

卢晶晶,徐迪峰.地形对中小尺度低涡活动影响的数值试验研究[J].暴雨灾害,2011,30(1):19-27

地形对中小尺度低涡活动影响的数值试验研究

卢晶晶,徐迪峰

(宁波市气象局,宁波 315012)

摘要: 利用浙江省地面加密雨量站等多种观测资料以及4种地形数值试验方案的模拟结果,对2009年8月9—10日“莫拉克”台风外围东风背景下宁波中小尺度地形与中小尺度低涡的关系以及受地形影响产生的中尺度低涡对降水的作用进行了初步分析。结果表明,改变地形影响 β 中尺度低涡系统的生成及其出现时间、气旋性环流的曲率,即原始地形和地形加倍,宁波山地东侧均产生较明显的 β 中尺度低涡,地形高度减半和无地形高度下,宁波山地东侧均无明显的中尺度低涡生成;改变地形,则改变中尺度低涡或气旋性环流的位置和强度,局地强降水位置和强度随之发生变化;中尺度低涡或气旋性环流增强与降水出现明显增幅密切相关;850 hPa湿位涡负值中心和强降水区有较好的对应关系,湿位涡负值中心对应中尺度低涡生成位置,且其负值中心的出现与同时陡然出现的降水增幅有明显关系。

关键词: 低涡;地形;降水;WRF;数值试验

中图分类号:P435 文献标识码:A 文章编号:1004-9045(2011)01-0019-09

Numerical Simulation of Topographic Influences on Meso- and micro- Scale Vortex in Ningbo

LU Jingjing, XU Difeng

(Ningbo Meteorological Bureau, Ningbo 315012)

Abstract: By using various conventional observation data and the analytic values from four topographic numerical simulation tests, preliminary analysis was conducted on the relationship between meso- and micro- scale topography and meso- and micro- scale low vortices in Ningbo and precipitation effects of mesoscale low vortices originated by topographic influences against a background of easterlies in the periphery of Molake during 9—10 August of 2009. The main results are as follows. Firstly, the change of topographic altitude not only influences the initial position, start time and intensity of β mesoscale vortex or the curvature of cyclone circulation, but also changes the local precipitation areas and precipitation intensity. The initial or doubled altitude of topography in the experiments is advantageous to generate mesoscale low vortex, while the halved or removed altitude of topography is a disadvantage for the generation of mesoscale low vortices. Secondly, the strengthening of mesoscale low vortices or cyclone circulation is closely related with abrupt increase of precipitation. Thirdly, the negative moisture potential vorticity center at 850 hPa is consistent with the severe precipitation zone and initial locations of the mesoscale vortices, and it is closely related to abrupt increase of precipitation.

Key words: Low vortex; Topography; Precipitation; WRF; Numerical experiment

1 引言

宁波市位于我国海岸线中段和浙江宁绍平原东端,即 $120^{\circ}55'—122^{\circ}16'E$ 、 $28^{\circ}51'—30^{\circ}33'N$ 。宁波境内多丘陵山区,全市地形西南高、东北低,高差约1 000 m,主要山脉有四明山和天台山(图1a)。热带气旋是影响宁波最严重的灾害性天气系统之一,常造成当地强风、暴雨;宁波特殊地形地貌不仅影响热带气旋的强

度、移动路径,还影响台风降水的强度和分布。由于热带气旋多由南向北影响宁波,当宁波处于偏东大风的控制时,山脉东侧迎风坡起抬升作用,引起降水明显增幅,降水由宁波西南山区向北部平原递减,地形对热带气旋降水增幅作用明显^[1]。

关于地形对中尺度涡旋系统及暴雨影响的研究由来已久,我国气象工作者取得较多研究成果。何光碧等^[2]利用MM5模式对青藏高原东侧陡峭地形对一

收稿日期:2010-07-26;修订日期:2010-10-13

资助项目:宁波市科技局“宁波突发灾害性天气精细化预报技术研究”项目(2007C10042)

第一作者:卢晶晶,女,1980生,工程师,主要从事中尺度数值预报和短期天气预报。E-mail: lujingjing116@yahoo.com.cn

次盆地中尺度涡旋及暴雨进行数值试验,认为复杂陡峭地形扰动有利于中尺度涡旋形成,地形与涡旋活动及降水分布密切相关。陈静等^[3]对青藏高原东侧一次 β 中尺度对流系统进行数值模拟,提出了盆地上空尺度系统的一些新见解。崔粉娥等^[4]通过对山西一次低涡暴雨进行地形敏感试验,从数值模拟角度探讨了中尺度地形对山西降水的影响。钮学新^[5]的试验结果表明,地形作用使迎风坡及降水中心雨量增加、背风坡雨量减少,造成降水分布更不对称、更不均匀。宋清芝等^[6]对 2005 年 7 月 20—22 日河南西部特大暴雨成因进行诊断分析,认为地形作用是特大暴雨的触发机制之一。王鹏云^[7]就我国台湾岛地形对第 9608 号台风暴雨影响的数值研究表明,台湾山区两侧地形对台风中心东南方气旋式环流的辐合抬升使台湾暴雨增幅达 6 倍多。以上地形影响降水的研究多集中在对较大尺度地形与中尺度对流系统形成和发展的关系上,对较小尺度地形产生的更小尺度涡旋或波动的研究较少,这因区域性模式和中尺度实况资料精细化程度不高所致。那么,在大尺度环流背景下,中小尺度地形与中小尺度低涡发生发展的关系是什么?宁波市气象台曾用 WRF 数值预报模式对 2009 年 8 月 9—10 日“莫拉克”台风影响宁波地区的降水过程进行预报,结果发现宁波山区东侧曾有一次中尺度低涡形成过程。为了进一步探讨宁波中小尺度地形对中小尺度系统生成

的影响程度,本文利用浙江省中尺度地面加密雨量站等多种观测资料,通过 4 种地形方案的数值试验研究,分析在台风大尺度环流背景下本地中小尺度地形与中小尺度低涡的关系以及地形产生的中尺度低涡对降水的影响。

2 “莫拉克”台风降水实况及中尺度低涡演变

2.1 降水概况

图 1a 是宁波市地形图。2009 年“莫拉克”台风宁波降水始于 8 月 6 日上午,至 8 月 11 日凌晨结束。全市过程平均累计降水量多为 80~200 mm (图 1b), 桑州、黄坛、宁海、雷虎、董家、南溪口、塔下、四明山庄、雪窦寺等 9 站累计降水量为 300~400 mm, 过程累计最大降水量(497.5 mm)出现在奉化市南溪口。实况降水资料显示,影响宁波的此次台风降水由两部分构成:一是台风北侧外围云系影响导致的降水,云系从 6 日开始影响宁波南部;二是台风螺旋云带带来的降水,随台风 9 日 16 时 20 分左右在福建霞浦登陆,其北侧云系增强,受其影响宁波出现强降水,强降水主要分布在宁波西部山区及象山港以南地区,过程最大降水区域在西部山区,雨量普遍为 300 mm 以上。本文讨论的降水与宁波地形有关,所以其降水分析和数值试验只针对台风外围东风背景下的螺旋云带降水,即 9—10 日的降水过程。

