

层状云宏微观物理结构分析与 人工影响降水研究

谢 璞 张 蓓 杨道侠 等编著
魏 强 李宏宇 郭恩铭

气象出版社

层状云宏微观物理结构分析与 人工影响降水研究

谢 璞 张 蔷 杨道侠 等编著
魏 强 李宏宇 郭恩铭

气象出版社

内容提要

本书对北京地区(含临近本地区的省(市))层状云宏微观物理结构进行了分析,介绍了北京地区多年人工影响降水的试验效果,以及近年来开展的地基人工降水、GPS探测资料的应用和2008年北京奥运会将进行的人工消雨试验。书中还介绍了人工影响层状云降水数值模拟和人工消雨的研究成果,以便为充分利用越过北京地区上空的云水资源提供科学依据。

本书可供防灾、减灾人员、人工影响天气工作者和科研工作者参考。

图书在版编目(CIP)数据

层状云宏微观物理结构分析与人工影响降水研究/谢璞等编著.

—北京:气象出版社,2005.9

ISBN 7-5029-4021-9

I. 层… II. 谢… III. ①层云-结构分析②人工降水-研究
IV. ①P426.5②P48

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 108061 号

层状云宏微观物理结构分析与人工影响降水研究

谢 璞 张 蔷 杨道侠 等编著
魏 强 李宏宇 郭恩铭

责任编辑:李太宇 章澄昌 终审:汪勤模

封面设计:安红霞

* * *

气象出版社出版

http://cmp.cma.gov.cn E-mail: qxcbs@263.net
(北京海淀区中关村南大街 46 号 邮编:100081 电话:62176428)

