

高守亭, 孙建华, 崔晓鹏. 暴雨中尺度系统数值模拟与动力诊断研究. 大气科学, 2008, 32 (4): 854~866

Gao Shouting, Sun Jianhua, Cui Xiaopeng. Numerical simulation and dynamic analysis of mesoscale torrential rain systems. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2008, 32 (4): 854~866

暴雨中尺度系统数值模拟与动力诊断研究

高守亭 孙建华 崔晓鹏

中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

摘 要 本文总结了近年来我们在暴雨中尺度系统数值模拟与动力诊断研究领域的主要成果。从广义位涡理论、梅雨锋及变形锋生、暴雨中尺度系统的不稳定性、有限区域风场分解技术对暴雨中尺度系统的识别、中尺度波流相互作用理论以及数值模拟研究等方面进行了分类概括。对暴雨中尺度系统数值模拟与动力诊断的研究回顾表明, 雷达资料同化进入模式有效地改进了对中尺度系统发生、发展的模拟结果; 一些新的物理量, 如非均匀饱和位涡、对流涡度矢量、变形场锋生以及有限区域风场分解方法等在暴雨中尺度系统及热带对流发展诊断分析中得到了广泛应用。同时, 波流相互作用理论也被应用到了中尺度系统发展的动力分析研究中。

关键词 暴雨 中尺度系统 数值模拟 动力诊断

文章编号 1006-9895 (2008) 04-0854-13 中图分类号 P435 文献标识码 A

Numerical Simulation and Dynamic Analysis of Mesoscale Torrential Rain Systems

GAO Shouting, SUN Jianhua, and CUI Xiaopeng

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

Abstract Some progresses in numerical simulation and dynamic analysis of mesoscale torrential rain systems in recent years are summarized in this article, which are divided into several sections, such as generalized moist potential vorticity, Meiyu front and its frontogenesis, instability of mesoscale rainstorms, window partition in a limited region and its application in the identification of mesoscale rainstorms, mesoscale wave-flow interaction, and numerical simulations. It shows that assimilation of radar observations into numerical models improve the simulations well and some new diagnostic tools such as non-uniformly saturated moist potential vorticity, convective vorticity vector, deformation, and window partition in a limited region are widely used in diagnostic analysis of mesoscale rainstorms and tropical convections. And wave-flow interaction theory is also extended to be used in the dynamic analysis of mesoscale torrential rain systems.

Key words torrential rain, mesoscale system, numerical simulation, dynamic analysis

1 引言

我国是一个受暴雨灾害影响严重的国家, 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及其中小尺度

收稿日期 2008-03-20, 2008-04-10 收修定稿

资助项目 国家自然科学基金资助项目 40575025、40505012, 武汉暴雨研究所暴雨开放基金项目 IHR2006 K01

作者简介 高守亭, 男, 1945 年出生, 研究员, 目前从事波流相互作用、中尺度动力学研究。E-mail: gst@lasg.iap.ac.cn

系统的天气学特征和动力学进行过全面的论述, 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过程的研究都总结在《中国之暴雨》^[11] 一书中, 这本书全面总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针对我国暴雨的分析和预报方法。至今仍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, 之后的一系列研究得以顺利深入地展开。

1991 年长江流域大洪水和 1998 年我国大面积洪涝灾害发生以来, 我国政府和气象部门对暴雨重新给予高度重视, 加强了暴雨等灾害天气的基础和应用研究, 先后设立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”以及“我国南方致洪暴雨监测与预测的理论和研究方法研究”等国家级研究课题, 集中对暴雨系统发生、发展的机理展开了深入探讨。在暴雨研究的各个方面都取得了有意义的成果, 这些成果大都反映在项目专著^[2~4]中。其中, 《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分析和探讨。

近年来, 我们在暴雨中尺度系统的数值模拟和动力诊断研究等方面也开展了一系列科研工作, 取得了一些成果, 本文将从以下两个主要方面进行简单回顾和总结。

2 暴雨系统动力学和诊断分析研究

2.1 适用于暴雨中尺度系统识别的广义位涡理论研究

位涡是“位势涡度”的简称, 是一个十分重要的大气热动力学诊断量。1940 年, Rossby^[5]最先提出位涡的概念, 而 Ertel^[6]独立推导出非流体静力平衡条件下, 绝热、无摩擦大气中第三个物质守恒量(位温和比湿为另外两个守恒量), 即 Ertel 位涡。20 世纪 50 年代, Kleinschmidt^[7]首先提出位涡反演理论。1985 年, Hoskins 等^[8]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^[8]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。例

如, 吴国雄等^[9~12]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^[9, 10], 并进而提出和建立了适用于研究倾斜等熵面附近地区, 系统涡度发展的倾斜涡度发展理论^[9~12], 指出沿等熵面下滑的空气质块, 其垂直涡度在一定条件下将出现较大的增长。

1998 年大洪水以后, 位涡理论在暴雨研究方面得到进一步发展。针对暴雨系统内由于强降水造成湿空气质量亏空, 破坏了系统内的质量守恒的特点, 顾弘道等^[13]和 Gao 等^[14]最早提出了“质量强迫”的概念。在 Gao 等^[14]的研究中, 突破了长期以来对大尺度位涡研究只考虑“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”的影响, 而且还要受到因强降水造成的“质量强迫”效应的影响, 推导了包含热力、质量强迫效应的湿位涡方程, 阐明在暴雨系统中引起的强降水会造成热力、质量强迫下的湿位涡异常。高守亭等^[15]还利用资料诊断出湿位涡异常的高度和强度, 指出湿位涡可以作为暴雨的一种示踪物, 这为暴雨预报提供了线索和思路。邓国等^[16]进一步分析了强降水中“质量强迫”相关的湿位涡异常特征, 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^[17]从湿位涡方程出发, 基于倾斜涡度发展理论^[9~12], 探讨上滑情况下的倾斜涡度发展(图 1), 并从等熵面倾斜的角度研究海洋锋面气旋的爆发性发展和移动特征以及暴雨中尺度系统的发生、发展; 很好地解释了海洋气旋发展与移动过程中的垂直涡度变化特征, 提出了海洋气旋发展和移动过程的概念模型^[18]; 对暴雨中尺度系统发展和演变也做出了合理的物理解释^[19]。

