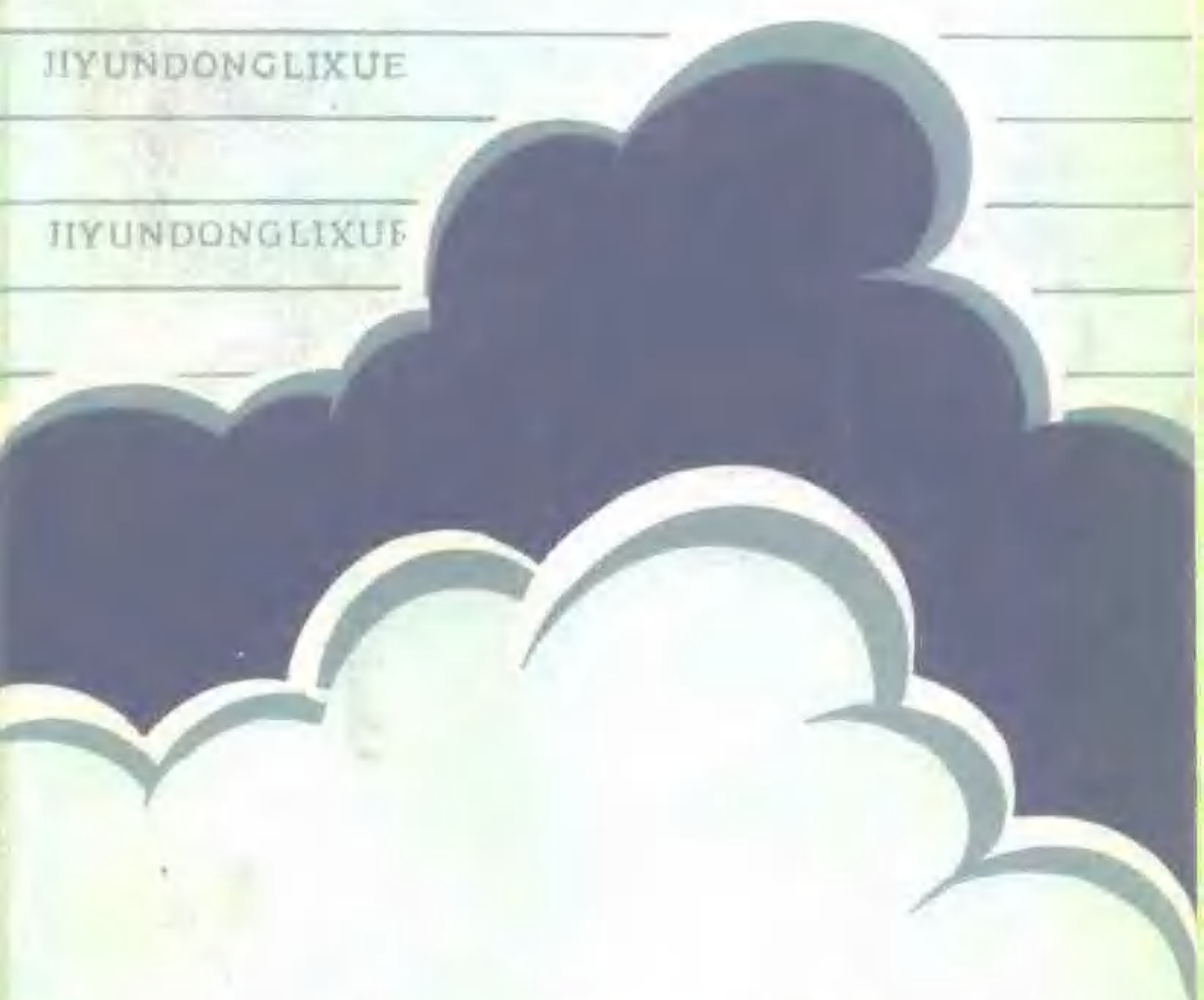


JYUNDONGLIXUE

叶家东著

JYUNDONGLIXUE

JYUNDONGLIXUE



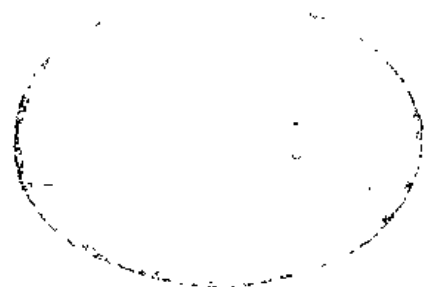
积云动力学

JYUNDONGLIXUE

高等教育出版社

积云动力学

叶家东 李如祥 编著



气象出版社

106176

内 容 简 介

本书用流体力学和热力学原理分析积云发生发展的宏观动力过程,着重分析云中各种作用力与运动之间的关系,以及与云微物理过程的相互作用。全书共分五章:第一章叙述积云对流和强风暴的动力过程;第二章给出积云对流动力学方程组;第三章分析参数化微物理过程;第四章讲述对流的云发生发展的气象条件和动力因子;第五章介绍积云降水数值模式。

本书可供从事大气物理研究的科技人员,大专院校有关专业师生阅读,也可供从事人工影响天气的科技人员参考。

积 云 动 力 学

叶家东 编著
李如祥

责任编辑 陶国庆

* * *

气象出版社 出版

(北京西郊白石桥路11号)

科技情报印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 全国各地新华书店经售

开本850×1168 1/32 印张:11 字数:281千字

1988年6月第一版 1988年6月第一次印刷

印数:1—1000 定价:2.20元

ISBN 7-5029-0083-7

P·0055(课)

前 言

云动力学是用流体力学和热力学原理研究云发生发展的宏观动力过程的科学，它着重研究云中各种作用力与运动之间的关系，与云微物理过程的相互作用十分密切。近二十年来，由于云物理学和人工影响天气试验研究的深入开展，以及局地灾害性天气的基础研究和监测、预报业务研究工作的开展，提出了大量的云动力学基本科学问题，大大促进了云动力学特别是积云对流动力学的研究，目前它已成为现代气象学中十分活跃的分支学科之一。

