

学校编码: 10384

密级 \_\_\_\_\_

学 号: 22320130153759

厦门大学

博士 学 位 论 文

# 热带季节内振荡的模拟及最优预报误差分析

The simulation of Madden-Julian Oscillation and  
the optimal forecast error analysis

李晓静

指导教师姓名: 陈大可院士 唐佑民研究员

专业名称: 物理海洋学

论文提交日期: 2016 年 4 月

论文答辩时间: 2016 年 5 月

2016 年 5 月

## 厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下，独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果，均在文中以适当方式明确标明，并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范（试行）》。

另外，该学位论文为（ ）课题（组）的研究成果，获得（ ）课题（组）经费或实验室的资助，在（ ）实验室完成。（请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称，未有此项声明内容的，可以不作特别声明。）

声明人（签名）：

年 月 日

## 厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文(包括纸质版和电子版)，允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

- ( ) 1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，于  
年   月   日解密，解密后适用上述授权。  
( ) 2. 不保密，适用上述授权。

(请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。)

声明人(签名)：

年   月   日

# 目录

摘要.....	I
Abstract .....	I
第 1 章 绪论.....	1
1.1 选题依据和研究意义.....	1
1.2 热带季节内振荡（MJO）的研究进展.....	2
1.2.1 MJO 机制研究进展.....	2
1.2.2 MJO 的 MSE 收支分析研究 .....	7
1.2.3 MJO 模拟的研究进展.....	8
1.2.4 MJO 预报的研究进展.....	11
1.3 本文内容和章节安排.....	13
第 2 章 CESM 模式和观测资料 .....	15
2.1 CESM 模式.....	15
2.1.1 大气模块.....	15
2.1.2 其他模块.....	16
2.2 观测再分析资料.....	17
第 3 章 CESM 模式中 MJO 模拟能力的诊断 .....	18
3.1 试验设置和 MJO 诊断方法.....	18
3.1.1 试验设置.....	18
3.1.2 MJO 季节内变率特征的诊断方法.....	20
3.1.3 MJO 对流和大尺度环流耦合相干特征的诊断方法.....	21
3.2 季节内变率（ISV）特征的模拟 .....	24
3.2.1 ISV 方差空间分布 .....	24
3.2.2 频率-波数特征 .....	28
3.2.3 传播特征.....	30
3.3 对流和大尺度环流耦合相干特征的模拟.....	33
3.3.1 U850 和 OLR 的交叉谱分析.....	33

3.3.2 EOF 分析 .....	37
3.3.3 MJO 生命周期合成分析.....	43
3.4 水汽过程的分析结果.....	47
3.5 本章小结.....	53
<b>第 4 章 MJO 预报的最优预报误差分析 .....</b>	<b>55</b>
4.1 气候相关的奇异向量方法.....	55
4.1.1 方法概述.....	55
4.1.2 传播算子 $R$ 的计算 .....	56
4.2 试验设置.....	57
4.2.1 扰动变量.....	57
4.2.2 目标变量.....	62
4.3 湿静能（MSE）收支分析方法 .....	63
4.3.1 MSE 概述 .....	63
4.3.2 SST 初始扰动机制分析方法.....	64
4.4 最优初始扰动计算结果.....	65
4.4.1 印度洋 SST 扰动的奇异向量.....	65
4.4.2 最优初始扰动对初始时刻的敏感性分析.....	74
4.4.3 不同扰动区域的最优初始扰动.....	77
4.5 本章小结.....	83
<b>第 5 章 总结和讨论 .....</b>	<b>84</b>
5.1 主要内容和结论.....	84
5.2 本文创新点.....	85
5.3 未来展望.....	86
<b>参考文献.....</b>	<b>88</b>
<b>致谢.....</b>	<b>103</b>
<b>攻读博士学位期间发表的论文 .....</b>	<b>105</b>

## 摘要

热带季节内振荡(在大气中以 Madden-Julian Oscillation 为主, 以下简称 MJO), 是全球季节内尺度预报的最主要信号来源, 在天气气候系统的预报中起着非常重要的作用。作为目前发现的全球最强的季节内准周期信号, 国内外普遍认为 MJO 的预报是联系数值天气预报和季节预报的桥梁, 能够填补中期预报与短期气候预测之间的延伸期预报时段的“缝隙”。自 20 世纪 70 年代 Madden 和 Julian 提出以来, MJO 现已在国际上获得了广泛关注, 其机理研究和预报开展已经成为了全球气候研究的热门方向之一。

