

李汀, 严欣, 据建华. 2012. MJO 活动对云南 5 月降水的影响 [J]. 大气科学, 36 (6): 1101–1111, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.11152. Li Ting, Yan Xin, Ju Jianhua. 2012. Impact of MJO activities on precipitation in May over Yunnan [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 36 (6): 1101–1111.

MJO 活动对云南 5 月降水的影响

李汀¹ 严欣² 据建华³

1 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, 北京 100029

2 云南大学资源环境与地球科学学院, 昆明 650031

3 云南省气象局, 昆明 650034

摘 要 本文分析了 1979~2008 年 5 月 MJO (Madden and Julian Oscillation) 不同位相上大尺度环流对流和水汽输送的异常情况及其对云南 5 月降水的影响。按 MJO 活动中心位置从西向东分为 8 个位相, 在不同位相上, 云南 5 月降水呈现出明显的差异: 第 4~6 位相 (MJO 对流中心位于赤道印度洋中部至西太平洋) 降水偏多, 而第 7~8 位相 (赤道太平洋中部以东) 和第 1~3 位相 (赤道印度洋中西部) 降水偏少, 其中以第 6 位相的降水正异常和第 2 位相的负异常最为显著。在 MJO 1~8 位相中, 对流主体从热带印度洋东移。在第 1~3 位相, 孟加拉湾还未形成西南向水汽输送, 而云南又处于水汽辐散区, 降水较少; 第 4 位相时对流主体到达 90°N 附近, 部分对流云系向孟加拉湾北传, 并在孟加拉湾生成气旋性环流, 向云南输送水汽, 云南降水增多; 第 5 位相时对流主体传到南海, 部分对流云系在南海北传, 同时在南海形成北传的气旋性环流; 第 6 位相时赤道 MJO 对流主体虽然东移出孟加拉湾, 但孟加拉湾和南海的两个气旋性环流依然继续北传, 孟加拉湾气旋东部的西南风和南海气旋西部的东北风在云南交汇, 云南被强烈的水汽辐合区控制, 降水最充沛。第 7~8 位相时, 对流主体减弱, 东移到南海和西太平洋一带, 孟加拉湾转向为偏北风, 停止向云南输送水汽, 且云南处于水汽辐散区控制, 降水偏少。因此, MJO 主体在东传过程中, 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气旋环流的可利配置是造成云南 5 月降水的重要原因。

关键词 MJO 活动位相 云南 5 月降水 孟加拉湾 水汽输送

文章编号 1006-9895(2012)06-1101-11

中图分类号 P461

文献标识码 A

doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2012.11152

Impact of MJO Activities on Precipitation in May over Yunnan

LI Ting¹, YAN Xin², and JU Jianhua³

1 State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

2 Resource Environment and Earth Science College of Yunnan University, Kunming 650031

3 Yunnan Meteorological Administration, Kunming 650034

Abstract This paper analyzes the abnormal conditions of large-scale circulations, convection, and water vapor transportation and their effects on Yunnan precipitation at various MJO (Madden and Julian Oscillation) phases in May during 1979–2008. During this period, Yunnan precipitation showed obverse differences at eight MJO phases that were divided by the central location of MJO from west to east. Positive precipitation anomalies occurred at phases 4–6, where the main MJO convective body was situated along the equator from the central Indian Ocean to the western Pacific Ocean. Negative precipitation anomalies appeared at phases 7–8, when the main MJO convective body appeared east of the

收稿日期 2011-08-28, 2012-07-23 收修定稿

资助项目 国家自然科学基金云南省联合基金项目 U0833602, 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室开放项目 2012LASW-A02

作者简介 李汀, 女, 1981 年出生, 博士后, 主要研究方向为全球气候变化和季风研究。E-mail: iamtingtingting@126.com

通讯作者 据建华, E-mail: jujh@cma.gov.cn

equator at the central Pacific Ocean, and at phases 1–3, when it was situated over the central and western Indian Ocean. The positive anomalies at phase 6 and the negative anomalies at phase 2 are the most significant. The main convective body moved northward and eastward from the tropical Indian Ocean. At phases 1–3, the southwestward water vapor transport had not yet formed in the Bay of Bengal (BOB); therefore, the precipitation in Yunnan at various divergent regions decreased. At phase 4, the main convective body moved near 90°E, and a partial convective cloud system began a northward transfer to the BOB. As a result, cyclonic circulation formed and transported water vapor to Yunnan; therefore, its precipitation showed positive anomalies. At phase 5, the main convective body moved to the South China Sea (SCS), from which a partial convective cloud system began a northward transfer with northward cyclonic circulation. At phase 6, the main convective body of the equatorial MJO had moved eastward from the BOB. However, the two cyclonic circulations in the BOB and SCS continued northward, and the southwestern wind along the eastern cyclone of the BOB and the northeastern wind along the western cyclone of the SCS met and joined in Yunnan. Because they were controlled by a strong water vapor convergent region, and precipitation in this region shows the highest increase. At phases 7–8, the main convective subject was weakened and moved eastward to the SCS and the western Pacific Ocean. The wind in the BOB shifted to the north and no longer transported water vapor to Yunnan, where it was controlled by divergent water vapor to decrease precipitation. Therefore, northward convection propagation along paths in the BOB and SCS during the eastward migration process of MJO created strong water vapor transportation. Their advantageous coordination in the two sea regions is the main reason for Yunnan precipitation in May.

Key words MJO, activity phase, Yunnan precipitation in May, Bay of Bengal, water vapor transportation

1 引言

20 世纪 70 年代初, Madden 和 Julian (1971) 最先发现了热带大气风场和气压场变化存在 30~60 d 周期性大尺度振荡现象, 即 MJO (Madden and Julian Oscillation)。它作为热带大气活动在 30~60 d 时间尺度的最强振荡信号, 国内外对其进行了一系列研究, 对其结构、变化、传播等规律和动力学机制已有了一系列基本认识 (李崇银等, 2003; 李崇银和李桂龙, 1998; 杨辉和李崇银, 2005)。MJO 活动对全球很多地区的天气和气候都有重要影响, 尤其对全球不同区域的降水都有不同程度的影响 (Jeong et al., 2005, 2008; Yan et al., 2002)。

云南省位于中国西南的低纬度高原地区, 受季风气候的影响, 全年分为雨旱两季, 雨季通常从 5 月开始。5 月作为云南从旱季向雨季过渡的关键期, 是云南一年中强降水天气突变最大的月份, 也是云南大部分地区的大春作物栽种期, 因此, 5 月雨季的开始时间、降雨总量和强降水发生概率都与云南工农业生产和人民生活密切相关, 对云南 5 月降水的研究和预测也一直是云南气象科研的重要组成部分。如严华生等 (1995) 研究了云南 5 月降水的天气气候成因, 据建华和李绚丽 (1999) 研究了前期大气环流场和热带 OLR 变化对云南初夏 (5 月) 降水的影响, 解明恩等 (2004) 研究了云南雨季开始期大雨过程的形成原因, 晏红明等 (2001) 研究

