地形对登陆热带气旋“黄蜂”(2002)强度影响的模拟研究

闫敬华[1] 徐建平[2] 丁伟钰[1] 陈子通[1] 廖移山[3]

1 中国气象局广州热带海洋气象研究所，广州 510080
2 广东省气象局，广州 510080
3 中国气象局武汉暴雨研究所，武汉 430074

摘 要 以“目标登陆台风外场试验研究”(CLATEX)项目的目标热带气旋“黄蜂”为对象，在用高分辨数值模式模拟其近海加强和登陆减弱过程的基础上，通过 5 组对比数值试验，从定量和时间演化角度细致地分析了热带气旋周边海陆和地形分布对热带气旋强度的影响及其机理。分析表明，华南西部地理因子(地形、粗糙度、海陆分布等)对热带气旋强度变化具有重要影响。华南西部地形的存在，有利于低层弱冷空气向南侵袭，从而激发对流发展，使气旋迅速加强，是“黄蜂”近海加强的关键原因；登陆后冷空气切入造成的稳定层结抑制了对流发展，阻断了对流潜热能源，是“黄蜂”登陆后迅速减弱的重要原因；华南西部真实地形下的地表摩擦效应是“黄蜂”登陆后迅速减弱的重要原因之一；南海热带气旋区的地表热交换以潜热输送(蒸发)为主，其量值一般是感热输送的 5 ~ 10 倍；洋面热交换与气旋强度间存在正反馈关系，符合热带气旋发展的“WISHE”(风引起的表面热交换)机制观点，即“WISHE”可能是南海热带气旋发展的一种重要机制。

关键词 热带气旋 登陆 强度 地形影响 模拟
文章编号 1006 – 9895(2005)02 – 0205 – 08 **中图分类号** P444 **文献标识码** A

A Modeling Study of the Impact of Terrain on the Intensity of Landfalling Tropical Cyclone Vongfong (0214)

YAN Jing-Hua[1], XU Jian-Ping[2], DING Wei-Yu[1], CHEN Zi-Tong[1], and LIAO Yi-Shan[3]

1 *Guangzhou Institute of Tropical and Marine Meteorology, China Meteorological Administration, Guangzhou* 510080
2 *Guangdong Meteorological Bureau, Guangzhou* 510080
3 *Wuhan Institute of Heavy Rain, China Meteorological Administration, Wuhan* 430074

Abstract Taking the target tropical cyclone (TC) Vongfong of 2002 Chinese Landfall Typhoon Experiments (CLATEX) as object, the impact and its mechanism of sea-land distribution and terrain on TC intensity change are analyzed in detail from quantitative and temporal evolution points of view, based on the successful high resolution simulation of inshore intensification and weakening after landfall, and through 5 groups of numerical experiments, of Vongfong. Analyses show that terrain factors (terrain height, roughness length, sea-land distribution) in the western part of South China have important impacts on TC intensity change at landfall. The intensity change of Vongfong before and after landfall is closely related to the existence of the actual terrain in the western part South China, which is in favor of the southward invading of lower level cold air, inspiring convection and rapid intensification of TC, which is the key reason of inshore intensification of Vongfong. The cut-in of cold air into TC in lower atmosphere after landfall stabilizes the stratification and restrains convection, which is a key reason of Vongfong decay after landfall. While the friction effect under real terrain is one of the most important reasons for Vongfong decay after landfall. Moreover, the surface heat exchange relies mainly on latent heat transportation (evaporation), which is generally 5 – 10 times of the amount of sensible heat trans portation, in

收稿日期 2003 – 08 – 07, 2004 – 03 – 17 **收修定稿**
基金项目 国家科技部公益重点项目 2001DIA20026 和科技部公益研究专项“我国南方致洪暴雨预测预警系统研究”
作者简介 闫敬华，男，1963 年出生，理学硕士，研究员，现主要从事低纬中尺度天气及数值预报研究. E-mail：jhyan@grmc.gov.cn

the South China Sea TC area. And the sea surface heat exchange has the positive feedback relation with TC intensity, which satisfies the "WISHE" (wind induced surface heat exchange) suggestion, i.e., "WISHE" may be an important mechanism for the South China Sea TC intensification.

Key words tropical cyclone, landfall, intensity, terrain effect, simulation

1 引言

热带气旋(简称 TC)研究一直是国际上一个热点问题,近年国际上在 TC 路径、强度、结构等问题的细致研究方面取得了显著进展[1,2],①~③。然而,TC 强度变化问题比路径问题要复杂得多[2],虽然近年已在环境影响、理论研究和数值模拟等方面取得了一些成果[3~7],但离问题的全面解决还差距甚远,尤其是近海强度突变和登陆问题更缺乏研究。有分析表明[8],90%以上的近海热带气旋强度都减弱,只有少量强度突增。而在我国年均约 2 个近海加强的 TC 中,南海沿岸约占 1.5 个,并且在历史上已多次发生 TC 强度近海突增导致重大灾害的事例。因此,南海地区 TC 近海强度突增问题尤为重要。粤西地区是我国 TC 活动最频繁的地区,对这一地区 TC 的近海强度突增问题虽然有过一些定性分析和讨论[9],但至今仍缺乏较为细致和深入的研究。登陆和地形影响方面,过去在登陆过程中的结构变化、强度变化、路径偏折、暴雨非对称分布、维持机制、边界层结构等方面作了一些研究。如 Powell 等[10]通过实例分析认为,由于地形粗糙度增加可导致岸上风速比海上小 50%,但陡峭海岸能使风速增加 20%~80%。Kaplan 等[11]认为,登陆后热带气旋风速的减小受垂直风切变和大气斜压性的影响。此外,在岛屿(如台湾、菲律宾等)和海岸地形对热带气旋路径、结构和强度影响方面也作了许多研究工作[12]。但目前在沿海地理因子对近海和登陆热带气旋强度影响方面的细致和定量化研究方面还很不足。"我国登陆台风灾害的监测及预报技术研究"外场试验目标 TC "黄蜂"是一个典型的粤西地区近海加强和登陆的南海热带气旋,适合进行上述科学问题的研究。试验获取了较为丰富的探测数据,同时,近年发展的高分辨数值模式系统已具备对 TC 发展过程进行细致模拟分析的能力。因此,本文依托于探测信息分析,用高分辨数值模拟手段从实例试验中分析沿海地形对近海和登陆 TC 强度的作用及机理。

