

江苏省青蓝工程“云雾降水与气溶胶研究”创新团队项目 资助
江 苏 高 校 优 势 学 科 建 设 工 程

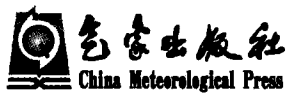
云降水物理研究

牛生杰 ◎ 著

江苏省青蓝工程“云雾降水与气溶胶研究”创新团队项目 资助
江苏高校优势学科建设工程

云降水物理研究

牛生杰 著



内容简介

本书介绍了著者有关中国云降水物理过程宏观、微观特征的研究成果。内容涉及:层状云宏微观结构;层状云和对流云降水的滴谱特征;观测和模拟的积层混合云形成过程;冰雹微物理结构、谱特征及生长条件;强对流降水宏微观结构;雷电发生频次及起电机理。这些内容有利于读者系统、深入地认识中国云降水物理过程及相应物理机制,为中国人工防雹和人工增雨等提供了科学基础。

本书适用于大气物理学、大气化学、大气环境、气候变化、天气分析和预报等专业领域,也可供相关领域的研究、教学人员和研究生参考。

图书在版编目(CIP)数据

云降水物理研究/牛生杰著. —北京:气象出版社,
2012.5

ISBN 978-7-5029-5478-9

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

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 087146 号

Yunjiangshui Wuli Yanjiu

云降水物理研究

牛生杰 著

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¹

总 编 室:010-68407112

网 址: <http://www.cma.gov.cn>

责任编辑:黄红丽

封面设计:博雅思企划

责任校对:华 鲁

印 刷:北京中新伟业印刷有限公司

开 本:787 mm×1092 mm 1/16

字 数:288 千字

版 次:2012 年 5 月第 1 版

定 价:48.00 元

邮政编码:100081

发 行 部:010-68406961

E-mail: qxcbs@cma.gov.cn

终 审:周诗健

责任技编:吴庭芳

印 张:11.25

彩 插:2

印 次:2012 年 5 月第 1 次印刷

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

云和降水是大气运动的动力过程、热力过程和微物理过程综合作用的结果,是大气运动的终极产物。我国气候受亚洲季风影响,降水时空分布极不均匀。在西北地区,干旱、冰雹等气象灾害频发,损失严重。以宁夏回族自治区南部的固原地区为例,多年平均的年降雹日数在20 d以上。1984年7月20日海原县郑旗乡发生了一次超级单体降雹过程,收集到的最大冰雹的直径达6.4 cm,降雹将房瓦砸成碎片,将树皮剥光,庄稼更是颗粒无收,令人十分痛心。宁夏南部地区还是干旱频发的地区,基本上是十年九旱。为了防灾减灾,自20世纪50年代以来,我国北方省(自治区、直辖市)相继开展了具有科学意义的人工防雹和人工增雨等科学实践,南方也有相当一部分省份开展了这项工作。为了提高人工影响天气的有效性,需要研究云和降水形成、发展的机理即云降水物理学。本书正是作者及其团队成员在该领域多年来研究成果的总结。

本书分为6章,涉及层状云宏微观结构、降水物理特征、积层混合云形成过程、冰雹云物理、强对流降水及雷暴物理机制等。

参加本研究的主要成员有:宁夏回族自治区气象局桑建人正研级高级工程师、安夏兰高级工程师;南京信息工程大学刘晓莉、李艳伟、张羽等博士,赵丽娟、周悦、岳岩裕等博士研究生,杨文霞、侯团结、樊明月、封秋娟、项磊、闵爱莲、陈倩、王慧娟、岳治国、贾星灿、赵永欣、周黎明、刘莹莹、张宇、蔡寿强等硕士。

本书素材主要来源于作者和团队成员主持完成的国家自然科学基金重点项目(编号:40537034)、面上项目(编号:49060017,40175003,40975086)、青年基金项目(编号:40805057),以及作者参与研究的国家科技部西部开发科技行动“黄河中上游人工增雨优化技术推广与示范”(编号:2001BA901A)、国家科技部科技支撑计划“人工影响天气关键技术与装备研发”(编号:2006BAC12B001)等项目。作者还获得江苏省青蓝工程“云雾降水与气溶胶研究”创新团队项目、江苏高校优势学科建设工程等资助。

作者对中国科学院大气物理研究所雷恒池研究员、南京信息工程大学倪东鸿编审的帮助,表示感谢。

因作者学识水平所限,疏漏之处在所难免,敬请读者指正。

南京信息工程大学 牛生杰

2011年12月

目 录

第 1 章 层状云宏微观结构	(1)
1.1 层状云宏观结构	(1)
1.2 层状云云滴谱	(3)
1.2.1 云滴谱的平均状况	(4)
1.2.2 高空云滴谱分布	(5)
1.2.3 云滴谱拟合	(6)
1.3 层状云含水量	(9)
1.3.1 含水量的平均状况	(9)
1.3.2 液水含量水平分布	(10)
1.3.3 液水含量垂直分布	(11)
1.3.4 液水含量跃变特征	(12)
1.4 层状云中冰雪晶	(15)
1.4.1 冰雪晶平均特征	(15)
1.4.2 冰雪晶形态随温度的分布	(16)
1.4.3 冰雪晶数浓度垂直分布	(17)
1.4.4 冰雪晶谱拟合	(18)
1.5 小结	(20)
参考文献	(21)
第 2 章 降水的滴谱特征	(22)
2.1 雨滴谱观测方法	(22)
2.2 地面雨滴谱分析	(23)
2.2.1 不同天气条件下的雨滴谱特征	(23)
2.2.2 层状云雨滴谱特征	(25)
2.2.3 对流云与层状云对比	(29)
2.3 空中雨滴谱谱型演变特征	(34)
2.3.1 空中雨滴谱随高度的分布	(35)
2.3.2 空中、地面雨滴谱对比	(36)
2.4 雨滴下落末速度	(38)
2.4.1 不同类型的雨滴下落末速度	(38)

