

积云动力学和积云数值模拟讲习班讲义

云 动 力 学

南京大学 叶家东

福建省气象科学研究所印

一九八二年十一月

目 录

前 言	1
第一章 对流云的动力结构和结构模式	
§ 1 概 论	5
§ 2 气团雷暴的结构特征和结构模式	11
§ 3 强风暴的结构特征和结构模式	34
第二章 积云动力学方程组	
§ 1 积云动力学原始方程	58
§ 2 对流近似理论	65
§ 3 非静力平衡	67
§ 4 偏差压力的作用	68
§ 5 连续方程的简化	73
§ 6 积云动力学基本方程	77
第三章 微物理过程的参数化	
§ 1 云水和雨水连续方程	84
§ 2 凝结过程	88
§ 3 碰并过程	90
§ 4 冰化过程	104
§ 5 蒸发过程	112
第四章 对流云发展阶段的环境条件和动力因子	114
§ 1 对流云在低层发展的层结条件	114
§ 2 卷入过程对对流云发展的影响	121
§ 3 云外补偿下沉气流的影响	142
§ 4 降水对积云发展的影响	163
§ 5 环境风垂直切变的影响	180

前 言

云动力学是用流体力学和热力学原理研究云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，云动力学特别是对流云动力学的研究发展迅速，它已成为现代气象学中一个十分活跃的分支学科。

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从云滴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空气运动的制约，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，决定和影响云质点的浓度、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，从而限制了降水质点所能达到的最终大小，以及降水强度和持续时间。所以云的动力学研究在云和降水形成过程中具有基本的意义。反之，微物理过程对于宏观动力过程又有反馈作用。云和降水质点的增长蒸发伴随着相变和水分浓度的改变，提供了一种热源和热汇，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主要因素。近年来，越来越多的人致力研究云中空气运动和微物理过程之间的相互作用。如果说15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学过程和微物理过程有机地结合起来，把云的物理——动力结构和模式研究作为一个问题加以研究，而云和降水的数值模拟试验则已成为云动力学研究的一种主要理论手段。

在云动力学研究中，对流云动力学占着突出的地位，相对于层状云动力学而言，对流云动力学受到更大的注意。首先，很多小范围的灾害性天气现象，如雷暴、闪电、强风、冰雹、龙卷和暴雨等都与对流云的猛烈发生有关。低纬度地区有大约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降水也是主要的降水来源，是夏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中对流雨带有时会产生暴雨。特别，中纬度地区许多强烈的灾害天气如龙卷、冰雹等常常由有组织的强对流过程引起。因此，对流云动力学的研究将有助于预报这些灾害性天气提供一定的理论基础。

其次，积云在热带大气的能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。研究指出，热带的扰动能主要是从涡旋的有效位能中取得的，而后者是由深厚积雨云塔中凝结潜热的释放所产生的，积雨云在这里起着一种“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，组成云簇或云团。台风发展的第二类条件不稳定性(CISK)就是中小尺度积雨云系统与天气尺度台风相互作用的结果。此外，积云对流在全球大气环流的能量平衡中也起着重要作用。积云对流是水汽、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影响，众所周知，热带海洋地区是能量的汇。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，据计算，在热带地区只要有大约1500—5000个积雨云，其面积只占赤道辐合带面积的千分之一，就可以完成这种能量的输送。

所以，对流云动力学对于云物理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短期预报，以及增进热带天气的长期预报能力都有重要意义。这是近年来对流云动

力学得以迅速发展的重要动力。

另一方面，近二十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，特别是多普勒雷达、气象卫星以及探空探测飞机等现代探测设备的发展和运用，使得人们认识和研究云动力学的能力大大提高。这是云动力学能够取得重大进展的基本条件。

积云对流动力学的研究对象主要是对流的云单体，一般属于小尺度天气系统（2.5—25公里）。在讨论强风暴系统如超级对流单体、多单体风暴等的动力过程时，也涉及中尺度天气系统（25—250公里）。而天气尺度系统（250—2500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和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规律。

