

东海黑潮温度锋激发热带气旋二波结构的 现象和机制分析

曲恒鑫¹, 黄 菲^{1,2,3}, 许士斌¹

¹中国海洋大学海洋与大气学院, 山东 青岛

²中国海洋大学物理海洋教育部重点实验室, 山东 青岛

³中国海洋大学海洋高等研究院, 山东 青岛

收稿日期: 2025年4月3日; 录用日期: 2025年5月5日; 发布日期: 2025年5月13日

摘 要

本文利用全球降水计划(Global precipitation measurement, GPM)降水数据以及中国气象局发布的西北太平洋热带气旋最佳路径集等数据, 分析了0515号台风“卡努”经过黑潮海洋锋时的结构变化, 并利用WRF模式进行数值模拟, 初步分析了其中的物理机制。结果显示, 卡努穿越黑潮的过程中, 下垫面黑潮海洋锋强度较强, 海面向卡努提供强烈的非对称非绝热加热, 通过傅里叶谐波分解计算发现该加热以二波分量占据主导地位, 这会使得卡努切向的二波分量活动增强, 与其相关的位涡扰动在激发对流以后, 黑潮提供的有利条件会进一步促进位涡扰动和对流的发展, 导致二波结构的增强, 形成两个较强的降水对流中心, 最终使得卡努产生更严重的危害性。

关键词

黑潮, 热带气旋, 二波结构, 非绝热加热

Phenomena and Mechanisms of Wavenumber-2 Structure Excitation in Tropical Cyclones by the Kuroshio Temperature Front in the East China Sea

Hengxin Qu¹, Fei Huang^{1,2,3}, Shibin Xu¹

¹College of Oceanic and Atmospheric Sciences, Ocean University of China, Qingdao Shandong

²Key Laboratory of Physical Oceanography, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao Shandong

³Institute for Advanced Ocean Study, Ocean University of China, Qingdao Shandong

文章引用: 曲恒鑫, 黄菲, 许士斌. 东海黑潮温度锋激发热带气旋二波结构的
现象和机制分析[J]. 气候变化研究快报, 2025, 14(3): 368-383. DOI: 10.12677/ccrl.2025.143038

Received: Apr. 3rd, 2025; accepted: May 5th, 2025; published: May 13th, 2025

Abstract

This study investigates the structural changes of Typhoon Khanun (0515) as it traversed the Kuroshio front, utilizing precipitation data from the Global Precipitation Measurement (GPM) mission and the best-track dataset of tropical cyclones in the Northwest Pacific issued by the China Meteorological Administration. Numerical simulations were conducted using the Weather Research and Forecasting (WRF) model to preliminarily analyze the underlying physical mechanisms. The results reveal that during Khanun's passage over the Kuroshio front, the strong sea surface temperature gradient of the Kuroshio provided intense asymmetric diabatic heating to the typhoon. Fourier harmonic decomposition indicates that the heating was dominated by the wavenumber-2 component, which enhanced the tangential wavenumber-2 activity of Khanun. The associated potential vorticity perturbations, upon triggering convection, were further amplified by the favorable conditions provided by the Kuroshio, leading to the intensification of the wavenumber-2 structure. This process resulted in the formation of two strong convective precipitation centers, ultimately increasing the destructive potential of Typhoon Khanun.

Keywords

Kuroshio Front, Tropical Cyclone, Wavenumber-2 Structure, Diabatic Heating

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

1. 引言

热带气旋(TC)活动常伴随极端大风、暴雨及风暴潮等恶劣天气,严重威胁沿海地区的财产和生命安全。而 TC 结构的变化则会增加这些气候灾害的预测难度[1] [2]。西北太平洋地区由于拥有温暖的海水温度和有利的大尺度环流条件,成为了全球约三分之一 TC 的生成地。因此,研究该海域 TC 的结构变化和活动特征具有重要意义[3] [4]。

以往的研究表明,TC 的雨带结构及其内部活动常常受到多种因素的影响。例如, Lin 等分析了 TC 雨带结构及降水对海温的依赖关系,发现随着相对海温的升高,TC 的规模、雨带面积以及降水强度均有所增强[5]。Ma 等人通过数值模拟探讨了热通量对 TC 的影响。发现尽管感热通量相较于潜热通量量级较小,但仍对 TC 的雨带结构具有显著影响[6]。另有研究表明,强烈的垂直风切变(VWS)会导致 TC 雨带结构的不对称性增强,且这种不对称性会随着 VWS 强度的增加而加剧[7] [8]。

除了海温、热通量和风切变等环境因素外,涡旋罗斯贝波(VRW)也常被认为是影响 TC 雨带活动和发展的因素。Macdonald 在其关于螺旋雨带形成机制的研究中首次定性地提出了 VRW 的存在[9]。TC 的结构(特别是内核的不对称性)与低波数 VRW 的活动存在显著关联,这些低波数的 VRW 通常与对流耦合,从而影响 TC 内核螺旋雨带的形成和活动及 TC 的强度变化[10] [11]。Wang 则进一步强调了非绝热加热对 VRW 的重要性,并指出与对流相关的非绝热加热,尤其是其非对称分量,是 VRW 的主要驱动力[10]。

而黑潮作为北半球最强大的西边界暖流之一,从低纬度向中纬度地区输送了大量的水汽、热量和盐

分,这对天气、气候及生态系统都产生了广泛的影响[12]。同时,黑潮也被证实对 TC 的强度有重要影响作用:据统计,在 1949 年至 2016 年间,共有 81 个 TC 穿越了黑潮区域,其中 59 个维持或发展到了更低的中心气压,这与黑潮的暖水强度密切相关[13]-[15]。此外,我们还希望进一步分析黑潮的温暖海水对 TC 降水或雨带是否存在显著影响。

前人的研究证实了海温、水汽以及热通量等环境条件对 TC 雨带的影响,而黑潮区域相较于周边海域提供了更为丰富的水汽和非绝热加热条件,因此本文重点关注黑潮的非绝热加热对 TC 降水分布的影响。本文的章节安排如下:第二节介绍了本文中使用的数据与方法;第三节以台风“卡努”(0515)为例分析了 TC 经过黑潮时雨带结构变化的特征;第四节通过敏感性试验证实了黑潮海洋锋对 TC 结构的作用;在第五节进行了总结和讨论。

2. 数据与方法

本文中所使用的 TC 的中心位置和强度等数据来源于中国气象局热带气旋资料中心提供的西北太平洋热带气旋最佳路径集。海表面温度、风、气温等海洋大气资料来自于欧洲中期天气预报中心(ECMWF)的 ERA5 全球大气再分析资料;海表流速以及多层海温资料选自国家海洋科学数据中心的再分析 CORAv2.0 资料的日平均数据;降水数据来自全球降水计划(GPM)多卫星降水联合反演 IMERG 卫星降水产品(V06)。

本文使用 WRF(Weather Research and Forecasting)模式(4.3 版本)进行数值模拟,该模式可以根据实际的大气状态或理想化条件进行数值模拟,在 TC 的模拟方面表现尤为突出,是 TC 研究中广泛采用的数值模型之一。TC 模拟个例选择 2005 年第 15 号强台风卡努,模拟时间从 9 月 9 日 18 时至 9 月 11 日 06 时(初始 6 小时为模拟预热期),输出数据空间分辨率为 9 km×9 km,时间分辨率 1 小时。在参数化方案的选择上,微物理过程采用 WRF Single-Moment 6-class 方案;长波辐射和短波辐射均选用 RRTMG 方案;行星边界层方案采用 Yonsei University 方案;路面参数化则选择 Noah 方案;积云参数化方案选用 Kain-Fritsch-Cumulus Potential 方案。

在分析过程中,我们采用了 Nguyen 等人在 2014 年提出的气压质心方法,来定位模式数据中 TC 的中心位置[16]。方法如公式(1)所示,其中 x_i 和 y_i 分别代表格点的经度和纬度, R 为参考半径,在本研究中设置为 100 km, P'_i 为参考半径的平均气压与格点气压之差。经过试验比对,定位效果良好。

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=0}^{r=R} x_i P'_i}{\sum_{i=0}^{r=R} P'_i} \text{ and } \bar{y} = \frac{\sum_{i=0}^{r=R} y_i P'_i}{\sum_{i=0}^{r=R} P'_i}; P'_i = P_{env} - P_i \quad (1)$$

模式的初始边界条件从欧洲中期天气预报中心(ECMWF)的 ERA5 全球大气再分析资料中获得,时间分辨率为 1 小时,水平分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 。ERA5 再分析数据分辨率较高,能够更精准地再现黑潮的海温结构。

本文采用傅里叶级数分解方法提取谐波分量,从而完成对主要结论的分析,如公式(2)所示,其中谐波分量振幅由 $A(k)$ 表示,零波分量 $A(0) = a_0$ 。

$$f(x) = a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} (a_k \cos \omega_k x + b_k \sin \omega_k x) \text{ and } A(k) = \sqrt{a_k^2 + b_k^2} \quad (2)$$

3. 台风“卡努”降水分布特征

台风“卡努”(0515)于 2005 年 9 月 6 日 18 时在西北太平洋生成,初始位置位于菲律宾以东洋面(约北纬 13.0 度,东经 135.2 度),此时中心附近最大风速为 18 m/s,中心最低气压为 1000 hPa,定级为热带

