

包络地形和重力波拖曳对气候模拟效果的影响*

钱永甫

(南京大学大气科学系, 南京 210093)

提 要

该文用 Nju-POM 的数值试验, 研究了包络地形和地形重力波拖曳作用对 7 月气候模拟效果的影响. 通过试验结果的对比分析, 发现包络地形和重力波拖曳作用都可在一定程度上改善模式的模拟性能, 使模拟结果更符合气候实况.

关键词: 气候模拟 包络地形 地形重力波拖曳效应

引 言

80 年代以来, 人们对中期数值预报和气候模拟中的系统性误差(气候漂移)的原因进行了多方面的研究, 认识到模式地形结构以及地形的重力波拖曳作用描述不好, 可能是其重要原因. 因此, Wallace 等(1983)建议采用包络地形来改善模式的地形结构^[1]. 此后, 有关包络地形对气候模拟和中期数值预报效果的影响已有不少研究. 我国在这方面的研究较少, 只有李龙和朱抱真(1990)研究了修正的包络地形对地形绕流和爬坡流的影响^[2]. 作者在这之后(1995)也研究了包络地形对气候模拟特征的影响, 并引入了地形包络度的概念^[3]. 研究表明, 采用较大包络度的地形可在一定程度上改善气候模拟效果, 尤其是在冬季. 作者也指出, 包络地形如使用不当, 可能造成海陆分布变形而影响模拟效果和计算的稳定性. 至于地形所产生的重力波拖曳作用的影响, 也在 80 年代中期开始进行研究. Palmer 等人首先试图用重力波拖曳所产生的附加动量交换效应, 来减弱模式高空西风过强现象^[4]. Palmer 等(1986)以及 McFarlane 等(1986)^[5]和 Helfand 等(1986)^[6]以后又做了一些预报试验, 证明引入地形重力波拖曳作用可在一定程度上改进预报和模拟效果.

本文将包络地形和重力波拖曳作用引入南京大学 p - σ 混合坐标系气候模式(Nju-POM), 以检验在多大程度上改善了模拟结果, 以及有效改善的内容.

1 试验方案

1.1 包络地形

包络地形 Z_e 的通常定义如下:

* 本文由国家“九五”科技攻关项目“我国短期气候预测系统的研究”96-908-02-04-04 子专题资助. 1998-07-13 收到, 1998-10-28 收到修改稿.

$$Z_e = Z_m + \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Z_i - Z_m)^2} = Z_m + \sigma_{Z_m} \quad (1)$$

式中 $Z_m = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Z_i$ 为模式格点上的平均地形高度, Z_i 为格点周围的次网格尺度地形, σ_{Z_m} 为格点地形的标准差. N 为求 Z_m 时所用的 Z_i 个数. 本文用 $1^\circ \times 1^\circ$ 的地形资料, 求得 $5^\circ \times 5^\circ$ 的平均地形, 然后求得 σ_{Z_m} , 故 $N = 25$.

作者曾引入过包络度 k_e 的概念^[3], 即将式(1)改写为

$$Z_e(k_e) = Z_m + k_e \sigma_{Z_m} \quad (2)$$

当 $k_e = 0$ 时, $Z_e = Z_m$, 即为平均地形, 当取 $k_e > 0$ 时, 可构成不同的包络地形 $Z_e(k_e)$.

数值试验表明, 不同包络度的包络地形对模拟结果有不同的影响, 引入包络度 k_e 后, 可以方便地挑选最适合于模式的包络地形, 而且在不同的地区, 可以用不同的包络度^[2,3]. 本文提出了一种新的包络地形, 其与式(1)的差别在于 σ_{Z_m} 的求法, 即将 σ_{Z_m} 表示为

$$\sigma'_{Z_m} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Z_i - Z_{im})^2} \quad (3)$$

式中 Z_{im} 为在次网格地形点上求得的网格尺度平均地形. Z_{im} 用 Z_m 的双线性插值或用求 Z_m 相同的方法在次网格点上求得. 计算表明, 对一维阶梯式地形, 用式(3)的 σ'_{Z_m} 所构成的包络地形与实际地形更为接近. 我们将用平均地形作的试验称为控制试验, 记为 EV_0 , 用 σ_{Z_m} 构成的包络地形做的试验记为 EL_1 , 用 σ'_{Z_m} 构成的包络地形做的试验记为 EL_2 和 EL_3 . 地形包络度 $k_e = 0.5$.

