

超强台风“摩羯”强度异常变化特征及原因分析

杨国杰 韩浦城 程正泉 龚月婷 韦凯华 沙天阳

广东省气象台, 广州 510640

摘要: 利用站点监测、探空、FY-4B 卫星、多普勒天气雷达、ERA5 再分析数据等资料, 对 2024 年第 11 号超强台风“摩羯”的强度变化特征及其原因进行了分析。发现“摩羯”是 1981 年以来登陆我国最强的秋季台风, 在南海维持超强台风级 SuperTY 达 64 h, 是维持 SuperTY 最久的南海台风, 出现了三次快速增强, 其中一次达到极端快速增强, 12 h、24 h 增强幅度均是自 1981 年以来最大的南海台风。强盛西南季风为台风发展提供充足水汽, 稳定的副热带高压和大陆气流将陆地上的对流不稳定气团输送至台风中心附近, 加强了台风环流范围附近的大气位势不稳定, 减弱的环境垂直风切变和良好的高层出流条件均有利于台风快速增强和维持高强度。南海北部海面温度超过 30°C, 较常年偏高 1~2°C, 向大气提供了大量的潜热通量。“摩羯”快速增强时台风范围动能增长明显, 动能制造项的迅速增大是动能增长的主要因子, 动能垂直和水平输送对动能增长也有重要贡献。

关键词: 摩羯, 超强台风, 快速增强, 南海, 季风, 副热带高压, 动能收支

Characteristics and Causes of the Anomalous Intensity Change in Super Typhoon Yagi(2024)

Yang Guojie Han Pucheng Cheng Zhengquan Gong Yueting Wei Kaihua Sha Tianyang

Guangdong Meteorological Observatory, Guangzhou 510640

Abstract: Based on the station observation, sounding data, FengYun 4B satellite image, Doppler weather radar and ERA5 reanalysis data, the characteristics and causes of the anomalous intensity change in Super Typhoon Yagi(2024) are carried out. It is found that Yagi is the strongest landfalling autumn typhoon in China since 1981, and maintained super typhoon level (SuperTY) in the South China Sea for 64 hours, making it the longest-lasting SuperTY in the region. Yagi experienced three rapid intensification (RI) events, one of which reached extreme rapid intensification (ERI), with its 12-hour and 24-hour intensity increases being the highest recorded in the South China Sea since 1981. The robust southwestern monsoon supplied abundant moisture for typhoon development, while the stable subtropical high and continental airflow transported convectively unstable air masses from land toward the typhoon's core. This enhanced atmospheric potential instability near the typhoon's circulation, while weakened environmental vertical wind shear and favorable upper-level outflow conditions collectively facilitated RI and sustained peak intensity. The sea surface temperature in the northern South China Sea exceeded 30 °C, 1–2 °C above normal, providing substantial latent heat flux to the atmosphere. During Yagi's RI, a significant increase in kinetic energy within the typhoon's domain was observed. The primary driver of this kinetic energy growth was a sharp rise in kinetic energy production, with vertical and horizontal kinetic energy transport also playing crucial roles.

Key words: Typhoon Yagi, Super Typhoon, Rapid intensification, South China Sea, Monsoon,

广东气象联合基金重点项目(2024B1515520002)、国家自然科学基金(42475015)和中国气象局重点创新团队(CMA2023ZD07)共同资助。

第一作者: 杨国杰。主要从事天气预报和台风相关研究工作。E-mail: gjyang@gd121.cn

通讯作者: 程正泉。主要从事天气预报和台风相关研究工作。E-mail: chengzq1975@126.com

引言

在台风预报业务中,路径和强度预报是首要面对的问题,做好这两方面预报,对台风防御工作大有裨益。近年来,随着技术的发展,台风路径预报能力显著提升,但强度预报能力提升较缓慢,其中快速增强(rapid intensification, RI)台风的强度预报及其防御工作难度更大,尤其是当快速增强台风发生在近海海域时,所造成的影响更为严重。

为了有效开展快速增强台风的研究和预报工作,国内外研究先后对西北太平洋快速增强给出了定义标准,较经典的是利用大量台风样本,统计 24 h 变压,将降压幅度排在前 25% 分位数事件定义为快速增强(Holliday and Thompson, 1979)。另一种根据台风中心最大风速变化定义,分别给出了西北太平洋、我国近海台风快速增强和极端快速增强(extremely rapid intensification, ERI)的 12 h 和 24 h 变化标准(阎俊岳等, 1995)。最新研究在总结前人工作基础上,对比了平均值法和百分位法,定义了西北太平洋、南海台风快速增强和极端快速增强的 6、12、24 h 变化标准,更契合实际台风业务需求(龚月婷等, 2024)。据统计,我国台风强度近海突然增强多数发生在南海北部,远多于东海、黄海海域(冯锦全和陈多, 1995; 阎俊岳, 1996; 郑峰, 2015; 郑峰等, 2016),因此南海北部海域和华南地区受此类台风影响最大。

大量研究主要从大气环流条件、海洋条件、能量学和台风内部动力学等角度开展对台风快速增强的特征和原因进行分析。众多学者研究发现,低层充足水汽、低层辐合流场、较小垂直风切变、高海温是影响台风快速增强的主要因子(李霞等, 2014; 胡皓, 2015; 黄勇等, 2016; 韩慎友等, 2020; Shu et al, 2012; Oey and Lin, 2021)。南海夏季风气流对台风快速增强很重要,且快速增强多发生在南海夏季风季节的后期(林良勋等, 2006; 陈小敏, 2015)。高层辐散流场和净辐散的增大,是台风急剧增强的一种重要背景场(季亮等, 2007; 于玉斌等, 2008);进一步研究发现,高层强的流出发生在台风逆垂直风切变一侧时,能阻挡高层环流,使台风内区局地垂直风切变减小,有利于台风发展增强(Shi and Chen, 2021)。高空槽活动对台风增强有影响,在大西洋海域,当出现切断低压环流时,更容易引发台风快速增强(Fischer et al, 2019)。弱冷空气侵入能促使台风外围区域辐合抬升,有利于强度增强(陈联寿和丁一汇, 1979; 刘赛赛等, 2017)。南海台风强度越强,快速增强时对环境场因子的变化越敏感(胡皓, 2015)。

台风强度变化中能量学过程是重要的研究方向(陈联寿和丁一汇, 1979)。有研究将台风动能分成旋转风动能、辐散风动能,旋转风动能的增强可能是台风突然增强的主因(刘春霞和容广坝, 1996; 于玉斌, 2007)。在对台风“温妮”变性再发展个例的动能收支研究中,发现动能制造项是主要的动能源,水平输送项对台风有负贡献,低层的散度风是动能制造的主要原因(朱佩君等, 2005)。在台风“海马”变性加强个例研究中,辐散风动能对强度变化有更好的指示意义(程正泉等, 2012)。无论是东海海域还是南海快速增强的台风,在其发展阶段动能制造项会产生大量的动能,促使台风强度的增强(梁力和吴志伟, 1986; 程正泉等, 2017b)。另外,在实际业务中也有关于台风快速增强的预报技术和工具,美国联合台风警报中心(JTWC)发展了一种包含快速增强概率预报和确定性预报的工具,在业务应用中取得了不错的效果(Sampson et al, 2011; Knaff et al, 2018; 2020)。

2024 年 11 号台风“摩羯”在南海期间长时间维持高强度,并出现多次快速增强的特征,其是登陆我国最强的秋季台风,对海南、广东西南沿海、广西等地造成严重影响。本文利用实况、再分析数据等资料,主要从大气环流条件、海洋环境、动能变化等角度分析“摩羯”的强度异常变化特征及原因。

1 资料和方法

本文使用资料包括站点监测、遥感探测、再分析数据等，站点资料有南海海域、广东、广西、海南等地的国家级自动气象站和自动气象站监测数据，遥感探测资料指多普勒天气雷达、FY-4B 卫星等数据，再分析资料主要使用欧洲中心第 5 代再分析数据 ERA5 (Hersbach et al, 2020)，数据的空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ ，时间分辨率为逐小时。

