

ZHONGXIAOCHIDU TIANQIXUE

中小尺度天气学

张 杰 编著

气象出版社

China Meteorological Press

中小尺度天气学

张 杰 编著

气象出版社

内 容 简 介

中小尺度气象学主要研究天气尺度以下范围天气现象(如暴雨、雷暴、大风、冰雹、龙卷、下击暴流等)的形成机理、发生发展及移动演变规律和对它们的预测、预报,以及人工影响的理论、方法和技术。本书将天气学基础理论与数学、物理推导相结合,使之具有科学严谨性;注意兼顾了教学要求与台站实际需要,使之具有较高的实用性;尽量地反映当前中小尺度天气学研究新进展,使之具有前瞻性。全书共七章,分别讨论了中小尺度天气系统的基本概念、物理基础、动力过程、由大气内部过程和由地形作用产生的中小尺度系统,较详细地介绍了常用的分析、预报和监测方法。为方便学习和教学,每章开头都有课前导读和要点提示,结束时还给出了一些复习思考题,并在书末给出了参考答案。

本书内容丰富充实、论理简明扼要、方法清晰实用,既可以作为高校大气科学专业及相关专业教材,又可以作为气象专业成人教育等相关领域的培训教材,还可作为天气预报工作者研究学习的参考材料。

图书在版编目(CIP)数据

中小尺度天气学/张杰编著. —北京:气象出版社,2006.2

ISBN 7-5029-4112-6

I. 中… II. 张… III. ①中尺度-天气学②小尺度-天气学 IV. P445

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 006291 号

Zhongxiaochidu Tianqixue

中 小 尺 度 天 气 学

张 杰 编著

责任编辑:林雨晨 终 审:黄润恒

封面设计:陈 璐 责任技编:王丽梅 责任校对:王丽梅

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

总 编 室:010-68407112

发 行 部:010-62175925

印 刷:北京市昌平环球印刷厂

开 本:787mm×960mm 1/16

印 张:18.25

字 数:365 千字

邮政编码:100081

网 址:<http://cmp.cma.gov.cn/>

Email:qxcsb@263.net

版 次:2006 年 2 月第 1 版

印 次:2006 年 2 月第 1 次印刷

印 数:0001~4000

定 价:28.00 元

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

中小尺度天气学是天气学的一个分支,它是研究中小尺度天气系统的活动规律、天气特征和预报方法的一门学科。中小尺度天气从形成机制上可以分为两类,一类是由大气内部过程的综合作用产生;另一类是由不均匀下垫面引起的强迫作用产生。由于大多数中小尺度系统具有很大能量,会造成剧烈天气,这不仅会给国民经济和人民生命财产造成重大损失,还会严重地威胁航空、航天活动和其它军事活动。因此,对中小尺度天气系统的研究已成为当代大气科学重大研究课题之一。近年来,许多国家进行了多项中小尺度天气系统研究,取得了众多成果,这些成果与其它领域的成果一起,丰富和促进了人们对大气现象的认识与理解。

本书是在成都信息工程学院《中小尺度预报讲义》的基础上改编而成的,该讲义在教学实践中听取了许多来自基层气象台站的进修学员的意见后进行了修订。全书共分七章,第一章从分类标准、研究内容对象、研究方法等方面介绍了中小尺度天气系统的基本概念;第二章介绍了中小尺度天气系统预报的物理基础;第三章根据大气层结的稳定度,介绍了中小尺度天气系统的动力过程,这些都是中小尺度天气预报工作者必须掌握的基本理论。第四、五章从中小尺度系统的生成原因出发,分别讨论了由大气内部过程综合作用产生和由地形作用产生的中小尺度系统;第六章介绍了当前中小尺度天气研究中常用的分析方法;第七章介绍了中小尺度天气预报和监测方法。

编写中主要遵循以下原则:

1. 天气学基础理论与数学、物理推导相结合;
2. 兼顾教学要求与台站实际需要;

3. 尽量反映当前研究新进展。

本书可供高等学校气象专业学生学习和天气预报工作者参考。

本书内容丰富,讲授时可根据授课对象情况及授课时间酌情取舍。

在编写本书的过程中,作者努力跟踪大气科学中关于中小尺度系统研究的新进展、新技术,把它们纳入到教材中来,力求反映当代新成果、新技术,力图保持本书的先进性和实用性。但由于学识所限,必有许多不足之处,希望学术同仁不吝赐教。

