

低纬高原地形对强降水过程影响的数值试验研究

董海萍¹ 赵思雄² 曾庆存²

¹ 空军气象中心, 北京 100843

² 中国科学院大气物理研究所国际气候环境中心, 北京 100029

摘要 在对云南2001年5月31日~6月2日的强降水过程较为真实模拟的基础上, 对云南特有的地形对此次强降水过程的影响进行了对比试验。结果表明: 红河河谷的喇叭口地形结构对此次云南强降水的落区和降水强度都有着不可忽视的作用, 它不但能改变近地层气流的走向, 而且对低层水汽通量散度分布也有一定的影响; 同时, 改变云南南部地形对此次强降水过程的气流走向和水汽分布也都有影响, 但相对而言不如红河河谷的作用显著; 而降低云南东北部地形, 则使云南北部的近地层气流辐合线发生变化, 它主要对此次云南北部地区的降水产生影响, 但对该地区水汽输送影响不大。

关键词 低纬高原地形 强降水 数值模拟 对比试验

文章编号 1006-9585 (2007) 03-0381-16 **中图分类号** P **文献标识码** A

A Numerical Simulation of Topography on Heavy Rainfall in Lower Latitude Plateau

DONG Hai-Ping¹, ZHAO Si-Xiong², and ZENG Qing-Cun²

¹ Air Force Meteorological Center, Beijing 100843

² Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Abstract On the basis of successful simulations of a heavy rainfall, there existed probability though the numerical simulations to study the special topography of Yunnan in heavy rainfall. It is noticed that the trumpet-shape topography of the Red River played important role in the influence on intensity and distribution of heavy rainfall. The topography in south Yunnan also influenced to the pattern of air current and the distribution of water vapor, even the influence was weaker than that of Red River estuary. The reduction of the topography in northeastern Yunnan would change the convergence line, however, the influence was only in the central and north Yunnan, and it was no obvious influence to the water vapor transportation.

Key words topography in lower latitude plateau, heavy rainfall, numerical simulation, comparative experiments

1 引言

暴雨与地形有着密切的关系^[1], 大尺度环境条件不仅制约强降水的性质和演变过程, 而且还影响中尺度对流内部的结构、强度、运动

和组织程度。历史上一些特大暴雨就发生在特定的环境地形下^[2], 因此在局地暴雨的研究中, 地形的影响一直受到关注。Spren^[3]利用地形的高度、坡度等作为预报因子, 解释了落基山脉地区平均年降水量88%的方差; Danard^[4]的研究进一步证实了利用地形特征预报山区降水量

收稿日期 2007-03-27 收到, 2007-04-20 收到修定稿

资助项目 国家重点基础发展规划项目 2004CB418301 和国家自然科学基金资助项目 40233027

作者简介 董海萍, 女, 1965年出生, 博士, 工程师, 主要从事中尺度强对流天气研究。E-mail: donghaiping@mail.iap.ac.cn

的有效性。我国气象工作者也很早就地形对大气环流和天气的影响进行了研究^[5~8]。近期的各种观测和研究表明^[9,10],山脉对大气有重要的影响,大地形影响着天气尺度的环流形势,而一些局地地形也成为激发中小尺度对流产生的原因。并且近几年研究人员对喇叭口地形所引起的强降水也十分关注^[11~13]。一些模拟试验^[14~18]也证实了山脉迎风坡的强迫抬升作用,喇叭口地形的辐合作用,以及地形通过影响某些物理过程对降水产生增幅作用等,从而对强降水的落区及降水量产生影响。

云南是我国仅次于青藏高原的第二大高原。云贵高原的主体(图1),其山地面积约占全省总面积的90%(左右),地势呈西北高,东南低,自北向南呈阶梯状逐级下降。西部是著名的横断山脉,呈西北-东南走向,平均高度大多在3 000 m以上,来自其西南方的暖湿气流常与之呈正交之势,由于西南气流非常潮湿,层结不稳定,遇到横断山脉这样陡峭的地形,强迫抬升作用使气流的上升运动加剧,致使大量水汽凝结。东部为滇东、滇中高原,是云贵高原的主体,地势波状起伏,平均海拔2 000 m,来自东北方的冷空气常受其阻挡而绕流南下。只有在南部、西南部边境地区,地势逐渐平缓,河谷开阔,一般海拔在1 500~2 200 m左右,并且有多个喇叭口地形。如在滇南李仙江的左侧是无量山,右侧是哀牢山,从南往

北两山之间距离愈来愈窄,是一标准的开口向南的喇叭口地形,受其影响,偏南暖湿气流被明显的辐合抬升,热带降水系统多滞留且雨量增多;另外,云南东南部红河入口区的喇叭口地形也对气流有辐合抬升作用。就云南地区平均而言,每年到5月下旬降水量迅速增加,大雨和暴雨开始出现。从历年云南暴雨的频率和强度来看,它不像我国东部那样出现大范围的洪水,降水强度相对小一些。但由于其地形复杂,且暴雨和洪涝多为局地性,洪涝快速、猛烈,短时间造成很大损失的事件时有发生。因此在讨论云南降水时,地形是一个重要的影响因子。但目前关于云南地形对暴雨影响作用的研究还很少,并且由于云南地形分布相当复杂,在数值试验中要完全孤立出“纯粹”的中尺度地形对暴雨的影响又是十分困难的,因而需要开展这方面的研究。

本文是在对云南一次强降水过程已进行较为详细的诊断分析的基础上^[20],利用中尺度模式MM5对云南特有的地形,对此次强降水过程的影响做进一步的分析研究,从而对低纬高原复杂地形对强降水发生发展的影响机制有一了解。

2 强降水的分布特征及地形的可能影响

2001年5月31日0时~6月2日0时(世界时,以下同),云南的中部至南部发生了一次强降水过程。这次强降水过程发生在印缅槽较为稳定地维持于90°E附近,而同时又有东亚冷槽东移南压的环境场中,此种形势非常有利于暖湿气流从云南的西南部输入及冷空气不断南下,致使冷暖空气在云南地区汇合,造成强降水的发生^[20]。从24 h的累计降水分布可看到(图2),5月31日0时~6月1日0时的强降水中心位于云南中部25°N,亦是南部暖湿气流向北输送至地势较高的位置,并且降水有向其东南方红河河谷延伸的趋势,在红河河谷上有一40 mm的降水中心,说明降水有沿红河河谷走向的特征(图2a);而6月1日0时~6月2日0时的降水则基本位于25°N以南地势较低且平坦的区域(图2b)。由此可见,降水的局地性较强,这除了与冷暖空气的势力对峙有关外,是否与云南地区特殊的地形特征

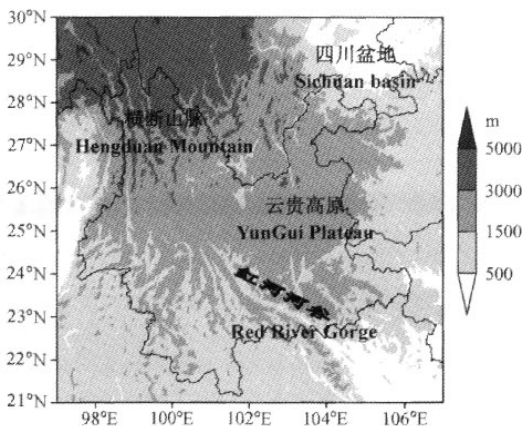


图1 云南及其周边地形

Fig. 1 Terrain in Yunnan, China

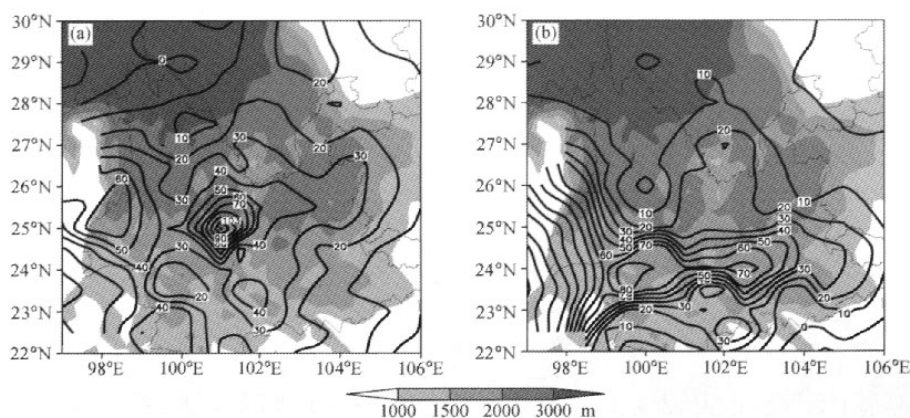


图2 5月31日~6月2日暴雨累计降水量(单位:mm);(a)5月31日0时~6月1日0时;(b)6月1日0时~6月2日0时

Fig. 2 The precipitation amount (units, mm); (a) 0000 UTC 31 May to 0000 UTC 1 Jun; (b) 0000 UTC 1 Jun to 0000 UTC 2 Jun

有关呢?

