

与季节内振荡-超级云团系统相关的赤道波的识别

赵 南 丁汇

(国家气候中心, 北京, 100081)

高桥正明

(东京大学气候系统研究中心, 东京, 153)

摘 要

文中重点研究与热带季节内振荡-超级云团系统相关联的赤道波的识别。考虑到赤道波的本质为截获在赤道地区的一般的气候平衡场附近的线性动力过程的固有模态, 首先从原理上阐明了 POPs 分析技术对于分离各类赤道波动的有效性, 以后利用这种分析方法对日本静止气象卫星所观测到的黑体红外辐射温度资料进行了 POPs 分析。结果表明, 在热带季节内振荡-超级云团系统中, 对应于 40 d 振荡的模态基本表现为 Kelvin 波的结构; 对应于 10 d 左右的模态, 亦为 Kelvin 波, 而在 2 d 尺度上, 则分别存在经向模态序号 $n = 1$ 和 $n = 2$ 的西进和东进惯性重力波。分析中还发现了西进的混合 Rossby 重力波的存在。

关键词: 季节内振荡, 超级云团, 赤道波, POPs 技术。

1 引 言

如果说以往的热带季节内振荡的研究仅局限于与这一振荡相对应的时间空间尺度上的话, 那么近年来的研究则更加倾向于将季节内振荡-超级云团系统及其嵌入于其中的多重尺度的结构作为一个相互紧密关联的整体来看待。

这一观点首先起源于 Nakazawa^[1] (1988) 的有关超级云团及其组织化结构的分析工作。他通过对 GMS 的 TBB 资料的分析, 指出与季节内振荡密切相关的热带西太平洋上的超级云团(Super Cloud Cluster) 有如下特征: 热带超级云团是若干个尺度为数百公里的云团(Cloud Cluster) 的集合; 这些云团的生命史为 1~2 d, 它们不断在超级云团的东部产生, 并西移直至衰亡。这样, 总的效果造成了超级云团以 10 m/s 的相速东传。而每 2~3 个超级云团为一组, 以 10 d 左右间隔间歇出现, 这组超级云团则对应于季节内振荡的某一活跃的位相。这种组织化的结构以及它对于热带季节内研究的重要意义逐步受到人们的广泛重视。Lau 等^[2] (1991), Sui 和 Lau^[3] (1992) 使用静止气象卫星辐射资料的研究再次确定了嵌入在季节内振荡-超级云团系统中的时间尺度主要包括准 10 d, 4~5 d 及 2~

3 d。随后的有关这一方面的资料分析工作多限于确定与各尺度对应的结构属于何种赤道波动。例如 Takayabu 与 Nitta^[4] (1993) 认为 3 ~ 5 d 尺度上主要对应于混合 Rossby 重力波; Takayabu^[5] (1994) 指出构成超级云团的西进的云团为经向模态序号 $n = 1$ 的西进惯性重力波等。

由于正确地识别出与各时间尺度相对应的赤道波动及了解它们之间的相互作用对于认识季节内振荡的结构与激发机制具有十分重要的意义并已经成为季节内振荡研究的主要方面之一, 在本文中将进行这方面的较系统的资料分析工作。这一工作包括指出一种适用于此问题的资料分析方法和用该方法的分析结果。

2 如何识别出各种赤道波

首先必须明确的是这里所指的各种赤道波动是什么。通常所说的赤道波动是由 Matsuno^[6] (1966) 理论所给出的静态背景下的线性动力学的固有模态。这些固有模态包括 Kelvin 波, 惯性重力波, Rossby 波及混合 Rossby 重力波等各种线性波动。而实际上, 由于加热场的非均一性, 静态的基本态是不可能存在的。因此, 更一般地来讲, 实际大气的各类赤道波动只能定义为在这个一般的基本态附近的热带大气的线性动力学过程的截获于赤道地区的固有模态。因此可以设想, 如果没有关于其线性动力学的知识, 从观测资料正确地分离出各类赤道波是非常困难的。另一方面, 通过传统的方法如带通滤波技术只能分离出某一频率范围的波动, 而在这一尺度上, 各种固有模态混杂在一起, 很难鉴别出它们属于哪种赤道波。

既然各种赤道波是赤道地区的线性动力学过程的固有模态, 我们也许要问是否可以直接从观测资料的时间序列提取有关热带大气的主要的线性动力过程的控制方程, 从而找出其固有模态或各类赤道波。有关知识表明在一定条件下这是可以办到的。

假定 X 为气候场在平衡态附近的扰动, 那么热带大气的控制方程无论如何复杂总能写为

$$\frac{dX}{dt} = LX + \text{其他}$$

与其等价的时间离散的形式可以写为

$$X_{t+1} = AX_t + \text{其他}$$

这里 L, A 为线性算子, 它们刻划了热带大气的线性动力学过程, 或者更加确切地说有关热带大气在其平衡态附近的线性动力学的全部信息均包含在其中。而各类赤道波动则对应于其本征模态。这里其他的过程主要是指: (1) 由于平流非线性及条件加热型非线性所导致的赤道波动间的相互作用; (2) 与波动相关的对流凝结加热等。

现在的问题相应地变为如何从观测资料确定出 A , 从而计算出其本征模或各类赤道波动。事实上, 这一思想正是近年来发展起来的 POPs 分析的出发点。POPs (Principal Oscillation Patterns) 技术首先由 Hasselmann^[7] (1988) 在理论上提出, 其后逐步开始用于气候资料的分析。有关这一方法的详细评述及若干应用实例可参见 von Storch 等^[8] (1995)。POPs 方法的一个重要假定是: 观测时间序列可以认为是主要由一线性动力学系统对于

