

南海及其毗邻海域热带气旋生成研究进展概述

李勋^{1, 2}

(1 海南省南海气象防灾减灾重点实验室, 海口 570203; 2 海南省气象台, 海口 570203)

摘要: 南海及其毗邻海域是西北太平洋热带气旋(TC)重要生成源地, 提前和精准预测TC生成, 是进行TC路径、强度变化和风雨预报以及减轻TC危害的前提。回顾梳理了近年来有关于TC生成的环境要素、物理机制、主要天气环流形势的相关研究进展。初步分析了TC初始扰动在有利环流背景条件下, 菲律宾群岛地形动力作用对于南海及其毗邻海域TC生成的直接促进作用, 并提出了一些与地形动力作用有关TC生成方面的科学问题。

关键词: 热带气旋生成, 研究进展, 菲律宾群岛, 地形动力作用

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2020.04.015

An Overview for the Studies About Tropical Cyclones Genesis over the South China Sea and Its Adjacent Basins

Li Xun

(1 Key Laboratory of South China Sea Meteorological Disaster Prevention and Mitigation of Hainan Province, Haikou 570203

2 Hainan Meteorological Observatory, Haikou 570203)

Abstract: The South China Sea and its adjacent basins are the key area for tropical cyclone (TC) genesis over the western North Pacific. Forecasting the location and timing of TC genesis accurately is preliminary important from a perspective of effective early warnings for disasters associated with TCs movement, intensity, and rainfall. This article reviews recent progress in understanding the environmental factors, key physical mechanisms, and surrounding weather patterns for TC genesis. The focus is on the dynamic effect of orography around the Philippine Islands for TC genesis from a pre-existing tropical depression under the favorable environmental influences over the South China Sea and its adjacent basins. Some open scientific issues on the dynamic effect of orography for TC genesis are highlighted.

Keywords: tropical cyclone genesis, research progress review, the Philippine Islands, dynamic effect of orography

0 引言

热带气旋(TC)是生成于热带海洋上的强烈大气低压涡旋系统, 通常伴随着大范围的大风、暴雨和狂浪等现象, 严重影响海上作业和沿海陆地经济活动, 造成重大人员财产损失^[1]。

西北太平洋是全球TC出现最多的海域, 约占全球总数的1/3^[2]。菲律宾群岛周边, 即南海及其毗邻海域是重要的西北太平洋TC生成源地, 离华南沿海陆地距离较近, 该区域生成的TC不仅对我国华南沿海地区潜在影响力较大^[3], 还可能对我国海上“一带一路”战略实施和重点岛礁经济建设产生重大危害。因此, 开展TC生成研究, 及早精准地进行TC生成预测, 是进行TC路径、强度变化和风雨预报, 预防或减小TC影响危害的首要前提。

近年来, 有研究认为菲律宾吕宋岛的海陆分布热力作用对TC生成起到促进作用。例如, 随着南海低空西南暖湿气流加强, 以及吕宋岛西海岸的对流日变化使得低空大气加热增湿, 导致热带扰动云团在穿越吕宋岛以后生成为台风“米克拉”(0816)^[4-5]。除此以外, 对于菲律宾群岛地形与TC生成关系的研究鲜有报道, 可能原因: 1) 缺少高时空分辨率的卫星资料进行连续性甄别监测。应用卫星资料进行热带扰动发展与不发展的样本对比分析, 亦是2018年召开的第九届热带气旋国际会议(International Workshop on Tropical Cyclones)的建议研究方向之一^[6]; 2) 近年来最新的TC生成研究成果需要回顾总结, 并与南海及其毗邻海域TC生成现象进行理论和实际的结合。

本文拟在天气尺度上, 对近年来有关于TC生成的研究进行梳理, 在总结有利的环境背景条件下, 指出热带岛屿地形对于TC生成的促进作用。

1 热带气旋生成定义

世界气象组织和中国气象局规定, TC根据强度等

收稿日期: 2019年8月26日; 修回日期: 2020年5月26日

作者: 李勋(1981—), Email: cyrilpat@sina.com

资助信息: 国家自然科学基金项目(41365005)

级依次为热带低压 (TD)、热带风暴 (TS)、强热带风暴、台风、强台风和超强台风^[7-8]。

值得注意的是, TC生成的时间参考点定义尚未统一^[8-9]。通常, TC生成是指当外部触发影响作用趋小、气旋性暖心涡旋达到自我维持并加强时的状态, 当TC达到TD强度或者TS强度时都被认为符合此要求^[9-11]。研究认为, 各大业务中心对于TD初始时间点判定及其强度观测记录均存在差异, 而当TC由TD升级为TS强度时, 并给予名称和四位数字的国际编号时, 最佳路径资料集的一致性相对较好^[9, 12-16]。

2 有利于热带气旋生成的环境要素

TC生成所需的有利环境因子, 包括: 充分的海洋表层热力状况、相对潮湿的中层大气、不稳定大气层结等热力因子, 以及适宜的低空相对湿度和高低空纬向风垂直切变、一定的科氏力等动力因子, 其重要应用是利用因子的季节平均, 经验地估计TC生成频数空间分布^[17-22]。

在南海以及毗邻的西北太平洋低纬海区, 适宜TC生成的海洋热力状况、中层大气湿度、大气层结不稳定度等热力条件较易满足, 因此, 动力因子通常占主导作用, 但在东太平洋和大西洋, 海洋热力状况、中层大气湿度、大气层结不稳定度等热力因子则占主导作用^[23]。

上述环境因子的区域分布和季节变化, 解释了TC生成的地理限制和季节性特征。随着气候模式分辨率和预报能力提升, 上述环境因子的季节变化和地理分布得以深入区分, TC生成潜在指数 (GPI) 应运而生^[24-26]。GPI的特别之处是, 用潜在强度替换单一的海洋表层热力状况、中层大气湿度等条件描述, 叠加考虑海表温度、海平面气压、大气温度和混合比垂直分布、耗散加热、以及湿熵饱和盈亏度等环境热力因子的综合作用, 得到更为精确的经验关系。由于TC活动具有较强的年际变化特征^[27-33], 与之对应, GPI受厄尔尼诺与南方涛动 (ENSO)^[24, 34]、以及季节内震荡 (MJO)^[4, 35-38]等现象的调制作用所制约。

相对于潜在强度和海洋表层热力状况等热力因子随季节变化而缓慢波动, 风垂直切变和低空相对湿度则具有较强的天气尺度变化特征^[7]。随着高时空分辨率的卫星观测大量应用, 使得TC生成的初始对流胚胎之热带云团 (TCC) 实时监测成为可能^[39-40]。一般而言, TCC是多个中尺度对流系统 (MCS) 组成的紧凑对流云团, 在包含出流卷云的情况下, 直径可达250~2500 km, 持续时间可达数天^[39, 41-44]。

基于卫星观测资料、业务应用于TC客观定位定强

的德沃夏克方法 (Dvorak technique)^[45-46], 被逐步改进用于TC生成前期阶段监测^[47-49], 如初期德沃夏克分析方法 (Early-stage Dvorak Analysis)^[50]。另外, 将天气模式输出的动力和热力因子预报, 应用动力-统计模型进行基于TCC识别的TC生成逐日诊断预报, 提高了样本识别率, 成为了TC生成客观预报的重要手段; 缺点是随着样本识别率提高, 空报率也随之增加, 其主要原因是天气模式预报输出产品分辨率依然不够精细、以及预报模型未考虑天气形势差异^[21, 40, 51-52]。

然而, 全球年均约有1600个TCC形成, 生成成为TC的比例却不到7%^[53]。甚至在西北太平洋海域, TCC生成成为TC的比率还有下降趋势^[32, 54], 说明TCC向TC转化的条件及原因有待于进一步探究。

