

基于西南涡加密探空资料同化的一次奇异路径耦合低涡大暴雨数值模拟研究*

高笃鸣^{1,2} 李跃清^{1,2} 程晓龙^{1,2}

GAO Duming^{1,2} LI Yueqing^{1,2} CHENG Xiaolong^{1,2}

1. 中国气象局成都高原气象研究所, 成都, 610072

2. 高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室, 成都, 610072

1. *Institute of Plateau Meteorology, China Meteorological Administration, Chengdu 610072, China*

2. *Heavy Rain and Drought-Flood Disasters in Plateau and Basin Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610072, China*

2017-06-28 收稿, 2017-12-14 改回.

高笃鸣, 李跃清, 程晓龙. 2018. 基于西南涡加密探空资料同化的一次奇异路径耦合低涡大暴雨数值模拟研究. *气象学报*, 76(3):343-360

Gao Duming, Li Yueqing, Cheng Xiaolong. 2018. A numerical study on a heavy rainfall caused by an abnormal-path coupling vortex with the assimilation of southwest China vortex scientific experiment data. *Acta Meteorologica Sinica*, 76(3):343-360

Abstract Using the Weather Research Forecast (WRF) model and WRF data assimilation system (WRFDA), sensitivity experiments are conducted to simulate a heavy rainfall caused by the coupling of the Tibetan Plateau vortex (TPV) and an abnormal-path southwest China vortex (SWCV) in Sichuan Basin with assimilation of operational sounding data and the intensive observed data obtained through the SWCV Scientific Experiment. The model simulations of precipitation and the vortex moving path using different initial conditions are compared, and the impacts on the structure evolution of the SWCV and associated precipitation by assimilating intensive sounding data are analyzed. The results show that the model capability for the forecast of precipitation and the moving paths of TPV and SWCV is improved by assimilating both intensive sounding data and conventional sounding data, while the forecast is less satisfactory with assimilation of only the conventional sounding data. By introducing intensive sounding data, the intensities of initial TPV and SWCV are enhanced due to the increased cyclonic perturbation on the initial wind field. In addition, the more unstable stratification adjusted by data assimilation makes it easy for the model to produce large precipitation with a magnitude that is consistent to observation at the initial time. The experiment reveals that the generation and maintenance of the SWCV at 700 hPa in this case not only rely on high potential vorticity in the upper levels, but also rely on increases in positive vorticity caused by horizontal convergence in the lower levels and its upward transport, which is favorable for the SWCV to develop and move. Latent heat release associated with precipitation at the beginning of the simulation also plays an important role in the development of SWCV. Results of the present study are helpful for better understanding the mechanisms for the development of SWCV and associated precipitation process.

Key words SWCV, TPV, WRFDA, Intensive sounding data of SWCV, Vorticity equation

摘要 利用 WRF 模式及 WRFDA 同化系统, 引入业务探空资料和西南涡加密探空资料, 对一次四川盆地奇异路径低涡耦合大暴雨过程进行了数值试验, 对比检验不同同化试验对本次过程降水和低涡移动路径的模拟能力, 分析了加密探空资料同

* 资助课题: 国家自然科学基金重点项目(91337215)、国家自然科学基金面上项目(41275051)、四川省应用基础研究重点项目(2016JY0046)、公益性行业(气象)科研专项项目(GYHY201006053)。

作者简介: 高笃鸣, 主要从事中尺度数值模拟研究。E-mail: 307285424@qq.com

通讯作者: 李跃清, 主要从事高原气象研究。E-mail: yueqingli@163.com

化对西南涡结构及其降水演变的影响。结果表明:在同化业务探空资料的基础上,引入西南涡加密探空资料能改善模式对本次降水和低涡移动路径的模拟,而仅同化业务探空资料对模拟结果的改善作用有限;引入西南涡加密探空资料,一方面能在初始风场上产生气旋式扰动,增加初始高原涡和西南涡的强度,另一方面通过调整初始四川盆地上空大气温、湿度结构,使模式在积分初期就能产生出实况量级的降水;西南涡加密探空资料的同化试验揭示了仅靠高层的高位涡不足以激发和维持700 hPa的西南涡,需要通过低层水平辐合引起正涡度增加并向上输送来增强700 hPa的气旋式环流,进而促进西南涡的移动和发展,而模拟初期降水的潜热释放也起重要作用,加深了对西南涡及其降水成因的认识。

关键词 西南涡,高原涡,WRFDA,西南涡加密探空资料,涡度方程

中图法分类号 P435

1 引言

数值模式是天气预报业务和科研的重要工具。一般来说,大气在未来某一时刻的状态是由大气在一个时刻的状态决定的(Bjerknes, 1904),即理论上大气是一个确定论的系统(丑纪范, 2007)。但是,数值模式作为真实大气的近似总会有误差存在,这些误差一方面来源于模式本身的性能,包括算法近似、模式动力框架设计和物理过程通过参数化引入模式的不确定性等(纪立人等, 2005; 张大林, 2005),另一方面与模式初始场的准确程度有关。所以,涉及数值模式的改进工作总是围绕提高模式本身的精度和改善模式的初值来进行的。在计算机飞速发展、模式分辨率不断提高、更合理参数化方案得以使用的今天(陈德辉等, 2004),数值模式的初值问题就显得尤为重要。而资料同化作为改善初值问题的主要手段,已受到研究和业务部门的普遍关注。目前,利用资料同化技术开展灾害天气系统及其影响的研究与预报也成为重要的科学技术问题。

灾害天气系统西南低涡(简称西南涡)和高原低涡(简称高原涡)都与青藏高原动力、热力作用密切相关,是大气环流与青藏高原特殊地形相互作用下产生的低值系统。西南涡常出现在中国西南地区的对流层低层(850—700 hPa),是一种初期具有暖性结构的 α 中尺度系统,其生命史一般小于48 h,少数能维持到6—7 d(卢敬华, 1986)。西南涡不仅是西南地区重要的降水系统,同时也是中国东部地区暴雨的主要影响系统之一(李国平, 2007)。在一定的环流条件下,西南涡或其诱生的不稳定扰动能有组织地沿着梅雨锋辐合带东移,在其路径上发展成剧烈的天气系统(丁一汇, 1993; 张小玲等, 2004)。高原涡生成于青藏高原主体边界层中,是高原夏季500 hPa上主要的降水系统,在一定的环流形势下能移出青藏高原,影响下游广大地区的降水(Tao,

et al, 1981)。而地处青藏高原东侧的四川地区受西南涡和高原涡的影响,容易发生暴雨、大暴雨等灾害性强降水天气。因此,西南涡、高原涡对四川暴雨的影响一直备受气象科研与业务部门的关注(陶诗言等, 1980; 陈忠明等, 2004; 刘红武等, 2008; 何光碧, 2012; 李跃清等, 2016)。

然而,由于青藏高原及其附近地区地形复杂、测点稀疏、代表性差,与西南涡、高原涡时空尺度相适应的气象观测能力薄弱,气象资料精细程度不够,造成这两类低值系统发生、发展及其细致结构的研究具有较大的不确定性。为此,中国气象局成都高原气象研究所从2010年起开展了每年一次的西南涡外场加密观测专项科学试验,获得了时空分辨率更高的连续加密探空资料,并实时应用于西南天气预报业务和区域数值预报模式系统。实际应用表明:有效提高了对于西南涡及其强降水的预报能力(李跃清等, 2010, 2011, 2012)。在此基础上,使用该试验资料已进行了一些有意义的研究与应用,在加密观测资料的数值预报同化、低涡及其暴雨的精细分析与过程诊断、短期天气预报技术等方面取得了初步的结果(张利红等, 2011; 卢萍等, 2012, 2016; Cheng, et al, 2016)。但是,关于移动性西南涡的演变过程、物理机制和降水影响等理论研究和数值模拟仍是一个难点,尤其是奇异路径低涡及其天气影响问题更加复杂、困难。如何基于西南涡加密观测科学试验,进一步加强资料应用和理论研究非常必要(李跃清等, 2016)。

因此,利用西南涡加密观测试验得到的西南涡过程加密探空资料,结合中尺度高分辨率数值模式WRF(Weather Research and Forecasting Model)及其同化系统WRFDA(WRF Data Assimilation System),针对2013年夏季发生在青藏高原东侧四川盆地的一次奇异路径高原涡、西南涡耦合引发的暴雨过程开展初值敏感性试验,检验西南涡加密探空

资料的引入对西南涡路径和降水模拟的改善效果,探究同化该试验资料对本次低涡暴雨天气过程模拟结果的可能影响,以加深对西南涡及其降水的认识,并为西南涡加密观测资料在西南区域数值预报业务系统中的更好应用提供科学依据和技术支撑。

2 个例简介与试验方案设计

2.1 降水实况和天气背景

2013年6月29日—7月2日,四川盆地出现了一次持续性区域大暴雨天气过程。此次暴雨过程具有降水总量大、强度高、范围广和持续时间长的特点,强降水主要位于盆地中部、东北部地区,降水中心遂宁日降水量达415.9 mm,为四川省日降雨量历史第二大极值,过程累积最大降雨量出现在遂宁船山区老池,达623.7 mm,暴雨洪涝灾害给当地国民经济、工农业生产造成了巨大的损失。此次暴雨

过程是在高原涡、西南涡、低空急流和切变线的共同影响下形成的(张芳华等,2014; Cheng, et al, 2016)。从500 hPa环流场(图1)可以看到,此次过程期间,亚洲中高纬度地区高度场呈“一槽一脊”型分布,巴尔喀什湖到贝加尔湖为一宽广低槽,高压脊位于中国东北地区。受西行台风“温比亚(Rumbia)”影响(图略),西太平洋副热带高压(副高)位置偏北,一直稳定于四川东北地区,其外围强盛的西南低空急流向四川盆地暴雨区输送大量的水汽和能量。另外,副高的稳定少动阻挡低涡等暴雨影响系统的东移,使低涡形成打折旋转的奇异路径,致使高原涡和西南涡长时间停滞于四川盆地。而200 hPa盆地上空为南亚高压控制,高层辐散、低层辐合的垂直空间配置为此次特大暴雨天气的发生、发展提供了有利的物理条件。

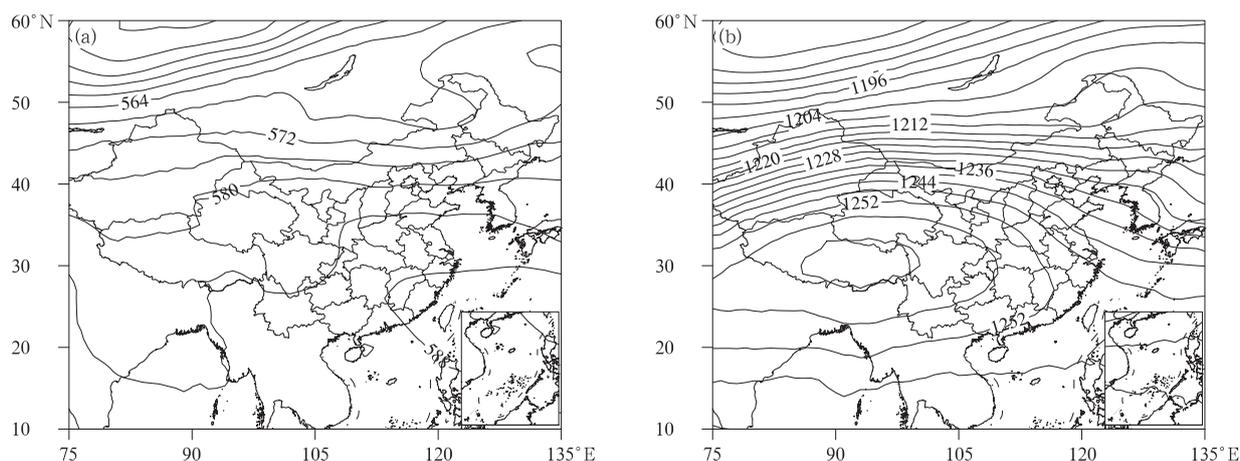


图1 2013年6月29日—7月2日每日12时(世界时,下同)500 hPa (a)和200 hPa (b)的平均位势高度场(单位: dagpm)