台风快速增强的定义参照龚月婷等 (2024) 提出的标准，即南海台风快速增强和极端快速增强标准分别是中心最大风速增幅 $\Delta V_{24} \geq 15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $\Delta V_{12} \geq 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $\Delta V_6 \geq 7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $\Delta V_{24} \geq 20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $\Delta V_{12} \geq 13 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $\Delta V_6 \geq 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

台风范围是以台风为中心，取不同纬距为边长的矩形网格场范围，如 $8^\circ \times 8^\circ$ 、 $12^\circ \times 12^\circ$ 、 $14^\circ \times 14^\circ$ 。

环境垂直风切变是 200 hPa 与 850 hPa 之间的环境风之差，计算如式 (1) 所示 (程正泉等, 2017a)：

$$\vec{V}_{200-850} = (\overline{\Delta u_{200-850}}) \cdot \vec{i} + (\overline{\Delta v_{200-850}}) \cdot \vec{j} \quad (1)$$

$$\overline{\Delta u_{200-850}} = \frac{\sum_i^n (u_{200 \text{ i}} - u_{850 \text{ i}})}{n} \quad (2)$$

$$\overline{\Delta v_{200-850}} = \frac{\sum_i^n (v_{200 \text{ i}} - v_{850 \text{ i}})}{n} \quad (3)$$

式中： $\vec{V}_{200-850}$ 是垂直风切变， u 、 v 分别代表水平风的纬向、经向分量。

动能收支通过有限区域的动能方程计算，计算如式 (4) 所示 (丁一汇, 1989)：

$$\frac{\partial K}{\partial t} = -\vec{V} \cdot \nabla K - \omega \frac{\partial K}{\partial p} - \vec{V} \cdot \nabla \phi - D \quad (4)$$

式 (4) 等号左边为动能的局地变化，右边四项分别为动能水平平流或水平输送项、动能垂直输送项、动能制造项和余项，其中 $K = \frac{1}{2}(u^2 + v^2)$ ， $\vec{V}$ 是水平风矢量， ω 是垂直速度， ϕ 是位势高度， D 是余项。

2 “摩羯”强度异常变化特征

2411 号台风“摩羯”于 2024 年 9 月 1 日 23:00 (北京时，下同) 在菲律宾近海编号命名，生成后向北偏西方向移动穿过菲律宾吕宋岛，3 日早晨进入南海东北部海面，之后转向偏西行，6 日白天增强至巅峰强度，中心最大风速达到 $68 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (17 级以上)，6 日 16:20 前后以超强台风级 (SuperTY, 17 级以上， $62 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) 在海南文昌沿海登陆，登陆强度仅次于 1409 号台风“威马逊”，是有记录以来登陆我国第二强台风，也是登陆我国的最强秋台风，之后进入北部湾继续向西偏北方向移动，7 日 15:30 前后以 SuperTY (17 级， $58 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) 在越南广宁南部沿海登陆 (图 1)。

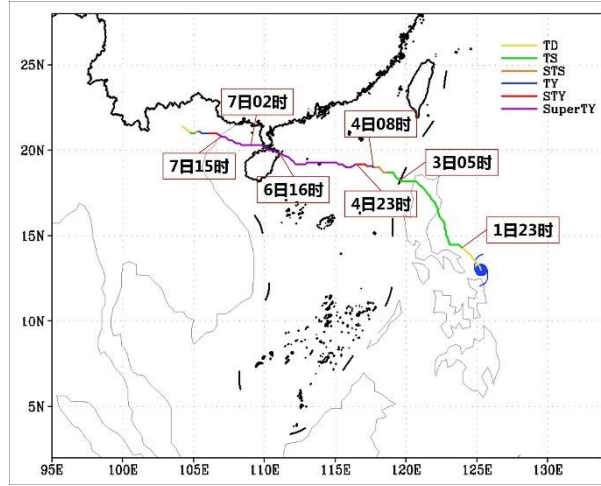


图 1 2411 号台风“摩羯”路径

Fig. 1 The track of super typhoon Yagi

“摩羯”进入南海后，强度出现了多次明显变化，图 2 是“摩羯”进入南海 120°E 到登陆越南期间强度（中心附近最大风速）随时间变化，及每个时次的 12 h、24 h 变化幅度。可以发现“摩羯”经历了三次明显增强阶段：第一阶段 9 月 3 日 05:00 至 5 日 05:00，“摩羯”在南海东北部缓慢偏西行，强度持续增强，并出现显著的连续快速增强特征，48 h 内从热带风暴级（TS，9 级， $23\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ）增强至 SuperTY（17 级以上， $58\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ），其中 4 日 05:00—17:00 的 12 h 最大增幅为 $18\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，4 日 05:00 至 5 日 05:00 的 24 h 最大增幅为 $28\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，均达到了极端快速增强标准；第二阶段 9 月 5 日 20:00 至 6 日 05:00，“摩羯”在登陆海南岛前，中心附近最大风速从 $58\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 增强至 $68\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ （17 级以上），12 h 增幅为 $10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，达到了 12 h 快速增强标准；第三阶段 9 月 7 日 08:00—14:00，“摩羯”进入北部湾重新加强，6 h 内增强了 $8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，至 $60\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ （17 级以上），达到了 6 h 快速增强标准。

在 1981—2024 年的南海台风中，满足 12 h 增幅达 $13\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的极端快速增强的台风有 14 个，24 h 增幅达 $20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的极端快速增强的台风有 13 个。这些台风中 12 h、24 h 最大增幅分别为 $17\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $27\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，均小于“摩羯”，表明“摩羯”在南海的快速增强具有显著极端性。

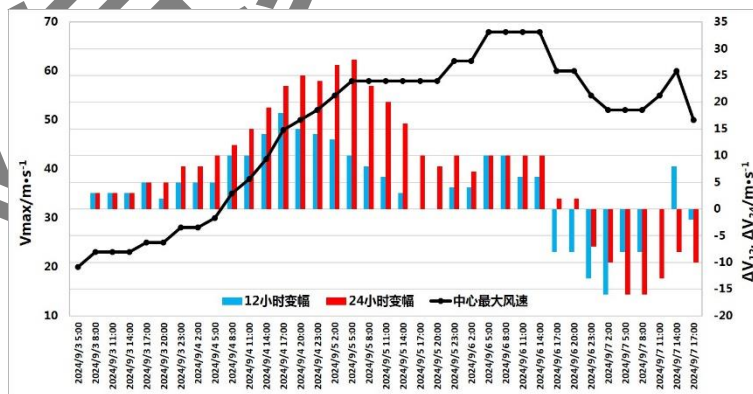


图 2 2024 年 9 月 3 日 05:00 至 7 日 17:00 台风“摩羯”强度（中心最大风速）随时间的演变，及各时次的 12 h、24 h 强度变化幅度

Fig. 2 The maximum wind speed of Yagi and the variation of the maximum wind speed from 05:00 3rd Sep. to 17:00 7th Sep. Unit: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$

(Line: maximum wind speed. Bars: the variation. Blue: 12hours variation. Red: 24hours variation)

“摩羯”从 9 月 4 日 14:00 至 7 日 17:00 连续 75 h 达到 14 级及以上强度，约占其生命

史 (169 h) 44%，其中 4 日 23:00 至 7 日 15:00 维持在 SuperTY (16~17 级以上)，长达 64 h (图 3)。在 1981—2024 年的南海台风中，共有 53 个发展到强台风级 (STY)，STY 及以上强度维持时间超过 70 h 的有三个台风，“摩羯”排第三，前两位是 1013 号台风“鲇鱼 (Megi)”和 8309 号台风“Ellen”，均为 84 h；发展到 SuperTY 的南海台风仅有 9 个，“摩羯”时间最长，远超第二位 2309 号台风“苏拉 (Saola)” (48 h)，说明“摩羯”在南海长时间维持 SuperTY 极为罕见。