在本书编写过程中,编者主要参阅了杨国祥、郑良杰、陆汉城、朱乾根、林锦瑞、寿绍文等专家教授主编或编著的著作,参阅了中国人民解放军空军司令部气象局编撰的《北京地区强对流监测试验论文集》中有关专家的著作,得到了成都信息工程学院成教院有关领导和学院地球环境系的老师及解放军理工大学气象学院的许多专家学者和气象出版社编辑的支持和帮助,在此向他们表示致谢。

编 者

2005年8月

目 录

第一章 中小尺度天气系统的基本概念	(1)
§ 1.1 天气系统的分类标准	(1)
1.1.1 动力学标准	(2)
1.1.2 欧美、日本标准	(3)
1.1.3 Orlanski 标准	(3)
§ 1.2 中小尺度天气学的主要研究对象	(4)
1.2.1 中小尺度天气系统的基本特征	(4)
1.2.2 中小尺度天气学的主要研究对象	(5)
§ 1.3 主要研究进展	(7)
1.3.1 研究不同尺度系统的相互作用	(9)
1.3.2 研究新的观测事实	(10)
1.3.3 中小尺度系统的数值模拟	(11)
复习思考题	(13)
第二章 中小尺度天气预报的物理基础	(14)
§ 2.1 包辛内斯克近似	(14)
§ 2.2 滞弹性近似	(20)
§ 2.3 夹卷过程	(24)
2.3.1 气泡模式	(24)
2.3.2 气柱模式	(26)
§ 2.4 对流发生的中尺度触发机制	(28)
复习思考题	(31)
第三章 中小尺度天气系统的动力过程	(32)
§ 3.1 静力稳定度	(32)
3.1.1 静力稳定度	(32)
3.1.2 对流性不稳定	(35)
§ 3.2 对称稳定性	(39)
3.2.1 第二类条件性不稳定(CISK)	(39)
3.2.2 惯性不稳定及其判据	(40)
3.2.3 干对称不稳定	(42)

3.2.4	无限湿大气的条件性对称不稳定	(44)
3.2.5	有限湿大气的条件性对称不稳定	(45)
3.2.6	应用及实例	(47)
3.2.7	切变不稳定	(48)
复习思考题		(51)
第四章 天气尺度系统衍生的中小尺度系统		(52)
§ 4.1	中尺度雨团和中尺度雨带	(52)
4.1.1	积云单体	(53)
4.1.2	浅单体对流	(54)
4.1.3	中尺度雨团和雨带	(56)
§ 4.2	雷暴	(62)
4.2.1	多单体风暴	(63)
4.2.2	超级单体风暴	(65)
4.2.3	雷暴云的移动规律	(71)
§ 4.3	飑中系统	(73)
4.3.1	雷暴高压	(73)
4.3.2	飑线	(74)
4.3.3	中尺度低压	(81)
4.3.4	飑中系统生命史及与锋面的区别	(84)
§ 4.4	下击暴流	(85)
§ 4.5	龙卷	(89)
4.5.1	龙卷的一般情况	(89)
4.5.2	龙卷的形成	(92)
§ 4.6	强雷暴发生、发展的有利条件	(95)
§ 4.7	中尺度对流复合体(MCC)	(98)
4.7.1	MCC的一般特征	(98)
4.7.2	MCC的中尺度结构	(99)
4.7.3	MCC生成和发展的天气尺度环境	(102)
4.7.4	MCC的一次实例	(105)
复习思考题		(110)
第五章 地形衍生的中小尺度系统		(111)
§ 5.1	地形作用	(111)
5.1.1	抬升作用	(112)
5.1.2	辐合作用	(112)

