第26卷 第5期
2002 年 9 月

大 气 科 学
Chinese Journal of Atmospheric Sciences

Vol. 26, No. 5
Sept. 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

孙建华 赵思雄

(中国科学院大气物理研究所，北京 100029)

P426 A

摘 要 在该文第 I 部分中选取 1994 年 6 月 12 日～13 日过程进行了较深入的研究. 在确定云雨、垂直运动的模拟基本正确以后，利用模式的输出资料对在此期间的 β 中尺度对流系统的结构和演变进行了分析研究。第 II 部分继续探讨物理过程、初始环境场以及地形对 β 中尺度对流系统的发生、发展的影响。结果表明：潜热释放对强对流系统发生、发展都有重要的作用。行星边界层过程对对流的发生阶段影响较为明显、而对发展阶段的影响似乎还不大。地面感热和潜热通量对对流系统的强度有影响。对初始场的试验表明，初始湿度场的改变会很明显地影响模拟结果，温度场的影响次之。地形的改变对大尺度的雨带影响不是很大，主要影响强暴雨的强度和落区，地形尤其是喇叭口地形对"94·6"暴雨的增幅作用十分明显。

关键词：β中尺度对流系统；数值模拟；物理过程

1 引言

在本文第 I 部分中选取 1994 年 6 月 12 日～13 日的过程进行了较深入的研究，研究表明，一个较为完善的高分辨模式可能揭示一些中尺度系统的发展规律和形成机制及其结构演变特征。在确定云雨、垂直运动的模拟基本正确以后，利用模式的输出资料对在此期间的 β 中尺度对流系统（MCS）的结构和演变进行了分析研究[1]。然而，对中尺度对流系统的发生、发展，凝结潜热释放，边界层过程和水的相变等物理过程都有一定的作用，一些有关 MCS 的模拟研究也指出，对流参数化、可分辨尺度相变和边界层等物理过程在模拟实测的对流天气系统方面起着重要的作用[2,3]。

大尺度环境场对中尺度对流系统的影响也是很显著的。陶诗言等[4]指出，大尺度环境条件不但制约了暴雨和强对流天气及其演变过程，而且还可影响对流系统内部的结构、强度、运动和组织。中尺度对流系统的发生、发展与气象环境场有密切的关系，如大气的温度场、湿度场、层结结构和风场等的大小和分布状况。

暴雨是一定天气形势的产物，但地形对于暴雨的强度、落区等有不可忽视的作用，尤其是一些特大暴雨往往是在特定的地形下产生的。地形的作用主要有以下几个方面：

2000-05-10 收到，2001-06-09 收到修改稿

* 国家重点基础研究发展规划项目 G1998040907"我国重大气候和天气灾害形成机理和预测理论的研究"第 II 部分、国家自然科学基金资助项目 49735180 以及国家科技部攀登专项 95-专-3 共同资助

山脉迎风坡的强迫抬升作用；喇叭口地形的辐合作用；地形通过影响云中微物理过程对降水产生增幅作用；对对流系统的组织和增强作用；产生地形性中尺度系统等。但地形本身的条件是不随时间变化的，对于不同的天气条件和天气系统，地形影响的差异是明显的。在研究暴雨形成、落区和雨量时，研究地形暴雨产生的天气条件和机制是非常重要的。

目前，在实际观测资料不足的情况下，利用数值模拟来讨论各种物理过程、初始环境场和地形对强对流系统发生、发展过程的作用是一种可尝试的方法。本文第 II 部分中设计了三类共 27 个试验，比较系统地讨论了物理过程、初始环境场及地形对广西地区中尺度对流系统的影响，现将结果分别介绍如后。

2 物理过程对 β 中尺度对流系统的作用（试验 1～5）

控制试验为本研究第 I 部分中的模拟试验（试验 0），控制试验中已知广西的强对流系统在 13 日 07 时已经消亡，因而下面的 β 中尺度对流系统的研究，不再做 24 小时模拟，而是只模拟到 13 日 07 时即可。下面将通过数值试验来分析一些主要的物理过程，诸如，潜热释放，边界层过程及地面感热、潜热通量对 6 月 12 日广西的强对流系统发生、发展的影响。试验内容见表 1。

表 1 物理过程对中尺度对流系统影响的试验方案

试验编号	试验名称		试验内容
1	潜热释放试验	NLH1	整个模拟过程无潜热释放
2		NLH2	13 日 00 时以后的模拟过程无潜热释放
3	边界层试验	NPBL1	整个模拟过程无边界层过程
4		NPBL2	13 日 00 时以后的模拟过程无边界层过程
5	感热、潜热试验	NFL	整个模拟过程无地面感热、潜热通量

2.1 潜热释放对强对流系统发生发展的作用

在过去的研究中发现潜热释放对爆发性气旋及强风暴的发展是非常重要的，用 MM5 模拟北大西洋的九个爆发性气旋时，发现如果没有潜热释放，气旋和风暴很难发展到"爆发性"的强度[5,6]。对华南地区的 β 中尺度对流系统的发生发展过程，潜热的影响如何？

在对"94·6"暴雨个例，试验 1 模拟中不考虑凝结潜热（NLH1），即试验中网格和次网格尺度的凝结加热效应都不考虑，潜热不计入热力方程，但水汽的影响还存在，即在方程中采用虚温。降水模拟结果，12 日 12 时～13 日 00 时的降水区域（图 1a）与控制试验（图 2a）相似，但强度相差较大，控制试验中从东到西有大范围的 25 mm 以上的雨区，其中还有几个 50 mm 以上的暴雨区，而 NLH1 中只有分散的 25 mm 雨区，无 50 mm 以上的暴雨区出现。13 日 00 时～07 时段模拟的降水（图 1b）与控制试验（图 2b）差别较大，控制试验中东北—西南向的雨带在 NLH1 中已不存在，只有小范围的 10 mm 雨区，这说明没有强对流系统在试验 NLH1 中形成。从每小时一次的垂直运动分布（图略），发现整个过程中都没有大于 0.2 $m\,s^{-1}$ 的上升运动出现。

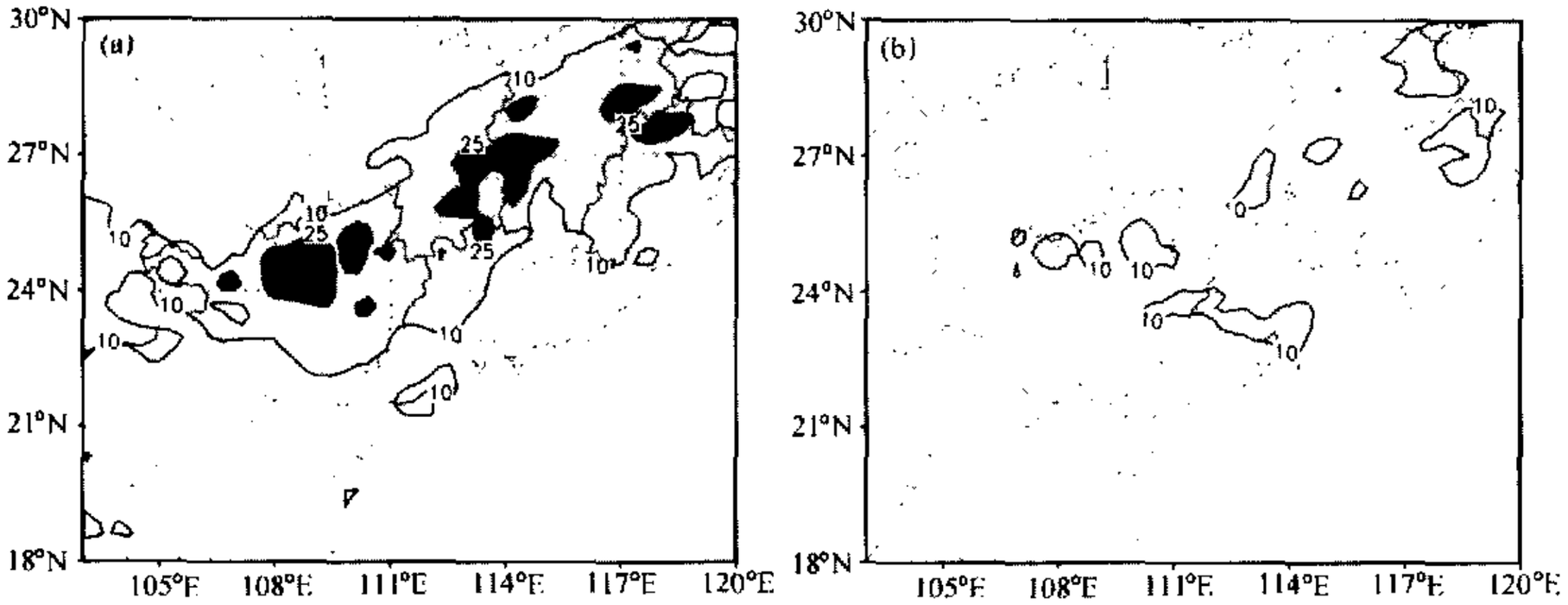

图 1　1994 年 6 月 12 日 12 时～13 日 07 时的模拟降水量（无凝结潜热试验 NLH1，单位：mm）
(a) 12 日 12 时～ 13 日 00 时；　(b) 13 日 00 时～13 日 07 时