2.4.2	空气密度对雨滴下落末速度的影响	(39)
2.4.3	湍流对雨滴下落末速度的影响	(40)
2.5	层状云催化的数值模拟	(42)
2.5.1	模式及催化方案	(42)
2.5.2	过冷水消耗与恢复过程的数值试验	(43)
2.6	小结	(49)
	参考文献	(50)
第3章	积层混合云研究	(52)
3.1	积层混合云系的观测研究	(52)
3.1.1	天气形势分析	(52)
3.1.2	形成过程	(53)
3.1.3	物理特征	(56)
3.1.4	稳定度分析	(57)
3.1.5	降水情况	(58)
3.2	层云积化型积层混合云的数值模拟	(59)
3.2.1	环境的促进作用	(59)
3.2.2	云系形成过程	(60)
3.2.3	阶梯式分布的嵌入对流群	(63)
3.2.4	平行式分布的嵌入对流群	(65)
3.3	积云并合扩展型积层混合云的数值模拟	(65)
3.3.1	环境的促进作用	(66)
3.3.2	云并合过程	(67)
3.3.3	积层混合云的发展维系过程	(74)
3.4	小结	(76)
	参考文献	(77)
第4章	冰雹微物理研究	(78)
4.1	冰雹的物理结构	(78)
4.1.1	雹胚	(78)
4.1.2	冰雹分层结构	(81)
4.2	冰雹谱	(81)
4.2.1	研究方法	(81)
4.2.2	平均谱	(83)
4.2.3	电谱演变特征	(86)
4.2.4	动能通量谱及 Z_e - E 关系	(88)
4.3	由实验结果推断冰雹生长条件	(89)
4.3.1	研究方法	(89)

4.3.2 冰雹形成及生长环境	(93)
4.3.3 冰雹生长轨迹推测	(95)
4.3.4 氡值与晶体平均长度的关系	(96)
4.4 小结	(97)
参考文献	(98)
第5章 强对流降水研究	(99)
5.1 强对流降水宏观结构	(99)
5.1.1 中尺度对流系统组织模型及灾害分析	(99)
5.1.2 强对流风暴含水量雷达反演和数值模拟	(106)
5.1.3 初始扰动对对流发展的影响	(109)
5.2 微物理过程分档处理的三维对流云数值模拟	(121)
5.2.1 强对流发展演变特征模拟	(122)
5.2.2 对流云中粒子谱演变规律	(124)
5.3 特大暴雨个例研究	(129)
5.3.1 一次特大暴雨过程的特点及成因	(129)
5.3.2 特大暴雨数值模拟	(133)
5.4 小结	(142)
参考文献	(143)
第6章 雷电发生频次及起电机理	(144)
6.1 雷电发生频次时空分布	(144)
6.1.1 雷州半岛雷暴频次变化特征	(144)
6.1.2 雷暴发生频次变化与农作物布局变化的可能相关关系	(147)
6.1.3 雷州半岛夏季闪电特征	(150)
6.1.4 雷电与强降水关系	(153)
6.2 起电机制数值模拟	(158)
6.2.1 长春地区对流云起电过程的数值模拟	(158)
6.2.2 非感应起电参数化方案的对比研究	(163)
6.3 小结	(168)
参考文献	(169)
附:作者团队在该领域发表的主要学术论文	(171)

第1章 层状云宏微观结构

中国全境年平均降水量为 630 mm 左右,人均水资源占有量不到世界平均水平的四分之一,是世界上 13 个贫水国家之一,水资源短缺已严重影响着中国部分地区经济和社会特别是农业的持续健康发展。中国北方地区干旱更为频繁,为了缓解旱情,多年来开展了从春季至夏季的人工增雨催化作业。层状云系是中国北方降水的一种主要云系,高层云、层积云和雨层云都能产生降水,其中雨层云的降水强度较大且降水时间较长。对层状云降水过程宏微观结构的观测研究可以进一步了解层状云降水的形成机制,为人工增雨作业方案的优化提供科学依据。因此,研究中国北方地区层状云的宏微观结构特征显得尤为重要。

1.1 层状云宏观结构

利用 1978—1990 年在宁夏的 38 架次人工增雨作业的云和降水资料,对层状云的宏观结构特征进行分析,飞行高度如图 1.1 所示。取样范围:高度 1 500~6 000 m,温度 $-13.5\sim 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。无层积云的高层云的云底高度范围为 1 500~4 600 m,平均高度为 3 600 m;云顶高度范围为 4 500~6 000 m,平均高度为 5 100 m;平均云厚为 1 555 m。飞行作业在 5 000~5 500 m 高空较多。

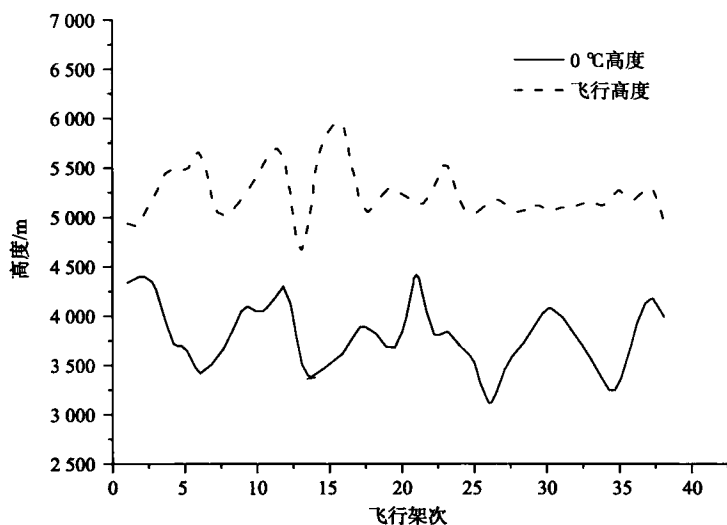


图 1.1 飞行观测高度

与无层积云的高层云对比(表 1.1)可知,有层积云的云厚为 1 000~2 000 m,平均云厚为 1 600 m,云底高度平均为 3 400 m,云顶高度平均为 5 000 m 左右。对比发现,由于层积云的