5.1.3 云物理作用	(114)
§ 5.2 海陆风	(116)
5.2.1 海陆风锋	(116)
5.2.2 海陆风锋与天气系统叠加作用	(119)
§ 5.3 地形波	(123)
5.3.1 地形波现象	(123)
5.3.2 地形波的理论解释	(124)
§ 5.4 城市热岛效应	(132)
5.4.1 城市热岛的基本特征	(132)
5.4.2 城市热岛形成的天气学条件	(136)
5.4.3 城市热岛环流及其对天气的影响	(137)
§ 5.5 下坡风	(142)
5.5.1 下坡风和大尺度天气形势	(142)
5.5.2 下坡风和逆温层	(143)
5.5.3 下坡风和地形	(145)
复习思考题	(147)
第六章 中小尺度天气分析的常用方法	(149)
§ 6.1 资料搜集与处理	(149)
6.1.1 中小尺度天气资料的搜集	(150)
6.1.2 中小尺度天气资料的获得和处理	(151)
§ 6.2 尺度分离	(157)
6.2.1 Barnes 方法	(158)
6.2.2 Shuman-Shapiro 方法	(161)
§ 6.3 中小尺度天气图绘制与分析	(165)
§ 6.4 中小尺度天气系统诊断分析	(169)
6.4.1 大气不稳定能量和对流的关系	(169)
6.4.2 对流有效位能(CAPE)高度所作的功	(170)
6.4.3 对流抑制能量(CIN)	(171)
6.4.4 下沉对流有效位能(DCAPE)	(172)
6.4.5 常用的热力稳定度指数	(172)
6.4.6 大气热力—动力稳定度组合参数	(173)
6.4.7 几种参数的求法	(175)
6.4.8 高分辨不稳定能量的计算	(176)
6.4.9 Q 矢量分析	(178)

6.4.10 位涡分析	(180)
6.4.11 螺旋度分析	(185)
§ 6.5 中尺度数值模拟简介	(191)
复习思考题	(192)
第七章 中小尺度天气系统的预报	(193)
§ 7.1 临近预报和甚短期预报的概念	(194)
§ 7.2 临近预报和甚短期天气预报方法的类型	(197)
7.2.1 线性外推	(198)
7.2.2 中尺度模式法	(203)
7.2.3 气候学方法	(210)
7.2.4 利用气象知识法	(216)
§ 7.3 暴雨预报	(222)
7.3.1 暴雨的定义和类别	(222)
7.3.2 中国大暴雨过程的天气形势	(224)
7.3.3 暴雨预报方法	(224)
§ 7.4 强对流天气的预报	(234)
7.4.1 强对流的定义和类别	(234)
7.4.2 强对流的天气气候特征及天气形势	(234)
7.4.3 雷暴的发生、强度及移动预报	(235)
7.4.4 雷暴大风(下击暴流)预报	(237)
7.4.5 冰雹预报	(240)
7.4.6 预报准确率的评估及提高途径	(249)
§ 7.5 临近预报和甚短期预报系统	(251)
7.5.1 预报系统的特征	(251)
7.5.2 预报系统的设计	(254)
7.5.3 预报系统的业务工作站	(256)
复习思考题	(263)
参考答案	(265)
参考文献	(277)

第一章 中小尺度天气系统的基本概念

【课前导读】

本章介绍了中小尺度天气系统常用的划分标准。阐明了中小尺度天气学的主要研究对象是天气尺度以下范围的各种天气现象(如暴雨、雷暴、大风、沙尘暴、冰雹等)的形成机理、发生发展及移动和演变的规律,以及对它们的预测、预报和人工控制、影响的理论、方法和技术;最后介绍了中小尺度天气研究的主要进展。

【要点提示】

- ◆ Orlanski 分类标准
- ◆ 中小尺度天气系统的基本特征
- ◆ 中小尺度天气学的主要研究对象
- ◆ 中小尺度天气研究的进展

§ 1.1 天气系统的分类标准

大气探测和天气分析的实践证明,大气演变是多尺度大气运动相互作用的结果。一年中的四季变化,持续数天的连阴雨过程,海陆风、山谷风的昼夜交替,阵性雷雨等等都表现了不同时间尺度的大气运动。影响范围有十几米到几百米的龙卷风,几千米到十几千米的冰雹,几十千米到几百千米的飏线,几百千米到几千千米的气旋(反气旋)、高空槽(脊)等等表现了不同空间尺度的大气运动。一般来讲,各类天气系统的主要区别在于时空尺度的不同。大气中,运动的时空尺度差别很大。小的如微扰动涡旋仅有 $10^1 \sim 10^2 \text{ m}$,持续几秒钟到10多分钟;大的如行星波可达 10^7 m 。对天气有直接影响的运动系统约在 10^2 m (龙卷) $\sim 10^7 \text{ m}$ 之间。天气系统按其时空尺度可以划分为大尺度、中尺度和小尺度三类系统。大尺度系统的水平尺度一般在几百至几千千米,生命期常为一天至几天,如气旋、反气旋、锋面、台风、高空槽(脊)等。中尺度系统的水平尺度一般在十几千米至几百千米,生命期约为1小时至十几小时,如雷暴群、飏线等。小尺度

