

南海台风模式成功预报“暹芭（2022）”生成原因探究*

黄燕燕¹ 陈子通¹ 戴光丰¹ 李梦婕¹ 张诚忠¹ 郑彬¹

1. 中国气象局广州热带海洋气象研究所/区域数值天气预报重点实验室/粤港澳大湾区气象研究院, 广州, 510640

摘要 本文针对 2022 年 3 号台风“暹芭”，对比分析了南海台风模式 CMA-TRAMS (China meteorological administration tropical regional atmospheric model system) 和 ECMWF (European Center for Mediumrange Weather Forecasts) 模式对“暹芭”生成的预报差异，从台风胚胎发展环境、胚胎内物理过程、胚胎结构及其发展等不同方面分析探讨了 CMA-TRAMS 成功预报“暹芭”生成的原因。结果表明，72-120 h 两模式预报菲律宾西侧的季风槽气旋式环流形势的显著差异，是造成台风生成预报差异的直接原因。CMA-TRAMS 在 96-120 h 预报出多个中尺度对流系统或中尺度涡旋在正涡度环境下生成、发展、合并，并组织化发展成暖心结构，是其成功预报“暹芭”生成的重要因素。菲律宾西侧季风槽的风场预报精度可能对南海台风生成预报有重要影响。本研究结果加深了我们对台风生成主要物理过程的理解，增进了我们对数值模式台风生成预报影响因素的认识，并为模式改进台风生成预报提供线索。

关键词 南海台风模式 CMA-TRAMS；“暹芭”台风；数值预报；生成预报。

文章编号 1006-9895 (2025) 04-

中图分类号 P458.3

文献标识码 A

doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2504.24086

Analysis of the successful genesis forecast of "Chaba (2022)" by the CMA-TRAMS model

Huang Yanyan¹, Chen Zitong¹, Dai Guangfeng¹, Li Mengjie¹, Zhang Chengzhong¹, Zheng Bin¹

1. Guangdong Provincial Key Laboratory of Regional Numerical Weather Prediction, Guangzhou Institute of Tropical and Marine Meteorology of China Meteorological Administration, GBA Academy of Meteorological Research, Guangzhou, 510640, China

Abstract: Based on the tropical regional atmospheric model system of China Meteorological

收稿日期: 2024 年 8 月 12 日; **网络预出版日期:**

作者简介: 黄燕燕, 主要研究方向为数值预报、台风、暴雨, E-mail: vyhuang@gd121.cn

资助项目: 国家自然科学基金项目 (42275123); 广东省基础与应用基础研究基金 (2023A1515240067, 2022A1515011870)。

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grant 42275123); Guangdong Basic and Applied Basic Research Foundation (Grants 2023A1515240067 and 2022A1515011870)

Administration (CMA-TRAMS) and European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF), the forecast differences of tropical cyclone (TC) formation for the No. 3 Typhoon "Chaba" in 2022 are compared and analyzed and the reasons of the successful genesis prediction of CMA-TRAMS for Typhoon "Chaba" are investigated from different aspects such as the development environment of tropical cyclone (TC) embryos, physical processes within TC embryos, embryo structure and the corresponding development. The results indicate that numerical models are required to have good descriptive ability in the above aspects to perform well in TC generation forecast. This study is beneficial for us to understand the main physical processes and factors closely related to TC generation prediction in numerical models, and it would provide clues for the follow-up model development and improvement. The results indicate that the significant difference in the cyclonic circulation pattern of the monsoon trough in the western Philippines between the 72-120 h forecasts is the direct cause of the difference in TC generation forecasts between the two models. CMA-TRAMS predicts the generation, development, and merging of multiple mesoscale convective systems (MCSs) or mesoscale convective vortices (MCVs) in a positive vorticity environment between 96-120 h, and the organization of circulation to form warm core structures, which is important in its successful prediction of the formation of "Chaba". The accuracy of wind field forecasting in the western monsoon trough of the Philippines may have a significant impact on the prediction of TC formation in the South China Sea. The continuous convergence and merging of MCSs and MCVs, and the organization of cyclone circulation are important physical processes for TC formation. The results of this study have deepened our understanding of the main physical processes involved in TC formation, enhanced our knowledge of the influencing factors of numerical model prediction for TC formation, and provided clues for improving model forecasts.

Key words Tropical regional atmospheric model system of China Meteorological Administration (CMA-TRAMS); Typhoon Chaba; numerical weather prediction; TC genesis forecast

1. 引言

台风（热带气旋）是影响我国的主要灾害性天气之一，其伴随的狂风、暴雨严重影响人民生命财产的安全（陈联寿和丁一汇，1979；张端禹等，2024）。理解台风活动的变化规律，提高台风预报水平，是现代天气预报业务的迫切需求。台风的生成预报可为防台减灾提供更长的预警防御时间，因而至关重要。

台风的生成是多尺度动力学和热力学过程相互作用的过程，各种海洋和大气因素决定热带扰动是否以及如何发展为台风（张庆红和郭春蕊，2008；Tang et al., 2020）。Gray (1998) 将台风生成的环境条件归纳为：适当的柯氏力，适宜的低层高相对涡度区，弱的水平风速垂直切变，海表以下 60 m 深的水温在 26 °C 以上，深厚的条件性不稳定大气以及相对潮湿的中层大气。除了适宜的环境条件外，台风生成还需要外部扰动的触发，扰动源主要有：东风波、季节内振荡、高空槽、热带辐合带与季风槽等（张庆红和郭春蕊，2008；张文龙和崔

晓鹏, 2013)。热带扰动源在适宜环境条件下如何转变成具有暖心结构的低压的过程, 即台风生成的触发机制问题。早期台风生成物理机制主要有第二类条件不稳定机制 CISK(conditional instability of second kind, Charney and Eliassen, 1964) 和风驱动的海气热量交换机制 WISHE(wind-induced surface heat exchange, Emanuel, 1986, 2003)。CISK 机制中关键性的反馈发生在大尺度环流和对流之间, 强调积云对流加热的空间组织化; WISHE 机制中关键反馈则发生在环流与海洋表面通量之间, 强调海表加热与气温扰动的正反馈。部分研究(Emanuel, 1986; Craig and Gray, 1996; 张文龙等, 2009)认为, CISK 条件不稳定的层结大气不是台风生成的必要条件, WISHE 机制比 CISK 机制更重要。此外, 张文龙等(2009)基于观测研究提出正压不稳定是季风槽中台风生成的重要机制。由于 CISK 和 WISHE 机制都以一定强度的初始涡旋已建立为前提(张庆红和郭春蕊, 2008; 张文龙等, 2009), 因而更适于解释台风的发展, 而热带扰动如何发展转变为一定强度的初始涡旋, 仍是尚未解决的问题。随着研究和认识的深化, 对台风生成阶段和发展加强阶段的区分趋于明确(Emanuel, 2003; 张文龙等, 2008a, 2008b), 将生成阶段定义为系统从一个不以地表通量为驱动能量的扰动发展到一个轴对称、具有暖心并在地面有低压中心的过程, 并将生成期划分为生成前期(热带气旋性扰动到热带低压阶段)和生成后期(热带低压发展为热带风暴阶段)(Zehr, 1992; 张文龙和崔锦鹏, 2013)。通过外场观测研究, 中尺度对流系统(Mesoscale Convective System, 简称 MCS)或中尺度对流复合体(Mesoscale Convective Complex, 简称 MCC)被认为是台风生成的“前兆”因子(Ritchie and Holland, 1999), 中层中尺度涡旋(Mesoscale Convective Vortex, 简称 MCV)是台风生成的“胚胎”(Harr et al., 1998; Chanh and Zhang, 2008)。Bartels and Maddox(1991)指出 MCV 一般产生在“母对流系统”(Parent MCS)减弱消亡后, 并会引起“第二次对流”(secondary convection)的发生发展。Trier et al.(2000)也指出 MCV 的一个重要特征是可以引起第二次对流的发展。针对中层 MCV 影响台风生成的过程, 气象学者提出了“Top-Down”(Bister et al., 1997)自上而下发展过程和“Bottom-Up”(Zhang and Bao, 1996)自下而上发展过程的不同假说, 但均未被 PREDICT(Pre-Depression Investigation of Cloud-Systems in the Tropics)、GRIP(Genesis and Rapid Intensification Process)等外场试验所证实。此外, Dunkerton et al.(2009)基于多尺度相互作用提出了“pouch(育儿袋)”假说。随着中尺度对流系统存在小尺度塔状的积雨云对流或“热塔”的发现, Hendricks et al.(2004), Montgomery et al.(2006), 张文龙等(2008a)通过数值模拟试验研究了“热

塔”在大西洋飓风或太平洋台风生成中的作用，细化了中层 MCV 影响台风生成的物理图像。但目前关于南海台风生成实例的高分辨数值模拟工作较少。

较多台风生成研究工作从气候角度出发研究气候变化对台风生成机制的影响，如分析台风活动的频数及其与大气环流的关系（王会军和范可，2006；李春晖等，2007；郝赛和毛江玉，2015），总结适宜台风生成的气候条件（Gray, 1998; 李宪之，1983），提出潜在生成指数应用到季节预报以验证台风生成机制（Gray, 1975; 李雪等，2010；Wang and Murakami, 2020）。但是基于长期的、缓慢改变的大尺度环流进行台风生成的季节预报并不能满足台风生成的逐日预报的需求。

由于多种影响因子相互作用的复杂性，基于主观预报或物理诊断的方法预报难度很大，基于数值模式进行台风生成预报是最有效手段。随着计算机技术的进步，数值模式已经成为日常天气预报，特别是台风预报业务的重要支撑（冯文等，2016；陈贞璇等，2024），气象学者针对台风开展了大量数值模拟和检验评估工作（雷小途等，2019；李泽椿等，2020；钱奇峰等，2021），台风的路径预报取得了较大进展，但强度预报和生成预报仍然是数值预报面临的重要挑战（端义宏等，2005；张庆红和郭春蕊，2008；雷小途等，2019；钱奇峰等，2021）。Pasch et al. (2006) 和 Halperin et al. (2016, 2020) 对比分析了 GFS、UKMET 等全球模式对大西洋、东北太平洋热带气旋的生成预报情况。Wang et al. (2009) 发展了大西洋飓风生成实时预报产品。冯文等 (2016) 基于低层涡度、低层风速等提出了多物理量阈值的台风生成预报方法并应用于 ECMWF 模式开展逐日预报试验，结果表明预报效果显著依赖于所使用的阈值。Li et al. (2024) 根据 2020 年的 ECMWF 和 CMA-TRAMS 模式业务预报数据对西太平洋和南海的台风生成预报加以评估，认为 CMA-TRAMS 在大多数台风的生成预报上表现出比 ECMWF 模式更优的性能，但尚未针对数值预报结果开展原因和机制的进一步分析，台风生成阶段的触发转变过程尚不了解。

南海地区台风活动频繁，生成频数高（白莉娜和王元，2009）。南海北部濒临广东、福建等沿海地区，经济繁荣、人口众多，南海台风的活动对人民生活有重要影响。由于南海海域较小并且紧邻大陆，因此南海台风突发性强，生成后经历很短时间就可能登陆，如 2024 年 2 号台风 MALIKSI 于 5 月 31 日 14 时（北京时，下文如未指出与此同）生成编号，6 月 1 日凌晨 1 时左右即登陆广东阳江。对这类生命史极短的台风，如果不能提前预报其生成，将使防台减灾工作陷入极大被动。由于南海地理环境特殊，影响热带气旋生成的系统与其他海域有所不同（李雪等，2010），南海台风的生成也具有特殊性（张文龙和崔晓鹏，2013）。

因此有必要针对典型的南海台风个例，开展数值模式台风生成预报的深入分析，理解模式中与生成预报密切相关的主要物理过程和相关机制，以增进认识并为模式改进提供线索。本文选取 2203 号台风“暹芭”为例加以分析。

2. 数据和方法

2.1 南海台风模式

CMA-TRAMS (China meteorological administration tropical regional atmospheric model system) 南海台风模式 (陈子通等, 2020; 徐道生等, 2019) 是基于 GRAPES (Global/Regional assimilation and prediction model) 区域模式 (陈德辉和沈学顺, 2006) 发展的非静力经纬度网格模式。它采用半隐式半拉格朗日的时间积分方案、Arakawa-C 网格和 Charney-Philips 垂直分层设置, 垂直坐标为高度地形追随坐标。采用 NSAS 积云参数化方案 (徐道生等, 2015)、WSM6 微物理参数化方案、MRF 边界层方案、SLAB 陆面过程方案、SWRAD 短波辐射方案以及 RRTMG 长短波辐射方案。模式侧边界采用松弛边界条件来处理。

CMA-TRAMS 南海台风模式覆盖范围为 81.6°E - 160.89°E , 0.8°N - 50.57°N , 分辨率为 9 km , 垂直方向为 65 层, 每天世界时 00 和 12 时提供未来 7 天的预报产品。

