

何洁琳, 段安民, 覃卫坚. 2013. 热带大气季节内振荡与西北太平洋热带气旋活动的季节预测: 统计事实研究 [J]. 气候与环境研究, 18 (1): 101-110, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2012.11075. He Jielin, Duan Anmin, Qin Weijian. 2013. Statistics on the modulation of Madden-Julian oscillation on tropical cyclone activity in the western North Pacific [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 18 (1): 101-110.

热带大气季节内振荡与西北太平洋热带气旋活动的季节预测: 统计事实研究

何洁琳^{1,2,3} 段安民¹ 覃卫坚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 南京信息工程大学, 南京 210044

3 广西壮族自治区气候中心, 南宁 530022

摘 要 应用 NOAA 气候预测中心提供的热带大气季节内振荡 (MJO) 客观业务指数及中国气象局上海台风研究所提供的西北太平洋热带气旋 (TC) 最佳路径资料集, 定量统计检验了 MJO 对夏季西北太平洋 TC 活动的调制作用。结果表明: MJO 对 TC 的生成、强度、路径和登陆活动都有显著的调节作用。当高空辐合中心位于 120°E~160°E (MJO 位相 3~5) 时, 西北太平洋 TC 生成偏少, 且生成位置偏北; 而当高空辐合中心位于 10°W~70°E (MJO 位相 8~10) 时, 西北太平洋 TC 生成偏多, 且生成位置偏南; 随着 TC 强度加强, 能达到显著调节作用的 MJO 位相逐渐减少, 当高空辐合辐散中心位于 70°E (MJO 位相 10) 时, 对 TC 强度调制最显著。在路径调节方面, MJO 位相 1~4 和 10 时, TC 活跃于菲律宾以东的西北太平洋上, 主要路径为西北偏北行, 可能登陆华东、华北; 而位相 5~8 时, TC 主要活跃在菲律宾附近及以西到南海, 以偏西行路径为主, 可能登陆华南。MJO 对登陆华南 TC 也有显著影响。该定量统计检验结果可为 TC 活动季节内预测提供依据。

关键词 热带大气季节内振荡 热带气旋 路径 强度 西北太平洋

文章编号 1006-9585 (2013) 01-0101-10

中图分类号 P444

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2012.11075

Statistics on the Modulation of Madden-Julian Oscillation on Tropical Cyclone Activity in the Western North Pacific

HE Jielin^{1,2,3}, DUAN Anmin¹, and QIN Weijian³

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 Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

3 Guangxi Zhuang Autonomous Region Climate Center, Nanning 530022

Abstract Using the Madden-Julian oscillation (MJO) index provided by Climate Prediction Center, NOAA, and the tropical cyclone (TC) best track dataset over the western North Pacific (WNP) provided by Shanghai Institute of Typhoon of CMA, the quantified statistics of the modulation of MJO on tropical cyclone activity are performed. The results show that the genesis, intensity, landfall, and path of TCs are all modulated by MJO significantly. When the upper-air convergent center locates in 120°E-160°E (MJO phases 3-5), there are less TCs form and the genesis position locates more north in the WNP; While the upper-air convergent center locates in 10°W-70°E (MJO phases 8-10), more TCs form

收稿日期 2011-05-25 收到, 2012-09-13 收到修定稿

资助项目 国家自然科学基金项目 41075073, 广西自然科学基金项目 210GXNSFA013010, 广西青年科学基金 0991060, 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开放课题

作者简介 何洁琳, 女, 1972 年出生, 博士, 高工, 主要从事台风气候学和季风动力学研究。E-mail: hjlchinese@163.com

and the genesis position locates more southward. When the upper-air convergent center locates at 70°E, i.e., MJO phase 10, the intensity of TCs is significantly modulated; during phases 1–4 and 10, the vigorous TCs occur in the east of the Philippines of WNP, indicating the dominant northwestward and northward paths, possibly making landfall on the East and North China; while during the phases 5–8, the TCs occur frequently in the vicinity of the Philippines to the South China Sea, suggesting the dominant westward tracks and possible TC landfall on the south China. These statistical facts could be useful in the prediction of TC intraseasonal activity.

Keywords Tropical intraseasonal oscillation, Tropical cyclone, Path, Intensity, Western North Pacific

1 引言

西北太平洋上每年约生成 30 个热带气旋 (tropical cyclone, TC), 是世界上 TC 活动最活跃的海区。我国濒临西太平洋, 有着漫长的海岸线。每年台风季节, 从华南到华东、华北、东北沿海地区都可能受到 TC 的登陆影响, 每年约 8 个 TC 登陆我国 (李英等, 2004; 杨亚新, 2005)。西北太平洋上 TC 的生成、强度、路径、登陆活动具有季节性、年际和年代际变化特征, 对西北太平洋 TC 的活动预报是每年台风季节的关注重点。TC 业务预报的时间尺度主要有两个, 一是 5 d 左右的中短期预报, 一是季节尺度和年际尺度的短期气候趋势预测。由于动力中尺度数值模式的系统误差和大气物理量本身的噪音, 7 d 以上的预报准确率大大降低, 而气候模式的模拟能力和较低的时空分辨率仍无法达到预测的要求。因此, 对于 TC 季节和年际尺度的预测, 影响 TC 活动的季节和年际尺度的大气低频现象仍是有效的预报因子。

热带大气季节内振荡 (Madden-Julian Oscillation, MJO) 是发生在热带地区向东传播、纬向 1 波的大气季节尺度的最强信号, 主要周期为 40~50 d, 是热带地区季节气候预测的最佳因子 (Madden and Julian, 1994; 杨辉和李崇银, 2005; CLIVAR Madden-Julian Oscillation Working Group, 2009)。MJO 对印度和我国典型的季风降水有明显的影响 (董敏等, 2004; 黄菲等, 2008; 琚建华等, 2008; Bhanu Kumar et al., 2010), 与南海夏季风爆发的关系密切 (穆明权和李崇银, 2000), 2008 年我国低温雨雪冰冻天气也与大气环流的季节内振荡有关 (王允等, 2008; 马宁等, 2011)。在 MJO 调制 TC 活动方面, 国内外众多研究表明: MJO 在西太平洋的湿位相期往往与东亚夏季风强盛期一致, 此时 MJO 低层西风会进一步加强季风槽, 为 TC 活动加强提供了有利环境; TC 群发、强度、路径都会受到 MJO 的影响,