限于条件和篇幅，本课程主要将对流云动力学的基本内容和进展，及其与微物理过程的相互作用，作一力所能及的概括和阐述。目的是使学生对这门新兴学科的研究现状和存在的问题有一大概的了解，以图引起学员对这一专题领域的兴趣。至于积云对流对天气尺度系统的作用及其相互关系，本课程不拟作具体讨论。在大气动力学研究中，这种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要素表示积云对流作用的总效应。

第一章介绍对流云的动力结构和结构模式；第二章导出云动力学基本方程组；第三章是云微物理过程的参数化，主要研究微物理过程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；第五章较系统地介绍对流云降水的数值模拟研究。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全面而又恰到好处地总结，几乎是不可能的。加上我们水平有限，缺乏经验，在课程内容的取舍和难易程度上，以至于在基本观点的阐述上不可避免地会有局限性和主观性，错误和不妥之处一定很多，请同志们批评指正。

第一章 对流云的动力结构和结构模式

§ 1. 概论

对流运动是层结大气中广泛存在的一种垂直运动。人们早就知道，大气中对流发生取决于三个基本条件：(1) 大气层结不稳定度；(2) 水汽条件；(3) 能发对流的外力大小。关于大气对流运动发生条件的研究，可以追溯到经典的气块法。气块法假定一空气块由于某种启动原因而上升时，既不影响环境大气的运动状态，和周围空气也不发生混合，空气块运动是绝热的。由此导出层结稳定度的判据：

$\gamma > \gamma_a$ 层结不稳定 (绝对不稳定)

$\gamma < \gamma_m$ 层结稳定 (绝对稳定)

$\gamma_m < \gamma < \gamma_a$ 条件性不稳定，对于未饱和空气为稳定，

对于饱和空气为不稳定。

30年代提出的落层法，对上述判据作出修正，即空气块的运动可以影响环境大气，引起相应的补偿运动。据此导出层结稳定度的落层法判据。

$\gamma > \gamma_a$ 层结不稳定

$\gamma < \gamma_m$ 层结稳定

$\gamma_m < \gamma < \gamma_a$ 时：(1) 上升、下沉气流都是未饱和时为稳定；

(2) 上升、下沉气流都是饱和时为不稳定。

(3) 上升为饱和，下沉为未饱和时，

只有当 $\frac{\gamma - \gamma_m}{\gamma_d - \gamma} > \frac{A'}{A}$ 时为不稳定。其中 A' 和 A 分别为上升气流和下沉气流所占据的截面积。

上述判据当然是在高度简化条件下得出的结论。但是由于它简单，物理概念明确，应用方便，能定性地反映出对流发展的基本条件，并且在诸如予测凝结高度或积云基底高度等问题上还比较成功，所以在气象中至今仍广为应用，是一种基本的气象判据。

现代关于积云对流的性质和知识主要源自于 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观测揭示了对流云结构中许多重要事实，初步得到了云中上升气流、下沉气流、液态含水量、降水类型以及雷暴单体的三维结构等重要资料。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，对流运动绝非绝热。例如，按照气块法的概念，实际上所有热带积云都应能穿入平流层，至少到 100 毫巴或以上。但是在实际大气中，只有少数尺度很大的系统才能真正穿越对流层顶。大多数热带积云顶高处于 3—5 公里高。按照气块法，这些高度正是气块的浮力最大的地方，云为什么会不再向上发展的？肯定有某种类型的拖带力与浮力相平衡。而且，云中的液态含水量也往往比绝热含水量小。在此基础上提出了对流云发展的夹卷理论 (mixing, 1947)。1946—1947 年美国进行的雷暴研究计划是战后第一个大规模有组织的积云对流综合考察研究计划。Hess 和 Brunt 根据这个计划的观测结果，概括出气团雷暴发展的三阶段模式。50 年代初根据质贯连续原理提出了动力

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, 给出了积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的相互关系。在研究积云对流动力过程时, 应该把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。特别是美国, 龙卷和冰雹是美国中西部地区夏季的主要灾害性天气, 尤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年代初期根据多普勒雷达的协同观测, 揭示了强风暴的基本波动特征, 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。进一步指出有时云底可观测到冷的上升气流, 从而推论出在对流模拟中考虑压力扰动的必要性。

