

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2024.094>



西北太平洋热带气旋生成-快速增强 复合事件的对流及环境特征

施东雷¹, 李箭², 李启华³

1. 中国地质大学(武汉)环境学院, 湖北武汉 430078

2. 中国民用航空华东地区空中交通管理局气象中心, 上海 200335

3. 中国人民解放军 93213 部队, 北京 100085

摘要: 作为业务预报中的主要难点, 明晰热带气旋(TC)生成、快速增强(RI)及两者复合事件(RIFG)的成因对于防灾减灾具有重要意义。基于观测资料对西北太平洋 RIFG 事件和无 RI 生成事件(NRIG)的对流及环境特征进行了研究。结果表明, RIFG 个例相比 NRIG 个例平均纬度更低, 且逆切变左侧的内核降水更强, 受到较弱的垂直风切变和背景相对涡度、较高的内核相对涡度、高层辐散、海温、中层相对湿度和海表潜热通量的影响, 这些有利的动力、热力条件为 RIFG 事件的发生提供了基础。进一步对比弱风切变(W-VWS)和中等-强风切变(MS-VWS)下的 RIFG 个例发现, MS-VWS 个例的降水更强、更不对称, 且 W-VWS(MS-VWS)个例在逆切变、切变右侧(顺切变、切变左侧)有更为有利的环境热动力条件。

关键词: 热带气旋; 生成; 快速增强; 对流; 气象学。

中图分类号: P445

文章编号: 1000-2383(2025)09-3382-13

收稿日期: 2024-07-20

Convective and Environmental Characteristics of Tropical Cyclone Genesis-Rapid Intensification Compound Events in the Western North Pacific

Shi Donglei¹, Li Jian², Li Qihua³

1. School of Environmental Studies, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430078, China

2. Meteorological Center of East China Regional Air Traffic Management Bureau of Civil Aviation Administration of China, Shanghai 200335, China

3. Chinese People's Liberation Army 93213 Unit, Beijing 100085, China

Abstract: As one of the main challenges in operational forecasting, clarifying the mechanisms behind tropical cyclone (TC) genesis, rapid intensification (RI), and their compound events (RIFG) is of great significance for disaster prevention and mitigation. Based on observational data, this study examines the convective and environmental characteristics of RIFG events and non-RI genesis events (NRIG) over the western North Pacific. On average, RIFG cases occur at lower latitudes compared to NRIG cases, and have stronger inner-core precipitation on the upshear left side. These cases are also associated with weaker vertical wind shear and background relative vorticity, higher inner-core relative vorticity, upper-level divergence, sea surface temperature, mid-level relative humidity, and surface latent heat flux. These favorable dynamic and thermodynamic conditions

基金项目: 国家自然科学基金项目 (Nos. 42305004, 42005007); 中国博士后科学基金项目 (No. 2023M743283); 中国地质大学(武汉)“地大学者”人才岗位科研启动经费 (No. 2022123)。

作者简介: 施东雷 (1994-), 男, 讲师, 从事台风动力学与数值模拟相关研究及教学工作。ORCID: 0000-0002-0566-2295. E-mail: shidonglei@cug.edu.cn

引用格式: 施东雷, 李箭, 李启华, 2025. 西北太平洋热带气旋生成-快速增强复合事件的对流及环境特征. 地球科学, 50(9): 3382-3394.

Citation: Shi Donglei, Li Jian, Li Qihua, 2025. Convective and Environmental Characteristics of Tropical Cyclone Genesis-Rapid Intensification Compound Events in the Western North Pacific. *Earth Science*, 50(9): 3382-3394.

provide the basis for RIFG events. Further comparison between RIFG cases under weak vertical wind shear (W-VWS) and moderate-strong vertical wind shear (MS-VWS) shows that MS-VWS cases exhibit stronger and more asymmetric precipitation. Additionally, W-VWS (MS-VWS) cases experience more favorable environmental dynamic and thermodynamic conditions on the upshear and right-of-shear sides (downshear and left-of-shear sides), respectively.

Key words: tropical cyclone; genesis; rapid intensification; convection; meteorology.

0 引言

热带气旋(tropical cyclone, 简称 TC)是我国最为严重的灾害性天气系统之一。每年, TC 登陆我国时所带来的大风、暴雨和洪涝灾害导致数百万人受灾, 并造成数百亿元的经济损失。为减少 TC 灾害的风险, 准确预报 TC 的生成、移动和强度变化显得至关重要。近几十年来, 得益于观测技术和数值模式的发展, TC 移动路径预报的误差已显著减小; 但 TC 生成及强度预报的研究进展仍十分缓慢, 这主要源于人们对 TC 生成及强度变化机理的认识不够充分。因此, 研究 TC 生成及强度变化的物理机制具有重要意义。

TC 的生成与大尺度环境条件密切相关。Gray (1968)提出了影响 TC 生成的多个必要环境条件, 包括 26 °C 以上的海表面温度、离赤道 5° 以上的纬度(以保证足够的科氏力)、较高的中层相对湿度、较弱的垂直风切变、正的低层相对涡度和大气不稳定层结等。由于环境对 TC 生成的关键影响, 前人提出了多个基于环境动力和热力因子的热带气旋生成指数(Gray, 1975; Emanuel and Nolan, 2004; Wang and Murakami, 2020), 这些指数对 TC 生成的季节、年际和年代际预测起到了重要作用。

除了大尺度环境, 对流也是影响和预测热带气旋(TC)生成的重要因素之一。Zawislak and Zipser(2014)对比了大西洋地区不同热带低压扰动的对流特征, 发现那些能够成功发展为 TC 的热带低压扰动通常伴随着更大的降水范围。Wang (2018)进一步指出, 热带扰动环流中心区域对流的增强和组织化是 TC 生成的关键先导信号。

热带气旋所处的大尺度环境和对流特征不仅影响其生成过程, 对其强度变化也有重要影响。目前, 在热带气旋强度的业务预报中, TC 的快速增强(rapid intensification, 简称 RI)过程预报是最大的难题。RI 的常规定义为 24 h 内 TC 的近海表最大风速增强不少于 30 节(kn; 1 kn=0.514 m/s)。已有许多学者通过对比 RI 和非 RI 热带气旋个例的

大尺度环境条件, 总结了影响 RI 的关键环境因子, 包括较高的海温、较弱的垂直风切变、较高的中低层相对湿度、高层散度和海表热通量等(Kaplan and DeMaria, 2003; 梅耀和余锦华, 2016; 高拴柱和吕心艳, 2023)。可以看出, 影响生成与 RI 的环境因子大部分相同。前人已基于上述环境因子构建 RI 的统计预报模型, 用于预测 TC 发生 RI 的概率, 并取得了一定的预报技巧(Knaff *et al.*, 2020)。

TC 强度变化和内核区对流强度的相关性已被大量观测事实所验证。Rao and Macarthur(1994)通过分析卫星微波遥感数据, 发现 TC 未来 24 h 的强度变化与 222 km 半径范围内的平均降水率有显著的正相关关系。利用 TRMM(tropical rainfall measuring mission)降水雷达数据, Jiang(2012)分析了多个表征内区对流强度的因子与 TC 强度变化的相关性, 发现更强的内区对流通常对应着更大的增强速率和 RI 概率。近年来, TC 内区的极端深对流(通常称“对流爆发”或“旋涡热塔”)被认为是 RI 的重要特征和导致 RI 的关键因素之一(Chen and Zhang, 2013)。快速增强的 TC 通常比未发生快速增强的 TC 具有更多且更靠近涡旋中心的深对流活动。

