

大气热源和大地形对夏季印度季风和东亚季风环流形成作用的数值模拟^{*}

骆美霞 张可苏

(中国科学院大气物理研究所)

提 要

本文利用一个 σ 坐标的三层初始方程热带球圈数值模式,以全球夏季平均纬向风场为初始场,研究地形的纯动力作用和不同地区的大气热源、冷汇对亚洲夏季两支独立的季风环流系统形成的影响,针对它们对季风环流的主要成员如越赤道气流、季风槽、青藏高压等的相对重要性设计并进行了一系列试验,东亚季风环流和印度季风环流系统的成员被很好地模拟出来。

关键词: 东亚季风环流; 印度季风环流; 地形动力作用; 大气非绝热作用。

一、引 言

关于季风问题的研究是近来国内外十分关注的一个重要研究课题,1979年进行了全球夏季风实验,中国位于典型的季风气候区,中国的冷、暖、旱、涝同亚洲季风活动密切相关,因此,对亚洲季风环流的研究有着极其重要的意义,陈隆勋等^[1-2]利用天气学诊断分析方法,指出夏季东亚季风环流(又称南海—西太平洋季风环流系统)和印度季风环流是两支独立的季风环流,1987年贺海晏等^[1]利用FGGE资料研究了1979年东亚季风和印度季风建立过程中的时间序列,指出东亚季风系统的风场、温度场、降水和加热场各分量的演变均先于印度季风,文献^[2-3]认为印度季风环流的主要成员是马斯克林高压、索马里急流、印度季风槽等,东亚季风环流的主要成员是澳大利亚高压、105°E的跨赤道气流、南海西太平洋的东亚季风槽和ITCZ,本文利用数值模拟的方法研究大尺度地形和不同地区的定常大气热源对这两支季风环流系统形成的影响。

二、数值模式简述

本文利用的数值模式是三层初始方程热带球圈模式^[4],这个模式源自朱抱真等^[5]的北半球三层初始方程模式,模式的控制方程组如下:

$$\frac{\partial}{\partial t} \frac{p_s u}{m} = -m \left[\frac{\partial}{\partial x} \frac{p_s u}{m} u + \frac{\partial}{\partial y} \frac{p_s v}{m} u + \frac{\partial}{\partial \sigma} \frac{p_s \dot{\sigma}}{m} u \right] + \frac{p_s}{m} f(v - v_g) + \frac{p_s}{m} F_u, \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \frac{p_s v}{m} = -m \left[\frac{\partial}{\partial x} \frac{p_s u}{m} v + \frac{\partial}{\partial y} \frac{p_s v}{m} v + \frac{\partial}{\partial \sigma} \frac{p_s \dot{\sigma}}{m} v \right] - \frac{p_s}{m} f(u - u_g) + \frac{p_s}{m} F_v, \quad (2)$$

1988年12月30日收到,1989年5月30日收到再改稿。

^{*} 国家自然科学基金资助项目。

$$\frac{\partial}{\partial \sigma} \frac{p_* \dot{\sigma}}{m} = -\frac{1}{m} \left[m^2 \left(\frac{\partial}{\partial x} \frac{p_* u}{m} + \frac{\partial}{\partial y} \frac{p_* v}{m} \right) + \frac{\partial p_*}{\partial t} \right], \quad (3)$$

$$\frac{\partial p_*}{\partial t} = - \int_0^1 m^2 \left(\frac{\partial p_* u}{\partial x} + \frac{\partial p_* v}{\partial y} \right) d\sigma, \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \frac{c_p p_* T}{m} = & \\ -m \left[\frac{\partial}{\partial x} \frac{p_* u}{m} (c_p T + \phi) + \frac{\partial}{\partial y} \frac{p_* v}{m} (c_p T + \phi) + \frac{\partial}{\partial \sigma} \frac{p_* \dot{\sigma}}{m} (c_p T + \phi) \right] & \\ - \frac{1}{m} \frac{\partial \sigma \phi}{\partial \sigma} \frac{\partial p_*}{\partial t} + \frac{p_*}{m} f (u v_x - v u_x) + \frac{p_*}{m} \dot{H} + \frac{p_*}{m} D_T, & \quad (5) \end{aligned}$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial \ln \sigma} = -RT, \quad (6)$$

式中

$$\begin{aligned} u_g &= -\frac{m}{f} \left(\frac{\partial \phi}{\partial y} + RT \frac{\partial \ln p_*}{\partial y} \right), \\ v_g &= \frac{m}{f} \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} + RT \frac{\partial \ln p_*}{\partial x} \right), \end{aligned}$$

其中, p_* 为地面气压, F 表示垂直湍流扩散项, D 表示水平湍流扩散, 本文只在运动方程中考虑由地表摩擦引起的垂直扩散. m 是麦卡托投影的放大系数, $m = \sec \varphi$ 模式的垂直差分是将整个大气分为等距的 3 层. 水平网格距在赤道上是 555km. 水平积分范围是从 44.6°S—57.1°N 的球圈. 时间步长为 15min.

