

增强副热带高压对西南涡影响的一次数值试验研究

卢萍^{1,2} 李跃清^{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

摘要 本文通过对伴随副高东退而东移的一次典型西南涡天气过程(“20150721”)进行数值模拟,采用数值敏感性对比试验探讨了增大副高强度对这次东移西南涡的影响,得到以下结论:1)副高强度增大以后,可长时间的稳定维持,能对西南涡中尺度天气系统整个发展演变过程造成持续影响。西南涡路径和强度的变化直接改变了降水的落区和强度。2)副高强度增大率先改变了环流场,使入侵的北风偏弱,西南引导气流偏强,最终导致西南涡发展偏弱、移速偏快。3)环流场的改变直接影响到水汽输送、辐合辐散,从而进一步影响西南涡的发展演变过程。4)副高强度增大以后,西南涡移速过快,导致了低涡中心与低层热力中心偏离,使得动力和热力中心不完全匹配,由此削弱西南涡发展强度。

关键词 副高 西南涡 敏感性试验 环流场 水汽输送

文章编号

中图分类号 P447

文献标识码

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2008.20161

The effect of enhancement subtropical high on the simulation of the southwest vortex

Lu Ping^{1,2}, Li Yueqing^{1,2}

1 Institute of Plateau Meteorology, China Meteorological Administration (CMA), Chengdu 610072, China

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

Abstract: Based on regional model simulations of one typical cases of the eastward moving southwest vortex with the subtropical high east retreat (case 20150721), this study discusses the effect of subtropical high strength for the eastward

作者简介 卢萍,女,1976年出生,副研究员,主要从事天气分析、数值模拟研究。

E-mail:abc-123@mail.iap.ac.cn.

资助项目 国家自然科学基金项目 91937301,成都高原气象研究所开放实验室基金项目 BROP202014,气象预报业务关键技术发展专项子项目 YBGJXM(2020)2A-14

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grant 91937301), Open Lab Foundation of Institute of Plateau Meteorology, China Meteorological Administration (Grants BROP202014), Sub-project for the development of key technologies in meteorological forecasting operations(YBGJXM(2020)2A-14).

southwest vortex through the numerical sensitivity test of enhancement subtropical high. The main results are as follows: (1) 1)The enhanced subtropical high can be maintained stably for a long time, which can have a lasting impact on the whole development and evolution process of the southwest vortex meso-scale system. The area and intensity of precipitation directly depends on the path and intensity of southwest vortex. (2) The circulation field firstly changes when the subtropical high strength increases. the invading north wind is weaker, southwest guided airflow is stronger, and it eventually led to the faster and more weak southwest vortex. (3)The change of circulation field directly affects transport, convergence and divergence of the water vapor, and further affects the whole evolution process of southwest vortex. (4) after the increase of the subtropical high, the faster southwest vortex result in the deviation between the center of southeast vortex and the thermal center in the lower layer, and result in the mismatch between the dynamic and thermal centers, thus strength of the southwest vortex weaken.

Keywords subtropical high, southwest vortex, sensitivity test, circulation field, water vapor transport

1 引言

西南低涡（简称“西南涡”）是青藏高原东侧背风坡地形与大气环流相互作用下（Wang Qiwei 和 Tan Zhemin, 2014），在我国西南地区（ 100° - 108° E, 26° - 33° N）形成的具有气旋式环流的 700 或 850hPa 等压面的 α 中尺度闭合低压涡旋系统（卢敬华，1986；何光碧，2012；李跃清和徐祥德，2016；李国平和陈佳，2018）。九龙地区、四川盆地和小金一带是西南涡的三个生成集中区（陈忠明等 2004；慕丹和李跃清，2017；马勋丹等，2018），其主要活动路径有三条：偏东路径、东南路径、东北路径（王金虎等，2015）。

西南涡是我国重要的暴雨中尺度系统，中尺度系统都是在有利的大尺度环境场下酝酿产生的，对流层中低层大尺度与中尺度系统之间的相互作用使得中尺度系统迅速发展（沈新勇等，2018）。陈忠明（1989）提出西南涡的移动受到许多因子影响，其中环境流场的引导起着较重要作用。丁治英等（1991）通过对发展东移和不发展东移的西南涡合成诊断发现：移出涡前为暖平流，涡后为冷平流，

西南风低空急流较强,低层以辐合为主,移出涡扰动动能的制造大于消耗。卢敬华等(1996)指出西南涡的移动除受综合引导气流牵引之外,重要的是受700hPa高度场上的散度、涡度平流、斜压性/动量垂直涡旋通量分布不均匀以及地面气压梯度与西南涡综合涡度产生的控制。黄明政等(2005)发现对流层上部大尺度环流的变化使得低层的西南涡和气旋开始发生发展,再配合高空槽的抽吸作用,最终导致暴雨发生。潘旻等(2011)研究了东移西南涡空间结构的气候学特征,指出高层风速差异的纬向梯度加强了长江中游地区的高空辐散,在西南涡东部形成有利于降水和气旋性环流发展的动力抬升机制;对流层低层的西风偏差在青藏高原南麓至我国东部长江以南形成一条异常的水汽输送带,为低涡东部的降水潜热反馈作用提供了充足的水汽。Zhong Rui 等(2014)认为副高和700hPa地转风对西南涡的移动方向起着重要作用。Wang Xinmin 等(2017)认为在河南2013年5月25-26日的大暴雨过程中,低空西南风急流及其暖平流在西南涡的发展和移动过程中扮演着重要角色。雷丽娟等(2018)指出台风“玛瑙”间接阻挡西南涡东移,减缓其东移速度;其强大的水汽源未向西南涡直接提供水汽。

南亚高压、西太平洋副热带高压(简称“副高”)和阻塞形势是暴雨形成的环流背景,对流层中层东移的槽脊系统与低层的低涡系统相配合,高空急流和低空急流上下耦合,共同触发了强暴雨的发生发展。大尺度天气系统对西南涡发展过程的影响是一个复杂的科学问题,也是研究西南涡中尺度系统不可回避的科学难题。尤其是副高,它是夏半年西南涡发展演变过程中无法绕开的一个重要大尺度系统。从众多的西南涡引发的暴雨天气过程都可以发现,在西南涡发展演变过程中,往往存在副高这样的大尺度天气系统的直接或间接影响。数值敏感性试验乃是研究该科学问题的有效途径,因此,本文以2015年7月21日00时-24日00时(简称“20150721”过程)一次西南涡发生发展并伴随副高的东退而快速东移的典型过程为例,设计了增大副高强度的敏感性试验,通过与对照试验的对比分析具体探讨增强副高对西南涡活动的影响。

2 天气过程和数值试验

2.1 模式介绍

本文数值试验采用AREM(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；公颖等，2010；Luo Yu 和 Zhang Lifeng，2011）。模式区域范围为 $85^{\circ}\sim 125^{\circ}\text{E}$ ， $15^{\circ}\sim 45^{\circ}\text{N}$ ，水平分辨率约为 12km，垂直方向分为 42 层，模式层顶为 10hPa。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，模式参数详见有关参考文献（卢萍等，2014）。模式以 NCEP 再分析资料（ $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ ）为背景场和时变(6h)边界场，结合常规台站资料作为初值，积分 72h，输出分辨率为 $0.2^{\circ}\text{E}\times 0.1^{\circ}\text{N}$ 逐时的温、压、湿、风和雨量等要素场。

