

谱模式中负地形的处理与东亚 副热带气候的模拟*

刘屹岷 吴国雄 刘 辉

(中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029)

摘 要 谱模式中负地形对气候模拟有严重干扰。本文重新处理 IAP/LASG GOALS 模式地形及海陆分布, 通过对比新旧地形强迫下数值试验的结果, 揭示了原有 GOALS/LASG 气候模式对西太平洋副高模拟中存在的系统偏差与 (30°N , 120°E) 长江口附近的负地形及纬向地形谷有关, 与 NCEP/NCAR 再分析资料和 CMAP 综合分析资料比较表明, 新的地形方案减弱了负地形效应, 使东亚气候, 如夏季西太平洋副热带高压及夏季降水的模拟得到明显改善。

关键词 谱模式 负地形 副热带高压

1 引言

地形对气候的形成起着非常重要的作用^[1~3], Manabe、Terpstra 和 Hahn 详细地比较了大气环流模式中“有山”和“无山”气候间的区别^[4,5]。山地不仅对气流有机械的转向作用, 而且通过与其表面感热加热的非线性相互作用影响大气^[6,7]。因此模式气候特别是大地形下游的环流型与气候模式中地形的处理密切相关。

为提高气候模式中辐射传输的处理在反映实际物理过程的水平, 王标^[8]将 K 分布辐射方案^[9]引入了 IAP/LASG GOALS^[10]大气模式 AGCM 中, 纠正了与非绝热加热过程直接有关的大气温度结构和纬向平均风场的偏差。但模式对东亚副热带系统的模拟仍然存在误差, 尤其在 30°N 的长江口附近地区各季节的表面气温和 500 hPa 位势高度均偏高, 夏季更为明显(参见文献[8]中图 4.5、4.6、4.9、4.10)。与 SSiB 耦合后形成的 IAP/LASG GOALS 陆气耦合模式(版本 1)仍然存在同样的问题(见本文图 4b、e)。我们认为引起这一系统偏差的原因之一是与谱模式中普遍存在的虚假的负地形高度有关。本文将重新处理模式地形, 希望得到更合理的副热带环流。

第 2 节阐明地形作用于大气环流场的基本原理; 第 3 节给出对负地形高度的处理; 第 4 节对比了新旧地形下模式模拟出的东亚副热带气候, 并与 NCEP/NCAR 提供的 1980~1995 年的月平均再分析资料比较; 讨论在第 5 节给出。

1998-06-26 收到, 1998-08-01 收到修改稿

* 国家重点基础研究发展规划项目“我国重大气候灾害的形成机理和预测理论的研究”以及国家自然科学基金重点资助项目 49635170、49823002 和 49705061 的联合资助

2 地形高度作用于大气环流场的基本原理

2.1 标准大气的表面气压及表面温度

IAP/LASG GOALS 谱模式中模式大气由两部分组成: 标准大气和偏差大气。在做标准层结扣除时得到的标准大气的表面气压 $\bar{p}_*$ 及表面温度 $\bar{T}_*$ 为^[11]

$$\ln \bar{p}_* \equiv \bar{q}_* = \ln p_{00} + \frac{c_p}{R} \ln \left[1 - \frac{1}{X} (\Phi_* - Y \ln p_{00} + Y \ln \bar{p}_*) \right], \quad (1)$$

$$\bar{T}_* (\ln \bar{p}_*) = \frac{Y}{R} + \left[\left(\bar{T}_s - \frac{Y}{R} \right) / p_{00}^{R/c_p} \right] \exp \left(\frac{R}{c_p} \ln \bar{p}_* \right) = \frac{Y}{R} + \frac{X}{c_p} \left(\frac{\bar{p}_*}{p_{00}} \right)^{R/c_p}. \quad (2)$$

这里

$$X = c_p \left(\bar{T}_s - \frac{c_p}{R^2} C_0^2 \right), \quad Y = \frac{c_p}{R} C_0^2,$$

地面上 C_0 设为常数 94.63 m/s。根据 ECMWF 资料, 平均海平面气压 $p_{00} = 1013$ hPa, 平均表面温度 $\bar{T}_s = 284.75$ K。

上式中 Φ_* 为地形表面位势, 因此标准大气的表面气压及表面温度随着地形位势也就是地形高度的增加而减少。青藏高原的表面气压即在 550 hPa 左右, 其地面温度是同纬度的最低。

