DOI:10.13718/j.cnki.xsxb.2017.09.007

重庆地区“5.30”暴雨过程的数值模拟及诊断分析①

刘　毅[1]，　廖芷仪[1]，　张亚萍[1]，　陈　鹏[1]，　夏吉英[2]

1. 重庆市气象台，重庆 401147；2. 重庆市气象信息与技术保障中心，重庆 401147

摘要：利用 WRF(Weather Research Forecast)中尺度数值模式模拟了 2004 年 5 月 29 日 20 时至 30 日 20 时发生在重庆及周边地区的暴雨过程，使用模式输出的高分辨率资料从动力角度对这次暴雨过程进行了诊断分析. 结果表明：WRF 模式较成功地模拟出了本次大气降水的演变过程，可为暴雨预报和物理诊断提供参考；模拟诊断表明在预报业务中使用螺旋度、非地转湿 Q 矢量和等位温面图的流线分析等可能会提高预报效果.

关　键　词：重庆；暴雨；数值模拟；西南涡；非地转湿 Q 矢量

中图分类号：P426.6　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1000－5471(2017)09－0032－08

重庆暴雨的主要影响系统有高原槽(涡)、西南低涡、切变线、高低空急流、地面冷锋等[1]. 孙继松等[2]认为大量的预报业务人员对强对流天气中的大多数基本概念和基础理论“既熟悉、又陌生”，这是造成强对流分析、预报过程中许多概念和理论被滥用，预报思路不清晰的重要原因. 岳彩军等[3]对螺旋度理论在上述灾害性天气应用中的研究工作进行了全面、系统地归纳、总结，并对未来关于螺旋度的应用研究工作进行了有意义的展望. 2004 年 5 月 29 日 20 时至 30 日 20 时川渝地区受冷空气入侵出现了 1 次灾害性暴雨天气过程，这次过程几乎全部囊括重庆暴雨的主要影响系统，本文采用数值模拟及诊断分析方法对该次暴雨做了详细的分析，以此加深对该类暴雨天气的认识和理解.

1　资料选取和模式介绍

本文使用的资料为重庆地区 34 个区域站的地面实时观测资料、沙坪坝站探空资料和 NCEP/NCAP 每 6 h 1 次的分析资料(水平分辨率 1°X1°).

WRF 模式是云尺度到天气尺度的数值预报模式，不仅能体现较大尺度的环流强迫特征，还能细致描述区域内中小尺度特征. 本文采用 WRF_ARW V3.4.1 对这次暴雨过程进行数值模拟. 模式的初始场和侧边界均取自 NCEP/NCAP 1 日 4 次的分析资料，以 2004 年 5 月 29 日 08 时(北京时，下同)作为初始场，积分 48 h，每 6 h 更新 1 次侧边界，每 1 h 输出 1 次模拟结果. 设计双向反馈 3 层嵌套网格，水平分辨率分别为 27,9,3 km(图 1)；垂直方向为 28 层 η 坐标，模式顶取 50 hPa；模拟中心为 29.9°N，107.7°E. 模式中参数化方案的选取详如表 1 所示.

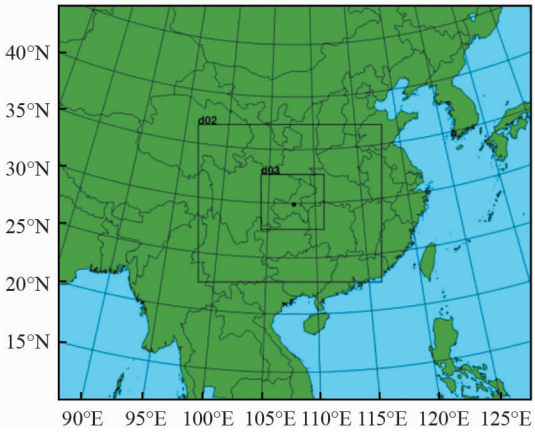


图 1　模拟区域示意图

① 收稿日期：2017－01－03
基金项目：公益性行业(气象)科研专项项目(GYHY201206028)；中国气象局预报员专项项目(CMAYBY2015－061)；重庆市气象局 2017 年业务技术攻关团队项目(YWGGTD-201701).
作者简介：刘　毅(1970－)，男，重庆合川人，高级工程师，硕士，主要从事灾害性天气预报研究.
通信作者：廖芷仪，硕士，工程师.

表 1　试验方案中主要物理过程

物理过程名称	d01	d02	d03
微物理方案	WSM 3	WSM 3	WSM 3
积云对流参数化方案	Kain-Fritsch	Kain-Fritsch	no cumulus
边界层方案	YSU	YSU	YSU
陆面过程方案	thermal diffusion	thermal diffusion	thermal diffusion

2　暴雨过程概述

2004 年 5 月 29 日夜间至 30 日白天，重庆出现 1 次区域暴雨天气过程(图 2)，除西部偏北局部及东北部偏北地区出现小到中雨外，其余地区普降大雨到暴雨，18 站达暴雨，其中丰都达大暴雨.

