

汪亚萍, 崔晓鹏, 冉令坤, 等. 2015. 动力因子对 2006 “碧利斯” 台风暴雨的诊断分析 [J]. 大气科学, 39 (4): 747–756. Wang Yaping, Cui Xiaopeng, Ran Lingkun, et al. 2015. Diagnosis of dynamical parameters in torrential rain associated with typhoon “Bilis” in 2006 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 39 (4): 747–756, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1411.14184.

动力因子对 2006 “碧利斯” 台风暴雨的诊断分析

汪亚萍^{1,2} 崔晓鹏^{1,3} 冉令坤¹ 余晖⁴

1 中国科学院大气物理研究所云降水物理与强风暴重点实验室, 北京 100029

2 中国科学院大学, 北京 100049

3 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京 210044

4 中国气象局上海台风研究所, 上海 200030

摘 要 本文利用 2006 年登陆台风“碧利斯”暴雨过程高分辨率数值模拟资料, 结合湿热力平流参数、广义对流涡度矢量垂直分量、水汽螺旋度、热力螺旋度、散度垂直通量、热力散度垂直通量、热力切变平流参数和 $\mathbf{Q}^*$ 矢量散度等 8 个动力因子, 对“碧利斯”台风暴雨进行诊断分析。结果指出: (1) 8 个动力因子在“碧利斯”台风强降雨区均表现为强信号, 其中, 水汽螺旋度、热力螺旋度、散度垂直通量、热力散度垂直通量等动力因子与降水强度的相关系数均达 0.99 以上, 与总云水物质的相关系数也均达 0.97 以上, 而热力切变平流参数与上述二者的相关系数最低, 达 0.5 左右; (2) 8 个动力因子中, $\mathbf{Q}^*$ 矢量散度随降水强度先增大后减小, 与“霰融化成雨水造成雨水增长”微物理过程随降水强度的变化相似, 热力切变平流参数随降水强度呈现“增大—减小—再增大”的变化特征, 而其他 6 个动力因子均呈现单调增长趋势, 与“雨水碰并云水造成雨水增长”微物理过程随降水强度的变化相类似; (3) 总体看来, 水汽螺旋度、热力螺旋度、散度垂直通量、热力散度垂直通量 4 个动力因子与降水强度及雨水收支相关的总的云微物理过程转化率对应更好, 因此, 对降水的指示意义也更好。

关键词 “碧利斯” 台风暴雨 动力因子 云微物理过程

文章编号 1006-9895(2015)04-0747-10

中图分类号 P444

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1411.14184

Diagnosis of Dynamical Parameters in Torrential Rain Associated with Typhoon “Bilis” in 2006

WANG Yaping^{1,2}, CUI Xiaopeng^{1,3}, RAN Lingkun¹, and YU Hui⁴

1 Key Laboratory of Cloud–Precipitation Physics and Severe Storms, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

3 Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

4 Shanghai Typhoon Institute (STI) of China Meteorological Administration, Shanghai 200030

Abstract High-resolution numerical simulation data of typhoon Bilis in 2006 was used for diagnostic analysis of eight dynamical parameters in a torrential rain event associated with Bilis. The eight parameters are moist thermodynamic advection parameter (G), the vertical component of the generalized convective vorticity vector (CVZ^*), moisture helicity (H_m), thermal helicity (H_t), divergence vertical flux (I), thermal divergence vertical flux (I_t), thermodynamic shear advection parameter (J), and generalized $\mathbf{Q}$ -vector divergence ($\mathbf{Q}_d^*$). The results show that the following. (1) All eight dynamical parameters show strong signals in torrential

收稿日期 2014-05-13; 网络预出版日期 2014-11-23

资助项目 上海台风研究基金项目 2013ST01

作者简介 汪亚萍, 女, 1990 年出生, 硕士研究生, 主要从事台风数值模拟与诊断研究。E-mail: wangyaping@mail.iap.ac.cn

通讯作者 崔晓鹏, E-mail: xpcui@mail.iap.ac.cn

rainfall regions. The correlation coefficients of the rain rate and H_m , H_t , Γ , Γ_t are all larger than 0.99, while the correlation coefficients of the total cloud hydrometeors and the four parameters above are all larger than 0.97. The correlation coefficients between J and rain rate, and J and total hydrometeors are both about 0.5, which is the lowest. (2) Q_d^* first increases and then decreases with an increase in rainfall intensity, sharing the same variation as the melting of graupel. J shows an increasing–decreasing–increasing pattern, while the other six parameters always increase with an increase in rainfall intensity, sharing the same variation pattern as the accretion of cloud water by rain water. (3) Overall, H_m , H_t , Γ and Γ_t correspond better with the rain rate and total cloud-microphysical processes associated with rain water. Thus, they are more indicative of strong precipitation.

Keywords Bilis, Typhoon torrential rain, Dynamical parameters, Cloud-microphysical processes

1 引言

我国是世界上受台风影响最为严重的国家之一（陈联寿和孟智勇，2001）。台风，尤其是登陆台风，能带来暴雨、大风和暴潮，其中台风暴雨灾害影响最大。我国历史上几大破纪录的暴雨灾害均与台风有关（Chen et al., 2010）。因此，台风强降水（暴雨）预报一直是气象部门关注的重点。

暴雨预报的主要手段包括数值预报和利用卫星、雷达等非常规观测资料的外推临近预报（高守亭等，2013b），其中，数值预报是主要趋势。数值预报可以提供丰富的和热、动力协调的预报产品，应用广泛。随着数值模式的不断发展和进步，如何更好地应用数值预报产品成为一个重要课题。考虑到模式降水来自于复杂的数值模式物理过程参数化（包括对流参数化和云微物理过程参数化等），其复杂性常常带来模式降水直接预报的误差，而数值模式对除降水外的其他热、动力场（风场和温度场等）的预报相对比较稳定，因此，气象学者们开始寻找一些与降水具有良好相关性的动力因子，进而利用数值模式预报的热、动力场量计算这些动力因子，最终给出基于数值预报模式基础上的降水动力因子释用预报，取得了很好的预报效果（姚秀萍和于玉斌，2000，2001；岳彩军和寿绍文，2002；陆慧娟和高守亭，2003；Gao et al., 2004a, 2004b, 2005a, 2005b, 2007；Gao and Cao, 2007；Cao and Gao, 2007；刘汉华等，2007；冉令坤和楚艳丽，2009；齐彦斌等，2010；Wu et al., 2011；冉令坤等，2011；周冠博等，2012；楚艳丽等，2013；冉令坤等，2013；高守亭等，2013a, 2013b；刘海军等，2013；许雯等，2013；Ran et al., 2013）。这种释用预报方法是基于数值预报模式的产品，因此，与数值模式发展相伴随的模式热、动力场预报水平的提高也必将带动该释用预报方法水平的进一步提升。本文将选取上述主要动力因子，利用“碧

利斯”台风暴雨过程的高分辨率数值模拟资料，进一步验证多种动力因子对台风暴雨、尤其是登陆之后的暴雨突然增幅过程的指示意义。综合多种降水动力因子，针对同一降水过程开展诊断分析，这方面的工作开展的不多，其研究结果将有助于进一步理解和认识各种动力因子及其对降水的指示意义，也将有助于更好地组织多种动力因子开展集合动力因子降水释用预报等。

