

过山气流二维定常模式的实际应用

彭永清 钱维宏*

提 要

本文对气流流经三种不同水平宽度的地形所产生的动力学效应进行了研究。应用定常的二维模式作数值模拟,结果表明:大尺度地形可影响到山脊上游的大气运动,山脊上游出现下沉气流,造成干燥气候;中尺度山脉促使下游大气产生波状扰动,可影响飞机飞行;小尺度山丘(或建筑群)对气流中的气溶胶扩散会产生影响。充分了解小尺度地形气流的特点,可给山区城镇工厂烟囱的合理布局以及作物育苗阶段的秧田选地提供依据。

一、引 言

中小尺度地形对过山气流的影响,是一个越来越引起人们重视的问题。因为,人们不再仅满足于对气流流经中尺度地形可在背风一侧出现波状扰动,从而可以解释波状云的形成这一类问题了。实际上,中小尺度地形对过山气流的影响,涉及到近地气层的大气污染,山区城市建设中工厂烟囱的布局是否合理,以及农业生产中育苗阶段的秧地选择等方面。本文从生产角度出发,就中小尺度地形对过山气流的动力学效应,采用定常的二维模式进行研究,并对其实际意义作了必要的讨论。

二、控 制 方 程

为明确起见,我们从气流翻越地形的二维问题着手,即不考虑绕流的影响。山脊高度方程为 $z = \delta(x)$; 假定未受扰动的气流方向沿 x 轴,且仅与高度 z 有关。在定常情况下,我们给出下列控制方程^[1]

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u}{\partial z} = - \frac{\partial \pi}{\partial x} \quad (1)$$

$$u \frac{\partial w}{\partial x} + w \frac{\partial w}{\partial z} = - \frac{\partial \pi}{\partial z} + \lambda \theta \quad (2)$$

*江苏省东台县气象局

$$u \frac{\partial \theta}{\partial x} + w \frac{\partial \theta}{\partial z} + S(z)w = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

方程中 $\pi = \frac{C_p \Theta_0}{A} \left(\frac{p}{1000} \right)^{\frac{AR}{C_p}} = \frac{C_p \Theta_0}{A \theta} T$ 代替气压; $\lambda = \frac{g}{\Theta} = \text{常数}$, 为浮力参数;

$S = \frac{\partial \Theta}{\partial z} = \frac{\Theta}{T} (\gamma_d - \gamma)$, $\gamma = -\frac{\partial T}{\partial z}$, $\gamma_d = \frac{Ag}{C_p}$ 为干绝热温度递减率; θ 为扰动位温, Θ_0 为未扰动位温 Θ 的平均值, 其它均为通用符号。

由方程(4)得知, 可引进流函数 ψ , 使

$$u = \frac{\partial \psi}{\partial z} \quad w = -\frac{\partial \psi}{\partial x} \quad (5)$$

于是, 代入(3)式可得定常情形下热流入量方程的雅可比形式

$$\frac{\partial \left(\psi, \theta + \int_0^z S(z) dz \right)}{\partial(x, z)} = 0 \quad (6)$$

由此, 根据雅可比的性质, 立即得到积分式

$$\theta = f_1(\psi) - \int_0^z S(z) dz \quad (7)$$

式中 $f_1(\psi)$ 为 ψ 的任意函数。由(1)、(2)两式消去 π , 再根据(5)式可导出

$$\frac{\partial(\psi, \Omega)}{\partial(x, z)} = \lambda \frac{\partial \theta}{\partial x} \quad (8)$$

式中 Ω 为涡度, 即

$$\Omega = \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} \quad (9)$$

将(7)式代入(8)式则可化为雅可比形式

$$\frac{\partial(\psi, \Omega - \lambda f_1'(\psi) z)}{\partial(x, z)} = 0 \quad (10)$$

式中撇号表示对自变量的导数。由(10)式, 我们又得到一个积分

$$\Omega = f_2(\psi) + \lambda f_1'(\psi) \cdot z \quad (11)$$

这样方程(1)~(4)就归结为求解方程组(7)、(9)和(11), 而方程中出现的任意函数 $f_1(\psi)$ 、 $f_2(\psi)$, 在基态 $U(z)$ 和 $S(z)$ 为给定的简单解析式时, 可由边界条件求出。比如, 给定

$$U = \text{常数} \quad S = \text{常数} \quad (12)$$

由下列边界条件

$$u|_{x=-\infty} = U \quad \theta|_{x=-\infty} = 0 \quad (13)$$

代入(7)式得 $f_1(\psi_\infty) = Sz$, 又令 $\psi|_{x=-\infty} = U \cdot z$, 于是 $f_1(\psi)$ 确定为

$$f_1(\psi) = \frac{S}{U} \psi \quad (14)$$

将 $x = -\infty$ 时的值代入(9)和(11)两式, 並考虑到关系式 $\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} = 0$, $\frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} = 0$; $z = \frac{\psi}{U}$,