Fig. 1 Geopotential height at 500 hPa (a) and 200 hPa (b) at 12:00 UTC averaged from 29 June to 2 July of 2013 (unit: dagpm)

2.2 模式物理过程、同化方案设计

采用中尺度数值模式WRF(v3.5.1),对暴雨过程进行数值试验。使用美国环境预报中心(NCEP)6 h时间分辨率的 $1^\circ \times 1^\circ$ FNL(Final Operational Global Analysis)资料作为模式的初边界条件,模拟区域如图2,模式水平方向格距为10 km,由于计算资源充足,本次模拟没有使用多重嵌套,而是使用更为直接的单层模拟方案,模式总共 321×176 个格点,垂直方向分为40层,模式层顶取50 hPa。模式

运行的初始时刻为2013年6月29日12时,一共积分60 h。模拟使用的物理过程如表1。

为检验西南涡加密探空资料对模式预报的影响,使用WRFDA(v3.5.1)三维变分同化模块同化模拟区域内的19个业务探空站资料和4个空间加密探空站资料(即西南涡加密观测资料),4个空间加密站点分别为川西高原西南部的九龙站(海拔2925 m)、四川盆地西缘的名山站(海拔691 m)、盆地北缘的剑阁站(海拔544 m)和川西高原中部的金

川站(海拔 2169 m),所有探空资料在同化前都经过一定质量控制,以满足三维变分同化的基本约束,在 WRFDA 中还会进行阈值检验,保证了进入 WRF-

DA 中观测资料的质量。在此基础上形成了对照试验(CNTL_EXP)和 2 组同化试验(A19_EXP、A23_EXP)(表 2)。

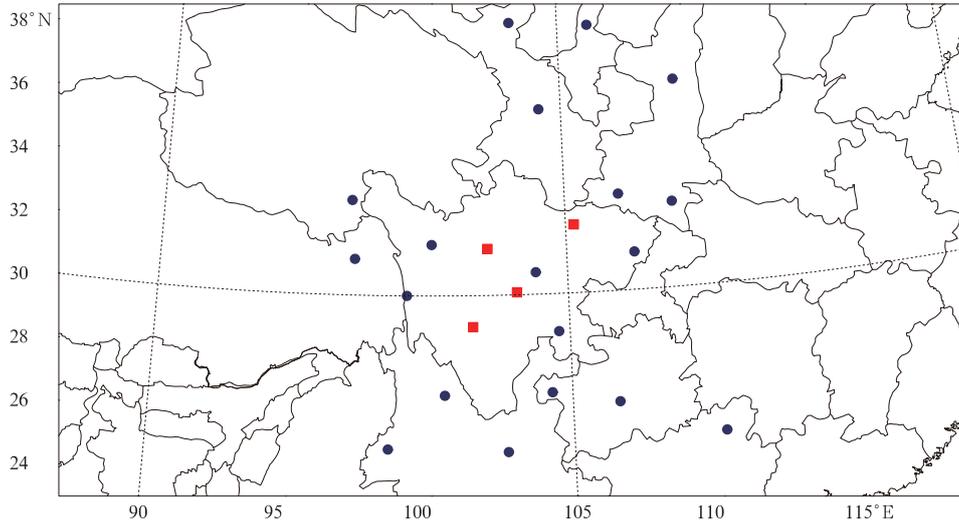


图 2 模式的区域设置及同化探空站点分布

(蓝色圆点为业务探空站,红色方块为西南涡加密探空站,分别为九龙、金川、名山和剑阁)

Fig. 2 Model domain and distribution of radiosonde stations

(Operational radiosonde stations are denoted by blue dots, the SWCV intensive radiosonde stations (Jiulong, Jinchuan, Minshang, Jiange) are shown by red squares)

表 1 模式物理过程设置

Table 1 Model configuration and parameters

物理参数化方案	参数设置	参考文献
积云对流参数化方案	Kain-Fritsch	Kain, et al, 1990, 1993
短波辐射方案	Dudhia	Dudhia, 1989
长波辐射方案	RRTM	Mlawer, et al, 1997
近地层方案	Monin-Obukhov	Janjić, 2001;Beljaars, 1995
云微物理参数化方案	WSM3	Hong, et al, 2004
陆面过程参数化方案	Noah	Chen, et al, 2001
边界层参数化方案	YSU	Hong, et al, 2006

表 2 同化试验设计方案

Table 2 Assimilation of data in different experiments

试验方案名称	同化探空资料站点情况
CNTL_EXP(对照试验)	无
A19_EXP(同化试验)	19 个业务探空站资料
A23_EXP(同化试验)	19 个业务探空站和 4 个西南涡加密探空站资料

3 降水分布及低涡路径分析

图 3 为不同时次各试验累积降水量分布,图中累积降水量从模式起报时间开始计算,实况降水及参考流场分别由中国地面自动站观测资料和 FNL 资料给出。实况降水显示,距初始时刻仅 6 h(6 月

29 日 18 时),四川盆地就出现了大范围累积降水,盆地中部 6 h 雨量超过 50 mm,四川其他地区无雨或少雨。之后,随时间累积降水逐渐增多,各时次累积降水中心大致位于 700 hPa 西南涡的东南象限,主要累积雨区集中在四川盆地。对比各试验:对照试验积分 6 h 后,盆地西部地区出现了少量降水,四

川西北、西南部存在两个虚假降水区,随着积分时间的延长,盆地范围内虽有较大量级降水出现,但落区分散,较实况偏东,范围偏大,强度偏弱,累积雨量最大值远超出 700 hPa 西南涡的控制范围;A19 同化试验显示,模式积分 6 h 后,盆地依然没有大量级降水出现,随着时间的推移,雨区范围相对对照试验有所增加,但降水强度远不及实况,降水落区和西南低涡的相对位置也没有明显改善;A23 试验各时次累积降水量显示,加入西南涡加密探空资料后,仅积分 6 h,盆地西部就出现一超过 50 mm 的强降水中心,与实况相比,虽然 A23 试验降水更集中,落区偏西,但降水量级相对于对照试验和 A19 试验更接近实况,盆地西北和西南部的虚假降水明显减弱,随着积

分时间延长降水落区几乎位于 700 hPa 西南涡正下方,A23 累积雨区的落区、形态和量级越来越接近实况,降水模拟得到明显改善。

综上,同化业务探空资料(A19 试验)后,由于模式在积分初期(6 h)各物理量场和动力场还没有达到平衡状态,没有出现实况等级的降水,而随着模式的运行,虽然降水量较对照试验有所增大,但远达不到实况的降水强度,因此,仅同化业务探空资料对本次过程降水模拟的改善作用有限。而加入西南涡加密探空资料的 A23 试验在积分 6 h 时就预报出了实况 50 mm 以上量级的降水,使模式起转时间显著降低,且各时次累积降水落区和量级与实况基本一致,A23 试验对本次降水过程有较好的改善作用。

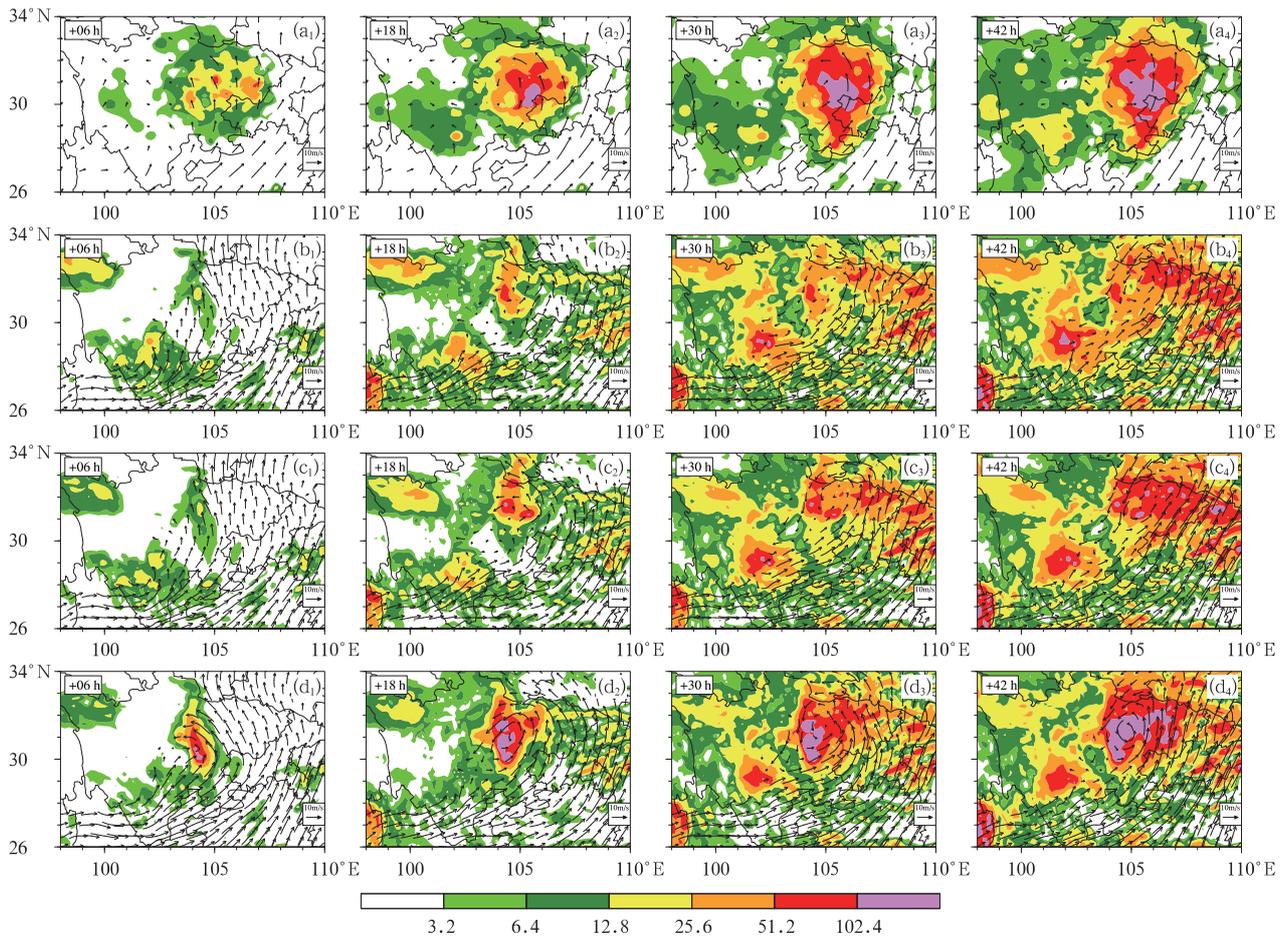


图3 实况(a)和各试验(b. 对照试验, c. A19_EXP, d. A23_EXP 试验) 06 h (a₁—d₁), 18 h (a₂—d₂), 30 h (a₃—d₃)和 42 h (a₄—d₄)不同时段 700 hPa 参考流场(单位:m/s)及累积降水量(单位:mm)分布