1.2 地形重力波拖曳作用

地形重力波拖曳作用最先由 Palmer 等人引入模式, 并进行试验. 本文参照 Palmer 等人的方案, 将重力波拖曳作用引入 N_{ju}-POM. 具体做法如下:

首先根据 σ_{Z_m} 以及地面大气稳定度情况计算地面向上的动量通量密度 $\vec{\tau}_s$, 即

$$\vec{\tau}_s = \rho_s k N \vec{V}_s \sigma_{Z_m}^2 \quad (4)$$

式中 ρ_s 和 \vec{V}_s 分别为地面附近空气密度和风矢, 本文取 \vec{V}_s 为模式最下层风矢的 0.7 倍. $k = 2.5 \times 10^{-5} \text{ m}^{-1}$, 是激发重力波的地形特征参数, N 为 Brunt-Väisälä 频率. 在计算 $\vec{\tau}_s$ 时, σ_{Z_m} 的值要有所限制, 即 $\sigma_{Z_m} \leq 400 \text{ m}$, 否则 $\vec{\tau}_s$ 过大. Helfand 等人又据重力波理论认为 σ_{Z_m} 还应 $\leq 0.85 |\vec{V}_s| / N$. 当 $N^2 \leq 0$ 时, $\vec{\tau}_s = 0$.

在用式(4)算出 $\vec{\tau}_s$ 后, 再自下向上计算每一模式层上部界面的动量通量 $\vec{\tau}_k$, k 为模式层编号, 本文中自上而下增大. 在计算 $\vec{\tau}_k$ 时, 有几个约束条件, 即 $N_k^2 > 0$, Richardson 数 $Ri_k \geq 0.25$, 以及 $\vec{V}_k \cdot \vec{V}_s > 0$. 若上述 3 个条件中有一个不满足, 则 $\vec{\tau}_k = 0$. 若 3 个条件同时满足, 则可由不同方案计算 $\vec{\tau}_k$. 分述如下:

Palmer 方案: 先设 $\vec{\tau}_k$ 与 $\vec{\tau}_{k+1}$ 相等, 则可求得与 $\vec{\tau}_k$ 相应的重力波位移 δ_k , 即 $\delta_k^2 = \vec{\tau}_{k+1} / (\rho_k k N_k \vec{V}_k)$. 此处带下标 k 的量, 均为该界面以上和以下模式层相应量的平均值. 由 δ 可算出该层的 Froude 数, 定义为 $Fr_k = N_k \delta_k / u_k$, 此处 u_k 为风的 u 分量绝对值, 对 v 分量有相

同表达式. 由 $F r_k$ 和 $R i_k$ 可计算出该层的最小 Richardson 数, 记为 $R i_{m i n}$, 即

$$R i_{m i n} = R i(1 - F r) / (1 + R i^{\frac{1}{2}} F r)^2 \quad (5)$$

式中已将各量的下标 k 略去(下同). 由 $R i_{m i n}$ 的值, 可估计在该层中重力波是否破碎. 当 $R i_{m i n} > 0.25$ 时, 无破碎现象, 此时, $\vec{\tau}_k \equiv \vec{\tau}_{k+1}$. 若 $R i_{m i n} \leq 0.25$, 则有破碎发生, 在令 $R i_{m i n} = 0.25$ 后重新计算 $F r$ 数. 由式(5)很易解得新的 $F r$ 数, 并记为 $F r_0$, 有

$$F r_0 = (2 + R i^{\frac{1}{2}})^{\frac{1}{2}} (2 - (2 + R i^{\frac{1}{2}})^{\frac{1}{2}}) \quad (6)$$

则可将 $\vec{\tau}_k$ 的东西分量表示为

$$\tau_k^{(u)} = F r_0^2 \rho_k k u_k^3 / N_k \quad (7)$$

南北分量类似. 式(6)系作者重新整理后的表达式, 比原式更简单, 但结果相同.

Helfand 方案: 此方案与 Palmer 方案无本质差别, 只是在计算 $R i_{m i n}$ 时, 将其表达式写为

$$R i_{m i n} = R i(1 - F r) \quad (8)$$

因此, 当 $R i_{m i n} \leq 0.25$ 时, $F r_0$ 变为

$$F r_0 = 1 - 0.25 / R i \quad (9)$$

然后用下式计算 $\vec{\tau}_k$:

$$\vec{\tau}_k = (F r_0 / F r)^2 \vec{\tau}_{k+1} \quad (10)$$

McFarlane 方案: 此方案也建立在 Palmer 方案基础上, 主要差别是在计算 δ_k^2 后, 再与 $(F_c \cdot u_k / N_k)^2$ 比较, 取小者为新的 δ_k^2 , 然后将其代入 $\vec{\tau}_k$ 的计算式, 即 $\vec{\tau}_k = \rho_k k N_k \vec{V}_k \delta_k^2$, F_c 取 0.7.

