

# 大地形对行星波空间结构及其 移速影响的数值试验

徐祥德

(南京气象学院)

## 提 要

本文采用  $p$ - $\sigma$  混合坐标十二层初始方程模式,研究了青藏高原与东亚实际地形对于行星波空间结构影响效应问题。

本文数值试验表明:青藏高原动力效应与大地形结构特征显著相关;大地形因素的影响可以导致行星波在移动过程中其空间结构呈复杂变化,即引起行星波在大地形南北坡的位相差、系统的变速现象及结构的形变等特征。

## 一、引 言

近年来青藏高原对环流和天气气候的影响问题是国内外研究的重要课题。研究高原地区天气系统演变和成因的机理也是气象学共同关心的问题。青藏高原地区是许多天气系统产生、发展的源地,又是造成外来天气系统强度与空间结构发生显著变化的关键区。

青藏高原为东西方向长,南北宽度短的近似一庞大的椭球体,且高原的南北坡度较为显著。这样的地形结构状况对移动性外来系统的影响效应将是一不可忽视的因素。

若先考虑地形高度为  $y$  的线性变化函数,且为了简化问题,假设下垫面抬升速度以及上界面条件:

$$\begin{aligned} \omega_0 &= -\rho_0 k v \frac{\partial h_s}{\partial y} & (p = p_0) \\ \omega_r &= 0 & (p = 0) \end{aligned} \quad (1)$$

引入上、下边界条件,并考虑  $\psi$  为平均位面上量,且对  $p$  积分连续方程,代入线性化准地转涡度方程可得

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial}{\partial x}\right) \nabla^2 \psi + (\beta + A^* \frac{\partial h_s}{\partial y}) \frac{\partial \psi}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

其中  $A^* = f_0 \rho_0 g \frac{k}{p_0}$ , 且假设  $\bar{u}, \beta, \frac{\partial h_s}{\partial y}$  均为常数。

$$\text{令} \quad \psi = \bar{\psi} e^{i(kx + ly - \omega t)} \quad (3)$$

代入方程(2),求得

$$\omega = \bar{u}k - \frac{(\beta + A^* \frac{\partial h_s}{\partial y})}{(k^2 + l^2)} k \quad (4)$$

由(4)式可得

$$C_x = \bar{u} - \frac{(\beta + A^* \frac{\partial h_s}{\partial y})}{k^2 + l^2}$$

$$C_y = (\bar{u} - \frac{\beta + A^* \frac{\partial h_s}{\partial y}}{k^2 + l^2}) \frac{k}{l} \quad (5)$$

$$C_{gx} = \bar{u} - \frac{(\beta + A^* \frac{\partial h_s}{\partial y})}{k^2 + l^2} + \frac{2k^2(\beta + A^* \frac{\partial h_s}{\partial y})}{(k^2 + l^2)^2}$$

$$C_{gy} = \frac{2kl(\beta + A^* \frac{\partial h_s}{\partial y})}{(k^2 + l^2)^2} \quad (6)$$

由(5)、(6)式可知,由于大地形南北坡度特征的差异(南坡  $\frac{\partial h_s}{\partial y} > 0$ ; 北坡  $\frac{\partial h_s}{\partial y} < 0$ ), 可导致移动系统在南北坡产生位相差, 且系统移动在北坡快于南坡。这里, 设  $\Delta C_x = C_{x(\text{北})} - C_{x(\text{南})}$ ,

$$\text{即} \quad \Delta C_x = \frac{2A^* \left| \frac{\partial h_s}{\partial y} \right|}{(k^2 + l^2)} \quad (7)$$

由相速差  $\Delta C_x$  可知, 对于不同的纬向或经向波数  $k, l$  以及坡度  $\frac{\partial h_s}{\partial y}$ 、纬度  $\varphi$ , 相速差大小有所区别。例如坡度越大, 且纬向波数越小, 大地形南北坡度因素产生的位相差越显著。因此对于行星波的移动过程, 大地形效应可能是一重要影响因素。

同理, 对波能量的输送过程大地形仍是不可忽视的因子。这里将反映波动能量输送特征的大地形南北坡群速差写为

$$\Delta C_{gx} = - \frac{2(k^2 - l^2)A^* \left| \frac{\partial h_s}{\partial y} \right|}{(k^2 + l^2)^2} \quad (8)$$

$$\Delta C_{gy} = - \frac{4klA^* \left| \frac{\partial h_s}{\partial y} \right|}{(k^2 + l^2)^2} \quad (9)$$

