0577-6619/2009/67(4)-0540-48 *Acta Meteorologica Sinica* 气象学报

对流涡度矢量和湿涡度矢量在暴雨诊断分析中的应用研究*

赵 宇[1,2] 崔晓鹏[3]

ZHAO Yu[1,2] CUI Xiaopeng[3]

1. 南京信息工程大学,南京,210044
2. 中国气象局武汉暴雨研究所,武汉,430074
3. 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
1. *Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing* 210044,*China*
2. *Institute of Heavy Rain, CMA Wuhan, Wuhan* 430074,*China*
3. *Laboratory of Cloud-Precipitation Physics and Severe Storms, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100029,*China*

2007-11-11 收稿,2008-05-23 改回.

Zhao Yu, Cui Xiaopeng. 2009. Application of convective and moist vorticity vectors in the analysis of a heavy rainfall event. *Acta Meteorologica Sinica*, 67(4):540－548

Abstract Convective vorticity vector (CVV, $(\zeta_a \times \nabla \theta_e)/\rho$) and moist vorticity vector (MVV, $(\zeta_a \times \nabla q_v)/\rho$) introduced by Gao et al. in 2004, 2005, and 2007 are used to study a heavy rainfall event in North China. The result shows that vertical components of the CVV and the MVV are closely associated with clouds and precipitation. Analysis of domain-averaged and mass-integrated quantities shows that the linear correlation coefficients between the vertical component of the CVV (MVV) and the sum of mixing ratio of cloud hydrometeors is 0.92 (0.95), and that between the vertical component of the CVV (MVV) and precipitation rate is 0.71 (0.47). Cloud hydrometeors can be further broken into ice hydrometeor and water hydrometeors. Although ice hydrometeors are little, they contribute more to the evolution of clouds. Analysis of lag correlation suggests that minimum cloud hydrometeor leads the maximum precipitation rate by 4－5 h, and maximum cloud hydrometeor lags maximum precipitation rate by 1－2 h. The lag correlation coefficient between cloud hydrometeors and precipitation rate is mainly determined by the weighted lag correlation coefficient between water hydrometeors and surface rain rate, only one fourth of the lag correlation coefficient is contributed to the weighted lag correlation coefficients between ice hydrometeors and surface rain rate. Vertical components of CVV and MVV are well correlated with cloud hydrometeors (in phase or lag correlation) and precipitation rate, and they may represent the development of clouds and convective system. The local changes of C_z and M_z lead surface rain rate by 3 h, which may be a precursor for rainfall and has potential significance for rainfall prediction. The linear correlation coefficient between the local change of C_z and surface rain rate is larger than that between the local change of M_z and surface rain rate. Therefore, the local change of C_z can be used to estimate the change of surface rain rate in operational forecast.

Key words Convective Vorticity Vector(CVV), Moist Vorticity Vector(MVV), Heavy rainfall event, Lag correlation

摘 要 利用对流涡度矢量(CVV,$(\zeta_a \times \nabla \theta_e)/\rho$)和湿涡度矢量(MVV,$(\zeta_a \times \nabla q_v)/\rho$)对华北地区一次大范围的大到暴雨天气过程进行了诊断研究。结果表明,CVV 和 MVV 垂直分量与云和降水密切相关,暴雨区区域平均和垂直积分的 CVV 和

* 资助课题:中国气象局武汉暴雨研究所暴雨研究开放基金项目(IHR2008K03),国家自然科学基金项目(40775036)及山东省气象局项目(2006sdqxz18)。

作者简介:赵宇,主要从事中小尺度动力学和数值模拟的研究工作。E-mail:zy0817@126.com

MVV 垂直分量与云中水凝物混合比的相关系数分别为 0.92 和 0.95,与降水率的相关系数分别为 0.71 和 0.47。云中水凝物分为液态水凝物和固态水凝物,虽然固态水凝物的含量相对较少,但它在云的变化中起着更重要的作用。滞后相关分析表明,降水率的峰值到来之前 4—5 h 云中水凝物含量最少,降水率的峰值到来之后 1—2 h,云中水凝物含量最多。云中水凝物与降水率的滞后相关系数主要是由液态水凝物与降水率的滞后相关系数决定的,只有约 1/4 的滞后相关系数是由固态水凝物与降水率的滞后相关系数贡献的。CVV 和 MVV 的垂直分量与云中水凝物具有非常好的相关性(同时及滞后),与降水率的相关也较好,可以代表云和对流系统的发展。CVV 和 MVV 垂直分量的局地变化超前降水率 3 h 左右,可以作为降水发生的先兆,对降水的预报有潜在的意义。CVV 垂直分量的局地变化与降水率的相关系数大于 MVV 垂直分量的局地变化与降水率的相关系数,因此在实际预报中可以利用 CVV 垂直分量的局地变化来估计未来降水的变化。

关键词　对流涡度矢量,湿涡度矢量,暴雨,滞后相关

中图法分类号　P44

1　引　言

早在 20 世纪 30 年代末,Rossby(1939,1940)就注意到绝对涡度 ζ_a 的垂直分量 ζ_z 对大尺度运动的重要性,并提出在正压大气中 ζ_z/h 的守恒性(h 为流体柱的厚度)。40 年代初,Ertel(1942)提出了位涡的概念,即 $P_E=\zeta_a\cdot\nabla\theta/\rho$,指出在绝热无摩擦的干空气中,Ertel 位涡具有严格守恒的特性。80 年代初,Hoskins 等(1985)对位涡在大气诊断中的应用做了系统的分析,再次指出了位涡理论的应用价值。然而,当有云发展和潜热释放时,位涡不再守恒。Bennetts 等(1979)引入潜热作用,导得湿球位涡变化方程。90 年代初,吴国雄等(1995)用相当位温代替位温,证得绝热无摩擦的饱和湿空气具有湿位涡守恒的特性,在此基础上研究了湿斜压过程中垂直涡度的发展。位涡除了在绝热无摩擦的干空气中具有严格守恒的特性外,在平衡系统中还具有可逆性以及位涡物质的不可穿透性等重要特性,因此位涡理论在分析天气系统移动和发展方面有着广泛的应用,尤其是在对爆发性气旋的研究方面取得了较大的进展(Cao, et al,1995;Cho, et al, 1998;Huo, et al,1999;Jonathan, et al,2002;Cray,2002;Cui, et al, 2003)。Atallah 等利用位涡理论研究飓风的变性和降水分布,也得出了有指导意义的研究成果。对大尺度运动来说,位涡是完美的,因为在笛卡尔坐标系中位温面与水平面是近似平行的,涡度矢量和位温梯度矢量的交角较小,两个矢量点乘的积是明显的。因此对许多中高纬度天气系统的发展和演变来说,位涡是一个非常有效的热力动力示踪物。

