

1999 年梅雨锋系结构特征的模拟诊断^{*1}

崔晓鹏¹ 高守亭¹ 张海霞² 郝世峰³

CUI Xiaopeng¹ GAO Shouting¹ ZHANG Haixia² HAO Shifeng³

1. 中国科学院大气物理研究所云降水物理与强风暴实验室,北京,100029

2. 河北省邯郸市气象局,邯郸,056001

3. 浙江省气象科学研究所,杭州,310017

1. LACS, *Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China*

2. *Handan Meteorological Office, Handan 056001, China*

3. *Zhejiang Institute of Meteorology, Hangzhou 310017, China*

2006-08-04 收稿,2006-09-06 改回.

Cui Xiaopeng, Gao Shouting, Zhang Haixia, Hao Shifeng. 2008. A diagnostic analysis of the simulated structure of the meiyu front system in 1999. *Acta Meteorologica Sinica*, 66(1): 26–34

Abstract A numerical simulation of a torrential rain event occurring in the Jiang-Huai valley of China from June 22 to 24, 1999 by using the PSU/NCAR MM5 mesoscale non-hydrostatic model is analyzed, and the high-resolution model output data are utilized to diagnose the double front structure, and the relevant potential temperature, equivalent potential temperature and specific humidity distributions in the vicinity of the meiyu front system (MYFS) in the Jiang-Huai valley. The results show that both the potential temperature gradient and specific humidity gradient have important impact on the two strong equivalent potential temperature gradient zones associated with the double front structures of the MYFS, but the latter is more important to the structure. Then the tendency equation of specific humidity gradient is theoretically derived, and it shows that the variation of specific humidity gradient is related to the advection, divergence/convergence, horizontal and vertical vortex tube (secondary circulation) effects and the gradient of water vapor source/sink. As an example, the budget of the meridional component of the trend equation is selected and diagnosed by using the above mentioned mesoscale simulation data of the torrential rain in the Jiang-Huai valley, and the diagnostic results show that the temporal variation of the averaged specific humidity gradient over the duration of the simulation is mainly related with convergence/divergence effect, secondary circulation effect associated with horizontal vortex tube, and water vapor source/sink effect. Since the water vapor source/sink is often resulted from the phase change processes associated with the water vapor in air and thus directly related with the development and evolution of cloud and precipitation microphysical processes. Therefore, the variation of specific humidity gradient is close related to the distribution, development and evolution of cloud and precipitation systems. The double front structure of the MYFS provides advantageous environmental conditions for the development and movement of the mesoscale torrential rain systems nearby, thus organizing and controlling the evolution of the systems, and in turn, the development and evolution of the relevant cloud and precipitation systems exert important impact on the MYFS through changing the thermal and moisture distributions.

Key words Meiyu front system, Double front structure, Specific humidity gradient, Tendency equation

摘 要 通过中尺度模式 MM5 对 1999 年江淮流域一次梅雨锋暴雨过程的数值模拟,利用高分辨率模拟资料,诊断了江淮地区梅雨锋系的双锋结构特征及相应的大气相当位温、位温和湿度(比湿)分布特征。结果表明,大气位温梯度和湿度梯度均对江淮梅雨锋系双锋结构中相应的两个相当位温梯度大值带的存在有着重要贡献,而湿度梯度的贡献更大。进而从理论上推

^{*} 资助课题:国家自然科学基金项目(40505012,40433007)和中国科学院知识创新工程领域前沿项目(IAP07214)。

作者简介:崔晓鹏,主要从事中尺度动力学、中尺度和云尺度数值模拟、地面降水过程等方面研究。E-mail: xpcui@mail.iap.ac.cn

导了大气湿度梯度倾向方程,指出大气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;利用中尺度模拟资料对湿度梯度倾向方程的经向分量进行了简单的方程诊断,模拟时段平均的诊断分析表明,大气经向湿度梯度绝对值的变化主要同散度效应、与水平涡管相关的次级环流效应以及水汽源汇效应相关。由于水汽源汇是由与水汽相关的相变过程造成,与云物理过程的发展和演变直接相关,因此,大气湿度梯度的演变与云物理过程,并进而与云或降水系统的分布、发展和演变相关。梅雨锋系的存在为其附近暴雨中尺度系统的发展提供了有利的环境条件,起到一定的组织或控制作用;反过来,暴雨系统的发展、降水云系的发展和演变,又通过改变大气温、湿状况,对梅雨锋系产生影响。

关键词 梅雨锋系,双锋结构,湿度梯度,倾向方程

中图法分类号 P441

1 引言

在夏季季风季节,从中国长江中下游到日本西南部,常有一条降水带发生并维持长达数周,造成大雨或者暴雨天气,这条雨带在中国被称为梅雨。梅雨一直是东亚,尤其是中国、日本以及韩国气象学家们十分关注的气象现象和研究课题。早期研究表明,梅雨主要由一条东西走向的准静止锋及锋面附近的降水系统造成,这条准静止锋就是梅雨锋。针对梅雨锋,气象学家们做了大量的研究(Akiyama, 1973, 1975; Gao, et al., 1990, 2002; Matsumoto et al., 1970, 1971; Ninomiya, 1999; 寿绍文等, 2001; Cui, et al., 2003a, 2003b; 崔晓鹏, 2001; Yan, et al., 2005; 倪允琪等, 2004; 覃丹宇等, 2004),指出,(1)梅雨锋两侧大气湿度对比明显,对梅雨锋的表征,应该使用相当位温梯度,而不是温度梯度。(2)梅雨锋是个多尺度的副热带锋面系统,其上对流活动明显。梅雨锋从中国大陆向东,经过东海、日本群岛,一直延伸到北太平洋。它是东亚季风区最重要的水循环系统之一。由于其明显的南北向湿度梯度和相对较弱的温度梯度特征,梅雨锋与其他典型中纬度锋面明显不同。

