

吴琼,梅海霞,秦孟晟,等. 一次大暴雨过程中地形重力波拖曳作用的研究[J]. 气象研究与应用,2021,42(2):07-12.

Wu Qiong, Mei Haixia, Qin Mengsheng, et al. Study on the orographic gravity wave drag effect during a heavy rainstorm[J]. Journal of Meteorological Research and Application, 2021, 42(2): 07-12.

# 一次大暴雨过程中地形重力波拖曳作用的研究

吴 琼<sup>1</sup>, 梅海霞<sup>2</sup>, 秦孟晟<sup>1</sup>, 张 渊<sup>1</sup>, 程 远<sup>1</sup>

(1 扬州市气象局, 江苏 扬州 225000; 2 江苏省气象科学研究所, 南京 210009)

**摘要:** 利用 WRFV3.9 数值模式, 对 2011 年 6 月 9—10 日发生在湘鄂赣交界附近山区的一次江淮气旋大暴雨天气过程进行模拟。进行了地形重力波拖曳作用的控制试验和不考虑地形重力波拖曳作用的敏感性试验。结果表明, 控制试验能较好地再现江淮气旋及其产生的强降水; 模式引入地形重力波拖曳后能够更好地模拟出地形附近雨带的中心位置和强度; 地形重力波拖曳在本次大暴雨过程中能够减弱地形附近的经向风速, 增强低层气流辐合, 促进垂直上升运动, 从而有利于对流的触发和维持。

**关键词:** 大暴雨; WRF; 地形重力波拖曳; 地形作用

**中图分类号:** P456.7

**文献标识码:** A

**doi:** 10.19849/j.cnki.CN45-1356/P.2021.2.02

**OSID:**



## 引言

暴雨是我国常见的灾害性天气之一, 而在复杂地形的暴雨更容易引发山洪、山体滑坡、泥石流等次生灾害。影响暴雨落区和雨量的因素有很多, 其中地形作用不可忽视<sup>[1-6]</sup>。中尺度 WRF 模式在 2009 年发布的 WRF3.1 版本后引入了地形重力波拖曳参数化方案 (Orographic Gravity Wave Drag, 简称 OGWD), 用来处理区域内复杂地形中非静力模式的重力波拖曳作用。研究表明<sup>[7-11]</sup>, 若考虑地形重力波拖曳作用, 有利于改善对动量通量的垂直发散度及强度的预报, 可以提高对大尺度环流系统如温带气旋、冬季大陆高压和热带气旋的强度和移动路径的预报, 改善大气模式中因南风偏差以及西风带偏差引起的冷极等问题, 提高模式的预报性能。

引入 OGWD 方案后, 有利于改善降水预报质量。王文等<sup>[12]</sup>用地形重力波方案对暴雨天气进行模拟, 同时考虑重力波和对流运动的相互作用, 可以比较完整地揭示雨带的强度, 以及维持和发展的原因; 艾凯等<sup>[13]</sup>在研究 WRF 模式中地形重力波参数化方案后指出, OGWD 方案的引入, 对降水的落区和强

度均有较好的改善。叶虎<sup>[14]</sup>和刘蕾<sup>[15-16]</sup>研究发现, 引入重力波拖曳参数可以更加合理地模拟地形对气流的影响, 使山区暴雨的模拟效果更接近实况。

地形附近降水的落区和雨量的预报一直是困扰预报员的预报难点之一, 湘鄂赣交界处于江淮气旋东移的主要路径中, 且地形复杂, 东移出的江淮气旋常在该区域造成暴雨, 并极易伴随山体滑坡泥石流等次生灾害。本文针对 2011 年 6 月 9—10 日发生在湘鄂赣交界附近的江淮气旋大暴雨天气过程, 设计数值试验, 研究引入地形重力波拖曳作用是否对模式表现有正效果, 并讨论地形重力波拖曳对本次大暴雨的作用, 以期对预报员在复杂地形区域的暴雨预报中提供一定的预报参考。

