



观点

2024年超强台风“摩羯”进入南海后“爆发式”增强的原因及可预报性

占瑞芬^{1,2}, 冯杰^{1,3*}

1. 复旦大学大气与海洋科学系/大气科学研究院, 上海 200438

2. 中国气象局-复旦大学海洋气象灾害联合实验室, 上海 210044

3. 上海市海陆气界面过程与气候变化重点实验室, 上海 200438

* 通讯作者, E-mail: fengjie@fudan.edu.cn

收稿日期: 2024-12-06; 收修改稿日期: 2025-02-11; 接受日期: 2025-02-24; 网络版发表日期: 2025-03-07

国家自然科学基金基础科学中心项目(42288101)和上海市科委项目(23DZ1204703)资助

1 引言

近海台风加强, 尤其是快速加强(rapid intensification, RI)过程, 因其预警时效短, 破坏力强, 常常给沿海地区人民的生命财产构成巨大威胁, 也给台风预报业务带来了巨大挑战. 因此, 理解近海台风加强的物理机制和可预报性具有重要意义. 然而, 由于台风强度变化涉及不同尺度的动力和物理过程以及它们之间的相互作用, 近海台风加强, 尤其是RI发生的物理机制至今仍未得到充分认识.

2024年第11号超强台风“摩羯”进入南海后强度出现了“爆发式”增强(短时间内强度显著增加), 短短15h内完成“台风-强台风-超强台风”三连跳, 甚至在近海相继出现了3次快速增强(参考Li等(2021)对近海台风快速加强的定义: 12h加强率超过 8 m s^{-1}), 导致“摩羯”维持超强台风级别长达64h, 打破了1949年有记录以来台风在南海持续加强的记录, 实属罕见. 此外, “摩羯”生成后一路西行, 相继在3个国家4次登陆, 其中后3次均以超强台风级别登陆(图1a), 路径覆盖广, 灾害影响巨大. 为深入理解这次罕见的近海台风活动, 我们研究其进入南海后持续加强的机理和可预报性.

2 结果

2.1 台风“摩羯”发生快速加强的可能机理

台风“摩羯”进入南海后经历了3次RI: 第1次从9月3日12时开始, 历经24h连续RI阶段(1个阶段为12h), 强度从 25 m s^{-1} 增强到 58 m s^{-1} , 增加了 33 m s^{-1} ; 第2次从9月5日9时开始, 历经2个连续RI阶段, 强度从 58 m s^{-1} 增强到顶峰 68 m s^{-1} , 增加了 10 m s^{-1} ; 登陆海南后“摩羯”经历了短暂的减弱, 并于9月6日18时开始了仅经历1个阶段的第3次RI, 强度从 52 m s^{-1} 再次增强到 60 m s^{-1} , 增加了 8 m s^{-1} , 达到整个生命史的第2个峰值. 这3次RI过程在强度和持续时间上均有明显差异, 第1次RI持续时间最长, 可以认为是“马拉松式”RI(至少包含8个连续重叠的RI阶段), 而后2次RI持续时间较短, 尤其是第3次RI过程最短, 实际加强仅在6h内完成, 因此被认为是“冲刺型”RI(最多包含4个连续重叠RI阶段)(Judt等, 2023). 值得注意的是, 本文的“冲刺型”快速增强与Judt等(2023)提出的并不完全一致, 他们的分类仅针对涡旋初期对流活动, 而我们引申到台风发展的不同时期. 由此可见, “摩羯”能够维持超强台风级别长达64h与连续出现3次RI事件密不可分. 下面将通过环境因子、风

中文引用格式: 占瑞芬, 冯杰. 2025. 2024年超强台风“摩羯”进入南海后“爆发式”增强的原因及可预报性. 中国科学: 地球科学, 55(4): 1346–1350, doi: 10.1360/SSTe-2024-0296

英文引用格式: Zhan R, Feng J. 2025. Causes and predictability of the “explosive” intensification of Super Typhoon Yagi after entering the South China Sea in 2024. Science China Earth Sciences, 68(4): 1298–1302, <https://doi.org/10.1007/s11430-024-1533-7>

