



印度洋地区 MJO 对流生成动力学机制的研究进展

摘要

Madden-Julian Oscillation (MJO) 是热带大气在季节内时间尺度上的主要变化特征, MJO 对流的活动对全球很多地区的天气和气候系统都有重要的影响, 因此 MJO 是大气科学重要的前沿课题之一. MJO 对流的生成过程是 MJO 研究中公认的最薄弱的环节, 文中从 MJO 的研究背景出发, 对 MJO 对流生成的有关研究工作及其进展进行了回顾与总结, 主要包括 MJO 对流生成的前期信号、MJO 对流的数值模拟、MJO 对流生成的动力学机制. 最后对 MJO 对流生成研究中还有待解决的问题进行了分析与讨论.

关键词

MJO; 对流; MJO 生成; 动力学机制; 数值模拟

中图分类号 P434; P435

文献标志码 A

收稿日期 2018-04-10

资助项目 中国科学院战略性先导科技专项 (XDA20060501)

作者简介

张媛文, 女, 博士生, 主要研究方向为热带大气季节内振荡. ywzhang@lasg.iap.ac.cn

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

2 中国科学院大学, 北京, 100049

0 引言

Madden-Julian Oscillation (MJO) 是热带大气季节内振荡的主要组成部分^[1-2], 是热带地区乃至全球重要的大气环流系统之一. MJO 的活动对全球很多地区的天气和气候系统都有重要的影响, 因此备受各国学者的关注, 成为大气科学重要的前沿课题之一.

MJO 最先由 Madden 和 Julian 在 1971 年发现^[1], 他们在分析南太平洋坎顿岛 (Kanton Island, 3°S, 172°W) 的无线电探空数据时发现其纬向风和地面气压存在着一个周期为 40~50 d 的低频振荡. 随后, 他们指出这种振荡在全球热带大气中普遍存在, 主要以纬向一波结构向东传播 (图 1)^[2]. Gruber^[3] 和 Zangvil^[4] 的研究表明赤道附近的云也存在周期为 40~50 d 的振荡, 证实了 Madden 和 Julian 关于赤道附近云系存在东传的推测. Yasunari^[5] 发现印度季风区的云量也存在 40 d 左右的周期变化, 并认为印度季风区向北传播的云系始于赤道印度洋上向东传播的云系. 随着 1979 年全球大气研究计划 (Global Atmospheric Research Program, GARP) 第一期全球试验 (First GARP Global Experiment, FGGE) 和 GARP 季风试验 (Monsoon Experiment, MONEX) 的进行, 与 MJO 相关的研究得到了蓬勃开展. 人们对 MJO 基本活动规律有了清晰的认知^[6-10], 如 MJO 具有纬向一波为主的行星尺度空间结构, 30~60 d 的宽频振荡周期, 以平均约 5 m/s 的速度从热带印度洋向热带太平洋中部地区缓慢东传; MJO 的垂直结构主要表现为对流层上下反向的斜压结构、纬向风和温度场随高度明显西倾; 水平结构主要表现为东西方向上的偶极子特征; 此外, MJO 的活动还表现出明显地域差异与季节性差异, MJO 在北半球冬季和夏季的主要特征存在显著不同.

在 MJO 对流和环流系统东传的过程中, MJO 对流异常通过热力强迫和遥相关的方式对热带乃至全球天气和气候产生不同程度的影响^[11]. 研究表明, MJO 的活动对全球的季风系统都具有一定的调制作用^[12], 它会影响亚洲季风^[5, 13-16]、澳洲季风^[17-18] 以及美洲季风^[19] 的爆发和中断; MJO 能够改变热带气旋生成的大尺度条件, 进而调制热带气旋的活动^[20-23]; MJO 和 ENSO 之间存在相互作用^[24-28], MJO 东传时的强西风异常能够影响西太平洋和中太平洋地区的海温, 从而影响 El Niño 的发展速度以及强度; MJO 对印度洋偶极子事件的发生、发展和消亡过程起着不同程度的作用^[29-30]. 此外, MJO 对极端降水^[31-32]、洪涝^[33-34] 以及热带大气气溶胶^[35] 等都具有一定的调制作用.

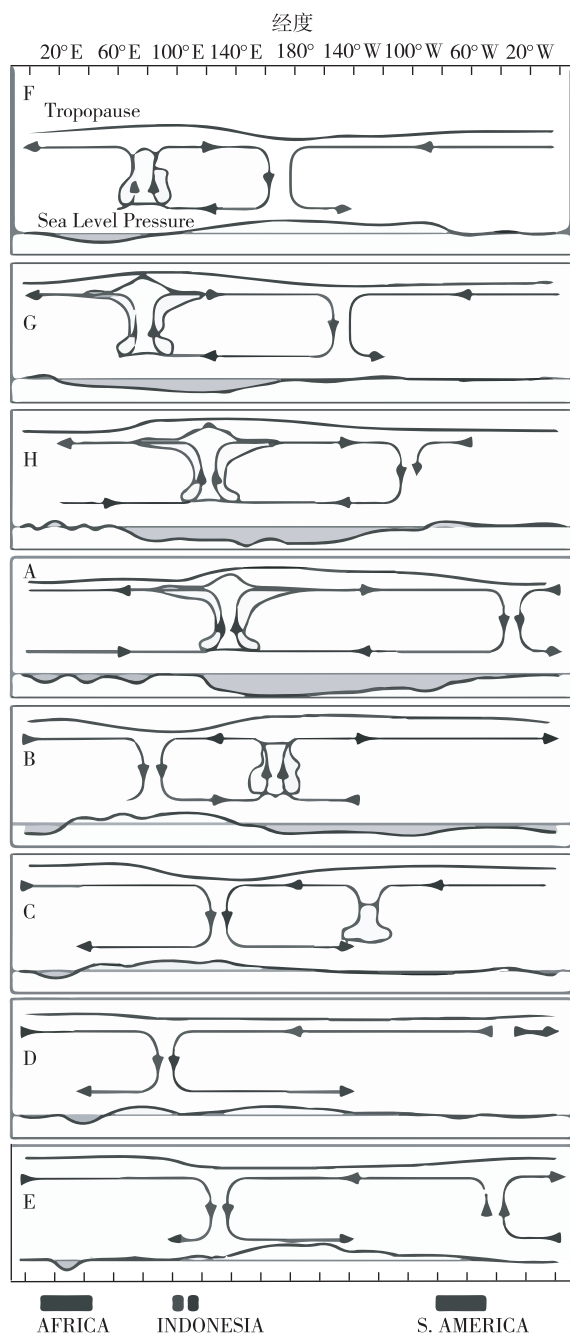


图1 沿赤道 MJO 生命周期(从上向下)中基本大尺度特征的经度-高度示意^[1](云的符号表示对流中心, 箭头表示纬向环流, 环流上方和下方的曲线分别表示对流上层和海平面的气压扰动)

Fig. 1 Longitude-height schematic diagram along the equator illustrating the fundamental large-scale features of the Madden-Julian Oscillation (MJO) through its life cycle (from top to bottom)^[1]

(Cloud symbols represent the convective center, arrows indicate the zonal circulation, and curves above and below the circulation represent perturbations in the upper tropospheric and sea level pressure)

中国也处于 MJO 对流活动的传播经度范围内, MJO 在中国东部地区的天气、气候异常中扮演着重要角色. MJO 的活动会影响我国东南地区冬季和夏季的降水强度^[36-38]和云南地区的降水异常^[39-40], 并且对夏季江淮流域的旱涝^[41-44]有重要影响. 此外, MJO 的活动与我国一些极端天气现象关系密切. 如 2008 年 1 月到 2 月初, 我国南方大范围持续冰冻雨雪天气和 MJO 的活动密切相关^[45-47].