三、数值试验方案

为了研究不同地区的大气冷、热源和大尺度地形的动力作用对夏季亚洲两支季风环流系统形成的作用, 我们以夏季 200、500、850hPa 3 个等压面上的全球纬向平均风速作为初始风场, 采用不同的加热分布进行了一系列数值试验 (见表 1). 作 6 天或 6 天以上的数值时间积分, 观察青藏高原等大地形和不同地区的大气冷、热源对亚洲两支不同的季风环流系统形成的影响.

模式中的地形高度取自文献 [6], 经过一定的光滑处理后, 地形仍保留了实际地形的大尺度特征, 但地形高度和坡度都比实际地形低一些, 各种试验取基本相同的地形分布, 青藏高原的最高高度为 3800m, 落基山高原的最高高度为 1600m^[4]. 对于各种试验, 模式中的非绝热加热都取固定分配的加热方案, 温度方程 (5) 中各层的非绝热加热率 $\dot{H}$ 都根据初始输入的加热通量按经验给出, 中层加热大于高层和低层.

方案 1: 只考虑地形的动力强迫作用, 不考虑大气的非绝热作用, 地形高度分布同文献 [4] 中图 1.

表 1 数值试验方案

方案	地形	非绝热场
1	有	无
2	无	加热场 1: 最大加热中心位于孟加拉湾, 其次在青藏高原上 (图 1a)
3	有	同方案 2
4	有	加热场 2: 在方案 2 的基础上, 根据文献 [7], 在南海地区增加一个热中心, 在澳大利亚北部增加一个冷源中心
5	有	加热场 3: 修正的 FGGE 加热场 (图 1b)
6	无	加热场分布同方案 5

方案 2: 不考虑地形的动力作用, 只考虑大气的非绝热作用, 初始输入的加热场如图 1a 所示, 我们称为加热场 1, 最大加热中心在孟加拉湾地区, 最大值为

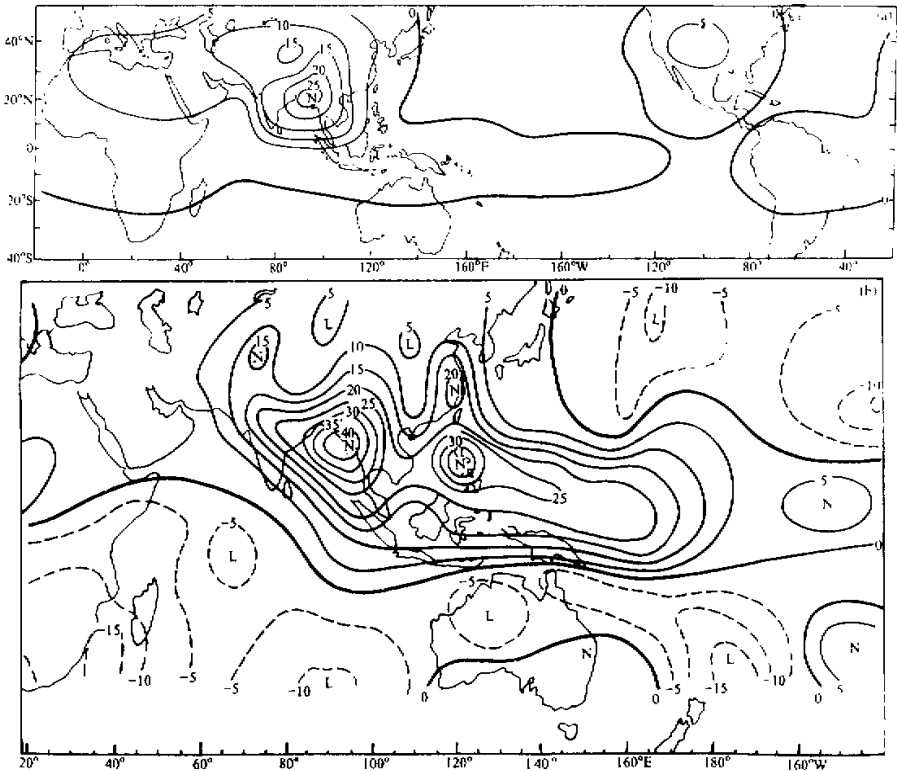


图1 模式输入的加热通量场
41.8J/d · cm², (a) 方案 2; (b) 方案 5

$1170\text{J}/\text{d} \cdot \text{cm}^2$.