北京市北中印刷厂印刷

气象出版社发行

开本:850×1168 1/32 印张:5.0 字数:140 千字

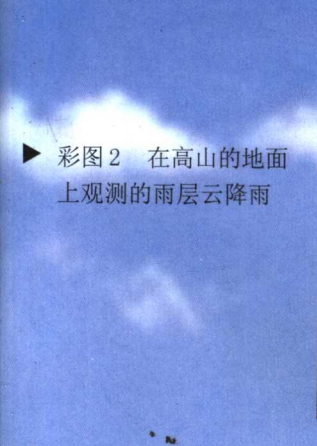
2005 年 9 月第一版 2005 年 9 月第一次印刷

印数:1~800 册 定价:15.00 元

ISBN 7-5029-4021-9/P·1443



◀ 彩图1 飞机上观测的层积云顶部和高层云底



▶ 彩图2 在高山的地面上观测的雨层云降雨



◀ 彩图3 安-26 云、降水宏微观探测和作业专用飞机

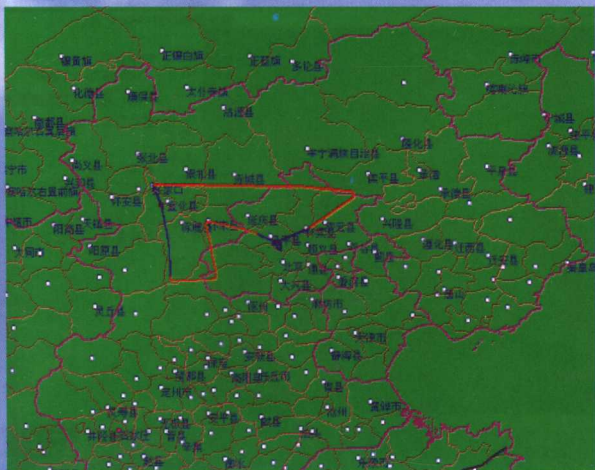
► 彩图4 机载PMS粒子测量系统探头



◀ 彩图5 夏延-III A型人工降水和探测专用飞机

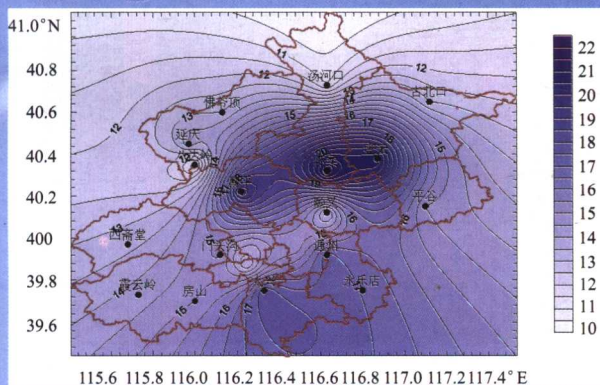
► 彩图6 2005年4月8日10:09~12:03第一次飞行作业航迹图



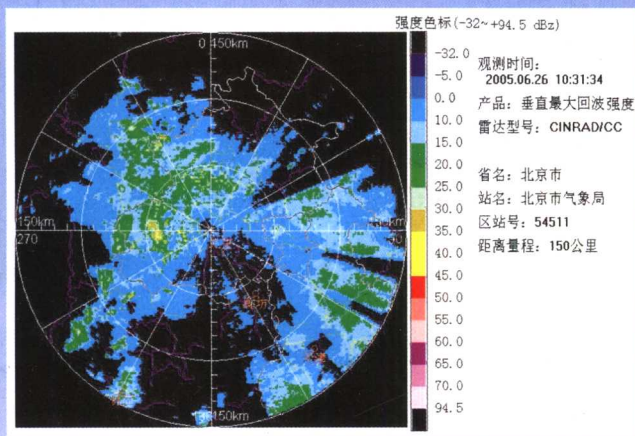


彩图7 2005年4月
8日15:00~16:43第
二次飞行作业航迹图

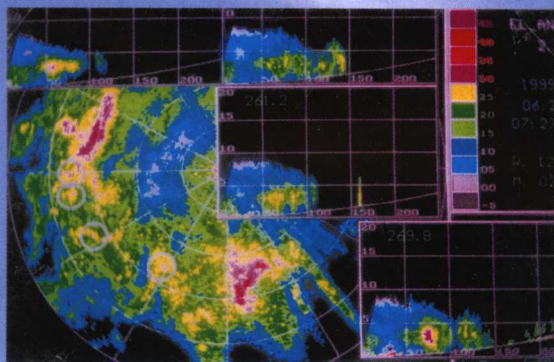
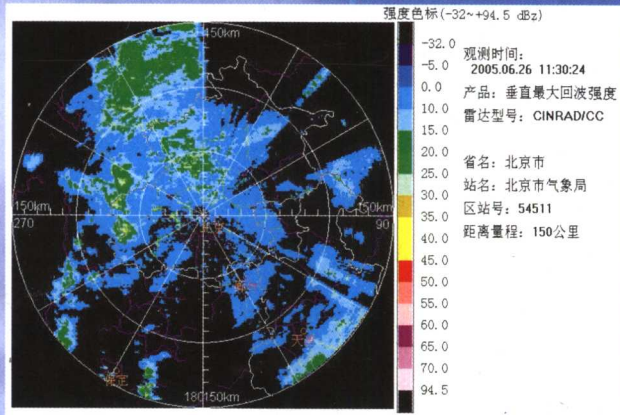
彩图8 2005年4月
8日05时~09时累计
24小时北京地区降
水量(单位: mm)
分布



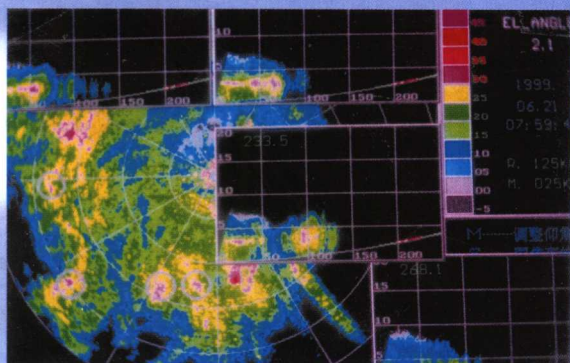
彩图9 2005年
6月26日10:31
最大回波强度



► 彩图 10 2005 年 6 月 26 日 11:30 最大回波强度



彩图 11 1999 年 6 月 21 日 07:27 飞机在过冷层状云中播撒 AgI 烟剂前回波状况。回波强度 (红色 30 dBz 是自然降水, 黄色 25 dBz 未产生降水)。