在中尺度系统的发展和演变中位涡也有较大的应用空间,但在深对流系统中,由于湿等熵面的倾斜,位温梯度矢量与涡度矢量的交角变大,极端时可接近 90°,两个矢量的点乘积变小,位涡变得较弱。高守亭等(2004,2005,2007)将位涡定义广义化,引入了对流涡度矢量(CVV,$(\zeta_a\times\nabla\theta_e)/\rho$)和湿涡度矢量(MVV,$(\zeta_a\times\nabla q_v)/\rho$))的概念,他们在二维云分辨模式及三维云分辨模式中应用对流涡度矢量和湿涡度矢量研究热带对流系统得到了较有价值的研究成果:CVV 和 MVV 的垂直分量与热带对流密切相关,能把热带对流的中尺度动力过程和热力过程与云微物理过程密切联系起来。

虽然上述对 CVV 和 MVV 的研究得到了令人鼓舞的结果,但仍有许多工作要做。因为这些研究局限在热带对流,而热带对流与中纬度对流有着很大的不同,那么 CVV 和 MVV 是否仍然可以作为研究中纬度深对流系统的有力工具?它们和云的发展及暴雨的关系如何?崔晓鹏等(2007)用 CVV 研究江淮流域暴雨中尺度系统的发展和移动,发现 CVV 垂直分量的分布与垂直运动和云中水凝物对应得较好。赵宇等(2007,2008)分别用 CVV 和 MVV 研究了华北地区一次强降水过程,指出 CVV 和 MVV 垂直分量比湿位涡与云中水凝物和地面降水有更好的对应关系。可见,CVV 和 MVV 在分析中纬度和副热带系统发展以及降水发生方面是十分有用的。我们知道,云中水凝物可进一步分为固态水凝物和液态水凝物,这两种相态的水凝物,哪一种在降水发展中起主导作用?CVV 和 MVV 与云和降水的发生发展又有怎样的超前滞后关系?在暴雨预报中有什么实际意义?这些都是亟待解决的问题。因此,本文针对上述问题对 CVV 和 MVV 进行较为深入的研究。

本文利用非静力中尺度模式系统 ARPS(The Advanced Regional Prediction System),对 2004 年 8 月 12—13 日发生在华北地区的强降水天气过程

进行数值模拟,利用模式输出的高时空分辨率资料,计算三维的 CVV 和 MVV 以及区域平均和垂直积分的 CVV 和 MVV 各分量及湿位涡与云中水凝物混合比(云水(小云滴)、雨水(雨滴)、云冰(小冰晶)、雪和雹)和地面降水率之间的滞后相关关系。

2 对流涡度矢量、湿涡度矢量和湿位涡的定义和计算

在笛卡尔坐标系中,对流涡度矢量($\boldsymbol{C}$)、湿涡度矢量($\boldsymbol{M}$)、湿位涡(P_{m})分别定义为

$$\boldsymbol{C}=\frac{\boldsymbol{\zeta}_{\mathrm{a}}\times\nabla\theta_{\mathrm{e}}}{\rho} \tag{1}$$

$$\boldsymbol{M}=\frac{\boldsymbol{\zeta}_{\mathrm{a}}\times\nabla q_{\mathrm{v}}}{\rho} \tag{2}$$

$$P_{\mathrm{m}}=\frac{\boldsymbol{\zeta}_{\mathrm{a}}\cdot\nabla\theta_{\mathrm{e}}}{\rho} \tag{3}$$

式中 $\boldsymbol{\zeta}_{\mathrm{a}}=\nabla\times\mathbf{V}+2\boldsymbol{\Omega}$ 为绝对涡度,θ_{e} 为相当位温,q_{v} 为比湿,ρ 为湿空气密度。因此在 z 坐标系中,$\boldsymbol{C}$、$\boldsymbol{M}$ 和 P_{m} 分别为:

$$\boldsymbol{C}=\frac{1}{\rho}\left[\left(\zeta_y\frac{\partial\theta_{\mathrm{e}}}{\partial z}-\zeta_z\frac{\partial\theta_{\mathrm{e}}}{\partial y}\right)\boldsymbol{i}+\left(\zeta_z\frac{\partial\theta_{\mathrm{e}}}{\partial x}-\zeta_x\frac{\partial\theta_{\mathrm{e}}}{\partial z}\right)\boldsymbol{j}+\left(\zeta_x\frac{\partial\theta_{\mathrm{e}}}{\partial y}-\zeta_y\frac{\partial\theta_{\mathrm{e}}}{\partial x}\right)\boldsymbol{k}\right]=C_x\boldsymbol{i}+C_y\boldsymbol{j}+C_z\boldsymbol{k} \tag{4}$$

$$\boldsymbol{M}=\frac{1}{\rho}\left[\left(\zeta_y\frac{\partial q_{\mathrm{v}}}{\partial z}-\zeta_z\frac{\partial q_{\mathrm{v}}}{\partial y}\right)\boldsymbol{i}+\left(\zeta_z\frac{\partial q_{\mathrm{v}}}{\partial x}-\zeta_x\frac{\partial q_{\mathrm{v}}}{\partial z}\right)\boldsymbol{j}+\left(\zeta_x\frac{\partial q_{\mathrm{v}}}{\partial y}-\zeta_y\frac{\partial q_{\mathrm{v}}}{\partial x}\right)\boldsymbol{k}\right]=M_x\boldsymbol{i}+M_y\boldsymbol{j}+M_z\boldsymbol{k} \tag{5}$$

$$P_{\mathrm{m}}=\zeta_x\frac{\partial\theta_{\mathrm{e}}}{\partial x}+\zeta_y\frac{\partial\theta_{\mathrm{e}}}{\partial y}+\zeta_z\frac{\partial\theta_{\mathrm{e}}}{\partial z} \tag{6}$$

其中 $\zeta_x=\frac{\partial w}{\partial y}-\frac{\partial v}{\partial z}$,$\zeta_y=\frac{\partial u}{\partial z}-\frac{\partial w}{\partial x}+f'$,$\zeta_z=\frac{\partial v}{\partial x}-\frac{\partial u}{\partial y}+f$,$f$ 是地转参数,$f=2\Omega\sin\varphi$,$f'=2\Omega\cos\varphi$,φ 为纬度。由于 f' 比($\frac{\partial u}{\partial z}-\frac{\partial w}{\partial x}$)小一个量级,为计算和讨论的方便,本文计算 ζ_y 时忽略 f'。C_x 表示经向涡度和相当位温垂直梯度的相互作用以及垂直涡度和相当位温经向梯度的相互作用,C_y 反映了纬向涡度和相当位温垂直梯度的相互作用以及垂直涡度和相当位温纬向梯度的相互作用,C_z 表示水平涡度和水平相当位温梯度的相互作用。而 M_x 表示经向涡度和比湿垂直梯度的相互作用以及垂直涡度和比湿经向梯度的相互作用,M_y 反映了纬向涡度和比湿垂直梯度的相互作用以及垂直涡度和比湿纬向梯度的相互作用,M_z 表示水平涡度和水平比湿梯度的相互作用。

