

# 暴雨和中尺度气象学问题\*

丁一汇

(中国气象科学研究院,北京,100081)

## 提 要

对近年来暴雨和中尺度气象学的进展进行了综合评述,这包括(1)暴雨发生的条件;(2)强风暴和中尺度对流系统概念模式;(3)中尺度系统的数值模拟;(4)中尺度动力学问题;(5)暴雨预报等。对于暴雨和中尺度气象学将来研究的问题也作了讨论。

**关键词:** 最新进展;暴雨,中尺度气象学。

## 1 引 言

中国是一个多暴雨的国家,尤其是东南沿海暴雨出现最频繁,年暴雨日数一般在 5d 以上。每年由不同范围的暴雨造成的全国洪水面积可达几十万 km<sup>2</sup>。在过去 30 年中(1951—1980 年),共发生了 1601 次不同程度的洪水灾害,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<sup>[1,2]</sup>。例如 1975 年 8 月 5—7 日河南大暴雨 3d 雨量达 1605mm,在淮河中上游造成了空前的洪水灾害<sup>[3]</sup>,水库跨坝,近 100 县受淹,3 万多人丧生,经济损失达到几亿元。1963 年 8 月上旬华北持续 10d 左右的大暴雨是另一个例子<sup>[4]</sup>。1991 年 5—7 月江淮地区出现了严重的暴雨和洪涝<sup>[2]</sup>,造成了高达 600 亿人民币的直接经济损失,是建国以来最严重的一次洪涝灾害,因而引起了中国各级政府部门以及国内外各界人士的高度重视。

中国气象部门和气象工作者长期以来对暴雨的研究和预报十分重视,作了大量工作,暴雨的研究和预报水平不断提高。近 40 年来大致可划分为三个阶段<sup>[5]</sup>:“75.8”河南大暴雨发生前是初期阶段,研究的重点是大尺度环流和天气尺度降水系统,降水预报主要是经验和定性的;“75.8”暴雨以后,全国各级气象部门对暴雨的研究和预报都十分重视,组织了专门的暴雨研究协作组(如华北、长江中下游、华南前汛期等),组织了几次规模较大的野外观测试验(如华南前汛期试验<sup>[6]</sup>、华东梅雨期中尺度试验等<sup>[7]</sup>)。在“七五”期间,通过国家攻关项目还建立了京、津、冀,长江三角洲,长江中游,珠江三角洲等四个中小尺度基地。研究工作的重点从天气尺度转向了中尺度。在降水业务预报上,研制和运行了全国性的区域降水数值预报模式(LAFS)和武汉的有限区暴雨模式。同时不少台站还研制和使用了暴雨诊断方法和专家预报系统,使暴雨预报向客观定量化方向转变<sup>[8]</sup>,从而使暴雨的研究和预报上了一个新台阶。1991 年江淮特大暴雨的发生对中国的暴雨研究提出了新的

\* 1994 年 2 月 23 日收到原稿,1994 年 3 月 26 日收到修改稿。本文得到国家自然科学基金会的资助。

挑战: 必须使暴雨的监测技术和系统以及收集传输系统进一步现代化, 研制更准确的客观定量的暴雨预报方法, 并尽可能延长其预报时效, 研究暴雨成灾的原因、评估方法和防灾对策等。

在国际上日本和美国对于暴雨的研究和预报也相当重视。日本每年 6—7 月深受梅雨暴雨的灾害。从 1970 年代起日本就专门组织了梅雨的观测试验和专题研究, 获得了许多有关梅雨锋性质与特征以及天气尺度与中尺度扰动特征的结果。在这个基础上日本发展了细网格的区域降水预报模式, 并在业务上使用, 具有一定的暴雨预报能力。近年来日本又把暴雨的研究与亚洲季风的问题联系起来, 试图从更广泛的时空尺度研究暴雨问题。美国的暴雨主要由强对流活动产生, 多表现为突发性暴雨, 常常在几个小时内局部地区骤降大量降水, 从而造成重大灾害。例如 1976 年 7 月 31 日—8 月 2 日在美国落基山东侧科罗拉多州大汤姆逊峡谷地区出现了一场大暴雨<sup>[8]</sup>, 4h 内降下了高达 300mm 的降水, 造成了破坏性突发性洪水。1972 年 6 月 9—10 日在拉皮特城出现了一次类似的暴雨过程<sup>[9]</sup>, 最大降水量达 400mm, 降水主要是出现在 1—2h 内。1981 年 5 月 24 日夜, 在得克萨斯州奥斯汀地区, 一个缓慢移动的多单体雷暴仅在 2h 内就产生了 200mm 以上的降水, 引起了该地区创纪录的洪水<sup>[10]</sup>。为了解决暴雨和强风暴天气的监测与预报问题, 美国专门制定了耗资巨大为期 10 年的风暴计划, 目前已在美国东部和中部地区实施。同时也积极发展超短期预报系统(主要由 NOAA 的预报系统实验室负责)和中尺度数值模式, 在这方面已经取得了显著的进展。