## 1 过程简介

2011 年 6 月 9—10 日, 低层西南涡移出, 发展为江淮气旋东移, 并在沿途造成暴雨到大暴雨天气。10 日雨带呈东西向分布, 雨量中心出现在安徽东南部和鄂湘赣交界 (114°E, 29°N) 附近, 日雨量中心分别达到 100~150mm 及 200mm 以上 (图 1a), 根据逐小时的降水演变情况来看, 强降水开始在 9 日下午,

收稿日期: 2020-04-29

基金项目: 江苏省气象局青年基金项目 (KQ202126)

作者简介: 吴琼 (1988—), 女, 硕士, 工程师, 主要从事气象预报服务工作。E-mail: 20061320061301262wq@sina.com

9 日 22 时到 10 日 04 时为降水最强时段,湘鄂赣三省交界处部分站点小时雨强超过 40mm。因为强降水区域为九岭山、幕阜山地形所在(图 1b),本次山

区暴雨伴有山体滑坡、泥石流等次生地质灾害,造成极大的经济损失和人员伤亡。

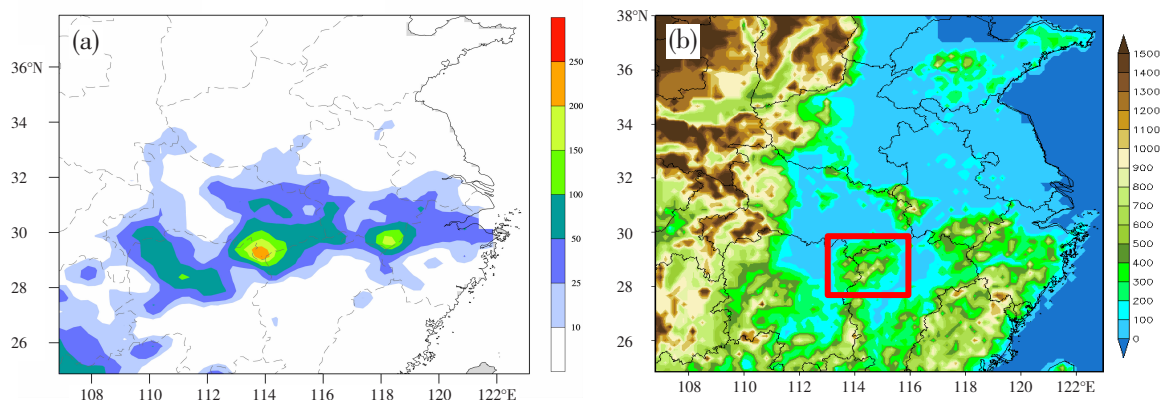


图 1 10 日 24h 累积雨量(a,单位:mm)和地形图(b,单位:m)  
红色框区为湘鄂赣交界附近九岭山、幕阜山地形所在

## 2 资料和方法

(1)利用国家气象自动站与 CMORPH<sup>[17]</sup>降水产品融合的逐小时降水量网格数据(空间分辨率为  $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ ,时间间隔为 1h)作为本文雨量实况;

(2)运用 WRFV3.9 对选取个例进行模拟,并分别设计引入地形重力波拖曳作用的控制试验和不考虑地形重力波拖曳作用的敏感性试验。通过对比控制试验和敏感性试验模拟效果来研究地形重力波拖曳在本次大暴雨天气过程中的作用。

