

局地地形、地表特征对上海暴雨过程影响的研究

齐琳琳^{1,2,3} 赵思雄¹

- 1 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029
- 2 中国气象科学研究院, 北京 100081
- 3 空军装备研究院航空气象防化研究所, 北京 100085

摘要 作者在对2001年8月5~6日上海地区一场特大暴雨的诊断分析与数值模拟研究中确知, 停滞在上海的热带低压及在其内发生、发展起来的中尺度对流云团是造成此次暴雨的直接天气系统。暴雨过程中, 非常规观测资料及高分辨率暴雨数值模拟结果的分析对于揭示热带低压内暴雨中尺度系统的结构及发展演变的时空连续性具有重要作用。但同时也意识到, 对于造成暴雨的各尺度系统的发生、发展, 特别是造成局地突发性强降水的暴雨中尺度系统, 某些物理过程的影响是不可忽视的。这些物理过程或独立影响着暴雨中尺度系统的发展, 或相互作用、相互制约, 共同影响着暴雨中尺度系统的发展。为此, 作者在此次暴雨过程较成功的数值模拟研究基础上, 对上海附近山脉地形及上海地区地表状况等可能影响暴雨中尺度系统发展的物理过程进行了模拟试验研究, 结果表明, 上海及其周边地区局地山脉地形和上海地区的地表分布特征虽不是造成此次局地突发性强暴雨的直接原因, 但明显影响着暴雨系统的移动、停滞、发展和加强。上海以西的莫干山、天目山在热带低压东移过程中对于气流具有一定阻挡作用, 有利于暖湿气流的聚集及热带低压移速的减慢。但若山脉过高且热带低压移至非平原地带, 则来自西南的暖湿气流会受阻而汇集在莫干山至杭州湾一带, 这样在相对强的偏西气流作用下, 热带低压的移向就会出现变化。另外, 上海局地地表城市化特征的加强使得城市近地层空气的暖干特性效应和城区上风方风速辐合, 并由此引起暴雨系统内中尺度动力、热力特征出现变化, 这值得在局地暴雨强度预报中加以关注。局地城市地表特征是城市暴雨灾害不容忽视的影响因素。

关键词 暴雨 地形 地表 数值模拟

文章编号 1006-9585 (2006) 01-0033-16 **中图分类号** P444 **文献标识码** A

The Analysis of the Influence of the Terrain and the Earth's Surface on the Heavy Rainfall in Shanghai

QI Lin-Lin^{1,2,3} and ZHAO Si-Xiong¹

- 1 Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029
- 2 Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081
- 3 Institute of Aviation Weather, Air force Academy of Arming, Beijing 100085

Abstract The strong heavy rainfall with precipitation amount of 294 mm/12 h occurred in Shanghai during 5—6 August 2001 and the serious city disaster appeared. To better understanding of the heavy rainfall process and its predictability, the PSU/NCAR mesoscale model (MM5) has been employed to replicate the process. The simulation results show that the heavy rainfall was mainly associated with the mesoscale convective systems developing in the landed tropical cyclone (TC) and the location, strength and duration agree fairly well with the observation although

收稿日期 2004-07-06 收到, 2005-10-12 收到修定稿

资助项目 中国科学院知识创新工程重要方向项目 KZCX3-SW-213、国家重点基础研究发展规划项目 2004CB418301 和中国科学院奥运科技项目 KACX1-02

作者简介 齐琳琳, 女, 1973 年出生, 博士, 高级工程师, 从事中尺度天气分析和数值模拟研究, E-mail: niceqli@mail.iap.ac.cn

some deficiencies exist. On the basis of success simulation, the physical processes such as the terrain and the earth's surface, which could influence the heavy rainfall, are investigated. The analyses indicate that the mesoscale topography and the characteristic of the surface can influence not only the moving, stagnation and development of the landed tropical cyclone but also the location and intensity of the heavy rainfall indirectly. It is suggest that they are possible to enhance rainfall while favorable weather system stagnates and develops in the city. Therefore, the mesoscale topography and the characteristic of the surface in the city should be taken into account in the movement of the landing tropical cyclone and local severe heavy rainfall precipitation prediction, which will improve the prediction of meteorological disasters in urban area.

Key words heavy rainfall, topography, characteristic of the surface, numerical simulation

1 引言

东亚是世界上著名的季风区,夏季热带系统活跃,而西太平洋又是世界上热带气旋发生最频繁的地区,热带气旋在此形成后常向西移动并在我国登陆,使得我国成为世界上受热带气旋影响最多的国家之一。热带气旋是我国夏秋季节重要的灾害天气系统之一,其引发的暴雨常常造成严重的洪涝灾害,因而,长期以来热带气旋暴雨的研究和预报受到人们广泛的关注。自 20 世纪 50 年代以来,我国学者对热带气旋的结构、强度变化、运动突变、热带气旋暴雨等作过许多研究。大量研究表明^[1],地形、地表状况对于热带气旋的结构、强度、运动及其引发的暴雨具有重要影响。陈联寿等^[2]在热带气旋结构和强度变化的研究中指出,冷空气、急流、西风槽、中小尺度系统、地形、海面温度等物理因子可直接影响热带气旋的结构和强度变化。特别是地形,在一定条件下会通过改变热带气旋的局部结构来影响其强度变化。通常,陆地的摩擦会使登陆后的热带气旋减弱消亡,但有时也可造成热带气旋在短时间内的增强。如热带气旋移近陆地上山脉附近时,增强的辐合对流可产生中尺度对流系统,中尺度对流活动的增强可促使热带气旋在短时间内得以增强。孟智勇等^[3]的数值研究表明,当台风接近台湾岛时,在岛屿的另一侧可诱生出新的涡旋。适当条件下,诱生的涡旋可发展并取代原有的台风环流。另外,地形效应在热带气旋运动中的影响也不容忽视。贺海晏等^[4]通过对热带气旋运动方程的分析指出,地形可通过强迫抬升、动量、质量、水汽交换及摩擦造成大尺度环流的演变等

直接或间接影响热带气旋的运动。

地形、地表分布状况对热带气旋暴雨的影响研究一直在热带气旋研究中占有十分重要的地位。在造成热带气旋暴雨的中尺度系统发生、发展过程中,特别是局地性强、发生突然且持续时间不长的暴雨中尺度系统,局地地形、地表分布等物理过程对其有着明显的影响。这些物理过程或独立影响着中尺度系统,或相互作用、相互影响,共同决定着热带气旋内暴雨中尺度系统的发展。如山脉地形在一定条件下形成的地形辐合线往往是热带气旋内部产生中尺度强对流系统的源等。

2001 年 8 月 5 日夜至 6 日晨,滞留在上海的热带低压使得上海市区普降大暴雨。市区 15 h 的平均降雨量约为 150~200 mm,黄浦、徐家汇地区 12 h 的降雨量更是分别达到 294 mm 和 248 mm,为特大暴雨。已有分析指出^[5],登陆后的热带低压在转向东移至上海后停滞,并有所加强发展,在停滞的热带低压内部发生、发展起来的一系列中尺度对流系统是造成此次局地强暴雨的直接原因。在对热带低压的转向发展及其引发的大强度暴雨分析中,有人曾提出上海附近的山脉地形可能对热带低压的转向及发展有利,而上海三面环水的特殊地表特征对于此次降雨强度可能具有一定影响。为弄清上海附近局地山脉地形及上海城市地表分布是否对此次上海局地强暴雨过程有影响,本文将在文献 [6] 的基础上,对此次上海特大暴雨过程进行数值模拟对比试验研究,利用数值模拟对比试验结果的分析来探讨上海附近山脉地形及上海地区地表状况对此次局地突发性暴雨的影响,以明确城市暴雨灾害监测、预报中不容忽视的物理过程。

2 模拟方案及控制试验结果

2.1 模式简介

本文的对比模拟研究采用的是 PSU/ NCAR 的 MM5 模式^[7,8]。该模式不仅可以较成功地模拟中国夏季的降水过程^[9]，而且还可对夏季发生于北方地区的持续高温天气和春季的沙尘天气进行模拟研究^[10,11]。研究表明该模式可以较成功地模拟出由中尺度系统造成的局地强对流天气过程。

模拟采用非静力、双向三重嵌套方案，模拟区域以 (31.30°N, 121.5°E) 为中心，格距分别为 54、18 和 6 km，嵌套区域主要模拟上海及其周边地区 (图 1)。整层 σ 坐标垂直分 30 层，在 700 hPa 下大约有 15 层，能够较细致地描述边界层及对流层低层天气系统较复杂的结构，这对由地形、地表影响降雨过程的模拟尤其重要。模式中的物理过程分别采用 Blackadar 高分辨率边界层参数化方案，混合相微物理显式方案、Grell 积云对流参数化方案及新版的 Kain-Fritsch 积云参数化方案。模式初值采用 NCEP 的 $1^\circ \times 1^\circ$ 再分析格点资料以及国家气象中心提供的每 3 h 一次的地面观测资料和每 12 h 一次的探空资料，侧边界条件由 6 h 间隔的 NCEP 分析资料得到。模拟时效为 2001 年 8 月 4 日 0000 UTC~6 日 0000 UTC。

