

热带印度洋低频振荡强度的年际变化及其主模态特征

邓锐捷, 巩远发

(成都信息工程大学大气科学学院 高原大气与环境四川省重点实验室, 四川 成都 610225)

摘要:为研究热带印度洋 30~60 d 低频振荡强度的年际变化特征,利用逐日向外长波辐射(简称 OLR)资料,以低频振荡的能量作为低频振荡的强度指数,首先分析热带印度洋准 30~60 d 的低频振荡强度的季节变化特征,然后用 EOF 方法分析了各个季节准 30~60 d 振荡强度年际变化的空间主模态特征。结果表明:热带印度洋 30~60 d 低频振荡强度季节变化比较明显,其中春季最强,夏季和秋季相对较弱;其活跃区的季节分布也有明显差异,反映出明显的年变化特征。4 个季节强度的空间变化第一模态基本表现为一致的变化特征;空间变化第二模态发现偶极子或三极子分布型。

关键词:气象学;气象与气候;热带印度洋;低频振荡强度;年际变化;空间主模态

中图分类号:P466

文献标志码:A

0 引言

大气运动错综复杂,不仅在空间上存在各种尺度系统的运动和变化,在时间上也有不同尺度系统的运动变化。这些不同尺度系统的变化特点各有所异,其对天气气候变化的影响也大相径庭。其中大气运动时间尺度在 10~100 d 的称为低频变化,可以将其分为季节内振荡(ISO)和准双周振荡(BWO)^[1]。Madden and Julian 等^[2]最早通过谱分析发现赤道附近热带大气纬向风场以及气压场存在 40~50 d 周期振荡(后来被称之为 MJO),其后的研究进一步指出并证明了热带地区都存在这种 30~60 d 左右的准周期振荡,也称之为季节内振荡^[3]。MJO 不仅可以影响热带地区的天气气候,对中高纬度的天气气候也有重要的影响;后来的研究指出 MJO 在热带具有纬向 1 到 2 波的向东传播的特征,起源于热带印度洋以及西太平洋,垂直结构是对流层上下层反相的斜压结构,并且在热带印度洋以及西太平洋非常活跃。对于热带大气 MJO 形成的机制,有著名的 WAVE-CISK 机制,积云对流加热反馈使得热带大气中的 Kelvin 波减速而成为低频波(CISK-Kelvin 波)^[4-6]。随着对 MJO 研究的展开,有研究表明它和不同尺度系统的天气气候有一定联系,比如可以影响亚洲季风的爆发,中断过程,在季风的演变过程中也存在季节内振荡特征^[7-10]。还包括季风区大气低频振荡的传播特征^[11-12]。据建华^[13]研究指出在气候平均状况下 ISO 在亚洲季风区存在 5 个大气季节内振荡的活跃中心。龙振夏等^[14]研究热带大气季节内

振荡的年际变化与 ENSO 之间的关系,结果表明热带大气季节内振荡强度的年际变化在热带中西太平洋地区最强。李崇银^[15]以热带大气的低频动能为研究对象,结果表明当厄尔尼诺事件发生之后,热带大气的低频动能减小,MJO 被削弱。李丽平等^[17]发现 OLR 季内振荡强度与 SSTA 之间存在显著局地正相关关系,海表温度正(负)异常时,OLR 季内振荡强度增强(减弱),特别在冬春季节这一关系更清楚。由于中国地处东亚季风区内,因此大气低频振荡与中国天气气候的联系引起了学者的关注,许多研究指出热带大气低频振荡与长江流域及华南地区的持续性降水有密切关系。白旭旭等^[18]通过对比分析指出 MJO 主要通过引起大尺度环流、水汽输送的异常、涡度场,从而使春季中国东部的降水产生影响。李汀等^[19]认为 MJO 在其东传的过程中,激发了热带对流在孟加拉湾和南海两条通道上的北传,强盛的水汽输送和两个海区环流之间的有利配置是影响云南降水异常的缘由。贾燕等^[20]认为东亚地区低频振荡强度年际变化与中国夏季降水异常的分布存在密切相关,通过奇异值分解的结果表示,其前 3 个模态分别对应的江淮型、华南型及长江中下游型 3 个降水型。在前人的研究基础上,运用 1979~2013 年的 OLR 卫星观测资料,研究热带印度洋 30~60 d 低频振荡强度的年际变化及其主模态特征,发现一些新的事实。

