

热带大气季节内振荡的传播及影响因子研究

杨辉¹ 李崇银^{1,2}

1 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029

2 解放军理工大学气象学院, 南京 211101

摘要 通过观测资料的分析, 对热带大气季节内振荡 (ISO) 的传播 (移动) 进行了深入系统的研究, 揭示了热带大气 ISO 的纬向和经向移动的特征, 以及热带大气低频动能的跨赤道传播特征。同时, 通过对比分析还揭示了 ENSO 和热带对流加热异常对热带大气 ISO 移动的影响。

关键词 热带大气 季节内振荡 传播 ENSO 对流加热

文章编号 1006-9585 (2005) 02-0145-12 **中图分类号** P434 **文献标识码** A

A Study of Propagation of Tropical Intraseasonal Oscillation and Its Influence Mechanism

YANG Hui¹, LI Chong-Yin^{1,2}

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

2 Meteorological College, PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101

Abstract Through the analyses in observational data about 45 years, the propagations of intraseasonal oscillation (ISO) in the tropical atmosphere are investigated systematically. The characteristics of the zonal and meridional propagations of the ISO in tropical atmosphere and the propagation across the equator of kinetic energy of the ISO are revealed in this study. Simultaneously, the influences of the ENSO and anomaly of tropical convection heating on the propagation of the ISO are also indicated through the comparing analyses.

Key words tropical atmosphere, intraseasonal oscillation, propagation, ENSO, convection heating

1 引言

大气季节内 (30~60 天) 振荡已被视为重要的大气环流系统之一, 它的活动及其异常对不少地区的天气和短期气候都有重要影响。因此, 自季节内振荡 (ISO) 在 20 世纪 70 年代初被发现以来^[1,2], 一直是大气科学的重大前沿课题, 国内外已对其进行了一系列的研究^[3~6], 对其结构和活

动规律已有了基本的认识, 尤其是关于它的纬向一波特征和东传性质^[7,8]。关于 ISO 的动力学机制也有一系列的研究, 包括积云对流加热反馈的 CISK (Conditional Instability of Second Kind) 机制^[9~11], 蒸发-风反馈机制^[12,13], 外强迫激发机制^[14], 以及海气耦合机制^[15,16]。

但是, 有关热带大气 ISO (也有人称 MJO) 的活动等还仍然存在不少问题, 有待深入研究, 例如它的传播问题一直未完全清楚, 2003 IUGG

收稿日期 2003-10-29 收到, 2005-05-16 收到修定稿

资助项目 中国科学院知识创新工程项目 KZCX3-SW-226 及国家自然科学基金项目 40233033、40325015

作者简介 杨辉, 女, 1962 年生, 副研究员, 主要从事气候变化的研究。E-mail: yanghui@mail.iap.ac.cn

科学大会上仍为大家研讨的内容之一。就其纬向移动来讲,热带大气 ISO 在赤道附近确实主要表现为东传特征,但在赤道外的热带地区也常常看到西传的特征^[17];而且就是在赤道地区,也不时可以看到大气 ISO 西传的情况^[18,19]。更为有意思的是,数值模拟试验表明,赤道地区大气 ISO 的纬向移动与积云对流活动(即大气加热)的水平分布有着密切的关系^[20]。因此,有关热带大气 ISO 的移动及其可能原因还有不少问题,需要从分析和理论上进一步深入研究。

本文将通过分析 NCEP/NCAR 再分析资料以及 OLR (Outgoing Longwave Radiation) 资料等,对热带大气 ISO 的纬向和经向传播作进一步研究,更好地揭示热带大气 ISO 的活动规律。

2 资料及分析方法

本文使用的基本资料是 NCEP/NCAR 日平均再分析资料(1955~1999 年),分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$,垂直方向本文只用了 850 hPa 和 200 hPa 的资料。另外,为了确定对流活动及降水场的形势,我们也用到了 NCAR 的 OLR 月平均资料和 NCEP/NCAR 的月平均降水率资料,同时为了表明 El Niño 和 La Niña 的活动情况,还用到了英国 Hadley 中心的月平均海表温度(SST)资料。

为了描写热带大气 ISO 的活动,首先对 200 hPa 和 850 hPa 的风场进行了 30~60 天带通滤波处理,其滤波器为一般所常用的^[21]。因为热带大

气 ISO 主要表现为纬向风的变化,本文将主要分析带通滤波后 u 分量的情况。

根据 SST (Sea Surface Temperature) 资料,图 1 给出了 Niño 3 区平均 SSTA (sea-surface temperature anomaly) 的时间演变曲线,它十分清楚地表明了 El Niño 和 La Niña 的活动情况。显然自 1955 年以来,1957、1963、1965、1968~1969、1972、1976、1982~1983、1986~1987、1991~1992、1994 和 1997 年为 El Niño 年;1955、1964、1967、1970、1973、1975、1984~1985、1988 和 1998 年为 La Niña 年;1959、1960、1962、1980 和 1990 年的 SSTA 比较接近零线,可视为无 ENSO (非 El Niño 和非 La Niña) 影响的一般情况的代表。下面将分别对上述不同情况进行分析研究,并探讨影响大气 ISO 移动的主要因素。

3 赤道大气 ISO 纬向移动的季节特征

过去的研究已初步指出,赤道大气 ISO 虽然主要表现为东传,但有时东传并不明显,甚至有西传情况;而且在一定程度上其纬向传播还同太平洋海温以及对流活动有一定关系。因此,为了揭示一般情况下赤道大气 ISO 的纬向移动特征,我们专门分析了非 El Niño 和非 La Niña 情况下(Niño 3 区 SSTA 基本维持在 0 线附近)的 ISO 的时间-经度剖面。其结果表明,无论在 200 hPa 还

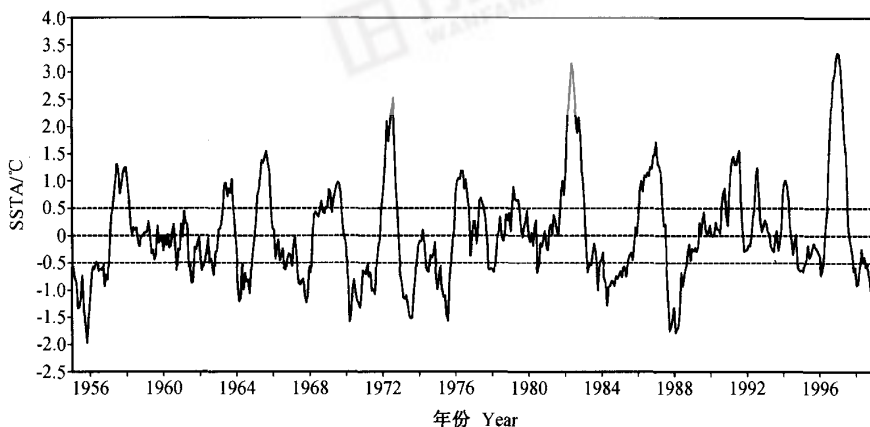


图 1 Niño 3 区平均 SSTA 的时间变化

Fig. 1 Time series of SSTA in Niño 3

是在 850 hPa, 赤道大气 ISO 在冬半年较之夏半年更显示出明显的东传特征。图 2 分别给出的是 1959、1962、1980 和 1990 年 850 hPa 平均纬向风 ($10^{\circ}\text{S}\sim 10^{\circ}\text{N}$) 的时间-经度剖面, 它们都极为清楚地表明, 在夏半年 (主要是 6~9 月) 大气 ISO 东传不甚清楚或时而有西传, 冬半年大气 ISO 都有极明显的东传特征。也就是说, 在一般情况下 (无 ENSO 影响), 赤道大气 ISO 的纬向移动有明显的年变化特征, 在冬半年大气 ISO 的东传十分明显, 但在夏季 ISO 的移动性不明显, 有时可以看到不显著的东传或西传情况。