方案 3: 同时考虑大气的非绝热作用和地形的动力作用, 初始输入的加热场同方案 2, 地形高度同方案 1.

方案 4: 同时考虑大气的非绝热作用和地形的动力作用, 地形高度分布基本同方案 1, 它们之间的差别是新加坡, 马来西亚等地区的地形高度比方案 1 稍高, 初始输入的非绝热场与方案 2 不同, 根据文献 [7] 在方案 2 的基础上增加了南海地区的热中心, 另外在澳大利亚北部有一冷源, 我们称为加热场 2.

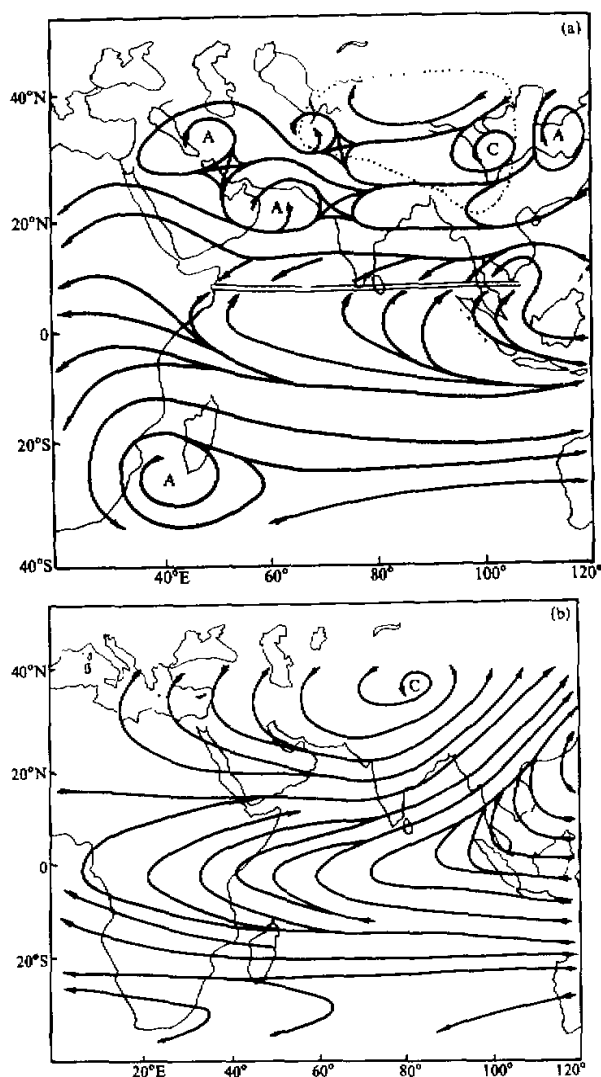


图 2 模拟的第 6 天 850 hPa 流场图

(a) 方案 1, (b) 方案 2, 图中点线以内区域的流线是虚假的

方案5: 地形高度分布同方案4, 采用经过修正的1979年FGGE加热场作为初始输入的加热通量场, 以文献[8]给出的FGGE夏季实测加热场为基础, 然后应用文献[7]由观测资料算出的加热场对FGGE亚洲地区的加热分布进行修正, 即在孟加拉湾和南海地区有两个加热中心, 另外在中国东部(120°E , 31°N)附近有一个小范围的热中心, 我们称为加热场3. 图1b只给出了对FGGE加热场修正部分的加热分布. 在计算中对实际加热场的梯度进行了光滑.

方案6: 去掉地形的动力作用, 只考虑大气的非绝热作用, 初始输入的加热场分布同方案5.

1. 大尺度地形和非绝热热力强迫对印度季风环流系统形成的作用

在讨论数值模拟结果前, 我们先利用欧洲中心给出的1979—1984年6月1日至8月31日的观测平均风^[9]分析观测事实. 在欧洲中心给出的850hPa图上^[9], 存在有马斯克林高压(中心大约位于 28°S , 33°E), 45°E 附近的索马里低空急流、印度季风低压等. 文献[1—2]认为这些系统是印度季风环流的主要成员. 在850hPa图上^[9]还可看到, 在南海—西太平洋地区存在有东亚季风槽和ITCZ, 105°E 附近存在一支向北的跨赤道气流, 另外还有西太平洋的副高、澳大利亚高压等. 文献[1—2]认为这些系统是东亚季风环流的主要成员, 在高层200hPa图上^[9], 在亚洲上空存在有强大的青藏高原, 在 45°E 附近和 100°E 附近有向南的跨赤道气流, 并且 100°E 附近的一支比 45°E 附近的一支强.

