

简单热带海气耦合模型中不同扰动形式间的耦合作用*

林一骅 薛 峰

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

练树民

(中国科学院海洋研究所, 青岛 266071)

p4 A

摘 要 在局地热平衡情况下研究了简单热带海气耦合模式中不同扰动形式间的耦合, 依次讨论了由大气准定常 Kelvin 波与海洋 Rossby 波、大气准定常 Rossby 波与海洋 Kelvin 波、大气准定常 Kelvin 波与海洋 Kelvin 波、大气准定常 Rossby 波与海洋 Rossby 波组成的耦合系统的性质, 并研究了存在于其中的耦合扰动的特征。

关键词: 热带; 海气耦合模型; 不同扰动形式

1 引言

所谓海气相互作用, 就其实质而言, 是大气和海洋这两种介质同时相互对来自对方的强迫的一种响应过程, 其中包括大气对海洋强迫的响应和海洋对大气强迫的响应这两个同时发生且相互影响的过程。从这个意义上讲, 对于实际存在的大气和海洋, 大气(海洋)中的 Kelvin 波运动作为一个对于赤道对称的强迫源既可以激发出海洋(大气)中的 Kelvin 波, 又可以激发出海洋(大气)中对称于赤道的 Rossby 波; 反过来, 海洋(大气)中的 Kelvin 波也可以由大气(海洋)中的 Kelvin 波和大气(海洋)中对称于赤道的 Rossby 波激发产生。同时, 大气(海洋)中的对称于赤道的 Rossby 波运动作为一个对于赤道对称的强迫源既可以激发出海洋(大气)中的 Kelvin 波和海洋(大气)中对称于赤道的 Rossby 波, 也可以由大气(海洋)中的 Kelvin 波和大气(海洋)中对称于赤道的 Rossby 波激发产生; 而大气(海洋)中的反对称于赤道的 Rossby 波运动作为一个反对称于赤道的强迫源只能激发出海洋(大气)中反对称于赤道的 Rossby 波, 或由海洋(大气)中反对称于赤道的 Rossby 波激发产生。正因为大气-海洋耦合系统可能存在这样的物理过程, 所以有必要讨论不同扰动之间的耦合作用。

2 基本方程及求解方法

近似地可以认为纬向风应力 τ^x 正比于纬向风速, 即 $\tau^x = K_S U$, 海洋对大气的加热

1999-11-22 收到, 2000-03-10 收到修改稿

* 国家自然科学基金资助项目 49975021、49735160 和国家重点基础研究发展规划 G1998040905-2 项目第一部分共同资助

率正比于海洋混合层厚度, 即 $Q = K_H \phi^{[1-3]}$ 。取 $L = (C_s / 2\beta)^{1/2}$, $\bar{t} = (2\beta C_s)^{-1/2}$, 长波近似下, 赤道 β 平面上无量纲热带海洋和大气耦合运动方程^[3,4]为

$$\tilde{A}U - \frac{1}{2}yV = -\frac{\partial P}{\partial x}, \quad (1)$$

$$\frac{1}{2}yU = -\frac{\partial P}{\partial y}, \quad (2)$$

$$\tilde{A}P + \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} = -\tilde{K}_H \phi, \quad (3)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \tilde{a}u - \frac{1}{2}yv + \frac{\partial \phi}{\partial x} = \tilde{K}_H U, \quad (4)$$

$$\frac{1}{2}yu + \frac{\partial \phi}{\partial y} = 0, \quad (5)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \tilde{a}\phi + \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0, \quad (6)$$

其中

$$\tilde{K}_H = K_H \bar{t} \alpha^2, \quad \tilde{K}_S = K_S \bar{t}, \quad (7)$$

$$\tilde{A} = A \bar{t}, \quad \tilde{a} = a \bar{t}, \quad (8)$$

K_H 是海洋对大气的加热系数, K_S 是风应力系数, A 和 a 是大气和海洋中 Rayleigh 摩擦或 Newton 冷却系数, $\alpha = C_s / C_a$ 是海洋重力波速与大气重力波速之比, 其余符号为大气和海洋中常用。 α 大小反映了海洋和大气特征尺度的相对大小, 也体现了海洋混合层的厚薄或大气垂直结构的复杂程度 (这在一定程度上反映着大气斜压性的强弱), 而且还包含了海洋和大气自身的水平尺度和垂直尺度的正比关系^[5]。

