

正压地形扰动的数值试验

袁重光 曾庆存

(中国科学院大气物理研究所)

提 要

本文用正压模式对一种水平差分格式在有复杂地形下的计算稳定性及动力性能作了多种检验,模拟了在不同结构的基流上扰动的传播,得到了较为理想的结果。

一、引 言

自数值天气预报开展以来,地形的处理仍然是一个困难而重要的问题,至今尚未得到完全的解决。由于大气环流数值模拟的结果对地形较为敏感,近来更加受到人们的重视。地形的作用有热力和动力两个方面,对于动力作用,可以从差分格式上进一步改进,以提高模式的计算稳定性及精度,同时也应当考虑扰动与基流的相互作用与某些动力学理论的结论是否一致,从而检验差分格式的动力性能,增加我们对模拟结果的可信程度。在文献[1]中我们曾对一种水平差分格式在无地形情况下作了长时间积分,本文则将该格式在有地形情况下的性能作进一步试验。

二、模式、地形及初始场

文献[1]中对正压模式及水平差分格式已有较详细的叙述,为阅读方便,这里我们仅直接写出差分方程,不加更多的阐述。

$$\left\{ \begin{aligned} \left(\frac{\partial U}{\partial t} \right)_{i,j} &= -\mathcal{L}_1(\bar{U})_{i,j} - \mathcal{L}_2(\bar{U})_{i,j} - \frac{\bar{\Phi}_{i,j}^*}{a \sin \theta_j} \frac{\bar{\Phi}_{i+\frac{1}{2},j} - \bar{\Phi}_{i-\frac{1}{2},j}}{\Delta \lambda} - \bar{\mathcal{F}}_{i,j} \\ \left(\frac{\partial V}{\partial t} \right)_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}} &= -\mathcal{L}_1(\bar{V})_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}} - \mathcal{L}_2(\bar{V})_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}} \\ &\quad - \frac{\bar{\Phi}_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}}^*}{a} \frac{\bar{\Phi}_{i+\frac{1}{2},j+1} - \bar{\Phi}_{i+\frac{1}{2},j}}{\Delta \theta} + \bar{G}_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}} \\ \left(\frac{\partial \phi}{\partial t} \right)_{i+\frac{1}{2},j} &= -\frac{1}{a \sin \theta_j} \left\{ \frac{(\bar{\Phi}^* \bar{U})_{i+1,j} - (\bar{\Phi}^* \bar{U})_{i,j}}{\Delta \lambda} \right. \\ &\quad \left. + \frac{(\bar{\Phi}^* \bar{V} \sin \theta)_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}} - (\bar{\Phi}^* \bar{V} \sin \theta)_{i+\frac{1}{2},j-\frac{1}{2}}}{\Delta \theta} \right\} \end{aligned} \right. \quad (1)$$

在两个极点上

$$\left(\frac{\partial \phi}{\partial t} \right)_{NP} = -\frac{1}{\delta S} \sum_i (\bar{\Phi}^* \bar{V} \sin \theta)_{i+\frac{1}{2},\frac{1}{2}} a \Delta \lambda$$

$$\left(\frac{\partial \phi}{\partial t}\right)_{SP} = \frac{1}{\delta S} \sum_i (\Phi^* \bar{v} \sin \theta)_{i+\frac{1}{2}, j-\frac{1}{2}} \alpha \Delta \lambda$$

$\mathcal{L}_i = \mathcal{L}_1 + \mathcal{L}_2$ 是平流算子, $\mathcal{F}$ 、 G 是柯氏项加上曲率项, 变量 $U = \Phi v_\lambda$ 、 $V = \Phi v_\theta$,

$$\Phi = \sqrt{g(h - h_s)}$$

$\phi = gh$, h 是自由面高度, h_s 是地形高度, 只要不取 $h_s = 0$ 就自然地引入了地形, 不需对差分格式及算法作任何修改, 试验中取 $\Delta \lambda = 5^\circ$ 经度、 $\Delta \theta = 4^\circ$ 纬度, $\Delta t = 5$ 分钟, 详细计算方案请参阅文献[1].