3 热带气旋生成的物理机制

经典的TC生成理论, 即第二类条件不稳定理论 (CISK)^[55], 即在较强的条件不稳定大气中, 天气尺度扰动通过Ekman次级环流产生水汽辐合, 积云对流被组织并维持; 积云对流释放的潜热加强径向次级环流, 增强低层辐合, 从而使低空涡旋增强; 积云对流和涡旋扰动互为正反馈, 最终促使TC生成。

然而, 积云对流和涡旋扰动在实际大气中并不总能实现正反馈作用, 弱涡旋的边界层由于对流下沉补偿运动而冷却, 使得涡旋随着时间推移衰减, 只有当自由大气足够潮湿并补偿蒸发冷却下沉运动的负面作用时, 涡旋才能够发展^[56-57]。低空涡旋的大气饱和度较高, 是TC生成的关键条件^[58-61]。当中高空存在气旋性环流时, 气柱的动力拉伸作用促使气旋性环流下伸至低空或海表面, 埃克曼抽吸作用促使边界层顶的暖湿空气垂直向上输送, 激发中尺度对流活动, 使得热带地区大气增湿趋于饱和状态, 即风致表面热交换机制 (WISHE)^[62]。

WISHE机制需要事先存在初始扰动, 其形成的机理主要有两种观点: Top-down和Bottom-up途径。Top-down观点认为, 低层气旋性涡旋由已经存在的对流层中层中尺度涡旋发展而来。中尺度涡旋可以来自于多个对流涡旋系统的合并, 随着渗透厚度和涡旋水平尺度增加, 正涡度向上及向下传播, 从而加强低层涡旋旋转^[63-65]。此外, 层云降水中的蒸发冷却作用, 使得对流层上层为暖异常, 下层为冷异常, 促使层云降水的中层首先出现中尺度涡旋, 而冷异常的下层由于强迫下沉运动又有一个相对暖干的气团出现。中层中尺度涡旋逐渐向下延伸, 冷异常气团取代了中层的暖干气团, 此时对流层中下层都是冷异常气团, 向下延伸的中尺度涡旋促进海表通量输送, 并且冷异常气团

下沉有利于增加边界层的相当位温,促进对流重新发展^[66]。Bottom-up观点则认为,在中尺度涡旋中,存在着深厚对流运动的涡旋热塔(Vortical Hot Towers),在一定的环境风垂直切变强迫下,降水和上升运动的区域得以区分,使得持续加热的潜热不被冷却下沉作用抑制;此外,风垂直切变形成的水平涡管受涡旋热塔的强烈上升作用影响会出现拉伸的现象,导致包含正负涡度的垂直涡管出现,正涡度的涡管倾向和中层中尺度涡旋的正涡度合并,负涡度的涡管则逐渐消失,涡管的合并、低层辐合的产生以及涡旋热塔的对流加热作用促进了气旋性环流加强,最终生成TC^[67-71]。观测分析^[72-74]表明,在TC生成前期,系统主要是由层云降水维持,随着系统发展,逐渐转变为以深厚对流为主,说明Top-down和Bottom-up并不是非此即彼,这两个过程在TC生成的过程中均有可能存在,意味着详细考察生成过程中的三维结构演变依然十分必要。

4 有利于热带气旋生成的天气环流形势

4.1 西北太平洋海域

该海域影响TC生成的主要天气环流形势有:季风槽、热带波动、以及热带对流层上层槽。

4.1.1 季风槽

季风槽处于赤道一侧西风带和信风东风带之间,能有效地提供气旋性涡度、充沛水汽、以及较小的风垂直切变等环境条件,是最有利于TC生成的环流背景,易于形成初始扰动,即TC前兆扰动(tropical cyclogenesis precursors)^[10, 18, 75-78]。东伸的季风槽区具有低空正涡度气旋式环流、高空负涡度反气旋式环流和携带暖湿空气的深厚上升运动等特征,且风垂直切变低值区恰好横穿槽区,使得暖湿空气释放的热量容易集中在该区域,动力不稳定特征明显^[79-83]。

研究^[76]将季风槽细分为三类季风环流形势,分别是:(1)季风切变线,是季风槽内的水平气旋式切变线;(2)季风辐合区,是季风槽东端、赤道一侧西南气流和副热带高压脊南侧偏东信风的纬向分布辐合区;(3)季风涡旋,是季风槽发展过程中出现的天气尺度涡旋系统^[78, 84-86]。其中,有46%、18%和9%比例的西北太平洋TC生成分别受季风切变线、季风辐合区和季风涡旋影响^[87]。可见,多达70%以上的TC生成于季风槽内^[88-89]。

4.1.2 热带波动

TC前兆扰动主要来源于季风槽区,但也有部分初始扰动来自于季风槽以外。一般来说,这部分初始扰动通常与天气尺度热带波动环流形势有关,主要归类为东风波和TC罗斯贝波能量频散^[87]。

基于不同研究时段,与东风波和TC罗斯贝波能量频散两类天气环流形势有关的TC生成比例略有差异,如1984—1992年,分别有18%和8%的TC生成与两类天气环流型有关^[76],而在1979—2013年,则分别是14%和9%的比例^[87]。

当前,不少研究把东风波当成TD型扰动,为副热带高压南侧东风气流中产生的自东向西移动的天气尺度波状扰动,周期为3~9 d,波长2500~4000 km,深对流出现在环流中心附近,向西相速为9 m/s左右^[90-92]。由于大西洋并不存在类似于西太平洋的季风槽,所以大西洋中多数TC生成与东风波有直接联系,东风波在西太平洋和大西洋所扮演的角色并不相同^[93]。“袋鼠理论”(marsupial theory)被用来解释东风气流背景下的TC生成^[94-95],即天气环流形势影响的关键高度是在热带波动的临界层(波动传播速度与基本气流相当),相对于初始扰动的移动速度,这一区域环流移速相对静止、呈闭合气旋性旋转,有利于充沛水汽、MCS聚集、对流加热、正涡度增长在这一区域内不断积累,从而有利于初始扰动维持和加强,直到初始扰动从原波动中分离出来形成TC。

TC罗斯贝波能量频散是导致另一个TC生成的一个重要对流扰动来源^[96-97]。当TC向西北方向运动时, β 效应会使TC区域内的能量频散向外散播,在TC的东南方向形成反气旋性和气旋性环流交替出现的天气尺度波列^[4, 97-102]。

4.1.3 热带对流层上层槽

由于惯性不稳定度随高度递减,因而TC在生成阶段容易受到高空系统的外部强迫作用^[103]。影响TC生成最重要的高空环流是热带对流层上层槽(TUTT)^[32]。其槽线为东北—西南走向,以200 hPa高度最为明显。TUTT对TC生成的促进作用主要表现在三个方面:槽前西北气流叠加在低层西风槽的西南气流之上可减小风垂直切变;加强高空辐散促进上升运动带动地面扰动发展;以及建立有效的流出通道从而加强对流潜热释放^[104-105]。

研究^[106-107]认为,中纬度槽底南侵至副热带地区时会诱发TUTT内的冷心涡旋发展,并伴随中尺度对流发生发展,促使大气加热和增湿,可导致TC生成^[105, 107-112]。

近年来,研究^[32, 113]发现,近30年来,西北太平洋TUTT位置显著西伸,导致TC生成的年平均位置也随之出现西移。

4.2 南海海域

南海是西北太平洋最大的边缘海,影响TC生成的

主要天气环流形势为季风槽和热带波动。吕心艳等^[114]将西北太平洋地区的季风槽分为五个模态,即中国南海—西北太平洋型、西北太平洋型、中国南海型、反向型和夏末型,其中,影响我国的TC主要生成于前三个模态中,中国南海—西北太平洋型为TC群发的主要模态,可见季风槽是南海TC生成的重要环流型。南半球冬季冷空气爆发导致的越赤道“风涌”,以及MJO位相东移,常促使季风槽赤道一侧偏西气流加速^[4, 115-121],东风气流则在季风槽加速的偏西气流上方抬升,维持并调节季风辐合区中的湿对流过程,增强对流活动,有利于中尺度对流云团生成^[75, 80, 122-123]。

