李琴,杨帅,崔晓鹏,等. 2016. 四川暴雨过程动力因子指示意义与预报意义研究 [J]. 大气科学, 40 (2): 341-356. Li Qin, Yang Shuai, Cui Xiaopeng, et al. 2016. Diagnosis and forecasting of dynamical parameters for a heavy rainfall event in Sichuan Province [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 40 (2): 341-356, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1507.14296.

四川暴雨过程动力因子指示意义与预报意义研究

李琴^{1,2}杨帅¹ 崔晓鹏^{1,3} 冉令坤¹

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 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

摘 要本文利用 2010 年 8 月 18~19 日四川盆地西部地区一次引发了泥石流等次生灾害的暴雨天气过程的数 值模拟资料及 0.5°×0.5°分辨率、每 6 h 一次的 GFS(Global Forecast Model)预报资料,结合集合动力因子预报 系统中的广义对流涡度矢量垂直分量、质量散度、垂直螺旋度、质量垂直螺旋度、水汽垂直螺旋度、热力垂直螺 旋度、湿热力平流参数、密度散度垂直通量、散度垂直通量、热力散度垂直通量、水汽散度通量、广义 Q 矢量散 度等 12 个动力因子成员对此次暴雨过程进行诊断分析和预报研究,结果显示:(1)集合动力因子预报系统中的动 力因子对此次降水落区诊断效果良好;(2)各动力因子区域均值随时间的变化曲线都能表现出降水区域均值随时 间变化曲线双峰形态,其中,广义 Q 矢量散度、水汽垂直螺旋度、热力垂直螺旋度、质量垂直螺旋度、垂直螺旋 度与降水的相关系数较大(达 0.9 以上),对此次降水的诊断效果较好;(3)动力因子对此次强降水过程的发展演 变具有一定的预报能力。

关键词 四川暴雨 动力因子 诊断与预报

文章编号 1006-9895(2016)02-0341-17 doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1507.14296 中国分类号 P434+.5 P458.3 文献标识码 A

Diagnosis and Forecasting of Dynamical Parameters for a Heavy Rainfall Event in Sichuan Province

LI Qin^{1, 2}, YANG Shuai¹, CUI Xiaopeng^{1, 3}, and RAN Lingkun¹

1 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 and Technology, Nanjing 210044

Abstract A torrential rain event with severe secondary disasters (e.g., debris flow) occurred in the western Sichuan Basin during 18–19 August 2010. Based on numerical simulation data and $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ four-times-daily reanalysis data from the NCEP's Global Forecast System products, combined with dynamic parameters including the generalized vertical convective vorticity vector (cvz^{*}), mass divergence (divden), vertical helicity (hel), mass vertical helicity (helden), moisture vertical helicity (helqv), thermal vertical helicity (helth), moist thermodynamic advection parameter (mtp), mass divergence flux (wdiv), divergence flux (wdendiv), thermal vertical divergence flux (wptediv), moisture divergence flux (wqvdiv), generalized Q vector divergence (divq^{*}), a diagnostic analysis and forecasting study of this torrential rain event

收稿日期 2014-10-17; 网络预出版日期 2015-07-09

作者简介 李琴,女,1988年出生,博士研究生,主要从事暴雨过程数值模拟与诊断研究。E-mail: liqin@mail.iap.ac.cn

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

资助项目 中国科学院重点部署项目 KZZD-EW-05-01

Founded by the Key Research Program of the Chinese Academy of Sciences (Grant KZZD-EW-05-01)

were carried out. The results showed that: (1) all twelve dynamical parameters showed strong signals in the torrential rainfall area. (2) The curves of the temporal trends of regional average dynamic parameters and the mean regional rainfall were similar, showing a twin-peak structure. The time series' correlation coefficients of the mean regional rainfall and the regional average values of generalized Q vector divergence, moisture vertical helicity (helqv), thermal vertical helicity (helth), mass vertical helicity (helden) and vertical helicity (hel) were greater than 0.9. (3) The dynamic parameters considered in this study are of considerable importance in the diagnosis and prediction of torrential rain in this region. **Keywords** Sichuan basin, Rainstorm, Dynamic parameters, Diagnosis, Prediction

1 引言

中国西南部地形复杂,夏季降雨频发。特别是 位于青藏高原东南边缘的四川西部地区,盛夏时区 域性大暴雨过程的频率、强度都远大于东部(朱艳 峰和宇如聪, 2003), 从高原到盆地地势陡降, 在 川西高原与四川盆地接壤处的暴雨极易引发山洪、 滑坡、崩塌、泥石流等次生地质灾害。以往对中国 西南部川西陡峭地形附近地质灾害频发区暴雨的 研究,多集中在降水的日变化(白爱娟等,2011; 沈沛丰和张耀存,2011)和年际变化特征(胡德强 等,2014)、大尺度环流特征(郁淑华,1984,1986; 蒋兴文, 2008)、影响的天气系统以及地形影响(郁 淑华等, 1998; 葛晶晶等, 2008; 卢萍等, 2008; 沈沛丰和张耀存,2011)等几个方面。如,盆地西 缘盛夏多暴雨,降水主要集中在7、8月份,具有 局地性强、时间变异大、多夜雨(卢萍等, 2009; 薛羽君等, 2012)等特征; 四川盆地西部盛夏降水 年际变化同我国西北、华北地区降水呈明显的正相 关关系,而与江南地区降水有明显的负相关关系 (胡德强等, 2014); 在四川盆地西部地区盛夏降 水偏多年,西太平洋副热带高压偏北,同时西南涡 较常年活跃(胡德强, 2014);赵玉春等(2012)、 赵玉春和王叶红(2010)研究了一次高原涡东移诱 生西南涡引发川中特大暴雨的天气过程,指出:随 着高原低值系统移入盆地上空和受秦岭和大巴山 地形影响,盆地低层气流方向从偏南逐渐发展成偏 东,高原大地形对偏东气流的阻挡产生的绕流有利 于西南涡的形成,地形对偏东气流的强迫抬升作用 有利于触发对流产生降水。由于地形抬升作用影 响,降水沿盆西山势形成一条近似南北向的多雨 带,素有"华西雨屏"之称(徐裕华等,1991)。 复杂山地地形对对流系统的传播有阻碍作用,使暴 雨增幅明显,地形越高对暴雨增幅越明显,降水分 布越不均匀(盛春岩等,2012)。但这些研究主要 是利用统计学和天气学等方法围绕暴雨的气候学 特征、相关环流形势以及地形效应等进行的,涉及 四川暴雨精细化落区的诊断和预报研究相对较少, 难以满足暴雨预报业务水平的提高和社会防灾减 灾的需求。四川盆地西部暴雨强度主要呈增强趋势 (周长艳等,2011),在遭受大地震袭击后,盆地 西部暴雨就更易引发泥石流等次生灾害,因此,四 川暴雨落区,尤其是易于引发泥石流等次生灾害的 盆地西部暴雨落区的精细化研究是十分重要和迫 切的。