彩图12 飞机在层状云中播撒AgI后20~32 min, 07:59黄色(25 dBz)回波已演变成红色(30 dBz)出现降水。由此可看出人工影响后降水的效果。

前言

我国国民经济正在迅速发展,水资源的合理利用和开发显得日益突出。

北京地区是我国水资源短缺的区域之一。人均占有水量约 285 m^3 , 是全国人均占有量 2670 m^3 的 10.7%。北京地区年均降水量 626 mm。全年降水量主要集中在夏季(6~8月), 占全年降水量的 70%~76% 以上, 春、秋、冬季比较干旱少雨。

近 20 年来, 在全球变暖背景下, 北京地区年平均气温明显升高, 年降水量减少, 且夏季暴雨的中心南移, 致使密云、官厅两大水库蓄水量连续偏少。随着现代化建设发展, 城市供水问题也很突出, 需要采用多种途径解决供水问题。2003 年以来在北京市政府的支持下, 在市发委和财政局的资金保证下, 启动了《密云、官厅水库汇水区人工增雨》应急方案用以缓解缺水问题。

为了充分利用越过北京地区上空的云水资源, 北京市气象局、北京市人工影响天气办公室与各科研、院校等单位, 于 1958~2005 年先后开展了人工降水试验, 并取得了增加雨、雪的效果。特别是近年来实施的人工增雨作业, 对于缓解北京地区水资源短缺问题做出了贡献。在人工增雨作业的同时, 也开展了云宏微观物理结构探测、人工影响增雨技术和效果检验等研究工作。

本书介绍了层状云宏微观物理结构、飞机人工降水试验、催化技术、地基人工增雨、效果评估、数值模拟等研究成果, 还介绍了人工消云、雨和减少降雨试验等问题。

书中各章节由谢璞、张蕾、杨道侠、魏强、李宏宇、郭恩铭、张朝林、董鹏捷、秦长学、韩光、李睿劼、李书严、刘丰、宛霞等编写。

2 层状云宏微观物理结构分析与人工影响降水研究

本书得到北京市科学技术委员会项目“综合人工增雨系统示范工程”(H010810290119)、“奥运期间人工防雹、消雨作业试验研究”(H020620250190)及国家科学技术委员会项目“人工增雨技术研究及示范”(2001BA610A-06-03)支持;在编写过程中,吴正华先生提出了宝贵意见,尤翠敏在编写工作中给予了大力帮助,在此致以谢意。

本书可供人工降水作业时应用和参考。书中如有不当之处,请予指正。

编著者

2005年8月

目 录

前言

第一章 层状云的温度分布和宏微观物理结构特征	(1)
1.1 层状云的云顶、云底高度和厚度分析	(1)
1.2 0℃层的高度和云顶温度分析	(2)
1.3 层状云中云水的相态分布	(3)
1.4 层状云中的滴谱、含水量和冰晶的分布	(4)
1.5 机载 PMS 粒子测量系统探测云微物理结构	(12)
1.6 单、双频地基 GPS 遥测大气水汽	(32)
第二章 人工影响降水的催化物质性能	(36)
2.1 干冰(CO ₂)的性能和生成冰晶的数量	(36)
2.2 碘化银(AgI)的性能和成冰核率	(37)
2.3 液氮(LN)性能和成冰核的测定结果	(42)
第三章 人工影响层状云降水	(45)
3.1 应用飞机播撒干冰人工影响层状云降雪	(45)
3.2 应用飞机播撒碘化银人工影响层状云降雨	(50)
3.3 应用飞机播撒液氮人工影响层状云降水	(64)
3.4 应用飞机播撒液氮人工影响层积云和雨层云增雨	(69)
第四章 地基人工影响增雨	(76)
4.1 BR-1 焰剂型碘化银发生器	(77)
4.2 地基碘化银发生器	(79)
4.3 地基人工增雨试验	(80)
4.4 碘化银扩散浓度的测量	(82)