为了对比, 图 3 给出的是一般情况下, 赤道以外热带大气 ISO 的纬向传播情况。与图 2 相比较可以看到, 在赤道以外的热带地区, 大气 ISO 既东传、也西传, 且西传更明显。这主要是因为动力学理论研究已表明, 在那里 ISO 既受到 CISK-Kelvin 波的影响, 还要受到 CISK-Rossby 波的影响, 而且后者往往更为重要。

4 赤道大气 ISO 纬向移动与 ENSO 的关系

基于 20 世纪 80 年代资料的已有研究表明, El Niño 与热带大气季节内振荡存在一定的相互作用, 在 El Niño 事件发生之前赤道太平洋大气 ISO 有极明显的异常增强, 而在 El Niño 事件发生之后, 大气 ISO 又明显减弱^[22]。一些个例的分析又表明, 赤道大气 ISO 的显著系统性东传与 El Niño 事件的发生有一定关系^[23]。本文将进一步系统分析自 1955 年以来在 El Niño 年和 La Niña 年赤道大气 ISO 的主要纬向移动特征, 从而揭示 ENSO 与赤道大气 ISO 纬向移动的关系。因篇幅关系, 本文将只分别选择给出 4 个 El Niño 年和 4 个 La Niña 年的典型形势进行分析, 各年虽有一些不同, 但有大体相近的特征。

图 4 是 4 个 El Niño 年 (1965、1982、1987 和 1997 年) 200 hPa 上赤道大气 ISO 的 u 分量的时间-经度剖面。850 hPa 有类似情况, 但 200 hPa 振幅大一些, 移动特征更显著, 故用了 200 hPa u 分量进行分析。从图 4 可以看到, 赤道大气 ISO 在 El Niño 年不仅在冬半年向东移动的特征十分显著, 而且在夏季也表现出明显的东移。同图 2

所示的一般情况相比较, 大气 ISO 的明显系统东传的确同 El Niño 的发生有关。

图 5 给出了 4 个 La Niña 年 (1967、1970、1988 和 1998) 200 hPa 上赤道大气 ISO 的 u 分量的时间-经度剖面。与图 4 相比较, 除了秋冬季大气 ISO 的东移不如 El Niño 年之外, 最为突出的是夏季大气 ISO 的纬向移动将以西传为主, 尽管系统性没有东传那么清楚。也就是说 La Niña 的发生同赤道大气 ISO 的西传有一定关系。

5 对流加热分布对赤道大气 ISO 纬向移动的影响

在一个有关热带大气 ISO 的数值模式研究中, 发现模拟的热带大气 ISO 的纬向移动同赤道太平洋区域的降水分布形势有一定关系^[20]。本文将通过对观测资料的系统性分析, 进一步揭示对流加热分布 (主要是纬向分布差异) 对赤道大气 ISO 纬向移动的影响。

1983 和 1987 年都是 El Niño 事件的持续之年, 但赤道大气 ISO 的纬向传播在这两年有着明显差异, 尤其是在夏季 (图 6)。1983 年赤道大气 ISO 东传特征很不明显, 特别是夏季还有西传的现象; 而 1987 年大气 ISO 的系统性东传十分显著, 尤其是夏季。由于对流凝结加热对热带大气 ISO 起着十分重要的作用, 因此我们需要比较分析这两年赤道太平洋的对流活动情况及其差异。图 7 分别给出了 1983 年和 1987 年太平洋区域 $10^{\circ}\text{S}\sim 10^{\circ}\text{N}$ 纬带平均的 OLR 距平的时间经度剖面, 它们表明了各年对流活动及对流加热的不同形势。图 7 十分清楚地表明, 1987 年的主要对流活动区在中太平洋, 而 1983 年的主要对流活动区在东太平洋, 尤其是在夏季上述差异更为明显。数值模拟结果曾指出, 如果赤道东太平洋有较强降水 (对流加热), 则有利于热带大气 ISO 的向西传播 (移动)。1983 年和 1987 年的对比分析正好印证了 GCM 模拟的结果, 1983 年因为在赤道东太平洋一直维持强降水 (对流加热), 因而该年大气 ISO 显示出较明显的西传特征, 尤其是夏季; 而 1987 年大气 ISO 有非常系统的东传特征, 与之对应在中太平洋有最强降水 (对流加热)。