数值试验采用中尺度模式 WRFV3.9。模式采用的初始场资料为 NCEP FNL 全球分析资料(水平分辨率为  $1^\circ \times 1^\circ$ ,时间间隔为 6h),起报时间从 2011 年 6 月 9 日 00 时(世界时)开始,终止时间到 2013 年 6 月 10 日 12 时(世界时)结束,模式运行时间为 36h。模式的控制试验具体设置如下:采用双向双重嵌套网格,母网格的区域范围为  $90^\circ\text{E} \sim 130^\circ\text{E}$ ,  $10^\circ\text{N} \sim 50^\circ\text{N}$ ,中心位置在  $(110^\circ\text{E}, 30^\circ\text{N})$ ,子网格的区域范围为  $100^\circ\text{E} \sim 125^\circ\text{E}$ ,  $20^\circ\text{N} \sim 40^\circ\text{N}$ 。母网格网格距为  $12\text{km} \times 12\text{km}$ ,子网格的网格距为  $4\text{km} \times 4\text{km}$ 。母网格的积分步长是  $90^\circ$ ,子网格积分步长为  $30'$ 。母网格数据输出时间为 1h,子网格数据输出时间为 10min。母网格和子网格的垂直分层均为 50 层,模式层顶达到 50hPa。微物理过程采用 WSM3 类简单冰方案;边界层参数方案为 YSU 方案;陆面过程采用了 Noah 方案;积云参数采取 Kain-Fritsch 方案;短波辐射采用

的是 Dudhia 方案;长波辐射方案为 RRTM 方案。敏感性试验方案关闭地形重力波拖曳作用,其余的物理过程均一样。

## 3 控制试验模拟效果检验

为了检验控制试验的模拟效果,分别从气旋路径、急流和降水的模拟几个方面将模拟结果与实况进行比较。

江淮气旋是本次强降水过程的重要影响系统。实况中江淮气旋的路径是先东移后东移北上,整体向东北方向移动,从控制试验模拟结果来看,气旋也是先东移再东移北上,整体向东北方向移动,控制试验对于气旋的移动路径模拟较好(图 2a)。但是对比气旋中心各个时刻的位置和实况还是有些许差异,整体位置比实况略偏北;前期两者速度相当,但过程后期试验中气旋的移动速度比实况偏慢。在发生最强降水时段的 9 日夜间前后,试验对江淮气旋的模拟不论是从气旋中心位置、移速和路径来看,均与实况有较高的相似性。

低空急流为本次大暴雨提供水汽和动量。在 10 日 02 时,实况中有较大范围的低空西南急流,西起  $107^\circ\text{E}$ ,东至太平洋,急流北端可到达  $30^\circ\text{N}$  附近,风速均达  $12\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  以上,强降水发生在低空急流左侧(图 2b);而从控制试验的模拟急流模拟情况来看,急流范围是大致相同的,但是模拟的急流强度比实况略强一些,在  $115^\circ\text{E} \sim 116^\circ\text{E}$ ,  $27^\circ\text{N} \sim 29^\circ\text{N}$  区域内,

部分格点风速可达  $18\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  以上, 中心最大风力可达  $21\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  以上, 位于强降水的右侧(图 2c)。比较两者风场的分布情况, 10 日 02 时, 实况的  $109^{\circ}\text{E}\sim 115^{\circ}\text{E}$ ,  $29^{\circ}\text{N}\sim 32^{\circ}\text{N}$  区域内, 风场呈气旋式环流, 形成东北西南向的低压中心, 而模式控制试验模拟情况, 在  $850\text{hPa}$  上  $109^{\circ}\text{E}\sim 115^{\circ}\text{E}$ ,  $29^{\circ}\text{N}\sim 32^{\circ}\text{N}$  区域内, 风场整体呈气旋式环流切变, 且其中包含 3 个独立气旋式环流。整体风场的模拟还是比较成功的, 急流强度比实况略强一些。