$f_1'(\psi_\infty) = \frac{S}{U}$ 可求得

$$f_2(\psi) = -\frac{\lambda S}{U^2} \psi \quad (15)$$

下标 ∞ 表示 $x = -\infty$ 时的流函数值。将(14)、(15)及(9)各式代入(11)式, 就得到用来描写不同尺度地形对过山气流影响的方程如下

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} + \frac{\lambda S}{U^2} (\psi - Uz) = 0 \quad (16)$$

此为赫姆霍尔兹型方程。

三、数值求解及其结果

取山脉的截面形如一半长轴为 a 、半短轴为 b 的的椭圆形上半部, 即

$$\delta(x) = \begin{cases} \frac{b}{a} \sqrt{a^2 - x^2} & |x| \leq a \\ 0 & |x| > a \end{cases}$$

在基流 $U = \text{常数}$, 层结为稳定的 ($S = \text{常数} > 0$) 情况下, 按不同网格距, 对方程(16)进行数值求解。采用塞得尔迭代法给出 ψ 场。下面我们将对三种不同尺度的地形, 讨论过山气流所产生的不同的动力效应。

1. 气流流经大尺度地形时的情形

首先按下列参数： $a=4 \times 10^3$ 米， $b=5 \times 10^3$ 米， $U=16$ 米/秒， $S=4 \times 10^{-3}$ 度/米；水平网格距为 4×10^3 米，垂直格距为 2×10^3 米；给出水平范围为3200公里，垂直厚度为30公里区域内的初始场，而后依(16)式的差分方程进行迭代求解，直到迭代结果收敛为止，结果如图1所示。

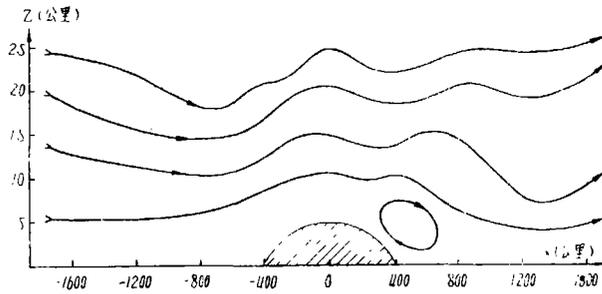


图1 二维定常模式中大尺度过山气流示意图。
 $a=400$ 公里， $b=5$ 公里， $S=4 \times 10^{-3}$ 度/米，
 $U=16$ 米/秒

图1为未扰动气流 $U=16$ 米/秒(类似与中纬度自由大气中的平均气流)流经大尺度地形时所产生的动力学效应。由图可见，气流流经大地形时，扰动不单在下游产生，上游也出现扰动。基流流速较大时，山脊上游半个山脊长轴之外的中上层气层有一致的下沉气流。这一下沉气流可形成这一地区多日照的干燥气候。沿我国青藏高原 $30^\circ\text{N} \sim 35^\circ\text{N}$ 的纬向剖面就有类似这样的大地形，尤为引人注意的是，图1与文献[2]从资料分析得到的平均纬向环流非常相象。

不过需要说明，对于象垂直厚度占据了整个对流层的气层来说，忽略了空气密度随高度的变化对运动的影响，而采取不可压流体的假定，是过于简化了，上述结果有一定的局限性。只是为了比较，才进行了必要的数值计算。

2. 气流流经中尺度地形的情形

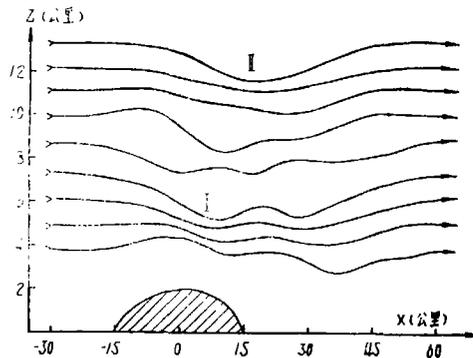


图2 越中尺度地形的气流

其次,我们按下列参数: $a=15 \times 10^3$ 米, $b=2 \times 10^3$ 米, $U=10$ 米/秒, $S=4 \times 10^{-3}$ 度/米;水平网格距为 15×10^3 米,垂直格距为 2×10^3 米;对区域为90公里 \times 16公里范围的气流按(16)式的差分方程求解,结果如图2所示。

当气流流经中尺度地形时,仅在背风一侧形成波状扰动。水汽条件充足时,可以形成几条平行于山脉走向的云带,若在背风一侧出现暴雨中心,则会逆气流方向传播*;水汽条件不具备时,虽然不形成云系,但这种扰动仍然存在,扰动向上传播,促使高层形成晴空湍流,这种湍流甚至可在12公里高度上观测到。

特别值得重视的是,图2中在背风一侧形成的波状扰动,在山脊右上方各有两处流线密集区(图中注以I、II),这里,在稳定层结大气下局部风速能增强几倍,如果大气处于不稳定层结状态下,将会产生强烈的对流。这时,在这些高度上对飞机的飞行是危险的。

3. 气流流经小尺度地形时的情形

我们又对 $a=100$ 米, $b=300$ 米,陡峭的小地形进行了计算。区域的水平距离为800米,垂直厚度为1200米,基流风速 $U=8$ 米/秒, S 仍为 4×10^{-3} 度/米。为说明问题,我们分别给出了扰动流线分布(如图3所示)和经过 $\psi = \psi' + Uz$ 转换的流场(如图4所示)。

