

近年来我国暴雨中尺度动力分析研究进展

孙淑清 周玉淑

中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

摘 要 总结了近十年以来中国气象科研人员在暴雨中尺度动力分析研究领域的主要研究成果, 从大尺度环流背景与中小尺度系统的相互作用、高低空急流、低涡、位涡与对流涡度矢量、螺旋度、不稳定等方面对它们进行了分类概括。对暴雨中尺度动力分析研究的回顾表明, 以往常用的数值模拟、能量转换收支分析、涡度、散度、涡度收支、涡度平流、温度平流、各种不稳定指数等的诊断仍然是暴雨中尺度动力分析的主要手段, 但是, 近年来, 除了位涡、螺旋度等动力变量在暴雨中尺度动力分析中的广泛应用以外, 一些新的物理量, 如非均匀饱和广义湿位涡、对流涡度矢量以及有限区域风场分解方法在暴雨中尺度动力分析中也得到了更多的应用。

关键词 暴雨 中尺度动力分析

文章编号 1006-9895 (2007) 06-1171-18

中图分类号 P445

文献标识码 A

Advances in Meso-Scale Dynamical Analysis of Torrential Rain Systems in Recent Years in China

SUN Shu-Qing and ZHOU Yu-Shu

Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Abstract The main study results on torrential rain and meso-scale dynamical analysis in recent years are summarized, which include large scale circulation, the interaction between the large scale and meso-micro scale systems, upper and low level jet, vortex, potential vorticity and convective vorticity vector, helicity and instability, etc. The review on meso-scale dynamical analysis of torrential rain systems manifests that the numerical simulation, transform and budget of energy, vorticity, divergence, vorticity budget, vorticity advection, temperature advection, various instability indexes, etc., are still the general variables for diagnosing the meso-scale systems. But in recent years, besides the potential vorticity and the helicity are used more effectively than before, some new variables, such as generalized moist potential vorticity in non-uniformly saturated atmosphere, convective vorticity vector, and wind partitioning method in a limited region, are applied more to the meso-scale dynamical analysis of torrential rain systems.

Key words torrential rain, meso-scale dynamical analysis

1 引言

暴雨是一种严重的灾害性天气, 对人民的经济财产和人身安全具有重大影响, 因此, 对暴雨的研

究一直是气象学家及气象业务工作者最关注的问题之一。

我国是一个受暴雨灾害严重的国家, 长期以来, 暴雨的研究和预报一直受到政府和气象部门的

收稿日期 2007-05-30, 2007-06-20 收修定稿

资助项目 中国科学院方向性项目 KZCX2-YW-206-4 和 KZCX3-SW-225, 国家自然科学基金资助项目 40405007, 中国科学院海外杰出学者基金项目 2005-2-16

作者简介 孙淑清, 女, 1936 年出生, 研究员, 从事中尺度气象和季风气象研究。E-mail: ssq@mail.iap.ac.cn

高度重视。早在 20 世纪 70 年代, 针对我国暴雨灾害的严重性, 陶诗言先生就对暴雨以及中小尺度系统的天气学特征及动力学进行过系统全面的研究, 增强了气象工作者对暴雨系统的认识和预报能力。对 20 世纪中国大陆发生的多次大暴雨的研究都总结在《中国之暴雨》一书^[1]中, 这本书全面小结了我国暴雨过程发生的宏观物理条件, 各种天气尺度系统与暴雨的关系以及我国暴雨的分析和预报方法, 至今仍然是气象学者对暴雨中尺度系统进行研究和预报时必读的专著之一。在此工作的基础上, 之后的一系列研究工作得以顺利深入开展。

1998 年, 我国大面积发生洪水, 其影响范围广、持续时间长、洪涝灾害严重。分析表明, 此次水灾对 1998 年的中国经济影响在 0.5~1.0 个百分点之间, 引起世界瞩目。从此, 我国政府和气象部门加强了对暴雨等灾害天气的基础研究和应用研究, 重新给予高度的重视, 先后开展了国家重点基础研究发展规划项目“我国重大灾害天气形成机理和预测理论研究”及“我国南方致洪暴雨监测与预测的理论和研究方法”等国家级研究课题, 集中对暴雨系统发生发展的机理进行了探讨。在南方暴雨研究的各个方面都取得了一批有意义的成果, 这些成果大都反映在项目专著^[2~4]中。其中, 专著《1998 夏季中国暴雨形成机理与预报研究》^[2]对 1998 年夏季中国暴雨的形成机理与预报做了非常细致的研究, 这是陶诗言先生对中国暴雨研究做出的又一次贡献。具体来说, 近十年来暴雨中尺度动力分析方面的研究可分为以下几个方面。

2 大尺度环流背景及其与中小尺度的相互作用

暴雨(尤其是大范围暴雨)的发生发展有其特殊的环流条件, 当天气尺度的系统移动缓慢或停滞时, 就容易形成特大暴雨。关于暴雨的成因机理, 特别是暴雨发生时不同尺度系统的演变及其相互作用的研究表明^[5, 6], 暴雨的发生是不同天气尺度系统相互作用造成的。在稳定的大形势背景下, 短波槽、低涡、气旋等天气尺度系统的活动, 造成一次次的短期暴雨过程。Bosart^[7]通过分析一个中尺度与天气尺度相互作用的个例, 指出天气尺度形势对中尺度环流的起源和发展起控制作用。行星尺度、天气尺度和中小尺度系统的共同作用造成了持续性

的暴雨过程。

1998 年我国大范围发生持续性暴雨, 这必然要求有更大、更稳定的环流形势。因此, 关于大尺度系统对暴雨的影响的研究在 1998 年之后得以充分发展, 得到许多有意义的结果。影响夏季长江流域暴雨降水的主要环流系统包括: 高层的南亚高压, 中层中高纬度环流与冷空气以及西太平洋副热带高压, 低层热带季风涌及其输送的暖湿气流^[8]。张庆云等^[9]探讨了夏季中国东部长江流域严重洪涝灾害发生时的天气气候异常特征。分析表明: 东亚夏季风环流偏弱是夏季长江流域发生严重暴雨洪涝灾害的气候特征。东亚中高纬大气环流出现 20~30 天的低频振荡, 有利于青藏高原上空的低压系统沿着中纬度东传到 115°E~125°E 附近, 造成长江流域梅雨锋低压扰动加强; 东亚低纬大气环流出现 20~30 天的低频振荡, 有利于印度洋、南海和热带西太平洋的水汽输送到长江流域, 为长江流域暴雨提供持续充足的水汽来源。夏季西太平洋副热带高压西伸出现 20~30 天的低频振荡, 有利于低压系统在长江流域(115°E~125°E)再生和维持。杨秋明^[10]对 25 年逐候东半球热带外 500 hPa 高度距平场进行小波分析和旋转主成分分析, 研究了 30~60 天低频振荡的时空变化及其与长江下游夏季旱涝和暴雨频数年际变化的关系。结果表明: 6~10 月欧亚型(EU)低频振荡强度与长江下游暴雨频数呈显著负相关, 同时, 提出了能揭示变量间非线性关系的对比函数分析(CFA)方法, 发现当 5~8 月西太平洋型(WP)低频流型偏强时, 长江下游暴雨频数增加, 容易发生洪涝; 反之, 无明显影响。仅当前期 3~5 月南亚大陆型偏强时长江下游降水量偏少, 而 3~5 月南亚大陆型偏弱时暴雨频数明显增加。因此, 长江下游旱涝与低频流型异常之间同时存在线性和非线性相关。

另外, 陈红和赵思雄^[11, 12]对 1979 年第一次全球大气研究计划试验(FGGE)期间华南前汛期 3 次暴雨过程和 1998 年 5~6 月海峡两岸及邻近地区暴雨试验(HUAMEX)期间的 6 次暴雨过程及其环流特征进行了诊断分析, 并将 HUAMEX 暴雨过程与 FGGE 期间的华南暴雨过程及“94.6”近百年一遇的华南暴雨过程作了比较。Chen 等^[13]和 Jiang 等^[14]的研究结果表明: Niño 3 区海温与台湾春季暴雨降水存在正相关。特大暴雨在暖期发生相对更

为频繁,与东太平洋亚洲遥相关相耦合的中纬度锋面系统,当它入侵中国东部沿海地区时,是暖期春季特大暴雨的首要影响因子。ENSO 年与非 ENSO 年台湾春季暴雨的大尺度环流形势非常不同。周玉淑等^[15, 16]研究了长江流域夏季旱涝前期的冬春季青藏高原下垫面热力结构的异常分布,通过资料分析揭示出长江中下游地区夏季降水异常前期冬、春季青藏高原下垫面三维热力结构的“强信号”特征,即长江中下游地区夏季旱涝前期冬春青藏高原各层次的地温距平呈反位相分布。从地面 0 m 到地下 3.2 m 的地温距平分布为:涝年高原偏南部(30°N 以南)为正,中部和北部为负,早年时则与此相反,其中地温距平的大值区在 0.4 m 层到 1.6 m 层之间。通过资料统计分析和数值模拟,他们的研究结果^[15, 16]揭示出北半球环流型对青藏高原下垫面热力异常可能产生遥响应,并形成季尺度低频波的传播,从而影响长江中下游地区后期的降水,反映了遥相关是区域性旱涝形成的一个动力机制,是国内首次通过动力统计方法来反映大气环流遥相关机制方面的研究。黄嘉佑等^[17]则提出用气候信号噪音比的概念来分析 500 hPa 逐日高度场,并建立 500 hPa 高度信号场来分析我国暴雨发生的气候异常环境。结果表明,此法能进行天气意义分析和气候异常现象的统计规律诊断,对我国年度暴雨短期预报分析有一定的参考价值,可以作为传统天气动力诊断的补充工具。

3 梅雨锋研究

梅雨锋是汛期造成我国降水的一个重要天气系统,梅雨锋雨带内降水不均,常有一个个暴雨雨团。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降水的情况,中国梅雨降水带有明显的阵性^[1]。倪允琪和周秀骥^[18]总结了国家重点基础研究发展规划项目“我国重大天气灾害形成机理与预测理论研究”取得的一系列重要的研究成果时就指出:通过该项目的研究后,气象学家们提出了基于多种实时观测资料的梅雨锋暴雨的多尺度物理模型,建立了梅雨锋暴雨的天气学模型,认为梅雨锋是由多个不同尺度系统构成的梅雨锋系,它具有介于温带锋系结构与热带辐合带结构之间的副热带锋系结构,在长江中下游有时可表现为双锋结构,锋前的湿物理过程与锋上强对流系统发展形成

的正反馈过程以及梅雨锋系的不同尺度系统的相互作用是梅雨锋维持与发展的重要机制。

在梅雨锋锋生方面的研究较多^[19, 20],以往主要流行 Eady 波增长引起低层锋生的观点,强调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^[21, 22]。曾庆存^[23]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。高守亭等^[24]进一步从天气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,从动力学上找出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。伍荣生^[25]用旋转大气的二维非静力模型,用 Simpson 和 Linden 的级数展开方法和数值积分方法讨论了地面锋附近由于非地转平衡所产生的重力流及锋生作用。余志豪等^[26]和朱民等^[27]还对梅雨锋上的中尺度雨带和雨团以及梅雨锋上中尺度气旋发展的反馈机制进行了分析。