此次过程造成巫山、荣昌、涪陵、巴南、綦江、丰都、璧山、江津等地受灾，受灾人口达 28.7 万人，其中死亡 3 人，受伤 4 人；农作物受灾 1.2 万 hm^2，成灾 4 022.7 hm^2，绝收 726.7 hm^2；房屋损坏 2 167 间，倒塌 2 097 间；直接经济损失 3 546.1 万元.

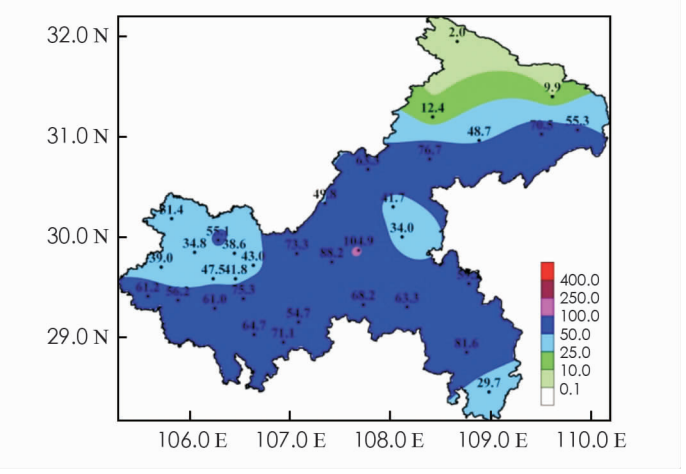


图 2　2004 年 5 月 29 日 20 时—5 月 30 日 20 时区域站雨量分布图(单位：mm)

此次降水过程主要是在高层西风槽、中低层西南低涡、低空急流以及冷空气入侵共同作用下导致的暴雨过程. 5 月 30 日 08 时(图 3)，500 hPa 上空副热带高压位于华南沿岸至西太平洋地区，青藏高原上空也为高压控制，西风槽从东北一直伸展至四川盆地北部，且湖北西部至重庆南部存在一短波槽，西风槽东移过程中，不断引导冷空气南下入侵中低层，为中低层系统发展提供有利条件；700 hPa，甘肃东部有强冷空入侵，与四川盆地暖湿空气交汇，有利于西南低涡的形成和发展，而后低涡切变东移南压，有利于重庆南部降水；850 hPa，西南低涡位于重庆南部至贵州北部，低涡系统南侧广西至湖南西部风速达到 12 m/s，为明显的低空急流，有利于暴雨水汽输送；强降水过程，中低层有明显的冷空气入侵，地面图强冷锋位于长江中游至重庆南部地区.

