

次天气尺度及中尺度暴雨系统研究进展^{*}

高守亭 赵思雄 周晓平 孙淑清 陶诗言

(中国科学院大气物理研究所, 北京 100029)

摘 要 回顾了 75 年来中国科学院大气物理研究所科研人员在次天气尺度及中尺度暴雨系统领域的研究工作, 这些领域主要包括暴雨、中尺度低空急流、低涡、梅雨锋结构及梅雨锋生、对称不稳定和涡层不稳定以及暴雨等灾害天气的天气动力学及数值模拟研究等; 总结了在次天气尺度及中尺度暴雨系统研究的不同时期所取得的成就以及这些成就在防止和减轻中尺度暴雨灾害方面所起到的重要作用。

关键词: 次天气尺度; 中尺度; 暴雨系统

1 暴雨研究

中国受亚洲夏季风影响, 每年的降水多少变化很大, 很容易发生旱涝灾害。夏季风爆发和盛行期间是中国的雨季或汛期, 也是中国的暴雨季节, 其中持续性暴雨最易造成大范围的严重洪涝, 如建国以来, 1954、1963、1991、1998 年发生在中国不同区域的特大暴雨给国民经济带来了重大的损失, 造成严重的人口伤亡, 引起世界瞩目。所以暴雨的研究和预报一直受到政府和气象部门的高度重视。这也正是中国科学院大气物理研究所(简称大气物理所)气象学家研究的主攻对象之一。早在 1958 年, 陶诗言就从东亚大气环流和天气过程变化的观点研究了长江流域的梅雨, 指出, 梅雨实际上是东亚大气环流季节过渡时期或突变的产物, 这一观点在 20 世纪 50~60 年代受到气象界普遍的重视, 后来, 国内外的大气环流数值试验也证实了这种观点的正确性^[1,2]。1965 年, 陶诗言^[3]对长江中上游暴雨短期预报做了进一步的研究。

1975 年 8 月上旬河南特大暴雨发生之后, 大气物理所加强了对暴雨的研究。孙淑清等^[4~7]先后研究了大中尺度低空急流与暴雨发生的关系, 指出了低空急流对暴雨系统发生的触发作用。李麦村^[8]研究了华南前汛期特大暴雨与低空急流的非地转风关系。陶诗言^[9]根据 1953~1977 年的中国大暴雨资料研究了历史上发生的中国大暴雨, 指出暴雨虽然是中尺度现象, 却是几种不同尺度天气系统相互作用的结果。造成暴雨的天气系统是尺度为 25~250 km 的中尺度系统, 它对暴雨有两个作用: (1) 产生强上升运动并造成水汽通量辐合和明显的位势不稳定层, 其强度一般要比天气尺度大 1 个量级。(2) 对积云对流活动起明显的组织与增强作用。在这种 25~250 km 的中尺度系统中, 包含有若干尺度为 2.5~25 km 的直接造成暴雨的积雨云团, 而 25~250 km 的中尺度

2003-01-20 收到, 2003-03-20 收到修改稿

^{*} 中国科学院知识创新重要方向项目 KZCX3-SW-213 和 KZCX2-208 共同资助

系统又是在尺度 250~2000 km 的系统里生成的。这种多尺度相互作用的概念和观点近年来得到了明显的重视。

陶诗言等^[10]还详细研究了中国大暴雨的分布特征，并总结出中国持续大暴雨发生的 3 个基本条件：

(1) 大形势稳定。在大形势稳定条件下，当两个天气尺度的降水系统相遇时，它们的移速减慢或者停滞少动。这样，在这相遇的地区维持着提供中尺度上升运动的背景，使得在该地区有多次中尺度降水系统发生或者有某个中尺度系统持久地存在着。

(2) 水汽的输送和辐合。假若没有周围大气向暴雨区输送水汽，只考虑气柱内的含水（水汽）量全部凝结造成的可降水量不超过 75 mm。因此持久性的暴雨要求天气尺度系统有源源不断的水汽输送，以补充暴雨发生所造成气柱内的水汽损耗。实际上，持续性的暴雨发生时，经常存在一支天气尺度或次天气尺度的低空急流，它将暴雨区外围的水汽迅速向暴雨区集中，供应暴雨所需要的“燃料”。