其中  $\Delta C_{gx} = C_{gx(\text{北})} - C_{gx(\text{南})}$ ;  $\Delta C_{gy} = C_{gy(\text{北})} - C_{gy(\text{南})}$ 。

由(8)、(9)式可知, 大地形南北坡度因素不仅影响了行星波的移速, 而且导致南北坡波动能量输送分布特征的差异, 也可能引起能量的积累, 从而影响行星波系统的演变特征。

另一方面, 若考虑  $h_s$  不随  $y$  变化, 仅为  $x$  的函数, 相应的上、下边条件则可写为

$$\omega_0 = - \rho_0 g k u \frac{\partial h_s}{\partial x} \quad (10)$$

$$\omega_T = 0$$

因此,代入上述边条件(10)后,涡度方程可得如下形式:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + u \frac{\partial \zeta}{\partial x} + v \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \beta v = -A^* u \frac{\partial h_s}{\partial x} \quad (11)$$

由(11)方程可得

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} \propto -\vec{V} \cdot \nabla \zeta - A^* u \frac{\partial h_s}{\partial x} \quad (12)$$

即

$$\frac{\partial \psi}{\partial t} \propto (\vec{V} \cdot \nabla \zeta + A^* u \frac{\partial h_s}{\partial x}) / (k^2 + l^2)$$

由(12)式可讨论大地形对于西风槽脊移动的影响效应。根据行星波移过高原地区,西风槽前、槽后正负变涡区受(12)式右端二项叠加效应影响,其关系可写为:

行星波 移速变化	}	大地形西侧,槽前 $-\vec{V} \cdot \nabla \zeta > 0; \frac{\partial h_s}{\partial x} > 0 \Rightarrow$	槽前	移速	(13)
			正变涡减弱	减慢	
		大地形中部,槽前 $-\vec{V} \cdot \nabla \zeta > 0; \frac{\partial h_s}{\partial x} < 0 \Rightarrow$	槽前	移速	
		正变涡加强	加快		
		大地形东侧,槽后 $-\vec{V} \cdot \nabla \zeta < 0; \frac{\partial h_s}{\partial x} < 0 \Rightarrow$	槽后	移速	
			负变涡减弱	减慢	

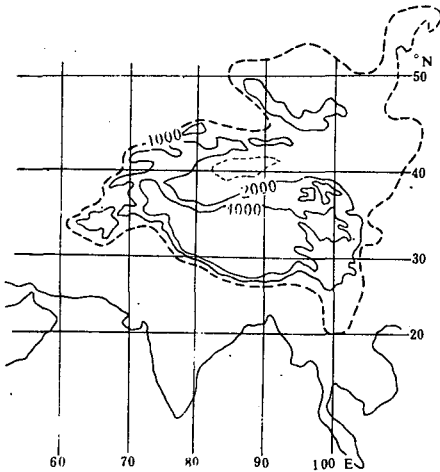


图1 模式采用的青藏高原地形高度分布

由上述定性分析可知,大地形结构东西方向坡度特征可能造成移动行星波经过高原地区时的变速运动(即慢→快→慢变化特征)。

青藏高原地形复杂,范围广。为了进一步研究青藏高原对行星波系统实际影响效应,本文模拟试验采用了  $p-\sigma$  混合坐标十二层原始方程模式,且加入青藏高原实际地形(图1),探讨高原上移行的行星波系统的演变特征,即南北位相差、变速运动等现象。这一研究工作将为测站稀少、资料缺乏的高原地区天气系统的预报方法提