对此次强降水过程的诊断分析可知^[20],当云南地区维持有利的大尺度环流形势时,其独特的地形地貌使近地层经常会有一些中尺度辐合线生成。如当北部冷空气向南扩散时,由于青藏高原的地形阻挡,冷空气沿高原的东南侧经四川盆地南下,在冷空气较为偏北时,可能沿着四川与云南间的低谷进入云南,并与东南气流形成东西向的辐合线;随着冷空气的东移南下,由于云贵高原的阻挡,冷空气则由云南东南部地势较低处侵入云南,并易在红河河谷引起辐合线生成(见文献[20]中的图7)。与此同时,当孟加拉湾与印地区有低槽产生和发展时,西南暖湿气流明显,为对流云团的产生和发展提供必要的水汽和不稳定能量。从卫星红外云图上可清楚地看到(见文献[20]中的图8a),在云南的西南部不断有对流云团移入,并几乎在同一地区,即在上述两条辐合线的交汇区移动减慢,甚至停滞少动并加强发展,引发某一地区强降水的产生。从此次暴雨过程中的雨团活动特征也可知(见文献[20]中的表1),雨团基本上在辐合线的交汇区产生、增强,直至减弱,移动范围较小,并且降水具有典型的 β 中尺度的特点,这非常有利于在局部地区产生强降水。由此可见,虽然大尺度系统为云南强降水的产生提供了有利的环流形势,但局地强降水却是由低层辐合线及它们间的相互作用诱生出的一些中尺度系统所致,而辐合线的形成和维持则与

云南特有的地形地貌密切相关。

3 数值试验方案及结果

为进一步了解云南地形特征对此次强降水的影响,利用中尺度模式MM5V3.6非静力版^[21,22]对此次强降水过程进行了数值模拟。由于2天内的降水中心分别在云南的不同区域形成,且主要由分别发生在5月31日7时~18时和6月1日19时~2日1时两时段内的强降水造成(见文献[20]中的表1),因此模拟时段分别选为2001年5月30日12时~6月1日0时和2001年5月31日12时~6月2日0时,各36h。

模拟方案选取二层嵌套,内外区格距分别为10和30 km,中心点分别为(25°N, 101°E)和(25°N, 95°E),地形分别采用5'×5'和10'×10'的数据,粗细格点数分别为91×91和153×153,垂直分辨率为23层;初估场资料为在NCEP每6h一次的1°×1°的格点资料基础上,加入实时的常规探空(0时和12时)和地面(每3h)观测资料;采用张弛逼近侧边界条件;主要物理过程为显式水汽-混合冰相方案,MRP高分辨行星边界层方案,云辐射方案,积云对流参数化外区采用Kain-Fritsch,内区为Grell;又采用Noah Land-Surface Model土壤模式;四维同化为牛顿张弛方案。下面只利用粗网格区域的模拟结果做进一步的分析,这主要是由于云南地形较为复杂,致使

细网格区域的降水模拟结果有一些虚假现象,有待进一步改进。

从模拟 2 天的 24 h 降水量可看到 (图 3), 模拟结果与实际观测量较为一致。5 月 31 日 0 时~6 月 1 日 0 时云南中部、南部和西部的较强降水中心都模拟出来 (图 3a), 特别是云南中部 80 mm 的降水中心和东南部 40 mm 的降水中心的位置和强度与实际结果较一致, 而 6 月 1 日 0 时~6 月 2 日 0 时云南南部的两较强降水中心的位置也与实际结果相符, 只是降水的强度较实际略偏弱 (图 3b)。

从上节的资料分析可知, 降水雨团的产生似乎与云南近地层中尺度辐合线的扰动密切相关, 强降水的落区基本位于两辐合线的交汇处, 而其中一条辐合线与云南的地形特征相关联, 即降水的分布与云南特有的地形特征有关。模拟的近地面层 (地面上 10 m) 流线图 (图 4) 基本反映了实际近地面层的流线分布 (见文献 [20] 中的图 7)。云南北部由于冷暖空气交汇, 形成一条东西向的辐合线, 同时, 随着印缅槽的形成和发展, 沿红河河谷也有一条辐合线产生和维持。

从模拟的水汽通量和水汽通量散度在 750 hPa 上的演变可看到 (图 5), 模拟的水汽输送情况也较好地再现了水汽演变状况 (与文献 [20] 中的图 10 比较)。如在 5 月 30 日 12 时, 模拟的云南

及其周边的水汽通量散度与实际一致, 在云南中部有 $-4 \times 10^{-7} \text{ g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1}$ 的水汽通量散度负值中心, 相对应在云南中部有强降水的发生发展; 至 5 月 31 日 0 时, 随着印缅槽的加深, 沿着孟加拉湾东海岸的西南暖湿气流加强, 有 2 支暖湿气流在云南的中部汇合, 这与实际的水汽演变一致; 至 6 月 2 日 0 时, 孟加拉湾的暖湿气流转为偏西并有加强趋势, 致使云南境内的水汽辐合区南移并加强, 因而云南南部有较强降水产生。

4 云南地形对强降水影响的试验分析

陶诗言^[1]指出, 地形引起的垂直上升运动使得对流发展, 引发降水, 造成不稳定能量释放, 这可能是中小尺度和强对流系统的触发机制。同时, 地形对降水的作用主要在于一个降水系统移近山区时, 可以使原来没有降水的天气系统开始出现降水, 而使有降水的天气系统中雨量的分布变得很不均匀。从云南及其临近地区的地势分布特征可清楚地看到 (图 1), 在云南的南部, 有几个类似于喇叭口的地形区, 其中沿红河河谷, 即从越南进入我国云南的呈东南-西北向的喇叭口地形特征最为显著。而喇叭口地形 (或马蹄型地形)

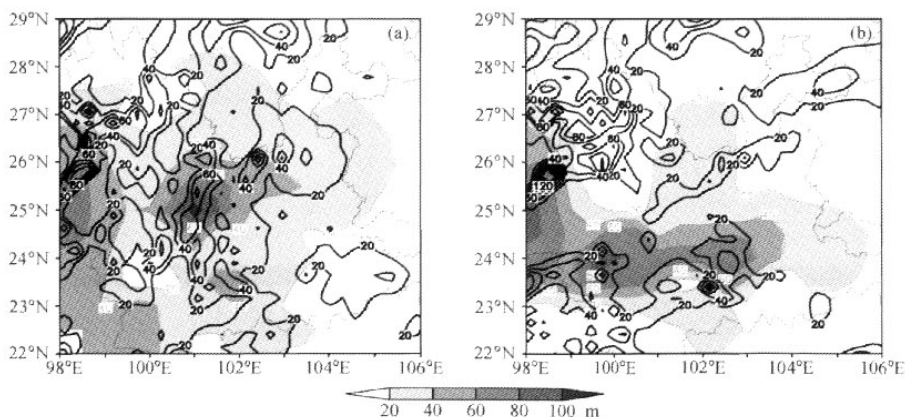


图 3 降水过程中模拟 (水平网格距, 30 km) 的 24 h 降水与实况对比 (单位: mm); (实线: 模拟, 阴影: 实况; 间隔 20 mm); (a) 5 月 31 日 0 时~6 月 1 日 0 时; (b) 6 月 1 日 0 时~6 月 2 日 0 时

Fig. 3 The comparison between simulated (solid line) and observed (shaded area and broken line) precipitation amount (units, mm, at interval of 20 mm). (a) 0000 UTC 31 May to 0000 UTC 1 Jun; (b) 0000 UTC 1 Jun to 0000 UTC 2 Jun

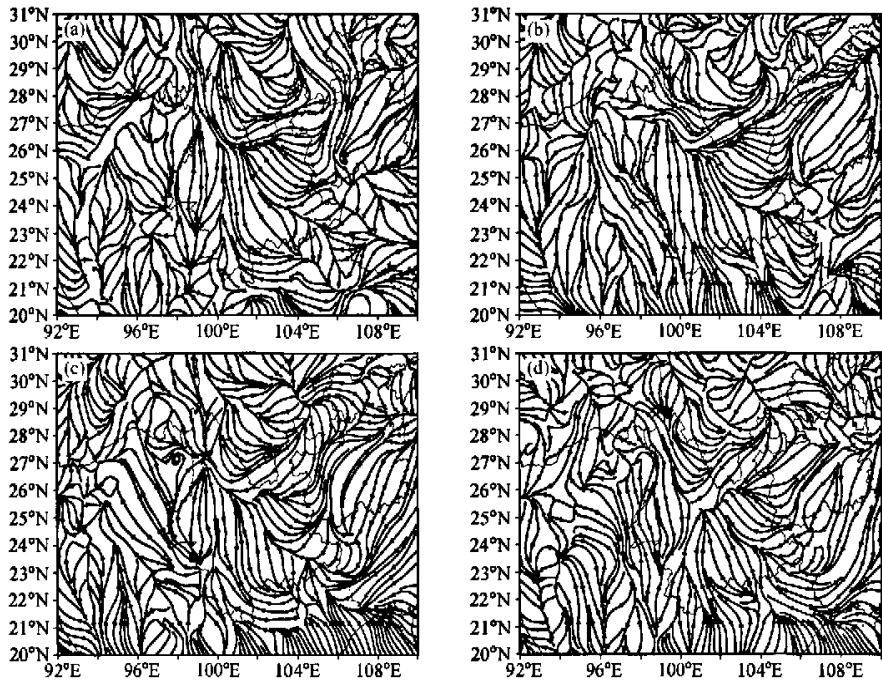


图 4 近地层（地面上 10 m）流线模拟：(a) 5 月 31 日 12 时；(b) 6 月 1 日 0 时；(c) 6 月 1 日 12 时；(d) 6 月 2 日 0 时