2006年“碧利斯”台风登陆中国大陆后，降水量不降反增，在湖南、广东、江西三省交界附近地区降水突然增幅，出现特大暴雨，带来严重灾害。王黎娟等（2013）利用最高分辨率为3 km的ARPS（the Advanced Regional Prediction System）模式，成功模拟了“碧利斯”的登陆过程，并较好地再现了登陆后的暴雨增幅。Ren and Cui（2014）利用上述高分辨率模拟资料，研究了“碧利斯”暴雨增幅的云微物理可能成因，发现暴雨增幅期间，云水的增加主要通过两个途径对暴雨增幅产生贡献：一是通过雨水对云水的碰并收集，造成雨水含量增加；二是通过云中雪粒子对云水的碰并，造成雪粒子含量增加，增加的雪粒子又被云中霰粒子碰并收集造成霰含量增长，进而由霰粒子融化为雨水，造成雨水含量增长。本文将进一步利用上述高分辨率模式资料，通过计算湿热力平流参数、广义对流涡度矢量垂直分量、水汽螺旋度、热力螺旋度、散度垂直通量、热力散度垂直通量、热力切变平流参数和 Q^* 矢量散度等8个动力因子，分析动力因子与降水落区、降水强度、云中水凝物含量以及与地面降水直接相关的云微物理转化过程之间的关系，研究上述多种动力因子对“碧利斯”台风登陆后，在我国湖南、广东、江西三省交界处引发的暴雨增幅过程的指示意义。本文所用资料取自王黎娟等（2013）的3 km高分辨率模式输出资料，包括标准常规输出项和云微物理转化过程项，该资料已在王黎娟等（2013）以及Ren and Cui（2014）工作中得到充分

验证。

2 动力因子简介

下面对本文诊断分析中所用到的 8 个动力因子做简要介绍。

2.1 湿热力平流参数

Wu et al. (2011) 和高守亭等 (2013b) 把位温平流的水平梯度和广义位温水平梯度的点积定义为湿热力平流参数 (G), 并用于诊断锋面附近的强降水事件, G 表达式定义为

$$G = \nabla_h (\mathbf{v} \cdot \nabla \theta) \cdot \nabla_h \theta^*, \quad (1)$$

其中, $\mathbf{v} = (u, v, w)$, 为三维风速矢量, θ 为位温, $\theta^* = \theta \exp[(q_v/q_s)^k L_v q_s / (c_p T_c)]$ 为广义位温 (Gao et al., 2004b), q_v 为水汽比湿, q_s 为饱和水汽比湿, k 为经验常数。 $\nabla_h = \partial/\partial x \mathbf{i} + \partial/\partial y \mathbf{j}$ 和 $\nabla = \partial/\partial x \mathbf{i} + \partial/\partial y \mathbf{j} + \partial/\partial z \mathbf{k}$ 分别为水平和三维空间的梯度算子。湿热力平流参数将水平锋生和斜压性自然地联系起来, 综合描述了在锋区附近冷、暖气团中的动力、热力和水汽特征。

对 G 取绝对值并从 1250~5750 m (约 850~500 hPa) 进行质量垂直积分, 得到

$$G_{\text{sum}} = \int_{1250\text{m}}^{5750\text{m}} \rho |G| dz. \quad (2)$$

2.2 广义对流涡度矢量垂直分量

在中尺度深对流系统中, 强烈的对流和潜热释放使得相当位温梯度转为近水平方向, Gao et al. (2004a, 2007) 提出了对流涡度矢量, 其表达式定义为

$$\text{CVV} = \frac{\omega_a \times \nabla \theta_e}{\rho}, \quad (3)$$

其中, ω_a 为绝对涡度, θ_e 为相当位温, ρ 为密度。以广义位温 θ^* 替代 θ_e , 可得广义对流涡度矢量 $\text{CVV}^* = \omega_a \times \nabla \theta^* / \rho$, 许变等 (2013) 和王成鑫等 (2013) 将广义对流涡度矢量应用于台风暴雨的诊断分析中, 取得很好效果。略去小项后, z 坐标系下 CVV^* 的垂直分量写为

$$\text{CVZ}^* = \frac{1}{\rho} \left(-\frac{\partial v}{\partial z} \cdot \frac{\partial \theta^*}{\partial y} - \frac{\partial u}{\partial z} \cdot \frac{\partial \theta^*}{\partial x} \right), \quad (4)$$

进行如上质量垂直积分后得到

$$\text{CVZ}_{\text{sum}}^* = \int_{1250\text{m}}^{5750\text{m}} \rho |\text{CVZ}^*| dz. \quad (5)$$

2.3 水汽螺旋度

p 坐标系下的传统垂直螺旋度定义为 $H = \omega(\partial v/\partial x - \partial u/\partial y)$, 其中 u 、 v 、 ω 分别为 p 坐标系

中的 x 、 y 、 z 方向的速度。在此基础上, 考虑大气中的水汽效应 (冉令坤和楚艳丽, 2009; 高守亭等, 2013b; 杨帅等, 2013), 得到 z 坐标系下的水汽螺旋度:

$$H_m = w \left[\frac{\partial(vq_v)}{\partial x} - \frac{\partial(uq_v)}{\partial y} \right], \quad (6)$$

其中, u 、 v 、 w 分别为 z 坐标系中的 x 、 y 和 z 方向的速度, q_v 为水汽比湿。该物理量将垂直速度和垂直涡度耦合起来, 并加入水汽的作用, 对暴雨系统有很好的指示作用, 对其进行质量垂直积分后得到

$$H_{\text{msum}} = \int_{1250\text{m}}^{5750\text{m}} \rho |H_m| dz. \quad (7)$$

2.4 热力螺旋度

高守亭等 (2013b) 和杨帅等 (2013) 将广义位温引入垂直螺旋度的概念中, 给出了热力螺旋度的定义:

$$H_t = w \left[\frac{\partial(v\theta^*)}{\partial x} - \frac{\partial(u\theta^*)}{\partial y} \right], \quad (8)$$

该物理量既包含大气动力学特征, 也包含大气湿斜压性特征, 对其进行质量垂直积分后得到

$$H_{\text{tsum}} = \int_{1250\text{m}}^{5750\text{m}} \rho |H_t| dz. \quad (9)$$

2.5 散度垂直通量

大气低层辐合、高层辐散以及上升运动是降水过程中的典型动力结构特征, 冉令坤和楚艳丽 (2009), 周冠博等 (2012) 和刘海军等 (2013) 将垂直速度和水平散度的乘积定义为散度垂直通量, 其在 z 坐标系下的表达式为

$$\Gamma = w \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right), \quad (10)$$

进行质量垂直积分后得到

$$\Gamma_{\text{sum}} = \int_{1250\text{m}}^{5750\text{m}} \rho |\Gamma| dz. \quad (11)$$

2.6 热力散度垂直通量

在散度垂直通量基础上, 通过引入能够反映湿大气非均匀饱和特性的广义位温, 高守亭等 (2013b) 定义了热力散度垂直通量, 此因子综合体现了降水过程中的动力和热力特征, 其在 z 坐标系下的表达式为

$$\Gamma_t = w \left[\frac{\partial(u\theta^*)}{\partial x} + \frac{\partial(v\theta^*)}{\partial y} \right], \quad (12)$$

质量垂直积分后得到

$$\Gamma_{\text{tsum}} = \int_{1250\text{m}}^{5750\text{m}} \rho |\Gamma_t| dz. \quad (13)$$

2.7 热力切变平流参数

齐彦斌等 (2010) 引入了热力切变平流参数, 表达式为

$$J = -\left(\frac{\partial u}{\partial z} \cdot \frac{\partial \theta^*}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial z} \cdot \frac{\partial \theta^*}{\partial y}\right) + \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y}\right) \frac{\partial \theta^*}{\partial z}, \quad (14)$$

该因子第一项为对流涡度矢量的垂直分量, 体现了水平风场的垂直切变与大气斜压性, 第二项为水平散度和广义位温垂直梯度的相互作用项。对其进行质量垂直积分后得到

$$J_{\text{sum}} = \int_{1250 \text{ m}}^{5750 \text{ m}} \rho |J| dz. \quad (15)$$

