

呼延李豆,吴钰,翟丹华,等.重庆一次暴雨过程的数值模拟与初值分析[J].陕西气象,2022(6):15-20.

文章编号:1006-4354(2022)06-0015-06

重庆一次暴雨过程的数值模拟与初值分析

呼延李豆^{1,2}, 吴钰^{1,2}, 翟丹华³, 高松⁴

(1. 重庆市气象科学研究所, 重庆 401147;

2. 重庆市农业气象与卫星遥感工程技术研究中心, 重庆 401147;

3. 重庆市气象台, 重庆 401147; 4. 重庆市长寿区气象局, 重庆 401220)

摘要:针对2017年5月2—3日重庆地区发生的一次区域性暴雨过程,利用重庆市气象局天资·高分辨率预报系统对本次过程进行了数值模拟。分析结果表明,该系统能够较好地模拟出本次区域暴雨过程的大尺度环流形势和降水的落区、强度。使用GDAS和ERA资料分别作为模式的初始场,对比分析二者的模拟结果,可以看出不同的初始资料对这场暴雨的预报结果存在较为显著的影响;对总能量偏差进行功率谱分析得出,对这次暴雨过程而言,整个积分时间内两种初始资料模拟结果的总扰动能量偏差在较大尺度上增长缓慢,而在较小尺度上增长速度很快,且累积降水量的功率谱分析表明最初的主要降水尺度出现在700 km左右,随着积分时间的增长,主要降水尺度向大尺度方向转移。

关键词:暴雨;数值模拟;初值分析;总能量偏差

中图分类号:P458.121.1

文献标识码:A

关于初始条件对天气系统发生发展和数值模拟问题,学者们已经做了大量的工作^[1-7],大家普遍认同的观点是数值天气预报的难点很大程度上是由于天气形势的演变对初始条件的敏感性,初始环境中微小的差异在时间的推移下会逐渐扩散,误差增长的速率也随尺度大小表现不同。天气尺度的可预报性时效是有限的这一观念现在逐渐被认可。Zhang等针对美国东海岸2000年1月的一次暴雪过程分析了初始误差对数值模式预报产生的可能影响^[8-9],其结果在Tan等的工作中得到证实^[10]。在以上工作基础上Zhang等研究了包含对流的理想斜压波试验中模式预报误差的增长情况^[11]。

针对我国的暴雨过程,学者们也分析了在暴雨的发生发展过程中数值模拟的初值问题。Bei和Zhang研究了我国的一次梅雨锋暴雨事件初

始误差相关的可预报性问题^[12]。Zhai和Lin利用模式的扰动能量偏差分析了上海地区发生的一次特大暴雨事件的可预报性时效^[13]。吴亚丽等^[14]通过数值试验分析了模式初始湿度条件差异对暖区对流系统的可预报性造成的影响。徐幼平等^[15]研究了我国南方暴雨中不同资料分析场对暴雨数值预报结构的作用。唐永兰等^[16]针对2008年一次西南涡暴雨过程研究了数值模式中不同初值的问题。这些结果深化了对我国暴雨过程中尺度可预报性的理解和认识,但关于中国暴雨事件数值模拟的初值问题,还有待于更多的个例研究。

重庆地区有着特殊的地理位置和气候条件,每年由于暴雨产生的次生灾害给工农业生产带来巨大经济损失。以往对重庆暴雨的研究主要集中在其产生的动力和热力条件等方面^[17-18],对暴雨

收稿日期:2021-07-14

作者简介:呼延李豆(1990—),女,汉族,陕西延安人,博士,工程师,主要从事数值预报产品的解释应用。

基金项目:重庆市自然科学基金面上项目(cstc2021jcyj-msxmX0698);重庆市技术创新与应用发展专项重点项目(cstc2019jscx-tjsbX0007)