本文主要针对 MJO 的数值模拟和集合预报两方面做了一些研究, 采用的数值模式是美国国家大气研究中心 (NCAR) 的地球系统模式 (CESM), 这是目前国际上对 MJO 模拟效果较好的全耦合模式之一。

首先, 本文通过使用不同的模式设置, 设计了五个敏感试验, 通过将模拟结果与观测再分析数据进行 MJO 特征的诊断比较, 分析了 CESM 新版本对 MJO 基本特征模拟的能力, 主要包括: 基本的季节内变率 (ISV) 特征、频率 30-90 天和波数 1-3 波的特征、冬季向东传播和夏季向北传播的特征, 以及对流场与大尺度环流场的耦合相干性特征等。在此基础上, 本文进一步探讨了 CESM 模式中的海气耦合、模式水平分辨率以及不同的大气物理模块 (CAM4 和 CAM5) 对 MJO 特征模拟的影响。研究发现, 对几乎所有 MJO 特征的模拟, 非耦合试验的准确度都要比耦合试验低, 包括主要变量季节内变率的时空变化和向东传播特征。耦合试验中, 海气相互作用能够改善对流和大尺度环流的耦合相干性; 高分辨率在基本 ISV 的空间分布和传播特征的模拟等方面有助于改善 MJO 特征模拟的细节。而对于 CAM4 和 CAM5 两个不同的大气物理模块, 在高分辨率的试验中, 二者模拟 MJO 的一些特征的能力基本持平, 例如 ISV 空间分布和向东传播过程, 而在 MJO 的传播速度和 OLR 频率 - 波数谱特征的模拟中, CAM5 有明显优势, 这是由于 CAM5 中采用了新的浅对流

方案，改善了对流层低层的水汽过程的模拟。另外，虽然 MJO 向北传播的物理机制被认为是有别于向东传播的机制，但由于浅对流过程的模拟结果较好，采用 CAM5 的耦合试验（CPL5）在夏季的向北传播特征模拟中同样也比采用 CAM4 大气模块的耦合模式（CPL4）要好。而 CPL5 试验最大的缺陷是其模拟的 MJO 对流信号强度比观测值要弱很多。

其次，基于模式的诊断分析结果，本文采用了大气模块为分辨率约为  $1^{\circ}$  的 CAM4 的耦合模式设置，运用气候相关的奇异向量方法，计算了 MJO 对流预报中，海表面温度（SST）作为预报扰动变量的最优初始扰动，并利用湿静能（MSE）收支分析探讨了该扰动对 MJO 对流预报影响的误差增长机制，分析了最优初始扰动，即奇异向量（SV），对于初始时刻以及扰动区域的敏感性。研究发现，印度洋 SST 扰动对应的奇异向量的分布类似于印度洋东西偶极子分布结构，在苏门答腊岛西岸海域与索马里东岸海域呈现正负反相位变化。MJO 对流异常在日期变更线以西存在明显的向东传播的特征，通过垂向质量加权积分的 MSE 收支分析发现，水平平流、垂向输运和潜热通量三项对此贡献较大。在各收支项中，水平平流负异常项对 OLR 的向东传播贡献最大，垂向输运负异常、辐射通量正异常的贡献同样也很重要，而潜热通量的正异常是 MJO 向东传播的前置条件。在初始场中加入 SV 扰动之后，SST 的扰动主要是通过潜热通量项来影响 MJO 的发展。SV 对初始扰动时刻的敏感性较低，只有较大的型态差异才能影响 SV 的结果，可能是由于大气对海洋热源扰动的大小和位置的响应不同，而 SV 对扰动区域则相对要敏感一些，印度洋与太平洋之间的联合作用在 MJO 的发展传播过程中有着重要的作用。

本文的研究结果为 MJO 模拟结果的改善指出了一个方向，有利于对 MJO 物理机制的进一步理解，也为 MJO 预报集合的构建提供了一种方法，对于进一步开展季节内集合预报有一定的指导作用。

## Abstract

The Madden-Julian Oscillation (MJO) is the dominant mode of intraseasonal variability in the tropics. Coherent eastward propagation of convection and zonal wind over the Indian Ocean, the Maritime Continent, and the western Pacific Ocean are the salient features of the MJO. Furthermore, the MJO plays a critical role in connecting the weather and climate variation. Thus, the MJO has become an intensive research topic in recent years. Many studies focused on understanding and predicting the MJO using statistical and dynamical methods. Moreover, the MJO has extensive interactions with other components of the climate system, for instance, the El Nino-Southern Oscillation, the Asian and Australian monsoon systems, and the extratropics. Therefore, it is important to represent the MJO realistically in models for climate modeling and prediction.