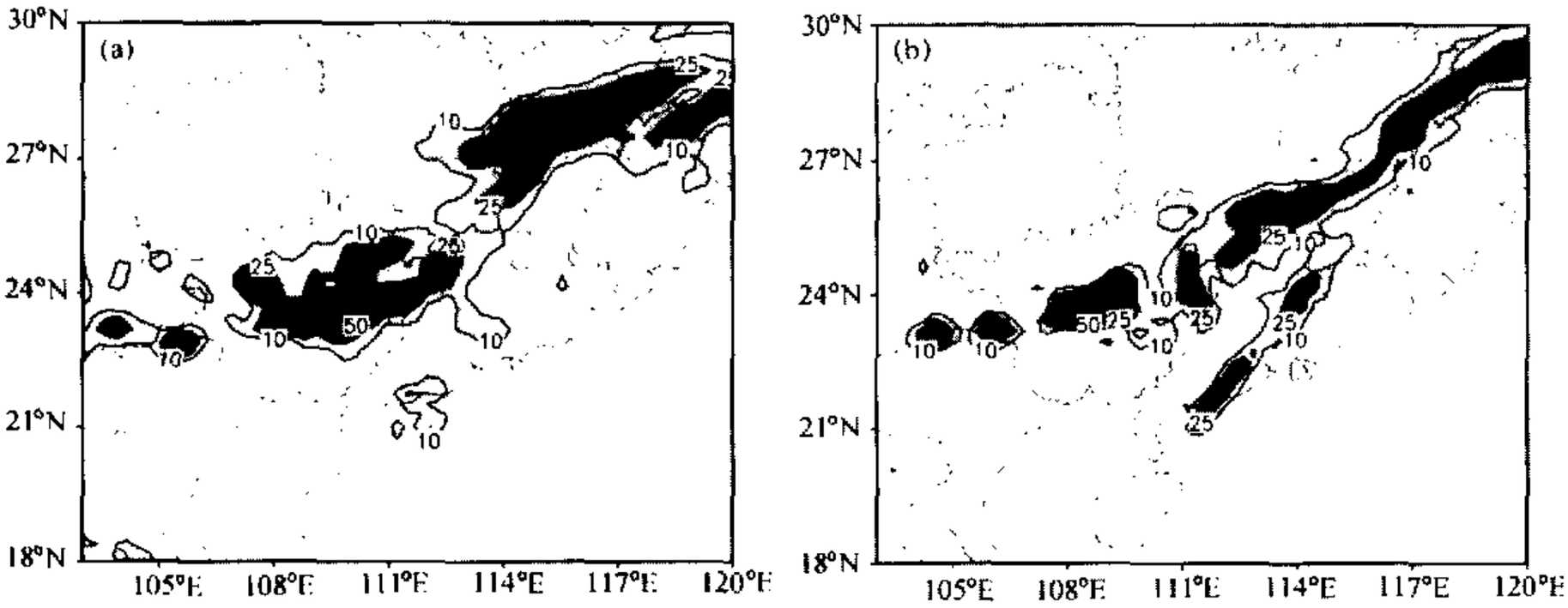

图 2　1994 年 6 月 12 日 12 时～13 日 07 时的模拟降水量（控制试验，单位：mm）
(a) 12 日 12 时～ 13 日 00 时；　(b) 13 日 00 时～13 日 07 时

从试验 NLH1 中可以看到潜热对强对流系统的启动是十分重要的，没有潜热的释放，对流很难发展起来。为试验潜热对对流系统发展过程的作用，试验 2（NLH2）与试验 1（NLH1）不同，在强对流系统启动后去掉潜热的影响（即在 13 日 00 时以后去掉潜热），结果发现对流在 13 日 00 时以后一个小时就消失了，与控制试验的对流系统合并发展的结果完全不同。由此看到，对一个已经发展起来的对流系统，如果没有潜热的释放，系统也是很难维持的。

2.2　行星边界层过程对强对流系统发生发展的作用

许多 β 中尺度现象的产生和维持都取决于各种非绝热物理过程的强迫和与边界层的相互作用。这是因为边界层过程造成的垂直热量、动量和水汽输送，对于对流系统的发展是非常重要的[7,8]。过去的研究和观测发现，当中尺度和大尺度的强迫较弱时，对

流系统的形成和加强与白天混合层的发展有关[9,10]。在一定的大尺度环境场里，边界层的作用有助于低空急流的形成，是促进夜间出现降水最大值的因素。此外，一旦对流的下沉气流进入边界层也可能使原先的动力、热力过程遭到破坏。

在分析该过程的 GMS 卫星云图时，发现大的对流云团都在下午和夜间生成、发展，因而，对流云团的日变化可能与边界层的日变化有关。控制试验中采用高分辨的 Blackadar 行星边界层方案，文献[11]中证明高分辨的行星边界层方案对较强暴雨的模拟和预报有一定的作用。而 6 月 12 日的这个强对流系统强度非常强，范围大，维持时间长。因此，为了研究边界层过程在强对流系统的发生、发展过程中的作用，设计了不采用任何行星边界层方案试验 3（NPBL1）。

试验 3（NPBL1）模拟的 12 日 12 时～13 日 00 时的雨区和雨强（图 3a）基本与控制试验一致，但后一时段（图 3b）相差较大，江苏、浙江一带的雨区偏小，强度偏弱，广西中部的强降水区未模拟出来，只在广西东部有 25 mm 的雨区。分析每小时的上升运动分布（图略），发现前 6 小时与控制试验相差较小，但以后的变化和控制试验相差较大，12 日 18 时在（107°E，24°N）有一强扰动发生，而控制试验是在 12 日 19 时出现的，此试验中扰动出现的时间早了一小时，位置也偏西了一点，但此对流系统很快减弱，在 12 日 23 时就基本消亡，因而，此试验中没有强对流发生。

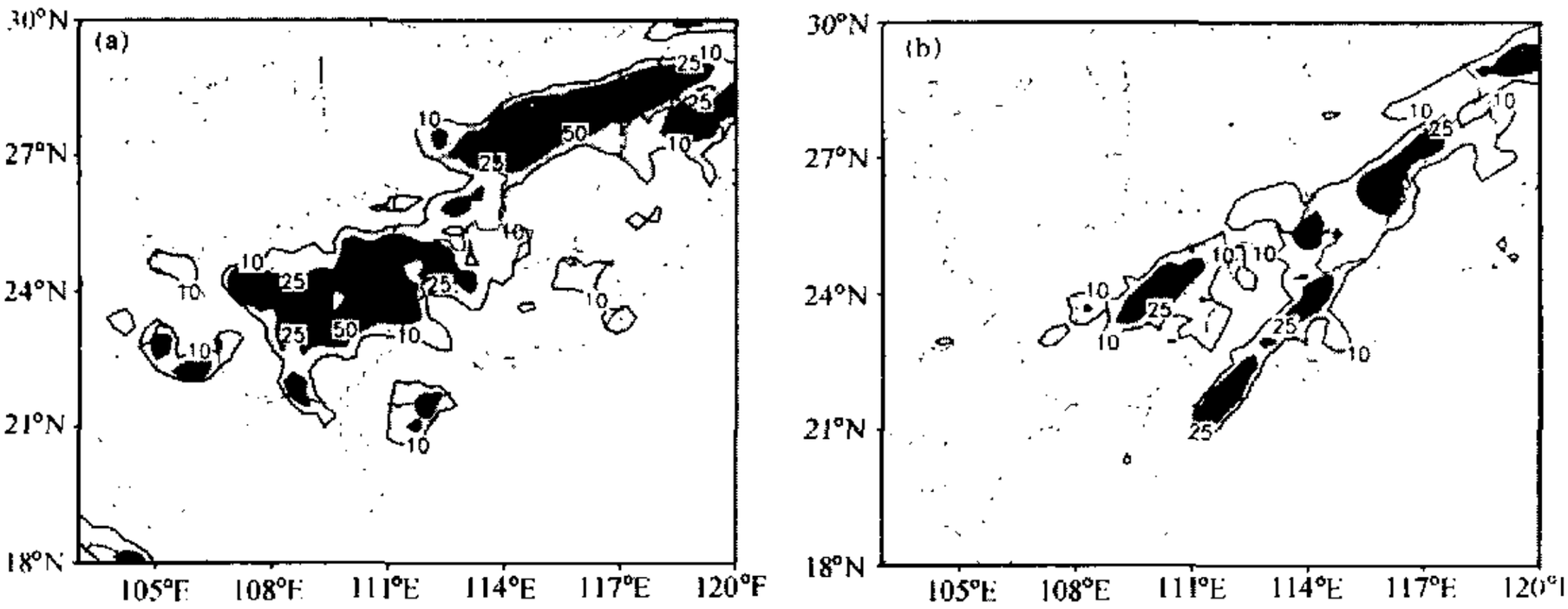

图 3 1994 年 6 月 12 日 12 时～13 日 07 时的模拟降水量（无行星边界层方案试验 NPBL1，单位：mm）
（a）12 日 12 时～13 日 00 时；（b）13 日 00 时～13 日 07 时

