

# Detecting the Intensity Evolutions of Northwest Pacific Super Typhoons in 2015 Using Deviation Angle Variance Technique

Meng Yuan<sup>1</sup>, Wei Zhong<sup>1</sup>, Shuai Wu<sup>2</sup>, Lutong Tian<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institutes of Meteorology and Oceanography, National University of Defense Technology, Nanjing Jiangsu

<sup>2</sup>Unit No. 32021 of People's Liberation Army, Beijing

Email: yuanm2012@foxmail.com, wzhong\_vivian@126.com

Received: Oct. 16<sup>th</sup>, 2018; accepted: Oct. 30<sup>th</sup>, 2018; published: Nov. 6<sup>th</sup>, 2018

---

## Abstract

This paper analyzes the intensity evolutions of northwest Pacific super typhoons in 2015 using the Deviation angle variance technique (DAV-T) from the perspective of symmetry of the brightness temperature distribution in the tropical cyclone (TC) system. It is found that with the increase of TC intensity, the axisymmetry of deep convective clouds shows different characteristics; meanwhile, the minimum value of DAV map (MMV) decreases obviously and the DAV distribution change from the irregular to near-circular structure that around a TC circulation center. However, when the intensity of TC is below the tropical depression intensity as well as there is a large-scale non-closed deep convective clouds, the MMV would at a low level but its position would locate at the most convective area which deviates from the center of the system circulation and the relative distance (RD) between the location of the MMV and the circulation center can be used as an important reference for judging whether the MMV reflects the center of axisymmetry of the deep convection cloud agree with the TC circulation center. In summary, MMV is an important indicator for the prediction of TC intensity and position.

## Keywords

Deviation Angle Variance Technique (DAV), Axisymmetry, Super Typhoon

---

# 利用偏角方差技术分析2015年西北太平洋超强台风全生命史过程演变特征

袁 猛<sup>1</sup>, 钟 玮<sup>1</sup>, 武 帅<sup>2</sup>, 田路通<sup>1</sup>

<sup>1</sup>国防科技大学气象海洋学院, 江苏 南京

<sup>2</sup>解放军32021部队, 北京

Email: yuanm2012@foxmail.com, wzhong\_vivian@126.com

收稿日期: 2018年10月16日; 录用日期: 2018年10月30日; 发布日期: 2018年11月6日

## 摘要

本文利用偏角方差技术(Deviation angle variance technique: DAV-T)从热带气旋(Tropical cyclone: TC)系统亮温分布的对称化程度的角度, 分析了2015年西北太平洋地区13个超强台风整个生命史过程中结构和强度的演变特征。结果表明, 在热带气旋不同强度阶段其系统内深对流云团的轴对称化程度不同, 相对应的DAV极小值(Map minimum value: MMV)随系统强度增大而出现明显减小, 同时整体DAV分布也呈现由不规则分布向围绕热带气旋环流中心的近圆形结构变化的特征。然而在热带气旋系统处于热带低压及以下的低强度时期, 且存在较大尺度非闭合深对流云团时, MMV量值较低但其位置则偏离系统环流中心出现在对流最旺盛的区域, 此时MMV所在位置与环流中心的相对距离(Relative Distance: RD)可作为判断MMV所反映深对流云团对称化中心是否位于热带气旋环流中心的重要参考。综上所述, MMV的量值大小和位置对于热带气旋强度和位置的预报具有重要的指示意义。

## 关键词

偏角方差(DAV), 对称化程度, 超强台风

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

## 1. 引言

西北太平洋地区是全球热带气旋(Tropical cyclone: TC), 发生次数最多、强度最大的区域之一[1], 热带气旋活动十分频繁。而热带气旋的发生发展会对我国日趋增加的海上活动产生重要影响。因此, 加强对西北太平洋地区热带气旋全生命史过程中强度和结构变化的研究对提高热带气旋活动预报能力具有积极意义。

热带气旋系统一般生成于低纬度地区的洋面上, 而这些地区由于伸展范围广且缺少常规观测资料, 因此可见光和红外卫星云图数据成为对海上热带气旋长生命史过程追踪的唯一有效手段[2]。当前基于卫星云图应用最广泛的分析热带气旋的方法, 为上世纪70年代由Davorak提出的Davorak [3] [4]。该方法利用红外和可见光卫星云图, 将需要研究的云团结构同一系列热带气旋的标准模型进行比对进而得出结论。这些标准模型利用云团系统的环流来检测旋度, 利用最低亮温值来检测云墙区的深对流, 利用最高亮温值来检测眼区中心的环流, 还利用最高亮温值与最低亮温值之差来预报热带气旋强度。最初的Davorak方法主观性很强, 需要连续而密集的分析, 并且准确性依赖于分析者的经验水平。Velden等[5]在原有Davorak方法的基础上进行了一些完善, 提出了客观Davorak方法(Objective Davorak Technique: ODT)。该方法通过测量热带气旋眼区和周围区域的温度差异, 根据由经验确定的查找表来预报热带气旋强度。尽管ODT可以相对客观地计算热带气旋强度, 但眼区的位置仍需要通过与原Davorak方法类似的分析或者利用航天观测资料来确定。Olander及Velden [6]在ODT的基础之上又提出了改进的客观Davorak方法(Advanced Objective Davorak Technique: AODT)。它根据眼区和环绕眼区的云系在不同发展阶段表现

出的特征将云型进一步细分。该方法基于统计结果在 ODT 的基础上作了调整, 并利用回归方程来预报热带气旋强度[7]。为了使该技术应用于热带气旋的整个生命史, 当热带气旋还没达到热带风暴强度时, 通过分析其螺旋云带的云型及曲率来得到强度估测值。此外, 还有一些其他的基于数值天气预报产品来预报热带气旋生成和强度的方法。然而这些方法难以从普通云团中区分容易发展成为热带气旋的云团系统, 仅仅适用于云团系统出现明显的螺旋云带之后[2]。

