

张立凤, 余沛龙, 黎爱兵, 等. 2014. 地形强迫对大气长波调整的可能影响 [J]. 大气科学, 38 (4): 804–812, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2013.13271.
Zhang Lifeng, Yu Peilong, Li Aibing, et al. 2014. Possible impacts of topography on adjustment of atmospheric long-waves [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 38 (4): 804–812

地形强迫对大气长波调整的可能影响

张立凤¹ 余沛龙¹ 黎爱兵² 顾明逸³

¹ 中国人民解放军理工大学气象海洋学院, 南京 211101

² 中国人民解放军 96631 部队, 北京 102208

³ 南京信息工程大学, 南京 210044

摘 要 地形作为大气的外部强迫, 其动力和热力作用对波动结构演变及极端天气出现都有不能忽视的作用。本文通过数值求解考虑地形强迫的 β 平面正压准地转位势涡度方程, 探讨了地形强迫作用对大气长波调整的可能影响, 结果表明: 同非线性作用和纬向非均匀基流作用一样, 无基流情形下具有纬向差异的地形分布影响了大气长波结构的演变, 也能强迫出大气长波调整现象。大气长波调整依赖于地形的高度和地形分布, 地形越高, 长波越容易出现波数的调整; 地形波数越大, 即地形结构复杂, 越不易出现波数变化。大气长波调整还与纬度有关, 纬度越高, β 越小, 地形强迫作用越突出, 长波调整容易出现; 反之, 低纬度以 β 效应为主的线性波动不易出现波数调整。大气长波调整对波动初始波动的振幅不敏感, 但依赖于波动的初始结构。此外, 有基流作用时, 地形强迫还是诱发定常波的重要因素, 且定常波流场结构依赖于地形高度分布, 与波动初始结构无关。

关键词 地形强迫 长波调整 Rossby 波 纬向波数

文章编号 1006-9895(2014)04-0804-09

中图分类号 P433

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2013.13271

Possible Impacts of Topography on Adjustment of Atmospheric Long-Waves

ZHANG Lifeng¹, YU Peilong¹, LI Aibing², and GU Mingyi³

¹ College of Meteorology and Oceanography, PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101

² No. 96631 Troop of PLA, Beijing 102208

³ Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

Abstract Topography is an important external forcing factor on the atmosphere and has orographic thermal and dynamic impacts on the evolution of atmospheric long waves and the emergence of extreme weather. In this study, numerical calculation with the forced β plane quasi-geostrophic potential vorticity equation considering linear Rossby waves with and without the influence of basic flow is used to investigate the possible impacts of topography on the adjustment of long waves. The results show that without the basic flow, the phenomenon of long-wave adjustment was accompanied by the forcing of zonal nonuniform topography, which is also an important mechanism for the adjustment. The adjustment is closely related to topographic amplitude and zonal structure. As the amplitude of topography increases, the phenomenon of wave-number adjustment in the evolution of linear Rossby waves becomes more obvious. However, the adjustment is difficult to identify in topography with a high zonal wave number. Long-wave adjustment is also associated with latitude. High latitude relates to a low β value in which the influence of topography is strong and adjustment of the wave number is simple. On the contrary, the wave number of a linear Rossby wave with a large β effect in low latitudes is not easily changed. Long-wave adjustment is associated with the structure of the initial field and is not

收稿日期 2013-09-22, 2013-11-15 收修定稿

资助项目 国家重点基础研究发展规划 (973 计划) 项目 2013CB956203

作者简介 张立凤, 女, 1961 年出生, 教授, 主要从事大气动力学与数值模拟研究。E-mail: Zhanglif@yeah.net

sensitive to the amplitude of the initial fluctuation. Moreover, when the basic flow is considered, the forcing of topography is also an important factor in producing a solitary Rossby wave. The structure of this solitary wave is determined by the distribution of the topography and is independent of the structure of initial fluctuation.

Keywords Topography, Adjustment of long waves, Rossby wave, Zonal wave number

1 引言

大气环流的异常与大气波动演变密切相关。在大气环流演变中, 大气长波(即 Rossby 波)的调整关系着环流形势的变化, 伴随环流形势变化, 天气过程也必然发生变化, 从而影响着天气预报和气候预测的成败, 所以研究大气长波调整机制及调整规律, 对了解大气环流演变和提高天气预报、气候预测的水平具有重要的科学意义。

关于大气长波的研究已有很多工作, 主要是利用标准模方法(Lorenz, 1972)、WKB 方法(Zeng, 1983)、解析(Zhao et al., 2006; 赵强和于鑫, 2008)和数值求解(Lu and Byod, 2008)等方法, 着眼于波动的稳定性与波流相互作用等方面(Eliassen and Palm, 1961; 曾庆存和卢佩生, 1980; 赵强等, 2000; 张亮等, 2010), 涉及到长波结构调整的研究较少。在我们的前期工作中(张立凤等, 2011a, 2011b; 张立凤等, 2012; 黎爱兵等, 2012), 已认识到非线性作用和纬向非均匀基流是长波发生调整的重要机制, 即大气长波的演变与大气内部动力过程密切相关, 但实际上大气外部强迫对长波的演变也有非常重要的作用, 如地形和热源强迫, 都能激发出定常行星波(Huang and Gambo, 1981; Held et al., 2002; 段安民等, 2006)。Charney and Devore (1979)利用准地转正压位涡方程及低阶谱模式研究了有摩擦耗散、非绝热加热和地形作用的大气非线性运动。汪萍和戴新刚(2005)利用该强迫正压模式模拟了强迫耗散和非线性共同作用下大气运动的若干特征。谭本旭和伍荣生(1995)还讨论了强迫和耗散对非线性 Rossby 包络孤立波的影响。虽然这些工作讨论了外强迫对波动演变的作用, 但都没有考虑外强迫对长波调整的影响。

