

影响大兴安岭焚风的几个因子^{*}

齐 瑛 傅抱璞

(南京大学大气科学系)

提 要: 本文借助二维大气中尺度数值模式, 讨论了我国东北地区1月份大兴安岭东坡的焚风与山区地形形状的关系, 并定性地绘出了该焚风现象生消的背景条件。

主题词: 大兴安岭 焚风 地形

我国东北地区大兴安岭东坡的焚风不仅是我国冬季地形影响气候的三大主要现象之一, 而且也是造成大兴安岭东坡冬季易发森林火灾的重要局地气候背景。但是, 至今为止, 关于大兴安岭焚风现象的理论研究开展很少。作者¹⁾利用二维大气中尺度数值模式成功地模拟了冬季1月份大兴安岭东坡的焚风现象, 进而证实大兴安岭东坡的焚风确属地形的动力强迫作用所致。本文将借助数值模式进一步分析影响该焚风现象的几个因子, 具体地讨论了大兴安岭山区的地形形状对焚风的影响, 并分析了造成该焚风现象的大尺度背景条件, 为大兴安岭焚风的客观分析及预报提供了有益的参考。

一、模式介绍

(一) 基本方程组

假设模式大气干燥、不可压, 且满足静力平衡。作下列地形坐标变换:

$$z^* = \bar{S} \frac{z - S_c}{\bar{S} - S_c}$$

其中 \bar{S} : 模式顶高, S_c : 地形函数, 本文取y方向地形均一。在地形坐标系中的二维运动方程、位温方程及连续方程为:

$$\frac{du}{dt} = -\theta \frac{\partial \pi}{\partial x} + f_v + g \cdot \frac{z^* - \bar{S}}{\bar{S}} \frac{\partial S}{\partial x} + \frac{\bar{S}}{\bar{S} - S_c} \cdot \frac{\partial(-\overline{u'w'})}{\partial z^*} \quad (1)$$

$$\frac{dv}{dt} = f_u g - f_u + \frac{\bar{S}}{\bar{S} - S_c} \cdot \frac{\partial(-\overline{u'w'})}{\partial z^*} \quad (2)$$

本文1991年10月26日收到, 1992年4月20日收到修改稿。

* 国家自然科学基金资助项目(49175243)

1) 过山气候与山区气温分布, 1991, 待发表。

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{\bar{S}}{\bar{S} - S_G} \cdot \frac{\partial(-\overline{\theta'w'})}{\partial z^*} \quad (3)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w^*}{\partial z^*} - \frac{u}{\bar{S} - S_G} \cdot \frac{\partial S_G}{\partial x} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial \pi}{\partial z^*} = - \frac{\bar{S} - \bar{S}_G}{\bar{S}} \cdot \frac{g}{\theta} \quad (5)$$

其中 $\pi = C_p [p/10000]^{R/\theta}$

$$W^* = \frac{\bar{S}}{\bar{S} - S_G} \cdot W + \frac{z^* - \bar{S}}{\bar{S} - S_G} \left(u \frac{\partial S_G}{\partial x} \right)$$

$$\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + u \frac{\partial}{\partial x} + W^* \frac{\partial}{\partial z^*}$$

u_g 为 x 方向地转风，带撇的量为湍流脉动量。我们采用二阶距方程闭合上述方程组，二阶距方程中的压力相关项、粘性项以及三阶相关项，应用 Mellor & Yamada^[1] (1974) 的参数化方案表示。在地形坐标系中，二阶距方程：