1 资料和方法

1.1 OLR 资料

OLR 是指地球大气系统在大气层顶向外辐射出

去的所有波长的热辐射能量密度,它的大小由下垫面的温度决定,所以 OLR 能够反映大气中的气候状况和云覆盖状况、热带大气对流状况,垂直运动等。目前 OLR 已成为研究热带大气 30 ~ 60 d 低频振荡变化特征的主要资料之一。

文中采用的美国国家海洋大气局(NOAA)的分辨率为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 的逐日外逸长波辐射观测资料(简称 OLR),时间序列长度 1979 年 1 月到 2013 年 12 月共 12784 天。

1.2 方法

带通滤波采用 Lanczos 带通滤波器,由两个 Lanczos 低通滤波器构成, f_{c1} 、 f_{c2} 为截断频率。主要研究 30 ~ 60 d 频带的季节内低频振荡信号,因此 30 ~ 60 d 频带选取 $f_{c1} = 1/60$, $f_{c2} = 1/30$ 。

低频振荡强度的定义采用类似于李丽平的方法^[16],对 t_{year} 年, t_{day} 天,空间 (i, j) 格点上的某物理量 A,进行 Lanczos 带通滤波,得到该物理量 A 的 30~60 d 低频分量,记为

$$f_{30-60}(i, j, t_{year}, t_{day}) \quad (1)$$

低频振荡的强度(能量)定义为

$$E_{30-60}(i, j, t_{year}, t_{day}) = f_{30-60}^2(i, j, t_{year}, t_{day}) \quad (2)$$

使用常规的 12 ~ 次年 2 月为冬季,3 ~ 5 月为春季,6 ~ 8 月为夏季,9 ~ 11 月为秋季,因此 MJO 的季节强度由 $E_{30-60}(i, j, t_{year}, t_{day})$ 做季节平均得到。

将 1979 ~ 2013 年共 35 年各个季节热带印度洋区域($45^\circ\text{E} \sim 105^\circ\text{E}$, $30^\circ\text{S} \sim 40^\circ\text{N}$)内 25×29 个格点,组成为空间点 $m = 25 \times 29$,时间点 $n = 35$ 的资料矩阵,进行 EOF 分解,计算出特征向量和时间权重系数,分析热带印度洋 30 ~ 60 d 低频振荡强度的年际变化特征。

2 热带印度洋 30 ~ 60 d 低频振荡(MJO)强度的季节变化

图 1 是用 1979 ~ 2013 年共 35 年的 OLR 逐日资料进行带通滤波,然后用前述方法计算的热带印度洋地区 35 年平均的 30 ~ 60 d 低频振荡强度的 4 个季节的季节分布图。从图 1(a)看出冬季,30 ~ 60 d 的低频振荡强度在热带印度洋主要呈西南-东北带状分布,其活跃区南伸至马达加斯加附近,北伸至孟加拉湾附近。相比于北半球,南半球是冬季 30 ~ 60 d 低频振荡的主要活跃区,其能量高值区大概集中于赤道到 15°S 马尔代夫以东的印度洋海域,中心值能量可以达到 $300 \text{ W}^2/\text{m}^4$ 。春季,由图 1(b)可以看出,30 ~ 60 d 低频振荡能量活跃区以赤道为中心呈南北分布,其中心位

置相比冬季略微北移,中心值强度比冬季增强,可达到 $400 \text{ W}^2/\text{m}^4$ 。夏季图 1(c),30 ~ 60 d 低频振荡能量活跃区继续北移,主要覆盖于北半球热带地区,并且东西跨度也减小。在夏季出现 3 个能量高值区,分别位于阿拉伯海、孟加拉湾以及孟加拉湾以南的印度洋海域,其大值中心强度可达到 $300 \text{ W}^2/\text{m}^4$ 。秋季图 1(d),30 ~ 60 d 低频振荡能量活跃区分布和夏季类似,主要位于北半球热带地区,同样有 3 个能量高值区,位置和夏季基本一致,但覆盖面积有所减小,大值中心强度可以达 $300 \text{ W}^2/\text{m}^4$,与夏季相差不大。

