

南亚地区季风与邻近海域海温相互影响的初步研究*

刘莉红 郑祖光 夏友龙 吴 洪

(中国气象局培训中心, 北京, 100081)

摘 要

文中利用简化的海-气耦合模式及低谱方法和多平衡态理论, 讨论了南亚地区冬夏季风与邻近海域海温季节变化之间的相互影响。结果表明: (1) 冬季风较强时, 冬季海温较低, 翌年夏季海温也较低; 反之亦然。夏季风较强时, 夏季海温较高; 反之亦然。夏季风强弱对冬季海温的影响不明显。(2) 海-气相互作用使南亚冬季风和夏季风都加强。海温经向梯度使冬季风加强, 而夏季风减弱。

关键词: 南亚季风, 海表温度, 海-气耦合, 低谱方法, 多平衡态。

1 引 言

南亚季风是南亚地区非常重要的天气气候现象, 是全球大气环流的重要组成部分, 因而受到人们的关注^[1~6]。例如, 关于地形对南亚季风的影响, 文献[2]用描写南亚季风的赤道大气平衡模式进行研究, 指出地形效应对于冬夏季风时间长度的非对称性是非常重要的; 地形的动力作用在亚洲地区 6 月和 10 月大气环流突变中起着主导作用; 地形作用使冬季风和夏季风这两个稳定的平衡态产生明显的非对称性。我们知道, 在南亚季风区, 20°N 以南的广阔地区是海洋^[1], 因此用海-气耦合模式来讨论南亚季风与海洋的相互影响更为合适。从海-气相互作用的角度看, 南亚地区冬夏季风对其邻近海域的海流和海温会有影响; 而海洋(尤其是海洋斜温层)对南亚季风也会有影响, 并通过热通量和海温的重新分布(海温梯度的变化)体现出来。因此, 采用动力学方法研究南亚地区海-气相互影响, 对于深入认识南亚冬季风和夏季风的强弱及其相互转换的机理, 具有重要的意义。

本文采用非线性海温方程以及赤道平衡模式, 在海温方程中引入海-气交换作用, 构成一个海-气耦合模式。进而通过低谱途径将其简化成便于分析

讨论的截谱模式, 用多平衡态及其稳定性的理论与方法, 分别讨论了南亚冬夏季风对邻域海温季节变化的影响, 以及海-气相互作用和海温经向梯度对南亚季风的影响。

2 基本方程组

2.1 大气方程

描写南亚季风的赤道平衡模式为^[2]:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right) + v \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial v}{\partial y} \frac{\partial u}{\partial y} - \beta_y \frac{\partial v}{\partial y} - \beta_v = -\gamma \frac{\partial u}{\partial y} \\ \beta_u + \beta_y \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} = 0 \\ C_0^2 \frac{\partial v}{\partial y} = Q + v \frac{\partial h}{\partial y} - \varepsilon \phi \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中包含了地形和加热作用; γ 是 Rayleigh 型摩擦系数, ε 是大气中牛顿型冷却系数, u, v 分别是 x, y 方向的风速, ϕ 是扰动位势高度; Q 是大气的热力强迫, 在对流层低层 $Q > 0$ ($Q < 0$) 为热源(热汇); $C_0 = \sqrt{gh}$ 是长重力波速度, 其中 h 是某一层大气的相当厚度, 可以选择适宜的 h 值模拟对流层低层的运动。

在低纬地区, 下垫面主要是海洋, 为了突出海

* 初稿时间: 2003 年 3 月 3 日; 修改稿时间: 2003 年 6 月 15 日。
资助课题: 国家自然科学基金(49875018)。

气相互作用, 参照文献[1], 将式(1)的第3方程写成:

$$C_0^2 \frac{\partial v}{\partial y} = Q + \mu(a_0\phi - T_s) - \varepsilon\phi \quad (2)$$

式(2)右端第2项为海-气之间的感热交换作用项^[8], μ 为热交换系数, a_0 为经验订正系数, T_s 为海表层温度(SST)。

2.2 海温方程

海温方程为^[3]:

$$\frac{dT_s}{dt} = H_s + \lambda(a_0\phi - T_s) - \alpha_s T_s \quad (3)$$

式(3)中 H_s 表示海温场的已知热源, λ 是海-气热交换系数, α_s 为海洋中牛顿型冷却系数。在轴对称坐标中, $\frac{\partial}{\partial x} = 0$, 则式(3)变为:

$$\frac{\partial T_s}{\partial t} + v_s \frac{\partial T_s}{\partial y} = H_s + \lambda(a_0\phi - T_s) - \alpha_s T_s \quad (4)$$

式(4)中, v_s 为 y 方向的洋流; 式(4)左端第2项是海温平流项, 因此是非线性方程。如果不考虑 H_s , 式(4)同文献[7]。

Ekman 根据大量的观测资料, 求出洋流 v_s 与风速 v_a 有如下经验关系^[8]:

$$v_s = (0.0127 / \sqrt{\sin\theta}) v_a \quad (5)$$

式(5)把洋流和表面风联系起来, 其中 θ 是纬度。在赤道地区, 若平均取 $\theta = 5^\circ$, 则 $\sin\theta = 0.0875$, 代入式(5), 用 v 代替 v_a , 有:

$$v_s = \acute{a}v \quad (6)$$

式(6)中, $\acute{a} \approx 0.04$, 是经验常数。

把式(6)代入式(4), 得:

$$\frac{\partial T_s}{\partial t} + \acute{a}v \frac{\partial T_s}{\partial y} = H_s + \lambda(a_0\phi - T_s) - \alpha_s T_s \quad (7)$$

将式(7)线性化, 令 $H_s = \bar{H}_s + H'_s$, $\phi = \bar{\phi} + \phi'$, $T_s = \bar{T}_s + T'_s$, 这里 \bar{T}_s 是全年平均温度, T'_s 是海温距平, 冬季 $T'_s < 0$, 夏季 $T'_s > 0$, 代入式(7)后经简化得到:

$$\frac{\partial T_s}{\partial t} + \acute{a}v \frac{\partial T_s}{\partial y} + \acute{a}v \frac{\partial T_s}{\partial y} = H_s + \lambda(a_0\phi - T_s) - \alpha_s T_s \quad (8)$$