2.2 ECMWF 模式

ECMWF (European Center for Mediumrange Weather Forecasts) 模式是欧洲中心大气高分辨静力模式, 水平方向采用简化高斯网格, 垂直风向使用有限元格式, 时间积分方案为半隐式半拉格朗日。采用考虑了深层、浅层和中层对流 (Bechtold et al., 2008; Bechtold et al., 2014) 的积云对流方案, 包含六个水物质相关预测变量 (Forbes and Tompkins, 2011) 的云参数化方案, 快速辐射传输模型 RRTM 方案 (Iacono et al., 2008) 和 TESSEL 陆地表面交换方案 (Balsamo et al., 2009)。

ECMWF 为全球模式, 分辨率约为 10 km , 每天世界时 00、06、12 和 18 时提供未来 10 天的高分辨率预报。

2.3 数据

采用中国气象局业务定位台风报文资料, 包含定位信息、海平面气压、最大风速等。此外, 还采用了南海台风模式 CMA-TRAMS 和欧洲中心模式 ECMWF 的业务预报数据进行分析, 水平分辨率为分别为 $0.09^{\circ}\times 0.09^{\circ}$ 和 $0.1^{\circ}\times 0.1^{\circ}$, 垂直方向均为 17 层标准等压面。

2.4 “暹芭 (2022)” 概况

2022 年第 3 号台风“暹芭”于 6 月 30 日 00 时 (世界时, 下文如未指出与此同) 台

风“暹芭”生成于海南省东偏南的海面上（图 1a），台风中心位于 115.3 °E, 16.2 °N，生成后向西北方向移动，于 7 月 2 日 15 时以台风级在广东省茂名电白沿海登陆，登陆时中心最大风力 35 米/秒（12 级），中心最低气压 965 百帕。登陆后“暹芭”继续向北偏西方向移动，强度缓慢减弱，2 日 22 时从广东化州移入广西玉林后缓慢向偏北方向移动，4 日 08 时在广西桂林减弱为低气压。“暹芭”是近 20 年来登陆广东的最强南海“土”台风。

3. 各模式“暹芭”生成预报概况

南海台风模式 CMA-TRAMS 在 6 月 24 日 12 时提前 132 小时（5.5 天）准确预报台风“暹芭”在南海中部生成（图 1b），生成地点略偏东、偏南，同时间欧洲中心（ECMWF）全球模式未预报台风生成（图 1c），美国（NOAA/NCEP）全球模式虽预报台风生成，但生成地点明显偏东、偏北（图略）。

对比相近时次（6 月 24 日 10 时）的卫星观测，在可见光云图（图 2a）南海上基本为对应海洋、大水体的黑色，鲜少对应云的白色，反映此时南海区域上空基本无云；红外云图（图 2b）上，南海大部分为对应较高温度的黑色，也反映出南海地区大部分为晴空，没有系统性大云系的遮挡。根据这些卫星观测资料，南海没有台风即将生成的迹象。综上，相比于观测资料，数值模式（尤其 CMA-TRAMS）在台风生成预报方面具有巨大潜力。以下将以 CMA-TRAMS 和 ECMWF 模式为例，分析二者“暹芭”生成预报差异的原因，并探讨 CMA-TRAMS 模式触发其生成的物理机制。

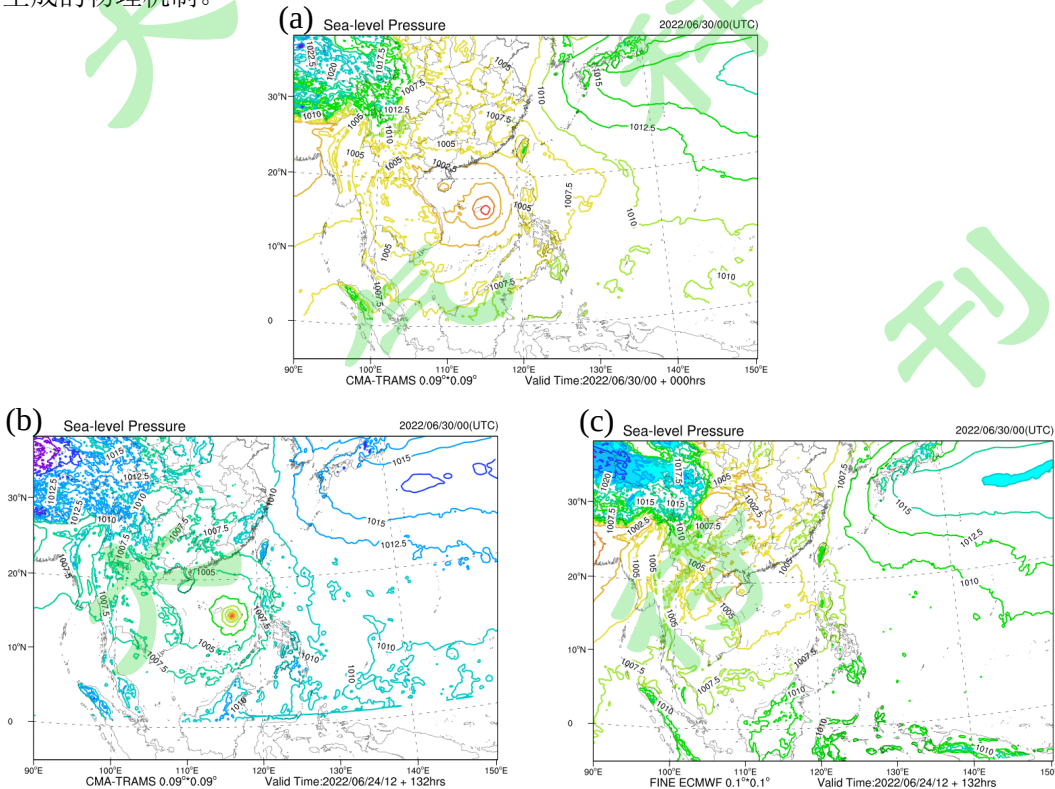


图1 2022年6月30日00时 (a) 海平面气压实况分析场、(b) CMA-TRAMS 和 (c) ECMWF24日12时起报的海平面气压预报 (单位: hPa)

Figure 1 (a) Analysis and prediction of Sea level pressure (SLP) at 0000 UTC 30th, June 2022 by (b) CMA-TRAMS and (c) ECMWF model initiated at 1200 UTC 24th, June 2022

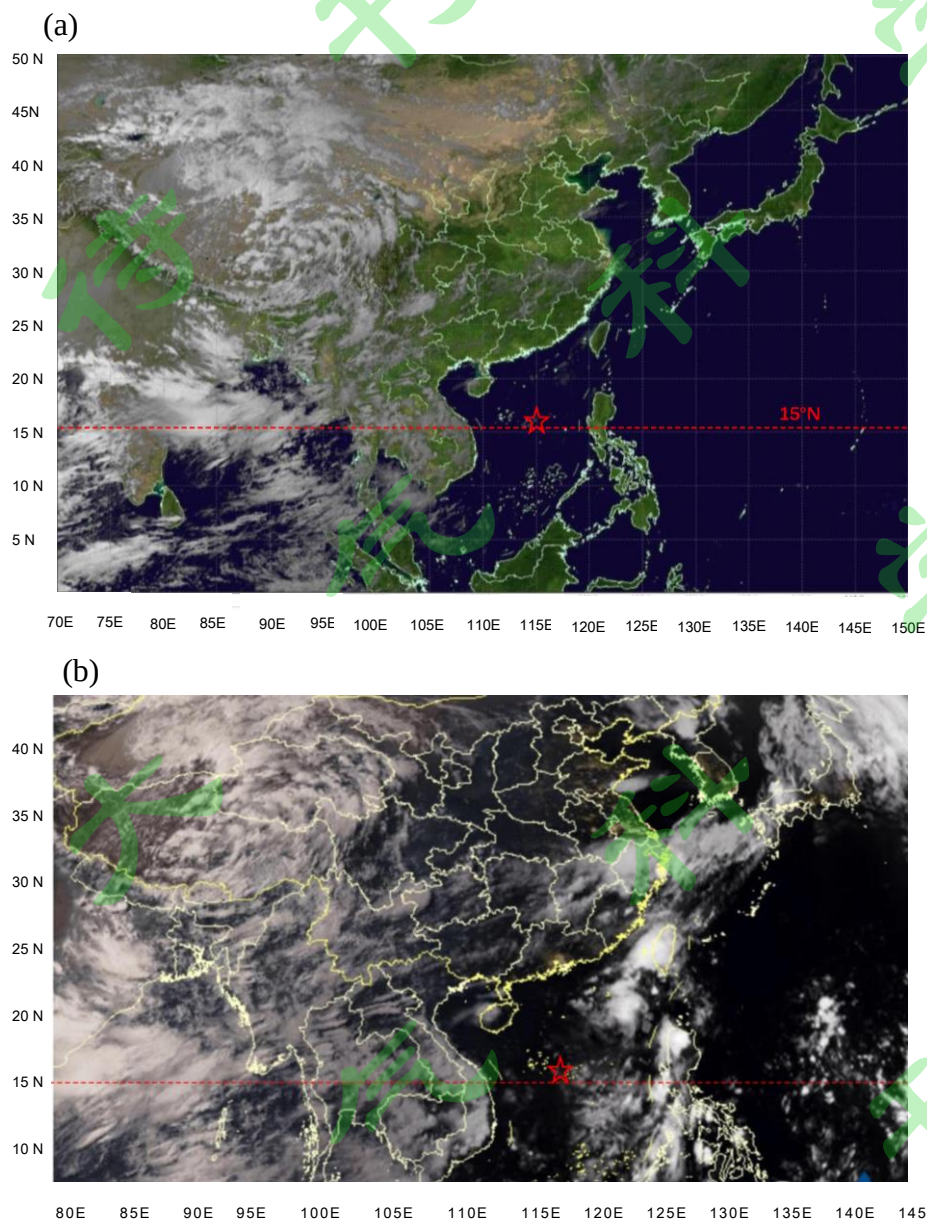


图2 2022年6月24日10时 (北京时18时) 卫星(a) FY2G可见光云图和(b)FY4A红外云图 (五角星代表台风生成位置)

Figure 2 Satellite (a) visible light cloud image and (b) infrared cloud image at 1000 UTC 24th, June 2022 (The pentagram represents the location of TC formation.)

4. CMA-TRAMS 和 ECMWF 模式预报差异及机制探讨

4.1 预报差异

本部分针对南海台风模式 CMA-TRAMS 和欧洲中心 ECMWF 模式在 2022 年 6 月 24 日 12 时起报的预报结果加以分析。

由 850 hPa 高度图（图 3），CMA-TRAMS 预报 108 h 后在 118 °E、13.5 °N 附近出现高度低值区，并持续发展，到 132 h 形成较强低压闭合环流、台风生成（图 3a, 3b, 3c），而 ECMWF 在此期间 850 hPa 上南海区域均未形成类似发展的低值中心（图 3d, 3e, 3f），直至 168 h 在相近位置才形成弱低压环流、但未生成台风（图略）。