代表其它次要过程的随机强迫的响应。而这一主要的线性系统的复共轭固有模态则代表一些振荡型,它们通常被称为 POPs。问题仍然归结于从观测资料如何识别出这一线性系统。对于目前的问题而言它正是赤道大气的线性动力学,而在这以外的其他过程首先从量级上来说比较小,其次充分无规则,因而可遵循 POPs 分析的思想将其假定为白噪声。从而描写赤道波动的方程最终可写为

$$X_{t+1} = AX_t + \text{白噪声}$$

由于观测资料为空间离散的, A 在这里为矩阵,通常称为系统矩阵。其中包含了有关赤道波动的全部信息。为了从观测时序估计出 A , 上式的两边同时右乘 X_t^T 的转置,并对整个时序求期望,可求出 A 为

$$A = E\{X_{t+1}X_t^T\}E\{X_tX_t^T\}^{-1}$$

不难发现系统矩阵最终可由协方差阵及 lag-1 交叉协方差阵估出。

周期振荡传播型或波动是由 A 的一对复共轭特征向量 $p = p_r + p_i, p^* = p_r - p_i$ 所描述的。通常我们等价地使用其实部 p_r 和虚部 p_i 所代表的型来反映该波动的空间结构。与其相应的特征值为 $\lambda = e^{-i\omega}$ 。可以证明(von Storch, et al, 1995)^[8]该波动的振荡及传播行为可以由下式刻划

$$[\cos(\omega t)p_r - \sin(\omega t)p_i] \quad (1)$$

由于耗散的存在,所有的模态均为衰减的,因而应有 $|\lambda| < 1$ 。其衰减的 e -折度时间为 $\tau = -1/\ln|\lambda|$, 振动周期为 $T = 2\pi/\omega$ 。当外加随机强迫近乎白噪声的情况下,可以证明对于 POP 时间系数的自乘谱(Autospectrum) $S(\omega)$ 有

$$S(\omega) = \frac{1}{e^{-2\tau\omega} - 1}$$

由此式可以看出, $S(\omega)$ 在频率 $\omega = 0$ 处为一峰值,并且 τ 值越大(或者 T 越长),该峰就越显著。

POPs 分析在用于诊断气候系统的时空变化如季节内振荡、QBO, ENSO 及斜压波时被证明是一种强有力的工具。这一方法正逐渐被应用于气候问题的许多方面,且日益变为一种常规分析方法。如果上述的关于赤道波动的分析是正确的话,与季节内振荡-超级云团系统所密切相关的各类赤道波(它们在不同程度上受非均匀加热场的扭曲),作为赤道地区线性动力学的固有模态,原则上是可以由 POPs 方法检出的。

3 资料及具体方法

文中所使用的资料是日本静止气象卫星“向日葵”所观测到的 3 h 间隔的黑体红外辐射温度(GMS/IRTBB)的 $1^\circ \times 1^\circ$ 的网格上的平均值。该资料的覆盖区域为南北纬 60° 与 80° E 到 160° W 之间。本研究所选择的期间为 1991 年 5 月 1 日至 7 月 31 日的 3 个月并仅作赤道西太平洋(10° N - 10° S) \times (90° E - 180°) 区域中的分析。

为了表示对流活动沿赤道的主要传播特征,在图 1 中给出了南北纬 5 度间平均的

TBB 资料的时间-经度剖面图。黑色阴影部分表示 TBB > 225 K 的较强的对流活动。首先由此图可以看出与季节内振荡及超级云团活动相联系的对流活动具有多重的时间空间尺度, 其中较大尺度的系统与超级云团有关并显示出一定的东进趋势, 而尺度较小的结构则可能对应于云团的活动, 它们亦表现出某种程度的西移或东移的趋势, 尽管上述特征没有 Nakazawa^[1] (1988) 所指出的那样典型。需要在此强调的是, 这里使用的是南北纬 5 度间的平均资料, 因而它仅反映一些主要的关于赤道对称的模式传播状况。

因为 POPs 做为一种线性分析方法仅适用于相对于平衡场的扰动, 文中的分析中近似地使用 TBB 的距平场。为了压缩数据, 减少空间自由度, 以下的分析使用 $2^\circ \times 2^\circ$ 的平均。为了提取热带大气中所发生的主要线性过程, 并进一步压缩自由度, 首先对 TBB 场进行 EOF 展开, 截断至前 85 个 EOF, 此时占到总方差的 70%。POPs 分析是对这些 EOF 的时间系数所构成的向量的时间序列进行的。

如上所述, 系统矩阵 A 的复特征向量的实部 p_r 与虚部 p_i 反映了波动的空间结构。而多重时间尺度特征, 则可通过由相应的特征值计算出的振动周期 T 以及 e -折度时间 所构成的谱来反映。图 2 为所得到的这种特征时间谱。它清楚地反映出了复杂的多重时间尺度特征, 尽管如此, 大致可以依据其时间尺度将各种振动模式分为以下 3 类: (1) 季节内振动; (2) 准两周及准 10 d 振动; (3) 周期为几天的振动。这一结果与有关的热带低频振荡及赤道波动的知识相一致。

4 结 果

4.1 季节内振荡信号

上面所发现的最重要的 POP 之一对应于通常的季节内振荡, 其周期为 38 d, 图 3 为其实部以及虚部。首先可以看出这一模态具有较大的纬向尺度, 这与有关季节内振荡的知

