

Influence of Scale Interaction on Tropical Cyclone Genesis Number over the Western North Pacific

Mengxiang Xu

College of Oceanic and Atmospheric Sciences, Ocean University of China, Qingdao Shandong
Email: x1970418924@163.com

Received: Jun. 27th, 2019; accepted: Jul. 5th, 2019; published: Jul. 12th, 2019

Abstract

Based on the best-track data of tropical cyclone (TC) provided by Regional Specialized Meteorological Center-Tokyo Typhoon Center of Japan Meteorological Agency (RSMC), a statistical analysis of TC genesis number was made and the reason for its difference on inter-annual scale was discussed. Results indicated that, during extreme high years of TC genesis number, the barotropic energy converted between large-scale low-frequency circulation, intra-seasonal oscillation (ISO) and synoptic scale eddy (SSE) increased more TC over South China Sea-Philippines and eastern part of the Western North Pacific. As for the region of South China Sea-Philippines, large-scale background environmental factors played a dominant role. The barotropic energy conversion between large-scale background low-frequency circulation and SSE leads to the enhancement of SSE kinetic energy. The relative vorticity in the lower troposphere and the anomalous ascending motion in the middle troposphere provided favorable dynamic conditions for the generation and development of TC and SSE. As for the region of eastern part of the Western North Pacific, with the strengthened ISO activity and favorable dynamic conditions, such as increased relative vorticity, anomalous ascending motion and decreased vertical wind shear, SSE obtained more barotropic energy from large-scale low-frequency circulation, which benefited the generation and development of SSE, and further led to more TC generate over this region.

Keywords

Western North Pacific, Tropical Cyclone Genesis Number, Synoptic Scale Disturbance, Intra-Seasonal Oscillation, Large Scale Background Circulation

尺度相互作用对西北太平洋热带气旋生成频数的影响分析

徐梦翔

中国海洋大学海洋与大气学院, 山东 青岛
Email: x1970418924@163.com

收稿日期: 2019年6月27日; 录用日期: 2019年7月5日; 发布日期: 2019年7月12日

摘要

根据日本气象厅区域专业气象中心 - 东京台风中心(Regional Specialized Meteorological Center, RSMC)提供的热带气旋(Tropical cyclone, TC)最佳路径数据集, 对盛期(7~10月)生成于西北太平洋的TC进行了统计, 探究了其在年际上的差异及其产生原因。研究发现在TC生成频数异常偏高年, 南海 - 菲律宾(10°N~20°N, 110°E~130°E)和西北太平洋中东部(15°N~25°N, 140°E~170°E) TC生成频数显著增多的主要原因是大尺度背景低频环流, 季节内振荡(Intra-seasonal Oscillation, ISO)和天气尺度涡(Synoptic Scale Eddy, SSE)三者之间的正压能转换造成的。在南海 - 菲律宾地区, 大尺度背景环境因子占主导作用, 大尺度背景低频环流与SSE间的正压能转换导致SSE动能加强。该区对流层低层相对涡度和中层异常上升运动, 为TC和SSE的生成发展提供了有利动力条件。而在西北太平洋中东部地区, 季节内振荡(Intra-seasonal Oscillation, ISO)活动加强, 伴随有利的动力条件, 如低层较大的相对涡度和较小的垂直风切变, 使得SSE从大尺度低频环流中获得正压能, 导致该区SSE生成发展, TC生成频数增多。

关键词

西北太平洋, 热带气旋生成频数, 天气尺度扰动, 季节内振荡, 大尺度背景环流

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

开展热带气旋的天气和气候预测研究具有重要的社会经济价值和科学意义。西北太平洋是热带气旋生成最活跃的区域, 每年大约有 1/3 的热带气旋在该地区生成[1]。其中平均每年在我国登陆的热带气旋有 6~8 个[2], 给我国沿海城市带来大暴雨以及热带气旋深入内陆引发的暴雨洪涝等重大灾害。严重影响了人民生活和社会经济的发展[3]。

热带大气环流中有多种时空尺度的大气涡旋和天气现象共存, 包括年际变化、季节变化、季节内振荡(Intra-seasonal Oscillation, ISO)和天气尺度扰动(如天气尺度涡(Synoptic Scale Eddy, SSE)、TC)等, 大气中各种时空尺度之间存在着各种形式的能量转换和不同尺度之间的相互作用[4]。TC 的生成与发展与大气中各种尺度之间的相互作用密切相关[5] [6]。天气尺度涡是 TC 的初始扰动源, SSE 与平均流相互作用过程中 SSE 活动的变化能影响 TC 的生成[7] [8]。大尺度平均气流与 SSE 间的正压能量转化是热带扰动生成和发展的重要机制[9]。ISO 活动能影响 SSE 动能变化, ISO 西风位相时, 较强的正压能转换有利于 SSE 和 TC 生成, ISO 东风位相时, 正压能转换较弱[10]。上述研究主要着重于探究平均流和 ISO 对 SSE 和 TC 生成的单独影响, 而关于 SSE 和 TC 向平均流和 ISO 的能量转换过程没有涉及。

但是反能量串级过程在不同尺度之间的相互作用同样很重要, SSE 可能反向影响平均流和 ISO 活动, 小尺度能量向大尺度能量输送。SSE 和季节平均环流存在相互作用, 研究发现当西北太平洋 SSE 移动到

副热带和中纬度地区, SSE 向季节平均环流输送涡动能[11], 同样 SSE 和 ISO 活动之间也存在相互作用, 研究发现将原始场中 SSE 环流去除之后, 沿 SSE 路径的低层涡度的 ISO 方差减少[12]。因此 SSE 还可能向平均环流和 ISO 活动进行反向能量输送, 从而丢失能量, 研究三者之间的能量转换及其相互作用过程是必要的。在上述研究工作的基础上, 由于上述研究尺度相互作用中的动能诊断公式只包含了平均流和 SSE, 因此也只描述了二者的相互作用过程。所以, 为了研究三种尺度之间的相互作用, 有必要在此基础上分离出季节平均环流(≥ 90 天)、ISO (10~90 天)和 SSE (≤ 10), 以进一步探究 SSE 与大尺度平均环流、ISO 之间的相互作用。研究发现, 无论 ISO 在哪个位相, SSE 总是从平均流中获得动能[13]。而 SSE 与 ISO 的相互作用过程在不同 ISO 位相有差异, ISO 西风位相时, SSE 从 ISO 中获得动能, ISO 东风位相时, SSE 丢失动能。而且研究发现影响 SSE 生成的能量转化过程主要是大气正压能转化, 在 ISO 东风位相, SSE 不仅损失正压能, 从平均流中获得的正压能也很少, 不利于 SSE 生成[13] [14]。上述研究主要是从气候平均态探究大气中各种尺度之间的相互作用的, 而且从年代际的角度研究发现, SSE 从平均流和 ISO 中损失的正压能是导致西北太平洋 TC 生成在 1998 年突变减少的重要原因[15]。