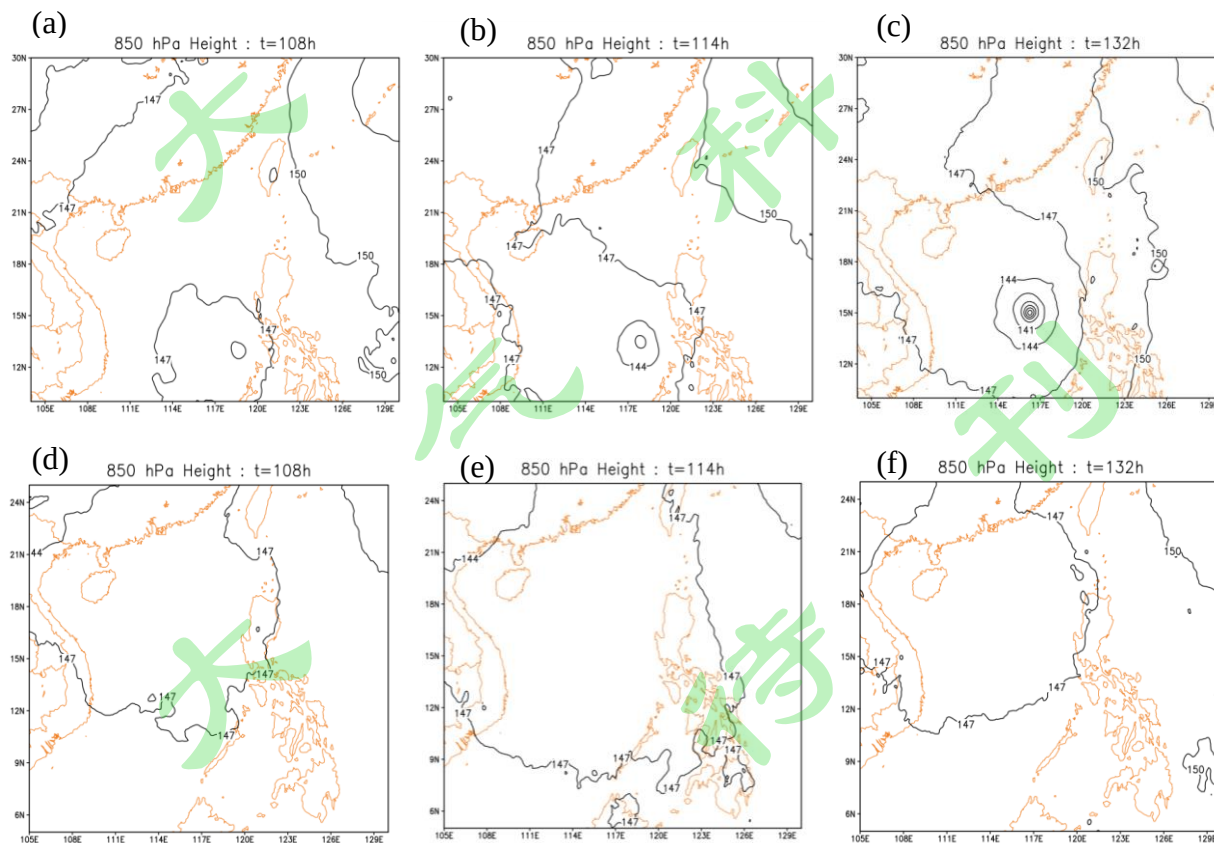
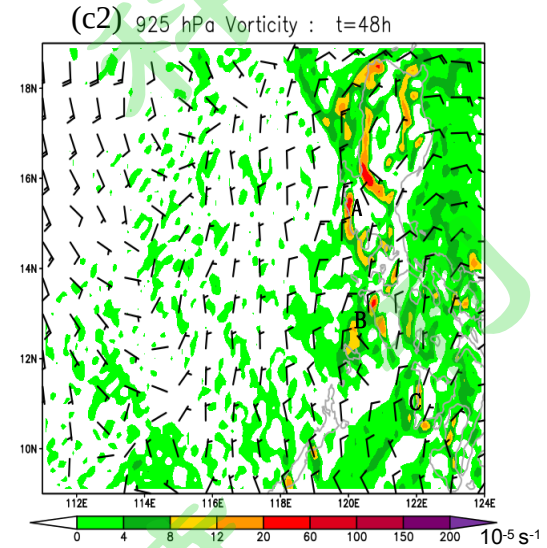
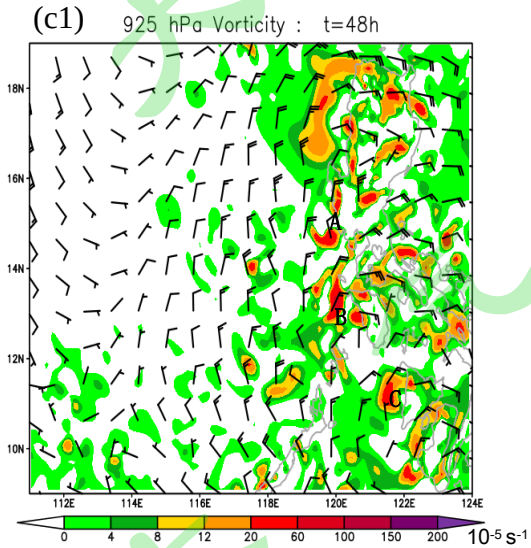
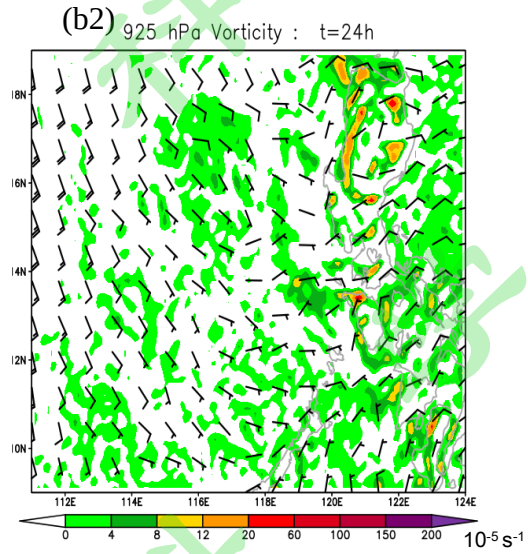
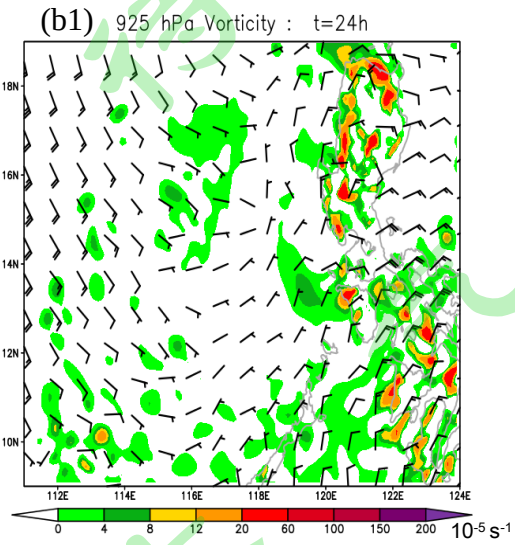
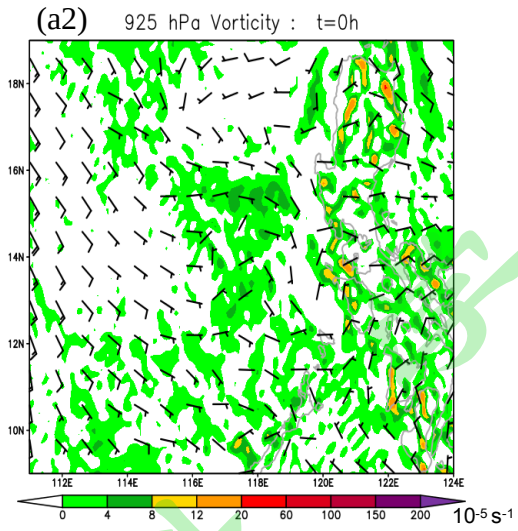
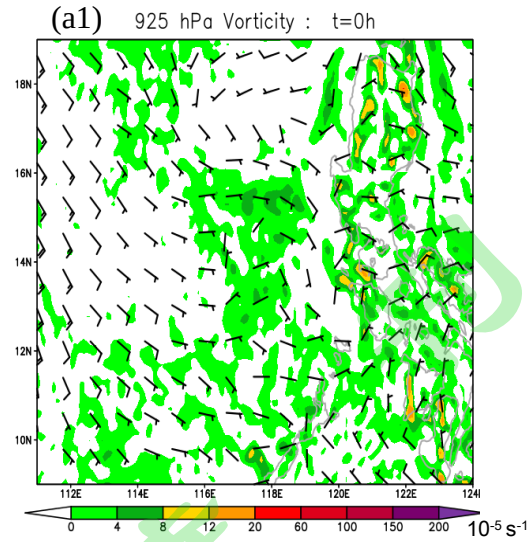


图3 (a,b,c)CMA-TRAMS 和(d,e,f)ECMWF 模式预报 (a,d) 108 小时、(b,e) 114 小时、(c,f)132 小时的 850 hPa 位势高度场 (单位: dagpm)

Figure 3 The 850 hPa geopotential height at (a,d)108 h、(b,e)114 h、(c,f)132 h predicted by (a,b,c)CMA-TRAMS and (d,e,f)ECMWF. (Unit: dagpm)

分析两模式预报的 925 hPa 相对涡度的逐日演变 (图 4)。初始时两模式风场和涡度场基本一致 (图 4a1, 4a2), 24 h CMA-TRAMS 在菲律宾附近出现较多涡度小扰动, 12° N 以北菲律宾北部风场有较大转变, 出现偏东风-偏北风的气旋式切变 (图 4b1), ECMWF 涡度扰动中心较弱, 风场在菲律宾附近也出现了气旋式切变, 但偏北风较弱、切变较弱 (图 4b2)。48 h CMA-TRAMS 预报多个涡度扰动移至菲律宾以西, 其中 15° N、 13° N 和 11° N 的扰动 (分别记为中尺度对流系统 MCS A、B 和 C) 增强较明显, 即台风生成的前兆因子, 台风即由 11° N 附近的扰动 MCS C 发展生成, 13° N 以南菲律宾的东侧 (123° E 附近) 由东北风转为偏东风、东南风, 气旋式切变增强 (图 4c1)。48 h ECMWF 在菲律宾西侧 15° N、 13° N 和 11° N 涡度扰动 (MCS A、B 和 C) 比 CMA-TRAMS 弱, 特别 11° N 附近涡度扰动 C 明显偏弱, 13° N 以南菲律宾东侧仍大多为东北风, 切变比 CMA-TRAMS 明显偏弱 (图 4c2)。72 h CMA-TRAMS 预报菲律宾以西的涡度扰动继续发展, MCS C 涡度有所增强、范围增大, 其附近增加多个 MCS 小扰动, 其西侧 (118° E 以西) 入流带上新增多个涡度扰动中心, 12° N 以南、 121° E 以东由偏北风转为偏南风, 形成气旋式闭合环流, 位于 MCS C 西南侧 (图 4d1)。此时 ECMWF 北侧涡度扰动减弱, 11° N 附近涡度扰动有所发展、但比 CMA-TRAMS 预报明显偏弱, 风场的转变与 CMA-TRAMS 相似, 但因 12° N、 121° E 附近未转为偏东风, 风场为东北风-偏南风切变, 未形成闭合气旋式环流 (图 4d2)。96 h CMA-TRAMS 预报 MCS C 继续发展、范围增大, 略向西移, 南侧的气旋式闭合环流北移, 风速明显加强、切变增强, 闭合环流以西偏北风和偏西风的卷入气流路径上涡度扰动增强 (图 4e1)。96 h ECMWF 在 122° E 附近涡度扰动增强, 风场切变环流位于其西侧 119° E 附近, 但风速较小、切变较弱, 且仍未形成闭合环流 (图 4e2)。CMA-TRAMS 预报 120 h MCS C 附近多个涡度中心合并发展, 在东南风引导气流下向西北移动, 位于 117° E、 14° N 附近, 涡度明显增强, 涡度中心与闭合环流中心基本重合, 闭合环流半径缩小, 风速显著加大, 其东、西两侧各有一强涡度中心 (图 4f1)。此时 ECMWF 在 15° N 以北、菲律宾附近仍未转为东风, 在 118° E 附近、 15° - 19° N 则形成狭长的

弱闭合环流，菲律宾区域多为偏南风，因此前期的涡度扰动范围主要向北扩展，呈狭长形（图 4f2）。由低层涡度逐日演变预报来看，96-120 h 为 CMA-TRAMS 台风发展生成的关键期。局地涡度扰动 C 发展增强，与环境场气旋式切变环流相配合，扰动中心 C 与切变环流中心重合，形成强涡度系统（台风胚胎）。由以上分析也可看到，CMA-TRAMS 和 ECMWF 模式初始场基本一致，二者差异是在预报过程中逐步出现，并愈加显著。ECMWF 预报台风生成区域的低层风场切变持续偏弱，72 h 未能报出 12° N 以北菲律宾附近转为偏东风，切变弱；风场偏东分量较小，涡度扰动中心 C 维持在 120° E 附近；扰动中心 C 西侧的气旋式切变为狭长形，结构较松散；在气旋式环流北移前，扰动中心 C 能西移与气旋式切变环流汇合；中后期随气旋式切变环流北移，扰动中心 C 西北方向 13.5° N 附近的涡度扰动 D、E 加强，但同样未能汇合切变环流发展为台风。