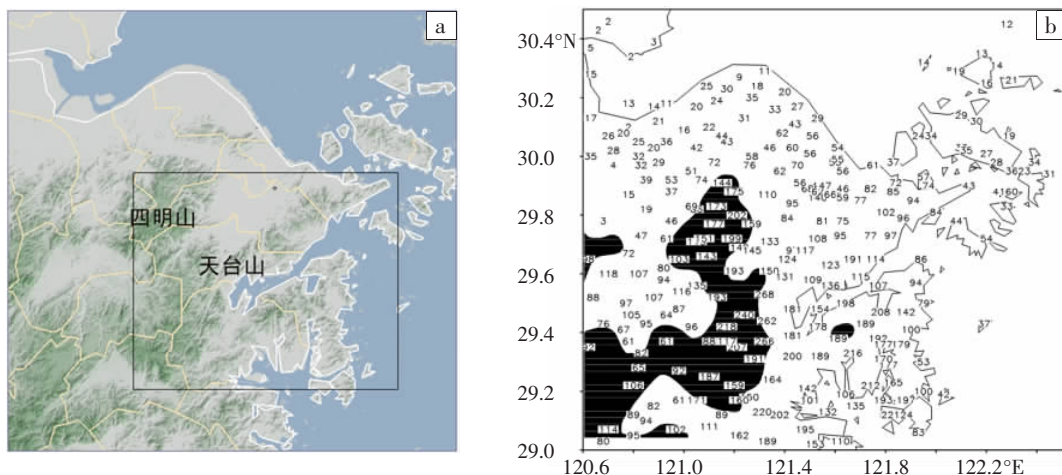


图 1 宁波市地形图(a,方框所示为分析范围)与 2009 年 8 月 9 日 08 时至 10 日 08 时实况累计雨量分布图(b,黑色阴影为高度在 300 m 以上地形)

2.2 中尺度低涡活动及其对暴雨的影响

宁波 2009 年 8 月 9—10 日降水在 9 日 21—23 时(北京时,下同)出现了明显增幅。从这一时段自动站雨量图上可见(图 2a),宁波西部山区 3 h 降水普遍在 50~80 mm,其中 3 h 最大降水量(88.9 mm)出现在奉化南溪口站。分析同期不同时次 1 h 瞬时风场资料表明,9 日 17 时(图 2b),奉化至象山港附近已出现风速

风向辐合区,其尺度虽小,但能清楚看到气旋性辐合;9 日 20 时(图 2c),辐合区瞬时风速增大,风向气旋性更明显,这说明宁波 300 m 以上高度地形东侧奉化至象山港附近有低涡活动;当日 23 时(图 2d),风速辐合区风速减小,风向气旋性减弱,表明该地区中尺度低涡活动减弱;到 10 日 00 时(图略),风速辐合已不明显。分析奉化南溪口站逐时实况降水量变化表明,从

月 9 日 19 时开始,该站降水出现明显增幅,并一直维持到 23 时;之后,降水明显回落,表明地形附近中尺

度低涡活动可能是造成奉化山区降水量出现明显增幅的原因。

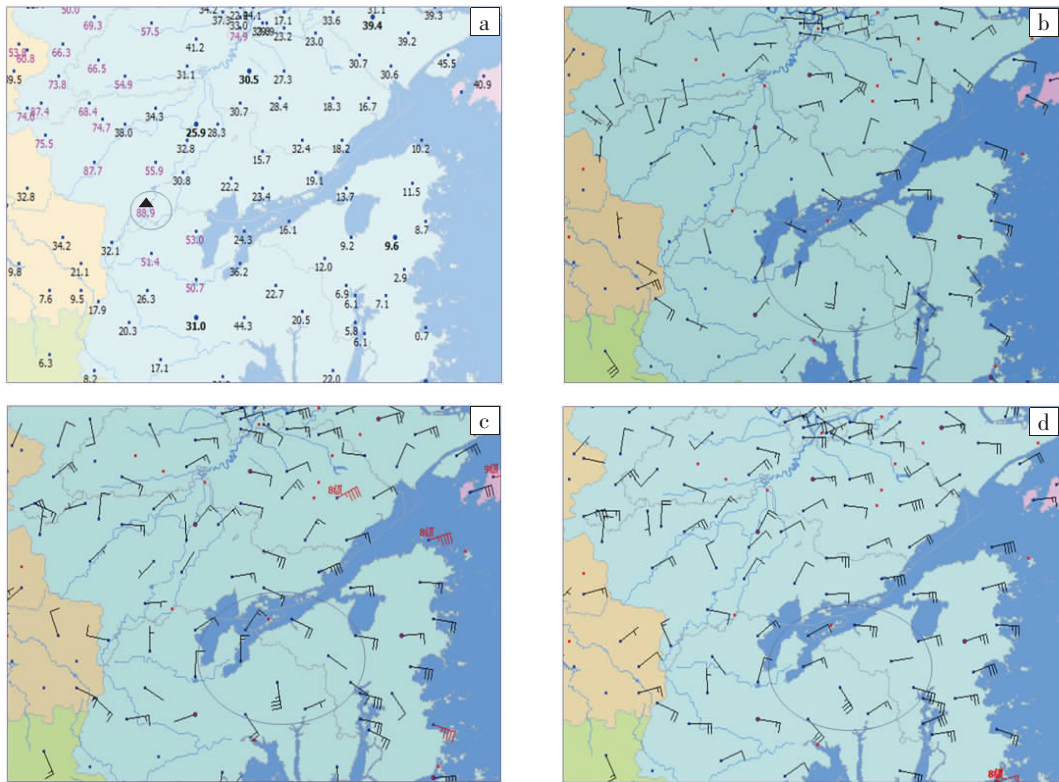


图 2 2009 年 8 月 9 日 21—23 时宁波地面自动站雨量(单位: mm)分布图(a, ▲所示为南溪口站)与 9 日 17 时(b)、20 时(c)、23 时(d) 地面自动站观测 1 h 瞬时风场(线圈为风速辐合区)