了云南 5 月降水与热带海温异常和孟加拉湾季风活动的关系, 陶云等 (2002) 研究了云南 5 月降雨的年际和年代际转折突变, 曹杰等 (2002) 研究了云南 5 月强降水天气与南亚季风和南海季风的关系, 张小玲 (1999) 等研究了 ENSO 事件对云南初夏降水的影响。

近年来, ISO 对云南降水的影响越来越受关注, 如据建华和叶乃青 (1999)、解明恩等 (1999) 研究了孟加拉湾和南海 OLR 的活动对云南初夏降水的影响, 肖子牛和温敏 (1999) 研究了云南 5 月降水与前期 ISO (Intraseasonal Oscillation, 即季节内振荡) 的相互关系, 但大多限于 MJO 或 ISO 强度变化与云南降水间的统计学关系。而 MJO 的活动特征不仅体现在强度方面, 还体现在位置方面, 当 MJO 对流主体移动到不同位置时, 对天气气候的影响是不同的。本文将在上述研究成果的基础上, 分析在 MJO 活动中心所处的不同位置时大气对流场和水汽环流场的相应变化及其对云南 5 月降水的影响。

2 资料和方法

2.1 资料

(1) 日本气象厅人类自然与大气科学研究所提供的高分辨率亚洲降水及水资源评价资料 (the Asian Precipitation-Highly-Resolved Observational Data Integration Towards Evaluation of the Water Resources, 即 APHRODITE) 中亚洲季风区域 (Mon-

soon of Asia, 即 MA) 降水数据 APHRO_MA_V1003R1, 分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$, 时间范围: 1979 年 1 月 1 日~2007 年 12 月 31 日;

(2) 云南省气象局提供的 124 站逐日降水数据;

(3) NCEP/NCAR 提供的 OLR、17 层风场 (u , v) 和 8 层比湿场等逐日再分析资料, 水平分辨率均为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$;

(4) Wheeler and Hendon (2004) 提出的描述 MJO 观测事实的逐日独立指数 RMM (All-Season Real-Time Multivariate MJO Index, 即全年实时多变量 MJO 指数), 含 RMM1 (RMM 指数序列 1)、RMM2 (RMM 指数序列 2)、MJO 振幅和位相等, 可由 <http://www.bom.gov.au/bmrc/clfor/cfstaff/matw/maproom/RMM/> [2011-05-10] 获得。

资料 (2)~(4) 时间范围为 1979 年 1 月 1 日~2008 年 12 月 31 日。

2.2 方法

本文采用 RMM 指数来确定 MJO 的位置。采用近赤道地区 ($15^\circ\text{S} \sim 15^\circ\text{N}$) 平均 850 hPa 纬向风、200 hPa 纬向风和 OLR 的合成场, 在移除季节变化、年变化、年际变化以及更长时间尺度变化的成分之后, 进行 EOF (Empirical Orthogonal Function, 经验正交函数) 分析, 以第一、二模态的时间系数分别作为 MJO 序列 1 和 2 (RMM1 和 RMM2)。由 RMM 指数可计算得到 MJO 的逐日强度 (振幅) $\sqrt{\text{RMM1}^2 + \text{RMM2}^2}$, 且由于 MJO 的逐日平均强度为 0.9 (Pohl and Matthews, 2007), 因此将 $\sqrt{\text{RMM1}^2 + \text{RMM2}^2} \geq 0.9$ 时定义为强 MJO 事件, 并在强 MJO 事件中根据 RMM1 和 RMM2 的变化划分为 8 个位相 (phases 1~8), 以描述 MJO 的传播特征; 其余则定义为弱 MJO 事件 (phase-weak)。

图 1 以 1979 年 5 月 1~31 日为例, 由每日 RMM1 和 RMM2 构成二维位相空间, 由此确定 8 个 MJO 位相。图中的圆半径 $\sqrt{\text{RMM1}^2 + \text{RMM2}^2} = 0.9$, 落在圆内的点表示当日为弱 MJO 事件, 如 1979 年 5 月 10~12 日; 而圆外的点则对应强 MJO 事件, 每个点所处位相反应了当日 MJO 活动中心所处的空间位置 (蓝色英文字)。从第 1 到第 8 位相, 反映了一个完整的 MJO 周期, MJO 活动中心从赤道西印度洋 (1 位相) 发源, 随后沿着赤道东传, 经印度洋 (2~3 位相) 到印尼群岛及西太平洋 (4~6 位相), 到太平洋中部、东部和西半球 (7~8 位相)。

本文对强 MJO 事件中的 8 个位相和弱 MJO 位相

所对应的降水、对流场、水平风场、水汽通量及其散度场等分别进行统计合成, 用以分析不同 MJO 位相上相关气象要素的变化情况及其对云南 5 月降水的影响。

3 MJO 不同位置的活动对云南 5 月降水的影响

5 月是云南天气气候变化最明显的时期, 夏季风的到来使得云南开始从旱季转入雨季, 雨量显著增加。根据 1979~2008 年云南 124 站逐日降水资料计算得到, 云南 5 月单站平均日降水量约为 3.57 mm d^{-1} 。图 2 是由 APHRO_MA_V1003R1 降水资料计算得到的 1979~2007 年云南 5 月日平均降水量, 如图所示, 云南 5 月降水大致呈现从西北向东南递增的趋势, 迪庆、丽江等地降水最少, 仅有 $0 \sim 1 \text{ mm d}^{-1}$; 保山、大理、楚雄和昭通等地降水较少, 低于全省平均值; 而思茅、红河和文山南部降水最多, 可达 $7 \sim 8 \text{ mm d}^{-1}$ 。这也反映出云南 5 月降水受到南方暖湿气流的极大影响。

为表现 MJO 活动中心位置与云南 5 月降水量及分布的关系, 分别用 APHRO_MA_V1003R1 降水资料 (图 3) 和云南 124 站日降水资料 (图 4) 计算得到的云南 5 月日平均降水距平百分率在 MJO 1~8 位相上的合成, 图 3 括号中的数字为 30 年中 5 月 MJO 强对流中心发生该位相的累计天数 (弱位相图略, 共 263 天)。结合图 3 和 4 可知, 当 MJO 活动中心处于第 6 位相时, 云南 5 月降水最充沛, 全省大部呈现降水正距平, 平均单站距平百分率为 27.4%, 云南西部、西南部和东南部均在 40% 以上, 其中德宏西部降水最多, 达 80% 以上, 仅在东北部昭通地区存在弱的负距平区。MJO 第 4 位相时, 云南 5 月降水平均单站距平百分率次大, 为 15.1%, 正距平区集中在西南和东南部, 以临沧和红河较明显, 在 30% 以上。MJO 第 2 位相时云南 5 月降水最少, 单站距平百分率为 -26.3%, 除东北和东部小片地区外, 全省均为负距平区, 以西部、西南和东南地区较为明显, 最小可达 -40% 以下。MJO 第 8 位相时云南 5 月降水次少, 为 -18.2%, 负距平区主要集中在中西部和西北、西南的部分地区, 最小也可达 -40% 以下。其它几个位相中云南 5 月降水变化较小, 距平百分率均未超过 $\pm 7\%$, 其中第 5 位相和弱位相降水为弱的正距平, 而第 1、3 和 7 位相降水为弱的负距平。