2 层状云宏微观物理结构分析与人工影响降水研究

4.5	人工增雨火箭与增雨作业·····	(82)
第五章	人工增雨效果的评估 ·····	(86)
5.1	不同方法评估人工增雨效果·····	(86)
5.2	密云水库区人工增雨效果·····	(92)
第六章	人工增雨数值模拟 ·····	(105)
6.1	液氮催化层状云增雨的数值模拟试验 ·····	(105)
6.2	华北春季一次降水过程的物理分析和人工降水 数值模拟试验 ·····	(115)
第七章	消云、消雨试验 ·····	(133)
7.1	人工消云试验 ·····	(134)
7.2	人工消雨试验 ·····	(139)
7.3	人工影响减少降雨试验 ·····	(147)

第一章 层状云的温度分布和宏微观物理结构特征

北京地区春、秋、冬季降水云多为层状云。探测云中温度分布及宏微观物理结构对于研究降水机制、人工降水和飞机积冰等问题都有实际意义。

在 20 世纪 60 年代初期,中央气象局观象台与北京市气象局、河北省气象局对华北地区层状云进行了多次飞机探测,收集到一些资料。探测飞机安装有飞机气象仪、滴谱仪、含水量仪、飞机温度表和冰晶扩散器等仪器。飞机气象仪以毛发、双金属片和空盒为感应元件,自动记录航程中温、湿、压的变化。滴谱仪取样系用熏了氧化镁烟粒的玻璃片。测含水量用涂有玫瑰精的吸水纸取样。观测冰晶形状用圆锥体冰晶扩散器取样,然后进行目测。

1.1 层状云的云顶、云底高度和厚度分析

根据飞机人工降水试验作业中探测的资料,对层状云的云顶、云底高度和厚度进行了统计(见表 1.1)。高层云云顶平均高度为 5020 m,最高 8000 m,最低 3400 m。云底高度 2000 至 4700 m 之间,平均 3210 m。高层云厚度根据多次观测,平均 1990 m,最厚 3500 m,最薄 1000 m^[1]。

高积云的形状是多种多样。积云性高积云和复高积云云顶高度最高 7700 m,云底最低高度 2300 m。平均厚度 1490 m,最厚是 2900 m,而透光高积云最薄的只有 500 m。

2 层状云宏微观物理结构分析与人工影响降水研究

表 1.1 层状云的云顶、云底高度和云的厚度

云状	观测项目	平均值(m)	最高(厚)(m)	最低(薄)(m)
As	云顶高度	5020	8000	3400
	云底高度	3210	4700	2000
	云 厚	1990	3500	1000
Ac	云顶高度	4820	7700	3000
	云底高度	3500	6400	2300
	云 厚	1490	2900	500
Ns	云顶高度	4500	4600	4400
	云底高度	400	700	100
	云 厚	4100	4500	3700
Sc	云顶高度	2750	3000	750
	云底高度	1330	2800	250
	云 厚	1420	2000	200
St	云顶高度	800	850	750
	云底高度	350	850	250
	云 厚	450	500	400

对雨层云的观测只进行了两次,都有自然降雪。平均云顶高度 4500 m。最高 4600 m;云底最低 100 m;平均云厚 4100 m。

所观测的层积云,云层厚薄不均,多层次的层积云。云底最低距地面 250 m。在对流较盛时,云顶高度可达 3000 m。平均厚度为 1420 m,积云性层积云最薄为 200 m。

所观测到的层云多属降水天气的低云,云底最高 850 m,最低 250 m。云层也较薄,平均 450 m。层云以下常有碎层云。

1.2 0℃层的高度和云顶温度分析

根据 1957~1961 年北京 07 和 19 时探空资料统计的结果(见图 1.1)表明,冬季地面温度在 0℃以上和具有逆温的天气条件下,0℃层的高度平均不低于 500 m;春季平均高度在 1500~3000 m 以上;夏季多数在 4000~4700 m。秋季是 1500~3500 m。

