云滴增长的理论研究 120

3.3.1. 单个云滴的凝结增长 120

3.3.2. 积云中云滴群的凝结增长 124

3.3.3. 小积云中云滴的形成 138

3.3.4. 层云中云滴的凝结增长 138

3.3.5. 过饱和度的随机起伏对云滴谱加宽的影响 141

3.3.6. 云滴的碰撞与碰并增长 143

3.3.7. 小尺度湍流对云滴间碰撞的影响 151

3.4. 结束语 152

第四章 云中冰相的生成 154

4.1. 有杂质水的过冷却 155

4.2. 过冷水的均质核化 163

4.3. 过冷水低于-40°C的可能性 171

4.4. 大气中的冰核 173

4.4.1. 实验技术 173

4.4.2. 冰核浓度与温度的关系 181

4.4.3. 冰核浓度的时间和空间变化 185

4.4.4. 冰核活化的方式 187

4.4.5. 冰核的性质和起源 192

4.5. 冰核的再生过程	204
4.5.1. 雪晶的碎裂	204
4.5.2. 冻结水滴的碎裂	205
4.6. 人造冰核	211
4.6.1. 无机化合物的成冰核化性质	211
4.6.2. 有机化合物的成冰核化性质	220
4.6.3. 核化性质和晶体结构的关系	225
4.6.4. 碘化银烟粒的产生和性质	227
第五章 雪晶的形成	235
5.1. 固态降水分类	235
5.2. 雪晶的质量、大小和下落速度	238
5.3. 雪晶的定形和照相技术	244
5.4. 自然云中冰晶的产生	246
5.4.1. 雪晶单体的形态	246
5.4.2. 冰晶聚合成雪片	254
5.5. 实验室里的冰晶增长研究	257
5.5.1. 冰晶形状随温度和过饱和度的变化	257
5.5.2. 杂质对冰晶形状的影响	272
5.5.3. 在电场里的冰晶增长	274
5.6. 冰晶形状变化的机制	276
5.7. 冰晶的表面结构	281
5.8. 冰晶的增长率	287
第六章 自然降水过程物理学	293
6.1. 降水的形式	294
6.2. 降水形成的物理过程	296
6.3. 降水云特征的观测资料	300
6.3.1. 中纬度云的观测	300
6.3.2. 热带和副热带地区云的观测	305
6.4. 层状云降水	308
6.4.1. 降水层状云的特征和结构	308
6.4.2. 层状云中降水元的增长	317
6.5. 阵雨云降水	325
6.5.1. 阵雨云的特征和结构	325
6.5.2. 云滴碰并形成的阵雨	327

6.5.3. 大滴破碎引起的雨滴增殖	336
6.5.4. 冰粒增长引起的降雨	339
6.6. 冰雹	341
6.6.1. 冰雹的产生	341
6.6.2. 冰雹的分类	342
6.6.3. 冰雹的大小和形状	343
6.6.4. 冰雹的结构	345
6.6.4.1. 冰结构的种类	345
6.6.4.2. 凝聚冰的密度、晶体结构和空气含量	346
6.6.4.3. 软雹的结构	349
6.6.4.4. 小雹丸的结构	351
6.6.4.5. 冰雹的结构	351
6.6.5. 冰雹的密度	360
6.6.6. 冰雹的空气动力学	361
6.6.7. 冰雹增长理论	362
6.6.8. 冰雹的融化	382
第七章 人工影响云和降水	385
7.1. 历史简介	385
7.2. 积状云的撒播实验	388
7.2.1. 撒播干冰的实验	388
7.2.2. 用碘化银撒播积云	392
7.2.3. 用水滴和吸湿性核撒播积云	395
7.3. 撒播层状云的实验	398
7.4. 大范围的播云作业	401
7.4.1. 效果检验方法	402
7.4.2. 用飞机撒播碘化银	403
7.4.3. 用地面燃烧炉撒播碘化银—“巨大试验Grossversuch III”计划 ...	408
7.5. 大冰雹的防止	409
7.6. 讨论	411
第八章 云和降水的雷达研究	416
8.1. 雷达基本理论	417
8.1.1. 目标物后向散射功率的计算	417
8.1.2. 雷达参数的选择	419
8.2. 气象粒子对雷达波的散射和衰减	421