风暴等级。生成后,卡努向西北方向移动,逐渐接近琉球群岛和东海海域。在移动过程中,受暖海水和高空辐散条件的支持,其强度持续增强。当卡努接近黑潮流轴(暖流区域)时,达到其生命史中的最高强度,中心附近最大风速达 50 m/s,中心最低气压为 945 hPa (图 1)。这一强度变化表明,卡努在黑潮区域通过海面获得了更多能量,这与赵振驰等关于黑潮暖水促进台风强度增强的研究结论一致[17]。

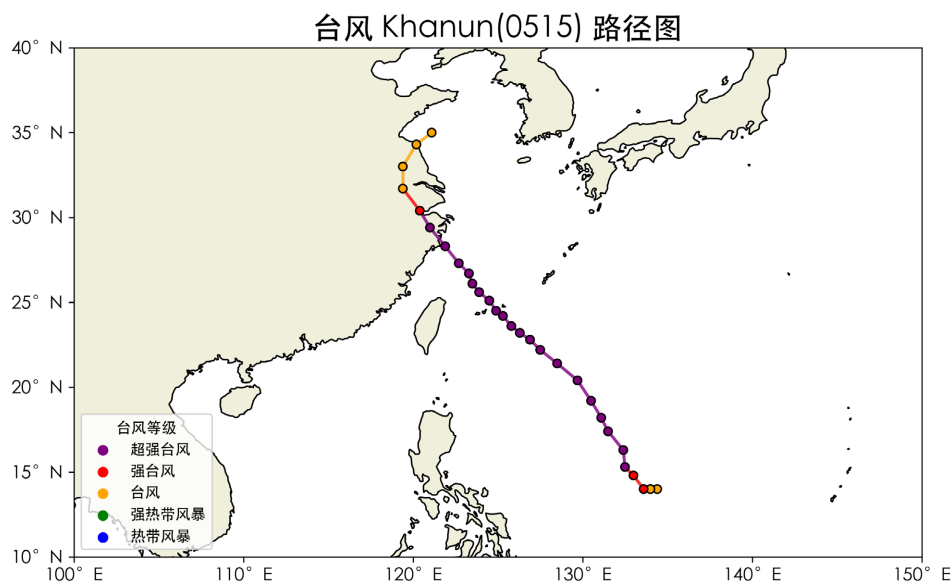


Figure 1. The track and intensity during the lifetime of Typhoon Khanun (0515)

图 1. 台风卡努(0515)路径及生命史强度变化

值得注意的是,除了强度的增强,卡努在经过黑潮区域时其核心区降水分布也发生了显著改变。9月10日7时至8时(图 2(a), 图 2(b)),当卡努中心位于(24.5°N, 125°E)附近,其核心区逐渐接近黑潮流轴时,黑潮流轴附近开始出现一个降水大值中心,此时核心区降水以一波非对称结构为主。随着台风中心进一步靠近黑潮,黑潮流轴附近的降水中心迅速发展,但其位置未发生显著移动(图 2(c), 图 2(d))。当台风中心穿越黑潮关键区时,此降水中心逐渐向内核区迁移,导致核心区降水呈现显著的二波结构(图 2(d)~(i))。随着台风离开关键区,雨带的波二波结构逐渐减弱,重新回归一波波数主导的分布(图 3)。这一过程中,降水中心的变化与黑潮区海温的强迫作用密切相关。

为了从更高的时空分辨率分析降水变化的过程,验证黑潮对 TC 降水的影响,本文利用 WRF 模式对卡努的降水演变过程进行了模拟。为了尽可能再现黑潮区域海温对降水的影响,在此组试验中海温使用再分析资料中的原始海温场,命名为 with-K 试验。如图 4 所示,与观测数据相比(图 2),模拟结果能够再现 TC 雨带波数变化的主要特征:雨带的二波结构在靠近黑潮轴线时增强,随 TC 穿越黑潮区域后,二波结构减弱,一波结构增强。在极坐标系下对 TC 雨带和 800 hPa 的 PV 进行谐波分析,并提取它们的二波分量,结果如图 5、图 6 所示。雨带的二波分量整体上沿着 TC 中心气旋式旋转,在 11 时至 13 时有明显的增强。通过对比降水与 PV 的波分量,可以看到二者具有相同的运动趋势。特别是在 60 km 至 120 km 范围内, PV 的正异常区域与降水的正异常区域基本吻合,这表明 TC 雨带的二波结构变化在一定程度上受到 VRW 二波分量活动的影响。

为了进一步证实 PV 波分量、VRW 和 TC 雨带结构三者之间的关系,我们提取出了 60~120 km 范围内的 PV 和雨带的 2 波分量。如图 7 所示,通过该图能够更加直观地看到 PV 和雨带的协同变化关系。对于二波分量, PV 和雨带的异常强度、传播速度都表现出高度一致性,尤其是在 09 时至 14 时 TC 在关键

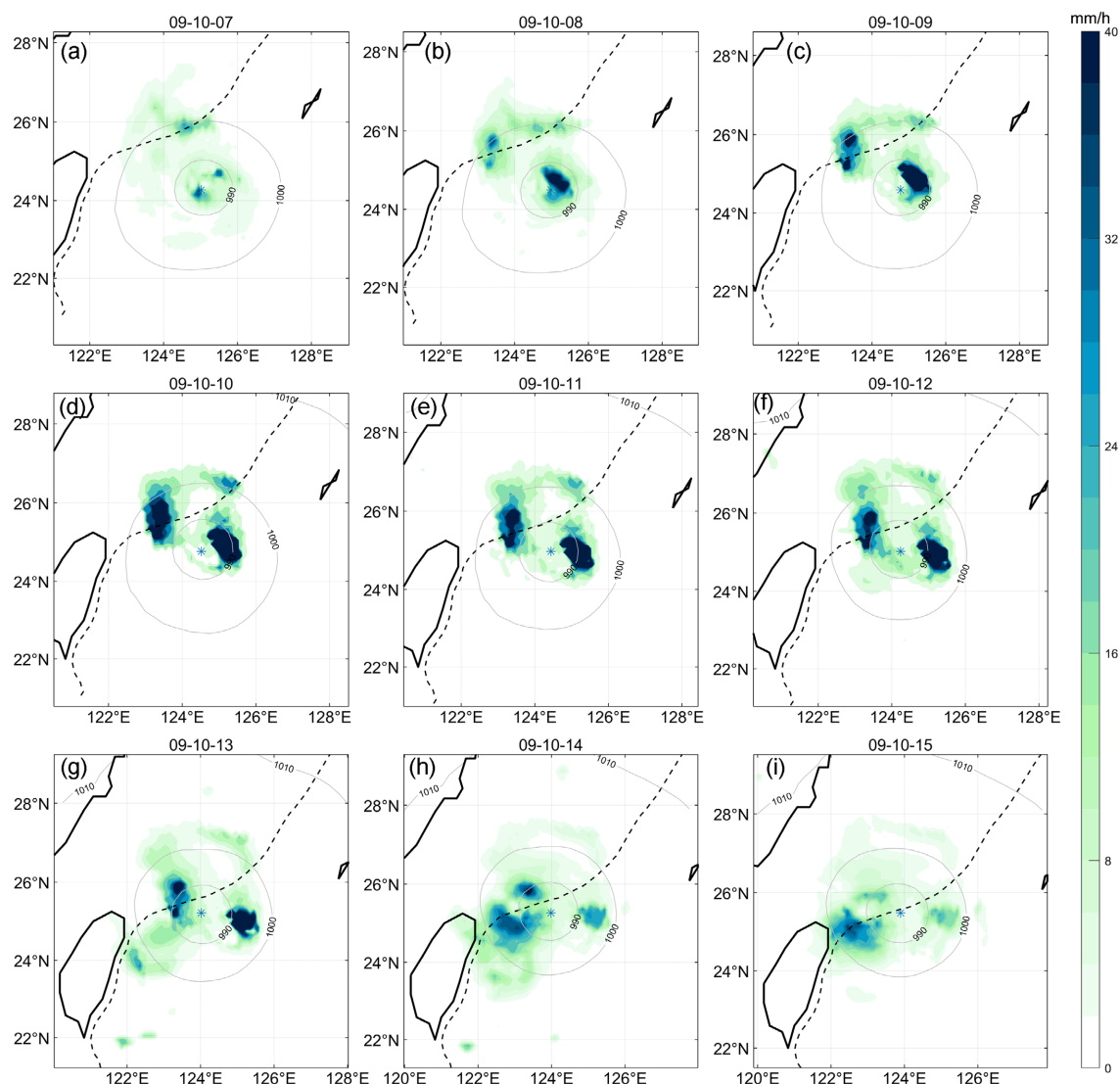


Figure 2. The distribution of the rainbands (shaded areas) during the movement of Typhoon Khanun (0515) over the Kuroshio region (gray solid lines represent sea surface pressure, and black dashed lines indicate the axis of the Kuroshio Current)
图 2. 台风卡努(0515)在黑潮区域运动期间的雨带(填色区域)分布(灰色实线表示海表面气压, 黑色虚线表示黑潮轴线)