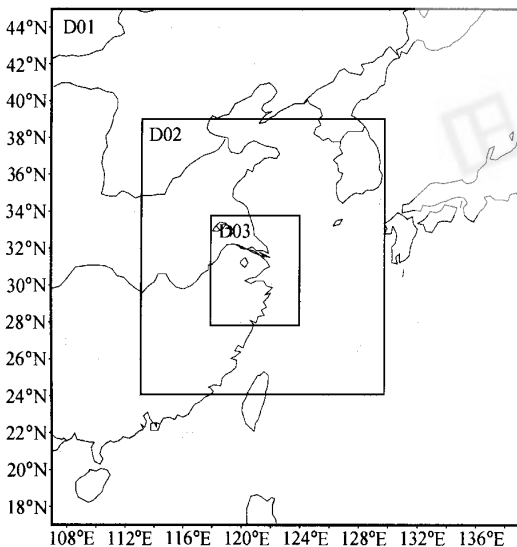


图 1 双向三重嵌套网格模拟区域

Fig. 1 Three nested domains in simulation

由于本文研究的重点是热带低压引发的局地特大暴雨，因此，为了逼真模拟出热带低压内暴雨中尺度系统的局地发展，模式尽可能地使用了一些高时空分辨率的非常规观测资料。不论是控制模拟试验还是对比模拟试验，模式均利用自身的四维资料同化系统，同时对分析场和观测场进行了张弛逼近的四维资料同化，其中，向观测场做张弛逼近时，采用的非常规观测资料为国家卫星中心提供的红外云图逐时云顶亮温资料 (18.35~43.35°N, 106.22~130.22°E) 及上海 16 个地面自动站温度、相对湿度、风场资料^[12]。

2.2 控制试验模拟结果分析

对控制模拟试验模式积分 24 h 和 48 h，区域 1 (D01) 模拟的 500 hPa 5 日 0000 UTC 及 6 日 0000 UTC 的位势高度场与相应时刻的客观分析场进行对比分析表明 (图 2)，虽然模式模拟的热带低压偏强，而副热带高压偏弱，与相应的客观分析场存在一定差异；但从整体上看，模式还是较好地再现出热带低压的移动及其在上海地区的停滞过程，而且，模式对暴雨发生前后各尺度天气系统的位置、分布也有较好的再现。对于模拟的热带低压偏强，而副热带高压偏弱，这可能是由于模式中采用了积云对流参数化，该过程的考虑有可能加大降雨凝结释放的潜热与热带低压系统间的互馈作用，从而使模拟的热带低压偏强。而模式中对动量的垂直输送过程未进行参数化，这样就有可能影响到整个形势场的模拟效果。目前模式中动量垂直输送过程是中尺度数值模式中亟待解决的一个共同问题，

将区域 3 (D03) 模拟的 2001 年 8 月 5 日 0000 UTC~6 日 0000 UTC 24 h 降水与观测相比 (图 3)，可以清晰看到，模式模拟的暴雨中心强度和雨区范围与实况有较好的对应关系。24 h 降水达 200 mm 的强降雨区基本位于 (31~31.3°N, 120.8~121.4°E) 附近，与上海自动雨量站观测到的暴雨集中在上海市区，24 h 累计雨量在 200~300 mm 间基本吻合。

为了检验模式模拟的降雨持续时间及最强降雨时段，我们还分析了上海南市 (31.11°N, 121.29°E)、杨浦 (31.15°N, 121.31°E) 测站附近模拟雨量的时序变化 (图 4)。分析发现，模拟雨量的时序变化与观测降雨较为接近，较好地反

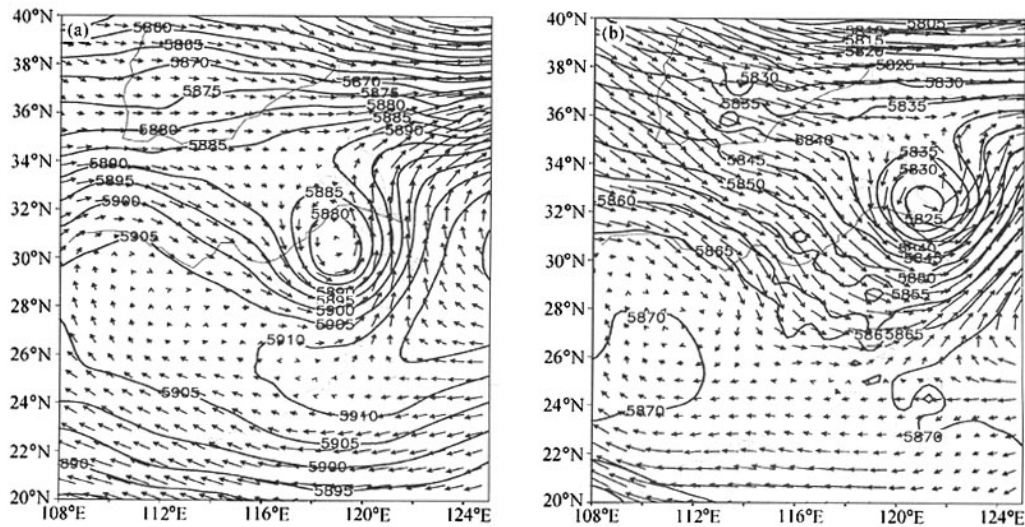


图 2 区域 1 (D01) 模拟的 500 hPa 位势高度场 (单位: gpm) 和流场分布。(a) 积分 24 h, 5 日 0000 UTC; (b) 积分 48 h, 6 日 0000 UTC
Fig. 2 Simulated geopotential high and wind of Domain 1 (D01) at 500 hPa (units: gpm) . (a) 24 h simulation, 0000 UTC 5 Aug 2001; (b) 48 h simulation, 0000 UTC 6 Aug 2001

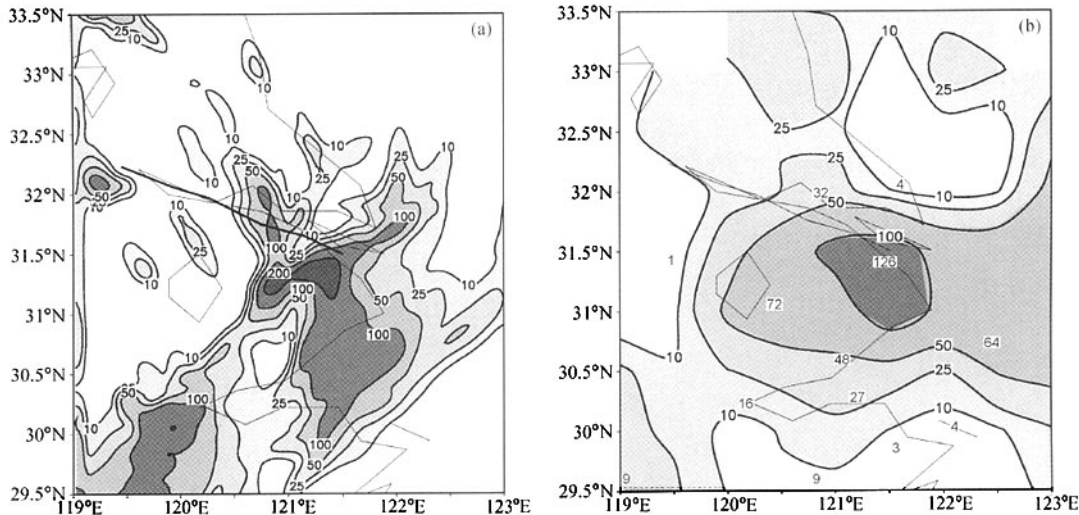


图 3 5 日 0000 UTC~6 日 0000 UTC 降雨分布 (单位: mm)。(a) 区域 3 (D03) 模拟; (b) 实况观测
Fig. 3 Distribution of 24 h rainfall from 0000 UTC 5 to 0000 UTC 6 Aug 2001 (units: mm) . (a) Simulated rainfall of Domain 3 (D03); (b) observation rainfall

映出暴雨过程中降雨随时间的演变特征,特别是对 5 日 1400~1700 UTC 时段内的强降雨过程,无论是雨强还是时效模拟效果均较好。模拟的强降雨雨集中出现在 5 日 1500~1600 UTC,且最大雨强达 $50 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 左右。模拟的降雨不仅在落区、

强度上与实况较为吻合,而且强降雨峰出现时间与实况也基本一致。值得指出的是,对 5 日 2100 UTC~6 日 0000 UTC 时段内的局地降雨,模式模拟的效果不理想,这可能与此时段降雨云团尺度相对小,强度相对弱,以致降雨范围具有更强

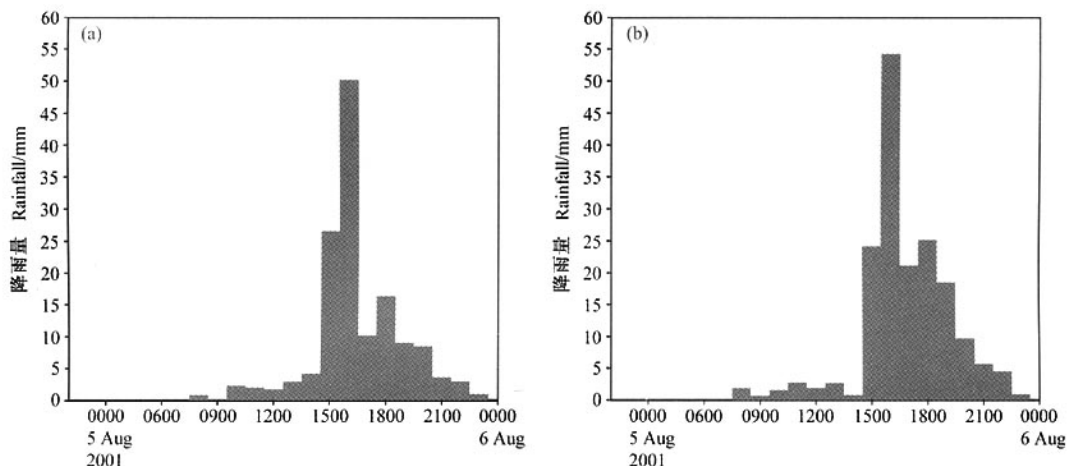


图4 区域3 (D03) 模拟的 (a) 南市、(b) 杨浦附近逐时降雨分布

Fig. 4 Evolution of rainfall of Domain 3 (D03) from 0000 UTC 5 to 0000 UTC 6 Aug 2001. (a) Nanshi station; (b) Yangpu station