但是在年际时间尺度上尺度相互作用过程对 SSE 活动和 TC 的变化的研究明显不足。最近的研究发现, 南海($5^{\circ}\text{N}\sim 25^{\circ}\text{N}$, $110^{\circ}\text{E}\sim 120^{\circ}\text{E}$)和西北太平洋($5^{\circ}\text{N}\sim 25^{\circ}\text{N}$, $120^{\circ}\text{E}\sim 180^{\circ}\text{E}$)两个区域内 TC 的生成频数在年际变化尺度上是相互独立的, 且具有明显的区域性差异[16]。而前人的研究还缺乏对尺度相互作用影响 TC 的区域性差异的关注。因此, 本文选取整个西北太平洋 TC 的盛期(7~10 月), TC 生成频数异常偏多、偏少年进行合成分析, 探究尺度相互作用在 TC 生成中的贡献, 以及在不同地区的贡献, 为 TC 的预测提供可能的依据。

2. 数据与方法

2.1. 数据来源

热带气旋资料: 日本气象厅区域专业气象中心 - 东京台风中心(Regional Specialized Meteorological Center, RSMC)热带气旋 6 小时最佳路径数据集。

环境变量资料: 欧洲数值预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECWMF), 中 ERA-interim 月平均资料。时间为 1979~2014 年, 分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$, 垂直层为 17 层。其中本文所用日资料包括纬向风(U)、经向风(V)、垂直速度(ω)、温度(T), 月平均资料包括相对湿度(RH)、比湿(Q)、垂直速度(ω)、相对涡度等(ζ)。月平均海平面温度资料来源于哈德莱环流中心(Met Office Hadely Centre)中 HadISST1 数据集, 分辨率为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$, 分析时间范围为 1979~2014 年。

2.2. 方法

任意环境变量 A 可由下式表示[13] [14]:

$$A = \tilde{A} + A'_I + A'_S \quad (1)$$

其中, \tilde{A} 代表背景流低频信号(≥ 90 天), $'$ 代表高频分量, I 为季节内振荡信号(ISO, 10~90 天), S 为天气尺度信号(SSE, ≤ 10 天)。

SSE 动能平衡方程为[13] [14]:

$$\frac{\partial K'_S}{\partial t} = \underbrace{-V'_S \cdot [(V'_S)_3 \cdot \nabla_3]}_{CK_{M-S}} \tilde{V} - \underbrace{V'_S \cdot [(V'_S + V'_I)_3 \cdot \nabla_3]}_{CK_{I-S}} V' - \underbrace{\frac{R}{P} T'_S \omega'_S}_{CE} - \underbrace{-V'_3 \cdot \nabla_3 K'_S}_{AK} - \underbrace{-\nabla_3 \cdot (V'_S \phi'_S)}_{BG} + D \quad (2)$$

其中

$$CK_{M-S} = -\overline{u_s'^2 \frac{\partial \tilde{u}}{\partial x}} - \overline{u_s' v_s' \frac{\partial \tilde{u}}{\partial y}} - \overline{u_s' v_s' \frac{\partial \tilde{v}}{\partial x}} - \overline{v_s'^2 \frac{\partial \tilde{v}}{\partial y}} - \overline{u_s' \omega_s' \frac{\partial \tilde{u}}{\partial p}} - \overline{v_s' \omega_s' \frac{\partial \tilde{v}}{\partial p}} \quad (3)$$

$$CK_{I-S} = -\overline{u_s'^2 \frac{\partial u_I'}{\partial x}} - \overline{u_s' v_s' \frac{\partial u_I'}{\partial y}} - \overline{u_s' v_s' \frac{\partial v_I'}{\partial x}} - \overline{v_s'^2 \frac{\partial v_I'}{\partial y}} - \overline{u_s' \omega_s' \frac{\partial u_I'}{\partial p}} - \overline{v_s' \omega_s' \frac{\partial v_I'}{\partial p}} \quad (4)$$

$$-\overline{u_s' u_I' \frac{\partial u_I'}{\partial x}} - \overline{u_s' v_I' \frac{\partial u_I'}{\partial y}} - \overline{v_s' u_I' \frac{\partial v_I'}{\partial x}} - \overline{v_s' v_I' \frac{\partial v_I'}{\partial y}} - \overline{u_s' \omega_I' \frac{\partial u_I'}{\partial p}} - \overline{v_s' \omega_I' \frac{\partial v_I'}{\partial p}}$$

上式中 $K'_S = \frac{1}{2}(u_s'^2 + v_s'^2)$ 为 SSE 动能；横线为 10 天滑动平均， V 为水平风， T 为温度， ω 为垂直速度， R 为气体常数， ϕ 为位势。代表平均流与 SSE 之间的正压能转换，代表 ISO 与 SSE 之间的正压能转换，两者共同构成 CK 代表正压能转换的整个过程。 CE 代表有效位能与 SSE 动能间的斜压能转换。 AK 代表平均流和 SSE 产生的动能平流。 BG 代表重力位势边界通量辐合产生的 SSE 动能。 D 代表摩擦耗散和次网格过程的影响。

本文中采用 LANCZOS 时间滤波法提取低频环流、ISO 以及 SSE 信号。LANCZOS 时间滤波法是依据不同时间尺度提取原始场各时间分量的滤波方法。主要依据以下线性关系： $Y_t = \sum w_k x_{t-k}$ 其中 w_k 为权重函数， x 为时间序列， y 为经过高通滤波的时间序列[17]。除此之外，本文还采用了曼惠特尼 (Mann-Whitney) 秩检验法判断两样本间差异是否显著。

文中判断成为 TC 的标准是指其最大持续风速达到 34 kt。TC 生成频数的空间分布是将西北太平洋 ($0^\circ\text{N}\sim 40^\circ\text{N}$, $100^\circ\text{E}\sim 180^\circ\text{E}$) 划分为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 网格后，统计每个网格中每年盛期(7~10 月)的 TC 生成个数得到。

3. 热带气旋生成频数的年际变化

图 1 为盛期(7~10 月)和全年的西北太平洋 TC 生成频数的标准化时间序列。盛期西北太平洋上生成的 TC 数占全年的 70%，因此，盛期 TC 生成频数的年际变化近似反映全年的年际变化。盛期 TC 生成频数不仅有显著的年际变化特征，还在 1998 年前后有显著的年代际转折，前人研究中，Hsu 等[15]和 Hu 等[18]详细论述了这一突变产生的原因，本文主要关注年际上的变化。于是将 TC 生成频数标准化时间序列达到 0.7 (-0.7) 标准的年份视为异常偏高(偏低)年份，异常年份的统计结果见表 1。

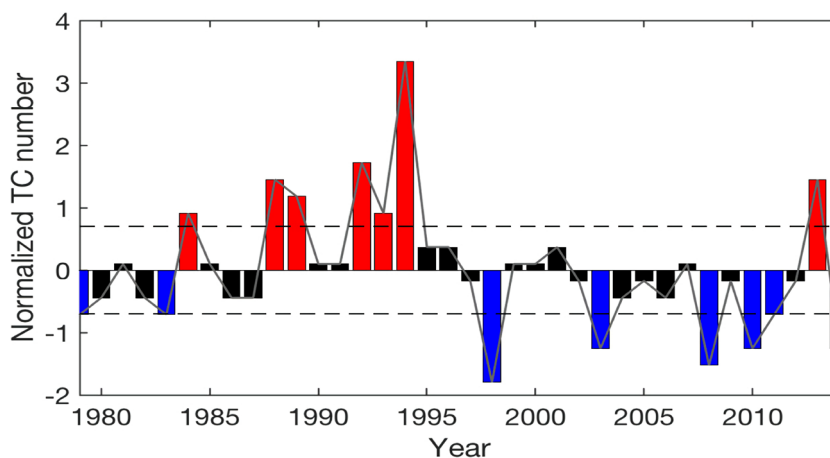


Figure 1. Normalized time series of TC genesis number during peak season (bar) and whole year (solid line) over Western North Pacific. The dashed line represents for threshold of 0.7, red bar means normalized TC genesis number exceed 0.7, blue bar means normalized TC genesis number lower than -0.7