本身的可预报时限问题知之甚少。在实际业务中,暴雨预报的不确定性越来越受到气象工作者的关注和重视,因此研究暴雨本身的不确定性及其物理成因对提升预报能力,降低暴雨对人民生活的不利影响有着重大的科学和现实意义。2017年5月2日到3日重庆地区发生了2017年首次区域性暴雨过程,重庆东北部大部地区、中西部部分地区出现大雨到暴雨,局地大暴雨天气。本次过程中有7个区县达到暴雨量级,其中最大降雨量出现在梁平的聚奎村(197.8 mm)。本文利用重庆市气象局天资·高分辨率预报系统,主要着眼于不同初始资料的差异对2017年5月2日到3日暴雨过程可预报性产生的影响,旨在增强对暴雨过程模拟中初值问题的理解和认识。

1 资料和方法

所用的资料包括全球大气数据同化系统(global data assimilation system, GDAS)再分析资料(6 h 间隔)和欧洲中期天气预报中心(European Centre for medium-range weather forecast)全球再分析资料(6 h 间隔,简称 ERA),其中包括位势高度、相对湿度、垂直速度以及水平风场等信息;降水数据使用的是中国自动站与CMORPH(climate prediction center morphing technique)降水产品融合的逐小时格点资料,水平分辨率为 $0.05^\circ \times 0.05^\circ$ ^[19-20]。为方便叙述,文中出现的时间除特殊说明外,均为世界时。控制试验的初始值和边界值来源于GDAS的 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 全球再分析格点资料^[21],模拟时间从2017年5月2日0000UTC到5月3日0000UTC。

计算模式区域内总能量偏差 D_{TE} 采用的是Zhang等讨论模式误差的时间演变及其可预报性问题时使用的计算公式^[9],即

$$D_{TE} = 1/2 \sum (U'_{ijk2} + V'_{ijk2} + \kappa T'_{ijk2})。 (1)$$

式(1)中, U' 、 V' 和 T' 分别是两个模拟试验的风场、温度场之间的差值; $\kappa = C_p/T_r$, C_p 为定压比热,一般取 $1\ 004.6\text{ m}^2/(\text{s}^2\text{K})$, T_r 为参考温度,一般取 287 K ; i, j, k 分别为 x, y 和 σ 方向的格点数。

2 模式介绍

本文基于重庆市气象局业务运行的天资·高

分辨率数值预报系统(Tianzi high resolution numerical weather prediction system, CQHPS)开展预报试验。该模式由美国俄克拉荷马大学风暴分析和预测中心、重庆市气象局、重庆市气象科学研究所和中国科学院重庆绿色智能技术研究院联合研发。该模式自研发应用以来,在重庆地区发生的多次区域性暴雨天气过程中,较准确地提前预报出了暴雨发生的落区和量级,为业务部门提前发布暴雨预警信息提供了有价值的参考^[22]。该模式采用三层单向嵌套,模式分辨率分别为27、9、3 km,其中D01区域中心位置为 $(34.5^\circ\text{N}, 104.5^\circ\text{E})$,区域分辨率为27 km,格点数为 200×160 ,覆盖了中国及周边地区;D02区域分辨率为9 km,覆盖了黄河、长江流域大部分区域及周边地区,格点数为 288×216 ;D03区域分辨率为3 km,格点数为 480×360 ,覆盖了重庆及周边地区($24.5^\circ\text{N} \sim 34.5^\circ\text{N}, 99^\circ\text{E} \sim 113^\circ\text{E}$;图1)。垂直方向为51层^[23]。模式采用的微物理参数化方案为含有冰、积雪过程等的WSM6方案^[24],边界层方案使用了Mellor-Yamada-Jajic(简称MYJ)方案^[25],积云参数化方案选用了Betts-Miller-Janjic(简称BMJ)方案^[26]。考虑到本次暴雨过程和计算时效性等,采用GDAS和ERA两种资料为初始场作对比分析,模式的起报时间为2017年5月2日0000UTC,预报时间为24 h,下文中均选取的是D03输出的模拟结果。

