

普通高等教育“九五”国家级重点教材

中尺度天气原理和预报

陆汉城 主编

气象出版社

普通高等教育“九五”国家级重点教材

中尺度天气原理和预报

陆汉城 主编

陆汉城 杨国祥 编著

气象出版社

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/陆汉城主编. - 北京:气象出版社, 2000.4
ISBN 7-5029-2908-8

I. 中… II. 陆… III. ①中尺度-天气分析-高等学校-教材②天气预报-高等学校-教材 IV. P458.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 19600 号

中尺度天气原理和预报

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:林雨晨 责任技编:谷 青 责任校对:谷 青

出版发行:气象出版社

出版社地址:北京海淀白石桥路 46 号

出版社电话:68407112

电子邮箱:cmp@rays.cma.gov.cn

邮政编码:100081

传真号码:62176428

经 销:新华书店总店北京发行所
印 刷:北京昌平环球印刷厂

开 本:787mm × 960mm 1/16
印 张:19
字 数:381 千字
定 价:23.50 元

版 次:2000 年 4 月第 1 版
印 次:2000 年 4 月第 1 次印刷
印 数:0001 ~ 4000

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,空军司令部气象局李福林局长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

2000 年 2 月

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)
第二章 中尺度大气运动的动力学基础	(11)
§ 2.1 中尺度天气运动的控制方程组	(11)
§ 2.2 弹性近似及中尺度大气运动的特征波动	(17)
§ 2.3 中尺度重力波的动力学特征	(23)
§ 2.4 中尺度大气运动的动力不稳定	(31)
第三章 影响中尺度大气运动的物理条件	(39)
§ 3.1 大气的热力不稳定性与对流运动	(39)
§ 3.2 下沉气流	(43)
§ 3.3 挟卷效应	(46)
§ 3.4 风的垂直切变	(51)
§ 3.5 低空急流与高空急流	(59)
§ 3.6 积云对流反馈作用	(69)
第四章 地形性中尺度环流	(76)
§ 4.1 背风波	(76)
§ 4.2 下坡风	(84)
§ 4.3 尾流区环流	(87)
§ 4.4 海陆风环流	(91)
§ 4.5 城市热岛环流	(97)
第五章 强烈对流性中尺度系统	(103)
§ 5.1 普通单体雷暴和局地强风暴	(103)
§ 5.2 飚线	(108)
§ 5.3 中尺度对流复合体(MCC)	(117)
§ 5.4 龙卷	(124)
§ 5.5 下击暴流	(130)
第六章 中纬度锋面的中尺度天气特征和锋生环流动力学	(135)
§ 6.1 中纬度锋面的中尺度天气特征	(135)
§ 6.2 锋生和锋生动力学	(144)

§ 6.3	锋生横向次级环流	(153)
第七章	中尺度锋	(156)
§ 7.1	飑锋	(156)
§ 7.2	海岸锋和海风锋	(164)
§ 7.3	干线	(170)
第八章	天气尺度涡旋运动的中尺度特征	(176)
§ 8.1	中纬度气旋中的重力波	(176)
§ 8.2	热带气旋中的中尺度特征	(181)
第九章	中尺度天气分析	(189)
§ 9.1	中尺度天气系统的分离	(189)
§ 9.2	热力稳定度分析	(196)
§ 9.3	高分辨不稳定能量的计算	(201)
§ 9.4	条件对称不稳定的分析和计算	(207)
§ 9.5	中尺度重力波分析	(213)
第十章	中尺度天气预报	(219)
§ 10.1	中尺度天气的监测	(220)
§ 10.2	中尺度天气预报的基本方法	(228)
§ 10.3	中尺度天气的预报系统	(244)
第十一章	强对流天气的预报	(251)
§ 11.1	强对流天气的发展机理分析	(251)
§ 11.2	强对流天气和暴雨发展机理的差异分析	(261)
§ 11.3	对流尺度相互作用对强对流天气发展的影响	(264)
§ 11.4	强对流天气的类别预报	(268)
§ 11.5	暴雨预报	(274)
§ 11.6	强对流天气预报系统	(283)
参考文献		(289)

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影响的结果。

中尺度天气系统及其影响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,24 h 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,受灾面积三亿亩^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 24 h 降水达 460mm;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 400mm,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

^① 1 亩 = 666.6 m^2 ,下同。

大,1982年2月28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。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。最近的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 72 h 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。

(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 12 h)。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,可以看到一个主要问题是,一旦超出有效外推期(1 h 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 ~ 48 h 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 ~ 6 h 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 ~ 12 h 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 12 h 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。

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 ~ 10 min	正研究中	非常有限
龙卷	1 ~ 10 min	有限,目视监视,雷达外推	现在非常有限,用 NEXRAD(下一代雷达)可能达到 0.5 h
强雷暴	10 ~ 60 min	有一些,主要靠雷达	很有限
造成突发性洪水的降雨	1 ~ 10 h	有一些,雷达,卫星,一些特殊的观测网	很有限
地形性大风	1 ~ 10 h	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 ~ 20 min	有一些,主要靠雷达	很有限
中尺度有组织雷暴	1 ~ 2 h	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

