

# 环境风场对地形对流云发展的影响

谷国军 王昂生

(中国科学院大气物理研究所, 北京 100029)

许焕斌

(北京应用气象研究所, 北京 100081)

## 提 要

通过一个带地形处理的二维弹性对流云数值模式, 模拟了斜坡地形上不同的环境风对地形对流云发展的影响. 模拟结果表明, 环境风场对于地形抬升产生的对流云的发展强度、云体结构以及地面降水等具有重大的影响. 当中上层风与爬坡风的方向相反时, 环境风切变和中上层风速越大, 对流的强度越大; 当中上层风和爬坡风方向一致时, 环境风切变削弱对流云的最大强度.

**关键词:** 数值模拟; 地形对流云; 环境风.

## 1 前 言

地形对流云降水在夏季对流性降水中占有很大的比重, 许多人就此进行过数值模拟研究<sup>[1,2,3,4]</sup>. 60年代, Orville 等<sup>[1]</sup>研究并模拟了山坡地形上积云的发展. 近期 Ogura 等<sup>[2,3]</sup>应用二维和三维积云模式分别模拟了夏季季风带中东阿拉伯海和 Ghat 山上的对流性降水以及 1976年发生在美国科罗拉多的 Big Thompson 风暴. 在该风暴的模拟中, 引入处理过的实际地形, 指出初始湿度分布对于对流云形成的位置有重要的影响, 并进一步指出降水区的位置与第一个对流泡形成的位置有非常密切的关系.

本文通过一个二维对流云模式, 模拟了在不同的环境风作用下斜坡地形上对流云的发展, 并初步讨论了环境风对地形对流云的强度、结构及降水的影响.

## 2 模式简介

模式所采用的动力框架是非静力、完全弹性的<sup>[5,6]</sup>. 根据文献<sup>[2,3,7,8]</sup>, 地形坐标系为

$$\bar{x} = x, \quad \bar{z} = H(z - z_s(x)) / (H - z_s(x))$$

1992年3月7日收到, 7月11日收到修改稿.

• 本研究得到大气科学和地球流体力学数值模拟开放实验室资助.

式中,  $z_s(x)$  是地表变化函数,  $H$  是模拟区域的高度。

在  $(x, \bar{z})$  中的预报方程为

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + \bar{w} \frac{\partial u}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p'}{\partial x} - \frac{1}{\rho} G1(x, \bar{z}) \frac{\partial p'}{\partial z} + D_u \\ \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + \bar{w} \frac{\partial w}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} G2(x) \cdot \frac{\partial p'}{\partial z} + \left[ \frac{T'_v}{T_{v0}} - \frac{p'}{p_0} - q_r \right] g + D_w \\ \frac{\partial p'}{\partial t} + u \frac{\partial p'}{\partial x} + \bar{w} \frac{\partial p'}{\partial z} + p_0 \cdot \left[ \frac{\partial u}{\partial x} + G1(x, \bar{z}) \frac{\partial u}{\partial z} + G2(x) \frac{\partial w}{\partial z} \right] \\ &+ w \cdot G2(x) \cdot \frac{\partial p_0}{\partial z} = \frac{p_0}{T_{v0}} \cdot \left[ \frac{\partial T'_v}{\partial t} + u \frac{\partial T'_v}{\partial x} + \bar{w} \frac{\partial T'_v}{\partial z} \right] + D_{p'} \\ \frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + \bar{w} \frac{\partial T}{\partial z} &= \frac{1}{\rho_0 c_p} \left[ \frac{\partial p'}{\partial t} + u \frac{\partial p'}{\partial x} + \bar{w} \frac{\partial p'}{\partial z} \right] - r_d \cdot w + Q_T + D_T \\ \frac{\partial q_v}{\partial t} + u \frac{\partial q_v}{\partial x} + \bar{w} \frac{\partial q_v}{\partial z} &= -C_1 + C_2 + P_3 + D_{q_v} \\ \frac{\partial q_c}{\partial t} + u \frac{\partial q_c}{\partial x} + \bar{w} \frac{\partial q_c}{\partial z} &= C_1 - C_2 - P_1 - P_2 + D_{q_c} \\ \frac{\partial q_r}{\partial t} + u \frac{\partial q_r}{\partial x} + \bar{w} \frac{\partial q_r}{\partial z} &= \frac{1}{\rho} \cdot G2(x) \cdot \frac{\partial}{\partial z} (\bar{\rho} V_T q_r) + P_1 + P_2 - P_3 + D_{q_r} \\ q_r &= q_r + q_c \\ \bar{w} &= u \cdot G1(x, \bar{z}) + w \cdot G2(x) \\ G1(x, \bar{z}) &= \frac{H}{H - z_s(x)} \cdot \left[ \frac{\bar{z}}{H} - 1 \right] \cdot \frac{\partial z_s(x)}{\partial x} \\ G2(x) &= \frac{H}{(H - z_s(x))} \end{aligned}$$