Fig. 3 Wind vectors at 700 hPa (unit: m/s) and accumulated precipitation (unit: mm) from observations (a) and from simulations by the different experiments (b. CNTL_EXP, c. A19_EXP, d. A23_EXP) at 06 h (a₁ - d₁), 18 h (a₂ - d₂), 30 h (a₃ - d₃) and 42 h (a₄ - d₄)

青藏高原、四川盆地低值系统在盆地相互作用常能引起盆地内特大暴雨天气。研究表明,高、低空正涡度中心在垂直方向上相互叠加,其强迫作用能激发出气流的辐合增长,是高原涡、西南涡强烈发展的一种重要物理机制(程麟生等,1988)。此次低涡暴雨天气,高原涡与西南涡的耦合过程正好对应特大暴雨过程,因此,移动中的西南涡、高原涡能否成功耦合是模式准确预报本次强降水过程的关键,有必要对两低涡的移动路径进行对比分析。从实况和

各试验高原涡、西南涡的移动路径(图4)可以看到,初始时刻(6月29日12时),高原涡和西南涡分别位于四川北部和西南部,随后高原涡东移至甘肃南部后再南折,与东北移西南涡在四川盆地西部耦合,6月30日06时两涡合并后向东南方向移至遂宁上空并长久维持,稳定少动,造成了该地大暴雨天气,直至7月1日12时合并涡才向偏北方向移动离开四川地区。

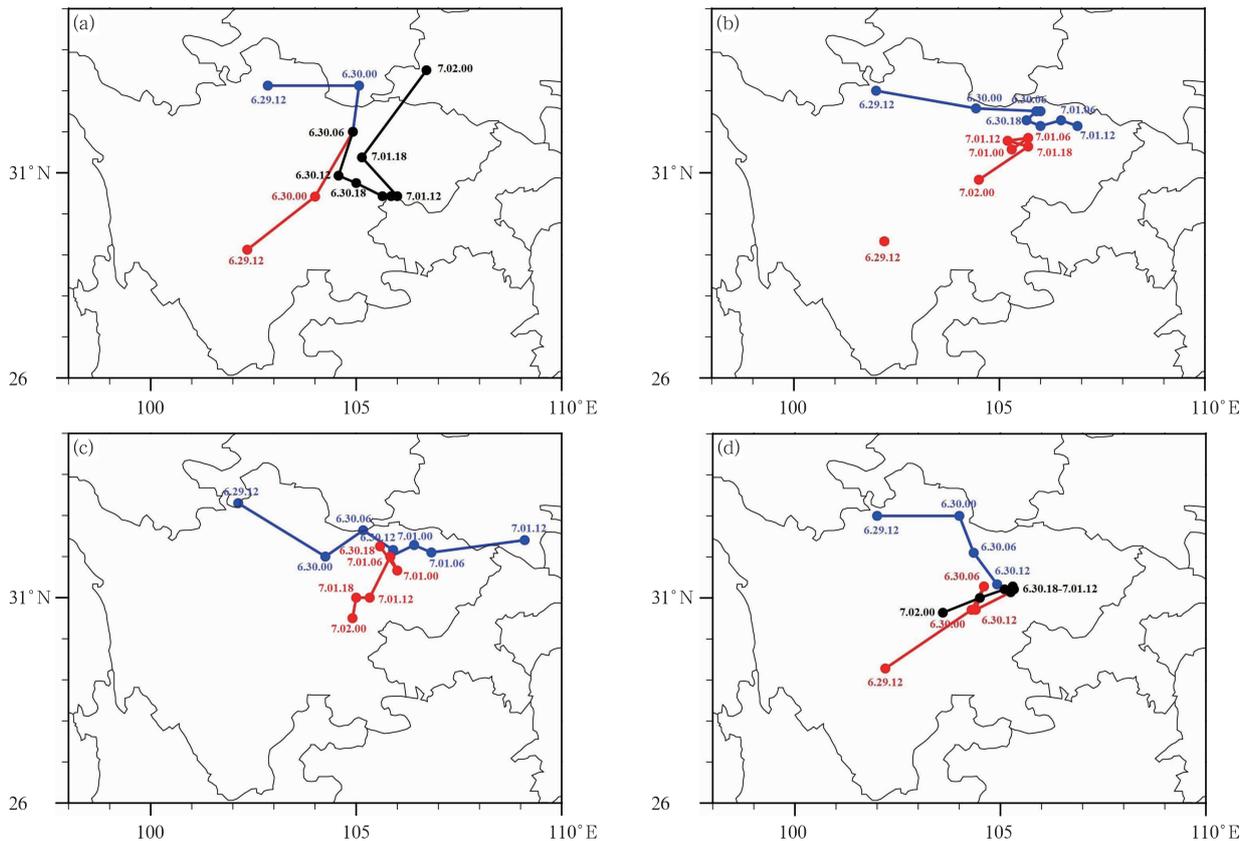


图4 实况(a)和各试验(b. CNTL_EXP, c. A19_EXP, d. A23_EXP)高原涡(蓝色实线)和西南涡(红色实线)各时次低涡中心位置及移动路径(黑色实线:合并涡)

Fig. 4 The central positions and moving paths of the TPV at 500 hPa (blue lines), SWCV at 700 hPa (red lines) and the merged vortex (dark lines) in the observation (a) and the experiments (b. CNTL_EXP, c. A19_EXP, d. A23_EXP)

对比各试验高原涡移动路径,发现初始时刻3个试验在四川北部都能模拟出一高原涡,位置较实况略偏西,此后几个时次各试验高原涡均向东移动,但东移路径有所差别:对照试验中,高原涡迅速向东移动,30日06时移至四川东北部后移速减缓,直到7月1日12时在盆地北部减弱消失(图4b);A19同化试验中,高原涡一路东移,30日12时移至四川盆地后移速减缓,到7月1日12时移出四川并消亡

(图4c);引入4个加密探空站后,A23试验显示,高原涡在30日00时东移至盆地西北侧后再南折,到30日18时与北上的西南涡相遇耦合,合并后的低涡在原地维持18h后开始西退,直到7月2日00时消失在四川中部(图4d)。

对比各试验西南涡的移动路径,发现3个试验在西南涡移动路径上有较大差别:初始时刻对照试验与实况在同一位置出现一西南涡,此后几个时次,

该试验 700 hPa 流场上并未出现明显气旋性环流,直到 7 月 1 日 00 时在四川东北再次出现西南涡并开始原地“打转”,到 7 月 1 日 18 时该西南涡突然向西南方向移动,7 月 2 日 00 时消失于四川盆地中部(图 4b);A19 试验显示,初始时刻 700 hPa 没有西南涡出现,30 日 18 时在盆地北部出现一西南涡,随后,该西南涡缓慢南移,7 月 2 日 00 时在盆地中部消失(图 4c);A23 试验在初始时刻和实况于同一位置出现一西南涡,随后该低涡迅速向东北移动,到 6 月 30 日 18 时与南折的高原涡合并(图 4d)。

综上,对照试验中高原涡几乎一直平直东移,与实况的南折路径不符,西南涡出现在盆地的时间也比实况晚 24 h,导致两涡并未相遇耦合,同化业务探空资料后,A19 试验中高原涡的东移速度反而加快,西南涡在盆地出现时间虽较对照试验提前 6 h,但移速较慢,并没有和高原涡相遇,由于本次降水过程中西南涡和高原涡的耦合加强及其在盆地上空的长久维持是产生持续、集中强降水的关键因素,但对照试验和 A19 试验模拟的西南涡和高原涡没有发

生耦合,且两类低涡都没有在四川盆地上空稳定维持,导致其降水分散、量级偏低;而增加 4 个加密探空站资料后的 A23 试验,再现了高原涡与实况在同一时刻发生南折,西南涡在盆地出现时间较对照试验和 A19 试验明显提前,移动路径几乎与实况重合,虽然两低涡在流场上耦合的时间较实况滞后 12 h,但耦合后的合并涡能长久维持在盆地上空,产生大量降水,并与实况在同一时刻移出主要降水区,A23 试验有效改善了模式对本次个例低涡移动路径与耦合的模拟。

值得一提的是,实况中,耦合后的低涡在遂宁地区停留一段时间后向北移动,直至消亡,而 A23 试验中,合并涡在盆地停留一段时间后发生西退,与实况不符。注意到发生西退时模式已经积分 48 h,可能是因为同化加密探空资料产生的作用影响时间有限。因此,又设计了一组附加同化试验,即在原有试验设计基础上,以 7 月 1 日 00 时为模式初始时间,使用 FNL 资料为初边界条件,同化试验方案不变,得到修正后的低涡移动路径(图 5)。图 5 表明,3 个

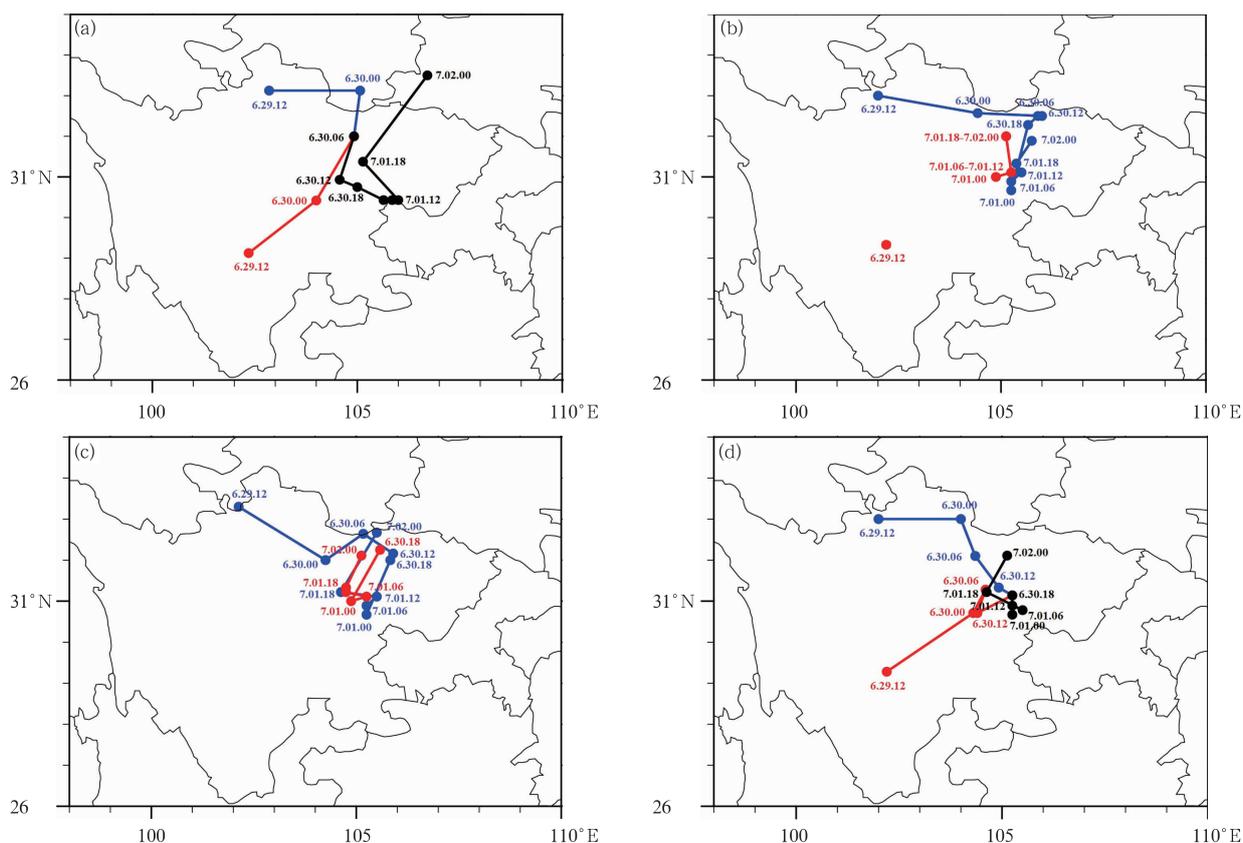


图 5 同图 4,但为修正后的情况

Fig. 5 Same as Fig. 4 but for the revised moving paths

新的试验中,只有 A23 试验效果有明显的改进。修正后的 A23 试验较好地再现了两低涡耦合合并及其整个演变过程,揭示了两低涡合并后在遂宁上空维持 24 h,然后向北移动,与实况基本吻合。