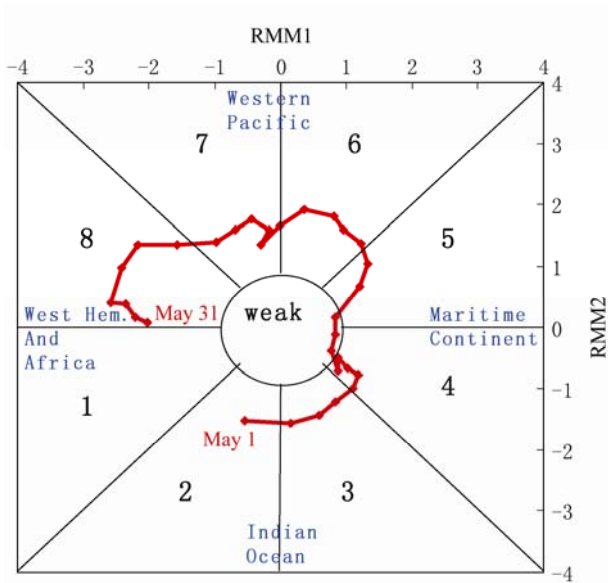


图1 1979年5月MJO位相图

Fig. 1 The phase diagram of MJO in May of 1979

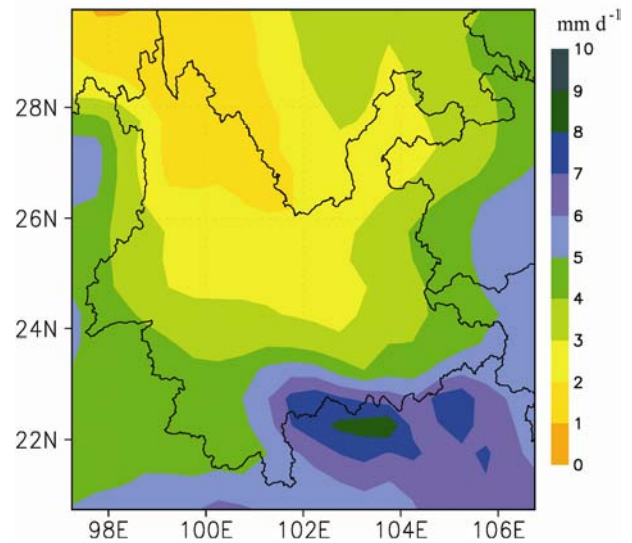
图2 1979~2007年云南5月每日平均降水量(单位: mm d^{-1})

Fig. 2 Yunnan daily-averaged precipitation in May during 1979-2007

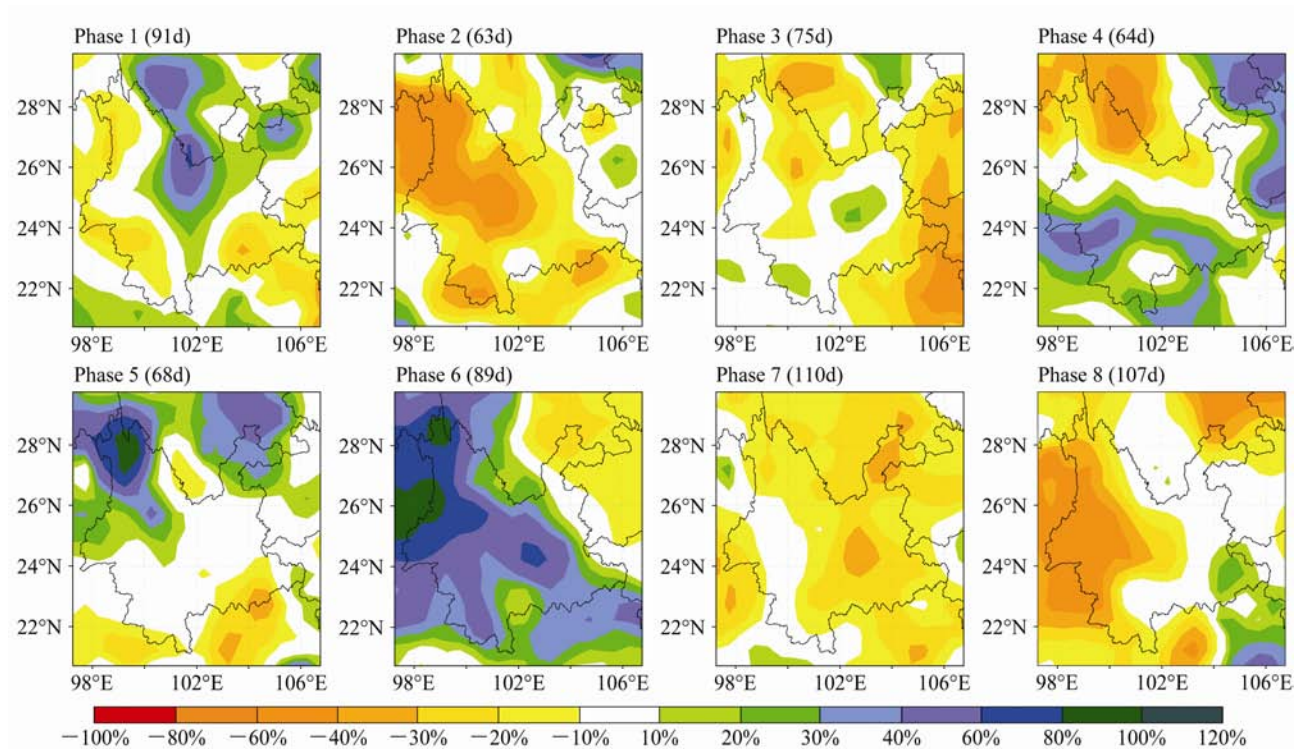


图3 1979~2007年云南5月降水距平百分率在MJO 1~8位相的合成。括号内数字为1979~2008年5月发生该位相的天数累计

Fig. 3 Yunnan precipitation departure percent in May synthesized at MJO phases 1-8 during 1979-2007. The numbers in parentheses is the days of corresponding MJO phases in May during 1979-2008