图 1. 盛期(7~10 月, 条柱)和全年(实线)的西北太平洋 TC 生成频数标准化时间序列。虚线代表 ± 0.7 标准差, 红色柱代表超过 0.7 标准差, 蓝色柱代表低于 -0.7 标准差

Table 1. Extreme high (H) and low (L) years of TC genesis number during peak season over Western North Pacific
表 1. 盛期西北太平洋 TC 生成频数异常偏高(H)、偏低(L)年份

异常偏高(H)	1984	1988	1989	1992	1993	1994	2013
异常偏低(L)	1979	1998	2003	2008	2010	2011	2014

为了看 TC 生成频数在异常偏高、偏低年空间分布上的差异，进行了合成分析(图 2)。从图 2(a)可以看出，在异常偏高年，TC 主要生成在南海、菲律宾沿岸以东以及西北太平洋中东部地区。在异常偏低年(图 2(b))，TC 主要生成于菲律宾沿岸以东，生成频数其分布范围都较小。相比于异常偏低年，偏高年的 TC 主要在南海 - 菲律宾沿岸(10°N~20°N, 110°E~130°E)以及西北太平洋中东部(15°N~25°N, 140°E~170°E)显著增多(图 2(c))。

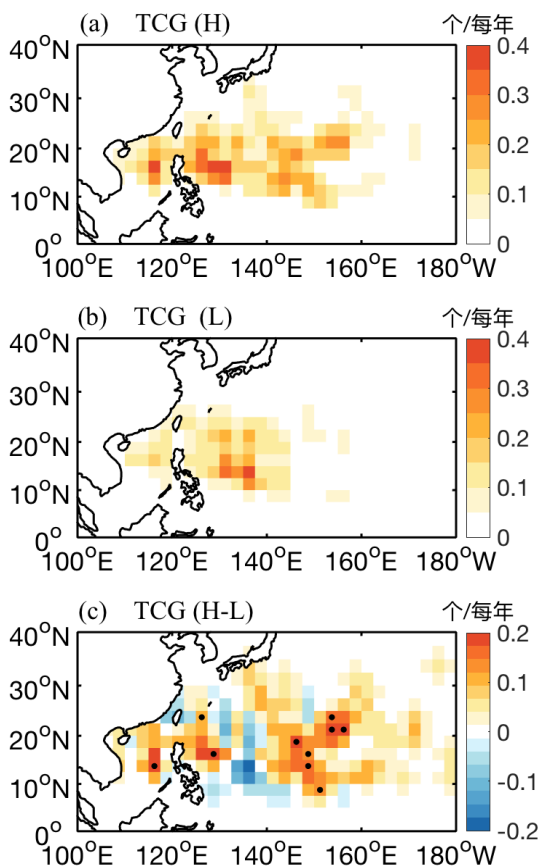


Figure 2. TC genesis number composite during peak season in extreme years of high (a), low (b), and their difference (high-minus low). Black dots in (c) represent differences passed 95% statistically significance test

图 2. 盛期西北太平洋 TC 生成频数在异常偏高(a)，偏低年(b)和偏高 - 偏低年差异(c)的合成。(c)中黑点代表差值通过 95%显著性检验

4. 天气尺度、季节内振荡动能及大尺度环境因子差异

众多研究表明 SSE 能为 TC 生成提供初始扰动，那么南海 - 菲律宾和西北太平洋中东部地区 TC 生成频数的增多是否和 SSE 活动增强有关？图 3(a)~(c)为 SSE 动能在异常偏高、偏低年的差异。不难发现，对流层低层 SSE 动能的分布在异常偏高年比偏低年更向东延伸，南海 - 菲律宾及西北太平洋中东部 SSE 动能显著增强，与 TC 生成频数在这两个地区显著增多一致。这说明增强的 SSE 活动可能提供更多(或更

强)的初始扰动, 有利于 TC 生成。

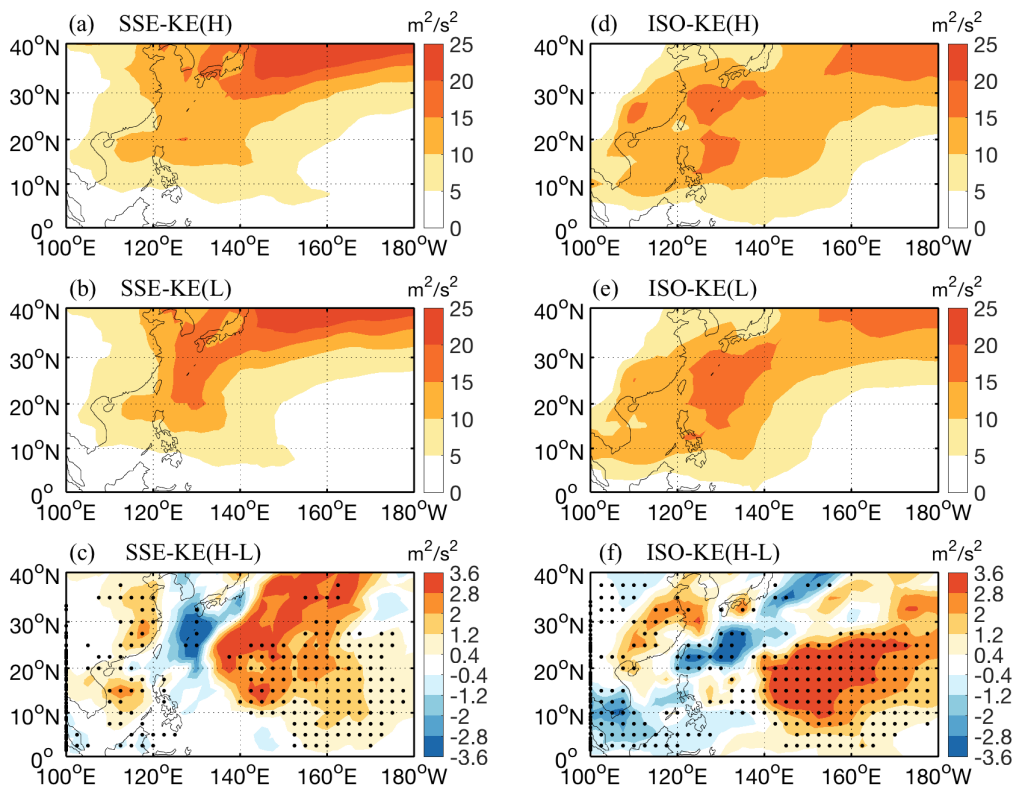


Figure 3. Composite of SSE and ISO kinetic energy distribution at 850 hPa during extreme high years (a, d), low years (b, e) and difference (c, f). Black dots in (c, f) represent differences passed 95% statistically significance test