其中,  $u, w$  为  $(x, z)$  中的风速分量,  $\bar{w}$  为  $(x, \bar{z})$  中的垂直速度,  $p'$  为扰动气压,  $q_v, q_c, q_r$  分别为水汽、云水、雨水的混合比;  $p_0, \rho_0, T_0$  分别为基本状态下的气压、密度、温度, 它们满足静力平衡关系和状态方程:  $\frac{\partial p_0}{\partial z} = -\rho_0 g, p_0 = \rho_0 R T_0 (1 + 0.61 q_{v0}), q_{v0}$  为初始水汽混合比;  $Q_T$  表示相变潜热引起的温度变化;  $V_T$  为雨滴的末速;  $C_1$  为凝结率,  $C_2$  为云水的蒸发率,  $P_1$  为云水到雨水的自动转换率,  $P_2$  为云水到雨水的碰并转换率,  $P_3$  为雨水的蒸发率。本文采用 Kessler 的暖云参数化方案<sup>[5]</sup>。D 项为次网格湍流混合项, 采用一阶闭合<sup>[7]</sup>。

### 3 模拟所用的初始条件

模拟区域的水平尺度为 120km, 垂直尺度为 17.5km (包括一个 2.5km 厚的上边界耗散层), 水平格距为 2km, 垂直格距为 0.5km。采用 Klemp 等<sup>[5]</sup>提出的大小时间步长分离法处理声波, 大时间积分步长取 12.5s, 小时间步长取 2.5s。地形为一缓慢上升的斜坡, 坡高为 2km, 波的半宽度为 10km, 坡面函数为  $ha^2/(x+a^2)$ 。初始温、湿场在  $(x, z)$  坐标中水平均匀, 0—12km 的温度平均递减率为 7.15°C/km, 地面温度 25.0°C, 地面温度露点差 5.0°C, 坡顶处温度 23.4°C, 坡顶处温度露点差 2.0°C。初始平均流的建立在 12.5min 内完

成。

为了考察离开坡顶高度(2km)以上的环境风对地形对流云的影响,将1.0km以下的环境风都取为15m/s,1.5km处环境风为10m/s,斜坡顶所在的高度(即2.0km处)风速为0.初始环境风场在(x,z)坐标中水平均匀.到初始调整完成,斜坡能够产生80m/s左右的最大垂直抬升速度.共取7种不同的风场(She1—She7)进行比较(表1).

表1 环境风场的主要参数

个 例	切变范围 (km)	切变强度 ( $\times 10^{-3} s^{-1}$ )	最大上层风 (m/s)
She1	2—4.5	-0.8	-2.0
She2	2—4.5	-4.0	-10.0
She3	2—4.5	-8.0	-20.0
She4	2—7.0	-4.0	-20.0
She5	2—9.5	-2.0	-20.0
She6	2—4.5	0.8	2.0
She7	2—4.5	4.0	10.0

注:负号表示中上层风速方向与爬坡风方向相反.

### 4 模拟结果及分析

由初始温、湿、风场可知,7种情况下斜坡对对流泡出现的位置和强度是相同的,不同的是2.0km以上的环境风场分布.

