

胡皓, 端义宏. 南海热带气旋迅速加强环境场因子的影响分析[J]. 热带气象学报, 2016, 32(3): 299-310.

文章编号: 1004-4965(2016)03-0299-12

南海热带气旋迅速加强环境场因子的影响分析

胡皓, 端义宏

(中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081)

摘 要: 使用中国气象局上海台风研究所整理的热带气旋最佳路径资料, 对 1979—2012 年间南海海域热带气旋迅速加强的时空分布特征进行分析。结果表明, 南海热带气旋迅速加强主要出现在夏秋两季, 其中 9 月频数最高, 空间分布主要集中在海南岛东南侧以及南海中部远离大陆的海域。基于 ERA-Interim 再分析资料, 确定了一种环境因子的新阈值计算方法, 计算出风垂直切变、高(低)层散度、低层垂直涡度、低层水汽通量散度、对流层中层相对湿度、海表面温度和海洋热含量 8 种环境场因子有利于迅速加强的阈值条件, 结果表明风垂直切变、低层辐合、低层水汽辐合是影响迅速加强的主要因子。强台风以下级别的南海热带气旋级别越高迅速加强概率越大, 迅速加强时满足阈值的因子个数也越多。除海洋热含量以外的 7 个因子中, 满足阈值的因子个数为 6 个(热带风暴级别)或 5 个(强热带风暴级别、台风和强台风级别)时迅速加强概率最大。这些对提高南海热带气旋强度突变的预报有一定指导意义。

关 键 词: 天气学; 热带气旋迅速加强; 统计分析; 环境场; 阈值

中图分类号: P444

文献标识码: A

Doi: 10. 16032/j. issn. 1004-4965. 2016. 03. 002

1 引 言

热带气旋(Tropical Cyclone, 以下简称 TC)是发生在低纬度地区海面上的气旋性环流, 是影响我国的主要灾害性天气之一。近年来随着观测技术、数值模式和理论研究的不断进步, 对于 TC 路径的客观预报水平有了明显提高^[1], 但有关 TC 强度变化尤其是 TC 迅速加强的研究和预报技术的发展相对滞后^[2-4], 主要原因是观测资料不足以及对强度变化的物理机制缺乏认识^[5]。

南海主要位于热带地区, 是 TC 多发海域以及 TC 迅速加强多发海域^[6-7]。特别是在我国南海海域生成的 TC, 生成后经历很短的时间就会登陆, 如遇上其强度迅速加强会导致严重的灾害。研究表明, 影响 TC 强度变化的因子主要可分为三类: 环境场、海洋热状况、TC 本身结构变化^[3]。南海地区大气环境场复杂多变, 高空槽带来的辐散气流^[8]、高空冷涡造成的较弱风垂直切变及正涡

度平流^[9]、TC 位于副热带高压西南侧^[10]、西南季风带来的水汽及涡度输送^[11]、越赤道气流较弱年季风槽偏西导致季风槽动能集中在南海海域附近^[12]等均有利于南海地区 TC 的强度加强。已有研究工作中大多针对某一个例进行分析, 而对于 TC 迅速加强时受到环境场影响的统计分析较少。其原因可能是各个例中影响迅速加强的天气系统不同, 且各环境因子的量化分析比较缺乏, 难以进行批量统计。从已有研究中可发现, 各系统主要通过改变 TC 高低层散度、风垂直切变、水汽输送等物理量造成 TC 迅速加强, 因此, 通过这些物理量对环境场因子进行量化分析是一种可能的途径。

在环境场因子的量化分析中, Chen 等^[13]采用多种物理量代表环境场因子大小, 通过计算各环境场因子与 TC 强度变化的相关系数选出影响南海 TC 强度变化的主要环境场因子, 并提出一种 TC 强度预测方案。但该研究中并没有给出各环境场因子有利于 TC 迅速加强的阈值大小, 明确各

收稿日期: 2015-03-05; 修订日期: 2015-11-28

基金项目: 国家重点基础研究发展项目(2015CB452805); 国家自然科学基金项目(41375068)共同资助

通讯作者: 端义宏, 男, 上海市人, 研究员, 博士, 主要从事热带气旋及数值模拟研究。E-mail: duanyh@cma.gov.cn

环境场因子有利于 TC 迅速加强的阈值对 TC 强度预报有重要的指导意义。关于环境场因子阈值的研究中, Kaplan 等^[2]通过对比北大西洋海域 12 年间迅速加强和非迅速加强 TC 的环境场因子大小差异, 筛选出差较大的环境场因子, 同时采用各因子平均值代表其有利于迅速加强的阈值并计算出满足阈值时的迅速加强概率。梅双丽等^[14]运用类似的方法对西北太平洋海域 TC 的迅速加强进行了统计, 指出 TC 前 12 h 强度变化、海表面温度和风垂直切变因子是影响其迅速加强的主要因子。但针对南海海域并没有类似研究, 且上述研究中计算环境场因子仅通过取圆环平均来避开 TC 涡旋的影响, 并不能真正将 TC 涡旋和环境场分离开。同时上述研究中使用环境场因子平均值代表阈值并不能真正反映各环境场因子的阈值范围。

为了更深入了解南海 TC 迅速加强时环境场因子的作用, 本文对 1979—2012 年间南海 TC 加强过程中环境场因子进行分析, 以期给出迅速加强过程中各因子大小分布, 为南海 TC 强度预报提供参考。同时本文将迅速加强和非迅速加强过程环境场因子进行对比, 以期找出各因子有利于 TC 迅速加强的阈值范围。

2 资料与方法

2.1 资料

目前西北太平洋 TC 主要有 4 套较完整的最佳路径数据, 分别来自中国气象局(CMA)、日本气象厅(JMA)、美国台风联合警报中心(JTWC)和香港天文台(HKO)。而对于影响我国的 TC 来讲 CMA 的资料更加有优势^[15], 故本文台风数据采用中国气象局上海台风研究所整理的最佳路径数据集(1979—2012 年)。环境场数据采用欧洲中期预报中心的 ERA-Interim 再分析资料, 时间范围为 1979—2012 年, 每日四次, 水平分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$, 垂直方向共 37 层, 所使用的要素包括水平风、绝对湿度、相对湿度以及海表面温度。计算海洋热含量使用的海温数据来自美国全球海洋资料同化实验室(USGODAE), 时间范围为 2005—2012 年, 每日一次, 经向格点数为 2 161, 纬向格点数为 1 051, 垂直方向共 34 层($0 \sim 5\,000\text{ m}$)。

2.2 方法

TC 迅速加强的定义。根据中国气象局上海台风研究所最佳路径数据集中的 2 分钟平均近中心最大风速(简称: V)来定义 TC 的强度, 以 V 在 12 h 以内的变化 ΔV_{12} 来划分 TC 的强度变化。具体划分方式参考文献[16—17]定义的标准, 将强度在热带低压(TD)及以上的 TC 加强过程划分为以下四个等级:

特别迅速加强: $\Delta V_{12} \geq 15\text{ m/s}$;

迅速加强: $10\text{ m/s} \leq \Delta V_{12} \leq 14\text{ m/s}$;

缓慢加强: $5\text{ m/s} \leq \Delta V_{12} \leq 9\text{ m/s}$;

强度少变: $0 < \Delta V_{12} \leq 4\text{ m/s}$ 。

为了避免减弱 TC 对统计结果造成的影响, 本文将迅速加强和特别迅速加强($\Delta V_{12} \geq 10\text{ m/s}$)统称为迅速加强, 将强度少变和缓慢加强($0 < \Delta V_{12} \leq 9\text{ m/s}$)统称为非迅速加强。根据该定义, 南海海域在 1979—2012 年间共发生 TC 加强现象 1 338 次, 其中迅速加强现象 78 次, 非迅速加强现象 1 260 次, 迅速加强次数占总加强次数的 5.83%。

涡旋分离。将 TC 涡旋场从再分析资料场中剔除是 TC 环境场因子计算的关键。本文采用文献[18—19]提出的涡旋分离方案: 首先利用变化平滑系数的 3 点平滑算子将原始场分解为基本场和扰动场; 其次确定涡旋范围(850 hPa 扰动场切向风小于 6 m/s 且切向风梯度小于 $4 \times 10^{-6}\text{ s}^{-1}$, 或切向风小于 3 m/s)并将扰动场中涡旋范围内的数据剔除, 利用最优插值方法重新计算出涡旋范围内的数据得到大尺度扰动场; 最后将基本场和大尺度扰动场相加得到 TC 环境场。

环境场因子计算。根据以往的研究, 本文确定风垂直切变、 200 hPa 水平风散度、 850 hPa 水平风散度、 850 hPa 垂直涡度、 850 hPa 水汽通量散度、 925 hPa 水汽通量散度、 $1\,000\text{ hPa}$ 水汽通量散度因子来代表各种天气系统的环境因子, 同时考虑到海洋下垫面是 TC 发展的主要能量来源, 本文还计算了海表面温度因子及海洋热含量因子以代表海洋热状况的作用, 考虑到对流层中层相对湿度较高时积雨云可发展得更强大^[20], 本文选择 500 hPa 相对湿度因子作为影响因子之一。上述 10 个因子具体计算方法如表 1 所示, 其中 u_{200} 、 u_{850} 、 u_{925} 、 $u_{1\,000}$ 代表 200 hPa 、 850 hPa 、 925 hPa 、

1 000 hPa 上的纬向风速, v_{200} 、 v_{850} 、 v_{925} 、 $v_{1\,000}$ 代表 200 hPa、850 hPa、925 hPa、1 000 hPa 上的经向风速, q_{850} 、 q_{925} 、 $q_{1\,000}$ 代表 850 hPa、925 hPa、1 000 hPa 上的绝对湿度, g 代表重力加速度, ρ 代表海水密度, c_p 代表定压比热容, $T(z)$ 代表海水深度为 z 的海温。

风垂直切变是指水平风在垂直方向上的变化, 为方便计算一般采用高低层水平风速之差来近似表示, 但具体计算方法不同研究中不尽相同。高低空层次上, 绝大多数研究选取 850 hPa 和 200 hPa 代表低层和高层^[21]。计算的水平区域上, 区域形状主要有圆形^[13]、圆环形^[22]、正方形^[23], 区

域大小也不相同。有学者通过计算不同大小正方形区域内的垂直切变, 指出 $10^\circ \times 10^\circ$ 范围内的垂直切变与 TC 强度相关性较好^[24]。因此, 本文选取以 TC 为中心 $10^\circ \times 10^\circ$ 范围内水平风速的区域平均来代表水平风大小计算风垂直切变, 且为统一起见所有因子均取该区域内平均值。高低层散度因子以 200 hPa 和 850 hPa 水平风散度来表示。低层涡度因子以 850 hPa 垂直涡度来表示。水汽收支因子以 850 hPa、925 hPa 和 1 000 hPa 水汽通量散度来表示。对流层中间层相对湿度因子以 500 hPa 相对湿度来表示。海洋热含量以海表面至 26°C 等温线对应深度之间海洋热含量来表示。

表1 各环境场因子定义及计算方法

名称	定义	计算公式	单位
VWS	风垂直切变	$\sqrt{(u_{200} - u_{250})^2 + (v_{200} - v_{250})^2}$	m/s
DIV200	200 hPa 水平风散度	$\frac{\partial u_{200}}{\partial x} + \frac{\partial v_{200}}{\partial y}$	10^{-6} s^{-1}
DIV850	850 hPa 水平风散度	$\frac{\partial u_{850}}{\partial x} + \frac{\partial v_{850}}{\partial y}$	10^{-6} s^{-1}
VOR850	850 hPa 垂直涡度	$\frac{\partial v_{850}}{\partial x} - \frac{\partial u_{850}}{\partial y}$	10^{-6} s^{-1}
MDIV850	850 hPa 水汽通量散度	$(\frac{\partial q_{850} u_{850}}{\partial x} + \frac{\partial q_{850} v_{850}}{\partial y})/g$	$10^{-10} \text{ g}/(\text{s} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{hPa})$
MDIV925	925 hPa 水汽通量散度	$(\frac{\partial q_{925} u_{925}}{\partial x} + \frac{\partial q_{925} v_{925}}{\partial y})/g$	$10^{-10} \text{ g}/(\text{s} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{hPa})$
MDIV1 000	1 000 hPa 水汽通量散度	$(\frac{\partial q_{1\,000} u_{1\,000}}{\partial x} + \frac{\partial q_{1\,000} v_{1\,000}}{\partial y})/g$	$10^{-10} \text{ g}/(\text{s} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{hPa})$
RH	500 hPa 相对湿度	—	%
SST	海表面温度	—	$^\circ\text{C}$
OHC	海洋热含量	$\rho c_p \int_{h(T=26^\circ\text{C})}^0 T(z) dz$	kJ/cm^2

3 南海 TC 迅速加强的时空分布特征

1979—2012 年间南海地区 TC 平均持续时间大约为 36 小时, 共 51 个 TC 发生迅速加强现象, 共发生迅速加强过程 78 次。图 1 为 78 次迅速加强过程发生的位置及迅速加强 TC 的源地, 其中黑色方框内为本文定义的南海海域 ($105^\circ \sim 120^\circ \text{E}$, $5^\circ \sim 25^\circ \text{N}$), 南海 TC 迅速加强主要发生在南海海域中部及北部, 靠近华南沿海较多, 而靠近南海西部越南一侧的沿海却很少; 另外靠近菲律宾沿海一侧较多, 可能与 TC 在经过菲律宾后入海再增强有关。但是, 南海 TC 强度突变主要集中在南海中部