令

$$\xi = P + U, \quad \zeta = P - U, \quad (9)$$

$$q = \phi + u, \quad r = \phi - u. \quad (10)$$

设各量在纬圈方向具有波状结构, 在经圈方向用韦伯函数展开

$$\theta = \sum_{n=0}^{\infty} \theta_n D_n(y) e^{i(kx - at)}, \quad (11)$$

θ 代表 ξ 、 ζ 、 V 、 q 、 r 、 v 和 U , 利用韦伯函数正交性, 有

$$\begin{aligned} [(2n-1)\tilde{A} - ik]\xi_n &= -\frac{1}{2}\tilde{K}_H \xi_{n-2} - \frac{1}{2}(2n-1)\tilde{K}_H \xi_n \\ &\quad - \frac{1}{2}(n-1)(n+2)\tilde{K}_H \xi_{n+2}, \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \sigma q_n &= \left(-\frac{k}{2n-1} - i\tilde{a}\right)q_n - \frac{i}{2(2n-1)}\tilde{K}_S \xi_{n-2} \\ &\quad + \frac{i}{2}\tilde{K}_S \xi_n - \frac{i(n-1)(n+2)}{2(n-1)}\tilde{K}_S \xi_{n+2}, \end{aligned} \quad (13)$$

(12) 和 (13) 式中包括大气准定常 Kelvin 波(ξ_0)和海洋 Kelvin 波(q_0), 大气准定常

Rossby 波($\xi_n, n \geq 2$) 和海洋 Rossby 波($q_n, n \geq 2$), 只要在 (12) 和 (13) 式中去掉相应下标的项就可以滤掉某种形式的扰动, 只讨论我们关心的扰动间的耦合作用。文献 [6] 指出, (12) 与 (13) 式在 $n=4$ 处截断既保留了耦合模型中的关键扰动且物理意义明确, 以下讨论均针对在 $n=4$ 处截断进行。

3 计算结果分析

3.1 大气准定常 Kelvin 波与海洋 Kelvin 波耦合

赤道大气和海洋中的 Kelvin 波是大气和海洋中一类独特的运动形式, 这种运动形式是由于赤道这个“边界”上要求经向速度为零再加上地球自转的影响而出现的。自由状态下的赤道 Kelvin 波向东传播, 而热带海洋大气耦合系统中的确存在缓慢东移的运动形式, 其中或许有赤道 Kelvin 波的贡献, 但这类缓慢东移的运动与自由状态下的赤道 Kelvin 波又有显著不同, 例如其速度远小于大气和海洋 Kelvin 波的相速, 且这类缓慢运动还常常是发展的 (至少在某些时段上如此), 这就引导人们去研究海气耦合系统。Lau^[1] 讨论了由大气 Kelvin 波和海洋 Kelvin 波组成的简单热带海气耦合系统, 认为在局地热平衡情况下, Kelvin 波可以发展。此后, Philander^[2]、Hirst^[3]、Yamagata^[4] 等就更一般的耦合模式进行了讨论, 得出类似的结论。Lau^[1] 的模式中既包含了真实存在的 Kelvin 波, 也包含了实际大气和海洋中并不存在的向西传的重力波, 而其结果中发展的扰动相速为零, 所以很难断定是真实存在的 Kelvin 波受海气耦合修正的产物还是实际大气和海洋中并不存在的向西传的重力波受海气耦合修正的产物。进一步的研究表明, 在局地热平衡情况下, 在仅由大气 Kelvin 波和海洋 Kelvin 波组成的耦合系统中, 大气 Kelvin 波和海洋 Kelvin 波由于耦合作用而被修正, 并从理论上证明了耦合扰动不能发展。由于 Lau^[1] 的模式中包含了实际大气和海洋中并不存在的向西传的重力波, 而其结果中发展的扰动的相速为零, 所以很有可能是实际大气和海洋中并不存在的向西传的重力波受海气耦合修正的产物。在文献 [2~4] 耦合模式中, Kelvin 波型的耦合扰动可以发展是考虑了 Rossby 波的缘故^[6]。该问题作者已另文^[7] 仔细讨论, 在此不再赘述。