3 地形数值试验及结果分析

3.1 数值试验方案设计

数值试验模式采用 ARW-WRF/3DVAR (V3.1)系统,使用双向反馈的三重嵌套网格,格距分别为 15、5、1.67 km,格点数分别为 246×232、106×106、121×121,模式母域中心点为 30°N、120°E,垂直坐标为 η 坐标,分辨率为 35 层,模式顶为 50 hPa。模式母域地形资料采用 USGS 的 30'' 地形数据,第二、三积分区域采用 2' 地形。采用 Thompson 微物理方案、rrtm 长波和 Dudhia 短波辐射方案、Monin-Obukhov 地面方案和 Noah 陆面过程方案、YSU 行星边界层方案。

数值试验的初猜场采用美国国家环境预报中心(NCEP/GFS)逐 6 h 全球分析场,水平分辨率 0.5°×0.5°,利用 WRF 同化系统,同化模式积分范围的常规探空资料、地面观测资料以及浙江省内雷达和自动站资料,初始化未采用 TC-Bogus 方案。模式积分开始时间为 2009 年 8 月 9 日 08 时,结束时间为 10 日 08 时,时间积分步长分别为 60、20、6.7 s。

3.2 模式降水预报效果检验

“莫拉克”台风降水主要发生在台风登陆时及登

陆后,特大暴雨主要出现在宁波市西南山区。图 3 给出模式模拟的 2009 年 8 月 9 日 12 时至 10 日 00 时 12 h 累积降水量与自动站观测实况雨量。

从模式模拟的 12 h 累积降水量分布图上可看到(图 3a): 模拟降水落区分布与实况观测的降水落区十分相似,且 100 mm 以上大暴雨区分布也与实况(图 3b)非常一致,但模拟的强降水中心值较实况观测值偏大,如温州北部和台州南部强降水中心,模式模拟的累积降水量达 400 mm 以上,实况为 220 mm 左右;另外在宁波山区,实况观测到一较强降雨中心,模式模拟降水量在 300 mm 以上,实况中心最大值为 262 mm。可见,模式模拟的降水分布形状、范围及强度均与实况观测基本吻合。

图 4 给出奉化南溪口站 8 月 9 日 08 时至 10 日 08 时实况降水与模式模拟降水的逐时变化。从中可见,模拟的最大降水集中期与实况较吻合,其中积分 8 h 之前模拟的降水较弱,这可能与模式模拟在初始时刻不稳定有关;积分 8 h 后,模拟与实况降水趋势基本一致,模拟降水出现较大增幅的时间比实况时间略晚,实况降水在 9 日 19 时开始就出现明显增幅,而模拟降水 9 日 22 时才开始明显增大。量级上,模拟的最

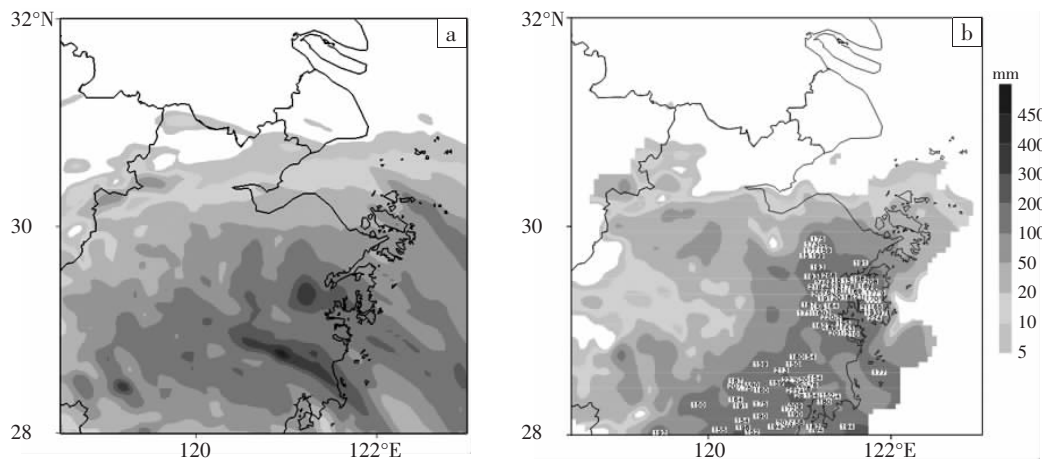


图 3 模式模拟的 2009 年 8 月 9 日 12 时至 10 日 00 时累积雨量图(a)与自动站观测雨量图(b,数值标注的为降水量大于 100 mm 的站点)。单位: mm

大降水增幅(达 77.2 mm)出现在 9 日 23 时,实况 9 日 22 时该站 1 h 最大降水量为 50.3 mm, 两者较为接近。总之,模式模拟的降水量级虽偏强且雨量逐时变化较大,但与实况的时间演变趋势基本一致,降水增

幅时间模拟比实况出现的略晚。上述对比分析表明:此次台风暴雨过程的模拟比较成功,可认为该模式的设计基本合理,模拟结果具有分析价值。

3.3 模式模拟地形产生的中尺度低涡活动

模式积分至 13 h, 从 1 000 hPa 流场图上可见(图 5b), 在 121.2°—121.6°E、29.2°—29.5°N 之间出现一中尺度低涡,同时在 500、850 hPa 流场上(图略)出现低涡,且整个系统较深厚,该区域正是宁波山地迎风坡一侧。按照对中小尺度天气系统的分类,该中尺度低涡尺度大约在 40~50 km,属 β 中尺度系统。再从 9 日 23 时雨量模拟分布图上可见(图 5a),中尺度低涡形成之后,宁波地区 121.3°E 附近出现降水中心,最大降水区域在偏向地形迎风坡一侧,与中尺度低涡形成位置基本吻合。