系统的水平尺度一般在几十米至十几千米,生命期只有几分钟至几小时,如雷暴单体、龙卷等。

大气环流极为复杂,不同尺度的系统具有不同的物理性质,在大气科学研究中,对天气系统具体分类常采用动力学标准、欧美(日本)标准和 Orlanski 标准。

1.1.1 动力学标准

在大气动力学中,一般是通过大气内部的各种物理参数的大小,来区分大气现象的时空尺度。尽管目前我们并不完全了解由观测导出的时空尺度与物理参数间的内在关系,但是,通过 Ro (罗斯贝数)、 Fr (弗劳德数)、 Ri (里查森数)、 Re (雷诺数) 等无量纲参数的大小,可以反映作用于大气的各种基本作用力的相对大小,从而确定不同尺度大气运动的性质。表 1.1 中列举了 Ro 数和 Fr 数的差异所决定不同尺度运动的特性。对于中尺度大气运动来说, $Ro \sim 1$, $Fr < 1$ 具有准静力平衡、旋转和非地转平衡是基本的运动性质,因而,Peilke 把中尺度运动定义为:它的水平范围足够的大,以致能够维持准静力平衡近似,但又足够的小,以致在边界层以上的自由大气中,实际风环流不能维持地转风和梯度风平衡。

表 1.1 不同尺度的运动性质

	Ro	Fr	运动性质
大尺度	10^{-1}	$\ll 1$	准静力、旋转是基本的,忽略非地转平衡
中尺度	1	< 1	准静力、旋转和非地转平衡是基本的
小尺度	$10^1 \sim 10^2$	$10^0 \sim 10^1$	非静力、忽略旋转,非地转平衡是基本的

大气内部过程不稳定性的尺度选择是与数 Ri 有关的,它的大小反映出不同性质的物理过程,并且可以通过形态比(L/H)所确定的几何上与动力上的约束,来区分各种不稳定性的不同尺度。表 1.2 是几种不稳定度的 Ri 数大小、时空尺度和形态比。斜压不稳定时, $Ri \gg 1$, 它的水平尺度相当于 Rossby 变形半径,形态比为 N/f_0 , 这种不稳定性,表征着温度扰动的有效位能向风场旋转部分调整,它属于大尺度过程。对称不稳定时, $Ri \sim 1$, 它的水平尺度为 $\bar{U}_z H / f_0$, 形态比为 $\bar{U}_z / f_0$, 这种不稳定性,表征着斜压大气中所出现的扰动动能是由基本气流动能转换而来的,属于中尺度过程。对流不稳定时 $Ri \ll 1$, 它的水平尺度为 H , 形态比为 1。这种不稳定性是将对流不稳定能转化为扰动动能,属于小尺度过程。

从大气对强迫作用的线性响应情况的不同,也可反映出不同尺度的大气运动。如果有均匀气流 U , 通过波数为 k 的弱正弦波地形,在线性响应情况下,大气产生波动的垂直波数为 m , 这时气块受到强迫作用的振荡频率 $\omega = kU$, 所产生的重力惯性波的色散关系为

$$m^2 = k^2 \left(\frac{N^2 - \Omega^2}{\Omega^2 - f^2} \right) \quad (1.1.1)$$

式中 $\Omega(z) = \omega - kU$, 表示多普勒偏移频率, 在拉格朗日坐标系里 $\Omega(z) = \omega$ 。由不同的 ω 所表征的大气响应情况, 可以区分不同尺度的大气过程。当 $N > \omega > f$ 时, 大气波动可向上垂直传播, 对于复数 m 这时 $\text{Re}(m) > 0$, 响应的这些过程, 包括中尺度重力惯性波, 某些深对流等属于中尺度范围的大气运动。但在 $\omega > N, f > \omega > \sqrt{\beta U}$ 时, 大气响应随高度呈指数衰减, 明显地反映了中尺度运动同小尺度和大尺度运动的差别。