Fig. 4 The simulated streamline at 10 m above ground. (a) 1200 UTC 31 May, (b) 0000 UTC 1 Jun, (c) 1200 UTC 1 Jun, (d) 0000 UTC 2 Jun

对于低空气流有明显的辐合抬升作用，在这类地区降水天气系统常呈停滞状态，且有雨量增强的现象，在特大暴雨出现时，有不少是与这类地形有关^[1]。为进一步分析云南地区红河河谷、南部地形对暖湿空气的作用，以及东北部地形对冷空气的阻挡等，设计了如下一些试验方案（表 1）。

为了与完全保持云南较真实地形的模拟结果对比，将图 3 作为对照试验结果。图 6a 和 6b 是将模拟区域（22~24.5°N，101~104.5°E）范围内的地形高度降为 1 000 m 时粗、细网格区域的地形高度，这样红河河谷的喇叭口地形就改变成

为一个矩形开口，喇叭口对气流的收缩辐合作用减弱；而图 6c 是将区域（22~24.5°N，101~104.5°E）范围内低于 1 500 m 的高度都抬升为 1 500 m，此时红河河谷的喇叭口地形作用消失了；我们试图用这两组试验来探讨红河河谷对此次强降水所产生的作用。图 6d 和 6e 是分别将（22~24.5°N，97~104.5°E）范围内大于 1 000 m 的高度都降为 1 000 m 和低于 1 500 m 的高度都抬升为 1 500 m，以此来了解云南南部地形的改变对环流形势和降水产生的影响，从而也可观察云南南部其余几个喇叭口地形的消失对此次强降水的作用。

表 1 地形影响的对比试验方案

Table 1 Comparison of different topography scheme experiments

试验	名称	方案
1	削减红河喇叭口地形 TOPN	将（22~24.5°N，101~104.5°E）范围内的高度都设为 1 000 m
2	抬高红河喇叭口地形 TOPH	将（22~24.5°N，101~104.5°E）范围内低于 1 500 m 的高度抬升为 1 500 m
3	降低云南南部地形 TOPSN	将（22~24.5°N，97~104.5°E）范围内大于 1 000 m 的高度降为 1 000 m
4	抬高云南南部地形 TOPSH	将（22~24.5°N，97~104.5°E）范围内低于 1 500 m 的高度抬升为 1 500 m
5	降低云南东北部地形 TOPEN	将（24.5~28°N，101~105.5°E）范围内大于 1 000 m 的高度降为 1 000 m

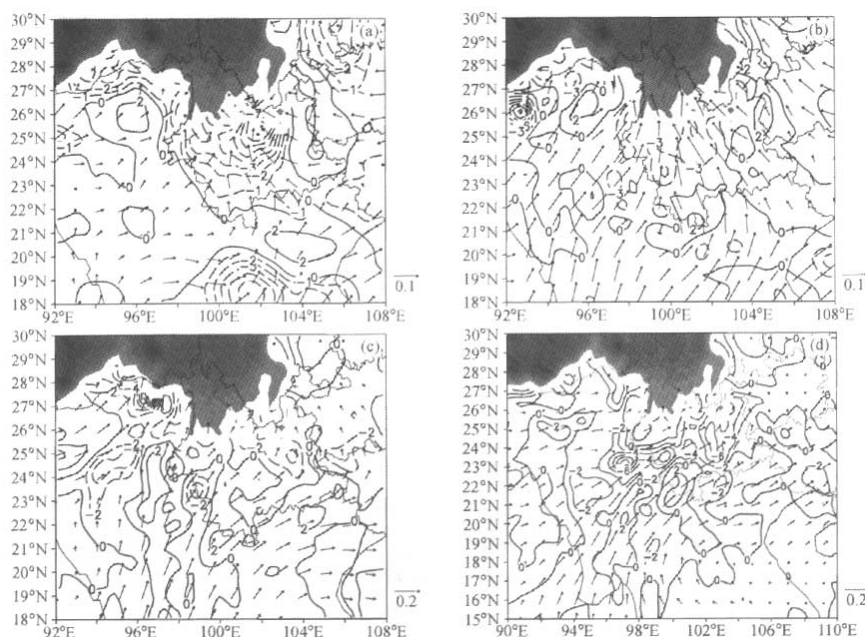


图 5 750 hPa 水汽通量模拟 (矢量箭头, 单位: $\text{g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1}$) 及水汽通量散度模拟 (单位: $10^{-7} \text{g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1}$) (阴影区高度大于 2500 m), (a) 5 月 30 日 12 时; (b) 5 月 31 日 0 时; (c) 6 月 1 日 0 时; (d) 6 月 2 日 0 时

Fig. 5 Simulated Moisture Flux (MF) (showed by vector, units, $\text{g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1}$) and divergence of MF (units, $10^{-7} \text{g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1}$, Shaded area is the terrain higher than 2500 m) at 750 hPa; (a) 1200 UTC 30 May; (b) 0000 UTC 31 May; (c) 0000 UTC 1 Jun; (d) 0000 UTC 2 Jun

图 6f 是将 (24.5~28°N, 101~105.5°E) 范围内大于 1000 m 的高度都降为 1000 m, 以此来观察当云贵高原的北部地形降低后, 来自北部影响云南的冷空气的走向是否会由此改变, 进而会影响到云南降水的强度和落区。

4.1 红河喇叭口地形的影响

喇叭口地形产生暴雨的有利条件与低空风的风向风速有关^[1], 它要求流入谷地气流的风向与喇叭口地形的开口方向正交, 风速较大, 以及近地面风速随高度增大, 使地形引起的水平辐合值在近地面层维持一个较大的值。从云南的地形特征可见 (图 1), 红河喇叭口地形走向为西北-东南向, 而进入云南的暖湿气流为西南向, 与红河喇叭口呈正交; 同时, 700 hPa 以下近地面的西南风速也是随高度增大的 (图略)。因此, 红河河谷的喇叭口地形对此次强降水有较明显的影响。这亦表现在此次强降水过程中, 近地层沿红河河谷长

期维持一气流辐合线, 它使得中尺度低涡由附近地区移入, 可叠加在地形切变线上; 或在有利的大尺度环流形势下, 冷暖气流在辐合线附近交汇时, 中尺度系统得到产生和发展, 由此引发暴雨。

4.1.1 削减红河喇叭口地形

将红河河谷的喇叭口地形变为一个矩形开口后, 喇叭口对气流的辐合作用被削减。从试验 TOPN 模拟的降水 (图 7) 与对照试验 (图 3) 的对比可看到, 在地形未被改变的云南的北部和西部地区的降水模拟结果, 与对照试验中的降水基本一致, 只是强度有所变化, 但地形被改变地区的降水结果却变化较大, 其中 5 月 31 日 0 时~6 月 1 日 0 时沿红河河谷的降水区域未模拟出来, 并且以 (25.5°N, 101°E) 为中心的降水区域也未模拟出来; 同样, 6 月 1 日 0 时~6 月 2 日 0 时的南部雨带虽模拟出来, 但以 (23.5°N, 102°E) 为中心的降水区域略有西移, 且强度也减弱。