从大气 30 ~ 60 d 低频振荡能量的季节分布图中可以发现,OLR 的 30 ~ 60 d 低频振荡强度变化比较明显,且低频振荡能量春季最强;OLR 30 ~ 60 d 低频振荡能量活跃区的季节分布有明显差异,冬季活跃区以赤道以南的热带地区为主体,春季活跃区以赤道为中心呈南北分布,夏秋季以赤道以北的热带为活跃主体区。

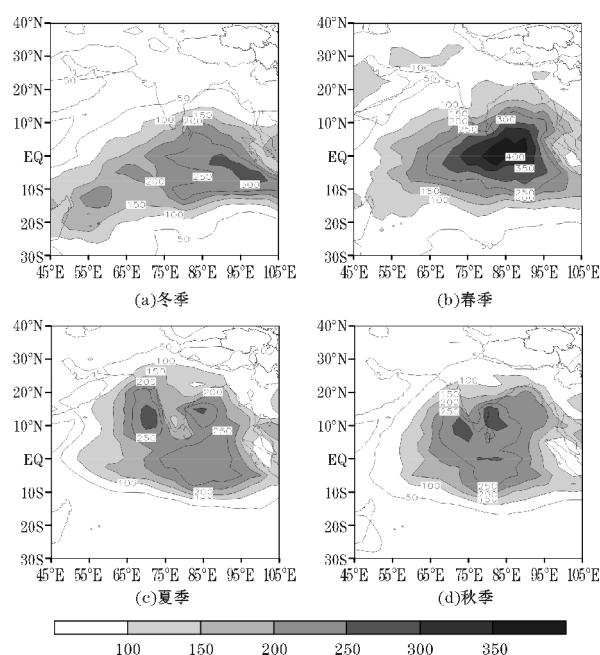


图 1 1979 ~ 2013 年平均 OLR 的 30 ~ 60 d 低频振荡强度的空间分布

3 印度洋 30 ~ 60 d 低频振荡强度时空变化特征

为得到热带印度洋 30 ~ 60 d 低频振荡强度的时空变化特征,进一步对春夏秋冬四季 30 ~ 60 d 低频 OLR 能量场的距平场进行 EOF 分解。表 1 是 4 个季节 EOF 展开前 3 个空间模态的方差贡献率。下面主要介绍前两个主模态的空间分布和时间演变特征。图 2 和图 4 分别表示第一模态和第二模态 EOF 分解后得

到的空间分布图,可以体现主要的特征量,实线代表正,虚线代表负,结合时间系数可以反映热带印度洋 30 ~ 60 d 低频振荡强度在不同时间年份上空间分布的特点,当时间系数处于正位相时,正的阴影区强度偏大,负的阴影区强度偏弱,当时间系数处于负位相时,情况相反。

表 1 EOF 展开前 3 个空间模态的方差贡献率/%

	冬季	春季	夏季	秋季
第一特征向量	22.05	27.83	22.10	17.17
第二特征向量	9.48	11.07	13.35	10.81
第三特征向量	8.57	6.46	7.61	8.38

3.1 热带印度洋 30 ~ 60 d 低频振荡强度时空变化的第一模态

冬季,第一特征向量场占总方差的 22.05 %,根据 North 的标准,可以通过 North 检验,可以同其他模态区分。冬季第一模态特征向量场图 2(a) 和时间序列图 3(a),其中特征向量场与 30 ~ 60 d 低频振荡能量场同季节气候态的空间分布相似,在热带印度洋区域基本为正值,大值区位于南半球热带区域,大值中心在热带印度洋东部海域。对应的时间系数反应出明显的年际变化特征,可以看出在 1987、1992、2002、2007 年这几年热带印度洋 30 ~ 60 d 低频振荡强度异常强,在 1986、1995、1997、1999、2006 年异常偏弱。