图 3. 850 hPa SSE 动能和 ISO 动能在异常偏高年(a, d)异常偏低年, (b, e)和异常偏高 - 偏低年差异(c, f)的合成。(c, f)中黑点代表差值通过 95%显著性检验

从以上的分析得知, TC 生成频数的变化与 SSE 活动关系紧密, 那么导致 SSE 活动变化的原因又是什么呢? 前人研究表明[19], ISO 向 SSE 的能量转化有利于天气尺度扰动的生成和发展。从对流层低层 ISO 动能分布来看(图 3(d)、图 3(f)), 整体呈现西南 - 东北向的倾斜分布, 在异常偏高年, 140°E 以东 ISO 动能显著增强, 这与 SSE 动能差异分布一致。同样地, 西北太平洋中东部增强的 ISO 动能与 TC 生成频率增多相对应, 这表明异常的 ISO 活动可能影响 SSE、TC 的生成。而在南海 - 菲律宾 SSE 动能、TC 增多的区域, ISO 动能并没有表现出一致显著增强趋势, 这说明 ISO 活动可能在不同地区贡献不同。

除了 ISO, 大尺度背景环流条件也能影响 SSE 和 TC 活动。图 4 给出了可能影响 TC 活动的热力、动力因子在异常偏高、偏低年及差异分布。可以发现, 太平洋海温在异常偏高年呈现类似厄尔尼诺的分布状态, 东太平洋海温异常偏高, 西太平洋异常偏低。在 SSE 活动和 TC 生成频数增加的南海 - 菲律宾及西北太平洋中东部两个地区, 海温异常偏低, 这说明该区域的局地海温的变化可能不是影响 SSE 和 TC 生成的关键因子, 这与 Choi 等[20]的结论一致。此外, 在异常偏高年, 对流层中低层相对湿度在西北太平洋中部减少、东部增加(图 4(b)), 不利于 SSE 和 TC 在中部生成, 有利于其在东部生成, 这与实际 TC 异常分布情况不符。对流层低层相对湿度在整个中低纬度地区加强(图 4(c)), 以及西北太平洋中东部显著减弱的垂直风切变(图 4(e))均为西北太平洋中东部地区的 SSE 和 TC 的生成提供了有利的条件。而在南海地区, 显著加强的低层相对涡度(图 4(c))和异常上升运动(图 4(d))有利于 SSE 和 TC 生成, 其它因子变化不显著, 影响较小。这说明动力因子(低层相对涡度、垂直风切变)在影响 SSE 和 TC 生成中占主导作用。

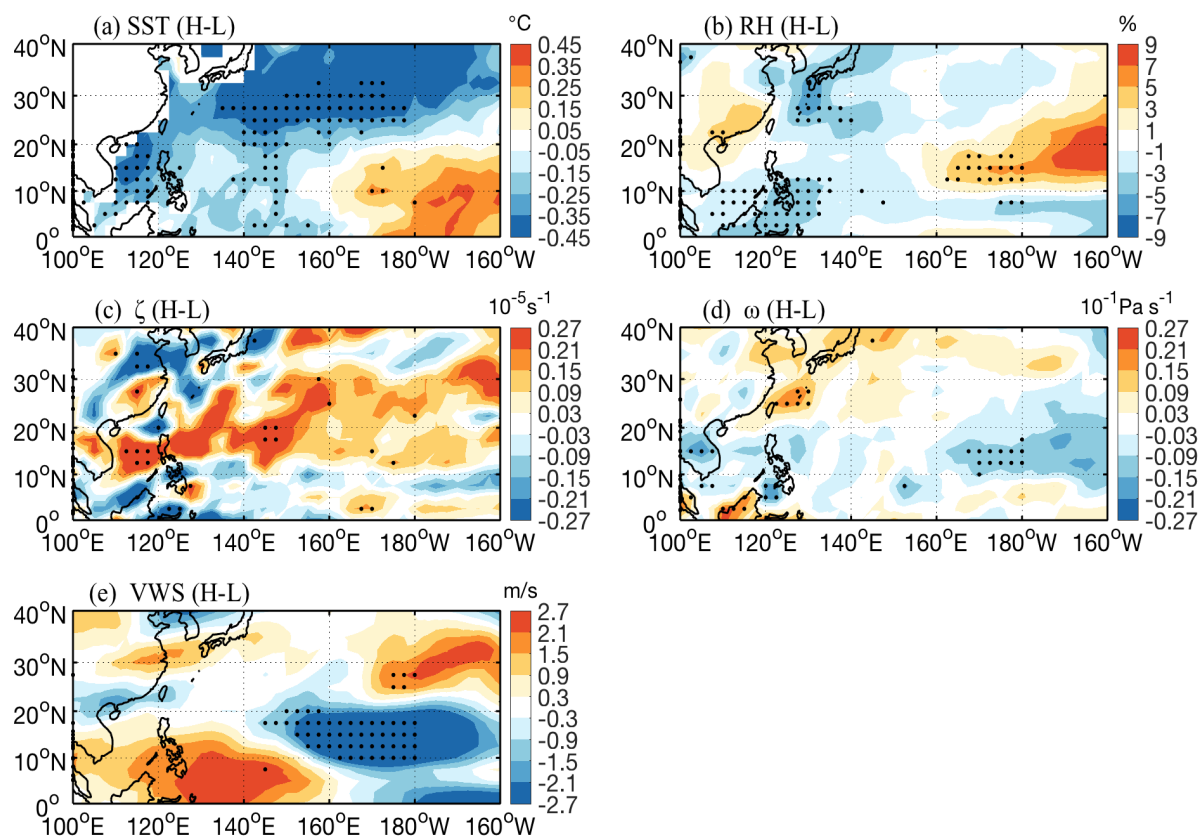


Figure 4. Difference composite (high minus low years) of large-scale variables of SST (a), relative humidity at 700 hPa (b), relative vorticity at 850 hPa (c), p-level vertical speed at 500 hPa (d), vertical wind shear between 200 hPa and 850 hPa (e). Black dots in (a-e) represent differences passed 95% statistically significance test

图 4. 大尺度环境因子 SST(a), 700 hPa 相对湿度(b), 850 hPa 相对涡度(c), 500 hPa 垂直速度(d), 200~850 hPa 垂直风切变(e)在异常偏高 - 偏低年的差异合成。(a~e)中黑点代表差值通过 95%显著性检验

综合以上分析可知, 在异常偏高年, 对应南海 - 菲律宾 TC 增多和 SSE 活动增强, ISO 活动变化不显著, 大尺度环境条件有利; 对应西北太平洋中东部 TC 生成增多和 SSE 活动增强, ISO 活动增强、大尺度背景环流条件也有利。因此, ISO 活动和大尺度背景环流与 SSE 和 TC 的生成关系密切, 下面将从能量转化的角度来探究它们之间的联系。

5. SSE 动能变化诊断

为了探究导致南海 - 菲律宾和西北太平洋中东部地区与 TC 生成频数增加相对应的 SSE 动能增加的物理过程。因为研究表明正压能转换(CK)、斜压能转换(CE)项是导致 SSE 动能变化的源和汇[10]。所以将这两项沿 TC 主要生成带(10°N~25°N)平均, 得到其经向 - 垂向剖面(图 5)。