和北部远离陆地的海上, 这也说明, 海洋的作用是南海 TC 迅速加强的一个不可或缺的因子。南海迅速加强 TC 的源地可分为两种: 一种位于南海内部, 通常称为南海“土台风”; 一种位于菲律宾以东海域, 而后移入南海海域。统计结果显示, 在 1979—2012 年间, 78 次迅速加强过程中, “土台风”有 33 次, 占 42.3%; 移入 TC 有 45 次, 占 57.7%。进一步统计发现, 1979—2012 年间南海 TC 发生迅速加强的比率为 10.8%, 其中“土台风”发生迅速加强比率为 10.9%, 移入 TC 发生迅速加强的比率为 10.7%。两者所占的比例几乎相当。

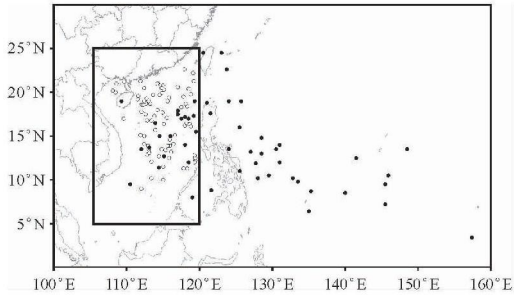


图 1 南海 TC 迅速加强时 TC 位置(空心圆)及对应 TC 源地位置(实心圆)的空间分布

图 2 为 1979—2012 年南海 TC 迅速加强频数的年际变化、季节变化和日变化(北京时间)。由图 2a 可看出,1990 年代之前,南海 TC 迅速加强频数波动较小,基本维持在每年 2~4 次之间。1990 年代后,南海 TC 迅速加强频数波动明显加大,有些年份没有发生迅速加强,而有些年份迅速加强频数达到 6~7 次。由图 2b 可看出,南海 TC 迅速加强主要集中在 7—11 月之间,其中 9 月频数最高,10 月次之。说明夏秋两季尤其秋季是南海 TC 迅速加强的多发季节,其原因是该段时间内 TC 频数较高且西南季风活跃。由图 2c 可看出,南海 TC 迅速加强主要发生在 08—14 时之间,其中 08 时迅速加强频数最高,共 29 次,占迅速加强总频数的 37.18%;其次为 14 时,共 23 次,占迅速加强总频数的 29.49%。其原因可能是白天受到太阳辐射影响,海水吸收的辐射能量增加,造成海洋热含量升高,从而更有利于 TC 的迅速加强。

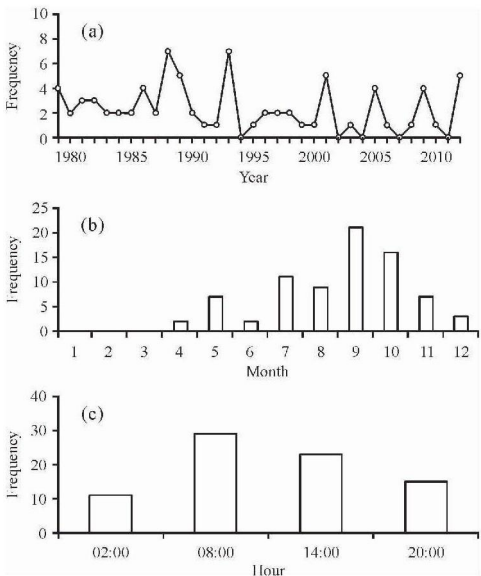


图 2 南海 TC 迅速加强频数年际变化(a)、季节变化(b)和日变化(c)

4 南海 TC 迅速加强时各环境场因子大小分布

为比较环境场条件在迅速加强和非迅速加强过程之间是否存在显著差异,对迅速加强和非迅速加强时刻环境场因子大小分布进行双边 t 检验,结果如表 2 所示。在迅速加强和非迅速加强过程之间差异最明显的因子为 MDIV925、MDIV1 000、SST 以及 OHC,这四个因子均在 0.01 的信度水平上有显著差异;其次为 VWS、DIV850、RH,这三个因子均在 0.05 的信度水平上有显著差异;再次为 MDIV850,在 0.1 的信度水平上有显著差异;而 DIV200 和 VOR850 因子没有表现出显著差异。同时,迅速加强时海洋因子(SST 和 OHC)均值要小于非迅速加强。对于 SST 来讲,虽然迅速加强时其均值小于非迅速加强,但其均值也达到了 28.72℃,对于 TC 的强度加强依然是有利条件;对于 OHC 来讲,则可能是由于样本量太小所致。以上结果表明,与非迅速加强相比,迅速加强的 TC 具有更小的风垂直切变、更高的低层辐合和低层水汽辐合条件,而高层辐散和低层涡度因子在不同程度加强过程之间并没有明显差异。

表 2 迅速加强和非迅速加强过程中 9 个环境场因子均值差异分析

因子	迅速加强 均值	非迅速 加强均值	均值差	检验
VWS	7.26	8.20	-0.94	**
DIV200	7.16	7.21	-0.05	
DIV850	-3.12	-2.59	-0.53	**
VOR850	17.87	18.17	-0.3	
MDIV850	-4.03	-3.44	-0.59	*
MDIV925	-10.12	-8.51	-1.61	***
MDIV1 000	-11.82	-10.16	-1.66	***
RH	68.67	70.90	-2.23	**
SST	28.72	28.99	-0.27	***
OHC	30.08	42.31	-12.22	***

注:星号代表双边 t 检验的信度水平,其中 * 代表信度水平为 0.1, ** 代表信度水平为 0.05, *** 代表信度水平为 0.01。

4.1 动力因子

为进一步观察各环境场因子在迅速加强和非迅速加强之间的差异,对各环境场因子大小分布

进行对比。图3为迅速加强和非迅速加强时3个环境场动力因子大小的频率直方图。由图3a可看出,迅速加强主要发生在风垂直切变(VWS)小于11 m/s的条件下,这一区间内迅速加强频率为83.33%。对比迅速加强和非迅速加强可发现,当风垂直切变小于5 m/s时更容易发生迅速加强现象。说明较弱的风垂直切变有利于南海TC的迅速加强。但当风垂直切变较大时也会发生迅速加强现象,说明其他因子较强时可抵消风垂直切变的负作用。由图3b可看出,南海海域TC加强主要发生在低层垂直涡度因子大于 $16 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ 的条件下,但迅速加强和非迅速加强过程之间差异并不明显,说明较大的低层气旋性涡度有利于南

