

中国气象出版社



杨国祥 主编

华东对流性天气的 分析预报

气象出版社

华东对流性天气的分析预报

主 编：杨国祥

副主编：李建辉

气象出版社

内 容 简 介

本书是华东中尺度天气试验成果之一，是在华东中尺度天气试验获取大量资料的基础上对雷暴等对流性天气综合研究的结果，包括气候特征、大尺度环境条件、中尺度对流复合体、飑线、雷暴群、穿谷流、边界层急流及湖陆效应等中尺度现象分析、预报方法等内容。

本书可供气象高等院校师生，气象研究人员和业务人员学习参考。

华东对流性天气的分析预报

主 编：杨国祥

副主编：李建辉

责任编辑：陆 勇

气象出版社出版

（北京西郊白石桥路46号）

北京顺义兴华印刷厂印刷

气象出版社发行 各新华书店经售

开本：787×1092 1/16 印张：9.625 字数：236.8 千字

1989年12月第一版，1989年12月第一次印刷

印数：1—4000 定价：8.50元

ISBN 7-5029-0251-1/P·0152

科技新书目：206—251

序

华东中尺度天气试验是中国人民解放军总参谋部气象局组织和领导的一次规模较大的对流性天气试验。

对流性天气包括雷暴、暴雨、冰雹、下击暴流等天气现象，它们不仅严重威胁军事活动，而且给国民经济建设和人民生命财产带来重大损失。1975年8月河南一次特大暴雨，暴雨中心过程总降水量达1631.1毫米，造成水库垮坝，江河横流，人民生命财产损失极大，为仅次于唐山地震的严重自然灾害；1972年5月2日，贵阳机场一次持续8分钟的冰雹，飞机受到重大破坏；1961年—1980年这20年，据不完全统计，上海市地区强对流天气损坏船舶舰艇1400余艘，飞机6架。这次试验的目的，在于研究华东地区对流性天气的特征以及与之相伴的中尺度天气系统的结构、性质和发生发展演变规律，并建立预报模式和方法，提高对流性天气预报能力。

这次试验由总参气象局和各参试单位指定专人组成领导小组。下设的办公室由总参气象局、南京军区司令部和空军气象学院派人组成；技术组由空军气象学院、总参气象研究所、空军第七研究所和南京军区空军司令部气象处派人组成。分别负责试验的日常工作和技术工作。试验区设在长江、淮河中下游地区，以南京为中心，西起安徽的霍山，东迄江苏的东台，北自江苏的泗阳，南至安徽的铜陵，面积约为141000平方公里。试验区布置了27个无线电探空站，13个天气雷达站。无线电探空资料的平均站距达到90公里，时间间隔为3—6小时；天气雷达资料时间间隔为30分钟。试验期间还收集了该地区260个地面气象站和1315个水文站的数据，以及日本GMS-1和2的云图资料。地面观测资料平均站距为55分里，时间间隔为1小时，卫星云图资料时间间隔为3—6小时。试验分为两个阶段进行：现场试验阶段和资料分析研究阶段。

1980年—1983年为现场试验阶段，在指挥组（由办公室和技术组联合组成）的统一组织下，于每年4月下旬至6月中、下旬观测。参加单位和人员有北京、沈阳、济南、南京、福州、武汉军区以及海军、空军、二炮和国防科工委所属的30多个部队共40个气象分队近千。这次试验共抓住32个对流性天气过程，其中探空、测风资料4480时次，雷达回波照片46892张，收集相应的高空、地面资料156000多份，雨量资料11412516份。在试验期间，参加资料收集、审核勘误和加工整理的同志都付出了辛勤的劳动。观测人员往往顶风冒雨，连续奋战几昼夜；为了保证记录的准确，资料分析人员对全部资料反复核对、精细加工、认真整理。显然，没有这些同志的辛勤劳动，不可能取得这样一批时空密度大、过程多、质量可靠的资料。

1983—1987年为资料分析研究阶段，由空军气象学院、总参气象研究所、空军第七研究所、南京军区司令部气象处、南京军区空军司令部气象处、海军东海舰队航空兵司令部气象处、二炮80302部队气象室和国防科工委89960部队的气象室等单位参加协作。中国科学院学部委员、研究员陶诗言同志为科学顾问。分析研究的范围甚广，内容包括对观测区域内雷暴群、飚线、江淮气旋、梅雨、低空急流和中尺度对流复合体等天气系统的研究，发现了一些事实，提出了一些新观点并对之进行了理论解释。研究方法有：传统天气分析、近代天气学诊断、数值试验、雷达气象学和卫星气象学。这次试验的大

部份研究论文已被汇集成《华东中尺度天气试验论文集》。为了全面系统地总结华东中尺度天气试验成果，我们在该论文集的基础上编著了《华东对流性天气的分析预报》、《长江中下游梅雨暴雨的研究》和《中尺度天气系统的诊断分析和数值模拟》三册书，并由气象出版社正式出版。相信这一成果将对改进华东地区春末夏初强对流性天气的预报保障工作必将起到积极的作用。