我们将这 3 种方案所做的试验分别表示为 G_{r1} 、 G_{r2} 和 G_{r3} . 在计算时, 将 \vec{V}_k 分解成 u_k 和 v_k 后分别进行计算, 因此 δ 、 $F r$ 对 u_k 和 v_k 有不同的值.

试验所用模式为 Nju-P σ M 的全球范围版本, 有关模式和物理过程参数化方案可参阅文献[7~9]. 试验的初值场均为 6 月纬向平均气象场, 海温采用多年平均 7 月气候海温场. 所有试验的结果均为相应的 7 月气候模拟场.

2 包络地形的试验结果

图 1(a, b) 为模式所用的地形标准差 σ'_{z_m} 、 $\sigma'_{z_{m1}}$. 其中 σ_{z_m} 由传统方法得到, $\sigma'_{z_{m1}}$ 由式(3)求得, z_{m1} 由次网格地形点上的 $5^\circ \times 5^\circ$ 平均地形的求法求得. 为保持海陆分界线不受歪曲, 在海洋上的地形标准差一律取为零. 由图可见, 两种标准差的基本分布是相似的, 但细节上有较多差异, 尤其是在落基山脉、东非沿岸以及青藏高原地区.

图 2(a, b) 是 $E V_0$ 试验的总降水率 (mm/d) 以及 $E L_1$ 、 $E V_0$ 的总降水率差值分布. 由图 2a 可见, 用平均地形 z_m 模拟出的降水基本上与 7 月的实况降水相符. 由图 2b 可见, 采用传统的包络地形后, 降水分布发生了变化, 变化大的区域主要在热带辐合带内, 原 $E V_0$ 中降水偏大的区域, 降水率有所下降. 500 hPa 高度场差值(图略)表明, $30^\circ N$ 附近的西太平洋副热带高压和青藏高原上的低压都有所加强, 而里海周围的高度升高, 澳大利亚高压更为明显. 沿 $90^\circ E$ 的差值经圈环流(图略)中, 季风环流圈更强, 且高原南侧出现了下沉的差值

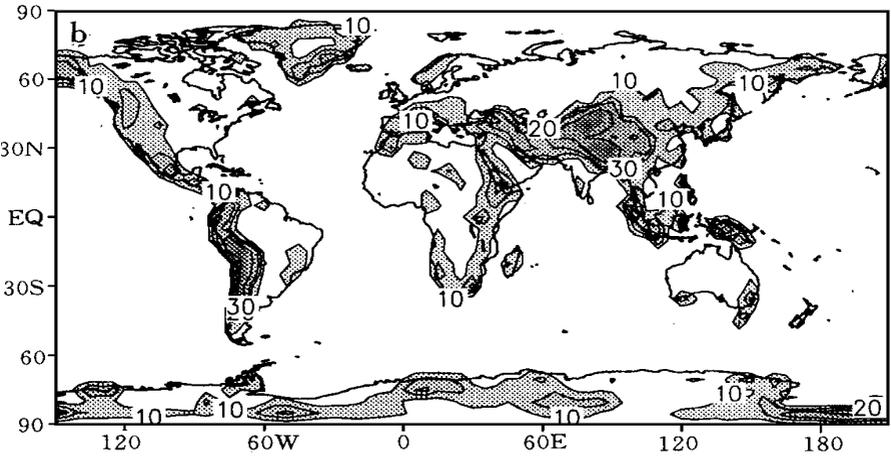
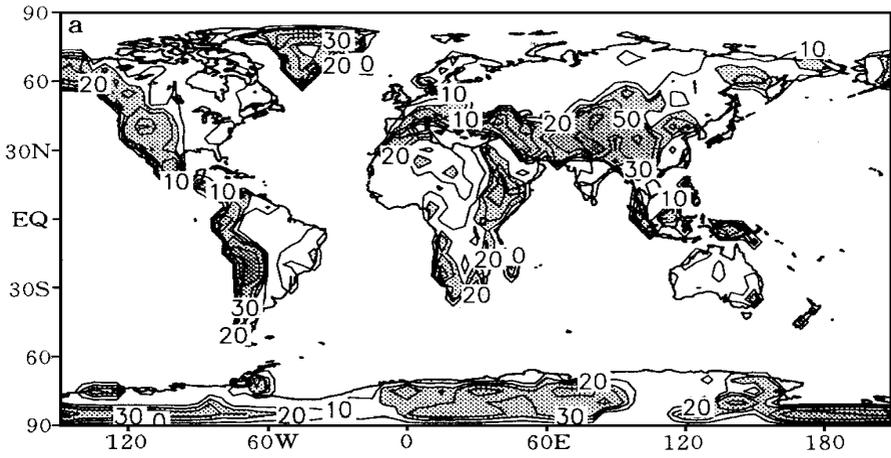