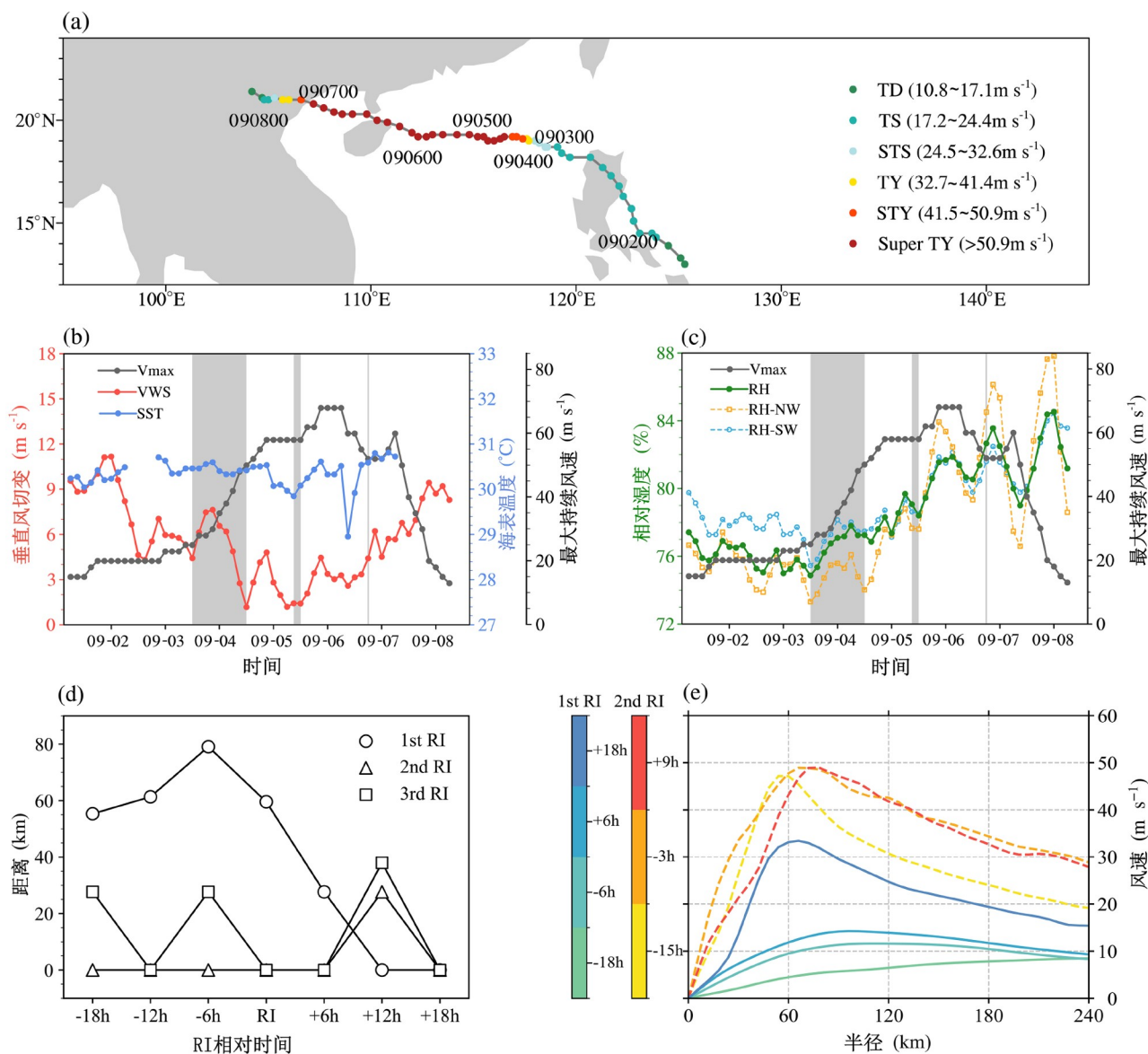


图1 台风“摩羯”路径、强度与环境因子及RI发生前后涡旋倾斜幅度与平均切向风径向廓线的时间序列

(a) 台风路径图; (b) 台风近中心最大风速 $V_{\max}$ 、台风中心200~800km环带内200~850hPa垂直风切变($VWS = \sqrt{(U_{200} - U_{850})^2 + (V_{200} - V_{850})^2}$)和台风中心半径3°范围内的SST; (c) 台风中心半径10°范围内850~700hPa滤波后的相对湿度(RH), 以及其西北象限和西南象限平均值。在(b)和(c)中, 灰色竖框(线)为RI的发生时刻。 (d) 涡旋倾斜幅度(km), 定义为地表环流中心(海平面气压)和中层环流中心(500hPa位势高度)之间的距离; (e) RI发生前后平均10m切向风径向廓线($m s^{-1}$), 实线为第1次RI过程, 虚线为第2次RI过程。台风数据来自中国气象局, 环境因子数据来自欧洲中心ERA5再分析资料