为了考察边界层过程在强对流系统发展过程中的作用，在模拟的前 12 小时采用高分辨的行星边界层方案，而 13 日 00 时之后不采用边界层方案（试验 4，NPBL2），结果发现当对流系统发展起来后，边界层过程对系统的发展影响不大。这说明就本例而言，边界层过程对强对流系统的触发有一定的作用，但对对流系统发展的影响似乎不太明显。

梁志和[12]通过对实测资料分析后指出，1994 年 6 月 11 日～17 日广西特大暴雨与边界层状况有密切关系。边界层中 925 hPa 在桂北大暴雨中心附近生成和维持的中尺度辐合中心（图 4），为暴雨区边界层和低层持续输送 78%以上的暖湿空气，是暴雨生成和

维持的主要水汽来源，并对建立和维持不稳定层结有重要作用。

综上所述，行星边界层过程对此次强对流系统的启动是不可缺少的，而对对流系统的发展影响不太明显。

2.3 感热、潜热通量对强对流系统发生发展的作用

去掉地面感热、潜热通量过程模拟（试验 5，NFL）的 12 日 12 时～13 日 00 时的雨区和雨强（图略）与控制试验相差较小，但后一时段（13 日 00 时～07 时）的雨区和雨强都较控制试验小，特别是广西中部的暴雨区，控制试验的中心强度在 100 mm 以上，而此试验模拟的降雨强度只有 50 mm，且面积偏小。从每小时的雨量和垂直运动变化（图略）来看，去掉感热、潜热通量主要影响的是垂直运动的强度，上升运动较控制试验弱得多，而整个系统的发展过程和控制试验是基本相似的。

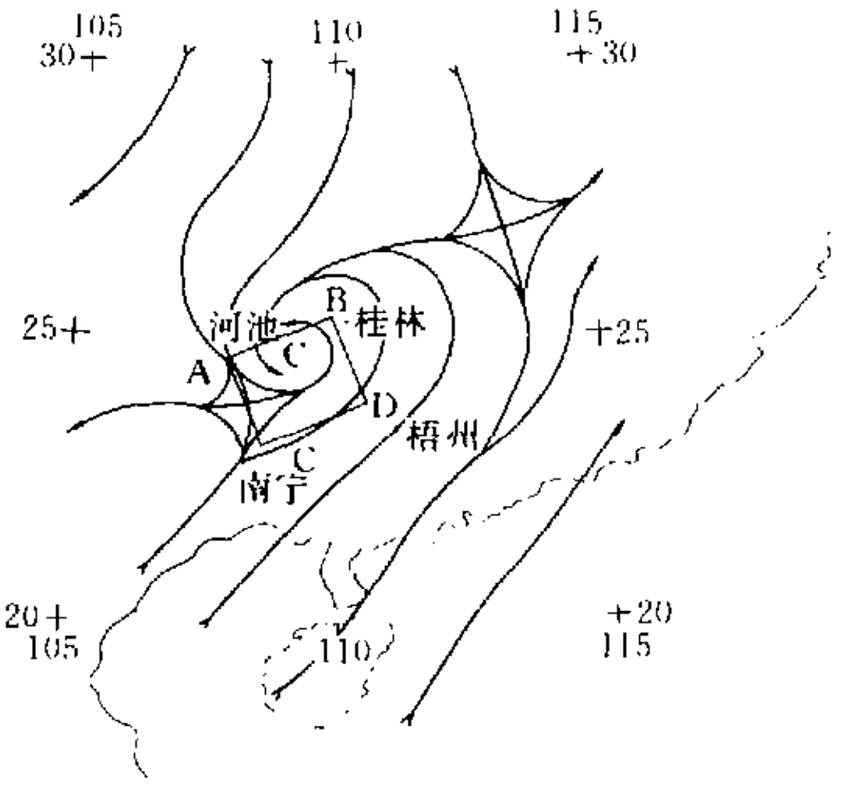

图 4　1994 年 6 月 13 日 08 时 925 hPa 华南区域流线图（引自文献[12]）

3　环境温湿场对雨带和中尺度对流系统的作用（试验 6～21）

环境条件对对流系统发生、发展的影响主要有两个方面，一是对流的启动，一是对流启动后能否继续发展形成强对流系统。强对流系统的触发可以来自地面的局地加热、地形扰动和边界层的扰动，也可以是大气波动、气流辐合以及中尺度天气系统的扰动，是一个十分复杂而研究难度较大的问题。另外，对流系统发展过程中与环境场又有相互作用，会制约或促进对流系统自身的发展演变，也是一个非常复杂的问题。下面将采用实际的初始场，对温度场和湿度场的作用进行探讨。主要的试验内容见表 2。

3.1 湿度场的作用

首先试验整层湿度场对对流系统发生、发展的作用。试验 6 初始场整层的相对湿度减小 10%（RHS10）；试验 7 初始场整层的相对湿度减小 5%（RHS5）；试验 8 初始场整层的相对湿度减小 2%（RHS2）；试验 9 初始场整层的相对湿度增加 10%（RHL10）；试验 10 初始场整层的相对湿度增加 5%（RHL5）；试验 11 初始场整层的相对湿度增加 2%（RHL2）。模拟时间为 12 日 12 时～13 日 07 时，共 20 小时。相对湿度场调整后湿度超过 100%时调整到 100%，小于 0 时调整到 2%。

试验 RHS10 模拟的结果表明，初始场的相对湿度减小 10%以后，模拟雨带的强度较控制试验弱得多，范围也小得多（图 5），并且整个模拟过程中没有强对流系统产生。这说明湿度场对降水的模拟是至关重要的，10%的误差几乎使整个降雨带不存在，强降水中心也不再出现。试验 RHS5 模拟雨区（图略）的范围和强度与控制试验有一定的差异，强度较弱，但模拟的中尺度对流系统发生、发展过程差异较大。试验

表 2 初始环境场对中尺度对流系统影响的试验方案

试验编号	试验名称				试验内容
6	湿度场	整层	减小湿度场试验	RHS10	整层的相对湿度减小 10%
7				RHS5	整层的相对湿度减小 5%
8				RHS2	整层的相对湿度减小 2%
9			增加温度场试验	RHL10	整层的相对湿度增加 10%
10				RHL5	整层的相对湿度增加 5%
11				RHL2	整层的相对湿度增加 2%
12		低层	LRHS10		850 hPa 以下各层的相对湿度减小 10%
13			LRHL10		850 hPa 以下各层的相对湿度增加 10%
14		中低层	MRHS10		400 hPa 以下各层的相对湿度减小 10%
15			MRHL10		400 hPa 以下各层的相对湿度增加 10%
16	温度场	低层	LTTS12		975～850 hPa 三层的温度减小 2℃
17			LTTL12		975～850 hPa 三层的温度增加 2℃
18		中层	MTTS2		850～400 hPa 各层的温度减小 2℃
19			MTTL2		850～400 hPa 各层的温度增加 2℃
20		高层	HTTS2		400～100 hPa 各层的温度减小 2℃
21			HTTL2		400～100 hPa 各层的温度增加 2℃