积云对流动力学的研究对象主要是积云对流单体，一般属于小尺度天气系统(10^0 — 10^1 公里)*。在讨论强风暴系统如超级单体及多单体风暴等的动力过程时，也涉及中尺度天气系统(10^1 — 10^2 公里)，而天气尺度系统(10^2 — 10^3 公里)通常是作为环境条件和背景加以考虑的。由于积云对流是一种小尺度天气系统，而且云中的宏观动力过程与微物理过程密切相关，因此，它与一般大气动力学不论在研究对象上或在方法上都有很大不同。自然，它们的共同理论基础都是流体力学和热力学的基本定律。

限于篇幅，本书主要将积云对流动力学的基本内容和主要进展予以概括和阐述，目的是使读者对这一新兴学科的研究现状和存在的基本问题有一大概的了解，以图引起研究这一专题领域的兴趣，为进一步开展云动力学研究提供一本引论性的教学和科研参考书。

第一章介绍对流云的动力结构和结构模式，为进一步分析云动力学理论提供基本的观测事实和结构框架；第二章导出积云对流动力学方程组；第三章是参数化的微物理过程，主要介绍微物理过程的参数化方法及其对宏观动力过程的作用；第四章讨论影响对流云发展的动力因子和气象条件；第五章介绍对流云降水的数值模拟研究。

本书是在南京大学大气物理专业云动力学讲义基础上修改、编写而成的。第二、五两章由李如祥编写，概论和第一、三、四章由叶家东编写。叶家东对全书内容作了统一整理。南京大学大气物理专业、南京气象学院云物

*国外将大于1000公里的系统定义为大尺度系统，而将1—1000公里尺度定义为中尺度系统，分为 α (100—1000公里)， β (10—100公里)， γ (1—10公里)尺度。将小于1公里的尺度定义为小尺度系统。

理专业（78级）以及积云动力学和数值模拟讲习班的学员对本课程的内容提了有益的意见。王鹏飞教授仔细审阅了全部书稿，并提了许多宝贵的意见。谨此一并致谢。自然，对于一门目前尚处于迅速发展过程中的新兴学科进行系统而又恰如其分的概括，是有一定困难的，加上编者水平有限，在本书的取材和内容编排上，以至于在一些基本观点的阐述上难免会有局限性和主观性，错误和不妥之处一定很多，希望读者批评指正。