本文试验中采用两种地形:

(1) 理想地形, 在东经 85 度经线上, 从 20°N 到 55°N 设置高墙一座, $h_s = 2500\text{m}$, 和 Arakawa 试验位熵守恒格式时所取的地形相似, 这样的地形激发两倍格距波, 对于差分模式来说是一个严重的考验.

(2) 全球真实地形, 不另加光滑处理, 西藏高原的最高地形为 4900 米.

试验中应用的初始场如下:

(1) 刚体转动的纬向气流, 取转动速度为 $\lambda = 10$ 经度/天, 高度场由地转关系积分推出, 自由面的平均高度取为 5000 米, u 及 ϕ 的计算公式为:

$$u(\theta) = 1.286978\lambda \sin \theta \quad (4)$$

$$\phi(\theta) = \phi(\theta - \Delta\theta) + [u(\theta) + u(\theta - \Delta\theta)] \cdot 464.5733\Delta\theta \cos\left(\theta - \frac{\Delta\theta}{2}\right) \quad (5)$$

λ 的单位取 $^\circ/\text{天}$.

(2) $u(\theta)$ 取一月份气候平均纬向西风, ϕ 场的计算与上同, 自由面的平均高度, 在理想地形时取为 5000 米, 在真实地形时取为 8000 米.

表 1 是两种风场沿经圈的分布情况, 其主要区别是气候值有明显的急流, 对抗动的传播有不同的影响.

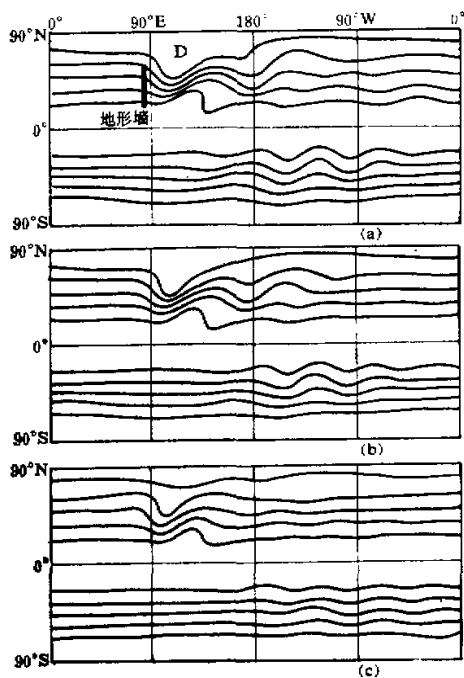
三、试验结果及讨论

我们用上述地形及初始场作了大量的试验, 均积分到 30 天, 这里介绍其中的三个试验结果.

试验 I. 取理想地形 (墙高 2500 米) 及 $\lambda = 10^\circ/\text{天}$ 的刚体转动西风初始场, 图 1(a) 是积分第 15 天的高度场, 在北半球地形东侧形成第一个槽, 其槽线呈东北西南向, 180°E 附近出现第二个槽, 其强度较第一个槽为弱, 两槽之间有一脊, 脊线也呈东北西南向, 更东则槽脊很弱, 渐趋平直; 在南半球的 $60^\circ\text{W} - 180^\circ$ 也出现较为明显的槽脊系统, 南半球的其余地区则较为平直; 图 1(b) 是积分第 11 天至第 20 天的平均高度场, 图 1(c) 是积分第 1 天至第 30 天的平均高度场, 它们的特点和图 1(a) 颇为一致, 只是平均图上扰动振幅略小些. 从逐日的高度场可观察到, 下游的槽是由上游槽中不断分出的小扰动所形成和维持, 从第 7 天起就开始形成了这样的准定常形势. 还有一点值得注意的是: 南半球的扰动正处于北半球地形槽槽线的法线方向 (波射线) 上, 它和北半球的扰动一起组成一个完整的波列. 南半球并不存在扰源, 显然, 是这种跨过赤道在两半球传播的波列是