本文利用数值模式的输出资料计算了 CVV 和 MVV 各分量 C_x、C_y、C_z、M_x、M_y、M_z 及湿位涡 P_{m} 从 250 m 到模式顶 20500 m 高度的垂直积分$[C_x]$,$[C_y]$,$[C_z]$,$[M_x]$,$[M_y]$,$[M_z]$,$[P_{\mathrm{m}}]$,同时计算了云中水凝物混合比($q_5=q_{\mathrm{c}}+q_{\mathrm{r}}+q_{\mathrm{i}}+q_{\mathrm{s}}+q_{\mathrm{h}}$)、固态水凝物混合比 q_3($q_3=q_{\mathrm{i}}+q_{\mathrm{s}}+q_{\mathrm{h}}$)、液态水凝物混合比 q_2($q_2=q_{\mathrm{c}}+q_{\mathrm{r}}$)的垂直积分$[q_5]$、$[q_3]$和$[q_2]$。

3 暴雨过程数值模拟及验证

3.1 降水概况

2004 年 8 月 12 日 08 时(北京时,下同)—13 日 08 时,受副热带高压和弱冷空气的影响,华北大部分地区出现了一次区域性大到暴雨天气过程,雨带呈东北—西南向带状分布(图 1),覆盖了河北、山西和京津的大部地区。整个雨带内有 A、B、C 3 个降水中心(图 1a),A 中心(即最大的降水中心)位于河北省的元氏(37.75°N,114.53°E),雨量为 133.2 mm;B 中心位于山西中部的太谷(37.41°N,112.58°E),雨量为 107.2 mm;C 中心位于天津的塘沽(39°N,117.71°E),降水量为 68.7 mm。全国 730 个标准站的降雨量资料中,华北地区共有 29 个站的雨量超过 50 mm,5 个站的雨量超过 100 mm。

3.2 模式和模拟方案设计

本文采用美国俄克拉荷马大学风暴分析和预测中心开发的非静力中尺度模式系统 ARPS 对该暴雨过程进行数值模拟。模式模拟区域中心为(40.0°N,115°E),水平网格点数为 91×91,水平网格距为 27 km,模式区域在垂直方向分 43 层,垂直方向的平均格距是 500 m;采用每 6 h 间隔分辨率为 1°×1°的美国 NCEP 分析资料作为模式的初始场和侧边界条件,初始时刻利用 ARPS 的初值分析模块 ADAS,将地面和探空资料分析到初始场中,对其进行订正,形成模式的初值。模式以 2004 年 8 月 12 日 08 时为初始时刻,积分 24 h。模拟中包含的物理过程主要有:Kain-Fritsch 积云对流参数化方案,Lin 等(1983)冰微物理参数化方案,大气辐射传输参数化方案;地表采用 Noilhan/Planton 方案及两层土壤植被模式,1.5 阶 TKE 次网格湍流混合方案。每30 min 输出一聪模拟结果。

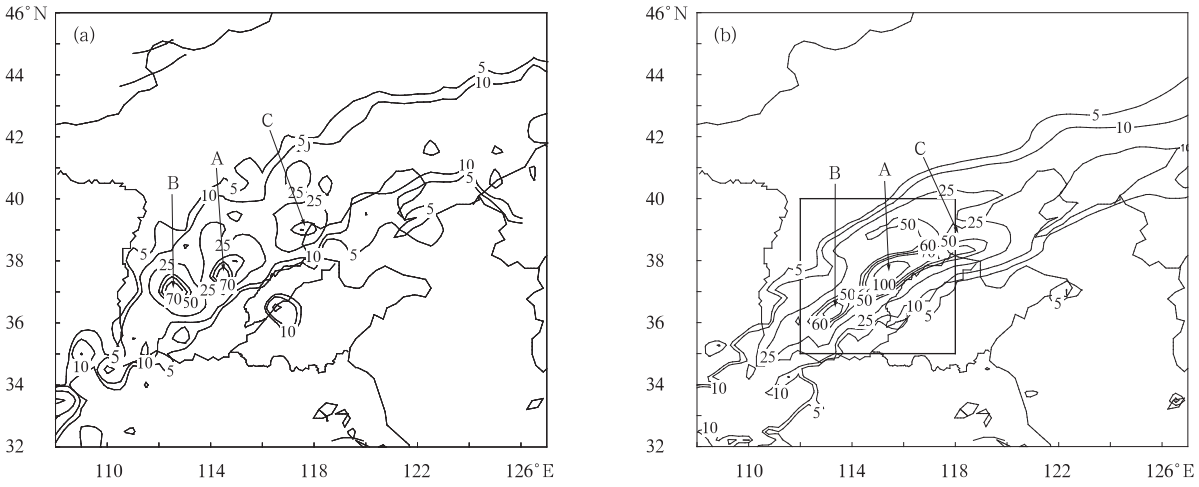


图 1　2004 年 8 月 12 日 08 时—13 日 08 时降水实况(a)及模拟(b)(单位:mm)
(等值线:5,10,25,50,60,70,100;其中 A,B 和 C 分别代表 3 个暴雨中心)

Fig. 1　Observed (a) and simulated (b) rainfall (mm) from 08:00 BST 12 to 08:00 BST 13 August 2004
A,B and C represent three heavy rainfall centers;contours: 5, 10, 25, 50, 60, 70, 100

3.3　数值模拟结果检验

对比 24 h 实况降水(图 1a)与模拟结果(图 1b),可以发现模式较好地再现了这次降水过程,模拟的雨带走向、雨区范围和量级与实况有很好的一致性。模式基本模拟出了 3 个雨量中心,模拟的 A 中心雨量为 130 mm,与实况非常接近,位置比实况略偏南,模拟的 100 mm 的雨量范围较实况偏大;模拟的 B 中心雨量为 75 mm,比实况略偏小,位置也比实况偏南;模拟的 C 中心比实况偏南 100 km,雨量接近实况,但模拟的 A 中心和 C 中心之间的降水比实况略偏大,故 C 中心没有像实况那样成为一个单独中心。

通过对比模拟的 6 h 累积降水量与实况 6 h 降水(图 2),可以发现模式基本复制出了这场强降水过程,降水的位置和强度与实况比较接近。模式清楚地模拟出东北—西南向带状雨区的南压和暴雨中心的发展演变过程。通过对比模拟的形势场与实况形势场可以发现,模式较好地模拟出了大尺度环流形势的发展和演变。有关模拟更细致的验证可参见文献(赵宇等,2008)。总之,模式模拟的降水的发生发展趋势与实况比较接近,模拟结果基本抓住了各时段中尺度系统的发展演变特征,能清楚地反映中尺度雨团的活动,比较合理地再现了这次暴雨天气的形成和发展过程,下面利用高分辨率的数值模拟结果对这次暴雨过程做进一步的分析。