从降水的模拟情况来看, 实况 10 日 00 时—10 日 06 时的 6h 降水中心主要有三个(图 2d), 自西向东分别位于: 1、湖南中部  $28^{\circ}\text{N}$ ,  $111^{\circ}\text{E}$  附近, 中心雨量  $150\sim 200\text{mm}$ ; 2、湘鄂赣交界处  $29^{\circ}\text{N}$ ,  $114^{\circ}\text{E}$  附近, 中心雨量达到  $200\sim 250\text{mm}$ ; 3、最东侧雨量中心位于皖赣浙交界处, 中心雨量在  $40\sim 80\text{mm}$ 。其中第二个降水中心, 也就是九岭山、幕阜山地形所在处 24h 累积雨量最大, 也是本次重点研究的降水中心。控制试验中较好地模拟出了三个降水中心(图 2e), 对于地形附近的雨量中心而言, 6h 的控制试验与实况相比对雨量中心降水量的模拟较为准确, 范围略扩大。但值得注意的是, 模式对位于地形下游的降水中心雨量模拟略偏强, 考虑与模式中重力波拖曳作用后, 对垂直运动的加强有关。

综上所述可以看出, 考虑了地形重力波拖曳作用的模式, 较好的模拟出本次大暴雨过程的影响系统和降水情况。

## 4 敏感性试验与控制试验的对比分析

### 4.1 降水模拟对比

为了进一步研究地形重力波拖曳在本次大暴雨过程中的作用, 设计了一次敏感性试验用来对比分析, 敏感性试验不考虑地形重力波拖曳参数化方案。

对比实况降水和敏感性试验对降水模拟效果(图 2f)可以发现, 在未考虑地形重力波拖曳效果时模拟的降水较为散乱, 虽然可以模拟出东北—西南走向的雨带分布, 但是不能很好的模拟出三个降水中心的范围, 且对于湘鄂赣交界处的雨量中心降雨量模拟比实况要偏小, 但对于地形下游地区的东部降水中心的降水空报反而有一定改善。

比较敏感性试验和控制试验对降水的模拟效果可以发现, 两者的降水范围差异主要体现在经向上, 敏感性试验的降水范围明显向南扩展, 说明地形重力波拖曳作用有效的使降水范围更加集中, 雨带传播有所停滞, 因此控制试验的雨带范围更窄更密集, 和实况也更加接近。