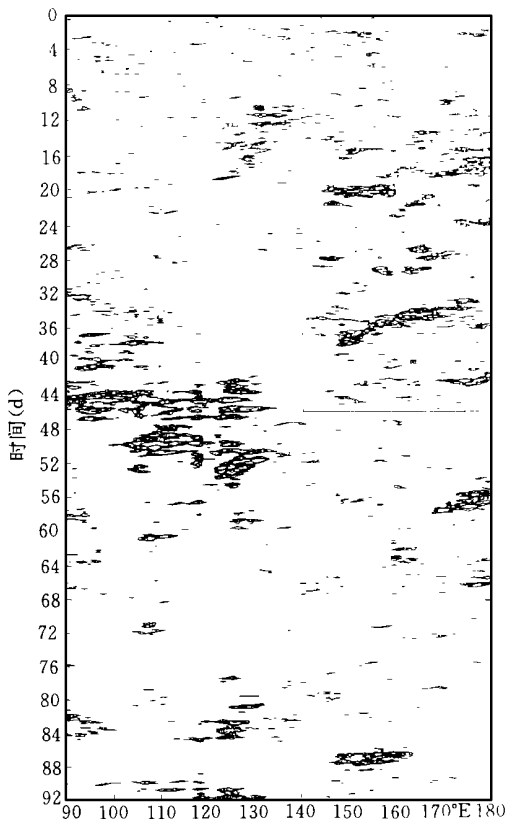


图 1 南北纬 5 度间平均的 TBB 资料的时间-经度剖面 (黑色阴影部分表示 TBB > 225 K 的较强的对流活动)

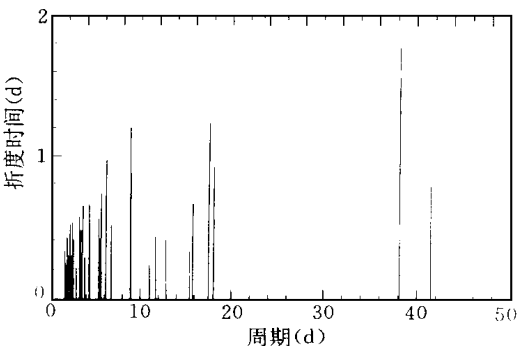


图 2 由相应的特征值计算出的振荡周期 T 以及 e -折度时间 所构成的特征时间谱

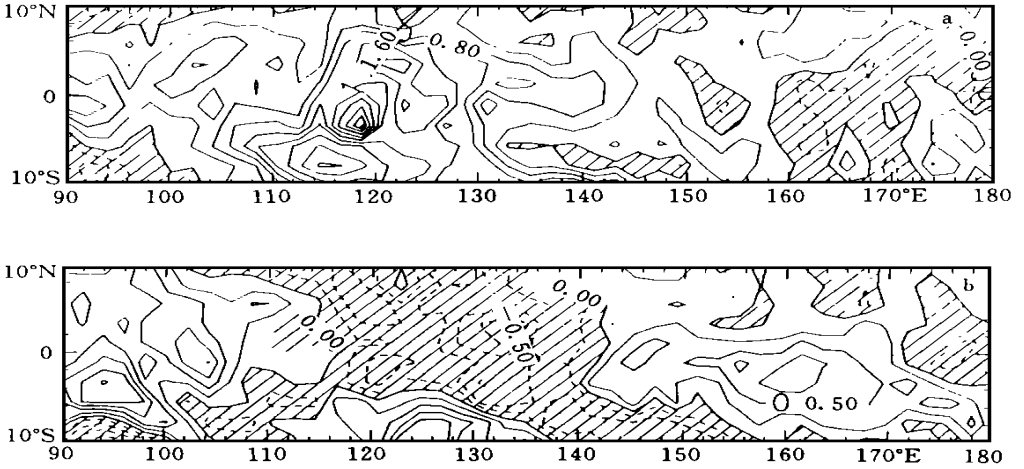


图3 对应于通常的季节内振荡的POP的实部以及虚部(其周期为38 d)

识不矛盾。在南北方向上,基本上为关于赤道的对称结构,其活动中心位于赤道。因而它应被认为是 Kelvin 波。

如前所述,振荡模态的传播行为取决于 p_r (图 3a) 和 p_i (图 3b) 之间依照式(1)的交替。更加直接地,使用这种交替在南北纬 2 度间平均的时间-经度剖面图来表示其纬向传播的状况(见图 4)。可以看出这一振荡基本上为向东传播,但是在其振幅最大的 110 E 至 130 E 之间主要呈现出驻波的特征(伴随有一定的西进)。这一特征主要是与在该地区(即所谓的海洋-大陆)旺盛发展的积云对流活动相联系。对应于该地区的局地加热首先被激发出的尺度最大的模态显然应是 Kelvin 波模。但是,它由于受到非均匀加热场的作用其传播特性表现出较大的差异。

4.2 准两周及准 10 d 振荡

由特征时间谱即图 2 可以看出,另外两种重要的振荡分别为 17 d 和 9 d 左右,对应

于准两周和准 10 d 振荡。关于前者,作为低频振荡的一种应专门予以研究,在此不打算过多涉及。而准 10 d 振荡由于它对应于超级云团间歇出现的周期,在季节内振荡的研究中通常受到特别地关注。从图 5 及图 6 所示准 10 d 振荡的结构及传播情况可以看出它具有与季节内振荡相类似的 Kelvin 波结构,只是与季节内振荡相比较波长较短(或频率较快)。由此似乎可以断定,与单个超级云团的时空尺度相对应的赤道本征模态亦应为