4 不同同化试验初始场分布特征

一个尽可能描述真实大气物理状态的初始场是数值模式做出正确预报的关键,而资料同化的主要目的就是为模式提供一个尽量贴合真实大气状况的初始场。由上述分析可知,A19 和 A23 两个同化试验对本次强降水分布和低涡中心移动路径的模拟表现出明显差异,其根本原因还在于初始条件的不同。因此,以下进一步对两个同化试验各初始物理量分布特征(分析场)进行分析。

从 500 hPa 各同化方案初始位势高度及其与对照试验的差值分布(图 6a、b)可知,对照试验初始时刻在四川西北部有一接近闭合的低压(高原涡),副高 5860 gpm 位势高度等值线位于重庆至贵州一带。而同化探空资料后,四川上空 500 hPa 位势高度均有所降低,位势高度增量的负值区大致分布在同化站点覆盖的区域,两同化试验位势高度降低最多的区域有所差别:A19 试验在青海、甘肃交界处和四川中部降低最多,A23 试验在青海东部降低最多,整个分析区域 A19 试验位势高度降低较 A23 试验更明显,但在初始高原涡所在的四川西北部,两试验位势高度差别并不大。对于温度场,同化探空资料后,两同化试验 500 hPa 温度场(图 6c、d)均呈“东高西低”的形势分布,初始温度降低最多的区域位于青海南部,甘肃南部为温度增量极大值区,500 hPa 两同化试验在整个分析区域的温度与对照试验的差值在 ± 1 K 以内,差别不大。

对于湿度场(图 6e、f),在绝大部分地区,两同化试验的比湿增量相差不大(± 0.5 g/kg 以内),但在四川盆地,比湿变化完全相反:A19 试验初始比湿较对照试验有所降低,盆地西部降低最多;而 A23 试验初始比湿明显高于对照试验,四川西部比湿增量极大值区与对照试验比湿高值区刚好重合,注意到 A23 试验比湿最大的区域正好位于初始 700 hPa 西南涡上空附近,可能会对西南涡的后续发展及其引起的降水产生一定影响,后文将详细讨论。

从同化试验与对照试验的风矢量差值(图 6g、h,阴影区为风速大小的差值)分布可知,A19 试验

与对照试验风矢量相差最大的地区位于青海南部、四川西北部,表现为平直的西北气流,而四川盆地 A19 试验初始风场和对照试验差别不大;A23 试验在青海南部、横断山脉上空和四川北部分别存在 3 个风矢量增量极大值区,这 3 个极大值区包围着的整个四川西北部存在着气旋式扰动,且在 400 hPa 更加明显,扰动位置较 500 hPa 略偏西(图略),而此区域正是初始高原涡所在位置(图 4)。该区域的气旋式扰动使得 A23 试验初始高原涡明显强于 A19 试验和对照试验,有利于大气要素场的辐合,可能会影响高原涡后续的发展与移动。

从 700 hPa 各试验初始物理量场(图 7)分布可知,两同化试验的位势高度在整个分析区域较对照试验均有所降低(图 7a、b),且越靠近四川盆地降低越明显。其中,A19 试验在四川中部位势高度较 A23 试验低约 2 hPa,但在初始西南涡所在的四川南部,两试验位势高度差别不大。温度场上,两同化试验较对照试验温度偏高,在四川、云南交界处都有一温度增量极大值区。此外,A23 试验在四川盆地存在一温度增量极大值区,在盆地 A23 试验较 A19 试验温度偏高更明显。

700 hPa 比湿场(图 7e、f)表明,A19 试验比湿分布与对照试验差异不大,而 A23 试验在四川东南部比湿比对照试验显著偏高。事实上,对比该试验各层比湿分布情况(图略)发现,引入 4 个加密探空站资料后,四川东南部 850—400 hPa 都存在明显的比湿正增量,层次越低增湿越明显,这种下湿上干的大气层结在适当的热力垂直结构条件下更容易触发降水,这正是 A23 试验在开始积分的 6 h 内就能产生与实况量级相当降水的主要原因。有研究(赵平等,1991,1992)指出,降水释放的潜热通过降低涡区气压,使低层气旋性辐合和高层反气旋性辐散得到加强,进而使西南涡进一步发展。图 3 中 A23 试验积分初期出现的大量级累积降水区正好位于该试验西南涡的东北象限,降水凝结潜热的释放可能使西南涡得到快速发展,一定程度上也影响西南涡的移动。因此,引入加密探空资料后带来的模式初始湿度场的调整是 A23 试验优于其他试验的关键所在。

另外,700 hPa 风矢量差值(图 7g、h)表明,在大部分分析区域内,A19 试验初始风速与对照试验相差不大(1—2 m/s),而 A23 试验与对照试验初始风速差别明显。A23 试验在四川盆地、贵州北部大部

分地区风速比对照试验偏大 3 m/s 以上,在盆地上空存在明显的气旋式扰动,A23 试验的初始西南涡

较其他试验更强,有利于该试验的水汽辐合。

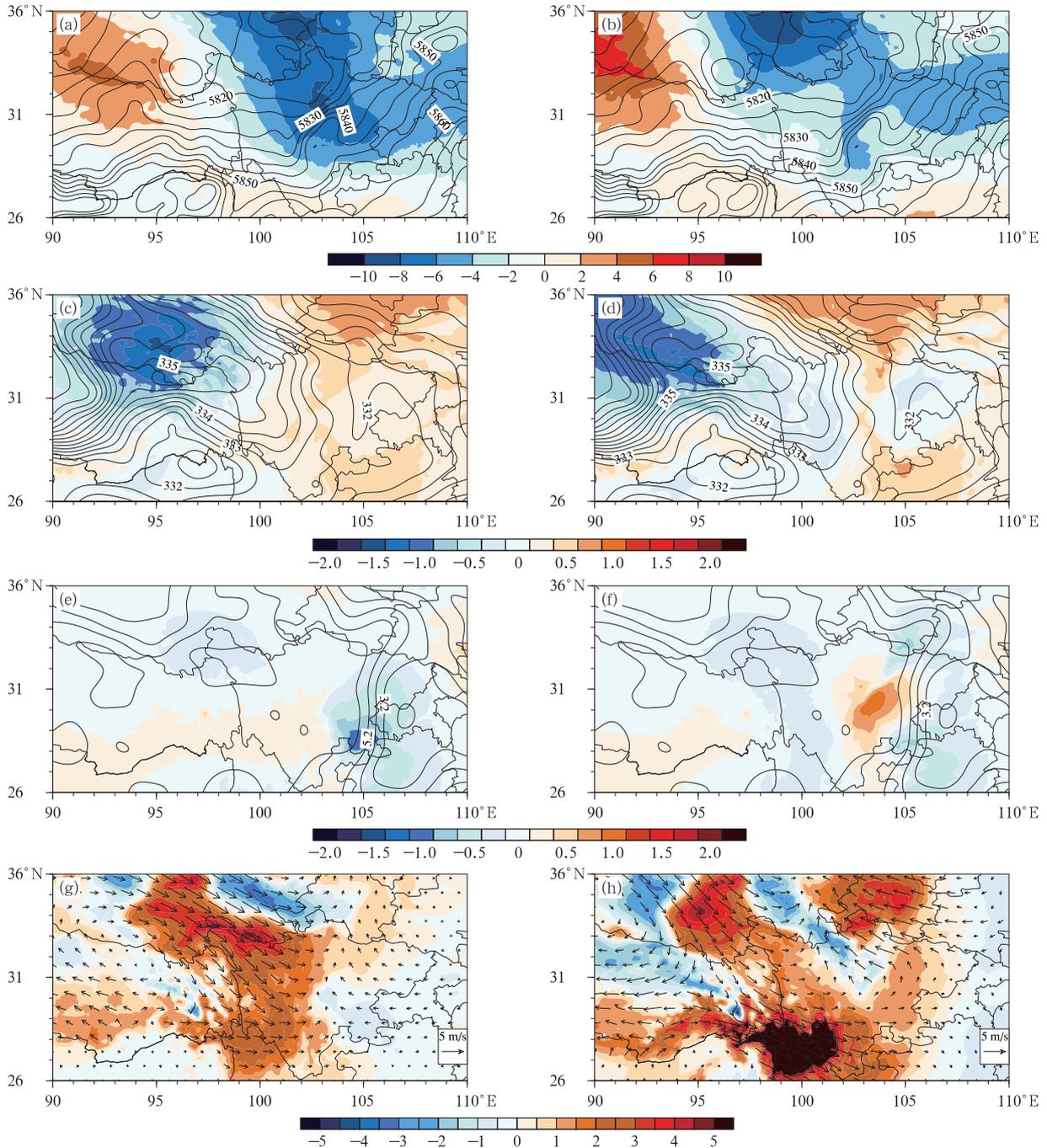


图 6 对照试验 500 hPa 初始场各变量(等值线)分布及与同化试验的差值
(填色图、矢量图为同化试验减对照试验; a, b. 位势高度(单位:gpm), c, d. 温度(单位:K), e, f. 比湿(单位:g/kg),
g, h. 风速(单位:m/s); a, c, e, g. A19 同化试验减对照试验, b, d, f, h. A23 同化试验减对照试验)

Fig. 6 Differences (shaded areas and vectors) in initial fields of various variables at 500 hPa
between the control experiment and assimilation experiments

(a, b. geopotential height (unit: gpm), c, d. temperature (unit: K), e, f. specific humidity (unit: g/kg),
g, h. wind vectors (unit: m/s); a, c, e, g. A19_EXP minus CNTL_EXP, b, d, f, h. A23_EXP minus CNTL_EXP)

