

台风 Rananim 登陆期间地形对其降水和结构影响的数值模拟试验

冀春晓¹ 薛根元² 赵放³ 余贞寿³ 张寒⁴

1 浙江省气象科学研究所, 杭州 310017

2 浙江省气象局, 杭州 310002

3 浙江省温州气象局, 温州 325027

4 浙江省绍兴气象局, 绍兴 312000

摘 要 应用非静力平衡中尺度模式 MM5 (V3.6), 对 0414 号台风 Rananim 在登陆期间移动路径和所产生的降水进行了数值模拟研究, 模式较好地再现了台风 Rananim 的移动路径和所产生的降水, 但模拟的过程降雨量与实况值还有所偏差。多普勒雷达探测资料表明, 台风 Rananim 登陆期间, 强回波带出现在台风移动的右前方, 螺旋云带中镶嵌着大量的对流云团; 垂直液态水含量的高值区出现在台风中心的西北侧。作者通过在浙江、福建东部沿海一带进行有无地形的数值对比试验, 着重讨论了台风登陆期间地形对台风降水、台风结构特征变化的影响。结果表明: (1) 台风登陆期间, 地形的影响对台风降雨量有明显的增幅作用。由地形强迫产生的降雨量和地形走向相一致, 迎风坡降雨量增加, 背风坡降雨量减少, 地形影响使浙江东部一带增加的平均降雨量约占该地区模拟平均总降雨量的 40% 左右。(2) 台风登陆期间, 地形的强迫作用有利于在低层台风眼的西北侧形成明显的辐合带, 高层为明显的辐散区; 在中尺度环流场上, 地形的影响有利于台风中心西北侧低层中尺度气旋性涡旋系统的发生发展, 从而激发中尺度对流云团, 形成中尺度雨团, 造成了台风中心南北雨区和雨量的不对称分布。(3) 地形的强迫作用, 可以使台风流场局部发生改变。当地形强迫产生与台风环流同向的中尺度扰动时, 将使台风环流局部明显增强; 当地形强迫产生与台风环流反向的中尺度扰动时, 将使台风环流局部明显减弱。(4) 台风登陆期间, 地形的影响可以使台风靠近陆地一侧眼壁内的垂直上升速度增大, 位涡明显增强, 从而造成台风涡旋的增强。

关键词 台风 地形影响 数值模拟

文章编号 1006-9895 (2007) 02-0233-12

中图分类号 P444

文献标识码 A

The Numerical Simulation of Orographic Effect on the Rain and Structure of Typhoon Rananim During Landfall

JI Chun-Xiao¹, XUE Gen-Yuan², ZHAO Fang³, YU Zhen-Shou³, and ZHANG Han⁴

1 Zhejiang Institute of Meteorological Sciences, Hangzhou 310017

2 Zhejiang Meteorological Bureau, Hangzhou 310002

3 Wenzhou Prefectural Meteorological Bureau of Zhejiang Province, Wenzhou 325027

4 Shaoxing Prefectural Meteorological Bureau of Zhejiang Province, Shaoxing 312000

Abstract Numerical simulation has been carried out on the track and precipitation of typhoon Rananim (0414) using the non-hydrostatic version 3.6 of the Pennsylvania State University/NCAR mesoscale numerical model (MM5).

收稿日期 2005-06-09, 2006-03-06 收修定稿

资助项目 温州市科技局社会发展科技计划项目 S2003A011, 浙江省气象局重大科技项目 2004ZD03、2004ZD03

作者简介 冀春晓, 女, 1963 年出生, 硕士, 高级工程师, 研究方向: 数值预报。E-mail: jichunxiao@sina.com

The model can well simulate the track and precipitation of typhoon Rananim though the precipitation is underestimated in comparison with observation. However, the model can basically capture the characteristics of intensity change of typhoon Rananim, especially its weakening during landfall. Other features like the heavy rain pattern and the mesoscale rain-band can also be well simulated by the model, though their locations are slightly deviated from observation.

During landfall of typhoon Rananim, the base reflectivity of Doppler radar at Wenzhou indicates that the strong echo bands are located in the right front along the typhoon moving direction, with a lot of mesoscale convective cloud masses in the spiral echo bands, and the high value of vertically integrated liquid (VIL) in the northwest of the typhoon eye. These characters are closely related to the effect of orography. The sensitivity experiments of orographic effect on the changes of precipitation and structure of typhoon Rananim during its landfall by keeping/removing mountains in the eastern area of Zhejiang and Fujian provinces show that: 1) there exists significant increase of rainfall. The precipitation pattern is consistent with orientation of orography, i. e. the rainfall increases on the windward side, while decreases on the lee side. 2) In the northwest of the typhoon eye, there occur many significant convergence zones and mesoscale convective systems in the lower layer, and divergence ones in the upper layer. Mesoscale convective cloud masses are generated and resulted in heavy rain with its distribution highly asymmetric from northwest to southeast. These phenomena are consistent with observations by Doppler radar at Wenzhou. 3) The circulation of typhoon Rananim can be partly changed as the result of orographic forcing. The local circulation of typhoon will be enhanced obviously when mesoscale turbulences initiated by orographic forcing is in phase with the local circulation of typhoon, and vice versa. 4) The vertical motion on the side of the eye wall of the typhoon close to land will be increased, with significant enhancement of potential vorticity leading to strengthening of the typhoon vortex.

Key words typhoon, orographic effect, numerical simulation

1 引言

2004 年, 浙江省承受了 5 个台风 (0407 号 Mindule、0414 号 Rananim、0416 号 Megi、0418 号 Aere、0421 号 Haima) 的影响, 0414 号台风 Rananim 是其中影响最强的一个。Rananim 台风于 2004 年 8 月 8 日 12 时 (国际协调时, 下同) 在吕宋岛以东洋面上生成, 生成后向偏北方向移动, 一路不断加强, 于 8 月 10 日 18 时发展成台风, 8 月 12 日 12 时在浙江省温岭市石塘镇登陆, 登陆后穿过浙江省台州地区南部、温州地区北部、丽水地区北部和衢州地区, 并于 8 月 13 日 03 时离开浙江省进入江西境内。受 Rananim 台风影响, 浙江沿海海面出现了 12 级以上的大风, 其中共有 11 个站超过了 40 m/s, 大陈站的风速最大为 58.7 m/s, 其次为三门县三角塘 46.4 m/s, 浙江省除湖州和衢州地区以外, 其余地区都有 8~10 级大风。浙江省普降大到暴雨, 东部地区出现了暴雨到大暴雨, 台州地区和温州部分地区出现特大暴雨。从 2004 年 8 月 11 日 12 时~13 日 12 时的过程累计雨量 (自动气象观测站) 来看, 浙江省有 30 个测站出现了 200 mm 以上

的降水量, 300 mm 以上的降水有 14 个测站, 其中雨量最大为黄岩的沙埠 451mm, 其次为仙居的朱溪 450 mm, 温岭的坞根 420 mm, 都出现在浙江省的台州市。

对台风的研究历来是气象学家所关注的重要课题, 随着各种数值模式的发展, 利用模式对台风进行数值研究也逐渐成为一种主要手段, 其中以模拟台风路径和强度变化、台风结构、各种参数化方案以及凝结潜热对台风的影响为多。Shapiro 等^[1]曾对飓风的内部结构如飓风眼、眼壁等特征进行了研究。Guinn 等^[2]对飓风所产生的螺旋雨带进行了详细讨论。朱佩君等^[3, 4]对登陆台风 Winnie (1997 年) 的结构变化和变性过程进行了数值模拟研究, 成功模拟了 Winnie 台风在登陆后其云系的结构从热带气旋的螺旋结构到温带气旋的锋面云系结构的转变过程。Liu 等^[5, 6]曾利用高分辨中尺度数值模式对飓风 Andrew (1992 年) 进行了多尺度数值研究, 对飓风 Andrew 的路径、强度、运动学和内部结构等进行了详尽的模拟, 对所使用的高分辨中尺度数值模式进行了检验, 他们的研究表明, 在使用包含真实的物理过程和与大尺度环流背景相关

