

秦岭山脉对冷空气屏障的理论研究*

齐 瑛

傅抱璞

(中国科学院力学研究所,北京,100080)(南京大学大气科学系,南京,210008)

李兆元

(陕西省气象局,西安,710015)

摘 要

利用二维大气中尺度数值模式,以 1977 年 1 月 20 日—22 日的冷空气侵袭秦岭山区为例,从观测资料与数值计算两方面分析了由秦岭山脉的屏障作用而引起南北温差的主要原因。结果表明:这种屏障作用不仅体现在秦岭山脉对冷空气的阻挡作用上,而且还与秦岭南坡上的下坡风引起的绝热下沉增温有关。秦岭山脉对冷空气阻挡的动力原因除与秦岭山脉本身的拔海高度较高有关外,还与它的地形形状有关,尤其是位于秦岭北部的渭河河谷,它抑制冷空气入侵谷内,进而阻挡冷空气翻越秦岭山脉。

关键词: 秦岭山脉;冷空气;屏障;动力学机制。

1 引言

秦岭是中国著名的东西走向山脉,其中段干位于陕西境内,恒且于渭河与汉中之间,拔海高度一般均在 1500—3000m 之间。在冬季,它对来自北方的冷空气具有明显的屏障作用,是中国气候上著名的温带与北亚热带分界线^[1]。因此,研究秦岭山脉对冷空气的屏障作用,不仅是中国区域气候的重要研究内容,也将为中国山地气候资源的开发与利用提供重要科学依据。

李兆元和傅抱璞(1984)^[2]曾利用 1961—1970 年 32—35°N 范围内所有测站的资料,研究了秦岭山区的气温分布规律,结果表明:秦岭山区以南,1 月份平均气温均在 2—3℃,山区以北则均在 -1℃ 以下,南麓和北麓气温相差达 4—5℃。这一气温分布规律表明了冬季秦岭对冷空气的显著屏障作用。但是,迄今为止,秦岭山脉对冷空气屏障的动力学机制尚未得到研究。本文将利用作者的中尺度数值模式^[3—4],以一次典型的冷空气入侵秦岭山区为例,全面分析秦岭山脉对冷空气屏障作用的动力学机制。

2 模式简介

2.1 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

* 1993 年 3 月 22 日收到原稿,1993 年 8 月 17 日收到修改稿。得到国家自然科学基金资助。

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

其中 \bar{S} : 模式顶高; S_G : 地形函数, 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

$$\frac{du}{dt} = -\theta \frac{\partial \Pi}{\partial x} + fv + g \frac{z^* - \bar{S}}{\bar{S}} \frac{\partial S_G}{\partial x} + \frac{\bar{S}}{\bar{S} - S_G} \frac{\partial(-\overline{u'w'})}{\partial z^*} \quad (1)$$

$$\frac{dv}{dt} = fu_s - fu + \frac{\bar{S}}{\bar{S} - S_G} \frac{\partial(-\overline{v'w'})}{\partial z^*} \quad (2)$$

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

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

$$\frac{\partial \Pi}{\partial x^*} = -\frac{\bar{S} - S_G}{\bar{S}} \frac{g}{\theta} \quad (5)$$

其中 $\Pi = c_p \left(\frac{p}{10^5}\right)_{c_p}^R$

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

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

u_s 为 x 方向地转风, 带撇的量为湍流脉动量。为了闭合上述方程, 我们采用高阶矩湍流闭合方案(Qi and Fu, 1993)^[3]。

2.2 差分方案与计算步骤

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。为了有效地模拟重力内波, 本模式采用 Sun(1980)^[5] 提出的向前-向后计算方案来实施我们的计算步骤。

2.3 初边值条件

下边界取为粗糙边界, 上边界增加一吸收层, 以吸收模式顶部的反射波(Klemp and Lilly, 1978)^[6]。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。