式(8)中已经略去“'”号。

2.3 海-气耦合方程组

由式(8)及式(1)构成一个描述南亚区域季风的

海-气耦合模式:

$$\begin{cases} \frac{\partial T_s}{\partial t} + \acute{a}v \frac{\partial T_s}{\partial y} + \acute{a}v \frac{\partial T_s}{\partial y} = H_s + \lambda(a_0\phi - T_s) - \alpha_s T_s \\ \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right) + v \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial v}{\partial y} \frac{\partial u}{\partial y} - \beta \frac{\partial v}{\partial y} - \beta v = - \gamma \frac{\partial u}{\partial y} \\ \beta u + \beta_y \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} = 0 \\ C_0^2 \frac{\partial v}{\partial y} = Q + \mu(a_0\phi - T_s) - \varepsilon\phi \end{cases} \quad (9)$$

方程组(9)包含两种物理过程:(1) 大气受到海陆的热力强迫, 陆地、海洋对大气不同的热力强迫, 是季风的基本驱动力;(2) 海温由于受到南亚季风的风吹流而改变其分布。

3 方程组的简化

为了使方程组(9)便于分析讨论, 首先将它无量纲化, 然后作谱展开并截取谱分量。

3.1 无量纲方程

应用尺度分析方法, 设 $y = L_0 y'$, $(u, v) = U_0 (u', v')$, $t = L_0^2 t' / v_0$, $\phi = v_0^2 \phi'$, $T_s = T_0 T'_s$, 代入式(9), 得到无量纲化方程组:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right) + v \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial v}{\partial y} \frac{\partial u}{\partial y} - \beta_y \frac{\partial v}{\partial y} - \beta v = - \gamma \frac{\partial u}{\partial y} \\ \beta u + \beta_y \frac{\partial u}{\partial y} = - \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} \\ \frac{\partial v}{\partial y} = - \acute{Q} - \acute{\varepsilon}\phi + a_1\phi - a_2 T_s \\ \frac{\partial T_s}{\partial t} + a_3 v + \acute{a}v \frac{\partial T_s}{\partial y} = H_s + \acute{\lambda}\phi - \lambda_1 T_s \end{cases} \quad (10)$$

式(10)中, $\beta = \frac{\beta L_0^2}{U_0}$, $\gamma = \gamma \frac{L_0}{U_0}$, $\acute{\varepsilon} = \frac{\varepsilon U_0 L_0}{C_0^2}$, $\acute{Q} =$

$$\frac{Q L_0}{C_0^2 U_0}, a_1 = \frac{\mu L_0 a_0 U_0^2}{C_0^2}, a_2 = \frac{\mu T_0 L_0}{C_0^2 U_0}, a_3 = \frac{\acute{a} L_0 \partial T_s}{T_0 \partial y},$$

$$\acute{\lambda} = \lambda \frac{a_0}{T_0}, \lambda_1 = \lambda + \alpha_s.$$

3.2 谱展开和截谱模式

将式(10)中变量 u, v, ϕ, Q, H_s 以及 T_s 分别作正交函数展开, 并取最简单的情形, 即只包含2阶抛物柱函数:

$$(u, v, \phi, Q, H_s, T_s) = \sum_{n=0}^N (u_n, v_n, \phi_n, Q_n, H_n, T_n) D_n \quad (11)$$

其中 D_n 为抛物柱函数; $D_0, D_1, D_2 = (1, y, y^2 - 1) e^{-y^2/4}$; 对于 T_s, H_s, u, ϕ 取 $n = 1, 2$; 对于 Q, v 取 $n = 0, 1$ 。

展开式(11)中, 后面分析用到的几个新变量的含义如下: T_1 和 T_2 表示海温距平的主要结构, 文中 $T_1 > 0$ 是夏季海温, $T_1 < 0$ 是冬季海温。 H_1 和 H_2 表示海洋的热力强迫, 文中 H_1 特指太阳辐射(对全年的)距平值, 冬季 $H_2 < 0$, 夏季 $H_2 > 0$ 。 u_1, u_2 和 v_0, v_1 表示对流层低空气流的主要结构, 文中 v_0 特指南亚地区的越赤道气流, 冬季风 $v_0 < 0$, 夏季风 $v_0 > 0$ 。 Q_0 和 Q_1 表示大气的热力强迫, 文中 Q_1 特指海陆加热差值。在冬季和夏季, Q_1 的正负号刚好相反。

把式(11)代入式(10), 利用正交关系可得下列截谱方程组(除了 λ, \dot{a} , 其余参数略写“ \langle ”号):

$$\begin{cases} \frac{\partial T_1}{\partial t} = -a_3 v_1 + \lambda \phi_1 - \lambda_1 T_1 - \frac{2\dot{a}}{\sqrt{6}} v_0 T_2 + H_1 \\ \frac{\partial T_2}{\partial t} = -\lambda_1 T_2 + \lambda \phi_2 + \frac{2\dot{a}}{3\sqrt{6}} v_0 T_1 - \frac{\dot{a}}{9\sqrt{6}} v_1 T_2 + H_2 \\ \frac{\partial u_1}{\partial t} = -\frac{35}{9\sqrt{6}} v_0 u_2 - \frac{8}{9\sqrt{6}} u_1 v_1 + \beta v_0 - \gamma u_1 \\ \frac{\partial u_2}{\partial t} = \frac{4}{3\sqrt{6}} v_0 u_1 + \frac{8}{9\sqrt{6}} u_2 v_1 + \frac{1}{2} \beta v_1 - \gamma u_2 \\ \beta u_1 = \frac{3}{2} \phi_1 \\ \beta u_2 = \frac{5}{2} \phi_2 \\ v_0 = -2Q_1 + 2(\epsilon - a_1) \phi_1 + 2a_2 T_1 \\ v_1 = 2Q_0 \end{cases} \quad (12)$$