通过上述分析可见, 在 MJO 活动不同位相上, 云南 5 月降水呈现出明显差异: 第 4~6 位相降水偏多, 第 7~8 和 1~3 位相降水偏少, 其中以第 6 位相的正异常和第 2 位相的负异常最为显著。这一方面说明 MJO 活动中心位置变化确与云南 5 月降

水有关, 另一方面也给我们带来疑问: 通常认为云南汛期雨量受到孟加拉湾西南季风的极大影响, 而 MJO 在经过热带东印度洋(2~3 位相)和孟加拉湾以南的热带地区(4 位相)时, 激发 ISO 向东北或向北的传播, 对孟加拉湾西南季风的水汽输送产

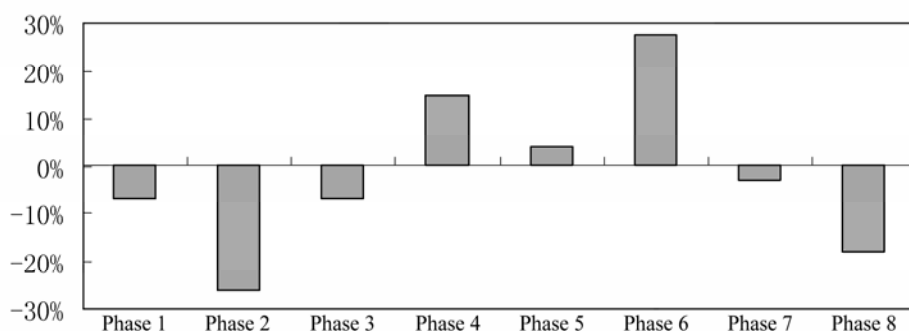


图4 1979~2008年云南5月全省单站日平均降水距平百分率在MJO 1~8位相的合成

Fig. 4 Yunnan single station daily-averaged precipitation departure percent in May synthesized at MJO phases 1-8 during 1979-2008

生作用,从而影响云南降水。然而从统计结果来看,2~3位相时云南5月降水并没有开始;第4位相时,尽管云南确实进入了降水过程,但却并不是降水最多的位相。反而在第6位相(MJO对流主体已东移到孟加拉湾下游的南海和西太平洋地区)时,云南5月降水却最多。我们将在下一节中详细分析造成这一现象的原因。

4 5月MJO不同位相对应的大尺度环流背景分析

正如上文所述,尽管MJO的对流异常和东传主要发生在热带约 $15^{\circ}\text{S}\sim 15^{\circ}\text{N}$ 之间,但这种热带对流却可以对副热带环流场产生强迫作用,从而影响到包括云南在内的我国很多地区的降水,下面将就分析MJO不同位相对热带及副热带地区的大尺度环流背景的影响。

图5(见文后彩图)是1979~2008年5月平均OLR和850 hPa矢量风,如图所示,5月对流活跃区主要位于热带印尼群岛及其以西的印度洋和南半球热带西太平洋上;热带印度洋主要为西风,在印尼群岛和中南半岛一带出现南风分量,云南主要受到孟加拉湾西南风的影响,而中国南方则受到孟加拉湾和南海两地汇合的西南风的影响。

图6是1979~2008年5月OLR和850 hPa矢量风在MJO 1~8位相的距平合成图。MJO第1位相时,OLR显著负异常区所代表的MJO对流主体位于赤道以北、印度半岛以西的印度洋和非洲大陆上;在 20°N 的西太平洋存在反气旋环流。第2位相时,对流主体加强并东移了约5个经度,扩大到南半球热带印度洋地区,并覆盖了孟加拉湾西部地区,其前沿到达印尼群岛附近;南海、菲律宾群岛及其以东的西太平洋上为对流活跃区,西太平洋的

反气旋环流加强,其西北侧的华南、贵州和广西等地均为西南风,但云南境内为弱的偏西风,南风分量很弱。第3位相时,对流主体显著加强,迅速东移到印度半岛以东、孟加拉湾以南的热带印度洋面上,其前沿已经越过印尼群岛到达西太平洋,印度半岛西南侧的印度洋上产生了对应的气旋性环流, $5^{\circ}\text{N}\sim 15^{\circ}\text{N}$ 纬带上为气旋北侧的东风气流;副热带西太平洋的反气旋北移到了 $25^{\circ}\text{N}\sim 30^{\circ}\text{N}$ 附近。第4位相时,对流主体在继续东移过程中也开始沿孟加拉湾北移,对应的气旋性环流也到达孟加拉湾南部,在中南半岛上产生了明显的南风分量,云南东南及华南一带为西南风,受暖湿气流的影 响,云南进入了降水阶段;西太平洋对流活跃区有所减弱。第5位相时,对流主体继续东移到南海南部,前期在孟加拉湾北移的对流不断发展并占据整个孟加拉湾,气旋性环流也随之北移到孟加拉湾北部,孟加拉湾西岸为西南风,气旋南侧 $5^{\circ}\text{N}\sim 10^{\circ}\text{N}$ 纬带上也由东风转向为西风;同时,随着对流活跃区北移到南海北部,南海北部和华南地区形成气旋性环流,而副热带西太平洋上的反气旋环流东移减弱,南海的东南风转为西南风,而华南、广西和贵州则转为东北风。第6位相时,对流主体继续向东移到了西太平洋;孟加拉湾北部的气旋性环流继续北移到了孟加拉湾以北的青藏高原南侧,该气旋东侧的西南风与华南气旋西侧的东北风在云南和中南半岛北部地区交汇,形成了非常有利于云南出现强降水的环流形势,云南继续维持在弱的OLR负距平区中。第7~8位相时,MJO对流主体东移到了菲律宾群岛东侧的西太平洋地区,副热带西太平洋上出现对应的大范围气旋性环流,其西侧的东北风逐渐南压;孟加拉湾对流受到抑制(OLR正异常区),中南半岛上转为偏北风,印度洋、印尼群岛等热带