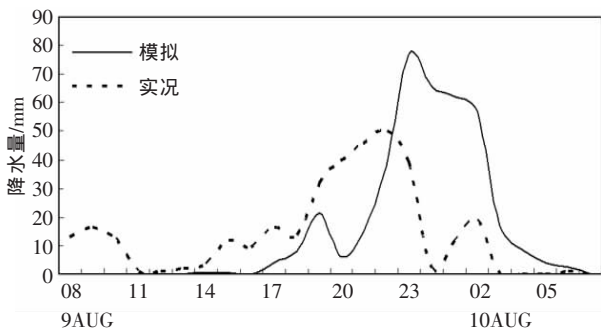


图 4 奉化南溪口站 2009 年 8 月 9 日 08 时至 10 日 08 时实况降水(虚线)与模式模拟降水(实线)逐时变化图

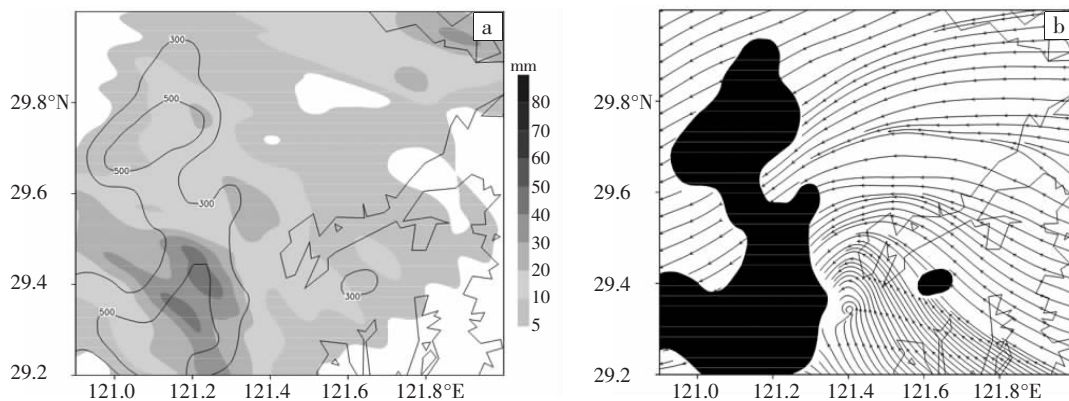


图 5 WRF 模式模拟的 2009 年 8 月 9 日 23 时雨量分布图(a,等值线为地形高度;阴影为雨量,单位:mm)与 1 000 hPa 流场(b,黑色阴影为 300 m 以上地形)。模拟时效 13 h

上述时刻各物理量特征是否反映了地形涡的生成? 地形对大气辐合和正涡度增长是否有影响并有利于降水持续呢? 图 6 给出此次过程累积降水量最大的奉化南溪口站附近格点(121.3°E、29.3°N) 850 hPa 涡度、散度时间变化图。从中可见,模式模拟出该点 9 日

21 时出现的较强正涡度和辐合。对应涡度值的迅速增大(图略),21 时对流层低层出现中尺度涡旋,辐合带由于地形阻挡向西北方向移动,到 10 日 00 时辐合消失。这种中尺度涡旋有利于宁波山区上空正涡度增长和辐合上升运动发展,而正涡度增长和辐合上升运动

又有利于降水维持和累积雨量增加,且模式模拟的最大降水格点的雨量在 9 日 22—23 时持续增加,对该点累积降水贡献很大。因此,宁波地形造成在迎风坡一侧出现的这种 β 中尺度涡旋或气旋性环流可能对宁波山区暴雨贡献较大。

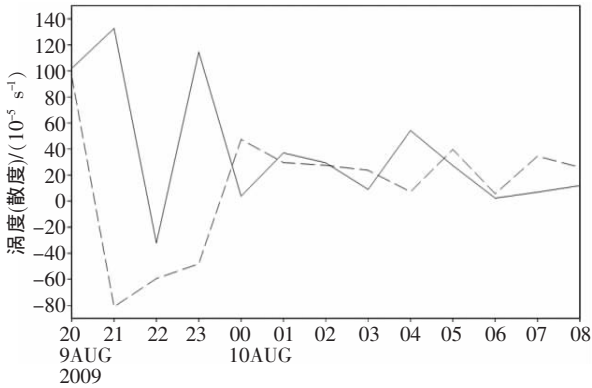


图 6 2009 年 8 月 9 日 20 时至 10 日 08 时降水量最大点南溪口(121.3°E、29.3°N)850 hPa 涡度(实线)、散度(虚线)逐时变化图(单位: $10^{-5} s^{-1}$)

本文第 2 节分析表明,宁波山地附近中尺度低涡与其山区降水增幅对应关系较好。对比模拟与实况结果发现,时效上,模拟的中尺度低涡出现时间比实况偏晚;模拟的中尺度低涡出现位置比实况的辐合中心位置偏南,但模式对这种 β 中尺度低涡的活动反应较

敏感,表现出较好的模拟能力。

4 地形对 β 中尺度低涡活动影响的数值试验

此次过程中,宁波山地东侧 β 中尺度低涡的生成可能与宁波中尺度地形有关。为了研究 β 中尺度低涡形成同宁波地形的关系,针对小区域细网格模型进行地形敏感性试验,以便分析小地形对环境流场的作用。在其他参数保持不变的情况下,设计 4 种地形数值试验方案:方案 1 为控制试验,采用 30'' 地形数据,保持原始地形;方案 2,所有地形设为 0,无地形高度;方案 3,将地形加倍,即地形高度乘以 2,地形高度和坡度均增大;方案 4,将所有地形减半,即地形高度为原始地形的 1/2,地形高度和坡度降低。

4.1 地形对 β 中尺度低涡形成的影响

分析上述四种地形方案的每个时次高度场表明,方案 1 在积分 13 h 时(9 日 21 时)950 hPa 高度场上(图 7a),121.4°E、29.4°N 附近出现一明显的低值中心;积分 15 h 时(图 7b),即 9 日 23 时,该低值中心消失。这说明 9 日 21 时出现一中尺度低涡。方案 2 无地形(图略),各时次宁波地区均基本处在台风偏东环流中,未发现明显的中尺度低涡。方案 3 方案地形增高 1 倍,地形高度和陡峭程度均明显增加,但在积分 11 h 时(9 日 19 时)发现(图 7c),在山地 121.4°E、29.3°N 附近有明显