2 方法

本文以 CLATEX 的目标台风"黄蜂"为对象,采用高分辨数值预报模式模拟与有关探测资料对照的方法,在成功模拟该热带气旋近海加强和登陆减弱过程基础上,通过一组对比数值试验细致分析华南西部地理因子(地形、粗糙度、海陆分布等)对热带气旋近海和登陆过程中强度变化的影响。

分析所使用的探测信息包括热带气旋警报、地面降水、TRMM 卫星反演降水、三维变分分析场(应用了雷达"TREC"风、"QuikScat"海面风及其他加密观测信息)、卫星 TBB 和探空资料等。

采用的数值模式为广州高分辨模式(GZHM),该模式基本框架为德国天气局的业务中尺度模式(HRM)。特点是物理过程完整,方案先进,包括质量通量对流参数化方案、包含云微物理效应的网格降水方案、二阶矩闭合的边界层方案等,动力框架采用多项先进技术。模式水平分辨率为 14 km,垂直分为 31 层,因此,适于热带气旋中尺度特征的模拟分析。该模式系统对 2001~2002 年所有影响华南热带气旋的模拟试验[13]表明,其对华南近海 TC 的生成、路径、结构、强度、风雨分布等具有良好的预报能力,在许多情况下其预报的热带气旋强度、云雨结构等演变过程可与实况较好吻合。因此,用本模式系统来进行 TC 强度变化的中尺度分析是可行的。

本文设计了五个对比试验方案,从不同侧面分析地形的影响。方案设计见表 1。

为定量分析各种动、热力因子与 TC 强度变化之间的关系,文中基于拉格朗日坐标(即以各时次 TC 的中心位置为原点)计算了气旋区域半径 50~100 km 范围内平均的各因子随时间的演变。这是本文的一大特点。

① Elsberry R L. Tropical cyclone structure and structure change. Proceedings of the Fifth International Workshop on Tropical Cyclones (IWTC-V). 2002, Cairns, Queensland, Australia

② Ritchie E A. Environmental effects. Proceedings of the Fifth International Workshop on Tropical Cyclones (IWTC-V).2002,Cairns, Queensland, Australia

③ Smith R K. Role of convective processes. Proceedings of the Fifth International Workshop on Tropical Cyclones (IWTC-V).2002,Cairns, Queensland, Australia

表 1 数值试验方案一览表

Table 1 Schedule graph of schemes of numerical experiments

试验编号 Expt no	试验名称 Expt name	设计方案* Scheme setup	目的 Aim
1	控制试验 Control	实际地理信息下的模拟 Real geography	检验模式性能，试验对比 Model performance & control
2	无潜热 No latent heat	同上，但不考虑凝结潜热作用 Same as 1, but without latent heat	机理分析 Mechanism analysis
3	无粗糙 No rough	同 1，但设定陆地 $Z_0 = 0.0002$ m Same as 1, but $Z_0 = 0.0002$ m over land	影响分析 Impact analysis
4	无地形 No terrain	同 3，但设定陆地 $Z_s = 0.01$ m Same as 3, but $Z_s = 0.01$ m over land	影响分析 Impact analysis
5	无陆地 No land	同 1，但将陆地设定为海 Same as 1, but set land as sea	影响分析 Impact analysis

* 地理参数改变区域仅限于 (18°N ~ 24°N，107°E ~ 114°E)，Z_0 粗糙度，Z_s 地表高度。

Modification area of geographical factor：(18°N – 24°N, 107°E – 114°E), Z_0：roughness length, Z_s：terrain height.

3 结果分析

2002 年第 14 号强热带风暴“黄蜂”于 8 月 17 日编号，19 日加强为强热带风暴。19 日 1240 UTC(世界协调时，下同)在湛江吴川市沿海地区登陆后北上减弱。此过程基本上为西北偏北路径移动，速度先慢后快。本文重点分析沿海地形影响，即该热带气旋近海及登陆前后的强度变化过程，因此，以 18 日 00 时为初始场，积分模拟 48 小时。重点分析第 12 ~ 48 小时的特征。