地形作为大气的外部强迫, 其动力和热力作用对波动结构及极端天气的影响是值得重视的。在这方面陶诗言先生做过大量深入的研究工作。如盛华和陶诗言(1988a, 1988b)通过数值试验分析了青藏高原和落基山对气旋动力影响的异同, 陶诗言(1980)总结了 50 年(1931~1980 年)中国暴雨

的特性, 指出: 中国东部的许多强降水是由高原系统引起的, 中国强降水雨带的分布和范围受高原热力、动力作用的影响。随后, 通过对 1998 年长江流域洪涝灾害的研究指出(张顺利和陶诗言, 2002), 由于青藏高原的热力作用, 夏季高原东北部多短波槽活动, 这对夏季长江中游的洪涝灾害有着很大的影响, 1998 年长江流域两段梅雨期间, 正是高原东移的短波槽加强了梅雨锋, 并引起梅雨锋上强暴雨。通过对 2008 年初我国南方大范围冰雪天气过程的成因分析指出(陶诗言和卫捷, 2008), Rossby 波列的下游发展效应和从高原东移的高位涡舌诱发了低层静止锋锋生是这次高影响性灾害天气的制造者。陶先生的多年系列研究工作都表明, 对于我国的高影响天气青藏高原地形有不能忽视的作用, 这也是我国多灾害性天气频发的原因之一。

为研究地形强迫对长波调整的可能影响, 本文在先前研究基础上(张立凤等, 2011a, 2011b; 张立凤等, 2012; 黎爱兵等, 2012), 数值求解了考虑地形强迫的准地转正压位涡方程, 探讨了地形强迫作用下大气 Rossby 波演变的作用, 特别是地形强迫作用对大气长波调整的影响。

2 强迫正压模型及求解

基于 Charney and Devore (1979)构造的有外源强迫的准地转正压位势涡度方程, 在只考虑地形作用时, 描述大气运动的无量纲方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\nabla^2 \psi - F\psi) + J(\psi, \nabla^2 \psi + h) + \beta \frac{\partial \psi}{\partial x} = 0, \quad (1)$$

其中, ψ 为地转流函数, $F=(L/R)^2$, L 为特征水平尺度, R 为 Rossby 变形半径, h 为地形高度, $J(\psi, \nabla^2 \psi + h)$ 为雅克比函数。令 $\psi(x, y, t) = \bar{\psi}(y) + \psi'(x, y, t)$, 其中, $\bar{\psi}$ 和 ψ' 分别为 ψ 的基本量和扰动量, 西风基流为 $U = -\partial \bar{\psi} / \partial y$, 则大气波动方程可写为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\nabla^2 \psi' - F\psi') + U \frac{\partial}{\partial x} \nabla^2 \psi' + (\beta - U_{yy}) \frac{\partial \psi'}{\partial x} + J(\psi', h) + \varepsilon J(\psi', \nabla^2 \psi') + U \frac{\partial h}{\partial x} = 0, \quad (2)$$

其中, U_{xy} 为 U 关于 y 的二阶导数, $J(\psi', h)$ 反映地形与波动的直接作用, 而 $U(\partial h / \partial x)$ 代表地形与基流共同影响, ε 等于 0 或 1 表示式 (2) 为线性或非线性方程, 且分别代表线性和非线性 Rossby 波。

在计算区域 $\Omega = [0, L_x] \times [0, L_y]$ 范围内, 式 (2) 的初边值条件可设为 (张立凤等, 2011a, 2011b)

$$\psi'(x, y, 0) = A \cos(2\pi k_0 x / L_x) \sin(m_0 \pi y / L_y), \quad (3)$$

$$\psi'(x, y, t) = \psi'(x + L_x, y, t), \quad (4)$$

$$\psi'(x, 0, t) = \psi'(x, L_y, t) = 0, \quad (5)$$

其中, A 、 k_0 和 $m_0/2$ 分别为扰动流函数的波动初始振幅、 x (纬向) 和 y (经向) 方向上的初始波数。式 (4) 和 (5) 分别表示纬向取周期边界和经向取固壁边界。为研究地形强迫对 Rossby 波演变的影响, 设地形分布为

$$h(x, y) = h_0 \cos(2\pi k_h x / L_x + \theta_0) \sin(\pi y / L_y), \quad (6)$$

其中, h_0 和 k_h 分别为地形的高度和波数, θ_0 为地形初始位相, 决定地形峰谷位置, 无特别说明, $\theta_0 = 0$ 。

由于解析求解的困难性, 以下采用数值求解方法求解 (黎爱兵等, 2012)。空间采用蛙跳格式, 时间采用一阶隐式格式, 对方程 (2) 构造差分方程, 然后通过 Gauss-Seidel 迭代方法 (Schoeberl and Lindzen, 1984) 求解。数值计算时, 无特别说明, L_x 取 60°N 纬圈上无量纲长度, $L_y = 2$, 将 L_x 在 x 方向等分为 144 个格点, 步长为 Δx , 而 y 方向有 15 个格点, 步长为 Δy , 时间步长 $\Delta t = 0.05 \Delta x$, 每一时间层次允许的最大迭代误差为 10^{-8} 。

在前期的工作中, 我们已认识到方程的非线性或西风基流的纬向非均匀性都是激发长波调整的因子 (张立凤等, 2012; 黎爱兵等, 2012), 因此, 为突出地形强迫作用, 以下针对线性方程和纬向均匀基流进行计算。此外, 由于经向固壁边界条件的影响, Rossby 波的经向波数无论初始如何都会调整到半波结构 (张立凤等, 2011b), 故扰动初始的经向波数都取为半波, 即 $m_0 = 1$ 。分析式 (2) 可知, 地形对大气长波的影响还与纬向西风基流 U 有关。为突出地形的作用, 首先分析无基流 ($U=0$) 的情况, 然后分析基流的作用。

