

崔静,杨双艳, Li Tim, 2021. MJO 与北半球高纬地区冬季地表气温异常的联系[J]. 气象, 47(1):49-59. Cui J, Yang S Y, Li Tim, 2021. Relationship between the Madden-Julian oscillation and high-latitude surface air temperature during boreal winter [J]. Meteor Mon, 47(1):49-59(in Chinese).

## MJO 与北半球高纬地区冬季地表气温异常的联系\*

崔 静<sup>1</sup> 杨双艳<sup>1</sup> LI Tim<sup>1,2</sup>

1 南京信息工程大学气象灾害教育部重点实验室/气候与环境变化国际合作联合  
实验室/气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京 210044

2 夏威夷大学国际太平洋研究中心, 夏威夷 美国

**提 要:** 基于 1979—2016 年 NCEP-NCAR 逐日再分析资料研究了热带季节内振荡(MJO)和北半球冬季高纬地区地表气温(SAT)之间的联系。利用实时多变量 MJO(RMM)指数, 将 MJO 分为 8 个位相, 其中位相 2(位相 6)对应于位于印度洋地区的正(负)对流。不同 MJO 位相下的 SAT 合成结果显示 MJO 第二位相后的 5~15 d, 北半球高纬地区(60°~90°N、180°~60°W)有明显的负 SAT 异常; 由于热带异常加热信号的改变, 在 MJO 第六位相后的 5~15 d 该地区则对应于显著的正 SAT 异常。该地区温度的垂直结构在各个位相下也表现出类似的分布特征。合成的 500 hPa 位势高度异常场显示, 在温度负(正)异常的位相对应有明显的位势高度负(正)异常, 这种环流异常主要是由与热带对流异常相联系的向东北方向传播的罗斯贝波列所引起的。通过对波活动通量的计算, 推断该东北方向传播的罗斯贝波列很可能是罗斯贝波能量频散的结果。合成的 700 hPa 比湿异常场和 SAT 之间存在较好的对应关系, 考虑到对流层中层的比湿与向下长波辐射之间存在着正相关关系, 说明该温度异常也可能与辐射过程相关。上述分析表明与 MJO 对流相关的大尺度环流异常对高纬地区季节内 SAT 变率有重要影响, 该异常 SAT 信号可能来自平流输送和辐射过程等。准确把握 MJO 位相与 SAT 异常信号的联系也可以为北半球高纬地区 SAT 的延伸期预报提供一些可靠线索。

**关键词:** MJO, 地表气温, 罗斯贝波列, 波活动通量

**中图分类号:** P461

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2021.01.005

## Relationship Between the Madden-Julian Oscillation and High-Latitude Surface Air Temperature During Boreal Winter

CUI Jing<sup>1</sup> YANG Shuangyan<sup>1</sup> LI Tim<sup>1,2</sup>

1 Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education/Joint International Research Laboratory of Climate and Environment Change/Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disaster, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

2 International Pacific Research Center and Department of Atmospheric Sciences, University of Hawaii at Manoa, Honolulu, Hawaii USA

**Abstract:** The relationship between the Madden-Julian oscillation (MJO) and the high-latitude wintertime surface air temperature (SAT) is examined based on NCEP-NCAR reanalysis daily data during 1979—2016. The real-time multivariate MJO (RMM) index, which divides the MJO into eight phases, where Phase 2 (Phase 6) corresponds to the enhanced (reduced) convection over the Indian Ocean and Maritime Continent, is used. A significant positive SAT anomaly over northern high-latitude region of (60°—90°N,

\* 国家重点研发计划(2018YFC1505803、2018YFC1505602)、江苏省高校自然科学基金项目(18KJB170015)、国家自然科学基金项目(41975048)和南京信息工程大学人才引进启动基金(2018R027)共同资助

2019 年 8 月 20 日收稿; 2020 年 7 月 10 日收修定稿

第一作者: 崔静, 主要从事季节内振荡动力学研究. E-mail: nuist\_jingcui@qq.com

通讯作者: 杨双艳, 主要从事季节内振荡动力学与短期气候预测研究. E-mail: yangsy@nuist.edu.cn

180°—60°W) is found 5—15 days following MJO Phase 2, while a negative SAT anomaly appears over the same region about 5—15 days after the MJO is detected in Phase 6, as the tropical forcing changes sign. An analysis of the lagging composite of the geopotential height at 500 hPa indicates that the Arctic SAT anomaly is a result of a north-eastward propagating Rossby wave train associated with the tropical convection anomaly of the MJO, which may have great impacts on intraseasonal SAT variability over high latitude. An analysis of the wave activity flux indicates that the north-eastward propagating Rossby wave train is likely a result of Rossby energy propagation. Composite maps of the specific humidity at 700 hPa also show close relationship with the SAT signals in high latitudes, due to the positive relationship between mid-troposphere specific humidity and downward longwave radiation. These analyses suggest that large-scale circulation anomalies associated with the MJO convection may have great impacts on high-latitude SAT signals, which can result from both advective and radiative processes. Hence, the MJO phases provide useful information for the extended-range forecast of high-latitude surface air temperature during boreal winter.

**Key words:** MJO, surface air temperature, Rossby wave train, wave activity flux

## 引 言

热带大气季节内振荡(Madden-Julian oscillation, MJO)是热带地区大气环流异常的一个最重要的模态,主要的时间尺度为30~60 d,主要特征表现为沿全球热带地区东传的对流活动,具有纬向1波为主的行星尺度空间结构(Madden and Julian, 1971; 1972)。MJO活动表现出明显的季节演变特征。在北半球冬季, MJO以沿赤道向东的传播为主;在北半球夏季,向东传播会减弱,在印度季风区以及东亚季风区以北传的对流活动为主导,在西北太平洋区以西北向的传播为主导。Li(2014)指出北半球夏季热赤道的北移是造成北印度洋和中国南海地区MJO对流北向传播的重要原因之一,同时背景场中的东风切变和水汽的经向分布也起到了重要贡献(Jiang et al, 2004)。关于MJO动力机制(包括其触发机制和东传机制)的研究工作已取得了显著的进展(Wang and Rui, 1990; Wang and Li, 1994; Hsu and Li, 2012; Sobel and Maloney, 2013; Zhao et al, 2013)。

MJO作为热带最主要的环流演变模态可以直接调节热带地区的天气气候(Madden and Julian, 1994)。比如,它会对热带气旋和飓风的生成和加强(Maloney and Hartmann, 2000; Hall et al, 2001; 祝从文等, 2004; 李崇银等, 2012)产生影响。MJO还会影响印度洋偶极子事件(Rao and Yamagata, 2004)、北美环流异常(Higgins and Mo, 1997)、南海

夏季风(林爱兰等, 2016; 李春晖等, 2016)、孟加拉湾西南夏季风季节内振荡(李汀和琚建华, 2013)以及ENSO事件的发展(Zhang and Gottschalck, 2002)。

前人的许多研究表明, MJO对环流异常的影响不仅仅局限于热带, 由于对流加热异常可以激发罗斯贝波列(Ferranti et al, 1990; Kiladis and Weickmann, 1992), 这种影响可以延伸至中高纬地区(Lau and Phillips, 1986)。比如, Bond and Vecchi(2003)指出了MJO对于俄勒冈州和华盛顿早冬和晚冬降水的重要影响; Lin and Brunet(2009)表明MJO位相与加拿大冬季地表气温(SAT)之间存在显著的相关关系。除热带季节内振荡以外, 中高纬的季节内振荡(ISO)同样会对热带和中高纬的天气气候产生重要影响(Wen et al, 2011; 许乐心等, 2017; Yang and Li, 2016; 2017; Yang et al, 2019; 李健颖和毛江玉, 2019)。近年来, 针对MJO与我国气候异常间的联系也开展了一系列研究, 研究发现MJO对我国降水有重要的调制作用(吴捷等, 2018), 对中国东部地区夏季(白旭旭等, 2011)和冬季(刘冬晴和杨修群, 2010)、华南前汛期(李文铠等, 2014; 章丽娜等, 2011)、夏季西南(李永华等, 2016)、云南地区(牛法宝等, 2013; 李汀等, 2012)以及夏季广东(林爱兰等, 2013)的降水异常均存在一定程度的影响。同时, MJO对我国气温异常也存在显著影响, 比如2008年初南方持续性冰冻雨雪天气(吴俊杰等, 2009; 马宁等, 2011)以及2009年11月我国东部大范围雨雪天气(贾小龙和梁潇云, 2011)等极端天气都与MJO存在着密切的联系。因此, MJO的发展和演变, 对

