

《风暴和云动力学》述评

美国科罗拉多州立大学(CSU)的 W. R. Cotton 教授和国家大气研究中心(NCAR)的 R. A. Anthes 博士所著的《Storm and Cloud Dynamics》(1989)中译本《风暴和云动力学》已由气象出版社出版,全书 949 页 78 万字。这本专著以中尺度气象学的核心领域—中小尺度降水系统为中心,系统地论述了云和降水性中小尺度系统的动力学和物理学,较深刻地阐释了中小尺度气象数值模式的理论基础,概括了 1980 年代这一专题领域最新研究成果。具有较高的科研参考价值,是研究生和大学本科高年级学生学习云动力学和中小尺度气象学的一本好的教学参考书。书中附有大量反映最新研究进展的参考文献,累计达 1533 篇。下面就该书的基本内容和特点作一简要的概括和评述。

1 基本概念和参数化

前 6 章讨论云和云系的基本理论和各种次网格物理效应的参数化。第 2 章根据尺度分析导出一组用张量形式表达的适合于云模式或中尺度模式的湿对流系统基本方程组。其中热力学方程引进了一个在液水—冰水绝热转化过程中守恒的热力学变量 θ_w , 称为冰—液水位温,相当于干系统中的位温 θ 。在水分连续方程中引进包括水汽、云水、雨水、冰晶、霰和冰晶聚合体的混合比,且各态自有相应的连续方程,其中包含各种形态水物质之间的转换率,通过微物理过程的参数化方案来计算(第 4 章)。为了闭合湿对流系统方程组,需有计算压力的预报方程。在积云和雷暴系统中,垂直速度太大,需采用非静力平衡法计算压力场,书中介绍了三维云模式中采用的时间分离方案,即将运动方程分解为含声波和不含声波的两部分,用小时步积分含声波部分解出声波,然后利用全弹性连续方程和状态方程建立压力倾向方程求解,受平流时间尺度控制的部分和各标量方程按长时步积分。在非静力平衡模式中采用 σ - Z 坐标系,以方便描绘地形。第 3 章全面论述了各种平均理论,并就雷诺平均过程导出雷诺应力和湍流输送项。作者在评述一阶闭合理论的基础上指出,涡动交换理论的基本弱点是物理属性总是顺梯度扩散的,不能解释行星边界层和深对流研究中发现的逆梯度输送的现象,所以对高阶闭合理论尤其是二阶闭合理论作了较为详细的阐释。该章还讨论了中尺度模式网格体的“部分凝结”及其效应问题。

第 4 章讨论云微物理过程及其参数化,包括暖雨过程和冷雨过程的参数化。首先在引进暖云胶性稳定度概念基础上评述各种滴谱拓宽机制、碰并效率、大水滴的自发破碎和碰撞破碎机制。因此用显式模式模拟上述过程引起的全滴谱演变过程十分困难,在较复杂的云和中尺度模式中常采用较简单的参数化方法,但目前的暖云自动转化参数化方案的模拟能力很小,不同方案计算的转化率可相差几个数量级。在雨滴碰并云滴增长过程的参数化方案中对滴谱函数的人为假定使其模拟能力受到限制。云模式或冰相微物理过程的参数化要更为复杂,由于冰质点的形状、密度、运动特性等特性各异,现有的理论很不完善,

相应的参数化公式的不确定性更大。因此,在模式中采用何种详细程度的参数化微物理过程需要斟酌。实际上目前云模式中包含的复杂微物理过程,大多数还不能从云物理观测中得到证实。该章还简单讨论了云微物理过程对云动力学的影响。

第5章介绍辐射效应及其参数化。适合云或中尺度模式的辐射参数化方案较少,主要是缺乏能明显影响云中辐射传输的云物理特征的有代表意义的资料。目前主要采用“双流近似”方案。对于短波辐射,书中介绍了 Stephens 等发展的参数化方案。对于长波辐射,通常将光学厚度大的云视为黑体,而把光厚度不大的卷云及层积云等看成是“灰体”,定义一有效放射率,根据云中液态水路径的垂直分布确定长波辐射通量垂直廓线。