3 地形强迫对长波调整的作用

考虑到北半球实际海陆分布特征, 地形分布取双波形式 (Luo and Li, 2001; 刁一娜等, 2004)。图

1a 为双波地形的分布, 地形参数取 $h_0=1.0$ 和 $k_h=2$ 。图 1b–d 为该地形强迫下, $U=0$ 和初始 $A=0.1$ 、 $k_0=5$ 的线性 Rossby 波流场结构演变。由该图可知, 随着时间演变, 地形强迫作用导致了扰动中心的重新分布, 对应地形低值中心, 扰动中心向北移动, 反之, 扰动向南偏移。地形强迫还导致了纬向波数的变化, 初始 5 波扰动, 经过 120 天演变后调整为 9 波, 波动尺度明显变小。这说明即使是线性波动, 地形强迫的作用也会激发扰动中心位置和波数大小的改变, 即出现波动结构调整现象。分析方程 (2) 还可知, 在无基流时, 无论是扰动中心位置的调整, 还是波数大小的调整, 地形的非均匀分布与波动的相互作用项 $J(\psi', h)$ 起着重要作用, 其中 $-(\partial \psi' / \partial y)(\partial h / \partial x)$ 决定着波动的调整能否出现, 即地形的纬向非均匀性起着重要作用。若地形只为 y 的函数, 即 $-(\partial \psi' / \partial y)(\partial h / \partial x) = 0$ 时, 线性波动纬向波数不发生变化 (图略)。因此, 除非线性和基流的纬向非均匀性作用外, 地形的纬向差异也是 Rossby 波发生调整的机制之一。

4 地形结构对长波调整的影响

从公式 (6) 可见, 地形强迫作用与地形高度和结构有关。图 2 给出了不同高度双波地形强迫下初始波数为 5 的线性 Rossby 波纬向波数随时间变化。从该图可见, 当地形较低时, 线性 Rossby 发生长波调整难度较大, 在积分的 180 d, 其纬向波数仍没有改变。然而, 随着地形高度的增加, 地形的作用增强, 波动纬向波数发生调整, 且调整开始的时间也与地形高度密切相关。当地形高度 $h_0=1.0$ 时, 初始 5 波演变 70~80 d 后, 其纬向波数才开始变化, 而 $h_0=2.0$ 时, 长波开始调整的时间在 30 d 左右, 故地形越高, 长波出现调整的时间越早, 波动结构改变越容易。我国东部处于青藏高原大地形的下游, 不仅具有复杂的季风气候特征, 大地形造成的波动结构调整, 在地形的下游容易出现较小尺度的波动, 即次天气尺度的短波槽, 而这些系统的东移, 往往会造成多变的天气, 梅雨季节的江淮流域的暴雨过程就与高原东侧的短波槽东移有密切关系, 这也从理论上支持了陶诗言先生对江淮流域异常天气的研究结果 (Tao et al., 1980; 张顺利和陶诗言, 2002; 陶诗言和卫捷, 2008)。

以上分析已发现, 地形分布的纬向差异是无基流情形下线性长波调整的关键因子。为分析地形纬

向结构对长波调整的影响,图3给出了不同纬向结构的地形分布、初始5波的线性扰动的纬向波数随时间变化。从该图可见,对于具有不同纬向波数的地形,线性 Rossby 波调整的结果也有差异,地形波数越大,长波调整越难发生。在 $k_h=1$ 和 $k_h=2$ 的地形强迫作用下,尽管在 Rossby 波的演变中发生了波数调整,但双波地形作用下长波开始调整的时间要晚于单波地形。此外,对于 $k_h=3$ 的地形强迫,初始5波扰动的演变相对稳定,在积分的180 d内

一直维持5波运动,这说明局部的地形强迫对长波调整的作用更显著,这也可能是局部的极端天气的发生往往与地形有关的原因之一。

5 地形强迫与纬度、波动初始结构和基流的关系

5.1 与纬度的关系

经典 Rossby 波的产生源于 β 效应,而 β 参数与纬度相关,故纬度应该也是影响长波演变的因子

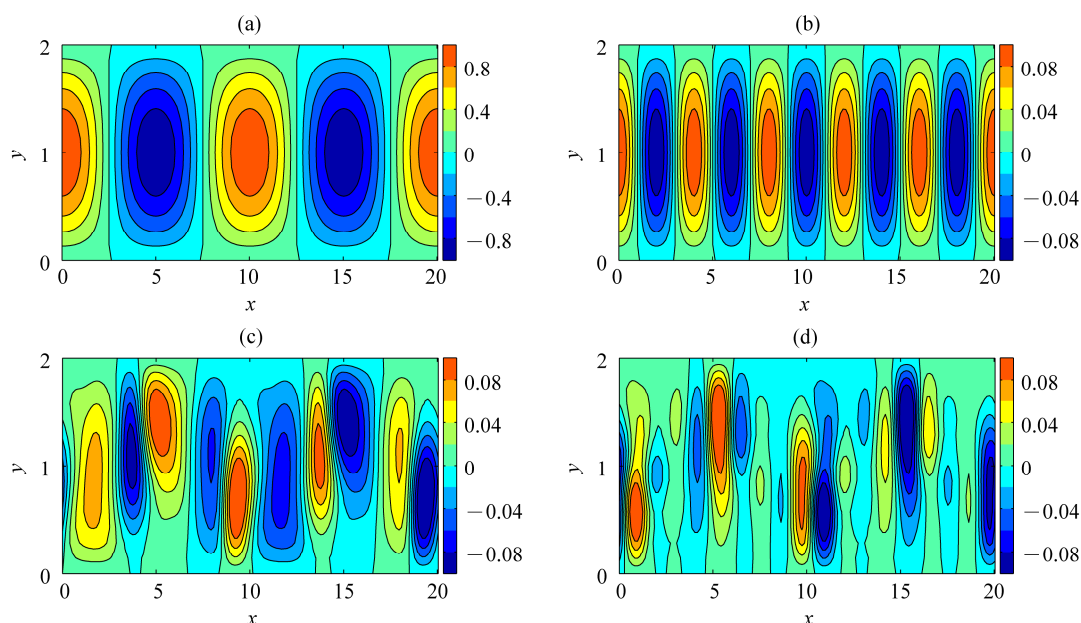


图1 双波地形强迫作用下线性 Rossby 波流函数结构随时间演变: (a) 地形高度; (b) 初始时刻、(c) 积分 30 天和 (d) 积分 120 天的线性 Rossby 波
Fig. 1 The evolution of linear Rossby wave stream function under the impact of wavenumber-two orographic forcing: (a) Non-dimensional distribution of topography; (b, c, d) the Rossby stream function at (b) the initial time, integrating (c) 30 d and (d) 120 d