海海域TC加强,但并不会对加强速率造成太大影响。由图3c可看出,迅速加强主要发生在高层辐散(DIV200)大于 $3 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ 的条件下,这一区间内的迅速加强频率为83.34%。对比迅速加强和非迅速加强可发现,高层辐散在 $7 \times 10^{-6} \sim 15 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ 之间更有利于发生迅速加强现象,说明一定强度的高层辐散有利于南海TC迅速加强。由图3d可看出,迅速加强主要发生在低层辐合(DIV850)小于 $-2 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ 的条件下,这一区间内的迅速加强频率为73.08%。对比迅速加强和非迅速加强可发现,当低层辐合小于 $-2 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ 时更有利于南海TC迅速加强。说明一定程度的低层辐合有利于南海TC迅速加强。

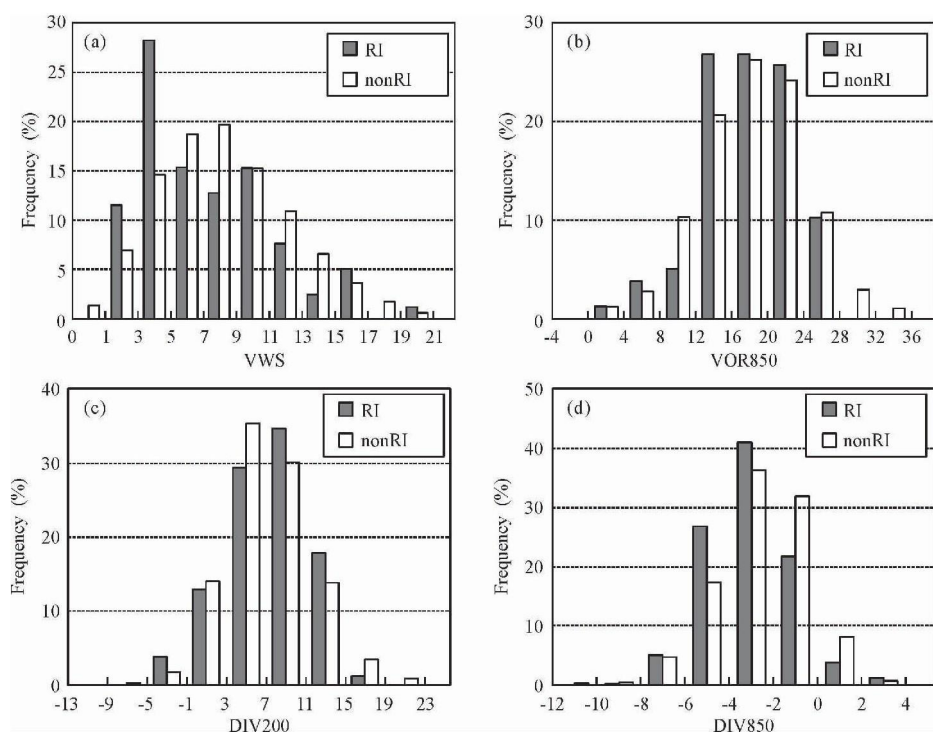


图3 迅速加强和非迅速加强时各环境场动力因子频率直方图

a. 风垂直切变; b. 低层垂直涡度; c. 高层辐散; d. 低层辐合。黑色代表迅速加强,白色代表非迅速加强。

4.2 热力因子

图4为迅速加强和非迅速加强时6个环境场热力因子大小的频率直方图。由图4a、4b、4c可看出,低层水汽辐合因子(MDIV850、MDIV925、MDIV1000)在迅速加强和非迅速加强之间差异十分明显。具体来看,当850 hPa水汽辐合小于 $-6 \times 10^{-10} \text{ g}/(\text{s} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{hPa})$ 、925 hPa水汽辐合小于 $-8 \times 10^{-10} \text{ g}/(\text{s} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{hPa})$ 、1000 hPa水汽辐合小于 $-10 \times 10^{-10} \text{ g}/(\text{s} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{hPa})$ 时南海TC

更容易发生迅速加强现象。这些条件下迅速加强的频率分别为73.08%、69.23%、71.80%,非迅速加强频率分别为53.26%、53.41%、49.60%。说明较强的低层水汽辐合有利于南海TC迅速加强。

由图4d可看出,南海海域TC加强主要发生在对流层中层相对湿度因子(RH)大于60%小于80%的条件下。说明较大的对流层中层相对湿度有利于南海TC迅速加强。但对比迅速加强和非迅速加强可发现,对流层中层相对湿度在两种加

强过程中分布趋势较为一致,差异并不明显。说明较大的对流层中层相对湿度为南海 TC 加强提供了有利的湿度条件,但对于 TC 的加强速度并没有明显贡献。

由图 4e 可看出,南海海域 TC 迅速加强主要发生在海表面温度因子大于 27.5 °C 小于 29.5 °C 的条件下,该区间内迅速加强频率为 92.3%,说明较高的海温有利于南海 TC 的迅速加强。对比迅速加强和非迅速加强可发现,海表面温度在 27.5 ~ 29.0 °C 之间更有利于南海 TC 的迅速加强,说

明海温与 TC 加强并非线性关系,海温过高时 TC 加强的幅度会减少。这与文献[25]利用海气耦合模式得到的结论基本一致。其原因主要是海温较高时会导致 TC 高层过分增暖,从而造成暖核所在气柱趋于稳定,抑制 TC 的发展。图 4f 为海洋热含量因子(OHC)的分布情况,非迅速加强过程海洋热含量主要集中在 20 ~ 60 kJ/cm² 之间,而迅速加强过程海洋热含量分布不规则且较分散,可能是由于样本量太少,缺乏统计意义的关系。

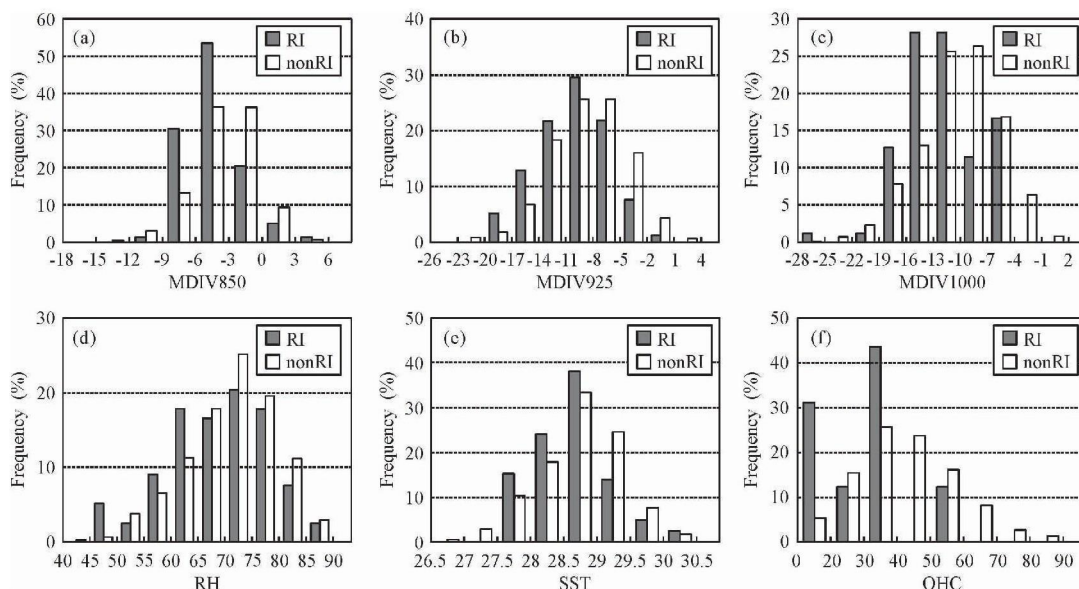


图4 同图3,但因子为热力因子 a. 850 hPa 水汽通量散度;b. 925 hPa 水汽通量散度;c. 1 000 hPa 水汽通量散度;d. 对流层中层相对湿度;e. 海表面温度;f. 海洋热含量。黑色代表迅速加强,白色代表非迅速加强。