2.8 广义 Q^* 矢量散度

将广义位温代替非地转湿 Q 矢量 (姚秀萍和于玉斌, 2000) 中的位温, 且不考虑凝结潜热的作用, 得到广义 Q 矢量 $Q^* = (Q_x^*, Q_y^*)$, 其各分量表达式为:

$$Q_x^* = f \left(\frac{\partial v}{\partial p} \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial p} \frac{\partial v}{\partial x} \right) - \frac{1}{\rho \theta^*} \left(\frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial \theta^*}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial x} \frac{\partial \theta^*}{\partial y} \right), \quad (16)$$

$$Q_y^* = f \left(\frac{\partial v}{\partial p} \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial u}{\partial p} \frac{\partial v}{\partial y} \right) - \frac{1}{\rho \theta^*} \left(\frac{\partial u}{\partial y} \frac{\partial \theta^*}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \frac{\partial \theta^*}{\partial y} \right). \quad (17)$$

而 Q^* 矢量散度定义为

$$Q_d^* = \nabla \cdot Q^*, \quad (18)$$

质量垂直积分后得

$$Q_{\text{dsum}}^* = \int_{1250 \text{ m}}^{5750 \text{ m}} \rho |Q_d^*| dz. \quad (19)$$

3 动力因子模拟诊断分析

本节将利用王黎娟等 (2013) 的“碧利斯”台风暴雨过程高分辨率 (3 km) 数值模式资料, 结合上述 8 个动力因子, 针对同一台风暴雨过程开展诊断分析, 探讨多个动力因子对台风暴雨的指示意义。

3.1 累积降水量与动力因子水平分布

图 1 给出了 2006 年 7 月 14 日 12:00 到 15 日 12:00 (协调世界时, 下同) “碧利斯”台风登陆期间, 数值模式模拟的 24 小时累积降水量以及利用模拟资料计算的 24 小时平均的质量垂直积分动力因子水平分布[“碧利斯”台风暴雨过程实况、数值模拟与验证、登陆后的暴雨增幅过程分析等详见王黎娟等 (2013) 以及 Ren and Cui (2014)]。由图可见, 24 小时累积降水量达到 350 mm 以上, 主要分布在广东、湖南和江西三省交界附近地区, G_{sum} 、

CVZ_{sum}^* 、 H_{msum} 、 H_{tsum} 、 Γ_{sum} 、 Γ_{tsum} 、 J_{sum} 和 Q_{dsum}^* 等 8 个动力因子在上述降水区均表现为较强信号, 说明上述动力因子对此次台风暴雨落区均具有一定指示意义。其中, G_{sum} 的信号异常区基本上与强降水区相对应 (图 1a), 但在 (25.5°~26.5°N, 114°~115°E) 区域存在的强信号没有对应明显强降水中心; CVZ_{sum}^* 、 J_{sum} 和 Q_{dsum}^* 的异常信号基本覆盖整个 24 小时降水落区, CVZ_{sum}^* 在强降水区等值线较密集 (图 1b), 但强信号中心较降水中心偏向东北, J_{sum} (图 1g) 异常中心与强降水区吻合较差, 而 Q_{dsum}^* 的最大信号异常中心与强降水中心较为接近 (图 1h); H_{msum} 、 H_{tsum} 、 Γ_{sum} 和 Γ_{tsum} (图 1c、d、e、f) 与强降水落区对应最好, 异常信号集中在降水强度大于 75 mm 的地区, 这 4 个动力因子的分布较为相似, 信号异常中心与降水中心基本重合, 对此次降水过程的强降水中心指示意义最好。

“碧利斯”台风登陆之后, 在广东、湖南和江西三省交界附近地区引发暴雨突然增幅, 14 日 18:00~15 日 00:00 模拟 6 小时累积降水量最大超过 240 mm (图略), 较暴雨增幅发生前明显增大, 达 14 日 12:00~15 日 12:00 的 24 小时累积总降水量的 2/3 左右 (图 1), 同时, 云中水凝物也较暴雨增幅前出现显著增长 (Ren and Cui, 2014)。进一步分析发现, 以上 8 个动力因子在暴雨增幅时段 (14 日 18:00~15 日 00:00) 对降水也具有非常好的指示意义, 其与 6 小时累积降水分布的关系与图 1 类似, 各个因子的指示能力也相类似 (图略)。

3.2 动力因子与逐小时降水强度、云水凝物以及微物理过程变化的关系

选取 24 小时累积降水量达到暴雨级别 (>50 mm) 的区域, 对逐小时累积降水量、质量垂直积分后的动力因子、与雨水相关的主要云微物理过程整层累加后的转化率 (Pracw, 雨水碰并云水造成雨水增长; Pgmlt, 霰粒子融化成雨水; Ren and Cui, 2014)、整层累加后的云中水凝物混合比做区域平均, 得到四者的逐小时变化图 (图 2 和图 3), 其中, 云中水凝物包括云水 (Q_c)、雨水 (Q_r)、云冰 (Q_i)、雪 (Q_s) 和霰 (Q_g), 而云水物质总混合比记为 $Q_{\text{CH}} (= Q_c + Q_r + Q_i + Q_s + Q_g)$ 。总体看来, 动力因子、云微物理过程转化率与小时降水强度均具有较为一致的变化趋势 (图 2), 但 Q_{dsum}^* 、 CVZ_{sum}^* 和 G_{sum} 比降水强度变化提前 1 至 2 个小时达到最大