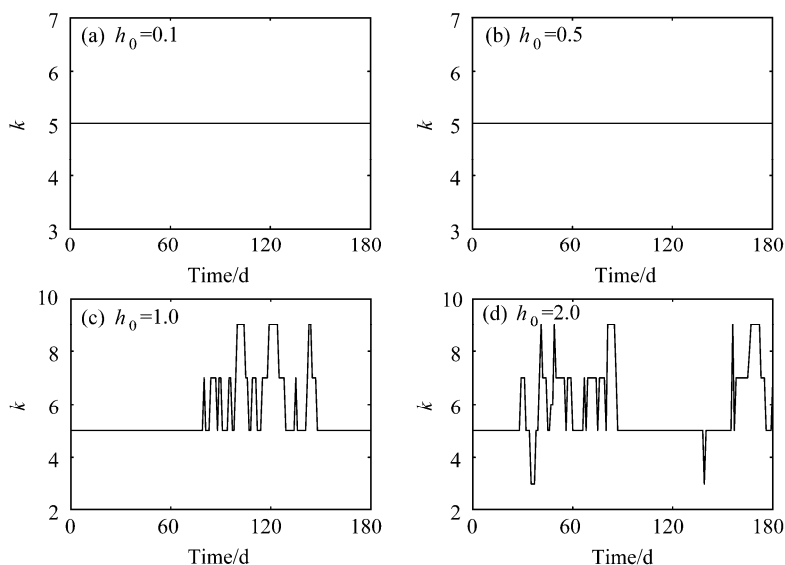


图2 $k_h=2$ 时, 不同 h_0 地形强迫下线性 Rossby 波纬向波数 k 随时间演变: (a) $h_0=0.1$; (b) $h_0=0.5$; (c) $h_0=1.0$; (d) $h_0=2.0$
Fig. 2 The evolution of zonal wavenumber k with different h_0 when $k_h=2$: (a) $h_0=0.1$; (b) $h_0=0.5$; (c) $h_0=1.0$; (d) $h_0=2.0$

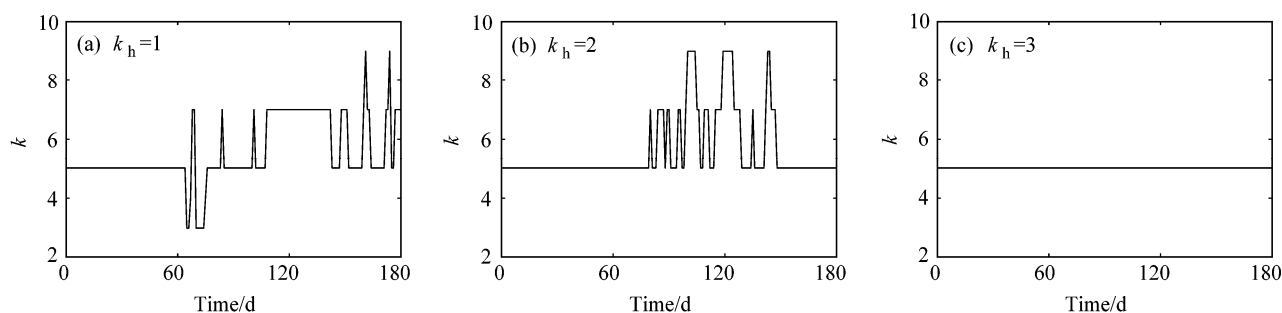


图3 $h_0=1.0$ 时不同 k_h 地形强迫作用下线性 Rossby 波纬向波数 k 随时间演变: (a) $k_h=1$; (b) $k_h=2$; (c) $k_h=3$

Fig. 3 The evolution of zonal wavenumber k with different k_h when $h_0=1.0$: (a) $k_h=1$; (b) $k_h=2$; (c) $k_h=3$

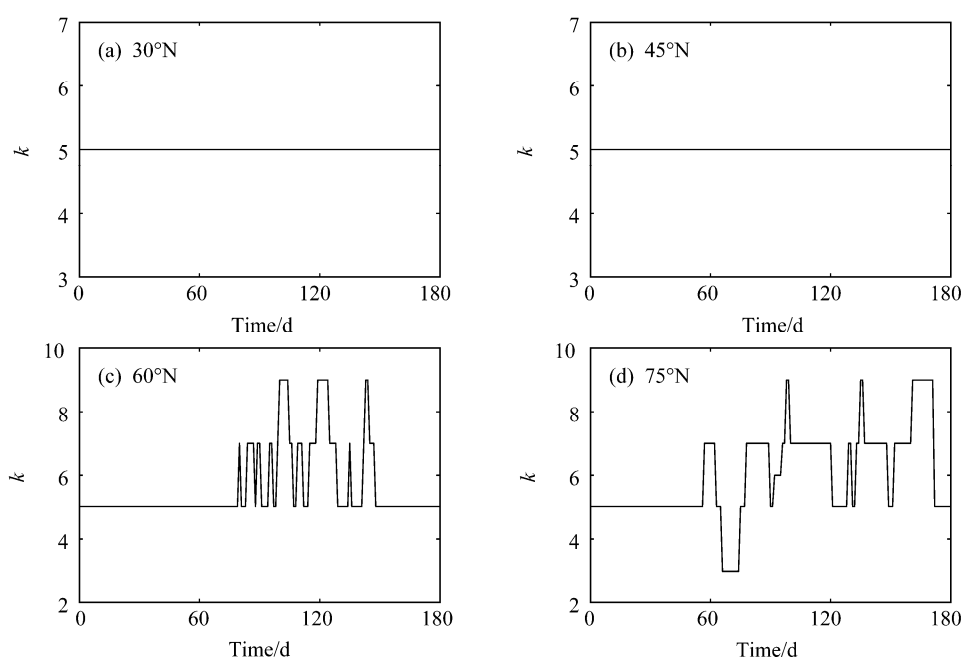


图4 双波地形作用不同纬度上线性 Rossby 波纬向波数 k 随时间演变: (a–d) 纬度分别为 30°N、45°N、60°N 和 75°N

Fig. 4 The evolution of zonal wavenumber k at different latitudes under the impact of wavenumber-two orographic forcing: (a) 30°N, (b) 45°N, (c) 60°N, (d) 75°N