由于极其复杂地形影响下该地区的暴雨预报 率仍然较低是一个急需解决的难点,多途径预报方 法的试行或许是解决方案之一。高守亭等(2013) 以暴雨触发机制为出发点,基于国内最新研发的一 系列暴雨动力因子开发了集合动力因子预报系统 (简称 EDFF),其基本原理是加强释用暴雨中的 动、热力过程信息,利用模式预报较为准确的基本 产品,构建具有明确物理意义且可表征关键热动力 过程的因子,并将其用于暴雨预报。该系统曾先后 在北京、山东、贵州、陕西、山西、吉林等省份投 入业务应用(牛立强等, 2013)。该系统的动力因 子对暴雨落区的预报能力在 2008 年我国南方地区 的冰雪凝冻天气(冉令坤和楚艳丽, 2009), 多个 台风个例(林青, 2011; 周冠博等, 2012; 王黎娟 等,2013;许娈等,2013)和华北(赵宇和高守亭, 2008; 冉令坤和楚艳丽, 2009; 骆凯等, 2010; 杨 帅等, 2013; 冉令坤等, 2014)、东北(牛立强等, 2013)、华东(朱刚, 2012)、华南等地区多个暴雨 个例中得到了检验,一系列检验工作均表明:动力 因子在强降水区表现为强信号,在弱降水区和非降 水区表现为弱信号,在降水落区预报方面,集合动 力因子的预报略优于 GFS (Global Forecast System) 模式的自身预报,它们能较好地追踪降水系统的发 展演变,它们对地面观测降水有一定的指示作用 (高守亭等, 2013)。既然 EDFF 方法在中国多个 地区对于多种暴雨类型均显示出一定诊断和预报 效果,在西南陡峭地形的川西地区,是否有效呢?

因此,本文借助于集合动力因子预报系统及其 成员,运用中尺度精细化模拟资料、美国 NCEP/ NCAR 分辨率为 0.5°×0.5° GFS 预报场资料,对 2010 年 8 月 18~19 日发生在四川盆地西部的一次 引发了泥石流灾害的暴雨过程的降水强度及落区 进行诊断分析,主要解决如下几个问题:(1)集合 动力因子预报系统是否适用于四川西部地区?(2) 如果适用,其中的哪些成员(或者说哪些动力因子) 对该地区了诊断效果最好?(3)挑选的诊断效果 最优的成员可否预报四川西部地区暴雨?本文先 通过个例分析回答以上问题,找到最优诊断和预报 因子,以便将来下一步通过大量个例检验其诊断和 预报效果,以期为四川盆地西部暴雨预报业务工作 提供参考思路。

2 资料和方法

2.1 资料

本文运用中尺度 WRF 模式 (V3.4.1) 精细化模

拟资料 (9~3 km) (李琴等, 2014)、美国 NCEP/ NCAR 0.5°×0.5°分辨率 GFS 预报场资料,对 2010 年8月18~19日发生在四川西部的一次引发了泥 石流灾害的暴雨过程的降水强度及落区进行诊断 预报分析。这次过程发生在 2010 年 8 月 18 日 12:00~19日12:00(协调世界时,下同)四川盆地 西部山脉与四川盆地中部较平坦地形之间的狭长 陡峭地形附近区域(即汶川一雅安地震带附近), 青衣江暴雨区与龙门山暴雨区(马力等, 2013)连 接成带,呈东北一西南走向分布,3个自动站达到 特大暴雨量级[绵竹、大邑和蒲江站过程雨量分别达 294.8、277.2 和 203.2 mm (24 h)⁻¹],降水空间分布 极不均匀;造成大邑、绵竹、都江堰等 16 县市出 现了洪涝,并引发赵公山一带等地震灾区出现多处 泥石流、滑坡等次生地质灾害。此次暴雨过程位于 一个鞍型场的大尺度背景环流下(陈栋等, 2010), 异常强大西伸的副高与中高纬东侧高压脊形成 "东高西低"环流形势,为此次暴雨过程提供了有

表1 动]力因子简介
Table 1	The brief introduction of dynamic parameters

动力因子	计算公式	物理意义	相关文献
广义对流涡度 矢量垂直分量	$\operatorname{cvz}^* = \frac{1}{\rho} [(\frac{\partial \omega}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial p}) \frac{\partial \theta^*}{\partial y} + (\frac{\partial u}{\partial p} - \frac{\partial \omega}{\partial x}) \frac{\partial \theta^*}{\partial x}]$	它结合了涡度矢量和广义位温梯度,能较好表征深 对流系统	Gao et al. (2004, 2007) 赵宇和高守亭 (2008) Yang and Wang (2009)
质量散度	divden = $\frac{\partial(u\rho)}{\partial x} + \frac{\partial(v\rho)}{\partial y}$	它能表征雨区上空典型的垂直动力结构	
垂直螺旋度	hel = $-\frac{\omega}{\rho} \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}\right) = -\frac{\omega}{\rho} \zeta$	它表征了相对涡度的垂直通量	冉令坤和楚艳丽(2009) 岳彩军等(2011)
质量垂直螺旋 度	helden = $\omega \left[\frac{\partial(v\rho)}{\partial x} - \frac{\partial(u\rho)}{\partial y} \right]$	它能体现低涡对暖湿气流的抽吸作用	朱刚(2012)
水汽垂直 螺旋度	helqv = $\frac{\omega}{\rho} \left[\frac{\partial(vq)}{\partial x} - \frac{\partial(uq)}{\partial y} \right]$	它能反映出水汽通量涡度的垂直输送情况	冉令坤和楚艳丽(2009)
热力垂直 螺旋度	helth = $-\omega [\frac{\partial (v\theta^*)}{\partial x} - \frac{\partial (u\theta^*)}{\partial y}] = -\omega \zeta_{ih}$	它体现了垂直热量通量与相对垂直涡度的耦合作 用,还包含了大气湿斜压性等信息	高守亭等(2013)
湿热力平 流参数	$\mathrm{mtp}=\nabla_{h}(-\nu\cdot\nabla\theta)\cdot\nabla_{h}\theta^{*}$	它能反映降水的热力平流效应,并与云微物理过程 密切相关	高守亭等(2013)
散度垂直 通量	wdiv = $\frac{\omega}{\rho} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right)$	它代表水平散度的垂直通量	冉令坤和楚艳丽(2009)
密度散度垂直 通量	wdendiv = $\omega [\frac{\partial(u\rho)}{\partial x} + \frac{\partial(v\rho)}{\partial y}]$	多数情况下,雨区以外也存在散度,将质量散度与 垂直速度结合,能更准确地描述暴雨系统的发展演 变过程	
热力散度 垂直通量	wptediv = $\omega \cdot \nabla(\theta^* \cdot \vec{v})$	它综合了降水区附近热量和水汽的集中效应与强烈 上升运动	高守亭等(2013)
水汽散度 通量	wqvdiv = $\frac{\omega}{\rho} \left[\frac{\partial(uq)}{\partial x} + \frac{\partial(vq)}{\partial y} \right]$	它能反映水汽通量散度的垂直输送情况	冉令坤和楚艳丽(2009)
广义 Q 矢量散 度	divq [*] = $-(\frac{\partial Q_x^*}{\partial x} + \frac{\partial Q_y^*}{\partial y})$	它能揭示垂直运动场演变及其与降水系统的联系	Yang et al. (2007)