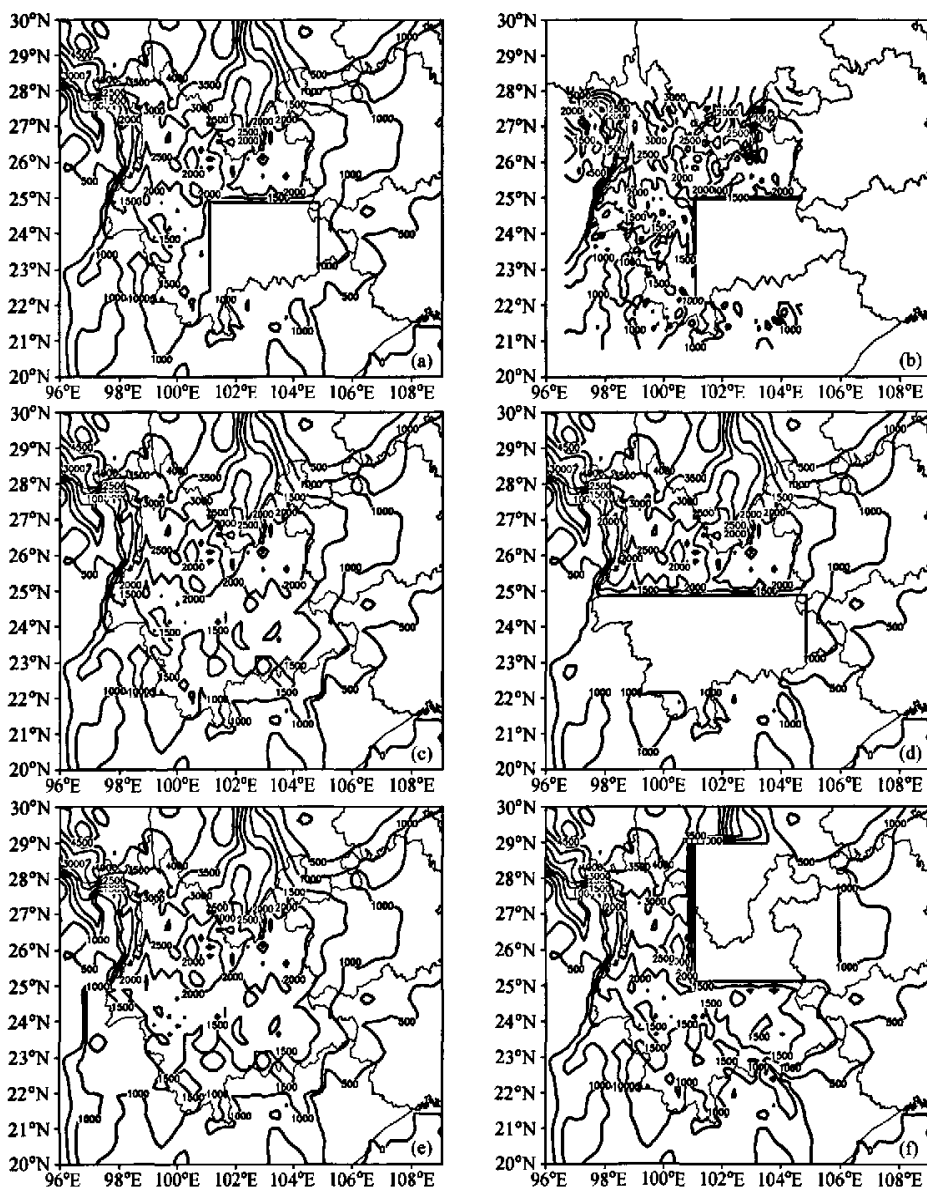


图6 地形对比试验中各方案的地形分布(单位:m): (a)模拟试验 TOPN 中外区云南的地形; (b)模拟试验 TOPN 中内区云南的地形; (c)模拟试验 TOPH 中外区云南的地形; (d)模拟试验 TOPSN 中外区云南的地形; (e)模拟试验 TOPSH 中外区云南的地形; (f)模拟试验 TOPEN 中外区云南的地形

Fig. 6 The terrain distribution in the various experiments (units: m): (a) exterior terrain area in experiment TOPN; (b) interior terrain area in experiment TOPN; (c) terrain in experiment TOPH; (d) terrain in experiment TOPSN; (e) terrain in experiment TOPSH; (f) terrain in experiment TOPEN

分析一下为什么会有这样的结果。从近地层流线图(图8)可看到,5月31日12时(图8a),云南北部沿26°N的东西向气流辐合线仍存在,但沿红河河谷从东南流向西北的气流辐合线消失,

而变为从东到西的较为平直的气流,并没有气流的辐合,且在地形改变部分的北端还出现了气流的辐散。至6月1日0时(图8b),由于印缅槽的加深和副高的西伸北抬,使云南南部的偏南气流

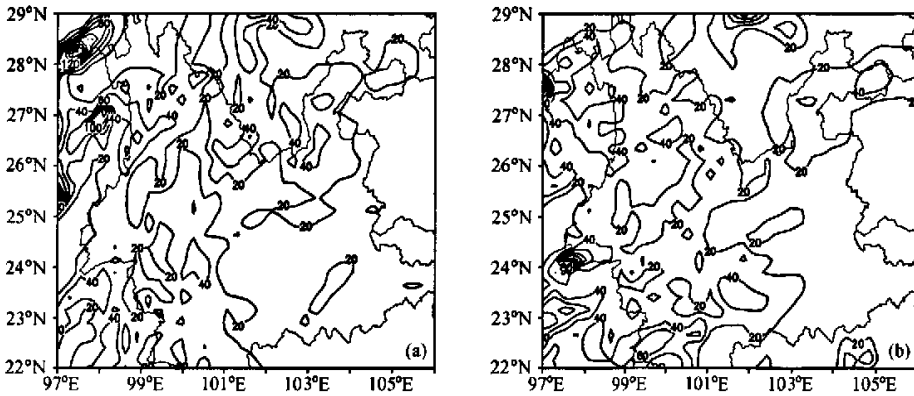


图7 外区模拟的降水分布(单位: mm, 地形 TOPN 试验); (a) 5月31日0时~6月1日0时; (b) 2001年6月1日0时~6月2日0时

Fig. 7 The precipitation distribution in simulated experiment in the outer region. (units, mm, TOPN); (a) 0000 UTC 31 May—0000 UTC 1 Jun; (b) 0000 UTC 1 Jun—0000 UTC 2 Jun

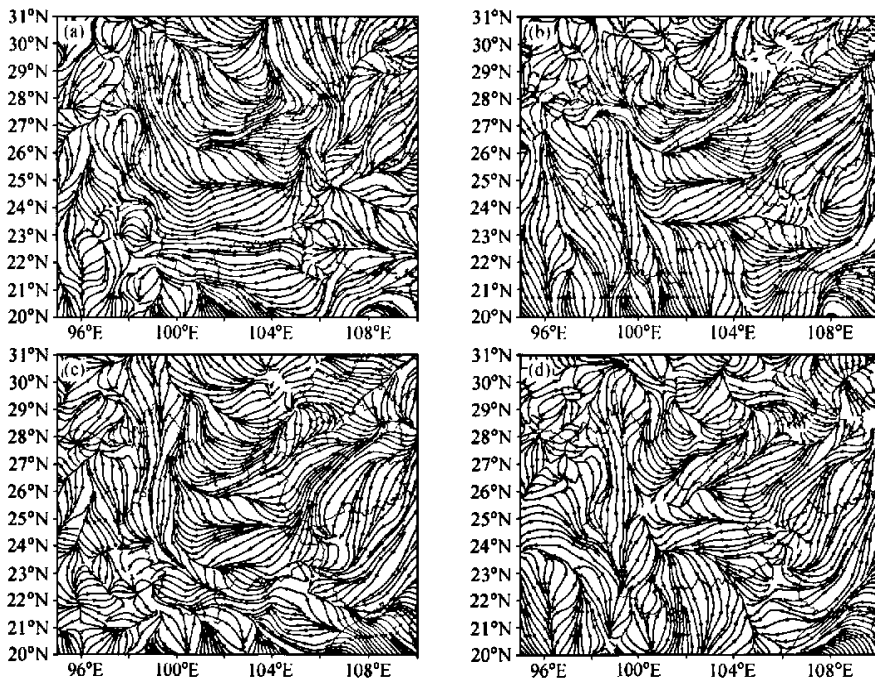


图8 外区模拟的近地面层(地面上10 m)流线模拟(地形 TOPN 试验); (a) 5月31日12时; (b) 6月1日0时; (c) 6月1日12时; (d) 6月2日0时

Fig. 8 The simulated streamline at 10 m above ground in outer region (TOPN); (a) 1200 UTC 31 May; (b) 0000 UTC 1 Jun; (c) 1200 UTC 1 Jun; (d) 0000 UTC 2 Jun

加强, 并与北部气流在 23°N 形成一东西向的辐合区, 并稳定维持(图 8c、8d), 在气流的交汇点 (23.5°N , 101.5°E) 有对应的降水中心产生。从气流的走向可清楚地看到, 红河河谷地形的减弱

会改变近地层气流的走向, 从而也使降水的落区和强度发生相应的变化。

另外, 从 750 hPa 水汽通量和水汽通量散度变化可知, 红河河谷地形的变化使云南地区的水

汽通量散度也发生了较大改变。在 31 日 0 时 (图 9a), 云南的西部有一水汽通量辐合区, 而在云南的中部则为水汽通量辐散中心; 而后沿红河河谷也维持一水汽通量的辐散区 (图 9b), 这可能是 5 月 31 日 0 时~6 月 1 日 0 时沿红河河谷的降水区域未模拟出来的原因。其后, 水汽通量散度变化