3.2 大气准定常 Rossby 波与海洋 Rossby 波耦合

在热带大气和海洋中, 除去高频的重力波和 Rossby-重力混合波外, 就是低频的赤道 Kelvin 波和赤道 Rossby 波。赤道 Kelvin 波主要存在于赤道附近一个赤道 Rossby 变形半径之内且要求沿经圈方向速度为零, 因此它在大气和海洋中所起的作用和影响范围是有限的, 而 Rossby 波存在和影响的范围应该更大。我国学者在大气 Rossby 波与海洋 Rossby 耦合作用方面做过较多工作^[6]。这些工作大都使用准地转位涡方程经圈方向用抛物线柱函数展开, 仅截取 $n=0, n=1$ 和 $n=2$ 三阶 Rossby 波, 这样处理存在缺陷^[8], 因为 $n=0$ 的 Rossby 波在原始方程中并不存在, 这是准地转假定的产物。

反对称于赤道的运动通常不容易发展^[6], 此处只研究对称于赤道的运动。将 (12) 和 (13) 式在 $n=4$ 处截断, 对于 ξ_n (大气), 去掉下标 $n=0$ [准定常 Kelvin 波 ($n=0$)] 的项, 保留下标 $n=2$ 和 $n=4$ [准定常 Rossby 波 ($n=2, 4$)] 的项; 同样对于 q_n (海洋) 亦去掉下标 $n=0$ [Kelvin 波 ($n=0$)] 的项, 保留下标 $n=2$ 和 $n=4$ [Rossby 波 ($n=2, 4$)] 的项。这样既有较高的精度且物理意义清晰, 求解由 (12) 与 (13) 式所构成的特征值问

题,就可了解耦合扰动的主要性质。

由图 1a、b 可见, R1 和 R2 是经海气耦合作用修正的瞬变海洋 Rossby 波, R1 和 R2 在计算的波数范围内均向西传且衰减, 波数较小的扰动即长波衰减较快, 衰减率数值随波数增大而减小。图 1c、d 是波数 $k=0.15$ 即波长为 7300 km 的扰动的频率和增长率随 $K_H K_S$ 的变化($K_H K_S$ 的单位为 10^{-8} s^{-2})。随 $K_H K_S$ 的增大, R1 的频率数值增大, R2 在 $K_H K_S$ 大于 $3.0 \times 10^{-8} \text{ s}^{-2}$ 时改向东传; 二者均为衰减, 衰减率数值随 $K_H K_S$ 的增大而增大。