作者^[4]曾利用上述模式成功地模拟了 Wangara 资料第 33 天 09:00—18:00 时对流边界层的演变过程及边界层内的湍流结构, Klemp and Lilly (1978) 的有限振幅地形波以及 1972 年 1 月 11 日美国 Boulder 下坡风暴, 基本证实了该模式不仅具有描述大气边界层过程以及边界层内湍流结构的能力, 而且亦具有很好地模拟非线性地形波, 波破碎现象以及波破碎区内湍流结构的能力。

3 观测资料分析

1977年1月20—22日有一次较强的冷空气侵袭秦岭山区。从20日08时的地面天气图,850hPa和700hPa高空图中发现,此时位于陕西的西北方有一冷槽逐渐向陕西移来。到21日08时,在700hPa高空图上西安测站温度明显下降,并已在850hPa高空图上出现较强的偏北风。图1a,b分别为西安,安康的几个时刻温度探空廓线。从图中比较20日07时和20日19时的温度探空廓线可知,在1.5km高度以上,两时刻的廓线基本重合,仅在低层,由于受太阳辐射日变化的影响,温度差异比较明显。根据这些资料的分析可知,1977年1月20日,秦岭山区尚未受到冷空气影响,但由西安、安康等测站的逐时高空记录表明,在20日20时,已在山区之上的低层吹偏北风。至21日07时,从图1a,b中可知,位于1.5—4.0km高度层内均出现明显降温,西安测站2.5km高度上降温约6℃,安康测站2.5km高度上降温3℃。由此可见,在21日已有冷空气入侵秦岭山区,而且来自上游较高层的冷空气已翻越秦岭山脉,故山南、山北之上较高层大气温度均受到影响,只是山南的降温幅度要比山北的小。在低层,从图1a,b可见,由于明显受太阳辐射日变化的影响,很难分辨受冷空气入侵影响后的气温变化规律。为了消除日变化的影响,我们分析了日平均气温的变化规律。附表为陕西的陕北、关中、陕南三地区各测站日平均气温的变化表。由此可知,在21日,陕北地区各测站普遍降温2℃左右,至22日,一些纬度较高的测站气温已出现了回升,这说明冷锋已经过境。在关中、陕北地区,海拔高度较高的测站(例如华山、太白、镇坪、佛坪等)的日平均气温变化规律与陕北地区各测站基本一致。这些进一步表明:21日07时来自上游较高层的冷空气已翻越整个秦岭山脉。但是在关中地区,位于渭河附近的测站以及河谷坡上拔海较低的低各测站,21日并没有明显的降温,有些测站(例如富平、兴平等)反有升温现象,明显降温现象主要发生在22日。在陕南地区的秦岭南坡上海拔较低的测站(例如汉阳,西乡等)气温则在21日反而普遍升高,至22日基本稳定。

由此可见,来自上游较高层的冷空气可翻越秦岭山脉,影响秦岭以南较高海拔高度上的大气温度,只是秦岭以南的降温幅度较以北的降温幅度要小。但是,在秦岭山脉以北的渭河河谷内,首先出现阻滞冷空气降温甚至表现为增温现象,之后冷空气才逐渐入侵其内;而在秦岭的南坡,除海拔较高的几个测站外,不仅冷空气未能带来降温的影响,相反,

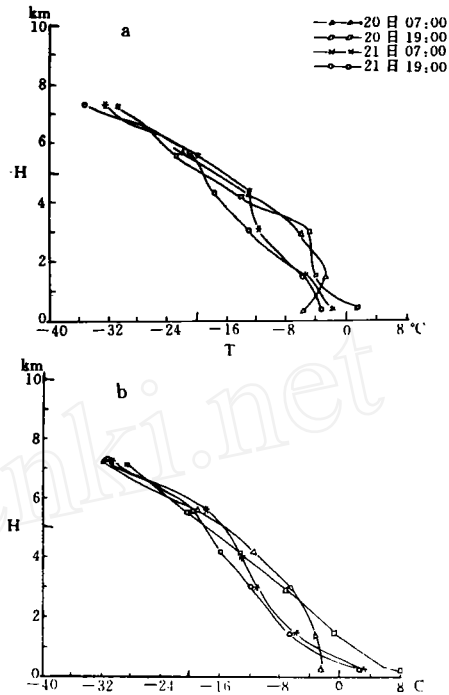


图1 1977年1月20—21日几个时刻
温度探空廓线
(a. 西安(山北); b. 安康(山南))