在考虑实际大气非均匀饱和特征的基础上, 高守亭等^[20, 21]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“桑拿”(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具有指示性, 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。周玉淑等^[22]对广义湿位涡异常与暴雨预报关系研究的结果也表

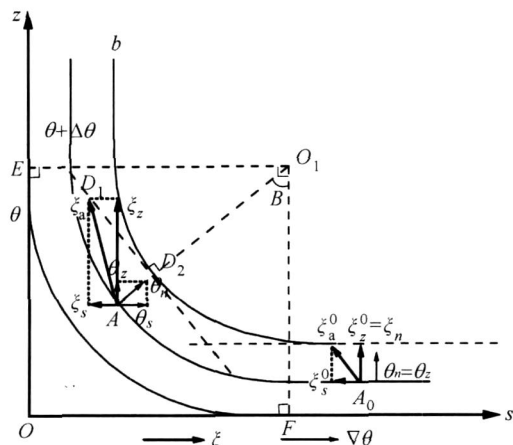


图 1 上滑情况下的倾斜涡度发展示意图 (引自文献 [19])
 Fig. 1 Schematic diagram of up-sliding slantwise vorticity development (from reference [19])

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。Cao 和 Gao^[23]在证明广义位温守恒性的基础上,把广义位涡用于一个气旋移动路径的诊断。Yang 等^[24]推导了非均匀饱和湿大气中的 Q 矢量表达式,并将其应用于一次梅雨锋降水过程的分析与预报,发现新的 Q 矢量不仅包含了潜热释放效应,而且还充分考虑了相对湿度的作用(水汽效应),比干 Q 矢量和饱和湿 Q 矢量具有更完备的物理意义,而且其 Q 矢量散度可较好地指示未来 6 小时降水,说明它是一种很有意义的动力预报方法。

在研究热带深对流发展时, Gao 等^[25, 26]在国际上首次提出一个新的对流涡度矢量 CVV [$CVV = (\nabla \times \mathbf{e}) / \Delta$], 他们的分析表明, CVV 的垂直分量与对流关系十分密切。进一步推导和分析 CVV 垂直分量的倾向方程后,指出 CVV 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^[27]同时还引进湿涡度矢量 MVV [$MVV = (\nabla \times \mathbf{q}) / \Delta$] 和动力涡度矢量 DVV [$DVV = (\nabla \times \mathbf{V}) / \Delta$] 来诊断研究热带对流,结果表明, MVV 的垂直分量、DVV 的垂直及纬向分量与热带对流都有很好的相关关系,进一步推导了 MVV 垂直分量、DVV 纬向及垂直分量的倾向方程。Gao 等^[28]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,是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。

2.2 梅雨锋及锋生研究

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。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特征。Gao 等^[29]和 Zhou 等^[30]在研究梅雨锋暴雨和梅雨锋结构时,利用 NCEP 分析资料诊断出强梅雨年,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,认为风场在中低层的辐合和变形效应是梅雨锋系双锋结构形成的主要原因。崔晓鹏等^[31, 32]则从理论上探讨大气湿度分布对梅雨锋系双锋结构的贡献,指出水汽分布(湿度梯度)对梅雨锋系双锋结构的形成十分重要,进而推导了大气湿度梯度的倾向方程,探讨对湿度梯度变化有影响的物理过程,指出湿度梯度的变化与平流效应、散度效应、水平或垂直涡管(次级环流)效应以及水汽源汇的梯度有关。周玉淑等^[33~36]进一步研究了梅雨锋系对应的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,还与其他条件有关。

在梅雨锋锋生的研究方面,曾庆存^[37]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^[38]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。

风场作为温、压、湿、风四大气象要素场中唯

一的矢量场, 其重要性很早就被学者们认识到。Petterssen^[39]将二维风场泰勒展开(取一阶近似)成散度、涡度以及变形等的组合形式。传统上, 比较关注的是涡度和散度这两个量, 针对涡度和散度, 分别推导出了相应的涡度方程和散度方程。但是变形场同样存在^[39], 却一直没有相应的变形场方程, 这是动力学上的一个缺陷。为了填补这一空白, Gao 等^[40]推导了变形场方程, 并将其应用于暴雨的预报, 分析发现^[41], 由总变形倾向方程进行 6 小时积分, 积分后得出的总变形场的大值带与降水落区基本一致, 其增减趋势和降水量的增减趋势呈正相关。可见, 总变形可作为降水尤其是变形场主导流型中降水过程的具有预报意义的一个动力因子, 通过计算总变形的未来倾向而构成变形场的动力预报方法。除了应用于暴雨预报, 变形场在很多其他问题上也很重要, 特别是伸长轴上的气流汇合, 它可形成一条温湿对比强的狭带, 即变形场对锋生有重要驱动作用。因此, Gao 等^[42]推导了以总变形水平梯度的绝对值随时间的局地变率表示的变形锋生函数, 并通过 NCEP 资料计算的实际锋生个例, 发现变形锋生不仅能够驱动温度梯度的密集, 而且对湿度梯度大的露点锋也非常有效。变形锋生是从动力场(风场)驱动(温度或湿度)等值线的密集出发, 从动力上更本质的考虑锋生问题, 其在变形流型主导的锋生过程中有较好的应用。

2.3 暴雨中尺度系统不稳定性研究

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。对于不稳定的研究, 国内一直没有停止过。如高守亭和孙淑清^[43]引入了对称不稳定的概念, 并将其用于中尺度系统稳定性的研究, 曾庆存^[37]发展了一种广义变分方法来研究大气的非线性不稳定, 而高守亭等^[44]从波流相互作用的观点研究了急流加速诱导低层锋生的不稳定性问题, Mu^[45]研究了准地转流的非线性不稳定。