4　对流涡度矢量、湿涡度矢量和湿位涡的诊断

4.1　对流涡度矢量、湿涡度矢量及湿位涡与云中水凝物的相关关系

本文选取降水发生的主要区域(35°—40°N,112°—118°E,图 1b 中的方框所示)计算了各垂直积分量的区域平均。从区域平均的$[C_x]$、$[C_y]$、$[C_z]$、$[P_m]$和$[q_5]$的时间序列(图 3a)中可以看到,$[C_z]$和$[q_5]$两条曲线的变化十分接近,都有两个峰值和一个谷值,它们的相关系数高达 0.92,表明$[C_z]$与云中水凝物的相关性非常好,$[C_z]$直接反映了云和降水的发生发展。$[C_x]$为负值,它的变化与$[q_5]$的变化呈反位相,两者的相关系数为−0.79。$[C_y]$虽为正值,但它与$[q_5]$的相关系数仅为 0.19。从区域平均的$[M_x]$、$[M_y]$、$[M_z]$和$[q_5]$的时间序列(图 3b)可以看到,$[M_z]$和云的相关性也十分好,它们的相关系数达 0.95。而$[M_x]$和$[M_y]$与$[q_5]$的相关系数分别为−0.39、0.41。从图中还可看到$[P_m]$与$[q_5]$的相关性并不好,它们之间的相关系数仅为0.47,远低于$[C_z]$、$[M_z]$与$[q_5]$的相关。图 3c 给出了地面降水率和云中水凝物的时间序列,由图可见地面降水率与云的发展演变并不完全一致,两者具有一定的位相差,进一步分析发现液态水凝物$[q_2]$与总水凝物$[q_5]$的位相变化非常一致,固态水凝物$[q_3]$的含量相对较少,其分布与总水凝物和液态水凝物有所不同,只有一个明显的高值。$[C_z]$与降水

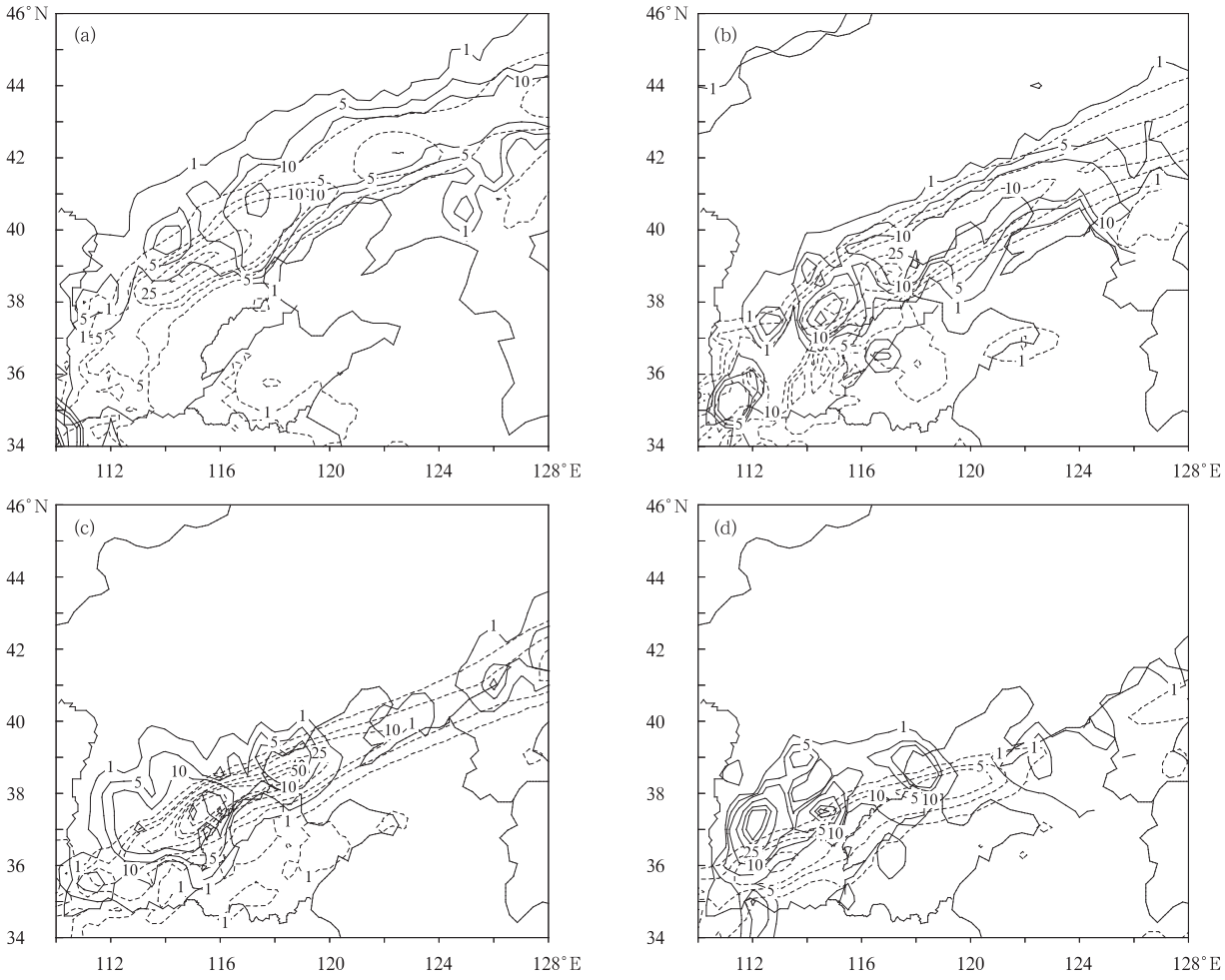


图 2 2004 年 8 月 12 日 08 时—13 日 08 时每隔 6 h 的实况(实线)和模拟(虚线)降水量对比(单位:mm)
(a. 12 日 08—14 时,b. 12 日 14—20 时,c. 12 日 20—13 日 02 时, d. 13 日 02—08 时; 等值线:1, 5, 10, 25, 40, 50, 75)

Fig. 2 Comparison of real (solid line) and simulated (dashed line) 6-h accumulated rainfall (mm) from 08:00 BST 12 to 08:00 BST 13 August 2004
(a) 08:00—14:00 BST 12 August, (b) 14:00—20:00 BST 12 August, (c) 20:00 12 —02:00 BST 13 August, and (d) 02:00—08:00 BST 13 August; contours: 1, 5, 10, 25, 40, 50, and 75