方程组(12)中, 前4个方程是演变方程, 后4个是平衡方程。方程组(12)是一个复杂的非线性系统, 用它来讨论本文的命题, 需要作进一步简化。假设海-气之间感热通量对大气的影 响较小, 而对海流有重要的影响, 这样在考虑洋流过程时, 方程组(12)的第2方程中的 v_0 使用 $v_0 = -2Q_1 + 2(\epsilon - a_1) \phi_1 + 2a_2 T_1$; 而第3, 4, 7方程中的 v_0 使用 $v_0 = -2Q_1 + 2\epsilon \phi_1$ 。于是, 方程组(12)改写成:

$$\begin{cases} \frac{\partial T_1}{\partial t} = -a_3 v_1 - \alpha_s T_1 + H_1 + \frac{4a_1 \dot{a}}{\sqrt{6}} T_2 - \frac{4\dot{a}}{\sqrt{6}} (\epsilon - a_1) \phi_1 T_2 - \frac{4\dot{a}}{\sqrt{6}} a_2 T_1 T_2 \\ \frac{\partial T_2}{\partial t} = -\alpha_s T_2 + H_2 - \frac{\dot{a}}{9\sqrt{6}} v_1 T_2 + \frac{4\dot{a}}{3\sqrt{6}} Q_1 T_1 + \frac{4\dot{a}}{3\sqrt{6}} (\epsilon - a_1) \phi_1 T_1 + \frac{4\dot{a}}{3\sqrt{6}} a_2 T_1^2 \\ \frac{\partial u_1}{\partial t} = -\frac{35}{9\sqrt{6}} v_0 u_2 - \frac{8}{9\sqrt{6}} u_1 v_1 + \beta v_0 - \gamma u_1 \\ \frac{\partial u_2}{\partial t} = \frac{4}{3\sqrt{6}} v_0 u_1 + \frac{8}{9\sqrt{6}} u_2 v_1 + \frac{1}{2} \beta v_1 - \gamma u_2 \\ \beta u_1 = \frac{3}{2} \phi_1 \\ \beta u_2 = \frac{5}{2} \phi_2 \\ v_0 = -2Q_1 + 2\epsilon \phi_1 \\ v_1 = 2Q_0 \end{cases} \quad (13)$$

方程组(13)即是用于后面分析讨论的海-气耦合模式(动力系统)。

4 海-气耦合模式的平衡态及其稳定性

4.1 模式的平衡态

4.1.1 南亚季风的多平衡态

在方程组(13)中, 令前4个方程的时间导数 $\frac{\partial}{\partial t} = 0$, 则有:

$$\begin{cases} -a_2 v_1 - \alpha_s T_1 + H_1 + \frac{4a_1 \dot{a}}{\sqrt{6}} T_2 - \frac{4\dot{a}}{\sqrt{6}} (\epsilon - a_1) \phi_1 T_2 - \frac{4\dot{a}}{\sqrt{6}} a_2 T_1 T_2 = 0 \\ -\alpha_s T_2 + H_2 - \frac{\dot{a}}{9\sqrt{6}} v_1 T_2 + \frac{4\dot{a}}{3\sqrt{6}} Q_1 T_1 + \frac{4\dot{a}}{3\sqrt{6}} (\epsilon - a_1) \phi_1 T_1 + \frac{4\dot{a}}{3\sqrt{6}} a_2 T_1^2 = 0 \\ -\frac{35}{9\sqrt{6}} v_0 u_2 - \frac{8}{9\sqrt{6}} u_1 v_1 + \beta v_0 - \gamma u_1 = 0 \\ \frac{4}{3\sqrt{6}} v_0 u_1 + \frac{8}{9\sqrt{6}} u_2 v_1 + \frac{1}{2} \beta v_1 - \gamma u_2 = 0 \\ \beta u_1 = \frac{3}{2} \phi_1 \\ \beta u_2 = \frac{5}{2} \phi_2 \\ v_0 = -2Q_1 + 2\epsilon \phi_1 \\ v_1 = 2Q_0 \end{cases} \quad (14)$$

方程组(14)的后 6 个方程表征南亚季风的平衡态, 其求解过程如下。由式(14)可得:

$$\begin{cases} \phi_1 = \frac{v_0 + 2Q_1}{2\varepsilon} \\ u_1 = \frac{3}{2\beta}\phi_1 = \frac{3}{4\beta\varepsilon}(v_0 + 2Q_1) \\ u_2 = \frac{1}{\gamma - \frac{16}{9\sqrt{6}}Q_0} \left[\beta Q_0 + \frac{1}{\sqrt{6}\beta\varepsilon}v_0^2 + \frac{2Q_1}{\sqrt{6}\beta\varepsilon}v_0 \right] \end{cases} \quad (15)$$

将式(15)代入式(14)的第 3 方程, 得:

$$Av_0^3 + Bv_0^2 + Cv_0 + D = 0 \quad (16)$$

这是关于南亚季风 v_0 的 3 次方程, 其中系数

$$\begin{aligned} A &= \frac{35}{54} \cdot \frac{1}{(\gamma - \frac{16}{9\sqrt{6}}Q_0)\beta\varepsilon}, B = \frac{35}{27} \cdot \frac{Q_1}{(\gamma - \frac{16}{9\sqrt{6}}Q_0)\beta\varepsilon}, \\ C &= \frac{35}{9\sqrt{6}} \cdot \frac{\beta Q_0}{\gamma - \frac{16}{9\sqrt{6}}Q_0} + \frac{4Q_0}{3\sqrt{6}\beta\varepsilon} + \beta + \frac{3\gamma}{4\beta\varepsilon} \\ D &= \frac{8Q_0Q_1}{3\sqrt{6}\beta\varepsilon} + \frac{3\gamma Q_1}{2\beta\varepsilon} \end{aligned}$$

由式(16) 求出平衡解 v_0 。又由式(15) 求得 ϕ_1, u_1, u_2 , 进而用式(14) 的第 6 方程求得 ϕ_2 , 最后得到南亚季风的多平衡态。

