

王坚红, 杨艺亚, 苗春生, 等. 2017. 华南沿海暖区辐合线暴雨地形动力机制数值模拟研究 [J]. 大气科学, 41 (4): 784–796. Wang Jianhong, Yang Yiya, Miao Chunsheng, et al. 2017. The numerical study of terrain dynamic influence on warm area heavy rainfall of convergence lines in South China coast [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 41 (4): 784–796, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1702.16182.

华南沿海暖区辐合线暴雨地形动力机制 数值模拟研究

王坚红¹ 杨艺亚^{1,2} 苗春生¹ 高义梅³ 张旭³

1 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心/气象灾害教育部重点实验室, 南京 210044

2 江西省气象信息中心, 南昌 330096

3 华风气象传媒集团有限公司, 北京 100081

摘 要 华南沿海暖区暴雨是单一暖气团降水。本文采用客观分析方法确定暖区暴雨主要影响系统为两类辐合线低值系统: 偏南向辐合线与西南向辐合线; 此类辐合线系统具有强烈的辐合上升层次与暖心结构, 是一类强烈的暖区暴雨天气系统。偏南向辐合线多出现在粤西沿海, 而西南向辐合线多出现于粤东沿岸, 分别具有短时团状与持续带状两类强降水。华南沿海地区山脉河口众多, 其中珠江口以西的团状云雾山正面阻挡偏南向辐合线, 河口以东的带状莲花山侧面阻挡西南向辐合线。利用 WRF 数值模式分别研究粤东和粤西山脉对两类辐合线及其暴雨的地形影响, 包括正面阻挡和侧面摩擦。结果显示, 将偏南向型辐合线所遇云雾山范围地形降低 80%后, 因正面阻挡缺失, 辐合线及其降水向北推进, 雨带强度减弱, 形状改变。地形的正面阻挡促使低层辐合气流迅速抬升触发强降水。降水释放的凝结潜热, 又加强系统的上升运动和暖心结构强度与层厚, 进而增强暴雨。填充偏南向型狭管地形的试验显示, 狭管效应构成对强降水位置和强度的直接强迫影响, 加之与云雾山正面阻挡配合, 两项作用造成粤西暴雨频繁特征。测试粤东西南向莲花山脉对西南向辐合线的侧向阻挡与摩擦效应, 通过对比莲花山两种地表粗糙度环境模拟效果, 获得显著的局地垂直上升速度差, 显示粤东沿海山脉的侧向摩擦不仅增强西南辐合线强度也加强垂直上升运动强度, 由于西南气流的持续, 山脉走向与气流的配置, 维持了降雨时长及雨带范围。同时对粤西近海西南辐合气流及河口的暴雨雨带也有连带增强与维持作用。进一步地山脉地形抬升以其抬升迅速, 范围集中, 层次深厚, 而有别于锋面气团抬升。加之近海水汽充沛, 抬升后中层凝结释放的配合, 增强了辐合线低值系统强度, 造成暖区降水雨强远高于华南锋面降水。

关键词 暖区暴雨 辐合线系统 沿海山脉 数值试验 动力影响

文章编号 1006-9895(2017)04-0784-13

中图分类号 P444

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1702.16182

The Numerical Study of Terrain Dynamic Influence on Warm Area Heavy Rainfall of Convergence Lines in South China Coast

WANG Jianhong¹, YANG Yiya^{1,2}, MIAO Chunsheng¹, GAO Yimei³, and ZHANG Xu³

1 Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters / Key Laboratory of Meteorological Disaster of

收稿日期 2016-05-24; 网络预出版日期 2017-02-24

作者简介 王坚红, 女, 1956 年出生, 教授, 博士生导师, 从事海洋气象学和区域海气相互作用研究。E-mail: jhwang@nuist.edu.cn

通讯作者 苗春生, E-mail: 1597706505@qq.com, csmiao@nuist.edu.cn

资助项目 国家科技支撑计划项目 2012BAH05B01, 公益性行业(气象)科研专项 GYHY201206068, 国家自然科学基金项目 41276033, 江苏科技支撑项目 BE2012774、BE2014729, 江苏高校优秀学科建设工程项目(PAPD)

Funded by National Key Technology Research and Development Program of the Ministry of Science and Technology of China (Grant 2012BAH05B01), Special Scientific Research Fund of Meteorological Public Welfare Profession of China (Grant GYHY201206068), National Natural Science Foundation of China (Grant 41276033), Jiangsu Science and Technology Support Programs (Grants BE2012774, BE2014729), Superiority Discipline Construction Project of Jiangsu Universities and Colleges (PAPD)

Ministry of Education Nanjing University of Information Science & technology, (NUIST), Nanjing 210044

2 Jiangxi Province Meteorological Information Center, Nanchang 330096

3 Huafeng Meteorological Media Group, Beijing 100081

Abstract Heavy rainstorms in the coastal region of South China are often caused by single warm air mass. Based on objective analysis by computational program, two types of convergence line, i.e. the southerly convergence line and southwesterly convergence line, are determined to be the major systems affecting the warm area heavy rainstorms. The structure of such convergence lines is characterized by a strong and deep warm center and ascending motions. The convergence line is essentially a strong synoptic storm system in warm air mass area. The southerly convergence line often occurs at the western coast of Guangdong Province of South China, which can induce short-term heavy precipitation clusters. The southwesterly convergence line often appears at the eastern coast of Guangdong and results in continuous heavy precipitation belts. Terrain in coastal region of South China is complex with various mountains and estuaries. Mountain Yunwu at the western coast of Guangdong can block the southerly convergence line at a right angle, while Mountain Lianhua at the eastern coast of Guangdong curves laterally to meet the southwesterly convergence line and imposes significant frictional effects on it. The numerical model WRF3.5 is applied to investigate the influence of mountainous terrain on the two types of convergence line with a focus on the effects of blocking at the right angle and the lateral friction. The results show that after the height of Mountain Yunwu is reduced by 80%, the southerly convergence line and the accompanied rainstorm move northward without the mountain blocking. Rainfall pattern and location also change, and the intensity decreases. The mountain blocking forces the low convergence flow to rise fast and triggers heavy rainstorm, while the latent heat release caused by condensation strengthens the convergence line. The depth and intensity of the warm center and the ascending motion all intensify, which in turn increases precipitation. The experiment with the narrow valley between Mountain Yunwu and the Mountain Tianlu to its southeast filled shows that the tunneling effect of the valley can determine the rainfall location and intensity. Due to the joint effects of the valley tunneling and the blocking of Mountain Yunwu, the storm happens frequently in the western coast of Guangdong. In the southwesterly convergence line experiment, a comparison between two kind of roughness coefficients of Mountain Lianhua surface were made. A remarkable difference of vertical velocity appeared; the result showed that the lateral friction of Mountain Lianhua can enhance southwesterly convergence line and its ascending motions. Due to the shape of mountain is the southwest wards, it leads southwest jet flowing along the mountain. They maintain the longer rainstorm duration and belt shape of rainfall location. Meanwhile, it can influence the rainstorm at west coast and the estuary to become narrow and slightly move southward. The influence of mountain terrain is different from the synoptic systems because mountain can cause local faster lifting and can make thick upwards motion. Especially there is plentiful moisture vapor along the coast, the moisture condenses and releases latent heat at high level, then it enhances convergence line systems. The process causes the rainstorm intensity in single warm airmass is larger than that of front rainfall in South China.

Keywords Rainstorm in warm area, Convergence line system, Mountain along the coast, Numerical experiments, Dynamic influence

1 引言

我国华南暖区暴雨发生在华南地面锋面南侧暖区或是在南岭至南海北部单一暖气团的形势下，多出现在华南沿海。近年来，对华南暴雨的中尺度对流系统诊断与数值模拟方面的研究工作比较多（古志明等，2000；蒙伟光等，2004，2007；夏茹娣等，2006；赵玉春等，2008；张晓美等，2009）。这些研究多关注西风带南下的低值系统，如气旋族以及变形场锋生引起的华南暴雨，而单一气团的暖区暴雨机制复杂，往往因大尺度系统不清晰，预报难度较大。在单一暖气团内，通常无常见的天气尺

度的低涡、切变线系统，但是华南夏季常出现较强烈的偏南气流辐合，尤其在华南沿海可形成辐合线低值系统，其尺度可达 700 km 左右（王坚红等，2014；苗春生等，2017）。Wilson et al. (1994) 较早提出了边界层辐合线的概念。Estoque (1961) 模拟了海岸线变化对辐合线海风锋的影响。大气边界层辐合线附近往往成为风暴或者强对流系统的源地（Wilson and Schreiber, 1986; Wilson et al., 1992; Wilson and Mueller, 1993; Wilson and Megenhardt, 1997）。因此低纬低层风场辐合线应是暖区暴雨重要系统。