于把握这种气候异常有很大的帮助。MJO 作为次季节时间尺度上最具可预报性的模态 (Gottschalck et al, 2010), 是延伸期 (10~30 d) 预报主要的可预报来源 (丁一汇和梁萍, 2010; 贾小龙等, 2012)。MJO 和大气低频季节内振荡的准确预报对于填补短期天气预报和长期气候预测之间的空隙至关重要。

在 Vecchi and Bond (2004) 的工作中分析了 MJO 对高纬地区冬季 SAT 的影响, 他们的合成分析均为基于 MJO 各个位相同时次的合成。前人的研究表明中高纬地区对于热带强迫的响应在时间上存在一定的滞后, 完全发展建立需要两周左右的时间 (Jin and Hoskins, 1995)。为使这种异常 SAT 信号更加显著, 我们的工作主要关注了 MJO 与北半球冬季高纬地区 SAT 之间的滞后相关关系, 从环流分析等角度进一步揭示两者之间的联系。旨在将 MJO 和高纬地区的大气变率相联系, 从而为该地区季节内 SAT 变率的延伸期预报提供参考。

## 1 资料和方法

### 1.1 资料

本文使用了美国国家海洋与大气中心 (NOAA) 的逐日向外长波辐射 (OLR) 资料以表征热带大尺度对流特征; 同时使用了美国国家环境预测中心-国家大气研究中心 (NCEP-NCAR) 发布的全球逐日再分析资料 (水平分辨率为  $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ )。本文的分析时段为 1979/1980 年到 2015/2016 年共 37 个冬季, 冬季定义为 11 月到次年 3 月共 5 个月。再分析资料中使用到的气象要素包括 2 m 处的地表气温 ( $T_{2m}$ ) 以及各个高度层次的纬向风 ( $u$ )、经向风 ( $v$ )、温度 ( $T$ )、 $p$  坐标系下的垂直速度 ( $\omega$ ) 等。

采用由 Wheeler and Hendon (2004) 所定义的实时多变量 MJO 指数 (real-time multivariate MJO indices, 简称 RMM 指数) 来描述 MJO 的活动特征, RMM 指数最常用于 MJO 的监测和预报。本文使用到的逐日 RMM 指数可以在澳大利亚气象局官网下载 (<http://www.bom.gov.au/climate/mjo/>)。该指数是将逐日资料投影到热带地区 ( $15^\circ\text{S} \sim 15^\circ\text{N}$ ) 纬向平均后的逐日的 850 hPa 纬向风 ( $u_{850}$ )、200 hPa 纬向风 ( $u_{200}$ ) 和 OLR 的前两个多变量 EOF 模态上, 得到的前两个主成分时间序列, 将该时间序

列标准化即可得到 RMM 指数, 分别记为 RMM1 和 RMM2。上述资料均去除了年循环和年际变率。根据 RMM1 和 RMM2 所确定的二维位相空间, 可以将强的 MJO 沿全球热带地区的纬向传播分为 8 个空间位相。MJO 的地理位置可以由一个以 RMM1 和 RMM2 指数所定义的二维位相空间中的一个点来表示, 而该点与整个空间中心的距离则表示 MJO 的振幅, 代表 MJO 事件的强度, 这 8 个位相分别对应于 MJO 生命史的特定阶段, 表示 MJO 对流从印度洋到太平洋的向东传播。

### 1.2 方法

为提取与 MJO 相关的季节内信号, 对原始数据进行了相关处理。首先去除了 1979—2016 年多年气候态的 0~3 波以去除季节循环, 然后通过使用 Lanczos 带通滤波方法 (Duchon, 1979) 进行 30~60 d 的带通滤波, 滤波后选择了 11 月至次年 3 月的资料用于分析, 但 1979 年 1 月至次年 3 月以及 2016 年 11—12 月的资料未包括在内。

为研究罗斯贝波列的波源及其传播情况, 计算了罗斯贝波源 (Sardeshmukh and Hoskins, 1988) 和波活动通量 (WAF; Takaya and Nakamura, 2001)。扰动罗斯贝波源定义为:  $S' \approx -\bar{\zeta} \nabla \cdot v'_x - v'_x \cdot \nabla \bar{\zeta}$ , 其中  $v'_x$  为 200 hPa 异常纬向风的辐散风分量,  $\bar{\zeta}$  为冬季气候态平均的绝对涡度。二维的 WAF 方程可以写为:

$$W = \frac{1}{2|\bar{U}|} \left[ \bar{u}(\psi'^2_x - \psi'\psi'_{xx}) + \bar{v}(\psi'_x\psi'_y - \psi'\psi'_{xy}) \right] \\ \left[ \bar{u}(\psi'_x\psi'_y - \psi'\psi'_{xy}) + \bar{v}(\psi'^2_y - \psi'\psi'_{yy}) \right]$$

式中:  $|\bar{U}| = \sqrt{\bar{u}^2 + \bar{v}^2}$ , 方程中下标表示偏导,  $\psi'$  代表扰动流函数,  $\bar{u}$  和  $\bar{v}$  分别为 200 hPa 冬季平均 (11 月至次年 3 月) 纬向风和经向风。

为检验每个 MJO 位相合成结果是否显著, 使用到的  $t$  检验公式为:

$$t = \frac{|\bar{x} - \bar{y}|}{s \left( \frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} \right)^{1/2}}$$

式中:  $s^2 = \left[ \sum_{i=1}^{m_1} (x_i - \bar{x})^2 + \sum_{i=1}^{m_2} (y_i - \bar{y})^2 \right] / (m'_1 + m'_2 - 2)$ ,  $\bar{x}$  和  $\bar{y}$  分别是 MJO 各位相  $x_i$  ( $i=1, m_1$ ) 的样本均值和所有数据  $y_i$  ( $i=1, m_2$ ) 的均值。考虑到日资料的自相关性, 参考 Wilks (2011) 计算了总体数据的有效自由度  $m'_2$ :

$$m'_2 = m_2 \frac{(1 - \rho_1)}{(1 + \rho_1)}$$

式中:  $\rho_1$  为滞后一天的相关系数,  $m_2$  是  $y_i$  的样本数。

## 2 MJO 位相合成的高纬地表气温异常

### 2.1 MJO 位相

Wheeler and Hendon(2004)使用 RMM 指数将 MJO 的传播分为 8 个空间位相, 对应于赤道强对流从印度洋到太平洋的东向传播。这里只考虑了强的 MJO 事件, 即振幅 ( $\sqrt{RMM1^2 + RMM2^2}$ )  $> 1$  的事件, 因此弱 MJO 事件将在分析中去除。

为了证实赤道对流活动是和 MJO 的位相相联系

的, 图 1 给出了各个位相下合成的 OLR 场及 850 hPa 的经向风和纬向风异常场。在位相 1, MJO 对流中心位于非洲和西印度洋, 此时太平洋以西风异常为主, 而印度洋存在东风异常; 在位相 2 和位相 3, 对流中心主要位于印度洋, 继续发展并逐渐东移至海洋性大陆(位相 4、位相 5); 位相 6~位相 8, 对流中心由西太平洋继续东移至中太平洋。

