

文章编号: 0529-6579 (1999) 03-0090-04

山谷环流的二维数值模拟^{*}

林文实¹, 牛国跃², 王雪梅³, 范绍佳¹

(1. 中山大学大气科学系, 广东 广州 510275;

2. 中国科学院大气物理所, 北京 100029; 3. 中山大学环境科学系)

摘 要: 建立一个采用地形跟随坐标系, 能适用于复杂地形的边界层数值模拟的二维静力平衡大气模式. 模式只需要单点探空资料及高层地转风资料作为初始条件. 利用该模式对祁连山引起的山谷风环流进行模拟研究. 试验结果表明在早晨有较强的下坡风, 厚度为 1 000 m; 而在下午表现为谷风, 厚度为 800 m.

关键词: 山谷环流; 边界层; 二维数值模拟

中图分类号: P 404 **文献标识码:** A

复杂地形上边界层的研究, 越来越受到重视. 野外观测试验常受到限制, 而通过建立平流扩散方程的数值模式来模拟边界层的结构便成为一种有效的途径. 国内已有人采用数值模拟的方法研究陆面边界层的状况^[1]. 本文试图建立比较简单的二维数值模式, 揭示祁连山谷风环流的特征.

1 模式的介绍

1.1 模式方程组

模式采用了地形跟随坐标下的二维不可压缩流体静力平衡原始方程组. 地形坐标系转换为 $z^* = \frac{H}{H - Z_g}(z - Z_g)$, 其中, H 为模式顶高, Z_g 为地形高度. 经此坐标变换后, 模式的基本方程组在二维坐标系 (x, z^*, t) 中的形式为^[2]

$$\frac{du}{dt} = f_v - \theta \frac{\partial \pi}{\partial x} + g \frac{z^* - H}{H} \frac{\partial Z_g}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(K_H \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \left(\frac{H}{H - Z_g} \right)^2 \frac{\partial}{\partial z^*} \left(K_z \frac{\partial u}{\partial z^*} \right) \quad (1)$$

$$\frac{dv}{dt} = -fu + fu_g + \frac{\partial}{\partial x} \left(K_H \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \left(\frac{H}{H - Z_g} \right)^2 \frac{\partial}{\partial z^*} \left(K_z \frac{\partial v}{\partial z^*} \right) \quad (2)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_H \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + \left(\frac{H}{H - Z_g} \right)^2 \frac{\partial}{\partial z^*} \left(K_\theta \frac{\partial \theta}{\partial z^*} \right) \quad (3)$$

$$\frac{dq}{dt} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_H \frac{\partial q}{\partial x} \right) + \left(\frac{H}{H - Z_g} \right)^2 \frac{\partial}{\partial z^*} \left(K_q \frac{\partial q}{\partial z^*} \right) \quad (4)$$

^{*} 收稿日期: 1998-06-22 作者简介: 林文实, 男, 1965 年生, 讲师.

$$\frac{\partial \pi}{\partial z^*} = -\frac{g}{\theta} \frac{H - Z_g}{H} \quad (5)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w^*}{\partial z^*} - \frac{1}{H - Z_g} u \frac{\partial Z_g}{\partial x} = 0 \quad (6)$$

其中, $\pi = C_p (p/1000)^{R/C_p}$, $w^* = w \frac{H}{H - Z_g} + \frac{z^* - H}{H - Z_g} u \frac{\partial Z_g}{\partial x}$, $\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + u \frac{\partial}{\partial x} + w^* \frac{\partial}{\partial z^*}$. u, v 分别为风速在纬向和经向的分量(m/s), w 为 (x, z, t) 坐标系下的垂直速度, w^* 为 (x, z^*, t) 坐标系下的垂直速度, u_g 为定常地转风速(m/s), θ 为位温(K), q 为水汽比湿(g/kg), p 为气压(hPa), f 为科氏参数, $f = 2\Omega \sin \varphi$ (s^{-1}), C_p 为空气的定压比热($1004 J \cdot K^{-1} \cdot kg^{-1}$), R 为干空气的气体常数($287 J \cdot K^{-1} \cdot kg^{-1}$), K_H 和 K_z 分别为水平和垂直动量湍流交换系数(m^2/s), K_θ 和 K_q 分别为热量和水汽湍流交换系数(m^2/s).

1.2 方程组闭合方案

近地层的参数化采用 Monin-Obukhov 相似理论. 近地层以上的湍流交换系数, 在白天不稳定条件下采用 O'Brien^[3] 提出的廓线系数公式; 在陆地夜间时, 采用 Blackadar^[4] 提出的局地交换系数的形式. 混合层高度由 Deardorff^[5] 的预报公式给出.

