

WRF 模式不同地形平滑方案对降水预报的影响

陈良吕¹ 夏宇² 庄潇然³

(1 重庆市气象科学研究所, 重庆 401147; 2 北京城市气象研究院, 北京 100089;
3 江苏省气象台, 南京 210008)

摘要 基于重庆市气象局中尺度数值预报业务系统, 开展不同地形平滑方案对模式降水预报的影响研究, 详细对比 WRF 模式中不使用地形平滑方案以及使用 s-d-s 和 1-2-1 两种平滑方案生成的静态地形高度场的差异, 开展不同地形平滑方案批量平行试验并选取典型强降水个例进行对比分析, 结果表明: 不同地形平滑方案生成的静态地形高度场之间有明显的差异, 特别是在地形较为陡峭的高原和山脉等地区, 最大绝对偏差可达 462.56 m; s-d-s 和 1-2-1 两种地形平滑方案主要平滑掉了模式地形中较小尺度的地形特征, 且总体而言 1-2-1 方案的平滑效果比 s-d-s 方案明显。连续一个月批量平行试验降水预报检验结果表明, 进行模式地形平滑对大雨及以上量级降水预报有正面影响, 且使用 1-2-1 平滑方案的预报结果优于使用 s-d-s 平滑方案的预报结果; 降水个例对比分析结果表明: 采用不同的地形平滑方案会造成垂直速度和水汽通量散度预报的明显差异, 这样的明显差异会进而影响强降水预报的落区和强度。

关键词 WRF 模式; 模式地形; 地形平滑; 降水预报

中图分类号: P456 **DOI:** 10.19517/j.1671-6345.20190451 **文献标识码:** A

引言

地形除对降水的气候分布具有显著影响外, 还会通过动力作用、热力作用及其与中小尺度环境场的相互作用等对降水的触发、落区和强度等产生影响, 特别是复杂地形下的强降水过程, 许多学者就地形对降水的影响开展了较多的研究^[1-11]。在数值模式中, 降水是一个重要的预报对象, 其预报精度除了受模式动力框架、模式初值及物理过程参数化方案等诸多因素的影响外, 还与模式地形关系密切。以往较多研究表明^[12-14], 模式地形的处理对于提高数值预报性能至关重要, 模式地形不仅需要尽可能的真实和精确, 还需要达到一定的平滑程度, 从而减少次网格惯性重力波的激发, 保证计算的稳定性及预报精度。

在 WRF 模式中, 当确定了模式区域和分辨率以后, 可选取一定的地形平滑方案对模式静态数据

库中的地形基础数据进行平滑并生成模式积分所需要的静态地形高度场, 选取不同的地形平滑方案得到的地形高度场及由此得到的数值预报结果会存在明显的差异。姚昊等^[15]针对湖北西北部地区的一次暴雨过程, 开展了 WRF 模式中不同地形平滑方案敏感性试验, 结果表明: 降水预报结果对地形平滑方案的选取非常敏感, 地形平滑方案与降水的强度及分布状况有很大的相关性。李俊等^[16]在一次对不同集合预报扰动方法集合离散度演变的异同性研究中, 认为真实地形向模式地形转换这一过程存在着不确定性, 并在一个基于 WRF 模式构建的中尺度集合预报系统中, 通过不同集合成员采用不同地形平滑方案和地形插值方案组合的方式实现模式地形扰动并针对一次强降水个例进行了分析, 结果表明: 当地形扰动同初值扰动(或物理过程扰动)相结合时对集合降水概率预报有一定的改进作用。

上述研究结果表明, WRF 模式中不同模式地

<http://www.qxkj.net.cn> 气象科技

重庆市气象局数值模式创新团队项目(ZHCXTD-202001)、重庆市技术创新与应用发展专项(cstc2019jsex-tjsb0008)和气象预报业务关键技术发展专项(YBGJXM(2018)1A-08)共同资助

作者简介: 陈良吕, 男, 1989 年生, 硕士, 工程师, 主要从事数值模式应用技术研究, Email: chenllv214@163.com

收稿日期: 2019 年 10 月 15 日; 定稿日期: 2020 年 4 月 21 日

形平滑方案对降水预报结果有一定的影响,但前人研究都仅限于一次强降水个例的分析,采用不同模式地形平滑方案得到静态地形高度场的量化差异如何,仍值得进行细致地对比分析。另外,对于一套区域和分辨率都已确定的数值预报系统而言,是否存在着统计意义上的最合适的模式地形平滑方案,尚需要通过批量试验进行探究。因此,本文在前人研究的基础上,基于重庆市气象局的中尺度数值预报业务系统,进一步开展不同地形平滑方案对模式降水预报的影响研究,详细对比 WRF 模式中不同地形平滑方案对生成的静态地形高度场的差异,并开展不同地形平滑方案批量平行试验并选取典型强降水个例进行对比分析,在此基础上探究地形平滑方案影响降水预报的可能原因并明确是否存在统计意义上最优的地形平滑方案,为提高数值模式降水预报性能提供科学参考。

1 模式和方法

1.1 模式系统简介

本文基于重庆市气象局业务运行的中尺度数值预报系统^[17]开展相关试验,该系统基于 WRF-ARWv3.3.1 建立,模式区域为 $27\text{ km} \times 9\text{ km} \times 3\text{ km}$ 的三重嵌套区域(图 1),最外层分辨率为 27 km 区域覆盖了绝大部分中国地区及其周边地区,最内层分辨率为 3 km 的区域以重庆为中心,覆盖了重庆及周边地区($24.5^\circ \sim 34.5^\circ\text{N}$, $99^\circ \sim 113^\circ\text{E}$)。模式预报初值和侧边界条件通过 NCEP 业务运行的 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 分辨率的 GFS(Global Forecast System) 分析初值及其预报资料动力降尺度获得,每 3 h 更新一次侧边界条件。物理过程参数化方案采用 Thomson 微物理过程方案^[18]、MYJ 边界层方案^[19]、BMJ 积云对流方案^[19](最内层分辨率为 3 km 的区域不使用积云对流参数化方案)、Noah 陆面过程方案^[20] 以及 RRTMG 长波辐射和短波辐射方案^[21]。该系统每天运行两次(北京时间 08:00 和 20:00),预报时效为 96 h 。

本文只关注分辨率为 3 km 的区域的数值预报结果,所有的统计检验及个例分析都只针对这个区域进行(后文不再赘述),该区域自西向东各种不同特征的地形交错分布,依次是青藏高原东部、川东平原、大巴山山脉(及其南侧同一经度带的巫山山脉和大娄山山脉等)以及长江中下游平原西部等地区,地