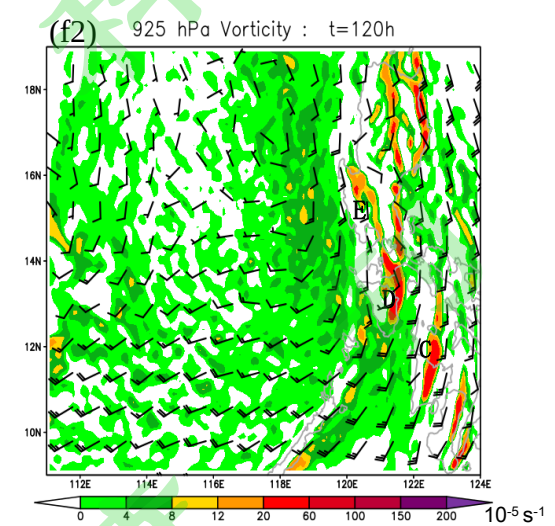
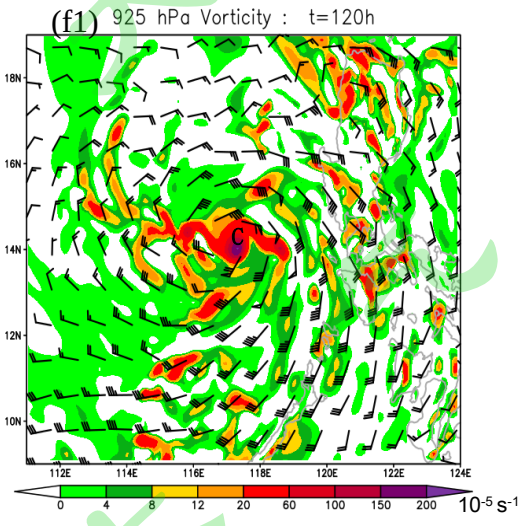
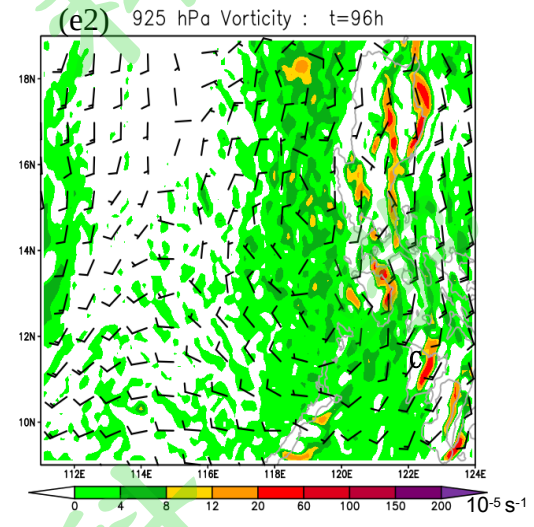
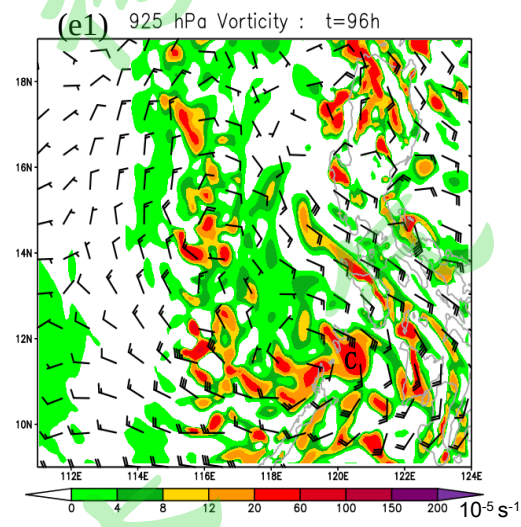
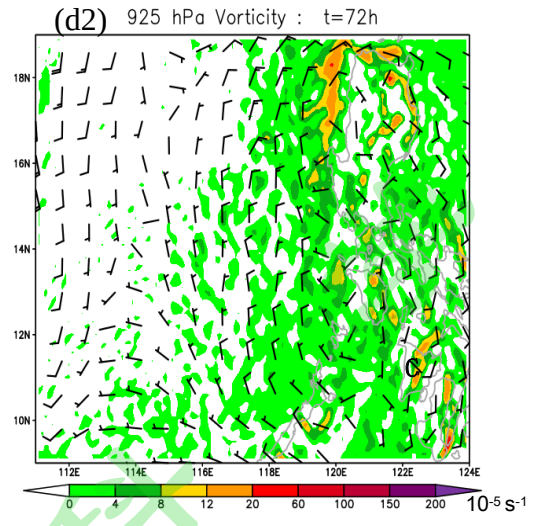
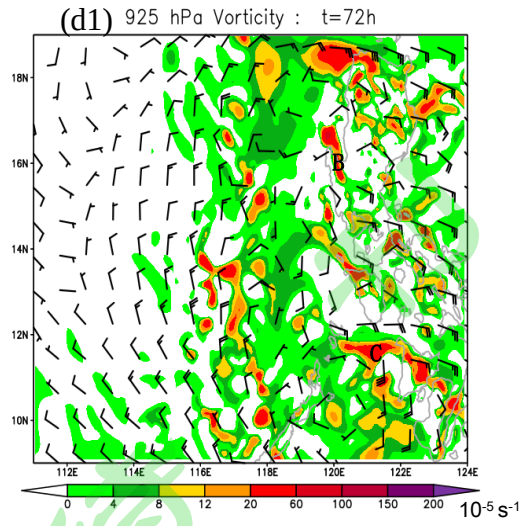


图4 (a1-f1)CMA-TRAMS 和(a2-f2)ECMWF 模式预报 925 hPa 相对涡度(填色, 单位: 10^{-5} s^{-1}) 和风场(风向杆)(a1-a2)0 h、(b1-b2)24 h、(c1-c2)48 h、(d1-d2)72 h、(e1-e2)96 h 和(f1-f2)120 h

Figure 4 The 925 hPa relative vorticity (shaded, Unit: 10^{-5} s^{-1}) and wind at (a1-a2)0 h、(b1-b2)24 h、(c1-c2)48 h、(d1-d2)72 h、(e1-e2)96 h and (f1-f2)120 h predicted by (a1-f1)CMA-TRAMS and (a2-f2)ECMWF.

求取不同时效两模式预报的台风生成区域(116°E , 10°N – 16°N)海表温度、垂直风切变(200 和 850 hPa 之间的风速切变)、500 hPa 相对湿度和 925 hPa 相对涡度的区域平均值(图 5), 可知 168 h 预报期内两模式台风生成区域的海温均超过 29°C , 满足台风生成的海温条件, 且体现明显的日变化特征, 72 h 后两模式海温均呈现出降温趋势, ECMWF 降温较显著, 从 72–90 h 海温高于 CMA-TRAMS, 演变至 120 h 后海温低于 CMA-TRAMS(图 5a)。此外, 48–102 h 两模式在台风生成区域的垂直风切变持续减小, 54 h、84 h 风速垂直切变分别减小至约 9 m/s、3 m/s(图 5b)。36 h 后, 两模式中层(500 hPa)相对湿度显著增加, CMA-TRAMS 在 96–132 h 相对湿度维持在 85%以上(图 5c), ECMWF 在 96–114 h 相对湿度大体维持 80%, 120 h 后维持在 85–95%。两模式预报的台风生成区域的低层(925 hPa)相对涡度(图 5d)在 48 h 左右由负值转为正值, 之后正涡度持续增强, 期间 CMA-TRAMS 预报的正涡度显著大于 ECMWF, 必须指出的是, 108 h 后 CMA-TRAMS 低层涡度较大与其低压中心形成有关, 但其形成前较大的环境涡度为台风生成提供了有利条件。由以上分析可见, 48 h 后两模式预报的垂直风切变、相对湿度和相对涡度均向有利于台风生成的条件转变, 48–96 h 期间 CMA-TRAMS 预报的中层湿度、低层涡度和环境风切变条件比 ECMWF 更有利, 这也与图 4 中 48–96 h MCS C 发展差异大相对应。

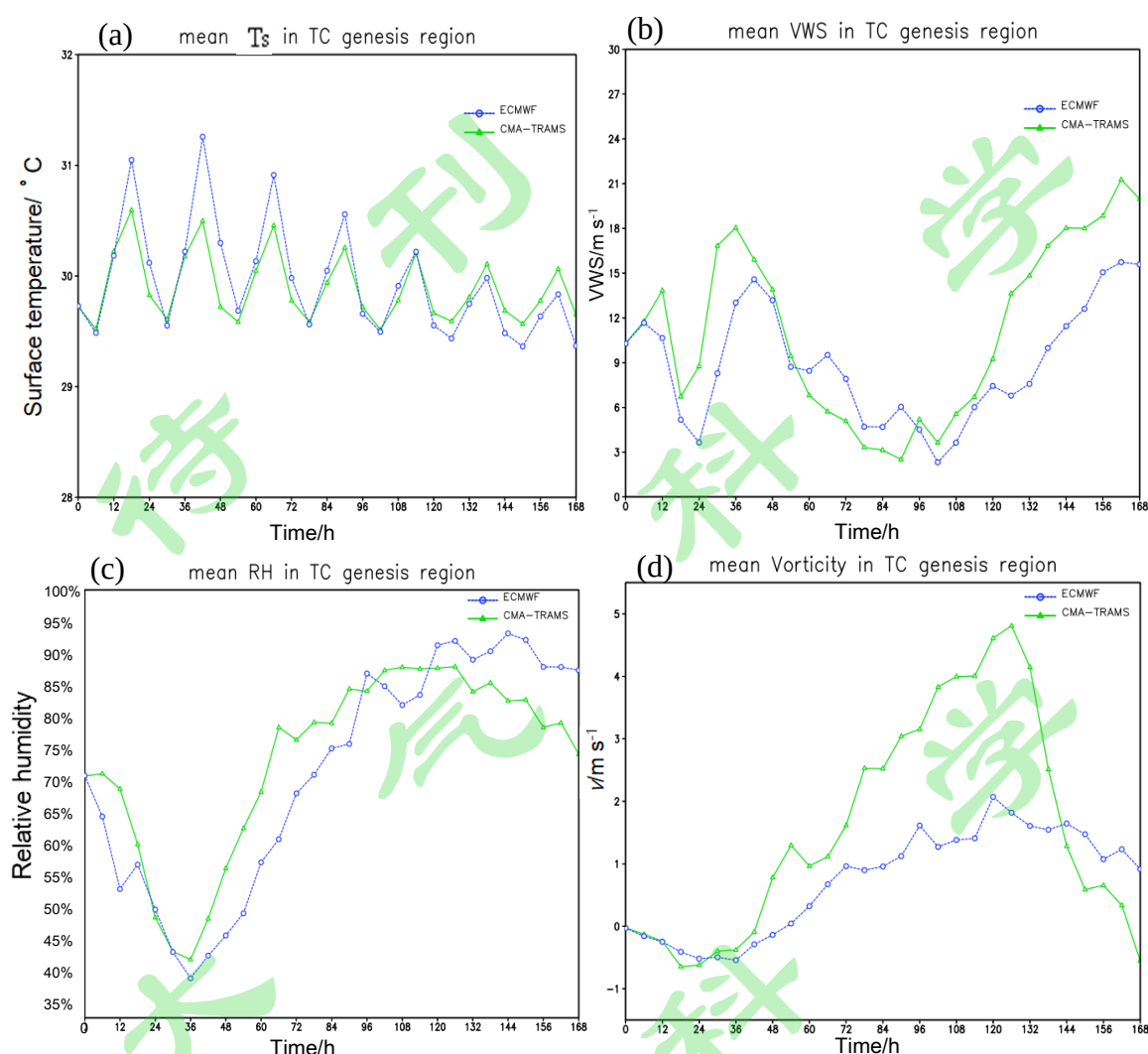


图5 CMA-TRAMS (绿) 和 ECMWF (蓝) 模式预报(a)表面温度(单位: $^{\circ}\text{C}$)、(b)垂直风切变(单位: m/s)、(c) 500 hPa 相对湿度和(d) 925 hPa 相对涡度在台风生成区域的区域平均值的时间演变曲线

Figure 5 Evolution of the regional average values of (a) surface temperature (Unit: $^{\circ}\text{C}$), (b) vertical wind shear (Unit: m/s), (c) relative humidity (Unit: $\%$) at 500 hPa and (d) relative vorticity (shaded, Unit: 10^{-5} s^{-1}) at 925 hPa in the TC generation region predicted by CMA-TRAMS (green) and ECMWF (blue).