本文主要从中尺度气象学的观点, 对暴雨研究和预报的现状作一综合评述。

## 2 暴雨发生的条件

暴雨是在几种尺度系统相互作用的情况下发生发展的。大尺度环流条件对暴雨的发生发展有明显的制约作用, 尤其是 3d 以上的持续性暴雨要受到行星尺度甚至半球尺度长波系统的影响。在这种持续性大暴雨发生前或发生中, 行星尺度长波系统一般会经历一次明显的调整过程, 以后表现出异常的稳定性。持续性大暴雨即出现在长波系统稳定的时期。在这种情况下, 天气尺度和中尺度降水系统可以在同一地区重复出现或沿同一路径移动, 以致造成很大的累积降水量。表 1 以 1991 年江淮特大暴雨为例说明不同尺度的影响系统与暴雨形成的关系<sup>[2]</sup>。概括起来, 这次暴雨的成因为: 有利的气候背景(ENSO 事件), 持续异常的高低纬大尺度环流(如阻塞形势)和 3 次低频振荡, 连续东移的天气尺度低压扰动和稳定的梅雨锋以及很强的低空急流, 极其频繁的中尺度对流系统活动, 凝结加热的正反馈作用与地形的降水增幅作用。上述因子形成一个多尺度的复杂的相互作用的系统, 最后导致 1991 年这一场异常的持续性特大暴雨。

关于中国暴雨发生的温湿和动力条件, 概括起来有以下几点<sup>[11]</sup>: (1) 位势不稳定层结; (2) 低空湿舌和深厚湿层, 并且有水汽辐合; (3) 位势不稳定释放的启动机制; (4) 高低空急流及其耦合作用<sup>[12, 13]</sup>; (5) 弱的风垂直切变。根据中国许多次大暴雨的动力学分析, 也证实了上述条件与暴雨发生的密切关系。根据对美国暴雨的研究<sup>[9]</sup>, 可以概括出 7 个天气和物理条件: (1) 暴雨及其所造成的突发性洪水主要与对流性系统有关; (2) 对流性暴雨发生在地面高露点区; (3) 有深厚湿层存在; (4) 云层上下的风垂直切变很弱; (5) 对流风暴

表1 1991年江淮暴雨时期不同尺度的影响系统及其与暴雨形成的关系一览表

| 暴雨的影响条件和系统  | 空间尺度     | 时间尺度    | 与暴雨的关系  |
|---|----------|---------|---|
| ENSO事件(1991—1992)和太阳黑子活动大峰年                               | 行星尺度     | 年际或10年际 | ENSO发生当年,长江流域易涝,且早涝有36.7年周期,造成暴雨发生的有利气候背景                     |
| 中高纬持续异常流型:阻塞高压和冷涡型造成3次冷空气活动;副热带高压异常北上并偏北稳定在25°N;夏季风3次强的扰动 | 大尺度或行星尺度 | 季节或季节内  | 引起3次冷暖空气的低频振荡活动(10—20d周期),并在江淮地区(32—35.0°N)交汇,使梅雨锋稳定在这个地区     |
| 9个中- $\alpha$ 尺度气旋扰动沿梅雨锋发展和移动,强低空急流输送大量水汽并产生中尺度振荡         | 天气尺度     | 5d      | 中- $\alpha$ 尺度低压系统与切变线内形成许多中尺度(中- $\beta$ 尺度)对流系统,这是直接的降水系统   |
| 许多中- $\beta$ 尺度系统和云雨团频繁发生。近于沿同一路径移动到暴雨洪涝区或受地形影响停滞在暴雨区     | 中尺度      | 5—12h   | 中- $\beta$ 尺度系统频繁生成,并合并以维持中- $\alpha$ 系统。通过凝结加热产生正反馈作用造成强烈的暴雨 |

