

大地形对夏季北半球副热带高压 形成作用的数值试验

骆美霞 朱抱真 沈如金

(中国科学院大气物理研究所)

提 要

本文利用一个 σ 坐标的三层初始方程热带球圈数值模式,研究大地形对纬向风带的纯动力扰动作用。

结果得到,大地形的直接动力强迫作用,可使纬向均匀的高压带在地形区发生断裂,形成青藏高原高压、落基山高压和伊朗高压;然后通过大气环流的动力调整,在上述三个高压的上、下游形成北非高压和两个大洋上的高压,两类高压的结构很不相同。大地形的纯动力作用,对于青藏高原高压和落基山高压这一类“暖性”结构高压的形成,也起了相当的作用。

一、引 言

在北半球夏季的副热带高压带上,有着明显的纬向不对称性,高压带经常断裂成几个闭合的反气旋环流。它们是:青藏高原高压、落基山高压(或叫墨西哥高压)、伊朗高压、非洲高压、太平洋高压和大西洋高压。

从近年 van de Boogaard 制作的热带环流平均图^[1],可以看出这些高压的三维结构特征是不同的。200hPa 青藏高原高压和墨西哥高压,在低空是气旋性环流,高空是反气旋环流,愈向高空,反气旋环流愈为强大;伊朗高压和非洲高压,在低空就有明显的反气旋环流,它们向上加强,但到对流层高空,则相对减弱;两个大洋的高压,在低层和中层很强,但到对流层高空,则已消失。

带状副热带高压带经常在一些固定的地理区域断裂成一些闭合的反气旋环流;这些反气旋环流具有不同的结构特征,这些都属行星波定常扰动的形成问题。

为了避免东西边界的影响,本文利用一个适合于中低纬度的球圈模式,通过数值试验的办法来研究上述问题。

二、数值模式简述

本文利用的数值模式是三层初始方程球圈模式,它是将纪立人等^[2]的热带有限区域

模式扩展而成的, 这个模式的 σ 坐标初始方程组是:

$$\frac{\partial U}{\partial t} = -\mathcal{L}(u) + fV - \frac{p_*}{m} f v_g + \frac{p_*}{m} F_u + \frac{p_*}{m} D_u \quad (1)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} = -\mathcal{L}(v) - fU + \frac{p_*}{m} f u_g + \frac{p_*}{m} F_v + \frac{p_*}{m} D_v \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{p_*}{m} c_p T \right) = & -\mathcal{L}(c_p T + \phi) - \frac{1}{m} \frac{\partial(\sigma \phi)}{\partial \sigma} \frac{\partial p_*}{\partial t} \\ & + (U f v_g + V f u_g) + \frac{p_*}{m} H + \frac{p_*}{m} D_T \end{aligned} \quad (3)$$

$$\frac{\partial \Sigma}{\partial t} = -\frac{1}{m} \left[m^2 \left(\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} \right) + \frac{\partial p_*}{\partial t} \right] \quad (4)$$

$$\frac{\partial p_*}{\partial t} = - \int_0^1 m^2 \left(\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} \right) d\sigma \quad (5)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial \ln \sigma} = -RT \quad (6)$$

式中

$$\begin{aligned} U = \frac{p_*}{m} u, \quad V = \frac{p_*}{m} v, \quad \Sigma = \frac{p_*}{m} \sigma, \quad \sigma = \frac{p}{p_*}, \\ u_g = -\frac{m}{f} \left(\frac{\partial \phi}{\partial y} + RT \frac{\partial \ln p_*}{\partial y} \right), \quad v_g = \frac{m}{f} \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} + RT \frac{\partial \ln p_*}{\partial x} \right), \end{aligned}$$

算符

$$\mathcal{L}(a) \equiv m \left[\frac{\partial}{\partial x} (Ua) + \frac{\partial}{\partial y} (Va) \right] + \frac{\partial}{\partial \sigma} (\Sigma a)$$

其中, p_* 为地面气压, F 表示垂直湍流扩散项, D 表示水平湍流扩散项, 本文只在运动方程中考虑由地表摩擦引起的垂直扩散, m 是麦卡托投影 $m = \sec \varphi$ 的放大系数.