与对照试验基本一致, 说明降水后期红河河谷的地形效应减弱。

4.1.2 抬高红河喇叭口地形

将红河河谷及其附近的地形抬高后, 红河喇叭口的地形作用就减弱消失了。从试验 TOPH 模拟的降水 (图 10) 与对照试验的对比可看到,

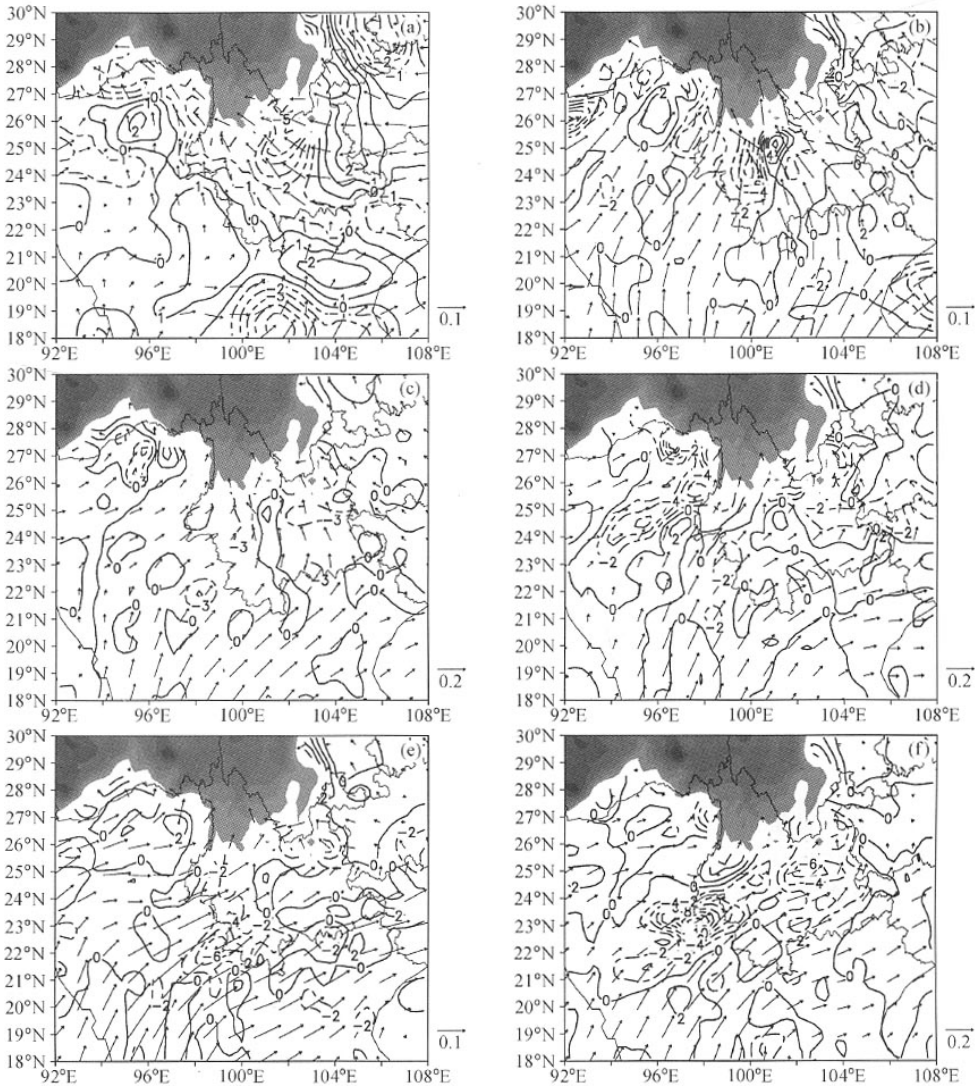


图 9 750 hPa 水汽通量模拟 (矢量箭头, 单位: $\text{g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1}$) 及水汽通量散度 (单位: $10^{-7} \text{g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1}$) (阴影区为高度大于 2500 m, 地形 TOPN 试验): (a) 5 月 30 日 12 时; (b) 5 月 31 日 0 时; (c) 5 月 31 日 12 时; (d) 6 月 1 日 0 时; (e) 6 月 1 日 12 时; (f) 6 月 2 日 0 时

Fig. 9 Simulated moisture flux (MF) (showed by vector, units, $\text{g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1}$) and divergence of MF (units, $10^{-7} \text{g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1}$, Shaded area is the terrain higher than 2500 m) at 750 hPa (TOPN): (a) 1200 UTC 30 May; (b) 0000 UTC 31 May; (c) 1200 UTC 31 May; (d) 0000 UTC 1 Jun; (e) 1200 UTC 1 Jun; (f) 0000 UTC 2 Jun

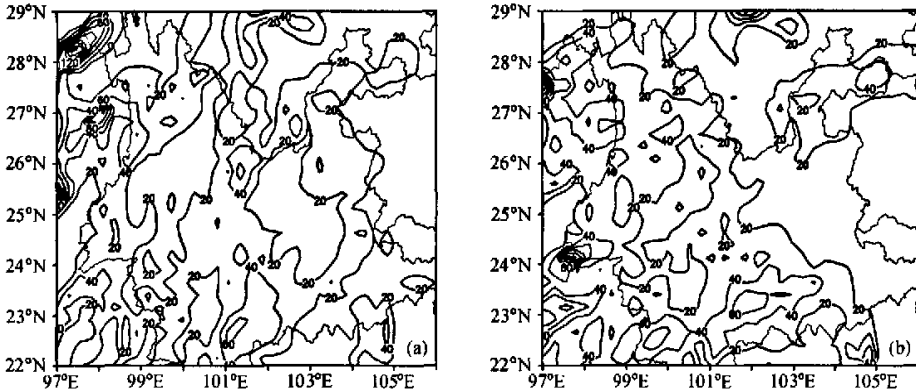


图 10 外区模拟的降水分布 (单位: mm, 地形 TOPH 试验): (a) 2001 年 5 月 31 日 0 时~6 月 1 日 0 时; (b) 2001 年 6 月 1 日 0 时~6 月 2 日 0 时

Fig. 10 The precipitation distribution in simulated experiment in the outer region. (units: mm, TOPH): (a) 0000 UTC 31 May—0000 UTC 1 Jun; (b) 0000 UTC 1 Jun—0000 UTC 2 Jun

5 月 31 日 0 时~6 月 1 日 0 时的降水模拟结果相差较大, 云南中部的强降水中心未模拟出来, 同样, 沿红河河谷的降水区域也未模拟出来。但在云南的南部, 沿 100.5°E 和 101.5°E 各有一南北向的降水区域, 从改变后的地形高度可清楚地看到, 在原红河河谷的西侧仍有开口向南的喇叭口地形结构, 这也许就是当红河河谷消失后, 气流在云南南部其余类似喇叭口地形作用下产生的降水。6 月 1 日 0 时~6 月 2 日 0 时的降水模拟结果与对照试验基本一致, 只是云南南部的强降水略有减弱, 这也说明红河河谷在 6 月 1 日 0 时~6 月 2 日 0 时强降水中的作用减弱。

从近地层流线图 (图 11) 可看到, 5 月 31 日 12 时 (图 11a), 云南北部沿 26°N 的气流辐合线仍存在, 而沿红河河谷的气流辐合线不存在。部分从北部来的气流绕云贵高原的东部南下, 从云贵高原的南部向西运动, 然后沿地形较低处向北运动。这样, 北部沿 26°N 的气流辐合线与南部辐合线的交汇点不明显而使云南中部的强降水中心消失。随着南部气流加强, 在红河河谷西部的类似喇叭口处又一新的较强辐合区出现 (图 11b), 并伴有降水中心产生。在 6 月 2 日的气流变化看, 红河河谷内为偏东气流, 而在被抬高地形的南端为气流辐合, 并在高地形的西端逐渐与北部气流辐合线相交 (图 11d), 从而有强降水中心产生。

从 750 Pa 水汽通量及其散度变化还可以看到 (图略), 31 日 0 时 (24°N , 101°E) 附近有一较

强水汽辐合中心存在, 并维持到 31 日 12 时, 对应云南南部有一较强降水中心。而后, 水汽辐合中心减弱东移, 气流也逐渐转为偏西方向。6 月 2 日 0 时云南南部的较强降水也与较强的水汽辐合相对应。

从以上结果可知, 红河河谷的喇叭口地形对此次云南强降水的落区和降水强度均有重要影响。它不但会改变近地层气流的走向, 而且对低层水汽通量散度值的分布也很有关系, 从而使强降水的落区发生改变。同时, 由于喇叭口地形对气流辐合和强迫抬升作用的改变, 使降水强度随之改变。因此, 在云南这样的低纬高原地区的降水预报中, 红河河谷喇叭口的地形作用不可忽视。

4.2 云南南部地形的影响

从云南的地形分布可以看到, 云南的地势为南部低、北部高, 且在云南的南部存在几个类似红河河谷的喇叭口地形结构。因此下面通过试验 TOPSN 和 TOPSH, 试图了解云南南部地形的改变对此次强降水过程所产生的影响。