华南沿海水汽充沛，地形复杂，地形在暴雨过

程中的作用,受到很多关注。越来越多的学者利用数值试验研究暴雨的中尺度特征,尤其是深入研究地形的作用(董海萍等,2008;夏茹娣和赵思雄,2009;郭欣等,2013;何建军等,2014)。地形对环流的强度、方向、大气层结稳定度、水汽输送和垂直风切变均造成影响,地形的形态、走向和高度都可导致暴雨特征变化(Colle,2004)。华南是我国地形复杂的区域,山脉众多,河谷交错,又濒临海洋与海岛,华南著名的特大暴雨都与特定地形有关(林良勋等,2006)。在华南暴雨过程中西南气流与南岭地形相遇,形成利于强对流系统生成和发展的环境,尤其是海上水汽的近距离输送受沿海地形抬升,有利于大暴雨形成。研究发现,不考虑地形时降水中心的雨量可减小一半(张立凤等,2000)。中尺度地形尤其是喇叭口地形对暴雨强度和落区影响明显,如广东境内云雾山中尺度地形、珠江三角洲喇叭口地形等对华南暴雨都有增强作用(孙健等,2002;孙建华和赵思雄,2002;赵玉春等,2007)。李博等(2013)通过三组数值试验也证实,华南地区数百米高的山地可影响到对流层中上层环流变化;局地地形的改变,能引起局地中尺度对流的发展和暴雨增幅。因此在暴雨过程,地形对风场环流的作用非常显著。

华南沿海暖区暴雨是单一暖气团降水,其中降水天气系统的确定是个难点。本研究采用客观分析方法确定华南暖区暴雨主要影响系统为两类辐合线低值系统:偏南向辐合线与西南向辐合线。偏南向辐合线多出现在粤西,西南向辐合线多出现在粤东,对应两类辐合线的华南沿海强降水也是偏南型团状降水和西南向带状降水两类。华南沿海地区地形特殊,对两类辐合线系统和辐合线暴雨的形成以及它们各自的特征起着关键作用。本文将重点探讨华南沿海地形对两类暖区辐合线及辐合线暴雨的影响,针对两类华南沿海暖区辐合线暴雨过程,设计地形影响试验,对比讨论沿海地形对两种类型华南暖区辐合线系统及其暴雨所产生的动力机制,以及引起的动力和热力机制的综合作用,期望为今后华南沿海暖区单一气团暴雨的分析和预报提供一些有意义的依据。

2 资料与方法

所研究的华南地区为($17^{\circ}\sim 28^{\circ}\text{N}$, $105^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E}$),包括广西、广东、福建和海南四省,两类

辐合线均由海上向内陆一侧伸展,尺度可延展至整个研究纬度带(见图1)。两类暖区辐合线系统登陆时易于在沿海造成特大暴雨(王坚红等,2014),这应与华南沿海山脉阻挡有直接关系,因此重点研究区域为华南沿海部分,重点分析内容为沿海山脉地形作用。资料为美国国家环境预报中心 NCEP (National Center for Environmental Prediction) 的全球业务化在分析资料 FNL (Final Operational Global Analysis) 再分析资料、气象台站常规地面降水资料、中国自动站与 CMORPH 卫星—地面自动站降水融合资料,以及 WRF 中尺度模式模拟资料。

分析方法包括:(1)单一暖气团辐合线系统客观判定;(2)区域数值模式地形影响模拟试验。辐合线客观判定主要依据低层风场的风向角度和风速的大小。华南沿海暖区地处低纬度地区,等高线稀疏,高度场上无法确定明显的影响系统,从流场角度分析,考虑偏南向辐合区由西南、偏南、东南三支气流汇合,因此该经向辐合线的辐合轴左右两侧分别为倾角相对的气流,即气流的 v 分量均为向北,而辐合线辐合轴两侧 u 分量相反。由此可由程序客观地确定偏南向辐合轴线,类似地考虑西南向辐合区由偏西和偏西南两支气流汇合,相对于纬向 x 方向,偏西气流的角度小于西南气流的角度,并且气流均为自西向东,因此通过确定最大角度矢量,同样可由程序客观地确定西南向辐合线轴线。进一步地,采用 WRF3.5 模式对两类辐合线系统进行对照试验与地形敏感性试验。

3 两类华南沿海暖区辐合线暴雨与地形

3.1 两类暖区辐合线暴雨基本结构特征

以辐合线的客观判定作为分类标准,对 2009~2014 年的 4~6 月的华南四省范围每日 4 次标准时刻的地面降水量 6 h 累计场,共计 2184 个时次样本,进行普查,首先挑选出研究范围具有 6 h 累计降水量 ≥ 25 mm 的暴雨样本,再作暴雨与低空 850 hPa 流场配置分析。经统计,得到对应两类暖区辐合线暴雨 741 个样本:第一类(图 1a; 5 个典型样本合成,并采用辐合线客观分析技术绘制)偏南向辐合线暖区暴雨(简称偏南向型)共 439 个样本;主要是由东南、偏南、西南风三支气流汇合,形成偏南向辐合线系统,在华南沿海尤其是珠江口以西的暴雨、局地大暴雨到特大暴雨多为此种偏南向辐合线系统;此类辐合线暴雨时间短,雨量相对集中,强

雨区主要发生在辐合线及其左侧,那里是强的气旋性风切变区。第二类(图 1b; 5 个典型样本合成,并采用辐合线客观分析技术绘制)西南向辐合线型暖区暴雨(简称西南向型)共 302 个样本;主要是由偏西风、西南风两支气流汇合,形成西南向辐合线,在华南沿海形成局地大暴雨到特大暴雨;此类辐合线暴雨持续时间相对较长,降水呈狭长带状,多出现在珠江口至粤东沿岸。往往有两条平行辐合线,分别为沿粤东海岸线和经广东北部。相对应的两条强降雨带也主要在辐合线北侧的气旋式风切变区,分别在广东和福建沿海,以及在广西北部至广东北部到江西中部。其中沿海雨带明显更强(图 1b)。

对于这两类辐合线低值系统,苗春生等(2017)的研究显示它们的基本特征为较强烈的暴雨天气系统,具有几个垂直叠置的辐合中心,形成较深厚的辐合层,强盛的垂直速度中心可伸展到 400 hPa 高度。均有较强的凝结潜热释放,造成辐合线系统的暖心结构,维持强辐合及上升气流,也造成对流不稳定能量层次伸展。其中西南向型中凝结潜热释放较偏南向型更强,更持久,西南向型的水平流场强于偏南向型,凝结潜热释放更强,显著增强低层辐合流场 30% 以上,减弱中层的辐散流场 30% 左右,维持了辐合线系统的强辐合性质。

3.2 华南沿海暖区地形特征

华南地处低纬,濒临南海,水汽丰沛,地势大体北高南低。境内山脉众多,丘陵与河网密布,海岸曲折。沿海暖区高温高湿,降水多集中于两个区域,分别为粤西沿岸,以及珠江口至粤东沿岸。前述两种类型暖区暴雨发生地的位置如图 2 所示。虚线框分别表示偏南向型辐合线及暴雨在粤西地形范围,西南向型辐合线及暴雨在粤东地形范围。粤西主要有呈团状的云雾山以及天露山,其主峰海拔高度达 1704 m,是粤西南最高峰。而粤东莲花山呈东北西南带状,绵延 300 km,北面还有九连山、青云山和罗浮山等。

3.3 地形对两类辐合线的影响

通常地形对大气环流的动力作用主要是迫使气流绕行和爬坡。爬坡分量和扰流分量所占比重与地形本身的尺度、形状、气流的强弱以及气流与地形的相对位置等因素密切相关。此外山脉的侧向摩擦也起着一定作用。

偏南向型辐合线暴雨,粤西云雾山地形基本是迎面对应偏南向辐合线,其动力作用有两个。一个

是对登陆气流正面阻挡,利用其海拔高度较高较陡的特征使偏南向辐合线迅速爬坡抬升。第二个是山顶高空辐散,气柱形成强抽吸。抬升与抽吸两者配合形成强上升运动,利于充沛水汽垂直输送。触发的降水更为强烈和集中。同时云雾山和其东南邻近的天露山形成狭管地形也加强了山前的气流辐合上升。降水形成后,伴随的中层凝结潜热释放有利于辐合线低值系统维持。

西南向型,低空急流带来海上丰沛水汽,低层有明显的湿舌,易形成强对流不稳定。粤东的西南向莲花山脉对西南向辐合线产生扰流与侧向摩擦,气流向岸的山脉一侧辐合,受山脉作用形成沿山脉走向的狭长强上升运动层。山脉侧向摩擦使得辐合线减速停滞,延长降水时间,在此过程中在中层释放大量的凝结潜热,有利于辐合线低值系统的增强与维持。