可以看出, 对流层低层(850 hPa 及以下)西北太平洋正压能转换项为正值, 且在南海 - 菲律宾地区有较大的正值中心, 这说明低层 SSE 通过正压转换过程从低层环流中获得能量(图 5(a), 图 5(b))。而在高层, 西北太平洋中西部 SSE 的正压能为负值, SSE 向高层环流输送能量; 西北太平洋东部, SSE 从高层环流获得能量。TC 生成频数异常偏高年份, 南海 - 菲律宾地区正压能显著增加, 西北太平洋中东部也有所增加, 增加的幅度的相对较弱(图 5(c))。相对应地, SSE 的斜压能转换项在对流层中高层有较大的正值, 在中层为负值, 低层有较小的正值。说明在低层, SSE 通过对流有效位能的转换过程获得较弱的能量。TC 生成频数异常偏高年份, 斜压能在南海 - 菲律宾有一定的加强, 而在西北太平洋中东部无显著变化(图 5(f))。

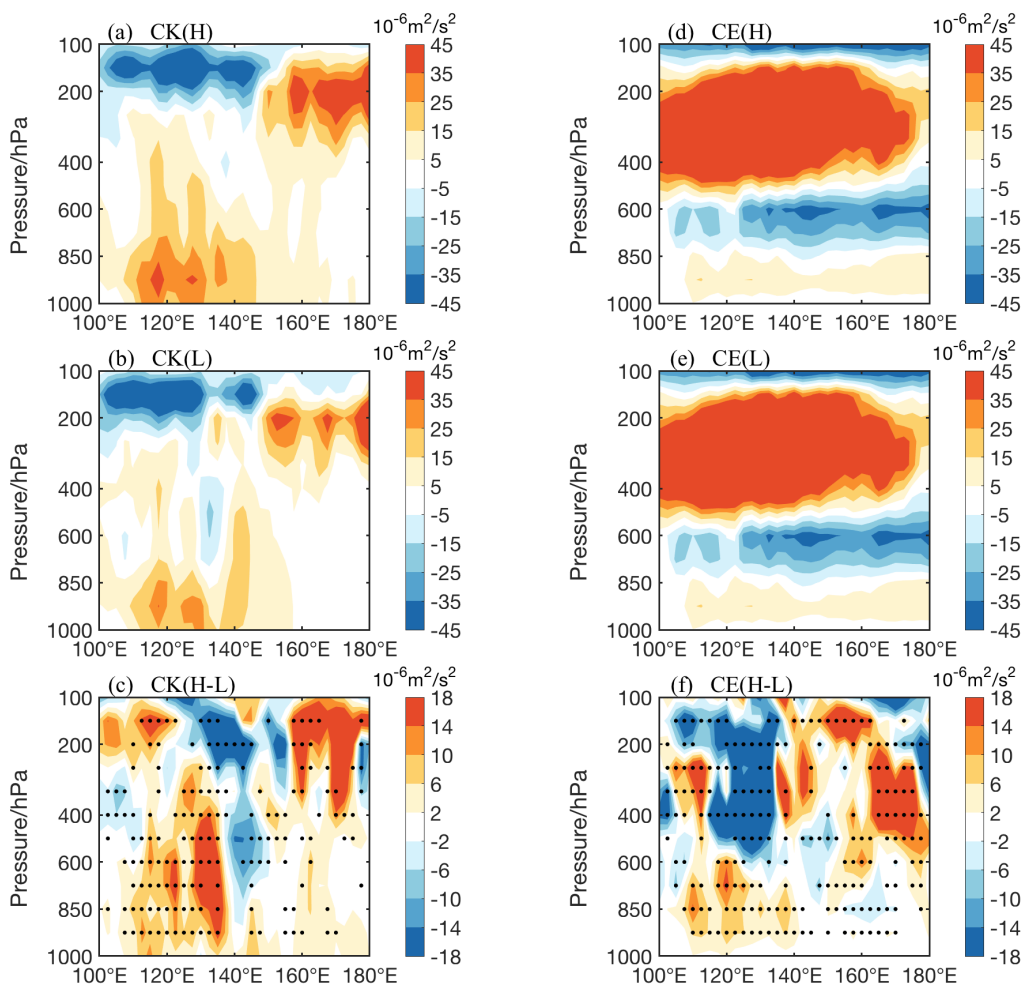


Figure 5. Vertical cross section of SSE barotropic and baroclinic energy conversion along $10^{\circ}\text{N} - 25^{\circ}\text{N}$ during extreme high (a, d), low (b, e) years, and difference (c, f). Black dots in (c, f) represent differences passed 95% statistically significance test

图 5. 正压能和斜压能转换项沿 $10^{\circ}\text{N} - 25^{\circ}\text{N}$ 平均的经向 - 垂向剖面在异常高年(a, d), 异常低年(b, e)和异常偏高 - 偏低年差异(c, f)的合成。(c, f)中黑点代表差值通过 95% 显著性检验

为了更细致地看 SSE 动能收支的各项在不同地区的具体分布,图 6 给出了正压能转换、斜压能转换、位势通量散度以及动能平流项在异常偏高 - 偏低的差异合成。可以发现,在异常偏高年,南海 - 菲律宾和西北太平洋中东部这两个地区 CK 显著增加(图 6(a)),分别达到 $7.1 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-3}$ 和 $2.61 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-3}$ (表 2)。而 CE 只在南海 - 菲律宾有较弱的加强,在西北太平洋变化较弱(图 6(d))。说明低层正压转换过程是影响 SSE 和 TC 生成主要因素,正的能量转换是导致上述两个区域 SSE 活动加强,从而导致 TC 生成增加。除此之外,西北太平洋西北部 CK 为负值,与 TC 较少在该区生成相对应。从公式(2)中我们知道,CK 是由两项构成,它们分别代表背景低频环流和 ISO 与 SSE 相互作用时的正压能转换过程。在南海 - 菲律宾和西北太平洋中东部均为正值,分别达到 $8.49 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-3}$ 和 $1.92 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-3}$,说明 SSE 能从低频背景环流中获得正压能,但在南海 - 菲律宾地区获得的能量要多于西北太平洋中东部(图 6(b),表 2)。在两个 TC 生成增多的区域差异较大,在南海 - 菲律宾主要为负值,达到 $-1.43 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-3}$,表明 ISO 与 SSE 相互作用时,SSE 是向 ISO 环流输送能量;而在西北太平洋中东部为较小的正值,为 $0.69 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-3}$,SSE 从 ISO 环流中获得能量(图 6(c))。位势边界通量散度和动能平流项是 SSE 动能的输送项。研究表明位势通量能指示罗斯贝波的传播[21],从图 6(e)可以看出,天气尺度罗斯贝波在南海和西北太平洋

中东部形成辐散中心, SSE 动能向外输送而减少(图 6(f))。南海较弱的波动和西北太平洋中东部较强的波动在 130°E 附近汇合, 形成位势通量的辐合中心(图 6(e)), 导致 SSE 动能在此汇聚(图 6(f))。位势通量散度和动能平流项反向变化的幅度相当, 相互抵消。