春季,第一模态特征向量占总方差的 27.83 %,可以通过 North 检验。图 2(b) 和图 3(b) 分别为春季第一模态特征向量场和时间系数,由特征向量场可以得知春季 30 ~ 60 d 低频振荡活跃区以赤道为中心呈南北分布,和春季气候态的空间分布类似,时间系数反映出明显的年际变化特征,其中 1982、1986、1997、2002、2005、2013 年这几年来低频振荡强度偏强,在 1983、1999、2000、2004、2010 年这几年来低频振荡强度偏弱。

夏季,第一特征向量场占总方差的 22.10%,可通过 North 检验,说明第一模态可以同其他模态区分。通过图 2(c) 夏季特征向量场可以看出夏季 30 ~ 60 d 低频振荡存在 3 个高值区,分别位于阿拉伯海、孟加拉湾以及孟加拉湾以南的印度洋海域,其空间分布对应于气候态。图 3(c) 时间系数反映出明显的年际变化特征,在 1979、1981、1989、1996、2000、2005、2007、2008 年这几年来低频振荡强度异常强,在 1980、1985、1997、2010、2013 年异常偏弱。

秋季第一模态特征向量场占总方差的 17.17 %,可以通过 North 检验。由图 2(d) 和图 3(d) 得出,特征向量场和其他季节出现同样的情况:与 30 ~ 60 d 低频

振荡能量场秋季气候态空间分布类似,时间系数表现出明显的年际变化特征,低频振荡强度偏强的年份为 1981、1990、1998、2000、2008 年,偏弱的年份为 1988、1989、1991、1997、2001、2006、2012 年。

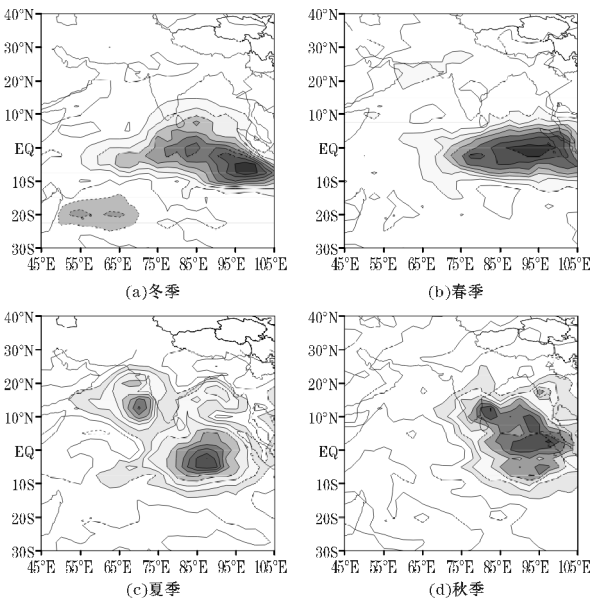


图 2 1979 ~ 2013 年热带印度洋 30 ~ 60 d 低频振荡强度 EOF 分析第一模态空间向量

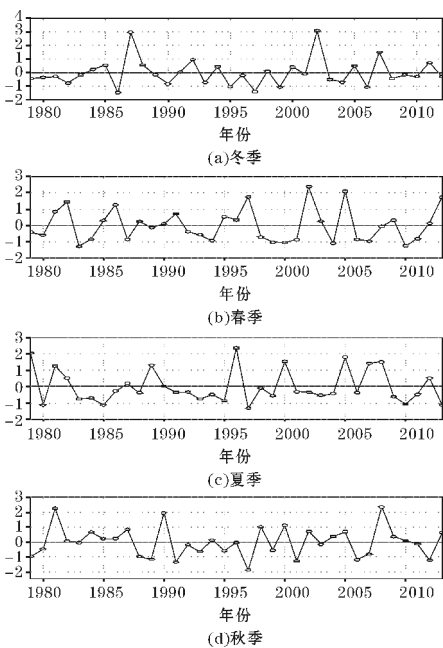


图 3 1979 ~ 2013 年热带印度洋 30 ~ 60 d 低频振荡强度 EOF 分析第一模态时间系数

3.2 热带印度洋 30 ~ 60 d MJO 强度时空变化的第二模态

冬季、春季、夏季、秋季第二特征向量场分别占总方差的 9.48 %、11.07 %、13.35 %、10.81 %,根据 North 的标准,均可以通过 North 检验,第二模态可以