这次试验得到了许多单位的支持。地方气象部门，水文部门和电讯部门为这次试验的观测场地，气象资料以及资料传输都作出了很大的贡献，我们对他们表示衷心的感谢。

张丙辰

1987年7月15日于南京

前 言

对流性天气的分析预报一直是气象工作者十分关注的课题。在华东中尺度天气试验中,这一课题被列为试验的主攻目标之一。在四年野外试验获取大量资料的基础上,共写出有关论文100多篇。本专著就是这些论文的概括。全书共分十章:第一章引论,对近年来国内外雷暴等对流性天气研究的成果和试验情况作了综合介绍;第二章雷暴的气候背景及其与大尺度环流的关系,揭示了华东雷暴的地理分布和时序分布等气候特征;第三章雷暴发生的大尺度环境条件,对华东雷暴发生前的环流形势和生成发展时的环境条件作了分析,给出了大尺度概念模式;第四章中尺度对流复合体(MCC),对华东地区MCC的环流形势、结构和活动规律作了分析,并与其它地区的MCC作了比较;第五章飑线,对华东地区几种类型的飑线的特征、结构和活动规律作了介绍;第六章雷暴群,对华东地区雷暴群的基本特征和触发机制作了分析,并探讨了稳定性对雷暴群的作用;第七章和下垫面影响有关的中尺度特征,介绍了华东地区穿谷流、边界层急流、湖陆效应的基本事实及其对雷暴等强对流天气的影响;第八章对流性天气的短期预报,介绍了用天气概念模式、数值模式的物理条件、模式输出的预报产品以及中上层冷平流、湿有效位能等预报雷暴暴雨的方法;第九章对流性天气的短时预报,介绍用地面天气实况,卫星、雷达资料等制作对流性天气的短时预报方法;第十章雷暴预报智能化业务系统,介绍这一系统的概貌以及数据存取、专家预报等子系统的思路和方法。

本书由杨国祥担任主编,李建辉担任副主编。第一、三、六章由杨国祥编写,第二章由张丙辰编写,第四章由张伟廉、张少洪编写,第五、七章由何齐强编写,第八章第四节由李洪勤编写,其余由李建辉编写;第九章第一节由刘金玉、李建辉编写,第二节由徐宏编写,其余由李建辉编写;第十章由陈国楚编写。本书还承蒙章淹教授审阅并提供了宝贵意见,在此表示衷心感谢。

由于编写者水平所限、时间仓促,本书必有不少缺点,希望读者多加指正。

目 录

序	
前言	
第一章 引论	(1)
第二章 雷暴的气候背景及其与大尺度环流的关系	(8)
第一节 雷暴的地理分布	(8)
第二节 雷暴的时序分布	(10)
第三章 雷暴发生的大尺度环境条件	(20)
第一节 雷暴发生前的环流形势	(20)
第二节 雷暴发生和加强的条件分析	(22)
第三节 大尺度概念模式	(32)
第四章 中尺度对流复合体 (MCC)	(36)
第一节 概述	(36)
第二节 大尺度的环流特征	(40)
第三节 MCC的个例分析	(41)
第四节 华东地区与黔桂地区MCC的比较	(47)
第五章 飚线	(50)
第一节 飚线群	(50)
第二节 冷锋飚线的中尺度特征	(55)
第六章 雷暴群	(59)
第一节 雷暴群的中尺度分析	(59)
第二节 雷暴群的触发和加强	(64)
第三节 稳定度对雷暴群中尺度特征的影响	(68)
第七章 与下垫面影响有关的中尺度特征	(73)
第一节 穿谷流	(73)
第二节 边界层急流	(78)
第三节 湖陆效应	(83)
第四节 小结	(86)
第八章 对流性天气的短期预报	(88)
第一节 用天气概念模式预报雷暴和暴雨	(88)
第二节 用简化的数值模式和模式的物理条件预报雷暴和暴雨	(91)
第三节 用模式输出预报量等综合统计方法预报雷暴和暴雨	(95)
第四节 用中上层冷平流预报飚线雷暴	(99)
第五节 用湿有效位能预报雷暴和暴雨	(104)
第九章 对流性天气的短时预报	(107)
第一节 用地面扰动场预报雷暴和暴雨	(107)
第二节 用高分辨的不稳定能量分析预报雷暴和暴雨	(116)

第三节	用概率回归模型逐时预报雷暴和暴雨.....	(120)
第四节	用卫星数字云图制作雷暴和暴雨的概率预报.....	(122)
第五节	用雷达回波判别强对流天气.....	(126)
第十章	雷暴预报智能化业务系统	(134)
第一节	华东雷暴预报系统概 貌.....	(135)
第二节	华东雷暴预报数据存取系统.....	(136)
第三节	华东雷暴预报专家系统.....	(139)