5 环境场因子的阈值分析

5.1 环境场因子阈值确定

在计算 TC 强度突变因子阈值的方法上,有些学者使用数值模式进行敏感性试验来判断环境场因子阈值大小^[25-26],但这种方式大部分研究仅针对海洋因子进行,许多大气因子并不适合;还有些学者计算大量样本中各因子的平均值作为阈值^[2],但这样处理过于简单并不能真正反映各因子的阈值范围。

本文尝试提出了一种新的阈值计算方法。在计算阈值时主要运用统计学方法,可很方便地适用于各种因子;同时计算时仅考虑发生加强过程的 TC 中迅速加强和非迅速加强的对比,避免了减弱个例的影响。对于环境场因子 x 发生迅速加强

时阈值的具体计算步骤如下。

首先判断因子 x 是否服从正态分布。主要通过判断 x 的偏度系数(表征分布形态和均值的偏离程度)和峰度系数(表征分布形态图形顶峰的凸平度)是否通过显著性水平 α 的检验^[27]。经检验,本文所计算的因子在 $\alpha = 0.05$ 的显著性水平下均近似服从正态分布。偏度系数(g_1)与峰度系数(g_2)的计算公式如公式(1)、公式(2)所示。

$$g_1 = \sqrt{\frac{1}{6n}} \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i - \bar{x}}{s} \right)^3 \quad (1)$$

$$g_2 = \sqrt{\frac{n}{24}} \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i - \bar{x}}{s} \right)^4 - 3 \right] \quad (2)$$

其中 \bar{x} 代表因子 x 的平均值, s 代表标准差, n 代表样本量。

其次确定阈值的取值范围。为了保证大多数

迅速加强过程中因子 x 满足阈值条件同时排除异常大或异常小的值,规定阈值取值范围在 \bar{x} 至 $\bar{x} \pm 2s$ 之间。

最后确定阈值。文献[2]定义了满足阈值条件时的迅速加强概率(Probability of RI)如下:

$$P_{RI} = \frac{N_{RI}}{N_{RI} + N_{nonRI}} \quad (3)$$

其中 P_{RI} 代表迅速加强概率, N_{RI} 代表满足阈值条件的迅速加强次数, N_{nonRI} 表示满足阈值条件的非迅速加强次数。迅速加强概率越大则满足阈值条件时发生迅速加强的可能性越大。对于所有符合第二步中规定取值范围内的阈值,计算其对应的迅速加强概率,将迅速加强概率最大值对应的阈值作为 x 因子发生迅速加强的阈值。考虑到因子对 TC 迅速加强的影响可能具有超前性,本文在计算阈值时,对 TC 迅速加强前 24 h 至迅速加强时刻以 6 h 为间隔分别计算各因子阈值,以迅速加强概率最大时刻对应的阈值作为该因子的最终阈值。

使用上述阈值定义方法计算出各环境场因子阈值对应的迅速加强概率,并与使用平均值作为阈值得到的迅速加强概率进行对比(图5),各环境场因子使用新阈值定义方法时迅速加强概率均有不同程度的提高,尤其是对于迅速加强概率较低的因子提高更为明显。这说明使用新的阈值计算方法得到的各因子阈值范围可使更多的迅速加强过程满足阈值条件,同时满足阈值条件的非迅速加强过程更少,即新的阈值计算方法可更明显地将迅速加强过程和非迅速加强过程区分开。

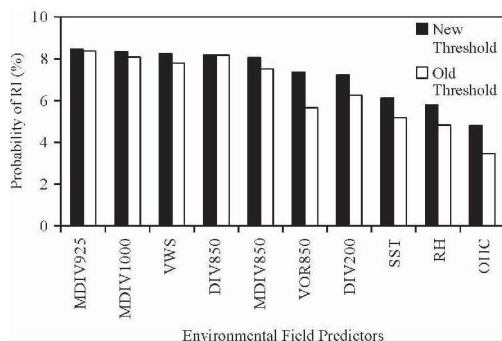


图5 各环境场因子采用不同阈值定义方法时迅速加强概率对比

由于不同强度 TC 本身环境场因子大小不同,因此本文在进行阈值分析时将南海 TC 按等级分

类。统计结果显示,1979—2012 年间南海迅速加强的 TC 中,热带风暴级别共 14 次,强热带风暴级别共 36 次,台风级别共 22 次,强台风级别共 6 次。考虑到强台风的个例太少,为了保证样本量,本文在统计时将台风和强台风等级的个例放在一起进行分析。由于海洋热含量仅有 2005 年以后的数据,该时间段内样本量太少(共 16 次迅速加强),故不对其分等级讨论。

为了保证各环境场因子的独立性,分析前先计算 850 hPa、925 hPa、1 000 hPa 水汽通量散度因子(MDIV850、MDIV925、MDIV1 000)在不同级别 TC 中的迅速加强概率,仅挑选迅速加强概率最大的因子作为低层水汽通量散度因子的代表。通过计算发现热带风暴级别 TC 中 1 000 hPa 水汽通量散度(MDIV1 000)因子迅速加强概率较大,强热带风暴、台风和强台风级别中 850 hPa 水汽通量散度(MDIV850)因子迅速加强概率较大。

5.2 TC 迅速加强时各环境场因子阈值

表3给出不同级别南海 TC 迅速加强时各环境场因子阈值及各因子满足阈值时的迅速加强概率。TC 等级越高各因子满足阈值时迅速加强概率越大。单一因子满足阈值条件时,热带风暴级别 TC 迅速加强概率最大值为 6.38%,强热带风暴级别 TC 迅速加强概率最大值为 16.23%,台风和强台风级别 TC 迅速加强概率最大值为 18.69%。这主要是由于 TC 等级较强时迅速加强概率较大造成的(迅速加强在热带风暴级别中所占比例为 3.33%,在强热带风暴级别中所占比例为 10.75%,在台风和强台风级别中所占比例为 13.66%)。但并非 TC 强度越强迅速加强概率就越大,当 TC 强度超过台风级别以后,发生迅速加强的次数明显降低。统计结果显示 1979—2012 年间强台风级别 TC 仅发生迅速加强现象 6 次,超强台风没有发生过迅速加强。这主要是由于 TC 强度太强时,其最大可能强度与实际强度差值较小,即 TC 发展的潜在能力较小。