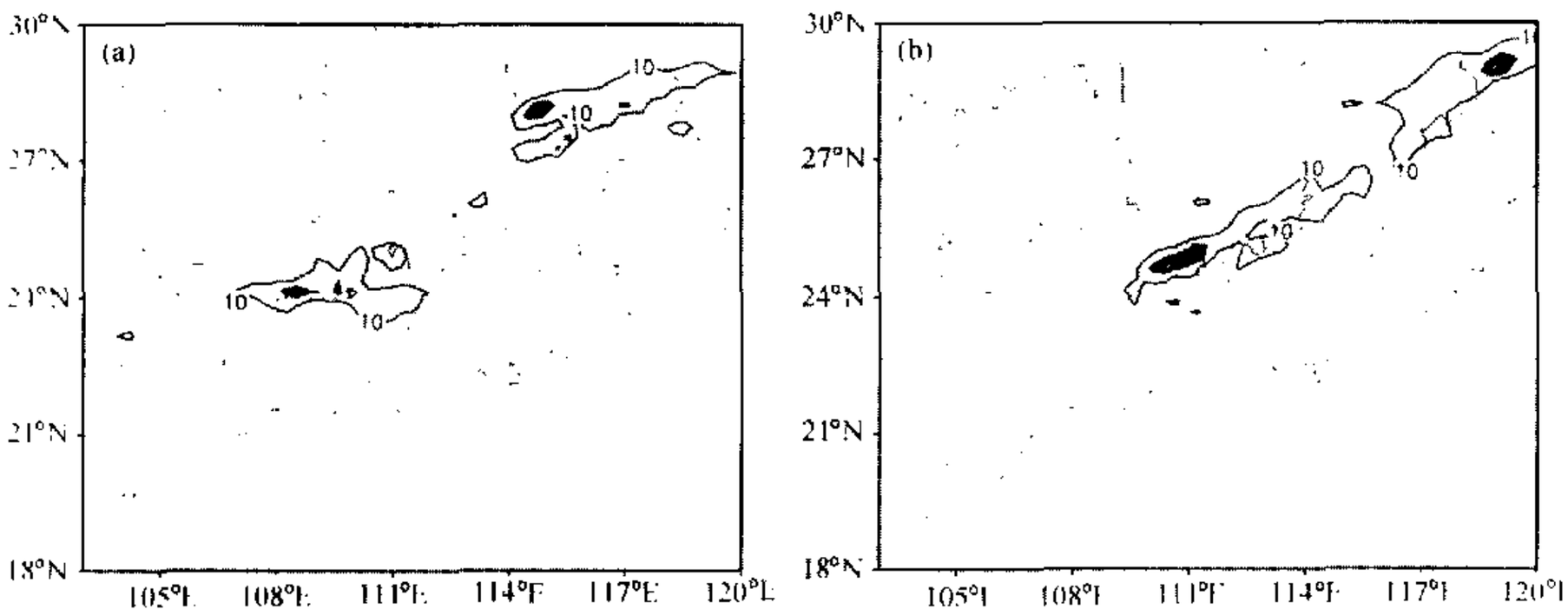

图 5 1994 年 6 月 12 日 12 时～13 日 07 时试验 RHS10 的模拟雨量（单位：mm，整层的湿度场减小 10%）
(a) 12 日 12 时～13 日 00 时；(b) 13 日 00 时～13 日 07 时

RHS2 模拟雨区的范围和强度（图略）以及广西的强对流系统发生、发展过程与控制试验基本相近。

试验 RHL10 模拟雨带（图 6）比控制试验增大，强度增强，出现很多 100 mm 以上的强暴雨中心，而控制试验只有广西中北部出现强度达 100 mm 的暴雨区。从 500 hPa 的垂直运动的发展变化来看，广西地区有一系列较强的对流系统发生（图略）。试验 RHL5 模拟的雨区的范围增大，强度增强（图略），特别是前 12 小时的模拟雨量比控制试验强得多，广西境内的强降水中心与控制试验的落区基本一致，只是强度较强。从每小时的 500 hPa 的垂直运动（图略）的发展来看，控制试验中广西境内发展的强对

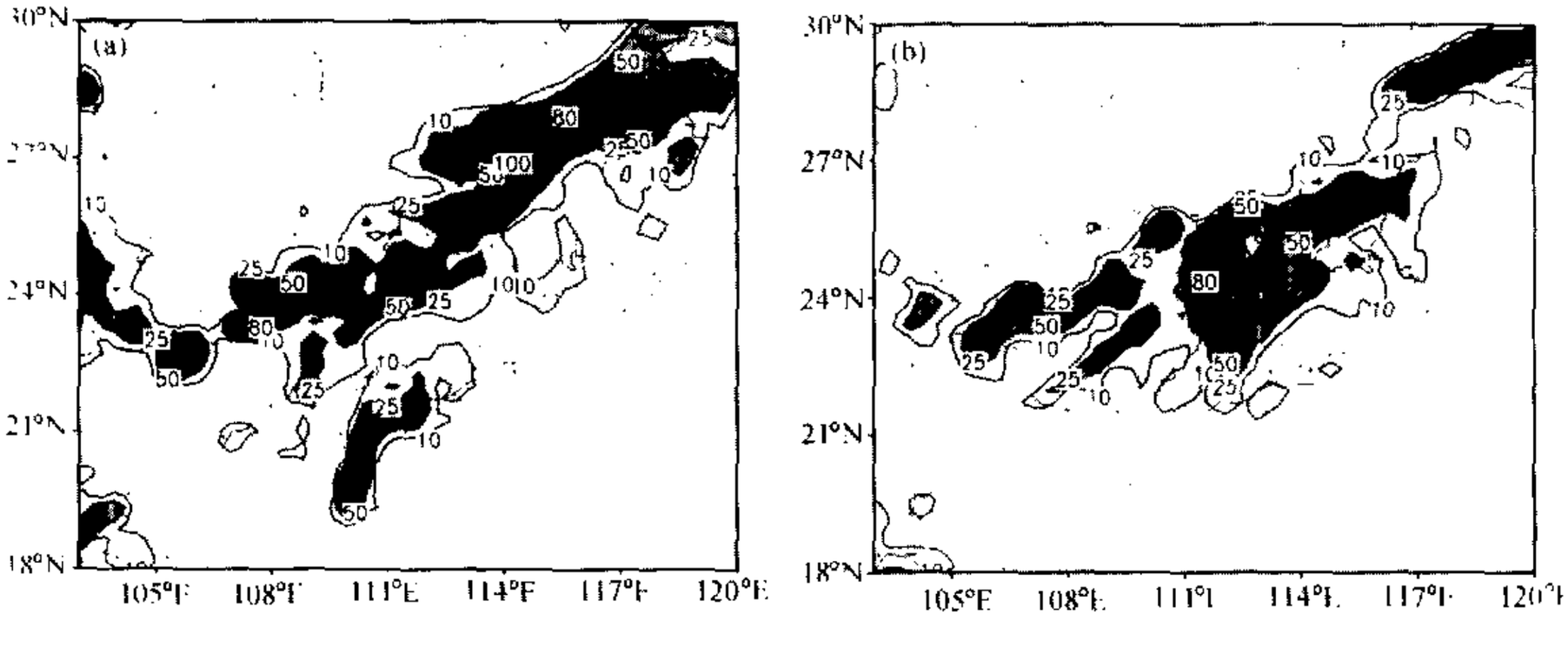

图 6　1994 年 6 月 12 日 12 时～13 日 07 时试验 RHL10 的模拟雨量（单位：mm，整层的湿度场增加 10%）
(a) 12 日 12 时～13 日 00 时；(b) 13 日 00 时～13 日 07 时

流中心，在此试验中也出现了。试验 RHL2 的模拟结果（图略）与控制试验基本一致，只是强降水中心的强度稍强，这说明相对湿度增加 2%，对整个雨带和暴雨中心的模拟影响不大。

将控制试验和湿度场试验的形势场对比发现，虽然在初值中改变了整个积分区域的相对湿度，但随着模式积分时间的增加，相对湿度的分布和大小逐渐和控制试验趋于一致，只是在个别地方有较大的差别（对流发展的地方）。模拟的结果与控制试验相差较大的是风场，而风场差别最大的地方又在辐合线附近。试验 RHS10 减小了初值的相对湿度，随着模拟时间的增加，使辐合线附近的辐合减弱（风场的差值表现为辐合）（图略），再分别分析 U 和 V 的变化，特别是 V 场的变化，发现减小湿度使辐合线南侧的南风减弱，辐合线以北的北风也减弱，因此使辐合线附近的辐合减弱（图 7）。而增加相对湿度的试验 RHL10 却相反，随着模拟时间的增加，使辐合线附近的辐合增强（图略）。