联的初始涡旋扰动的高分辨中尺度数值模式的前提下,合理预报飓风的路径、强度和内部结构将成为可能。Zhang 等^[7~9]同时对成熟期飓风 Andrew 的内部热力学特征、动力诱发的垂直运动和非平衡气流进行了详细的模拟研究,并得出了成熟期飓风的概念模型,这为我们认识飓风的三维结构奠定了基础。近年来,人们较关注对登陆台风的研究。陈联寿等^[10]在登陆台风的研究中,主要分析了地形强迫下台风的异常运动、热带气旋与中纬度环流系统的相互作用等问题。在对地形的研究中,主要是针对岛屿(如台湾岛)地形对台风移动路径、台风强度变化影响的研究。蔡则怡等^[11]用中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室(简称 LASG) η 坐标数值模式对一次登陆台风造成的特大暴雨进行了数值模拟试验,发现山脉的相对高度和陡峭程度,以及山脉与暴雨系统的相对位置等对暴雨的强度是非常敏感的,地形稍有改变,其暴雨强度将减少 3/4 以上。钮学新等^[12]使用 MM5 对 0216 号台风降水及影响降水机制进行了数值模拟试验,结果表明,地形作用使迎风坡及降水中心增加雨量,背风坡雨量减少,从而使降水分布更不对称、更不均匀。袁金南等^[13, 14]的研究表明,岛屿地形对台风移动路径影响不明显,而对台风带来的降水则有明显影响。解以扬等^[15]在登陆台风暴雨地形增幅的数值试验中指出,下垫面地形的动力、热力强迫对台风的运动可以产生较为显著的影响,地形的动力强迫可使 500 hPa 垂直运动在有无地形偏差场上构成一对上升与下沉运动的“偶结构”,即地形强迫对登陆台风外围环流的响应。Wu^[16]利用飓风模式对台湾岛地形对台风(Gladys)的影响进行了数值模拟试验,发现飓风模式虽然低估了台风(Gladys)的强度,但仍然可以很好地再现台风在登陆期间的减弱过程;同时也发现由地形影响造成的绝热加热将会诱发地面低压中心的产生。Wu 等^[17]使用高分辨数值模式进行的数值模拟表明,模式准确模拟台风降水的能力主要取决于模式的水平分辨率和模式对地形的描述能力;地形对台风降雨具有明显的增幅效应。余晖等^[18]曾应用湿位涡方程和倾斜涡度发展理论,研究了热带气旋强度的突变问题,认为当热带气旋中心附近大部分区域的垂直涡度显著增长时,热带气旋就会在整体上表现为爆发性或迅速发展。高守亭等^[19]

从动力学上推导了热力、质量强迫下的湿位涡方程,研究结果表明,湿位涡异常区与暴雨区有很好的对应关系。但是,应用数值模式并结合新一代多普勒天气雷达探测资料分析台风在登陆期间地形对其降水和结构影响的研究目前尚少见。本文通过数值模拟对台风 Rananim 在登陆前后的降水及其结构特征变化进行了研究,并针对特定范围地形的取舍进行了敏感试验,得到了较为理想的模拟结果,对新一代多普勒天气雷达探测到台风 Rananim 的特征变化给予了合理的解释。

2 试验方案的设计

本文使用由美国宾州大学和美国大气研究中心提供的非静力平衡中尺度模式 MM5 (V3.6),模拟区域以(28°N , 120.5°E)为中心,采用两重嵌套网格,外域用粗网格,格距为 45 km,格点数为 121×121 ;内域用细网格,格距为 15 km,格点数为 91×91 ,垂直方向为不等距的 23 个 σ 层,地形分辨率为 $2'$,积云对流参数化方案为 Betts-Miller 方案,行星边界层方案采用 MRF 方案,且考虑由云引起的长、短波辐射。时间步长为 90 s。模拟时间从台风在浙江登陆前的 2004 年 8 月 11 日 12 时开始(即台风登陆前 24 h)到 2004 年 8 月 13 日 12 时(即台风登陆后 24 h)结束,模式积分 48 h。本文模式的初值场和边值场均采用 NCEP 的 AVN 资料,模拟全程用 FDDA 同化分析每隔 3 小时一次地面、浙江省中尺度自动站及每隔 12 小时一次探空资料进入模式。对台风未进行人工处理。

为了检验浙江省一带的地形对 Rananim 台风结构、强度以及所造成的降雨量的影响,在其他参数保持不变的情况下,我们针对地形的取舍,在本次数值模拟中设计了两套模拟试验方案:试验方案 I,保持模式原有的地形特征;试验方案 II,消除模式在($26^{\circ}\text{N} \sim 30^{\circ}\text{N}$, $118^{\circ}\text{E} \sim 122^{\circ}\text{E}$)范围内的地形,即地形高度取为 0 m。

为了节省篇幅,在下面的分析讨论中,我们着重对比分析这两种试验方案中内域输出的预报结果。

3 台风路径和台风降雨量的模拟

从图 1 我们可以清楚地看到,模式模拟的路径和台风实际路径是非常接近的。从实况路径来看,

登陆前台风基本向西北方向移动;登陆后台风路径先是有明显的西折,登陆 3 小时后向西北方向运动,登陆 9 小时后朝偏西方向运动。从模式模拟的台风路径来看,其移动趋势与实际路径基本一致,尤其是登陆地点和登陆后的西折现象都得到了很好的再现,这说明对台风 Rananim 路径的模拟是成功的。但模拟的登陆后台风移动速度却比实况偏慢,模拟台风中心位置与实况最大距离偏差约为 90 km

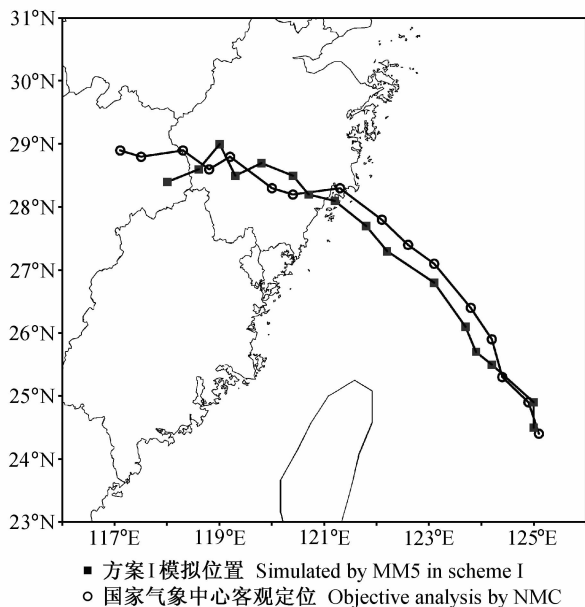
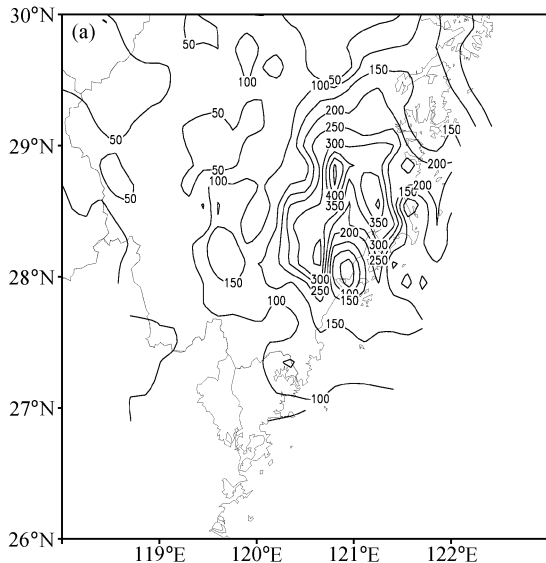


