

The Response of Tropical Atmosphere to Oceanic Heating and Its Feedback to Ocean

Hua Chen

School of Atmospheric Science, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing, P. R. China

Email: huach@nuist.edu.cn

Abstract: The response of tropical Atmosphere to oceanic heating and its feedback to ocean are studied by resolving the linear adiabatic equations on equator β plane. The results show that the direct heating of ocean to Atmosphere and Kelvin wave, short Rossby wave which are produced by oceanic heating are the reason of the variation of Atmospheric longitudinal wind and disturbed geopotency of zero class. Oceanic heating and short Rossby wave produce the variation of Atmospheric longitudinal wind and disturbed geopotency of two class. On the other hand, oceanic heating indirectly influences oceanic motion by the feedback of Atmosphere to ocean. Oceanic disturbed termocline and longitudinal current of zero class and two class are both indirectly influenced by oceanic heating and Kelvin wave、short Rossby wave which are produced by oceanic heating. High geopotency of tropical Atmosphere also moves eastward under the affection of oceanic heating.

Keywords: Feedback; Oceanic heating; Kelvin wave

热带大气对海洋加热的响应及其对海洋的反馈作用标题

陈 华

大气科学学院, 南京信息工程大学, 南京, 中国, 210044

Email: huach@nuist.edu.cn

摘 要: 通过求解赤道 β 平面上的绝热线性运动方程研究了热带大气对海洋加热的响应及其对海洋的反馈作用。结果表明, 海洋对大气加热的直接作用和海洋加热所产生的 Kelvin 波、Rossby 短波是大气零阶的扰动位势和纬向风速变化的原因, 而海洋加热和 Rossby 短波则制约二阶的扰动位势和纬向风速的变化。另一方面, 海洋本身的加热最终可通过大气对海洋的反馈间接影响到海洋运动, 海洋零阶和二阶的扰动温跃层和纬向流都间接受海洋加热和海洋加热所产生 Kelvin 波、Rossby 短波的影响。在海洋加热作用下存在高的热带大气的位势从西向东的移动。

关键词: 反馈作用, 海洋加热, Kelvin 波

1 引言

海洋是气候系统中最重要的组成部分, 它与大气之间强烈紧密的相互作用使其对气候产生巨大的影响, 现在海气相互作用已经成为气候变化的热点之一。在热带, 海洋次表层及其以上的运动实质上是对大气风应力的响应, 而热带大尺度运动基本上是对海洋加热的响应, 因此热带海洋和大气可以作为一个耦合系统整体地运动。

过去 20 多年对 ENSO 的研究已经从大气模式和海洋模式发展形成了一套描述海气耦合的模式族, 但是要在一个海气耦合的模式中把海洋和大气中的复杂运

动过程都包括进去, 来求其解析解以了解其中的物理过程是非常困难的。因此必须用大气环流模式 (AGCM) 和海洋环流模式 (OGCM) 的耦合来求其数值解。Zebiak 和 Cane^[1]早期创建的海气耦合模式对 ENSO 循环做了较为成功的模拟, 以后的 ENSO 预测模式大都以此为基础。Yamagata^[2]和 Hirst^[3]从理论上研究了 ENSO 循环中的海气相互作用, 结果是海气之间存在正反馈过程。

巢纪平^{[4][5]}等通过求解热带海气耦合系统中的耦合波的频散关系式研究了不稳定耦合波的性质及其在 ENSO 中的作用, 得到了很多有意义的结果。另外巢

纪平^{[6][7]}还用线性的等值浅水模式通过解析求解研究了热带大洋对风应力的响应问题。总之,对热带海气耦合既有模拟也有理论的研究,但求解海气耦合方程的解析解来研究海气耦合过程还比较欠缺。本文将在在此方面做一些尝试,对热带大气对海洋加热的响应及其对海洋的反馈作用问题进行探讨。

2 基本方程组

在风应力作用下的海洋运动的线性方程组为:

$$\frac{\partial u_s}{\partial t} - \beta y v_s + \frac{\partial \varphi_s}{\partial x} = \gamma u_a$$

$$\frac{\partial v_s}{\partial t} + \beta y u_s + \frac{\partial \varphi_s}{\partial y} = 0$$

$$\frac{\partial \varphi_s}{\partial t} + C_s^2 \left(\frac{\partial u_s}{\partial x} + \frac{\partial v_s}{\partial y} \right) = 0$$