(1)		
(2)		
(3)		
(4)		
(5)		
(6)		
(7)		
(8)		
(9)		
(10)		
(11)		
(12)		
(13)		
(14)		
(15)		
(16)		
(17)		
(18)		
(19)		
(20)		
(21)		
(22)		
(23)		
(24)		
(25)		
(26)		
(27)		
(28)		
(29)		
(30)		
(31)		
(32)		
(33)		
(34)		
(35)		
(36)		
(37)		
(38)		
(39)		
(40)		
(41)		
(42)		
(43)		
(44)		
(45)		
(46)		
(47)		
(48)		
(49)		
(50)		
(51)		
(52)		
(53)		
(54)		
(55)		
(56)		
(57)		
(58)		
(59)		
(60)		
(61)		
(62)		
(63)		
(64)		
(65)		
(66)		
(67)		
(68)		
(69)		
(70)		
(71)		
(72)		
(73)		
(74)		
(75)		
(76)		
(77)		
(78)		
(79)		
(80)		
(81)		
(82)		
(83)		
(84)		
(85)		
(86)		
(87)		
(88)		
(89)		
(90)		
(91)		
(92)		
(93)		
(94)		
(95)		
(96)		
(97)		
(98)		
(99)		
(100)		

第一章 引 论

对流天气是指雷暴、暴雨、冰雹、下击暴流和龙卷风等中小尺度天气，它们不仅严重威胁着飞行或其它军事活动，而且往往造成国民经济和人民生命财产的重大损失，研究这些天气，对于提高灾害性天气的短期、短时预报水平，有着十分重要的意义。因而对对流天气的研究，已越来越受到人们的重视。

如前言所述，华东中尺度天气试验所研究的中尺度天气系统，就是制造对流天气的雷暴系统，这次试验实际上是一次有限区域的雷暴试验。

关于雷暴研究，从第一次世界大战时，Bjerknes和Solberg所作的极锋气旋降水分析算起，至今已有七十年的历史。特别是近十年来，无论在观测事实、理论研究和实际预报方面，都取得了相当大的进展，其主要推动力有三：期待更高的预报准确率，中尺度观测能力的提高和了解复杂物理机制的要求。由于改进了处理小于传统天气尺度系统的能力，目前，风暴警报或局地强对流天气的预报水平正在得到有效的提高，这次华东地区雷暴试验的成果，也说明了这一点。

本书在正式介绍有关对流性天气分析预报的成果之前，先回顾一下近代雷暴研究的进展和问题，以便于更好地了解这次试验的基础及其研究成果的理论和实用价值。

(一)

对于雷暴的观念和认识，很大程度上依赖于观测手段和资料收集方法的变革。

早期对于雷暴的认识，主要是根据肉眼观测和少数地面观测资料推想出来的。那时认为雷暴中的塔状云是由低空的空气辐合上升形成的，并且已经初步认识到，蒸发冷却是引起下沉气流和地面雷暴大风的机制。

四十年代中期出现了气象雷达和气象飞机，开始对雷暴作定量观测。1946年和1947年夏季，美国在佛罗里达和俄亥俄州对雷暴进行了观测。Byers和Braham根据观测资料概括出雷暴单体发展三阶段的生命史模式，即：积云阶段，只有上升气流，降水开始形成；成熟阶段，上升气流和下沉气流都出现，降水到达地面；消散阶段，整个单体由下沉气流支配。

当时认为形成雷暴必须具备三个条件：水汽，条件不稳定层结，气块被抬升到凝结高度的机制。并将雷暴分成两类：一类是气团雷暴，是强度较弱而随机产生在气团内部的雷暴；另一类是锋面雷暴，它是强度较强沿锋产生的雷暴。

在四十年代，一般认为风的垂直切变是阻碍对流的云发展的，并为一些云的观测和雷达回波观测所证实。但Malkus从理论上分析了这种影响以后认为：风的垂直切变对云塔倾斜的影响，只是对小的云塔如积云、浓积云以至小积雨云等才重要，对体积庞大的雷暴云，这种效应并不显著。五十年代以后的气象雷达观测结果表明，有些大雷暴或强雷暴在强垂直风切变或高空急流存在的环境下发展，并能直立维持数小时。Newton第一次说明了环境风垂直切变与强雷暴的相互作用，指出通过这种相互作用，可以延长雷

暴的生命期。六十年代初, Ludlam等提出大型降雹雷暴所独有的积雨云环流模型。其特点是有一支倾斜的暖湿上升气流, 倾斜方向或者顺盛行风方向, 或者逆盛行风方向, 在中层以上有干冷空气自云体后部进入, 在云体后部形成一支冷湿下沉气流。在这样的环流系中, 允许有降水云在主要上升气流的外面下降, 而不致于由于降水的拖带减弱上升气流。云体后部的湿下沉气流与前方的倾斜上升气流, 通过各自的通道下沉与上升, 两者之间呈准片流状态。这就在积雨云和环境之间, 形成了能量供给和释放有组织的环流系。冷的地面出流造成的强低空辐合把前方低空空气抬升, 使新的上升气流不断形成, 并释放不稳定能量, 使对流活动长时间维持。为了区别于Byers-Braham提出的雷暴模式, 人们将这种长生命的强雷暴称为对流风暴或局地强风暴。

随着对流风暴观念的建立, 人们舍弃了原来的气团雷暴和锋面雷暴的分类, 代之以普通雷暴与对流风暴的分类。实际上纯粹的气团雷暴很难找到, 一些非锋面雷暴, 总是同大尺度环境条件、局地热点或地形影响相联系的, 雷暴并非随机发生。锋面雷暴也不一定比气团雷暴强烈, 在锋前气团内部出现的对流风暴往往要比锋上雷暴强烈得多, 按照新的分类法, “Byers-Braham”雷暴单体, 属于非强烈、短生命的普通雷暴, 而众多单体强雷暴、超级单体强雷暴, 以及飚线强雷暴, 均属于强烈的、长生命的对流风暴。