除了对流强度外, 当 TC 受中等强度以上的垂直风切变(>4.5 m/s; Rios-Berrios and Torn, 2017)影响时, 对流相对于垂直风切变矢量的分布对 TC 的强度变化也有显著影响。在垂直风切变影响下, TC 内区对流通常呈现明显的一波非对称特征, 最大降水出现在 TC 的顺切变方向左侧象限, 而逆切变象限的对流活动偏弱(Corbosiero and Molinari, 2003; Chen *et al.*, 2006; 吕心艳等, 2023)。基于观测资料的合成分析, 前人发现增强速率越大的 TC 通常在逆切变象限具有更高的对流覆盖率, 因此具有更为对称的内区对流结构(Zagrodnik and Jiang, 2014; Fischer *et al.*, 2018)。对流结构由一波非对称形态向对称形态的转变也被认为是中等强度以上风切变下的 TC 发生 RI 的先导信号之一(Chen *et al.*, 2018)。

综上所述, 对流和大尺度环境对 TC 生成及快速增强的影响已被广泛研究。然而, 在现有文献中,

TC 的生成和快速增强过程通常被视为独立的事件, TC 生成和快速增强连续发生的复合事件的特征和机理尚未得到深入分析. 近期 Judt *et al.* (2023) 指出, TC 可能在生成时刻附近发生爆发式快速增强, 从而对 TC 强度预报带来极大挑战. 本文旨在通过观测统计分析揭示 TC 生成-快速增强事件的对流及大尺度环境特征, 探讨其发生的物理机制. 期望通过这些研究为此类事件的预报提供理论指导, 从而改善 TC 强度预报的准确性.

1 数据与方法

1.1 数据

本文选取了 2000 年至 2020 年间在西北太平洋 (WNP) 海域生成的热带气旋作为研究对象. 热带气旋的强度和路径数据来自美国联合台风预警中心 (JTWC) 的最佳路径数据集, 该数据集提供了每 6 h 一次的 10 m 最大持续风速和热带气旋中心经纬度信息.

在本研究中, 笔者使用全球卫星降水测量数据集 (IMERG) 来表征热带气旋的对流活动. 该数据集具有 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 的空间分辨率和 30 min 的时间分辨率, 其较高的时空分辨率有助于人们探索热带气旋内核降水演变的细微特征. 为了与最佳路径数据匹配, IMERG 数据也被处理成 6 h 的时间间隔.

风场、温度场和湿度场等大气变量则来自欧洲中期天气预报中心 (ECMWF) 第五代全球大气再分析产品 (ERA5). ERA5 数据具有 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 的水平空间分辨率和逐小时的时间分辨率, 足以详细描述热带气旋周围的大尺度环境条件.

1.2 生成-快速增强复合事件定义

本文采用了前人文献中广泛使用的标准来定义 TC 的生成和快速增强. 具体而言, TC 生命周期中 10 m 最大风速首次达到 35 kn 的时刻被定义为其生成时刻 (Chen and Huang, 2009); 而当 TC 在 24 h 内最大风速增加大于或等于 30 kn 时 (Kaplan and DeMaria, 2003), 即定义为发生了一次快速增强事件. 在上述定义基础上, 若 TC 的快速增强启动时刻与其生成时刻重合, 或位于生成时刻后 12 h 内, 则定义该 TC 发生了一次生成-RI 复合事件 (RI following genesis, 简称 RIFG). 相反地, 若 TC 在其生成后 12 h 内未发生 RI, 则将该 TC 的生成过程定义为无 RI 生成事件 (non-RI genesis, 简称 NRIG).

西北太平洋海域 (包括中国南海) 在 2000 年至 2020 年间共有 387 个 TC 生成, 为减小 TC 和中纬度

系统的相互作用以及地形作用对本文结论的可能影响, 本研究仅关注生成位置位于 30°N 以南且未在生成时刻后 24 h 以内登陆的 TC 个例. 基于上述标准, 笔者共筛选出 97 个经历生成-RI 复合事件的 TC 个例和 225 个未经历生成-RI 复合事件的 TC 个例. 本文将对两类个例的对流和大尺度环境特征进行对比, 以解释 RIFG 事件的成因, 不同个例之间差异的显著性将通过 Bootstrap 方法 (Chen and Chou, 2014) 进行检验.

1.3 相对于垂直风切变矢量的合成分析

如前文所述, 大尺度垂直风切变对 TC 的动力及对流结构存在显著调制作用 (Chen *et al.*, 2006; Zhang and Tao, 2013; 覃丽等, 2019; 郑秀丽等, 2020), 也是影响台风 RI 的关键因子之一 (胡皓和端义宏, 2016; Ryglicki *et al.*, 2018; Shi and Chen, 2023). 对流和环境变量相对于垂直风切变矢量的分布相比其地理分布对于 TC 的强度变化有更为重要的影响和指示意义 (Rios-Berrios and Torn, 2017; Nguyen *et al.*, 2019; Shi and Chen, 2021; 吕心艳等, 2021). 为研究各变量相对于垂直风切变的分布情况, 本研究以 TC 中心为原点, 以垂直风切变矢量为 y 轴建立坐标系, 将不同 TC 个例的降水场和环境变量场进行旋转后依据该坐标系进行合成, 最终得到各变量相对于垂直风切变矢量合成分布图像. 对 IMERG 卫星降水资料进行合成分析时, TC 中心位置由 JTWC 资料给定. 对再分析资料变量进行合成分析时, 由于再分析资料中的 TC 中心和 JTWC 资料并不完全对应, 笔者将 JTWC 中心作为初猜值, 在其 500 km 半径范围计算 850 hPa 位势高度场的质心, 作为合成的原点.

参考 Shi and Chen (2021), 本文对环境垂直风切变的定义如下:

$$Shear = \sqrt{(\bar{u}_{200} - \bar{u}_{850})^2 + (\bar{v}_{200} - \bar{v}_{850})^2}, \quad (1)$$

其中 \bar{u} 、 \bar{v} 表示距 TC 中心 400~800 km 半径范围内的平均纬向风和经向风矢量, 下标代表变量所在层次为 200 或 850 hPa.

2 生成-快速增强复合事件的成因分析

2.1 生成-快速增强复合事件的强度、位置及对流特征

图 1 给出了生成-RI 复合事件和无 RI 生成事件所对应的 TC 个例的强度演变情况和生成位置分布, 为方便描述, 笔者将在后文中将两类热带气旋

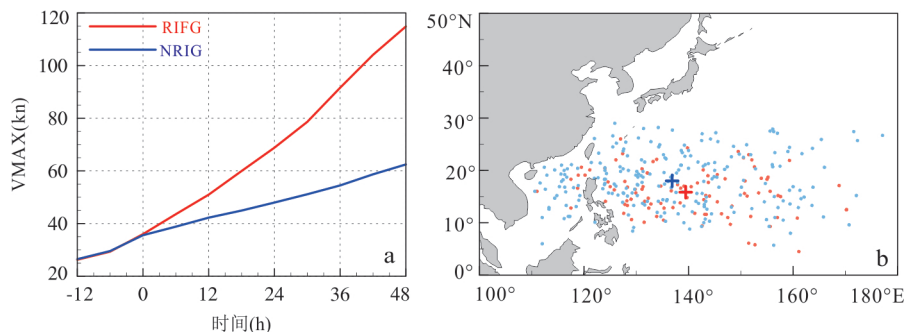


图1 RIFG和NRIG热带气旋个例的合成强度演变曲线(a),RIFG和NRIG事件的生成位置分布(b)

Fig.1 The composite time series of TC intensity for the RIFG and NRIG cases (a), and the genesis locations of the two groups (b)

