

中尺度动力学与暴雨等灾害性天气 预测理论的研究^{*}

赵思雄

(中国科学院大气物理研究所, 北京 100080)

摘 要 我国科学工作者对中小尺度天气动力学的研究一直给予高度重视, 同时注意灾害性天气预测理论的发展。本文介绍了近年来中国科学院大气物理研究所在这方面的部分主要研究结果, 并对今后的工作提出了一些看法。

关键词 中尺度动力学 灾害性天气 预测理论

1 前言

我国是世界上自然灾害尤其是气象灾害频繁发生的国家之一, 自然灾害对人民生命财产构成了重大的威胁。而且经济愈发展, 灾害造成的损失也愈大。其中, 作为主要灾害影响系统的暴雨及强对流活动, 实质上与中尺度系统(水平尺度 20~2000 km)密切相关。

长期以来, 中尺度系统的预报一直是很困难的问题。这是因为这一领域的基础性研究进行得还远远不够, 尤其是对这种尺度系统发生发展的机理还缺乏深入的了解。

建国以来, 特别是 1975 年 8 月河南省特大暴雨发生以来, 中国科学院大气物理研究所对中尺度动力学及暴雨等灾害性天气的基础和应用研究给予了高度的重视。取得了一批很有意义的成果。近年来, 我们积极投身于国民经济的主战场, 承担了“七五”国家科技攻关“中尺度灾害天气系统与临近预报”及“八五”国家科技攻关“台风、暴雨监测与预报研究”等任务。

多年来, 中国科学院大气物理研究所的科学工作者集中对我国夏季暴雨和强对流天气系统形成过程的一般规律及机理进行了研究。建立了暴雨的天气模型和特大暴雨的基本环流以及强对流天气的中尺度物理模型^[1~6]。近年来, 还对由台风等热带系统与中纬度系统相互作用引发的暴雨及西太平洋海上爆发性温带气旋结构与演变特征, 以及它们所诱生的中尺度系统等进行了探讨。通过这些研究推动了中尺度动力学的发展。

2 关于自由的和强迫的中尺度环流的研究

在中尺度稳定性理论研究方面。除了继续探讨对称不稳定外, 对横波不稳定亦作了

1998-02-26 收到

• 本文得到中国科学院重点项目(KZ952-J1-403)的资助

研究,发现横波不稳定谱是由连续和离散两种谱组成,以往单纯用离散谱是不完备的。对横波连续谱的研究表明,它可能是大气中尺度运动能量的最主要载体。对我国实际个例的稳定度进行分析,表明我国某些中尺度暴雨灾害天气发展过程可用横波不稳定性来解释^[7,8]。从系统能量转换机制和总能量守恒出发,提出了守恒型中小尺度动力学模型,并应用尺度分析法,详细研究适合于中小尺度动力学的模型,得到四种守恒性模型,即浅对流模型、深对流模型、灵活弹性模型和完全弹性模型,并研究了它们的使用条件。根据上述模型,研究了深厚系统和浅薄系统中线性小扰动的稳定性,同时还研究了深厚系统中重力(惯性)内波在层结和风切变影响下的发展演变规律。

地形,特别是较大地形对中尺度系统的形成和发展起着重要的强迫作用。如山前迎风面的冷空气堆积(或称静止锋)及平行于山脉的急流;山后的背风波、重力流及背风涡旋等都是较典型的与地形强迫有关的中尺度天气现象。近年来,对上述现象不仅从理论上进行了较深入的研究,而且利用现代化的研究手段,如转盘实验、数值实验等,对上述现象进行了较成功的物理及数值模拟^[9]。研究表明,冷空气堆积的强度与范围主要依赖于弗罗德(Froude)数。数值实验、转盘实验及理论分析一致表明,小弗罗德数下冷空气在山前堆积的范围及强度都明显大于大弗罗德数的情况。平行于山脉的急流强度变化主要依赖于与山脉纵横比有关的气压梯度力及科里奥利力的平衡,并同摩擦大小有关^[10,11]。另外,转盘实验和数值实验得出,大地形下背风波是在弱旋转及弱层结条件下出现的。在强层结及强旋转前提下主要形成下滑风,波动并不明显。在中等强度层结及适度旋转时容易形成背风涡旋。而过去的研究工作对于强旋转和强层结条件下背风波和背风涡旋的形成未进行什么研究。