2.2 负地形的影响

谱模式中需要地形高度场的谱截断系数, 而在格谱转换中, 大地形的周围会产生虚假的负地形。IAP/LASG GOALS 气候模式原地形场来源于 Gates 等的 $1^\circ \times 1^\circ$ 地形资料^[12], 在全球范围都存在许多较小尺度扰动, 东半球尤其如此。图 1 给出区域为 ($0 \sim 70^\circ\text{N}$, $45 \sim 180^\circ\text{E}$) 的海陆分布及地形高度。青藏高原最大高度是 4910 m, (30°N , 120°E) 长江口处的地形高度是 -20 m。从图 1b 中还可看出, (30°N , 120°E) 附近是地形波的纬向波谷。由式 (1) 和 (2) 知, 对于一孤立的负地形, 其标准大气的表面气压 $\bar{p}_*$ 和表面温度 $\bar{T}_*$ 将比周围增加, 这使得模拟的长江口地区的表面气压及表面空气温度受到影响。

根据静力平衡原理 $\partial \Phi / \partial p = -RT/p$, 模式最低层 ($\sigma = 0.991$) 与地表面 ($\sigma = 1$) 的厚度 ΔH 可近似地表达为

$$\Delta H = \frac{\Delta \Phi}{g} \approx \frac{0.009 R \bar{T}}{g}, \quad (3)$$

其中 $\bar{T}$ 为层间平均温度。设温度垂直递减率为 γ , 则式 (3) 还可写成

$$\Delta H = \frac{0.009 R}{g + 0.0045 \gamma R} T_s. \quad (4)$$

于是当 $T_s = (\bar{T}_* + T')$ 偏高时, 负地形处 $\sigma = 0.991$ 层离地面的高度比周围增大, 地气温差

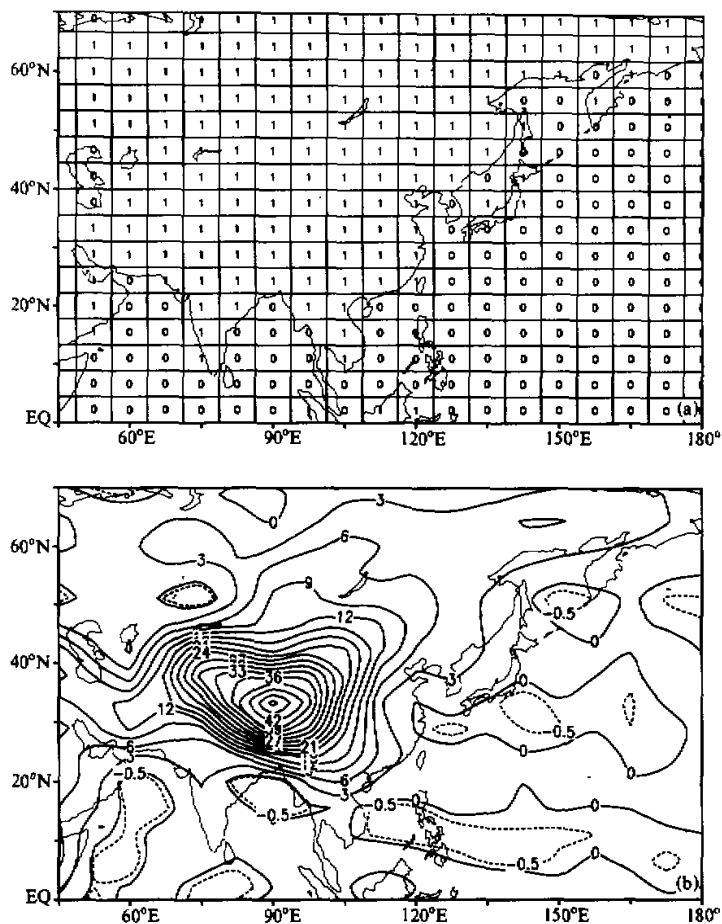


图1 (a) 旧地形方案中高斯网格上的海陆分布(1为陆地, 0为海洋); (b) 原地形高度场, 单位: 100 m

$$T_s - T_a = \gamma \Delta H \quad (5)$$

也随之加大, 从而导致表面感热通量增大, 进而影响到该地区上空的环流形势和降水。

3 对负地形高度的处理

原模式地形中, 落基山脉最高处是 1890 m, 美洲地形相对青藏高原来说比较光滑, 而且对西半球副高的模拟比较好^[13], 因此本文主要对东半球地形进行处理。

东半球存在许多岛屿, 其海陆分布的表面类型为陆地, 为避免由此引起的小尺度扰动, 首先将一些岛屿所在地的表面类型改为海洋, 它们包括非洲大陆以东的马达加斯加、印度尼西亚群岛、台湾、日本, 共 14 个高斯格点。然后, 在全球范围进行两次格