本文6种试验都以夏季纬向平均风场为初始场, 对方案4积分了三十天, 积分的环流从第五天起变化开始变小. 本文用五天或六天的积分结果讨论地形和非绝热对某些大尺度环流特征形成的作用. 本文所有850hPa图中点线以内的区域为地底下区, 区域内的风和流线是虚假的, 它是由模式预报出的 σ 面上风速值, 按等 σ 面上的值插到等压面上的插值公式插值得到的.

为了研究大尺度地形和大尺度热力强迫对印度季风环流形成的作用, 进行了方案1—3的试验.

图2a给出方案1(只有地形)积分第6天的850hPa流场. 由图看出, 位于 45°E 的低空跨赤道气流和马斯克林高压被模拟出来, 但是经过索马里穿过阿拉伯海进入印度的一支西南气流以及印度季风槽和季风低压均未模拟出来. 这说明地形纯动力作用不能产生印度季风. 为了研究纯热力作用对季风环流系统形成的影响, 并与地形纯动力效应对比, 在方案2中只考虑非绝热热力作用. 图2b给出方案2积分第6天的850hPa流场. 由图看到, 穿过阿拉伯海进入印度的印度西南季风被很好模拟出来. 这可能说明印度西南季风的形成, 是与孟加拉湾、青藏高原等地区的非绝热加热作用有重要的联系, 但模拟出来的低压中心位于 38°N , 85°E 附近, 与观测的位置比较偏向东北; 西南风侵入到高原主体所在位置, 而且印度季风槽不明显, 这可能说明青藏高原的机械阻挡作用对印度季风低压的位置及西南风强度和位置有影响. 方案1的结果指出, 在地形的纯动力作用下可以形成马斯克林高压, 高压中心位置比平均实况图^[9]偏东, 而在方案2中不考虑地形的纯动力作用则不能模拟出此高压, 这可能说明马斯克林高压是动力性高压, 地形的动力作用对它的形成是重要的.