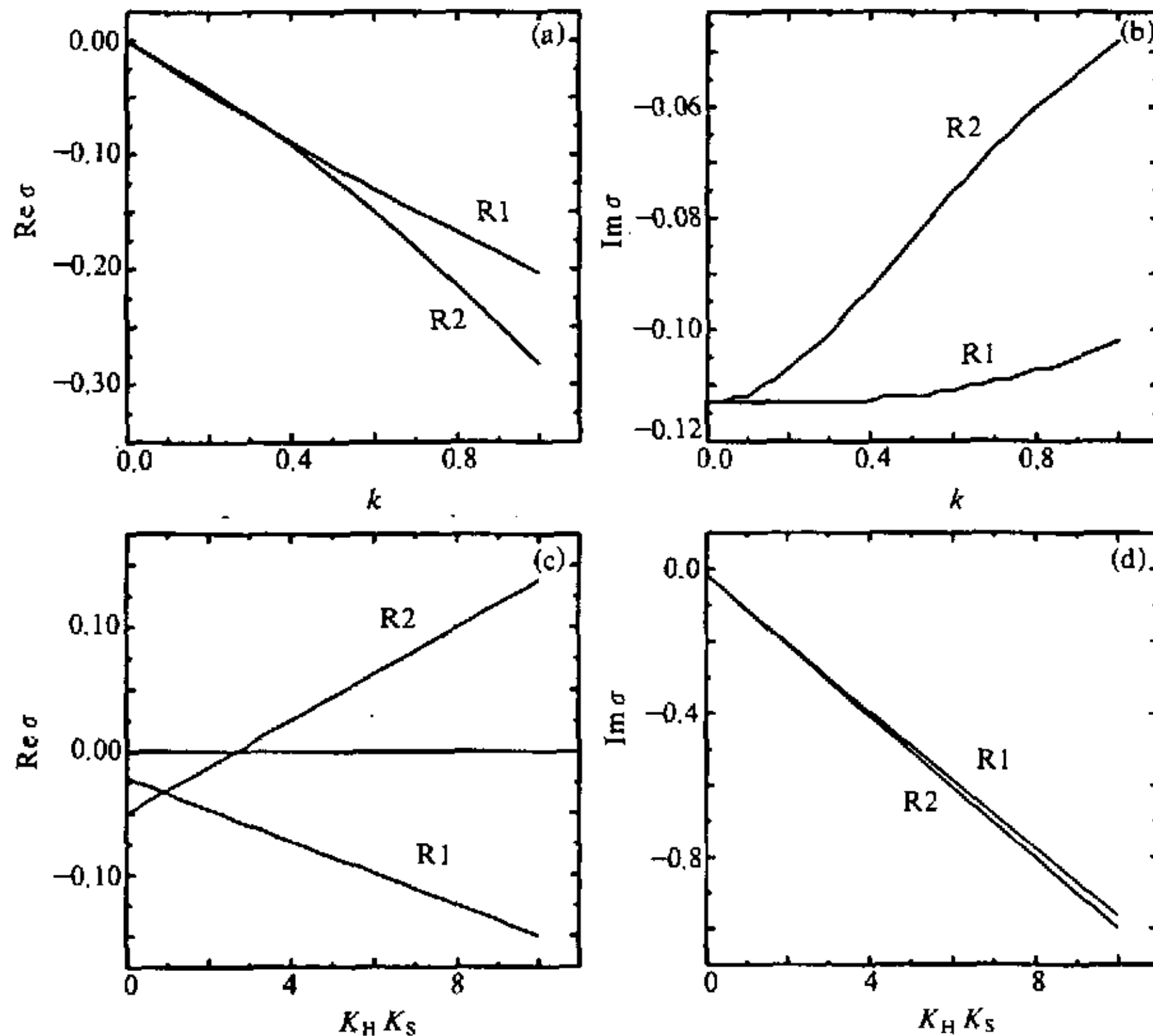


图1 大气准定常 Rossby 波与海洋 Rossby 波耦合的结果
扰动频率 $\text{Re } \sigma$ (a) 和增长率 $\text{Im } \sigma$ (b) 随波数 k ($k=0.15$) 的变化;
扰动频率 (c) 和增长率 (d) 随耦合强度参数 $K_H K_S$ 的变化 ($K_H K_S$ 的单位为 10^{-8} s^{-2})

3.3 大气准定常 Kelvin 波与海洋 Rossby 波耦合

大气中的 Kelvin 波运动作为一个对于赤道对称的强迫源可以激发出海洋 (大气) 中对称于赤道的 Rossby 波; 反过来, 大气中的 Kelvin 波也可以由海洋中对称于赤道的 Rossby 波激发产生, 因此有必要研究大气 Kelvin 波与海洋 Rossby 波的耦合。

将 (12) 和 (13) 式, 在 $n=4$ 处截断, 对于 ξ_n (大气), 只保留下标 $n=0$ [准定常 Kelvin 波 ($n=0$)] 的项, 对于 q_n (海洋) 则只保留下标 $n=2$ 和 $n=4$ [Rossby 波 ($n=2, 4$)] 的项, 求解由 (12) 与 (13) 式所构成的特征值问题, 可以了解由大气准定常 Kelvin 波与海洋 Rossby 波的耦合系统中耦合扰动的主要性质。

图 2a、b 显示, 经耦合作用修正的海洋瞬变 Rossby 波 R1 和 R2 在计算的波数范围内均向西传, R1 在长波波段因耦合作用频率降低即波速减慢; R2 的衰减率未受耦合作用影响, R1 则因耦合作用在波数小于 0.6 时发展, 波长 7 300 km 的扰动振幅 30 天增至 e 倍。图 2c、d 给出波数 $k=0.15$ 即波长为 7 300 km 的扰动的频率和增长率随 $K_H K_S$ 的变化 ($K_H K_S$ 的单位为 10^{-8} s^{-2})。随 $K_H K_S$ 的增大, R2 频率和衰减率不受影响, 而 R1 由西传转为东传, 由衰减变为发展频率和增长率几乎以线性递增。