的局地性有关。

通过以上对形势及降雨的模拟结果分析, 可以认为, 控制模拟试验不仅基本上再现出大、中尺度天气系统的结构与演变过程, 而且模拟的降雨效果可信度也很高, 这为我们下一步的对比模拟试验研究提供了合理的依据。

3 莫干山、天目山对暴雨过程影响的模拟研究

暴雨是在一定的天气形势下形成的, 而局地暴雨的出现不仅与当时的天气形势有关, 而且更与局地环境条件密切相关, 如雨区的地形、地貌、局地热力、动力条件。历史上一些特大暴雨往往发生在特定的环境地形下^[13]。因此, 在局地暴雨研究中地形的影响一直受到关注。地形对于暴雨的影响主要表现为: 地形起伏和地形摩擦造成垂直速度和风场变化对暴雨的动力贡献; 地形通过影响云中微物理过程进而对降雨起到增幅作用; 局地地形对对流系统的组织、增强作用; 造成局地地形性中尺度系统; 山地、平原、海陆等地形差别造成下垫面热力性质的不同对暴雨中小系统的影响。上述研究主要集中探讨了暴雨发生地附近地形对暴雨的动力贡献, 而对于位于雨区之外, 对暴雨系统移动、发展可能具有一定影响的地形研究, 目前还不多见, 上海地区处于长江下游平

原地带, 局地地形对于降雨的动力贡献相对很小, 位于上海以西的莫干山、天目山对此次登陆热带低压东移造成的局地强暴雨的影响明显属于后者, 因此, 有必要对雨区以外但对降雨系统移动、发展可能有影响的山脉地形进行分析研究。

3.1 不考虑局地山脉地形影响的分析

为分析上海以西, 高度约为 200~1000 m 左右莫干山、天目山对热带低压移动及上海局地降雨的影响, 我们首先进行了不考虑莫干山、天目山局地山脉地形影响的 NOTER 模拟试验。图 5 给出了控制模拟试验与 NOTER 模拟试验中模式地形高度的分布。考虑到莫干山、天目山距离仅为 200 m 左右, 因此在图 5a 中就以一个黑三角来表示山脉大致所在位置, 而图 5b 中的非闭合矩形区是由于该区的地形高度在模拟试验中取为 0, 从而在绘制地形图时随机产生的。

NOTER 模拟试验中, 区域 3 (D03) 模拟的 5 日 0000 UTC~6 日 0000 UTC 24 h 降雨分布显示 (图 6), 上海市区基本无降水发生, 雨区位置整体偏移到上海的东北方向, 降雨中心位于崇明岛一带附近, 且强度明显偏弱, 降雨中心仅为 50 mm 左右。由此可知, 不考虑上海以西莫干山、天目山局地山脉地形影响, 上海地区不仅降雨落区有明显偏差, 而且降雨强度也明显偏弱, 这表明上海附近的局地山脉地形对此次降雨确有一定的影响。

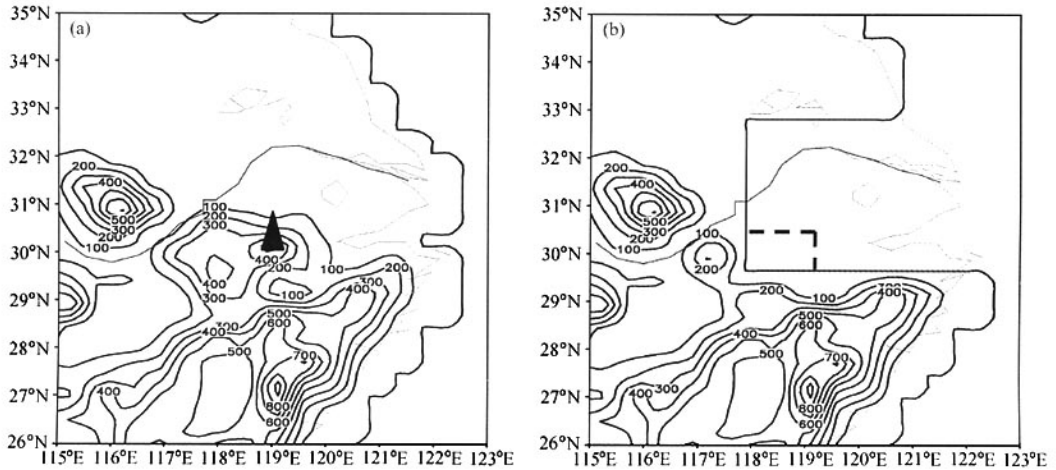


图5 模式模拟区域1 (D01) 地形高度的分布 (单位: m)。(a) 控制模拟试验 (黑三角表示莫干山、天目山所在地); (b) NOTER 模拟试验 (虚线内为不考虑莫干山、天目山地形)

Fig. 5 Distribution of topographical altitude of Domain 1 (D01) (units: m) . (a) CONTROL simulation (black triangle is the location of mountain); (b) NOTER simulation (dashed line is the domain without Moganshan, Tianmushan mountain)

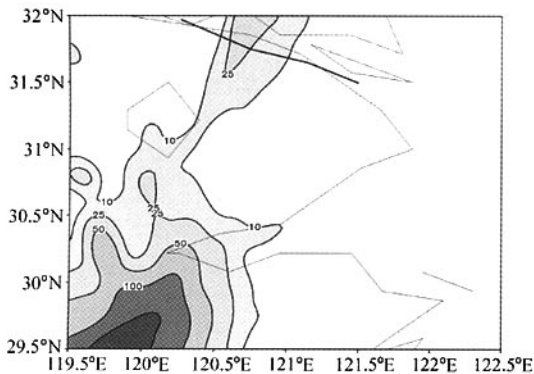


图6 NOTER 模拟试验中, 区域3 (D03) 模拟的5日0000 UTC~6日0000 UTC 24 h降雨分布 (单位: mm)

Fig. 6 Distribution of 24 h rainfall of Domain 3 (D03) from 0000 UTC 5 to 0000 UTC 6 Aug 2001 in NOTER (units: mm)

考虑到莫干山、天目山位于上海以西, 不可能直接影响到降雨落区及强度, 因此, 局地山脉地形对此次强降雨的影响势必是通过东移的热带低压的影响来实现的。因此, 下面我们就来分析莫干山、天目山的存在对热带低压降雨系统移动、发展演变的影响。分析 NOTER 模拟试验中区域1 (D01) 内对流层各层位势高度场和流场分布发现, 莫干山、天目山对热带低压的影响在其转向东移后的5日0600 UTC就有所反映 (图7)。

该模拟试验没有反映出500 hPa 5日0600 UTC后, 热带低压在移进上海后的减慢发展过程, 特别是5日1200~1800 UTC, 与暴雨中尺度系统的发生、发展密切相关的热带低压停滞、发展加强过程。该模拟试验中, 热带低压虽然在此期间也有所发展, 但同时还在向东北方向快速移动, 并于5日1800 UTC移出入海。这样就使得降雨系统位于崇明一带, 雨区自然就出现了相应偏离, 出现在上海的东北部地区。由此可知, 上海以西莫干山、天目山的存在对造成暴雨的热带低压移向和移速均有着明显的影响, 有利于东移的热带低压移速减慢, 甚至出现相对停滞, 从而为热带低压内暴雨中尺度系统的发生、发展提供有利的环境场。

对于该模拟试验中热带低压的快速移动, 分析其与控制模拟试验中, 对流层中下层的差值风场发现 (图8), 热带低压在东移过程中, 若无莫干山、天目山的阻挡影响, 5日0600 UTC后对流层中下层, 不仅热带低压所在处仍存在明显的风场辐合, 而且热带低压东南侧的西南风也明显加大, 5日1200 UTC强风中心就位于上海, 850 hPa上风速可达 $14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 风速加剧非常显著。此后, 强风带一直与热带低压相伴随, 强风区左侧为气旋式辐合气流。这表明若不考虑上海以西

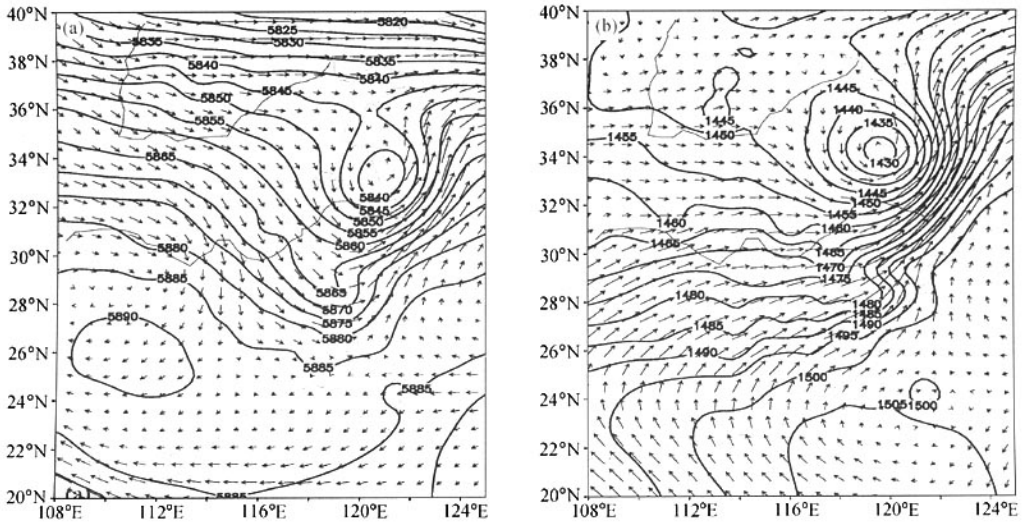


图 7 NOTER 模拟试验中，区域 1 (D01) 模拟的 500 hPa、850 hPa 位势高度场（单位：gpm）和流场分布。(a) 5 日 1800 UTC 500 hPa; (b) 5 日 1800 UTC 850 hPa