统计 1960 年 75 次随机观测记录的结果,春季(3、4、5 月)层

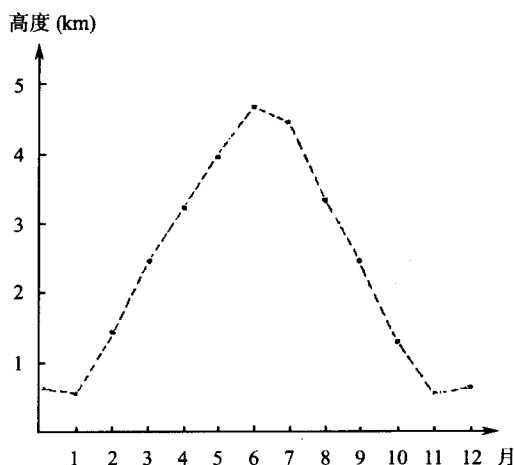


图 1.1 各月 0℃ 层平均高度

状云云顶温度 $74\% \leq 0^\circ\text{C}$ 。而 6、7 月份尚有 $34\% \leq 0^\circ\text{C}$ (见表 1.2) 根据 0℃ 层高度统计及云顶温度, 足见冬春两季锋面系统中层状云多为冷云, 而春末夏初则有时可出现暖性层状云。

表 1.2 层状云云顶温度

次 数 \ 月 份	3	4	5	6	7
云顶温度					
$< -15^\circ\text{C}$	0	0	2	4	0
$-15^\circ\text{C} \sim 0^\circ\text{C}$	4	1	13	11	1
$> 0^\circ\text{C}$	2	0	5	20	12

1.3 层状云中云水的相态分布

从飞机探测资料可以更清楚地看出, 冬、春锋面和初夏云系是多层次的。多数有四层, 即卷云、高层云(或雨层云)、层积云(或层

云)、最低层是碎层云(即雨层云下出现的破碎云片)。我们对 5600 m 以下的云层进行了比较详细的观测,对卷云只进行了目测。

根据云中相态及温度的分布,现将较详细的观测资料分为三类:冷云(云底温度接近或低于 0°C)、混合云(一般 0°C 层在整个云系的中上部,有冰晶存在)和暖云(整个云层温度高于 0°C)。

1.3.1 冷云

以 1962 年 2 月 10 日天津地区一个很强的降水天气系统的冷锋云层为例。从垂直剖面(见图 1.2a)可看出,云底高 100 m,温度 -0.8°C ;1000 m 以下由过冷水滴和冰晶组成,云中并有降雪;1000 m 以上云中多为冰晶;云顶高度 4600 m,温度 -17°C 。云顶上部可观测到卷云正在降雪幡。

1.3.2 混合云

以 1961 年 6 月 15 日天津地区一个气旋的暖区的云层为例。垂直剖面(图 1.2b)表明是由高层云、层积云和碎层云构成的。层积云底温度 8°C , 0°C 线在 4000 m 处,位于高层云的中部,层积云和高层云中下部由液态云滴构成,而 4000 m 以上是过冷水滴、冰晶和小雪花构成的冷云。

1.3.3 暖云

以 1961 年 6 月 18 日河北省一个锋面不明显的气旋云系为例。云层剖面如(图 1.2c),高层云很厚,其下有层积云和碎层云,该云下有小雨但未及地。云顶温度为 5°C ,整个云系是暖云。

1.4 层状云中的滴谱、含水量和冰晶的分布

1.4.1 层状云中的滴谱

滴谱是云的微结构中的主要要素。我们选用 1961 年 6 月 28 日一次较详细的观测资料进行如下分析。这一天是 850 hPa 和 700 hPa 高空图上的小槽越过河北省的天气,降水云系正在减弱