谱转换。对 45°S 以北的东半球 ($0\sim 180^{\circ}\text{E}$) 再做 9 点平滑, 并保持陆面格点上高度非负及青藏高原上最大高度不变。

图 2 给出了与图 1 相同区域的新地形场。可见新地形比原来光滑许多, 去掉了长江口附近的负值及纬向地形谷。

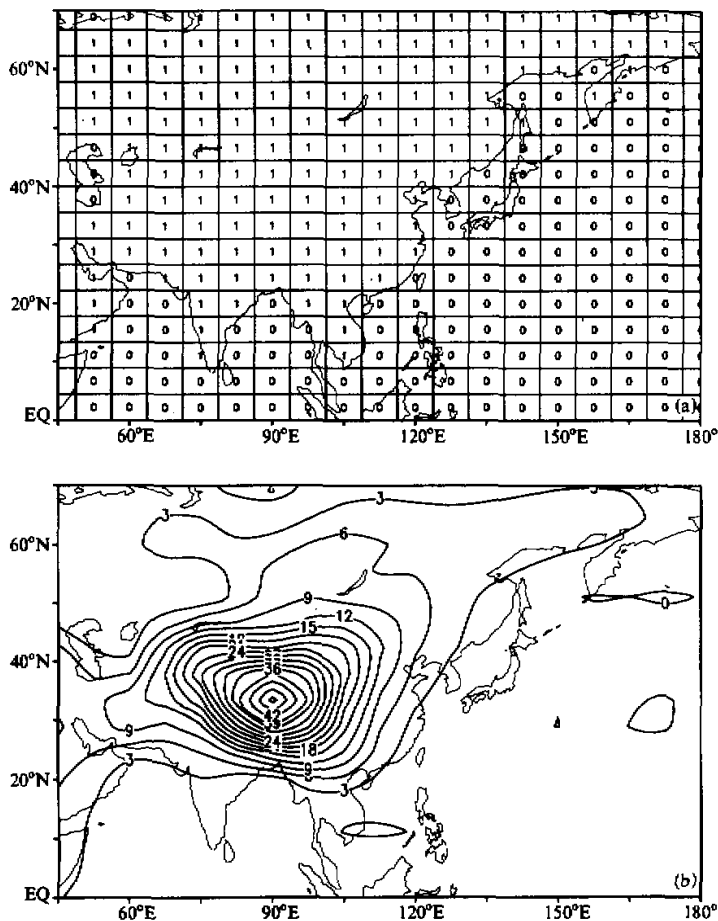


图 2 同图 1, 但为新地形方案

图 3 是新旧地形高度差异及由此引起的标准大气表面温度差的空间分布。表明地形高度增加将降低标准大气的表面温度, 与上节的机理分析一致。

4 模式副热带气候对改进的地形场的响应

将上述改善的新地形场及海陆分布放入 IAP/LASG GOALS 陆气耦合模式进行积分 (NCON), 与原地形下的背景试验结果 (OCON) 进行比较以研究负地形对气候模

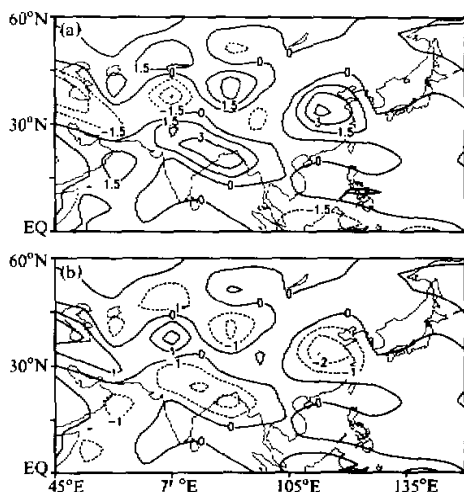


图3 新旧地形方案高度差异 (a, 单位: 100 m) 以及标准大气表面温度差异 (b, 单位: $^{\circ}\text{C}$) 的空间分布

的梯度比 NCEP 要大, 但比 OCON 有所改进 (图 4c)。与长江口附近的负地形改变相对应, 该地的感热通量减少近 20 W/m^2 , 而且由于台湾岛上的表面类型变成海洋, 并对地形作了平滑处理, 去掉了东南沿海许多较小尺度扰动。