很多研究讨论了梅雨锋附近的湿层结构、水汽输送特征等(Akiyama, 1973, 1975; Ninomiya, 1999a, 1999b, 2000; Kato, 1992, 1995; Shinoda, et al., 2002; Murakami, 1959; Lim, 2002; Moteki et al., 2004a, 2004b; Xu, et al., 2003; 丁一汇等, 2003; 仪清菊等, 2002)。Shinoda等(2005)研究指出,由于中国大陆上空白天湿对流混合层的发展以及浅对流云的生成,大陆上空的湿层较东部海洋上空的湿层深厚。Moteki等(2004a, 2004b)利用观测资料,研究了东海上空两个并合的云雨带的结构

和发展特征,发现梅雨锋南侧存在一个具有明显湿度梯度分布的“水汽锋”。Zhou等(2005)指出,梅雨锋附近,水汽由对流层低层向对流层中、高层输送,在向上输送的水汽通道的南北边缘存在两个明显的湿度梯度高值带,其中北面一支与梅雨锋对应,南面的一支为一个湿度对比明显的露点锋,他们将这支露点锋与其北面的梅雨锋,统称为“梅雨锋系”(Meiyu Front System,简称MYFS)。并指出梅雨锋系的发展,与江淮梅雨的强弱有很好的对应关系。Jiang等(2004)诊断了典型梅雨锋的结构特征及其维持机制,也指出了双锋结构(Zhou et al., 2005)的存在,并指出充足的水汽供应对梅雨锋的维持十分重要。显然水汽分布与梅雨锋系双锋结构的形成和维持关系密切。然而, Moteki等(2004a, 2004b)、Zhou等(2005)和 Jiang等(2004)均没有直接从水汽分布(梯度)的角度,对梅雨锋系中双锋结构的形成和维持机制等进行细致的理论和诊断研究, Wang等(2000)和 Wang等(2002)分别利用理论模式以及ARPS中尺度模式研究了冷锋锋生与湿物理过程的相互作用,给出了冷锋与锋面云带相互作用的概念模型,强调了大气水汽分布的影响。Cui等(2005)从理论上初步探讨了大气湿度(水汽)分布特征与梅雨锋系双锋结构的关系,指出湿度梯度对梅雨锋系双锋结构的存在较位温梯度更重要。本文将继续从大气湿度分布角度入手,进一步深入探讨大气湿度分布与双锋结构的关系,并推导大气湿度梯度倾向方程,从理论以及模拟诊断角度探讨双锋结构形成的原因。

2 梅雨锋系双锋结构与大气水汽分布特征

Cui等(2005)从相当位温定义出发,从理论上探讨了梅雨锋系双锋结构与大气湿度分布的关系。

对相当位温定义式 $\theta_e = \theta \exp\left(\frac{Lq}{c_p T}\right)$ 取自然对数, 并作运算 ∇ , 再利用简单的尺度分析, 略去小项, 得

$$\nabla \theta_e = \frac{\theta_e}{\theta} \nabla \theta + \frac{L\theta_e}{c_p T} \nabla q \quad (1)$$

这里 θ_e 、 θ 、 T 和 q 分别为相当位温、位温、大气温度以及比湿。 $L = 2.5 \times 10^6$ J/kg, $c_p = 1004$ J/(kg · K) 为气象常数, 如果选择典型大气值如下, $T = 300.0$ K, $\theta_e = 300.0$ K, $\theta = 300.0$ K, 则方程(1)可进一步简化为

$$\nabla \theta_e = \nabla \theta + 2500 \nabla q \quad (2)$$

众所周知, 大气相当位温梯度可以用来指示梅雨锋系的位置和强度变化(Ninomiya, 2000; Jiang, et al., 2004), 从方程(1)和(2), 可以看出, 大气相当位温梯度主要与两项有关, 一项为大气位温梯度, 另外一项为大气比湿梯度, 并且, 即使是很小的大气比湿梯度的变化, 由于配合着相对较大的尺度因子(2500), 仍然可以引起相当位温梯度较大的变化, 即梅雨锋系较大的变化。

大气中的水汽主要集中在对流层低层, 因此大气水汽分布和变化对相当位温梯度变化的影响一般也主要集中在对流层低层。然而在某些地区, 在某些时候, 这种影响会到达对流层中层, 甚至高层。在梅雨锋附近地区, 由于梅雨锋的存在, 水汽被垂直输送到对流层中、高层; 从而在水汽上传通道的南北两侧形成两个水平水汽梯度大值带(Jiang, et al., 2004); 由方程(1)和(2)可知, 对应两个水汽梯度大值带, 将存在两个水平相当位温梯度大值带, 其中, 北面的一支对应传统意义上的梅雨锋, 南面的一支对应“露点锋”(Zhou, et al., 2005)或者“水汽锋”(Moteki, et al., 2004a, 2004b), 而这两个锋面共同构成了梅雨锋系(Zhou, et al., 2005)(由下面的模拟诊断分析可以看到, 尽管大气位温梯度对梅雨锋系两个相当位温梯度大值带的贡献不可忽略, 但大气比湿梯度的贡献要更大些, 并且至少在水汽梯度大值区是这样)。

这里利用一次江淮暴雨过程的中尺度数值模拟, 从模拟诊断角度, 探讨江淮梅雨锋系双锋结构与大气湿度分布(梯度)之间的关系。采用的模式为 PSU/NCAR MM5 中尺度非静力数值模式, 个例为 1999 年 6 月 22—24 日发生在江淮地区的暴雨过

程。在这段时间里, 江淮地区有明显的暴雨系统沿着梅雨锋发展, 造成江淮地区明显的降水。利用 MM5, 从 22 日 0 时(世界时)启动模式, 对这次暴雨过程进行了 60 h 的模拟, 模拟结果与实际观测资料的对比分析表明(Cui, et al., 2003b; 崔晓鹏, 2001), 模式对这次江淮暴雨过程的模拟是比较成功的, 对暴雨系统的发展和移动过程、降水落区及走向、高低空环流形势以及梅雨锋演变特征等都有很好的模拟(篇幅所限, 具体实验设计及模拟验证和结果分析参见文献(Cui, et al., 2003b; 崔晓鹏, 2001)。这里将模式粗网格 3 h 间隔的模拟输出结果用于本文的诊断研究。由于梅雨锋系主要表现为南北向的相当位温梯度, 下面的诊断中将重点诊断式(1)的经向分量, 即

$$\frac{\partial \theta_e}{\partial y} = \frac{\theta_e}{\theta} \frac{\partial \theta}{\partial y} + \frac{L\theta_e}{c_p T} \frac{\partial q}{\partial y} \quad (3)$$