或单体可不断形成并移过同一地区;(6)弱高空槽触发暴雨并使暴雨集中;(7)暴雨区多发生在大尺度高空脊附近,而中国暴雨除此条件外,也经常发生在低涡或切变线附近。如果把上述中国和美国的暴雨发生的天气和物理条件相比较,其中(1),(6)和(7)是有明显的差别。(1)的差别表明,美国多强对流暴雨和突发性洪水,而中国多持续性暴雨。(6)与(7)的差别表明,造成美国暴雨的主要天气系统是弱短波槽和天气尺度脊,并且暴雨在脊区附近,而中国的暴雨发生主要与台风和低涡有更密切的关系,其次才是高空槽和锋面。(2)—(5)条件表明,美国和中国暴雨发生的一些基本条件又是相似的,即高湿且湿层深厚,弱垂直风切变等。

### 3 强风暴和中尺度对流系统概念模式

在1950年代前Byers和Braham根据1946—1947年进行的雷暴研究计划的观测结果,概括出了一般雷暴演变的3个阶段模式。但是这个模式只能用来说明一般雷暴单体(主要是气团雷暴)的生命史,它们的强度较弱,生命期也短。对于更强烈的风暴系统(即产生冰雹、龙卷和暴雨的雷暴)则不适用。通过近10多年的研究已揭示出这种尺度更大、生命史更长的局地强风暴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差别<sup>[14]</sup>。人们根据一些新的观测事实,例如上升气流和下沉气流的位置和强度、飑锋、雷达回波特征(弱回波区、钩状回波等)以及其中物理过程和其作用的研究提出了不少强风暴的概念模式,如超级单体、多单体和飑线等强风暴模式,更合理地说明了其中气流的结构和相互作用过程以及强天气(冰雹、龙卷等)的发生。这些雷暴模式对于了解雷暴单体及有组织雷暴群的物理本质,在数值预报中设计更合理的强对流模式和改进雷暴及暴雨预报有很大的帮助。它们是研究中尺度系统的基础。

近年来中尺度对流系统(MCS)引起人们的明显重视。MCS是一种深对流系统,其尺度远大于雷暴单体,在中高层常有大片层状云砧,水平尺度广达数百公里。这种云系的一般生命史达6—12h。MCS是一种主要的降水系统。位于MCS之中的雷暴或强对流单体可引起暴雨和灾害性强风,有时还会产生冰雹和龙卷。根据大量的研究已概括出各种

MCS 的模式, 这包括热带和中纬度飮线, 中尺度对流复合体(MCC)等概念模式。MCC 是 MCS 的一种重要类型, 经常在中纬度观测到。主要发生在水汽供应丰富和水平风切较弱的环境中, 是中纬度重要的降水系统。

#### 4 中尺度系统的数值模拟

最近 10 几年间, 已可用数值方法成功地模拟出从一朵孤立的积云直到中尺度飮线和 MCC 系统的发展和结构。与早期研究的系统不同, 现在主要研究的是深对流现象, 并包含有复杂的降水过程(暴雨、冰雹等)。不但涉及到各种动力学, 而且涉及到云的微物理学及其间的相互作用。如冰晶过程、撒播过程等<sup>[15-18]</sup>。中尺度数值模式作为一种强有力的工具已被广泛地用于中尺度气象的研究和业务预报中。

中尺度模式根据模拟现象共分 3 类: 中- $\alpha$  尺度模式(水平格距 50—200km), 中- $\beta$  尺度模式(水平格距 5—50km)和中- $\gamma$  尺度模式(水平格距小于 5km)。中- $\alpha$  尺度模式一般是用实时资料对区域尺度作 12—48h 的预报。利用目前的计算机条件, 这些模式已业务化, 目前不少国家(美国、日本、加拿大、澳大利亚、法国、中国、欧洲中期天气预报中心等)建立了有限区模式。这种模式在某种意义上是 60 年代天气尺度模式发展的产物。主要差别是增加了水平和垂直分辨率, 并且改进了物理参数化方案(边界层、积云对流作用等)。表 2 是各国目前使用的一些中- $\alpha$  尺度模式一览表。利用上述中- $\alpha$  尺度模式已能够模拟一系列中尺度现象, 这包括过山气流、山脉波、地形雨、空气质量模拟、山谷风、海陆风、温带气旋、热带气旋、锋面环流、飮线、中尺度对流复合体、对流性雷暴、干线、急流中心的环流、沿岸效应、雨带、城市环流以及区域气候。但由于模式的性能和复杂程度不同, 模拟的结果常有一定或甚至明显的差别。根据最近国际上一次中- $\alpha$  尺度模式的比较(用表 2 中的国外模式对 1981 年 4 月 21—25 日一次大西洋气旋的发生发展过程进行了 72h 的模拟预报, 共作了 42 次试验)表明, 影响中尺度预报的各因子其重要性依次如下: (1) 边条件; (2) 湿物理过程(如潜热加热); (3) 边界层物理; (4) 初条件; (5) 分辨率。因而质量好的中尺度模式是要有较复杂的物理过程和参数化方案, 较细的分辨率和实测的侧边界条件。而质量差的中尺度模式则是把上述各种条件作了不同程度的简化, 并且用了预报边条件。上述的比较也指出了一个重要问题, 侧边界条件比初条件更重要。初条件对模拟结果的影响不如原来认为的那样大。这是与以前的看法不同的。因而最近 Anthes<sup>[19]</sup>指出, 如果一个中尺度模式比较真实地处理好地面条件和物理过程, 只要用较好的大尺度条件作为初值, 则能够模拟和预报出世界各地大部分不同的天气尺度和中尺度现象。中国的学者也得到了类似结果<sup>[20-22]</sup>。