在一定的大气环流背景下,感热通量的空间分布和时间跃变可增强海气相互作用,对南海TC生成有重要影响^[124]。例如,在台风“蒲公英”(1005)初始涡旋生成阶段时,南海中东部盛行中国南海型季风槽环流,风应力造成的Ekman输送导致南海中东部较暖海水流向吕宋岛西侧,局地海温升高,自海洋向大气输送的感热通量增大,使得近地层气压下降,并叠加了来自于吕宋岛西侧的中低层涡度平流,强迫出上升运动,导致凝结潜热释放,使得最大加热中心出现在对流层中层,初始涡旋被有效而持续地加强。但是,来自于吕宋岛西侧的中低层涡度平流产生的物理机制尚未有定论,其可能与菲律宾群岛地形动力作用存在着联系。

5 地形动力作用对南海及其毗邻海域热带气旋生成的影响

目前,对于地形动力作用对于TC生成的直接影响研究并不多见,已有研究主要针对的是东太平洋和印度洋岛屿地形对于低纬度TC生成的影响。近赤道地区的苏门答腊岛为西北—东南走向的狭长山脉地形,研究^[125]指出,该狭长山脉地形容易产生波破碎、气流分流、背风涡旋等现象,增加大气不稳定性;在苏门答腊岛的东、西两端地形可诱生脱体涡(shed vortices),小部分脱体涡在有利的环境背景条件下,涡旋不断增长并最终生成TC。然而,上述研究结果只是基于较高空间分辨率的格点再分析资料进行分析,尚未使用高时空分辨率的卫星观测进行验证。

研究对地形动力作用做了理论分析和理想模拟试验,并指出,无量纲Froude数,是研究大气层结流体在接近和越过地形时激发绕流和背风涡旋(Lee vortices)的最重要参数^[126-129]。在Froude数较小的理想状况下(即 U/Nh 小于1, U 为背景风速, N 为层结稳定度Brunt-Väisälä频率,在对流层大气中其典型值为0.01, h 为地形高度),低空气流往往被地形阻塞,在

迎风坡产生地形强迫绕流和辐合性抬升,触发对流;在背风坡则由于过山背风涡旋、以及迎风坡的绕流辐合而产生垂直运动,也能触发对流^[130]。为了定性分析地形对于理想气流强迫是绕山为主还是爬山为主,引入了参数无量纲山高 $H=Nh/U$,即Froude数的倒数,也就是存在一个临界高度 H_c ,当 $H>H_c$ 时地形流以绕山为主,当 $H<H_c$ 时地形流主要以爬山为主,通常 $H_c=1.2$ ^[131]。我国台湾岛中央山脉是南方典型的南北走向山地,对热带系统以及局地中尺度对流具有十分重要的影响作用,低空气流经过台湾中央山脉时偏转十分明显,以地形绕流为主要特征^[128]。

此外,研究^[132-133]发现,当东风波逐渐移动至加勒比海中部时,其低空东风气流受到美洲中部山区地形阻滞,风向偏转为东北风并沿着山区地形吹向山区南侧,导致海滨急流、以及山区南侧和西侧的切变涡度大值区出现,东北风与热带辐合带(ITCZ)西南气流交汇形成闭合环流,导致飓风“Guillermo”(1991)形成。大气湿度敏感性试验^[132]表明,即便大气层结稳定度(N)不是影响地形绕流强度的主要因子,但在干性大气背景条件下,低空东风气流受到美洲中部山区地形阻滞时并未出现东北风绕流。类似地,研究指出地形流动特征在干、湿大气情况下有着明显的不同,较高的初始条件不稳定气流更容易受到地形触发而产生对流单体,从而使得流场形式无法体现地形流的特征^[134]。

研究表明,菲律宾吕宋岛西海岸、具有日变化特征的中尺度热对流云团发展演变,对于台风“米克拉”(0816)生成具有重要作用^[4],并进行了有无吕宋岛陆地下垫面的敏感性试验,结果表明,将原有的吕宋岛陆地下垫面替换为海洋下垫面之后,吕宋岛西海岸原先存在的热对流云团消失,处于西风气流中的对流云团未能有效汇集并形成中层涡旋,导致TC无法生成。但是,菲律宾群岛与我国台湾岛地形相似,以南北走向山地为主,地形绕流特征应当较为明显,仅仅进行有无陆地的敏感性试验,不足以圆满解释菲律宾群岛地形对于TC生成的影响机理。

值得注意的是,菲律宾群岛地形对于台风“米克拉”(0816)生成的影响不是孤立的,其前提是在菲律宾群岛附近事先存在TC初始扰动,以及有利的环流形势演变,“米克拉”生成的初始扰动来自于菲律宾群岛周边活动TC罗斯贝波能量频散,此外,MJO位相东移则加强了吕宋岛西侧的南海海域西南低空气流。