重点点射脉冲多普勒雷达利用云雾粒子垂直运动的多普勒效应测定云中垂直运动 (已)。们探索云中垂直气流场开辟了一种途径。七十年代初, 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血流分布和演变, 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。这期间研究方法上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年代初为了验证短积带理论基础上的“竞争项”雷暴物理而开展的“国家冰雹研究计划”(NHRE), 还有“科罗拉多联合雷暴计划”(1968—1970) 美国与加拿大合作开展的“阿巴拉契亚雷暴计划”和近几年为研

究龙卷、冰雹等灾害性天气而在美国中下开局的“强风暴和中尺度试验计划”等。采用装备有各种现代云物理仪的专用考察飞机，有时还配备有可以穿越雷云的T-28型装甲飞机，可测云内运动场的单多普勒雷达和双多普勒雷达，气象卫星特别是地球同步气象卫星和各种遥感仪，如可测冰雹的双波长雷达，能辨认出非球形固体降水的偏振光雷达，监测龙卷等强风暴流场的敏微压计以及激光、微波探测计、声谱探测计等，地面设置有线探测和高空探测网。有的高空站间距仅20—30公里，每隔15小时施放一次探空气球从这些考察研究计划中得到的大量强风暴的资料，大大促进了强对流问题的研究。许多重要成果的产生和研究成果几乎都来自这些有计划的综合研究计划。

自60年代以来，理论研究有了巨大飞跃，特别是云物理近十几年研究进展很快。这一方面是由于现代计算机速度和容量不断增大，使人们处理复杂问题的计算能力大大增强，同时也由于人们日益认识到，积云对流的复杂性是如此之大，以致很少能不求助于计算机计算而能正式处理对流系统的理论问题。因此，人们称近二十年为云物理的“计算机年代”，不仅如此，而且还广泛应用于快速记录并处理大量观测数据，收集到的云物理资料，如云内温度、湿度、风速、风向、降水、冰雹、龙卷等资料。

(1) 在云动力学模式中将云物理过程进行参数化，从而开始将云动力学过程和微物理过程结合在一个统一的模式中。开始是简单参数化并直接参数化，后来发展到应用物理模型进行参数化，后者则是用不同的物理过程统一而处理，在物理过程参数化和物理过程的微物理过程参数化方面取得进展。

(2) 提出了考虑夹卷效应的将非积云塔的一维云动力学模式，并用以预报积云动力催化的“可播性”，并在塔内微物理过程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，并试图在一定程度上从动力学角度考虑环境空气卷入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) 在二维模式中考虑水平风速的垂直切变，模拟出积云的生成及生命史，在一些模式中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。在这种认识基础上，提出了各种考虑风垂直转向切变影响的三维积云动力学模式，多数还处于探索性研究阶段。

数值模拟研究能在一定程度上模拟出雷暴内下的气流结构和环境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，能模拟出与实际情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、结构特征及与环境大气的相互作用有较深入的认识。

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别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，云微物理的质点大小从直径为 10^{-2} 微米的气溶胶到 5×10^2 微米的降水质点，对于含雹积雨云甚至可大至 10^4 微米，大小相差了 7 个数量级。另外，导致积云形成的涡旋尺度可以从 10^{-2} 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 个数量级的不同大小

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，使问题变得更其复杂。

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在物理过程和动力过程领域。由于大气运动一般是非势力的，非常强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是不能胜任的。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通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，总存在着很大的不确定性。例如，在深厚过冷积云中，冰质点的产生和云内冰晶的增长过程受到限制，限制了人们定异地模拟过冷积云的形成过程和动力过程的能力。另一方面，由于积云对流是高度湍流性的，目前人们对云与周围环境如何混合的物理过程以及云中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示湍流效应和湍流应力就成为积云模拟问题中一个症结所在。也许正是积云模拟研究中最困难的一个问题。