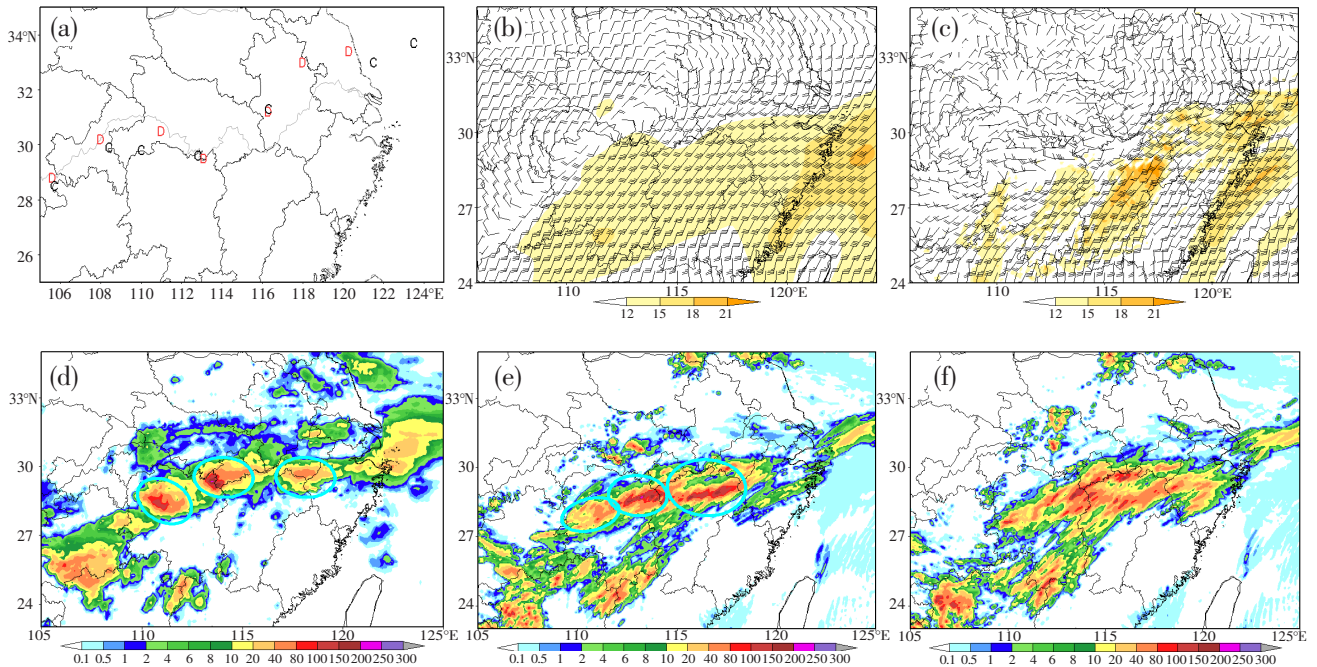


图 2 09 日 08 时至 10 日 20 时逐 6h 气旋中心位置(C 为实况, D 为控制实验)、850hPa 风杆 (单位:  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) 和全风速 (阴影, 单位:  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) (a), 实况 (b), 控制试验 (c); 10 日 00—06 时逐 6h 降水 (单位: mm) CMORPH (d), 控制试验 (e), 敏感性试验 (f)



## 4.2 辐合强度模拟对比

比较 850hPa 流场(图 3a—b)可以发现,控制试验可以更好地模拟出低层流场的辐合,在地形附近上空存在着东北—西南走向的由偏西风场和西南风场组成的明显辐合带,而在敏感性试验中,地形附近上空是较为均匀的西南气流,无法形成明显的风向辐合。可以看出引入地形重力波拖曳方案后,模式对于地形附近的风向辐合有更好的模拟效果。

为了进一步更直观地对比两组试验的散合分布情况(图 3c—d),比较两者的散度分布情况可以发现,控制试验可以更好地模拟出低层流场的辐合。从散度的数值大小来看,在敏感性试验中,虽然也存在

辐合,但辐合的强度弱于控制性试验,且辐合区域零散不连续,控制试验可以明显模拟出带状分布的辐合区,和回波形态(图略)对应较好。

为了研究风速的散合情况,制作了控制试验和敏感性试验的经向风速的差值(图 3e),可以发现在地形附近,尤其是迎风坡,风速差值为大范围的负值区,负值中心风速差值可达  $18\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,说明在考虑了地形重力波拖曳效果后,控制试验的经向风速在地形南侧偏小而北侧偏大,因此存在风速的辐散。综合可知,辐合带主要是风向造成的辐合而非风速辐合。