云底相对较低,而无层积云的云厚与有层积云时的云厚区别不大,所以无层积云时的高层云顶高度高于有层积云时的云顶高度。

表 1.1 有层积云的高层云与无层积云的高层云宏观特征的对比

高层云类型	平均云厚/m	平均云底高度/m	平均云顶高度/m
有层积云	1 600	3 400	5 000
无层积云	1 555	3 600	5 100

吴兑(1987)对宁夏地区 1978—1982 年夏季 57 架次飞机观测到的 36 次降水天气中蔽光高层云的宏观结构进行了统计(表 1.2 和表 1.3)。可以看出,宁夏地区降水性层状云云底较低,云层较厚且雨强较小;云底温度 5—8 月逐月增高,而云顶温度则逐月降低,仲夏比初夏的云层深厚,且云中含水量也较多。云顶温度在 $-15\sim-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内的出现频数平均达到 64.9%。

表 1.2 蔽光高层云飞机观测结果

月份	个例	云底离地高度/m	云顶离地高度/m	云厚/m	雨强/ ($\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$)	降水持续时间/h	观测次数	平均含水量/ ($\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	最大含水量/ ($\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)
5—6 月	30	1 800	5 020	3 220	0.3	8	500	0.14	2.5
7—8 月	27	1 870	6 320	4 450	1.2	15	658	0.30	3.9

表 1.3 蔽光高层云的云底和云顶不同温度的百分率(%)

月份	个例	云底温度/ $^{\circ}\text{C}$				云顶温度/ $^{\circ}\text{C}$			
		10~15	5~10	0~5	-5~0	<-25	-25~-15	-15~-5	>-5
5 月	17	11.8	29.4	41.2	11.8	0	29.4	70.0	0
6 月	13	15.4	23.1	30.8	23.1	7.7	7.7	69.2	15.4
7 月	24	25.0	50.0	25.0	0	4.2	29.2	58.3	8.3
8 月	3	0	100.0	0	0	0	33.3	66.7	0
	平均	17.5	40.4	29.8	8.8	3.5	24.6	64.9	7.0

段英等(1998)对河北省 1990—1991 年春、夏季 49 次飞机催化作业中层状云的宏观特征进行了统计(表 1.4)。发现,作业主体云为高层云(As)一层积云(Sc)或高层云—雨层云(Ns)、云垂直厚度(不包括两层云间的无云区厚度)大于 2 000 m、云底高小于 2 000 m、过冷层厚大于 1 500 m、催化层高为 4 000~5 500 m、催化温度为 $-13\sim-6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时人工催化效果较好。同时由表 1.4 还可知,上层为 As、下层为 Sc 最多(有时 2 层云中不存在无云区),这表明 Sc 和 As 互相配置的层状云系为河北省人工催化的主要目标云。此外,当系统云减弱或消散时仅有 1 层 Sc,厚度一般不超过 2 000 m,云中无过冷却水,不宜进行人工催化。同时,云温度随季节变化较大,云中温度与天气系统、云类型及云性质有密切关系。

刘健等(2005)通过分析 2001—2002 年 5—7 月吉林省层状云的观测资料发现,降水性层状云主要分为 3 种类型:Ns 云型;As op-Sc op 云型;As tra 云型。一般情况下,1 000 m 左右到低于 3 000 m 为层积云,3 000 m 左右到低于 6 000 m 为 As op 云;而 Ns 云底高度一般在 1 000 m 左右,云顶一般低于 6 000 m。Ns 云层最厚,As op-Sc op 云层中间有夹层,为分层结构;As tra 云层一般发生在系统的前部或尾部,因此该云层较薄;其中,Sc op 是蔽光层积云,As tra 是透光高层云。

表 1.4 1990—1991 年河北省飞机播云的物理参数

催化日期	主要云类型	云底高度/ 云顶高度/		云厚/ m	云底温度/ 云顶温度/		催化层状况		
		m	m		℃	℃	高度/m	温度/℃	位置
1990-04-22	As, Sc	1 500	6 000	4 500	-1	-20	4 500	-9	云中
1990-04-29	As op	3 500	5 500	2 000	-8	-15	5 000	-12	云顶
1990-04-30	As, Ns	1 500	4 500	3 000	0	-10	4 000	-8	云顶
1990-05-12	As op	3 900	5 100	1 200	-5	-15	4 600~5 100	<-10	云顶
1990-05-16	Cs, As, Ns	700	7 000	6 300	10	<-15	5 000	-10	云中
1990-05-16	Cs, As, Ns	200	7 000	6 800	11	<-10	4 900	-10	云中
1990-05-16	As, Ns	1 000	6 000	5 000	8	<-13	5 000	-10	云中
1990-05-16	As, Sc	1 700	4 500	2 000	3	-12	4 300	-6	云中
1990-05-19	As op	3 000	4 800	1 800	-4	-13	4 000	-7	云顶
1990-05-31	As, Sc	1 500	4 100	2 600	2	-14	4 000	7	云顶
1990-06-06	As, Sc	1 100	6 000	4 900	14	-18	4 000~5 000	-12	云中
1990-06-17	As	4 300	6 000	1 700	-5	-15	5 500	-12	云中
1990-06-24	As, Sc	1 300	5 000	3 700	13	-12	5 000	-12	云顶
1990-07-01	As, Sc	1 000	5 000	4 000	13	-10	4 500	-8	云顶
1990-07-06	As, Sc, Fc	1 000	7 000	6 000	15	<-15	4 800	-8	云中
1990-07-13	As, Ns	1 000	4 200	3 200	10	-6	4 200	6	云顶
1990-07-18	As, Sc	1 500	5 000	2 500	7	-10	4 200	-6	云中
1991-04-06	As, Sc	800	5 000	2 800	7	-14.5	5 000	-14.5	云顶
1991-04-07	As, Sc	900	5 000	4 100	6.3	-13.5	3 300~4 000	-9~-6.9	云中
1991-04-11	As, Sc	1 700	4 800	3 100	1.2	-6	4 800	-6	云顶
1991-04-11	As, Sc	1 400	5 000	3 600	1.4	-7.2	4 500	-5.5	云顶
1991-04-16	As, Sc	1 500	4 600	3 100	2	-5	4 600	-5	云顶
1991-04-17	As, Ns, Fn	1 700	5 000	3 300	0	-10	4 000	-6	云中
1991-05-05	As, Sc	2 000	4 500	2 500	-7	-15	4 000	-11	云顶
1991-05-05	As, Sc, Fc	1 600	5 000	3 400	-6	<-15	3 250	-12	云中
1991-05-22	As, Sc	700	4 300	3 000	6	-8	4 300	-8	云顶
1991-05-24	As, Sc	400	4 100	3 300	8.5	-6.5	4 000	-6.5	云顶
1991-05-25	As, Sc, Fc	800	5 000	4 200		-9	4 450	-6	云中
1991-07-18	As, Sc	850	5 000	3 750	10.5	-10	4 400	-8	云顶
1991-07-27	As, Sc	800	5 000	3 800	11.9	-13	4 500	-10	云顶