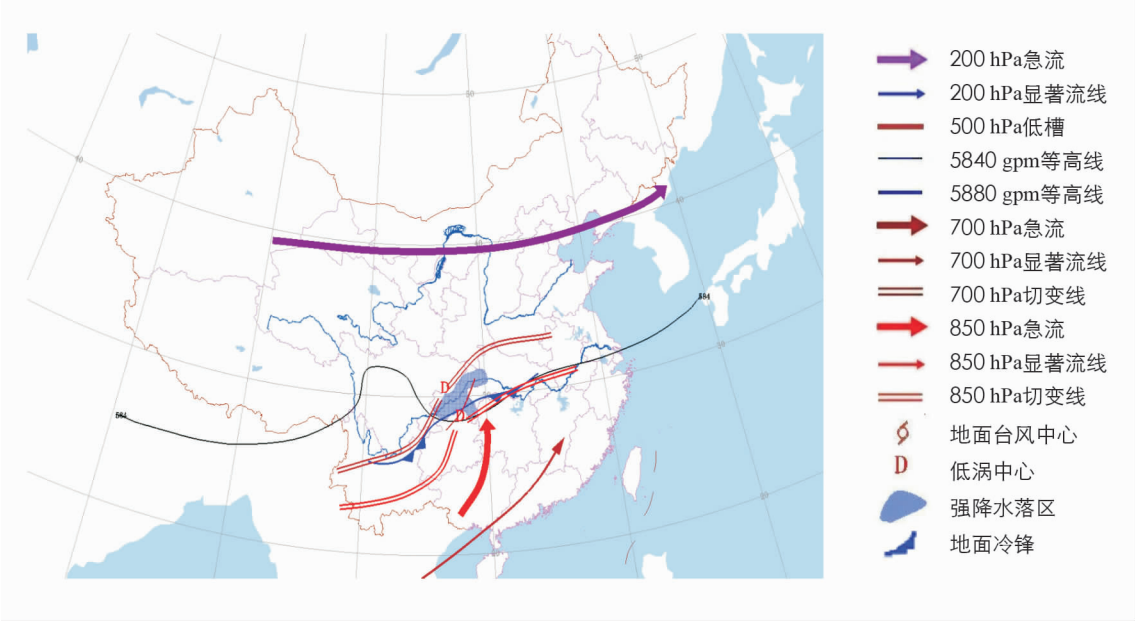


图 3　2004 年 5 月 30 日 08 时综合分析图

3 模拟结果分析

3.1 降水模拟

对比2004年5月29日20时—2004年5月30日20时24 h实况累计降水量(图4a)和数值模拟结果(图4b)可见：降水范围上，实况降水量基本上规律地呈现出自北向南逐渐增加的趋势，WRF模式较为准确地模拟出了这分布特点，雨带的分布形式与实况相似程度高；降水强度上，模式模拟出了重庆中部的大暴雨中心，降水强度的位置把握得比较好. 但同时，模式模拟的暴雨及以上量级降水的范围比实况略大：模式模拟的降水在局部地区强度略大于实况(例如，梁平实际出现大雨而模式则表现为暴雨)；对于超过50 mm的落区，实况没有出现大暴雨中心，而模式模拟结果显示在武隆和彭水地区出现了一个大暴雨中心. 另外，由于观测资料有限，图4a在空间上不足以反映真实的降水分布，自动站于2005年开始逐步建立，在这之前仅用局地1个人工观测站代表1个地区的气象要素分布，对于中小尺度系统产生的降水，其空间分布的不均匀性就无法得到体现. 但整体而言模式已经成功地模拟出了这次暴雨过程，本文的试验方案是可行的. 所以，可用WRF模式输出的高时空分辨率资料对这次暴雨过程进行诊断分析，这是地面观测和探空观测在时间和空间精度上无法比拟的.

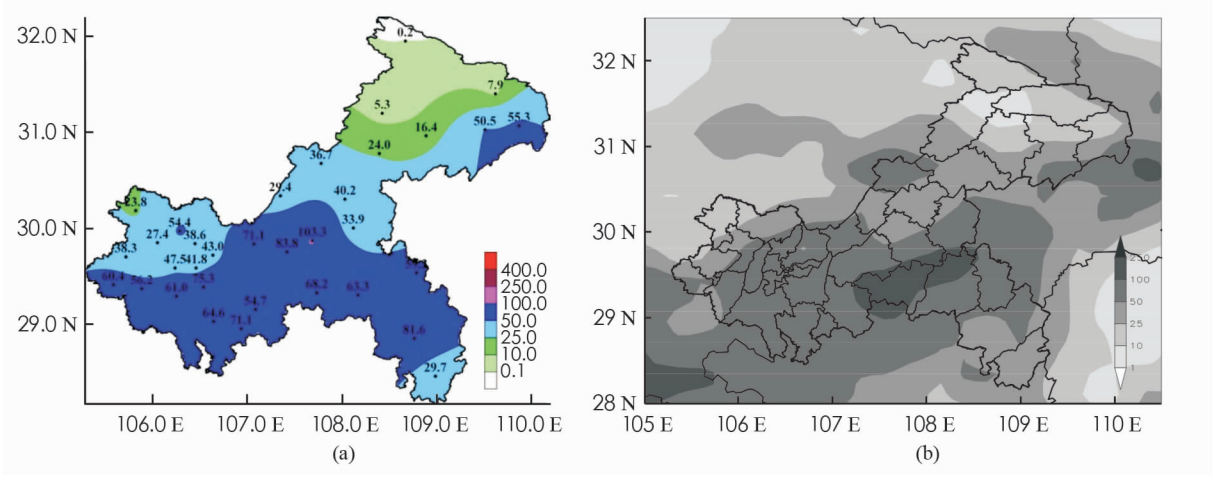


图4 2004年5月29日20时—2004年5月30日20时累计雨量分布图(a：实况；b：模拟结果)(单位：mm)