1.3 地表能量平衡方程

地表温度由文献[4]发展的“强迫—恢复”薄层土壤能量收支方程计算

$$C_g \frac{\partial T_g}{\partial t} = H - H_m \quad (7)$$

其中, $H = R_n - H_s - H_L = Q_s + I_s - H_s - L_H E_s$, $R_n = Q_s + I_s = Q_s + I \downarrow - I \uparrow$, $H_m = C_g K_m (T_g - T_m)$. R_n 为净辐射通量, Q_s 和 I_s 分别是净短波辐射和长波辐射通量, H_s 是由于分子传导而进入深层土壤的热通量, C_g 为土壤单位面积热容量($180 kJ \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$), T_m 为深层土壤温度, K_m 为土壤热传输系数. H_s 和 E_s 为感热通量和水汽通量, L_H 为蒸发潜热($2501 \times 10^6 J/kg$). 以上参数和计算步骤详见文献[1].

1.4 数值计算和边界条件

各变量在网格中的分布采用交错网格形式. 时间采用向前差分, 水平平流项采用3次样条差值法, 垂直平流项采用显式迎风差分格式, 其余项均采用中央差分格式.

下边界条件取 $u = v = w^* = 0$, $q_g = F_w q_{gs} + (1 - F_w) q(1)$, F_w 为土壤湿度(取为0.30), q_{gs} 为地表处的饱和比湿, $q(1)$ 为第一层的湿度.

在上边界 $z^* = H$ 处, $u = u_g$, $v = 0$, $w^* = 0$. 为了避免在上边界造成反射, 在模式顶层5个格点, 设置了吸收层^[6].

在侧边界, 位温、比湿及 π 采用零梯度边界 $\frac{\partial}{\partial x}(\theta, q, \pi) = 0$, $\frac{\partial}{\partial y}(\theta, q, \pi) = 0$. 风速在上下游边界采用 $u = u_g$, 下游边界 $\frac{\partial}{\partial x}(u, v) = 0$.

2 模式的输入参数及初始值

选取祁连山脉高台地区为模式积分的区域, 纬度范围为 $38 \sim 40^\circ N$ 的南北剖面. 模拟日期选定在夏至后的7月1日. 模式计算范围为 $270 km \times 12 km$. 模拟的水平格点为45个, 水平网格距为6km, 垂直15层, 垂直方向分成不等距的格点, 时间积分步长为30s, 模拟时间为24

h. 背景风速 u 为 0.5 m/s , v 则为 0 . 垂直层次和初始温湿层结如表 1.

表 1 边界层模拟的初始温湿层结

Tab 1 The initial temperature and moisture stratification in the simulation of the atmospheric boundary layer

高度/m	8	15	100	300	700	1 200	2 000	3 000	4 000	5 000	6 000	7 000	8 000	10 000	12 000
位温/K	290	291	292	293	295	307	312	318	324	329	344	346	349	352	361
比湿/($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	4.2	3.8	2.7	2.0	1.9	0.8	0.6	0.4	0.2	0.2

3 模拟结果

山谷风是在山区经常出现的局地环流. 祁连山的山峰和山谷的拔海高度差异大, 有很强的地形梯度, 山谷环流的表现更加明显.

图 1 是积分到早晨 6:00 时的水平风速和垂直风速分布图. 可以看出, 早晨表现为较强的流泄风(下坡风), 在近地面层达到最大, 其中下沉气流非常强, 并且在山坡部位最强, 达 0.7 m/s 以上. 在谷地上空转变为上升气流, 反映了祁连山上空及坡面的地表面, 在夜间由于辐射冷却而形成热力强迫的山风环流. 在山坡上空 1 km 高度上为上升气流, 说明流泄风的厚度较大. 高空还强迫出重力波.

