

覃皓, 郑凤琴, 伍丽泉. 台风威马逊(1409)强度与降水变化的相互作用. 应用气象学报, 2022, 33(4): 477-488.

DOI: 10.11898/1001-7313.20220408

台风威马逊(1409)强度与降水变化的相互作用

覃皓¹⁾ 郑凤琴^{2)*} 伍丽泉²⁾³⁾

¹⁾ (广西壮族自治区气象台, 南宁 530022)

²⁾ (广西壮族自治区气候中心, 南宁 530022)

³⁾ (广西壮族自治区气象灾害防御技术中心, 南宁 530022)

摘 要

利用 2014 年 7 月 10 日 00:00—19 日 18:00(世界时)热带降水测量(TRMM)卫星 3B42 降水估测数据以及 ERA5 再分析数据, 结合傅里叶变换以及 Liang-Kleeman 信息流等方法, 分析台风威马逊(1409)强度与降水变化的相互作用。结果表明: 台风威马逊(1409)降水具有明显的非对称性, 降水主要位于台风中心偏西一侧, 在该区域台风强度与降水相互影响。相较于台风强度对降水的影响, 由降水到台风强度的信息流减小接近 1 个量级, 表明在两者的相互作用中, 台风强度变化的影响占主导。在水汽条件上, 台风强度的增强(减弱)导致台风中心西南侧水汽通量辐合(辐散)的增强, 进而与该区域的降水建立联系。此外, 台风威马逊(1409)移动过程中随着强度变化, 南海以及西太平洋水汽通道均存在明显响应。在动力条件上, 中低层垂直螺旋度强值中心主要位于台风中心西侧, 台风强度的增强(减弱), 导致台风中心西侧的垂直螺旋度绝对值增大(减小), 一定程度促进(抑制)了该区域上升运动的发展, 造成更多(更少)的水汽凝结致雨。

关键词: 台风强度; 降水; 信息流; 相互作用; 非对称

引 言

我国海岸线绵长, 是世界上受台风影响最严重的国家之一, 台风常给我国沿海地区带来狂风暴雨, 严重危害人民生命财产安全。台风威马逊(1409)(简称台风威马逊)是近 10 年严重影响我国的登陆台风之一, 同时也是 1949 年以来最强登陆台风, 不仅造成人员伤亡, 还导致我国华南地区大范围农作物受灾, 破坏力极强。郑艳等^[1]分析台风威马逊近海急剧增强的原因, 指出副热带高压加强西伸、低空急流建立以及西南季风加强等为其提供了有利条件。陈见等^[2]通过对比台风威马逊与超强台风达维(0518), 指出地形摩擦耗散较小是前者较后者进入广西北部湾后强度减弱幅度更小的原因。薛一迪等^[3]利用轨迹追踪模式分析台风威马逊登陆期间强降水的水汽来源并定量诊断各水汽源区的贡献。这

些工作揭示若干外强迫因子对台风威马逊强度变化的影响, 但目前关于台风威马逊自身强度变化与降水相互作用的研究鲜见报道。同时, 台风作为极为活跃的天气系统, 其本身的动力学过程也不可忽视^[4-5]。

早在 20 世纪 80 年代, 人们利用卫星产品对比, 发现随着台风强度增强, 最大降水率的半径减小, 而平均降水率和暴雨贡献率均增大^[6]。Lonfat 等^[7]利用热带降水测量(Tropical Rainfall Measuring Mission, TRMM)卫星数据研究不同强度台风的降水特征, 发现平均状况下越强的台风对应轴对称降水极大值越大。钮学新等^[8]利用 MM5V3.5 模式模拟 0216 号台风时发现, 在其他环境条件不变的情况下, 台风中心气压降低(升高)11 hPa, 降水中心雨量增加(减少)1 倍。统计 1952—2000 年登陆珠江口至长江口的热带气旋的降水特征发现, 台风强度是影响其降水的主要因素之一^[9]。随着观测数据的

2022-02-23 收到, 2022-04-11 收到再改稿。

资助项目: 广西重点研发计划项目(桂科 AB20159013), 广西气象科研计划项目(桂气科 2022QN08), 广西科技计划项目(桂科 AB21075008)

* 通信作者, 邮箱: zhengfengq@sohu.com

丰富, Jiang^[10] 结合卫星、降水雷达以及可见光红外扫描仪等观测数据也指出, 台风内核区对流与台风强度变化存在密切联系, 其中雷达反射率因子 20 dBZ 最大伸展高度与台风强度变化相关性最佳。Alvey 等^[11] 利用热带气旋遥感数据集分析降雨性质与台风强度变化关系, 指出台风强度的变化与降水的轴对称分布密切相关。可见, 人们对台风强度和降水关系研究已取得一定成果。然而, 相较于台风路径, 台风强度以及台风降水的精细化预报仍是预报的难点^[12-13], 台风影响因素多且复杂^[9], 台风强度变化时距离中心不同位置的降水情况也存在差异^[14], 因而台风强度与其降水关系也值得深入研究。

此外, 已有成果大多从相关性的角度出发, 对因果联系探讨较少。Liang-Kleeman 信息流理论可以根据时间序列间单位时间内传递的信息表征两者间的因果关系^[15-17]。Stips 等^[18] 通过该方法验证了温室气体是全球变暖的主要影响因子, 并指出在古气候尺度则是温度变化影响二氧化碳变化。Xiao 等^[19] 使用该方法揭示了 1920—2018 年北极地表温度异常在各阶段的驱动因子。Liang 等^[20] 通过因果试验寻找中部型厄尔尼诺预报因子时, 发现 22~50 年前的太阳活动与赤道太平洋海表温度异常具有密切联系, 基于信息流的因果人工智能方法可对中部型厄尔尼诺进行 10 年甚至更长时段的准确预报。鉴于 Liang-Kleeman 信息流在因果关系分析中具有定性及定量的优越性, 本文采用该方法探讨台风威马逊强度与降水变化间的联系, 加深对台风强度变化及其对降水影响的认识。

1 数据与方法

1.1 数据

台风强度、位置等信息来自中国气象局热带气旋最佳路径数据集。采用欧洲中期天气预报中心 ERA5 逐小时再分析数据, 包括风场、比湿等, 水平分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 。考虑到不同数据反映的台风中心位置可能存在差异, 利用 ERA5 再分析数据计算海平面最低气压点得到台风威马逊的定位信息, 并与最佳路径数据进行比对, 发现两者并无明显差异, 对本文研究结论也无影响。采用 TRMM 卫星 3B42 第 7 版的降水数据, 时间分辨率为 3 h, 水平分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 。TRMM 是于 1997 年发

射的世界上第 1 颗搭载测雨雷达的卫星, 首次实现了热带地区 ($35^\circ\text{S} \sim 35^\circ\text{N}$) 海洋及陆地上降水数据的获取。国内外对 TRMM 卫星降水数据精度评价已开展大量研究^[7, 21-22], 结果表明: TRMM 3B42 降水数据与地面观测具有很好的一致性, 且随着时间尺度增大, 其精度逐步提高, 能较好地捕捉台风降水的特征。该数据已在台风降水研究中得到广泛应用^[7, 21-23]。此外, 文中时间均采用世界时, 所用数据时间段均为 2014 年 7 月 10 日 00:00—19 日 18:00。

