

地形对台风“苏迪罗”降水影响的数值研究

叶龙彬¹, 谌芸², 肖天贵¹

(1. 成都信息工程大学, 四川 成都 610225; 2. 国家气象中心, 北京 100081)

摘要:为研究地形对1513号台风“苏迪罗”在闽北浙南一带的强降水过程的影响,利用NCEP FNL $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 再分析资料和WRF V3.7对此次强降水过程进行数值模拟,并通过更改模式中闽北浙南一带地区的地形高度,设计敏感性试验,对此次强降水过程地形的作用进行研究。结果发现闽北浙南高地形对此次台风强降水过程有明显的促进作用。研究表明:(1)模式对台风“苏迪罗”于闽北浙南地区强降水过程有较好的模拟效果。(2)闽北浙南山区地形对台风移动路径、降水分布以及降水强度都有明显影响;浙闽交界地区高地形的出现会导致台风绕行;强降水中心多位于地形迎风坡处。(3)地形对降水存在明显的增幅作用,有地形时暴雨区上升运动相对于无地形时明显增强;水汽主要集中在高地形迎风坡处,地形作用导致风场辐合,形成中尺度辐合线,是导致降水增幅的重要因素。

关键词:中尺度气象学;数值研究;台风暴雨;地形;降水增幅

0 引言

几乎每一场台风特大暴雨都与地形有关系。地形突出的作用表现在两方面,一是迎风坡对潮湿空气上升运动有着加强作用,二是在大尺度流场稳定的条件下,天气尺度的强降水系统有利于在地形辐合区停滞。地形辐合线有利于中尺度云团的生成与发展。郑庆林等^[6]对9216号台风进行数值模拟,结果表明,地形抬升作用对对流性降水起了很大的增幅作用,台风登陆过程迎风坡降水增幅显著。钮学新等^[9]对0216号台风进行研究,表明地形作用使迎风坡降水增大,背风坡降水减少。余贞寿等^[7]使用非静力模式MM5来模拟了0414号“海棠”台风,结果表明浙南闽北地形对登陆台风暴雨有增强作用,同时导致降水分布不均匀。陈联寿等^[12]采用外场科学试验与数值模拟相结合的方法,对登陆中国的热带气旋做了系统的研究,指出收到陆地山脉地形的强迫作用,台风的降雨强度和分布在登陆后,会和海上时有较大差异,同时指出当有潮湿的气流向岸地形辐合时,会使台风暴雨增强,雨区范围扩大。

2015年第13号台风“苏迪罗”具有路径稳定、强度强、在陆地上维持时间长、影响范围广,带来的风雨强度特别大等特点。共有11个省(市)受到影响,7日8时至11日8时,浙江、福建、江西北部 and 东部、安徽中南部、江苏中南部等地累计降雨100 mm以上,其中浙江东部和南部、福建东北部、江苏中部局地350 ~

600 mm,浙江温州局地650 ~ 800 mm。2015年8月8日18时后,随着“苏迪罗”主体向北扩展,雨带逐步向闽北浙南一带蔓延。8日22时10分,“苏迪罗”于福建莆田秀屿区登陆。台风“苏迪罗”登陆前后,于闽北浙南地区带来强降水过程。本文通过高分辨率的中尺度数值模式WRF V3.7对台风“苏迪罗”登陆过程进行模拟,并设计多个地形敏感性试验来研究浙南闽北地形对此次台风暴雨的影响。

1 模拟试验方案

使用WRF V3.7对台风“苏迪罗”于闽北浙南一带的强降水过程进行模拟,积分时间为:2015年08月08日06时-09日12时(UTC),积分时长共30小时。初始场和侧边界采用了 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ FNL资料(间隔6h),模式采用3层嵌套,中心点位于 25.47°N , 119.88°E 。各嵌套水平分辨率分别为27 km、9 km、3 km,格点数为 80×80 、 160×154 、 274×322 ;垂直方向30层。三层网格地形分辨率分别为 $10'$ 、 $2'$ 、 $30''$ 。第一、第二层网格使用浅对流Eta-Fritsch积云参数化方案,第三层网格未使用对流参数化方案。其他物理方案三个网格选择一致,都采用WSM6方案的微物理过程、Noah陆面参数化方案以及YSU边界层方案。共设计了控制试验和3个地形敏感性试验来分析闽北浙南地区地形((26°N , 118°E)-(29°N , 121°E))对台风“苏迪罗”降水的影响:

- (1)控制试验——Con:各敏感性试验的对比基础;
- (2)敏感性试验1——test0.0:不考虑闽北浙南地区地形;
- (3)敏感性试验2——test0.5:闽北浙南地区地形

降低 50% ;

(4) 敏感性试验 3——test1.5: 闽北浙南地区地形提高至 150% ;

文中主要利用细网格(第 3 重区域)的模拟结果来分析地形对台风“苏迪罗”强降水过程的影响。

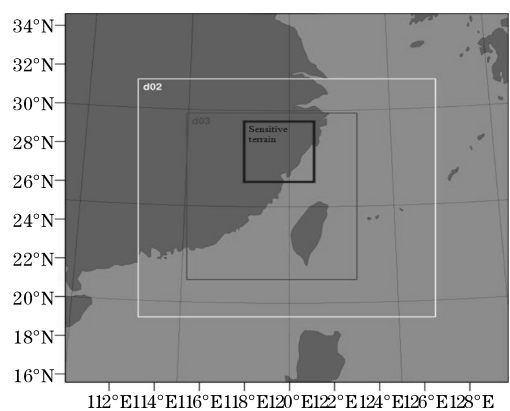
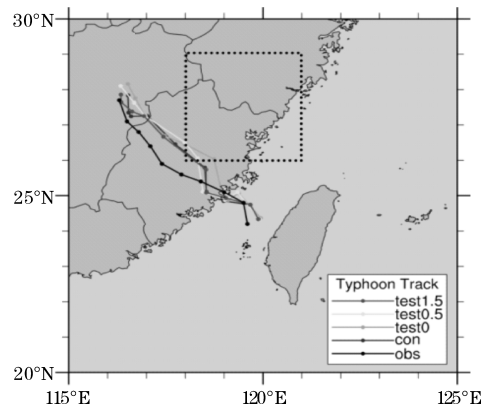


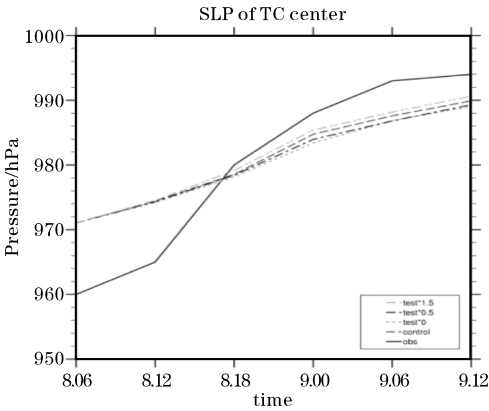
图 1 模式模拟区域和敏感性地形区域示意图

2 试验结果分析

2.1 台风路径及强度的对比分析



(a) 路径(黑色虚线矩形框为敏感性地形区域)



(b) 中心气压

图 2 08 月 08 日 06 时-9 日 12 时(UTC)“苏迪罗”观测资料与模拟结果对比

图 2(a)为台风“苏迪罗”观测实况路径和 4 个模拟试验的台风路径(通过各个试验模拟结果的海平面气压场最小值确定台风中心位置)。可以发现:(1) Con 试验台风路径整体与实况路径较为一致,都向西北方向行进。但由于模式初始场与实况存在一定的差异,导致模拟起始时间台风位置相对于实况略微偏东;另外,考虑观测路径和由海平面气压场定位的模拟路径两者之间存在一定的误差,这些原因导致 Con 试验台风路径相对于观测路径略微偏东北,但两者偏差较小。因此认为 Con 试验较为成功地模拟出了台风“苏迪罗”登陆前后过程,Con 试验的模拟资料可以作为其他 3 个敏感性试验的对比基础。(2) test0.5、test1.5 与 Con 试验路径较为一致,偏差较小。三者对比可以发现,在台风靠近敏感性地形区域时,test0.5 相对于 Con 试验更靠近敏感性地形区域,而 test1.5 则相反,略微远离敏感性地形区域。而从 test0 试验的台风路径发现,当台风登陆后,移动路径相对于 Con 试验明显发散,位置偏北,且为 4 组试验中最靠近敏感性地形区域的一组,这种偏差一直持续到台风中心离开敏感性地形区域,test0 的路径才与 Con 试验趋于重合。可见,浙闽交界地区地形对台风路径有着明显的影响,高地形的出现会导致台风出现一定程度的绕行。

