

地形降水试验和背风回流降水机制

李子良

(北京大学物理学院大气科学系, 100871)

提 要: 利用中尺度数值模式 (ARPS 模式) 研究了湿气流过山脉地形和地形降水的产生机制。研究表明, 地形降水是水汽、气流和地形相互作用而形成的。小山脉地形降水主要发生在山脉的迎风坡, 表现出典型的迎风降水和背风雨影特征。而回流降水天气是湿气流过大的山脉地形的产物, 大的山脉地形有利于风切变临界层的产生, 地形降水并不只是简单的上坡降水, 还有背风回流和背风波降水机制。
关键词: 数值试验 迎风降水 背风雨影 背风回流降水 山脉地形

Simulations of Precipitation Induced by Reversal Flow in the Lee of Mountain

Li Ziliang

(Department of Atmospheric Sciences, Physics of School, Peking University, 100871)

Abstract: The moist air current crossing over the higher mountains and the forming of the reversal flow at the lower layer in the lee of the mountain are investigated with the advanced regional prediction system (ARPS). The results show that the trend and elevation of the mountain range are the most important factors in the influence of terrains on weather and climate, and the mountain plays a positive role in the reversal flow weather. The effects of moisture are apparent on the forming of the blocked reversal flow in the upslope and the reversal flow in the lee of the mountain. It is suggested that the precipitation mechanism should include the lee precipitation mechanism for the lee reversal flow, except the upslope precipitation, especially for the moist airflow over higher mountain.

Key Words: numerical simulation mountain upslope precipitation lee reversal precipitation rain shadow

引言

最近几十年,人们提出了几种地形降水机制,如上坡凝结,地形阻塞引起的上游对流,背风辐合等。对于每一种降水机制,外界条件的改变,如热力学大气层结,水汽供应,上游风分布,高空水汽的产生率,通过流动阻塞,障碍物上的背风波和微物理时间尺度,能够影响地形降水的分布和地形降水量。Smith^[1]和林之光^[2]等在前人研究工作的基础上,系统总结了地形对降水的加强作用。指出山脉迎风降水和背风雨影是湿气流对山脉地形响应所产生的地形降水的基本特征,降水在山脉迎风坡加强而在背风面大大减少是山脉地形对大气中的水汽输送和降水分布发生作用的主要表现形式。大量的地形降水的数值模拟试验表明^[3-5],水汽的存在能够强烈的改变流动特征,在饱和的上升运动区,潜热释放能够改变流动对地形强迫的响应。Qingfang, Jiang^[6]使用非静力中尺度模式研究了地形降水和流动驻点的相互作用,他处理了两个密切相关的问题,流动阻塞和潜热对上坡降水的影响以及凝结和降水对山脉驻点的影响。Miglietta^[7]使用中尺度数值模式研究了湿气流过简单的三维山脉,研究了障碍物附近不同流动特征的存在及其它们之间的转变。Colle^[8]使用中尺度数值模式 MM5 进行了地形降水的敏感性试验,研究了地形降水和外界环境流动、均匀的湿静力稳定度、凝结层和障碍物的高度及其宽度等物理参数的关系,通过改变过障碍物的环流和微物理结构看这些参数是如何影响地形降水的。当前三维湿流动过山脉的问题已经成为人们研究的重点,特别是它们和地形降水的关系^[9]。

但是,地形降水,特别是暴雨洪涝及其

它灾害性天气的产生、发展和演变都是具有不同风速分布,不同水汽分布和不同温度和气压分布等两种不同性质的气团的相互作用的产物。然而两种不同性质的气团的相互作用必然产生不连续的流体界面,比如水平风速切变线或垂直风速切变线是典型的风速不连续问题,无论是高低空急流的相互作用还是冷暖气团的相互作用,都表现为风切变临界层或逆温临界层。因而流体临界层的产生、发展和演变是灾害性天气发生、发展和天气演变的最终决定因素。而临界层气流和地形的相互作用以及地形对流体临界层的形成和发展的作用很少引起人们的注意。本文重点就是研究气流过山所产生的回流降水天气和地形在回流天气和风切变临界层的产生中的作用。探索地形降水以及暴雨洪涝灾害性天气的产生机理和寻求新的有效的灾害性天气预测的手段和技术。