针对以往主观分析方法的局限性, Piñeros [8]提出了一种使用红外卫星云图来获取热带气旋云团结构的形状和动力学特征的客观方法, 即偏角方差技术(Deviation Angle Variance Technique: DAV-T)。当热带气旋系统从未组织化的云团中发展和加强时, 云团结构或相对于一个特别的参考点而变得更加轴对称。该方法能够通过计算红外云图上的亮温梯度来得到每个热带气旋系统的对称化程度, 并以此对热带气旋的组织化程度进行量化。结果表明, 该方法在热带气旋系统的初生期、发展期、成熟期和消亡期的整个生命史过程中均客观有效。之后, Piñeros 等[9]将该方法应用于北大西洋地区 2004~2009 台风季期间的热带气旋系统, 利用对热带气旋云团系统的组织化程度或对称化程度的量化结果来间接测量最大风速, 最终得到的最大风速即可作为对热带气旋强度的估计, 其结果与美国国家飓风中心(National Hurricane Center: NHC)最佳路径集资料的均方根误差在  $6.7\sim 7.7\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  之间。Ritchie 等[10]将 DAV-T 应用于 2007~2011 年间北太平洋地区的热带气旋强度预报。在应用时采取了多种卫星资料来源(GEOS-E、GEOS-W、MTSAT 等), 并且鉴于在东北太平洋和西北太平洋地区热带气旋整体上的差异性, 在这两个区域分别采取了不同的计算参数。结果发现, DAV-T 在西北太平洋地区预报热带气旋的强度与联合台风警报中心(Joint Typhoon Warning Center: JTWC)的最佳路径集资料相比, 均方根误差在每一年都处于  $6.6\sim 7.8\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  之间, 而在东北太平洋地区预报热带气旋的强度与 NHC 的最佳路径集资料相比均方根在每一年均处于  $4.8\sim 8.6\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  之间。此外, DAV-T 在热带气旋生成(Tropical Cyclogenesis: 热带气旋生成)的识别上也表现出巨大的应用价值[2] [11] [12]。

然而, DAV-T 作为一种新兴的技术方法, 对其物理意义及其相关应用的研究仍不够深入, 特别是利用 DAV 值表征热带气旋对称化程度的具体细节不够清晰。因此, 需要加强对多个热带气旋个例全生命史演变过程中 DAV 值及分布的细致分析, 以进一步揭示其与热带气旋系统结构和强度的关系。此外, 还需要加强我国自主资料来源(如 FY 系列卫星资料等)对 DAV-T 应用的验证分析, 为建立基于我国自主资料来源的热带气旋结构和强度的客观监测和预报方法打下基础。

## 2. 数据与方法

### 2.1. 数据

目前我国用于监测西北太平洋区域的在轨静止卫星主要是 FY-2F 和 FY-2G, 其星下点分别位于  $112^{\circ}\text{E}$  和  $105^{\circ}\text{E}$ , 径向覆盖范围为  $52^{\circ}\sim 172^{\circ}\text{E}$ ,  $45^{\circ}\sim 165^{\circ}\text{E}$ 。考虑到资料的协调性, 将研究资料覆盖的范围整合为  $0^{\circ}\sim 40^{\circ}\text{N}$ ,  $100^{\circ}\text{E}\sim 160^{\circ}\text{E}$ 。但由于卫星调试、区域加密观测任务等原因, 单个卫星在某些时间段缺少全区或部分区域的观测信息, 因此本文以 FY-2F 卫星观测资料为主, 在其资料缺失期间以 FY-2G 卫星资料进行补充。本文主要使用的卫星资料来源于静止气象卫星长波( $10.7\ \mu\text{m}$ ), 每小时一次的红外亮温数据, 空间分辨率为  $0.05^{\circ}$ /像素(约  $5\ \text{km}$ /像素)。研究发现, 适当降低研究资料的空间分辨率不会对计算结果产生显著影响, 但会显著减少计算所需时间[2] [9], 因此为提高运算效率, 将研究资料的空间分辨率提取为  $0.1^{\circ}$ /像素(约  $10\ \text{km}$ /像素)。

本文用于描述热带气旋强度、位置以及物理量场分布的常规资料包括中国台风网提供的中国气象局最佳路径(China Meteorological Administration Best Track Datas: CMA-Best Track)资料和美国国家环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction: NCEP)提供的全球分析资料(FNL: Final Operational

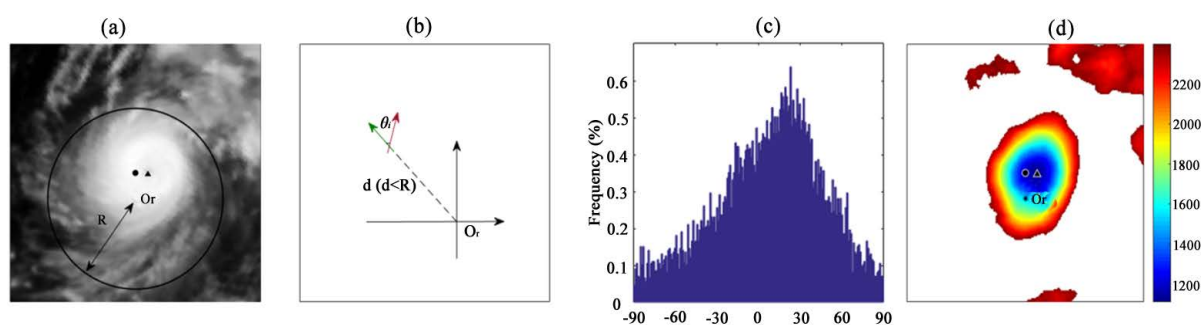
Global Analysis), 其中最佳路径资料时间分辨率为 6 小时, 主要用于分析台风位置、强度及其不同生命史阶段的划分; 再分析资料时间分辨率为 6 小时, 水平分辨率为  $1^\circ \times 1^\circ$ , 主要用于热带气旋个例环境场的诊断分析。

为了覆盖热带气旋全生命史过程, 本文选择 2015 年达到超级台风强度的所有台风个例作为研究范围, 但由于其中台风 Champi 和 Infa 的卫星资料缺失较多, 因此将研究对象设定为 13 个超强台风个例: Maysak、Noul、Dolphin、Chan-hom、Nangka、Soudelor、Goni、Atsani、Kilo、Dajuan、Mujigae、Koppu 和 Melor。本文将 CMA-Best Track 对每个台风从开始记录时刻到停止记录时刻期间的全过程定义为其完整生命史过程。并按照《热带气旋等级》标准<sup>1</sup>将常规资料样本划分为弱于热带低压(Weaker than Tropical Depression:  $\leq$ TD)、热带低压(Tropical Depression: TD)、热带风暴(Tropical Storm: TS)、强热带风暴(Severe Tropical Storm: STS)、台风(Typhoon: TY)、强台风(Severe Typhoon: STY)、超强台风(Super Typhoon: Super TY)、以及变性的温带气旋(Extratropical Cyclone: ET)八个等级。