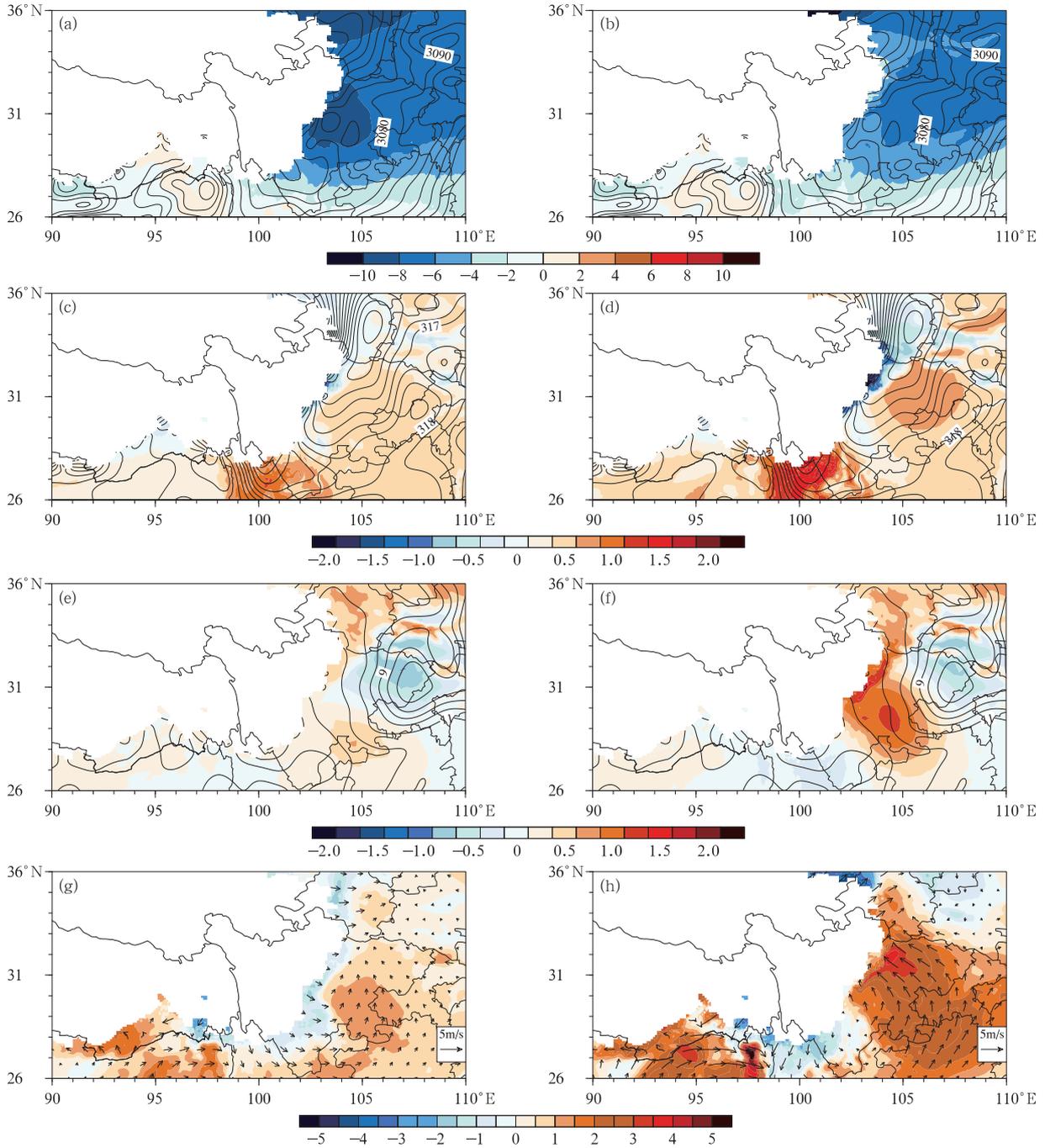


图7 同图6,但为700 hPa
Fig. 7 Same as Fig. 6 but for 700 hPa

综上,同化不同探空资料均能降低四川地区500和700 hPa初始位势高度,但在初始低涡所在区域,不同同化试验位势高度与对照试验的差异不大。温度场上,同化探空资料对500 hPa初始温度场的影响较小,对700 hPa初始温度场有升温作用,其中,A23试验在川、滇交界处及四川盆地温度正增量较其他试验明显。不同同化试验在比湿分析场上

差异较大,其中A19试验在500和700 hPa与对照试验差别不大,对初始比湿场的改进不明显,增加4个加密探空站后,A23试验在四川中、南部整层比湿都增大,高度越低,增湿越明显,这种上干下湿的层结在积分初期更容易产生大量降水,促使西南涡发展加强。动力场上,仅同化业务探空资料的A19试验,只能加强500 hPa青海南部、四川西北部的西北

气流,对700 hPa风场几乎无影响,引入加密探空资料后的A23试验,盆地上空500、700 hPa均出现气旋性扰动,初始高原涡、西南涡的强度明显增强。

对比3组试验不难发现,引入西南涡加密探空资料对初始高原涡的改善作用主要体现在动力因素上,即通过在上层叠加初始气旋式扰动来增强高原涡的初始强度,而对西南涡的改进作用除在动力上增加了低涡强度外,还通过改变大气的温湿结构进而影响到西南涡的发展、移动,A23试验仅积分6 h,就已在105°E以西700 hPa(图3)产生了不同于其他两个试验的气旋式环流,而该气旋式环流对积分初期的上升运动和降水也很重要。由此可见,同化加密探空资料对对流层低层(700 hPa)系统的影响大于中层(500 hPa),故下面对对流层低层西南涡的结构演变做进一步分析。

5 同化试验西南涡结构演变及其影响

位涡是综合反映大尺度大气动力和热力特性的物理量,对低涡系统演变过程的结构、强度等特征也有很好的指示作用(刘晓冉等,2014;郁淑华等,2017)。因此,针对本次个例,分析了西南涡初始阶段、发展移动阶段、耦合阶段和成熟阶段代表时次的位涡分布特征(图8)。其中,用于对比的资料采用NCEP的 $1^\circ \times 1^\circ$ FNL资料,但该资料分辨率有限,对一些较为细致的结构不能精确描述,仅作为参考。相反,同化探空资料后所得到的包含中小尺度信息的初始场可能更能揭示出真实大气的细致结构。从图8看到,FNL资料在初始时刻(29日12时)沿盆地西南(29.7°N, 102.5°E)到盆地中部(32°N, 106°E)700—400 hPa存在一个高位涡带,3组试验均能较好地反映这一特征,但A23试验与其他试验有一定差别:受初始气旋式扰动影响,A23试验初始阶段(29日12时)高位涡带比FNL资料和另外两试验范围偏大、强度更强;西南涡发展移动阶段(29日18时)FNL资料显示,随着西南涡向东北方向移动,初始时刻的高位涡带也有所东移,并在垂直方向向上发展,高位涡带正下方的700 hPa有一弱的气旋式环流(图3),即西南涡。对照试验和A19试验很好地模拟出了该阶段FNL资料位涡的变化,两试验的高位涡带与FNL资料在同一位置向上发展,且位涡高值中心较FNL资料偏强,但此时两试验700 hPa风场并没有出现明显的气旋式环流(图3)。对于A23试验,由于引入加密探空资料,初始的高

位涡带在该阶段有所东移,并在垂直方向上迅速发展加强,700 hPa以下出现了一个新的正位涡中心,和其上的高位涡带打通,形成了一个“高位涡柱”,并与东侧的低位涡区(105°E以东)形成较强的位涡梯度,700 hPa流场出现了明显的气旋式环流(图3)。30日06时耦合阶段,FNL资料显示,西南涡和高原涡在105°E附近发生耦合,两低涡耦合时位涡呈左右对称分布,300和600 hPa各有一个位涡高值中心,高原涡和西南涡分别位于高、低空位涡中心的正下方,对照试验和A19试验均没有模拟出位涡场的这一重要特征,而A23试验虽然此时在风场上两涡没有明显上下重合,但位涡场上已经显示出耦合的初始特征:105°E附近从700 hPa一直到300 hPa为一大于2.5 PVU的正位涡中心,且位涡值较另外两试验更接近FNL资料。7月1日00时成熟维持阶段,FNL资料中两低涡耦合后,向东南方向移至遂宁附近,并在该地区稳定维持,合并涡的位涡场在(31.4°N, 105°E)上空从850到300 hPa均为大于1 PVU的高位涡区,其中,位于600 hPa以上的高位涡区水平范围较大,其东侧向低层倾斜,西侧与平流层的“高位涡库”(寿绍文,2010)相连,600 hPa以下高位涡区水平范围较小,整个位涡高值区呈“倒三角”的形态,表明合并涡中高原涡部分的影响范围较西南涡更大。对照试验和A19试验在该处模拟的位涡分布与FNL资料差别较大,两试验模拟的高位涡区主要位于400 hPa以下,且高层高位涡范围较低层水平范围小,与FNL资料不符。而A23试验虽能大致模拟出FNL资料中合并涡高位涡区的“倒三角”分布,但其高层部分呈左右对称分布,没像FNL资料一样出现倾斜,且位涡值明显偏大,同化加密探空资料产生的正效果在该阶段逐渐减弱消失。

Hoskins(1997)在位涡理论中指出,高层的高值正位涡能够诱生低层气旋式环流或激发气旋式环流的发展和加强。对比FNL资料与3组试验,29日18时,各试验均能很好模拟出FNL资料105°E附近的高位涡带,但只有A23试验模拟出了700 hPa的气旋式环流,可能说明仅靠高层的正值高位涡并不足以激发或维持本次个例的700 hPa西南涡,该西南涡的发展维持必然还受其他因素影响。

为更深入地探究西南涡在盆地发展的原因,使用涡度方程对3组试验涡度收支情况进行诊断。 p 坐标系下的涡度方程

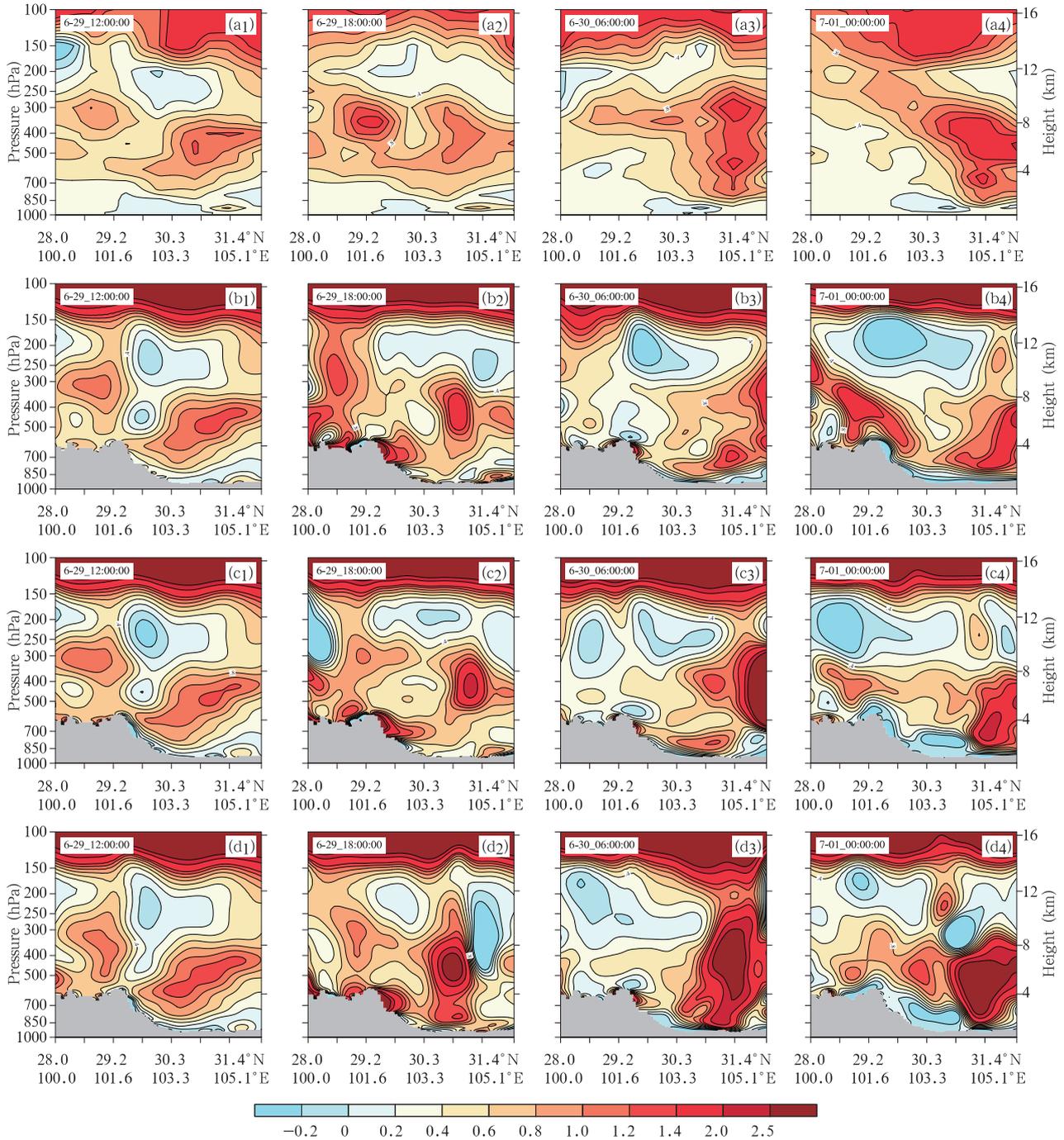


图8 FNL资料(a)和各试验方案(b. 对照试验, c. A19同化试验, d. A23同化试验)沿(28°N, 100°E)到(32°N, 106°E)的西南涡各阶段(a₁—d₁. 初始场, a₂—d₂. 移动发展阶段, a₃—d₃. 耦合阶段, a₄—d₄. 合并涡稳定维持阶段)位涡(单位:PVU)剖面(灰色阴影为地形区)