3.2 影响系统

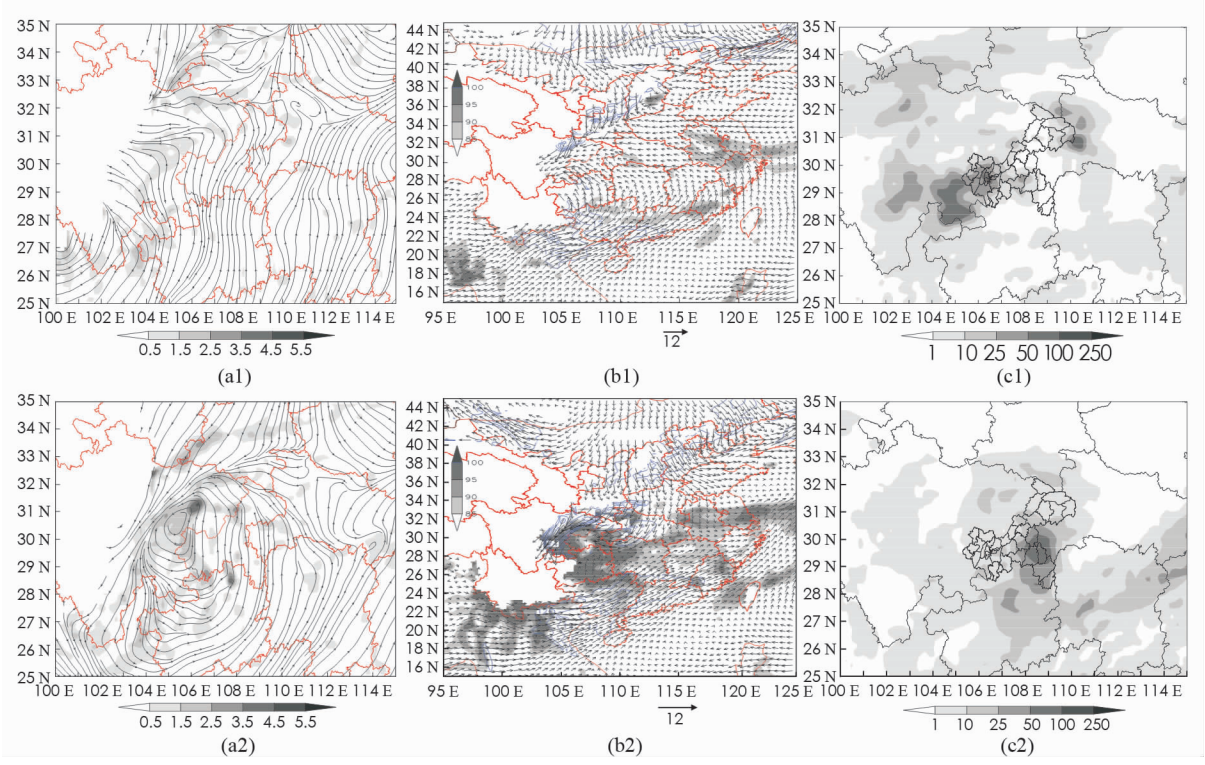
3.2.1 西南低涡和低空急流

图5(a1—a2)为模拟的700 hPa流线与涡度场分布. 2004年5月30日00时，700 hPa上重庆以南的川、黔、滇三省交界处出现1个闭合低压环流，正涡度中心与此相吻合. 850 hPa上表现为倒槽形势，存在1个位势高度为1 400 gpm的低值中心(图略)，气流之间有较强的切变，从而有利于该区域气旋性环流的形成. 在此之前，500 hPa上有一西风槽移过川渝两地，其槽后冷空气对西南低涡的补充是其发展的重要条件之一. 低涡在东移过程中逐渐发展，且上旋至对流层中层，30日08时(图5a2)，低层正涡度中心位于环流中心的东北侧，中层两者重合.

低空急流为暴雨的形成提供有利条件. 通过模拟850 hPa风场发现，有2支性质不同的急流逐渐加强并于29日20时(图5b1)在四川盆地内形成明显的辐合环流. 一支是盆地北部的东北风急流，这支气流在秦岭一带经历爬坡后，干冷空气侵入到盆地中(图6)，部分低空北风气流被迫转向从东面迂回进入四川盆地，峡谷效应使得盆地内的东北气流得到加强；另一支急流于云贵高原南部绕行后，受盆地地形影响，这种气旋式旋转在盆地附近又再次得到加强，对应700 hPa上有西南涡生成. 冷空气进入四川盆地后受云贵高原地形阻挡，与暖空气交汇，极易产生较强的对流性降水，图5c1即表明，在四川东南部有一个暴雨团，重庆西部有1个次暴雨中心. 说明西南低空急流在暴雨出现前建立，暴雨和低涡几乎同时出现. 30日08时850 hPa风场上(图5b2)重庆以东区域有盛行的偏东回流达到低空急流标准. 随后的降水(图5c2)主要集中

在重庆的东部，地形对气流有辐合抬升作用，迎风坡强的地形上升运动造成大量的水汽凝结.

通过前面的分析得知，有 2 支性质完全不同的急流使得 2 种性质不同的气团在川渝地区相遇. 这支低空急流持续时间较长，自 29 日 20 时(图 5b1)加强为西南急流，于 30 日 10 时逐渐减弱消失，此后盆地被冷空气占据. 北方和南方温度差别大，空气中绝对水汽质量分数有明显差别[2]，然而即便是在同一温度的暖气团内，水汽也很难被凝结成直径足够大的水滴而产生降水，如果有冷气团侵入，冷空气的强迫抬升作用造成暖空气“被抬升”会导致水汽相对距离饱和的程度更近.



注：a1、b1 和 c1：29 日 20 时；a2、b2 和 c2：30 日 08 时.