这个模式源自朱抱真等^[4]的北半球三层初始方程模式. 模式的差分方程组的空间差分, 保持大气的总质量、动量、动能和总能量守恒, 详细情况见文献[3]. 模式的垂直差分是将整个大气分为等距的三层. 水平网格距在赤道上为 555 公里. 水平积分范围是从南纬 37.1 度到北纬 62.2 度的球圈. 南北侧边界取固定边界. 时间差分取欧拉后差, 步长为 15 分钟.

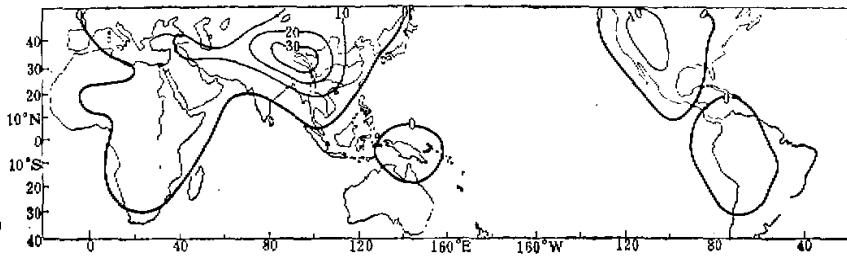


图 1 模式中的地形分布及试验范围(单位: 100 米)

初值和气压梯度力项的计算,以及温度场和位势高度场的转换关系同文献[2]。

模式中的地形高度取自文献[4],经过光滑处理后,如图1所示,它保留了实际地形的
大尺度特征,但地形高度和坡度都比实际地形降低很多,青藏高原的最高高度为3800米,
落基山高原的最高高度为1600米。

为了探讨高原地形对夏季副热带高压形成的动力作用,我们取夏季200、500、850hPa
三个等压面上的纬向平均风速作为初始基本风场(取自文献[2]),作了6天的时间积分观
察青藏高原、落基山、伊朗高原等大地形对带状副热带高压带的断裂过程。

三、数值实验结果

1. 大型反气旋环流的形成过程

纬向均匀对称的初始环流,经过地形扰动,一天以后,就在对流层低层(850hPa)出现了
明显的大尺度地形波动,原来纬向对称的带状高压带变为纬向不对称。在青藏高原的
西部(70°E)、南部(90°E)和东南部(115°E)处出现了明显的断裂,在伊朗高原的南
部已出现一个反气旋环流,中心位于阿拉伯半岛。但中高层并无明显的断裂现象,500hPa
只是在青藏高原和落基山附近的90°E和120°W两处有微弱的断裂,出现了一个弱槽。
200hPa流场的断裂则更不明显,只在120°W处的风向有微弱的变化。

到第二天,地形的动力扰动已经影响到上、中、下各层,带状副热带高压带在各层都明
显地出现了断裂。200hPa流场上,在三个大地形的南部,出现了三个明显的反气旋环流,
它们的中心分别位于(23°N, 45°E)、(23°N, 106°E)、(23°N, 100°W),正和气候平
均场的伊朗高压、青藏高压和美洲的落基山高压(或叫墨西哥高压)相对应,只是位置偏
南。其中以青藏高压最为强大,成为全球最强大的副热带反气旋环流系统。

500hPa流场上,在伊朗高原和落基山脉南部也形成了两个明显的反气旋环流系统,
中心分别位于(27°N, 40°E)和(27°N, 106°W),比气候位置偏西偏南,其中以伊朗高
压最强。850hPa流场上(图2),地形的动力作用迫使原来位于33°N和28.7°N之间的
带状高压带南移到28.7°N和24.2°N之间,在大地形附近这种南移则更明显,带状高压
带的断裂现象也更为显著。落基山脉的东南部出现了新的反气旋环流中心。

