

大气位势场对海表温度异常线性定常响应 的数值试验*

张荣华 巢纪平

(中国科学院大气物理研究所) (国家海洋局海洋环境预报中心)

提 要

利用具有月、季长期天气过程数值天气预报能力的滤波距平模式(FAM)、运用谱方法研究了大气位势场对海表温度异常(SSTA)的线性定常响应,分析了SSTA强迫作用所产生的定常行星波波型、大气中遥相关型以及大气位势场响应对SSTA位置和基本气流的敏感性,得到一些有意义的结果。

一、引 言

大量的观测事实和数值试验结果表明,海洋在长期天气过程中有极其重要的作用。海洋大气耦合构成丰富多彩的长期天气过程物理图案;海气相互作用提供月、季甚至更长时间尺度天气气候预报的物理基础,延长了大气对长期天气过程的记忆能力。

近年来,海表温度异常(SSTA)对大气环流的影响有很多研究,例如Webster^[1-2], Gill^[3], Rowntree^[4], Hoskines^[5], Wallace和Gutzler^[6]等。巢纪平等^[7-8]曾提出了一个长期数值天气预报的滤波距平模式(FAM),本文用FAM的大气部分来研究局地SSTA所产生的北半球大气位势场的响应。鉴于海洋的缓变性,本文把SSTA作为一个不变的外界强迫,大气位势场作为这种强迫的一个响应,且只研究其线性定常响应。此外,本文给出一种较精确求解球面上拟线性定常方程的数值计算方法,来求解FAM的控制方程。

二、滤波距平模式(FAM)简介

本文所用模式方程为巢纪平等^[7-8]所提出的FAM方程的线性化形式。该模式有如下特点,首先其预报对象为距平量,而把实测到的月平均气候场作为已知场输入到模式中。其次,根据月平均图上海温场同高度场有一定配置关系这一统计事实,从理论上论证

* 本文于1986年5月18日收到,1987年5月4日收到修改稿。

分析了海气耦合系统中潜在的内部动力学过程,证明在中纬度当过程的持续时间大于 Rossby 行波的周期时,大气运动将向 SSTA 场适应,适应时间不到一个月,因此就长期天气过程而言,可把瞬变 Rossby 行波作为长期天气过程的高频噪音而滤去,使系统中只包含对长期天气过程起主要作用的非绝热长周期波动。基于这种物理考虑,在数学求解时,忽略方程中局地时间变化项,求解高度距平场同下垫面温度场间适应后的平衡方程,这样可大大缩短计算时间。第三,该模式为一海气耦合模式。

三、模式方程和数值求解方法

FAM 中大气部分的非绝热温度距平方程为:

$$\frac{d \Delta \phi'}{dt} + \beta_y \frac{\partial \phi'}{\partial x} - \beta_x \frac{\partial \phi'}{\partial y} - K \Delta \phi' = F \cdot T' \quad (1)$$

其中 $\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + (\bar{u} + u') \frac{\partial}{\partial x} + (\bar{v} + v') \frac{\partial}{\partial y}$, $\beta_y = \frac{\partial(\bar{\xi} + f)}{\partial y}$, $\beta_x = \frac{\partial(\bar{\xi} + f)}{\partial x}$,

$$K = -b f k \frac{\partial}{\partial p} \left(\frac{\tilde{T}^*}{p \bar{\sigma}_p} \right) > 0, F = \frac{f^2 R}{\bar{\sigma}_p \cdot p_0^2 \cdot \tau_R} > 0, \text{方程(1)中 } -K \Delta \phi' \text{ 项是考虑了}$$