图1 2004年8月11日12时~13日12时每3小时一次的台风中心位置

Fig. 1 The track of typhoon Rananim per 3 h from 1112 UTC to 1312 UTC Aug 2004



左右。从模拟的台风中心气压(图略)来看,模拟的台风中心气压在登陆前减小,登陆后逐渐增大,其变化趋势与实况基本接近,但模拟的台风中心气压大于实际台风中心气压,主要原因可能是由于海上观测资料稀少,模式的水平分辨率还不够高,所采用的 NCEP 初始场中对台风的强度达不到更精确的描述,所以模拟的台风中心气压要明显高于实际值。这说明模式对台风强度的模拟存在一定的不足。

图 2a 为 2004 年 8 月 11 日 12 时至 13 日 12 时 50 mm 以上实况累积降雨量图。浙江范围的雨量资料中加入了地面中尺度雨量站的资料。这次 Rananim 台风带来的降雨主要出现在台风登陆时及登陆后,特大暴雨区主要出现在浙江省的东部沿海一带。8 月 11 日 12 时到 13 日 12 时,达到 400 mm 以上的强降水中心有两个,位于浙江省台州南部一带,一个 350 mm 以上的强降水中心位于浙江省温州的北部一带;在浙江省丽水的东南部、温州的南部存在降水中心值为 150 mm 以上的强降水中心;此外,在浙江省的西部出现了多个 50 mm 以上的暴雨中心。从试验 I 模拟累积降水量(图 2b)可以看到:模拟的 100 mm 以上大暴雨区与实况是非常一致的,几个大暴雨中心均有良好的表现。对于温州北部和台州南部一带的强降水中心,模拟累积降水量达到了 300 mm 以上,但在量值上还是要小于实况值,在位置上向东北方向偏离了 80 km 左右;丽水东南部的强降水中心模拟累积降水量达到了

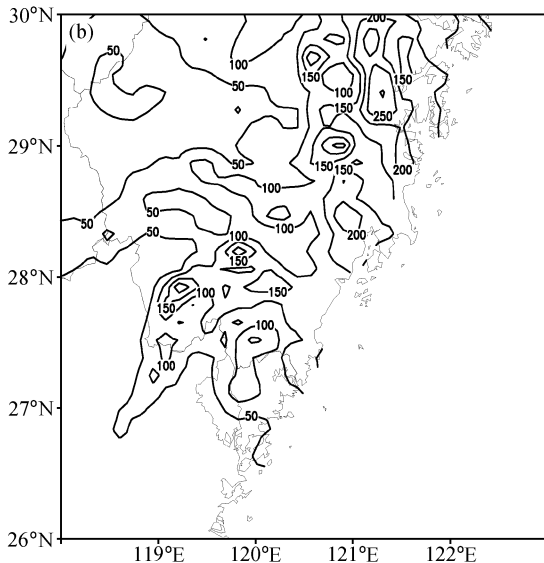


图2 2004年8月11日12时~13日12时累积降雨量(单位:mm): (a) 实况; (b) 方案I模拟

Fig. 2 Precipitation (mm) from 1112 UTC to 1312 UTC Aug 2004: (a) Observation; (b) simulation in scheme I

200 mm 左右, 与实况值基本相一致, 强降水中心的位置也基本吻合; 温州南部的强降水中心模拟累积降水量达到了 150 mm 左右, 其量值和中心位置都与实况值基本相一致。浙江省西部的暴雨中心也得到了很好的模拟。所以, 无论从路径的模拟, 还是雨量的模拟, MM5 都有良好的表现。

4 多普勒雷达观测结果分析

首先, 从温州多普勒雷达探测到的基本反射率图(图 3)来看, 在台风 Rananim 登陆前, 台风眼壁环形呈闭合环状, 强度 45 dBZ 以上, 高度在 12~15 km, 眼壁外螺旋回波范围 700 km 以上, 螺旋状回波带结构严密、汇集在眼壁上, 螺旋云带中镶嵌着大量的对流云团, 说明螺旋云带中的中尺度系统活跃, 回波强度向上过滤 30 dBZ 后可见到呈“9”字分布的强主体结构。从多普勒雷达探测到的台风中垂直累积液态水含量产品(VIL)(图 4a)的结果分析发现, 台风 Rananim 登陆时含水量极大值位于台风中心的前部和右前侧, 垂直累积液态水含量最大值达 13 kg/m²。随着台风登陆后逐步向内陆移动, 约半个小时后(图 4b), 空中垂直液态水含量出现一些新的变化, 主要是台风前进方向的右侧出现含水量带状大值区, 其水平范围明显增大, 最大值也

达到 13 kg/m², 与图 4a 相比较, 表明这一区域是液态水含量高值区的发生地, 这其实是台风螺旋云带强降水云团的触发地, 其中的生消过程说明了其中源地的存在, 这一区域正是地面出现强降水的乐

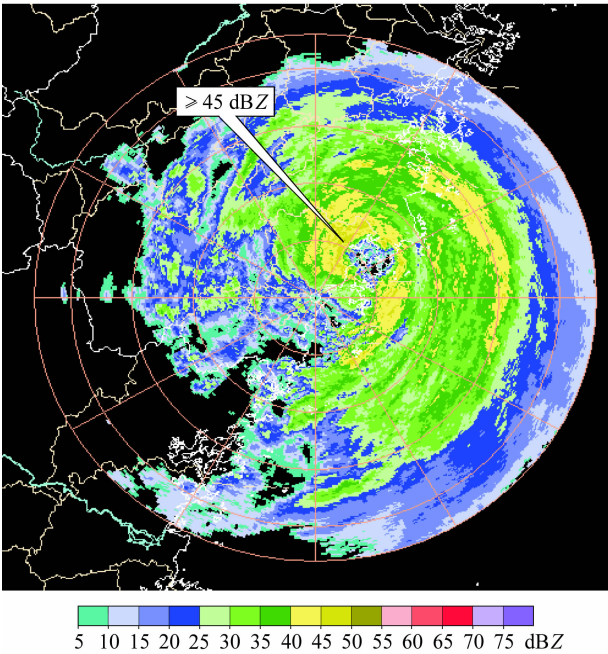


图 3 2004 年 8 月 12 日 11:54 多普勒雷达基本反射率图
Fig. 3 Base reflectivity of Doppler radar at Wenzhou at 1154 UTC 12 Aug 2004