“摩羯”在三次强度变化过程中，结构有明显的变化。在 9 月 3 日 05:00 至 5 日 05:00 第一个快速增强阶段 (图 4a, 4b)，台风迅速发展至对称结构，并出现清晰的眼区，眼墙区云顶温度最低下降到 190 K，同时台风 7 级风圈半径也随之增大 (图 3)；在第二个阶段，5 日白天台风发生一次眼墙置换，尺寸变小，7 级风圈半径有所收缩 (图 3)，而强度维持，眼墙置换完成后，5 日夜间至 6 日白天台风再次增强，结构仍维持对称结构 (图 4c, 4d)；在第三个阶段，台风进入北部湾重新增强，云系脱离了陆地 (海南岛和雷州半岛) 对其的影响，再次发展至对称结构，眼墙区云顶温度最低下降到 190 K (图 4e, 4f)。综上所述，“摩羯”三次增强过程都伴随着对称结构的发展。

当“摩羯”近岸时，多普勒天气雷达能监测到低空台风中心强风。6 日 14:00 (注：箭头所示为台风中心。图 5a)，海口雷达 0.5°仰角监测台风中心最大风速出现了一次速度模糊，退模糊后距离雷达中心 110 km 的最大风速约为 $64 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (高度约为 1.8 km)，7 日 11:00 (注：箭头所示为台风中心。

图 5b)， “摩羯”在北部湾海面，北海雷达 0.5°仰角监测台风中心最大风速出现了一次速度模糊，退模糊后距离雷达中心 125 km 的最大风速约为 $64 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (高度约为 2.1 km)。

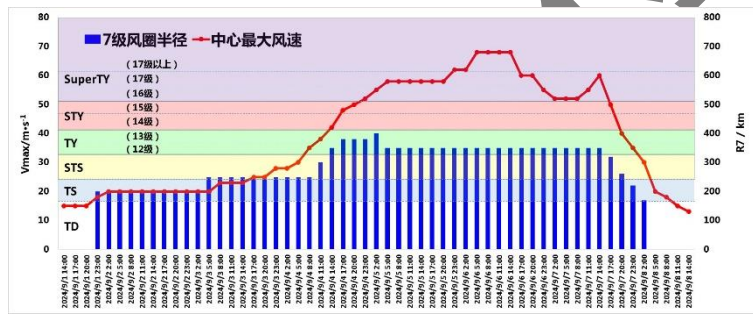


图 3 2024 年 9 月 1—8 日“摩羯”中心最大风速和 7 级风圈半径随时间的演变

Fig. 3 The maximum wind speed of typhoon center (Red, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) and radius of gale-force winds (Blue, km) of Yagi from 1st Sep. to 8th Sep.

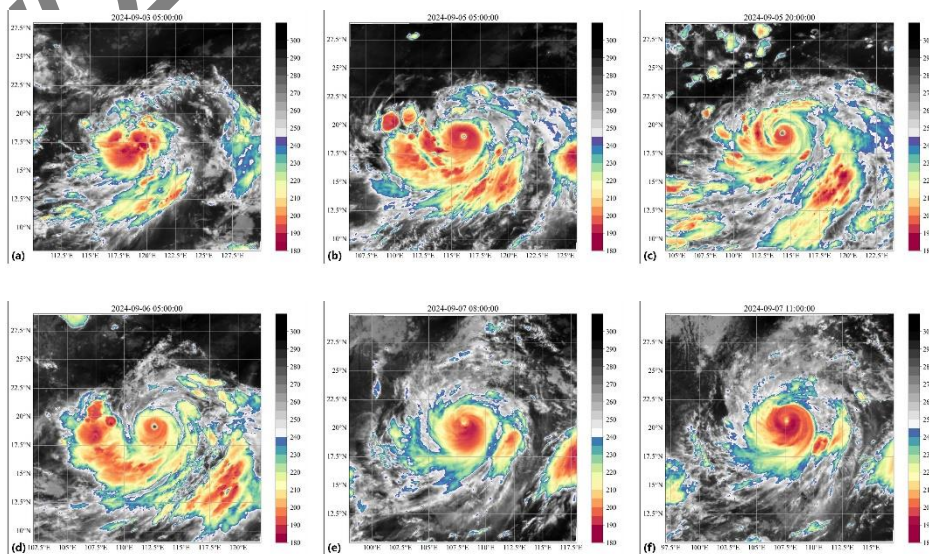
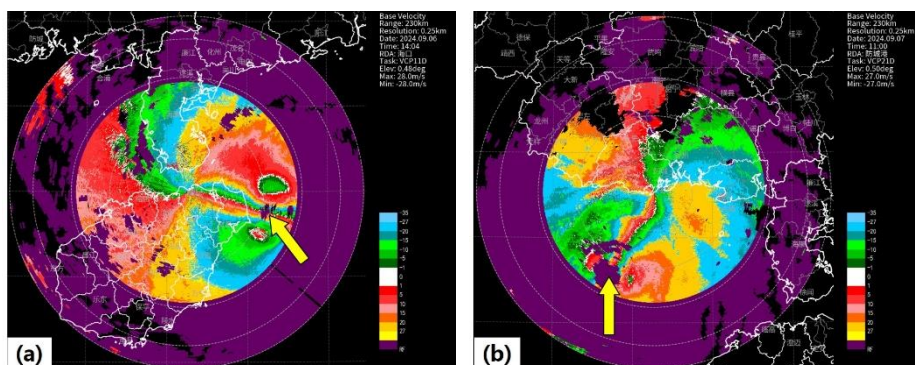


图 4 FY-4B 红外增强云图

(a) 3 日 05:00, (b) 5 日 05:00, (c) 5 日 20:00, (d) 6 日 05:00, (e) 7 日 08:00, (f) 7 日 11:00

Fig. 4 Infrared image of FY4B

(a)05:00 3rd. (b)05:00 5th. (c)20:00 5th. (d) 05:00 6th. (e) 08:00 7th. (f) 11:00 7th.

注：箭头所示为台风中心。

图 5 2024 年 9 月 (a) 6 日 14:00 海口, (b) 7 日 11:00 防城港多普勒天气雷达 0.5° 仰角径向速度

Fig. 5 The radial velocity imagery at 0.5° elevation of Doppler weather radar (the yellow arrows represent the center of Yagi)

(a) 14:00 6th Haikou radar. (b)11:00 7th Beihai radar.

3 “摩羯”强度异常变化的原因分析

针对“摩羯”三次明显增强及长时间维持 SuperTY, 从大气环流条件、海洋环境和台风动能收支等角度分析强度变化原因。

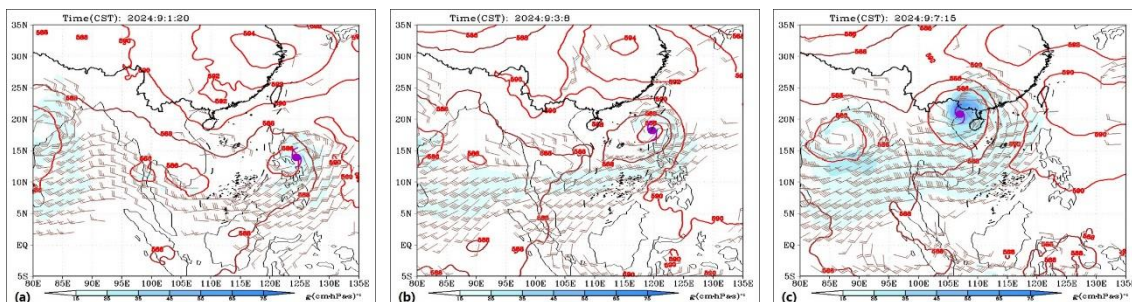
3.1 大气环流分析

“摩羯”进入南海后, 增强的西南季风维持强盛, 注: 台风符号所示为台风中心位置。

图 6 是“摩羯”进入南海前后的 500 hPa 位势高度场、850 hPa 风场和水汽通量。“摩羯”进入南海前 (9 月 1 日 20:00), 季风气流总体偏弱 (注: 台风符号所示为台风中心位置)。

图 6a), 进入南海后至登陆越南前 (3 日 08:00 至 7 日 15:00), 印度洋至南海的季风气流明显增强, 而且越赤道气流在“摩羯”进入南海后也有加强趋势 (注: 台风符号所示为台风中心位置)。

图 6b, 6c), 其携带的水汽通量超过了 $15 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, 输送至台风范围的水汽通量达到了 $55 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, 对台风的加强和维持产生了重要影响。



注：台风符号所示为台风中心位置。

图 6 2024 年 9 月 (a) 1 日 20:00, (b) 3 日 08:00, (c) 7 日 15:00 的

500 hPa 位势高度（等值线，单位：dagpm）和 850 hPa 风（风羽， $\geq 8\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ）、水汽通量（填色，单位： $\text{g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ ）

Fig. 6 Potential height at 500hPa(contour, dagpm), wind(barb) and vapor flux(colored, $\text{g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$) at 850hPa
(a)20:00 1st Sep. (b)08:00 2nd Sep. (c)15:00 7th Sep.