上述分析表明,评估菲律宾群岛地形对于TC生成的影响,不仅需要考察地形高度、大气背景风场和湿

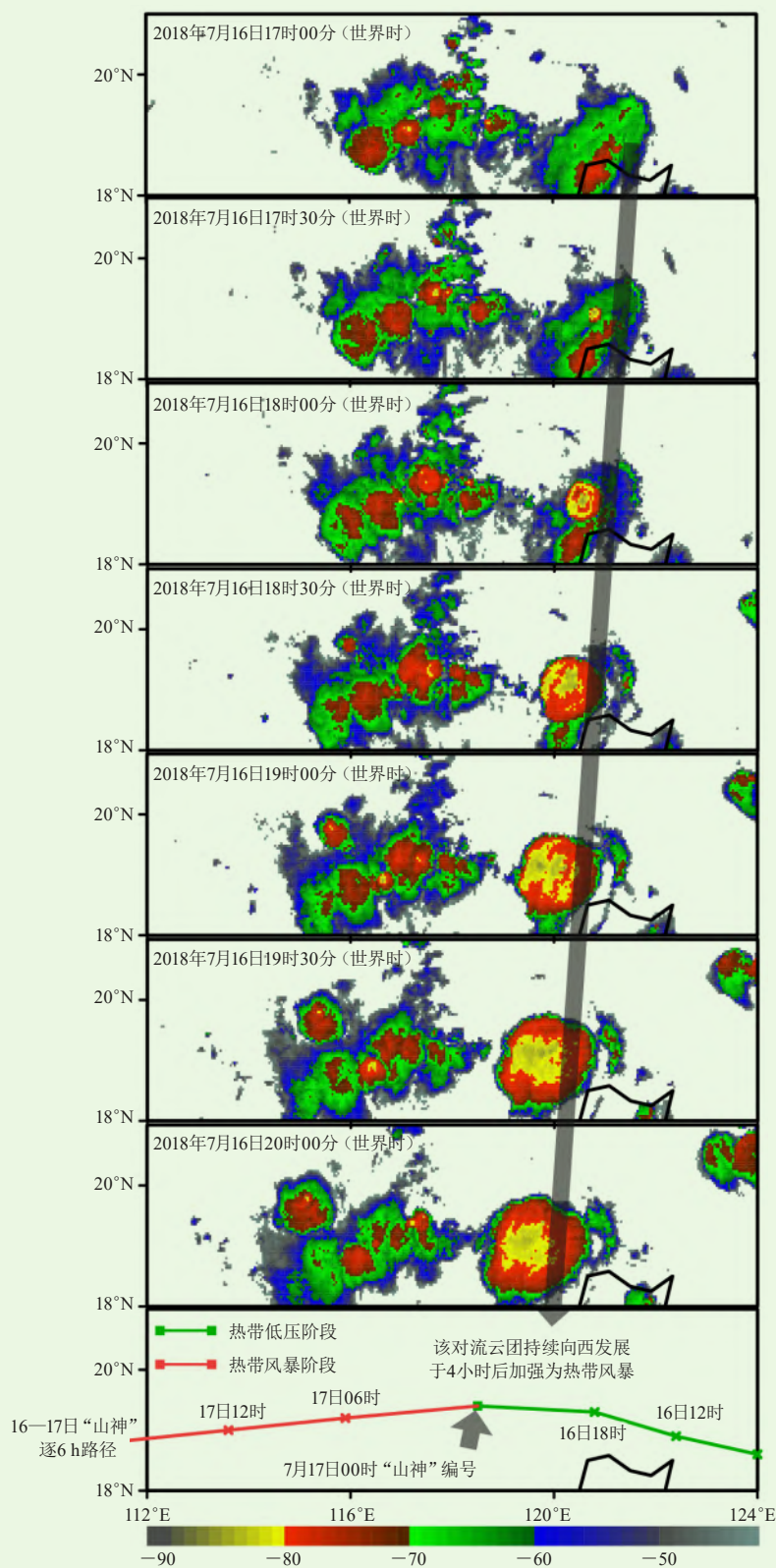


图1 台风“山神”(1809)临近编号前的逐半小时葵花-8静止卫星红外通道亮温观测(填色,单位:°C)和逐6h最佳路径示意图

Fig. 1 Himawari-8 satellite infrared images in every half-hour from 1700 UTC 16 July 2018 to from 2000 UTC 16 July 2018, and the best track every six hours for pre-genesis stage of Typhoon Son-Tinh (1809)

度等条件的相对重要性，还需要结合有利的天气环流形势背景进行讨论。

在菲律宾群岛附近海域，时常有爆发性发展的对流云团突然出现进而导致TC生成的情况发生，例如1809号台风“山神”（图1）。在“山神”编号以前12 h（2018年7月16日12时，世界时，下同），处于季风辐合区内、较为弱小的热带低压环流，正逼近吕宋岛北部（图2a~2b）。5 h以后（7月16日17时00分），位于菲律宾吕宋岛北部沿海的对流云团依然较弱，但此后1 h，热带低压中心附近对流云团明显发展（-80℃以下亮温区域明显扩大）（图1）。该对流云团此后数小时持续发展并偏西方向移动，于2018年7月17日00时编号命名为台风“山神”。

经初步分析，发现与“山神”编号直接关联的对

流云团明显发展，可能与吕宋岛西海岸、中科迪勒拉山脉（Cordillera Central）的地形强迫有关（图2和图3）。2018年7月16日15时（图2b），热带低压中心进一步逼近吕宋岛东北部，中科迪勒拉山脉迎风坡绕流与热带低压本体气流交汇辐合于吕宋岛西北部，热带低压中心西南侧涡度增长。2018年7月16日18时（图2c），热带低压中心逐步移过吕宋岛西北部，有气旋性过山绕流，背风坡一侧涡度增长，并汇入热带低压本体。明显地，地形绕流作用所导致的热带低压环流涡量增加，与“山神”生成编号直接关联的对流云团明显发展有很好的地理和时间对应关系。也就是说，季风辐合区提供了大涡度、小切变等有利背景条件，但地形诱生的对流则直接导致热带低压发展为台风“山神”。

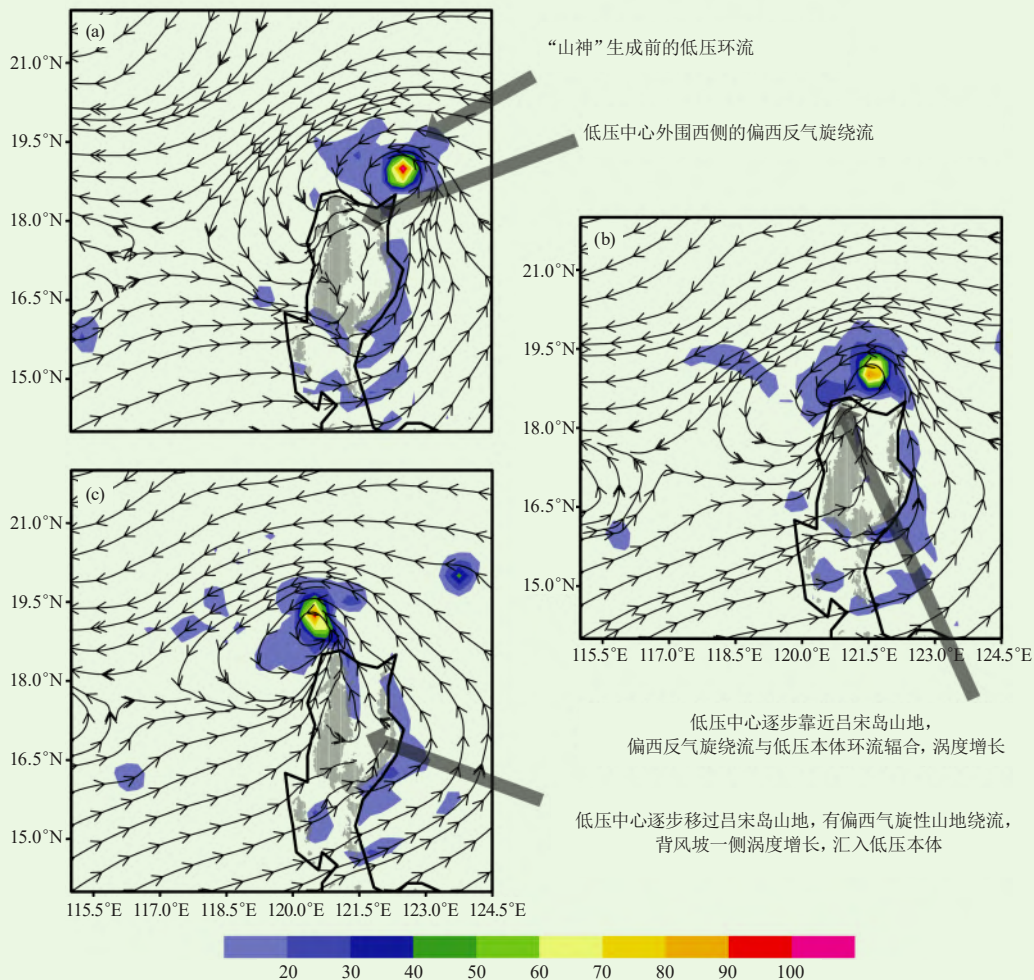


图2 台风“山神”（1809）临近编号以前的950 hPa高度风场环流（流线）和相对涡度（彩色填色，单位： 10^{-5} s^{-1} ）（均为ECMWF再分析资料绘制，空间分辨率为 0.25° ），以及大于500 m高度的地形（灰色填色）

（a）2018年7月16日12时；（b）2018年7月16日15时；（c）2018年7月16日18时

Fig. 2 Low level (950 hPa) circulation (wind barb) and vorticity (color shaded, 10^{-5} s^{-1}) by ECMWF re-analysis for pre-genesis stage of Typhoon Son-Tinh (1809) (Terrain height above 500 m is shaded by gray)