行星边界层摩擦辐散辐合所造成的水汽相变潜热而引入的项, $F \cdot T'$ 项是根据郭晓岚辐射参数化方案,即辐射能在弱吸收区相当于牛顿冷却形式,然而垂直积分与下垫面 T' 联系起来而引入的项,表示下垫面温度场对大气的强迫作用。其它项及符号为常见的可参见 [7]。球坐标系中, FAM 方程相对于基本态作线性化处理后的适应方程为:

$$\frac{a}{\sqrt{1-\mu^2}} \left[\bar{u} \frac{\partial \Delta \phi'}{\partial \lambda} - \bar{v} (\mu^2 - 1) \frac{\partial \Delta \phi'}{\partial \mu} + \bar{\beta}_\mu \frac{\partial \phi'}{\partial \lambda} + \bar{\beta}_\lambda \cdot (\mu^2 - 1) \frac{\partial \phi'}{\partial \mu} \right] - a^2 K \Delta \phi' = a^2 F T' \quad (2)$$

其中 λ, ϕ 分别为经度和纬度 ($\mu = \sin \phi$), a 为地球半径。上式是本文的基本方程,可用谱方法数值求解。

所谓谱方法是把因变量在研究区域上用适当的函数系展开来数值求解控制方程。对于球面上任意连续函数 $\psi(\lambda, \mu, t)$, 一般可用球面调和函数 $Y_n^m(\lambda, \mu)$ 展开成一个收敛的级数:

$$\psi(\lambda, \mu, t) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=|m|}^{\infty} \psi_n^m(t) Y_n^m(\lambda, \mu) \quad (3)$$

其展开系数为:

$$\psi_n^m(t) = \frac{1}{4\pi} \int_{-1}^1 \int_0^{2\pi} \psi(\lambda, \mu, t) Y_n^m(\lambda, \mu) d\lambda d\mu \quad (4)$$

其中 $Y_n^m(\lambda, \mu) = p_n^m(\mu) \cdot e^{im\lambda}$, $p_n^m(\mu)$ 为归一化的缔合勒让德函数。为使方程闭合,应从方程(3)中截取有限项,即要确定模式的分辨率,常用截取方法有平行四边形截取和三角形截取。本文用平行四边形截取方法。

包含在(3)、(4)式中的分解算法公式为:

$$\left\{ \begin{aligned} \psi(\lambda, \mu, t) &= \sum_{m=-M}^M \psi^m(t, \mu) e^{im\lambda} \\ \psi^m(t, \mu) &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \psi(\lambda, \mu, t) e^{-im\lambda} d\lambda \xrightarrow{\text{离散化}} \frac{1}{L} \sum_{i=0}^{L-1} \psi(\lambda_i, \mu, t) e^{-im\lambda_i} \\ \psi^m(t, \mu) &= \sum_{n=|m|}^{|m|+N} \psi_n^m(t) p_n^m(\mu) \\ \psi_n^m(t) &= \frac{1}{2} \int_{-1}^1 \psi^m(t, \mu) p_n^m(\mu) d\mu \xrightarrow{\text{离散化}} \frac{1}{2} \sum_{k=1}^J G_k \psi^m(t, \mu_k) p_n^m(\mu_k) \end{aligned} \right.$$

其中 L 为纬圈方向所取格点数, μ_k, G_k, J 分别为经圈方向的高斯坐标、高斯权重和高斯网格点数, M, N 分别为纬圈、经圈方向所取的波数。在计算傅氏变换及反变换时用实数序列的 FFT 方法。

当给定 $\psi(\lambda, \mu, t)$, 由谱展开可得 $\psi_n^m(t)$, 则纬圈、经圈方向梯度计算公式分别为:

$$\begin{aligned} \psi_\lambda &= \frac{\partial \psi}{\partial \lambda} = \sum_{m=-M}^M \sum_{n=|m|}^{|m|+N} im \psi_n^m(t) p_n^m(\mu) e^{im\lambda} \\ \psi_\mu &= (\mu^2 - 1) \frac{\partial \psi}{\partial \mu} = \sum_{m=-M}^M \sum_{n=|m|}^{|m|+N} \psi_n^m(t) H_n^m(\mu) e^{im\lambda} \end{aligned}$$

其中: $H_n^m(\mu) = (\mu^2 - 1) \frac{d p_n^m(\mu)}{d \mu} = n d_{n+1}^m p_{n+1}^m(\mu) - (n+1) d_n^m p_{n-1}^m(\mu)$,

