

MJO 特征的多尺度子空间重构

游佳慧^①, 梁湘三^{①②*}

^① 南京信息工程大学 大气科学学院, 江苏 南京 210044;

^② 南京信息工程大学 海洋科学学院, 江苏 南京 210044

* 联系人, E-mail: liang_xs@ yahoo.com

2015-06-16 收稿, 2015-12-30 接受

国家自然科学基金资助项目(41276032);“全球变化与海气相互作用”专项项目(GASI-IPOVAI-06);2015 江苏省双创团队项目;江苏省特聘教授项目

摘要 通过构造两种不同类型的理想序列,将多尺度子空间变换(Multiscale Window Transform, MWT)与传统使用最多的带通滤波方法(Butterworth)进行比较发现:MWT滤波的结果在整体上与原序列几乎完全吻合,而 Butterworth 的滤波结果在振幅上总是偏小;同时 MWT 对边界的处理也比 Butterworth 要好。为此使用这两种方法分别对 MJO 进行重构,并比较两种方法下 MJO 特性的差异。结果表明:在经向(meridional)传播上,两种方法得出的 MJO 基本类似;但在纬向(zonal)传播及其季节变化上,两种方法的结果无论在强度还是分布上都存在明显的差异,并且这种差异主要存在于西太平洋地区。本文发现:MJO 波列从年初到夏季由南向北传播,从夏季到岁末传播方向却逆转成由北向南(尤其是在西太平洋地区),这一点与前人的结果迥异。

关键词

热带大气季节
内振荡(MJO)
多尺度子空间
变换(MWT)
Butterworth 滤波

在热带大气中,季节内振荡的主要成分为 Madden-Julian Oscillation (MJO)。它是一个南北(东西)30个纬度(经度)的行星尺度的40 d左右时间尺度的准周期现象。MJO在20世纪70年代初首先被发现并提出(Madden and Julian, 1971, 1972),自80年代后,相关研究得到了蓬勃的发展。例如, Murakami et al. (1984)发现,赤道西太平洋地区和南亚季风区都存在着这样的30~60 d的振荡; Lau and Chan (1986)的EOF(Empirical Orthogonal Function)分析表明前两个EOF模态也都有这种现象。Murakami et al. (1984)的风场资料显示,热带大气中的这种振荡主要表现为1~3波的形式,尤其是纬向1波;在垂直方向上,李崇银(1990)的研究表明, MJO 有着深厚涡旋的结构特征。随着对于 MJO 波谱特征的深入研究,发现 MJO 无论在时间与空间上都有着不同的尺度,即它是一个多尺度的时空系统(Nakazawa, 1988)。目前,在 MJO 的频率域和空间

谱特征的诊断研究中,时空谱分析(Hayashi, 1982)被广泛使用。

MJO 的多尺度特征随着时间的不同而不同,其中一个重要现象就是这种特征的季节变化。Madden (1986)通过谱技术研究得到,纬向风季节内谱峰振幅的最大值在冬季,最小值在夏季,其他学者也得到过类似的结论(Dennis and Jack, 1988; Hendon and Salby, 1994)。Yasunaria (1979)的研究表明,亚洲夏季风的季节内变化对北半球夏季的西太平洋30~60 d振荡有很大影响。Hendon et al. (1999)认为,印度洋和西太平洋对流强度的季节性变化以及每年振荡发生数量的变化都影响着 MJO 的年际变化。陶丽等(2015)利用 EOF 方法分析得到,夏季季节内振荡与冬季季节内振荡存在不同的强度趋势,夏季振荡指数有明显加强的趋势,而冬季指数的趋势则不明显。

此外, MJO 还有一个非常明显的独特的传播特

引用格式:游佳慧,梁湘三,2017.MJO 特征的多尺度子空间重构[J].大气科学学报,40(1):25-35.

You J H, Liang X S, 2017. Reconstructing the MJO with multiscale window transform [J]. Trans Atmos Sci, 40(1): 25-35. doi: 10.13878/j.cnki.dqkxxb.20150616001. (in Chinese).

征。Knuston et al. (1986) 通过对 OLR (Outgoing Longwave Radiation) 和速度势 30~60 d 信号的经向传播的研究发现, 它们都在赤道附近有东移为主的特征, 但同时也发现存在着西移的情况。沈桐立等 (1996) 研究指出, 温度的异常响应对 MJO 的东传影响非常明显。William and Duane (2005) 的研究表明, MJO 对流通常起始于西印度洋, 并且在东传进东印度洋和西太平洋过程中逐渐增强, 当通过太平洋冷舌时, 振荡减弱。此外, Maloney (2009) 阐述了水汽对维持 MJO 的东传有重要作用。

MJO 的明显东传主要发生在北半球的冬、春季节, 夏、秋季节纬向风的东传要弱的多。夏季 MJO 的一个最主要的传播模态是经向传播。Yasunari (1979) 发现, 在印度季风区存在着 30~40 d 的振荡信号, 并且这种振荡有从赤道区域由南向北传播的趋势。Krishnamurti and Subrahmanyam (1982) 通过对南亚季风槽脊的研究也得到了类似结论。前人对于这种振荡的北传机制也做了相关的研究, Wang and Xie (1997) 提出, 他们采用的模式中北传的对流与赤道 Kelvin-Rossby 波包有关。Kemballcook and Wang (2001) 发现, 印度洋地区北传的季节内振荡在 5、6 月主要是与赤道印度洋地区激发的 Rossby 波有关。

综上所述, MJO 无论从空间还是时间上来看, 都是一个复杂的多尺度过程, 具体表现为: 在时间上, 它是一个宽频带的范围; 在空间上, 它又具有明显的时空局地性特征。然而局地性与多尺度性这两个概念在传统意义下的多尺度分析 (如傅里叶分析) 过程中是不相容的, 并且在大气海洋研究中大量使用的滤波方法中, 大部分是不正交的, 因此它们在能量上是不守恒的。以往针对 MJO 特性的研究中, 几乎都是使用的 Butterworth 这一传统滤波方法 (Murakami and Nakazawa, 1985), 其中得到的一些特征有可能不够精确。