供一定理论依据与线索。

## 二、数值模式简述

本文数值试验是采用  $p-\sigma$  混合坐标初始方程模式[1,2],此模式基本方程为

$$\begin{aligned} \frac{\partial \vec{V}}{\partial s} + h(\vec{V} \cdot \nabla_s \vec{V}) + s \frac{\partial \vec{V}}{\partial s} + (k \times \vec{V})[f + (k \times \vec{V}) \cdot \nabla_s h] \\ = h(-\nabla_s M + \pi \nabla_s \theta) + h[\nabla_s \cdot (\tau \nabla_s \vec{V})] + F \end{aligned} \quad (14)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + h(\vec{V} \cdot \nabla_s \theta) + s \frac{\partial \theta}{\partial s} = \alpha_r^{-1}(\theta_f - \theta) + h_2[\nabla_s \cdot (\tau \nabla_s \theta)] \quad (15)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\partial p}{\partial s} \right) + h^2 \nabla_s \cdot \left( \frac{\vec{V}}{h} \frac{\partial p}{\partial s} \right) + \frac{\partial}{\partial s} \left( s \frac{\partial p}{\partial s} \right) = 0 \tag{16}$$

$$\frac{\partial M}{\partial s} = \pi \frac{\partial \theta}{\partial s} \tag{17}$$

式中

$$\pi = C_p (p/p_0)^{R/c_p}$$

$$M = gz + \pi \theta$$

$$\vec{F} = c_a \rho_0 g |\vec{V}| \vec{V} / \Delta p \tag{18}$$

$$\tau = 0.1 d^2 \left\{ \left( \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 \right\}^{1/2} / h$$

其中  $\tau$  为 Smogorinsky (1965) 所用涡动粘性扩散,  $\alpha_r^{-1}(\theta_f - \theta)$  为牛顿加热或冷却项<sup>[2]</sup>,  $\theta_f$  为平衡温度,  $\theta$  为大气温度,  $\alpha_r$  为张弛时间系数, 即为控制、阻尼温度扰动时间尺度,  $h$  为 Mercator 投影放大系数。

地形处理取 Mesinger (1983) [3] 方法, 即  $\sigma$  坐标与地形相交, 形如“阶梯”构造方式。 $\sigma$  坐标相应层次的地形高度取 1000m、2000m、3000m、4000m、5000m。

考虑到计算稳定, 保持连续大气积分等原因, 模式采用 Arakawa、Lamb 研制的 UCLA 大气环流模式中格式 C 的变量分布。模式水平积分区域取东西向 60°E—20°W, 且东西边取循环边条件; 南北向取 10°N—63°N, 且为零倾向量边条件。

初始场取纬向均匀分布的温度场, 其锋区位于 43°N 附近。另外, 地面气压场高原东侧中纬地区为一低压系统(图 2 所示)。

各层初始高度场以及温度场可采用如下式子计算:

$$\begin{aligned} \pi &= \pi_s + \frac{\partial \pi}{\partial \theta} (\theta - \theta_s) \\ \theta &= \theta_1 + a(\pi - \pi_1) + b(\pi - \pi_1)^2 / 2 \\ \varphi_{k+1} &= \varphi_k - \bar{C}_p \left[ \left( \frac{p_{k+1}}{p_0} \right)^{R/c_p} - \left( \frac{p_k}{p_0} \right)^{R/c_p} \right] \end{aligned} \tag{19}$$

式中  $\theta_1$  与  $\pi_1$  为对流层位温与气压指数函数,  $\pi_s$  为地表气压指数函数。 $a$ 、 $b$  为与  $\bar{\theta}$ 、 $\pi$  有关的参数,  $\frac{\partial \pi}{\partial \theta}$  为递减率<sup>[2]</sup>。

在东西向循环边条件下, 考虑到大地形以及风、压场适应过程及其动力调整, 选取模式计算 7 天后西风槽移过高原演变过程作为研究大地形影响效应的“取样”阶段

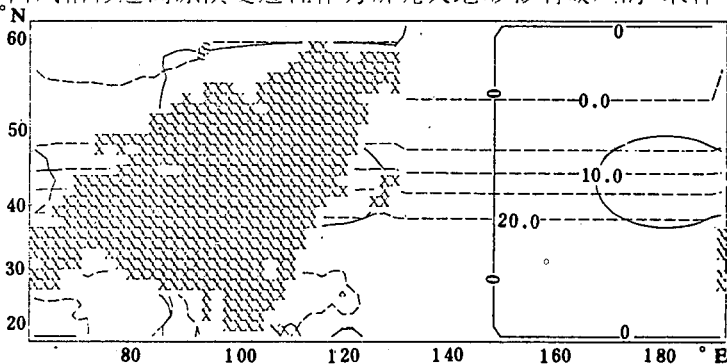


图 2 模式初始气压场和温度场(锋区偏北类)