对比 72 h 两模式预报的 850 hPa 形势场 (图 6), 虽然二者总体形势相似, 南海、菲律宾附近存在南海季风槽, 但 CMA-TRAMS (图 6a) 副高较强, 面积较大、西脊点延伸至 130°E 附近, 季风槽气旋式切变较强、环流较紧凑, 为台风生成提供了大尺度扰动源, 同时较强

的环境背景涡度为扰动进一步发展和 MCS、MCV 的产生提供了有利条件。ECMWF (图 6b) 中纬度大陆上的低压较强, 海上副高较弱, 西脊点位置较偏东, “150” 等值线位于菲律宾以东, 致使偏东风维持在 130°E 以东、菲律宾东侧主要为偏南风; 季风槽未形成闭合等值线, 环流为松散狭长形。96 h 两模式菲律宾以西的气旋式环流北移、风速加强 (CMA-TRAMS 风速显著加强)、形态维持 (图略)。MCV 一般产生在“母对流系统” (Parent MCS) 减弱消亡后, 并会引起“第二次对流” (secondary convection) 的发生发展 (Bartels and Maddox, 1991)。Trier et al. (2000) 也指出 MCV 的一个重要特征是可以引起第二次对流的发展。本文对 MCV 的定义为: 台风生成区域附近的 MCS 在发展至减弱阶段后, 在同一地区或邻近地区 700 hPa (或 850 hPa) 高度上有闭合涡旋环流出现。

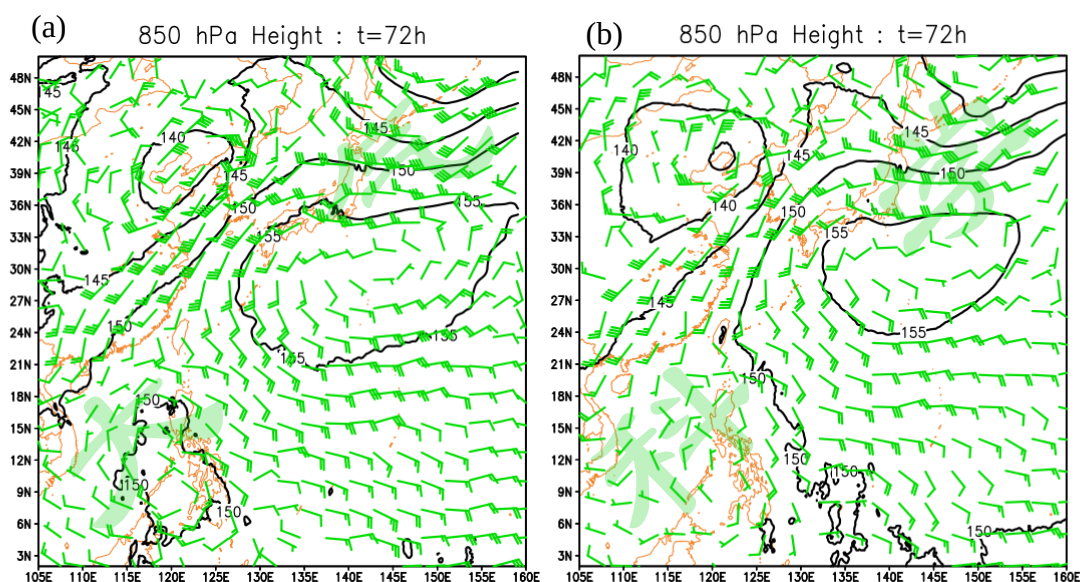


图 6 (a)CMA-TRAMS 和(b)ECMWF 模式预报 72 h 850 hPa 位势高度 (等值线, 单位: dagpm) 和风场

Figure 6 The geopotential height (conoured, Unit: dagpm) and wind at 850 hPa at 72 h predicted by (a)CMA-TRAMS and (b)ECMWF.

4.2 “暹芭” 的生成机制探讨

基于模式预报结果, 针对 72-120 h 涡度扰动关键发展时期加以分析, 探讨“暹芭”生成的机制。

图 7 给出 CMA-TRAMS 该时段不同预报时效台风生成区域的相对涡度 (填色) 和散度 (等值线) 的高度-经度垂直剖面, 不同时效取 MCS C 中心位置所在纬度作剖面。72 h 121°E 附近 MCS C 涡度中心主要位于对流层低层, 其西侧 116°E 附近存在 2 个中层中尺度涡旋 MCV,

强涡度区对应强辐合（图 7a，沿 11.6°N 作剖面）；84 h 区域内涡度扰动不断组织化发展成为多个中尺度对流系统（图 7b，沿 11.6°N 作剖面）， 116°E 附近的中层 MCVs 与环境场相互作用，并向上、向下延伸， $116\text{--}122^{\circ}\text{E}$ 低层辐合明显减弱，MCS C 低层涡度减弱，邻近区域出现一中层 MCV；96 h， 121°E 附近 中层 MCV 引起第二次对流发展、其自身涡度明显增强，在水平方向和垂直方向范围增大、尺度增长，其低层辐合较强，中高层辐散不明显（图 7c，沿 11.6°N 作剖面），其西侧 119°E 有一中层 MCV， 118°E 附近中尺度涡旋在 500 和 925 hPa 各有一涡度中心，该时次各 MCSs 正压性加强；102 h MCS C 移至 120°E 以西，并与西侧的 2 个中尺度涡旋汇合，MCS C 低层辐合延伸至中层 600 hPa，400 hPa 以上为辐散（图 7d，沿 12.2°N 作剖面）；108 h 3 个 MCVs 组织为一个正压、强涡度系统（图 7e，沿 13°N 作剖面），其低层辐合加强、水平范围增大，其东侧中低层为强辐合，西侧为辐散，系统向西移动、并发展，114 h 该系统在低层形成强涡度中心（ $200\times 10^{-5}\text{ s}^{-1}$ ）、地面建立起低压环流（图略）；120 h 该系统进一步发展增强（图 7f，沿 14°N 作剖面），水平范围约 150 km，强涡度中心延伸至中层 500 hPa，其东、西两侧各有一强涡度系统（与图 4f1 对应），低层辐合、高层辐散增强，之后合并发展生成台风。

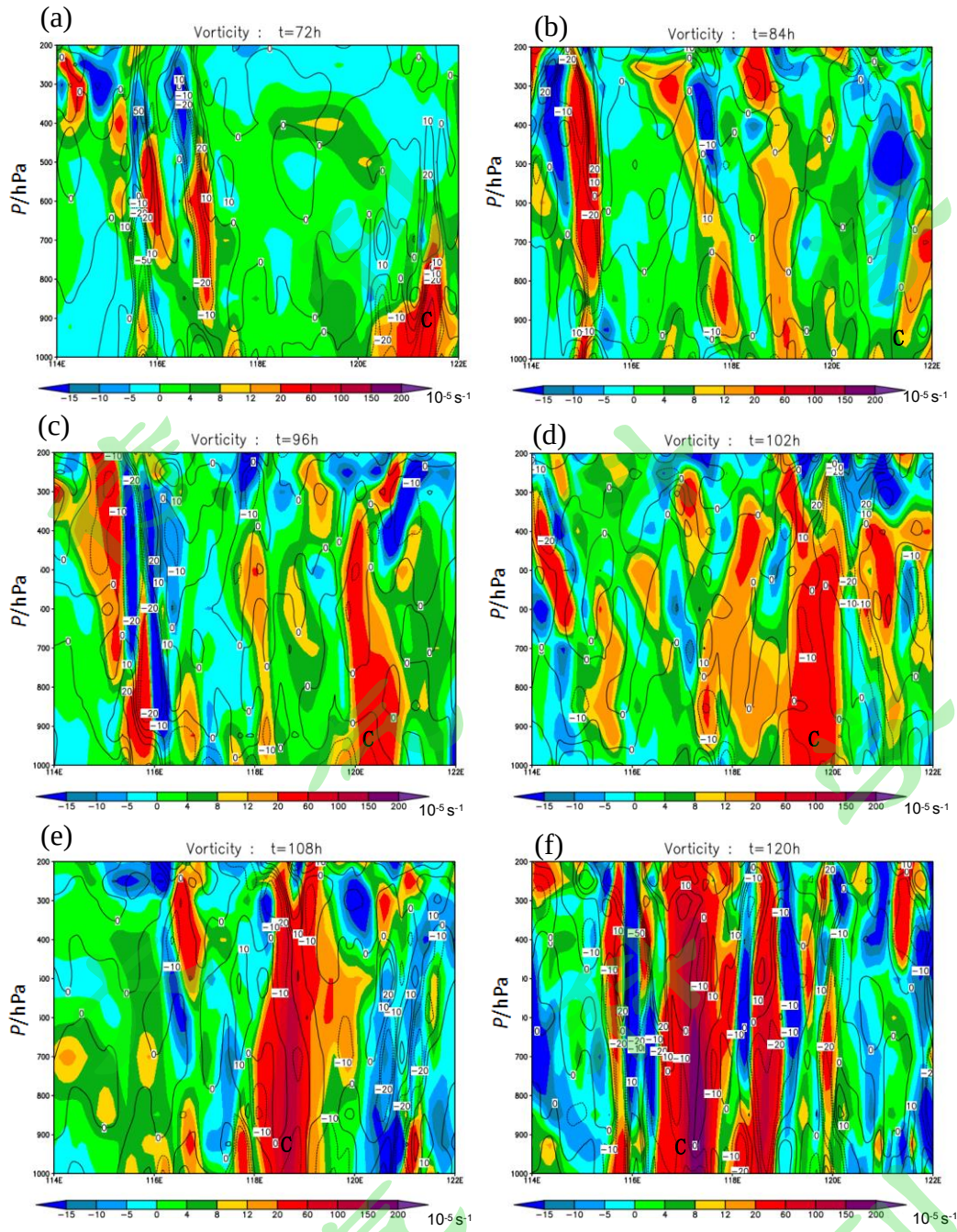


图7 CMA-TRAMS 模式预报 72-120 h 相对涡度（填色，单位： 10^{-5} s^{-1} ）和散度（等值线，单位： 10^{-5} s^{-1} ）的气压-经度垂直剖面(a)72 h、(b)84 h、(c)96 h、(d)102 h、(e)108 h 和(f)120 h

Figure 7 The longitude-pressure cross sections of relative vorticity (shaded, Unit: 10^{-5} s^{-1}) and divergence (contoured, Unit: 10^{-5} s^{-1}) at (a)72 h、(b)84 h、(c)96 h、(d)102 h、(e)108 h and (f)120 h predicted by CMA-TRAMS.

图8 为 ECMWF 不同预报时效台风生成区域的相对涡度和散度的高度-经度垂直剖面。由于 ECMWF 预报的涡度系统发展情况与 CMA-TRAMS 有所不同，CMA-TRAMS 为扰动 MCS C 汇合气

旋式环流发展而来，ECMWF 预报中扰动 C 未汇合切变环流，中后期随切变环流北移，位于扰动 C 西北方向的 MCS D、E（如图 4f2）的发展更关键、更显著。为观察扰动对流系统与切变环流是否汇合发展，根据靠近切变环流的对流系统（前期为扰动 C、中后期为扰动 D、E）所在纬度作剖面。由图 8，ECMWF 96 h 和 102 h MCS C 涡度明显偏弱（图 8a，沿 11.6° N 作剖面；图 8b，沿 12.2° N 作剖面），102 h 虽然在其西侧形成多个中层 MCV，但至 120 h 和 132 h 中层 MCVs 并未发展加强或合并（图 8c，沿 13.7° N 作剖面；图 8d，沿 13.9° N 作剖面），144 h 118° E 附近 MCVs 明显加强并向下延伸（图 8e，沿 13.9° N 作剖面），至 168 h 位于 117° E 和 118° E 的两个系统发展加强，并趋向汇合（图 8f，沿 15.7° N 作剖面），但尚未形成如 CMA-TRAMS 108 h 模拟的正压、组织化环流结构，最大涡度介于 $20\sim 60\times 10^{-5}\text{ s}^{-1}$ ，比 CMA-TRAMS 显著偏弱。