4.1.2 海温的多平衡态

从方程组(14) 中消去 v_1 和 T_2 , 得到关于海温距平 T_1 的 3 次方程:

$$aT_1^3 + bT_1^2 + cT_1 + d = 0 \quad (17)$$

式(17)中, 系数 $a = \frac{8\dot{a}^2\dot{a}_2^2}{9}$,

$$b = - \left[\frac{4\dot{a}a_2}{3\sqrt{6}} \left(\frac{4Q_1\dot{a}}{\sqrt{6}} - \frac{8\dot{a}\beta(\varepsilon - a_1)}{3\sqrt{6}} u_1 \right) + \frac{4\dot{a}a_2}{\sqrt{6}} \cdot \left(\frac{8\dot{a}}{9\sqrt{6}}(\varepsilon - a_1)u_1 - \frac{4\dot{a}Q_1}{3\sqrt{6}} \right) \right],$$

$$c = - \left[\left(\frac{4Q_1\dot{a}}{\sqrt{6}} - \frac{8\dot{a}\beta(\varepsilon - a_1)}{3\sqrt{6}} u_1 \right) \cdot \left(\frac{8\dot{a}}{9\sqrt{6}}(\varepsilon - a_1)u_1 - \frac{4\dot{a}Q_1}{3\sqrt{6}} \right) - \frac{4\dot{a}a_2H_2}{\sqrt{6}} - \alpha_s \left(\alpha_s + \frac{2\dot{a}\alpha_0}{9\sqrt{6}} \right) \right],$$

$$d = - \left[\left(\frac{4Q_1\dot{a}}{\sqrt{6}} - \frac{8\dot{a}\beta(\varepsilon - a_1)}{3\sqrt{6}} u_1 \right) \cdot H_2 - (2a_3Q_0 - H_1) \left(\alpha_s + \frac{2\dot{a}\alpha_0}{9\sqrt{6}} \right) \right]; \text{而}$$

$$T_2 = \frac{2a_3Q_0 + \alpha_s T_1 - H_1}{\frac{4Q_1\dot{a}}{\sqrt{6}} - \frac{4\dot{a}a_2}{\sqrt{6}} T_1 - \frac{4\dot{a}(\varepsilon - a_1)2\beta}{\sqrt{6}} \frac{1}{3} u_1}$$

由式(17) 求出平衡解 T_1 , 又由 T_2 表达式求出 T_2 。

4.2 多平衡态的稳定性

采用线性稳定性方法讨论上述平衡态的稳定性。为此, 从方程组(13) 中消去 ϕ_1, ϕ_2, v_1, v_2 , 得到:

$$\begin{cases} \frac{\partial T_1}{\partial t} = (H_1 - 2a_3Q_0) - \alpha_s T_1 + \frac{4Q_1\dot{a}}{\sqrt{6}} T_2 - \frac{4\dot{a}\beta}{3\sqrt{6}}(\varepsilon - a_1)u_1 T_2 - \frac{4\dot{a}}{\sqrt{6}} a_2 T_1 T_2 \\ \frac{\partial T_2}{\partial t} = H_2 - \frac{4\dot{a}}{3\sqrt{6}} Q_1 T_1 - \left(\alpha_s + \frac{2Q_0\dot{a}}{9\sqrt{6}} \right) T_2 - \frac{8\dot{a}\beta}{9\sqrt{6}}(\varepsilon - a_1)u_1 T_1 + \frac{4\dot{a}}{3\sqrt{6}} a_2 T_1^2 \\ \frac{\partial u_1}{\partial t} = - \left(\frac{16Q_0}{9\sqrt{6}} + \gamma - \frac{4\beta^2\varepsilon}{3} \right) u_1 + \frac{70}{9\sqrt{6}} Q_1 u_2 - \frac{140\beta\varepsilon}{27\sqrt{6}} u_1 u_2 - 2Q_1\beta \\ \frac{\partial u_2}{\partial t} = - \frac{8\alpha_1}{3\sqrt{6}} u_1 + \left(\frac{16}{9\sqrt{6}} Q_0 - \gamma \right) u_2 + \frac{16\beta\varepsilon}{9\sqrt{6}} u_1^2 + \beta Q_0 \end{cases} \quad (18)$$

在式(18) 中令:

$$\begin{aligned} u_1 &= \bar{u}_1 + u'_1, u_2 = \bar{u}_2 + u'_2, \\ T_1 &= \bar{T}_1 + T'_1, T_2 = \bar{T}_2 + T'_2 \end{aligned} \quad (19)$$

式(19)中, $\bar{T}_1, \bar{T}_2, \bar{u}_1, \bar{u}_2$ 是平衡态; T'_1, T'_2, u'_1, u'_2 是对于平衡态的扰动量。将式(19) 代入式(18), 得到线性化后的方程组为:

$$\begin{cases} \frac{\partial T'_1}{\partial t} = A_{11}T'_1 + A_{12}T'_2 + A_{13}u'_1 + A_{14}u'_2 \\ \frac{\partial T'_2}{\partial t} = A_{21}T'_1 + A_{22}T'_2 + A_{23}u'_1 + A_{24}u'_2 \\ \frac{\partial u'_1}{\partial t} = A_{31}T'_1 + A_{32}T'_2 + A_{33}u'_1 + A_{34}u'_2 \\ \frac{\partial u'_2}{\partial t} = A_{41}T'_1 + A_{42}T'_2 + A_{43}u'_1 + A_{44}u'_2 \end{cases} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} \text{其中 } A_{11} &= -\alpha_s - \frac{4\dot{a}}{\sqrt{6}} a_2 T_2, A_{12} = \frac{4Q_1\dot{a}}{\sqrt{6}} - \frac{4\dot{a}\beta}{3\sqrt{6}} \cdot \\ &(\varepsilon - a_1)\bar{u}_1 - \frac{4\dot{a}}{\sqrt{6}} a_2 T_1, A_{13} = -\frac{4\dot{a}\beta}{3\sqrt{6}}(\varepsilon - a_1)\bar{T}_2, \\ A_{14} &= 0; A_{21} = -\frac{4\dot{a}}{3\sqrt{6}} Q_1 - \frac{8\dot{a}\beta}{9\sqrt{6}}(\varepsilon - a_1)\bar{u}_1 + \frac{8\dot{a}}{3\sqrt{6}} \cdot \\ &a_2 T_1, A_{22} = -\left(\alpha_s + \frac{2Q_0\dot{a}}{9\sqrt{6}} \right), A_{23} = -\frac{8\dot{a}\beta}{9\sqrt{6}}(\varepsilon - a_1) \\ &\bar{T}_1, A_{24} = 0; A_{31} = 0, A_{32} = 0, A_{33} = -\left(\frac{16Q_0}{9\sqrt{6}} + \gamma - \right. \\ &\left. \frac{4\beta^2\varepsilon}{3} \right) - \frac{140\beta\varepsilon}{27\sqrt{6}} \bar{u}_2, A_{34} = \frac{70}{9\sqrt{6}} Q_1 - \frac{140\beta\varepsilon}{27\sqrt{6}} \bar{u}_1, A_{41} = \end{aligned}$$

