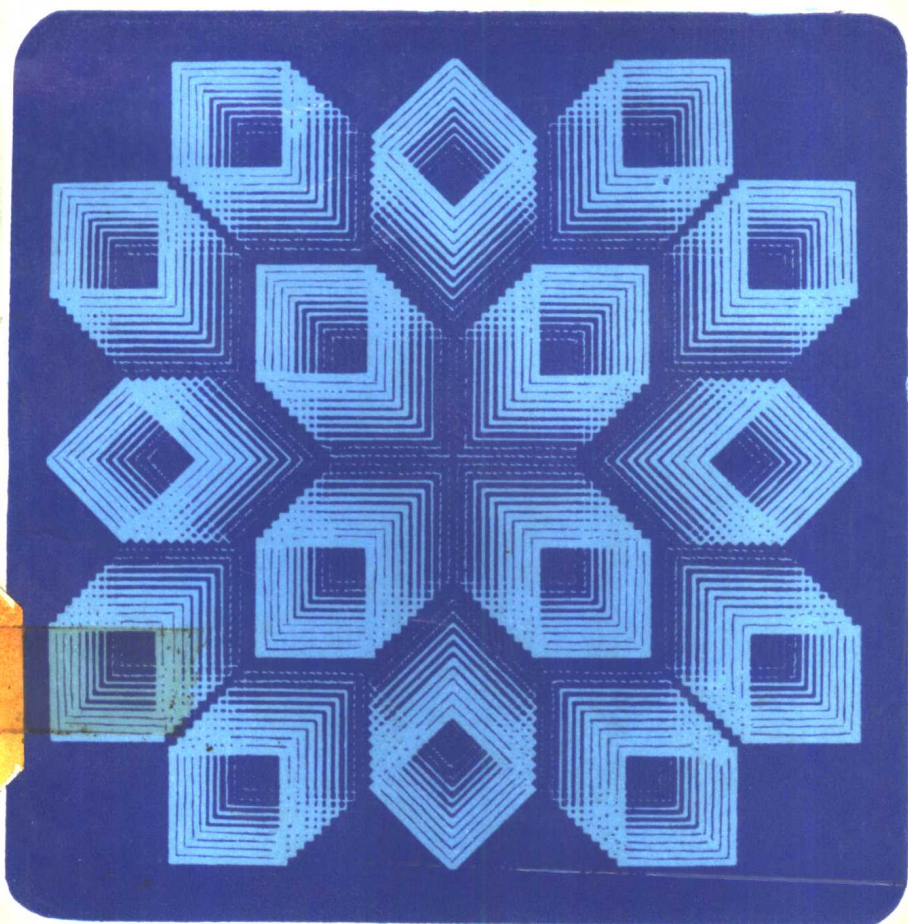


中尺度气象学

杨国祥 何齐强 陆汉城



气象出版社

中尺度气象学

杨国祥 何齐强 陆汉城

气象出版社

内 容 简 介

本书较系统全面地介绍中尺度气象学的基本原理和在中尺度天气分析方面的应用,综合概括了近年来国内外有关中尺度气象研究的新成就。内容重点是从动力学理论入手,论述各类中尺度环流系统。在论述中注重动力和天气相结合,理论和应用相结合。

本书可供高等院校气象专业研究生阅读,也可供气象专业本科生、气象教学和科研人员以及台站气象人员学习参考。

中尺度气象学

杨国祥 何齐强 陆汉城

责任编辑 成秀虎

* * *

气象出版社出版

(北京西郊白石桥路46号)

国防科工委印刷厂印刷

新华书店总店科技发行所发行 全国各地新华书店经销

* * *

开本: 850×1168 1/32 印张: 11.625 字数: 295千字

1991年5月第一版 1991年5月第一次印刷

印数: 1—2100 定价: 10.10元

ISBN 7-5029-0609-6/P·0339

前 言

当今气象学科学研究朝着向时间尺度和空间尺度的两极方向发展，随着人类社会活动的现代化进程，中尺度气象的研究，引起人们的高度重视。但是，一方面由于在理论上和实际观测上的困难，迄今为止，中尺度研究涉及的诸多问题尚在讨论之中，而另一方面它是新兴的气象学研究分支，已经有不少令人感兴趣的观测事实和理论工作呈现在我们面前。因此，在汇集众多研究的基础上，加上多年来我们在中尺度气象的科学研究及教学实践，编著了这本“中尺度气象学”，以适应该学科发展的需要。全书共分十二章，内容包括：中尺度气象的进展和问题，中尺度运动的控制方程和不稳定理论，各类中尺度系统的结构特征及其形成、发展条件，锋和气旋的中尺度特征，中尺度系统的分析和数值模拟等。