注: As 为高层云, As op 为蔽光高层云, Cs 为卷层云, Fc 为碎积云, Fn 为碎雨云, Ns 为雨层云, Sc 为层积云。除 1990 年 4 月 29 日, 5 月 12, 16, 19 日和 6 月 17 日无催化效果外, 其余均有催化效果。

1.2 层状云云滴谱

自 20 世纪 50 年代末以来, 中国就利用飞机和地面高山云雾站, 收集有关云微结构及降水微物理结构的资料。采用云滴碰撞采样器测量云滴谱, 滤纸色斑法观测云中液态水含量和雨滴数浓度及其粒子尺度谱, 铝箔碰撞采样器观测云中冰、雪晶。碰撞采样器一直延续使用至

20 世纪 80 年代。20 世纪 80 年代初引进了美国 PMS 粒子测量系统。PMS 采用不同探头测量不同尺度范围的粒子,构成除雪团、冰雹以外几乎全程覆盖。测量系统主要包括一个标准的一维前向散射滴谱仪(FSSP-100 探头)、两个标准二维云粒子和二维降水粒子谱仪(OAP-2D-C 和 OAP-2D-P),总的测量范围为 $2\sim 6\,400\ \mu\text{m}$ 。其中 FSSP-100 适用于测量小粒子($2\sim 47\ \mu\text{m}$)的数浓度谱,并计算相应的云水含量。2D-C($25\sim 800\ \mu\text{m}$)和 2D-P($200\sim 6\,400\ \mu\text{m}$)探头主要是测量大的云滴、雨滴和冰、雪晶粒子,不仅可以给出所探测到的粒子数浓度,还可以给出所探测到的雨滴、冰晶以及雪花粒子的图像资料。3 个云粒子探头分别挂在飞机两机翼下方。

其他常规仪器有:TPM-1 型云滴谱仪、TPZ-2 型含水量仪(仿苏 A-27 型机载液态含水量仪)和铝箔取样器等。云滴谱仪取样器安装在伊尔-12 型、伊尔-14 型飞机上,使用熏碘淀粉胶片作为取样片基,取样体积为 $300\ \text{cm}^3$ (真空速 $600\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,暴露时间 $0.005\ \text{s}$)至 $1\,600\ \text{cm}^3$ (真空速 $80\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,暴露时间 $0.02\ \text{s}$),代表了飞行路径上 $0.3\sim 1.6\ \text{m}$ 范围内的平均情况。云滴直径范围是 $4\sim 100\ \mu\text{m}$,对样片显微照相后采用归入法读数,云滴谱是按 $4\ \mu\text{m}$ 等间隔进行处理的。仿苏 A-27 型机载液态含水量仪采用滤纸法取样。取样体积为 $0.005\sim 0.080\ \text{m}^3$,测得的含水量代表 $300\sim 400\ \text{m}$ 水平范围内的平均状况。

1.2.1 云滴谱的平均状况

研究层状云的微观特征首先应分析滴谱的特征。云滴的大小、数浓度是云雾物理性质的一个重要方面。利用宁夏 1988—1989 年 5—7 月人工增雨作业期间使用 TPM-1 型云滴谱仪观测到的 276 份云滴谱资料,分析了低槽冷锋、青海低涡和西风小槽 3 种天气条件下高层云云滴谱的平均特征(表 1.5)。可以看出,在三类天气条件下,高层云云滴数浓度基本上是 10^2 量级。其中,青海低涡天气高层云云滴数浓度最大,平均为 $442.3\ \text{cm}^{-3}$,云滴平均直径较小,为 $3.8\ \mu\text{m}$ 。西风小槽天气云滴平均数浓度最小,仅为 $55.3\ \text{cm}^{-3}$,平均直径为 $4.5\ \mu\text{m}$;低槽冷锋天气云滴平均数浓度为 $240.6\ \text{cm}^{-3}$,平均直径为 $4.4\ \mu\text{m}$ 。三类天气下都是冷层中的云滴平均数浓度大于暖层中的,平均直径则是冷层中的低于暖层中的(西风小槽型除外)。由表 1.5 可看出,直径大于 $24\ \mu\text{m}$ 的云滴平均数浓度为 $2.8\sim 4.1\ \text{cm}^{-3}$,这说明可为冰晶繁生提供一定的大滴。与吉林的平均云滴数浓度($142\sim 207\ \text{cm}^{-3}$)、平均云滴直径($11.7\ \mu\text{m}$),以及内蒙古的平