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16 km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28 km,每隔1.5 h或3 h施放一次探空仪,地面站距20~30 km。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10 km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。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AVE-SESAME中尺度试验,通过各种观测手段得到了一套5~1000 km(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(0~12 h)预报以满足日益发展的经济建设、海港、航空、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中尺度预报对于水资源管理、陆上和海上交通、污染和区域气候也是十分必要的。

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 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。

§ 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。

一、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 1000 km,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 ~ 6000 km。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,时间尺度约为 1 ~ 12 h。而在大气动力学中,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的,尽管我们并不完全了解观测导出的时空尺度与物理参数之间的内在关系,但是根据尺度分析得到各种无量纲物理参数 Ro (罗斯贝数)、 Fr (弗罗德数)、 Ri (里查森数)、 Re (雷诺数)……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,从而确定不同尺度运动的特性。表 1.2.1 列举了 Ro 数和 Fr 数的差异所决定的不同尺度运动的特性。对于中尺度运动来说, Ro 约为 1, $Fr < 1$,从而准

静力平衡、旋转和非地转平流是中尺度运动基本的性质。这样, *Pielke* 把中尺度运动定义为:“它是这样的大气系统,它们的水平范围足够的大,以致维持着流体静力近似,但又足够的小,以致在边界层以上地转风和梯度风作为实际风环流近似已不合适”,从后面的分析可以看到,这种流体静力近似主要适用于中尺度运动中的尺度较大的系统。

表 1.2.1 不同尺度大气运动的性质

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

无论从观测或理论分析的角度来看,中尺度所包括的范围很广,特别是理论上对大气运动过程的尺度划分时的数量界限又是不确定的,因而仅从动力学意义的中尺度概念和定义去讨论各种中尺度现象,实际上有一定困难,在实用上都是依据动力分析所得到的尺度范围,结合实际的需要,去具体确定区分尺度的界限。

(1)欧美和日本气象界,一般以水平空间尺度作为划分标准,将大气过程区分为大尺度(macro-水平尺度大于 2000 km),中尺度(meso-水平尺度为 2 ~ 2000 km),小尺度(micro-水平尺度小于 2 km)。而在日本又于中尺度和大尺度之间,给出中间尺度(intermediate scale,水平尺度为 200 ~ 2000 km 之间)的定义。

(2)Gate 将热带天气现象的水平尺度区分为:A 尺度(波动尺度, $10^3 \sim 10^4$ km), B 尺度(云簇尺度, $10^2 \sim 10^3$ km), C 尺度(中尺度, $10^1 \sim 10^2$ km), D 尺度(积云尺度, 1 ~ 10 km)。

(3)AEIOU 分类法: *Fujita* (1981)提出以一个英语母音 AEIOU 分类法来划分尺度,以地球尺度圆周约 40000 km 为准,将大气过程具体划分为五种尺度: mAso 尺度(400 ~ 40000 km), mEso 尺度(4 ~ 400 km), mIso 尺度(40m ~ 4 km), mOso 尺度(40 cm ~ 40 m), mUso 尺度(4 mm ~ 40 cm)。

(4)Orlanski (1975)则认为在“大尺度”和“小尺度”之间有宽广的天气现象领域,需要按时间尺度和空间尺度进一步细分,因而提出了大、中、小尺度及其细分类,构成 8 种尺度,其水平尺度大小如表 1.2.2 所示。

表 1.2.2 Orlanski 的大气运动尺度的划分

大 尺 度		中 尺 度			小 尺 度		
α 大尺度	β 大尺度	α 中尺度	β 中尺度	γ 中尺度	α 小尺度	β 小尺度	γ 小尺度
macro- α	macro- β	meso- α	meso- β	meso- γ	micro- α	micro- β	micro- γ
> 10000km	2000 ~ 10000km	200 ~ 2000km	20 ~ 200km	2 ~ 20km	200m ~ 2km	20m ~ 200m	< 20m
水平尺度		水平尺度			水平尺度		

目前我国常用的中尺度分类与 Orlanski 的分类法基本一致,因而本书简述中尺度气象学问题时采用这一分类法。

由于强风暴天气系统的水平尺度一般为 $20 \sim 200 \text{ km}$, 属于 β 中尺度, 此时流体静力近似也不适用, 它是中尺度天气学研究的重点, 因此常将 β 中尺度系统作为中尺度气象学的研究典型。

二、中尺度大气运动的基本特征

中尺度大气运动的种类很多, 雷雨、冰雹、龙卷风等强对流天气, 一般伴有一定的中尺度天气系统, 中尺度天气系统的基本特征是:

(1) 空间尺度小, 生命期短。从上面分析已经知道 β 中尺度系统的水平尺度(L)一般为 $20 \sim 200 \text{ km}$, 垂直尺度(H)为 10 km 左右, 因而形态比 H/L 为 $10^{-1} \sim 10^0$, 而大尺度系统的形态比为 10^{-2} , β 中尺度系统的生命史一般在几小时到十几小时, 而大尺度系统在 $12 \sim 24 \text{ h}$ 以上, 由于上述时空尺度的特点, 就决定了中尺度系统有许多不同于大尺度系统的动力学特征。

(2) 气象要素梯度大。在天气尺度系统中气象要素的梯度(如气压、温度、露点)一般较小, 气团内部更小, 即使在锋区的附近, 温度和气压的梯度也仅达 $1 \sim 10^\circ\text{C}/100 \text{ km}$, $1 \sim 10 \text{ hPa}/100 \text{ km}$; 而中尺度天气系统气象要素的梯度很大, 气压达 $1 \sim 3 \text{ hPa}/10 \text{ km}$, 温度 3°C 以上/ 10 km , 大尺度锋面过境时的变压仅为 $1 \sim 2 \text{ hPa/h}$, 而中尺度系统如飑线过境时, 变温为 $10^\circ\text{C}/15 \text{ min}$ 左右, 变压为 $6 \text{ hPa}/15 \text{ min}$ 左右。

同这种大的气象要素梯度相联系, 中尺度天气系统产生的天气现象一般比较激烈, 例如雷暴、暴雨、冰雹等往往都与它们相联系, 大尺度天气现象中一般大风只有 $10 \sim 20 \text{ m/s}$, 在台风中最大风速也只有 $10 \sim 100 \text{ m/s}$, 然而飑线中的阵性大风就能达 $10 \sim 100 \text{ m/s}$, 而龙卷大风甚至可达 $100 \sim 200 \text{ m/s}$ 。

(3) 非地转平衡和非静力平衡及强的垂直运动。尺度分析表明, 中尺度系统的动量方程中, 加速度项与地转偏向力和气压梯度力具有相同的量级, 不能满足地转平衡关系。因而在中尺度分析时不能运用地转关系来调整等压线和流线, 常常发现风向和等压线有明显交角, 甚至出现相垂直的情况, 即有风穿越等压线, 尤其在中尺度系统强烈发展时, 这种非地转平衡特征更明显。准静力平衡近似对于大尺度运动是相当精确的, 由于中尺度运动包含的空间尺度范围比较宽广, 一般认为对于较大的中尺度运动, 静力平衡仍是一种较好的近似, 特别是用尺度分析法讨论 α 中尺度系统的垂直运动方程时, 加速度项比气压梯度力和浮力项小一个量级。但是对于 β 中尺度, 尤其是 γ 中尺度运动, 准静力平衡假定对所描述的中尺度系统有明显的歪曲, 因而有人提出采用非静力平衡的模式更能描述中尺度系统的物理本质和过程, 这个问题还在进一步研究之中。与上述特征相联系的中尺度系统的散度和涡度几乎达到相同数量级, 而且比大尺度运动大一个数量级, 即散度约为 $10^{-4}/\text{s}$, 涡度约为 $10^{-4}/\text{s}$, 因而垂直运动的量级可达 $0.1 \sim 1 \text{ m/s}$, 垂直运动速度也就明显大于大尺度运动。

(4)小概率和频谱宽、大振幅事件。中尺度系统在统计的意义上是小概率的,它的空间尺度跨越的范围宽,且中尺度系统影响时的要素变化激烈,表明它是频谱宽的大振幅事件。

Vinnichenko(1970)对自由大气和近地面层的東西风分量作了能谱密度分析。

图 1.2.1 给出了不同时间尺度的能谱分布,表明在 1 分钟、1 日到数日、年的时间尺度上分别有能量密度的峰值,这些峰值分别反映了大气的边界层湍流、日变化和季节变化的运动,而在几十分钟到十几小时的时段(即中尺度运动的时间尺度)上,则是能量密度的低谷或称为中尺度缝隙(gap),这种谱分析结果反映了不同尺度客观存在性,它表明中尺度环流的能量密度小,但是它在大幅度度和小尺度运动的能量变换中起着重要作用。

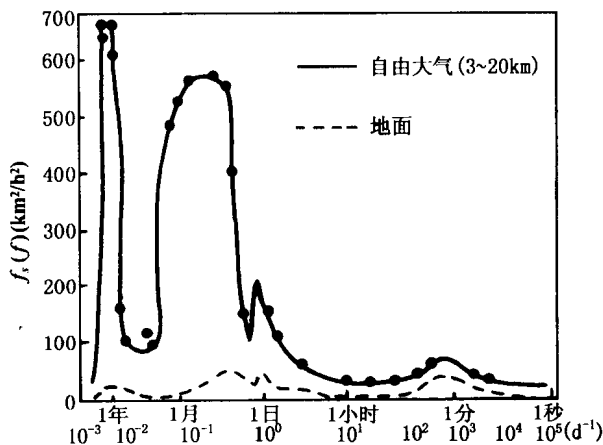


图 1.2.1 自由大气和近地面的东西风分量的平均动能(引自 Vinnichenko, 1970)