

地形和热源对冬季定常行星波形成的影响

傅晓卫 许有丰

(中国科学院大气物理研究所, 北京 100080)

提 要

本文用二层非线性原始方程谱模式, 并在方程中考虑了 Rayleigh 摩擦、Newton 冷却和温度水平扩散, 在纬向均匀的初始场下, 积分 40 天, 分别模拟了地形、热源单独作用和共同作用对冬季定常行星波形成的影响, 尤其考虑了不同尺度地形和非定常热源的影响。

关键词: 地形; 热源; 定常行星波; 数值模拟。

一、引 言

地形和热源对定常行星波形成的影响是大气科学研究中一个基本而又一直普遍受到重视的问题, 定常波的维持和演变对中期天气过程和长期天气预报都有重要意义。

Charney 和 Eliassen^[1]、Smagorinsky^[2]、朱抱真^[3]很早就用线性理论解释了定常波的形成, 以后又有许多作者在这方面进行了数值模拟研究, 如: Kasahara^[4]、Manabe^[5], 前者指出在对流层形成定常波的主要因子是热力作用, 而后者则更强调大地形对形成对流层及平流层大尺度扰动的重要影响, Hoskins^[6]等用线性化的 5 层原始方程谱模式研究了球面斜压大气对热力强迫和地形强迫的响应, 黄荣辉^[7]用准地转 34 层线性模式讨论了冬季热源位置与热源的南北宽度对定常行星波的影响。上述工作都从不同方面强调了热源、地形及热源变化对定常行星波形成的重要性。本文从原始方程非线性谱模式出发, 讨论了不同尺度地形和热源的非定常变化对冬季定常行星波的影响。

二、基本方程组

1. 模式的垂直分层

模式分为二层, σ 放在半层上, 其余变量均放在整层上。定义 $\Delta\sigma_k = \sigma_k + \frac{1}{2}$
 $-\sigma_k - \frac{1}{2}$ 。

1990年5月26日收到, 1992年12月30日收到修改稿。

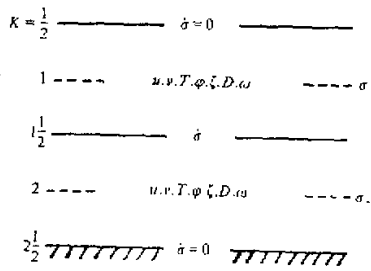


图 1 模式的垂直分层

2. 模式方程

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = \frac{1}{a(1-\mu^2)} \frac{\partial F_v}{\partial \lambda} - \frac{1}{a} \frac{\partial F_\mu}{\partial \mu} - R_f \zeta, \quad (1)$$

$$\frac{\partial D}{\partial t} = \frac{1}{a(1-\mu^2)} \frac{\partial F_\mu}{\partial \lambda} + \frac{1}{a} \frac{\partial F_v}{\partial \mu} - \nabla^2 \left(\frac{U^2 + V^2}{2(1-\mu^2)} + \varphi + RT_0 \ln P_* \right) - R_f D, \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial T'}{\partial t} = & \frac{1}{a(1-\mu^2)} \frac{\partial (UT')}{\partial \lambda} - \frac{1}{a} \frac{\partial (VT')}{\partial \mu} + DT' - \sigma \frac{\partial T'}{\partial \sigma} + \frac{R}{c_p} \frac{T\omega}{P} + \frac{Q}{c_p} \\ & - \alpha T' + K_T \nabla^2 T', \end{aligned} \quad (3)$$

$$\frac{\partial \ln P_*}{\partial t} = -\vec{V} \cdot \nabla \ln P_* - D - \frac{\partial \sigma}{\partial \sigma}, \quad (4)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \ln \sigma} = -RT, \quad (5)$$