图 5　a：模拟的 700 hPa 流线和正涡度(阴影)(单位：$10^{-5}s^{-1}$)；b：模拟的 850 hPa 风场和风速大于 12 m/s 的低空急流带(等值线)(单位：m/s)；c：未来 6 h 的累计降水量(单位：mm)

雨团的移动路径与西南涡的移动路径基本一致，说明西南涡的移动对降水分布有重要影响. 雨区主要分布在低涡移向的右前方，在低涡的左前方降水较小，而在低涡的后部，则基本上无雨. 当低涡移动时，在低涡右前侧有较强的正的局地涡度变化，因而产生较强的负变压，其变压风促使气流辐合上升，所以在这个部位有较强的降水. 随着冷空气南下，西南急流迅速减弱消失，西南涡填塞，降水量急剧减少，雨带移至华南地区. 由此可判断，暴雨、西南急流和西南低涡几乎是同时减弱的.

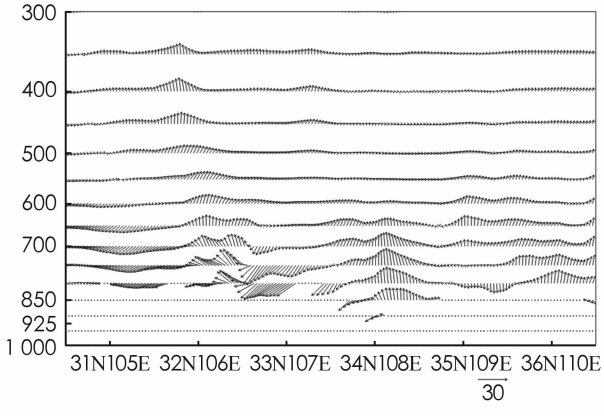


图 6　5 月 29 日 20 时沿 31°N，105°E 至 36°N、110°E 两点之间 VW 风矢量的斜剖图(单位：m/s)

3.2.2　冷锋

本次暴雨过程受冷空气活动影响，在地面图上长江中游地区可清晰地分析 1 条冷锋. 从温度与位温的剖面图(图 7)上可以看到，锋区附近等温线走向由水平转为倾斜[3]. 等位温线在锋区内也表现为倾斜的特征，但是由于倾斜的方向和等温线相反，故锋

区内等位温线的走向和锋区的走向接近平行. 位温场上不仅位温的水平梯度大，垂直梯度也大. 剖面图上分析等位温线的主要目的就是凸显锋区，密集而倾斜的等位温线非常直观地表现出了倾斜的锋区的空间形状.

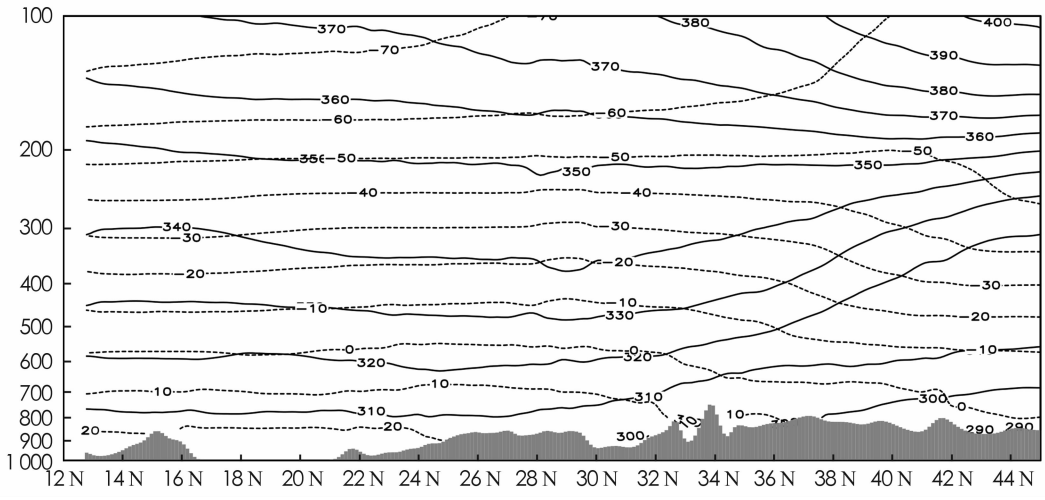


图7 5月30日08时沿107.5°E位温(实线)(单位：k)和温度(虚线)(单位：℃)的纬度—高度剖面图

3.3 等位温面的分析

常规天气图(等压面图)上只能分析水平运动，不能分析垂直运动. 等位温面图的流线分析解决了这一难题，是天气分析的一个重大进步，也是等位温面分析的主要意义所在[3]. 图8是320 K等位温面上气压和流线的分布情况. 气压是用来表示等位温面的高度，反映等位温面的空间形状. 图中最高处的气压为280 hPa，最低处的气压为600 hPa，所以等位温面是一个几乎斜穿整个对流层的斜面. 通过等位温面上的流线分析可判别空气垂直运动的方向. 这是因为在绝热假定下位温不变，空气块沿着等位温面上的流线运动. 如果沿流线方向等位温面高度升高(即气压降低)，则有向上的垂直运动，反之，则为下沉运动. 四川盆地除与云南省交界的局部区域以外，偏南气流一致从600 hPa流向560 hPa(图8)，说明盆地内几乎全部是上升运动. 对照同一时刻700 hPa上西南涡的位置也就不难得出西南涡内的垂直运动是向上的.