第6章较全面的论述了积云对流参数化。它涉及两个方面,一个是大尺度强迫对积云对流的控制和调节作用,这与降雨率的确定有关;另一个是积云对流对大尺度环境的反馈效应,包括相变潜热效应及热量、水分和动量的垂直输送效应。该章在详细阐述积云参数化的物理依据、观测证据和联结大尺度参数与积云效应之间的数学框架的基础上,对现有的积云参数化方案作了全面深入的评述,包括湿对流调整方案、郭晓岚型方案、Arakawa-Schubert 方案,以及适用于中尺度模式的 Kreitzberg-Perkey 方案和 Fritsch-Chappell 方案。并指出到目前为止,尚没有一种积云参数化方案能反映不同时空尺度上都适用的积云对流与环境之间相互作用的信息。近年来提出用显式模拟云和降水效应的方法避免现有积云参数化方案的随意性。这类能显式分辨对流尺度与中尺度相互作用细节的细分辨模式,有可能成为研究不同尺度系统之间相互作用的最有前途的途径。

2 云动力学

后6章占全书篇幅的2/3,论述各类云和云系的物理学和动力学,结合理论模拟和观测分析中所获取的最新认识论述这一领域的研究现状。第7章讨论动力性最小的雾和层积云,把雾作为边界层层状云的一种来看待是有其特色的。该章的重点是海洋性层积云和含云边界层模式,包括整层平均模式、实体型模式、高阶闭合模式、大涡旋模式,以及夹卷不稳定机制和风切变效应。海洋层积云对局地气候起着重要的影响。

第8章讨论积云。在分析晴天积云和单体积云结构的基础上,较全面地论述了积云的组织机制、夹卷效应和下沉气流的发动及其在积云组织中的作用、重力波的作用、降水和冰相过程的作用、积云合并机制及其与大尺度辐合的相互作用。

第9章积雨云和强对流风暴,是全书篇幅最大的一章。该章较深入地评述了各种对流风暴的结构特征、概念模式、上升气流和湍流、下沉气流和低层外流及阵风锋、风暴的移动和传播机制,包括对流翻转模式和波动-CISK 模式两种自传播理论、风暴的分离、旋转雷暴中气旋和龙卷、雹暴、对流性暴雨和风暴起电与风暴动力学的相互关系等。

第10章中尺度对流系统(MCS),阐述热带飑线系统、热带云团、中纬度飑线系统和尺度对流复合体(MCC)四类MCS的结构特征、概念模式和形成机理,指出MCS的发生及其稳定维持涉及一系列复杂过程,关键的问题是尺度环流的建立和维持,这与深对流的砧状云相互合并、低层中高压形成所创造的自身斜压性以及辐射不稳定化等过程有关。该章还讨论了热带气旋的中尺度结构及其与水汽、热力不稳定度及边界层辐合等环流特征的相互作用。

第 11 章为温带气旋的中尺度结构和中、高云。在气旋形成的大尺度扰动不稳定基础上概括出三类输送带的概念模式,并讨论了温带气旋不同部位的 6 类中尺度雨带的结构特征和成因。该章对中、高云的结构及其数值模拟也作了概括,并从辐射效应角度论述了大尺度模式的中、高云的参数化。

第 12 章主要讨论受地形强迫产生或加强的冬季降水性云和云系。除了过山气流的线性和大振幅理论以外,对地形性降水中的播撒-受播过程、地形对温带气旋及其降水的影响,以及地形云中过冷液态水分布和降水效率都作了较为详细的评述,后者对飞机结冰、云的辐射特性和人工降水机会等方面都有重要的意义。

本书最后指出,1990 年代美国正发展新的观测系统,包括新型 NEXRAD 多普勒雷达系统,风、温、湿垂直廓线仪系统,新的卫星探测系统,以及自动遥测地面观测网,可分辨出中- β 尺度系统的特征,并可以构划出水分及其不同相态之间的四维收支图象。这将使强天气研究和短时预报取得实质性进展。并将促进全球大气化学、大气环流和气候变化等方面的研究。

《风暴和云动力学》一书将云物理学、云动力学与中尺度气象学有机的结合起来,是该书最大的特点。全书始终强调观测研究与模拟研究相结合的重要性。书中对各专题领域的论述兼顾各家观点并作有针对性的评论,并给读者留有独立思考的余地,做到针对性与客观性相结合。当然,该书取材主要源自美、欧、澳地区,对亚洲和中国的云和风暴研究状况几乎没有论及。在中译本前言中作者 Cotton 表示:“我希望本书有助于了解这些风暴在我们各自国家之间的相似性和相异性。我盼望更多地了解这些风暴在中国的特征。”我们也希望这书的中译本将有助于国内云物理和中尺度气象领域的读者了解风暴和云动力学的基本理论和国外近年来的研究进展。

叶家东 范蓓芬
(南京大学大气科学系)