从各环境场因子来看,低层水汽辐合因子在不同等级 TC 的迅速加强过程中均表现出较大贡献,其迅速加强概率在热带风暴级别以及台风和强台风级别中均最高,与其相关的低层辐合因子迅速加强概率也较大。说明低层水汽辐合是影响 TC 迅速加强最重要的环境场因子。海表面温度

因子迅速加强概率相对较小,但这并非说明其对 TC 的迅速加强贡献不大。其原因主要是海表面温度因子为 TC 加强提供了有利的下垫面条件,但在不同程度的加强过程之间差异并不明显。

表 3 不同级别南海 TC 迅速加强时各环境场因子阈值及对应迅速加强概率 P 代表迅速加强概率。

TC 等级	因子	阈值	$P/\%$	超前时间/h
热带风暴	MDIV1 000	≤ -11.57	6.38	0
	DIV850	≤ -3.07	5.23	12
	DIV200	≥ 8.06	4.97	24
	VWS	≤ 7.80	4.57	12
	VOR850	≥ 16.88	4.31	12
	SST	≥ 28.90	3.81	6
	RH	≥ 70.36	3.67	18
强热带风暴	VWS	≤ 7.29	16.23	18
	DIV850	≤ -2.65	15.00	6
	MDIV850	≤ -3.31	13.71	6
	SST	≥ 28.67	12.50	0
	VOR850	≥ 14.26	11.57	18
	RH	≥ 56.82	11.36	0
	DIV200	≥ 4.45	11.15	24
台风和强台风	MDIV850	≤ -3.36	18.69	0
	DIV200	≥ 8.27	18.48	6
	DIV850	≤ -3.21	18.39	0
	SST	≥ 28.26	16.42	12
	VOR850	≥ 16.42	16.30	0
	VWS	≤ 6.77	15.46	12
	RH	≥ 58.26	14.02	0
	OHC	≥ 12.01	4.81	0

从超前时间来看,各环境场因子中超前最明显的因子为风垂直切变因子和高层散度因子。风垂直切变因子的超前时间为 12 ~ 18 h,高层散度因子的超前时间为 6 ~ 24 h。同时可发现,TC 等级越强,各因子的超前时间越短。这说明 TC 等级越强,迅速加强时对环境场因子的变化越敏感。

5.3 多个环境场因子共同作用下 TC 的迅速加强概率

由表 3 可发现,单一环境场因子对应的迅速加强概率并不高,最高的也只达到了 18.69%。考虑到迅速加强现象往往是在多种环境场因子共同作用下发生的,故对同时有多个环境场因子满足阈值条件时迅速加强概率进行分析。由于海洋热含量因子的样本量与其它因子的样本量不一致,故在分析时不考虑海洋热含量的影响。

图 6 为迅速加强和非迅速加强过程中满足阈值因子个数对应不同级别南海 TC 频率分布,其中横坐标代表满足阈值的因子个数,TC 级别越高,其迅速加强时满足阈值的因子个数越多。迅速加强过程中,热带风暴级别 TC 满足阈值的因子个数主要集中在 4 ~ 6 个,占热带风暴级别 TC 的 64.29%,满足阈值因子个数为 5 个时频率最高;强热带风暴级别 TC 满足阈值的因子个数主要集中在 5 ~ 7 个,占强热带风暴级别 TC 的 77.78%,满足阈值因子个数为 5 个时频率最高;台风和强台风级别 TC 满足阈值的因子个数越多迅速加强频率越大,7 个因子满足阈值时频率最高。

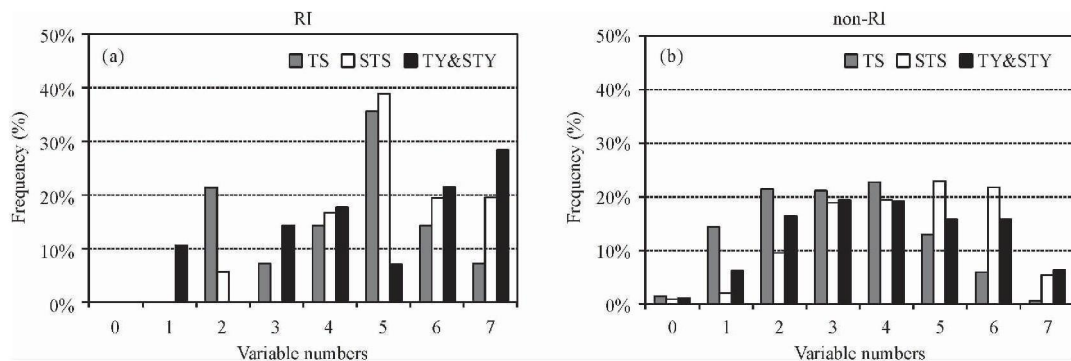


图 6 多个环境场因子满足阈值时迅速加强(a)和非迅速加强(b)频率直方图

灰色代表热带风暴级别,白色代表强热带风暴级别,黑色代表台风和强台风级别,横坐标代表满足阈值因子个数。

对比非迅速加强过程可发现,非迅速加强过程满足阈值的因子个数不同时加强频率差别不大,不同等级 TC 迅速加强过程满足阈值的因子个数均大于非迅速加强过程。非迅速加强过程中,热带风暴级别 TC 满足阈值的因子个数主要集中在 1~4 个,占热带风暴级别 TC 的 79.12%;强热带风暴级别 TC 满足阈值的因子个数主要集中在 3~6 个,占强热带风暴级别 TC 的 82.61%;台风和强台风级别 TC 满足阈值的因子个数主要集中在 2~6 个,占台风和强台风级别 TC 的 86.44%。

为进一步分析哪几种因子满足阈值时最有利于南海 TC 的迅速加强,计算不同级别南海 TC 迅速加强过程中满足阈值因子个数为 N 时最大迅速加强概率及 N 个因子的组合(表 4)。当热带风暴级别 TC 满足阈值的因子个数为 6 个时迅速加强概率达到最大,强热带风暴级别以及台风和强台

风级别 TC 满足阈值的因子个数为 5 个时迅速加强概率达到最大,此时热带风暴级别、强热带风暴级别、台风和强台风级别 TC 的迅速加强概率最大值分别为 50.00%、30.43%、42.11%。当满足阈值条件的因子个数超过 5 个时迅速加强概率不会继续增大,其原因主要是由于满足阈值条件的要求过强,满足要求的迅速加强个例较少所致。

