



中尺度天气原理和预报

ZHONGCHIDU TIANQI YUANLI HE YUBAO

陆汉城 主编 / 陆汉城 杨国祥 • 编著



气象出版社

China Meteorological Press

内 容 提 要

本书根据十多年来教学实践和科学研究的总结,以国内外中尺度气象学发展趋势为思路,吸取了近年来最新研究成果,并考虑到业务发展的需要,综合概括了中尺度天气系统发生、发展的原理及中尺度天气的预报方法。本书依据天气学和动力学相结合的原则,以中尺度大气运动为主要对象,将中尺度气象学的诸多内容有机结合,物理概念清晰,深入浅出,并注重理论和实际的相互联系。

本书经教育部审定为普通高等教育“九五”国家级重点教材,可作为高等院校大气科学专业及相关专业的教材,也可作为气象、海洋、航空、农林、水利、环境等部门的科研人员和业务人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

中尺度天气原理和预报/陆汉城,杨国祥编著. —2 版. —北京:气象出版社,2004.2
ISBN 7-5029-2908-8

I. 中… II. ①陆…②杨… III. ①中尺度-天气尺度-理论-高等学校-教材②中尺度-天气预报-高等学校-教材 IV. P432

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 010194 号

Zhongchidu Tianqi Yuanli he Yubao

中尺度天气原理和预报(第二版)

陆汉城 主编

陆汉城 杨国祥 编著

责任编辑:陶国庆 终 审:周诗健

封面设计:世纪白马 责任技编:王丽梅 责任校对:王丽梅

出版发行:气象出版社

出版社地址:北京市海淀区中关村南大街 46 号

出版社电话:68407112

电子邮箱:CMP01@263.NET

出版社网址:HTTP://CMP.CMA.GOV.CN/

邮政编码:100081

传真号码:62176428

印 刷:北京昌平环球印刷厂
开 本:787mm×960mm 1/16
印 张:19.5
字 数:392 千字

版 次:2004 年 2 月第 2 版
印 次:2004 年 2 月第 1 次印刷
定 价:28.00 元

版权所有 侵权必究

前 言

当今大气科学研究朝着时间尺度和空间尺度的两极方向发展,即气候变化和中尺度气象是人们普遍关注的科学问题,而中尺度气象是研究暴雨、冰雹、雷暴大风等不稳定强风暴天气及低云、浓雾等稳定中小尺度天气的形成、发展原因与预报的学科。随着人类社会活动现代化快速发展的进程,现代大气探测技术和计算机技术的广泛运用,揭示了大量的观测和研究事实,使中尺度气象有了更丰富的研究内容。因此,在汇集众多研究成果的基础上,加上我们二十多年来对这一领域的科学研究和教学实践,以及教学改革的需要,又根据 21 世纪大气科学学科的发展和人才培养的要求,编写了这本教材。

本书的第一章至第八章由陆汉城编写;第九章至第十一章由杨国祥编写,全书由陆汉城统编。由于水平限制,书中错误和不妥之处在所难免,请读者赐正。吕梅同志曾经为本书提供了部分章节的素材和承担了一些校对工作,在此表示感谢。

本书的编写得到教育部、中国气象局、总参谋部气象局和空军司令部气象局的大力支持,南京大学伍荣生院士、谈哲敏教授,南京气象学院朱乾根教授、寿绍文教授,解放军理工大学费建芳教授及气象出版社陶国庆副编审详尽审阅了全书,他们还参加了 1999 年 12 月 4 日在南京召开的本书评审会,对本书的内容提出了宝贵的意见,作者表示衷心的感谢!

陆汉城

1999 年 12 月

第二版前言

本书自 2000 年出版以来,受到读者的广泛关注和欢迎,提出了宝贵的建议,特别是在教学实施中,不少老师和同学与编著者进行了有益的讨论。借此修订再版的机会,作者对本书进行了认真的审读,并进行修订。修订的重点是改正了原版中的错误,删去少量不适合自学的内容,同时,根据中尺度气象学的快速发展和教学需要,适当增加了一些内容,使本书更臻完善。

在《中尺度天气原理和预报》第二版出版之际,作者谨向关心本书的所有读者致以衷心的感谢!