其中, ζ : 绝对涡度; D : 散度; T' : 温度扰动; P_* : 场面气压; Φ : 位势高度; φ : 纬度; a : 地球半径; R_f : Rayleigh 摩擦系数; α : Newton 冷却系数; K_T : 温度水平扩散系数; Q : 非绝热加热率. 而

$$\mu = \sin \varphi, \quad T' = T - T_0(\sigma), \quad \text{取 } T_0(\sigma) = 273 \text{ K},$$

$$U = u \cos \varphi, \quad V = v \cos \varphi,$$

$$D = \frac{1}{a(1-\mu^2)} \left[\frac{\partial U}{\partial \lambda} + (1-\mu^2) \frac{\partial V}{\partial \mu} \right], \quad \zeta = f + \frac{1}{a(1-\mu^2)} \left[\frac{\partial V}{\partial \lambda} - (1-\mu^2) \frac{\partial U}{\partial \mu} \right],$$

$$F_\mu = V\zeta - \sigma \frac{\partial U}{\partial \sigma} - RT' \frac{\partial \ln P_*}{a \partial \lambda}, \quad F_v = -U\zeta - \sigma \frac{\partial V}{\partial \sigma} - RT'(1-\mu^2) \frac{\partial \ln P_*}{a \partial \mu},$$

把方程 (1) — (5) 写成垂直差分的向量形式:

$$A_\sigma = \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \end{bmatrix}, \quad A \text{ 为任意一变量.}$$

则

$$\frac{\partial \zeta_\sigma}{\partial t} - z_\sigma = -R_f \zeta_\sigma, \quad (6)$$

$$\frac{\partial D_\sigma}{\partial t} - d_\sigma = -\nabla^2 \left(\Phi_\sigma + R B T_\sigma + R T_0 \ln P_\sigma \right) - R_f D_\sigma, \quad (7)$$

$$\frac{\partial T'_\sigma}{\partial t} - t_\sigma = -\frac{G}{c_p} D_\sigma + \frac{Q}{c_p} - \alpha_\sigma T'_\sigma + K_T \nabla^2 T'_\sigma, \quad (8)$$

$$\frac{\partial \ln P_\sigma}{\partial t} - P = -\bar{\pi}_1 D_\sigma, \quad (9)$$

其中

$$z_\sigma = \left(\frac{1}{a(1-\mu^2)} \frac{\partial F_\nu}{\partial \lambda} - \frac{1}{a} \frac{\partial F_\mu}{\partial \mu} \right)_\sigma,$$

$$d_\sigma = \left(\frac{1}{a(1-\mu^2)} \frac{\partial F_\mu}{\partial \lambda} + \frac{1}{a} \frac{\partial F_\nu}{\partial \mu} \right)_\sigma - \nabla^2 \left(\frac{U^2 + V^2}{2(1-\mu^2)} \right)_\sigma,$$

$$F_{\mu\sigma} = (-V \cdot \zeta)_\sigma - R T'_\sigma \frac{\partial \ln P_\sigma}{a \partial \lambda} - \dot{\sigma}_{1.5} (U_2 - U_1) \pi_{3\sigma},$$

$$F_{\nu\sigma} = (-U \cdot \zeta)_\sigma - R T'_\sigma (1-\mu^2) \frac{\partial \ln P_\sigma}{a \partial \mu} - \dot{\sigma}_{1.5} (V_2 - V_1) \pi_{3\sigma},$$

$$t_\sigma = t_{1\sigma} + t_{2\sigma},$$

$$t_{1\sigma} = - \left(\frac{1}{a(1-\mu^2)} \frac{\partial (U T')}{\partial \lambda} + \frac{1}{a} \frac{\partial (V T')}{\partial \mu} \right)_\sigma,$$

$$t_{2\sigma} = -\dot{\sigma}_{1.5} (T'_2 - T'_1) \pi_{3\sigma} + [T'] \left(I - \frac{R}{c_p} \underline{C} \right) D_\sigma$$