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, 使得切变线降水十分不均匀, 在低值系统发展区, 经常出现暴雨甚至大暴雨。以往研

究, 主要从切变不稳定角度来分析长江流域切变线暴雨的发生, 近年来, 高守亭等^[46, 47]率先指出: 从理论上说, 造成切变线上中尺度低值系统发生的原因, 可以归结为切变线上的涡层不稳定。这种不稳定的发生对环境场(如风场、温度场等)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。这打破了传统的 Kelvin-Helmholtz 研究切变不稳定的观点。周玉淑等^[48]进一步把涡层不稳定理论应用于实例分析, 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。

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之一, 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) 研究不够。实际上 N_m^2 的大小对 Ri 也有很大影响, 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_w) 也忽略了饱和气块的混合比的作用。刘栋和高守亭^[49]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_w 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_w 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。杨帅等^[50]推导了干、湿饱和流中的 Ri 方程, 选取华北的一次降水过程, 利用模式输出资料计算并对分析干空气、湿饱和

流中 R_i 方程中的各项,发现干过程中水平风速的垂直切变对干 R_i 的变化和不稳定的影响占主导地位,而在湿过程中,湿饱和 R_i 的分子 (Brunt-Vaisala frequency, 简称 BVF) 对 R_i 的变化及不稳定的影响可达到与分母相当的量级。既然 BVF 在湿过程中对不稳定有非常重要的影响, Yang 和 Gao^[51] 重新推导了更符合湿过程中实际情况的非均匀饱和 BVF 和 R_i 表达式,并通过在实际个例中的应用证明了其在暴雨诊断方面的优越性。

2.4 有限区域风场分解技术研究

研究暴雨中尺度系统的一个重要方面是提炼出中尺度系统中的无辐散风和无旋风,并分析它们的相互作用。在该方面的研究中最为有用的工具就是进行有限区域流函数和速度势的计算,并通过流函数和速度势与风场的关系计算得到无辐散风和无旋风。周玉淑和高守亭^[52] 发展了有限区域水平风场分解的调和-弦计算方法(称为平均的调和-弦计算方法),该方法把函数展开成两个部分之和:第一部分是 Laplace 方程在给定边界条件下的解,由于 Laplace 方程的解是调和函数,这个部分可称为调和部分,又因为其解与区域内部值无关,也称外部部分;第二部分是原始函数与调和部分之差,也是一个函数,是齐次边条件下 Poisson 方程的解,只与区域内部的涡度和散度有关,故称为内部部分,可以用双傅立叶的余旋函数系列展开。由于计算过程中的求导都是用谱系数计算,计算精度比常用的差分方法高出两阶以上。而且,由于外部部分给出的边界条件物理意义清楚,边界光滑,成功克服了以往求解有限区域流函数、速度势时迭代过程中出现的计算不稳定、原始风场无法还原、边界上的系统缺失等问题,可以准确分解和重建有限区域的风场。利用 NCEP/NCAR $1^\circ \times 1^\circ$ 的实时分析资料和日本气象厅区域谱模式 (RSM) 20 m 分辨率的再分析资料,他们利用调和-余弦算法得到的无辐散风分量和无旋风分量,对 2006 年的 8 号超强台风“桑美”(SAOMEI) 进行风场结构的比较分析。结果发现,低层无辐散风中心与台风中心的对应关系比原始风场好。同时,无旋风分量也能更好地显示原始风场上并不明显的低层辐合高层辐散的特征。大尺度无辐散风分量可以更清晰地显示出台风的水汽输送通道。从与台风中心的对应关系看,台风在海上发展阶段,SAOMEI 台风的旋转中心与辐合

中心并不是时时重合,这个特点只能通过风场分解才能得到。可见,分解后的无辐散风场和无旋风场能更清楚地体现出 SAOMEI 的风场结构,在台风结构分析中有重要的推广应用价值。此外,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^[53] 和曹洁等^[54] 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,表明通过平均的调和-余弦计算方法得到的分解风场能更准确地定位暴雨中尺度系统。

在平均的调和-余弦计算方法对水平矢量分解的基础上, Gao 等^[55] 和 Cao 等^[56] 把调和-余弦计算方法进一步扩展到 Q 矢量的分解,通过对一次暴雨过程的诊断分析表明, Q 矢量的旋转分量与暴雨落区和暴雨强度都有很好的对应关系,可作为一个判断暴雨落区和强度的物理量。

2.5 中尺度波流相互作用理论研究

在大气科学研究中,通常把物理量分解成基本态和叠加其上的扰动态两部分,基本态可以通过对物理量取空间平均、时间平均或其他类似的平均而得到,扰动态是物理量与其基本态之间的偏差,也可以称为“波动”或“涡动”。扰动态和基本态之间的相互作用被称为波流相互作用。波流相互作用是大气动力学中一个非常重要的研究内容,利用波流相互作用理论可以解释一些重要天气现象,例如重力波上传破碎理论可以解释赤道平流层东西风准两年振荡^[57],行星波上传与临界层理论可以解释平流层爆发性增温^[58],广义斜压大气 E-P 通量理论可以解释对流层顶高空急流的加速与减速现象^[59,60]。

长期以来,人们一直希望建立一种动力学框架来描述基本态和扰动态之间的相互作用。在很多方面,“波作用”以及“波作用方程”恰好可以为人们提供这样一种动力学框架或动力学基础。近三十年来人们根据不同的研究目的建立了各种各样的波作用(守恒)方程。以往波作用(守恒)方程在实际应用中都有一定的局限性,例如 WKB 近似假设严格地限制了小振幅波作用守恒方程的应用范围;准地转近似下的波作用守恒方程在低纬度热带地区不适用,并且不能有效地描述中小尺度运动;用气块