2.2 过程概况

2015 年 7 月 21 日 00 时-24 日 00 时，我国西南地区生成一个西南涡并东移发展，引发一次自西向东的大范围强降水天气过程（实况降水如图 2a 所示）。7 月 21 日 12 时，500hPa 四川盆地西部到甘孜州南部为青藏高压和副高之间的切变线，河套东部到陕南是一西风低槽，700hPa 四川盆地西部有西南涡生成，并延伸到 500hPa 以上。整个过程中河套低槽逐渐向南推进，副高东退，青藏高压则有西伸的趋势，使得两高之间的低值系统（西南涡）也逐渐东移（图略）。

2.3 敏感性试验

副高的强弱、进退和移动，同中国的天气以及旱涝等的关系极其密切，是夏半年天气预报中需要着重分析研究的天气系统之一。中尺度系统都是在有利的大尺度环境场下酝酿产生的，副高作为大尺度天气系统对中小尺度天气系统的发生发展有着非常重要的影响。研究副高强度对西南涡的影响具有相当的现实意义，而数值敏感性试验是此类研究的有效方法，增大副高强度的敏感性试验设计如下：

思路：进一步增大位势高度值高于阈值范围内的所有格点的位势高度值（以最稀疏等值线为域值；水平范围：位势高度值超过该阈值的区域；垂直范围：从 925hPa 到 300hPa）。

具体做法：增量是其与阈值之差的 40%，以 500hPa 为例（见图 1），图 1a 是对照试验中初始场 500hPa 位势高度分布，等值线最为稀疏的区域是 5860gpm，因此定义其为 500hPa 的阈值，增大所有位势高度大于 5860gpm 的格点值，增幅为该格点的位势高度值减去 5860gpm 之差的 40%。这样的试验设计是为了让改变

区域与其他区域之间不出现跃变点，平缓过渡。从试验设计可清楚地看到，位势高度越高的区域，其增加幅度也越大（图 1b）。图 1c 是 500hPa 上敏感性试验和对照试验的差值，显示了主要的改变区域与副高相吻合，且最大差值位于副高中心位置，其值超过 35gpm。图 1d 则是沿 20°N 二者之差的纬向剖面，显示了这次敏感性试验增量最大的层次位于对流层中层（700–500hPa）。从图 1 可以看到，这样的设计实现了在初始场中增强副高强度的目的。

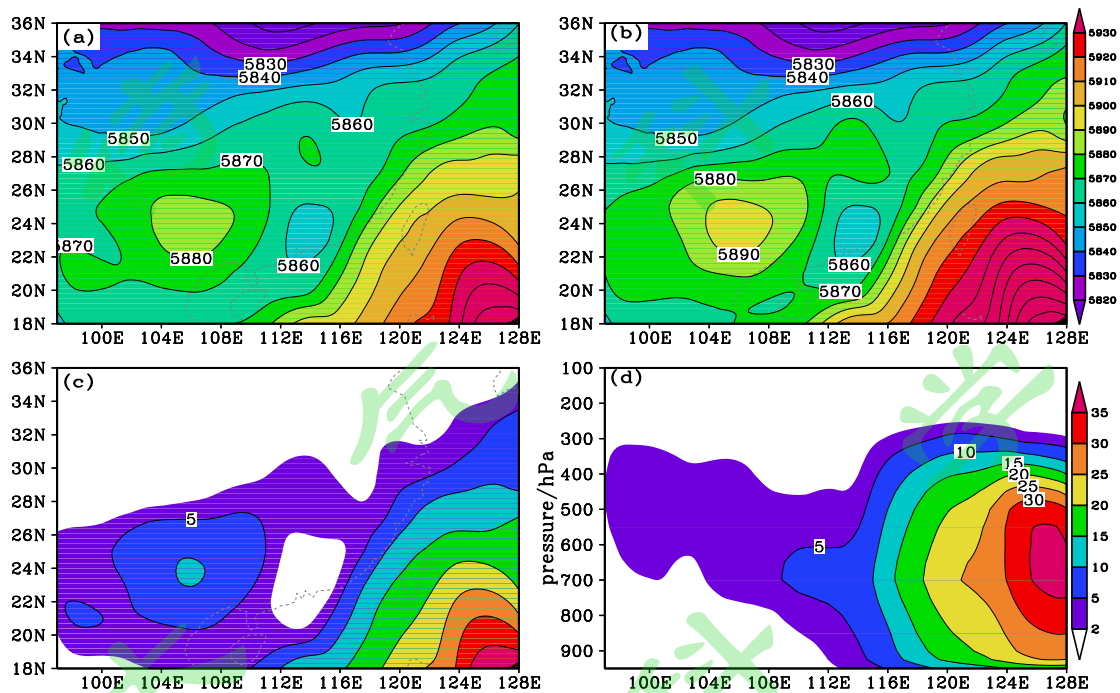


图 1 初始时刻，500hPa 位势高度 (a) 对照试验、(b) 敏感性试验及敏感性试验与对照试验之差 (c) 平面图和 (d) 沿 20°N 的纬向剖面（单位：gpm）

Fig.1 The potential height on the 500hPa at the initial moment (a) the control test, (b), the sensitivity test, (c) the difference of potential height between the sensitivity test and the control test, and (d) zonal profile difference of potential height along the 20°N(unit:gpm)

3 模拟结果对比分析

3.1 降水分布特征

2015 年 7 月 21–24 日发生了一次典型的西南涡持续快速东移的强降水天气过程，其中，图 2a 为 7 月 21–24 日 72h 的实况累计雨量分布。从图 2 可知：这是一次典型的降水落区随着西南涡中尺度系统逐渐由西向东移动的强降水过程，雨带从四川东南部历经重庆、湖南、湖北和安徽一线的长江中游地区（图 2a），

数值试验模拟的降水落区较好地再现了雨带随时间逐渐向东伸展的基本特征，但强度略强且雨带略偏北偏宽（图 2b），而敏感性试验的雨带比对照试验整体偏北，强度略弱（图 2c）。以上西南涡暴雨天气过程降水实况与模拟结果的对比分析表明：AREM/LASG 数值模式的模拟结果基本再现了这次西南涡东移造成的降水过程，因此，基于该模拟结果开展的增强副高对东移西南涡演变的影响研究是基本可行和可靠的。

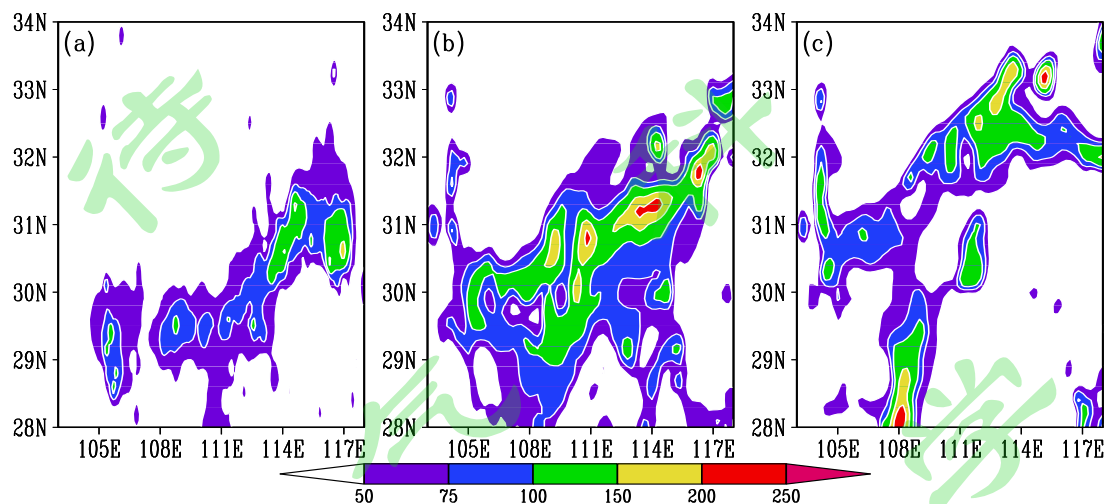


图 2 2015 年 7 月 21 日 00 时-24 日 00 时 72h 累计强降水分布（单位：mm）a、实况；b、对照试验；c、敏感性试验

Fig.2 Accumulated 72 h precipitation from GMT 00 h on the 21st to GMT 00 h on the 24th of July, 2015(units:mm). (a) observations;(b) the control test;(c) the sensitivity test.