$$+ [T'] \frac{R}{c_p} (I - \underline{C}) \cdot (\bar{V} \cdot \ln P_\sigma)_\sigma,$$

$$[T']、[T] \text{ 为对角矩阵, } [T'] = \begin{bmatrix} T'_1 & 0 \\ 0 & T'_2 \end{bmatrix}, \quad [T] = \begin{bmatrix} T_1 & 0 \\ 0 & T_2 \end{bmatrix},$$

$$I \text{ 为单位矩阵, } \pi_{3\sigma} = \frac{1}{2\Delta\sigma} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix},$$

$$P = -\bar{\pi}_1 (\bar{V} \cdot \nabla \ln P_\sigma)_\sigma,$$

$$\bar{\pi}_1 = [\Delta\sigma, \Delta\sigma],$$

$$\dot{\sigma}_{1.5} = \bar{\pi}_2 (D + \bar{V} \cdot \nabla \ln P_\sigma)_\sigma,$$

$$\bar{\pi}_2 = [-\Delta\sigma(1-\sigma_{1.5}), \Delta\sigma \cdot \sigma_{1.5}],$$

$$\underline{B} = \begin{bmatrix} \ln \frac{\sigma_{1.5}}{\sigma_1} & \ln \frac{\sigma_{2.5}}{\sigma_{1.5}} \\ 0 & \frac{1}{2} \ln \frac{\sigma_{2.5}}{\sigma_{1.5}} \end{bmatrix}, \quad \underline{C} = \underline{B}^T, \quad \underline{G} = T_0 \underline{C}.$$

把方程 (6) — (9) 中 D 、 ζ 、 T' 、 $\ln P_\sigma$ 、 Φ_σ 、 Q 用球函数展开, 取三角截断, 表示为

$$X(\lambda, \mu, \sigma, t) = \sum_{m=-M}^M \sum_{n=1}^M X_{mn}(\sigma, t) P_n^m(\mu) e^{im\lambda}, \quad (10)$$

设热源的垂直分布为

$$Q(\lambda, \varphi, p) = Q_0(\lambda, \varphi) \exp \left[- \left(\frac{p - \bar{p}}{d} \right)^2 \right], \quad (16)$$

其中 $Q_0(\lambda, \varphi)$ 为已知的 500 hPa 热源分布, $\bar{p} = 500 \text{ hPa}$, $d = 300 \text{ hPa}$, 与原始热源资料^[8]相比, 冷热源的分布基本一致, 但中心强度偏弱, 尤其在海上。

初始 μ , φ , T 场取有 Oort (1983) 的 10 层纬向均匀的气候资料。

三、地形和热源对定常行星波形成的影响

1. 地形对定常行星波形成的影响

取 $Q_0 = 0$, $\alpha_1 = \alpha_2 = 0$, $K_T = 0.1 \times 10^6 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, $R_f = 0.1 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$, 积分 40 天, 取第 5 天到 25 天 500 hPa 高度场平均, 得到平均的 500 hPa 高度场图 3。

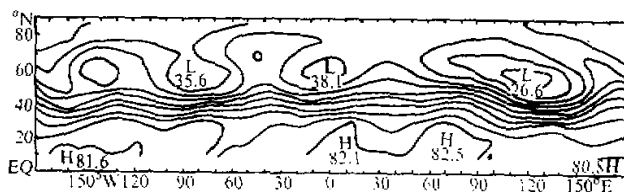


图 3 地形作用下 500 hPa 平均高度场

常年冬季北半球 500 hPa 为三波型。东亚大槽、北美大槽、欧洲浅槽, 在阿拉斯加和大西洋常为高压脊区。从图 3 可见, 地形作用下模拟的定常槽脊的分布相似于常年冬季的, 但欧洲槽偏强, 东亚、北美大槽强度较常年偏弱, 位置略偏西。