#### 4.1 数值模拟结果的比较

(1)中上层风(2.0km以上,下同)与低层风(2.0km以下,下同)方向相反的情况

将表1中的前5例分作三组进行比较,A组由She1、She2、She3组成,它们具有相同的切变范围、不同的切变强度和上层风;B组由She3、She4、She5组成,它们具有相同的

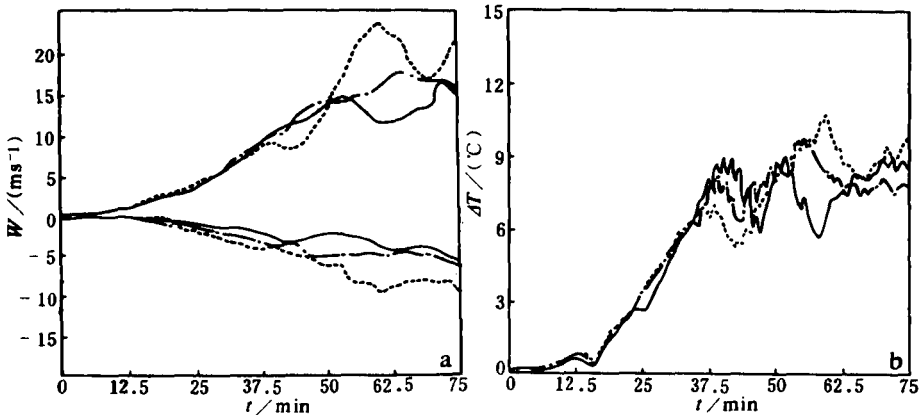


图1 She1、She2、She3的最大上升(下沉)速度(a)和扰动温度(b)的时间变化  
(--- She1, -.- She2, ..... She3)

中上层风,不同的切变强度和切变范围;C组由She2和She4组成,它们具有相同的切变强

度、不同的切变范围和中上层风。

A 组:由图 1 可以发现,随着切变强度的增大,最大垂直上升速度和最大下沉速度的峰值都有较大的增长,分别为 16.0、17.5、23.0m/s 和 -5.5、-6.5、-9.5m/s;最大扰动温度的峰值也发生了较大的增长,分别为 8.7、9.6、10.5℃。这说明,随着切变的增强,云中释放的潜热增加,对流加强。

从它们的地面累积降水曲线(略)可以发现,随着切变的加强,地面的累积降水增加,到 75min,分别为 780、890、920ton。因此切变的增强,不仅增加了对流强度,还可以加大地面降水。

B 组:由图 2a 可以发现,随着切变范围的减小和切变强度的增大,最大垂直速度的峰值有较大的增长,She3、She4 明显强于 She5。

从它们的累积降水曲线(图 2b)看,切变的增大,能够造成地面降水的增加。

从图 3(仅给出模拟区域中的一个 80km 长,12.5km 高的主要区域)可以发现,随着低层切变的减小,地形对流云云体的上部和主上升区发生了逆风倾斜,随着切变的减小,倾斜程度加大,它们扰动气压场的分布表明,斜坡上地形对流云的存在,改变了初始上坡风形成的高压阻塞形势,而形成了比较深的低压,由于降水的作用和辐合上升气流的作用,低压区一分为二,降水在斜坡上发生。

另外还可以看到,随着切变的增加,云体沿斜坡向下的运动速度加快,因此造成了它们之间降水位置的差异。

上述结果也表明,在上层风一样的情况下,中下层切变强度的增加,虽然同时减小了切变范围,但地形对流云的强度增大,云的移动速度加快,地面累积降水增多。

从图 3 还可以发现,地形对流云的上升区虽然没有分裂,但其液态水分布已经出现多个极值中心。

C 组:由图 1 和图 2 可以发现,随着中上层风速的增加,最大垂直上升速度和下沉速度的峰值都有增大,分别由 She2 的 17.0m/s、-6.5m/s 变为 She4 的 23.0m/s、-10.5m/s。此外,最大扰动温度也由 She2 的 9.7℃ 增高到 She4 的 12.0℃;到 75min 时的地面累积降水由 She2 的 890ton 增加到 She4 的 940ton。这说明,在此地形与风场的作用下,中上层风速的增大,也能加大对流强度,有利于对流云的发展。