图 1 给出了模拟时段平均的方程(3)中各项的纬度-高度剖面分布, 由图可以清楚的看到大气经向湿度分布(比湿梯度)与经向相当位温梯度的分布十分一致, 并且数值上也相差不多, 尤其是在正负极值区, 两者对应的更好, 并且在梅雨锋区两者较好的对应关系甚至可以到达对流层中高层(图 1b)。在江淮地区, 与梅雨锋系双锋结构对应的两个经向相当位温梯度大值带主要由水汽梯度项($\frac{L\theta_e}{c_p T} \frac{\partial q}{\partial y}$)贡献, 而位温梯度(主要反映了大气温度的分布)贡献项($\frac{\theta_e}{\theta} \frac{\partial \theta}{\partial y}$)在这两个大值区的表现较差, 尤其是对江淮地区与梅雨锋对应的负极值的贡献明显不如比湿梯度项, 甚至贡献相反(图 1a)。可见, 至少从经向梯度的分布可以看出, 对于与江淮地区梅雨锋系双锋结构对应的南北两个相当位温梯度大值区, 大气位温梯度和湿度梯度均有贡献, 但湿度梯度更重要(位温梯度主要对南侧的正梯度带有贡献; 而对位于北侧的负梯度带贡献不大, 且主要集中在中、高层, 在中、低层贡献相反, 且较弱; 而比湿梯度对南北两侧正负极值均有重要贡献)。

由以上分析可知, 梅雨锋系双锋结构与大气湿度梯度关系密切; 那么大气湿度梯度又有怎样的变化特征呢? 下面进一步分析大气湿度梯度的变化。

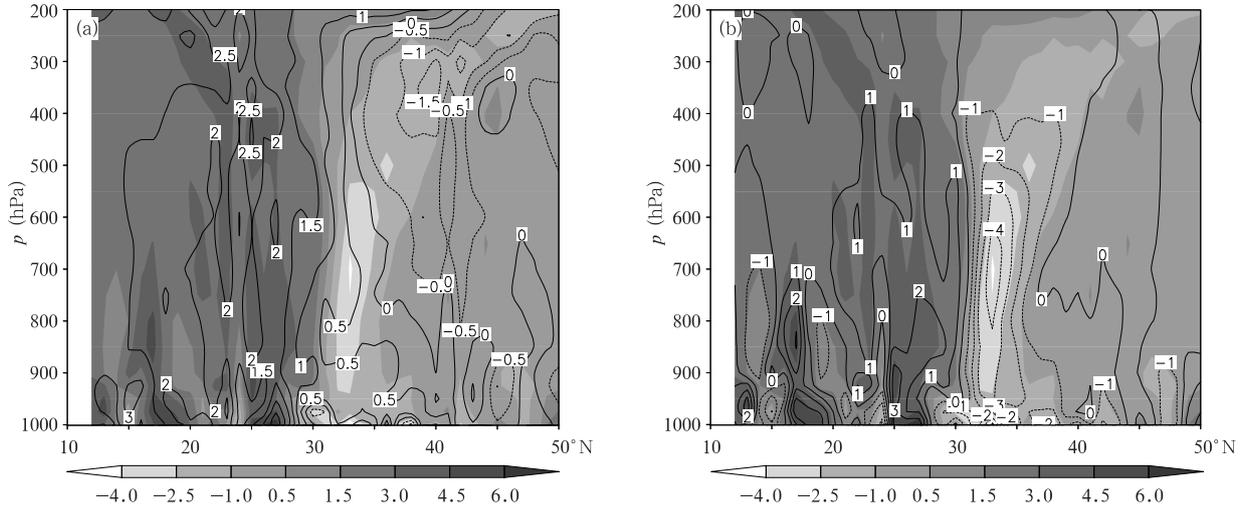


图1 模拟时段(3—57小时)平均的经过120°E的纬度-高度剖面

(a. 位温经向梯度项($\frac{\theta_e}{\theta} \frac{\partial \theta}{\partial y}$), 等值线间隔 0.5, b. 比湿经向梯度项($\frac{L\theta_e}{c_p T} \frac{\partial q}{\partial y}$), 等值线间隔 1;

阴影区为相当位温的经向梯度; 单位: 10^{-5} K/m)

Fig. 1 Time averaged latitude-height cross-sections of the meridional gradients of equivalent potential temperature (shadings; 10^{-5} K/m) and (a) potential temperature ($\frac{\theta_e}{\theta} \frac{\partial \theta}{\partial y}$) (contour interval: 0.5×10^{-5} K/m), and (b) specific humidity

($\frac{L\theta_e}{c_p T} \frac{\partial q}{\partial y}$) (contour interval: 10^{-5} K/m) across 120°E over the integration from the 3rd to 57th hour

3 大气湿度梯度倾向方程

为了分析大气湿度梯度的变化, 首先推导出大气湿度梯度倾向方程。

大气比湿方程写为

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \mathbf{V} \cdot \nabla q = S_v \quad (4)$$

这里 S_v 为大气比湿(水汽)源汇, 与水汽相变有关。云尺度模式的研究表明(Li, et al., 1999; Gao, et al., 2006; Gao, et al., 2005), S_v 可以表示为

$$S_v = -(P_{\text{CND}} + P_{\text{DEP}} + P_{\text{SDEP}} + P_{\text{GDEP}}) + P_{\text{REVP}} + P_{\text{MLTS}} + P_{\text{MLTG}} \quad (5)$$

