

西北太平洋热带气旋群发与MJO的联系

何洁琳^{1, 2} 段安民² 黄永森³

(1 广西区气候中心, 南宁 530022; 2 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; 3 广西玉林市气象局, 玉林 537000)

摘要: 利用客观MJO指数及定义西北太平洋热带气旋(TC)群发标准, 初步研究了西北太平洋TC群发特征及其与MJO的相互作用, 结果表明: (1) 30°N以南的西北太平洋海域平均每年发生3.6次TC群发过程, 在1978—2009年间TC群发呈现出减少的变化趋势, 但群发强度无明显变化; (2) 当MJO强对流位于印尼群岛东部(即位相5)和西太平洋东部(即位相7)时西北太平洋TC最易群发; 而当MJO对流主要位于非洲(即位相1)和印度洋西部时(即位相2)时, TC群发受到抑制; (3) TC群发活动后MJO的传播发生变化, 这种变化与TC群发活动本身及其引起的海气相互作用通量的改变有关。

关键词: 热带气旋, 群发, MJO

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2013.03.007

On the Relationship between MJO and Clustering of Tropical Cyclone Activities over the Western North Pacific

He Jielin^{1, 2}, Duan Anmin², Huang Yongsen³

(1 Climate Center of Guangxi, Nanning 530022 2 State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics (LASG), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029 3 Yulin Meteorological Bureau of Guangxi, Yulin 537000)

Abstract: By using the object MJO index and defining the clustering of tropical cyclone (TC) activities over the Western North Pacific (WNP), the clustering characteristics of tropical cyclones and their associations with MJO are discussed. The results show that 1) the frequency of the clustering of TCs is 3.6 per year in the south of 30°N over the WNP. There was a decreasing trend of the frequency of the clustering TC activities during 1978 to 2009, while there was not any trend of the intensity. 2) The clustering of TC activities favor occurring in MJO phase 5 and 7, when the strong MJO convection locates in the east of Indonesia and the east of western Pacific, while they seldom occur in MJO phase 1 and 2, when the strong MJO convection locates in Africa and the west of Indian Ocean. 3) The characteristics of MJO propagation change after the clustering TC activities, such changes may possibly be related to the cluster activities themselves and the changes of the air-sea variables which they have brought about.

Keywords: tropical cyclone, clustering, MJO

1 引言

热带气旋(TC)活动与热带大气季节内振荡(Madden-Julian Oscillation, 简称MJO)关系密切。一方面, MJO调制着TC的活动, MJO湿位相期间所在区域的TC活动易群发。Gray^[1]最早探讨了MJO与TC的关系, 发现北大西洋TC生成在时间上有集中发生的趋势: 2~3周的TC较多生成之后是2~3周TC较少生成的阶段; Nakazawa^[2]利用向外长波辐射资料分析

得到TC在两个半球夏季MJO活跃位相中群发现象; Liebmann等^[3]认为在西太平洋湿位相期间有更多的强风暴和台风生成是因为在此期间有更多的热带低压生成, MJO解释了大部分的TC活动变化。MJO湿位相期间大气低层持续的较大尺度的低频气旋性环流以及不稳定初始扰动易生成和有利的垂直风切变条件, 为TC的生成创造了适宜的环境, 导致TC的相继群发^[4]。另一方面, TC活动极大地影响海洋状况。TC经过的局地海表温度显著降低; 在台风环流内海气界面热量交换非常强烈, 潜热通量、有效反射辐射等都出现显著变化; TC强度突变或移行较缓时易引起海洋时空尺度较大的强烈响应^[5, 6]。研究表明, 积云对流加热反馈为主的CISK-Kelvin和CISK-Rossby波理论^[7-10],

收稿日期: 2012年5月11日; 修回日期: 2012年7月18日
第一作者: 何洁琳(1972—), Email: hjlchinese@163.com
资助信息: 广西自然科学基金项目(210GXNSFA013010);
中科院大气物理研究所LASG开放课题; 中国气象局华南区域气象中心科技攻关项目(GRMC2012Z04)