位移表示的有限振幅波作用守恒方程在利用常规观测资料进行计算方面有一定的困难; 建立在 Hamiltonian 动力学基础上的二维有限振幅波作用守恒方程不能表征三维空间内的波流相互作用; 由于等熵面在对流层有较大弯曲, 并且经常与地面相交, 所以等熵坐标系中有限振幅波作用方程不适合在对流层中、低层, 并且不能反映大气的非静力平衡特性。此外, 这些波流相互作用理论主要是建立在静力平衡和准地转平衡(或地转和半地转平衡)动力学基础上, 适用于大尺度运动, 不适用于容易造成暴雨的非地转平衡和非静力平衡的中尺度系统。

鉴于以往波流相互作用研究的不足, Ran 和 Gao^[61] 针对小振幅扰动, 利用“Momentum-Casimir”和“Energy-Casimir”方法从局地直角坐标系中原始方程出发建立了非地转条件下非静力平衡的三维拟动量和拟能量波作用方程, “Momentum-Casimir”和“Energy-Casimir”方法的内在本质决定了拟动量波作用方程和拟能量波作用方程对基本态有不同的要求, 前者的基本态可以是定常的, 也可以是非定常的, 但必须是关于某个坐标轴对称的; 而后的基本态可以是空间二维的, 也可以是空间三维的, 但必须是定常的。不同于传统波流相互作用理论, 在推导过程中我们没有采用任何形式的纬向平均或时间平均, 这是“Momentum-Casimir”和“Energy-Casimir”方法的一个优点。由于建立在非地转平衡和非静力平衡动力框架下, 所以我们建立的波作用方程适合于描述容易导致暴雨等灾害性天气的中尺度系统, 可以通过计算拟动量和拟能量波作用通量散度分析和预测中尺度系统的发展演变。

在本质上, 波流相互作用本身包含了波对基本流的反馈作用和基本流对波的强迫作用, 在扰动动量和热量的输送下, 基本流通常不再定常, 而是随时间缓慢变化。波流相互作用的这两方面是相互关联、密不可分的, 二者之间的联系体现了波和基本流之间的相互作用、互相影响和互相制约。过去人们把波对基本流的作用和基本流对波的作用这两个方面分开单独研究, 没有把这两方面有机结合起来, 作为一个整体来研究。在充分认识到这点后, 我们假设大气是关于 x 轴对称的, 一阶扰动量满足线性扰动方程组, 二阶扰动量保留在基本态方程组中, 利用 Momentum-Casimir 方法在局地直角坐标

系中建立描写纬向动量基本态倾向与波作用量密度倾向之间关系的波流相互作用方程, 分析表明, 纬向动量基本态的局地减小, 二阶扰动通量和基本态通量的辐合有利于拟动量波作用密度的局地增加, 反之, 纬向动量基本态的局地增大以及二阶扰动通量和基本态通量的辐散可以导致拟动量波作用密度减小。对于闭合系统, 拟动量波作用量的时间演变完全取决于纬向动量基本态的变化和源汇项, 二者互相影响、互相转化。

以往波流相互作用研究主要针对干空气, 而对湿空气研究比较少。实际空气既不是绝对干的, 也不是绝对饱和的, 而是非均匀饱和的, 考虑到真实大气的状况, 引入适合描述非均匀饱和湿大气的广义位温, 并考虑水汽相变引起的质量强迫效应, 我们把前面获得的非地转平衡和非静力平衡波作用方程进一步推广到非均匀饱和湿大气中。

水汽是大气的重要组成成分, 在暴雨过程中发挥着重要作用, 但水汽在波流相互作用中研究较少。为此, 我们在位涡定理基础上, 在局地直角坐标系中建立了与垂直速度有关的广义波作用方程

$$\frac{\partial A_{w_e}}{\partial t} = - \Delta \cdot F_{w_e} + \Delta \left(S_e \Delta w_e \times k \right),$$

其中,

$$A_{w_e} = \frac{\partial}{\partial x} \left(e \frac{\partial w_e}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(e \frac{\partial w_e}{\partial x} \right)$$

为广义波作用密度, e 为任意标量的扰动量, $F_{w_e} = v_e A_{w_e} + w_e A_{w_e} + G_{w_e} \cdot e \times k + (v_e \cdot 0) w_e \times k$ 为广义波作用通量, $S_e = d/dt$ 为源汇项。这里 A_{w_e} 具有两点重要性质: 第一, 它不能描述均匀介质中平面波的发展演变, 但可以表征非均匀介质中缓变波列的发展演变; 第二, 它不能穿过等 e 面输送, 在两个等 e 面之间不能凭空产生, 也不能凭空消失, 即具有不可渗透性。

我们令 θ_e 分别等于水汽、广义位温和虚位温, 就可以得到关于这三个量的具体波作用方程, 由于这三个量与微物理过程和热力学过程有关, 因此水汽、广义位温和虚位温波作用方程可以用于研究动力过程、热力过程和微物理过程之间的作用引起的扰动发展演变。这样, 把波流相互作用理论从大尺度范畴延伸到中尺度领域, 从干空气拓展到湿空气, 丰富了波流相互作用理论。