由于东亚季风降雨, 夏季从印度半岛到长江流域陆面感热比冬季小。图 4d 是 NCEP/NCAR 7 月东亚地区的感热分布, 显示出从东南向西北的梯度。东南地区的表面感热通量小于 20 W/m^2 。OCON、NCON 试验都能将表面感热向西北方向增加的空间分布模拟出来。然而图 4e 显示的 OCON 的感热通量高达 60 W/m^2 。NCON 试验中, 东南亚地区的感热仍偏高, 但长江口附近的感热通量已降到 20 W/m^2 左右, 更接近 NCEP 的数值 (图 4f)。夏季负地形造成的感热变化较大, 这与式 (5) 中温度递减率 γ 在夏季比冬季大有关。

图 5 是表面气温 1 月、7 月空间分布。与 NCEP/NCAR 的表面气温 (图 5a、d) 相比, 总体上, 两个试验都相当好地模拟了表面气温的大尺度分布特征和季节差异。两者共同的不足之处是青藏高原地区的表面气温均偏高, 而对高纬的模拟偏低。前者主要是由于模式中青藏高原的高度比实际低得多, 也与模式对高原陆面过程描述不当有关。后者是因为在本试验中, 为了简化分析, 海洋分模式被从 GOALS 中关闭, 而代之以给定的气候场和海冰。而这种陆气耦合模式对北极冰雪过程处理不当。俞永强的研究指出与海洋模式、海冰模式的耦合可改善对高纬表面温度的模拟^[14]。

1 月表面气温明显的改进在日本北部。OCON 试验中此处的表面类型是一个陆地 (岛屿) 点。对于这种尺度较小的地形下的环流模拟是低分辨率模式所不能胜任的。这导致 1 月日本北部的表面气温位于零下, 明显偏低, 其中最低点达 -10°C (图 5b)。在去掉这些岛屿点的 NCON 试验结果中, 该地的表面气温在 $0\sim 5^{\circ}\text{C}$ 之间 (图 3c), 与 NCEP 的分析结果图 5a 相同。

拟的影响, 同时与 NCEP/NCAR 80~95 月平均资料的分析进行对比。

新 (NCON)、旧 (OCON) 地形试验均积分 20 年, 取后 16 年统计。图 4 给出东亚区域 NCEP、OCON 和 NCON 感热通量 1 月、7 月的空间分布。再分析数据显示 (图 4a), 1 月东亚陆地上 30°N 以北基本上是负值, 表明大气有向下的感热通量输送; 30°N 以南是正值, 大气得到能量。冬季最大的能量交换在大陆东海岸, 这是由于来自大陆的冷空气到达暖湿的洋面受到加热所致。OCON 试验 (图 4b) 中, 由于模式不能正确描述较小尺度岛屿的陆面过程, 日本北部感热通量出现了负值, 并使这一地区的感热通量的梯度过大。NCON 试验 1 月的感热通量

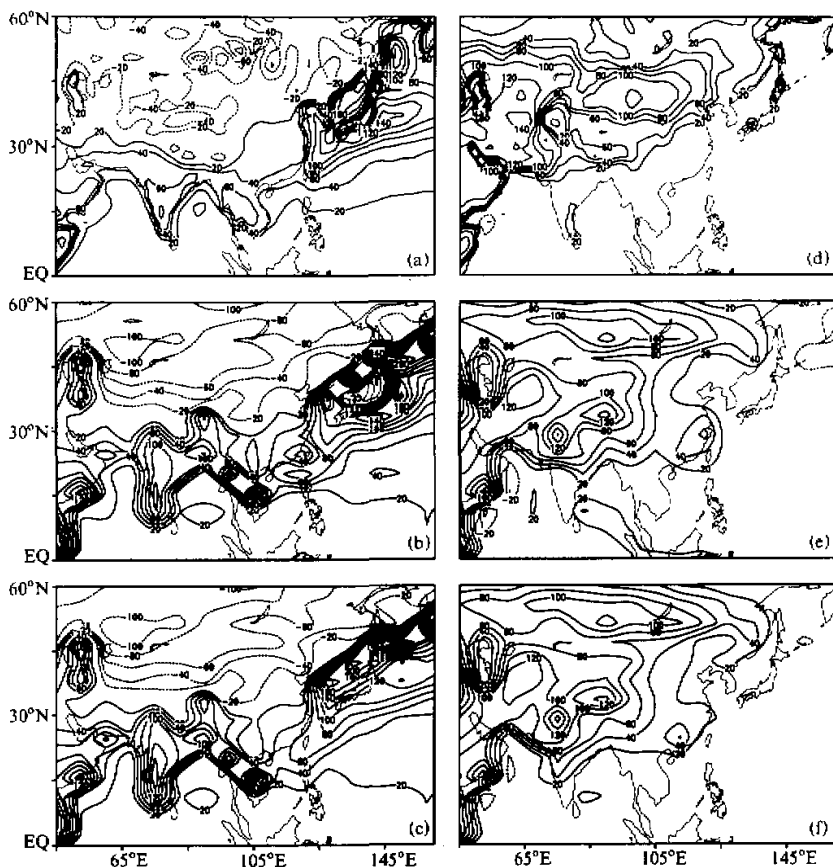


图4 表面感热通量1月(左)和7月(右)的空间分布
(a)、(d) NCEP/NCAR; (b)、(e) OCON; (c)、(f) NCON
单位: W/m^2