(3) 对流不稳定能量的释放和再生。强对流的发生需要有不稳定层结，一旦强对流发展后，大气中的不稳定能量就迅速释放，层结趋于中性，使对流不能进一步得到发展，要使暴雨持久，就要求在暴雨区有位势不稳定层结不断重建的机制。位势不稳定层结建立的型式是多种多样的。对暴雨过程来说，低空暖湿空气的流入是很重要的。对流层中上部冷干空气的进入并不必要，一般弱的冷平流较为有利，而强的冷干平流对暴雨并不有利。有时只有低空的暖湿平流即使没有高空的冷干平流，也可以重建位势不稳定层结。在天气尺度低空急流的左前方，一方面引起暴雨区水汽的输送和辐合，同时也促进对流不断再生。

陶诗言等^[9]还提出了暴雨的落区预报方法。这个方法从提出后一直被业务预报部门所采用。

1980~1990 年，由于中国没有发生大范围的严重暴雨灾害，是暴雨研究的间歇期。1991 年长江下游及江淮地区发生的特大洪涝，特别是 1998 年的特大洪水，震惊了政府和各级领导，也促使科学家们再次掀起暴雨中尺度研究的高潮。

自 1991 年江淮流域的特大洪涝发生后，丁一汇等^[11]对其中的大暴雨过程进行了较为全面的深入研究。此外，陶诗言^[12]还对 1994 年 6 月发生于华南尤其是珠江流域的大暴雨进行了研究，这次暴雨引发了 1915 年以来华南最严重的洪水。陶诗言指出，这次特大暴雨是由于 1994 年夏季环流异常所致，研究表明，水汽输送在中国华北地区夏季降水异常中有重要作用^[13~15]。赵思雄等^[16]对 1998 年 6 月珠江三角洲的大暴雨进行了分析，这是一次同时影响海峡两岸的大暴雨，低层风场的扰动引发香港日雨量 400 mm 以上的降水。陈红等^[17]对 1998 年 6 月华南暴雨过程及其环流特征作了分析，并与 1979 年第一次全球大气研究计划试验的结果作了比较，发现存在着明显的差异。近年来，陶诗言等^[18]对 1998 年 7 月长江流域的“二度梅”暴雨的机理和预报进行了较深入的研究，提出了梅雨锋上一类突发性暴雨的物理模型。

针对暴雨系统内由于强降水造成的质量亏空破坏了系统内的质量守恒，顾弘道等^[19]、高守亭等^[20]和崔小鹏等^[21]最早提出了质量强迫的概念，同时提出了由于质量强迫造成的湿位涡异常，并利用湿位涡的不可渗透性原理，把湿位涡异常作为一个动力示踪物来进行暴雨短期落区预报^[22]。

2 中尺度低空急流研究

低空西南风急流是引起中国暴雨的主要天气系统之一。陶诗言^[3]早在讨论长江流域的暴雨时就提到这支急流的作用。后来从统计关系得知,暴雨同低空急流的相关率达 70% 以上。陶诗言等^[9]首先提出了与暴雨有关的中尺度(其长度一般为几百公里)低空急流的天气概念,研究了低空急流与暴雨的关系,指出暴雨发生在急流的左前端,距急流 2~3 纬度。这类急流主要发生在行星边界层内,其最大风速的高度有时可低至 600 m 左右;且具有很大的垂直风切变,使边界层处于极不稳定的状态。因此这种急流对强对流天气的发生、发展影响极大。在研究这种急流的垂直结构时,陶诗言指出,在急流中心的北侧是辐合区,有强的上升气流,在急流高度上,上升运动可达到 10 cm s^{-1} 以上;在其南侧为下沉区,可构成一个湿上升、干下沉的垂直环流圈。他否定了日本天气学家松本诚一等认为的在急流的下半部和上半部存在着相反的环流圈的论断。陶诗言还进一步把理论研究同应用相结合,针对暴雨同低空急流的关系,指出绝大多数暴雨发生在离急流轴 0~200 km 之内,且暴雨多发生在低空急流轴线的左前方。这一研究成果至今仍被业务预报部门作为预报暴雨的一项指标。孙淑清等^[6,7]系统地研究了低空急流在促进中尺度暴雨系统形成中的重要作用,对低空急流的三维结构、超地转特点、不稳定性、中尺度系统在急流轴上的传播等做了详细的研究。高守亭和孙淑清^[23]利用多参数展开的方法,从天气动力学的角度进一步研究了这种超地转风的形成机制,得出变压风是造成这种风速超地转的主要原因,并认为变压风的形成是与其上高层辐散场的存在有关,并明确指出低空急流的超地转特征主要是由变压风叠加在地转风场上所致。高低空急流相互作用引起的上下层质量调整是造成低层出现变压风的一个重要原因。