3.2 环流场的改变

增强副高强度后，整体大尺度环流形势也会有所改变。图3是23日00时500hPa的位势高度场和风场。ERA5再分析资料(4次/天，0.25*0.25)显示，相较21日00时，副高北抬，西北部高压脊稳定维持并略有加强，西伯利亚到巴尔喀什湖附近的深厚低槽稳定分裂短波南移后加强发展为深厚的冷涡。西北气流和西南气流在中纬度地区交汇（图3a）。对照试验能再现这一整体环流形势，模拟的副高强度略微偏弱（图3b）。敏感性试验中，副高在整个模拟时段都表现得非常强大，对北方冷涡向东向南的发展起到一定的抑制作用，使得北方冷涡的强度偏弱，不能快速从西向东南发展，同时阻碍了西北部高压脊的发展。西北气流的强度也因此减弱，向南入侵的深度同样变浅，副高西北部的西南气流则有所增强（图3d）。

由此可见，副高作为大尺度系统，增强以后，能长时间的保持其强度，范围也随之增大，他不仅能影响到北方冷涡等较大尺度的系统，更能对生命史相对短的中尺度天气系统整个发展演变过程造成持续影响。

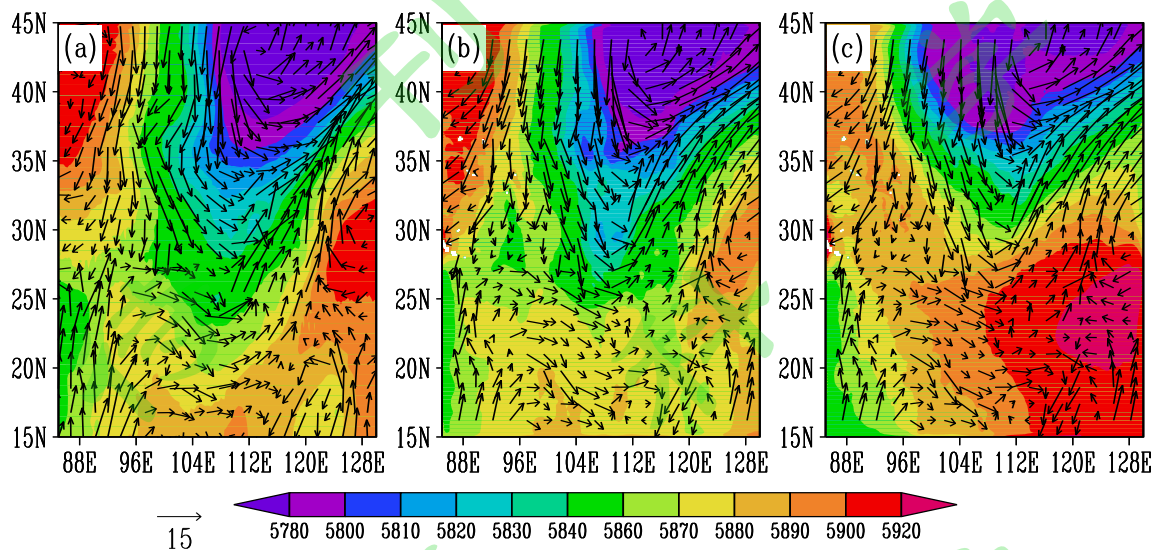


图3 “20150721”过程中，7月23日00时500hPa环流场，阴影为位势高度（单位：gpm），矢量是合成风场（单位：m/s）。其中（a）为ERA5再分析资料；（b）为对照试验结果；（c）为敏感性试验结果

Fig.3 The geopotential height (shaded, unit: gpm) and the wind filed (vector, unit: m/s) on 500 hPa at 00UTC on 23 July in case 20150721. where (a) are ERA5 reanalysis data, (b) the results of the control test, and (c) are the results of the sensitivity test.

3.3 西南涡演变过程

首先，对比对照试验和敏感性试验模拟的西南涡在初生、强烈发展和旺盛三个生命阶段在700hPa的位置和强度异同。图4a显示：初生阶段，西南涡生成于四川盆地西部，强的西南风气流和弱北风在该区域汇合，风场呈现明显的气旋性弯曲，但强度弱（图4a、d）。随后强烈发展阶段，北方的冷空气入侵更加显著，西南涡逐渐发展东移加强。此时，对照试验中西南涡的强度明显强于敏感性试验的结果，且涡度中心位置也更偏南（图4b、e）。旺盛阶段，西南涡继续东移加强，对照试验的低涡强度远远超过敏感性试验，且低涡中心位置略偏南偏西（图4c、f）。从各个不同阶段风场分布可以推断造成西南涡演变过程差异的主要原因是：敏感性试验中入侵的北风偏弱，而副高的增强，使得西南引导气流偏强，最终导致西南涡发展偏弱向东移速偏快。

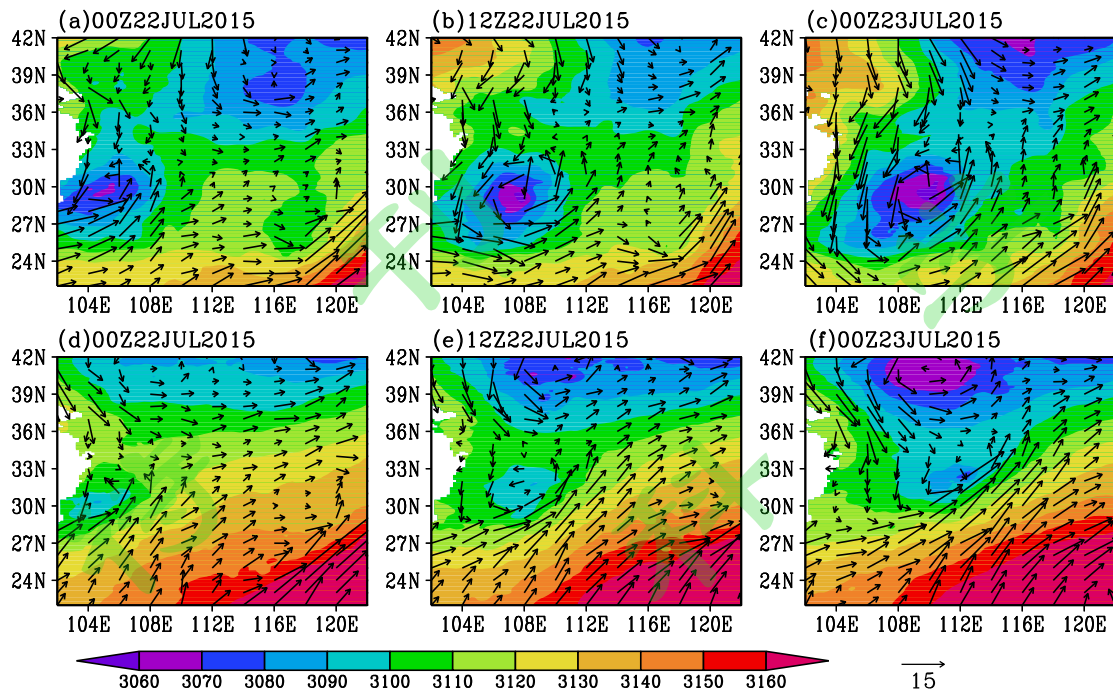


图 4 “20150721”过程中，700hPa 西南涡系统随时间的演变，阴影为位势高度（单位：gpm），矢量是合成风场（单位：m/s）。其中（a）、（b）、（c）为对照试验结果；（d）、（e）、（f）为敏感性试验结果。白色实心圆点是西南涡中心。