率的相关系数为 0.71,超过了 99%的置信度检验,$[M_z]$与降水率的相关系数为 0.47,也超过了 98%的置信度检验。

C_z/M_z 是把水平涡度和相当位温(比湿)的水平梯度很好地耦合在一起的物理量,综合反映了系统发展过程中次级环流和水平湿斜压性的变化,它们把系统发生发展的动力作用和热力作用密切地联系在一起。云的形成和发展虽然直接是由云的微物理过程决定的,但动力过程和热力过程在对流系统的发展演变过程中对云的微物理过程也有着重要影响。C_z/M_z 虽为热动力学量,但它们与云的相关性很好,可以通过对 C_z/M_z 的分析来探讨云的发展和演变,通过 C_z/M_z 的变化方程来探讨云微物理过程和热动力过程的相互联系,因此 C_z/M_z 架起了中尺度动力过程和热力过程与云微物理过程相互联系的桥梁,可以很好地揭示降水的发生发展过程。

从上述分析可知 C_z 和 M_z 是与云的发展相联系的参数,而云的发展与降水率有一定的位相差。那么 C_z、M_z 及云中水凝物与地面降水率的超前滞后关系如何呢? 我们是否可以通过对 C_z 和 M_z 的研究来反映云的发展和演变过程,从而对地面降水进行可能的估计和预测呢?

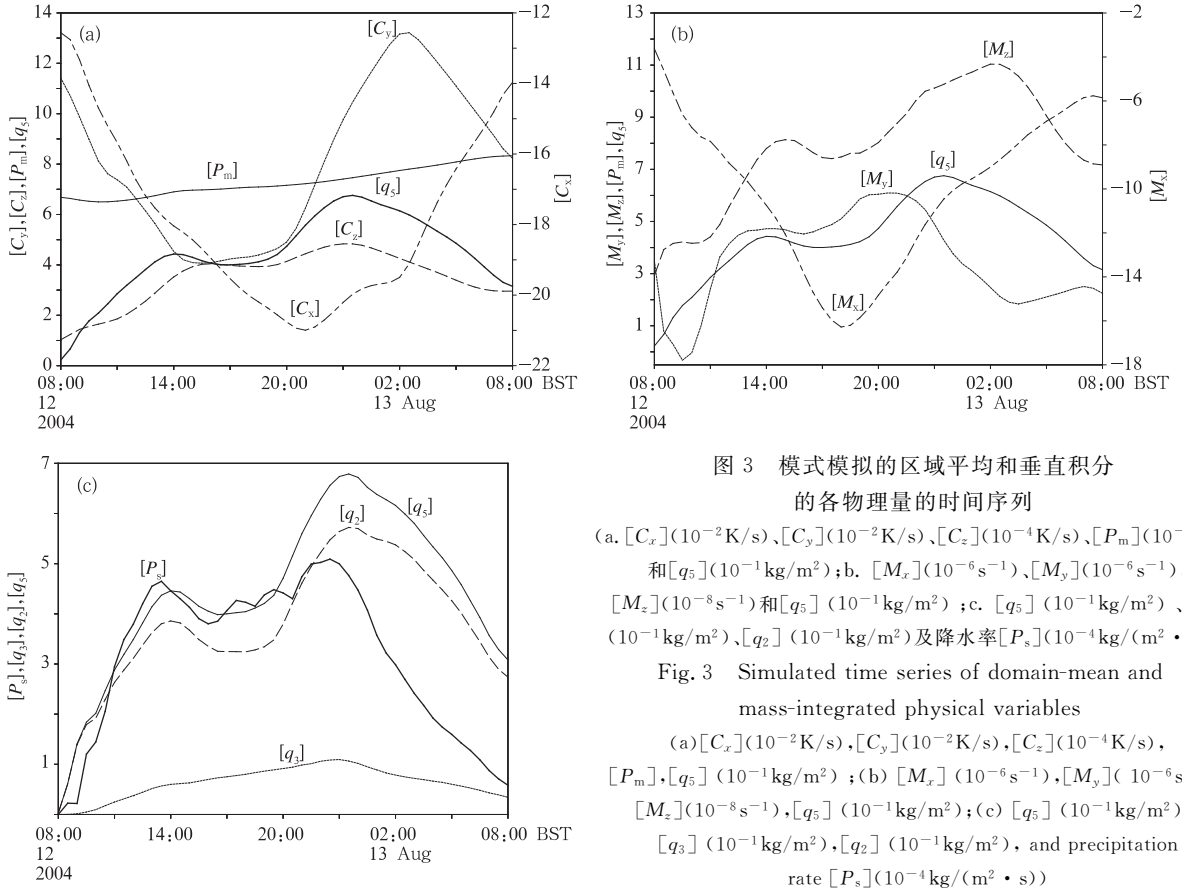


图 3　模式模拟的区域平均和垂直积分的各物理量的时间序列

(a.$[C_x]$(10^{-2}K/s)、$[C_y]$(10^{-2}K/s)、$[C_z]$(10^{-4}K/s)、$[P_m]$(10^{-3}K/s)和$[q_5]$(10^{-1}kg/m^2);b. $[M_x]$(10^{-6}s^{-1})、$[M_y]$(10^{-6}s^{-1})、$[M_z]$(10^{-8}s^{-1})和$[q_5]$(10^{-1}kg/m^2);c. $[q_5]$(10^{-1}kg/m^2)、$[q_3]$(10^{-1}kg/m^2)、$[q_2]$(10^{-1}kg/m^2)及降水率$[P_s]$(10^{-4}kg/(m^2·s)))

Fig. 3　Simulated time series of domain-mean and mass-integrated physical variables

(a)$[C_x]$(10^{-2}K/s),$[C_y]$(10^{-2}K/s),$[C_z]$(10^{-4}K/s),$[P_m]$,$[q_5]$(10^{-1}kg/m^2);(b) $[M_x]$(10^{-6}s^{-1}),$[M_y]$(10^{-6}s^{-1}),$[M_z]$(10^{-8}s^{-1}),$[q_5]$(10^{-1}kg/m^2);(c) $[q_5]$(10^{-1}kg/m^2),$[q_3]$(10^{-1}kg/m^2),$[q_2]$(10^{-1}kg/m^2), and precipitation rate $[P_s]$(10^{-4}kg/(m^2·s))

4.2　各物理量的滞后相关关系分析

4.2.1　各物理量与云中水凝物和降水率的滞后相关关系

图 4a 为$[C_z]$、$[M_z]$和$[P_m]$与云中水凝物的滞后相关系数,正的滞后时间表示最大值的$[C_z]$、$[M_z]$或$[P_m]$领先最大值的云中水凝物,负的滞后时间表示最大值的$[C_z]$、$[M_z]$或$[P_m]$落后最大值的云中水凝物。从图中可以看出,$[C_z]$与云中水凝物基本为同相关系,这种同相关系表明 CVV 的垂直分量可以代表云系和对流的发展演变,可以通过$[C_z]$来表达云的热动力演变,进而来研究对流系统的演变特征。$[M_z]$的峰值落后云中水凝物约1—