针对上述问题, 2007 年 Liang and Anderson (2007) 首先引入了“尺度子空间” (scale window) 这一概念, 即每个子空间都包含了某些特定尺度的过程, 并据此构造了一个泛函工具, 即“多尺度子空间变换” (Multiscale Window Transform, MWT)。MWT 通过将动力过程空间正交分解为任意多个尺度子空间表示的之和, 使其既保存当地性、又能通过简便地变换系数来表示当地能量, 很好地解决了前述的局地性与多尺度性的矛盾, 从而最终能够很方便地从能量角度来研究不同尺度子空间之间的

相互作用。MWT 与小波分析以及 Hilbert-Huang 变换有些相似之处, MWT 同样要求时间序列点的个数为 2 的 N 次方 (如本文对于 MJO 研究所取的尺度窗口为 32~64 d), 但他们又存在本质的区别, 主要体现在 MWT 所表达的是一个尺度子空间 (包含一系列的尺度) 过程而非某具体尺度过程。总的说来 MWT 具有以下几个主要特征: 1) 正交性: 能够信实表达物理意义上的能量; 2) 时空局地性: 避免了平均造成的虚假信息; 3) 多尺度子空间性: 能够准确表达包含多尺度的动力过程 (如中尺度涡旋、湍流惯性区)。对于此变换的具体细节参见 Liang and Anderson (2007)。本文将首次利用 MWT 对 MJO 进行重构, 以期能展示一个关于 MJO 更加精确的特性。

1 资料与研究方法

1.1 资料介绍

本文使用的资料为: NCEP/NCAR 的再分析资料中的 1980—2002 年的 OLR 场逐日资料, 空间分辨率为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 。在气候过程中, 实时资料往往包含了季节循环, 这是由于地球公转周期造成的, 并不涉及其内部的动力过程, 在资料处理过程中先对其进行去除, 具体做法如下:

假设考虑的状态变量是 u , 是时间 t 的函数, 将 u 分解为以下形式:

$$u(t) = A + Bt + C \sin\left(\frac{2\pi t}{T_0}\right) + D \cos\left(\frac{2\pi t}{T_0}\right) + \varepsilon \quad (1)$$

其中: A 表示变量 u 的气候值; Bt 项代表 u 的线性变化趋势; $C \sin\left(\frac{2\pi t}{T_0}\right)$ 和 $D \cos\left(\frac{2\pi t}{T_0}\right)$ 项代表的是周期为 T_0 的循环 ($T_0 = 365$); ε 项为去除线性趋势与季节循环后的剩余结果; 时间 t 的单位为 d。用最小二乘法拟合时间序列 $u(t)$, 即可得到上述各项。在本研究中, u 还是空间的函数, 所以得到的各项也存在空间分布。

1.2 MWT 与 Butterworth 滤波效果的比较

如前所述, 局地性与多尺度性这两个概念在传统意义下的多尺度分析 (如傅里叶分析) 过程中是不相容的, 而在大气海洋研究中大量使用的滤波方法中, 大部分是不正交的, 因此它们在能量上是不守恒的。以往针对 MJO 特性的研究中, 几乎都是使用 Butterworth 这一传统滤波方法 (Murakami, 1984), 其中得到的一些特征有可能不够精确。本文通过构造两组分别体现多尺度性和间隙性的时间序列分析

这个问题。

1) 构造一条包含了4个尺度的序列:

$$\begin{cases} y = 2\sin\left(\frac{2\pi}{10}t\right) + 9\sin\left(\frac{2\pi}{32}t\right) + 16\sin\left(\frac{2\pi}{64}t\right) + 5\sin\left(\frac{2\pi}{100}t\right); \\ T_1 = 10, T_2 = 32, T_3 = 64, T_4 = 100, t \in [1, 8192]。 \end{cases} \quad (2)$$

(2)式体现了时间序列的多尺度特性,本文的目标是提取时间尺度为32~64d的过程,显然理想结果应为:

$$y' = 9\sin\left(\frac{2\pi}{32}t\right) + 16\sin\left(\frac{2\pi}{64}t\right)。 \quad (3)$$

现在本文将用MWT和Butterworth方法对原序列 y 分别进行滤波处理,并将它们的滤波结果与理想序列 y' 进行比较。由图1可以看出,Butterworth的滤波效果相对于理想序列来说在整体最大的缺陷在于,在振幅上不能完全的与原序列吻合,滤波出的结果在振幅上相比于原序列来说,总是偏小;而MWT滤波出的结果在整体上与原序列几乎完全吻合。由图2通过扩大细节可以从局部看出,MWT的滤波效果对于初始边界值的处理效果也要比Butterworth效果好。

2) 构造如下序列:

$$x = \begin{cases} 6\sin\left(\frac{2\pi}{32}t\right), t \in [1, 1024); \\ \sin\left(\frac{2\pi}{8}t\right), t \in [1024, 2048); \\ 5\sin\left(\frac{2\pi}{64}t\right), t \in [2048, 8192]。 \end{cases} \quad (4)$$

(4)式包含了3个时间尺度, $T_1 = 32, T_2 = 8, T_3 = 64$,这个序列主要是体现了间隙性这一特点,其中理想序列2结果为:

$$x' = \begin{cases} 6\sin\left(\frac{2\pi}{32}t\right), t \in [1, 1024); \\ 5\sin\left(\frac{2\pi}{64}t\right), t \in [2048, 8192]。 \end{cases} \quad (5)$$

本文依然通过使用MWT和Butterworth方法对原序列 x 分别进行滤波处理,并将它们的滤波结果与理想序列 x' 进行比较。由图3可以看出,MWT的滤波效果依然是几乎与理想序列完全吻合,而Butterworth在振幅上的依然存在明显差异。