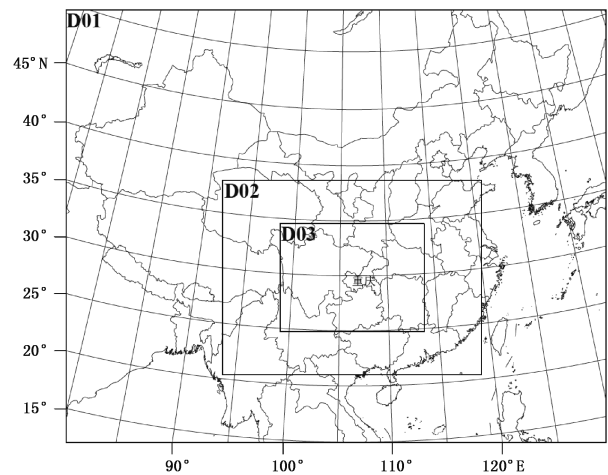


图 1 重庆市气象局中尺度数值预报业务系统三重嵌套区域示意

形分布特征较为复杂,部分区域地形梯度较大。

1.2 WRF 模式地形平滑方案简介

目前 WRF 模式中提供了 3 个地形平滑方案选项: smth-desmth (s-d) 方案、smth-desmth-special (s-d-s) 方案及 1-2-1 方案。s-d-s 方案的地形平滑计算方法与 s-d 方案一致,但如果某个格点的地形高度在地形平滑前为正值,而地形平滑后为负值,则该格点平滑后的地形高度仍然设置为平滑前的地形高度。数值模式中的静态地形高度通常不会出现负值,经试验,采用 s-d 方案和 s-d-s 方案进行地形平滑后得到的地形高度场完全一致。因此,本文主要对 s-d-s 方案和 1-2-1 方案进行对比,经查阅 WRF 模式相关源程序,两种地形平滑方案的具体计算方法如下:

s-d-s 方案中每个格点的静态地形高度依次按照公式(1)~(4)进行东西方向和南北方向的平滑,最终得到平滑后的地形高度 $H_4(i, j)$ 。

$$H_1(i, j) = 0.5H_0(i, j) + 0.25[H_0(i-1, j) + H_0(i+1, j)] \quad (1)$$

$$H_2(i, j) = 0.5H_1(i, j) + 0.25[H_1(i, j-1) + H_1(i, j+1)] \quad (2)$$

$$H_3(i, j) = 1.52H_2(i, j) - 0.26[H_1(i-1, j) + H_1(i+1, j)] \quad (3)$$

$$H_4(i, j) = 1.52H_3(i, j) - 0.26[H_3(i-1, j) + H_3(i+1, j)] \quad (4)$$

1-2-1 方案中每个格点的静态地形高度依次按照公式(5)~(6)进行东西方向和南北方向的平滑,

最终得到平滑后的地形高度 $G_2(i, j)$ 。

$$G_1(i, j) = 0.5G_0(i, j) + 0.25[G_0(i-1, j) + G_0(i+1, j)] \quad (5)$$

$$G_2(i, j) = 0.5G_1(i, j) + 0.25[G_1(i, j-1) + G_1(i, j+1)] \quad (6)$$

1.3 本文的试验方案

本文选取了 2019 年 5 月 1 日 08:00(北京时, 下同)到 2019 年 5 月 31 日 08:00 连续 1 个月进行不同地形平滑方案批量试验, 预报时效为 96 h。3 组试验静态地形高度场均基于 WRF 模式中分辨率为 30 弧秒(中纬度地区大致对应 0.8 km 左右的分辨率)的静态基础地形数据插值获得, 控制试验采用的模式静态地形高度场不进行地形平滑(为便于叙述, 该试验后文中简称为 exp0), 两组对照试验在控制试验的基础上分别采用 s-d-s 方案(为便于叙述, 该试验后文中简称为 exp1)和 1-2-1 方案(为便于叙

述, 该试验后文中简称为 exp2)进行地形平滑。后文将对 3 组试验地形高度差异、批量平行试验的降水预报统计检验结果及降水个例的物理量诊断分析结果, 由此探究 WRF 模式中不同地形平滑方案对降水预报的影响。

2 地形平滑效果对比分析

确定了具体的对比试验方案以后, 分别生成了 exp0、exp1 和 exp2 所对应地形高度场, 在此基础上, 计算了不同方案得到的地形高度场之间的绝对偏差。图 2 给出了 exp0 的地形高度场及不同试验方案的地形高度场之间的绝对偏差分布, 从图中可以看出: exp1 和 exp2 经过平滑后的地形高度场与 exp0 未经过地形平滑的地形高度场之间有明显的差异, 且绝对偏差的分布与实际地形的分布特征非常相似, 在地形较为陡峭的高原和山脉地区偏差较

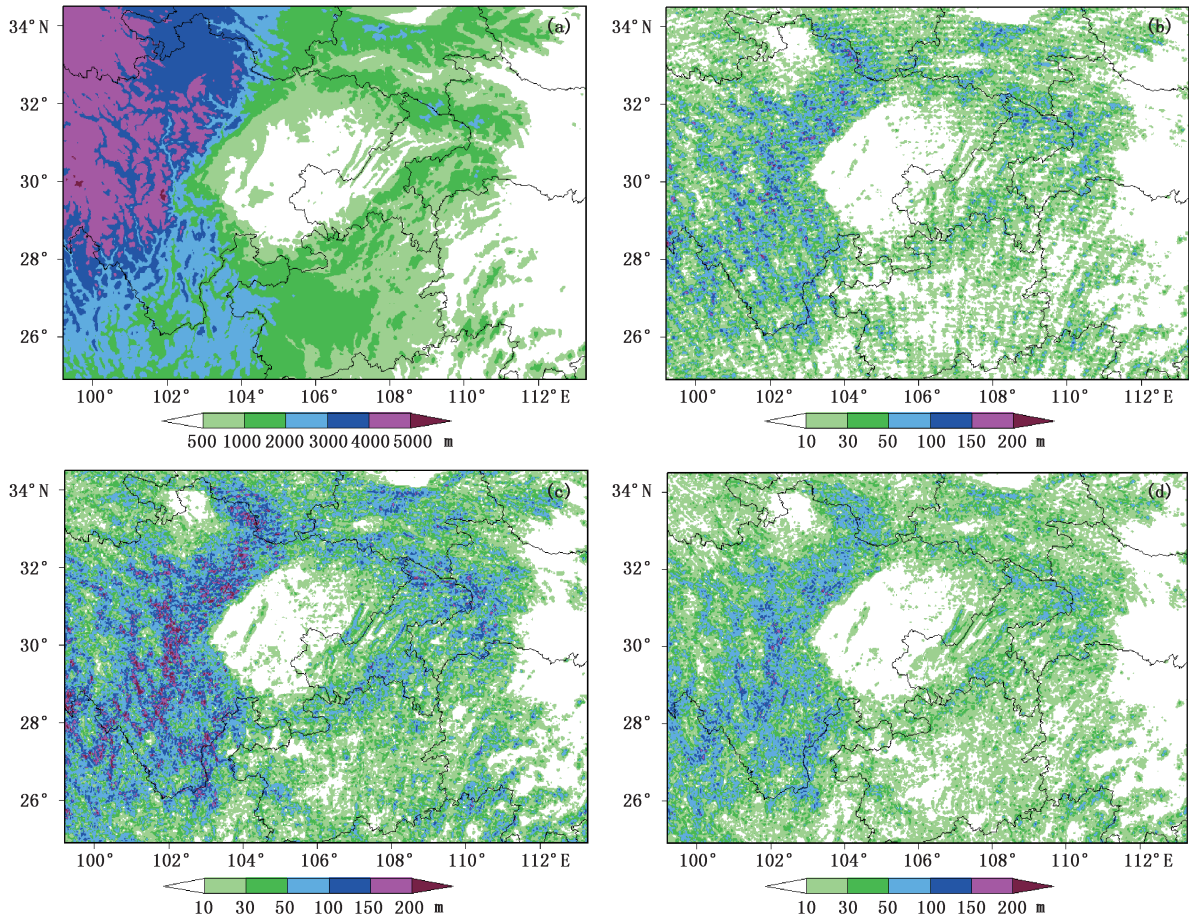


图 2 exp0 的地形高度场及不同试验方案地形高度场之间的绝对偏差分布:
 (a) exp0 的地形高度场, (b) exp1 与 exp0 的地形高度绝对偏差,
 (c) exp2 与 exp0 的地形高度绝对偏差, (d) exp2 与 exp1 的地形高度绝对偏差