方案1和方案2的结果说明, 单独的地形的纯动力作用和大气的非绝热热力作用都

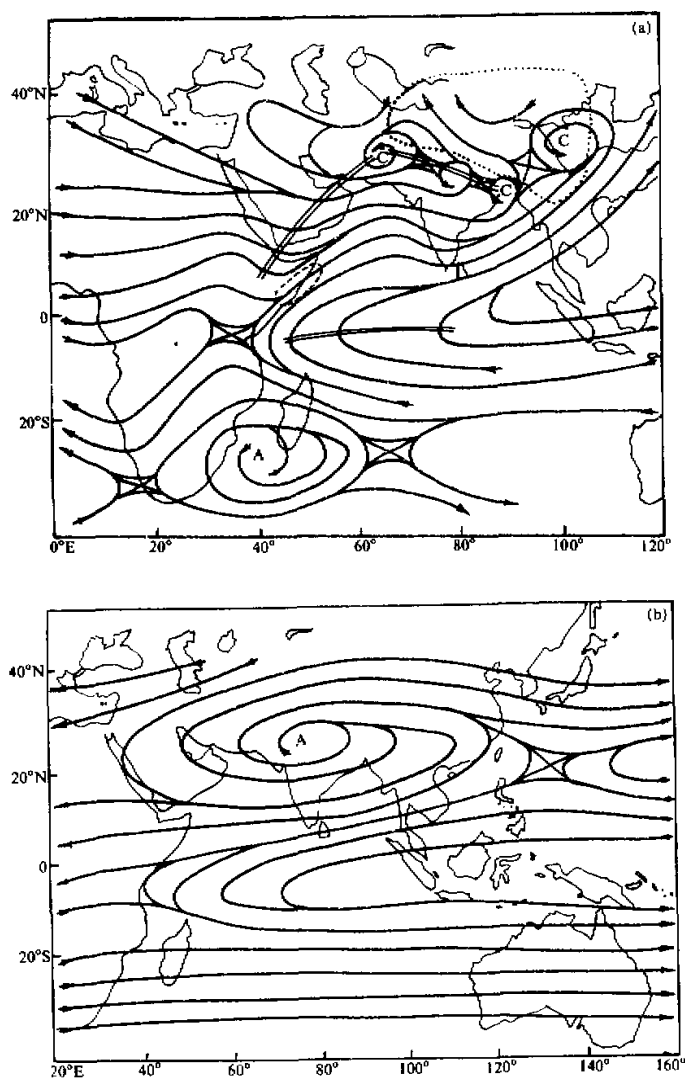


图3 方案3模拟的第6天流场图
(a) 850hPa, (b) 200hPa. 其余说明同图2

不是完整模拟印度季风环流系统的主要成员。在方案3中我们同时考虑地形的纯动力作用和大气非绝热热力作用。图3a—b给出方案3积分第6天的流场，图3a为850hPa，图3b为200hPa。从图3a看出，印度季风环流系统中的主要成员：马斯克林高压，45°E附近的向北跨赤道气流，印度季风低压和季风槽均被很好模拟出来，印度西南风被青藏高原挡在高原以南，与观测结果^[9]一致，模拟的跨赤道气流的风速达3—5m/s，过赤道后西南气流的速度达7m/s(图中虚线内)，虽比实况弱但这个数

值是比较可观的。这表明青藏高原的机械阻挡作用对印度季风低压的位置及西南风强度和位置有明显的影响。在200hPa图上(图3b),位于 45°E 附近的一支向南高空越赤道气流和青藏高压被模拟出来,但是东亚季风环流系统中的东亚季风槽和ITCZ 105°E 附近的低层和高层的跨赤道气流均未模拟出来。

从方案1—3的模拟结果中看出,初时纬向均匀的夏季平均环流在纯地形动力作用和纯非绝热热力作用下,都不能很好成为印度季风环流系统的主要成员。同时考虑青藏高原非洲地形的动力作用和孟加拉湾等地区的大气非绝热热力作用后,印度季风环流系统的主要成员被很好模拟出来。青藏高原和非洲地形的动力作用及孟加拉湾、青藏高原等地区的大气非绝热热力作用对印度季风环流系统的形成似乎是同等重要的。

2. 非绝热热力作用对东亚季风环流系统形成的影响

方案1—3的模拟结果表明,虽然印度季风环流系统被很好模拟出来,但东亚季风环流系统中的东亚季风槽、 105°E 附近的跨赤道气流等系统在三个试验中均未被模拟出来,为此我们进行了方案4—6的一系列试验。方案4的加热场的特点是,在图1a的基础上增加了南海地区的加热中心和澳大利亚北部的冷源中心^[7]。图4给出方案4积分第5天的850hPa流场,由图4看到, 105°E 附近的一支北越低空跨赤道气流被模拟出来,这可能说明南海热源和澳大利亚北部的冷源这一对冷、暖中心,对 105°E 附近的跨赤道气流的形成起了一定的作用。由图4还可以看到,南海—西太平洋地区的东亚季风槽和ITCZ仍未模拟出来。高空200hPa上位于 100°E 附近的向南跨赤道气流也没有模拟出来(图略)。

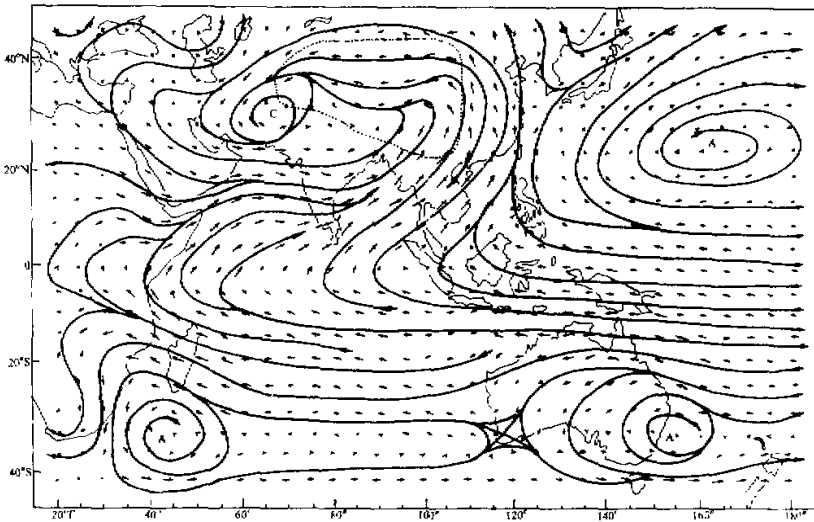


图4 方案4模拟的第5天850hPa流场图

图中点线以内区域的风和流线是虚假的

方案5采用经过修正的FGGE加热场,加热场的特点是除有孟加拉湾、南海地区的加热中心和澳大利亚北部的冷源外,中国东部有与降水相对应的加热中心(120°E 、 31°N),赤道太平洋地区存在有明显的纬向加热带(图1b)。图5给出了方案5积分第