3.1 移动路径和强度的模拟

“黄蜂”在登陆前后(18 日 12 时至 20 日 00 时)，基本以较平直的路径向西北偏北方向运动，前期移动速度较慢，后期加快。气旋从海南岛东侧和雷州半岛东侧边沿近海北移登陆，其间有路径短时偏折现象，如登陆前 3 小时有右折现象(图略)。各试验都较好地预报了气旋路径，其中控制试验成功模拟了“黄蜂”的路径，48 小时内最大误差小于 150 km，第 48 小时预报误差仅 64 km。其中误差最大的时段(21 小时前后)为实况中结构不典型、定位比较困难的时段(定位误差可能比较大)。另外，模拟登陆时间较实况早约 2 小时，实况“黄蜂”于 19 日 2040 UTC(相当于模拟第 36 小时 40 分)在湛江吴川市沿海地区登陆，而模拟在第 34 小时前后登陆。此外，模拟中也很好地反映了登陆前路径右折等几次短时路径偏折现象(图略)。其他各敏感试验路径误差的差异也不大，一般差异都小于 40 km，其中各试验中 48 小时以内的路径误差均小于 160 km(图略)。即，模拟路径对各试验方案(地形因子)的敏感性不大，各试验都较准确地模拟了“黄蜂”登陆前后的移动路径。

“黄蜂”在近海登陆过程中，经历了登陆前加强和登陆后减弱的强度变化过程。控制试验中成功地模拟了这一过程。图 1 为实况和模拟强度的演变情况，可见模拟的强度变化趋势与观测一致，即在 0 ~ 48 小时的模拟过程中有两次显著的加强过程和登陆减弱过程。第一次加强发生在模拟 6 小时前后，第二次加强发生在 24 小时前后，对应“黄蜂”迅速加强为强热带风暴的过程(由于观测精度的关系，实况强度表现为阶梯式变化)，登陆后强度持续减弱。详细观察模拟的强度变化过程发现，从登陆前约 2 小时起(模拟登陆较实况提前约 2 小时)，强度已开始有所减弱，这与观测中登陆前几小时起，对流显著减弱、西南季风减弱是一致的(TBB 图像及 0.25° × 0.25°的变分同化分析场)[14]。

可见，模式成功地模拟了“黄蜂”近海和登陆过程的路径及强度变化过程，因此，可以通过对比试验来分析地形因子对强度变化的影响。

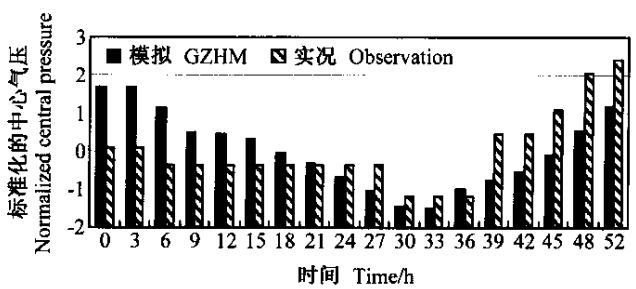

图 1 控制试验中标准化的“黄蜂”中心气压实况(地面气压)及模拟(850 hPa 位势高度)的时间变化，初始时刻为 2002 年 8 月 18 日 00 时

Fig. 1 Normalized time evoltion of the observed central surface pressure and the simulated central geopotential height at 850 hPa in the control run of TC Vongfong. The initial time is at 0000UTC 18 August 2002

3.2 地形对“黄蜂”强度影响的分析

3.2.1 各试验方案中“黄蜂”强度变化的差异

首先,分析各对比试验方案中气旋强度的模拟情况(见图2)。如图1的分析,“控制试验”较准确地模拟了“黄蜂”登陆前加强和登陆后减弱的过程。相比之下,“无潜热”方案不能模拟出气旋的加强过程,说明凝结加热过程在“黄蜂”的发展过程中是至关重要的,这一点将在另文中详尽讨论。

“无粗糙”方案中,在前30小时的模拟中,强度变化过程与“控制试验”几乎完全一致。这是由于此时气旋距大陆还较远,陆地粗糙度还不能显著影响到气旋强度。30小时后,随着气旋逐渐移近大陆并登陆北行,二者强度差异逐渐加大,主要反映在后者在模拟33小时后,由于靠近陆地及登陆,强度逐渐减弱,而前者于模拟第33小时(登陆)达到最强后,6小时内强度只有非常微小的减弱,至38小时后才缓慢减弱(此时TC已移至粗糙度没有设为0的区域),且此后强度一直比后者强许多。从定量角度说明陆地摩擦效应的一个重要作用是使TC登陆后迅速减弱。

“无地形”方案中,气旋强度变化与“无粗糙”方案非常接近,所不同的是,在积分第24~33小时期间,由于地形动力阻挡效应的差异,前者强度比后者略强;而34~44小时期间,前者强度反而比后者稍弱,这是由于此时已登陆,相对于后者,“无地形”情况下不利于地形爬升和降水(参见下节图3等的讨论),能量源偏弱。说明华南西部地形的另一个作用是,(登陆前)通过对TC外围流场的动力阻挡作用,对TC的加强具有阻碍的作用,而登陆后则通过地形爬升、增强降水等过程对TC强度的减弱具有减缓的作用。

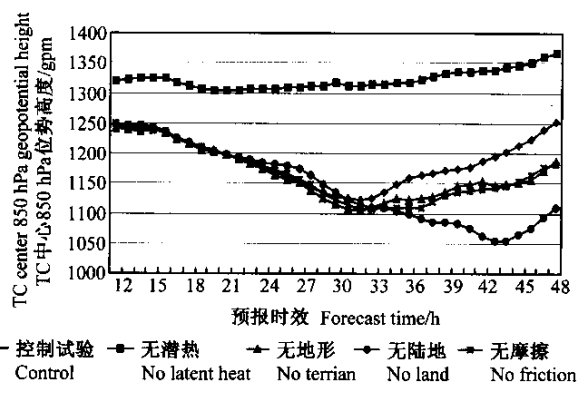

图2 各对比试验中850 hPa气旋中心位势高度随时间的变化

Fig. 2 Time evolution of 850 hPa geopotential height at the TC center for different control numerical experiments