书中的第一、二、四、七、十章由杨国祥编写，第三、五、六、八、九章由何齐强编写，第十一章由陆汉城和杨国祥编写，第十二章由陆汉城编写。

由于编写者的水平有限，欢迎读者提出宝贵意见。

编著者

一九八九年十月

目 录

第一章	引 论	1
第二章	中尺度运动的控制方程及其简化	16
第一节	中尺度运动的基本控制方程	16
第二节	滞弹性 (anelastic) 近似	19
第三节	包辛内斯克 (Boussinesq) 近似	22
第四节	散度方程的中尺度平衡	23
第五节	涡度方程的中尺度平衡	27
	参考文献	29
第三章	中尺度不稳定	30
第一节	Kelvin-Helmholtz 不稳定	30
第二节	干对称不稳定	34
第三节	条件性对称不稳定	42
第四节	Ekman 层动力不稳定	46
	参考文献	54
第四章	非强烈对流性环流	56
第一节	观测结果及其主要特征	56
第二节	制约积云对流发展的因子和过程	64
第三节	浅单体对流理论	81
	参考文献	92
第五章	强烈对流性环流	94
第一节	局地强对流风暴	94
第二节	飚线	103
第三节	对流风暴的移动	115
第四节	对流风暴的反馈作用	118
	参考文献	120
第六章	中尺度对流复合体 (MCC)	122

第一节	MCC的一般特征	122
第二节	MCC的环境特征	125
第三节	MCC的内部结构	139
	参考文献	143
第七章	地形性环流	144
第一节	地形波	144
第二节	海陆风环流	154
第三节	城市热岛效应	166
第四节	尾流区环流	182
	参考文献	188
第八章	锋和锋生环流(一)	
	锋生和高空急流锋	190
第一节	锋生理论	190
第二节	高空急流锋	198
	参考文献	210
第九章	锋和锋生环流(二)	
	几种类型的中尺度锋	211
第一节	海岸锋	211
第二节	陆锋	221
第三节	海风锋	235
第四节	干线	242
	参考文献	249
第十章	锋和气旋的中尺度特征	252
第一节	锋面气旋的气流和雨带模式	252
第二节	梅雨锋雨带的中尺度结构	260
	参考文献	275
第十一章	中尺度天气的分析和诊断	277
第一节	中尺度系统的分离	277
第二节	高分辨不稳定能量的计算	283
第三节	干暖盖的分析	289
第四节	位涡的诊断分析	291

第五节 对称不稳定的分析计算	297
参考文献	304
第十二章 中尺度数值模拟	306
第一节 中尺度数值模拟的基本问题	306
第二节 中- α 及中- β 尺度数值模式	321
第三节 积云数值模式	345
参考文献	362

第一章 引 论

中尺度气象学所研究的两类中尺度天气现象：一类是雷暴、暴雨、冰雹、雷暴大风以及下击暴流等对流性天气；另一类是某些低云、浓雾等稳定性天气（包括局地污染）。它们不仅对国民经济和人民生命财产会造成重大损失，而且还严重威胁着飞行和其它军事活动。因此，对于中尺度气象的研究，已越来越受到人们的重视，它已成为当代大气科学的重大研究课题之一。近二三十年来，许多国家组织进行了各种中尺度气象试验，通过试验积累了一批宝贵的资料，取得了不少研究成果，它不仅推动着中尺度气象学的发展，并与其它领域的研究成果一起，把大气科学的水平推向一个新的高度。

一、什么是中尺度

大气演变是多尺度运动相互作用的结果。大气运动的多尺度性质，早为大气探测和天气分析的实践所证实。积云单体的生命不过几分钟时间，山谷风和海陆风在一日间交替变化，中纬度的一次降水过程往往持续数天，一年的四季周期变化，都是反映着大气运动的不同时间尺度。通过天气图和遥感资料的分析，可以区分出不同空间尺度的大气现象。从天气图上的常规观测站网资料分析得到的是大尺度天气系统。小尺度的积云对流，通过用测雨雷达探测可以见到介于大尺度和小尺度之间的大气现象，用目前常规的观测和分析手段就难以抓住。人们把两者之间的大气现象，泛指为中尺度现象。Ligda (1951年)曾把中尺度现象定义为^[1]：对常规高空探测网（间隔几百公里）来说太小，以致捕捉不到；对单站雷达观测太大（缺乏遥感能力），又不能完全观测得到的那些大气现象。