从试验 TOPSN 模拟的降水 (图 12) 与对照试验的对比可看到, 5 月 31 日 0 时~6 月 1 日 0 时的降水模拟结果相差较大, 云南大部分地区的强降水中心都未模拟出来, 特别是云南的中部和南部都没有降水产生, 而只在云南的北部和西部有降水出现; 但 6 月 1 日 0 时~6 月 2 日 0 时的降水模拟结果与对照试验基本一致, 只是云南南部的强降水略有减弱。由此可表明降低云南南部

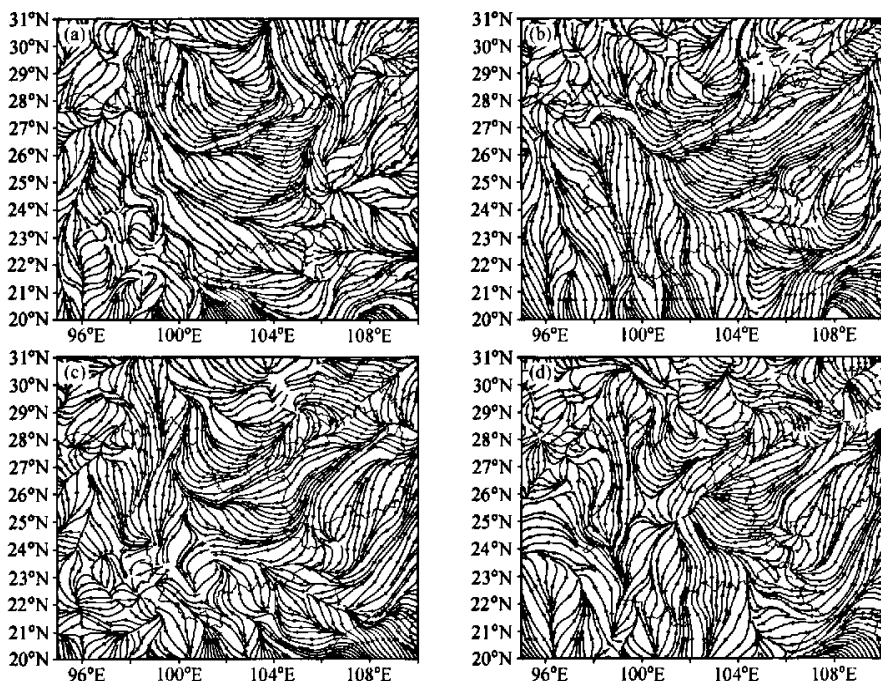


图 11 近地层(地面上 10 m)流线模拟(地形 TOPH 试验): (a) 5 月 31 日 12 时; (b) 6 月 1 日 0 时; (c) 6 月 1 日 12 时; (d) 6 月 2 日 0 时

Fig. 11 The simulated streamline at 10 m above ground (TOPH); (a) 1200 UTC 31 May; (b) 0000 UTC 1 Jun; (c) 1200 UTC 1 Jun; (d) 0000 UTC 2 Jun

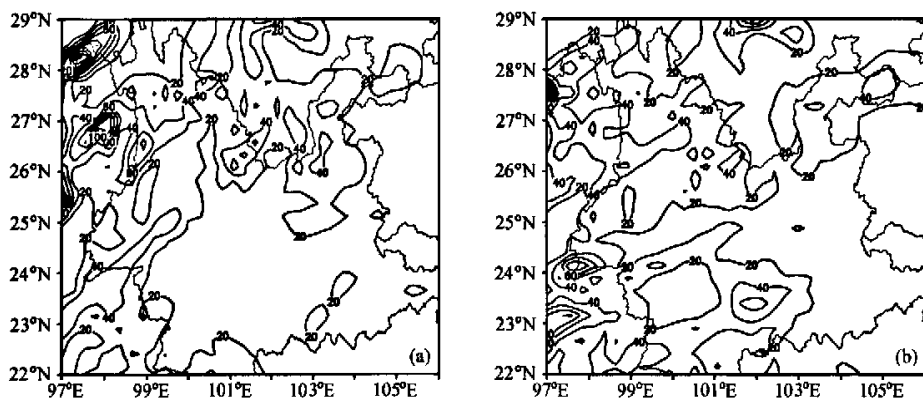


图 12 外区模拟的降水分布(单位: mm, 地形 TOPSN 试验): (a) 5 月 31 日 0 时~6 月 1 日 0 时; (b) 6 月 1 日 0 时~6 月 2 日 0 时

Fig. 12 The precipitation distribution in simulated experiment in the outer region (units: mm, TOPSN); (a) 0000 UTC 31 May—0000 UTC 1 Jun; (b) 0000 UTC 1 Jun—0000 UTC 2 Jun

地形对次日强降水的作用不甚明显, 这也许是北部气流已南压至南部, 南部气流北抬作用减弱的缘故。

从近地面层流线图(图 13)可看到, 在 5

月 31 日 12 时, 云南北部沿 26°N 的气流辐合线仍存在, 而在云南大部分地区基本上为偏东气流, 没有气流的辐合, 并在被降低地形的北端为一气流的辐散线。在 6 月 1 日 0 时, 随着南

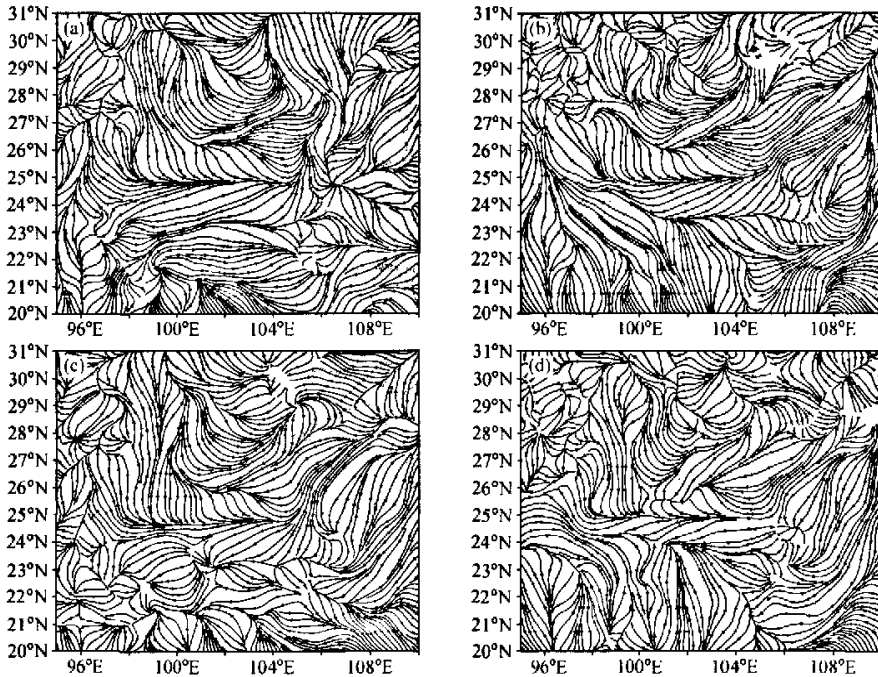


图 13 近地层 (地面上 10 m) 流线模拟 (地形 TOPSN 试验): (a) 5 月 31 日 12 时; (b) 6 月 1 日 0 时; (c) 6 月 1 日 12 时; (d) 6 月 2 日 0 时

Fig. 13 The simulated streamline at 10 m above ground (TOPSN): (a) 1200 UTC 31 May; (b) 0000 UTC 1 Jun; (c) 1200 UTC 1 Jun; (d) 0000 UTC 2 Jun

部气流的加强, 在云南的南部 23.5°N 有一气流辐合线产生。随后, 辐合线又有所减弱, 至 6 月 2 日 0 时, 云南南部气流辐合又得到加强, 但云南的中部始终为偏东气流, 且为气流辐散区。由此可见, 云南南部地形的降低可能使其对云南东部气流的阻挡作用减弱, 从而使来自东北的冷空气直接进入云南省, 南北气流汇合减弱, 气流的辐合相应减弱。而随着冷空气的南压, 气流辐合区位于云南的南部, 使南部气流向北的爬越减弱, 致使其南部地形的降低对气流的改变不显著。

从 750 hPa 水汽通量及水汽通量散度变化还可以看到 (图略), 云南南部地形的改变同样也使水汽分布受到影响。在 5 月 31 日 0~12 时, 云南的中南部为水汽通量辐散区, 说明云南南部地形的改变对此次强降水过程的水汽通量的分布影响较大。而至 6 月 1 日 12 时, 在云南的西南部有水汽通量的辐合中心存在, 对应于水汽通量辐合中心有强降水存在。由此可见, 云南南部地形的改