以及因边界层海气相互作用引起的高频不稳定Kelvin-Rossby耦合波理论是解释季节内振荡水平传播的主要机制^[11-14]。因此,当TC群发时,其所产生的对流潜热、对海洋卷夹作用、降低海表温度等的影响等达到一定的时空尺度,很可能对MJO产生反馈影响。西北太平洋TC群发与MJO的相互作用值得研究。本文主要研究西北太平洋的TC群发活动的特征,分析TC群发后引起的海气相互作用,对TC群发与MJO的相互联系进行初步探讨。

2 资料和方法

(1) 澳大利亚气象局提供的1979—2009年实时多变量逐日MJO客观指数(RMM)资料,来自官方网站<http://www.bom.gov.au>;

(2) 上海台风研究所提供的1978—2009年西北太平洋热带气旋最佳路径集;

(3) 美国国家海洋和大气局提供的1979—2009年逐日平均向外长波辐射(OLR)资料及NCEP-NCAR 850hPa逐日平均再分析风场与代表海气作用的有关物理量:表面潜热通量、表面温度和表面向下日照辐射通量等逐日平均再分析资料(高斯格点分布)^[15]。

RMM指数是Wheeler等^[16]在前人研究的指数方法基础上改进后得到的一种可进行实时监测和预测MJO活动的指数。该指数的制作方法是利用近赤道(15°S—15°N)平均的对外长波辐射(OLR)、高层(200hPa)和低层(850hPa)的纬向风进行EOF分析,得到前两个主成分主要代表了MJO的变化,其对应的时间序列定义为RMM1、RMM2,可反映MJO的强度和位相变化,具体请参见文献[16]。该指数不必进行主观的带通滤波而直接具有滤波的效果,比较客观,已在印度和澳洲季风爆发监测、降雨诊断和预测的业务中得到应用。本文应用该指数对MJO的位相和强度进行客观统计分析。

TC群发性表现在时空上,即在相同区域相同时段内有多多个TC发生。这种TC群发现象已经得到验证,如在热带辐合区内多个台风同时发展^[17],在大气季节内振荡的湿位相期间热带气旋易集中出现^[1-4]等。为便于定量研究,根据TC群发需多个TC在同时同区域发生的要求,本文对TC群发定义为:根据西北太平洋热带气旋最佳路径集,在30°N以南的西北太平洋海域(含南海)内,在同一时刻出现3个编号TC记录为群发;每6h一次的TC群发记为一次群发记录;持续的TC群发记录为同一次群发过程。同时,参考Emanuel^[18]定义的热带气旋潜在灾害指数(PDI)定义TC群发强度为群发过程中所有TC每6h一次最大风速

立方的累积值。根据定义,统计TC群发结束后20d内MJO位相情况。

参考Hall等^[19]、Kim等^[20]和Barrett等^[21]的研究方法,利用二项分布假设统计理论进行TC群发事件和MJO事件发生的显著性检验。具体为:假设TC群发次数在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群发记录数和期望的概率值,期望值用每个MJO位相发生的气候频率来表示。原假设成立则TC群发在各MJO位相期间一致,MJO对群发无影响,反之则MJO影响TC的活动。TC群发活动在某位相期的显著检验值Z由式(1)表示,满足正态分布。

$$Z_{\text{MJO_Phase}} = \frac{\hat{p}_{\text{MJO_Phase}} - P_{0\text{MJO_phase}}}{\sqrt{P_{0\text{MJO_phase}}(1 - P_{0\text{MJO_phase}}) / N_{\text{MJO_phase}}} \quad (1)$$

式中 N 是TC群发记录的总次数,MJO_phase指某MJO位相期的位相状态,这里是RMM指数定义的1到8位相。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。

当统计TC群发后MJO位相次数出现显著性时,则 \hat{p} 值以MJO位相次数值代替。

3 统计结果

3.1 西北太平洋 TC 群发的特征

根据本文的定义,1978—2009年的32a间共有940次TC群发记录,平均每年29.4次;而TC群发过程为116次,平均每年3.6次。1994年TC群发记录最多,有121次记录,9次群发过程;其次为1978年,有103次TC群发记录,发生5次群发过程;而最少的是1999年,无一次TC群发。图1为32a标准化的TC群发记录次数(1个标准差为26.7次),可见,32a间,年TC群发记录呈现出减少的变化趋势,其趋势显著性通过95%信度检验,每10a减少0.36次TC群发记录。图2为32a逐年累积TC群发强度曲线变化。可见,TC群发最多的年份并未对应TC群发强度最强的年份,TC群发多时可能为强度等级较小的热带低压型群发。TC群发强度在32a里也未出现变化趋势。这表明,虽然TC群发记录可能减少,但群发时的强度未出现气候变化趋势。