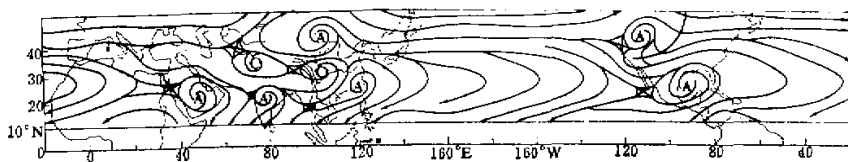


图2 模拟的第二天流场图(850hPa)

积分的环流从第五天起变化开始变小,图3给出第六天的数值模拟图。青藏高压和落
基山高压从第二天形成后,就比较稳定。到第六天,200hPa青藏高压的位置略北移,它是
全球最强大的副热带高压系统。这同平均实况比较一致,只是高压中心位置偏东偏南。到
第六天,200hPa上落基山反气旋环流的范围略有缩小。500hPa落基山反气旋环流的中

心略向西移动一些,比气候图上的中心 (33°N , 105°W) 偏西偏南。

太平洋高压、北非高压和大西洋高压直到第五天才同时在 850hPa 上形成。从第六天的 850hPa 模拟图(图 3c) 看出,太平洋和大西洋高压的尺度最大,在东西方向的范围几乎延伸到整个大洋。这与平均情况相符,但模拟图上太平洋高压中心位于西太平洋,东太平洋为相对的反气旋环流区,无明显的中心,而气候图上太平洋高压中心则位于东太平洋。模拟的大西洋高压中心偏于气候中心位置 (29°N , 50°W) 的东北部。北非高压中心位于 (27°N , 3°W), 偏于气候位置 (31°N , 6°E) 的西南部。

500hPa 流场上,太平洋反气旋中心也是在第五天形成的,而北非反气旋中心直到第六天才形成。从第六天的 500hPa 模拟图(图 3b) 看出,太平洋高压中心位于 (27°N , 151°E), 与气候图上的中心位置 (27°N , 152°E) 非常一致。大西洋上只是一个相对的反气旋环流区,还没有明显地断裂出高压中心,而气候图上则有明显的反气旋中心。模拟的北非高压中心位于 (27°N , 6°W), 比气候图上的中心 (30°N , 4°W) 略偏南。

从以上的模拟结果可以看到,副热带上的六个高压,都得到一定程度的模拟,其中以 500hPa 上的高压模拟得较好,大陆上的高压中心都比较偏南。

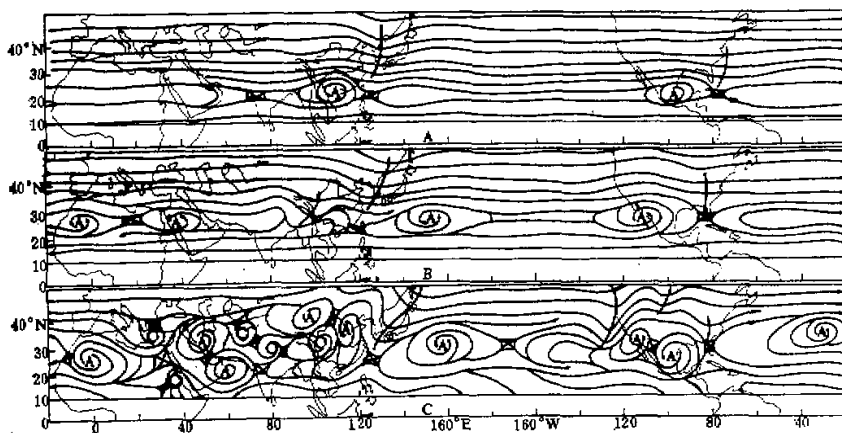


图 3 模拟的第六天流场图
(A 示 200hPa B 示 500hPa , C 示 850hPa)