在 MJO 湿位相有更多、更强的 TC 生成, 在某些年份引起了登陆的异常 (Gray, 1979; Liebmann et al., 1994; Hall et al., 2001; Straub and Kiladis et al., 2003; 祝从文等, 2004; Nakazawa, 2006; Kim et al., 2008; Barrett and Leslie, 2009; 陈光华和黄荣辉, 2009)。

NOAA 气候预测中心用扩展经验正交分解方法 (Extended Empirical Orthogonal Function, EEOF) 开发了业务化的客观定量 MJO 指数用于短期气候预测, Barrett and Leslie (2009) 研究了该指数与北大西洋和东太平洋 TC 活动的联系, 提供了该区域 TC 活动季节预测的新业务化工具。本文利用该 MJO 指数对夏季西北太平洋 TC 活动, 包括生成、强度、路径和登陆等进行分类和影响统计研究, 定量讨论 MJO 对西北太平洋 TC 活动的系统调制关系, 为 TC 季节预测提供有效的预报业务工具。

2 资料和方法

本文使用资料有:

(1) 中国气象局上海台风所提供的 1978~2008 年 6~9 月西北太平洋热带气旋最佳路径数据集 (<http://www.typhoon.gov.cn> [2009-12-08])。TC 的强度等级参照中国国家 TC 等级标准 (GB/T 19201-2006), 分为热带低压 (tropical depression, TD, 最大平均风速在 10.8~17.1 m s⁻¹, 下同), 热带风暴 (tropical storm, TS, 17.2~24.4 m s⁻¹), 强热带风暴 (severe tropical storm, STS, 24.5~32.6 m s⁻¹)、台风 (typhoon, TY, 32.7~41.4 m s⁻¹)、强台风 (severe typhoon, STY, 41.5~50.9 m s⁻¹) 和超强台风 (super typhoon, Super TY, ≥51 m s⁻¹) 6 个等级, 包含南海 TC。

(2) NOAA 气候预测中心 (Climate Prediction Center, CPC) 提供的 1978~2008 年逐候 MJO 指数 (http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/daily_mjo_index/proj_norm_order.ascii [2009-12-08])。

NOAA CPC 的业务 MJO 指数每侯实时更新。该指数利用历史 200 hPa 速度势函数, 用 EEOF 来制作。第一个 EEOF 特征函数 (EEOF1) 由 10 个时间滞后模组成, 描述了约 50 d 周期纬向 1 波的东传振荡。10 个时滞模的 200 hPa 速度势异常中心分别位于全球中低纬带上 10 个不同的纬向位置: 80°E、100°E、120°E、140°E、160°E、120°W、40°W、10°W、20°E、70°E, 代表了 MJO 的 10 个位相; 将历史逐日 200 hPa 速度势异常投影到 EEOF1 的 10 个时滞模上进行回归, 最后将回归系数进行标准化即得到 MJO 指数。当 MJO 指数值为正时, 表示 200 hPa 速度势异常为正值, 将 10 个 MJO 空间模依次称为位相 1、位相 2、…、位相 10, 依次对应上述速度势中心位置。当指数值 ≥ 1.0 为正位相; 指数值 ≤ -1.0 则为反位相; $-1.0 < \text{指数值} < 1.0$ 为中间位相, 指 MJO 强度较弱的气候正常状态。

用 200 hPa 速度势函数表示的散度风反映了大尺度高空气流的辐合辐散。当高空为大尺度辐散环流时, 低层对应为辐合环流, 垂直方向为上升气流; 反之当高空辐合、低层辐散时为下沉气流。这里使用了 Mancuso (1967) 的速度势函数求解散度风的计算方法, 当速度势函数为正 (负) 值时, 表示辐合 (辐散)。

图 1 为 2008 年第 29 候的 MJO 指数值在各位相上的分布, 指数 3 为正最大值, 反映在 120°E 上空 200 hPa 为正最大速度势异常, 气流辐合; 指数 8 则为负最大值, 反映在 10°W 上空 200 hPa 为负最大速度势异常, 气流辐散。MJO 空间状态呈现在西太平洋上为对流抑制下沉, 在美洲区域为强对流上升分布。指数正负分布正好反映了明显的 MJO 纬

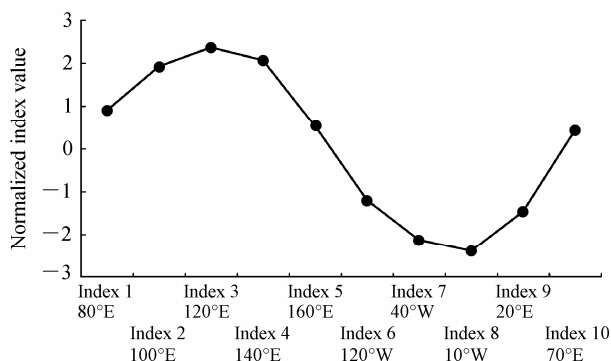


图 1 2008 年第 29 候的 MJO 指数值 (“Index 1” 表示位相 1, 速度势异常中心位于 80°E, 依此类推)

Fig. 1 The Madden-Julian oscillation (MJO) indices of the 29th pentad in 2008 (Index 1 denotes phase 1 and the velocity potential center locates at 80°E, and so forth)

向 1 波的分布。由于这 10 个空间模都属于 EEOF 的第一个特征向量, 它们具有一致性, 位相 3 和位相 8 互为反位相, 其余空间模态依此类推。在以下讨论中, 某 MJO 位相系指正位相, 需要指出反位相时则特别指出。

MJO 与 TC 活动关系统计和显著性检验方法如下:

以最佳路径数据集中 TC 中心近地面平均风速达到 12 m s^{-1} ——首次达到热带低压强度时为 TC 生成。根据 TC 生成时或首次达到某强度等级时的日期所属 MJO 位相, 对在各 MJO 位相时形成的各等级 TC 进行所属 MJO 位相归类。在统计检验中, 每个 MJO 位相的 TC 检验样本数都为某等级 TC 的总数。

参考 Hall et al. (2001)、Kim et al. (2008) 和 Barrett and Leslie (2009) 中使用的统计显著性检验方法, MJO 调节 TC 活动关系显著检验利用二项分布假设统计理论进行。具体如下:

假设 TC 活动频率在 MJO 各位相期间都是恒定的, 满足二项分布。原假设

$$H_0: \hat{p} = p_0,$$

其中 $\hat{p}$ 和 p_0 分别是每个 MJO 位相期间 TC 活动实际观测和期望的概率值, 期望值用每个 MJO 位相发生的气候频率来表示。原假设成立指 MJO 对 TC 活动无调制作用, 反之则 MJO 影响 TC 的活动。某类型 TC 活动在某位相期的显著检验值 Z 由公式 (1) 表示, 满足正态分布:

$$Z = \frac{p - p_{0\text{MJO}}}{\sqrt{p_{0\text{MJO}}(1 - p_{0\text{MJO}})/N_{\text{TC}}}}, \quad (1)$$

其中, p 是指 TC 活动实际观测的概率值, p_0 是指 MJO 位相发生的气候概率值, N_{TC} 是每种 TC 活动类型 (生成、强度) 的总个数 (次数), 下标 MJO 指某 MJO 位相期的位相状态, 如正位相 (p)、反位相 (n) 或属于中间的气候正常态 (e)。当样本量足够大时, 达到 95% 信度的显著性临界值为 1.96。当 $Z \geq 1.96$ 时, 认为这种 TC 活动比期望的要活跃; 反之, 当 $Z \leq -1.96$ 时, 则比期望的要偏弱。

关于 MJO 对 TC 路径的影响, 本文参考 Kim et al. (2008) 的研究方法, 将西北太平洋海区 ($0^\circ \sim 50^\circ \text{N}$, $100^\circ \text{E} \sim 180^\circ$) 划分为 5° (纬度) $\times 5^\circ$ (经度) 小区的网格, 统计 TC 活动位置在每个小区上

出现的次数, 位置频次偏多的区域反映 TC 在该区域活动活跃, 由频次分布区域和大值轴向可判断 TC 活动的主要路径和登陆地区。具体步骤为: 首先统计 31 年夏季平均的 TC 位置频次分布, 计算气候平均的频次分布概率。接着, 分别统计在 10 个 MJO 正位相期间的 TC 位置频次分布概率。最后, 进行 TC 频次分布异常显著性检验, 检验理论与上述相似。显著性检验值 T 的计算公式如下:

$$T = \frac{m - m_0}{\sqrt{m_0(1 - m_0)/n_{\text{MJO}}}}, \quad (2)$$

其中, m 是某 MJO 位相期间 TC 频次分布概率, m_0 为 TC 频次分布气候平均概率, n_{MJO} 为某 MJO 位相期间的 TC 分布总频次。 T 遵从正态分布, 当统计检验值超过阈值, 则 TC 频次分布显著异常, MJO 对 TC 路径有显著影响。

本文统计时段为 1978~2008 年的夏季(6~9 月)。

3 统计结果

3.1 MJO 对 TC 生成和强度的调制

MJO 位相 1~10 的不同空间分布态对西北太平洋 TC 生成和强度的调节能力不同。从 TD 的生成即 TC 生成来看(表 1), 在位相 8 时, 在夏季生成共 597 个 TD 中, 有 107 个在正位相时生成, 概率为 0.24, 相应的位相 8 出现的气候概率为 0.15(见表 2), 其统计检验值 Z 为 2.02, 通过 95% 的信度检验, TC 在此期间生成个数显著偏多; 在反位相时 TC 生成个数仅为 50 个, Z 值为 -2.56, 显著偏少。总体来看, MJO 位相 3~5 期间, 即高空辐合中心位于 $120^{\circ}\text{E} \sim 160^{\circ}\text{E}$ 时, Z 都为负值, 且小于 -1.96, 则在此期间 TC 生成显著偏少; 而在位相 8~10 期间, 即高空辐合中心位于 $10^{\circ}\text{W} \sim 70^{\circ}\text{E}$ 时, Z 都为正值, 且大于 1.96, 则在此期间 TC 生成显著偏多。位相 3~5 与位相 8~10 正好互为反位相, Z 统计值符号相反, 统计结果是合理的。MJO 位相 3~5 和 8~10 对 TC 生成的调节作用是显著的, 而其他 MJO 空间态则无显著调节作用。在位相 8~10 期间, 即 MJO 对流活跃区位于 $120^{\circ}\text{E} \sim 160^{\circ}\text{E}$ 的西太平洋(该区域正是西北太平洋 TC 生成的主要区域), TC 生成个数大约是 MJO 位相 3~5 (MJO 对流抑制区位于西太平洋上) 期间生成的 1~2 倍。

从表 1 还可看到, 随着 TC 强度的增强, 能达到显著调制作用的 MJO 位相逐渐减少。位相 5、6

和 1、10 是对 STS 以上强度等级 TC 有显著调制作用的主要位相。STY 等级受到 MJO 影响也较大, MJO 位相 9、10、1 和 5~7 都对 STY 的生成有显著影响; 而对于 Super TY, 基本没有达到显著调节作用的 MJO 位相。位相 10 是个值得注意的 MJO 空间模态, 除了 Super TY 外, 其余所有强度等级 TC 的活动都受到它的显著调制: 在正位相时, 各等级 TC 形成显著偏多, 而在其反位相时, 各等级 TC 形成显著偏少。位相 10 的高空辐合中心是 70°E , 即印度洋的上空, 正是 MJO 的主要活动区, 其正(反)位相对应着 MJO 对流在印度洋的抑制(活跃), 在强 MJO 事件中相应为夏季风的中断与盛行, MJO 可能籍此对 TC 发展产生影响。

因此, 从表 1 的定量统计检验可见, MJO 对西北太平洋 TC 的生成及强度都有显著调制作用。虽然如此, 非 MJO 位相期间生成的 TC 比在 MJO 位相期间多得多, 即 MJO 对 TC 的生成和强度影响仅是调节作用, 而非决定作用。

3.2 MJO 对 TC 生成的位置、路径和登陆的影响

3.2.1 MJO 对 TC 生成位置的影响

绘制对夏季 TC 生成有显著影响的位相 5 正、反位相时期 TD 生成的位置图(图 2), 以夏季 TD 生成平均位置点为基点画东西南北分向的坐标线, 可反映 TC 生成位置在不同位相时的分布。可见, 在正位相时 TC 在第 1、2 象限即约 17°N 以北的西北太平洋北部生成多, 而在 3、4 象限即西北太平洋南部生成少; 在反位相时正相反: 在西北太平洋北部生成少, 而在南部生成多。位相 3、4 对 TC 生成位置的影响与位相 5 类似, TC 生成位置有南北向的区别, 而在位相 8~10 时的影响则是相反的(图略)。如前述, 由于位相 3~5 对 TC 生成的影响作用基本一致, 与位相 8~10 正是反位相, 这些空间模组成同一个 EEOF1, 当 MJO 位相 8~10 时, 有利于 TC 生成在西北太平洋偏南区域; 而在其反位相, 即位相 3~5 时, TC 易生成在偏北区域。可见, MJO 对 TC 的生成位置也有调节作用, 这在 Kim et al. (2008) 的研究中也发现有类似现象。