试验表明，湿度场对雨区和雨强的模拟非常重要，由于水汽主要集中在对流层低层，因而下面还将试验对流层低层的湿度场对雨区模拟的重要性。试验 12 初始场 850 hPa 以下各层的相对湿度减小 10%（LRHS10）；试验 13 初始场 850 hPa 以下各层的相对湿度增加 10%（LRHL10）。模拟结果显示，试验 LRHS10（图略）雨带模拟出来，只是强度较弱，强中心较少，广西中北部的强对流系统未模拟出来。试验 LRHL10 模拟的雨区和雨强都较控制试验大（图略），但又比试验 RHL10 弱得多，模拟过程中的强对流系统也比试验 RHL10 少而且弱。因此，低层的湿度场对于正确模拟强对流系统的发生、发展是非常重要的。然而，只改变低层的湿度对雨区和雨强模拟影响比改变整层的湿度场影响弱得多。这些模拟结果表明，中上层湿度场的影响是不可忽视的。下面将在低层湿度场试验的基础上，进一步改变中低层的湿度场。试验 14 初始场在 400 hPa 以下各层的相对湿度减小 10%（MRHS10）；试验 15 初始场 400 hPa 以下各层的相对湿度增加 10%（MRHL10）。模拟结果显示，试验 MRHS10 模拟的雨区和雨强（图略）与试验 RHS10 相似，没有模拟出整条雨带，模拟过程中也无较强对流活动。

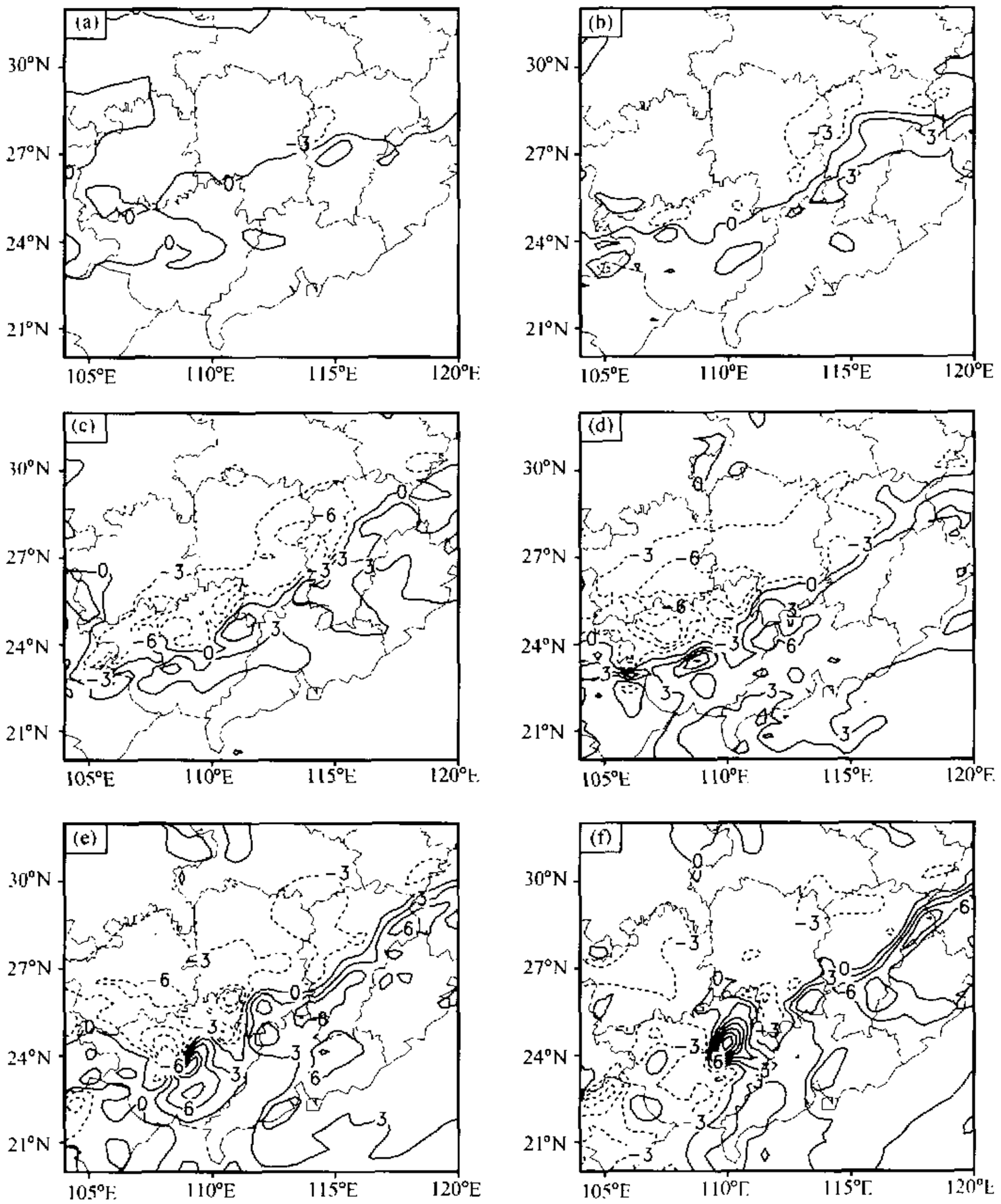

图 7 控制试验的V场与试验 RHS10（整层湿度场减小 10%）的差值（单位：$m\,s^{-1}$）
(a) 12 日 15 时；(b) 12 日 18 时；(c) 12 日 21 时；(d) 13 日 00 时；(e) 12 日 03 时；(f) 13 日 06 时

试验 MRHL10 模拟的雨带和雨强（图略）在 12 日 12 时～13 日 00 时与试验 RHL10 相似，但后期（13 日 00 时～07 时）比试验 RHL10 弱一些。

通过对初始场的相对湿度场试验表明，初始场的湿度分布对降水的模拟是非常重要的，湿度增减 2%左右对强对流系统的发生、发展以及雨区和雨强的模拟影响尚小，超过 5%影响就较大。湿度减小 10%整个雨带缩小，强度减弱，强对流系统不再发生。

增加 10%，则整个雨带增大，强度增加，强对流系统大量发展。根据以上试验的结果，中低层的湿度场对雨区和雨强的模拟影响较大，高层由于水汽较少，影响不是太大。在模式的初值中改变相对湿度场，对模拟结果影响最大的是风场，而对风场影响最大的区域在辐合线附近。

3.2　温度场的作用

试验 16 将整个初始场的 975～850 hPa 的温度减小 2℃（LTTS2）。试验 17 将整个初始场的 975～850 hPa 的温度增加 2℃（LTTL2）。试验 LTTS2 虽然整个雨带模拟出来了，但雨强减弱，强的暴雨中心没有模拟出来（图 8）。整个的模拟过程基本没有较强的对流系统生成。对辐合线附近的风场和有较强对流发展地区的湿度场影响较大，相对控制试验，辐合线附近的风场辐合减弱（图略）。试验 LTTL2 模拟的雨带中出现了许多强暴雨中心（图略），前 12 小时模拟出几个降水超过 100 mm 的强降水中心，后面几小时模拟的降水量超过 50 mm 的强降水中心也有几个。整体看来，此试验模拟的降水强度比控制试验强得多，广西地区的强对流系统无论在数量上还是在强度上都超过了控制试验，且切变线的东段也有较强的对流系统发展。相对控制试验，辐合线附近的风场辐合增强（图略）。