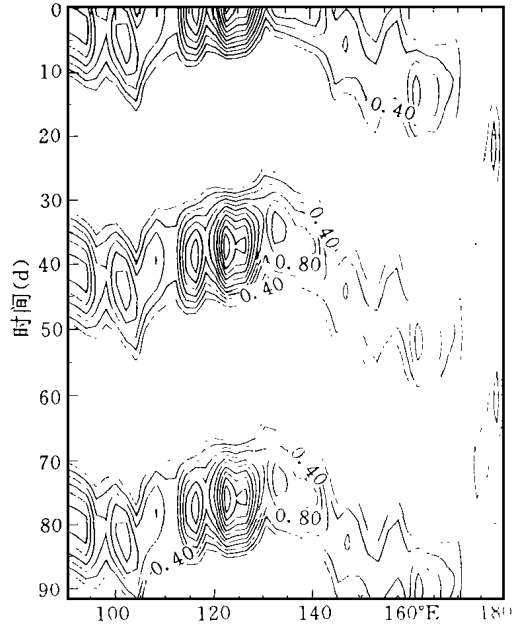


图4 使用 p_r 和 p_i 之间依照式(1)的交替在南北纬 2 间平均的时间-经度剖面图来表示季节内振荡纬向传播的状况

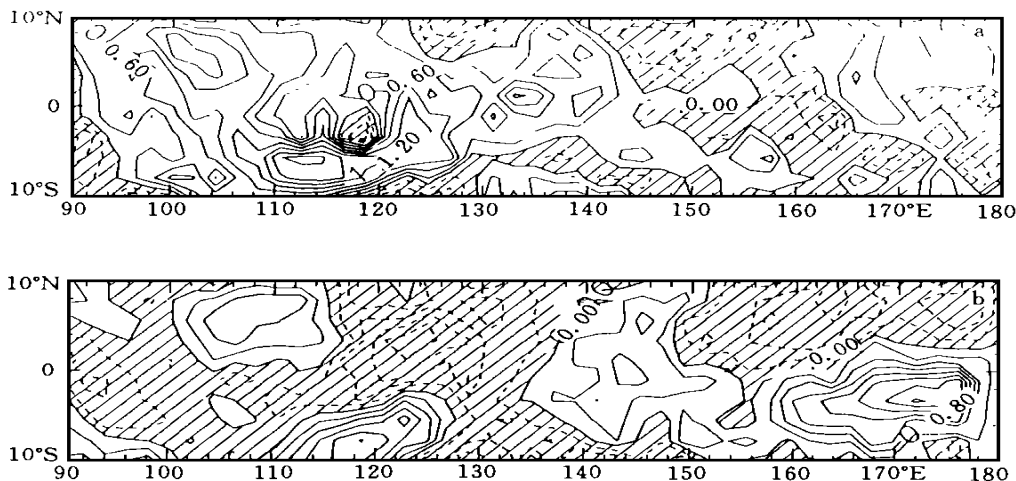


图5 准 10 d 振荡的 POP 的实部以及虚部

Kelvin 波。

4.3 周期为数天的赤道波动

在一个典型的超级云团中,存在着数天时间尺度的组织化的对流活动,为了深入了解超级云团的动力结构,有必要确定出与这一尺度的对流活动相对应的赤道波的种类。最近, Takayabu^[5] (1994) 的工作通过谱分析及其对波动的频散关系的研究试图给出对流云团等与经典的 Matsuno^[6] (1966) 理论赤道本征模态的对应关系。事实上,由于赤道波为截获在赤道地区的线性动力学的本征模态,其经向结构特征对于识别它的类型是十分重要的。而传统的分析方法在分离单个本征模态时,似乎显出某种局限性。因为在任何狭窄的频率带上,可以有许多模态存在,简单地使用带通滤波技术似乎难以有效地分离出某一个的赤道波模态, POPs 分析技术在这一方面则显出某种程度上的优越性。

4.3.1 混合 Rossby 重力波

自从经向模态序号为 $n = 0$ 的赤道波模态在理论上被 Rosenthal^[9] (1965) 及 Matsuno^[6] (1966) 所发现并在实际大气中被观测到以来,由于它在平流层下层的 QBO 的生成中所起的重要作用,其重要性受到了人们的广泛重视。观测结果表明,其周期约为 4.5 d, 波长为 104 km, 并以 23 m/s 的相速西传^[10] (Yanai 与 Maruyama, 1966)。