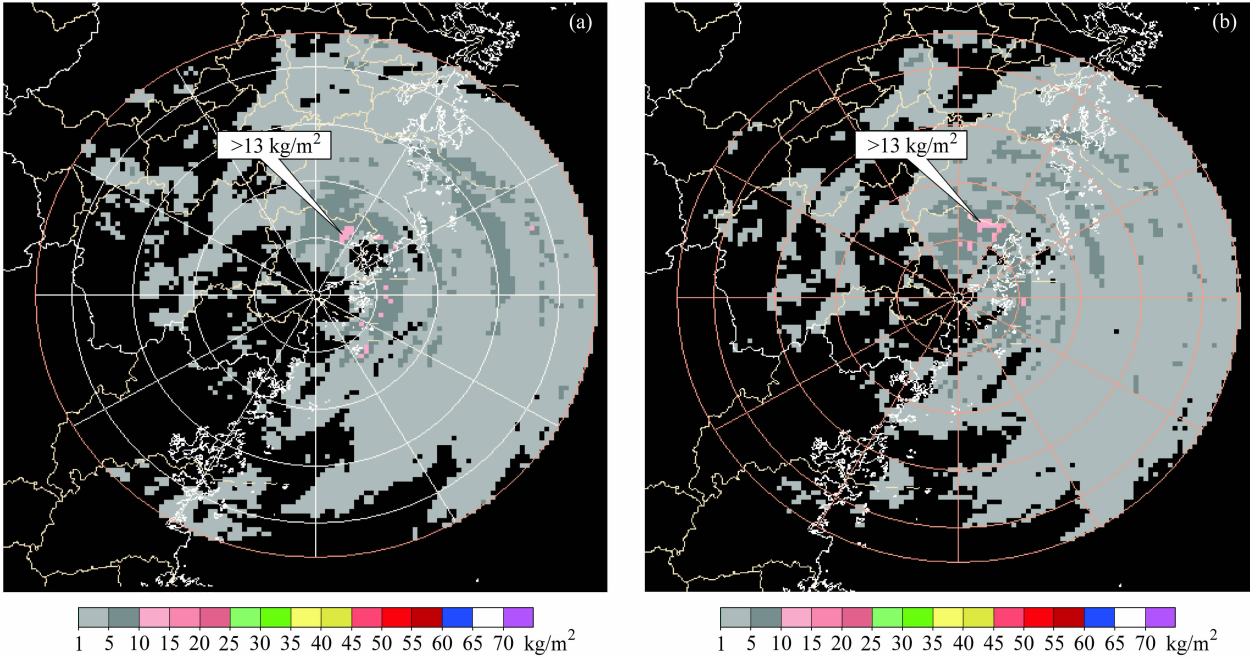


图 4 2004 年 8 月 12 日多普勒雷达垂直累积液态水含量图: (a) 12:00; (b) 12:30
Fig. 4 Vertically integrated liquid of Doppler radar at Wenzhou on 12 Aug 2004; (a) 1200 UTC; (b) 1230 UTC

清礅头和永嘉中保山区一带，这与前面分析的强降雨中心相一致。从Rananim台风移动路径来看，对于乐清礅头和永嘉中堡等临近乡镇，在Rananim台风自东向西移来时，形成了两个喇叭口状的地形效应；Rananim台风西进后，又处在台风东南环流中，风向与北雁荡山脉形成较大的夹角，造成的抬升作用持续维持。从而引发两地出现历史上罕见的暴雨及泥石流的发生。

5 登陆期间地形对台风动力、热力学结构影响分析

5.1 地形对水平流场的影响

5.1.1 地形对大尺度水平流场的影响

陈联寿等^[20]在我国热带气旋研究十年进展中指出，地形在一定条件下会改变热带气旋的局部结构而使其强度变化。陆地磨擦影响总的趋势是使热带气旋减弱消亡，但也有短时间内使热带气旋增强的作用。当热带气旋趋近海岸、陆地、岛屿时，向岸风或沿海山脉迎风坡的辐合作用将加剧对流运动，陆地上山脉地形增强的辐合对流会不断产生中尺度对流系统。地形的这些作用均会使热带气旋得到短时间的加强。为进一步讨论地形的动力抬升作用，我们分析了速度场的演变情况。图5a为积分

24 h 试验 I 中 850 hPa 流场和试验 I 减去试验 II 散度差分布图。当台风Rananim靠近陆地时，受地形的强迫，偏东北或偏北气流沿山脉开始爬升，低层850 hPa台风中心西北侧的气流吹进喇叭口地形中，产生明显的辐合效应。由图5a可知，地形的影响在台风眼的外侧造成了明显的辐合带，辐合区围绕台风眼成螺旋带状分布，靠近台风眼内侧的辐合带比外侧的辐合带要强，且强的辐合带主要分布在台风眼的西北侧，最小值达到了 $-6 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ ，辐合带中存在着多个强的辐合中心；在高空300 hPa以上，与辐合区相对应的是强的辐散区，低层辐合，高层辐散，必然导致对流运动的发生发展；这些强的辐合中心刚好与雷达观测到的中尺度强对流回波($\geq 45 \text{ dBZ}$)相对应(图3)。图5b给出了积分24 h时850 hPa试验I减去试验II所得风矢量的分布图，由图中可知，在低层水平流场上强辐合带上对应着正的风速差分布，强的辐合中心与大风速差中心相对应，最大风速差在20 m/s左右，与地形的分布有很好的对应关系。从风矢量差(图5b中箭头所示)的分布来看，在正风速差分布区域，风矢量刚好与台风环流相一致；在正风速差的两侧为负风速差分布，风矢量与台风环流相反。所以，当地形强迫产生与台风环流同向的扰动时，将

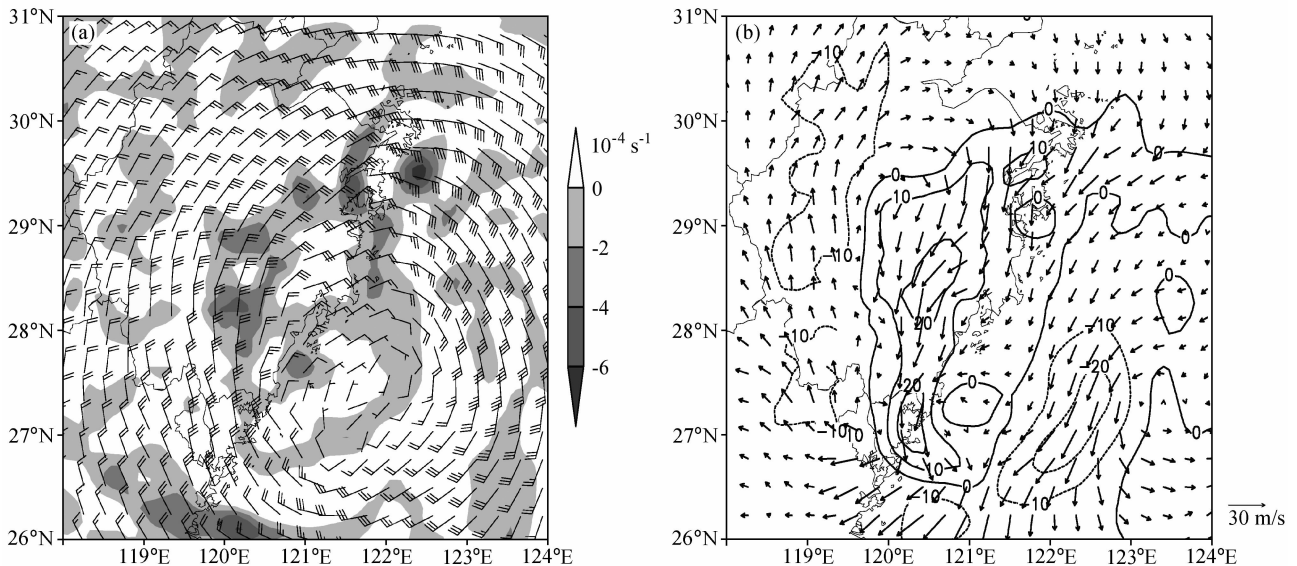


图5 积分24 h的结果：(a) 方案I的850 hPa流场(单位：m/s)与方案I减去方案II散度差分布(阴影)；(b)方案I减去方案II风矢量量差分布，等值线为风速差(单位：m/s)，实线代表正值，虚线代表负值

Fig. 5 Simulated results after integrating 24 h: (a) 850 hPa wind field (m/s) in scheme I and the difference of divergence between scheme I and II (shaded); (b) the difference of wind vector between scheme I and scheme II, isoline is difference of wind speed (m/s), solid denotes positive, dashed denotes negative