1998 年大洪水以后,关于梅雨锋上暴雨的研究显著增多。张小玲等^[28]根据观测分析,概括出长江流域梅雨锋上主要有三类暴雨:梅雨锋上 β 中尺度的对流性暴雨、梅雨锋东部(115°E 以东)的初生气旋暴雨、梅雨锋西端深厚高空低压槽前部的持续性强暴雨。第一类暴雨局地性特征明显,其范围一般小于 300 km,暴雨的瞬时强度大,暴雨发生所需的强上升运动由局地强的对流有效位能(CAPE)释放的浮力抬升引起。第二类和第三类暴雨的共同点在于都有明显的大尺度强迫过程,大尺度的动力强迫使持续暴雨所需的垂直上升运动得以维持。且后两类暴雨的数值预报效果较第一类的好,比梅雨锋上 β 中尺度暴雨预报更容易掌握。Qian 等^[29]分析了 1998 年梅雨锋暴雨的形成机制,得出:长江流域暴雨的水汽主要来自孟加拉湾,通过西南低空急流输送到长江流域,梅雨降水产生的凝结潜热又通过加大低空急流而加强了西南水汽输送,形成一个正反馈。降水循环机制虽然对长江流域的总降水增强不明显,但它通过增加大气湿度和减少地面温度而使得最大降水中心向梅雨雨带暖侧偏移。Gao 等^[30]和 Zhou 等^[31]在研究梅雨锋暴雨和梅雨锋结构时,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双锋结构特征,并提出了梅雨锋系的概念。周玉淑等^[32~35]则进一步研究了梅雨锋系双锋结构的形成原因以及梅雨锋系对应三个区域的水汽输送和收支特征,认为在江淮流域梅雨期间,夏季印度风环流和南海夏季风是向江淮流域输送水汽的主要通道。梅雨期内,中层大气中的水汽主要是垂直上升运动对低层水汽的抬升作用,同时,低纬大洋上的水汽也可途经青藏高原后再从西边界向东输入到江淮地区,它的输送有可能增大江淮流域上空对流层中层大气中的水汽含量,从而有利于强梅雨在江淮流域的发生。具体的计算分析还表明了强降水区是与大范围的水汽输送和辐合中心相联系的,较小空间范围的强暴雨洪涝的发生在有利的大尺度环境下,还与其它条件有关。

廖捷和谈哲敏^[36]利用江淮地区一次梅雨锋暴雨过程的模拟结果,分析了不同尺度天气系统相互作用对特大暴雨过程的影响作用。在这次特大暴雨过程中,位于梅雨锋北侧的呈东北-西南走向,深厚、稳定的短波槽系统与槽前从西南移来的低涡系统相配合,加强了位于梅雨锋北侧的反气旋性扰动发展,从而导致梅雨锋北侧反气旋性涡旋的形成。该类反气旋性涡旋形成对江淮切变线的加强与维持起重要作用。中尺度对流系统的潜热释放首先导致梅雨锋低层切变线上的中尺度对流性涡旋(MCV)的形成,而中尺度对流性涡旋的形成进一步加强了切变线上的低层辐合,中尺度对流性涡旋消亡后,在切变线上形成低涡。梅雨锋附近主要存在4种不同垂直环流,它在降水的不同阶段具有不同的结构、配置与动力学作用。其中跨锋面、高层非地转两支垂直环流对锋区的对流扰动发展和暴雨形成最为重要,而降水发展可以调整锋区垂直环流的结构、配置,随降水的减弱,梅雨锋区的不同垂直环流系统又重新恢复到先前结构。梅雨锋上不同尺度、高度的天气系统之间的相互作用主要通过这些垂直环流系统的调整来实现。刘黎平等^[37]的研究结果表明,在梅雨锋暴雨雨带中,存在有许多 β 中尺度或 γ 中尺度强回波带或回波团,在长江中游,混合性强降水雨带在长200 km以上的低空切变线上形成;在切变线南侧的低空西南急流和北侧的偏东气流共同作用下形成上升气流,对流云得到发

展,切变线低空风场的扰动、中尺度切变和 β 中尺度辐合是造成对流发展的原因; β 中尺度对流系统常常伴有尺度更小的中尺度涡旋和中尺度辐合等 γ 中尺度结构,这些 γ 中尺度结构在强对流的发展过程中也起了很重要的作用。对“99.6”梅雨锋暴雨过程中对流动量输送特征进行诊断分析研究^[38],得出:动量收支残差与平均流场的方向一致,它有利于加速西南气流北上和 β 中尺度系统的发生和发展,结果也表明强矢量几乎总是与产生强烈上升运动的 β 中尺度系统相对应。动能转换的诊断表明,在中尺度系统强烈发展时大尺度系统与中尺度系统之间的能量转换非常复杂,并不是简单的能量串级过程所能描述的,能量主要是从大尺度向次网格尺度转换,激发次网格尺度系统的发生和发展。

另外,通过对1998年二度梅雨期间梅雨锋的演变和其不同阶段的水平、垂直结构进行的诊断分析^[39],确认了二度梅雨期间梅雨锋结构的一些普遍特征,同时揭示了其结构不同于一般梅雨锋的典型特征。它不同于温带锋面结构,而是更倾向于赤道辐合带的性质,并且在各个阶段其结构并不完全相同。

4 高低空急流的研究

东亚高空急流是影响东亚及中国天气的重要系统,东亚大气环流的季风转换、中国大部分地区雨季的开始和结束都与西风急流位置的南北移动以及强度变化有紧密的联系。以前,我国学者对高空急流的研究,主要是从大尺度角度来分析它的形成及其对环流的影响,如叶笃正等^[40]指出亚洲季风转变是与6月及10月大气环流的突变相联系的,而这种突变的重要表现之一就是亚洲西风急流的北跃与南移过程。陶诗言等^[41]则指出东亚梅雨的开始和结束与6月及7月亚洲上空南支西风急流的二次北跳过程密切相关。高守亭等^[42, 43]首先指出波与纬向流的相互作用,主要是波与高空急流的相互作用,波的动量通量和热量通量在急流区辐合,促使高空急流加速。后来,Pfeffer^[44]再次提出高空波作用引起高空急流加速的论点证实了高守亭等^[43]的结论。

1998年以后,关于高空急流对暴雨作用的研究开始增多。如徐海明等^[45]从理论分析和实例计算两方面探讨了高空急流轴的倾斜对急流出口处右

侧辐散场形成的作用。结果表明,一旦高空急流轴发生倾斜,则由于其出口处水平风场的分布不均匀势必会在“倾斜”急流轴出口处的右侧出现较强的辐散场,且它的出现明显早于大暴雨的产生。因此,高空急流轴走向的变化对于预报暴雨的发生发展具有很好的指示意义。周兵等^[46]的结果表明:高空西风急流增强有利于加强低空急流,降水在控制试验雨带的南侧会增强,在北侧会减弱,雨带位置南撤,引起暴雨中心位置偏南;高空西风急流减弱则相反,雨带位置向北推进,暴雨中心位置偏北。而丁治英等^[47]首先对非纬向高空急流与远距离台风暴雨的相关进行了分析,得出:暴雨发生时,200 hPa 高空一般为西南风急流(90%),暴雨区位于高空急流右后方。另外,通过对 1991、1996、1998 年的梅雨锋暴雨与高空急流的统计与合成分析表明^[48],梅雨暴雨与高空急流关系密切,暴雨多出现在西北风高空急流的右前方或西南风高空急流的右后方。

低空西南风急流是引起中国暴雨的主要天气系统之一。陶诗言等^[1]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,研究低空急流与暴雨的关系,否定了日本气象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。他还进一步把理论研究与应用相结合,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,是陶先生对中国气象业务做出的重要贡献之一。

在前人工作的基础上,近年来对低空急流的许多研究都得到了类似的结果。例如,Chen 等^[49]统计分析了低空急流的各种特征,并讨论了低空急流出现频率、垂直结构、时空分布与暴雨的关系。结果表明:台湾北部 94% 的暴雨 850 hPa 附近有急流,88% 的暴雨在 700 hPa 附近有急流,并且低空急流的强度、深度、最大风速、持续时间等特征对总降水均具有影响。参照北美研究低空急流气候特征的方法,对中国低空急流进行重新定义^[50],从而实现了低空急流定义的统一,并在此基础上对低空急流活动特征进行了分析。结果表明:中国低空急流主要有两个活动中心,分别位于江南地区和东北地区;汛期低空急流活动与长江流域区域暴雨有伴

随性。

在高低空急流研究中,另一个重要进步是加大了对高低空急流相互作用方面的研究,如朱乾根等^[51]通过对 1998 年发生于武汉附近的一次强暴雨过程的分析发现,边界层南风急流、低空西风急流和高空西风急流上下的耦合作用是强暴雨发生的重要原因。张维桓等^[52]利用对一次大暴雨过程模拟得到的高时空分辨率资料,对伴随高、低空急流的次级环流进行了诊断,结果表明急流和暴雨之间通过次级环流存在着正反馈相互作用。另外,何华等^[53]揭示了在冷锋切变环流形势下云南大范围暴雨发生前后对流层高低空急流或强风速带的演变特征及其与大范围暴雨发生之间的关系。

5 低涡的研究

低涡是造成局部暴雨的主要天气系统之一,中国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^[1, 54]。

西南低涡是造成中国暴雨的一种重要的天气尺度系统。陶诗言等^[1]从天气学角度概括地给出了西南低涡的定义,并指出,西南低涡在与低槽、极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恰当时易造成大暴雨。Wang 等^[55]指出印度季风爆发后的青藏高原东侧暖性暴雨涡旋主要是由移动的高原边界层扰动触发、由积云对流加热控制的。高守亭^[56]指出西南低涡的形成与盆地、河谷以及气流分层有关,低层的浅薄暖湿西风有利于西南低涡的形成。另外,罗四维等^[57]通过大量统计事实和典型个例分析,对高原涡的形成发展提出了概念模式。高守亭^[56]的研究还指出,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。

可以看到,以前对西南低涡的研究主要是对其发生发展机制进行探讨。近年来,气象学家们加大了西南低涡影响暴雨降水方面的研究。对 1998 年西南低涡的研究结果^[58]表明:1998 年夏季长江中上游降水异常偏多与西南低涡活动密切相关。西南低涡的发生发展导致低涡东部气流辐合和非平衡性增强,强辐合和非平衡负值强迫结合是诱发低涡东部发生大暴雨天气的重要原因。另外,通过个例诊断分析,陈忠明等^[59]揭示出中低纬系统相互作用

在促进西南低涡发展和暴雨发生中所起的一些重要作用：活跃于南海的热带气旋，可通过其北侧偏东南低空强风带的向北伸展，与四川盆地西南低涡东侧的偏南气流贯通，实现两者的直接相互作用。建立水汽和能量输送带，为处于内陆地区的西南低涡的强烈发展和特大暴雨天气的发生提供有利的环境场条件。

另外，气象学者们还加强了对长江中游地区低涡的研究（以前在这方面的研究相对较少）。程麟生等^[60, 61]对 1998 年 7 月长江中游突发性特大暴雨的分析表明，特大暴雨与 β 中尺度低涡的生成和强烈发展直接相关。该低涡具有明显的动力-热力结构特征：特强上升运动与饱和气柱相互耦合，超强散度柱和强涡柱耦合发展，湿静力不稳定与湿对称不稳定共存。冯伍虎等^[62]对“98.7”低涡发展的涡源进行了诊断分析，在突发性暴雨强烈发生发展期，武汉周边地区上空从低层到高层有一近乎垂直的涡源高值区生成，其垂直结构的发展演变与涡度场的垂直结构发展演变相一致。这说明大气总涡源对该中尺度低涡切变线的生成和发展起着决定性的作用。时间平均涡源和纯扰动涡源对低涡切变线的生成都很重要；在低涡切变线东移并减弱时，非线性相互作用涡源的贡献减弱，该期间时间平均涡源和纯扰动涡源起着重要作用。另外，通过数值模拟^[63]，发现中心分别位于庐山和黄石的两个 β 中尺度低涡产生了“98.7”突发性暴雨。