TC 生成位置可以部分决定 TC 的路径和登陆, 这在以前对 TC 的研究中有发现, 当 TC 生成于太平洋北部时, 往往对应东北转向路径, 而生成在南部时, 多为西行登陆路径; 生成偏西位置比偏东位置易登陆 (Harr and Elsberry, 1995; Camargo et al., 2007a, 2007b)。因此, MJO 对 TC 路径也应有影响。

表 1 1978~2008 年夏季 MJO 各位相期间西北太平洋各强度等级 TC 形成个数及显著性检验统计值

Table 1 The genesis numbers and significant test statistics of tropical cyclone (TC) in the western North Pacific (WNP) during the Madden-Julian oscillation (MJO) phases in boreal summer for the period 1978–2008

指数名称	中心位置	TD				TS				STS			
		正位相		反位相		正位相		反位相		正位相		反位相	
		统计检		统计检		统计检		统计检		统计检		统计检	
		观测个数	验值	观测个数	验值	观测个数	验值	观测个数	验值	观测个数	验值	观测个数	验值
Index 1	80°E	74	0.8	90	−1.43	71	1.97*	68	−2.22*	65	2.54*	55	−2.39*
Index 2	100°E	49	−1.79	97	1.15	50	−0.36	74	0.1	39	−0.87	65	0.4
Index 3	120°E	46	−2.46*	108	2.14*	39	−2.21*	83	0.98	34	−1.9	70	0.85
Index 4	140°E	56	−3.6*	106	1.63	54	−2.43*	87	1.23	52	−1.39	79	1.83
Index 5	160°E	85	−2.28*	92	2.56*	72	−2.03*	81	2.85*	64	−1.5	68	2.52*
Index 6	120°W	91	−1.08	72	0.34	73	−1.41	73	2.05*	63	−1.16	63	2.05*
Index 7	40°W	94	0.71	52	−1.67	71	−0.36	48	−0.92	57	−0.77	37	−1.43
Index 8	10°W	107	2.02*	50	−2.56*	84	1.11	44	−2.07*	70	0.85	38	−1.81
Index 9	20°E	101	2.51*	74	−3.01*	85	2.31*	65	−2.43*	68	1.54	58	−1.88
Index 10	70°E	93	2.47*	92	−2.44*	82	2.79*	75	−2.5*	74	3.22*	65	−2.14*
总个数		597				502				426			
指数名称	中心位置	TY				STY				Super TY			
		正位相		反位相		正位相		反位相		正位相		反位相	
		统计检		统计检		统计检		统计检		统计检		统计检	
		观测个数	验值	观测个数	验值	观测个数	验值	观测个数	验值	观测个数	验值	观测个数	验值
Index 1	80°E	42	1.51	36	−2.36*	25	1.74	15	−2.62*	10	0.72	6	−1.97*
Index 2	100°E	33	0.37	39	−0.71	24	1.91	22	−0.27	12	1.78	6	−1.46
Index 3	120°E	34	0.34	47	0.41	24	1.73	29	1.16	12	1.64	12	0.46
Index 4	140°E	37	−1.04	53	1.19	20	−0.72	32	1.67	9	−0.45	8	−0.96
Index 5	160°E	40	−1.95	48	2.21*	15	−2.76*	27	1.93	8	−1.44	7	−0.56
Index 6	120°W	42	−1.27	44	1.72	20	−1.46	28	2.36*	8	−1.27	12	1.39
Index 7	40°W	37	−1.1	35	0.52	24	0.14	26	2.24*	9	−0.48	12	1.64
Index 8	10°W	47	0.41	33	−0.34	27	0.71	17	−0.41	10	−0.21	10	0.61
Index 9	20°E	47	1.22	41	−1.48	27	1.32	17	−2.13*	8	−0.53	7	−1.61
Index 10	70°E	50	2.41*	44	−1.98*	29	2.30*	18	−2.56*	9	0.11	9	−1.42
总个数		297				159				71			

*为超过显著信度 95%检验临界值±1.96 的值。

表2 1978~2008年夏季 MJO各位相出现的候数和气候概率

Table 2 The pentad numbers and climate frequency of MJO phases in boreal summer for the period 1978–2008

指数名称	中心位置	正位相		反位相	
		候数	概率	候数	概率
Index 1	80°E	88	0.11	134	0.17
Index 2	100°E	81	0.10	113	0.15
Index 3	120°E	84	0.11	116	0.15
Index 4	140°E	113	0.15	119	0.15
Index 5	160°E	138	0.18	93	0.12
Index 6	120°W	131	0.17	90	0.12
Index 7	40°W	114	0.15	84	0.11
Index 8	10°W	116	0.15	91	0.12
Index 9	20°E	104	0.13	132	0.17
Index 10	70°E	95	0.12	150	0.19

3.2.2 MJO 对 TC 路径和登陆的影响

Nakazawa (2006)、Kim et al. (2008)、Barrett and Leslie (2009) 用不同的方法对 MJO 与 TC 路径和登陆的关系进行了研究。本文根据第 2 节所述方法研究 MJO 对 TC 路径的影响。

由图 3 可见，南海至菲律宾和中国台湾岛海域是 TC 活动最多的海区，频次图的最大值轴向反映了 TC 的主要移动路径为西行、西北行与东北转向 3 种类型，登陆地区包括从 10°N 以北到 50°N 以南的东亚大陆沿海及日本列岛。

由 TC 活动位置频次统计结果（见图 4）可见，频次分布概率正异常区表示 TC 活动在该区域该位相时异常活跃；负异常区则相反，表示 TC 活动在该区域该位相时受到抑制，其分布反映了某类型路