使台风环流局部明显增强, 台风降雨相应增大; 反之, 当地形强迫产生与台风环流反向的扰动时, 将使台风环流局部明显减弱, 台风降雨相应减少。由此可见, 地形影响可以使台风环流局部发生改变, 从而造成台风降雨的不均匀分布。

5.1.2 地形对中尺度水平流场的影响

为了分析中尺度扰动场, 滤波方案采用格点分析与显示系统 (grads) 九点平滑算子, 对积分流场进行尺度分离。滤掉 2、3、4、5、6 倍格距的波, 得到低通滤波场。用原始场减去低通滤波场, 得到中尺度扰动场。从图 5a 可以看到, 未经过滤波时低层流场为台风的气旋式环流, 在浙江东部沿海一带为偏东北气流。图 6 给出了不同方案经过滤波后积分 24 h 时 900 hPa 的中尺度流场。从方案 I (图 6a) 的模拟结果可以看到, 在浙江东部沿海一带 900 hPa 的流场上存在着中尺度气旋性涡旋系统, 它们均位于山脉的东南侧, 其分布与地形的走向相一致。值得指出的是, 位于温州永嘉一带 (28.3°N, 120.7°E) 的中尺度气旋性涡旋系统, 它与图 3 上的中尺度强对流回波 (≥ 45 dBZ)、图 4a 中垂直累积液态水含量的极大值区域都十分吻合, 模拟结果与观测事实相一致; 而在方案 II 的模拟结果 (图 6b) 中, 浙江东部沿海一带 900 hPa 的流场上却不存在中尺度气旋性涡旋, 而是被一个反气旋性涡旋所取代。这一结果说明地形的影响有利于低层流场上中尺度气旋性涡旋系统的发生发展, 从而导致中尺度

对流云团的加强, 对当地特大暴雨的产生起到了极其重要的作用。

5.2 地形对相当位温、垂直速度、位涡的影响

从相当位温 (θ_e) 的水平分布图 (图略) 可以看到, 从整体来看, θ_e 的高值中心呈螺旋状分布在台风 Rananim 中心的周围, 即台风的眼壁为 θ_e 的高值区, 与台风云系有很好的对应关系, 台风中心为 θ_e 的相对低值区, 所以, 台风眼内和眼壁外围是相当位温的相对低值区。这与已有研究结果相一致^[18]。

图 7 为试验 I 中积分 15 h (图 7a) 和 24 h (图 7b) 沿台风近中心的垂直剖面。从图 7a 中可知, 存在着强烈的上升运动, 对流云发展旺盛, 强上升气流呈倾斜状位于台风中心的前方, 垂直速度的最大值位于 550 hPa 附近, 量值达到了 1.1 m/s。在上升气流的下方, 即 700 hPa 以下存在着相当位温的高值区, 中心值达到了 366 K; 对应在湿度场上, 也存在着混合比的高值区, 中心值为 0.02 kg/kg (图 8a)。这样, 台风眼壁中倾斜的上升气流把低层的高温、高湿空气向高空输送。台风眼壁附近等相当位温线近于陡立且存在着强烈的上升运动, 是涡旋发展最激烈的地方。所以我们可以看到, 与倾斜上升运动区相对应, 存在着位涡的高值区, 极大值为 5 PVU ($1 \text{ PVU} = 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{K} \cdot \text{kg}^{-1}$), 位于 400 hPa 以下 (图 8a)。随着台风逐渐向大陆靠近, 地形对台风的强迫作用明显增加。当积分到

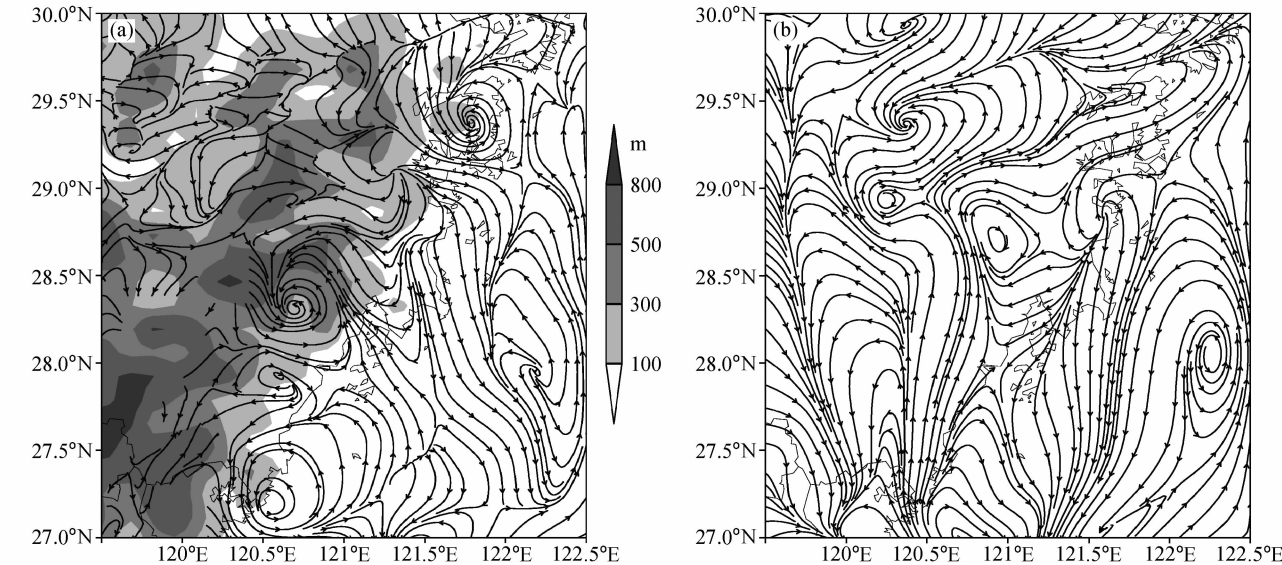


图 6 积分 24 h 的 900 hPa 中尺度流场分布图: (a) 方案 I, 阴影为地形高度; (b) 方案 II

Fig. 6 Simulated 900 hPa mesoscale wind field after integrating 24 h: (a) Scheme I (the shading is topography); (b) scheme II