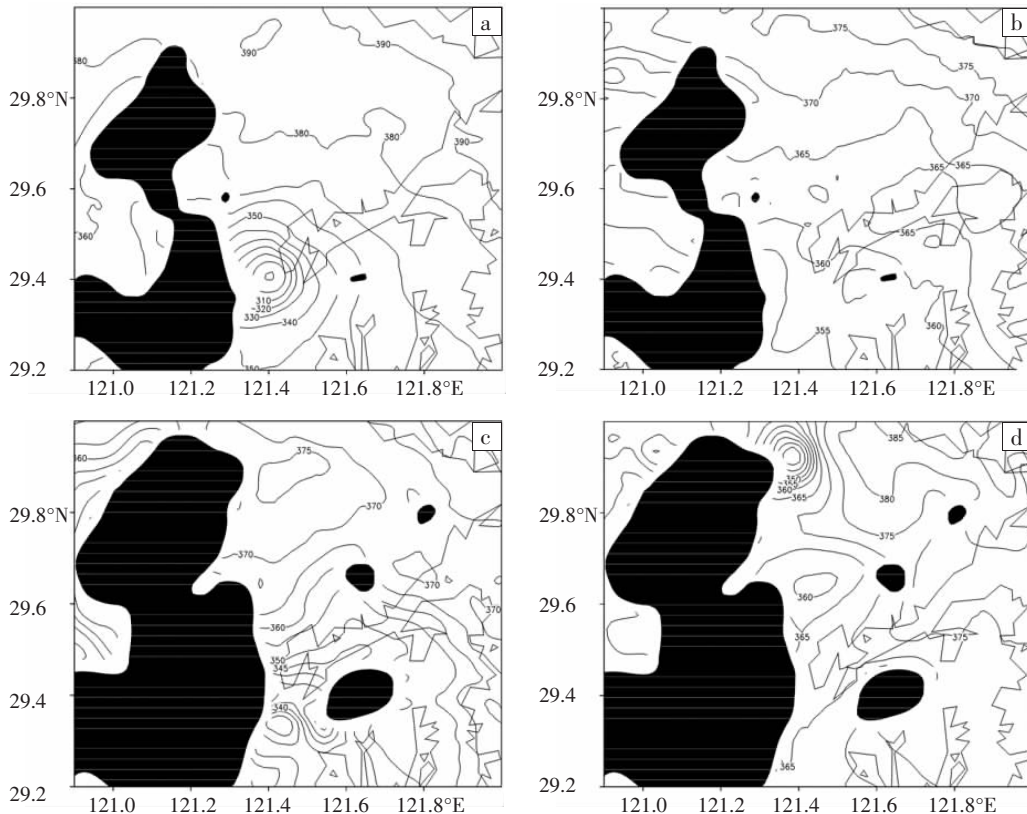


图 7 2009 年 8 月 9 日 21 时(a)、23 时(b)地形数值试验方案 1 与 9 日 19 时(c)、21 时(d)方案 3 的 950 hPa 高度场(黑色阴影为 300 m 以上地形)

的中尺度低涡，随后中尺度低涡沿地形向北移动，积分 13 h 时(9 日 21 时)，该低涡移到地形北侧 121.4°E、29.9°N(图 7d)，随后低涡消失。方案 4 地形减半，各时次高度场上也未发现明显的中尺度低涡(图略)。

从 4 种地形数值试验方案各层流场可进一步分析地形对中尺度低涡形成的影响。方案 1 中，积分 13 h 时 850 hPa 流场(图 8a)，宁波山地东侧出现明显气旋性环流，随后几个时次流场图上虽在山地东侧仍可见辐合存在，但已无明显气旋性环流，低值中心消失。同时，500 hPa 流场图(图 8b)和 200 hPa 流场图上(图略)也能看到山地东侧低涡较深厚，但积分 15 h

时 500 hPa 以上气旋性环流明显减弱。方案 2 中，无明显中尺度气旋性环流出现(图略)。方案 3 中，整个流场在山地附近都有气旋性环流存在(图略)，积分 11 h 时(9 日 19 时)也能看到(图 8c)，对应山地附近低涡出现的位置有小尺度气旋性环流，随后气旋性环流沿山地向北移动，在山地东北一侧有明显气流辐合，从积分 13 h 时 500 hPa 流场上可见(图 8d)，系统较深厚，但其气旋性曲率明显减小。方案 4 中，地形降低一半，各时刻流场未发现明显的中尺度气旋性环流，但积分 13 h 时流线变密集(图略)，山地上空有明显辐合和弱气旋性环流，但其随时间变化很快填塞(图略)。

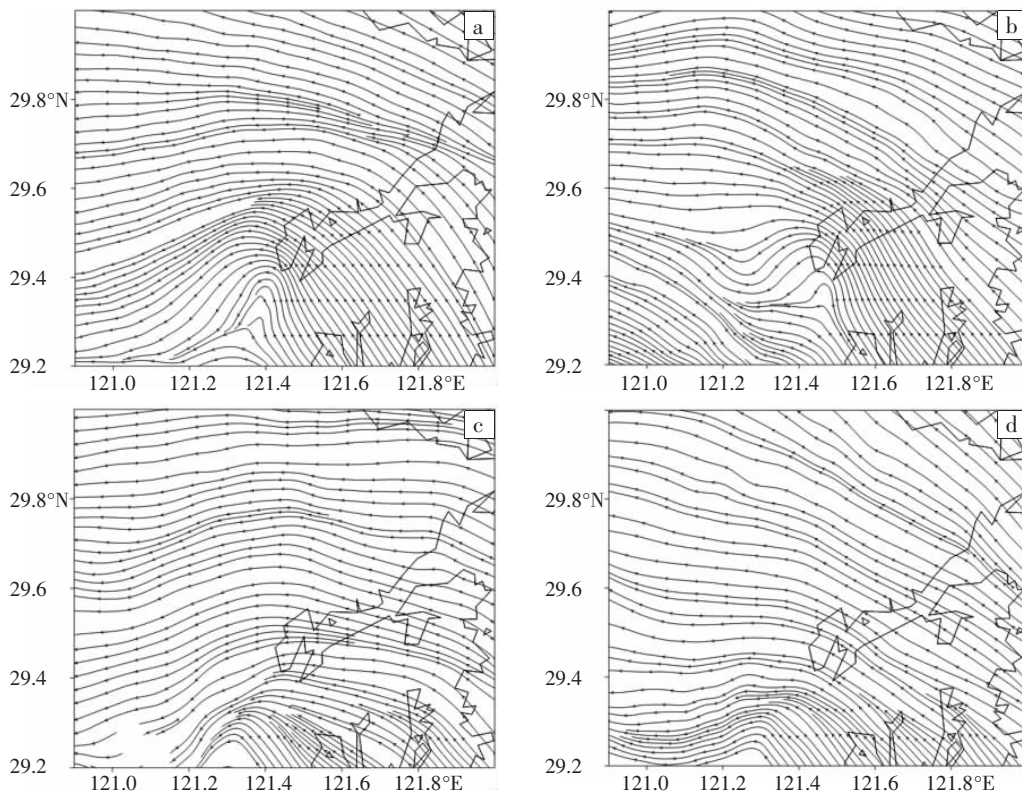


图 8 地形数值试验方案 1 和方案 3 积分不同时间的对流层中低层流场
 (a) 方案 1 的 850 hPa 流场(2009 年 8 月 9 日 21 时); (b) 方案 1 的 500 hPa 流场(9 日 23 时);
 (c) 方案 3 的 850 hPa 流场(9 日 19 时); (d) 方案 3 的 500 hPa 流场(9 日 21 时)

对比上述 4 种试验方案的结果可知，方案 1、3 中宁波山地东侧都产生了较明显的 β 中尺度低涡，但与方案 1 相比，方案 3 由于地形阻挡而使中尺度气旋性环流出现时间提前。方案 3 中，山地附近中尺度低涡持续时间较长，并看到其明显移动，比较而言，方案 1 中低涡持续时间短但强度更大，方案 3 低涡持续时间长但强度略弱。这说明地形高度和坡度变化明显影响 β 中尺度低涡系统的生成时间和气旋性曲率。方案 2 和方案 4 无明显的中尺度低涡生成。