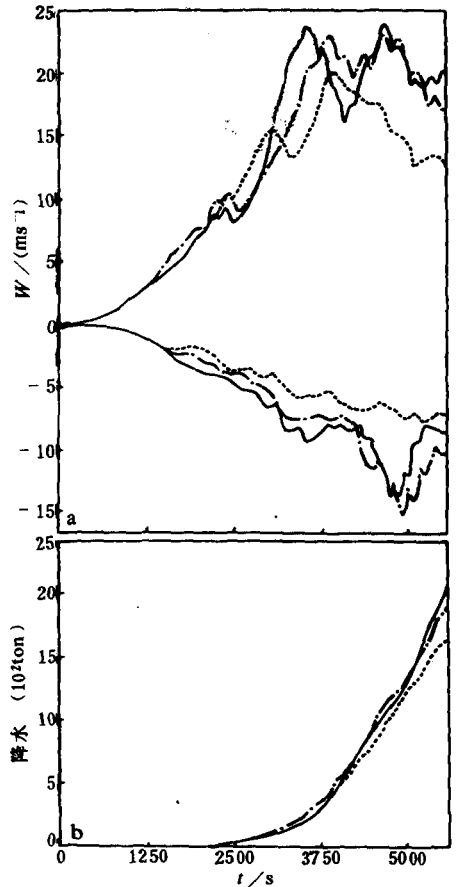


图 2 She3, She4, She5 的最大上升(下沉)速度(a)和地面累积降水(b)的时间变化(—She3, - - -She4, .....She5)