场结构以及内核动力特征, 探讨这3次RI发生的可能原因。

图1b和1c给出了“摩羯”整个生命史过程台风中心附近环境因子, 包括海表温度(sea surface temperature, SST)、环境垂直风切变和低层环境相对湿度的演变。可以看出, “摩羯”整个生命史过程基本都处于高SST

区($30^{\circ}C \sim 31^{\circ}C$ 之间), 尤其是第3次RI前3h SST有明显升高, 这可能与“摩羯”正好穿越较冷的琼州海峡进入暖的北部湾有关。环境垂直风切变的演变则呈现了不同阶段的特征: 第1次RI开始前1天, “摩羯”处于中等切变中, RI后期开始明显减小, 这可能与台风垂直直立有关(图1d)。第2次RI开始前1天, “摩羯”处于弱切变

条件下, RI开始后更是下降到 1m s^{-1} 附近, 这时台风轴线基本直立, 有利于内核区能量(对流凝结潜热)的积累和暖心的快速增强. 第3次RI开始时垂直风切变略有回升. 低层湿度整个过程都处于75%以上, 略高于1989~2006年所有RI案例的样本均值74%(Kaplan等, 2010), 因此可能有利于RI发生. 尤其是第3次RI发生在湿度最高的环境, 大致处于80%以上. 此外, 我们也计算了台风中心半径1000km范围内西北象限和西南象限的相对湿度, 前者可以代表北方干冷空气入侵, 而后者则可代表季风气流的汇入(图1c). 第1次RI开始前尽管西北象限有弱冷空气侵入, 但西南象限持续不断的季风暖湿气流为台风提供了充足的水汽和对流有效位能, 有利于台风的快速增强. 第2次和第3次RI爆发前后西北象限的相对湿度有所增加, 季风则更加活跃, 导致水汽输送进一步加强, 加之暖SST有所升高, 这些都有利于台风内核对流活动的进一步爆发, 导致了台风的快速增强.

台风最大风速半径收缩和台风涡旋在垂直方向倾斜的减小和直立是RI发生的有利条件(Rogers等, 2015; Rios-Berrios等, 2018). 图1d和1e分别给出了台风地表中心和中层中心之间的距离(也称为位移, 表示倾斜程度)随时间的演变和前2次RI发生前后台风切向风径向廓线的变化. 第1次RI开始前18h到开始时刻, 风廓线演变缓慢, 涡旋在垂直方向倾斜较大, 至RI前6h中层中心相对于地表中心偏移约80km, 与台风缓慢增强一致. 然而, RI开始后6h, 涡旋倾斜迅速减少, 风廓线表明台风内核的快速收缩和台风的快速增强, 特别是12~18h风廓线已类似于典型台风结构, 其切向风最大风速半径由RI前6h的100km快速向内收缩到大约60km, 地表与中层中心基本对齐, 表现为典型的RI特征. 这种垂直对齐标志着台风暖心的建立, 眼墙内加热效率的增大, 以及眼墙加热导致的眼区下沉增温及暖心的快速增强, 从而中心眼内海平面气压下降导致台风的快速增强. 第2次和第3次RI呈现出不同的结构特征. 这两个过程风廓线大致呈相似状态, 没有发生重大结构变化, 涡旋在垂直方向上也几乎高度对齐, 表明台风结构较为稳固, 内核能量充足. 由于台风内核尺度已经比较小, 内核区的惯性稳定性处于高位, 眼墙加热效率进一步提升, 从而有利于台风的进一步增强(Wang和Wang, 2013). 然而, 从雷达回波上可以发现(图略), 在第3次RI发生前3h, “摩羯”出现了类似双眼墙结构,

由于较好的环境条件(图1b和1c), RI开始时刻内、外眼墙同时增强. 此后在西移过程中西侧的外眼墙已有部分登陆, 环状对流结构逐渐演变为非闭合的外雨带. 外眼墙的消亡加速了内眼墙的发展, 动量和水汽向台风更小半径处输送, 结果9月7日12~13时, “摩羯”的强度迅速增加了 5m s^{-1} , 达到第2个峰值.