为了分析不同尺度扰动对定常槽脊形成的贡献, 我们把 500 hPa 平均高度场展开为 1—3 和 4—9 波合成场, 由图 4a 可见: 在青藏高原、洛基山下游有 2 个负扰动中心, 而其上游为 2 个正扰动中心, 另外在格陵兰东部为正扰动中心, 而新地岛以东的北冰洋为负扰动中心, 在副热带扰动较小。尤以青藏高原上下游的一对正负扰动最大。比较图 4a 与图 4b, 在常年冬季定常槽脊较强处, 如东亚、北美、大西洋等地都是 1—3 波和 4—9 波扰动中心一致所在。而欧洲浅槽、里海浅槽主要以 4—9 波扰动为主。而且图 4b 还表明: 北美 4—9 波的扰动比东亚的要强, 这与地形不同尺度有关, 即地形作用下, 东亚大槽的形成超长波扰动的贡献比长波扰动的大, 而北美大槽的形成, 超长波扰动贡献与长波扰动贡献相当。

2. 热源对定常行星波形成的影响

取地形高度场为零, 热源分布见图 2b。热源作用下定常槽脊的分布 (图略), 虽然北半球中高纬亦有 3 个槽脊系统, 但系统平浅, 中心强度比地形作用下的要大, 东亚大

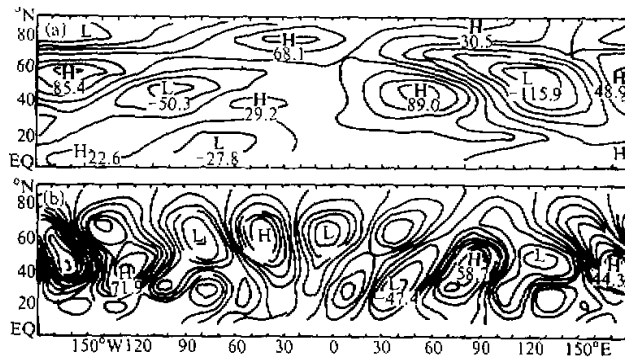


图4 地形作用下, 1—3波(a)和4—9波(b)高度扰动场

槽接近常年位置, 而欧美系统偏西, 与常年的相差 20—30 个经度, 这可能与谱展开后, 冷热源强度偏弱有关。而美洲一带的位势高度变化对热源变化可能又比较敏感, 就本文数值模拟而言, 地形作用下模拟的冬季定常槽脊的分布比热源作用下模拟的要好。

3. 定常热源和地形共同作用下对定常行星波形成的影响

由图 5 可见: 500 hPa 有 3 个槽: 北美大陆东部、欧洲—地中海, 东亚沿海, 其中以东亚大槽最强, 其槽线呈东北—西南向, 槽底有一支西风急流相配合, 欧洲槽的位置和强度也比地形、热源单独作用下模拟的更符合实际, 美洲槽线北段呈西北—东南向, 南段为东北—西南向, 在大西洋北部为一较强的高压脊, 亚洲大陆亦为一宽平的高压脊控制。这些分布特征与常年定常冬季系统分布十分相似, 但阿拉斯加脊未出现。地形作用下, 阿拉斯加为一高脊, 热源作用下, 为一浅槽, 而地形和定常热源共同作用下, 为较平直的环流。

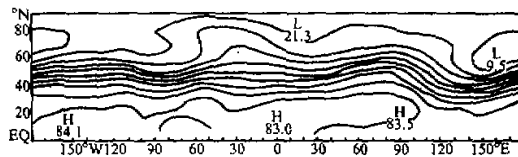


图5 地形、定常热源下, 500hPa 平均高度场

4. 非定常加热与地形共同作用对定常行星波形成的影响

以上模式中的热源是给定的定常分布, 而实际大气中热源变化是复杂的, 由于中短期内热源的变化规律和资料所知甚少, 北方寒潮研究中曾计算过某一阶段逐日的热源变化, 冷热源的移动有时是很明显的, 因此我们设计了一种简单的热源非定常形式——行波式。把 1 月热源场依 1—3 波、4—9 波, 10—21 波展开 (图略)。1—3 波热源合成场

