

加热场的三维结构对亚洲夏季风环流的影响*

林本达 张劲松

(北京大学地球物理系)

提 要

本文利用原始方程线性波模式考察了加热场的三维结构对夏季定常行星波特性的影响, 比较了不同加热方式对亚洲夏季风环流的形成及维持所起的作用。指出与低纬深厚积云对流相联的凝结加热对亚洲夏季风环流所起的作用和大气定常行星波响应对加热场的垂直结构的敏感性。

一、引 言

大气定常行星波反映季节平均环流的特点。定常行星波的成因及维持机制的研究有助于揭示决定不同季节平均环流的基本因子。已有不少作者讨论过冬夏两季平均环流维持的机制^[1-6]。

南亚是夏季风特别显著的地区, 夏季风的爆发、间断或持续以及与之相联的行星环流的东西振荡和南北跳跃等变化, 直接关系着我国雨季的进程及雨带的分布, 对我国的天气气候有重大的影响。夏季风的研究具有重大的理论和实际意义。

关于亚洲夏季风的成因, 一般认为主要是由于海陆分布的影响, 可能与高原的作用也有关。Lin(1983)^[5]的数值试验表明, 高原地形的单纯动力爬坡强迫效应并不能产生符合实际的夏季风环流, 认为热力因子对亚洲夏季风应起主导作用。黄荣辉(1986)^[6]也持这种看法。

加热场的强迫效应不同于地形。它不仅出现在地面, 而且出现在大气中, 是一种三维的强迫函数。不同的加热方式, 其加热场有着不同的三维结构, 它们所强迫的定常行星波的结构就可能不同。在一些数值试验中, 人们常人为地规定某种形式的加热场垂直分布^[1,7,8]。这种人为规定的加热场垂直分布对结果的影响, 需要加以考察。Sanka-Rao(1965)^[9]曾根据其简单的准地转 β 平面模式的计算, 认为定常行星波对加热场的垂直分布并不敏感, 垂直廓线的选择可以多少带有任意性。这个结论需要重新加以考察和验证。

本文利用一个较为完善的线性波模式来考察加热场的三维结构对夏季定常行星波特性的影响, 并且讨论不同的加热方式对亚洲夏季风环流所起的作用。

二、模式的描述

本文采用以 $z = -H \ln p/p_0$ 为垂直坐标的球坐标原始方程线性波模式。模式方程的

* 本文于 1986 年 11 月 26 日收到, 于 1987 年 7 月 22 日收到修改稿。该文系国家自然科学基金资助项目。

详细推导见Lin(1982)^[4], 下面给出简略的描述。

该模式下, 线性化扰动方程的定常形式为

$$\begin{cases} \frac{\bar{u}}{a \cos \theta} \frac{\partial u'}{\partial \lambda} + \left[\frac{1}{a \cos \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} (\bar{u} \cos \theta) - 2\Omega \sin \theta \right] v' + \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} w' = -\frac{1}{a \cos \theta} \frac{\partial \phi'}{\partial \lambda} - \kappa u' \\ \frac{\bar{u}}{a \cos \theta} \frac{\partial v'}{\partial \lambda} + \left[2\Omega \sin \theta + \frac{2\bar{u}}{a} \tan \theta \right] u' = -\frac{1}{a} \frac{\partial \phi'}{\partial \theta} - \kappa v' \\ \frac{\partial \phi'}{\partial z} = -\frac{RT'}{H} \\ \frac{1}{a \cos \theta} \frac{\partial u'}{\partial \lambda} + \frac{1}{a \cos \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} (v' \cos \theta) + \frac{\partial w'}{\partial z} - \frac{w'}{H} = 0 \\ \frac{\bar{u}}{a \cos \theta} \frac{\partial T'}{\partial \lambda} + \frac{\partial \bar{T}}{a \partial \theta} v' + \left(\frac{R\bar{T}}{c_p H} + \frac{\partial \bar{T}}{\partial z} \right) w' = \frac{Q'}{c_p} - \kappa_T T' \end{cases} \quad (1)$$