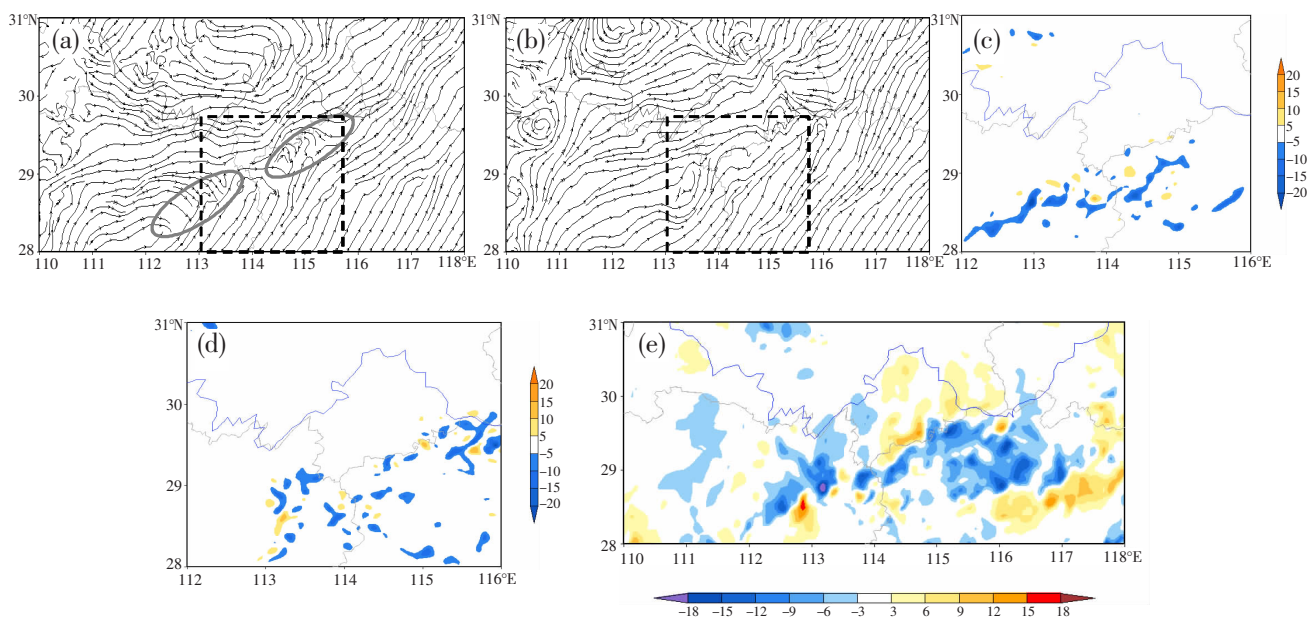


图3 10日03时850hPa流场(单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )控制试验(a),敏感性试验(b);10日03时散度场(阴影,单位: $10^{-4}\text{s}^{-1}$ )控制性试验(c),敏感性试验(d)(框区阴影为地形所在区域);10日2时30分850hPa控制试验与敏感性试验v分量之差(e)(阴影,单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,虚线框为地形所在地)

## 4.3 垂直运动模拟对比

地形重力波拖曳作用的引入不仅可以使模式对环流和辐合的模拟效果更佳,在对垂直运动的模拟中起着重要作用。

对  $113^{\circ}\text{E}\sim 115^{\circ}\text{E}$  范围内做垂直速度的平均经向—垂直剖面(图 4a—d),对比后可以看出控制试验的垂直上升运动比敏感性试验更强,在 9 日 23 时 30 分,控制试验中  $29.7^{\circ}\text{N}$  附近的垂直上升速度可达  $1.5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,敏感性试验中仅为  $0.6\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,垂直上升运动加强了一倍多,且控制试验低层辐合高层辐散的散合中心强度也强于敏感性试验。在 10 日 2 时 30 分,

强上升运动随着雨带略向南移动,在  $28.8^{\circ}\text{N}$  附近的垂直上升运动,控制试验中可达  $1.5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,且低层辐合高层辐散,敏感性试验中仅为  $0.3\sim 0.6\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,辐合辐散不明显,控制试验中的垂直上升运动仍然强于敏感性试验。

综上所述,地形重力波拖曳作用对本次大暴雨过程的发生起到了一定作用,使地形附近雨带范围更加集中,且对地形附近模式降水量模拟有正效果;在地形附近,尤其是迎风坡,地形重力波拖曳作用增加了风向的辐合,可以更好地完善模式对强降雨时段在地形附近的散度模拟情况;引入 OGWD 参数化

