

# 正压模式中大地形作用下的低频波

付遵涛<sup>1</sup> 刘式适<sup>1\*</sup> 王树涛<sup>2</sup>

(1 北京大学地球物理系 北京 100871)

(2 哈尔滨市渔业机械化施工公司 黑龙江省哈尔滨市 150070)

**摘 要** 利用包含大地形和常数纬向基本气流的正压模式方程组,研究了大地形对低频波激发的作用,结果表明:起作用的地形因子主要是地形的最大高度和地形坡度。地形最大高度的作用主要是使 Rossby 波趋向低频,而地形坡度的作用主要是对 Rossby 波的稳定性起决定作用。同时,适当的地形坡度也可导致低频波的形成。

**关键词** 大地形 低频波 地形最大高度 地形坡度

**分类号** P434

自 Madden 和 Julian<sup>[1]</sup>通过谱分析发现热带大气在风场和地面气压场的变化中存在着 40~50 天周期的低频振荡以来,人们对大气的低频变化做了广泛而深入的研究,但是研究的重点集中于热带低纬地区。对于中高纬地区 30~60 天大气低频振荡的存在,最早可见于 Anderson 等<sup>[2]</sup>关于大气角动量输送的研究。基于对 FGGE 资料的分析,Krishnamurti 等<sup>[3]</sup>指出 30~60 天振荡是一种全球大气变化现象。进一步的研究表明,中高纬与低纬的季节内振荡在垂直结构、纬向尺度、纬向传播方向及时空演变上存在不同。具体为中高纬季节内振荡具有正压结构特征,位势场上主要表现为纬向波数 2~4 波,振荡主要以向西传播为主,具有二维 Rossby 波特征。更具体的差异可见李崇银<sup>[4,5]</sup>的叙述。

随着大气低频振荡现象及其特征的揭示,人们开始探索大气低频振荡产生的原因。Wallace 等<sup>[6]</sup>把大气低频振荡的产生原因概括为 6 种,实际上可归结为两种机制,即大气对外源的强迫响应和大气运动的非线性相互作用。对于低纬,关于大气低频振荡动力学机制研究得比较多,也取得了较好的结果。而对于中高纬大气低频振荡机制的研究相对少些,章基嘉等<sup>[7]</sup>研究指出青藏高原(夏半年)是 30~60 天大气低频振荡的活跃区和重要源地,并认为大地形的动力作用和热力作用可激发出低频波。张可芬<sup>[8]</sup>和杨大升<sup>[9]</sup>的研究则表明,基本流正压不稳定是激发中高纬低频振荡的重要机制,李崇银等<sup>[10]</sup>进一步说明了基流的动力不稳定对激发中高纬大气低频振荡的重要性。罗德海等<sup>[11]</sup>研究了在大地形和常数纬向基流作用下的 30~60 天振荡,说明了地形对低频振荡的重要激发作用。

收稿日期:1997-09-30;改回日期:1998-01-20

本文得到国家攀登 B 项目“青藏高原地-气系统物理过程观测和理论研究”及攀登项目“气候动力学和气候预测理论的研究”的资助

第一作者简介:付遵涛,男,1970 年 1 月出生,在读博士生,主要从事大气动力学和非线性动力学的研究

\* 本文联系人

在上述研究的基础上,本文构造了一个包含大地形和基流作用的正压模式方程组,主要讨论在基流存在或不存在时大地形对中纬度 Rossby 波的动力影响。

## 1 基本方程

含地形高度  $h_s(x, y)$  的正压模式方程组为:

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - f v = - \frac{\partial \phi}{\partial x}, \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + f u = - \frac{\partial \phi}{\partial y}, \\ \frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{\partial(\phi - \phi_s)}{\partial x} u + \frac{\partial(\phi - \phi_s)}{\partial y} v = 0, \end{cases} \quad (1)$$

其中  $\phi = gh$  ( $h$  为自由面高度),  $\phi_s = gh_s$  ( $h_s$  为地形高度)。  $u, v$  分别为纬向和经向风速,  $f$  为科氏参数(本文取  $-f = f_0 + \beta_0 y$ ,  $f_0 = f_0, df/dy = \beta_0$ )。令:

$$u = \bar{u} + u', v = \bar{v} + v', \phi = \bar{\phi} + \phi', \quad (2)$$

其中带“ $\bar{\quad}$ ”的量为基本量,带“ $'$ ”的量为扰动量,并假定:

$$f_0 \bar{u} = \frac{\partial \bar{\phi}}{\partial y}, \bar{u} = \text{const}, h_s = h_s(y), \beta_0 = \frac{d\phi_s}{dy} = \text{const}, \quad (3)$$