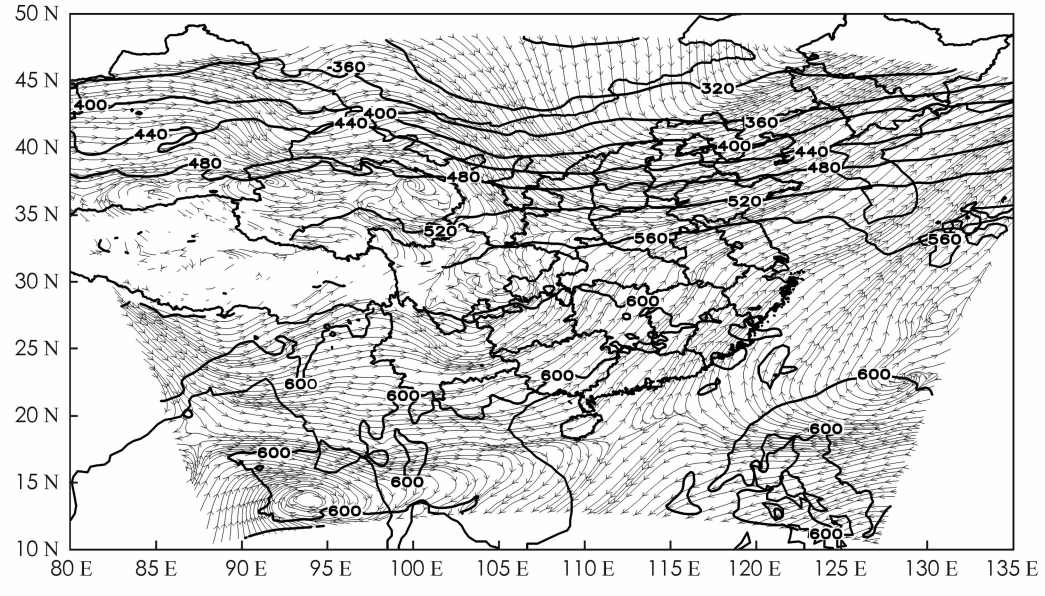


图8 2004年5月30日08时320K等位温面上的等压线(单位：hPa)和流线分布

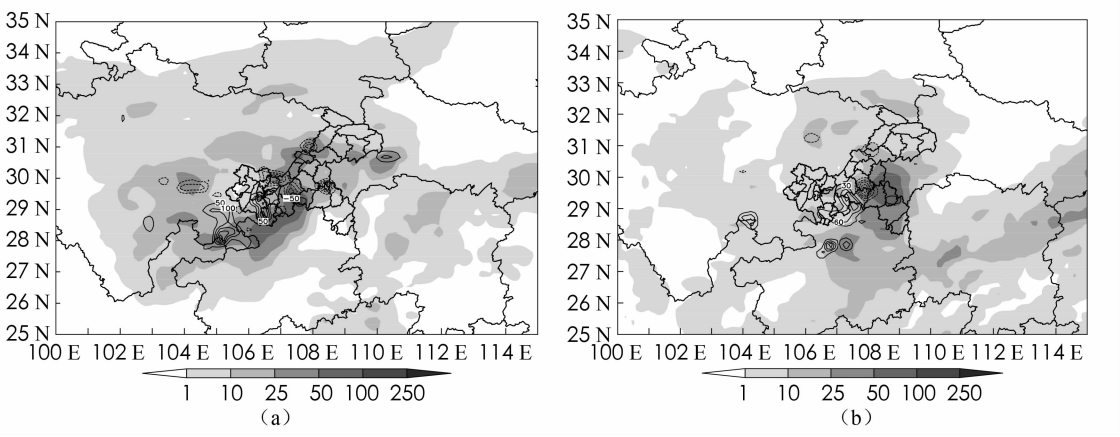
3.4　中尺度物理量与暴雨的关系

3.4.1　螺旋度

螺旋度不仅考虑了大气旋转的特性，同时也考虑水平和垂直方向的输送作用[4-5]. 陆慧娟等[4]指出，水平螺旋度更具指示性. 基于寻找川渝地区暴雨的预报指标，本文分别对水平相对螺旋度和螺旋度的垂直分量作探讨. 水平相对螺旋度的计算采用岳彩军等[6]使用探空资料，根据解析几何性质得到公式(1)；垂直螺旋度用相对涡度的垂直分量和垂直速度的乘积来表示.