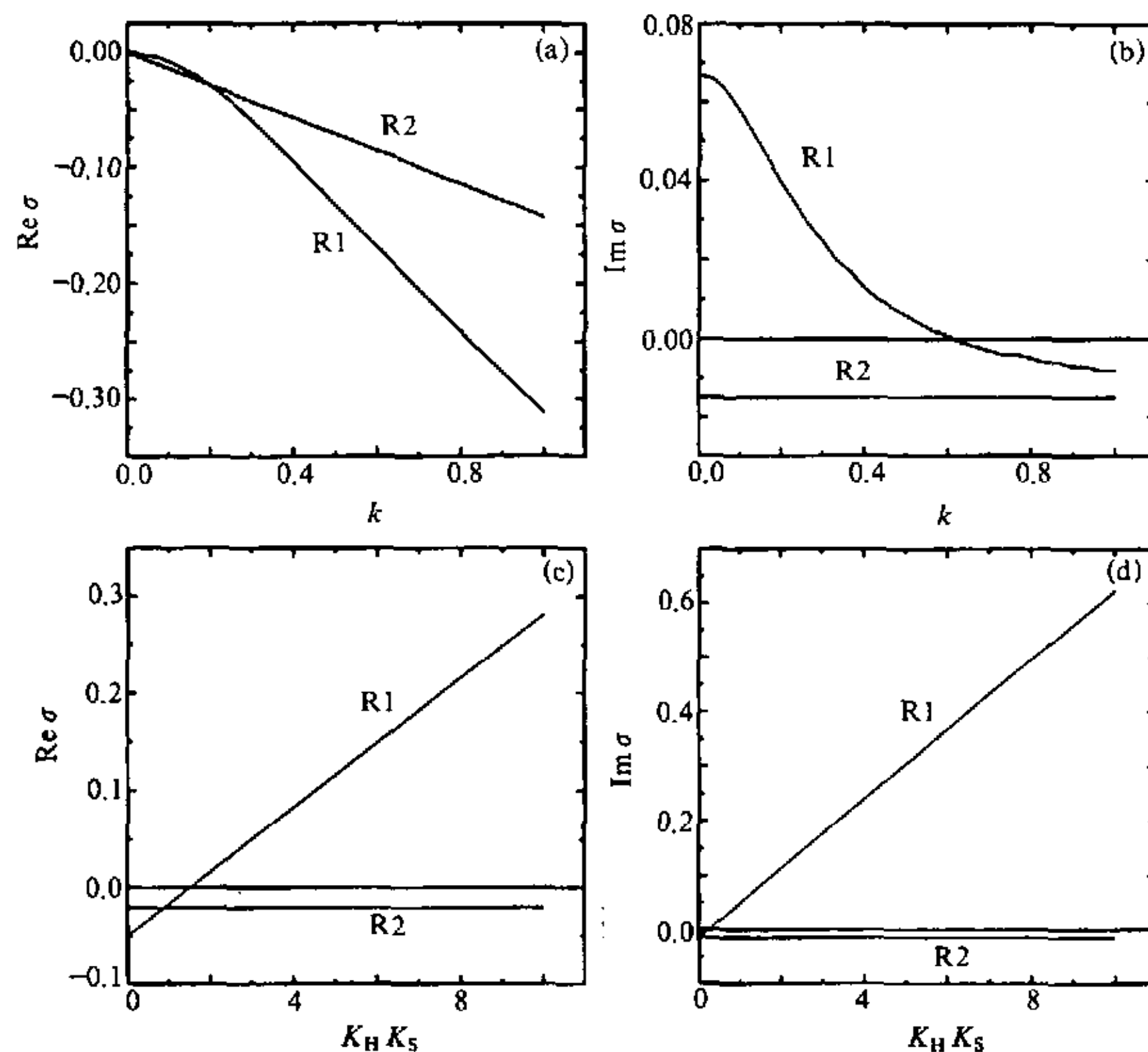


图 2 大气 Kelvin 波与海洋 Rossby 波耦合的结果, 其余同图 1

3.4 大气准定常 Rossby 波与海洋 Kelvin 波耦合

大气中对称于赤道的 Rossby 波运动作为一个对于赤道对称的强迫源可以激发出海洋 (大气) 中的 Kelvin 波; 反过来, 大气中对称于赤道的 Rossby 波也可以由海洋中的 Kelvin 波激发产生, 下面讨论大气 Rossby 波与海洋 Kelvin 波的耦合。