This paper presents an assessment of the MJO simulated in five experiments using the Community Earth System Model (CESM) under different model settings. The analysis focused on the effects of air-sea coupling, resolution and atmospheric physics on the basic characteristics of the MJO, including intraseasonal variance, wavenumber-frequency characteristics and eastward propagation, using outgoing longwave radiation (OLR), zonal winds at 850 hPa (U850) and at 200 hPa (U200). Five experiments are conducted for this purpose including one atmospheric model -- Community Atmosphere model version 4 (CAM4), two coupled models with CAM4 or CAM5 (Community Atmosphere model version 5) as the atmospheric component at a low resolution (CLP4\_2d, CPL5\_2d) and two the same coupled model with a high resolution (CPL4\_1d and CPL5\_1d).

The MJO diagnostic results show that all models have better intraseasonal characteristics in U850 than in OLR. The uncoupled model CAM4 has lower fidelity than the cou-

pled models in characterizing MJO basic features including the temporal and spatial intraseasonal variability and the eastward propagation. With ocean feedback, the coherence of convection and circulation is improved in the coupled models. The higher resolution is helpful in improving ISV spatial distribution and eliminating low frequency bias in the frequency-wavenumber spectra although it has little improvement to MJO-band variance (power) in frequency-wavenumber spectra. The new shallow convection scheme in CAM5 improves the moisture process of the lower troposphere so that CPL5\_2d and CPL5\_1d have more realistic eastward propagation speed in the boreal winter and better northward propagation in the boreal summer than other models. However, the strength of the convective MJO signal in CPL5\_2d and CPL5\_1d are weaker than other models and observations, which is probably one of the most spurious features in CPL5\_2d and CPL5\_1d experiments, suggesting that the CAM5 has a weaker convection activity than its predecessor.

Based on the analysis above, the climate related singular vector (CSV) is used to calculate the optimal SST initial perturbation of the MJO related OLR forecast. To analyze the optimal error growth mechanism, the moist static energy (MSE) budget analysis is applied. Moreover, the sensitivity of the singular vector (SV) to the initial time and the perturbation area is discussed. The pattern of the SV calculated from the Indian Ocean SST perturbation is resemble to the Indian Ocean Dipole (IOD) pattern, which shows opposite anomaly between the west coast of the island of Sumatra and the Somalia's east coast. Through the MSE budget analysis of the original simulation, the obvious eastward propagation of the intraseasonal OLR and the column-integrated MSE is found to the west of the date line. Among all the budget terms, the horizontal advection, vertical advection and latent heating flux are the main contributing terms. The advection's negative anomaly contributes most to the OLR's east propagation. And the horizontal component lags the convection signal for about 3-4 days. Besides, the vertical advection and the latent heating flux

are also very important. The latent heating flux's positive anomaly usually happens ahead of the enhanced convective activity, which means the latent heating may precondition the deep convection. In the results of the simulation with the initial SST added the SV, the development of the MJO is affected by the changes of the latent heating terms. The optimal initial perturbation of the MJO related OLR forecast shows low sensitivity to different initial times. But its sensitivity to the perturbation areas is a little higher, which may result from the different sensitivities of the responses to the changes of the heat sources' strength and location. The connection between the Indian Ocean and the Pacific Ocean plays an important role in the MJO's forecast.