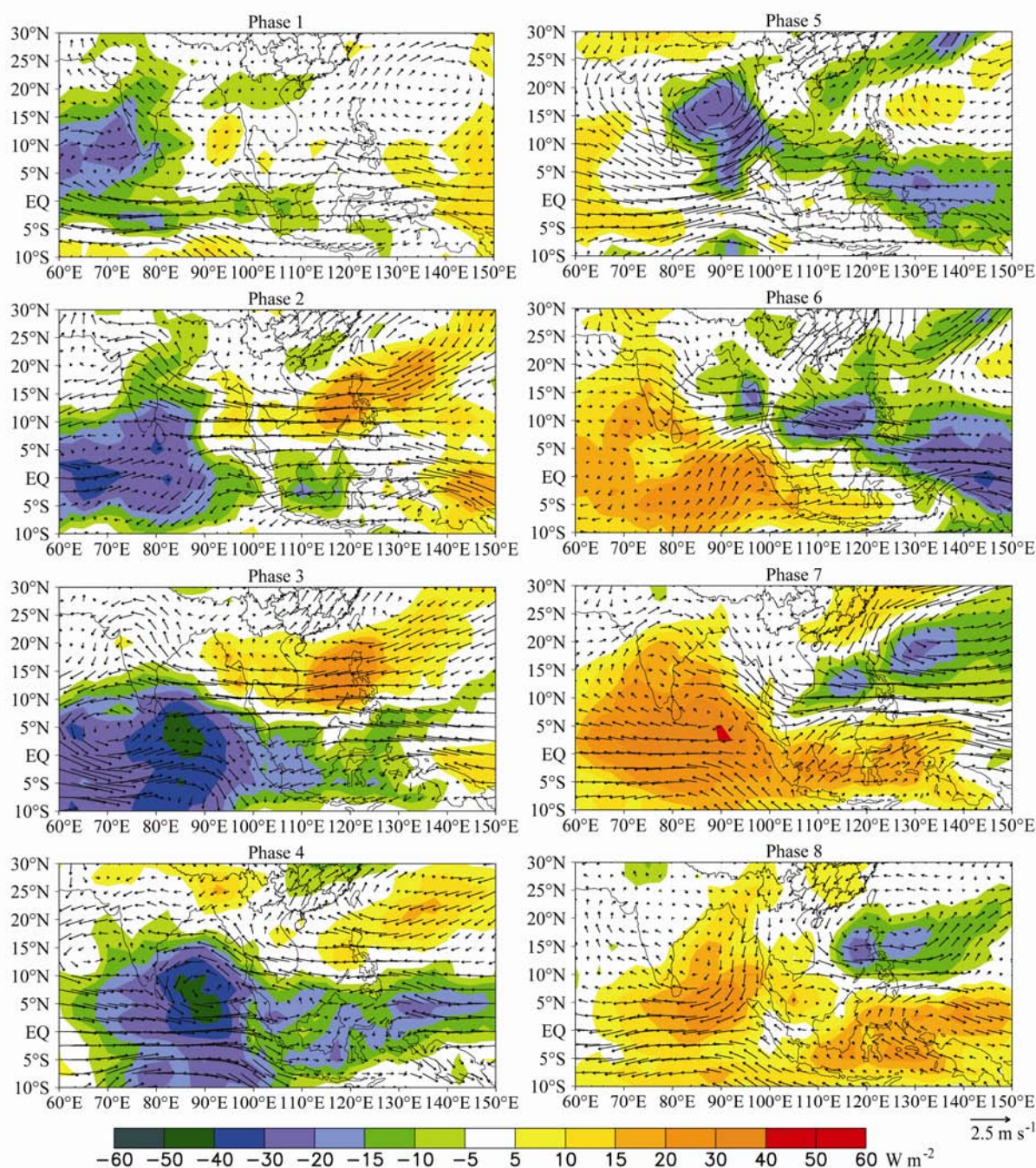


图6 1979~2008年5月OLR(单位: W m^{-2})和850 hPa矢量风(单位: m s^{-1})距平在MJO 1~8位相上的合成

Fig. 6 Averaged OLR departure and 850-hPa wind vector departure in May synthesized at MJO phases 1-8 during 1979-2008

地区对流减弱, OLR 正异常中心位于孟加拉湾以南、印尼群岛以西的印度洋上, 孟加拉湾以南的热带印度洋上形成反气旋环流, 在 $5^{\circ}\text{S}\sim 5^{\circ}\text{N}$ 纬度带上, 印尼群岛以西为东风, 以东为西风, 云南处于弱的对流抑制区中。

上述分析说明, 在 MJO 对流中心从西向东传播过程中 (1~8 位相), 分别在孟加拉湾和南海两个海域激发了向北传播的对流活动。MJO 在热带印

度洋的对流活动在第 1~4 位相发展, 而在第 5~8 位相减弱, 并且第 2~4 位相和第 6~8 位相呈现明显的反位相特征, 在对应的大尺度环流场上也得以体现。在第 5 位相时对流北传达到 $20^{\circ}\text{N}\sim 25^{\circ}\text{N}$ 纬带, 在孟加拉湾北部和南海西北部形成两个对应的气旋性环流, 第 6 位相时对流主体虽然进一步东移了, 但这两个气旋性环流所带来的风场异常依然维持, 云南正好处于两个气旋中间, 其西侧孟加拉湾

气旋的西南风和其东侧南海—华南气旋的东北风正好在云南交汇;而云南同时也受到北传对流的影响,处于对流活跃区的控制,水汽条件和对流条件都有利,因此在第 6 位相云南出现的降水最充沛。云南 5 月的水汽来源主要是孟加拉湾的西南季风,而 MJO 正是通过其东传过程中并同时激发 ISO 北传而作用于孟加拉湾和南海地区水汽输送,在两个海域气旋的共同作用下对云南 5 月降水产生了显著影响。

为了进一步证明上述分析,我们再对水汽场做出分析。水汽通量作为矢量,可以反映出大尺度环流场和湿度场的共同特征,而水汽通量的辐合辐散(即水汽通量散度)则可以反映水汽源汇的强度和分布情况。通常水汽通量是从地表到大气层顶的垂直积分,考虑到云南地处高原,而水汽输送又主要集中在对流层低层,因此本文采用 850~700 hPa 的水汽通量矢量场和散度场作为分析对象。

图 7(见之后彩图)是 1979~2008 年 5 月 850~700 hPa 平均水汽通量和水汽通量散度,如图可见,5 月对流层低层的水汽通量与 850 hPa 风场大致相似,云南的水汽主要由孟加拉湾的西南风输送,并且云南处于水汽辐合区,青藏高原南侧则为水汽辐散区,对云南西部稍有影响。

图 8 是 1979~2008 年 5 月 850~700 hPa 平均水汽通量和水汽通量散度距平在 MJO 1~8 位相的合成。在第 1~3 位相时,受图 6 中对流场分布影响,在印度半岛南部为气旋性水汽通量环流,孟加拉湾西部沿岸直至青藏高原南侧都为水汽辐合区;而在副热带西太平洋则为反气旋性水汽通量环流和水汽辐散区,随着对流的东移和加强,水汽辐合区由西印度洋逐步扩大到印度半岛西岸、孟加拉湾中部、印尼群岛和中南半岛,云南和两广地区则为强的水汽辐散区所控制。第 4 位相中,气旋性水汽通量环流北移到孟加拉湾南部,在孟加拉湾中部、南海和华南地区出现水汽强辐合,云南南部也位于水汽辐合区内,这与图 3 中第 4 位相的降水正异常出现在云南南部相符。热带印度洋由西向东的水汽和热带西太平洋由东向西的水汽在印尼群岛附近汇合并向北输送,在中南半岛由东南向转为西南向水汽输送。尽管此时大量水汽从孟加拉湾和中南半岛向云南输送,但从图 8 来看,水汽在云南地区的辐合并不是很显著,大量水汽向下游的华南地区输送,为华南地区前汛期的降水提供了有利的水汽条