注: θ^* 为广义湿位温, ρ 是空气密度, u 为纬向风速, v为经向风速, ω 为p坐标系下的垂直速度,

 $Q_x^* = f(\frac{\partial v}{\partial p}\frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial p}\frac{\partial v}{\partial x}) - \frac{1}{\rho\theta^*}(\frac{\partial u}{\partial x}\frac{\partial\theta^*}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial x}\frac{\partial\theta^*}{\partial y}), \quad \\ Q_y^* = f(\frac{\partial v}{\partial p}\frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial u}{\partial p}\frac{\partial v}{\partial y}) - \frac{1}{\rho\theta^*}(\frac{\partial u}{\partial y}\frac{\partial\theta^*}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y}\frac{\partial\theta^*}{\partial y}), \quad \\ f = 0.0001 \ .$



图 1 2010 年 8 月 18 日 12:00~18:00 模拟的 6 h 累积地面降水量(阴影,单位: mm)以及逐时平均动力因子质量权重垂直积分量(等值线): (a) 广义对流涡度矢量垂直分量(cvz^{*}_{sum}.单位: 10⁻¹K s⁻¹); (b)质量散度(divden_{sum},单位: 10²kg³m⁻⁷ s⁻³); (c)垂直螺旋度(hel_{sum},单位: 10³kg² m⁻²s⁻⁶); (d)质量垂直螺旋度(helden_{sum},单位: 10³kg⁴ m⁻⁸s⁻⁶); (e)水汽垂直螺旋度(helqv_{sum},单位: 10 kg² m⁻²s⁻⁶); (f)热力垂直螺旋度(helth_{sum}, 单位: 10⁵K kg³ m⁻⁵s⁻⁶); (g)湿热力平流参数(mtp_{sum},单位: 10⁻⁴K²kg² m⁻⁶s⁻³); (h)散度垂直通量(wdendiv_{sum},单位: 10²kg⁴ m⁻⁸s⁻⁶); (i) 密 度散度垂直通量(wdiv_{sum},单位: 10³kg² m⁻²s⁻⁶); (j) 广义 Q矢量散度(divq^{*}_{sum},单位: 10⁻⁸kg m⁻³s⁻³)

Fig. 1 The 6-hour simulated rainfall (shaded, units: mm) and hourly average quality weighted vertical integration of dynamic parameters (contours) from 1200 UTC 18 to 1800 UTC 18 August 2010: (a) Vertical component of generalized convective vorticity vector (cvz^*_{sum} , units: 10^{-1} K s⁻¹); (b) mass divergence (divden_{sum}, units: 10^{2} kg³ m⁻⁷ s⁻³); (c) vertical helicity (hel_{sum}, units: 10^{3} kg² m⁻² s⁻⁶); (d) mass vertical helicity (helden_{sum}, units: 10^{3} kg⁴ m⁻⁸ s⁻⁶); (e) moisture vertical helicity (helqv_{sum}, units: 10 kg² m⁻² s⁻⁶); (f) thermal vertical helicity (helth_{sum}, units: 10^{5} K kg³ m⁻⁵ s⁻⁶); (g) moist thermodynamic advection parameter (mtp_{sum}, units: 10^{-4} K² kg² m⁻⁶ s⁻³); (h) divergence vertical flux (wdendiv_{sum}, units: 10^{2} kg⁴ m⁻⁸ s⁻⁶); (i) mass dvergence flux (wdiv_{sum}, units: 10^{3} kg² m⁻² s⁻⁶); (j) generalized **Q** vector divergence (divq^{*}, units: 10^{-8} kg m⁻³ s⁻³)





Fig. 1 (Continued)

利的大尺度条件;西南涡的发展加强及其与副高西侧边缘强风速带的相互作用,增强了川西陡峭地形的抬升效应,促发暴雨发生(李琴等,2014)。

2.1 方法

本文借助于高守亭和冉令坤等(高守亭等, 2013)以暴雨触发机制为出发点研发的集合动力因 子预报系统(EDFF方法),首先分析了集合动力因 子预报系统的成员,剔除掉与该地区域性影响系统 相去甚远的成员(比如能较好表征梅雨锋生和相关 的锋面降水的广义锋生函数(Yang et al., 2014),结 合川西地域特征,选取与该地高原大地形热动力效 应和环流特征更为相关、与暴雨发生的水汽和垂直 运动等必要条件紧密联系的12个动力因子成员(如 表1所示),试图加强释用该地区暴雨中的动、热 力过程信息,利用模式预报较为准确的基本产品, 将其用于暴雨预报。首先利用集合动力因子预报系 统诊断分析是否适用于四川西部地区,其次寻找其 中的最优诊断和预报成员。

在等压坐标系内对上述表格中的物理量A取从 850 ~ 500 hPa 的 质 量 权 重 垂 直 积 分 , 即 $-\int_{850 hPa}^{500 hPa} \rho |A| dp$,其中,|A|代表物理量 A 取绝对 值, ρ 是空气密度。下面将利用上述 12 个动力因 子的质量权重垂直积分量对此次暴雨过程开展诊 断分析。

3 暴雨落区的动力学诊断分析

模拟的 6 h 降水是累积量,而模拟的动力因子 是瞬时量,因此在图 1、图 2、图 3 中所示动力因 子均为模拟累积降水初始至结束时刻逐时平均动 力因子垂直积分量。2010年8月18日12:00~18:00 (图1),模拟的6h累积地面降水主要位于青衣江 暴雨区和龙门山暴雨区,两个强降水中心分别位于 泸定县和雅安附近;随着天气系统的发展与移动, 18日18:00~19日00:00(图2),青衣江暴雨区和 龙门山暴雨区连接成带,强降水集中在盆地西部山 脉与盆地中部较平坦地形之间、呈东北一西南走向 的狭长陡峭地形附近区域(即汶川一雅安地震带附 近),在降水雨带的西南部主要有两个强降水中心, 分别位于眉山和温江附近。19日00:00~06:00(图 3),降水带略向东南方向移动,强降水中心强度衰 减。19日06:00~12:00(图略),降水雨带持续向 东南方向移动,降水强度进一步减弱。