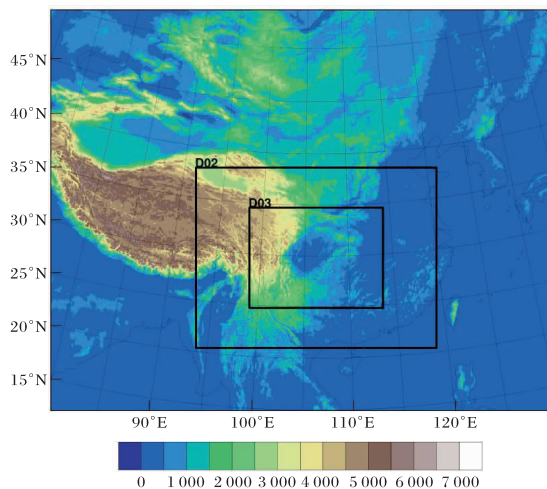


图1 CQHPS模式嵌套区域图(填色为地形高度,单位为m)

3 数值模拟结果

3.1 模拟结果与观测对比

暴雨主要降水时段集中在 2017 年 5 月 2 日白天到 3 日白天。图 2a 为 2017 年 5 月 2 日 0000UTC 到 5 月 3 日 0000UTC 的 24 h 观测累积降雨量,可以看出本次暴雨过程主要降雨中心

在 $30.5^{\circ}\text{N}, 107^{\circ}\text{E}$ 。图 2b 给出了利用 GDAS 资料为初始场, CQHPS 模拟的 24 h 累积降雨量和位置,模拟的主要降水位置在 $30.1^{\circ}\text{N}, 106.5^{\circ}\text{E}$ 。与观测相比,模拟的降水落区稍偏南偏西,降雨量偏小,由于数值模式模拟大气系统会存在一些局限,认为本次过程降水的模拟结果是有参考价值的。

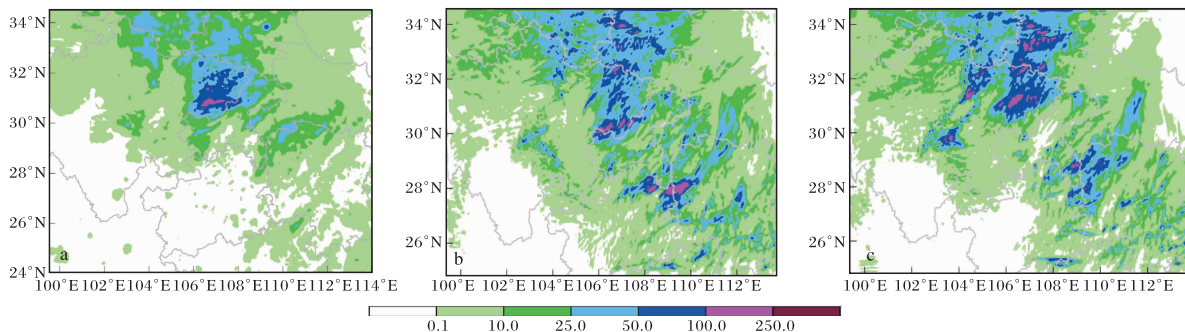


图 2 2017-05-02T0000UTC—03T0000UTC 24 h 累积降雨量(单位为 mm;a 实况观测,b GDAS 资料为初始场的 CQHPS 模拟结果,c ERA 资料为初始场的 CQHPS 模拟结果;审图号为 GS(2019)3082 号)

3.2 天气形势场模拟结果

图 3 为 GDAS 再分析资料在 D01 区域 500 hPa 和 700 hPa 两个等压面上 2 日 1200 UTC 及 3 日 0000 UTC 风场、位势高度场及比湿场(将 GDAS 再分析资料视为实况观测资料)。图 4 则给出了

使用 GDAS 资料的 CQHPS 模拟结果。通过对比分析表明,虽然模式模拟的西南低涡偏弱,与对应的实况观测形势存在一定差异,但是模式结果可以较好地模拟出高原低槽的移动过程及其在四川盆地东部的停滞,而且也较好地模拟出了本次