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 、 Fr 、 Ri 、 Re ...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。对于中尺度运动来说， $Ro \sim 1$ ， $Fr < 1$ ，具有准静力平衡，旋转和非地转平流是基本的运动性质。因而，Peilke 把中尺度运动定义为^[2]：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，忽略非地转平流
中尺度	1	< 1	准静力、旋转和非地转平流是基本的
小尺度	$10^1 - 10^2$	$10^0 - 10^1$	非静力、忽略旋转，非地转平流是基本的

大气内部过程不稳定性的尺度选择是与 Ri 数有关的，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^[2]。表1.2是几种不稳定度的 Ri 数大小，时空尺度和形态比。斜压不稳定的 $Ri \gg 1$ ，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份调整，它属于大尺度过程。对称不稳定时， $Ri \sim 1$ ，它的水平尺度为 $\bar{U}_* H / f_0$ ，形态比为 $\bar{U}_* / f_0$ ，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。对流不稳定的 $Ri \ll 1$ ，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。

表1.2 大气过程几种不稳定度的参数和形态比

	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	$U_z H/f_0$	$1/f_0$	U_z/f_0
对流不稳定	$\ll 1$	H	$\sim 1/N$	1

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

$$m^2 = K^2 \left(\frac{N^2 - \Omega^2}{\Omega^2 - f^2} \right) \quad (1.1)$$

这里， $\Omega(z) = \omega - KU$ ，表示多普勒变移频率，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 $\omega > N$ 和 $f > \omega > \sqrt{\beta U}$ 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。

由于中尺度所包括的范围很广，而理论上对大气过程尺度划分的数量界限又是不确定的，因而单从动力学意义上的中尺度概念和定义去讨论各种中尺度现象，实际上有一定的困难，在实用上，都是依据动力分析所得的尺度范围，结合实际的需要，去具体确定区分尺度的界限并尽可能地使得所要分类的现象，大部分

被包括在某种尺度间距内。有的还进一步将中尺度细分,以便更确切地描述不同的大气现象。日本、欧美各国气象界,一般以水平空间尺度做为尺度划分标准,将大气过程区分为大尺度($>2000\text{km}$)、中尺度($2000-2\text{km}$)、小尺度($<2\text{km}$),而在日本,在大尺度和中尺度间,又分出一种中间尺度(Intermediate Scale; $200-2000\text{km}$)。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; 10^2-10^3km)、C尺度(中尺度; 10^1-10^2km)、D尺度(积云尺度; $1-10\text{km}$)。Orlanski (1975)提出了大中小尺度及其细分类(α 、 β 、 γ),构成八种尺度^[4],即Macro α ($>10,000\text{km}$)、Macro β ($2,000-10,000\text{km}$)、Meso α ($200-2,000\text{km}$)、Meso β ($20-200\text{km}$)、Meso γ ($2-20\text{km}$)、Micro α ($200\text{m}-2\text{km}$)、Micro β ($20-200\text{m}$)及Micro γ ($<20\text{m}$)。这种尺度区分法、目前已被气象界所广泛采用。Fujita (1981)综合各家尺度划分,又提出一个母音AEIOU尺度分类法^[5]。他以地球赤道圆周,即以 $40,000\text{km}$ 为准将大气过程具体划分为五种尺度界限:mAso尺度($400-40,000\text{km}$) mEso尺度($4-400\text{km}$)、mIso尺度($40\text{m}-4\text{km}$)、mOso尺度($40\text{cm}-40\text{m}$)及mUso尺度($4\text{mm}-40\text{cm}$)。总起来说,这种大气尺度的划分,一般采取两种方法^[6]:一是按大家熟知的大(Macro)、中(Meso)、小(Micro)尺度的大小顺序划分,每一尺度范围约差两个数量级;二是再以数字(I、II、III...)或字母(α 、 β 、 γ)细分,每一尺度范围约差一个数量级。这些主要以水平空间尺度划分尺度的方法,在实用上是很方便的,问题是由于考虑到不同的实际需要,各人提出的区分尺度的界限并不一致,有的还有较大的差别。在中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。本书在阐述中尺度气象学问题时,采用了Orlanski的中尺度定义,这与当前我国惯用的尺度分类法是一致的。