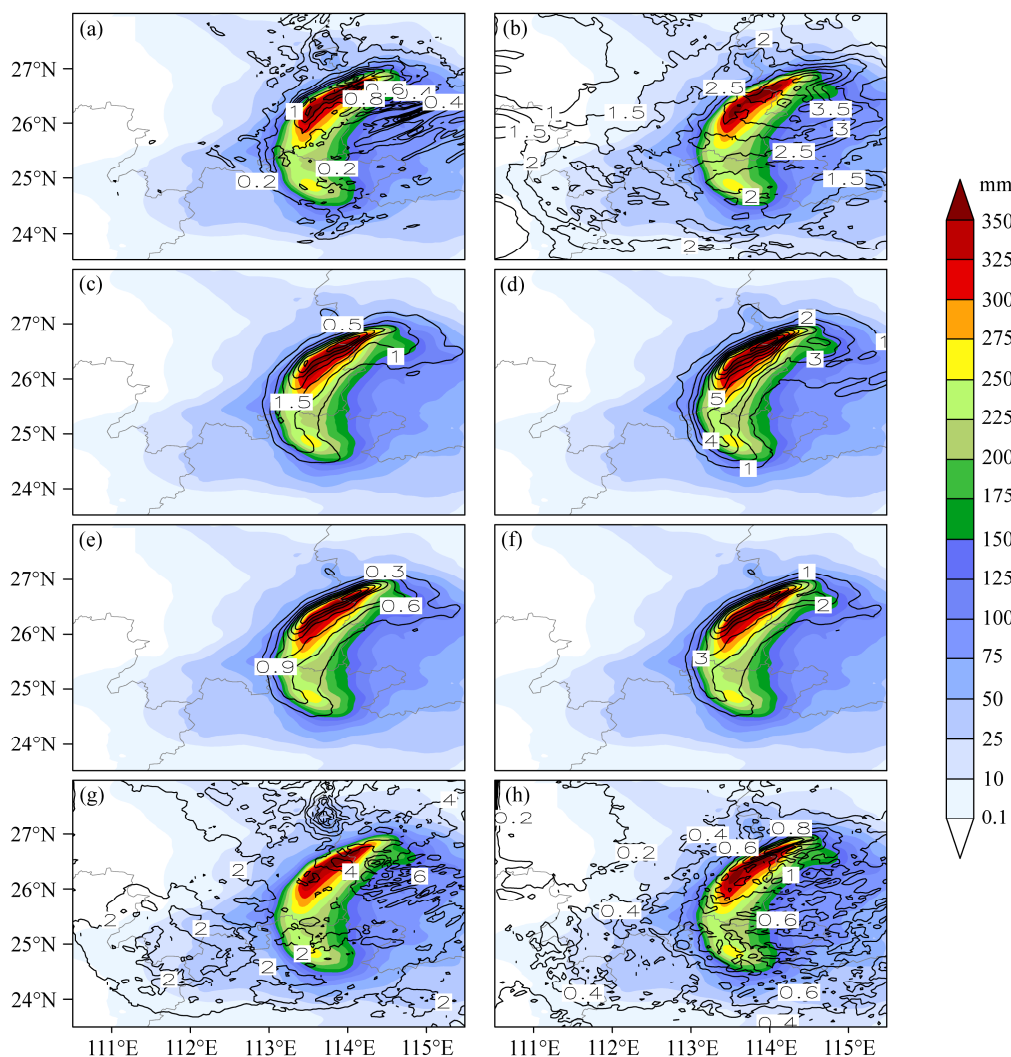


图1 2006年7月14日12:00~15日12:00(协调世界时,下同)的24小时累积降水量(阴影,单位:mm)以及平均的8个动力因子(等值线)分布:(a)湿热力平流参数, G_{sum} , 单位: $10^{-8} \text{ K}^2 \text{ kg m}^{-4} \text{ s}^{-1}$; (b)广义对流涡度矢量垂直分量, $\text{CVZ}_{\text{sum}}^*$, 单位: $10^{-5} \text{ K m}^{-1} \text{ s}^{-1}$; (c)水汽螺旋度, H_{msum} , 单位: $10^{-5} \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-2}$; (d)热力螺旋度, H_{tsum} , 单位: $10 \text{ K kg m}^{-1} \text{ s}^{-2}$; (e)散度垂直通量, Γ_{sum} , 单位: $10^{-1} \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-2}$; (f)热力散度垂直通量, Γ_{tsum} , 单位: $10 \text{ K kg m}^{-1} \text{ s}^{-2}$; (g)热力切变平流参数, J_{sum} , 单位: $10^{-6} \text{ K kg m}^{-3} \text{ s}^{-1}$; (h) $\mathbf{Q}^*$ 矢量散度, $\mathbf{Q}_{\text{dsum}}^*$, 单位: $10^{-11} \text{ kg m}^{-3} \text{ s}^{-3}$

Fig. 1 24-hour cumulative precipitation(shaded, units: mm) and averaged eight dynamical parameters(contours) from 1200 UTC 14 Jul to 1200 UTC 15 Jul, 2006: (a) Moist thermodynamic advection parameter, G_{sum} , units: $10^{-8} \text{ K}^2 \text{ kg m}^{-4} \text{ s}^{-1}$; (b) the vertical component of the generalized convective vorticity vector, $\text{CVZ}_{\text{sum}}^*$, units: $10^{-5} \text{ K m}^{-1} \text{ s}^{-1}$; (c) moisture helicity, H_{msum} , units: $10^{-5} \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-2}$; (d) thermal helicity, H_{tsum} , units: $10 \text{ K kg m}^{-1} \text{ s}^{-2}$; (e) divergence vertical flux, Γ_{sum} , units: $10^{-1} \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-2}$; (f) thermal divergence vertical flux, Γ_{tsum} , units: $10 \text{ K kg m}^{-1} \text{ s}^{-2}$; (g) thermodynamic shear advection parameter, J_{sum} , units: $10^{-6} \text{ K kg m}^{-3} \text{ s}^{-1}$; (h) generalized $\mathbf{Q}$ -vector divergence, $\mathbf{Q}_{\text{dsum}}^*$, units: $10^{-11} \text{ kg m}^{-3} \text{ s}^{-3}$

值, 而 J_{sum} 提前了3个小时, 这种提前是否具有预报价值尚待进一步多个例的深入研究。同时相关分析发现(表1), $\text{CVZ}_{\text{sum}}^*$ 、 H_{msum} 、 H_{tsum} 、 Γ_{sum} 和 Γ_{tsum} 的逐小时变化与小时降水量变化有很好的相关性, 相关系数均达到0.95以上, 表现出对强降水很好的指示意义; G_{sum} 和 $\mathbf{Q}_{\text{dsum}}^*$ 变化与降水量变化的相关性也较好, 相关系数在0.90左右; 而 J_{sum} 与降水量的相关性相对较差, 接近0.5; 与雨水生成相关的2个主要的云微物理过程(Pracw和Pgmlt)与8个动

力因子也表现出很好的相关性(图2, 表1), 其变化特征与小时降水量相类似(图2), 相关系数也类似(表1)。由图3可见, 总体上看, 各动力因子和云中水凝物含量也具有较为一致的变化趋势, 除 J_{sum} 外的其他7个动力因子与5种水凝物之和(Q_{CH})的相关系数均达到0.9以上, J_{sum} 与 Q_{CH} 的相关系数也略高于与小时雨量的相关系数, 达到约0.55。雨水、云冰、雪、霰及总水凝物均在降水最大时段(图2)达到最大值, 云水的变化比较独特, 其最

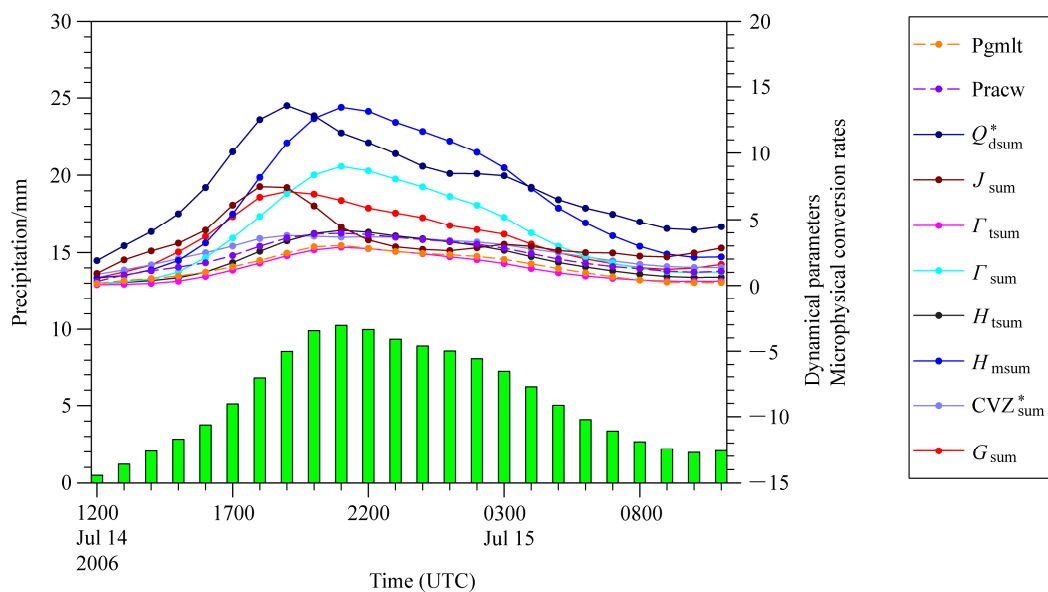


图2 2006年7月14日12:00~15日12:00逐小时累积降水量(柱状图)、8个动力因子(标圆点的实线, G_{sum} , 单位: $10^{-9} \text{ K}^2 \text{ kg m}^{-4} \text{ s}^{-1}$; CVZ^*_{sum} , 单位: $10^{-5} \text{ K m}^{-1} \text{ s}^{-1}$; H_{msum} , 单位: $10^{-6} \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-2}$; H_{tsum} , 单位: $10^1 \text{ K kg m}^{-1} \text{ s}^{-2}$; I_{sum} , 单位: $10^{-2} \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-2}$; I_{tsum} , 单位: $10^1 \text{ K kg m}^{-1} \text{ s}^{-2}$; J_{sum} , 单位: $10^{-6} \text{ K kg m}^{-3} \text{ s}^{-1}$; Q^*_{dsum} , 单位: $10^{-12} \text{ kg m}^{-3} \text{ s}^{-3}$)以及云微物理过程转化率(Pgmlt和Pracw, 标圆点的虚线, 单位: $10^{-6} \text{ g g}^{-1} \text{ s}^{-1}$)随时间变化图