长江口及其附近地区是中国夏季温度最高的区域, 7月平均温度是 25°C , 不超过 27°C (图 5d)。OCON 在 $(30^\circ\text{N}, 120^\circ\text{E})$ 有一温度达 30°C 的高温中心, 显著偏高 (图 5e)。与对感热通量的模拟相对应, 去掉负地形的 NCON 的模拟是 $25\sim 27^\circ\text{C}$ (图 5f), 明显比 OCON 更接近再分析的结果。

图 5b、c 显示 1 月 NCON 长江口附近的表面气温没有明显降低。这是因为模式中表面气温并不直接来自式 (2) 中的标准大气表面温度。由式 (5) 知, 地形的变化首先改变大气边界层上感热通量, 再进一步影响环流状态。而表面气温是由地面热通量平衡方程所决定^[11]。方程中除感热通量外, 还有辐射、潜热通量等。这些物理过程在冬季将起着较大作用。

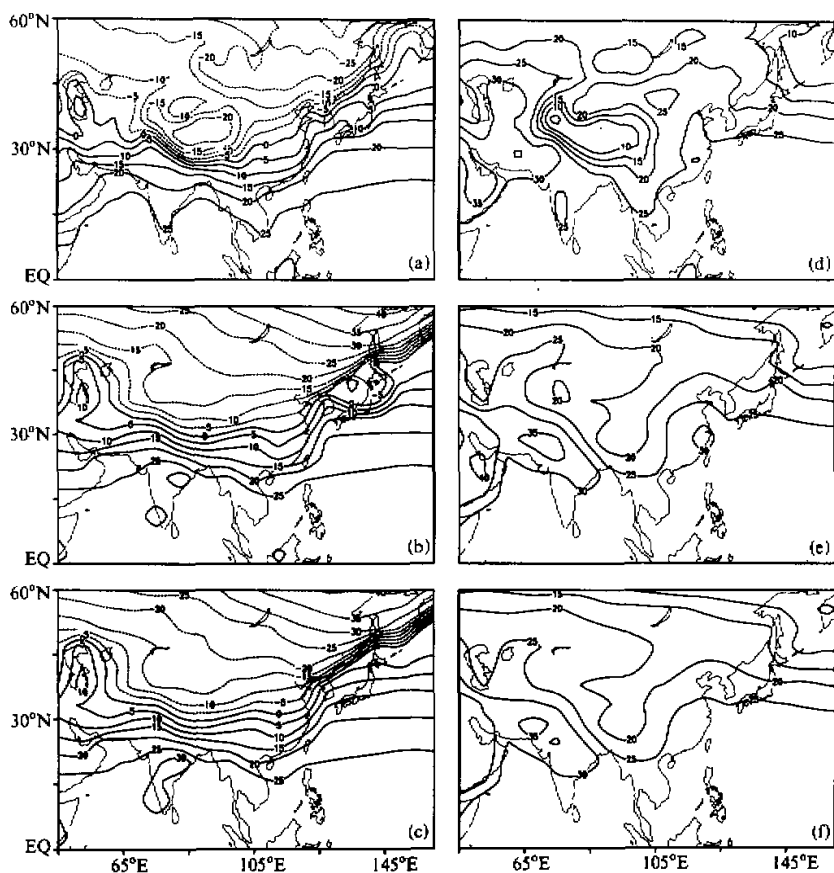


图5 同图4, 但为表面气温的空间分布
单位: $^{\circ}\text{C}$

包含热力作用的全型垂直涡度倾向方程^[13,15]是

$$\frac{\partial \zeta_z}{\partial t} + \mathbf{V} \cdot \nabla \zeta_z + \beta v = (1 - \kappa)(f + \zeta_z) \frac{\omega}{p} + \frac{1}{\theta_z} \zeta_a \cdot \nabla Q, \quad \theta_z \neq 0, \quad (6)$$