石宗祥和金仪璐同志为本书绘制了插图，谨此致谢。

作 者

目 录

前言

概论	(1)
----	-----

第一章 积云对流和强风暴的动力结构	(10)
-------------------	------

§1 对流云的结构特征和气团雷暴的结构模式	(10)
-----------------------	------

§2 强风暴的结构特征和结构模式	(40)
------------------	------

第二章 积云对流动力学方程组	(61)
----------------	------

§1 积云对流动力学原始方程组	(61)
-----------------	------

§2 对流近似理论	(72)
-----------	------

§3 非静力平衡	(75)
----------	------

§4 扰动压力的作用	(76)
------------	------

§5 连续方程的简化	(81)
------------	------

§6 积云对流动力学基本方程组	(85)
-----------------	------

§7 积云对流动力学方程组的其它形式	(86)
--------------------	------

第三章 参数化的微物理过程	(91)
---------------	------

§1 云水和雨水连续方程	(91)
--------------	------

§2 凝结过程 (P_1)	(95)
-------------------	------

§3 暖雨过程 (P_2)	(97)
-------------------	------

§4 冷雨过程	(122)
---------	-------

§5 蒸发和升华过程	(134)
------------	-------

第四章 对流云发生发展的气象条件和动力因子	(141)
-----------------------	-------

§1 对流云发生发展的层结条件	(141)
-----------------	-------

§2 夹卷效应	(146)
---------	-------

§3 云外补偿下沉气流的影响	(183)
----------------	-------

§4 降水的重力拖曳和蒸发冷却效应	(202)
-------------------	-------

§5 扰动气压的动力学效应	(217)
---------------	-------

§ 6 环境风垂直切变的影响	(231)
第五章 积云降水数值模式	(247)
§ 1 一维模式	(247)
§ 2 二维模式	(275)
§ 3 三维模式	(325)
参考文献	(339)

概 论

1. 研究云动力学的意义

云动力学是云和降水物理学的一个重要组成部分。通过长期的云物理研究和人工影响天气试验,人们日益认识到云中降水的形成不能仅仅根据云的微物理过程加以认识。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,决定性地影响了云质点的数密度、初始大小分布及其物理性质,规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过程。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。自然,微物理过程对于宏观动力过程又有重要的反馈作用。云和降水质点的凝结和凝华、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(特别是对流云)内外空气的运动,而降水质点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力学与微物理学的相互作用。如果说20年以前云动力学主要是指云的宏观动力学条件和机制的研究,那么当今云动力学研究的一个重要特点是将宏观动力过程和微物理过程结合起来,把云的微物理结构和动力学结构联系起来,组成统一的云模式加以研究。云和降水的数值模拟试验已成为云动力学研究的一种重要理论手段。

在云动力学的研究中,积云对流动力学占着突出的地位。首先,很多局地灾害性天气现象,如雷暴、闪电、强风、冰雹、龙卷和暴雨等都与对流云的猛烈发展有关。低纬度地区大约有四分之三的雨是由对流性降水造成的,中纬度地区夏季对流云也是主要的降水

源。一、二季人工降水和防雹的主要对象。冬季中纬度一些地区的气旋风暴和中尺度对流雨带有时会产生暴雨，特别是中纬度地区许多强烈的灾害性天气如冰雹、龙卷等常常由有组织的强对流过程引起。因此，积云对流动力学的研究将为监测和预报这些局地灾害性天气提供一定的理论基础。

其次，积云对流在热带大气的热量收支中以及在大尺度热带扰动的形成和生长过程中起着重要作用，这是过去早就知道而现在为人们所广泛强调的。尽管各种物理因子的相互作用使热带扰动问题变得很复杂，热带深厚积雨云云塔中凝结潜热的释放仍是热带扰动动能的主要来源，积雨云在这里起着一种“热塔”或“燃烧室”的作用。卫星云图分析表明，热带海洋云系是高度组织化的，往往组成云簇或云团。台风发展的物理机制，是以水汽凝结潜热为能源的扰动不稳定自激增长的结果，所谓第二类条件不稳定（CISK）就是中小尺度积雨云系统与天气尺度台风相互作用的过程。此外，积云对流在全球大气环流的能量平衡中起着关键作用。积云对流是大气中最有效的一种能量转换器，是水汽、热量和动量垂直输送的重要机制，它对更大尺度的天气系统或环流发生重要的影响。众所周知，就全球而论，热带海洋地区是能量的源， 28° 以外的中高纬度是能量的汇。为了平衡中高纬度能量收支的亏损，必须有能量从热带向中高纬度输送。研究表明，在热带地区为数不多的（1500—3000个）巨大积雨云塔，其面积仅约占赤道辐合带面积的千分之一，就承担着维持热带哈特来环流的能量供应。热带积雨云塔是平流层内水汽的一个重要来源，因此也就成了调节全球热量收支的一个重要的辐射“阀门”。这些云塔的数目和集中程度的变化趋势与信风强弱及季风变化有关，它影响平流层的水汽含量并进而可能影响气候。而直到目前为止，在全球热量收支计算中难以肯定的项目仍然是与云的形成、演变和分布以及云的辐射性质有关的热通量。它们还决定海表面的热量平衡，而这对建立有意义的稳态或时变气候模式是必需的。值得强调指出，不同尺度大气过程的相互作用已日益成