图 a 中横坐标表示相对于 TC 生成时刻的小时数; 图 b 中红色和蓝色 + 符号分别表示两类 TC 的平均生成位置

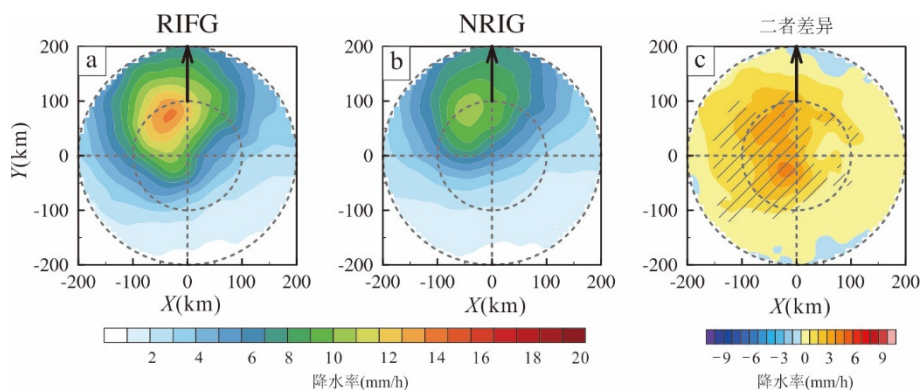


图2 RIFG(a)和NRIG(b)热带气旋个例在生成后 12 h 时段内的平均降水率(单位:mm/h),两类个例的降水率差异(c)

Fig.2 Composite precipitation rates (unit: mm/h) during the 12 h period following TC genesis for RIFG (a) and NRIG (b) cases, and the difference in precipitation rate between RIFG and NRIG cases (c)

黑色箭头表示垂直风切变方向,图 c 中斜线表示差异通过 95% 显著性检验

分别称为 RIFG 个例和 NRIG 个例. 合成结果表明, 两类 TC 个例的强度差异在生成时刻之前并不显著, 但在生成时刻之后持续增大(图 1a). 在生成 24 h 后, RIFG 和 NRIG 个例的平均强度为 69 kn 和 48 kn, 差异达到 21 kn(通过 95% 显著性检验). 在生成 48 h 之后, RIFG 个例的平均强度为 115 kn, 已达到超强台风(100 kn)的标准, 而 NRIG 个例的平均强度仅为 62 kn, 尚未达到台风的强度标准. 该结果表明, 经历 RIFG 事件的 TC 个例有很大概率在短时间内发展为强台风或超强台风, 其强度预报难度和潜在破坏力远高于 NRIG 个例.

从生成位置来看, RIFG 个例的分布相对集中, 主要位于 120°E 至 160°E 之间, 而 NRIG 个例的分布范围较广, 特别是在南海区域, NRIG 个例的 TC 数量明显多于 RIFG 个例(图 1b). RIFG 个例的平均生成位置位于 NRIG 个例平均生成位置的东南侧(两者的纬度差异通过了 95% 的显著性检验). 通常来

说, 生成于南海(尤其是中西部区域)或较高纬度的 TC 发展时间较短, 因此发生快速增强的概率偏低(Shi *et al.*, 2020); 而低纬度地区的 TC 通常处于较高环境湿度和海温的影响之下, 发生快速增强的概率较大. 此外, 前人研究表明, 在海温相同且无风切变的理想环境下, 低纬度 TC 的增强速率通常比高纬度 TC 更快, 这是由于低纬度地区的科氏参数 f 较小, 边界层存在更强的梯度风不平衡, 能够推动低层入流的发展, 从而促进 TC 增强(Li *et al.*, 2012). 综上所述, RIFG 和 NRIG 的生成位置差异可能是导致两者增强速率差异的原因之一.

图 2 给出了 RIFG 和 NRIG 个例生成时刻后 12 h 时段内平均的合成降水场. 在两类 TC 个例中, 降水场的分布均呈现出明显的一波非对称性(图 2a 和 2b), 最大降水出现在顺切变左侧象限, 这与前人发现的垂直风切变与降水非对称结构之间的关系相符(Corbosiero and Molinari, 2003; Zagrodnik and

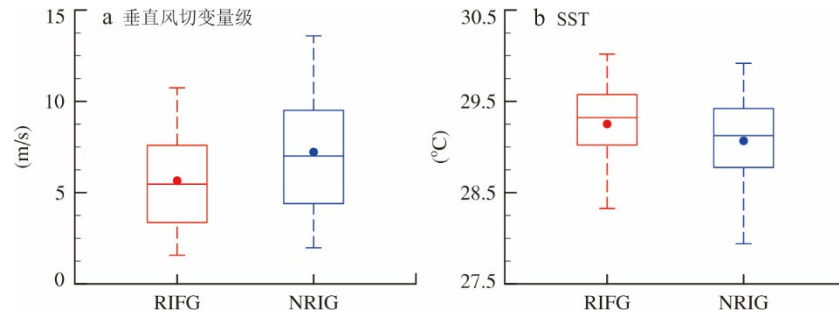


图3 RIFG和NRIG个例在生成后12 h时段内的垂直风切变量级(m/s)和海表面温度(SST,单位:°C)的箱线图

Fig.3 Box-whisker plots of the vertical wind shear magnitude (m/s) and sea surface temperature (SST, unit: °C) of the RIFG and NRIG cases during the 12 h period following TC genesis

虚线延伸至5%和95%百分位数,箱边界和中线分别代表25%、75%百分位数和中位数,点代表均值

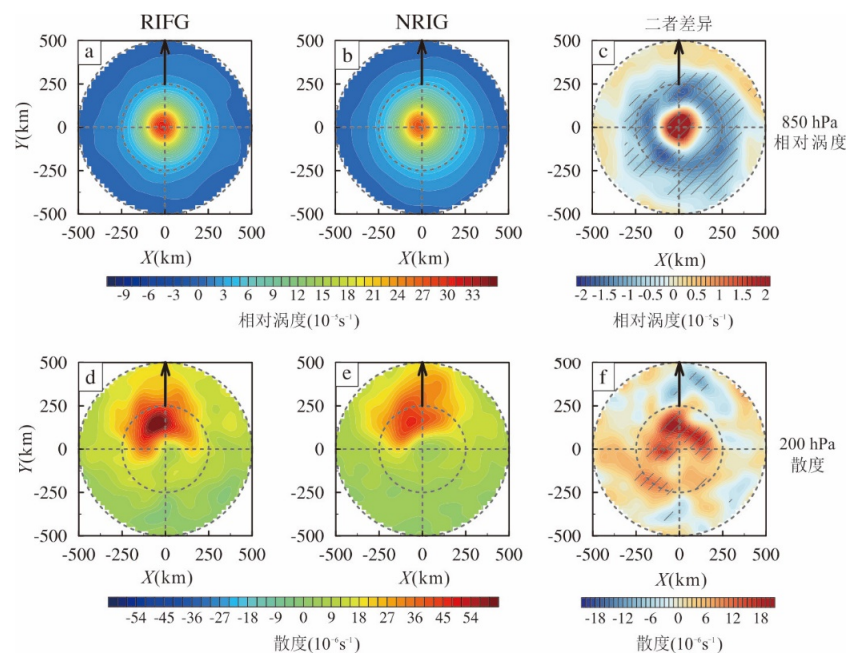


图4 RIFG(a,d)和NRIG(b,e)个例在生成后12 h时段内的(上)850 hPa相对涡度(单位: $1 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$)和(下)200 hPa散度(单位: $1 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$)相对于垂直风切变的分布,两类个例的差值(RIFG-NRIG)(c,f)

Fig.4 Composite shear-relative patterns of (upper) 850 hPa relative vorticity (unit: $1 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$) and 200 hPa divergence (unit: $1 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$) in RIFG (a, d), and NRIG (b, e) cases during the 12 h period following TC genesis, and their differences (RIFG-NRIG) (c, f)

黑色箭头表示垂直风切变方向;图c中斜线表示差异通过95%显著性检验

Jiang, 2014; 杨璐等, 2017). 与RIFG热带气旋相比, NRIG个例的降水强度显著偏弱, 不利于TC的增强(Rao and Macarthur, 1994; Jiang, 2012). 此外, 两类TC个例之间的显著降水率差异主要位于风切变方向左侧, 尤其是逆切变左侧象限. 如前文所述, 该象限的对流强度对于垂直风切变影响下的TC尤为重要, 更强的对流有助于减小TC的倾斜度(Tao and Zhang, 2019; Shi and Chen, 2023), 这能够较好地解释RIFG和NRIG个例之间的增强速率差异.