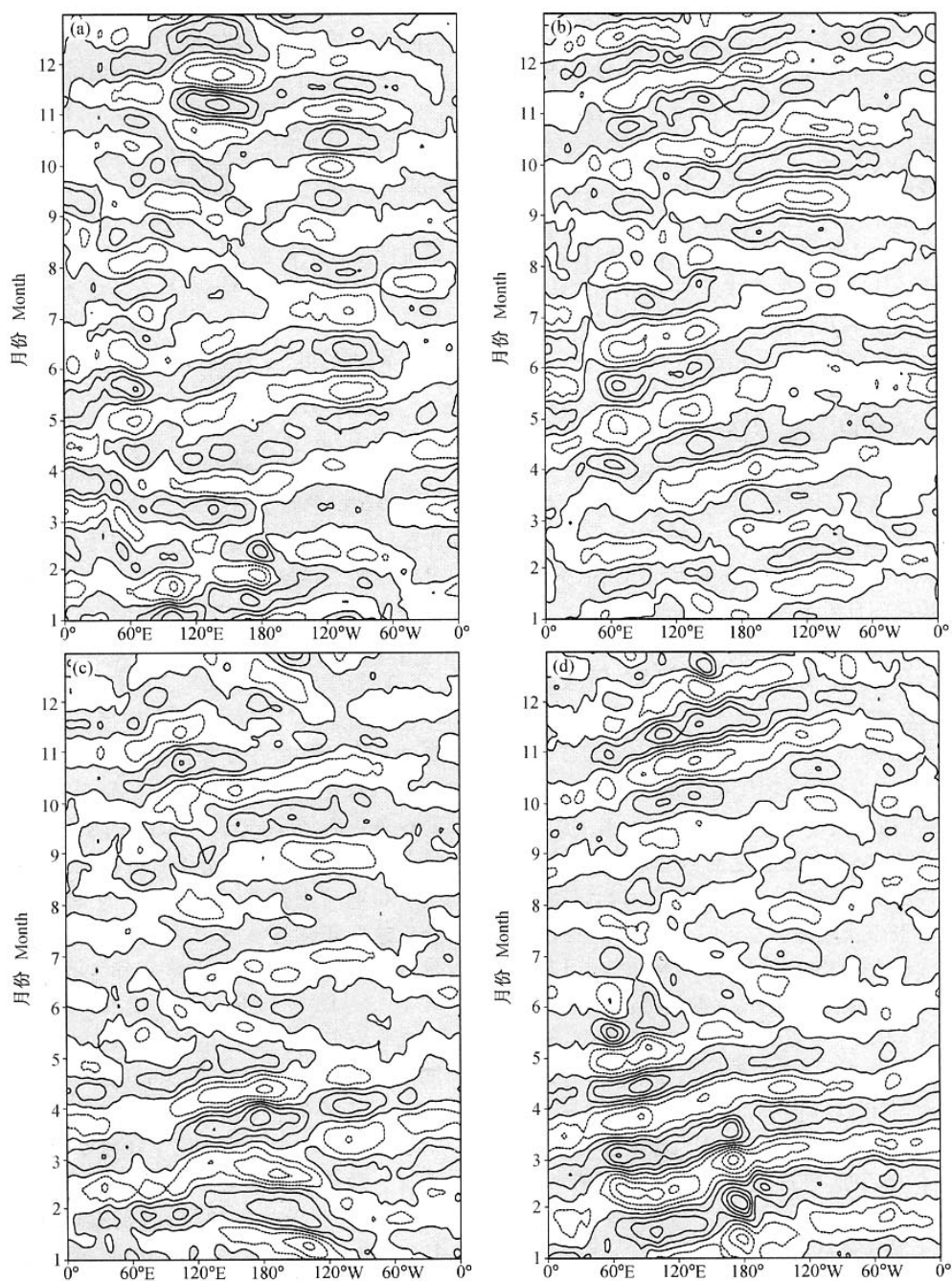


图2 无 ENSO 影响的 850 hPa 在 $10^{\circ}\text{S}\sim 10^{\circ}\text{N}$ 平均的大气 ISO 纬向风的时间-经度剖面 (等值线间隔: $1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)。 (a) 1959 年; (b) 1962 年; (c) 1980 年; (d) 1990 年

Fig. 2 Time-longitude section of ISO u -component averaged from 10°S to 10°N at 850 hPa for non-ENSO (contour interval: $1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$). (a) 1959; (b) 1962; (c) 1980; (d) 1990

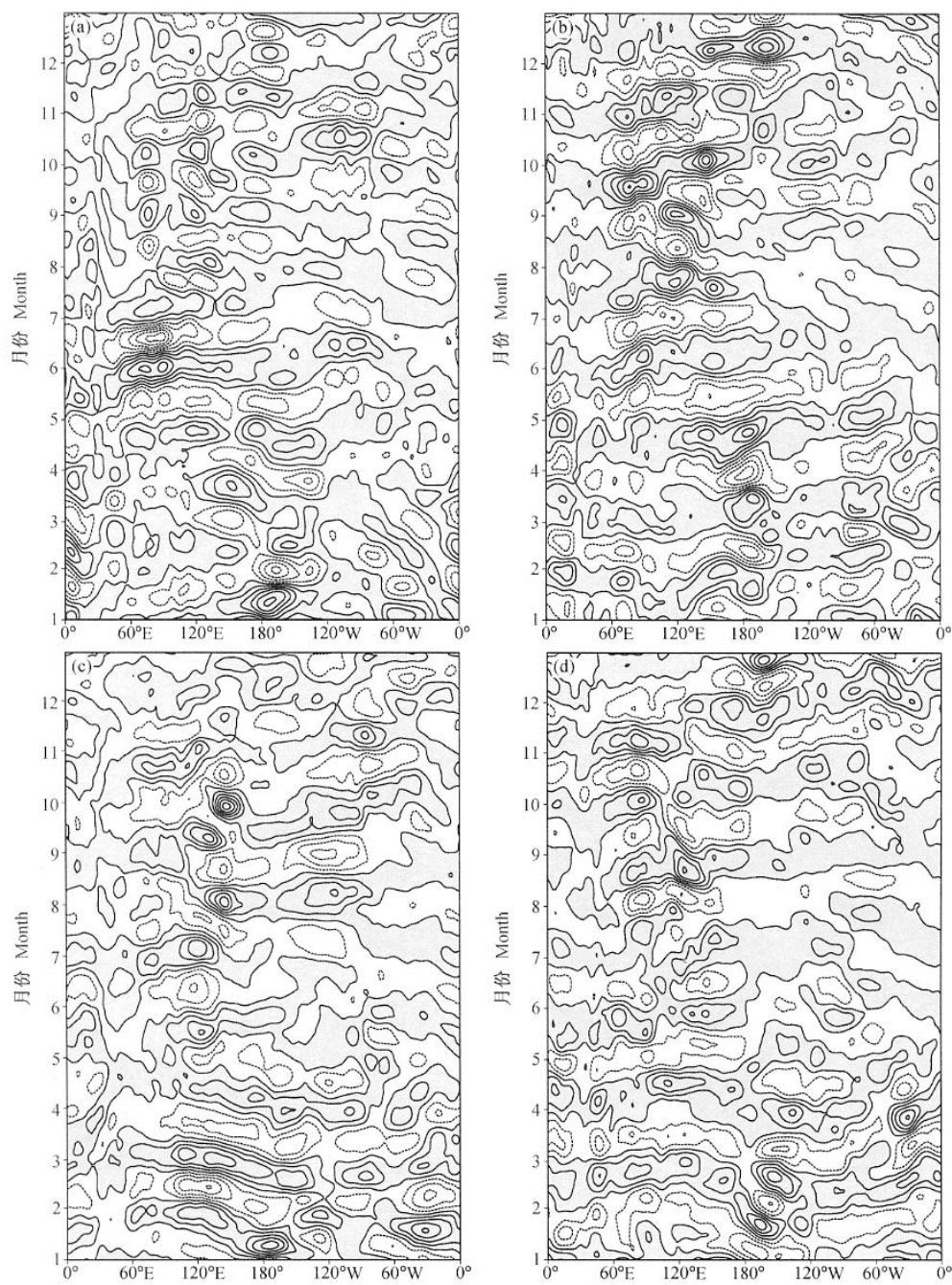


图 3 无 ENSO 影响的 850 hPa 在 10~20°N 平均的大气 ISO 纬向风的时间-经度剖面（等值线间隔：1 m·s⁻¹）。(a) 1959 年；(b) 1962 年；(c) 1980 年；(d) 1990 年