$$\begin{aligned} \frac{d(\overline{u'u'_j})}{dt} = & -\overline{u'_i u'_k} \frac{\partial u_j}{\partial X_k^*} - \overline{u'_j u'_k} \frac{\partial u_i}{\partial X_k^*} \\ & + \frac{g}{\theta_0^*} (\overline{u'_i \theta'} \delta_{ij} + \overline{u'_j \theta'} \delta_{ij}) - \frac{q}{3l_1} \left(-\frac{\partial \theta}{\partial x_j} \right. \\ & \left. \left(\overline{u'_i u'_j} - \delta_{ij} \cdot \frac{q^2}{3} \right) + \frac{\partial \theta}{\partial x_j} C_1 \cdot q^2 \right. \\ & \left. \left(-\frac{\partial u_i}{\partial x_j^*} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i^*} \right) - \frac{2}{3} \frac{q^3}{\lambda_1} \delta_{ij} + \frac{\partial}{\partial X_k^*} \right. \\ & \left. \left(q\lambda_1 \left(\frac{\partial \overline{u'_i u'_j}}{\partial X_k^*} + \frac{\partial \overline{u'_j u'_k}}{\partial X_j^*} + \frac{\partial \overline{u'_i u'_k}}{\partial X_i^*} \right) \right) \right) \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \frac{d(\overline{\theta' u'_j})}{dt} = & -\overline{u'_i u'_k} \frac{\partial \theta}{\partial X_k^*} - \overline{\theta' u'_k} \frac{\partial u_i}{\partial X_k^*} + \frac{q}{\theta_0} \cdot \overline{\theta' u'_j} \\ & - \frac{q}{3l_2} \overline{u'_i \theta'} + \frac{\partial}{\partial X_k^*} \left(q\lambda_2 \left(\frac{\partial \overline{u'_i \theta'}}{\partial X_k^*} + \frac{\partial \overline{u'_k \theta'}}{\partial X_i^*} \right) \right) \end{aligned} \quad (7)$$

$$\frac{d\overline{\theta'^2}}{dt} = -2\overline{u'_k \theta'} \frac{\partial \theta}{\partial X_k^*} - 2 \cdot \frac{q}{\lambda_2} \cdot \overline{\theta'^2} + \frac{\partial}{\partial X_k^*} \left(q\lambda_3 \cdot \frac{\partial \overline{\theta'^2}}{\partial X_k^*} \right) \quad (8)$$

其中

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial X_i^*} = & (\delta_{i1} + \delta_{i2}) \frac{\partial}{\partial X_i} + \left(\frac{z^* - \bar{S}}{\bar{S} - S_G} \frac{\partial S_G}{\partial X_i} \delta_{i1} \right. \\ & \left. + \frac{\bar{S}}{\bar{S} - S_G} \delta_{i3} \right) \delta_{i3} \frac{\partial}{\partial x_j} \end{aligned}$$

$$q^2 = \overline{u_1'^2} + \overline{u_2'^2} + \overline{u_3'^2}$$

θ_0 、 α_0 为参考状态的位温和比容, α_{00} 为 α_0 的地面值, i 、 j 、 k 均可取1、2、3。

$$(l_1, l_2) = (A_1 l, A_2 l), (\lambda_1, \lambda_2) = (B_1 l, B_2 l), \lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = 0.23 l,$$

$$(A_1, A_2, B_1, B_2) = (0.78, 0.78, 15.0, 8.0), C_1 = 0.056, l \text{ 为混合长:}$$

$$l = \begin{cases} L_1 & \partial\theta/\partial z \leq 0, \\ \frac{L_1 L_2}{L_1 + L_2} & \partial\theta/\partial z > 0. \end{cases}$$

这里

$$L_1 = xz^* \bar{S} / (\bar{S} - S_G) / (1 + xz^* \bar{S} / (\bar{S} - S_G) / l_0)$$

$$L_2 = 0.53q \left/ \left(\frac{q}{\theta_0} \frac{\partial\theta}{\partial z} \right)^{\frac{1}{2}} \right.$$

$$l_0 = 0.1 \int_0^\infty q (\bar{S} / (\bar{S} - S_G))^2 z^* dz^* / \int_0^\infty q \bar{S} / (\bar{S} - S_G) dz^*$$

方程(1) — (8)由此构成了一组闭合的基本方程组。

(二) 差分方案与初、边值条件

本模式在水平方向取等间距网格,垂直方向取不等间距网格。各变量在网格上的分布采用跳点格式,非线性平流项取显式上游差分,方程(6) — (8)中的压力相关项,粘性项以及三阶相关项均取隐式差分。计算步骤取 $S_{un}^{[2]}$ (1983)提出的向前-向后计算方案(forward-backward Scheme)。

下边界取为粗糙边界,并忽略地表的加热源作用。上边界增加一吸收层,以吸收模式顶部的反射波(Klemp & Lilly^[3] 1978)。侧边界取辐射边界条件,并增加一海绵边界层。初始场假设各变量在水平方向均一。