变同时也使其水汽分布受到影响。

从试验 TOPSH 模拟的降水 (图 14) 与对照试验的对比可看到, 5 月 31 日 0 时~6 月 1 日 0 时的降水模拟结果与对照试验相差较大, 但与 TOPH 试验结果基本一致。云南中部的强降水中心和沿红河河谷的降水区域都未模拟出来, 而在云南的南部, 沿 100.5°E 和 101.5°E 各有一南北向的降水区域, 只是降水强度有所减弱。从改变后的地形也可看到, 在云南的南部还存在地势由低到高的梯度变化, 但没有原先的明显。由此说明云南南部地形的变化对此次云南强降水有影响, 但不如红河河谷的作用大。同样, 6 月 1 日 0 时~6 月 2 日 0 时的降水模拟结果与对照试验基本一致。

从近地层流线图 (图略) 和 750 hPa 水汽通量及其散度变化 (图略) 也可清楚地看到, 近地层气流的走向及低层水汽通量散度分布与试验 TOPH 基本一致, 这也说明将 ($22\sim24.5^{\circ}\text{N}$, $97\sim104.5^{\circ}\text{E}$) 范围内低于 1 500 m 的高度抬升至 1 500 m 时, 除红河河谷的喇叭口地形对此次强降

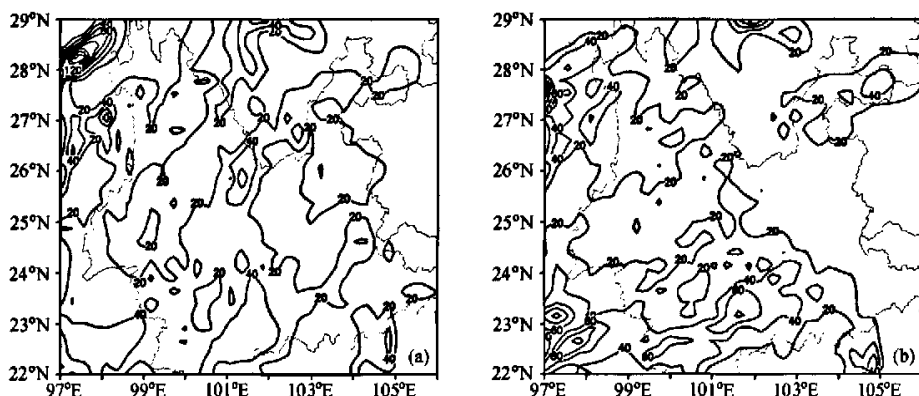


图 14 外区模拟的降水分布 (单位: mm, 地形 TOPSH 试验); (a) 5 月 31 日 0 时~6 月 1 日 0 时; (b) 6 月 1 日 0 时~6 月 2 日 0 时
Fig. 14 The precipitation distribution in simulated experiment in the outer region (units: mm, TOPSH); (a) 0000 UTC 31 May—0000 UTC 1 Jun; (b) 0000 UTC 1 Jun—0000 UTC 2 Jun

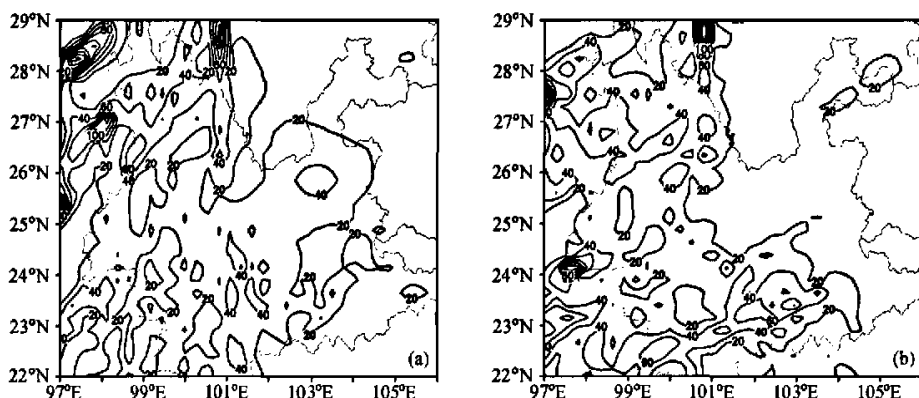


图 15 外区模拟的降水分布 (单位: mm, 地形 TOPEN 试验); (a) 5 月 31 日 0 时~6 月 1 日 0 时; (b) 6 月 1 日 0 时~6 月 2 日 0 时
Fig. 15 The precipitation distribution in simulated experiment in the outer region (units: mm, TOPEN); (a) 0000 UTC 31 May—0000 UTC 1 Jun; (b) 0000 UTC 1 Jun—0000 UTC 2 Jun

水过程的影响较为明显外, 其余地形改变后的影响不明显。

4.3 云南东北部地形的影响

对此次强降水过程形势场的分析可知^[20], 强降水的产生是由冷暖空气交汇所致。由于云南的东部为滇东高原, 系云贵高原主体, 来自云南东北部的冷空气往往受其阻挡而沿高原绕流, 因此云南东北部地形对冷空气的走向可能会有一定的影响。为此, 通过试验 TOPEN 来分析和讨论改变云南东北部地形对此次强降水过程的影响。

从试验 TOPEN 模拟的降水 (图 15) 与对照

试验的对比可看到, 同样, 5 月 31 日 0 时~6 月 1 日 0 时的降水模拟结果与对照试验相差较大。云南中部沿 101°E 的降水中心未模拟出来, 在云南的东北部虽有一 40 mm 的降水中心, 但强度较对照试验小。云南南部及西部地区的降水模拟与对照试验相差不大, 且沿红河河谷的降水区域和强度都与对照试验基本一致。6 月 1 日 0 时~6 月 2 日 0 时的降水模拟结果与对照试验基本一致, 只是云南南部的强降水略有减弱。由此说明降低云南东北部地形对其东部以至中部区域的降水都有影响, 这一区域的地形的确对此次云南降水过程起到了一定的作用。

从近地层流线图(图 16)可看到,在 5 月 31 日 12 时(图 16a),云南北部沿 26°N 的气流辐合线已不复存在,而只是变为一致的东北气流,并在 $24^{\circ}\sim 25^{\circ}\text{N}$ 间与东南气流汇合。同时,沿红河河谷仍保留一气流辐合线。两辐合线的交汇区都较对照试验偏南,并且在气流的交汇区附近有降水产生。

从试验 TOPEN 模拟的 750 hPa 水汽通量及其散度变化可以看到(图略),除局部水汽通量散度有较小差异外,总的分布及变化趋势与对照试验基本一致。这说明云南东北部地形的改变对云南水汽输送影响不大。

由以上分析可知,云南东北部地形的改变对此次云南强降水过程中北部降水的落区和强度有一定的影响。它主要通过来自东北部气流的改变,从而改变冷暖空气交汇的区域和强度,进而对云南北部地区的降水产生影响,但对水汽通量散度分布的影响不明显。

5 结论和讨论

地处低纬高原的云南,高山峡谷相间、地形波涛起伏。在其南部的喇叭口地形区,由于地形收缩,气流辐合加强,同时还因河谷的升高而使气流产生抬升,因此最易出现暴雨;同时,云南西北部的青藏高原和其东部的云贵高原对来自北方冷空气的入侵有阻挡作用,致使冷空气的路径发生改变。本文在对 2001 年 5 月底 6 月初的一次强降水过程较为合理模拟的基础上,又对云南红河喇叭口地形和云南南部地形对暖湿气流的影响,以及云贵高原对北部冷空气的阻挡作用进行了对比试验分析。结论如下:

(1) 在数值试验中,抬升或降低红河喇叭口地形,从而使红河喇叭口对气流的收缩辐合作用减弱,它不但改变了近地层气流的走向,而且也使低层水汽通量散度值的分布发生变化,从而使强降水的落区发生改变。同时,由于喇叭口地形对气流辐合和强迫抬升作用的改变,也可随之改

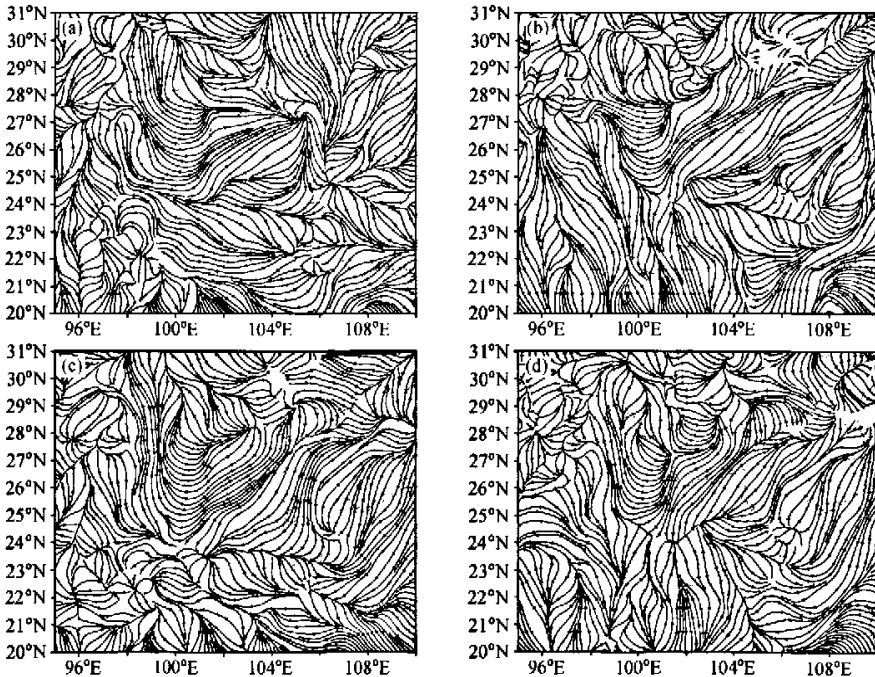


图 16 近地层(地面上 10m)流线模拟(地形 TOPEN 试验): (a) 5 月 31 日 12 时; (b) 6 月 1 日 0 时; (c) 6 月 1 日 12 时; (d) 6 月 2 日 0 时