基本反映了冬季的冷热源分布, 而随着波数增大, 热源扰动量减小, 因此我们假设热源的移动依波数而变 1—3 波热源场, 以 1 个经度 / d 东移, 4—9 波、10—21 波作为一种瞬变的热源扰动, 分别以 10、20 经度 / d 东移, 这样既保留了冬季加热场的主体特征, 又使得热源中心位置和强度随时间有一定变化, 这种变化的主要特征以 58°N、47°N 上冷热源的变化曲线图 6 来说明。

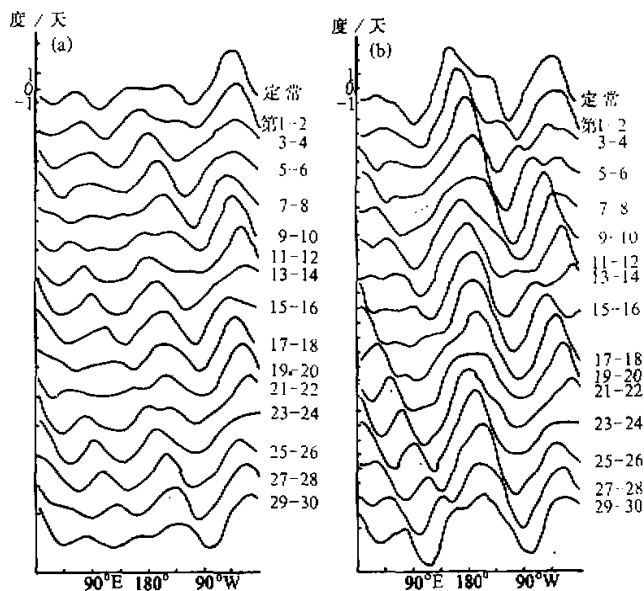


图 6 热源沿纬圈随时间变化

(a) 58°N; (b) 47°N

从图 6a 可见, 热源在高纬分布以 1 波型为主, 大西洋的热源最强, 且比较稳定, 而高纬太平洋热源相对较弱, 移动较快, 而图 6b 表明: 中纬热源分布为二波型, 在太平洋和大西洋有 2 个峰值, 尤以太平洋热源最强, 而中纬大西洋的热源移动比高纬的快, 图中清楚可见, 冷热源强度, 中心位置的变化, 下面我们分析一下这种非定常加热对定常槽脊的影响, 以及与定常加热下的区别。

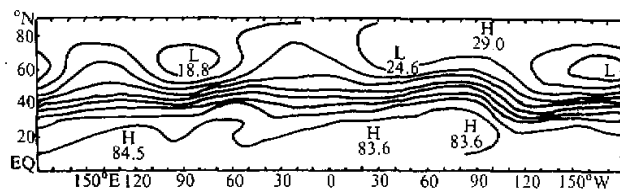


图 7 非定常加热、地形下 500 hPa 平均高度场

从图 7 可见, 500 hPa 的 3 个槽分别位于美洲大陆东部、欧洲、东亚沿海, 3 个脊分别位于: 阿拉斯加、大西洋北部、亚洲大陆为一线脊, 与定常加热下的相比 (图 5), 东亚环流形势差别不大, 而美洲大陆的位势高度相差较大, 非定常加热下, 阿拉斯加为一高脊, 美洲槽强度也比定常加热下的要强, 这与实际冬季 500 hPa 定常槽脊分布更相近, 从反面也说明热源的非定常比定常合理, 美洲地区环流对热源的变化较其它地区更灵敏。为了说明热源变化对位势高度变化的影响, 我们做了 5 天平均的热源距平和位势高度距平分析, 以非定常值减去定常值 (图略)。北半球冷热源距平最大中心在日本岛—太平洋中西部, 且维持少动, 略向东移, 而积分 10 天后, 500 hPa 位势高度场距平有一种类似于 PNA 波列式的分布 (图 8)。太平洋中西部有一高度负距平, 阿拉斯加为正距平、北美大陆为负距平, 沿洛基山一带传播, 距平值越来越小。虽然在北美—大西洋也存在一对次大的冷热源距平, 而它所引起的下游的位势高度变化却不大。