同其他模态区分。

冬季特征向量场图 4(a) 和时间序列图 5(a), 特征向量场出现至西向东的“+ - +”三极子型分布, 其中负中心位于马尔代夫群岛附近, 两个正中心位于两侧, 通过时间系数可以看出, 大约在 1997 年前 (1979 ~ 1997 年), 第二模态的时间系数主要为正, 结合特征向量场可以看到, 这段时期印度洋以西低频振荡强度偏强, 中部偏弱, 东部偏强, 从西至东呈“+ - +”纬向三极子分布; 从 1998 ~ 2013 年时期第二模态时间系数变为主要为负, 说明印度洋中部偏强, 东部和西部偏弱, 从西至东呈“- + -”纬向三极子分布。

图 4(b) 和图 5(b) 为春季特征向量场以及时间系数, 其中特征向量表现为三角形三极子型分布, 其中负中心位于孟加拉湾至马六甲海峡附近, 两个正中心以纬向型分布位于南半球的热带印度洋海域, 对应的时间系数表现出在 1979 ~ 1996 年主要为正, 因此这段时期孟加拉湾至马六甲海峡附近的 30 ~ 60 d 低频振荡强度偏强, 南半球热带印度洋海域低频振荡强度偏弱; 1997 ~ 2013 年时间系数主要为负, 说明这段时期孟加拉湾至马六甲海峡附近的低频振荡强度偏弱, 南半球热带印度洋海域低频振荡强度偏强。

图 4(c) 表示夏季特征向量场, 其空间分布出现经向偶极子型分布, 两个中心分别位于阿拉伯海和孟加拉湾以南的印度洋海域。通过时间系数图 5(c) 可以看出在 1979、1986、1992、1996、2004 年时间系数主要为负, 热带印度洋 30 ~ 60 d 低频振荡强度主要表现为北高南低的经向偶极子分布, 在 1981、1982、2001、2008、2012 年这些年份时间系数为正, 表现为南高北低的经向偶极子分布。

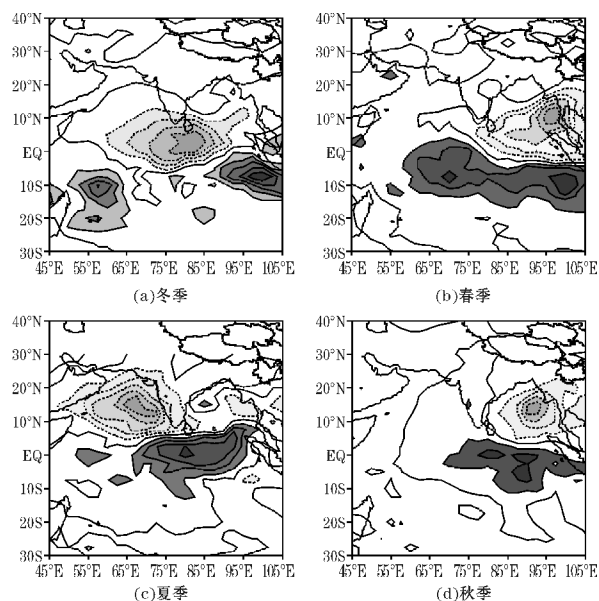


图4 1979 ~ 2013 年热带印度洋 30 ~ 60 d 低频振荡强度 EOF 分析第二模态空间向量

秋季第二模态特征向量场图 4(d) 和对应的时间系数图 5(d), 其中特征向量场同夏季一样出现经向偶极子分布, 其中负中心相比夏季东移至孟加拉湾, 通过对应的时间系数看出, 1979 ~ 1992 年这段时期, 热带印度洋 30 ~ 60 d 低频振荡强度主要表现为北高南低的经向偶极子分布, 1993 ~ 2013 年这段时期主要表现为南高北低的经向偶极子分布。