根据经典的Byers-Braham的普通雷暴模式, 普通雷暴为单体积雨云, 它的水平尺度为5—10km, 包括3—4个具有对流上升和下沉的单体, 每一对流单体的水平范围为几公里。而对流风暴包含一个或多个积雨云体, 此长彼消组织成为一个整体。从六十年代起, Browning, Eagleman, Lemon等许多人先后提出了对流风暴的多种三维环流结构模式, 使人们对于雷暴的认识大大前进了一步。多普勒雷达在气象上的应用使雷暴研究有一个突破, 人们第一次有可能观测到对流风暴的内部环流及其周围的环境变化, 从而找出两者的相互关系。通过对多普勒雷达观测资料的分析, 进一步证实和丰富了原先提出的对流风暴三维环流模式。例如发现有些风暴中心区存在旋转上升气流的情况, 旋转开始出现于中层, 然后逐渐下传而最终形成一个龙卷。

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的集合体, 称为中尺度对流系统(MCS), 它包括了不同类型的中尺度组织, 如云团、中尺度对流复合体(MCC)以及飚线等等。中尺度对流系统不仅占据着大部分热带云区, 在中纬度地区也时有出现, 并且有许多中尺度对流系统的对流部分, 既不强烈也不很深厚。它们的水平尺度为数百公里, 并且有卷云状云顶特征。雷达和卫星观测表明, 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, 尤其以降水为主的中尺度对流系统更为明显。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。这种概念模式的建立以及确认其中层状区的存在, 对于改进大尺度数值天气预报模式, 以及局地短期、临近预报, 都有着重要意义。

(二)

雷暴发生和组织过程, 包含了多种尺度运动及其相互作用。在它发生之前, 需要一个有利的大尺度环境, 提供对流系统发生的动力和热力条件。Miller根据美国对流系

统发生的情况提出雷暴发生的14种环境参数值。发生的环境条件包括：（1）位势不稳定层结；（2）低层有湿舌或强水汽辐合；（3）使不稳定能释放的触发机构；（4）有高空急流存在；（5）垂直风切变；（6）中层有干冷空气或高动量向地面输送，等等。Carlson等特别指出干暖盖对强对流风暴产生的重要性。在干暖盖下面是潮湿潜流，其地面边界是干线所在，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。

在有利的大尺度环境条件中，雷暴发生在哪个地区，有时为天气尺度扰动中的二级环流所控制。Shapiro讨论了高空急流锋区附近由地转变形场和其它次网格尺度的强迫作用引起的锋生环流。这种锋区横向环流是中- α 尺度的，它不仅加速和增强由天气尺度扰动带来的暖湿和冷干差动平流，而且由于非地转运动所加强的环流上升支部分，更有利于深对流的爆发。因此，对流系统发生前的环境，实际上是在天气尺度和中- α 尺度的相互作用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，常常是中尺度抬升的结果。抬升机制来源于大气中的各种不稳定（对称不稳定、开尔文-赫姆霍兹不稳定、边界层不稳定等），地面边界层过程（云风环流、海风和湖风环流、地形强迫等），结构不连续（冷锋、干线、出流边界等），或者是它们的综合作用。

雷暴发生后的移动情况随雷暴性质不同而有差异。普通雷暴大体随对流层的平均气流漂移。如果对流云体发展为几公里的厚度，云的顶底风有较大差异，这时由于对流动量输送的作用，整个云体的平均风速低于环境风平均速度，因而，雷暴云体通常以低于气层平均风速移动。对流风暴移动受环境风垂直切变的影响更大。雷达观测资料表明，许多对流风暴并不是简单地随环境流场移动。由于对流风暴发生在强垂直风切变环境中，促使风暴前部出现上升气流，后部出现下沉气流。在不稳定环境大气中，出现风暴前生后消的传播过程。对流风暴的移动主要受着传播的影响。除了上述由于对流垂直输送动量产生的传播机制以外，引起风暴传播的还有两类物理过程，一类是依赖于风暴自身。C.W. Newton和H.R. Newton（1969）在研究对流风暴移动时，考虑到风暴内部风速由于动量的垂直输送趋向均匀化，把矗立在环境风场中的对流风暴，视为刚体障碍物。如果风暴处在风随高度顺转的暖平流环境里，在低层风暴右侧有相对入流，产生正动压，而上层空气则从这一侧流出，产生负动压，这样形成了风暴右侧向上的垂直动压梯度，有利于云体向右侧传播。如果环境风随高度是逆转的，即在有冷平流的情况下，风暴向左侧传播。另一类是与风暴自身无关的传播过程。常见的外部传播机制是低层辐合作用。低层辐合区，为风暴提供水汽、不稳定能和上升气流，有利于对流的发展。Weaver（1979），杨国祥（1980）等指出，这种显而易见的随机运动，常同一些中- α 尺度的水汽辐合区联系的。Zehr和Purdum（1982）认为，锋、雷暴出流边界、海风锋和干线等系统都能建立局地的低层强辐合区，它们所加强的上升气流，直接影响风暴的传播。