陆汉城

2004 年 1 月 9 日

目 录

前言

第一章 引论	(1)
§ 1.1 中尺度天气学的科学意义及应用前景	(1)
§ 1.2 中尺度大气运动的基本特征	(7)
1.2.1 中尺度大气运动定义	(7)
1.2.2 中尺度大气运动的基本特征	(9)
第二章 中尺度大气运动的动力学基础	(11)
§ 2.1 中尺度大气运动的控制方程组	(11)
2.1.1 热力学变量的尺度分析	(12)
2.1.2 状态方程和位温方程的简化	(13)
2.1.3 水平运动方程的简化	(14)
2.1.4 垂直运动方程的简化	(14)
2.1.5 连续方程的简化	(15)
2.1.6 热力学方程的简化	(16)
2.1.7 中尺度运动的简化控制方程组	(17)
§ 2.2 弹性近似及中尺度大气运动的特征波动	(18)
2.2.1 包辛内斯克(Boussinesq)近似和滞弹性(anelastic)近似	(18)
2.2.2 弹性流体的特征波动	(18)
2.2.3 弹性近似后的滤声波方程	(23)
§ 2.3 中尺度重力波的动力学特征	(24)
2.3.1 惯性重力内波形成的机制	(25)
2.3.2 惯性重力内波的不稳定机制	(26)
2.3.3 重力波的动力学性质	(27)
2.3.4 惯性重力波的结构及其对天气影响	(30)
§ 2.4 中尺度大气运动的动力不稳定	(32)
2.4.1 对称性不稳定的概念	(32)
2.4.2 对称不稳定的判据	(33)

第三章 影响中尺度大气运动的物理条件	(41)
§ 3.1 大气的热力不稳定性与对流运动	(41)
3.1.1 静力稳定度	(42)
3.1.2 条件性不稳定、对流性不稳定及位势不稳定	(43)
3.1.3 逆温层和干暖盖的作用	(44)
§ 3.2 下沉气流	(45)
3.2.1 普通积云的云外下沉气流	(45)
3.2.2 强风暴中尺度环流的下沉运动	(47)
§ 3.3 挟卷效应	(48)
3.3.1 气泡模式	(49)
3.3.2 气柱模式	(50)
3.3.3 有挟卷作用的饱和过程中气块温度变化率	(51)
§ 3.4 风的垂直切变	(53)
3.4.1 风垂直切变影响风暴发展的动力学机制	(54)
3.4.2 风的垂直切变影响对流运动的物理过程	(57)
§ 3.5 低空急流与高空急流	(61)
3.5.1 低空急流与强对流天气	(61)
3.5.2 高空急流的作用	(66)
3.5.3 高低空急流的耦合与对流天气	(68)
3.5.4 高低空急流耦合对强风暴发展的作用	(69)
§ 3.6 积云对流反馈作用	(70)
3.6.1 积云对流潜热反馈对垂直速度的增幅作用	(70)
3.6.2 第二类条件不稳定(CISK)	(72)
3.6.3 积云对流潜热对风场的反馈作用	(76)
第四章 地形性中尺度环流	(77)
§ 4.1 背风波	(77)
4.1.1 地形波	(77)
4.1.2 背风波的特征和形成条件	(77)
4.1.3 背风波理论	(78)
§ 4.2 下坡风	(84)
4.2.1 暖风——焚风	(85)
4.2.2 冷风——布拉风	(85)