且  $y > 0$  时,  $\beta_0 < 0$  (称为北坡),  $y < 0$  时,  $\beta_0 > 0$  (称为南坡),从而有

$$\begin{cases} \bar{\phi} = \bar{\phi}_0 - \beta_0 y, \\ \phi_s = \phi_{sm} + \beta_0 y, \end{cases} \quad (4)$$

其中  $\beta_0 = f_0 \bar{u}, \bar{\phi}_0 = gH$  ( $H$  为静止时  $y = 0$  处自由面高度),  $\phi_{sm} = gh_{sm}$  ( $h_{sm}$  为地形最大高度,这时  $y = 0$ )。

将(2)式、(3)式和(4)式代入(1)式,得到(1)式的线性化形式:

$$\begin{cases} \frac{\partial u'}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial u'}{\partial x} - f v' = - \frac{\partial \phi'}{\partial x}, \\ \frac{\partial v'}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial v'}{\partial x} + f u' = - \frac{\partial \phi'}{\partial y}, \\ \text{he} \quad \frac{\partial \phi'}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \phi'}{\partial x} + c^2 \left( \frac{\partial u'}{\partial x} + \frac{\partial v'}{\partial y} \right) - \beta_0 v' = 0, \end{cases} \quad (5)$$

其中  $c^2 = c_0^2 - \beta_0 y, c_0^2 = \bar{\phi}_0 - \phi_{sm}, \beta_0 = \beta_0 + \beta_0$ 。

(5)式即为讨论问题的基本方程,下面我们分  $\bar{u} = 0$  和  $\bar{u} \neq 0$  两种情况分别进行讨论。

## 2 $\bar{u} = 0$ 的情况

将方程组(5)式化为

$$\frac{\partial u'}{\partial t} - f v' = - \frac{\partial \phi'}{\partial x}, \quad (6)$$

$$\frac{\partial v'}{\partial t} + f u' = - \frac{\partial \phi'}{\partial y}, \quad (7)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + (c_0^2 - \phi_0 y) \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) - \phi_0 v = 0, \quad (8)$$

由(6)式、(7)式消  $\phi$  则有:

$$\left[ \frac{\partial^2}{\partial t \partial y} - f \frac{\partial}{\partial x} \right] u = \left[ \frac{\partial^2}{\partial t \partial x} + f \frac{\partial}{\partial y} + \phi_0 \right] v, \quad (9)$$

由(6)式、(8)式消  $\phi$  则有:

$$\text{其中} \quad \left[ \frac{\partial^2}{\partial t^2} - (c_0^2 - \phi_0 y) \frac{\partial^2}{\partial x^2} \right] u = \left[ f \frac{\partial}{\partial t} + (c_0^2 - \phi_0 y) \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} - \phi_0 \frac{\partial}{\partial x} \right] v, \quad (10)$$

由(9)式和(10)式消  $u$  则有:

$$\mathcal{E}_1 v = 0, \quad (11)$$

$$\mathcal{E}_1 = \frac{\partial}{\partial t} \left[ \frac{\partial^2}{\partial t^2} - (c_0^2 - \phi_0 y) \left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) + f_0^2 + 2 \phi_0 \frac{\partial}{\partial y} \right] - [ \phi_0 (c_0^2 - \phi_0 y) + f_0 \phi_0 ] \frac{\partial}{\partial x}, \quad (12)$$

(11)式为本节讨论问题的基本方程(注意:为了保证方程中不出现增根,在由(9)式、(10)式消  $u$  时没有考虑方程(3)式和(10)式左端消元次序变化的作用)。

首先,分析(11)式的最简单情形,即忽略方程中含  $\phi_0 y$  的项,此时方程化为

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[ \frac{\partial^2}{\partial t^2} - c_0^2 \left( \frac{\partial^2}{\partial t^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) + f_0^2 + 2 \phi_0 \frac{\partial}{\partial y} \right] v - [ \phi_0 c_0^2 + f_0 \phi_0 ] \frac{\partial v}{\partial x} = 0, \quad (13)$$