数值试验是研究雷暴发展的一个重要工具。雷暴的数值试验主要表现在两个方面：一是用区域尺度数值模式模拟雷暴发展的环境；二是用积云尺度数值模式或与前者结合起来，模拟雷暴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，采用较小的网格距（50—100km）和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，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、急流和热力学特性。Benjamin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。由他模拟出的“盖子”及其边缘的层结稳定度梯度与实况十分相近。

积云模式从一维发展到三维,已经能够考虑影响对流的相当复杂的因子。一维(1-d)模式是同气块原理差别不大的最简单的积云模式,它只考虑垂直运动方程。由于将复杂的对流问题简化为一维问题,模式给定许多限制性假设,使模拟能力受到限制。二维(2-d)模式被广泛应用于雷暴的数值模拟。对流风暴的基本概念,首先是通过2-d模式得到的。例如:Takeda(1971)对准稳态雷暴的数值模拟,Miller(1974)对于对流过程应用静力平衡条件有效性的检验,Orville和Sloan(1976)关于对流的地形影响以及Thorpe等对飊线形成的数值模拟等等,均是通过2-d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出现,终于实现了应用3-d模式进行雷暴数值模拟的目标,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发展等均得到成功的模拟。Weisman和Kiemap(1984)用3-d模式对不同风的垂直分布条件下的雷暴发展加以模拟。结果表明,在相同对流有效位能情形下,弱风切变环流里产生一个短生命普通雷暴,如果切变增大一倍,就得到一条末端有超级单体的多单体风暴线。仅在2.5km以下气层内有强切变时,产生一条飊线,并且飊锋远离风暴中心区域而在飊线雷达回波的前边。模拟结果证实了风的垂直切变与雷暴发展的密切关系,切变的强弱是区别对流雷暴与普通雷暴的基本动力学条件之一。

雷暴发展所引起的热量和动量垂直输送,对高空大尺度风场和温度场有重要影响。还有通过垂直方向上的水汽再分布和中尺度云场对辐射的影响,也给大尺度场起反馈作用。雷暴发展还影响较小尺度运动的动力学特征,如锋生环流和重力波的振幅,以及伴随对称不稳定的垂直运动的增强等。雷暴对其它尺度运动的反馈影响,可以持续其整个生命期,并将影响到下游天气系统的生长。雷暴过程中的一个重要特点,是在对流中层有大量的凝结潜热释放出来,加热对流云内大气使云团变暖。丁一汇等对河南“75.8”特大暴雨过程中对流凝结潜热的反馈作了分析,通过 ω 方程计算这次过程中潜热对垂直运动贡献,结果表明潜热对 ω 的增强作用非常重要,潜热项造成的 ω ,占总 ω 的1/2以上并随暴雨的增强而加大。高空的对流性增温使高层等压面抬高,并引起高空质量外流,结果使暴雨区上空形成反气旋辐散气流,随着高空暖区出现,在暴雨区以北水平温度梯度增加,在暴雨区以北建立高空强风带。二宫洗三曾经利用卫星云图和高空气象记录对一次强雷暴作过详细分析,分析结果同样表明,由强雷暴所组成的对流风暴中,也出现了上述类似反馈影响。对流凝结潜热对其它较小尺度运动的影响也是明显的。Emanuel(1982)在讨论斜压气流中的条件性对称不稳定时,通过湿对流参数化,加进了CISK机制,结果,可以引起明显的中尺度环流,这种环流向平均垂直风切变的右边传播,并由此解释中纬度飊线的触发和移动。以后在研究梅雨锋雨带和条件性对称不稳定的关系时,也得到类似结果。

雷暴预报有两类问题:一类是发生预报;另一类是移动和维持的预报。解决第一类问题,一般是先考虑出现雷暴的大尺度环境条件,从而了解可能出现的区域范围,确定它的落区。然后在落区中,通过中尺度条件和监测来预报落时和落点。目前,这个问题还远未解决。主要的困难是中尺度条件的预报,对于象由下垫面强迫作用产生的中尺度

过程预报,固然解决得好一些,而对自由大气内部过程所产生出来的中尺度环流,预报能力就很差。大气内部未来出现什么样的不稳定,这种不稳定能量怎样建立和释放,有什么锋生过程及其相联系的环流出现等许多问题,预报还相当困难。因而雷暴的发生,目前只能在一段时间、一个地区内作出预报。对于第二类问题:一是很短的时间内,凭借观测实况作线性外推的临近预报(Nowcasting)。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。例如对于雷暴单体外推时限为20分钟到1小时。线性外推时限,一般为其生命期的1/10,最多不超过其1/4。做线性外推,要考虑到系统发展的物理过程,对系统发展的物理过程了解得更深刻,外推结果就更好一些。二是甚短期预报, (Very short range forecast)。除了利用实况外推,还考虑系统的发展变化、预报时限不超过12小时。三是短期预报,预报时应用概念或数值模式,预报时限可到24小时。由于应用的模式考虑了热力和动力调整过程,增加了预报信息,因而尽管时限增长了,预报能力反而提高了。由于大尺度运动存在着准地转和准静力关系,大尺度天气预报的时限最多可达到10天—2周,超过这个时限,由于受许多小一级尺度系统的反馈影响,预报的有效性很低。中尺度运动不符合准地转和热成风关系,因而对雷暴预报,只能限制在短时间内,一般不超过24小时,预报水平还是很低的,预报准确率不到50%。