1.2 方法

本文利用的方法主要有傅里叶变换以及 Liang-Kleeman 信息流方法。

台风轴对称 (0 波) 降水分量为从台风中心向外逐 50 km 计算降水的环状方位角平均。台风非对称降水分量参照 Lonfat 等^[7] 和 Yu 等^[23] 的方法, 利用傅里叶变换, 计算 1 波非对称值表征降水的非对称程度:

$$\begin{cases} a_1 = \sum_i R_i \cos\theta_i, \\ b_1 = \sum_i R_i \sin\theta_i. \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中, R_i 为 TRMM 估测降水值, θ_i 为每个降水值相对于台风中心的方位角 (正北方向为 0°), 则 1 波降水的振幅为

$$F_1 = \sqrt{a_1^2 + b_1^2}. \quad (2)$$

在因果分析中使用 Liang-Kleeman 信息流理论。一个事件到另一个事件存在非零的信息流 (信息传递), 表明前者与后者存在因果联系, 若无因果联系则信息流为零。对于一个二维系统, 当只给出两时间序列 X_1 和 X_2 , 在一定的线性假设下, Liang^[15, 17] 推导出从 X_1 到 X_2 信息流的最大似然估计为

$$T_{2 \rightarrow 1} = \frac{C_{11}C_{12}c_{21} - C_{12}^2c_{11}}{C_{11}^2C_{22} - C_{11}C_{12}^2}. \quad (3)$$

式(3)中, C_{ij} 为 X_i 与 X_j 的样本协方差 ($i=1, 2; j=1, 2$), c_{ij} 为 X_i 与 \dot{X}_j 的样本协方差, \dot{X}_j 为 dX_j/dt 的欧拉前差差分近似。若 $|T_{2 \rightarrow 1}|=0$, 则 X_1 的变化独立于 X_2 , 即 X_2 不是 X_1 变化的原因。若 $|T_{2 \rightarrow 1}|>0$, 并通过显著性检验^[17], 则 X_2 是 X_1 变化的原因, 其值越大表明因果联系越强。

台风强度及降水变化的物理机制复杂, 往往存在较多的影响因子, 难以提取单一变量的信号。Liang-Kleeman 信息流的性质保证在未知第三方变量影响的情况下, 被考虑的两变量间因果联系保持一

致。在计算中,研究时段覆盖最佳路径数据中台风威马逊整个生命史(2014年7月10日00:00—19日18:00),时间间隔为6h,共40个样本。

2 台风威马逊降水的时空分布特征

2014年7月10日台风威马逊生成于西北太平洋,随后西行,路径稳定(图1)。7月14日12:00台风威马逊在菲律宾以东洋面上加强升级为台风级,在穿过菲律宾前加强为超强台风。随后台风威马逊向西北偏西移动进入南海北部,于17日18:00再次

加强成为超级台风,在18日07:00登陆我国海南省文昌市。在登陆24h后台风威马逊减弱为台风级,并于19日21:00减弱为热带低压,中央气象台于20日00:00对其停止编号。由整个过程中台风威马逊的实况强度和路径以及累积降水量分布可以看到,降水呈带状沿西北—东南方向分布,主要位于台风威马逊移动路径的左侧,而右侧降水不明显。利用以台风中心为原点的动态坐标系,分析台风威马逊移动过程中的降水情况,发现累积降水量大值区主要位于台风中心偏西一侧,具有明显的非对称性。

研究表明:降水的非对称分布与环境风垂直切

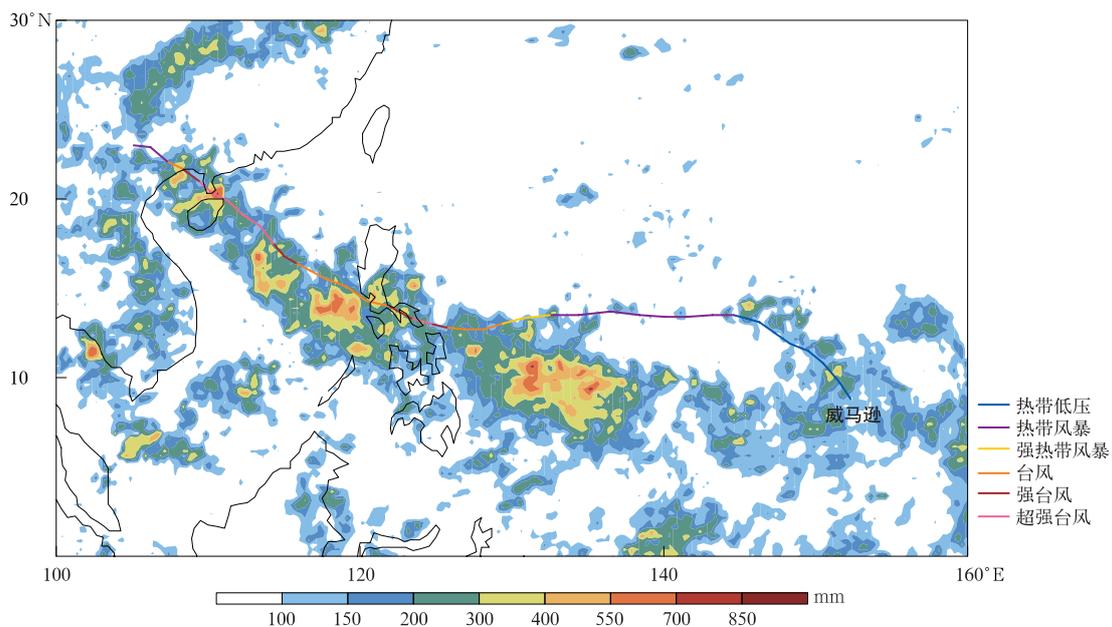


图1 2014年7月10日00:00—19日18:00台风威马逊实况路径(实线)及累积降水量(填色)

Fig. 1 The best track(the solid line) of Typhoon Rammasun and accumulated precipitation(the shaded) from 0000 UTC 10 Jul to 1800 UTC 19 Jul in 2014

变密切相关,北半球台风降水率大值区常出现在环境风垂直切变的顺切变一侧^[24-26]。计算台风中心附近 $10^{\circ}\times 10^{\circ}$ 网格内200 hPa和850 hPa的平均水平风矢量差,表征环境风垂直切变^[27]。在台风威马逊整个生命史中,除初生阶段外,垂直切变矢量均指向台风中心西南侧,这与累积降水量大值区的分布具有很好的对应关系,降水主要位于顺切变一侧,与前人结论类似^[24,28]。

将台风威马逊降水分解为轴对称(0波)降水与非对称降水,考察两分量随时间的演变特征。由于1波降水在非对称降水分量中占主要部分^[29-30],故以1波降水作为非对称降水分量。对于轴对称降水

(图2a),大于 $12\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 的降水率主要分布在距离台风中心100 km的范围内。7月15日06:00台风威马逊穿过菲律宾中部后,强度由台风级增强至超强台风,降水率首次出现明显的大幅增强,距离台风中心小于50 km的内核区降水率最大超过 $24\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$,同时外围雨带扩展至400 km。17日18:00—18日12:00,台风威马逊登陆海南,强度再次达到超强台风级,外围雨带向内收缩至300 km,轴对称降水再次出现明显增强,且强度和范围增幅超过首次增幅,最大降水率出现在距台风中心50 km附近,大于 $30\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 。登陆后24 h雨带迅速缩小,降水骤减。在非对称降水的径向-时间剖面上,非对称分