$0; A_{42} = 0, A_{43} = -\frac{8Q_1}{3\sqrt{6}} + \frac{32\beta\epsilon}{9\sqrt{6}}u_1, A_{44} = \frac{16}{9\sqrt{6}}Q_0 - \gamma。$

于是,考察动力系统(13)的平衡态的线性稳定性,归结为判断平衡态的扰动量随时间是发展还是减弱,这取决于方程组(20)右端的系数矩阵 A 的特征值:

$$A = \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} & 0 \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} & 0 \\ 0 & 0 & A_{33} & A_{34} \\ 0 & 0 & A_{43} & A_{44} \end{pmatrix} \quad (21)$$

求出矩阵 A 的全部(4个)特征值后,作如下判断:若全部特征值的实部都小于零,则平衡态是线性稳定的;若至少有一个实部大于零,则不稳定,这种平衡态在物理上观测不到。

5 南亚季风对海温季节变化的影响

研究表明^[4],海表温度的季节变化主要受太阳辐射的季节变化、海流的性质以及盛行风系的季节变化的影响。本文在讨论这个问题时,取南亚季风 v_0 为参数,太阳辐射加热 H_2 为可调参数,通过求解式(17)得到 T_1 ,分析海温平衡态及其稳定性。计算式(17)的系数 a, b, c, d 时,与大气及南亚季风有关的参数取值同文献[2];与海洋有关的参数取值如下:海温距平尺度 $T_0 = 10^\circ\text{C}, H_1 = 0.15, a_3 = -0.06, a_5 = 0.2, a_2 = 0.5, \lambda = -0.5。$

5.1 南亚冬季风($v_0 < 0$)对海温季节变化的影响

比较图1的曲线I和II发现,当南亚冬季风较强(绝对值较大),冬季的海温较低(负距平的绝对值较大),而且夏季的海温也较低(正距平较小)。而南亚冬季风较弱,冬季海温较高,夏季海温也较高。研究指出^[2],冬季过程是影响夏半年海洋温度状况形成的主要因素,对夏季海温的变化起着重要作用;在冬季形成的海温的正负距平,通常在整个夏季都能保存下来。这一观测事实与本文的动力学分析结果相类似。

图1还表明,冬季风较强,从负海温距平(第四象限)向上突跳到正海温距平(第一象限)所需的太阳辐射加热较大;从正海温距平(第二象限)向下突跳到负海温距平(第三象限)所需的太阳辐射加热也较大(的绝对值较小)。

5.2 南亚夏季风($v_0 > 0$)对海温季节变化的影响

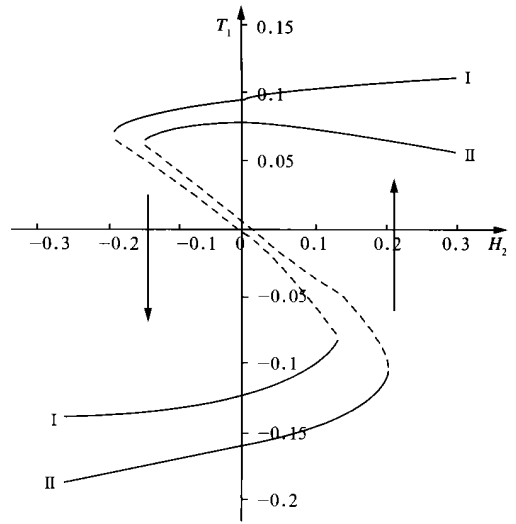


图1 海温距平 T_1 与太阳辐射加热 H_2 以及南亚冬季风 v_0 的关系

($\epsilon = 0.3, \gamma = 0.2, Q_0 = -0.04, H_1 = 0.15, a_3 = -0.06, a_5 = 0.2, a_2 = 0.5, \lambda = -0.5。$ 曲线I: $v_0 = -0.2$, 曲线II: $v_0 = -0.4, v_0$ 为负值表示冬季风。实线为线性稳定的平衡态,虚线为不稳定的平衡态)

Fig. 1 Relations among sea-surface temperature anomalies, solar radiation heating up and Southern Asia winter monsoon ($\epsilon = 0.3, \gamma = 0.2, Q_0 = -0.04, H_1 = 0.15, a_3 = -0.06, a_5 = 0.2, a_2 = 0.5, \lambda = -0.5。$ Curve I: $v_0 = -0.2$, curve II: $v_0 = -0.4$, denotes winter monsoon when it is negative value. Solid line represent linear stable equilibrium states, dashed line represent unstable equilibrium states)

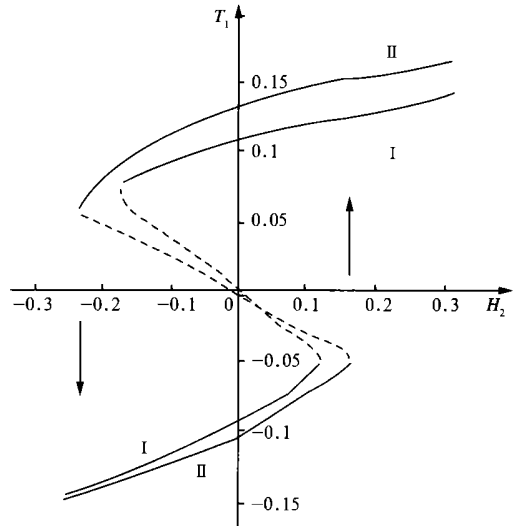


图2 海温距平与太阳辐射加热以及南亚夏季风的关系 ($v_0 >$ 表示夏季风。曲线I: $v_0 = 0.2$; 曲线II: $v_0 = 0.4$ 。其余说明同图1)