为全球气候模式、数值天气预报和大气环流研究的注意焦点，而在这一尺度链中，积云对流动力过程及其与大中尺度天气系统的相互作用是至关重要的、曾经一度被忽视的、而研究起来又相当困难的关键环节。

所以，积云对流动力学对于云物理学研究和人工影响天气试验，对于改善对流云降水，特别是局地灾害性天气的监测和短期或临近预报，以及增进热带天气的长期预报能力和完善全球气候模式及大气环流的研究都有重要的意义。这是近年来积云对流动力学得以迅速发展的主要动力。

另一方面，近20年来由于计算机技术迅猛发展，计算速度和容量大大增强；也由于各种现代探测技术，如多普勒雷达、气象卫星和各种类型的飞机探测平台等现代探测技术的发展和运用，使得人们认识和研究云动力学的的能力明显提高。这是云动力学能够取得重大进展的基本条件。

云动力学的理论基础仍是把动量、质量、能量和水汽守恒这样一些基本物理原理，应用于牛顿（纳维-斯托克斯）运动方程、质量连续方程、热力学方程和气体状态方程。为了将蒸发、凝结、降水这样一些云物理效应包括进来，方程组中增加了水汽和液水量（或冰水量）连续方程，并将加热项加以修正，以便把潜热释放效应考虑在内，再根据小尺度对流运动的特性对方程组作必要的简化，组成各种类型的云动力学模式。云和降水的物理-数学模式同实际大气的复杂性相比尽管比较简单，但它应能合理地表示出那些控制云体时空尺度发展演变的主要物理过程和动力过程，应能适当地表示出云体（或云系）运动与环境较大尺度天气系统的相关关系及其非线性相互作用，应能恰当地表示出所有小尺度湍流运动和云微物理过程对云体运动以及输送和转换能量和质量的总体效应。后者通常是通过参数化方法来表示它们的统计平均特征而加以考虑的。这是云动力学模式研究的基本任务。

2. 云动力学研究的主要进展

现代关于积云对流性质的知识主要源自于40年代。由于战争迫切需要了解雷暴天气的飞行条件，雷暴的研究引起了广泛的重视。一系列气象雷达和飞机气象观测揭示了对流云结构中许多重要事实，初步得到了关于云中上升气流、下沉气流、液态含水量、降水类型以及雷暴单体发展过程的定量资料。大量观测表明，云内外空气之间存在着强烈的质量、热量、动量和水分的交换，对流运动远非绝热。例如，按照经典气块法的概念，实际上所有热带积云都应能穿入平流层，云顶高度可到气压高度100百帕处或以上。但是在实际大气中，只有少数尺度很大的积云才能真正穿透对流层顶。大多数热带积云顶高处于3—6公里高。按照气块法，这些高度正是气块的浮升力最大的地方，云怎么会不再向上发展呢？肯定有某种类型的拖曳力与浮升力相平衡。而且，云中的液态含水量往往比绝热含水量小，云中温度垂直递减率也往往比湿绝热递减率大。在这些观测事实基础上提出了对流云发展的夹卷理论(Stommel, 1947)。1946—1947年美国进行的雷暴研究计划是现代第一个大规模有设计的积云对流综合考察研究计划。根据这个计划的观测结果，概括出气团雷暴发展史的三阶段模式(Byers和Braham, 1949)。50年代初根据质量连续性原理提出了动力夹卷的理论(Houghton, 1951)。同时根据室内实验的结果，指出夹卷率与对流单体的半径成反比。在湍流夹卷和动力夹卷假说基础上，提出了对流云发展的气块模式和气柱模式。60年代根据大量的观测事实，认识到云内外气流的相互作用十分复杂，建立在夹卷理论基础上的积云对流动力学模式对于云内外空气的相互作用处理得过于简单，而且也没有恰当地处理云动力学过程与微物理过程的相互作用。在研究积云对流动力过程时，应该将云体及其环境作为一个流体力学场加以研究。