表

类别 \ 纬度	90°N	80°N	70°N	60°N	50°N	40°N	30°N
刚体转动	0	2.2	4.4	6.4	8.3	9.9	11.2
气候平均	0	3.3	6.5	9.6	15.7	25.5	32.4

图 1 试验 I 的 ϕ 场

(a) 积分第 15 天, (b) 11—20 天平均 (c) 1—30 天平均。

由地形扰动所产生。

图 2(a)、(b)、(c) 分别为积分第 14、15、16 三天的扰动高度场,从图上可以看到两个总的特征,一是三张图几乎完全一样,二是波列十分清楚地从地形扰源区向东南方传播,同时也有一支波列在北半球向东传播。从逐日的扰动分布来看,扰动中心逐日向前推进,在第 6 天到达南半球的 60°W 附近,然后转而沿纬圈传播,成为移动性扰动,振幅也逐渐减小,波列的传播路径和位相也几乎成为准定常的了。图上的正、负中心大体上沿着波列的传播路径排列。

试验 II. 取理想地形及气候西风初始场。图 3(a) 是积分第 15 天的高度场。在北半球,地形东侧有一个槽,在 170°E 附近有第二个槽,两槽之间有一很弱的脊,两槽相接形成一个扁平而广阔的槽区;在 90°W 处也有第三个槽。试验 II 和试验 I 相比有较大

1

20°N	10°N	0°	10°S	20°S	30°S	40°S	50°S	60°S	70°S	80°S	90°S
12.1	12.7	12.9	12.7	12.1	11.2	9.9	8.3	6.4	4.4	2.2	0
20.9	4.9	-2.3	-2.0	4.2	13.8	20.8	20.8	11.6	3.1	1.3	0

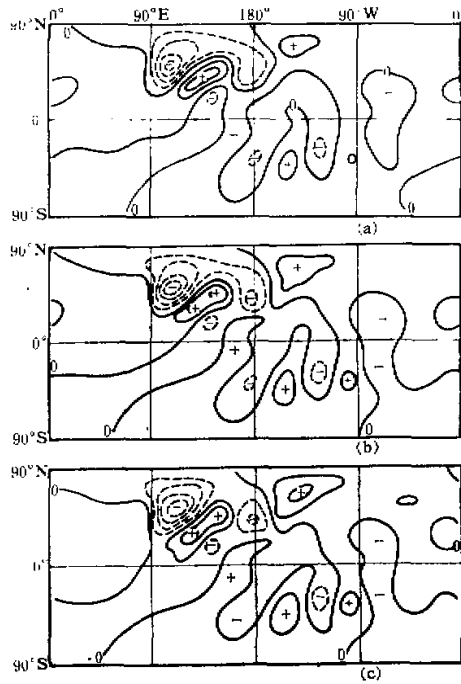


图 2 试验 I 的波列传播

(a) 第 14 天 (b) 第 15 天 (c) 第 16 天。

差别。图 1(a) 中地形东侧的槽经向发展较强,槽一直向南伸展,两槽间的脊也很明显,而第三个槽则非常弱。但在图 3(a) 中第一个槽的南伸受到很大抑制。另一个重要差别是在南半球,试验 I 的南半球有明显的扰动,而试验 II 的南半球扰动则十分微弱,在整个积分过程中都是如此。这说明在试验 II 中扰动能量几乎不向南半球传播。图 3(b) 是积分第 1 天到 30 天的平均高度场,与图 3(a) 相比也十分相似,说明扰动几乎是定常的。图 3(c) 是第 15 天的扰动场,与图 2(b) 相比,差别也是很明显的: 试验 I 中有一支扰动很清楚地从扰源区沿槽线的法线方向向东南一直传播至南半球,在南半球的 $60^{\circ}\text{W}-180^{\circ}$ 区域内产生极明显的扰动;而试验 II 中扰动主要是在偏北地区沿东西方向传播,整个南半球的扰动都很小。这反映了不同结构的基本气流对于扰动传播的影响可以是很不相同的。

