

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 [J]. 大气科学, 40 (4): 730–742. Lu Ping, Li Xu, Li Ying, et al. 2016. The influence of spatially intensive sounding observation data on the numerical modeling of southwest vortex rainfall [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 40 (4): 730–742, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1511.15170.

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

卢萍¹ 李旭² 李英¹ 李跃清¹ 郑伟鹏³

1 中国气象局成都高原气象研究所/高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室, 成都 610072

2 四川省气象服务中心, 成都 610072

3 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体物理学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029

摘 要 本文基于 AREM (Advanced Regional Eta Model) 模式, 结合中国气象局成都高原气象研究所西南低涡加密观测科学试验得到的探空观测第一手资料, 通过对 2012 年 7 月 3~4 日四川区域性暴雨天气过程 (20120703 过程) 进行数值模拟分析, 结果表明: (1) 降水雨带的分布主要取决于西南低涡移动路径, 不同初值会使得低涡路径在磨合协调期产生强摆动, 稳定后则在此基础上, 随着环境流场继续移动发展。(2) 引入 4 个加密探空站点资料会对整个大气物理量场造成一定影响, 最大差值分布在这些站点附近, 热力和动力物理量场最大偏差中心并不重合。时间演变直观地说明了初值对局地大气状态的影响时段有限, 主要集中在前期, 与模式自身调整期相重叠。(3) 初始的大气状态必然会随着模式的磨合过程进行调整, 不同初值在调整期能对中小尺度低涡系统的位置及强度产生影响, 形成各自稳定的低涡系统初态。(4) 低涡中心所对应的散度、涡度、垂直速度关系非常密切, 但三者强度和发展高度的演变并非完全一致。

关键词 西南低涡 AREM (Advanced Regional Eta Model) 模式 加密探空 初值 移动路径

文章编号 1006-9895(2016)04-0730-13

中图分类号 P443

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1511.15170

The Influence of Spatially Intensive Sounding Observation Data on the Numerical Modeling of Southwest Vortex Rainfall

LU Ping¹, LI Xu², LI Ying¹, LI Yueqing¹, and ZHENG Weipeng³

1 Institute of Plateau Meteorology, China Meteorological Administration/Heavy Rain and Drought-Flood Disasters in Plateaus and Basins Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610072

2 Sichuan Meteorological Service Center, Chengdu 610072

3 State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geographical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy Sciences, Beijing 100029

Abstract A regional-scale heavy rainfall process that occurred in the Sichuan area during 3–4 July 2012 was simulated

收稿日期 2015-03-26; 网络预出版日期 2015-11-10

作者简介 卢萍, 女, 1976 年出生, 副研究员, 主要从事天气分析研究。E-mail: abc-123@mail.iap.ac.cn

通讯作者 郑伟鹏, E-mail: zhengwp@mail.iap.ac.cn

资助项目 公益性行业 (气象) 科研专项经费项目 GYHY201206039, 国家自然科学基金项目 41275051、41405145, 成都高原气象研究所开放实验室基金项目 BROP201512

Funded by Special Scientific Research Fund of Meteorological Public Welfare Profession of China (Grant GYHY201206039), National Natural Science Foundation of China (NSFC) (Grants 41275051, 41405145), Laboratory Open Fund Project of Institute of Plateau Meteorology of Chengdu (Grant BROP201512)

by the Advanced Regional Eta Model, forced by first-hand data obtained from the Intensive Observation Scientific Experiment of the Southwest vortex. Results show that: (1) The distribution of the rain belt was determined by the moving path of the Southwest vortex; different initial conditions lead to a strong shift of the path in the spin-up processes, and then the large-scale circulation becomes important in regulating the movement and development of the vortex. (2) Four newly added sounding stations have impacts on all atmospheric fields; the largest differences occurred around these stations, and the largest deviations of the thermal and dynamical field were not consistent. The time series indicates that the impact of initial conditions is constrained at the beginning of the simulation, related to the model spin-up process. (3) The initial atmospheric circulation adjusted to the model spin-up process. Different initial conditions have impacts on the location and strength of the meso-small-scale vortex and forms a distinct initial state of the stable vortex. (4) The diversion, vorticity and vertical velocity corresponding to the vortex are tightly related; however, the evolutions of strength and height are not consistent.

Keywords Southwest vortex, Advanced Regional Eta Model, Intensive sounding, Initial value, Movement path

1 引言

西南低涡是在青藏高原复杂地形与大气环流相互作用下,发生于我国西南地区的 700 或 850 hPa 等压面上的中尺度气旋式闭合低压系统,是影响我国夏半年降水天气过程的一个相当重要的天气系统。半个多世纪以来,对西南低涡开展了大量卓有成效的分析研究,取得了一些重要进展(陈忠明等, 2004; 刘红武和李国平, 2008; 何光碧, 2012)。西南低涡的三个生成集中区分别位于九龙地区、四川盆地和小金县一带。移动类西南低涡仅占低涡总数的 20.5%, 且主要取偏东路径(70.7%)。关于西南低涡的基本结构,解明恩等(1992)的数值模拟发现: 700 hPa 西南低涡在边界层内具有较复杂的流场结构,在整个气旋式环流的局部存在反气旋式环流,形成了上升与下沉运动的交替出现。彭新东和程麟生(1992)通过对高原东侧低涡的分析认为:西南低涡具有暖湿的中心结构。Fu et al. (2014)指出降水是长生命史西南低涡存在的必要条件,其不同象限的演变机制和能量特征显著不均匀。韦统健和薛建军(1996)、王晓芳等(2007)指出:西南低涡的温湿场和垂直流场在低涡区呈现明显的不对称分布,低涡是一个显著的斜压系统。康岚等(2011)指出,引发暴雨的西南低涡相对于环境场是湿涡,南边界是主要水汽输送方向。辜旭赞和徐明(2012)研究认为,“西南低涡一切变线”系统的暴雨发生在暖湿气团与变性冷气团之间的中尺度风场辐合上升运动区,中尺度雨团发生在层结不稳定的暖湿气团一侧。对于西南低涡机理的研究,高守亭等(1987)认为西南低涡的形成与盆地、河谷和气流分层有关。Kuo et al. (1986, 1988)研究认为动力过程决定西南低涡的生成,热力过程在其

发展过程中有重要影响。李国平等(1991)、朱禾等(2002)分别从热力、地形方面指出,地面感热加热与暖平流对暖性西南低涡形成起着较大的作用,地形与环流的恰当配置与耦合作用是西南低涡生成的主要因素。母灵和李国平(2013)指出,秦岭、大巴山山脉对西南低涡的形成不具有决定性影响,但对西南低涡的维持和发展具有非常重要的作用;横断山脉、云贵高原对西南低涡的生成位置、强度以及移动路径均很重要,青藏高原大地形对偏东气流的阻挡而产生的绕流有利于西南低涡的生成,对西南低涡的移动也有重要影响。Wang and Tan (2014)通过理想化的地形试验,指出青藏高原和横断山脉对西南低涡的位置和尺度起决定性作用,四川盆地则增加了地形梯度,有利于西南低涡的维持和发展。在西南低涡对降水的影响方面,何光碧等(2005)得到,西南低空急流建立于暴雨出现之前,暴雨和盆地涡同时出现,而暴雨、低空急流和盆地涡几乎同时减弱。蒋璐君等(2014)指出西南低涡引发的强降水中不管是层云降水还是对流云降水,6 km 高度以下降水量的贡献最大,不同高度降水量对总降水量贡献的大小随着高度的升高而减小。郝丽萍等(2013)得到大气水汽总量(GPS-PWV)的急升与陡降对西南低涡大暴雨的形成与减弱有一定指示意义。

但是,对于西南低涡这样的中尺度天气系统,由于现有观测资料的限制,分析使用的数据时空分辨率不够精细,影响了对西南低涡基本结构、活动特征及其天气影响的具体认识。2010 年夏季开始,中国气象局成都高原气象研究所(简称高原所)建立了常态化的西南低涡加密观测试验机制:在西南低涡主要活动区与影响区,每年进行为期 41 天的高时空分辨率的现场综合气象观测,获取了连续加

密观测的探空资料(李跃清等, 2010, 2011)取得一些初步成果(卢萍等, 2012, 2013)。因此, 本文在西南低涡加密观测大气科学试验的基础上, 结合数值模式模拟, 深入地分析研究典型西南低涡及其暴雨天气过程, 进一步认识西南低涡的结构特征、演变过程和天气影响, 为西南低涡及其暴雨研究与预报提供新的成果。

2 加密资料及模式简介

西南低涡加密观测科学试验是高原所从 2010 年起持续开展的一项大气科学试验, 试验时段为每年的 6 月 21 日至 7 月 31 日, 试验期间每天进行 4 次探空观测, 其中, 高原所在四川地区增设九龙、名山、剑阁以及金川 4 个空间加密探空站, 这些站点分布在川西高原、高原东侧边坡及川东北部, 采用 GPS 观测系统; 温江、达州、宜宾、西昌、甘孜、红原、巴塘 7 个业务探空站开展时间加密观测[除了每天 00 时(协调世界时, 下同)、12 时 2 次常规探空, 另外增加了 06 时和 18 时的 2 次探空]。观测试验的资料包括: 气压、温度、相对湿度、风向、风速、露点温度、比湿、时间、高度、距离、经度、纬度。