大,在地形较为平坦的平原地区偏差较小(普遍在 10 m 以下),绝对偏差的大值中心普遍位于青藏高原东部的大巴山山脉等地形复杂地区;总体而言,exp2 与 exp0 的地形高度绝对偏差的大值中心幅度大于 exp1 与 exp0 的地形高度绝对偏差,且在绝对偏差大值中心最为明显;exp2 与 exp1 的地形高度绝对偏差的分布也与实际地形的分布特征非常相似,偏差的大值中心位于地形复杂地区。

为了了解不同试验方案地形高度场之间的量化差异,本文计算了不同试验方案地形高度场之间的最大绝对偏差和平均绝对偏差。exp1 和 exp2 进行地形平滑后得到的地形高度场相对于 exp0 未进行地形平滑的地形高度场的平均绝对偏差分别为 21.14 m 和 38.23 m,最大绝对偏差分别为 355.22 m 和 462.56 m,总体而言,exp2 相对于 exp1 经过平滑后的地形高度场变化更大。exp1 和 exp2 进行地形平滑后得到的地形高度场之间也有明显的差异,平均绝对偏差为 22.63 m,最大绝对偏差为 269.32 m。

为了进一步了解采用不同模式地形平滑方案进行地形平滑对地形高度场的影响,本文利用快速傅里叶变换^[22]对 3 组试验得到的地形高度场进行了波谱特征分析,图 3 为不同试验方案地形高度场的波谱特征曲线,从图中可以看出:exp1 和 exp2 地形高度场的在 25 km 左右及以下的波长尺度的波谱能量明显低于 exp0,且 exp2 比 exp1 更加显著,其余波长范围 3 组试验的波谱能量无明显差别。由此可见,两种地形平滑方案主要平滑掉了较小尺度的

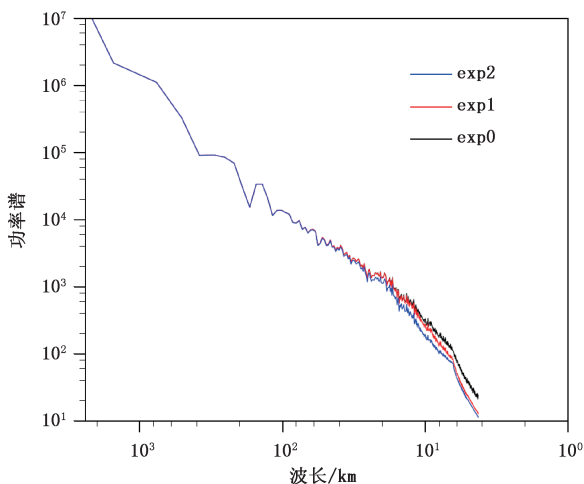


图 3 不同试验方案地形高度场的波谱特征曲线

地形特征,且 1-2-1 方案的平滑程度比 s-d-s 方案更大。

3 试验结果分析

在上述工作的基础上,本文对 3 组试验在 2019 年 5 月 1 日 08:00 至 2019 年 5 月 31 日 08:00 连续一个月的 24 h 累计降水预报结果进行了统计检验,检验的观测资料采用中国气象局气象信息中心开发的 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 分辨率的中国地面自动站与 CMORPH 融合格点降水数据^[23],计算了试验期内 31 天平均的不同降水量级 24 h 累计降水 TS 评分和 Bias 评分以及 3 h 累计降水 TS 评分,并对结果进行了对比分析。在此基础上,选取了 2019 年 5 月 14 日的一次强降水个例进行对比分析,由此探究不同模式地形平滑方案对降水预报的影响。

3.1 批量试验降水检验结果

图 4 是 3 组试验 0~96 h 逐 24 h 累计降水预报不同降水量级的 TS 评分,从图中可以看出:对于 0~24 h 累计降水预报,小雨量级 TS 评分 exp0 略优于 exp1 和 exp2,中雨和大雨量级 TS 评分均是 exp1 最优,其次是 exp2 和 exp0,暴雨和大暴雨量级 TS 评分 exp2 最优,其次是 exp1 和 exp0;对于 24~48 h 累计降水预报,小雨量级 TS 评分 exp1 最优,其次是 exp0 和 exp2,中雨量级 TS 评分 exp2 最优,其次是 exp1 和 exp0,大雨、暴雨和大暴雨量级 TS 评分均是 exp2 最优,其次是 exp1 和 exp0;对于 48~72 h 累计降水预报,小雨和中雨量级的 TS 评分 exp0 略优于 exp1 和 exp2,大雨、暴雨和大暴雨量级 TS 评分均是 exp2 最优,其次是 exp1 和 exp0;对于 72~96 h 累计降水预报,小雨量级 TS 评分 exp2 最优,其次是 exp1 和 exp0,中雨量级 TS 评分 exp1 最优,其次是 exp2 和 exp0,大雨量级 TS 评分 exp2 最优,其次是 exp1 和 exp0,暴雨和大暴雨量级 TS 评分 exp2 最优,其次是 exp0 和 exp1。总体而言,exp1 和 exp2 相对于 exp0 对大雨及以上量级降水具有更高的预报技巧,除个别预报时效外,exp2 的预报技巧明显优于 exp1。由此说明,进行模式地形平滑对大雨及以上量级降水预报有正面影响,且 1-2-1 平滑方案优于 s-d-s 平滑方案。

图 5 是 3 组试验 0~96 h 逐 24 h 累计降水预报不同降水量级的 Bias 评分,从图中可以看出:通常认为 Bias 评分的理想值为 1,3 组试验各个降水量