$d_n^m = [(n-m)(n+m)/(2n-1)(2n+1)]^{1/2}$, 另外利用对称性可进一步减少计算量。

把给定的 SSTA 强迫, 待求的变量场及其导数按球面函数展开(其中: $A_n = n(n+1)/a^2$)

$$\begin{bmatrix} T'_s \\ \phi' \\ \Delta \phi' \\ \phi'_\lambda \\ \phi'_\mu \\ (\Delta \phi')_\lambda \\ (\Delta \phi')_\mu \end{bmatrix} = \sum_{m=-M}^M \sum_{n=|m|}^{|m|+N} \begin{bmatrix} T_n^m P_n^m \\ \phi_n^m P_n^m \\ -A_n \phi_n^m P_n^m \\ im \phi_n^m P_n^m \\ \phi_n^m H_n^m \\ -im A_n \phi_n^m P_n^m \\ -A_n \phi_n^m H_n^m \end{bmatrix} \cdot e^{im\lambda}$$

所有这些关系代入(2), 两边同乘上 Y_n^m 的共轭复数, 并沿全球面积分, 利用球面函数的正交性可得方程:

$$\sum_{m'=-M}^M \sum_{n'=|m'|}^{|m'|+N} L_{n',m'}^{n',m'} \phi_{n'}^{m'} + Kn(n+1)\phi_n^m = a^2 F \cdot T_n^m \quad (5)$$

其中: $L_{n',m'}^{n',m'} = \frac{1}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_{-1}^1 \frac{a}{\sqrt{1-\mu^2}} \left[\bar{u} \cdot \frac{-imn(n+1)}{a^2} \cdot p_n^m(\mu) - \bar{v} \cdot \frac{-n(n+1)}{a^2} \cdot H_n^m(\mu) + \bar{\beta}_\mu \cdot im p_n^m(\mu) + \bar{\beta}_\lambda \cdot H_n^m(\mu) \right] \cdot e^{i(m-m')\lambda} \cdot p_{n'}^{m'}(\mu) d\mu d\lambda$

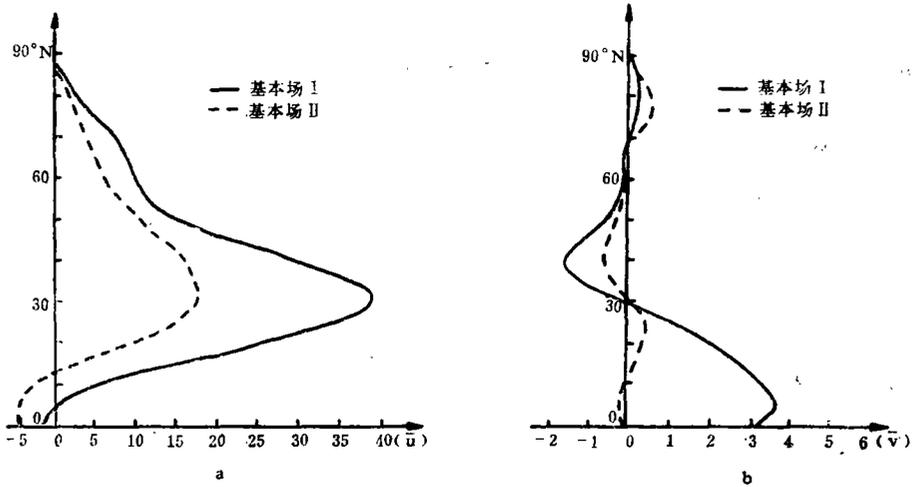


图 1 数值试验中所取两种纬圈平均基本场
(a \bar{u} 分量, b \bar{v} 分量, 单位: m/s)