上式中 Q 为热力学方程中的非绝热加热率。由于表面感热通量的垂直非均匀加热所产生的涡度制造

$$\frac{(f + \zeta)}{\theta_z} \frac{\partial}{\partial z} (Q_{\text{SH}}) < 0, \quad (7)$$

表面感热通量的增大使其上空大气附加一反气旋式涡源, 位势高度增加。因此负地形造成的表面感热通量的增加将会影响该地上空的环流形势。下面重点分析东亚夏季环流形势。

图6给出夏季500 hPa重力位势高度场。再分析资料(图6a)显示, 夏季副高中

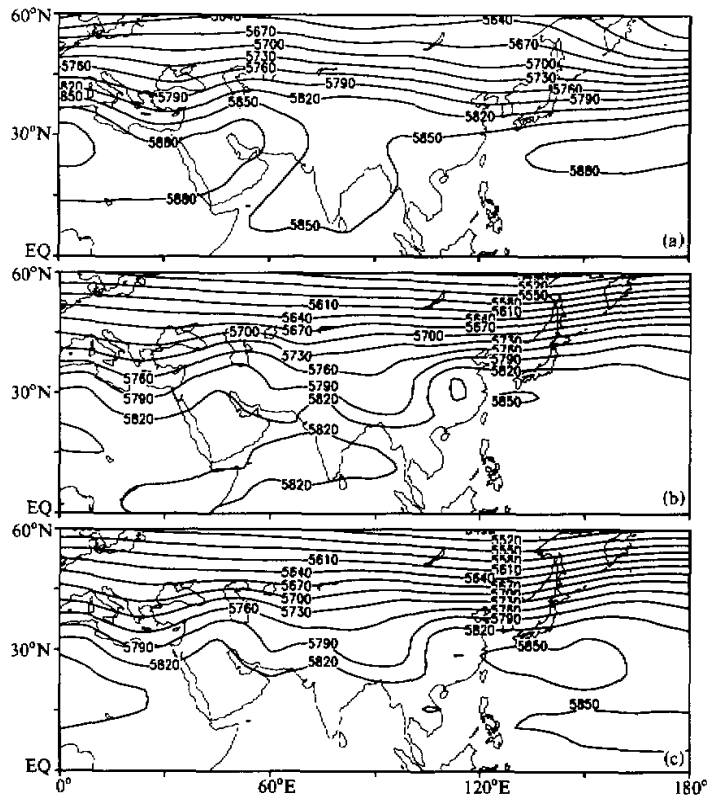


图 6 夏季平均 500 hPa 位势高度场
(a) NCEP/NCAR; (b) OCON; (c) NCON. 单位: 位势米

心位置在中西太平洋上。模拟的 500 hPa 高度场强度均偏弱, 位置偏西。新地形 NCON 试验下的误差明显小于 OCON 试验, 主体已位于洋面上 (图 6c)。除此以外, 在 OCON 中, 与长江下游地区过强的表面感热加热 (图 4e) 及偏暖的气柱 (图 5e) 相对应, 500 hPa 出现一个虚假的较小尺度的高压。

图 7 是夏季 (6~8 月) 降水场, 显示在 OCON 试验中 (30°N, 120°E) 长江口地区是东亚地区的低值中心 (图 7c), 夏季平均降水小于 4 mm/d。NCON 试验中降水低值区已移至海上 (图 7d)。图 7a、b 分别是夏季 NCEP/NCAR 及 CMAP^[16] (观测、卫星估算和数值模式综合分析) 降水场。因 NCEP 的再分析降水场受到争议, 这里同时给出 CMAP 18 年 (1979~1996) 的分析结果。显示长江口附近地区夏季平均降水略小于 6 mm/d。NCON 试验比 OCON 更接近综合分析的结果, 为 4~6 mm/d。

图 6d 显示印度降水显著减少, 其原因是新地形场的设计中印度半岛地形高度降低 (图 3a), 从而引起该地区感热通量加大 (图 4b、c)。于是根据 (7) 式, 感热通量增加导致其上空大气的反气旋式涡度加大, 不利于对流发展, 造成降水减少。这也说明地形