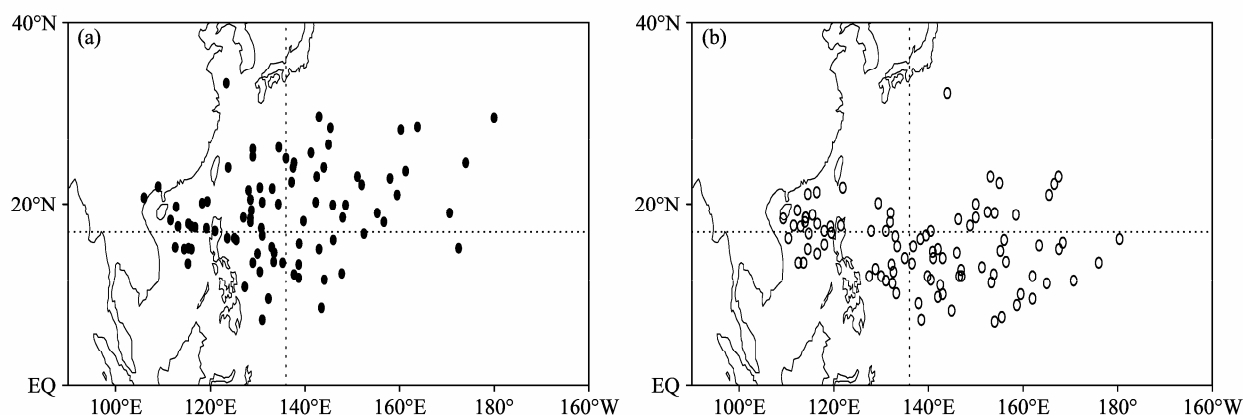


图2 位相5期间夏季热带低压生成位置: (a) 正位相; (b) 反位相 [虚线交点为夏季热带低压生成平均位置 (16.9°N, 136.0°E)]

Fig. 2 The genesis positions of TC in phase 5 in boreal summer: (a) Positive phase; (b) negative phase [the intersection of dashed lines denotes the mean position (16.9°N, 136.0°E) of TC genesis in boreal summer]

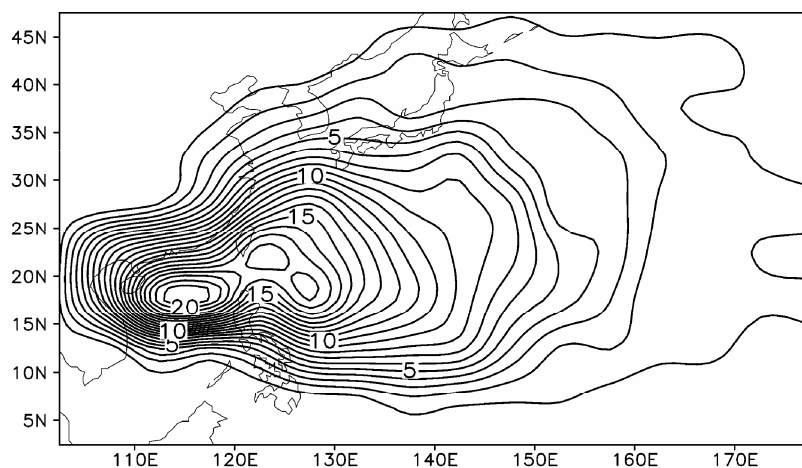


图3 1978~2008年夏季气候平均的西北太平洋TC位置年频次

Fig. 3 The climatological annual mean frequencies of TC passage in boreal summer for the period 1978–2008

径或登陆活动的异常, 阴影区为通过 95% 信度显著性检验区域。在 MJO 位相 1~4 和位相 10 时, 菲律宾及其以西到南海海域、华南沿海地区都是 TC 活动负频次概率异常区域, 反映该区域 TC 活动异常偏弱以及登陆华南的 TC 也偏少。这 5 个连续的 MJO 位相特征是: 高空环流辐合中心从印度洋地区东移到西太平洋, 即对流抑制区域位于这些地区, 不利于 TC 在西北太平洋西南部的活动。动态地来看, 即 MJO 从 20°E (位相 9) 开始, 随着 MJO 对流的东传, TC 的正异常频次中心有规律地从西太平洋 (130°E~145°E 之间) 向西北方向移动 (部分登陆、部分向北转向), 正频次大值轴向反映了 TC 在西太平洋东部生成后西北行或西北行后转向的主要路径。这可能与 MJO 异常东风的东撤 (副高的东北撤) 有关。如图 5 中的示意路径所示: TC 一部分可西行到达台湾以东, 125°E 附近; 另一部

分到达华北沿海、朝鲜半岛和日本南部, 并可能在这些地区登陆; 还有一部分活跃在日本以东海域; 其中位相 2、3 与位相 10、1 的区别是 TC 活跃显著区的位置更偏北。

当 MJO 位相 5~8, 即位相 1~3 和 10 的反位相时 (图 4e-h), TC 活动的情况正相反: 菲律宾以西、南海到华南沿海的 TC 活动频次异常概率为正, 而在菲律宾以东的西北太平洋上 TC 频次异常概率为负, 反映在这些位相期间生成于菲律宾附近并西行到华南沿海或登陆的 TC 偏多。位相 6 时, 在西北太平洋 140°E 以东, 25°N 以北的 TC 活动频次异常偏多, 反映生成在该区域或海上转向不登陆路径 TC 偏多; 在位相 7 时, 日本南部区域 TC 频次显著偏多, 表明东北转向登陆日本的路径偏多; 而到了位相 8, 这一频次偏多区域还西移到朝鲜半岛、渤海和我国东北地区, 表明登陆这些区域的概