Fig. 3 Same as Fig. 2, but averaged from 10°N to 20°N

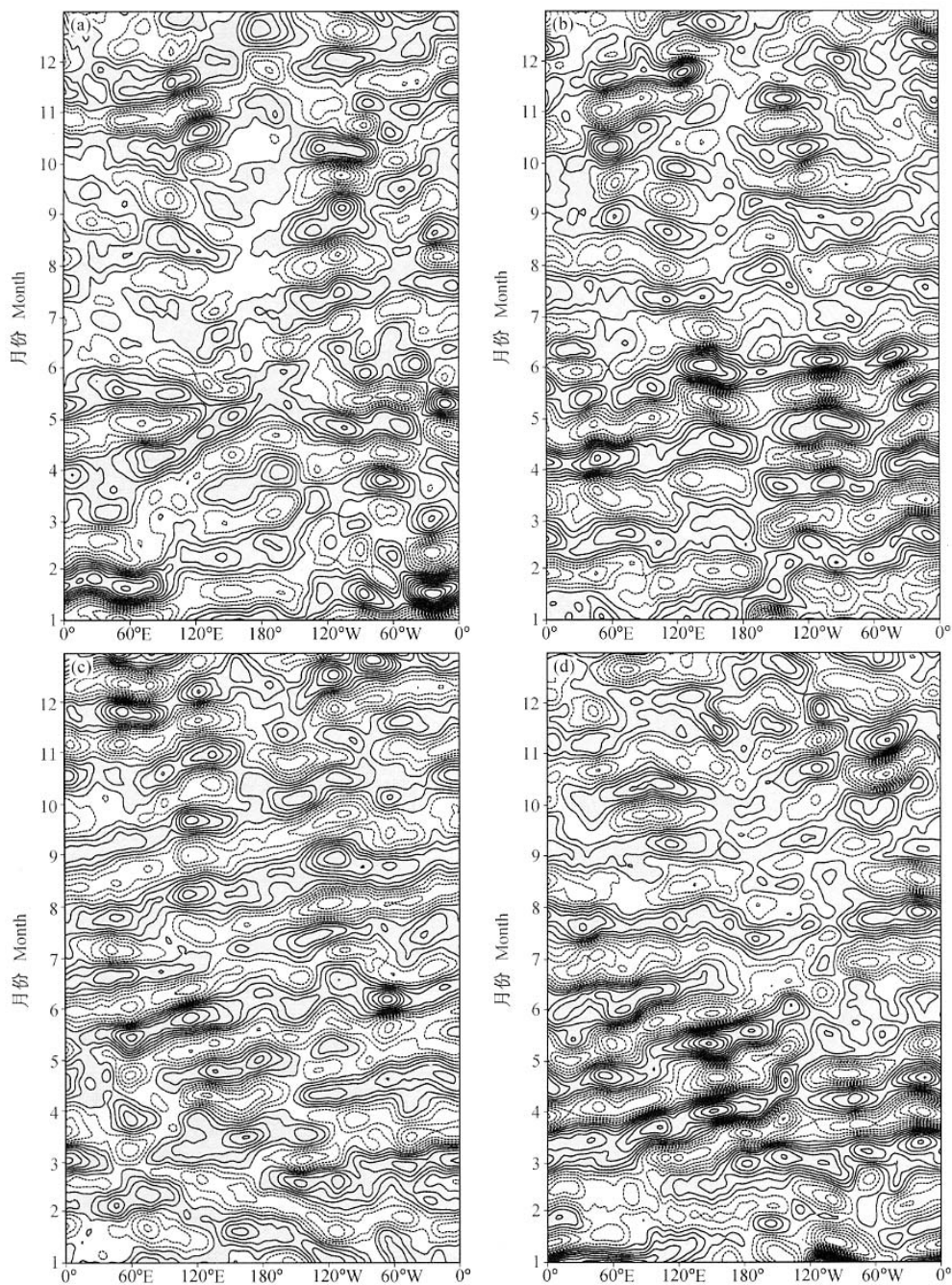


图4 El Niño年200 hPa大气ISO ($10^{\circ}\text{S}\sim 10^{\circ}\text{N}$ 平均)的 u 分量的时间-经度剖面(等值线间隔: $1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)。(a) 1965年; (b) 1982年; (c) 1987年; (d) 1997年

Fig. 4 Time-longitude section of ISO u -component averaged from 10°S to 10°N at 200 hPa for El Niño (contour interval; $1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$). (a) 1965; (b) 1982; (c) 1987; (d) 1997