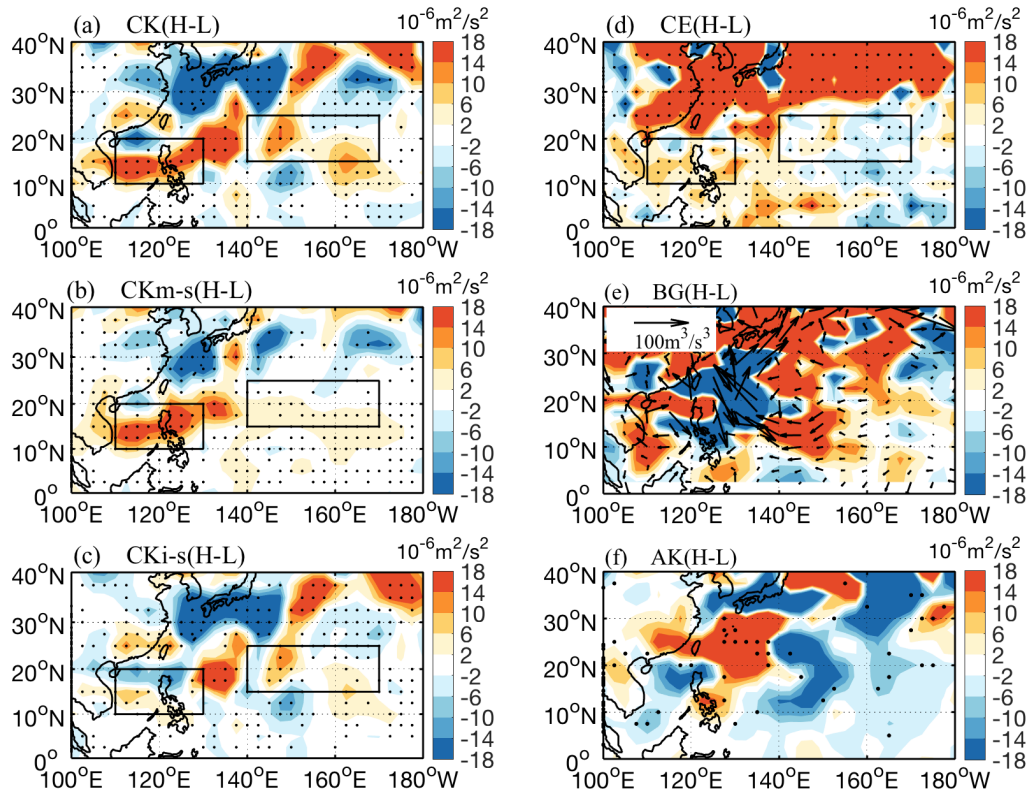


Figure 6. Composite of difference (high minus low years) of SSE barotropic energy conversion (a), kinetic energy conversion from background low frequency circulation to SSE (b), kinetic energy conversion from ISO to SSE (c), baroclinic energy conversion (d), boundary geopotential flux divergence (shading) and geopotential flux (vector) (e), kinetic energy advection (f) at 850 hPa. The black box in (a-d) represent more TC tend to generate in South China Sea-Philippines (10°N - 20°N, 110°E - 130°E) and central and eastern part of Western North Pacific (15°N - 25°N, 140°E - 170°E). Black dots in (c, f) represent differences passed 95% statistically significance test

图 6. 850 hPa 总正压能转换项(a), 低频背景环流向 SSE 动能转换项(b), ISO 动能向 SSE 动能转换项(c), 斜压能转换项(d), 重力位势边界通量散度(填色)和位势通量(矢量)(e), 动能平流(f)在异常高 - 低年差异的合成。黑色方框为 TC 生成数异常偏多区域, 分别为南海 - 菲律宾(10°N~20°N, 110°E~130°E)和西北太平洋中东部(15°N~25°N, 140°E~170°E)。图中黑点代表差值通过 95%显著性检验

Table 2. Difference (high minus low years) of barotropic energy conversion (unit: $10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-3}$) over South China Sea-Philippines and central and eastern part of Western North Pacific

表 2. 正压能转换项在南海 - 菲律宾和西北太平洋中部地区的异常偏高 - 偏低年的差值(单位: $10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-3}$)

	CK	CK _{M-S}	CK _{J-S}
南海 - 菲律宾	7.1	8.49	-1.43
西北太平洋中东部	2.61	1.92	0.69

综上所述, 主要是背景低频环流和 SSE 相互作用带来的正压能, 使得南海 - 菲律宾和西北太平洋中东部 SSE 动能加强, 但在这两个地区的贡献不同, 下面将探究正压转换中哪些作用项引起上述差异, 并探究影响这些差异的物理机制。

表 3 给出了南海 - 菲律宾和西北太平洋中东部的 CK_{M-S} 、 CK_{I-S} 的各分量在异常偏高 - 偏低年的差值。 CK_{M-S} 中前四项贡献最大。其中在南海 - 菲律宾地区, $-\overline{v_s'^2} \frac{\partial \tilde{v}}{\partial y}$ 的正贡献最大, 使得 SSE 从低频环流中获得较多的正压能; 在西北太平洋中东部, $-\overline{u_s'v_s'} \frac{\partial u_l'}{\partial y}$ 有最大的正贡献。这两项使得低频环流通过正压能转换向 SSE 提供能量, 使上述两个地区 SSE 动能增加。 $-\overline{u_s'v_s'} \frac{\partial \tilde{u}}{\partial y}$ 项在南海 - 菲律宾地区有最大负贡献, 在西北太平洋中东部地区有最大正贡献。该项导致 ISO 环流与 SSE 相互作用的能量收支, 在上述两地区呈反相特征。

Table 3. Difference (high minus low years) of components of CK_{M-S} and CK_{I-S} (unit: $10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-3}$) over South China Sea-Philippines and central and eastern part of Western North Pacific. Bold represents the maximum contribution

表 3. CK_{M-S} 、 CK_{I-S} 各分量在南海 - 菲律宾及西北太平洋中部地区的异常偏高 - 偏低年差值(表中粗体代表最大贡献项, 单位: $10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-3}$)

CK	各项分量	南海	西北太平洋中东部	CK	各项分量	南海	西北太平洋中东部
CK_{M-S}	$-\overline{u_s'^2} \frac{\partial \tilde{u}}{\partial x}$	-2.78	0.78	CK_{I-S}	$-\overline{v_s'^2} \frac{\partial v_l'}{\partial y}$	1.18	-1.64
	$-\overline{u_s'v_s'} \frac{\partial \tilde{u}}{\partial y}$	3.83	2.05		$-\overline{u_s'\omega_s'} \frac{\partial u_l'}{\partial p}$	0.21	0.21
	$-\overline{u_s'v_s'} \frac{\partial \tilde{v}}{\partial x}$	0.8	-0.94		$-\overline{v_s'\omega_s'} \frac{\partial v_l'}{\partial p}$	0.07	-0.1
	$-\overline{v_s'^2} \frac{\partial \tilde{v}}{\partial y}$	7.02	0.03		$-\overline{u_s'u_l'} \frac{\partial u_l'}{\partial x}$	0.13	0.46
	$-\overline{u_s'v_s'} \frac{\partial \tilde{u}}{\partial p}$	-0.16	0.19		$-\overline{u_s'v_l'} \frac{\partial u_l'}{\partial y}$	-1.98	0.22
CK_{I-S}	$-\overline{v_s'\omega_s'} \frac{\partial \tilde{v}}{\partial p}$	-0.22	-0.19	$-\overline{v_s'u_l'} \frac{\partial v_l'}{\partial x}$	4	-1.78	
	$-\overline{u_s'^2} \frac{\partial u_l'}{\partial x}$	-2.15	1.96	$-\overline{v_s'u_l'} \frac{\partial v_l'}{\partial x}$	0.54	-0.69	
	$-\overline{u_s'v_s'} \frac{\partial u_l'}{\partial y}$	-6.42	4.04	$-\overline{u_s'\omega_l'} \frac{\partial u_l'}{\partial p}$	0.35	0.11	
	$-\overline{u_s'v_s'} \frac{\partial v_l'}{\partial x}$	2.72	-2.16	$-\overline{v_s'\omega_l'} \frac{\partial v_l'}{\partial p}$	-0.08	0.06	