经过 40 多年的研究, 目前人们对 MJO 有了一定程度的认知, 例如 MJO 的大尺度结构^[48-51]和多尺度特征^[52-53], MJO 对全球天气、气候系统的影响^[11, 54], MJO 的传播机制^[55-57]等. 但是仍然存在很多问题亟待解决^[58-61], 目前大多数模式都无法准确模拟 MJO 的强度、周期及传播特征, MJO 活动的预测能力偏低, 现有理论并不能完全解释 MJO 的生成、维持和传播机制. 其中, MJO 对流生成过程是 MJO 研究中公认最薄弱的环节, 这反映出在 MJO 动力学理论机制, 尤其是 MJO 对流信号在印度洋地区生成机制方面的研究中还存在明显不足.

本文将首先回顾 MJO 对流生成的前期信号, 并梳理 MJO 对流数值模拟的现状, 着重介绍现有 MJO 对流生成的动力学机制, 最后对 MJO 对流生成研究中还有待解决的问题进行分析与讨论, 以期加深对印度洋地区 MJO 对流生成的理解.

1 MJO 对流生成的前期信号

MJO 对流是 MJO 研究的核心部分, 它一般在西印度洋生成并向东传播, 途经海洋性大陆地区进入西太平洋, 到达日界线后逐渐减弱并最终消亡. 尽管在热带印度洋到太平洋暖池地区均可能有 MJO 对流生成, 但印度洋是大多数 MJO 对流的生成地. 目前关于 MJO 对流在初期形成的原因尚无定论, 但已有不少研究指出 MJO 对流生成前期印度洋地区存在一些前兆信号.

Ling 等^[62]对比了初始型 MJO 和非 MJO 对流生成之前大尺度环流场, 指出 MJO 生成前热带印度洋地区存在 3 种大尺度信号: 对流层低层首先出现东风异常并从低层向对流层中层延伸, 与此同时该信号在印度洋地区自西向东移动; 海平面气压场呈现纬向一波的结构, 并且负的海平面气压距平在赤道地区从非洲一直延伸至海洋性大陆; 对流层中层存在着负温度距平, 并且以接近 MJO 传播的速度从印度洋开始缓慢东传. 以上信号在 MJO 对流信号生成

之前的 20 d 就已经存在,这些大尺度的信号可以为预测 MJO 对流的生成提供重要的客观指标。

Zhao 等^[63]通过诊断 NOAA 卫星观测资料和 ERA-40 再分析资料,揭示了冬季 MJO 生成的前兆信号和相关动力过程.其研究指出热带西印度洋是 MJO 对流活动生成的关键区域.在 MJO 对流生成之前,热带西印度洋地区对流层低层的湿度显著增加并且温度显著增高.水汽和温度的增长有利于该地区对流不稳定的增长并最终导致 MJO 对流产生. MJO 对流触发期间, MJO 风场与低频湿度场(温度场)相互作用导致的水平湿平流(水平暖平流)是比湿(温度)增加的主要原因.而这种低频风场是对热带东印度洋 MJO 抑制位相的罗斯贝波响应,即下游强迫.但是并非每次 MJO 对流发生前都会有一个 MJO 事件存在,因此这种前兆信号的普适性有待检验。

Mei 等^[64]检验了赤道西印度洋上持续东传的强 MJO 事件的前期信号,并将其分为 3 类:边界层水汽超前型(类型 I)、对流层低层上升运动超前型(类型 II)和无明显前兆信号型(类型 III).在类型 I 中 MJO 对流发生前约 7 天时印度洋地区边界层水汽已经开始增加,这种增湿过程主要由低频风场对平均湿度的平流引起,而这种低频风场是位于赤道东印度洋上受前期 MJO 抑制位相引起的罗斯贝波的一部分.在类型 II 中 MJO 对流发生前约 4 天时印度洋地区对流层低层上升运动出现,水平暖平流是上升运动产生的主要原因.类型 III 中对流层低层并没有显著的前期水汽和上升运动异常信号,这种类型的 MJO 对流生成可能受到中纬度罗斯贝波能量的影响。

以上研究从不同的角度探究 MJO 对流生成的前期信号,对 MJO 的预测具有一定的参考价值,但是更具有普适性的 MJO 对流生成的前兆信号依然有待于进一步探究。

2 MJO 对流的数值模拟

从 19 世纪 80 年代开始,越来越多的学者将数值模式运用到 MJO 的研究中,数值试验有助于探究 MJO 生成机制,然而大多数模式对 MJO 的模拟效果并不理想(图 2)。

目前大多数的大气模式都低估了 MJO 的强度^[65],未能再现 MJO 的季节性差异^[66-67],模式中 MJO 的东传速度过快^[58],高频信号比观测更强^[68],

纬向西传比东传偏强^[69]. Hung 等^[70]评估了 20 个 CMIP5 模式对 MJO 和赤道波动的模拟能力,并且和 CMIP3 模式进行了对比,结果显示大部分 CMIP5 模式模拟 MJO 的振幅、周期和东传速度都有了显著提高,但是模式模拟 MJO 的能力还是偏弱.导致模式模拟 MJO 存在偏差的可能原因主要包括模式分辨率^[71-72]、对流参数化方案^[73]、海气相互作用^[74]以及模式的平均态^[75]等。

不同模式对 MJO 的模拟能力与模式分辨率的关系存在差异. Hayashi 等^[76]对比了 GFDL (Geophysical Fluid Dynamics Laboratory) 模式 2 个不同分辨率版本中 MJO 的模拟结果,发现提高模式水平分辨率有利于 MJO 的模拟. Slingo 等^[77]对比了法国国家气象研究中心 CNRM (Centre National de Recherches Meteorologiques) 3 个不同分辨率版本对 MJO 的模拟能力,发现随着水平分辨率的提高 MJO 的强度反而减弱. Gualdi 等^[78]对 ECHAM3 模式的 3 个不同分辨率版本的分析结果也表明水平分辨率提高实际上降低了 MJO 的模拟能力. Jia 等^[68]对比了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发展的大气环流模式 SAMIL (Spectral Atmospheric Model of IAP/LASG) 3 个不同分辨率版本,结果表明分辨率的变化并没有使 MJO 的模拟能力发生本质上的变化,但是对 MJO 的某些特征起到了明显的调制作用。

对流参数化方案被普遍认为是影响 MJO 模拟的重要因素^[79]. Slingo 等^[77]对比了使用不同对流参数化方案的大气环流模式对 MJO 模拟的结果,认为相比于基于水汽辐合的对流方案,浮力闭合对流方案可以更好地模拟出 MJO 的特征.王坤等^[80]利用中国科学院大气物理研究所的大气环流模式 (IAP AGCM 4),分析了 Emanuel 方案 (EMA)、Zhang-McFarlane 方案 (ZM) 和修改的 Zhang-McFarlane 方案 (MZM) 3 种不同的对流方案,结果表明 MZM 方案较好地模拟出了 MJO 的基本特征,包括季节内的时间尺度、东传特征以及传播的连续性。