值得指出的是,这种波在我们的 POPs 分析中也可以检测到。它所对应的 POP 是一

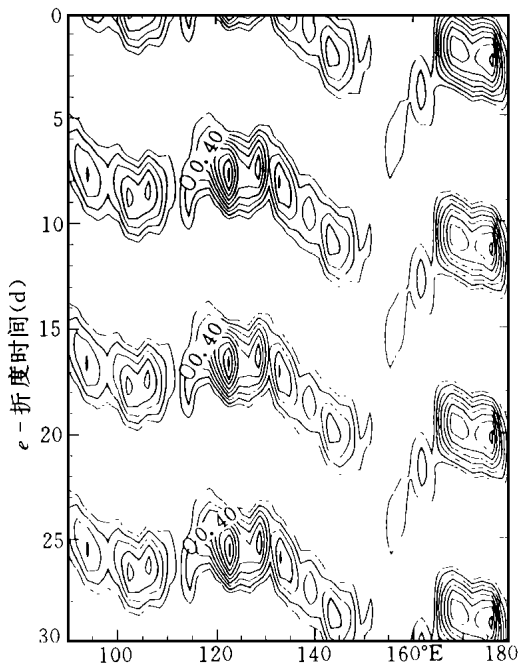


图6 准 10 d 振荡的 POP 的传播情况

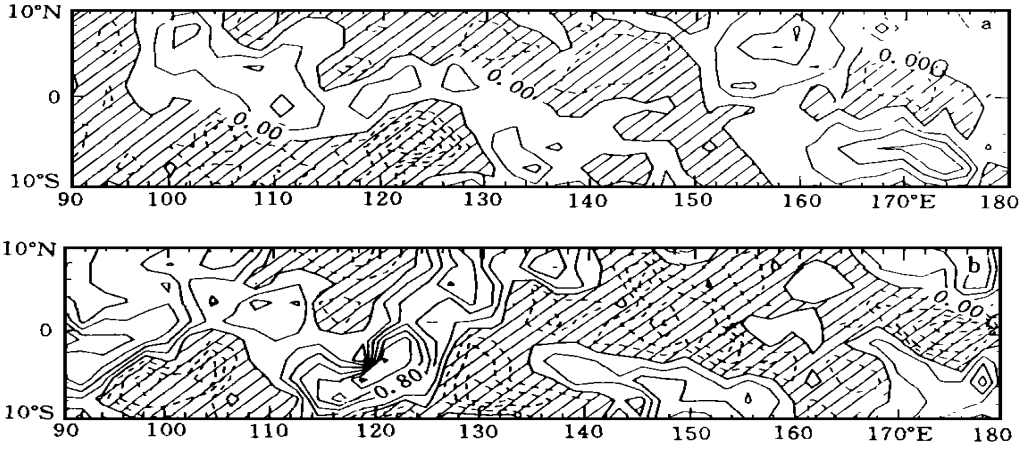


图7 对应于混合 Rossby 重力波的 POP 的实部以及虚部

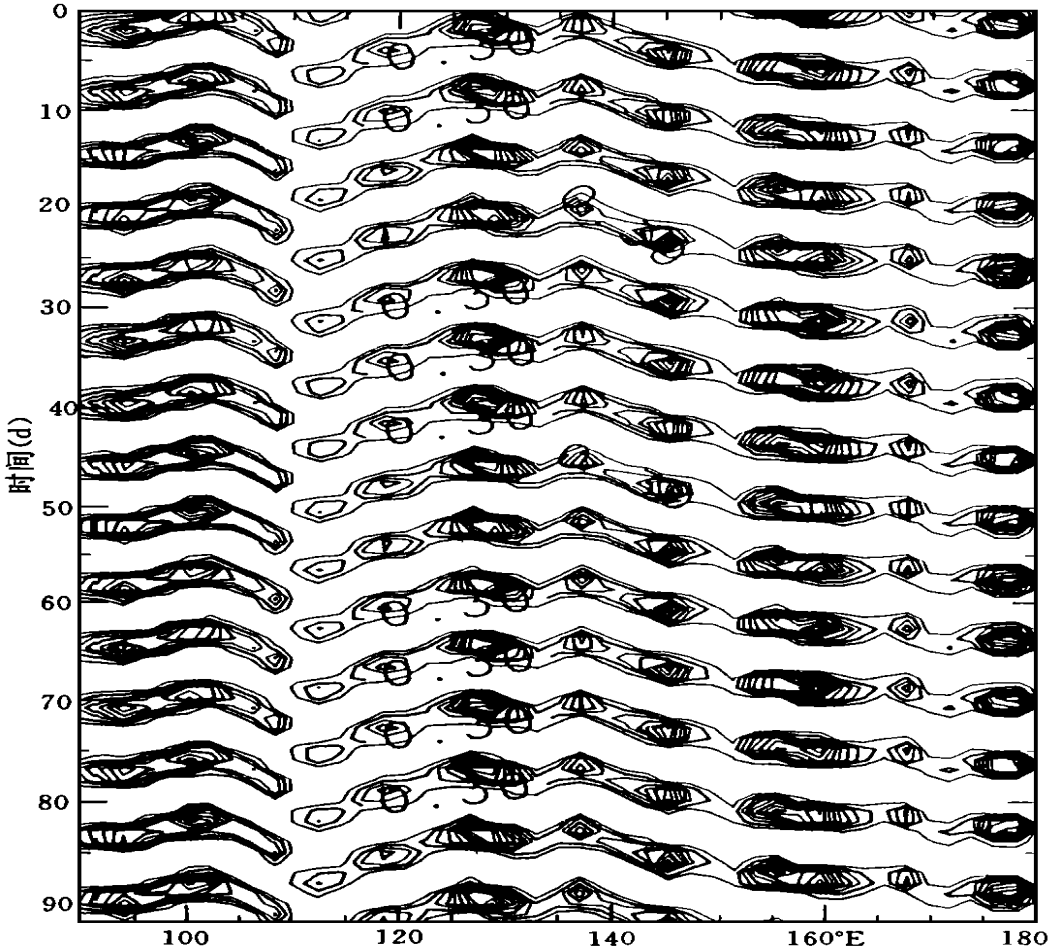


图8 表征混合 Rossby 重力波传播状况的 4~8 N 间的平均时间-经度剖面

个周期为 6.2 d(比通常值略高)的振荡模态。图 7 给出了它的由 p_r (图 7a) 及 p_i (图 7b) 所表示的水平结构。可以看出, 在 150°E 以西, 这一模态呈现出较为典型的关于赤道的反对称结构。而从表征该模态传播状况的 4°N 至 8°N 间的平均时间-经度剖面图(图 8)可以看出, 在对应于反对称结构的 140°E 以西地区该波动主要表现为西进。因此, 似乎可以断定这一模态对应于经典的混合 Rossby 重力波。须要注意的是, 由于加热场的非均一性, 对应于加热源西侧该波受到激发而在东侧受到抑制并主要表现为 Kelvin 波性质。POPs 分析的结果在某种程度上是合乎常识的。

4.3.2 惯性重力波

众所周知, 在一个典型的超级云团当中始终存在着 2~3 个不断西进的生命期为 1.5~2.5 d 的云团。Takayabu^[5](1994) 的研究表明, 这一尺度的运动主要是 $n = 1$ 的西进惯性重力波。在此, 用 POPs 分析方法除了再次证实这一观点以外, 同时也想证实在一一般的情形下, 与这一尺度对应的也有东进惯性重力波。