2.2 大尺度动力、热力条件对RIFG事件的影响

为了进一步解释RIFG事件的成因, 笔者对两类个例生成后12 h时段内的大尺度环境条件进行了对比. 图3给出了两类个例的环境垂直风切变量级和海表面温度(sea surface temperature, 简称SST)的箱线图. 可以看出, RIFG个例通常比NRIG个例处于环境垂直风切变更低和SST更高的环境中, 对TC的增强更为有利. 两类个例间的垂直风切变量级和SST的差异分别通过了95%和90%的显著性检验, 说明上述两个大尺度环境变

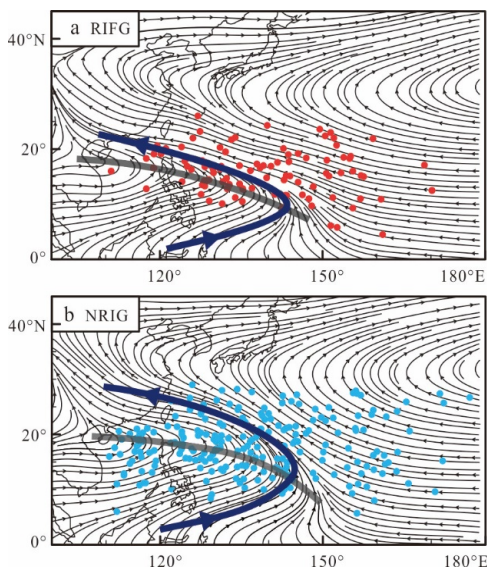


图5 RIFG (a)和NRIG (b)个例在生成后 12 h 时段内的 850 hPa 大尺度背景环流场和生成位置

Fig.5 Composite 850 hPa large-scale circulation fields (streamlines) during the 12 h period following TC genesis for RIFG (a) and NRIG (b) cases, with the dots denoting the genesis location of TCs

深蓝色和灰色曲线分别表示季风槽和槽线

量是区分 RIFG 和 NRIG 热带气旋的重要因子。由于垂直风切变对 TC 的结构和强度变化有显

著的调制作用,笔者进一步分析了多个环境动力和热力因子相对于垂直风切变矢量的分布情况.图 4 给出了两类个例的 850 hPa 相对湿度相对于垂直风切变的合成分布,可以看出,低层相对湿度并没有明显的非对称结构,在各个象限间分布较为均匀,最大值位于 TC 中心区域(图 4a 和 4b).与 NRIG 个例相比,RIFG 个例在约 100 km 半径范围内具有更强的相对湿度,但在 100~400 km 半径内具有显著偏弱的相对湿度(图 4c).该结果说明 RIFG 个例的涡旋尺度更小,且背景场的环境湿度较弱.前人研究表明,尺度较为紧凑的 TC 通常具有较大的内核区惯性稳定度,从而使对流的加热效率更高,即对流潜热能够更高效地转为涡旋的动能(Schubert and Hack, 1982),从而促进 TC 的快速增强.

为了解释相对湿度场的差异,图 5 给出了两类 TC 的 850 hPa 大尺度背景环流场.与 RIFG 个例相比, NRIG 个例所处的大尺度背景环流场中的季风槽范围更大,槽线偏北,因此生成于季风槽范围内的 NRIG 个例多于 RIFG 个例.这很好地解释了为何 RIFG 热带气旋外围区域的相对湿度显著低于 NRIG 个例.从高层散度场上看,两类个例的散度大值区都位于 TC 的顺切变一侧,且主要在顺切变左侧象限(图 4d 和 4e),和对流

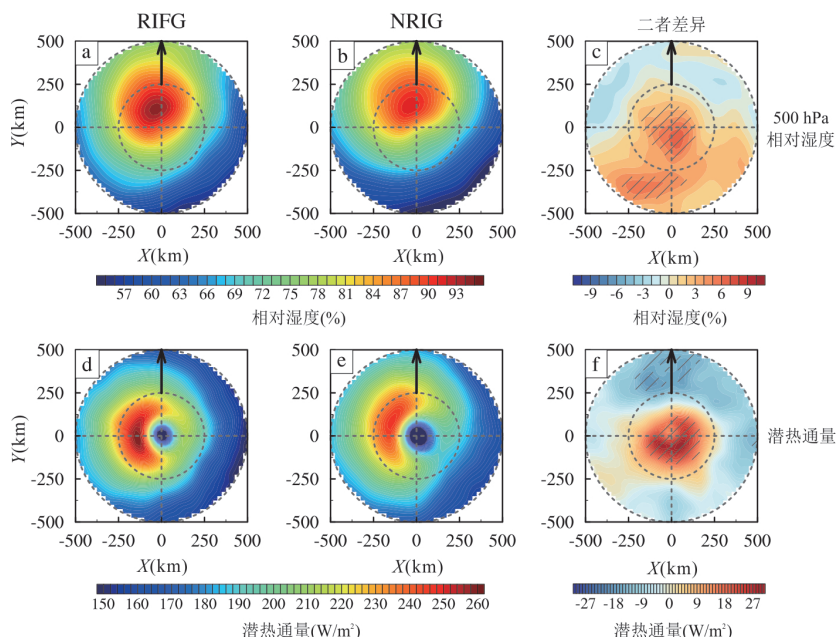


图6 RIFG(a,d)和NRIG(b,e)个例在生成后 12 h 时段内的(上)500 hPa 相对湿度(单位:%)和(下)海表潜热通量(单位:W/m²)相对于垂直风切变的分布图,两类个例的差值(RIFG-NRIG)(c,f)

Fig.6 Composite shear-relative patterns of (upper) 500 hPa relative humidity (unit: %) and 200 hPa divergence (unit: W/m²) in (a, d) RIFG, and (b, e) NRIG cases during the 12 h period following TC genesis, and their differences (RIFG-NRIG)(c, f)

黑色箭头表示垂直风切变方向;图 c 和图 f 中斜线表示差异通过 95% 显著性检验

的分布一致.从散度差值场上看,RIFG个例的高层散度正异常不仅分布在顺切变一侧,还进一步延伸至逆切变左侧象限. Shi and Chen (2021)指出,TC逆切变一侧的高层辐散增强有助于对高层环境气流形成阻挡作用,减小TC受到的高层环境风的外强迫作用,有利于TC的增强.

为了探讨环境热力条件对RIFG事件的贡献,图6给出了500 hPa中层相对湿度和海表潜热通量在两类个例中的相对于垂直风切变的分布情况.与对流的非对称结构相似,500 hPa相对湿度高值区也位于顺切变左侧象限,且RIFG个例比NRIG个例具有更高的中层相对湿度(图6a和6b).从差值场看,RIFG个例中的相对湿度正异常主要位于逆切变象限,尤其是逆切变左侧象限(图6c),这有助于削弱环境中层干空气对TC内核区的入侵作用,即中层通风效应(Alland *et al.*, 2021; Shi and Chen, 2023).两类TC的最大海表潜热通量均位于风切变左侧方向(图6d和6e),与NRIG个例相比,RIFG个例在250 km半径范围内具有显著偏大的海表热通量,且海表热通量正异常区域主要位于逆切变和顺切变右侧象限,这有助于为RIFG热带气旋个例的边界层气流提供潜热能,增强大气的不稳定度,从而促进内核区对流的发展和对称化(Nguyen *et al.*, 2019; Alland and Davis, 2022),帮助TC发生快速增强.