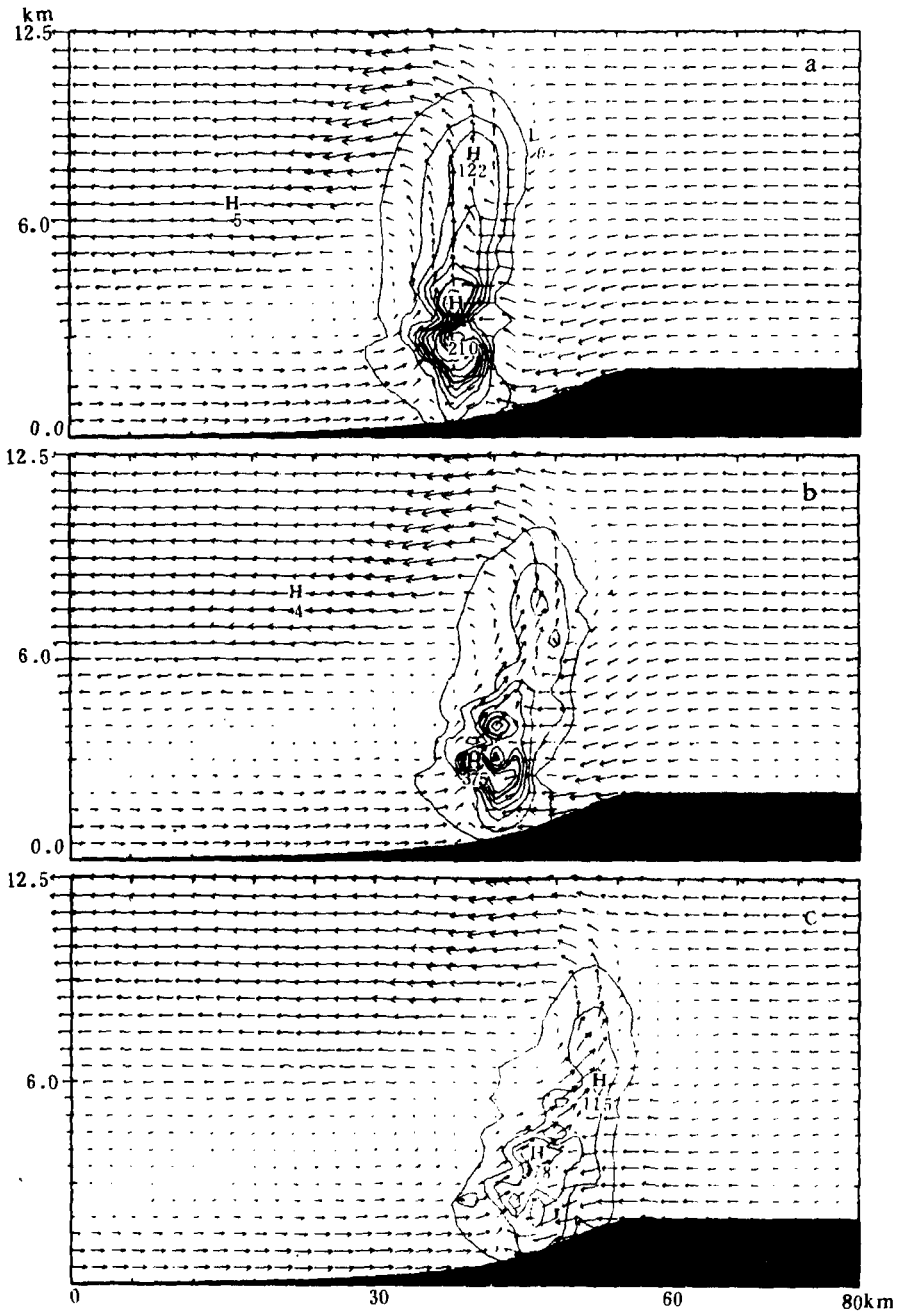


图3  $t = 62.5 \text{ min}$  时, *She3*(a)、*She4*(b)、*She5*(c) 的对流云流场和液态水的空间分布  
(凝结量的间隔为  $4 \times 10^{-3} \text{ g/g}$ , 最小值为  $1 \times 10^{-3} \text{ g/g}$ )

## (2) 中上层风与低层风同向的情况

表1中的 *She6* 和 *She7* 具有相同的切变范围、不同的切变强度和 中上层风(见图4)。由于切变的增强,抑制了对流云的发展。随着切变的增强,各要素的峰值明显减小。从最大垂直速度的时间演变可以发现,此类对流云的发展具有明显的双峰或多峰变化。

从 75min 对流云的发展状况(图略)可以发现, *She6* 的移动速度较慢,上坡风形成的

上升区和它本身的上升区联成一片,保证了坡下潮湿空气的供应.到75min时,*She6*的中心基本上还在坡顶位置,而*She7*已离开坡顶大约6km,因此*She7*在右移过程中没有受到上坡风的明显作用.此外,它们的流场和外形也有明显的差异.

#### 4.2 环境风对地形对流云的影响

从上述模拟结果可以得到,环境风(离开坡顶以上)相对于抬升坡面的方向、中上层风速的大小和切变强度,对于抬升生成的地形对流云的发展强度、云体结构、降水量及云的移动速度等具有决定性的影响.

由于中上层风的方向基本决定着对流云的移动方向,所以当上中层风方向与爬坡风方向相反(即前5例)时,对流云在靠近坡顶的位置生成,向坡下运动,从坡底吹来的潮湿空气成了它继续发展的能源补充;而在中上层风与爬坡风方向一致(即后2例)时,对流云由坡顶向右运动,前方辐合进来的空气比较干燥,所以后一类对流云的强度明显弱于前一类对流云的强度(图1、2、4).

由前5例的结果比较可以得到:当中上层风的方向与爬坡风方向相反时,切变强度的增加可以促使对流强度的增加(见A、B组),中上层风速的增加也能增加对流的强度(见C组).这与平坦地面上风切变对对流云发展影响的二维数值模拟结论是相反的.平坦地面上,环境风切变的增强可能会抑制对流云所具有的最大强度<sup>[9]</sup>;而在此情况下,由于切变和中上层风都能驱使对流云沿斜坡向坡底移动,而使云的底部不断受到坡面的强迫抬升,低层潮湿的爬坡气流成了其理想的前部入流,切变越强或中上层风越大,这种驱使力和强迫力越大,对流云向坡底运动的速度越大,它获得的潜能(即水汽)亦越多.因此,切变的增强不仅不能削弱对流云的强度,反而能促使对流云的发展.由于斜坡的持续抬升作用和前部潮湿空气的不断进入,对流云在降水出现后仍能保持一定的上升速度(图1、2、4).

与前5例的情况不同,*She6*和*She7*比较接近于平坦地面上对流云的发展情况,即切变的增强对对流云的最大强度起削弱作用.但是由于斜坡的不断抬升,使得对流云的后部可以补充不同程度的潮湿空气,*She6*比较明显,因此对流云在降水出现后也能持续发展.最大垂直速度的时间变化曲线具有的多峰结构就是由斜坡抬升生成的小对流泡并入造成的.