4.2 地形产生的中尺度低涡对降水的影响

4.2.1 地形试验对降水强度和分布的影响

上述分析结果表明，改变模式的地形，其产生的

中尺度低涡(简称地形涡)的生成位置和生成时间随之变化，从而降水也发生明显变化。为了探讨地形涡对降水的影响，图 9 给出 4 种地形数值试验方案低涡生成后的降水分布图。从中可见，方案 3 地形高度增加，模拟的累计降水量最大(图 9c)，方案 2 无地形，模拟的累计降水量最小(图 9b)。降水分布上，方案 1 模式模拟的宁波山地东侧地形涡形成区域对应较明显的降水增幅(图 9a);与方案 1 比较，方案 3 模拟的中尺度低涡强度略偏弱，但低涡维持时间长、位置更靠近山地、降水中心偏强，强降水中心位置更靠近山顶，与中尺度涡旋位置对应;方案 2 未考虑地形影响，无明显低涡产生，降水区呈带状分布，无明显与地形相对应的雨

量中心,且强度更弱;方案 4 降低地形高度后,未发现明显的中尺度气旋性环流(图 9d),但与方案 1 相比,气

旋性辐合位置大致相同,但辐合强度减弱,因此降水分布也无明显改变,只是降水强度明显减弱。

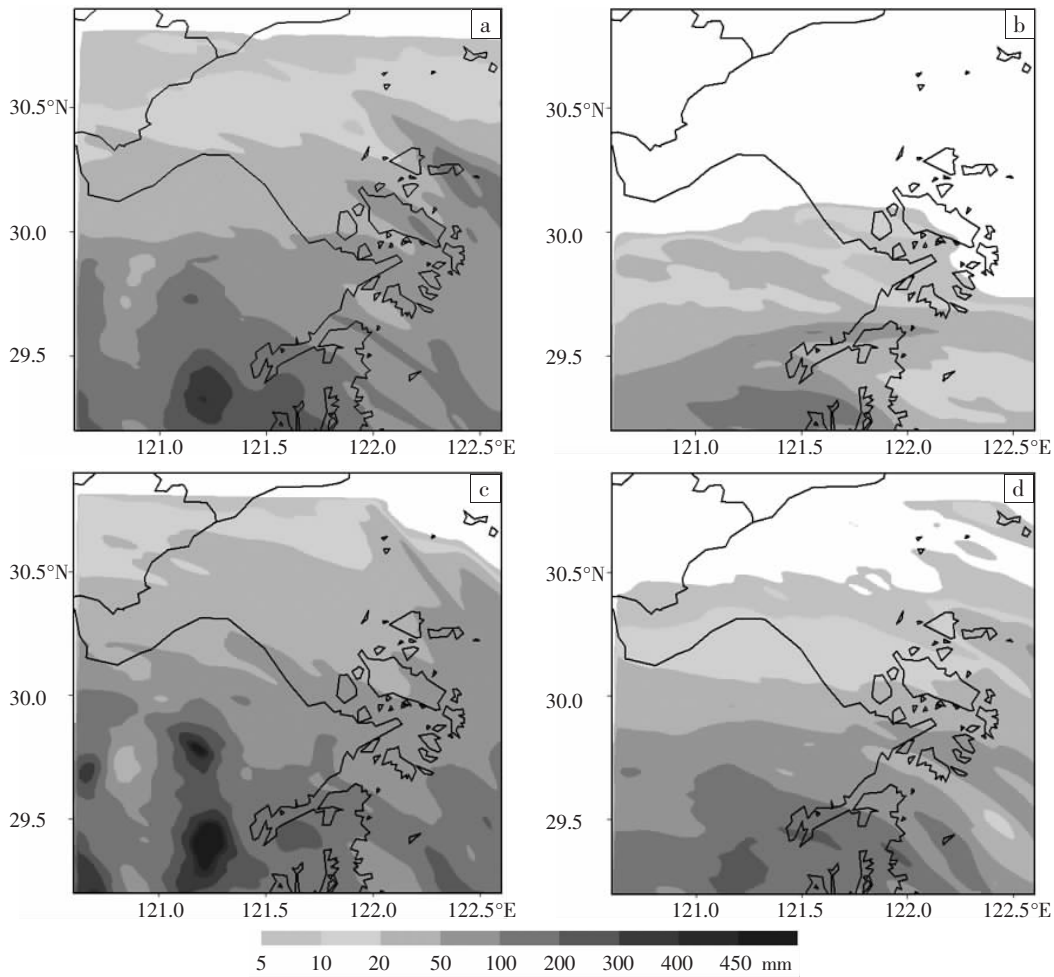


图 9 地形数值试验方案 1 (a)、方案 2 (b)、方案 3 (c)、方案 4 (d) 模拟的 2009 年 8 月 9 日 18 时至 10 日 08 时累计降水量分布图(单位: mm)

图 10 是上述 4 种地形数值试验方案模拟的最大降水区域雨量时间变化。从中可见,方案 1,中尺度低涡出现在 9 日 21 时,22 时左右降水出现明显增幅,随着中尺度低涡很快消失,后期降水变化不大;方案 3,中尺度气旋性环流开始生成的时间时是 9 日 19 时,对应降水在 19—20 时呈上升趋势,说明低涡出现与

降水增幅关系明显;方案 2 和方案 3 都无中尺度低涡生成,方案 2 中降水变化幅度很小,降水相对最弱,方案 3 由于地形降低形成的气旋性环流曲率极小,对应降水增幅也不明显。因此,中尺度低涡生成对强降水有明显的正贡献。

4.2.2 中尺度低涡对降水的影响

图 11 给出 4 种地形数值试验方案中最大降水格点正涡度达最大时 WRF 模式模拟的沿 29.3°N 的涡度纬向垂直剖面图。

分析图 11 的试验结果表明,方案 1,中尺度低涡出现在宁波山区东部 121.4°E 附近(图 11a),低涡出现前一时次在 121.7°E 附近从 700 hPa 到 300 hPa 为辐合,300 hPa 以上为辐散,且高层辐散明显强于中层辐合,低涡出现时,山顶附近从 900 hPa 到 300 hPa 存在较强的正涡度柱。这说明宁波山地附近对流层中低层辐合、高层辐散产生的抽吸效应有利于低层辐合和对流上升运动加强,上升运动区与正涡度区耦合促使