华南暖区暴雨为单一气团系统性降水,此类降水与冷暖气团相遇的气流抬升以及冷暖气团饱和水汽压之差造成的凝结降水不同,主要为环境水汽充沛,海上水汽输送持续,单一气团辐合线的系统性辐合抬升与地形大坡度稳定抬升相互促进共同作用,加强暖区辐合线低值系统的上升运动。实际大气中锋面坡度非常小。冷锋坡度较大,约为 $1/50 \sim 1/100$,暖锋坡度约为 $1/150 \sim 1/200$ 。冬季中国华南准静止锋坡度更小,约 $1/300$ 左右。而沿海山脉的坡度大约为 $1/13 \sim 1/50$,坡度远大于锋面。因此造成的垂直速度层抬升迅速,范围集中,层次深厚。充足的暖湿气流因抬升在高空凝结降水,并释放潜热,又增强和维持辐合线暖心低值系统,通过相互作用造成更强的暴雨。由于粤西山脉与粤东山脉形状差异以及与暖区暴雨密切关系,本文将重点探讨沿海山脉的正面抬升与侧面摩擦对两类辐合线系统及其暴雨的影响作用。

4 数值试验方案设计

为了更详细地讨论华南沿海山脉地形对两种辐合线系统的动力影响机制,针对沿海地形区域,选取典型个例,采用数值试验方法进行研究。

4.1 对照试验及结果验证

数值模拟采用的是 WRF3.5 中尺度模式。两种暖区辐合线暴雨类型的对照试验(记为 TCTL)都是三重(D01、D02 和 D03)网格嵌套,格距分别为 36 km、12 km、4 km。偏南向型典型个例模拟时

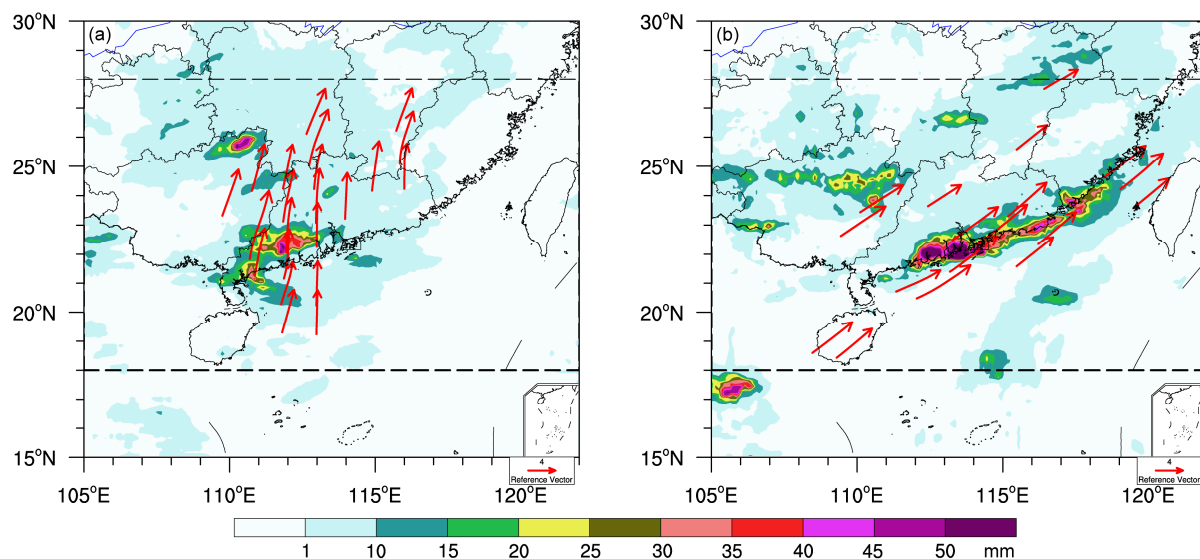


图1 两类华南沿海暖区辐合线暴雨合成的平均降水分布与客观分析的辐合线系统轴线(850 hPa): (a) 偏南向型; (b) 西南向型。阴影为典型个例最强降水时刻合成降水量, 单位: mm; 红色箭头为客观判定的辐合线, 虚线为研究区域的南北边界

Fig. 1 Distribution of precipitation and convergence axes of the two types of convergence lines that induce warm area heavy rainfall along South China coastal region (850hPa): (a) Southerly pattern; (b) southwesterly pattern. Shaded areas indicate precipitation, units: mm. Red arrows are the convergence axes, dashed lines indicate the south-north border lines of research area

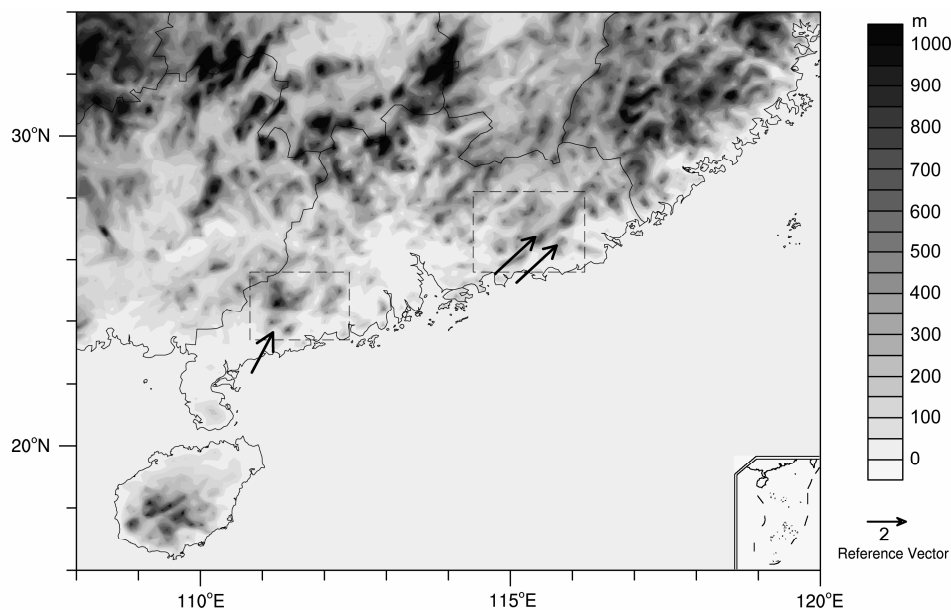


图2 华南地形图。阴影为海拔高度, 单位: m。图中箭头表示两类辐合线与两个研究区的相对位置

Fig. 2 Terrain height (units: m) in South China. Shaded areas indicate the altitude of the topography, the vectors show the convergence line positions related to the two experiment areas

段从2013年5月7日12:00至8日12:00(协调世界时,下同),此类多为短时强降水,模拟时间24 h。选用的模式物理过程方案包括:(1)WSM3 微物理过程;(2)积云对流参数化方案D01 采用Kain-Fritsch, D02 采用BMJ, D03 不考虑积云对流程;(3)边界层方案(YSU);(4)辐射方案(RRTM)

等。西南向型典型个例模拟时段从2013年5月21日06:00到22日12:00,此类多为持续性降水,过程时间相对较长,模拟时间30 h。选用的方案,微物理过程是Ferrier (Skamarock, 2007),其余方案均与偏南向相同。这样选择是考虑偏南型辐合线暴雨地形正面抬升显著,故注意高层云水与云冰的计

算,西南型辐合线暴雨水平气流辐合更强,故注意平流效应计算。另外地面粗糙特征,考虑低纬热带,选山脉地表为落叶阔叶林覆盖。

通过对两种类型最强降水时段的降水以及流场的诊断图与模式对照试验结果比较(图3),结果显示对照试验能够比较好地模拟出雨带的位置、形状、走向和大值中心,以及各层流场分布形势。此外两种类型雨区的降水强度、垂直速度、凝结潜热的量值大小与实况均有良好的时空对应关系(图略),如凝结潜热在中高层达到最大,所对应的垂直速度也更强;西南向型较偏南向型有着更强、时段更长的凝结潜热释放等,这些特点均显示选用的参数化方案以及初边界条件、地表特征等基本合

理。下面在此基础上进行地形作用的敏感性试验。

4.2 地形敏感性试验方案

对于偏南向型,三支气流汇合形成偏南向辐合线从海洋吹向粤西沿海,携带丰沛水汽,遇云雾山脉正面阻挡,气流进一步辐合抬升,在云雾山的东南侧形成强降水。云雾山的东南侧还有天露山,两山之间形成狭管地形。设计两组地形试验:第一组降低山脉试验(记为RM0.2),将(21.7°~22.8°N, 110.8°~111.8°E)区域内的地形降低80%,即去除云雾山对系统爬坡抬升的影响。第二组填充试验(记为FILL),将(21.7°~22.8°N, 110.8°~111.8°E),区域内低于350 m的地形填充至350 m。去除两山间的狭管地形,但保留地形对系统爬升作