## 2.2. 研究方法

基于卫星资料的观测研究表明, 热带气旋的生成、发展和消亡过程, 对应于区域分散的强对流云团趋于集中和闭合的组织化过程、围绕眼心的组织化环状强对流带的轴对称化过程以及陆面或较冷洋面上的组织化对流云带的非对称消散过程[3] [13] [14]。对于具有一定强度的热带气旋, 其红外云图上亮温值的梯度方向将趋向于指向暖心的辐合型形状, 且热带气旋的强度越强, 云团的对称化程度相应也就越高。基于此, 可以通过计算热带气旋云团区域内红外云图亮温梯度与其相对于参考中心的径向矢量的夹角偏差累积量(Deviation Angle Variance: DAV)来表征热带气旋强对流云团的对称化程度, 从而实现热带气旋的定位跟踪和强度估计。

以台风 Noul 在 5 月 10 日 06 时的红外云图图像为例(图 1(a)), DAV-T 的计算过程如下:



**Figure 1.** Schematic diagram of DAV-T. (a) The IR-image of typhoon Nepartak at UTC 12:00 06 July (shading, units: K); (b) Schematic diagram of the calculation for deviation angle (units: degree); (c) Deviation angle frequency distribution given reference point ( $O_r$ ) in (a) and (b), whose DAV value is  $1532 \text{ deg}^2$ ; (d) DAV map (shading, units:  $\text{deg}^2$ ). In figures, “●” represents the typhoon center from CMA-Best Track datas; “▲” means the location of MMV; “\*” is the position of agiven reference point  $O_r$ ; R is the defining radius for DAV calculation and the rounded solid line encloses the calculation area for the DAV value of  $O_r$ . The red and green arrow respectively represents the direction of the brightness temperature gradient at a certain pointand the radial direction of the point, while  $\theta$  is the deviation angle of the above two

**图 1.** DAV-T 算法原理示意图。(a) 台风 Noul 在 UTC 5 月 10 日 06 时的红外云图分布(阴影, 单位: K); (b) 偏差角计算示意图(单位: 角度); (c) 参考点  $O_r$  的偏差角频率分布图(单位:  $\text{deg}^2$ ), 所有偏差角的方差值为  $1532 \text{ deg}^2$ ; (d) DAV 值分布图(阴影, 单位:  $\text{deg}^2$ )。其中 “●” 为 CMA-Best Track 资料记录的台风中心; “▲” 为 MMV 所在位置; “\*” 为任意选取的参考点  $O_r$  位置; R 为像素半径; 圆形黑线包围区域为参考点  $O_r$  的 DAV 值的计算区域; 红色箭头代表计算区域内的某一点的亮温梯度方向; 绿色箭头方向为该点相对于参考点  $O_r$  的径向方向;  $\theta$  即为该点相对于参考点  $O_r$  的偏差角

<sup>1</sup> 《热带气旋等级》国家标准(GB/T 19201-2006)。

首先, 在红外云图上选定一个像素点  $O_r$  作为热带气旋中心, 该点同时作为 DAV 计算的参考点。然后以该参考点为中心, 选定某一确定的计算半径  $R$  以内的范围作为参考点  $O_r$  处进行计算的区域。其次, 对处于  $O_r$  点计算区域内的每一个像素点, 均计算出该像素点的亮温梯度方向与该像素点指向参考点  $O_r$  方向的夹角  $\theta_i$ , 即为该像素点相对于参考点  $O_r$  的偏差角(Deviation Angle)(图 1(b))。  $\theta_i$  绝对值的大小, 表征了热带气旋云团亮温梯度与理想涡旋亮温梯度分布之间的差异, 因此偏差角位于  $0^\circ$  附近的像素点越多, 表明对流云团相对于选择参考中心的对称化程度越高(图 1(c))。  $O_r$  点的 DAV 即定义为该点计算区域内所有像素点偏差角绝对值的方差。由此可见, 当给定中心位置后, 可通过计算得到一个表征热带气旋系统整体的对称化程度的 DAV。因此, DAV 的大小对中心位置的选择非常敏感。实际观测尤其是实时监测和预警过程中, 难以准确确定热带气旋的中心位置。为此, 将红外云图上的每个像素点依次选为参考点, 依次重复上述计算过程即可得到整个红外云图对应的 DAV 分布图(图 1(d))。其中 DAV 的低值区对应于红外云图上对应于该点对称化程度较高的云团的分布区; DAV 极小值(Map minimum value: MMV)的大小对应于热带气旋系统中云团对称化水平的最高程度, 与此同时, MMV 的位置则可以表征热带气旋参考中心的位置。因此, 利用 DAV-T 可以将云团的亮温分布信息与热带气旋的结构特点相匹配, 进而可以对热带气旋的强度和位置等相关信息进行分析 and 判定。

此外, 计算过程中边界半径的大小也会影响热带气旋系统区域的划分, 从而影响对系统对称性程度的计算结果。本文在计算过程中考虑到西北太平洋热带气旋系统尺度的大小, 参考 Wood 等[11]的研究, 将每个 DAV 值计算选取 35 个像素点(约为 350 km)作为计算区域的半径。由于当某一格点上 DAV 值高于一定量值后, 表明相对该点的云团对称化程度已经较弱, 不具备热带气旋的系统性特征, 因此 Wood 等[11]将  $2000 \text{ deg}^2$  作为对热带气旋系统进行识别的 DAV 阈值, 即 DAV 大于  $2000 \text{ deg}^2$  的可不作分析。但其研究对象仅限处于海面上的热带气旋系统, 而本文分析了包括台风登陆之后的整个生命史过程, 其中在台风登陆之后的过程中, 由于受到地形的动力、热力作用影响, 使得台风在消亡阶段的 DAV 值较高, 因此本文将  $2400 \text{ deg}^2$  作为阈值, 将所有高于  $2400 \text{ deg}^2$  的 DAV 值均以空值代替, 使得图形结果在更加直观和易于分辨的同时, 能够识别和追踪热带气旋整个生命史阶段的云团分布特征。