60年代对于往往引起局地灾害性天气的强风暴研究有了很大的进展。例如在美国，龙卷和冰雹是美国中西部地区夏季的主要灾害

性天气，光是冰雹造成的农作物和其它财产损失每年总计达八亿二千多万美元，引起了广泛的注意。60年代初期根据多部气象雷达的协同观测，揭示了强风暴的基本回波特征，指出环境风的垂直切变有助于建立和维持稳定持久的强风暴系统，并提出了强风暴的三维结构模式。强风暴中有时云底可观测到冷的上升气流，从而推论出深对流模拟中考虑压力扰动的必要性。

铅直指向脉冲多普勒雷达利用云雾粒子垂直运动的多普勒效应测量空气垂直运动，已为人们探索云中垂直气流场开辟了一种遥感途径。70年代初双多普勒雷达共轭扫描观测云中气流场的理论方案是云物理研究方法的一个突破。它使人们第一次有可能观测到对流云体内部的气流分布和演变，从而对一些风暴系统中对流的产生、动力结构的演变及其与环境大气的相互作用进行定量的考察。这期间的观测研究特别注重气流场和水汽凝结体分布场，除了用双多普勒雷达观测云中流场以外，还用双波长雷达判定雹区，T-28型装甲飞机穿云直接观测云微物理及动力学参量，并配合投掷式探空仪器测定云中垂直气流等等。为了获得风暴系统的云物理——动力结构及其时空演变的资料，研究强风暴形成、发展的机制和气象效应，这期间研究方法上的一个明显的特点是组织大规模的有设计的综合考察研究计划。例如美国70年代初为了验证建立在累积带理论基础上的“竞争场”防雷原理而开展的“国家冰雹研究试验”计划(NHRE)，还有“科罗拉多联合冰雹计划”，美国与加拿大合作的“阿尔伯塔冰雹研究计划”，和近几年为研究龙卷、冰雹等灾害性天气而在美国中部开展的“强风暴和中尺度试验”计划(SESAME)，为研究对流风暴的降水效率及其与环境的相互作用，以及动力过程与微物理过程的相互作用而在美国西北部进行的“对流云降水协作试验”(CCOPE)等等。采用装备有各种现代云物理仪器的专用考察飞机，有时还配备有可以穿越冰雹云的T-28型装甲飞机，可测云内运动场的多普勒雷达，气象卫星特别是地球同步气象卫星和各种遥感仪器。如可测冰雹的双波长雷达，能辨认出非球形固体降水质点

卵偏振光雷达，监测龙卷等强风暴源的灵敏微压计以及激光、微波探测计，声波探测器等。地面设置加密的地面和高空探测网，有的高空站间距仅20—30公里，每隔一个半小时施放一次探空气球。从这些考察研究中得到了许多强风暴的结构资料，促进了强对流问题的研究。许多重要的观测事实和研究成果几乎都是来自这些有设计的综合研究计划。

自60年代以来，理论研究有了重大进展，特别是云的数值模拟研究发展很快。这一方面是由于现代化计算机速度和容量不断增大，使人们处理复杂问题的运算能力大大增强。同时也由于人们日益认识到，积云对流问题的复杂性是如此之大，以致不求助于计算机演算就很少有希望能正确处理对流系统的理论。无怪乎有人称近20年为云物理的“计算机年代”。这不仅对数值模拟研究如此，而且还广泛应用于快速记录并处理大量飞机探测或各种遥感仪器收集到的云物理资料。进展主要表现在：

(1) 在云的动力学模式中引进了参数化的微物理过程，从而开始将云的动力过程与微物理过程结合在一个统一的数值模式中。起初是用连续碰并方程参数化，后来发展到应用随机碰并方程的参数化。它允许采用不同的初始云滴谱，因而可以在模式中对大陆性和海洋性云的微结构差异加以适当处理。在一些模式中且采用各种微物理过程的非参数化方案，较真实地模拟了云中降水形成的物理过程。