这里既包含了与水汽相变相关的水相微物理过程又包含了冰相微物理过程。其中 P_{CND} 为水汽向云水的转化(凝结)率, P_{DEP} 、 P_{SDEP} 和 P_{GDEP} 分别为水汽向云冰、雪以及软雹(霰)的转化(凝华)率, P_{REVP} 、 P_{MLTS} 和 P_{MLTG} 分别为雨滴、融雪以及软雹表面液态水向水汽的转化(蒸发)率。对方程(4)两端做运算 ∇ , 得到

$$\frac{\partial \nabla q}{\partial t} + \nabla(\mathbf{V} \cdot \nabla q) = \nabla S_v \quad (6)$$

进一步推导得到

$$\frac{d\nabla q}{dt} + \frac{\partial q}{\partial x} \nabla u + \frac{\partial q}{\partial y} \nabla v + \frac{\partial q}{\partial z} \nabla w = \nabla S_v \quad (7)$$

式(7)便是大气比湿梯度的倾向方程, 为了更好的理解此倾向方程的物理意义, 将上述倾向方程写成分量形式为

$$\frac{dq_x}{dt} + q_x \frac{\partial u}{\partial x} + q_y \frac{\partial v}{\partial x} + q_z \frac{\partial w}{\partial x} = \frac{\partial S_v}{\partial x} \quad (8a)$$

$$\frac{dq_y}{dt} + q_x \frac{\partial u}{\partial y} + q_y \frac{\partial v}{\partial y} + q_z \frac{\partial w}{\partial y} = \frac{\partial S_v}{\partial y} \quad (8b)$$

$$\frac{dq_z}{dt} + q_x \frac{\partial u}{\partial z} + q_y \frac{\partial v}{\partial z} + q_z \frac{\partial w}{\partial z} = \frac{\partial S_v}{\partial z} \quad (8c)$$

其中, $q_x = \frac{\partial q}{\partial x}$, $q_y = \frac{\partial q}{\partial y}$, $q_z = \frac{\partial q}{\partial z}$, 式(8)进一步可以写成

$$\frac{\partial q_x}{\partial t} = \frac{\partial S_v}{\partial x} - \mathbf{V} \cdot \nabla q_x - \left(q_x \frac{\partial u}{\partial x} + q_y \frac{\partial v}{\partial x} + q_z \frac{\partial w}{\partial x} \right) \quad (9a)$$

$$\frac{\partial q_y}{\partial t} = \frac{\partial S_v}{\partial y} - \mathbf{V} \cdot \nabla q_y - \left(q_x \frac{\partial u}{\partial y} + q_y \frac{\partial v}{\partial y} + q_z \frac{\partial w}{\partial y} \right) \quad (9b)$$

$$\frac{\partial q_z}{\partial t} = \frac{\partial S_v}{\partial z} - \mathbf{V} \cdot \nabla q_z - \left(q_x \frac{\partial u}{\partial z} + q_y \frac{\partial v}{\partial z} + q_z \frac{\partial w}{\partial z} \right) \quad (9c)$$

由式(9)可知, 大气湿度梯度的局地变化与平流效

应、散度效应 $(-q_x \frac{\partial u}{\partial x}, -q_y \frac{\partial v}{\partial y}, -q_z \frac{\partial w}{\partial z})$ 、水平或垂直涡管(次级环流)效应 $(-q_y \frac{\partial v}{\partial x}, -q_x \frac{\partial u}{\partial y}; -q_z \frac{\partial w}{\partial y}, -q_y \frac{\partial v}{\partial z}, -q_x \frac{\partial u}{\partial z}, -q_z \frac{\partial w}{\partial x})$ 以及水汽源汇效应(云物理过程)的梯度有关。由于江淮梅雨锋系主要表现为南北向的相当位温梯度,因此,下面的分析将主要关注大气湿度梯度经向分量的变化,即方程(9b)。由式(9b)可知,大气经向湿度梯度的局地变化与经向湿度梯度的平流效应、水平涡旋(变形或者扭转)效应 $(-q_x \frac{\partial u}{\partial y})$ 、经向辐合、散(变形)效应 $(-q_y \frac{\partial v}{\partial y})$ 、经向次级环流 $(-q_z \frac{\partial w}{\partial y})$ 以及水汽源汇(云物理过程)的经向分布(梯度) $(\frac{\partial S_v}{\partial y})$ 有关。

4 双锋结构倾向方程模拟诊断

为了便于讨论梅雨锋系双锋结构的发展和演变,即锋生(消)过程,这里参照 Ninomiya(1984)锋生函数的定义,对方程(9b)两边同时乘以 q_y ,得

$$\underbrace{q_y \frac{\partial q_y}{\partial t}}_A = q_y \frac{\partial S_v}{\partial y} \underbrace{- q_y (\mathbf{V} \cdot \nabla q_y)}_B - \underbrace{q_x q_y \frac{\partial u}{\partial y}}_C - \underbrace{q_y q_y \frac{\partial v}{\partial y}}_D - \underbrace{q_y q_z \frac{\partial w}{\partial y}}_E \quad (10)$$

方程(10)左边表示了经向湿度梯度绝对值的局地变化,右端各项是对这种变化的贡献项,方程(10)将用于这一节的诊断。其中 A 为经向比湿梯度绝对值的局地变化项,代表梅雨锋系双锋结构极值的演变,进而代表了锋生(消)的变化; B 为比湿梯度的平流效应项, C 为水平涡旋(变形或者扭转)效应项, D 为经向辐合、散(或变形)效应项, E 为次级环流效应项。对于方程(10)中水汽源汇的经向梯度项 $(q_y \frac{\partial S_v}{\partial y})$,由于受模式目前没有输出详细物理过程的限制,在这里仅做间接的诊断(即 $q_y \frac{\partial S_v}{\partial y} = A - (B + C + D + E)$)及定性的理论探讨,待今后改造模式输出详细物理过程后,再做详细定量诊断。