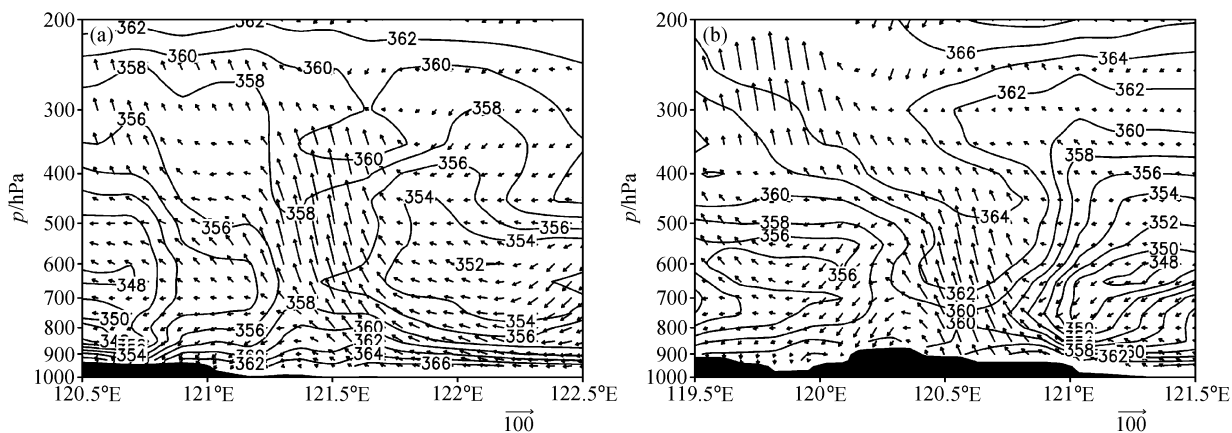
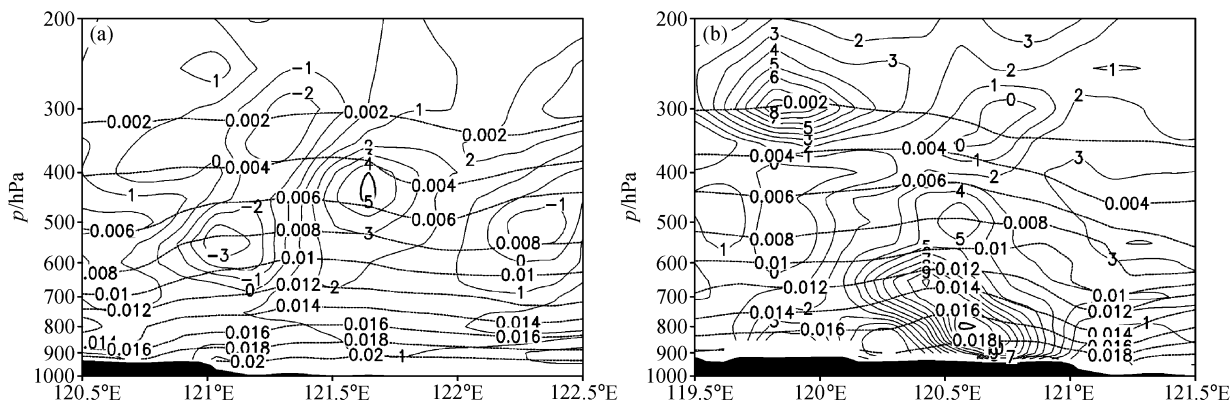


图 7 方案 I 中不同时刻 θ_e (等值线, 单位: K) 和合成垂直流场 (用 u 与 $100 \times w$ 合成, u 和 w 的单位: m/s) 的纬向剖面图: (a) 积分 15 h; (b) 积分 24 h

Fig. 7 Longitudinal cross sections of simulated equivalent potential temperature (isoline, units: K) and composite wind field (u and $100 \times w$, units for u and w : m/s) in scheme I after integrating 15 h (a) and 24 h (b)



大,进而造成台风涡旋的增强,导致特大暴雨的产生。

6 地形对台风降水的影响分析

陈联寿等^[21]在登陆热带气旋研究的进展中指出,由于陆地山脉地形的强迫作用,登陆台风的降雨强度和分布与在海上时有较大差异。潮湿气流向岸地形成辐合将会使台风暴雨增长,雨区范围扩大。这种作用将使华东登陆台风中心北侧雨量增强,并使大范围雨区主要出现在台风中心北侧,形成台风中心南北雨区和雨量的不对称分布。这一结论在本次台风的试验研究中得到了证实。为了讨论地形对台风降雨的影响,我们进行了两种方案的对比试验。对比两种试验的累积降雨量图(图 2b、图 9a)可以发现,有地形时的雨量无论是雨区范围,还是雨量强度都明显大于无地形时的雨量,且分布更加不均匀。在图 2b 中,台风中心北侧的雨量明显大于南侧的雨量;在图 9a 上却刚好相反,去掉地形后,迎风坡和背风坡的效应几乎消失,出现了台风中心南侧的雨量明显大于北侧的雨量。在图 9b 上可以看到,在台风中心北侧两种试验的雨量差为正,而在台风中心的南侧,两种试验的雨量差则为负,两种试验最大雨量差的绝对值均可以达到 200 mm 以上,雨量差的分布和地形的走向相一致。

以上结果说明地形的影响可以使迎风坡台风雨量明显增加,使背风坡台风雨量明显减少。雨量差的正值区主要分布在(28°N~30°N, 120.5°E~121.5°E)范围内,在该范围内分别对两种方案模拟的累积降雨量求平均可以得到,方案 I 的平均降雨量为 161.3 mm,方案 II 的平均降雨量为 91.6 mm,后者为前者的 60% 左右。由于地形影响增加的方案 I 平均降雨量为方案 II 的 40% 左右。可见台风 Rananim 登陆之后,浙江东部沿海一带呈近似东北-西南走向的山脉对台风起到了很强的强迫抬升作用,既造成了南北雨量的不均匀分布,也使当地产生了特大暴雨。

从方案 I 每 3 小时的雨量模拟动态图中可以发现,当台风 Rananim 离陆地较远时,螺旋雨带基本环绕台风中心呈对称分布。当台风 Rananim 逐渐靠近陆地时(图 10a),靠近陆地一侧 3 h 累积降雨量开始增加,达到约 40 mm 左右,但螺旋雨带仍然呈圆形环绕在台风眼的周围,螺旋雨带中存在明显的中尺度雨团;而由于地形影响产生的降雨量(图 10c),即方案 I 与方案 II 的雨量差明显增大,靠近陆地一侧最大雨量差在 20 mm 以上,主要位于台风中心的偏北侧;积分 24 h(图 10b)时,此时台风 Rananim 登陆,螺旋雨带的结构发生了显著变化,3 h 累积降雨量明显增加,60 mm 以上的强降雨区

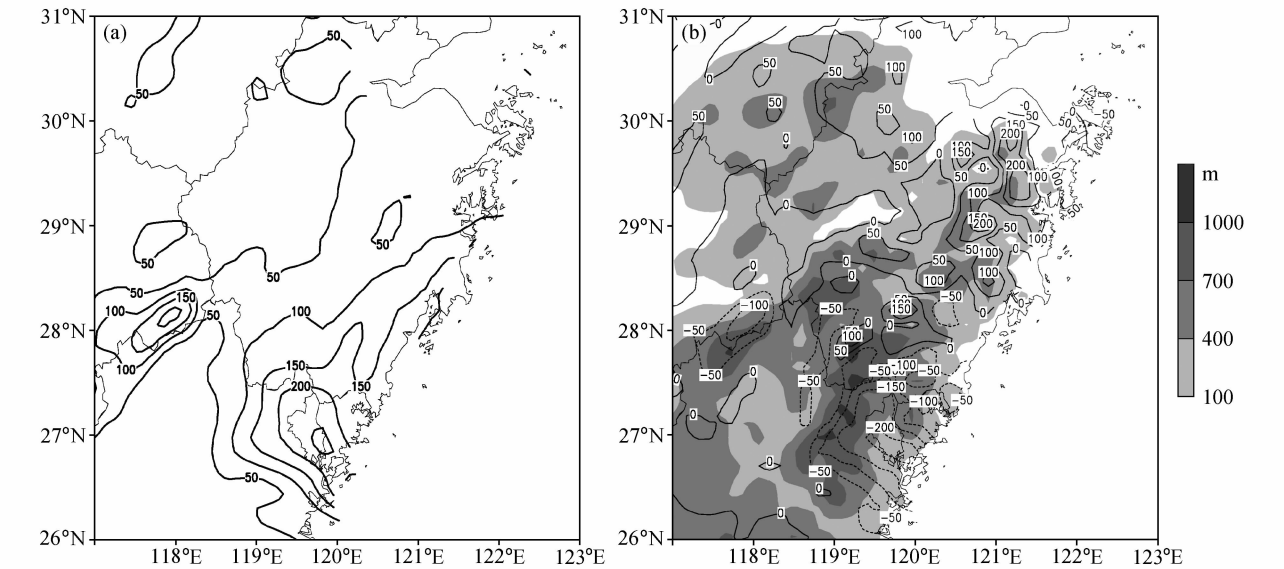


图 9 2004 年 8 月 11 日 12 时~13 日 12 时模拟结果(单位: mm): (a) 方案 II 模拟雨量; (b) 方案 I 减去方案 II 所得雨量差(阴影为地形)