量主要在距台风中心 50~450 km 范围内(图 2b)。其中,对应于轴对称降水的首次增强,非对称降水在距台风中心 250~450 km 范围内的外围雨带明显增强,最大值达到 $4 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。当第 2 次降水增幅出现时,非对称降水增强区域较对称降水更向外扩

展,位于距台风中心 80~150 km 范围内,大值中心出现在距台风中心 100 km 附近,最大降水率达到 $10 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。台风登陆后,非对称降水大值中心向外扩展,随后逐渐减弱。

考察两次降水增幅前后降水率分布特征。在首

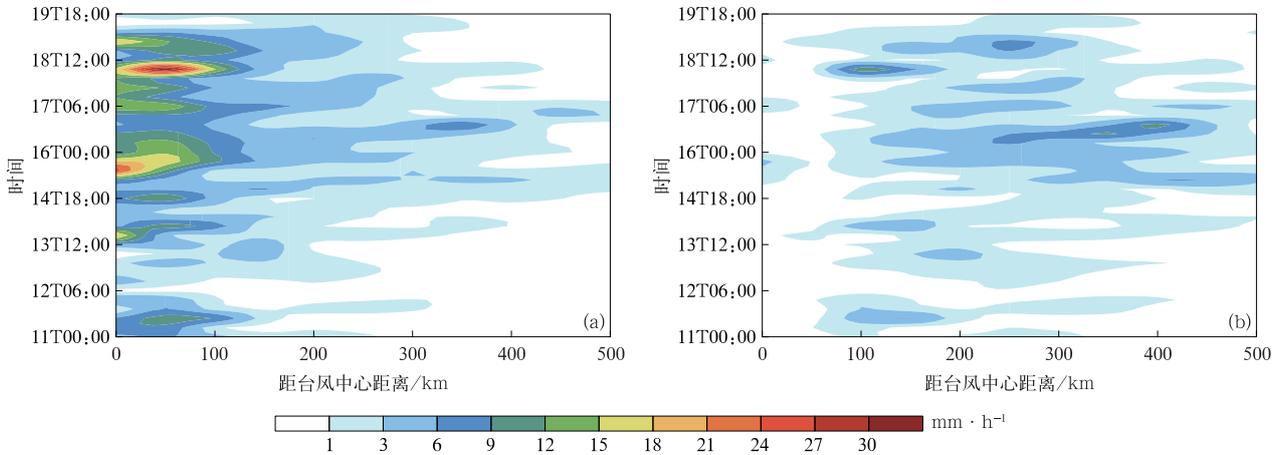


图 2 2014 年 7 月 11 日 00:00—19 日 18:00 台风威马逊环状平均(a)和 1 波降水率(b)的径向-时间剖面
Fig. 2 Radius-time cross-sections of azimuthally averaged precipitation rate(a) and wavenumber 1 precipitation rate(b) from 0000 UTC 11 Jul to 1800 UTC 19 Jul in 2014

次增幅前,7 月 14 日 12:00 台风中心附近降水较弱,落区集中于偏南偏西一侧,强度为 $4 \sim 6 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ (图 3a)。15 日 00:00—12:00 台风中心西侧降水逐渐增强,雨区也有所扩展,12:00 降水强中心位于西南一侧,最大降水强度达到 $35 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,体现出明显的非对称性(图 3b)。在第 2 次增幅阶段,16

日 18:00—18 日 18:00 降水落区逐渐向内收缩,但仍集中于台风中心偏南偏西一侧,18 日 18:00 降水强度达到最强,在台风中心北侧和西南侧各存在一个强中心,其中西南中心更强,达到 $40 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ (图 3c)。

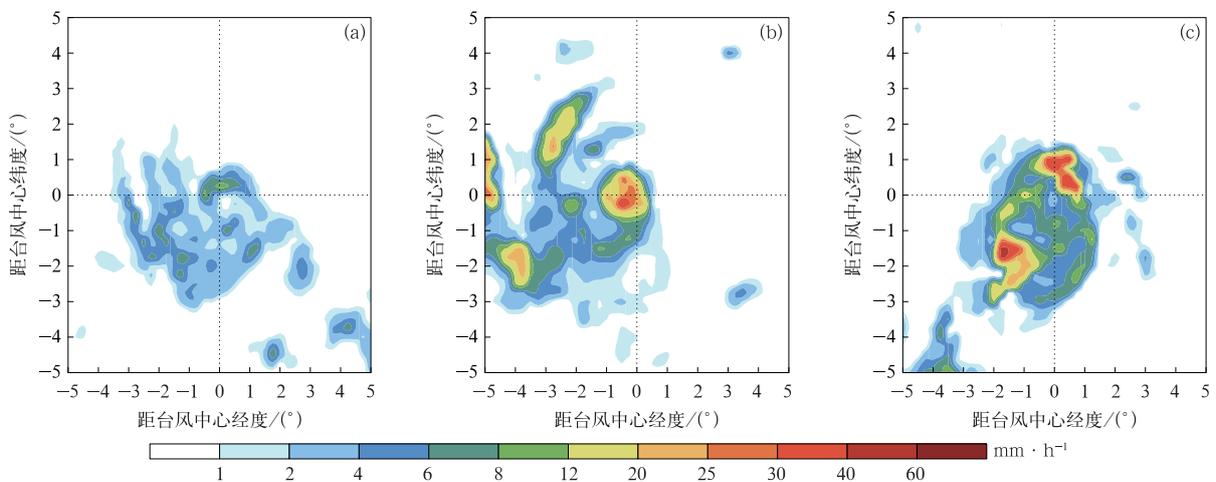


图 3 台风中心附近降水率
(a)2014 年 7 月 14 日 12:00,(b)2014 年 7 月 15 日 12:00,(c)2014 年 7 月 18 日 18:00
Fig. 3 Rain rate near the typhoon center
(a)1200 UTC 14 Jul 2014,(b)1200 UTC 15 Jul 2014,(c)1800 UTC 18 Jul 2014

3 台风威马逊强度与降水变化的联系

上述分析表明:随着台风强度的变化,台风威马逊降水也存在显著变化。对比台风风力、中心最低气压和距台风中心 500 km 范围内平均降水率的时间序列,发现三者具有很好的相关关系,在台风威马逊的两次增强阶段,平均降水率均明显增长。整个过程中台风风力强度、中心最低气压与平均降水率的相关系数分别为 0.764 和 -0.757 ,均达到 0.01 显著性水平,表明台风强度与降水相关显著,与文献[7,11,23,29]结论相符。然而相关性是存在因果联系的必要条件,但存在相关关系未必有因果关系。因此,通过 Liang-Kleeman 信息流理论,探究台风威马逊强度与降水变化间的因果联系。

计算台风强度到降水率的信息流以及反方向(降水率到台风强度)的信息流,考虑到风压关系在台风登陆时可能的变化^[23],分别采用台风风力强度以及中心最低气压进行计算。结果表明:无论是风力还是中心最低气压表征的台风强度,对降水率的信息流大值区均分布于台风的西侧(达到 0.05 显著性水平),其中北偏西侧、西南侧存在 3 个极大值中