已令纬向风应力与风速成正比, $C_s^2 = gh_s$ 为海洋重力波速。

受到海洋加热影响的大气运动的线性方程组为:

$$\frac{\partial u_a}{\partial t} - \beta y v_a + \frac{\partial \varphi_a}{\partial x} = 0$$

$$\frac{\partial v_a}{\partial t} + \beta y u_a + \frac{\partial \varphi_a}{\partial y} = 0$$

$$\frac{\partial \varphi_a}{\partial t} + c_a^2 \left(\frac{\partial u_a}{\partial x} + \frac{\partial v_a}{\partial y} \right) = -Q$$

对于海洋加热采用局地热力平衡近似,即加热函数与海表温度距平正相关,海表温度距平又与温跃层距平正相关。 $C_a^2 = gh_a$ 为大气重力波速。

再对大气和海洋运动方程组分别无量纲化。

大气运动的特征时间尺度为 $(2\beta c_a)^{-1}$, 特征空间尺度为 $(c_a/2\beta)^2$, 速度正比于 c_a , 位势高度正比于 c_a^2

海洋运动的特征时间尺度为 $(2\beta c_s)^{-1}$, 特征空间尺度为 $(c_s/2\beta)^2$, 速度正比于 c_s , 温跃层厚度正比于 c_s^2 , 加热函数的特征量为 Q_0 ,

然后分别对无量纲化的大气运动方程组和海洋方程组做如下变换,

$$q_a = \varphi_a + u_a \quad r_a = \varphi_a - u_a$$

$$q_s = \varphi_s + u_s \quad r_s = \varphi_s - u_s$$

3 海洋加热作用下大气运动的各级近似解以及海洋运动的各级近似解

将变化后的大气和海洋运动方程组分别做抛物圆柱函数(Weber 函数)展开,并经过 Laplace 变化,得到低频运动的零阶和二阶的控制方程组。

以上方程组可得到解析解,

海洋加热作用下大气运动的各级近似解,

$$\hat{\varphi}_{a0} = \frac{1}{2}(\hat{q}_{a0} + \hat{r}_{a0}) = \frac{b_\alpha}{6s} \hat{Q}_0 (5 - 5e^{-sx} - 2e^{\sqrt{0}x})$$

$$\hat{u}_{a0} = \frac{1}{2}(\hat{q}_{a0} - \hat{r}_{a0}) = \frac{b_\alpha}{6s} \hat{Q}_0 (1 - 5e^{-sx} + 2e^{\sqrt{0}x})$$

$$\hat{\varphi}_{a2} = \frac{1}{2}(\hat{q}_{a2} + \hat{r}_{a2}) = \frac{b_\alpha}{6s} \hat{Q}_0 (1 - 2e^{\sqrt{0}x} - e^{\sqrt{2}x})$$

$$\hat{u}_{a2} = \frac{1}{2}(\hat{q}_{a2} - \hat{r}_{a2}) = \frac{b_\alpha}{6s} \hat{Q}_0 (1 - 2e^{\sqrt{0}x} + e^{\sqrt{2}x})$$

而经圈流也可得到,

$$\hat{v}_{a1} = 0$$

$$\hat{v}_{a3} = -\frac{b_\alpha}{18s^2} e^{\sqrt{2}x} \hat{Q}_0$$

以上结果表明,大气零阶的扰动位势和纬向风速的变化来自于海洋对大气加热的直接作用和海洋加热所产生的 Kelvin 波、Rossby 短波,而二阶的扰动位势和纬向风速则受到海洋加热和海洋加热所产生的 Rossby 短波的制约。