对梅雨锋上发生的低涡及 MCS 也有很多新的研究成果，如高坤等^[64]将 1999 年 6 月下旬长江中下游梅雨锋低涡扰动分为两类：生成于四川，然后东移，并在江苏东部出海的西南涡及在长江中游大别山与幕阜山之间就地新生的低涡。隆霄等^[65]的模拟结果显示，在 α 中尺度低涡切变线发展过程中，低层强的西南急流和东北气流增强了低层的辐合；而高空的西风急流和东风急流则增强了高空的辐散；正是由于这种从低空到高空的环流配置才促进了 α 中尺度低涡不断发展，在低涡切变线前部会不断地产生 β 中尺度系统；尽管 β 中尺度系统的垂直上升运动很强，但由于其低层辐合强于中空辐散，所以当它远离母体时会很快衰减。高坤等^[66]利用数值模拟，对梅雨锋上与强降水密切相关的 5 个低涡的活动特点和四维结构进行了综合分析，识别和追踪了每个低涡的活动路径，分析其主要特征

的垂直结构、水平分布和时间演变，并通过轨迹和气块物理属性个别变化的计算，揭示了构成低涡的三股气流，分析低涡区水汽及冷空气来源和湿斜压锋区的形成。

在东北冷涡方面，对 1998 年松嫩流域较长的冷涡雨季中所发生的多次东北冷涡暴雨过程进行分析^[67]，结果表明，这些东北冷涡是大气环流由春末夏初到盛夏过渡时期不同过程的产物，因而具有不同的环流背景和降水性质，且在洪涝灾害的形成中起着不同的作用。周秀骥等^[68]和 Luo 等^[69]则基于动力学机制出发，在准地转模式的框架内，用数值试验研究了涡旋自组织的问题，初步提出了涡旋自组织的两类可能机制。他们的试验结果表明：中尺度地形的引进可以使分离的涡合并成为一个较大尺度的涡旋， γ 中尺度涡与 β 中尺度涡相互作用的引进，可以使分离的涡自组织形成一个类似于台风环流的涡旋。由于涡旋自组织与强灾害天气有密切的联系，这一研究结果有重要的应用意义。

6 位涡及对流涡度矢量的研究

随着气象科学的发展，除稳定性以外，先后又提出了一些新的可用对暴雨进行诊断分析的物理量，如位涡。位涡是“位势涡度”的简称，1940 年，Rossby^[70]最先提出位涡的概念，而 Ertel^[71]独立推导出非流体静力平衡条件下绝热、无摩擦大气第三个物质守恒量（位温和比湿为另外两个守恒量），即 Ertel 位涡。20 世纪 50 年代，Kleinschmidt^[72]首先提出位涡反演理论。1985 年，Hoskins 等^[73]首次从理论上全面、清晰地阐述了位涡反演原理，并提出能进行位涡反演必须具备的三个基本条件。

自从 Hoskins 等^[73]提出位涡反演原理后，人们掀起一轮用位涡及其反演原理研究某些气象现象（如气旋等）可能蕴藏的动力学机制的高潮，我国气象学者在这方面的研究也有不少，并得到了一些有意义的结果。如吴国雄等^[74~77]从完整的原始方程出发，在导出精确形式湿位涡方程的基础上，证明了绝热无摩擦饱和湿空气具有位涡守恒特性。并发展了 Z 坐标及 P 坐标中倾斜涡度发展理论，认为低空急流的加强或暖湿气流的加强均可导致斜压湿位涡增加及发展，有利于降水加剧。

1998 年大洪水以后，位涡理论在暴雨研究方面尤其得到发展。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, 顾宏道等^[78]和 Gao 等^[79]最早提出了质量强迫的概念。在 Gao 等^[79]的研究中, 突破了长期以来对大尺度位涡研究中只考虑热力强迫的传统观念, 明确指出在强暴雨系统中湿位涡随时间的变化不仅要受到热力强迫, 而且还受到因强降水造成的质量强迫。从动力上推导了热力、质量强迫下的湿位涡方程, 阐明了暴雨系统中发生的强降水会造成热力、质量强迫下的湿位涡异常。这两种强迫共同作用的结果会引起强暴雨系统中的湿位涡异常。高守亨等^[80]还用资料诊断出湿位涡异常的高度和强度, 显示出湿位涡是暴雨的一种示踪物, 这为暴雨预报提供了线索和思路。张国等^[81]和周玉淑等^[82]进一步分析了强降水中质量强迫的湿位涡异常特征, 认为对流层中低层的湿位涡异常区与降水区域有很好的对应关系, 可利用湿位涡的异常分布来预测降水未来可能的分布形势和走向。Cui 等^[83]则把湿位涡方程与倾斜涡度发展理论结合起来, 基于倾斜涡度发展理论, 从等熵面倾斜的角度研究了发生在西大西洋上的一次海洋气旋的发生、发展及其在海洋上的降水^[84]。根据湿位涡守恒原理和倾斜涡度发展理论, 对一次华南暴雨和 MCS 形成和发展的原因进行分析^[85], 结果表明: 暴雨和 MCS 发生在倾斜湿等熵面具有弱对流稳定性的下陷区, 沿湿等熵面下滑的冷空气与倾斜上升并具有较强的对流有效位能的暖湿空气在下陷区汇合的过程中经历了对流稳定性减小的过程, 导致在暴雨和 MCS 发生发展区域有气旋性的涡旋发展。对流发展区域的上空满足条件对称不稳定发生的条件, MCS 中上升气流呈倾斜状态。由于湿等熵面倾斜, 在暴雨和 MCS 的发展过程中, 水平风垂直切变和湿斜压度的增大也有利于涡旋的发展, 使暴雨和 MCS 得以维持。并给出了华南地区湿等熵面上暴雨和 MCS 发生发展的一个物理概念模型。寿绍文等^[86]分析了一次江淮梅雨锋暴雨过程中对流层低层的中尺度低涡及地面气旋发生发展的原因。结果表明, 在有利的等熵面形态下, 具有较高湿位涡值的高层冷空气沿等熵面快速向南下降的过程中绝对涡度增加, 导致了气旋性涡旋的发展加强。等熵面的形态及其中的湿位涡演变清晰地反映出产生暴雨的冷空气活动。在江淮地区等熵面的形态表现为一个东西向的深“坑”、边缘陡峭, 其深度从大约 400 hPa 下降到近地面层。这便是造

成涡度增加致使低涡和气旋形成与加强的重要原因之一。在考虑实际大气非均匀饱和的基础上, 高守亨等^[87~89]通过引入广义位温的概念, 推导了广义湿位涡方程, 并对近年来在大城市频繁发生的高温高湿天气进行了广义湿位涡异常的分析, 表明高温高湿天气形成时大气低层有广义湿位涡的负异常。这种负异常对高温高湿的发生有指示性, 因而可利用广义湿位涡的异常来识别高温高湿天气的出现并进行短时预报。同时, 周玉淑等^[90]对广义湿位涡异常与暴雨预报关系研究的结果也表明, 暴雨形成时大气低层有广义湿位涡的异常出现。广义湿位涡倾向对暴雨的发生有一定指示作用, 可利用广义湿位涡的异常来识别暴雨的出现。

在研究热带深对流发展时, Gao 等^[91, 92]在国际上首次提出了一个新的对流涡度矢量 CVV 概念 $[\mathbf{V}_{CV} = (\boldsymbol{\xi} \times \nabla \theta_e) / \rho]$, 他们的分析表明 CVV 的垂直分量对对流有重要影响。进一步推导和分析 CVV 垂直分量的倾向方程后, 表明 CVV 的垂直分量主要决定于涡度和云加热的水平梯度的相互作用。Gao 等^[93]同时还引进湿涡度矢量 MVV $[\mathbf{V}_{MV} = (\boldsymbol{\xi} \times \nabla q_v) / \rho]$ 和动力涡度矢量 DVV $[\mathbf{V}_{DV} = (\boldsymbol{\xi} \times \mathbf{V}) / \rho]$ 来分析、研究热带对流, 结果表明, MVV 的垂直分量、DVV 的垂直分量及纬向分量与热带对流都有很好的相关系数, 并推出了 MVV 的垂直分量、DVV 纬向分量及 DVV 垂直分量的倾向方程。Gao 等^[94]甚至还研究了冰相微物理过程对降水和热力过程的影响, 这些研究突破了传统位涡的概念, 更能反映中尺度系统发展特征的新的动力示踪物理量, 为大暴雨强对流发展的研究开拓了新的动力前景。

7 螺旋度的研究

从暴雨的研究和预报实践中得知, 单一的诊断物理量, 如涡度、散度等虽然对天气的发生发展具有一定的指导意义, 但暴雨等灾害性天气过程物理结构极为复杂, 同一次天气过程中结构也有变化。因此, 用简单的单一物理量或几个物理量一起参与进行解释, 其效果都不尽如人意。由于螺旋度是计算水平涡旋在环境场中向垂直方向倾斜时涡旋在雷暴上升气流中的发展趋向, 测量旋转上升气流的垂直风切变, 它可以直接估算发展雷暴的上升气流中涡旋(中气旋)的发展, 所以螺旋度能够较好地刻

画暴雨发生时的物理量空间结构。

1986 年, Lilly^[95, 96] 率先将螺旋度正式引入到强对流风暴研究中。后来, Etling^[97] 讨论总结了大气中存在的几种典型螺旋流, 并指出流体稳定性与螺旋度密切相关。伍荣生等^[98] 推导出完全的螺旋度方程, 并指出若不计摩擦, 在准地转运动中, 大气的螺旋度具有守恒的性质。Wu 等^[99] 对切变热对流扰动中螺旋度的产生以及螺旋度与非线性能量传输之间的关系进行了研究。

由于螺旋度在气象领域是一个相对较新的物理量, 以前我国对其研究不多。1998 年以后, 螺旋度的研究开始引起广泛关注。Xu 等^[100] 推导出完全的螺旋度方程, 并运用到台风螺旋雨带形成的解释中。Tan 等^[101] 讨论、研究了螺旋度在边界层和锋区的动力性质。陆慧娟和高守亭^[102] 从无摩擦的运动方程出发, 利用量纲分析的方法, 导出简化了的螺旋度方程和不同方向上的螺旋度方程, 并对影响它们变化的各因子进行了讨论。分析结果表明, 除了 Lilly^[103] 在 1986 年研究中强调的浮力效应外, 压力梯度与涡度共同作用项和力管项对螺旋度的变化也有重要影响, 甚至比浮力效应更大, 且力管作用、水平压力梯度与水平涡度的共同作用主要影响水平螺旋度, 浮力效应、垂直压力梯度与垂直涡度的共同作用主要影响垂直螺旋度; 螺旋度的输送和大气的辐散、辐合对螺旋度变化的影响较弱; 地转偏向力(无论是在水平方向还是垂直方向)的作用要在系统水平尺度较大时才能体现出来。水平和垂直方向上的螺旋度既相互区别, 在暴雨、强对流天气过程中表现出不同的作用, 但又相互联系。一方面, 水平螺旋度更具预示性, 对预报强风暴有指示意义, 而垂直螺旋度更能反映系统的维持状况和系统发展; 另一方面, 水平螺旋度有助于垂直螺旋度的增长, 而与垂直螺旋度对应的运动可能对水平螺旋度产生影响。将中尺度模式模拟结果和螺旋度计算结合起来有可能提高风暴路径和雨区预报的准确度。韩瑛等^[104] 还分别讨论了切变风的螺旋度和热成风的螺旋度。