扰动能量的传播,在二维问题中是沿着槽线的法线方向行进的^[2];在试验 I 中,地形

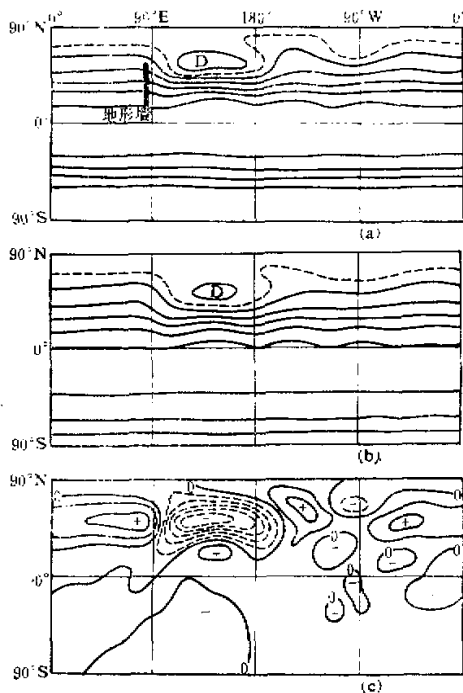


图 3 试验 II

(a) 第 15 天中场, (b) 1—30 天平均 (c) 第 15 天扰动场。

东侧的第一个槽, 其位置形状几乎不变, 槽线也始终维持着从东北到西南的走向, 槽线的法线方向正好指向南半球的扰动明显区域, 按照动力学理论, 不断地有波动能量向南半球的这一扰动区域传播, 在此区域形成并维持着几乎定常的扰动, 由此再传出的扰动就表现为移动性的, 且较弱, 因而在平均图上就不清楚了。

曾庆存等^[3]用线性化的方程讨论了波包的演变过程, 指出: 当波包被激发出来之后, 先向下游传播, 并向急流靠近, 振幅增至最大, 然后能量逐渐减少或为急流所反射。在试验 II 中, 初始场上有急流位于 30°N , 同时在赤道地区有东风由地形产生的扰动在向南传播时为基流吸收和反射, 所以扰动能量的向南传播受到很大抑制, 扰动主要沿着中、高纬度向东传播, 而在南半球只有很微弱的扰动。但在试验 I 中因没有急流存在, 扰动能量没有被急流吸收或反射, 可以畅通无阻地向南半球传播。这些表明, 不同结构的基本气流对波列传播的影响是十分不同的, 数值试验和理论结果是十分一致的。

表 2 是试验 II 中散度场随时间变化的情形, 单位是 秒^{-1} 。表中第二行是全场的最大散度, 其数值始终维持在 10^{-5} 的量, 比大气中常出现的较大散度还略小些; 而全球均方值只是 10^{-9} 的量级, 比实际大气的还要小, 说明运动始终保持较好的准地转无辐散状态。Arakawa^[4] 曾用类似的条件试验他的位涡能守恒格式, 和我们的结果相比颇为接近, 但我们的格式计算量却小得多。

表 2

天 数	5	10	15	20	25	30
最大散度	$-2.5 \cdot 10^{-5}$	$-1.71 \cdot 10^{-5}$	$0.773 \cdot 10^{-5}$	$-0.994 \cdot 10^{-5}$	$2.72 \cdot 10^{-5}$	$-3.81 \cdot 10^{-5}$
全球均方散度	$1.18 \cdot 10^{-9}$	$0.579 \cdot 10^{-9}$	$0.178 \cdot 10^{-9}$	$0.261 \cdot 10^{-9}$	$1.5 \cdot 10^{-9}$	$4.15 \cdot 10^{-9}$