3 锋生过程与低压快速发展过程动力学研究

锋面动力学的研究近年来重新成为大气科学的热点。春季冷锋常常伴随强烈的灾害天气,而过去对冬季冷锋研究较多。利用我国首次获得的中尺度试验资料,对春季强冷锋的结构和动力学过程进行了讨论。通过研究发现,与冷锋相对应的高空槽前存在一支下沉气流;有强的辐合区出现在对流层中层,锋前上升运动的最大值也出现在对流层中层;环绕锋区存在一支明显的热力直接环流,即暖湿空气沿冷锋倾斜上升。这些特点与北美地区的冷锋有某些共同之处。然而通过与北美春季冷锋(SESAME)个例的对比发现,此次冷锋个例中,锋区的温度密集区主要在对流层中层,而北美 SESAME 个例的温度密集区主要在对流层低层。这可能是由于东亚高空急流较强,动力强迫而引发锋生所致。同时注意到,在春季冷锋后存在一支较强的下沉气流,这支下沉气流对于冷锋逆温区的形成可能有重要作用。然而,与 Hoskins-Bretherton (HB) 的理论模型所进行的比较表明,虽然 HB 模型的结果可说明实际观测到的锋区的基本特征,然而,理论模型可能由于采用半地转假设所限,对这支下沉气流描写较弱,而这支气流对强烈天气的发展可能有重要意义^[12,13]。用数值方法证实了曾庆存提出的一种锋生机制^[14],即高空急流加速或高空动量输入通过地转适应过程造成高空锋生。对五种不同类型急流加速分布产生的锋生过程的模拟表明,适应锋生在高空锋生中的作用可能比在低空锋生中更显著。同时注意到,地转适应过程将加速高空急流向下层传输,使锋区变陡并向对流层中

下层延伸。这种对流层高低层的非地转耦合,可能是低空急流形成的另一种机制。

快速发展气旋,尤其是爆发性发展的温带气旋是一种重要的灾害性天气系统,对海上活动威胁甚大。然而,至今对它的预报经常失败,主要原因是对它的物理过程缺乏深入了解,尤其是在西北太平洋地区。研究表明,从东亚大陆移出的气旋,有低层相对涡度大值区与之对应,属于低层系统;Q 向量诊断表明,在气旋发生区附近,有很强的非地转环流存在,锋生函数的计算显示,从东亚沿岸至日本为一锋生区。强的斜压环境是气旋爆发的一个重要条件,随着冷空气的下沉,对流层顶下降,甚至平均可达 5 km。高空急流的切变项与曲率项对辐散的增强均有贡献。在气旋发展后期,由水汽辐合引起的凝结潜热释放的作用是不可忽视的。这与北大西洋上的模型有所不同。图 1 给出了一次西太平洋爆发性温带气旋位涡与位温的垂直结构。由于爆发性气旋的发展原因较为复杂,它涉及到动力因子、热力因子以及它们的相互作用,有必要进行更深入的研究^[15]。

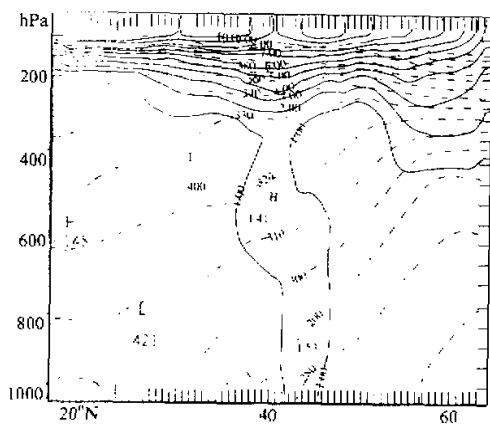


图 1 西太平洋爆发性温带气旋位涡与位温垂直剖面图
1979 年 3 月 30 日 12 时(UTC)

4 台风、暴雨数值模式与预测研究

在台风、暴雨数值预报模式物理过程方面取得了新的进展。其中尤其要强调指出的是,利用了“八五”期间时空加密观测资料,对积云对流参数化方案作了改进。包括对温湿型方案、浮力能量型方案等^[16,17]。同时对一维非静力时变积云模式进行了试验,该模式能够较好地描述积云的生成、发展和消亡过程。云中温湿结构等与观测较为接近,可用于有限区域模式,对对流性强降水区,改进效果明显^[18]。