满足阈值的因子组合方面,高低层散度因子和风垂直切变因子对热带风暴级别以及台风和强台风级别 TC 的迅速加强作用最明显,风垂直切变因子、高层辐散因子和海表面温度因子对强热带风暴级别 TC 的迅速加强作用最明显,相比较而言水汽辐合因子和对流层中层相对湿度因子对各级别 TC 迅速加强的作用并不明显。说明多个因子共同作用时动力因子对南海海域 TC 迅速加强的作用更为明显。

表 4 多个因子共同作用时不同级别南海 TC 最大迅速加强概率

N 代表因子个数, P 代表最大迅速加强概率。

级别	N	满足阈值因子组合方案								$P/\%$
热带风暴	1	MDIV1 000								6.38
	2	DIV200	DIV850							11.48
	3	DIV200	DIV850	VWS						18.18
	4	DIV200	DIV850	VWS	SST					30.00
	5	DIV200	DIV850	VWS	SST	MDIV1 000				40.00
	6	DIV200	DIV850	VWS	SST	VORT850	RH			50.00
	7	DIV200	DIV850	VWS	SST	VORT850	RH	MDIV1 000		33.33
强热带风暴	1	VWS								16.23
	2	VWS	DIV850							23.88
	3	VWS	DIV200	SST						25.45
	4	VWS	DIV200	SST	VORT850					28.89
	5	VWS	DIV200	SST	VORT850	DIV850				30.43
	6	VWS	DIV200	SST	VORT850	DIV850	MDIV850			30.43
	7	VWS	DIV200	SST	VORT850	DIV850	MDIV850	RH		30.43
台风和强台风	1	MDIV850								18.69
	2	VWS	DIV850							26.67
	3	VWS	DIV850	DIV200						32.26
	4	VWS	DIV850	DIV200	VORT850					37.04
	5	VWS	DIV850	DIV200	VORT850	SST				42.11
	6	VWS	DIV850	DIV200	VORT850	SST	MDIV850			42.11
	7	VWS	DIV850	DIV200	VORT850	SST	MDIV850	RH		42.11

5.4 环境场因子阈值检验

对于每一个南海 TC 加强过程,其满足阈值条件的环境场因子组合均可在 1979—2012 年的个例中计算出对应的迅速加强概率。为检验上述环境场因子阈值对南海海域 TC 迅速加强的预报是否具有指示意义,计算 2013 年和 2014 年间南海海域 TC 所有加强过程中满足阈值条件的环境场因子组合及其对应的迅速加强概率(图 7)。2013 年和 2014 年南海海域共发生 5 次迅速加强现象,67 次非迅速加强现象。由图 7 可看出,非迅速加强过程的迅速加强概率基本都在 6% 以下,该区间内非迅速加强频数占非迅速加强总数的 68.66%。相比较而言迅速加强过程中的迅速加强概率最小值也达到了 7.69%。说明本文所述环境场因子阈值条件可较好地地区分迅速加强过程和非迅速加强过程,为南海海域 TC 迅速加强的预报提供一定的指导意义。

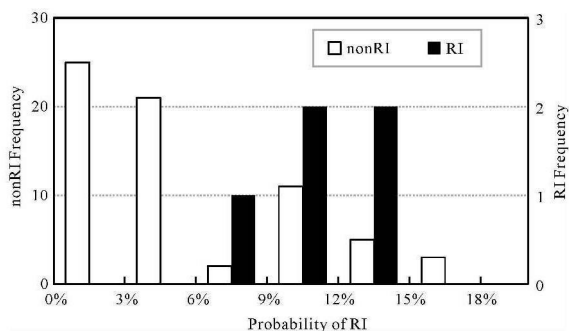


图 7 2013—2014 年南海海域 TC 加强过程对应的迅速加强概率频数分布 黑色代表迅速加强,白色代表非迅速加强。

6 结论与讨论

对南海 TC 迅速加强的时空分布特征进行分析。结果表明,空间分布上迅速加强的空间位置主要位于海南岛东南侧以及南海中部远离大陆的海域;年际变化上迅速加强频数自 1990 年代以来波动较大;季节变化上迅速加强主要出现在夏秋两季,其中 9 月频数最高;日变化上迅速加强主要出现在白天。

本文选取风垂直切变、高低层散度、低层垂直涡度、低层水汽通量散度、对流层中层相对湿度、海表面温度和海洋热含量共 10 个因子,对它们在南海 TC 迅速加强和非迅速加强时的分布进行对比。结果表明,风垂直切变、低层辐合、低层水汽

辐合、对流层中层相对湿度、海表面温度以及海洋热含量在两种加强过程之间差异较明显,高层辐散以及对流层中层相对湿度因子并没有明显差异。其中差异最大的因子为 1 000 hPa 水汽通量散度(MDIV1 000),共有 71.8% 的迅速加强发生在 MDIV1 000 小于 $-10 \times 10^{-10} \text{ g}/(\text{s} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{hPa})$ 的区间内,而这一区间内的非迅速加强频率仅为 49.6%。

本文提出一种新的阈值计算方法,并计算出南海不同级别 TC 迅速加强过程中 10 个环境场因子的阈值范围及其对应的迅速加强概率。结果表明,对于强台风以下级别的南海 TC 来说,环境场因子满足阈值条件时,TC 级别越高迅速加强概率越大。低层水汽通量散度因子和低层散度因子在不同等级 TC 中均表现出较高的迅速加强概率,海洋下垫面因子迅速加强概率较低。同时还发现,TC 等级越强各因子的超前时间越短,说明 TC 强度越强迅速加强时对环境场因子的变化越敏感。对南海不同级别 TC 迅速加强过程中环境场因子的综合贡献进行分析。结果表明,南海 TC 级别越高,迅速加强时满足阈值的因子个数越多。满足阈值的因子个数为 6 个(热带风暴级别)或 5 个(强热带风暴级别、台风和强台风级别)时迅速加强概率最大,此时热带风暴级别、强热带风暴级别、台风和强台风级别南海 TC 迅速加强概率分别达到 50.00%、30.43%、42.11%。通过对 2013—2014 年南海海域 TC 加强过程的检验也证明,本文给出的环境场阈值条件可较好地将迅速加强和非迅速加强过程区分开,为预报工作提供一定的指导意义。

通过本文的研究可发现,不同环境场因子对南海 TC 迅速加强的贡献大小并不相同,有些因子对南海 TC 迅速加强贡献较小(例如对流层中层相对湿度因子),在今后的研究工作和预报中可以省略。对于水汽辐合因子当 TC 强度大于强热带风暴级别时需要考虑 850 hPa 水汽通量散度因子的作用,而当 TC 强度较小时则应当多考虑较低层次的水汽辐合(例如热带风暴级别 TC 中 MDIV1 000 因子对应迅速加强概率最高)。然而环境场并非造成南海 TC 迅速加强的唯一影响因子,TC 内部结构等因素也会造成迅速加强现象。本文在统计过程中发现存在一些在满足阈值的环境场因子个