由此可知(13)式有如下形式的解:

$$v = V \exp(ikx + ily - it), \quad (14)$$

其中  $V$  为振幅,  $k, l$  分别为  $x, y$  方向的波数,  $\omega$  为圆频率。

(14)式代入(13)式有:

$$-\omega^3 + [c_0^2(k^2 + l^2) + f_0^2 + i2\phi_0 l] \omega + k(\phi_0 c_0^2 + f_0 \phi_0) = 0, \quad (15)$$

求(15)式的低频解(忽略  $\omega^3$  项):

$$\omega = - \frac{k\phi_0 + kf_0\phi_0/c_0^2}{k^2 + l^2 + f_0^2/c_0^2 + i2\phi_0 l/c_0^2}. \quad (16)$$

由(16)式可进行分析:

(i) 若  $\phi_0 = 0$  且  $\phi_{sm} = 0$ , 这时  $c_0^2 = c_{00}^2 = \bar{\phi}_0$ , 即无地形作用,

$$\omega_{00} = - \frac{k\phi_0}{k^2 + l^2 + f_0^2/c_0^2}, \quad (17)$$

(17)式即为中纬度 Rossby 波的频散关系式。

(ii) 若  $\phi_0 = 0$  且  $\phi_{sm} \neq 0$ . 这时  $c_0^2 = \bar{\phi}_0 - \phi_{sm} < c_{00}^2$ , 仅有地形高度作用,

$$\omega_{01} = - \frac{k\phi_0}{k^2 + l^2 + f_0^2/c_0^2}. \quad (18)$$

由(17)式和(18)式对比可知  $|\omega_{01}| < |\omega_{00}|$ , 即地形的抬升作用有利于 Rossby 波向低频波发展。罗德海和李崇银<sup>[11]</sup>研究指出:除了西风风速和 Rossby 波数要满足一定关系外,还要求地形高度达到一定程度时,地形强迫 Rossby 波扰动才能出现“不稳定”和 30~60 天尺度的低频周期。仅从周期尺度上看,我们的结果也与他们的相近。

(iii) 若  $\phi_0 \neq 0$ , 即存在地形坡度作用时,这时频散关系取(16)式。取:

$$= r + i i, \tag{19}$$

其中  $r$  表示波的圆频率,  $i$  表示波的增长率。把(19)式代入(16)式有:

$$r = - \frac{(k_0 c_0^2 + f_0 k)(c_0^2 k^2 + c_0^2 l^2 + f_0^2)}{(c_0^2 k^2 + c_0^2 l^2 + f_0^2)^2 + 4 f_0^2 l^2}, \tag{20}$$

$$i = \frac{2 f_0 l (k_0 c_0^2 + f_0 k)}{(c_0^2 k^2 + c_0^2 l^2 + f_0^2)^2 + 4 f_0^2 l^2}, \tag{21}$$

分析(20)式和(21)式可知:南坡  $c_0 > 0$ ,  $i > 0$ ,  $r < 0$ , 则 Rossby 波增长, 西传。北坡  $c_0 < 0$ , 当  $c_0 > -c_0^2/f_0$  时,  $i < 0$ ,  $r < 0$ , 则 Rossby 波衰减, 西传。  $c_0 < -c_0^2/f_0$  时,  $i > 0$ ,  $r > 0$ , 则 Rossby 波增长, 东传。这样, 在地形坡度的作用下, Rossby 波的稳定性和传播特性会发生改变, 且由(20)式可以看出北坡更有利于 Rossby 波趋向低频, 且坡度的作用要比高度的作用更大。