使用到的 RMM 指数时间段包括从 1979/1980—2015/2016 年的 37 个冬季, 因此可以得到每个位相所对应的天数。图 2 给出了每个 MJO 位相所对应的天数及平均振幅的大小。可以看到位相 2~位相 4 以及位相 6~位相 8 MJO 事件的发生频率较高, 其中平均振幅的最大值出现位相 3。

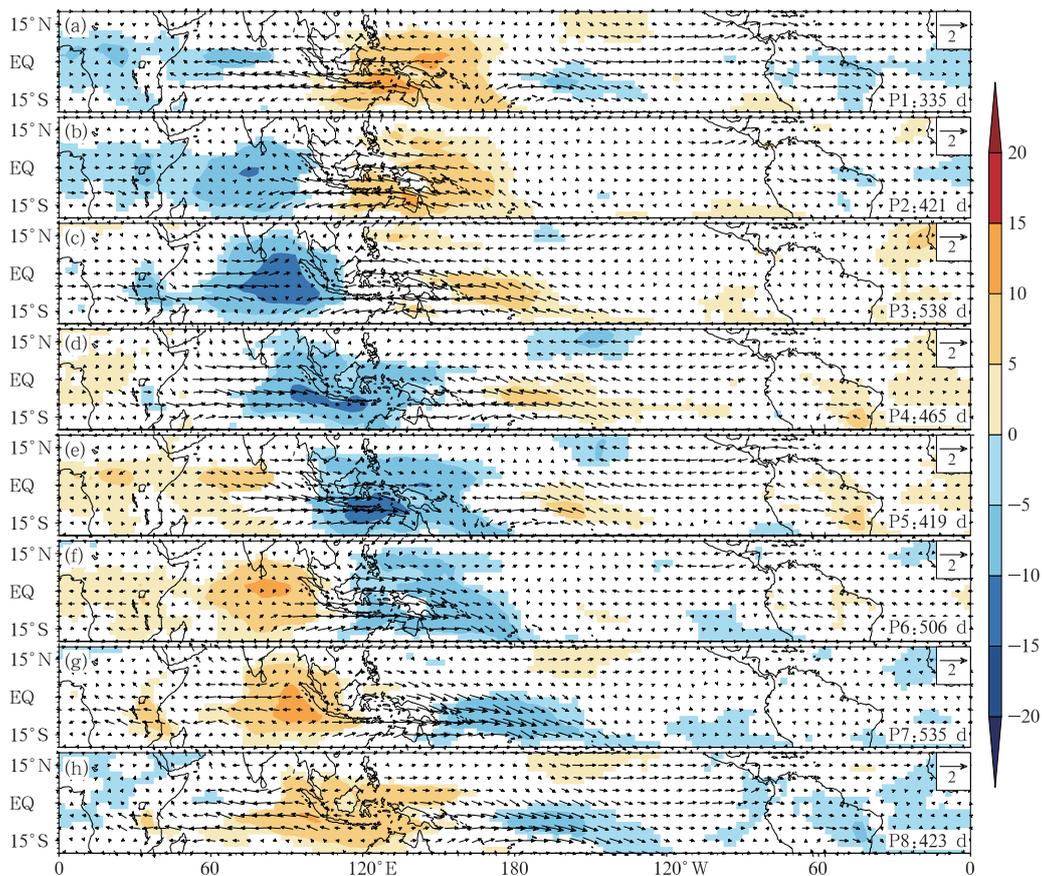


图 1 MJO 8 个位相(a~h)下合成的 30~60 d 滤波后的冬季 OLR 异常场(填色, 单位:  $W \cdot m^{-2}$ ) 和 850 hPa 异常风场(箭头, 单位:  $m \cdot s^{-1}$ )

(阴影区为通过 0.05 显著性水平检验区域,  $t$  检验; 右下角数字为每个位相对应的天数)

Fig. 1 Composite of 30—60 d filtered OLR (colored, unit:  $W \cdot m^{-2}$ ) and 850 hPa wind (vector, unit:  $m \cdot s^{-1}$ ) anomalies for each active MJO phase during wintertime (a—h)

(Shaded areas exceed the significance test at 0.05 level, the number of days in each phase is marked at the bottom right in each map)

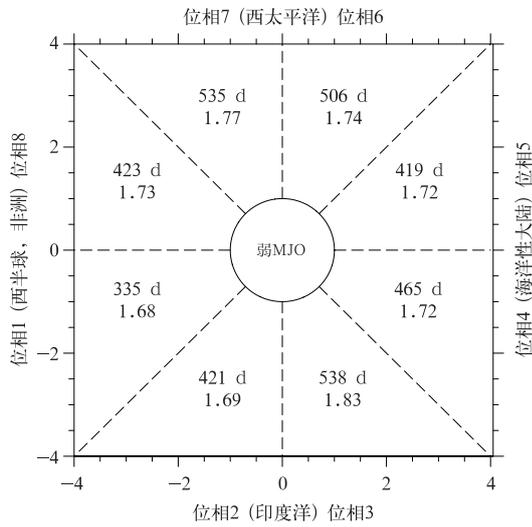


图 2 二维 MJO 指数(RMM1 和 RMM2) 定义的 MJO 空间位相以及各位相对应 的天数和平均振幅

Fig. 2 Phase space diagram defined by the 2-component MJO index (RMM1 and RMM2), the days and average amplitude corresponding to each phase

### 2.2 与 MJO 相联系的高纬地区地表气温异常

为探究北半球冬季 SAT 和 MJO 之间的联系, 对不同 MJO 位相下的 SAT 进行了合成分析。在北半球高纬地区这种 SAT 异常信号较为显著。Jin and Hoskins(1995)研究表明: 给定的热带加热响应

下的罗斯贝波列会在 15 d 以内完全建立。因此在下文的合成分析中将分别采取 0, 5, 10, 15 d 的滞后。

MJO 的位相 1~位相 4 代表其一半的生命周期, 而位相 5~位相 8 则代表相反的另一半周期, 这种生命史的对称特征也表现在 SAT 的合成场上, 随着滞后时间的变化, 每个位相下高纬 SAT 异常的强度也会有一定的变化, 总体来说在滞后 5~15 d 时位相 2~位相 7 下高纬地区 SAT 信号比较显著, 第 0 天时(即同时次的合成图中)这种异常 SAT 信号相对较弱, 随着滞后时间的增加, 该异常信号得到加强。这里给出了滞后 5~15 d 的 MJO 的 8 个位相下的异常 SAT 合成图(图 3), 可以看到位相 2 和位相 6 以及位相 3 和位相 7 下这种 SAT 信号比较显著, 并且该异常 SAT 信号存在着明显的反向对应关系(即位相 2、6 表现为明显的负异常而位相 3、位相 7 则表现为明显的正异常), 后续为了简洁起见选择位相 2 和位相 6 进行研究(对位相 3 和位相 7 也做了同样分析, 得到相似结论)。从图 4 中可以看到在 MJO 的第 2(第 6)位相后 5 d 左右北半球高纬地区开始出现负(正)的 SAT 异常, 在滞后 10~15 d 时这种异常信号表现得更加明显。

此外, 值得关注的是在高纬地区(60°N 以北), 其 SAT 的异常情况并不是完全一致的, 部分区域会呈现出相反的变化, 在滞后 5 d 以后其 SAT 异常信