在螺旋度的应用研究方面, 陈华等^[105] 将螺旋度引入热带气旋, 对热带涡旋螺旋度的结构特征及其在热带气旋发展过程中的演变过程进行了研究。结果表明, 热带气旋这种具有较强螺旋性的天气系统, 其发展过程也就是螺旋度增强的过程, 螺旋度

对热带气旋稳定过程的维持及其长久的生命期具有重要的作用。Fei 等^[106] 利用强风暴模式成功地模拟了一次强对流风暴过程, 讨论了风暴发展过程中螺旋度和超螺旋度的空间结构和时间演变特征, 以及在强风暴系统的对流发展过程中的动力学作用。螺旋度在对暴雨的诊断分析中也得到应用, 如李耀辉和寿绍文^[107] 利用模式输出的细网格动力协调资料, 根据螺旋度理论分析一次暴雨演变以及对流层低层的中尺度低涡及地面气旋发生发展的原因。结果表明, 正的旋转风螺旋度大值中心及其演变较好地对应和反映了暴雨中心及造成暴雨的中尺度涡旋的发生位置及演变, 较大的螺旋度值是暴雨及低层中尺度低涡和地面气旋系统发生发展的机制之一, 螺旋度的强度变化对暴雨发生有一定的指示意义。对“98.7”特大暴雨过程螺旋度的诊断分析^[108] 表明, 与强暴雨区和切变线低涡相应的是一对符号相反而又紧邻的螺旋度带, 它们的垂直结构是一对符号相反而又互伴的螺旋度柱; 螺旋度及其诸分量的量级是相同的。这表明, 垂直运动的水平切变和水平速度的垂直切变对螺旋度有相同大小的贡献, 也意味着强垂直运动和低空急流对暴雨的发生和发展极其重要。高守亭等^[109] 在考虑中尺度强对流天气系统特征的基础上, 从能够同时考虑旋转、辐散及垂直运动的螺旋度方程出发, 得到中尺度的平衡模式和非平衡方程, 用来诊断非平衡过程破坏和平衡恢复两个阶段, 同时将它们与水平螺旋度和垂直螺旋度联系起来, 做中尺度平衡方程及非平衡流的诊断。由于中尺度的平衡是一个很难的问题, 他们的这个研究在中尺度平衡研究放面迈出了可喜而重要的一步。

8 不稳定性研究

不稳定性可用来判断对流系统发生发展的可能及强度, 是暴雨研究的主要方法之一。早在一百年前, Helmholtz^[110]、Kelvin^[111] 和 Rayleigh^[112] 就研究了切变流中不稳定的必要条件, 得出基本流剖面应有一个拐点。后来这个必要条件由 Fjörtoft^[113] 完善为在流场某处必有 $U(U-U_s) < 0$ 。Lin^[114] 较详细地研究了正压切变流和粘性流的稳定性问题。Howard^[115] 在研究非均匀切变流的稳定性时得到 Howard 半圆定理。郭晓岚^[116] 把 Rayleigh 的结果^[112] 推广到旋转大气中, 得到了大气运动正压不

稳定的必要条件。Charney^[117]和 Eady^[118]提出斜压不稳定理论。Stone^[119]研究了对称不稳定。之后对稳定性的研究越来越多,从线性、弱非线性到非线性,从保守系统到耗散系统。例如,Arnold^[120, 121]首次把变分原理与先验估计方法结合起来,研究了平面上无粘不可压定常流的非线性稳定性问题。

对于不稳定的研究,国内也一直没有停止过。如高守亭和孙淑清^[122]引入理查森数并将其用于中尺度系统稳定性的研究,曾庆存^[123]发展了一种广义变分方法来研究大气的非线性不稳定,陆维松^[124]则研究了摩擦耗散和非线性正压不稳定,而 Gao 等^[125]从波流相互作用的观点研究急流加速诱导低层锋生的不稳定性问题, Mu^[126]研究了准地转流的非线性不稳定。

近年来,关于暴雨过程的不稳定性研究又取得重要进展。

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。之前,主要是从切变不稳定角度来分析长江切变线暴雨的发生,近年来,高守亭等^[127, 128]率先指出:从理论上说,造成切变线上中尺度低值系统的原因,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。涡层不稳定理论考虑了强涡度切变存在时切变线已构成一个涡层,这时切变线的不稳定问题已变为涡层的不稳定问题,因此要考虑由涡层所产生的诱导速度,从理论上得出水平切变线上涡层不稳定必要条件的判据。这就打破了传统的 Kelvin-Helmholtz 研究切变不稳定的观点。周玉淑等^[129]进一步把涡层不稳定理论用于实例分析,结果表明:降水期间大气低层有对流不稳定和对称不稳定能量的积聚,在这两类不稳定条件都基本满足的情况下,涡层不稳定的维持对降水过程中暴雨的发生提供了有利的不稳定环境场,表明环境场的配置制约着切变线上低涡扰动的发展,是造成降水的重要原因之一。

Lu 等^[130]从含摩擦耗散的 f 平面上 Boussinesq 近似下的非线性方程组出发,提出了一种新的广义能量作为 Lyapunov 函数,取消平均量是 (x, z) 的双线性函数的限制,并取平均量是 (x, z) 的任意函数,由此导出一种新的广义非线性对称稳定性判据。此稳定性判据表明:不仅耗散系数必须大于某一临界值,而且同时初始扰动振幅也必须小于另一临界值。由此可见,后一条件对前一条件附加了一个很强的约束,当初始扰动振幅大于某一临界值时,容易出现非线性亚临界对称不稳定,它大大改进了以前同类工作的结果。另外,夏瑛和陆维松^[131]对 1998 年“二度梅”暴雨进行诊断分析,结果表明:非线性亚临界对称不稳定可能是此次梅雨暴雨形成的重要机制,它的增强可能使降水增多。

Brunt-Väisälä 频率(N_m^2)是流体力学和动力气象中应用比较广泛的参数,常用作不稳定判据。 N_m^2 直接影响理查森数(Ri),且常出现在反映流体特性的各种特征数中,如 Rayleigh 数、Froude 数等。以前的研究中,特别是在研究有关中尺度不稳定的问题时,常以 Ri 的大小作为稳定与否的判据,但过去的研究大多注意 Ri 的分母作用,即风速垂直切变的大小,而对 Ri 的分子作用(N_m^2 的大小)的研究不够。实际上 N_m^2 的大小对 Ri 也有很大的影响,特别是在湿过程中。实际大气中受扰动的饱和气块发生凝结后,凝结水会部分脱离气块。以前研究饱和湿大气的 Brunt-Väisälä 频率时都没有考虑凝结水的部分脱离,相当位温(θ_e)也忽略了饱和气块的混合比的作用。刘栋和高守亭^[132]针对这些不足,在假设饱和空气中只存在气液转换条件下,推导出液态水部分脱离气块的、更符合实际情况的 N_m^2 表达式和修正的饱和湿大气 θ_e 表达式。新的 N_m^2 表达式增加了部分脱离气块的液态水的作用项,新的 θ_e 表达式中也包含有饱和气块的混合比,并对有关的表达式分别作了讨论和比较,这为湿大气中对称不稳定的研究奠定了基础。Yang 等^[133]在考虑实际大气非均匀饱和的基础上,还进一步推导了非均匀饱和气流中的理查森数,分析表明这个修改了的理查森数与雨区有很好的对应关系。

9 暴雨的数值模拟研究

在对暴雨的数值模拟方面,由于最近二十年来中尺度数值模拟和预报迅速发展,涌现了 MM4、

MM5、RAMS、ARPS、WRF 等很多中尺度数值模式,对暴雨的模拟也相应得到突飞猛进的进步,准确率有所提高。

随着计算机的发展和数值模拟方法的推广,1998 年大洪水之后,暴雨数值模拟的各个方面都得到了很大发展。例如,在暴雨数值模拟的初始条件方面,贝耐芳和赵思雄^[134, 135]通过对 1998 年“二度梅”特大暴雨的数值模拟,充分认识到初值的重要性,认为如果利用尽可能收集到的资料,包括特征层的资料,则对“98.7”突发性强暴雨的预报会有显著的改善。在对一次暴雨进行数值模拟时,将雷达资料经过处理加入模式中,改变初始湿度场分析,然后做 24 小时数值模拟,并与控制实验作比较。结果表明^[136]:加入雷达资料后的数值模拟预报,由于增强了暴雨区及其邻近区域对流层中低层水汽和辐合上升运动,雨区位置和雨量中心值比控制实验更接近实况。而周兵等^[137]的结果则表明,云迹风资料同化能有效地改善高空风场质量,修正控制试验中模式高空风场对中纬度高空西风急流前沿西风强度的描述,使得模拟的暴雨强度与实际降水分布更加接近。分析认为在暴雨预报业务和科研中,云迹风资料的使用可有效地改善高空风场分布,对提高降水预报质量是一个有效途径,值得进一步尝试。

积云参数化是数值预报模式中最重要的一种非绝热加热物理过程之一。积云常为大尺度环流强迫和控制,又通过其感热、潜热和动量输送等反馈作用影响大尺度环流,并直接影响着大气温度、湿度场的垂直结构;此外,积云是大暴雨的直接制造者。积云参数化直接影响着降水特别是强降水的预报,同时也对大尺度环流的预报起重要的作用。因此,它是数值预报研究和日常业务工作的重要课题。Ping 等^[138]在研究英国气象局的 Gregory 积云参数化方案特征的基础上,根据我国区域降水的特点,发展和改进了 Gregory 积云参数化方案。首先,在总体云群模式中,直接考虑了低层大尺度辐合对积云对流的影响,即在云模式中,加入了有组织的卷入和卷出;其次,调整了积云对流初始的质量通量并考虑了过冷水存在对饱和水汽压的影响;最后,调整了向下拖曳气流的强度。在改进 Gregory 积云参数化方案后,对我国近年来典型年份的夏季降水进行了预报实验,结果表明:发展和改进

后的 Gregory 方案能较好地模拟出我国的降水形势,取得了较好的预报效果。利用非静力 MM5 模式,分析不同积云对流参数化方案对华南暖区暴雨数值预报的不确定性影响,进行中尺度暴雨模式扰动集合预报试验^[139],结果表明,单一的确定性预报在暴雨落区和强度方面的可信度不稳定,集合产品能给华南暴雨过程提供更有价值的指导预报,具有较高的应用价值。此外,陈静等^[140]还研究了非绝热物理过程对中国暴雨动力和热力场预报的影响,深入分析了对流参数化方案在中尺度暴雨预报中的作用,讨论了利用模式扰动方法开展中国暴雨集合预报的可行性。结果表明,在短期数值预报中,非绝热物理过程对高度场预报影响较小,但边界层方案和对流参数化方案对产生暴雨的 3 个基本条件即水汽通量散度、垂直速度、不稳定层结的影响很明显。不同对流参数化方案所预报的中尺度热力、动力场离差的结构特征与所预报降水的离差特征相似,且主要是在模式积分初期迅速增加,其后即趋于稳定。对中国热力场较均匀的暴雨过程,可以通过扰动模式的边界层和对流参数化方案,构造集合预报模式。

另外,通过对造成地面降水的云进行模拟和分析^[141],得出:地面降水率可由公式表示成云和水汽源汇之和,水汽汇由水汽局地变化、水汽辐合、地面蒸发组成,而云的源汇主要由水汽凝结物的局地变化项决定。尽管水汽汇的变化可以解释地面降水的绝大部分,云源汇对地面降水率的影响仍然非常明显。当地面降水率增加 0~1 mm/h 时,云源汇的强度增大,而当地面降水率增加 1~2 mm/h 时,云源汇的强度减小。云源汇可进一步分成水滴和冰晶凝结物,分析表明,冰晶凝华物比水滴凝结物对云变化的贡献更大,它们的生长可以影响地面降水率 1~2 mm/h。Gao 等^[142]的分析表明,质量加权平均方案中垂直热量对流与凝结潜热、可降水方案中垂直湿对流与可降水存在着很好的平衡关系。