其中 Q' 是扰动加热场, κ 和 κ_T 分别是雷莱摩擦系数和牛顿冷却系数, 其它符号的意义依惯例。

引进如下的无量纲变量:

$$\begin{cases} u^* = u' \cos \theta / 2\Omega a, & \bar{u}^* = \bar{u} \cos \theta / 2\Omega a, & v^* = v' \cos \theta / 2\Omega a \\ w^* = w' / 2\Omega H, & z^* = z / H, & \phi^* = \phi' / (2\Omega a)^2 \\ T^* = RT' / (2\Omega a)^2, & \bar{T}^* = R\bar{T} / (2\Omega a)^2, & Q^* = RQ' / (2\Omega)^3 a^2 c_p \end{cases} \quad (2)$$

代入方程组(1), 化成无量纲扰动变量满足的方程组, 再对这些无量纲扰动变量取纬向谐波分解, 即令

$$(u^*, v^*, w^*, \phi^*, Q^*) = (u, v, w, \phi, Q) e^{ik\lambda + z^*/2} \quad (3)$$

可以得到其单波复振幅 u, v, w, ϕ 和 Q 满足的方程组, 经过消元, 最后可以化成对扰动位势场复振幅 ϕ 的二阶非齐次偏微分方程:

$$A \frac{\partial^2 \phi}{\partial \theta^2} + B \frac{\partial^2 \phi}{\partial \theta \partial z^*} + C \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^{*2}} + D \frac{\partial \phi}{\partial \theta^*} + E \frac{\partial \phi}{\partial z^*} + F \phi = G \quad (4)$$

其中 G 是加热场强迫项, 其形式为

$$G = -i \left[\frac{1}{\cos \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} (\tilde{\beta} \tilde{\lambda}) + \frac{k \tilde{\omega}_D \tilde{\lambda}}{\cos^2 \theta} + \frac{1}{2S} + \frac{1}{S^2} \frac{\partial S}{\partial z^*} \right] Q - \frac{i \tilde{\beta} \tilde{\lambda}}{\cos \theta} \frac{\partial Q}{\partial \theta} + \frac{i}{S} \frac{\partial Q}{\partial z^*} \quad (5)$$

(4)中的系数 A, B, C, D, E 以及(5)中的参数 $\tilde{\beta}, \tilde{\lambda}, \tilde{\omega}_D, S$ 等都是基本状态(\bar{u} 和 \bar{T})及纬度的已知函数, 其具体函数形式可参看[4]。

作为经向侧边界条件, 取

$$\begin{cases} \theta = \frac{\pi}{2}: \phi = 0 \\ \theta = 0: \frac{\partial \phi}{\partial \theta} = 0 \end{cases} \quad (6)$$

作为垂直边界条件, 在模式的顶层 z_T 取

$$z = z_T: \phi = 0 \quad (7)$$

对夏季, 取 $z_T = 40$ km, 由于夏季平流层盛行的东风基本气流阻止行星波上传, (7)的假定是合理的, 不会出现波的反射。在下边界, 不考虑地形, 即取 $w = 0$, 将热力学方程应用于

地面, 可得如下的边界条件:

$$z=0: D_0 \frac{\partial \phi}{\partial \theta} + E_0 \frac{\partial \phi}{\partial z^*} + F_0 \phi = iQ_0 \quad (8)$$

其中 D_0, E_0, F_0 也是基本气流的已知函数, 而 Q_0 是地面的加热强迫。

只要基本气流 \bar{u} 和加热场 Q' 的分布给定, 方程(4)即可在边界条件(6)–(8)下, 用差分法求得数值解。解出 ϕ 后, 可求得对单波扰动位势场的振幅和位相的纬度-高度分布。再将求得的扰动位势场 ϕ' 对波数求和, 可以得到合成行星波在各个高度的水平波型, 亦即强迫的定常行星波环流。方程(4)的差分形式及数值解法可参看[4]。

三、数值试验的结果

本文的目的是考察加热场的三维结构对夏季风环流的影响。所用的潜热加热场是从降水资料^[10]换算的。夏季的降水分布如图 1 所示。根据对这个潜热场及 Budyko 给出的地表感热通量场^[11]做的谱分析发现, 两者的纬度分布比较相似, 为了简单起见, 我们用由