3 低涡的研究

低涡是造成局部暴雨的主要天气系统之一,大气物理所的科学家对低涡进行过大量的研究,并且得到了许多重要成果。陶诗言等^[9]和赵思雄等^[24]系统地研究了影响中国的不同类型的低涡过程,指出不同地域的低涡由于其生成原因不同而有很大的差异。如:北方低涡(包括华北低涡、东北低涡等)尺度稍大,为冷性结构,斜压性明显,层结极不稳定,常伴有大风、冰雹过程。他们的研究指出,当北方冷涡与北上的热带系统(如北移台风倒槽、台风外围东风带)相结合时,就会激发出极强的暴雨过程,较早地指出了中低纬度系统相互作用对中尺度系统发生发展的重要性。高守亭^[25]的研究指出,在边界层内的摩擦作用下,较弱的低涡就可导致明显的径向流动,产生从四周向低涡中心的辐合,使中心附近垂直运动达到中尺度垂直运动的量级。

西南低涡是造成中国暴雨的另一种重要中尺度系统。它具有暖性结构,尺度较小。陶诗言等^[9]通过大量个例分析研究后得出:西南低涡是造成中国夏半年暴雨的主要原因之一。它是在中国青藏高原地形影响下产生的中间尺度天气系统,在垂直方向上伸展较浅薄,在其形成的初期,在 700 hPa 有气旋环流出现,而在 500 hPa 和 300 hPa

上,对应的常是高压区或高压脊。这就从天气学角度概括地给出了西南低涡的定义。他进一步研究了西南低涡发生的源地,发现西南低涡存在着三个最易发生的源区:一是“雅布”—九龙地区,这是西南低涡出现最多的地区,占 64%;二是黑河地区,占 19%;三是四川盆地,占 11%。在研究什么条件下西南低涡易造成暴雨时,他指出,西南低涡在与低槽、冷锋或高空切变线相结合时容易产生暴雨,当同季风辐合区的移动配合适当时易造成大暴雨。他的这些论断已被天气实践所证实。高守亭^[26]对西南低涡又进行了天气动力学研究,采用二层模式讨论了地形及高、低层流场配置对西南低涡形成的动力作用,指出西南低涡的形成与盆地、河谷以及气流分层有关。在上、下为西风分层时期,低层的浅薄暖湿西风有利于西南低涡的形成;在上、下为东西风分层时期,上层浅薄东风有利于西南低涡的形成。在初夏即 5~6 月份,四川盆地上空变为冷而干的西风,下层为暖而湿的西南风,构成来源不同的两股偏西气流的分层,且下层暖湿气流较浅薄,而上层冷干气流较深厚,所以极有利于西南低涡的形成。到了 6 月下旬~7 月上旬,西南季风盛行,高层副热带高压南侧的东风带西伸,在四川盆地南部出现浅层东风,而下层是西南季风,这种流场配置也十分有利于西南低涡的形成。因此,5 月到 6 月上旬,在西风分层下形成的盆地低涡位置偏北,且夜间活跃,在大气中层西风急流的引导下,以向东南移动为主;在 6 月下旬到 7 月上旬,在东西风分层下形成的盆地低涡偏南,且在中层西南气流的引导下以向东北方向移动为主。这为低涡的预报提供了很好的思路和线索。赵平等^[27]对西南低涡个例进行了形成过程的数值实验和诊断分析,指出在低涡形成过程中,低层位能向散度风动能转换,以及散度风动能向旋转风动能转换,并随时间加强,使低层气旋性环流形成。同时高层位能和旋转风动能均向散度风动能转换,使高层反气旋性环流维持和加强,有利于低涡发展。

赵思雄^[28]对梅雨锋上中尺度低压系统做了研究,指出:梅雨锋上存在着两类不同的中尺度低压(扰动),一类水平尺度为百公里至 500 km,生命史为 1 天左右,另一类开始时为一中尺度系统,在有利条件下,可发展为上千公里的系统,并可维持数日。

4 梅雨锋生研究

早在 1958 年,陶诗言^[1]在研究中国梅雨时就给出了梅雨锋的天气学描述。他把梅雨气旋后部的冷锋变成静止时的锋称为梅雨锋。在给出梅雨锋的基本概念之后,他又指出过去挪威学派的锋面气旋降水区分布的模型,并不适合中国大陆梅雨气旋的情况,中国梅雨气旋降水带有明显的阵性。20 世纪 70 年代,陶诗言^[9]再次明确了梅雨锋的概念,指出梅雨雨带是出现在梅雨锋上,梅雨锋雨带内降水不均,常有一个个暴雨雨团。