图1 (a)传统标准差 σ_{z_m} (b)新定义标准差 $\sigma'_{z_{m1}}$ (单位: 10 m)

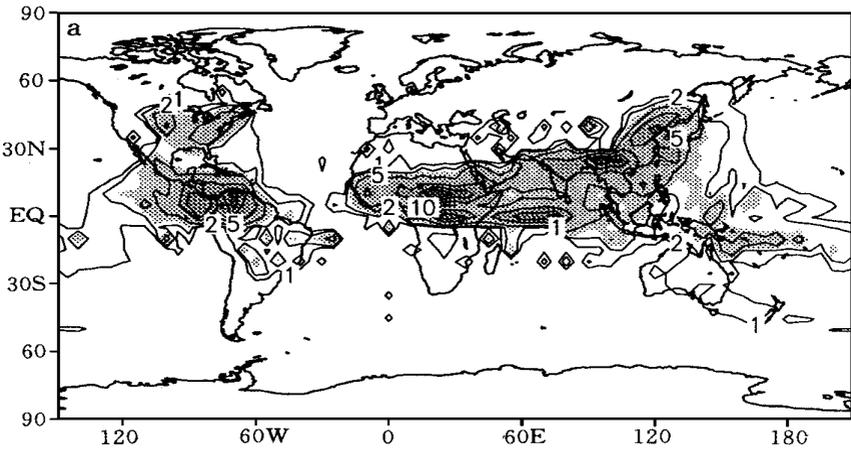
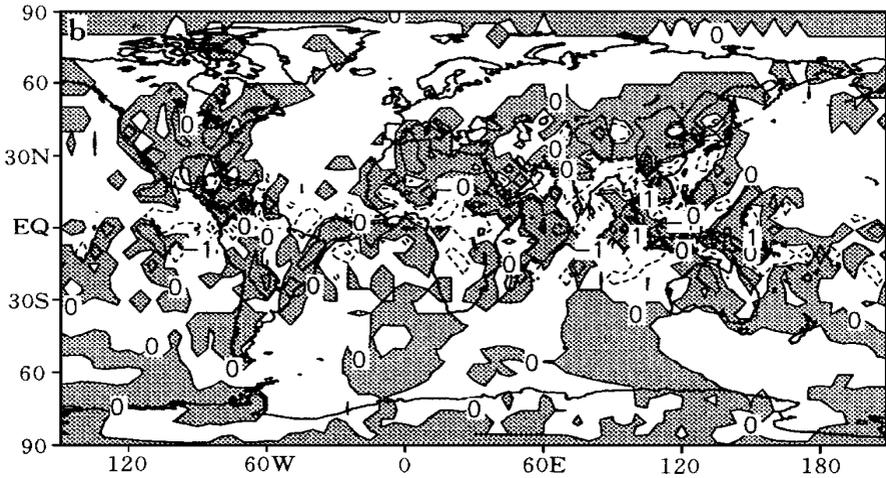


图2 (a)EV₀模拟的总降水率(mm/d)和(b)EL₁-EV₀总降水率差(mm/d)



(续图 2)

气流,使高原地形的动力和热力作用更为明显.因此,包络地形的加入,使高原地形更为陡峭,从而部分地改善了模拟效果. EL_3 试验与 EV_0 试验的总降水率差值和沿 $90^\circ E$ 经圈差值环流与 EL_1 和 EV_0 的差值分布类似,不再给出图示.可见新定义的包络地形标准差 $\sigma'_{z_{m1}}$ 与 σ_{z_m} 有相同的效应.

由以上分析可见,引入包络度为 0.5 的包络地形可以在一定程度上改善模拟效果.其它包络度的包络地形对模拟效果的影响可参见文献[3].

3 重力波拖曳作用的试验结果分析

如前所述,重力波拖曳的引入,主要是想改善平流层西风过大的模拟缺陷.因此,本节主要引入重力波拖曳作用对西风动量的影响,讨论风场改变情况.