1 地形降水的数值试验设计

数值试验采用美国风暴分析和预报中心(CAPS)的三维非静力的区域天气预报系统 ARPS^[10]模式 5.0 版本,数值模拟计算区域采用 160km×20km 的空间计算域,计算网格点数空间分布为 160×04×83,采用 1km 的均匀水平网格距。垂直坐标采用地形追随坐标,垂直方向 83 层,顶部 40 层为上边界 Rayleigh 的吸收阻尼层,其垂直网格点分辨率为 0.25km,其垂直分辨率是高度的立方函数,自地面 0.05km 缓慢拉伸到计算域的层顶 0.25km 的分辨率。模式使用 1.5 阶次网格尺度湍流闭合方案描述其次网格尺度湍流混合。所有试验均不考虑科里奥利力。关闭其他的物理过程如辐射物理过程、土壤模式等微物理过程。

山脉地形采用常用的钟形山脉地形,

$$h(x, y) = h_{\max} \left/ \left(1 + \left(\frac{x - x_0}{a} \right)^2 \right) \right.$$

式中 h_{\max} 为山脉高度, a 为 x 方向的山脉半宽度 10km, x_0 为山脉的中心位置并将山脉地形置于水平计算域的中心。

模式积分的大的时间步长为 2.5s 和小的时间步长为 0.5s, 流动初始条件采用具有 $U = 20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的均匀水平风速分布和具有浮力频率 $N = 0.011 \text{ s}^{-1}$ 的基本状态大气作为控制试验。模式侧边界条件在东西方向上采用辐射侧边界条件, 而在南北方向则采用周期性侧边界条件。考虑水汽和潜热释放对山脉波的影响, 打开微物理过程软件包和 Kessler 暖雨的微物理参数化。大气中的初始水汽含量的分布主要考虑两种情况, 一是水汽均匀的分布在整個计算域, 二是只考虑在模式计算域的中层 3km 至 5km 具有水汽分布而上下两层为干气流。同时山脉最大高度考虑 0.5km (试验一) 和 2km (试验二)

两种条件下的降水特征。

2 小地形降水的数值试验

地形降水是水汽, 气流和山脉地形相互作用的产物。对于较小的山脉地形而言 (试验一), 如果初始的水汽均匀的分布在整個计算域, 当山脉最大高度为 0.5km 时, 则地形降水主要表现为上坡降水。水汽的引入大大的改变了流动结构特征及其表现出与无水汽时完全不同的波动特征, 在山脉上游及其迎风坡上产生阻塞回流, 水汽的引入因潜热的释放而抑制波的活动。而气流中的水汽则主要积聚在山脉的背风侧的低层流动中。但是从云水和雨水的混合比 (如图 1) 可知, 山脉波动云则主要产生在山脉及其背风面, 而降水则主要发生在山脉的迎风坡, 表现出典型的迎风降水特征。