Fig. 2 Variation of hourly cumulative precipitation (histogram), eight dynamical parameters (solid lines with dots, G_{sum} , units: $10^{-9} \text{ K}^2 \text{ kg m}^{-4} \text{ s}^{-1}$; CVZ^*_{sum} , units: $10^{-5} \text{ K m}^{-1} \text{ s}^{-1}$; H_{msum} , units: $10^{-6} \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-2}$; H_{tsum} , units: $10^1 \text{ K kg m}^{-1} \text{ s}^{-2}$; I_{sum} , units: $10^{-2} \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-2}$; I_{tsum} , units: $10^1 \text{ K kg m}^{-1} \text{ s}^{-2}$; J_{sum} , units: $10^{-6} \text{ K kg m}^{-3} \text{ s}^{-1}$; Q^*_{dsum} , units: $10^{-12} \text{ kg m}^{-3} \text{ s}^{-3}$), and cloud microphysical process conversion rates (dashed lines with dots; Pgmlt, the melting of graupel; Pracw, accretion of cloud water by rain, units: $10^{-6} \text{ g g}^{-1} \text{ s}^{-1}$) in the period of 1200 UTC 14 Jul to 1200 UTC 15 Jul, 2006

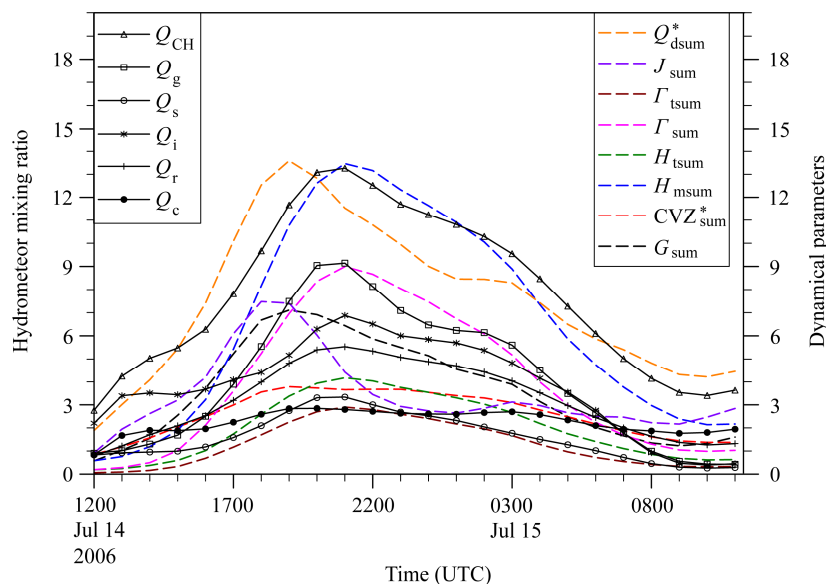


图3 2006年7月14日12:00~15日12:00的8个动力因子(虚线, G_{sum} , 单位: $10^{-9} \text{ K}^2 \text{ kg m}^{-4} \text{ s}^{-1}$; CVZ^*_{sum} , 单位: $10^{-5} \text{ K m}^{-1} \text{ s}^{-1}$; H_{msum} , 单位: $10^{-6} \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-2}$; H_{tsum} , 单位: $10^1 \text{ K kg m}^{-1} \text{ s}^{-2}$; I_{sum} , 单位: $10^{-2} \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-2}$; I_{tsum} , 单位: $10^1 \text{ K kg m}^{-1} \text{ s}^{-2}$; J_{sum} , 单位: $10^{-6} \text{ K kg m}^{-3} \text{ s}^{-1}$; Q^*_{dsum} , 单位: $10^{-12} \text{ kg m}^{-3} \text{ s}^{-3}$)和云中水凝物混合比(实线, Q_c , 单位: 10^{-3} g g^{-1} ; Q_r , 单位: 10^{-3} g g^{-1} ; Q_i , 单位: 10^{-4} g g^{-1} ; Q_s , 单位: 10^{-3} g g^{-1} ; Q_g , 单位: 10^{-4} g g^{-1} ; Q_{CH} , 单位: 10^{-3} g g^{-1})随时间变化图

Fig. 3 Variation of eight dynamical parameters (dashed lines, G_{sum} , units: $10^{-9} \text{ K}^2 \text{ kg m}^{-4} \text{ s}^{-1}$; CVZ^*_{sum} , units: $10^{-5} \text{ K m}^{-1} \text{ s}^{-1}$; H_{msum} , units: $10^{-6} \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-2}$; H_{tsum} , units: $10^1 \text{ K kg m}^{-1} \text{ s}^{-2}$; I_{sum} , units: $10^{-2} \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-2}$; I_{tsum} , units: $10^1 \text{ K kg m}^{-1} \text{ s}^{-2}$; J_{sum} , units: $10^{-6} \text{ K kg m}^{-3} \text{ s}^{-1}$; Q^*_{dsum} , units: $10^{-12} \text{ kg m}^{-3} \text{ s}^{-3}$) and cloud hydrometeors mixing ratios (solid lines, Q_c , units: 10^{-3} g g^{-1} ; Q_r , units: 10^{-3} g g^{-1} ; Q_i , units: 10^{-4} g g^{-1} ; Q_s , units: 10^{-3} g g^{-1} ; Q_g , units: 10^{-4} g g^{-1} ; Q_{CH} , units: 10^{-3} g g^{-1}) in the period of 1200 UTC 14 Jul to 1200 UTC 15 Jul, 2006

表 1 2006 年 7 月 14 日 12:00~15 日 12:00 质量垂直积分的动力因子与 1 小时累积降水量、云微物理过程转化率 (Pgmlt, Pracw)、云中水凝物混合比 (Q_c , Q_r , Q_i , Q_s , Q_g , Q_{CH}) 的相关系数

Table 1 Correlation coefficients of the vertically integrated dynamical parameters and 1-hour cumulative precipitation, cloud microphysical processes conversion rates (Pgmlt, Pracw), cloud hydrometeors mixing ratios (Q_c , Q_r , Q_i , Q_s , Q_g , Q_{CH}) from 1200 UTC 14 Jul to 1200 UTC 15 Jul, 2006