但是，真正的困难还是来自于缺乏基本的观测资料，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。有时用真实的云来验证它，特别是对流云内外的速度场，对于含水和粒子的深厚积云，更其如此。即使像温度廓线和比湿含水率这些比较简单的宏观属性，也缺乏关于它们在云的生命史中如何变化的足够的观测资料来与模式作有意义的对比，甚至为

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，观测研究还大大落后于模式研究。因此，尽管近二十年来积云参变的仪器设备已有很大进步，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。

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一个热门的专题领域。不过，这已超出本课程的范围。

§ 2 气团雷暴的结构特征和结构模式

1. 对流云的空间尺度

不同纬度，不同气团属性以及处于不同发展阶段的对流云空间尺度差别很大。一般低纬度对流云在发展阶段，云的厚度就可以达到5—10公里。云底穿入平流层的例子也不少，在我国华南海洋性气团中，由于空气暖湿不稳定，浓积云的厚度就可以达到10公里，而热带海洋上的信风积云一般却只有1—2公里厚。我国西北地区的积雨云常常只有3—4公里，极地气团中，雷雨云的厚度也只有4—5公里。

对流云的水平尺度，一般在淡积云阶段为几百米或1公里量级，气团性浓积云或积雨云单体的水平尺度为几公里至十几公里，至于一些家族数十公里的对流系统，则是积雨云单体聚集合并而成的。

对流云的空间尺度虽然因时因地差异很大，但是与大气中别的一些对流现象，如山谷风、海陆风等不同，对流云的垂直厚度 H 与水平宽度 L 具有同一量级，即 $\frac{H}{L} \approx 1$ 。这也是积状云与层状云结构特征上的主要区别之一。

2. 对流云中的垂直气流

对流云中垂直气流的大小和分布随对流云的发展阶段而不同。在形成阶段，云内的系统上升气流速度平均为几米/秒。雷雨云中最大上升气流速度为 20—25 米/秒，也曾云内观测到 60 米/秒的最大上升速度。在消散阶段，云内的下沉气流速度也可以达到与上升气流相当的强度。

平均讲，云内上升气流速度随高度的分布是从云底向上升速增加，在云的中下部中上下达到极大，而后向上减小，垂直分布近似地呈拋物型（图 1.1），但是，云中不同部位，上升气流的垂直分布可以是很不一样的。一般在雷雨云移动方向的前下，上升气流速度从云底向上逐渐增加，到云的上部达到最大值，而后向上迅速减小（图 1.2 a），而在雷雨云的后下边缘则在云的下部可以观测到下流气流，在 3—4 公里处达到最大，而云的上部仍有微弱的上升气流（图 1.2 c）。也曾观测到垂直气流起灭多变，随着高度交替出现升降气流的情形（图 1.2 b）。

图 1.3 列出一块处于发展阶段雷雨云互镜时，用一垂直指向的 3 厘米多普勒雷达观测到的云中垂直气流速度廓线。从中可以看出，在云的发展期间，云内盛行上升气流，上升速度最大值也是在云的中上部而回波顶的上升速度大概是云内最大升速值的一半，这一关系如果能为大多数观测事实所证实的话，那么我们就可以根据这一关系由普通雷达观测的回波顶的上升速度估计云内最大升速。图中在云的中心部位（14 时 05 到 07 分期间），