自 80 年代以来,中国科学院大气物理研究所先后建立和运行了 SIGMA 坐标和适用于陡峭地形的 ETA 坐标等有限区域模式^[3,19~23]。这些模式通过试验和检验,技术评分达到国际先进水平。ETA 模式把地形表示为三维阶梯状,在模式内形成侧边界,减小了计算误差;采用了保形水汽平流方案,不会出现负水汽现象。因而,已用 ETA 模式成功地模拟了“雅安天漏”现象,并作了暴雨实时预测。

在此基础上,建立了 IAP 汛期暴雨实时预测系统,自 1990 年以来,每年夏季进行暴雨短期预测。按照“长江三峡工程大江截流期气象保障服务技术开发课题”的业务运行部署,在 1997 年长江三峡大江截流期气象保障服务中,IAP-ETA 坐标模式投入了 9 月 25 日~10 月 4 日的准业务运行和 10 月 5 日~11 月 8 日的正式业务运行。图 2 给出了 1997 年 10 月 24 日 00 时预报的 24 小时降雨量。在大江截流的 44 天服务期间,每天下午 3 时

半前将数值预报的 24 小时降水量等雨量图及库区西部（重庆—万县）、库区东部（万县—宜昌）平均面雨量传真至武汉区域中心，供大江截流预报会商和综合决策集成预报应用，取得良好的预报效果，为长江三峡大江截流期气象保障服务作出了贡献^[24]。

中国科学院大气物理研究所发展的新一代的非静力三维数值预报模式，也取得了很好的结果。完成了一些基础试验及实例试验，可作为今后发展中尺度及强风暴（包括暴雨的强雷达回波）预报模式的胚胎。模式的动力学框架为三维非静力可压缩的完全弹性模型，模式只选择了对风暴系统短时预报有重要意义的参数化方法，节省了计算量。图 3 给出了非静力模式计算得到的一些结果。在最近的将来，机器条件即将可能实现实时预测^[25,26]。

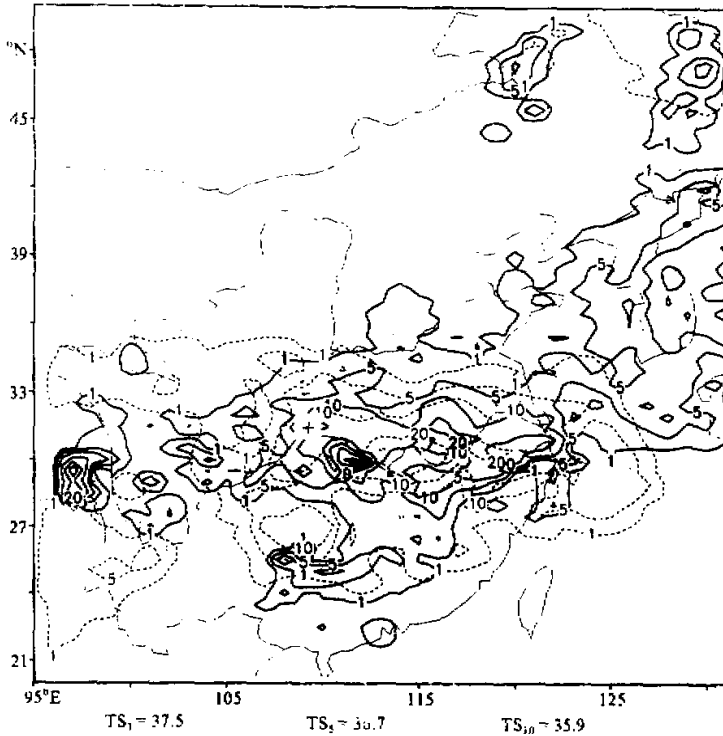


图 2 1997 年 10 月 24 日 00 时为初值的 24 小时雨量预报
单位：mm。虚线：实况，实线：预报。图中“4”处为三峡位置
 TS_1 、 TS_5 、 TS_{10} 分别为 1、5、10 mm 的 TS 评分

5 暴雨等中尺度对流系统的动力学诊断

近年来，由于一批中尺度观测资料的获取，使得有可能对暴雨等中尺度系统进行较深入的动力学诊断。利用台湾地区中尺度试验（TAMEX）资料，对我国台湾地区的

“梅雨”进行了研究。其中,两次加密观测资料发现,对云团的追踪显示,台湾地区对流系统与作为上游的大陆地区的中尺度系统有紧密联系。由飞机落仪资料揭示,这些云团有深厚的湿层,水平尺度约 3 个纬距。计算表明,其水汽主要来源于低层,其水汽通量的水平辐合大值区在 700 hPa 以下。研究还表明,大陆东移的 500 hPa 高空短波槽的配合对引发和增强台湾地区的降水有重要贡献。与此同时,对该次台湾地区中尺度试验期间的站网设计方案进行了评估。敏感性试验表明,去掉该观测网中任何一个站,对计算结果均有影响。但影响最大的站是在台湾海峡南段至南海及东沙岛一带。这也许是由于台湾地区梅雨与低空急流有很密切的关系,而低空急流常见于台湾岛西南部^[27]。