3.2 TC 群发与 MJO 的联系

利用上述TC群发的统计结果及RMM指数,进一步统计TC群发与MJO特征的联系,并用式(1)检验统计显著性。由于RMM指数从1979年开始,因此统计1979—2009年的TC群发与MJO过程的关系。表1为在各MJO位相期间发生的TC群发记录次数(以下称

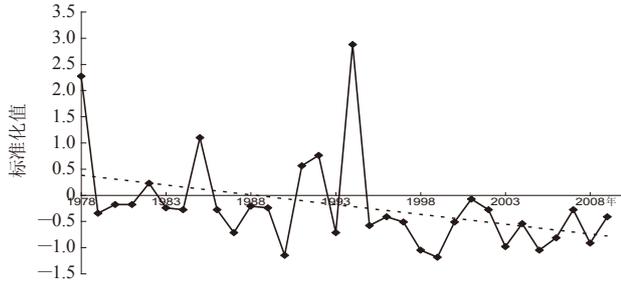


图1 1978—2009年标准化TC群发记录
(虚线为趋势线)

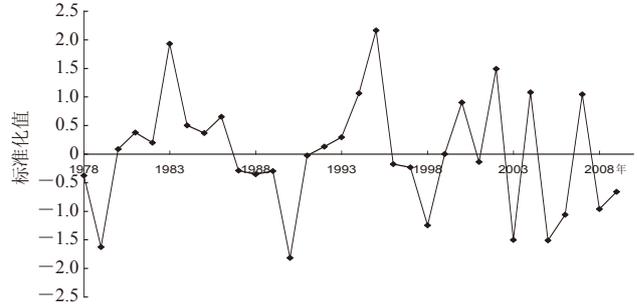


图2 1978—2009年标准化TC群发强度

为群发次数)和对应的MJO位相及强度统计。31a间111次TC群发过程共有837次TC群发记录, TC群发在各MJO位相期间均有发生。许多研究已表明, MJO对TC生成和群发有影响^[1-4], 就时空尺度而言, MJO属于低频行星尺度系统, 对高频天气尺度的TC系统的调控作用是占主导的。从表1中的统计结果可知, 某些MJO位相对TC群发有显著调制作用。位相5和7是有利于TC群发的位相, 即MJO对流活跃于120°E附近的印尼群岛海域及150°E以东的西太平洋东部时, TC群发次数最多, TC群发活动活跃, 分别发生了170次和156次; 而在位相1和2, 即MJO对流活跃于非洲地区和印度洋东部(40°—100°E, 0°—20°N)范围时, TC群发次数最少, 仅发生了57次和68次, 群发活动受到显著抑制。可见, 在MJO从印度洋东传到西半球环绕整个地球低纬地区的过程中, 当MJO对流到达菲律宾附近海域, 易引起TC群发, 此海域是西北太平洋TC生成和发展的主要区域; 当对流到达150°E以东到日界线附近, TC亦易群发, 该区域则为热带扰动及TC最早发源地, 两个影响显著区域是热带扰动较多的区域, 满足群发的基本条件。统计结果证明了MJO对TC生成和发展的调制作用, MJO促进了TC的群发。从MJO的平均强度来看, TC群发时, MJO在从印度洋东部到东太平洋的强度较强, 在非洲到印度洋东部区域, TC群发时则此MJO位相强度偏弱, 但各位相间无显著区别。

此统计结果可用MJO活动期间的大气环流环境来解释, 由于MJO对流活跃区的气流在低层为辐合上升不稳定区域, 在高层为辐散区, 水汽充沛, 有利于TC

表1 1979—2009年西北太平洋热带气旋群发及其对应MJO位相统计(黑体为通过显著性检验)

MJO位相	1	2	3	4	5	6	7	8
区域	西半球及非洲	印度洋	印尼群岛	西太平洋	西半球及非洲	西半球及非洲	西半球及非洲	西半球及非洲
TC群发次数	57	68	96	95	170	98	156	97
MJO平均强度	0.86	0.84	2.27	2.27	2.24	2.27	2.40	2.40
TC群发显著性检验值Z	-5.30	-4.54	-0.48	-1.00	6.77	-0.54	5.38	-0.08