前面的分析指出,六个副高的形成过程是不同的,按照高压的形成过程不同,我们可以将副热带高压分为两类:

a) 地形扰动作用直接产生的高压

象伊朗高压、青藏高原高压和落基山高压可以说是地形扰动作用直接产生的一类副高,形成过程很快。其中伊朗高压最先出现于阿拉伯半岛,然后向西移动,最后再向东移到高原主体。这个过程与朱抱真等^[9]的事实分析结果相似。伊朗高压是一个移动性的并且变化较多的系统。

青藏高原高压的特点与伊朗高压不同, 200hPa 上的青藏高原高压于第二天形成后,就很稳定,

成为北半球副热带上空一个最显著的准静止性超长波系统, 200hPa 上落基山高压于第二天形成后也比较稳定, 成为另一个准静止性的反气旋。

b) 环流调整作用形成的高压

北非大陆高压、太平洋高压和大西洋高压都是在地形扰动直接产生的伊朗高压、青藏高原高压和落基山高压形成后, 直到积分第五天才开始形成, 在垂直方向上它们先在低层出现, 然后向上扩展。因此, 可以说它们是在地形高压形成后, 大气环流在整个球圈带内发生调整、诱生出来的。这说明高原地形的纯动力影响不只限于高原附近的有限范围, 它可以通过大气环流的动力调整, 在上、下游影响到全球的范围。

2. 副热带高压的三维结构

图 4 给出各个副热带高压的东西向垂直结构。我们用第六天的数值模拟结果 (图 3 和图 4) 讨论各个副热带高压的三维结构, 并与气候图^[1]比较。模拟的伊朗高压从垂直结构看, 上、中、下三层都是反气旋环流, 但下、中层的反气旋系统水平尺度较大, 到高层减弱, 不再具有明显的中心。这与平均实况相近。从图 4 知伊朗高压随高度向西倾斜。

落基山高压的垂直结构特征是: 在对流层中、上层为明显的反气旋环流, 低层对应的是两个高压之间的鞍型区, 大致与气候图相似。但 500hPa 上模拟的位置偏西, 200hPa 上模拟的位置偏东。从图 4 可知落基山高压的位相是准垂直的。

值得特别提出的是青藏高原高压的三维结构, 在观测的平均图上, 青藏高原高压的结构在 200hPa 上为反气旋环流, 500hPa 上对应的是气旋性环流。模拟的青藏高原高压结构也是高层 200hPa 为反气旋环流, 500hPa 上对应的是槽脊过渡带。这说明模拟的青藏高原高压结构同平均实况是比较一致的。