表 1.5 高层云云滴谱平均特征

天气系统	层次	数浓度/ cm^{-3}	数浓度/ cm^{-3} ($D>24\ \mu\text{m}$)	数浓度/ cm^{-3} ($D>40\ \mu\text{m}$)	平均直径/ μm	平均立方根 直径/ μm
低槽冷锋型	暖层($t\geq 0\ ^\circ\text{C}$)	111.1	4.2	2	5	10.8
	冷层($t< 0\ ^\circ\text{C}$)	253.1	2.6	1.2	4.4	4.3
	平均	240.6	2.8	1.3	4.4	4.9
青海低涡型	暖层($t\geq 0\ ^\circ\text{C}$)	352.9	6.7	0	4.3	9.1
	冷层($t< 0\ ^\circ\text{C}$)	453.7	3.8	1.4	3.8	8.7
	平均	442.3	4.1	1.2	3.8	8.7
西风小槽型	暖层($t\geq 0\ ^\circ\text{C}$)	45.1	3	4.2	4.2	10.7
	冷层($t< 0\ ^\circ\text{C}$)	56.2	2.7	2.1	4.5	12.1
	平均	55.3	2.8	2.3	4.5	12.0

均云滴数浓度(116.3 cm^{-3})、平均云滴直径($12.7 \mu\text{m}$)(汪学林和金德镇,1987)相比,宁夏地区层状云云滴数浓度(239.2 cm^{-3})较高,平均云滴直径($4.3 \mu\text{m}$)较小,这说明层状云系处于初生阶段,催化潜力较大。

进一步利用1978—1990年宁夏地区33架次飞行所取得的541份云滴谱资料,统计分析了无层积云的高层云冷层和暖层的云滴谱平均特征(表1.6)。可以看出,无论在冷层还是暖层,无层积云的高层云云滴数浓度基本上是 10^2 量级。其中暖层云的云滴数浓度平均为 319.7 cm^{-3} ,小于冷层云的云滴数浓度(435.9 cm^{-3})。而暖层云的云滴平均直径($6.8 \mu\text{m}$)大于冷层云的云滴平均直径($4.5 \mu\text{m}$)。综合541份滴谱资料可知,冷层中的云滴平均数浓度大于暖层中的,而冷层中的云滴平均直径则低于暖层中的,这与使用1988—1989年飞机观测资料的分析结果基本一致,但两层中的云滴数浓度和平均直径都明显大于1988—1989年的观测结果。

此外,观测发现有层积云的云滴平均数浓度为 546.37 cm^{-3} ,数浓度较高,说明层积云中主要是一些直径较小的云滴,不考虑大滴的影响,有层积云的云催化潜力比无层积云的云催化潜力略大。

表1.6 无层积云的高层云的云滴谱平均特征

层次	取样温度/ ℃	观测 次数	数浓度/ cm^{-3}	数浓度/ cm^{-3} ($D > 24 \mu\text{m}$)	数浓度/ cm^{-3} ($D > 40 \mu\text{m}$)	$D_1/\mu\text{m}$	$D_2/\mu\text{m}$	$D_3/\mu\text{m}$
暖层($t > 0^\circ\text{C}$)	0~12.2	55	319.7	9.9	7.7	6.8	14.5	28.4
冷层($t < 0^\circ\text{C}$)	-12.1~0	486	435.9	15.9	0.2	4.5	8.3	15.6
合计/平均	-12.1~12.2	541	424.1	15.3	0.96	4.7	8.9	16.9

注: D_1 表示云滴的平均直径, D_2 表示云滴的平均立方根直径, D_3 表示云滴的有效直径。

1.2.2 高空云滴谱分布

研究云中粒子尺度谱的变化特征对认识云微物理机制有着重要意义。云中各类粒子群的形成机制各不相同,但其粒子数密度按尺度的分配特征(粒子谱)常具有相似的形式。层状云的云粒子谱型主要有单峰型、负指数型和双峰型,有时也会出现多峰型。云系结构的不同使得云滴在各高度层上表现出不同谱型,同高度上的谱型较相似(Kenneth,1984)。

图1.2给出了1978—1990年宁夏地区5—9月飞机观测得到的不同高度高层云的平均云滴谱特征(滴谱资料是按 $0\sim 60 \mu\text{m}$ 每隔 $4 \mu\text{m}$ 取一档, $60\sim 100 \mu\text{m}$ 每隔 $20 \mu\text{m}$ 取一档,一共取17档)。各高度上的云中粒子谱存在差异,但谱型非常相似,虽有起伏波动,但大多数表现为随粒子直径的增大,数密度单调下降。云滴数密度基本集中在小于 $40 \mu\text{m}$ 的滴谱区间,小粒子数密度大。 6350 m 的高空基本以小滴为主,谱宽较窄,这是由于该高度水汽含量较少,过冷水也少,小滴数目很多,小滴通过凝结增长和碰并过程增长的概率小且较困难,增长缓慢,且受飞行高度限制,该高度所得测值数据也较少; 5500 m 高度谱型分布较均匀; 4500 m 高度数密度的量级相差较小,大滴相对较多,有利于碰并增长,云层发展旺盛; 3500 m 高度在大滴处有较大起伏,但出现的频次较少; 2500 m 高度分布基本平缓;而 1650 m 高度也以小滴为主,其原因可能是由于该高度温度较高,下落过程中大滴蒸发、破碎,从而在此高度云滴谱集中于小滴端。