4.2.3	下坡风的机制	(86)
§ 4.3	尾流区环流	(88)
4.3.1	中尺度背风低压	(88)
4.3.2	中尺度背风涡旋	(89)
§ 4.4	海陆风环流	(90)
4.4.1	经典海陆风环流理论	(91)
4.4.2	近代海陆风环流的数值研究	(93)
§ 4.5	城市热岛环流	(96)
4.5.1	城市热岛的基本特征	(97)
4.5.2	城市热岛形成的天气学条件	(99)
4.5.3	城市热岛环流及其对天气的影响	(100)
第五章	强烈对流性中尺度系统	(101)
§ 5.1	普通单体雷暴和局地强风暴	(101)
5.1.1	普通单体雷暴	(101)
5.1.2	局地强风暴	(102)
§ 5.2	飚线	(106)
5.2.1	飚线的概念	(106)
5.2.2	飚线形成的大尺度条件和形成方式	(106)
5.2.3	中纬度飚线的结构	(110)
5.2.4	热带飚线	(113)
§ 5.3	中尺度对流复合体(MCC)	(114)
5.3.1	MCC 的一般特征	(114)
5.3.2	MCC 的中尺度结构	(115)
5.3.3	MCC 生成和发展的天气尺度环境	(117)
§ 5.4	龙卷	(121)
5.4.1	龙卷的基本特征	(121)
5.4.2	龙卷与母体风暴	(122)
5.4.3	龙卷形成的机制分析	(125)
§ 5.5	下击暴流	(127)
5.5.1	下击暴流的尺度和种类	(128)
5.5.2	下击暴流的形成	(129)
第六章	中纬度锋面的中尺度天气特征和锋生环流动力学	(131)
§ 6.1	中纬度锋面的中尺度天气特征	(131)

6.1.1	天气尺度的降水系统	(132)
6.1.2	锋面中的中尺度雨带	(135)
§ 6.2	梅雨锋暴雨的中尺度特征	(139)
6.2.1	α 中尺度降水系统	(139)
6.2.2	β 中尺度降水系统	(142)
§ 6.3	锋生和锋生动力学	(146)
6.3.1	锋生运动学	(146)
6.3.2	锋生动力学的基本特征	(148)
6.3.3	地转动量近似下的锋生	(149)
§ 6.4	锋生横向次级环流	(155)
第七章	中尺度锋	(157)
§ 7.1	飑锋	(157)
7.1.1	飑锋的一般特征	(157)
7.1.2	飑锋的结构	(158)
7.1.3	飑锋动力学	(161)
§ 7.2	海岸锋和海风锋	(164)
7.2.1	海岸锋	(164)
7.2.2	海风锋	(167)
§ 7.3	干线	(170)
7.3.1	干线的一般特征	(170)
7.3.2	干线的形成	(172)
第八章	大气涡旋运动的中尺度特征	(175)
§ 8.1	中纬度气旋中的重力波	(175)
8.1.1	气旋内重力波的分析	(175)
8.1.2	气旋内重力波的动力学特征和天气分布	(179)
§ 8.2	热带气旋中的中尺度特征	(180)
8.2.1	热带气旋的一般结构	(180)
8.2.2	眼壁的特征	(182)
8.2.3	中尺度螺旋云雨带	(183)
8.2.4	横式大气的飓风中尺度环流特征	(185)
第九章	中尺度天气分析	(187)
§ 9.1	中尺度天气系统的分离	(187)