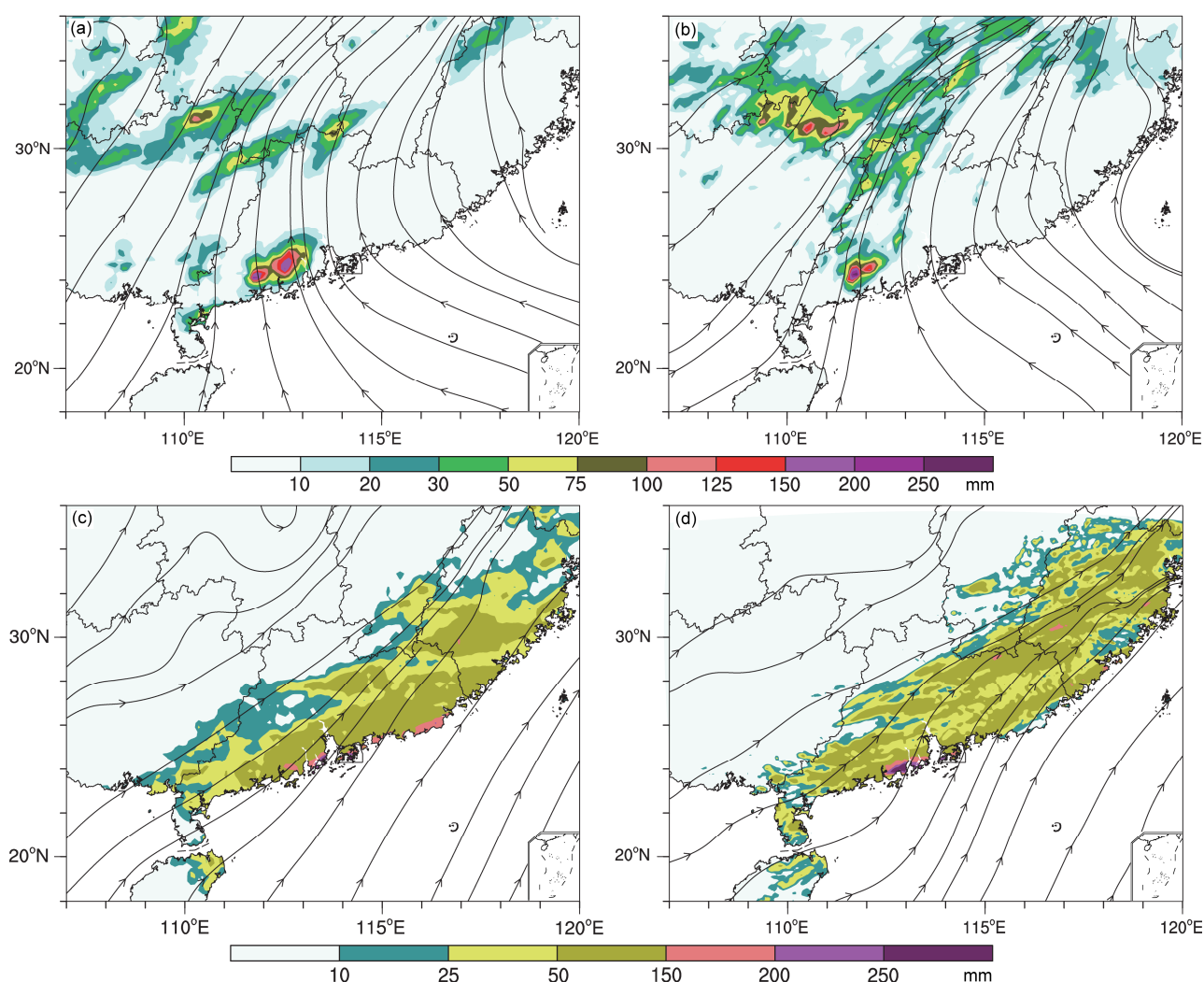


图3 两种类型(a、c)实况与(b、d)对照试验降水量(填色;单位:mm)与850 hPa风场分布:(a、b)偏南向型(2013年5月7日19:00至8日06:00 12 h累积降水量和5月8日00:00风场分布);(c、d)西南向型(2013年5月21日06:00至22日12:00 30 h累积降水量及5月21日18:00风场分布)

Fig. 3 Precipitation distribution (units: mm) and streamline (wind field at 850 hPa) patterns from (a, c) observations and (b, d) numerical simulations: (a, b) Southerly patterns (12-h cumulative precipitations from 1900 UTC 7 May 2013 to 0600 UTC 8 May 2013 and wind at 0000 UTC 8 May 2013); (c, d) southeasterly patterns (30-h cumulative precipitations from 0600 UTC 21 May 2013 to 1200 UTC 22 May 2013 and wind at 1800 UTC 21 May 2013)

用,重点讨论狭管地形对系统的辐合上升作用。试验中各项参数与对照试验一致。

对于西南向型,偏西与偏西南两支气流在沿海汇合形成西南向辐合线,平行于东北—西南走向的莲花山脉,形成了从珠江口西侧到整个粤东沿海的带状降水。为调查莲花山对粤东沿海暴雨的直接影响,以及对粤西沿海暴雨的连带影响,设计地形试验:第一组降低山脉试验(记为 RM50):将(22.8°~24.1°N, 114.4°~116.2°E)区域内的地形整体降低至 50m。测试去除莲花山脉地形对西南气流的阻挡。第二组修改山脉表面粗糙度试验(记为 CHANGE)基于表面粗糙度大小与摩擦系数具有正比关系趋势。考察山脉侧向摩擦效应,对莲花山脉地表选用植被为贫瘠稀疏植物的地表环境,以便与对照组的

落叶阔叶林覆盖地表进行比对。在 WRF3.5 中,这两种表层环境的地表粗糙度分别给定为落叶阔叶林 0.5,贫瘠稀疏植物 0.01。试验中各项参数与对照试验一致。

5 两类暖区暴雨过程地形动力影响分析

5.1 粤西云雾山对偏南向型暖区暴雨的影响

(1) 云雾山正面阻挡抬升试验

云雾山 2000 m 高度,这种地形对偏南向型辐合线的阻挡、爬坡抬升作用明显。当把地形降低 80%以后,偏南向型 RM0.2 与对照试验的地形与辐合线及雨区位置对应关系如图 4 所示。此时由西南风、偏南风 and 东南风形成的偏南向辐合线缺少了山