**关键词：**热带季节内振荡；MJO 诊断；奇异向量方法；最优预报误差

**Keywords:** Tropical intraseasonal oscillation; MJO diagnostic; Singular vector method; Optimal forecast error

厦门大学博硕士论文摘要库

## 第1章 绪论

### 1.1 选题依据和研究意义

在上个世纪 70 年代, Madden and Julian (1971, 1972) 发现赤道附近的大气中有 40 天左右的准周期振荡现象, 之后的研究发现, 整个热带大气甚至全球大气都存在 30-60 天时间尺度的振荡现象, 该现象被称为季节内振荡 (ISO)。现在, 通常将赤道附近的大气季节内振荡称为 MJO。从 80 年代开始, MJO 逐渐成为各国科学家关注的热点, 现如今已经成为大气、海洋的前沿研究课题之一, 各国科学家已利用观测资料和统计动力模式对 MJO 的结构特征和活动规律, 及其对全球气候系统的影响做了大量的研究。

MJO 的主要特征包括以下几点: 活动只局限在赤道热带区域, 强对流是其主要表征; 对流传播过程中同时伴随着纬向风场的斜压振荡性质; 北方冬季有明显的纬向东传特征, 增强的深对流从印度洋开始发展, 该对流过程不断向东传播, 经过印度-太平洋暖池, 最后在进入西太平洋后, 深对流逐渐减弱直至消失。

MJO 通过对整个热带环流的影响, 几乎会对全球各尺度的现象产生影响, 比如对年际尺度的 ENSO (李崇银和廖清海 1998; Kessler 2001; Saith and Slingo 2006; Peng et al. 2011; Hoell et al. 2014), 季节尺度的季风系统 (穆明权和李崇银 2000; Schubert and Wu 2001; Lavender and Matthews 2009; Evans et al. 2014), 天气尺度的热带气旋的产生 (李崇银 et al. 2012; Bessafi and Wheeler 2006; Klotzbach 2010; Li and Zhou 2013; Tao and Li 2014), 以及平均气候态 (Sardeshmukh and Sura 2007), 北大西洋振荡 (Cassou 2008) 以及热带外地区 (Zhou and Miller 2005; Gong et al. 2014) 等的影响, 国内外已经有大量的工作对此进行了研究。因此, 对于气候模型和天气预报来说, 能够更真实地模拟出 MJO 对提高预报技巧非常重要 (Peng et al. 2011)。虽然目前一些全球气候模式已经能较好得模拟出 MJO 的一些基本特征 (Subramanian et al. 2011; Crueger et al. 2013), 一些工作也使我们更好地认识了准

确模拟 MJO 的必要要素 (Majda et al. 2007; Li et al. 2009; Cai et al. 2013)，但至今对 MJO 物理机制的认识仍然不是很清楚 (Zhang 2013; Li 2014)，模式对 MJO 的模拟同样还需要进一步改进 (Kim et al. 2009; Sperber and Annamalai 2008; Shelly et al. 2014)。

现如今，天气尺度的天气预报和季节尺度的气候预报已经比较成熟，但是以 MJO 为代表的季节内尺度预报尚属起步阶段。因此，国际上已经启动了一系列的海洋调查和观测计划，旨在提高 MJO 模拟和预报能力的研究计划，比如热带对流年计划 (Year of Tropical Convection)；MJO 动力学计划 (DYNAMO)；MJO 非绝热过程后报计划 (Diabatic Hindcast Project)；MJO 先锋计划 (TASK Force)；季节内变率后报试验计划 (ISVHE) 等。其中 MJO 非绝热过程后报计划主要是利用全球天气和气候模式研究 MJO 的物理和动力过程(包括加热, 加湿和动量的混合过程)，而 MJO 先锋计划和 ISVHE 计划，重点研究 MJO 的模拟和预报，评估 MJO 的可预报性和预报能力。

提高模式对 MJO 的模拟预报能力与 MJO 机制的研究之间有相辅相成的关系，只有深入了解了 MJO 的物理机制，才能更准确地改进模式相应的物理过程的模拟，不断提高 MJO 的模拟预报能力，同时，模式对 MJO 的准确模拟预报，也有助于对 MJO 关键物理过程的研究。MJO 的预报可以填补短期天气预报与季节预报之间的空白，是目前全球大气海洋领域一个迫切的研究课题，也是当前大气、海洋科学的研究的国际前沿。

## 1.2 热带季节内振荡 (MJO) 的研究进展

### 1.2.1 MJO 机制研究进展

目前，MJO 的物理机制问题还没有一个定论，这是由于 MJO 本身的复杂性、观测数据的缺少，以及表征 MJO 的变量、方法和标准的不一致性、MJO 性质的多样性，使得通过理论和模式研究 MJO 的物理机制变得十分困难。一些理论认为 MJO