Fig. 4 The evolution in the geopotential height (shaded, unit: gpm) and the wind filed (vector, unit: m/s) on 700 hPa in case 20150721. The white circle show the central of SWV. where (a), (b), (c) the results of the control test, and (d), (e), (f) are the results of the sensitivity test.

“20150721”过程，21日12时到23日12时时段都有明显的西南涡中尺度系统存在，在整个时段体现为以偏东路径为主的快速东移过程。ERA5再分析资料中，低涡从低涡从103.5°E，30.75°N移动到115°E，31.25°N。对照试验中，低涡从104.2°E，30.9°N移动到113.8°E，31.1°N。敏感性试验中，低涡从104.2°E，31.5°N移动到115.2°E，33.2°N。22日00时-22日18时段，ERA5再分析资料 and 对照试验的西南涡移动方向都为东略偏南，而敏感性试验的西南涡则是东略偏北，造成敏感性试验的整体路径较对照试验偏北约2个纬度，而22日00时-06时和22日18时-23日00时这两个时段，敏感性试验模拟的低涡移动速度比对照试验显著偏快，造成西南涡整体移动距离更偏东（图5）。由于移动路径的差异直接导致了模拟的降水分布不同（图2），可见西南涡的移动路径决定着降水的分布，因此，正确模拟西南涡的位置是准确预报低涡降水落区的关键因素。

“20150721”过程，对照试验初生阶段（21日00时）西南涡中心的位势高

度约为 3086gpm，比敏感性试验和 ERA5 再分析资料低约 10gpm。随着模拟时长的增加，对照试验的西南涡中心位势高度迅速降低，尤其是 21 日 12 时-22 日 06 时这个时段，位势高度从 3086gpm 快速降低到 3051gpm，而同一时段敏感性试验模拟的西南低涡中心位势高度从 3097gpm 下降到 3087gpm，降幅仅为 10gpm，显著偏小，ERA5 再分析资料给出的西南低涡中心位势高度则从 3098gpm 下降到 3074gpm，降幅达 24gpm。此后，模拟的西南涡中心位势高度值继续在此基础上呈现缓慢降低趋势（图 6）。整个“20150721”过程中，对照试验模拟的西南涡强度比 ERA5 再分析资料和敏感性试验都偏大，直接导致其模拟的降水强度也比实况和敏感性试验显著偏强（图 2），这进一步验证了西南涡强度是决定降水强度的直接关键影响因素。

通过对西南涡演变过程的对比发现：两个试验模拟结果在 21 日 18 时-22 日 06 时这个时段演变最为剧烈，因此，下面重点对 22 日 00 时和 06 时两个时次展开对比分析，由此探讨造成西南涡演变过程差异的关键影响因素。

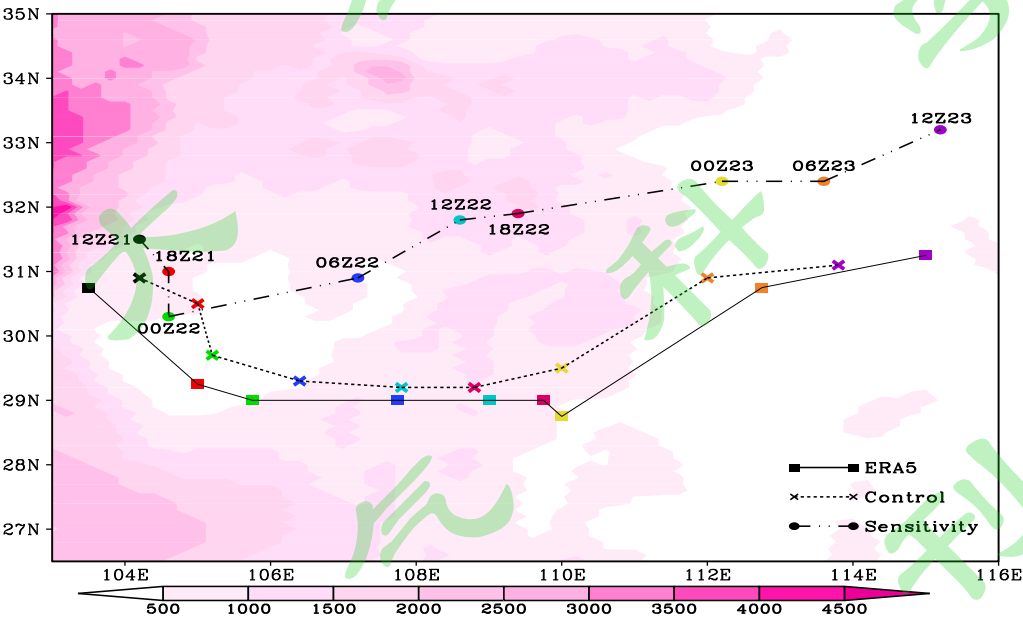


图 5 “20150721”过程中，700hPa 西南涡的移动路径，实心方框-实线是 ERA5 再分析资料，实心三角形-短虚线是对照试验，实心圆-点虚线是敏感性试验，相同的色标代表同一时次，粉色阴影为模式地形。

Fig.5 The movement of the southwest vortex on 700hPa in case 20150721. The solid square-solid line is ERA5 reanalysis data, the solid triangle-short dotted line is the control test, and the solid circle-point dotted line is the sensitivity test. The same color code represents the same time, and the pink shadow is the terrain.