近年来国外还将每小时1—2次的同步气象卫星资料,同雷达观测和天气实况结合起来,试验对中尺度天气进行监视和制作短时预报,取得了一定的成功。它不但能够监视沿海岸的中尺度环流的出现以及对流云的发展,还可以对高空小扰动的位置、移动很好地加以监视,并能成功地预报它对局地天气的影响。为了使天气预报客观化、定量化、自动化,许多国家还致力于人工智能预报系统的研究,有的已经投入业务使用,象我国的暴雨预报专家系统、美国的WILLARD雷暴预报专家系统等,目前已成为暴雨和强雷暴预报的有力助手。

(三)

七十年代以来,随着数字化雷达、多普勒天气雷达、自动化遥测地面站网、数字化卫星资料、大气要素的廓线遥感探测和气象探测飞机等技术的发展,以及用计算机实现的高速通讯、信息处理,把各种探测资料融为一体,形成能快速了解三维空间大气场结构和准实时变化的新系统。这一系统的形成和发展标志着对中小尺度天气的研究进入了新阶段,把研究和业务结合的试验已有了可能。因此,一些发达国家相继提出并组织了一系列规模较大的中尺度天气研究或研究和业务结合的试验。

例如,美国在1979—1982年间组织的强风暴与中尺度天气试验 (SESAME),动员了一、二百名科学家,运用了大量最先进的仪器设备,耗资数百万乃至上千万美元,它是规模很大的一次研究中尺度天气的联合行动。试验地点在Oklahoma州,这是龙卷出现较多的地区,试验期是每年4月1日到6月8日,前后共两个多月时间,试验的目标是要解决:(1)对流风暴在中尺度环境中的发展过程,了解什么是强风暴发展的触发机制?什么因子控制风暴的强度和龙卷的产生?强风暴对后来的风暴以及大尺度环流有什么影响?(2)检查新的直接探测和遥测系统是否能准确、及时的测量中尺度系统及对

流风暴的发展过程,利用由精密的直接探测仪器组成的特殊观测网检验遥测系统。(3)发展与试验预报强风暴的有限区域与小尺度数值模式。

1986年开始,在美国执行的风暴尺度气象业务和研究计划,是一项规模更为庞大的国家中尺度(STORM)试验计划。试验先从美国中部开始,几年后再扩大到美国的东、西部,计划耗资3亿多美元,到1999年完成。整个试验分三个阶段,分别先后在美国的中央和东、西部分进行。第一阶段的计划,主要目的是要进一步了解中纬度中尺度对流系统及其天气的预报能力。这些MCS包括产生暴雨和强对流天气的MCCs、飑线和超级单体雷暴等。所要达到的具体目标是要解决四个核心问题:(1)MCS发生前的环境及其触发机制;(2)MCS的发展、结构和消散;(3)MCS对其它尺度运动的反馈;(4)MCS的预报。这次计划既包括了对流尺度、中尺度和区域尺度的多种尺度的外场试验,也是一次名副其实的由研究人员和业务人员共同合作的计划。

我国七十年代之后的中小尺度天气试验也有不少,都是研究暴雨和强对流天气的,但大多数是因陋就简利用常规的观测手段进行试验的。八十年代以后有了变化。目前正在进行的“9-2”项目:灾害性天气监测和0—12小时预报研究,是由国家组织的业务和研究结合的一次中尺度天气试验。计划在珠江三角洲、长江三角洲、京津冀、三峡等地建立灾害性天气监测基地及0—12小时预报系统,同时研究雷暴、冰雹、暴雨、雷暴大风等天气的活动的规律。具体目标是在现有站网、设备条件基础上充分采用先进的探测手段,通过高速数值技术迅速收集资料,运用计算机处理和图形处理技术,构成一个对本地区灾害性天气进行有效监测和资料收集的网,在此基础上开展对灾害性天气的甚短期预报和警报的研究,并将研究结果直接用于气象业务和气象专业服务中去。

1986年起,军队在华东组织中尺度天气试验,历经野外观测和分析研究两个阶段之后,在1986年底基本结束。通过这次试验,在对流天气现象及其有关的中尺度天气系统结构和生成发展机制方面,研究工作取得了明显的进展,同时还建立了一个适用于部队的雷暴短期、短时人工智能预报系统。这些成果,对于提高部队的中尺度天气分析和雷暴预报水平,必将是一个有力的推动。

参 考 文 献

- S.L.Barnes, Severe Local Storms: Concepts and Understanding, *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 57, 412-419 (1976).
- H.R.Byers and R.R. Braham, The Thunderstorm, U.S.Govt. Printing Office, Washington, Dc, 287 (1949).
- J.S.Malkus, The Slope of Cumulus Clouds in Relation to External Wind Shear, *Quar. J. Roy. Meteor. Soc.* 78 (332), (1952).
- C.W. Newton, Dynamics of Severe Convection Storms, Severe Local Storms, Meteor. Monogr. 5(27) (1963).
- F. H. Ludlam, Severe Local Storms: A Review, Meteor. Monogr. 5(27), Amer. Meteor. Soc, Boston, MA, (1963).
- K.A. Browning, Airflow and Precipitation Trajectories within Severe Local Storms which Travel to the Right of the Winds, *J. Atmos. Sci.* 21, 634(1964).
- J.R. Eagleman, A Double Vortex Thunderstorms Model, 7th Conf. on Severe Local Storms, Amer. Meteor. Soc, 177-178 (1971).
- L.R.Lemon, Wake Vortex Structure and Aero-Dynamic Origin in Severe Thunderstorms, *J. Atmos. Sci.* 33, (1976).