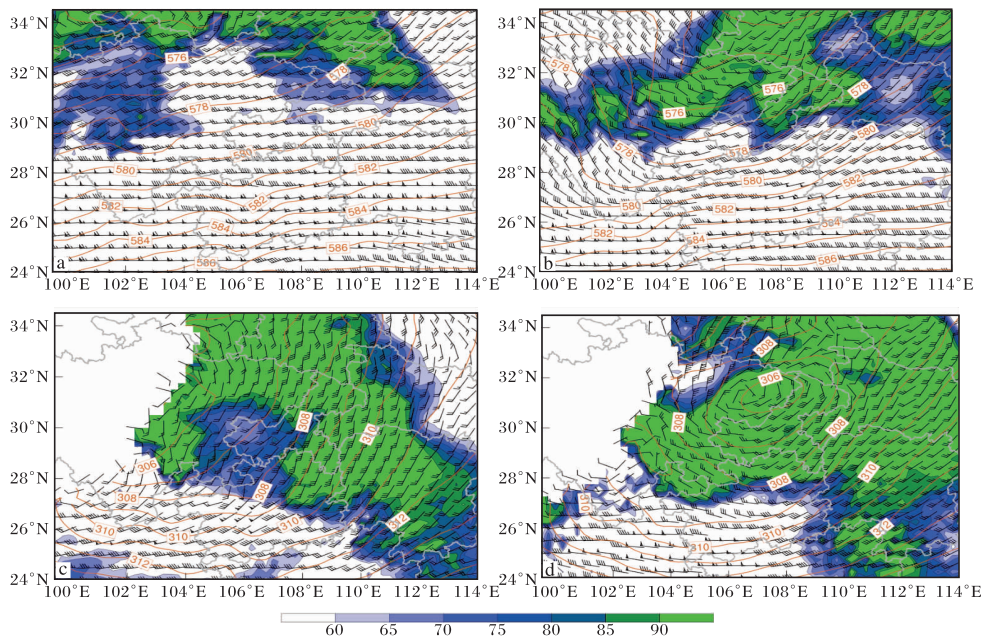


图 3 实际观测的水平风场、比湿($>60\%$)和位势高度场(a 2017-05-02T1200UTC 500 hPa, b 2017-05-03T0000UTC 500 hPa, c 2017-05-02T1200UTC 700 hPa, d 2017-05-03T0000UTC 700 hPa;审图号为 GS(2019)3082 号)

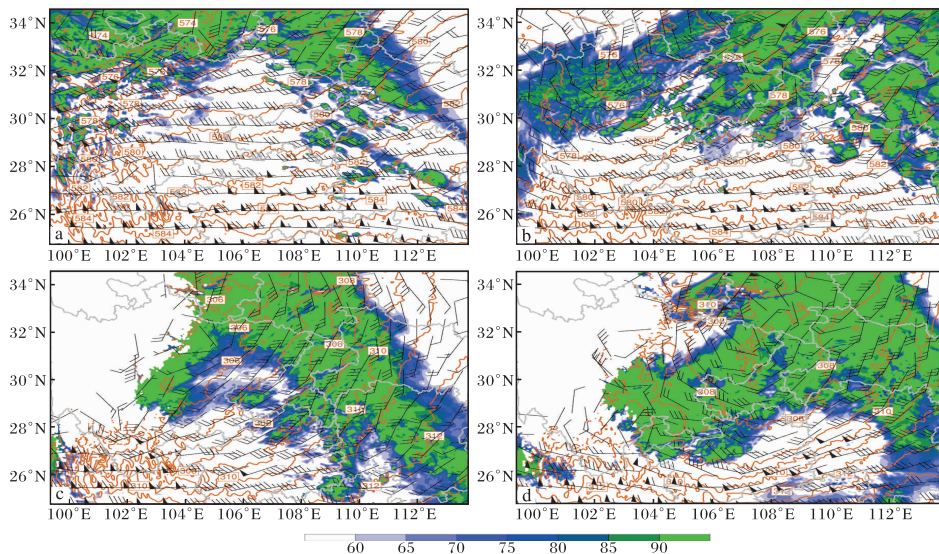


图4 GDAS资料为初始场的CQHPS水平风场、位势高度场和比湿($>60\%$)模拟结果
(a 2017-05-02T1200UTC 500 hPa, b 2017-05-03T0000UTC 500 hPa, c 2017-05-02T1200UTC
700 hPa, d 2017-05-03T0000UTC 700hPa;审图号为GS(2019)3082号)