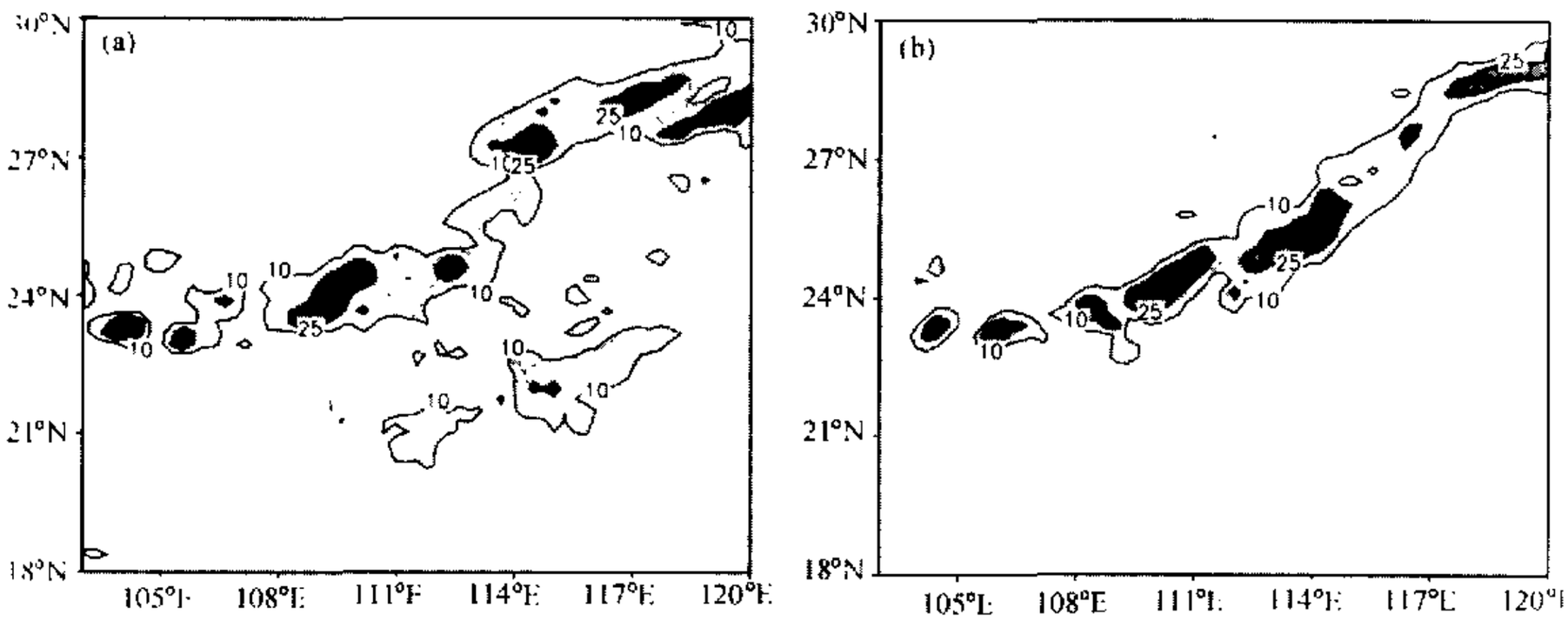

图 8　1994 年 6 月 12 日 12 时～13 日 07 时试验 LTTS2 的模拟雨量（单位：mm）
（a）12 日 12 时～13 日 00 时；（b）13 日 00 时～13 日 07 时

对流层低层的温度场对对流系统的发生、发展过程有较大的影响。减小低层温度后，对流系统的强度明显减弱，增加低层温度，对流系统的强度明显增强。

对对流层低层温度场的试验表明，低层温度场对降水的模拟影响较大，但对流系统要发展起来，与对流层中上层温度场也是有密切关系的，下面将试验对流层中上层温度场对雨带和强对流系统的影响。试验 18 将整个初始场的 850～400 hPa 这几层的温度减小 2℃（MTTS2）；试验 19 将整个初始场的 850～400 hPa 这几层的温度增加 2℃（MTTL2）。

试验 MTTS2 雨带虽然模拟出来，但雨带的宽度缩小，雨强明显减弱（图略），特别是 13 日 00～13 日 07 时段的模拟雨带比控制试验弱得多。广西地区的对流系统发生

后，很快减弱，只维持 3～4 小时，因而没有较强的对流系统发展（图略）。试验 MTTL2 模拟的雨带较控制试验增大，雨强增强，出现较多的强对流中心（图略）。广西地区有尺度较大、强度较强的对流系统发展（图略），这个强对流系统比控制试验范围大，强度强，维持时间长。

试验 20 将整个初始场的 400～100 hPa 这几层的温度减小 2℃（HTTS2）；试验 21 将整个初始场的 400～100 hPa 这几层的温度增加 2℃（HTTL2）。试验 HTTL2 模拟的雨带（图略）比控制试验稍有增强，模拟的广西北部的对流系统的发生、发展过程（图略）与控制试验也较相似，只是对流系统合并的时间提前了两个小时，减弱的时间也较控制试验早了一个小时左右。试验 HTTS2 模拟的雨带（图略）比控制试验稍弱，模拟的广西北部只有一个对流系统发生发展（图略），没有两个系统合并发展的过程，但这一个对流系统的生命史和控制试验基本一致。从试验结果看，改变高层温度场对雨带和强对流的模拟有一定的影响，但相对中低层的影响、高层的影响较小。

4 区域地形对强对流系统发生发展的影响（试验 22～27）

华南地区地形复杂，丘陵起伏，河谷与盆地错落，平原较小。华南地区尺度达数百公里范围的喇叭口地形有两个：珠江三角洲平原和广西北部柳州附近地区。广西西北部为云贵高原的东南侧，东北部为南岭山脉，使桂北成为一个向南开口的喇叭口（图 9），另外，自北向南伸展的驾桥岭和瑶山又把这个大的地形喇叭口分为两个，一个在柳州北面，一个在桂林北面[13]。但华南地区单纯的地形动力抬升产生的暴雨不多，在一定的天气形势下，多数暴雨尤其是大暴雨经常在动力抬升与喇叭口地形收缩结合的情形下产生，暖湿空气吹向开口的喇叭口地形对暴雨生成最有利。

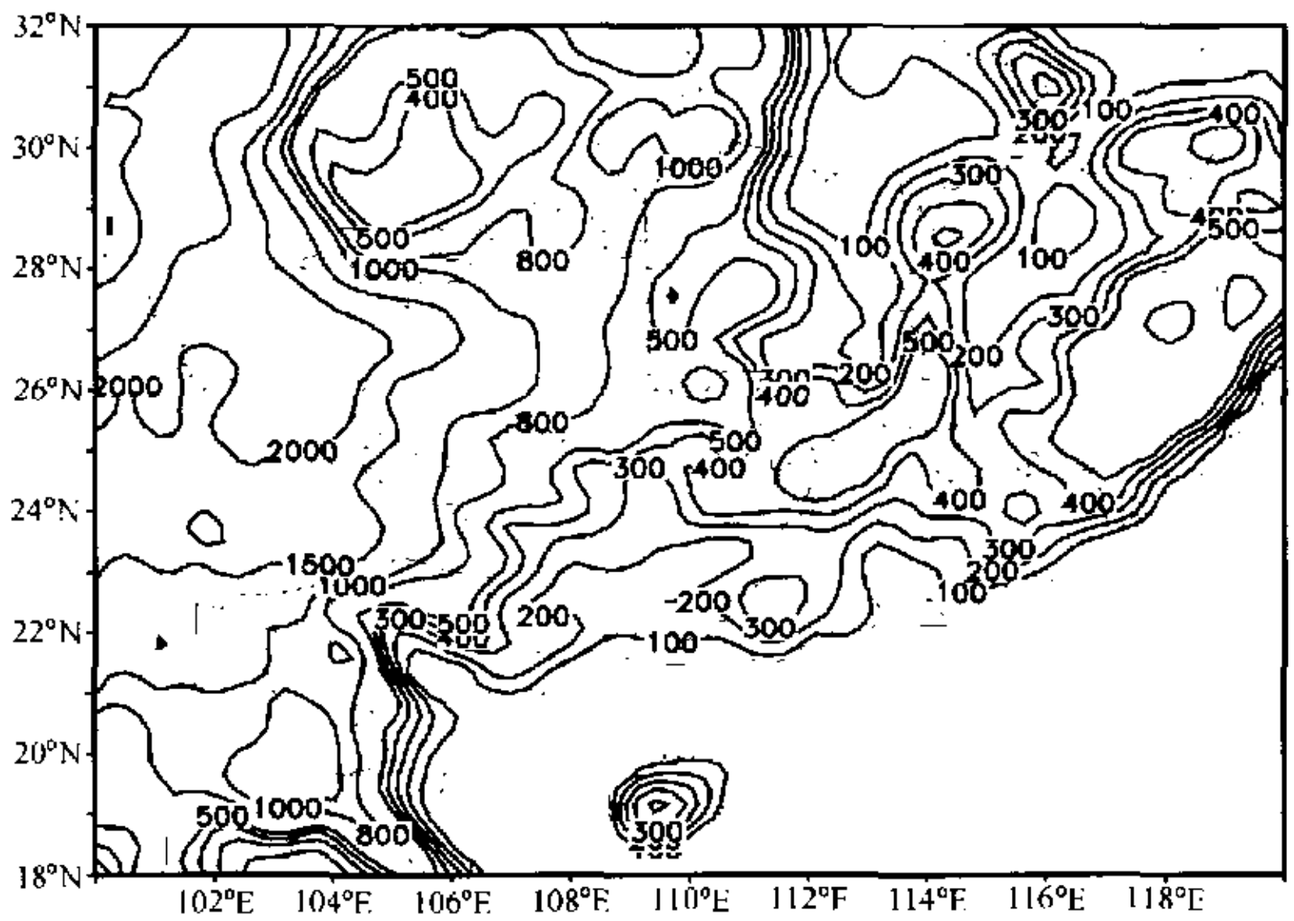

图 9 控制试验的地形

从前面的分析中发现，低层的辐合对于对流系统的形成很重要，那么为什么低层的局地辐合容易在此地生成呢？这可能与广西地区独特的地形有关，分析控制试验中风场的变化，850 hPa 的盛行风场为西南风，当西南风遇到东边和北边的山地时，西南风逐渐转为南风，再加上北方冷空气的侵入（图 10），极易形成气旋式涡旋，当北风减弱时，辐合也减弱。虽然广西北部喇叭口的东北和东面的地形高度较低，但对 850 hPa 的风场影响也较大。对低层 925 hPa 风场（图略），西南风在喇叭口的北部受地形影响转为东南风，到达西面的山地时又转为北风，形成气旋式涡旋，但低层的北风未到达广西地区，而 850 hPa 上北风到达了广西的北部。