(2) 发展了考虑夹卷效应的浮升积云塔的一维积云动力学模式，并据以预报积云动力催化的“可播性”，首次将数值模拟研究应用于人工影响天气试验。

(3) 发展了各种一维时变模式，模式中包括较详细的微物理过程，其中包括冰相过程，并在一定程度上从动力学角度考虑环境空气夹卷等因素对云发展的效应，提出所谓“一维半模式”。

(4) 发展了各种各样的二维轴对称单体积云模式，能较好地模拟出云的某些实测特征。

(5) 在二维面对称模式中考虑水平风速的垂直切变，模拟出

积云生成及生命史。在一些模式中还考虑了山脉加热和过山气流效应。

(6) 通过多普勒雷达及投掷式探空仪观测,发现对流云的垂直结构比现在所认识或假定的要复杂得多,需要更复杂的模式加以模拟。70年代后期对风速垂直切变环境中的对流云动力学的研究有所进展,指出对上升气流有效的浮力必须适当地与大尺度风垂直切变相匹配。若大气低层存在几公里的暖湿空气楔,而暖湿空气楔与中层对流层的急流相遇,强风暴通常就发生在这种有相当大的位势不稳定且具有较强风垂直切变的环境中。近年来提出了各种考虑风垂直转向切变影响的三维积云对流动力学模式,主要模拟超级单体的发展和结构,有的还着重研究环境风的切变强度及其垂直分布对右行和左行强风暴发展的影响,还讨论了多重分裂风暴的模拟及其动力机制。不过,多数三维模式还处于探索性研究阶段。

3. 云动力学研究的关键问题

云的数值模拟研究能在一定程度上模拟出雷暴内部的气流结构和环境大气条件对积云对流的作用。现在有些数值模式以实际资料为初始场,能模拟出与实况大体相似的风暴结构特征和演变过程,使人们对积云对流系统的发生发展机制、结构特征及其与环境大气的相互作用有较深入的认识。

越来越明显的事实是,中尺度动力学的核心问题是云的动力学问题,特别是积云对流动力学问题。但是,从理论上研究积云对流运动毕竟是一个十分复杂的课题。积云对流动力过程一方面受到各种尺度的大气涡旋运动的制约,另一方面又受到云微物理过程的强烈反馈作用。因此,积云对流过程中既包括了尺度范围很广的各种类型的云和降水质点之间的相互作用,也包括了尺度范围甚至更广的各种尺度大气涡旋之间的相互作用。在降水性对流云中,云质点大小从直径为 10^{-2} 微米的气溶胶粒子到 5×10^3 微米的降水质点,对于含雹积雨云甚至可大至 10^5 微米,大小相差7个量级。另外,与积

云生消有关的大气涡旋尺度可以从 10^{-3} 米的湍流耗散尺度，通过对流尺度（ 10^3 — 10^4 米）直至 10^5 — 10^6 米的天气尺度运动。如果积云是强的温带或热带气旋扰动的组成部分，则数值达9个量级不同尺度的大气涡旋之间的强烈非线性相互作用，可以在很短的时间尺度中发生。再加上云的动力过程和微物理过程之间极其复杂的热力的和动力的相互作用，使问题变得更为复杂。

所以，积云对流的模拟问题包括了范围极其广泛的湿对流系统中的物理过程和动力过程领域。研究对流风暴降水的主要困难在于许许多多气象现象以多种方式的相互作用。降水的形成显然受云体的尺度和持续时间的制约，从而也取决于边界层性质、大气层结结构和风场等因子，而且还常常与早先降雨带来的下沉气流有关。由于积云对流运动一般是非静力、非常定的湍流性很强的运动，需要完全的三维运动方程才能描述它们。目前多数计算机的速度和容量，对于模拟如此复杂的运动过程还不能胜任。因此，积云对流的模拟研究多数都涉及参数化问题，不仅包括基本的云微物理过程的参数化，而且还包括模式所不能分辨的湍流涡旋能量和涡旋通量的参数化。在微物理过程方面，至今仍有许多关键性问题有待解决。需知人们关于云微物理学的许多知识，是建立在实验室的实验基础上的。因此，当把这种实验室可控条件下得到的结果外推到极其复杂的自然条件下的群滴演变过程时，会产生很大的不确定性。例如，在深厚过冷积云中，冰质点的产生和云体冰晶化的不确定性强烈地限制了人们定量地模拟过冷积云的物理过程和动力过程的能力。而云中冰晶起源问题之所以模糊不清，不只是因为成核作用的模式和可能的冰晶繁生机制等基本方面有许多不确定性，还在于不知道对流云里任一给定部分是由来自何处的气块混合组成的。由于积云对流是高度湍流性的，目前人们对于云与周围环境如何混合的物理过程以及云中的湍流通量实际上尚未真正了解。因此，在动力学中如何恰当地表述夹卷效应和湍流应力就成为积云对流模拟问题中一个症结所在。也许这是积云模拟研究中最困难的问题之一。