锋生是梅雨期间出现的一种重要现象,区域性锋生会带来灾害性天气,如暴雨等。所以,锋生是中尺度天气系统研究中的重要内容之一。关于这方面的研究,以往主要流行 Eady 波增长引起低层锋生的观点,强调了低层锋生是斜压波增长引起垂直环流和变形场的加强而造成的^[29,30]。曾庆存^[31]最早注意到在高空波动活跃期的寒潮爆发过程中,组成高空槽的冷空气通过界面对暖空气做功,暖区动能增加,造成围绕冷槽的高空急流增强,进而加强高空急流所造成的适应过程,引起对流层中层的锋生。高守亭

和陶诗言^[32]进一步从天气动力学角度以波与流相互作用的观点研究了中国长江流域梅雨锋的锋生。从动力学上找到了低层锋生函数同急流区内纬向平均风加速的关系,指出在急流入口区高空急流加速有利于大气低层锋生,并从天气学的角度给出了高空急流加速同低层大气锋生的环流形态特征:即高空波的动量和热量通量在急流区的辐合,促使高空急流加速,并引起急流入口区上下层之间的质量调整,在急流轴高度以下出现一个反环流,反环流的上升支同其下原有的弱锋前的上滑爬升气流发生耦合,造成上滑气流加强,低层锋面坡度变陡,引起锋生。这同资料分析结果完全一致^[33]。李勇红、张可苏^[34]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。比较一下便很清楚,以 Hoskins 为代表的低层锋生理论,强调发展着的斜压波一方面从基本流中取得发展的能量,另一方面诱使低层锋生,而曾庆存的观点是,充分发展了的斜压槽把其本身的热量和动量首先输送给高空急流区,然后由适应过程中的调整质量环流引起下层锋生。可见,这两种物理过程是很不相同的,他们分别描述了两种不同的锋生现象。李振军、赵思雄^[35,36]利用中国首次获得的华东中尺度试验资料,对春季东亚强冷锋的结构和动力学过程进行了讨论。高守亭等^[37]在研究梅雨锋暴雨时,利用 NCEP 实时分析资料诊断出在强梅雨年时,在副热带高压的边缘会出现一条与梅雨锋对峙的新的露点锋,这条锋同梅雨锋构成强梅雨年的梅雨锋系,提出了梅雨锋系的概念,并研究了他们的结构特征。另外,赵思雄^[38]在梅雨锋能量的研究方面也开展了不少工作。

5 关于对称不稳定、横波型不稳定和涡层不稳定的研究

对称不稳定及涡层不稳定是中尺度系统研究中的主要理论内容之一。在低空急流发展的盛期,非地转偏差十分明显,急流轴以下低空风的垂直切变很大,在这种情况下 Richardson 数变得非常小而导致不稳定,使中尺度扰动迅速发展。高守亭和孙淑清^[39]在国内最早引入对称不稳定的概念,并将其用于中尺度系统稳定性的研究。在此之前,国际上就对称不稳定已有不少研究^[40,41],他们得出的判据是 Richardson 数 $Ri < 1$ 时才能有对称不稳定发展。但从北京地区 45 个暴雨个例分析中,发现临近暴雨发生前,因低空风的切变加大,绝大多数里 Richardson 数 $Ri < 5$ 时有中尺度扰动发展。经过仔细研究,高守亭和孙淑清^[39]发现只要 $Ri < 5.2$,就会发生对称不稳定。而后,赵平和高守亭^[42]利用原始方程和压力对数坐标,进一步研究了对称不稳定,找出了 Ri 依赖于 Rossby 数的判据。张可苏^[43,44]除了讨论对称不稳定的判据并给出其结构以外,还用非地转模型研究了横波不稳定,得到了在 Eady 模态的短波截断外存在不止一组中尺度非地转的不稳定谱区。但在天气尺度不稳定谱区与中尺度不稳定谱区之间则存在稳定的波谱区,该稳定的波谱区间随 Richardson 数的不同而不同,即在 α 中尺度或 β 中尺度范围内,总存在一些稳定的区域,这也表明对中尺度横波型不稳定来说不稳定的存在对波长具有选择性。