表 1.2 大气过程几种不稳定度的参致和形态比

	Ri	水平尺度	时间尺度	形态比
斜压不稳定	$\gg 1$	NH/f_0	$\sqrt{Ri/f_0}$	N/f_0
对称不稳定	~ 1	$\bar{U}_z H/f_0$	$1/f_0$	$\bar{U}_z/f_0$
对流不稳定	$\ll 1$	H	$\sim 1/N$	1

1.1.2 欧美、日本标准

欧美各国、日本气象界, 一般以水平空间尺度作为大气过程的尺度划分标准。他们将大气过程划分为大尺度($>2000\text{km}$)、中尺度($2000 \sim 2\text{km}$)和小尺度($<2\text{km}$)。而日本, 在大尺度和中尺度间又分出一种中间尺度($200 \sim 2000\text{km}$)。Gate 则将热带现象的水平尺度区分为 A 尺度(波动尺度; $10^3 \sim 10^4\text{km}$)、B 尺度(云簇尺度; $10^2 \sim 10^3\text{km}$)、C 尺度(中尺度; $10^1 \sim 10^2\text{km}$)、D 尺度(积云尺度; $10^0 \sim 10^1\text{km}$)。

1.1.3 Orlanski 标准

Orlanski(1975)提出了大中小尺度及其细分(α, β, γ), 构成八种尺度, 详见表 1.3。这种尺度区分方法目前已被气象界广泛采用。

表 1.3 Orlanski 尺度标准

大尺度(Macro)		中尺度(Meso)			小尺度(Micro)		
α	β	α	β	γ	α	β	γ
$>10000\text{km}$	$2000 \sim 10000\text{km}$	$200 \sim 2000\text{km}$	$20 \sim 200\text{km}$	$2 \sim 20\text{km}$	$200\text{m} \sim 2\text{km}$	$20 \sim 200\text{m}$	$<20\text{m}$

概括来说, 这种大气尺度的划分, 一般有两步: 一是按大家熟知的大(Macro)、中(Meso)、小(Micro)尺度的大小顺序划分, 每一尺度范围大约相差两个数量级; 二是再以数字(I, II, III)或字母(α, β, γ)细分, 每一尺度范围大约相差一个数量级。这些主要以水平空间尺度划分尺度的方法, 在实用上是方便的。由于考虑到不同实际需要, 各人

提出的尺度界限并不一定一致,有的还有较大差别。在中小尺度气象业务和研究工作中,究竟用哪种尺度分类,应当根据自己的实际情况来确定。

本书采用 20~200km 的标准来阐述中尺度天气系统,采用 2~20km 的标准来阐述小尺度天气系统,这与我国惯用的尺度分类方法是一致的。

§ 1.2 中小尺度天气学的主要研究对象

在过去的几十年里,尽管中小尺度气象已经引起了人们的较大注意,并进行了一些试验和研究,但大气科学的研究,仍主要致力于直接了解大尺度环流和改进天气尺度的气象预报。随着计算机、气象卫星、多普勒天气雷达、全球大气观测和气象资料的迅速传输等各种技术进步,以及数值预报模式的不断完善,对于天气尺度的环流形势和天气数值预报已经取得了明显的成功。然而对于像下击暴流、暴雨、雷暴等一类中小尺度天气现象的预报却进展相当迟缓。这种情况十分常见,天气尺度的环流形势预报是正确的,而中小尺度天气现象的预报却是失败的。一方面这是因为中小尺度系统的水平尺度一般小于目前常规气象观测网的站点距离,在它影响下所发生的天气常被遗漏,无法为中小尺度天气预报有效地提供新的气象信息,难以准确地解决中小尺度天气数值预报的初值问题。另一方面是到现在为止,人们对于大、中、小尺度系统的相互作用问题认识还不很清楚。中小尺度系统的研究,是研究各种尺度运动相互作用的重要一环,它有助于改进数值预报模式和整个天气预报,特别是对于提高灾害性、危险性天气的短时预报水平,有着重要的意义。

1.2.1 中小尺度天气系统的基本特征

中小尺度天气系统有以下基本特征。

(1) 水平尺度小和生命期短

小尺度天气系统的水平尺度为 2~20km,中尺度天气系统的水平尺度为 20~200km,>200km 以上的各种系统为大尺度天气系统。中小尺度系统的垂直尺度为 10km 左右,因而对这两类系统来说, H/L 分别为 10^{-1} 和 10^0 ,但大尺度系统为 10^{-2} 。大尺度系统的生命史一般在 12~24h 以上,而中尺度系统的生命史在几小时到十几小时,小尺度系统一般在 1h 以下。由于上述时空尺度的特点,决定了中小尺度系统具有许多不同于大尺度系统的动力学的特征。