但是，基本的困难还是缺乏充分的观测资料。因而，模式中的参数就没有坚实的事实依据，模拟的结果也难以验证，难于用真实的云来检验它，特别是对流云内外的速度场，对于含冰相粒子的深厚对流云更是如此。即使象温度廓线和液态含水量这些比较简单的属性，也缺乏关于它们在云的生命史中如何演变的足够的观测资料来与模式作有意义的比较。甚至为了与模式对比，实测参数应如何取平均，云的“环境”应如何确切描述也还是未解决的问题。总的来说，观测研究还明显落后于模拟试验。因此，尽管近二十年来积云考察的观测设备和技术已有很大进展，人们关于积云对流的动力结构和属性的知识已远非二十年前可比，但它至今仍是积云动力学研究进一步发展的关键。

因此，高质量的中尺度外场综合研究计划是重要的，这不仅对模式的验证，而且对于了解基本的云物理-动力过程、降水机制以及强风暴的监测和预报都是重要的。但是，外场考察应有模式研究作指导，仅仅是物理观测而没有指导性的模式就难以避免一定的盲目性，不能充分发挥设备潜力。另一方面，真实云的模拟研究中，过分大的模式由于是高度参数化的，常常不能同时做到精确地考虑云动力学和微物理学，其价值可能变得有限，它们会偏离真实性，并且往往难于估价。所以，模拟研究需要考虑模式的“恰当性”问题，模式应力求为同时进行的好的观测及有用的资料系列所证实。

至于积云对流与大中尺度天气系统之间的相互作用的研究，目前尚处于初期阶段，这里有许多更为复杂的因素和尚未认识的知识领域。由于积云对流对大尺度天气系统演变的重要性，目前短期和长期数值天气预报以及大气环流研究的进一步完善，主要取决于正确考虑大尺度和中小尺度气象因子之间的相互作用。因此，它已成为大气动力学和数值预报研究中的一个热门的专题领域。不过，这已超出本书的范围。在大气动力学研究中，积云对流对天气尺度系统的作用一般是用积云对流参数化的方法表达的，即用描述天气尺度系统的量来表述积云对流作用的总效应。

第一章 积云对流和强风暴的动力结构

近三十多年来,由于气象雷达、飞机探测、气象卫星以及多普勒雷达等现代探测技术和设备的发展和应用,对积云对流和局地强风暴的动力、热力和微物理结构的观测研究有了重大进展,使人们从对积云和强风暴的形态学分类研究深入到云体内部的动力结构、热力结构和水汽凝成物场及其演变和相互关系的研究,对云内外流场结构以及云和环境大气的相互作用也进行了一些富有特色的探索性考察研究。在各种外场综合考察研究基础上提出了一些典型的雷暴云结构模式,为进一步的理论分析提供了依据,并为验证理论成果提供必要的观测证据。理论源自于实践,又受实践的检验,观测研究是气象学包括云动力学的主要实践基础。本章将概括地介绍现有的关于积云对流和强风暴的结构特征和基本的结构模式,以作为进一步理论分析的基础。自然,从下面的介绍可以看出,当前的观测研究,从可靠性和完整性上讲,都远未完善,需要深入发展,它至今仍是云动力学取得实质性进展的关键。

§1 对流云的结构特征和雷暴的结构模式

1. 对流云的结构特征

(1) 对流云的空间尺度

对流云的垂直尺度一般与湿绝热不稳定层的厚度有关,云中最大上升气流速度所在高度一般接近湿绝热不稳定层的上边界高度。