的生成和发展; 而在MJO对流抑制区则情况正相反, 是低层辐散和高层辐合, 气流下沉稳定区, 不利于TC的发展。在MJO对流东传到西太平洋暖池海域, 极易在有利的海温条件配合下促使TC的生成。在北半球夏季台风季节, 印度洋和西太平洋是MJO对流最活跃的区域, 此两位相也正是互为反位相, 在该两位相的TC活动统计得到了显著的结果。

Hsu等^[22]通过分离TC和大尺度背景信号的研究已表明, 当低频环流对TC的生成产生群发效应时, TC群同时也对背景气流有显著影响, TC的贡献没有因其属天气尺度系统而被抵消, 因此影响气候信号和变量。由于TC活动本身携带的巨大能量, 其群发活动可能对大气和海洋环境产生影响, 进而可能对MJO活动产生反馈作用。以下进行TC群发后的MJO位相特征统计。

表2为TC群发过程结束后(以下称群发后)1—20d内每候累计的MJO位相情况统计结果, 统计111个TC群发过程共555个记录。显著性检验结果表明, TC群发后5d, MJO位相4(即强对流位于偏西的海洋性大陆(80°—100°E, 0°—20°N)区域)及位相6(即强对流位于西太平洋西北部区域(120°—150°E, 0°—20°N))出现日数最多, 而位相3和5出现的日数最少, 这4个位相的统计值都通过了显著性检验, 即TC群发后5d内, MJO位相4和6出现显著偏多, 而位相3和5显著偏少。这可能是TC群发后向西移动的直接结果。一次TC过程一般可持续

表2 TC群发后20d各MJO位相的统计(黑体为通过显著性检验)

TC群发后时间	位相区域	1 西半球及非洲	2 印度洋	3 印尼群岛	4 西太平洋	5 西太平洋	6 西太平洋	7 西太平洋	8 西半球及非洲
	MJO位相天数	71	81	45	87	53	85	59	74
5d	显著性检验	-0.12	0.77	-2.83	2.27	-2.14	2.14	-1.32	1.21
	MJO位相天数	104	87	48	58	71	56	74	57
10d	显著性检验	4.05	1.51	-2.44	-1.46	0.17	-1.60	0.60	-1.04
	MJO位相天数	116	95	44	45	70	48	55	82
15d	显著性检验	5.57	2.51	-2.96	-3.13	0.04	-2.64	-1.84	2.27
	MJO位相天数	105	98	44	52	74	60	59	63
20d	显著性检验	3.42	1.92	-2.79	-1.14	-0.34	-0.80	-0.97	0.55

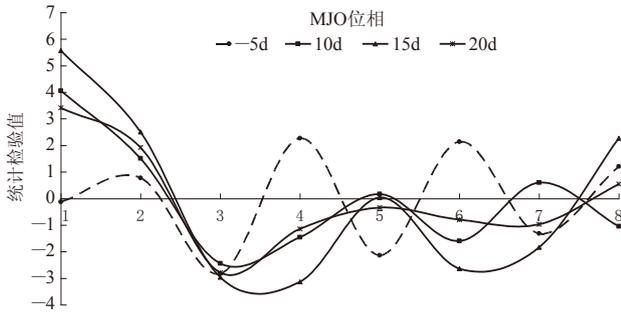


图3 TC群发后MJO位相次数统计检验值曲线

3~7d, 在时间尺度上足以影响某MJO位相的活动。由于TC群发多发生在MJO位相5或7, 在TC群向西移后直接加强了MJO位相4或6对流, 反映了MJO西传特征, 这是夏季北半球MJO的传播特征之一^[23, 24]。

群发后10d, 位相1显著偏多, 而位相3受到抑制, 这种状况持续到TC群发后20d。在群发后15d的统计结果, 显著性检验曲线呈现类似的某MJO位相态(图3), 忽略位相5的值(该值未通过显著性检验), 则此形态为MJO对流在西半球及非洲到东印度洋的对流活跃, 而在印度洋西部到西太平洋为对流抑制的MJO第1位相态。由于MJO对流传播到110°E以东的西太平洋区域后易引起TC的群发, TC群发之后, MJO仍将继续东传, 15d后在进入西半球后得到加强。若MJO传播周期为40d, 则15d正是MJO从第5