### 三、数值试验结果

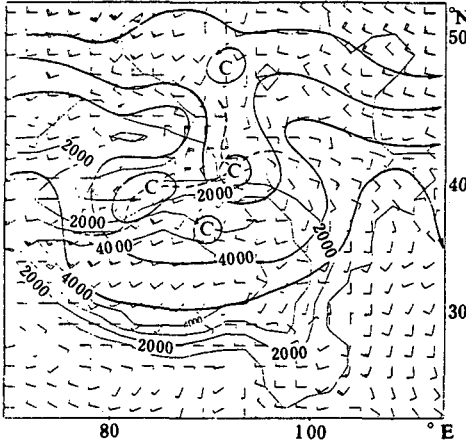


图3 模式积分8天后地面流场  
(细实线为等高线,粗实线为流线)

#### 1. 南北坡系统移动过程的位相差

当西风槽移过青藏高原时,行星波扰动与大地形强迫扰动之间的非线性相互作用构成了高原地面流场特征,图3为模式计算第8天模拟的地面流场,此时正是西风槽移至高原中部80°E附近。由图3可见,高原地区有明显的低涡、切变线系统,且地面流场特征与高空槽移至高原中部情况相对应,表现出类似西风槽的显著“北快南慢”特点。

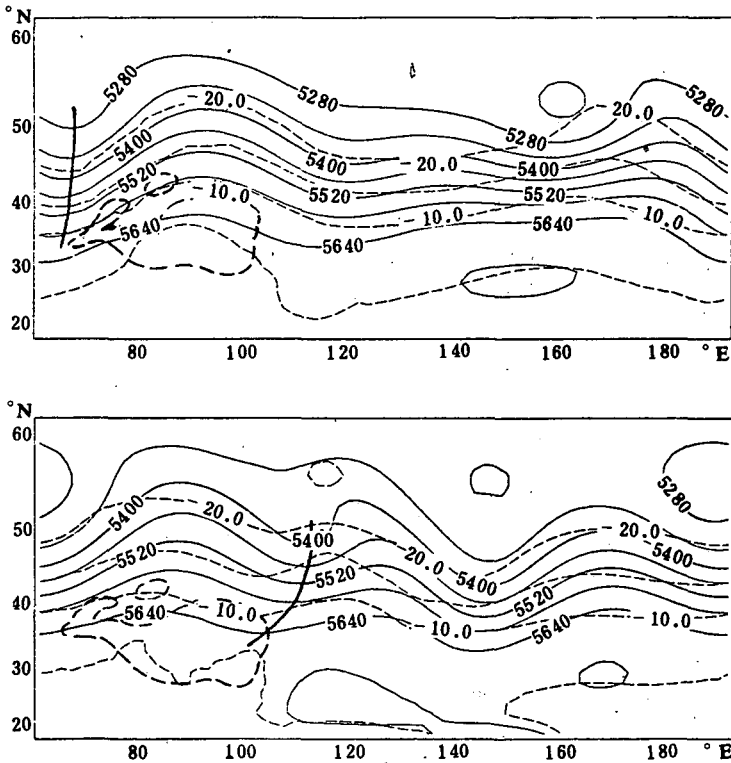


图4 模式积分7天(上)、11天(下)500hPa 高度场和温度场  
(细直线为等高线,粗直线为槽线,虚线为等温线,粗虚线为青藏高原地形)

另外,对比模式计算7日与11日所模拟的300hPa(图略)、500hPa 高度场、温度场(图4),可以发现,这两等压面上模拟的西风槽线移动过程均呈“北快南慢”的位相差特征,即

模式计算第 7 天,位于青藏高原西侧 70°E 附近的槽线在东移过程中槽线南北端移速出现差异。在模式计算第 11 天,槽线已移至青藏高原东侧 110°E 附近,此时原南北向槽线变为东北—西南走向的导式槽。从模式计算第 7 天—第 11 天,该槽线北端与南端可相差约 12 个经度。这一试验结果与高空槽往往在青藏高原北侧强度减弱,移速加快,而南侧移动停滞的天气事实相吻合。

另外,500hPa 等压面槽线变形比 300hPa 等压面更为显著,即 500hPa 等压面槽线在经过高原时“北快南慢”特征表现得更为明显。这也反映了低层槽线受青藏高原地形影响比高层要大些的现象,