心,信息流绝对值最大达到 0.7(图 4a,由于中心最低气压到降水率的信息流绝对值更大,具有更为显著的信号,因此仅给出中心最低气压到降水率的信息流结果,以下讨论中均以该指标表征台风强度)。由 2014 年 7 月 10 日 00:00—19 日 18:00 平均的降水率分布(图 4 中等值线)可见,在台风威马逊的整个生命史中,降水落区主要位于台风中心偏西一侧,最大降水出现在西南象限,这与信息流大值区对应较好,表明台风威马逊降水在一定程度上受其自身强度变化的调控。

在反向信息流上也存在因果联系显著的区域。降水率到台风风力强度信息流(图 4b)的大值区同样分布于台风的偏西一侧,与平均降水率大值区相对应,表明降水变化一定程度上影响台风强度,这体现了第 2 类条件不稳定(CISK)机制在台风强度与降水变化中的作用:更多的降水释放更多的潜热,导致对流层中、上层增暖,进而高层增压辐散,促进低层台风中心气压下降^[31-32]。此外,计算发现降水率对台风风力强度和中心最低气压的信息流具有相似分布特征,但降水率对中心最低气压的影响更为显著,这可能与降水产生的潜热释放造成气压变化先于风场有关。

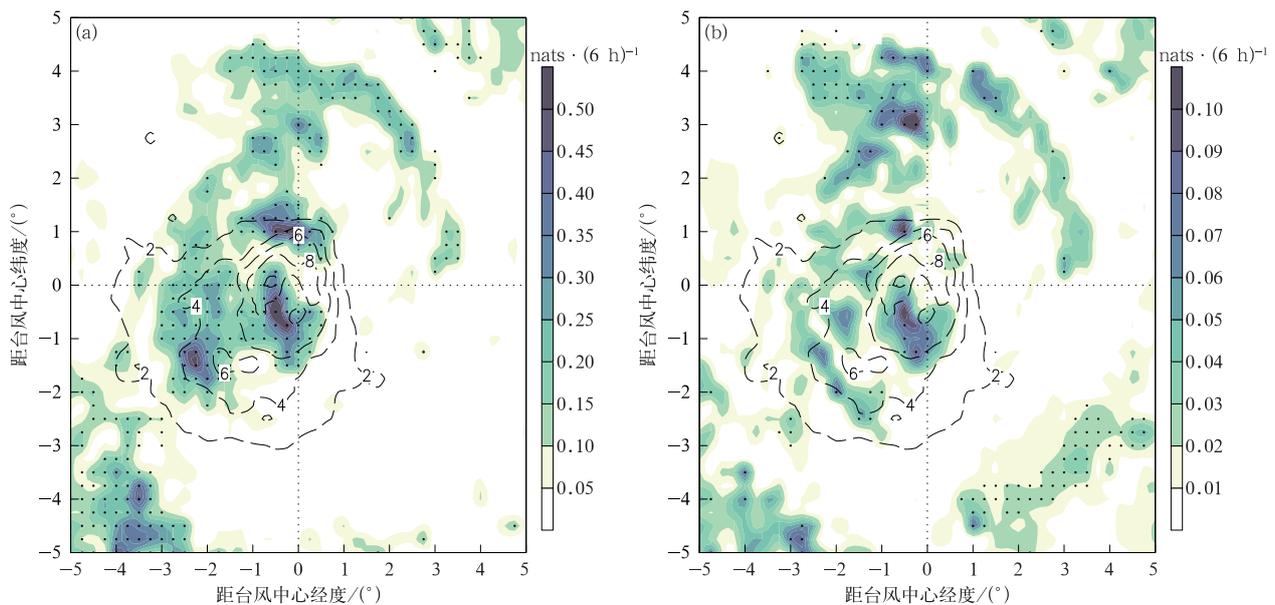


图 4 台风强度到降水率(a)及降水率到台风强度(b)的信息流(填色)

(打点区域表示达到 0.05 显著性水平;等值线为降水率过程平均值,单位: $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$)

Fig. 4 Information flows(the shaded) from typhoon intensity to precipitation rate(a) and from precipitation rate to typhoon intensity(b)

(dotted areas denote passing the test of 0.05 level;the contour denotes the averaged rain rate,unit: $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$)

以上信息流分析表明:台风降水强度变化受台风自身强度的影响,同时台风降水率变化同样可以反作用于台风强度,两者相互影响的区域均位于台风中心偏西一侧。值得注意的是,相较于台风强度对降水的影响,反向信息流减小接近1个量级,这表明在台风强度与降水的相互作用中,台风强度变化的影响占主导。在以下分析中,主要关注台风强度变化对降水的影响。

4 台风威马逊强度变化影响降水可能途径

4.1 水汽条件

充足的水汽供应有利于台风强度的维持^[28,33],而台风增强后更低的中心气压又有利于更多水汽向台风中心附近输送,进而为降水提供条件。计算以台风中心为原点的 $10^{\circ}\times 10^{\circ}$ 网格内区域平均的整层水汽通量散度,得到台风中心附近整层水汽通量散度的时间序列。分别计算台风威马逊强度与距台风中心500 km范围内平均降水率以及整层水汽通量散度的相关系数和信息流(从台风强度到降水率以及水汽通量散度)。结果表明:台风威马逊强度分别与台风中心附近整层水汽通量散度和平均降水率呈显著的正相关和负相关,相关系数分别为0.679和

-0.757,均达到0.01显著性水平,即台风中心气压越低,台风中心附近水汽辐合越强,降水也越强。台风强度到降水率以及水汽通量散度的信息流分别为0.162和0.45,分别达到0.05和0.01显著性水平,体现出台风强度变化对水汽辐合辐散以及降水的显著影响。因此相关以及因果分析表明:台风威马逊强度增强(减弱),可能是通过增强台风中心附近水汽辐合(辐散)进而增强(减弱)降水。

2014年7月14日06:00—12:00台风威马逊为强热带风暴至台风级,该时段平均的整层水汽辐合中心位于台风西南象限(图5a),与图3a中降水率分布具有较好的对应关系,此时降水率较小,水汽通量散度绝对值最大也仅为 $4.5\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。15日06:00—12:00台风威马逊达到超强台风级,平均整层水汽辐合区位于台风偏西一侧,最大水汽通量散度绝对值增大1倍,达到 $8\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (图5b),降水率也随之增大(图3b),且降水落区仍存在较好对应。18日12:00—18:00也存在上述关系,台风威马逊再次增强为超强台风级,水汽通量散度绝对值维持在 $7\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (图5c),在台风中心西南侧以及北侧均有较强的水汽辐合,与图3c中降水率大值区相匹配。