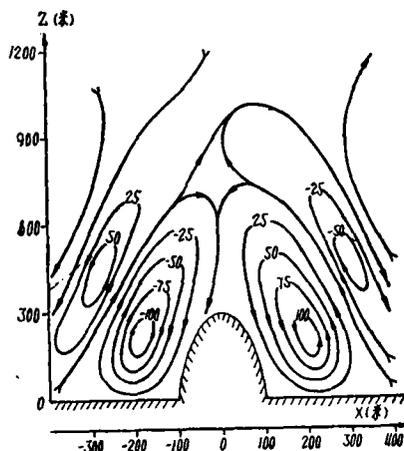


图3 气流流经小尺度地形时扰动流函数 ψ' 的分布

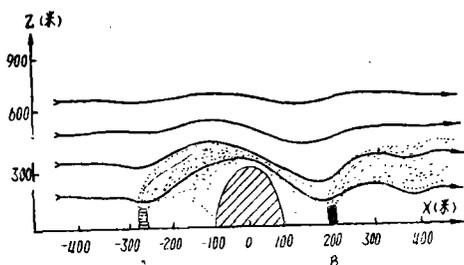


图4 气流流经小尺度地形时对工厂烟囱排放质粒扩散的影响

由图3可见,扰动气流主要分布在山脊两侧的低层,在山坡近傍为下沉气流,这是一个有利于农作物育苗阶段的农田小气候的地带。设在图3的右方为向阳坡,若某种作物(如水稻)在春季育苗,白天山坡受太阳辐射增热快,能提供较适宜的气温条件;夜晚,山坡冷却也快,似为不利,但由于局地气流越过山脊时为下沉气流,因为下沉增温,而不致产生危害。1972年因倒春寒,在我国江南大部分地区都因冷害曾出现烂秧现象,但有部分丘陵地区正由于借助了这种小地形下沉气流的特点,没有出现烂秧,这是发挥了农田小气候作用的结果。

另外,在丘陵山区和有高大建筑群的城市,由于山地或建筑群的存在,对流经小尺度地形的气流将产生影响,如果不加充分注意,则将产生灾害。例如工厂厂址选择不

*李启泰,福建山区雨季背风波暴雨的发生发展及其次声波探测,气象论文选,福建省气象科学研究所编,1982年3月

合理, 烟囱排放废气和烟尘, 会污染近地气层大气, 破坏环境。如图 4 所示, 工厂烟囱的安排布局不同, 就会产生不同的扩散结果。烟囱建在山脊上风方一侧(如图4中位置A), 气流在山脊前, 沿山脊上升, 但到达山脊上方时, 则因出现下沉气流, 使烟囱排放的污染物在山后向下大量沉降, 污染了山丘前后的环境。看起来, 山后的居民点、医院、疗养院等设施离烟囱较远, 还隔着一座山, 但因为小地形对气流的影响, 也会出现严重污染。若烟囱建在山脊背风一侧(如图4中位置B), 污染物的排放随气流向上扩散, 若适当加高烟囱高度, 则污染质粒可扩散到自由大气中去, 不致造成危害。

四、结 论

本文对气流流经三种不同水平宽度的地形所产生的动力学效应进行了研究。应用定常的二维模式作数值模拟, 结果表明: 大尺度地形可影响到山脊上游的气流运动, 山脊上游中上层出现下沉气流, 造成干燥气候。中尺度山脉促使下游大气产生波状扰动, 如果处于层结不稳定状态下, 将会产生强烈对流, 且使扰动向上传播, 形成晴空湍流, 可影响飞机飞行。小尺度山丘(或建筑群)对气流中的气溶胶扩散会产生影响, 充分了解小尺度地形气流的特点, 可给山区、城镇、工厂烟囱的合理布局, 或为作物育苗阶段的秧田选地提供依据。

参 考 文 献

- [1] 古特曼著, 曲延禄译, 中尺度气象过程非线性理论引论, 科学出版社, 1976。
- [2] 叶笃正、高由禧等著, 青藏高原气象学, 科学出版社, 1979。

PRACTICAL APPLICATION OF A TWO-DIMENSIONAL STATIONARY MODEL FOR THE FLOW OVER MOUNTAINOUS AREAS

Peng Yongqing, Qian Weihong*

ABSTRACT

A two-dimensional stationary model is used to examine the dynamical effects produced by the flow over mountainous areas of three horizontal scales. Results from numerical simulation show; (1) large-scale orograph may produce subsidence of air flow upstream of the mountain ridge, thus resulting in dry climate; (2) meso-scale mountain ranges may cause wave motion downstream which may influence aircraft in flight; and (3) small-scale hilly areas (or architectural complexes) may have some influence on the aerosol diffusion in the flow. A better knowledge of the characteristic features of the small-scale orographic flow would help to plan the rational distribution of factories in the mountainous areas and the proper sitting of the rice seedling beds during the seedling stage.

*The Weather Station of Dongtai County, Jiangsu Province