我们先来定性分析水汽源汇效应项 $(q_y \frac{\partial S_v}{\partial y})$ 的作用,由方程(4)和(5)可知, S_v 代表由于水汽相变造成的大气比湿的个别变化。在梅雨锋附近,降水系统(云系)紧邻梅雨锋发展和演变(Cui, et al., 2003b),图2给出了模拟时段平均的经过 120°E 的纬度-高度剖面,由图可见,降水系统及降水云系总是沿着与梅雨锋对应的陡立的等相当位温面发展,我们知道,降水系统(云系)的发展与水汽相变过程密切相关,因此在降水系统(云系)附近, S_v 具有显著分布和变化。当降水和云系发展旺盛时,在梅

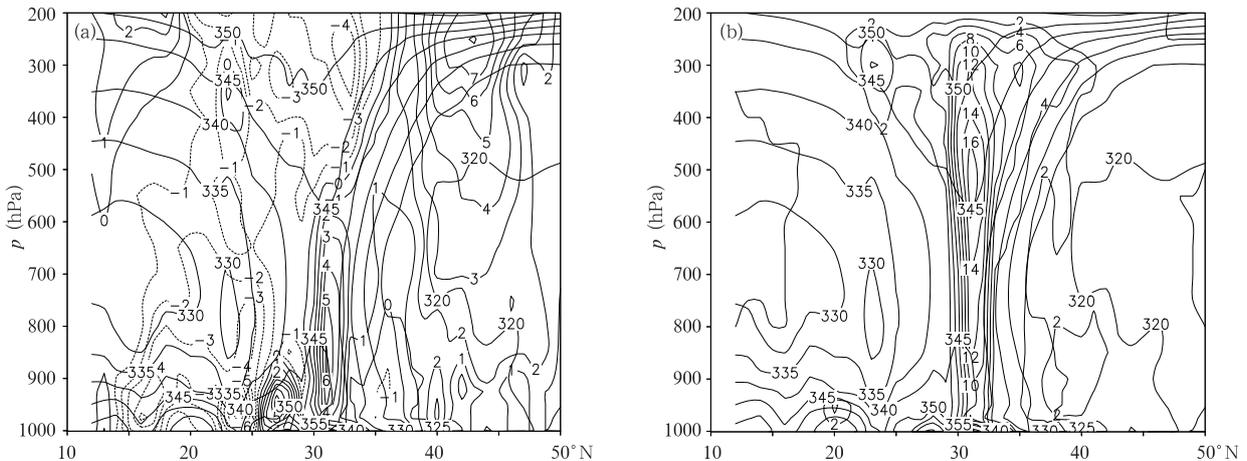


图2 模拟时段(3—57小时)平均的经过 120°E 的纬度-高度剖面
(粗实线为相当位温,单位:K;a.垂直相对涡度 (ζ_z) ,细线,等值线间隔 1.0 ,单位: 10^{-5} s^{-1} ;b.模式模拟的水凝物(云水、雨水等)之和,细实线,等值线间隔 2 ,单位: 10^{-5} kg/kg)

Fig. 2 Time averaged latitude-height cross-sections of equivalent potential temperature (thick solid lines; contour interval: 5 K) and (a) vertical component of relative vorticity (ζ_z ; thin solid lines; contour interval: 10^{-5} s^{-1}), and (b) sum of mixing ratios of simulated hydrometeors (cloud water, rain water and so on; thin solid lines; contour interval: $2 \times 10^{-5} \text{ kg/kg}$) along 120°E over the integration from the 3rd to 57th hour

雨锋附近,其南侧 S_v 往往为负值,并向北侧逐渐增长。因此,我们有 $q_y \frac{\partial S_v}{\partial y} < 0$ ($q_y < 0$),根据方程(10),从而造成经向比湿梯度绝对值出现负的变化, $q_y \frac{\partial q_y}{\partial t} < 0$,即经向比湿梯度减弱,进一步由方程(3)可知,这里的经向相当位温梯度也将减弱,即梅雨锋将出现锋消。

图3给出了模拟时段平均的式(10)中各项的纬度-高度剖面分布(其中对水汽源汇效应项的诊断,基于上面所述原因,在这里由 $q_y \frac{\partial S_v}{\partial y} = A - (B + C + D + E)$ 间接诊断得到),由图可见,从模拟时段时间平均角度来看,经向比湿梯度绝对值的主要变化出现在梅雨锋系双锋结构中北面的分支(即梅雨锋区)附近,垂直方向上主要分布在600 hPa以下,在700以及900 hPa附近各存在一个极大值中心,其中700 hPa附近的中心较强;而南面的经向梯度大值区没有太大变化(图3a),说明模拟时段内,明显的锋生过程出现在梅雨锋上,由于梅雨锋是冷干、暖湿空气以及梅雨锋与暴雨中尺度系统的主要相互作用区,因此这里明显的梯度变化和锋生(消)过程很容易理解。由图3b—3f可知,这种变化主要由经向辐合、散效应($-q_y q_y \frac{\partial v}{\partial y}$),经向次级环流效应($-q_y q_y \frac{\partial w}{\partial y}$)以及水汽源汇效应($q_y \frac{\partial S_v}{\partial y}$)造成。

经向辐合、散效应($-q_y q_y \frac{\partial v}{\partial y}$)在500 hPa以下的对流层中、低层较明显,700与900 hPa附近各存在一个正值中心,700 hPa的中心相对更强,说明在这里存在明显的经向辐合($\frac{\partial v}{\partial y} < 0$),造成较强的经向锋生。这里700、900 hPa的两个极值中心与经向比湿梯度绝对值的局地变化(图3a)中的两个极值中心一一对应,说明经向辐合动力过程对梅雨锋经向锋生十分重要。经向次级环流项(图3e)抵消了部分水汽源汇效应(图3f)的作用,并且两者均在700 hPa附近存在极值中心,与上面A和D项的极值中心一一对应,说明这些项都对梅雨锋经向大值梯度的变化具有重要贡献。与上述有关水汽源汇效应的讨论一致,这里简单的模拟诊断也表明,在梅雨锋附近,尤其是在降水系统(云系)与梅雨锋之