8.2.1. $D \ll \lambda$ 球形粒子的散射	421
8.2.2. $D \ll \lambda$ 非球形粒子的散射	422
8.2.3. 散射理论实验验证	430
8.2.4. $D \gg \lambda/20$ 的大水成物的散射	432
8.2.5. 非降水云的散射	442
8.2.6. 雷达波通过云和降水的衰减	443
8.3. 雷达资料的显示	445
8.4. 不同云系的雷达回波	452
8.5. 雷达信号的分析	455
8.5.1. 回波强度的估算	455
8.5.2. 信号脉动和多普勒雷达	458
8.5.3. 多普勒谱和脉动强度谱	462
8.6. 来自多普勒雷达的气象信息	462
8.6.1. 由多普勒谱确定滴谱分布	462
8.6.2. 降雨和雷暴中空气运动及降水增长的测量	467
8.6.3. 水平风、风切变和辐合的测定	474
8.7. 雷达显示的降水性层状云的结构	478
8.7.1. 一般特征	478
8.7.2. 0°C 层以上的区域	479
8.7.3. 融化区	482
8.7.4. 融化带下面的区域	483
8.7.5. 水成物散射辐射的偏振	483
8.7.6. 回波强度随高度的变化	484
8.7.7. 融化带理论	485
8.7.8. 雷达高带	488
8.8. 用毫米波雷达探测非降水云	491
8.9. 雷达探测积雨云和雷暴	493
8.10. 雷达测量降雨	498
第九章 云的起电	504
9.1. 晴天的垂直电场和电流	504
9.2. 雷暴和闪电产生的地面电场	508
9.2.1. 闪电造成的电场变化	508
9.2.2. 闪电后电场的恢复——电矩的产生	515
9.3. 闪电的结构	516

9.3.1. 闪电摄影术	516
9.3.2. 闪电时的电场变化	520
9.3.3. 电击穿机制	528
9.4. 雷暴的电结构	531
9.5. 闪电和降水的相关性	536
9.6. 雷暴中电荷产生和分离的机制	539
9.6.1. 完善理论要满足的基本要求	539
9.6.2. 云起电的主要机制	540
9.6.2.1. 感应起电机机制	540
9.6.2.2. 大水滴破碎产生的起电	542
9.6.2.3. 雷暴起电的对流理论	545
9.6.2.4. 水的冻结和融化起电	545
9.6.2.5. 冰内的热电效应	550
9.6.2.6. 冰晶的碰撞和破裂起电	558
9.6.2.7. 水滴的冻结和碎裂起电以及结霜起电	561
9.6.3. 降水云中电荷和电场的产生	568
9.6.3.1. 离子选择俘获的 Wilson 机制	568
9.6.3.2. 极化电场中云粒子由水成物上弹回产生的起电	569
9.6.3.3. 在雹丸上碰撞和冻结的云滴破碎起电	574
9.7. 大气和地球间电量的输送——地球电荷的维持	576
9.7.1. 闪电放电输送的电量	576
9.7.2. 尖端放电电流输送的电量	576
9.7.3. 降水输送的电量	578
9.7.4. 地球表面的电量平衡	583

附录 A 水滴在空气中下落时的碰撞与碰并

A. 1. 碰撞效率的理论计算	585
A. 2. 电场和电荷对碰撞效率的影响	596
A. 3. 水滴碰撞和碰并的实验研究	597
A. 4. 碰并机制	603

附录 B 雨滴自由下落的物理特性

B 1. 在静止空气中水滴下落的末速度	609
B. 1.1. 末速度的计算	609
B. 1.2. 雨滴末速度的测量	612
B. 2. 大雨滴的形状和破碎	615

B. 3. 雨滴谱	619
B. 3.1. 实验技术	619
B. 3.2. 观测结果的概括	624
一些有用的物理常数	631
参考文献和著者索引	634

第一章 水汽凝结的核化过程

云是由于潮湿空气的上升以及随后的绝热膨胀冷却而形成的，而膨胀则是大气压力随高度的增加不断降低的缘故。膨胀冷却的结果，相对湿度随着升高，最后空气中的水汽达到饱和。进一步的冷却产生了过饱和水汽，而这些过剩的水汽就凝结在大量悬浮于空气中的某些微小粒子上，这样就形成了由很多小水滴组成的云。这些小水滴的增长将阻碍过饱和度的进一步增加，过饱和度一般只达到低于百分之一的峰值，然后降低。在没有杂质和离子时，凝结成水滴要求有很高的过饱和度。虽然在自然云中从来没有遇到过这种过程，但我们还是从水汽的均质核化讨论起，因为它是凝结过程中最简单的形式。而且对于一般核化问题的理论探讨来说，它可以提供最直观的说明，下面我们来讨论它的某些实例。

1.1. 均质凝结

Wilson (1897)发现，对于尽可能清除了杂质的原来饱和的空气，如果受到了足够大而迅速的膨胀，将从水汽自发形成由很小水滴组成的云。他指出，在初始温度为 20°C 时，只有当膨胀率超过 1.37 倍时才形成云，否则只能产生少数大水滴。这时瞬间过饱和度差不多达到 8 倍(800%)之多。

在没有杂质条件下，凝结相聚集物的产生只能是由于过饱和水汽分子偶然碰撞的结果。由于在水汽中有微小的温度和密度起伏，这些很小的凝聚物(或称胚胎)就不断形成或消散，只有当它们达到临界大小时，它们才能幸存下来并继续增长，否则就会蒸发消失，此临界值是由占优势的过饱和度和温度所决定。过饱和水汽是一种亚稳相，要使胚胎能增长成为易于水相发展的核，它必须达