由图 7 可见，西北太平洋副热带高压（以下简称副高）稳定控制我国东部地区，500 hPa 高度场中心超过 590 dagpm，位于淮河流域；长江流域至华南地区的 500 hPa 与 850 hPa 的假相当位温之差普遍小于 $-16\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，部分区域低于 $-24\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，中低层大气呈现明显的对流不稳定层结，从 4 日开始，“摩羯”以北的大陆上 850 hPa 东北到东风逐渐加强，并持续至 6 日，在该气流作用下，大陆上的不稳定气团输送至台风环流附近，加强了台风环流附近的位势不稳定层结，使台风有更好的对流发展条件。这表明大气环流作用能将大陆上的不稳定气团输送给台风，有助于台风环流附近的对流发展，促使强度增强或维持。

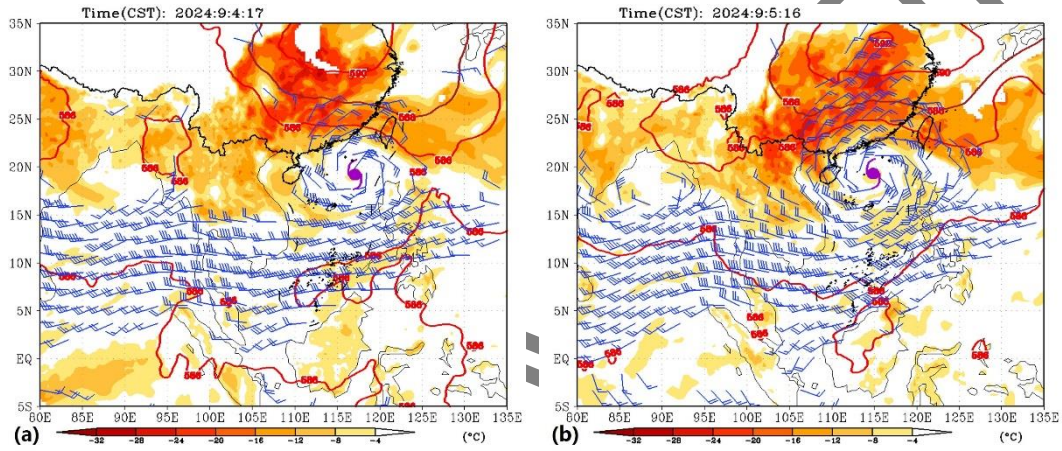


图 7 2024 年 9 月 (a) 4 日 17:00, (b) 5 日 16:00 的 500 hPa 位势高度、850 hPa 风（风羽， $\geq 6\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ）、500 hPa 与 850 hPa 假相当位温之差（填色， $\leq -4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ）

Fig. 7 Potential height at 500hPa(contour, dagpm), wind(wind barb, wind speed greater than or equal to $6\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), difference of pseudo-equivalent potential temperature between 850hPa and 500hPa(shaded, $^{\circ}\text{C}$)
(a)17:00 4th Sep. (b)16:00 5th Sep.

王珍等（2023）指出，较弱的环境风垂直切变有利于台风强度的增强和维持。由图 8 可见，“摩羯”整个生命史中垂直风切变几乎不超过 $10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ；当台风在极端快速增强时（4 日 05:00 至 5 日 05:00），垂直风切变最低下降至 $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右，当台风登陆海南前后，垂直风切变开始出现增大趋势，但台风在北部湾增强前，垂直风切变重新下降至 $4.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右。由影响“摩羯”的高低层 200 hPa 和 850 hPa 环境风可知（图略，与环境风垂直切变所取范围相同），200 hPa 高层环流以东到东北风、850 hPa 低层环流以西南风为主，因此影响环境风垂直风切变的主要是高低层的纬向风（ u 风），从图 8 的 200 hPa、850 hPa 纬向风和环境风垂直风切变的演变特征发现，3 日白天至 4 日夜间，850 hPa 偏西风无明显变化，介于 $1\sim 3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，而 200 hPa 偏东风明显降低，平均风速大约从 $5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 降低至 $1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，5 日白天至 6 日早晨，200 hPa 偏东风变化不大，而 850 hPa 偏西风减弱并转变成弱偏东风，导致该阶段环境风垂直风切变不断下降并达到最低值；“摩羯”登陆海南前后，200 hPa 偏东风重新增大，850 hPa 从弱偏东风转变为偏西风，使得垂直风切变呈现增大趋势，当台风进入北部湾时，高低层的偏北和偏南风短暂减弱（图略），引起垂直风切变小幅减小。表明在“摩羯”增强过程中，大气环流提供了弱垂直风切变环境背景，有利于台风暖心和轴对称结构的维持，促使台风强度增强和维持。

高空出流在台风增强过程中能提供有利的背景条件(高拴柱和吕心艳, 2023; 吕心艳等, 2021)。由图 9 可见,“摩羯”上空的散度始终大于 $5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$, 在进入南海到登陆海南岛之前(3—6 日, 图 9a~9c), 最大散度中心增大至 $10 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$, 表明台风高层的气流辐散明显, 同时台风西侧有清晰的东北气流, 该气流与赤道地区强盛的偏东气流结合, 使得台风高层处于明显的东北风出流区域, 将台风上空辐散的气流快速向西南方向(赤道区域)输送, 维持台风上空的辐散状态; 当“摩羯”进入北部湾(7 日, 图 9d) 台风西侧的东北气流有所减弱, 而西北侧又出现较明显的东南气流, 与大陆上的偏东气流相结合, 使台风高层继续维持较强的出流条件, 有助于台风增强。

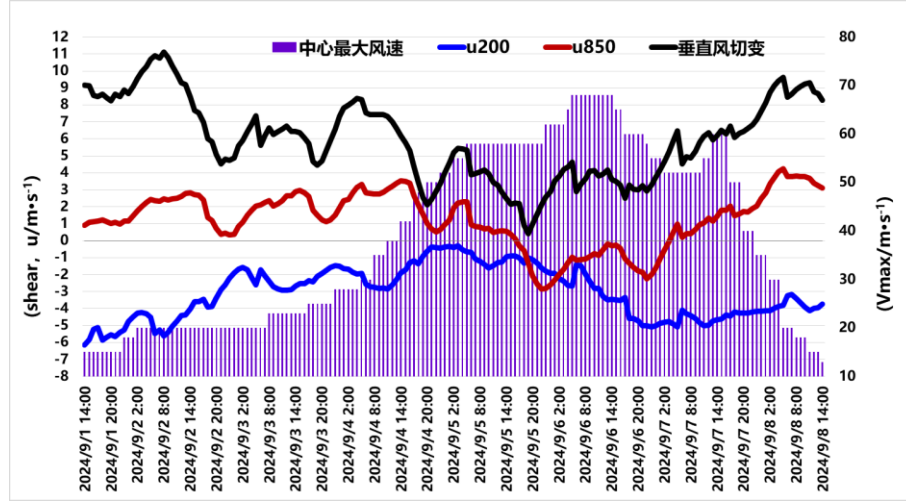


图 8 2024 年 9 月 1—8 日台风“摩羯”中心最大风速、200~850 hPa 台风范围($14^\circ \times 14^\circ$)环境垂直风切变、200 hPa 和 850 hPa 纬向风(u 风)随时间的演变