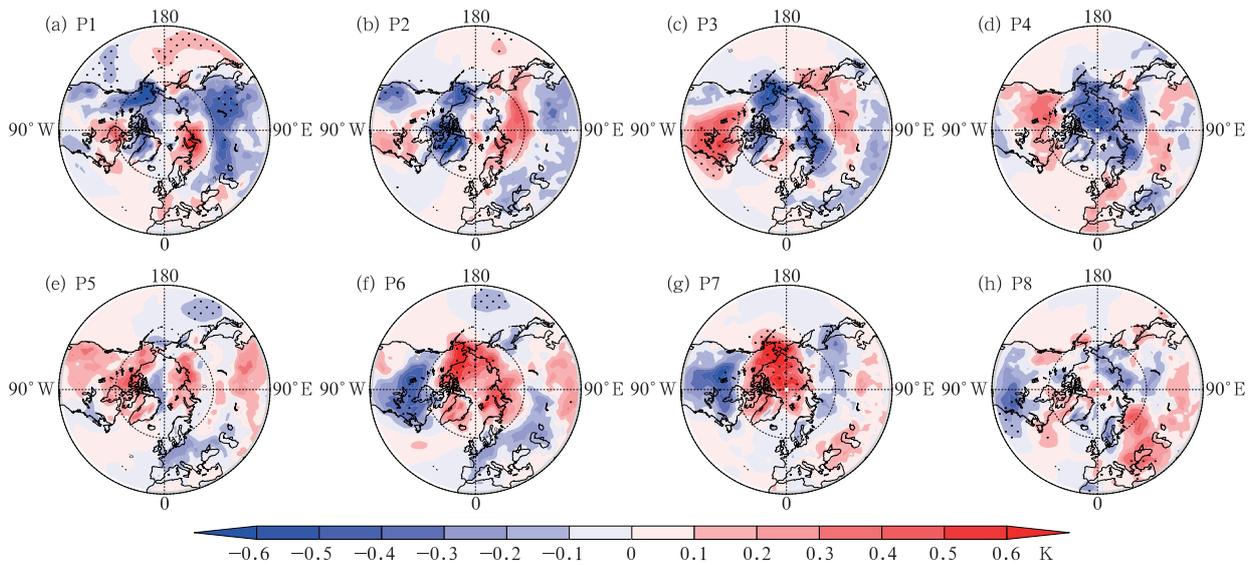


图 3 MJO 8 个位相(a~h)下冬季 SAT 滞后 5~15 d 的合成 (打点代表通过 0.05 的显著性水平检验)

Fig. 3 Composite of SAT anomaly with a 5-15 d lag for each MJO phase (a-h) (Black dots represent values exceeding significance test at 0.05 level)

号均较为显著和一致的主要为  $60^{\circ}\sim 90^{\circ}\text{N}$ 、 $180^{\circ}\sim 60^{\circ}\text{W}$  这部分区域。为了探究该区域温度的垂直结构是否也有类似的变化特征,图 5 给出了 MJO

位相 2 和位相 6 滞后 0, 5, 10, 15 d 后的温度异常及位势高度异常沿纬向平均 ( $180^{\circ}\sim 60^{\circ}\text{W}$ ) 后的经向-垂直分布。和地表气温类似,整个对流层的温度异

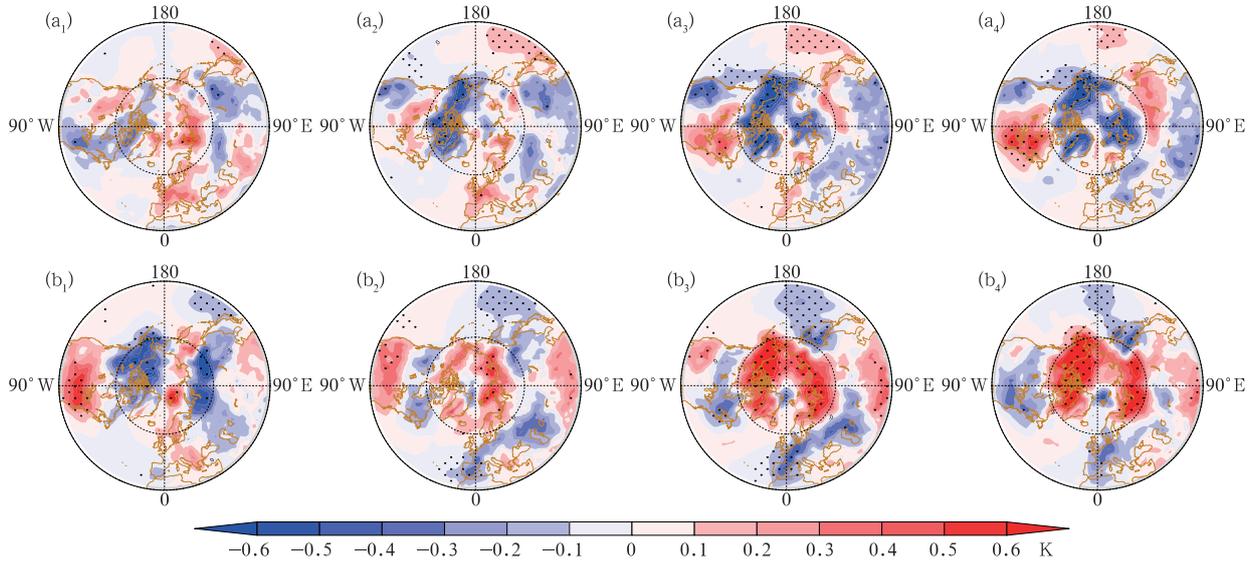


图 4 MJO 位相 2(a)和位相 6(b)下冬季 SAT 滞后 0 d ( $a_1, b_1$ ), 5 d ( $a_2, b_2$ ), 10 d ( $a_3, b_3$ ), 15 d ( $a_4, b_4$ ) 的合成 (打点代表通过 0.05 的显著性水平检验)

Fig. 4 Lagged composite of SAT anomaly for MJO Phase 2 (a) and Phase 6 (b) with lag days 0 d ( $a_1, b_1$ ), 5 d ( $a_2, b_2$ ), 10 d ( $a_3, b_3$ ) and 15 d ( $a_4, b_4$ ) (Black dots represent values exceeding the significant test at 0.05 level)

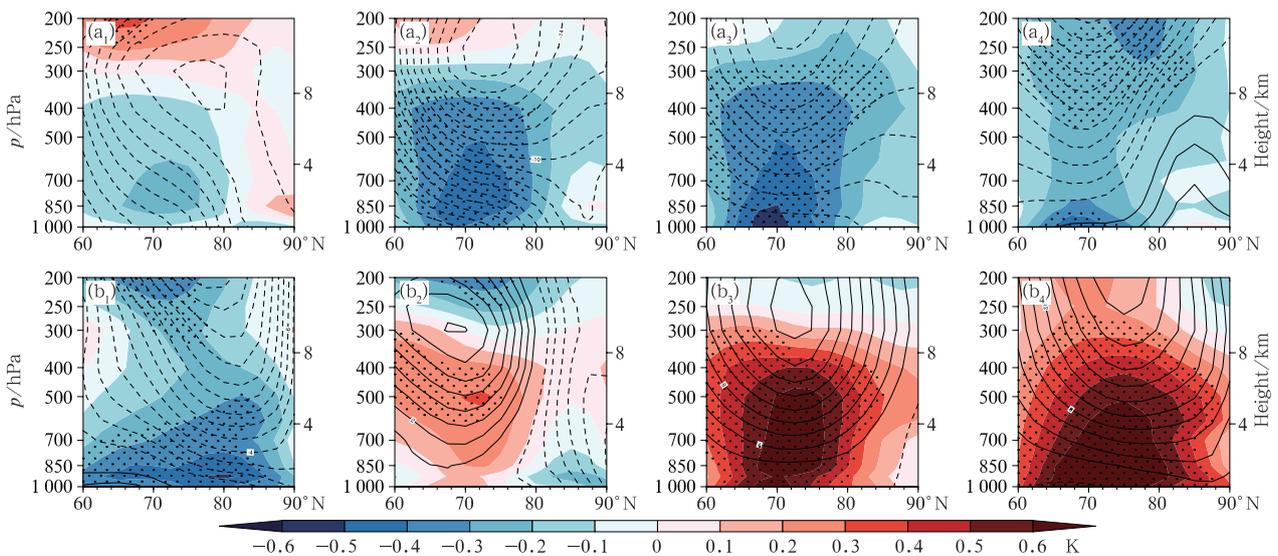


图 5 MJO 位相 2(a)和位相 6(b)下滞后 0 d ( $a_1, b_1$ ), 5 d ( $a_2, b_2$ ), 10 d ( $a_3, b_3$ ), 15 d ( $a_4, b_4$ ) 的冬季温度异常场(填色)以及位势高度异常场(等值线, 单位: gpm)沿  $180^{\circ}\sim 60^{\circ}\text{W}$  平均后的经向-垂直分布 (打点代表通过 0.05 显著性水平检验)