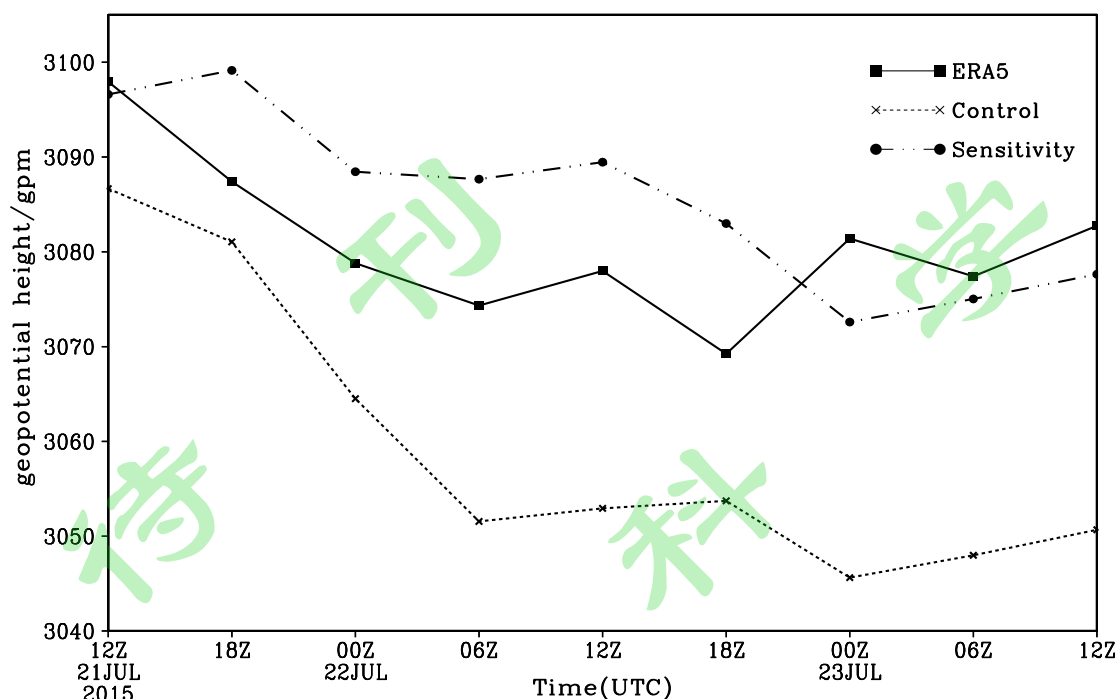


图 6 “20150721” 过程中，700hPa 西南涡中心位势高度值随时间的演变（单位：gpm），十字叉-实线为 ERA5 再分析资料，空心圆-虚线为对照试验结果，实心圆-点点虚线为敏感性试验结果。

Fig.6 The evolution of the center potential height of southwest vortex on 700hPa over time in case 20150721(unit:gpm).The cross-solid line represents ERA5 reanalysis data, the hollow circle-dotted line represents the control test results, and the solid circle-dot dotted line represents the sensitivity test results.

3.4 西南涡演变过程差异的关键影响因素

22 日 00 时，西南涡中心入流的整层水汽主要来源于西南和西北两个方向，且以西南气流为主，一部分水汽在西南涡附近产生明显的气旋性辐合，另一部分从东北方向流出。对照试验和敏感性试验的差异清晰地显示：对照试验中无论西北方向还是东南方向的入流水汽都显著多过敏感性试验的结果（图 7a、c）。22 日 06 时，东南方向输送来的水汽更加充沛，且随着西南涡强度的加深，在其附近产生的气旋性辐合也随之增强，二者的差异与 00 时相似，主要体现在对照试验入流的水汽明显大于敏感性试验，而出流则相反（图 7b、d），该差异直接说明了对照试验中有更多的水汽辐合并垂直向上输送，必然造成更强的潜热反馈作用，从而更有利于西南涡的不断发展。

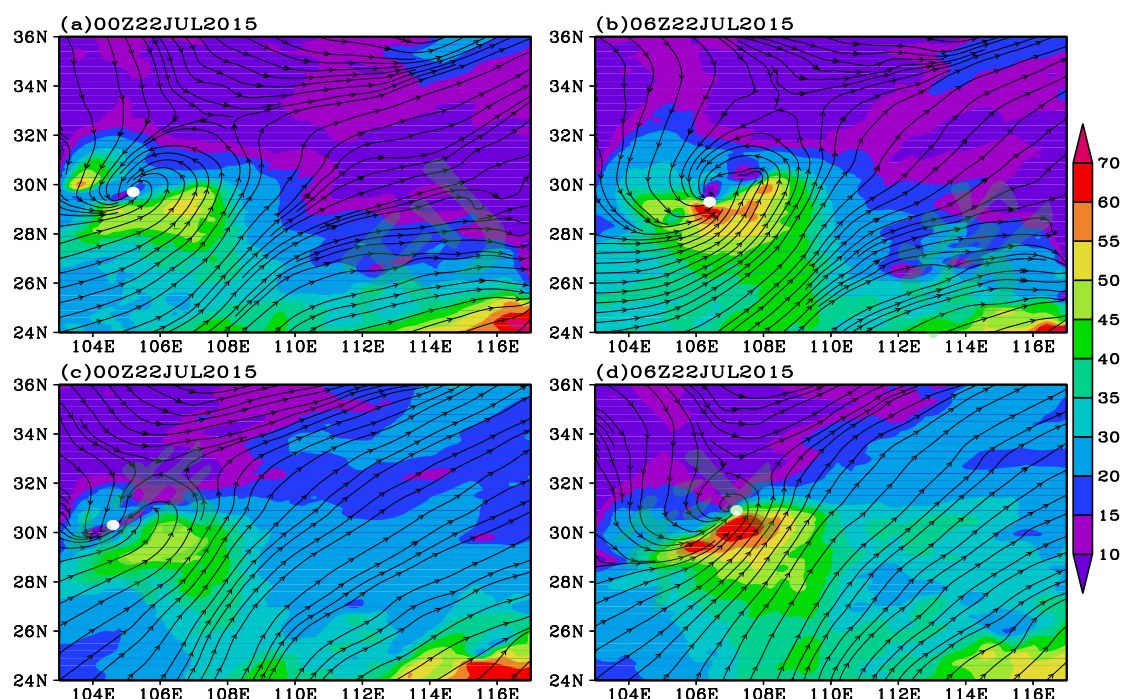


图 7 整层水汽通量（单位： $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ），其中，（a）、（b）为对照试验结果，（c）、（d）为敏感性试验结果，白色圆点是 700hPa 低涡中心位置。

Fig.7 The water vapor flux for the whole layer (unit: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$), where (a), (b) are the results of the control test, and (c), (d) are the results of the sensitivity test. The white dot is the center of the southwest vortex on 700hPa.

22 日 00 时，对照试验西南涡中心的假相当位温明显高于其它区域，尤其是低涡中心低层存在明显的假相当位温高值区，而中间层的假相当位温垂直梯度小，自下而上整层结构表现为：强不稳定层结-中性层结-稳定层结，这样的大气垂直结构非常有利于对流的发生发展（图 8a），敏感性试验的假相当位温垂直分布与对照试验相似，但低层假相当位温的极值区与西南涡中心位置略有偏离（图 8c）。22 日 06 时，对照试验假相当位温继续增高，层结显得更加不稳定（图 8b），敏感性试验的西南涡中心与低层假相当位温的极值区偏离距离有所增大，由此造成其对流发展弱于对照试验（图 8d）。