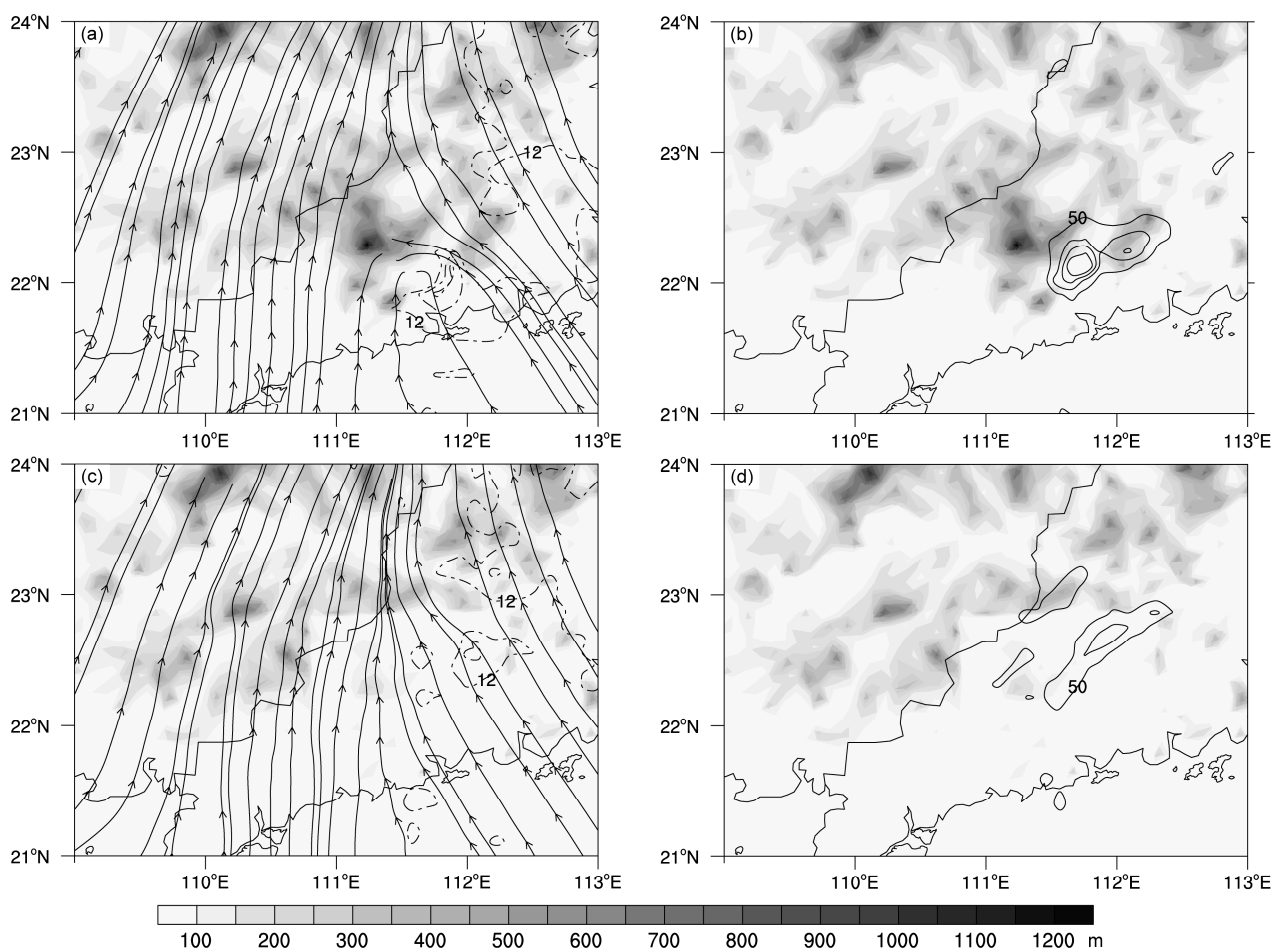


图 4 偏南向型对照试验与 RM0.2 试验的地形与辐合线及雨带配置:(a、b)对照试验;(c、d) RM0.2 试验。填色为海拔高度,单位:m;实线表示 2013 年 5 月 8 日 01:00 至 06:00 大于 50 mm 的 6 h 累积降水量,单位:mm;流线为 925 hPa 上 5 月 8 日 02:00 的风场辐合线,点线为 925 hPa 上大于 12 m s⁻¹ 等风速线,(单位:m s⁻¹)

Fig. 4 Terrain height, convergence line, and precipitation in the (a, b) control experiment and (c, d) RM0.2 experiment for the southerly pattern. Shaded area indicates terrain height, units: m; solid lines show 6-h accumulated precipitation of greater than 50mm during 0100–0600 UTC 8 May 2013, units: mm; streamlines show the wind field convergence lines, and dashed lines display wind speed of greater than 12 m s⁻¹ at 925 hPa at 0200 UTC 8 May 2013, units: m s⁻¹

脉的正面阻挡,直接向北推进。在原有山脉位置失去强烈的风向辐合,风速大值区呈零散状,少量风速达 12 m s^{-1} ,整体风速减小至少 4 m s^{-1} ,显示地形阻挡对系统辐合风速的影响达 $25\% \sim 33\%$ 。对应的强降水雨带也随辐合线向北推进,雨带狭长,降水量减小幅度近 50% 。

所以,对于偏南向型辐合线暖区暴雨,降低区域内山脉海拔高度,偏南向辐合线失去云雾山的正面阻挡,风向的辐合减弱,风速减小,失去地形的强迫爬坡抬升,系统上升运动极大削弱,降水也减弱。

在经雨区中心沿 111.8°E 的经向垂直剖面上计算 TCTL 与 RM0.2 (对照试验与敏感性试验) 的垂直速度差 (图 5),在沿海地区 $22^\circ\text{N} \sim 23^\circ\text{N}$ 附近,有无地形的两者垂直速度差 (即对照试验减敏感试验),垂直速度差达到 2 m s^{-1} (绿色填色),厚度达约 500 hPa 。随着降水的发生发展,这种差距迅速增大。在降水最强盛的两个时刻垂直速度差值在 22°N 附近最大,接近 5 m s^{-1} (图 5c 和 d 中的红色垂直部分)。由于地形无时间变化,因此垂直速度差也与辐合线气流的活跃过程直接相关。图 5 显示

地形作用造成的强垂直上升区是与山峰位置对应的,范围集中,层次深厚。

敏感性试验去掉地形作用后,不仅地形的爬坡抬升作用被删减,原有的辐合线系统的低值辐合上升也因辐合线的北上而减弱。由此造成后续水汽辐合不足,垂直速度减弱,降水量减少,凝结潜热释放量减少。因此地形的动力爬坡抬升不仅影响垂直上升运动,还影响凝结潜热释放,进而通过类似第二类条件不稳定作用影响辐合线系统发展及其暴雨过程。

(2) 云雾山“狭管辐合抬升”试验

敏感性试验填充狭管地形后 (图 6),使两山脉成为一个整体。偏南向辐合线遇填充后的整体地形阻挡,产生扰流,在整体山脉东南气旋式流场一侧形成一个降水中心,新的降水中心的强度明显弱于原有狭管效应降水 (图 4a、b)。在此降水中心南侧的风速大值中心风速达 $12 \sim 14 \text{ m s}^{-1}$,相比对照试验辐合风速减小 $2 \sim 4 \text{ m s}^{-1}$,说明狭管地形对系统辐合风速的影响力达 $13\% \sim 25\%$,并影响到辐合上升层次与降水强度。

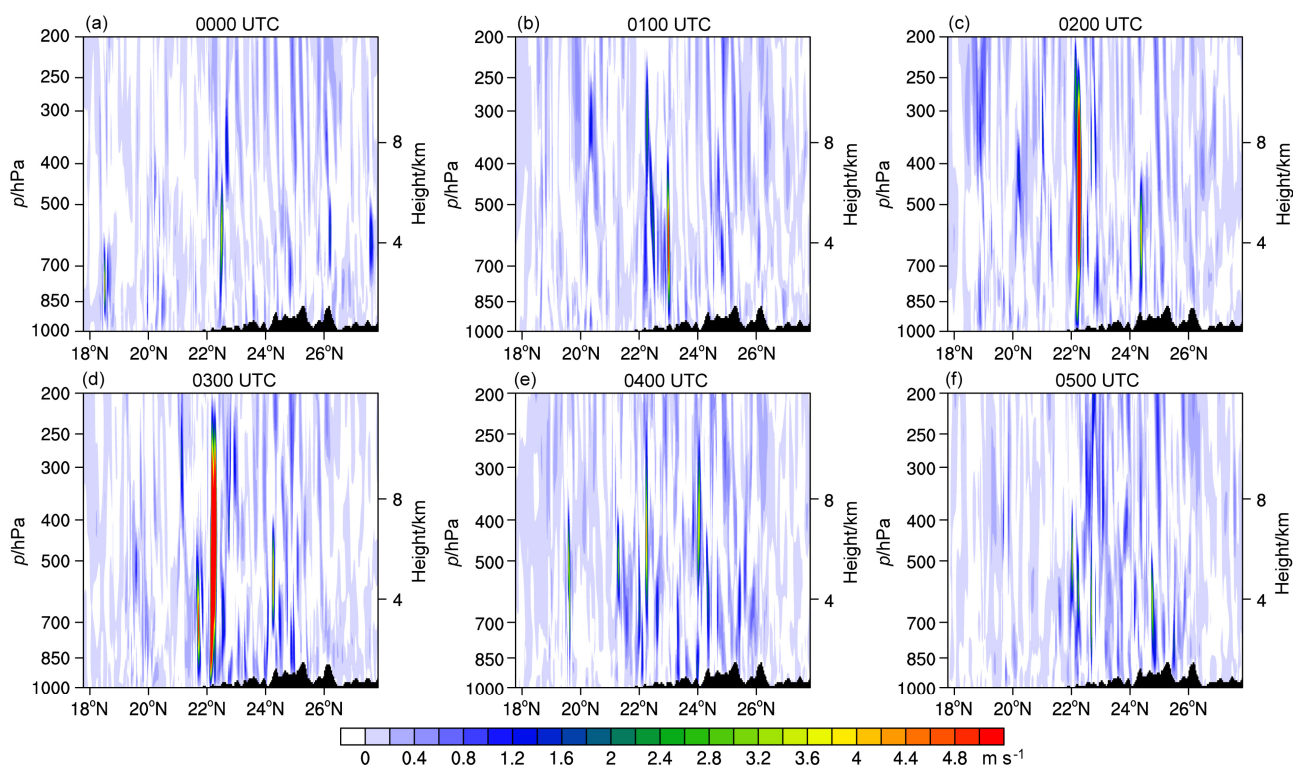


图 5 2013 年 5 月 8 日 (a-f) 00:00~05:00 偏南向型辐合线暴雨过程最强 6 个时刻的 TCTL (对照试验) 与 RM0.2 试验垂直速度差沿 111.8°E 的垂直剖面 (填色; 单位: m s^{-1})

Fig. 5 Vertical cross sections of vertical velocity differences (units: m s^{-1}) along 111.8°E between TCTL (control experiment) and RM0.2 experiment at six times of strongest precipitation for the southerly pattern. (a-f) From 0000 to 0500 UTC 8 May 2013, respectively