与中- $\alpha$  尺度模式不同, 中- $\beta$  尺度模式主要是在理想条件下模拟大气现象而不是用实际资料去作预报。这种模式主要用来研究海陆风、山谷风、过山气流(山脉波)、地形雨、台风和中尺度对流系统(MCS)等的物理机制。但今后随着计算机能力的增加, 完全可以用这种尺度的三维模式进行实时预报。但就目前而言, 这种模式最大的实用之处在于改进中- $\beta$  系统的概念模式, 并确定有利于其发展的大尺度结构。在国外已经发展了许多中- $\beta$  尺度模式, 这包括 Pielke 的海陆风模式、ERL(美国环境研究实验室)的中尺度模式、宾州大学和 NCAR 的中尺度模式以及美国飮风研究室的模式等。中国已经开始研究这种模式。

表 2 各国业务和研究使用的中- $\alpha$  尺度数值模式一览表

| 国家                      | 水平格距<br>(km)   | 区域                     | 垂直层数     | 侧边界条件           | 分析              | 初值化         | 物理                                     | 模式顶<br>(hPa) | 垂直坐标     | 地形           |
|-------------------------|----------------|------------------------|----------|-----------------|-----------------|-------------|--|--------------|----------|--------------|
| 澳大利亚                    | 80, 160        | 60×45                  | 10       | NMC             | NMC             | 非正则<br>模态   | 随稳定度而变的交换系数。郭氏积云参数化方案                  | 100hPa       | $\sigma$ |              |
| 加拿大                     | 75, 150        | 29×21<br>141×117       | 15       | 双向相互作用          | NMC             | 非正则<br>模态   | 乱流动能 PBL、郭氏积云参数化方案和短对流调整方案             | 100hPa       | $\sigma$ |              |
| 法国                      | 40, 80, 160    | 43×57<br>75×107        | 15       | NMC             | NMC+<br>探空      | 非正则<br>模态   | 随稳定度而变的交换系数。郭氏积云参数化方案或 Bougeault 积云参数化 | 50           | $\sigma$ | 包络地形         |
| 佛罗里达州立大学                | 45, 70         | 83×59 或全球<br>(384×160) | 12       | NMC             | NMC             | 动力初值或非正交模态  | 由相似理论计算地面通量。郭氏积云参数化方案                  | 101          | $\sigma$ | 包络地形         |
| 日本<br>(格点)              | 80, 160        | 25×33<br>49×64         | 15       | NMC 及<br>NMC+探空 | NMC 及<br>NMC+探空 | 非初值化        | 由相似理论计算地面通量。郭氏积云参数化方案                  | 60           | $\sigma$ |              |
| 日本<br>(谱模式)             | 83×70<br>62×62 | 亚洲及西太平洋和日本周围           | 16<br>19 | 亚洲谱<br>模式       | NMC             | 非正则<br>模态   | 由 Louis 方案计算地面通量。郭氏积云参数化方案             | 0            | $\sigma$ |              |
| 海军模式<br>(USA)           | 80             | 109×82                 | 12       | NMC             | NMC             | 非初值化        | 总体公式。郭氏积云参数化方案                         | 50           | $\sigma$ | 1'           |
| 美国国家<br>气象中心<br>(NMC)   | 80             | 113×90                 | 12       | 双向相互作用          | NMC+<br>探空      | 非正交<br>模态   | 依稳定度而变的交换系数。郭氏积云参数化方案                  | 0            | $\sigma$ | 平均地形         |
| 海军研究<br>实验室<br>(USA)    | 55             | 101×51                 | 10       | NMC             | NMC+<br>探空      | 非初值化        | 总体公式。无积云加热, 改变加热剖面 and 郭氏积云参数化方案       | 0            | $\sigma$ | 10' 和增强的地形作用 |
| 宾州大学<br>与 NCAR<br>(MM4) | 80, 160        | 31×24<br>61×46         | 10<br>15 | NMC             | NMC<br>NMC+探空   | 非正交模态<br>扰动 | 总体公式。改进的 Anthes 积云参数化方案                | 100          | $\sigma$ | 10' 地形       |
| 中国国家<br>气象中心            | (球面)<br>1.875° | 27×41                  | 15       | 套网格<br>(单向)     | 多元最优<br>插值      | 非线性正则模态     | 总体公式。郭氏积云参数化方案                         | 0            | $\sigma$ | 平均地形         |
| 武汉气象<br>台与大气<br>物理所     | 100            | 29×23                  | 5        | NMC             | 逐次订正            | 非初值化        | 大尺度加热                                  | 100          | $\sigma$ |              |