2 MJO的MWT重构及其与Butterworth的差异比较

2.1 经向传播

MJO的一个主要特征就是他的传播特征,其中包括经向和纬向传播两种。图4给出的是两种滤波

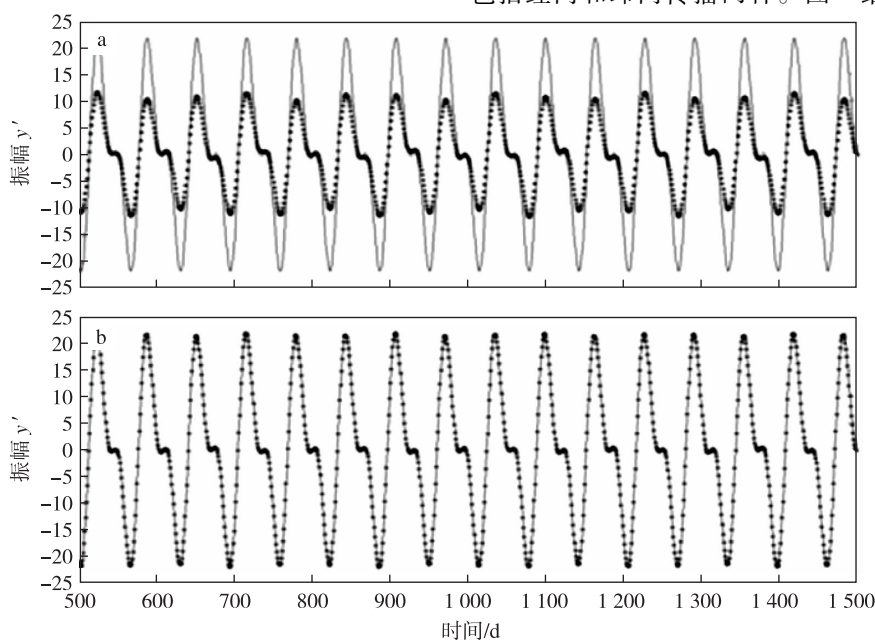


图1 滤波效果对比(实线为理想序列 y' ; * 线为滤波提取出的序列)

a. Butterworth 滤波; b. MWT 滤波

Fig.1 Comparison of the filtered time series between the two methods [solid line for accurate series y' ; starred line (*) for filtered time series]: (a) accurate time series y' and Butterworth filtered time series; (b) accurate time series y' and MWT filtered time series

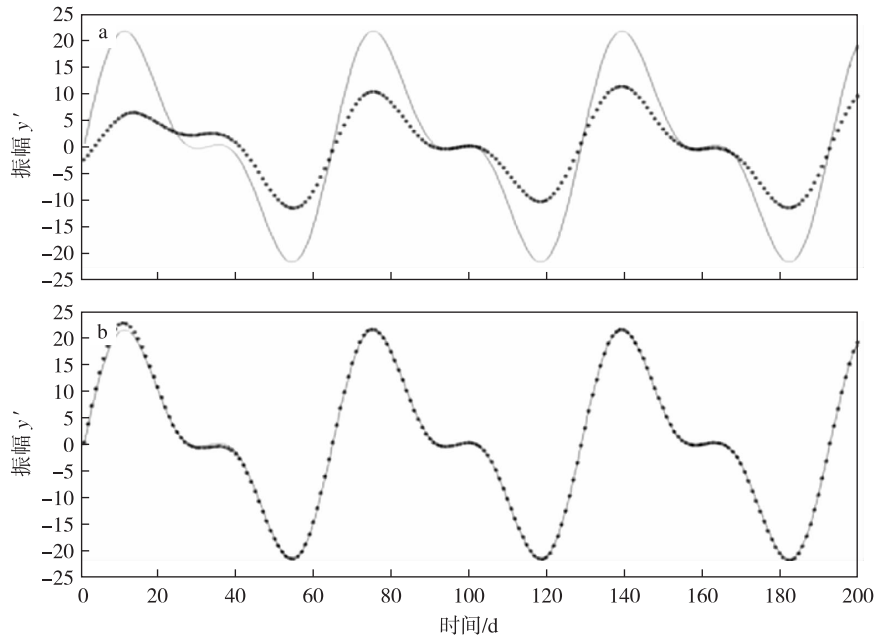


图2 滤波初始值的效果对比(实线为理想序列 y' ; * 线为滤波提取出的序列)
a.Butterworth 滤波;b.MWT 滤波

Fig.2 Comparison of the filtered time series' initial value between the two methods[solid line for accurate series y' ; starred line (*) for filtered time series]; (a) accurate time series y' and Butterworth filtered time series; (b) accurate time series y' and MWT filtered time series

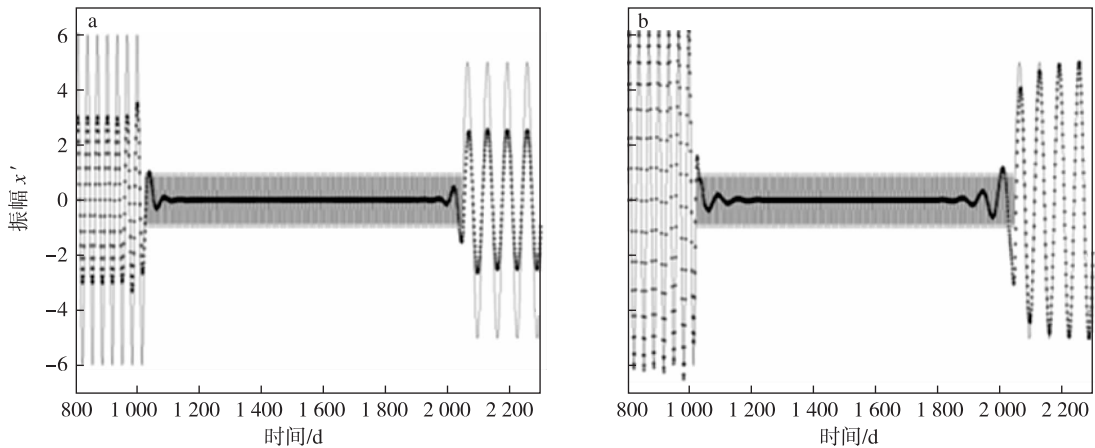


图3 滤波效果对比(实线为理想序列 x' ; * 线为滤波提取出的序列) a.Butterworth 滤波;b.MWT 滤波

Fig.3 Comparison of the filtered time series between the two methods[solid line for accurate series x' ; starred line (*) for filtered time series]; (a) accurate time series x' and Butterworth filtered time series; (b) accurate time series x' and MWT filtered time series

情况下热带地区 ($10^{\circ}\text{S} \sim 10^{\circ}\text{N}$) OLR 场 1980—2002 年气候态的时间—经度分布情况,可见在 6、7 月和 11、12 月存在强的振荡中心,但是只有 11、12 月的振荡出现了明显的向东传播,冬、春季的振荡可以东传至日更线处。两种滤波方法下,MWT 情况下的振荡振幅更强,这也使得 a、b 两种情况存在一定的差异。