鉴于惯性重力波通常具有比较小的水平尺度, 我们相应地进行更加细致地分析。仅对介于 140°E 至 180° 之间, 期间为 5 月 1 日到 6 月 14 日(图 1 中右上的方框中)的资料进行 POPs 分析。在此期间云团的活动显得比较旺盛。经向格距仍为 2 度而纬向格距改为 1 度。

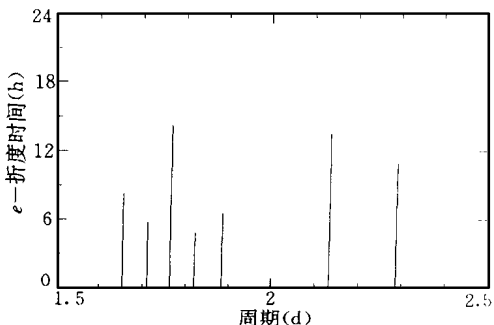


图 9 周期位于 1.5 至 2.5 d 的最主要的 POP

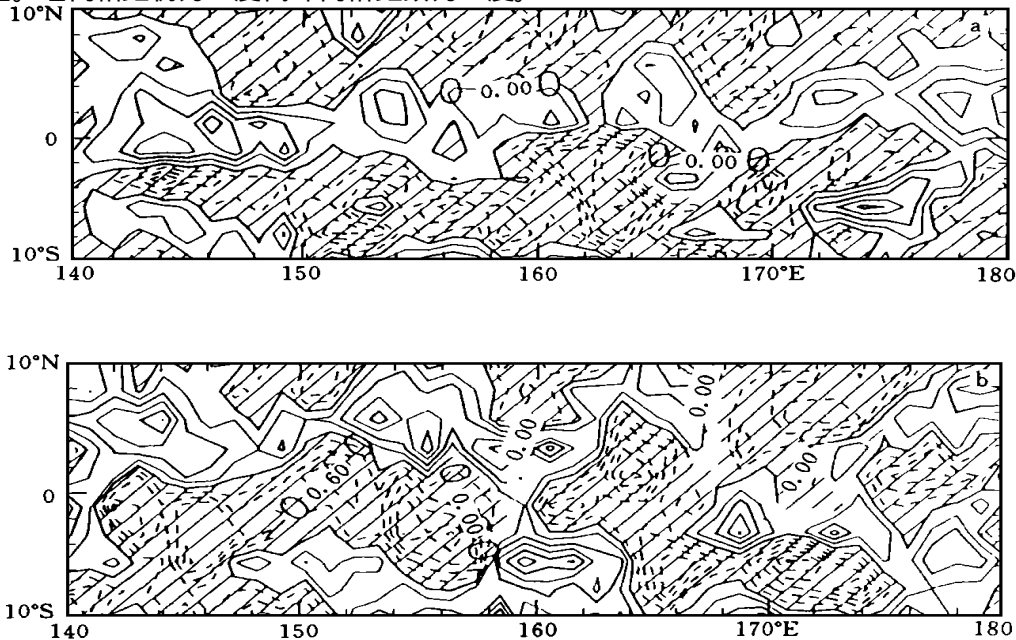


图 10 对应于 $n = 1$ 的惯性重力波的 POP 的实部以及虚部

分析结果表明,周期位于 1.5 至 2.5 d 的最主要的两个 POP(图 9) 所代表的波动被认为对应于惯性重力波。第一个周期为 2.1 d。其水平结构如图 10 所示。无论其实部或虚部均呈现出关于赤道对称的分布。并且,一些活动中心沿赤道排列,在其两侧偏离赤道约 5 度的地方,是一些具有相反位相的活动中心。纬向波长约为 103 km 上述特征是典型的 $n=1$ 的惯性重力波的水平结构。用图 11 所示的 $2^{\circ}\text{N}-2^{\circ}\text{S}$ 间平均的时间-经度剖面图来表征其传播特征。不难看出,在 155°E 以西,波动主要表现为西传,因此这一部分可以