(a) 1200 UTC 16 July 2018, (b) 1500 UTC 16 July 2018, (c) 1800 UTC 16 July 2018

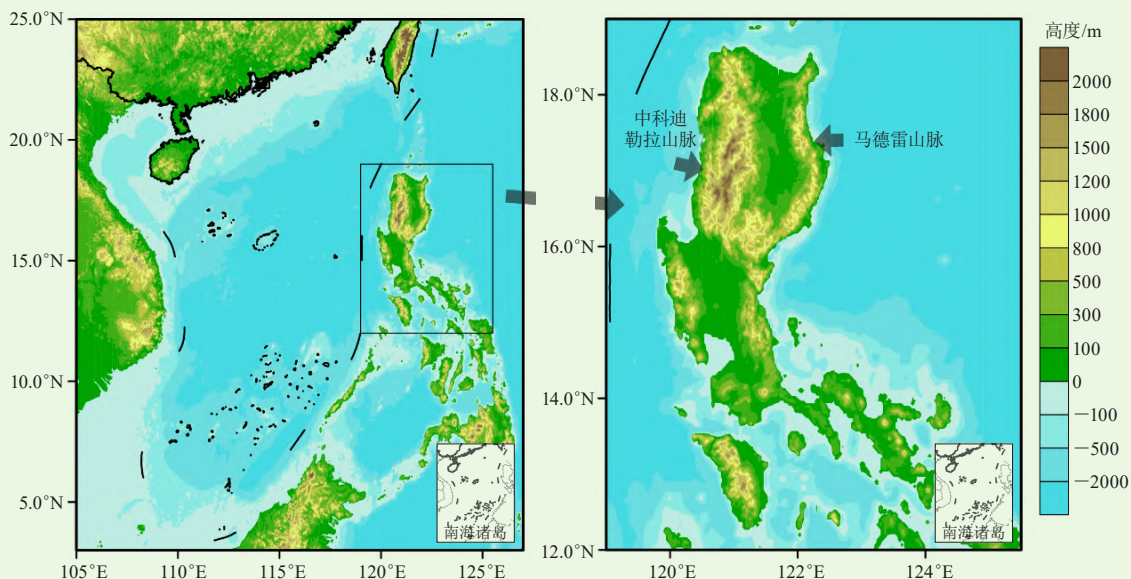


图3 菲律宾群岛及周边区域地形示意图 (填色为地形高度)
Fig. 3 Map of the Philippine Islands and surrounding areas (terrain height in shaded)

6 结论

已有的TC生成研究主要关注两大条件：环境背景和动力-热力学过程^[62]，环境外部强迫和内部物理过程相辅相成最终促成低空中尺度涡旋形成及其涡量增长，从而导致TC生成^[135]。

在低纬海区，合适的海洋热力状况、中层大气湿度、大气层结不稳定度等季节性环境背景为热带云团(TCC)形成提供有利条件。TCC通常是TC生成的初始胚胎，全球年均约有1600个TCC形成，但生成成为TC的TCC占比却不到7%^[53]。甚至在南海以及毗邻西北太平洋海域，TCC生成成为TC的比率还有下降趋势^[32,54]，说明季节因子能够为TCC形成提供有利环境条件，但难以与TC生成的物理机制和天气尺度过程方面建立直接的联系。

广泛被接受的TC生成物理机制主要有第二类条件不稳定理论(CISK)、以及风致表面热交换机制(WISHE)。无论是CISK还是WISHE解释TC生成，其前提是需要开阔洋面上事先存在着初始扰动。在南海及毗邻海域，有利于形成初始扰动的低空环流天气形势主要有季风槽和热带波动。研究发现，在台风“蒲公英”(1005)生成早期，出现了中国南海型季风槽环流与吕宋岛西侧中低层涡度平流相叠加促进涡旋发展的情况，说明吕宋岛陆地对低层东风气流起到了强迫作用^[124]。另外，研究分析了菲律宾吕宋海陆分布对流日变化以及低空西南气流加强对于台风“米克拉”(0816)生成的作用^[4, 136]，而对于菲律宾群岛地形动力强迫作用与TC生成的关系研究尚未见诸报道，

其原因可能在于过去缺少高时空分辨率卫星资料加密连续监测，以及实际个例的追踪分析。

经初步分析，发现台风“山神”(1809)的生成与菲律宾群岛地形诱发对流关系密切。菲律宾群岛附近是重要的TC生成源地，TC生成以后对我国潜在影响力较大，目前，尚不清楚菲律宾群岛山地触发对流直接导致TC生成的确切数量，对应有哪些环流形势背景、对流云团形态及其演变、以及相应的中小尺度关键物理过程。需更多个个例进行深入归类研究。该问题的解决不仅能够丰富我们对TC生成的认识，同时也能对我国TC生成预报与精确预警提供理论依据和新的思路，具有明确的应用前景。

参考文献

- [1] 张娇艳, 吴立广, 张强. 全球变暖背景下我国热带气旋灾害趋势分析. 热带气象学报, 2011, 27(4): 442-454.
- [2] Sharmila S, Walsh K J E. Impact of large-scale dynamic versus thermodynamic climate conditions on contrasting tropical cyclone genesis frequency. Journal of Climate, 2017, 30(22): 8865-8883.
- [3] 张丽杰, 朱慧云. 影响中国的热带气旋生成源地研究. 热带气象学报, 2018, 34(3): 289-296.
- [4] Park M S, Kim H S, Ho C H, et al. Tropical cyclone Mekkhala's (2008) formation over the South China Sea: Mesoscale, synoptic-scale, and large-scale contributions. Monthly Weather Review, 2014, 143(1): 88-110.
- [5] Parker C L, Lynch A H, Mooney P A. Factors affecting the simulated trajectory and intensification of tropical cyclone Yasi (2011). Atmospheric Research, 2017, 194: 27-42.
- [6] Tang B H, Fang J. Synoptic, mesoscale, and convective scale aspects of cyclogenesis. IWTC-9 Working Group. IWTC-9, 2018: 1-23.
- [7] 张庆红, 郭春蕊. 热带气旋生成机制的研究进展. 海洋学报(中文版), 2008, 30(4): 1-11.
- [8] 张文龙, 崔晓鹏. 热带气旋生成问题研究综述. 热带气象学报, 2013, 29(2): 337-346.
- [9] Kerns B W, Chen S S. Cloud clusters and tropical cyclogenesis: Developing and nondeveloping systems and their large-scale