总体而言, 台风“摩羯”的3次RI事件受到了复杂的环境和动力因素的共同作用. 高SST为维持台风需要的海面高焓通量提供了前提条件, 持续的暖湿西南气流克服了因西北侧较为干冷空气侵入的负面影响并为台风内核对流提供源源不断的水汽和能量条件, 环境垂直切变的减小有利于台风结构的垂直对齐, 使得台风暖心很快建立和快速增强是触发第1次RI的关键热力机制; 高的SST、水汽的增加和垂直风切变的进一步减弱则是导致第2次RI的主要原因; 高的SST、充足的水汽供应、弱的垂直风切变以及高的内核惯性稳定性为摩羯的第3次RI提供了有利的环境及内部动力条件, 同时类似双眼墙结构的出现和外眼墙的崩解进一步促进了内眼墙即台风的加强, 导致了第3次较短RI的发生. 这些因素共同作用, 使得“摩羯”能够维持超强台风的强度长达64h.

2.2 台风“摩羯”增强过程的可预报性

台风“摩羯”的3次RI表现出了独特性, 也是导致其在南海长时间维持超强台风级别的主要原因, 那么数值预报能否合理地预报这些过程?

前人已对台风RI的可预报性进行了探索(Judt和Chen, 2016), 但这些研究并未区分RI的不同类型. 本文选择了上海台风研究所的区域一体化集合预报(20个成员, 9km分辨率)系统SWARMS-EN的台风强度预报结果, 探究3次RI过程的可预报性. 该系统基于WRF模式, 并且针对台风的强度预报对物理参数化方案进行了优化. 注意, 9km集合预报系统无法分析台风内核过程的精细结构, 本文仅研究不同成员之间的不确定性分布和模式如何捕捉RI发生的可能性. 我们的评估结果表明(图2), 该系统对台风摩羯的强度预报整体表现好于其他全球集合预报系统. 对于第1次RI的前12h强度变化, SWARMS-EN系统有一定的预报能力, 提前48、24和12h分别有40%、35%和25%的集合成员可以报出12h内的RI过程. 然而, 模式对于从9月3日12时开始的连续24h的RI过程的预报能力显著下降. 提前24和

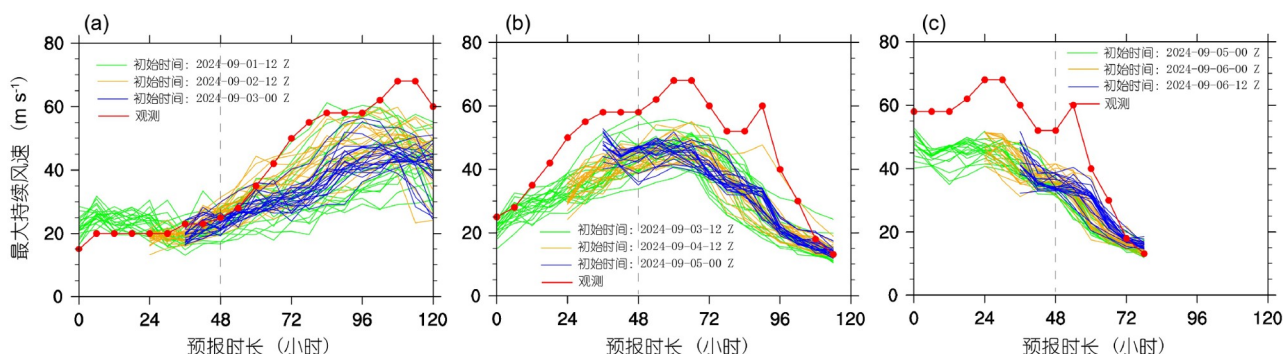


图 2 台风“摩羯”强度集合预报

3次台风快速加强的起始时间用竖灰色虚线表示。(a)中第1次RI的3次预报的初始时间是2024-09-01 12:00(绿色)、2024-09-02 12:00(橙色)和2024-09-03 00:00(蓝色)。(b)中第2次RI的3次预报的初始时间是2024-09-03 12:00(绿色)、2024-09-04 12:00(橙色)和2024-09-05 00:00(蓝色)。(c)中第3次RI的3次预报的初始时间是2024-09-05 00:00(绿色)、2024-09-06 00:00(橙色)和2024-09-06 12:00(蓝色)。红色实线代表观测强度