从实际诊断效果来看,在整个降水时段中,模 拟的 6h累积地面降水区上空覆盖着广义对流涡度 矢量垂直分量(cvz^{*}sum</sub>)(图 1a、图 2a 和图 3a)、 质量散度垂直积分量(divdensum)(图 1b、图 2b 和 图 3b)和广义 *Q* 矢量散度垂直积分量(divq^{*}sum</sub>) (图 1c、图 2c 和图 3c)大值区,随着天气系统的 发展与移动,雨区连接成带,这三个动力因子垂直 积分量也连接成带,且呈东北—西南走向分布,并 向东南方向移动。

cvz^{*}sum</sub>的大值带位置较降水带略偏东南,其强 中心位置较强降水中心略偏东,由其定义式表明, 它主要与大气水平斜压性有关,这可能是其与降水 落区不完全重合的原因之一。但广义对流涡度矢量 垂直分量与降水云中水凝物的有较好对应关系,而 云的发展往往要先于降水的发展,从而 cvz^{*}sum 的大 值带位置偏东南及其强中心值位置偏东从某种程 度上可能预示着降水在下一时刻的落区位置。在整



Fig. 2 Same as in Fig. 1 but for 1800 UTC 18 to 0000 UTC 19 August 2010





个过程中 divden_{sum} 强中心位置与强降水中心位置 较吻合, divden_{sum} 可以较好地追踪降水系统的发展 与演变。在盆地的东部、四川南部地区以及重庆地区 也有大片 divden_{sum} 大值覆盖区,但没有相应的观测降 水与之对应,其原因有等进一步深入研究。divq^{*}_{sum} 的 极值中心与降水极值中心十分吻合,诊断效果较好。

垂直螺旋度 helsum、质量垂直螺旋度 heldensum、 水汽垂直螺旋度 helqv_{sum}、热力垂直螺旋度 helth_{sum}、 湿热力平流参数 mtpsum、密度散度垂直通量 wdendiv_{sum}、散度垂直通量 wdiv_{sum}、热力散度垂直 通量 wptediv_{sum}、水汽散度垂直通量 wqvdiv_{sum}这 9 个动力因子对暴雨落区的诊断效果相似(图 1c、d、 e、f、g、h、i,图2c、d、e、f、g、h、i,图3c、 d、e、f、g、h、i, 其中热力散度垂直通量 wptediv_{sum}、 水汽散度垂直通量 wqvdiv_{sum} 的诊断效果与密度散 度垂直通量 wdendivsum 极其相似,所以它们的图 略),它们随模拟降水的时间演变趋势比较一致, 其强中心位置与地面降水极值有较好的吻合,并且 在模拟降水大值区内这些动力因子参数表现为强 信号,而在弱降水区或非雨区表现为弱信号。这些 动力因子与强降水中心的良好相关性与它们的物 理意义密切相关,例如湿热力平流参数 mtp_{sum}综合 反映了平流涡度、等熵面及水汽梯度的作用,是与云 的发展对应较好的参数(林青, 2011),因此其异 常的高值区与降水大值区域有较好的对应关系;又 如散度垂直通量 wdivsum 可以很好地描述强降水区 低层辐合、高层辐散的动力特征及垂直运动特点, 因此对强降水落区具有很好指示意义。

总体的来看,这些 12 个动力因子与模拟 6 h 累积地面降水量及降水过程的发展演变具有良好 的对应关系,它们对此次降水过程均具有良好的指 示意义,表明集合动力因子预报系统适用于此次降 水模态分布的诊断分析。

4 动力因子与模拟降水的相关性分析

基于 WRF 模式高分辨率数值模拟输出的逐时 资料,通过作区域平均(见图 4a),作平均的区域 为(30.3°N~31.4°N,102.8°E~103.5°E)进一步分 析 2010 年 8 月 18 日 12:00 至 19 日 12:00 四川地区强 降水期间动力因子与模式降水时间演变的相关性。

图 4b、c 表明,区域降水均值(绿线)随时间 的变化呈双峰特征,第一个小时降水峰值位于 18 日 21:00,小时降水量达 9 mm。随后区域降水均值

强度随时间缓慢减弱,在19日03:00达两波峰间的 极小值 (6 mm h^{-1}), 第二个小时降水峰值位于 19 日 06:00, 达 8 mm h⁻¹。从各个动力因子区域均值 随时间的变化曲线来看,虽然各动力因子的时间变 化存在一定差异, 与降水时间变化在细节上也有偏 差,但从总体上来看,各动力因子的时间变化均表 现出与降水时间变化相类似的双峰特征。虽然广义 对流涡度矢量(cvz^{*}_{sum})曲线与降水曲线偏差较大, 但也能对双峰型的时间变化特征给出较好地呈现。 绝大多数动力因子均超前降水极大值1小时达到极 大值,并且在双峰之间达极小值的时间(19日 03:00) 也与降水时间变化完全一致。从表 2 中可以 看出,上述方框区域内平均动力因子与区域平均模 拟降水均具有较好的相关性,所有相关系数均大于 0.6。广义对流涡度矢量(cvz^{*}sum)与降水相关系数 最小,为0.63955,而垂直螺旋度 hel 的垂直积分量、 质量垂直螺旋度 helden 的垂直积分量、水汽垂直螺 旋度 helqv 的垂直积分量、热力垂直螺旋度 helth 的 垂直积分量、广义Q矢量散度 divq 的垂直积分量 与降水相关系数均超过 0.9, 究其原因, 李琴等 (2014)指出在陡峭地形附近的强降水中心上空湿 度大,温度高,有强上升运动及强涡度中心,从而 导致强的螺旋度;从物理机制上讲,螺旋度把旋转 性和上升运动这两个特征耦合起来(李耀东等, 2005; 岳彩军等, 2011), 可以有效地表征潜在不 稳定能量的释放(冉令坤和楚艳丽,2009),质量 螺旋度在螺旋度中耦合并入了暴雨过程的高湿及 气旋性环流特征,反映了水汽的垂直输送效应,同 时也体现了低涡对暖湿气流的抽吸作用。水汽(垂 直)螺旋度,热力(垂直)螺旋度,表示水汽(通

表 2 图 4a 方框区域内各个动力因子与降水的相关系数 Table 2 The correlation coefficients between dynamic parameters and regional rainfall in the Fig. 4a square area

parameters and regions	a ramman in the right in square area
动力因子	与模拟降水的相关系数
cvz [*] _{sum}	0.63955
divden _{sum}	0.79004
wdendiv _{sum}	0.795485
mtp _{sum}	0.807458
wptediv _{sum}	0.815394
wqvdiv _{sum}	0.8406
wdiv _{sum}	0.875209
divq [*] _{sum}	0.903174
helqv _{sum}	0.92482
helth _{sum}	0.942195
helden _{sum}	0.942465
hel _{sum}	0.94416