通过分别用 WRF 与 MM5 对 1998 年的三次暴雨过程进行数值模拟,孙健等^[143]得出:与 MM5 对比,WRF 更好地模拟了引起这几次降水过程中的主要天气系统的位置和移动过程,从而使 WRF 模拟的降水落区好于 MM5。但在这几次过程中 WRF 模拟的降水都比 MM5 小,也小于实况值,分析得知,WRF 模拟的垂直速度明显小于 MM5 的模拟

结果,这可能是导致模拟的降水偏小的原因之一。王春明等^[144]还利用三维非静力平衡中尺度/云模式对 1999 年 6 月 23 日 0800UTC 到 24 日 0800UTC 的江淮地区一次梅雨锋系统降水过程进行了五种不同水平分辨率的数值模拟试验。模拟结果表明,提高模式水平分辨率,明显提高了大到暴雨的定量预报(大于 25 mm 和大于 50 mm)的精度。但研究发现,这种精度的改进随着水平分辨率的进一步提高存在明显的阈界,即在水平分辨率提高到 18 km 以后,再提高水平分辨率,对暴雨预报成功率的改进幅度不大,因此,对于梅雨锋雨带中尺度强降水的业务预报,将模式水平分辨率提高到 18 km 比较适宜。Peng 等^[145]利用 MM5 模式再现了“98.7”武汉及其临近地区 β 中尺度对流系统的时空四维结构,在此基础上讨论 β 中尺度对流系统的触发机制。应用位涡反演理论对比分析对流层下层、中层及上层位涡扰动对 β 中尺度对流系统形成的作用,得出对流层下层位涡扰动为该 β 中尺度对流系统爆发的主要因子,进而分析指出,在大气为条件性不稳定层结情况下,西南低空急流与重力波相互作用导致 β 中尺度对流系统的爆发。

杨帅和高守亭^[146]利用 WRF 模式对江淮流域一次典型的梅雨锋暴雨过程进行了数值模拟,在模拟结果比较可信的基础上,利用模式输出资料分析了三维散度的时空分布特征与降水关系,发现对流层中低层的三维散度非零区与雨带对应较好,其移动趋势也与雨带移动趋势一致。暴雨中心与三维散度极值中心重合,降水量的增减与三维散度强度变化一致。他们的研究^[146]指出,三维散度之所以能较好地诊断降水,是因为对流层低层的水汽蒸发和对流层高层的水汽凝结形成云,而云导致的质量强迫对三维散度的这种上负下正的分布又有正反馈作用,而且还为降水的发生发展提供了有利条件。利用有限区域流函数和速度势的有效计算技术和 MM5 的模拟结果,周玉淑等^[147]和曹洁等^[148]对长江流域梅雨锋上的降水系统以及华北地区的降水系统进行了旋转场和无旋场的较准确分离,结果表明分解后的旋转流场能更准确地定位低涡中心,而无旋场能更准确地反映辐合辐散中心,这表明有限区域风场分解能更准确地定位暴雨中尺度系统。Sheng 等^[149]和盛春岩等^[150]将国内新一代多普勒雷达(CINRAD)反射率及径向风资料直接用于中尺

度数值模式 ARPS 进行模拟,通过一次华北地区暴雨过程的模拟对比试验,分析了雷达资料对初始场的改进效果及其对模拟结果的影响。对比分析表明,加入雷达资料后明显改进了初始几个小时的模拟结果。所以,雷达资料加入模式对于临近预报水平的提高有显著意义。

总之,随着数值模式的发展,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暴雨系统相互联系的天气过程,使得分析中小尺度系统的结构和发生发展过程成为可能。

10 小结

近几年来,我国气象研究者在中尺度暴雨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。本文只是总结了自 1998 年至今我国气象科研人员在暴雨中尺度动力学分析以及相关的数值模拟和诊断分析等方面的研究成果。由于水平所限,挂一漏万,疏漏之处在所难免。

然而,迄今为止,对暴雨的发生发展及移动变化规律等尚有许多缺乏客观认识的方面,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 and 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,还需要广大科研工作者付出艰苦和不懈的努力。

参考文献 (References)

- [1] 陶诗言,等. 中国之暴雨. 北京: 科学出版社, 1979. 225 pp
Tao Shiyan, et al. *The Torrential Rain in China* (in Chinese). Beijing: Science Press, 1979. 225 pp
- [2] 陶诗言,倪允琪,赵思雄,等. 1998 夏季中国暴雨形成机理与预报研究. 北京: 气象出版社, 2001. 184pp
Tao Shiyan, Ni Yunqi, Zhao Sixiong, et al. *Study on Formation Mechanism and Forecast of Torrential Rain in China in 1998*. Beijing: China Meteorological Press, 2001. 184pp
- [3] 赵思雄,陶祖钰,孙建华,等. 长江流域梅雨锋暴雨机理的分析研究. 见: 倪允琪,周秀骥主编. 国家重点基础发展规划项目“我国重大天气灾害形成机理与预测理论研究”研究专著系列丛书之一. 北京: 气象出版社, 2004. 282pp
Zhao Sixiong, Tao Zuyu, Sun Jianhua, et al. Analysis study on mechanism of Meiyu front torrential rain over Yangtze River. In: *Study on Formation Mechanism and Prediction*

- Theory of Key Weather Disaster* (I) (in Chinese). Ni Yunqi, Zhou Xiuji, Eds. Beijing: China Meteorological Press, 2004. 282pp
- [4] 伍荣生, 高守亭, 谈哲敏, 等. 锋面过程与中尺度扰动. 见: 倪允琪, 周秀骥主编. 国家重点基础研究发展规划项目《我国重大天气灾害形成机理与预测理论研究》研究专著系列丛书之三. 北京: 气象出版社, 2004. 170pp
- Wu Rongsheng, Gao Shouting, Tan Zhemín, et al. Front process and meso-scale distribution. In: *Study on Formation Mechanism and Prediction Theory of Key Weather Disaster* (III) (in Chinese). Ni Yunqi, Zhou Xiuji, Eds. Beijing: China Meteorological Press, 2004. 282pp
- [5] Ninomiya K, Akiyama T. Multiscale features of Baiyu, the summer monsoon over Japan and the East Asia. *J. Meteor. Soc. Japan*, 1992, **70**: 467~495
- [6] Zhang Shunli, Tao Shiyan, Zhang Qingyun, et al. Large and meso- α scale characteristics of intense rainfall in the mid-and lower reaches of the Yangtze River. *Chinese Science Bulletin*, 2002, **47** (9): 779~786
- [7] Bosart L F. The Texas coastal rainstorm of 17-21 September 1979: An example of synoptic mesoscale interaction. *Mon. Wea. Rev.*, 1984, **112** (6): 1108~1133
- [8] 陶诗言, 张庆云, 张顺利. 夏季北太平洋副热带高压系统的活动. *气象学报*, 2001, **59** (6): 747~758
- Tao Shiyan, Zhang Qingyun, Zhang Shunli. An observation study on the behavior of the subtropical high over the Pacific in summer. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2001, **59** (6): 747~758
- [9] 张庆云, 陶诗言, 张顺利. 夏季长江流域暴雨洪涝灾害的天气气候条件. *大气科学*, 2003, **27** (6): 1018~1030
- Zhang Qingyun, Tao Shiyan, Zhang Shunli. The persistent heavy rainfall over the Yangtze River valley and its associations with the circulations over East Asian during summer. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2003, **27** (6): 1018~1030
- [10] 杨秋明. 长江下游旱涝与夏半年欧亚环流 30~60 天振荡的年际变化. *气象学报*, 2001, **59** (3): 318~326
- Yang Qiuming. The drought/flood in the low research of Yangtze River and the interannual variations of the 30-60 day oscillation of Eurasian circulation during summer half year. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2001, **59** (3): 318~326
- [11] 陈红, 赵思雄. 第一次全球大气研究计划试验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
- Chen Hong, Zhao Sixiong. Heavy rainfall in South China and related circulation during first GARP global experiment period. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2000, **24** (2): 238~252
- [12] 陈红, 赵思雄. 海峡两岸及邻近地区暴雨试验 (HUAMEX) 期间暴雨过程及环流特征研究. *大气科学*, 2004, **28** (1): 32~47
- Chen Hong, Zhao Sixiong. Heavy rainfalls in South China and related circulation during HUAMEX period. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2004, **28** (1): 32~47
- [13] Chen George Tai-Jen, Jiang Zhihong, Wu Ming-Chin. Spring heavy rain events in Taiwan during warm episodes and the associated large-scale conditions. *Mon. Wea. Rev.*, 2003, **131** (7): 1173~1188
- [14] Jiang Zhihong, Chen George Tai-Jen, Wu Ming-Chin. Large-scale circulation patterns associated with heavy spring rain events over Taiwan in strong ENSO and non-ENSO years. *Mon. Wea. Rev.*, 2003, **131** (8): 1769~1782
- [15] Zhou Yushu, Deng Guo, Gao Shouting, et al. The wave train characteristics of teleconnection caused by the thermal anomaly of the underlying surface of the Tibetan Plateau. Part I: Data analysis. *Adv. Atmos. Sci.*, 2002, **19** (4): 583~593
- [16] 周玉淑, 高守亭, 邓国, 等. 青藏高原冬春季地温异常对长江中下游夏季旱涝影响的研究. *南京气象学院学报*, 2002, **25** (5): 611~619
- Zhou Yushu, Gao Shouting, Deng Guo, et al. Effect of the winter/spring soil temperature of the Tibetan Plateau on the summer precipitation over the mid-lower reaches of the Yangtze River. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology* (in Chinese), 2002, **25** (5): 611~619
- [17] 黄嘉佑, 杨扬, 周国良. 我国暴雨的 500 hPa 高度信号场分析. *大气科学*, 2002, **26** (2): 221~229
- Huang Jiayou, Yang Yang, Zhou Guoliang. Jump phenomena in the 500 hPa signal field and the occurrence of China's heavy rainfalls. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2002, **26** (2): 221~229
- [18] 倪允琪, 周秀骥. 中国长江中下游梅雨锋暴雨形成机理以及监测与预测理论和方法研究. *气象学报*, 2004, **62** (5): 647~662
- Ni Yunqi, Zhou Xiuji. Study for formation mechanism of heavy rainfall within the Meiyu front along the middle and downstream of Yangtze river and theories and methods of their detection and prediction. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2004, **62** (5): 647~662
- [19] 谈哲敏, 伍荣生. Ekman 动量流的动力特征与锋生. *中国科学 (B)*, 1990, **12**: 1322~1332
- Tan Zhemín, Wu rongsheng. Dynamical characters of Ekman flow and frontogenesis. *Science in China (B)* (in Chinese), 1990, **12**: 1322~1332
- [20] 肖庆农, 伍荣生, 张颖. 地形的动力作用与冷锋锋生研究. *大气科学*, 1997, **21** (3): 289~296
- Xiao Qingnong, Wu Rongsheng, Zhang Ying. Dynamic influence of orography on frontogenesis. *Chinese Journal of At-*