由图 4 可见,在 MWT 情况下 3、4 月份的 $60 \sim 120^{\circ}\text{E}$ 处的振荡强度比 Butterworth 情况下的振荡强度高,但是传播速度小于 Butterworth 滤波下的振荡传播;对于 6、7 月较强的振荡来说,MWT 情况下,强的振荡中心持续存在于 $60 \sim 100^{\circ}\text{E}$ 处,在 100°E 处变弱,并持续向东传播。在 Butterworth 情况下,由于振荡的振幅强度偏弱,使得 6、7 月的振荡呈现

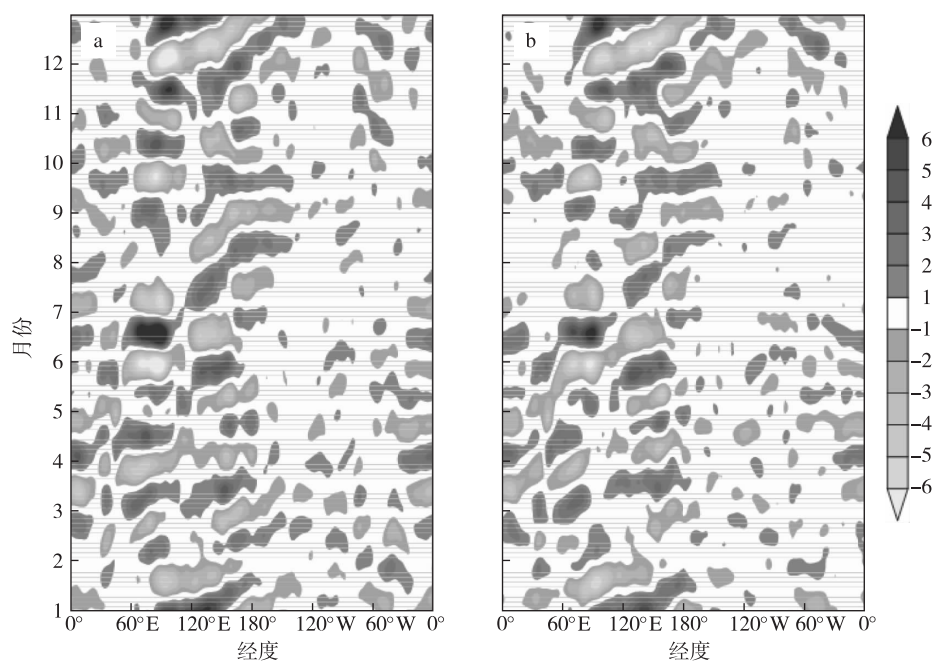


图4 1980—2002年热带地区(10°S~10°N)32~64 d的OLR场气候态的时间—经度剖面(单位: $W \cdot m^{-2}$) a.MWT滤波;b.Butterworth滤波

Fig.4 Time—longitude diagrams(1980—2002) of the long-term mean 32—64-day filtered OLR anomalies in the tropical area (10°S—10°N) (units: $W \cdot m^{-2}$): (a)MWT filter; (b)Butterworth filter

连续的由40°E处向东传播至近日更线处;在11月则存在正位相的振荡,在MWT滤波情况下,可以看出一个最强振荡中心位于80°E处,并且振荡由120°E处分别向东、向西传播。但在Butterworth的情况下,80°E处并没有最强的振荡中心,并且该位相的振荡是由60°E处连续地向东传播。

对比两种方法下逐年的OLR纬向传播情况发现,除了在MWT滤波情况下,各年的振荡强度以及振幅中心的频带宽度较强烈于Butterworth滤波情况的振荡,两种滤波情况下相同年份的的传播趋势几乎相同。由于这种差异不甚明显,与多年平均后两种滤波情况的经向分布的差异大体相似(图4),故不再重复给出逐年经向分布之间的差异。

2.2 纬向传播

除了明显的经向传播外,MJO的纬向传播情况也不可忽略。多年平均后两种滤波情况下的纬向传播出现了很大差异(图5)。图5表明,尽管就逐年的经向传播情况来看,每年的差异并不大,但是经过多年平均之后,两种滤波情况下的传播以及振荡分布情况存在较大的差异,并且这种差异明显大于两种滤波方法下纬向传播的差异。首先从振荡中心的分布情况可见,在MWT情况下,4—9月以及11、12月都存在较强的32~64 d的振荡;而在Butterworth

情况下,2—8月以及10—12月都存在较强的32~64 d振荡。其次从振荡的传播情况来看,在MWT方法下,在4—11月北半球的振荡存在由北向南的传播,并最终汇于赤道处,这种南传的趋势在夏季最为明显,冬季的振荡则无明显的纬向上的传播;在Butterworth情况,振荡几乎静止于赤道地区,在赤道以北表现出弱的北传趋势。此外,研究两种方法下逐年的OLR纬向传播情况发现,其在纬向传播上逐年的差异较经向传播更为明显,并且由于这种更加明显的差异导致了多年平均后两种滤波情况下的纬向传播出现了显著的差异[文中给出了一个强年(1999)与弱年(1990)的比较,详见图6、7]。

由于图5给出的是印度洋和太平洋区域振荡的纬向传播情况,下面将进一步研究两种方法下的MJO分别在印度洋和太平洋的纬向传播存在怎样的差异。图8是印度洋地区的振荡纬向传播情况,其振荡的纬向传播存在一定的差异。在Butterworth情况下,印度洋地区的振荡最强出现在春夏和冬季,并且在春夏季北半球出现了北传的趋势;而在MWT情况下,印度洋地区振荡也是在春夏和冬季最强,但是在春夏季的振荡却没有出现Butterworth情况下明显的北传趋势。图9给出的是西太平洋地区的MJO纬向传播情况,结果显示,两种方法下振