Fig. 16 The simulated streamline at 10 m above ground (TOPEN): (a) 1200 UTC 31 May; (b) 0000 UTC 1 Jun; (c) 1200 UTC 1 Jun; (d) 0000 UTC 2 Jun

变强降水的强度。因此, 在云南的降水预报中红河河谷喇叭口地形的作用不可忽视。

(2) 云南南部地形的改变对此次强降水过程的气流走向和水汽分布均有影响, 但不如红河河谷的作用那样显著。且对此次过程降水的前期影响较大, 而对后期降水的影响减小, 这也许是在降水过程的后期, 由于北部气流已南压至南部, 从而使南部气流北抬作用减弱的缘故。

(3) 降低云南东北部地形, 可使云南北部的气流辐合线发生变化。这主要是通过对来自东北部气流的改变而影响冷暖空气交汇的区域和强度, 并且主要对云南北部地区降水的改变产生影响, 但对主要来自西南部的水汽输送影响不大。

综上所述, 强降水的产生离不开冷暖空气的相互作用, 而在云南冷暖空气的活动又明显地受到地形的制约。在本文的个例中, 沿红河河谷的喇叭口地形致使云南南部气流辐合抬升及云南东北部的云贵高原对冷空气阻挡而产生的绕流, 使云南地区的强降水分布有明显的沿地形走向的特征。然而云南地形对降水的影响是一个十分复杂的过程, 仅通过本文一个个例的分析是不够的。云南复杂的地形对强降水产生的强度和产生地域的多样性及复杂性是目前云南暴雨预报的难点, 今后还需做进一步的研究。

参考文献 (References)

- [1] 陶诗言. 中国之暴雨. 科学出版社, 1980. 225pp
Tao Shiyan. *Rainfall in China* (in Chinese). Beijing: Science Press, 1980. 225pp
- [2] 章名立. 地形对暴雨的影响. 暴雨文集. 吉林人民出版社, 1978. 58~64
Zhang Mingli. Influence of topography on storm rainfall. In: *Papers of Heavy Rainfall Study* (in Chinese). Changchun: Jilin People Press, 1978. 58~64
- [3] Spreen W C. A determination of the effect of topography upon precipitation. *Trans Amer. Geophys. Union*, 1947, 28: 285~290
- [4] Danard M. A simple model for mesoscale effects of topography on surface winds. *Mon. Wea. Rev.*, 1977, 105: 572~581
- [5] 周晓平, 顾震潮. 大地形对高空行星波传播的影响. 气象学报, 1958, 29 (2): 99~103
Chow Shiaoping, and Koo Chenchao. The Influence of the Slope of a Plateau on the Movement of Troughs and Ridges. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1958, 29 (2): 99~103
- [6] 叶笃正, 罗四维, 朱抱真. 青藏高原及其附近的流场结构和对流层大气的热量平衡. 气象学报, 1957, 28 (2): 108~121
Yeh Tucheng, Lo Szuwei, Chu Paochen. The Wind Structure and Heat Balance in the Lower Troposphere over Tibetan Plateau and its Surrounding. *J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 1957, 28 (2): 108~121
- [7] 叶笃正. 小地形对于气流的影响. 气象学报, 1956, 27 (3): 243~265
Ye Duzheng. Topographical Effect on the Airflow. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1956, 27 (3): 243~265
- [8] 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): 276~290
Ding Yihui, Cai Zeyi, Li Jishun. The Research of Severe Heavy Rainfall in Henan, China in August 1975. *Scientia Atmospherica Sinica* (in Chinese), 1978, 2 (4): 276~290
- [9] 崔春光, 闵爱荣, 胡伯威. 中尺度地形对“98·7”鄂东特大暴雨的动力作用. 气象学报, 2002, 60 (5): 602~612
Cui Chunguang, Min Airong, Hu Bowei. Dynamic Effect of Mesoscale Terrain on “98·7” Extremely Heavy Rain in the East of HuBei Province. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2002, 60 (5): 602~612
- [10] 齐琳琳, 赵思雄. 局地地形、地表特征对上海暴雨过程影响的研究. 气候与环境研究, 2006, 11 (1): 33~48
Qi Linlin, Zhao Sixiong. The Analysis of the Influence of the Terrain and the Earth's Surface on the Heavy Rainfall in Shanghai. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2006, 11 (1): 33~48
- [11] 王政宇. 喇叭口地形对降水的作用. 气象, 1982, 1: 17~18
Wang Zhengyu. The influence of trumpet-shape topography on precipitation. *Meteorology* (in Chinese), 1982, 1: 17~18
- [12] 彭贵康, 柴复新, 曾庆存, 等. “雅安天漏”研究 I: 天气分析. 大气科学, 1994, 18 (4): 466~475
Peng Guikang, Cai Fuxin, Zen Qingcun, Yu Rucong. Research on “Ya-An-Tian-Lou”. Part I: Synoptic Analysis. *Scientia Atmospherica Sinica* (in Chinese), 1994, 18 (4): 466~475
- [13] 彭贵康, 李志友, 柴复新. 雅安地形与降水的气候特征. 高原气象, 1985, 4 (3): 230~240
Peng Guikang, Li Zhiyou, Cai Fuxin. The Relationship Between Topography and Precipitation in Ya'an District. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 1985, 4 (3): 230~

240

- [14] 高坤, 翟国庆, 俞樟孝, 等. 华东中尺度地形对浙北暴雨影响的数值模拟. 气象学报, 1994, 52 (2): 157~164
Gao Kun, Zhai Guoqing, Yu Zhangxiao, et al. The Simulation Study of the Meso-scale Orographic Effects on Heavy Rain in East China. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1994, 52 (2): 157~164
- [15] 贝耐芳, 赵思雄. 初值及物理过程对“98·7”暴雨预报结果的影响. 气候与环境研究, 2002, 7 (4): 386~396
Bei Naifang, Zhao Sixiong. Effect of Initial Data and Physical Processes on the Heavy Rainfall Prediction in July 1998. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2002, 7 (4): 386~396
- [16] 韩志伟, 张美根, 雷孝恩. 复杂地形局地环流的数值模拟研究. 气候与环境研究, 1999, 4 (2): 210~223
Han Zhiwei, Zhang Meigen, and Lei Xiaoen. Numerical Simulation of Regional Circulation in Complex Terrain. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 1999, 4 (2): 210~223
- [17] 王鹏云. 台湾岛地形对台风暴雨影响的数值研究. 气候与环境研究, 1998, 3 (3): 235~246
Wang Pengyun. A Numerical Study on the Effects of Orography of Taiwan Island on Typhoon Induced Heavy Rainfall. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 1998, 3 (3): 235~246
- [18] 贝耐芳, 赵思雄. 一次引发台湾地区强降水的锋面及中尺度系统分析研究. 气候与环境研究, 2005, 10 (3): 474~491
Bei Naifang, and Zhao Sixiong. Diagnosis Analysis of Severe Heavy Rainfall in Taiwan Area during Heavy Rainfall Experiment in South China. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2005, 10 (3): 474~491
- [19] 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. 大气科学, 2002, 26 (5): 541~557
Sun Jianhua, Zhao Sixiong. 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. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2002, 26 (5): 541~557
- [20] 董海萍, 赵思雄, 曾庆存. 我国低纬高原地区初夏强降水天气研究 I. 2001 年 5 月印缅槽维持期间云南暴雨及其尺度特征. 气候与环境研究, 2005, 10 (3): 443~459
Dong Haiping, Zhao Sixiong, Zeng Qingcun. Study of strong heavy rainfall in low latitude plateau area in China during early summer. Part I: Case study of a heavy rainfall in Yunnan under influencing of Indian-Myanmar trough. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2005, 10 (3): 443~459
- [21] Dudhia J. A nonhydrostatic version of the Penn State/NCAR mesoscale model: Validation tests and simulation of an Atlantic cyclone and cold front. *Mon. Wea. Rev.*, 1993, 121, 1493~1513
- [22] Grell G A, Dudhia J, Stauffer D R. A Description of the Fifth-Generation Penn State/NCAR Mesoscale Model (MM5). NCAR Technical Note, NCAR/RN-398+ STR, 1994, 138