间,水汽源汇效应项将造成负值的A项变化,即经向比湿梯度绝对值负的变化,进而造成经向相当位温梯度绝对值负的变化,梅雨锋在这里出现锋消。以上暴雨过程时间平均的模拟诊断初步表明,对梅雨锋的经向锋生过程起主要作用的有3项:经向辐合动力过程以及经向次级环流效应促进锋生,而与微物理过程相关的水汽源汇的经向梯度效应则抑制了锋生。

这里给出的仅仅是暴雨过程模拟时段平均的结果,并且仅仅关注了经向的锋生、消。在天气系统不同的发展时期,不同的高度上,由于冷干、暖湿空气相互作用的不同以及梅雨锋与暴雨中尺度系统相互作用的不同,以上各项的作用将会出现一定的差异,因此,若想全面细致地考察这种锋生、消过程,进而研究梅雨锋与暴雨系统的相互作用过程,利用模式资料以及上述方程,探讨不同时段,不同方向的锋生、消是很有必要的。由于篇幅所限,这种在暴雨系统发展的不同时刻,梅雨锋系演变过程(锋生、消过程)的差异性将另文详细讨论。

5 结论和讨论

本文利用MM5对1999年江淮流域一次梅雨锋暴雨过程的数值模拟,利用高分辨率模拟资料,诊断了江淮地区梅雨锋系的双锋结构特征以及相应的大气相当位温、位温和湿度(比湿)分布特征。结果表明,大气位温梯度和湿度梯度均对江淮梅雨锋系双锋结构中相应的两个相当位温梯度大值带的存在有着重要贡献,而湿度梯度的贡献更大。进而,从理论上推导了大气湿度梯度倾向方程,并利用中尺度模拟资料进行了简单的方程收支诊断,指出,大气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等有关。模拟时段时间平均分析进一步指出,大气经向湿度梯度变化主要由经向辐合、散效应,经向次级环流效应以及水汽源汇效应造成,其中,在梅雨锋附近,辐合、散效应对锋生的作用最显著,而水汽源汇效应与上述辐合、散效应以及经向次级环流效应的作用相反,造成梅雨锋的锋消。由于水汽源汇与水汽相变过程直接相关,进而与云物理过程的发展和演变直接相关,因此,大气湿度梯度的演变与云物理过程,并进

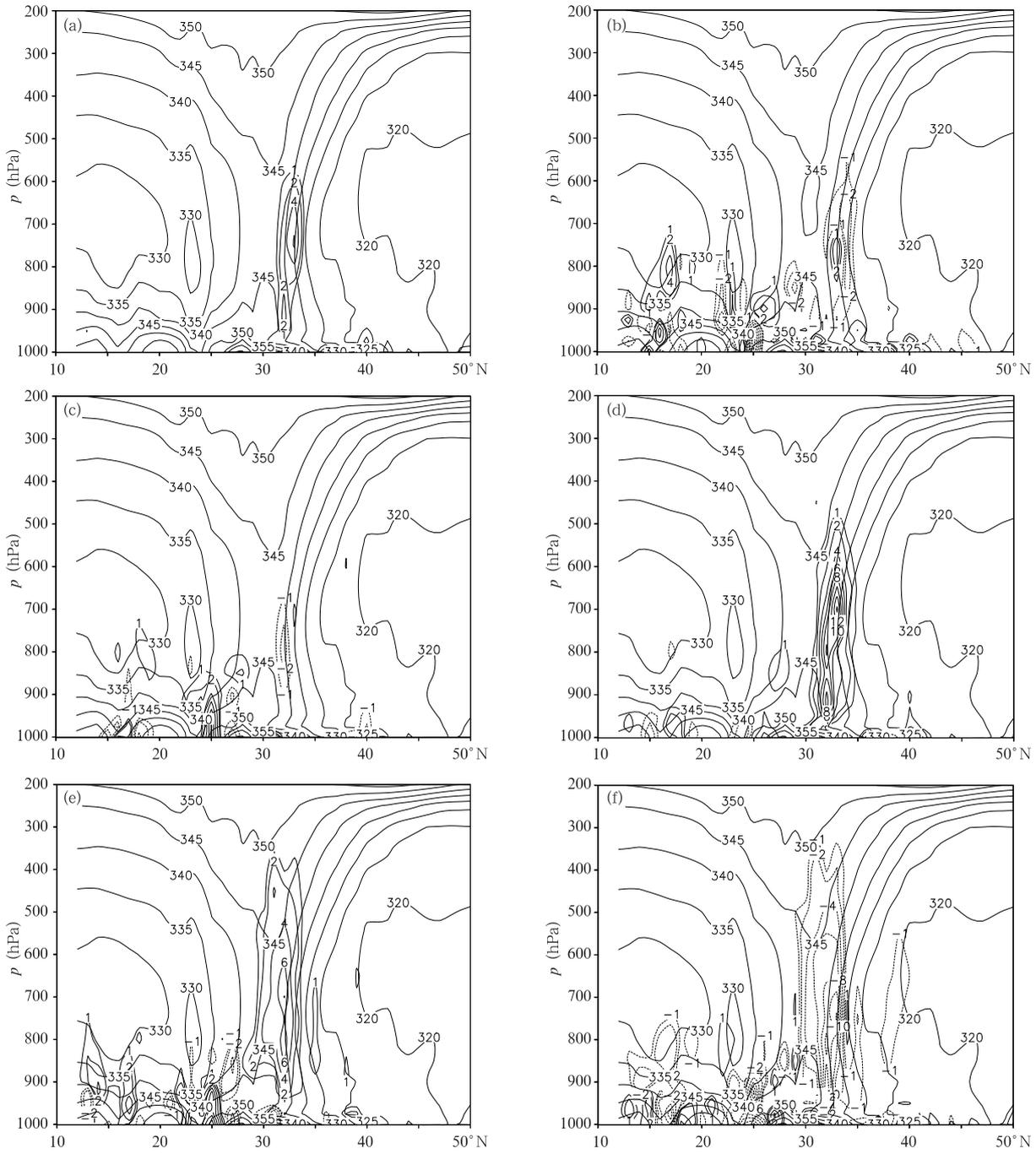


图3 模拟时段(3—57小时)平均的经过 120°E 的纬度-高度剖面

(细实线为相当位温,单位:K;粗线代表方程(10)中各项,单位: $10^{-21} \text{ kg}/(\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s})$; a. 经向比湿梯度绝对值的局地变化($q_y \frac{\partial q_y}{\partial t}$),

b. 平流效应项($-q_y(\mathbf{V} \cdot \nabla q_y)$), c. 水平旋转载效应项($-q_y q_y \frac{\partial u}{\partial y}$), d. 经向辐合、散效应项($-q_y q_y \frac{\partial v}{\partial y}$), e. 经向次级