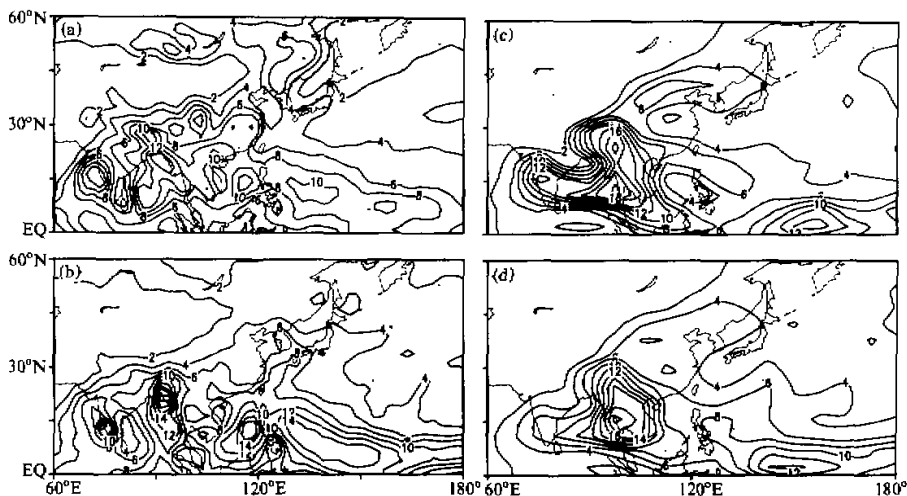


图7 夏季平均降水场

(a) NCEP/NCAR; (b) CMAP; (c) NCON; (d) OCON. 单位: mm/d

场还需更细致的改进。

新旧试验模拟的降水场在夏季 120°E 以东偏弱, 大于 4 mm/d 的降水中心偏西。根据文献[14], 位于对流层中高层强大的季风凝结潜热的释放对邻近的副热带高压形成起着重要作用。500 hPa 位于最大凝结加热层的下方, 从式 (6) 知, 短时间内潜热 (LH) 产生的涡度制造 $[(f+\zeta)/\theta_z](\partial/\partial z)(Q_{LH}) > 0$, 即可强迫出气旋式环流。

对于长时间尺度的演变, 涡度的局地变化可略。由于副热带近地层是东西风交接带, 平流很弱, 而且垂直运动项 $(f+\zeta)(1-\kappa)\omega/p$ 的量级 (10^{-11}) 又比热源的垂直变化所产生的涡度强迫的量级 (10^{-10}) 小 (参见文献[14])。因此在最大潜热热源的下方, 式 (6) 简化为

$$\beta_v \propto \frac{f+\zeta}{\theta_z} \frac{\partial Q_{LH}}{\partial z} > 0. \quad (8)$$

于是在 β 项作用下, 热源中心下方出现偏南风, 使气旋式环流出现在热源西侧, 反气旋式环流出现在热源东侧。因此降水中心偏西也使副高位置偏西。这一理论研究已得到文献[17]中的数值试验和观测分析结果的证实。

5 小结及讨论

通过对比新旧地形强迫下的数值试验, 揭示了谱模式中负地形对气候模拟有严重干扰, 因地形对标准大气的作用不受季节变化的影响, 文中没有分析环流夏季季节内的变化, 但所得结果已证明原有 IAP/LASG GOALS 气候模式对西太平洋副高模拟中存在

的系统偏差是与 (30°N, 120°E) 长江口附近的负地形及纬向地形谷有关。与 NCEP/NCAR 再分析资料及 CMAP 综合分析资料的比较表明, 新的地形方案减弱了负地形效应, 使东亚气候, 如夏季西太平洋副热带高压及夏季降水的模拟有明显改善。本研究还指出低分辨率谱模式中对复杂地形的描述不一定越精确越好, 地形场应与模式的分辨率相适应。

虽然孟加拉湾和中南半岛以东的负地形同样明显, 图 3b 也表明这些地区的标准大气表面温度在 NCON 中有所降低, 但对该地区的模拟无明显改进。说明除改善局地负地形外, 还应做海陆分布的处理及较大范围的地形改变。NCON 试验过程就显示, 长江口附近的地形谷必须去掉。总之, 模式地形场的试验仍需进行, 以进一步改善对副热带气候的模拟。