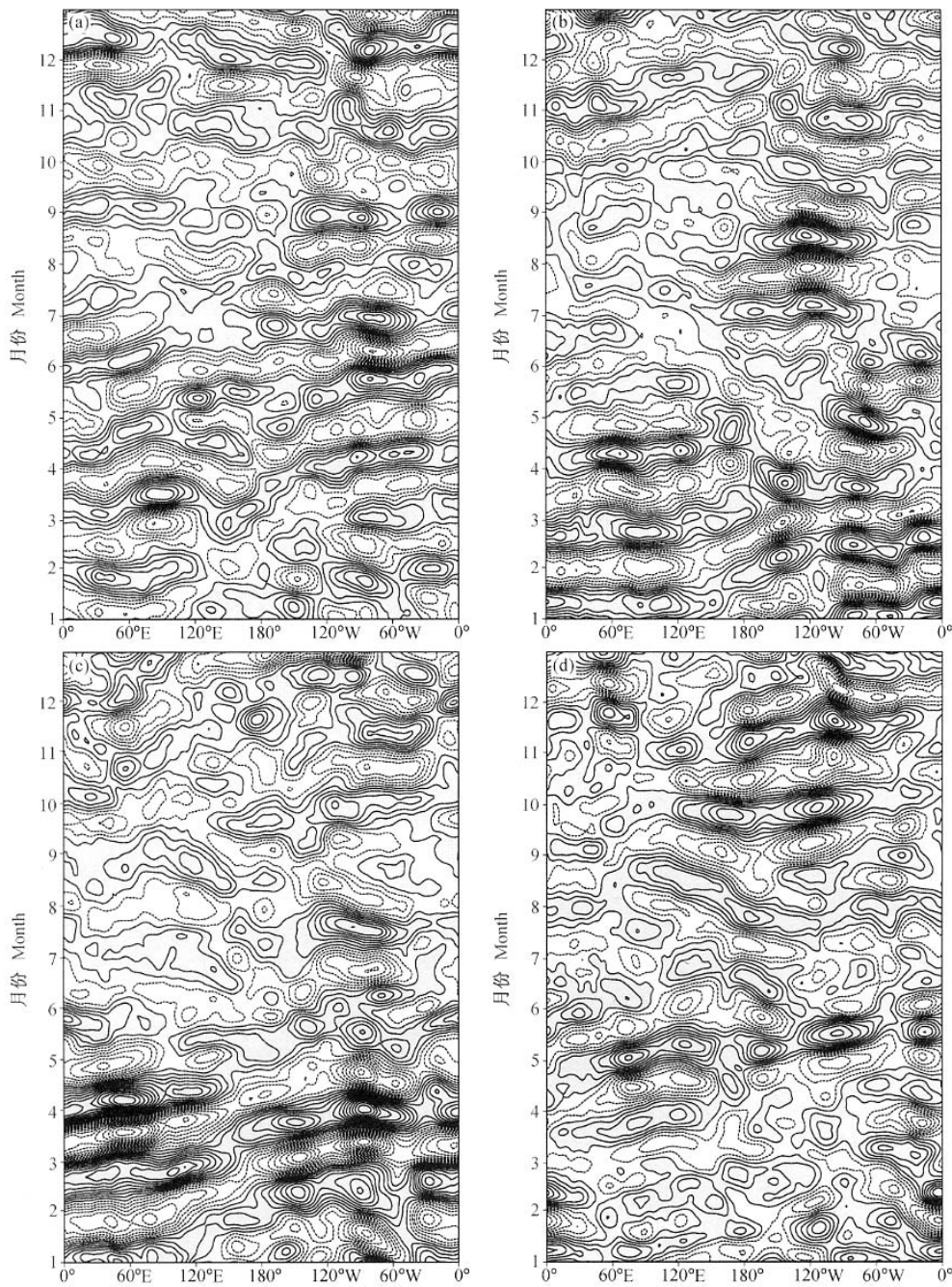


图5 同图4，但为 La Niña 年情况。(a) 1967 年；(b) 1970 年；(c) 1988 年；(d) 1998 年
Fig.5 Same as Fig. 4, but for La Niña. (a) 1967; (b) 1970; (c) 1988; (d) 1998

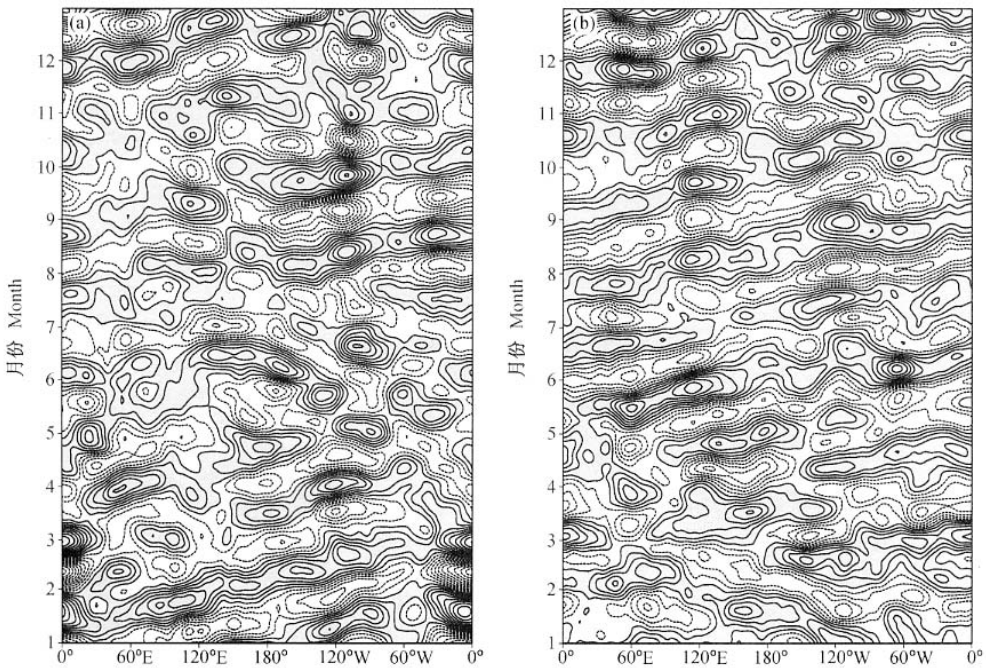


图6 200 hPa 赤道大气 ISO ($10^{\circ}\text{S}\sim 10^{\circ}\text{N}$ 平均) 纬向风分量的时间-经度剖面 (等值线间隔: $1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)。 (a) 1983 年; (b) 1987 年
Fig. 6 Time-longitude section of ISO u -component averaged from 10°S to 10°N at 200 hPa (contour interval: $1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) . (a) 1983; (b) 1987

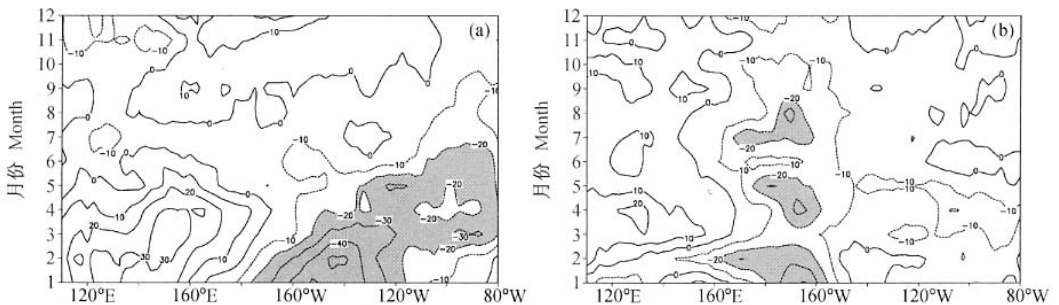


图7 $10^{\circ}\text{S}\sim 10^{\circ}\text{N}$ 纬带平均的 OLR 距平的时间-经度剖面 (单位: $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$, 负距平表明有强对流活动)。 (a) 1983 年; (b) 1987 年
Fig. 7 Time-longitude section of OLR anomaly averaged from 10°S to 10°N (units: $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$) . (a) 1983; (b) 1987

对于非 ENSO 年的情况, 我们以 1960 年和 1990 年为例作对比分析, 1960 年赤道大气 ISO 的东传也不清楚, 并可见西传情况, 而 1990 年赤道大气 ISO 的东传比较明显 (图 8)。这两年的对流活动及对流加热也有显著的差异, 因 1960 年无 OLR 资料可用, 我们分析了 NCEP/NCAR 的降水率的演变 (图 9b), 以及计算了它们的潜热加热场 (Q_2)^[24] 及其演变 (图略), 进而对比分析两年的差异。图 9 是 $10^{\circ}\text{S}\sim 10^{\circ}\text{N}$ 纬带平均的可降水

量距平的时间-经度剖面, 它十分清楚地表明 1960 年赤道太平洋区域的降水量是东边多、西边少, 而 1990 年是西边多、东边少。也就是说, 对流加热在 1960 年 (1990 年) 是赤道东 (西) 太平洋强于赤道西 (东) 太平洋, 其对应的大 ISO 的纬向移动情况也与 GCM 模拟结果相一致, 赤道东太平洋出现异常强降水 (对流加热) 不利于大气 ISO 的东传。