(三) 模式性能检验

为了证实我们这一模式具有模拟地形动力作用的能力,我们利用该模式模拟了文献[3]给出的有限振幅地形波(mountain waves),结果表明:我们的模拟结果和[3]给出的结果非常吻合(图略)。

二、模拟结果与理论分析

我国大兴安岭山系基本呈南北走向,而且大兴安岭的焚风暖脊在南北方向伸展约10个纬度,因此,我们基本可将研究大兴安岭焚风视为二维问题分析。但是,实际地形错综复杂,在大兴安岭的东坡中,与陡坡东侧相连的为较长的缓坡,此外,在大缓坡上还叠加了许多小山脊。为了讨论这些复杂地形形状对大兴安岭焚风的影响,我们取下述三种典型的地形形状对大兴安岭焚风进行气候数值模拟: 1) 43°31'N剖面上的实际地形。2) 43°31'N剖面上经过平滑处理的地形。3) 不含大缓坡的地形。模式的大尺度平均气温递减率取我国1月份东北地区的平均气温递减率 $\frac{\partial t}{\partial z} = -0.6045^\circ\text{Cm}^{-1}$,地转风 $u_g = 10\text{ms}^{-1}$,地表粗糙度近似取0.1m。模拟

结果分别如图1、2、3所示。

比较矢量图1a和图2a可知,实际地形和经过平滑处理的地形上的流场基本一致,仅是经过

平滑处理的地形上的下坡风较实际地形上的略强。在图1b和图2b的气温分布中分布规律亦基

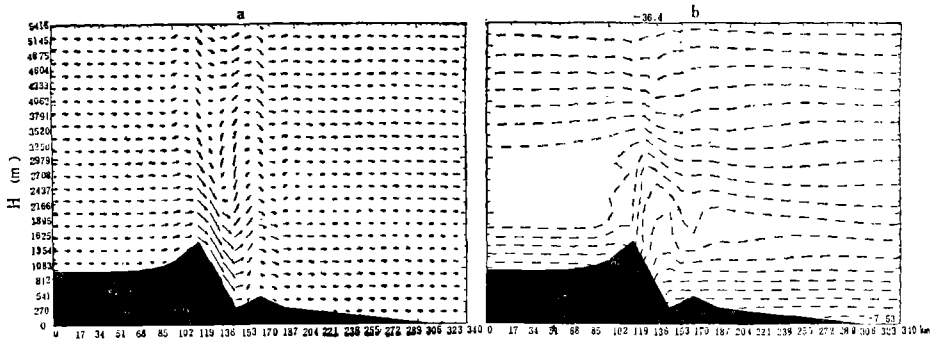


图 1 大兴安岭 $43^{\circ}31'N$ 剖面的实际地形上的模拟结果

a. U—W 矢量 (ms^{-1})。b. 温度 ($^{\circ}C$)。

Results of the simulation over the real topography of
Daxinganling mountain chain at $43^{\circ}31'N$

a. U—W vectors (ms^{-1}) b. Temperature ($^{\circ}C$)

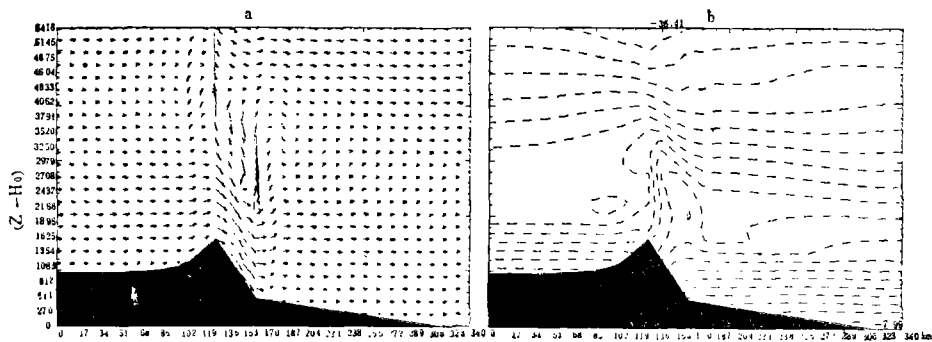


图 2 经过平滑处理的地形上的模拟结果，其余同图 1

The same as in Fig1, except for the smoothed topography.