为验证台风威马逊强度变化对整层水汽通量散

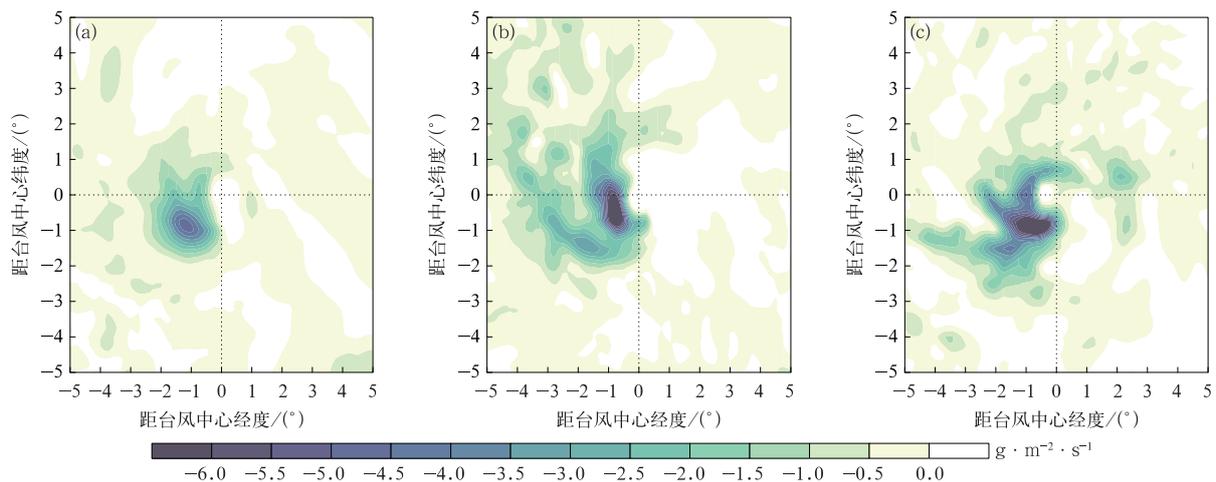


图5 台风中心附近平均整层水汽通量散度

(a)2014年7月14日06:00—12:00,(b)2014年7月15日06:00—12:00,(c)2014年7月18日12:00—18:00

Fig. 5 Averaged moisture flux divergence of vertical integral near the typhoon center

(a)from 0600 UTC to 1200 UTC on 14 Jul 2014,(b)from 0600 UTC to 1200 UTC on 15 Jul 2014,

(c)from 1200 UTC to 1800 UTC on 18 Jul 2014

度变化的影响,计算台风强度与台风中心附近整层水汽通量散度相关系数及信息流。结果表明:整个台

风生命史中水汽辐合中心主要位于台风西南侧,而该区域水汽通量散度的变化与台风强度具有显著的相

关(图略)及因果联系(图 6a)。其中,相关系数为正,最大达到 0.7,其与信息流的大值中心均与水汽辐合中心相吻合,且两者均达到 0.05 显著性水平。综上所述,台风强度的增强(减弱)部分导致了台风中心西南侧水汽通量辐合(辐散)的增强,进而与该区域的降水建立联系。

潜热能与大气中的水汽有关,更多的水汽辐合上升凝结将释放更大的潜热能。整个台风生命史中平均整层潜热能的大值区位于台风中心附近,强中心与水汽辐合中心对应,且潜热能与台风强度为显

著负相关,相关系数为-0.7(达到 0.01 显著性水平,图略)。同时,由信息流分布(图 6b)可见,台风中心偏西一侧的整层潜热能对台风强度变化有明显响应,台风强度的变化是导致该区域潜热能变化的原因之一。上述结果表明:台风强度的增强(减弱)一定程度上造成了台风中心偏西一侧整层潜热能增大(减小),而这与更多(更少)的水汽在该区域辐合相关。因此,通过考察潜热能与台风强度的关系进一步证实了台风强度变化对水汽辐合辐散的影响。

在水汽输送方面,台风威马逊进入南海前水汽

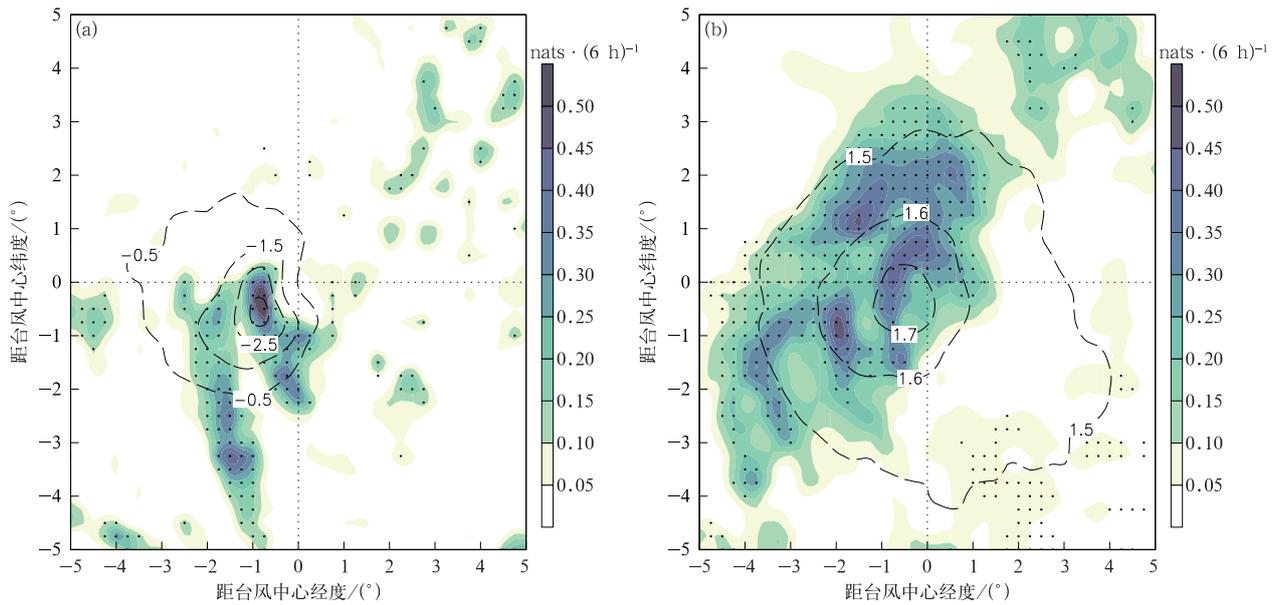


图 6 台风强度到整层水汽通量散度(a)和潜热能(b)的信息流(填色)(打点区域表示达到 0.05 显著性水平,

图 6a 中等值线为整层水汽通量散度的过程平均值,单位: $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$;

图 6b 中等值线为整层潜热能的过程平均值,单位: $\text{J} \cdot \text{m}^{-2}$)

Fig. 6 Information flows(the shaded) from typhoon intensity to moisture flux divergence of vertical integral(a) and from typhoon intensity to latent energy of vertical integral(b)(dotted areas denote passing the test of 0.05 level, the contour in Fig. 6a denotes the averaged moisture flux divergence of vertical integral, unit: $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$; the contour in Fig. 6b denotes the averaged latent energy of vertical integral, unit: $\text{J} \cdot \text{m}^{-2}$)

主要来源于西太平洋的东路输送,台风威马逊进入南海后,来自孟加拉湾的偏西气流与 110°E 附近的越赤道气流在南海交汇,将孟加拉湾和南海的水汽一起并入台风环流^[3,28,33]。分析整层积分的水汽通量也得出上述结论。7月15日12:00(图 7a)台风威马逊位于菲律宾东侧,主要受副热带高压南侧西太平洋偏东水汽输送影响,此时孟加拉湾和南海水汽通道尚未建立。18日12:00(图 7b)孟加拉湾和越赤道水汽输送明显,而西太平洋的水汽输送被后续台风麦德姆(1410)切断。