本文基于 AREM2.5 (Advanced Regional Eta Model)/LASG 数值模式, 该模式垂直方向采用 ETA 坐标, 对于地形复杂的西南山地区域暴雨天气具有较好的模拟和预报能力(宇如聪, 1994; 宇如聪和徐幼平, 2004; 吴蓁等, 2008; 卢萍和肖玉华 2010; 公颖等, 2010), 模式参数详见卢萍等(2014), 即模式区域范围为 ($15^{\circ}\sim 45^{\circ}\text{N}$, $85^{\circ}\sim 125^{\circ}\text{E}$), 水平分辨率约为 12 km, 垂直方向分为 42 层, 模式层顶为 10 hPa。模式物理过程包括: 显式云预报方案、简化的 Betts 对流调整方案、非局地大气边界层方案、Berjamin 和 Seaman 的考虑地表辐射平衡的简单辐射参数化方案、多层结通量—廓线的地表参数化方案。模式以 NCEP 再分析资料 ($1^{\circ}\times 1^{\circ}$) 为背景场和时变 (6 h) 边界场, 结合常规台站资料作为初值, 积分 72 h, 输出逐时的温、压、湿、风场和雨量等要素预报场。这里, 敏感性试验即在基本业务探空资料(模式包含 568 站点信息, 其中 129 个站分布在模拟区域)的基础上, 增加 4 个加密台站的探空资料进行客观分析, 作为模式的初始场开展模拟试验。文中以“obs”代表观测, “ctr”代表控制试验, “sim”代表敏感性试验。

3 西南低涡的移动低涡路径及其降水分布

2012 年 6 月 21 日至 7 月 31 日, 西南低涡加密观测试验期间, 西南低涡频繁发生, 活动时间长、范围广, 影响大。四川地区一共发生了多次西南低涡降水过程, 包括 6 月 24~25 日, 7 月 3~4 日, 7 月 12~14 日, 7 月 15~16 日, 7 月 21~22 日 5 次强降水天气过程。对这几次西南低涡降水过程皆进行数值模拟试验, 因各个过程效果相似, 受篇幅所限, 本文仅针对 7 月 3~4 日的典型个例进行深入分析。

2012 年 7 月 3 日 00 时~4 日 00 时, 四川地区出现了一次区域性的暴雨天气过程, 称为 20120703 过程。西南低涡中尺度系统是造成这次暴雨过程的主要因素, 该过程最大降水中心位于川东北, 降水强度超过 100 mm d^{-1} (图 1a), 控制试验和敏感性试验皆能较好地再现这次强降水的位置及强度, 敏感性试验的最强降水中心与实况更为接近(图 1b、c), 将 2 个模拟结果进行对比后发现, 引入空间加密探空资料以后模拟的雨带比控制试验模拟的雨带略微偏东偏南(图 1d)。下面, 具体分析造成这一差异的可能原因及其演变过程。

20120703 过程中, 初始时刻已经有一个低涡存在于川北地区 (32.1°N , 106.8°E), 由于模式中对初值没有进行同化处理, 而是采用更为直接的客观分析方法, 因此在模拟初期, 模式存在一段较为明显的 spin-up (磨合) 过程(通常为 3~6 h), 可以在初始场中加入 4 个新的探空站点资料以后, 模式的前期调整更为剧烈, 截止到 09 时, 低涡中心不再打转, 各个物理量场已经磨合协调一致, 2 个试验中低涡中心皆同步向东北方向移动, 移动路径接近平行, 与控制试验相比敏感性试验的路径比较偏东南, 与路径偏差模拟的雨带偏差分布相一致。低涡的前期移动速度较慢, 后期移速明显加快, 低涡中心的位势高度值前期一直降低, 并在 3 日 15 时至 4 日 06 时一直维持较低的值, 此后迅速升高(表 1), 对应的雨量也是中前期多后期少。2 个试验中, 低涡路径的强波动主要发生在模拟前期, 此后的低涡路径则是在前期磨合协调状态的基础上继续移动发展(图 2)。

4 引入探空资料后造成的初始场的差异及演变情况

4 个新增站点中, 位于川西地区的九龙 (29°N ,

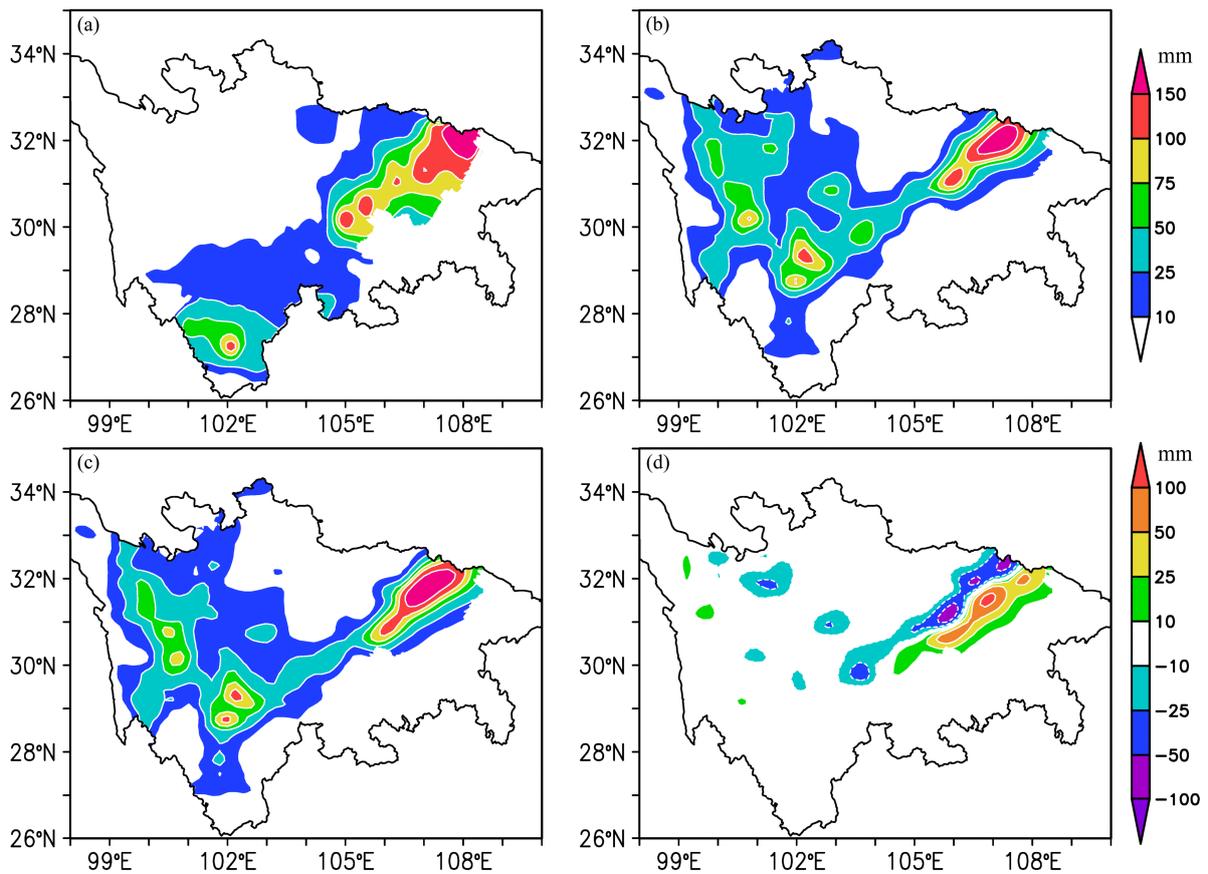


图1 2012年7月3日00时(协调世界时,下同)至4日00时24 h降水分布(单位: mm): (a) 观测; (b) 控制试验; (c) 敏感性试验; (d) 差(敏感性试验-控制试验)

Fig. 1 Accumulative precipitation from 0000 UTC 3 to 0000 UTC 4 July 2012 (units: mm): (a) Observed; (b) control test; (c) sensitivity test; (d) difference (sensitivity test minus control test)

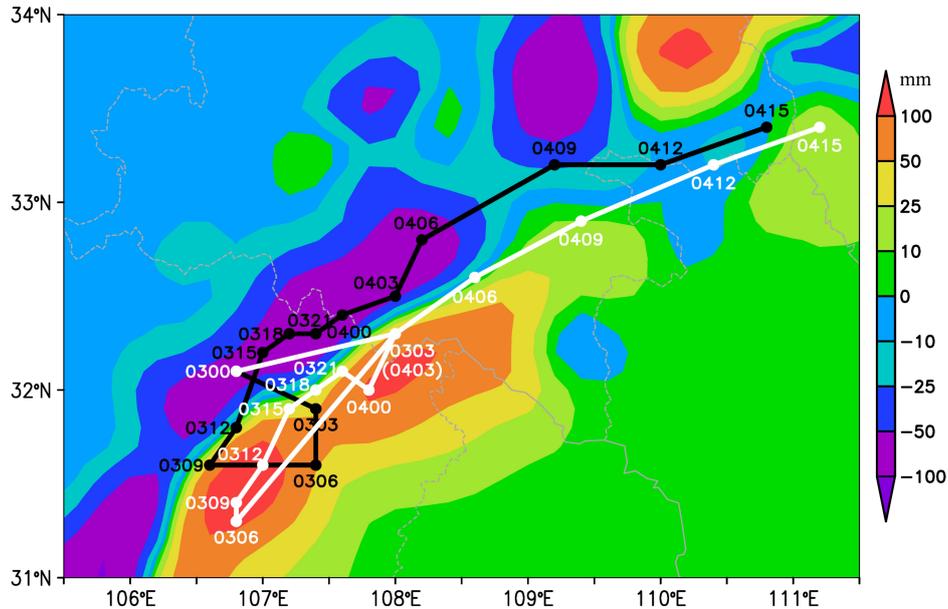


图2 20120703过程中,西南低涡中心移动路径(黑线是控制试验,白线为敏感性试验,时间间隔为3 h,时间标注在实心圆点上,0300代表3日00时,以此类推,下同)及24 h降水分布差异(阴影:敏感性试验-控制试验;单位: mm)