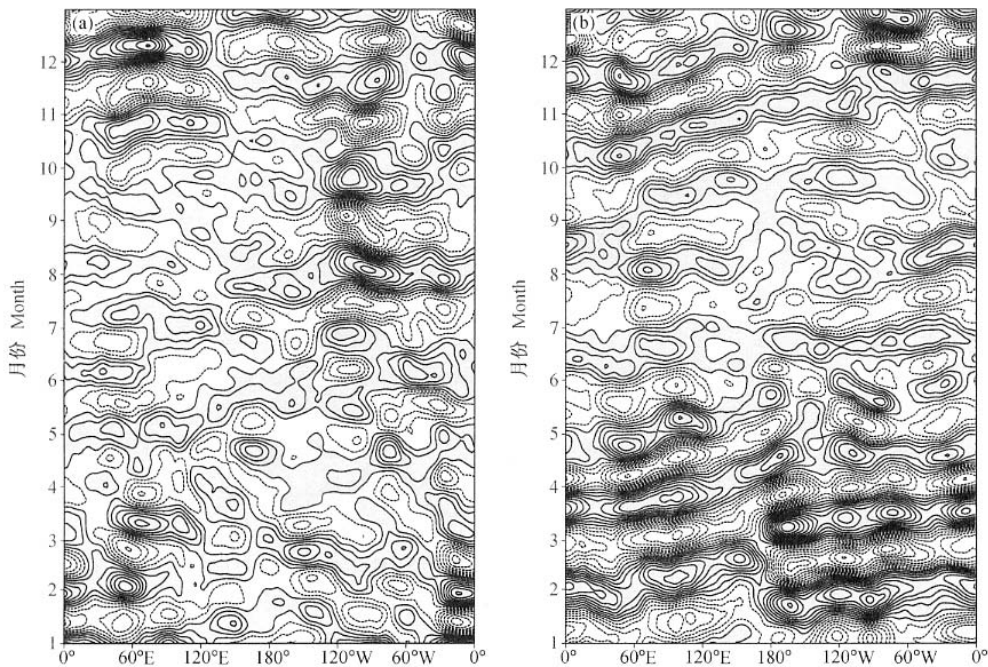


图 8 同图 6，但分别为 1960 年 (a) 和 1990 年 (b) 情况
Fig. 8 Same as Fig. 6, but for 1960 (a) and 1990 (b)

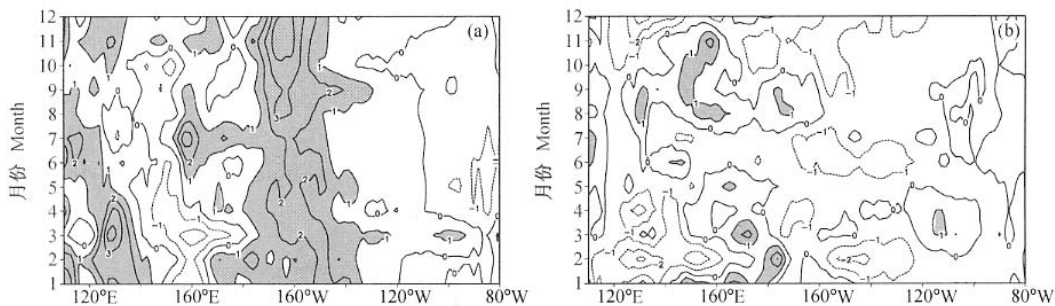


图 9 10°S~10°N 纬带平均的降水率距平的时间-经度剖面 (单位: $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$)。 (a) 1960 年; (b) 1990 年
Fig. 9 Time-longitude section of precipitation anomaly averaged from 10°S to 10°N (units: $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$) . (a) 1960; (b) 1990

6 热带大气季节内振荡的经向传播

最早有关热带大气 ISO 的研究都认为大气 ISO 在北半球有从赤道向北传播的特征^[3,7]，其后，我们的分析研究指出热带大气 ISO 的经向传播虽然以北传为主，但随地域和季节而会有所改变^[6]。这里我们将基于更多资料来系统研究热带大气 ISO 的经向传播问题，由于印度洋和大西洋

地区热带大气 ISO 的向北传播比较突出，本文的分析将只就太平洋区域进行。

最近在有关西太平洋及附近地区大气 ISO 的研究中也表明，虽然那里大气 ISO 主要是向北传播，但在其所给出的图中也明显存在着向南传播的情况^[25,26]。对近 45 年资料所作的大气 ISO 纬向风分量的时间-纬度剖面的分析研究表明，在热带西太平洋 (120~140°E)，一般情况下大气 ISO 主要表现为向北传播，尤其是夏季；但在冬季也常

常有向南传播的现象(图略)。然而在 El Niño 年,热带西太平洋的大气 ISO 冬春季也都有明显的向北传播特征(图略)。

从时间-纬度剖面图上,热带西太平洋的大气 ISO 呈现出一种“波列”的演变特征(图 10)。在冬季和初春,强的大气季节内振荡基本上在 10°S ~ 15°S 纬度带;4~5 月份(具体时间各年有差异)相对最强的大气 ISO 活动带急速地由南半球向北跳到北半球 10°S ~ 15°N 纬度带;10 月份之后又逐渐回到南半球。这里我们将“波列”二字加上引号,是因为波列一词本来表示二维平面上的一种空间遥相关分布特征,而图 10 和图 11 中所表明的正负中心的相间分布形势并非平面上的分布。这种强大气 ISO 活动区的“波列”型演变特征,实际上反映了大气 ISO 的能量传播特征;而在 4~5 月份由南半球向北半球的跳跃可能同东亚夏季风的建立有关(有待进一步深入研究)。因此,除了热带大气 ISO 的经向移动之外,热带大气

ISO 能量的经向传播也是十分重要而有趣的问题。

在热带中东太平洋区域,大气 ISO u 分量的时间-纬度剖面表明,那里大气 ISO 的经向移动十分不明显,常为准静止型振荡(图略)。但在那里大气 ISO 也呈现出一种“波列”演变特征,只是与热带西太平洋地区的“波列”型式有明显不同(图 11)。可以清楚看到,中东太平洋热带大气 ISO 在时间-纬度剖面图上的演变也有一个“波列”结构,而这种从北半球 25°N 附近向南到南半球 20°S 的能量传播的形势,一般在 9~10 月份跨越赤道。从近 45 年资料分析结果,我们发现只有这种从北半球向南半球的低频能量传播是较为清楚的,在中东太平洋没有低频能量由南半球向北半球的明显传播。我们过去关于全球低频遥相关的研究已经指出,赤道中太平洋是大气低频能量频散的主要通道,在那里的低频能量的跨赤道传播是大气 ISO 半球相互作用的重要过程^[6]。本文的分析结果与其十分一致。