孟加拉湾、南海、西太平洋均为台风威马逊降水的水汽源,其中南海的水汽贡献在台风威马逊降水中占比最大^[3]。上述水汽输送的变化必然对台风威马逊降水产生影响。然而随着热带气旋强度增强,水汽向其环流中心附近的输送也随之加强^[34]。计算台风强度到整层水汽通量的信息流,可以发现水汽输送环流的演变中也存在台风威马逊强度变化的信号(图 7c)。由信息流分布可见,西太平洋以及南海水汽输送均受到台风威马逊的影响,两个区域信息流均达到 0.05 显著性水平,体现了台风威马逊移

动过程中不同水汽通道随其强度变化的响应。因此,台风威马逊强度变化还通过影响水汽输送的变

化而与降水建立联系。

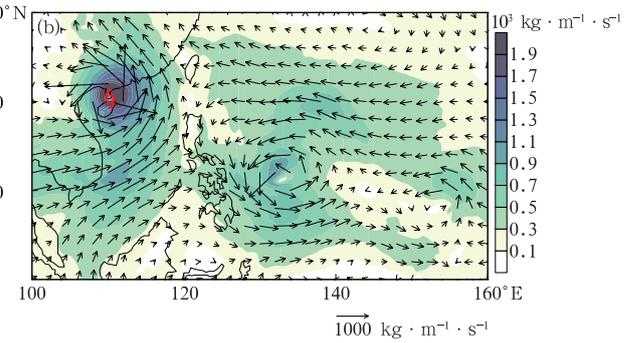
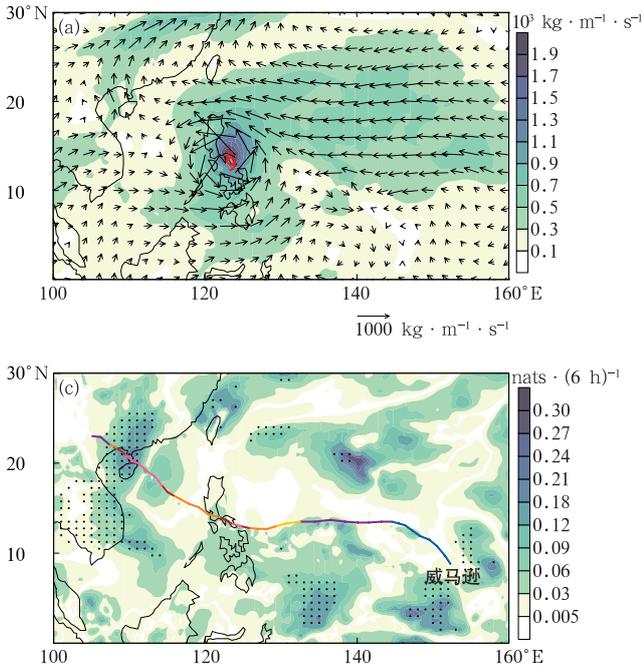


图7 2014年7月15日12:00(a)和7月18日12:00(b)整层水汽通量(矢量)、通量值(填色)及台风强度到整层水汽通量值的信息流(打点区域表示达到0.05显著性水平)(c)
 Fig. 7 Moisture flux of vertical integral (the arrow) and its value(the shaded) at 1200 UTC 15 Jul 2014(a) and 1200 UTC 18 Jul 2014(b) with information flow from typhoon intensity to precipitation rate (dotted areas denote passing the test of 0.05 level)(c)

4.2 动力条件

垂直螺旋度综合反映大气垂直运动和水平旋转的特征,其表达式为

$$H_z = \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right) \cdot \omega = \xi \cdot \omega. \quad (4)$$

式(4)中, ξ 为垂直涡度, ω 为 p 坐标系下的垂直速度。研究发现对流层中低层垂直螺旋度正值区(采用单位为 $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ 的垂直速度则对应负值区)与台风降水落区具有较好的对应关系^[35-37],一定程度上反映了台风环流中心附近垂直运动对降水的影响,而台风强度的增强又有利于降水中心低层辐合上升加强^[34]。分析图3降水时段平均700 hPa垂直螺旋度,发现垂直螺旋度强值中心均与降水落区对应,且在台风强度达到超强台风级时段,垂直螺旋度绝对值更大,最大达到 $3.5 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-2}$ 。而在较弱的强热带风暴级时垂直螺旋度绝对值最大仅为 $0.6 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-2}$ (图略)。但不同强度时期,垂直螺旋度强中心均位于台风中心西侧,这也与水汽辐合中心相对应(图5),旋转上升与水汽辐合相配合造成降水落区的非对称分布。

通过计算相关系数和信息流,可以发现这种非对称的上升运动与台风强度变化密切相关。整个台风生命史中平均700 hPa垂直螺旋度中心位于台风偏西一侧,且在西南象限存在 $-1 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-2}$ 的强旋转上升中心。相关分析表明:随着台风强度增

强,中低层垂直螺旋度也显著增强(图略)。这种中低层上升运动的变化受台风强度的影响,在700 hPa垂直螺旋度强中心对应信息流大值中心(图8)。因

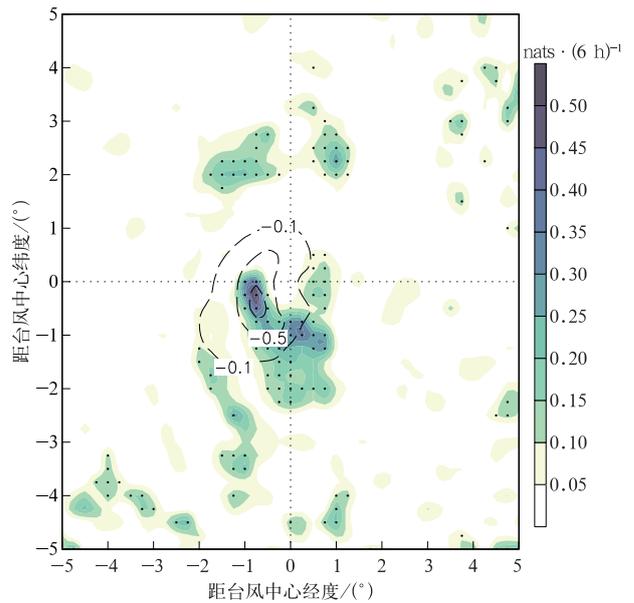


图8 台风强度到700 hPa垂直螺旋度的信息流(填色)(等值线为700 hPa垂直螺旋度的过程平均值,单位: $10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-2}$)
 Fig. 8 Information flow from typhoon intensity to 700 hPa vertical helicity(the shaded) (the contour denotes the averaged 700 hPa vertical helicity, unit: $10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-2}$)

此,台风强度的增强(减弱)一定程度上影响台风中心附近的垂直运动,导致台风中心西侧的垂直螺旋度绝对值加大(减小),促进(抑制)该区域上升运动的发展,进而造成更多(更少)的水汽凝结致雨。

5 小 结

研究表明:

1) 台风威马逊降水具有明显的非对称性,降水主要位于台风中心偏西一侧。在整个生命史中降水出现两次明显增强,与台风强度增强时段相对应。

2) 信息流分析表明:台风威马逊降水强度变化受到台风自身强度影响,同时台风降水强度变化可以反作用于台风强度,两者相互影响的区域均位于台风中心偏西一侧。相较于台风强度对降水的影响,由降水到台风强度的信息流减小接近1个量级,表明在两者的相互作用中,台风强度变化影响占主导。