Fig. 9 Simulated results from 1200 UTC 11 Aug to 1200 UTC 13 Aug 2004: (a) Precipitation (mm) in scheme II; (b) the difference of rainfall (mm) between schemes I and II (scheme I—scheme II, the shading is topography)

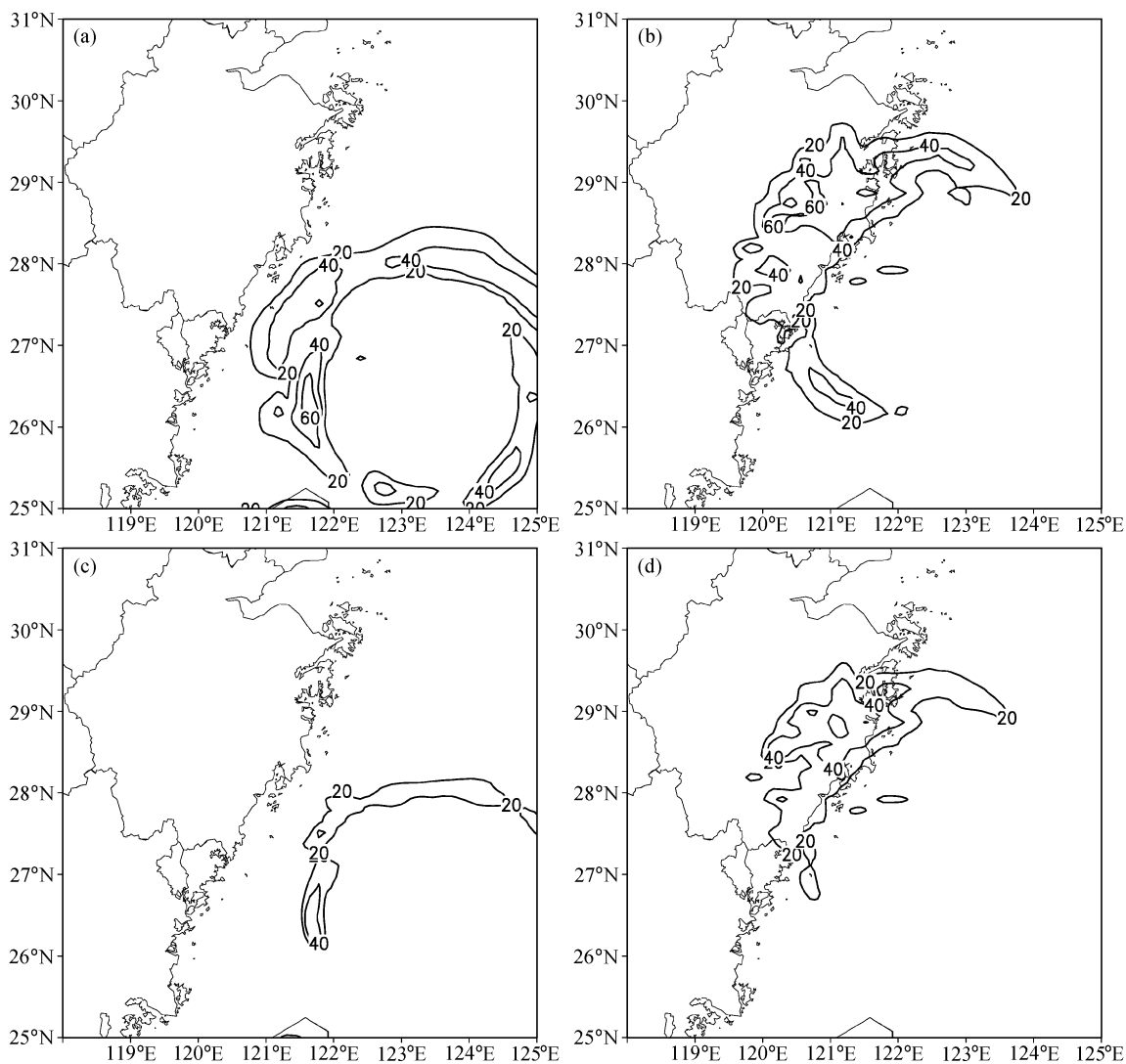


图 10 积分 12~15 h (a、c) 和积分 21~24 h (b、d) 方案 I 模拟累积雨量 (a、b) 及方案 I 减去方案 II 所得雨量差 (c、d)

Fig. 10 Simulated 3 h rainfall (a, b) in scheme I and the difference of rainfall (c, d) between scheme I and scheme II during integrating 12–15 h (a, c) and 21–24 h (b, d)

与图 6a 中位于温州永嘉一带 (28.3°N , 120.7°E) 的中尺度气旋性涡旋系统有很好的对应关系。雨区主要分布在台风中心的西北侧, 呈明显的不对称分布, 雨区范围明显扩大, 并且螺旋雨带中的中尺度雨团特征更加明显, 存在着多个中小尺度的雨团中心, 这些中小尺度雨团的水平尺度与当地山脉的水平尺度基本一致。方案 I 与方案 II 雨量差 (图 10d) 的大值区同样分布在台风中心的西北侧, 呈南北不对称分布, 最大雨量差在 60 mm 左右, 说明浙江沿海一带的山脉地形对台风 Rananim 产生的降雨量起着非常重要的作用。以上这些特征变化与多普勒雷达探测到的台风中垂直累积液态水含量、

基本反射率分布非常吻合。所以, 当台风逐渐逼近大陆和登陆时, 由于地形的强迫抬升作用, 地形影响使台风 Rananim 的降水量和降水范围不断增强与扩大, 且围绕台风中心成不对称分布, 台风中心西北侧的地形降水明显大于东南侧的地形降水。

为了进一步检验地形对台风降雨的增强作用, 如图 11 在最大雨量差近中心处沿纬线作垂直剖面图, 图中虚线为地形高度, 实线为雨量值。从图 11 中可以看到, 当台风从东到西逐渐靠近陆地时, 模拟的降雨量随着山脉的变化而改变。在迎风坡, 雨量随着地形高度的增大而增加; 在背风坡, 雨量随着地形高度的减小而减少, 雨量量值分布曲线与山

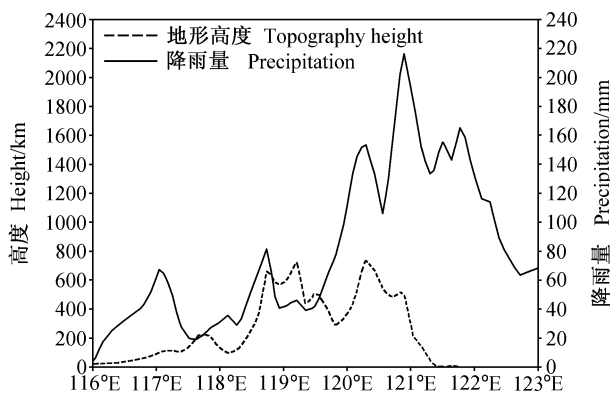


图 11 方案 I 48 h 模拟雨量纬向垂直剖面图

Fig. 11 The vertical cross-section of simulated 48 h precipitation in scheme I

脉高度分布曲线相一致。当台风在翻越不同海拔高度的山脉时, 由地形产生的雨量有较大的差别; 随着台风继续向内陆的深入, 所产生的降雨量明显减少, 因此, 地形的强迫对台风雨量有明显的增幅作用, 也是造成雨量分布极其不均匀的主要原因。