9.1.1 Barnes 方法	(187)
9.1.2 Shuman-Shapiro 方法	(190)
§ 9.2 热力稳定度分析	(194)
9.2.1 $\theta_e(\theta_{se}')$ 和 $E_\sigma(T_\sigma)$ 的分析	(194)
9.2.2 对流不稳定能量	(196)
9.2.3 热力稳定度指数	(199)
9.2.4 对流不稳定倾向方程	(201)
§ 9.3 高分辨不稳定能量的计算	(202)
9.3.1 $\Delta H_{ip_1}^{p_2}$ 是 T_{vi} 的内插值多项式	(203)
9.3.2 厚度场 $\Delta H_{ip_1}^{p_2}(x, y)$ 的计算	(204)
9.3.3 实例分析	(206)
§ 9.4 条件对称不稳定的分析和计算	(207)
9.4.1 二元法	(208)
9.4.2 有效位能法	(210)
§ 9.5 中尺度重力波分析	(213)
9.5.1 中尺度重力波不稳定的动力条件分析	(213)
9.5.2 中尺度重力波不稳定的热力条件分析	(215)
9.5.3 波导过程在中尺度重力波维持中的作用	(216)
§ 9.6 倾斜湿位涡的分析	(219)
9.6.1 湿位涡守恒性	(220)
9.6.2 倾斜涡度发展(SVD)	(220)
9.6.3 P 坐标系下倾斜涡度发展	(222)
第十章 中尺度天气预报	(223)
§ 10.1 中尺度天气的监测	(224)
10.1.1 中尺度天气监测网的设置	(224)
10.1.2 中尺度天气的监测手段	(225)
§ 10.2 中尺度天气预报的基本方法	(232)
10.2.1 线性外推	(233)
10.2.2 模式预报	(237)
10.2.3 结构化预报	(239)
10.2.4 局地条件气候学	(241)
10.2.5 统计学方法	(243)
10.2.6 中尺度数值预报	(248)

§ 10.3	中尺度天气的预报系统.....	(249)
10.3.1	预报系统的特征.....	(249)
10.3.2	预报系统的设计.....	(251)
10.3.3	预报系统的业务工作站.....	(253)
第十一章	强对流天气的预报	(255)
§ 11.1	强对流天气的发展机理分析.....	(255)
11.1.1	对流风暴的发展条件.....	(255)
11.1.2	对流风暴的环境.....	(257)
§ 11.2	强对流天气和暴雨发展机理的差异分析.....	(265)
§ 11.3	对流尺度相互作用对强对流天气发展的影响.....	(267)
§ 11.4	强对流天气的类别预报.....	(271)
11.4.1	雷暴大风(下击暴流)预报.....	(271)
11.4.2	冰雹预报.....	(274)
11.4.3	短时局地强降水预报.....	(276)
§ 11.5	暴雨预报.....	(278)
11.5.1	暴雨发生的大尺度环流背景.....	(278)
11.5.2	造成暴雨的天气系统及其垂直环流.....	(279)
11.5.3	中尺度系统在暴雨形成中的作用.....	(281)
11.5.4	暴雨预报方法.....	(284)
§ 11.6	强对流天气预报系统.....	(287)
11.6.1	预报工作平台.....	(287)
11.6.2	预报系统设计.....	(288)
11.6.3	系统构成.....	(292)
中文参考文献		(293)
外文参考文献		(295)

第一章 引 论

中尺度天气学研究两类中尺度天气现象：一类是雷暴、暴雨、冰雹、大风、下击暴流等对流性天气；另一类是局地低云、浓雾等稳定性天气。它们都是在一定的大尺度环流背景中，由各种物理条件相互作用形成的中尺度天气系统产生的结果。

中尺度天气系统及其产生的中尺度天气现象的明显特征就是生命史短、空间范围小，但天气变化剧烈。大多数中尺度天气系统具有很大的能量，若以风速估计，一个对流风暴的平均能量约为 $10^8 \text{ kW} \cdot \text{h}$ ，相当于十多个二次大战时使用的原子弹爆炸的能量。本章概述中尺度天气学的科学意义及中尺度大气运动的基本特征。