是大气对外部强迫的一种响应（例如，Hsu et al. 1990），而一些理论则认为其是对大气内部不稳定的自发现象（例如，Matthews 2000）。现有的观测数据的研究结果表明，后者更能解释 MJO 的观测性质。因此，以下着重针对此理论框架讨论 MJO 的机制研究进展。

MJO 的机制主要可以概括为以下几类：1) 波动第二类条件不稳定(wave-CISK)；2) 风-蒸发反馈 (WISHE)；3) 对流-水汽反馈。现阶段的 MJO 机制研究主要是这三类以及基于这三类理论的发展延伸，且这三种理论并不是完全排斥、互相独立的，而是相互结合的：波动 CISK 提供大尺度的水汽控制；对流-水汽反馈对湿静能的积累以及浅对流和深对流的发生，从而对 MJO 的传播过程有重要作用；WISHE 是湿静能变化的关键，为 MJO 发展提供能量源。季节内振荡是一个全球大气海洋的复杂系统，Lau and Waliser (2011) 提出了季节内振荡的基本物理过程的理论框架，如图 1-1 所示。以下对这三类机制的基础理论进行简要介绍。

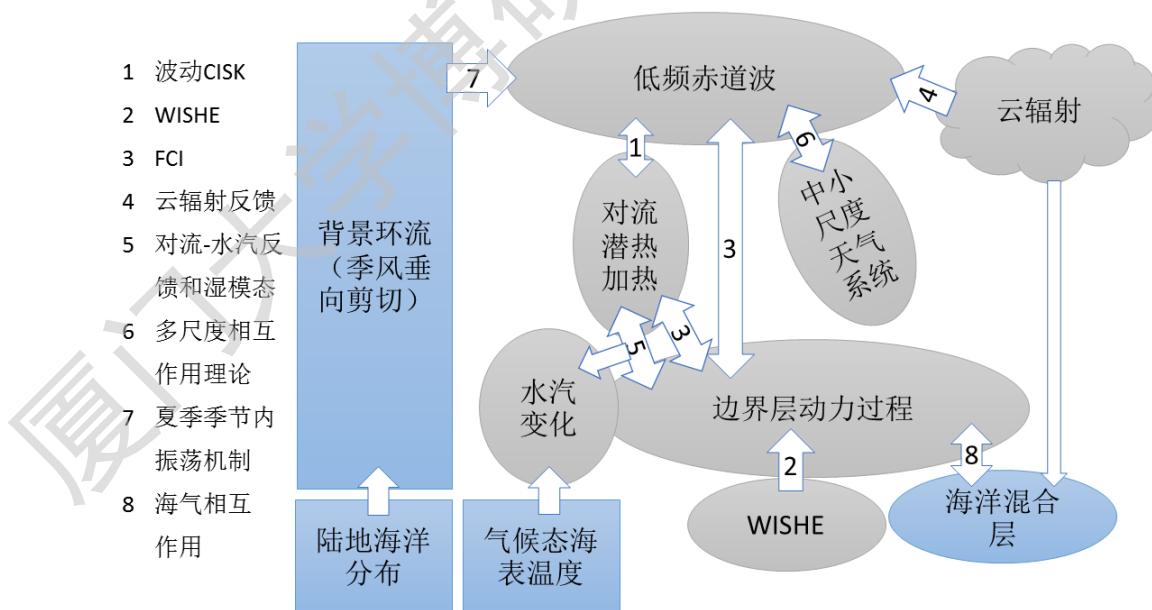


图 1-1 季节内振荡的基本物理过程框架图 (Lau and Waliser 2011)

**Figure 1-1 Essential physical processes involved in theoretical modeling of the in-traseasonal oscillation (Lau and Waliser 2011)**

### (1) 波动第二类条件不稳定 (wave-CISK)

波动第二类条件不稳定理论的核心内容是不稳定湿辐聚反馈，即低层辐聚通过加强的重力位势扰动来驱动对流加热。不同于在上升区域通过减少绝热冷却率来降低有效分层，非绝热加热的作用远超过绝热降温，从而促进扰动的不稳定发展。第二类条件不稳定机制是 Charney and Eliassen (1964) 作为小尺度对流驱动艾克曼抽吸的反馈提出的，该反馈又会通过驱动大尺度低层辐聚，来进一步促进对流发展。Lindzen (1974) 在该理论基础上发展出改进的 CISK 机制，即波动 CISK，解释了热带地区波动驱动的辐聚与大尺度组织的对流之间类似的反馈作用。该理论的不足是经常引入一些不实际的假设，例如，忽略水平 MSE 平流、大气对于湿对流的条件不稳定性等。许多基于该波动 CISK 机制的模式在解释 MJO 时出现的问题是不稳定在短波尺度最大，并且向东传播速度要快于观测结果 (Zhang 2005)，并且该理论也无法解释短波成分快速增长的情况下，扰动如何保持行星尺度的结构 (Chao 1995)。