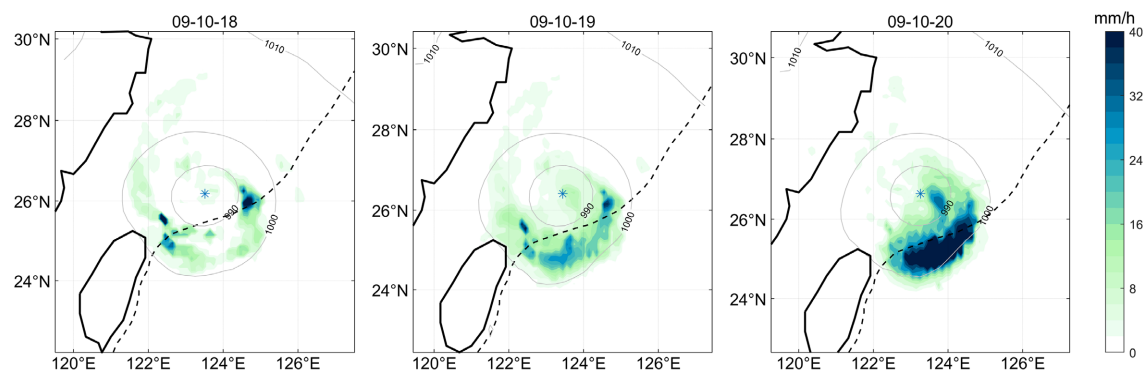


Figure 3. Distribution of rainbands (colored areas) during the period when Typhoon Khanun (0515) was far from the Kuroshio region (solid gray lines indicate sea surface pressure, and dashed black lines indicate the Kuroshio axis)
图 3. 台风卡努(0515)在远离黑潮区域期间的雨带(填色区域)分布(灰色实线表示海表面气压, 黑色虚线表示黑潮轴线)

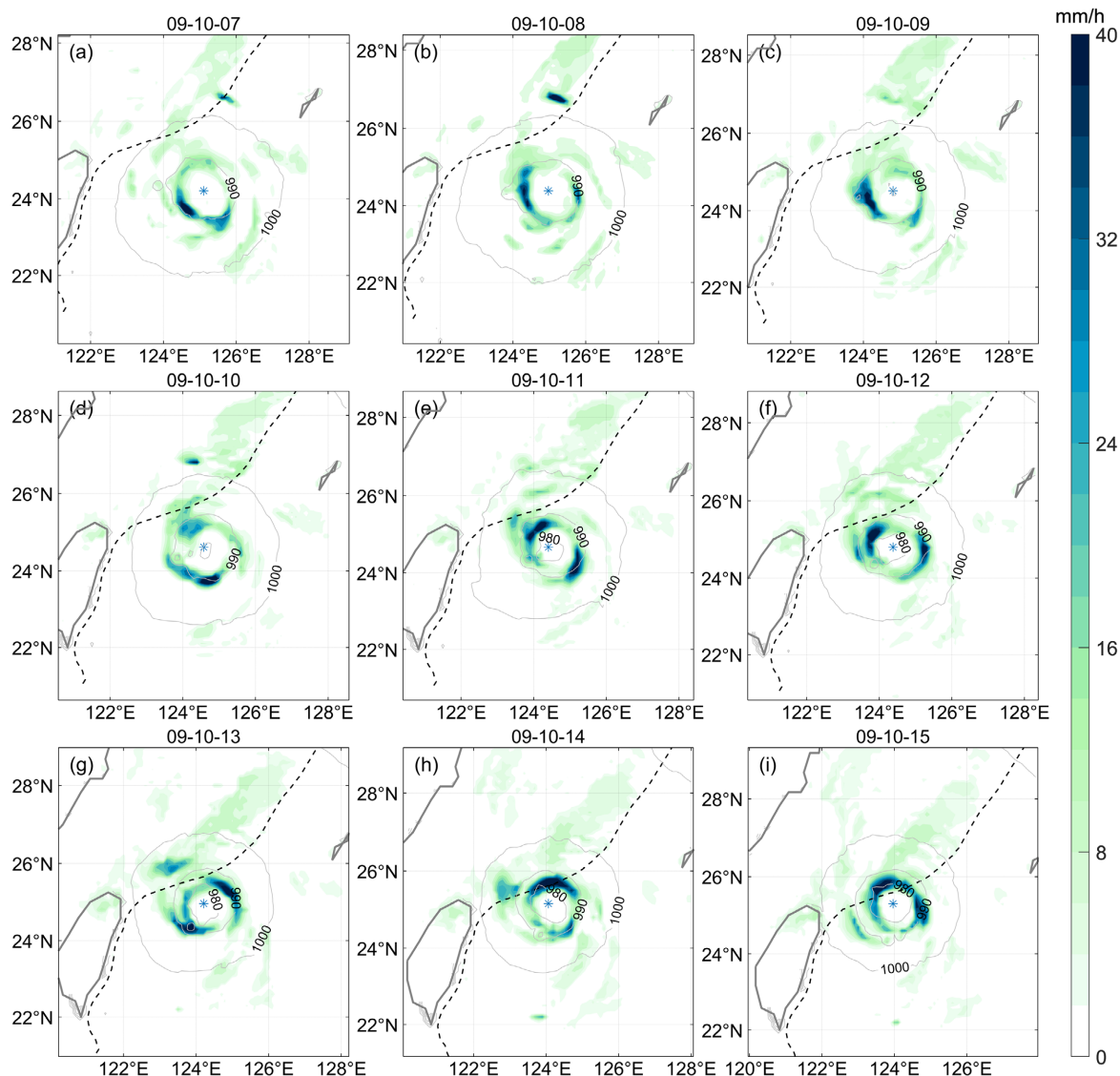


Figure 4. Distribution of rainbands (shading) during the movement of Khanun (0515) in the Kuroshio region as simulated in the with-K experiment (solid gray lines indicate sea surface pressure, and dashed black lines indicate the Kuroshio axis)

图 4. with-K 试验中卡努(0515)在黑潮区域运动期间的雨带(填色)分布(灰色实线表示海表面气压, 黑色虚线表示黑潮轴线)

区运动的时段, PV 的二波分量增强与雨带二波结构的增强呈现出明显的对应关系。此外, 通过 VRW 的频散关系(3)计算得出的理论方位角相速度, 可以验证 PV 的二波分量与 VRW 之间的关系[17]。

$$\omega = n\bar{\Omega} + \frac{n}{R} \frac{\bar{\xi}}{\bar{q}} \left[\frac{\bar{q}'(r)}{k^2 + \frac{n^2}{R^2} + \bar{\eta}\bar{\xi} \frac{m^2}{N^2}} \right] \quad (3)$$

经过计算, 在 11 时到 12 时之间 PV 波分量以 22.4 m/s 的速度气旋式传播(图 7(b))。参考半径为 70 km 的 VRW 理论方位角相速度(2 波分量)大约为 27.3 m/s。计算得出的理论 VRW 传播速度略大于模式模拟的 PV 波分量传播速度但仍处于可接受的范围, 这说明 PV 波分量的传播和加强是 VRW 活动的表现之一, 即 TC 雨带的二波结构的增强受 VRW 活动影响。VRW 有关 PV 扰动在触发对流以后, 黑潮提供的