- mospheric Sciences* (in Chinese), 1997, **21** (3): 289~296
- [21] Williams R T. Atmospheric frontogenesis, a numerical experiments. *J. Atmos. Sci.*, 1967, **24**: 12~96
- [22] Hoskins B J, Bretherton F P. Atmospheric frontogenesis models; Mathematical formulation and solution. *J. Atmos. Sci.*, 1972, **29**: 11~37
- [23] 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
- Zeng Qingcun. *Maths and Physics Bases of Numerical Weather Forecast* (in Chinese). Beijing: Science Press, 1979. 237~314
- [24] 高守亭, 陶诗言. 高空急流加速与低层锋生. 大气科学, 1991, **15** (2): 11~21
- Gao Shouting, Tao Shiyao. The lower layer frontogenesis induced by the acceleration of upper jet stream. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica)* (in Chinese), 1991, **15** (2): 11~21
- [25] Wu Rongsheng. A numerical study of geostrophic adjustment and frontogenesis. *Adv. Atmos. Sci.*, 1998, **15** (2): 179~192
- [26] 余志豪, 陆汉城. 梅雨锋暴雨的中尺度雨带和雨锋团. 中国科学 (B), 1988, **9**: 1002~1010
- Yu Zhihao, Lu Hancheng. Mesoscale rainbelt and rain cluster of the Meiyu front. *Science in China (B)* (in Chinese), 1988, **9**: 1002~1010
- [27] 朱民, 陆汉城, 余志豪. 梅雨锋 α 中尺度气旋发展中的正反馈机制研究. 大气科学, 1998, **22** (5): 763~770
- Zhu Min, Lu Hancheng, Yu Zhihao. Study of positive feedback mechanism for meso- α scale cyclone growing on Meiyu front. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica)* (in Chinese), 1998, **22** (5): 763~770
- [28] 张小玲, 陶诗言, 张顺利. 梅雨锋上的三类暴雨. 大气科学, 2004, **28** (2): 187~205
- Zhang Xiaoling, Tao Shiyao, Zhang Shunli. Three types of heavy rainstorms associated with the Meiyu front. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2004, **28** (2): 187~205
- [29] Qian Jian-Hua, Tao Wei-Kuo, Lau K.-M. Mechanisms for torrential rain associated with the Mei-Yu development during SCS-MEX 1998. *Mon. Wea. Rev.*, 2004, **132** (1): 3~27
- [30] Gao Shouting, Zhou Yushu, Lei Ting. Structural features of the Meiyu front system. *Acta Meteorologica Sinica*, 2002, **16** (2): 195~204
- [31] Zhou Yushu, Gao Shouting, Shen S S P. A Diagnostic study of the structural and dynamical features of the Meiyu front system. *J. Meteor. Soc. Japan*, 2004, **81** (6): 1565~1576
- [32] Zhou Yushu, Deng Guo, Lei Ting, et al. The thermodynamic and dynamical features of double front structure during 21-31 July 1998 in China. *Adv. Atmos. Sci.*, 2005, **22** (6): 924~935
- [33] Zhou Yushu, Deng Guo, Cheng Huailiang, et al. Synoptic features of the second Meiyu period in 1998 over China. *Acta Meteorologica Sinica*, 2005, **19** (1): 31~43
- [34] Zhou Yushu, Deng Guo, Pu Yifen. Analysis of moisture transport and budget over the Yangtze River and the Huanhe River valleys during the heavy Meiyu period in 2003. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2005, **29** (4): 339~352
- [35] 周玉淑, 高守亭, 邓国. 江淮流域 2003 年强梅雨期的水汽输送特征分析. 大气科学, 2005, **29** (2): 195~204
- Zhou Yushu, Gao Shouting, Deng Guo. A diagnostic study of water vapor transport and budget during heavy precipitation over the Changjiang River and the Huanhe River basins in 2003. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2005, **29** (2): 195~204
- [36] 廖捷, 谈哲敏. 一次梅雨锋特大暴雨过程的数值模拟研究: 不同尺度天气系统的影响作用. 气象学报, 2005, **63** (5): 771~789
- Liao Jie, Tan Zhemin. Numerical simulation of a heavy rainfall event along the Meiyu front: Influences of different scale weather systems. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2005, **63** (5): 771~789
- [37] 刘黎平, 阮征, 覃丹宇. 长江流域梅雨锋暴雨过程的中尺度结构个例分析. 中国科学 (D), 2004, **34** (12): 1193~1201
- Liu Liping, Ruan Zheng, Qin Danyu. Case analysis of meso-scale structures during Meiyu front torrential rain over the Yangtze River. *Science in China (D)* (in Chinese), 2004, **34** (12): 1193~1201
- [38] 隆霄, 程麟生. “99.6” 梅雨锋暴雨对动量输送特征的诊断分析. 气象学报, 2004, **62** (4): 439~448
- Long Xiao, Cheng Linsheng. Diagnostic analysis for characters of convective momentum transport on ‘99.6’ Meiyu front transtorm. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2004, **62** (4): 439~448
- [39] 黄艳芳, 郑永光. 1998 年二度梅雨锋的演变及结构特征. 北京大学学报 (自然科学版), 2004, **40** (5): 797~805
- Huang Yanfang, Zheng Yongguang. Evolution and structures of Meiyu-front during the secondary Meiyu-season in 1998. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinesis* (in Chinese), 2004, **40** (5): 797~805
- [40] 叶笃正, 陶诗言, 李麦村. 六月和十月大气环流的突变现象. 气象学报, 1958, **29**: 249~263
- Ye Duzheng, Tao Shiyao, Li Maicun. Break phenomenon of atmosphere circulation on June and October. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1958, **29**: 249~263
- [41] 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
- Tao Shiyao, Zhao Yujia, Chen Xiaomin. The Meiyu in China. In: *Thesis of National Meteorological Administration* (in Chinese), No. 4, 1958. 36pp
- [42] 高守亭, 陶诗言, 丁一汇. 表征波与流相互作用的广义 E-P 通量. 中国科学 (B 辑), 1989, **33**: 774~784

- Gao Shouting, Tao Shiyao, Ding Yihui. The generalized E-P flux of wave-mean flow interactions. *Science in China* (Series B) (in Chinese), 1989, **33**, 774~784
- [43] Gao Shouting, Tao Shiyao, Ding Yihui. The generalized E-P flux of wave mean flow interactions. *Science in China* (B), 1990, **33** (6): 704~715
- [44] Pfeffer R L. A study of eddy-induced fluctuations of the zonal-mean wind using convective and transformed Eulerian diagnostics. *J. Atmos. Sci.*, 1992, **49**: 1036~1050
- [45] 徐海明, 何金海, 周兵. “倾斜”高空急流轴在大暴雨过程中的作用. 南京气象学院学报, 2001, **24** (2): 155~161
Xu Haiming, He Jinhai, Zhou Bing. Role of the NW-SE oriented upper-tropospheric jet axis in rainstorm development. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology* (in Chinese), 2001, **24** (2): 155~161
- [46] 周兵, 韩桂荣, 何金海. 高空西风急流对长江中下游暴雨影响的数值试验. 南京气象学院学报, 2003, **26** (5): 595~604
Zhou Bing, Han Guirong, He Jinhai. Numerical experiment of effects of the upper level westerly jet on a torrential rain over the middle-lower reaches of the Yangtze River. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology* (in Chinese), 2003, **26** (5): 595~604
- [47] 丁治英, 张兴强, 何金海, 等. 非纬向高空急流与远距离台风中尺度暴雨的研究. 热带气象学报, 2001, **17** (2): 144~152
Ding Zhiying, Zhang Xingqiang, He Jinhai, et al. The study of storm rainfall caused by interaction between the non-zonal high level jet streak and the far distant typhoon. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 2001, **17** (2): 144~152
- [48] 王小曼, 丁治英, 张兴强. 梅雨暴雨与高空急流的统计与动力分析. 南京气象学院学报, 2002, **25** (1): 111~117
Wang Xiaoman, Ding Zhiying, Zhang Xingqiang. Statistic and dynamic analysis to the relation between Meiyu storm and high level jet. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology* (in Chinese), 2002, **25** (1): 111~117
- [49] Chen George Tai-Jen, Wang Chung-Chieh, Lin David Tai-Wei. Characteristics of low-level jets over northern Taiwan in Mei-Yu season and their relationship to heavy rain events. *Mon. Wea. Rev.*, **133** (1): 20~43
- [50] 王蕾, 张文龙, 周军. 中国西南低空急流活动的统计分析. 南京气象学院学报, 2003, **26** (6): 797~805
Wang Lei, Zhang Wenlong, Zhou Jun. Statistic analysis on the south-westerly LLJ in China. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology* (in Chinese), 2003, **26** (6): 797~805
- [51] 朱乾根, 周伟灿, 张海霞. 高低空急流耦合对长江中游强暴雨形成的机理研究. 南京气象学院学报, 2001, **24** (3): 308~314
Zhu Qian'gen, Zhou Weican, Zhang Haixia. Mechanism of the formation of torrential rain by coupled high/low level jets over the middle reaches of the Yangtze River. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology* (in Chinese), 2001, **24** (3): 308~314
- [52] 张维桓, 董佩明, 沈桐立. 一次大暴雨过程中急流次级环流的激发及作用. 大气科学, 2000, **24** (1): 47~57
Zhang Weihuan, Dong Peiming, Shen Tongli. Triggering and effects of the secondary circulation associated with upper and low-level jets in a heavy rainfall process. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2000, **24** (1): 47~57
- [53] 何华, 孙绩华. 高低空急流在云南大范围暴雨过程中的作用及共同特征. 高原气象, 2004, **23** (5): 629~634
He Hua, Sun Jihua. The role of upper and lower tropospheric jet in Yunnan rainstorm occurrence and their common characteristics. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 2004, **23** (5): 629~634
- [54] 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
Zhao Sixiong, Liu Suhong, Liu Mingyang. The meso-scale analysis of cold vortex in Beijing in summer. *Study on Torrential Rain and Heavy Convective Weather* (in Chinese). Beijing: Sciences Press, 1980
- [55] Wang Bin, Isidoro Orlanski. Study of a heavy rain vortex formed over the eastern flank of the Tibetan Plateau. *Mon. Wea. Rev.*, **115** (7): 1370~1393
- [56] 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
Gao Shouting. The circulation structure of the vortex within the planet boundary layer. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1983, **41** (3): 285~295
- [57] 罗四维, 何梅兰, 刘晓东. 关于夏季青藏高原低涡的研究. 中国科学 (B), 1993, **23** (7): 778~784
Luo Siwei, He Meilan, Liu Xiaodong. Study on Tibetan Plateau vortex in summer. *Science in China* (B) (in Chinese), 1993, **23** (7): 778~784
- [58] 陈忠明, 徐茂良, 闵文彬, 等. 1998 年夏季西南低涡活动与长江上游暴雨. 高原气象, 2003, **22** (2): 162~167
Chen Zhongming, Xu Maoliang, Min Wenbin, et al. Relationship between abnormal activities of southwest vortex and heavy rain the upper reach of Yangtze River during summer of 1998. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 2003, **22** (2): 162~167
- [59] 陈忠明, 黄福均, 何光碧. 热带气旋与西南低涡相互作用的个例研究. 大气科学, 2002, **26** (3): 352~360
Chen Zhongming, Huang Fujun, He Guangbi. A case study of interactions between the tropical cyclone and the southwest vortex. Part I: Diagnostic analysis. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2002, **26** (3): 352~360
- [60] 程麟生, 冯伍虎. “987” 突发大暴雨及中尺度低涡结构的分析和数值模拟. 大气科学, 2001, **25** (4): 465~478