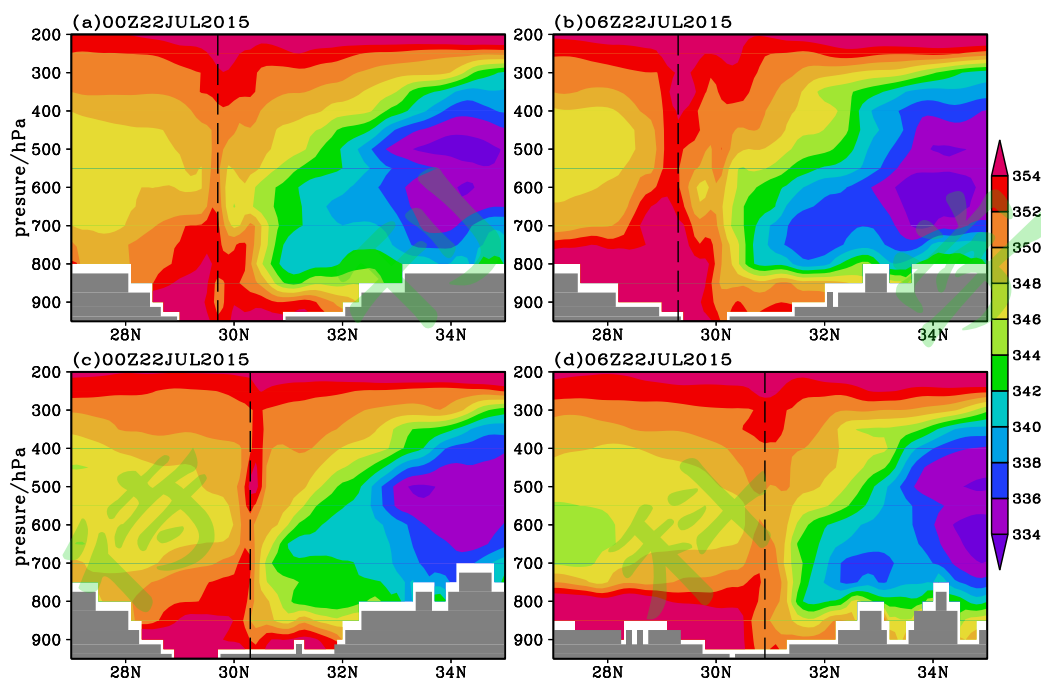


图 8 经过西南涡中心的假相当位温经向剖面（单位：K）。其中（a）、（b）为对照试验结果，（c）、（d）为敏感性试验结果, 竖虚线是 700hPa 西南涡中心位置

Fig.8 The meridional section of pseudo-equivalent potential temperature (unit: K) passing through the center of southwest vortex. Where (a) , (b) are the results of the control test, and (c), (d) are the results of the sensitivity test. The vertical dotted line is the center of the southwest vortex on 700hPa.

22 日 00 时，对照试验中，西南涡中心北侧低层有较强的偏北风气流，南侧低层之上为较强的偏南风气流，东西风气流在低涡中心附近交汇，且偏东风气流从低层入侵现象明显（图 9a）。敏感性试验中，低涡中心北侧低层也有较强的偏北风气流，南侧低层之上为较强的偏南风气流，东西风气流同样在低涡中心附近交汇，低层偏东风气流也有显著的入侵现象，只是这股偏东气流略弱于对照试验（图 9c）。22 日 06 时，对照试验的低层偏北气流基本维持略有减弱，但低涡南侧低层之上的偏南风入流在整层都有显著增强，此地交汇的南北风气流比 22 日 00 时更强大，表现出非常强烈的暖湿气流抬升和气旋性辐合特征（图 9b）。敏感性试验中，低涡中心南侧低层之上偏南风入流非常强，而北侧低层的偏北风入流则明显较弱，东西方向的交汇气流呈现为低层偏东风控制，低层之上则是偏西风为主（图 9d），敏感性试验在 2 个时刻的低层偏北风都弱于对照试验，冷空气的影响被极大地削弱。由此可知：对照试验和敏感性试验都表现出了西南涡北侧低层的偏东偏北气流与南侧低层之上的偏西偏南气流的交汇和气旋式辐合

以及高纬气流低层入侵和低纬气流抬升的基本特征，但具有强度、范围、结构等的明显差异。

22 日 00 时，对照试验中，西南涡中心东侧低层的偏东风气流明显强于中高层的偏西风出流，南北风气流在低涡中心附近交汇，且偏北风气流从低层入侵现象明显（图 10a）。敏感性试验中，西南涡中心东侧低层的偏东风气流和中高层的偏西风出流强度相当，南北风气流同样在低涡中心附近交汇，低层偏北风气流也有显著的入侵现象，只是这股偏北气流略弱于对照试验（图 10c）。22 日 06 时，对照试验的低层偏东气流有所减弱，但低涡西侧的偏西风入流在整层都有显著增强，在此地交汇的南北风气流比 22 日 00 时更强，表现出非常强烈的气旋性辐合特征（图 10b）。敏感性试验中，低涡中心东侧的低层偏东风入流和中高层偏西风出流显著弱于对照试验的结果，其西侧低层也没有对照试验那样出现强的偏西风入流，南北方向的交汇气流（尤其是低层偏北风）同样远远弱于控制试验的结果（图 10d），表现为敏感性试验的整体水汽辐合显著弱于对照试验。

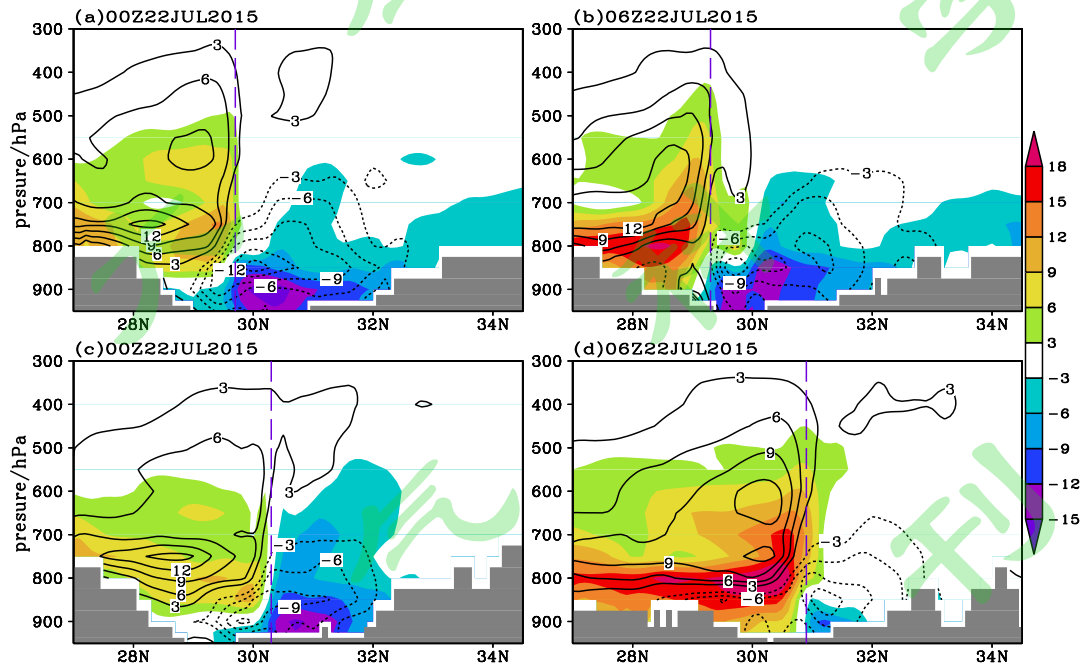


图 9 同图 8 但为水汽通量经向剖面，其中阴影为南北向通量，等值线为东西向的水汽通量（单位： $\text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ）。

Fig.9 Same as Fig.8, but for the meridional section of water vapor flux (unit: $\text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$), the shadow is the north-south flux and the contour line is the east-west water vapor flux