中- $\gamma$  尺度模式主要用来模拟对流云和对流风暴的发生发展、演变、结构和降水等。与中- $\alpha$  和中- $\beta$  尺度模式所用的方程不同,中- $\gamma$  尺度方程是非静力平衡的,并且要包含有描述云和降水的预报方程。一般一维和二维的中- $\gamma$  尺度模式对于云的微物理过程描述得相当详细,而三维模式限于计算机条件对云和降水物理学多采用高度简化的参数化方法。用这种模式已成功地模拟出强风暴的许多重要特征,尤其是二维模式分辨率很高(40km 宽的区域中格距可为 200m),可以获得雷暴单体的许多细微结构。这包括倾斜的上升气流、穹形云顶、高空辐散流出、降水质点的循环、密度流、飑锋等。也可研究冰雹的形成以及降水的演变及其对上升气流和下沉气流的影响。因而将来有可能利用这种模式和中- $\beta$  或中- $\alpha$  尺度模式相结合来预报暴雨和冰雹的大小。近年来这种二维模式也被用来模拟播撒干冰人工影响降水以及降水的酸化过程。三维的中- $\gamma$  尺度模式除了模拟风暴单体本身的特征外,还可以模拟环境风的切变、中尺度涡旋对、中层环境气流的阻挡作用等以及强烈的中纬度对流风暴(如超级单体和多单体)和热带深对流等。

目前和在可预见的将来还不可能把云模式用于实时的业务预报,在更远的将来也许有这种可能性和实际需要,但这还要取决于作这种预报的价值-效益比。就现在而论,云模式主要是一种诊断工具以增加我们对风暴结构和演变的认识,包括它如何受大尺度环境影响以及如何影响大尺度环境,也为中- $\alpha$  尺度模式设计更合理的湿对流参数化方案提供依据。另外也可以用来识别有利于强对流风暴发展的某种大尺度结构(风切变、温度、湿度场),以便为超短期预报提供指导,或直接发展简单的统计模式或列线图以作实时预报。中国已经发展了二维和三维的中- $\gamma$  尺度的模式,包含了较复杂的云微物理过程。用这种模式已成功地模拟了对流风暴的结构和降水过程。

## 5 中尺度动力学问题

中尺度动力学主要从理论上研究中尺度天气系统的特征、结构演变和运动等基本问题。它是中尺度预报尤其是中尺度数值预报的理论基础。应该指出,中尺度动力学的中心问题是强风暴动力学,它与积云动力学有明显的差别<sup>[23]</sup>。它主要是从理论上解释尺度更大、生命史更长、天气更强烈、并与环境有明显的相互作用的对流系统。近 10 年来对下列各个方面的问题进行了研究并取得了重要的结果。

### 5.1 中尺度环流的动力机制

这包括中尺度环流(如次级环流)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均匀流中有三种不稳定性能够增长:第一是浮力不稳定;二是惯性浮力型,又称对称不稳定;三是切变型不稳定,又称凯尔文-赫姆霍兹不稳定。第一和第三种不稳定的尺度为几公里到几十公里,产生的主要是对流层中观测到的小尺度乱流,积云单体以及小涡旋等。第二种不稳定的尺度为几十到几百公里,一般认为这种不稳定是产生许多中尺度雨带和雪带的直接原因。许多计算表明,大气一般是条件稳定的,但如果发生凝结,则会产生条件失稳现象,这时则使对称不稳定问题转化为条件对称不稳定问题。它可能是锋面附近暴雨和强对流发展的重要物理机制。目前非线性对称不稳定性已引起人们的重视<sup>[24]</sup>。