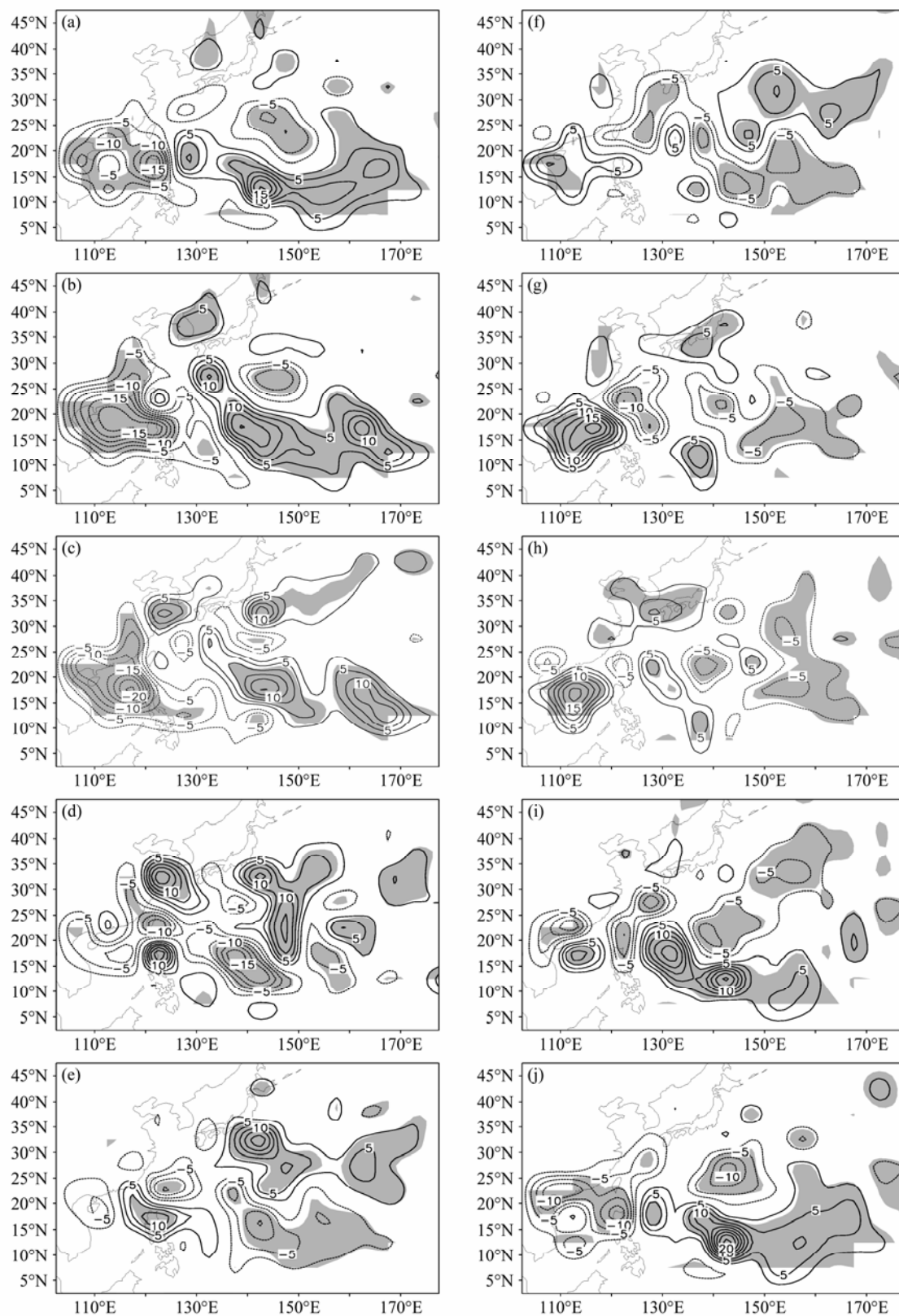


图4 (a-j) 夏季MJO位相1~10期间的TC位置频次异常概率(阴影通过95%以上信度检验, 实线和虚线分别为正值和负值)

Fig. 4 The probability anomalies of TC passage frequencies in boreal summer for (a-j) MJO phases 1-10 (shadings are above 95% confidence level, the solid and dashed lines are positive and negative values, respectively)

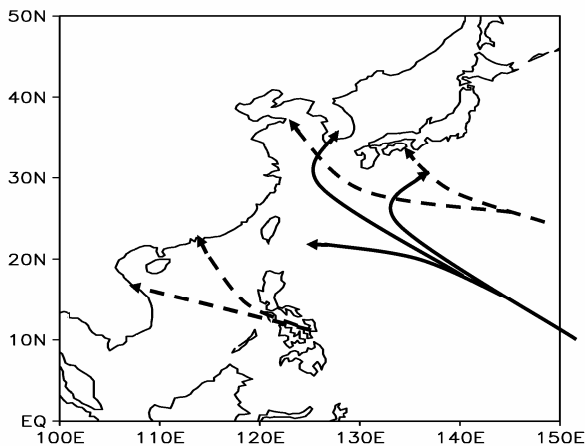


图5 夏季MJO各位相期间TC活动主要路径及登陆地区示意图(实线指示位相1~4和10路径,虚线指示位相5~8路径)

Fig. 5 Schematic diagram of TC paths and landing regions during different MJO phases in boreal summer (the solid lines denote paths of Phases 1-4 and 10, the dashed lines denote paths of Phases 5-8)

率加大。这些 MJO 位相特征是高空辐合中心在 160°E 及以东的太平洋中东部,对流在这些地区上空抑制,抑制 TC 在西太平洋中东区域的活动,而在印度洋到西太平洋西部恰为对流活跃时期,有利于 TC 在此区域生成和发展。

位相 9 中 TC 异常活动特征(图 4i)一部分类似位相 1~4 的情况,在 25°N 以南、菲律宾以东的西太平洋上 TC 频次显著偏多,另一部分则类似位相 5~8 的情况,在南海区域也存在 TC 频次显著偏多的活动特征,但登陆华南的活动仍为偏少。

以下定量检验 MJO 对登陆我国 TC 的影响。将 31 年夏季登陆东亚大陆的 254 个 TC 按照登陆日期所属 MJO 位相进行分类统计,并用第 2 节所述方法进行显著性检验。本文中将进入海岸线 100 km 内的 TC 都认为具有登陆影响,以首次发生登陆影响的日期确定所属 MJO 位相,第二次进入影响不再统计。由于登陆我国 TC 主要在华南和华东地区,因此将登陆类型分为华南登陆(包括部分登陆越南的 TC)和华东登陆,即在 18°N~25°N 和 25°N~40°N 登陆两类(图 5)。统计结果如表 3。

可见, MJO 的位相 2、3 和 7 对登陆华南 TC 有显著调节作用:位相 2、3 的正位相时,登陆华南 TC 显著偏少,而在位相 7 的正(反)位相时,登陆华南 TC 显著偏多(偏少),与图 4b、4c、4h 的特征一致。