长江流域切变线是造成大到暴雨的重要天气系统之一。特别是在梅雨期,700 hPa 或 850 hPa 上的切变线在长江流域持续维持,造成该地区持续降水。在切变线上经常形成类“涡街”式的中尺度低值系统,凡是中尺度低值系统形成的地方,降水强度明显

加大，使得切变线降水表现为十分不均匀，在低值系统发展区，经常出现暴雨甚至大暴雨。从理论上来说，造成这种低值系统的原因，可以归结为切变线上涡层的不稳定。这种不稳定的发生对环境场（如风场、温度场等）都有一定的要求，体现了强暴雨系统发生过程中不同尺度系统之间的相互作用。高守亭等^[45,46]在研究切变线上涡层不稳定理论时，打破了传统的 Kelvin-Helmholtz 研究切变不稳定的观点，考虑了强涡度切变存在时切变线已构成了一个涡层，这时切变线的不稳定问题就变为涡层的不稳定问题，同时考虑由涡层所产生的诱导速度，从理论上得到了水平切变线上涡层不稳定必要条件的判据，在判据中表明环境场的配置制约着切变线上扰动的发展，中尺度扰动同环境场之间存在着相互作用。

6 暴雨等灾害天气的数值模拟研究

赵思雄等^[47]对 1975 年 8 月特大暴雨的数值实验表明，初始风场对于暴雨的发生有相当大的影响，要想得到较好的预报结果应设法使用实测风为初始资料。周晓平等^[48]对梅雨锋上中尺度低压过程进行了数值模拟，发现这种中尺度系统的形成至少应划分为发生和发展两个阶段。就发生阶段来讲，风场的动力作用是不容忽视的，而在维持和发展阶段中，则水汽潜热的影响较为明显。赵思雄^[49]用数值模拟手段，对高原东侧的锋生过程进行了研究。施曙等^[50]对梅雨锋上引发强暴雨的中低压结构及三维流场进行了分析。赵思雄等^[51]对 1998 年 7 月长江流域特大暴雨进行了特征分析。张小玲等^[52]对 1997 年 7 月“二度梅”期间特大暴雨过程中的 β 中尺度系统进行了分析。贝耐芳等^[53,54]在对 1998 年 7 月“二度梅”特大暴雨的数值模拟中，充分认识到了初值的重要性。如果利用尽可能收集到的资料，包括特性层的资料，则对“98.7”突发强暴雨的预报会有显著的改善。

为了发展适用于东亚季风区的数值模式的物理过程，赵思雄等^[55]利用时空加密观测资料对温差型积云参数化方案进行了改进试验，而马群飞等^[56]对能量型积云对流参数化方案进行了试验研究。平凡等^[57]在 Gregory 质量通量积云参数化方案的基础上进行了改进。此外，何溪澄等^[58]还对 Betts-Miller 型对流调整方案在热带天气预报中的应用作了试验。周晓平等^[59]还发展了用于暴雨模式的一维积云模式。与此同时，对于边界层参数化的问题也给予了足够的重视。为了避免由于非线性计算不稳定所造成的问题，Zhao 等^[60]采用准拉格朗日方案的数值模式对暴雨过程进行了模拟。暴雨预测实践证明，卫星探空资料的使用和同化对于澳大利亚强暴雨的模拟结果有很大改善^[61]。而水汽通量散度这一物理量的成功描写，是 1998 年 7 月韩国大暴雨成功模拟的关键所在^[62]。采用实测资料和数值模式，贝耐芳等^[63,64]对发生在长江流域的 1998 年 7 月 20 日至 22 日期间的强暴雨过程进行了分析，认为除去副热带高压南退且稳定维持这种有利的大尺度条件外，一系列 β 中尺度天气系统在长江中游（即鄂东河谷地区）的发生发展是造成本次强暴雨的直接原因。这类系统的发生发展具有很大的局地性和突发性。分析表明，对流层中低层水汽的大量集中以及对流不稳定条件的存在可能对此类系统的发展提供了有利环境，而地形的热力强迫及梅雨锋上的中尺度扰动可能对此类系统的发生发展起了触发作用。孙建华等^[65,66]除了对 1994 年 6 月中旬的华南暴雨过程进行