图 7 给出了 CK_{M-S} 前四项(表 3)中 SSE 动量通量和背景低频风场在异常偏高、偏低及偏高 - 偏低年的差异合成分布。第一项和第四项代表 SSE 动量通量和背景低频环流的辐合辐散作用。异常偏高和偏低年份, $u_s'u_s'$ 和 $v_s'v_s'$ 在整个西北太平洋为正值(图 7(a)、图 7(b), 图 7(g)、图 7(h))。南海 - 菲律宾地区处在季风槽下, 背景低频环流趋向辐合, 于是 $-\overline{u_s'^2} \frac{\partial \tilde{u}}{\partial x}$ 和 $-\overline{v_s'^2} \frac{\partial \tilde{v}}{\partial y}$ 也为正值。异常偏高 - 偏低年差异中, 该区处于整个西北太平洋强的异常气旋的西部, $-\frac{\partial \tilde{v}}{\partial y}$ 显著加强(图 7(i))。该区显著加强的扰动通量 $v_s'v_s'$ 与西部异常气旋的相互作用, 导致 $-\overline{v_s'^2} \frac{\partial \tilde{v}}{\partial y}$ 成为南海 - 菲律宾的 SSE 正压能加大。在西北太平洋中东部, 异常偏高、

偏低年份, 该区位于季风槽北端的东南风中, 水平辐合辐散较弱, $-\frac{\partial \tilde{u}}{\partial x}$ 小于 0, 于是扰动通量和辐合的显著加强, 二者相互作用最终贡献仍不大(表 3)。而该区 $-\frac{\partial \tilde{u}}{\partial y}$ 在异常偏高、偏低年大于 0, 加上正的扰动通量 $u'_s v'_s$, 导致 $-\overline{u'_s v'_s} \frac{\partial \tilde{u}}{\partial y}$ 始终为正值。于是加强的扰动通量和加强的异常气旋环流的相互作用使得该项有较大的正贡献。

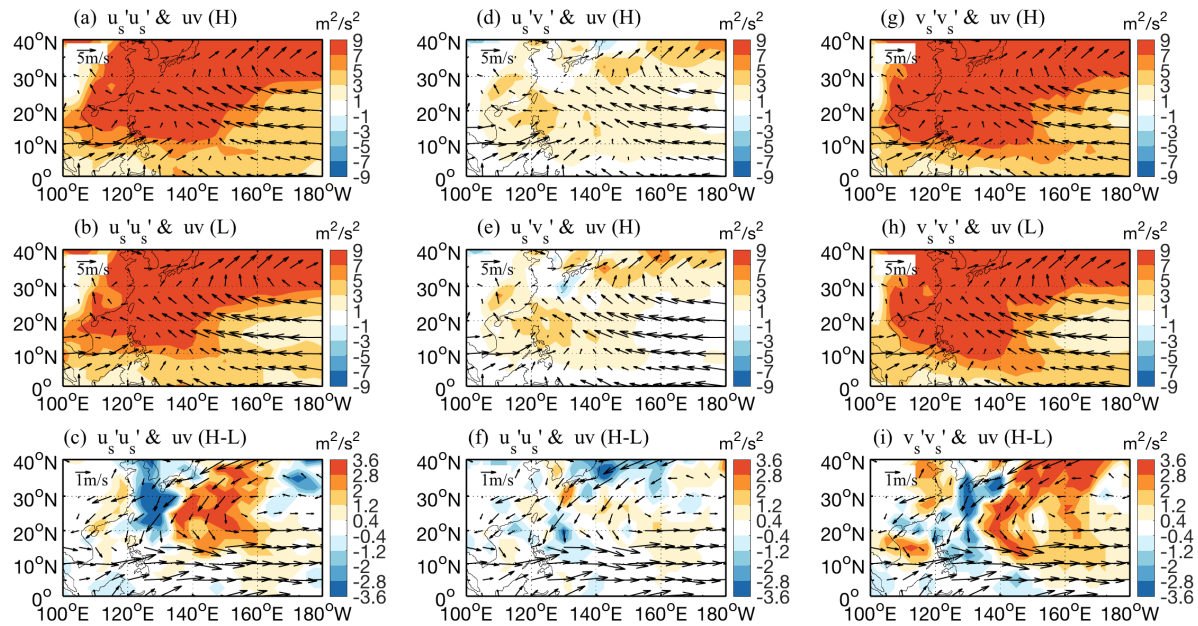


Figure 7. Composite of SSE momentum flux (shading) of $u'_s u'_s$ and low-frequency wind (vector) during extreme high years (a), low years (b), and difference between high and low years (c). (d-f) and (g-i) are same as (a-c), except for $u'_s v'_s$ and $v'_s v'_s$.
图 7. 850 hPa SSE 动量通量(填色) $u'_s u'_s$ 和低频风场(矢量)异常偏高(a), 偏低(b)和偏高 - 偏低(c)年差异的合成。(d-f)和(g-i)与(a-c)一致, 但为 $u'_s v'_s$ 和 $v'_s v'_s$ 项

6. 总结与讨论

分析 SSE、ISO 和低频环流三者的能量相互转换对西北太平洋 TC 生成频数的影响, 得到以下结论。

1) 盛期(7~10 月)西北太平洋 TC 生成频数有显著的年际变化, 在其异常偏高的年份, 南海 - 菲律宾(10°N~20°N, 110°E~130°E)和西北太平洋中东部(15°N~25°N, 140°E~170°E)的 TC 生成频数显著偏多; 异常偏少年, 这两个地区 TC 生成频数偏少。

2) 天气尺度涡作为提供 TC 生成的初始扰动, 其活动异常与 TC 异常分布一致: 异常偏高年, 南海 - 菲律宾和西北太平洋中东部 SSE 动能加强; 异常偏低年, 与此相反。

3) SSE 动能在异常偏高年的加强, 来源于 ISO 和背景大尺度条件。在南海 - 菲律宾地区, ISO 活动稍微减弱, 背景大尺度环境因子占主导作用。该区对流层低层相对涡度和中层异常上升运动, 为 TC 和 SSE 的生成发展提供了有利动力条件。在西北太平洋中东部地区, ISO 活动加强, 伴随有利的动力条件(如低层较大的相对涡度和较小的垂直风切变)都使得该区 SSE 生成发展, TC 生成频数增多。