### 3. 台风 Noul、Soudelor 生命史过程中的 DAV 分布特征

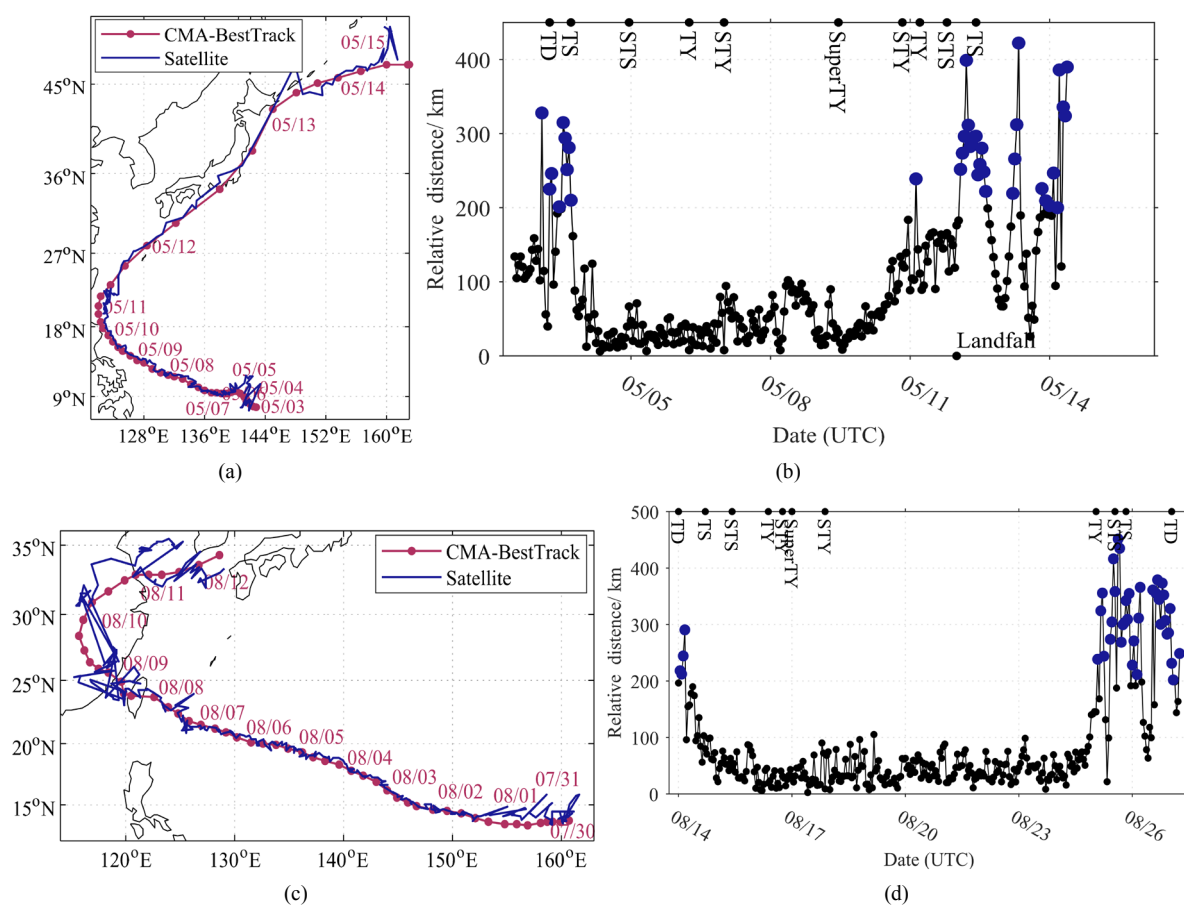
为了直观分析 DAV 分布与热带气旋全生命史过程中的路径变化和强度演变的对应关系, 并揭示热带气旋不同阶段 DAV 分布和变化特征, 本节选取 Noul 和 Soudelor 两个超强台风个例进行研究。

#### 3.1. MMV 分布与热带气旋路径和强度关系

将台风 Noul 与 Soudelor 生命史过程中由每个时刻所对应的 MMV 位置的变化轨迹与 CMA-Best Track 资料记录的热带气旋路径进行对比, 从图中可以看出(见图 2)两者具有良好的匹配性。为了进一步量化两者之间的相关程度, 计算了 CMA-Best Track 资料记录的热带气旋中心与该时刻 MMV 所在位置的相对距离。从热带气旋不同时期相对距离的演变中(图 2(c), 图 2(d))可以看出, 在热带气旋强度较强的成熟期, 相对距离较小; 相对距离较大的点则全部集中于热带气旋强度较弱的生成期和消亡期。特别的, 由于在台风 Noul 的成熟期影响其发展的天气系统较少, 因此对应的相对距离波动很小; 然而, 在消亡期由于受到吕宋海峡地形较为强烈的影响, 系统的对称化程度明显减弱, 导致相对距离在该时期出现了剧烈的增加且波动很大。对于台风 Soudelor, 在初生期和消散期, 相对距离均具有较为剧烈的波动, 特别是在登陆之后, 由于受到地形强烈的动力和热力作用, 路径曲率增大, 台风开始向非对称结构演变, 使得相对距离在这一阶段要显著高出其他时期。

由于根据每小时红外云图亮温资料计算得到的 MMV 时间序列相对于 CMA-Best Track 资料记录得到

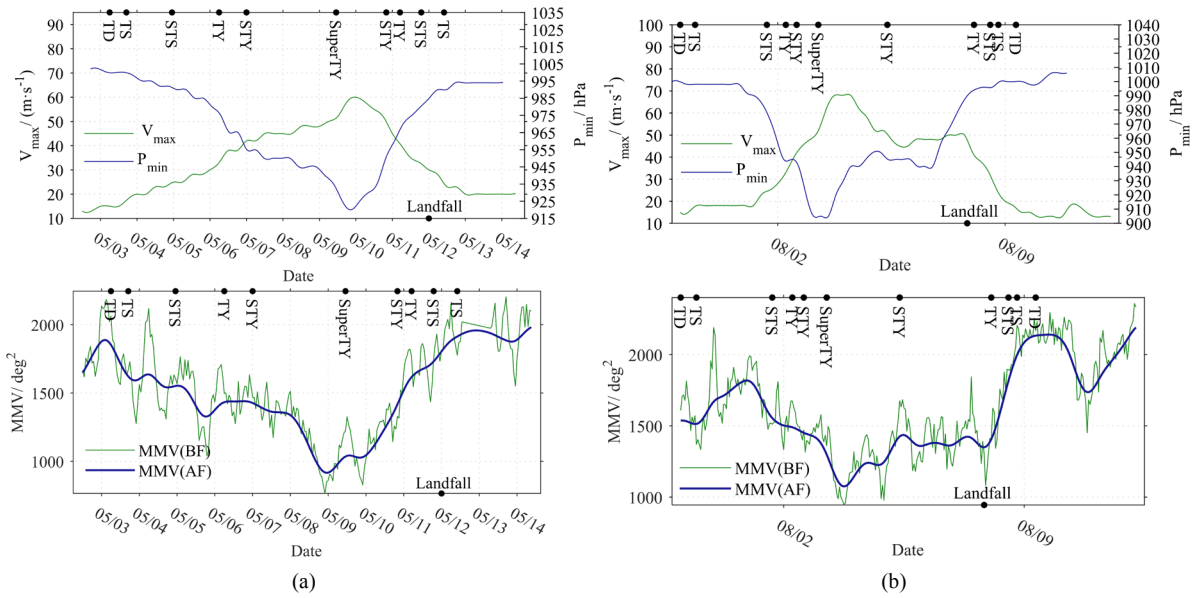
每 6 小时的台风强度变化反映的是不同时间尺度上的系统特征，因此 MMV 在快时间尺度上的高频变化难以在客观分析资料中得到体现[2] [9]，同时 MMV 时间序列的高频信号主要反映的是热带气旋系统环流内对流活动的瞬时变化特征，对系统强度的变化影响较小[8]。因此图 3 在给出 CMA-Best Track 的每 6 小时海表面最大风速和海平面最低气压与基于红外云图亮温资料计算得到的 MMV 原始时间序列的基础上，采用切比雪夫(低通)滤波器，以研究的每个台风对象的总时次为采样率，设置截断频率为  $0.01\pi$ ，得到滤掉高频波动后的 MMV 时间序列。