“无陆地”方案中,强度变化过程与其他方案差异巨大,主要表现在:(1)加强过程偏晚,至积分第28小时左右才开始迅速加强,而其他方案(除“无潜热”方案)从23小时起就迅速加强,导致23~33小时期间“无陆地”方案的强度较其他方案明显偏弱。其原因是本方案中强的对流加热出现时间较其他方案明显偏晚(参见图3讨论)。(2)第34小时后,由于其他方案中气旋已登陆,强度不再继续加强,而“无陆地”方案强度继续加强,至42小时气旋“登陆”后,强度才迅速减弱。故此阶段该方案强度较其他方案强许多。原因也与本方案中对流加热继续维持强盛至42小时“登陆”(参见图3讨论)密切相联。结合后面的讨论可知,尽管此阶段本方案的地表摩擦不断增大,但由于下垫面水热输送和降水不断加强,使TC强度不断加强。表明陆地对TC强度的影响不仅限于摩擦及地形阻挡、抬升等效应,而且包含了对下垫面水热供应条件的影响,后者的作用可能更重要。

3.2.2 各试验方案中气旋区域潜热释放的差异

作者的另文[①]分析指出,“黄蜂”近海加强的主要原因是与西北侧低层冷空气侵入激发有关的对流能量释放加强。即对流凝结潜热释放在“黄蜂”强度变化过程中起着关键作用。因此,这里细致对比分析各试验方案中降水(潜热释放)的差异(图3)。

就气旋中心区域次网格对流降水而言,“控制试验”中,对流降水在第24小时前后迅速达到最强,以后逐渐减弱但维持较强至33小时,34小时登陆后迅速减弱消失,这一过程与该方案中气旋强度的变化趋势基本一致,即对流较强的阶段气旋加强,对流较弱时气旋减弱。“无粗糙”方案中,情况类似,主要差异是34小时(登陆)后,本方案的对流要比前者稍强一些。“无地形”方案情况与“无粗糙”方案也基本一致,因此这几个方案中TC登陆前的强度变化过程基本一致。差异最大的是“无陆地”方案,主要表现在其他方案对流在21小时后迅速加强,于第24小时前后达到最强,而本方案在24小时前后对流加强较慢,至29小时后才迅速加强,于32小时达到最强,此时其加热强度比其他方案要强,以后维持较强的对流,至42小时“登陆”才迅速减弱。另文[①]的分析指出,第24小时前后的对流加强过程与低层弱冷空气侵入形成的有利发展条件有关。前三个方案中,由于陆地的存在,海陆分布相同,冷空气向南的影响形势基本相同,因此这几个方案中对流发展的情况基本一致,登陆前的强度变化过程也

①闫敬华,丁伟钰.热带气旋黄蜂(2002)近海加强机理的模拟研究.待发表

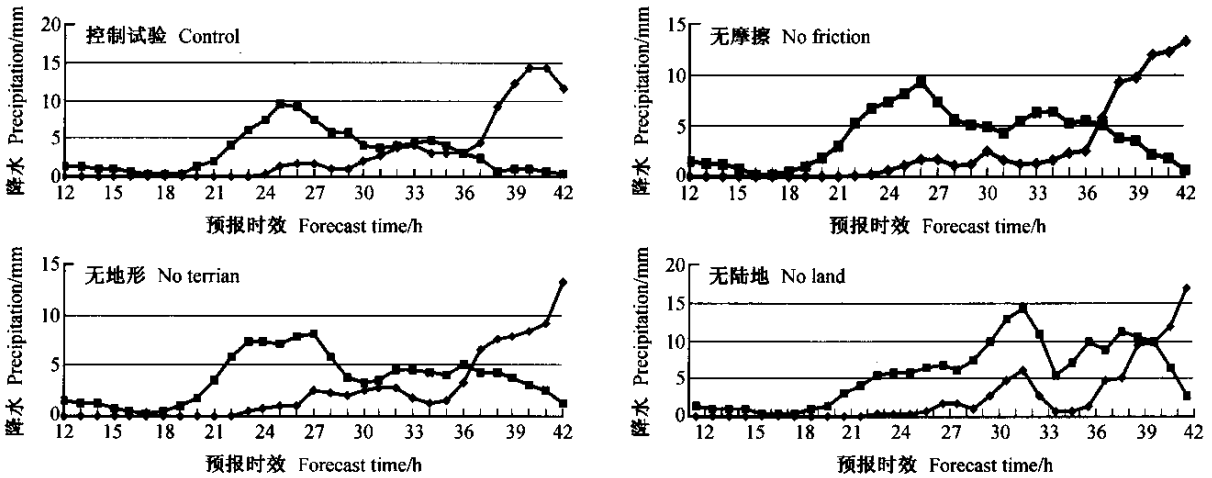

图 3 各对比试验中气旋中心区域 100 km 范围平均的次网格对流(方块线)和网格尺度(菱块线)降水随时间的变化

Fig. 3 Time evolution of subgrid scale (line with quadrate mark) and grid scale (line with diamond mark) precipitation, averaged over the vicinity of the TC center with a radius of 100 km, in each control experiments

基本一致(登陆后的强度变化差异将在后面进一步讨论)。而“无陆地”方案中,华南西部全设为海洋,无陆地存在(见表 1),故由于海陆热力效应的差异,该弱冷空气南侵速度变慢,而且不能到达 19°N 一带(见图 6 讨论),因此,对流峰值不在 24 小时前后出现,而是推迟到 32 小时前后(该方案中此时冷空气才侵入 TC),相应强度加强过程也偏晚。