综上所述,与NRIG热带气旋相比,RIFG热带气旋在生成初期处于更为有利的大尺度动力及热力环境之下,这些环境因素促进了RIFG热带气旋的内核区的对流发展,并有助于潜热能以更高的效率向动能转换,为快速增强的发生提供有利的条件.

3 不同强度垂直风切变下的RIFG个例特征

在上述分析中,笔者将RIFG个例作为一个整体,探讨了大尺度环境因素对生成-快速增强复合事件的可能贡献.前人研究指出,在不同强度的垂直风切变下,TC发生快速增强时的对流模态和内核动力过程可能存在差别.为了进一步揭示RIFG个例间可能存在的增强机制差异,本节将分析不同强度垂直风切变下的RIFG热带气旋的对流及大尺度环境特征.基于Rios-Berrios and Torn (2017)对风切变强度的划分,笔者将不高于4.5 m/s的风切变定义为弱风切变(weak vertical wind shear,简称W-VWS),将大于4.5 m/s的风切变定义为中等-强风切变(moderate to strong vertical wind shear,简称MS-VWS).在97个RIFG个例中,分别有35和62个例处于W-VWS和MS-VWS环境下.

图7a给出了两类RIFG个例的RI起始位置的分布,可以看到,MS-VWS个例的RI起始位置和W-VWS个例相比总体偏西南,由于海温通常随纬度降低,MS-VWS个例的海温总体上略高于W-VWS个例(图7b),两者的5%百分位数的差异尤为明显.需要注意的是,两类个例的生成位置和SST的差异并未通过显著性检验,这可能与两类个例的样本容量较小有关.上述结果表明,在更强的垂直风切变下,TC需要更高海温的支持才能在生成后发生快速增强.

图8给出了两类RIFG个例的合成降水结构随时间的演变情况.在RI启动时刻前12~24 h时段内,两组个例的降水均呈现出明显的一波非对称

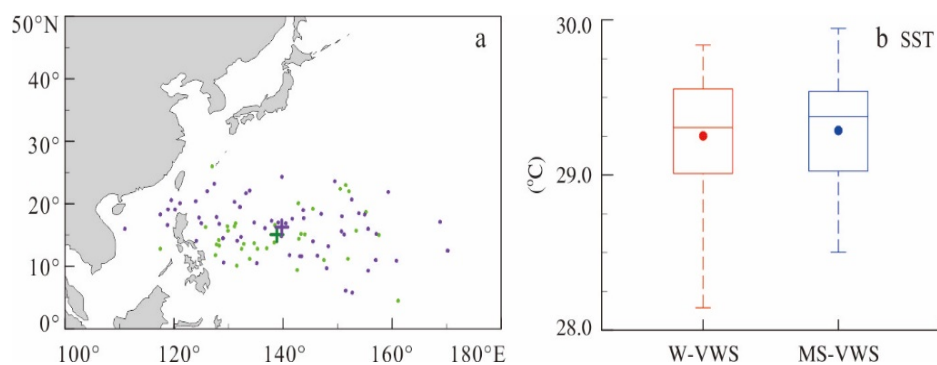


图7 W-VWS型(紫)和MS-VWS型(绿)RIFG热带气旋的快速增强起始位置(a),海表温度(SST;单位:°C)的箱线图(b)

Fig.7 TC locations (a) at RI onset for (purple) W-VWS and (green) MS-VWS RIFG cases and the box-whisker plot (b) of SST (unit: °C)

图a中绿色和紫色+符号分别表示两类TC的平均生成位置

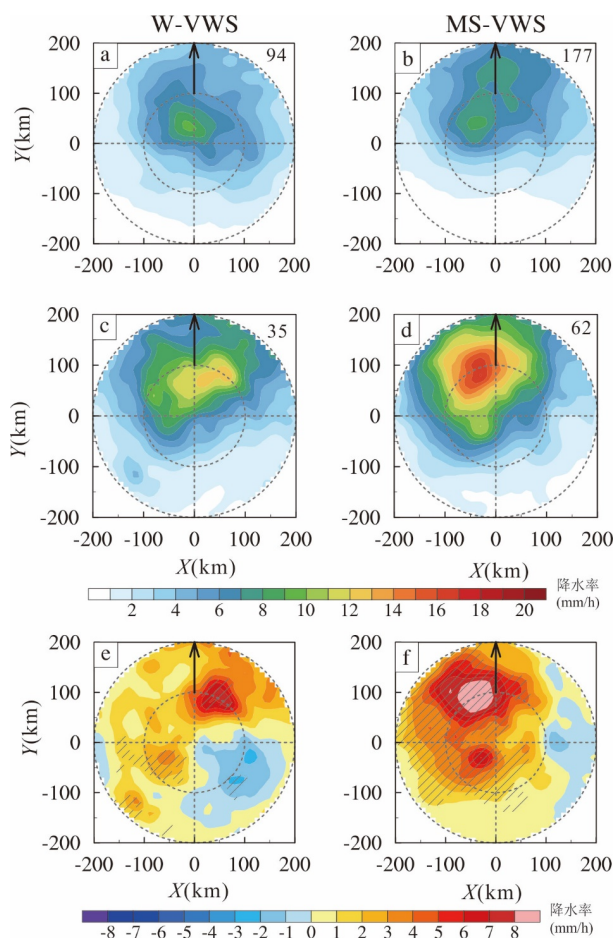


图 8 (左)W-VWS 和(右)MS-VWS 型 RIFG 个例在 RI 启动前 12~24 h 时段内 (a、b) 和 RI 启动时刻 (c、d) 的平均降水率 (单位: mm/h), 两个时段的降水率差异 (e、f)

Fig.8 Composite precipitation rates (unit: mm/h) during 12~24 h before RI onset (a, b) and at RI onset (c, d) for (left) W-VWS and (right) MS-VWS cases, and the difference (c) in precipitation rate between W-VWS and MS-VWS cases

黑色箭头表示垂直风切变方向;图 e 和 f 中斜线表示差异通过 95% 显著性检验

性,最大降水位于顺切变左侧,量级相近(图 8a 和 8b).到达 RI 启动时刻之后,两组个例的降水率均出现显著上升,且降水率大于 10 mm/h 的强降水区有向逆切变象限延伸的趋势(图 8c 和 8d).值得注意的是,W-VWS 型个例的降水最大值出现在顺切变右侧象限,而 MS-VWS 的降水最大值出现在顺切变左侧象限.这说明 MS-VWS 个例的降水结构主要受垂直风切变所主导,而 W-VWS 个例的降水结构则是受到偏弱的垂直风切变和其他环境因素的共同影响而形成的.在目前已有研究中,此类降水最大值位于顺切变右侧的快速增强 TC 尚未被发现并讨论.此外,在 RI 启动时刻,MS-VWS 个例的降水增大幅度明显高于 W-VWS 个例,这说明当 TC 生成于较强的垂直风切变下时,需要更强的对流来驱动其发生快速增强.这一发现和 Shi and Chen (2021) 的观测分析结果相

似,尽管该研究同时关注了 TC 生成及发展阶段的快速增强事件,并未单独分析 RIFG 个例.

为了解释两类 RIFG 个例的对流结构差异的可能形成机制,笔者对其大尺度动力和热力环境特征做了进一步的对比分析.图 9 给出了两类个例在快速增强启动时刻的 850 hPa 涡度和 200 hPa 散度相对于垂直风切变的分布场.可以看出,相比 W-VWS 个例,MS-VWS 个例在 100 km 半径以内区域,尤其是风切变左侧区域具有较大的涡度,而在外围区域的涡度显著偏弱(图 9a~9c).从高层散度场上看,W-VWS 个例和 MS-VWS 个例的散度最大值分别位于顺切变右侧和顺切变左侧象限(图 9d~9e),与其对流场的分布形态一致.MS-VWS 个例在 250 km 半径以内区域的顺切变左侧象限具有较高的散度,而在其他象限的散度偏弱(图 9f).因此,W-VWS 个例的散度分布总体上较 MS-VWS 个例更为对称.