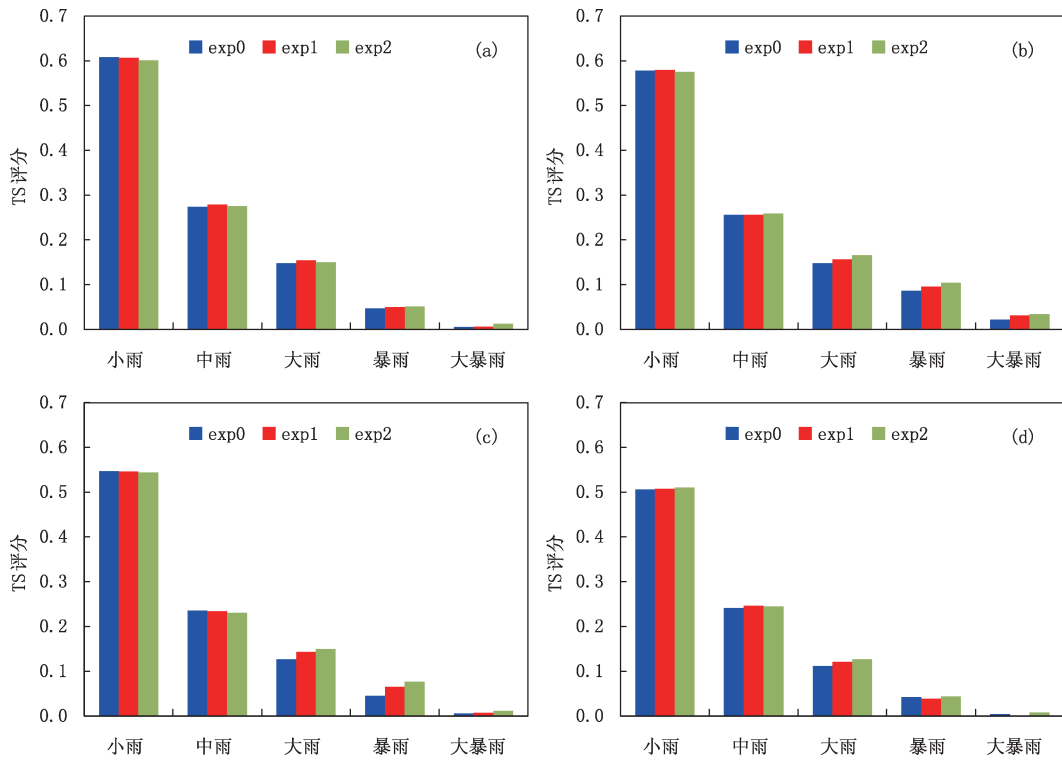


图 4 3 组试验 0~96 h 逐 24 h 累计降水预报 TS 评分：
(a)0~24 h, (b)24~48 h, (b)48~72 h, (d)72~96 h

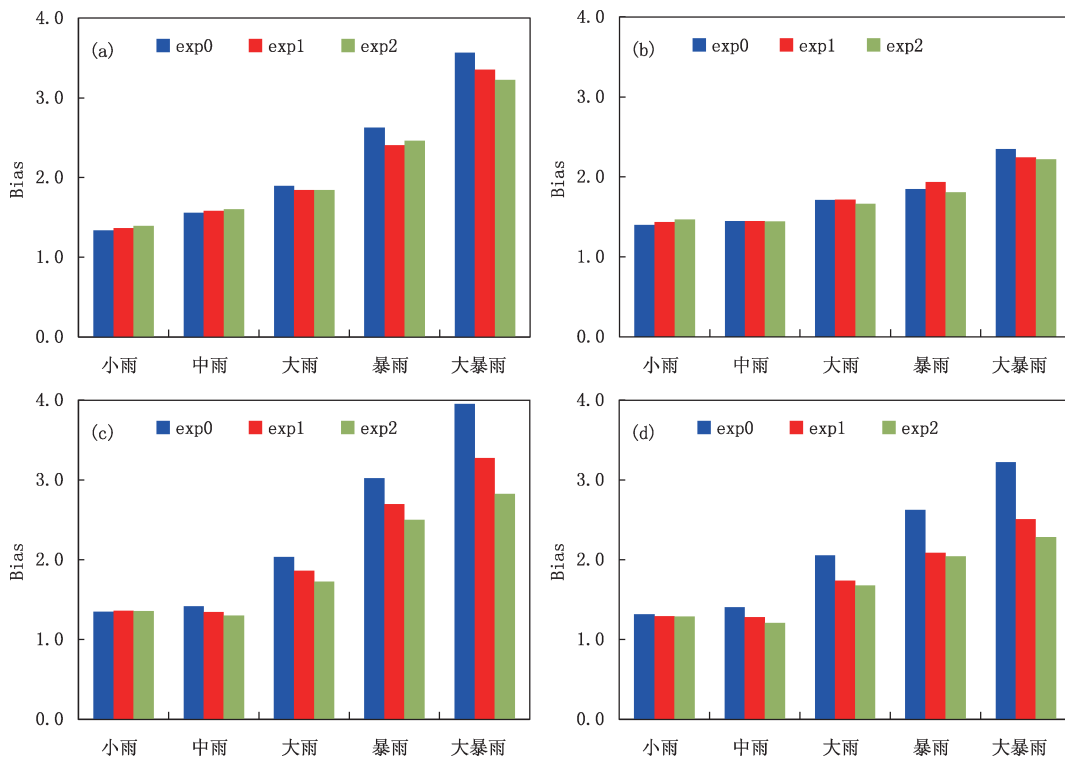


图 5 3 组试验 0~96 h 逐 24 h 累计降水预报 Bias 评分：
(a)0~24 h, (b)24~48 h, (b)48~72 h, (d)72~96 h

级各个预报时效的的 Bias 评分均明显大于 1 且随着降水量级的增大而增大,说明 3 组试验的降水预报均存在较为明显的空报现象;对于 0~24 h 累计降水预报,小雨和中雨量级的 Bias 评分 exp0 略优于 exp1 和 exp2,大雨量级的 Bias 评分 exp1 和 exp2 基本相当且明显优于 exp0,暴雨量级的 Bias 评分 exp1 和 exp2 明显优于 exp0 且 exp1 略优于 exp2,大暴雨量级的 Bias 评分 exp2 最优,其次是 exp1 和 exp0;对于 24~48 h 累计降水预报,小雨量级的 Bias 评分 exp0 略优于 exp1 和 exp2,中雨量级的 Bias 评分 3 组试验则基本相当,大雨量级的 Bias 评分 exp2 最优且 exp0 和 exp1 基本相当,暴雨量级的 Bias 评分 exp2 最优,其次是 exp0 和 exp1,大暴雨量级的 Bias 评分 exp2 最优,其次是 exp1 和 exp0;对于 48~72 h 累计降水预报,小雨量级的 Bias 评分 exp0 略优于 exp1 和 exp2。其余量级 3 组试验的 Bias 评分表现特征一致,exp2 和 exp1 明显优于 exp0,且这种优势随着降水量级的增大而越发明显,exp2 的评分明显优于 exp1。对于 72~96 h 累计降水预报,各个降水量级 3 组试验的 Bias 评分

表现特征一致,exp2 和 exp1 明显优于 exp0,且这种优势随着降水量级的增大而越发明显,exp2 的评分明显优于 exp1。总体而言:exp1 和 exp2 相对于 exp0 而言,大雨及以上量级降水的 Bias 评分明显减小,由此说明,进行模式地形平滑能够在一定程度上减少数值模式对大雨及以上量级降水的空报;对于大雨及以上量级降水,除个别预报时效外 exp2 的 Bias 评分明显优于 exp1,说明 1-2-1 平滑方案优于 s-d-s 平滑方案。