5 天的流场. 可以看到, 在对流层低层 850hPa 流场上 (图 5a), 东亚季风环流系统中的南海—西太平洋地区的季风低压, 东亚季风低槽和 ITCZ 被很好模拟出来, 东亚季风系统中的其它主要成员: 西太平洋副高、105°E 附近的跨赤道气流、澳大利亚高压都被模拟出来, 与观测事实^[9] 基本一致, 澳高中心偏东. 由图 5b 看到在 200hPa 流场上, 100°E 附近的南越跨赤道气流也被成功地模拟出来, 并且 100°E 附近的一支比 45°E 的附近的一支强, 模拟的青藏高原高压中心位于 (85°E, 27°N), 这些都与观测事

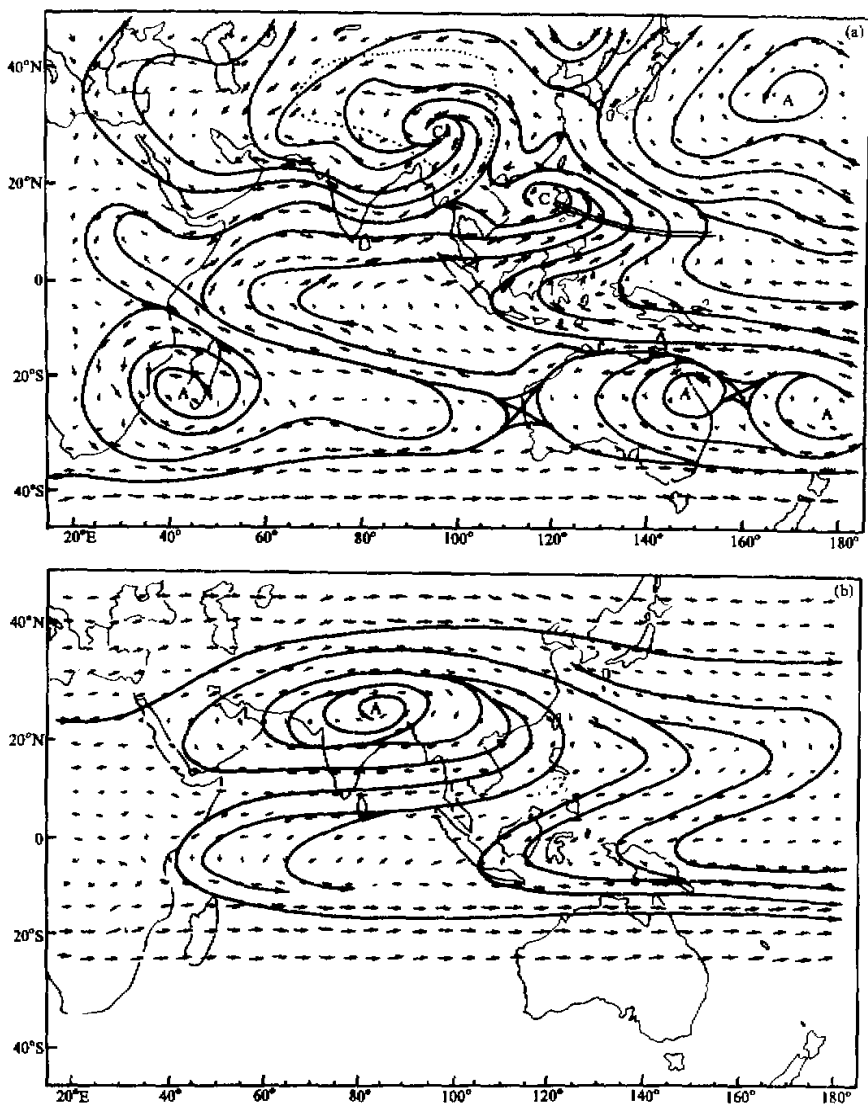


图 5 方案 5 模拟的第 5 天流场图

(a) 850hPa, (b) 200hPa, 其余说明同图 4

实^[9]非常一致。

为了试验地形的动力作用对东亚季风槽和ITCZ形成的作用,在方案6中去掉地形,只考虑非绝热热力作用,非绝热场的分布同方案5。图6给出方案6积分第5天的流场,a示850hPa,b示200hPa。由图6a看到,在低层850hPa图上,东亚季风槽和ITCZ和东亚季风环流系统的其它成员仍被模拟出来,但位于南海地区的季风低压不如方案5(图5a)明显,这可能表明青藏高原和沿海地形的阻挡对东亚季风低压的形成起到一定的作