- C.A. Deswell, The Operational Meteorology of Convective Weather, Vol. Storm Scale Analysis, (1985).
- E.J. Zipser, Mesoscale Structure of Tropical Convective Storms, Dynamics of Mesoscale Weather Systems, (1984).
- R.A. Houze, Stratiform Precipitation in Mesoscale Convective Systems, Dynamics of Mesoscale Weather Systems, (1984).
- R.C. Miller, Note on Analysis and Severe Storm Forecasting, Procedure of the Military Weather Warning Center, (1967).
- 杨国祥, 中小尺度天气学, 气象出版社, (1983).
- T.N. Carlson The Role of the Lid in Severe Storm Formation, Some Synoptic Examples from SESAME, 12th Conf. on Severe Local Storms, (1980).
- M.A. Shapiro Frontogenesis and Geostrophically Forced second Circulation in the Vicinity of Jet Stream-frontal Zone Systems, *J. Atmos. Sci.* 38, (1981).
- UCAR, The National Storm Program Stormscale Operational and Research Meteorology, (1983).
- C.W. Newton and H.R. Newton, Dynamical Interactions between Large Convective Clouds and Environment with Vertical Shear, *J. Meteor.* 16, (1959).
- J.F. Weaver, Storm Motion as Related to Boundary-Layer Convergence, *Mon. Wea. Rev.* 107, (1979).
- 杨国祥、林兆丰, 边界层对飢线活动的作用, 强对流天气文集, 气象出版社, (1980).
- R.M. Zehr and J.F.W. Purdom, Examples of a Wide Variety of Thunderstorm Propagation Mechanism, 12th Conf. Severe Local Storms, *Amer. Meteor. Soc.*, (1982).
- R.A. Anthes, H.O. Orville and D.J. Ragmond, Mathematical Modeling of Convection, Thunderstorms, A Social, Scientific and Technological Documentary, Vol. 2, Thunderstorm Morphology and Dynamics (E. Kessler, Ed.) NCAA/ERL, (1982).
- S.C. Benjamin, Some Effects of Differential Heating and Topography on the Regional Severe Storm Environment, Numerical Simulations of the SESAME IV (9-10 May 1979) case, 6th Conf. On Numerical Weather Prediction (1983).
- T. Takeda, Numerical Simulation of a Precipitating Convective Cloud, The Formation of a Long-Lasting Cloud, *J. Atmos. Sci.* 28, (1971).
- M.J. Miller, On the Use of Pressure as a Vertical Co-ordinate in Modelling Convection, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* 100, (1974).
- H.V. Orville and L.J. Sloan, A Numerical Simulation of the Life History of Rainstorms, *J. Atmos. Sci.*, 27(1970).
- A.J. Thorpe M.J. Miller and M.W. Moncrieff, Two-dimensional Convection Non-constant shear, A Model of Mid-latitude Squall Lines, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 108, (1982).
- M.L. Weisman and J.B. Klemp, The Structure and Classification of Numerically Simulated Convective Storms in Directionally Varying Wind Shears, *Mon. Wea. Rev.*, 112 (1984a).
- 丁一汇等, 1975年8月上旬河南特大暴雨的研究, *大气科学*, 2(4), (1978).
- K. Ninomiya, Mesoscale Modification of Synoptic Situation from Thunderstorm Development as Revealed by ATS III and Aero-logical Data, *J. Appl. Meteor.*, 10 (12), (1971).
- K.A. Emanuel, Inertial Instability and Mesoscale Convective Systems, Part II, Symmetric CISK in a Baroclinic Flow, *J. Atmos. Sci.*, 39, (1982).
- Wen Yih Sun, Rainband and Symmetric Instability, *J. Atmos. Sci.* 41 (23), (1984).
- K.A. Browning (Ed.), Nowcasting, Academic Press, (1982).
- S.M. Zubrick, C.E. Riese, An Expert System to Aid in Severe Thunderstorm Forecasting, 14th Conf. Severe Local Storms, *Amer. Meteor. Soc.*, (1985).