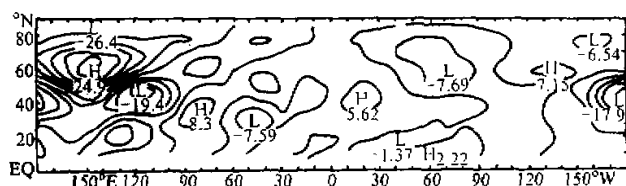


图 8 非定常加热下, 高度距平分布

由此, 我们认为, (1) 西太平洋地区的热源非定常变化对环流形势的影响相对更重要, (2) 北美地区位势高度场对热源变化的响应比东亚的要大。

四、结 语

由上面数值试验, 得到以下结论:

(1) 地形作用下, 二层原始方程非线性谱模式可以模拟出与常年冬季相近的定常槽脊分布。东亚大槽的形成, 超长波扰动对其贡献比长波扰动贡献要大, 而美洲大槽的形成, 二者贡献相当。

(2) 在地形和热源共同作用下, 定常槽脊的强度和位置模拟较理想, 特别在考虑了非定常热源后, 阿拉斯加的高压脊和美洲槽强度模拟更接近实况。

(3) 定常加热下, 热源中心之一在西太平洋, 而非定常加热下, 除热源中心主体慢慢东移外, 不断有热源小扰动东传, 西太平洋的热源变化对下游阿拉斯加~北美的位势高度变化影响较大。

参 考 文 献

- [1] Charney, J. G. and A. Elsasser, 1949, A numerical method for predicting the perturbations of the middle latitude westerlies. *Tellus*, 1, 38-54.

- [2] Smagorinsky, J., 1953, The dynamical influence of large scale heat source and sinks on the quasistationary mean motion of atmosphere, *Q. J. Roy. Met. Soc.*, **79**, 342-366.
- [3] 朱抱真, 1957, 大尺度热源、热汇和地形对西风带的常定扰动(二), *气象学报*, **28**, 198-224.
- [4] Kasahara, A. and W. M. Washington, 1971, General circulation experiments with six-layer NCAR model including orography, cloudiness and surface temperature calculations, *J. Atmos. Sci.*, **28**, 657-701.
- [5] Manabe, S. and T. B. Terpstra, 1974, The effects of mountains on the general circulation of the atmosphere as identified by numerical experiments, *J. Atmos. Sci.*, **31**, 3-42.
- [6] Hoskins, B. J. and D. J. Karoly, 1981, The steady linear response of a spherical atmosphere to thermal and orographic forcing, *J. Atmos. Sci.*, **38**, 1179-1196.
- [7] 黄荣辉, 1984, 冬季热源位置与热源的南北宽度对定常行星波的影响, *大气科学*, **8**, 117-125.
- [8] 朱抱真等, 1961, 北半球热源热汇的年变化和大气环流的年变化, *动力气象论文集*, 科学出版社, 38-64.

The Effects of Topography and Heat Source on the Formation of the Standing Planetary Waves in Winter

Fu Xiaowei and Xu Youfeng

(Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

Abstract

A two-layer nonlinear primitive spectral model which includes Rayleigh friction, Newtonian cooling and the horizontal thermal diffusivity is used. The numerical simulation initiates from zonal mean flow field and carries out integration for 40 days. The results computed by this model show the effects of the standing planetary waves in winter. Particularly, the effects of different scale topography and adjustable heat sources are considered.

Key words: topography; changeable heat source; standing planetary waves; numerical simulation.