Fig. 2 Relations among sea-surface temperature anomalies, solar radiation heating up and Southern Asia summer monsoon (Same as fig. 1 but $v_0 = 0.2$ in curve I and $v_0 = 0.4$ in curve II)

比较图 2 的曲线看出, 夏季风较强(较大时), 夏季海温较高; 夏季风较弱, 夏季海温较低。但南亚夏季风的强弱对冬季的海温影响不明显。还可看出, 夏季风较强时, 海温距平由正值跳到负值所需的太阳辐射加热较小(绝对值较大), 而海温由负距平跳到海温正距平所需的太阳辐射加热也较小。

6 海-气耦合作用和海温梯度对南亚季风的影响

6.1 海-气耦合作用对南亚季风的影响

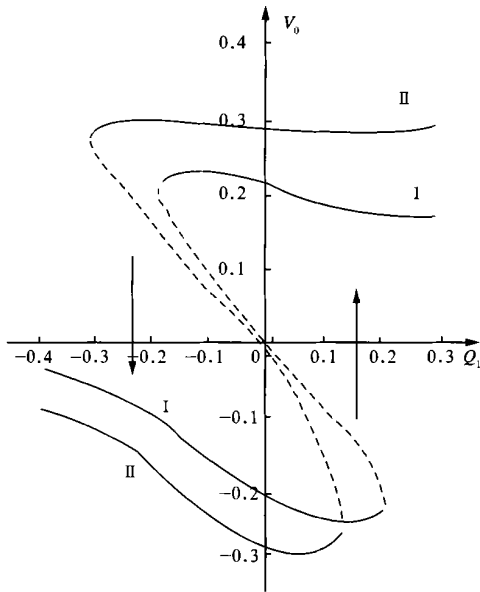


图 3 海-气相互作用对南亚季风的影响

(曲线 I : 无海-气相互作用情形, $\mu = \lambda = 0, \varepsilon = 0.3, \gamma = 0.2, Q_0 = -0.04$, 无海温梯度 $\partial T_S / \partial y = 0$; 曲线 II : 有海-气相互作用情形, $a_1 = a_2 = 0.3, \lambda = a_3 = -0.02, \lambda_1 = 0.06$, 其他参数同曲线 I 的说明。曲线 I 和 II 的实线部分均为线性稳定的平衡态, 虚线部分均为不稳定的平衡态)

Fig. 3 The effect of air-sea interaction for Southern Asia monsoon (Curve I : a case without air-sea interaction, $\mu = \lambda = 0, \varepsilon = 0.3, \gamma = 0.2, Q_0 = -0.04$, without SST grads $\partial T_S / \partial y = 0$; Curve II : a case with air-sea interaction, some parameters are as same as curve I, but $a_1 = a_2 = 0.3, \lambda = a_3 = -0.02, \lambda_1 = 0.06$ (for cure I and II, solid line represent linear stable equilibrium states, and dashed line represent unstable equilibrium states.)

本文讨论这个问题时, 分别针对有无海-气相互作用的情形, 取海陆加热差异 Q_1 为可调参数, 其余参数如无另作说明, 取法与前面第 5 节相同, 计算出式 (16) 的系数, 解出 v_0 , 分析南亚季风平衡态及其稳定性。结果见图 3。

比较图 3 的曲线 I 和 II 看出: (1) 海-气相互作

用的存在, 使南亚夏季风 ($v_0 > 0$) 和冬季风 ($v_0 < 0$) 的强度都得到加强; 而且海-气交换越强烈, 南亚冬夏季风的强度越强(由海-气交换系数的其他数值绘成的曲线在图 3 上从略)。海-气耦合项使冬、夏季风都增强表明, 海-气之间的感热交换等热力作用对季风强度有重要的影响。(2) 从夏季风转换到冬季风的情形看(状态曲线从第二象限向下突跳到第三象限), 无海-气交换时, 较小的海陆差异 ($|Q_1| \approx 0.18$) 就能实现这种转换; 有海-气交换时, 这种转换发生在差值较大处 ($|Q_1| \approx 0.3$)。(3) 从冬季风转换到夏季风的情形看(状态曲线从第四象限向上突跳到第一象限), 无海-气交换时发生在差值较大处 ($|Q_1| \approx 0.21$), 有海-气交换时却发生在较小处 ($|Q_1| \approx 0.12$)。(4) 综合上述 (2) 和 (3) 两点, 在海-气耦合作用下, 从 Q_1 的绝对值看, 南亚季风由冬转夏所对应的海陆加热差异比由夏转冬时小。这表明, 海气相互作用使夏季风的持续时间长于冬季风。

6.2 平均的海温经向梯度对南亚季风的影响

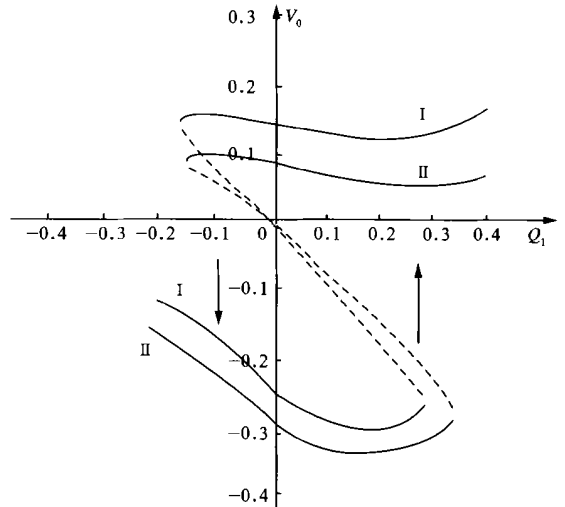


图 4 平均海温经向梯度对南亚季风的影响

($\frac{\partial T_S}{\partial y} \neq 0$, 曲线 I : $\lambda = a_3 = -0.03$, 曲线 II : $a_2 = -0.06$; 其他说明同图 3 的曲线 I)

Fig. 4 The effect of Average SST meridian grads for Southern Asia monsoon

($\frac{\partial T_S}{\partial y} \neq 0$, some parameters are as same as curve I in fig 3, but in cure I

$\lambda = a_3 = -0.03$ and in curve II $a_2 = -0.06$)