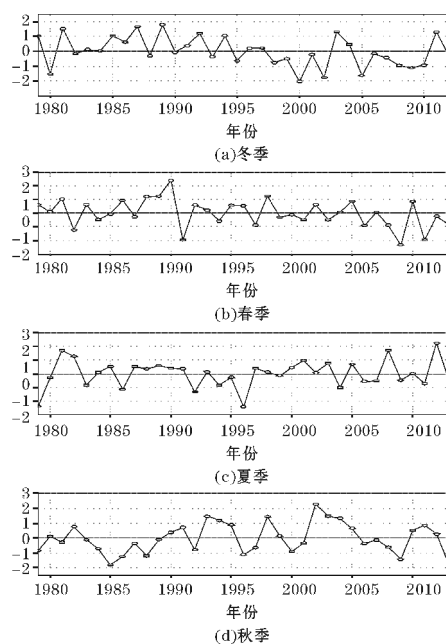


图5 1979 ~ 2013 年热带印度洋 30 ~ 60 d 低频振荡强度 EOF 分析第二模态时间系数

4 结论

(1) OLR 的 30 ~ 60 d 低频振荡强度季节变化比较明显, 且低频振荡能量春季最强; OLR 30 ~ 60 d 低频振荡能量活跃区的季节分布有明显差异, 冬季活跃区以赤道以南的热带地区为主体, 春季活跃区以赤道为中心呈南北分布, 夏秋季节以赤道以北的热带为活跃主体区。

(2) EOF 分解第一模态表明: 冬季低频振荡强度大值区位于南半球热带区域, 大值中心在热带印度洋东部海域, 对应的时间系数反映出明显的年际变化特征; 春季低频振荡强度活跃区以赤道为中心呈南北分布; 夏季显示低频振荡强度存在 3 个高值区, 分别位于阿拉伯海、孟加拉湾以及孟加拉湾以南的印度洋海域; 秋季显示低频振荡强度活跃区主要位于北半球热带地区, 位置和夏季基本一致。

EOF 分解第二模态表明: 冬季出现自西向东的“+ - +”三极子型分布, 在 1997 年前, 印度洋以西低频振

荡偏强,中部偏弱,东部偏强,从西至东呈“+--”纬向三极子分布;春季表现为三角形三极子型分布,其中负中心位于孟加拉湾至马六甲海峡附近,两个正中心以纬向型分布位于南半球的热带印度洋海域,1996年之前(后)孟加拉湾至马六甲海峡附近的30~60 d低频振荡强度偏强(偏弱),南半球热带印度洋海域低频振荡强度偏弱(偏强);夏季出现经向偶极子型分布,两个中心分别位于阿拉伯海和孟加拉湾以南的印度洋海域。在1979、1986、1992、1996、2004年时间系数主要为负,热带印度洋30~60 d低频振荡强度主要表现为北高南低的经向偶极子分布,在1981、1982、2001、2008、2012年这些年份时间系数为正,表现为南高北低的经向偶极子分布;秋季同夏季一样出现经向偶极子分布,其中负中心相比夏季东移至孟加拉湾,通过对应的时间系数看出,1992年之前,热带印度洋30~60 d低频振荡强度主要表现为北高南低的经向偶极子分布,1992年之后主要表现为南高北低的经向偶极子分布。各个季节第二模态时间系数大约在1996年前后出现明显的正负交替。

最后需要说明的是研究发现了热带印度洋上低频振荡强度的偶极子变化模态,过去的大量研究都表明印度洋海面温度(SST)也有偶极子变化模态,二者的关系如何,低频振荡强度的偶极子是否为SST偶极子所激发等问题是进一步研究的问题。

参考文献:

- [1] 徐国强,朱乾根. 大气低频振荡研究回顾与概述[J]. 气象科技,2003(4).
- [2] MADDEN R A, JULIAN P R. Detection of a 40 ~ 50 day oscillation in the zonal wind in the tropical Pacific [J]. J Atmos Sci, 1971, 28(5): 702-708.
- [3] MADDEN R A, JULIAN P R. Description of global-scale circulation cells in the tropics with a 40 ~ 50 day period[J]. J Atmos Sci, 1972, 29(6): 1109-1123.
- [4] Knutson T R and WeiCkmann K M. 30 -60 day atmospheric oscillation: composite life cyclones of convection and circulation anomalies. Mon. Wea. Rev., 1987, 115 : 1407 -1436.
- [5] Bjerknes, J. A possible response of the atmospheric Hadley circulation to equatorial anomalies of Ocean temperatures[J]. Tellus, 1996, 18: 820-829.
- [6] Rasmusson E M, Carpenter T H. Variations in tropical sea surface temperature and surface wind fields associated with the southern Oscillation/Elnino[J]. Mon. Wea. Rev. 1982, 110: 354-384.
- [7] Li Chongyin, Li Guilong. Evolution of intraseasonal oscillation over the tropical western Pacific/South China Sea and its effect to the summer precipitation in Southern China [J]. Adv Atmos Sci, 1997, 14(2): 246-254.
- [8] 徐国强,朱乾根. 1998年南海夏季风低频振荡特征分析[J]. 热带气象学报, 2002, (4).
- [9] 琚建华,钱诚,曹杰. 东亚夏季风的季节内振荡研究[J]. 大气科学, 2005, (2).
- [10] 陈尚锋,温之平,陈文. 南海地区大气30~60天低频振荡及其对南海夏季风的可能影响[J]. 大气科学, 2011, 35(5): 982-992.
- [11] 何金海,杨松. 东亚地区低频振荡的经向传播及中纬度的低频波动[J]. 气象学报, 1992, (2).
- [12] 琚建华,孙丹,吕俊梅. 东亚季风区大气季节内振荡经向与纬向传播特征分析[J]. 大气科学, 2008, (3).
- [13] 琚建华,刘一伶,李汀,等. 南海夏季风季节内振荡的年际变化研究[J]. 大气科学, 2010, 34(2).
- [14] 龙振夏,李崇银. 热带低层大气30~60天低频动能的年际变化与 ENSO 循环[J]. 大气科学, 2001, (6).
- [15] 李崇银,周亚萍. 热带大气季节内振荡和 ENSO 的相互关系[J]. 地球物理学报, 1994, (2).
- [16] 李丽平. 海气系统季节内振荡现象的气候学研究[D]. 南京:南京气象学院, 2004.
- [17] 李丽平,王盘兴,管兆勇. 热带对流和环流季内振荡强度与海表温度关系对比研究[J]. 大气科学, 2009, 33(4): 771-782.
- [18] 白旭旭,李崇银,谭言科,等. MJO 对我国东部春季降水影响的分析[J]. 热带气象学报, 2011, (6).
- [19] 李汀,严欣,琚建华. MJO 活动对云南5月降水的影响[J]. 大气科学, 2012, 36(6): 1101-1111.
- [20] 贾燕,王黎娟,张佳婷. SVD 揭示的东亚地区低频振荡强度与中国夏季降水的联系[J]. 热带气象学报, 2013, 29(5): 813-823.

Madden-Julian Oscillation's Inter-annual Variability and the Characteristics of its Major Modes over the Tropical Indian Ocean

DENG Rui-jie, GONG Yuan-fa

(College of Atmosphere Sciences, Chengdu University of Information Technology, Plateau Atmosphere and environment Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610225, China)

Abstract: In order to discuss the characteristics of Madden-Julian Oscillation's Inter-annual variability of 30–60 d over the Tropical Indian Ocean, the Madden-Julian oscillation energy as the Madden-Julian oscillation intensity index based on the outgoing long-wave radiation date, this study investigates the Madden-Julian oscillation of 30–60 d over the tropical Indian ocean and its characteristics of seasonal variation, then analyze the spatial major modes of each season's oscillation energy of 30–60 d by EOF. The results shows that the seasonal variation of 30–60 d's oscillation over the tropical Indian ocean varied obviously, and the oscillation energy is highest in Spring while it's relatively weak in summer and autumn. Each season has its different active area and reflect inter-annual variability obviously. Madden-Julian oscillation intensity's first mode has the similar characteristics in each season. The second mode raise triople or dipole.

Key words: meteorology; meteorology and climatology; tropical Indian ocean; Madden-Julian oscillation intensity; inter-annual variability; spatial major modes