二、中尺度气象研究的进展

近二三十年来,中尺度气象的研究,无论在观测事实、理论研究、数值试验和实际预报等方面都有了许多进展,概括说来有以下几个方面:

(一)得到了不少新的观测事实,提出了各种中尺度概念模式。从对流系统来说,五十年代至六十年代通过对特殊的地面、高空观测网,配合雷达和飞机观测,发现了在强垂直风切变中能垂直发展的巨型雷暴——对流风暴,同时进一步了解到环境气流与风暴之间的相互作用,由此提出了对流风暴的模式^[7]。七十年代早期,通过多普勒雷达的观测,使人们能够进一步深入观测雷暴内部的气流结构及其环境条件,了解从一个普通雷暴发展为对流风暴的演变过程,更清楚地确定了对流风暴的模式^[8]。

气象卫星的出现扩大了观测者的视野。在以往观测资料的基础上,通过卫星观测又发现若干对流风暴常常组织成为一个整体运行的系统,这种表现为中尺度的对流风暴集合体,称为中尺度对流系统(MCS)。成熟的中尺度对流系统的内部结构特征,时常是深对流单体区(对流区)和层状云降水区(层状区)共存。1984年 Houze 提出了一个以降水为主的中尺度对流系统概念模式^[9],这种模式的建立,对于改进大尺度数值预报模式,以及局地短期,短时天气预报均有重要意义。

除了上述对流系统的各种模式之外,还提出了温带气旋的中尺度结构模式。Browning^[10]、Hobbs^[11]等发现中纬度气旋的降水常具有中尺度带状结构,雨带同气旋的某一锋面走向基本一致。根据雨带处于不同气旋部位及其特征,再把雨带组成分为六类,即暖锋雨带、暖区雨带、宽冷锋雨带、窄冷锋雨带、锋前空中冷涌雨带和锋后雨带。

近年来对长江中下游梅雨锋暴雨分析的结果表明,在大尺度梅雨带中,镶嵌着1—2条中- α 尺度雨带,雨带里还有中- β 尺度雨团活动。综合梅雨期的中- α 尺度雨带的热力结构和动力结构,

得到一条和两条雨带的概念模式^[12]。从雨团的分析看,中- β 尺度雨团出现在梅雨锋上,其中高空有明显的暖心结构,低空为相对干空气,雨团低层辐散下沉,中层辐合上升,高层辐散^[13]。西南季风是维持暴雨发展的水汽源,触发机制可能是西风带中的小波动。以上这些观测事实和概念模式,均有助于进一步掌握这些中尺度特征形成的物理本质和做好中尺度天气预报。

(二)明确了中尺度环流系统的成因,进一步掌握了制约对流发展的物理条件。

研究认为,直接影响中尺度天气发展的中尺度环流系统,它的形成机制有两种:一种主要是非均匀性质下垫面引起强迫作用的结果;另一种主要是由大气内部过程产生出来的^[14]。

在非均匀性质下垫面强迫作用下,可产生出一定的中尺度环流系统。下垫面的非均匀性质,包括海陆分布、粗糙度、热容量、传导率以及反射率的差异等等。这种强迫作用一部分来自机械原因,典型的例子有山地背风波,在障碍物背风侧出现的背风槽和中尺度低压等。近年来通过卫星云图分析,发现有稳定气流绕过孤立海岛时,在海岛的下风方,能见到由轮廓明显的层积云组成的卡门涡列,涡列延顺风方向伸展在尾流区内^[15]。

热力原因产生中尺度环流典型的例子,除了大家熟知的海陆风、山谷风环流之外,还有城市热岛环流,以及在地面干线两侧干湿区之间形成的内陆海风环流等。在白天的低云和晴空区之间,由于在边界层内两个区域的日射增温不同,也能在云的边界附近形成冷空气下沉、热空气上升的垂直环流^[16]。

大气内部过程产生出来的中尺度环流系统,典型的例子,如高空急流锋环流,当高空西风主槽(涡)后部,有同高空短波槽联系的冷空气自高空向南爆发时,在其前缘引起高空锋生,锋区与槽前急流结合形成高空急流锋。对急流锋锋生及其环流演变的诊断分析表明^[17],当斜压波的温度槽落后于高空槽,有冷空气不断注入槽前高空急流区,斜压波发展,急流锋锋生,产生暖空气