(2) 气象要素梯度大

大尺度天气现象,要素梯度较小,气团内部更是如此,即使是梯度大的锋区附近,温度和气压一般要相距 100km 至几百千米才变化几摄氏度、几百帕。然而中小尺度天气现象中要素场的梯度要大得多。例如气压梯度可达 1~3hPa/km,温度梯度可达

5°C/10km。大尺度锋面过境时,变压一般是1~2hPa/h,而飑线等中小系统过境时,变压为1hPa/1~2min。湿度场中,大尺度的露点梯度约为几°C/100km,而中尺度露点梯度为1.5°C/10km左右。

同大要素梯度相联系,中小尺度天气现象一般比较激烈,例如雷暴、暴雨、冰雹等等。大尺度天气现象中大风一般只有十几m/s,台风中最大风力也只有几十m/s,然而通常飑线阵性大风就能达几十m/s,而龙卷大风甚至可达100~200m/s。

同中小尺度系统中的激烈的天气现象相联系的,是出现很强的垂直运动。大尺度天气系统的垂直运动的量级一般只有 10^0 cm/s,而中尺度系统为 10^1 cm/s~几m/s;小尺度系统一般为10m/s,有人曾观测到50m/s。同样的,大尺度系统的散度约为 10^{-5} /s,而中系统约为 10^{-3} ~ 10^{-4} /s,小系统如龙卷有时可达 10^{-1} ~ 10^{-2} /s。

(3)非地转平衡和非静力平衡

大尺度运动是准地转的,在大尺度系统中近于满足地转风或梯度风平衡。在中系统中,加速度同地转偏向力和气压梯度力具有相同量级,而小系统中的地转偏向力比加速度和气压梯度力要小1~2个量级,因而不能满足地转风平衡。所以进行中小尺度天气分析时,一般不宜用地转风原则,我们常会看到风向与等压线相垂直的现象。

对于大尺度系统和大多数中尺度系统可以看作是准静力平衡的,但在强风暴一类的对流系统和小尺度系统中,大气运动是非静力平衡的。

1.2.2 中小尺度天气学的主要研究对象

中小尺度天气系统主要包括中低压、中气旋、雷暴群、对流风暴、气旋和锋面中的中尺度系统、MCC、中尺度重力波、海陆风环流、高低空急流中的大风核、热岛效应、龙卷风等。这些天气系统从成因上可以分为二类,一类是由大气内部过程综合作用为主衍生的,如中低压、中气旋、雷暴群、对流风暴、MCC等;另一类是由地形中不均匀的下垫面引起强迫作用为主衍生的,如海陆风、山谷风、热岛效应、下坡风等等。

中小尺度天气学主要的研究对象是天气尺度以下范围的各种天气现象(如下击暴流、暴雨、降水、大风、沙尘暴、冰雹等)的形成机理、发生发展及移动和演变的规律,对它们的预测、预报和人工控制、影响的理论、方法和技术,研究这些天气现象所造成的各种灾害及对各种灾害的评估、预警、防治和对策方法。

中小尺度气象包含的现象很多,并还在不断地发现和描述。就天气系统来说, α 中尺度系统,有中尺度对流复合体、小尺度气旋等; β 中尺度系统,有局地对流风暴、飑线、海陆风锋等; γ 中尺度系统,有雷暴单体、热岛效应、晴空湍流等等。但在如此众多的系统中,最受人们关注的是对流系统。因为,它一般具有很大的能量,若以风速估计它的动能,那么,一个对流风暴的平均能量为 10^8 J,相当于十多个第一颗原子弹,由它造成的剧烈天气,会给人类活动带来严重影响。暴雨和强对流天气现象,都是同局地对流风