之一。为揭示纬度对地形强迫长波调整影响,图4给出了不同纬度环境下 $h_0=1$ 和 $k_h=2$ 时初始5波的线性扰动纬向波数随时间演变。从该图可见,纬度较低时(见图4a、b),线性波动纬向结构一般不随时间变化,而随着纬度的增加,长波波数发生了调整(见图4c、d),且纬度越高,长波调整开始的时间越早。从公式(2)中可以看出, β 的作用包含在 $\beta(\partial\psi'/\partial x)$ 项中,地形强迫作用包含在 $-(\partial\psi'/\partial y)(\partial h/\partial x)$ 项中。在地形不变时,纬度越低, β 越大, $\beta(\partial\psi'/\partial x)$ 越大, β 的作用也就越大,而此时地形对波动的作用就相对较弱,从而波动受地形的影响越小,地形造成的长波调整效应越不明显,长波难以调整。故在无基流情形下线性 Rossby

波不容易发生调整,但随着纬度的增加, β 减小,地形作用逐渐突出,相应长波调整开始出现。

5.2 对波动初始结构的敏感性

图5是 $h_0=1.0$ 和 $k_h=2$ 的双波地形(见图1a)强迫下,波动的初始振幅为 $A=1.0$ 和初始波数为 $k_0=5$ 时,线性 Rossby 波流场结构随时间演变。对比 $A=0.1$ 的情况(图1b–d)不难发现,相同地形环境下,波动初始振幅不同时,线性波动的结构随时间演变相同,这与纬向非均匀基流作用下线性波的演变特征相似(黎爱兵等,2012)。因此,同纬向非均匀基流作用一样,地形强迫作用下的线性 Rossby 波演变对波动初始动振幅不敏感,即波动结构演变及相应的长波调整特征与波动初始振幅无

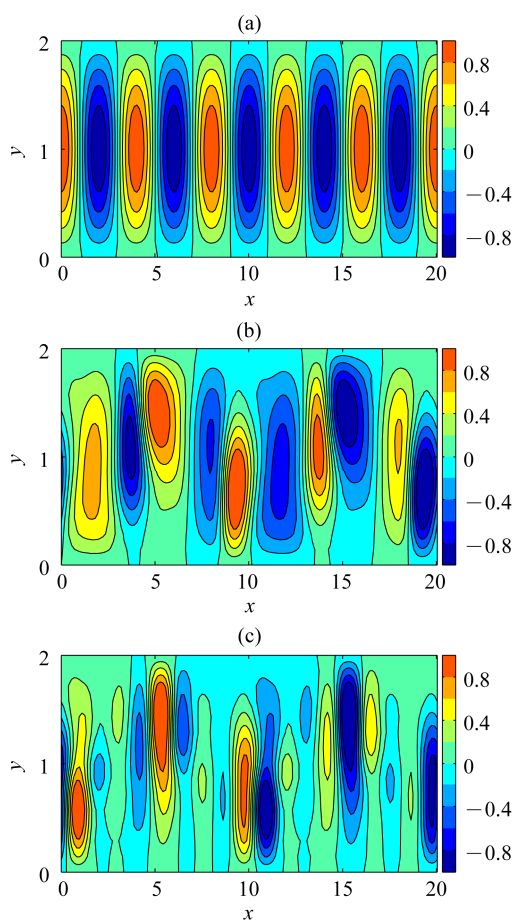


图5 双波地形作用下 $A=1.0$ 、 $k_0=5$ 的线性 Rossby 波流函数结构随时间演变: (a、b、c) 分别表示初始时刻、积分 30 d 和积分 120 d 的扰动流函数

Fig. 5 The evolution of linear Rossby wave stream function under the impact of wavenumber-two orographic forcing when $A=1.0$, $k_0=5$: (a, b, c) The Rossby wave stream function at (a) the initial time, integrating (b) 30 d and (c) 120 d

关。故前面的数值计算中, A 都取为 0.1。

为揭示初始波动尺度对波动结构演变的影响, 取不同的初始波数做了计算, 对于 $k_0=1\sim3$ 的超长波, 大气环流演变相对稳定, 其纬向波数不容易发生变化。图6给出了 $h_0=1.0$ 和 $k_t=2$ 时不同初始波数 ($k_0=4\sim7$) 时, 线性波动纬向波数随时间的演变。从该图来看, 对于初始波数为 4 和 5 的波动, 随着时间的演变, 其纬向波数一般向高波数调整, 且调整的方向具有反复性, 即纬向波数随时间改变后, 还可恢复到原来的波数。然而, 初始 6 波和 7 波的演变相对稳定, 其纬向波数在积分的 150 d 内维持不变。

在双波地形作用下, 具有不同初始结构的线性 Rossby 波流场分布还存在非常相似的两个区域。图7为不同 k_0 线性 Rossby 波积分 45 d 的流场结构。从该图可知, 对于初始波数为偶数的波动, 在 $x=5$