波动周期( $T$ )可写为

$$T = 2\pi / |r|, \tag{22}$$

由(20), (21)和(22)式可绘图说明波动周期随纬向波数和地形坡度的变化情况, 见图 1a。

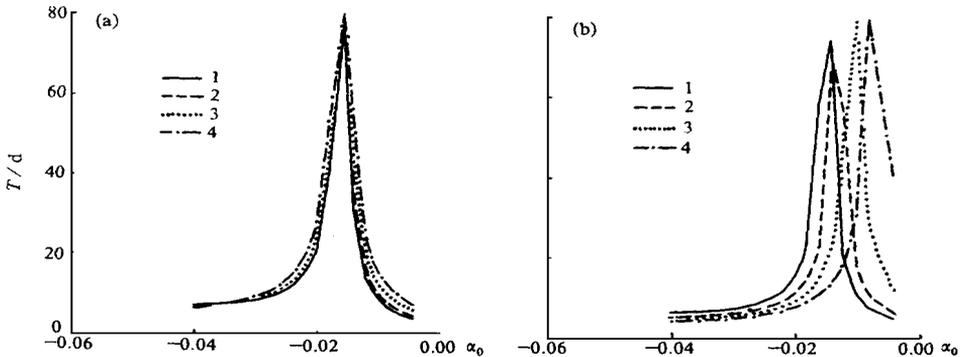


图 1  $T$  随地形坡度( $\alpha_0$ )的变化

(a) 无基本气流, (b) 有基本气流; 图中曲线 1, 2, 3, 4 分别表示取纬向 1, 2, 3, 4 波, 取 30 N 为 y 轴零点,  $c_0^2 = 6 \times 10^4 \text{m}^2/\text{s}^2$

Fig. 1 Variation of  $T$  with  $\alpha_0$ . (a) Without basic flow, (b) with basic flow. The curve 1, 2, 3, 4 indicates zonal wave 1, 2, 3, 4 respectively, 30 N is zero point of y axis,  $c_0^2 = 6 \times 10^4 \text{m}^2/\text{s}^2$ .

如果在(11)式中不作简化, 则方程(11)有如下形式的解:

$$v = V(y) \exp(ikx - i t), \tag{23}$$

(23)式代入(11)式有

$$- (c_0^2 - \alpha_0 y) \frac{d^2 V}{dy^2} + 2 \alpha_0 \frac{dV}{dy} + [ (f_0^2 + k^2 c_0^2 - \alpha_0^2 - k^2 \alpha_0 y) + k (c_0^2 + f_0 \alpha_0) - k_0 \alpha_0 y ] V = 0, \tag{24}$$

求(24)式的低频解(即去掉方程(24)中含  $\alpha_0^3$  的项), 则(24)式可化为

$$(c_0^2 - \sigma_0 y) \frac{d^2 V}{dy^2} - 2\sigma_0 \frac{dV}{dy} - \left[ f_0^2 + k^2 c_0^2 + \frac{k(\sigma_0 c_0^2 + f_0 \sigma_0)}{2} - (k^2 + \frac{k\sigma_0}{\sigma_0 y}) \right] V = 0, \quad (25)$$

(25) 式为如下形式的 Laplace 方程:

$$\dagger (A_0 y + B_0) \frac{d^2 V}{dy^2} + (A_1 y + B_1) \frac{dV}{dy} + (A_2 y + B_2) V = 0, \quad (26)$$

其中:

$$\begin{cases} A_0 = -\sigma_0, B_0 = c_0^2, A_1 = 0, B_1 = -2\sigma_0, \\ A_2 = (k^2 + k\sigma_0/\sigma_0) \sigma_0, B_2 = -[k^2 c_0^2 + f_0^2 + k(\sigma_0 c_0^2 + f_0 \sigma_0)/2] \end{cases} \quad (27)$$

令:

$$V = \bar{V} \exp(py), \quad y = \mu + \nu, \quad (28)$$

并取:

$$\begin{cases} p = -A_0/(2A_0 p + A_1) = -1/(2p), \quad \mu = -B_0/A_0, \\ p = -(A_1 + \sqrt{A_1^2 - 4A_0 A_2})/(2A_0) = -\sqrt{-A_0 A_2}/A_0, \end{cases} \quad (29)$$

将(28),(29)式代入(25)式,这时(25)式可化为合流超比方程:

$$\frac{d^2 \bar{V}}{d\mu^2} + (\dots) \frac{d\bar{V}}{d\mu} - \bar{V} = 0, \quad (30)$$

其中:

$$\begin{cases} \dots = (A_0 B_1 - A_1 B_0)/A_0^2 = 2, \\ \dots = (B_0 p^2 + B_1 p + B_2)/(2A_0 p + A_1) = \\ \dots \mu + (f_0^2 + kf_0 \sigma_0)/(2\sqrt{\frac{2}{\sigma_0}(k^2 + k\sigma_0/\sigma_0)}), \end{cases} \quad (31)$$