暴、飚线、雷暴群、中尺度对流复合体等中尺度对流系统有关的。而有些影响飞行活动的低云,如发生在暖洋面上的冷性低云,看起来是稳定性天气,实际上也是与浅对流过程有关的一种天气现象,因而弄清中尺度对流系统的结构及其生成演变机制,一直是中小尺度气象学研究的主要目标。中小尺度气象学包括中小尺度天气学、中小尺度动力学与数值模拟、中小尺度天气的短期和甚短期预报,也包括中小尺度大气物理学。它面临的主要科学问题是:关于中小尺度对流系统及形成暴雨的系统三维结构和发生、发展过程的观测研究;中小尺度系统和地形的关系研究;各类尺度天气系统与中尺度系统相互作用研究;中小尺度系统触发机制研究;中小尺度大气运动不稳定研究;中小尺度天气数值模拟和预报研究;以及中小尺度灾害性天气的短期、甚短期和临近预报方法研究。

中小尺度动力学主要从理论上研究中尺度天气系统的特征、结构演变与运动等基本问题,它是中小尺度天气预报,尤其是数值预报的基础,中小尺度动力学的中心问题是强风暴动力学,它与积云动力学存在明显的差别,它主要从理论上解释比积云尺度更大、生命史更长、天气更强烈、并与环境有明显相互作用的对流系统,下列各个方面的问题需要进行进一步的研究。

(1) 中小尺度环流的动力机制

包括中小尺度环流的动力结构、产生和维持的机理,以及中小尺度不稳定问题。在具有风的垂直切变和浮力的水平基本气流中有三种不稳定能够增长:一是浮力不稳定;二是惯性浮力型不稳定,又称对称不稳定;三是切变型不稳定,又称开尔文-赫姆霍兹(Kelvin-Helmholtz)不稳定。第一和第三种不稳定的尺度为几千米到几十千米,产生的主要是对流层中观测到的小尺度乱流、积云单体和小涡旋等,第二种不稳定的尺度为几十千米到几百千米,被认为是产生中尺度雨带和雪带的原因,它可能是锋面附近暴雨和强对流发展的重要物理机制。此外,波动-CISK,斜压-CISK及包含对流的不稳定机理用于解释中尺度系统的发展也需深入的研究。

(2) 中小尺度强迫机制和中小尺度波的传播特征

包括中小尺度波的波导现象,即在有折射指数梯度和临界层存在的条件下中尺度波的反射、吸收和传播特征以及强迫这些波的机理,它们与流体中的中小尺度能量输送方向关系密切。

(3) 积云与中尺度系统的相互作用

根据尺度分析,正压大气似乎不能产生界于对流尺度和变形半径之间尺度的运动,但观测表明,在热带(正压大气)确实存在明显的有组织的中尺度系统,这需从理论上进一步阐明。另一方面许多强的中尺度对流系统都是发生在中纬度的斜压气流中,因而研究斜压气流中对流推动的中尺度环流的发展已愈来愈引起人们的重视。对于湿对流和参数化问题也需要进一步研究。

(4) 中小尺度环流与大尺度环流的相互作用

包括中小尺度环流的触发机制、组织机制以及反馈作用等,这方面已做了很多研究,但对于中小尺度环流的热量、水汽和动量输送对全球环流或斜压波与行星波的影响还没有进行系统的研究。根据最近的研究表明,由海风产生的垂直热输送可占全球涡动输送的5%,这是不容忽视的作用。

(5) 中小尺度系统可预报性问题

现在是用两种方法研究这个问题,一是用确定性的数值模式来预报中小尺度天气的产生和发展;二是已知中小尺度系统的发生发展的大尺度条件,预报中小尺度环流出现的统计概率。最近的中小尺度可预报性研究表明,不同于全球或大尺度模式,中尺度可预报性在某些情况下对初始风、温度和水汽场的随机误差并不敏感,也就是说,初始条件的差别或误差在72h的预报中不会增长,因而只需把大尺度条件报好,并且在中尺度模式中有较高的分辨率、较真实的地面强迫和物理参数化方案就可能做出较好的区域尺度的72h预报。而在中尺度模式的初始场中同化进更多的中尺度信息,则可进一步改进预报效果。

由于强对流系统造成的天气现象剧烈,危害严重,本书在阐明中小尺度天气问题时,以强对流系统天气系统为主。

§ 1.3 主要研究进展

中小尺度气象学是我国大气科学的发展重点之一,近年来取得了显著成就。早在1960年代初期,我国已开始进行中尺度气象观测试验,1970年代后期以来,我国曾在华南、华中(湘中基地)、华北及华东地区进行了较系统的中尺度观测试验,积累了大量资料,对我国对流性天气发生的大尺度环境条件、一些中间尺度和中尺度天气系统,例如梅雨锋、江淮气旋、低空急流以及飑线等的结构特征及其生成和发展机制进行了诊断分析。