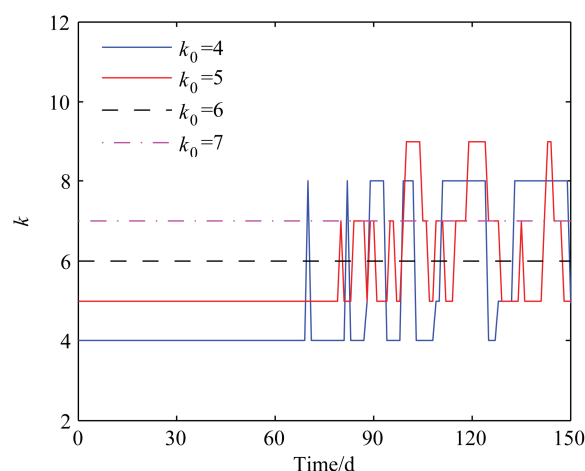


图6 双波地形作用下不同 k_0 的线性 Rossby 波纬向波数 k 随时间演变
Fig. 6 The evolution of zonal wavenumber k with different k_0 under the impact of wavenumber-two orographic forcing

附近的槽脊结构与 $x=15$ 附近槽脊结构非常相似 (图 7a-c); 而对于初始波数为奇数的流场, 也存在相似的两部分 (如图 7b-d), 其与偶数波动不同的是两相似部分正负符号相反, 即存在 π 的位相差。此外, 该现象的出现与地形波数有关, 对于单波地形 (图略), 一般不会出现类似现象。

5.3 基流的影响

上面的结果都是在 $U=0$ 的情况下得到的, 在 $U \neq 0$ 时, $U(\partial h / \partial x)$ 的作用也要考虑。有基流作用时, 地形强迫对 Rossby 波演变的影响与无基流时有很大不同, 基流与地形共同作用可强迫出与地形同波数的定常波 (图 8)。此外, 地形的峰谷位置决定着定常波的槽脊分布。对于初始位相偏差 $\theta_0=0$ 的余弦波地形 (图 1a), 地形峰值东西两侧定常波槽发展 (图 8a), 且两槽中心与地形谷的位置对应; 当 $\theta_0=\pi$ 时, 地形谷值东西两侧定常波脊发展 (见图 8c), 且两脊中心与地形峰值的位置相对应; 对于 $\theta_0=\pi/2$ 或 $\theta_0=3\pi/2$ 的正弦波地形, 定常波也逐渐向地形调整, 且正负中心明显存在 (见图 8b 和 d)。同时, 我们还分析了有基流作用时, 地形强迫对不同初始结构线性 Rossby 波演变的影响, 结果表明, Rossby 定常波产生及结构分布与波动初始结构无关。由此可见, 有基流情形下, 地形效应是诱发 Rossby 定常波的重要因素, 且定常波流场结构分布与地形分布密切相关。

6 结论

为研究地形强迫作用对长波调整的可能影响, 在前期研究待基础上, 本文数值求解了有地形强迫的

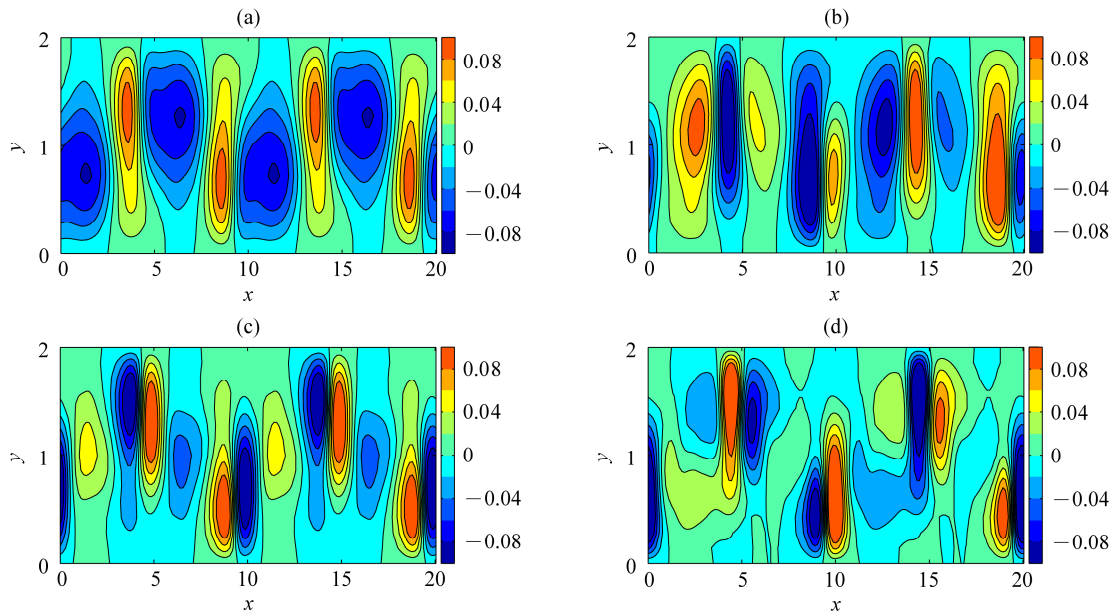


图7 双波地形作用下不同 k_0 的线性 Rossby 波积分 45 d 的流函数结构: (a) $k_0=4$; (b) $k_0=5$; (c) $k_0=6$; (d) $k_0=7$

Fig. 7 The linear Rossby wave stream function with different k_0 under the impact of wavenumber-two orographic forcing at integrating 45 d: (a) $k_0=4$; (b) $k_0=5$; (c) $k_0=6$; (d) $k_0=7$