3 暴雨系统与地面降水过程的数值模拟研究

近年来由于中尺度数值模拟和预报的迅速发展,涌现出 MM5、ARPS、WRF 等很多中尺度数值模式,暴雨的模拟研究得到突飞猛进的发展。尤其是 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^[62, 63]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,指出如果可以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。李柏等^[64]进一步利用时间尺度密集的长沙、常德、合肥、南昌、南京、武汉和宜昌共 7 个站的中国气象局新一代天气雷达(CINRAD-SA 雷达)观测反演资料、TBB 资料、常规的探空和地面观测资料、NCEP 分析资料与中尺度 MM5 模式相结合,以 NCEP 格点资料作为大尺度背景场,加入 12 h 间隔的探空、3 h 间隔的常规地面观测资料及 1 h 间隔的雷达反演风廓线资料进行四维同化模拟,考察中尺度数值模式 MM5 对 2003 年梅雨期间发生在湖南、安徽和江苏的暴雨过程(7 月 8~9 日)的模拟能力。他们的模拟结果分析表明:除了模拟降水与实况接近以外(雨量和雨区),MM5 模式输出的风廓线和从雷达观测反演得到的风廓线结果也有很好的相似性。加入雷达反演风廓线资料后增强了暴雨区及其邻近区域对流层中低层的辐合上升运动,雨区位置和雨量中心值比控制实验更接近实况,对模拟结果有一定改进,为进一步利用模式输出结果研究造成 2003 年江淮流域暴雨洪涝的中尺度对流系统的结构和机理提供了可能。孙建华等^[65]采用 2002 年 6~7 月 973 项目中国暴雨外场试验(ChERES)在长江中下游地区进行观测得到的资料,对中尺度对流系统的发生和发展过程进行分析,研究表明 2002 年 6 月 20~24 日几个尺度较大的中尺度对流系统(MCS)在长江中下游地区造成了大范围的强降雨,其源地是大别山和大别山与九华山之间的长江河谷地带。MCS 生成于切变线南侧的西南暖湿气流中,低层西南风的水汽输送是对流不稳定和对流有效位能积聚的主要原因。雷达回波分析表明 MCS 中有中尺度和中尺度系统的活动,MCS 中的带状回波

有地面中尺度辐合线配合,对流带随地面的中尺度辐合线移动,对流带中的对流单体沿辐合带移动。同时对 2002 年一次由中尺度对流系统(MCS)发展而产生的低涡,以及伴随其发生发展的对流系统进行了分析和模拟研究^[66],发现由于对流层中层正涡度中心的强迫和潜热释放使 MCS 产生了气旋,低涡东部的对流系统发生在气旋东部的暖切变上,西部对流系统发生在冷切变附近。在低涡的南部偏南风与偏北风之间形成辐合线,辐合线上有低层偏东风与高层偏西风的垂直切变,对流沿辐合线由西南向东北方向移动形成对流带。根据这些研究工作提出了长江流域梅雨锋暴雨的多尺度物理模型^[67, 68]。近年来,孙建华等^[69]对北方地区的暴雨也进行了一些研究工作,对 20 世纪 90 年代造成华北地区夏季特大暴雨过程的天气形势进行分型,认为华北地区发生大暴雨大体可分为 5 型:台风与低槽(低涡)远距离相互作用,低涡(登陆台风)与西风槽相互作用,登陆台风北上受高压阻挡停滞,低涡暴雨和暖切变暴雨。针对其中一类系统“登陆台风北上受高压阻挡停滞”(图 2)进行模拟研究^[70],指出此次过程中台风倒槽内的 2 个中尺度对流云团是造成此次暴雨的直接影响系统,暴雨期间低空急流不仅强度大而且伸展高度也相对较高,伴随强对流系统的主要入流和出流气流分别有 2 支(图 3)。杨帅和高守亭^[71]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,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。盛春岩等^[72, 73]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。雷达资料加入模式对于临近预报水平的提

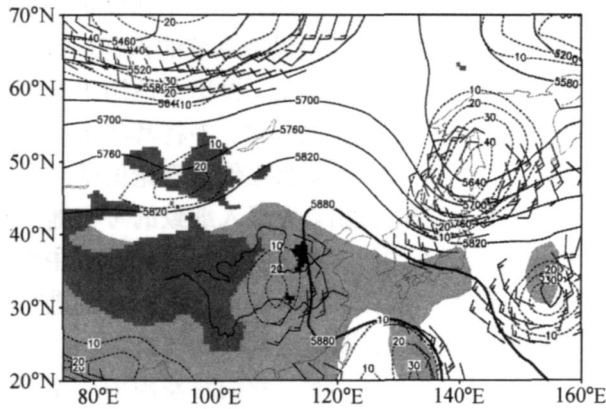


图2 1996年8月4日登陆台风北上受高压阻挡停滞天气形势合成分布(引自文献[70])。浅阴影: 850 hPa $\theta_{se} \geq 338$ K; 深阴影: 地形大于1500 m; 黑色阴影: 24 h 降雨量 ≥ 50 mm 的暴雨中心。风标: 风速 ≥ 12 m/s 表示 850 hPa 上的低空急流; 粗实线: 500 hPa 等高线(单位: gpm); 短虚线: 500 hPa 上的等涡度线(单位: $10^{-5} s^{-1}$)

Fig. 2 The composite synoptic weather pattern on 4 Aug 1996 (from reference [70]). Light shading, $\theta_{se} \geq 338$ K at 850 hPa; heavy shading, topography greater than 1500 m; black shading, 24-h precipitation ≥ 50 mm. Barbs: wind speed ≥ 12 m/s at 850 hPa; thick solid lines: geopotential height (gpm) at 500 hPa; short dashed lines: vorticity ($10^{-5} s^{-1}$) at 500 hPa

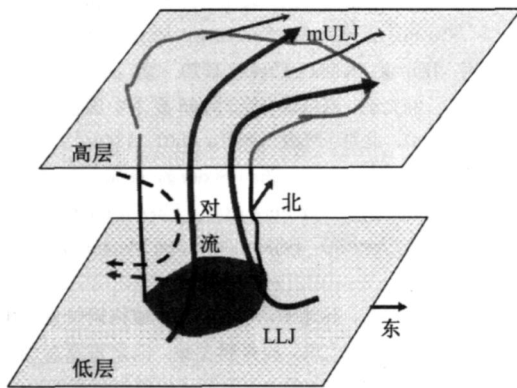


图3 “96.8”暴雨的中尺度对流系统模型(引自文献[70])
Fig. 3 The schematic model of the mesoscale convective system of torrential rain in Aug 1996 (from reference [70])

高有显著意义。

积云参数化对数值预报模式十分重要。积云被大尺度环流强迫和控制, 又通过感热、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; 同时, 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, 并进而对大尺度环流的预报起重要的作用。因此, 积云参数化是数值预报研究和日

常业务工作的重要课题。Ping 等^[74]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, 直接考虑低层大尺度辐合对积云对流的影响, 即在云模式中加入有组织的卷入和卷出; 其次, 调整积云对流初始的质量通量并考虑过冷水存在对饱和水汽压的影响, 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。