§ 1.1 中尺度天气学的科学意义及应用前景

暴雨、冰雹、龙卷、雷暴大风等中尺度强风暴天气能形成严重自然灾害，给国民经济建设和军事活动带来重大损失。世界各国频数较高的自然灾害是气象原因造成的，而由中尺度天气造成的重大灾害占有很大比例。例如美国是世界上出现龙卷最多的国家，平均每年达 403 个，1974 年 4 月 3~4 日，在美国中、东部，24h 内连续出现 148 个龙卷。由于龙卷灾害造成的损失平均每年达 1 亿美元，人员伤亡也很严重。1925 年 3 月 18 日，美国出现一个迄今最强大的龙卷，风暴以 30 m/s 的速度走了 360 km ，沿途 689 人死亡，1980 人受伤。1992 年 8 月的飓风 Andrew 使美国遭受 250 亿美元的损失。中国是一个多暴雨的国家，每年由暴雨造成的洪水面积达几十万平方千米，在 1951~1982 年的 30 年中，共发生 1601 次洪涝灾害，平均每年 53 次。最严重的洪水受灾地区是江淮流域、黄河流域和华南地区，其中极强的或持续性大暴雨造成的灾害最为严重。例如 1975 年 8 月 5~7 日的河南省特大暴雨，三天雨量达 1605 mm ，在淮河上游造成空前洪水灾害，水库塌坝，近 100 个县受淹，几万人丧生，经济损失数亿元；1991 年 5~7 月江淮地区梅雨期出现持续特大暴雨而形成洪涝，以江苏、安徽、湖北三省最为严重，据统计，直接经济损失达 600 亿元，受灾面积 3 亿亩^①，死亡 1163 人。1998 年梅雨期暴雨使长江中下游地区造成历史上罕见的洪水灾害，其中汉口 7 月 21~22 日 24h 降水达 460 mm ；江西 6 月 12~27 日 15 天出现暴雨 214 站次，全省 50 个县市累计降水超过 400 mm ，人民生命财产蒙受重大损失。另外，生命期短的强对流系统（如飑线）破坏性很大，1982 年 2 月 28

^① 1 亩 = 666.6 m^2 ，下同。

日至3月1日广西壮族自治区发生的一次飑线,大风风速达 $10.8\sim 24.0\text{m/s}$,并伴有暴雨和冰雹,在20个县造成影响,致使一客轮翻船沉没,147人丧生,经济损失达千万元以上。由中尺度天气系统形成的灾害是不胜枚举的。长期以来,对于监测、预报和研究中尺度天气系统是气象工作者的重要任务。

当前,社会和经济的发展对大气科学提出了更高和更迫切的要求,在过去30年中,科学技术的迅猛发展,尤其是气象卫星、电子计算机以及大气遥感技术的兴起,使大气科学研究朝着时间和空间尺度的两个方向发展,即系统研究世界范围的气候异常,了解气候异常的变化规律和形成机制,并预测气候变化的中、长期趋势是大气科学研究的一个前沿课题。另一方面,中尺度气象学的研究已经引起人们的高度重视。目前大范围的天气预报,尤其是气压形势预报已取得显著成绩,但对空间尺度为 $2\sim 2000\text{km}$ 的中尺度天气系统及其所造成的强烈天气的预报依然是大气科学中的难题。

中尺度气象学包括中尺度天气学、中尺度动力学与数值模拟、中尺度天气的短期和甚短期预报,也包括中尺度大气物理学。它面临的主要科学问题是:关于中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;中尺度系统触发机制研究;中尺度大气运动不稳定研究;中尺度天气数值模拟和预报研究;以及中尺度灾害性天气的短期、甚短期和临近预报方法研究。

最近十几年来,中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比二十多年前有了很大进展,这主要表现在:

(1)提出和得到了强风暴的三维模式。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。20世纪40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;50年代至60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;70年代多普勒雷达的应用使人们进一步了解风暴内部气流结构和环境条件,了解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(conceptual model)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。

(2)进一步阐明了制约雷暴和中尺度系统演变的物理机制。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。

(3)深入开展了强对流系统的数值模式的试验。最近十几年来,已成功模拟从一朵积云到中尺度飑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。

(4)中尺度动力学的深入开展。中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,它是中尺度天气预报,尤其是数值预报的基础,中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,近年来对下列各个方面的问题进行了研究并取得重要的结果:

①中尺度环流的动力机制。这包括中尺度环流的动力结构、产生和维持的机理,以及中尺度不稳定问题。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-亥姆霍兹(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也被用于解释中尺度系统的发展。