位相到第7位相开始传播进入到第8到2位相的时间, 正对应着显著出现的位相。北半球夏季的MJO对流活跃区主要位于印度洋和西太平洋, 西半球的MJO对流现象一般不明显, 仅在高层的低频辐散风中可观测到全球传播的MJO现象^[21, 25, 26], 而统计结果却表明在TC群发后, 位于西半球到非洲的MJO的8、1、2位相得到显著加强, 这说明TC的群发亦同样加强了MJO的传播。

对逐日资料进行30~80d带通滤波得到低频变量, 选择群发显著的位相5和7期间发生的TC过程合成低频变量。图4为在MJO位相5和7期间TC群发后20d内合成的逐日30~80d带通滤波OLRA和850hPa矢量风在(0°—20°N)平均的纬向剖面图。在TC群发后5d内, MJO对流在印尼群岛到西太平洋地区得到加强, 但在10~20d后则在该地区受到抑制, 而在西半球到非洲地区的对流一直得到加强, 低频对流伴随着低频异常偏西风, 对流抑制区则伴随异常偏东风。这与统计结果基本一致, TC群发后5d, MJO位相4和6显著偏多, 而在10~20d位相8和1显著偏多。

以上统计和分析表明, 一方面, MJO影响着TC的群发, 某些位相显著加强或抑制了TC群发; 另一方面, TC的群发也对MJO产生反馈影响, TC群发后某些位相显著加强或抑制。

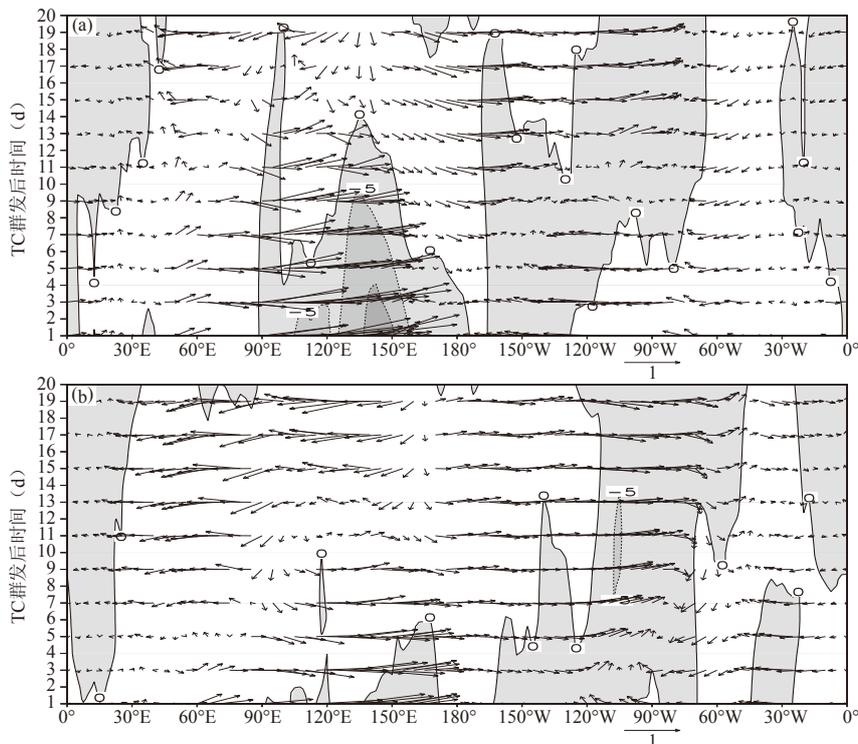


图4 TC过程群发后合成的30~80d带通滤波逐日OLRA(阴影, W/m^2)和850hPa矢量风(矢量, m/s)在0°—20°N平均的纬向剖面图(a和b分别为位相5和7的过程合成)