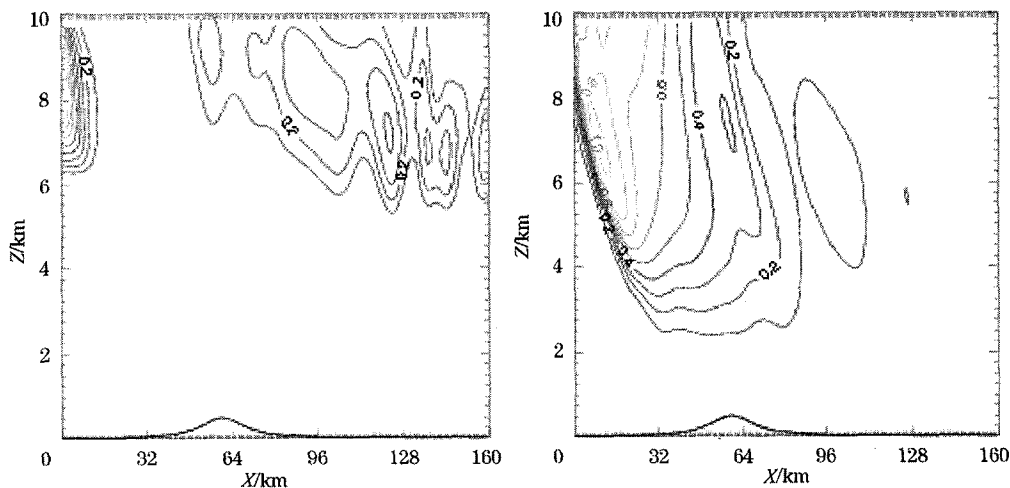


图 1 初始的水汽分布在整個模式层, 山脉最大高度 0.5km, 模式积分 8000s 时的云水混合比 (左) 和雨水混合比 (右) 垂直分布图

如果只考虑在模式计算域的中间某一层如 3~5km 具有水汽分布而上下两层为干气流, 当山脉最大高度为 0.5km 时, 则地形

降水主要表现为上坡降水和背风雨影现象。水汽的引入大大的改变了流动结构特征, 但相对于水汽充满整个模式计算域的情况而言

表现出更多的背风波动特征。在山脉上游及其迎风坡上产生阻塞回流,而且在山脉下游局部地区产生背风回流,回流的深度大大超过山脉的高度以及迎风阻塞回流的深度。中层水汽也开始扩散到山脉下游背风侧的低层

流动中。但是从云水和雨水的混合比(如图2)可知,山脉波动云和降水则表现出典型的迎风降水和背风雨影特征,具有明显的波动特征。

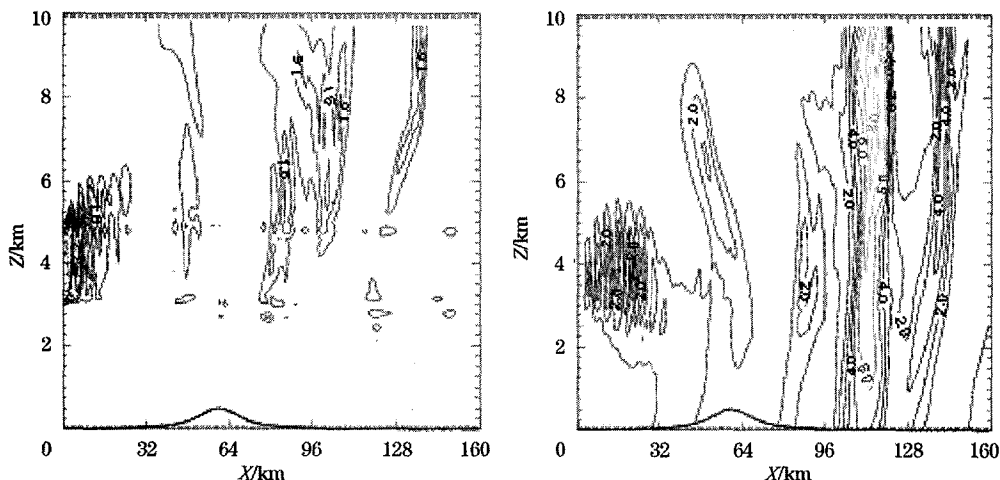


图2 初始的水汽分布在3~5km高度,山脉最大高度0.5km,模式积分12000s时的云水(左)和雨水混合比(右)垂直分布图

3 大地形降水的数值试验

对于较大的山脉地形(试验二),如果只考虑在模式计算域的中间某一层如3~5km具有水汽分布而上下两层为干气流,当山脉最大高度增加到2km时,地形降水同样主要表现为上坡降水和背风雨影现象。从水平速度和水汽的垂直分布(如图3)可以看出,水汽的引入大大的改变了流动结构特征,由于中层水汽的引入,潜热的释放,改变了大气的稳定度和Scorer参数的空间分布,流动表现出背风波动特征。同样在山脉迎风坡上产生阻塞回流,而且在山脉下游也在局部地区产生背风转子回流,具有背风波动特征。但是从云水和雨水的混合比(如图4)可知,山脉波动云和降水则表现出典型

的迎风降水和背风雨影特征,具有明显的波动特征,降水分布与背风面的上升和下沉运动区相对应。由于水汽在山脉迎风坡上的稳定上升和背风面的重力波抬升而形成降水。

如果初始的水汽均匀的分布在整個计算域,当山脉地形最大高度增加到2km高度时,则具有与小地形完全不同的流动特征和地形降水机制,地形降水主要表现为背风回流降水天气。从水平速度的垂直分布(如图3)可以看出,湿气流过大的山脉地形有利于产生回流降水天气形势,在背风坡之上由于垂直传播波的破碎而出现强烈的减速和上升运动,在山脉背风下游的回流的强度和深度大大超过了山脉上游及其迎风坡上产生阻塞回流深度和山脉高度。从雨水的混合比(如图5)可知,降水分布与小地形完全不同,大地形降水则主要发生在山脉及其背风