图 3 给出了 SAMIL R42L9 分别使用 MCA 和 Tiedtke 积云对流参数化方案所模拟的 MJO 传播特征.可以看到使用 MCA 方案可以模拟出 MJO 的东传信号,而 Tiedtke 方案却不能.对比它们的热带大气垂直加热廓线发现,使用 MAC 方案的大气垂直加热廓线的峰值位于对流层中下层.很多研究都表明,在对流参数化方案能否刻画出对流层中低层的加热峰

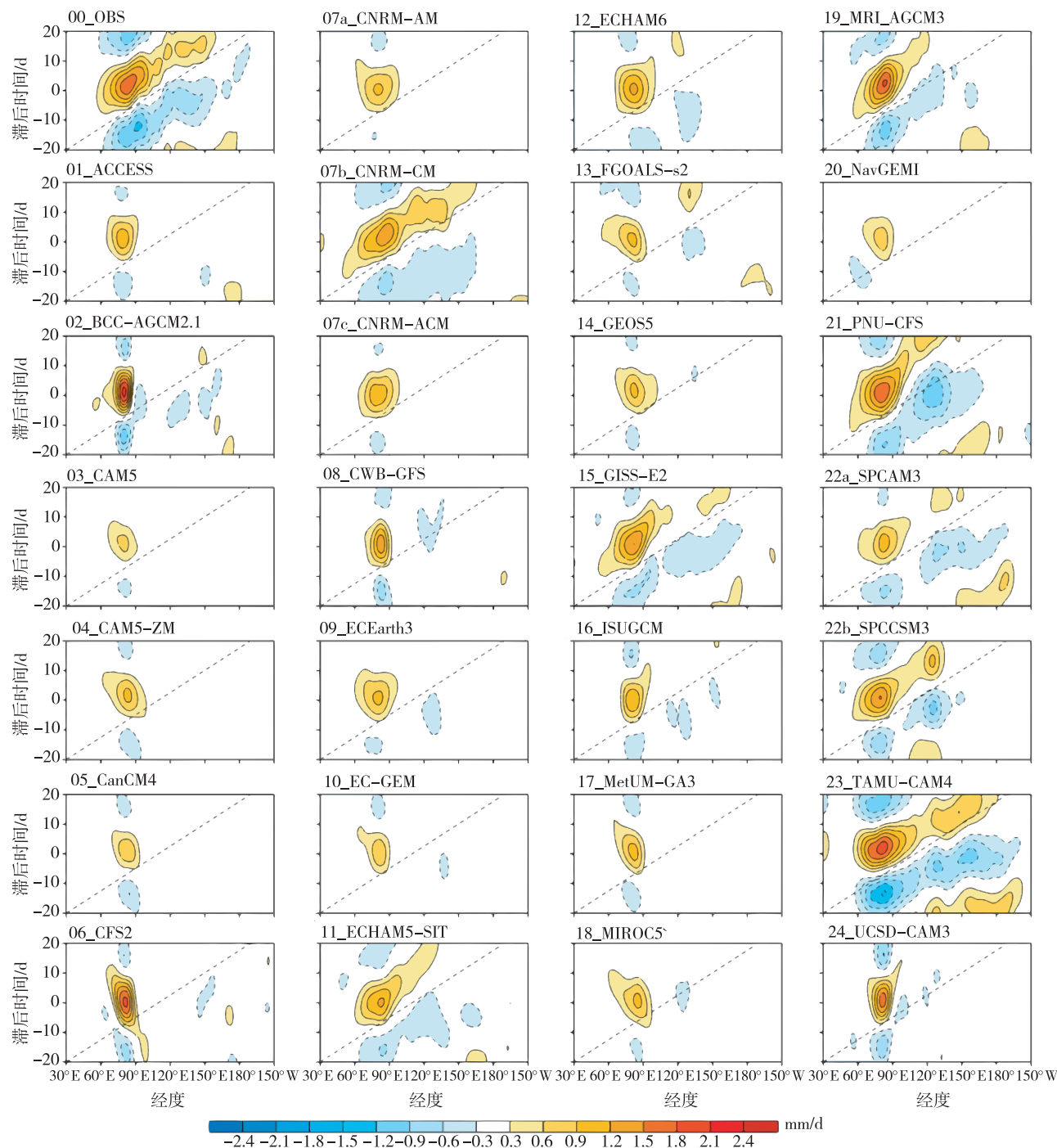


图2 20~100 d带通滤波的降水异常以热带东印度洋(75~85°E;5°S~5°N)平均为参考对其本身回归的经度-时间演变^[61](降水异常为10°S~10°N的平均值,虚线表示5 m/s东传的相速度)

Fig. 2 Longitude-time evolution of rainfall anomalies by lag regression of 20-100 d band-pass-filtered anomalous rainfall against itself averaged over the equatorial eastern Indian Ocean (75-85°E;5°S-5°N)^[61] (Rainfall anomalies are averaged over 10°S-10°N;dashed lines in each panel denote the 5 m/s eastward propagation phase speed)

值最为关键^[81].只有当模式中热带大气垂直加热廓线的峰值位于对流层中低层时,才可以在对流层低层产生很强的上升运动以及水汽辐合,有利于深对流的产生和维持,从而使模式模拟出MJO的基本

特征.

海气相互作用对MJO的模拟性能也有一定的影响.一些研究认为引入海温的季节内扰动反馈可

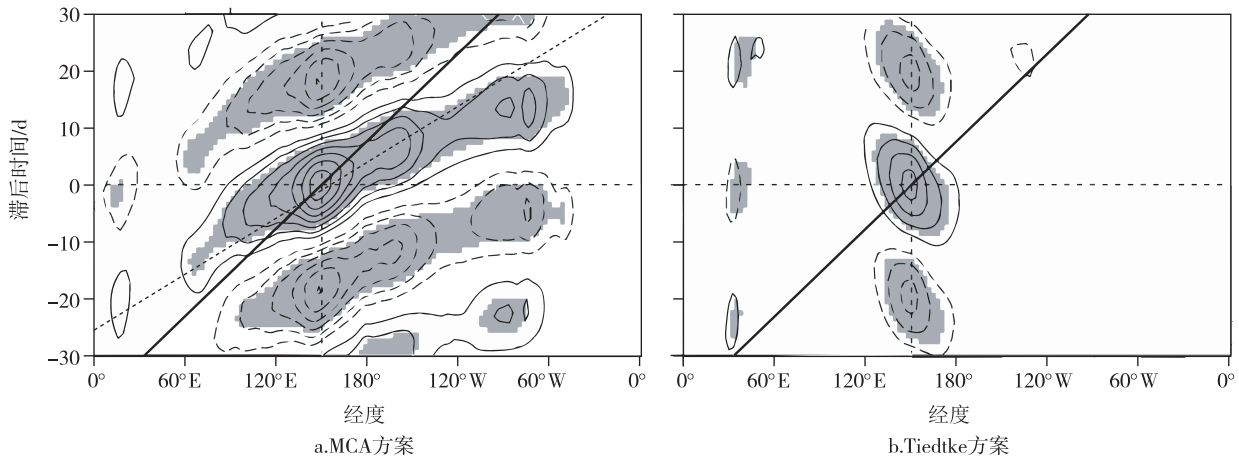


图3 分别使用 MCA 方案和 Tiedtke 方案以 150°E 为参考点回归的热带平均 ($15^{\circ}\text{S}\sim 15^{\circ}\text{N}$) SAMIL 模式的季节内 850 hPa 纬向风 (等值线间距为 0.2 m/s) 的传播特征 (实线表示数值大于 0, 虚线表示数值小于 0; 阴影区表示通过 90% 置信度检验的区域; 黑直线表示 5 m/s 的传播速度) [62]