Fig. 2 Movement path of the Southwest vortex in the regional-scale heavy rainfall process that occurred in the Sichuan area during 3-4 July 2012 (the black and white lines indicate the control test and sensitivity test, respectively; time interval: 3 h; shading shows the difference between the sensitivity test and the control test for 24-h accumulated precipitation, i.e., sensitivity test minus control test)

101.5°E; 2925 m) 和金川 (31.48°N, 102.07°E; 2169 m) 的海拔比较高, 位于高原东侧边坡的名山 (30.08°N, 103.12°E; 691 m) 和四川东北部的剑阁 (32.02°N, 105.47°E; 536 m) 海拔高度较低。比较两个数值试验的初始客观分析场, 发现 20120703 过程在初值中引入加密探空资料以后, 其 700 hPa 位势高度场主要呈现西面 (四川甘肃交界地带) 偏高东部 (川东北) 偏低的分布形态, 最大偏差值分别位

于控制试验中低涡中心的東西两侧 (图 3a)。温度场则是以偏低为主, 越靠近高原东侧边坡地带, 偏差越显著 (图 3b), 850 hPa 和 500 hPa 层上的温度皆偏高 (图略)。四川地区上空 700 hPa 高度上的比湿整体表现为高值区, 靠近高原东坡地带比湿略微偏低 (图 3c)。就整层水汽分布而言, 川西高原上空偏低而川北 (川甘陕交界处) 偏高 (图略)。风场在盆地虽然存在一个明显的气旋环流, 但其与低涡位置

表 1 2 个数值试验中各个时次低涡中心的位势高度值 (单位: gpm)

Table 1 Geopotential height (units: gpm) at the vortex center at each time in the two numerical experiments

试验	两个数值试验中各个时次低涡中心的位势高度													
	3日00时	3日03时	3日06时	3日09时	3日12时	3日15时	3日18时	3日21时	4日00时	4日03时	4日06时	4日09时	4日12时	4日15时
控制试验	3040	3048.5	3024.1	3021.9	3018.4	3003.3	2997.4	3002.2	3001.4	2995.0	2988.7	3014.5	3015.8	3007.3
敏感性试验	3032.8	3048.4	3020.8	3019.2	3014.8	3002.7	2997.4	3000.6	3000.5	2998.1	2991.6	3021.0	3018.2	3014.2

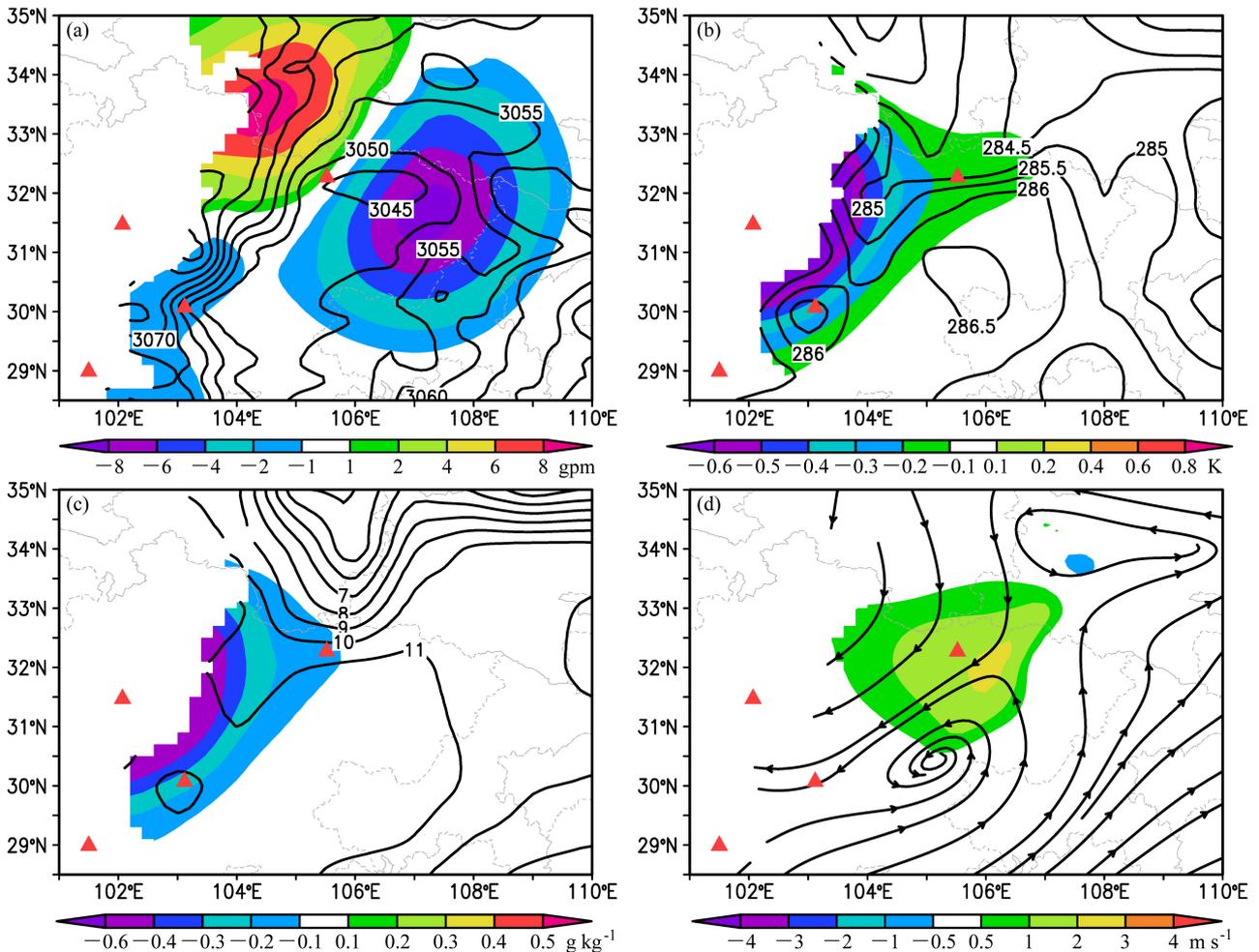


图 3 控制试验在 700 hPa 层上各物理量场的分布 (等值线或流线) 及引入加密探空资料后初始场差值 (阴影: 敏感性试验-控制试验): (a) 位势高度 (单位: gpm); (b) 温度 (单位: K); (c) 比湿 (单位: $g\ kg^{-1}$); (d) 风场 (单位: $m\ s^{-1}$)。四个三角形分别表明了 4 个站点所处位置

Fig. 3 Distribution of each physical quantity at 700 hPa in the control test (contour or streamline) and the initial difference after the introduction of intensive sounding data (shading; sensitivity minus control): (a) Geopotential height (units: gpm); (b) temperature (units: K); (c) humidity (units: $g\ kg^{-1}$); (d) wind (units: $m\ s^{-1}$). The four triangles represent the four site locations

并不重合，最大风速差值区集中在低涡中心区域(图 3d)。整个四川地区上空大气的热力和动力物理量场的最大偏差出现位置并不一致。

下面，分析各个物理量场的垂直结构差异及偏差随时间的演变。700 hPa 上最大的负值中心位于(32°N, 107°E)(图 4a1)，600 hPa 以下层的位势高度偏小值都在-8 gpm 左右，往上位势高度差值逐渐减小，300 hPa 附近缩小到-3 gpm 左右，其上层大气的位势高度差值又随高度增高而增长(图 4b1)。并且，随着模拟时间的增长，该中心点位势高度的差值演变情况是：500 hPa 以下层负的极大值在 1 h 后就明显减弱，至 7 h 以后，2 个试验模拟的位势高度相差无几了，此后还逐渐转变为正的差值。400 hPa 以上层前 4 h 跃变为正的差值，5~9 h 又突变为强的负差值，此后再次突变为强的正差

值，并随模拟时间的增长逐渐衰减(图 4c1)。最大差值的垂直廓线结构反映了 2 个试验中整层大气的位势高度偏差强度并不完全一致，甚至会在不同高度上出现反位相的偏差值(温度，比湿及风场图略)，差值在垂直高度上的变幅比较显著(图 4b)。时间演变直观地说明了初值对局地大气状态的影响时段有限，主要集中在前期，与模式自身调整期相重叠(图 4c)。

基于加密观测资料，将观测站点(九龙和剑阁)模拟的位势高度与加密探空观测的垂直廓线进行比较，分析他们初值及其后演变的差异(图 5)。3 日 00 时，敏感性试验模拟的九龙站上空的位势高度总是略低于控制试验的结果，600 hPa 以下层，模拟的位势高度值皆大于实测值，敏感性试验的位势高度偏差略小，600 hPa 以上层则是模拟的位势