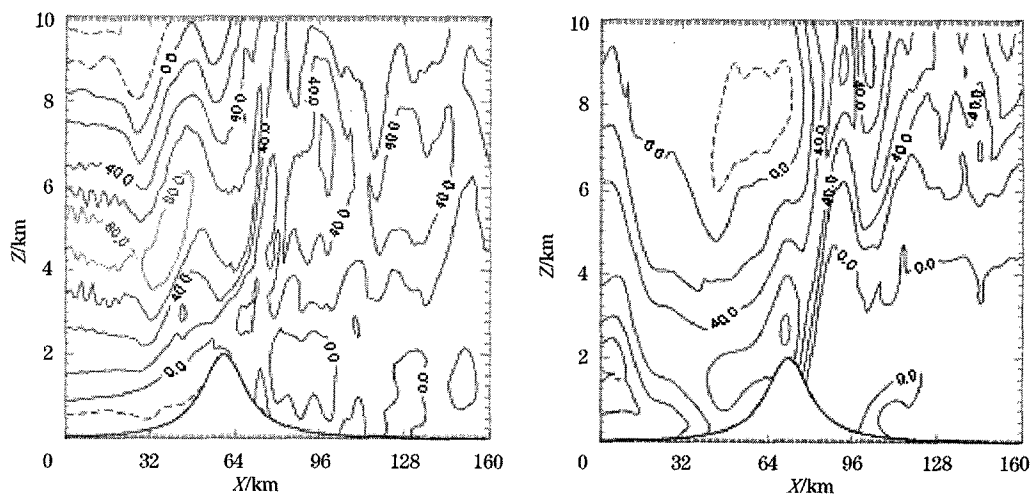


图 3 山脉最大高度 2km, 初始的水汽分布在 3~5km 高度, 模式积分 12000s 时的水平速度 (左) 和初始的水汽分布于整个模式层, 模式积分 12000 秒时水平速度 (右) 分布图