图 6 是 3 组试验 0~96 h 不同降水量级逐 3 h 累计降水预报的 TS 评分,从图中可以看出:对于小雨量级降水预报,3 组试验的 TS 评分基本相当;对于中雨量级降水预报,exp1 和 exp2 的 TS 评分在绝大多数预报时效均略优于 exp0;对于大雨和暴雨量级降水预报,exp1 和 exp2 的 TS 评分总体而言略优于 exp0,exp2 总体而言相对于 exp1 表现出了一定的优势。总体而言,exp1 和 exp2 相对于 exp0 而言对大雨及以上量级降水具有更高的预报技巧,大多数预报时效 exp2 的预报技巧优于 exp1,这与 3 组试验 24 h 累计降水对比检验结论基本一致。

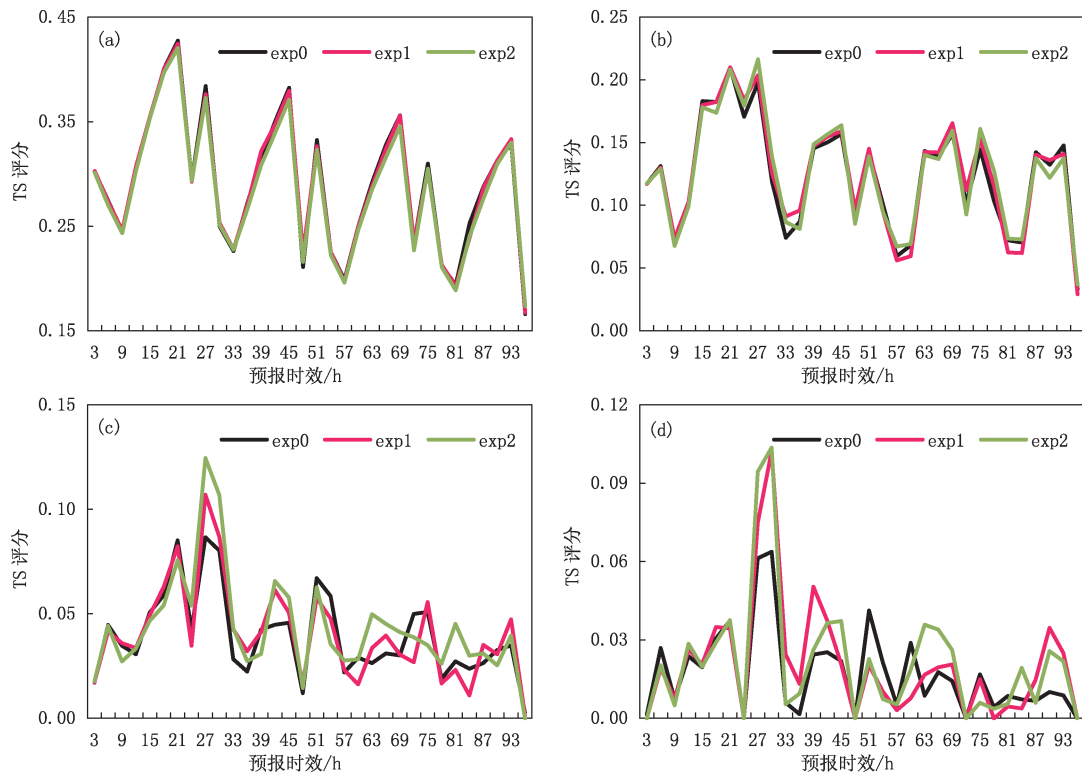


图 6 3 组试验 0~96 h 不同降水量级逐 3 h 累计降水预报 TS 评分:

(a)小雨,(b)中雨,(c)大雨,(d)暴雨

3.2 降水个例分析

上述检验结果表明 exp1 和 exp2 相对于 exp0 而言对大雨及以上量级降水具有更高的预报技巧,且对暴雨和大暴雨量级降水预报的优势最为明显。为了对不同模式地形平滑方案影响强降水预报的可能原因进行一些初步的探讨,本文在前面工作的基础上,选取了2019年5月14日的一次强降水个例进行分析。考虑到强水汽输送和强上升运动是暴雨及以上量级强降水发生发展的重要因素,对比分析了三组试验预报结果的垂直上升速度、水汽通量及水汽通量散度等诊断量之间的差异及其与强降水落区和强度的对应关系,由此探究不同模式地形平滑方案对强降水预报的影响。

图7给出了2019年5月14日20:00至5月15日08:00的12h累计降水实况及3组试验2019年5月14日08:00起报的12~24h累计降水预报,从图中可以看出:实况的大雨及以上量级降水主要出现在重庆东南部和湖南西北部地区,降水雨带总体呈东西向分布;3组试验的小雨和中雨量级的降水预报差别不大,但大雨及以上量级的降水预报有明显差异,特别是暴雨和大暴雨量级的降水预报的落区和分布;总体而言,exp1和exp2相对于exp0而言,暴雨和大暴雨量级降水的空报现象明显减少,如重庆中部地区虚假的暴雨雨带、湖南中部地区的虚假的大暴雨雨带以及湖南西北部偏北地区虚假的大暴雨雨带。