由于华南暴雨与长江流域的“梅雨”有诸多的不同,因此,很有必要进行深入探讨^[28]。但过去的研究受资料的限制,某些问题难于深入。1979 年第一次全球大气研究计划的观测试验 (FGGE) 资料,为我们重新探讨这方面的问题提供了可能。1998 年进行的华南暴雨试验和南海季风试验,将为我们提供更多的信息。通过使用 FGGE 资料所作的预研究表明,1979 年前汛期 (5~6 月) 有三次暴雨过程,这三次过程均有来自北方的冷空气的活动,但热带系统的影响是不可忽略的,FGGE 期间南海季风有三次向北推进,与上述三次暴雨过程有直接的联系。计算还表明,三次暴雨过程中,华南地区的视热源和视水汽汇项有明显的作用,反映出积云对流所造成的对流凝结加热作用是重要的,特别是华南上空的 β 中尺度对流云团为暴雨的发生提供了有利条件。

对亚洲、澳大利亚季风区中尺度对流系统进行了较多的研究^[30,31],获得了新的认识。首先,对东亚,尤其是我国大陆上与梅雨锋有关的中尺度低压及其环境流场进行了诊断,结果表明,其低压区的涡度、散度和垂直运动的垂直廓线与其周围环境有明显的差异。有些个例比松本诚一分析的日本梅雨试验期的中尺度低压更为强烈与深厚。利用拉格朗日方案对气块进行计算和追踪所得到的三维流场表明,中尺度低压强烈发展的区域正好是低空输送带 (偏南气流) 转为上升并与高空偏西气流汇合的区域。这两支气流汇合后在长江中下游地区使高空辐散增强,促进梅雨锋上中低压的发展^[29]。

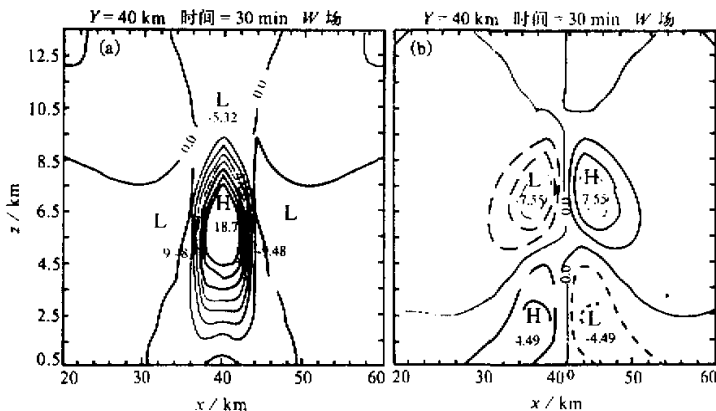


图3 由非静力模式得到的第 30 min 时沿风暴中心的 $X-Z$ 垂直剖面
(a) W 场, (b) u 场。单位: m/s

6 中低纬度系统的相互作用与不同尺度系统的相互作用

对中低纬系统的相互作用过程进行了较为详细的研究。尤其是登陆台风与冷锋相遇时,使锋面受“激发”重新活跃,有可能连续产生出一系列的 β 中尺度系统,在我国大陆上(甚至远至华北)造成大暴雨。图4给出了1994年7月11日12时(9406台风)850 hPa上的水汽通量分布情况。然而,亚澳季风区其相互作用个例有不同的特点。与北美的情况不同的是,不属于热带气旋转变为温带气旋,而是在原有气旋系统中有新的中尺度系统新生^[30,31]。研究还显示,其能量转换过程也与北美典型的个例Hazel不同,动能不完全来自有效位能的释放,主要来自动能的水平输送,可能还有网格尺度与次网格尺度之间能量的交换^[32]。