Fig. 8 The maximum wind speed(bars) of Yagi , environmental vertical wind shear(black line), zonal wind(u -wind) at 200hPa(blue line) and 850hPa(red line) of typhoon from 1st Sep. to 8th Sep. Unit: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$

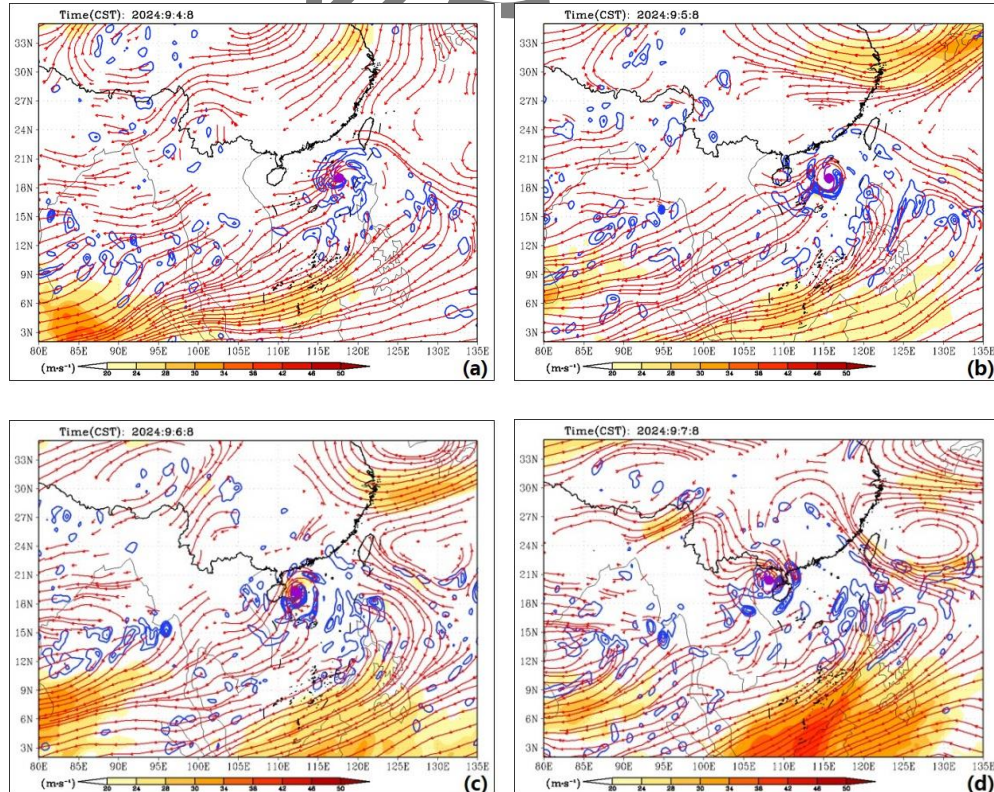


图 9 2025 年 9 月(a)4 日 08:00, (b)5 日 08:00, (c)6 日 08:00, (d)7 日 08:00 的 200 hPa 流场 (流线, $\geq 15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)、风速 (填色, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) 和散度 (等值线, $\geq 5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$)

Fig. 9 Stream(stream lines, greater than or equal to $15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), wind speed(shaded, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) and divergences at 200hPa(contour, greater than or equal $5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$)
(a) 08:00 4th; (b)08:00 5th; (c)08:00 6th; (d)08:00 7th.

3.2 海洋环境分析

9 月 1 日“摩羯”生成于菲律宾东侧洋面，此后进入南海北部，此前 2024 年 8 月南海出现空台，区域海温很高，1—7 日南海北部的海面温度普遍超过 30°C ，较气候平均偏高 $1\sim 2^\circ\text{C}$ (图略)，异常偏高的海温可以为台风提供强烈的热量输送，使台风中心附近容易形成强烈的对流，促使台风强度增强或维持。

由图 10 可见，在“摩羯”的整个生命史，海洋的潜热通量远大于感热通量，说明海洋向大气传输的潜热通量非常显著，在“摩羯”强度增强的三个阶段，感热和潜热通量还呈现出不同的作用。3 日 05:00 至 5 日 05:00 “摩羯”快速增强阶段，感热通量略微增大，但总体变化不大，最大约为 $100 \text{ kJ}\cdot\text{m}^{-2}$ ，潜热通量从 3 日开始潜热通量迅速增大，中间有降低时段，可能与日变化特征有关，到 5 日增大至超过了 $1100 \text{ kJ}\cdot\text{m}^{-2}$ ；5 日 17:00 至 6 日 05:00 “摩羯”登陆海南岛前二次快速增强阶段，感热通量开始缓慢下降，而潜热通量重新增大，从 $900 \text{ kJ}\cdot\text{m}^{-2}$ 增大至 $1100 \text{ kJ}\cdot\text{m}^{-2}$ 左右，6 日 14:00 至 7 日 08:00，潜热和感热通量同时下降，此时台风先后登陆海南岛和雷州半岛，并受陆地影响，感热通量下降至 $0 \text{ kJ}\cdot\text{m}^{-2}$ 以下，海洋热量通量整体减弱，台风强度也随之降低；7 日 08:00—14:00 “摩羯”第三次增强阶段，感热通量仍处于下降期，而潜热通量再次出现短暂增大，达到了 $900 \text{ kJ}\cdot\text{m}^{-2}$ ，直至台风登陆越南后，潜热通量迅速降低。这反映了海洋热量通量显著影响“摩羯”强度变化，其中感热作用较小，潜热起到关键作用。

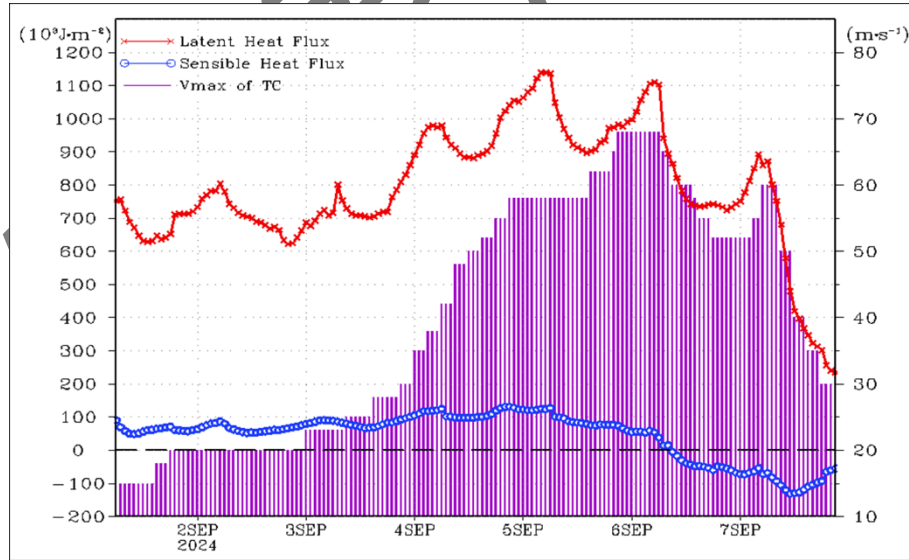


图 10 2024 年 9 月 1—7 日台风中心最大风速、台风中心区域平均海平面潜热通量和感热通量

Fig. 10 The maximum wind speed of Yagi(Bars, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), the area mean latent heat flux(Red line) and sensible heat flux(Blue line) at sea surface of Yagi from 1st Sep. to 7th Sep. (Unit: $\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}$)

陈联寿和丁一汇 (1979) 定性分析了影响海气间潜热通量的机制，指出潜热通量与风速成正比、与海洋比湿和大气间比湿之差成正比。在上文分析已知，南海北部海面温度普遍超过 30°C ，比气温高，导致海面饱和比湿 q_{sea} 大，形成海洋与大气的比湿之差，海洋通过蒸发作