除了上述三种不稳定机制外,波动-CISK,斜压-CISK 以及包含对流的不稳定机理等

也被用来解释中尺度系统的发展。

### 5.2 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条件下中尺度波的反射、吸收和传输特征以及强迫这些波动的机理。它们与流体中的中尺度能量输送方向有密切关系。

### 5.3 积云与中尺度系统的相互作用

根据尺度分析,正压大气中的对流似乎不能产生介于对流尺度与变形半径之间尺度的运动。但观测表明,在热带(正压大气)确实存在着明显的有组织的中尺度系统,这需要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。对于湿对流对大尺度运动反馈作用的参数化问题也取得了一定的进展。

### 5.4 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。这方面已作了很多研究。但对于中尺度系统或环流的热量、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垂直输送的 5%,这是个不容忽视的作用。

### 5.5 中尺度的可预报性问题

现在使用两种方法来研究这个问题:一是用确定性的数值模式来预报中尺度天气的产生和以后的发展;一是已知有利于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,中尺度的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。因而只要把大尺度条件报好,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作出较好的区域尺度的 3d 预报。

中国在中尺度动力学的研究方面是有基础的。在 1960 年代以前曾经对积云动力学的研究有了不少成果。但积云动力学与强风暴的动力学有明显的差别。至少表现在五个方面:(i)环境条件与积云不同,强风暴是在强风垂直切变下发展的对流系统;(ii)内部气流结构及微物理过程不同;(iii)下沉气流的作用不同,对强风暴下沉气流的产生和加强不是风暴减弱的标志,而是加强和达到强盛的标志;(iv)移动不同,强风暴可明显地偏于平均气流的右方或左方,也可以发生分裂;(v)产生的天气强烈程度不同,强风暴动力学必须解释冰雹、暴雨、雷暴大风和龙卷等激烈天气现象的产生。“75.8”暴雨发生之后中国国内开展了很多暴雨和有关的中尺度分析<sup>[25]</sup>,近年来更开展了一些中尺度动力学的理论研究,主要侧重于梅雨锋内中间尺度扰动和中尺度扰动的特性和不稳定分析<sup>[26]</sup>。

## 6 暴雨预报的进展

暴雨预报由于难度大,总的来说水平还比较低,再加上各地区暴雨的气候规律、影响系统、地形条件、评定方法等不同,故各国、各地区暴雨预报的准确率不同。但应该指出,近年来由于探测工具的发展、通信条件的改善和数值预报的不断改进,暴雨预报水平从总体

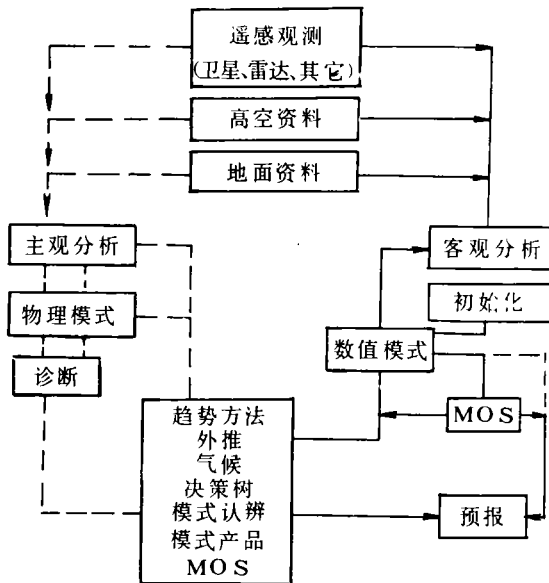
上有了相当提高。目前暴雨预报除仍使用天气图预报方法和统计学方法外,数值预报在暴雨综合预报中占有愈来愈重要的比重。从时间尺度上暴雨预报分两类:超短期预报和短期预报。