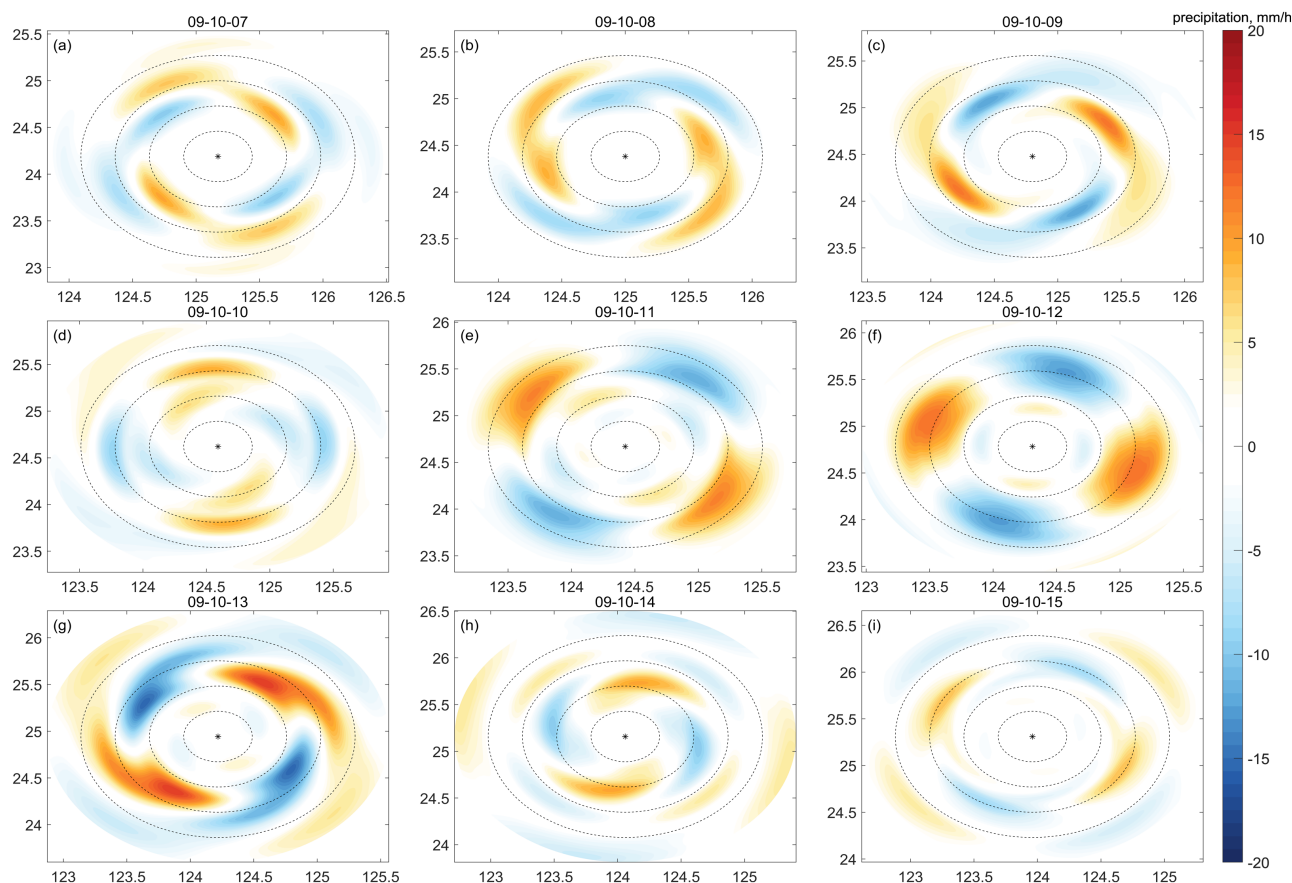


Figure 5. The wavenumber-2 component of the TC rainband in the with-K experiment (with gray dashed lines spaced at 50 km intervals)
图 5. with-K 试验中 TC 雨带二波谐波分量(其中灰色虚线间隔 50 km)

持续的非绝热加热以及充足的水汽供应会进一步增强 PV 扰动和对流, 最终对 TC 雨带的非对称结构产生显著的影响。

4. 黑潮影响 TC 降水的机制分析

前文通过对 with-K 试验结果的分析, 说明了 VRW 分量与 TC 雨带结构的关系。本节进一步结合两组敏感性试验阐明黑潮海洋锋强度在这个过程中的重要作用。敏感性试验的设计参考了赵振驰等的方法 [18], 试验分为两组: 在第一组中, 下垫面强迫场仅保留 50%黑潮暖舌特征(如图 8(b)所示, half-K 试验); 第二组试验完全去除黑潮暖舌特征的 SST 作为下垫面强迫场(如图 8(c)所示, non-K 试验)。

图 9、图 10 分别展示了 half-K 和 non-K 试验中 TC 雨带分布随时间的变化情况。在 half-K 试验中, 我们仍然可以在 11 时至 13 时之间观察到 TC 雨带的二波结构特征, 但与同期的 with-K 试验相比, 其强度明显减弱。而对于 non-K 试验则几乎无法从中观察到雨带的二波结构。进一步对三个试验的 TC 雨带进行谐波分析, 分离波数为 2 的谐波分量, 并计算其方差贡献, 结果如图 10 所示。在 with-K 试验中, 雨带的二波分量占比在运动至黑潮区域时有明显的增加, 在 12 时前后接近 16%达到峰值, 随后伴随着 TC 远离轴线占比下降, 于 16 时前后离开黑潮的主要影响区域。在 half-K 试验中 2 波分量的占比表现出与 with-K 试验中相似的变化趋势, 但峰值略低于 with-K 试验的峰值。这一结果与图 9 所展示的特点一致: 黑潮轴线附近的 TC 雨带呈现出比 with-K 试验更弱的二波结构。最后在 non-K 试验中, 雨带二波分量的占比几乎没有增强的趋势。通过对比三个试验中 TC 雨带的分布, 并结合谐波分量的计算, 说明 TC

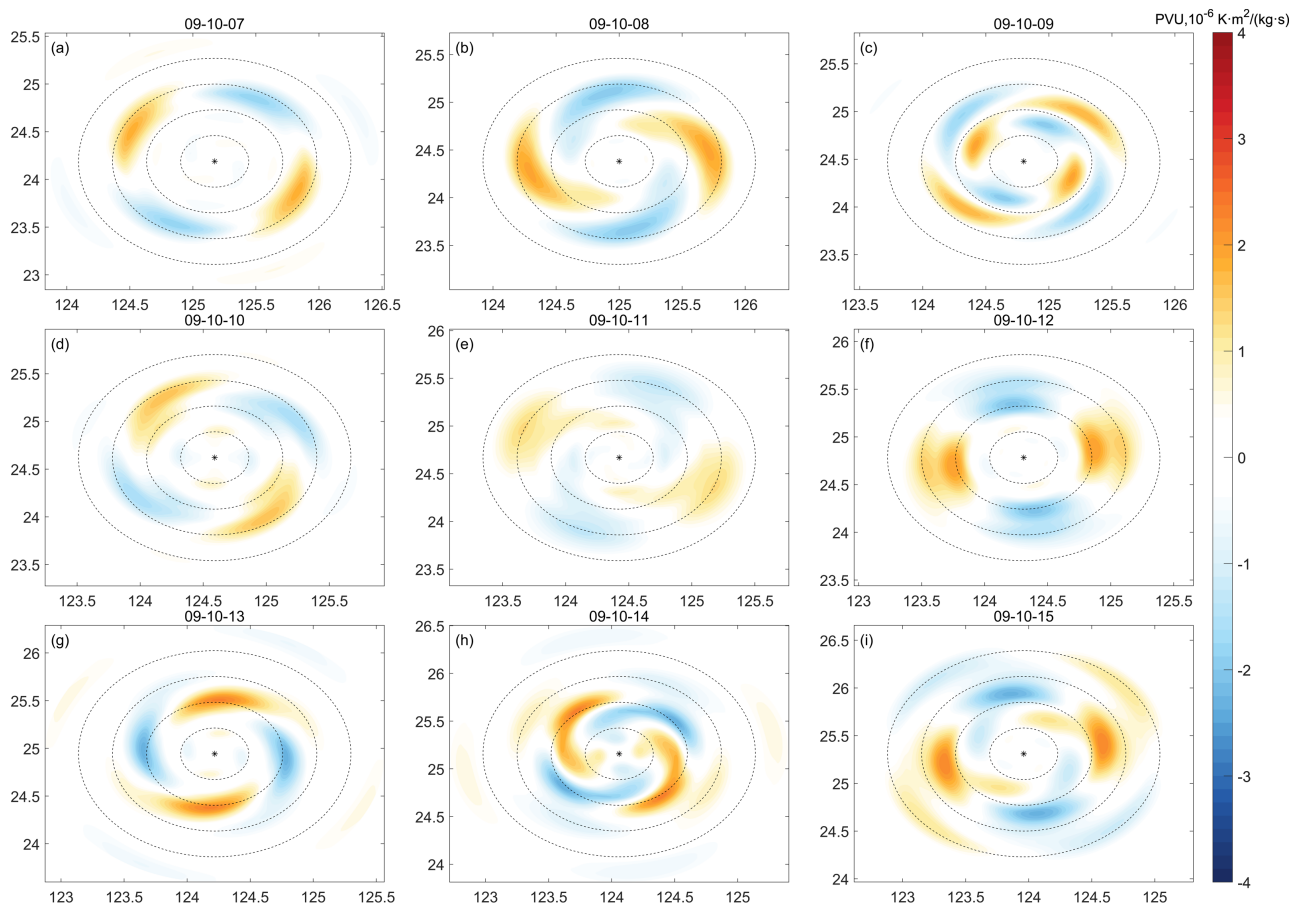


Figure 6. The wavenumber-2 component of the PV in the with-K experiment (with gray dashed lines spaced at 50 km intervals).
图 6. with-K 试验中位涡(800 hPa)波数为 2 的傅里叶谐波分量(其中灰色虚线间隔 50 km)