海气耦合条件下海洋运动的各级近似解,

$$\hat{\varphi}_{s0} = \frac{a_\gamma b_\alpha}{36s^2} (1 - 5e^{-sx})(1 - 5e^{-sx} + 2e^{\sqrt{0}x}) \hat{Q}_0$$

$$= \frac{a_\gamma b_\alpha}{36s^2} (1 - 10e^{-sx} + 2e^{(-\frac{1}{2s}-3s)x} + 25e^{-2sx} - 10e^{(-\frac{1}{2s}-4s)x}) \hat{Q}_0$$

$$\hat{u}_{s0} = \frac{5a_\gamma b_\alpha}{36s^2} (1 - e^{-sx})(1 - 5e^{-sx} + 2e^{\sqrt{0}x}) \hat{Q}_0$$

$$= \frac{5a_\gamma b_\alpha}{36s^2} (1 - 6e^{-sx} + 2e^{(-\frac{1}{2s}-3s)x} + 5e^{-2sx} - 2e^{(-\frac{1}{2s}-4s)x}) \hat{Q}_0$$

$$\begin{aligned}
\widehat{\varphi}_{s2} &= -\frac{a_\gamma b_\alpha}{36s^2} (1 + e^{-(\frac{1}{2s}+7s)x}) (1 - 5e^{-sx} + 2e^{l_0 x}) \widehat{Q}_0 \\
&= -\frac{a_\gamma b_\alpha}{36s^2} (1 - 5e^{-sx} + 2e^{(\frac{1}{2s}-3s)x} + e^{-(\frac{1}{2s}+7s)x} \\
&\quad - 5e^{-(\frac{1}{2s}+8s)x} + 2e^{-(\frac{1}{s}+10s)x}) \widehat{Q}_0 \\
\widehat{u}_{s2} &= -\frac{a_\gamma b_\alpha}{36s^2} (1 - e^{-(\frac{1}{2s}+7s)x}) (1 - 5e^{-sx} + 2e^{l_0 x}) \widehat{Q}_0 \\
&= -\frac{a_\gamma b_\alpha}{36s^2} (1 - 5e^{-sx} + 2e^{(\frac{1}{2s}-3s)x} - e^{-(\frac{1}{2s}+7s)x} \\
&\quad + 5e^{-(\frac{1}{2s}+8s)x} - 2e^{-(\frac{1}{s}+10s)x}) \widehat{Q}_0 \\
\widehat{v}_{s1} &= 0 \\
\widehat{v}_{s3} &= -\frac{a_\gamma b_\alpha}{108s^3} e^{-(\frac{1}{2s}+7s)x} (1 - 5e^{-sx} + 2e^{l_0 x}) \widehat{Q}_0 \\
&= -\frac{a_\gamma b_\alpha}{108s^3} (e^{-(\frac{1}{2s}+7s)x} - 5e^{-(\frac{1}{2s}+8s)x} + 2e^{-(\frac{1}{s}+10s)x}) \widehat{Q}_0
\end{aligned}$$

以上结果反映了海洋运动如何最终受到海洋本身加热的间接作用，零阶的扰动温跃层和纬向流受海洋加热和海洋加热所产生 Kelvin 波、Rossby 短波的影响，二阶的扰动温跃层和纬向流同样受到则受到海洋加热和海洋加热所产生 Kelvin 波、Rossby 短波的制约。