了诊断分析和数值模拟研究外,还选取 1994 年 6 月 12 日~13 日过程对华南“94.6”特大暴雨的中尺度对流系统及其环境场进行了研究,在确定云雨、垂直运动的模拟基本正确以后,利用模式的输出资料对在此期间的 β 中尺度对流系统的结构和演变进行了分析研究,并探讨物理过程、初始环境场以及地形对 β 中尺度对流系统的发生、发展的影响。结果表明:潜热释放对强对流系统发生和发展都有重要的作用。行星边界层过程对对流的发生阶段影响较为明显,而对发展阶段的影响似乎还不大。地面感热和潜热通量对对流系统的强度有影响。对初始场的试验表明,初始湿度场的改变会很明显地影响模拟结果,温度场的影响次之,地形主要影响强暴雨的强度和落区。

总之,随着数值模式的发展,我们已经可以利用模式输出的“接近实况”的高分辨率的资料来分析各种与暴雨系统相联系的天气过程,使得分析中小尺度系统的结构和发生发展过程成为可能。

7 小结

大气物理研究所自 1928 年以来,在次天气尺度和中尺度暴雨系统研究方面取得了令人瞩目的成绩,为国民经济的发展和减轻暴雨灾害带来的损失做出了重大贡献,然而,迄今为止,对许多中尺度系统的发生发展机理和移动变化规律尚缺乏客观的认识,还有许多问题有待深入研究。因此,在充分利用卫星、雷达等遥感资料的情况下,除了需要分析大量的观测事实,对其物理过程进行深入的分析和研究外,还要建立和改进中尺度资料的同化及物理过程,以提高对暴雨中尺度系统的模拟能力和分析水平。

回顾大气物理研究所几十年的发展,展望未来,可以相信,随着科学技术的发展和几代人的共同努力,对清楚地揭露次天气尺度和中尺度暴雨系统的形成机理和演变过程是可以实现的。当然,要实现这个目标还需要经过漫长的道路,需要科研人员付出不懈的、辛勤的劳动。

参 考 文 献

- 1 陶诗言、赵煜佳、陈晓敏,中国的梅雨,中央气象局气象论文集,第 4 号,1958,36pp.
- 2 陶诗言、赵煜佳、陈晓敏,东亚的梅雨期与亚洲上空大气环流季节变化的关系,气象学报,1958, **29**, 119~134.
- 3 陶诗言,长江中上游暴雨短期预报的研究,中国夏季副热带天气系统若干问题的研究,北京:科学出版社,1965.
- 4 孙淑清,低空急流及其与暴雨的关系,暴雨文集,长春:吉林人民出版社,1978.
- 5 孙淑清、马廷标、孙纪改,低空急流与暴雨相互关系的对比分析,气象学报,1979, **37**, 36~44.
- 6 孙淑清、赵思雄,盛夏大尺度低空急流及其与华北暴雨的关系,暴雨及强对流天气的研究,中国科学院大气物理研究所集刊,第 9 号,北京:科学出版社,1980.
- 7 孙淑清、翟国庆,低空急流的不稳定性及其对暴雨的触发作用. 大气科学,1980, **4**, 327~337.
- 8 李麦村,华南前汛期特大暴雨与低空急流的非地转风关系,暴雨及强对流天气的研究,中国科学院大气物理研究所集刊,第 9 号,北京:科学出版社,1979.
- 9 陶诗言等,中国之暴雨,北京:科学出版社,1980, 225pp.
- 10 Tao Shiyan, and Ding Yihui, Observational evidence of the influence of the Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau on