图 2(b)中心气压模拟结果对比分析可知,4 个模拟试验台风强度整体呈持续减弱趋势,与实况台风强度变化趋势较为一致。8 日 12 时(UTC,下同),随着台风中心靠近陆地,4 个模拟试验强度都出现不同程度的减弱。随着台风的登陆,陆面摩擦作用增强,强度减弱不断加大。从图中可知,台风减弱强度程度与浙闽交界地形高度成正比,表明地形阻塞摩擦作用是影响台风强度的重要因素之一。

2.2 台风降水对比分析

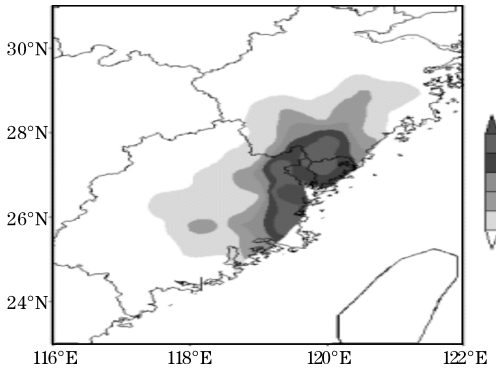


图 3 8 月 8 日 14 时-9 日 20 时台风“苏迪罗”过程降雨量实况图(单位:mm)

图 3 是 8 月 8 日 14 时-9 日 20 时(BT)加密自动站降水雨量图,可以看出台风登陆前后在闽北浙南地

区的降水强度最大,浙闽交界一带降水量普遍达250 mm以上,降水分布与海岸线一致,呈西南-东北走向。Con 试验累积雨量(图3a)与实况对比中,降水分布、降水强度以及强降水中心,都较为一致。位于洞宫山、鹫峰山及太姥山一带的强降水中心在 Con 试验中都有较好的体现。总体来说,Con 试验对此次台风暴雨有着较好的模拟效果。

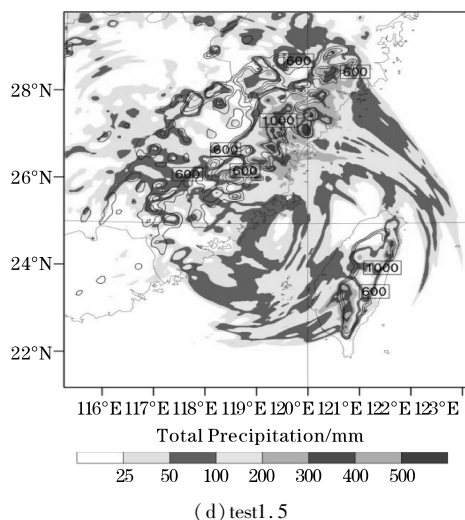
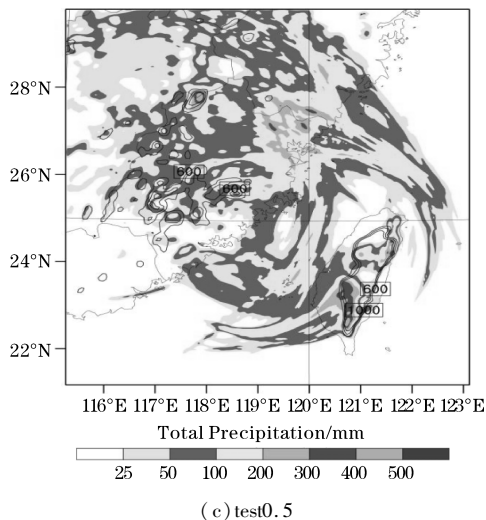
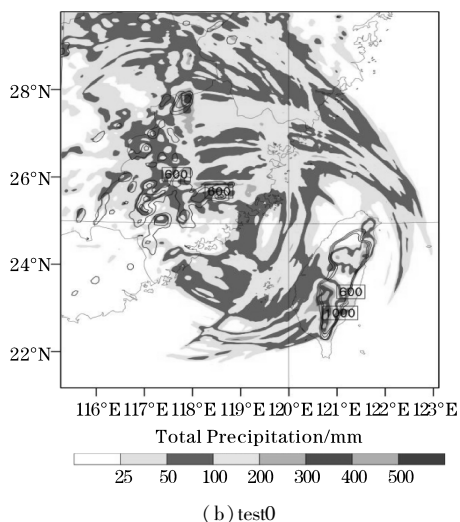
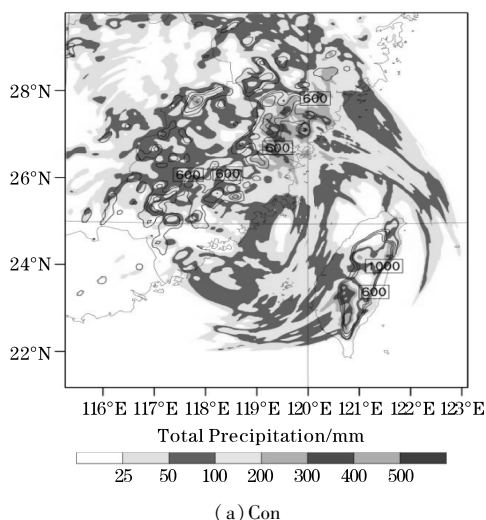