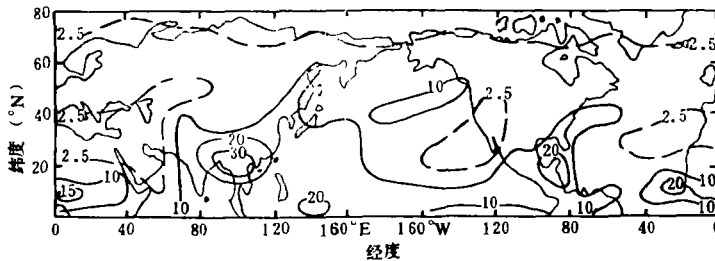


图 1 夏季的降水分布
(cm/月, 取自[10])

降水换算的潜热场统一地代表加热场的水平分布, 而以不同的垂直分布来区别不同的加热方式。我们假设了几种不同的加热场垂直分布, 分别计算和比较它们所产生的扰动位势场的单波(取波数 1)振幅的纬度-高度分布及合成行星波(取波数 1 到 4)在地面及对流层上层(15 km)的水平波型。下面讨论数值试验的结果。

1. 潜热加热对夏季风环流的重要性

大气热机的主要燃料来自地面, 地面通过感热、潜热和辐射等加热形式影响大气, 其中感热加热主要集中在地表附近, 属于边界强迫效应; 而潜热加热则不同, 地面输给大气的水汽要经过垂直抬升, 在某高度以上发生凝结才能释放潜热。这种加热主要出现在大气中, 属于三维的空中加热。现在来比较这两种不同的加热垂直分布所产生的定常行星波响应的差别。

我们假设潜热加热的垂直分布为

$$CQ(z) = Q_1 \sin \frac{\pi z}{D_1} \quad (9)$$

其中 $CQ(z)$ 是扰动加热场随高度变化的部分, Q_1 是对气柱的总加热按(9)垂直分布后在极值层 ($D_1/2$) 的加热强度, 而 D_1 表示潜热加热的垂直厚度。考虑到在低纬盛行深厚的积云对流, 凝结加热极大值出现的高度较高, 加热的厚度较厚, 而高纬主要是大尺度凝结加

热,云的高度较低,厚度较薄,我们在 45°N 以北和以南,分别取 D_1 为 7.5 及 15 km,这种垂直分布与水平分布结合得到的潜热加热的纬度-高度分布与 Newell 等^[12] 给出的分布相近。这种潜热加热所强迫的定常行星波结构如图 2 所示,图 2 a 所示的波数 1 的振幅结

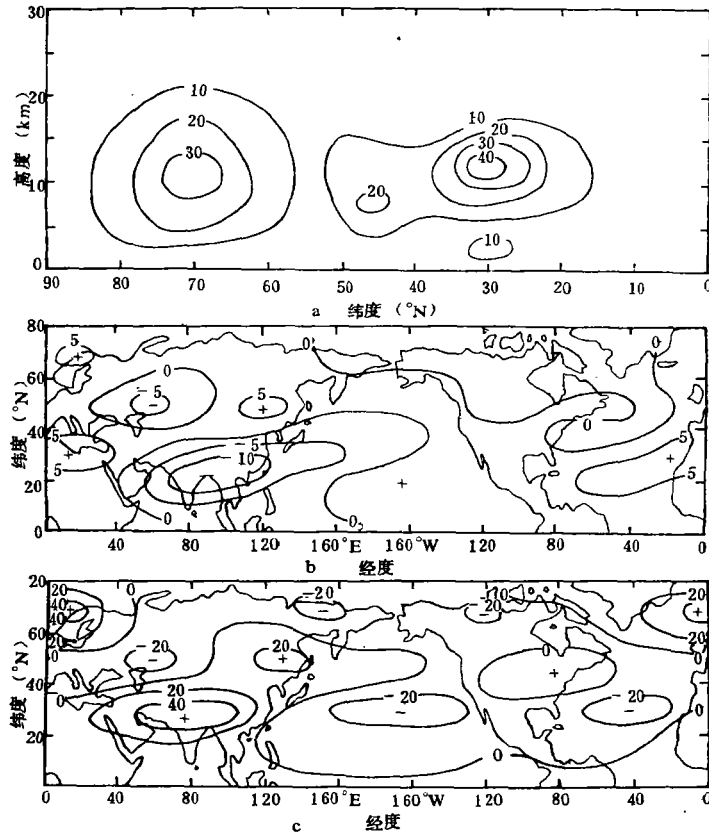


图 2 潜热加热所强迫的定常行星波

(a 为波数 1 的振幅结构; b, c 为合成行星波在地面及 15 km 的波型)