- environment. *Monthly Weather Review*, 2013, 141(1): 192-210.
- [10] Briegel L M, Frank W M. Large-scale influences on tropical cyclogenesis in the Western North Pacific. *Monthly Weather Review*, 1997, 125(7): 1397-1413.
- [11] Emanuel K A. Tropical cyclones. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2003, 31(1): 75-104.
- [12] Barcikowska M, Feser F, von Storch H. Usability of best track data in climate statistics in the Western North Pacific. *Monthly Weather Review*, 2012, 140(9): 2818-2830.
- [13] Knapp K R, Knaff J A, Sampson C R, et al. A pressure-based analysis of the historical Western North Pacific tropical cyclone intensity record. *Monthly Weather Review*, 2013, 141(8): 2611-2631.
- [14] Knapp K R, Kruk M C. Quantifying interagency differences in tropical cyclone best-track wind speed estimates. *Monthly Weather Review*, 2010, 138(4): 1459-1473.
- [15] 余晖, 胡春梅, 蒋乐怡. 热带气旋强度资料的差异性分析. *气象学报*, 2006, 64(3): 357-363.
- [16] 邹燕, 赵平. 几种台风资料的对比及台风年鉴数据的订正. *热带气象学报*, 2009, 25(3): 295-299.
- [17] Gray W M. Tropical cyclone genesis in the Western North Pacific. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 1977, 55(5): 465-482.
- [18] Gray W M. The formation of tropical cyclones. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 1998, 67(1): 37-69.
- [19] Ryan B F, Watterson I G, Evans J L. Tropical cyclone frequencies inferred from Gray's yearly genesis parameter: Validation of GCM tropical climates. *Geophysical Research Letters*, 1992, 19(18): 1831-1834.
- [20] Gray W M, Landsea C W, Mielke P W, et al. Predicting Atlantic Basin seasonal tropical cyclone activity by 1 June. *Weather and Forecasting*, 1994, 9(1): 103-115.
- [21] DeMaria M, Knaff J A, Connell B H. A tropical cyclone genesis parameter for the tropical Atlantic. *Weather and Forecasting*, 2001, 16(2): 219-233.
- [22] Gray W M. Global view of the origin of tropical disturbances and storms. *Monthly Weather Review*, 1968, 96(10): 669-700.
- [23] Wang Y, Song J, Wu R. A new insight into the contribution of environmental conditions to tropical cyclone activities. *Acta Meteorologica Sinica*, 2013, 27(3): 344-355.
- [24] Camargo S J, Emanuel K A, Sobel A H. Use of a genesis potential index to diagnose ENSO effects on tropical cyclone genesis. *Journal of Climate*, 2007, 20(19): 4819-4834.
- [25] Bruyère C L, Holland G J, Towler E. Investigating the use of a genesis potential index for tropical cyclones in the North Atlantic Basin. *Journal of Climate*, 2012, 25(24): 8611-8626.
- [26] Tippett M K, Camargo S J, Sobel A H. A poisson regression index for tropical cyclone genesis and the role of large-scale vorticity in genesis. *Journal of Climate*, 2011, 24(9): 2335-2357.
- [27] 王会军. 基于前期观测降水和500 hPa高度场的西北太平洋热带风暴生成频数的新预测方案. *气象学报*, 2012, 70(2): 165-173.
- [28] Wang B, Chan J C L. How strong ENSO events affect tropical storm activity over the Western North Pacific. *Journal of Climate*, 2002, 15(13): 1643-1658.
- [29] Chan J C L. Tropical cyclone activity over the Western North Pacific associated with El Niño and La Niña events. *Journal of Climate*, 2000, 13(16): 2960-2972.
- [30] Zhan R, Wang Y, Lei X. Contributions of ENSO and East Indian Ocean SSTA to the interannual variability of Northwest Pacific tropical cyclone frequency. *Journal of Climate*, 2011, 24(2): 509-521.
- [31] Li X, Yang S, Wang H, et al. A dynamical-statistical forecast model for the annual frequency of western Pacific tropical cyclones based on the NCEP Climate Forecast System version 2. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013, 118(21): 12,12-61,74.
- [32] Wang C, Wu L. Interannual shift of the tropical upper-tropospheric trough and its influence on tropical cyclone formation over the Western North Pacific. *Journal of Climate*, 2016, 29(11): 4203-4211.
- [33] Zhao J, Zhan R, Wang Y, et al. Intensified interannual relationship between tropical cyclone genesis frequency over the Northwest Pacific and the SST gradient between the Southwest Pacific and the Western Pacific warm pool since the Mid-1970s. *Journal of Climate*, 2016, 29(10): 3811-3830.
- [34] Emanuel K A. Tropical cyclone activity downscaled from NOAA-CIRES reanalysis, 1908-1958. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 2010, 2, 1, doi:10.3894/JAMES.2010.2.1.
- [35] Wang B, Moon J Y. An anomalous genesis potential index for MJO modulation of tropical cyclones. *Journal of Climate*, 2017, 30(11): 4021-4035.
- [36] Zhao H, Yoshida R, Raga G B. Impact of the Madden-Julian Oscillation on Western North Pacific tropical cyclogenesis associated with large-scale patterns. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2015, 54(7): 1413-1429.
- [37] 赵军平, 吴立广, 赵海坤. 西北太平洋热带气旋潜在生成指数的改进. *气象科学*, 2012, 32(6): 591-599.
- [38] 邓诗茹, 吴立广, 王瑞芳等. 多种再分析资料中热带气旋潜在生成指数分析. *气象科学*, 2014, 34(3): 243-251.
- [39] Mapes B E, Houze R A. Cloud clusters and superclusters over the oceanic warm pool. *Monthly Weather Review*, 1993, 121(5): 1398-1416.
- [40] Hennon C C, Marzban C, Hobgood J S. Improving tropical cyclogenesis statistical model forecasts through the application of a neural network classifier. *Weather and Forecasting*, 2005, 20(6): 1073-1083.
- [41] Maddox R A. Satellite depiction of the life cycle of a mesoscale convective complex. *Monthly Weather Review*, 1981, 109(7): 1583-1586.
- [42] Houze R A. Cloud clusters and large-scale vertical motions in the tropics. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 1982, 60(1): 396-410.
- [43] McBride J L, Zehr R. Observational analysis of tropical cyclone formation. Part II: Comparison of non-developing versus developing systems. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1981, 38(6): 1132-1151.
- [44] Hennon C C, Helms C N, Knapp K R, et al. An objective algorithm for detecting and tracking tropical cloud clusters: Implications for tropical cyclogenesis prediction. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2011, 28(8): 1007-1018.
- [45] Dvorak V F. Tropical cyclone intensity analysis using satellite data. US Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, National Environmental Satellite, Data, and Information Service, 1984.
- [46] Fetanat G, Homaifar A, Knapp K R. Objective tropical cyclone intensity estimation using analogs of spatial features in satellite data. *Weather and Forecasting*, 2013, 28(6): 1446-1459.
- [47] Pineros M F, Ritchie E A, Tyo J S. Detecting tropical cyclone genesis from remotely sensed infrared image Data. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2010, 7(4): 826-830.
- [48] Cossuth J H, Knabb R D, Brown D P, et al. Tropical cyclone formation guidance using Pregenesis Dvorak climatology. Part I: Operational forecasting and predictive potential. *Weather and Forecasting*, 2012, 28(1): 100-118.
- [49] Wood K M, Rodríguez-Herrera O G, Ritchie E A, et al. Tropical cyclogenesis detection in the North Pacific using the deviation angle variance technique. *Weather and Forecasting*, 2015, 30(6): 1663-1672.
- [50] Yamaguchi M, Koide N. Tropical cyclone genesis guidance using the early stage Dvorak analysis and global ensembles. *Weather and Forecasting*, 2017, 32(6): 2133-2141.
- [51] Chand S S, Walsh K J E. Forecasting tropical cyclone formation in the Fiji region: A probit regression approach using Bayesian fitting. *Weather and Forecasting*, 2011, 26(2): 150-165.
- [52] Hennon C C, Hobgood J S. Forecasting tropical cyclogenesis over the Atlantic Basin using large-scale data. *Monthly Weather Review*, 2003, 131(12): 2927-2940.
- [53] Hennon C C, Papin P P, Zarzar C M, et al. Tropical cloud cluster climatology, variability, and genesis productivity. *Journal of Climate*, 2013, 26(10): 3046-3066.
- [54] Zhao H, Chen S, Raga G B, et al. Recent decrease in genesis productivity of tropical cloud clusters over the Western North Pacific. *Climate Dynamics*, 2018, 52: 5819-5831.
- [55] Charney J G, Eliassen A. On the growth of the hurricane depression. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1964, 21(1): 68-75.
- [56] Rotunno R, Emanuel K A. An air-sea interaction theory for