**Figure 2.** Track analysis of typhoon Noul and Soudelor. (a) Path of the CMA-Best Track center and the MMV location of typhoon Noul; (b) Curve of relative distance in the life history of typhoon Noul (units: km); (c) Path of the CMA-Best Track center and the MMV location of typhoon Soudelor; (d) Curve of relative distance in the life history of typhoon Soudelor (units: km). In figures, the blue solid line represents the typhoon moving path; the solid black line means the locus of the MMV location; the blue points characterize the time when the relative distance is greater than 200 km

**图 2.** (a) 台风 Noul 最佳移动路径及 MMV 所在位置移动轨迹对比，及其(b)生命史过程中对应时刻 MMV 位置与热带气旋中心相对距离变化(单位: km); (c) 台风 Soudelor 最佳移动路径及 MMV 所在位置移动路径对比，及其(d)对应时刻 MMV 位置与热带气旋中心相对距离变化(单位: km)。左列图中蓝色点实线为台风移动路径，黑色实线为 MMV 所在位置移动轨迹；红色原点及数字表示对应日期 00 点热带气旋中心位置。右列图中点实线中蓝色圆点表示 RD 大于 200 km 的时刻，图表框上界标注了热带气旋不同强度阶段的对应时刻

整体而言，台风 Noul 的生成和消散过程均十分迅速，强度变化过程呈典型的“V (倒 V)”型分布，而台风 Soudelor 处于强度较弱的时间则较长，特别具有较长的消散期，并且在其发展过程中强度维持和加强交替出现。对于不同发展特点的台风，MMV 的量值大小与热带气旋中心最大风速均呈现相反的变化趋势、与中心最低气压均呈现相同的变化趋势。这表明 MMV 对于热带气旋强度具有重要的指示意义。



**Figure 3.** Typhoon Noul and Soudelor changes in intensity and MMV. (a) Curve of  $V_{max}$  and  $P_{min}$  during typhoon Lionrock's life history; (b) Curve of  $V_{max}$  and  $P_{min}$  during typhoon meranti's life history; (c) Changes in MMV of typhoon Lionrock; (d) Changes in MMV of typhoon meranti. In figures, the green line represents the change of  $V_{max}$  (units:  $m \cdot s^{-1}$ ) and MMV (units:  $deg^2$ ) before filtering; the blue line represents the change of  $P_{min}$  (units: hPa) and the filtered MMV (units:  $deg^2$ )

**图 3.** 基于最佳路径资料分析得到的台风 Noul (a)和台风 Soudelor (b)生命史过程强度变化, 其中绿色实线表示最大地面风速( $V_{max}$ , 单位  $m \cdot s^{-1}$ ), 蓝色实线表示最低海平面气压( $P_{min}$ , 单位 hPa), 以及基于卫星资料分析得到的台风 Lionrock (c)和台风 Meranti (d)生命史不同阶段滤波前后 MMV (单位:  $deg^2$ )的演变, 其中滤波前(后)由绿(蓝)色实线表示

### 3.2. 热带气旋系统的 DAV 空间分布特点

由上分析, MMV 及相对距离均与热带气旋的强度呈现出显著的对应关系。考虑到在热带气旋的生成期或消散期容易出现 MMV、相对距离与强度变化不相对应的异常情况, 因此选择 Noul 具有较高 MMV 和较大相对距离的时刻, 及其强盛期具有较低 MMV 和较小相对距离的时刻, 结合台风的云系结构和环流形势特征以及 NCEP 再分析资料, 进一步探究 DAV 值分布特点与 TC 系统结构的关系。

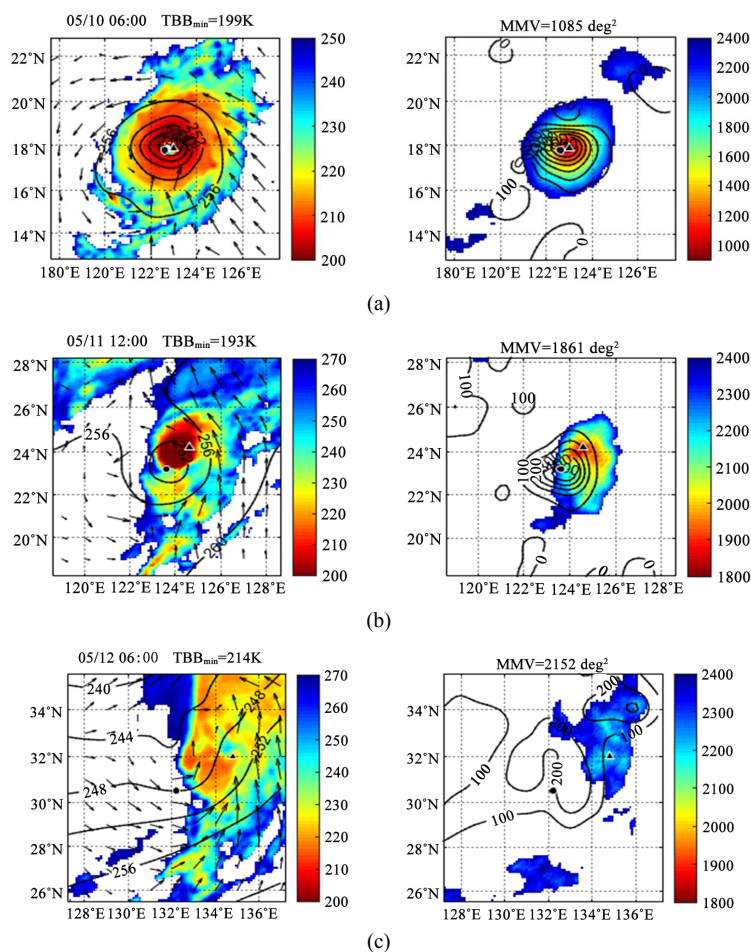
在 5 月 10 日 06 时(如图 4(a), 图 4(b)), 台风 Noul 中心气压达到最低值——920 hPa, 其强度也随之达到顶峰; 此时 TC 系统内出现闭合的深对流眼墙, 对应 DAV 的分布也呈现围绕 TC 系统中心的近圆形低值区域, 其 MMV 量值低至 1183  $deg^2$ , 其位置位于台风内核环流区域强对流云团中心的局地量温高值区, 说明当 TC 强度越大, 且系统内深对流云团组织化成为环状闭合眼墙后, MMV 量值越小, 同时其位置能够指示环状云团的对称中心。比较 CMA-Best Rack 资料记录的台风中心发现, 其与 MMV 位置基本重合。在 11 日 12 时, 尽管台风 Noul 强度已经出现减弱, 但尚未登陆, 从红外云图上看其具有明显的闭合结构, 并且对流强度较强。其对应的 DAV 低值区也基本呈现出圆盘状的分布, 但 MMV 已显著增加(2005  $deg^2$ )。至 12 日 06 时, 热带气旋已登陆, 从红外云图上看, 系统的环流特征已基本消失, 等位势高度线不再闭合, 云团结构呈高度非对称性。从 DAV 图上来看, DAV 低值区面积显著缩小, 并且边缘不规则, 同时 MMV 进一步增加, 达到 2145  $deg^2$ , 说明该时刻基本不存在组织化的深对流云团, 此时 MMV 的位置也与 TC 环流中心明显偏离, 从而导致相对距离出现了一个跃升的突变(见图 2(d))。