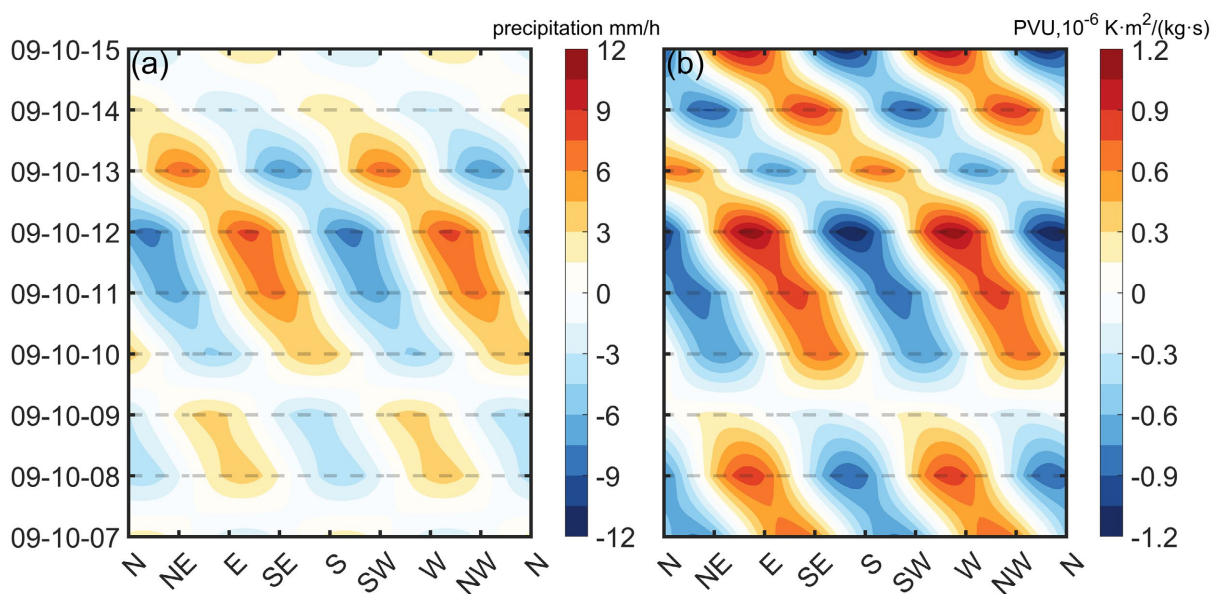


Figure 7. Time-azimuth Hovmöller diagrams of (a) the TC rainband and (b) the potential vorticity 2-wave component in the with-K experiment.

图 7. with-K 试验中(a)TC 雨带和(b)位涡 2 波分量的时间 - 方位角 Hovmoller 图

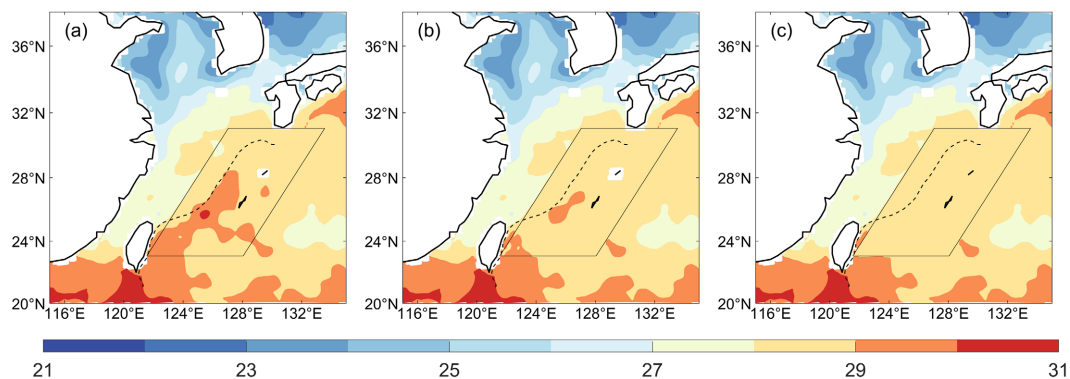


Figure 8. Underlying sea surface temperature forcing fields for (a) the with-K experiment, (b) the half-K experiment, and (c) the non-K experiment (units: $^{\circ}\text{C}$; black dashed lines indicate the Kuroshio axis, and the black box represents the key Kuroshio region, *i.e.*, the area where Kuroshio sea temperatures were modified).

图 8. (a) with-K 实验、(b) half-K 实验、(c) non-K 实验的下垫面海温强迫场(单位: $^{\circ}\text{C}$, 黑色虚线表示黑潮轴线, 黑框表示黑潮关键区即黑潮海温修改区域)

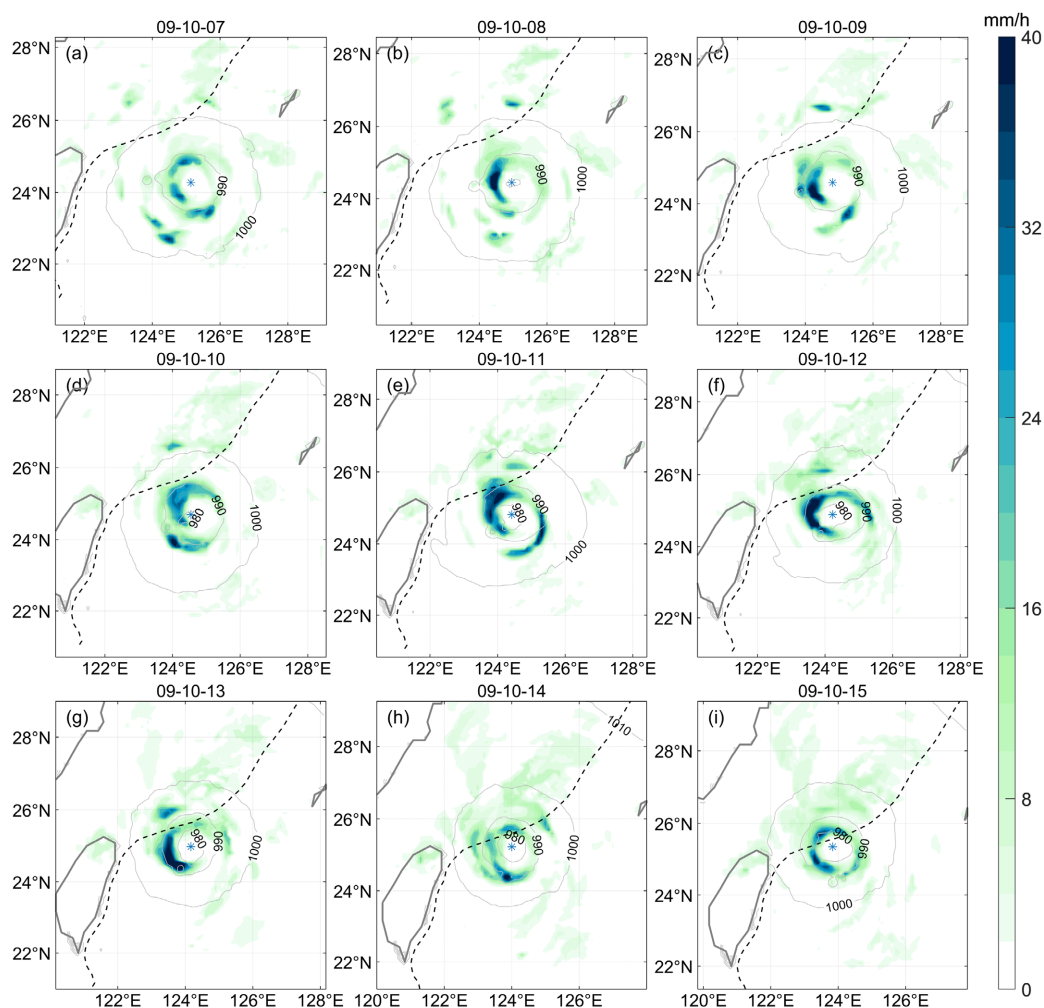


Figure 9. Distribution of rainbands (shading) during the movement of Typhoon Khanun in the Kuroshio region as simulated in the half-K experiment (solid gray lines indicate sea surface pressure, and dashed black lines indicate the Kuroshio current axis)

图 9. half-K 试验模拟中台风卡努在黑潮区域运动期间的雨带(填色)分布(灰色实线表示海表面气压, 黑色虚线表示黑潮流轴)