图4 08月08日06时-9日12时模拟累积降水量(填色,单位:mm)和模式地形 ≥ 600 m区域(等值线,单位:m)

从地形敏感性试验降水(图4)对比分析可知:(1)台风“苏迪罗”在浙闽一带造成特大暴雨与地形有密切关系。当去掉闽北浙南地区地形时(图4b),整个区域的降水量明显减少,强降水中心减少达300~400 mm。地形高度减半时(图4c),降水量200~300 mm区域减少,向山地地区收拢。强降水中心降水量减少达200 mm左右。相反,当地形高度抬升至150%时(图4d),降水量200~300 mm范围显著扩大,强降水中心降水范围也明显扩大。可以发现,降水强度与地形高度存在明显的相关性,地形高度增高,降水强度也随之加强。反正,降水则相应减弱。(2)通过地形高度与降水量的空间分布分析可知,在高地形(Con、test1.5)的作用下,强降水中心多位于迎风坡,而背风坡降水较少,降水分布不均匀。而在低地形(test0.5、test0)的作用下,迎风坡与背风坡降水分布较为均匀。

3 成因分析

3.1 地形对风场、降水分布的影响

图5(a)~(c)中Con试验3 h累积雨量及900 hPa风场演变特征分析可知,8日12时(UTC,下同),台风中心北部为东北气流和偏东气流。两股气流在闽北浙南一带形成辐合线,在鹫峰山及太姥山东面迎风坡处存着大于80 mm的降水大值中心。8日15时,随着台风“苏迪罗”的不断靠近大陆,浙南闽北一带山地地形逐渐受偏东气流控制,东风气流与浙南闽北西南-东北走向地形几乎正交,东风气流带来的暖湿空气在山地迎风坡抬升凝结产生大暴雨,在太姥山东面大于80 mm的降水范围迅速扩大,鹫峰山东侧降水大值中心仍然