即 
$$\Delta C_{gz}(500hPa) > \Delta C_{gz}(300hPa) \quad (20)$$

### 2. 系统经过高原地区的变速现象

本文数值试验表明,在模式考虑实际地形分布条件下,模拟的西风槽移过青藏高原的演变过程也表现出存在显著的变速运动特征。由图 5 可见,模式积分 7—8 天 700hPa 高空槽移动了约 13 个经度,8—9 天高空槽移动了近 18 个经度,即在高原东半部地区槽线产生了异常加速运动;而后,在 9—10 天,10—11 天,11—12 天槽线均以每天 5 个经度的速度缓慢移动,即槽线移过高原后又发生了减速运动。这些现象表明西风槽移过高原时在高原的不同区域(即高原西半部、东半部以及高原东侧边缘区域)会表现出具有一定规律性的变速运动特征。该结果与上述理想化条件下( $\frac{\partial h_s}{\partial x} = Const$ )导出的结论有所类似。另外,由图 5 可知,这类变速与大地形结构有密切相关,700hPa 等压面槽线过高原时其移动过程不仅表现出变速,而且处在高原地区槽线的中段移动的加速现象远远比槽线北端明显,导致槽线在高原区域移动时的变形,即中段快两端慢的状况。而此槽线移出高原后又表现出中段、南端的减速远远比北端显著。这些现象进一步说明,地形影响越大,槽线的变速运动越显著。

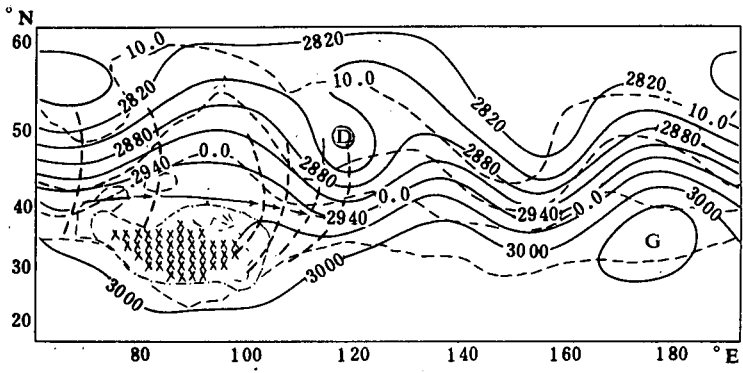


图 5 模式积分 7—12 天 700hPa 槽线移过高原的变速现象

(细实线为积分 12 天的等高线,虚线为积分 12 天的等温线,粗实线为槽线,箭头为槽线移动过程)

另外对比模式计算第 8 天与第 9 天模拟高原的地面风场(图 3、图 6),可发现,相应于西风槽移动过程在高原东半部地区的加速运动,此阶段高原地面风场特征与低涡分布均有显著变化。计算第 8 天低涡位于高原中部与西部 70°E—80°E 附近,第 9 天其已伴随着高空槽迅速东移至高原东侧边缘区域。

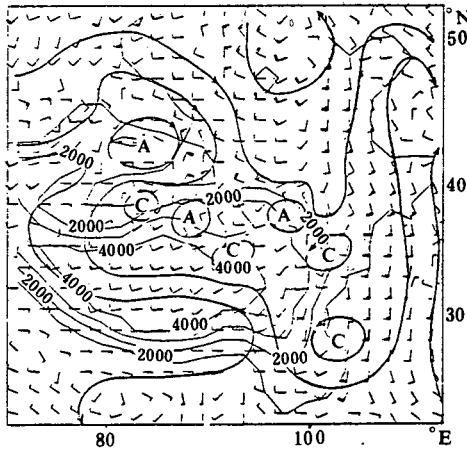


图6 模式积分9天后地面流场(说明同图3)