其满足  $\bar{V}|_{\mu=0} < \dots$  和  $\bar{V}|_{\mu \sim n}$  本征值为

$$= -n(n = 0, 1, 2, \dots), \quad (32)$$

即:

$$(f_0^2 + kf_0 \sigma_0)/(2\sqrt{\frac{2}{\sigma_0}(k^2 + k\sigma_0/\sigma_0)}) = -1 - n(n = 0, 1, 2, \dots), \quad (33)$$

由(33)式得

$$(f_0^4 - 4(n+1)^2 \frac{2}{\sigma_0} k^2)^2 + (2kf_0^3 \sigma_0 - 4(n+1)^2 \frac{2}{\sigma_0} k \sigma_0) + k^2 f_0^2 \frac{2}{\sigma_0} = 0, \quad (34)$$

则:

$$= [(4(n+1)^2 \frac{2}{\sigma_0} k \sigma_0 - 2kf_0^3 \sigma_0) \pm \sqrt{\dots}]/2(f_0^4 - 4(n+1)^2 \frac{2}{\sigma_0} k^2), \quad (35)$$

$$= (2kf_0^3 \sigma_0 - 4(n+1)^2 \frac{2}{\sigma_0} k \sigma_0)^2 - 4k^2 f_0^2 \frac{2}{\sigma_0} (f_0^4 - 4(n+1)^2 \frac{2}{\sigma_0} k^2) = 16(n+1)^2 k^2 \frac{3}{\sigma_0} ((n+1)^2 \frac{2}{\sigma_0} \sigma_0 + k^2 \sigma_0 f_0^2 - \sigma_0 f_0^3). \quad (36)$$

由(35),(36)和(22)式作图可分析波动周期和增长率随纬向波数和地形坡度的变化情况(图略)。由图可以看出,只有在纬向 1 波的小地形坡度时才会出现 30~60 天左右的周期,且向东、西两个方向传播和南坡可出现不稳定。随着波数和地形坡度的增加,波动周期变短,且波动稳定。

以上结论是在  $\bar{u} = 0$  的情况下得到的,对中纬度来说,  $\bar{u} = 0$  具有很大的局限性,因

此,下面就  $\bar{u} = 0$  的情形进行讨论。

### 3 $\bar{u} = \text{const} = 0$ 的情况

这时控制方程组为(5)式,类似消元有

$$\mathcal{L}_2 v = 0, \quad (37)$$

$$\mathcal{L}_2 = \left[ \frac{\partial}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial}{\partial x} \right] \left[ \left[ \frac{\partial}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial}{\partial x} \right]^2 - (c_0^2 - \beta y) \left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) + f_0^2 + 2 \frac{\partial}{\partial y} \right] - \left[ (c_0^2 - \beta y) \frac{\partial}{\partial x} + f_0 \right] \frac{\partial}{\partial x}, \quad (38)$$

最简单情形(忽略方程中含  $y$  的项)的低频解为

$$v = \bar{u} - \frac{k_0 + kf_0 / c_0^2}{k^2 + l^2 + f_0^2 / c_0^2 + i2l / c_0^2}, \quad (39)$$

把(19)式代入(39)式有

$$r = \bar{u} - \frac{(k_0 c_0^2 + f_0 k)(c_0^2 k^2 + c_0^2 l^2 + f_0^2)}{(c_0^2 k^2 + c_0^2 l^2 + f_0^2)^2 + 4l^2}, \quad (40)$$

$$i = \frac{2l(k_0 c_0^2 + f_0 k)}{(c_0^2 k^2 + c_0^2 l^2 + f_0^2)^2 + 4l^2}. \quad (41)$$

由(40)式和(41)式可以看出,基本气流的存在使得 Rossby 波的圆频率和增长率都发生了变化,具体分析如下:

(1) 对于西风基本气流  $\bar{u} > 0$ ,  $\beta > 0$ , 南坡  $\beta > 0$ ,  $\beta > 0$ ,  $i > 0$ , Rossby 波增长。北坡  $\beta < 0$ , 当  $0 < -\beta < \beta$  时,  $\beta > 0$ ,  $i > 0$ , Rossby 波增长; 当  $-\beta > \beta$  时,  $\beta < 0$ , 如果  $-\beta > \beta + c_0^2 \beta / f_0$ ,  $i > 0$ , Rossby 波增长; 如果  $\beta < -\beta < \beta + c_0^2 \beta / f_0$ , 则  $i < 0$ , Rossby 波衰减。