模拟的北非高压和两个大洋高压的结构特征是: 在低空和中层反气旋环流明显, 向上明显地减弱。高压的位相都是随高度向西倾斜。这些都与实况相符。

一般说, 对高度场而言, “暖性”高压的垂直结构特征是: 低空为气旋性环流, 高空为

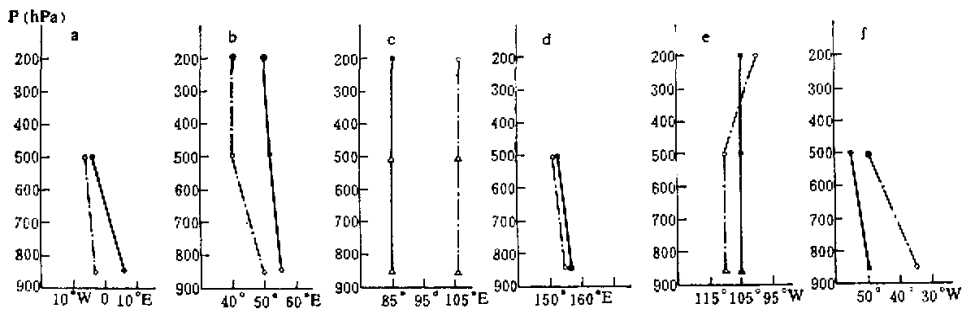


图 4 各个副热带高压的垂直结构

a 示北非高压, b 示伊朗高压, c 示青藏高原高压, d 示太平洋高压, e 示落基山高压, f 示大西洋高压。图中 Δ 表示该点处于槽底部或两个高压中心之间的鞍型区, $\odot$ 表示反气旋中心不明显, 实心圆点 $\bullet$ 表示气候位置。计算位置用点划线连接, 气候位置用实线连接

反气旋环流,反气旋环流的强度向上增强。“动力性”高压的三维结构特征是:低层和中层的反气旋明显,反气旋环流的强度向上减弱。从图3和图4看出,模拟的青藏高原和落基山高压的三维结构特征是:低空处于反气旋和气旋环流之间的过渡带,高空为反气旋环流,反气旋环流的强度向上增强。可以说这类高压具有“暖性”反气旋的结构特征。北非高压和两个大洋高压,是由动力调整作用形成的,具有“动力性”高压结构特征。它们的结构特点是:低空和中等反气旋环流明显,反气旋环流的强度向上减弱,到对流层高空几乎完全消失。这些和上述“暖性”高压的垂直结构特征不同。

3. 大地形对于“暖性”高压形成的作用

Krishnamurti 等^[6]认为青藏高原是一个暖性的高空反气旋,和加热过程有关;而墨西哥高压(本文称为落基山高压)和非洲高压是动力性反气旋,动力性反气旋则是暖性高压形成后作为一个动力屏障,对纬圈环流扰动的结果。纪立人等^[2]在有限区域的数值试验中,当只有青藏高原纯地形作用时,高空没有断裂出反气旋环流,只有在引进加热作用后,200hPa 才出现反气旋环流,因此他们认为青藏高原是热力作用形成的,地形动力作用引起的扰动可能只局限于低层的浅薄系统,对青藏高原的形成没有作用。

本文的实验结果表明,单纯的大地形动力作用,不只是影响对流层低层,而且可影响到200hPa,在那里形成强大的准静止性超长波反气旋系统,并且具有“暖性反气旋”结构特征。即在垂直结构上,低层近于气旋性环流,高层为反气旋环流。人们通常认为这类暖性结构高压的形成是由热力作用引起的,但我们在纯动力作用下模拟出的青藏高原,也具有这种暖性结构特征。因此我们认为大地形的纯动力性机械作用,对于青藏高原和落基山高压这一类暖性结构高压的形成,也产生相当的作用。

另外,本文模拟结果指出,由地形纯动力扰动作用直接产生的青藏高原、落基山高压和伊朗高压具有不同的结构特征,前两个具有暖性高压结构特征,第三个具有动力性高压结构特征。这三个高压几乎同时于第二天形成,而非洲高压和两个大洋高压的形成则是前三个地形高压形成后大气环流动力调整的结果。

从模拟图(图3)和观测的平均图^[1]都可以看到,青藏高原和落基山高压的特征虽有很大的相似之处,但是它们也还存在着差异,200hPa 青藏高原在500hPa 上对应的是低槽;但200hPa 落基山高压在500hPa 上对应的仍是一个明显的反气旋环流。在只有纯地形动力作用下为什么会产生这种差异呢?我们初步认为可能是与青藏高原和落基山高原的地形分布特点不同有关。青藏高原是长轴为东西向的巨大椭圆形,南北向坡度显著;而落基山则是一个东西向较窄,东北向较长的窄长山地,它们对气流产生的动力强迫不同。

从图3看出,当西风气流过青藏高原时,500hPa 流场出现了北脊南槽的分流现象,随着积分时间的增长,南槽逐渐加强,这可能是因为当西风气流过巨大的椭圆形青藏高原时,发生明显的绕流,地形的直接阻挡作用,使气流出现了分流现象,气流在北坡山脊上出现了同地形形状相似的脊,在南坡强迫形成槽,使得200hPa 青藏高原在500hPa 上对应的是低槽。