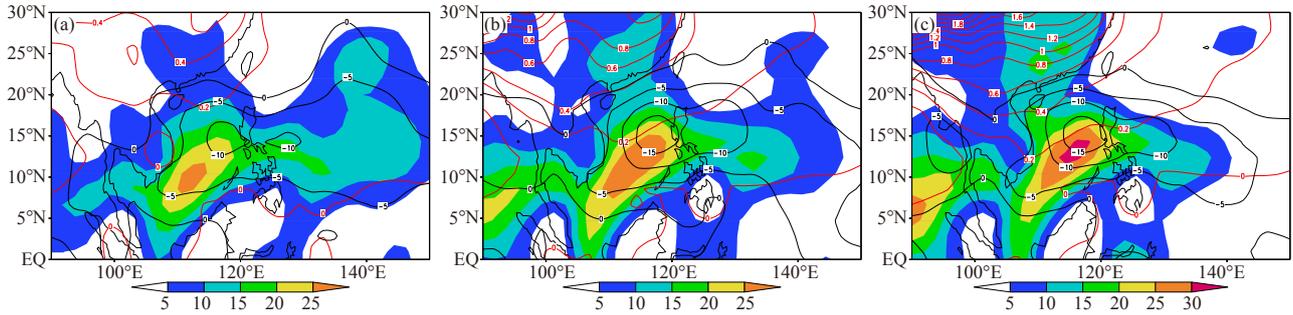


图5 合成的TC群发后海气作用物理量变化 (阴影为表面潜热通量, 黑色等值线为向下短波辐射通量, 单位: W/m^2 ; 红色等值线为表面温度, 单位: K; a, b和c分别为TC群发时与群发后5, 10, 15d的差值)

4 TC群发的海气相互作用

上述结果表明西北太平洋TC群发与MJO存在密切联系, MJO的东传到西北太平洋特定海域会引起TC群发; 而TC群发后, 其西移可促进MJO对流的西传特征, 同时部分MJO对流继续东传加强。为探讨TC群发后的海气相互作用对MJO的影响, 对TC群发前后的海气相互作用物理量值进行分析。以TC群发结束日为0d, 以前4日(-4d)到0d, 1d到5d, 6d到10d, 11d到15d, 每5日的合成值分别代表TC群发时, TC群发后5d、10d、15d的海气通量, 计算TC群发时与群发后的物理量差值, 以分析海气通量的变化(图5)。

从图5可见, 表面潜热通量和短波辐射通量在TC群发前后的变化较大。图5a显示在 5° — 20° N, 90° — 160° E区域的热带海洋上大部为正的表面潜热通量差值覆盖, 表示该区域在TC群发时海洋获得的潜热通量比TC群发后5d多, 差值最大区域位于印尼群岛附近海域(110° — 120° E, 10° — 15° N), 与TC群发次数最多的MJO位相5区域一致(可将此区域作为TC群发主要区域)。TC群发时的表面潜热通量比群发后5d偏多 $20\sim 25 W/m^2$, 反映了TC群发时所产生的凝结潜热被海洋获得, 而群发后海洋则逐渐向大气释放潜热通量, 该值在TC群发后10和15d逐渐加大。向下短波辐射通量差值在热带海洋上为负值, 表明TC群发时海洋表面获得的短波辐射比群发后少, 在TC群发主要区域5d后偏少 $5\sim 10 W/m^2$, 15d时偏少达 $15 W/m^2$ 以上, TC群发结束后逐渐获得更多的日照短波辐射。表面温度在TC群发前后变化仅为 $0\sim 0.2 K$, 为正值, 表明TC群发时海温比群发结束后高, 温度变化值在TC群发区域10和15d后仍然未出现大的变化, 保持正值。

上述海洋表面物理量的变化反映了TC群发和海洋间的相互作用, 由于云团、降雨和风蒸发的作用, TC群发时使海洋表面获得的太阳短波辐射减少, 而获得水汽凝结释放的潜热, 且温度降低。当群发结束后, 海洋获得的水汽潜热减少, 并可能逐渐转为将自身的

潜热释放到大气; 同时, 云团减弱甚至出现晴空, 海洋表面可获得太阳短波辐射, 海表温度应逐渐上升。从图5b和c中可见, 这种获得潜热减少、短波辐射增加的情形在群发结束后 $10\sim 15$ d内都在加强; 尽管获得日照加强, 但大范围海面温度的明显增温仍未出现。这反映了TC群发对海温深层次的影响。许多研究也表明, TC会使其周围海域的海温迅速降低, 降温幅度 $2^{\circ}C$ 左右, 个别TC过程甚至能使海温降低 $5^{\circ}C$, 而海温恢复过程则非常缓慢^[6, 27]。