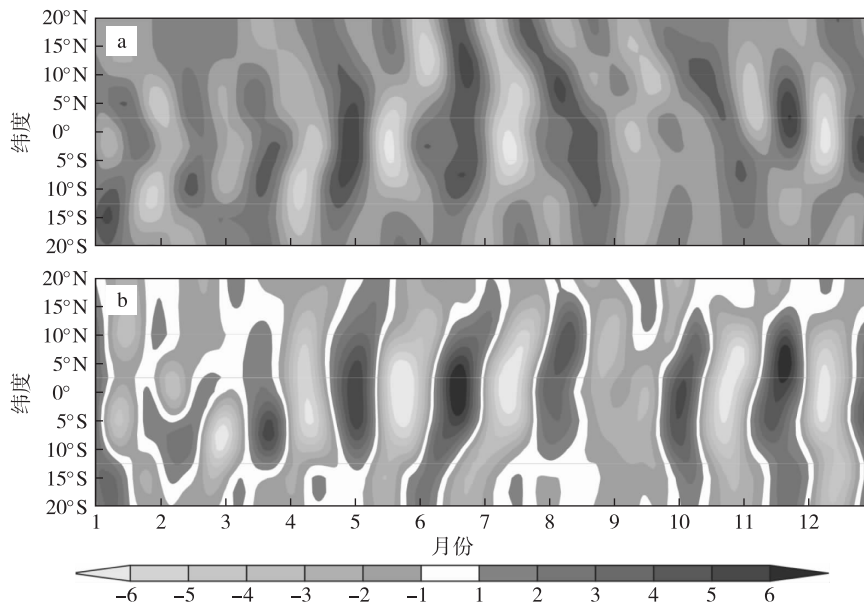


图5 1980—2002年印度洋西太平洋地区(50°E~160°W)32~64 d的OLR场气候态的时间—纬度剖面(单位:W·m⁻²) a.MWT滤波情况;b.Butterworth滤波情况

Fig.5 Time—latitude diagrams(1980—2002) of the long-term mean 32—64-day filtered OLR anomalies in the India—West Pacific Ocean(50°E—160°W)(units;W·m⁻²):(a)MWT filter;(b) Butterworth filter

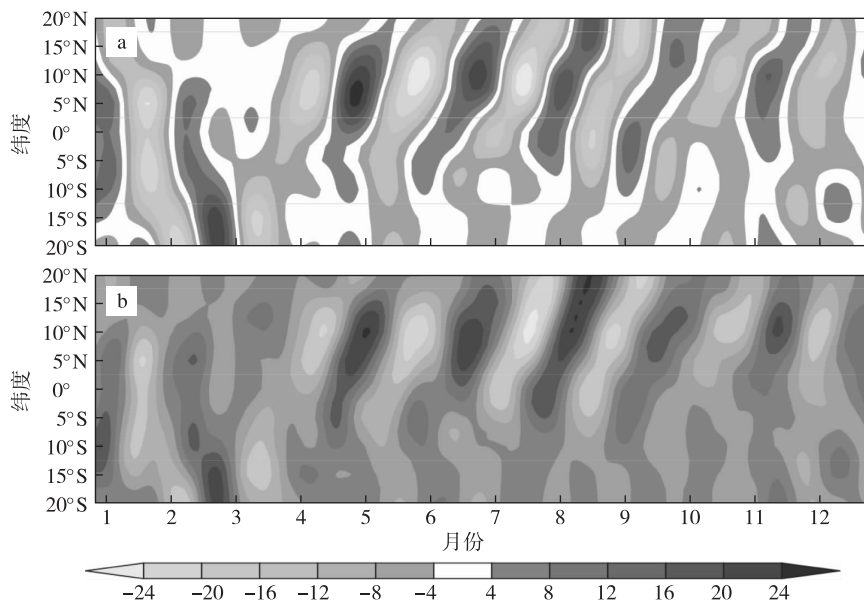


图6 1999年(强年)印度洋西太平洋地区(50°E~160°W)32~64 d的OLR场时间—纬度剖面(单位:W·m⁻²) a.MWT滤波情况;b.Butterworth滤波情况

Fig.6 Time-latitude diagrams of the 32—64-day filtered OLR anomalies in the India—West Pacific Ocean(50°E—160°W) in 1999(strong year):(a)MWT filter;(b) Butterworth filter(units;W·m⁻²)

荡的纬向传播出现了明显差异。在 Butterworth 情况,西太地区夏季的 MJO 依然存在明显的北传趋势;但 MWT 情况下,该区域的夏季振荡则出现了明显的南传趋势。由此可见,图 5 中振荡纬向传播的

差异主要是由西太平洋地区振荡的纬向传播差异引起的。

2.3 季节变化

除传播特征外,MJO 另一个重要的特征就是其

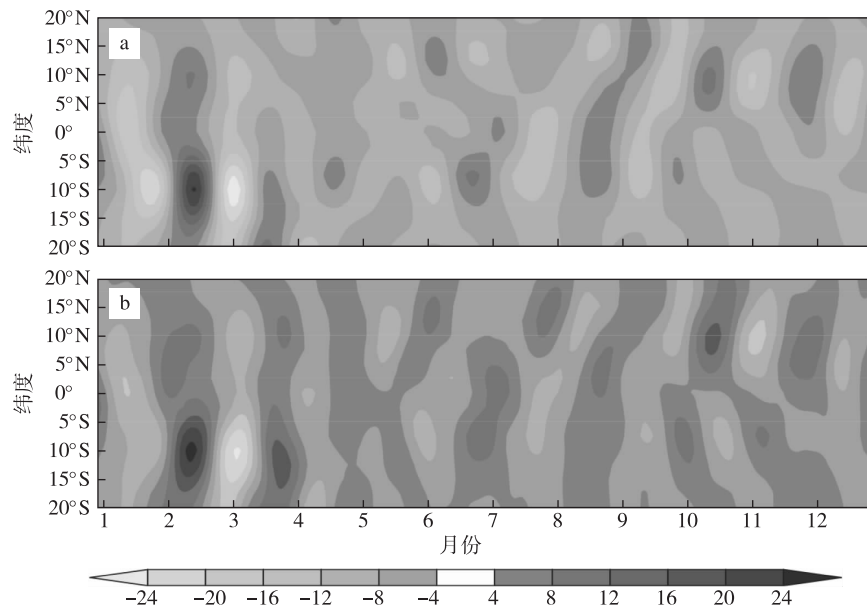


图7 1990年(弱年)印度洋—西太平洋地区($50^{\circ}\text{E}\sim 160^{\circ}\text{W}$)32~64 d的OLR场时间—纬度剖面(单位: $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$) a.MWT滤波情况;b.Butterworth滤波情况