3) 整层水汽通量的辐合区与降水落区具有较好对应关系。台风强度增强(减弱),可能通过增强台风中心附近水汽辐合(辐散)增强(减弱)降水。台风强度增强(减弱)部分导致台风中心西南侧水汽通量辐合(辐散)增强,进而与该区域的降水建立联系。除此之外,台风威马逊移动过程中随着其强度变化,南海以及西太平洋水汽通道均存在明显响应。

4) 在动力条件上,中低层垂直螺旋度强中心主要位于台风中心西侧,台风强度的增强(减弱),导致台风中心西侧垂直螺旋度绝对值加大(减小),一定程度促进(抑制)该区域上升运动发展,造成更多(更少)水汽凝结致雨。

影响台风强度以及降水因子众多,机制复杂,本文仅以台风威马逊为例,从因果联系角度讨论两者相互作用,具体影响机制还需要在模拟试验中验证。此外,台风强度与降水相互作用可能存在个体差异,不同登陆点以及不同源地台风反映的物理联系可能有所不同^[38-39],因此今后需要对多种类型台风进行分类对比。

参 考 文 献

- [1] 郑艳,蔡亲波,程守长,等. 超强台风“威马逊”(1409)强度和降水特征及其近海急剧加强原因. *暴雨灾害*, 2014, 33(4): 333-341.
- [2] 陈见,孙红梅,高安宁,等. 超强台风“威马逊”与“达维”进入北部湾强度变化对比分析. *暴雨灾害*, 2014, 33(4): 392-400.
- [3] 薛一迪,崔晓鹏. “威马逊”(1409)降水水汽来源和源区定量贡献分析. *大气科学*, 2020, 44(2): 341-355.
- [4] 李崇银,钮学新. 台风自身动力学过程(CISK)对其移动的影响. *气象学报*, 1988, 46(4): 497-501.
- [5] 何立富,陈双,郭云谦. 台风利奇马(1909)极端强降雨观测特征及成因. *应用气象学报*, 2020, 31(5): 513-526.
- [6] Rodgers E B, Adler R F. Tropical cyclone rainfall characteristics as determined from a satellite passive microwave radiometer. *Mon Wea Rev*, 1981, 109(3): 506-521.
- [7] Lonfat M, Marks F D, Chen S Y. Precipitation distribution in tropical cyclones using the Tropical Rainfall Measuring Mission(TRMM) microwave imager: A global perspective. *Mon Wea Rev*, 2004, 132(7): 1645-1660.
- [8] 钮学新,杜惠良,刘建勇. 0216号台风降水及其影响降水机制的数值模拟试验. *气象学报*, 2005, 63(1): 57-68.
- [9] 钮学新,杜惠良,滕代高,等. 影响登陆台风降水量的主要因素分析. *暴雨灾害*, 2010, 29(1): 76-80.
- [10] Jiang H Y. The relationship between tropical cyclone intensity change and the strength of inner-core convection. *Mon Wea Rev*, 2012, 140(4): 1164-1176.
- [11] Alvey G R, Zawislak J, Zipser E J. Precipitation properties observed during tropical cyclone intensity change. *Mon Wea Rev*, 2015, 143(11): 4476-4492.
- [12] 杨舒楠,端义宏. 台风温比亚(1818)降水及环境场极端性分

- 析. 应用气象学报, 2020, 31(3): 290-302.
- Yang S N, Duan Y H. Extremity analysis on the precipitation and environmental field of Typhoon Rumbia in 2018. *J Appl Meteor Sci*, 2020, 31(3): 290-302.
- [13] 郑倩, 毛程燕, 丁丽华, 等. 台风利奇马(1909)与台风摩羯(1814)云特征对比. 应用气象学报, 2022, 33(1): 43-55.
- Zheng Q, Mao C Y, Ding L H, et al. Comparison of cloud characteristics between Typhoon Lekima(1909) and Typhoon Yagi(1814). *J Appl Meteor Sci*, 2022, 33(1): 43-55.
- [14] Tu S F, Xu J J, Chan J C L, et al. Recent global decrease in the inner-core rain rate of tropical cyclones. *Nat Commun*, 2021, 12(1): 1948.
- [15] Liang X S. Information flow within stochastic dynamical systems. *Phys Rev E*, 2008, 78(3): 031113.
- [16] Liang X S. The Liang-Kleeman information flow: Theory and applications. *Entropy*, 2013, 15(1): 327-360.
- [17] Liang X S. Unraveling the cause-effect relation between time series. *Phys Rev E*, 2014, 90(5): 052150.
- [18] Stips A, Macias D, Coughlan C, et al. On the causal structure between CO₂ and global temperature. *Sci Rep*, 2016, 6: 21691.
- [19] Xiao H X, Zhang F, Miao L J, et al. Long-term trends in Arctic surface temperature and potential causality over the last 100 years. *Climate Dyn*, 2020, 55(5/6): 1443-1456.
- [20] Liang X S, Xu F, Rong Y N, et al. El Niño Modoki can be mostly predicted more than 10 years ahead of time. *Sci Rep*, 2021, 11: 17860.
- [21] Cai Y C, Jin C J, Wang A Z, et al. Spatio-temporal analysis of the accuracy of tropical multisatellite precipitation analysis 3B42 precipitation data in mid-high latitudes of China. *Plos One*, 2015, 10(4): e0120026.
- [22] 常婉婷, 高文华, 端义宏, 等. 云微物理过程对台风数值模拟的影响. 应用气象学报, 2019, 30(4): 443-455.
- Chang W T, Gao W H, Duan Y H, et al. The impact of cloud microphysical processes on typhoon numerical simulation. *J Appl Meteor Sci*, 2019, 30(4): 443-455.
- [23] Yu Z F, Wang Y Q, Xu H M, et al. On the Relationship between intensity and rainfall distribution in tropical cyclones making landfall over China. *J Appl Meteor Climatol*, 2017, 56(10): 2883-2901.
- [24] 蒋贤玲, 任福民, 马柱国, 等. 2014年两次路径相似热带气旋降水特征及其成因的对比. 地球物理学报, 2017, 60(4): 1305-1320.
- Jiang X L, Ren F M, Ma Z G, et al. Rainfall characteristic and cause comparison of two track-similar tropical cyclones in 2014. *Chinese J Geophys*, 2017, 60(4): 1305-1320.
- [25] 覃丽, 吴启树, 曾小团, 等. 对流非对称台风“天鸽”(1713)近海急剧增强成因分析. 暴雨灾害, 2019, 38(3): 212-220.
- Qin L, Wu Q S, Zeng X T, et al. Analysis on cause of rapid intensification of asymmetrical Typhoon Hato. *Torrential Rain Disaster*, 2019, 38(3): 212-220.
- [26] 吴天贻, 周玉淑, 王咏青, 等. 两次不同季风强度背景下的西行台风登陆过程降水特征对比分析. 大气科学, 2021, 45(6): 1173-1186.
- Wu T Y, Zhou Y S, Wang Y Q, et al. Comparative analysis of precipitation characteristics of the westward typhoon cases “Bilis” and “Sepat” during landfall under different monsoon intensities. *Chinese J Atmos Sci*, 2021, 45(6): 1173-1186.
- [27] 周芯玉, 程正泉, 涂静, 等. 台风艾云尼非对称降水及动热力结构演变特征分析. 气象学报, 2020, 78(6): 899-913.
- Zhou X Y, Cheng Z Q, Tu J, et al. Analysis on the asymmetrical precipitation and evolution of dynamic and thermodynamic structure of Typhoon Ewiniar. *Acta Meteor Sinica*, 2020, 78(6): 899-913.
- [28] 吕心艳, 许映龙, 黄焕卿. 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, 2021, 38(3): 1-10.
- Lü X Y, Xu Y L, Huang H Q. Analysis on environmental factors of the extremely rapid intensification of Typhoon “Rammason”(1409) in the northern South China Sea. *Marin Forec*, 2021, 38(3): 1-10.
- [29] Marks F D. Evolution of the structure of precipitation in Hurricane Allen(1980). *Mon Wea Rev*, 1985, 113(6): 909-930.
- [30] Marks F D, Houze Jr R A, Gamache J. Dual-aircraft investigation of the inner core of Hurricane Norbert. Part I: Kinematic structure. *J Atmos Sci*, 1992, 49(11): 919-942.
- [31] 李崇银. 第二类条件不稳定理论及其进一步研究. 气象科技, 1984(4): 1-9.
- Li C Y. The “CISK” theory and its further research. *Meteor Sci Technol*, 1984(4): 1-9.
- [32] 张建海, 张立波, 庞盛荣. 台风“卡努”(0515)加强过程对边界层参数化方案的敏感性试验. 应用海洋学学报, 2007, 26(1): 26-35.
- Zhang J H, Zhang L B, Pang S R. Sensitive experiments on the boundary layer schemes during the strengthening process of typhoon Khanun. *J Appl Oceanogr*, 2007, 26(1): 26-35.
- [33] 程正泉, 林良勋, 杨国杰, 等. 超强台风威马逊快速增强及大尺度环流特征. 应用气象学报, 2017, 28(3): 318-326.
- Cheng Z Q, Lin L X, Yang G J, et al. Rapid intensification and associated large-scale circulation of Super Typhoon Rammason in 2014. *J Appl Meteor Sci*, 2017, 28(3): 318-326.
- [34] 张建海, 庞盛荣. “莫兰蒂”台风(1010)暴雨成因分析. 暴雨灾害, 2011, 30(4): 305-312.
- Zhang J H, Pang S R. Analysis on the cause of rainstorm of the Typhoon Meranti(1010). *Torrential Rain Disaster*, 2011, 30(4): 305-312.
- [35] 鲁亚斌, 张腾飞, 徐八林, 等. 麦莎台风造成冀东大暴雨的数值模拟和诊断分析. 应用气象学报, 2006, 17(2): 201-206.
- Lu Y B, Zhang T F, Xu B L, et al. Mesoscale analysis on a