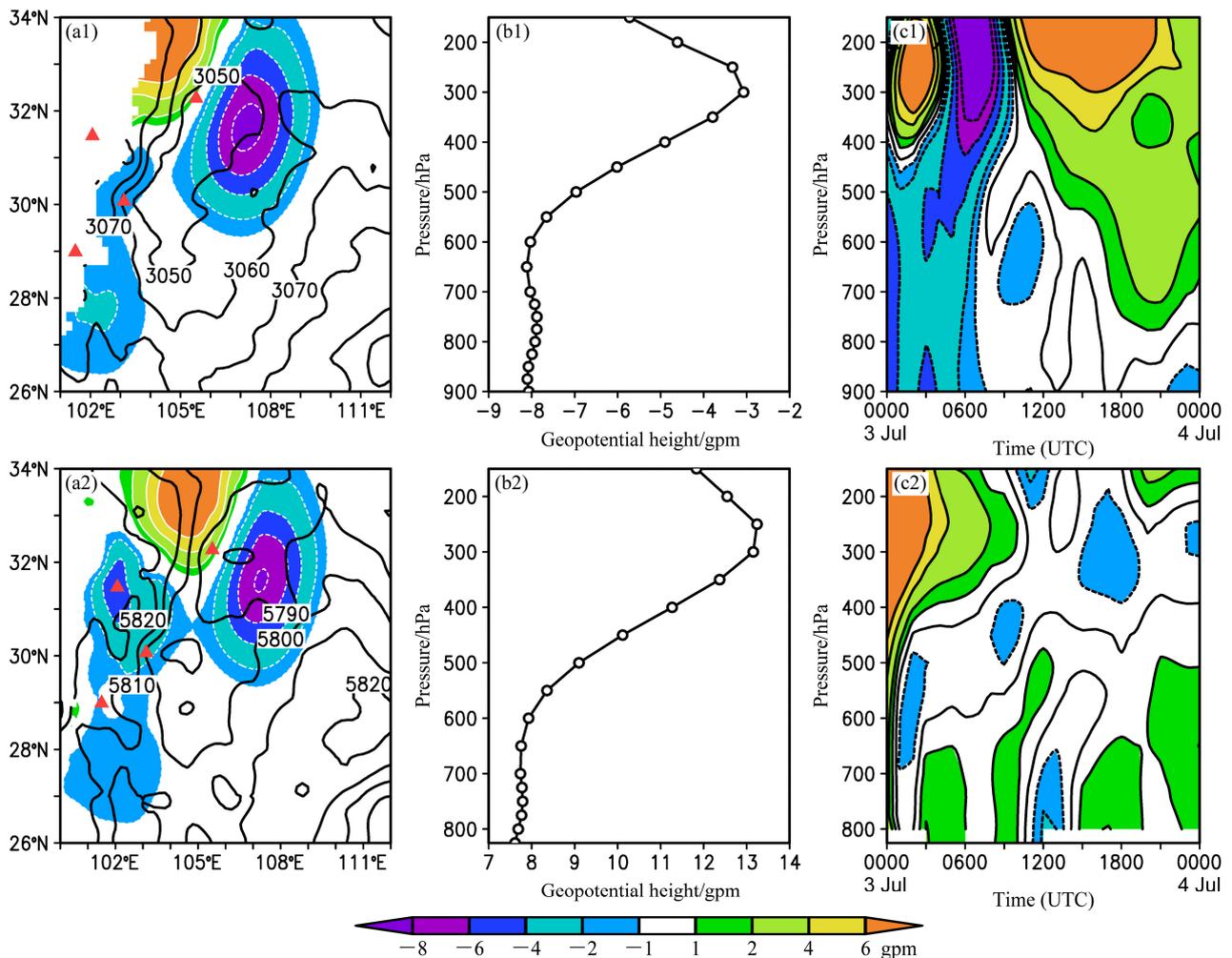


图 4 (a1) 700 hPa 和 (a2) 500 hPa 上的位势高度(等值线, 单位: gpm) 及差值(阴影)分布, 最大差值中心(700 hPa: 32°N, 107°E; 500 hPa: 33.5°N, 105°E) 随 (b1, b2) 高度及 (c1, c2) 时间的演变
Fig. 4 Geopotential height at (a1) 700 hPa and (a2) 500 hPa (contours, units: gpm) and the difference between the sensitivity test and the control test (shading); Evolution of the biggest difference's center with (b1, b2) height and (c1, c2) time (700 hPa: 32°N, 107°E; 500 hPa: 33.5°N, 105°E)

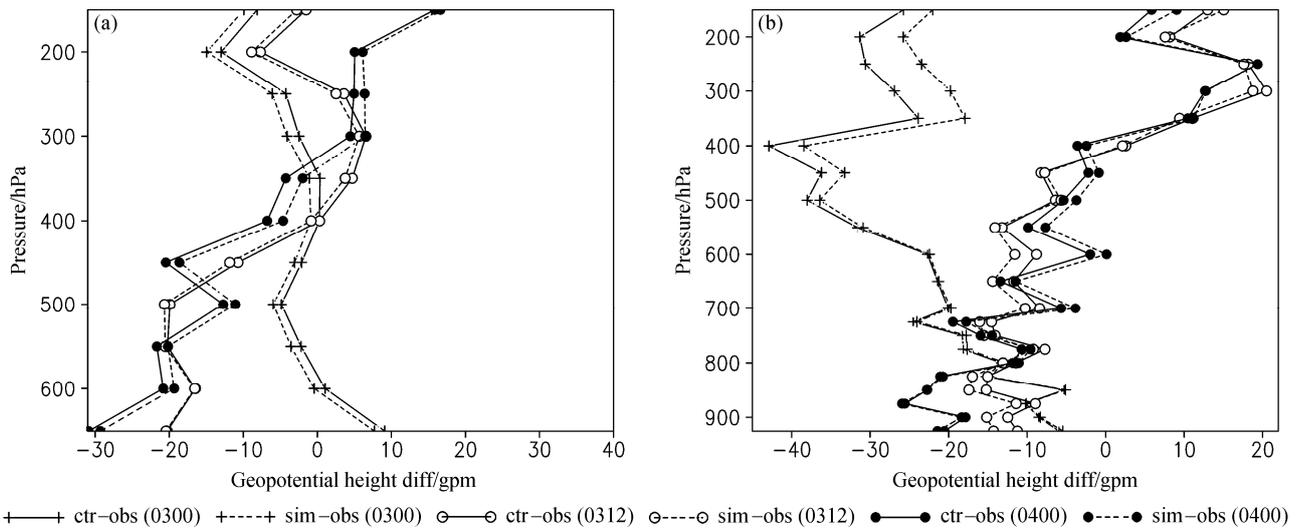


图 5 观测和模拟的位势高度差异廓线 (单位: gpm): (a) 九龙站; (b) 剑阁站

Fig. 5 Difference in geopotential height between the observation and simulation (units: gpm): (a) Jiulong station; (b) Jian'ge station

高度值小于实测值, 敏感性试验模拟的位势高度值更小。随着时间的推移, 3 日 12 时, 2 个数值试验模拟位势高度值非常接近, 在 500 hPa 以下层位势高度值完全一致, 皆比实测值小 20 gpm 左右, 而其上层, 敏感性试验模拟的位势高度值仅比控制试验模拟的值略小一点。4 日 00 时, 敏感性试验模拟的位势高度值反而略大于控制实验的结果, 与探空观测相比, 低层表现为较强的负偏差, 越向高空, 偏差越小, 350 hPa 高度以上层转变为正偏差 (图 5a)。再看剑阁站的偏差廓线, 3 日 00 时, 模拟的位势高度值皆低于实测值, 最大负偏差出现在 400 hPa 高度附近, 偏差值约为 40 gpm 左右, 550 hPa 以上层敏感性试验的偏差值显著小于控制试验, 随着时间的推移, 模拟的中高层大气的位势高度偏差逐渐缩小, 而 800 hPa 以下层大气的位势高度负偏差反而有所增长 (图 5b)。初始时刻, 越往高层, 大气位势高度偏差越大, 随着时间的推移, 低层大气的位势高度偏差略有增大, 而高层的位势高度偏差则明显减小。

再通过假相当位温廓线来分析观测和模拟的 2 个站大气的层结稳定性 (图 6)。首先对比九龙站的假相当位温廓线: 3 日 00 时, 500 hPa 以下层大气层结比观测更为不稳定, 3 日 12 时, 观测和模拟的 550 hPa 以下层大气皆不稳定, 实测廓线表现得更加不稳定, 4 日 00 时, 观测和模拟的大气层结廓线皆趋于稳定, 但模拟的假相当位温值比实测值偏大 (图 6a)。再分析剑阁站大气层结结构: 3 日 00 时,

实测 725 hPa 以下层的大气皆不稳定, 尤其是 850~725 hPa 层之间, 几乎是超绝热的, 模拟的大气从地面到 350 hPa 几乎是绝热的。3 日 12 时, 实测的 725 hPa 以下层依然非常不稳定, 模拟结果则是 825 hPa 以下层为绝热层, 825~775 hPa 之间大气呈现层结稳定状态, 775~600 hPa 的中间层大气又表现为层结不稳定, 敏感性试验模拟的该层的大气假相当位温最高。4 日 00 时, 观测的 800 hPa 以下大气层依然不稳定, 模拟的结果则是 725 hPa 以下大气层结皆不稳定, 750 hPa 以下大气的模拟值明显高于实测值, 最大差异主要体现在中低层大气中 (图 6b)。通过站点上空的垂直廓线对比, 发现与实况相比, 初始时刻的差异最为显著, 随着模拟时段的增长, 差异有缩小的趋势。控制试验和敏感性试验在这九龙站的垂直廓线结构非常相似, 而剑阁站位置比较接近降水中心, 2 个试验模拟的中低层大气的最大差异出现在 3 日 12 时, 恰好是最强降水出现前夕, 4 日 00 时, 降水过后, 二者模拟的垂直结构又趋于一致。