上文讨论中(图 3), 取 $\partial T_S / \partial y = 0$; 而实际上, 平均的海温经向梯度 $\partial T_S / \partial y \neq 0$, 并对南亚季风产生影响。通常情况下, 低纬年平均海温自南向北减

小, $\partial T_S / \partial y < 0$, 故 $\lambda = a_3$ 取负值。图 4 的曲线 I 对应 $a_3 = -0.03$; 曲线 II 对应 $a_3 = -0.06$, 即海温梯度较大。比较曲线 I 和 II 发现, 海温经向梯度较大时, 冬季风较强 (v_0 绝对值较大), 而夏季风较弱。

同时, 海温经向梯度 (a_3) 对冬夏季风转换所需的海陆加热差异 (Q_1) 的大小也有影响。对于季风由夏到冬的转换: 当 $a_3 = 0$ 时 (图 3 曲线 I), $|Q_1| \approx 0.2$; 当 $a_3 = -0.03$ 时, $|Q_1| \approx 0.17$; $a_3 = -0.06$ 时, $|Q_1| \approx 0.15$ 。亦即 a_3 (绝对值) 较大, $|Q_1|$ 较小。然而对于季风由冬到夏的转换, 海温经向梯度较大, 转换所需的海陆加热差值也较大。可见, 较大的海温经向梯度易使夏季风转成冬季风, 而使冬季风转成夏季风变得困难, 总的效果是有利于冬季风的维持和加强。这与上述关于海气相互作用有利于夏季风长期维持是不一样的。

7 结果和讨论

本文利用一个简化的海气耦合系统和多平衡态及其稳定性理论, 探讨了南亚季风与邻近海域海温之间相互影响, 得到以下主要结论:

(1) 冬季风较强时, 冬季海温较低, 翌年夏季海温也较低; 反之亦然。夏季风较强时, 夏季海温较高; 反之亦然。夏季风强弱对冬季海温的影响不明显。

(2) 海气相互作用的存在使冬夏季风都得到加强。它的作用使夏季风容易维持。

(3) 海温经向梯度的存在使冬季风加强, 夏季风减弱。它的作用使冬季风容易维持。海温经向梯度和海气耦合作用对南亚冬季风和夏季风这两个平衡态的非对称性所起的作用是不同的。

对上述结果作如下讨论:

(1) 南亚季风与东亚季风有很大的差别^[9]。南亚季风区的海陆分布主要是南北向。当南亚地区出现冬季风时, 产生离岸流, 使冷海水上翻, 冬季风越强, 产生的离岸流越强, 海水上翻越多, 使海温越低。冬季海温对夏季海温有很大的影响, 而且分析大量观测资料表明^[10], 冬季的海温特性可以在翌年夏季保持下来直到秋季。这样, 冬季风首先影响冬季海温, 然后通过冬季海温影响夏季海温。当南亚夏季风出现时, 海流由海洋流向岸边, 暖海水在海岸堆积, 夏季风越强, 暖海水堆积越多, 海温越高。但是, 为什么夏季风对冬季海温影响不明显, 这个问题有待进一步研究。

(2) 本文是用简化模式所得的结果, 从一个侧面印证了南亚季风与邻近海域海温之间相互影响的若干观测事实, 并给出较为合理的结论。从计算结果来看, 文中的结果与南海地区季风的一些观测研究结果更接近^[11,12], 例如冬季风—南海海温—夏季风的海气相互作用过程。诚然, 南亚季风是非常复杂的大尺度环流系统, 远非本文模式所能概括。因此, 文中的结果在多大程度上符合实际情况, 要用比较完善的海气耦合模式以及更多的观测资料来验证和对照。这个问题有待继续研究。

参考文献

- 1 Hahn D G, Manabe S. The role of mountains in the south Asian monsoon circulation. *J Atmos Sci*, 1975, 32(8): 1515~ 1541
- 2 Zhu Baozhen, Zhao Jingxia. Multiple flow equilibria in tropical circulation and monsoon. *Advances in Atmospheric Sciences*. 1987, 4(4): 375~ 384
- 3 朱抱真, 金飞飞, 刘征宇. 大气和海洋的非线性动力学概论. 北京: 海洋出版社, 1991. 250~ 269
- 4 周静亚, 杨大升. 海洋气象学. 北京: 气象出版社, 1994. 105~ 113
- 5 武炳义, 黄荣辉. 冬季赤道西太平洋环流状况与后期亚洲季风. *大气科学*, 2001, 25(5): 609~ 626
- 6 李双林, 纪立人, 张道民. 南亚季风区加热影响副高的数值试验. *热带气象学报*, 1999, 15(2): 106~ 119
- 7 Pedlosky J. The development of thermal anomalies in a coupled ocean-atmosphere model. *J Atmos Sci*, 1975, 32(12): 1501~ 1514
- 8 Ekman V W. On the influence of the Earth's rotation on ocean currents. *Arkiv for matematik, Astronomi Och Eysik*. 1905, 2(11): 52pp
- 9 陈隆勋, 朱乾根, 罗会邦等. 东亚季风. 北京: 气象出版社, 1991. 335~ 340
- 10 米. 格. 格拉哥列娃, 帕. 伊. 斯克里普图诺娃著. 海洋水温预报 (中译本). 王宗山, 徐伯昌译. 北京: 海洋出版社, 1982. 111~ 152
- 11 王启, 丁一汇. 南海夏季风演变的气候学特征. *气象学报*, 1997, 55(4): 466~ 483
- 12 闫俊岳. 南海西南季风爆发的气候学特征. *气象学报*, 1997, 55(2): 174~ 186

A PRIMARY STUDY OF INTERACTION BETWEEN MONSOON AND SEA-SURFACE TEMPERATURE IN THE NEIGHBORING SEA AREA IN SOUTH ASIA

Liu Lihong Zheng Zuguang Xia Youlong Wu Hong

(China Meteorological Administration Training Center, Beijing 100081)

Abstract

From view point of air-sea interaction, in South Asia, winter and summer monsoon affect ocean current and sea temperature of neighborhood sea area, and ocean (especially ocean inclined temperature layer) also affects monsoon by redistributing heat flux and sea temperature. So it is significant to research South Asian air-sea interaction by dynamics method for understanding deeply the strongness or weakness of winter and summer monsoon as well as the mechanism of their transition.