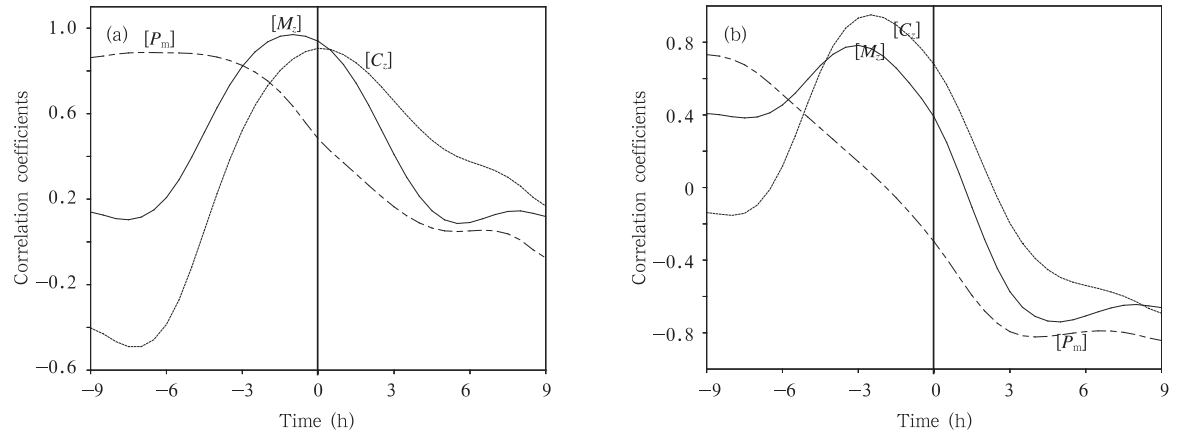


图 4　$[C_z]$、$[M_z]$及$[P_m]$分别与云中水凝物(a)和降水率(b)的滞后相关系数

Fig. 4　(a) Lag correlation coefficients between $[q_5]$and$[C_z]$, between $[q_5]$ and $[M_z]$, between $[q_5]$ and $[P_m]$; (b) Lag correlation coefficients between $[P_s]$ and $[C_z]$, between $[P_s]$ and $[M_z]$, between $[P_s]$ and $[P_m]$

2 h,这表明[C_z]与[M_z]可能代表着不完全相同的云系的物理过程,这与 Gao 等(2004,2007)的研究结果是一致的。[P_m]的峰值落后云中水凝物 5—6 h。可见,[C_z]和[M_z]与云的相关较[P_m]更好。进一步,从[C_z]、[M_z]和[P_m]与降水率的滞后相关系数(图 4b)可以看到,[C_z]落后降水率 2—3 h,滞后相关系数高达 0.97,[M_z]约落后降水率 3—4 h,滞后相关系数也高达 0.77。可见,[C_z]、[M_z]与降水率均有明显的滞后相关关系,但[C_z]比[M_z]与降水率的滞后相关更好。而[P_m]与降水率的滞后相关表明降水极大值发生前约 4 及 9 h[P_m]出现最小值,[C_z]、[M_z]也具有类似的滞后相关关系,但相关系数略小。从上述分析可知,[C_z]、[M_z]与云及降水关系更好、更明显、更直接,更具有一定的应用意义,而[P_m]尽管也具有一定相关关系,但所表现的时间尺度更大,关系更复杂(图 3a, 图 4)。

地面降水率是气象学和水文学中重要的参数之一,中国处于东亚季风区,夏季多暴雨和强对流天气,因此,对降水率的精确测量和定量估计及预报有相当大的实际意义和应用价值。然而,地面降水过程与动力、热力、云微物理和辐射过程非线性相关,这使得精确地估计地面降水率有相当的困难。我们从以上的分析可知,[C_z]和[M_z]与云中水凝物具有非常好的相关性(同时及滞后),与降水率的相关也较好,这为我们利用 C_z 和 M_z 来表征云的演变,通过研究 C_z 和 M_z 的变化来估测和研究地面降水率的变化提供了一种可能的途径。

从云中水凝物与地面降水率的滞后相关系数的分布(图 5a)上看到,云的发展滞后于降水率的发展约 1—2 h,降水率的峰值到来之前 4—5 h 云量最少;降水率达最大时,云量并不是最多的,降水率的峰值到来之后 1—2 h,云中水凝物最多,云的发展最旺盛。为了进一步考察液态水凝物[q_2]和固态水凝物[q_3]对总水凝物[q_5]和降水率的相关关系的贡献,计算了考虑权重的云中水凝物和降水率的相关系数。对一个标量 $F=\sum_{i=1}^{N}F_i$,它与另一标量 G 的权重相关系数可以表示为 $C_{G,F}=\sum_{i=1}^{N}\frac{\sigma_{Fi}}{\sigma_F}C_{G,Fi}$,这里 σ 是标准偏差,$\frac{\sigma_{Fi}}{\sigma_F}C_{G,Fi}$ 表示 G 和 F_i 之间的权重相关系数,$C_{G,Fi}$ 为 G 和 F_i 之间的相关系数。图 5b 给出了固态水凝物和液态水凝物与降水率的滞后权重相关系数,可以看出云中水凝物和降水率的相关系数主要是由液态水凝物与降水率的相关系数决定的,只有 1/4 的滞后相关系数是由固态水凝物与降水率的相关系数贡献的。

从[C_z]、[M_z]和[P_m]与固态水凝物和液态水凝物的滞后相关系数的分布(图 5c,d)可以看到,[C_z]与液态水凝物为同相关系,两者的相关系数为 0.82,这与总水凝物与[C_z]的同相相关关系比较一致,[M_z]落后液态水凝物约 1 h。[C_z]与固态水凝物也基本上为同相关系,而[M_z]落后固态水凝物约 2—3 h,相关系数为 0.90。可见,[C_z]与固态水凝物的相关性更好,相关系数为 0.97(图 5d),而[C_z]与液态水凝物的相关差一些,相关系数为 0.82(图 5c)。从以上分析可知,[C_z]与云中水凝物为同相关系,与降水率存在一定的滞后关系,[C_z] 落后降水率 2—3 h 时具有非常高的滞后相关系数(图 4b)。[M_z]与降水率的相关比[C_z]略差一些,可以通过研究[C_z]和[M_z]与降水率的超前滞后关系来研究降水率的变化。