另外, 通过对直接造成地面降水的云进行高分辨率数值模拟和分析, Gao 等^[75]得出: 地面降水率可由公式表示成云源汇和水汽源汇之和, 水汽源汇由水汽局地变化、水汽辐合、地面蒸发组成, 而云源汇主要由水汽凝结物的局地变化及其辐合项决定。尽管水汽源汇的变化可以解释地面降水的绝大部分, 但云源汇对地面降水率仍起到了重要的订正作用。Gao 等^[76]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。Zhou 等^[77]利用一次热带对流发生、发展和消亡过程的云尺度模拟的逐时输出资料, 通过对 Gao 等^[75]提出的地面降水诊断方程进行诊断, 研究热带对流发展过程中, 云中凝结降水物对地面降水过程的贡献, 结果表明: 在热带对流发生、发展和消亡过程中, 考虑了云中凝结降水物的作用后, 很好地订正了对地面降水率的过高估计, 云中凝结降水物对地面降水率的精确估计起到重要作用。进一步对热带对流发展中的深对流云和砧状云的分析表明: 仅利用深对流云和砧状云中的水汽估计的地面降水率的量级是相近的, 然而实际情况是, 大的地面降水率出现在深对流云中, 而小的地面降水率出现在砧状云中, 这主要是由于深对流云发展中水云消耗增强了地面降水率, 而砧状云中冰云的发展减弱了地面降水率。Cui 等研究了作为水汽源汇之一的海面蒸发对热带地面降水过程的贡献^[78], 以及热带对流云、层状云等不同云区的云微物理收支特征等问题^[79]。指出时间和纬向平均的海面蒸发主要来自非降水性层云和晴空区(即非降水区, 这里的海面蒸发与水汽辐射相平衡), 而降水性层云和对流云区(即降水区)

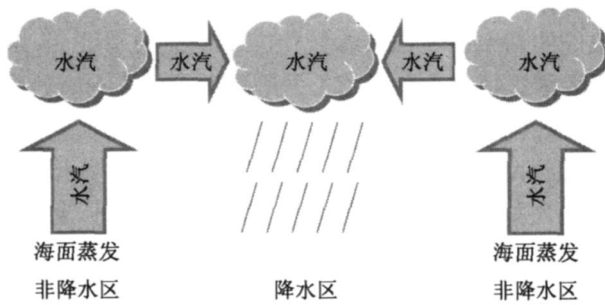


图4 海面蒸发在地面降水过程中作用示意图

Fig. 4 Sketch map of the role of sea surface evaporation in surface rainfall processes

水汽辐合对地面降水过程十分重要,海面蒸发作用几乎可以忽略。非降水区的海面蒸发将水汽带入大气,而辐散过程将水汽由非降水区输送到降水区,支持了那里降水的发生(图4)。

总之,随着计算技术和数值模式的发展,我们已经可以利用模式输出的“接近实况”的高分辨率资料来分析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。

4 小结

近年来,我们在暴雨中尺度系统数值模拟与动力诊断研究领域取得了一些新的结果。本文从适用于暴雨中尺度系统识别的广义位涡理论、梅雨锋及变形锋生、暴雨中尺度系统的不稳定性、有限区域风场分解技术、中尺度波流相互作用理论以及暴雨系统与地面降水过程的数值模拟等几个方面进行了小结。

湿位涡诊断对暴雨研究十分重要,从守恒性质的提出到倾斜涡度发展理论的建立,这些都对暴雨过程的诊断和理论分析提供了重要手段。“质量强迫”概念的引入,打破了传统暴雨研究中“热力强迫”为主的局面,对以强降水为主要特点的暴雨系统的研究提供了较全面的思考和方法。基于非均匀饱和基础上的广义湿位涡的引入以及 CVV、MVV 和 DVV 等一些新的物理矢量诊断量的提出,也为暴雨和对流系统发生、发展研究提供了很好的诊断工具。变形场方程的建立及其在暴雨研究中的初步应用使得风场的分析更加全面(涡度、散度和变形场方程分析相结合)。涡层不稳定的提出以及 Brunt-Väisälä 频率 (N_m^2) 的修正是在中尺度不稳定研究中的主要发展,而有限区域风场分解技术的

研究和应用则使我们能够从另外一个角度进一步深入探讨风场及其对暴雨中尺度系统的识别。针对以往波流相互作用研究的不足,提出了适用于暴雨研究的中尺度波流相互作用理论,并将其从干空气推广到湿空气,丰富了波流相互作用理论的范畴。地面降水诊断方程的提出,为深入细致的考察地面降水过程提供了有用的诊断工具。通过在模式中引入雷达、卫星等非常规观测资料,对暴雨系统进行大量的模拟及预测,也取得了良好的效果。

通过这一系列的研究,我们对暴雨中尺度系统有了进一步的深入认识。但迄今为止,对暴雨等灾害天气系统的发生、发展及移动变化规律等许多科学问题还有待继续深入研究。在充分利用卫星、雷达等遥感观测手段的基础上,除了需要分析大量的观测事实,对其物理过程进行深入的探讨和研究外,还需要进一步建立和改进对中尺度资料的同化系统及模式物理过程,以提高对暴雨中尺度系统的模拟能力和分析水平,这需要我们科研工作者持之以恒,继续付出艰苦不懈的努力。

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 Shiyao, 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 Shiyao, Ni Yunqi, Zhao Sixiong, et al. *Study on Formation Mechanism and Forecast of Torrential Rain in China in 1998* (in Chinese). Beijing: Chinese 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一. 北京: 气象出版社, 2004. 282pp
Zhao Sixiong, Tao Zhuyu, 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* (in Chinese). Ni Yunqi, Zhou Xiujie, 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 Zheming, et al. Front process and meso-scale distribution. In: *Study on Formation*