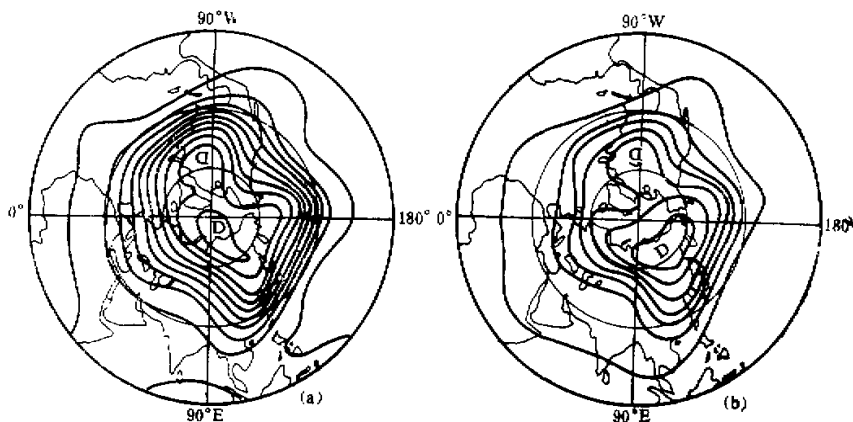


图 4 试验 III 的平均流型

(a) 1—10 天平均中场 (b) 1—30 天平均中场

试验 III 取全球真实地形及气候西风初始场。图 4(a) 是积分第 1 天至第 10 天的平均图, 图 4(b) 是积分第 1 天至第 30 天的平均图。总的来说, 两张图上的形势十分相近, 在高原东侧东亚、北美各有一大槽, 从欧洲到地中海有一个较浅的槽, 两个大槽的位置比对流层气候平均流型上槽的位置偏西; 在阿留申地区也出现一个槽, 实况这里只有一些较浅的气旋性弯曲。从逐日的形势演变来看, 这个槽似乎是由东亚大槽不断分出扰动东传受到落基山的阻挡而形成的。在大西洋东部也有这样的气旋性弯曲出现。但实况是两个大洋上主要为平均脊所占据。虽然我们这里只有正压情况下的地形动力作用, 模拟出的流场形势在总体上却能和大气实际状态相近, 这似乎说明了地形的动力作用在形成对流层平均流型上的重要作用。对此, Manabe 等^[5]曾有类似阐述, J. M. Wallace^[6]同时强调了青藏高原及落基山对冬季高空位势场的作用, 和我们这里数值试验的结果是颇为一致的。

图 5(a)、(b)、(c)、(d) 分别为积分第 10、12、15 及 18 天的高度场, 在第 10 天, 北美大槽中不断有扰动向东传至较低纬度, 第 12 天在欧洲西岸形成高压中心, 第 15 天高压中心增强向西北移至大西洋东北部, 第 18 天高压中心在格陵兰, 第 20 天迅速减弱, 然后消失, 同时在高压的南侧有切断低压活动。高压活动的全过程和阻塞形势类似。地形和非线性作用是这次阻塞生成的原因, 有人在 β 平面情况下所得的看法^[7]与此类似。

从图 4 的两张平均图来看, 似乎流场是准定常的, 但从逐日的高度场来看, 却是不断在移动、演变着; 东亚和北美两个大槽的活动也不一样, 东亚大槽有交替更新, 槽的主体可