4.2.2 各物理量的局地变化与降水率的滞后相关关系

从图 6a 的液态水凝物、固态水凝物和总水凝物的局地变化与降水率的滞后相关系数的分布可以看到,液态水凝物、固态水凝物和总水凝物的局地变化均超前降水率 2—3 h,而其中固态水凝物的局地变化与降水率的相关最强,两者的相关系数达 0.78 ,而液态水凝物的局地变化与降水率的相关系数仅为 0.4,固态水凝物的变化出现极大值之后 3 h 降水率达到峰值,因此我们可以通过固态水凝物的局地变化的极大值来推断降水率峰值的出现,从而为预报提供参考。在实际业务中并无云水、雨水、云冰、雪和雹等各种粒子的观测,因此很难进行降水率的估测,但正如上面所述,我们可以通过 C_z、M_z 和水凝物建立起联系,进而通过对 C_z、M_z 的局地变化与降水率的关系来估测地面降水的发展变化。从图 6b 的[C_z]、[M_z]及[P_m]的局地变化与降水率的滞后相关系数的分布上可以看到,[C_z]和[M_z]的局地变化都超前降水率,[C_z]的局地变化的极大值超前降水率极大值 3 h 出现,相关系数达 0.6,[M_z]的局地变化超前降水率约 2 h,相关系数达 0.5,而[P_m]的局地变化极大值与降水率极大值是同位相和滞后相关,没有超前变化的先兆,预报意义不大。应该注意到,MPV的局地变化的极小值超前地面降水率极大值约5 h,其中原因如前所述较复杂,有待

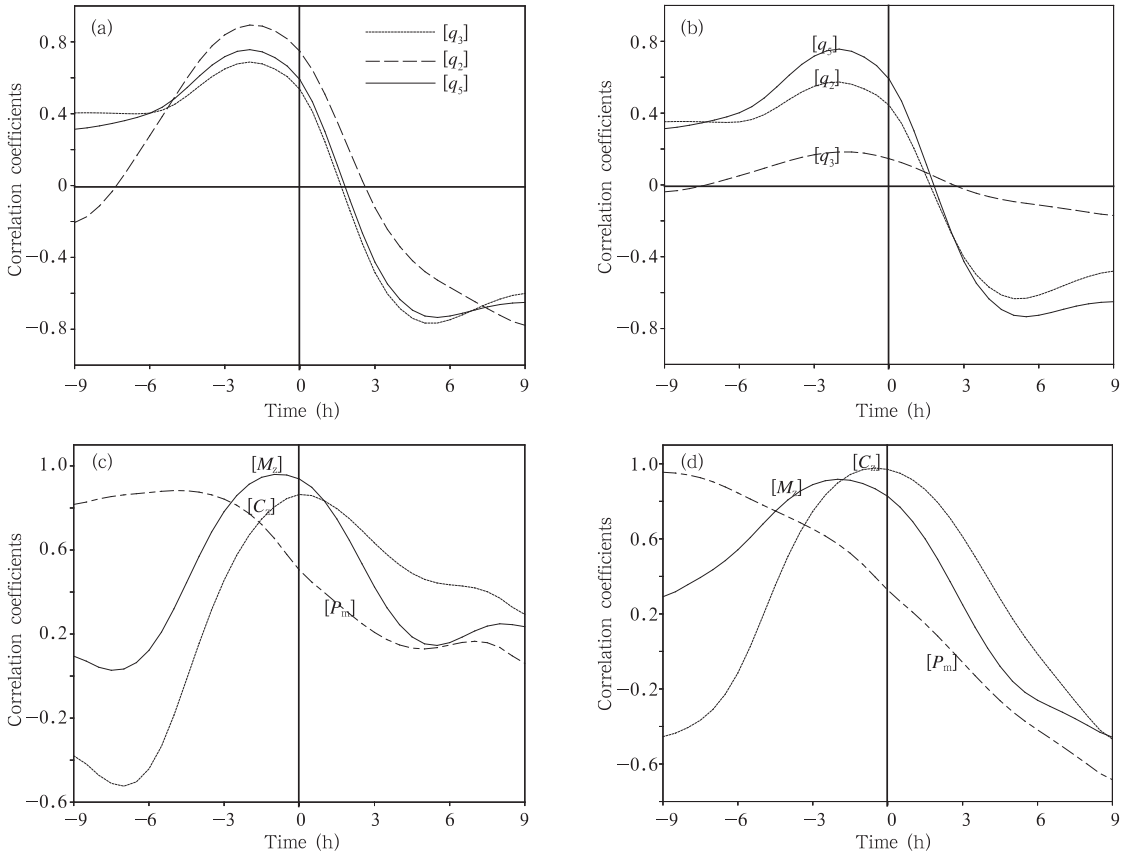


图 5　(a)液态水凝物、固态水凝物和总水凝物与降水率的滞后相关系数;(b)总水凝物与降水率及液态水凝物和固态水凝物与降水率的权重滞后相关系数;[C_z]、[M_z]及[P_m]分别与液态水凝物(c)和固态水凝物(d)的滞后相关系数

Fig. 5　(a) Lag correlation coefficients between [P_s] and [q_2], [P_s] and [q_3], [P_s] and [q_5]; (b) Lag correlation coefficients between [P_s] and [q_5] and weighted lag correlation coefficients between [P_s] and [q_2] and between [P_s] and [q_3] (c)Lag correlation coefficients between [C_z] and [q_2], [M_z] and [q_2], [P_m] and [q_2]; (d) Lag correlation coefficients between[C_z] and [q_3], [M_z] and [q_3], [P_m] and [q_3]

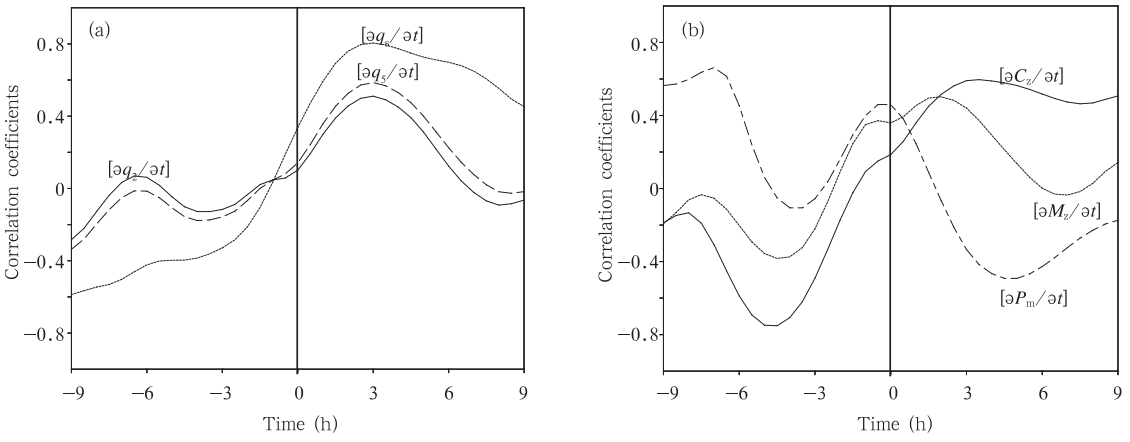


图 6　(a) 液态水凝物、固态水凝物及云中水凝物的局地变化与降水率的滞后相关系数;
(b) [C_z]、[M_z]及湿位涡[P_m]的局地变化与降水率的滞后相关系数