环流效应项($-q_y q_y \frac{\partial w}{\partial y}$), f. $A - (B + C + D + E)$, 相当于水汽源汇效应项($q_y \frac{\partial S_v}{\partial y}$)

Fig. 3 Time averaged latitude-height cross-sections of equivalent potential temperature

(thin solid lines; contour interval: 5 K) and (a) local variation term of the meridional gradient of specific humidity($q_y \frac{\partial q_y}{\partial t}$),

(b) advection term($-q_y(\mathbf{V} \cdot \nabla q_y)$), (c) vertical vorticity term ($-q_y q_y \frac{\partial u}{\partial y}$), (d) meridional convergence term ($-q_y q_y \frac{\partial v}{\partial y}$),

(e) meridional secondary circulation terms($-q_y q_y \frac{\partial w}{\partial y}$), and (f) $A - (B + C + D + E)$, equivalent to source/sink terms of water

vapor($q_y \frac{\partial S_v}{\partial y}$) along 120°E over the integration from the 3rd to 57th hour (Bold lines; solid line; positive value; dash line; negative value) in a, b, c, d, e, f, are for the terms in Equation (10) in a unit of $10^{-21} \text{ kg}/(\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s})$

而与系统或云的分布、发展和演变相关。

本文研究表明,江淮地区与梅雨锋系双锋结构对应的两个相当位温梯度大值带与大气湿度分布关系十分密切,大气水汽分布对梅雨锋双锋结构的维持十分重要(Jiang, et al., 2004)。借助大气比湿梯度的倾向方程,可以探讨大气水汽分布(比湿梯度)的变化,进而探讨大气相当位温梯度的演变,得到江淮梅雨锋系双锋结构的演变规律(如锋生、消过程等)。

我们知道,江淮梅雨锋系与梅雨锋附近地区的降水(云系)以及相应的暴雨系统关系密切(Cui, et al., 2003b),梅雨锋系为暴雨系统的发生、发展提供了有利的环境条件(包括对流不稳定条件,充足的水汽供应以及抬升机制等),使得暴雨系统总是在梅雨锋附近发生、发展,暴雨系统和降水云系总是沿着梅雨锋陡立的等相当位温面发展和移动(Cui, et al., 2003b; Wu, et al., 1998),而暴雨系统的发展,又通过降水(水汽相变)热力强迫以及质量强迫效应(Gao, et al., 2002; Cui, et al., 2003a, 2003b; 崔晓鹏, 2001)(水汽相变造成大气质量亏损,连续性方程不守恒,出现源汇项。)等改变大气的温、湿结构等,进而对梅雨锋造成影响(产生锋生、消等变化)。充分了解这种梅雨锋与暴雨系统(尤其是直接造成暴雨的中尺度系统)之间的相互作用,对于我们进一步了解梅雨锋系附近的降水过程,做好降水预报都是十分重要的(Wang, et al., 2002)。利用涡度方程(Cui, et al., 2003b)以及上面提到的水汽梯度变化方程或者锋生函数方程(Niaomiya, 1984),我们可以深入探讨梅雨锋系与暴雨系统之间的这种相互作用过程。而本文的水汽梯度变化方程(式(9b)、(10))抓住了梅雨锋区的主要矛盾,即水汽分布(梯度)的重要作用,并将锋生、消过程与梅雨锋附近降水云物理过程通过水汽梯度变化联系起来,在梅雨锋系及其附近暴雨过程的诊断上具有一定特点和优势。

本文在模拟诊断中,仅仅利用了一个个例的模拟结果,考虑到个例之间的差异性,未来利用更多个例的资料进行研究是必要的。

References

Akiyama T. 1975. Southerly transversal moisture flux into the ex-

- tremely heavy rainfall zone in the Baiu season. *J Meteor Soc Japan*, 53:304-316
- Akiyama T. 1973. The large-scale aspects of the characteristic features of the Baiu Front. *Pap Meteor Geophys*, 24:157-188
- Cui X, Gao S, Wu G. 2003a. Moist potential vorticity and up-sliding slantwise vorticity development. *Chin Phys Lett*, 20:167-169
- Cui X, Gao S, Wu G. 2003b. Up-sliding slantwise vorticity development and the complete vorticity equation with mass forcing. *Adv Atmos Sci*, 20:825-836
- Cui X, Gao S, Zong Z, et al. 2005. Physical mechanism of formation of the bimodal structure in the Meiyu front system. *Chin Phys Lett*, 22:3218-3220
- Cui Xiaopeng. 2001. Study on slantwise vorticity development of subtropical cyclones[D]. Beijing: Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, 146pp
- Ding Yihui, Hu Guoquan. 2003. A study on water vapor budget over china during the 1998 severe flood periods. *Acta Meteor Sinica (in Chinese)*, 61: 129-145
- Gao S, Cui X, Zhu Y, et al. 2005. A modeling study of moist and dynamic vorticity vectors associated with 2D tropical convection. *J Geophys Res*, 110: D17104, doi:10.1029/2004JD005675
- Gao S, Lei T, Zhou Y. 2002. Moist potential vorticity anomaly with heat and mass forcings in torrential rain systems. *Chin Phys Lett*, 19:878-880
- Gao S, Ping F, Cui X, et al. 2006. Short timescale air-sea coupling in the tropical deep convective regime. *Meteor Atmos Phys*, 93: 37-44, doi 10.1007/s00703-005-0161-8
- Gao S, Tao S, Ding Y. 1990. The generalized E-P flux of wave-mean flow interactions. *Sci Chin (Ser B)*, 33:704-715
- Jiang J, Ni Y. 2004. Diagnostic study on the structural characteristics of a typical Mei-yu front system and its maintenance mechanism. *Adv Atmos Sci*, 21:802-813
- Kato K, Matsumoto J, Iwasaki H. 1995. Diurnal variation of cb-clusters over China and its relation to large-scale conditions in the summer of 1979. *J Meteor Soc Japan*, 73: 1219-1234
- Kato K. 1992. Synoptic features on moisture field and shallow convection in the subtropical high area around Japan in early July of 1988. *J Meteor Soc Japan*, 70:757-768
- Li X, Sui C H, Lau K M, et al. 1999. Large-scale forcing and cloud-radiation interaction in the tropical deep convective regime. *J Atmos Sci*, 56:3028-3042
- Lim Y K, Kim K Y. 2002. Temporal and spatial evolution of the Asian summer monsoon in the seasonal cycle of synoptic fields. *J Climate*, 15:3630-3644
- Matsumoto S, Ninomiya K, Yoshizumi S. 1971. Characteristic features of Baiu front associated with heavy rainfall. *J Meteor Soc Japan*, 49:267-281
- Matsumoto S, Yoshizumi S, Takeuchi M. 1970. On the structure of the Baiu front and associated intermediate-scale disturbances in the lower atmosphere. *J Meteor Soc Japan*, 48:479-491