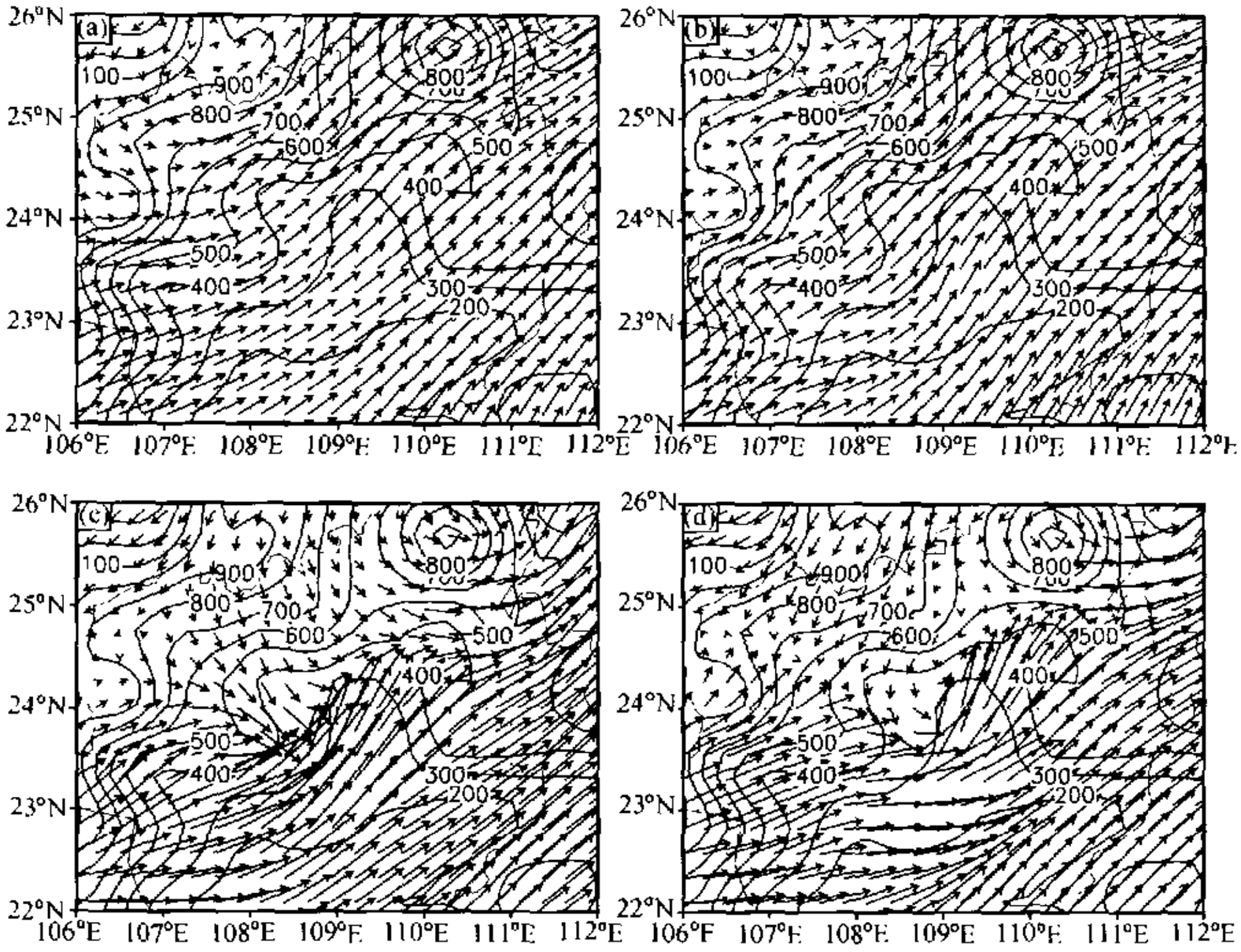

图 10　控制试验模拟的 1994 年 6 月 12～13 日的 850 hPa 风场（等值线为地形高度，单位：m）
（a）12 日 14 时；（b）12 日 16 时；（c）13 日 02 时；（d）13 日 04 时

下面将探讨地形对强对流系统发生、发展的作用，主要采用数值模拟方式，通过对改变地形后的模拟结果的分析来探讨地形的可能影响。主要试验内容见表 3。

一般认为，喇叭口地形的辐合作用对强对流系统的发生、发展有一定的影响。为了试验广西的喇叭口地形对强对流云团的发生、发展过程的影响，设计以下试验。试验 22（TOPN1）将（105～111°E，22～25°N）的地形都降低到 100 m，这样广西北面的喇叭口地形就变成一个矩形的开口，喇叭口对气流的收缩辐合作用就减弱了；试验 23（TOPN2）将（105～116°E，22～25°N）的地形都降低到 100 m，这样广西、广东境内的小地形没有了，只有西面、北面地形对气流的阻挡作用；试验 24（TOPN3）将（105～116°E，22～30°N）的地形都降低到 100 m，广西、广东以及北面的贵州、湖南

表 3 地形对中尺度对流系统影响的试验方案

试验编号	试验名称		试验内容
22	去掉喇叭口地形试验	TOPN1	105～111°E，22～25°N 范围内的地形降低到 100 m
23		TOPN2	105～116°E，22～25°N 范围内的地形降低到 100 m
24		TOPN3	105～116°E，22～30°N 范围内的地形降低到 100 m
25	移动喇叭口试验	TOPMOV	广西北部的喇叭口地形向东挪 3 个经度
26	抬高喇叭口中地形的试验	TOPH1	105～111°E，22～25°N 范围的低于 400 m 的地形都抬升到 400 m
27		TOPH2	105～111°E，22～25°N 范围的低于 600 m 的地形都抬升到 600 m

和江西境内的小地形没有了，这个试验进一步将北面的地形的阻挡作用减小，对广西地区来说，北面地形的阻挡作用也不存在了。

试验（TOPN1）模拟的降水（图略）与控制试验对比，未改变地形的东部地区模拟的降水，与控制试验基本一致。但改变了地形的西部地区，降水的分布发生了很大的变化，西边靠近高原地区由于地形梯度较大形成了较大的虚假降水，北边由于在 25°N 形成了一个 500 m 高的地形就对水汽的向北输送有较大的影响，强降水发生在 25°N 以南。控制试验中 13 日位于广西中北部的强降水中心已位于广西的东部，降水强度基本与控制试验的强度相近。广西地区对流系统的发展过程（图略）有较大的差异，12 日 23 时在（109.0°E，23.7°N）有一个较强的垂直运动区出现（大于 1 $m\,s^{-1}$），以后该系统的上升运动没有加强，但尺度增大了，13 日 04 时减弱消亡，此系统的强度没有控制试验强。试验 TOPN2（图略）和试验 TOPN3（图略）的模拟结果与试验 TOPN1 相似，与 TOPN1 比较，试验 TOPN2 和 TOPN3 的地形改变对广西对流系统的影响不大，只是对强度稍有改变。

试验 25（TOPMOV）将广西北部的喇叭口地形向东挪动 3 个经度，位于广东、广西的交界处。模拟结果（图 11）广西地区的强降水中心也向东移动，正好位于新的喇叭口地形中。分析对流系统的演变，即 500 hPa 的垂直运动（图略），在新形成的