7 小结

(1) 试验 I 对台风 Rananim 路径的模拟是成功的, 在过程降雨量的模拟上, 大暴雨区与实况还是非常接近的, 但最大模拟过程降雨量小于实况值, 其中心落区与实况也有约 80 km 的偏差, 说明模式对个别站点的特大暴雨模拟能力存在不足。

(2) 地形对台风的降雨量有明显的增幅作用。由地形强迫产生的降雨量和地形的走向相一致, 迎风坡降雨量增加, 背风坡降雨量减少, 地形影响在浙江东部一带造成的平均降雨量约占该地区平均模拟总降雨量的 40% 左右。

(3) 地形的影响可以激发螺旋云带中尺度对流云团的发生发展。台风登陆期间, 由于地形的强迫作用, 在低层台风眼的西北侧形成了明显的辐合带, 高层为明显的辐散区, 地形的影响有利于低层中尺度气旋性涡旋的产生, 从而在台风中心的西北侧激发中尺度对流云团的发生发展, 形成中尺度雨团, 造成了台风中心南北雨区和雨量的不对称分布, 台风中心西北侧雨强比东南侧的要强; 西北侧雨区范围比东南侧的要大, 与多普勒雷达观测结果相一致。

(4) 地形的强迫作用, 可以使台风流场局部发生改变。当地形强迫产生与台风环流同向的中尺度

扰动时, 将使台风环流局部明显增强; 当地形强迫产生与台风环流反向的中尺度扰动时, 将使台风环流局部明显减弱。

(5) 台风登陆期间, 地形的影响可以使台风靠近陆地一侧眼壁内的垂直上升速度增大, 位涡明显增强, 从而造成台风涡旋的增强。

参考文献 (References)

- [1] Shapiro L J, Willoughby H E. The response of the balanced hurricanes to local sources of heat and momentum. *J. Atmos. Sci.*, 1982, 39: 378~394
- [2] Guinn T A, Schubert W H. Hurricane spiral bands. *J. Atmos. Sci.*, 1993, **50**: 3380~3403
- [3] 朱佩君, 陈敏, 陶祖钰, 等, 登陆台风 Winnie (1997) 的数值模拟研究 I: 结果检验和云系的模拟. *气象学报*, 2002, **60** (5): 553~559
Zhu P J, Chen M, Tao Z Y, et al. Numerical simulation of typhoon Winnie (1997) after landfall. Part I: Model verification and model clouds. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2002, **60** (5): 553~559
- [4] 朱佩君, 陈敏, 陶祖钰, 等, 登陆台风 Winnie (1997) 的数值模拟研究 II: 结构演变特征分析. *气象学报*, 2002, **60** (5): 560~567
Zhu P J, Chen M, Tao Z Y, et al. Numerical simulation of typhoon Winnie (1997) after landfall. Part II: Structure evolution analysis. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2002, **60** (5): 560~567
- [5] Liu Y B, Zhang D L, Yau M K. A multiscale numerical study of hurricane Andrew (1992). Part I: Explicit simulation and verification. *Mon. Wea. Rev.*, 1997, **125**: 3073~3093
- [6] Liu Y B, Zhang D L, Yau M K. A multiscale numerical study of hurricane Andrew (1992). Part II: Kinematics and inner-core structures. *Mon. Wea. Rev.*, 1999, **127**: 2597~2616
- [7] Zhang D L, Liu Y B, Yau M K. A multiscale numerical study of hurricane Andrew (1992). Part III: Dynamically induced vertical motion. *Mon. Wea. Rev.*, 2000, **128**: 3772~3778
- [8] Zhang D L, Liu Y B, Yau M K. A multiscale numerical study of hurricane Andrew (1992). Part IV: Unbalanced flows. *Mon. Wea. Rev.*, 2001, **129**: 92~107
- [9] Zhang D L, Liu Y B, Yau M K. A multiscale numerical study of hurricane Andrew (1992). Part V: Inner-core thermodynamics. *Mon. Wea. Rev.*, 2002, **130**: 2745~2763
- [10] 陈联寿, 徐祥德, 罗哲贤, 等. 热带气旋动力学引论. 北京: 气象出版社, 2002. 168~313
Chen L S, Xu X D, Luo Z X, et al. *Introduction to Tropical*

- Cyclone Dynamics* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 2002. 168~313
- [11] 蔡则怡, 宇如聪. LASG η 坐标有限区域数值预报模式对一次登陆台风特大暴雨的数值试验. *大气科学*, 1997, **21** (4): 459~471
- Cai Z Y, Yu R C. A numerical simulation of an extraordinary storm rainfall caused by a landing typhoon with LASG mesoscale model. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica)* (in Chinese), 1997, **21** (4): 459~471
- [12] 钮学新, 杜惠良, 刘建勇. 0216 号台风降水及影响降水机制的数值模拟试验. *气象学报*, 2005, **63** (1): 57~68
- Niu X X, Du H L, Liu J Y. The numerical simulation of rainfall and precipitation mechanism associated with typhoon Sinlaku (0216). *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2005, **63** (1): 57~68
- [13] 袁金南, 万齐林. 岛屿地形和对流凝结潜热对登陆台风“黄蜂”影响的数值研究. *热带气象学报*, 2003, **19** (增刊): 81~87
- Yuan J N, Wan Q L. Numerical study on the effect of island topography and convective condensation heating on landfall typhoon “Vongfong”. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 2003, **19** (supplement): 81~87
- [14] 袁金南, 万齐林. 台风“玛姬”(9903)数值模拟试验. *热带气象学报*, 2003, **19** (3): 317~322
- Yuan J N, Wan Q L. Numerical simulation experiments of the typhoon Maggie. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 2003, **19** (3): 317~322
- [15] 解以扬, 徐祥德. 登陆台风暴雨地形增幅的数值试验. *南京气象学院学报*, 1993, **19** (4): 451~456
- Xie Y Y, Xu X D. Numerical experiments on amplitude increment of landfall typhoon rainstorm caused by topographic forcing. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology* (in Chinese), 1993, **19** (4): 451~456
- [16] Wu C C. Numerical simulation of typhoon Gladys (1994) and its interaction with Taiwan terrain using the GFDL hurricane model. *Mon. Wea. Rev.*, 2001, **129**: 1533~1549
- [17] Wu C C, Yen T H, Kuo Y H. Rainfall simulation associated with typhoon Herb (1996) near Taiwan. Part I: The topographic effect. *Weather and Forecasting*, 2002, **17**: 1001~1015
- [18] 余晖, 吴国雄. 湿斜压性与热带气旋强度突变. *气象学报*, 2001, **59** (4): 440~449
- Yu H, Wu G X. Moist baroclinity and abrupt intensity change of tropical cyclone. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2001, **59** (4): 440~449
- [19] 高守亭, 雷霆, 周玉淑. 强暴雨系统中湿位涡异常的诊断分析. *应用气象学报*, 2002, **13** (6): 662~670
- Gao S T, Lei T, Zhou Y S. Diagnostic analysis of moist potential vorticity anomaly in torrential rain systems. *Journal of Applied Meteorological Science* (in Chinese), 2002, **13** (6): 662~670
- [20] 陈联寿, 罗哲贤, 李英. 登陆热带气旋研究的进展. *气象学报*, 2004, **62** (5): 541~549
- Chen L S, Luo Z X, Li Y. Research advances on tropical cyclone landfall process. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2004, **62** (5): 541~549
- [21] 陈联寿, 孟智勇. 我国热带气旋研究十年进展. *大气科学*, 2001, **25** (3): 420~432
- Chen L S, Meng Z Y. An overview on tropical cyclone research progress in China during the past ten years. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2001, **25** (3): 420~432