附表 1977 年 1 月 20—22 日各测站气温

测站	纬度(°N)	经度(°E)	海拔(m)	20 日气温(°C)	21 日气温(°C)	22 日气温(°C)
陕北各站						
黄陵	35°36'	109°49'	1081.8	-5.0	-7.0	-7.4
富县	36°00'	109°23'	920.0	-6.2	-9.8	-6.8
延长	36°35'	110°04'	804.5	-6.9	-8.9	-8.3
延安	36°36'	109°30'	957.6	-6.7	-8.6	-6.0
延川	36°53'	110°11'	803.7	-7.0	-9.0	-7.6
吴堡	37°31'	110°43'	752.5	-5.5	-8.0	-7.7
关中各站						
太白	34°02'	107°19'	1543.1	-4.8	-6.6	-4.9
周至	34°06'	108°12'	433.1	-1.1	-2.0	-4.2
长安	34°09'	108°55'	438.0	-1.3	-2.9	-5.9
西安	34°18'	108°56'	396.9	-1.7	-3.4	-5.1
兴平	34°17'	108°17'	410.9	-2.0	-1.8	-4.6
华山	34°29'	110°05'	2064.9	-5.0	-8.1	-4.2
富平	34°47'	109°11'	470.9	-2.9	-2.2	-4.9
大荔	34°52'	109°56'	367.9	-2.2	-2.6	-3.7
陕南各站						
镇坪	31°57'	109°31'	995.8	1.4	-0.7	0.3
安康	32°43'	109°02'	290.8	2.5	3.8	2.7
汉阳	38°54'	108°30'	413.1	2.1	3.0	3.0
西乡	32°59'	107°43'	446.0	2.3	3.2	3.2
南郑	33°00'	106°56'	536.5	2.3	2.4	1.4
城固	33°10'	107°20'	486.4	2.4	2.6	1.7
洋县	33°13'	107°33'	468.6	-1.0	-0.2	-0.5
佛坪	33°32'	107°59'	1087.7	-0.3	-1.2	-0.5

气温却有增高。可见,冷空气入侵秦岭山区以后,不仅有秦岭对冷空气的阻挡,而且还有秦岭南坡上的增温作用以及秦岭山脉以北的渭河河谷对冷空气入侵的阻滞作用,造成了秦岭南北温度的显著差异。

4 数值研究

为了进一步研究冷空气入侵秦岭山区时的气温分布规律及造成秦岭山脉南北温差的动力学机制,我们将利用第 2 节介绍的中尺度数值模式作数值研究。

4.1 秦岭对冷空气屏障的数值模拟

由于秦岭山脉呈东西走向,冷空气入侵的影响是自北向南的,故可将该问题视为南北方向变化的二维情形处理。X 轴为南北方向,指向正北为正,Z 轴为垂直方向,指向天顶为正。为使模拟结果更具有代表性,取 107°E、108°20'E、109°40'E 三个经向剖面上的地形平均作为模式地形。为了有效地研究秦岭山脉对入侵冷空气的动力阻挡作用,忽略地形的热力强迫作用,取冷空气入侵之前的风速和温度作为初始场,本文取为 1977 年 1 月 20 日秦岭