12h的集合预报均没有任何成员可以预测连续24h的RI。提前48h的预报有20%的成员可以预测连续24h的RI。这说明模式对台风摩羯的“马拉松式”快速加强的过程可能具有一定的预报技巧。从较弱的热带风暴强度开始初始化预报, 预报系统具有较为准确的初始涡旋强度, 且具有更长时间让台风在模式动力中进行调整和加强, 从而相比在台风阶段初始化预报具有更准确的RI过程的预测(Feng和Wang, 2021)。

第2次RI过程仅持续2个阶段, 但集合预报系统对于不同的预报时长, 均没有技巧预测出RI过程, 且台风强度预测的误差整体达到 10m s^{-1} 。这可能主要是由于处于强台风阶段时, 缺乏台风眼墙附近的高质量观测进入同化系统, 模式的初始场明显低估台风强度(Feng和Wang, 2019; Feng等, 2022)。第3次RI过程持续时间更短, 模式的预报技巧更差。几乎所有集合成员预报台风强度维持或降低。这3次RI过程的预报结果说明台风强度的长时间维持, 以及在这个过程中的多次RI过程可能具有较低的可预报性, 尤其是对于“冲刺型”RI可预报性最低。

3 讨论

研究表明, 在全球变暖背景下, 近海台风RI事件存在增多趋势(Li等, 2023; Li等, 2024)。无疑, 这给台风强度预报带来了更大的挑战。未来, 在预报多次RI事件时, 除了关注环境场(如高SST、持续的季风水汽输送和减弱的垂直风切变)外, 还需要特别重视台风内部的

动力结构演变, 如台风倾斜的减小、暖心增暖效率的提高以及眼墙替换等。此外, 如何针对不同类型的RI事件, 结合数值模拟和机器学习方法改进台风强度预报也是未来研究的重要方向。

致谢 感谢Yuqing WANG教授提供宝贵的意见, 赵大军博士和王靖博士提供部分观测数据, 黄伟研究员提供SWARMS-EN业务集合预报系统的台风预报数据。

参考文献

- Feng J, Wang X. 2019. Impact of assimilating upper-level dropsonde observations collected during the TCI field campaign on the prediction of intensity and structure of Hurricane Patricia (2015). *Mon Weather Rev*, 147: 3069–3089
- Feng J, Wang X. 2021. Impact of increasing horizontal and vertical resolution during the HWRF Hybrid EnVar Data assimilation on the analysis and prediction of Hurricane Patricia (2015). *Mon Weather Rev*, 149: 419–441
- Feng J, Qin X, Wu C, Zhang P, Yang L, Shen X, Han W, Liu Y. 2022. Improving typhoon predictions by assimilating the retrieval of atmospheric temperature profiles from the FengYun-4A's Geostationary Interferometric Infrared Sounder (GIIRS). *Atmos Res*, 280: 106391
- Judt F, Chen S S. 2016. Predictability and dynamics of tropical cyclone rapid intensification deduced from high-resolution stochastic ensembles. *Mon Weather Rev*, 144: 4395–4420
- 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. *Mon Weather Rev*, 151: 2683–

2699

- Kaplan J, Demaria M, Knaff J A. 2010. A revised tropical cyclone rapid intensification index for the Atlantic and Eastern North Pacific Basins. [Weather Forecasting](#), 25: 220–241
- Li X, Zhan R, Wang Y, Xu J. 2021. Factors controlling tropical cyclone intensification over the marginal seas of China. [Front Earth Sci](#), 9: 795186
- Li X, Zhan R, Wang Y, Zhao J, Ding Y, Song K. 2024. Recent increase in rapid intensification events of tropical cyclones along China coast. [Clim Dyn](#), 62: 331–344
- Li Y, Tang Y, Wang S, Toumi R, Song X, Wang Q. 2023. Recent increases in tropical cyclone rapid intensification events in global offshore regions. [Nat Commun](#), 14: 5167
- Rios-Berrios R, Davis C A, Torn R D. 2018. A hypothesis for the intensification of tropical cyclones under moderate vertical wind shear. [J Atmos Sci](#), 75: 4149–4173
- Rogers R F, Reasor P D, Zhang J A. 2015. Multiscale structure and evolution of Hurricane Earl (2010) during rapid intensification. [Mon Weather Rev](#), 143: 536–562
- Wang Y, Wang H. 2013. The inner-core size increase of Typhoon Megi (2010) during its rapid intensification phase. [Trop Cycl Res Rev](#), 2: 65–80

(责任编辑: 陈桂兴)