图 4 (a) 2010 年 8 月 18 日 12:00 至 19 日 12:00 模拟的 24 小时累积地面降水量(等值线,单位:mm;填色为地形数据,单位:km),红色方框所示区 域为文中作区域平均的区域(30.3°N~31.4°N, 102.8°E~103.5°E)。(b、c)方框区域降水量均值(单位:mm h⁻¹)及各个动力因子质量权重垂直积分量(广 义对流涡度矢量垂直分量(cvz^{*}_{sum}*2.单位:K s⁻¹);质量散度(divden_{sum},单位:10²kg³m⁻⁷s⁻³);垂直螺旋度(hel_{sum},单位:10³kg²m⁻²s⁻⁶);质量垂直 螺旋度(helden_{sum}/5,单位:10²kg⁴m⁻⁸s⁻⁶);水汽垂直螺旋度(helqv_{sum},单位:10^{kg²m⁻²s⁻⁶);热力垂直螺旋度(hel_{sum}/3,单位:10⁵K kg³m⁻⁵s⁻⁶);湿 热力平流参数(mtp_{sum}*5,单位:10⁻³K²kg²m⁻⁶s⁻³);密度散度垂直通量(wdiv_{sum},单位:10³kg²m⁻²s⁻⁶);散度垂直通量(wdendiv_{sum}/3,单位:10²kg⁴m⁻⁸ s⁻⁶);水汽散度通量(wqvdiv_{sum},单位 kg²m⁻²s⁻⁶);热力散度垂直通量(wptediv_{sum}/1.5,单位:10⁵kg³Km⁻⁵s⁻⁶);广义*Q* 矢量散度(divq^{*}_{sum}*2.5,单位: 10⁻⁷kg m⁻³s⁻³)均值随时间的变化曲线}

Fig. 4 (a) Simulated 24-hour accumulative precipitation (contours, units: mm; shaded: terrain data, units: km) from 1200 UTC 18 to 1200 UTC 19 August 2010. The red square is the regional average area. (b, c) Time series of regional average rainfall (units: mm h⁻¹) and regional average quality weighted vertical integration of dynamic parameters (vertical component of generalized convective vorticity vector (cvz^*_{sum} , units: $10^{-1} K s^{-1}$); mass divergence (divden_{sum}, units: $10^2 kg^3 m^{-7} s^{-3}$); vertical helicity (hel_{sum}, units: $10^3 kg^2 m^{-2} s^{-6}$); mass vertical helicity (helden_{sum}, units: $10^3 kg^4 m^{-8} s^{-6}$); moisture vertical helicity (helqv_{sum}, units: $10 kg^2 m^{-2} s^{-6}$); thermal vertical helicity (helth_{sum}, units: $10^5 K kg^3 m^{-5} s^{-6}$); moist thermodynamic advection parameter (mtp_{sum}, units: $10^{-4} K^2 kg^2 m^{-6} s^{-3}$); mass divergence flux (wdiv_{sum}, units: $10^3 kg^2 m^{-2} s^{-6}$); divergence vertical flux (wdendiv_{sum}, units: $10^2 kg^4 m^{-8} s^{-6}$); moisture divergence flux (wqvdiv_{sum}, units: $10^3 kg^2 m^{-2} s^{-6}$); thermal vertical divergence flux (wptediv_{sum}/1.5, units: $10^5 kg^3 Km^{-5} s^{-6}$); generalized **Q** vector divergence (divq^{*}, units: $10^{-7} kg m^{-3} s^{-3}$)



图 5 2010 年 8 月 18 日 12:00~18:00 实测 6 h 累积降水量(阴影)与 GFS 资料预报场平均动力因子垂直积分量(等值线):(a)广义对流涡度矢量 垂直分量(cvz^{*}_{sum},单位:10²K s⁻¹);(b)质量散度(divden_{sum},单位:10²kg³m⁻⁷s⁻³);(c)垂直螺旋度(hel_{sum},单位:10²kg²m⁻²s⁻⁶),(d)质 量垂直螺旋度(helden_{sum},单位:10³kg⁴m⁻⁸s⁻⁶);(e)水汽垂直螺旋度(helqv_{sum},单位:10⁻¹kg²m⁻²s⁻⁶);(f)热力垂直螺旋度(helth_{sum},单位: 10⁴K kg³m⁻⁵s⁻⁶);(g)湿热力平流参数(mtp_{sum},单位:10⁻⁶K²kg²m⁻⁶s⁻³);(h)散度垂直通量(wdendiv_{sum},单位:10 kg⁴m⁻⁸s⁻⁶);(i)密度散度 垂直通量(wdenv_{sum},单位:10 kgm⁻²s⁻⁶);(j)广义 Q 矢量散度(divq^{*}_{sum},单位:10⁻⁹kgm⁻³s⁻³)

Fig. 5 The 6-hour observed rainfall (shaded, units: mm) and average dynamic parameter vertical integration (contours) at 1200 UTC 18 and 1800 UTC 19 August 2010: (a) Generalized vertical convective vorticity vector (cvz^*_{sum} , units: 10^2 K s^{-1}); (b) mass divergence (divden_{sum}, units: $10^2 \text{ kg}^3 \text{ m}^{-7} \text{ s}^{-3}$); (c) vertical helicity (helden_{sum}, units: $10^2 \text{ kg}^2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-6}$); (d) mass vertical helicity (helden_{sum}, units: $10^3 \text{ kg}^4 \text{ m}^{-8} \text{ s}^{-6}$); (e) moisture vertical helicity (helqv_{sum}, units: $10^{-1} \text{ kg}^2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-6}$); (f) thermal vertical helicity (helth_{sum}, units: $10^4 \text{ K kg}^3 \text{ m}^{-5} \text{ s}^{-6}$); (g) moist thermodynamic advection parameter (mtp_{sum}, units: $10^{-6} \text{ K}^2 \text{ kg}^2 \text{ m}^{-6} \text{ s}^{-3}$); (h) divergence vertical (wdiv_{sun}, units: $10 \text{ kg}^4 \text{ m}^{-8} \text{ s}^{-6}$); (i) mess divergence (wdendiv_{sun}, units: $10 \text{ kg}^2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-6}$); (j) generalized \boldsymbol{Q} vector divergence (divq^{*}_{sum}, units: $10^{-6} \text{ kg} \text{ m}^{-3} \text{ s}^{-3}$)



量)涡度、热力涡度垂直向上/向下输送状况(杨帅 等,2013.),广义Q 矢量散度能比较清楚地揭示垂 直运动场的演变及其与降水系统的联系(岳彩军和 寿绍文,2002),因此这几个动力因子与此次暴雨 系统的关系更为密切和直接。因此,文章所选动力 因子与降水均具有良好的相关性,特别是广义Q 矢 量散度和与螺旋度有关的动力因子,可用于这一地 区类似降水过程的降水预报研究。