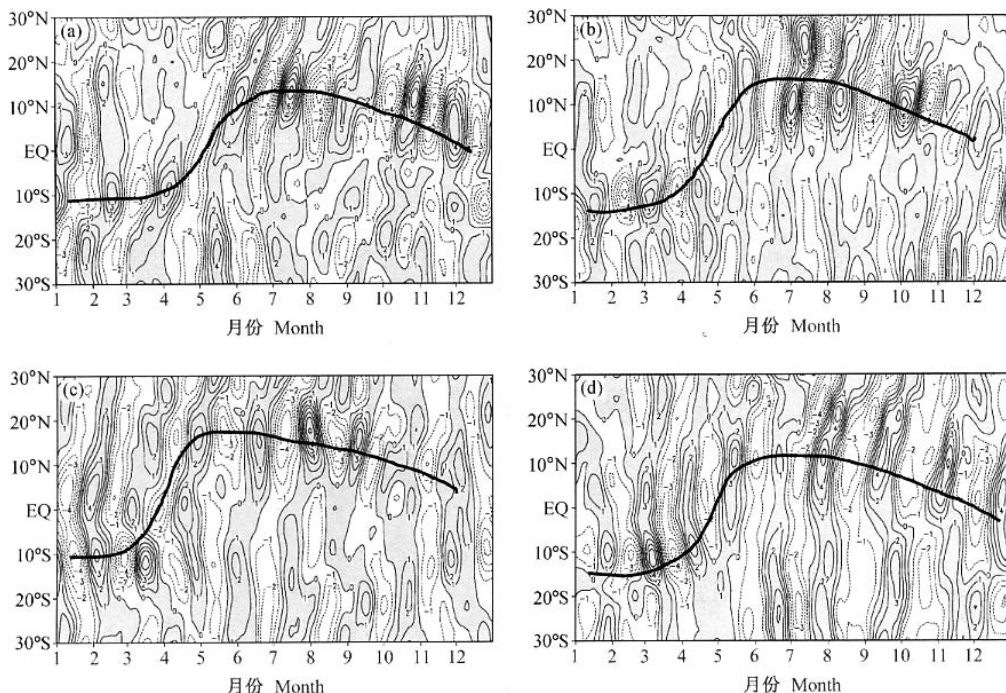


图 10 1958 (a)、1979 (b)、1989 (c) 和 1996 (d) 年 850 hPa 热带西太平洋 (120°E ~ 140°E) 大气 ISO u 分量的时间-纬度剖面(等值线间隔: $1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)。粗实线表示“波列”(能量传播)特征

Fig. 10 Time-latitude section of ISO u -component averaged from 120°E to 140°E at 850 hPa during 1958 (a), 1979 (b), 1989 (c) and 1996 (d) (contour interval: $1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$). Thick solid line shows the “wave train”

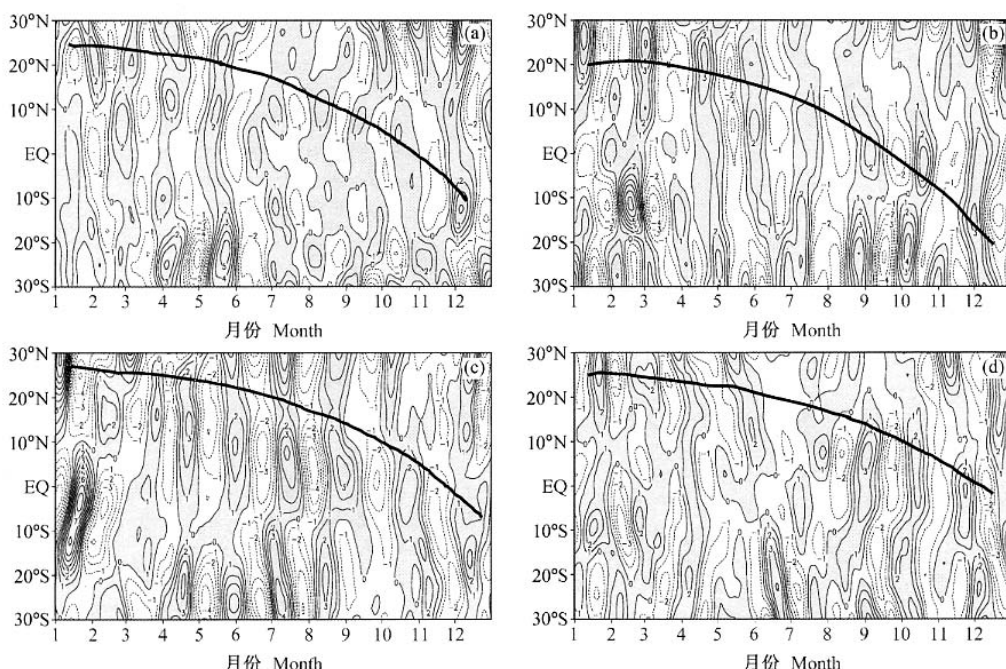


图 11 1966 (a)、1978 (b)、1979 (c) 和 1983 (d) 年 850 hPa 热带中东太平洋 (170~150°W) 大气 ISO u 分量的时间-纬度剖面 (等值线间隔: $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)。粗实线表示“波列”(能量传播)特征

Fig. 11 Time-latitude section of ISO u -component averaged from 170°W to 150°W at 850 hPa during 1966 (a), 1978 (b), 1979 (c) and 1983 (d) (contour interval: $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$). Thick solid line shows the “wave train”

7 讨论及结论

本文分别讨论了 ENSO 情况下和非 ENSO 情况下大气 ISO 移动的异同之处, 同时对比分析了在相同 ENSO 及非 ENSO 背景下的形势, 目的在于更好揭示热带大气 ISO 的移动特征, 以及 ENSO 和对流加热异常分布对热带大气 ISO 移动的影响。ENSO 影响实质上是 SSTa 和对流加热的共同影响, 尽管对流和 SSTa 也有一定关系, 但对流加热异常并不同于 ENSO 的影响。由于积云对流加热反馈是热带大气 ISO 的主要动力学机制, 对流加热(降水)的异常分布必然通过改变湿对流不稳定条件而影响 CISK-Kelvin 波和 CISK-Rossby 波的性质, 从而影响热带大气 ISO 的移动。ENSO 的影响所包括的 SSTa 的作用可能通过海气耦合性质的变化影响 ISO 的移动。当然, 有关这些影响的完善动力学研究还有待深入。本文从资料分析提供了一定的观测依据, 结果表明:

(1) 赤道地区大气 ISO 的纬向移动一般以东传为主, 但也可见西传的情况; 东传在冬半年一般更显著, 而西传在夏季比较容易看到。在赤道之外, 热带 ISO 的纬向移动兼有东传和西传的特征, 而西传相对更明显。

(2) ENSO 与热带大气 ISO 的纬向传播有一定关系, 赤道大气 ISO 的系统性东传与 El Niño 有密切关系, 而 La Niña 的发生同大气 ISO 的西传关系明显, 尤其是夏季。