- the occurrence of heavy rain and severe convective storms in China, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1981, **62**, 23~30.
- 11 丁一汇等, 1991 年江淮流域持续性特大暴雨的研究, 北京: 气象出版社, 1993, 255pp.
- 12 陶诗言, 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, 1994 年华南特大洪涝学术研讨会论文集, 北京: 气象出版社, 1996, 1~5.
- 13 张人禾, El Nino 盛期印度夏季风水汽输送在中国华北地区夏季降水异常中的作用, 高原气象, 1999, **18**, 567~574.
- 14 Zhang Renhe, Relation of water vapor transports from Indian monsoon with those over east Asia and summer rainfall in China. *Adv. Atmos. Sci.*, 2001, **18**, 1005~1017.
- 15 Zhang Renhe, and A. Sumi, Moisture circulation over east Asia during El Nino episode in northern winter, spring and autumn. *J. Meteor. Soc. Japan*, 2002, **80**, 213~227.
- 16 赵思雄、贝耐芳、孙建华, 华南暴雨试验期间 (HUAMEX) 强对流系统的研究, 海峡两岸及邻近地区暴雨试验研究, 北京: 气象出版社, 2000, 256~260.
- 17 陈红、赵思雄, 第一次全球大气研究试验计划期间华南前汛期暴雨过程及其环流特征的诊断研究, 大气科学, 2000, **24** (2), 238~252.
- 18 陶诗言、倪允琪、赵思雄等, 1998 夏季中国暴雨的形成机理与预报研究, 北京: 气象出版社, 2001, 184pp.
- 19 顾弘道、钱正安, 数值模式的质量守恒方程中水汽源汇项作用的讨论, 科学通报, 1990, **22**, 1721~1724.
- 20 Gao Shouting, Lei Ting, and Zhou Yushu, Moist potential vorticity anomaly with heat and mass forcings in torrential rain systems, *Chin Phys. Lett.*, 2002, **19** (6), 878~880.
- 21 Cui Xiaopeng, Gao Shouting, and Wu Guoxiong, Moist potential vorticity and up-sliding slantwise vorticity development, *Chin Phys. Lett.*, 2003, **20** (1), 167~169.
- 22 高守亭、雷霆、周玉淑, 强暴雨系统中湿位涡异常的诊断分析, 应用气象学报, 2002, **13** (6), 662~270.
- 23 高守亭、孙淑清, 次天气尺度低空急流的形成, 大气科学, 1984, **8**, 178~188.
- 24 赵思雄、刘苏红、刘名扬, 夏季北京冷涡强对流天气的中尺度分析, 暴雨及强对流天气的研究, 中国科学院大气物理研究所集刊, 第 9 号, 北京: 科学出版社, 1980.
- 25 高守亭, 行星边界层内低涡的环流结构, 气象学报, 1983, **41** (3), 285~295.
- 26 高守亭, 流场配置及地形对西南低涡形成的动力作用, 大气科学, 1987, **11**, 263~271.
- 27 赵平、胡昌京、孙淑清, 一次西南低涡形成过程的数值试验和诊断, 大气科学, 1992, **16**, 177~184.
- 28 赵思雄, 梅雨锋上扰动发生发展的能量分析, 大气科学, 1988, 特刊, 191~201.
- 29 Hoskins, B. J., and F. P. Bretherton, Atmospheric frontogenesis models: mathematical formulation and solution, *J. Atmos. Sci.*, 1972, **29**, 11~37.
- 30 Williams, R. T., Atmospheric frontogenesis, a numerical experiments, *J. Atmos. Sci.*, 1967, **24**, 12~96.
- 31 曾庆存, 数值天气预报的数学物理基础, 北京: 科学出版社, 1979, 237~314.
- 32 高守亭、陶诗言, 高空急流加速与低层锋生, 大气科学, 1991, **15**, 11~21.
- 33 张雪雯、钱家声, 中国锋生环流特征初探, 气象学报, 1988, **46**, 82~91.
- 34 李勇红、张可苏, 急流加速产生的高空锋生和低空锋生, 大气科学, 1992, **16** (4), 452~463.
- 35 李振军、赵思雄, 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, 1996, **20** (6), 662~672.
- 36 李振军、赵思雄, 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, 1997, **21** (1), 91~98.
- 37 Gao Shouting, Zhou Yushu, and Lei Ting, Structural features of the Meiyu front system, *Acta Meteorologica Sinica*, 2002, **16** (2), 195~204.
- 38 Zhao Sixiong, Energetics of cyclogenesis on Meiyu (Baiu) front, Proceedings of Palmen Memorial Symposium on Extratropical Cyclones, Helsinki, Finland, American Meteorological Society, 1998, 205~209.
- 39 高守亭、孙淑清, 应用里查森数判别中尺度波动的不稳定, 大气科学, 1986, **10**, 171~182.
- 40 Stone, P. H., On non-geostrophic baroclinic stability, *J. Atmos. Sci.*, 1966, **23** (4), 390~400.