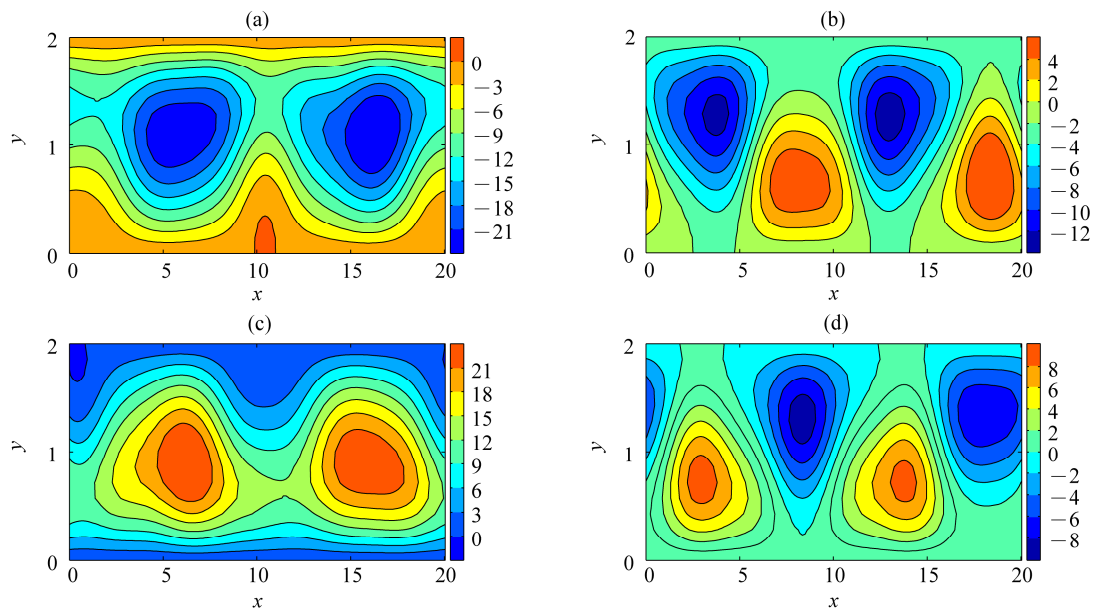


图8 $U=0.5$ 、 $h_0=0.5$ 、 $k_h=2$ 和 $k_0=5$ 时不同 θ_0 地形作用下的线性 Rossby 波积分 60 d 的流函数结构: (a) $\theta_0=0$; (b) $\theta_0=\pi/2$; (c) $\theta_0=\pi$; (d) $\theta_0=3\pi/2$

Fig. 8 The linear Rossby wave stream function under the impacts of orographic forcing with different θ_0 at integrating 60 d when $U=0.5$, $h_0=0.5$, $k_h=2$, and $k_0=5$. (a) $\theta_0=0$; (b) $\theta_0=\pi/2$; (c) $\theta_0=\pi$; (d) $\theta_0=3\pi/2$

准地转正压模型,探讨了在地形强迫作用下,大气线性 Rossby 波的演变问题。结果表明,除大气的非线性和基流的纬向非均匀性作用外,地形强迫作用也能改变大气长波的结构,激发出大气长波调整现象,而这种地形强迫的作用主要体现在地形分布的纬向非均匀性上。进一步分析了地形强迫作用与地形高度和结构的关系,以及纬度、波动的初始参

数和基本气流对大气长波演变的影响,主要的结论有:

(1) 大气长波调整的发生强依赖于地形强迫的高度及结构,地形越高,长波越容易调整,且开始调整时间也越早,地形波数越大,线性 Rossby 波演变相对稳定,不易出现长波调整。

(2) 地形强迫作用对大气长波调整的影响还与

纬度环境有关, 纬度越高, β 越小, 地形作用突出, 长波调整容易出现, 反之, 纬度越低, 线性波动不易出现长波调整。

(3) 地形强迫作用下, 大气长波调整对波动初始振幅不敏感, 但依赖于波动的初始结构, 对于双波地形, 不同初始结构的线性 Rossby 波流场结构在大形东西两侧具有对称性分布特征。

(4) 有基流作用时, 地形强迫可产生定常 Rossby 波, 定常波流场结构分布由地形高度分布决定, 与波动初始结构无关。

大气长波调整伴随大气环流异常变化以及天气过程的转折, 长波调整越容易, 大气环流越不稳定, 天气的变化越频繁。本文仅考虑了地形强迫对大气长波的作用, 然而, 摩擦耗散和热源强迫作用对大气长波的调整也非常重要。因此, 关于外源强迫因子的影响仍需进一步研究。

参考文献 (References)