	1 小时累积降水量	云微物理过程转化率		Q_c	Q_r	Q_i	Q_s	Q_g	Q_{CH}
		Pracw	Pgmlt						
G_{sum}	0.9025	0.931	0.9191	0.851	0.9214	0.8366	0.9201	0.923	0.929
CVZ^*_{sum}	0.9687	0.9793	0.9675	0.9306	0.9789	0.8815	0.922	0.9527	0.9723
H_{msum}	0.9948	0.9873	0.9832	0.9003	0.9852	0.8646	0.9408	0.9764	0.9774
H_{tsum}	0.9954	0.99	0.9868	0.8993	0.9883	0.8719	0.9499	0.9816	0.9819
Γ_{sum}	0.9914	0.9887	0.9872	0.8826	0.9867	0.8816	0.9606	0.9829	0.9825
Γ_{tsum}	0.9913	0.9889	0.9873	0.8828	0.9868	0.8816	0.961	0.9832	0.9827
J_{sum}	0.4941	0.5558	0.5215	0.5797	0.5273	0.4349	0.5457	0.5459	0.5493
Q^*_{dsum}	0.8902	0.9196	0.897	0.8791	0.904	0.7786	0.88	0.9033	0.9087

大值出现的时间略超前其他水凝物，也略超前地面降水最大值的出现（图 2 和图 3），这种变化特征与 J_{sum} 的变化更为接近，因此， J_{sum} 与云水的相关系数也是与其他物理量相关系数中最高的（0.5797，表 1）。

可见，8 个动力因子均能在不同程度上指示出降水云系的发展演变以及与雨水生成相关的主要云微物理过程的发展演变，因此对地面降水过程展现出很好的指示意义；同时也应注意到，各个动力因子对此次暴雨过程降水云系、主要云微物理过程和地面降水的指示能力不同，有些还可能具有一定超前性，而这种超前性的存在可能与某些动力因子更倾向于指示降水云系的初期发展过程有关，这有待于进一步深入分析。

3.3 动力因子强度随降水强度的变化分析

进一步，将 2006 年 7 月 14 日 18:00~15 日 00:00 模拟的暴雨增幅期间 6 小时累积降水按照降水强度分成 8 级：0~13 mm、13~25 mm、25~60 mm、60~120 mm、120~160 mm、160~200 mm、200~240 mm 和 240~280 mm，并分别计算不同降水强度级别平均的 8 种动力因子以及不同降水强度级别平均的垂直累加的雨水主要源汇项。其中雨水主要源汇项包括：雨水碰并云水造成雨水增长 (Pracw)、霰融化成雨水 (Pgmlt)、雪融化成雨水 (Psmilt)、霰碰并云水转化成雨水 (Qgacw)、云冰粘附雨水造成雪或霰增长 (Piacr) 以及雨水蒸发 (Ern) (Ren and Cui, 2014)，雨水相关总的云微物理过程转化率为上述 6 项转化率之和。由图 4 可以看到，Pracw 和 Pgmlt 是雨水的两个最主要来源项，并且，Pracw 随着降水强度的增大而增大，而 Pgmlt 随着降水强度

的增大先增大后减小 (Cui et al., 2014)，雨水相关总的云微物理过程转化率随着降水强度的增大而增大；8 个动力因子中， Q^* 矢量散度 (Q^*_{dsum}) 随着降水强度先增大后减小，与“霰融化成雨水造成雨水增长”微物理过程 (Pgmlt) 随降水强度的变化特征相似，热力切变平流参数 (J_{sum}) 随降水强度则呈现出“增大—减小—再增大”的变化特征，其他 6 个动力因子 (G_{sum} 、 CVZ^*_{sum} 、 H_{msum} 、 H_{tsum} 、 Γ_{sum} 和 Γ_{tsum}) 随降水强度均呈现单调增长变化特征，与“雨水碰并云水造成雨水增长”微物理过程 (Pracw) 随降水强度的变化特征相类似，其中 H_{msum} 、 H_{tsum} 、 Γ_{sum} 和 Γ_{tsum} 等 4 个动力因子的表现更好。

综合以上分析可见，8 个动力因子均能在不同程度上对 2006 年“碧利斯”台风降水云系的发展和地面降水过程展现出很好的指示能力，而水汽螺旋度、热力螺旋度、散度垂直通量、热力散度垂直通量等 4 个动力因子与降水强度及雨水收支相关的总云微物理过程转化率对应更好，因此，对降水的指示意义也更好。

4 结论

本文利用 2006 年“碧利斯”台风暴雨过程的高分辨率数值模拟资料（包括标准常规输出项和云微物理转化过程项资料），分析研究了湿热力平流参数 (G_{sum})、广义对流涡度矢量垂直分量 (CVZ^*_{sum})、水汽螺旋度 (H_{msum})、热力螺旋度 (H_{tsum})、散度垂直通量 (Γ_{sum})、热力散度垂直通量 (Γ_{tsum})、热力切变平流参数 (J_{sum}) 和 Q^* 矢量散