Fig. 7 Simulated geopotential high and wind of Domain 1 (D01) at 500 hPa and 850 hPa in NOTER (units: gpm) . (a) 1800 UTC 5 Aug 500 hPa; (b) 1800 UTC 5 Aug 850 hPa

的莫干山、天目山，则北上的西南气流不仅明显增强，而且急流前部左侧还出现辐合，这样就使得位于其左侧的热带低压加速向偏东北方向移去，而不会在上海地区出现相对停滞。这样一来，即使热带低压在上海地区有所加强，但其所处的环境场也不利于暴雨的出现。由此可以说，上海以西莫干山、天目山的局地山脉地形对此次热带低压局地强暴雨的影响主要表现在对对流层中下层风场的影响上。山脉的存在可对西南暖湿气流有一定阻挡作用，这样就使得输送至上海地区的暖湿气流前部受阻，移速减慢，而后部又有源源不断的气流输送而来，从而利于暖湿气流在此汇集和系统移速减慢，出现相对停滞。

另外，考虑到水汽辐合的位置和强度是影响降雨的重要因素，而上海附近风场的变化势必影响到水汽在该地区的聚集，因此我们又分析了控制模拟试验和 NOTER 模拟试验中上海地区对流层中下层的水汽辐合状况。结果发现，不考虑上海以西的莫干山、天目山，虽然西南向暖湿气流的输送强度明显加大，但水汽在上海地区的聚集程度却很弱（图 9），尤其是暴雨期间，850 hPa 附近的水汽聚集中心不仅明显偏离上海市区，位于上海北部地区，而且强度仅为控制实验的一半

左右，这充分说明山脉的存在对暴雨期间水汽在上海地区的汇集有明显影响。此外，地形对风场的改变还对上海地区大气层结的稳定性造成一定影响。通过分析控制模拟试验和 NOTER 模拟试验中假相当位温沿 121.25°E 的垂直分布发现（图略），不考虑上海局地山脉的影响，上海地区对流层低层的位势不稳定层结明显减弱，接近中性，而对流层高层的稳定性层结却有所加强，由此更能说明削弱局地山脉地形高度，不仅使得上海地区的风场出现变化，而且水汽在此处的聚集，对流层低层不稳定能量的聚集均受到影响，热力条件的明显减弱不再利于局地大暴雨的出现。

3.2 加强局地山脉地形影响的分析

前面我们就上海以西的莫干山、天目山对此次热带低压局地强暴雨的影响做了较详细的分析，知道此次降雨过程中，山脉地形的存在对于阻挡西南气流北上，使得热带低压在上海移动减慢，并出现相对停滞具有一定意义。但同时我们也知道，局地地形对对流系统具有组织、增强的作用，可造成局地地形性中尺度系统。那么如果此次热带低压移进的上海地区并非平原地带，而是具有一定山脉地形，这种局地山脉地形又会对此次局地强暴雨过程有何影响？为此，我们在保持其他

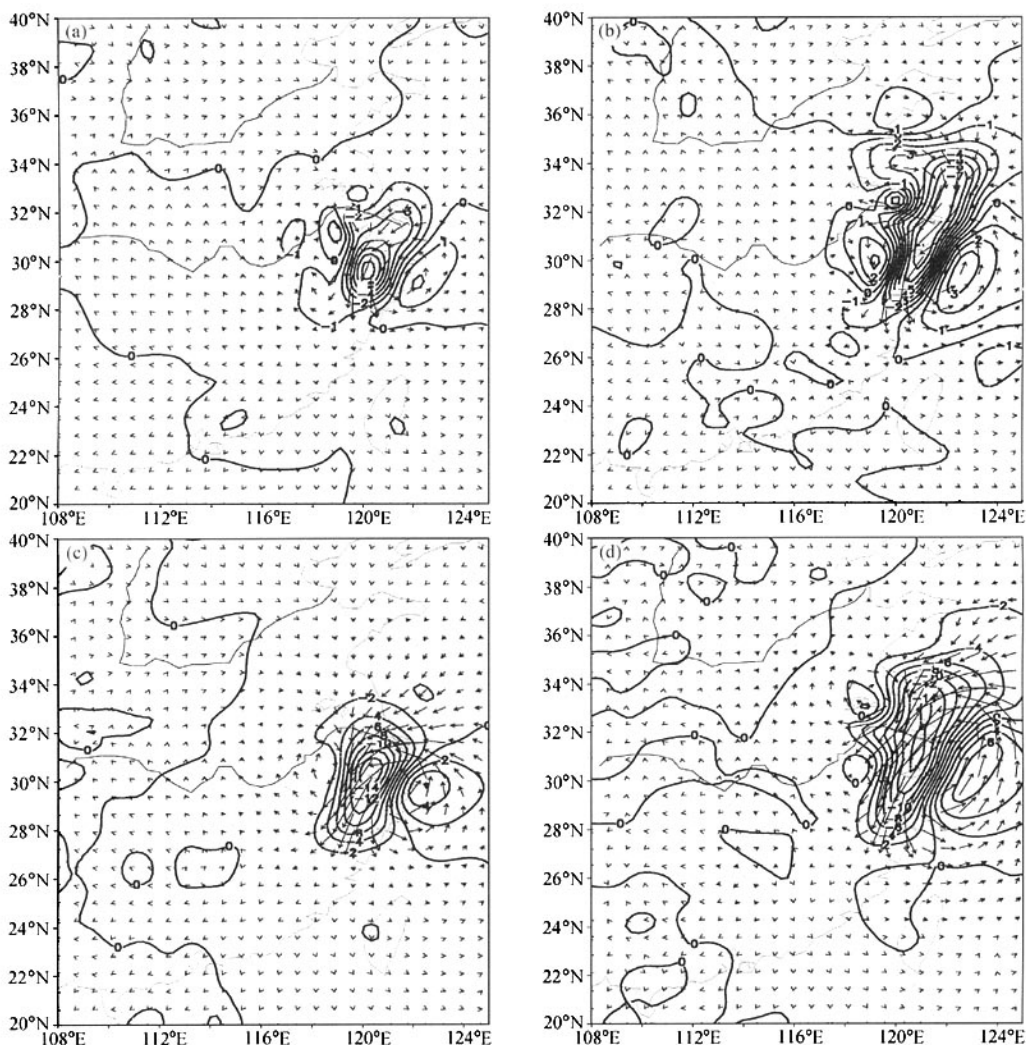


图8 控制试验与NOTER模拟试验中500 hPa、850 hPa上区域1(D01)水平差值风场(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)。(a) 5日0600 UTC 500 hPa; (b) 5日1200 UTC 500 hPa; (c) 5日0600 UTC 850 hPa; (d) 5日1200 UTC 850 hPa

Fig. 8 Difference of wind of Domain 1 (D01) at 500 hPa, 850 hPa between CONTROL and NOTER (units: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) . (a) 0600 UTC 5 Aug 500 hPa; (b) 1200 UTC 5 Aug 500 hPa; (c) 0600 UTC 5 Aug 850 hPa; (d) 1200 UTC 5 Aug 850 hPa

物理过程不变的情况下,进行了抬高上海及其周边地区的地形高度的 MONTAIN 模拟试验。试验中虚线框表该区域的局地地形高度均抬高了 300 m (图 10)。

从 MONTAIN 模拟试验区域 3 (D03) 模拟的 5 日 0000 UTC~6 日 0000 UTC 24 h 降雨分布可以看到,降雨出现在上海西(西南杭州湾一带,最大降雨中心只有 100 mm 左右,不仅降雨强度弱,而且雨区分布较为凌乱,上海地区的强暴雨

没能较好地反映出来(图 11)。

同样分析 MONTAIN 试验中,区域 1 (D01) 内对流层中下层位势高度场和流场分布发现,抬高上海及其周边地区的地形高度可导致雨区出现在上海西北、偏南气流形成气旋式环流的两侧,且集中在环流西侧(图 12),环流中心没有降雨出现。对于该试验中上海地区水汽辐合及大气层结稳定度的分布表明,不仅输送至上海地区的西南暖湿空气明显减弱,而且水汽在此基本没有聚集