数较少的条件下仍然发生了迅速加强现象,78次迅速加强过程中共有3次发生在仅有一个环境场因子满足阈值条件的情况下。这些个例为何能够

在环境场条件不十分有利的情况下发生迅速加强将在今后的工作中进行进一步的研究和分析。

参 考 文 献:

- [1] 陈国民,余晖,曹庆. 2012年西北太平洋热带气旋预报精度评定[J]. 气象, 2013, 39(10): 1 350-1 358.
- [2] KAPLAN J, DEMARIA M. Large-scale characteristics of rapidly intensifying tropical cyclones in the North Atlantic basin[J]. Wea Forecasting, 2003, 18(6): 1 093-1 108.
- [3] 端义宏,余晖,伍荣生. 热带气旋强度变化研究进展[J]. 气象学报, 2005, 63(5): 636-645.
- [4] CHU H, WU R. Environmental influences on the intensity change of tropical cyclones in the Western North Pacific[J]. J Meteor Res, 2013, 27(3): 335-343.
- [5] KRISHNAMURTI T N, PATTNAIK S, STEFANOVA L, et al. The hurricane intensity issue[J]. Mon Wea Rev, 2005, 133(7): 1 886-1 912.
- [6] 陈乾金. 我国近海台风突然加强和眼结构变化及其与环流背景关系的统计研究[J]. 海洋学报, 1996, 18(3): 121-127.
- [7] 陆波,钱维宏. 华南近海台风突然增强的初秋季节锁相[J]. 地球物理学, 2012, 55(5): 1 523-1 531.
- [8] SHIEH O H, FIORINO M, KUCAS M E, et al. Extreme Rapid Intensification of Typhoon Vicente (2012) in the South China Sea[J]. Wea Forecasting, 2013, 28(6): 1 578-1 587.
- [9] LI Y, GUO L, XU Y, HU S. Impacts of upper-level cold vortex on the rapid change of intensity and motion of typhoon Meranti (2010)[J]. J Trop Meteor, 2012, 18(2): 207-219.
- [10] 胡春梅,端义宏,余晖,等. 华南地区热带气旋登陆前强度突变的大尺度环境诊断分析[J]. 热带气象学报, 2005, 21(4): 377-382.
- [11] 吕心艳,端义宏. 季风槽内热带气旋生成的基本特征分析[J]. 气象学报, 2011, 69(6): 990-1 000.
- [12] 冯涛,沈新勇,黄荣辉,等. 热带西太平洋赤道气流的年际变化对西北太平洋热带气旋生成的影响[J]. 热带气象学报, 2014, 30(1): 11-22.
- [13] CHEN P, YU H, JOHNNY C L. A western north pacific tropical cyclone intensity prediction scheme[J]. J Meteor Res, 2011, 25(5): 611-624.
- [14] 梅双丽,江静. 西北太平洋热带气旋迅速增强特征及其影响因子[J]. 热带气象学报, 2012, 28(1): 1-11.
- [15] 孙红梅,汤杰,雷小途. 不同数据集下西北太平洋热带气旋变性特征的比较[J]. 热带气象学报, 2014, 30(3): 443-454.
- [16] 阎俊岳,张秀芝. 热带气旋迅速加强标准的研究[J]. 气象, 1995, 21(5): 9-13.
- [17] 阎俊岳. 近海热带气旋迅速加强的气候特征[J]. 应用气象学报, 1996, 7(1): 28-35.
- [18] KURIHARA Y, BENDER M A, ROSS R J. An initialization scheme of hurricane models by vortex specification[J]. Mon Wea Rev, 1993, 121(7): 2 030-2 045.
- [19] KURIHARA Y, BENDER M A, TULEYA R E, et al. Improvements in the GFDL hurricane prediction system[J]. Mon Wea Rev, 1995, 123(9): 2 791-2 801.
- [20] 陈联寿,丁一汇. 西太平洋台风概论[M]. 北京: 科学出版社, 1979: 1-491.
- [21] WANG H, WANG Y. A Numerical Study of Typhoon Megi (2010): Part I: Rapid Intensification[J]. Mon Wea Rev, 2014, 142(1): 29-48.
- [22] 高栓柱,吕心艳,王海平,等. 热带气旋莫兰蒂(1010)强度的观测研究和增强条件的诊断分析[J]. 气象, 2012, 38(7): 834-840.
- [23] ZHAO B, DUAN Y, YU H, et al. A statistical analysis on the effect of vertical wind shear on tropical cyclone development[J]. Acta Meteor Sinica, 2006, 20(3): 383-388.
- [24] PALMER C K, BARNES G M. The effect of vertical wind shear as diagnosed by the NCEP/NCAR reanalysis data on northeast Pacific hurricane intensity[C]//25th Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology. San Diego: Amer Meteor Soc, 2002:122-123.
- [25] CHAN J C L, DUAN Y, SHAY L K. Tropical cyclone intensity change from a simple ocean-atmosphere coupled model[J]. J Atmos Sci, 2001, 58(2): 154-172.
- [26] LIN I I, WU C C, EMANUEL K A, et al. The interaction of super typhoon Maemi (2003) with a warm ocean eddy[J]. Mon Wea Rev, 2005, 133(9): 2 635-2 649.
- [27] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术(第2版)[M]. 北京: 气象出版社, 2007: 32-33.

ANALYSIS OF ENVIRONMENTAL VARIABLES OF RAPIDLY INTENSIFYING TROPICAL CYCLONES IN THE SOUTH CHINA SEA

HU Hao, DUAN Yi-hong

(State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: Based on the CMA-STI tropical cyclone best track data, spatial and temporal characteristics of rapidly intensifying tropical cyclones (RITCs) from 1979 to 2012 are investigated. The results show that in the South China Sea (SCS) the RITCs are most likely to happen in summer and autumn and reach the highest frequency in September. Besides, spatial distribution indicates that the RITCs mainly appear to the southeast of Hainan Island and in the central part of SCS. Based on the ERA-Interim reanalysis data (4 times daily), a new threshold calculation method is introduced. The threshold and probability of eight environmental variables of vertical wind shear, high and low level divergence, low level vorticity, low level moisture flux convergence, mid-level relative humidity, sea surface temperature and ocean heat content are calculated. The results show that vertical wind shear, low level convergence, and low level moisture flux convergence are the key variables associated with the RITCs. For tropical cyclones with the strength under Severe Typhoon, the stronger the intensity, the higher the probability of rapid intensification is. Without consideration of ocean heat content, we found that the probability of RITCs reach the highest when six (for Tropical Storm) or five (for Severe Tropical Storm, Typhoon & Severe Typhoon) of the seven variables meet the threshold. These results could be useful in forecasting the RITCs in the SCS.

Key words: synoptics; rapid intensification of tropical cyclone; statistical analysis; environmental field; threshold