件。而对云南来说,水汽通量辐合不强是该阶段云南降水不多的主要原因。第 5 位相时,孟加拉湾北部为明显的气旋性水汽通量环流,其东北部的南风影响到云南西部,同时孟加拉湾北部的水汽辐合区也到达云南西部,这与图 3 中第 5 位相的降水正异常主要出现在云南西部相符合;同时,在南海东北部和华南地区还出现一个弱的气旋性水汽通量环流。第 6 位相中,孟加拉湾北部的气旋性水汽通量环流继续北移,而南海东北部的气旋性环流大大加强,两个气旋性水汽通量环流共同作用于云南,西南向水汽通量和东北向水汽通量在云南交汇,云南境内为强烈的水汽辐合区,尤其以南部辐合最强,而东北部则受到主体在贵州的辐散区的影响,这与图 3 中第 6 位相时云南 5 月降水最多、全省除东北部昭通地区外皆为降水正距平区、且以西南部分尤为显著的现象相符。第 7~8 位相时,与图 6 的对流场形势相对应,孟加拉湾西南部和印度半岛南部已转为反气旋性水汽通量环流,而副热带西太平洋上则转为气旋性水汽通量环流,热带印度洋和西太平洋的水汽通量方向也已经转向,云南境内转为水汽辐散区,降水结束。

以上分析表明,5 月水汽通量受大尺度环流场和对流场影响,在 MJO 不同位相也呈现出不同环流特征。在第 1~3 位相,孟加拉湾还未形成西南水汽输送,而云南又处于水汽辐散区,降水较少。第 4~5 位相时,由于孟加拉湾气旋性环流的生成,开始向云南输送水汽,而云南部分地区开始进入北传的水汽辐合区内,因此出现降水正距平。此时虽有强盛的水汽向云南输送,但环流配置不利于水汽在云南辐合,因此云南仍然未出现大的降水过程;第 6 位相时,孟加拉湾北部和南海东北部的两个气旋性水汽通量环流在云南交汇,云南处于强烈的水汽辐合区控制下,形成对云南 5 月降水最有利的环流形势,云南 5 月降水最多。所以,尽管云南 5 月降水是在 MJO 第 6 位相时最多,但却是在第 4 位相中对流沿孟加拉湾北传时就开始酝酿,第 5 位相时在孟加拉湾北部和南海东北部出现的两个气旋性水汽通量环流经过进一步北传,到第 6 位相时造成南北向输送的水汽在云南强烈交汇,造成云南 5 月的主要降水过程。第 7~8 位相时,随着 MJO 对流中心继续向中东太平洋传播,孟加拉湾水汽通量转向为偏北分量,停止向云南的水汽输送,云南转为水汽辐散区控制,降水明显减少。

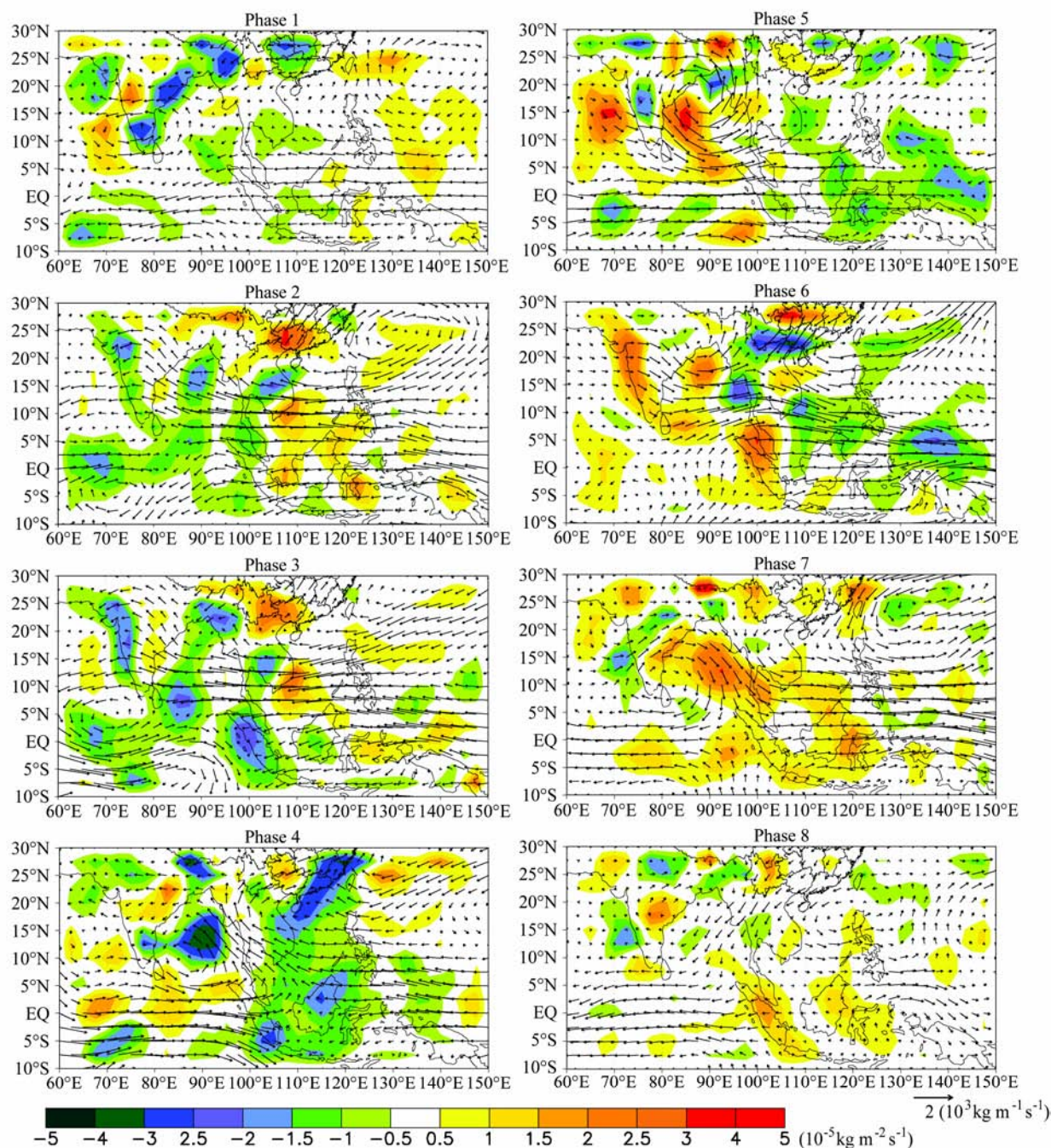


图8 1979~2008年5月850~700 hPa水汽通量(单位: $10^3 \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$)和水汽通量散度距平在MJO 1~8位相上的合成