山区的风速和温度的平均值,并假设水平方向各变量均一。为了消除初始条件不协调给模拟结果带来的误差,模式本身先积分,待各变量协调之后模式才进入正式物理积分。冷空气源自上游侧边界输入,初始时刻定为1977年1月21日00时,模拟结果每积分4h输出一次。图2a,b分别为平均地形上34°30'N和32°48'N上几个时刻温度廓线的模拟结果。由于图2a所在纬度与西安测站相近,平均海拔高度约700m,仅略比西安测站高,故图2a可与图1a作对比检验。在图2a中,积分至20h,位于1.5—3km高度范围内明显降温,在2km高度附近约降4℃,这与图1a中在21日19时2.5km处降温约6℃相当,且降温范围亦基本一致。只是图2a与图1a的低层变化规律不一致,这是由于在数值模拟中仅考虑了地形的动力强迫作用,而实测资料中却还含有由于地表热状况的日变化而引起的温度变化。若将图2a低层温度随时间的演变规律与渭河附近的各测站上消除日变化影响后的观测结果(见附表)作对比,我们将发现:在图2a低层,在冷空气入侵期间,首先出现升温,然后逐渐降温,这一规律与实测结果相一致。

图2b所表示的纬度虽与安康测站相近,但是,图2b表示的是该纬度处平均海拔高度上的温度廓线演变图,其海拔高度较安康测站高出约1km。在图2b中,积分至20h,3km高度上降温约1℃左右。与图1b相比,在图1b中,主要降温发生在3.0km高度附近,且至21日19h,约降温3℃左右。显然,这种差异主要是不同的海拔高度所致。在图2b中,低层随着冷空气的入侵,其温度反而呈增温趋势,至积分20h时,温度基本无变化。这一变化规律与秦岭南坡上消除了日变化影响之后的观测结果(附表)相符合。

为了进一步与实测资料比较,我们还给出了秦岭山区气温水平分布的时间演变图,如图3所示。从图中知,在秦岭山脉以北,位于河谷的上游,由于冷空气的不断入侵,气温逐渐下降,至积分20h,基本趋于不变;在谷内,冷空气入侵初期反而升温,之后整个谷内才

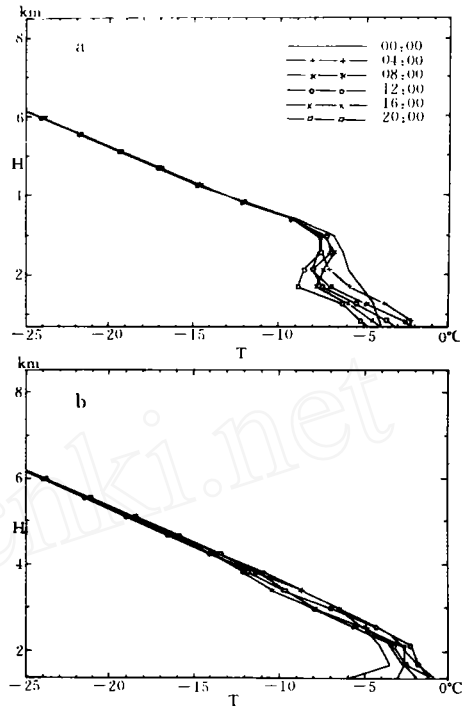


图2 平均地形上几个时刻温度廓线的模拟结果
(a. 34°30'N处; b. 32°48'N处)

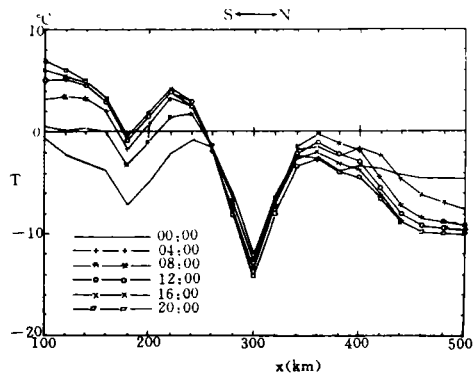


图3 秦岭山区气温水平分布的模拟结果

逐渐降温;在秦岭山脉的南坡上,随着冷空气的入侵出现升温现象,且至积分 20h 时基本不变。这些均与附表的观测结果相符合。

综合上述的分析可见,我们比较成功地模拟了秦岭山脉对入侵冷空气的屏障作用。

4.2 秦岭山脉对冷空气屏障的动力学机制

为了分析秦岭山脉对入侵冷空气屏障作用的动力学机制,我们将进一步分析冷空气入侵秦岭山脉时的流场、位温场等演变规律。当模式积分 4h 时,从位温场中可知,此时冷空气尚未进入秦岭以北的河谷。但在水平风速及流场中,位于冷空气前缘的风速极大值区已侵入河谷的背风坡上;在秦岭的北坡上,则出现反向气流,即气流阻塞,并自该处向上游伸展出一风速极小值区;在秦岭的南坡上,普遍出现很强的下坡风。在温度场中,位于河谷之内以及秦岭南坡上的气温均较初始时高,这均是由于下坡风的绝热下沉增温所致。