图 6 为在位相 2 和 7 时登陆华南的 TC 路径,可见登陆个数的显著区别,在位相 2 正位相时,南海和华南沿海的活动偏少,而在位相 7 时正相反。

MJO 对登陆华东区域 TC 的调节作用不显著, 10 个位相的 TC 登陆统计都未通过显著性检验。但可看到,位相 2~6 这 5 个连续位相的检验指数都为负值(表 3),而位相 1 和位相 7~10 都为正值,反映了 MJO 对流在西太平洋地区抑制位相时登陆华东 TC 可能减少,而加强位相时登陆华东 TC 可能增多, MJO 对登陆华东 TC 的影响仍然存在。

表 3 夏季各 MJO 位相期间登陆华东、华南的 TC 个数统计和显著性检验

Table 3 Statistics and significance tests of TCs landing East China and South China during MJO phases in boreal summer

指数名称	中心位置	华东 (25°N 以北)				华南 (25°N 以南)			
		正位相		反位相		正位相		反位相	
		观测个数	统计检验值	观测个数	统计检验值	观测个数	统计检验值	观测个数	统计检验值
Index 1	80°E	8	0.24	9	-0.73	13	-0.96	24	-0.31
Index 2	100°E	6	-0.32	13	1.24	5	-2.79*	29	1.77
Index 3	120°E	5	-0.82	12	0.79	7	-2.37*	30	1.85
Index 4	140°E	5	-1.57	12	0.69	16	-1.27	29	1.47
Index 5	160°E	8	-1.16	10	0.84	18	-1.76	15	-0.67
Index 6	120°W	10	-0.33	8	0.17	27	0.47	13	-1.05
Index 7	40°W	11	0.50	6	-0.42	30	1.95	4	-3.17*
Index 8	10°W	11	0.44	4	-1.40	28	1.39	12	-1.35
Index 9	20°E	10	0.46	7	-1.34	20	0.07	17	-1.76
Index 10	70°E	9	0.39	9	-1.12	15	-0.76	28	-0.09

注: *为超过显著信度 95%检验临界值±1.96 的值。

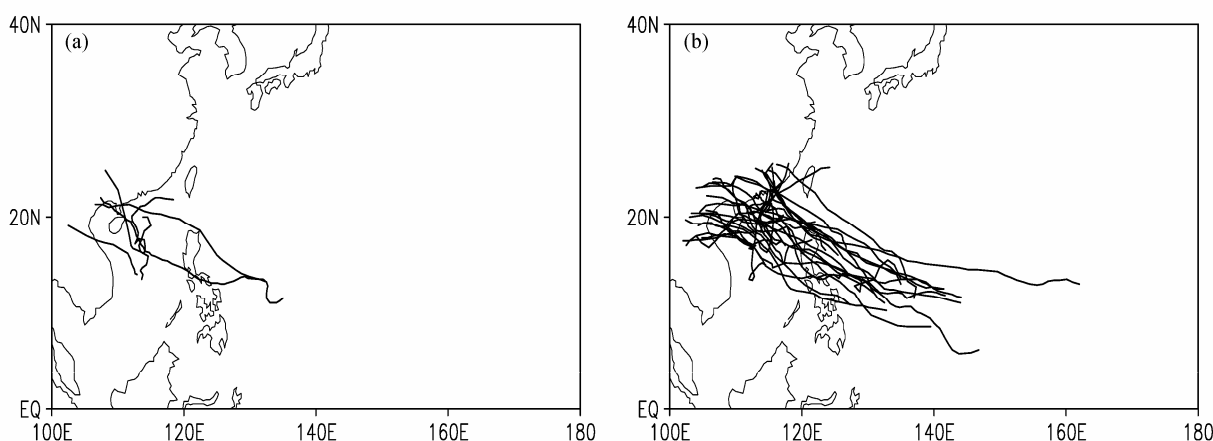


图6 夏季在MJO (a) 位相2和 (b) 位相7时登陆华南及其以南的TC路径

Fig. 6 The paths of TC landing in and to the south of South China in boreal summer during MJO (a) Phase 2 and (b) Phase 7

4 总结

本文利用 200 hPa 势函数定义的 10 个 MJO 位相指数和 31 年夏季 TC 资料, 对 MJO 影响西北太平洋 TC 活动的作用进行了定量统计和显著性检验, 结果表明: MJO 对西北太平洋 TC 的生成、强度、路径和登陆活动都有显著影响, 主要结论如下:

(1) MJO 对 TC 生成的调制中, MJO 位相 3~5 时, 即当高空辐合中心位于 $120^{\circ}\text{E}\sim 160^{\circ}\text{E}$ 期间, TC 生成偏少, 而其反位相或位相 8~10, 即当高空辐合中心位于 $10^{\circ}\text{W}\sim 70^{\circ}\text{E}$ 时则相反, TC 生成偏多。位相 8~10 期间生成的 TC 大约是位相 3~5 期间生成的 1~2 倍。随着 TC 强度的增强, 能达到显著调制作用 MJO 位相逐渐减少。当高空辐合中心位于印度洋上空 (位相 10) 时, 除 Super TY 外, 所有强度等级 TC 都受到它的显著调制作用: 在正位相时, 各强度等级 TC 形成显著偏多, 而在其反位相时则相反。

(2) MJO 对 TC 生成位置、路径和登陆也具有调节作用: 位相 3~5 时, 西北太平洋 TC 生成位置偏北, 而位相 8~10 时 TC 生成位置偏南; 位相 1~4 及位相 10 期间, TC 主要活动在菲律宾以东的西北太平洋东南部和西北部, 西北行或东北转向路径为主, 有可能登陆华东、华北及朝鲜半岛, 而生成在南海或西行登陆华南的活动偏弱; 在位相 5~8 期间, TC 以生成在菲律宾附近西行到华南沿海或登陆路径为主, 同时还存在一条 TC 生成在西北太平洋东北部, 向西北偏北行后登陆日本的活跃路径; MJO 对夏季登陆华南 TC 有显著调节作用, 位

相 2、3 的正位相时, 登陆华南 TC 显著偏少, 在位相 7 的正 (反) 位相时, 登陆华南 TC 显著偏多 (偏少)。

本文利用 NOAA CPC 客观 MJO 业务指数研究了 MJO 对西北太平洋 TC 活动的影响, 这些统计结果将有助于西北太平洋 TC 活动季节内预测。由于生成在非 MJO 位相期间的 TC 更多, 因此, MJO 对 TC 的活动影响属于调节作用, 而非直接决定 TC 活动的大气现象。关于 MJO 对 TC 活动产生影响的大尺度环境特征及可能物理机制将另文阐述。