### (2) 风-蒸发反馈 (WISHE)

风-蒸发反馈机制最初见 Emanuel (1987) 和 Neelin et al. (1987) 的研究中，之后发展为风诱导表面热量交换 (WISHE) 理论 (Yano and Emanuel 1991)，该机制的提出是为了解释支持 MJO 及其传播的不稳定性。在线性 WISHE 理论中，平均风场被假设为东风，低层的风异常叠加到平均风场上，引起表面潜热通量的不对称。该不对称性诱导使得降水响应的不对称，因此在正温度扰动地区产生对流加热异常，从而有利于波的增长，并产生向东传播的现象。

线性 WISHE 理论与波动 CISK 理论有同样的不足，即不稳定性更趋于短波增长，并且传播速度过快。而且，原始模式依赖低层的东风平均态来驱动向东传播，而观测结果表明在 MJO 活动强烈的印度洋和西太平洋地区，风场平均态是西风。同时，表面潜热通量的异常不对称性也与观测值有出入。还有一个问题，是该理论中假设风异常相对于平均风场很小，在此假设下，不对称的风异常才能产生不对称的表面热通量异常响应。虽然 WISHE 有以上不足，但却是季节内振荡的重要能量源，

Xie and Arkin (1997) 和 Wang and Li (1994) 在模式中加入了条件加热参数化的赤道波动动力作用之后，WISHE 机制便能导致不稳定并加强向东传播，而不再需要平均东风的假设，该非线性 WISHE 能够产生持续向东传播的西风和对流的耦合相干信号。

Wang (1988) 提出驱动 MJO 的不稳定是源于边界层中摩擦产生的湿辐聚，称为摩擦辐聚不稳定 (FCI)，该理论认为，MJO 是由边界层中摩擦引致的湿辐聚产生的不稳定来驱动的，该湿辐聚与大尺度赤道波动相关。摩擦湿辐聚能够与赤道开尔文波和罗斯贝波耦合，通过摩擦组织的对流加热，并产生一个摩擦辐聚不稳定模态，该模态缓慢向东传播，即依靠边界层中湿辐聚与开尔文和罗斯贝波的有效耦合，产生向东缓慢传播的不稳定。FCI 解释的关键特征是在湿辐聚领先于对流层的对流活动和强烈降水异常，该理论认为波致湿辐聚并不能引起不稳定 (Wang 1988; XIE and Kubokawa 1990)。

### (3) 对流-水汽反馈机制

自由对流湿气和降水的密切关系在基于水汽补给释放和湿模态的 MJO 理论中起着关键的作用。自由对流层水汽的补给释放过程是湿模态理论的核心内容，而湿模态理论能够为驱动水汽补给释放机制的物理过程提供具体性质的解释。总的来说，湿模态理论提供了一个动力支柱，并为水汽补给释放理论提供具体驱动过程。

#### a. 水汽补给释放理论

已经有一些研究表明 (Kembal-cook and Weare 2001; Kiladis et al. 2005; Benedict and Randall 2007 等)，在 MJO 对流过程发生之前，存在一段对流层湿度和大气不稳定性逐渐增加的水汽补给时期。对流开始后，湿度开始相对快速地释放，大气稳定性也随之增加。水汽释放结束后，又会接着进行新一轮的水汽补给过程，这个过程的速率决定了整个 MJO 过程的周期。补给释放理论并不排除波动 CISK 或者 WISHE 理论的作用，这两者都在驱动补给释放过程中起着重要的作用。在该理论中，对自由对流层水汽过程的修正通过影响对流羽的浮力和对流下降气流的发生状况来

Degree papers are in the “[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)”.

Fulltexts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to [etd@xmu.edu.cn](mailto:etd@xmu.edu.cn) for delivery details.