Fig. 6　(a) Lag correlation coefficients between [P_s] and local change of [q_2], [P_s] and local change of [q_3], [P_s] and local change of [q_5]; (b) Lag correlation coefficients between [P_s] and local change of [C_z], [P_s] and local change of [M_z], [P_s] and local change of [P_m]

另文详述。$[C_z]$和$[M_z]$的局地变化领先降水率2—3 h,表明$[C_z]$和$[M_z]$的局地变化可以作为降水发生的先兆,对降水估计有潜在的意义。

5 结 论

本文利用中尺度模式ARPS模拟了华北一次大到暴雨天气过程,利用模式提供的高时空分辨率资料,计算了湿位涡及对流涡度矢量($(\zeta_a \times \nabla \theta_e)/\rho$)和湿涡度矢量($(\zeta_a \times \nabla q_v)/\rho$)在$x$、$y$、$z$方向上的各分量,研究了区域平均和垂直积分的各分量与云中水凝物和降水率的超前滞后相关关系,得到如下结论:

(1) 云中水凝物可进一步分为固态水凝物和液态水凝物,云中固态水凝物的含量相对较少,液态水凝物的含量远比固态水凝物的含量大,但在降水的发展过程中固态水凝物起着更重要的作用。降水率的峰值到来之前4—5 h云量最少;降水率达最大时,云量并不是最多的,降水率的峰值到来之后1—2 h,云中水凝物最多。云中水凝物和降水率的滞后相关系数主要是由液态水凝物与降水率的相关系数决定的,只有约1/4的相关系数是由固态水凝物与降水率的相关系数所贡献的。

(2) $[C_z]$和$[M_z]$与云中水凝物具有非常好的相关性(同时及滞后),与降水率的相关也较好,可以代表云和对流系统的发展。这为利用C_z和M_z来表征云的演变,通过研究C_z和M_z的变化来估测和研究地面降水率的变化提供了一种可能的途径。

(3) $[C_z]$、$[M_z]$与降水率均有一定的滞后相关关系,但$[C_z]$比$[M_z]$与降水率的滞后相关更好。$[C_z]$和$[M_z]$的局地变化可以作为降水发生的先兆,对降水的预报有潜在的意义。$[C_z]$的局地变化与降水率的相关系数大于$[M_z]$的局地变化与降水率的相关系数,因此在实际预报中可以利用$[C_z]$的局地变化来估计未来降水的变化。

References

Atallah E H, Bosart L F. 2003. The extratropical transition and precipitation distribution of hurricane Floyd (1999). Mon Wea Rev, 131: 1063-1081

Bennetts D A, Hoskins B J. 1979. Conditional symmetric instability—A possible explanation for frontal rainbands. Quart J Roy Meteor Soc, 105: 945-962

Cao Z, Cho H. 1995. Generation of moist vorticity in extratropical cyclones. J Atmos Sci, 52: 3263-3281

Cho H, Cao Z. 1998. Generation of moist vorticity in extratropical cyclones, part II: Sensitivity to moisture distribution. J Atmos Sci, 55:595-610

Cui Xiaopeng, Gao Shouting, Wu Guoxiong. 2003. Moist potential vorticity and up-sliding slantwise vorticity development. Chin Phys Lett, 20:167-169

Cui Xiaopeng, Gao Shouting, Li Xiaofan. 2007. Diagnostic analysis of mesoscale rainstorms in the Jiang-Huai valley of China with convection vorticity vector. Progress Natural Sci, 17(4):71-80

Ertel H. 1942. Ein neuer hydrodynamischer Wirbelsatz. Met Z, 59: 277-281

Gao S, Ping F, Li X, et al. 2004. A convective vorticity vector associated with tropical convection: A two-dimensional cloud-resolving modeling study. J Geophys Res, 109: D14106, doi: 10.1029/2004JD004807

Gao S, Cui X, Zhou Y, et al. 2005. A modeling study of moist and dynamic vorticity vector associated with two-dimensional tropical convection. J Geophys Res, 110: D17104, doi: 10.1029/2004JD005675

Gao S, Li X, Tao W, et al. 2007. Convective and moist vorticity vectors associated with tropical oceanic convection: A three-dimensional cloud-resolving model simulation. J Geophys Res, 112:D01105, doi:10.1029/2006JD007179

Hoskins B J, McIntyre M E, Robertson A W. 1985. On the use and significance of isentropic potential vorticity maps. Quart J Roy Meteor Soc, 111: 877-946

Huo Zonghui, Zhang Da-Lin, GYakum J R. 1999. Interaction of potential vorticity anomalies in extratropical cyclogenesis, part Ⅰ: static piecewise inversion. Mon Wea Rev, 11:2546-2561

Huo Zonghui, Zhang Da-Lin, GYakum J R. 1999. Interaction of potential vorticity anomalies in extratropical cyclogenesis, part Ⅱ: sensitivity to initial perturbations. Mon Wea Rev, 11:2563-2575

Jonathan E M, Nathan Marsili. 2002. Surface cyclolysis in the north Pacific ocean. Part Ⅱ: Piecewise Potential vorticity diagnosis of a rapid cyclolysis event. Mon Wea Rev, 130:1264-1281

Lackmann C M. 2002. Cold-frontal vorticity maxima, the low-level jet, and moisture transport in extratropical cyclones. Mon Wea Rev, 130:59-74

Lin Y-L, Farley R D, Orville H D. 1983. Bulk parameterization of the snow field in a cloud model. J Climate Appl Meteor, 22: 106-1092

Rossby C G. 1939. Relation between variations in the intensity of the zonal circulation of the atmosphere and the displacements of the semi-permanent centers of action. J Marine Rev, 2(1):38-55

Rossby C G. 1940. Planetary flow patterns in the atmosphere. Quart J Roy Meteor Soc, 66(suppl) :68-67

Wu Guoxiong, Cai Yaping, Tang Xiaojing. 1995. Moist potential vorticity and shantwise vorticity development. Acta Meteor Sinica (in Chinese), 53(4): 387-404

Zhao Yu, Wang Jianguo, Xue Deqiang. 2007. Application of the moist vorticity vector in the analysis of a heavy rainfall event in North China. Progress Natural Sci, 17(12): 1457-1465

Zhao Yu, Gao Shouting. 2008. Application of the convective vorticity vector to the analysis of a rainstorm. Chinese J Atmos Sci (in Chinese), 32(3): 444-456

附中文参考文献

吴国雄,蔡雅萍,唐晓菁. 1995. 湿位涡和倾斜涡度发展. 气象学报, 53(4):387-404

赵宇,高守亭. 2008. 对流涡度矢量在暴雨诊断分析中的应用研究. 大气科学, 32(3): 444-456