存在。18 时,东风气流继续维持,大于80 mm降水范围向洞宫山一带延伸。综上可知,降水的分布主要受地形作用影响,降水大值中心大多出现在山地迎风坡处。闽

北浙南一带为多山地区,鹫峰山、雁荡山以及洞宫山等西南-东北走向的山脉与台风的向岸风形成较大的夹角,高地形强迫水汽抬升凝结,导致迎风坡降水异常强。

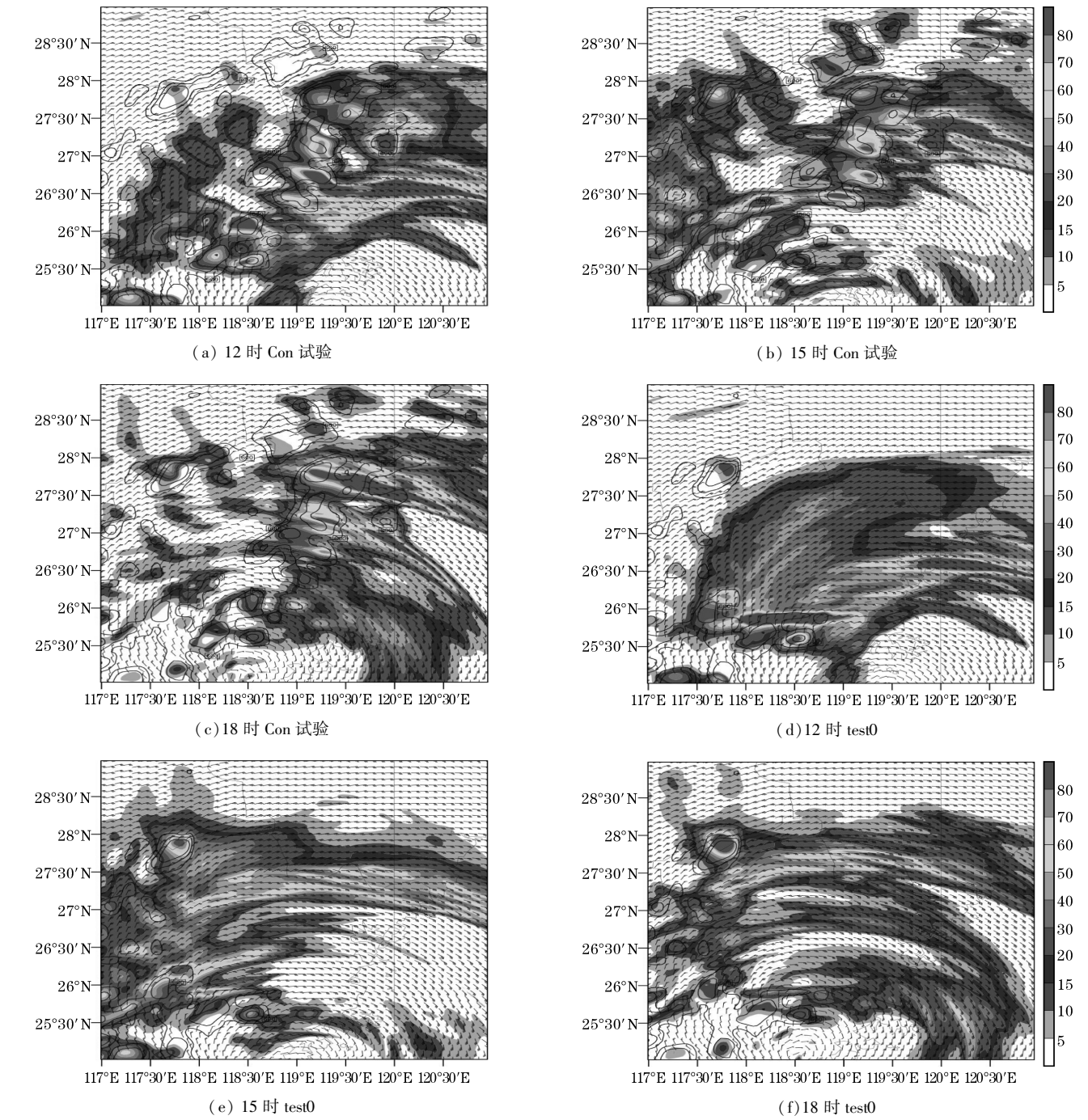


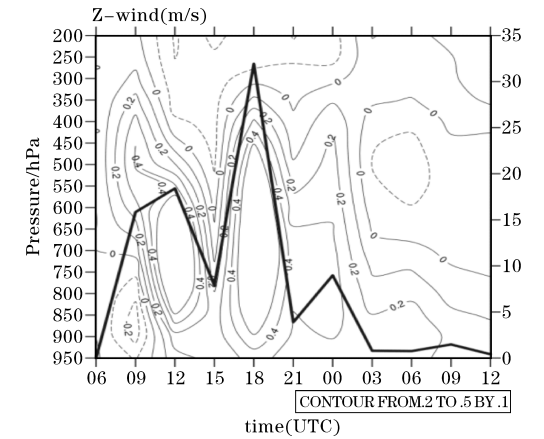
图5 08月08日12、15、18时Con试验和test0 3 h 累积降水量(单位:mm)模式地形 ≥ 600 m 区域(等值线,单位:m)及900 hPa 风场(风向标)演变