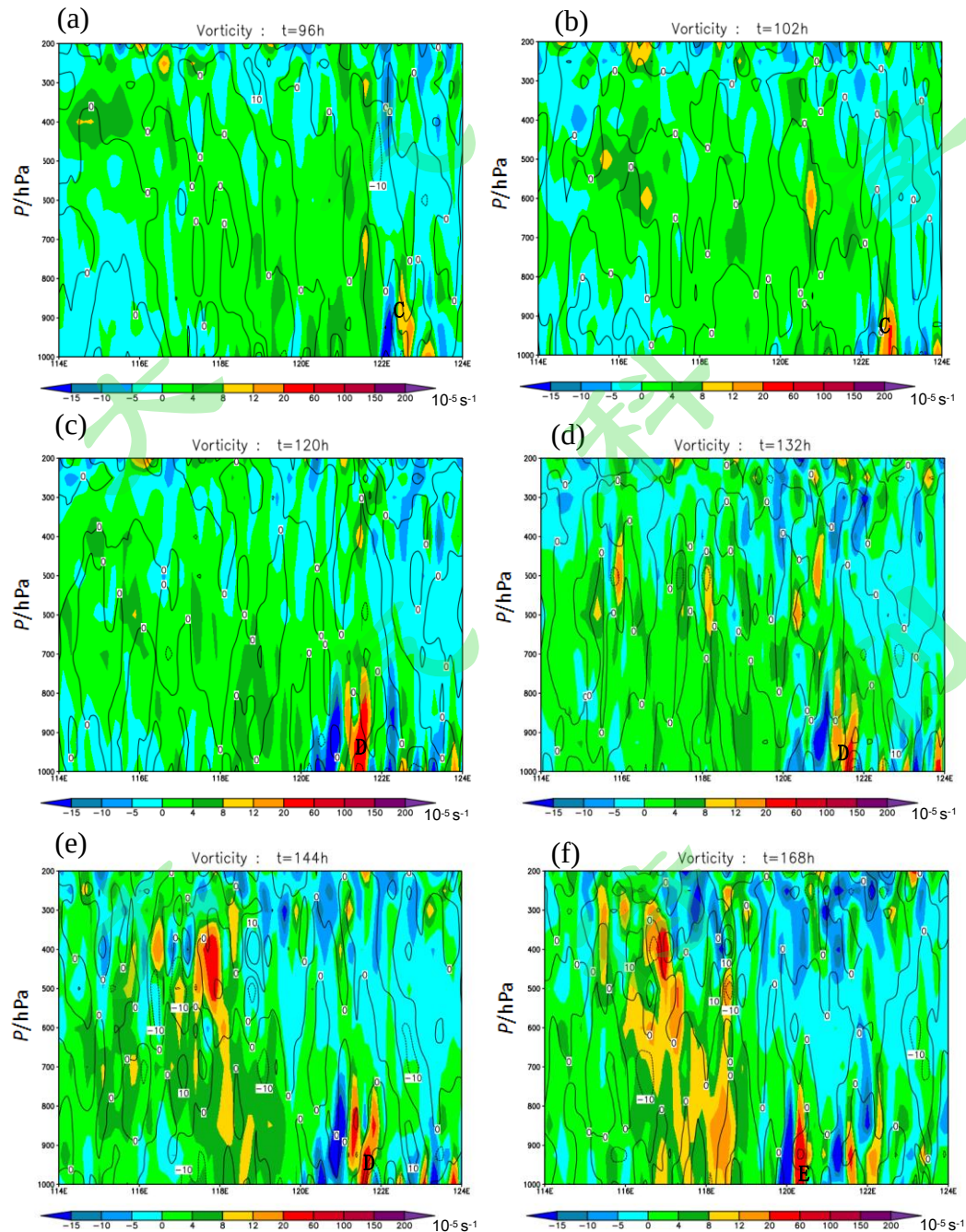


图8 ECMWF 模式预报 96-168 h 相对涡度（填色，单位： 10^{-5} s^{-1} ）和散度（等值线，单位： 10^{-5} s^{-1} ）的气压-经度垂直剖面(a)96 h、(b)102 h、(c)120 h、(d)132 h、(e)144 h 和(f)168 h

Figure 8 The longitude-pressure cross sections of relative vorticity (shaded, Unit: 10^{-5} s^{-1}) and divergence (contoured, Unit: 10^{-5} s^{-1}) at (a)96 h、(b)102 h、(c)120 h、(d)132 h、(e)144 h and (f)168 h predicted by ECMWF.

结合图7、图8对比CMA-TRAMS和ECMWF在台风生成关键阶段的预报差异,可知CMA-TRAMS预报出在背景涡度作用下,台风生成区域内多个中尺度对流系统(MCSs)不断生成、发展,台风胚胎C西移过程中与周边MCVs合并,组织化为一个正压涡度系统、在地面形成低压环流中心,并持续发展增强,从而促使其生成台风。CMA-TRAMS相对于ECMWF模式,在中、小尺度对流扰动系统的发展预报上具有优势,其对流参数化方案能较好触发并促进系统的垂直对流发展增强,同时有能力较好描述两个或多个对流扰动“汇合-合并-发展”的过程。

分析台风生成区域菲律宾西侧气旋式环流形势差异对MCSs、MCVs产生、发展的影响。根据以往研究,强的低空风垂直切变和辐合作用有利于产生MCV(Nielsen and Schumacher, 2018)。强的低空垂直切变诱发旋转,提供的旋转能量可增加对流系统组织性,当上层风速大于下层时,动量传递和风速梯度使下层空气产生垂直加速度增强上升;配合低空辐合更多水汽和不稳定能量的供应,可促进MCV形成和加强。图9给出菲律宾西侧区域CMA-TRAMS和ECMWF模式预报96 h的低层风速垂直切变(925hPa - 1000 hPa)。可看到,CMA-TRAMS预报中(图9a),菲律宾西侧季风槽气旋式环流区域存在较强低层风速垂直切变,多为 $4 \sim 6 \text{ m s}^{-1}$,大值区与季风槽气旋式环流区域(图9a中涂色箭头)和MCSs、MCVs产生区域(图4e1、图7c)有较好对应,图4e1中该区域产生多个中尺度涡度中心,MCS C也位于较强风切变区域内,而ECMWF(图9b)菲律宾西侧的气旋式环流区域其低层风速垂直切变多为 2 m s^{-1} 以下,明显小于CMA-TRAMS。

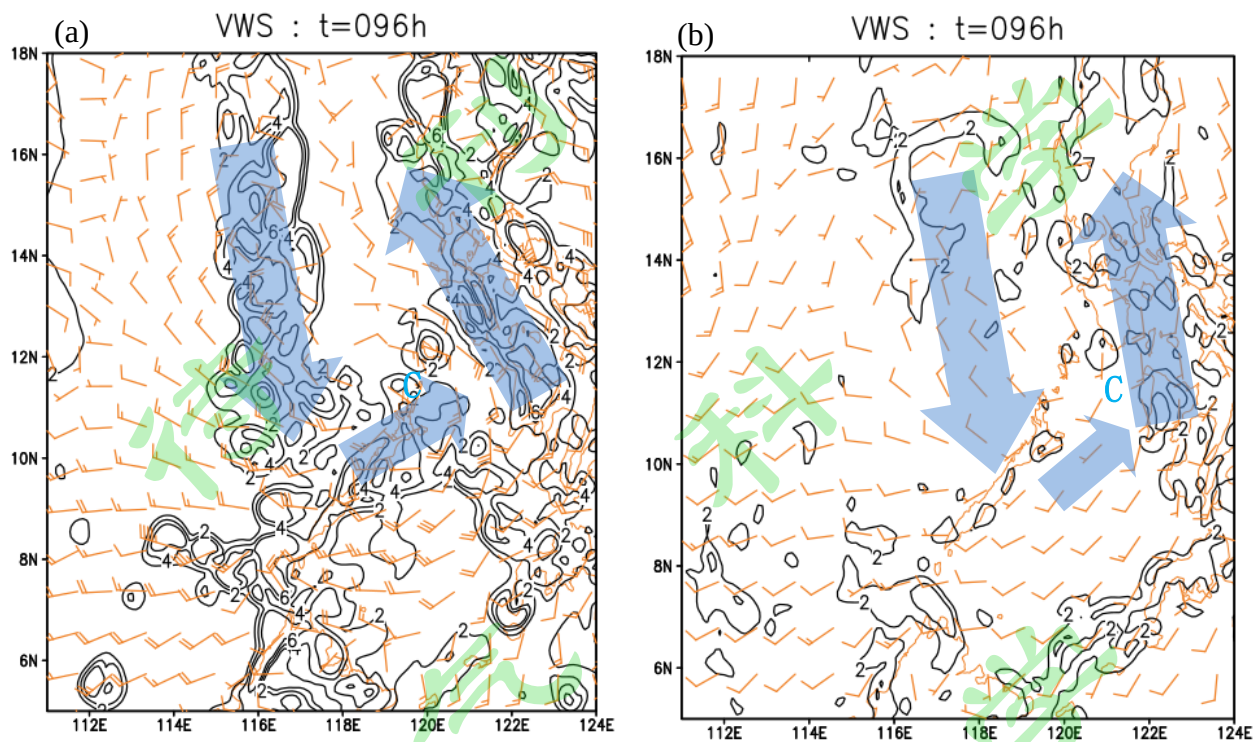


图 9 (a)CMA-TRAMS 和(b)ECMWF 模式预报 96 h 低层风速垂直切变(等值线; m s^{-1})和 925 hPa 风场

Figure 9 The vertical wind shear in the low layer (contoured; m s^{-1}) and wind bar in 925 hPa predicted by (a)CMA-TRAMS and (b) ECMWF at 96 h. (图中涂色箭头代表气旋式环流区域, C 代表)

图 10 给出 CMA-TRAMS 和 ECMWF 预报 925 hPa 散度和风场, 因两模式涡度系统发展的时间有所不同, 故选择不同的分析时次, 图中“C”、“E”分别表示对应时次 CMA-TRAMS 和 ECMWF 预报涡度系统所在位置。由 CMA-TRAMS 预报 925 hPa 散度和风场(图 10a, 10b), 114 h, 低层 925hPa 在低压中心东北、西南区域各形成一条螺旋状强辐合带, 同时外围带状强辐合区配合中心区域辐合带使大量气体输送、卷入到低压中心(图 10a), 使中心被气体填塞、旋转加强, 低层涡度加强(图略); 126 h 低层螺旋状强辐合带增多、加强、更紧密, 低层入流进一步加强、气旋性环流中心半径减小(图 10b), 涡度继续增大, 促使低压发展生成台风。而 ECMWF 在涡度系统有所发展的后期(图 10c, 10d), 925 hPa 上相应的区域气体辐合仍明显偏弱, 仅有几个较为孤立的小辐合中心, 未能形成强的辐合输送带, 而风场呈现西南风—偏南风的切变形式, 也未能形成气旋式闭合环流, 因而未能促使低压发展增强为台风。

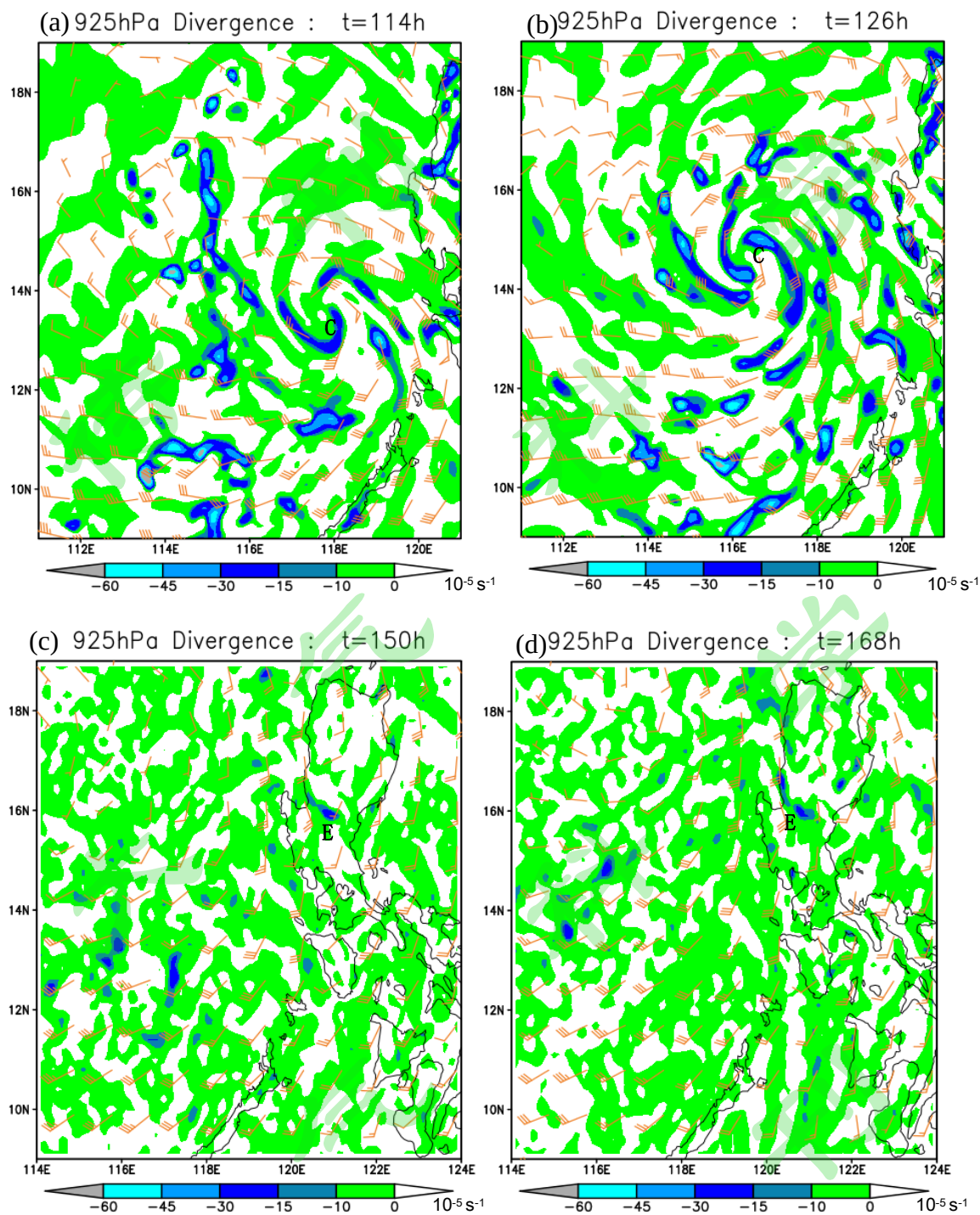


图 10 (a, b)CMA-TRAMS 和 (c, d)ECMWF 模式预报 (a) 114 h、(b) 126 h、(c) 150 h 和 (d) 168 h 低压区域 925 hPa 散度场（填色； 10^{-5} s^{-1} ）、风场（风向杆）

Figure 10 The divergence (shaded; 10^{-5} s^{-1}) and wind bar in central region in 925 hPa at (a) 114 h、(b) 126 h、(c) 150 h and (d) 168 h predicted by (a, b)CMA-TRAMS and (c, d)ECMWF, respectively.