初始场中, 两个数值试验的低涡中心位置比较一致, 但敏感性试验的低涡强度略强于控制实验, 且敏感性试验在低涡中心上空的水汽含量更为丰富 (图 7a)。3 日 01~03 时, 模式自身的调整较为剧烈, 位势高度场的形态因此发生了剧烈的变化, 此时降水中心与低涡位置的对应关系并不显著 (图 7b, c), 直到 3 日 03 时, 2 个数值试验低涡位置与降水分布才有了较好的一致性, 即低涡中心位置与

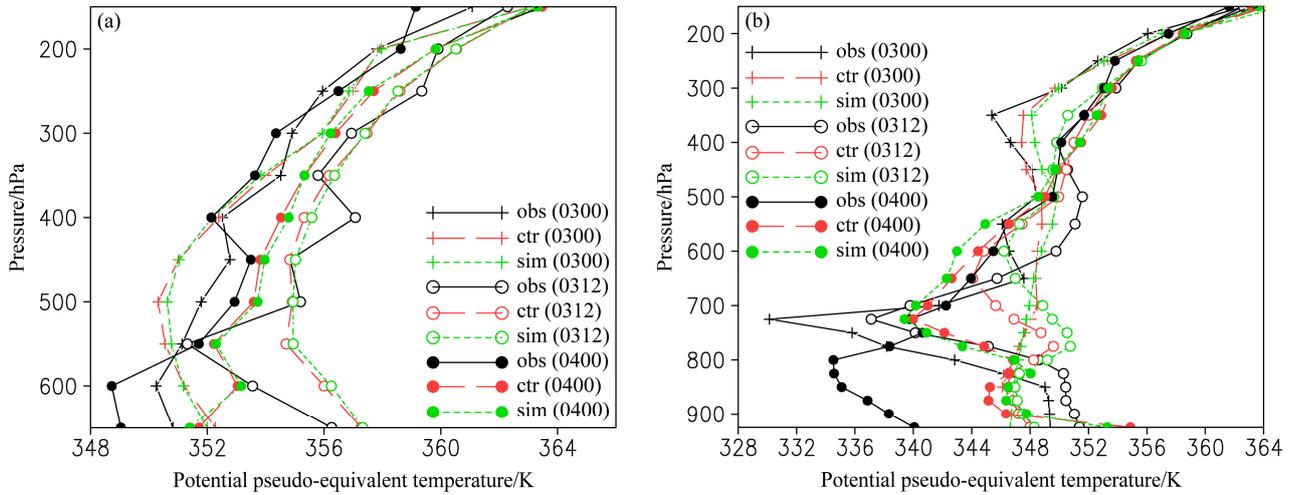


图 6 实测及模拟的假相当位温廓线 (单位: K): (a) 九龙站; (b) 剑阁站

Fig. 6 Potential pseudo-equivalent temperature from the observation and simulation (units: K): (a) Jiulong station; (b) Jian'ge station

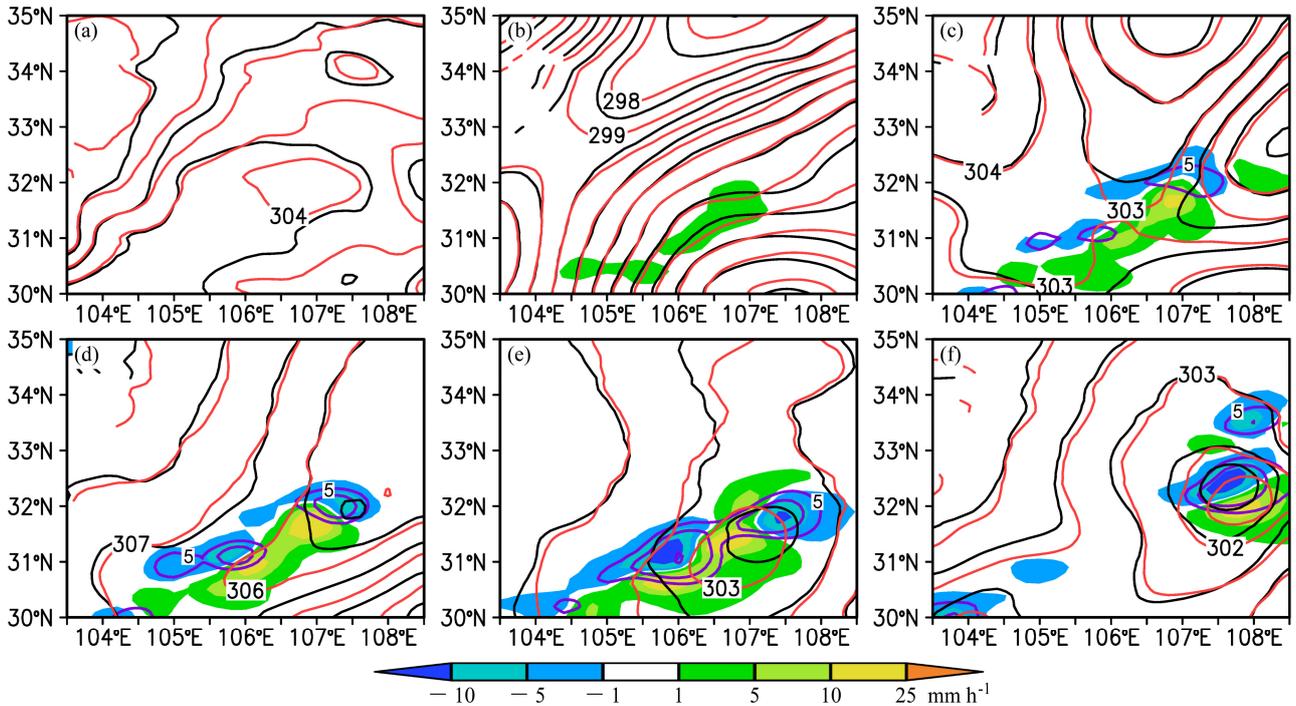


图 7 700 hPa 位势高度 (单位: gpm) 及逐时降水 (单位: mm h^{-1}) 分布随时间的演变 (黑色等值线为控制试验的位势高度, 红色等值线是敏感性试验的位势高度, 紫色等值线为控制试验模拟的逐时降水, 阴影是敏感性试验减去控制试验逐时降水之差): (a) 0300; (b) 0301; (c) 0302; (d) 0303; (e) 0306; (f) 0400

Fig. 7 Time evolution of the geopotential height at 700 hPa (units: gpm) and hourly precipitation (units: mm h^{-1}) distribution (black contours are the geopotential height in the control test; red contours are the geopotential height in the sensitivity test; purple contours are the hourly rainfall in the control test; shading is the hourly precipitation difference, i.e., the sensitivity test minus the control test): (a) 0300; (b) 0301; (c) 0302; (d) 0303; (e) 0306; (f) 0400

各自最大降水中心位置相接近 (图 7d, e, f)。在模式调整期, 初始场的差异导致控制试验和敏感性试验在对流调整时, 局地辐合的中心位置有所偏差, 致使前期降水落区及强度皆不尽相同。因此, 模式在磨合调整过程以后, 低涡中心位置便各自倾

向于其降水中心, 敏感性试验的低涡中心位置比控制试验的低涡中心位置略偏东偏南, 这一偏差状态一直持续到该西南低涡系统东移消失 (图 7, 2)。

由此可见, 初始的大气状态必然会随着模式的 spin-up 过程进行调整, 虽然最大差异区局地大气状

态会很快得到调整,但不同初值会在调整期产生迥异的水汽辐合,其凝结潜热对大气的反馈作用,能对中小尺度低涡系统的位置及强度产生影响,而此后的降水天气过程,则是在调整后得到的该低涡系统基础上,继续发展、加强、减弱并最终消亡。

5 西南低涡中心区域动力演变特征

可以看到:控制试验和敏感性试验模拟的这次降水皆有 2 次对流发展过程,控制试验模拟的最大涡度、散度及垂直速度分别出现在 3 日 03 时和 3 日 19 时,敏感性试验则出现在 3 日 02 时和 3 日 13 时,峰值出现时间比控制试验超前。敏感性试验模拟的前一峰值中,涡度、散度和垂直速度强度明显大于控制试验的值,而后一峰值强度却弱于控制试验,但持续时间略长于控制试验(图 8)。这一结果说明:有助于降水的敏感性试验的初始场,在数值试验初期就能通过垂直上升运动使得近饱和大气凝结并产生降水,再通过凝结潜热等反馈作用的调整,使二者中小尺度结构产生了一定的偏差,当然,仅 4 个站点初始场的加入,对于大尺度形势场的作