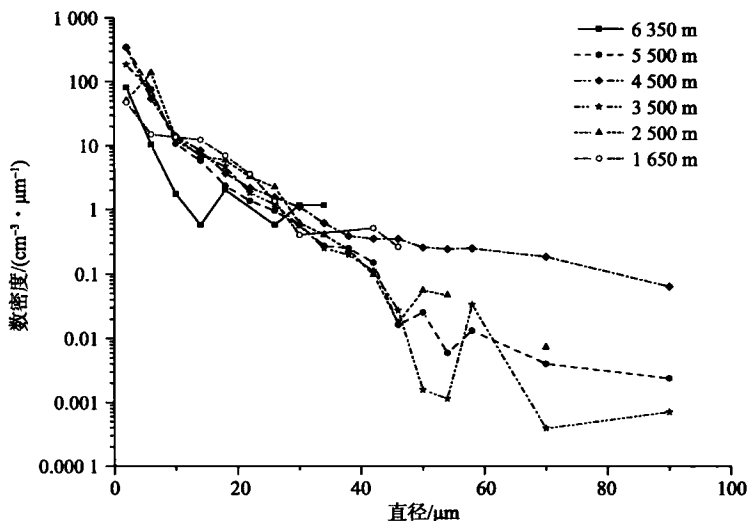


图 1.2 不同高度云滴谱的分布

2004 年在长春利用 PMS 探测系统 FSSP-100 探头对云滴进行探测。从此次降水性层状云在 5 200, 4 650, 4 000 m 高度处的粒子谱分布(图 1.3)可以看出, 云滴谱呈单峰型, 峰值位于 $6.5 \mu\text{m}$ 处, 在小云滴端($2 \sim 27 \mu\text{m}$)粒子数密度随高度降低而有所升高, 这可能是由于 0°C 层高度以上, 下层供应的水汽较多, 凝结形成了较小的云滴, 导致粒子数密度增大。

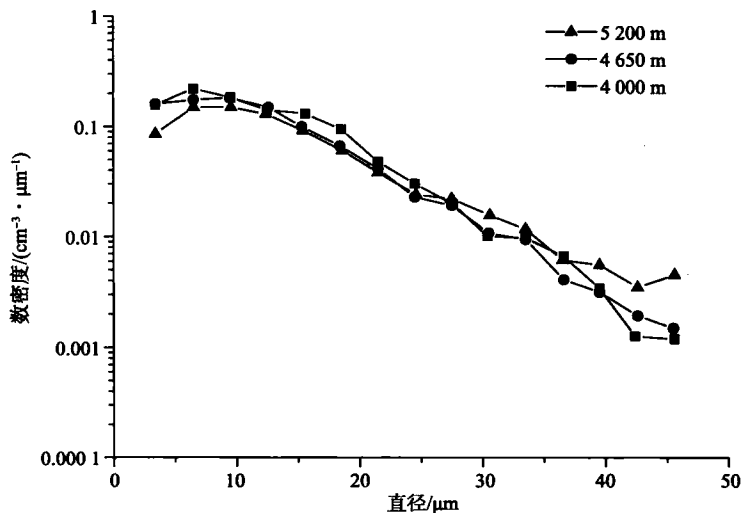


图 1.3 2004 年 7 月 5 日冷云区内不同高度处的 100 m 厚度平均粒子谱分布

1.2.3 云滴谱拟合

1988—1989 年 5—7 月人工增雨作业期间, 利用 TPZ-2 型含水量仪、铝箔取样器和 TPM-1 型云滴谱仪对 18 次天气过程进行观测。图 1.4 给出了三类主要降水天气条件下高层云的平均云滴谱分布。低槽冷锋天气高层云滴谱在第七格($24 \sim 28 \mu\text{m}$)出现了第二峰值。青海低涡天气高层云平均云滴谱呈单调下降型, 平均数浓度为 4.1 cm^{-3} , 直径大于 $24 \mu\text{m}$ 的云滴相对

较多。低槽冷锋天气和西风小槽天气平均数浓度为 2.8 cm^{-3} ，高层云滴谱直径大于 $24\text{ }\mu\text{m}$ 的云滴较少。对低槽冷锋型天气来说，不论是冷层还是暖层，其平均滴谱都存在着数浓度的第二极值，暖层中大滴较冷层中多。对青海低涡型天气而言，高层云冷层中的谱宽较暖层中的宽，分别为 $48\text{ }\mu\text{m}$ 和 $36\text{ }\mu\text{m}$ 。对西风小槽型天气来说，冷层中平均云滴直径($4.5\text{ }\mu\text{m}$)大于暖层中的平均云滴直径($4.2\text{ }\mu\text{m}$)。

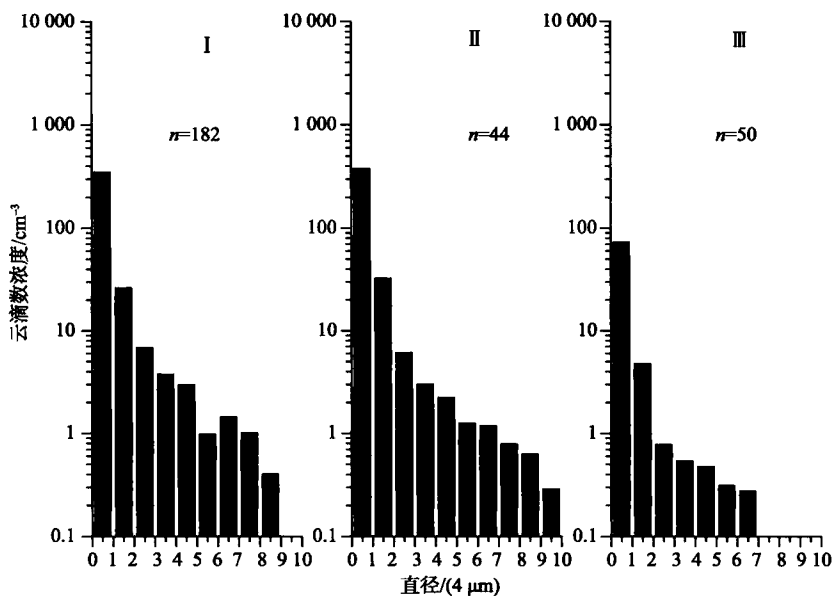


图 1.4 三类天气条件下高层云平均谱(n 为样本数)
I: 低槽冷锋型, II: 青海低涡型, III: 西风小槽型

采用常用的云滴谱分布公式 $N(r)=cr^2\exp(-br)$ ，其中 c, b 分别为拟合系数， r 为粒子半径。对低槽冷锋型、青海低涡型和西风小槽型三类降水天气下，高层云平均谱及其冷层、暖层的平均谱进行了拟合，结果见表 1.7。