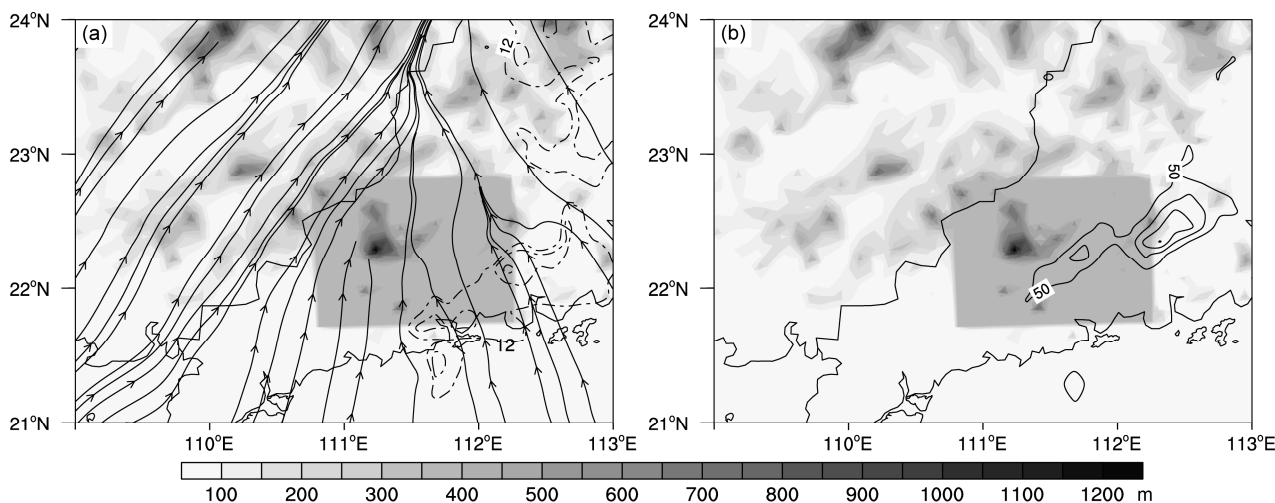


图6 2013年5月8日偏南向型FILL试验地形与辐合线及雨带配置:(a) 925 hPa上03:00风场辐合线(流线;虚线为大于 12 m s^{-1} 等风速线,单位: m s^{-1});(b) 01:00~06:00大于50 mm的6 h累积降水(实线,单位:mm)。阴影为海拔高度,单位:m。图中矩形区为地形修改研究区

Fig. 6 Terrain height, convergence line, and precipitation in the FILL experiment for the southerly pattern. (a) Streamlines show the wind field convergence line, dashed lines are for wind speed of greater than 12 m s^{-1} at 925 hPa at 0300 UTC 8 May 2013, units: m s^{-1} ; (b) solid lines are for 6-h accumulated precipitation of greater than 50 mm (units: mm) during 0100–0600 UTC 8 May 2013. Shaded area indicates height, units: m. The rectangle indicates the terrain change area

5.2 粤东莲花山对西南向型暖区暴雨的影响

沿海地形对西南向的作用主要体现在粤东莲花山的侧向摩擦阻挡。由于西南向辐合线对应的雨带覆盖了粤东与珠江口附近,其中粤东雨带直接受到辐合线与莲花山相遇的影响,而珠江口附近的雨带则属于西南向辐合线趋近莲花山时的登陆效果。

(1) 莲花山侧向阻挡与连带珠江口雨区变化

从西南向型对照试验的地形与辐合线及雨区的配置看,西南向辐合线自海上一路向东北延伸,受莲花山侧向阻挡,流线在山脉向岸一侧有聚拢,如图7a中流线箭头所示。显示了山脉对西南气流的侧向阻挡,有利于气流沿山脉走向辐合,以及辐合上升运动。对比去除粤东莲花山地形的图7c,当西南向辐合线缺少山脉侧向阻挡,在粤东登陆流程呈反气旋弧形,不利于降水,此时原粤东雨区范围的流线明显变得稀疏零散,说明风速急剧减小,粤东沿岸莲花山附近降水减小。同时西南向气流区,缺少沿海山脉,西南向流线明显变得更稀疏,气流较有山脉时更均匀地从海洋吹向陆地,珠江口附近的登陆地形缺乏沿海山脉的配合阻碍,对应雨带变得狭长,宽度变窄,见降水分布对比图(图7b和d)。

(2) 莲花山侧向摩擦对辐合线系统上升运动的影响

为了进一步讨论莲花山的侧向摩擦影响,对比

莲花山脉地面两种粗糙度(50:1,即常规的热带阔叶林与贫瘠的裸露地表)造成的两种雨区经向—垂直剖面上垂直速度分布差异,如图8a、b。对应沿海雨区的 114°E ,暴雨过程较强时段内的22日01:00,图8b中低粗糙度辐合线区的辐合上升运动显著小于高粗糙度环境(图8a),实际上,从之前的一两个小时,就已经开始显示出此种现象。可以看出弱的侧向摩擦对辐合线区的辐合垂直运动的强度和持续时间两方面的作用都显著低于高粗糙度地表环境。

图8c、d为21日23:00的比湿分布的对比。显然高粗糙度的高侧向摩擦下,沿海暴雨区高比湿区范围大(图8c),而低粗糙度的低侧向摩擦下(图8d),相应时刻的高比湿区范围明显减少收缩。这些动力和湿度条件的变化,直接影响到此处降水量值的减小(见图7d)。

试验显示莲花山具有高粗糙度,对西南向辐合线通过侧向摩擦,导致辐合线在此区域内停滞辐合,有利于上升运动和水汽汇集,形成强的降水。尤其是侧向摩擦造成的西南辐合线在此停滞,影响到降水持续时间比偏南型更长,释放的凝结潜热较偏南型更多。而降低莲花山表面粗糙度则显示侧向摩擦的减弱,不利于此处的辐合上升运动,减弱降水强度与时间。

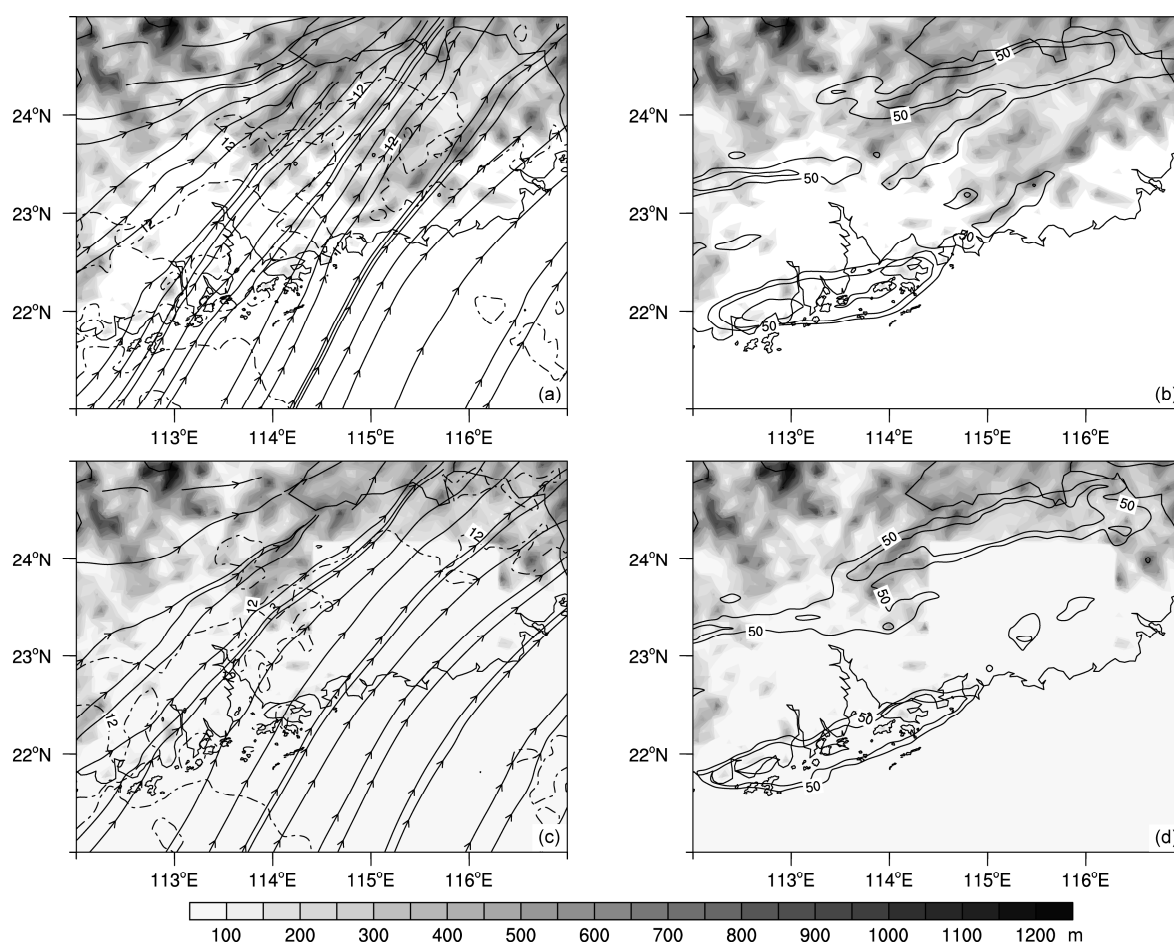


图7 西南向型(a、b)对照试验 TCTL 和(c、d)敏感性试验 RM50 的地形与辐合线及雨带配置。阴影为海拔高度, 单位: m; 流为 925 hPa 上 2013 年 5 月 21 日 20:00 风场辐合线, 虚线为大于 12 m s^{-1} 等风速线, 单位: m s^{-1} ; 实线表示 2013 年 5 月 21 日 19:00 至 22 日 00:00 大于 50 mm 的 6 h 累积降水量 (单位: mm)