用甚微。因此,初始场的这种改变对于积分后一阶段的整体趋势模拟结果的影响是有限的。

从图 9 可以看到:实况和模拟皆呈现 2 个降水峰值,观测的前一个峰值出现在 3 日 04 时,后一峰值出现在 3 日 13 时。控制试验模拟的前一峰值同样出现在 3 日 04 时,后一峰值比较滞后,出现在 3 日 18~19 时前后。敏感性试验模拟的前一峰值出现在 3 日 03 时,后一峰值同样出现在 3 日 13 时。敏感性试验模拟的前一峰值的降水强度最大,其次是控制试验,实况最小,而后一峰值的降水明显大于前一峰值,实况的降水峰值最强,但持续时间相对较短(图 9a),加入探空资料后,敏感性试验模拟的降水发生发展过程更接近于实况。两个试验模拟的最大垂直速度出现在 500 hPa 附近,将其演变情况与 700 hPa 的位势高度进行对比分析后发现,控制试验中,前一垂直速度峰值出现在 3 日 03 时,降水峰值和位势高度极小值皆出现于 3 日 04 时,而后一降水峰值、垂直速度极大值及位势高度最小值的出现时间都在 3 日 19 时,比较一致;敏感性试验中,前一垂直速度峰值出现在 3 日 02 时,

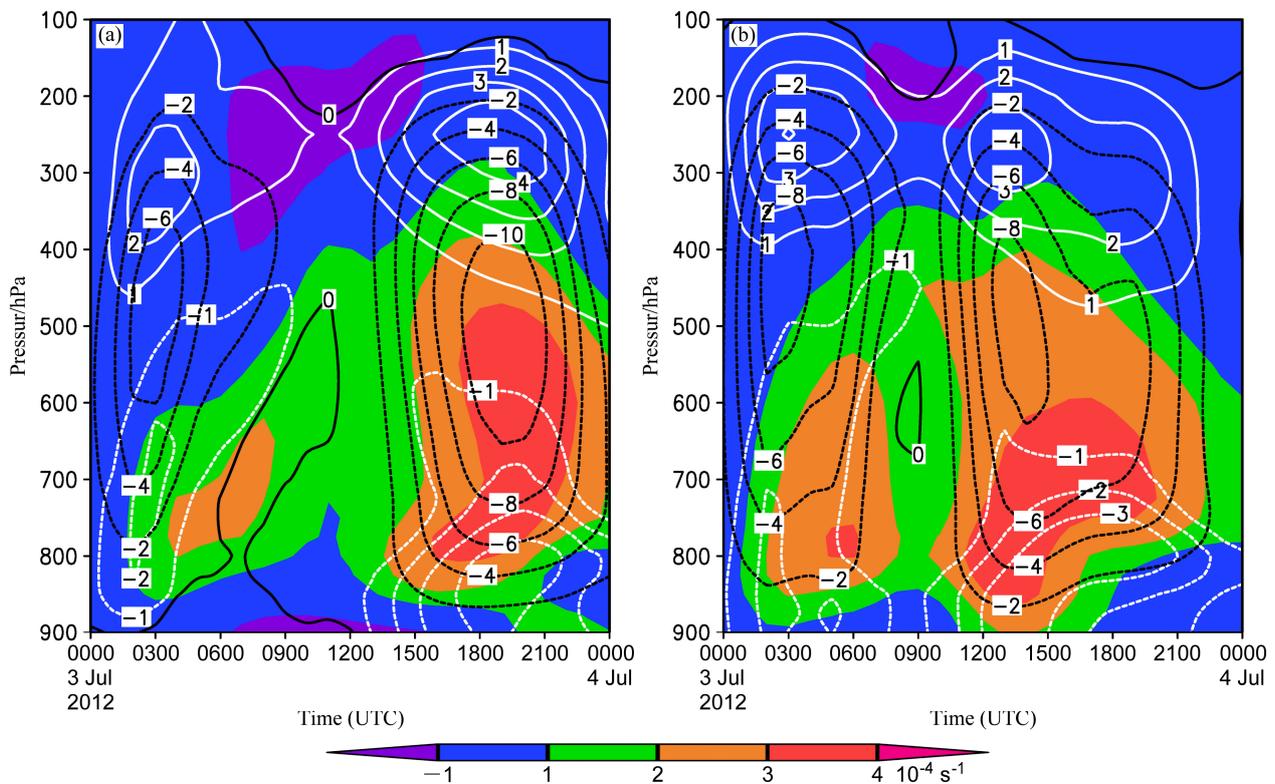


图 8 降水中心区域平均的涡度(阴影,单位: 10^{-4}s^{-1})、散度(白色等值线,单位: 10^{-4}s^{-1})、垂直速度(黑色等值线,单位: Pa s^{-1})随时间的演变:(a)控制试验区域($31.9^{\circ}\sim 32.2^{\circ}\text{N}$, $107^{\circ}\sim 107.4^{\circ}\text{E}$);(b)敏感性试验区域($31.6^{\circ}\sim 31.9^{\circ}\text{N}$, $106.8^{\circ}\sim 107.2^{\circ}\text{E}$)

Fig. 8 Time evolution of the regionally averaged vorticity (shading; units: 10^{-4}s^{-1}), divergence (white contours; units: 10^{-4}s^{-1}), and vertical velocity (black contours; units: Pa s^{-1}): (a) Control experiment ($31.9^{\circ}\sim 32.2^{\circ}\text{N}$, $107^{\circ}\sim 107.4^{\circ}\text{E}$); (b) sensitivity test ($31.6^{\circ}\sim 31.9^{\circ}\text{N}$, $106.8^{\circ}\sim 107.2^{\circ}\text{E}$)

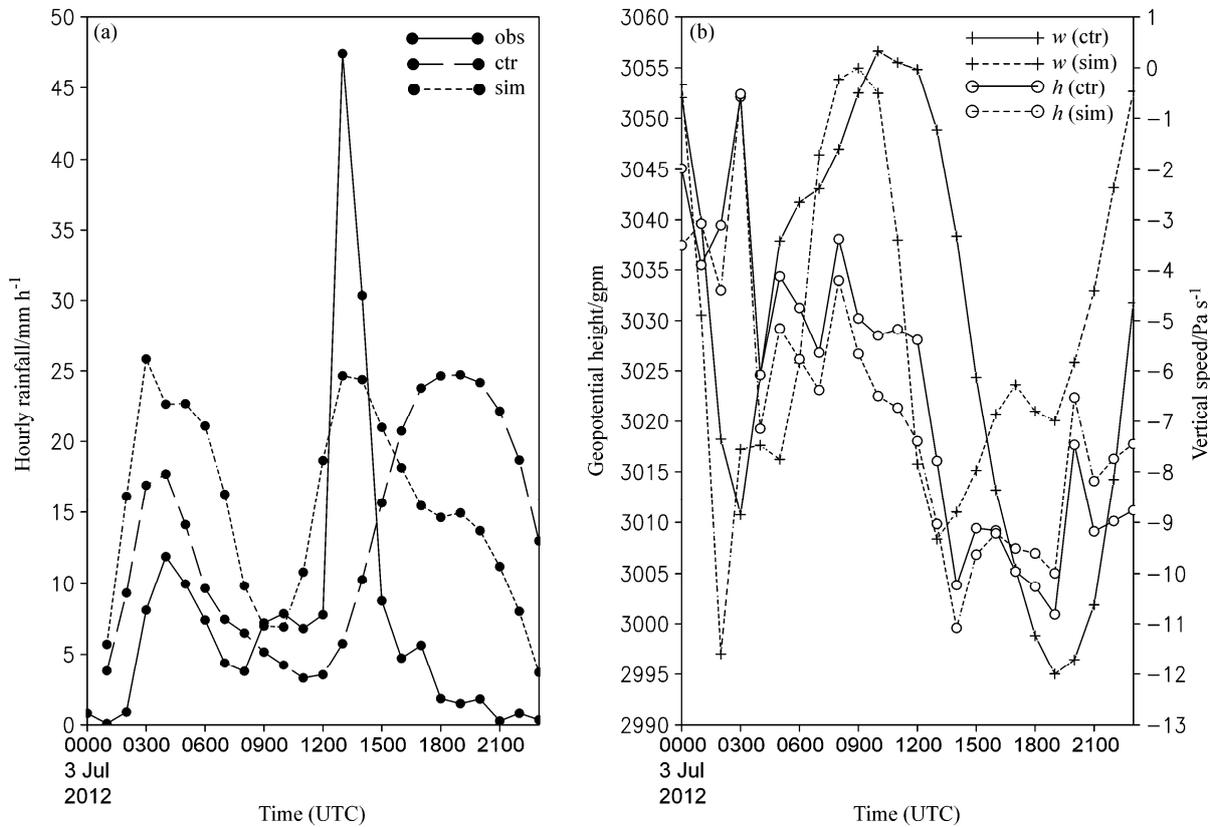


图9 降水中心平均的 (a) 逐时降水分布 (单位: mm h^{-1}) 及 (b) 700 hPa 位势高度 (单位: gpm)、500 hPa 垂直速度 (单位: Pa s^{-1})。其中, 实况降水中心 ($31.9^{\circ}\sim 32.2^{\circ}\text{N}$, $107.9^{\circ}\sim 108.3^{\circ}\text{E}$; 控制试验降水中心 ($31.9^{\circ}\sim 32.2^{\circ}\text{N}$, $107^{\circ}\sim 107.4^{\circ}\text{E}$; 敏感性试验降水中心 ($31.6^{\circ}\sim 31.9^{\circ}\text{N}$, $106.8^{\circ}\sim 107.2^{\circ}\text{E}$)