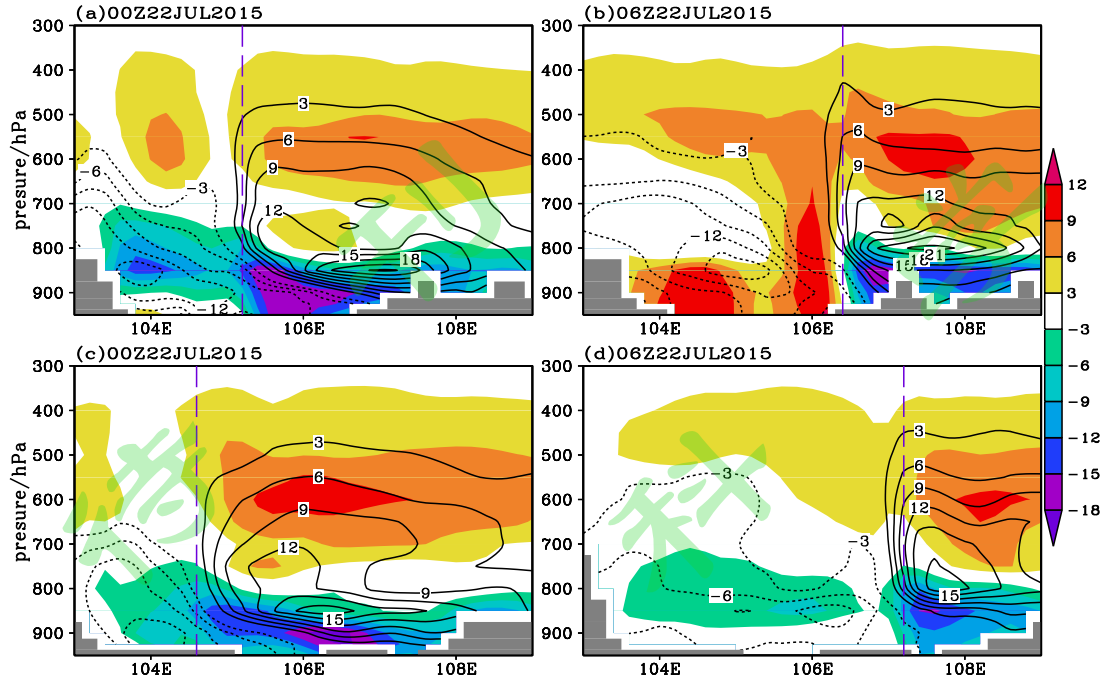


图 10 同图 9 但为纬向剖面，其中阴影为东西向通量，等值线为南北向的水汽通量（单位： $\text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ）。

Fig.10 Same as Fig.9, but for the zonal section of water vapor flux (unit: $\text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$), the shadow is the east-west flux, and the contour line is the south-north water vapor flux.

22 日 00 时，对照试验中，西南涡中心低层辐合和高层辐散特征明显，最大正涡度中心位于 700hPa 高度附近，其值超过 $4 \times 10^{-4} \text{s}^{-1}$ （图 11a）。敏感性试验中，低涡中心低层辐合略强于控制试验，但高层辐散弱于控制试验且辐散大值区位于 500hPa 高度附近，远远低于控制试验，最大正涡度中心位于 750hPa 附近，其值同样超过 $4 \times 10^{-4} \text{s}^{-1}$ ，与控制试验相当（图 11c）。22 日 06 时，对照试验的低层辐合和高层辐散皆显著增强，垂直方向上正涡度的范围增大，强度有所增强，最大正涡度中心位置也相应地变高，低涡呈现明显的发展增强状态（图 11b）。敏感性试验中，低涡低层的辐合强度变化不大，垂直方向上范围有所增加，高层辐散强中心高度抬高，强度明显增强，但与对照试验相比，辐合和辐散强度都明显偏弱。正涡度也同样发展增强，最大正涡度达到 $5 \times 10^{-4} \text{s}^{-1}$ ，位于 750hPa 高度附近（图 11d）。整层的辐合辐散强度对西南涡的发展演变起着非常重要的作用，尤其是高层辐散的作用。

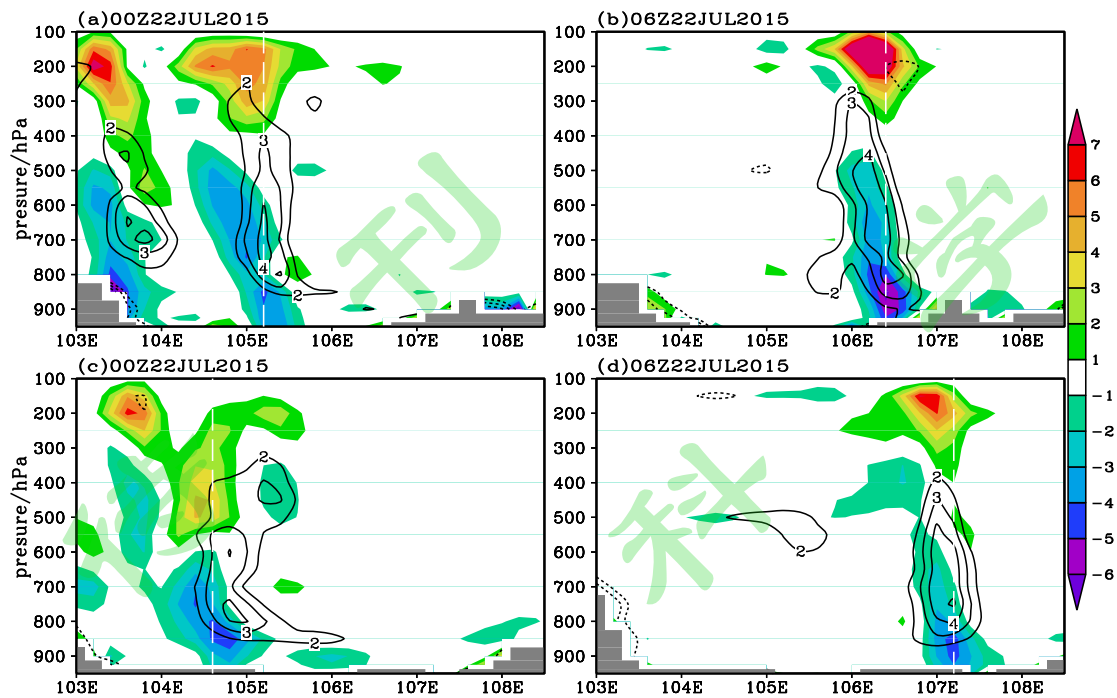


图 11 同图 8 但为涡度和散度（单位： $10^{-4} \cdot s^{-1}$ ）。其中阴影为散度，等值线为涡度。

Fig.11 Same as Fig.8, but for vorticity and divergence (unit: $10^{-4} \cdot s^{-1}$). The shadow is divergence and the contour is vorticity.