Fig.7 Time-latitude diagrams of the 32—64-day filtered OLR anomalies in the Indian Ocean—West Pacific Ocean ($50^{\circ}\text{E}\sim 160^{\circ}\text{W}$) in 1990(weak year); (a) MWT filter; (b) Butterworth filter (units: $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)

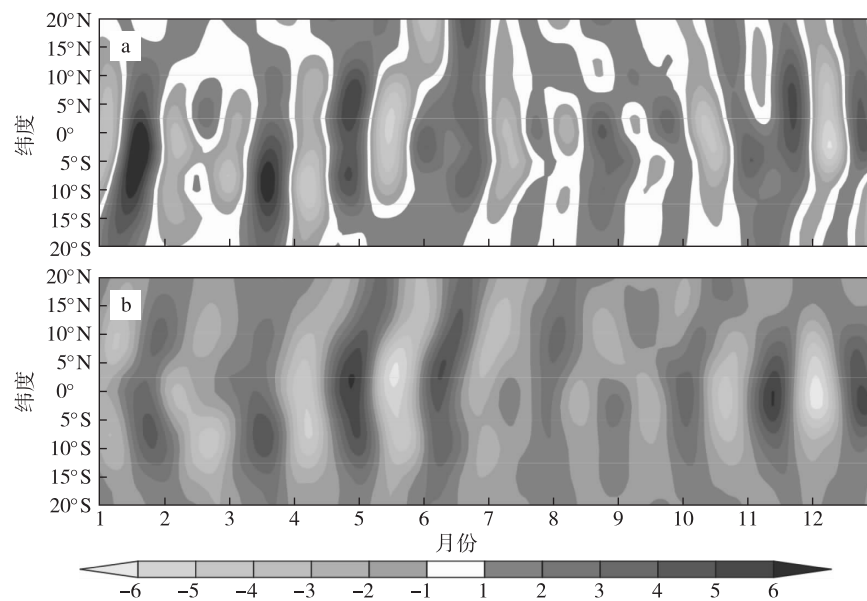


图8 1980—2002年印度洋($50\sim 120^{\circ}\text{E}$)32~64 d的OLR场气候态的时间—纬度剖面(单位: $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$) a.MWT滤波情况;b.Butterworth滤波情况

Fig.8 Time-latitude diagrams of the long-term mean 32—64-day filtered OLR anomalies in the India-Pacific Ocean ($50\sim 120^{\circ}\text{E}$): (a) MWT filter; (b) Butterworth filter (units: $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)

季节变化情况。通过对比两种滤波情况下热带地区各年季节内振荡的四季平均分布情况,可以看出,两种滤波情况下的季节内振荡逐年分布模态大体相似,但振幅差异明显(MWT较强于Butterworth,图

略),但是多年平均后的四季分布情况则出现了较大的差异(图10)。由图10可见,季节内振荡的四季分布主要位于 60°E 至日更线处,但是两种滤波方法下振荡的四季分布差异明显。在MWT情况,冬

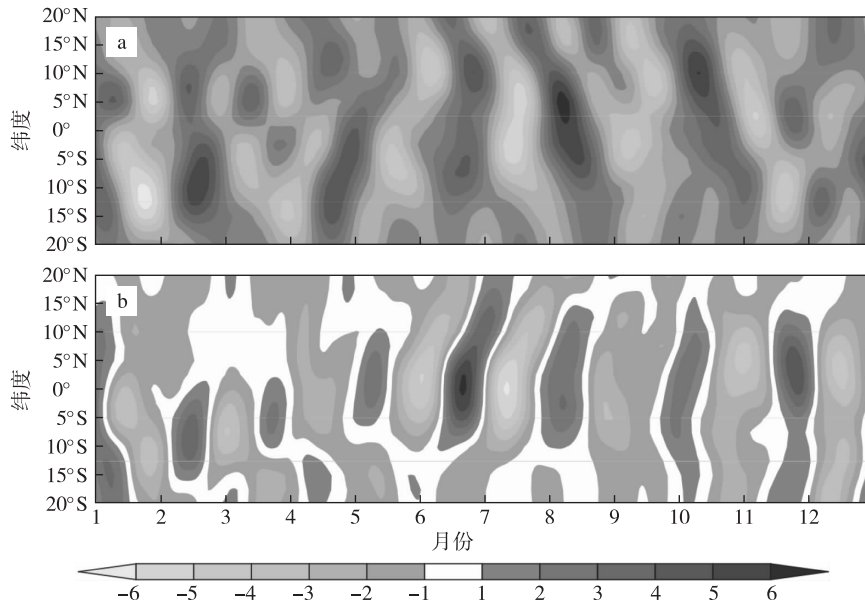


图9 1980—2002年太平洋地区(120°E~160°W)32~64 d的 OLR 场气候态的时间—纬度剖面(单位:W·m⁻²) a.MWT 滤波情况;b.Butterworth 滤波情况

Fig.9 Time-latitude diagrams of the long-term mean 32—64-day filtered OLR anomalies in the Pacific Ocean (120°E—160°W):(a)MWT filter;(b)Butterworth filter(units:W·m⁻²)

春季振荡强、夏秋季弱;在 Butterworth 情况下,振荡分布冬季最强,夏秋季次之。

此外,振荡的分布趋势也不尽相同的(图10),在春季,MWT 情况下春季的季节内振荡主要表现为130°E以西为正位相的振荡分布,以东为负位相的振荡分布。在 Butterworth 滤波情况下,春季的振荡主要表现为负位相的振荡分布;在夏季,MWT 情况下夏季表现为全是正位相的季节内振荡。在 Butterworth 情况下,印度洋地区存在明显强的正的振荡中心,同时在南海地区存在小面积的负振荡中心;在秋季,MWT 情况下秋季的振荡主要表现为130°E以西为正位相振荡分布,以东地区则相反。在 Butterworth 情况下秋季的振荡主要表现为100°E至日更线处的正位相振荡分布;在冬季,MWT 情况下的冬季的振荡主要表现为在东印度洋地区存在明显的负位相的振荡中心,西太地区的振荡则是正位相分布。在 Butterworth 情况下冬季的振荡主要表现为负位相的分布,尤其是在东印度洋和西太地区,存在明显的负振荡中心。