图 11 给出 CMA-TRAMS 和 ECMWF 模式预报涡度中心相对于环境大气的温度距平和相对湿度的经度-气压垂直剖面（沿两模式各自预报涡度中心所在纬度），图中两模式经度范围根据各自预报的涡度中心位置选取，故略有差异。102 h，CMA-TRAMS 预报 102 h 120° E 以西为温度正距平，700–300 hPa 有一暖心，中心值超过 1K，300–400 hPa 暖心附近湿度达 100%（图 11a，沿 12.4° N）；随之暖心加强、范围扩大，在垂直方向位于 760–200 hPa，水平方向范围由 50km 增至约 150km，内核高湿区范围扩大（图略）；ECMWF 预报 102 h 中、高层大气有较大水平范围的温度正距平、距平值小于 1K（图 11b，沿 12.2° N）。108 h，CMA-TRAMS 暖心继续发展增强，最大温度正距平超过 2K、位于 400–200 hPa（图 11c，沿 13.0° N）；ECMWF 预报温度正距平小于 1K，未发展形成暖心结构，温度正距平区的相对湿度在 80–90%（图 11d，沿 12.4° N）。132 h，CMA-TRAMS 暖心显著增强，最大温度正距平超过 4K，温度距平大于 2K 的水平范围扩大，垂直方向向下延伸至 850 hPa，暖心内核对应高湿区、相对湿度 90–100%，呈现典型台风暖心结构（图 11e，沿 15.0° N）；ECMWF 预报温度正距平维持 1K 以下，仍未形成暖心结构（图 11f，沿 13.9° N）。

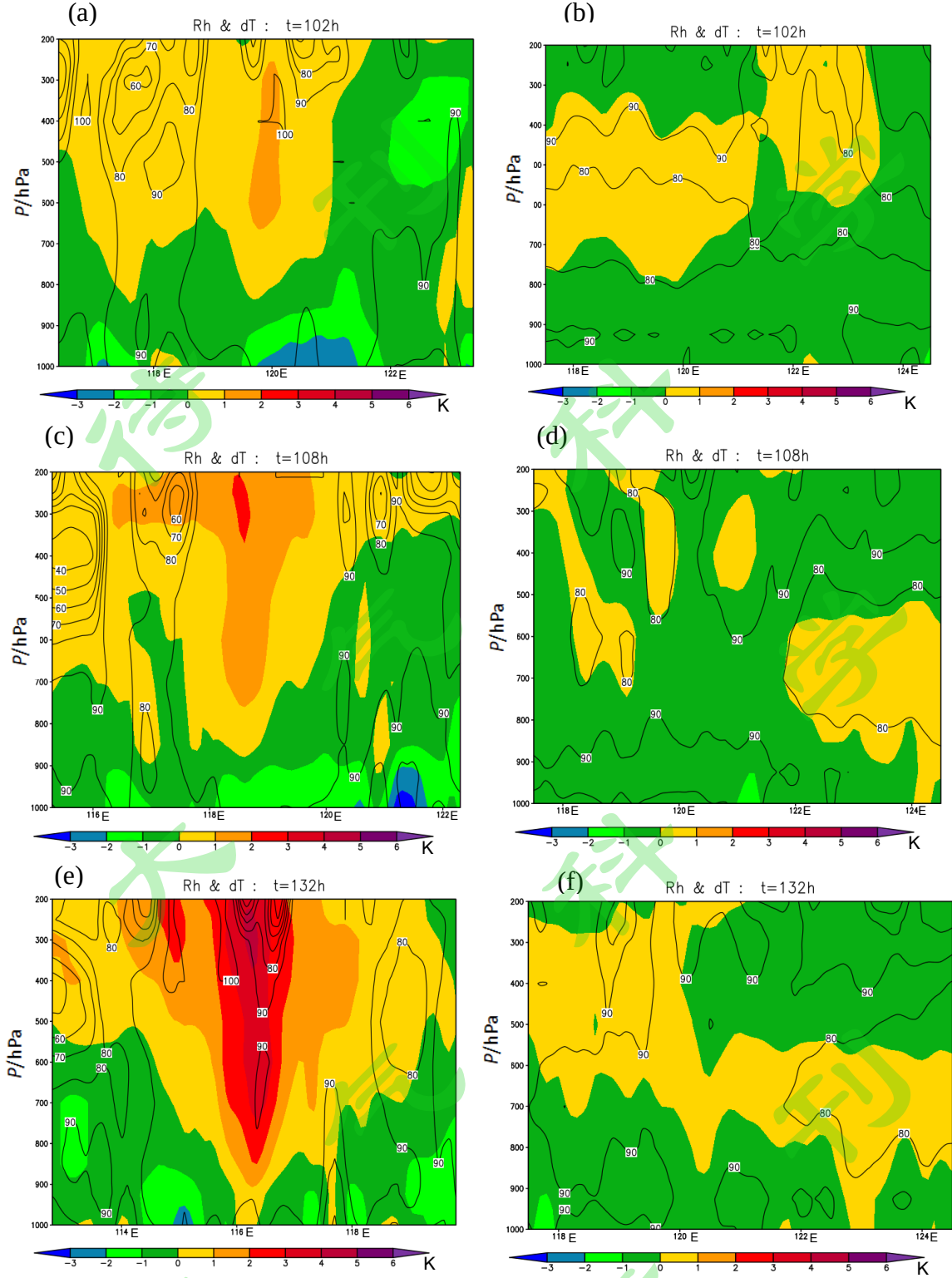


图 11 (a, c, e)CMA-TRAMS 和 (b, d, f)ECMWF 模式预报 (a, b)102、(c, d)108 和 (e, f)132 小时附近相对湿度（等值线，单位：%）和低压中心相对于环境大气的温度距平（单位：K）的经度-高度垂直剖面

Figure 11 The longitude-pressure cross sections of relative humidity (contoured, unit: %) and temperature anomaly (shaded, Unit: K) at embryo center according the surrounding environment at

(a, b)102 h, (c, d)108 h and (e, f)132 h by (a, c, e)CMA-TRAMS and (b, d, f)ECMWF.

99 h CMA-TRAMS 预报低压中心附近 850 hPa 和 200 hPa 之间低压中心的 U、V 风垂直切变均较小，位于零线附近（图略），说明低压环流上、下层之间的阻滞摩擦作用较小，有利于低压中心发展形成深厚气旋性环流。由 102、108 h 低压中心垂直速度剖面（图 12），低压中心为强上升气流（如图 12a，沿 119.9° N；图 12b，沿 118.8° N），上升速度大值中心与暖心基本重合，108 h 高层气体的上升速度比 99 h（图略）明显增大，高层暖心随之加强，表明低压中心区气体垂直上升速度增大与暖心的形成和发展关系密切，低层较暖的气体上升到高层，水汽凝结释放潜热、加热大气，促进中高层暖心形成、加强。

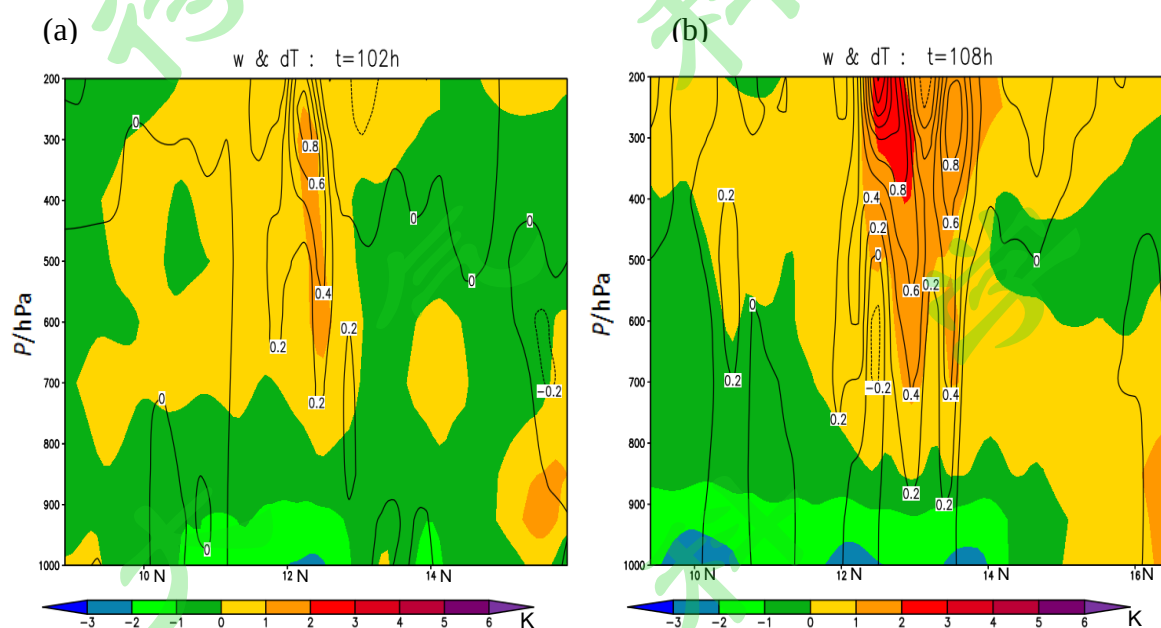


图 12 CMA-TRAMS 模式预报 (a)102 小时和 (b)108 小时低压中心附近垂直速度（等值线，单位： m s^{-1} ）和暖心结构（填色，单位：K）的纬度-高度垂直剖面

Figure 12 The latitude-pressure cross sections of vertical velocity (contoured, unit: m s^{-1}) and temperature anomaly (shaded, Unit: K) at embryo center according the surrounding environment at (a)102 h and (d)108 h by CMA-TRAMS.

以下针对报出台风生成的 CMA-TRAMS 模式结果, 进一步分析台风生成关键阶段中层 MCVs 的发生、发展和结构演变特征（图 13），探讨其在台风生成过程中的作用。81 h, 3 个 MCV 产生在 120-122E 之间（图 13a）；84 h 三者调整整合，118° E 产生一 MCV（图 13b）；至 87 h 整合为 2 个 MCV，位于 120E 东（记为 MCV 1）、西（记为 MCV 2）两侧（图 13c）；90

h 西部的 MCV 2 被东部 MCV 1 吸收, MCV 1 发展壮大 (图 13d); 93 h, 118E 附近产生 1 个新的 MCV 3, 之后向北偏东方向移动 (图 13e); 96 h MCV 3 和北部 11° N 的 MCV 1 距离减小, 两气旋式环流接近、调整 (图 13f); 99 h, 上述两气旋式环流整合, 呈东西向狭长状环流 (图 13g), 形成 1 个新的 MCV 4, 环流较为对称 (102 h, 图 13h), 105 h MCV 4 西南侧出现一气旋式环流 (图 13i), 108 h 其西南侧环流发展为 MCV 5, 趋近 MCV 4 (图 13j); 111 h MCV 5 被 MCV 4 外围环流整合吸收 (图 13k), 114 h 中心区域气旋性环流增强、流线更密实, MCV 4 涡度增强、范围增大 (图 13l), 之后 MCV 4 将大尺度气旋性环流 (菲律宾西侧气旋式环流) 中心区域新产生的 MCV 6 (117 h, 图略) 进一步吸收整合 (120 h, 图略), 此后该系统持续增强, 环流组织化发展、生成台风。可以看到, 在大尺度背景场气旋性环流的内部, 初期中心区域多个 MCVs 并存、各自呈气旋式闭合环流, 流场较凌乱; 之后中心区域持续有 MCVs 产生, 在背景环流引导下趋近某一 MCV (或互相趋近)、环流整合, 其母体 MCS 发展, 之后中心区域的环流逐渐组织化、形成一个尺度较大、较为紧密的气旋式环流, 并持续发展形成台风。可知, 中层 MCV 的生成和组织化发展有效地促进低压中心区域环流的一体化发展和增强, 在形成台风“暹芭”的过程中发挥了重要的支撑作用。