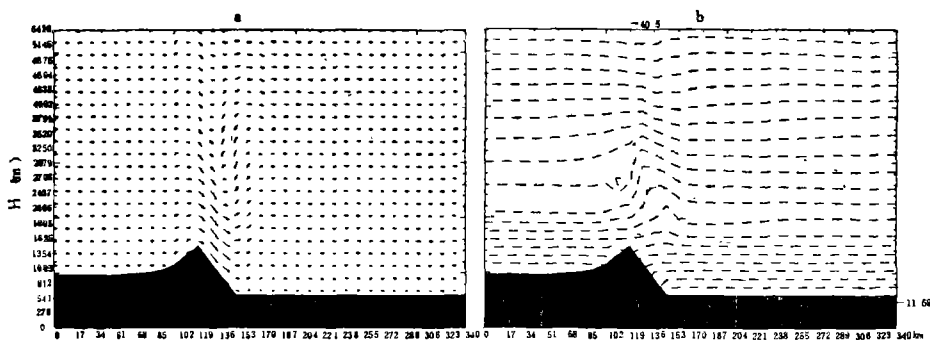


图 3 不含大缓坡地形上的模拟结果，其余同图 1

The same in Fig.1 except for the long-gentle slope

本一致,所不同的是经过平滑处理的地形上的暖脊略强。由此可见,小尺度山脊的存在仅仅是略微削弱了焚风的强度,并没有从本质上改变整个过山气流的性质。

图3为不含大缓坡地形上的模拟结果。从图3a的矢量图中仍可见,在东坡陡坡上有较强的下坡风,而且在图3b的温度场中亦有明显的暖脊出现。然而与图2a及图2b相比,无论是下坡风速还是暖脊强度均要小。可见,大兴安岭东坡的陡坡是造成焚风形成的动力因子,而东坡的缓坡则仅对焚风的发展起着促进作用。

为了进一步讨论大尺度背景场对大兴安岭焚风的影响,我们分别对不同的背景层结以及不同的风速作了敏感性数值试验。结果(图略)表明:无论是很强的风速或很弱的层结,还是很弱的风速或很强的层结,均不可能形成焚风,只有当适当的风速和层结相配置时,才会形成焚风。由此不难推测,已发展起来的大兴安岭焚风,当大尺度背景场的Scorer数(N/\bar{U})发生改变时,可导致焚风消失。

根据以上模拟结果分析,可以得到以下结论:1)导致大兴安岭焚风形成的主导地形因子是大兴安岭东坡的陡坡作用,东坡缓坡的存在进一步促进了大兴安岭焚风的发展,而小尺度山脊对大兴安岭焚风的作用可以忽略。2)大兴安岭焚风的形成需具备一定的大尺度背景条件,大尺度背景场的Scorer数(N/\bar{U})过大或过小均不可能形成焚风。

关于大兴安岭焚风生消的定量判据,有待于以后作进一步的理论研究。

参 考 文 献

- (1) Mellor G L and T Yamada A hierarchy of turbulence closure models for Planetary boundary layers, *J Atmos. Sci.*, 1974, 31: 1971-1836.
- (2) Sun W-Y, A forward-backward time integration scheme to treat internal gravity waves. *Mon. Weath. Rev.* 1980, 108: 402-407.
- (3) Klemp J B and D K Lilly, Numerical simulation of hydrostatic mountain waves. *J. Atmos. Sci.*, 1973, 30: 79-107.

FACTORS AFFECTING DAXINGANLING FOEHN

Qi Ying

Fu Baopu

(Department of Atmospheric Science, Nanjing University)

Subject terms: Daxinganling, Foehn, Topography

Abstract

In this paper, a few factors affecting the foehn of the east slope of Daxinganling mountainchain in Northeast China in January are discussed by using the two-dimensional atmospheric meso-scale numerical model. The results show: (1) The leading topographic factor resulting in Daxinganling foehn is the east steep slope of Daxinganling mountainchain. The eastern gentle slope further promotes the development of Daxinganling foehn. And the small-scale redges can be neglected. (2) The large-scale background conditions are essential for Daxinganling foehn forming. The Daxinganling foehn can not occur when the scorer number (N/\bar{U}) of the largescale background field is too great or too small.