Fig. 5 The meridional-vertical distribution of lagged composite temperature  $T'$  (colored) averaged along the longitudes  $180^{\circ}\sim 60^{\circ}\text{W}$  for MJO Phase 2 (a) and Phase 6 (b) with lag days 0 d ( $a_1, b_1$ ), 5 d ( $a_2, b_2$ ), 10 d ( $a_3, b_3$ ), 15 d ( $a_4, b_4$ ) (Black dots represent values exceeding the significant test at 0.05 level)

常也呈现出相似分布特征,即在滞后 5~10 d 时,位相 2(位相 6)呈现出明显的负(正)温度异常。另一个显著的特征是:例如在位相 2 后的 5 d,一个位于 300 hPa 左右的负位势高度异常中心出现在 70°~80°N,在该中心以上(以下)温度异常表现为暖(冷)异常,较好地满足了静力平衡关系。在第 6 位相也能看到这种较好的对应关系,静力平衡关系使得低层的与 MJO 相关的温度异常信号与对流层高层的位势高度异常之间建立了密切的关系。最后,由于在北半球高纬地区冬季有相似幅度的增暖(冷却)发生在 MJO 第 1, 3, 4(5, 7, 8)位相后的 1~2 周,所以该地区冬季 SAT 与 MJO 位相 2 和位相 6 之间的联系同样应该可适用于 MJO 的其他位相。

### 3 大尺度环流异常

为了进一步理解上述北半球高纬地区与 MJO 相联系的 SAT 信号,探究了与 MJO 位相相联系的大尺度异常环流场的分布特征。Ferranti et al (1990), Matthews et al (2004) 研究表明:与 MJO 相关的热带非绝热加热异常会激发罗斯贝波列并影响中高纬的大尺度环流异常。

图 6 给出了在冬季 MJO 位相 2 和位相 6 下合成的北半球 500 hPa 位势高度异常场。对于 MJO 位相 2,在滞后 5 d 时,一个显著的特征是有一个位于北太平洋,中心位于 40°N、180°附近的正位势高度异常中心。在阿拉斯加和加拿大西岸有一个负位

势高度异常中心,加拿大东部则为正位势高度异常,可以看到波的模态主要表现出向下游频散的特征,与 PNA 的模态很类似,但是相对于 PNA 有略微的西移;到滞后 10 d 时,北大西洋分支有明显的环流异常在发展,形成了近似于正的 NAO 的模态。位相 6 的合成图表现出和位相 2 相似的演变特征,但由于此时的热带强迫发生了变化,因此呈现出的波列模态也相反。

由图 6 可以看到北半球高纬表现出负(正)SAT 异常的地区主要对应于负(正)位势高度异常,这表明 MJO 对北半球高纬地区 SAT 信号的影响可能与水平温度平流的输送相关。这种位势高度的异常在对流层整层基本是一致的,呈现出正压的结构。参考前人的工作,可以推测与 MJO 相关的热带对流所引起的加热异常可能会触发罗斯贝波列,由此持续性地影响了北半球高纬地区的环流异常,从而对季节内 SAT 信号产生重要影响。

为进一步探究上述于北半球中高纬观测到的罗斯贝波列的波源和传播特征,图 7 给出了 MJO 位相 2 和位相 6 下扰动罗斯贝波源以及波活动通量的合成场。根据罗斯贝波源的定义式: $S' \approx -\zeta' \nabla \cdot v'_x - v'_x \cdot \nabla \zeta'$ ,虽然低纬区的绝对涡度较小,但在异常加热区(MJO 对流区)的边缘的辐散风相对较大并且有指向高纬的较大的绝对涡度梯度。在热带 MJO 正负加热异常的东北侧可以看到分别有一组正负波源(阴影),在正波源附近有东北向传播的波活动通量(矢量箭头),因此在中高纬地区观测到的

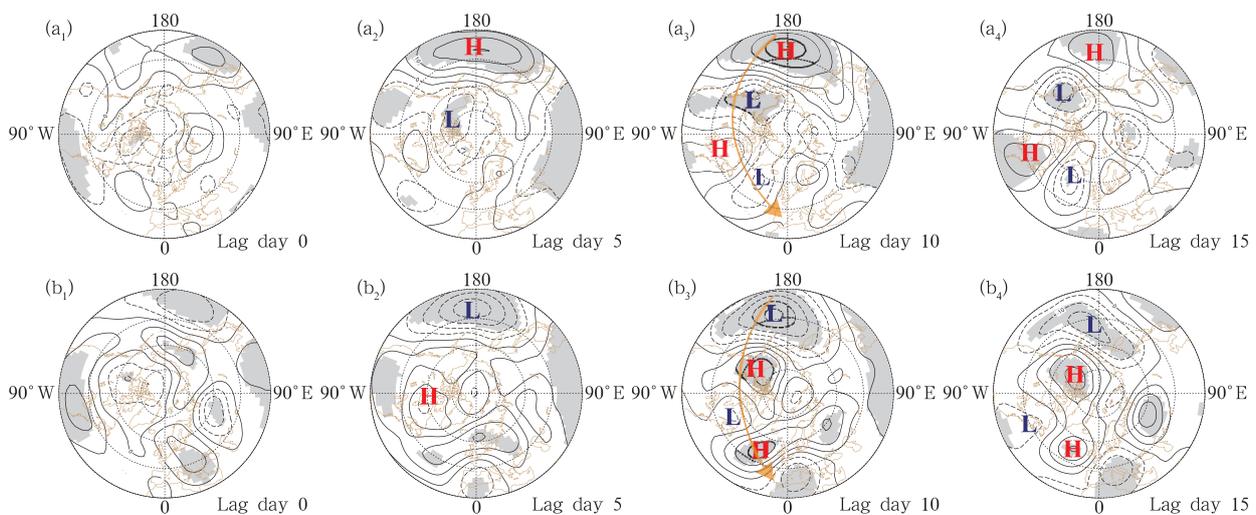


图 6 同图 5, 但为合成的冬季 500 hPa 位势高度异常场(等值线, 间隔为 2 gpm)  
(阴影为通过 0.05 的显著性水平检验)

Fig. 6 Same as Fig. 5, but for composite geopotential height anomaly fields (contour, with an interval of 2 gpm) at 500 hPa (Shaded areas exceed the significance test at 0.05 level)

波列可能是由 MJO 对流激发的。Henderson and Maloney (2018) 也指出在 MJO 事件中, 和异常对流相联系的上层辐散会导致副热带急流区的涡度异常并触发罗斯贝波列。因此, 图 7 的高度异常场上所表现出的波列模态很可能是罗斯贝波能量频散的结果。这种与热带对流相联系的加热异常触发了罗斯贝波列, 波列的持续东北向传播又影响了中高纬地区的异常环流场, 从而对高纬地区的季节内 SAT 异常信号产生重要影响 (Hu et al, 2019)。

为探究热力因素与异常 SAT 信号之间是否也存在着一一定的对应关系, 对 MJO 位相下合成的 700 hPa

比湿场异常场 (图 8) 进行了简单分析。可以看到 MJO 位相 2 (位相 6) 下较冷 (暖) 的 SAT 分别对应于 700 hPa 较干 (湿) 的空气, 考虑到对流层中层比湿和向下长波辐射之间又存在正相关关系 (Overland et al, 1997; Adams et al, 2000), 可以推测不同 MJO 位相下的比湿正 (负) 异常会导致向下长波辐射的正 (负) 异常, 从而会对该地区的正 (负) SAT 信号有一定的正贡献。