Nonlinear sea temperature equations and equator balance model were used in this paper. Air-sea interaction was introduced to the sea temperature equations, thus an ocean-atmospheric coupled model was made. The model contained two physical process: different imposed heat of land and ocean to atmosphere is the basic drive of monsoon; the distributing of sea temperature was changed by the wind blow flow of South Asian monsoon. This model is simplified to be the truncated spectrum model by low-order spectral method, which was easy to be discussed. Multi-equilibrium states and stability theory were used to discuss that winter and summer monsoon in South Asia affect sea temperature seasonal change of neighboring sea area respectively, and to discuss air-sea interaction and sea temperature longitudinal grads had an effect on monsoon. The main results were as follows:

(1) When winter monsoon became stronger, sea-surface temperature became lower, and the sea-surface temperature in the next summer became lower too, vice versa. When summer monsoon became stronger, the sea-surface summer temperature became higher, vice versa. The effect of summer monsoon intensity to winter sea-surface temperature was not evident.

(2) The air-sea interaction made winter and summer monsoon intense, and it made summer monsoon tend to sustain.

(3) Sea-surface temperature longitudinal gradient strengthened winter monsoon, but weakened summer monsoon, and it made winter monsoon tend to sustain. Sea-surface temperature longitudinal gradient and air-sea interaction affected two equilibrium states unsymmetrical quality of winter and summer monsoon differently.

The discussions are as follows:

(1) There are a great difference between South and East Asian monsoon. In south Asia, sea and land distribute mainly south-north direction. When winter monsoon come, the off shore flow is generated, it make cool sea water upturn, and as monsoon become more strong, the off shore flow becomes more strong, seawater upturn more, and sea temperature become lower. Summer sea temperature is deeply affected by winter monsoon, and it shows by analyzing a lot of observation data that winter sea temperature characteristic can keep up to the next summer until to autumn. In this way, winter monsoon affects winter sea temperature firstly, and then it affects summer sea temperature. When summer monsoon comes in South Asia, sea current flows to coast, warm seawater stack at seacoast. As summer monsoon becomes stronger, warm seawater stack more and more, and sea temperature become higher.

(2) The results obtained by the simple model verify some observation facts that South Asian monsoon inter-

acted with sea temperature neighboring ocean area, and the reasonable discussion is presented. The results calculated from this paper are close to some observations and research over South China Sea.

Key words: Southern Asian Monsoon, Sea-surface temperature, Air-sea coupled, Low-order spectral method, Multi-equilibrium states.

《气象学报》征稿简则

1. 《气象学报》是由中国气象学会主办的全国性大气科学学术期刊, 以气象、海洋、环境及水文等学科的科研人员、高校师生等为读者。主要刊登大气科学各主要分支学科具有创造性的论文; 国内外大气科学发展动态综合评述; 新观点、新理论、新技术、新方法的介绍; 研究工作简报及重要学术活动报道; 优秀大气科学专著的评介等。

2. 来稿要求

2.1 来稿要求论点明确, 内容充实, 数据可靠, 文字精练。全文必须包括: 题目(一般不超过 20 个汉字), 作者姓名、工作单位、邮编, 中文摘要(400 字左右), 关键词(3~ 8 个), 正文, 参考文献, 英文摘要(实词 600 个左右)。如属基金资助、获奖项目或重大课题, 需在文稿首页脚注标明。来稿时请附联系人的地址、邮编、电话、电子信箱。

2.2 来稿一律寄交编辑部, 勿送个人。稿件一式两份, 并自留底稿。手写稿件用 20×20 方格稿纸誊写清楚, 标点符号置于文字行格内; 计算机打印稿请在不大于 A4 幅面的纸上用不小于 5 号字单面打印, 在寄交最后审定的修改稿时, 请附有华光、方正等电子出版系统编排相应稿件的纯文本文件软盘。

2.3 文章摘要应说明本文的目的、方法、结果与结论。

2.4 文稿书写要工整, 用字规范, 标题层次分明。章条序号用 1, 1.1, 1.1.1; ……3, 3.1, 3.1.1; ……表示。

2.5 数学公式、物理量的符号和单位应符合国家标准和国际标准, 易混淆的外文字母、符号, 在第一次出现时用铅笔注明文种(希腊、英、俄等)、大小写、正斜体; 上下角标的字母、数码和符号, 其位置高低应区别明显, 易混淆者请用铅笔标注清楚。

2.6 科技术语和名词应使用全国科学技术名词审定委员会公布的名词。如系作者自译的新名词, 在文稿中第一次出现时请给出外文原词。计量单位一律采用中华人民共和国法定计量单位, 并以国际符号表示。

2.7 附图应清晰、美观, 纵、横坐标轴上标全物理量的名称(或符号)与单位。图中若有中国地图, 国界必须与中国地图出版社出版的地图一致, 中国全图上切勿漏绘台湾和南海诸岛。文稿中应留出插图的位置, 并给出图号、图题和图注。

2.8 附表请使用三线表, 列于正文的适当位置, 表的结构要简明。表内各栏目中参量符号之后注明单位(同插图)。

2.9 本刊的参考文献著录格式采用顺序编码制, 文献序号以文中出现先后顺序编排。期刊书写格式为: 作者. 论文题目. 期刊名, 年份, 卷号(期号): 页码; 图书书写次序为: 作者. 书名. 出版地: 出版单位, 出版年. 全书页码(××pp)。

2.10 稿件不符合上述要求, 将退给作者修改, 以稿件符合上述要求后交到编辑部的时间作为稿件收到日期。

3. 编辑部收到稿件后, 尽快给作者发稿件收到通知。自稿件收到日起, 6 个月内决定刊用与否。未能录用的稿件妥善处理。

4. 注意事项

请勿一稿两投。对登载的论文收取发表费, 并付稿酬。稿件刊出后, 赠样刊 2 册和抽印本 30 份。

《气象学报》期刊社地址: 北京中关村南大街 46 号中国气象学会

邮政编码: 100081

电话: (010) 68406942, (010) 68408571

电子信箱: cmsqx xb@ 263. net