参 考 文 献

- 1 Krishnamurti, T. N. et al, 1973, Tibetan High and upper tropospheric tropical circulation during northern summer, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **54**, 1234~1249.
- 2 Hahn, D. G. and S. Manabe, 1975, The role of mountains in the South Asian monsoon circulation, *J. Atmos. Sci.*, **32**, 1515~1541.
- 3 叶笃正, 杨广基, 王兴东, 1979, 东亚和太平洋上空平均垂直环流 (一) 夏季, *大气科学*, **3**, 1~11.
- 4 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.
- 5 Manabe, S. and D. G. Hahn, 1981, Simulation of atmospheric variability, *Mon. Wea. Rev.*, **109**, 2260~2286.
- 6 Wu Guoxiong, 1984, The Nonlinear response of the atmosphere to large-scale mechanical and thermal forcing, *J. Atmos. Sci.*, **41**, 2456~2476.
- 7 Wu Guoxiong and S. Tibaldi, 1987, The effects of mechanical forcing on the mean meridional circulation and transfer properties of the atmosphere, *Adv. Atmos. Sci.*, **1**, 24~42.
- 8 王标, 1996, 气候模拟中的辐射传输模式, 中国科学院大气物理研究所博士学位论文, 92pp.
- 9 Shi Guangyu, 1981, An accurate calculation and the infrared transmission function of the atmospheric constituents. Ph. D. Thesis, Dept. of Sci., Tohoku University of Japan, 191pp.
- 10 吴国雄, 张学洪, 刘辉等, 1997, LASG全球海洋-大气-陆面系统模式 (GOALS/LASG) 及其模拟研究, *应用气象学报*, **8** (增刊), 15~28.
- 11 Wu Guoxiong, Liu Hui, Zhao Yuchen and Li Weiping, 1996, A nine-layer atmospheric general circulation model and its performance, *Adv. Atmos. Sci.*, **13**, 1~18.
- 12 Gates, W. L. and A. B. Nelson, 1975, A new (revised) tabulation of the Scripps topography on a 1° global grid. Part I: Terrain heights, The Rand Corporation, R-1276-1-ARPA, 132pp.
- 13 刘屹岷, 刘辉, 刘平, 吴国雄, 1999, 空间非均匀加热对副热带高压带形成和变异的影响 II. 陆面感热加热与东太平洋北美副高, *气象学报*, **57**(4), 385~394.
- 14 俞永强, 1997, 海-冰-气耦合方案的设计及年代际气候变化的数值模拟研究, 中国科学院大气物理研究所博士学位论文, 131pp.
- 15 吴国雄, 刘屹岷, 刘平, 1999, 空间非均匀加热对副热带高压带形成和变异的影响 I. 尺度分析, *气象学报*, **57**(3), 257~263.
- 16 Xie and Arkin, 1996, Analyses of Global Monthly Precipitation Using Gauge Observations, Satellite Estimates, and Numerical Model Predictions, *J. Climate*, **9**, 840~858.
- 17 刘屹岷, 1998, 非绝热加热影响北半球夏季副热带高压带形态的物理机制, 中国科学院大气物理研究所博士学位论文, 135pp.

Disposal of Negative Orography in a Spectral Model and Modeling of Subtropical Climate in East Asia

Liu Yimin, Wu Guoxiong and Liu Hui

(State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics,
Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

Abstract Motivated by the serious impact of negative orography on climatic simulation in spectral models, the orography presentation has been renewed in the global climate model IAP/LASG GOALS. Based on comparison between results from old and new orographic experiments, it is revealed that the originally systemic deviation of modeling on the Western Pacific Subtropical High is related to the negative orography at 30°N , 120°E and along the latitude to its east. By comparing these model results with the reanalysis data of NCEP/NCAR and CMAP, it can be concluded that the effects of negative orography can be suppressed to a great deal under the new orography scheme, and therefore the simulation of East Asia subtropical climate can be distinctly improved.

Key words spectral model negative orography subtropical high

中国首次北极科学考察取得丰硕成果

中国首次北极科学考察队, 乘“雪龙号”科学考察船, 自 1999 年 7 月 1 日从上海启航, 至 9 月 9 日返回上海靠港为止, 历时 71 天。本次北极科学考察的主要内容是进行北冰洋的海、气、冰相互作用综合研究, 具体的科学目标有三个: 一是探讨北极在全球变化中的作用和对中国气候的影响, 二是了解北冰洋与北太平洋水团交换对北太平洋环流的变异影响, 三是了解北冰洋临近海域生态系统与生物资源对中国渔业发展的影响。共有来自海洋、生物、大气、地质、海冰等近 10 个学科的 124 名科学家参加了本次科学考察, 其中来自大气、海洋、海冰等多学科的科学家在 75°N 的浮冰上建立了一个连续工作 7 天的联合观测站, 利用多种先进手段, 对上至 30 000 m 的高空, 下至 3 000 m 深的海洋, 进行了立体式的海洋、海冰和大气综合观测。这是我国首次在北冰洋浮冰上建立联合观测站。

中国科学院大气物理研究所的邹捍、曲绍厚、王维、周立波参加了本次北极科学考察, 他们进行了高空大气探测 (包括臭氧的垂直分布) 和大气边界层系留气艇的观测研究。

本次考察对冰、气、海的综合作用进行多点同步观测, 取得了一系列珍贵的数据, 这些资料的对于人类科学认识北极有着重要的作用。

(周立波)