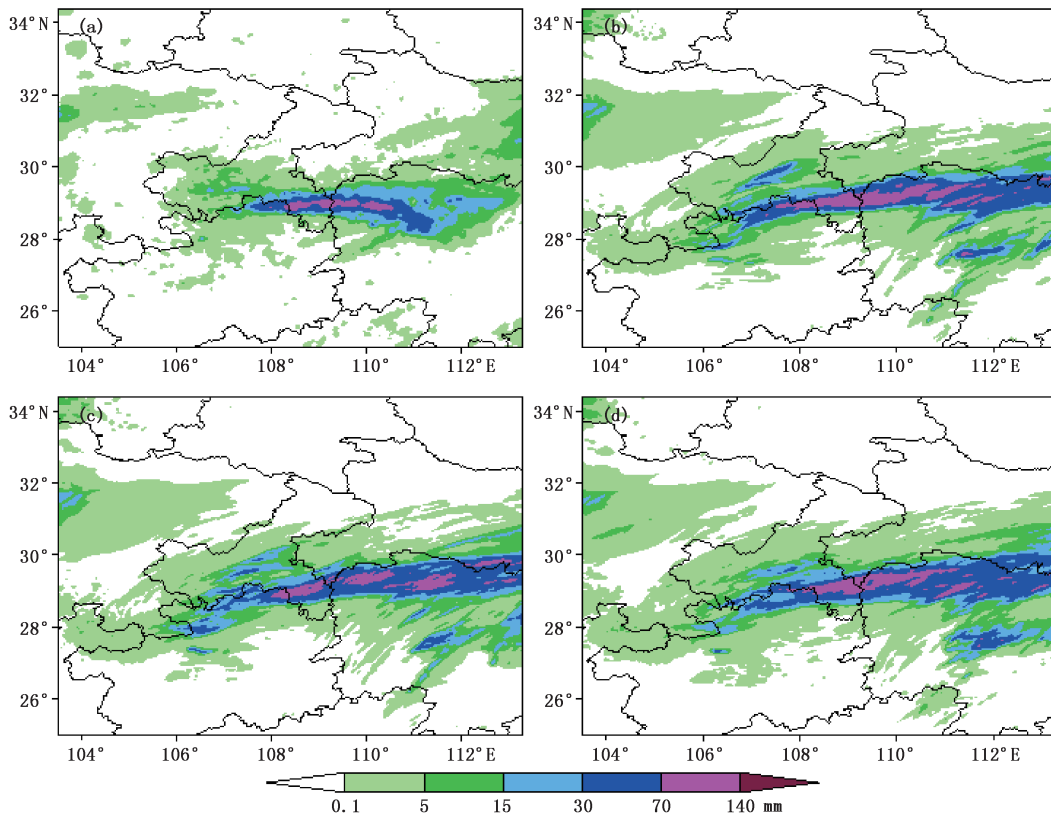


图7 2019年5月14日20:00至5月15日08:00的12h累计降水实况及3组试验
2019年5月14日08:00起报的12~24h累计降水预报:
(a)实况,(b)exp0,(c)exp1,(d)exp2

图8为exp0的2019年5月14日08:00起报的12~24h累计降水预报场(图8a)及3组试验12~24h累计降水预报场之间绝对偏差分布(图8b、图8c和图8d),从图中可以看出:3组试验之间的12~24h累计降水预报场绝对偏差分布与实况中

暴雨和大暴雨量级降水雨带有较好的对应,即较为明显的差异及绝对偏差的大值中心主要出现在暴雨及以上量级降水的雨带的位置,最大绝对偏差可达50mm以上,而3组试验实况为大雨及以下降水量级地区的绝对偏差普遍在5mm以内。

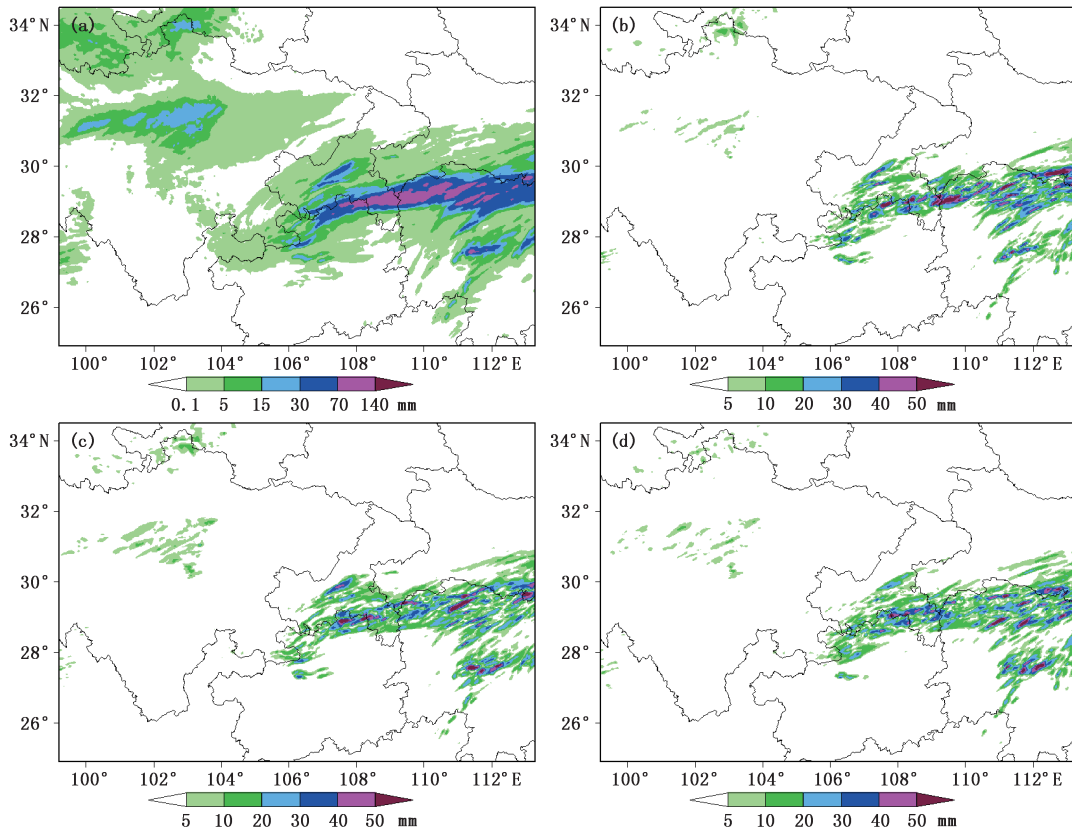


图 8 exp0 的 2019 年 5 月 14 日 08:00 起报的 12~24 h 累计降水预报及 3 组试验 12~24 h 累计降水预报场之间绝对偏差分布:(a)exp0 的 12~24 h 累计降水预报,(b)exp1 与 exp0 的 12~24 h 累计降水预报场绝对偏差,(c)exp2 与 exp0 的 12~24 h 累计降水预报场绝对偏差,(d)exp2 与 exp1 的 12~24 h 累计降水预报场绝对偏差)

图 9 为 exp0 的 2019 年 5 月 14 日 08:00 起报的 18 h 850 hPa 垂直速度预报场(图 9a)及 3 组试验 18 h 垂直速度预报场之间绝对偏差分布(图 9b、图 9c 和图 9d),从图中可以看出:3 组试验之间的 18 h 垂直速度预报绝对偏差分布与实际降水雨带有较好的对应,即较为明显的差异及绝对偏差的大值中心主要出现在暴雨及以上量级降水的雨带的位置,最大绝对偏差可达 $6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上。由此可见,采用不同的地形平滑方案会造成垂直速度预报的明显差异,这样的明显差异会进而影响强降水预报的落区和强度。

图 10 为 3 组试验 2019 年 5 月 14 日 08:00 起报的 18 h 850 hPa 水汽通量(箭头)和水汽通量散度(填色)预报,从图中可以看出:3 组试验之间的 18 h 水汽通量预报差别不大,水汽通量大值中心与实际降水雨带有较好的对应,且 3 组试验水汽通量散度大值中心的位置和强度都有明显的差异。由此可见,采用不同的地形平滑方案会造成水汽通量散度

预报的明显差异,这样的明显差异会进而影响强降水预报的落区和强度。

综合强降水个例分析的结果,总体而言:使用不同地形平滑方案(s-d-s 方案、1-2-1 方案以及不使用地形平滑方案)得到的垂直速度和水汽通量散度预报的大值中心位置和强度有明显的差异,这样的明显差异会影响降水区水汽的辐合上升运动并进而影响强降水预报的落区和强度。结合前文的分析和探讨,对于不同地形平滑方案得到的垂直速度和水汽通量散度这两个诊断量的预报结果出现明显差异的原因,可以从两方面加以追溯和定性分析。首先,使用不同地形平滑方案,生成的静态地形高度场之间有明显的差异,在地形较为复杂的高原和山脉等地区最大绝对偏差可达 400 m 以上,地形的差异会通过动力作用、热力作用及其与环境场的相互作用影响局地气象要素的分布,并通过西风带大气环流进而影响下游地区气象要素的预报,但这些仅是定性的分析,如何通过定量的诊断分析结果来加以验