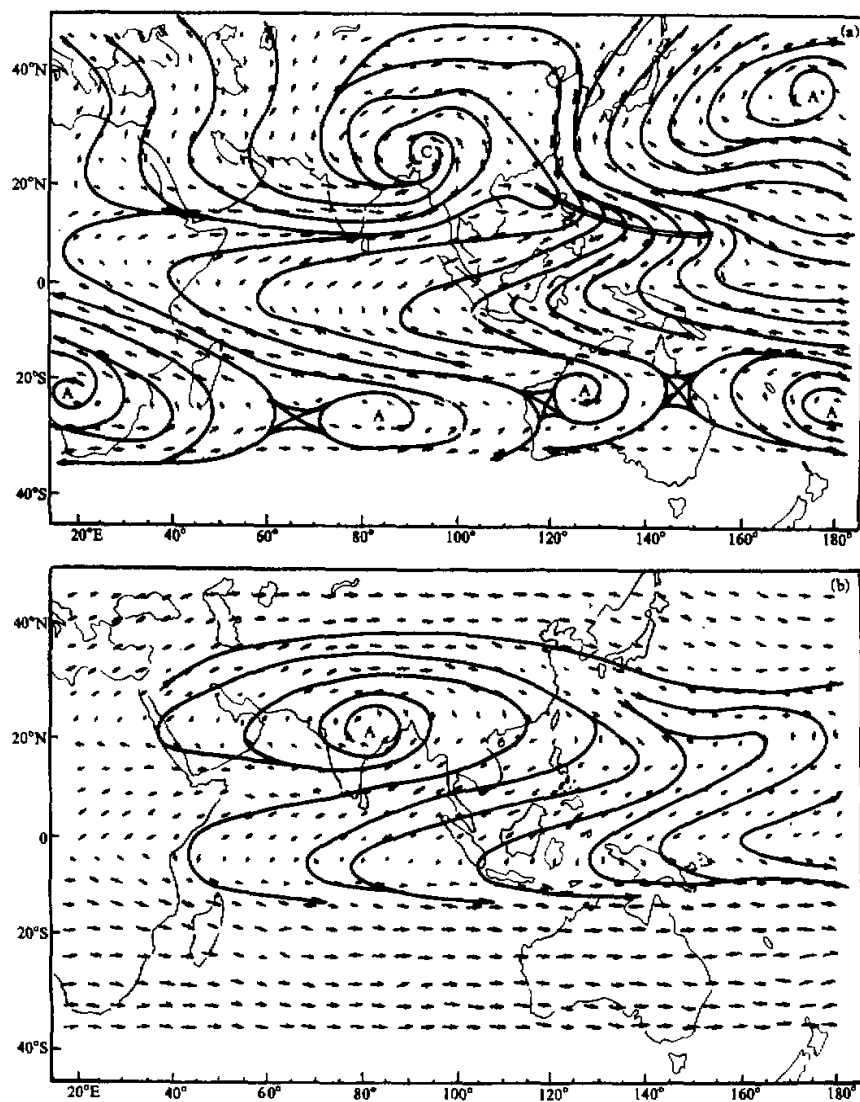


图6 方案6模拟的第5天流场图
(a) 850hPa, (b) 200hPa

用,另外比较图5a和图6a还可以看到,气流在 105°E 附近穿过赤道后转成西南气流,图5a中在马来西亚地区附近的西南气流比图6a中强,这表明地形的动力作用对东亚季风环流系统中的西南季风起着加强的作用,无地形时(图6a)澳高仍出现,高压中心与冷源较近,位于澳洲西部,有地形时(图5a)高压中心偏于澳洲东部。

在200hPa图上(图6b),位于 105°E 附近的南越跨赤道气流仍被模拟出来,但图6b中的这支南越跨赤道气流不如图5b中的强,这表明地形的动力作用对这支南越跨赤道气流起着加强的作用,与观测的平均实况相比,方案5(图5)的模拟结果最好,这表明欧亚大地形的动力作用对东亚季风环流系统的形成起到一定的加强作用。

方案4—6的模拟结果表明,中国东部的加热中心(120°E , 31°N)和赤道太平洋的纬向加热带对南海—西太平洋地区的东亚季风槽和ITCZ的形成起着重要的作用。地形的动力作用对东亚西南季风及南海低压环流起着加强作用,澳大利亚北部的冷中心和南海的热中心这一对冷汇热源对低空 105°E 附近的北越赤道气流的形成也起着一定的作用。