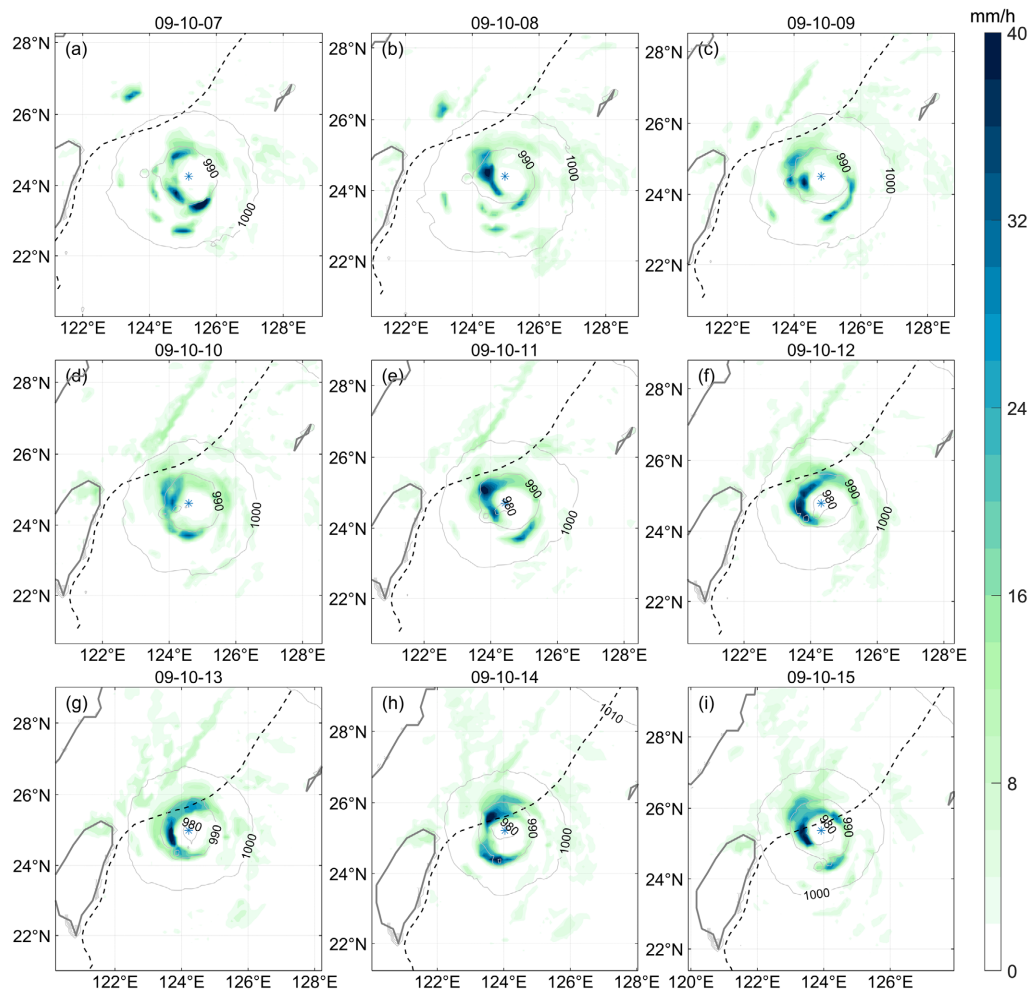


Figure 10. Same as Figure 8, but for the non-K experiment

图 10. 同图 8，但为 non-K 试验

雨带的二波结构强度与黑潮海洋锋的强度之间存在很强的相关性。

对于 TC 而言，黑潮海温条件变化所带来的最首要的外部环境影响是热通量的改变。这里首先关注 with-K 试验与两个敏感性试验中的热通量分布对比。如图 11、图 12 分别展示了三个试验在黑潮前后不同阶段的潜热通量和感热通量的分布。如图 11(b)所示，在 with-K 试验中，潜热通量在轴线处有明显的二波结构的增强(具体表现为在 TC 中心东北和西南两侧沿轴线方向的加热中心增强)，这一特征与 TC 雨带结构的变化相似。相比之下，在试验的前后两个阶段，类似的结构特征较弱或几乎不存在(图 11(a)、图 11(c))。在 half-K 试验的中期潜热通量的二波结构也有所增强(图 11(e))，但是强度明显弱于 with-K 试验中的表现。而在 non-K 试验中，则未观察到这一特征。感热通量的表现特征与潜热通量相似，但从整体数值的量级来看，似乎只起次要作用(图 12)。图 13 所示，我们同样采用傅里叶谐波分解的方法计算了非绝热加热的谐波分量：在 9 月 10 日 07 时，由于下垫面 SST 的影响，三个试验中的二波加热曲线开始出现显著差异，表明试验中 TC 进入了受黑潮影响的主要区域。直至 9 月 10 日 16 时，三个试验中的二波加热分量再次趋于一致。这一段时间可以认为是黑潮对热带气旋影响的主要时期，与之前的分析时段相一致。通过图 14，我们可以定量地观察到三个试验中非绝热加热的二波分量强度依次递减。这一结果与各试验中 TC 雨带的结构特征相符，进一步表明非绝热加热在这一过程中起到了关键作用。

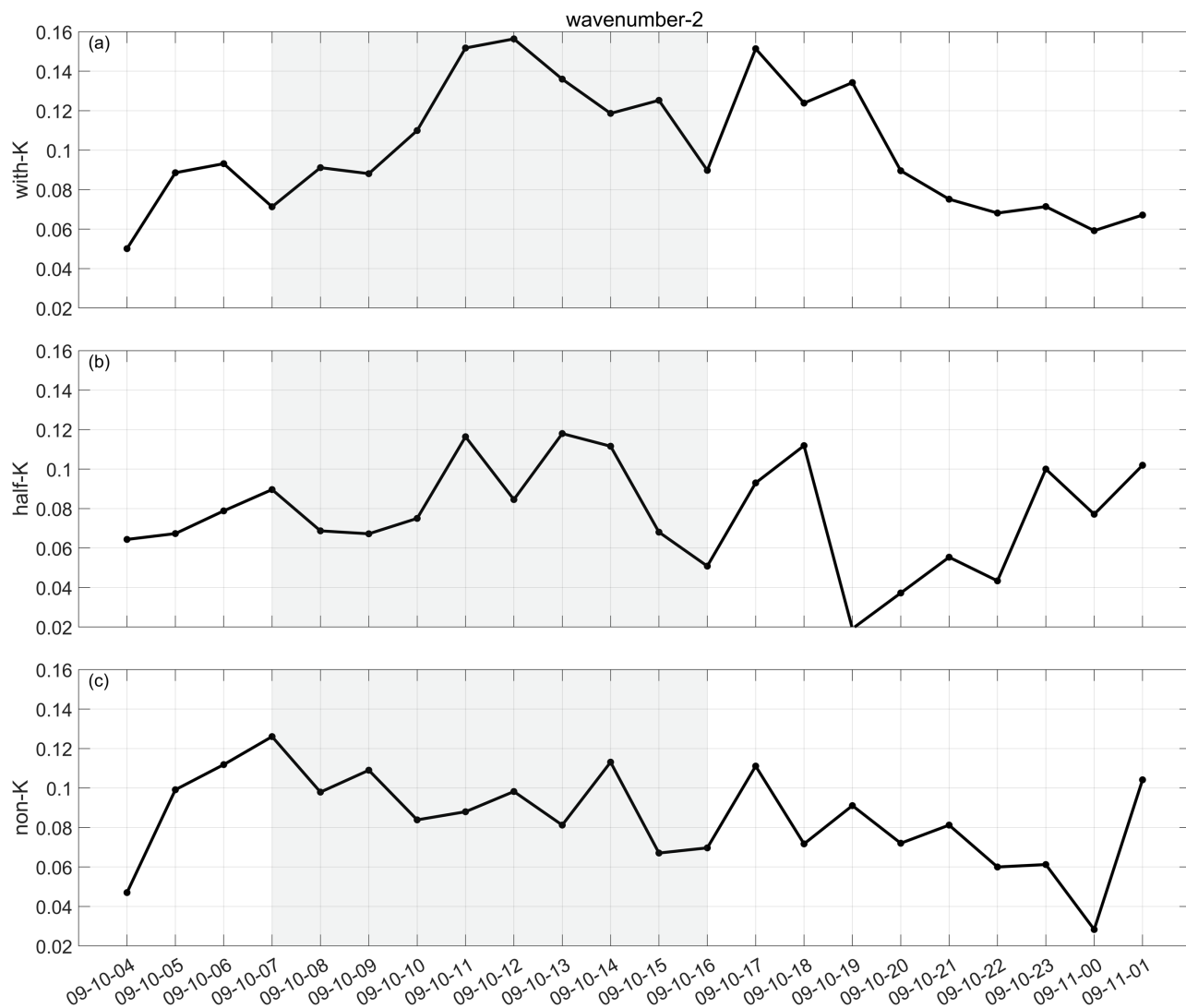


Figure 11. Time series of the proportion of the second Fourier harmonic component of the TC rainband in (a) the with-K experiment, (b) the half-K experiment, and (c) the non-K experiment (the gray shaded area indicates the period when the TC passed through the key Kuroshio region).

图 11. (a) with-K 试验、(b) half-K 试验和(c) non-K 试验中 TC 雨带的傅里叶谐波二波分量占比随时间的变化曲线(灰色区域表示 TC 经过黑潮关键区的时段)