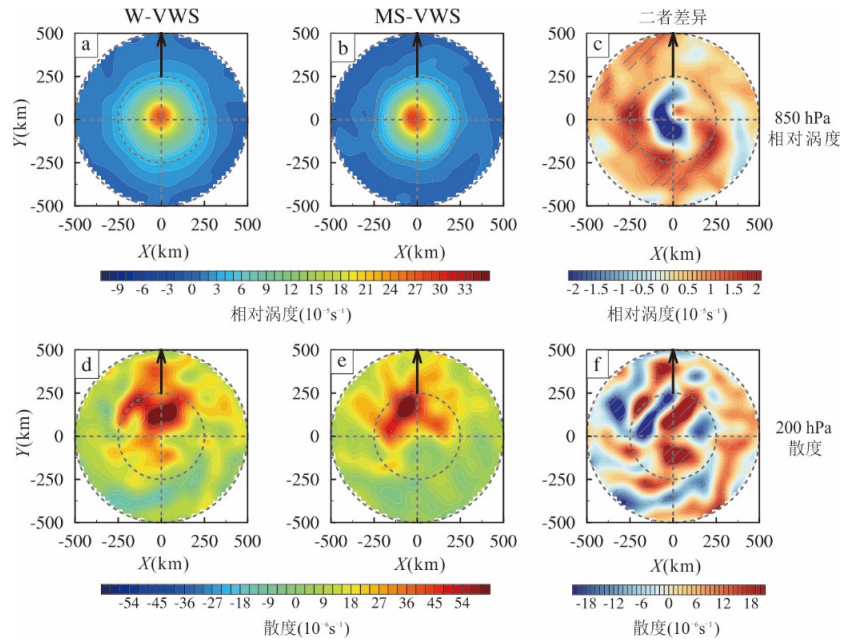


图9 W-VWS(a,d)和MS-VWS(b,e)个例在快速增强启动时刻的(上)850 hPa相对涡度(单位: $1 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$)和(下)200 hPa散度(单位: $1 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$)相对于垂直风切变的分布,两类个例的差值(W-VWS减MS-VWS)(c,f)

Fig.9 Composite shear-relative patterns of (upper) 850 hPa relative vorticity (unit: $1 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$) and 200 hPa divergence (unit: $1 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$) in W-VWS (a, d), and MS-VWS (b, e) cases at RI onset, and their differences (W-VWS minus MS-VWS) (c, f)

黑色箭头表示垂直风切变方向;图e和f中斜线表示差异通过95%显著性检验

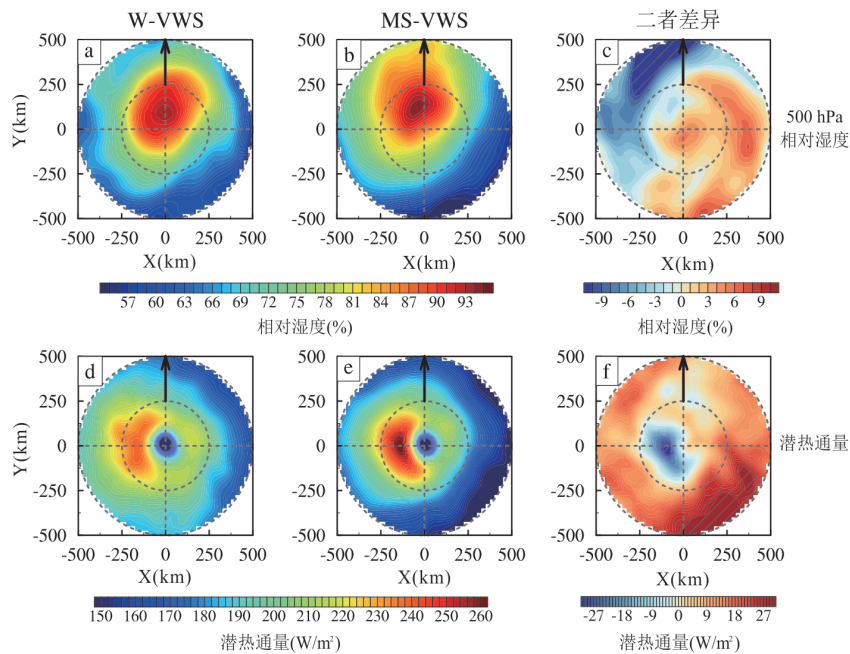


图10 W-VWS(a,d)和MS-VWS(b,e)个例在快速增强启动时刻的(上)500 hPa相对湿度(单位:%)和(下)海表潜热通量(单位: W/m^2)相对于垂直风切变的分布,两类个例的差值(W-VWS减MS-VWS)(c,f)

Fig.10 Composite shear-relative patterns of (upper) 500-hPa relative humidity (unit: %) and 200-hPa divergence (unit: W/m^2) in W-VWS (a, d), and MS-VWS (b, e) cases at RI onse, and their differences (W-VWS minus MS-VWS) (c, f)

黑色箭头表示垂直风切变方向;图e和f中斜线表示差异通过95%显著性检验

图10进一步对比了两类RIFG个例在快速增强启动时刻的两个关键热力因子,即500 hPa中层

相对湿度和海表面潜热通量的分布情况.与对流场的分布情况类似,两类个例的500 hPa最大相对湿

度均分布在顺切变方向(图10a和10b). 相对湿度的差值场呈现出明显的一波非对称形态, MS-VWS在切变左侧(尤其是顺切变左侧象限)具有显著偏大的相对湿度, 而W-VWS个例在切变右侧象限具有较大的相对湿度(图10c). 上述相对湿度的差异有助于MS-VWS个例的顺切变左侧象限的对流发展和W-VWS个例的顺切变右侧象限的对流发展. 从海表潜热通量场上看, W-VWS个例在250 km半径以外的区域, 尤其是逆切变右侧象限有较大的潜热通量, 而MS-VWS个例则在250 km半径以内的切变左侧区域有较大的潜热通量(图10d~10f). 上述潜热通量异常主要与海表面风速的异常有关(图未展示), 也和低层涡度场异常的分布相对应(图9a~9c). 通过对比两类个例的对流分布和海表潜热通量分布, 可知MS-VWS个例内核区切变左侧的海表热通量正异常有助于切变左侧象限的对流发展, 而W-VWS个例中外围区域逆切变象限的海表热通量正异常有助于顺切变右侧的对流发展.

综上所述, W-VWS个例(MS-VWS个例)在逆切变及切变右侧象限(顺切变及切变左侧象限)具有更为有利的环境动力和热力条件, 有助于促进顺切变右侧(顺切变左侧)的对流增强, 从而导致了两类RIFG个例对流特征的差异. 上述结果有助于进一步理解RIFG事件的物理机制在不同TC个例间可能存在的差异性, 为不同风切变下RIFG事件的预报提供指导.

4 结论

TC的生成和快速增强事件都是当前业务预报中的重大挑战, 其相关机理也是中尺度天气领域的前沿科学问题. 前人多将TC的生成和快速增强过程作为独立的事件进行分别研究, 而对两类过程连续发生的复合事件关注较少. 本研究基于2000—2020年的热带气旋最佳路径资料、卫星降水资料和大气再分析资料对西北太平洋海域TC的生成-快速增强复合事件的特征及发生机理进行了系统研究.