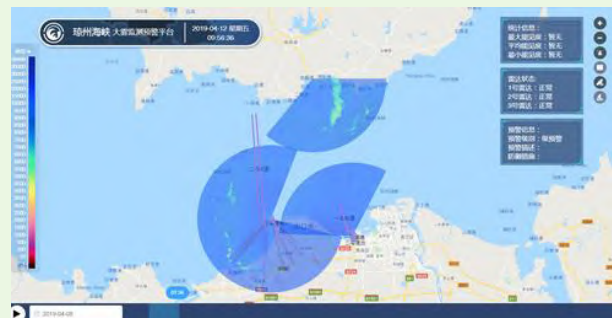
- tropical cyclones. Part II: Evolutionary study using a nonhydrostatic axisymmetric numerical model. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1987, 44(3): 542-561.
- [57] Emanuel K A. The finite-amplitude nature of tropical cyclogenesis. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1989, 46(22): 3431-3456.
- [58] Nolan D S. What is the trigger for tropical cyclogenesis? *Australian Meteorological Magazine*, 2007, 56: 241-266.
- [59] Rappin E D, Nolan D S, Emanuel K A. Thermodynamic control of tropical cyclogenesis in environments of radiative-convective equilibrium with shear. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2010, 136(653): 1954-1971.
- [60] Sippel J A, Zhang F A. Probabilistic Analysis of the dynamics and predictability of tropical cyclogenesis. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2008, 65(11): 3440-3459.
- [61] Kilroy G, Smith R K, Montgomery M T. A unified view of tropical cyclogenesis and intensification. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2017, 143(702): 450-462.
- [62] Emanuel K A. 100 years of progress in tropical cyclone research. *Meteorological Monographs*, 2018, 59: 15.1-15.68.
- [63] Ritchie E A, Holland G J. Scale interactions during the formation of typhoon Irving. *Monthly Weather Review*, 1997, 125(7): 1377-1396.
- [64] Simpson J, Ritchie E, Holland G J, et al. Mesoscale interactions in tropical cyclone genesis. *Monthly Weather Review*, 1997, 125(10): 2643-2661.
- [65] 郭春蕊, 张庆红. 台风榴莲(2001)生成初期中尺度涡旋合并过程研究. *气象学报*, 2012, 70(1): 1-14.
- [66] Bister M, Emanuel K A. The genesis of hurricane Guillermo: TEXMEX analyses and a modeling study. *Monthly Weather Review*, 1997, 125(10): 2662-2682.
- [67] Hendricks E A, Montgomery M T, Davis C A. The role of "Vortical" hot towers in the formation of tropical cyclone Diana (1984). *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2004, 61(11): 1209-1232.
- [68] Houze R A, Lee W-C, Bell M M. Convective contribution to the genesis of hurricane Ophelia (2005). *Monthly Weather Review*, 2009, 137(9): 2778-2800.
- [69] Montgomery M T, Nicholls M E, Cram T A, et al. A vortical hot tower route to tropical cyclogenesis. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2006, 63(1): 355-386.
- [70] Sippel J A, Nielsen-Gammon J W, Allen S E. The multiple-vortex nature of tropical cyclogenesis. *Monthly Weather Review*, 2006, 134(7): 1796-1814.
- [71] Wang Y, Huang Y, Cui X. Impact of mid- and upper-level dry air on tropical cyclone genesis and intensification: A modeling study of Dorian (2001). *Advances in Atmospheric Sciences*, 2018, 35(12): 1505-1521.
- [72] Raymond D J, Gjorgjievska S, Sessions S, et al. Tropical cyclogenesis and mid-level vorticity. *Australian Meteorological and Oceanographic Journal*, 2014, 64: 11-25.
- [73] Raymond D J, López Carrillo C. The vorticity budget of developing typhoon Nuri (2008). *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2011, 11(1): 147-163.
- [74] Raymond D J, Sessions S L. Evolution of convection during tropical cyclogenesis. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34, L06811.
- [75] 张文龙, 张大林, 王昂生, 等. 台风榴莲(2001)在季风槽中生成的机制探讨. *气象学报*, 2009, 67(5): 811-827.
- [76] Ritchie E A, Holland G J. Large-scale patterns associated with tropical cyclogenesis in the Western Pacific. *Monthly Weather Review*, 1999, 127(9): 2027-2043.
- [77] Liang J, Wu L, Zong H. Idealized numerical simulations of tropical cyclone formation associated with monsoon gyres. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2014, 31(2): 305-315.
- [78] Wu L, Zong H, Liang J. Observational analysis of tropical cyclone formation associated with monsoon gyres. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2013, 70(4): 1023-1034.
- [79] Ferreira R N, Schubert W H. Barotropic aspects of ITCZ breakdown. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1997, 54(2): 261-285.
- [80] Guo B, Ge X. Monsoon trough influences on multiple tropical cyclones events in the western North Pacific. *Atmospheric Science Letters*, 2018, 19(9): e851.
- [81] 段晶晶, 吴立广. 季风槽中热带气旋生成初期扰动的扰动动能收支分析. *气象科学*, 2016, 36(2): 141-148.
- [82] 张宏杰, 武亮, 黄荣辉. 两类El Niño型对西北太平洋季风槽及热带气旋生成的可能影响. *气候与环境研究*, 2018, 23(2): 150-160.
- [83] 张翔, 武亮, 皇甫静亮, 等. 西北太平洋季风槽的季节和年际变化特征及其与热带气旋生成大尺度环境因子的联系. *气候与环境研究*, 2017, 22(4): 418-434.
- [84] Lander M A. Description of a monsoon gyre and its effects on the tropical cyclones in the Western North Pacific during August 1991. *Weather and Forecasting*, 1994, 9(4): 640-654.
- [85] Wu L, Wen Z, Huang R, et al. Possible linkage between the monsoon trough variability and the tropical cyclone activity over the Western North Pacific. *Monthly Weather Review*, 2011, 140(1): 140-150.
- [86] 徐梦婷, 周顺武, 葛旭阳. 季风涡旋对热带气旋生成影响的理想试验研究. *气象学报*, 2016, 74(5): 733-743.
- [87] Fudeyasu H, Yoshida R. Western North Pacific tropical cyclone characteristics stratified by genesis environment. *Monthly Weather Review*, 2018, 146(2): 435-446.
- [88] 高建芸, 张秀芝, 江志红等. 西北太平洋季风槽异常与热带气旋活动. *海洋学报(中文版)*, 2008, 30(3): 35-47.
- [89] Chen T C, Wang S Y, Yen M C, et al. Are tropical cyclones less effectively formed by easterly waves in the Western North Pacific than in the North Atlantic? *Monthly Weather Review*, 2008, 136(11): 4527-4540.
- [90] Reed R J, Recker E E. Structure and properties of synoptic-scale wave disturbances in the equatorial Western Pacific. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1971, 28(7): 1117-1133.
- [91] Takayabu Y N, Nitta T. 3-5 day-period disturbances coupled with convection over the tropical Pacific Ocean. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 1993, 71(2): 221-246.
- [92] Dunkerton T J, Baldwin M P. Observation of 3-6-Day meridional wind oscillations over the Tropical Pacific, 1973-1992: Horizontal structure and propagation. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1995, 52(10): 1585-1601.
- [93] Landsea C W. A climatology of intense (or major) Atlantic hurricanes. *Monthly Weather Review*, 1993, 121(6): 1703-1713.
- [94] Dunkerton T J, Montgomery M T, Wang Z. Tropical cyclogenesis in a tropical wave critical layer: easterly waves. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2009, 9(15): 5587-5646.
- [95] Wang Z. What is the key feature of convection leading up to tropical cyclone formation? *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2018, 75(5): 1609-1629.
- [96] Holland G J. Scale interaction in the Western Pacific monsoon. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 1995, 56(1): 57-79.
- [97] Li T, Fu B. Tropical Cyclogenesis Associated with Rossby wave energy dispersion of a preexisting typhoon. Part I: Satellite data analyses. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2006, 63(5): 1377-1389.
- [98] Chan J C L, Williams R T. Analytical and numerical studies of the beta-effect in tropical cyclone motion. Part I: Zero mean flow. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1987, 44(9): 1257-1265.
- [99] Luo Z. Effect of energy dispersion of the structure and motion of tropical cyclone. *Acta Meteorologica Sinica*, 1994, 8(1): 51-59.
- [100] Ge X, Li T, Zhou X. Tropical cyclone energy dispersion under vertical shears. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34, L23807.
- [101] Ge X, Li T, Wang Y, et al. Tropical cyclone energy dispersion in a three-dimensional primitive equation model: Upper-tropospheric influence. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2008, 65(7): 2272-2289.
- [102] Yoshida R, Ishikawa H. Environmental factors contributing to tropical cyclone genesis over the Western North Pacific. *Monthly Weather Review*, 2013, 141(2): 451-467.
- [103] Holland G J, Merrill R T. On the dynamics of tropical cyclone structural changes. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1984, 110(465): 723-745.
- [104] Sadler J C. A role of the tropical upper tropospheric trough in early season typhoon development. *Monthly Weather Review*, 1976, 104(10): 1266-1278.