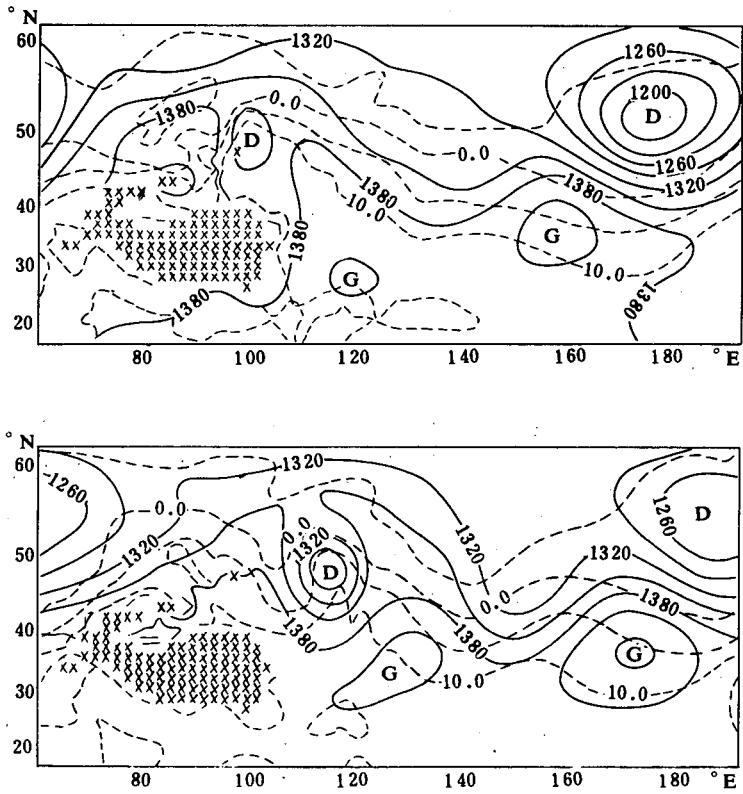


图7 模式积分9天(上),11天(下)850hPa 高度场和温度场  
(说明同图4)

对于高原东侧高空槽的减速运动现象,虽然处于高原北部的高空槽“北端”比处于高原地区的“中段”表现得弱些,但此现象仍存在。而且在槽减速过程,高原北部约50°N附近

的低涡也有显著加强的特征,见模式计算 9—11 天 850hPa 等压面上模拟的高度场(图 7)。高原北部地区(50°N)附近低涡加强的现象,可能与模式加入青藏高原及其北侧天山、阿尔泰山、萨彦岭等东亚沿海 20°N—60°N 大范围山脉地形有关。这些高原、山脉构成了如图 1 所示东亚沿海地形,因此类似过山后低压系统的加强效应可能一直延伸至偏北 50°N 附近。

本文的数值试验进一步揭示了大地形对于行星波空间结构特征的影响效应。试验结果表明,大地形结构特征的影响可以导致行星波在经过高原区域过程中其槽线南北端发生显著的位相差,并且出现加速与减速现象;尤其这些行星波结构的变形与高原地区天气系统的发生、发展也有着密切的联系。由此可见,高原地区行星波系统结构的形变及其移速异变现象也是研究高原天气系统的重要环节之一。

### 参 考 文 献

- [1] Bleck, R., An isentropic coordinate model suitable for lee cyclogenesis simulation, *Riv. Meteorol. Aeronaut.*, 44, 189—194, 1984.
- [2] Da Silva Aragão, M. R., The dynamic effects of the andes cordillera on the atmospheric flow: A channel model study. University of Miami, Ph. D. Thesis., 1987.
- [3] Mesinger, F., A blocking technique for representation of mountains in atmospheric models, Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modelling, Ed. I. D. Rutherford, World Climate Research Programme/Numerical Experimentation Programme, Report NO. 5, July, pp 4. 9—4. 10, 1983.

## NUMERICAL EXPERIMENTS WITH THE IMPACT OF THE PLATEAU ON THE CHARACTERISTIC SPATIAL STRUCTURE AND MOVING SPEED OF PLANETARY WAVES

Xu Xiangde

(*Nanjing Institute of Meteorology*)

### Abstract

The impact of the Qinghai-Xizang plateau as a huge orography on the spatial structure of moving planetary waves is investigated using the 12-layer primitive equation model with p- $\sigma$  incorporated coordinate.

The results show that the plateau's dynamic effect is highly correlated with its characteristic configuration. The plateau as a noteworthy factor may result in a complicated change of the spatial structure of moving planetary waves, that is to lead to the phase difference between two waves on the north-and south-facing slope, wave speed change and deformation of the spatial structure.