从以上分析可见, TC群发后的海温降低是显著。海温局地变化是影响MJO低频振荡传播的一个重要因素, 根据Gill^[28]的局地加热理论以及李崇银等^[7]、巢纪平等^[12]关于海温异常对MJO振荡影响的研究, 由于海温的持续偏低, 不稳定CISK-Kelvin波不易形成, 则使该海域的MJO对流受到抑制。这可能是之后的 $10\sim 20$ d内在印尼群岛和西太平洋海域MJO受到抑制的原因。但另一方面, TC群发时凝结潜热大量释放, 凝结潜热对大气内部的加热作用也是影响MJO的重要因子, 对MJO的传播起作用。这种加热使MJO振荡加强, 致使在西半球和非洲地区的MJO对流得到显著加强, 这有待进一步的验证。

5 结论和讨论

(1) 西北太平洋 30° N以南海域平均每年发生3.6次TC群发过程。在1978—2009年间TC群发呈现出减少的变化趋势, 但群发强度无趋势变化。根据RMM定义的MJO位相5(MJO强对流位于印尼群岛东部)和位相7(MJO强对流位于西太平洋东部)是西北太平洋TC最易发生群发的位相; 而在位相1和2时, 即MJO强对流主要位于非洲和印度洋西部时, TC最不易发生群发。

(2) TC群发结束后5d内, 位相4、6出现日数显著偏多, 而位相3和5显著偏少; 在群发后 $10\sim 20$ d, MJO位相1出现日数显著偏多, MJO位相3持续显著偏少; $11\sim 15$ d时, MJO第8, 1和2位相显著偏多, 而第

3, 4和6位相显著偏少, 即MJO对流在东太平洋、非洲到印度洋东部对流加强, 而在印尼群岛海域及西太平洋MJO对流受到抑制。这说明, 西北太平洋TC群发后, 一方面其自身的信号在5d内使MJO对流西移特征加强, 印尼群岛西部和西太平洋的MJO活动加强; 而另一方面, 在10~20d内MJO的向东传播加强。

(3) TC群发引起海表温度降低, 海面潜热通量增加, 而日照短波辐射减少; TC群发引起印尼群岛到西太平洋海温降温变化恢复过程缓慢, 在20d内仍未恢复到TC群发时; 而潜热通量和日照短波辐射都在群发结束后很快发生转变, 海表面迅速转变为失去潜热通量和接受太阳短波辐射。这些TC群发引起的海气相互作用通量的改变很可能对MJO的传播产生影响。

观测事实表明, MJO对西北太平洋TC群发存在调制作用, 而TC群发后对MJO的传播也产生影响, 其中TC群发引起的海气作用可能是部分原因。已有研究表明, 强对流活动的位置和水平尺度对热带大气低频振荡的传播方向和周期会产生影响^[29], 而数值试验研究也表明反映对流加热的非绝热加热廓线垂直分布和大小对ISO东传特征有很大影响^[30], TC群发亦产生其他的影响, 如能量东传、改变大尺度环流等^[21, 26]。因此, TC群发对MJO传播影响是多种因素影响的综合结果, 这有待在理论和数值试验方面进一步研究。