### 6.1 超短期预报(0—12h)的准业务试验或业务工作

随着专门的中尺度观测网的建立,不少国家都建立试验性或正式的超短期预报,综合利用各种资料来源和数值预报产品进行0—12h的暴雨和强对流天气预报。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不高,对于不少突发性、局地的强烈天气或暴雨几乎还难以预报出来。主要的问题是这种预报基本上依据外推法。一旦超出有效外推期(1—3h),预报能力非常有限,也就是说,用外推法要作出3—6h或3—12h的预报是比较困难的。即使有很详细的、及时的雷达、卫星和其它观测资料,有经验的预报员去作这种预报也常会失败,其中一个主要的困难是,要预报的对象时空尺度很小,涉及的因子复杂。对此必须研究新的预报方法。

### 6.2 短期暴雨预报(24—48h)

目前暴雨的短期预报主要是根据各种方法的综合结果由预报员作出的。暴雨预报方法虽然不少,但总的可以划分为主观预报和数值预报方法两类(附图)<sup>[27]</sup>。主观预报方法包括外推(线性与非线性)、气候概率、决策树(类似于预报流程)、模式产品应用和模式认辨等。这些方法主要预测暴雨发生的趋势。具体的落区和落时要由物理模式和诊断分析作出,因而暴雨概念或物理模式的研究是很重要的。由主观预报方法得到的结果须与客观的数值预报方法相结合最后作出暴雨预报。近年来也研制了暴雨预报专家系统,取得了一定效果。



附图 主观预报(左)与数值预报流程



## 7 未来暴雨和中尺度气象学研究

近 10 几年来暴雨和中尺度气象学的研究取得了显著进展,是大气科学领域中发展相当迅速的一个分支。但由于暴雨与中尺度系统是一种非常复杂的天气现象,还有许多问题值得今后研究。为了迅速提高暴雨研究和预报水平,应该:

- (1) 发展新一代的大气观测试验;
- (2) 大力加强专门的中尺度观测和通讯系统;
- (3) 加强暴雨科学研究,包括突发性和持续性暴雨形成的机理;
- (4) 研究超短期预报的理论和新方法,建立多功能的工作站;
- (5) 改进中尺度数值预报模式,同时也发展其它有效的暴雨预报方法。

中国的气象部门十分重视暴雨的研究与预报。“八五”期间,“台风、暴雨灾害性天气监测、预报技术研究”列为国家重点科技攻关项目,这对中国的暴雨研究和预报必将有重大的推动。

对于暴雨和中尺度气象学,下面六个问题值得深入研究:

- (1) 造成暴雨、冰雹和雷暴大风的中尺度灾害性天气发生发展的大尺度条件和中尺度过程;
- (2) 中尺度系统发展和维持的物理和动力学条件与因子,这包括水汽、辐射、凝结加热、边界层过程、下垫面热力差异、地形等。由于中国处于亚洲季风区,水汽条件是非常重要的,应重点研究水汽在中国中尺度系统发展中的作用<sup>[28]</sup>;
- (3) 中尺度系统的传播运动规律;
- (4) 中尺度系统的不稳定问题。应探索清楚对中国一些主要的中尺度灾害性天气系统是什么样的热力和动力不稳定机制起主要作用;
- (5) 中尺度灾害性天气系统的三维结构,由于资料所限,重点在中- $\alpha$  尺度的系统,如中国的 MCS、MCC、飑线、西南低涡和梅雨锋低压等中尺度降水系统;
- (6) 中小尺度云与降水动力学及其参数化问题。

通过上述研究,最终能得到中国暴雨中尺度天气系统的概念或物理模式,并在此基础上,建立一个具有国际水平的中尺度数值模式系统,它具有较好的预报中- $\alpha$  尺度以及某些中- $\beta$  尺度系统的能力<sup>[29]</sup>,为建立中国的中尺度数值预报业务准备条件。

## 参考文献

- [1] 陶诗言等. 中国之暴雨. 北京: 科学出版社, 1979. 225 页.
- [2] 丁一汇等. 1991 年江淮流域持续性特大暴雨研究. 北京: 气象出版社, 1993. 255 页.
- [3] 丁一汇, 蔡则怡, 李吉顺. 1975 年 8 月上旬河南特大暴雨的研究. 大气科学, 1978, 2: 276—289.
- [4] Ding Yihui and Reiter E R. A relationship between planetary waves and persistent rain and thunderstorms in China. Arch Met Geoph Bionl Ser B. 31: 221—252.
- [5] Ding Yihui. Summer monsoon rainfalls in China. J Meteor Soc Japan. 70: 373—396.
- [6] 黄土松等. 华南前汛期暴雨. 广州: 广东科技出版社, 1986. 244 页.
- [7] 张丙辰等. 长江中下游梅雨锋暴雨的研究. 北京: 气象出版社, 1990. 269 页.
- [8] 邹竞蒙. 中国的暴雨监测和预报. 暴雨和洪水国际学术讨论会, 1992 年 10 月 5—10 日, 黄山, 中国.
- [9] Maddox R A, Chapell C F and Hoxit L R. Synoptic and meso- $\alpha$  scale aspects of flash flood events. Bull Amer Me-