Fig. 3 Lag regression of MJO band (time periods of 30–90 d and zonal wavenumbers 1–5) filtered zonal wind at 850 hPa (interval: $0.2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) averaged over $15^{\circ}\text{S}\sim 15^{\circ}\text{N}$ on the reference point at 150°E from SAMIL with (a) the MCA scheme and (b) the Tiedtke scheme [62] (Dashed contours for negative values and zero contours were omitted; results passing significance test with the 90% confidence level or above are shaded; the bold solid lines stand for the $5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ eastward propagation speed)

以提高模式模拟热带大气 MJO 的能力 [9,66,82-84], 但是还有一些研究认为引入海气相互作用之后模式对 MJO 的模拟能力反而变差 [85-87]. Zhang [9] 认为, 引入海气相互作用能提升模式对 MJO 模拟能力的前提是该模式在没有引入海气相互作用的时候也可以模拟出 MJO 的信号. 但是 Liess 等 [87] 的研究却表明即使在大气模式可以模拟出 MJO 信号的前提下, 也不能保证在引入海气相互作用后可以改善模式对 MJO 模拟的能力.

模式平均态对 MJO 的模拟有重要影响. 对流层低层平均湿度场可以决定 MJO 的传播相速度和不稳定增长率 [9]. 存在强季节循环并且平均降水场更接近观测的模式可以模拟出较好的 MJO 信号 [77]. 此外, 平均垂直风切变和低层纬向风场也对 MJO 的模拟有不可忽视的作用 [84]. Ling 等 [75] 采用 MJO Tracking 方法评估了 27 个全球模式, 指出每个模式都可以模拟出 MJO 大尺度对流缓慢东传的信号, 只不过不同模式产生 MJO 对流的频率不同, 该研究还进一步指出模式背景态对 MJO 对流的模拟至关重要.

3 MJO 对流生成的动力学机制

随着 MJO 研究的逐步深入, MJO 对流的生成机

制受到广泛重视. 李崇银 [88] 最先将积云对流加热反馈机制 (CISK, Conditional Instability of Second Kind) 引入到 MJO 的动力学研究中, 认为积云对流加热反馈是激发 MJO 对流的重要动力学机制. 随后 Lau 等 [55] 在此基础上发展出了“可移动性”波动 CISK 理论, 较好地解释了 MJO 缓慢东传的原因. Wang [56] 进一步提出了摩擦波动 CISK 理论, 认为低层水汽辐合引发的深积云对流释放出的凝结潜热强迫出的不稳定东传模具有和 MJO 类似的东传速度. 后来 Li [89] 进一步研究发现在积云对流加热反馈作用下, 热带大气能够产生一种既可以向西也可以向东传播的并具有能量频散特性的 CISK 罗斯贝波, 并指出这种 CISK 罗斯贝波可能是赤道以外大气 30~60 d 振荡的重要激发和驱动机制. 自此, 与 MJO 相关的波动-CISK 机制得以完善. 虽然以上理论尝试给出 MJO 生成过程的完整物理图像和机制解释, 但是 MJO 对流在初期是如何形成的, 尚存争议. 目前关于 MJO 对流的生成机制主要可以分为热带强迫 (上游强迫、局地强迫和下游强迫) 与热带外强迫 [90].

上游强迫是指已存在的 MJO 对流沿赤道连续东传并激发开尔文波, 该开尔文波产生的异常风场东传从西侧进入热带西印度洋触发新的 MJO 对流 [55,91-94]. Hsu 等 [95] 认为已存在的 MJO 激发的开尔

文波在越过非洲时由于地形抬升作用改变了印度洋地区的温度场和湿度场,从而导致新的 MJO 对流的生成.

一些研究认为印度洋局地边界层比湿增加与水汽辐合^[49,96-97]、云-辐射-水汽反馈^[98-103]和局地海气通量与下垫面温度变化^[49,96,104-106]等局地变化过程能够激发 MJO 对流的生成.Kemball-Cook 等^[49]的研究表明,东风异常通过改变海表潜热通量使边界层大气增湿,湿静力能先在边界层增加引起浅对流的产生,又通过浅对流辐合进一步加湿大气,最终激发 MJO 深对流生成.Bladé 等^[98]指出,在对流活跃位相与抑制位相之间变化的静止热源通过辐射-对流-表面水汽通量之间的非线性作用进行自我调节,导致了热带印度洋 MJO 对流的生成.Wang 等^[106]的研究表明,印度洋局地海温的变化在某些 MJO 对流个例的生成中起着重要作用.

赤道太平洋地区已存在 MJO 抑制位相的罗斯贝波会通过异常水汽平流在热带西印度洋地区触发新的 MJO 对流生成^[46,63].Seo 等^[107]发现已存在的 MJO 会在对流层中低层产生正位涡,在东风作用下通过涡度平流引起上游低层辐合,产生上升区进而激发一次新 MJO 对流的生成.Zhao 等^[63]指出已存在的 MJO 抑制位相的罗斯贝波响应在热带印度洋产生的异常风场会激发新的 MJO 对流的生成.

另一些研究则强调来自热带外的扰动对 MJO 对流产生的影响,包括中纬罗斯贝波和斜压涡动的能量频散和动量传输^[63,108-112],有的研究还表明冷涌能够激发 MJO 对流^[108,113-114],但是在印度洋地区这样的个例偏少.

MJO 具有准周期性,其生成的时间并不规律.Matthews^[93]利用 OLR 指数将其分为初始型 MJO 和连续型 MJO.上述热带强迫机制中的上、下游强迫与连续型 MJO 对流的激发有密切的关系,局地强迫与初始型 MJO 对流的生成有一定联系,大多数研究认为初始型 MJO 对流的生成机制主要受到来自赤道外的影响.然而上述连续型 MJO 的生成机制难以解释为什么连续型 MJO 没有持续激发新的 MJO 对流,而初始型 MJO 的生成频率远远低于理论得出的生成次数,显然仅仅依靠热带外的影响不足以触发初始型 MJO 对流的生成.

4 总结与讨论

MJO 是热带大气在季节内时间尺度上的主要变

化特征,MJO 对流的活动对全球天气和气候系统都有重要的影响.作为全球最强低频信号,国内外普遍认为 MJO 可以作为联系天气和气候的桥梁.MJO 对流的生成过程是 MJO 研究中公认的最薄弱环节,由于篇幅和作者能力所限,本文只是对 MJO 对流生成的有关研究工作及其进展进行了简要的回顾与总结,可归纳为以下几点:

1) MJO 对流生成的前 20 d,热带印度洋地区存在如下大尺度信号:对流层低层存在东风异常并自西向东移动;海平面气压场呈现纬向一波的结构;对流层中层出现负温度距平并缓慢东传.此外,热带西印度洋地区生成的持续东传强 MJO 对流事件的前期信号可分为边界层水汽超前型、对流层低层上升运动超前型和无明显前兆信号型.