- 41 Gambo, K., The characteristics feature of medium-scale disturbances in the atmosphere, *J. Meteor. Soc. Japan*, 1970, **48**, 173~184.
- 42 赵平、高守亭, 里查森数与中尺度扰动稳定性的关系, 气象科学研究所院刊, 1989, **4**, 247~256.
- 43 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** (3), 258~226.
- 44 张可苏, 斜压气流的中尺度稳定性 II: 横波型不稳定, 气象学报, 1988, **46** (4), 385~392.
- 45 Gao Shouting, The instability of the vortex sheet along the shear line, *Advances in Atmospheric Sciences*, 2000, **17** (4), 523~537.
- 46 高守亭、周玉淑, 水平切变线上涡层不稳定理论, 气象学报, 2001, **59** (4), 393~404.
- 47 赵思雄、周晓平, 风场在预报暴雨发生中的作用, 大气科学, 1984, **8** (1), 1~6.
- 48 周晓平、赵思雄、张宝严, 梅雨锋上中尺度低压发生的数值模拟实验, 大气科学, 1984, **8** (4), 353~361.
- 49 赵思雄, 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, 1991, **15** (5), 40~49.
- 50 施曙、赵思雄, 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, 1994, **18** (4), 476~484.
- 51 赵思雄、孙建华、陈红等, 1998 年 7 月长江流域特大洪水期间暴雨特征的分析研究, 气候与环境研究, 1998, **3** (4), 368~381.
- 52 张小玲、陶诗言、张庆云, 1998 年 7 月 20~21 日武汉地区梅雨锋上突发性中- β 系统的发生发展分析, 应用气象学报, 2002, **13** (4), 386~397.
- 53 贝耐芳、赵思雄, 1998 年“二度梅”期间突发强暴雨系统的中尺度分析, 大气科学, 2002, **26** (4), 526~540.
- 54 贝耐芳、赵思雄, 初值及物理过程对“758”暴雨结果的影响, 气候与环境研究, 2002, **7** (4), 386~396.
- 55 赵思雄、张宝严、杜长萱等, 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, 1996, 1~9.
- 56 马群飞等, 能量型云模式积云参数化方案的实验, 台风、暴雨数值预报新技术的研究, 北京: 气象出版社, 1996, 32~37.
- 57 Ping Fan, Gao Shouting, and Wang Huijun, A comparative study of the numerical simulation of the 1998 summer flood in China by two kinds of cumulus convective parameterized methods, *Advances in Atmospheric Sciences*, 2003, **20** (1), 149~157.
- 58 何溪澄、沈如金、王康玲, Betts-Miller 型对流调整方案在热带数值天气预报中的初步试验, 台风、暴雨数值预报新技术的研究, 北京: 气象出版社, 1996, 38~44.
- 59 周晓平、曾朝霞, 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, 1996, 149~157.
- 60 Zhao Li, and Zhao Sixiong, Numerical experiments of Meiyu (Baiu) rainfall by quasi-Lagrangian limited area model with terrain, *Advanced in Atmospheric Sciences*, 1995, **12** (1), 57~66.
- 61 Mills, G. A., and Zhao Sixiong, A study of a monsoon depression bring record rainfall over Australia, Part I: Numerical predictability experiments, *Mon. Wea. Rev.*, 1991, **119**, 2053~2073.
- 62 Zhao Sixiong, and Zhang Feng, Diagnosis and simulation of heavy rain in Korean Peninsula during July 1998, Proceedings of International Conference on Mesoscale Convective Systems and Heavy Rain in East Asia, Seoul, Korea, 2000, 183~188.
- 63 Bei Naifang, Zhao Sixiong, and Gao Shouting, Numerical simulation of a heavy rainfall event in China during July 1998, *Meteorology and Atmospheric Physics*, 2002, **80**, 153~164.
- 64 贝耐芳、赵思雄, 1998 年“二度梅”期间突发性强暴雨系统的中尺度分析, 大气科学, 2002, **26** (4), 526~540.
- 65 孙建华、赵思雄, 华南“94.6”特大暴雨的中尺度对流系统及其环境场研究 I. 引发暴雨的 β 中尺度对流系统的数值模拟研究, 大气科学, 2002, **26** (4), 541~557.
- 66 孙建华、赵思雄, 华南“94.6”特大暴雨的中尺度对流系统及其环境场研究 II. 物理过程、环境场以及地形对

中尺度对流系统的作用，大气科学，2002，26（5），633~646.

Progress of Research on Sub-synoptic Scale and Mesoscale Torrential Rain Systems

Gao Shouting, Zhao Sixiong, Zhou Xiaoping, Sun Shuqing, and Tao Shiyan

(*Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*)

Abstract The main progress and achievement of research made in sub-synoptic scale and mesoscale torrential rain systems in the Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences in the past 75 years are summarized. The progress mainly lies in torrential rain, sub-synoptic scale and mesoscale low-level-jet and vortex, structure of Meiyu front and its frontogenesis, symmetric instability, vortex sheet instability and numerical simulations on meso- α and β scale systems. It is also pointed that these research achievements play an important role in disaster prevention and disaster reduction resulted by sub-synoptic scale and mesoscale torrential rain systems.

Key words: sub-synoptic scale, mesoscale, torrential rain systems