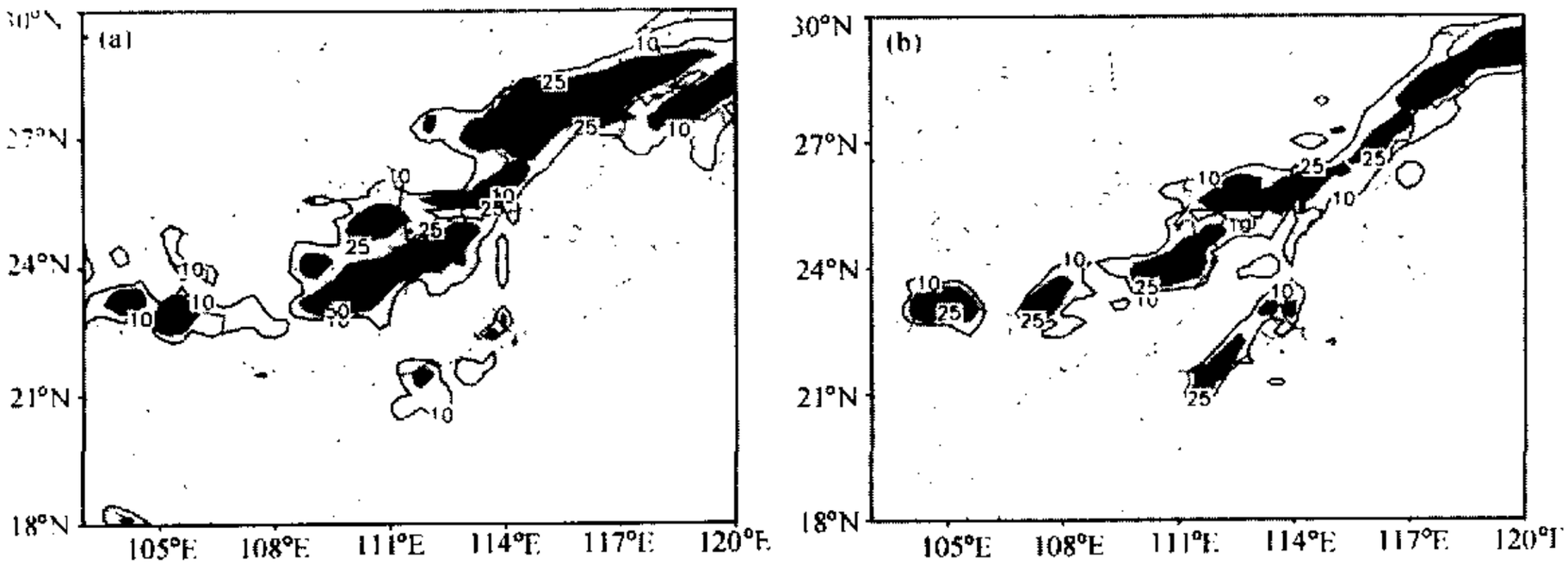

图 11 地形试验 TOPMOV 模拟的降水（单位：mm）
（a）12 日 12 时～13 日 00 时；（b）13 日 00 时～13 日 07 时

喇叭口中有较强的对流活动。由此可见，在一定的天气形势下，这种喇叭口地形对强对流系统的发生、发展有较明显的作用。

试验 26（TOPH1）将指定区域（105～111°E，22～25°N）的低于 400 m 的地形都抬升到 400 m，试验 27（TOPH2）将（105～111°E，22～25°N）的低于 600 m 的地形都抬升到 600 m，这种地形分布基本保持了广西北部的喇叭口形状，只是将中间的地形抬高。试验 TOPH1（图略）和试验 TOPH2 模拟的降水（图略）和广西地区的对流系统发生、发展过程与控制试验基本相似，说明只要保持了地形的喇叭口形状，地形改变对对流系统的发生、发展影响不太明显。

通过以上试验表明，较大范围整体地形的改变对大尺度的雨带分布影响不大，主要是对大暴雨的强度和落区有影响。即地形虽然有一定的影响，但决定因素还是气象背景环境场，地形实际起到了增幅的作用。

5　结论

本文通过对物理过程、初始环境场以及地形对华南"94·6"暴雨的雨带和中尺度对流系统影响的研究，获得如下看法：

（1）潜热释放对强对流系统发生、发展都有重要的作用。去掉潜热后，没有强对流系统生成，对流发展起来后，如无潜热的作用，系统也会迅速减弱。这说明潜热释放和反馈，有利于强对流系统的产生和维持。

（2）行星边界层过程对低层水汽的辐合及位势不稳定层结的建立与维持有影响，尤其是在对流的发生阶段更为明显，而对发展的影响似乎还不大。地面感热和潜热通量对对流系统的强度有影响。

（3）初始环境温湿场的试验表明，湿度场的改变会很明显地影响模拟结果，温度场的影响次之。因此，对降水和强对流系统的模拟，至少是对华南这样低纬度地区的对流系统的模拟来说，比较精确的初始湿度场和温度场是重要的。

（4）中尺度地形的改变对大尺度的雨带影响不是很大，表明决定暴雨是否发生的主要因子仍是大尺度的气象环境场。然而，中尺度地形尤其是喇叭口地形对强暴雨的强度和落区有一定的影响，对华南"94·6"暴雨有明显的增幅作用。

致谢：周晓平研究员、许焕斌研究员对本项研究工作提出宝贵的意见和建议，谨此致谢。

参 考 文 献

1　孙建华、赵思雄，华南"94·6"特大暴雨的中尺度对流系统及其环境场研究　I. 引发暴雨的β中尺度对流系统的数值模拟研究，大气科学，*2002*, **26**(4), 541～557.

2　Zhang, D.-L. and J. M. Fritsch, A case study of the sensitivity of numerical simulation of mesoscale convective system to varying initial condition, *Mon. Wea. Rev.*, 1986, **114**, 2418～2430.

3　Zhang, D.-L., The effect of parameterized ice microphysics on the simulation of vortex circulation with a mesoscale hydrostatic model, *Tellus*, 1989, **41**A, 132～147.

4　陶诗言、丁一汇、周晓平，暴雨对强对流天气的研究，大气科学，1979, 3(3), 227～238.

5 Anthes, R. A., Y. H. Kuo, S. G. Benjamin and Y.-F. Li, The evolution of the mesoscale environment of severe local storms, Preliminary modeling results, *Mon. Wea. Rev.*, 1982, **110**, 1187～1213.
6 Kuo, Y.-H. and L.-N. Simon, Prediction of nine explosive cyclones over western Atlantic Ocean with a Regional Model, *Mon. Wea. Rev.*, 1990, **118**(1), 3～25.
7 Pielke, R. A., *Mesoscale Meteorological Modeling*, New York: Academic Press, 1984, 612pp.
8 Benjamin, S. G. and T. N. Carlson, Some effects of surface heating and topography on the regional severe storm environment. Part I: Three-dimensional simulation, *Mon. Wea. Rev.*, 1986, **114**, 307～329.
9 Doneaud, A. A., J. R. Miller, Jr., D. L. Priegnitz and L. Viswanath, Surface mesoscale features as potential storm predictors in the Northern Great Plains-two case studies, *Mon. Wea. Rev.*, 1983, **111**, 273～192.
10 Garret, A. J., A parameter study of interactions between convective clouds, the convective boundary layer, and a forested surface, *Mon. Wea. Rev.*, 1982, **110**, 1041～1059.
11 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**, 381～392.
12 梁志和，边界层对"94·6"广西特大暴雨的作用，1994年华南特大暴雨洪涝学术研讨会论文集，北京：气象出版社，1996, 81～86.
13 《华南前汛期暴雨》编写组，华南前汛期暴雨，广州：广东科技出版社，1986, 119pp.

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

Sun Jianhua and Zhao Sixiong

(*Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100029)

Abstract In the first part of this study, a case (12 June～13 June, 1994) was selected for a deep study. Due to successful simulations of cloud water and vertical motion, the shear line and the meso-β systems along it are studied by using the model output data. In this part of study, the physical processes, initial environmental fields and topography, which are related to the heavy rainfall, are tested by using numerical model. The results show that latent heat can affect the triggering and developing of strong convective systems. Sensible heat flux, latent heat flux and PBL process also affect the developing of strong convective systems. The effects of large scale environmental fields on simulation of the strong heavy rainfall are tested by modifying the relative humidity and temperature of initial field. The effect of the relative humidity, especially at the low level, is the most significant to simulation of the strong convective systems. The effect of temperature of initial field is smaller than that of humidity field. The results of topography experiments show that topography seems to be not important to simulation of large-scale rain belts when its height is modified. However, the effect of the "trumpet"-shaped topography in the north of Guangxi Autonomous Region, is very important to simulation of the strong heavy rainfall.

Key words: meso-β convective system; numerical simulation; physical process