- [105] Sadler J C. Mid-season typhoon development and intensity changes and the tropical upper tropospheric trough. *Monthly Weather Review*, 1978, 106(8): 1137-1152.
- [106] Thorncroft C D, Hoskins B J, McIntyre M E. Two paradigms of baroclinic-wave life-cycle behaviour. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1993, 119(509): 17-55.
- [107] Patla J E, Stevens D, Barnes G M. A conceptual model for the influence of TUTT cells on tropical cyclone motion in the Northwest Pacific Ocean. *Weather and Forecasting*, 2009, 24(5): 1215-1235.
- [108] Montgomery M T, Farrell B F. Tropical cyclone formation. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1993, 50(2): 285-310.
- [109] Tai-Jen Chen G, Chou L-F. An Investigation of cold vortices in the upper troposphere over the Western North Pacific during the warm season. *Monthly Weather Review*, 1994, 122(7): 1436-1448.
- [110] Fitzpatrick P J, Knaff J A, Landsea C W, et al. Documentation of a systematic bias in the aviation model's forecast of the Atlantic tropical upper-tropospheric trough: Implications for tropical cyclone forecasting. *Weather and Forecasting*, 1995, 10(2): 433-446.
- [111] Wang Y M, Chen T J, Wang C C, et al. A case study of the cutoff process and latent heating effect in an upper-level cold-core low during the Mei-Yu Season in East Asia. *Monthly Weather Review*, 2012, 140(6): 1725-1747.
- [112] Lander M A. An exploratory analysis of the relationship between tropical storm formation in the Western North Pacific and ENSO. *Monthly Weather Review*, 1994, 122(4): 636-651.
- [113] Wang Y, Rao Y, Tan Z M, et al. A statistical analysis of the effects of vertical wind shear on tropical cyclone intensity change over the Western North Pacific. *Monthly Weather Review*, 2015, 143(9): 3434-3453.
- [114] 吕心艳, 端义宏. 季风槽内热带气旋生成的基本特征分析. *气象学报*, 2011, 69(6): 990-1000.
- [115] Love G. Cross-equatorial influence of winter hemisphere subtropical cold surges. *Monthly Weather Review*, 1985, 113(9): 1487-1498.
- [116] Yang Q, Majda A J, Khouider B. ITCZ breakdown and its upscale impact on the planetary-scale circulation over the Eastern Pacific. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2017, 74(12): 4023-4045.
- [117] Xu Y. The genesis of tropical cyclone Bilis (2000) associated with cross-equatorial surges. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2011, 28(3): 665-681.
- [118] 冯涛, 沈新勇, 黄荣辉, 等. 热带西太平洋越赤道气流的年际变化对西北太平洋热带气旋生成的影响. *热带气象学报*, 2014, 30(1): 11-22.
- [119] 张玲, 智协飞. 南海北部冷涌及其环流特征. *大气科学学报*, 2014, 37(1): 28-37.
- [120] 陈笑晨, 智协飞, 赵欢, 等. 澳大利亚冷空气活动对西北太平洋热带气旋生成的影响. *大气科学学报*, 2017, 40(1): 61-70.
- [121] 孙淑清, 刘炯, 张庆云. 南半球环流异常对夏季西太平洋热带气旋生成的影响及其机理. *大气科学*, 2007, 31(6): 1189-1200.
- [122] Guo Y P, Tan Z M. Impacts of the boreal spring Indo-Pacific warm pool Hadley circulation on tropical cyclone activity over the Western North Pacific. *Journal of Climate*, 2018, 31(4): 1361-1375.
- [123] 叶日新, 吴立广. 1998—2009年间台风不活跃期间热带云团活动分析. *气象科学*, 2016, 36(3): 291-300.
- [124] 郝赛, 毛江玉, 吴国雄. 南海海气相互作用对热带气旋生成的影响——一个例诊断. *热带气象学报*, 2013, 29(5): 5-8.
- [125] Fine C M, Johnson R H, Ciesielski P E, et al. The role of topographically induced vortices in tropical cyclone formation over the Indian Ocean. *Monthly Weather Review*, 2016, 144(12): 4827-4847.
- [126] Smolarkiewicz P K, Rotunno R. Low Froude number flow past three-dimensional obstacles. Part I: Baroclinically generated Lee vortices. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1989, 46(8): 1154-1164.
- [127] Smolarkiewicz P K, Rotunno R. Low Froude number flow past three-dimensional obstacles. Part II: Upwind flow reversal zone. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1990, 47(12): 1498-1511.
- [128] 王其伟, 谈哲敏. 我国主要地形上空理想定常流的流域分界分析. *地球物理学报*, 2006, 49(4): 971-982.
- [129] 高守亭, 平凡. 大地形强迫下背风涡旋的实验研究. *科学通报*, 2004, 49(23): 2485-2494.
- [130] 黄倩, 田文寿, 王文, 等. 复杂山区上空垂直速度场和热力对流活动的理想数值模拟. *气象学报*, 2007, 65(3): 341-352.
- [131] Smith R B, Grønås S. Stagnation points and bifurcation in 3-D mountain airflow. *Tellus A*, 1993, 45(1): 28-43.
- [132] Farfán L M, Zehnder J A. Orographic influence on the synoptic-scale circulations associated with the genesis of hurricane Guillermo (1991). *Monthly Weather Review*, 1997, 125(10): 2683-2698.
- [133] Zehnder J A, Powell D M, Ropp D L. The interaction of easterly waves, orography, and the intertropical convergence zone in the genesis of Eastern Pacific tropical cyclones. *Monthly Weather Review*, 1999, 127(7): 1566-1585.
- [134] 董继立, 谈哲敏. 条件不稳定湿大气中三维理想地形上空对流的动力学特征. *气象学报*, 2008, 66(3): 293-309.
- [135] Tang B H. Coupled Dynamic-thermodynamic forcings during tropical cyclogenesis. Part I: Diagnostic framework. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2017, 74(7): 2269-2278.
- [136] Park M S, Lee M I, Kim D, et al. Land-based convection effects on formation of tropical cyclone Mekkhala (2008). *Monthly Weather Review*, 2017, 145(4): 1315-1337.

琼州海峡大雾的实时立体监测

■ 许向春

2018年末,海口市气象局引进的3部激光雷达能见度监测仪在琼州海峡两岸闪亮登场。它们就像三部激光“望远镜”,通过发射一定波长的激光束,“扫描”琼州海峡的主要港池和航道,获取其扫描路径上的大气粒子后向散射信息,完成测量大气能见度的任务。与传统单点能见度仪相比,它有高精度、远距离、大范围、可穿透性的特点。它可以穿雾探测,获取探测路径上的逐段能见度信息,水平观测距离达到15 km,精度达到15 m。通过360°的水平扫描和上下垂直扫描,得到一幅连续的琼州海峡能见度空间分布图,实现了对琼州海峡大雾的实时立体监测。



(作者单位: 海南省气象局)