- eteor Soc. 1979, 60, 115—123.
- [10] Caracena F and Fritsch J M. Focusing mechanisms in the Texas Hill country flash floods of 1978. *Mon Wea Rev.* 1983, 111: 2319—2332.
- [11] 斯公望. 暴雨和强对流环流系统. 北京: 气象出版社, 1988. 350 页.
- [12] Chen Q (陈秋士). The instability of the gravity-inertia wave and its relation to low level jet and heavy rainfall. *J Meteor Soc Japan.* 1982, 60: 1041—1057.
- [13] 孙淑清. 梅雨锋中大振幅重力波的活动及其与环境场的关系. *大气科学*, 1990, 14: 163—172.
- [14] Cotton W R and Anthes R A. 风暴和云动力学 (中译本). 北京: 气象出版社, 1993. 949 页.
- [15] 许焕斌, 王思微. 三维可压缩大气中的云尺度模式. *气象学报*, 1990, 48: 80—90.
- [16] 王谦, 胡志晋. 三维弹性大气模式和实测强风暴的模拟. *气象学报*, 1990, 48: 91—101.
- [17] 黄安丽, 高坤, 李毓芳. 一次梅雨季暴雨过程的初步模拟. *气象学报*, 1987, 45: 426—436.
- [18] Qian Z-A (钱正安), Bromley R A and Agles M A. Some analyses and numerical simulations of Meiyu in East Asia in 1983. *Advances in Atmos Sci.* 1991, 8: 67—78.
- [19] Anthes R A. Recent application of the Penn State/NCAR mesoscale model to synoptic, mesoscale and climate studies. *Proc of International Conference on Meteorology and climate.* World Scientific, 1990: 274—283.
- [20] 周晓平, 赵思雄, 张宝严. 一次梅雨锋上中低压形成的数值模拟. *大气科学*, 1984, 8: 353—361.
- [21] Chen, S-J (陈受钧) and Dell'Osso L. Numerical prediction of the heavy rainfall vortex over Eastern Asia monsoon region. *J Meteor Soc Japan.* 1984, 62: 730—747.
- [22] Guo X R (郭肖容), Yan Z H and Zhong G A. BMC limited area model: operational application and research. *East Asia and Western Pacific Meteorology and Climate.* World Scientific, 572.
- [23] 杨国祥, 何齐强, 陆汉城. 中尺度气象学. 北京: 气象出版社, 1991. 363 页.
- [24] 丁一汇, 沈新勇. 对称不稳定理论及其应用问题. 将发表在应用气象学报 (1994 年).
- [25] 梁必琪, 包澄澜. 华南前汛期暴雨的中尺度分析. *暴雨文集*, 长春: 吉林人民出版社, 1980. 259 页.
- [26] 张可苏. 斜压气流的中尺度稳定性. I. 对称不稳定. *气象学报*, 1988, 46: 258—266.
- [27] Ray P. *Mesoscale Meteorology and Forecasting.* Amer Meteor Soc. Boston, 1986. 793 pp.
- [28] Xie Y B (谢义炳). Observational and theoretical studies of the moist baroclinic atmosphere. *Advances in Atmos Sci.* 1984, 1: 141—149.
- [29] 周晓平, 赵思雄, 张可苏, 刘苏红, 张宝严. 一个东亚季风区的暴雨数值预报模式. *大气科学特刊*, 1988, 43—59.

## SOME ASPECTS OF RAINSTORM AND MESO-SCALE METEOROLOGY

Ding Yihui

*(Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing, 100081)*

### Abstract

The present paper has made a review of recent progress on studies of rainstorms and meso-scale meteorology, including:

- (1) genesis conditions of rainstorms;
- (2) the conceptual model of the severe local storms and MCS;
- (3) meso-scale numerical simulation;
- (4) meso-scale dynamics and
- (5) prediction of rainstorms.

The future study on rainstorm and meso-scale meteorology has been also suggested.

**Key words:** Recent progress. Rainstorm. Meso-scale meteorology.