就网格尺度降水而言,各方案结果相似,即 24 小时前后开始缓慢加强,强度小于对流降水;登陆后,第 36 小时后迅速加强,强度大大超过对流降水。从对比上看,网格尺度降水与 TC 强度的加强关系不明显,反而在 TC 登陆减弱时网格降水有增大趋势。

为说明本文模拟中对流加热过程的正确性,专门计算了卫星 TBB(表征云高和对流强度)观测的气旋区域不同温度(云高)等级的覆盖面积(点数)(见图 4)。由图 4 可见,在 19 日 00 时前后,气旋区域的云覆盖主要以较深厚的对流云为主,深厚对流云在 19 日午后逐渐减弱,登陆后近于消失,但后期以较低的非对流云为主,持续较长时间。这一结果与模拟情况基本吻合。

模拟的凝结潜热加热的垂直分布(图略)表明,登陆前加强阶段强的潜热释放主要发生在高层 200 ~ 600 hPa。根据何财福等[15]的诊断分析结果,发生于高层的加热利于热带气旋的加强。

3.2.3 各试验方案中冷空气影响的差异

“黄蜂”向西北偏北移动的同时,青藏高原东侧有一高空槽东移,相应低层有弱冷空气南侵(图略)。作者的另文分析指出弱冷空气于 19 日 00 时(对应模拟第 24 小时)前后从低层西北侧侵入气旋中心,从而形成有利于涡度和对流发展的条件,促使气旋迅速加强。这里分析不同方案中冷空气影响的差异,以分析地理因子对热带气旋强度可能造成的影响。以 TC 中心区域 100 km 范围平均的 θ_{se} 的垂直结构的演变来表征冷空气的活动情况[图 5(见图版 I)]。控制试验、“无粗糙”、“无地形”三个方案中,由于陆地的存在,冷空气的影响基本相同。即,在气旋登陆以前,尤其是 19 日 06 时以前,由于气旋处于暖湿洋面,气旋区域为较强的条件不稳定结构,不稳定层厚达 500 hPa 以上;以后随着冷空气的影响,不稳定层结逐渐减弱,登陆后(19 日 12 时)完全变为冷空气控制的典型特征——低层是稳定层结。实际上,冷空气于第 24 小时预报前后就已经从西侧低层(900 hPa 以下)侵入到气旋区域,气旋西侧有很强的 θ_{se} 水平梯度,在个别层次(如 975 hPa),冷空气

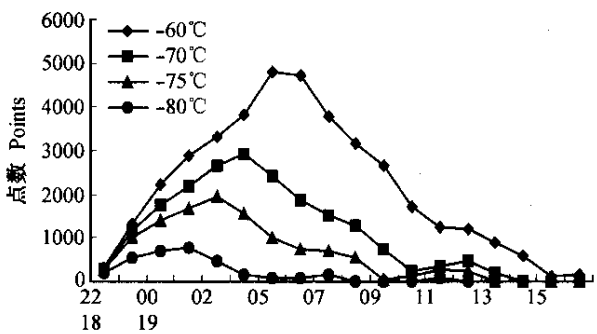

图 4 8 月 18 日 22 时至 19 日 16 时 TBB 资料计算的气旋区域不同云顶温度等级云覆盖点数

Fig. 4 Points of pels with different cloud top temperatures within the TC area, calculated from TBB data during 2200 UTC 18 August – 1600 UTC 19 August

还被卷入气旋中心附近的南侧和东南侧(图略),在中高层,则还没有冷气团显著侵入气旋内部。文献[16]的结构分析表明,此时气旋西侧已形成斜压结构。如图6(见图版Ⅰ)所示,此时冷空气侵入的特征已非常清晰,这一特征与气旋迅速加强密切相关,而此时的区域平均的垂直结构中还看不出这一细节。24小时变温等实测资料分析(图略)也证明了这一冷空气影响的过程。"无陆地"方案中,由于海陆热力效应的差异,弱冷空气向南影响的速度变慢,并且难以影响到19°N一带,气旋在模拟39小时以前主要受暖湿洋面条件的控制,故19日15时以前,对气旋区域平均而言一直是条件不稳定层结,以后才变为弱的稳定层结(图5b),使气旋有更长的加强时间。另外,该试验中由于海陆热力效应的差异,低层冷空气向南侵袭的过程变慢(图6b),冷空气向南伸展的范围比"控制试验"小,与之相联的对流过程也就推迟发生,从而使气旋加强过程推迟。以296.5 K线为例,模拟第24小时,控制试验中该线已南压到18.3°N附近,并东扩到海南岛中东部气旋中心附近,但"无陆地"试验中该线还在19°N以北,并且只影响到海南岛和雷州半岛以西。二者向东南方向伸展影响的距离差距达50~200 km。因此,华南西部陆地(包括海南岛)的存在有利于弱冷空气的迅速南侵,从而激发热带气旋近海加强。即海陆分布差异可影响冷空气活动,从而间接影响近海热带气旋的强度变化过程,是"黄蜂"近海加强的一个关键因素。