Fig. 9 Regionally averaged (a) hourly rainfall distribution (units: mm h^{-1}) and (b) geopotential height at 700 hPa (units: gpm) and vertical velocity at 500 hPa (units: Pa s^{-1}) [observation area: ($31.9^{\circ}\sim 32.2^{\circ}\text{N}$, $107.9^{\circ}\sim 108.3^{\circ}\text{E}$); control test area: ($31.9^{\circ}\sim 32.2^{\circ}\text{N}$, $107^{\circ}\sim 107.4^{\circ}\text{E}$); sensitivity test area: ($31.6^{\circ}\sim 31.9^{\circ}\text{N}$, $106.8^{\circ}\sim 107.2^{\circ}\text{E}$)]

降水峰值出现在 3 日 03 时, 而位势高度极小值出现于 3 日 04 时, 而后一降水峰值出现在 3 日 13 时、垂直速度极大值出现在 3 日 13 时, 位势高度最小值出现在 3 日 14 时 (图 9b)。在模式磨合过程中, 自身调整造成辐合辐散使得大气产生上升运动, 形成降水, 同时对中小尺度系统的位置及强度产生一定的影响, 而此后的降水则是取决于低值天气系统的强度及其位置。

图 10 给出了低涡中心 (位置如图 2) 对应的涡度、散度和垂直速度的强度及高度随时间的演变。对比同一时刻三者最大中心高度, 显而易见垂直速度伸展发展最高, 其次是涡度, 最强辐合中心所在位置最低。三者无论是强度还是伸展高度的总趋势皆是先增长, 再衰减。三者的演变过程都出现 2 个显著的相同拐点时刻: 分别为 3 日 15 时和 4 日 06 时。3 日 15 时以前, 低涡一直处于调整状态, 低涡

中心最强的涡度、散度和垂直速度强度都存在较大的波动, 此后则几乎是持续增强, 且向上发展。4 日 06 时三者都达到一个极大值, 此后, 无论强度还是高度都逐渐衰减。单从伸展高度的演变情况看, 垂直速度最先 (3 日 18 时) 达到极值, 其次是涡度 (3 日 21 时), 低层辐合最晚 (4 日 03 时)。由此可见, 对流的确可以促使正涡度由低层向上发展。虽说低涡中心所在位置也是最强辐合、最大正涡度及最大垂直速度中心 (图 8), 但细究其结构, 三者的强度和发展高度的演变并非完全一致, 他们之间的相互作用有待深入研究。

6 结论

本文基于 AREM 模式, 结合高原所在四川地区开展的大气加密探空试验所收集的第一手资料, 对发生在 2012 年西南低涡加密观测试验期间的几次

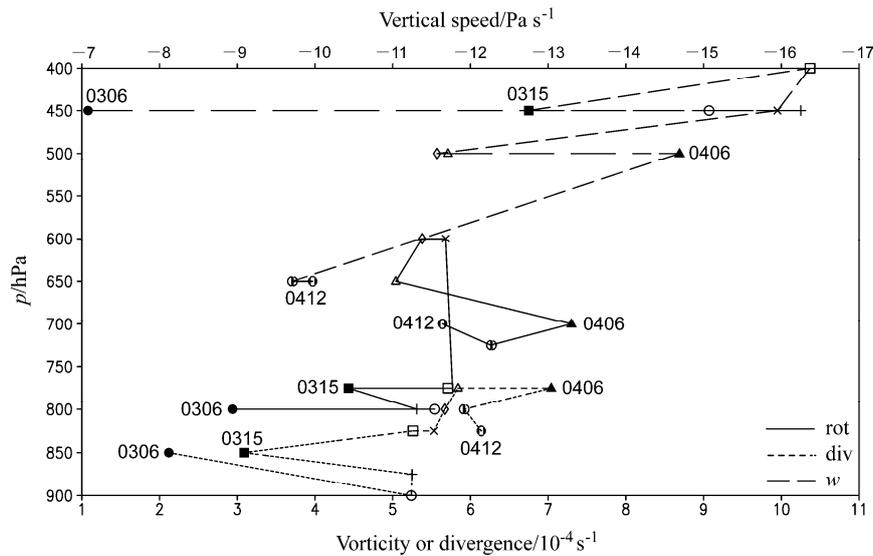


图 10 控制试验低涡中心的涡度、散度和垂直速度的强度（横坐标）及高度（纵坐标）随时间的演变（时间间隔为 3 h），同一时刻用相同类型的点标记，实线代表涡度，点线代表散度，虚线为垂直速度

Fig. 10 Evolution of vorticity, divergence, and vertical velocity at the low vortex center in the control test [time interval: 3 h; the same time is marked with the same type of dots; horizontal axis represents the strength; vertical axis represents the height; solid line represents the vorticity; dotted line represents the divergence; dashed line represents vertical velocity]

西南低涡强降水过程进行了数值试验，并以 20120703 过程为例进行了深入的分析，得到了以下主要结论：

(1) 降水雨带的分布主要取决于西南低涡移动路径，雨强则与低涡的强度及移动速度密切相关。不同初值的模拟试验表明低涡路径的强摆动主要发生在模拟试验前期，此后则在磨合达到的协调状态基础上，继续移动发展。

(2) 引入 4 个空间加密探空站点对四川地区上空的大气物理量场皆会造成一定的影响，最大差值分布在站点附近，但并不与站点位置相重叠，而且热力和动力物理量场的最大偏差出现位置也并不一致。物理要素场偏差强度在垂直方向上也不一致，甚至会在不同高度上出现反位相的偏差值，差值在垂直高度上的变幅比较显著。时间演变直观地说明了初值对局地大气状态的影响时段有限，主要集中在前期，与模式自身调整期相重叠。

(3) 初始的大气状态必然会随着模式的磨合过程进行调整，虽然最大差异区局地大气状态会很快得到调整，但不同初值会在调整阶段对中小尺度低涡系统的位置及强度产生影响，而此后的降水天气过程，则是在调整后得到的低涡状态基础上，继续发展、加强、减弱并最终消亡。

(4) 虽然低涡中心所对应的散度、涡度、垂直

速度的关系非常密切，但这三者强度和发展高度的演变并非完全一致。

本文引入高原所空间加密 4 个探空站资料，基于 AREM 模式进行数值试验，旨在讨论它们在数值模式中对西南低涡天气过程可能产生怎样的作用？初步表明：引入空间加密资料后，在模式调整期，中小尺度（这里，主要针对西南低涡）系统的位置及强度能在一定程度上随之改变，而且，这个改变将一直影响此后该系统的发展、加强、减弱及其消亡过程，进而影响到与之密切相关的降水强度和落区。但其对大尺度环流场的影响不突出，所以不能改变天气过程的整体趋势。当然，这些认识还有待于今后更加细致深入的分析研究。

参考文献 (References)

- 陈忠明, 闵文彬, 崔春光. 2004. 西南低涡研究的一些新进展 [J]. 高原气象, 23 (增刊): 1-5. Chen Zhongming, Min Wenbin, Cui Chunguang. 2004. New advances in southwest China vortex research [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 23 (Suppl.): 1-5, doi:10.3321/j.issn:1000-0534.2004.z1.001.
- Fu Shenming, Li Wanli, Sun Jianhua, et al. 2014. Universal evolution mechanisms and energy conversion characteristics of long-lived mesoscale vortices over the Sichuan Basin [J]. Atmos. Sci. Lett., 16 (2): 127-134, doi:10.1002/asl2.533.
- 高守亭. 1987. 流场配置及地形对西南低涡形成的动力作用 [J]. 大气科学, 11 (3): 263-271. Gao Shouting. 1987. The dynamic action of the