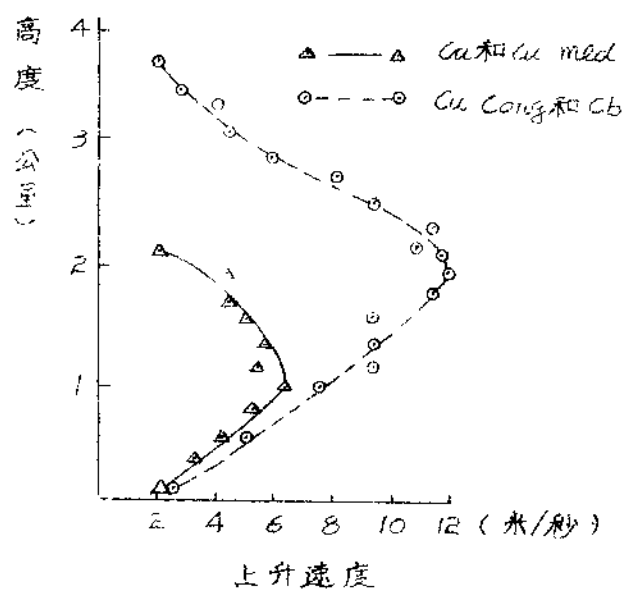


图 1.1 云中平均上升气流速度随高度的分布

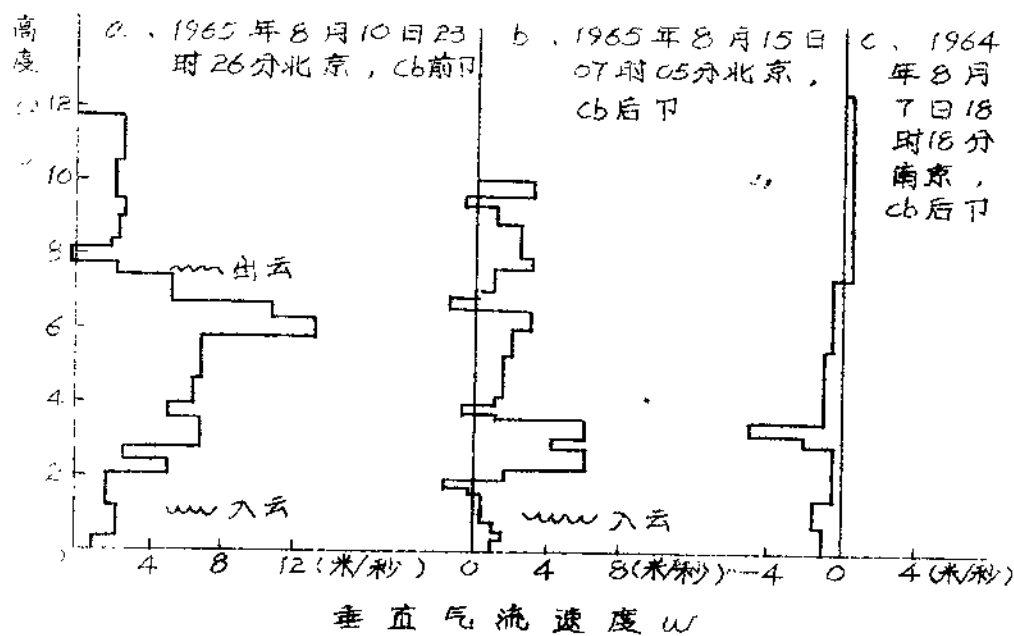


图 1.2 雷雨云不同阶段垂直气流速度随高度的变化

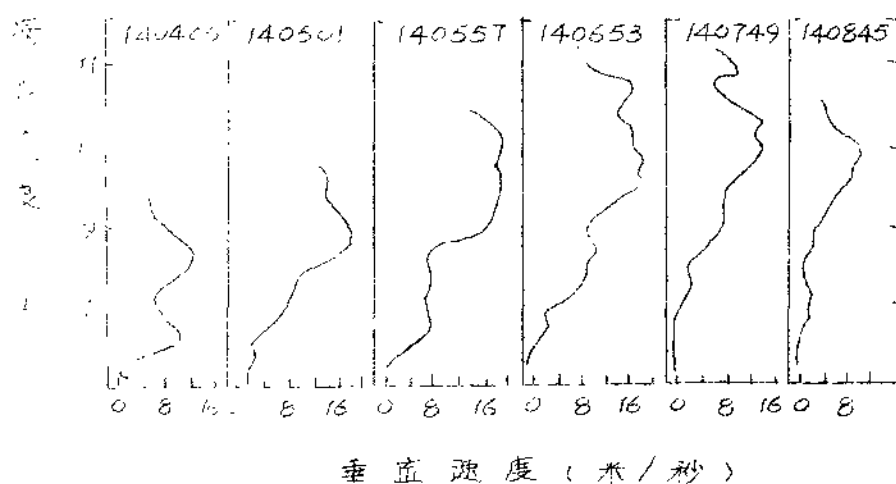


图1.3 一个雷暴内空气垂直速度廓线(按3厘米垂直指向的脉冲多普勒雷达观测推算)