大量的观测事实表明,山的迎风坡的降水要比山顶附近的降水多,亦即云容易在迎风坡上发展.当然,迎风坡的湿度条件及对流泡形成的位置是一个重要的原因.但是,从我们

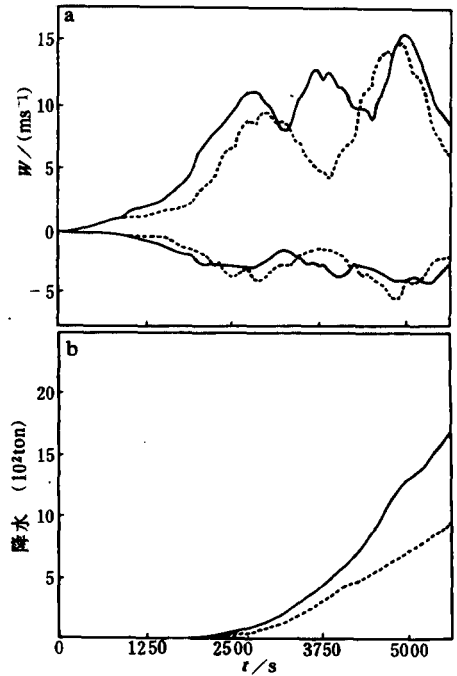


图4 *She6*、*She7* 的最大上升(下沉)速度(a)和地面累积降水(b)的时间变化(—*She6*, ···*She7*)

的模拟结果可以发现,当中上层风与爬坡风方向相反时,虽然对流泡在山顶附近形成,对流云在环境风的作用下仍在山坡上发展,形成降水。

因此,环境风对地形对流云发展的影响,首先在于风的方向,然后才是风的垂直结构。不同的中上层风方向(即与爬坡风方向相同或相反),风的垂直切变可以有相反的作用。所以,风的方向和切变大小对云的运动方向、移动速度、对流强度、降水等具有重要的影响。

## 5 结 语

从本文的模拟结果看,环境风状况对于地形对流云的发展具有重要的影响。地形对流云的发展及结构与平坦地面上对流云的发展存在许多差异,它的发展不仅受到环境层结的影响,而且受到环境风与地形相互作用的影响。因此,地形对流云的研究,还有待于大量的观测和数值模拟结果的分析。

致谢:感谢王秀敏同志绘制了部分图表。

## 参 考 文 献

- 1 Orville H. D. A Numerical Study of the Initiation of Cumulus Clouds over Mountainous Terrain. *J. Atmos. Sci.*, 1965, **22**: 684—699.
- 2 Ogura Y. and M. Yoshizaki, Numerical study of orographic-convective precipitation over the eastern Arabian Sea and the Ghat mountains in the summer monsoon season. *J. Atmos. Sci.*, 1988, **45**:2097—2122.
- 3 Yoshizaki M. and Y. Ogura. Two-and three-dimensional modeling studies of the Big Thompson storm. *J. Atmos. Sci.*, 1988, **45**: 3700—3722.
- 4 Cocho Y. Numerical experiment of orographic heavy rainfall due to a stratiform. *J. Meteor. Soc. Japan*, 1978, **56**: 405—423.
- 5 Klemp J. B. and R. B. Wilhelmson. The simulation of three-dimensional convective storm dynamics. *J. Atmos. Sci.*, 1978, **35**:1070—1096.
- 6 许焕斌,王思徽. 三维可压缩大气中的云尺度模式. *气象学报*, 1990, **48**:80—90.
- 7 Durran D. R., and J. B. Klemp. A compressible model for the simulation of moist mountain waves. *Mon. wea. Rev.*, 1983, **111**:2341—2361.
- 8 Clark T. L. A Small-scale dynamic model using a terrain-following coordinate transformation. *J. Comput. Physic.*, 1977, **24**:186—215.
- 9 叶家东,李如祥. 积云动力学. 北京:气象出版社,1988. 231—246.

## EFFECTS OF AMBIENT WIND ON THE DEVELOPMENT OF OROGRAPHIC-CONVECTIVE CLOUD

Gu Guojun Wang Angsheng

*(Institute of Atmospheric Physics, Academia Sinica, Beijing 100029)*

Xu Huanbin

*(Beijing Institute of Applied Meteorology, Beijing 100081)*

### Abstract

The paper simulates the effects of ambient wind on the development of orographic-convective cloud by means of a two-dimensional compressible convective cloud model with terrain-following coordinate. The results indicate: Ambient wind has a great influence on the developing intensity, structure and precipitation of orographic-convective cloud over an upslope. When the middle-upper wind and lower upslope wind are in the reverse direction, the larger the wind speed and Shear intensity of middle-upper level wind, the severer the convection; when in the identical direction, ambient wind will weaken the maximum intensity of convection.

**Key words:** Numerical simulation; Orographic-convective cloud; Ambient wind.