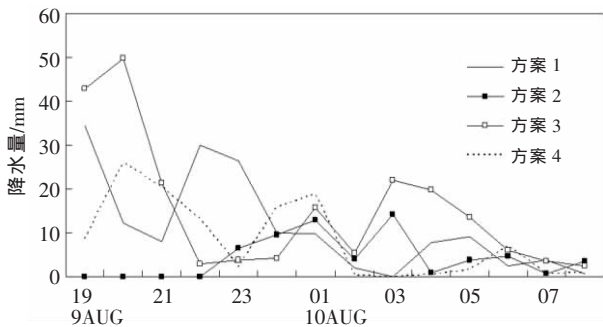


图 10 2009 年 8 月 9 日 18 时至 10 日 06 时宁波最强降水中心附近区域(121.2°—121.4°E,29.2°—29.4°N)模拟降水的时间变化图

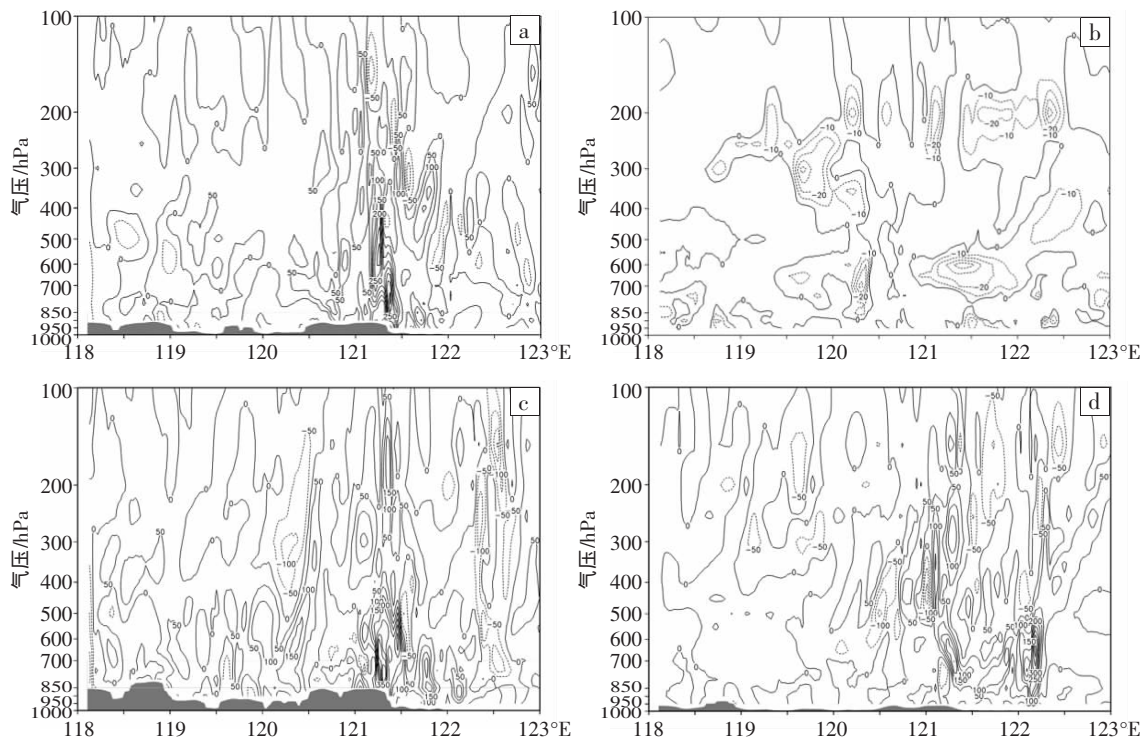


图 11 2009 年 8 月 9 日 21 时地形数值试验方案 1 (a)、方案 2 (b)与 9 日 19 时方案 3 (c)、方案 4 (d) 沿 29.3°N 的涡度纬向剖面图(单位:10⁻⁵ s⁻¹)。阴影区为地形高度

低值系统发展维持,有利强降水发生。方案 2,整层大气基本上无明显的辐合上升运动(图 11b),强降水发生的可能性较小。方案 3,气旋性环流位于宁波山区山顶附近,前一时次散度场山顶附近 700—300 hPa 为辐合,其上为辐散,大气抽吸作用有利于低值系统生成,并可能影响后一时次气旋性环流生成;中尺度低涡生成时,整层为延伸到 100 hPa 的正涡度柱(图 11c),相比方案 1,其正涡度柱伸展更高,强正涡度区与上升运动区耦合更有利于强降水发生,所以地形增高一倍对应的模拟降水也明显增强。方案 4,气旋性环流在宁波山区东部形成时,涡度柱伸展高度较方案 1 有所降低,仅延伸到 500 hPa(图 11d),正涡度柱强度和伸展高度较前者也有所降低,模拟降水明显减弱。

在讨论降水特别是强降水的陡然增幅时,还必须考虑到水汽的作用^[8]。因此,本文选择分析表征大气动力、热力属性和水汽作用的物理量湿位涡来进一步探讨降水出现明显增幅与中尺度低涡生成的关系。上述分析表明,方案 1 和方案 3 都有明显的中尺度低涡生成并伴有明显的降水增幅。所以,本文只分析这两个方案的湿位涡变化对降水增幅的影响。

湿空气位势涡度,简称湿位涡(ξ_{MPV}),其表达式为^[9]:

$$\xi_{MPV} = -g(\zeta + f) \frac{\partial \theta_e}{\partial p} + g \left(\frac{\partial v}{\partial p} \frac{\partial \theta_e}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial p} \frac{\partial \theta_e}{\partial y} \right)$$

等式右边第 1 项定义为湿位涡的垂直分量即正压项,第 2 项定义为水平分量即斜压项,则有:

$$\begin{cases} \xi_{MPV1} = -g(\zeta + f) \frac{\partial \theta_e}{\partial p} \\ \xi_{MPV2} = g \left(\frac{\partial v}{\partial p} \frac{\partial \theta_e}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial p} \frac{\partial \theta_e}{\partial y} \right) \end{cases}$$

即

$$\xi_{MPV} = \xi_{MPV1} + \xi_{MPV2}$$

其中, ξ_{MPV1} 表示惯性稳定性和对流稳定性的作用, ξ_{MPV2} 包含了湿斜压性和水平风垂直切变。湿位涡的单位(PVU)是 10⁻⁶ m²·s⁻¹·K·kg⁻¹。