Fig. 7 Terrain height, convergence lines, and precipitation (greater than 50 mm) in (a, b) TCTL (control experiment) and (c, d) RM50 experiment for the southwesterly pattern. Shaded area shows terrain height, units: m; streamlines show the wind field convergence lines, dashed lines are wind speed of greater than 12 m s^{-1} at 925 hPa at 2000 UTC 21 May 2013, units: m s^{-1} ; solid lines show 6-h accumulated precipitation of greater than 50 mm from 1900 UTC 21 May 2013 to 0000 UTC 22 May 2013

6 小结

通过数值试验, 讨论了两种类型华南沿海暖区辐合线暴雨发展过程中地形影响的作用, 得到以下结论:

(1) 对偏南型和西南型两类华南沿海暖区暴雨辐合线低值系统, 可通过客观方法确定。对两类辐合线暴雨分别进行地形影响试验。结果显示, 沿海山脉对形成与维持暖区辐合线系统, 确定辐合线暴雨落区、降水的范围、雨强量级都具有重要作用。此外通过与辐合线系统中的辐合上升运动配合, 地形抬升造成抬升迅速、范围集中、层次深厚的增强

上升运动层, 利于凝结潜热释放增加, 进而又反馈维持辐合线低值系统的强度以及暖区暴雨的强度。

(2) 对偏南向型辐合线系统, 降低云雾山地形 80% 后, 缺乏云雾山正面阻挡, 系统直接向北推进。在原有山脉位置对应的降水雨带也随辐合线的北上向北推进, 降水量显著减小, 减小量可达 50%。因此山脉地形正面抬升对华南暖区辐合线系统的影响是系统性的: 首先地形抬升直接影响山脉迎风处降水的形成, 而降水伴随凝结潜热释放, 又反馈增强辐合线低值系统暖心结构和加强其垂直运动层厚, 所以地形与环流配合形成的辐合线系统是华南沿海暖区暴雨的关键系统。

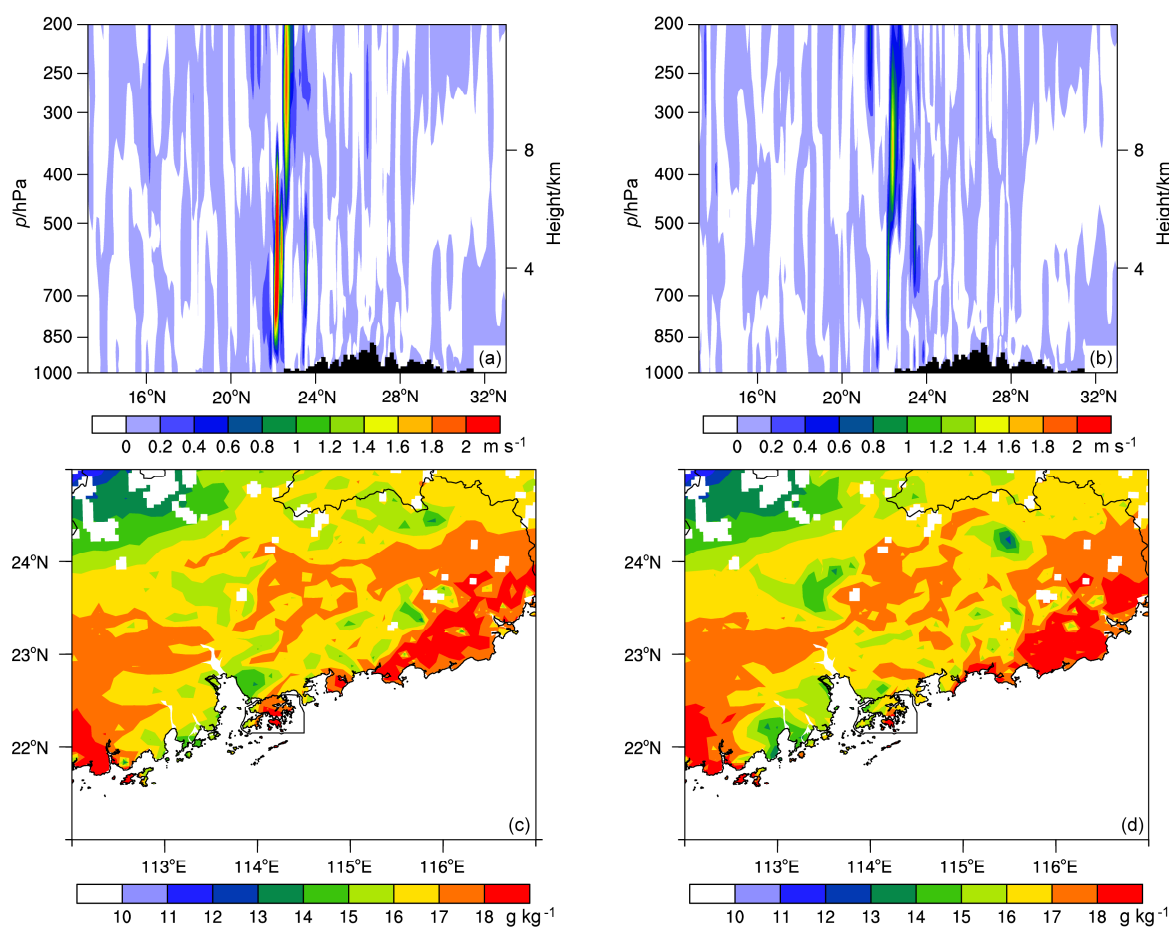


图 8 2013 年 5 月西南向型辐合线暴雨过程降水区 (a) 控制实验与 (b) 敏感实验 22 日 01:00 垂直速度沿 114°E 经向—垂直剖面 (单位: m s^{-1}) 和 (c、d) 21 日 23:00 925 hPa 层比湿差水平分布 (单位: g kg^{-1}): (a、c) TCTL; (b、d) CHANGE (低粗糙度试验)

Fig. 8 Vertical cross sections of vertical velocity along 114°E for the southwesterly patterns between (a) the control and (b) the sensitive tests (0100 UTC 22 May 2013, units: m s^{-1}) and (c, d) specific humidity distribution at 925 hPa (2300 UTC 21 May 2013, units: g kg^{-1}) in (a, c) TCTL and (b, d) CHANGE (low roughness experiment)

(3) 当填充云雾山和天露山之间的地形后, 模拟结果显示狭管地形对系统辐合风速的影响力达 13%~25%。地形正面抬升效应与狭管辐合上升效应的配合, 为偏南向辐合线系统及对应的强降水提供了进一步增强的环境, 所以构成此处华南暖区暴雨的频繁发生。

(4) 对西南向型辐合线系统, 去除粤东莲花山地形后, 粤东沿岸的西南向流型变形为具反气旋式, 流线辐合减少, 不利于强降水。同时连带影响到在珠江口附近的西南气流更稀疏, 造成左侧垂直于流线的气旋切变位置相对偏南。使珠江口对应雨带南移变窄更狭长。地形侧向摩擦作用影响西南气流辐合上升运动, 减弱山脉粗糙度, 即减小侧向摩擦, 将减弱垂直上升运动的强度、伸展厚度, 以及持续时间。也减少和减弱沿海强比湿分布范围, 进

而减小降雨区雨量强度与分布。

综上所述, 本文通过数值试验讨论了局地地形对华南两类暖区暴雨辐合线系统的影响。对进一步认识华南暖区暴雨系统及其主要分类特征, 以及地形抬升、地形阻挡、地形侧向摩擦效应对强降水基本条件的作用与影响, 提供了有意义的参考信息与实例结果。

参考文献 (References)

- Colle B A. 2004. Sensitivity of orographic precipitation to changing ambient conditions and terrain geometries: An idealized modeling perspective [J]. *J. Atmos. Sci.*, 61 (5): 588–606, doi:10.1175/1520-0469(2004)061<0588:SOOPTC>2.0.CO;2.
- 董海萍, 赵思雄, 曾庆存. 2008. 低纬高原地区一次强降水过程的中尺度雨团数值模拟研究 [J]. *大气科学*, 32 (5): 1159–1173.
- Dong Haiping, Zhao Sixiong, Zeng Qingcun. 2008. A numerical simulation study of