## 4. 2015 年超强台风的 DAV 统计特征

### 4.1. MMV 与热带气旋强度变化的关系

本节将 2015 年 13 个超强台风整个生命史过程中的强度与对应时刻表征热带气旋的对称化程度的

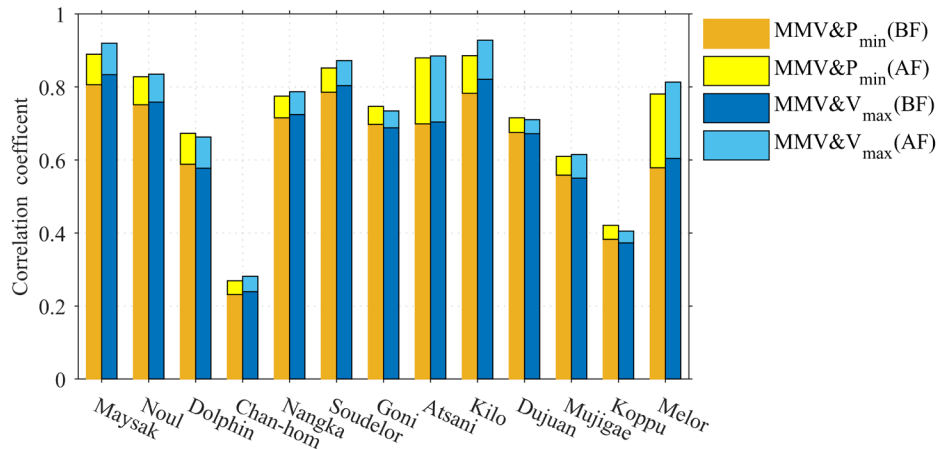
MMV 进行对比。结果表明(图 5), 所有热带气旋个例的 MMV 与  $V_{\max}$ 、 $P_{\min}$  相关关系的统计结果均通过显著性 t 检验, 且在 99%置信水平上显著。除与台风 Chan-hom 的强度变化为弱相关关系外, MMV 的量值大小与其余台风的强度均呈现强相关关系。其中, MMV 与台风 Maysak 的相关性最好, 滤波前(后)与风场的相关系数达  $-0.83$  ( $-0.93$ ), 与气压场的相关系数达  $0.81$  ( $0.89$ )。此外, 在整体分布上, 滤波后的 MMV 与热带气旋强度的相关系数(绝对值)要明显高于滤波前; 同时 MMV 与热带气旋系统  $V_{\max}$  的相关系数要明显高于与  $P_{\min}$  的相关系数。对 CMA-Best Track 记录的所有超强台风个例各个时刻的  $V_{\max}$  与对应的 MMV 进行纵向对比分析, 两者之间的相关系数为  $-0.82$ , 结果在 99%置信水平上显著, 具有强相关性。以上分析表明, 热带气旋的 MMV 随着时间的变化会出现一定的高频波动, 去掉这些高频波动的影响可以使其与热带气旋的要素场之间有更好的对应关系; 同时相比于热带气旋的气压场, MMV 能表达更多的风场信息, 因此可以通过建立 MMV 与  $V_{\max}$  的关系来间接的估计热带气旋强度。



**Figure 4.** Comparison between IR-image, meteorological elements field and DAV distribution at special moments of Noul. (a) and (b) are figures at UTC 06:00 on May 10th. (c) and (d) are figures at UTC 12:00 on May 11th. (e) and (f) are figures at at UTC 06:00 on May 12th. Left graph: IR-image (shading, units: K); geopotential height field of 500 hPa (contour, units: dgpm); wind field of 10 m height (arrow,  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ). Right graph: DAV distribution (shading, units:  $\text{deg}^2$ ); vorticity field of 850 hPa (contour,  $10^{-6} \text{ s}^{-1}$ ); “●” represents the typhoon center from CMA-Best Track datas; “▲” means the location of MMV

**图 4.** 台风 Noul 典型时刻红外云图、气象要素场及 DAV 分布的对比。选取时刻为(a)和(b) UTC 5 月 10 日 06 时; (c)和(d) UTC 5 月 11 日 12 时; (e)和(f) UTC 5 月 12 日 06 时。左侧为红外卫星云图(阴影, 单位: K); 500 hPa 等位势高度线(等值线, 单位: dgpm)和 10 m 高度风场(箭头, 单位:  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )。右侧为对应时刻的 DAV 分布图(阴影, 单位:  $\text{deg}^2$ )和 850 hPa 涡度场分布(等值线, 单位:  $10^{-6} \text{ s}^{-1}$ )。其中“●”为 CMA-Best Track 资料记录的台风中心; “▲”为 MMV 所在位置