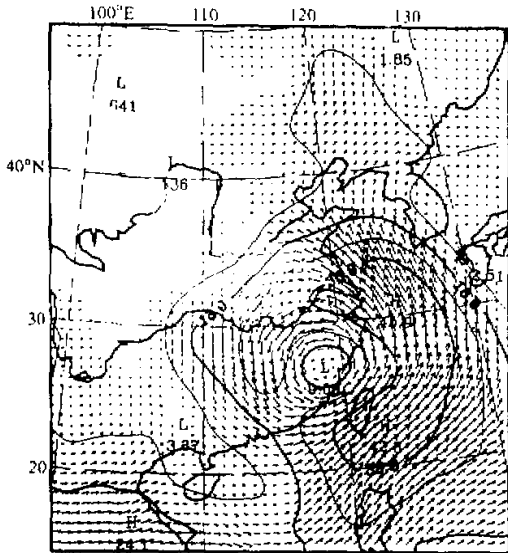


图4 1994年7月11日12时东亚850 hPa水汽通量
单位: $10^{-3} \text{ s} \cdot \text{g} \cdot \text{g}^{-1}$

意到中尺度及天气尺度系统对大尺度季风环流的维持及超地转特征的出现有重要影响,这主要是由于动量与能量的涡旋输送所致^[33,34]。

中小尺度动力学作为大气科学的前沿研究课题,“九五”期间受到了国家和中国科学院的重视与大力支持。中国科学院大气物理研究所已将其列为优先的领域之一。除进一步加强在气象方面的研究与应用外,也在大力推动与非气象方面的相互渗透,包括对大气环境污染方面中尺度气象场的预报等,应用前景广阔。

目前中国科学院大气物理研究所中小尺度与灾害性天气研究方面与国外有一批合作项目。中国与澳大利亚之间的“暴雨及强对流模拟研究”项目,我国(ICCES)和南方促进科技持续发展委员会(COMSATS)之间的“联合数值天气预报研究项目”正在进行之中,和其他国家如泰国等的“联合灾害天气预测试验研究”项目,也即将启动。

参 考 文 献

- 1 陶诗言, 1980, 中国之暴雨, 北京: 科学出版社, 1~225.