回波顶的最大上升速度达到16米/秒，而云中的最大升速超过19米/秒，当然，应该注意，单个垂直指向的多普勒雷达不可能区分云中气流的时空变化，也不知道上述时间剖面离云的中心有多远，因此，所观测的结果不一定就是上升气流最强的下位。

云内上升气流速度随高度的变化和变化规律，说明了一个很重要的事实，在云的中下下由于上升速度随高度递增，为满足连续性的要求，必须有水平辐合气流卷入云内，以补偿垂直气流速度变化所引起的质量辐散。相反，在云的顶下，则有水平辐散气流。因此，为观测到这种水平气流的辐合，辐散情形。根据在对流云周围施放一群测风气球的观测结果，表明在浓积云附近，云外空气几乎全是向云内辐合的，在雷雨云附近，中层气流是辐合的，高层和低层存在辐散气流(图1.4)。

由此可见，对于我国的对流云的垂直气流的分布要更为复杂

一些，云中不仅有系统的上升气流，也有系统的下沉气流，图1.5是一块阵雨云过境时根据多普勒雷达的观测资料绘制的云内垂直气流的时间剖面图。这块云的厚度约6公里，在云的上、下边缘进行上升气流，上升气流速度最大区域出现在云的上、下边缘4米/秒。云的下边缘是下沉气流，强度和范围比上升气流略小。初始回波出现在2—2.5公里高度处，温度为 -10°C 左右。这块阵雨云在地面产生的雨势不大，为0.7毫米，在开始降雨时，短期内降雨速率较大，达8毫米/小时。按多普勒资料推测云内雨滴直径

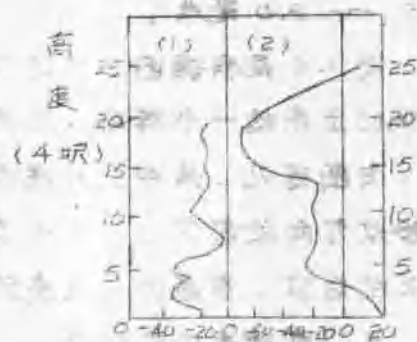


图 1.4 积状云内垂直气流
幅合、辐散的高度分布
(1) 积状云，(2) 积雨云。
(单位：每12秒
面积的平均值)

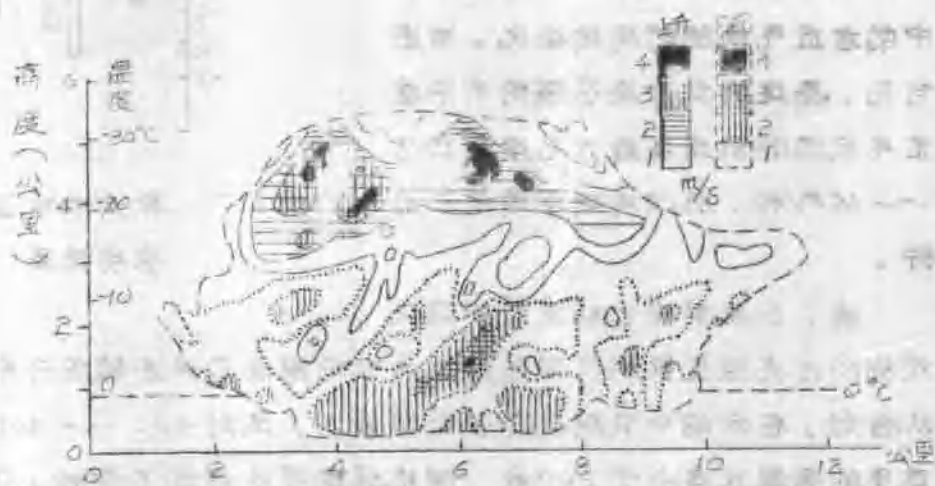


图 1.5 一块阵雨云中垂直气流高度分布