②中尺度强迫机制和中尺度波的传播特征,这包括中尺度波的波导现象,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介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取得一定进展。

④中尺度环流与大尺度环流的相互作用,这包括中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中尺度可预报性问题,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尺度天气的产生和发展;二是已知中尺度系统的发生发展的大尺度条件,预报中尺度环流出现的统计概率。一些中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三天预报。而在目前的研究中认为,中尺度模式的初始场中同化进更多的中尺度信息,特别是多普勒雷达和卫星观测资料,则可进一步改进预报效果。

(5)开展了临近预报和超短时预报的准业务试验或业务工作,发布了强天气的警报。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(描述当前天气现状,并对加强观测的中尺度现象在有效外推期所作的预报,但这个时段不能超过 12h)。根据国内外一些部门较客观的验证,这种预报已初步取得了效果,但是这种预报的水平还相当低,对于不少突发性的、局地的强烈天气还几乎报不出来,表 1.1.1 是目前临近和超短时预报对一些重要天气的预报水平现状的说明。

表 1.1.1 重大天气的临近和超短时预报(引自 Zipser,1983)

重大天气	外推有效的 时间尺度	用于临近预 报的观测能力	超过临近预报 时效的预报能力
下击暴流和微暴流	1~10min	正研究中	非常有限
龙卷	1~10min	有限,目击监视,雷达外推	现在非常有限,用 NEXRAD (下一代雷达)可能达到 0.5h
强雷暴	10~60min	有一些,主要靠雷达	很有限
造成突发性洪水的降雨	1~10h	有一些,雷达,卫星,一些特殊的观测网	很有限
地形性大风	1~10h	有一些,如果地面台站继续减少,则观测能力将减弱	有一些
暴雪,冬季风暴,暴风雪	几小时	有一些	有一些
霜冻	几小时	有一些	有一些
飓风或台风	数小时	好,飞机,雷达,卫星	尚可
以上是发布天气监视和警报的项目			
雷暴单体	5~20min	有一些,主要靠雷达	很有限
中尺度有组织雷暴	1~2h	有一些,主要靠雷达	有一些
湖泊效应的雪暴	几小时	有一些,主要靠雷达,卫星	很有限
坏能见度	几小时	有一些,如果地面台站继续减少,则观测能力将减弱	有一些
空气污染事例	几小时	有一些	有一些
风	几小时	有一些,随时间减少	有一些
降水	几小时	有一些,随时间减少	有一些
锋面过境	数小时	有一些,随时间减少	尚可,或好

由表 1.1.1 可以看到一个主要问题是,一旦超出有效外推期(1h 左右),预报能力非常有限,尤其是对一些中尺度雷暴系统。因而许多预报员认为发布 24~48h 强雷暴是否会出现的概率预报可以做得很好,但是要做出在后 3~6h 这种强雷暴是如何具体演变则非常困难,即使提供最详细、最及时的雷达、卫星和其它观测资料,以最好的预报员

去预报,常常也会遭到失败,其中的主要困难是这种现象的时空尺度很小,以及涉及的复杂的因子,因而对 0~12h 的天气预报主要是发展新的预报方法,必须预报出在有效外推期到 12h 之间的中尺度系统的变化,而不应该把有效外推期作不合理的延长,或借用短期预报方法。

为什么在最近十几年间中尺度气象学会取得上述明显的进展呢?概括起来,至少有以下三个方面的原因:

①采用了新的观测工具和设置了专门的观测网。雷暴等强对流系统由于尺度小、生命期短,依靠常规的气象观测网和观测手段难以得到必要的资料,必须组织和设置专门的观测网,应用专门的观测手段才能探测雷暴系统的结构和演变,雷达观测是其中的主要手段,尤其是 20 世纪 70 年代多普勒(Doppler)雷达的应用是中尺度观测的一个重要突破,它使我们第一次有可能观测到云体内部气流的运动和变化,从而对一些雷暴系统中对流的产生、内部结构的演变及其周围环境的相互作用和衰亡过程有了细致定量的观测。目前多普勒雷达已成为发现和追踪强对流系统的强有力工具。此外卫星观测,尤其是同步卫星可以连续监测中尺度系统云系演变和移动,揭示了不少新的事实。近年来还使用其它一些探测仪,如新型飞机和一些遥感仪,如大气风廓线仪可连续探测 16km 以下风垂直分布,这种资料对中尺度数值模拟和中尺度天气预报是十分重要的,另外也利用声雷达、激光雷达、微波辐射仪、灵敏微压计、天电观测等。

除了采用专门观测技术以外,近 20 多年常规观测也得到了明显改善,地面和高空观测站皆有了增加,尤其是不少国家设置了专门的中尺度观测网。例如美国在 1966 年就设置了中尺度观测网,高空站距 28km,每隔 1.5h 或 3h 施放一次探空仪,地面站距 20~30km。除美国以外,日本、瑞典、英国、法国、加拿大等国家也建立了试验监测网。我国在近 5 年中,也分别在京津冀、长江三角洲、武汉和珠江三角洲四个地区建立起中尺度监测网,主要改进的有三个方面:一是增强雷达观测能力,引进安装了多部多普勒雷达,现有雷达进行了数字化改造,同时增强了卫星资料的处理能力;二是增加一些特殊观测,如使用 UHF 风廓线仪测量 10km 以下的风分布等;三是设置了一定数量的自动地面站。

对于强对流系统的观测主要分两个方面,即既要观测风暴内部环流结构,同时要尽可能细致监测风暴周围环流变化,以便找出两者相互关系,这就需要各种观测技术和方法的配合,近 10 年来,所以能在雷暴观测上揭示不少新事实,正是采用了多手段综合观测的结果。

②进行了多次野外观测试验,在一定地区和时段内专门针对某一现象进行集中观测是研究大气现象的一种有效方法,尤其是对中尺度天气现象,这种方法更为有效。早期雷暴生命史的特征就是 1946~1947 年美国根据雷暴研究计划得到的。1968~1972 年日本进行梅雨暴雨研究计划,揭示了暴雨内中尺度和中间尺度系统的结构和活动特

征及其与大尺度环流的关系。20 世纪 70 年代中,热带大西洋大规模试验主要目的是研究各种尺度之间的相互作用,尤其是中尺度和天气尺度的关系。1979 年春夏美国进行了著名的 AVESESAME 中尺度试验,通过各种观测手段得到了一套 5~1000km(α , β , γ 三种尺度)范围内关于强风暴及其环境条件的资料,为解决风暴的启动机制和维持机制,也为中尺度数值模式研究及了解大—中—小尺度过程之间的相互作用提供了必需的资料。最近几年,美国又制定了规模宏大的风暴计划,这个计划可能到 21 世纪初才能完成。

在我国也进行了多次中尺度天气或暴雨的试验,如 20 世纪 70 年代的华南前汛期暴雨试验;湘中中小尺度天气试验;1980~1984 年由总参气象局主办的华东中尺度天气试验,对于我国中尺度气象学的研究有很大的推动,尤其是关于梅雨锋试验获得的资料,不但提供了大量 α 中尺度资料,也第一次提供了较完整的 β 中尺度系统的个例;从 1991 年起由空军组织的北京地区强对流天气试验,为深入系统研究该地区强对流天气发生、发展规律,获得了一批有价值的强对流天气个例的分析资料。而二十世纪末的四大气象科学试验(南海季风试验、中国灾害性天气影响的观测和理论试验、海峡两岸及近邻地区暴雨中尺度试验和淮河流域能量与水分循环试验)为我国中尺度气象事业的发展提供了更有益的基础。

1987 年 5 月 10 日至 6 月 29 日在中国台湾省进行了中尺度试验(TAMEX),其主要目的是研究梅雨锋的中尺度环流^①,锋附近的中尺度系统的演变以及地形对锋及中尺度对流系统的作用,通过试验有助于改进突发性洪水降水过程的预报。