表 1 数值试验中 SSTA 位置、基本场、参数
与图例的对应关系

基本场 图例编号		基本场 I	基本场 II
		$K=1.57 \times 10^{-6}/s$ $F=1.0 \times 10^{-1}/s^{\circ}K$	$K=2 \times 10^{-6}/s$ $F=1.3 \times 10^{-14}/s^{\circ}K$
SSTA 中心位置 179°E	3°N	图 4 a	图 5 a
	30°N	图 4 b	图 5 b
	37°N	图 4 c	图 5 c
	57°N	图 4 d	图 5 d

表 2 Wallace 和 Gutzler 所给出
的遥相关型

字母编号	地理位置	类型名称
A B C D	(20°N, 160°W) (45°N, 165°W) (55°N, 115°W) (30°N, 85°W)	太平洋北美型 (PNA)
E F G	(25°N, 25°W) (55°N, 20°W) (55°N, 40°E)	东大西洋型 (EA)
H I	(55°N, 55°W) (30°N, 55°W)	西大西洋型 (WA)
J K	(60°N, 155°E) (30°N, 155°E)	西太平洋型 (WP)
L M N	(55°N, 20°E) (55°N, 75°E) (40°N, 145°E)	欧洲型 (E)

函数 $L_n^{n'}, m'$ 用 FFT 及勒氏变换法求解。因此给定平均态 $\bar{u}, \bar{v}, \bar{\beta}_1, \bar{\beta}_2$ 便可算出大气对给定 T'_s 的响应。本文中取 $M=N=10, L=32$, 考虑南北对称而取赤道到极地的高斯网格点数为 13, 这时(5)式为高阶线性代数方程组, 可用高斯法求解。

四、数值试验

取 $SSTA$ 为指数分布函数:

$$T'_s(i, j) = A \cdot e^{\left[\frac{-(i-i_c)^2}{l_i} - \frac{(j-j_c)^2}{l_j} \right]}$$

其中A为振幅, i_0, j_0 为中心座标, l_i, l_j 为表示 i, j 方向 $SSTA$ 范围的网格点数。本文取振幅为 1°C , 异常范围 $l_i = l_j = 5$, 取二种纬圈平均基本场(图1), 基本场 I 的风速分布和强度接近于 200 hPa 冬季平均场, 基本场 II 的风速分布和强度接近于 500 hPa 冬季平均场。这两种基本场除强度有别外, 在低纬还有一个显著的差别, 即基本场 II 的东风区比基本场 I 的东风区范围要大。数值试验中 $SSTA$ 位置, 基本场及参数与图例对应关系见表 1。

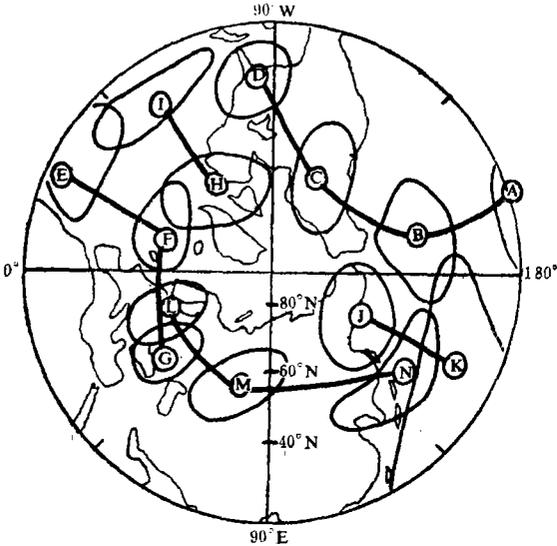


图 2 Wallace 和 Gutzler 给出的北半球冬季 500 hPa 高度场 5 种遥相关图和其作用中心

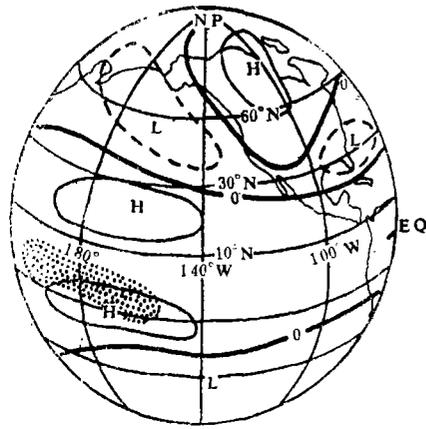


图 3 同赤道海温异常相联系的对流层位势高度场遥相关型简图 (阴影区为强降水区)