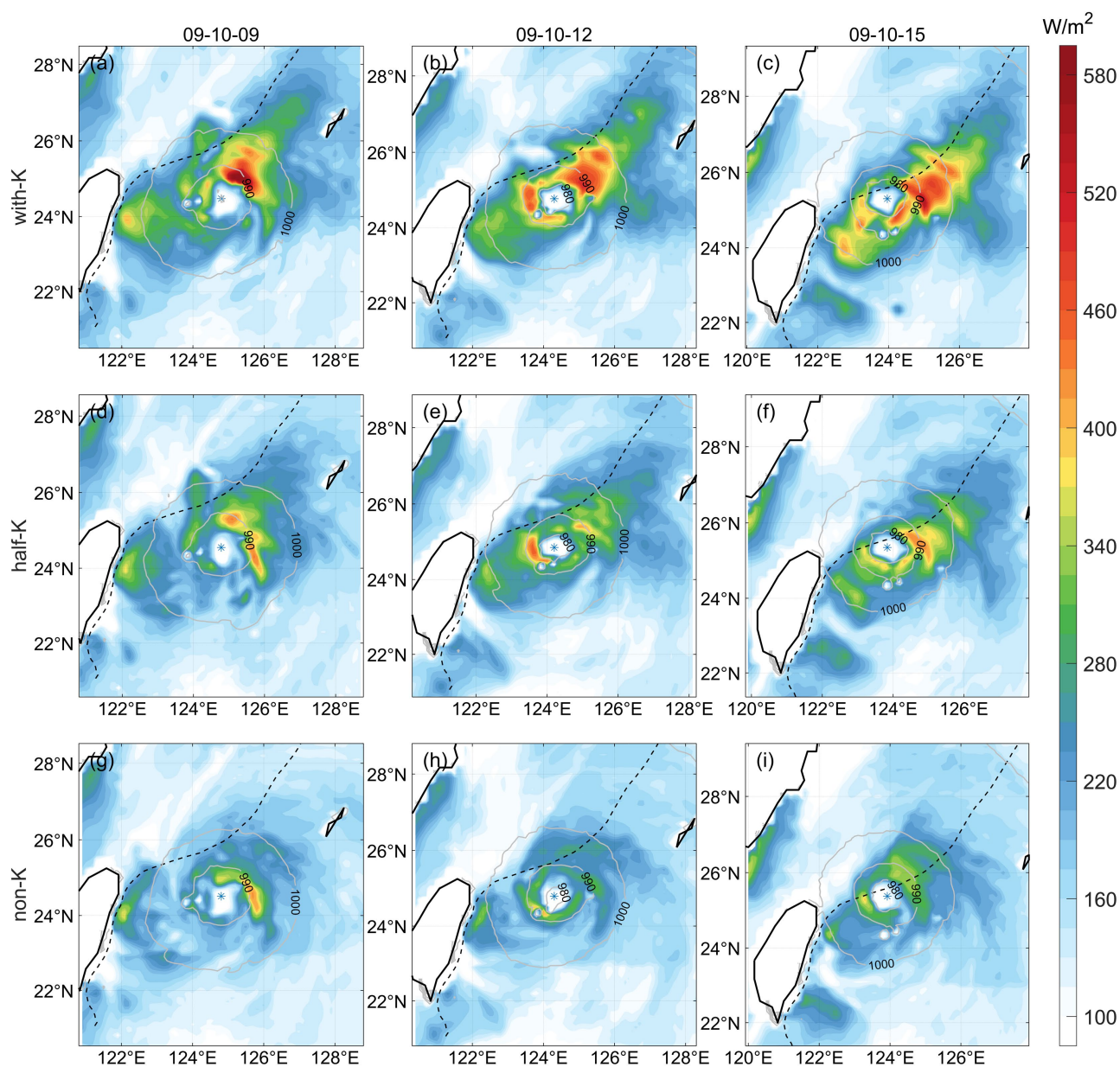


Figure 12. Latent heat flux at 09:00, 12:00, and 15:00 on September 10 in the with-K experiment (a)~(c), the half-K experiment (d)~(f), and the non-K experiment (g)~(i) (solid gray lines indicate sea level pressure, and dashed black lines indicate the Kuroshio current axis).

图 12. with-K 试验(a)~(c)、half-K 试验(d)~(f)、non-K 试验(g)~(i)中 9 月 10 日 09 时、12 时、15 时的潜热通量(灰色实线表示海平面气压, 黑色虚线表示黑潮流轴)