(3) 赤道大气对流加热场的异常分布与 ISO 的纬向移动有关, 赤道东太平洋的对流加热强, 一般有利于大气 ISO 的西传。

(4) 热带大气 ISO 的经向传播在北半球以由赤道向北为主要特征, 但某些地方的某些时间也可看到南传的情况。

(5) 西太平洋区域大气 ISO 的动能有向北传播的特征, 而且在 4~5 月有从南半球向北半球的突跳现象(可能与亚洲夏季风爆发有联系)。中东太平洋区域大气 ISO 动能的经向传播主要表现为

由北半球向南半球。

参考文献

- [1] Madden R A, Julian P R. Detection of a 40 50 day oscillation in the zonal wind in the tropical Pacific. *J. Atmos. Sci.*, 1971, **28**: 702~708
- [2] Madden R A, Julian P R. Description of global scale circulation cells in the tropics with 40 50 day period. *J. Atmos. Sci.*, 1972, **29**: 1109~1123
- [3] Krishnamurti T N, Subrahmanyam D. The 30 50 day mode at 850mb during MONEX. *J. Atmos. Sci.*, 1982, **39**: 2088~2095
- [4] Lau N C, Lau K M. The structure and propagation of 40 50 day oscillations appearing in a GFDL general circulation model. *J. Atmos. Sci.*, 1986, **43**: 2023~2047
- [5] Knuston T R, Weickmann K M. 30—60 day atmospheric oscillation: composite life cycles of convection and circulation anomalies. *Mon. Wea. Rev.*, 1987, **115**: 1407~1436
- [6] 李崇银. 大气低频振荡. 北京: 气象出版社, 1991. 276pp
Li Chongyin. *Atmospheric low-frequency oscillation* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 1991. 276pp
- [7] Murakami T, Nakazawa T, He J H. On the 40—50 day oscillation during the 1979 northern hemisphere summer. Part I: Phase propagation. *J. Meteor. Soc. Japan*, 1984, **62**: 440~468
- [8] Lau K M, Chan P H. Aspects of the 40—50 Day Oscillation during the Northern Winter as Inferred from Outgoing Longwave Radiation. *Mon. Wea. Rev.*, 1985, **113**: 1889~1909
- [9] Li Chongyin. Actions of summer monsoon troughs (ridges) and tropical cyclone over south Asia and moving CISK mode. *Scientia Sinica* (B), 1985, **28**: 1197~1206
- [10] Lau K M, Peng L. Origin of low-frequency (intraseasonal) oscillations in the tropical atmosphere, Part 1: Basic theory. *J. Atmos. Sci.*, 1987, **44**: 950~972
- [11] 刘式适, 王继勇. Wave CISK 的一个斜压半地转模式和低频振荡. *气象学报*, 1992, **50**: 393~402
Liu Shikuo, Wang Jiyong. A baroclinic semi-geostrophic model of wave CISK and low-frequency oscillation. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1992, **50**: 393~402
- [12] Neelin J D, Held I M, Cook K H. Eooperation-wind feedback and low-frequency variability in the tropical atmosphere. *J. Atmos. Sci.*, 1987, **44**: 2341~2348
- [13] 李桂龙, 刘式适. 蒸发—风反馈和低频振荡. *大气科学*, 1993, **17**: 403~414
Li G L, Liu S K. Evaporation - wind feedback and low frequency oscillation. *Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 1993, **17**: 268~278
- [14] Li Chongyin, Xiao Ziniu. The 30 60 day oscillation in the global atmosphere excited by warming in the equatorial eastern Pacific. *Chinese Science Bulletin*, 1992, **37**: 484~489
- [15] Lau K M, Shen S. On the dynamics of intraseasonal oscillation and ENSO. *J. Atmos. Sci.*, 1988, **45**: 1781~1791
- [16] Li Chongyin, Liao Qinghai. Behaviour of coupled modes in a simple nonlinear air-sea interaction model. *Adv. Atmos. Sci.*, 1996, **13**: 183~195
- [17] Chen Longxun, Xie An. Westward propagation low-frequency oscillation and its teleconnection in the eastern hemisphere. *Acta Meteor. Sinica*, 1988, **2**: 200~212
- [18] 李崇银. 热带大气季节内振荡的几个基本问题. *热带气象学报*, 1995, **11**: 276~288
Li Chongyin. Some fundamental problems of intraseasonal oscillation in the tropical atmosphere. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 1995, **11**: 276~288
- [19] 李崇银, 李桂龙. 热带大气季节内振荡的进一步分析. *气候与环境研究*, 1998, **3**: 27~37
Li Chongyin, Li Guilong. A further analysis on intraseasonal oscillation in the tropical atmosphere. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese). 1998, **3**: 27~37
- [20] Li Chongyin, Smith I. Numerical simulation of the tropical intraseasonal oscillation and the effect of warm SSTs. *Acta Meteor. Sinica*, 1995, **9**: 1~12
- [21] Murakami T. Large-scale aspects of deep convective activity over the GATE area. *Mon. Wea. Rev.*, 1979, **107**: 994~1013
- [22] 李崇银, 周亚萍. 热带大气季节内振荡和 ENSO 的相互关系. *地球物理学报*, 1994, **37**: 17~26
Li Chongyin, Zhou Yaping. Relationship between intraseasonal oscillation in the tropical atmosphere and ENSO. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 1994, **37**: 17~26
- [23] 李桂龙, 李崇银. 大气季节内振荡的活动与 El Niño. *热带气象学报*, 1998, **14**: 54~62
Li Guilong, Li Chongyin. Activity of atmospheric intraseasonal oscillation and El Niño. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 1998, **14**: 54~62
- [24] Yanai M, Esbensen S, Chu J H. Determination of bulk properties of tropical cloud clusters from large-scale heat and moisture budgets. *J. Atmos. Sci.*, 1973, **30**: 611~627
- [25] 孙颖, 丁一汇. 1997 年东亚夏季风活动的初步分析. 见: 丁一汇、李崇银主编, 南海季风爆发和演变及其与海洋的相互作用, 北京: 气象出版社, 1999. 94~100
Sun Ying, Ding Yihui. A study on anomalous activities of East Asian summer monsoon during 1997. In: *Onset and Evolution of the South China Sea Monsoon and its Interaction with the Ocean* (in Chinese), Ding Yihui, Li Chongyin, Eds. Beijing: China Meteorological Press, 1999. 84~100
- [26] 朱乾根, 徐国强. 1998 年南海夏季风低频振荡特征及其对长江流域降水的影响. 南海季风爆发和演变及其与海洋相互作用, 北京: 气象出版社, 1999. 108~111
Zhu Qiangeng, Xu Guoqiang. Intraseasonal oscillation of the South China Sea summer monsoon and its influence on rainfall of Changjiang valley during 1998. In: *Onset and Evolution of the South China Sea Monsoon and its Interaction with the Ocean* (in Chinese), Ding Yihui, Li Chongyin, Eds. Beijing: China Meteorological Press, 1999. 108~111