1. 大气中定常行星波波型和遥相关型模拟试验

图 2 和表 2 为 Wallace 和 Gutzler^[6] 给出的北半球冬季 500 hPa 高度场 5 种遥相关图和其作用中心, 其中最强的是 PNA 型和 EA 型。由图可见, 有一定范围的正负区交替排列, 各作用中心的地理分布几乎是固定的, 对其形成的物理机制已有不少定性定量的解释和数值试验。图 3 给出赤道太平洋为暖 SST 时北半球冬季对流层位势高度异常简图, 表明遥相关的存在同热带海温异常有密切关系。在此试图用 FAM 来模拟大气中存在的定常行星波波型和遥相关型, 以检验该模式的能力。

图 4 和图 5 给出本文的一系列数值试验结果, 由图可见, 整个北半球位势高度距平场存在正负相间的按一定地理区域分布排列的多个作用中心, 其结构类似于定常行星波波型和遥相关型。从这些不同位置的 SSTA 所激发的线性定常响应可见, 不同纬度的 SSTA 都能激发出一系列定常行星波波列, SSTA 不只是局地效应, 它能导致全球大气环流异常。这说明大气中遥相关型的普遍性。另一方面表明, FAM 具有模拟大气中因 SSTA 强迫作用所产生的定常行星波波列及大气中遥相关型的能力, 这正是 FAM 内部具有这种波动动力学机制的反映。此外, 由 FAM 所得结果还有一个明显的特点, 即正负中心交替相间的响应场除东北向排列的波列外, 还存在一支西北向排列的波列, 这支波列的存在可能是亚洲大气环流同赤道中东太平洋海洋参数相关性的机制所在, 有待于进一步研究。