本文将发生于生成时刻后12 h内的快速增强事件定义为RIFG, 将其余TC定义为NRIG. 通过对比发现, RIFG个例相比NRIG个例分布的纬度更低, 且较少出现在南海区域; 从对流场上看, RIFG个例具有更强的内核区降水率, 且降水率差异最大值出现在逆切变左侧象限. 进一步分析两类个例的

大尺度环境特征可知, RIFG个例相比NRIG个例处于更为有利的动力和热力条件之下, 有助于TC发生快速增强. 具体来说, 从动力条件看, RIFG个例处于较弱的环境垂直风切变、较强的内核相对涡度、较弱的背景相对涡度和较强的高层辐散条件之下, 这些条件有助于内核区对流的发展, 且使涡旋具有较高的加热效率; 从热力条件看, RIFG个例处于较高的海表面温度、中层相对湿度和海表潜热通量的影响之下, 且中层相对湿度和海表潜热通量的正异常主要位于逆切变象限, 有助于内核区对流的增强和对称化. 上述大尺度动力与热力环境条件为生成-快速增强复合事件的发生提供了有利的基础.

由于TC的对流模态和内核动力过程与垂直风切变的大小密切相关, 笔者将RIFG个例进一步分为弱风切变(W-VWS)个例和中等-强风切变(MS-VWS)个例, 并对两类TC的对流及大尺度环境特征进行对比, 以揭示不同个例间可能存在的增强机制差异. 结果表明, 在RI启动时刻, W-VWS和MS-VWS个例的降水最大值分别出现在顺切变右侧象限和顺切变左侧象限, MS-VWS个例的降水强度更大且非对称程度更为明显. 进一步分析表明, W-VWS个例(MS-VWS个例)在逆切变及切变右侧象限(顺切变及切变左侧象限)具有更为有利的环境动力和热力条件, 包括更强的低层涡度和高层辐散, 更高的中层相对湿度和海表潜热通量, 这些因素促进了W-VWS个例顺切变右侧(MS-VWS个例顺切变左侧)的对流发展, 从而导致了两类RIFG个例对流特征的差异.

总结来说, 本研究系统地揭示了RIFG事件的对流及环境特征, 阐述了不同垂直风切变影响下的RIFG事件的可能物理机制, 为RIFG事件的预报提供理论指导. 由于本研究的结论主要基于统计分析而得出, RIFG过程中的内核区中小尺度动力及热力机制尚未被分析. 因此, 未来工作中需要依靠RIFG热带气旋个例的高分辨率观测资料或数值模拟对RIFG事件的具体物理机制进行进一步研究.

References

- Alland, J. J., Davis, C. A., 2022. Effects of Surface Fluxes on Ventilation Pathways and the Intensification of Hurricane Michael (2018). *Journal of the Atmospheric Sciences*, 79(4): 1211–1229. <https://doi.org/10.1175/JAS-D-21-0166.1>
- Alland, J. J., Tang, B. H., Corbosiero, K. L., et al.,

2021. Combined Effects of Midlevel Dry Air and Vertical Wind Shear on Tropical Cyclone Development. Part II: Radial Ventilation. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 78(3): 783–796. <https://doi.org/10.1175/JAS-D-20-0055.1>
- Chen, G. H., Chou, C. A., 2014. Joint Contribution of Multiple Equatorial Waves to Tropical Cyclogenesis over the Western North Pacific. *Monthly Weather Review*, 142(1): 79–93. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-13-00207.1>
- Chen, G. H., Huang, R. H., 2009. Interannual Variations in Mixed Rossby-Gravity Waves and Their Impacts on Tropical Cyclogenesis over the Western North Pacific. *Journal of Climate*, 22(3): 535–549. <https://doi.org/10.1175/2008jcli2221.1>
- Chen, H., Zhang, D. L., 2013. On the Rapid Intensification of Hurricane Wilma (2005). Part II: Convective Bursts and the Upper-Level Warm Core. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 70(1): 146–162. <https://doi.org/10.1175/jas-d-12-062.1>
- Chen, S. S., Knaff, J. A., Marks, F. D. Jr, 2006. Effects of Vertical Wind Shear and Storm Motion on Tropical Cyclone Rainfall Asymmetries Deduced from TRMM. *Monthly Weather Review*, 134(11): 3190–3208. <https://doi.org/10.1175/mwr3245.1>
- Chen, X. M., Xue, M., Fang, J., 2018. Rapid Intensification of Typhoon Mujigae (2015) under Different Sea Surface Temperatures: Structural Changes Leading to Rapid Intensification. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 75(12): 4313–4335. <https://doi.org/10.1175/jas-d-18-0017.1>
- Corbosiero, K. L., Molinari, J., 2003. The Relationship between Storm Motion, Vertical Wind Shear, and Convective Asymmetries in Tropical Cyclones. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 60(2): 366–376. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(2003\)060<0366:TRBSMV>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(2003)060<0366:TRBSMV>2.0.CO;2)
- Emanuel, K. A., Nolan, D. S., 2004. Tropical Cyclone Activity and the Global Climate System. 26th Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology. American Meteorological Society, Miami.
- Fischer, M. S., Tang, B. H., Corbosiero, K. L., et al., 2018. Normalized Convective Characteristics of Tropical Cyclone Rapid Intensification Events in the North Atlantic and Eastern North Pacific. *Monthly Weather Review*, 146(4): 1133–1155. <https://doi.org/10.1175/mwr-d-17-0239.1>
- Gao, S. Z., Lyu, X. Y., 2023. Evolution of Environmental Circulation and Dynamic and Thermodynamic Conditions before and after the Onset of Typhoon Rapid Intensification. *Acta Meteorologica Sinica*, 81(5): 702–716 (in Chinese with English abstract).
- Gray, W. M., 1968. Global View of the Origin of Tropical Disturbances and Storms. *Monthly Weather Review*, 96(10): 669–700. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1968\)096<0669:GVOTOO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1968)096<0669:GVOTOO>2.0.CO;2)
- Gray, W. M., 1975. Tropical Cyclone Genesis in the Western North Pacific. *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*, 55: 465–482. https://doi.org/10.2151/jmsj1965.55.5_465
- Hu, H., Duan, Y. H., 2016. Analysis of Environmental Variables of Rapidly Intensifying Tropical Cyclones in the South China Sea. *Journal of Tropical Meteorology*, 32(3): 299–310 (in Chinese with English abstract).
- Jiang, H. Y., 2012. The Relationship between Tropical Cyclone Intensity Change and the Strength of Inner-Core Convection. *Monthly Weather Review*, 140(4): 1164–1176. <https://doi.org/10.1175/mwr-d-11-00134.1>
- Judt, F., Rios-Berrios, R., Bryan, G. H., 2023. Marathon versus Sprint: Two Modes of Tropical Cyclone Rapid Intensification in a Global Convection-Permitting Simulation. *Monthly Weather Review*, 151(10): 2683–2699. <https://doi.org/10.1175/mwr-d-23-0038.1>
- Kaplan, J., DeMaria, M., 2003. Large-Scale Characteristics of Rapidly Intensifying Tropical Cyclones in the North Atlantic Basin. *Weather and Forecasting*, 18(6): 1093–1108. [https://doi.org/10.1175/1520-0434\(2003\)0181093:lcorit>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0434(2003)0181093:lcorit>2.0.co;2)
- Knaff, J. A., Sampson, C. R., Strahl, B. R., 2020. A Tropical Cyclone Rapid Intensification Prediction Aid for the Joint Typhoon Warning Center's Areas of Responsibility. *Weather and Forecasting*, 35(3): 1173–1185. <https://doi.org/10.1175/WAF-D-19-0228.1>
- Li, T., Ge, X. Y., Peng, M., et al., 2012. Dependence of Tropical Cyclone Intensification on the Coriolis Parameter. *Tropical Cyclone Research and Review*, 1(2): 242–253. <https://doi.org/10.6057/2012TCRR02.04>
- Lyu, X. Y., Dong, L., Gao, S. Z., 2023. Analysis for the Rapid Intensification of Typhoon Mekkhala in Southern Taiwan Strait. *Acta Meteorologica Sinica*, 81(6): 866–878 (in Chinese with English abstract).
- Lyu, X. Y., Xu, Y. L., Huang, H. Q., 2021. Analysis on Environmental Factors of the Extremely Rapid Intensification of Typhoon “Rammasun” (1409) in the Northern South China Sea. *Marine Forecasts*, 38(3): 1–10 (in Chinese with English abstract).