2) 目前模式对 MJO 的模拟效果并不理想,大多数模式都低估了 MJO 的强度,未能再现 MJO 的季节性差异,模式中 MJO 的东传速度过快,模式中高频信号比观测更强.导致 MJO 模拟偏差的可能原因主要有模式分辨率、对流参数化方案、海气相互作用以及模式模拟的平均场等.其中,对流参数化方案在 MJO 对流的模拟中起着至关重要的作用.在对流参数化方案中,当热带大气垂直加热廓线的峰值位于对流层中低层时能够更好地刻画 MJO 的基本特征.尽管调整某些参数能够使 MJO 的模拟效果提高,但是这可能会导致模式对其他地方的模拟能力变弱.

3) MJO 对流信号在印度洋地区的生成机制尚不明确.目前关于 MJO 对流的生成机制主要可以分为热带强迫(上游强迫、局地强迫和下游强迫)与热带外强迫.但这些机制并不能完全解释 MJO 对流生成的原因.加深对 MJO 对流在印度洋地区生成机制的理解对提高模式对 MJO 的模拟能力和预测能力有重要的参考价值.

对 MJO 对流生成过程的深入理解能够为 MJO 生命史中其他阶段的研究工作提供参考,对提高模式的模拟能力和次季节预测的能力有重要参考价值.目前国际上大多数模式对 MJO 的模拟能力偏低,相关理论有待完善,这都反映了我们对 MJO 对流生成机制的认识还有待加深.因此,关于 MJO 对流生成机制、模拟和预测的全面和深入的研究工作有待进一步开展.

参考文献

References

[1] Madden R A, Julian P R. Detection of a 40-50 day oscill-

- lation in the zonal wind in the tropical Pacific [J]. *J Atmos Sci*, 1971, 28(5): 702-708
- [2] Madden R A, Julian P R. Description of global scale circulation cells in the tropics with 40–50 day period [J]. *J Atmos Sci*, 1972, 29(6): 1109-1123
- [3] Gruber A. The wavenumber-frequency spectra of satellite-measured brightness in the tropics [J]. *J Atmos Sci*, 1974, 31(6): 1675-1680
- [4] Zangvil A. Temporal and spatial behavior of large-scale disturbances in tropical cloudiness deduced from satellite brightness data [J]. *Mon Wea Rev*, 1975, 103(10): 904-920
- [5] Yasunari T. Cloudiness fluctuations associated with the northern hemisphere summer monsoon [J]. *J Meteor Soc Japan*, 1979, 57(3): 227-242
- [6] Krishnamurti T N, Subrahmanyam D. The 30–50 day mode at 850 mb during MONEX [J]. *J Atmos Sci*, 1982, 36(9): 2088-2095
- [7] Murakami T, Nakazawa T, He J. On the 40–50 day oscillation during 1979 northern hemisphere summer. Part I: phase propagation [J]. *J Meteorol Soc Japan*, 1984, 62: 440-468
- [8] 李崇银. 大气低频振荡 [M]. 北京: 气象出版社, 1993: 310
LI Chongyin. Atmospheric low frequency oscillation [M]. Beijing: China Meteorological Press, 1993: 310
- [9] Zhang C. Madden-Julian oscillation [J]. *Rev Geophys*, 2005, 43(2): 2003
- [10] Madden R A, Julian P R. Historical perspective [M] // Lau W K M, Waliser D D E. *Intraseasonal variability in the atmosphere-ocean climate system*. 2nd ed. Berlin: Springer, 2012: 36-54
- [11] Zhang C D. Madden-Julian oscillation: bridging weather and climate [J]. *Bull Amer Met Soc*, 2013, 94(12): 1849-1870
- [12] Lau W K M, Waliser D D E. *Intraseasonal variability of the atmosphere-ocean climate system* [M]. 2nd ed. Berlin: Springer, 2012: 613
- [13] Wang B, Xie X S. A model for the boreal summer intraseasonal oscillation [J]. *J Atmos Sci*, 1997, 54(1): 72-86
- [14] 穆明权, 李崇银. 1998 年南海夏季风的爆发与大气季节内振荡的活动 [J]. *气候环境研究*, 2000, 5(4): 375-387
MU Mingquan, LI Chongyin. On the outbreak of South China Sea summer monsoon in 1998 and activity of atmospheric intraseasonal oscillation [J]. *Climatic and Environmental Research*, 2000, 5(4): 375-387
- [15] Zhou L, Murtugudde R. Impact of northward-propagating intraseasonal variability on the onset of Indian summer monsoon [J]. *J Climate*, 2014, 27(1): 126-139
- [16] 马婷婷, 吴志伟, 江志红, 等. 4—6 月 MJO 北传与东亚季风爆发的关系 [J]. *热带气象学报*, 2014, 30(5): 921-931
MA Tingting, WU Zhiwei, JIANG Zhihong, et al. Relationship between the northward propagation of the Madden-Julian oscillation in the April to June and the outbreaks of east Asian monsoon [J]. *J Trop Meteor*, 2014, 30(5): 921-931
- [17] Wheeler M C, Hendon H H, Cleland S, et al. Impacts of the Madden-Julian oscillation on Australian rainfall and circulation [J]. *J Climate*, 2009, 22(6): 1482-1497
- [18] Wheeler M C, McBride J L. Australian monsoon [M] // Lau W K M, Waliser D D E. *Intraseasonal variability in the atmosphere-ocean climate system*. 2nd ed. Berlin: Springer, 2012: 147-198
- [19] Mo K C, Jones C, Paegle J N. Pan-America [M] // Lau W K M, Waliser D D E. *Intraseasonal variability in the atmosphere-ocean climate system*. 2nd ed. Berlin: Springer, 2012: 111-146
- [20] Liebmann B, Hendon H H, Glick J D. The relationship between tropical cyclones of the western Pacific and Indian Oceans and the Madden-Julian oscillation [J]. *J Meteor Soc Japan*, 1994, 72(3): 401-412
- [21] Maloney E D, Hartmann D L. Modulation of hurricane activity in the Gulf of Mexico by the Madden-Julian oscillation [J]. *Science*, 2000, 287(5460): 2002-2004
- [22] Maloney E D, Hartmann D L. Modulation of eastern north Pacific hurricanes by the Madden-Julian oscillation [J]. *J Climate*, 2000, 13(9): 1451-1460
- [23] 潘静, 李崇银, 宋洁. 热带大气季节内振荡对西北太平洋台风的调制作用 [J]. *大气科学*, 2010, 34(6): 1059-1070
PAN Jing, LI Chongyin, SONG Jie. The modulation of Madden-Julian oscillation on typhoons in the northwestern Pacific Ocean [J]. *Chinese J Atmos Sci*, 2010, 34(6): 1059-1070
- [24] 李崇银, 肖子牛. 赤道东太平洋增暖对全球大气 30~60 天振荡的激发 [J]. *科学通报*, 1991, 36(15): 1157-1160
LI Chongyin, XIAO Ziniu. The trigger of 30–60-day oscillation of the global atmosphere by the warming of the eastern equatorial Pacific [J]. *Chinese Sci Bull*, 1991, 36(15): 1157-1160
- [25] 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, 37(1): 17-26
LI Chongyin, ZHOU Yaping. Relationship between intraseasonal oscillation in the tropic atmosphere and ENSO [J]. *Acta Geophys Sinica*, 1994, 37(1): 17-26
- [26] 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, 25(6): 798-808
LONG Zhenxia, LI Chongyin. Interannual variability of 30–60 day low-frequency kinetic energy in the lower tropical atmosphere and ENSO cycle [J]. *Chinese J Atmos Sci*, 2001, 25(6): 798-808
- [27] Zhang C D, Gottschalck J. SST anomalies of ENSO and the Madden-Julian oscillation in the equatorial Pacific [J]. *J Climate*, 2002, 15(17): 2429-2445
- [28] Hendon H H, Wheeler M C, Zhang C D. Seasonal dependence of the MJO-ENSO relationship [J]. *J Climate*, 2007, 20(3): 531-543