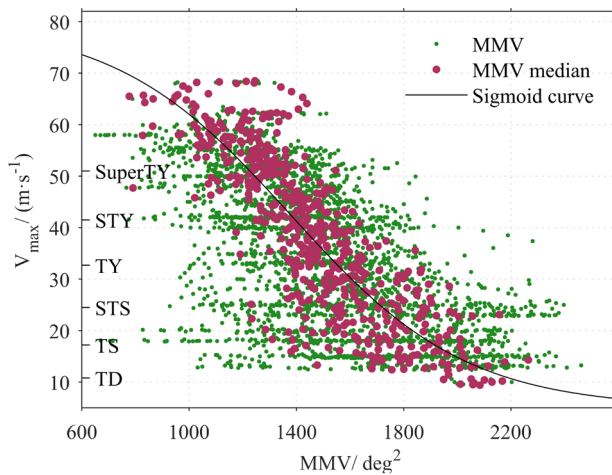
**Figure 5.** Correlation coefficient between MMV and typhoon intensity, in which blue colors represent the correlation coefficient between the before (after) filtering MMV (unit:  $\text{deg}^2$ ) and  $V_{\max}$  (units:  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ), and the yellow colors represent the correlation coefficient between before (after) filtering MMV (unit:  $\text{deg}^2$ ) and  $P_{\min}$  (units: hPa)

**图 5.** MMV 与台风强度的相关系数。其中暖色调代表滤波前(Before filtering: BF)后(After filtering: AF)的 MMV (单位:  $\text{deg}^2$ )与  $V_{\max}$  (单位:  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )的相关系数; 冷色调代表滤波前后的 MMV (单位:  $\text{deg}^2$ )与  $P_{\min}$  (单位: hPa)的相关系数

本文使用 Sigmoid 函数来建立 MMV 与  $V_{\max}$  之间的回归模型(见图 6)。该函数模型不仅与 MMV 的变化特征相吻合, 还具有在  $V_{\max}$  边界处收敛的特点, 从而避免得到偏离实际强度的估计。由于 CMA-Best Track 与 MMV 资料的时间尺度不同, 包含了更多大尺度的信息, 因此每个等级的强度都会对应若干 MMV 值, 这使得两者之间的相关关系的分析变得复杂。为克服该问题, 仅将每个等级强度所对应的 MMV 中位数选取为拟合数据, 进行回归分析[2] [9]。拟合方程如下:

$$\overline{V_{\max}} = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{1 + \exp(\alpha\sigma^2 + \beta)} + I_{\min} \quad (1)$$

其中  $\overline{V_{\max}}$  为  $V_{\max}$  的拟合值,  $\alpha$ 、 $\beta$  为根据数据调整的方程参数,  $\sigma^2$  为滤波后的 MMV 值,  $I_{\max}$ 、 $I_{\min}$  分别对应于最佳路径集资料中的最大强度和最小强度。预报强度的范围则会介于  $I_{\min} \sim I_{\max}$  之间。 $I_{\min}$  取  $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $I_{\max}$  取  $80 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。当残差值最小时,  $\alpha$  取  $3.05 \times 10^{-3}$  ( $2.96 \times 10^{-3}$ ,  $3.13 \times 10^{-3}$ ),  $\beta$  取  $-4.20$  ( $-4.32$ ,  $-4.08$ )。



**Figure 6.** Relationship between MMV and TC intensity ( $V_{\max}$ ). The black line is the sigmoid curve, and green and red points are MMV scatters and its median, respectively

**图 6.** MMV 与热带气旋中心最大风速( $V_{\max}$ )拟合关系。其中绿色点为 MMV 分布; 红色点为每个强度等级的 MMV 中位数; 黑色线为 Sigmoid 函数曲线

根据建立回归模型可以计算出每个强度下的 MMV 拟合值及置信区间(见表 1)。这样,采用 MMV 的拟合值或置信区间的上下限即可作为台风强度判别的阈值,从而为相应强度台风的预警提供参考。需要说明的是,当采用的 MMV 阈值越低,台风识别的准确率会较高,但漏报率也会较高;反之,当采用的 MMV 阈值越高,台风的漏报率会较低,然而误报率同时则会升高[11]。

**Table 1.** MMV fits at different typhoon intensities

**表 1.** 不同台风强度下的 MMV 拟合值

热带气旋强度分类	TD	TS	STS	TY	STY	Super TY
拟合值(deg <sup>2</sup> )	2191	1916	1721	1554	1396	1227
95% CI (deg <sup>2</sup> )	2093~2295	1825~2011	1636~1812	1473~1639	1319~1477	1154~1303

从结果来看,MMV 在不同阶段量值的分布特征有着显著的差异,这可以作为对台风强度分级的重要指标,对于台风的监测和预警有着重要意义。特别是在热带气旋系统由弱于 TD 至 TS 强度阶段的变化过程中,MMV 在整体上的下降幅度最大,表明强对流系统的轴对称过程对台风生成和消散过程具有重要影响,因此 DAV-T 对热带气旋生成期和消散期的意义更加显著。

#### 4.2. 相对距离与热带气旋强度变化的关系

从相对距离的统计特征来看(表 2),台风 Goni 的相对距离相对最小,而台风 Atsani 则相对最大。值得注意的是,DAV-T 的系统误差与资料的分辨率相同,均为 0.1° (约 11 km)。此外,鉴于热带气旋初生期水汽条件不充分、登陆后的消散期受地形影响较大,将低于 TD(含 TD)强度时期的样本排除后发现相对距离有了大幅下降。特别是对于受地形影响较大的 Noul 以及多次登陆的台风 Soudelor,相对距离均方根的降幅分别达到了 45.5%和 48.9%。整体而言,热带气旋云团的 MMV 所在位置与 BestTrack 资料记录的热带气旋中心具有很强的一致性,因此前者对于后者的确定具有重要的参考意义。

**Table 2.** Comparison of relative distance between MMV locations and CMA-Best Track data for different TC systems

**表 2.** 不同热带气旋系统 MMV 位置与 CMA-Best Track 资料的相对距离对比

误差 (km)	中位数		均方根	
	>TS 强度阶段	全生命过程	>TS 强度阶段	全生命过程
Maysak	79.2	88.6	105.6	137.3
Noul	60.0	67.7	124.3	130.9
Dolphin	87.7	105.4	134.6	143.7
Chan-hom	85.9	91.3	140.8	144.5
Nangka	79.2	81.3	93.8	111.9
Soudelor	50.4	62.6	122.5	153.5
Goni	46.4	49.0	121.6	126.6
Atsani	71.5	78.8	130.6	144.6
Kilo	113.8	113.8	190.4	190.4
Dujuan	67.0	86.5	131.7	156.2
Mujigae	57.2	57.1	76.8	78.1
Koppu	140.8	187.0	177.8	205.7
Melor	51.1	62.3	195.5	198.6

## 5. 结论与展望

本文基于 FY-2F、FY-2G 的红外卫星资料, 利用 DAV-T 从热带气旋系统对称化结构的角度研究了 2015 年 13 个超强台风的整个生命史过程。结果表明云团的 DAV 值分布及特征对于热带气旋系统的结构和强度具有重要的指示意义, 进一步揭示了 MMV 量值及其所在位置分别与热带气旋强度及其中心的物理联系, 并且充分验证了将我国自主资料源应用于该方法的可行性。