- Cheng Linsheng, Feng Wuhu. Analyses and numerical simulation on an abrupt heavy rainfall and structure of a mesoscale vortex during July 1998. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2001, **25** (4): 465~478
- [61] 程麟生, 冯伍虎. “98.7”暴雨 β 中尺度低涡生成发展结构演变: 双向四重嵌套网格模拟. *气象学报*, 2003, **61** (4): 385~395
- Cheng Linsheng, Feng Wuhu. Structural evolution of the genesis and development on meso- β vortex for the “98.7” heavy rainfall: Simulation of two ways with quartet nested grid. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2003, **61** (4): 385~395
- [62] 冯伍虎, 程麟生. “98.7”突发性特大暴雨中尺度切变线低涡发展的涡源诊断. *高原气象*, 2002, **21** (5): 447~456
- Feng Wuhu, Cheng Linsheng. Vorticity source diagnoses for the development of mesoscale low vortex with shearline during “98.7” abruptly extraordinary heavy rainstorm. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 2002, **21** (5): 447~456
- [63] 徐亚梅, 高坤. 1998年7月22日长江中游中 β 低涡的数值模拟及分析. *气象学报*, 2002, **60** (1): 85~95
- Xu Yamei, Gao Kun. Simulation and analysis of meso- β vortex over middle reaches of the Yangtze River on 22 July 1998. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2002, **60** (1): 85~95
- [64] 高坤, 徐亚梅. 1999年6月下旬长江中下游梅雨锋低涡扰动的结构研究. *大气科学*, 2001, **25** (6): 740~756
- Gao Kun, Xu Yamei. A simulation study of structure of mesovortices along Meiyu front during 22 - 30 June 1999. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2001, **25** (6): 740~756
- [65] 隆霄, 程麟生. “99.6”梅雨锋暴雨低涡切变线的数值模拟和分析. *大气科学*, 2004, **28** (3): 342~356
- Long Xiao, Cheng Linsheng. Numerical simulation and analysis for “99.6” Meiyu front rainstorm and the low vortex with shear line. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2004, **28** (3): 342~356
- [66] 陈丽芳, 高坤, 徐亚梅. 梅雨锋演变与低涡发展的联系. *浙江大学学报 (理学版)*, 2004, **31**: 103~109
- Chen Lifang, Gao Kun, Xu Yamei. Relationship between the evolvement of Meiyu front and the vortex along it. *Journal of Zhejiang University* (Sciences Edition), 2004, **31**: 103~109
- [67] 孙力, 安刚. 1998年松嫩流域东北冷涡大暴雨过程的诊断分析. *大气科学*, 2001, **25** (3): 342~354
- Sun Li, An Gang. A diagnostic study of northeast cold vortex heavy rain over the Songhuajiang - Nenjiang River basin in the summer of 1998. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2001, **25** (3): 342~354
- [68] 周秀骥, 罗哲贤, 高守亭. 涡旋自组织的两类可能机制. *中国科学 (D辑)*, 2006, **36** (2): 201~208
- Zhou Xiuji, Luo Zhexian, Gao Shouting. Two possible mechanisms for vortex self-organization. *Science in China (Series D)* (in Chinese), 2006, **36** (2): 201~208
- [69] Luo Zhexian, Zhou Xiuji, Gao Shouting. Two possible mechanisms for vortex self-organization. *Science in China (D)*, 2006, **49** (2): 202~211
- [70] Rossby C G. Planetary flow patterns in the atmosphere. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1940, **66** (Suppl.): 68~87
- [71] Ertel H. Ein Neuer gydrodynamischer Wirbelsatz. *Meteor. Z.*, 1942, **59**: 277~281
- [72] Kleinschmidt E. Die Entstehung einer Hohenzyklone uber Nordamerika. *Tellus*, 1955, **7**: 96~110
- [73] Hoskins B J, McIntyre M E, Robertson A W. On the use and significance of isentropic potential vorticity maps. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1985, **111**: 877~946
- [74] 吴国雄, 蔡雅萍, 唐晓菁. 湿位涡和倾斜涡度发展. *气象学报*, 1995, **53** (3): 387~405
- Wu Guoxiong, Cai Yaping, Tang Xiaojing. Moist potential vorticity and slantwise vorticity development. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1995, **53** (3): 387~405
- [75] 吴国雄, 蔡雅萍. 风垂直切变和下滑倾斜涡度发展. *大气科学*, 1997, **21** (3): 273~282
- Wu Guoxiong, Cai Yaping. Vertical wind shear and downsliding slantwise vorticity development. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica)* (in Chinese), 1997, **21** (3): 273~282
- [76] 吴国雄, 刘还珠. 全型垂直涡度倾向方程和倾向涡度方程发展. *气象学报*, 1999, **57** (1): 1~15
- Wu Guoxiong, Liu Huanzhu. Complete form of vertical vorticity tendency equation and slantwise vorticity development. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1999, **57** (1): 1~15
- [77] 吴国雄. 全型涡度方程和经典涡度方程比较. *气象学报*, 2001, **59** (4): 385~392
- Wu Guoxiong. Comparison between the complete-form vorticity equation and the traditional vorticity equation. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2001, **59** (4): 385~392
- [78] 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
- Gu hongdao, Qain Zheng'an. Discuss of the moist source/sink term in mass conservative of numerical model. *Chinese Science Bulletin* (in Chinese), 1990, **22**: 1721~1724
- [79] Gao Shouting, Lei Ting, Zhou Yushu. Moist potential vorticity anomaly with heat and mass forcing in torrential rain systems. *Chinese Physics Letters*, 2002, **19** (6): 878~880
- [80] 高守亭, 雷霆, 周玉淑, 等. 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): 662~669
- Gao Shouting, Lei Ting, Zhou Yushu, et al. Diagnostic analysis of moist potential vorticity anomaly in tropical rain systems. *Quarterly Journal of Applied Meteorology* (in Chinese), 2002, **13** (6): 662~669
- [81] 邓国, 周玉淑, 崔晓鹏. 2003年梅雨期湿位涡异常诊断分

- 析. 中国科学院研究生院学报, 2005, **22**: 712~719
- Deng Guo, Zhou Yushu, Cui Xiaopeng. A diagnosis of moist potential vorticity anomaly during Meiyu period in 2003. *Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Sciences* (in Chinese), 2005, **22**: 712~719
- [82] 周玉淑, 邓国, 雷霆. 湿位涡的保守性原理及其应用. 中国科学院研究生院学报. 2006, **23**: 692~700
- Zhou Yushu, Deng Guo, Lei Ting. Impermeability of moist potential vorticity substance and its application. *Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Sciences* (in Chinese), 2006, **23**: 692~700
- [83] Cui Xiaopeng, Gao Shouting, Wu Guoxiong. Moist potential vorticity and up-sliding slantwise vorticity development. *Chinese Physics Letters*, 2003, **20** (1): 167~169
- [84] 崔晓鹏, 吴国雄, 高守亭. 西大西洋锋面气旋过程的数值模拟和等熵分析. 气象学报, 2002, **60** (4): 385~399
- Cui Xiaopeng, Wu Guoxiong, Gao Shouting. Numerical simulation and isentropic analysis of frontal cyclones over the western Atlantic ocean. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2002, **60** (4): 385~399
- [85] 蒙伟光, 王安宇, 李江南, 等. 2004 年 5 月华南暴雨中尺度对流系统的形成及湿位涡分析. 大气科学, 2004, **28** (3): 330~341
- Meng Weiguang, Wang Anyu, Li Jiangnan, et al. Moist potential vorticity analysis of the heavy rainfall and mesoscale convective systems in South China. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2004, **28** (3): 330~341
- [86] 寿绍文, 李耀辉, 范可. 暴雨中尺度气旋发展的等熵面位涡分析. 气象学报, 2001, **59** (5): 560~568
- Shou Shaowen, Li Yaohui, Fan Ke. Isentropic potential vorticity analysis of the mesoscale cyclone development in a heavy rain process. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2001, **59** (5): 560~568
- [87] Gao S, Wang X, Zhou Y. Generation of generalized moist potential vorticity in a frictionless and moist adiabatic flow. *Geophys. Res. Lett.*, 2004, **31**, L12113, doi: 10.1029/2003GL019152
- [88] Gao Shouting, Zhou Yushu, Lei Ting, et al. Analyses of hot and humid weather in Beijing city in summer and its dynamical identification. *Science in China* (D), 2005, **48** (Suppl. II): 128~137
- [89] 高守亭, 周玉淑, 雷霆, 等. 北京城市夏季高温高湿天气过程分析及动力识别水. 中国科学 (D 辑), 2005, **35** (增刊): 107~114
- Gao Shouting, Zhou Yushu, Lei Ting, et al. Analyses of hot and humid weather in Beijing city in summer and its dynamical identification. *Science in China* (D) (in Chinese), 2005, **35** (Suppl. 2): 107~114
- [90] 周玉淑, 曹洁, 王东海. 非均匀饱和广义湿位涡在暴雨分析与预测中的应用. 应用气象学报, 2007, **18**: 817~822
- Zhou Yushu, Cao Jie, Wang Donghai. The application of generalized moist potential vorticity in non-uniformly saturated atmosphere to analyses and forecast of torrential rain. *Quarterly Journal of Applied Meteorology* (in Chinese), 2007, **18**: 817~822
- [91] Gao S, Ping F, Li X, et al. A convective vorticity vector associated with tropical convection: A two-dimensional cloud-resolving modeling study. *J. Geophys. Res.*, 2004, **109**, D14106, doi: 10.1029/2004JD004807
- [92] Gao S, Li X, Tao W-K, et al. Convective and moist vorticity vectors associated with tropical oceanic convection: A three-dimensional cloud-resolving model simulation. *J. Geophys. Res.*, 2007, **112**: doi: 10.1029/2006JD007179
- [93] Gao S, Cui X, Zhou Y, et al. A modeling study of moist and dynamic vorticity vectors associated with two-dimensional tropical convection. *J. Geophys. Res.*, 2005, **110**, D17104, doi: 10.1029/2004JD005675
- [94] Gao S, Ran L, Li X. Impacts of ice microphysics on rainfall and thermodynamic processes in the tropical deep convective regime: A 2D cloud-resolving modeling study. *Mon. Wea. Rev.*, 2006, **134** (10): 3015~3024
- [95] Lilly D K. The structure, energetics and propagation of rotating convective storms. Part I: Energy exchange with the mean flow. *J. Atmos. Sci.*, 1986, **43**: 113~125
- [96] Lilly D K. The structure, energetics and propagation of rotating convective storms. Part II: Helicity and storm stabilization. *J. Atmos. Sci.*, 1986, **43**: 126~140
- [97] Etling D. Some aspects of helicity in atmosphere flows. *Beitr. Phys. Atmos.*, 1985, **58**: 88~100
- [98] 伍荣生, 谈哲敏. 广义涡度与位势涡度守恒定律及应用. 气象学报, 1989, **47** (4): 436~442
- Wu Rongsheng, Tan Zheming. Conservative laws on generalized vorticity and potential vorticity and its application. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1989, **47** (4): 436~442
- [99] Wu W S, Lilly D K, Kerr R M. Helicity and thermal convection with shear. *J. Atmos. Sci.*, 1992, **49**: 1800~1809
- [100] Xu Yamei, Wu Rongsheng. The conservation of helicity in hurricane Andrew (1992) and the formation of the spiral rainband. *Adv. Atmos. Sci.*, 2003, **20** (6): 940~950
- [101] Tan Zheming, Wu Rongsheng. Helicity dynamics of atmospheric flow. *Adv. Atmos. Sci.*, 1994, **11** (2): 175~188
- [102] 陆慧娟, 高守亭. 螺旋度及螺旋度方程的讨论. 气象学报, 2003, **61** (6): 684~691
- Lu Huijuan, Gao Shouting. On the helicity and the helicity equation. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2003, **61** (6): 684~691
- [103] Lilly D. K. The structure, energetics and propagation of rotating convective storms. Part II: Helicity and storm stabilization. *J. Atmos. Sci.*, **43**: 126~140
- [104] Hang Ying, Wu Rongsheng, Fang Juan. Shearing wind hel-