当西风气流过落基山时,可能以爬越为主,500hPa 西风带上出现了迎风槽和背风槽

以及和山脊相重合的高压脊,而没有明显的的分流现象。因而 200hPa 落基山高压在 500 hPa 上对应的仍是一个反气旋环流。

四、结 语

本文是一个初步结果,虽然积分的日数不长,模拟的副高系统还不能说已经达到定常状态。但可以看到:大地形纯动力作用的影响,不只局限于对流层低层,而且可以影响到 200hPa,它可使纬向均匀的高压带在地形区发生断裂,形成青藏高原、落基山高压和伊朗高压;然后通过大气环流的动力调整,在上、下游形成北非高压和两个大洋高压。北半球副热带上的六个高压都得到一定程度的模拟。因此我们说大地形在纬圈上的不对称性所引起的动力强迫,对于副热带高压的形成起了重要的作用。

特别值得提出的是,我们认为大地形的纯动力作用,对于青藏高原和落基山高压这一类通常归于热力作用的“暖性高压”的形成,也发生相当的影响。

当然在实际大气中,地形动力作用是和热力作用连系在一起的,需要进一步在模式中考虑加热过程进行实验。可以预计进一步考虑这种地形的动力作用与热力作用的相互影响后,可能对高压的模拟有所改变。

致谢: 在工作中,同李玉兰同志进行过有益的讨论,作者表示感谢。

参 考 文 献

- [1] Henry Van de Boogaard 1977, The Mean Circulation of the Tropical and Subtropical Atmosphere—July, NCAR/TN-118 + STR NCAR TECHNICAL NOTE, September.
- [2] 纪立人、沈如金、陈于湘, 1984, 青藏高原气象科学实验文集(二), 科学出版社, 236—244.
- [3] 朱抱真、陈嘉滨、张学洪、季仲贞、骆美霞、纪立人、张道民、许有丰, 1980, 气象学报, 38, 130—141.
- [4] Berkofsky, L., and Bertont, E. A., 1955, Mean Topographic Charts for the entire earth, *Bulletin of the American Meteorological Society* 36, 350—354.
- [5] 朱抱真、宋正山、孙国武, 行星尺度环流特征和青藏高原对初夏青藏高原建立的作用(即将发表).
- [6] Krishnamurti, T. N. et al., 1973, Tibetan High and Upper Tropospheric Tropical Circulation During Northern Summer, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, Vol. 54, 1234—1249.

A NUMERICAL EXPERIMENT OF THE DYNAMIC EFFECT OF LARGE-SCALE TOPOGRAPHY ON THE FORMATION OF SUBTROPICAL HIGH IN THE NORTHERN SUMMER

Luo Meixia Zhu Baozhen Shen Rujin

(*Institute of Atmospheric Physics, Academia Sinica*)

Abstract

In this paper, the effect of the purely topographic forcing on the basic zonal wind belt is investigated by using a three-level global belt primitive equation model in σ -coordinate.

The numerical integration is started from the mean zonal flow of summer and performed up to 6 days. On the 2nd day integration, at 200 hPa level, the zonally uniform high pressure belt is broken into some anticyclones in regions near the mountains by the direct dynamical forcing of topography. These are the Qinghai-Xizang high, the Rocky high and the Iranian high, the first two of which are of thermal structure and the third is dynamical one. Then, the African high, the Pacific high and the Atlantic high are formed subsequently in the regions upstream and downstream of the above three topographic highs as a consequence of dynamical adjustment of atmospheric circulation in entire global belt.

Thus, we may conclude that the dynamic effect of large-scale topography of zonal asymmetry plays an important role in the formation of the Qinghai-Xizang high and the Rocky high.