区域性暴雨发生过程中高低层环流系统的配置情况。

通过比较分析本次暴雨过程模拟的24 h累积降水量和大尺度环流背景场,可以得出利用GDAS资料为初始场的CQHPS模拟结果和实际观测非常接近,模式的模拟比较合理,因此本文将此试验称为控制试验(control试验,下简称CNTL)。下文中的敏感试验以CNTL为背景展开对比研究。

4 初始误差的敏感性试验研究

下面主要利用实际的模式扰动误差,探讨不同扰动误差的演变特征及其对2017年5月2日重庆区域暴雨过程中尺度可预报性的影响。敏感性试验为初始场来自ERA全球格点资料的CQHPS模拟结果(下简称EXP-ERA),模式中其它的设置与CNTL一致。

比较EXP-ERA的24 h累积降水量(图2c)与CNTL的(图2b)可以看到,二者之间存在比较大的差异。图2c的模拟结果中暴雨中心位置在 $31.5^{\circ}\text{N}, 106.5^{\circ}\text{E}$,与图2b模拟的降水大值落区的中心位置相比偏西偏北,且降雨量在重庆地区偏少。二者模拟降水结果差异较大,表明在本次过程的模拟中,模式初始资料的差异对此次过程的降水预报结果产生了比较明显的影响。

通过功率谱分析的方法进一步分析初始资料的差异对此次暴雨过程模拟结果的影响。图5表

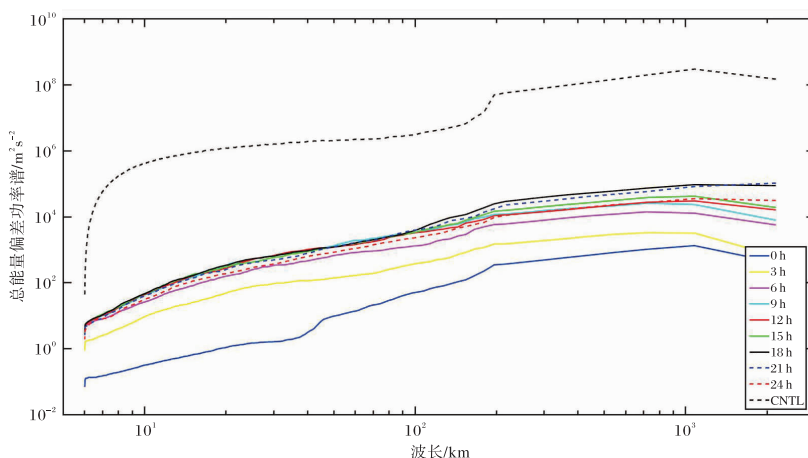
示CNTL与EXP-ERA的 D_{TE} 的时间演变。可以看出,初始时刻CNTL与EXP-ERA之间的 D_{TE} 在积分开始时刻主要出现在200 km以上的较大尺度上。从整个积分时间来看, D_{TE} 在大于200 km的尺度上增加的较为缓慢,而在小于200 km的尺度范围内增加的速度比较快,这和前人的研究结果是一致的^[27-28]。图6表示对CNTL的3 h累积降水量进行功率谱分析,结果反映了积分初始时刻降水尺度主要集中在700 km附近,随着积分时间的推移,降水的主要尺度也逐渐转向大尺度范围。

5 结论与讨论

利用重庆市气象局天资·高分辨率数值预报系统(CQHPS)对2017年5月2—3日重庆区域暴雨过程进行数值模拟,使用GDAS和ERA两种资料分别作为模式初始场,对比模拟结果并进行初值分析,结果如下。