Fig. 8 Vertical distributions of potential vorticity (unit:PVU) from (28°N, 100°E) to (32°N, 106°E) in different stages (a₁—d₁. initial stage, a₂—d₂. developing and moving stage, a₃—d₃. coupling stage, a₄—d₄. stable stage of merged vortex) of the SWCV from FNL data (a) and model outputs (b. CNTL_EXP, c. A19_EXP, d. A23_EXP) (grey shadows represent terrain)

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} = -\mathbf{V}_h \cdot \nabla_h \xi - \omega \frac{\partial \xi}{\partial p} + \mathbf{k} \cdot \left(\frac{\partial \mathbf{V}_h}{\partial p} \times \nabla_h \omega \right) - (\xi + f) \nabla_h \cdot \mathbf{V} - \beta v + R \quad (1)$$

式中, ξ 表示相对涡度的垂直分量, $\mathbf{V}_h = ui + vj$ 为水平风速, $\nabla_h = \frac{\partial}{\partial x} \mathbf{i} + \frac{\partial}{\partial y} \mathbf{j}$ 为二维微分矢量算子, $-\mathbf{V}_h \cdot \nabla_h \xi$ 为相对涡度平流项, $-\omega \frac{\partial \xi}{\partial p}$ 为相对涡度铅直输送项, $\mathbf{k} \cdot \left(\frac{\partial \mathbf{V}_h}{\partial p} \times \nabla_h \omega \right)$ 为倾侧项, $-(\xi + f) \nabla_h \cdot \mathbf{V}$ 为散度项, $-\beta v$ 为地转涡度输送项, R 为摩擦耗散、系统误差项。

从 6 月 29 日 18 时低涡关键区 ($29^\circ-33^\circ\text{N}$, $103^\circ-107^\circ\text{E}$) 各试验不同涡度因子随高度的分布 (图 9) 可以看到, 3 种试验方案模拟的关键区内地转

涡度输送项对正涡度的贡献均较小, 可以忽略; 涡度平流项在 800 hPa 以上对各试验正涡度增长有微弱抑制作用; 倾侧项对对照试验和 A19 试验的涡度收支影响较小, 而对 A23 试验在 700 到 500 hPa 正涡度的生成有负贡献; 3 组试验的散度项在 900 hPa 都接近 $10 \times 10^{-10} \text{ s}^{-2}$, 对该层正涡度增长有促进作用, 900 hPa 以上, 对照试验和 A19 试验的散度项减小到 0 左右, 对正涡度增长的贡献较小, 而 A23 试验的散度项在 900 hPa 以上虽有所减弱, 但对 850 到 400 hPa 的正涡度增长仍为促进作用; 铅直输送项对各试验正涡度的产生有不同程度的影响: 对照试验和 A19 试验 700 hPa 以下的正涡度几乎均由垂直输送项产生, 表示两试验向上或向下的涡度输送使该层涡度增大, 但在 700 hPa 及以上则显著减

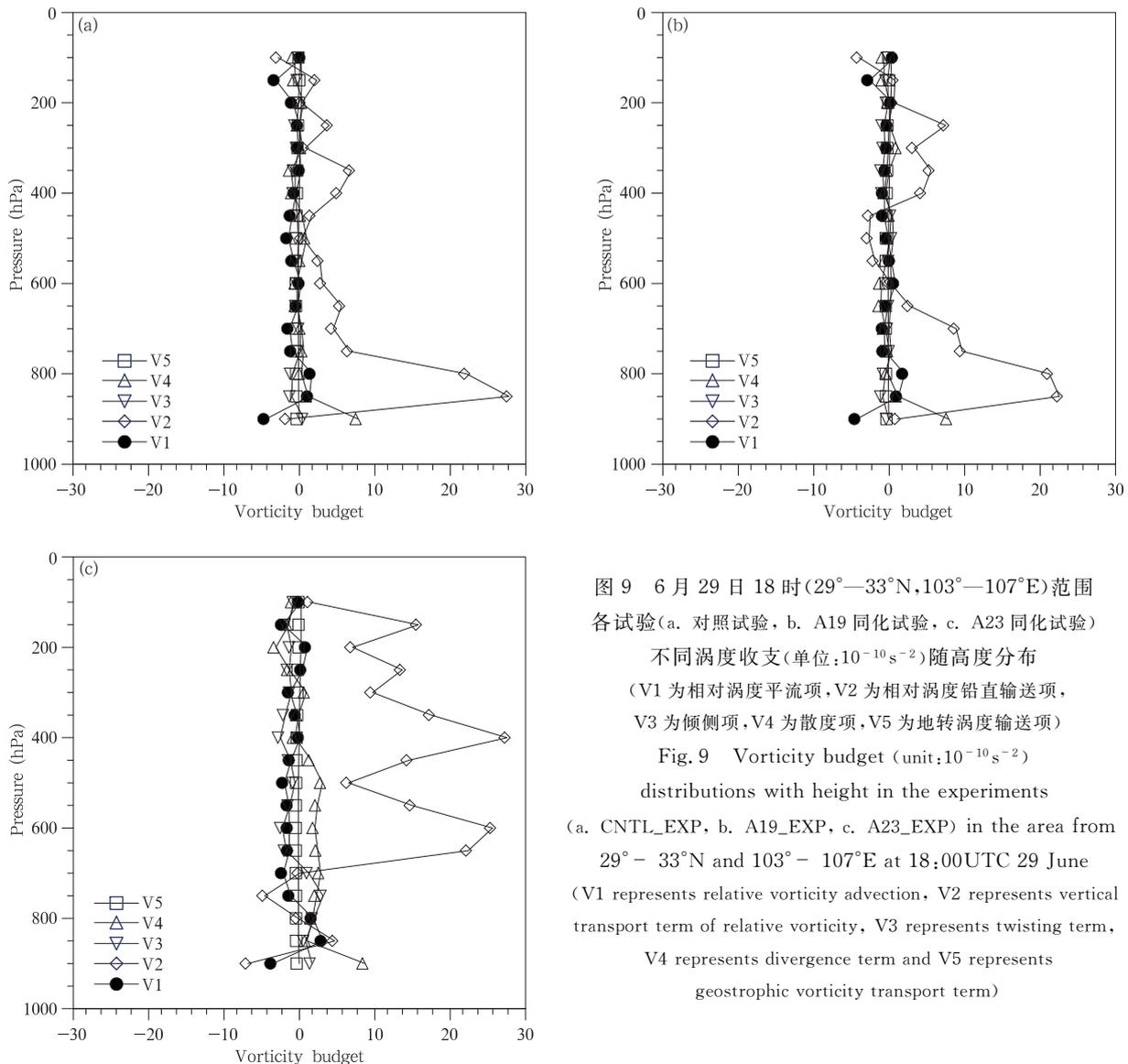


图 9 6 月 29 日 18 时 ($29^\circ-33^\circ\text{N}$, $103^\circ-107^\circ\text{E}$) 范围各试验 (a. 对照试验, b. A19 同化试验, c. A23 同化试验) 不同涡度收支 (单位: 10^{-10} s^{-2}) 随高度分布 (V1 为相对涡度平流项, V2 为相对涡度铅直输送项, V3 为倾侧项, V4 为散度项, V5 为地转涡度输送项)

Fig. 9 Vorticity budget (unit: 10^{-10} s^{-2}) distributions with height in the experiments (a. CNTL_EXP, b. A19_EXP, c. A23_EXP) in the area from $29^\circ-33^\circ\text{N}$ and $103^\circ-107^\circ\text{E}$ at 18:00UTC 29 June (V1 represents relative vorticity advection, V2 represents vertical transport term of relative vorticity, V3 represents twisting term, V4 represents divergence term and V5 represents geostrophic vorticity transport term)

小,对应两试验 700 hPa 没有产生明显气旋式环流。与之相反,A23 试验显示 700 hPa 以下垂直输送项对涡度的增大甚至有一定负作用,而 700 到 150 hPa,铅直输送项量值几乎均在 $10 \times 10^{-10} \text{ s}^{-2}$ 以上,主导了该层正涡度的产生。就涡度收支来看,水平辐合引起的散度项是 700 hPa 以下正涡度的主要制造者,700 hPa 及以上正涡度则由散度项和铅直输送项共同产生。另外,900 至 400 hPa 的水平辐合产生的上升运动也有利于涡度的垂直输送。因此,水平辐合引起的正涡度增大和垂直方向的涡度输送共同促使了 700 hPa 气旋式环流的发展。

这里,注意到 A23 试验在 29 日 18 时发展起来的“高位涡柱”主要位于 105°E 以西,而该时次的累积降水量正好位于 105°E 以西(图 3),说明 A23 试验局地位涡的增加和降水凝结潜热的释放可能有密切联系。从前面的分析可知,与对照试验和 A19 试验有所不同,引入加密探空资料后,对初始水汽场的改善使 A23 试验在积分初期更易产生降水,29 日 18 时,A23 试验出现了与实况一致的较大量级降水,而局地降水过程中水汽凝结潜热的释放能加热大气,在一定程度上也能加强上升运动。为验证这一点,使用视水汽汇 Q_2 (刘英等,2012)对水汽凝结引起的大气热力状况变化进行分析。 p 坐标系下 Q_2 的诊断公式为

$$Q_2 = -L \left(\frac{\partial q}{\partial t} + \mathbf{V} \cdot \nabla q + \omega \frac{\partial q}{\partial p} \right) \quad (2)$$