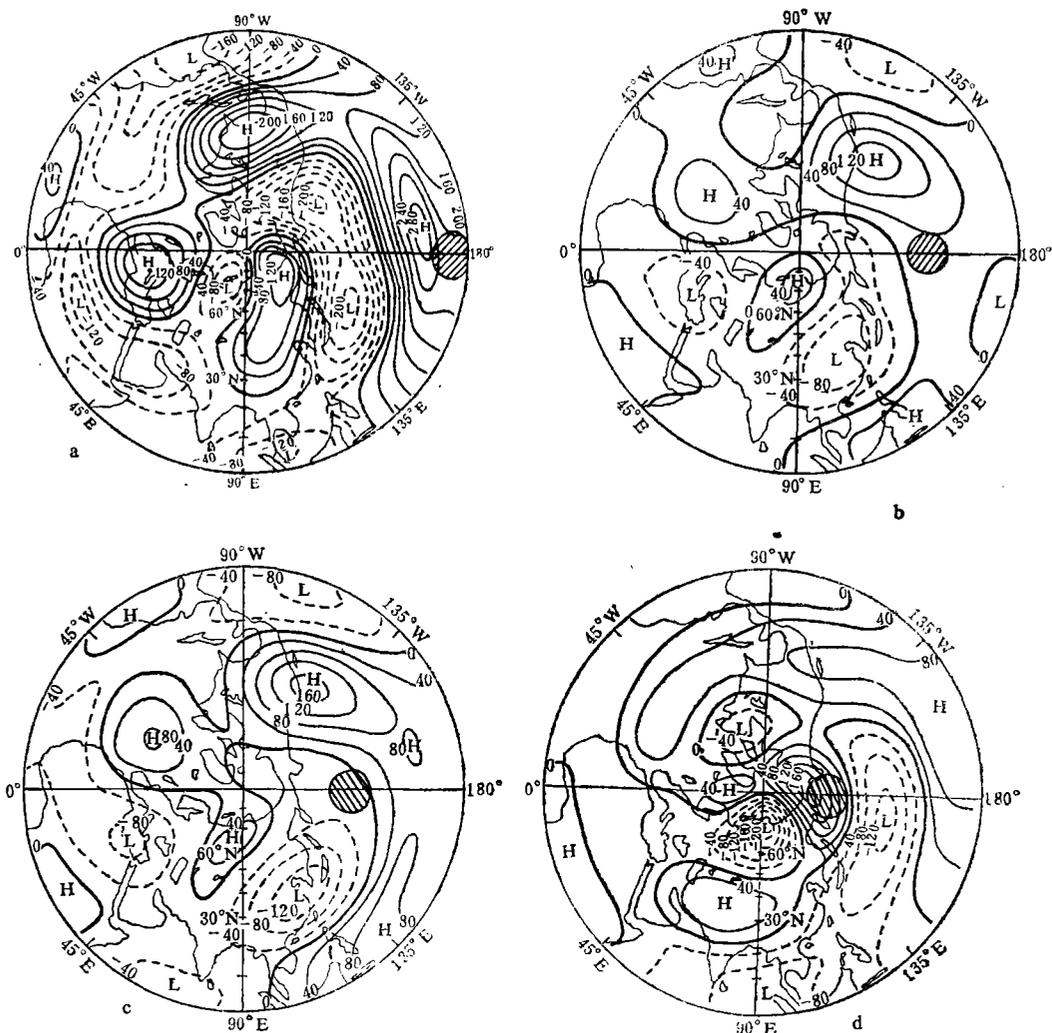


图 4 基本场 I 时大气位势距平场响应
(单位: dagpm, 阴影区为 SSTA ——见表 1)

2. 大气位势场响应对基本场的敏感性试验

观测事实和数值试验表明, 局地强迫所产生的局地效应能否传播出去影响全球大气与基本场密切相关, 基本场对球面上 Rossby 波传播起着重要的控制作用。基本气流为西风廓线时允许波沿纬圈传播, 而对东风而言, 波振幅随离源地呈指数衰减即被拦截。Webster^[2] 数值试验表明, 当强迫在西风区域时, 热带强迫能激发出大振幅的中高纬度 Rossby 波, Rossby 波在球面上的传播理论和基本场对波动传播的制约作用提供了对北半球遥相关强度随季节振荡的物理解释, 当高层为东风时的夏季, 遥相关是弱的或不存在, 而当冬季热带上空为西风时出现强的遥相关。从我们的数值试验结果看, 比较基本场 I 响应图 4 a 和基本场 II 响应图 5 a 可以看出, 前者响应比后者要强得多, 基本场 II 时中高