由上述分析发现与 MJO 对流相联系热带加热异常会触发东北向传播的罗斯贝波列, 该波列会影响到研究所关注的高纬地区的大尺度环流异

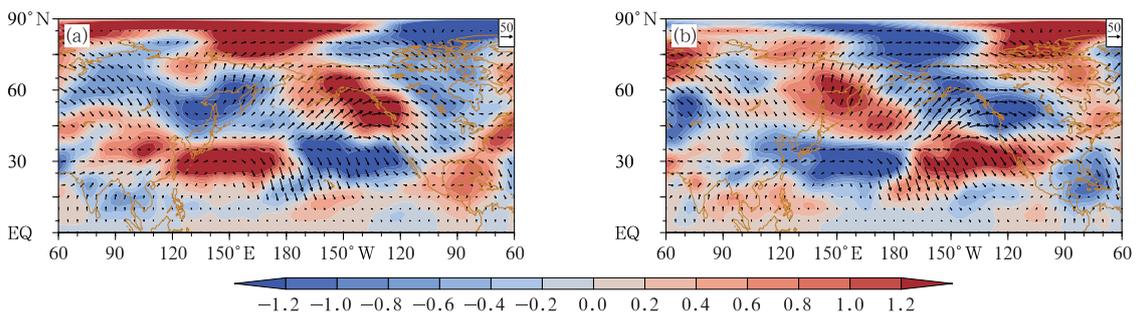


图 7 MJO 位相 2(a) 和位相 6(b) 合成的 200 hPa 波活动通量 (箭头, 单位:  $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ ) 及罗斯贝波源 (填色, 单位:  $10^{-10} \text{ s}^{-2}$ )

Fig. 7 The 200 hPa wave activity flux (vector, unit:  $10^2 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ ) and Rossby wave source (colored, unit:  $10^{-10} \text{ s}^{-2}$ ) with respect to MJO Phase 2 (a) and Phase 6 (b)

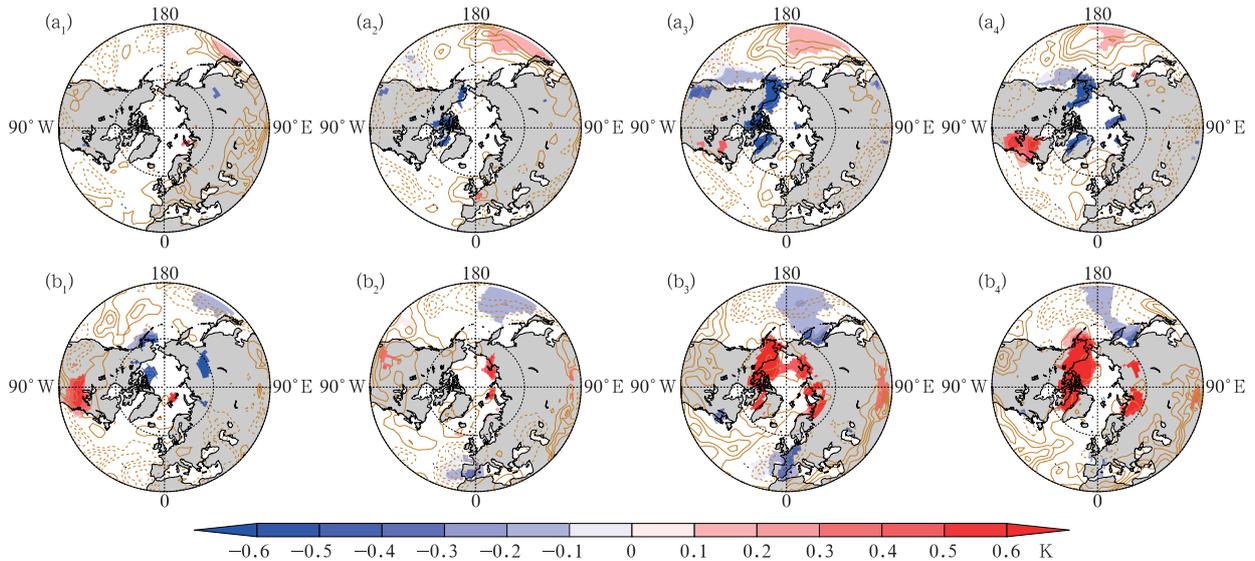


图 8 同图 5, 但为合成的冬季 SAT (填色, 仅显示通过 0.05 显著性水平检验的部分) 和 700 hPa 比湿异常场 (等值线, 间隔为  $2 \times 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )

Fig. 8 Same as Fig. 5, but for composite SAT anomaly (colored, the part respects only values exceeding the significant test at 0.05 level) and specific humidity field at 700 hPa (contour, with an interval of  $2 \times 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )

常,从而对该地区的季节内 SAT 异常信号产生重要影响。此外,除异常环流场以外,700 hPa 比湿场和高纬 SAT 信号间也有较好的对应关系,表明与辐射过程相关的热力因素可能对该地区的 SAT 异常有一定的正贡献。而具体哪一过程在温度异常的变化中起主导作用还需借助于温度方程进行诊断分析,在之后的工作中我们会作进一步的研究。

## 4 结论和讨论

本文研究了 MJO 和北半球冬季高纬地区 SAT 之间的联系,基于 38 年(1979—2016 年)的逐日 2 m 地表气温资料以及 RMM 指数,得到了 MJO 热带对流和北半球冬季高纬地区 SAT 异常之间显著的相关关系。全文主要关注了 MJO 生命周期中的两个位相:位相 2 和位相 6,分别对应于位于东印度洋和西太平洋地区的 MJO 正对流。考虑到中高纬对于热带对流的响应存在 1~2 周的延迟,为使与 MJO 相联系的异常信号更显著,在进行 MJO 位相的合成分析时考虑了 5~15 d 的滞后。可以明显看到:在北半球高纬地区,尤其是 60°~90°N、180°~60°W 这部分区域,在 MJO 位于位相 2 后的 5~15 d 有明显的负 SAT 异常,此时的正对流主要位于印度洋和海洋性大陆地区,负对流位于太平洋西部及中部;同样的,在 MJO 位于位相 6 后的 5~15 d,该区域有显著的正 SAT 异常,对应位于印度洋和海洋性大陆的负对流以及位于太平洋西部及中部的正对流。该地区的温度异常的垂直分布特征与 SAT 类似,即在 MJO 位于位相 2 后的 5~15 d 表现为负温度异常,而在 MJO 位于位相 6 后的 5~15 d 则表现为正温度异常。滞后合成的大尺度异常环流场表明热带对流活动会对中高纬的 SAT 产生影响,通常是以罗斯贝波列的形式。500 hPa 位势高度异常的合成场上可以明显看到在太平洋以及北美地区形成了类似于 PNA 模态的波列。罗斯贝波源及波活动通量的分析表明该波列应该是由与 MJO 对流相联系的热带加热异常所触发的,同时在加热场东北侧的正波源区有东北指向的波活动通量,表明观测的罗斯贝波列可能是东北方向频散的罗斯贝能量的结果。热带对流通过这种遥相关的方式对中高纬的环流形势产生影响,从而影响季节内 SAT 变率。此外 700 hPa 的比湿异常场的合成分析图也呈现出与 SAT 异常信号间较好的对应关系,在高纬地区温度负异常时

有明显的比湿负异常,相反的,在温度正异常时则有明显的比湿正异常,而对流层中层的比湿和向下长波辐射之间存在正相关关系,表明辐射过程等热力因素也可能对该地区的 SAT 异常有一定的贡献。