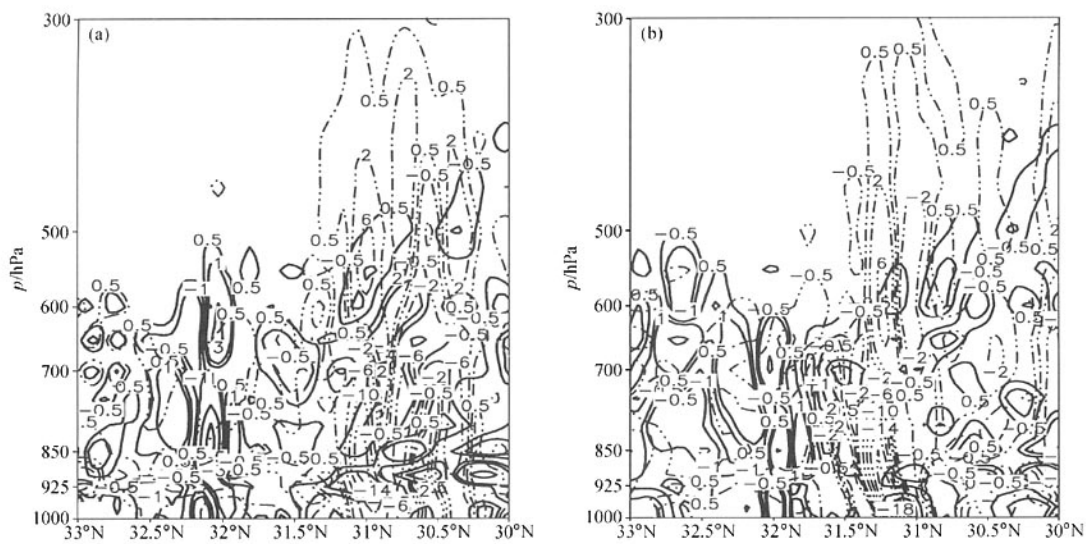


图9 控制试验与 NOTER 模拟试验沿 121.25°E 区域 3 (D03) 水汽辐合垂直分布 (实线: NOTER 模拟; 虚线: CONTROL 模拟, 单位: $10^{-8} \text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa} \cdot \text{s}^{-2}$)。 (a) 5 日 1500 UTC; (b) 5 日 1600 UTC

Fig. 9 Vertical cross section of convergence of moisture of Domain 3 (D03) along 121.25°E in CONTROL and NOTER simulation (solid line: NOTER; dashed line: CONTROL, units: $10^{-8} \text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa} \cdot \text{s}^{-2}$) . (a) 1500 UTC 5 Aug 2001; (b) 1600 UTC 5 Aug 2001

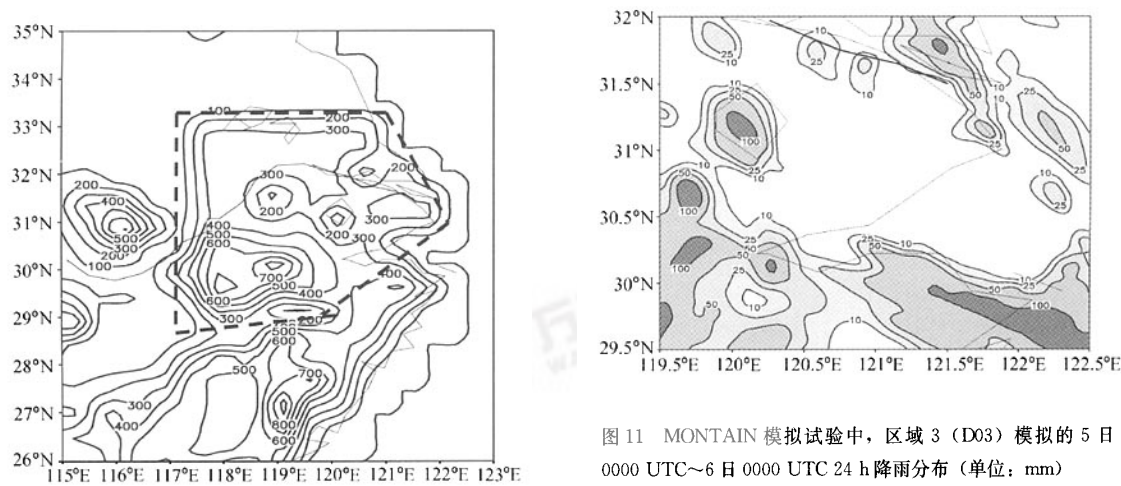


图 10 MONTAIN 模拟试验中, 区域 1 (D01) 的部分地形高度分布 (单位: m, 虚线内为抬高地形高度的区域)

Fig.10 Distribution of topographical height of Domain 1 (D01) in MONTAIN (units: m, dashed line is the domain which the topographical height added)

图 11 MONTAIN 模拟试验中, 区域 3 (D03) 模拟的 5 日 0000 UTC~6 日 0000 UTC 24 h 降雨分布 (单位: mm)

Fig.11 Distribution of 24 h rainfall of Domain 3 (D03) from 0000 UTC 5 to 0000 UTC 6 Aug 2001 in MONTAIN (units: mm)

能力, 大部分的水汽聚集主要出现在热带低压南侧的杭州湾附近 (图 13)。这样, 即使该模拟试验中上海地区对流层低层仍具有明显的位势不稳定层结, 且中上层的稳定性层结有所减弱, 但由于

输送至此的能量、水汽的减弱, 因此仍不能造成局地大暴雨。

综上所述可以认为, 无论是削弱局地山脉地形高度还是抬高局地山脉地形高度, 其对热带低压的影响均出现在 5 日 0600 UTC 后。5 日 0600 UTC 后, 削弱局地山脉地形高度试验中, 热带低压虽有所发展, 但却快速向东北方向移动, 再加

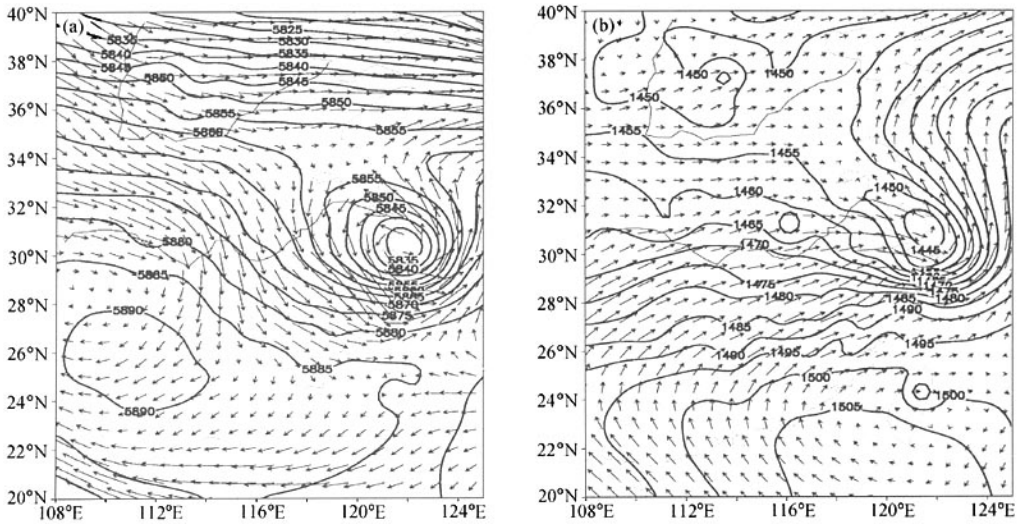


图 12 MONTAIN 模拟试验中, 区域 1 (D01) 模拟的 500、850 hPa 位势高度场 (单位: gpm) 和流场分布。(a) 5 日 1800 UTC 500 hPa; (b) 5 日 1800 UTC 850 hPa

Fig. 12 Simulated geopotential high and wind of Domain 1 (D01) at 500 hPa and 850 hPa in MONTAIN (units: gpm) . (a) 1800 UTC 5 Aug 500 hPa; (b) 1800 UTC 5 Aug 850 hPa

上水汽在此聚集能力的减弱, 因此不利于降雨的发生。对于抬高局地山脉地形热带低压的东南向移动, 主要是局地地形对西南向的暖湿气流具有了明显的阻挡作用, 受阻的气流汇集在上海以西的莫干山附近, 而低压西北侧势力相当的偏西北气流就使得热带低压向偏东南方向移去。1200 UTC 以后, 热带低压移至杭州湾一带并在此停滞加强。上海地区正处于闭合气旋式环流的西北侧, 虽然对流层低层具有不稳定层结, 但水汽没有聚集能力, 同样不利于降雨发生。相反, 受阻的西南暖湿气流一直伴随在向东南移动的热带低压的西南侧, 且气流在杭州湾一带存在辐合, 热带低压西南侧水汽充足且聚集, 因而在该地区产生了降雨。

至此, 通过降低、抬高上海及其以西局地地形高度的模拟试验可以知道, 上海以西局地山脉地形对此次热带低压强暴雨, 尤其是暴雨落区的确有一定的间接影响。不考虑上海以西莫干山、天目山局地地形的模拟试验表明, 适当地形的存在对西南向的暖湿气流具有一定阻挡作用, 这样就使得输送至上海地区的暖湿气流前部受阻, 气流移速减慢, 加上后部又有源源不断的气流输送而来, 因此, 暖湿气流不仅可以在上海地区得以汇集, 而且利于热带低压系统的移速减慢, 出现相对停滞, 从而为暴雨

中尺度系统的发生、发展提供有利的环境场。若没有局地山脉地形的阻挡, 不仅大量暖湿气流直接输送至海上而并未得以聚集, 而且造成热带低压系统的移速加快, 不利于暴雨中尺度系统的形成。但若起阻挡作用的山脉地形过高, 就会使得来自西南向的暖湿气流受阻而汇集在莫干山至杭州湾一带, 这样一来, 充裕的水汽不仅没有输送到上海, 而且在相对强的偏西气流作用下, 热带低压还将向偏东南向移动, 致使降雨出现在杭州湾附近。