1) DAV 的分布在热带气旋系统的不同阶段具有不同的特征。对于低强度的热带气旋系统, 其 DAV 的量值往往整体较高且边缘不规则; 反之, 对于高强度的热带气旋则对应于规则的 DAV 低值区。利用 DAV 低值区的极小值 MMV 能够对云团的对称化程度进行量化, 从而作为分析热带气旋的重要指标。MMV 的量值与用来表征热带气旋强度的  $V_{\max}$ 、 $P_{\min}$  之间存在良好的相关关系, 特别是前者, 因此可以通过建立回归模型的方法利用 MMV 来间接测量  $V_{\max}$ , 进而对热带气旋强度做出估计。

2) 在热带气旋系统的整个生命史过程中, MMV 所在位置与热带气旋中心具有良好的匹配性。两者之间的相对距离在热带气旋系统的不同阶段具有显著差异。整体而言, 在热带气旋系统的发展期和成熟期, 相对距离很小; 而在热带气旋系统的生成期和消亡期, 相对距离则相对较大。研究表明, 当热带气旋系统云团呈闭合分布时, MMV 位置能够较好地指示眼心所在; 然而当系统云系出现明显非闭合特征时, MMV 所在位置总是趋向于局地对流最旺盛的区域, 这使得在生成期和消散期 MMV 常处于组成热带气旋云团的某一云块中, 特别是在热带气旋登陆之后, 受地形的动力、热力等作用影响, 会使得热带气旋云团的结构更加复杂, 从而造成相对距离偏大。在热带气旋强度较弱的阶段相对距离的大小受强度影响较大, 而当热带气旋系统达到一定强度出现稳定的形态结构之后, 随着其强度的增加相对距离的下降幅度逐渐缓慢。根据相对距离在热带气旋不同强度时的分布差异, 可以将其作为热带气旋强度判别的辅助参考。

本文的研究在以下几个方面仍需要做进一步的研究: 1) 研究对象的选取需要覆盖更广的时间段以及更多不同强度的热带气旋个例, 进一步增强对 DAV-T 的普适性研究。2) 由于计算半径数值的选取对热带气旋系统对称化程度的量化过程会产生重要影响, 因此需要针对 DAV-T 计算半径进行敏感性实验, 以确定适用于我国自主资料源的最佳数值, 并进一步讨论不同的计算半径对不同强度热带气旋的影响。3) 相对距离在热带气旋系统的低强度时期数值仍相对偏大, 在原 DAV-T 算法基础上需进一步引进云团亮温值等其他客观资料信息作为判别阈值, 以提高定位精度并减少 MMV 的高频信号。

## 基金项目

国家自然科学基金项目(41275002, 41775055)共同资助。

## 参考文献

- [1] 唐丽丽, 胡德勇, 李小娟. 1951-2006 年西北太平洋热带气旋活动时空特征[J]. 自然灾害学报, 2012(1): 31-38.
- [2] Pineros, M.F., Ritchie, E.A. and Tyo, J.S. (2010) Detecting Tropical Cyclone Genesis from Remotely Sensed Infrared Image Data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 7, 826-830. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2010.2048694>
- [3] Dvorak, V.F. (1975) Tropical Cyclone Intensity Analysis and Forecasting from Satellite Imagery. *Monthly Weather Review*, 103, 420-430. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1975\)103<0420:TCIAAF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1975)103<0420:TCIAAF>2.0.CO;2)
- [4] Dvorak, V.F. (1984) Tropical Cyclone Intensity Analysis Using Satellite Data. *NOAA Technical Report*, 11, 6-25.
- [5] Velden, C.S., Olander, T.L. and Zehr, R.M. (1998) Development of an Objective Scheme to Estimate Tropical Cyclone Intensity from Digital Geostationary Satellite Infrared Imagery. *Weather and Forecasting*, 13, 172-186. [https://doi.org/10.1175/1520-0434\(1998\)013<0172:DOAOST>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0434(1998)013<0172:DOAOST>2.0.CO;2)
- [6] Olander, T.L. and Velden, C.S. (2007) The Advanced Dvorak Technique: Continued Development of an Objective

- Scheme to Estimate Tropical Cyclone Intensity Using Geostationary Infrared Satellite Imagery. *Weather and Forecasting*, **22**, 287-298. <https://doi.org/10.1175/WAF975.1>
- [7] 刘喆, 王新, 李万彪, 等. Dvorak 技术估测热带气旋强度研究进展[J]. 气象科技, 2007, 35(4): 453-457.
- [8] Pineros, M.F., Ritchie, E.A. and Tyo, J.S. (2008) Objective Measures of Tropical Cyclone Structure and Intensity Change from Remotely Sensed Infrared Image Data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **46**, 3574-3580. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2008.2000819>
- [9] Piñeros, M.F., Ritchie, E.A. and Tyo, J.S. (2015) Estimating Tropical Cyclone Intensity from Infrared Image Data. *Weather and Forecasting*, **26**, 232-233.
- [10] Ritchie, E.A., Wood, K.M., Rodríguezherra, O.G., *et al.* (2014) Satellite-Derived Tropical Cyclone Intensity in the North Pacific Ocean Using the Deviation-Angle Variance Technique. *Weather and Forecasting*, **29**, 505-516. <https://doi.org/10.1175/WAF-D-13-00133.1>
- [11] Wood, K.M., Rodríguezherra, O.S., Ritchie, E.A., *et al.* (2016) Tropical Cyclogenesis Detection in the North Pacific Using the Deviation Angle Variance Technique. *Weather and Forecasting*, **30**, 150904105011003.
- [12] Oscar, G.R., Wood, K.M., Dolling, K.P., *et al.* (2014) Automatic Tracking of Pregeneration Tropical Disturbances within the Deviation Angle Variance System. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **12**, 254-258.
- [13] Fritz, S. (2009) Satellite Pictures and the Origin of Hurricane Anna. *Monthly Weather Review*, **90**, 507. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1962\)090<0507:SPATOO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1962)090<0507:SPATOO>2.0.CO;2)
- [14] Hubert, L.F. and Timchalk, A. (1969) Estimating Hurricane Wind Speeds from Satellite Pictures. *Monthly Weather Review*, **97**, 382-383. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1969\)097<0382:EHWSFS>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1969)097<0382:EHWSFS>2.3.CO;2)

#### 知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2168-5711, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>  
期刊邮箱: [crl@hanspub.org](mailto:crl@hanspub.org)