此时亦将 (12) 和 (13) 式在 $n=4$ 处截断, 对于 ξ_n (大气) 只保留下标 $n=2$ 和 $n=4$ [准定常 Rossby 波 ($n=2,4$)] 的项, 对于 q_n (海洋) 只保留下标 $n=0$ [Kelvin 波 ($n=0$)] 的项, 求解由 (12) 与 (13) 式所构成的特征值问题, 就可了解由大气准定常 Rossby 波与海洋 Kelvin 波的耦合系统中耦合扰动的主要性质。

图 3a、b 给出扰动频率和增长率随波数的变化。经海气耦合作用修正的瞬变海洋 Kelvin 波 K 在计算的波数范围内向东传, 并因耦合作用变为发展, 波长 7 300 km 的扰动振幅 23 天增至 e 倍。图 3c、d 是波数 $k=0.15$ 即波长为 7 300 km 的扰动的频率和增

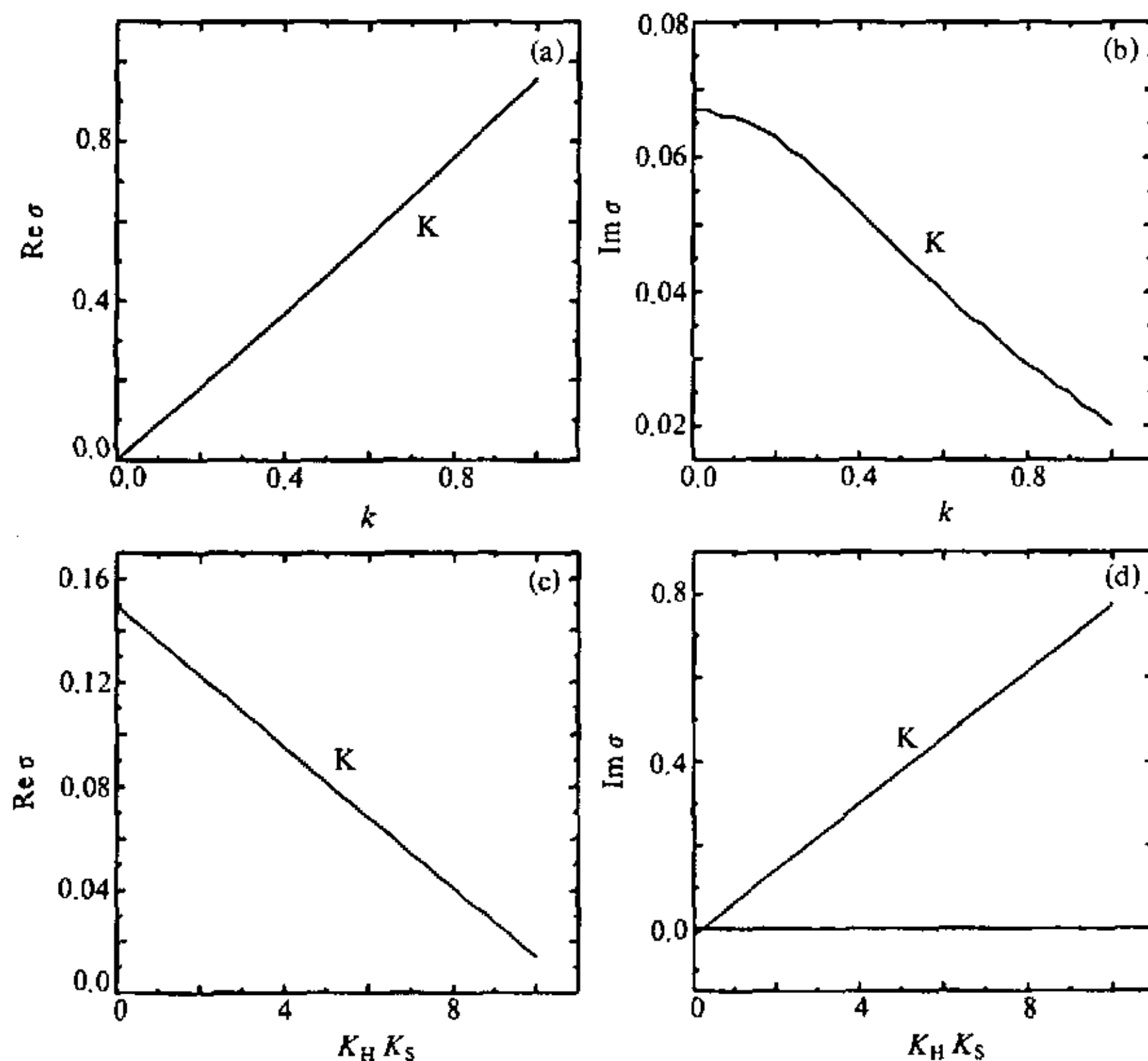


图3 大气 Rossby 波与海洋 Kelvin 波耦合的结果, 其余同图1

长率随 $K_H K_S$ 的变化 ($K_H K_S$ 的单位为 10^{-8} s^{-2})。随 $K_H K_S$ 的增大, 扰动 K 的频率大致呈线性递减, 而增长率几乎以线性递增。

4 总结

由以上讨论可知, 在局地热平衡情况下, 大气准定常 Kelvin 波和海洋 Kelvin 波耦合不能产生发展的耦合扰动, 大气准定常 Rossby 波与海洋 Rossby 波耦合亦不能产生发展的耦合扰动, 大气准定常 Kelvin 波与海洋 Rossby 波耦合可以产生向西传的发展的扰动, 而大气准定常 Rossby 波与海洋 Kelvin 波的耦合则可产生向东传的发展的扰动。这些结果与文献[9]有所不同, 这主要是所用模型不同导致, 因此有必要使用更复杂更合理的模型讨论这个问题, 以检验结论对于模型的敏感性。

参 考 文 献

- 1 Lau, K. M., Oscillations in a simple equatorial climate system, *J. Atmos. Sci.*, 1981, 38, 248~261.
- 2 Philander, S. G. H., Yamagata, T., and Pacanowski, R. C., Unstable air-sea interactions in the tropics, *J. Atmos. Sci.*, 1984, 41, 604~613.
- 3 Hirst, A. C., Unstable and damped equatorial modes in simple coupled ocean-atmosphere modes, *J. Atmos.*

- Sci.*, 1986, 43, 606~630.
- 4 Yamagata, T., Stability of a simple air-sea coupled model in the tropics, in: *Coupled Ocean-Atmosphere Models* (J. Nihoul, ed.), Amsterdam: Elsevier, 1985, 637~658.