随后,作为“七五”重点科技项目,在京津冀、长江三角洲、珠江三角洲和长江中游地区建立中尺度系统监测预报的试验研究基地并开展与业务相结合的研究工作,已取得明显的成绩和效果;利用先进的探测设备,建成了中尺度灾害性天气的监测系统;利用先进的信息技术,建成了通信采集处理系统;在研制了各种概念模式和预报方法的基础上建立了业务预报流程,并进行了业务运用,取得了明显的预报效果,所使用的预报方法包括诊断分析、雷达预报方法、卫星云图预报方法、专家预报系统、中尺度数值预报模式及综合预报方法;探索了与临近预报(0~2h)相适应的预报服务手段及方式和方法,取得了明显的社会效益和经济效益;这些试验基地进行的业务预报试验及准业务试验,积累了大量观测资料,为开展中尺度分析创造了条件,对某些类型的中尺度天气系统有

了一些新的认识。这四个中尺度试验基地的建立和发展,为我国中尺度气象学研究奠定了良好的基础。

在中尺度大气动力学和数值模拟方面,我国也作了有成效的工作。例如研究了重力惯性波的不稳定性、低空急流形成的动力学及低空急流对重力内波的激发作用,低空强风切变导致的 Ri 数的减小与对称斜压不稳定的关系,及强对流的天气气候特征和演变规律等。同时,对江淮气旋、低空急流、飕线及暴雨进行了数值模拟研究,也取得了一定成绩。我国的 α 中尺度数值模式已有较大改进;建立了 β 中尺度云团数值模式,可模拟风暴的三维结构及生命史等演变过程和风暴分离为新单体的过程;模拟其结构和降水过程。

此外,近年来我国开展了一系列关于暴雨和强风暴的短期和甚短期预报的试验研究,例如我国中部地区暴雨和强风暴临近预报的联合试验以及区域性暴雨落区甚短期预报方法的试验研究,这些工作都已取得相当好的成果。经过近几年的研究,区域性暴雨数值预报也有明显的进步,在长江中游地区实现了业务化预报,对梅雨暴雨预报具有一定的效果和较好的预报技巧。

最近几十年来,中小尺度气象学得到了迅速的发展,无论在观测事实、理论研究和预报方面都有了很大进展。

研究揭示了比积云对流尺度更大、生命史更长的强风暴系统(即产生冰雹、暴雨和龙卷、雷暴等强烈天气的系统),它们无论在内部结构和环境条件上都与早期的雷暴模式有很大的差别。1940年代主要根据雷达和飞机的观测,取得雷暴单体演变过程资料,概括了雷暴单体三阶段的生命史模式;1950~1960年代通过特殊的地面、高空观测网,配合雷达和飞机观测,发现了强垂直风切变条件下发展的巨型雷暴—对流风暴;1970年代多普勒雷达的应用使人们进一步了解了风暴内部的气流结构和环境条件,了解了一个普通雷暴发展到对流风暴的演变过程,由此确定对流风暴的模式。观测研究概括出的不同类型的概念模式有助于了解各类对流风暴的物理本质,而且有助于设计更合理的强对流数值预报模式和改进对流性天气预报,它们是研究中尺度系统的基础。

早期的雷暴研究提出了雷暴发生的三个条件:水汽、条件不稳定和抬升机制,后来的观测和理论方面已经确认,强垂直风切变是使普通的生命期短的雷暴转变为生命期长的强风暴的主要条件,对于大气层结(如干暖盖)、干冷空气吸入、重力波、低空急流扰动等是中尺度扰动的触发机制和增强机制的研究也得到确认。

最近几十年来,已成功模拟了从一朵积云中到中尺度飕线和中尺度对流复合体(MCC)的发展和结构,与早期研究不一样的是当今研究的是深对流现象,并包含复杂的降水过程,不但涉及各种动力学,而且涉及到云的微物理学及其相互作用,中尺度数值模式作为一种强有力的工具已被广泛应用于中尺度气象学的研究和业务预报中。

随着专门的中尺度观测网的建立,不少国家都建立试验性的或正式的临近预报(描