Fig. 8 Water vapor flux departure ($10^3 \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$) and water vapor flux divergence ($10^{-5} \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) departure Averaged for 850–700 hPa in May synthesized at MJO phases 1–8 during 1979–2008

5 结论

本文采用 NCEP/NCAR 提供的 OLR、风场和比湿场等逐日再分析资料, 云南省 124 站逐日降水资料, 日本 APHRO_MA_V1003R1 降水资料和 RMM 指数, 分析了 1979~2008 年 5 月在 MJO 活动中心自西向东移动过程中 (1~8 位相), 大尺度环流对

流和水汽输送的异常情况, 以此分析 MJO 活动中心处于不同位置时对云南 5 月降水的影响。

在 MJO 不同位相上, 云南 5 月降水呈现出明显差异: 第 4~6 位相 (MJO 活动中心位于赤道印度洋东部至西太平洋) 为云南降水偏多, 而第 7~8 位相 (MJO 活动中心位于赤道太平洋中部以东) 和第 1~3 位相 (MJO 活动中心位于赤道印度洋中西

部)则云南降水偏少,其中以第 6 位相的正异常和第 2 位相的负异常最为显著。在 MJO 东传过程中,在第 1~3 位相,孟加拉湾还未形成西南向的水汽输送,而云南又处于水汽辐散区,降水较少;第 4 位相时 MJO 对流主体到达 90°N 附近,部分对流云系开始向孟加拉湾北传,并在孟加拉湾生成气旋性环流,向云南输送水汽,云南降水增多;第 5 位相时对流主体传到南海,部分对流云系在南海开始北传,同时也在南海形成北传的气旋性环流;第 6 位相时赤道 MJO 对流主体虽然东移出了孟加拉湾,但孟加拉湾和南海的两个气旋性环流依然继续北传,孟加拉湾气旋东部的西南风和南海气旋西部的东北风在云南交汇,使云南被强烈的水汽辐合区控制,降水最充沛。第 7~8 位相时,对流主体减弱,东移到达南海和西太平洋一带,孟加拉湾转向为偏北风,停止向云南的水汽输送,云南处于水汽辐散区控制下,降水减少。MJO 主体在东传过程中,分别在孟加拉湾和南海两条通道激发了对流北传,强盛的水汽输送和两个海区气旋性环流的有利配置是造成云南 5 月降水主要原因。

综上所述,云南 5 月的水汽来源主要是孟加拉湾的西南季风,MJO 对流主体东传过程中激发了孟加拉湾和南海对流的北传,影响了环流场和孟加拉湾地区水汽输送,从而对云南 5 月降水产生影响。这一结论对云南 5 月降水的预报和短期气候预测具有重大意义。

需要指出的是,限于篇幅,本文对于 MJO 在孟加拉湾和南海这两个重要通道激发对流北传的过程没有详细讨论。作者在后续研究中发现,热带东印度洋的 ISO 异常对低频对流沿西南—东北方向的传播有重要影响,从而影响到孟加拉湾西南季风 ISO 的传播异常和云南夏季风的建立,最终作用于云南雨季开始期的早晚和 5 月降水量。本文作者将另外撰文对此作出详细的分析。

另外,限于合成统计分析局限性,本文只阐述了 MJO 位相影响大尺度环流背景和云南降水的总体情况,但对于单个 MJO 事件而言,其强度、发展过程、传播速度和程度都存在差异,因此在运用本结论分析云南 5 月降水时,还应注意单个 MJO 事件的特殊情况。

致谢 云南省气象局为本文提供了云南 124 站逐日降水资料,《大气科学》编辑和两位匿名审稿人为本文提出了宝贵意见和建议,特

此感谢!

参考文献 (References)

- 曹杰, 张小玲, 肖子牛. 2002. 云南 5 月强降水天气与亚洲季风变化的关系 [J]. 云南大学学报 (自然科学版), 24 (5): 361–365. Cao Jie, Zhang Xiaoling, Xiao Ziniu. 2002. The relation between the May very heavy rainfall in Yunnan and the Asia monsoon index [J]. Journal of Yunnan University (Natural Sciences) (in Chinese), 24 (5): 361–365.
- Jeong J H, Ho C H, Kim B M. 2005. Influence of the Madden-Julian Oscillation on wintertime surface air temperature and cold surges in East Asia [J]. J. Geophys. Res., 110: D11104, doi: 10.1029/2004JD005408.
- Jeong J H, Kim B M, Ho C H, et al. 2008. Systematic variation in wintertime precipitation in East Asia by MJO-induced extratropical vertical motion [J]. J. Climate, 21: 788–801.
- 据建华, 李绚丽. 1999. 云南初夏降水与前期大气环流的关系 [J]. 高原气象, 18 (1): 63–70. Ju Jianhua, Li Xuanli. 1999. A study on relation between the preceding circulation and the rainfall in Yunnan during early summer [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 18 (1): 63–70.
- 据建华, 叶乃青. 1999. 云南初夏雨量与前期热带 OLR 的联系 [J]. 热带气象学报, 15 (1): 76–80. Ju Jianhua, Ye Naiqing. 1999. Relationship between the precipitation in Yunnan Province during early summer and early tropical OLR [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 15 (1): 76–80.
- 李崇银, 李桂龙. 1998. 热带大气季节内振荡的进一步分析 [J]. 气候与环境研究, 3 (1): 27–37. Li Chongyin, Li Guilong. 1998. A further analysis on intraseasonal oscillation in the tropical atmosphere [J]. Climate and Environmental Research (in Chinese), 3 (1): 27–37.
- 李崇银, 龙振夏, 穆明权. 2003. 大气季节内振荡及其重要作用 [J]. 大气科学, 27 (4): 519–535. Li Chongyin, Long Zhenxia, Mu Mingquan. 2003. Atmospheric intraseasonal oscillation and its important effect [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 27 (4): 519–535.
- 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.
- Pohl B, Matthews A J. 2007. Observed changes in the lifetime and amplitude of the Madden-Julian Oscillation associated with interannual ENSO sea surface temperature anomalies [J]. J. Climate, 20: 2659–2674.
- 陶云, 曹杰, 段旭. 2002. 云南省 5 月雨量转折突变的研究 [J]. 气象科学, 22 (9): 287–293. Tao Yun, Cao Jie, Duan Xu. 2002. The research of the May rainfall turning abrupt change in Yunnan Province [J]. Scientia Meteorologica Sinica (in Chinese), 22 (9): 287–293.
- 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.
- 肖子牛, 温敏. 1999. 云南 5 月降水量与前期季节内振荡活动相互关系的分析研究 [J]. 大气科学, 23 (2): 177–183. Xiao Ziniu, Wen Min. 1999. Relation between the precipitation of Yunnan in May and Intraseasonal oscillation before May [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 23 (2): 177–183.
- 解明恩, 陶云. 2004. 云南雨季开始的大雨过程研究 [J]. 热带气象学报, 20 (6): 662–672. Xie Ming'en, Tao Yun. 2004. The research on the