构与 Defant 等^[13] 给出的观测分布相似,图 2b, 2c 所示的水平波型与 Egger^[2] 给出的观测的流型也较为一致,尤其是在南亚地区,地面的印度季风低压及对流层上层的南亚季风高压都十分显著。与图 1 相应的潜热加热场的分布相对照可以看到,南亚地区这种高低层反位相的明显的季风环流系统是和这个地区夏季存在着强大的潜热热源的强迫效应密切相关;而在北美,由于热源很弱,高低层的系统都不明显,季风的特点也不明显。结果表明,亚洲夏季风环流可以很好地用潜热加热的三维空中强迫效应加以解释。

现在来考察纯粹下边界加热的强迫效应。我们取大气内部的强迫项(即方程(4)中的 G 项)为零,而将对整个气柱的加热都加在地面(即加在下边界条件(8)的 Q_0 项),这种加热方式所强迫的定常行星波结构如图 3 所示。地面加热强迫的行星波的振幅随高度迅速衰减,到对流层中上层,响应已很微弱;其水平波型,在地面的位相分布与图 2 的相似,印度低压也出现,但强度大增,这是将对整个气柱的加热都集中于地面的结果。但是,这种加热不能在对流层上层产生强大而宽广的南亚季风高压。我们还试验过低层有浅薄的加热

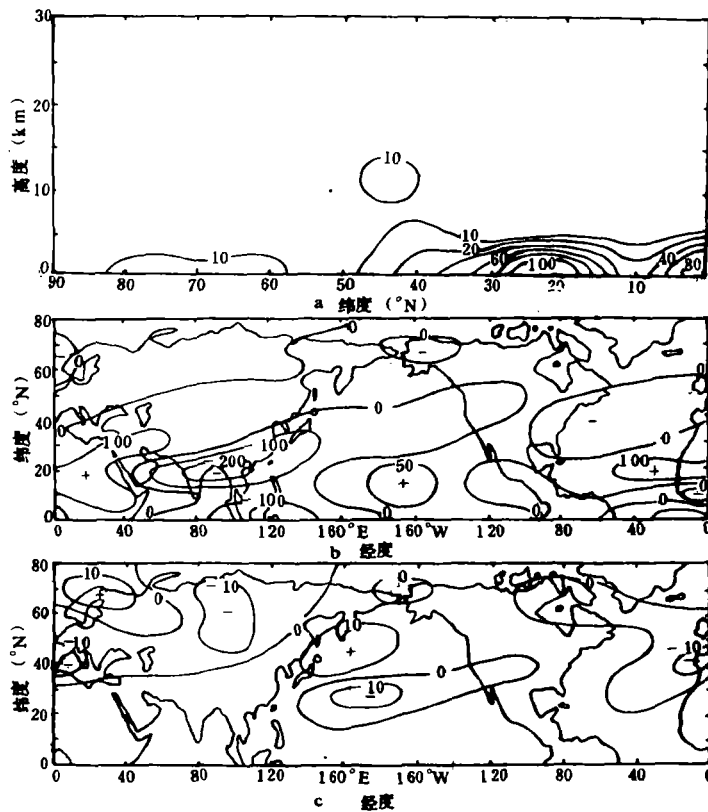


图3 地面加热强迫的定常行星波
(说明同图2)

的情形,让加热强度由地面向上呈指数衰减,即令

$$CQ(z) = Q_2 e^{-\tau z/D_1} \quad (10)$$

结果发现(图略),这种加热强迫的行星波结构与下边界加热情形(图3)相似,高层的响应仍然很弱,也不能产生显著的南亚季风高压。

上述比较试验说明,集中于下边界附近的感热或地面辐射加热,对夏季对流层低层的季风系统的形成和维持有一定的作用,但是,作为亚洲夏季风环流显著特点之一的对流层上层的南亚高压,主要是由与潜热加热相联为三维空中加热所强迫而形成的。

2. 积云对流凝结加热的重要性

上面的比较试验说明了凝结加热对夏季风环流的重要性。这一点也被陈受钧和 Dell'osso(1985)^[14]指出过。他们用ECMWP模式做的数值试验表明,亚洲夏季风的大尺度特点用包含所有物理过程的模式可以很好地被模拟出来,但是,在不含潜热反馈过程的试验中,亚洲夏季风则不出现。