- Moteki Q, Uyeda H, Maesaka T, et al. 2004a. Structure and development of merged two rainbands observed over East China Sea during X-BAIU-99. Part I: Meso- β -scale structure and development processes. *J Meteor Soc Japan*, 82: 19-44
- Moteki Q, Uyeda H, Maesaka T, et al. 2004b. Structure and development of merged two rainbands observed over East China Sea during X-BAIU-99. Part II: Meso-scale structure and build-up processes of convergence in the Baiu frontal region. *J Meteor Soc Japan*, 82:45-65
- Murakami T. 1959. The general circulation and water-vapor balance over the Far East during the rainy season. *Geophys Mag*, 29: 131-171
- Ni Yunqi, Zhou Xiuji. 2004. 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 Meteor Sinica (in Chinese)*, 62(5): 647-662
- Ninomiya K. 1999a. Moisture balance over China and the South China Sea during the summer monsoon in 1991 in relation to the intense rainfalls over China. *J Meteor Soc Japan*, 77:737-751
- Ninomiya K, Kobayashi C. 1999b. Precipitation and moisture balance of the Asian summer monsoon in 1991 part II: Moisture transport and moisture balance. *J Meteor Soc Japan*, 77:77-99
- Ninomiya K. 1984. Characteristics of Baiu front as a predominant subtropical front in the summer Northern Hemisphere. *J Meteor Soc Japan*, 62:880-894
- Ninomiya K. 2000. Large- and meso- α -scale characteristics of Meiyu/Baiu front associated with intense rainfalls in 1-10 July 1991. *J Meteor Soc Japan*, 78:141-157
- Qin Danyu, Jiang Jixi, Fang Zongyi. 2004. The characteristics of water vapor plume in the heavy rain events during 21-24 June 2002. *Acta Meteor Sinica (in Chinese)*, 62(3): 329-337
- Shinoda T, Uyeda H, Yoshimura K. 2005. Structure of moist layer and sources of water over the southern region far from the Meiyu/Baiu front. *J Meteor Soc Japan*, 83:137-152
- Shinoda T, Uyeda H. 2002. Effective factors in the development of deep convective clouds over the wet region of eastern China during the summer monsoon season. *J Meteor Soc Japan*, 80:1395-1414
- Shou Shaowen, Li Yaohui and Fanke. 2001. Isentropic potential vorticity analysis of the mesoscale cyclone development in a heavy rain process. *Acta Meteor Sinica (in Chinese)*, 59(5):560-568
- Wang C, Wu R, Wang Y. 2002. Interaction of diabatic frontogenesis and moisture processes in cloud-frontal rain-band. *Adv Atmos Sci*, 19:544-561
- Wang Y, Wu R, Pan Y. 2000. Evolution and frontogenesis of an imbalanced flow-the influence of vapor distribution and orographic forcing. *Adv Atmos Sci*, 17:256-274
- Wu G, Liu H. 1998. Vertical Vorticity development owing to down-sliding at slantwise isentropic surface. *Dyna Atmos Ocea*, 27: 715-743
- Xu X, Miao Q, Wang J, et al. 2003. Transport model at the regional boundary during the Meiyu period. *Adv Atmos Sci*, 20:333-342
- Yan J, Wu G, Cui X. 2005. Comparison of two kinds of atmospheric vorticity equations. *Chin Phys Lett*, 22:769-772
- Yi Qingju, Xu Xiangde. 2002. The propagation and development of cloud cluster systems and severe precipitation event in 1998. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 6(2):129-145
- Zhou Y, Gao S, Samuel S P Shen. 2005. A diagnostic study of formation and structures of the MYFS over East Asia. *J Meteor Soc Japan*, 82:1565-1576

附中文参考文献

- 崔晓鹏. 2001. 温带气旋倾斜涡度发展理论研究[D]. 北京:中国科学院大气物理研究所, 146pp
- 丁一汇, 胡国权. 2003. 1998年中国大洪水时期的水汽收支研究. *气象学报*, 61(2):129-145
- 倪允琪, 周秀骥. 2004. 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*, 62(5):647-662
- 寿绍文, 李耀辉, 范可. 2001. 暴雨中尺度气旋发展的等熵面位涡分析. *气象学报*, 59(5):560-568
- 覃丹宇, 江吉喜, 方宗义. 2004. 2002年6月21—24日梅雨锋暴雨过程中的水汽羽特征. *气象学报*, 62(3):329-337
- 仪清菊, 徐祥德. 2002. 不同尺度云团系统上下游的传播与1998年长江流域大暴雨. *气候与环境研究*, 6(2):129-145