- Mechanism and Prediction Theory of Key Weather Disaster* (in Chinese). Ni Yunqi, Zhou Xiujie, Eds. Beijing: China Meteorological Press, 2004. 282pp
- [5] Rossby C G. Planetary flow patterns in the atmosphere. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1940, **66** (Supple): 68 ~ 87
- [6] Ertel H. Ein Neuer gyrodynamischer Wirbelsatz. *Meteor. Z.*, 1942, **59**: 277 ~ 281
- [7] Kleinschmidt E. Die Entstehung einer Hohenzyklone uber Nordamerika. *Tellus*, 1955, **7**: 96 ~ 110
- [8] 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
- [9] 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
- [10] 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
- [11] 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
- [12] 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
- [13] 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, **35** (22): 1721 ~ 1724
Gu Hongdao, Qian Zheng'an. Discuss of the moist source/sink term in mass conservative of numerical model. *Chinese Science Bulletin* (in Chinese), 1990, **22**: 1721 ~ 1724
- [14] Gao Shouting, Lei Ting, Zhou Yushu. Moist potential vorticity anomaly with heat and mass forcings in torrential rain systems. *Chinese Physics Letters*, 2002, **19** (6): 878 ~ 880
- [15] 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. *Journal of Applied Meteorological Science* (in Chinese), 2002, **13** (6): 662 ~ 669
- [16] 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
- [17] Cui Xiaopeng, Gao Shouting, Wu Guoxiong. Moist potential vorticity and up-sliding slantwise vorticity development. *Chinese Physics Letters*, 2003, **20** (1): 167 ~ 169
- [18] 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 insentropic analysis of frontal cyclones over the western Atlantic ocean. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2002, **60** (4): 385 ~ 399
- [19] Cui Xiaopeng, Gao Shouting, Wu Guoxiong. Up-sliding slantwise vorticity development and the complete vorticity equation with mass forcing. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2003, **20** (5): 825 ~ 836
- [20] 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
- [21] 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, **35** (Supp. II): 128 ~ 137
- [22] 周玉淑, 曹洁, 王东海. 非均匀饱和和广义湿位涡在暴雨分析与预测中的应用. *应用气象学报*, **18** (6): 755 ~ 760
Zhou Yushu, Cao Jie, Wang Donghai. Application of generalized moist potential vorticity in non-uniformly saturated atmosphere to torrential rain forecast. *Journal of Applied Meteorological Science* (in Chinese), 2007, **18** (6): 755 ~ 760
- [23] Cao J, Gao S. Extended interpretations in Q vector analyses and applications in a torrential rain event. *Geophys. Res. Lett.*, 2007, **34**: L15804, doi: 10.1029/2007GL030781
- [24] Yang S, Gao S. Modified Richardson number in non-uniform saturated moist flow. *Chinese Physics Letters*, 2006, **23** (11): 3003 ~ 3006
- [25] 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
- [26] 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
- [27] 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
- [28] 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
- [29] Gao Shouting, Zhou Yushu, Lei Ting. Structural features of the Meiyu front system. *Acta Meteorologica Sinica*, 2002, **16** (2): 195 ~ 204
- [30] 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
- [31] Cui Xiaopeng, Gao Shouting, Zong Zhiping, et al. Physical mechanism of formation of the bimodal structure in the Meiyu front system. *Chinese Physics Letters*, 2005, **22** (12): 3218 ~ 3220
- [32] 崔晓鹏, 高守亭, 张海霞, 等. 1999 年梅雨锋系结构特征的模拟诊断. *气象学报*, 2008, **66** (1): 26 ~ 34
Cui Xiaopeng, Gao Shouting, Zhang Haixia, et al. A diagnostic analysis of the simulated structure of the Meiyu front system in 1999. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2008, **66** (1): 26 ~ 34
- [33] 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
- [34] 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
- [35] Zhou Yushu, Deng Guo, Pu Yifen. Analysis of moisture transport and budget over the Yangtze River and the Huaihe River valleys during the heavy Meiyu period in 2003. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2005, **29** (4): 339 ~ 352
- [36] 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 Huaihe River basins in 2003. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2005, **29** (2): 195 ~ 204
- [37] 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
- [38] 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 Shiyun. 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 ~ 22
- [39] Petterssen S. *Weather analysis and forecasting. Vol. I. Motion and motion systems (2nd Edition)*. McGraw-Hill, 1956, 428pp
- [40] Gao S T, Yang S, Xue M, et al. Total deformation and its role in heavy precipitation events associated with deformation-dominant flow patterns. *Adv. Atmos. Sci.*, 2008, **25**: 11 ~ 23
- [41] 高守亭. 大气中尺度运动的动力学基础及预报方法. 北京: 气象出版社, 2007. 215pp
Gao S T. *The Dynamical Basis and Predictive Method in Atmospheric Mesoscale Motion* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 2007. 215pp
- [42] Gao S T, Yang S, Lu C G. The analysis and applications of deformation frontogenesis theory. *J. Atmos. Sci.*, 2008 (Submitted)
- [43] 高守亭, 孙淑清. 应用里查逊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 perturbations with Richardson number. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica)* (in Chinese), 1986, **10**: 171 ~ 182
- [44] 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 Shiyun, 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
- [45] Mu M. Nonlinear stability criteria formations of multi-layer quasi-geostrophic flow. *Science in China (B)*, 1991, **34**: 1516 ~ 1528
- [46] Gao Shouting. The instability of the vortex sheet along the shear line. *Adv. Atmos. Sci.*, 2000, **17** (4): 523 ~ 537
- [47] 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
- [48] 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
- [49] 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
- [50] 杨帅, 高守亭, 王东海. 湿饱和流中的 Richardson 数和不稳定的研究. *地球物理学报*, 2007, **50** (2): 377 ~ 386
Yang S, Gao S T, Wang D H. A study of Richardson number and instability in moist saturated flow. *Chinese J. Geo-*