- disposition of the fluid fields and the topography on the formation of the south-west vortex [J]. *Chinese J. Atmos. Sci. (Scientia Atmos. Sinica)* (in Chinese), 11 (3): 263–271, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1987.03.05.
- 公颖, 林春泽, 李俊. 2010. AREM 模式预报体系对 2010 年 5 月我国南方连续暴雨过程预报效果评估 [J]. *暴雨灾害*, 29 (4): 356–362, 376.
- Gong Ying, Lin Chunzhe, Li Jun. 2010. The forecast effect evaluation of AREM prediction system for successive heavy rain courses in South China in May 2010 [J]. *Torrential Rain and Disasters* (in Chinese), 29(4): 356–362, 376, doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2010.04.010.
- 辜旭赞, 徐明. 2012. 一次西南涡特大暴雨的中尺度诊断分析 [J]. *气象与环境学报*, 28 (4): 1–7.
- Gu Xuzan, Xu Ming. 2012. A meso-scale diagnostic analysis of torrential rain caused by a southwest vortex in China [J]. *J. Meteor. Environ.* (in Chinese), 28 (4): 1–7, doi:10.3969/j.issn.1673-503X.2012.04.001.
- 郝丽萍, 邓佳, 李国平, 等. 2013. 一次西南涡持续暴雨的 GPS 大气水汽总量特征 [J]. *应用气象学报*, 24 (2): 230–239.
- Hao Liping, Deng Jia, Li Guoping, et al. 2013. Characteristics of GPS vapor in a persistent heavy rainfall related to southwest vortex [J]. *J. Appl. Meteor. Sci.* (in Chinese), 24 (2): 230–239, doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2013.02.011.
- 何光碧. 2012. 西南低涡研究综述 [J]. *气象*, 38 (2): 155–163.
- He Guangbi. 2012. Review of the southwest vortex research [J]. *Meteor. Mon.* (in Chinese), 38 (2): 155–163, doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2012.2.003.
- 何光碧, 陈静, 李川, 等. 2005. 低涡与急流对“04.9”川东暴雨影响的分析与数值模拟 [J]. *高原气象*, 24 (6): 1012–1023.
- He Guangbi, Chen Jing, Li Chuan, et al. 2005. Analysis and numerical simulation for effects of vortex and jet stream on heavy rain in East Sichuan in September 2004 [J]. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 24 (6): 1012–1023, doi:10.3321/j.issn:1000-0534.2005.06.023.
- 蒋璐君, 李国平, 母灵, 等. 2014. 基于 TRMM 资料的西南涡强降水结构分析 [J]. *高原气象*, 33 (3): 607–614.
- Jiang Lujun, Li Guoping, Mu Ling, et al. 2014. Structural analysis of heavy precipitation caused by southwest vortex based on TRMM data [J]. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 33 (3): 607–614, doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2013.00094.
- 康岚, 郝丽萍, 牛俊丽. 2011. 引发暴雨的西南低涡特征分析 [J]. *高原气象*, 30 (6): 1435–1443.
- Kang Lan, Hao Liping, Niu Junli. 2011. Feature analysis on southwest vortex of triggering rainstorm [J]. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 30 (6): 1435–1443.
- Kuo Y H, Cheng Linsheng, Anthes R A. 1986. Mesoscale analyses of the Sichuan flood catastrophe, 11 15 July 1981 [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 114 (11): 1984–2003, doi:10.1175/1520-0493(1986)114<1984:MAOTSF>2.0.CO;2.
- Kuo Y H, Cheng Linsheng, Bao Jianwen. 1988. Numerical simulation of the 1981 Sichuan flood. Part I: Evolution of a mesoscale southwest vortex [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 116 (12): 2481–2504, doi:10.1175/1520-0493(1988)116<2481:NSOTSF>2.0.CO;2.
- 李国平, 万军, 卢敬华. 1991. 暖性西南低涡生成的一种可能机制 [J]. *应用气象学报*, 2 (1): 91–99.
- Li Guoping, Wan Jun, Lu Jinghua. 1991. A potential mechanism of the warm vortex genesis in Southwest China quarterly [J]. *J. Appl. Meteor.* (in Chinese), 2 (1): 91–99.
- 李跃清, 赵兴炳, 邓波. 2010. 2010 年夏季西南涡加密观测科学试验 [J]. *高原山地气象研究*, 30 (4): 80–84.
- Li Yueqing, Zhao Xingbing, Deng Bo. 2010. Intensive observation scientific experiment of the southwest vortex in the summer of 2010 [J]. *Plateau and Mountain Meteorology Research* (in Chinese), 30 (4): 80–84, doi:10.3969/j.issn.1674-2184.2010.04.014.
- 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 [J]. *高原山地气象研究*, 31 (4): 7–11.
- Li Yueqing, Zhao Xingbing, Zhang Lihong, et al. 2011. Intensive observation scientific experiment of the southwest vortex in the summer of 2011 [J]. *Plateau and Mountain Meteorology Research* (in Chinese), 31 (4): 7–11, doi:10.3969/j.issn.1674-2184.2011.04.002.
- 刘红武, 李国平. 2008. 近三十年西南低涡研究的回顾与展望 [J]. *高原山地气象研究*, 28 (2): 68–73.
- Liu Hongwu, Li Guoping. 2008. The review and prospect of research on the southwest vortex in recent 30 years [J]. *Plateau and Mountain Meteorology Research* (in Chinese), 28 (2): 68–73, doi:10.3969/j.issn.1674-2184.2008.02.012.
- 卢萍, 肖玉华. 2011. 2010 年 AREM、GRAPES 模式预报性能对比检验分析 [J]. *高原山地气象研究*, 31 (3): 8–12.
- Lu Ping, Xiao Yuhua. 2011. Prediction capability verification of AREM and GRAPES models in 2010 [J]. *Plateau and Mountain Meteorology Research* (in Chinese), 31 (3): 8–12, doi:10.3969/j.issn.1674-2184.2011.03.002.
- 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 [J]. *高原山地气象研究*, 32 (1): 1–7.
- Lu Ping, Zheng Weipeng, Zhao Xingbing. 2012. Analysis of the sounding data of intensive observation of the southwest vortex in western Sichuan area and its application in the numerical simulations [J]. *Plateau and Mountain Meteorology Research* (in Chinese), 32 (1): 1–7, doi:10.3969/j.issn.1674-2184.2012.01.001.
- 卢萍, 蒋兴文, 李英. 2013. 基于数值模拟与加密观测的青藏高原东侧地区大气要素对比分析 [J]. *高原山地气象研究*, 33 (3): 8–15.
- Lu Ping, Jiang Xingwen, Li Ying. 2013. Analysis of atmospheric elements based on numerical simulation and intensive observation at the east region of the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Plateau and Mountain Meteorology Research* (in Chinese), 33 (3): 8–15, doi:10.3969/j.issn.1674-2184.2013.03.002.
- 卢萍, 李跃清, 郑伟鹏, 等. 2014. 影响华南持续性降水的西南涡分析和数值模拟 [J]. *高原气象*, 33 (6): 1457–1467.
- Lu Ping, Li Yueqing, Zheng Weipeng, et al. 2014. Analysis and numerical simulation of southwest vortex on continuous heavy rain processes in South China [J]. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 33 (6): 1457–1467, doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2013.00137.
- 母灵, 李国平. 2013. 复杂地形对西南低涡生成和移动影响的数值试验分析 [J]. *成都信息工程学院学报*, 28 (3): 241–248.
- Mu Ling, Li Guoping. 2013. Numerical experiments analysis of impact of complex terrain on generation and move of southwest vortex [J]. *Journal of Chengdu University of Information Technology* (in Chinese), 28 (3): 241–248, doi:10.3969/j.issn.1671-1742.2013.03.008.
- 彭新东, 程麟生. 1992. 高原东侧低涡切变线发展的个例数值研究 I. 分析和诊断 [J]. *兰州大学学报 (自然科学版)*, 28 (2): 163–168.
- Peng Xindong, Cheng Linsheng. 1992. A case numerical study on the evolution of the plateau-east-side low vortex and shear-line [J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)* (in Chinese), 28 (2): 163–168.
- Wang Qiwei, Tan Zhemin. 2014. Multi-scale topographic control of southwest vortex formation in Tibetan Plateau region in an idealized

- simulation [J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 119 (20): 11543–11561, doi:10.1002/2014JD021898.
- 王晓芳, 廖移山, 闵爱荣, 等. 2007. 影响“05. 06. 25”长江流域暴雨的西南低涡特征 [J]. *高原气象*, 26 (1): 197–205. Wang Xiaofang, Liao Yishan, Min Airong, et al. 2007. Characteristics of southwest vortex of influencing "05. 06. 25" Yangtze River rainstorm [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 26 (1): 197–205, doi:10.3321/j.issn:1000-0534.2007.01.023.
- 韦统健, 薛建军. 1996. 影响江淮地区的西南涡中尺度结构特征 [J]. *高原气象*, 15 (4): 456–463. Wei Tongjian, Xue Jianjun. 1996. The mesoscale structure characteristics of southwest vortex over Jiang-Huai River areas [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 15 (4): 456–463.
- 吴蓁, 郑世林, 李朝兴, 等. 2008. T213 与 AREM 模式分级降水预报对比检验 [J]. *气象与环境科学*, 31 (3): 1–4. Wu Zhen, Zheng Shilin, Li Chaoping, et al. 2008. Verification of T213 and AREM grading precipitation prediction [J]. *Meteor. Environ. Sci. (in Chinese)*, 31 (3): 1–4, doi:10.3969/j.issn.1673-7148.2008.03.001.
- 解明恩, 琚建华, 卜玉康. 1992. 西南低涡 Ekman 层流场特征分析 [J]. *高原气象*, 11 (1): 31–38. Xie Ming'en, Ju Jianhua, Bu Yukang. 1992. The characteristic analysis of Ekman layer's streamline fields of southwest vortex [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 11 (1): 31–38.
- 宇如聪. 1994. LASG-REM 对 1994 年中国汛期降水的实时预报试验 [J]. *大气科学*, 18 (增刊): 801–809. Yu Rucong. 1994. Real-time precipitation forecasting experiments in the summer China of 1994 by the LASG-REM [J]. *Chinese J. Atmos. Sci. (Scientia Atmos. Sinica) (in Chinese)*, 18 (Suppl.): 801–809, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1994.z1.04.
- 宇如聪, 徐幼平. 2004. AREM 及其对 2003 年汛期降水的模拟 [J]. *气象学报*, 62 (6): 715–724. Yu Rucong, Xu Youping. 2004. AREM and its simulations on the daily rainfall in summer in 2003 [J]. *Acta Meteor. Sinica (in Chinese)*, 62 (6): 715–724, doi:10.3321/j.issn:0577-6619.2004.06.001.
- 朱禾, 邓北胜, 吴洪. 2002. 湿位涡守恒条件下西南涡的发展 [J]. *气象学报*, 60 (3): 343–351. Zhu He, Deng Beisheng, Wu Hong. 2002. The development of southwest vortex in conservation of moist potential vorticity [J]. *Acta Meteor. Sinica (in Chinese)*, 60 (3): 343–351, doi:10.3321/j.issn:0577-6619.2002.03.010.