$$H_{s-r-D}=\frac{1}{h_{n+1}-h_n}[(u_{n+1}-c_x)(v_n-c_y)-(u_n-c_x)(v_{n+1}-c_y)] \tag{1}$$

对各层次水平相对螺旋度与暴雨的滞后相关关系对比分析发现：400 hPa 和 500 hPa 水平相对螺旋度大值中心的分布与暴雨落区的滞后相关关系明显且稳定[7]. 1 h 的滞后降水量图(图略)表明，暴雨一般发生在局地水平相对螺旋度的大值区里. 6 h 的滞后累计降水量图(图 9)表明，未来一段时间内暴雨易出现在螺旋度大值中心移向的前方.



注：a：30 日 02 时；b：30 日 08 时.

图 9　400 hPa 水平相对螺旋度(单位：10^{-6} m/s^2)与未来 6 h 的累计降水量(单位：mm)

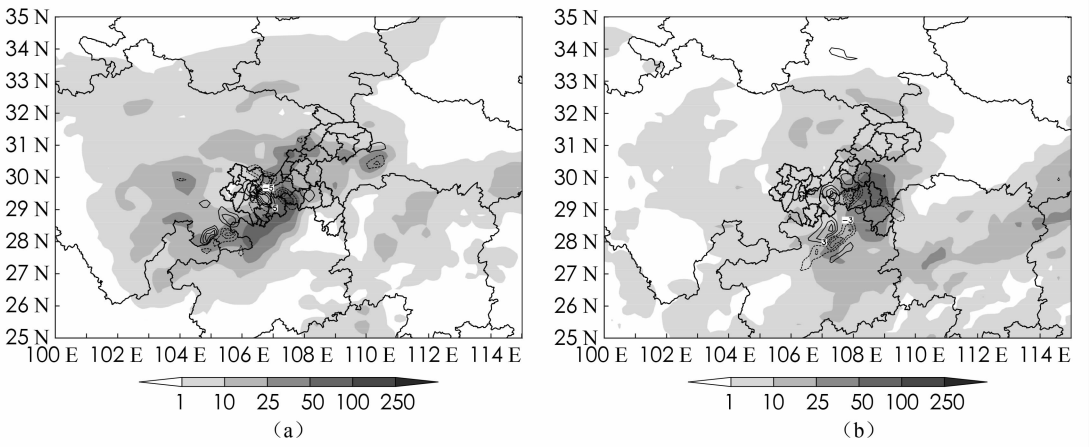
对各层次垂直螺旋度与暴雨的滞后相关关系对比分析发现：700 hPa 上负螺旋度对暴雨落区及强度有很好的预示意义[8]. 在暴雨过程中，700 hPa 负螺旋度分布与雨团演变有很好的对应关系[9]，负螺旋度的形状决定了降水区域的大致形状，大的降水中心与负螺旋度的大值中心相对应，当该雨团分裂时，螺旋度的等值线也会分裂成几个相应的闭合中心. 由上述分析可推断，螺旋度对暴雨是一个相关性较强的参数，较大的螺旋度值可能是暴雨发生发展的机制之一.

3.4.2　非地转湿 Q 矢量

众所周知，强烈的上升运动是形成暴雨的条件之一，但垂直运动至今无法直接测量，一般都是通过诊断分析而得[10]. Q 矢量被称为是目前计算垂直运动较好的工具[11]. 考虑到暴雨过程中有大量的凝结潜热释放，本文应用非地转湿 Q 矢量对这次暴雨过程进行诊断，目的是为了了解非地转湿 Q 矢量在川渝地区暴雨过程中的适用性.

分析各层非地转湿 Q 矢量散度与 1h 后的降水量(图略)发现：从 700 hPa 到 300 hPa 高度上，辐合范围与暴雨区基本相同，辐合强度变化与降水强度的变化也基本一致. 说明暴雨区垂直上升运动能伸展到对流层较高层，垂直上升运动的剧烈程度可以反映降水的强度，再次证明了垂直运动对于天气预报的意义. 分析各层非地转湿 Q 矢量散度与随后 6 h 的累计降水量发现：700 hPa 上非地转湿 Q 矢量辐合强度大小可预示着未来 6h 降水的强弱(图 10)，暴雨区多位于辐合场内及其移向的前沿. 30 日 02 时(图 10a)，最强辐合带在重庆中部地区，川滇黔三省交界处有 1 个次辐合中心，未来 6h 的暴雨落区就位于重庆与贵州省的交界处，在重庆武隆产生 1 个大暴雨中心，这也是辐合最大值中心所在的地方. 30 日 08 时(图 10b)，辐合带往东移，辐合强度较前 1 个时次有所减弱，因而，暴雨区在东移过程中范围就有所减小，强度也随之减弱. 综

上分析，非地转湿Q矢量散度的辐合辐散激发了中尺度系统的发展以及次级环流的形成，是暴雨发生发展的可能机制之一.