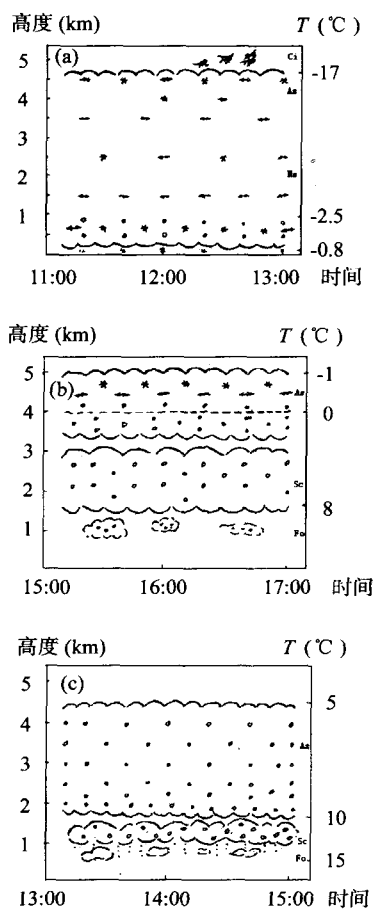


图 1.2 (a)1962 年 2 月 10 日冷云剖面
 (b)1961 年 6 月 15 日混合云剖面;
 (c)1961 年 6 月 18 日暖云剖面
 o—云滴; *—雪花; ←→—冰晶(下同)

中, 云层有: 高层云、高积云、层积云和碎云。飞机上升到 900 m 看到碎云, 在 1600 m 飞入层积云, 云顶高 2800 m。高积云底高 3200 m, 部分云顶与其上的高层云下垂的云幡相接。高层云底高 4400 m, 云顶高 5100 m。 0°C 线位于 4200 m 高度上。各层云不同高度上云滴谱的分布见(图 1.3)。

从图 1.3a 中可看出层积云滴谱的分布。层积云底部(2000 m 高度处)收集到 589 个云滴, 其滴谱分布: 峰值 $7.5\text{ }\mu\text{m}$, 与上部相比较小云滴较多, $2.5\text{ }\mu\text{m}$ 占 16%; 最大云滴直径(D) $48\text{ }\mu\text{m}$, 每升平均 20 个。层积云顶部(2700 m 高度处)从收集的 644 个云滴中测得, 最小 D 值为 $2.5\text{ }\mu\text{m}$, 占 19%; 峰值 $7.5\text{ }\mu\text{m}$, 占 23%; 最大云滴 $82.5\text{ }\mu\text{m}$, 占 1%, 每升 3.4 个; 大于 $50\text{ }\mu\text{m}$ 的占 16.4%。由此可看出层积云大云滴数随高度升高而增多是较明显的特征, 这可能是上部上升气流较强的缘故。

高积云底部从 471 个云滴观测看出, 滴谱分布较窄, 大云滴减少, 小云滴增多, 其峰值 $7.5\text{ }\mu\text{m}$ 占 48%, 每升 14 个(图 1.3b)。顶部(3700 m 高度处)由 371 个云滴中, 观测到 $7.5\text{ }\mu\text{m}$ 的小云滴略增, 计为 4%, 云顶两部位峰值接近重合, 只有大云滴稍有增加。最大云滴 $77.5\text{ }\mu\text{m}$; 大于 $50\text{ }\mu\text{m}$ 的占 3%, 每升有 8.5 个。

高层云底部在 4400 m 取到 495 个云滴。小云滴较少, 滴谱分布较宽; 最大云滴 $77.5\text{ }\mu\text{m}$, 占 1%, 每升 8.5 个; 大于 $50\text{ }\mu\text{m}$ 的占 15.9%(图 1.3c)。从中部 4600 m 高度上 406 个云滴观测的结果看, 滴谱分布较底部窄, 小云滴有显著增多。峰值 $7.5\text{ }\mu\text{m}$ 占 44%; 最大云滴 $52.5\text{ }\mu\text{m}$; 大于 $50\text{ }\mu\text{m}$ 的有 0.5%, 每升 7.1 个。云滴数量逐渐减少、滴谱分布较窄和大云滴减少, 可能是因该云层处于 0°C 线以下, 过冷水滴与冰晶共存, 冰晶数量增多水滴数量减少的缘故(观测到粒状冰晶有增多的现象)。

从以上分析看出, 云层中部位不同其滴谱分布也各异。层积