5 暴雨落区的动力学预报分析

前面的分析已经表明上述集合动力因子预报 系统及其成员与降水具有很好的相关性,那么这些 动力因子对实际降水的预报能力如何呢?虽然上 部分已经选出了最优成员,但本小节仍然计算 12 个成员来对比检验其预报效果。本节下面选用 2010 年8月18日至19日美国 NCEP/NCAR GFS 6 h 和 12 h 的预报场资料(水平分辨率为 0.5°×0.5°)计 算上述 12 个动力因子,进而给出动力因子对降水 的预报效果,分析上述 12 个动力因子对 2010 年 8 月18日12:00至19日12:00四川地区强降水过程的 预报指示意义。由于观测的 6 h 降水是累积量,而 动力因子是瞬时量,因此在图5、图6和图7中所示 动力因子均为累积降水初始与结束时刻的均值。 2010年8月18日12:00~18:00(图5,由于热力散 度垂直通量 wptediv_{sum}、水汽散度通量 wqvdiv_{sum}的预 报效果与密度散度垂直通量 wdendivsum 极其相似,所 以它们的图略,下同),盆地内的降水主要呈现团状 分布,在盆地西北侧的高原上有零星降水区,最强降 水出现在四川中部陡峭地形附近地区,存在两个明显 极值中心,北面极值降水中心强度达125 mm 以上, 南面极值中心达 25 mm 以上。从利用 GFS 预报场 资料计算的各动力因子的垂直积分量分布可以看出,

各动力因子均能较好地预报(指示)出发生在四川中 部地区的强降水过程,在强降水落区上空,覆盖着明 显的动力因子强扰动区,说明所有上述12个动力因 子对这6h降水落区均可以给出较好地预报。同时可 以看出,所有动力因子均没有很好地分辨出四川中部 的两个强降水中心,这可能与GFS模式预报场的水 平分辨率(0.5°×0.5°)较粗有关;另外,应注意到, 位于四川西北侧,高原地形上的4个较弱降水极值中 心在大多数动力因子预报中均没有得到很好地体现, 这可能由于这一地区位于高原之上,模式对地形效应 的处理能力,高原上观测稀缺以及观测资料的可能误 差有关;从图5还可以看出,所有动力因子扰动分布 基本均集中于四川中西部,部分动力因子在四川南 部,东南部存在较强极值中心,而观测降水在上述地 区并未出现明显降水中心,其原因有待进一步分析。

18日18:00至19日00:00降水明显发展加强(图 6),在四川盆地西部陡峭地形附近(汶川一雅安断 裂带陡峭地形附近)沿陡峭地形呈带状分布,其上 分布的若干强降水中心,其中(31.5°N,104°E)附 近降水中心最强,达125 mm以上。此外,在(30.4°N, 103°E)附近、(32°N, 104.5°E)附近以及(32.5°N, 105°E)附近还存在另外三个较强降水中心,其中 以(30.4°N, 103°E)附近的降水中心面积最大。从 所有 12 个动力因子的预报效果来看,所有动力因 子均对尺度最大的一个降水中心(30.4°N, 103°E) 具有较好的预报指示意义,大多数动力因子对东北 一西南走向雨带北侧的其它强降水中心预报效果 较差,其原因可能为:(1)GFS预报场水平分辨率 (0.5°×0.5°)降低; (2)这里的分析利用 6h 和 12 h 预报场两个时刻的动力因子相加的平均值来表示 6h 的平均值,并且与6h 累积降水作比较,这种算 法可能造成一定偏差; (3) GFS 系统对四川复杂地



Fig. 6 Same as in Fig. 5 but for 1800 UTC 18 and 0000 UTC 19 August 2010



图 7 同图 5, 但为 2010 年 8 月 19 日 00:00~06:00 Fig. 7 Same as in Fig. 5, but for 0000 UTC 19 and 0600 UTC 19 August 2010 形地区短时强降水过程的预报能力有限。

8月19日00:00~06:00(图7),降水带整体上 略有减弱,并且降水带南部有偏东北—西南向转为 偏东—西向分布。降水带上仍存在几个明显的强降 水中心,分别位于(29.8°N,102.9°E)、(30.2°N, 103.7°E)、(31.4°N,104.1°E)、(31.9°N,104.4°E) 附近。此时段各动力因子对降水带分布给出了较好 地预报,尤其是对降水带南部的雨带分布特征有较 好的刻画。19日06:00~12:00(图略),各动力因 子对降水也给出了较好的预报效果。

综上所述,这些动力因子对此次强降水过程降 水系统的发展与演变均具有一定的预报能力。

6 结论与讨论

本文首先利用高分辨率数值模拟资料对集合 动力因子预报系统中的广义对流涡度矢量垂直分 量(cvz^{*})、质量散度(divden)、垂直螺旋度(hel)、 质量垂直螺旋度(helden)、水汽垂直螺旋度(helqv)、 热力垂直螺旋度(helth)、湿热力平流参数(mtp)、 密度散度垂直通量(wdendiv)、散度垂直通量 (wdiv)、热力散度垂直通量(wptedive)、水汽散 度通量(wqvdiv)、广义*Q*矢量散度(divq^{*})等12 个动力因子的降水诊断意义进行分析,进一步利用 逐时高分辨率数值模拟结果计算动力因子时间演 变与地面降水时间演变的相关性,分析了动力因子 与降水之间的密切联系,最后用美国 GFS 6 h 和 12 h 的预报场资料计算各动力因子,给出降水过程预 报,并与实际降水进行对比,探讨了动力因子对降 水的预报指示意义,主要结论如下:

(1)集合动力因子预报系统中的动力因子大值 区与地面降水落区具有相当高的一致性,它们对此 次降水落区诊断效果良好。

(2)各动力因子区域均值随时间的变化曲线都 能表现出降水区域均值随时间变化曲线双峰形态;所有相关系数均超过 0.6,其中,广义 Q 矢量 散度、水汽垂直螺旋度、热力垂直螺旋度、质量垂 直螺旋度、垂直螺旋度与降水的相关系数较大(达 0.9 以上),对此次降水的诊断效果较好。

(3)利用 GFS 预报场资料开展的预报意义研究 发现,这些动力因子对观测降水具有一定的预报能 力,但由于 GFS 环流预报场的准确率以及预报资料 时空分辨率等原因,动力因子对此次降水过程某些 方面预报效果仍存在一定的差距。 实际预报经验表明,对于不同的暴雨过程,某一 个物理量因子场的分布特征和强度都存在着明显 的差异(蔡义勇,2006),各种动力因子表达了大 气环流的不同方面,对暴雨过程的指示作用也略有 不同,因此,我们需要利用更多四川盆地西部型暴 雨个例来开展动力因子更细致的预报及指示意义 研究工作。

参考文献(References)