表 1.7 云滴谱拟合结果

	低槽冷锋型			青海低涡型			西风小槽型		
	冷层	暖层	整层	冷层	暖层	整层	冷层	暖层	整层
c	15.996	5.298	14.706	12.313	20.018	10.555	1.313	1.6	0.898
b	0.598	0.492	0.571	0.541	0.556	0.524	0.462	0.501	0.427

国内外常用的小云滴谱分布是赫尔吉安—马逊分布(K-M 分布)，即 $N(r)=cr^2\exp(-br)$ ；雨滴谱是 M-P 分布，即 $N(r)=N_0\exp(-br)$ 。从上述资料分析得知，可用同一种谱分布形式 $N=AN_0\exp(-aD+bD^2-cD^3)$ 来表示云中水凝物粒子谱。其中 N_0 为拟合参数； A 是与总数浓度有关的系数，由经验确定，可取 10^0 或 10^{-2} ； a, b 和 c 是与谱有关的系数，由回归拟合得到； D 为水滴直径。对于小云滴谱， $c=0$ ；对于雨滴谱， $b=c=0$ 。利用不同地区夏季观测到的滴谱资料计算平均谱，表 1.8 给出了观测资料，其中大云滴是在新安江流域上空用飞机穿云观测到的。云中水凝物粒子谱是用同一个表达式表示小云滴、大云滴和雨滴，即分为三段。实际

上在数浓度分布上差 10~11 个数量级,在尺度分布上相差 3~4 个量级,很难找到一个方程可统一表示 3 种粒子谱,这种分段表示是合理的。由表 1.9 可以看出,在水凝物粒子谱分布中,对于雨滴部分来说, $b=0, c=0, A=10^0=1$,因此,在拟合雨滴谱部分时,水凝物粒子谱函数可简化成 $N=N_0 \exp(-aD)$,即 M-P 分布;对于大云滴谱部分,函数形式为 $N=N_0 \exp(-aD+bD^2-cD^3)$;对于小云滴谱部分, $c=0$,在拟合滴谱时水凝物粒子谱函数可以简化为 $N=AN_0 \exp(-aD+bD^2)$ 。

表 1.8 观测资料

云状	小云滴			大云滴			雨滴		
	观测次数	观测地点	观测时间	观测次数	观测地点	观测时间	观测次数	观测地点	观测时间
Sc	13	泰山玉皇顶	1963 年	82	新安江上空	1979-06-07	8	泰山玉皇顶	1962-07
As	97	泰山玉皇顶	1963 年	47	新安江上空	1979-06-07— 1980-06-07	38	泰山玉皇顶	1962-08

表 1.9 降水性层状云水凝物粒子谱参量及系数

	Sc			As		
	小云滴/ μm ($2 < D < 40$)	大云滴/ μm ($40 < D < 600$)	雨滴/ μm ($D > 600$)	小云滴/ μm ($2 < D < 40$)	大云滴/ μm ($40 < D < 400$)	雨滴/ μm ($D > 400$)
平均直径/ μm	14.6	154	905	14.5	148	714
平均立方根直径/ μm	16.6	261	1 036	15.7	274	966
含水量/($\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)	0.4	0.072	0.056	1.8	0.3	0.25
云滴总数浓度/ m^{-3}	1.68×10^8	7 736	96	8.64×10^8	14 339	522
a	-0.405	0.013 75	0.002 35	-0.385	0.011 5	0.002 5
b	-0.03	0.000 295	0	-0.028 6	1.53×10^{-4}	0
c	0	2.42×10^{-6}	0	0	6.9×10^{-7}	0
A	0.01	1	1	0.01	1	1

云中粒子尺度谱的参数化拟合可分为负指数函数、二阶 Γ 函数、多阶 Γ 函数和负幂函数等多种函数。利用赫尔吉安—马逊分布即二阶 Γ 函数拟合云滴的分布,拟合结果与实测资料有较大的偏差。因此,对 2004 年 7 月 5 日吉林省一次热带气旋影响下的降水性层状云冷层 5 200, 4 650, 4 000 m 高度处的 FSSP-100 资料的粒子谱做 K-M 分布和多阶 Γ 分布拟合(图 1.5)。表 1.10 给出了不同高度上决定系数 R^2 最大时得到的最佳拟合参数 N_0, N, λ , 同时给出拟合得到的粒子谱计算值与实测值的均方根误差 $RMSE$ ($RMSE$ 表示拟合值和实测值偏离的大小)。从云滴谱的两种谱分布拟合的曲线比较来看,两种拟合曲线都比较接近于实际谱分布。但具体而言,在拟合云滴谱时用多阶 Γ 函数分布比用 K-M 分布拟合更接近实际谱型,在 $D > 24.5 \mu\text{m}$ 段,二阶 Γ 函数分布拟合谱偏离实测值并向下弯曲,拟合值低于实测值,多阶 Γ 函数分布拟合的谱分布明显优于 K-M 分布,与真实谱型较为接近,拟合值和观测值的相关系数达 0.99。