用向大气输送潜热通量, 有助台风增强。由图 11 可见, 3 日台风进入南海后, 台风中心区域海气比湿之差迅速增大, 潜热通量随之增大, 5 日海气比湿之差达到最大值, 由于台风中心区域风速快速增强, 因此潜热通量继续增大, 随后海气比湿逐渐下降, 而台风中心区域风速的增强使得海气间的湍流作用增强, 导致台风登陆海南岛并穿过琼州海峡后有潜热通量的短暂增大。表明异常高海温提供了大量的潜热通量, 台风增强后其中心区域风速增大、气压下降, 有助于湍流作用增强, 反过来能促使海洋对大气的潜热通量增强, 从而形成正反馈机制。

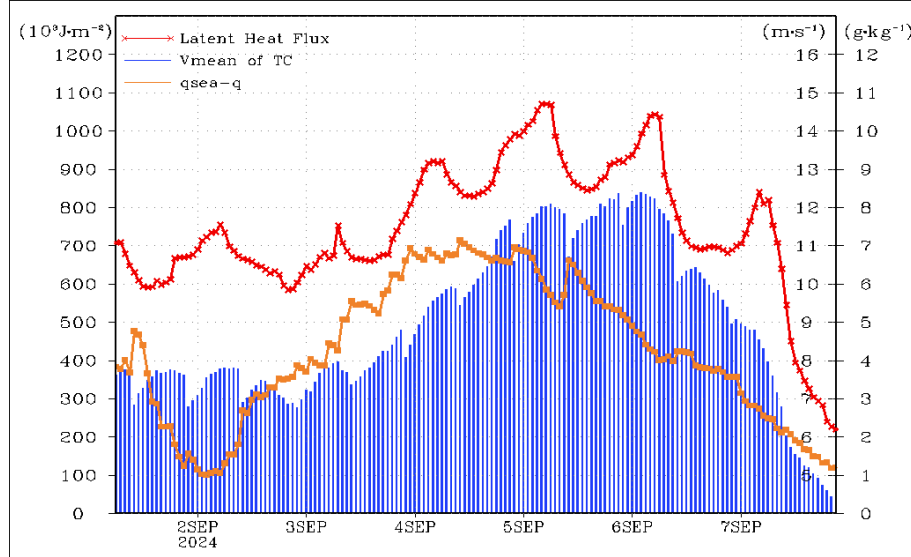


图 11 2024 年 9 月 1 日 14:00-8 日 05:00 台风中心区域平均全风速、平均海平面潜热和平均海气饱和比湿之差 q_{sea-q}

Fig. 11 The area mean wind speed (Bars, $m \cdot s^{-1}$), the area mean latent heat flux at sea surface (Red line, $kJ \cdot m^{-2}$) and the area mean q_{sea-q} of Yagi from 1st Sep. to 7th Sep. (Unit: $kJ \cdot m^{-2}$)

3.3 动能收支分析

陈联寿和丁一汇 (1979) 研究指出, 动能虽然在总能量平衡中是较小的量, 但对台风的发展非常重要。以“摩羯”为中心在 $12^\circ \times 12^\circ$ 的矩形范围内, 计算大气的平均动能局地变化 [式 (4), 图 12]。由图可见, 9 月 2 日经过菲律宾群岛时, “摩羯”的动能减小, 3 日进入南海后对流层内的动能开始加大, 在 4—5 日的极端快速增强阶段, 500 hPa 以上中高层大气的动能首先显著增大, 最大增幅达到 $1.5 m^2 \cdot s^{-3}$, 然后 700 hPa 以下低层动能也增大; 6 日“摩羯”强度超过 17 级, 先后登陆海南岛和雷州半岛, 之后降低至 16 级, 此时 925 hPa 以下近地面层动能负增长, 其余各层的动能增长幅度也明显减小; 7 日“摩羯”登陆越南后快速减弱, 500 hPa 以下中低层动能负增长明显, 达到 $-2.5 m^2 \cdot s^{-3}$ 。这反映了“摩羯”强度与其动能变化的紧密联系, 在台风强度变化的各阶段, 不同高度层的动能演变有不同特征。

进一步分析影响动能变化的因子, 计算动能收支方程中的各项, 图 13 是根据式 (4) 计算的“摩羯”台风范围内大气动能收支各项随时间的演变。总体而言, 动能制造项是主要动能增长因子, 余项包含了动能减小的主要因子, 动能水平和垂直输送项的作用介于前两项之间。2 日“摩羯”进入南海前, 850 hPa 以下低层动能制造项开始增大, 500~600 hPa 动能水平输送项和 400 hPa 以上高层余项也增大; 4—5 日“摩羯”极端快速增强阶段, 850 hPa 以下低层的动能制造项快速增大, 超过了 $6 m^2 \cdot s^{-3}$, 400 hPa 以上高层的动能垂直输送项也开始增大, 超过了 $1 m^2 \cdot s^{-3}$, 而各层的动能水平输送项变化不大, 余项则开始出现负值, 有研究发现动能制造主要集中在台风内核区, 入流穿过位势梯度大值区制造动能, 当台风环

流范围的对流发展增强，空气在台风内核区上升、外围下沉，形成次级环流，也促使低层入流、高层出流的维持和增大，制造更多的动能（梁力和吴志伟，1986；程正泉等，2017b），“摩羯”该阶段的动能制造和垂直输送反映了这种现象；5 日后至 7 日“摩羯”登陆越南前，850 hPa 以下低层的动能制造项持续增大，最大超过了 $12 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-3}$ ，700~400 hPa 中层动能制造项有缓慢降低的趋势，同时，动能中层水平输送项和高层垂直输送项都保持 $1 \sim 2 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-3}$ 的正值，两项的 925 hPa 以下近地面层则是负值，余项也始终维持负值，说明在该阶段，大气做功对动能增长起主要作用，其中边界层动能制造项可消除因近地面层动能水平和垂直输送项减小造成的影响，对台风范围动能维持尤为关键，中层的动能水平输入、高层的对流上升也有利于动能的增长，而余项主要抵消动能的增长。

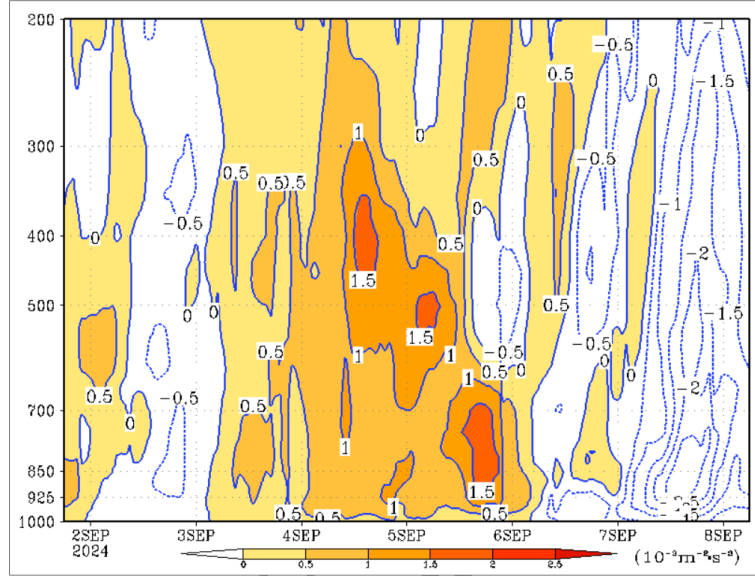
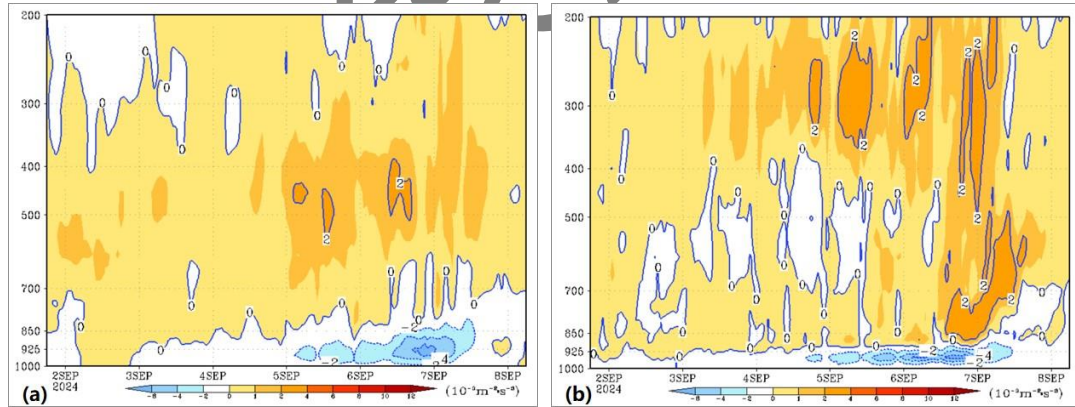