四、结 论

各种单因子的敏感性试验结果表明:

(1) 初始纬向均匀的夏季平均环流,在青藏高原、非洲等地区地形动力作用的单因子影响下,或孟加拉湾等地区大气非绝热热力作用的单因子影响下,都可以形成 45°E 附近的北越跨赤道气流,但强度不同,在地形动力和大气非绝热热力强迫的共同作用下,这支跨赤道气流明显的加强,只考虑地形的动力作用,不能形成印度季风低压和低压槽,只考虑大气的非绝热热力作用,模拟的低压中心及西风位置偏北,只有在二者的共同作用下这些系统才被成功地模拟,这表明青藏高原及非洲地形的动力作用同孟加拉湾地区的大气非绝热热力作用,对 45°E 附近的跨赤道气流、印度季风低压,低压槽的形成是同等重要的,而对于马斯克林高压的形成,地形的动力作用则是更重要的。

(2) 对于东亚季风环流中位于南海—西太平洋地区的东亚季风槽及ITCZ的形成,中国东部的加热中心与赤道太平洋区域的纬向加热带是极重要的,南海地区的热源和澳大利亚北部的冷源对 105°E 附近的低空北越赤道气流的形成是重要的。

总的来说,对于东亚季风环流系统的形成,大气非绝热热力作用比地形的动力作用更重要;而对于印度季风环流系统的形成,地形的动力作用和大气的非绝热热力作用都是同等重要的。本文的结果表明,初始纬向均匀的夏季平均环流,在光滑的真实地形的动力强迫和光滑的真实定常热力强迫共同作用下,东亚季风环流和印度季风环流系统,均可作为对外源的准定常响应,能成功地被模拟出来。

本文采用的是定常加热方案,实际大气的加热是复杂的,有待于更进一步的改进。

致谢:刘凯辉同志,赵光宇同志参加了本文部分上机计算工作,牛淑惠同志填写了本文部分计算结果图,王晓文同志帮助绘制本文的图,特此一并致谢。

参 考 文 献

- [1] He Haiyan et al., 1987, Onset of the Asian summer monsoon in 1979 and the effect of the Tibetan Plateau. *Monthly Weather Review*, 115, 1966—1995.

- [2] 陈隆勋、金祖辉、刘喜礼、施国强, 1983, 夏季亚洲地区热带环流的中期振荡, 海洋学报, 5, 575 — 585.
- [3] 金祖辉、陈隆勋, 1982, 夏季东亚季风环流系统的中期变化及其与印度季风环流系统的相互关系, 全国热带夏季风学术会议文集, 204 — 215.
- [4] 骆美霞、朱抱真、沈如金, 1986, 大地形对夏季北半球副热带高压形成作用的数值试验, 大气科学, 10, 258 — 265.
- [5] 朱抱真等, 1980, 一个包括地形和非绝热作用的原始方程数值模式, 气象学报, 38, 130 — 141.
- [6] Berkofsky, L., and Bertoni, E.A., 1955, Mean topographic charts for the entire earth, *Bulletin of American Meteorological Society*, 36, 350 — 354.
- [7] Chen Longxun et al., 1983, On the atmospheric heat source over asia and its relation to the summer circulation, Proceedings of the First Sino-American Workshop on Mountain Meteorology, Science Press, Beijing, China, 265 — 289.
- [8] Mingying Wei et al., 1983, Seasonal distribution of diabatic heating during the first GARP global experiment, *Tellus*, 35A, 241 — 254.
- [9] V. C. Mohanty, A. Hollingsworth and S. K. Dash, 1985, Asian summer monsoon circulation statistics, 1979 — 1984, European Centre for Medium Range Weather Forecasts, period I, 11 — 12.

Numerical Experiment on the Effects of the Large Scale Topography and Diabatic Heating on the Formation of East Asian Monsoon and Indian Monsoon Circulation

Luo Meixia and Zhang Kesu

(Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences)

Abstract

In this paper, the effects of the large scale topography and the stationary diabatic heating on the formation of East Asian summer monsoon and Indian summer monsoon circulation systems are investigated by using a three-level primitive equation channel model in σ -coordinate. The major elements of the East Asian summer monsoon and the Indian summer monsoon circulation systems as a results of response of motion fields to topographic and thermal forcing are well simulated.

Key words: East Asian monsoon circulation; Indian monsoon circulation; Dynamical effect of topography; Effect of diabatic heating.