4 海洋和大气方程组的解的 Laplace 反演

假定海洋加热不随 x 变化，而且由于海洋热状况随时间变化的缓慢性，可以认为海洋加热函数的振幅一直为 1，则 Laplace 变换为

$$\widehat{Q}_0 = \frac{1}{s}$$

对以上结果进行反演，并给出在海洋加热作用下大气位势在四个时次随纬度的变化图(图 1)，可见同样存在大的位势由西向东的移动，这是海洋加热对大气的作用所造成的。

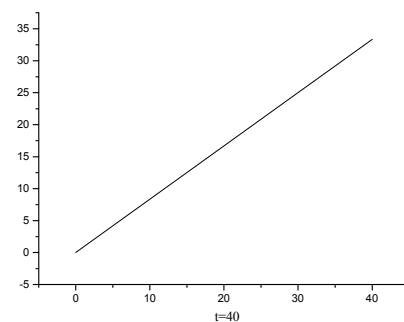
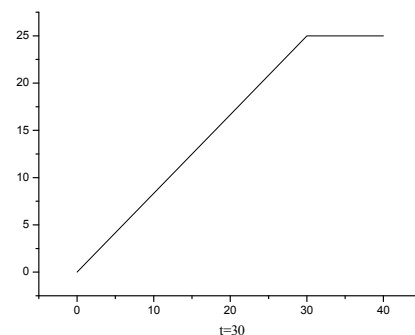
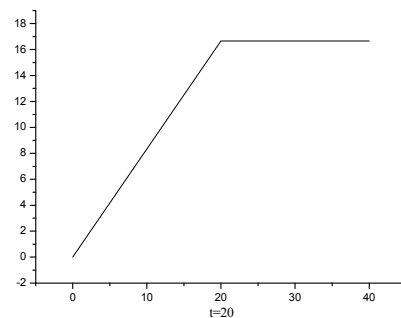
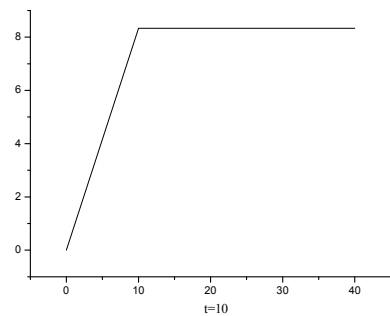


Figure 1. The geopotential variations of tropical atmosphere under the Oceanic heating.

Abscissa is the zonal distance, ordinate is atmospheric geopotential.

图 1. 海洋加热作用下热带大气位势在四个时次随 x 的变化
横坐标为纬向距离，纵坐标为大气位势

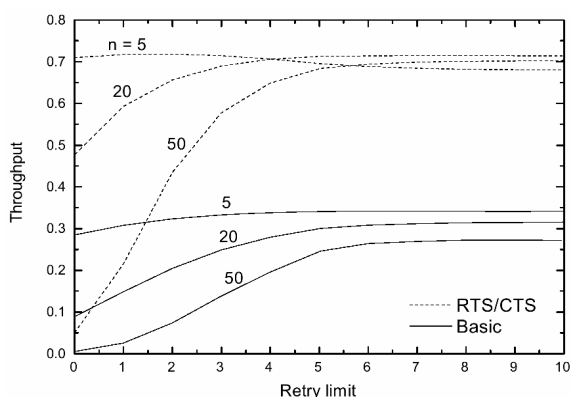


Figure 1. Curve: system result of standard experiment

图 1. 标准试验系统结果曲线

5 分析与结论

海洋对大气加热的直接作用和海洋加热所产生的 Kelvin 波、Rossby 短波是大气零阶的扰动位势和纬向风速变化的原因,而海洋加热和 Rossby 短波则制约二阶的扰动位势和纬向风速的变化。另一方面,海洋本身的加热最终可通过大气对海洋的反馈影响到海洋

运动,零阶的扰动温跃层和纬向流受风应力的直接作用和 Kelvin 波的影响,二阶的扰动温跃层和纬向流同样受到风应力和 Rossby 短波的制约。由于海洋加热对大气的作用,高的大气位势高度由西向东移动。

References (参考文献)

- [1] Zebiak S E, and M A Cane., A model El Nino/Southern Oscillation. Mon Wea Rev, 1987, 115, P2262-2278.
- [2] Yamagata T., Stability of a simple air-sea coupled model in the tropics in coupled Ocean-Atmosphere model, Ed. J C J Nihoul, Amsterdam, 1985, 767PP.
- [3] Hirst A C., Unstable and damped modes in simple atmosphere-ocean coupled models, J Atmos Sci., 1986, 43, P606-630.
- [4] Chao J. P., and Wang Z. G., Simple air-sea coupled waves in the tropics-the interaction between Rossby waves, Acta Meteorologica Sinica, 1993, 51(4), P385-393.
- [5] Chao J. P., and Wang Z. G., Simple air-sea coupled waves in the tropics-the comprehensive affects on Kelvin wave and Rossby wave, Acta Meteorologica Sinica, 1994, 52(1), P1-9.
- [6] Chao J. P. and Chen F., Responses of tropical oceans to asymmetric wind forcing, Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2000, 24(6), P724-738.
- [7] Chao J. P., The dynamics of the response of tropical western Pacific to wind stress, Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2002, 26 (2), P145-0.