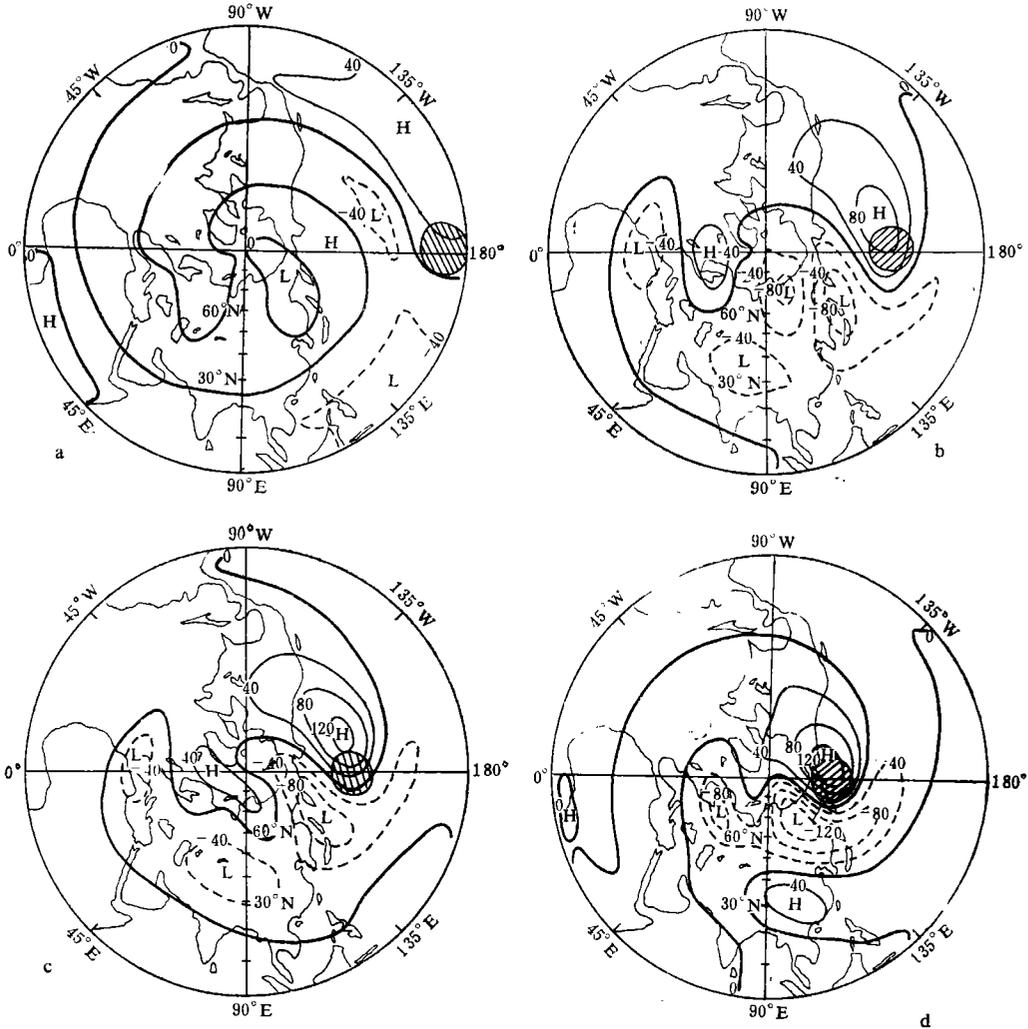


图 5 基本场 II 时大气位势距平场响应
 (单位: dagpm, 阴影区为 SSTA ——见表 1)

纬度几乎对低纬 SSTA 没有响应。这只要从基本场风速廓线图 1，根据以上理论就可明白，基本场 I 的低纬 SSTA 在西风带范围内，而基本场 II 的低纬 SSTA 在东风带内。

3. 大气位势场响应对海温异常位置的敏感性试验

大气对外界强迫响应除取决于大气基本场、扰动物、背景场及摩擦耗散等因子外，还和强迫源的位置和结构有关，即对强迫源的响应存在敏感性问题。由图 4 可见，不同纬度的 SSTA 所激发的响应场振幅是不一样的，其中热带的 SSTA 所激发的距平场振幅最大，说明距平场响应振幅对 SSTA 位置是极其敏感的，低纬热带是激发大气环流异常最敏感的区域，在有些情况下，热带 SSTA 对中高纬度大气环流的遥影响较中高纬度 SSTA 的局地影响更为重要。这似乎对数值预报提出了新的问题，即要求热带地区海温预报要有相当的精度，否则在一定条件下热带地区海温预报误差将影响中高纬度大气场的预报精度。此外还说明，对于时间尺度长于热带局地热源强迫所产生的波列传播到中高纬度所需时

间的数值天气预报而言,考虑热带和中高纬度间的遥相互作用是极其重要的,也正是这种遥相互作用性提供了长期天气过程数值预报的物理基础,延长了大气对长期天气过程的记忆。

五、结 语

本文用具有月、季长期天气过程数值预报能力的 FAM,研究了大气位势场对 SSTA 的线性定常响应。值得指出的是文中存在几条限制:(1) 所用模式为定常海温强迫下的准地转模型,因此赤道附近的结果会有一定误差,同时没有考虑海气间的反馈作用和大气斜压性。(2) 本文结果为模式方程的定常解,没有考虑流型的演变过程。为清楚地了解定常流型的形成过程,应完整地研究非定常强迫系统。(3) 本文用谱方法求解,除物理过程的考虑和参数的确定有人为性和不确定性外,在作数学处理时未引入其它近似,但最后可化为线性方程组是以对方程的线性化处理为代价的,因而没有考虑非线性作用。(4) 本文给出用 FAM 研究大气对 SSTA 响应的初步实验结果,只取两种纬圈平均的基本态。(5) 本文中 SSTA 所产生的定常波列西北向分布排列未作进一步讨论,仅给出数值试验结果。