4 上海地区地表特征城市化对暴雨中尺度系统的影响

人类对生态环境的影响和地球生态自身的演变, 使得近年来大气发生了明显的变化。变化的原因之一就是由于下垫面特征的变化改变了地气系统间的热量输送和水分循环, 进而影响到大气。近年来, 随着城市化进程的加快, 工业生产、人民生活均使得城市的下垫面特征日益发生变化, 这就必然影响到局地天气和气候状况, 因此, 城市气象灾害监测、防治中, 弄清城市下垫面特征与城市气象灾害之间的关系, 进而通过改变城市下垫面特征来积极改进城市天气和气候, 对于城市的发展和建设具有深远意义。

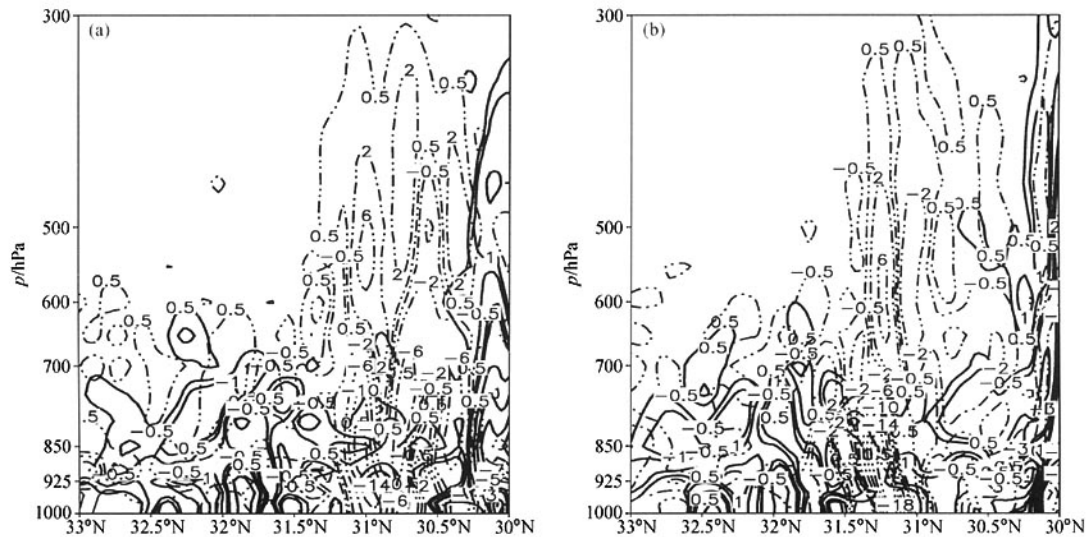


图 13 控制试验与 MONTAIN 模拟试验沿 121.25°E 区域 3 (D03) 水汽辐合垂直分布 (实线: MONTAIN 模拟; 虚线: CONTROL 模拟, 单位: $10^{-8} \text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa} \cdot \text{s}^{-2}$)。 (a) 5 日 1500 UTC; (b) 5 日 1600 UTC

Fig. 13 Vertical cross section of convergence of moisture of Domain 3 (D03) along 121.25°E in CONTROL and MONTAIN simulation (solid line; MONTAIN; dashed line; CONTROL, units: $10^{-8} \text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa} \cdot \text{s}^{-2}$). (a) 1500 UTC 5 Aug 2001; (b) 1600 UTC 5 Aug 2001

2001 年 8 月 5~6 日发生在上海的特大暴雨具有明显的局地性、突发性,属于典型的城市气象灾害。尽管上海地区地表特征日变化不是很大,而且大暴雨的发生与其也不存在着直接关系,但充分考虑城市发展引起的地表特征变化对局地发展起来的降雨系统的影响,会对城市发展规划中城市暴雨灾害的预测、防治方面提供一定参考、警示作用。因此,下面我们就上海市及其邻县地区的地表特征变化对此次降雨的影响进行了模拟试验研究。

值得指出的是,无论是控制模拟试验,还是地表特征城市化对比试验研究,模拟区域地形文件的形成均是采用模式自带的地形高度、24 类地表植被及土壤资料。考虑到模拟区域 Domain3 (D03) 网格数比较密集,绘制整个区域的地表植被分布难以分辨清楚,因此,图 14 只给出了控制

模拟试验的模拟区域 3 (D03) 中,上海市及其邻县部分地区的地表植被分布。可以看到,由于该地区的植被类型和土壤特征等变量是地形文件运行随机产生的,因此,地表植被分类具有多样性,地表特征城市化特征并不明显。为了分析上海地区地表特征城市化效应对此次局地强暴雨的影响,我们在 CITYLAND 对比模拟试验研究中针对植被类型和土壤特征变量作了适当调整,加强了地形文件变量中地表特征城市化效应的描述能力(表 1)。

表中各参数变化显示,有所降低的饱和率、辐射率、热惯性地表参数和有所增加的反射率、粗糙长度地表特征参数更突出了该模拟试验中城区的地形和地表特征。新的地表参数考虑了下垫面城市化后热力、动力、辐射等地气间的交换因素,较好地反映出下垫面城市化所具有的主要特点。

表 1 CITYLAND 试验与控制模拟试验中地表特征参数分布
Table 1 Description of physical parameters in CITYLAND and CONTROL simulation

	反射率 Reflectivity/%	饱和率 Saturation/%	辐射率 Radiance/%	粗糙度长度 Roughness/cm	热惯性 Thermal inertia/ $4.184 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{s}^{-1/2}$
CONTROL	18	50	92	15	0.04
CITYLAND	18	10	88	50	0.03

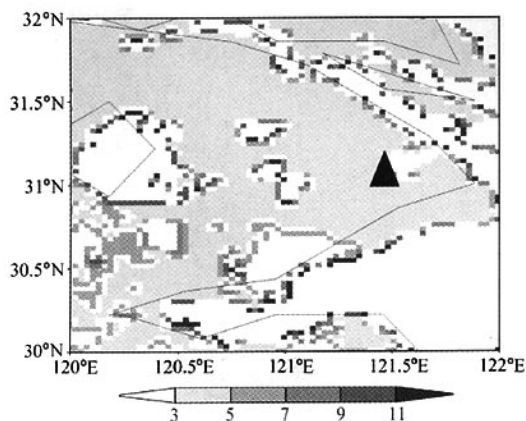


图 14 控制试验内区域 3 (D03) 部分地区地表植被分类指数 (黑三角为上海市观测站, 色标带表示模式中地表植被类型)
Fig. 14 Distribution of index of landuse in parts of Domain 3 (D03) in CONTROL simulation (black triangle is the Shanghai station, color marks represent vegetation categories in model)

分析 CITYLAND 模拟试验模拟的此次上海局地强暴雨过程发现, 上海地区下垫面城市化特征加强后, 模式不但较好地模拟出上海市区及其周边地区 5~6 日 24 h 雨量普遍达 100 mm 以上的降雨特征, 而且对上海市区的强暴雨中心也有很好的反映 (图 15)。对比分析该模拟试验模拟的 24 h 降雨与控制模拟试验 24 h 降雨、以及实况, 不难发现, 上海地区下垫面城市化特征的加强, 使得强暴雨中心出现在城区西侧, 24 h 降雨量可达 300 mm 左右, 降雨强度明显加强。由此可以说, 城市化的发展可能是导致市区降雨强度增大, 落区集中, 城市暴雨灾害出现几率加大的重要原因。

该模拟试验中逐时模拟雨量分布也显示 (图 16), 地表城市化特征加强后, 降雨的局地性更加明显。虽然强暴雨中心略偏于上海市区中心西侧些, 但对于暴雨集中倾泻在上海市区的这一特征还是可以清晰地反映出。市区内降雨的增强主要出现在 0512~0517 UTC, 暴雨中心最大增幅达 50 mm, 这与上海市区 5 日半夜观测到的强暴雨时段基本相符。由此可以认为, 地表城市化特征的加强可以极大地影响到该地区的降雨强度和暴雨出现时段。通常会使得降雨强度在午夜达最大, 且城区的降雨较周边地区偏大许多, 进而导致城

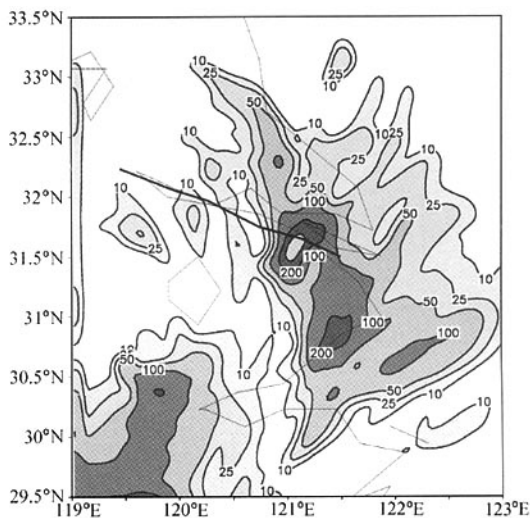


图 15 CITYLAND 模拟试验中区域 3 (D03) 模拟的 5 日 0000 UTC~6 日 0000 UTC 24 h 降雨分布 (单位: mm)

Fig. 15 Distribution of 24 h rainfall of Domain 3 (D03) from 0000 UTC 5 to 0000 UTC 6 Aug 2001 in CITYLAND (units: mm)