众所周知,凝结加热主要与云过程相联。然而,中高纬度的锋面云系和低纬的积云团,由于抬升凝结的机制不同,其相应的加热场的三维结构也不相同,因而它们对亚洲夏季风环流的贡献就可能不同。根据大尺度云系及积云对流具有不同的云高和云厚的特点,我们假定在(9)中较小的 D_1 值(取7.5 km)代表大尺度云系,较大的 D_1 值(取15 km)

代表深厚的积云对流。根据这种假定,我们做了如下三个比较试验:(1)低纬无加热,只有中高纬度的大尺度凝结加热,(2)高低纬度都只有大尺度凝结加热,(3)中高纬度无加热,只有低纬深厚积云对流的凝结加热,结果发现,中高纬度的大尺度凝结加热在低纬产生的行星波响应很弱,既不能在地面产生印度低压,也不能在高层强迫出南亚高压(图略)。当高低纬都只有大尺度凝结加热时,地面可出现印度低压,但高层不出现南亚高压(见图4)。与上两种情形不同,当只有低纬深厚积云对流的凝结加热时,在亚洲季风区的

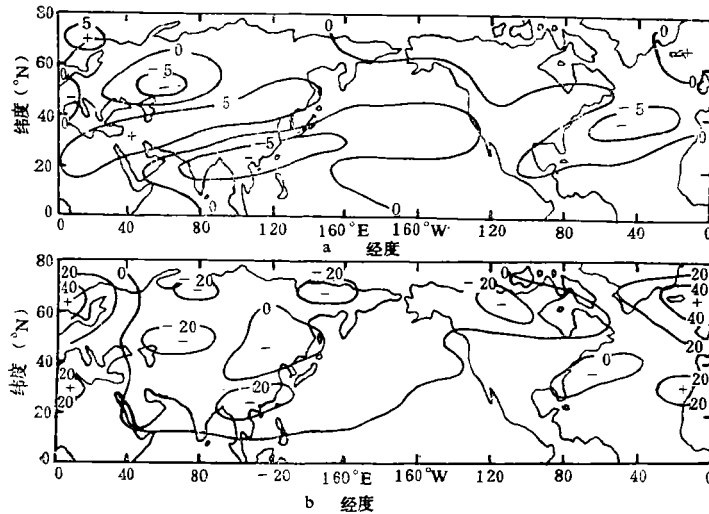


图4 高低纬都只有大尺度凝结加热时的定常行星波流型
(a 地面, b 15 km)

高低层强迫出的行星波流型(见图5)与实际的夏季风环流十分相似。这清楚地说明,亚洲的夏季风环流主要是由热带地区有组织的积云对流的凝结加热产生和维持的。我们还做过只给地面加热,而大气中的加热用常用的大尺度凝结加热公式加以参数化的试验,其结果并不能模拟出符合实际的夏季风环流,这可能也是由于我们的模式未能包含积云对流参数化方案的缘故。总之,我们的试验强调深厚积云对流的凝结加热对亚洲夏季风环流的重要性。积云对流是把地面的加热转变成三维的空中加热的有效运动形式,它不但通过凝结潜热的释放,而且还通过其辐射及垂直输送效应改变加热场的三维分布,从而影响定常行星波环流。

3. 定常行星环流对加热场垂直结构的敏感性

由以上的试验已经看到,加热场的不同垂直分布所强迫的定常行星波结构有相当大的差别,有的差别主要表现在系统的强度上(如图2和3的地面),有的不但强度有差别,而且系统的位相分布也有明显的差别(如图2,3,4的15 km)。为了进一步说明问题,让我们再来考察一种高低层反号的加热场垂直分布:

$$CQ(z) = Q_3 \cos \frac{\pi z}{D_1} \quad (11)$$

这种垂直结构的加热场所强迫的行星波(图6),在亚洲季风区的地面,强度比图2要强得多,在高层与图2几乎反位相。

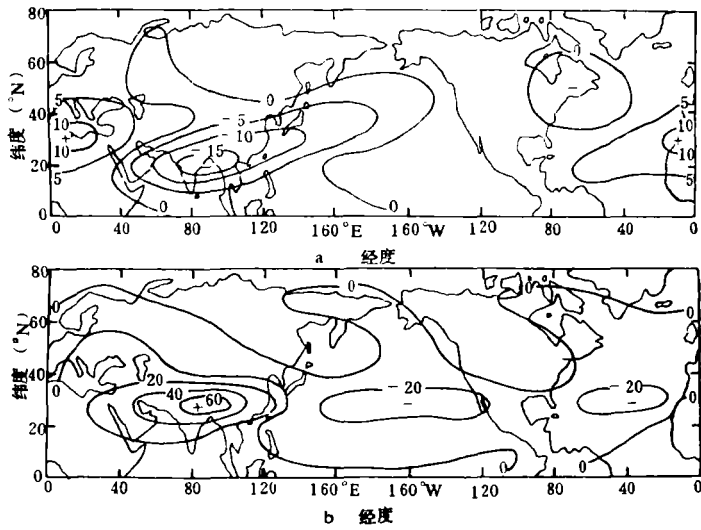


图 5 低纬积云对流凝结加热强迫的定常行星波环流
(说明同图 4)

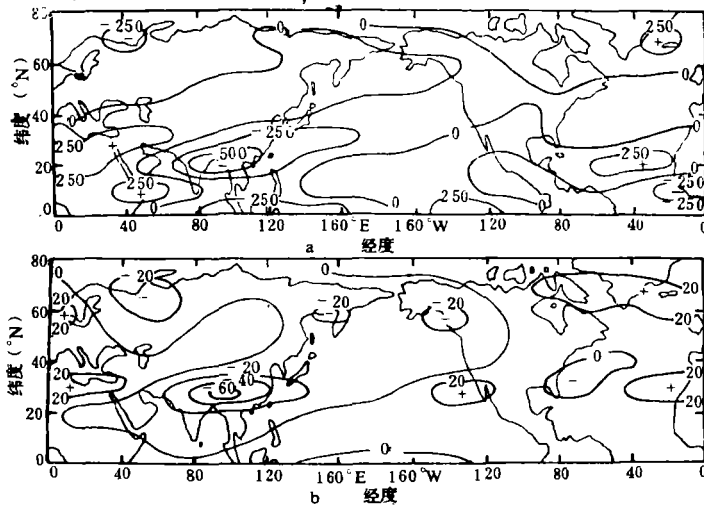


图 6 垂直结构(11)的加热场强迫的定常行星波流型
(说明同图 4)

总之,我们利用球坐标原始方程线性波模式的比较试验发现,定常行星波环流对加热场的垂直结构是敏感的。相对而言,加热场的垂直结构对地面系统的位相影响要小些(对强度的影响仍很大),而对高层系统的强度和位相都有较显著的影响。因此,我们认为 Sanka-Rao 早年关于行星波对加热场垂直分布的敏感性的结论^[9]需要加以修正。Sanka-Rao 之所以得出不敏感的结论,可能与他采用的准地转 β 平面模式有关。这种模式由于没有考虑地球的球形几何和基本气流的纬度变化,不能合理地描述行星波的经向传播,因而不能对强迫行星波的结构给出正确的结论。

我们还比较了加热强迫项 G 中各个因子的相对重要性。由(5)看到, G 包含三个因子,

即加热场本身 Q , 它的纬度导数 $\partial Q/\partial\theta$ 及垂直导数 $\partial Q/\partial z^*$ 。计算表明, 与之相联的三项极大值的比为6:1:11, 亦即加热场的垂直导数项具有最大的强迫效应。我们还分别计算了这三项所单独强迫的定常行星波波型。结果表明(图略), 加热场本身及其纬度导数这两个因子都不能产生符合实际的亚洲夏季风环流, 而加热场的垂直导数项强迫的波型与图2很相似, 高低层的亚洲夏季风环流系统都清楚地出现。这表明, 加热场的垂直导数项在非绝热强迫项 G 中占主导地位, 对亚洲夏季风环流起决定性的作用, 并进一步说明了加热场垂直结构对夏季定常行星环流影响的敏感性和重要性。

四、结 语

本文使用球坐标原始方程线性波模式考察了加热场的三维结构对夏季定常行星波环流的影响, 指出了与低纬深厚积云对流的潜热释放相联的空中加热对亚洲夏季风环流所起的重要作用以及定常行星波结构对加热场垂直分布的敏感性。