- 白爱娟, 刘晓东, 刘长海. 2011. 青藏高原与四川盆地夏季降水日变化 的对比分析 [J]. 高原气象, 30 (4): 852–859. Bai Aijuan, Liu Xiaodong, Liu Changhai. 2011. Contrast of diurnal variations of summer precipitation between the Tibetan Plateau and Sichuan Basin [J]. Plateau Meteor. (in Chinese), 30 (4): 852–859.
- 蔡义勇,刘爱鸣,陈雪钦,等. 2006. 福建省热带气旋暴雨落区完全预报 方法 [J]. 气象科技, 34 (2): 132–137. Cai Yiyong, Liu Aiming, Chen Xueqin, et al. 2006. Perfect prediction method of rainstorms induced by tropical cyclones over Fujian Province [J]. Meteor. Sci. Technol. (in Chinese), 34 (2): 132–137, doi:10.3969/j.issn.1671-6345.2006.02.003.
- 陈栋, 顾雷, 蒋兴文. 2010. 1981~2000 年四川夏季暴雨大尺度环流背景 特征 [J]. 大气科学学报, 33 (4): 443–450. Chen Dong, Gu Lei, Jiang Xingwen. 2010. Characteristics of large-scale circulation background of summer heavy rainfall in Sichuan during 1981–2000 [J]. Trans Atmos. Sci. (in Chinese), 33 (4): 443–450, doi:10.3969/j.issn.1674-7097.2010. 04.008.
- 高守亭, 冉令坤, 李娜, 等. 2013. 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. 2013. The "Ensemble Dynamic Factors" approach to predict rainstorm [J]. Torrential Rain and Disasters (in Chinese), 32 (4): 289–302, doi:10.3969/ j.issn.1004-9045.2013.04.001.
- 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: D01105, doi:10.1029/2006JD00717.
- Gao S T, Ping F, Li X F, et al. 2004. A convective vorticity vector associated with tropical convection: A two-dimensional cloud-resolving modeling study [J]. J. Geophys. Res., 109: D14106, doi:10.1029/2004JD004807.
- 葛晶晶,钟玮,杜楠,等. 2008. 地形影响下四川暴雨的数值模拟分析
 [J]. 气象科学, 28 (2): 176–183. Ge Jingjing, Zhong Wei, Du Nan, et al. 2008. Numerical simulation and analysis of Sichuan rainstorm under terrain influence [J]. Scientia Meteor. Sinica (in Chinese), 28 (2): 176–183, doi:10.3969/j.issn.1009-0827.2008.02.009.
- 胡德强, 陆日宇, 苏秦, 等. 2014. 盛夏四川盆地西部地区降水年际变化 及其对应的环流异常 [J]. 大气科学, 38 (1): 13-20. Hu Deqiang, Lu Riyu, Su Qin, et al. 2014. Interannual variation in the mid-summer rainfall over the western Sichuan Basin and the associated circulation anomalies [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 38 (1): 13-20, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2013.12192.

蒋兴文, 王鑫, 李跃清, 等. 2008. 近 20 年四川盆地大暴雨发生的大尺

度环流背景 [J]. 长江流域资源与环境, 17 (Z1): 132–137. Jiang Xinwen, Wang Xin, Li Yueqing, et al. 2008. Large-scale general circulation characteristics of heavy rain of Sichuan Basin at latest twenty years [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin (in Chinese), 17 (Z1): 132–137, doi:10.3969/j.issn.1004-8227.2008.z1.024.

- 李琴, 崔晓鹏, 曹洁. 2014. 四川地区一次暴雨过程的观测分析与数值 模拟 [J]. 大气科学, 38 (6): 1095-1108. Li Qin, Cui Xiaopeng, Cao Jie. 2014. Observational analysis and numerical simulation of a heavy rainfall event in Sichuan Province [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 38 (6): 1095-1108, doi:10.3878/j.issn.1006-9895. 1401.13255.
- 李耀东,刘健文,高守亭. 2005. 螺旋度在对流天气预报中的应用研究 进展 [J]. 气象科技, 33 (1): 7–11. Li Yaodong, Liu Jianwen, Gao Shouting. 2005. Progress in researches on application of helicity to convective weather prediction [J]. Meteor. Sci. Technol. (in Chinese), 33 (1): 7–11, doi:10.3969/j.issn.1671-6345.2005.01.002.
- 林青. 2011. 台风莫拉克的动力诊断分析与数值模拟 [D]. 南京信息工程大学硕士学位论文. Lin Qing. 2011. The dynamical diagnosis and numerical study of typhoon Morakot (0908) [D]. M. S. thesis (in Chinese), Nanjing University of Information Science and Technology.
- 卢萍, 宇如聪, 周天军. 2008. 2003 年 8 月"巴蜀夜雨"过程的模拟和分 析研究 [J]. 气象学报, 66 (3): 371–380. Lu Ping, Yu Rucong, Zhou Tianjun. 2008. Numerical simulation of the mid-night rainfall over Sichuan Basin during August 2003 [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 66(3): 371–380, doi:10.11676/qxxb2008.035.
- 卢萍, 字如聪, 周天军. 2009. 四川盆地西部暴雨对初始水汽条件敏感 性的模拟研究 [J]. 大气科学, 33 (2): 241–250. Lu Ping, Yu Rucong, Zhou Tianjun. 2009. Numerical simulation on the sensitivity of heavy rainfall over the western Sichuan Basin to initial water vapor condition [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33 (2): 241–250, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2009.02.04.
- 骆凯,李耀东,秦丽. 2010. 一次华北暴雨过程的数值模拟及水汽螺旋 度和水汽涡度收支应用分析 [J]. 气象与减灾研究, 33 (2): 35–42. Luo Kai, Li Yaodong, Qin Li. 2010. Numerical simulation and application of moisture helicity and moisture vorticity budget on a rainstorm process over North China [J]. Meteorology and Disaster Reduction Research (in Chinese), 33 (2): 35–42, doi:10.3969/j.issn.1007-9033.2010.02.005.
- 马力, 冯汉中, 杨进, 等. 2013. 四川天气预报手册 [M]. 成都:西南交 通大学出版社, 70pp. Ma Li, Feng Hanzhong, Yang Jin, et al. 2013. The manual of the weather forecast in Sichuan Province [M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 70pp.
- 牛立强, 陈长胜, 马洪波. 2013. 集合动力因子预报系统及其对一场切 变暴雨落区的预报检验 [J]. 吉林气象, (3): 12–16, 29. Niu Liqiang, Chen Changsheng, Ma Hongbo. 2013. Multi-dynamical parameters system and its forecast verification to a shear torrential rain areas [J]. Jilin Weather (in Chinese), (3): 12–16, 29.
- 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, 58 (11): 8094-8106, doi:10.7498/aps.58.8094.