市暴雨灾害出现可能性的加大。这也是当前社会发展向全面城市化过渡所面临得一个重要问题, 即城市暴雨灾害的监测与防治。

考虑到地表城市化特征的加强会明显影响到降雨强度, 因此, 地表城市化特征的加强对局地暴雨中尺度系统发展的影响也值得引起关注。分析发现, 若热带低压移到地表城市化特征明显加强的地区后, 热带低压的发展强度一定程度上会有所受限, 且移动更加缓慢 (图 17)。与控制模拟试验的差值风场分布也显示 (图略), 上风方的近地层风速在傍晚前出现减弱, 而下风方的近地层风速则出现加大, 风场的辐合、辐散得以重新分布, 即上风方附近出现风速的辐合, 且辐合在午后及强暴雨期间较为明显。由此可以说, 上海地区地表城市化特征的加强, 使得在此近乎停滞的热带低压内部东侧低层风场辐合增强, 这样即使热带低压的发展偏弱, 但由于其内局地低层辐合的加强, 因而引发的上升运动仍有所加强, 同样可导致局地强暴雨的发生。

另外, 该模拟试验与控制试验中, 近地层 1000 hPa 的温度、湿度差值场分布也表明 (图 18 和图 19), 地表城市化特征加强地区, 温湿变化基

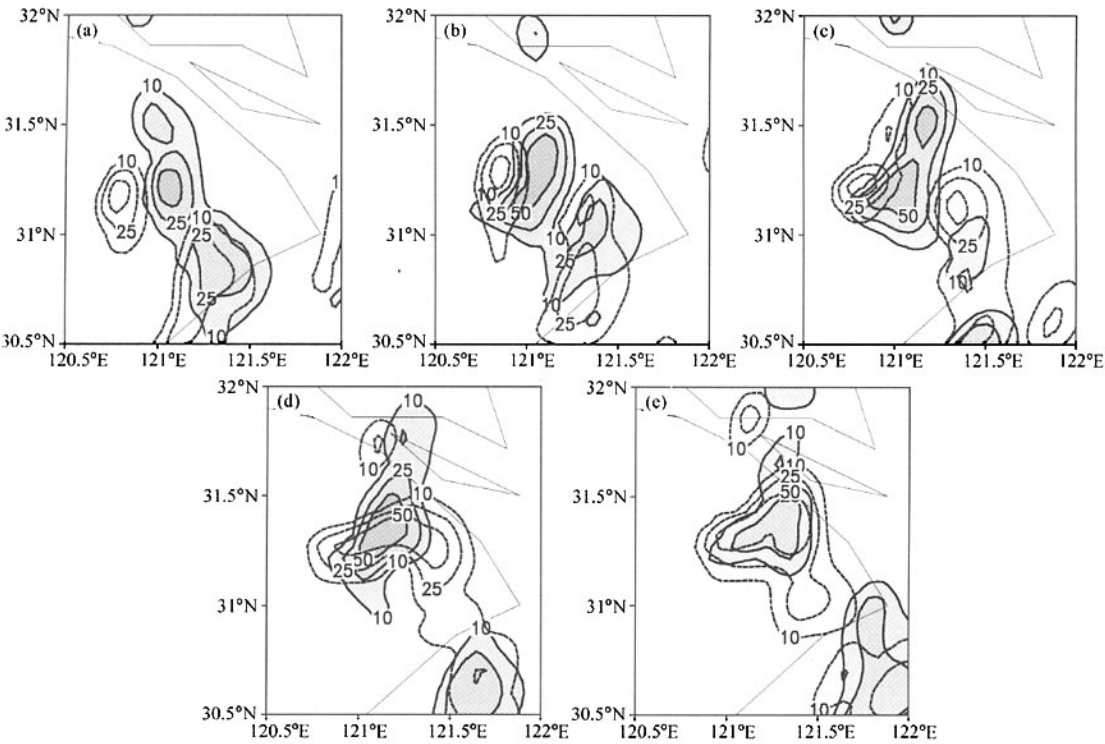


图 16 强降雨期间区域 3 (D03) 5 日 1400 UTC~1800 UTC 逐时雨量分布 (单位: mm)。(a) 5 日 1400 UTC; (b) 5 日 1500 UTC; (c) 5 日 1600 UTC; (d) 5 日 1700 UTC; (e) 5 日 1800UTC

Fig. 16 1 h rainfall of Domain 3 (D03) from 1400 UTC to 1800 UTC 5 Aug 2001 (units: mm) . (a) 1400 UTC 5; (b) 1500 UTC 5; (c) 1600 UTC 5; (d) 1700 UTC 5; (e) 1800UTC 5 Aug 2001

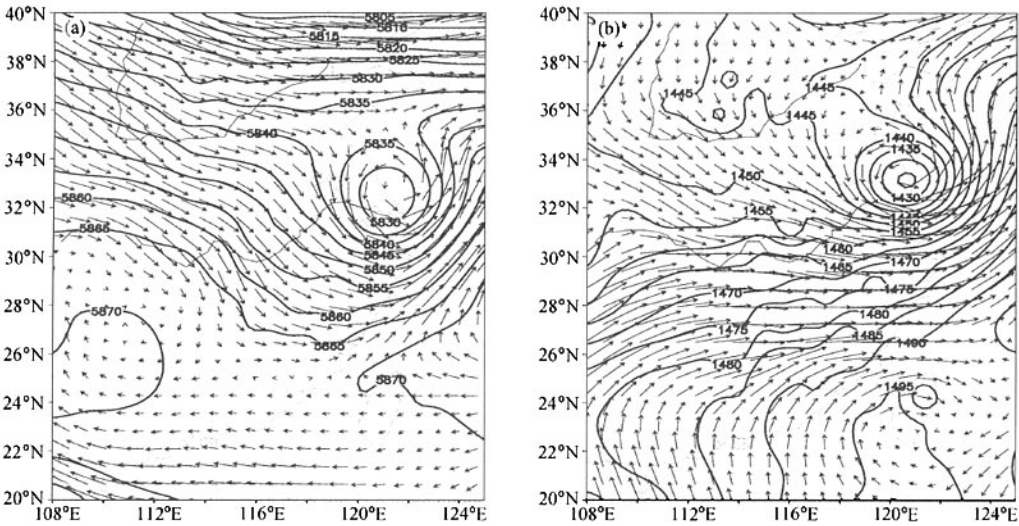


图 17 CITYLAND 模拟试验中, 区域 1 (D01) 模拟的 500 hPa、850 hPa 位势高度场 (单位: gpm) 和流场分布。(a) 6 日 0000 UTC 500 hPa; (b) 6 日 0000 UTC 850 hPa

Fig. 17 Simulated geopotential high and wind of Domain 1 (D01) at 500 hPa and 850 hPa in CITYLAND (units: gpm) . (a) 0000 UTC 6 Aug 2001 500 hPa; (b) 0000 UTC 6 Aug 2001 850 hPa

本相反,即近地层内温度有所增加,午后至傍晚期间平均增温 $1\sim 2^{\circ}\text{C}$,而湿度却有所减少,平均减少 $1.5\sim 2\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。这可能是由于地表特征的城市化使得地表植被及绿地面积减少,城市化路面特征加强,进而导致地面温度增高、湿度减少,地表温度的增高促使试验区内类似于“城市热岛效应”影响的加剧,对此模拟试验中地面感热通量的增强就也有所反映。日趋明显的“城市热岛

效应”使得城市暴雨灾害也日趋严重。

通过上述分析可以认为,城市地表特征虽然与降雨没有直接关系,但地表特征的分布对于降雨系统的影响还是存在的。当有利的降雨系统位于地表特征城市化明显的区域,地表动力和热力不均匀可通过湍流运动向上传输,造成边界层内风、温、湿的演变和水平差异,从而形成城市近地层空气的暖干特性效应和城区上风方风速辐合

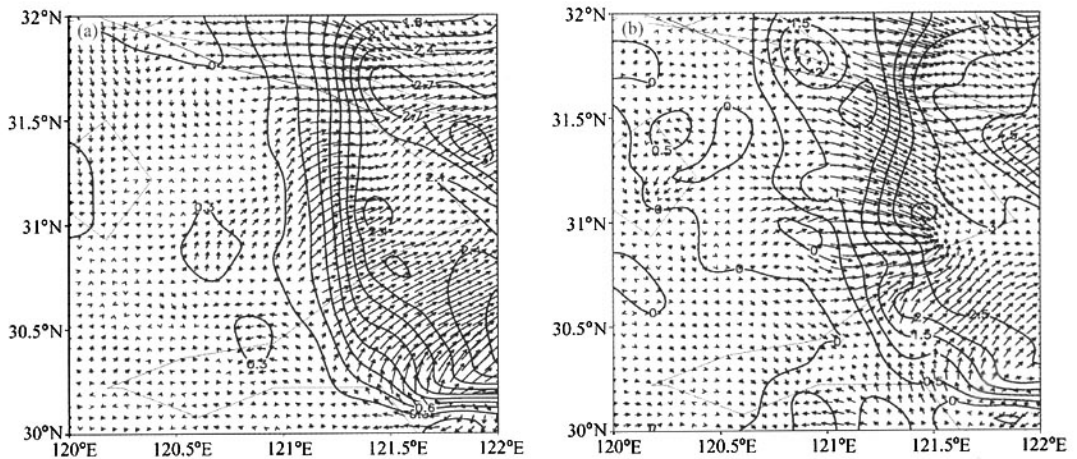


图 18 CITYLAND 试验与控制试验区区域 1 (D01) 的 1 000 hPa 风场与温度差值场 (单位: $^{\circ}\text{C}$)。 (a) 5 日 0300 UTC ; (b) 5 日 0600 UTC