- Mei, Y., Yu, J. H., 2016. Effect of Environment Field on Rapid Intensification Process of Tropical Cyclones over the Western North Pacific. *Journal of the Meteorological Sciences*, 36(6): 770–778 (in Chinese with English abstract).
- Nguyen, L. T., Rogers, R., Zawislak, J., et al., 2019. Assessing the Influence of Convective Downdrafts and Surface Enthalpy Fluxes on Tropical Cyclone Intensity Change in Moderate Vertical Wind Shear. *Monthly Weather Review*, 147(10): 3519–3534. <https://doi.org/10.1175/mwr-d-18-0461.1>
- Qin, L., Wu, Q. S., Zeng, X. T., et al., 2019. Analysis on Cause of Rapid Intensification of Asymmetrical Typhoon Hato(1713) over the Offshore of China. *Torrential Rain and Disasters*, 38(3): 212–220 (in Chinese with English abstract).
- Rao, G. V., MacArthur, P. D., 1994. The SSM/I Estimated Rainfall Amounts of Tropical Cyclones and Their Potential in Predicting the Cyclone Intensity Changes. *Monthly Weather Review*, 122(7): 1568–1574. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1994\)122<1568:tserao>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1994)122<1568:tserao>2.0.co;2)
- Rios - Berrios, R., Torn, R. D., 2017. Climatological Analysis of Tropical Cyclone Intensity Changes under Moderate Vertical Wind Shear. *Monthly Weather Review*, 145(5): 1717–1738. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-16-0350.1>
- Rygllicki, D. R., Cossuth, J. H., Hodyss, D., et al., 2018. The Unexpected Rapid Intensification of Tropical Cyclones in Moderate Vertical Wind Shear. Part I: Overview and Observations. *Monthly Weather Review*, 146(11): 3773–3800. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-18-0020.1>
- Schubert, W. H., Hack, J. J., 1982. Inertial Stability and Tropical Cyclone Development. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 39(8): 1687–1697. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1982\)039<1687:ISATCD>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1982)039<1687:ISATCD>2.0.CO;2)
- Shi, D. L., Chen, G. H., 2021. The Implication of Outflow Structure for the Rapid Intensification of Tropical Cyclones under Vertical Wind Shear. *Monthly Weather Review*, 149(12): 4107–4127. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-21-0141.1>
- Shi, D. L., Chen, G. H., 2023. Modulation of Asymmetric Inner-Core Convection on Midlevel Ventilation Leading up to the Rapid Intensification of Typhoon Lekima (2019). *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 128(7): e2022JD037952. <https://doi.org/10.1029/2022JD037952>
- Shi, D. L., Ge, X. Y., Peng, M., et al., 2020. Characterization of Tropical Cyclone Rapid Intensification under Two Types of El Niño Events in the Western North Pacific. *International Journal of Climatology*, 40(4): 2359–2372. <https://doi.org/10.1002/joc.6338>
- Tao, D. D., Zhang, F. Q., 2019. Evolution of Dynamic and Thermodynamic Structures before and during Rapid Intensification of Tropical Cyclones: Sensitivity to Vertical Wind Shear. *Monthly Weather Review*, 147(4): 1171–1191. <https://doi.org/10.1175/mwr-d-18-0173.1>
- Wang, B., Murakami, H., 2020. Dynamic Genesis Potential Index for Diagnosing Present-Day and Future Global Tropical Cyclone Genesis. *Environmental Research Letters*, 15(11): 114008. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abbb01>
- Wang, Z., 2018. What Is the Key Feature of Convection Leading up to Tropical Cyclone Formation? *Journal of the Atmospheric Sciences*, 75(5): 1609–1629. <https://doi.org/10.1175/jas-d-17-0131.1>
- Yang, L., Fei, J. F., Huang, X. G., et al., 2017. Effects of Vertical Wind Shear and Tropical Cyclone Motion on Asymmetric Distribution of Convective Clouds in TCs over the Western North Pacific. *Acta Meteorologica Sinica*, 75(6): 943–954 (in Chinese with English abstract).
- Zagrodnik, J. P., Jiang, H. Y., 2014. Rainfall, Convection, and Latent Heating Distributions in Rapidly Intensifying Tropical Cyclones. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 71(8): 2789–2809. <https://doi.org/10.1175/jas-d-13-0314.1>
- Zawislak, J., Zipser, E. J., 2014. A Multisatellite Investigation of the Convective Properties of Developing and Non-developing Tropical Disturbances. *Monthly Weather Review*, 142(12): 4624–4645. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-14-00028.1>
- Zhang, F. Q., Tao, D. D., 2013. Effects of Vertical Wind Shear on the Predictability of Tropical Cyclones. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 70(3): 975–983. <https://doi.org/10.1175/JAS-D-12-0133.1>
- Zheng, X. L., Wu, L. G., Zhou, X. Y., et al., 2020. Comparison of inner-Core Structure Changes during Rapid Intensification between Typhoon Rammasun (2014) and Hurricane Wilma (2005). *Journal of Tropical Meteorology*, 36(2): 219–231 (in Chinese with English abstract).

中文参考文献

- 高拴柱, 吕心艳, 2023. 台风快速增强爆发前后的背景环流和热力动力条件的演变. *气象学报*, 81(5): 702–716.

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

吕心艳, 董林, 高拴柱, 2023. 台风“米克拉”在台湾海峡南部快速增强的原因分析. 气象学报, 81(6): 866—878.

吕心艳, 许映龙, 黄焕卿, 2021. 台风“威马逊”(1409)在南海北部急剧增强的环境因子分析. 海洋预报, 38(3): 1—10.

梅耀, 余锦华, 2016. 环境场对西北太平洋热带气旋快速增强过程的影响. 气象科学, 36(6): 770—778.

覃丽, 吴启树, 曾小团, 等, 2019. 对流非对称台风“天鸽”(1713)近海急剧增强成因分析. 暴雨灾害, 38(3): 212—220.

杨璐, 费建芳, 黄小刚, 等, 2017. 西北太平洋环境风垂直切变和热带气旋移动对涡旋内对流非对称分布影响的特征分析. 气象学报, 75(6): 943—954.

郑秀丽, 吴立广, 周星阳, 等, 2020. 台风 Rammasun(2014)与飓风 Wilma(2005)快速增强过程的内核结构变化比较. 热带气象学报, 36(2): 219—231.

《地球科学》

2025年10月 第50卷 第10期 要目预告

考虑动态渗流的散粒体滑坡-涌浪过程两相SPH模拟彭 铭等

青藏高原高速远程滑坡研究:从地质现象到动力学机理王玉峰等

基于水土耦合SPH方法的滑坡-堵江-成坝灾害链全过程动力演化模拟李 爽等

基于PFC^{2D}的冻融循环作用下冰碛土微观损伤研究刘佳诺等

基于地质结构探测的多滑面边坡系统可靠度分析梁姚颖等

白格滑坡构造混杂岩的空间结构和强度特性对滑动带形成和远程运动的影响彭星亮等

闽粤赣边区“6·16”强降雨诱发群发滑坡特征与驱动因素冯文凯等

四川雅江县火后泥石流易发性与冲出规模预测模型龚学强等

基于PU-bagging负样本采样的白龙江流域泥石流易发性分级评价万芹江等