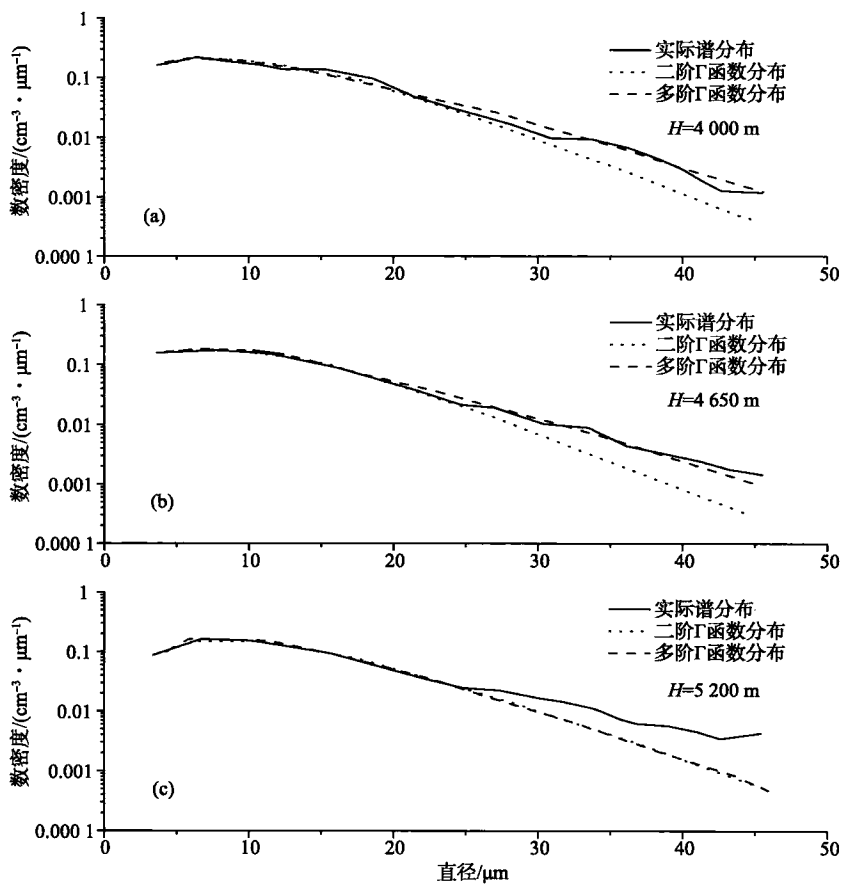


图 1.5 不同高度处云滴谱和拟合谱
(a)4 000 m;(b)4 650 m;(c)5 200 m

表 1.10 K-M 分布和多阶 Γ 分布各参数的拟合结果

高度/m	二阶 Γ 函数分布				多阶 Γ 函数分布				
	N_0	λ	R^2	RMSE	N_0	N	δ	R^2	RMSE
4 000	0.029	0.265 1	0.97	0.000 19	0.058 6	1.38	0.002 0	0.99	0.000 9
4 650	0.269	0.272 3	0.98	0.000 11	0.055 7	1.36	0.002 0	0.99	0.000 4
5 200	0.018	0.243 3	0.99	0.000 20	0.016 6	2.05	0.002 5	0.99	0.000 2

注： N_0, N, λ, δ 均为拟合参数, R^2 是决定系数, RMSE 是拟合后的均方根误差。

1.3 层状云含水量

1.3.1 含水量的平均状况

1988—1989 年 5—7 月人工增雨作业期间,利用 TPZ-2 型含水量仪、铝箔取样器和 TPM-1 型云滴谱仪对 18 次天气过程中的 408 份含水量资料进行统计分析。

表 1.11 为三类天气条件下高层云含水量的平均情况。可以看出,低槽冷锋天气高层云含水量最大,平均为 $0.11 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$;青海低涡天气高层云含水量次之,平均为 $0.08 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$;西风小槽天气高层云含水量最小,平均为 $0.05 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。暖层中的含水量大于冷层中的含水量。

表 1.11 三类天气条件下降水性高层云平均含水量(单位: $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)

天气系统	冷层含水量	暖层液含水量	整块云
低槽冷锋型	0.11	0.16	0.11
青海低涡型	0.06	0.10	0.08
西风小槽型	0.05	0.07	0.05

1.3.2 液水含量水平分布

观测资料表明:层状云中含水量的水平分布也是不均匀的。图 1.6 中给出了 1988 年 7 月 6 日 20:37—21:10BT(北京时间)的观测结果。即使是同一高度,含水量的起伏也很大。在 4.34 km 高度上所取 4 个样本,含水量最小为 $0.2 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$,最大为 $1.11 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$,是最小含水量的 5.55 倍。

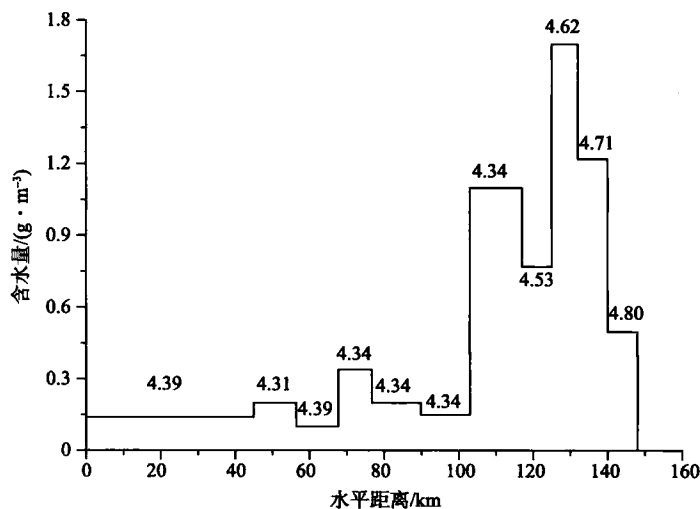


图 1.6 含水量水平不均匀分布的个例

(图中数字代表取样高度,单位:km)

综合观测资料可以发现,在宁夏地区层状云中含水量的水平分布是不均匀的。图 1.7 为 1979 年 7 月 1 日 07:42—08:33BT 的观测个例。可以看出,在 5100 m 高度所取的 3 个样本中,含水量最大值为 $0.489 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$,最小值为 $0.11 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$;5150 m 高度所取的 5 个样本中,含水量最大值为 $0.092 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$,最小值为 $0.04 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$;5200 m 高度所取的 4 个样本中,含水量最大值为 $0.37 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$,最小值为 $0.0049 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。上述分析表明,即便是在同一云层同一高度,含水量的分布也是不均匀、有起伏的。