- heavy rainfall process of Yunnan rainy season onset [J]. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 20 (6): 662–672.
- 解明恩, 鲁亚斌, 普贵明. 1999. 云南及其邻近地区 OLR 场的气候特征 [J]. *高原气象*, 18 (2): 185–191. Xie Ming'en, Lu Yabing, Pu Guiming. 1999. OLR field climatic features over Yunnan and around areas [J]. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 18 (2): 185–191.
- 晏红明, 杞明辉, 肖子牛. 2001. 云南5月雨量与热带海温异常及亚洲季风变化的关系 [J]. *应用气象学报*, 12 (3): 368–375. Yan Hongming, Qi Minghui, Xiao Ziniu. 2001. Relationship between precipitation in May over Yunnan and the changes of tropical sea surface temperature and Asia monsoon [J]. *Quarterly Journal of Applied Meteorology* (in Chinese), 12 (3): 368–375.
- 严华生, 鲁亚斌, 尤卫红. 1995. 云南省5月份雨量的天气气候成因探讨 [J]. *应用气象学报*, 6 (1): 124–128. Yan Huasheng, Lu Yabing, You Weihong. 1995. A study of weather and climate features of precipitation in May in Yunnan [J]. *Quarterly Journal of Applied Meteorology* (in Chinese), 6 (1): 124–128.
- Yan Xue, Higgins W, Kousky V. 2002. Influences of the Madden Julian Oscillations on temperature and precipitation in North America during ENSO-neutral and weak ENSO winters [G]. *NASA/Goddard Space Flight Center*, April 16–18.
- 杨辉, 李崇银. 2005. 热带大气季节内振荡的传播及影响因子研究 [J]. *气候与环境研究*, 10 (2): 145–156. Yang Hui, Li Chongyin. 2005. A study of propagation of tropical intraseasonal oscillation and its influence mechanism [J]. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 10 (2): 145–156.
- 张小玲, 据建华, 王三杉. 1999. El Nino对云南初夏降水的影响 [J]. *热带气象学报*, 15 (2): 168–176. Zhang Xiaoling, Ju Jianhua, Wang Sanshan. 1999. El Niño's impact on early summer precipitation in Yunnan [J]. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 15 (2): 168–176.

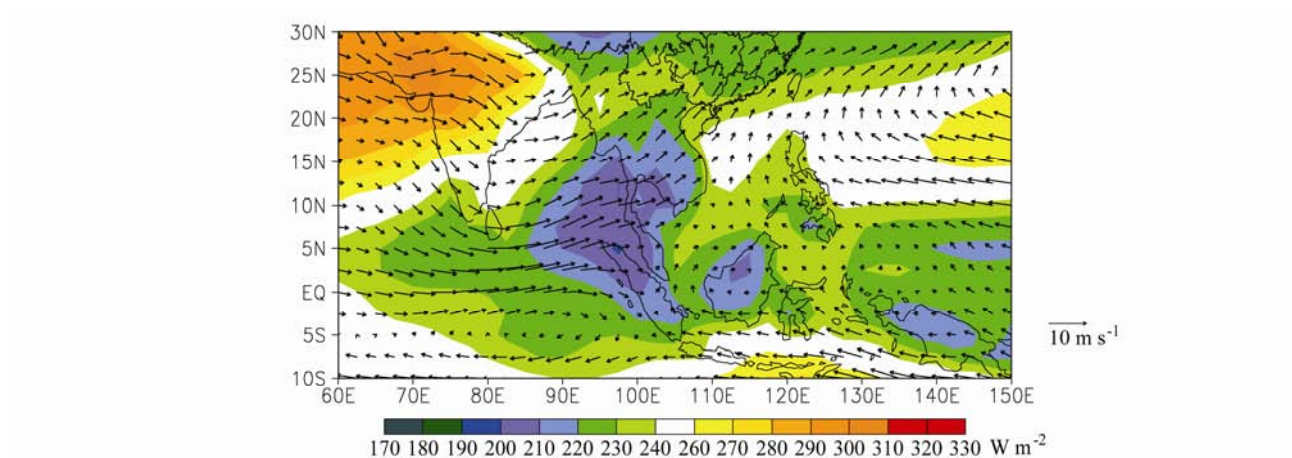


图 5 1979~2008 年 5 月平均 OLR (单位: W m^{-2}) 和 850 hPa 矢量风 (单位: m s^{-1})
Fig. 5 Averaged OLR and 850-hPa wind vector in May during 1979-2008

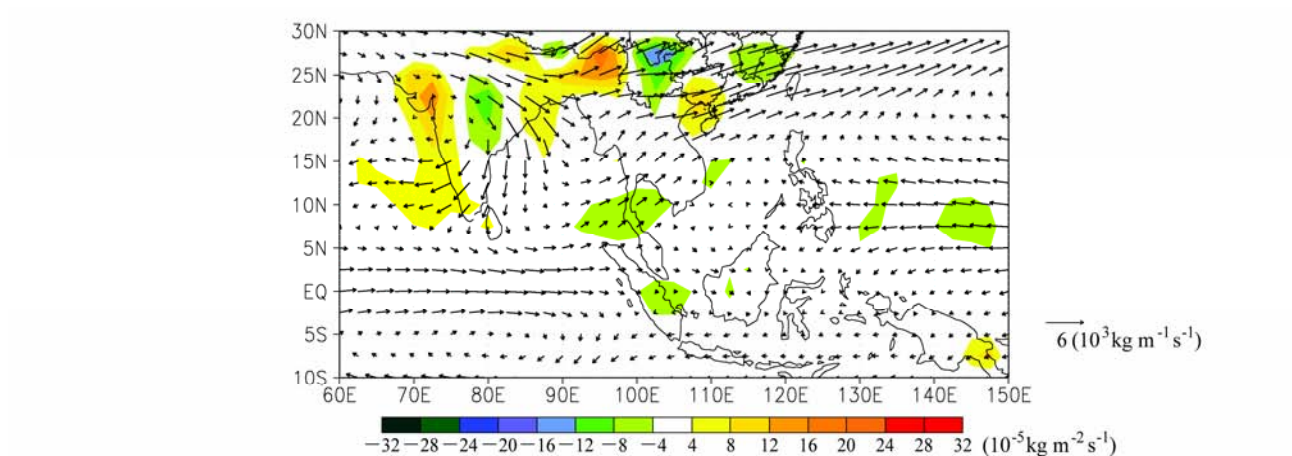


图 7 1979~2008 年 5 月平均 850~700 hPa 水汽通量 (单位: $10^3 \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$) 和水汽通量散度 (单位: $10^{-5} \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)
Fig. 7 Water vapor flux ($10^3 \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$) and water vapor flux divergence ($10^{-5} \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) averaged for 850-700 hPa in May during 1979-2008