下沉、冷空气上升的逆环流；反之，温度槽超前于高度槽，斜压波减弱，急流锋消，锋区环流调整为正环流。

从对流系统发生的大气内部过程来说，在发生之前，需要具备有利的大尺度环境，提供对流系统发生的有利的热力和动力条件，Miller根据美国对流系统发生的情况提出14种环境参数值^[18]。Carlson等特别指出“干暖盖”对强对流风暴产生的重要性^[19]，在这种形势下，“干暖盖”下面是潮湿潜流，其地面边界是地面干线所在，对流系统先发生在干线的暖空气一侧，以后在向冷湿空气一侧传播的过程中，组织成为强对流风暴。杨国祥等认为^[20]，在有利的大尺度环境条件下，对流系统发生在哪个地区，要受天气尺度扰动中的二级环流所控制，如与高空急流锋、低空急流大风核联系的中- α 尺度环流。对流系统是在天气尺度和中- α 尺度环流的相互作用的过程中建立和维持的。在有利的大尺度环境中，对流不稳定能的释放和对流系统的激发，常常是中尺度运动抬升的结果。抬升机制除了非均匀下垫面强迫作用之外，来源于大气中的各种不稳定（对称不稳定， $K-H$ 不稳定，边界层不稳定等），结构不连续（冷锋、干线，出流边界等），或者是它们的综合^[21]。

（三）广泛地开展了中尺度数值试验，动力学研究有新进展。

随着电子计算机的发展和广泛应用，以及对于中尺度系统发展机制的进一步认识，人们已利用各种数值模式进行中尺度天气系统的数值试验。从对流系统来说，主要表现在两个方面：一是用区域尺度数值模式模拟对流系统发展的环境；二是用积云尺度数值模式或与前者结合起来，模拟对流系统内部的对流环流及其演变，以及同环境的相互作用。

现在的区域尺度数值模式，采用较小网格距（50—100km）并含有相当复杂的对流及地面边界层过程。Carlson等（1980）和Anthes等（1982）的研究表明^[22]，在具有适当的初始条件下，可提前24小时或更长的时间预报出有利于强对流发展的锋、急流

或热力学特性。Benjamin (1983)^[25]用原始方程区域尺度模式,模拟了一次强对流风暴发生前的环境场,由它模拟出的“盖子”及其边缘的层结稳定度梯度,与实况十分相近。

积云二维模式已被广泛应用于对流系统的数值模拟,对流风暴的基本概念,首先是通过二维模式得到的。例如Takeda(1971)^[24]对准稳态风暴的数值模拟;Miller (1974)^[25]对于对流过程应用静力平衡条件有效性的检验;Orville和Sloan(1970)^[26]关于对流的地形影响,以及Thorpe等^[27]对飑线形成的数值模拟等等,均是通过二维模式完成的。在过去的十年里,由于拥有巨大计算能力的大型计算机的出现,终于实现了应用三维模式进行对流系统数值模拟的目标,并取得了可喜的进展。中气旋的发展,风暴分裂和新对流的再生等均得到成功的模拟。Weisman和Klemp (1984)^[28]用三维模式对不同风的垂直分布条件下的雷暴发展加以模拟,结果证实了风的垂直切变与对流系统发展的密切关系。垂直切变的强弱,是区别对流风暴与普通雷暴的基本动力学条件之一。Lyons等(1987)^[29]还用三维模式模拟海风对流雷暴,模拟出的海风辐合区,与实况十分一致。

在中尺度动力学方面,除了对流风暴动力学之外,中尺度扰动的不稳定问题,已引起人们的广泛兴趣。Bennetts (1979)^[30]Emanuel(1979、1982、1983)^[31]Hoskins(1974)^[32]等发现中尺度对称不稳定扰动可能在组织启动带状对流中有重要作用,指出稳定斜压流在满足湿对称不稳定条件下,可以产生一连串的二维倾斜滚轴状环流,滚动轴沿平均地转风切变方向,在这种中尺度环流中的倾斜饱和和上升气流窄而强,下沉未饱和气流宽而弱,它们构成倾斜湿对流运动,由此可以解释锋和气旋系统内部出现的多条中尺度雨带。