- [29] Rao S A, Yamagata T. Abrupt termination of Indian Ocean dipole events in response to intraseasonal disturbances [J]. *Geophys Res Lett*, 2004, 31(19): 353-364
- [30] Han W Q, Shinoda T, Fu L L, et al. Impact of atmospheric intraseasonal oscillations on the Indian Ocean dipole during the 1990s [J]. *J Phys Oceanogr*, 2006, 36(4): 670-690
- [31] Higgins R W, Leetmaa A, Xue Y, et al. Dominant factors influencing the seasonal predictability of U. S. precipitation and surface air temperature [J]. *J Climate*, 2000, 13(22): 3994-4017
- [32] Jones C, Waliser D E, Lau K M, et al. Global occurrences of extreme precipitation events and the Madden-Julian oscillation: observations and predictability [J]. *J Climate*, 2004, 17(23): 4575-4589
- [33] Barlow M, Wheeler M C, Lyon B, et al. Modulation of daily precipitation over southwest Asia by the Madden-Julian oscillation [J]. *Mon Wea Rev*, 2005, 133(12): 3579-3594
- [34] Aldrian E. Dominant factors of Jakarta's three largest floods [J]. *J Hidrosfir Indones*, 2008, 3(3): 105-112
- [35] Tian B, Waliser W E. Chemical and biological impacts [M] // Lau W K M, Waliser D D E. *Intraseasonal variability in the atmosphere-ocean climate system*. 2nd ed. Berlin: Springer, 2012: 569-586
- [36] 章丽娜, 林鹏飞, 熊喆, 等. 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*, 2011, 35(3): 560-570
ZHANG Lina, LIN Pengfei, XIONG Zhe, et al. Impact of the Madden-Julian oscillation on pre-flood season precipitation in South China [J]. *Chinese J Atmos Sci*, 2011, 35(3): 560-570
- [37] 林爱兰, 李春晖, 谷德军, 等. 热带季节内振荡对广东 6 月降水的影响 [J]. *热带气象学报*, 2013, 29(3): 353-363
LIN Ailan, LI Chunhui, GU Dejun, et al. Impact of tropical intraseasonal oscillation on the precipitation of Guangdong in June [J]. *J Trop Meteor*, 2013, 29(3): 353-363
- [38] 陈雄, 李崇银, 谭言科. 冬季热带西太平洋 MJO 活动强弱年的环境场特征 [J]. *热带气象学报*, 2015, 31(1): 1-10
CHEN Xiong, LI Chongyin, TAN Yanke. The environmental characteristics of strong/weak MJO activity over the tropical western Pacific in winter [J]. *J Trop Meteor*, 2015, 31(1): 1-10
- [39] 据建华, 吕俊梅, 谢国清. MJO 和 AO 持续异常对云南干旱的影响研究 [J]. *干旱气象*, 2011, 29(4): 401-406
JU Jianhua, LÜ Junmei, XIE Guoqing. Studies on the influences of persistent anomalies of MJO and AO on drought appeared in Yunnan [J]. *J Arid Meteor*, 2011, 29(4): 401-406
- [40] 吕俊梅, 据建华, 任菊章, 等. 热带大气 MJO 活动异常对 2009—2010 年云南北端干旱的影响 [J]. *中国科学(地球科学)*, 2012, 42(4): 599-613
LÜ Junmei, JU Jianhua, REN Juzhang, et al. The influence of the Madden-Julian oscillation activity anomalies on Yunnan's extreme drought of 2009-2010 [J]. *Scientia Sinica Terrae*, 2012, 42(4): 599-613
- [41] Yang H, Li C Y. The relation between atmospheric intraseasonal oscillation and summer severe flood and drought in the Jianghuai River Basin [J]. *Adv Atmos Sci*, 2003, 20(4): 540-553
- [42] 贺懿华, 王晓玲, 金琪. 南海热带对流季节内振荡对江淮流域旱涝影响的初步分析 [J]. *热带气象学报*, 2006, 22(3): 259-264
HE Yihua, WANG Xiaoling, JIN Qi. The preliminary analysis for the impact of intraseasonal oscillation of the tropical convection over South China Sea on the droughts and floods of Changjiang and Huaihe River basin [J]. *J Trop Meteor*, 2006, 22(3): 259-264
- [43] 岑思弦, 巩远发, 王霄. 2007 年夏季淮河流域洪涝与亚洲地区大气低频振荡的关系 [J]. *大气科学*, 2009, 33(6): 1286-1296
CEN Sixian, GONG Yuanfa, WANG Xiao. The relationship between the atmospheric low-frequency oscillation over Asia and the flood in the Huaihe River valley in the summer of 2007 [J]. *Chinese J Atmos Sci*, 2009, 33(6): 1286-1296
- [44] Yang S Y, Wu B Y, Zhang R H, et al. Relationship between an abrupt drought-flood transition over mid-low reaches of the Yangtze River in 2011 and the intraseasonal oscillation over mid-high latitudes of East Asia [J]. *Acta Meteor Sinica*, 2013, 27(2): 129-143
- [45] Hong C C, Li T. The extreme cold anomaly over southeast Asia in February 2008: roles of ISO and ENSO [J]. *J Climate*, 2009, 22(13): 3786-3801
- [46] 吴俊杰, 袁卓建, 钱钰坤. 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*, 2009, 25(增刊 1): 103-112
WU Junjie, YUAN Zhuojian, QIAN Yukun. The role of intraseasonal oscillation in the Southern-China snowstorms during January 2008 [J]. *J Trop Meteor*, 2009, 25(sup1): 103-112
- [47] 朱红蕊, 刘赫男, 张洪玲. 热带大气季节内振荡与 2008 年初中国南方雪灾的关系 [J]. *气象与环境学报*, 2013, 29(4): 77-83
ZHU Hongrui, LIU Henan, ZHANG Hongling, et al. The relationship between MJO and snow disaster in the south of China in January of 2008 [J]. *J Meteor Environ*, 2013, 29(4): 77-83
- [48] Wang B, Rui H L. Dynamics of the coupled moist Kelvin-Rossby wave on an equatorial beta plane [J]. *J Atmos Sci*, 1990, 47(4): 397-413
- [49] Kamball-Cook S R, Weare B C. The onset of convection in the Madden-Julian oscillation [J]. *J Climate*, 2001, 14(5): 780-793
- [50] Myers D S, Waliser D E. Three-dimensional water vapor and cloud variations associated with the Madden-Julian oscillation during northern hemisphere winter [J]. *J Climate*, 2003, 16(6): 929-950
- [51] Lin J L, Mapes B E, Zhang M H, et al. Stratiform precipi-