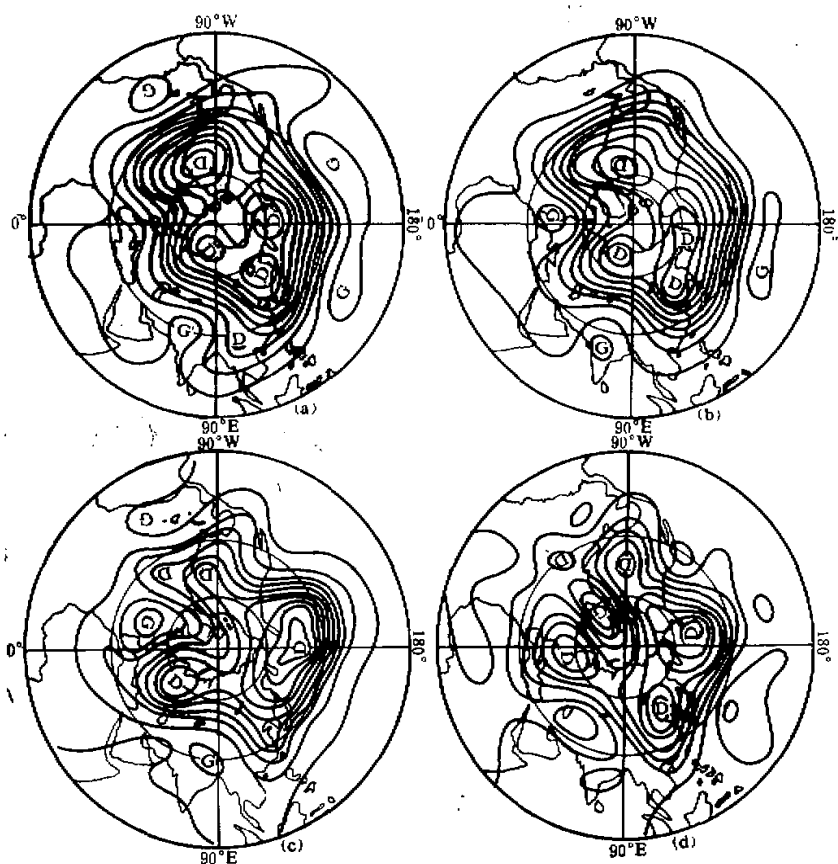


图5 一个阻高过程

(a) 第10天, (b) 第12天, (c) 第15天, (d) 第18天.

以完全东移消失;而北美大槽则只裂出扰动东移,落基山东侧始终有大槽维持。可见,不同的高原地形对气流影响是很不同的。许多人对此进行过探讨,看法大体一致:西藏高原使气流分支,以绕流为主;落基山上的气流则主要是爬坡,因而下游的流场很不相同。

四、结 语

在文献[1]中用 Rossby-Huairwitz 波及近似波解对一个环流模式的差分格式在无地形情况下的计算稳定性、精度及动力性能作了较为深入的检验,本文又用不同的地形及初始场对格式的性能作进一步的检验,并得到一些有意义的结果,进一步说明了这个差分格式是成功的,有相当好的稳定性和精度,能够正确描写流场变化的动力学过程,在有复杂地形情况下也能够作长时间的积分。

在简单地形下,强迫扰动能够很快趋于准定常;在复杂地形时,存在着波与波之间的

非线性相互作用及地形对不同气流的作用,流场一方面大体上维持平均形势,一方面又存在着明显的变动,出现如阻高一类的活动;不同结构的流场对波列传播的影响可以是很不相同的。

参 考 文 献

- [1] 曾庆存等, 1985, 一个大气环流模式差分格式的检验, 气象学报, 第 43 卷, 第 4 期。
- [2] Zeng Qingcun, 1983, The Evolution of a Rossby-Wave Packet in a Three-Dimensional Baroclinic Atmosphere, *J. Atm. Sci.* Vol. 40, No. 1, Jan.
- [3] Zeng Qingcun et al., 1986, Evolution of Large Scale Disturbances and Their Interaction with Mean Flow in a Rotating Barotropic Atmosphere Part I, II, *Advances in Atmospheric Sciences*, Vol. 2, No. 1—2.
- [4] Arakawa A. and V. R. Lamb, 1981, A Potential Enstrophy and Energy Conserving Scheme for the Shallow Water Equations, *M. W. R.* Vol. 109, 18—36, Jan.
- [5] Manabe, S. et al., 1974, The Effects of Mountains on the General Circulation of the Atmosphere as identified by numerical experiments, *J. A. S.* Vol. 31, No. 1, 3—42.
- [6] Haskins B. and R. Pearce, 1983, Large-scale Dynamical Processes in the Atmosphere, Academic Press, London, p. 27—52.
- [7] Egger, J., 1978, Dynamics of Blocking highs, *J. A. S.* Vol. 35, 1788—1801.

NUMERICAL EXPERIMENTS OF OROGRAPHIC INFLUENCE ON THE BAROTROPIC FLOW

Yuan Chongguang Zeng Qingcun

(*Institute of Atmospheric Physics, Academia Sinica*)

Abstract

In this paper, some tests are carried out for the property of a horizontal difference scheme under the case of complex orography using a barotropic model. We also simulated the propagation of disturbance superimposed on the basic flows which have various structures. The results are very good in comparison with the theoretical and observational studies.