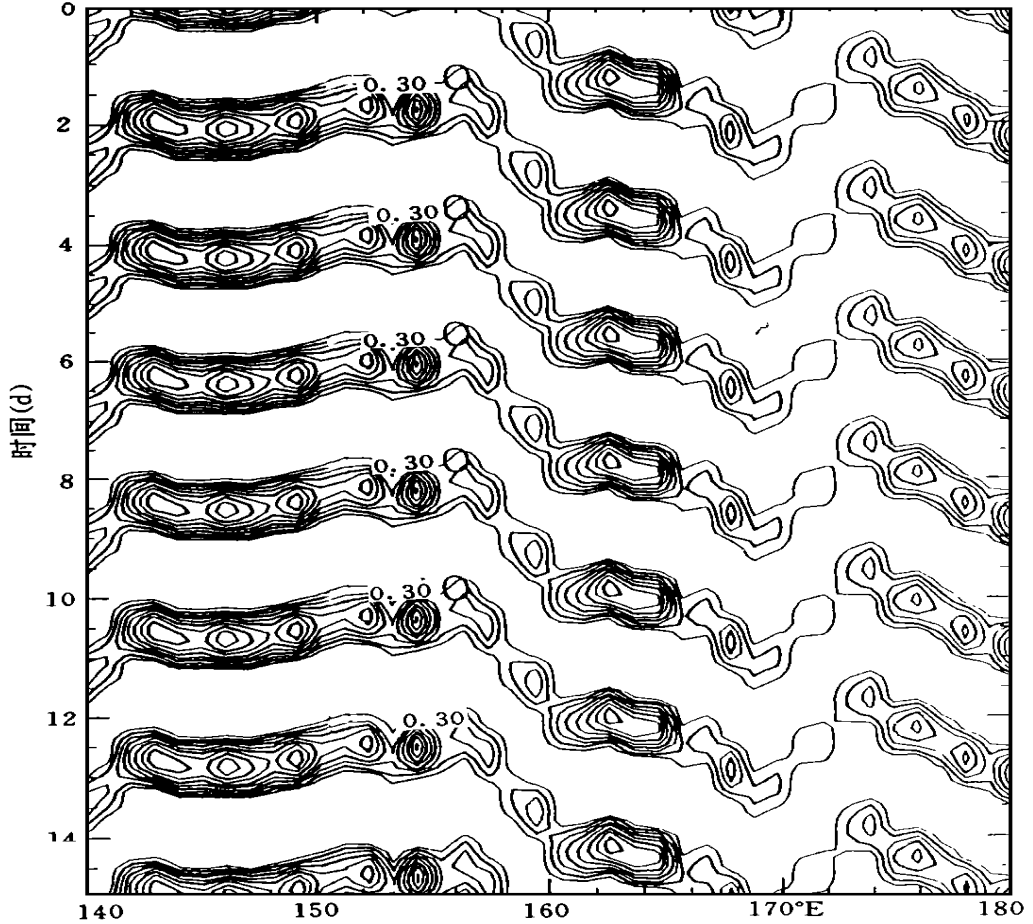
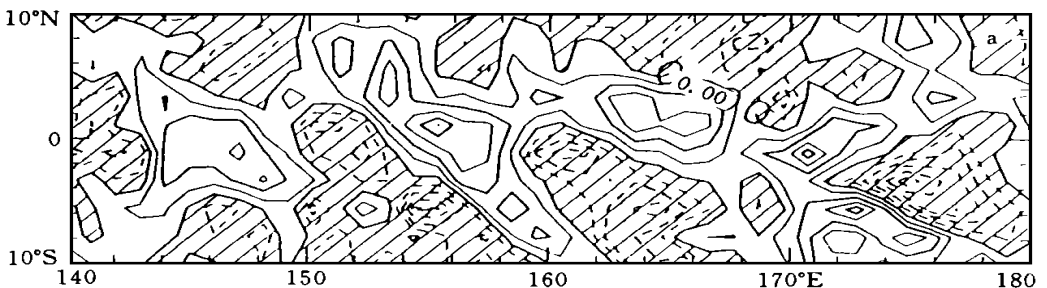


图 11 表征 $n=2$ 惯性重力波的传播状况的 $2^{\circ}\text{N}-2^{\circ}\text{S}$ 间平均时间-经度剖面



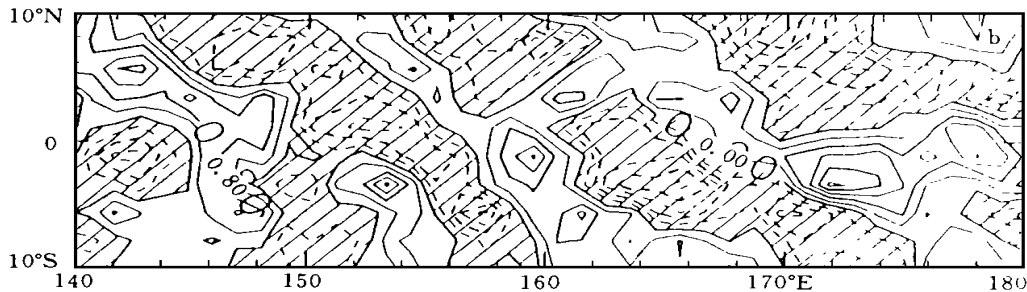


图 12 对应于 $n = 2$ 的惯性重力波的 POP 的实部以及虚部

认为是对应于西进的 $n = 1$ 的惯性重力波。类似地, 其东侧部分为 $n = 1$ 的东进惯性重力波。

另一个与惯性重力波有关的重要的 POP 具有 1.8 d 的振荡周期。其结构和传播情况分别见图 12 与图 13。 p_r 和 p_i 所表示的波为较典型的关于赤道反对称结构。并且它们呈现