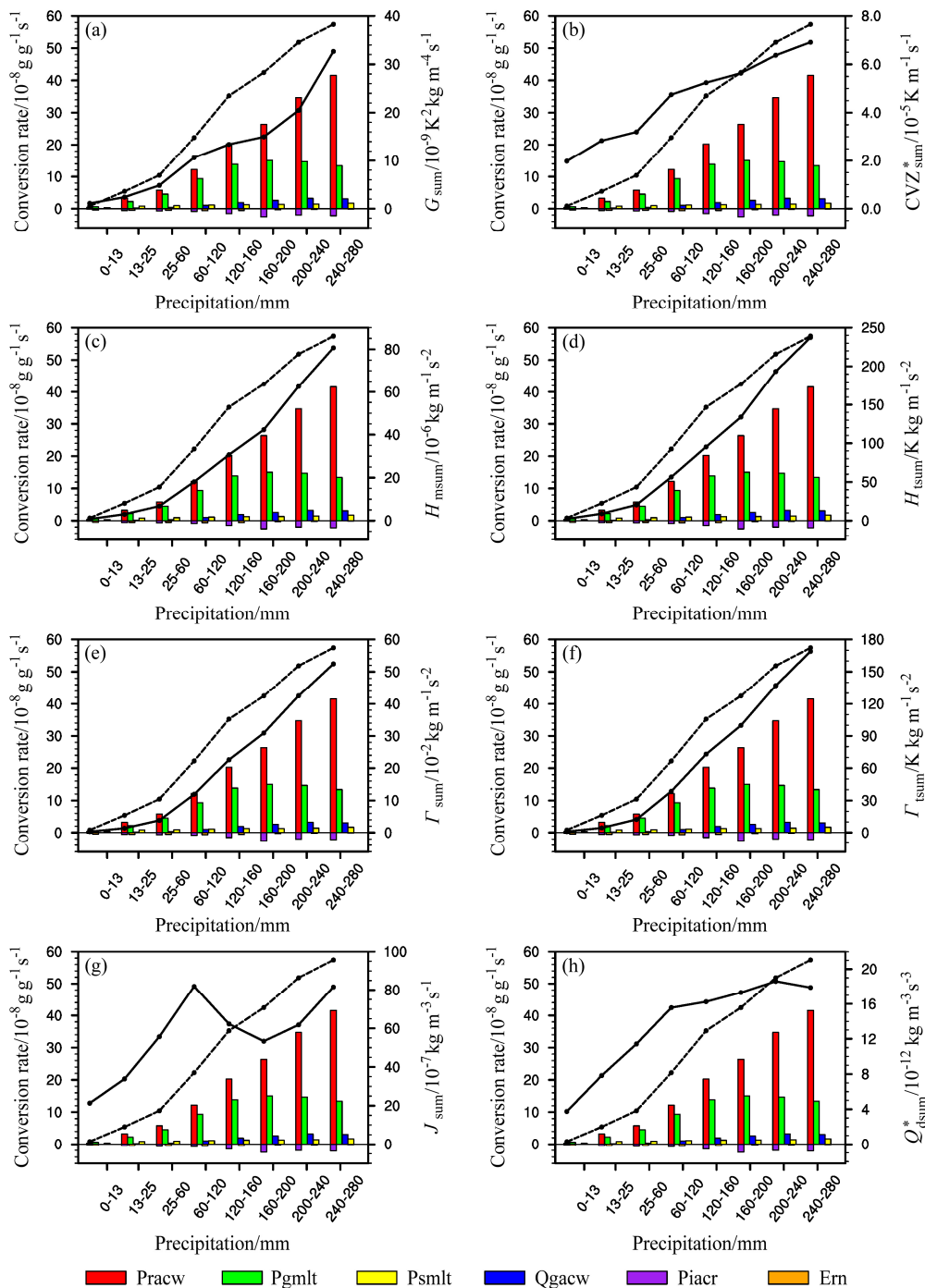


图4 2006年7月14日18:00~15日00:00的6小时平均的雨水主要源汇项转化率(柱状图,单位: $10^{-8} \text{ g g}^{-1} \text{ s}^{-1}$)、总云微物理过程转化率(标圆点的虚线)以及8种动力因子(标圆点的实线), (a) G_{sum} , 单位: $10^{-9} \text{ K}^2 \text{ kg m}^{-4} \text{ s}^{-1}$; (b) $\text{CVZ}_{\text{sum}}^*$, 单位: $10^{-5} \text{ K m}^{-1} \text{ s}^{-1}$; (c) H_{msum} , 单位: $10^{-6} \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-2}$; (d) H_{tsum} , 单位: $\text{K kg m}^{-1} \text{ s}^{-2}$; (e) Γ_{sum} , 单位: $10^{-2} \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-2}$; (f) Γ_{tsum} , 单位: $\text{K kg m}^{-1} \text{ s}^{-2}$; (g) J_{sum} , 单位: $10^{-7} \text{ K kg m}^{-3} \text{ s}^{-1}$; (h) Q_{dsum}^* , 单位: $10^{-12} \text{ kg m}^{-3} \text{ s}^{-3}$ 随降水强度的变化分布

Fig. 4 variation of 6-hour averaged cloud microphysical conversion rates associated with rain (histogram, unit: $\text{g g}^{-1} \text{ s}^{-1}$), the sum of all source and sink conversion rates associated with rain (dashed line with dots), eight dynamical parameters (solid line with dots), (a) G_{sum} , units: $10^{-9} \text{ K}^2 \text{ kg m}^{-4} \text{ s}^{-1}$; (b) $\text{CVZ}_{\text{sum}}^*$, units: $10^{-5} \text{ K m}^{-1} \text{ s}^{-1}$; (c) H_{msum} , units: $10^{-6} \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-2}$; (d) H_{tsum} , units: $\text{K kg m}^{-1} \text{ s}^{-2}$; (e) Γ_{sum} , units: $10^{-2} \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-2}$; (f) Γ_{tsum} , units: $\text{K kg m}^{-1} \text{ s}^{-2}$; (g) J_{sum} , units: $10^{-7} \text{ K kg m}^{-3} \text{ s}^{-1}$; (h) Q_{dsum}^* , units: $10^{-12} \text{ kg m}^{-3} \text{ s}^{-3}$ with different rainfall intensity in the periods of 1800 UTC 14 Jul to 0000 UTC 15 Jul, 2006

度 (Q_{dsum}^*) 等 8 个动力因子与降水落区、降水强度、云中水凝物含量以及与地面降水直接相关的云微物理转化过程之间的关系, 探讨了上述多种动力因子对 “碧利斯” 台风暴雨过程, 包括在湖南、广东、江西三省交界处引发的暴雨增幅过程的指示意义。主要结论如下:

(1) 各动力因子均能在不同程度上指示出 “碧利斯” 台风降水云系的发展演变以及与雨水生成相关的主要云微物理过程的发展演变, 因此对地面降水过程展现出很好的指示意义; 各动力因子的指示能力不同, 其中, 水汽螺旋度、热力螺旋度、散度垂直通量、热力散度垂直通量等 4 个动力因子逐小时变化与小时降水强度变化的相关系数均达到 0.99 以上, 与总云水凝物的相关系数也均达到 0.97 以上, 说明这些动力因子能够更好地指示出降水云系的发展和地面降水过程的发生;

(2) 8 个动力因子中, Q^* 矢量散度随降水强度先增大后减小, 与 “霰融化成雨水造成雨水增长” 微物理过程 (Pgmlt) 随降水强度的变化相似, 热力切变平流参数随降水强度呈现 “增大—减小—再增大” 的变化特征, 而其他 6 个动力因子均呈现单调增长趋势, 与 “雨水碰并云水造成雨水增长” 微物理过程 (Pracw) 随降水强度的变化相类似。

本文分析了多种动力因子对 “碧利斯” 暴雨增幅的指示意义, 及其与云微物理转化过程的关系, 在未来的工作中, 将进一步探讨动力因子 Q^* 矢量散度与 “霰融化成雨水造成雨水增长” 微物理过程, 以及动力因子 G_{sum} 、 CVZ_{sum}^* 、 H_{msum} 、 H_{tsum} 、 Γ_{sum} 、 Γ_{tsum} 与 “雨水碰并云水造成雨水增长” 微物理过程随降水强度呈现相类似的变化特征的原因。此外, 本文主要探讨了多种动力因子对 “碧利斯” 暴雨过程的指示意义, 未来工作计划利用预报场资料, 进一步探讨其对暴雨过程的预报意义。

参考文献 (References)

- Cao J, Gao S T. 2007. Extended interpretations in Q vector analyses and applications in a torrential rain event [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 34 (15): L15804, doi:10.1029/2007GL030781.
- 陈联寿, 孟智勇. 2001. 我国热带气旋研究十年进展 [J]. *大气科学*, 25 (3): 420–432.
- Chen Lianshou, Meng Zhiyong. 2001. An overview on tropical cyclone research progress in China during the past ten years [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 25 (3): 420–432.
- Chen L S, Li Y, Cheng Z Q. 2010. An overview of research and forecasting on rainfall associated with landfalling tropical cyclones [J]. *Adv. Atmos.*

Sci., 27 (5): 967–976.