- Charney J G, Devore J G. 1979. Multiple flow equilibria in the atmosphere and blocking [J]. *J. Atmos. Sci.*, 36: 1205–1216.
- 刁一娜, 李建平, 罗德海. 2004. 阻塞流场与瞬变涡动相互作用的动力学研究 [J]. *大气科学*, 28: 901–924. Diao Yina, Li Jianping, Luo Dehai. 2004. A dynamic study of the interaction between transient eddies and blocking [J]. *Chin. J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 28: 901–924.
- 段安民, 吴国雄, 刘屹岷. 2006. 定常条件下感热和地形影响的 Rossby 波 [J]. *气象学报*, 64: 129–136. Duan Anmin, Wu Guoxiong, Liu Yimin. 2006. Steady wave-like solution of the Rossby wave with sensible heating and topographic effects [J]. *Acta Meteor. Sin.* (in Chinese), 64: 129–136.
- Eliassen A, Palm E. 1961. On the transfer of energy in stationary mountain waves [J]. *Geofysiske Publikasjoner*, 22: 1–3.
- Held I M, Ting M F, Wang H L. 2002. Northern winter stationary waves: Theory and modeling [J]. *J. Climate*, 15: 2125–2144.
- Huang R H, Gambo K. 1981. The response of a model atmosphere in middle latitude to forcing by topography and stationary heat sources [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 59: 220–237.
- 黎爱兵, 张立凤, 张亮, 等. 2012. 纬向非均匀基流对大气长波调整的作用 [J]. *地球物理学报*, 55: 1104–1113. Li Aibing, Zhang Lifeng, Zhang Liang, et al. 2012. The effects of zonal non-uniform basic flow on adjustment of atmospheric long wave [J]. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 55: 1104–1113.
- Lorenz E N. 1972. Barotropic instability of Rossby wave motion [J]. *J. Atmos. Sci.*, 29: 258–26.
- Lu C G, Byod J P. 2008. Rossby wave ray tracing in a barotropic divergent atmosphere [J]. *J. Atmos. Sci.*, 65: 1679–1691.
- Luo D H, Li J P. 2001. Interaction between a slowly moving planetary-scale dipole envelope Rossby soliton and a wavenumber-two topography in a forced higher order nonlinear higher order nonlinear Schrodinger equation [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 18: 239–256.
- Schoeberl M R, Lindzen R S. 1984. A numerical simulation of barotropic instability. Part I: Schrodinger equation [J]. *J. Atmos. Sci.*, 18: 239–256.
- 盛华, 陶诗言. 1988a. 青藏高原和落基山对气旋的动力影响 [J]. *气象学报*, 46: 130–141. Sheng Hua, Tao Shiyun. 1988a. Dynamic effect of Qinghai-Xizang Plateau and Rocky Mountains on the lee cyclones [J]. *Acta Meteor. Sin.* (in Chinese), 46: 130–141.
- 盛华, 陶诗言. 1988b. 青藏高原与落基山背风气旋的对比分析 (二)——诊断分析 [J]. *大气科学*, 12: 337–345. Sheng Hua, Tao Shiyun. 1988b. A comparison between lee cyclones of Rocky Mountains and Qinghai-Xizang Plateau—Part II: Diagnose [J]. *Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 12: 337–345.
- 谭本旭, 伍荣生. 1995. 强迫耗散作用下的 Rossby 包络孤立波及其相互作用 [J]. *大气科学*, 19: 289–300. Tan Benkui, Wu Rongsheng. 1995. Envelope solitary Rossby waves and their interactions under the influence of forcing and dissipation [J]. *Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 19: 289–300.
- 陶诗言, 卫捷. 2008. 2008 年 1 月我国南方严重冰雪灾害过程分析 [J]. *气候与环境研究*, 13: 337–350. Tao Shiyun, Wei Jie. 2008. Severe snow and freezing-rain in January 2008 in the southern China [J]. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 13: 337–350.
- 陶诗言. 1980. 中国之暴雨 [M]. 北京: 科学出版社, 225pp. Tao Shiyun Y. 1980. *Torrential Rain in China* (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press, 225pp.
- 汪萍, 戴新刚. 2005. 外强迫作用下正压大气非线性特征数值模拟 [J]. *物理学报*, 54: 4961–4870. Wang Ping, Dai Xingang. 2005. Numerical modeling of non-linear characteristics for barotropic atmosphere with external forcing [J]. *Acta Phys. Sin.* (in Chinese), 54: 4961–4870.
- Zeng Q C. 1983. The evolution of a Rossby-wave packet in a three-dimensional baroclinic atmosphere [J]. *J. Atmos. Sci.*, 40: 73–84.
- 曾庆存, 卢佩生. 1980. 非均匀基流上扰动的演变 [J]. *中国科学 A 辑*, 23: 1193–1202. Zeng Qingcun, Lu Peisheng. 1980. The evolution process of disturbances on non-uniform basic flow [J]. *Science in China, Ser. A* (in Chinese), 23: 1193–1202.
- 张亮, 张立凤, 吴海燕, 等. 2010. 正压 Rossby 波扰动能量 [J]. *物理学报*, 59: 44–53. Zhang Liang, Zhang Lifeng, Wu Haiyan, et al. 2010. The disturbance energy of Rossby wave in barotropic atmosphere [J]. *Acta Phys. Sin.* (in Chinese), 59: 44–53.
- 张顺利, 陶诗言. 2002. 青藏高原对 1998 年长江流域天气异常的影响 [J]. *气象学报*, 60: 442–452. Zhang Shunli, Tao Shiyun. 2002. The influences of Tibetan Plateau on weather anomalies over Changjiang River in 1998 [J]. *Acta Meteor. Sin.* (in Chinese), 60: 442–452.
- 张立凤, 张亮, 李崇银. 2011a. 真实基流中非线性 Rossby 波演变特征 (一): 数值模式设计 [J]. *地球物理学报*, 54: 629–633. Zhang Lifeng, Zhang Liang, Li Chongyin. 2011a. The evolution characteristic of nonlinear Rossby wave in the real basic flow. I: Numerical model design [J]. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 54: 629–633.
- 张立凤, 张亮, 李崇银. 2011b. 真实基流中非线性 Rossby 波演变特征 (二): 能量、结构演变及初始场的影响 [J]. *地球物理学报*, 54: 886–895. Zhang Lifeng, Zhang Liang, Li Chongyin. 2011b. The evolution characteristic of nonlinear Rossby wave in the real

- basic flow. II: The energy and structure evolution of Rossby wave and effect of the initial field on it [J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 54: 886–895.
- 张立凤, 黎爱兵, 高建华. 2012. 影响大气长波调整的因子分析 [J]. 解放军理工大学学报 (自然科学版), 13: 460–465. Zhang Lifeng, Li Aibing, Gao Jianhua. 2012. Analysis on impacting factors of atmospheric long wave [J]. Journal of PLA University Science and Technology Natural Science Edition (in Chinese), 13: 460–465.
- 赵强, 于鑫. 2008. 完整 Coriolis 力作用下非线性 Rossby 波的精确解 [J]. 地球物理学报, 51: 1304–1308. Zhao Qiang, Yu Xin. 2008. Exact solutions to the nonlinear Rossby waves with a complete representation of the Coriolis force [J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 51: 1304–1308.
- 赵强, 刘式达, 刘式适. 2000. 切变基本纬向流中非线性赤道 Rossby 长波 [J]. 地球物理学报, 43: 746–753. Zhao Qiang, Liu Shida, Liu Shikuo. 2000. Nonlinear equatorial Rossby long waves in a shear flow [J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 43: 746–753.
- Zhao Q, Zhao Y, Liu S K. 2006. Two-dimensional Rossby waves: Exact solutions to Petviashvili equation [J]. Commun. Theor. Phys., 45: 414–416.