- 2 陶诗言, 1996, 1994年东亚夏季风活动的异常与华南的特大洪涝灾害, I. 大气环流的异常, 北京: 气象出版社, 1~5.
- 3 周晓平、赵思雄、张可苏、刘苏红、张宝严, 1988, 一个东亚季风区的暴雨数值预报模式, 大气科学 (特刊), 60~78.
- 4 赵思雄, 1988, 梅雨锋上扰动发生发展的能量分析, 大气科学 (特刊), 191~201.
- 5 蔡则治、李吉顺, 1990, 梅雨期间强对流暴雨与锋面暴雨的对比分析, 南京气象学院学报, 13(4), 524~528.
- 6 孙淑清、田生春、杜长萱, 1993, 中尺度低涡发展时高层流场特征及能量学研究, 大气科学, 17(2), 137~147.
- 7 刘健、张可苏, 1988, 梅雨锋对流活动的一种可能触发机制——关于非均匀层结、复杂环境风场下对称不稳定的一些研究, 大气科学 (特刊), 202~216.
- 8 王东海、周晓平, 1994, 斜压大气中尺度横波扰动的发展, 大气科学, 18(1), 61~71.
- 9 Gao, S. T. and P. A. Davies, 1998, Laboratory studies of lee wave behind and isolated obstacle in a stratified rotating flow, *Tellus*, in press.
- 10 Xu, Q. and S. T. Gao, 1995, An analytic model of cold air damming and its applications, *J. Atmos. Sci.*, 52(3), 353~366.
- 11 Xu, Q. and S. T. Gao, 1996, A theoretical study of cold air damming with upstream cold air inflow, *J. Atmos. Sci.*, 53(2), 312~326.
- 12 李振军、赵思雄, 1996, 东亚春季强冷锋结构及其动力学诊断研究, I. 东亚春季强冷锋结构, 大气科学, 20(6), 662~672.
- 13 李振军、赵思雄, 1997, 东亚春季强冷锋结构及其动力学诊断研究, II. 动力学诊断研究, 大气科学, 21(1), 91~98.
- 14 李勇红、张可苏, 1992, 急流加速产生的高空锋生和低空锋生, 大气科学, 16(4), 452~463.
- 15 Jia, Y. Q. and S. X. Zhao, 1994, A diagnostic study of explosive development of extratropical cyclone over East Asia and West Pacific Ocean, *Advanced in Atmospheric Sciences*, 11(3), 251~270.
- 16 赵思雄、张宝严、杜长萱、赵力、贾逸勤、孙建华, 1996, 根据时空加密观测资料对KUO型方案的改进试验, 台风、暴雨数值预报新技术的研究, 北京: 气象出版社, 1~9.
- 17 马群飞、贾逸勤、孙建华、赵思雄, 1996, 能量型云模式积云参数化方案的改进试验, 台风、暴雨数值预报新技术的研究, 北京: 气象出版社, 32~37.
- 18 周晓平、曾朝霞, 1996, 暴雨预报模式中的一维积云模式, 台风、暴雨数值预报新技术的研究, 北京: 气象出版社, 149~157.
- 19 宇如聪、曾庆存、彭贵康、柴复新, 1994, “雅安天漏”研究, II. 数值预报试验, 大气科学, 18(5), 535~551.
- 20 曾庆存、宇如聪、彭贵康、柴复新, 1994, “雅安天漏”研究, III. 特征、物理量结构及其形成机制, 大气科学, 18(6), 649~659.
- 21 宇如聪, 1994, 一个 η 坐标有限区域数值预报模式对1993年中国汛期降水的实时预报试验, 大气科学, 18(3), 284~292.
- 22 Zhao, L. and S. X. Zhao, 1995, Numerical experiments of Meiyu (Baiu) rainfall by quasi-Lagrangian limited area model with terrain, *Advanced in Atmospheric Sciences*, 12(1), 57~66.
- 23 赵思雄, 1991, 用10层准拉格朗日有限区域模式对高原东侧锋生过程的数值模拟, 大气科学, 15(5), 40~49.
- 24 赵思雄、张宝严、孙建华、杜长萱、陈红、蔡则怡、贝耐芳, 1998, IAP-ETA坐标模式在三峡地区天气预报中的试验及应用, 三峡工程大江截流气象保障服务技术开发课题论文集, 北京: 气象出版社.
- 25 周晓平、王东海, 1996, 短时风暴数值预报模式研究, I. 模式的理论框架, 大气科学, 20(1), 1~11.
- 26 周晓平、王东海, 1996, 短时风暴数值预报模式研究, II. 模式的基础试验结果, 大气科学, 20(3), 237~289.
- 27 马群飞、赵思雄, 1993, 台湾地区中尺度试验期间梅雨锋及其对流云团的研究, 大气科学, 17(2), 173~184.
- 28 陈红, 1997, FGGE期间华南前汛期暴雨过程的诊断与模拟研究, 中国科学院大气物理研究所研究生学位论文.
- 29 施曙、赵思雄, 1994, 梅雨锋上与强暴雨有关的中低压及其三维环境流场的诊断研究, 大气科学, 18(4), 476~484.
- 30 Mills, G. A. and S. X. Zhao, 1991, A study of a monsoon depression bringing record rainfall over Australia. Part I: Numerical predictability experiments, *Mon. Wea. Rev.*, 119, 2053~2073.
- 31 Zhao, S. X. and G. A. Mills, 1991, A study of a monsoon depression bringing record rainfall over Australia. Part II: Synoptic-diagnostic description, *Mon. Wea. Rev.*, 119, 2074~2094.

- 32 孙建华, 1996, 登陆台风引发的暴雨过程之诊断与模拟研究, 中国科学院大气物理研究所研究生学位论文.
- 33 Zeng Q. C., B. L. Zhang, Y. L. Liang and S. X. Zhao, 1994, East Asia summer monsoon — a case study, *Proc. Indian Natn. Sci. Acad.*, **60**, A, No. 100, 81~96.
- 34 Zhao, S. X. and J. H. Sun, 1995, Multi-scale characteristics of rainfall systems of East Asian Monsoon in 1994, *Proceedings of the second international study conference on GEWEX in Asia and GAME*, Pattaya, Thailand, 276~280.

Mesoscale Dynamics and Prediction of Disaster Weather

Zhao Sixiong

(*Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080*)

Abstract Chinese scientists have been paid more and more attention to the study of mesoscale dynamics and prediction of disaster weather systems and the great progress has been made in the recent years. In this paper, the main results in these aspects completed by the scientists of the Institute of Atmospheric Physics (IAP), Chinese Academy of Sciences are reviewed. They include mesoscale dynamic instability, orographic forcing, frontogenetical and cyclonegenetical dynamics, structure and dynamics of mesoscale convective systems (MCS), mesoscale numerical modeling and interaction between multi-scale systems and between middle and lower latitude systems.

Key words mesoscale dynamics disaster weather prediction