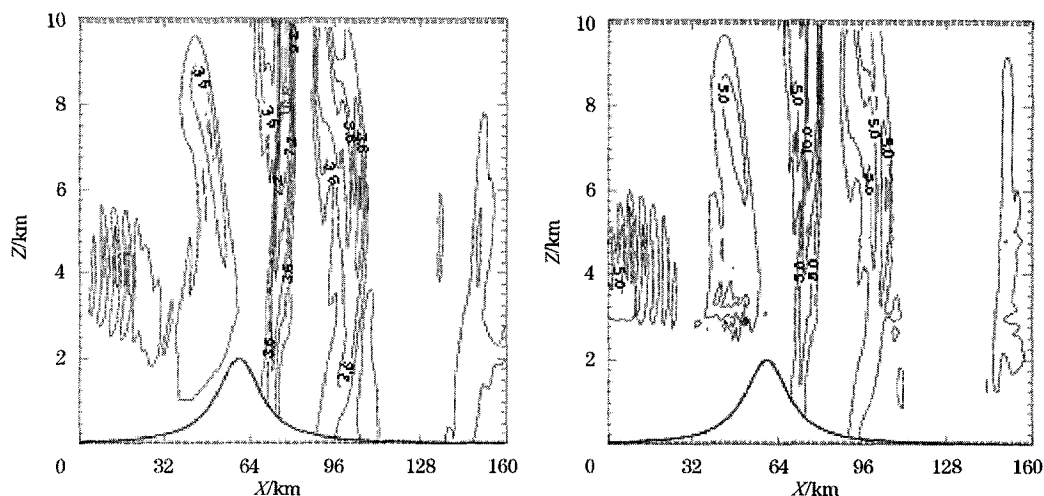


图 4 初始的水汽分布在 3~5km 高度, 山脉最大高度 2km, 模式积分 12000s 时的雨水 (左) 和整体水含量 (右) 的垂直分布图

坡, 表现出典型的背风回流降水天气特征。

4 结论和讨论

利用中尺度数值模式 ARPS 研究了湿气流过山脉地形和地形降水的产生机制, 研

究结果表明地形降水是水汽, 气流和地形相互作用而形成的。

(1) 小山脉地形降水主要发生在山脉的迎风坡, 表现出典型的迎风降水和背风雨影特征。

(2) 大的山脉地形有利于风切变临界层

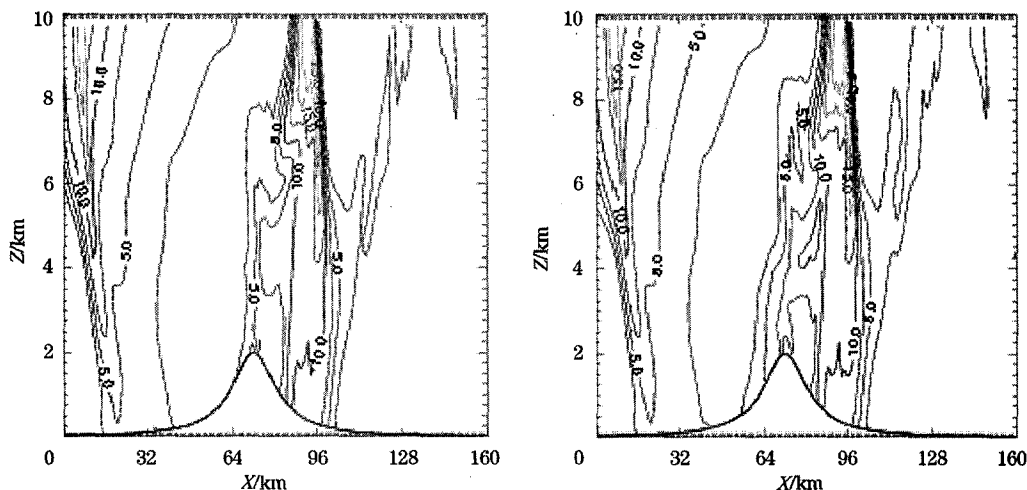


图5 初始的水汽分布在整个模式层, 山脉最大高度 2km, 模式积分 12000s 时的雨水混合比(左)和整体水含量(右)的垂直分布图

的产生, 地形降水并不只是简单的上坡降水, 还有背风回流和背风波降水机制。

(3) 回流降水天气形势是湿气流过大的山脉地形的产物。

(4) 就回流降水天气形势而言, 绝大多数气象工作者, 特别是预报员都非常熟悉, 回流降水天气形势是我国主要的降水天气形势之一。在我国绝大部分地区, 降水天气形势都表现为高层为西南气流, 而低层为东北回流, 俗称“东高西低的回流天气”。但是很少有人去思考回流天气形势是如何产生和演变的, 特别是与之相联系的水平风速切变线和垂直风速切变线是如何产生的。而我们的试验表明山脉地形对回流降水天气和风切变的产生和演变起着重要的作用。

致谢: 感谢导师谭本旭教授的指导和帮助。

参考文献

- 1 Smith, R. B. The influence of mountains on the atmosphere [J]. *Advances in Geophysics*. Academic Press, 1979, 29: 87-230.
- 2 林之光. 地形降水气候学 [M]. 北京: 科学出版社,

1995: 96-105.

- 3 Buzzi, A., Tartaglione, N., Malguzzi, P. Numerical simulations of the 1994 Piedmont flood: Role of orography and moist processes [J]. *Mon. Weather Rev.*, 1998, 126: 2369-2383.
- 4 Ferretti, R., Low-Nam, S., Rotunno, R. Numerical simulations of the 1994 Piedmont flood of 4—6 November [J]. *Tellus*, 2000, 52A: 162-180.
- 5 Rotunno, R., Ferretti, R. Orographic effects on rainfall in MAP cases IOP 2b and IOP 8 [J]. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 2003, 129: 373-390.
- 6 Qingfang, Jiang. Moist dynamics and orographic precipitation [J]. *Tellus*, 2003, 55A: 301-316.
- 7 Miglietta, M. M., Buzzi, A. A numerical study of moist stratified flow regimes over isolated topography [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 2004, 130 (600): 1749-1770, Part A.
- 8 Colle, B. A. Sensitivity of orographic precipitation to changing ambient conditions and terrain geometries: An idealized modeling perspective [J]. *Journal of The Atmospheric Sciences*, 2004, 61 (5): 588-606.
- 9 Medina, S., Houze, R. A., Jr. Air motions and precipitation growth in Alpine storms [J]. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 2003, 129: 345-372.
- 10 ARPS. ARPS Users Guide Version 4. 0, Center for Analysis and Prediction of Storms [M]. University of Oklahoma, 1995: 380.