注：a：30日02时；b：30日08时.

图10 700 hPa非地转湿Q矢量散度(单位：10^{-13}hPa$^{-1}\cdot$s^{-3})和未来6 h的累计降水量(单位：mm)

4 结论与讨论

本文利用WRF中尺度数值模式模拟了2004年5月29日20时至2004年5月30日20时发生在重庆及周边地区的暴雨过程，使用模式输出的高分辨率资料从动力角度对这次暴雨过程进行了诊断分析. 其结论如下：

1) 本次川渝地区春末夏初的暴雨过程是在大尺度天气系统基础上叠加中小尺度对流系统活动的背景下发生的. 主要的影响系统有西南低涡、低空急流、冷锋等. 西南低空急流在暴雨出现前建立，且暴雨和低涡基本同时出现，而暴雨、西南急流和西南低涡却几乎是同时减弱的.

2) 各层螺旋度的分析表明：中高层水平相对螺旋度大值中心的分布与暴雨落区的滞后相关关系明显且稳定，暴雨一般发生在局地水平相对螺旋度的大值区里，且未来一段时间内暴雨易出现在螺旋度大值中心移向的前方；而低层垂直螺旋度负值对暴雨落区及强度有很好的预示意义.

3) 非地转湿Q矢量分析发现：低层700 hPa非地转湿Q矢量辐合强度与未来6h降水的强弱有较好的对应关系，且非地转湿Q矢量散度的辐合辐散可能会激发中尺度系统的发展以及次级环流的形成，从而引发暴雨.

本文只是简单的对此次过程进行了模拟和动力分析，但对影响系统如何相互作用从而引起暴雨的动力机制还没有完全诠释清楚，同时暴雨的产生与西南低涡究竟如何相互影响也有待下一步工作详细分析.

参考文献：

[1] 刘 德，张亚萍，陈贵川，等. 重庆市天气预报技术手册[M]. 北京：气象出版社，2012.

[2] 孙继松，陶祖钰. 强对流天气分析与预报中的若干基本问题[J]. 气象，2012，38(2)：164－173.

[3] 岳彩军，郭 煜，寿绍文，等. 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，2011，30(2)：107－116.

[4] 陆慧娟，高守亭. 螺旋度及螺旋度方程的讨论[J]. 气象学报，2003，61(6)：684－691.

[5] 寿绍文，励申申，寿亦萱，等. 中尺度大气动力学[M]. 北京：高等教育出版社，2009.

[6] 岳彩军，寿亦萱，寿绍文，等. 我国螺旋度的研究及应用[J]. 高原气象，2006，25(4)：754－761.

[7] 金 琪，王 丽，孟英杰，等. “6.25”湖北省暴雨过程观测及AREM数值模拟资料分析[J]. 气象科学，2008，28(3)：276－282.

[8] DURRAN D R，SNELLMAN L W. The Diagnosis of Synoptic-Scale Vertical Motion in an Operational Environment[J].

Weather and Forecasting，1987，2(1)：17－31.

[9] 郭　渠，李　瑞，孙　佳，等. 重庆市主城区设计暴雨量推算探讨 [J]. 西南大学学报(自然科学版)，2017，39(5)：170－177.

[10] 青吉铭，何　军，李　强. 一次致洪大暴雨对长江两个子流域的影响分析 [J]. 西南师范大学学报(自然科学版)，2014，39(1)：105－113.

[11] 曹晓敏，刘志红，杨昭明，等. 黄土高原中部降雨量时空分异特征研究 [J]. 四川师范大学学报(自然科学版)，2011，34(5)：724－728.

On Numerical Simulation and Diagnosis of Heavy Rainfall Case on 30 May in Chongqing Area

LIU　Yi[1]，　LIAO Zhi-yi[1]，
ZHANG Ya-ping[1]，　CHEN　Peng[1]，　XIA Ji-ying[2]

1. Chongqing Meteorological Observatory，Chongqing 401147，China；

2. Chongqing Meteorological Information and Technology Support Center，Chongqing 401147，China

Abstract：Based on the Weather Research and Forecasting model (WRF)，a heavy rainfall event occurring between 29 and 30 May 2004 in Chongqing and the surrounding areas was simulated. From the perspective of dynamic，the rainstorm was diagnosed based on high resolution data of model output. The results show that the WRF model successfully reproduced the evolution process of the actual precipitation，which could provide reference for local storm forecasting and physical diagnosis. Application of helicity，ageostrophic wet Q vector and streamline in potential temperature surface to forecast operation may improve forecasting precision.

Key words：Chongqing；heavy rainfall；numerical simulation；southwest vortex；ageostrophic wet Q vector

责任编辑　包　颖