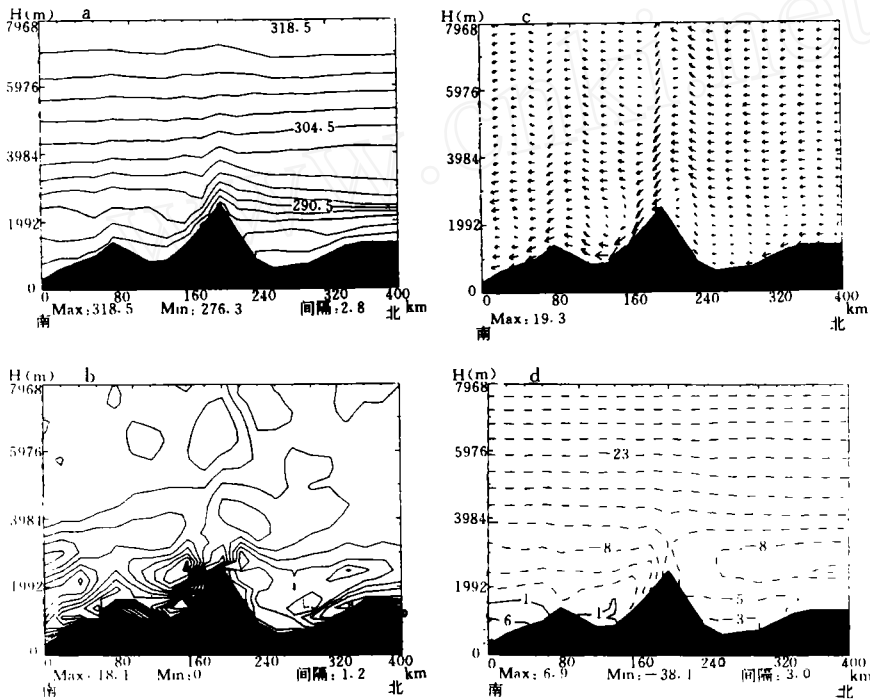


图4 冷空气入侵秦岭山脉 20h 的模拟结果
(a. 位温(K); b. 水平风速(m/s); c. 矢量场(m/s); d. 温度(°C))

模式继续积分,从计算结果(篇幅所限,这里仅附模式积分 20h 的结果如图 4 所示)可知,冷空气移至河谷的背风坡后,移动缓慢。在相应的流场中,位于河谷背风坡上的强下坡风稳定,少变。由此可见,秦岭以北河谷的下坡风下沉增温抑制了冷空气入侵整个河谷。但从温度场上我们可发现,河谷之上的冷空气较河谷之内的移动快,位于河谷之内的冷空气,当移近秦岭北坡时,若遇阻塞气流,则将逐渐向河谷之中侵入,促进谷内降温。

综上所述,自北方来的冷空气入侵秦岭山区时,渭河河谷南坡上的下坡风抑制冷空气入侵谷内,秦岭北坡上的阻塞气流阻挡冷空气过山,亦导致渭河河谷内冷空气的堆积,秦

岭南坡上的下坡风使得秦岭南坡上的气温反而增高。

5 结论

综合上述的观测资料分析和数值研究结果可知:

(1) 当北方的冷空气入侵秦岭山区时,渭河河谷内的降温具有明显的滞后效应,这是由于渭河河谷南坡上的下坡风抑制冷空气入侵谷内的缘故。

(2) 阻挡冷空气入侵秦岭山南的原因,除秦岭北坡上形成的阻塞气流作用外,还与渭河河谷南坡上的下坡风抑制冷空气入侵谷内有关。

(3) 秦岭南坡上的下坡风的下沉绝热增温抑制了入侵冷空气带来的降温作用,从而加剧了南北坡上的温差。

参考文献

- [1] 翁笃鸣, 罗哲贤. 山区地形气候. 北京: 气象出版社, 1990.
- [2] 李兆元, 傅抱璞. 秦岭山地的气候特点. 山地气候文集. 北京: 气象出版社, 1984. 87—97.
- [3] Qi Y and Fu B (齐瑛, 傅抱璞). Theoretical study on the interaction between airflow over mountain and the atmospheric boundary layer. Bound-Layer Meteor. 1993. 64:101—126.
- [4] 齐瑛. 中尺度地形强迫气流与大气边界层相互作用的理论及我国典型山地气候现象的研究. 博士论文. 南京大学, 1992年6月.
- [5] Sun W Y. A forward-backward time integration scheme to treat internal gravity waves. Mon Wea Rev. 1980, 108: 402—407.
- [6] Klemp J B and Lilly D K. Numerical simulation of hydrastatic mountain waves. J Atmos Sci. 1978. 35:78—107.

THEORETICAL STUDY ON COLD-AIR DAMPING OF THE QINLING MOUNTAINS

Qi Ying

(Institute of Mechanics, CAS, Beijing, 100080)

Fu Baopu

(Department of Atmospheric Sciences, Nanjing University, Nanjing, 210008)

Li Zhaoyuan

(Shanxi Institute of Meteorological Sciences, Shanxi, 710015)

Abstract

In this paper, the process of the cold air invading the Qinling Mountains during January 20—22, 1977 is analysed with the observations and is simulated by the mesoscale atmospheric numerical model with a higher-order turbulent closure. The simulated results are basically identical with the observed results. Furthermore, by the numerical model, the dynamic mech-

anism of the Qinling Mountains screening the cold air from the North is systematically discussed.

Key words: Qinling Mountains, Cold-air, Damping, Dynamic mechanism.

《气象学报》增刊(暴雨专集) 征 订 启 事

以暴雨的分析研究为主要内容的《气象学报》1995 年增刊,共发表以下 16 篇文章:

- 地形与锋生 吕克利 农尚尧
- 非均匀切变流中重力惯性波的不稳定和暴雨过程 夏友龙 郑祖光
- 非绝热加热对西南低涡的影响及其在大气中的应用 卢敬华 雷小途
- 一个爆发性海洋气旋的数值模拟 赵其庚
- “SPECTRUM-90”目标台风 Yancy (9012) 后期连续打转运动的数值试验 谭锐志 林元弼 薛纪善
- 预报近海热带气旋风雨的综合相似预报模式 钟元 金一鸣
- 评估台风预报技巧水平的一种客观方法 丁裕国 史久恩
- 用极轨气象卫星监测 1991 年 6 至 7 月江淮洪水 许健民 王大昌 萨阳等
- 1991 年夏季江淮洪涝成因的数值试验——西太平洋海温异常的影响 王谦谦 钱永甫 徐海明等
- 江汉平原突发性暴雨的中-β 尺度研究 袁恩国 廖移山 李劲等
- 长江中下游梅雨锋产生和发展的个例研究 胡伯威 彭广
- 大气季节内低频振荡与华北暴雨过程 胡坚 陈雪峰 胡元龙
- 华北地区锋面云系和降水个例研究 王成恕 胡志晋 游来光
- 北京地区强对流天气的中尺度研究 强对流预报课题组 何齐强
- 黄河中上游 7 月份旱涝的长期数值预报试验 胡增臻
- 流场垂直切变和温度水平梯度对线性及非线性重力波的影响 夏友龙 郑祖光

该增刊将于 1995 年 6 月 20 日正式出版,欲订购者请速与中国气象科学研究院情报所发行组联系.

开户银行:中国工商银行北京市海淀区紫竹院分理处

帐号:891068—28

邮编:100081