致谢 感谢南京信息工程大学管兆勇教授对本文的有益指导。感谢审稿人提出的富有建设性的意见。本文所有插图使用 Grads 软件绘制。

参考文献 (References)

- Barrett B S, Leslie L M. 2009. Links between tropical cyclone activity and Madden-Julian oscillation phase in the North Atlantic and northeast Pacific basins [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 137: 727–744.
- Bhanu Kumar I O S R U, Ramalingeswara Raol S, Ranganathan S, et al. 2010. Role of intra-seasonal oscillations on monsoon floods and droughts over India [J]. *J. Atmos. Sci.*, 46 (1): 21–28.
- Camargo S J, Robertson A W, Gaffney S J, et al. 2007a. Cluster analysis of typhoon tracks. Part I: General properties [J]. *J. Climate*, 20: 3635–3653.
- Camargo S J, Robertson A W, Gaffney S J, et al. 2007b. Cluster analysis of typhoon tracks. Part II: Large-scale circulation and ENSO [J]. *J. Climate*, 20: 3654–3676.
- 陈光华, 黄荣辉. 2009. 西北太平洋低频振荡对热带气旋生成的动力作用及其物理机制 [J]. *大气科学*, 33 (2): 205–214.
- Chen Guanghua, Huang Ronghui. 2009. Dynamical effects of low frequency oscillation on tropical cyclogenesis over the western North Pacific and the physical

- mechanisms [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33 (2): 205–214.
- CLIVAR Madden-Julian Oscillation Working Group. 2009. MJO simulation diagnostics [J]. J. Climate, 22: 3006–3030.
- 董敏, 张兴强, 何金海. 2004. 热带季节内振荡时空特征的诊断研究 [J]. 气象学报, 62 (6): 821–830. Dong Min, Zhang Xingqiang, He Jinhai. 2004. A diagnostic study on the temporal and spatial characteristics of the tropical intraseasonal oscillation [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 62 (6): 821–830.
- Gray W M. 1979. Hurricanes: Their formation, structure and likely role in the tropical circulation [M]// Shaw D B, Ed. Meteorology over the Tropical Oceans. London: Royal Meteorological Society, 155–218.
- Hall J D, Matthews A J, Karoly D J. 2001. The modulation of tropical cyclone activity in the Australian region by the Madden-Julian oscillation [J]. Mon. Wea. Rev., 129: 2970–2982.
- Harr P A, Elsberry R L. 1995. Large-scale circulation variability over the tropical western North Pacific. Part I: Spatial patterns and tropical cyclone characteristics [J]. Mon. Wea. Rev., 123: 1225–1246.
- 黄菲, 黄少妮, 张旭. 2008. 中国降水季节内振荡的气候特征分析 [J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 38 (2): 173–177. Huang Fei, Huang Shaoni, Zhang Xu. 2008. Study on the climatological intraseasonal oscillation of Chinese rainfall [J]. Periodical of Ocean University of China (in Chinese), 38 (2): 173–177.
- 据建华, 孙丹, 吕俊梅. 2008. 东亚季风区大气季节内振荡经向与纬向传播特征分析 [J]. 大气科学, 32 (3): 523–529. Ju Jianhua, Sun Dan, Lü Junmei. 2008. The relay character analysis of the zonal and longitudinal propagations of the atmospheric intraseasonal oscillation in the east Asian monsoon region [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 32 (3): 523–529.
- Kim J H, Ho C H, Kim H S, et al. 2008. Systematic variation of summertime tropical cyclone activity in the western North Pacific in relation to the Madden-Julian oscillation [J]. J. Climate, 21: 1171–1191.
- 李英, 陈联寿, 张胜军. 2004. 登陆我国热带气旋的统计特征 [J]. 热带气象学报, 20 (4): 14–23. Li Ying, Chen Lianshou, Zhang Shengjun. 2004. Statistical characteristics of tropical cyclone making landfalls on China [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 20 (1): 14–23.
- Liebmann B, Hendon H H, Glick J D. 1994. The relationship between tropical cyclones of the western Pacific and Indian oceans and the Madden-Julian oscillation [J]. J. Meteor. Soc. Japan, 72 (3): 401–411.
- 马宁, 李跃凤, 据建华. 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 Ning, Li Yuefeng, Ju Jianhua. 2011. Intraseasonal oscillation characteristics of extreme cold, snowy and freezing rainy weather in southern China in early 2008 [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 30 (2): 318–327.
- Madden R A, Julian P R. 1994. Observations of the 40–50-day tropical oscillation—A review [J]. Mon. Wea. Rev., 122: 814–837.
- Mancuso R L. 1967. A numerical procedure for computing fields of stream function and velocity potential [J]. J. Appl. Meteor., 6: 994–1001.
- 穆明权, 李崇银. 2000. 1998 年南海夏季风的爆发与大气季节内振荡的活动 [J]. 气候与环境研究, 15 (4): 375–387. Mu Mingquan, Li Chongyin. 2000. On the outbreak of South China Sea summer monsoon in 1998 and activity of atmospheric intraseasonal oscillation [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 15 (4): 375–387.
- Nakazawa T. 2006. Madden-Julian oscillation activity and typhoon landfall on Japan in 2004 [J]. J. Meteor. Soc. Japan, 2: 136–139.
- Straub K H, Kiladis G N. 2003. Interactions between the boreal summer intraseasonal oscillation and higher-frequency tropical wave activity [J]. Mon. Wea. Rev., 131: 945–960.
- 王允, 张庆云, 彭京备. 2008. 东亚冬季环流季节内振荡与 2008 年初南方大雪关系 [J]. 气候与环境研究, 13 (4): 459–467. Wang Yun, Zhang Qingyun, Peng Jingbei. 2008. Relationship between the intraseasonal oscillation of East Asian monsoon circulation and the heavy snow over southern China in boreal winter of 2007/2008 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 13 (4): 459–467.
- 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.
- 杨亚新. 2005. 西北太平洋热带气旋发生的时空变化特征 [J]. 海洋预报, 22 (1): 86–91. Yang Yaxin. 2005. Spatial-temporal variation feather of occurrence of tropical cyclone in western North Pacific [J]. Marine Forecasts (in Chinese), 22 (1): 86–91.
- 祝从文, Nakazawa T, 李建平. 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 Congwen, Nakazawa T, Li Jianping. 2004. Modulation of tropical depression/cyclone over the Indian–Western Pacific oceans by Madden-Julian oscillation [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 62 (1): 42–50.