式中, Q_2 为单位时间单位质量水汽凝结释放的热量引起的大气升温率, L 为潜热系数, q 为比湿, \mathbf{V} 为水平风矢量, ω 为垂直速度,方程右端 3 项分别为局地变化项、水平平流项和垂直输送项。为直观明了,使用 Q_2/c_p 表示视水汽汇,单位为 K/h , c_p 为定压比热。从 3 组试验 29 日 18 时沿 30°N 的 Q_2/c_p 纬向剖面(图 10)可知,对照试验在 105°E 西侧 500 至 250 hPa 有一潜热加热较大值区,中心强度为 1.9 K/h ,主要位于 300 hPa,往下加热率逐渐减小直到 600 hPa 变为 0,在该加热区的气柱有微弱向上的垂直风分量;A19 试验显示,同化业务探空资料后,低涡关键区(105°E 附近) Q_2/c_p 值有所减小,仅零星分布于 850—300 hPa,流场以平流为主,未出现明显垂直风分量;而 A23 试验, 105°E 以西有一 Q_2/c_p 极大值区,从 850 hPa 向上贯穿对流层直到 200 hPa 形成一加热气柱,强度超过 2.8 K/h ,对应

矢量场有明显向上的垂直风分量。说明整层的潜热加热对低涡关键区的上升运动有增强作用,结合前面涡度收支分析,此时相对涡度铅直输送项在 700 到 200 hPa 为高正值,即 $-\omega \frac{\partial \xi}{\partial p} > 0$,由于存在上升运动, $\omega < 0$,可得到 $\frac{\partial \xi}{\partial p} > 0$,即由下而上涡度随高度减小,这意味着低层涡度向高层输送,并在水平辐合的共同作用下产生并维持了 A23 试验 700 hPa 的西南涡。

综上,引入加密探空资料能使模式在积分初期反映一些更加细致的位涡场结构,且能更好地揭示本次个例西南涡在发展、移动过程中的演变特征。对比各组试验位涡结构,发现仅靠高层的高位涡不足以激发或维持本次个例 700 hPa 的西南涡,该低涡的发展加强还受其他因素的影响。3 组试验涡度收支方程的分析结果表明,水平辐合引起的散度项是 700 hPa 以下正涡度的主要贡献者,700 hPa 及以上正涡度则由散度项和铅直输送项共同制造。而 Q_2 的诊断结果表明,模式积分初期较大量级降水产生的凝结潜热对低涡关键区的上升运动也有增强作用。因此,低层水平辐合引起的正涡度增大并垂直向上输送增强了 700 hPa 的气旋式环流,再加上降水凝结潜热等影响因素的共同作用,最终使得本次个例 700 hPa 西南涡稳定维持并发展加强。

6 结论与讨论

使用 WRFV3.5.1 模式和 WRFDA3.5.1 同化系统,结合业务探空和西南涡加密探空资料,针对 2013 年 6 月 29 日—7 月 2 日发生在四川盆地的一次奇异路径高原涡、西南涡耦合引发的区域性大暴雨过程,设计了 3 组初值敏感性试验并进行数值模拟,对比探究西南涡加密探空资料对模拟结果的影响,得出以下主要结论。

(1)对比分析 3 组试验模拟的各时次累积降水量表明,仅同化业务探空资料的 A19 试验由于模式物理量场和动力场协调一致的时间较长,在积分初期不能产生实况量级的强降水,且随着时间的推移降水范围偏大、落区分散、强度偏弱,对降水的改善作用有限;而引入西南涡加密探空资料后,A23 试验积分仅 6 h 就能产生强降水,模式起转时间大大缩短,随着积分时间延长,模拟降水的落区和强度与实

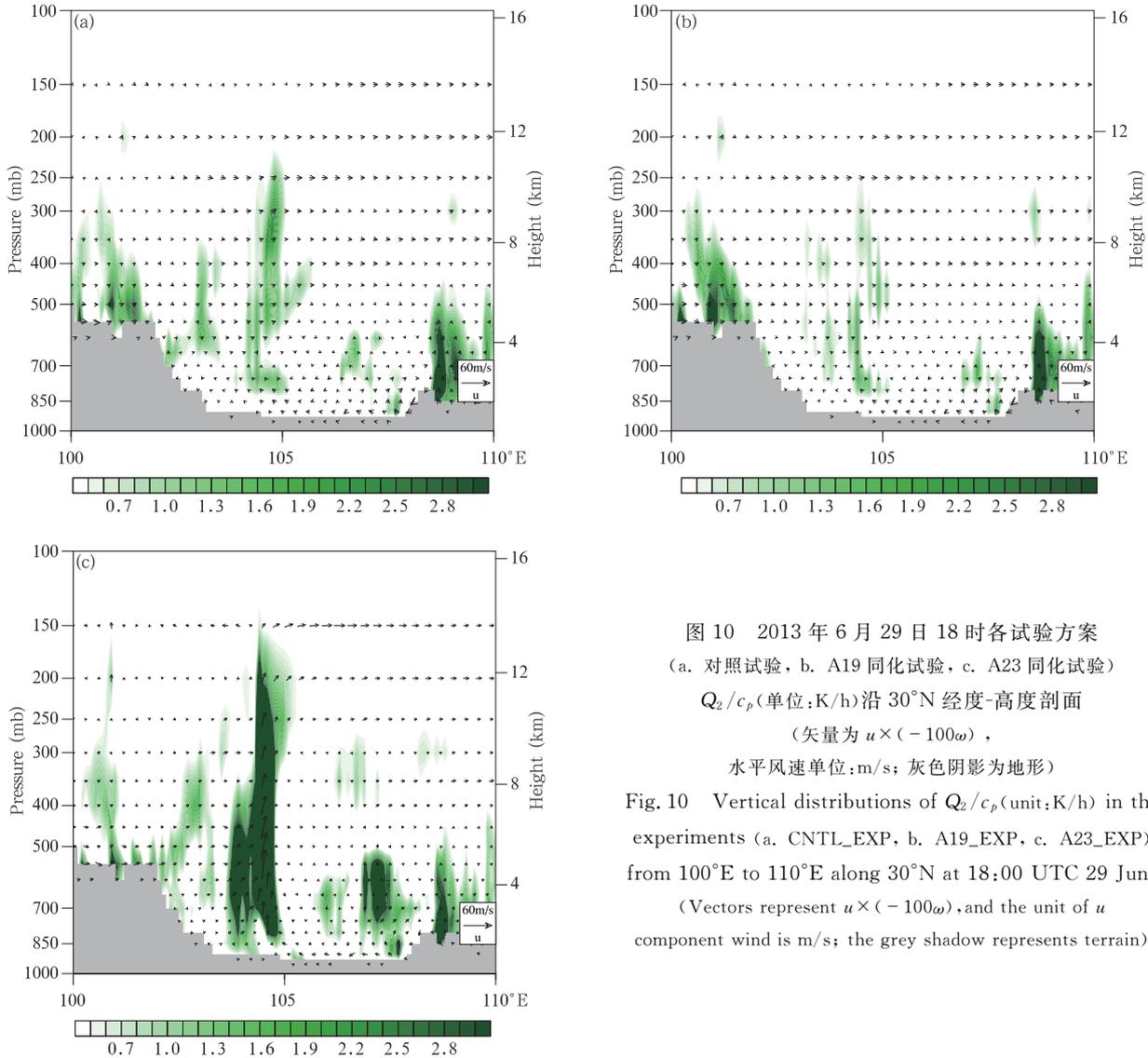


图 10 2013 年 6 月 29 日 18 时各试验方案
(a. 对照试验, b. A19 同化试验, c. A23 同化试验)

Q_2/c_p (单位:K/h)沿 30°N 经度-高度剖面
(矢量为 $u \times (-100\omega)$,
水平风速单位: m/s; 灰色阴影为地形)

Fig. 10 Vertical distributions of Q_2/c_p (unit:K/h) in the experiments (a. CNTL_EXP, b. A19_EXP, c. A23_EXP) from 100°E to 110°E along 30°N at 18:00 UTC 29 June (Vectors represent $u \times (-100\omega)$, and the unit of u component wind is m/s; the grey shadow represents terrain)

况趋于一致,对本次个例降水有明显改善作用。

(2)各试验对高原涡、西南涡移动路径的模拟结果表明,3组试验模拟初期高原涡移动路径的差别不大,在6月30日06时后,对照试验和A19试验中高原涡继续东移,直至消失,而A23试验高原涡南下与西南涡合并,更符合实际观测事实;各试验方案模拟的西南涡移动路径差异明显,对照试验和A19试验在积分前期没有西南涡生成,中期西南涡在四川盆地出现后向南移动,并未与东移高原涡发生耦合,仅同化业务探空资料对低涡移动的模拟没有明显改善。但增加西南涡加密探空资料后,A23试验能较好地模拟出西南涡的移动及其与高原涡的耦合过程。并且,由于同化探空资料时效性导致的

A23试验后期合并涡的西退现象,也能通过在适当的时间重新积分得到有效地解决。因此,同化西南涡加密探空资料能有效改善模式对本次个例低涡移动路径的模拟能力。

(3)不同同化试验均能使四川上空各层初始位势高度降低,但在初始高原涡和西南涡所在区域,同化试验和对照试验差别不大。温度场上,同化探空资料对500 hPa初始温度场的影响较小,对700 hPa初始温度场有升温作用。两组同化试验对初始湿度场和风场的影响截然不同:A19试验各层次初始比湿分布与对照试验差别不大,引入西南涡加密探空资料后,四川中部和南部整层比湿都有所增大,高度越低,增湿越明显,这种下湿上干的大气层结在适当

的热力结构下更容易触发降水,使 A23 试验积分初期就能产生与实况相当量级的降水。对于风场,仅同化业务探空资料的 A19 试验只能加强 500 hPa 青海南部、四川西北部的西北气流,对 700 hPa 风场几乎无影响,而引入西南涡加密探空资料的 A23 试验使四川盆地上空 500、700 hPa 均出现气旋式扰动,加强了高原涡、西南涡的初始强度。同化加密探空资料对对流层中层系统的影响主要表现在动力场上,对对流层低层的影响除动力因素外,还通过调整大气湿场结构进而影响低层系统的移动和发展。

(4)3 组试验的位涡分析结果表明,引入西南涡加密探空资料能使模式在积分初期反映一些更加细致的位涡场结构,能有效改善西南涡演变过程各个不同阶段的模拟,并揭示出了仅靠高层的高位涡并不足以激发或维持实况 700 hPa 的气旋式环流,本次个例西南涡的发展加强还受其他因素的影响。

(5)3 组试验低涡发展加强阶段的整层涡度收支分析结果表明,水平辐合引起的散度项是 700 hPa 以下正涡度的主要贡献者,700 hPa 及以上正涡度则由散度项和铅直输送项共同制造,即低层水平辐合引起正涡度增大并向上输送增强了 700 hPa 的气旋式环流,进而促进西南涡的移动和发展。各试验视水汽汇 Q_2 对该阶段低涡关键区垂直热力结构的进一步诊断发现:模式积分初期较大量级降水产生的凝结潜热加热整层气柱,促进了低涡关键区的辐合上升运动,也有利于西南涡稳定维持并不断加强。

虽然本研究得到了一些有重要意义的结果,但由于仅基于一次奇异路径高原涡、西南涡耦合产生的四川盆地大暴雨天气,因此,还需要基于多个个例、多种情况系统深入的研究与检验。尤其是应在考虑站点数量、站点布局、多种低涡路径的基础上,进一步验证加密探空资料同化效果的显著性、稳定性和时效性,以及针对奇异路径、正常路径低涡暴雨模拟效果的普遍性等问题。通过站点数量、站址改变的虚拟试验,开展更多个例、不同路径低涡暴雨的敏感性试验和深入分析,以期获得更具普遍性的成果。另外,西南地区地形复杂,测站稀疏,代表性弱,所以,本研究使用了高分辨率模式输出结果作为实况参考进行对比分析。但是,NCEP FNL 资料反映西南区域天气实况的精确程度及其相关影响也是需