4 结论和讨论

本文以“20150721”过程为例，通过增强副高强度的敏感性数值试验和对照数值试验的对比分析，探讨了增强副高强度对伴随副高东退而东移的西南涡发展演变过程的影响，得到以下主要结论：

（1）副高强度增强以后，可长时间的保持其强度，通过系统间的相互作用能对同样是大尺度系统的北方冷涡造成一定的影响，更能对西南涡这样的中小尺度天气系统发展演变的整个过程造成持续影响。西南涡路径和强度的变化直接改变了降水的落区和强度。

（2）副高强度增大以后，随之改变的是环流场：入侵的北风偏弱，西南引导气流偏强，最终导致西南涡发展偏弱移速偏快。

（3）流场的改变直接影响到水汽输送和辐合辐散：低层偏北冷空气的影响被极大地削弱的时候，西南暖湿气流的水汽辐合和垂直向上输送也显著减弱，使得潜热反馈作用随之减弱，因此不利于西南涡的发展。整层的辐合辐散强度对西南涡的发展演变起着非常重要的作用，尤其是高层辐散的作用。

（4）副高强度增大以后，西南涡移速过快，导致了低涡中心与低层热力中心偏

离,使得动力和热力作用不能完全协调发展,由此削弱西南涡的发展强度。

以上结论仅是针对一次伴随副高东退而快速东移的西南涡发展过程的敏感性数值试验研究结果,今后还需通过更多类似的西南涡过程进行深入分析,以进一步认识副高强度变化对东移型西南涡的具体影响。

参考文献 (References)

- [1]陈忠明.1989.环境场作用与西南涡移动的初步分析[J].高原气象,8(4):301-312.Chen Zhongming.1989.The preliminary study if effect of environment flow fields on movement of southwest vortex.Plateau Meteorology 8(4):301-312.
- [2]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 Shouthwest China vortex research[J]. Plateau Meteorology, 23(suppl):1-5. doi:1000-0534(2004)增-0001-05
- [3]丁治英,吕君宁.1991.西南涡动态的合成诊断[J].高原气象,10(2):156-165.Ding Zhiying, Lv Junning.1991.Composite diagnoses of the SW China Vortexes[J]. Plateau Meteorology, 10(2):156-165.
- [4]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. 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, 29(4):356-362. doi:1004-9045(2010)04-0356-07.
- [5]何光碧.2012.西南涡研究综述[J].气象,38(2):155-163.He Guangbi.2012.Review of the Southwest vortex research[J].Meteorological Monthly, 38(2):155-163.
- [6]黄明政,凌艺,梁卫芳,等.2005.多尺度天气系统的共同作用与暴雨成因分析[J].气象,31(6):67-70.Huang Mingzheng, Ling Yi, Liang Weifang, et al.2005.Interaction of different scale weather system of a heavy rainfall event in East China[J]. 31(6):67-70.
- [7]雷丽娟,雷小途.2018.东海台风对四川东部暴雨的影响研究[J].热带气象学报,34(3):314-323.Lei Lijuan, Lei Xiaotu.2018.Influence of typhoon in the east China sea on the Southwest vortex rainstorm in Sichuan province[J]. Journal of Tropical Meteorology, 34(3):314-323. doi:1004-4965(2018)03-0314-10

- [8] 李国平, 陈佳. 2018. 西南涡及其暴雨研究新进展[J]. 暴雨灾害, 37(4):293-302. Li Guoping, Chen Jia. 2018. New progresses in the research of heavy rain vortices formed over the southwest China[J]. *Torrential Rain and Disasters*, 37(4):293-302. Doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2018.04.001
- [9] 李跃清, 徐祥德. 2016. 西南涡研究和观测试验回顾及进展[J]. 气象科技进展, 6(3): 134-140. Li Yueqing, Xu Xiangde. 2016. A Review of the Research and Observing Experiment on Southwest China Vortex[J]. *Advances in Meteorological Science and Technology*, 6(3): 134-140. doi: 10.3969/j.issn.2095-1973.2016.03.018.
- [10] 卢敬华. 1986. 西南低涡概论[M]. 北京: 气象出版社, 63-64 页. Lu Jinghua. 1986. The Introduction of Southwest Vortex[M]. Beijing: China Meteorological Press, 63-64pp
- [11] 卢敬华, 雷小途. 1996. 西南涡移动的初步分析[J]. 成都信息工程学院学报, 11(1):40-49. Lu Jinghua, Lei Xiaotu. 1996. Preliminary analysis of movement of southwest vortex[J]. *Journal of Chengdu Institute of Meteorology*, 11(1):40-49.
- [12] 卢萍, 李跃清, 郑伟鹏, 等. 2014. 影响华南持续性强降水的西南低涡分析和数值模拟[J]. 高原气象, 33(6):1457-1466. Lu Ping, Li Yueqing, Zheng Weipeng, et al. 2014. The Analysis and Numerical Simulation of the Southwest Vortex on Continuous Heavy Rain Processes in Southern China[J]. *Plateau Meteorology*, 33(6):1457-1466. Doi: 10.7522/j.issn.1000-0534.2013.00137.
- [13] Luo Yu, Zhang Lifeng. 2011. A case study of the error growth and predictability of a Meiyu frontal heavy precipitation event. *Acta Meteorologica Sinica*, 25(4), 430-440. doi:10.1007/s13351-011-0404-1.
- [14] 马勋丹, 智协飞, 王静, 等. 2018. 1979-2016 年夏季西南涡活动及其与降水的关系[J]. 大气科学学报, 41(2):198-206. Ma Xudan, Zhi XieFei, Wang Jing, et al. 2018. Analysis of the southwest vortex activities in summer and their relationship with precipitation during the period of 1979-2016[J]. *Transactions of Atmospheric Sciences* 41(2):198-206. Doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20130427001.
- [15] 慕丹, 李跃清. 2017. 西南涡统计特征研究综述[J]. 干旱气象, 35(2): 175-181. Mu Dan, Li Yueqing. 2017. Statistical Characteristics Summary of the Southwest China Vortex [J]. *Journal of Arid Meteorology*, 35(2): 175-181. doi: 10.11755/j.issn.1006-7639(2017)-02-0175

- [16]潘昞, 李建, 宇如聪. 2011. 东移西南涡空间结构的气候学特征[J]. 气候与环境研究, 16(1):60-70. Pan Yang, Li Jian, Yu Rucong. 2011. Climatic characteristics of the spatial structure of the eastward-moving southwest vortex[J]. Climatic and Environmental Research 16(1):60-70. doi:1006-9585(2011)01-0060-11
- [17]沈新勇, 沙莎, 刘靓珂, 等. 2018. 大气中多尺度相互作用的研究进展[J]. 暴雨灾害, 37(3):197-203. Shen Xinyong, Sha Sha, Liu Liangke, et al. 2018. Research progress on atmospheric multiscale interaction[J]. Torrential Rain and Disasters, 37(3):197-203. doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2018.03.001.
- [18]王金虎, 李栋梁, 王颖. 2015. 西南涡活动特征的再分析[J]. 气象科学, 35(2):133-139. Wang Jinhu, Li Dongliang, Wang Ying. 2015. Characteristics reanalysis on southwest vortex. Journal of the Meteorological Sciences 35(2):133-139. doi:10.3969/2014jms.0039.
- [19] Wang Qiwei, Tan Zhemin. 2014. Multi-scale topographic control of southwest vortex formation in Tibetan Plateau region in an idealized simulation[J]. Journal of Geophysical Research: Atmos, 119(20):11543-11561. doi:10.1002/2014JD021898.
- [20] Wang Xinmin, Liu Yong. 2017. Causes of extreme rainfall in May 2013 over Henan Province: the role of the southwest vortex and low-level jet[J]. Theor Appl Climatol, 129:701-709. doi:10.1007/s00704-017-2054-4.
- [21]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(sup):801-809. Yu Rucong. 1994. Real-time Precipitation Forecasting Experiments in the Summer China of 1994 by the LASG-REM[J]. Scientia Atmospherica Sinica, 18(sup):801-809.
- [22]Zhong Rui, Zhong Lin-Hao, Hua Li-Juan, et al. 2014. A Climatology of the Southwest Vortex during 1979-2008[J]. Atmospheric and Oceanic Science Letters, (6):577-583. doi:10.3878/AOSL20140042.