图 3(a, b) 是控制试验 EV_0 中模式第 1 层(100 hPa) 和第 2 层(300 hPa) 风矢流线图.可以看出,在 100 hPa 上,南亚反气旋、北美反气旋以及大洋中的气旋性环流十分清楚,在 300 hPa 上更是如此.在第 3 层上(图略),西太平洋副高环流也十分明显.这些与 7 月气候状况是相符的.从图 3(a, b) 均可看出,在 $40^\circ N$ 以北,西风气流较强.

加入重力波拖曳作用后的三个试验有类似的模拟效果,本文只给出 G_{R3} 与 EV_0 的差别.图 4(a, b) 是 G_{R3} 试验与 EV_0 试验在 100 和 300 hPa 上的差值流线图.可以看出,流场的改变是明显的.在 100 hPa 上青藏高原以北 $30^\circ \sim 60^\circ N$ 的纬带内,西风减弱, $60^\circ N$ 以北西风增强.300 hPa 上有类似现象.在第三层上(约 550 hPa, 图略), $30^\circ N$ 和 $110^\circ E$ 处的副热带高压环流和地中海的高压环流均有所增强, $45^\circ N$ 的西风有所削弱.这些都使模拟效果有所改善.从图 4 还可以看到,地形重力波拖曳作用的引入,使对流层中高层及平流层中的流场改变较为复杂.由于非线性作用和流体的连续性,不仅在地形标准差大的地区流场改变大,而且也使地形标准差为零的广大海洋地区的流场发生了明显的变化.

由以上分析可见,模式中引入地形重力波的拖曳作用后,对模拟效果也有所改善.