3.2.4 各试验方案中地表摩擦效应的差异

根据个别变化形式的涡度方程,控制涡度变化的过程有涡度辐合生成项、扭转项、斜压项以及摩擦项。当摩擦项起主导作用时,气旋将减弱。图7给出了各试验方案中气旋区域总动量通量(地表摩擦)的时间演变情况。发现从21小时左右开始,随着气旋靠近海南岛、雷州半岛以及登陆,"控制试验"中摩擦一直大于其他方案,特别是接近大陆和登陆后阶段,其摩擦大约是"无粗糙"及"无地形"方案的2倍。前面图3的讨论曾指出,后两个方案中登陆后的对流潜热释放(可视为涡度源)只稍大于"控制试验",但其中热带气旋强度却能在登陆后维持较强,850 hPa低压中心值比"控制试验"低50 gpm左右。其原因应归为二者登陆后地面摩擦(可视为涡度汇)的差异,后两个方案中由于无粗糙,摩擦作用非常小,因此,气旋强度可以维持较长时间,衰减缓慢,这一结论与Powell等[10]的实例分析结果一致。而"无陆地"方案中,由于其对流加热(涡度源)持续加强,气旋强度(地表风速)不断增大,故35小时后地表摩擦显著大于"无粗糙"等两个方案,但仍然远小于控制试验方案(后者粗糙度较大),直至45小时"登陆"后摩擦才大于"控制试验"。因此,该方案中对流加热强、摩擦较小的结果,使气旋不断加强至"登陆"(见图2讨论)。

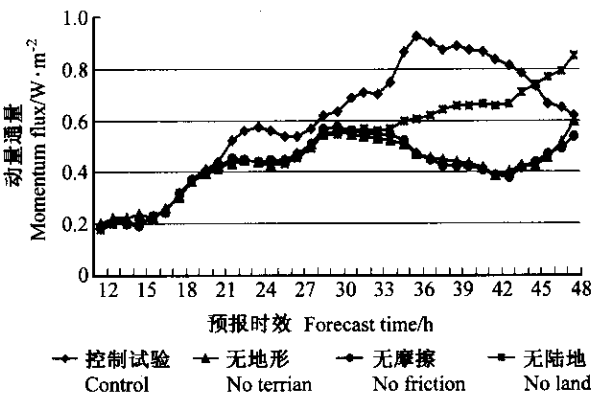

图7 各对比试验中气旋中心区域100 km范围平均的地表动量通量随时间的变化

Fig. 7 Time evolution of surface momentum flux, averaged over the vicinity of the TC center with a radius of 100 km, in each control experiment

由上述详细的分析可知,各方案间动量通量的差异,尤其是登陆后,主要表现在v方向通量的差异,而u方向差异不很大(图略,这里对此不再做深入分析)。可见,不同方案中摩擦效应的差异,是造成热带气旋(登陆后)强度变化差异的重要原因。

3.2.5 各试验方案中地表热通量的差异

地表热通量是热带气旋发展的一个重要能源,文献[5]指出,风引起的表面热交换(WISHE)可能是热带气旋发展的一种重要机制。因此,本文专门定量分析模拟中热带气旋区域各方案表面热交换特性。

首先,分析潜热交换[图8a(见图版Ⅰ)],在整个积分过程中,都是向上的通量,即蒸发。在大约前30小时积分过程中,各方案通量基本相同,这是由于气旋距大陆还比较远,各种地理因子的改变还未能对气旋区的表面热交换产生大的直接影响。此过程中潜热输送随气旋强度的增大而缓慢增大。此后,随着气旋逐渐靠近陆地及登陆,潜热通量逐渐减弱,但"控制试验"中潜热通量明显大于"无粗糙"和"无地形"方案,这是由于前者粗糙度和湍流较强,利于表面热交换的缘故。而"无陆地"方案中与TC强度继续增大的同时,潜热通量也继续增大,至43小时达到最大,其值是其他方案的2倍以上,"登陆"后才逐渐减小,这是由于本方案中气旋一直处于暖湿洋面条件,地表潜热通量及大气潜热释放与TC强度间正反馈的结果气旋不断加强,地表潜热通量也不断增加。这一结果符合TC发展的WISHE机制观点,即气旋强度(地表风)与表面热交换

大小的正反馈机制。

再看感热通量情况 [图 8b(见图版 I)]。总体看，感热输送量值远小于潜热输送，后者是前者的 5 ~ 10 倍。除控制试验方案登陆后以外，大部分时段都是向上的感热输送(符号为负)。其中前 30 小时各方案通量基本相同，仅 21 小时后控制试验由于靠近海南岛而使通量有所差异。与潜热输送不同的是，此过程中感热输送对 TC 强度部敏感。由于陆地效应的差异，31 小时后各方案差异显著，其中控制试验变为向下输送(即大气温度大于地表温度)；“无粗糙”和“无地形”方案仍然维持向上输送，但量值较小；“无陆地”方案感热输送随气旋强度不断增大，至 43 小时达到最大，“登陆”以后减弱。

4 结论和讨论

本文以“中国登陆台风试验”(CLATEX)目标台风“黄蜂”为实例，通过一组改变华南西部地形因子(粗糙度、地形、海陆分布等)的敏感性对比数值试验分析，定量化细致分析探讨了华南西部地形对近海和登陆热带气旋强度变化的可能影响，并与相关观测做比较。主要结论有：

(1) 华南西部地形的存在，有利于低层弱冷空气的向南侵袭，对“黄蜂”来说，其结果是前期冷空气从低层西侧侵入气旋，形成斜压结构，斜压能量激发了对流发展，使气旋迅速加强，后者是该气旋近海加强的关键原因。

(2) 华南西部地形通过地表摩擦效应对登陆热带气旋强度具有迅速衰减的作用。

(3) 在 TC 发展过程中，南海洋面热交换与热带气旋强度间存在正反馈关系，符合热带气旋发展的“WISHE”机制观点。即“WISHE”可能是南海热带气旋发展的一种重要机制。