Fig. 18 Difference of wind and temperature of Domain 1 (D01) at 1 000 hPa between CITYLAND and CONTROL. (a) 0300 UTC 5 Aug 2001; (b) 0600 UTC 5 Aug 2001 (units: $^{\circ}\text{C}$)

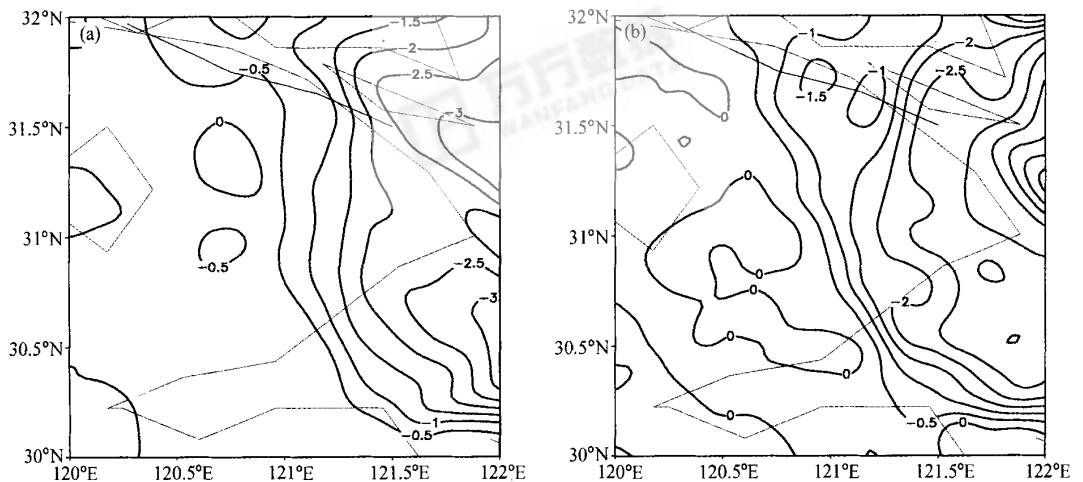


图 19 CITYLAND 模拟试验与控制试验区区域 1 (D01) 的 1 000 hPa 比湿差值场分布 (单位: $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)。 (a) 5 日 0300 UTC ; (b) 5 日 0600 UTC

Fig. 19 Difference of moisture of Domain 1 (D01) at 1 000 hPa between CITYLAND and CONTROL. (a) 0300 UTC 5 Aug 2001; (b) 0600 UTC 5 Aug 2001 (units: $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)

效应, 并由此增强上升运动, 进而增强该地区的对流。因此, 城市地表特征的演变应是城市暴雨灾害研究中一个值得关注的问题。

5 结论和讨论

本文采用中尺度数值模式 PSU/ NCAR 的 MM5 对 2001 年 8 月 5~6 日上海特大暴雨过程进行了模拟研究, 并在模式对降雨过程有较好模拟能力的基础上, 利用对比模拟试验对上海附近山脉地形及上海地区地表状况在此次暴雨过程中的影响进行较深入的分析。结果表明:

(1) 将 GMS 红外云图的云顶亮温及上海地面自动站温度等非常规观测资料, 直接用于非静力中尺度数值模式 MM5V3 的四维同化系统中进行模拟, 模式模拟暴雨的范围有所偏大, 强降雨中心也有一定偏差。但总体来讲, 中尺度模式不仅可以成功地模拟出降雨过程各种尺度系统的发展、演变, 而且还可较好地模拟出此次强局地突发暴雨的落区、雨强以及降雨时段, 特别是局地降雨随时间的演变。这对利用高分辨模式模拟结果来研究城市暴雨灾害是有益的尝试。

(2) 上海以西莫干山、天目山局地地形对此次上海局地强暴雨过程具有一定的间接影响。热带低压东移过程中, 适当高度的山脉对于西南暖湿气流具有一定阻挡作用, 使得输送至上海地区的暖湿气流前部受阻, 气流移速减慢, 加上后部又有源源不断的气流输送而来, 因此利于暖湿气流的聚集及热带低压移速的减慢, 从而为暴雨中尺度系统的形成提供一稳定有利的环境场。但若山脉过高且热带低压移至非平原地带, 则来自西南的暖湿气流会受阻而汇集在莫干山至杭州湾一带, 且在相对强的偏西气流作用下, 热带低压会向偏东南向移去。

(3) 上海局地地表特征城市化的加强, 会造成城市近地层空气的暖干特性效应和城区上风方风速辐合, 由此产生的上升运动增强了系统内的对流活动。而且, 城市化影响的加强使得城市特有的一系列中尺度动力、热力特征明显, 这对于局地暴雨强度的加大也是值得关注的。

综上所述可以认为, 上海及其周边地区局地山脉地形和上海地区的地表分布特征虽不是造成

此次上海局地强暴雨的直接原因, 但对暴雨系统的移动、停滞、发展加强还是有一定影响的, 因此, 局地山脉地形和城市地表特征就成为城市暴雨灾害不容忽视的影响因素之一。要进一步加强城市暴雨灾害的监测、防治就必须得提高城市暴雨的定性、定量预报水平, 发展与改进适用于城市地区的高分辨率中尺度数值天气预报模式, 模式中应针对适用区域的山脉地形及地表分布特征等物理过程作出足够考虑。

参考文献

- [1] 陈联寿, 丁一汇. 西太平洋台风概论. 北京: 科学出版社, 1979. 1~490
Chen Lianshou, Ding Yihui. *Introduction of Typhoon in West Pacific* (in Chinese). Beijing: Science Press, 1979. 1~490
- [2] 陈联寿, 徐祥德, 王继志, 等. 热带气旋动力学引论. 北京: 气象出版社, 2002. 1~13
Chen Lianshou, Xu Xiangde, Wang Jizhi, et al., *Introduction to Tropical Cyclone Dynamics* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 2002. 1~13
- [3] 孟智勇, 徐祥德, 陈联寿, 等. 台湾岛地形诱发次级环流系统对热带气旋异常运动的影响机制. 大气科学, 1998, 22 (2): 156~168
Meng Zhiyong, Xu Xiangde, Chen Lianshou, et al., Mechanism of the impact of the cyclone system induced by the Taiwan island topography on tropical cyclone unusual motion. *Scientia Atmospherica Sinica* (in Chinese), 1998, 22 (2): 156~168
- [4] 贺海晏, 杨平章. 台风移动规律的研究 II. 小地形与边界层的动力作用. 热带气象学报, 1995, 11 (2): 97~105
He Haiyan, Yang Pingzhang. A study on typhoon movement. Part II. Dynamical role of small topography and the boundary layer. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 1995, 11 (2): 97~105
- [5] 齐琳琳, 赵思雄. 一次热带低压引发上海特大暴雨过程的中尺度系统分析. 大气科学, 2004, 28 (2): 254~268
Qi Linlin, Zhao Sixiong. An Analysis of mesoscale features of heavy rainfall in Shanghai on 5—6 August 2001. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2004, 28 (2): 254~268
- [6] 齐琳琳, 赵思雄. 利用非常规观测资料对上海特大暴雨过程的模拟研究. 气候与环境研究, 2003, 8 (4): 417~435
Qi Linlin, Zhao Sixiong. A numerical simulation of the heavy rainfall in Shanghai using non-conventional observa-

- tional data. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2003, **8** (4): 417~435
- [7] Grell G A, Dudhia J, Stauffer D R. A description of the fifth generation Penn State/NCAR mesoscale model (MM5), NACR Technical Note, NCAR/TN-398+STR, 1994, 138pp
- [8] Dudhia J. A nonhydrostatic version of the Penn State/NCAR meoscale model; Validation tests and simulation of an Atlantic cyclone and cold front, *Mon. Wea. Rev.*, 1993, **121**: 1493~1513
- [9] 孙建华, 赵思雄. 一次罕见的华南大暴雨过程的诊断与数值模拟研究. 大气科学, 2000, **24** (3): 381~392
Sun Jianhua, Zhao Sixiong. A diagnosis and simulation study of a strong heavy rainfall in South China. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2000, **24** (3): 381~392
- [10] 赵琳娜, 孙建华, 赵思雄. 一次引发华北和北京沙尘(暴)天气起沙机制的数值模拟研究. 气候与环境研究, 2002, **7** (3): 279~294
Zhao Linna, Sun Jianhua, Zhao Sixiong. Numerical simulation of dust emission in North China. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2002, **7** (3): 279~294
- [11] 孙建华, 陈红, 赵思雄, 等. 华北和北京的酷暑天气. II. 模拟试验和机理分析. 气候与环境研究, 1999, **4**: 334~345
Sun Jianhua, Chen Hong, Zhao Sixiong, et al., A study on the severe hot weather in Beijing and North China. Part II. Simulation and analysis. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 1999, **4**: 334~345
- [12] 孟智勇, 徐祥德, 陈联寿. 卫星亮温资料四维同化方案及其对“7(20)”武汉特大暴雨的模拟试验. 大气科学, 2002, **26** (5): 663~676
Meng Zhiyong, Xu Xiangde, Chen Lianshou. TBB-nudging four-dimensional data assimilation method and simulations on heavy rain process in Wuhan on 20 July, 1998. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2002, **26** (5): 663~676
- [13] 丁一汇, 蔡则怡, 李吉顺. 1975年8月上旬河南特大暴雨的研究. 大气科学, 1978, **2** (4): 276~289
Ding Yihui, Cai Zheyi, Li Jisun. Research on the “75(8)” henan heavy rainfall. *Scientia Atmospherica Sinica* (in Chinese), 1978, **2**: 276~289