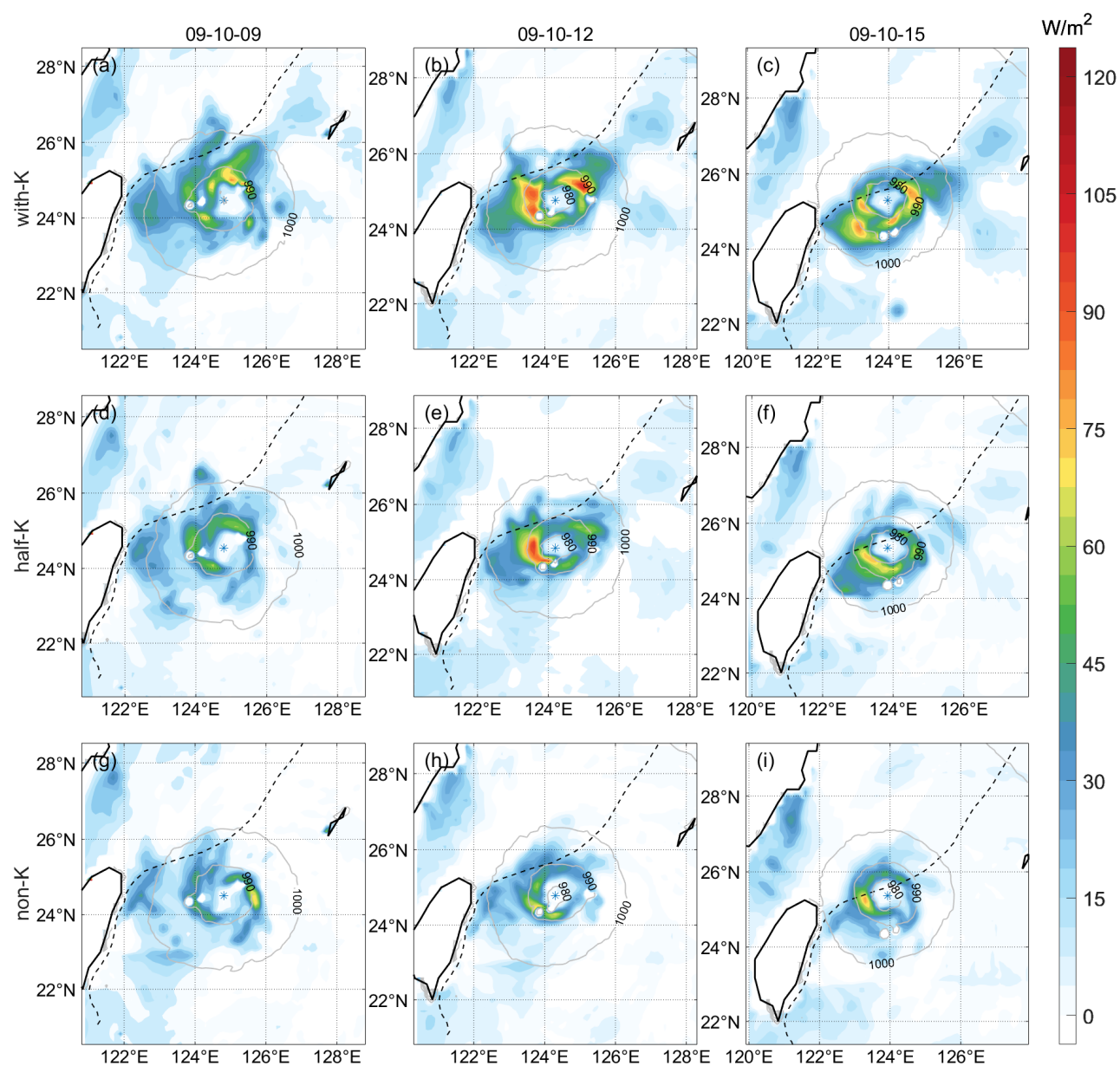


Figure 13. Same as Figure 11, but for the sensible heat flux

图 13. 同图 11，但为感热通量

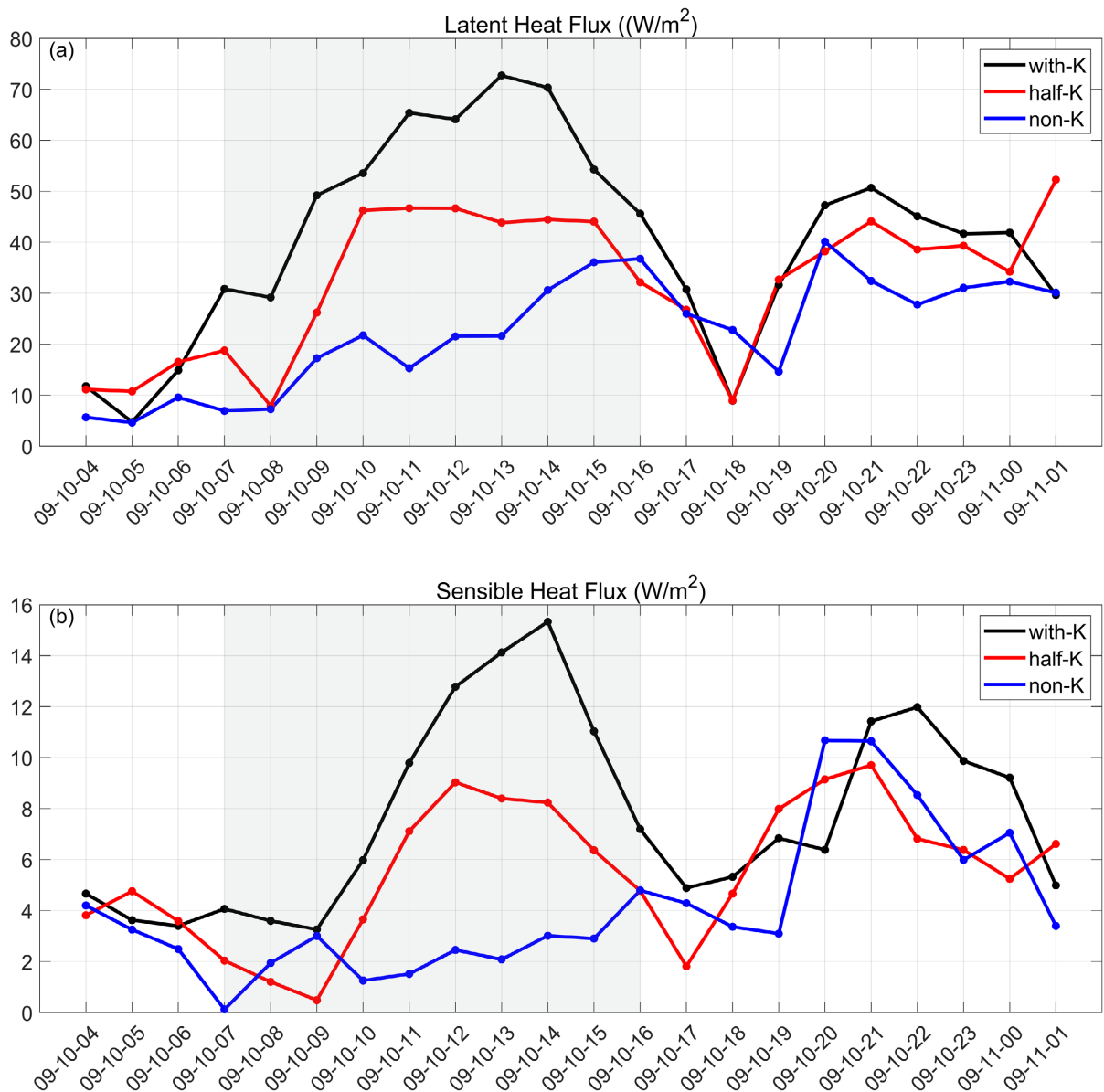


Figure 14. The wave number-2 component of diabatic heating in the three experiments (a: latent heat flux, b: sensible heat flux, and the gray area represents the main influence period of the Kuroshio key zone)

图 14. 三组试验中非绝热加热波数为 2 的谐波分量(a 是潜热通量, b 是感热通量, 灰色区域表示黑潮关键区主要影响时段)

S

中低层与对流相关的非绝热加热是 VRW 的主要驱动力[10], 我们认为黑潮所提供的非绝热加热同样能够影响 VRW 的活动。在我们的试验中, 与两个对照组相比, with-K 条件下更为显著的黑潮二波加热能够更有效地增强 VRW 的二波分量, 这促进了更强的局部对流的形成, 进而导致 TC 雨带结构发生显著变化。而在两个对照组中, 因黑潮的二波加热作用减弱, 雨带的二波结构特征也相应减弱。这样的结果也一定程度上说明了黑潮非绝热加热对 VRW 活动的重要影响。

5. 结论与讨论

为了研究黑潮对于 TC 雨带结构的影响, 本文利用卫星资料、再分析资料和数值模拟以 0515 号台风

“卡努”为例,对 TC 经过黑潮关键区前后雨带分布的变化进行了分析。结果发现卡努在经过黑潮关键区时,其核心区降水分布经历了从切向一波分布向二波为主的转变,台风中心穿越黑潮关键区后,又重新回到一波为主的分布,这种降水分布的变化过程与黑潮有密切的关系。

通过 WRF 模式对 2005 年 TC 卡努进行模拟发现,TC 雨带的二波分量与 800 hPa 位涡的二波分量运动趋势基本一致,且通过 VRW 频散公式计算得出,VRW 方位角相速度与模式中 PV 信号传播速度相近,由此将该 PV 扰动视为 VRW 活动的信号。因此,本文认为是 VRW 的二波分量在黑潮关键区得到了增强,与 VRW 相关的 PV 扰动在激发对流后,黑潮提供的有利条件又会促进 PV 扰动和对流的发展,最终导致 TC 雨带的二波结构增强。

通过调整黑潮关键区下垫面海温场进行的两组敏感性试验,结合前人已有的研究成果,我们认为黑潮提供的非绝热加热同样对于 VRW 的活动有重要的影响。较强的黑潮海洋锋会为 VRW 二波分量的活动提供更强的非绝热加热条件,导致 VRW 二波分量的增强,最终对 TC 的雨带结构产生影响。

总之,较强的黑潮海洋锋能够提供更充足的非绝热加热,其中非绝热加热的二波分量占据主导地位,这将增强 VRW 的二波分量的活动,并进一步影响台风中的对流活动,最终导致穿过黑潮的 TC 雨带呈现更强的二波结构。

参考文献

- [1] Smith, A.B. and Katz, R.W. (2013) US Billion-Dollar Weather and Climate Disasters: Data Sources, Trends, Accuracy and Biases. *Natural Hazards*, **67**, 387-410. <https://doi.org/10.1007/s11069-013-0566-5>
- [2] Liang, J. and Chan, K.T.F. (2021) Rainfall Asymmetries of the Western North Pacific Tropical Cyclones as Inferred from GPM. *International Journal of Climatology*, **41**, 5465-5480. <https://doi.org/10.1002/joc.7136>
- [3] Jin, R., Yu, H., Wu, Z. and Zhang, P. (2022) Impact of the North Atlantic Sea Surface Temperature Tripole on the Northwestern Pacific Weak Tropical Cyclone Frequency. *Journal of Climate*, **35**, 3057-3074. <https://doi.org/10.1175/jcli-d-21-0056.1>
- [4] Molinari, J. and Vollaro, D. (2013) What Percentage of Western North Pacific Tropical Cyclones Form within the Monsoon Trough? *Monthly Weather Review*, **141**, 499-505. <https://doi.org/10.1175/mwr-d-12-00165.1>
- [5] Lin, Y., Zhao, M. and Zhang, M. (2015) Tropical Cyclone Rainfall Area Controlled by Relative Sea Surface Temperature. *Nature Communications*, **6**, Article No. 6591. <https://doi.org/10.1038/ncomms7591>
- [6] Ma, Z., Fei, J., Huang, X. and Cheng, X. (2015) Contributions of Surface Sensible Heat Fluxes to Tropical Cyclone. Part I: Evolution of Tropical Cyclone Intensity and Structure. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **72**, 120-140. <https://doi.org/10.1175/jas-d-14-0199.1>
- [7] Chen, S.S., Knaff, J.A. and Marks, F.D. (2006) Effects of Vertical Wind Shear and Storm Motion on Tropical Cyclone Rainfall Asymmetries Deduced from TRMM. *Monthly Weather Review*, **134**, 3190-3208. <https://doi.org/10.1175/mwr3245.1>
- [8] Wingo, M.T. and Cecil, D.J. (2010) Effects of Vertical Wind Shear on Tropical Cyclone Precipitation. *Monthly Weather Review*, **138**, 645-662. <https://doi.org/10.1175/2009mwr2921.1>
- [9] Macdonald, N.J. (1968) The Evidence for the Existence of Rossby-Like Waves in the Hurricane Vortex. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, **20**, 138-150. <https://doi.org/10.3402/tellusa.v20i1.9993>
- [10] Wang, Y. (2002) Vortex Rossby Waves in a Numerically Simulated Tropical Cyclone. Part I: Overall Structure, Potential Vorticity, and Kinetic Energy Budgets. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **59**, 1213-1238. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(2002\)059<1213:vrwian>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(2002)059<1213:vrwian>2.0.co;2)
- [11] Li, Y., Lin, Y. and Wang, Y. (2019) A Numerical Study on the Formation and Maintenance of a Long-Lived Rainband in Typhoon Longwang (2005). *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **124**, 10401-10426. <https://doi.org/10.1029/2019jd030600>
- [12] Chen, C., Wang, G., Xie, S. and Liu, W. (2019) Why Does Global Warming Weaken the Gulf Stream but Intensify the Kuroshio? *Journal of Climate*, **32**, 7437-7451. <https://doi.org/10.1175/jcli-d-18-0895.1>
- [13] Bright, R.J., Xie, L. and Pietrafesa, L.J. (2002) Evidence of the Gulf Stream's Influence on Tropical Cyclone Intensity. *Geophysical Research Letters*, **29**, 48-1-48-4. <https://doi.org/10.1029/2002gl014920>
- [14] Yu, Y., Dong, C., Shan, H. and Zou, B. (2019) Statistical Analysis of Intensity Variations in Tropical Cyclones in the

-
- East China Sea Passing over the Kuroshio. *Journal of Oceanology and Limnology*, **38**, 1632-1639. <https://doi.org/10.1007/s00343-019-9069-x>
- [15] Fujiwara, K. and Kawamura, R. (2021) Active Role of Sea Surface Temperature Changes over the Kuroshio in the Development of Distant Tropical Cyclones in Boreal Fall. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **126**, e2021JD035056. <https://doi.org/10.1029/2021jd035056>
- [16] Nguyen, L.T., Molinari, J. and Thomas, D. (2014) Evaluation of Tropical Cyclone Center Identification Methods in Numerical Models. *Monthly Weather Review*, **142**, 4326-4339. <https://doi.org/10.1175/mwr-d-14-00044.1>
- [17] Montgomery, M.T. and Kallenbach, R.J. (1997) A Theory for Vortex Rossby-Waves and Its Application to Spiral Bands and Intensity Changes in Hurricanes. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **123**, 435-465. <https://doi.org/10.1002/qj.49712353810>
- [18] 赵振驰, 许士斌, 黄菲, 等. 东海黑潮暖舌对热带气旋“派比安”(1807)强度的影响[J]. 海洋气象学报, 2023, 43(2): 20-30.