综合全文分析，华南西部地形对 TC 强度的影响包含多个方面：有利于弱冷空气的南侵，从而在一定条件下激发 TC 的近海加强；地形对 TC 外围流场的动力阻挡作用对 TC 强度的加强具有阻碍作用；登陆后地形摩擦效应对 TC 强度具有迅速衰减的作用；登陆后地形的动力爬升及降水增幅效应，一定程度可以减缓 TC 的减弱；登陆后陆地对表面潜热输送的阻断使 TC 强度减弱。

地形对 TC 强度的最终影响决定于各方面影响的综合。在一定条件下，当增强的因素为主导时，TC 强度增强，而当消弱的因素主导时，TC 强度减弱。“黄蜂”近海登陆过程中，登陆前以冷空气激发 TC 加强为主，摩擦等效应较弱，故 TC 加强；登陆后摩擦加大、能量供应减小，故 TC 强度迅速减弱。

参考文献

[1] 陈联寿，孟智勇. 我国热带气旋研究十年进展. 大气科学，2001，**25**：420 ~ 432
Chen Lianshou, Meng Zhiyong. An overview tropical cyclone researches progress in China during the past ten years. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2001, **25**: 420 ~ 432

[2] Daniel J S, Shay L K. The role of oceanic mesoscale features on the tropical cyclone-induced mixed layer response: A case study. *Journal of Physical Oceanograph*, 2003, **33**: 649 ~ 676

[3] Tuleya R E. Tropical storm development and decay: Sensitivity to surface boundary conditions. *Monthly Weather Review*, 1994, **122**: 291 ~ 304

[4] DeMaria M. The effect of vertical shear on tropical cyclone intensity change. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1996, **53**: 2076 ~ 2088

[5] Craig G C, Gray S L. CISK or WISHE as the mechanism for tropical cyclone intensification. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1996, **53**: 3528 ~ 3540

[6] John Molinari, Steven Skubis, David Vollaro, et al. Potential vorticity analysis of tropical cyclone intensification. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1998, **55**: 2632 ~ 2644

[7] Schade L R. Tropical cyclone intensity and sea surface temperature. *J. Atmos. Sci.*, 2000, **57**: 3122 ~ 3130

[8] 冯锦全，陈多. 我国近海热带气旋强度突变的气候特征分析. 热带气象学报，1995，**11**：35 ~ 42
Feng Jinquan, Chen Duo. A climate feature analysis to the sudden change of intensity of tropical cyclones in the near coastal China. *Chinese Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 1995, **11**: 35 ~ 42

[9] 孔宁谦. 热带气旋进入北部湾后强度突变的天气气候特征分析. 海洋预报，1997，**14**：56 ~ 63
Kong Ningqian, Weather and climate analyses to the intensity sudden changes of tropical cyclones entered the Beibu Gulf. *Marine Forcasts* (in Chinese), 1997, **14**: 56 ~ 63.

[10] Powell M D, Houston S H. Surface wind fields of 1995 hurricanes Erin, Opal, Luis, Marilyn, and Roxanne at landfall. *Monthly Weather Review*, 1998, **126**: 1259 ~ 1273

[11] Kaplan J, DeMaria M. On the decay of tropical cyclone winds after landfall in the New England area. *Journal of Applied Meteorology*, 2001, **40**: 280 ~ 286

[12] 闫敬华，董克勤. 台湾附近地形对台风影响的数值模拟. 热带气象学报，1997，**13**：217 ~ 226
Yan Jinghua, Dong Keqin. Numerical study of the effects of terrain in the vicinity of Taiwan on Typhoons. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 1997, **13**: 217 ~ 226

[13] 闫敬华，丁伟钰，徐建平. 非 bogus 初值方案热带气旋数值预报及其性能. 应用气象学报，2004，待发表
Yan Jinghua, Ding Weiyu, Xu Jianping. Non-bogussing initial value scheme for tropical syclone prediction and its performance. *Journal of Applied Meteorological Science* (in Chinese), 2004, to be published

[14] 梁建茵，陈子通，万齐林，等. 热带气旋“黄蜂”登陆过程诊断分析. 热带气象学报，2003，**19**(增刊)：45 ~ 55

Liang Jianyin, Chen Zitong, Wan Qilin, et al. An analysis to the landfall of tropical cyclone "Vongfong". *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 2003, **19**(Suppl): 45 ~ 55

[15] **何财福,梁必骐.热带气旋强度变化机制的位涡拟能诊断研究.海洋学报,** 1995, **17**: 30 ~ 40

He Caifu, Liang Biqi. Diagnosis analysis to the potential enstrophy for the tropical cyclone intensity change. *Acta Oceanologica Sinica* (in Chinese), 1995, **17**: 30 ~ 40

[16] **闫敬华,丁伟钰,陈子通,等.热带气旋'黄蜂'动热力特征演变的模拟分析.热带气象学报,** 2003, **19**(增刊): 12 ~ 24

Yan Jinghua, Ding Weiyu, Chen Zitong, et al. A Simulation analysis to the dynamical and thermal features of tropical cyclone "Vongfong". *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 2003, **19**(Suppl): 12 ~ 24