锋生和锋生环流是另一种重要的中尺度过程。在 $R_0 < 1$ 的条件下,Shapiro (1981)等^[33]利用半地转模式研究急流锋系统的锋生和锋生环流,指出水平地转变形场可以引起垂直变形场和非

地转锋生，并认为在高空水平切变变形起更重要的作用，而在低空水平伸长变形更为重要。湍流混合消耗能量，限制锋的进一步增强，但它有利于高空急流锋附近产生二级环流。

小尺度气旋动力学研究也受到重视。Sanders 和 Gyakum (1980)^[34]研究了太平洋和大西洋西部的爆发性气旋，并将其内核称为气象“炸弹”。这些风暴容易在两大洋西部强海面温度梯度区附近发展，但是它们突然发展的更重要原因，是对流加热产生的正反馈作用引起气旋的迅速发展，类似于CISK机制在起着重要作用。极地低压(Polar Low)是另一种中- α 尺度的气旋。为估价不同机制在极地低压生成过程中的重要作用，Sardie (1983)^[35]等用三层准地转模式研究发现，单纯CISK和干斜压不稳定性均不能得到观测的波长和增长率，湿斜压过程可解释太平洋极地低压的形成，而它和CISK机制同时为大西洋极地低压的形成所必需。此外，如中尺度重力波，地形作用、边界层过程的中尺度影响，中尺度湍流和能量输送等的分析和研究，近年来也都取得了进展。

(四)提高了中尺度天气的监测和短时预报能力，开始了人工智能预报系统的研究。

六十年代以来，短期天气形势预报的准确率有了显著的提高，但一些同强对流天气联系的中尺度天气预报准确率却仍然很低。目前，雷暴的短期预报准确率不到50%，有关局地强风暴的预报水平仅为20—30%的准确率，远远不能满足需要。为了防止或减少中尺度天气带来的危害，许多国家都在着力研究它的预报问题，并在预报方法上取得了一些进展。八十年代初人们提出了临近预报(Nowcasting)的概念，它是指对当时天气状况的监测，并对0—2小时内的天气作外推预报^[36]。临近预报是使用现代化观测系统，例如卫星，多普勒雷达等对强对流天气进行观测监视，利用更新的周期短的资料作简单的线性外推。能够外推的时限，关键取决于受什么系统影响，这个系统又处于哪个发展阶

段。Browning 等 (1982) 曾对临近预报系统的设计、观测资料的形式以及观测资料的解释和外推等问题作较详尽的阐述, 提出了临近预报的方法。

除了临近预报之外, 还发展了甚短期预报 (Very Short range forecasting) 方法。它是预报时限不超过12小时, 考虑系统的发展变化, 综合选用了线性外推方法、动力学以及其它的各种方法。Purdum (1982)^[37]用时间分辨率较高的同步气象卫星资料和天气实况结合起来, 分析中尺度环流的出现以及对流云的发展, 由此作出的甚短期预报, 取得了一定的成功。研究表明, 同步卫星资料对中尺度天气预报将会起着重要作用, 它同其它常规资料如雷达和地面观测资料结合起来, 对于中尺度天气过程特征会有更好的分析和了解, 并能成功地预报它对局地天气的影响。Zipser^[38]、Pielke^[39]等 (1982) 还提出了应用概念模式或数值模式进行甚短期预报的方法。由于概念模式考虑了中尺度天气系统的生命史和天气的演变, 在数值模式中, 考虑了热力、动力调整过程, 增加了预报信息, 因而有助于预报能力的提高。

为了使中尺度天气预报客观化、定量化、自动化, 近年来兴起了对人工智能预报系统研究的热潮, 研究所得的系统, 有的已投入业务使用。WILLARD 是用美国中部雷暴预报的专家系统, 这个系统先分析能区别强雷暴和非强雷暴的条件, 各种条件等级的组合代表一种可能存在的气象形势, 因而在确定条件之后, 通过软件推理系统就可以迅速作出有无强雷暴的判断。我国华东中尺度天气试验建立起来的雷暴预报系统 (1987)^[40], 具有气象情报接收、选报、检误、处理、译码、分析、计算、图形图像处理、最终得出预报产品的功能, 从系统的试用情况看, 它的预报水平超过了日常业务预报的准确率。可以相信, 人工智能预报系统的推广使用, 必将有力地推动对流天气预报能力的提高。

三、中尺度气象学的重点

中尺度气象包含的现象很多, 并还在不断地发现和描述。就