(2) 对于东风基本气流,  $\bar{u} < 0$ ,  $\beta < 0$ , 南坡  $\beta > 0$ , 当  $-\beta > \beta$  时,  $\beta > 0$ ,  $i > 0$ , Rossby 波增长; 当  $0 < \beta < -\beta$  时,  $\beta < 0$ , 如果  $\beta > -\beta - c_0^2 \beta / f_0$ , 则  $i < 0$ , Rossby 波衰减; 如果  $\beta < -\beta - c_0^2 \beta / f_0$ ,  $i > 0$ , Rossby 波增长。北坡  $\beta < 0$ ,  $\beta < 0$ , 当  $-\beta > \beta + c_0^2 \beta / f_0$  时,  $i > 0$ , Rossby 波增长; 当  $-\beta < \beta + c_0^2 \beta / f_0$  时,  $i < 0$ , Rossby 波衰减。

同时由(40)式可以看出,基本气流的存在使得低频波的传播方向在很大程度上被改变。由(40), (41)和(22)式可绘图(见图 1b)看出,有基本气流存在与无基本气流时的情况不同。

由(38)式可直接求得低频解:

$$v = \bar{u} + \frac{(4(n+1)^2 k_0 - 2kf_0^2) \pm \sqrt{\dots}}{2(f_0^4 - 4(n+1)^2 k^2)}, \quad (42)$$

$$= 16(n+1)^2 k^2 \left[ (n+1)^2 \frac{\beta}{f_0} + k^2 f_0^2 - \beta f_0^3 \right]. \quad (43)$$

利用(42), (43)和(22)式作图可以看出波动周期和增长率随纬向波数、基本气流及地形坡度的变化情况(见图 2)。通过计算发现,在南坡和北坡都有低频波出现,相对来说,当  $n$  的数值较小( $n=0$ )时,北坡东风基流更有利于低频波的出现,但是北坡波动都是稳定的,波动既可东传又可西传;随着  $n$  值的增加,南坡西风更有利于低频波的形成,而且

低频波不稳定并集中于 30 ~ 60 天尺度范围内,西风基流时西传,东风基流时东传。同时,还可以看出随着波数的增加,低频波出现的可能性减小。虽然如此,季节内时间尺度的低频波在大地形的作用下总是出现的。

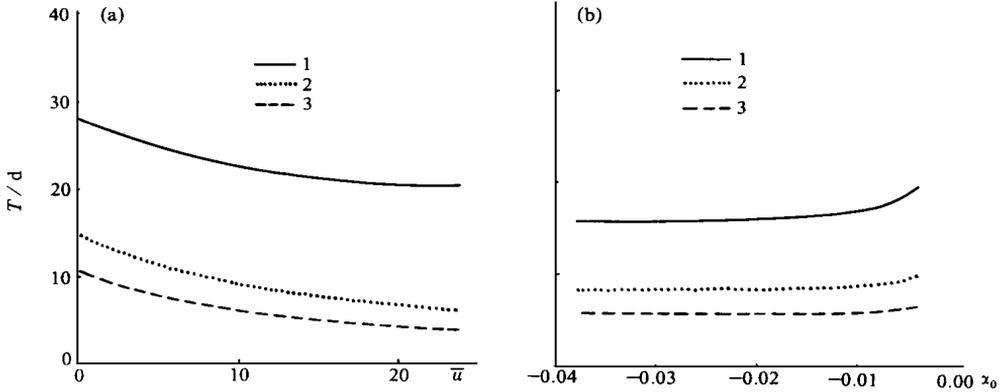


图 2  $T$  随基本气流  $\bar{u}$  (a) 和地形坡度  $\phi_0$  (b) 的变化

图中曲线 1, 2, 3, 分别表示取纬向 1, 2, 3 波, 取 30°N 为  $y$  轴零点,  $n = 1$ ; (a) 取  $\phi_0 = -1.5 \times 10^{-2}$ , (b) 取  $\bar{u} = 10\text{m/s}$

Fig. 2 Variations of  $T$  with  $\bar{u}$  (a) and  $\phi_0$  (b). The illustration is the same as Fig. 1 except  $n = 1$ , (a)  $\phi_0 = -1.5 \times 10^{-2}$ , (b)  $\bar{u} = 10\text{m/s}$ .