Test0 试验与 Con 试验结果对比发现,8 日 12 时,台风螺旋雨带在海面上带来的降水几乎不变。但去除地形后,闽北浙南一带降水大值中心都减弱消失,转而出现较为均匀的降水分布。台风环流北侧的东北气流与东风气流在敏感性地形区域南侧辐合,受敏感性地形区域边界的较高地形抬升影响,形成十分明显的东

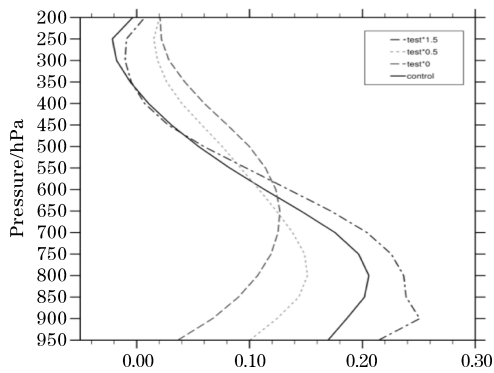
西横向雨带。8 日 15、18 时,闽北浙南地区风向由东北风与东风的辐合逐渐转为东风气流。降水呈多条螺旋雨带分布,相对于 Con 试验结果,test0 由于没有受到闽北浙南一带地形的作用,水汽随着东风气流向下游区域输送,导致上下游地区降水分布较为均匀。可知,地形的存在阻碍了水汽向下游地区的输送,使得降

水大值区多位于地形迎风坡,而地形背风坡的降水则相对减弱。

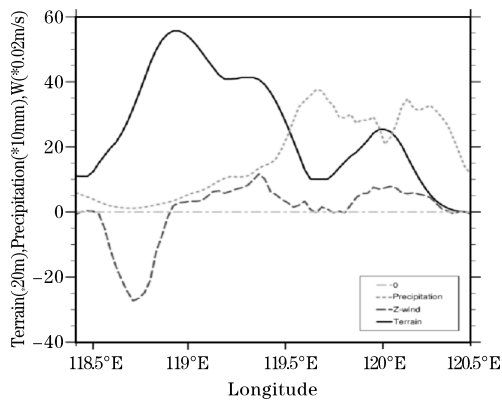
3.2 垂直运动特征分析



(a) 暴雨区平均垂直速度(等值线,单位:m/s)和平均降水量(折线,单位:mm)随时间演变图



(b) 08月08日06时-09时12时各模拟试验暴雨区平均垂直速度的平均时间廓线



(c) Con 试验 08 月 08 日 12 时过暴雨区(27°N)垂直速度、地形高度、降水量纬向剖面图

图6 垂直运动特征分析图

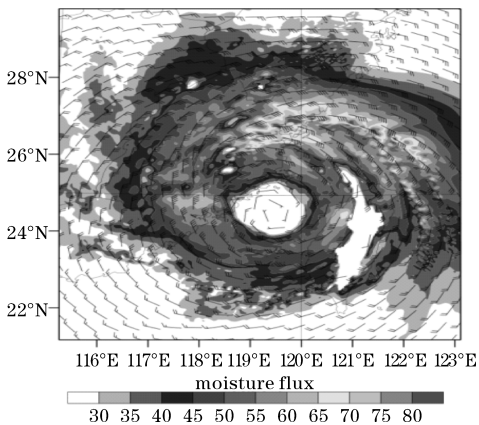
Con 试验中暴雨区((119.8°E, 26.8°N)~(120.2°E, 27.2°N))的平均垂直速度和平均降水量时间演变图(图6a)显示,暴雨区存在着两次明显的降水增幅,同时对应有着两次强烈的上升运动增强期,强

度达0.4 m/s,表明强上升运动与暴雨增幅密切相关。通过各试验暴雨区在模拟期间的平均垂直速度(图6b)对比发现, test0 最大垂直速度位于650 hPa附近, test1.5最大垂直速度位于900 hPa附近, Con、test0.5试验最大垂直运动则位于800 hPa附近。其中 test0 最大垂直速度最小,而其他有地形试验都明显大于 test0 试验的最大垂直速度。各试验的垂直速度差异主要存在于600 hPa以下,地形的高度与垂直速度呈现出正相关关系,表明地形的增高有利于上升运动的增强。