要重视的。数据资料问题一直是中小尺度低涡研究的瓶颈,今后可在业务站网布局完善的基础上,重点加强加密观测试验而逐步得到解决。

参考文献

- 陈德辉,薛纪善. 2004. 数值天气预报业务模式现状与展望. 气象学报, 62(5): 623-633. Chen D H, Xue J S. 2004. An overview on recent progresses of the operational numerical weather prediction models. Acta Meteor Sinica, 62(5): 623-633 (in Chinese)
- 陈忠明, 闵文彬, 崔春光. 2004. 西南低涡研究的一些新进展. 高原气象, 23(增刊): 1-5. Chen Z M, Min W B, Cui C G. 2004. New advances in southwest China vortex research. Plateau Meteor, 23(S): 1-5 (in Chinese)
- 程麟生, 郭英华. 1988. "81.7"四川暴雨期西南涡生成和发展的涡源诊断. 大气科学, 12(1): 18-26. Cheng L S, Guo Y H. 1988. The diagnosis of vorticity sources for the origin and development of the SW vortex during Sichuan heavy rainfall of 11-15 July 1981. Sci Atmos Sinica, 12(1): 18-26 (in Chinese)
- 丑纪范. 2007. 数值天气预报的创新之路:从初值问题到反问题. 气象学报, 65(5): 673-682. Chou J F. 2007. An innovative road to numerical weather prediction: From initial value problem to inverse problem. Acta Meteor Sinica, 65(5): 673-682 (in Chinese)
- 丁一汇. 1993. 1991 年长江淮河流域持续性特大暴雨研究. 北京: 气象出版社, 255pp. Ding Yihui. 1993. Study of Strong Heavy Rainfall in Yangtze-Huaihe River in 1991. Beijing: China Meteorological Press, 255pp (in Chinese)
- 何光碧. 2012. 西南低涡研究综述. 气象, 38(2): 155-163. He G B. 2012. Review of the southwest vortex research. Meteor Mon, 38(2): 155-163 (in Chinese)
- 纪立人, 陈嘉滨, 张道民等. 2005. 数值预报模式动力框架发展的若干问题综述. 大气科学, 29(1): 120-130. Ji L R, Chen J B, Zhang D M, et al. 2005. Review of some numerical aspects of the dynamic framework of NWP model. Chinese J Atmos Sci, 29(1): 120-130 (in Chinese)
- 李国平. 2007. 青藏高原动力气象学. 2 版. 北京: 气象出版社, 271pp. Li G P. 2007. Dynamic Meteorology of the Tibetan Plateau. 2nd ed. Beijing: China Meteorological Press, 271pp (in Chinese)
- 李跃清, 赵兴炳, 邓波. 2010. 2010 年夏季西南涡加密观测科学试验. 高原山地气象研究, 30(4): 80-84. Li Y Q, Zhao X B, Deng B. 2010. Intensive observation scientific experiment of the Southwest vortex in the summer of 2010. Plateau Mountain Meteor Res, 30(4): 80-84 (in Chinese)
- 李跃清, 赵兴炳, 张利红等. 2011. 2011 年夏季西南涡加密观测科学试验. 高原山地气象研究, 31(4): 7-11. Li Y Q, Zhao X B,

- Zhang L H, et al. 2011. Intensive observation scientific experiment of the Southwest vortex in the summer of 2011. *Plateau Mountain Meteor Res*, 31(4): 7-11 (in Chinese)
- 李跃清, 赵兴炳, 张利红等. 2012. 2012年夏季西南涡加密观测科学试验. *高原山地气象研究*, 32(4): 1-8. Li Y Q, Zhao X B, Zhang L H, et al. 2012. The intensive observation scientific experiment of Southwest China vortex in the summer of 2012. *Plateau Mountain Meteor Res*, 32(4): 1-8 (in Chinese)
- 李跃清, 徐祥德. 2016. 西南涡研究和观测试验回顾及进展. *气象科技进展*, 6(3): 134-140. Li Y Q, Xu X D. 2016. A review of the research and observing experiment on southwest China vortex. *Adv Meteor Sci Technol*, 6(3): 134-140 (in Chinese)
- 刘红武, 李国平. 2008. 近三十年西南低涡研究的回顾与展望. *高原山地气象研究*, 28(2): 68-73. Liu H W, Li G P. 2008. The review and prospect of research on the southwest vortex in recent 30 years. *Plateau Mountain Meteor Res*, 28(2): 68-73 (in Chinese)
- 刘晓冉, 李国平. 2014. 一次东移型西南低涡的数值模拟及位涡诊断. *高原气象*, 33(5): 1204-1216. Liu X R, Li G P. 2014. Numerical simulation and potential vorticity diagnosis of an eastward moving southwest vortex. *Plateau Meteor*, 33(5): 1204-1216 (in Chinese)
- 刘英, 王东海, 张中锋等. 2012. 东北冷涡的结构及其演变特征的一个例综合分析. *气象学报*, 70(3): 354-370. Liu Y, Wang D H, Zhang Z F, et al. 2012. A comprehensive analysis of the structure of a northeast China-cold-vortex and its characteristics of evolution. *Acta Meteor Sinica*, 70(3): 354-370 (in Chinese)
- 卢敬华. 1986. 西南低涡概论. 北京: 气象出版社, 276pp. Lu J H. 1986. *The Introduction of Southwest Vortex*. Beijing: China Meteorological Press, 276pp (in Chinese)
- 卢萍, 郑伟鹏, 赵兴炳. 2012. 川西西南涡加密探空资料分析及数值模拟试验. *高原山地气象研究*, 32(1): 1-7. Lu P, Zheng W P, Zhao X B. 2012. Analysis of the sounding data of intensive observation of the southwest vortex in western Sichuan area and its application in the numerical simulations. *Plateau Mountain Meteor Res*, 32(1): 1-7 (in Chinese)
- 卢萍, 李旭, 李英等. 2016. 空间加密探空观测资料对西南低涡暴雨天气过程数值模拟的影响. *大气科学*, 40(4): 730-742. Lu P, Li X, Li Y, et al. 2016. The influence of spatially intensive sounding observation data on the numerical modeling of southwest vortex rainfall. *Chinese J Atmos Sci*, 40(4): 730-742 (in Chinese)
- 寿绍文. 2010. 位涡理论及其应用. *气象*, 36(3): 9-18. Shou S W. 2010. Theory and application of potential vorticity. *Meteor Mon*, 36(3): 9-18 (in Chinese)
- 陶诗言等. 1980. 中国之暴雨. 北京: 科学出版社, 225pp. Tao S Y, et al. 1980. *Heavy Rainfalls in China*. Beijing: Science Press, 225pp (in Chinese)
- 郁淑华, 高文良. 2017. 高原低涡与西南涡结伴而行的不同活动形式个例的环境场和位涡分析. *大气科学*, 41(4): 831-856. Yu S H, Gao W L. 2017. Analysis of environmental background and potential vorticity of different accompanied moving cases of Tibetan Plateau vortex and Southwest China vortex. *Chinese J Atmos Sci*, 41(4): 831-856 (in Chinese)
- 张大林. 2005. 大气科学的世纪进展与未来展望. *气象学报*, 63(5): 812-824. Zhang D L. 2005. An overview of centenary advances and prospects in atmospheric sciences. *Acta Meteor Sinica*, 63(5): 812-824 (in Chinese)
- 张芳华, 陈涛, 徐珺等. 2014. 2013年4—10月我国主要暴雨天气过程简述. *暴雨灾害*, 33(1): 87-95. Zhang F H, Chen T, Xu J, et al. 2014. Important heavy rain events in China from April to October in 2013. *Torrential Rain and Disasters*, 33(1): 87-95 (in Chinese)
- 张利红, 李跃清, 秦宁生等. 2011. 青藏高原坡面观测信息对我国夏季降水预报的作用. *气象*, 37(10): 1233-1240. Zhang L H, Li Y Q, Qin N S, et al. 2011. The role of observations from Tibetan Plateau slope in summer rainfall NWP in China. *Meteor Mon*, 37(10): 1233-1240 (in Chinese)
- 张小玲, 陶诗言, 张顺利. 2004. 梅雨锋上的三类暴雨. *大气科学*, 28(2): 187-205. Zhang X L, Tao S Y, Zhang S L. 2004. Three types of heavy rainstorms associated with the Meiyu front. *Chinese J Atmos Sci*, 28(2): 187-205 (in Chinese)
- 赵平, 孙淑清. 1991. 一次西南低涡形成过程的数值试验和诊断(一): 地形动力作用和潜热作用对西南低涡影响的数值试验对比分析. *大气科学*, 15(6): 46-52. Zhao P, Sun S Q. 1991. Numerical simulation and diagnosis of the formation of SW vortex Part I: An analysis of numerical simulation of the effects of topography and latent heat on SW vortex. *Sci Atmos Sinica*, 15(6): 46-52 (in Chinese)
- 赵平, 胡昌琼, 孙淑清. 1992. 一次西南低涡形成过程的数值试验和诊断(二): 涡度方程和能量转换函数的诊断分析. *大气科学*, 16(2): 177-184. Zhao P, Hu C Q, Sun S Q. 1992. Numerical simulation and diagnosis of the formation process of SW vortex II: The diagnosis of vorticity equation and energy conversion function. *Sci Atmos Sinica*, 16(2): 177-184 (in Chinese)
- Beljaars A C M. 1995. The parametrization of surface fluxes in large-scale models under free convection. *Quart J Roy Meteor Soc*, 121(522): 255-270
- Bjerknes V. 1904. Das problem der Wettervorhersage betrachtet vom Standpunkte der Mechanik und der Physik. *Meteor Zeitschrift*, 21: 1-7
- Chen F, Dudhia J. 2001. Coupling an advanced land surface-hydrology model with the Penn State-NCAR MM5 modeling system.

- Part I: Model implementation and sensitivity. *Mon Wea Rev*, 129(4): 569-585.
- Cheng X L, Li Y Q, Xu L. 2016. An analysis of an extreme rainstorm caused by the interaction of the Tibetan Plateau vortex and the Southwest China vortex from an intensive observation. *Meteor Atmos Phys*, 128(3): 373-399
- Dudhia J. 1989. Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model. *J Atmos Sci*, 46(20): 3077-3107
- Hong S Y, Dudhia J, Chen S H. 2004. A revised approach to ice microphysical processes for the bulk parameterization of clouds and precipitation. *Mon Wea Rev*, 132(1): 103-120
- Hong S Y, Noh Y, Dudhia J. 2006. A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes. *Mon Wea Rev*, 134(9): 2318-2341
- Hoskins B. 1997. A potential vorticity view of synoptic development. *Meteor Appl*, 4(4): 325-334
- Janjić Z I. 2001. Nonsingular implementation of the Mellor-Yamada level 2.5 Scheme in the NCEP meso model. NCEP Office Note # 437, 61pp
- Kain J S, Fritsch J M. 1990. A one-dimensional entraining/detraining plume model and its application in convective parameterization. *J Atmos Sci*, 47(23): 2784-2802
- Kain J S, Fritsch J M. 1993. Convective parameterization for mesoscale models: The Kain-Fritsch scheme// Emanuel K A, Raymond D J. *The Representation of Cumulus Convection in Numerical Models*. Boston, MA: American Meteorological Society, 165-170
- Mlawer E J, Taubman S J, Brown P D, et al. 1997. Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave. *J Geophys Res*, 102(D14): 16663-16682
- Tao S Y, Ding Y H. 1981. Observational evidence of the influence of the Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau on the occurrence of heavy rain and severe convective storms in China. *Bull Amer Meteor Soc*, 62(1): 23-30