- heavy rain associated with Bengal Bay storm and cold air in west Yunnan. *J Appl Meteor Sci*, 2006, 17(2): 201-206.
- [36] 陈艳, 宿海良, 寿绍文, 等. 麦莎台风造成冀东大暴雨的数值模拟和诊断分析. *应用气象学报*, 2008, 19(2): 209-218.
- Chen Y, Su H L, Shou S W, et al. Numerical simulation and diagnosis analysis on heavy rain in east Hebei by Typhoon Matsa. *J Appl Meteor Sci*, 2008, 19(2): 209-218.
- [37] 覃武, 赵金彪, 黄荣成, 等. 台风“山竹”登陆结构变化及造成广西强降水异常分布的成因分析. *热带气象学报*, 2019, 35(5): 587-595.
- Qin W, Zhao J B, Huang R C, et al. Cause analysis on the structural change of Typhoon Mangkhut during its landing and the abnormal distribution of heavy precipitation in Guangxi. *J Trop Meteor*, 2019, 35(5): 587-595.
- [38] 高拴柱, 张胜军, 吕心艳, 等. 南海台风生成前48h环流特征及热力与动力条件. *应用气象学报*, 2021, 32(3): 272-288.
- Gao S Z, Zhang S J, Lü X Y, et al. Circulation characteristics and thermal and dynamic conditions 48 hours before typhoon formation in the South China Sea. *J Appl Meteor Sci*, 2021, 32(3): 272-288.
- [39] 李欣, 张璐. 北上台风强降水形成机制及微物理特征. *应用气象学报*, 2022, 33(1): 29-42.
- Li X, Zhang L. Formation mechanism and microphysics characteristics of heavy rainfall caused by northward-moving typhoons. *J Appl Meteor Sci*, 2022, 33(1): 29-42.

The Interaction Between Intensity and Rainfall of Typhoon Rammasun(1409)

Qin Hao¹⁾ Zheng Fengqin²⁾ Wu Liqun²⁾³⁾

¹⁾ (*Guangxi Meteorological Observatory, Nanning 530022*)

²⁾ (*Guangxi Climate Center, Nanning 530022*)

³⁾ (*Guangxi Meteorological Disaster Prevention Technology Center, Nanning 530022*)

Abstract

Based on the methods of Fourier decomposition, correlation analysis and Liang-Kleeman information flow, the interaction between intensity and rainfall of Typhoon Rammasun (1409) is studied using the best track data of Shanghai Typhoon Institute (STI) of China Meteorological Administration (CMA), Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) satellite 3B42 rainfall estimation data of National Aeronautics and Space Administration (NASA) and ERA5 reanalysis data of European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) with $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ grids. The results show that the rainfall of Typhoon Rammasun (1409) has obvious characteristics of asymmetry, and it is mainly located in the west side of the typhoon center. The rainfall of Typhoon Rammasun (1409) increases significantly twice during the whole life cycle, which corresponds to the intensification period. The information flow analysis shows that the rainfall of Typhoon Rammasun (1409) is affected by the intensity of typhoon itself, whereas the rainfall can also feedback on the latter. Compared with the influence of typhoon intensity on rainfall, the information flow from rainfall to typhoon intensity decreases by nearly an order of magnitude, indicating that the typhoon intensity plays a dominant role in the interaction relationship. The possible mechanism by which the typhoon intensity affects rainfall are analyzed by diagnosing the water vapor and dynamic conditions respectively. In terms of water vapor conditions, the convergence area of vertical integral of moisture flux corresponds well to the rainfall. The intensification (reduction) of Typhoon Rammasun (1409) partly results in the enhanced convergence (divergence) of vertical integral of moisture flux in the southwest of the typhoon center, which brings more (less) rainfall in this region. In addition, the South China Sea and the Western Pacific water vapor transport channel have obvious response to the changes of Typhoon Rammasun (1409) intensity. In terms of dynamic conditions, the strong center of vertical helicity in the middle and lower layers is mainly located in the west side of the typhoon center, indicating the rainfall area. The intensification (reduction) of Typhoon Rammasun (1409) leads to the increase (decrease) of absolute vertical helicity on the west side of the typhoon center, thus promotes (inhibits) the development of upward movement to a certain extent, resulting in more (less) water vapor condensation and rainfall.

Key words: typhoon intensity; rainfall; information flow; interaction; asymmetry