- phys., 2007, **50** (2): 377 ~ 386
- [51] Yang S, Gao S. Modified Richardson number in non-uniform saturated moist flow. *Chinese Physics Letters*, 2006, **23** (11): 3003 ~ 3006
- [52] 周玉淑, 高守亭. 有限区域风场分解方法及其在台风“桑美”研究中的应用. *物理学报*, 2008 (已投稿)
Zhou Yushu, Gao Shouting. The decompose method of wind in a limited area and its application to typhoon SAOMEI. *Acta Physica Sinica* (in Chinese), 2008 (Submitted)
- [53] 周玉淑, 曹洁. 有限区域风场的分解和重建. *物理学报*, 2008 (已投稿)
Zhou Yushu, Cao Jie. Partitioning and reconstruction problem of the wind in a limited region. *Acta Physica Sinica* (in Chinese), 2008 (Submitted)
- [54] 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)
- [55] Gao S, Cao J. Physical basis of generalized potential temperature and its application to cyclone tracks in nonuniformly saturated atmosphere. *J. Geophys. Res.*, 2007, **112**, D18101, doi: 10.1029/2007JD008701
- [56] Cao Jie, Gao Shouting, Zhou Yushu. Improved Q vector analyses from the perspective of field separation and its application in a torrential rain event. *Acta. Phys. Sin.*, 2008, to be printed in Vol. 4
- [57] Lindzen R S, Holton J R. A theory of the quasi-biennial oscillation. *J. Atmos. Sci.*, 1968, **25**: 1095 ~ 1107
- [58] Matsuno T. Vertical propagation of stationary planetary waves in the winter Northern Hemisphere. *J. Atmos. Sci.*, 1970, **27**: 871 ~ 883
- [59] Murgatroyd R J. The structure and dynamics of the stratosphere. *The Global Circulation of the Atmosphere*. London: Royal Meteorological Society, 1972. 159 pp
- [60] Gao Shouting, Tao Shiyun, Ding Yihui. The generalized E-P flux of wave-mean flow interactions. *Science in China* (Series B), 1990, **33**: 704 ~ 715
- [61] Ran Lingkun, Gao Shouting. A three-dimensional wave-activity relation for pseudomomentum. *J. Atmos. Sci.*, 2007, **64** (6): 2126 ~ 2134
- [62] 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
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
- [63] 贝耐芳, 赵思雄. 初值及物理过程对“98·7”暴雨预报结果的影响. *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
- [64] 李柏, 周玉淑, 张沛源. 新一代天气雷达资料在 2003 年淮河流域暴雨模拟中的初步应用: 模拟降水和风场的对比. *大气科学*, 2007, **31** (5): 826 ~ 838
Li Bai, Zhou Yushu, Zhang Peiyuan. Application of the China new generation weather radar data to the torrential rain simulation over the Jianghuai basin in 2003: Validation of precipitation and wind (in Chinese). *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2007, **31** (5): 826 ~ 838
- [65] 孙建华, 张小玲, 齐琳琳, 等. 2002 年 6 月 20 ~ 24 日梅雨锋中尺度对流系统发生发展分析. *气象学报*, 2004, **62** (4): 423 ~ 438
Sun Jianhua, Zhang Xiaoling, Qin Linlin, et al. An analysis on MCSs in Meiyu front during 20-24 June 2002. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2004, **62** (4): 423 ~ 438
- [66] 孙建华, 张小玲, 齐琳琳, 等. 2002 年中国暴雨试验期间一次低涡切变上发生发展的中尺度对流系统研究. *大气科学*, 2004, **28** (5): 675 ~ 691
Sun Jianhua, Zhang Xiaoling, Qin Linlin, et al. A study of vortex and its mesoscale convective system during China heavy rainfall experiment and study in 2002. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2004, **28** (5): 675 ~ 691
- [67] 孙建华, 张肖玲, 齐琳琳, 等. 2002 年中国暴雨试验期间一次低涡切变上发生发展的中尺度对流系统研究. *大气科学*, 2004, **28** (5): 675 ~ 691
Sun Jianhua, Zhang Xiaoling, Qi Linlin, et al. An analysis of meso-system in Meiyu front using the intensive observation data during CHERES 2002. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2005, **22** (2): 278 ~ 289
- [68] 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. 北京: 气象出版社, 2004. 281pp
Zhao Sixiong, Tao Zuyu, Sun Jianhua, et al. *Study on Mechanism Analysis of Formation and Development of Heavy Rainfalls on Meiyu Front in the Yangtze River Valley* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 2004. 281pp
- [69] 孙建华, 张小玲, 卫捷, 等. 20 世纪 90 年代华北暴雨过程特征的分析研究. *气候与环境研究*, 2005, **10** (3): 492 ~ 506
Sun Jianhua, Zhang Xiaoling, Wei Jie, et al. A study on severe heavy rainfall in North China during the 1990s. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2005, **10** (3): 492 ~ 506
- [70] 孙建华, 齐琳琳, 赵思雄. “9608”号台风登陆北上引发北方特大暴雨的中尺度对流系统研究. *气象学报*, 2006, **64** (1): 57 ~ 71
Sun Jianhua, Qi Linlin, Zhao Sixiong. A study on mesoscale convective systems of the severe heavy rainfall in North China by “9608” typhoon. *Acta Meteorologica Sinica*, 2006, **64** (1): 57 ~ 71
- [71] 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-dimensional divergence equation and its diagnosis analysis on storm rainfall system. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2007, **31** (1): 167 ~ 179
- [72] 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
- [73] 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
- [74] 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
- [75] 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
- [76] 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
- [77] Zhou Yushu, Cui Xiaopeng, Li Xiaofan. Contribution of cloud condensate to surface rainfall process. *Progress in Natural Science*, 2006, **16** (9): 967 ~ 973
- [78] Cui Xiaopeng, Li Xiaofan. Role of surface evaporation in surface rainfall processes. *J. Geophys. Res.*, 2006, **111**, D17112, doi: 10.1029/2005JD006876
- [79] Cui Xiaopeng, Zhu Yushu, Li Xiaofan. Cloud microphysical properties in tropical convective and stratiform regions. *Meteor. Atmos. Phys.*, 2007, doi: 10.1007/s00703-006-0228-1