 - 5 林一骅、季仲贞、曾庆存, 经向风应力作用下的热带海洋低频扰动, 自然科学进展, 1999, 9(12), 1358~1363.
 - 6 林一骅、季仲贞、曾庆存, 再论简单模式中的热带海气耦合扰动, 第十一届全国水动力学研讨会暨第四届全国水动力学学术会议文集, 北京: 海洋出版社, 1997, 188~193.
 - 7 林一骅, 论热带海气耦合扰动, 中国科学院大气物理研究所博士学位论文, 1995.
 - 8 林一骅、曾庆存, 再论简单热带海气耦合模式中的Kelvin波, 自然科学进展(英文版), 1999, 9(3), 211~215.
 - 9 巢纪平, ENSO与南方涛动动力学, 北京: 气象出版社, 1993.

Slow Tropical Disturbances in Simple Air-Sea Coupled Model — Interactions between Different Type Disturbances

Lin Yihua and Xue Feng

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

Lian Shumin

(Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071)

Abstract Interactions between the different type disturbances in a simple air-sea coupled model is investigated in local thermal equilibrium cases. The interactions are discussed between the atmospheric quasi-stationary Kelvin wave and the oceanic Rossby waves, the atmospheric quasi-stationary Kelvin wave and the oceanic Kelvin wave, the atmospheric quasi-stationary Kelvin wave and the oceanic Rossby waves, and the atmospheric quasi-stationary Rossby waves and the oceanic Rossby waves. The characteristics of the coupled disturbances are studied in detail.

Key words: tropics; air-sea coupled model; different type disturbance