### 4 结 论

通过上述简单的分析可以看出:大地形对 Rossby 波的改变是十分巨大的。地形高度对 Rossby 波的作用主要体现在相速度的改变上,而地形坡度则作用于波动的稳定性和传播特性上。二者的共同作用确实可以得到季内时间尺度的低频波。部分结论与章基嘉等<sup>[7]</sup>的研究结论相符,最简单情形的结论与吕克利等<sup>[12,13]</sup>的结论相似。但是坡度的作用无疑与传统上的有所不同。

从直观上讲,所得结论与章基嘉等<sup>[7]</sup>的结论不完全相同正是其合理之处,因为在本文中只考虑了大地形的动力作用,而对热力作用没有考虑,这无疑会造成与观测上的不同。另外,本文也没有考虑摩擦作用,所有这些都需要今后进一步讨论。

### 参考文献

- 1 Madden R D, P Julian. Detection of 40 ~ 50 day oscillation in the zonal wind in the tropical Pacific. *J Atmos Sci*, 1971, 28: 702 ~ 708
- 2 Anderson J R, R D Rosen. The latitude height structure of 40 ~ 50 day variations in atmospheric angular momentum. *J Atmos Sci*, 1983, 40: 1584 ~ 1591
- 3 Krishnamurti T N, S Gadgil. On the structure of the 30 to 50 day mode over the globe during FGGE. *Tellus*, 1985, 37A: 336 ~ 360
- 4 李崇银. 大气低频振荡. 北京:气象出版社, 1993
- 5 李崇银. 气候动力学引论. 北京:气象出版社, 1995. 104 ~ 151
- 6 Wallace J M, M L Blackman. Observations of low - frequency atmospheric variability. *Largescale Dynamical Process in*

the Atmosphere. Academic Press, London, 1983, 55 ~ 91

- 7 章基嘉, 孙国武, 陈葆德等, 青藏高原大气低频变化的研究. 北京: 气象出版社, 1991, 1 ~ 109
- 8 张可苏. 40 ~ 50 天的纬向基流低频振荡及其失稳效应. 大气科学, 1987, 11: 227 ~ 236
- 9 杨大升, 曹文忠. 中高纬大气 30 ~ 60 天低频振荡的一种可能动力机制. 大气科学, 1995, 19: 207 ~ 218
- 10 李崇银, 曹文忠, 李桂龙. 基本气流对中高纬大气季节内振荡不稳定激发的影响. 中国科学(B 辑), 1995, 9: 978 ~ 985
- 11 罗德海, 李崇银. 地形 Rossby 波的不稳定和 中高纬地区 30 ~ 60 天振荡. 气候变化若干问题研究. 北京: 科学出版社, 1992. 82 ~ 85
- 12 吕克利. 大地形与正压 Rossby 孤立波. 气象学报, 1987, 45: 267 ~ 273
- 13 吕克利. 大地形与正压 Rossby 的稳定性. 气象学报, 1986, 44: 275 ~ 281

## LOW - FREQUENCY WAVES FORCED BY LARGE - SCALE TOPOGRAPHY IN THE BAROTROPIC MODEL

FU Zun - tao<sup>1</sup>    LIU Shi - kuo<sup>1</sup>    WANG Shu - tao<sup>2</sup>

( 1 Department of Geophysics, Peking University, Beijing 100871)

( 2 Harbin Mechanized Constructing Fishery Corporation, Harbin, Heilongjiang 150070)

**Abstract** A barotropic model, including large - scale topography and zonal mean flow, was established to discuss the effects of large - scale topography on the low - frequency waves. The results show that two main factors which affects low - frequency waves is maximal height of topography and topographic slope. The former makes frequency of topographic Rossby waves decrease, the latter makes Rossby waves instable. Moreover, when topographic slope is optimum, it can also make Rossby waves turn into low - frequency waves.

**Key words** Large - scale topography    Low - frequency waves    Maximal height of topography    Topographic slope