本文虽有以上限制,但从线性定常响应数值试验得到以下有意义的结论:

1. FAM 具有模拟大气中因 SSTA 强迫产生的定常行星波波型能力,利用数值试验阐明了 SSTA 不只是局地效应,它能导致全球性环流异常。
2. 低纬热带 SSTA 对中高纬度定常波型有重要影响,在有些情况下,热带 SSTA 对中高纬度的遥影响较中高纬度 SSTA 的局地影响更为重要。
3. 从数值试验结果看,准确地预报 SST 对于准确地预报大气响应场是极其重要的。
4. 从 FAM 的数值试验表明, SSTA 产生的定常波列除已熟知的东北向排列的波列外,还存在一支西北向排列的波列。
5. 用谱方法数值求解 FAM 方程是一种较为满意的方法。

参 考 文 献

- [1] Webster, P. J., Response of the tropical atmosphere to local steady forcing, *Mon. Wea. Rev.*, **100**, 518—541, 1972.
- [2] Webster, P. J., Mechanisms determining the atmospheric response to sea surface temperature anomalies, *J. Atmos. Sci.*, **38**, 554—571, 1981.
- [3] Gill, A. E., Some simple solutions for heat-induced tropical circulations, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **106**, 447—462, 1980.
- [4] Rowntree, P. R., The influence of tropical East Pacific Ocean temperatures on the atmosphere, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **98**, 290—321, 1972.
- [5] Hoskins, B. J., and D. J. Karoly, The steady linear response of a spherical atmosphere to thermal and orographic forcing, *J. Atmos. Sci.*, **38**, 1179—1196, 1981.
- [6] Wallace, J. M., and D. S. Gutzler, Teleconnections in the geopotential height field during the Northern Hemisphere Winter, *Mon. Wea. Rev.*, **109**, 784—812, 1981.
- [7] 长期数值天气预报研究小组, 一种长期数值天气预报方法的物理基础, *中国科学*, 1977, 第 2 期, 162—172.
- [8] 长期数值天气预报研究小组, 长期数值天气预报的滤波方法, *中国科学*, 1979, 第 1 期, 75—84.

LINEAR STATIONARY RESPONSE IN ATMOSPHERIC POTENTIAL HEIGHT TO SST ANOMALY

Zhang Ronghua

(Institute of Atmospheric Physics, Academia Sinica)

Chao Jiping

(State Oceanic Administration)

Abstract

In this paper, with the spectral method, linear stationary responses in the atmosphere to SST anomaly (SSTA) are investigated using filtered anomaly model (FAM) which has a basis to be able to predict numerically weather process for the monthly or season scale. The teleconnection patterns, the stationary planetary wavetrans induced by SSTA in the atmosphere and sensitivity of atmospheric anomaly field to SSTA location and basic stream field have been analysed. The conclusions are as follows: First, it is pointed out that FAM has a ability to simulate the teleconnection patterns and stationary wavetrains forced by SSTA. Second, there are important influences of tropical heating anomaly on stationary wave patterns at mid-high latitude. The remote influences of tropical heating source on the atmosphere at mid-high latitude are more important than the influences of local heating source in some cases. Third, from the results of numerical experiments, it is quite important to predict accurately the SST for the atmospheric prediction. Fourth, it is indicated from the numerical results of FAM that besides the wavetrain in the direction of the northeast of SSTA location, there is another wavetrain in the direction of the northwest of one. Fifth, there is a clear benefit using spectral method to solve the FAM equation rather than finite difference method. This is a quite satisfied method to solve FAM equation.