(1)CQHPS能够在很大程度上模拟出本次区域暴雨过程的大尺度天气环流形势以及降水落区和降雨强度,模拟结果与观测比较吻合。

(2)使用不同的初始资料进行模拟会对本次暴雨过程的预报结果产生较为显著的影响;从总能量偏差 D_{TE} 的功率谱分析可见,在大于200 km的尺度上 D_{TE} 增加的较为缓慢,而在小于200 km



黑色虚线表示 CNTL 在 24 h 时的总能量功率谱。

图 5 CNTL 与 EXP-ERA 的总能量偏差(单位为 $\text{m}^2 \text{s}^{-2}$)的功率谱在不同积分时间(3 h 间隔)的分布

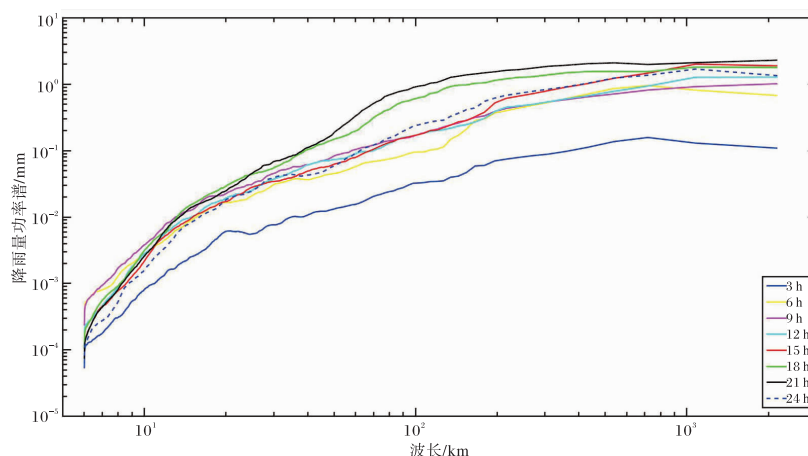


图 6 CNTL 3 h 累积降雨量(单位为 mm)的功率谱在不同积分时间(3 h 间隔)的分布

的尺度范围内增加的速度比较快,且功率谱结果也显示能量随积分时间的推移向着大尺度方向移动。

(3)因为初始资料和数值模式系统本身的自限性,所以结果和分析有一定的局限性,且本文只研究了 1 次区域暴雨个例,有关暴雨可预报性的其他问题有待更多更深入的研究。

参考文献:

- [1] THOMPSON P D. Uncertainty of initial state as a factor in the predictability of large scale atmospheric flow patterns [J]. Tellus, 1957, 9(3): 275-295.
- [2] LORENZ E N. The predictability of hydrodynamic flow [J]. Transactions of the New York Academy of Sciences, 1963, 25(4): 409-433.
- [3] LILLY D K. Numerical simulation studies of two-dimensional turbulence: II. Stability and predictability studies [J]. Geophysical Fluid Dynamics, 1972, 4(1): 1-28.
- [4] ERRICO R M, BAUMHEFNER D P. Predictability experiments using a high-resolution limited-area model [J]. Monthly Weather Review, 1987, 115(2): 488-504.
- [5] VUKICEVIC T, ERRICO R M. The influence of artificial and physical factors upon predictability estimates using a complex limited-area model [J]. Monthly Weather Review, 1990, 118(7): 1460-1482.