- 楚艳丽, 王振会, 冉令坤, 等. 2013. 台风莫拉克 (2009) 暴雨过程中位势切变变形波作用密度诊断分析和预报应用 [J]. *物理学报*, 62 (9): 099201.
- Chu Yanli, Wang Zhenhui, Ran Lingkun, et al., 2010. Diagnosis and application of potential shear deformation wave-activity density in the torrential rain of typhoon Morokat (2009) [J]. *Acta Physica Sinica* (in Chinese), 62 (9): 099201.
- 高守亭, 刘璐, 李娜. 2013a. 近几年中尺度动力学研究进展 [J]. *大气科学*, 37 (2): 319–330.
- Gao Shouting, Liu Lu, Li Na. 2013a. Major advances in research on mesoscale atmospheric dynamics in recent years [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 37 (2): 319–330.
- 高守亭, 冉令坤, 李娜, 等. 2013b. 集合动力因子暴雨预报方法研究 [J]. *暴雨灾害*, 32 (4): 289–302.
- Gao Shouting, Ran Lingkun, Li Na, et al. 2013b. The “Ensemble Dynamic Factors” approach to predict rainstorm [J]. *Torrential Rain and Disasters* (in Chinese), 32 (4): 289–302.
- Gao S T, Cao J. 2007. Physical basis of generalized potential temperature and its application to cyclone tracks in nonuniformly saturated atmosphere [J]. *J. Geophys. Res.*, 112 (D18): D18101, doi:10.1029/2007JD008701.
- Gao S T, Wang X R, Zhou Y S. 2004a. Generation of generalized moist potential vorticity in a frictionless and moist adiabatic flow [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 31 (12): L12113, doi:10.1029/2003GL019152.
- Gao S T, Ping F, Li X F, et al. 2004b. A convective vorticity vector associated with tropical convection: A two-dimensional cloud-resolving modeling study [J]. *J. Geophys. Res.*, 109 (D14): D14106, doi:10.1029/2004JD004807.
- Gao S T, Cui X P, Zhou Y S, et al. 2005a. A modeling study of moist and dynamic vorticity vectors associated with two-dimensional tropical convection [J]. *J. Geophys. Res.*, 110 (D17): D17104, doi: 10.1029/2004JD005675.
- Gao S T, Zhou Y S, Lei T, et al. 2005b. Analyses of hot and humid weather in Beijing city in summer and its dynamical identification [J]. *Science in China Ser. D Earth Sciences*, 48 (S2): 128–137.
- Gao S T, Li X F, Tao W K, et al. 2007. Convective and moist vorticity vectors associated with tropical oceanic convection: A three-dimensional cloud-resolving model simulation [J]. *J. Geophys. Res.*, 112 (D1): D01105, doi: 10.1029/2006JD007179.
- 刘汉华, 寿绍文, 周军. 2007. 非地转湿 Q 矢量的改进及其应用 [J]. *南京气象学院学报*, 30 (1): 86–93.
- Liu Hanhua, Shou Shaowen, Zhou Jun. 2007. Improvement and application of ageostrophic wet Q -vector [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology* (in Chinese), 30 (1): 86–93.
- 刘海军, 沈新勇, 许变, 等. 2013. 1011 号台风 “凡亚比” 登陆过程数值模拟及诊断分析 [J]. *气候与环境研究*, 18 (5): 583–594.
- Liu Haijun, Shen Xinyong, Xu Luan, et al. 2013. Numerical simulation and diagnostic analysis of landfall processes of typhoon Fanapi (1011) [J]. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 18 (5): 583–594.
- 陆慧娟, 高守亭. 2003. 螺旋度及螺旋度方程的讨论 [J]. *气象学报*, 61 (6): 684–691.
- Lu Huijuan, Gao Shouting. 2003. On the helicity and the helicity equation [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 61 (6): 684–691.
- 齐彦斌, 冉令坤, 洪延超. 2010. 强降水过程中热力切变平流参数的诊

- 断分析 [J]. 大气科学, 34 (6): 1201–1213. Qi Yanbin, Ran Lingkun, Hong Yanchao. 2010. Diagnosis of thermodynamic shear advection parameter in heavy rainfall events [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 34 (6): 1201–1213.
- 冉令坤, 楚艳丽. 2009. 强降水过程中垂直螺旋度和散度通量及其拓展形式的诊断分析 [J]. 物理学报, 58 (11): 8094–8106. Ran Lingkun, Chu Yanli. 2009. Diagnosis of vertical helicity, divergence flux and their extensions in heavy-rainfall events [J]. Acta Physica Sinica (in Chinese), 58 (11): 8094–8106.
- 冉令坤, 周玉淑, 杨文霞. 2011. 强对流降水过程动力因子分析和预报研究 [J]. 物理学报, 60 (9): 099201. Ran Lingkun, Zhou Yushu, Yang Wenxia. 2011. Analysis and forecasting of heavy-rainfall event by strong convection [J]. Acta Physica Sinica (in Chinese), 60 (9): 099201.
- 冉令坤, 刘璐, 李娜, 等. 2013. 台风暴雨过程中位势散度波作用密度分析和预报应用研究 [J]. 地球物理学报, 56(10): 3285–3301. Ran Lingkun, Liu Lu, Li Na, et al. 2013. The analysis of the potential-divergence wave activity density and its application to typhoon precipitation [J]. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 56 (10): 3285–3301.
- Ran L K, Li N, Gao S T. 2013. PV-based diagnostic quantities of heavy precipitation: Solenoidal vorticity and potential solenoidal vorticity [J]. J. Geophys. Res. Atmos., 118 (11): 5710–5723.
- Ren C P, Cui X P. 2014. The cloud-microphysical cause of torrential rainfall amplification associated with Bilis (0604) [J]. Science China Earth Sciences, 57 (9): 2100–2111.
- 王成鑫, 高守亭, 梁莉, 等. 2013. 动力因子对地形影响下的四川暴雨落区的诊断分析 [J]. 大气科学, 37 (5): 1099–1110. Wang Chengxin, Gao Shouting, Liang Li, et al. 2013. Diagnostic analysis of dynamical parameters for Sichuan rainstorm influenced by terrain [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 37 (5): 1099–1110.
- 王黎娟, 任晨平, 崔晓鹏, 等. 2013. “碧利斯”暴雨增幅高分辨率数值模拟及诊断分析 [J]. 大气科学学报, 36 (2): 147–157. Wang Lijuan, Ren Chenping, Cui Xiaopeng, et al. 2013. High-resolution numerical simulation and diagnostic analysis of rainfall amplification of Bilis (0604) [J]. Transactions of Atmospheric Sciences (in Chinese), 36 (2): 147–157.
- Wu X D, Ran L K, Chu Y L. 2011. Diagnosis of a moist thermodynamic advection parameter in heavy-rainfall events [J]. Adv. Atmos. Sci., 28 (4): 957–972.
- 许变, 何金海, 高守亭, 等. 2013. 集合动力因子对登陆台风“莫拉克”(0908)暴雨落区的诊断与预报研究 [J]. 大气科学, 37 (1): 23–35.
- Xu Luan, He Jinhai, Gao Shouting, et al. 2013. Diagnostic and predictive studies of torrential rain location associated with landfalling typhoon Morakot (0908) using multi-dynamical parameters [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 37 (1): 23–35.
- 杨帅, 陈斌, 高守亭. 2013. 水汽螺旋度和热力螺旋度在华北强“桑拿天”过程中的分析及应用 [J]. 地球物理学报, 56 (7): 2185–2194.
- Yang Shuai, Chen Bin, Gao Shouting. 2013. Diagnostic analyses and applications of the moisture helicity and thermal helicity for two strong “Sauna” weather processes in northern China [J]. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 56 (7): 2185–2194.
- 姚秀萍, 于玉斌. 2000. 非地转湿 $\mathbf{Q}$ 矢量及其在华北特大台风暴雨中的应用 [J]. 气象学报, 58 (4): 436–446. Yao Xiuping, Yu Yubin. 2000. Non-geostrophic wet $\mathbf{Q}$ -vector analysis and its application to typhoon torrential rain [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 58 (4): 436–446.
- 姚秀萍, 于玉斌. 2001. 完全 $\mathbf{Q}$ 矢量的引入及其诊断分析 [J]. 高原气象, 20 (2): 208–213. Yao Xiuping, Yu Yubin. 2001. Perfect $\mathbf{Q}$ -vector and its diagnoses [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 20 (2): 208–213.
- 岳彩军, 寿绍文. 2002. 湿 $\mathbf{Q}$ 矢量散度场与 ω 场的比较 [J]. 南京气象学院学报, 25 (3): 420–424. Yue Caijun, Shou Shaowen. 2002. Comparison of wet $\mathbf{Q}$ vector divergence with ω field [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 25 (3): 420–424.
- 周冠博, 崔晓鹏, 高守亭. 2012. 台风“凤凰”登陆过程的高分辨率数值模拟及其降水的诊断分析 [J]. 大气科学, 36 (1): 23–34. Zhou Guanbo, Cui Xiaopeng, Gao Shouting. 2012. The high-resolution numerical simulation and diagnostic analysis of the landfall process of typhoon “Fungwong” [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 36 (1): 23–34.