3 结论

本文使用 MWT 与 Butterworth 两种方法,分别对 MJO 进行重构,并比较两种方法下 MJO 特性的差异,主要结论如下:

1)用多尺度子空间变换(MWT)与 Butterworth

方法对本文理想序列的滤波效果显示:前者完全给出了正确结果,而后者在振幅上总是偏小,并且前者对于边界点的处理效果也好于后者。

2)在 MJO 的重构过程中,可以看出,在经向(meridional)传播上,两种方法对于逐年和多年平均的强度及分布情况上的差异不大,但对于纬向(zonal)传播和季节变化的情况来看,结果有明显的差异,尤其是在多年平均后的气候态分布更是如此,这表明前人用传统滤波研究 MJO 时得到的关于纬向传播结论可能并不可靠。

3)用 MWT 方法本文得到以下关于 MJO 的特征:在经向,MJO 整体上呈现为东传的趋势,冬季最强,呈现由60°E至日更线的连续传播,夏季在印度洋地区也存在较强的振荡中心,但经向传播并不明显;在纬向,在印度洋地区波列呈现从年初开始由南向北传至夏季,再从夏季由北向南传至岁末,南传始自夏季,这种差异在西太地区尤为明显;就 MJO 的四季分布来说,冬春季振荡最强,春季西太地区存在明显的振荡中心,而冬季振荡中心主要集中在东印度洋地区。此外秋冬季的振荡呈现反位相的分布情况。

由此可见,MJO 在夏季的时候存在南传的趋势,主要表现在西太平洋地区,这一点与前人的结果很不相同。

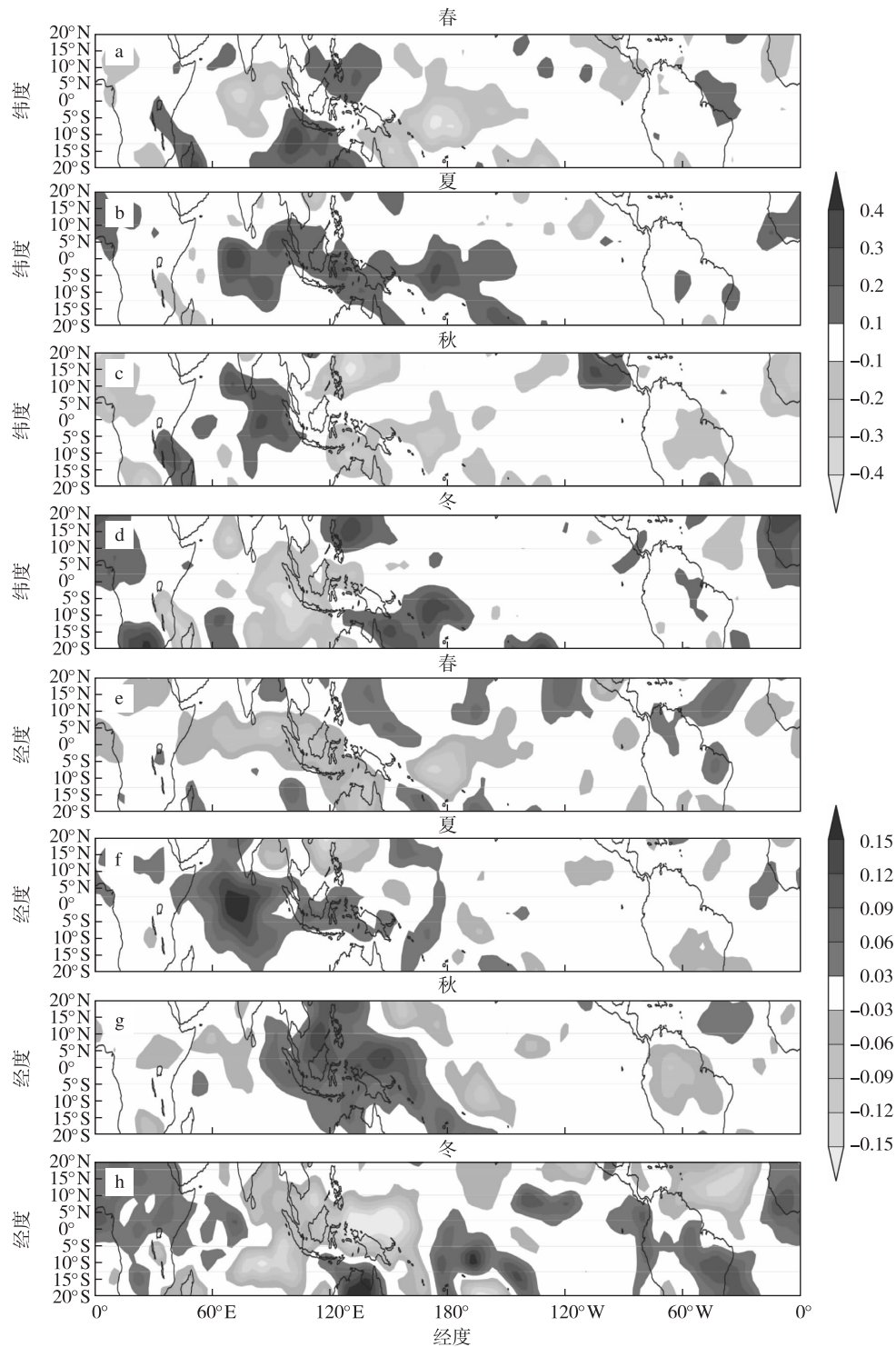


图 10 1980—2002 年 32~64 d 的 OLR 场气候态的四季经—纬分布(单位: $10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$)
a—d.MWT 滤波情况;e—h.Butterworth 滤波情况

Fig.10 The seasonal distributions of the long-term mean 32—64-day filtered OLR anomalies with (a—d) the MWT filter and (e—h) the Butterworth filter(units: $10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$)

参考文献 (References)

- Dennis L H,Jack R G,1988.Seasonal variability of the 40-50 day oscillation in wind and rainfall in the tropics[J].J Atmos Sci,45(19):2680-2702.
Hayashi Y,1982.Space-time spectral analysis and its application to atmospheric waves[J].J Meteor Soc Japan,60(1):156-171.
Hendon H H,Salby M L,1994.The life cycle of the Madden-Julian oscillation[J].J Atmos Sci,51(15):2225-2237.