第二章 雷暴的气候背景及其 与大尺度环流的关系*

雷暴的气候背景是华东对流性天气研究的课题之一。我们通过多年雷暴资料的统计分析,对江淮下游地区雷暴的天气气候特点与大尺度环流间的关系加以研究,以期揭示了雷暴的地理分布和时序分布,以及该地区雷暴发生的天气气候学规律。

第一节 雷暴的地理分布

为了弄清楚江淮下游地区雷暴的地理分布特征,我们采用了该地区131个观测站,从1961—1981年共21年的观测资料进行分析,该地区北起山东的苍山、枣庄;南至浙江的杭州、江西的庐山;西从豫皖之交的界首、固始,东到沿海,台站的分辨率平均约为55km。

一、雷暴的年地理分布

从江淮下游雷暴21年平均值的年地理分布可见(图2.1),在该地区的南部大别山区和天目山、黄山地区是两个多雷暴区,大别山区的南麓和山巅均在50天以上,如岳西为55天,英山为54天,太湖为50天,宿松为50天,相城为50天,天目山、黄山本身以及其东南一带山地也都在50天以上,如天目山为53天,黄山为50天,宁国为53天,祁门为58天,昌化为53天,屯溪竟达61天之多,这个多雷暴区实际上是南岭山地多雷暴带的一部分。另一个多雷暴地区是以洪泽湖为中心的北起睢宁,南至全椒的广大平原地带,其雷暴日数年平均也多在35—37天左右,如天长为35天,高邮为37天,金湖为36天,滁县为37天,盱眙为37天,这就形成该地区为一雷暴次多中心。除了上述3个多雷暴中心外,便是沿长江河谷和大别山北坡以及苏北平原的少雷暴带,这些地区比其四周约少5—10天不等。

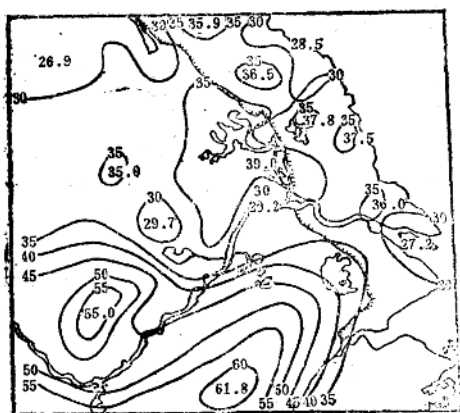


图2.1 江淮下游地区雷暴日的年地理分布

*本章取材于张立、陈金应、焦明怀、巴文伦的研究成果。

二、4—7月份雷暴的月地理分布

江淮下游地区的雷暴绝大多数发生在4月到9月，尤以4月和6、7、8月为最多，10月以后直到次年3月是雷暴发生少的月份，其中尤其是12月和1月，全区中不少地方无雷暴，就是多雷暴的南部山区，21年的平均也都不到0.3个雷暴日，现在我们以4月代表春季来讨论，图2.2是21年4月份的雷暴日数平均值的地理分布图，从图可见，它与冬季不

同，除了雷暴日数普遍增多和南部山区仍然是一个多雷暴区外，在该区的北部边缘即鲁苏交界一带出现了一个多雷暴区，该月的南部山区如大别山区以及天目山、黄山一带，不少地方都有4个雷暴日或更多，随着纬度向北减少，到苏皖北部差不多就不到两个雷暴日了。5月这个北部的多雷暴中心有所分散，此外在洪泽湖和扬州，六合一带出现一相对的少雷暴区，该季北部出现多雷暴区显然是与这个季中入海高压变性之后，停留在东海给该区带来较多的水汽以及蒙古气旋中的冷锋有关，检查一下4、5月份的

月平均地面气压场或流场，便可知道，这时入海高压中心位于东海或日本海一带，它与大陆上的西伯利亚气流间形成的气流辐合线或锋正位于江淮下游地区，6、7、8三个月属于夏季和盛夏形势。我们以7月份作代表，图2.3是7月份的雷暴地理分布情况，可以看到，这

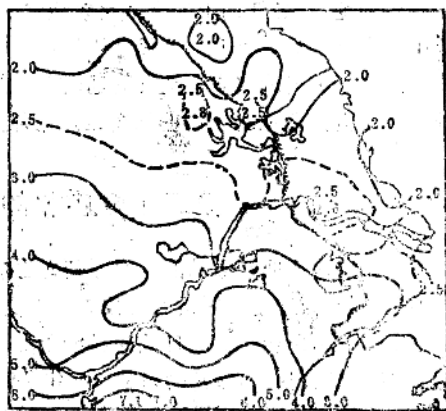


图2.2 4月雷暴日地理分布



图2.3 7月雷暴日地理分布

三个月内江淮下游地区的雷暴日数较之春季大大增多，尤其是7月达到一年中月平均雷暴日数的高峰，这时，大别山、黄山和天目山出现多雷暴中心，7、8两月其数值可达10—15天之多，如7月份位于大别山区的岳西为15天，天目山为14天，黄山为12天，宁国为14天便是例子。这时洪泽湖周围的多雷暴中心早已出现，如果求索这个多雷暴中心的始源可以一直追溯到春末5月份。5月，首先在洪泽湖出现多雷暴中心，以后它的范围逐渐扩大，到7月达到典型阶段，这时在中心区可达13天以上，它与南部山区的多雷暴中心之间，也即沿着长江河谷和大别山北麓一带，有一条明显的少雷

暴带，这种形势与全年雷暴的地理分布极相似，南部山地的多雷暴当与山地有关系；北部洪泽湖四周的多雷暴带，则与该季东亚环流有联系，从这三个月的东亚1500m的气流图可知位于江淮下游地区乃是一条东西向的气流切变线，该线以南是来自热带海洋上的气流，