③强风暴动力学的研究,在大量观测事实、风暴模式和积云动力学研究的基础上,对风暴系统发生、发展的机制、结构与环境的关系进行了许多理论研究,这使人们对风暴的物理本质和过程、中尺度系统不稳定机制有了较深入的认识,在动力学研究中,数值模拟试验是最重要的手段之一,许多重要成果都是通过数值试验得到的。

中尺度气象学的研究不仅具有重大的科学意义,而且具有明显的广泛应用前景,随着经济建设的迅速发展,对中尺度强对流灾害性天气的预报要求愈来愈高,这主要表现在:

①需要做出较准确的短时(0~12h)预报以满足日益发展的经济建设、海港、航空、航天、石油开采、农业生产等方面的需要,要尽可能准确预报出强烈天气出现的时间和地点。

②需要预报可能出现的持续性降水(或暴雨)出现的时段、地区和频数,以便有根据的做出每年的汛期降水或旱涝预报。

③中尺度灾害性天气或危险性天气预报对于防灾、减灾决策和实施水资源管理、陆

① 台湾地区所谓的梅雨锋是中国的华南前汛期的华南准静止锋。

上和海上交通、污染和区域气候是十分重要的。

需要指出的是中尺度天气预报对高技术战争条件下的气象保障是极为重要的,海湾战争表明,要保证对军事目标实施有效打击必须弄清目标区的天气变化,而局地强风暴天气对军事行动的影响是十分重大的,因此中尺度天气的预报是十分必须的。

因而如何准确预报中尺度灾害性天气的发生发展和移动对于满足经济建设和国防建设的需要,并减轻自然灾害的破坏具有现实意义和应用前景。

§ 1.2 中尺度大气运动的基本特征

观测和分析表明,大气环流是极为复杂的,大气的运动包含着从湍流微团到超长波运动等多尺度的运动系统,因此各种天气现象是大气中不同尺度系统相互作用的结果,各类中尺度天气现象是与中尺度天气系统联系在一起的,中尺度天气系统是大气环流的重要成员,它具有其它尺度运动的一些不同的特征。

1.2.1 中尺度大气运动定义

由于不同尺度的天气系统具有不同的物理性质,为了便于研究,须将它们进行分类。气象学者常把全球大气分成若干“部分”,这些“部分”通常称之为“运动系统”,即具有不同大小与生命期(或不同尺度)的运动的构造,这种对尺度的理解就变成正确认识大气环流不可缺少的东西。因此既根据观测,又根据理论分析讨论尺度概念是十分必要的。

从天气图上用常规观测站网资料分析得到的是大尺度天气系统,如气旋和反气旋,其水平尺度至少大于 1000km,气象学家认为还有更大尺度系统,如罗斯贝波,水平尺度是 3000~6000km。此外,人们感觉到的大气运动,例如在人站立不住的旋风中及用单站雷达探测到的积云单体是生命史只有几分钟的小尺度现象,水平尺度是几米到几千米。

近 30 年来,用雷达、装备有仪器的飞机、人造卫星和较密的地面观测网,对大气中从微尺度气象到天气尺度气象中间所不能研究的那一类运动提供了有益信息,从而了解这一类运动特征和结构,这就是中尺度运动。

事实上,由于人们对大气运动的认识和研究的对象的理解不一致,尺度划分并不十分一致。从观测的角度来看,人们把小尺度和大尺度两者之间的天气现象泛指为中尺度现象,Ligda(1951)曾把中尺度现象定义为:对常规高空探测网(间隔几百千米)来说太小,以致完全捕捉不到;对单站雷达观测又太大(缺乏遥感能力),而不能完全观测得到的那些大气现象。因而将中尺度描述性地定义为时间尺度和空间尺度比常规探测站网小,但比积云单体又大得多的一种尺度,即它们的水平尺度约为几千米到几百千米,时