4) 在 TC 生成频数异常偏高年, SSE 扰动通量与西北太平洋异常气旋的相互作用, 使得两个 TC 增多区的 SSE 获得正压能。其中, 以背景低频环流向 SSE 输送的正压能为主要贡献。ISO 活动与 SSE 相互

作用的能量贡献占小项。南海 - 菲律宾地区, SSE 扰动通量增强, 低频异常气旋的西部的辐合加强, 经向风的经向梯度加强, 二者相互作用($-\overline{v_s'^2} \frac{\partial \tilde{v}}{\partial y}$), 导致 SSE 从低频环流获得正压能。同理, 西北太平洋中东部的, 异常气旋使得 SSE 扰动通量与纬向风经向梯度相互作用($-\overline{u_s'v_s'} \frac{\partial \tilde{u}}{\partial y}$)加强, 导致 SSE 从低频环流中获得正压能。

本文的研究揭示了背景低频环流通过能量转换对 TC 生成的重要性, ISO 活动也有一定的贡献, 然而如何定量, 并且利用其构建 TC 预报指数还需进一步研究。

参考文献

- [1] 陈光华, 黄荣辉. 西北太平洋热带气旋和台风活动若干气候问题的研究[J]. 地理科学进展, 2006, 21(6): 610-616.
- [2] 冯涛, 黄荣辉, 陈光华, 等. 近年来关于西北太平洋热带气旋和台风活动的气候学研究进展[J]. 大气科学, 2013, 37(2): 364-382.
- [3] 牛海燕, 刘敏, 陆敏, 等. 中国沿海地区台风灾害损失评估研究[J]. 灾害学, 2011, 26(3): 61.
- [4] Lorenz, E.N. (1995) Available Potential Energy and the Maintenance of the General Circulation. *Tellus*, 7, 157-167. <https://doi.org/10.3402/tellusa.v7i2.8796>
- [5] 赵海坤, 吴立广. 西北太平洋热带气旋气候变化的若干研究进展[J]. 气象科学, 2015, 35(1): 108-118.
- [6] Murakami, S. (2011) Atmospheric Local Energetics and Energy Interactions between Mean and Eddy Fields. Part 1: Theory. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 68, 760-768. <https://doi.org/10.1175/2010JAS3664.1>
- [7] Zehr, R.M. (1992) Tropical Cyclogenesis in the Western North Pacific. NOAA Technical Report NESDIS 61, 181 p.
- [8] Chang, C.-P., Chen, J.M., Harr, P.A., et al. (1996) North-Westward-Propagating Wave Patterns over the Tropical Western North Pacific during Summer. *Monthly Weather Review*, 124, 2245-2266. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1996\)124<2245:NPWPOT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1996)124<2245:NPWPOT>2.0.CO;2)
- [9] Maloney, E.D. and Hartmann, D.L. (2001) The Madden-Julian Oscillation, Barotropic Dynamics, and North Pacific Tropical Cyclone Formation. Part I: Observations. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 58, 2545-2558. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(2001\)058<2545:TMJOB>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(2001)058<2545:TMJOB>2.0.CO;2)
- [10] Maloney, E.D. and Dickinson, M.J. (2003) The Intra-Seasonal Oscillation and the Energetics of Summertime Tropical Western North Pacific Synoptic-Scale Disturbances. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 60, 2153-2168. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(2003\)060<2153:TIOATE>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(2003)060<2153:TIOATE>2.0.CO;2)
- [11] Hsu, P.-C., Tsou, C.-H., Hsu, H.-H., et al. (2009) Eddy Energy along the Tropical Storm Track in Association with ENSO. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 87, 687-704. <https://doi.org/10.2151/jmsj.87.687>
- [12] Hsu, H.-H., Hung, C.H., Lo, A.K., et al. (2008) Influence of Tropical Cyclones on the Estimation of Climate Variability in the Tropical Western North Pacific. *Journal of Climate*, 21, 2960-2975. <https://doi.org/10.1175/2007JCLI1847.1>
- [13] Hsu, P.-C., Li, T. and Tsou, C.-H. (2011) Interaction between Boreal Summer Intra-Seasonal Oscillations and Synoptic-Scale Disturbances over the Western North Pacific. Part I: Energetics Diagnosis. *Journal of Climate*, 24, 927-941. <https://doi.org/10.1175/2010JCLI3833.1>
- [14] Tsou, C.-H., Hsu, H.-H. and Hsu, P.-C. (2014) The Role of Multiscale Interaction in Synoptic-Scale Eddy Kinetic Energy over the Western North Pacific in Autumn. *Journal of Climate*, 27, 3750-3765. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-13-00380.1>
- [15] Hsu, P.-C., Lee, T.-H., Tsou, C.-H., et al. (2017) Role of Scale Interactions in the Abrupt Change of Tropical Cyclone in Autumn over the Western North Pacific. *Climate Dynamics*, 49, 3175-3192. <https://doi.org/10.1007/s00382-016-3504-x>
- [16] 李雪, 任福民, 杨修群, 等. 南海和西北太平洋热带气旋活动的区域性差异分析[J]. 气候与环境研究, 2011, 15(4): 504-510.
- [17] Duchon, C.E. (1979) Lanczos Filtering in One and Two Dimensions. *Journal of Applied Meteorology*, 18, 1016-1022. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1979\)018<1016:LFIOT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1979)018<1016:LFIOT>2.0.CO;2)
- [18] Hu, F., Li, T., Liu, J., et al. (2018) Decrease of Tropical Cyclone Genesis Frequency in the Western North Pacific since 1960s. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 81, 42-50. <https://doi.org/10.1016/j.dynatmoce.2017.11.003>
- [19] Hong, C.C., Tsou, C.-H., Lee, M.-Y., et al. (2018) Effect of ISO-SSE Interaction on Accelerating the TS to Severe TS

Development in the WNP since the Late 1990s. *Geophysical Research Letters*, **45**, 12008-12014.

<https://doi.org/10.1029/2018GL079548>

- [20] Choi, Y., Ha, K.J., Ho, C.H., *et al.* (2015) Interdecadal Change in Typhoon Genesis Condition over the Western North Pacific. *Climate Dynamics*, **45**, 3243-3255. <https://doi.org/10.1007/s00382-015-2536-y>
- [21] Orlanski, I. and Sheldon, J.P. (1993) A Case of Downstream Baroclinic Development over Western North America. *Monthly Weather Review*, **121**, 292-295. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1993\)121<2929:ACODBD>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1993)121<2929:ACODBD>2.0.CO;2)

Hans 汉斯

知网检索的两种方式:

1. 打开知网首页: <http://cnki.net/>, 点击页面中“外文资源总库 CNKI SCHOLAR”, 跳转至: <http://scholar.cnki.net/new>, 搜索框内直接输入文章标题, 即可查询;
或点击“高级检索”, 下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2168-5711, 即可查询。
2. 通过知网首页 <http://cnki.net/>顶部“旧版入口”进入知网旧版: <http://www.cnki.net/old/>, 左侧选择“国际文献总库”进入, 搜索框直接输入文章标题, 即可查询。

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: ccrl@hanspub.org