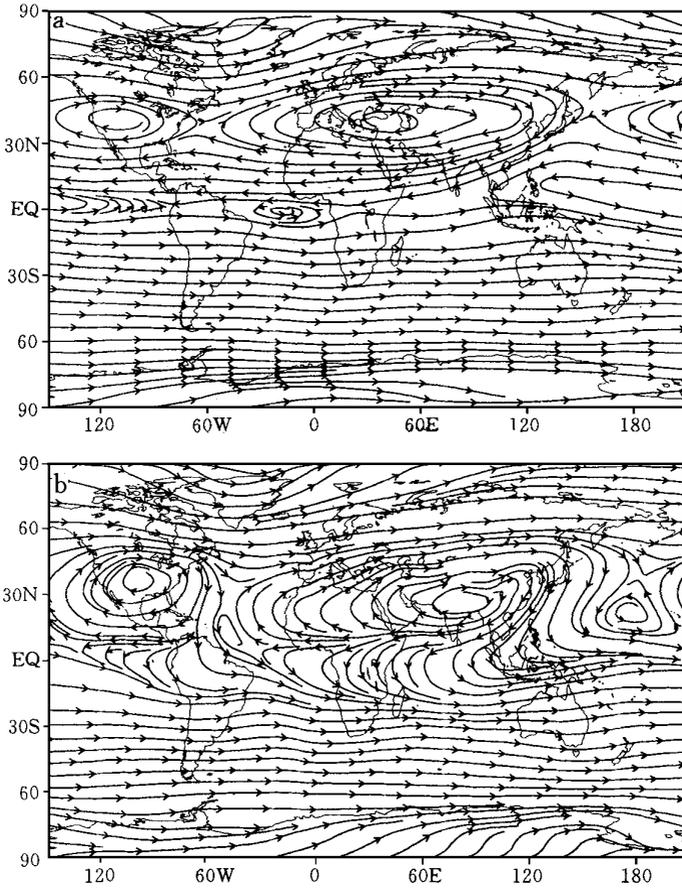


图 3 EV_0 在 100 hPa(a)和 300 hPa(b)的流线

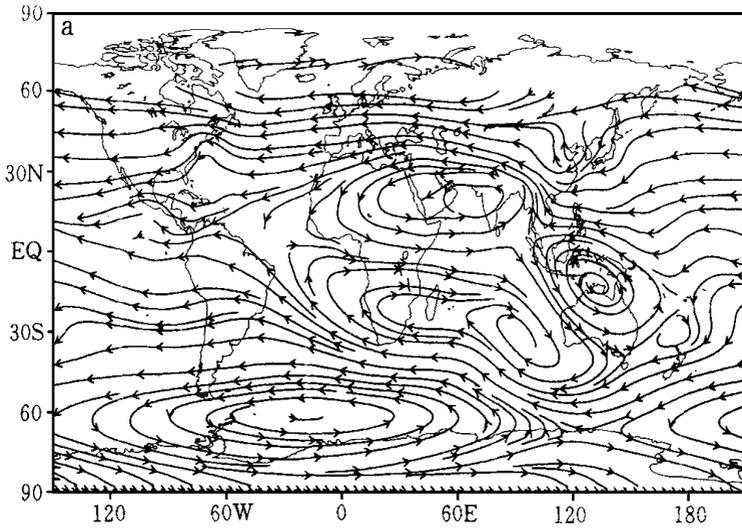
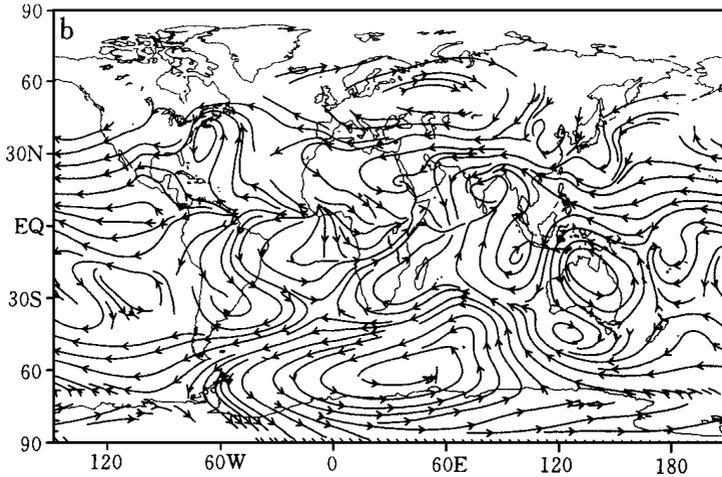


图 4 $G_{13}-EV_0$ 试验的差值流线图 (a)100 hPa (b) 300 hPa



(续图 4)

4 结 论

本文对包络地形和地形重力波拖曳作用对气候模式模拟效果的影响作了数值试验, 通过模拟结果的对比分析, 可以发现, 采用适当包络度的包络地形可以在一定程度上改善气候系统的模拟效果, 地形重力波拖曳作用对模拟结果也有较多影响, 对模式性能有所改进. 但本文的试验还是初步的, 有待于对更多的模式输出量进行对比分析后, 方能获得更为确切的结论.

参 考 文 献

- 1 Wallace J M, et al. Reduction of systematic forecast errors in the ECMWF model through the introduction of an envelope orography. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1983, **109**: 683~ 718.
- 2 Li Long and Zhu Baozhen. The modified envelope orography and the air flow over and around mountains. *Adv. Atmos. Sci.*, 1990, **7**(3): 249~ 260.
- 3 钱永甫, 董梁. 包络地形对气候模拟特征的影响. *高原气象*, 1995, **14**(2): 129~ 140.
- 4 Palmer, et al. Alleviation of a systematic westerly bias in general circulation and numerical weather prediction models through an orographic gravity wave drag parameterization. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1986, **112**: 1001~ 1039.
- 5 McFarlane, et al. Reduction of systematic errors in NWP and general circulation models by parameterized gravity wave drag. Special Vol. of *J. Meteor. Soc. Japan*, 1986, 713~ 728.
- 6 Helfand, et al. The effect of a gravity wave drag parameterization scheme on GLA fourth order GCM forecast. Special Vol. of *J. Meteor. Soc. Japan*, 1986, 729~ 742.
- 7 钱永甫, 等. 行星大气中地形效应的数值研究. 北京: 科学出版社, 1988. 217.
- 8 钱永甫. 地表热平衡温度的一种计算方法. *气象科学*, 1988, **8**(4): 14~ 27.
- 9 Qian Yongfu. Effects of different sea surface temperatures over the western Pacific on summer monsoon properties. *Acta Oceano Sinica*, 1993, **12**(4): 535~ 547.

EFFECTS OF ENVELOPE OROGRAPHY AND GRAVITY WAVE DRAG ON PERFORMANCE OF CLIMATE MODELING

Qian Yongfu

(Department of Atmospheric Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093)

Abstract

The Nju-POM is used to study the effects of envelope orography and gravity wave drag on July climate modeling. The results of analysis and comparison show that envelope orography and gravity wave drag could improve the modeling performance to some extent and result in more realistic simulations.

Key words: Climate modeling Envelope orography Gravity wave drag