有研究表明^[10],2006 年“碧利斯”引发强降水持续期间,降水强度与 ξ_{MPV} 负值中心强度存在相关性,即负值中心绝对值越大,降水增强越明显,反之则减弱;对流层中低层 ξ_{MPV} 分布和强降水区域有较好的对应关系。因此,本文选取 850 hPa 湿位涡场,分析其与强降水区域的关系。分别计算上述不同方案中尺度低涡生成时次 850 hPa 的湿位涡,方案 1,中尺度低涡生成时(积分 13 h,图 12a),在地形东侧出现一湿位涡强负值中心(达 -0.5 PVU),强中心正好对应中尺度低涡生成位置。对比模式模拟该时次的雨量分布(图 5a),强降水中心分布在宁波山地东侧,湿位涡强负值中心也基本与强降水中心对应,这说明该时次强湿位涡负值中心的出现与同时陡然出现的降水增幅有明显关系。与方案 3 相比,地形增加后中尺度低涡或气旋性环流出现的时间和位置发生变化,湿位涡分布图上(图 12b)也对应在中尺度低涡或气旋性环流所在位置(积分 11 h)出现一强负值区中心(-0.45 PVU),强度比方案 1 略弱,

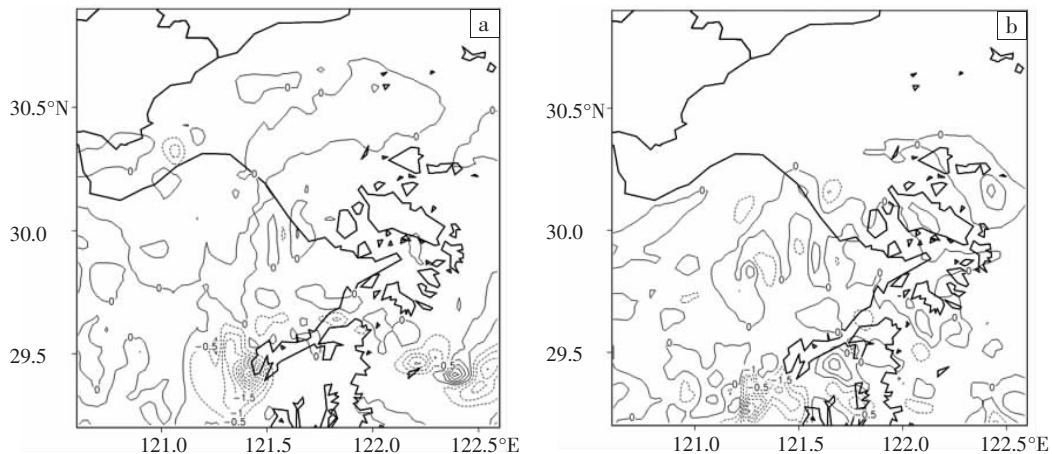


图 12 2009 年 8 月 9 日 21 时地形数值试验方案 1 (a)、9 日 19 时方案 3 (b) 气旋性环流出现时 850 hPa 等压面湿位涡水平分布图(单位: PVU)

但由于方案 3 中低涡维持时间长,积分 13 h 湿位涡中心沿山地北移,强中心为 -0.35 PVU 左右。本文上节分析表明,方案 3 模拟的累计降水较方案 1 偏强,这也反映了 850 hPa 的 ξ_{MPV} 负值中心和强降水区有较好的对应关系,不仅湿位涡负值区强度与降水中心强度呈正相关,且湿位涡负值区的维持时间对降水也有正贡献。

另外,计算结果显示,对于 ξ_{MPV} , ξ_{MPV2} 是小量, ξ_{MPV1} 起主要作用,这表明造成局地强降水的重要原因是局地出现强湿对流不稳定层结,有利低层正涡度和中尺度低涡发展和上升运动加强,从而造成降水出现明显增幅。因此,改变地形则改变中尺度低涡或气旋性环流的位置和强度,也改变局地动力和热力条件,局地强降水出现位置和强度也发生变化,这说明中尺度低涡或气旋性环流变化与降水出现明显增幅密切相关。

5 结论与讨论

本文通过 4 种地形方案的数值试验研究,分析了中小尺度地形与中小尺度低涡的关系以及地形产生的中尺度低涡对降水的影响。模拟结果表明:

(1) 改变地形影响 β 中尺度低涡系统的生成及出现时间和气旋性环流的曲率。原始地形和地形加倍,宁波山地东侧都产生了较明显的 β 中尺度低涡,与前者相比,后者由于地形阻挡而使中尺度气旋性环流出现时间提前,山地附近低涡持续时间较长,但强度略弱。地形高度减半,宁波山地东侧无明显的中尺度低涡生成,且气旋性环流曲率很小。无地形高度,宁波山地东侧也无明显的中尺度低涡生成。

(2) 改变地形,中尺度低涡或气旋性环流的位置和强度随之改变,局地强降水位置和强度也随之发生变化;中尺度低涡或气旋性环流增强与降水出现明显增幅密切相关。

(3) 不同地形条件下,中尺度低涡对降水的影响

是:原始地形,中尺度低涡在宁波山区东部发展维持,有利强降水发生;无地形高度,整层基本无明显辐合上升运动,强降水发生可能性较小;地形加倍,中尺度气旋性环流或低涡迅速发展,模拟降水明显增强;地形减半,中尺度气旋性环流发展减弱,模拟降水随之减弱。

(4) 850 hPa 湿位涡负值中心和强降水区有较好的对应关系,湿位涡强负值中心对应中尺度低涡生成位置,且其负值中心的出现与同时陡然出现的降水增幅有明显关系。

本次地形试验对于宁波小地形产生的中尺度低涡或气旋性环流的机制和原理的分析还较粗略,下一步将同时改变地形宽度和坡度来分析其中尺度低涡的移动和生消;另外,对于地形产生的中尺度低涡与局地暴雨增幅的定量关系,也有待于今后深入探讨。

参考文献:

- [1] 刘爱民,涂小萍,胡春蕾,等.宁波气候和气候变化[M].北京:气象出版社,2009.
- [2] 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.
- [3] 陈静,矫梅燕,李川.青藏高原东侧一次 β 中尺度对流系统的数值模拟[J].高原气象,2003,22(增刊):90-101.
- [4] 崔粉娥,王咏青,狄利华.山西一次低涡暴雨过程的成因分析[J].暴雨灾害,2009,28(3):241-245.
- [5] 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.
- [6] 宋清芝,乔春贵,高媛媛.河南一次特大暴雨过程的天气学分析[J].气象与环境科学,2009,32(3):6-9.
- [7] 王鹏云.台湾岛地形对台风暴雨影响的数值研究[J].气候与环境研究,1998,3(3):235-246.
- [8] 高守亭,崔春光.广义湿位涡理论及其应用研究[J].暴雨灾害,2007,26(1):3-8.
- [9] 杜楠,钟玮,陆汉城,等.一次四川暴雨过程的非线性对流—对称不稳定分析[J].南京气象学院学报,2008,31(3):308-316.
- [10] 陈德花,寿绍文,张玲,等.“碧利斯”引发强降水过程的湿位涡诊断分析[J].暴雨灾害,2008,27(1):38-41.