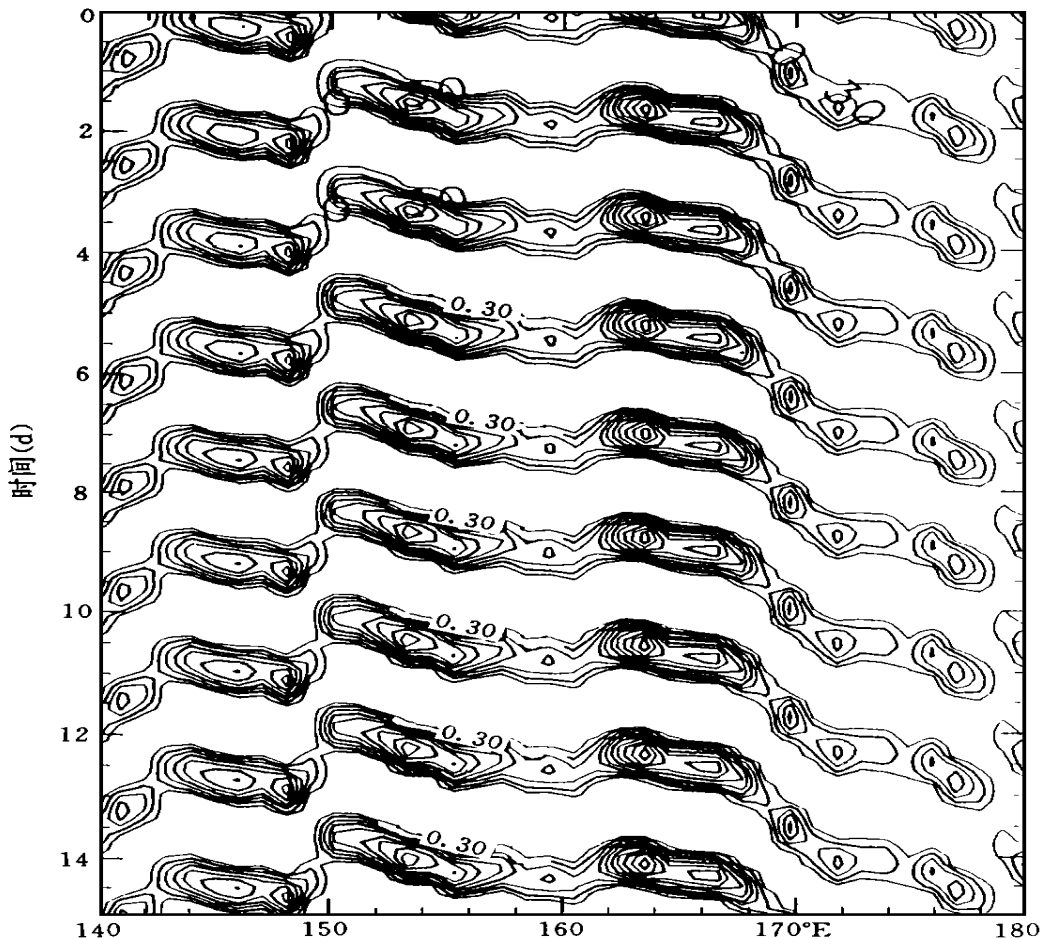


图 13 表征 $n = 2$ 的惯性重力波的传播状况的 4~8 N 间的平均时间-经度剖面

出较为复杂的经向分布。在赤道两侧,沿着经度方向符号改变两次。这是一种 $n = 2$ 的惯性重力波的结构特征。而由图 13 所表示的传播状况可以清楚地看出其东传的特征。由此,可以断定这一模态为东进的 $n = 2$ 的惯性重力波。

5 总 结

与季节内振荡超级云团系统相关联的多种时间空间尺度结构的存在不仅使对这一系统模式化时遇到困难,而且也使得传统的资料分析方法如滤波技术等,在识别赤道本征模态时显得不尽有效。而 POPs 分析技术作为一种介于动力学模式与统计分析之间的方法,对于有效地分离各种时空尺度,并识别其对应的赤道波类型显示出较强的功能。POPs 分析结果表明与季节内振荡相对应的 38 d 振荡模态主要表现 Kelvin 波特征。与超级云团相应的 10 d 周期也主要为 Kelvin 波成分。而在两天左右的云团活动的尺度上主要为 $n = 1, 2$ 的西传及东传惯性重力波。分析中也发现了混合 Rossby 重力波。

参考文献

- 1 Nakazawa T. Tropical super clusters with intraseasonal variations over the western Pacific. *J Meteor Soc Japan*, 1988, 66: 823– 839
- 2 Lau K M, Nakazawa T and Sui C H. Observations of cloud cluster hierarchies over the tropical western pacific. *J Geophys Res*, 1991, 96: 3197– 3208
- 3 Sui C H and Lau K M. Multiscale phenomena in the tropical atmosphere over the western Pacific. *Mon Wea Rev*, 1992, 120: 407– 430
- 4 Takayabu Y N and Nitta Ts. 3– 5 day-period disturbances coupled with convection over the tropical Pacific Ocean. *J Meteor Soc Japan*, 1993, 71: 221– 246
- 5 Takayabu Y N. Large-scale cloud disturbances associated with equatorial waves. Part II: Westward-propagating intertropical-gravity waves. *J Meteor Soc Japan*, 1994, 72: 451– 465
- 6 Matsuno T. Quasi-geostrophic motions in the equatorial area. *J Meteor Soc Japan*, 1966, 44: 25– 43
- 7 Hasselmann K. PIPs and POPs: The reduction of complex dynamical systems using principal interaction and oscillation patterns. *J Geophys Res*, 1988, 93: 11015– 11021
- 8 Von Storch H, Burger G, Schnur R and von Storch J-S. Principal oscillation patterns: A review. *J Climate*, 1995, 8: 377– 400
- 9 Rosenthal SL. Some preliminary theoretical considerations of tropospheric wave motions in equatorial latitudes. *Mon Wea Rev*, 1965, 93: 605– 612
- 10 Yanai M and Maruyama T. Stratospheric wave disturbances propagating over the equatorial Pacific. *J Meteor Soc Japan*, 1966, 44: 291– 294

DETECTING EQUATORIAL WAVES ASSOCIATED WITH INTRASEASONAL OSCILLATION/ SUPER CLOUD CLUSTERS SYSTEM

Zhao Nan Ding Yihui

(*National Climate Center, Beijing, 100081*)

Masaaki Takahashi

(*Center for Climate system Research, University of Tokyo, Tokyo, 153*)

Abstract

This paper is focused on the detection of equatorial waves related to the intraseasonal oscillation / super cloud cluster system. Since tropical waves can be generally defined as the tropically trapped eigenmodes of the linear dynamics of the tropical atmosphere, POP technique is regarded an effective method to separate all kinds of equatorial waves from observed data. Data of infrared equivalent black-body temperature by Japanese Geostationary Meteorological Satellite are subjected to a POP analysis. The results suggest that within a ISO/SCC system, eigenmodes with a period of about 40 and 10 days mainly exhibit Kelvin wave-like features, while those with periods of 2.1 and 1.8 days correspond to the westward-propagating inertio-gravity wave with meridional mode number $n = 1$ and eastward-propagating inertio-gravity wave with $n = 2$, respectively. An eigenmode which behaves like mixed Rossby-gravity wave is also found in the analysis.

Key words: Intraseasonal oscillation, Super cloud clusters, Equatorial waves, POPs technique.