本文中 MJO 位相和 SAT 异常间显著的相关关系可能会给北半球高纬地区 SAT 的预报提供一些帮助,因为热带地区缓慢变化的对流活动可以为预报提供季节内时间尺度上的信息。但是也认识到了本次工作中的几个局限,首先,上文所讨论的滞后合成分析仅仅是多个 MJO 事件的平均结果,而这些 MJO 事件通常具有不同的传播特征和强度。此外,北极的 SAT 异常更多是受到高纬地区自身的变化的影响,比如西伯利亚高压和北极涛动(AO)等,所以 MJO 的影响只能被视作是一个附加部分并且它的影响也是有限的。最后,还应该注意到,研究不可避免地会受到和厄尔尼诺等相关的更长时间尺度变率的影响。热带 MJO 是进行 10~30 d 延伸期预报的重要可预报来源,如果能准确预测 MJO 的发展和演变,对于气候异常的预测可以提供一些依据。

## 参考文献

- 白旭旭,李崇银,谭言科,等,2011. MJO 对我国东部春季降水影响的分析[J]. 热带气象学报,27(6):814-822. Bai X X, Li C Y, Tan Y K, et al, 2011. Analysis of the Madden-Julian oscillation impacts on the spring rainfall in East China[J]. J Trop Meteor, 27(6): 814-822(in Chinese).
- 丁一汇,梁萍,2010. 基于 MJO 的延伸预报[J]. 气象,36(7):111-122. Ding Y H, Liang P, 2010. Extended range forecast basing on MJO[J]. Meteor Mon, 36(7):111-122(in Chinese).
- 贾小龙,梁潇云,2011. 热带 MJO 对 2009 年 11 月我国东部大范围雨雪天气的可能影响[J]. 热带气象学报,27(5):639-648. Jia X L, Liang X Y, 2011. Possible impacts of the MJO on the severe ice-snow weather in November of 2009 in China[J]. J Trop Meteor, 27(5):639-648(in Chinese).
- 贾小龙,袁媛,任福民,等,2012. 热带大气季节内振荡(MJO)实时监测预测业务[J]. 气象,38(4):425-431. Jia X L, Yuan Y, Ren F M, et al, 2012. The real time MJO monitoring and prediction operation in NCC[J]. Meteor Mon, 38(4):425-431(in Chinese).
- 李崇银,潘静,田华,等,2012. 西北太平洋台风活动与大气季节内振荡[J]. 气象,38(1):1-16. Li C Y, Pan J, Tian H, et al, 2012. Typhoon activities over the western North Pacific and atmospheric intraseasonal oscillation[J]. Meteor Mon, 38(1):1-16(in Chinese).
- 李春晖,刘燕,李霞,等,2016. 热带西北太平洋 10~30 d 振荡对南海夏季风影响[J]. 应用气象学报,27(3):293-302. Li C H, Liu Y, Li X, et al, 2016. Impact of 10~30-day oscillation intensity over the tropical Northwest Pacific Ocean on the South China Sea

- summer monsoon[J]. *J Appl Meteor Sci*, 27(3):293-302(in Chinese).
- 李健颖,毛江玉,2019. 亚洲夏季风 30~60 天季节内振荡对中国东部地区持续性极端降水的影响[J]. *大气科学*, 43(4):796-812. Li J Y, Mao J Y, 2019. Impact of the boreal summer 30-60-day intraseasonal oscillation over the Asian summer monsoon region on persistent extreme rainfall over eastern China[J]. *Chin J Atmos Sci*, 43(4):796-812(in Chinese).
- 李汀, 琚建华, 2013. 热带印度洋 MJO 活动对孟加拉湾西南夏季风季节内振荡的影响[J]. *气象学报*, 71(1):38-49. Li T, Ju J H, 2013. The impact of tropic Indian MJO activities on the intraseasonal oscillation of the southwest summer monsoon over Bay of Bengal[J]. *Acta Meteor Sin*, 71(1):38-49(in Chinese).
- 李汀, 严欣, 琚建华, 2012. MJO 活动对云南 5 月降水的影响[J]. *大气科学*, 36(6):1101-1111. Li T, Yan X, Ju J H, 2012. Impact of MJO activities on precipitation in May over Yunnan[J]. *Chin J Atmos Sci*, 36(6):1101-1111(in Chinese).
- 李文铠, 何金海, 祁莉, 等, 2014. MJO 对华南前汛期降水的影响及其可能机制[J]. *热带气象学报*, 30(5):983-989. Li W K, He J H, Qi L, et al, 2014. The influence of the Madden-Julian oscillation on annually first rain season precipitation in South China and its possible mechanism[J]. *J Trop Meteor*, 30(5):983-989(in Chinese).
- 李永华, 向波, 卢楚翰, 等, 2016. 热带大气季节内振荡对西南地区东部夏季降水的影响及其可能机制[J]. *大气科学*, 40(2):437-450. Li Y H, Xiang B, Lu C H, et al, 2016. Impact of Madden-Julian oscillation activities on precipitation in summer over the east of Southwest China and its possible mechanism[J]. *Chin J Atmos Sci*, 40(2):437-450(in Chinese).
- 林爱兰, 谷德军, 李春晖, 等, 2016. 赤道 MJO 活动对南海夏季风爆发的影响[J]. *地球物理学报*, 59(1):28-44. Lin A L, Gu D J, Li C H, et al, 2016. Impact of equatorial MJO activity on summer monsoon onset in the South China Sea[J]. *Chin J Geophys*, 59(1):28-44(in Chinese).
- 林爱兰, 李春晖, 谷德军, 等, 2013. 热带季节内振荡对广东 6 月降水的影响[J]. *热带气象学报*, 29(3):353-363. Lin A L, Li C H, Gu D J, et al, 2013. Impact of tropical intraseasonal oscillations on the precipitation of Guangdong in June[J]. *J Trop Meteor*, 29(3):353-363(in Chinese).
- 刘冬晴, 杨修群, 2010. 热带低频振荡影响中国东部冬季降水的机理[J]. *气象科学*, 30(5):684-693. Liu D Q, Yang X Q, 2010. Mechanism responsible for the impact of Madden-Julian oscillation on the wintertime rainfall over eastern China[J]. *J Meteor Sci*, 30(5):684-693(in Chinese).
- 马宁, 李跃凤, 琚建华, 2011. 2008 年初中国南方低温雨雪冰冻天气的季节内振荡特征[J]. *高原气象*, 30(2):318-327. Ma N, Li Y F, Ju J H, 2011. Intraseasonal oscillation characteristics of extreme cold, snowy and freezing rainy weather in southern China in early 2008[J]. *Plateau Meteor*, 30(2):318-327(in Chinese).
- 牛法宝, 杞明辉, 杨素雨, 等, 2013. MJO 不同活动中心位置对云南冬半年降水过程的影响[J]. *气象*, 39(9):1145-1153. Niu F B, Qi M H, Yang S Y, et al, 2013. Influence of MJO center position on precipitation process of Yunnan in winter half year[J]. *Meteor Mon*, 39(9):1145-1153(in Chinese).
- 吴捷, 任宏利, 许小峰, 等, 2018. MJO 对我国降水影响的季节调制和动力-统计降尺度预测[J]. *气象*, 44(6):737-751. Wu J, Ren H L, Xu X F, et al, 2018. Seasonal modulation of MJO's impact on precipitation in China and its dynamical-statistical downscaling prediction[J]. *Meteor Mon*, 44(6):737-751(in Chinese).
- 吴俊杰, 袁卓建, 钱钰坤, 等, 2009. 热带季节内振荡对 2008 年初南方持续性冰冻雨雪天气的影响[J]. *热带气象学报*, 25(S1):103-112. Wu J J, Yuan Z J, Qian Y K, et al, 2009. The role of intraseasonal oscillation in the southern-China snowstorms during January 2008[J]. *J Trop Meteor*, 25(S1):103-112(in Chinese).
- 许乐心, 张人禾, 齐艳军, 2017. 长江中游和下游夏季降水季节内振荡的差异[J]. *大气科学*, 41(6):1125-1140. Xu L X, Zhang R H, Qi Y J, 2017. Differences in intraseasonal summer rainfall oscillation between the middle and lower reaches of the Yangtze River[J]. *Chin J Atmos Sci*, 41(6):1125-1140(in Chinese).
- 章丽娜, 林鹏飞, 熊喆, 等, 2011. 热带大气季节内振荡对华南前汛期降水的影响[J]. *大气科学*, 35(3):560-570. Zhang L N, Lin P F, Xiong Z, et al, 2011. Impact of the Madden-Julian oscillation on pre-flood season precipitation in South China[J]. *Chin J Atmos Sci*, 35(3):560-570(in Chinese).
- 祝从文, Nakazawa T, 李建平, 等, 2004. 大气季节内振荡对印度洋-西太平洋地区热带低压/气旋生成的影响[J]. *气象学报*, 62(1):42-50. Zhu C W, Nakazawa T, Li J P, et al, 2004. Modulation of tropical depression/cyclone over the Indian-Western Pacific Oceans by Madden-Julian oscillation[J]. *Acta Meteor Sin*, 62(1):42-50(in Chinese).
- Adams J M, Bond N A, Overland J E, 2000. Regional variability of the Arctic heat budget in fall and winter[J]. *J Climate*, 13(9):3500-3510.
- Bond N A, Vecchi G A, 2003. The influence of the Madden-Julian oscillation on precipitation in Oregon and Washington[J]. *Wea Forecasting*, 18(4):600-613.
- Duchon C E, 1979. Lanczos filtering in one and two dimensions[J]. *J Appl Meteor*, 18(8):1016-1022.
- Ferranti L, Palmer T N, Molteni F, et al, 1990. Tropical-extratropical interaction associated with the 30-60 day oscillation and its impact on medium and extended range prediction[J]. *J Atmos Sci*, 47(18):2177-2199.
- Gottschalck J, Wheeler M, Weickmann K, et al, 2010. A framework for assessing operational Madden-Julian oscillation forecasts: a CLIVAR MJO Working Group Project[J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 91(9):1247-1258.
- Hall J D, Matthews A J, Karoly D J, et al, 2001. The modulation of tropical cyclone activity in the Australian region by the Madden-Julian oscillation[J]. *Mon Wea Rev*, 129(12):2970-2982.
- Henderson S A, Maloney E D, 2018. The impact of the Madden-Julian oscillation on high-latitude winter blocking during El Niño-southern oscillation events[J]. *J Climate*, 31(13):5293-5318.