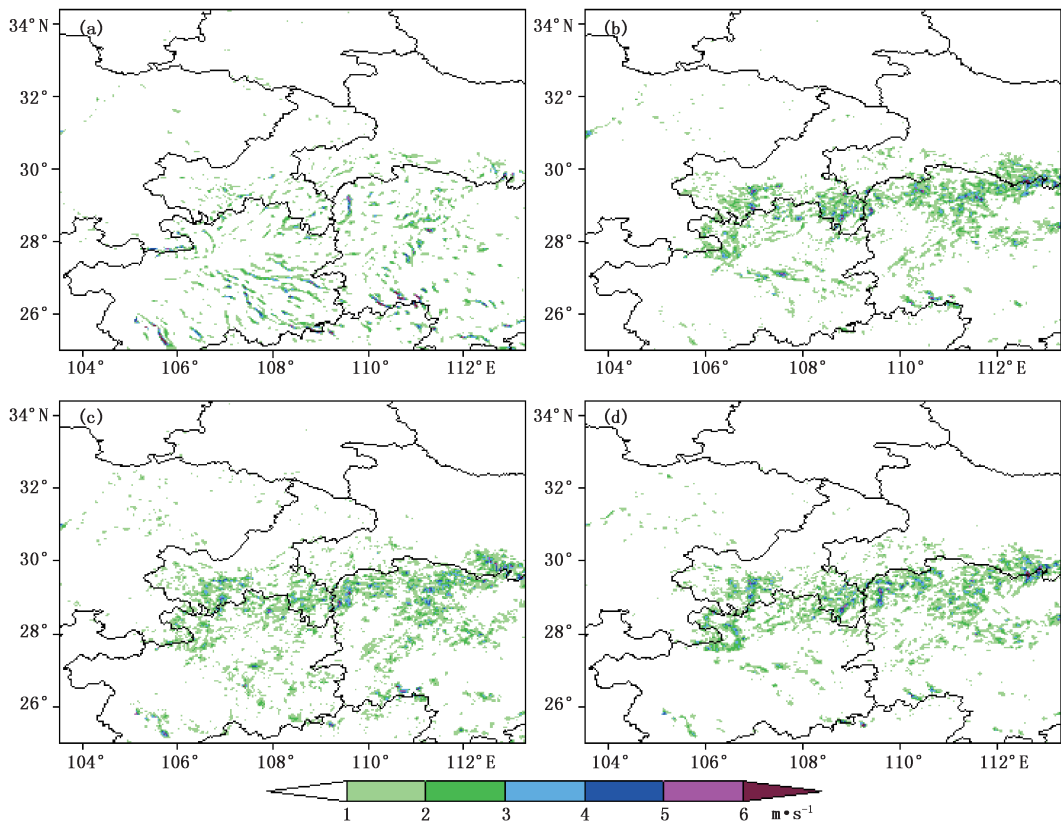


图 9 exp0 2019 年 5 月 14 日 08:00 起报的 18 h 850 hPa 垂直速度预报场及 3 组试验 18 h 垂直速度预报场之间绝对偏差分布:(a)exp0 的 18 h 垂直速度预报场,(b)exp1 与 exp0 的 18 h 垂直速度预报场绝对偏差,(c)exp2 与 exp0 的 18 h 垂直速度预报场绝对偏差,(d)exp2 与 exp1 的 18 h 垂直速度预报场绝对偏差

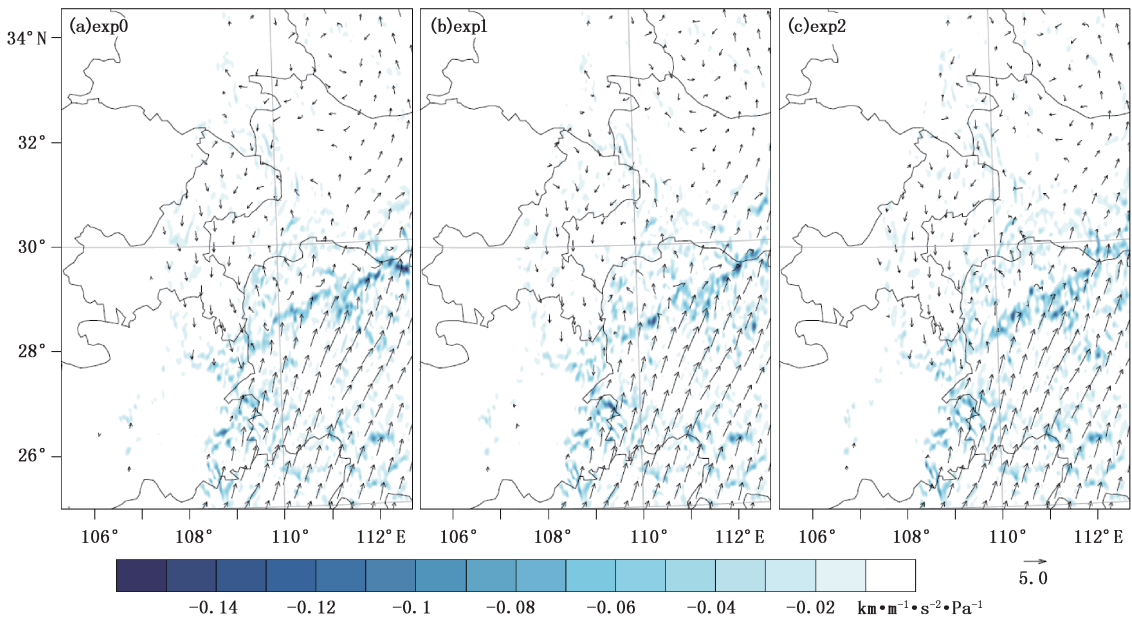


图 10 3 组试验 2019 年 5 月 14 日 08:00 起报的 18 h 850 hPa 水汽通量(箭头;单位: $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Pa}^{-1}$)和水汽通量散度(填色)预报

证,有待今后进一步的研究和探讨;其次,前人的研究表明^[12-14];模式地形达到一定的平滑度后,能够减少次网格惯性重力波的激发,从而保证计算的稳定性并进而提升模式预报技巧。

4 结论和讨论

本文基于重庆市气象局的中尺度数值预报业务系统,开展不同地形平滑方案对模式降水预报的影响研究,详细对比 WRF 模式中不使用地形平滑方案以及使用 s-d-s 方案和 1-2-1 方案生成的静态地形高度场的差异,并开展不同地形平滑方案批量平行试验并选取典型强降水个例进行对比分析,由此探究地形平滑方案影响降水预报的可能原因并明确是否存在统计意义上最优的地形平滑方案,主要结论如下:

(1)不使用地形平滑方案以及使用 s-d-s 方案和 1-2-1 方案生成的静态地形高度场之间有明显的差异,在地形较为平坦的平原地区偏差较小(普遍在 10 m 以下),在地形较为陡峭的高原和山脉(如青藏高原东部和大巴山山脉)等地形复杂地区差异较大,最大绝对偏差可达 462.56 m。

(2)WRF 模式中 s-d-s 和 1-2-1 两种地形平滑方案主要平滑掉了模式地形中较小尺度的地形特征,且总体而言 1-2-1 方案的平滑效果比 s-d-s 方案明显。

(3)连续一个月批量平行试验降水预报检验结果表明:总体而言,进行模式地形平滑能够明显减少大雨及以上量级降水预报的空报现象并进而改进预报技巧,且使用 1-2-1 平滑方案的预报结果优于使用 s-d-s 平滑方案的预报结果。

(4)降水个例对比分析结果表明:采用不同的地形平滑方案会造成垂直速度和水汽通量散度预报的明显差异,这样的明显差异会影响强降水区域水汽的辐合上升运动进而影响强降水预报的落区和强度。总体而言,不使用地形平滑方案以及使用 s-d-s 方案和 1-2-1 方案得到的小雨和中雨量级的降水预报差别不大,但大雨及以上量级的降水预报有明显差异,特别是暴雨和大暴雨量级的降水预报的落区和分布。

参考文献

[1] 范广洲,吕世华.地形对华北地区夏季降水影响的数值模拟

研究[J].高原气象,1999,18(4):659-667.

- [2] 舒守娟,王元,李艳.青藏高原地形扰动对其降水分布影响的研究[J].水科学进展,2006,17(5):585-591.
- [3] 何光碧.高原东侧陡峭地形对一次盆地中尺度涡旋及暴雨的数值试验[J].高原气象,2006,25(3):430-441.
- [4] 李川,陈静,何光碧.青藏高原东侧陡峭地形对一次强降水天气过程的影响[J].高原气象,2006,25(3):442-450.
- [5] 李子良.地形降水试验和背风回流降水机制[J].气象,2006,32(5):10-15.
- [6] 田越,苗峻峰.中国地区山谷风研究进展[J].气象科技,2019,47(1):41-51.
- [7] 朱丽,苗峻峰.中国地区城市热岛环流研究进展[J].气象科技,2019,47(1):52-61.
- [8] 郑艳,杨仁勇,程守长,等.地形对台风“海燕”暴雨增幅作用的观测与模拟[J].气象科技,2018,46(6):1147-1153.
- [9] 毕宝贵,刘月巍,李泽椿.秦岭大巴山地形对陕南强降水的影响研究[J].高原气象,2006,25(3):485-494.
- [10] 赵玉春,李泽椿,王叶红,等.2006年6月5—8日梅雨锋上中尺度对流系统引发福建北部暴雨的诊断分析[J].大气科学,2008,32(3):598-614.
- [11] 慕建利,李泽椿,李耀辉.高原东侧特大暴雨过程中秦岭山脉的作用[J].高原气象,2009,28(6):1282-1290.
- [12] 潘在桃.中尺度数值模式中初始场和地形的不同处理对降水预报的影响及相对比较[J].气象学报,1990,48(4):491-499.
- [13] 王光辉,陈峰峰,沈学顺,等.数值模式中地形滤波处理及水平扩散对降水预报的影响[J].地球物理学报,2008,51(6):1642-1650.
- [14] 屠妮妮,陈静,何光碧.切比雪夫多项式在模式地形平滑中的应用研究[J].高原气象,2012,31(1):47-56.
- [15] 姚昊,潘晓滨,臧增量.一次鄂西北地区暴雨过程中地形敏感性试验研究[J].气象与环境学报,2008,24(5):61-66.
- [16] 李俊,杜钧,刘羽,等.不同扰动方法集合离散度演变的异同性暨地形扰动初探[J].气象学报,2017,75(1):123-146.
- [17] 陈良吕,吴钰,高松.重庆中尺度集合预报系统预报性能分析[J].高原山地气象研究,2017,37(4):21-27.
- [18] Thompson G, Field P R, Rasmussen R M, et al. Explicit forecasts of winter precipitation using an improved bulk microphysics scheme. Part II: implementation of a new snow parameterization[J]. Mon Wea Rev, 2008, 136: 5095-5115.
- [19] Janjic Z I. The Step-Mountain Eta Coordinate Model: Further developments of the convection, viscous sublayer, and turbulence closure schemes[J]. Mon Wea Rev, 1994, 122, 927-945.
- [20] Niu Guoyue, Yang Zongliang, Mitchell K E, et al. The community Noah land surface model with multiparameterization options (Noah-MP): 1. Model description and evaluation with local-scale measurements [J]. J Geophys Res, 2011, 116: D12109.
- [21] Iacono M J, Delamere J S, Mlawer E J, et al. Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: Calculations with the AER ra-

- diative transfer models [J]. *J Geophys Res*, 2008, 113, D13103.
- [22] Germann U, Zawadzki I. Scale-dependence of the predictability of precipitation from continental radar images. Part I: description of the methodology [J]. *Mon Wea Rev*, 2002, 130; 2859-2873.
- [23] 潘畅, 沈艳, 宇婧婧, 等. 基于最优插值方法分析的中国区域地面观测与卫星反演逐时降水融合试验[J]. *气象学报*, 2012, 70(6):1381-1389.

Influence of Different Terrain Smoothing Schemes in WRF Model on Precipitation Forecast

CHEN Lianglyu¹ XIA Yu² ZHUANG Xiaoran³

(1 Chongqing Institute of Meteorological Sciences, Chongqing 401147; 2 Institute of Urban Meteorology, CMA, Beijing 100089;

3 Jiangsu Meteorological Observatory, Nanjing 210008)

Abstract: Based on the mesoscale numerical forecast system that is operationally implemented in the Chongqing Meteorological Service, the influence of different terrain smoothing schemes in the WRF model on precipitation forecast is studied. The differences between the static terrain height fields generated without smoothing and with two smoothing schemes (s-d-s and 1-2-1) in the WRF model are studied and compared in detail. Based on this, one month consistent experiments using different terrain smoothing schemes were carried out, and a typical heavy precipitation case was selected for further comparative analysis. The results show that there are obvious difference between the static terrain height fields generated by different terrain smoothing schemes, especially for the steep plateau regions or mountain regions while the maximum mean absolute error can be more than 462.56 m; the two terrain smoothing schemes (s-d-s and 1-2-1) mainly smooth out the topographic features of small scale in the mode terrain, and in general, the smoothing degree of the 1-2-1 scheme is greater than that of the s-d-s scheme. The verification results of the one month consistent experiments show that the model terrain smoothing process has a positive impact on the forecasts of heavy or above rainfall, and the prediction results using the 1-2-1 smoothing scheme are better than those using the s-d-s smoothing scheme. The comparative analysis results of a typical precipitation case show that different terrain smoothing schemes will cause significant differences in the prediction of vertical velocity and water vapor flux divergence, and such significant differences will further affect the fall area and intensity of heavy precipitation prediction.

Keywords: WRF model; model terrain; terrain smooth; precipitation forecast