冉令坤, 齐彦斌, 郝寿昌. 2014. "7.21"暴雨过程动力因子分析和预报研

究 [J]. 大气科学, 38 (1): 83–100. Ran Lingkun, Qi Yanbin, Hao Shouchang. 2014. Analysis and forecasting of heavy rainfall case on 21 July 2012 with dynamical parameters [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 38 (1): 83–100, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2013. 12160.

- 沈沛丰, 张耀存. 2011. 四川盆地夏季降水日变化的数值模拟 [J]. 高原 气象, 30 (4): 860–868. Shen Peifeng, Zhang Yaocun. 2011. Numerical simulation of diurnal variation of summer precipitation in Sichuan Basin [J]. Plateau Meteor. (in Chinese), 30(4): 860–868.
- 盛春岩,高守亭,史玉光. 2012. 地形对门头沟一次大暴雨动力作用的 数值研究 [J]. 气象学报,70 (1): 65–77. Sheng Chunyan, Gao Shouting, Shi Yuguang. 2012. Numerical simulation of the dynamic effect of the orography on a Mentougou severe torrential rain event [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 70 (1): 65–77, doi:10.11676/ qxxb2012.006.
- 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]. Trans. Atmos. Sci. (in Chinese), 36 (2): 147–157, doi:10.3969/j.issn. 1674-7097.2013.02.003.
- 许娈,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 land falling typhoon Morakot (0908) using multi-dynamical parameters [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 37 (1): 23–35, doi:10.3878/j.issn. 1006-9895.2012.11156.
- 徐裕华, 王宗德, 王明. 1991. 西南气候 [M]. 北京: 气象出版社, 298pp. Xu Yuhua, Wang Zongde, Wang Ming. 1991. Climate of Southwest China (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 298pp.
- 薛羽君, 白愛娟, 李典. 2012. 四川盆地降水日变化特征分析和个例模 拟 [J]. 地球科学进展, 27 (8): 885-894. Xue Yujun, Bai Aijuan, Li Dian. 2012. Analysis and numerical simulation of diurnal variation of precipitation in Sichuan Basin [J]. Adv. Earth Sci. (in Chinese), 27 (8): 885-894, doi:10.11867/j.issn.1001-8166.2012.08.0885.
- 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 the thermal helicity for two strong "sauna" weather processes in northern China [J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 56 (7): 2185–2194, doi:10.6038/cjg20130706.
- Yang S, Wang D H. 2009. Diagnostic analyses of the modified convective vorticity vector in non-uniformly saturated moist flow [J]. Atmospheric and Oceanic Science Letters, 2 (3): 142–147.
- Yang S, Gao S T, Wang D H. 2007. Diagnostic analyses of the ageostrophic *Q* vector in the non-uniformly saturated, frictionless, and moist adiabatic flow [J]. J. Geophys. Res., 112, doi:10.1029/2006JD008142.
- Yang S, Gao S T, Lu C G. 2014. A generalized frontogenesis function and its application [J]. Adv. Atmos. Sci., 31 (5), 1065–1078, doi:10.1007/ s00376-014-3228-y.

郁淑华. 1984. 四川盆地大范围强暴雨过程的合成分析 [J]. 高原气象, 3

(3): 58–67. Yu Shuhua. 1984. Resultant analysis of large-scale heavy-rain storm over Sichuan Basin [J]. Plateau Meteor. (in Chinese), 3
(3): 58–67.

- 郁淑华. 1986. 四川盆地大范围强暴雨的合成分析——(二) 温湿场和层结稳定度 [J]. 高原气象, 5 (1): 62–70. Yu Shuhua. 1986. The compositive analysis of broad heavy rain storms over Sichuan Basin. Part II: The fields of temperature, humidities and unstable stratifications [J]. Plateau Meteor. (in Chinese), 5 (1): 62–70.
- 郁淑华, 滕家谟, 何光碧. 1998. 高原地形对四川盆地西部突发性暴雨 影响的数值试验 [J]. 大气科学, 22 (3): 379–383. Yu Shuhua, Teng Jiamo, He Guangbi. 1988. The numerical experiment of plateau terrain influencing for a suddenly arising torrential rain in the west of Sichuan Basin [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 22 (3): 379–383, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1998.03.14.
- 岳彩军,寿绍文. 2002. 湿 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. Comparsion of wet Q vector divergence with ω field [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 25 (3): 420–424, doi:10.3969/j.issn. 1674-7097.2002.03.019.
- 岳彩军,郭煜,寿绍文,等. 2011. 螺旋度在我国多种灾害性天气研究中的应用进展 [J]. 暴雨灾害, 30 (2): 107–116. Yue Caijun, Guo Yu, Shou Shaowen, et al. 2011. Progress in application study of helicity to severe weathers [J]. Torrential Rain and Disasters (in Chinese), 30(2): 107–116, doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2011.02.002.
- 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 [J]. 大气科学, 32 (3): 444–456. Zhao Yu, Gao Shouting. 2008. Application of the convective vorticity vector to the analysis of a rainstorm [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 32 (3): 444–456, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2008.03.03.

赵玉春, 王叶红. 2010. 高原涡诱生西南涡特大暴雨成因的个例研究 [J].

高原气象, 29 (4): 819–831. Zhao Yuchun, Wang Yehong. 2010. A case study on plateau vortex inducing southwest vortex and producing extremely heavy rain [J]. Plateau Meteor. (in Chinese), 29 (4): 819–831.

- 赵玉春, 许小峰, 崔春光. 2012. 川西高原东坡地形对流暴雨的研究 [J]. 气候与环境研究, 17 (5): 607–616. Zhao Yuchun, Xu Xiaofeng, Cui Chunguang. 2012. A study of convective rainstorms along the east slope of western Sichuan Plateau [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 17 (5): 607–616, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2011.11056.
- 周长艳, 岑思弦, 李跃清, 等. 2011. 四川省近 50 年降水的变化特征及 影响 [J]. 地理学报, 66 (5): 619–630. Zhou Changyan, Cen Sixuan, Li Yueqing, et al. 2011. Precipitation variation and its impacts in Sichuan in the last 50 years [J]. Acta Geographica Sinica (in Chinese), 66 (5): 619–630, doi:10.11821/xb201105005.
- 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, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.01.03.
- 朱刚. 2012. 2009 年 5 月一次山东暴雨的数值模拟研究 [D]. 南京信息工程大学硕士学位论文. Zhu Gang. 2012. The numerical study of the rainstorm occurred in Shandong Province in May 2009 [D]. M. S. thesis (in Chinese), Nanjing University of Information Science & Technology.
- 朱艳峰,字如聪. 2003. 川西地区夏季降水的年际变化特征及与大尺度 环流的联系 [J]. 大气科学, 27 (6): 1045–1056. Zhu Yanfeng, Yu Rucong. 2003. Interannual variation of summer precipitation in the west of Sichuan Basin and its relationship with large-scale circulation [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 27 (6): 1045–1056, doi:10.3878/j. issn.1006-9895.2003.06.08.