图 12 9 月 1 日—8 日“摩羯”台风范围的平均动能局地变化随时间演变（单位： $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-3}$ ）

Fig. 12 The kinetic energy of Yagi at different levels from 1st Sep. to 8th Sep. (Unit: $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-3}$)



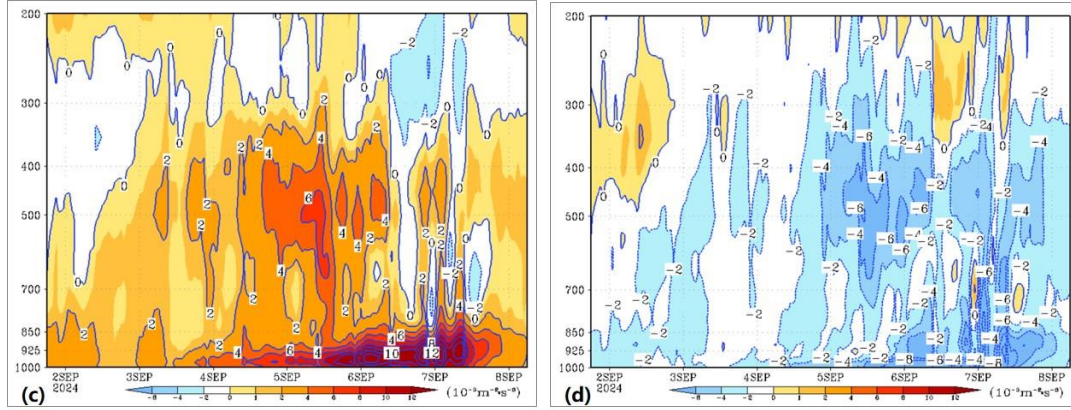


图 13 2024 年 9 月 1—8 日“摩羯”台风范围动能收支各项区域平均的时间演变 (单位: $10^{-3} \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-3}$)

(a) 动能水平平流, (b) 动能垂直输送, (c) 动能制造项, (d) 余项

Fig. 13 Each area mean term of kinetic energy budget ($10^{-3} \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-3}$) for typhoon Yagi from 1st Sep. to 8th Sep.

(a) Kinetic energy production. (b) Horizontal kinetic energy flux. (c) Vertical kinetic energy flux. (d) Residual term.

4 结论和讨论

本文分析了超强台风“摩羯”的强度变化特征, 并从大气环流条件、海洋环境、动能变化等角度分析其原因, 得到以下结论:

(1) “摩羯”长时间维持超强台风级达到 64 h, 是 1981 年以来维持超强台风级最久的南海台风。进入南海后, 出现了三次快速增强, 其中一次达到极端快速增强标准, 其 12 h、24 h 增强幅度也是自 1981 年以来增幅最大的南海台风。

(2) 强盛的西南季风为“摩羯”提供了充足水汽, 稳定的副高和大陆气流将陆地上的不稳定气团输送至台风环流范围附近, 促使台风区域位势不稳定层结得以加强和维持, 有利于对流发展旺盛, 弱环境垂直风切变和高层持续有利的大气出流条件, 对台风快速增强有非常重要的作用。

(3) 8 月南海空台, 海温偏高。在海洋向大气输送的热量通量中, 潜热通量所占比例很高, 其显著增大对台风快速增强和维持非常关键, 感热通量变化小, 对台风强度变化的影响程度小。

(4) 在快速增强过程中, 台风范围的动能迅速增大, 并维持至台风强度明显减弱。在动能收支各项中, 动能制造项是动能增长的主要源头, 动能垂直输送与台风范围的对流发展密切相关, 可间接影响动能制造, 中层动能水平输送对动能增长也有贡献。

本文指出了“摩羯”的快速增强在南海台风具有显著极端性, 相比其他快速增强的南海台风, 各方面因素具有哪些异常突出的作用, 还需要更多的对比和统计分析。本文虽然关注了海洋环境的作用, 以及台风动能收支的变化, 但对大气非绝热加热过程、台风整体的能量收支和循环过程尚未全面分析。另外, 从 ERA5 再分析资料提取的台风强度远比实况弱, 因此本文利用该资料的诊断分析结果只能定性揭示台风“摩羯”强度异常变化的原因, 更准确的原因还需要利用更多实况资料、精细数值模拟来探讨, 这有待下一步工作深入研究。

参考文献:

陈联寿, 丁一汇, 1979. 西太平洋台风概论[M]. 北京: 科学出版社: 491. Chen L S, Ding Y H, 1979. An Introduction to Typhoons in

the Western Pacific[M]. Beijing: Science Press:491(in Chinese).

陈小敏, 2015. 南海快速加强台风环境特征及内核动力过程研究[D]. 南京: 南京大学. Chen X M, 2015. Large-scale environmental characteristics and inner-core dynamical processes associated with rapid intensification of tropical cyclones in the South China Sea[D]. Nanjing: Nanjing University (in Chinese).

程正泉, 陈联寿, 李英, 2012. 登陆热带气旋海马(0421)变性加强的诊断研究[J]. 气象学报, 70(4): 628-641. Cheng Z Q, Chen L S, Li Y, 2012. Diagnosis of the extra-tropical transition of landfalling Tropical Cyclone Haima (2004)[J]. Acta Meteor Sin, 70(4): 628-641 (in Chinese).

程正泉, 林良勋, 杨国杰, 等, 2017a. 超强台风威马逊快速增强及大尺度环流特征[J]. 应用气象学报, 28(3): 318-326. Cheng Z Q, Lin L X, Yang G J, et al, 2017a. Rapid intensification and associated large-scale circulation of super Typhoon Rammasun in 2014[J]. J Appl Meteor Sci, 28(3): 318-326 (in Chinese).

程正泉, 杨国杰, 邓文剑, 2017b. 台风环境风垂直切变的计算[J]. 广东气象, 39(4): 1-5. Cheng Z Q, Yang G J, Deng W J, 2017b. Computation of vertical shear of environmental wind of typhoons[J]. Guangdong Meteor, 39(4): 1-5 (in Chinese).

丁一汇, 1989. 天气动力学中的诊断分析方法[M]. 北京: 科学出版社: 180-186. Ding Y, 1989. Diagnostic Analysis Methods in Synoptic Dynamics [M]. Beijing: Science Press: 180-186(in Chinese).

冯锦全, 陈多, 1995. 我国近海热带气旋强度突变的气候特征分析[J]. 热带气象学报, 11(1): 35-42. Feng J Q, Chen D, 1995. Analyses of climatic characteristics accompanying sudden intensity changes in offshore tropical cyclones in China[J]. J Trop Meteor, 11(1): 35-42 (in Chinese).

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[J]. 气象学报, 81(5): 702-716. Gao S Z, Lv X Y, 2023. Evolution of environmental circulation and dynamic and thermodynamic conditions before and after the onset of typhoon rapid intensification[J]. Acta Meteor Sin, 81(5): 702-716 (in Chinese).

龚月婷, 程正泉, 杨诗琪, 2024. 南海热带气旋极端快速加强标准研究[J]. 热带气象学报, 40(4): 650-658. Gong Y T, Cheng Z Q, Yang S Q, 2024. Definition of extremely rapid intensification of tropical cyclones over the South China Sea for operational forecasting[J]. J Trop Meteor, 40(4): 650-658 (in Chinese).