参考文献

- Gray W M. Hurricanes: Their formation, structure and likely role in the tropical circulation. In: Shaw D B. Meteorology over the Tropical Oceans. Royal Meteorological Society, 1979.
- Nakazawa T. Intraseasonal variations of OLR in the tropics during the FGGE year. *J Meteor Soc Japan*, 1986, 64: 17-34.
- Liebmann B 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 Meteor Soc Japan*, 1994, 72(3): 401-411.
- 孙长, 毛江玉, 吴国雄. 大气季节内振荡对夏季西北太平洋热带气旋群发性的影响. *大气科学*, 2009, 3(5): 950-958.
- 吴迪生, 邓文珍, 张俊峰, 等. 南海台风状况下海气界面热量交换研究. *大气科学*, 2001, 25(3): 329-341.
- 孙璐, 王东晓, 胡建宇, 等. 南海北部海洋对局地生成热带气旋的响应. *热带海洋学报*, 2008, 27(4): 10-18.
- 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. *科学通报*, 1991, 15: 1157-1160.
- Lau K-M, Peng L. Origin of low-frequency (intraseasonal) oscillations in the tropical atmosphere. Part I: basic theory. *J Atmos Sci*, 1987, 44(6): 950-972.
- Takahashi M. A theory of the slow phase speed of the intraseasonal oscillation using the Wave-CISK. *J Meteor Soc Japan*, 1987, 65: 42-49.
- Chang C-P, Lim H. Kelvin wave - CISK: a possible mechanism for 30-50d oscillation. *J Atmos Sci*, 1988, 45(11): 1709-1720.
- Madden R A. Seasonal variations of the 40-50 day oscillation in the tropics. *J Atmos Sci*, 1986, 43(24): 3138-3158.
- 巢纪平, 林永辉, 王斌. 海表温度异常对Madden-Julian振荡的影响. *气象学报*, 1996, 54(3): 257-271.
- Wang B, Xie X. A model for the boreal summer intraseasonal oscillation. *J Atmos Sci*, 1997, 54(1): 72-86.
- Wang B, Xie X. Coupled modes of the warm pool climate system. Part I: The role of air-sea interaction in maintaining Madden-Julian oscillation. *J Climate*, 1998, 11(8): 2116-2135.
- Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler, R, et al. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bull Amer Meteor Soc*, 1996, 77(3): 437-470.
- Wheeler C M, Hendon H H. An all-season real-time multivariate MJO index: Development of an index for monitoring and prediction. *Mon Wea Rev*, 2004, 132: 1917-1932.
- 丁一汇, 范惠君, 薛秋芳, 等. 热带辐合区中多台风同时发展的初步研究. *大气科学*, 1977, 2 (2): 89-98.
- Emanuel K A. Increasing destructiveness of tropical cyclones over the past 30 years. *Nature*, 2005, 436: 686-688.
- Hall J A, Matthews J, Karoly D J. The modulation of tropical cyclone activity in the Australian region by the Madden-Julian Oscillation. *Mon Wea Rev*, 2001, 129: 2970-2982.
- Kim J H, Ho C H, Kim H S, et al. Systematic variation of summertime tropical cyclone activity in the western North Pacific in relation to the Madden-Julian oscillation. *J Climate*, 2008, 21: 1171-1191.
- Barrett B S, Lance M L. Links between tropical cyclone activity and Madden-Julian oscillation phase in the north Atlantic and northeast Pacific basins. *Mon Wea Rev*, 2009, 137: 727-744.
- Hsu C-H H, Lo A-K, Hung C-W. Influence of tropical cyclones on the estimation of climate variability in the tropical western North Pacific. *J Climate*, 2008, 21: 2960-2975.
- Hsu H-H, Weng C-H. Northwestward propagation of the intraseasonal oscillation in the Western North Pacific during the boreal summer: Structure and mechanism. *J Climate*, 2001, 14(18): 3834-3849.
- 何洁琳, 万齐林, 管兆勇, 等. 亚洲-西太平洋夏半年ISO传播特征及其与热带天气尺度波动联系的观测事实研究. *热带气象学报*, 2010, 26(6): 724-732.
- Madden R A, Julian P R. Observations of the 40-50-day tropical oscillation: A review. *Mon Wea Rev*, 1994, 122: 814-837.
- Kiladis, G N, Straub K H, Haertel P T. Zonal and vertical structure of the Madden-Julian oscillation. *J Atmos Sci*, 2005, 62: 2790-2809.
- Sobel A H, Camargo S J. Influence of western North Pacific tropical cyclones on their environment. *J Atmos Sci*, 2005, 62: 3396-3407.
- Gill A E. Some simple solutions for heat-induced tropical circulation. *Quart J R Met Soc*, 1980, 106: 447-462.
- 崔雪峰, 黄荣辉. 热带强对流区域的位置和水平尺度对大气低频振荡的影响. *中国科学院研究生院学报*, 2002, 19(1): 49-58.
- 胡文婷, 段安民, 吴国雄. 积云对流参数化方案对热带大气季节内振荡模拟的影响. *中国科学: 地球科学*, 2011, 41(9): 1341-1351.