- mesoscale rainy-cluster producing heavy rainfall in lower latitude plateau during early summer [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 32 (5): 1159–1173, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2008.05.14.
- Estoque M A. 1961. A theoretical investigation of the sea breeze [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 87 (372): 136–146, doi: 10.1002/qj.49708737203.
- 古志明, 冯瑞权, 吴池胜, 等. 2000. 一次华南暴雨过程的数值模拟及结果分析 [J]. 热带气象学报, 16 (2): 173–179. Gu Zhiming, Fong Soikun, Wu Chisheng, et al. 2000. A modeling case study of heavy rain event over South China in May L994 [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 16 (2): 173–179, doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2000.02.010.
- 郭欣, 郭学良, 付丹红, 等. 2013. 钟形地形动力抬升和重力波传播与地形云和降水形成关系研究 [J]. 大气科学, 37 (4): 786–800. Guo Xin, Guo Xueliang, Fu Danhong, et al. 2013. Relationship between bell-shaped terrain dynamic forcing, mountain wave propagation, and orographic clouds and precipitation [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 37 (4): 786–800, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12114.
- 何建军, 余晖, 刘娜, 等. 2014. 复杂地形区陆面资料对 WRF 模式模拟性能的影响 [J]. 大气科学, 38 (3): 484–498. He Jianjun, Yu Ye, Liu Na, et al. 2014. Impact of land surface information on WRF's performance in complex terrain area [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 38 (3): 484–498, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2013.13186.
- 李博, 刘黎平, 赵思雄, 等. 2013. 局地低矮地形对华南暴雨影响的数值试验 [J]. 高原气象, 32 (6): 1638–1650. Li Bo, Liu Liping, Zhao Sixiong, et al. 2013. Numerical experiment of the effect of local low terrain on heavy rainstorm of South China [J]. Plateau Meteor. (in Chinese), 32 (6): 1638–1650, doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2012.00156.
- 林良勋, 冯业荣, 黄忠, 等. 2006. 广东省天气预报技术手册 [M]. 北京: 气象出版社, 138. Lin Liangxun, Feng Yerong, Huang Zhong, et al. 2006. Technical Guidance on Weather Forecasting in Guangdong Province (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 138.
- 蒙伟光, 王安宇, 李江南, 等. 2004. 华南暴雨中尺度对流系统的形成及湿位涡分析 [J]. 大气科学, 28 (3): 330–341. Meng Weiguang, Wang Anyu, Li Jiangnan, et al. 2004. Moist potential vorticity analysis of the heavy rainfall and mesoscale convective systems in South China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 28 (3): 330–341, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2004.03.02.
- 蒙伟光, 张艳霞, 戴光丰, 等. 2007. 华南沿海一次暴雨中尺度对流系统的形成和发展过程 [J]. 热带气象学报, 23 (6): 521–530. Meng Weiguang, Zhang Yanxia, Dai Guangfeng, et al. 2007. The formation and development of a heavy rainfall mesoscale convective system along southern China coastal area [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 23 (6): 521–530, doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2007.06.001.
- 苗春生, 杨艺亚, 王坚红, 等. 2017. 两类华南沿海暖区暴雨特征及热力发展机制对比研究 [J]. 热带气象学报, 33 (1): 53–63. Miao Chunsheng, Yang Yiya, Wang Jianhong, et al. 2017. Comparative study of characteristics and thermo-dynamical development mechanism on two types of warm-sector heavy rainfall in South China Coast [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 33 (1): 53–63.
- 孙健, 赵平, 周秀骥. 2002. 一次华南暴雨的中尺度结构及复杂地形的影响 [J]. 气象学报, 60 (3): 333–342. Sun Jian, Zhao Ping, Zhou Xiuji. 2002. The mesoscale structure of a South China rainstorm and the influence of complex topography [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 60 (3): 333–342, doi:10.11676/qxxb2002.040.
- 孙建华, 赵思雄. 2002. 华南“94·6”特大暴雨的中尺度对流系统及其环境场研究 II. 物理过程、环境场以及地形对中尺度对流系统的作用 [J]. 大气科学, 26 (5): 633–646. Sun Jianhua, Zhao Sixiong. 2002. A study of mesoscale convective systems and its environmental fields during the June 1994 record heavy rainfall in South China. Part II: Effect of physical processes, initial environmental fields and topography on meso- β -convective system [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 26 (5): 633–646, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2002.05.05.
- Skamarock W C, Klemp J B, Dudhia J, et al. 2007. A Description of the Advanced Research WRF Version2 [R]. NCAR Technical Note, NCAR/TN-468+STR.
- 王坚红, 徐碧裕, 刘刚, 等. 2014. 华南前汛期广东暴雨分区动力特征及特大暴雨分析 [J]. 气象与环境学报, 30 (6): 43–51. Wang Jianhong, Xu Biyu, Liu Gang, et al. 2014. Dynamics characteristics of rainstorm division in Guangdong Province and analysis of a severe rainstorm process [J]. Journal of Meteorology and Environment (in Chinese), 30 (6): 43–51, doi:10.3969/j.issn.1673-503X.2014.06.007.
- Wilson J W, Schreiber W E. 1986. Initiation of convective storms at radar-observed boundary-layer convergence lines [J]. Mon. Wea. Rev., 114 (12): 2516–2536, doi:10.1175/1520-0493(1986)114<2516:IOCSAR>2.0.CO;2.
- Wilson J W, Mueller C K. 1993. Nowcasts of thunderstorm initiation and evolution [J]. Wea. Forecasting, 8 (1): 113–131, doi:10.1175/1520-0434(1993)008<0113:NOTIAE>2.0.CO;2.
- Wilson J W, Megenhardt D L. 1997. Thunderstorm initiation, organization, and lifetime associated with Florida boundary layer convergence lines [J]. Mon. Wea. Rev., 125 (7): 1507–1525, doi:10.1175/1520-0493(1997)125<1507:TIOALA>2.0.CO;2.
- Wilson J W, Foote G B, Crook N A, et al. 1992. The role of boundary-layer convergence zones and horizontal rolls in the initiation of thunderstorms: A case study [J]. Mon. Wea. Rev., 120 (9): 1758–1815, doi:10.1175/1520-0493(1992)120<1785:TROBLC>2.0.CO;2.
- Wilson J W, Weckwerth T M, Vivekanandan J, et al. 1994. Boundary layer clear-air radar echoes: Origin of echoes and accuracy of derived winds [J]. J. Atmos. Oceanic Technol., 11 (5): 1184–1206, doi:10.1175/1520-0426(1994)011<1184:BLCARE>2.0.CO;2.
- 夏茹娣, 赵思雄, 孙建华. 2006. 一类华南锋前暖区暴雨 β 中尺度系统环境特征的分析研究 [J]. 大气科学, 30 (5): 988–1008. Xia Rudi, Zhao Sixiong, Sun Jianhua. 2006. A study of circumstances of meso- β -scale systems of strong heavy rainfall in warm sector ahead of fronts in South China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 30 (5): 988–1008, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2006.05.26.
- 夏茹娣, 赵思雄. 2009. 2005 年 6 月广东锋前暖区暴雨 β 中尺度系统特征的诊断与模拟研究 [J]. 大气科学, 33 (3): 468–488. Xia Rudi, Zhao Sixiong. 2009. Diagnosis and modeling of meso- β -scale systems of heavy rainfall in warm sector ahead of front in South China (middle part of Guangdong Province) in June 2005 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33 (3): 468–488, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2009.03.06.
- 张立凤, 查石祥, 张铭. 2000. 一次华南暴雨过程的数值模拟和试验 [J]. 气象科学, 20 (2): 120–128. Zhang Lifeng, Cha Shixiang, Zhang Ming. 2000. The numerical simulation and experiments of a storm rainfall in South China [J]. Journal of the Meteorological Sciences (in Chinese), 20

- (2): 120–128, doi:10.3969/j.issn.1009-0827.2000.02.002.
- 张晓美, 蒙伟光, 张艳霞, 等. 2009. 华南暖区暴雨中尺度对流系统的分析 [J]. 热带气象学报, 25 (5): 551–560. Zhang Xiaomei, Meng Weiguang, Zhang Yanxia, et al. 2009. Analysis of mesoscale convective systems associated with a warm sector heavy rainfall event over South China [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 25 (5): 551–560, doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2009.05.005.
- 赵玉春, 李泽椿, 肖子牛, 等. 2007. 一次热带系统北上引发华南大暴雨的诊断分析和数值研究 [J]. 气象学报, 65 (4): 561–577. Zhao Yuchun, Li Zechun, Xiao Ziniu, et al. 2007. A diagnostic and numerical study on a rainstorm in South China triggered by northward-moving tropical system [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 65 (4): 561–577, doi:10.11676/qxxb2007.052.
- 赵玉春, 李泽椿, 肖子牛. 2008. 华南锋面与暖区暴雨两个例对比分析 [J]. 气象科技, 36 (1): 47–54. Zhao Yuchun, Li Zechun, Xiao Ziniu. 2008. Comparison analysis of South China front and warm area heavy rain systems in June 2006 [J]. Meteorological Science and Technology (in Chinese), 36 (1): 47–54, doi:10.3969/j.issn.1671-6345.2008.01.009.