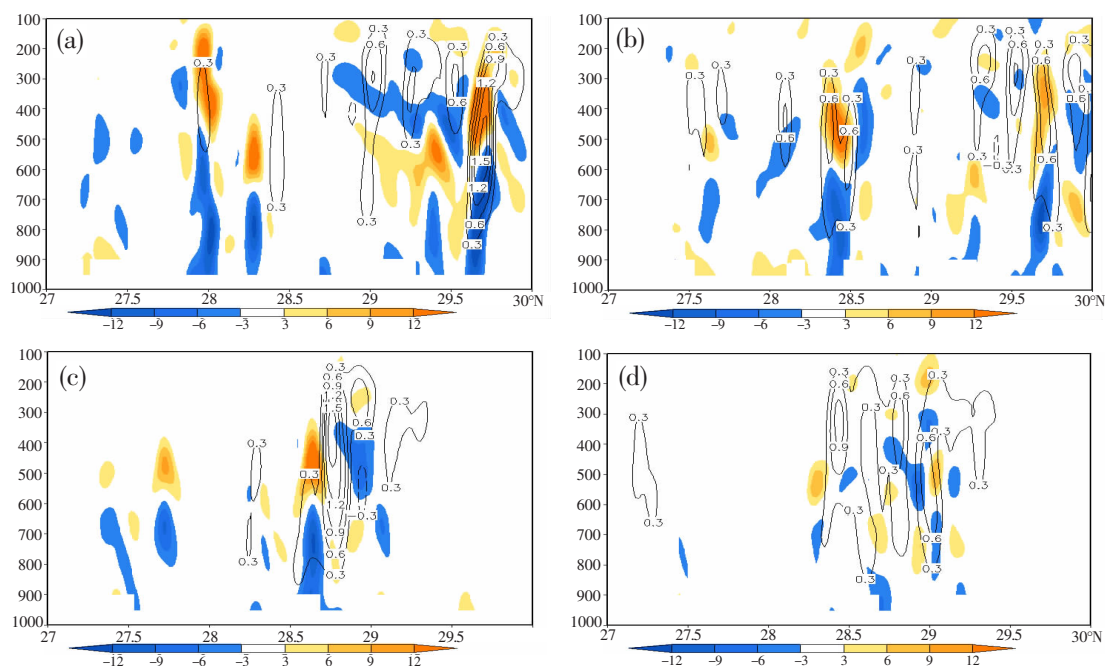


图4 垂直速度(单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )和散度场(阴影,单位: $10^{-4}\text{s}^{-1}$ )的控制试验(a、c)和敏感性试验(b、d)  
(a)、(b):9日23时30分;(c)、(d):10日02时30分

方案还可以更有效地促进次级环流的建立,加强垂直上升运动,使模式在地形附近的降水预报更接近于实况降水。

但值得注意的是,再引入重力波拖曳作用后,对地形下游地区的降水存在一定的雨量虚高的空报现象。考虑可能与地形重力波拖曳导致垂直上升运动加强,并随着时间积分增强作用被不断放大有关,但需要更多个例的佐证,有待在引入地形重力波拖曳作用后,根据模式在日常预报中的表现进一步加以验证。

## 5 结论

(1) 引入 OGWD 参数化方案后,WRF 对本次大暴雨天气过程模拟效果良好,对地形附近降水落区和量级模拟较为准确。

(2) 控制试验对地形附近降水的模拟优于敏感性试验。

(3) 本次大暴雨过程中地形重力波拖曳作用使地形附近雨带范围更加集中,增加迎风坡的风向辐合,有效地促进次级环流的建立,加强垂直上升运动,有利于模式对地形附近降水落区和量级做出正修订。