- icity and thermal wind helicity. *Adv. Atmos. Sci.*, 2006, **23** (4): 504~512
- [105] 陈华, 谈哲敏. 热带气旋的螺旋度特性. 热带气象学报, 1999, **15** (1): 81~85
- Chen Hua, Tan Zheming. Helicity dynamics in tropical cyclones. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 1999, **15** (1): 81~85
- [106] Fei Shiqiang, Tan Zheming. On the helicity dynamics of severe convective storms. *Adv. Atmos. Sci.*, 2001, **18** (1): 67~86
- [107] 李耀辉, 寿绍文. 旋转风螺旋度及其在暴雨演变过程中的作用. 南京气象学院学报, 1999, **22** (1): 95~102
- Li Yaohui, Shou Shaowen. Rotational wind helicity and its effects on torrential rain process. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology* (in Chinese), 1999, **22** (1): 95~102
- [108] 侯瑞钦, 程麟生, 冯伍虎. “98.7”特大暴雨低涡的螺旋度和动能诊断分析. 高原气象, 2003, **22** (2): 202~208
- Hou Ruiqin, Cheng Linsheng, Feng Wuhu. Diagnostic analysis of the helicity and kinetic energy for a low vortex of “98.7” extraordinary heavy rainfall. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 2003, **22** (2): 202~208
- [109] 高守亭, 周非凡. 基于螺旋度的中尺度平衡方程及非平衡流诊断方法. 大气科学, 2006, **30** (5): 854~862
- Gao Shouting, Zhou Feifan. Mesoscale balance equation and the diagnostic method of unbalanced flow based on helicity. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2006, **30** (5): 854~862
- [110] Helmholtz H. On discontinuous movements of fluids. *Physical Magazine*, 1868, **36** (4): 337~346
- [111] Kelvin W. The influence of wind on waves in water supposed frictionless. *Physical Magazine*, 1871, **42** (4): 368~374
- [112] Rayleigh Lord. On the stability, or instability, of certain fluid motions. *Proceeding London Maths Society*, 1880, **11**: 57~70
- [113] FjØrtoft R. Application of integral theorems in deriving criteria of stability for laminar flows and for baroclinic circular vortex. *Geophys. Publ.*, 1950, **17**: 1~52
- [114] Lin C C. *The Theory of Hydrodynamic Stability*. Cambridge: Cambridge University Press, 1955. 155pp
- [115] Howard L N. Note on a paper of John W. Miles. *J. Fluid. Mech.*, 1961, **10**: 509~512
- [116] Kuo H L. Dynamic instability of two-dimensional non-divergent flow in a barotropic atmosphere. *J. Meteor.*, 1949, **6**: 105~122
- [117] Charney J G.. The dynamics of long waves in a baroclinic westerly current. *J. Meteor.*, 1947, **4**: 135~163
- [118] Eady E T. Long waves and cyclone waves. *Tellus*, 1949, **1**: 33~52
- [119] Stone P H. On non-geostrophic baroclinic stability. *J. Atmos. Sci.*, 1966, **23** (4): 390~400
- [120] Arnol'd V I. Condition for nonlinear stability of stationary plane curvi linear flows of an ideal fluid Dokl. English Translation: *Soviet Maths*, 1965, **6**: 773~777
- [121] Arnol'd V I. On a priori estimate in the theory of hydrodynamic stability. *American Maths Society Translation*, 1969, **19**: 267~269
- [122] 高守亭, 孙淑清. 应用理查森数判别中尺度波动的不稳定. 大气科学, 1986, **10**: 171~182
- Gao Shouting, Sun Shuqing. Determining the instability of mesoscale perturbation with Richardson number. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 1986, **10**: 171~182
- [123] Zeng Q C. Non-geostrophic instability. *Science in China (B)*, 1989, **29**: 535~542
- [124] 陆维松. 摩擦耗散大气中切变流的非线性稳定性. 中国科学 (B), 1989, **8**: 888~896
- Lu Weisong. Nonlinear instability of shear flow in friction and dissipation atmosphere. *Sciences in China (B)* (in Chinese), 1989, **8**: 888~896
- [125] 高守亭, 陶诗言, 丁一汇. 寒潮期间高空波动与东亚急流的相互作用. 大气科学, 1992, **16** (6): 718~724
- Gao Shouting, Tao Shiyang, Ding Yihui. Upper wave-East Asian jet interaction during the period of cold wave outbreak. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica)* (in Chinese), 1992, **16** (6): 718~724
- [126] Mu M. Nonlinear stability criteria formations of multi-layer quasi-geostrophic flow. *Science in China (B)*, 1991, **34**: 1516~1528
- [127] Gao Shouting. The instability of the vortex sheet along the shear line. *Adv. Atmos. Sci.*, 2000, **17** (4): 523~537
- [128] 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
- Gao Shouting, Zhou Yushu. The instability of the vortex sheet along the horizontal shear line. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2001, **59** (4): 393~404
- [129] 周玉淑, 邓国, 黄仪虹. 长江流域一次暴雨过程中的不稳定条件分析. 气象学报, 2003, **61** (3): 323~333
- Zhou Yushu, Deng Guo, Huang Yihong. Analysis on instability condition during a torrential rain over Yangtze River basin. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2003, **61** (3): 323~333
- [130] Lu Weisong, Shao Haiyan. Generalized nonlinear subcritical symmetric instability. *Adv. Atmos. Sci.*, 2003, **20** (4): 623~630
- [131] 夏瑛, 陆维松. “1998年二度梅”暴雨与非线性亚临界对称不稳定的初步研究. 南京气象学院学报, 2004, **27** (5): 595~605
- Xia Ying, Lu Weisong. Primary study on nonlinear subcritical

- cal symmetric instability and the second Meiyu rainstorm in 1998. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology* (in Chinese), 2004, **27** (5): 595~605
- [132] 刘栋, 高守亭. 饱和湿大气 Brunt-Väisälä 频率及修正的相当位温. *气象学报*, 2003, **61** (3): 379~383
- Liu Dong, Gao Shouting. The Brunt-Väisälä frequency in a saturated atmosphere and the revised equivalent potential temperature. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2003, **61** (3): 379~383
- [133] Yang S, Gao S. Modified Richardson number in non-uniform saturated moist flow. *Chinese Physics Letters*, 2006, **23** (11): 3003~3006
- [134] 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
- Bei Naifang, Zhao Sixiong. Mesoscale analysis of severe local heavy rainfall during the second stage of the 1998 Meiyu season. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2002, **26** (4): 526~540
- [135] 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
- Bei Naifang, Zhao Sixiong. Effect of initial data and physical processes on the heavy rainfall prediction in July 1998. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2002, **7** (4): 386~396
- [136] 郭霞, 党人庆, 葛文忠. 雷达资料在江淮流域暴雨数值模拟中的应用. *热带气象学报*, 1999, **15** (4): 356~362
- Guo Xia, Dang Renqing, Ge Wenzhong. The use of radar data in the numerical simulation of heavy rainfalls in the Changjiang-Huanhe River basin. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 1999, **15** (4): 356~362
- [137] 周兵, 徐海明, 吴国雄, 等. 云迹风资料同化对暴雨预报影响的数值模拟. *气象学报*, 2002, **60** (3): 309~317
- Zhou Bing, Xu Haiming, Wu Guoxiong, et al. Numerical simulation of CMWDA with its impacting on torrential rain forecast. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2002, **60** (3): 309~317
- [138] Ping Fan, Gao Shouting, Wang Huijun. A comparative study of the numerical simulation of the 1998 summer flood in China by two kinds of cumulus convective parameterized methods. *Adv. Atmos. Sci.*, 2003, **20** (1): 149~157
- [139] 陈静, 薛纪善, 颜宏. 华南中尺度暴雨数值预报的不确定性与集合预报试验. *气象学报*, 2003, **61** (4): 432~446
- Chen Jing, Xue Jishan, Yan Hong. The uncertainty of mesoscale numerical prediction of south China heavy rain and the ensemble simulation. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2003, **61** (4): 432~446
- [140] 陈静, 薛纪善, 颜宏. 物理过程参数化方案对中尺度暴雨数值模拟影响的研究. *气象学报*, 2003, **61** (2): 203~218
- Chen Jing, Xue Jishan, Yan Hong. The impact of physics parameterization schemes on mesoscale heavy rainfall simulation. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2003, **61** (2): 203~218
- [141] Gao S, Cui X, Zhou Y, et al. Surface rainfall processes as simulated in a cloud-resolving model. *J. Geophys. Res.*, 2005, **110**: D10202, doi: 10.1029/2004JD005467
- [142] Gao S, Ping F, Li X. Tropical heat/water vapor quasi-equilibrium and cycle as simulated in a 2D cloud-resolving model. *Atmospheric Research*, 2006, **79** (1): 15~29
- [143] 孙健, 赵平. 用 WRF 与 MM5 模拟 1998 年三次暴雨过程的对比分析. *气象学报*, 2003, **61** (6): 692~701
- Sun Jian, Zhao Ping. Simulation and analysis of three heavy rainfall processes in 1998 with WRF and MM5. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2003, **61** (6): 692~701
- [144] 王春明, 王元, 伍荣生. 模式水平分辨率对梅雨锋降水定量预报的影响. *水动力学研究与进展 (A 辑)*, 2004, **19** (1): 71~80
- Wang Chunming, Wang Yuan, Wu Rongsheng. The effect of model horizontal resolution on quantitative precipitation forecast for Meiyu front torrential rainfall. *Journal of Hydrodynamics (A)* (in Chinese), 2004, **19** (1): 71~80
- [145] Peng Jiayi, Wu Rongsheng, Wang Yuan. Initiation mechanism of meso- β scale convective systems. *Adv. Atmos. Sci.*, 2002, **19** (5): 870~884
- [146] 杨帅, 高守亭. 三维散度方程及其对暴雨系统的诊断分析. *大气科学*, 2007, **31** (1): 167~179
- Yang Shuai, Gao Shouting. Three divergence equation and its diagnostic analysis on torrential rain system. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2007, **31** (1): 167~179
- [147] 周玉淑, 曹洁. 有限区域风场的分解和重建. *大气科学*, 2007 (已投稿)
- Zhou Yushu, Cao Jie. Partitioning and reconstruction problem of the wind in a limited region. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2007, Submitted
- [148] 曹洁, 周玉淑, 冯士德. 有限区域流函数和速度势求解方法比较. *气象学报*, 2007 (已投稿)
- Cao Jie, Zhou Yushu, Feng Shide. Comparative analyses in calculating streamfunction and potential velocity in a limited area. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2007, Submitted
- [149] Sheng C, Gao S, Xue M. Short-range prediction of a heavy precipitation event by assimilating Chinese CINRAD-SA radar reflectivity data using complex cloud analysis. *Meteor. Atmos. Phys.*, 2006, **94**: 167~183
- [150] 盛春岩, 浦一芬, 高守亭. 多普勒天气雷达资料对中尺度模式短时预报的影响. *大气科学*, 2006, **30** (1): 93~107
- Sheng Chunyan, Pu Yifen, Gao Shouting. Effect of Chinese doppler radar data on nowcasting output of mesoscale model. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2006, **30** (1): 93~107