- Hendon H H, Zhang C, Glick J D, 1999. Interannual variation of the Madden-Julian oscillation during Austral summer [J]. *J Climate*, 12(8): 2538-2550.
- Kemballcook S, Wang B, 2001. Equatorial waves and air-sea interaction in the boreal summer intraseasonal oscillation [J]. *J Climate*, 14(13): 2923-2942.
- Knutson T R, Weickmann K M, Kutzbach J E, 1986. Global-scale intraseasonal oscillations of outgoing longwave radiation and 250 mb zonal wind during northern hemisphere summer [J]. *Mon Wea Rev*, 114(3): 605-623.
- Krishnamurti T N, Subrahmanyam D, 1982. The 30-50 day mode at 850 mb during MONEX [J]. *J Atmos Sci*, 39(9): 2088-2095.
- Lau K M, Chan P H, 1986. Aspects of the 40-50 day oscillation during the northern summer as inferred from outgoing longwave radiation [J]. *Mon Wea Rev*, 114(7): 1354-1367.
- 李崇银, 1990. 大气中的季节内振荡 [J]. *大气科学*, 18(1): 32-45. Li C Y, 1990. Seasonal oscillations in the atmosphere [J]. *Chinese J Atmos Sci*, 18(1s): 32-45. (in Chinese).
- Liang X S, Anderson D G M, 2007. Multiscale window transform [J]. *Siam Journal on Multiscale Modeling & Simulation*, 6(2): 437-467.
- Madden R A, Julian P R, 1971. Detection of 40-50 day oscillation in the tropics [J]. *J Atmos Sci*, 28(5): 702-708.
- Madden R A, Julian P R, 1972. Description of global scale circulation cells in the tropics with a 40-50 day period [J]. *J Atmos Sci*, 29(6): 1109-1123.
- Madden R A, 1986. Seasonal variation of the 40-50 day oscillation in the tropics [J]. *J Atmos Sci*, 43(24): 3138-3158.
- Maloney E D, 2009. The moist static energy budget of a composite tropical intraseasonal oscillation in a climate model [J]. *J Climate*, 22(3): 711-729.
- Murakami T, Nakazawa T, He J, 1984. On the 40-50 day oscillation during the 1979 northern hemisphere summer. Part I: Phase propagation [J]. *J Meteor Soc Japan*, 62(3): 440-468.
- Murakami M, 1984. 30-40 day global atmospheric changes during the northern summer 1979 [J]. *GARP Special Report*, No.44: 113-116.
- Murakami T, Nakazawa T, 1985. Tropical 45 day oscillation during the 1979 northern hemisphere summer [J]. *J Atmos Sci*, 42(11): 1107-1122.
- Nakazawa T, 1988. Tropical super clusters within intraseasonal variations over the Western Pacific [J]. *J Meteor Soc Japan*, 66(6): 823-839.
- 沈桐立, 朱乾根, 丁一汇, 等, 1996. 热带大气高频温度异常对大气低频振荡影响的数值模拟研究 [J]. *南京气象学院学报*, 19(2): 160-167.
- Sheng T L, Zhu Q G, Ding Y H, et al., 1996. Simulation of LFO's response to tropical high frequency temperature anomaly [J]. *J Nanjing Inst Meteor*, 19(2): 160-167. (in Chinese).
- 陶丽, 吴盟盟, 沈新勇, 等, 2015. 1982—2009年冬夏两季热带季节内振荡的趋势特征 [J]. *大气科学学报*, 38(5): 641-649. Tao Li, Wu M M, Shen X Y, et al., 2015. Trend of tropical intraseasonal oscillations in summer and winter during 1982—2009 [J]. *Trans Atmos Sci*, 38(5): 641-649. (in Chinese).
- Wang B, Xie X, 1997. A model for the boreal summer intraseasonal oscillation [J]. *J Atmos Sci*, 54(1): 72-86.
- William K M Lau, Duane E Waliser, 2005. *Intraseasonal variability in the Atmosphere-Ocean climate system* [M]. Springer: Berlin.
- Yasunari T, 1979. Cloudiness fluctuations associated with the Northern Hemisphere summer monsoon [J]. *J Meteor Soc Japan*, 57(3): 227-242.

Reconstructing the MJO with multiscale window transform

YOU Jiahui¹, LIANG Xiangsan²

¹*School of Atmospheric Science, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China;*

²*School of Marine Sciences, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China*

Recently, a new functional analysis tool was developed, the multiscale window transform (MWT), to realistically represent and decompose the complex nonlinear multiscale processes within atmospheric and oceanic circulations. In this study, two types of idealized series were constructed to test the effect of the MWT versus the traditional and most widely used band-pass Butterworth filter. It was found that the MWT produced fairly accurate reconstructions, while the Butterworth filter tended to yield series with smaller amplitude. Besides, the boundary effect was successfully suppressed in the MWT reconstructions, in contrast to the Butterworth results. With these observations in mind, we reconstructed the MJO using these two methods. The results showed little difference in the meridional propagation pattern. However, with respect to the zonal distribution, both the strength and propagation patterns were quite different, especially in the western Pacific Ocean. This was particularly significant in terms of the annual mean distribution. It was found that, from January through June, the MJO wave packet propagated northward; but from June through December, the propagation reversed its direction, becoming southward. This propagation reversion is quite different from the scenarios revealed in previous studies. The zonal propagation in

the Indian Ocean and Pacific Ocean was different. The results showed that, in the Indian Ocean area, the oscillations in the Northern Hemisphere had a northward trend in spring and summer with the Butterworth filter; while in the case of MWT, the oscillations in spring and summer were less significant than the Butterworth case. In the western Pacific, the zonal propagation of the MJO showed a significant difference between the Butterworth filter and MWT filter. In the Butterworth case, the northward trend of the MJO in the western Pacific Ocean was still evident in summer; while in the case of MWT, the oscillation showed a significant southward trend. It was apparent that the southward trend of zonal propagation was mainly caused by the zonal propagation in the western Pacific Ocean. The MJO distribution was different in all seasons. The strongest oscillation occurred in winter and spring, which, in spring, was obvious in the western Pacific Ocean, whereas in winter it occurred obviously in the Indian Ocean.

MJO; Multiscale Window Transform (MWT); Butterworth filter

doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20150616001

(责任编辑:孙宁)