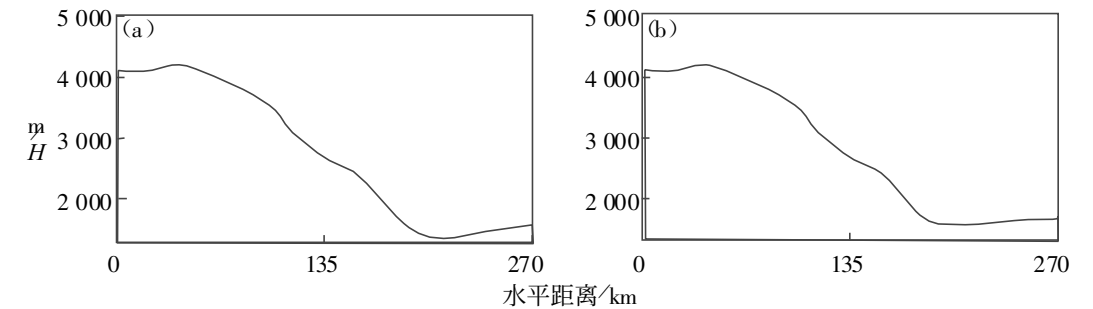


图 1 模拟的 6:00 时的水平—垂直剖面图

Fig 1 The model-simulated horizontal-vertical section at 6:00

(a) 水平风速 u , 等值线间隔为 1.0 m/s ; (b) 垂直风速 w , 等值线间隔为 4.0 m/s

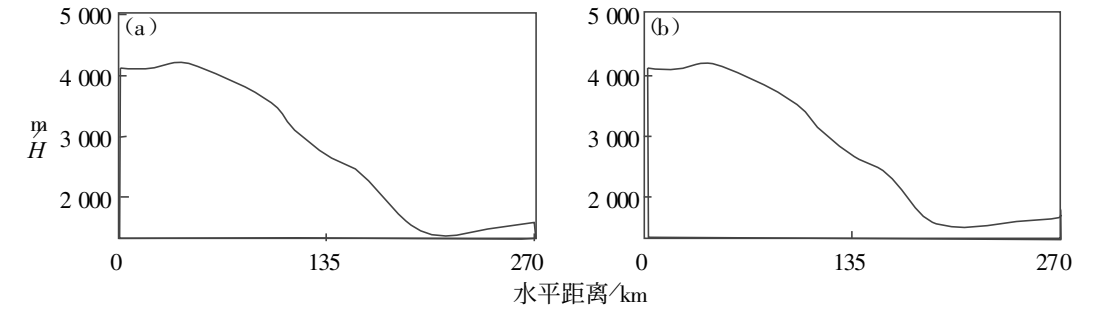


图 2 模拟的 14:00 时的水平—垂直剖面图

Fig 2 The model-simulated horizontal-vertical section at 14:00

(a) 位温 θ , 等值线间隔为 2.0 K ; (b) 比湿 q , 等值线间隔为 0.5 g/kg

图2是积分到14:00时的位温场和比湿场.可以看出由于祁连山上空在白天太阳辐射加热地表面,祁连山出现位温高值区,而在谷地呈现出一个弱的冷湿中心.

图3是在14:00时的风场情况,由于祁连山上空位温较高,被加热的空气有一强的上升气流,在地形梯度较大的山坡地段,也有上升气流高值区,风速的合成表现为从谷地吹向祁连山的谷风.谷风没有山风那么强,但水平风转向的高度也有800 m高.在谷地呈现出范围较大的下沉气流.

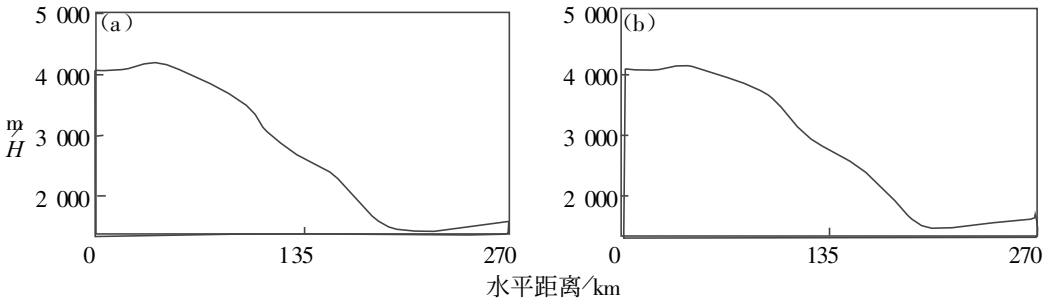


图3 模拟的14:00时的水平—垂直剖面图

Fig 3 The model-simulated horizontal—vertical section at 14:00

(a) 水平风速 u , 等值线间隔为 1.0 m/s; (b) 垂直风速 w , 等值线间隔为 4.0 m/s

参考文献:

- [1] 张雷鸣, 赵鸣. 冷空气爆发时陆地边界层的数值模拟 [J]. 大气科学, 1993, 17 (2): 239~248.
- [2] PIELKE R A 中尺度气象模拟 [M]. 张杏珍等译. 北京: 气象出版社, 1993. 676.
- [3] O'BRIEN J J A note on the vertical structure of the eddy exchange coefficient in the planetary boundary layer [J]. J Atmos Sci, 1970, 27: 1213~1215.
- [4] BLACKADAR A K. High resolution models of the planetary boundary layer [J]. Adv Envir Sci and Engine, 1979, 1 (1): 50~85.
- [5] DEARDORFF J W. Three-dimensional numerical study of the height and mean structure of a heated planetary boundary layer [J]. Bound Layer Meteor, 1974, 7: 81~106.
- [6] KLEMP J B, LILLY D K. Numerical simulation of hydrostatic mountain waves [J]. J Atmos Sci, 1978, 35: 78~107.

A Numerical Study on the Two-Dimensional Mountain-Valley Circulation

LIN Wen-shi^{*}, NIU Guo-yue, WANG Xue-mei, FAN Shao-jia

Abstract: A two-dimensional hydrostatic atmospheric boundary layer model over complex topographer in a terrain-following sigma coordinate system is developed. The single sounding material and the geostrophic wind can be used for the initial condition. The simulation of the mountain-valley circulation in the Qilian mountain is made. The results show that there is a strong down-slope wind with a depth of 1 000 m and a valley wind with a depth of 800 m in the afternoon.

Keywords: mountain-valley circulation; boundary layer; two-dimensional numerical simulation

^{*} Department of Atmospheric Sciences, Zhongshan University, Guangzhou 510275, China.