- Higgins R W, Mo K C, 1997. Persistent North Pacific circulation anomalies and the tropical intraseasonal oscillation[J]. *J Climate*, 10(2): 223-244.
- Hsu P C, Li T, 2012. Role of the boundary layer moisture asymmetry in causing the eastward propagation of the Madden-Julian oscillation[J]. *J Climate*, 25(14): 4914-4931.
- Hu W T, Liu P, Zhang Q, et al, 2019. Dominant patterns of wintertime intraseasonal surface air temperature over the CONUS in response to MJO convections[J]. *Climate Dyn*, 53(7/8): 3917-3936.
- Jiang X A, Li T, Wang B, 2004. Structures and mechanisms of the northward propagating boreal summer intraseasonal oscillation [J]. *J Climate*, 17(5): 1022-1039.
- Jin F F, Hoskins B J, 1995. The direct response to tropical heating in a baroclinic atmosphere[J]. *J Atmos Sci*, 52(3): 307-319.
- Kiladis G N, Weickmann K M, 1992. Circulation anomalies associated with tropical convection during northern winter[J]. *Mon Wea Rev*, 120(9): 1900-1923.
- Lau K M, Phillips T J, 1986. Coherent fluctuations of extratropical geopotential height and tropical convection in intraseasonal time scales[J]. *J Atmos Sci*, 43(11): 1164-1181.
- Li T, 2014. Recent advance in understanding the dynamics of the Madden-Julian oscillation[J]. *J Meteor Res*, 28(1): 1-33.
- Lin H, Brunet G, 2009. The influence of the Madden-Julian oscillation on Canadian wintertime surface air temperature[J]. *Mon Wea Rev*, 137(7): 2250-2262.
- Madden R A, Julian P R, 1971. Detection of a 40–50 day oscillation in the zonal wind in the tropical Pacific[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, Julian P R, 1994. Observations of the 40–50-day tropical oscillation—a review[J]. *Mon Wea Rev*, 122(5): 814-837.
- Maloney E D, Hartmann D L, 2000. Modulation of eastern North Pacific hurricanes by the Madden-Julian oscillation[J]. *J Climate*, 13(9): 1451-1460.
- Matthews A J, Hoskins B J, Masutani M, et al, 2004. The global response to tropical heating in the Madden-Julian oscillation during the northern winter[J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 130(601): 1991-2011.
- Overland J E, Adams J M, Bond N A, et al, 1997. Regional variation of winter temperatures in the Arctic[J]. *J Climate*, 10(5): 821-837.
- Rao S A, Yamagata T, 2004. Abrupt termination of Indian Ocean dipole events in response to intraseasonal disturbances[J]. *Geophys Res Lett*, 31(19): L19306.
- Sardeshmukh P D, Hoskins B J, 1988. The generation of global rotational flow by steady idealized tropical divergence[J]. *J Atmos Sci*, 45(7): 1228-1251.
- Sobel A, Maloney E, 2013. Moisture modes and the eastward propagation of the MJO[J]. *J Atmos Sci*, 70(1): 187-192.
- Takaya K, Nakamura H, 2001. A formulation of a phase-independent wave-activity flux for stationary and migratory quasigeostrophic eddies on a zonally varying basic flow[J]. *J Atmos Sci*, 58(6): 608-627.
- Vecchi G A, Bond N A, 2004. The Madden-Julian oscillation (MJO) and northern high latitude wintertime surface air temperatures[J]. *Geophys Res Lett*, 31(4): L04104.
- Wang B, Li T M, 1994. Convective interaction with boundary-layer dynamics in the development of a tropical intraseasonal system [J]. *J Atmos Sci*, 51(11): 1386-1400.
- Wang B, Rui H, 1990. Dynamics of the coupled moist Kelvin-Rossby wave on an equatorial  $\beta$ -plane[J]. *J Atmos Sci*, 47(4): 397-413.
- Wen M, Yang S, Higgins W, et al, 2011. Characteristics of the dominant modes of atmospheric quasi-biweekly oscillation over tropical-subtropical Americas[J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 24(15): 3956-3970.
- Wheeler M C, Hendon H H, 2004. An all-season real-time multivariate MJO index; development of an index for monitoring and prediction[J]. *Mon Wea Rev*, 132(8): 1917-1932.
- Wilks D S, 2011. *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences* [M]. 3rd ed. Waltham, MA: Academic Press; 676.
- Yang S Y, Li T, 2016. Intraseasonal variability of air temperature over the mid-high latitude Eurasia in boreal winter[J]. *Clim Dyn*, 47(7/8): 1-21.
- Yang S Y, Li T, 2017. The role of intraseasonal variability at mid-high latitudes in regulating Pacific blockings during boreal winter[J]. *Int J Climatol*, 37(S1): 1248-1256.
- Yang S Y, Zhu Z Z, Cui J, et al, 2019. Regulation of the intraseasonal oscillation over mid-to-high latitude Eurasia on winter surface air temperature over China[J]. *Dyn Atmos Oceans*, 86: 63-72.
- Zhang C D, Gottschalck J, 2002. SST anomalies of ENSO and the Madden-Julian oscillation in the equatorial Pacific[J]. *J Climate*, 15(17): 2429-2445.
- Zhao C B, Li T, Zhou T J, 2013. Precursor signals and processes associated with MJO initiation over the tropical Indian Ocean[J]. *J Climate*, 26(1): 291-307.