- tation, vertical heating profiles, and the Madden-Julian oscillation[J]. *J Atmos Sci*, 2004, 61(3):296-309
- [52] Hendon H H, Liebmann B. Organization of convection within the Madden-Julian oscillation[J]. *J Geophys Res*, 1994, 99(D4):8073-8083
- [53] Chen S S, Houze Jr R A. Diurnal variation of deep convective systems over the tropical Pacific warm pool[J]. *Q J R Meteorol Soc*, 1997, 123(538):357-388
- [54] 任宏利, 沈雨旸. MJO 对我国天气气候影响的新事实[J]. *气象科技进展*, 2016, 6(3):97-105
REN Hongli, SHEN Yuyang. A new look at impacts of MJO on weather and climate in China[J]. *Adv Meteor Sci Tech*, 2016, 6(3):97-105
- [55] Lau K M, Peng L. Origin of low-frequency (intraseasonal) oscillations in the tropical atmosphere. I: basic theory[J]. *J Atmos Sci*, 1987, 44(6):950-972
- [56] Wang B. Dynamics of tropical low-frequency waves—an analysis of the moist Kelvin wave[J]. *J Atmos Sci*, 1988, 45(14):2051-2065
- [57] Li C Y, Jia X L, Ling J, et al. Sensitivity of MJO simulations to diabatic heating profiles[J]. *Climate Dyn*, 2009, 32(2):167-187
- [58] Kim D, Sperber K, Stern W, et al. Application of MJO simulation diagnostics to climate models[J]. *J Climate*, 2009, 22(23):6413-6436
- [59] Fu X X, Lee J Y, Hsu P C, et al. Multi-model MJO forecasting during DYNAMO/CINDY period[J]. *Climate Dyn*, 2013, 41(3/4):1067-1081
- [60] Ling J, Bauer P, Bechtold P, et al. Global vs local MJO forecast skill of the ECMWF model during DYNAMO[J]. *Mon Wea Rev*, 2014, 142(6):2228-2247
- [61] Jiang X N, Waliser D E, Xavier P K, et al. Vertical structure and physical processes of the Madden-Julian oscillation: exploring key model physics in climate simulations[J]. *J Geophys Res*, 2015, 120(10):4718-4748
- [62] Ling J, Zhang C D, Bechtold P. Large-scale distinctions between MJO and non-MJO convective initiation over the tropical Indian Ocean[J]. *J Atmos Sci*, 2013, 70(9):2696-2712
- [63] Zhao C B, Li T, Zhou T J. Precursor signals and processes associated with MJO initiation over the tropical Indian Ocean[J]. *J Climate*, 2013, 26(1):291-307
- [64] Mei S L, Li T, Chen W. Three-type MJO initiation processes over the western equatorial Indian Ocean[J]. *Adv Atmos Sci*, 2015, 32(9):1208-1216
- [65] Lin J L, Kiladis G N, Mapes B E, et al. Tropical intraseasonal variability in 14 IPCC AR4 climate models. Part I: convective signals[J]. *J Climate*, 2006, 19(12):2665-2690
- [66] Waliser D E, Lau K M, Kim J H. The influence of coupled sea surface temperatures on the Madden-Julian oscillation: a model perturbation experiment[J]. *J Atmos Sci*, 1999, 56(3):333-358
- [67] Sabeerali C T, Dandi R, Dhakate A R, et al. Simulation of boreal summer intraseasonal oscillations in the latest CMIP5 coupled GCMs[J]. *J Geophys Res*, 2013, 118(10):4401-4420
- [68] Jia X L, Li C Y, Ling J, et al. Impact of a GCM's resolution on MJO simulation[J]. *Adv Atmos Sci*, 2008, 25(1):139-156
- [69] Lin J L, Weickman K M, Kiladis G N, et al. Subseasonal variability associated with Asian summer monsoon simulated by 14 IPCC AR4 coupled GCMs[J]. *J Climate*, 2008, 21(18):4541-4567
- [70] Hung M P, Lin J L, Wang W, et al. MJO and convectively coupled equatorial waves simulated by CMIP5 climate models[J]. *J Climate*, 2013, 26(17):6185-6214
- [71] Inness P M, Slingo J M, Woolnough S J, et al. Organization of tropical convection in a GCM with varying vertical resolution: implications for the simulation of the Madden-Julian oscillation[J]. *Clim Dyn*, 2001, 17(10):777-793
- [72] Duffy P B, Govindasamy B, Iorio J P, et al. High resolution simulations of global climate. Part I: present climate[J]. *Clim Dyn*, 2003, 21(5):371-390
- [73] Zhang G J, Mu M Q. Simulation of the Madden-Julian oscillation in the NCAR CCM3 using a revised Zhang-McFarlane convection parameterization scheme[J]. *J Climate*, 2005, 18(19):4046-4064
- [74] Sperber K R, Slingo J M, Inness P M, et al. On the maintenance and initiation of the intraseasonal oscillation in the NCEP/NCAR reanalysis and in the GLA and UKMO AMIP simulations[J]. *Clim Dyn*, 1997, 13(11):769-795
- [75] Ling J, Zhang C D, Wang S G, et al. A new interpretation of the ability of global models to simulate the MJO[J]. *Geophys Res Lett*, 2017, 44(11):5798-5806
- [76] Hayashi Y, Golder D. Tropical intraseasonal oscillations appearing in a GFDL general circulation model and FGGE data. Part I: phase propagation[J]. *J Atmos Sci*, 1986, 43(24):3058-3067
- [77] Slingo J M, Sperber K R, Boyle J S, et al. Intraseasonal oscillations in 15 atmospheric general circulation models: results from an AMIP diagnostic subproject[J]. *Clim Dyn*, 1996, 12(5):325-357
- [78] Gualdi S, Navarra A, von Storch H. Tropical intraseasonal oscillation appearing in operational analyses and in a family of general circulation models[J]. *J Atmos Sci*, 1997, 54(9):1185-1202
- [79] 贾小龙, 李崇银. 热带大气季节内振荡及其数值模拟[M]. 北京: 气象出版社, 2009
JIA Xiaolong, LI Chongyin. Tropical intraseasonal oscillation and its numerical simulation[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2009
- [80] 王坤, 林朝晖. IAP 大气环流模式中不同积云参数化方案对 MJO 模拟的影响研究[C]// 创新驱动发展 提高气象灾害防御能力: s13 热带海洋气象, 2013
WANG Kun, LIN Zhaohui. Effects of different cumulus cloud parameterization schemes in IAP atmospheric circulation model on MJO simulation[M]. Innovation Driven Development, Improving Meteorological Disaster Defense Capability: s13-Tropical Marine Meteorology, 2013
- [81] Ling J, Li C Y, Zhou W, et al. Effect of boundary layer la-