由于还缺乏对加热场真实的垂直结构的认识, 在我们的计算中, 只根据观测, 假设了潜热加热场强度的垂直分布形式, 而没有考虑加热场在不同高度的位相分布的差别。实际上, 由降水换算的潜热加热场反映的是受地形和环流影响后的潜热反馈效应, 与地面加热场(潜热, 感热)的位相分布可能不同, 需要进一步搞清地面加热与大气中加热之间的强度及位相关系, 并在加热场垂直分布中考虑位相关系。当然, 由于凝结加热与垂直环流直接相联, 一个气柱中通常有同号的垂直运动。因此不考虑潜热加热在大气不同高度的位相差别不会造成大的误差。

此外, 对大尺度凝结加热和积云对流的凝结加热, 我们只是通过假定它们具有不同的加热厚度及极值高度, 在强迫效应的空间分布上形式地加以区别, 而不是从物理过程的描述上加以区别, 这也是一个不足之处。虽然大尺度凝结加热可以通过适当公式加以参数化, 但由于该模式未能加进积云对流参数化方案, 因而无法从物理过程上对这两种形式凝结加热的强迫效果加以比较。这种比较需通过GCM型模式的试验才能较好地做到。

参 考 文 献

- [1] Sanka-Rao, M., and B. Saltzman, On a steady-state theory of global monsoon, *Tellus*, 21, 308—329, 1969.
- [2] Egger, J., On the theory of planetary standing waves: July, *Beitr. Phys. Atmos.*, 51, 1—14, 1978.
- [3] Huang Ronghui, and K. Gambo, The response of a hemispheric multi-level model atmosphere to forcing by topography and stationary heat sources, *J. Meteor. Soc. Japan*, 60, 78—105, 1982.
- [4] Lin Benda, The behavior of winter stationary planetary waves forced by topography and diabatic heating, *J. Atmos. Sci.*, 39, 1206—1226, 1982.
- [5] Lin Benda, The behavior of stationary waves and summer monsoon, *J. Atmos. Sci.*, 40, 1163—1177, 1983.
- [6] 黄荣辉, 夏季西藏高原对北半球定常行星波形成的热力作用, *大气科学*, 10, 1, 11—8, 1986.
- [7] Holton, J. R., A diagnostic model for equatorial wave disturbances: the role of vertical shear of the mean zonal wind, *J. Atmos. Sci.*, 28, 55—64, 1971.
- [8] Murakami, T., Steady and transient waves excited by diabatic heating sources during summer monsoon, *J. Atmos. Sci.*, 31, 340—357, 1974.
- [9] Sanka-Rao, M., On the influence of the vertical distribution of stationary heat sources and sinks in the atmosphere, *Mon. Wea. Rev.*, 92, 417—420, 1965.
- [10] Schutz, C., and W. L. Gates, Global climatic data for surface, 800 mb, 400 mb: July, R-1029—

- ARPA, The Rand Corporation, Santa Monica, CA, 180 pp, 1972.
- [11] Budyko, M. I., *Climate and Life*, Academic Press, 508 pp, 1974.
- [12] Newell, R. E., J. W. Kidson, D. G. Vincent and G. J. Boer, The general circulation of the tropical atmosphere and interaction with extratropical latitudes, Vol. 2, The Colonial Press Inc., 258 pp, 1974.
- [13] Defant, A. Osthaus, and P. Spleh, The global energy budget of the atmosphere. Part II, *Beitr. Phys. Atmos.*, **52**, 229—246, 1979.
- [14] Chen Shou-jun, and L. Delloso, Numerical experiments on the sensitivity of the monsoon circulation to differential heating, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **112**, 93—112, 1986.

THE EFFECTS OF THREE DIMENSIONAL STRUCTURE OF HEATING FIELD ON THE SUMMER MONSOON CIRCULATION IN ASIA

Lin Benda Zhang Jingsong

(Department of Geophysics, Peking University)

Abstract

In this paper, a primitive equation linear wave model is used to examine the effects of three dimensional structure of heating field on the behavior of stationary planetary waves in summer and to compare the roles of different heating functions for the formation and maintenance of summer monsoon circulation in Asia. It is shown that the aloft heating connected with latent heating, especially the deep condensation heating associated with cumulus convection in low latitudes, plays a crucial part for the Asian summer monsoon and the structures of planetary wave responses are quite sensitive to the vertical distribution of heating.