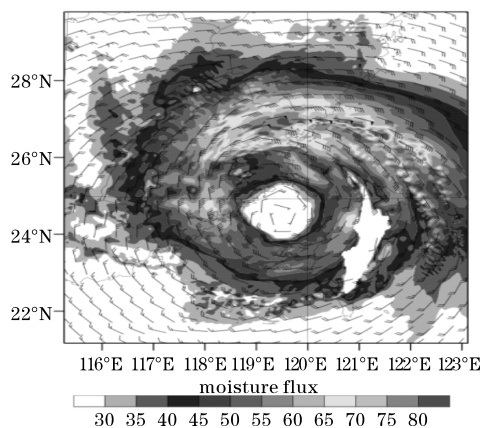
为了进一步分析降水、垂直上升运动和地形高度三者之间的位置关系,沿着暴雨区(27°N)作地形高度、6 h 累积降水量及垂直运动的纬向剖面图(图6c)。分析发现,暴雨区随着地形高度的变化降雨量及垂直速度也随之发生变化,存在以下特征:(1)降水量的波动与地形高度的变化密切相关,强降水区域主要位于高地形的东侧(迎风坡),地形高度的增加有利于迎风坡降水量的增幅,这种正相关关系主要存在800 m以下。(2)垂直上升运动的变化也有地形高度密切相关。垂直上升运动的增强往往出现在地形高度增加区域。同样,这种正相关关系主要存在800 m以下,800 m以上随着地形高度的继续增加,垂直上升运动则出现不同程度的减弱。在118.5°N~119°N之间地形高度存在大幅度的下降,对应区域出现强烈的下沉运动。

对比 test0.5、test1.5 试验的降水、垂直上升运动和地形高度三者之间的位置关系(图略)发现, test0.5 试验由于地形高度的降低,降水量与垂直上升运动都明显减弱。相反, test1.5 试验中,降水量与上升运动加强明显,总体位置关系不变。

3.3 地形对水汽通量的影响

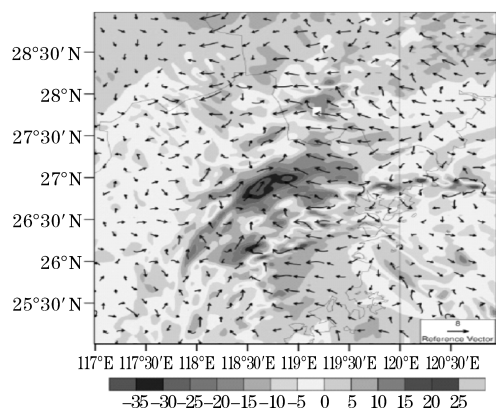


(a) 08 月 08 日 12 时 Con 试验 850 hPa 水汽通量(单位:g/(hPa·cm·s))及风场图(单位:m/s)



(b) 08月08日12时 test0 试验 850 hPa 水汽通量

(单位: $\text{g}/(\text{hPa} \cdot \text{cm} \cdot \text{s})$) 及风场图(单位: m/s)



(c) 08月08日12时 Con, test0 试验 850 hPa 水汽通量

(单位: $\text{g}/(\text{hPa} \cdot \text{cm} \cdot \text{s})$) 及 850 hPa 风场差值(单位: m/s)

图7 水汽通量及风场差值

从 Con 试验 850 hPa 水汽通量图(图 7a) 分析可以得出,台风存在着明显的不对称性,水汽通量主要集中在台风环流的北侧,且北侧水汽通量高值区主要位于闽北浙南山地地形迎风坡处,局地达 80 以上。在 test0 试验中,由于地形的移除,原本位于迎风坡的水汽通量高值区数值减弱,而背风坡区域的水汽通量明显加大。可以发现地形的作用有利于水汽在迎风坡抬升凝结,进而阻挡水汽至背风坡的输送。Con, test0 试验两者水汽通量与风场差值图(图 7c) 显示,水汽通量差值主要分布在迎风坡前后。相对于 test0 试验,Con 试验水汽通量主要集中在迎风坡区,而背风坡较弱。同时可以发现,图中存在明显的中尺度辐合线,与高地形区域吻合。综上分析可知,受地形强迫抬升作用,水汽通量主要集中在地形迎风坡处。同时,地形作用导致风场辐合,形成中尺度辐合线,有利于降水增幅。

4 结论

利用 NCEP FNL 再分析资料和 WRF V3.7 设计了控制试验和多个地形敏感性试验,对 1513 号台风“苏

迪罗”于闽北浙南地区带来的强降水过程中地形的作用进行分析,得出以下结论:

(1) 模式对台风“苏迪罗”于闽北浙南地区强降水过程有较好的模拟效果。与实况对比中,降水分布、降水强度以及强降水中心,都较为一致。

(2) 浙南闽北地形对台风“苏迪罗”降水影响显著。降水强度与地形高度存在明显的相关性,地形高度的升高有利于降水的增幅。地形同样导致了降水分布不均匀。高地形强降水中心多位于迎风坡,而背风坡降水较少,而在低地形情况下,迎风坡与背风坡降水分布较为均匀。

(3) 不同高度的地形导致暴雨区 600 hPa 以下垂直上升运动存在明显差异,地形的高度与垂直速度存在明显的正相关关系,地形的增高有利于上升运动的增强。

(4) “苏迪罗”在登陆过程中受地形强迫抬升作用,水汽通量主要集中在地形迎风坡处。同时,地形作用导致风场辐合,形成中尺度辐合线,有利于降水增幅。

参考文献:

- [1] 陈联寿,丁一汇. 西太平洋台风概论[M]. 北京: 科学出版社,1979.
- [2] 董美莹,陈联寿,程正泉,等. 地形影响热带气旋“泰利”降水增幅的数值研究[J]. 高原气象, 2011,30(3):700-710.
- [3] 朱红芳,王东勇,娄珊珊,等. 地形对台风“海葵”降水增幅影响的研究[J]. 暴雨灾害,2015,34(2):160-167.
- [4] 李江南,闫敬华,魏晓琳,等. 非地转强迫对 Fitow(0114)暴雨的影响[J]. 气象学报,2005,63(1):69-76.
- [5] 江敦春,党人庆,陈联寿. 卫星资料在台风暴雨数值模拟中的应用. 热带气象学报,1994,10(4):318-324.
- [6] 郑庆林,吴军. 地形对 9216 号台风增幅影响的数值研究[J]. 南京气象学院学报,1996,19(1):8-16.
- [7] 余贞寿,高守亭,任鸿翔. 台风“海棠”特大暴雨数值模拟研究[J]. 气象学报,2007,65(6):864-876.
- [8] 段丽,陈联寿. 热带风暴“菲特”(0114)特大暴雨的诊断研究[J]. 大气科学,2005,29(3):343-353.
- [9] 钮学新,杜惠良,刘建勇. 0216 号台风降水及其影响降水机制的数值模拟试验[J]. 气象学报, 2005,63(1):57-68.

- [10] 孙建华,齐琳琳,赵思雄.“9608”号台风登陆北上引发北方特大暴雨的中尺度对流系统研究[J]. *Acta Meteorologica Sinica*,2006,64(1):57-71.
- [11] 董美莹,陈联寿,程正泉,等.地形影响热带气旋“泰利”降水增幅的数值研究[J]. *高原气象*,2011,30(3):700-710.
- [12] 陈联寿,罗哲贤,李英.登陆热带气旋研究的进展[J]. *气象学报*,2004,62(5):541-549.
- [13] 孔宁谦,杨澄梅.广西沿海热带气旋暴雨分析[J]. *气象研究与应用*,2000,21(4):21-23.
- [14] 李英,陈联寿,钱传海,杨家康.登陆台风 Rannim(0414)环流内中尺度辐合线的形成和发展研究[J]. *气象学报*,2010,68(5):640-651.
- [15] Cheung K K W, Huang L R, Lee C S. Characteristics of rainfall during tropical cyclone periods in Taiwan [J]. *Natural Hazards Earth System Sciences*,2008,8(6).
- [16] Lee, C. -S. , C. -C. Wu, T. -C. Chen Wang, R. L. Elsberry *, 2011, *Advances in Understanding the " Perfect Monsoon- influenced Typhoon " : Summary from International Conference on Typhoon Morakot* [J]. *Asia-Pac J. Atmos. Sci.* , 2009,47(3):213-222.
- [17] Tao W K, J J Shi, P L Lin, et al. High-resolution numerical simulation of the extreme rainfall associated with Typhoon Morakot. Part I: Comparing the impact of microphysics and PBL parameterizations with observations. *Terr. Atmos. Ocean. Sci.* ,2011,22:673-696.