(4) OGWD 参数化方案的引入可以优化模式对复杂地形地区降水落区和量级的预报,但可能造成

地形下游地区雨量的空报。

## 参考文献:

- [1] 朱素行,徐海明,徐蜜蜜.亚洲夏季风区中尺度地形降水结构及分布特征[J].大气科学,2010,34(1):71-82.
- [2] 王宇虹,徐国强.青藏高原地形重力波拖曳的初步分析及数值模拟研究[J].气象学报,2017,75(2):275-287.
- [3] Pedatella N M, Smith A K, Liu H. WACCM Simulations of Zonal Mean Gravity Wave Drag Short-term Variability in the Southern Hemisphere Mesosphere[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres,2018,123(21):11,849-11,860.
- [4] 钟水新.地形对降水的影响机理及预报方法研究进展[J].高原气象,2020,39(5):1122-1132.
- [5] 周云霞,翟丽萍,何珊珊.2019年“5.27”广西靖西市极端暴雨成因及可预报性分析[J].气象研究与应用,2020,41(2):68-74.
- [6] 黄巾旗,黄子航,黄干淇.2017年7月广西大范围暴雨过程分析[J].气象研究与应用,2018,39(4):18-21,33,105.
- [7] 钟水新,陈子通,戴光丰,等.地形重力波拖曳参数化对热带气旋强度和路径预报影响的研究[J].大气科学,2014,38(2):273-284.
- [8] Hong S Y, Choi J, Chang E C, et al. Lower-tropospheric enhancement of gravity wave drag in a global spectral atmospheric forecast model[J]. Weather Forecast, 2008,

- 23:523–531.
- [9] 王宇虹,徐国强.青藏高原地形重力波拖曳的初步分析及数值模拟研究[J].气象学报,2017,75(2):275–287.
- [10] 覃卫坚,寿绍文,李启泰,等.影响惯性重力波活动规律的动力学因子研究[J].高原气象,2007,26(3):519–524.
- [11] 徐国强,杨学胜,黄丽萍,等.GRAPES 中地形重力波拖曳物理过程的引进和应用试验[J].气象学报,2010,68(5):631–639.
- [12] 王文,刘佳,蔡晓军.重力波对青藏高原东侧一次暴雨过程的影响[J].大气科学学报,2011,34(6):737–747.
- [13] 艾凯,郑益群,陈浩伟.WRF 模式中地形重力波参数化方案应用及不同拖曳力试验[J].干旱气象,2016,34(1):125–135,144.
- [14] 叶虎.重力波拖曳及地形高度在内蒙古东部 11.07 暴雨中的作用[D].南京:南京信息工程大学硕士论文,2013.
- [15] 刘蕾.一次暖区暴雨形成机制的数值试验与诊断分析[D].南京:南京信息工程大学硕士论文,2011.
- [16] 刘蕾,丁治英,常越,等.WRF 中地形重力波参数化方案在一次华南暖区暴雨形成机制分析中的应用[J].气象科技,2012,40(2):232–240.
- [17] 许时光,牛铮,沈艳,等.CMORPH 卫星降水数据在中国区域的误差特征研究[J].遥感技术与应用,2014,29(2):189–194.

## Study on the orographic gravity wave drag effect during a heavy rainstorm

Wu Qiong<sup>1</sup>, Mei Haixia<sup>2</sup>, Qin Mengsheng<sup>1</sup>, Zhang Yuan<sup>1</sup>, Cheng Yuan<sup>1</sup>

(1. Yangzhou Meteorology Bureau, Yangzhou Jiangsu 225000;

2. Jiangsu Meteorological Science Research Institute, Nanjing 210009)

**Abstract:** The WRFV3.9 numerical model was used to simulate a heavy rainstorm associated with the Jianghuai cyclone occurred during 9th to 10th June, 2011 near the border between Hunan, Hubei, and Jiangxi. Considering the influence of the underlying topography on the heavy rainfall, a control experiment considering the drag effect of the topographic gravitational wave and a sensitivity experiment without considering the drag effect of the topographic gravitational wave were designed. The control experiment could better reproduce the Jianghuai cyclone and the strong precipitation caused by it. Comparison between the sensitivity and control experiments showed that the position and intensity of rainstorm could be simulated better by introducing the OGWD in the model. It can reduce the wind speed near the terrain, enhance the convergence of the low-level airflow and thus promote vertical motion, which is conducive to the triggering and maintenance of deep convection.

**Key words:** heavy rainstorm, WRF, orographic gravity wave drag, effect of topography