- tent heating on MJO simulations [J]. *Adv Atmos Sci*, 2013, 30(1):101-115
- [82] Flatau M, Flatau P J, Phoebus P, et al. The feedback between equatorial convection and local radiative and evaporative processes; the implications for intraseasonal oscillations [J]. *J Atmos Sci*, 1997, 54(19):2373-2386
- [83] 李薇, 郭裕福, 张学洪. 热带大气季节内振荡研究进展: 观测、动力机制和数值模拟 [J]. *地球科学进展*, 2001, 16(1):72-78
LI Wei, GUO Yufu, ZHANG Xuehong. Proceeding of observation, dynamics and numerical simulation studies on Madden-Julian oscillation [J]. *Adv Earth Sci*, 2001, 16(1):72-78
- [84] Inness P M, Slingo J M. Simulation of the Madden-Julian oscillation in a coupled general circulation model. Part I: comparison with observations and an atmosphere-only GCM [J]. *J Climate*, 2003, 16(3):345-364
- [85] Hendon H H. Impact of air-sea coupling on the Madden-Julian oscillation in a general circulation model [J]. *J Atmos Sci*, 2000, 57(24):3939-3952
- [86] Liess S, Bengtsson L, Arpe K. The intraseasonal oscillation in ECHAM4. Part I: coupled to a comprehensive ocean model [J]. *Climate Dyn*, 2004, 22(6/7):653-669
- [87] Liess S, Bengtsson L. The intraseasonal oscillation in ECHAM4. Part II: sensitivity studies [J]. *Climate Dyn*, 2004, 22(6/7):671-688
- [88] 李崇银. 南亚夏季风槽(脊)和热带气旋的活动与移动性 CISK 波 [J]. *中国科学(B)*, 1985, 28(7):668-675
LI Chongyin. Actions of summer monsoon troughs (ridges) and tropical cyclones over south Asia and the moving CISK mode [J]. *Sci China Chem*, 1985, 28(7):668-675
- [89] Li C Y. A further inquiry on the mechanism of 30-60 day oscillation in the tropical atmosphere [J]. *Adv Atmos Sci*, 1993, 10(1):41-53
- [90] Li T, Zhao C B, Hsu P C, et al. MJO initiation processes over the tropical Indian Ocean during DYNAMO/CINDY2011 [J]. *J Climate*, 2015, 28(6):2121-2135
- [91] Wang B, Li T. Convective interaction with boundary-layer dynamics in the development of a tropical intraseasonal system [J]. *J Atmos Sci*, 1994, 51(11):1386-1400
- [92] Matthews A J. Propagation mechanisms for the Madden-Julian oscillation [J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 2000, 126(569):2637-2651
- [93] Matthews A J. Primary and successive events in the Madden-Julian oscillation [J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 2008, 134(631):439-453
- [94] Seo K H, Kim K Y. Propagation and initiation mechanisms of the Madden-Julian oscillation [J]. *J Geophys Res*, 2003, 108(D13):4384
- [95] Hsu H H, Lee M Y. Topographic effects on the eastward propagation and initiation of the Madden-Julian oscillation [J]. *J Climate*, 2005, 18(6):795-809
- [96] Jiang X A, Li T. Reinitiation of the boreal summer intraseasonal oscillation in the tropical Indian Ocean [J]. *J Climate*, 2005, 18(18):3777-3795
- [97] Seo K H, Kumar A. The onset and life span of the Madden-Julian oscillation [J]. *Theor Appl Climatol*, 2008, 94(1/2):13-24
- [98] Bladé I, Hartmann D L. Tropical intraseasonal oscillations in a simple nonlinear model [J]. *J Atmos Sci*, 1993, 50(17):2922-2939
- [99] Hu Q, Randall D A. Low-frequency oscillation in radiative-convective systems [J]. *J Atmos Sci*, 1993, 51(8):1089-1099
- [100] Raymond D J. Thermodynamic control of tropical rainfall [J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 2000, 126(564):889-898
- [101] Sobel A H, Gildor H. A simple time-dependent model of SST hot spots [J]. *J Climate*, 2003, 16(23):3978-3992
- [102] Zhang G, Song X L. Interaction of deep and shallow convection is key to Madden-Julian oscillation simulation [J]. *Geophys Res Lett*, 2009, 36(9):269-277
- [103] Maloney E, Sobel A H, Hannah W M. Intraseasonal variability in an aquaplanet general circulation model [J]. *J Adv Model Earth Syst*, 2010, 2(2), DOI: 10.3894/JAMES.2010.2.5
- [104] Li T, Tam F, Fu X H. Causes of the intraseasonal SST variability in the tropical Indian Ocean [J]. *Atmos Ocean Sci Lett*, 2008, 1(1):18-23
- [105] Sobel A, Wang S G, Kim D. Moist static energy budget of the MJO during DYNAMO [J]. *J Atmos Sci*, 2014, 71(11):4276-4291
- [106] Wang S G, Sobel A H, Zhang F Q, et al. Regional simulation of the October and November MJO events observed during the CINDY/DYNAMO field campaign at gray zone resolution [J]. *J Climate*, 2015, 28(6):2097-2119
- [107] Seo K H, Song E J. Initiation of boreal summer intraseasonal oscillation: dynamic contribution by potential vorticity [J]. *Mon Wea Rev*, 2012, 140(6):1748-1760
- [108] Hsu H H, Hoskins B J, Jin F F. The 1985/86 intraseasonal oscillation and the role of the extratropics [J]. *J Atmos Sci*, 1990, 47(7):823-839
- [109] Matthews A J, Kiladis G N. The tropical-extratropical interaction between high-frequency transients and the Madden-Julian oscillation [J]. *Mon Wea Rev*, 1999, 127(5):661-677
- [110] Pan L L, Li T. Interactions between the tropical ISO and midlatitude low-frequency flow [J]. *Climate Dyn*, 2008, 31(4):375-388
- [111] Ray P, Zhang C D, Dudhia J, et al. A numerical case study on the initiation of the Madden-Julian oscillation [J]. *J Atmos Sci*, 2009, 66:310-331
- [112] Ray P, Li T. Relative roles of circumnavigating waves and extratropics on the MJO and its relationship with the mean state [J]. *J Atmos Sci*, 2013, 70:876-893
- [113] Lim H, Chang C P. A theory for midlatitude forcing of tropical motions during winter monsoons [J]. *J Atmos Sci*, 1981, 38:2377-2392
- [114] Wang L, Kodera K, Chen W. Observed triggering of tropical convection by a cold surge: implications for MJO initiation [J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 2012, 138(668):1740-1750

Research progress on the mechanisms of convective initiation of the MJO over Indian Ocean

ZHANG Yuanwen^{1,2} LING Jian^{1,2}

- 1 State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics (LASG),
Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029
2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

Abstract The Madden-Julian Oscillation (MJO) is a dominant component of tropical variability at intraseasonal time scales. The activities of the MJO convection have important impacts on weather and climate systems in many parts of the world. The study of the MJO therefore represents one of the frontiers of atmospheric science. Since the convective initiation is the least understood aspect of MJO, this review aims to synthesize and summarize studies of convective initiation of the MJO include but are not limited to: its observed precursor signals, the numerical simulations, and the mechanisms. The focuses of ongoing research and unsolved issues related to MJO initiation are also presented.

Key words Madden-Julian oscillation; convection; MJO initiation; dynamic mechanisms; numerical simulation