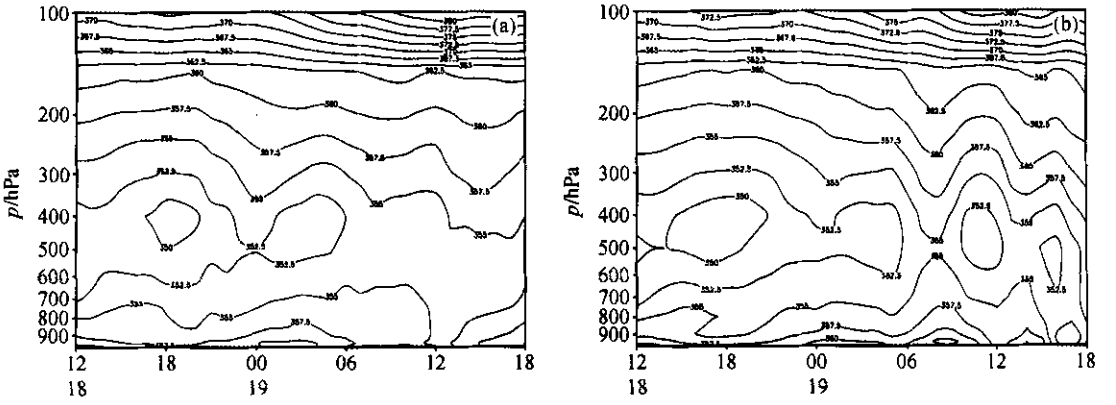

图5　数值模拟中气旋中心区域100 km 范围平均的 θ_{se} 垂直结构随时间 (8月18日12时~19日18时) 的变化：(a) 控制试验；(b)“无陆地”试验

Fig. 5　Time (1200 UTC 18 August – 1800 UTC 19 August) evolution of vertical structure of θ_{se} averaged over the vicinity of the TC center with a radius of 100 km in different control experimemts: (a) Control; (b) “no land”

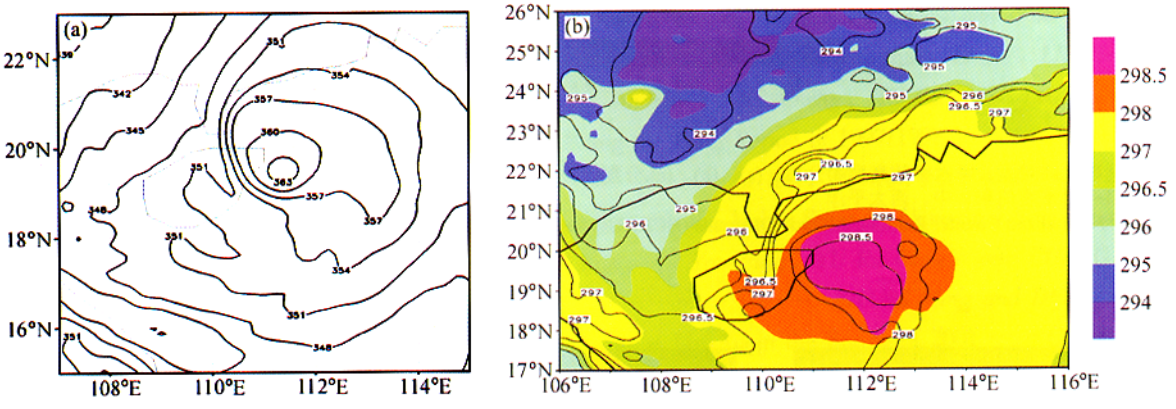

图6　模拟的气旋近海加强阶段 925 hPa θ_{se} 分布 (a) 和 950 hPa 温度场 (b)，等值线：“控制试验”，阴影：“无陆地”试验

Fig. 6　Simulated fields of 925 hPa θ_{se} (a) and 950 hPa temperature (b) in the intensifying stage. Contour: “control”, shaded: “no land”

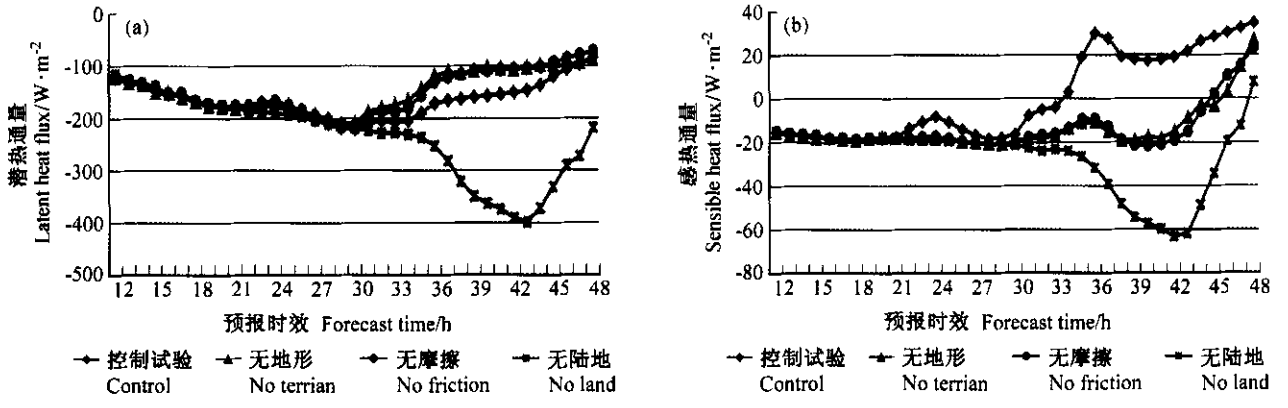

图8　各对比试验中气旋中心区域 100 km 范围平均的地表热通量随时间的变化：(a) 潜热通量；(b) 感热通量

Fig. 8　Time evolution of surface heat flux, averaged over the vicinity of the TC center with a radius of 100 km, in different control experiments: (a) Latent heat flux; (b) sensible heat flux