韩慎友, 陈伟斌, 陈见, 2020. 超强台风“天鸽”(1713)近海急剧加强特征及诊断分析[J]. 气象研究与应用, 41(1): 70-74. Han S Y, Chen W B, Chen J, 2020. Characteristics and diagnostic analysis on rapid intensification of Super Typhoon “Hato” (1713) over the offshore area[J]. J Meteor Res Appl, 41(1): 70-74 (in Chinese).

胡皓, 2015. 环境场因子对南海热带气旋迅速加强的影响研究[D]. 北京: 中国气象科学研究院. Hu H, 2015. Environmental influences on the rapidly intensifying tropical cyclones in the South China Sea[D]. Beijing: Chinese Academy of Meteorological Sciences (in Chinese).

黄勇, 王业桂, 蔡其发, 2016. 超强台风“梅花”急剧变化的环境特征和能量变化分析[J]. 海洋预报, 33(6): 22-31. Huang Y, Wang Y G, Cai Q F, 2016. Analysis on rapid intensity change of the environment condition and energy flux driven by the Super Typhoon Muifa[J]. Mar Forecasts, 33(6): 22-31 (in Chinese).

季亮, 费建芳, 黄小刚, 等, 2007. 台风“云娜”(2004)近海加强的数值模拟研究[J]. 气象科学, 27(5): 530-535. Ji L, Fei J F, Huang X G, et al, 2007. Numerical simulation of Typhoon Ranim (2004) intensification[J]. J Meteor Sci, 27(5): 530-535 (in Chinese).

李霞, 何如意, 段朝霞, 等, 2014. 台风“韦森特”路径突变和近海加强的成因分析[J]. 热带气象学报, 30(3): 533-541. Li X, He R Y, Duan Z X, et al, 2014. Analysis on the unusual track and intensification of Typhoon “Vicente” [J]. J Trop Meteor, 30(3): 533-541 (in Chinese).

梁力, 吴志伟, 1986. 东海近海台风发生发展的动能收支[J]. 热带气象, 2(2): 125-134. Liang L, Wu Z W, 1986. The kinetic energy budget of a typhoon over the East China Sea coastal waters[J]. J Trop Meteor, 2(2): 125-134 (in Chinese).

林良勋, 梁巧倩, 黄忠, 2006. 华南近海急剧加强热带气旋及其环流综合分析[J]. 气象, 32(2): 14-18. Lin L X, Liang Q Q, Huang Z, 2006. Analysis of circulation pattern of rapidly intensified offshore tropical cyclones of South China[J]. Meteor Mon, 32(2): 14-18 (in Chinese).

刘春霞, 容广坝, 1996. 近海突然加强台风能量场的诊断分析[J]. 热带气象学报, 12(2): 174-180. Liu C X, Rong G X, 1996. On diagnostic analysis of energy fields of abrupt intensification of typhoon offshore[J]. J Trop Meteor, 12(2): 174-180 (in Chinese).

- 刘赛赛, 张立凤, 张晓慧, 2017. 台风“彩虹”(1522)近海急剧加强的特征分析[J]. 气象科学, 37(4): 487-496. Liu S S, Zhang L F, Zhang X H, 2017. Characteristics analysis on rapid intensification of Typhoon Mujigae (1522) over the offshore area of China[J]. J Meteor Sci, 37(4): 487-496 (in Chinese).
- 吕心艳, 许映龙, 董林, 等, 2021. 2018 年西北太平洋台风活动特征和预报难点分析[J]. 气象, 47(3): 359-372. Lv X Y, Xu Y L, Dong L, et al, 2021. Analysis of characteristics and forecast difficulties of TCs over Northwestern Pacific in 2018[J]. Meteor Mon, 47(3): 359-372 (in Chinese).
- 王珍, 黄泓, 赵军, 等, 2023. 热带气旋近海加强机制的研究进展[J]. 气象, 49(5): 525-541. Wang Z, Huang H, Zhao J, et al, 2023. Research progress on the intensifying mechanism of coastal tropical cyclones[J]. Meteor Mon, 49(5): 525-541 (in Chinese).
- 阎俊岳, 1996. 近海热带气旋迅速加强的气候特征[J]. 应用气象学报, 7(1): 28-35. Yang J Y, 1996. Climatological characteristics of rapidly intensifying tropical cyclones over the offshore of China[J]. J Appl Meteor Sci, 7(1): 28-35 (in Chinese).
- 阎俊岳, 张秀芝, 陈乾金, 等, 1995. 热带气旋迅速加强标准的研究[J]. 气象, 21(5): 9-13. Yang J Y, Zhang X Z, Chen Q J, et al, 1995. The standard of rapidly intensified tropical cyclones[J]. Meteor Mon, 21(5): 9-13 (in Chinese).
- 于玉斌, 2007. 我国近海热带气旋强度突变的机理研究[D]. 南京: 南京信息工程大学. Yu Y B, 2007. The theoretical study on tropical cyclone intensity sudden change over the coastal waters of China[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology (in Chinese).
- 于玉斌, 陈联寿, 杨昌贤, 2008. 超强台风“桑美”(2006)近海急剧增强特征及机理分析[J]. 大气科学, 32(2): 405-416. Yu Y B, Chen L S, Yang C X, 2008. The features and mechanism analysis on rapid intensity change of Super Typhoon Saomai (2006) over the offshore of China[J]. Chin J Atmos Sci, 32(2): 405-416 (in Chinese).
- 郑峰, 2015. 中国近海台风突然增强和衰亡的研究[D]. 北京: 中国气象科学研究院. Zheng F, 2015. A study of rapid intensification and dissipation of typhoons over coastal water of China[D]. Beijing: Chinese Academy of Meteorological Sciences (in Chinese).
- 郑峰, 曾智华, 雷小途, 等, 2016. 中国近海突然增强台风统计分析[J]. 高原气象, 35(1): 198-210. Zheng F, Zeng Z H, Lei X T, et al, 2016. A statistical study of rapid intensification of typhoons over coastal water of China[J]. Plateau Meteor, 35(1): 198-210 (in Chinese).
- 朱佩君, 郑永光, 陶祖钰, 2005. 台风变性再度发展的动能收支分析[J]. 北京大学学报(自然科学版), 41(1): 93-103. Zhu P J, Zheng Y G, Tao Z Y, 2005. Kinetic energy budget of typhoon during extratropical transition[J]. Acta Sci Nat Univ Pekinensis, 41(1): 93-103 (in Chinese).
- Fischer M S, Tang B H, Corbosiero K L, 2019. A climatological analysis of tropical cyclone rapid intensification in environments of upper-tropospheric troughs[J]. Mon Wea Rev, 147(10): 3693-3719.
- Hersbach H, Bell B, Berrisford P, et al, 2020. The ERA5 global reanalysis[J]. Quart J Roy Meteor Soc, 146(730): 1999-2049.
- Holliday C R, Thompson A H, 1979. Climatological characteristics of rapidly intensifying typhoons[J]. Mon Wea Rev, 107(8): 1022-1034.
- Knaff J A, Sampson C R, Musgrave K D, 2018. An operational rapid intensification prediction aid for the western North Pacific[J]. Wea Forecasting, 33(3): 799-811.
- 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[J]. Wea Forecasting, 35(3): 1173-1185.
- Oey L, Lin Y C, 2021. The influence of environments on the intensity change of typhoon Soudelor[J]. Atmosphere, 12(2): 162.
- Sampson C R, Kaplan J, Knaff J A, et al, 2011. A deterministic rapid intensification aid[J]. Wea Forecasting, 26(4): 579-585.
- Shi D L, Chen G H, 2021. The implication of outflow structure for the rapid intensification of tropical cyclones under vertical wind shear[J]. Mon Wea Rev, 149(12): 4107-4127.
- Shu S J, Ming J, Chi P, et al, 2012. Large-scale characteristics and probability of rapidly intensifying tropical cyclones in the western North Pacific Basin[J]. Wea Forecasting, 27(2): 411-423.