- [6] EHRENDORFER M, RAEDER K D. Singular-vector perturbation growth in a primitive equation model with moist physics[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1999, 56(11): 1627-1648.
- [7] LANGLAND R H, SHAPIRO M A, GELARO R. Initial condition sensitivity and error growth in forecasts of the 25 January 2000 East Coast snowstorm[J]. *Monthly Weather Review*, 2002, 130(4): 957-974.
- [8] ZHANG F Q, SNYDER C, ROTUNNO R. Mesoscale predictability of the 'surprise' 24-25 January 2000 snowstorm[J]. *Monthly Weather Review*, 2002, 130(6): 1617-1632.
- [9] ZHANG F Q, SNYDER C, ROTUNNO R. Effects of moist convection on mesoscale predictability [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2003, 60(9): 1173-1185.
- [10] TAN Z, ZHANG F Q, ROTUNNO R, et al. Mesoscale predictability of moist baroclinic waves: Experiments with parameterized convection [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2004, 61(14): 1794-1804.
- [11] ZHANG F Q, BEI N, ROTUNNO R, et al. Mesoscale predictability of moist baroclinic waves: Convection-Permitting Experiments and Multi-stage Error Growth Dynamics[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2007, 64(10): 3579-3594.
- [12] BEI N, ZHANG F Q. Impacts of initial error scale and amplitude on the mesoscale predictability of heavy precipitation along the Mei-yu front of China [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2007, 133(622): 83-99.
- [13] ZHAI D H, LIN Y H. The mesoscale predictability of a heavy precipitation event [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2009, 23(4): 403-412.
- [14] 吴亚丽, 蒙伟光, 陈德辉, 等. 一次华南暖区暴雨过程可预报性的初值影响研究[J]. *气象学报*, 2018, 76(3): 323-342.
- [15] 徐幼平, 姜洪峰, 李鲲, 等. 初值不确定性对暴雨数值预报影响的初步研究[J]. *暴雨灾害*, 2007, 26(1): 21-28.
- [16] 唐永兰, 辜旭赞, 张兵. 不同初值和降水方案对一次西南涡暴雨过程的中尺度模拟与分析[J]. *暴雨灾害*, 2011, 30(4): 335-342.
- [17] 邓承之, 何跃, 庞玥, 等. 2014 年一次渝东北大暴雨天气成因诊断分析[J]. *气象科技*, 2016, 4(2): 290-296.
- [18] 孟晓文, 隆霄, 周国兵, 等. 同化常规资料对重庆地区一次大暴雨过程的数值模拟研究[J]. *暴雨灾害*, 2017, 36(4): 309-318.
- [19] SHEN Y, ZHAO P, PAN Y, et al. A high spatiotemporal gauge-satellite merged precipitation analysis over China[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2014, 119(6): 3063-3075.
- [20] 潘旸, 沈艳, 宇婧婧, 等. 基于贝叶斯融合方法的高分辨率地面-卫星-雷达三源降水融合试验[J]. *气象学报*, 2015, 73(1): 177-186.
- [21] ARAI K. Evaluation of regressive analysis based sea surface temperature estimation accuracy with NCEP/GDAS Data[J]. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 2012, 3(11): 47-52.
- [22] 高松, 方德贤, 陈贵川, 等. 中尺度集合预报对川渝地区“8.16”暴雨过程的分析[J]. *干旱气象*, 2018, 36(4): 652-666.
- [23] 陈良吕, 杜钦, 赵磊. 重庆风暴尺度集合预报系统降水预报性能分析[J]. *高原山地气象研究*, 2018, 38(1): 30-34.
- [24] HONG S Y, LIM J O J. The WRF single-moment 6-class microphysics scheme (WSM6) [J]. *Journal of the Korean Meteorological Society*, 2006, 42: 129-151.
- [25] MELLOR G L, YAMADA T. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems [J]. *Reviews of Geophysics*, 1982, 20(4): 851-875.
- [26] JANIIC Z I. The step-mountain eta coordinate model: Further developments of the convection, viscous sublayer, and turbulence closure schemes [J]. *Monthly Weather Review*, 1994, 112: 927-945.
- [27] 李建平, 丁瑞强, 陈宝花. 大气可预报性研究的回顾与展望[C]//21 世纪初大气科学前沿与展望—第四次全国大气科学前沿学科研讨会论文集. 北京: 气象出版社, 2006: 96-103.
- [28] 翟丹华. 一次暴雨过程的中尺度可预报性研究[D]. 北京: 中国气象科学研究院, 2008.