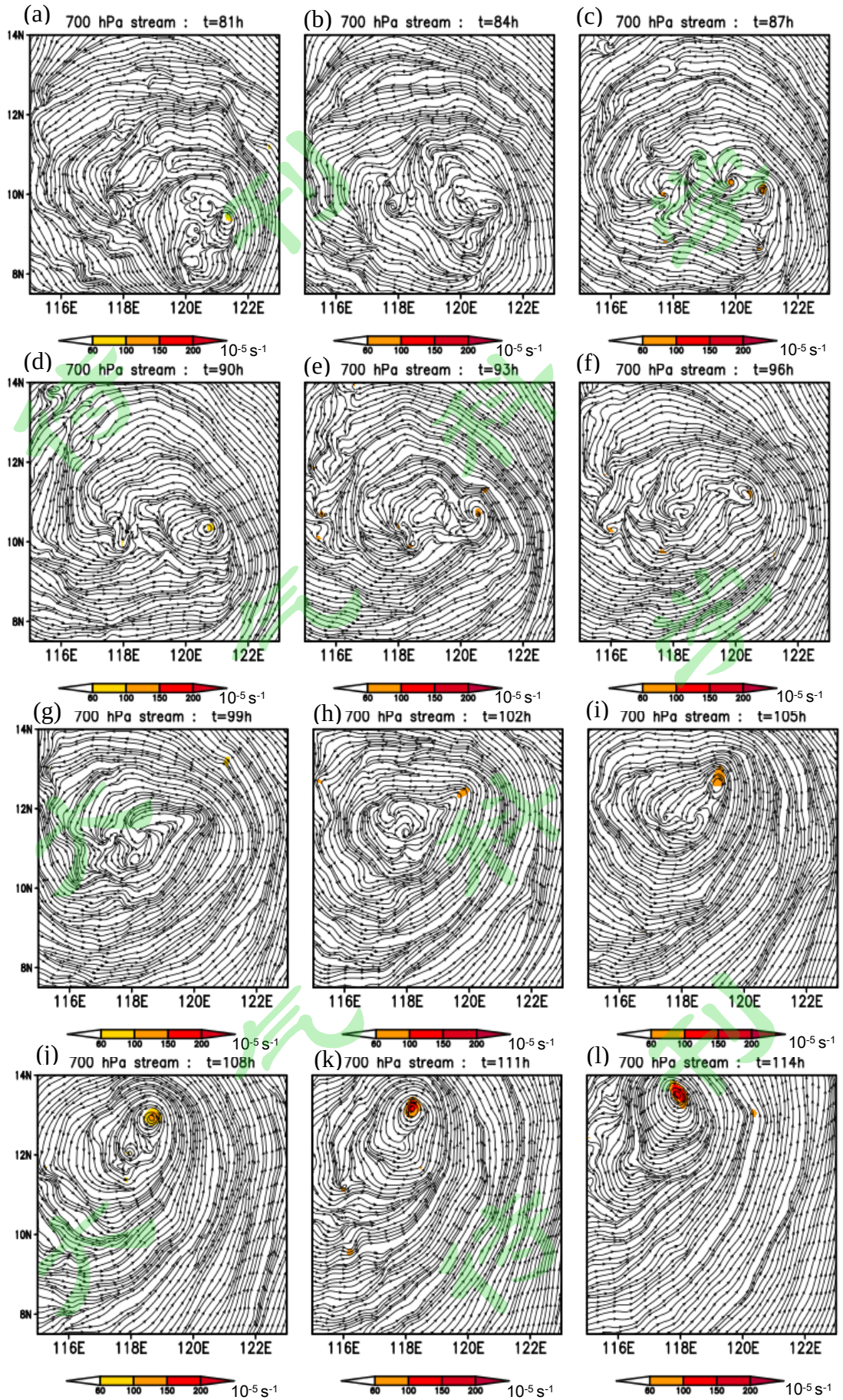


图 13 CMA-TRAMS 模式预报 81-114 h 700 hPa 流场和涡度（填色； 10^{-5} s^{-1} ）

Figure 13 The streamline fields at 700 hPa and relative vorticity (shaded, Unit: 10^{-5} s^{-1}) from 81 h to 114 h predicted by CMA-TRAMS.

在中层 MCV 提供的有利环境条件下，台风生成与积云对流热塔（水平尺度 10-30km）的产生、合并及轴对称化过程密切相关（Montgomery et al., 2006；张文龙等，2010）：中层 MCV 提供的正涡度环境有利于热塔的产生和聚集，热塔聚集后的反馈作用使中层 MCV 加强或维持，促进热塔合并及轴对称化发展。成熟的热塔应在整个对流层都存在垂直上升运动（张文龙等，2008a），参考张文龙等（2008a）的做法，以低、中、高三层垂直速度来考察 CMA-TRAMS 预报“暹芭”生成前期 84 h 和 120 h 中层 MCV 及其附近区域的热塔活动情况（图 14）。可看到，84 h 在 850 hPa（图 14a）、600 hPa（图 14b）和 300 hPa（图 14c）均存在多个点状的垂直上升中心，尺度约为 10-30 km，符合热塔的水平尺度特征。中层和高层的垂直速度中心个数比低层多，由于有些热塔可能不在成熟期（为新生或衰亡阶段），所以不是三个层次同时存在垂直速度中心。121° E 附近、8-10° N 之间有多个热塔在三个层次都观察到垂直上升中心。同时可看到，600 hPa（图 14b）存在多个中层 MCV，位于 121° E 中层 MCV 西侧的热塔 A 在 600 hPa 和 300 hPa 观察到与附近热塔的合并现象，热塔 B、C 在 300 hPa 观察到与附近热塔的合并现象。120 h 中层 MCV 的西侧和东侧三层高度都观测到垂直上升中心（图 14d, 14e, 14f），说明东、西两侧积云对流热塔基本成熟，上升中心的面积比 84 h 热塔稍大，两侧中低层相近的中心在高层 300 hPa 有合并现象（图 14f）；还可看到在南侧和西南侧，中层和高层存在数个垂直速度中心，但低层尚无，表明这些区域热塔未发展成熟或处于衰亡阶段。图 14 反映出热塔在中层 MCV 区域气旋性涡度环境中产生、聚集、合并的现象。由于热塔生命史较短（1~3 小时），其消亡后携带的热量、水汽和涡度存贮在中层 MCV 中。

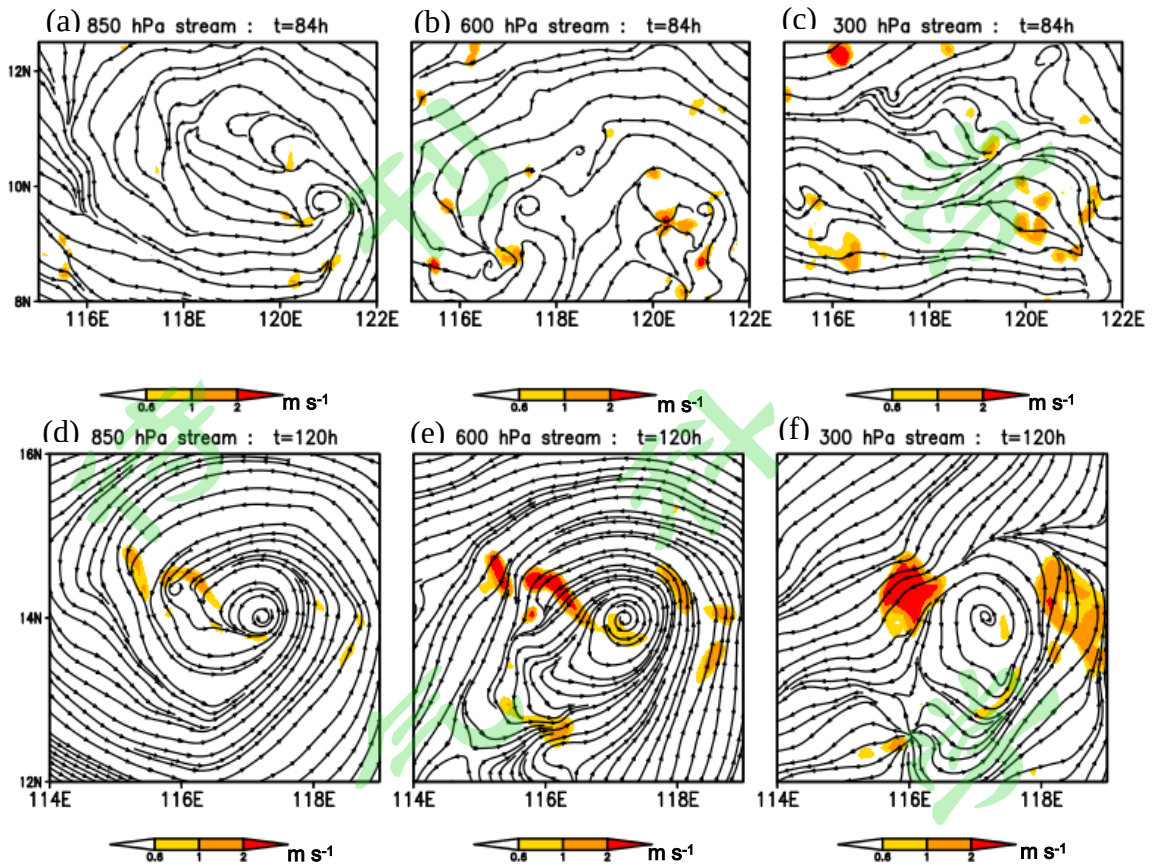


图 14 CMA-TRAMS 模式预报 (a, b, c) 84 h 和 (d, e, f) 120 h 的 (a)850 hPa, (b)600 hPa 和 (c)300 hPa 垂直速度 (填色; $\geq 0.6 \text{ m s}^{-1}$) 和流场

Figure 14 The vertical velocity (shaded, $\geq 0.6 \text{ m s}^{-1}$) and streamline fields at (a)850 hPa, (b) 600 hPa and (c)300 hPa at 84 h predicted by CMA-TRAMS.

选取 117.2° E 、 14° N 附近较为孤立的热塔做垂直剖面 (沿 117.2° E)，给出热塔附近相当位温 (图 15a)、垂直速度 (图 15b, 等值线) 和相对于环境的温度距平 (图 15b, 填色) 的高度-纬度剖面图。由图 15a, 14° N 附近热塔侧边界处的相当位温线较陡立, 说明热塔内气体上升过程基本未被环境空气稀释, 热塔两侧相当位温线基本对称。热塔底部相当位温高、其上层相当位温低, 为强对流不稳定层; 热塔顶部位温高于其下层, 为稳定逆温层; 低层 (925–850 hPa) 等相当位温线向上拱起, 是热塔内气体上升所致。以上结构与张文龙等 (2008a) 的模拟结果基本一致。由图 15b, 热塔位于垂直上升中心附近, 中上层气温相对于环境为正距平, 最大值超过 3K。

综上，CMA-TRAMS 对“暹芭”生成的模拟结果，反映出台风生成前期，中层 MCV 提供的气旋性涡度环境中，热塔产生、聚集、合并及轴对称化发展；热塔的涡度、能量、水汽被中层 MCVs 所吸收，中层 MCVs 加强、趋近、合并，气旋性环流组织化发展，形成近正压的强涡度系统，地面建立低压环流、气体垂直上升增强，形成暖心结构。

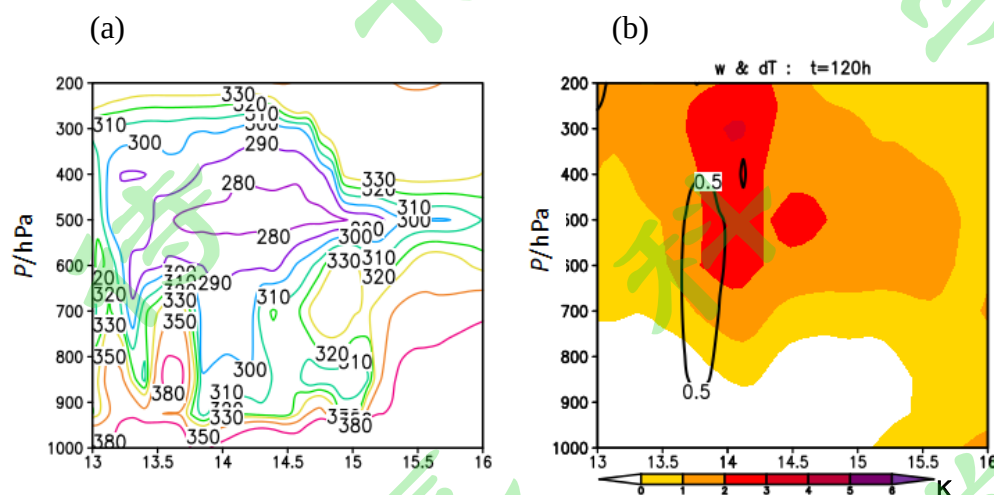


图 15 CMA-TRAMS 预报 120 h 热塔 E 的 (a) 相当位温(单位: K), (b) 垂直速度 (等值线, 单位: m s^{-1}) 和相对于环境的气温距平(单位: K)的气压-纬度垂直剖面

Figure 15 The pressure-latitude cross section of (a) equivalent potential temperature (unit: K), (b) vertical velocity (contour lines, unit: m s^{-1}) and temperature anomaly (unit: K) relative to the environment predicted by CMA-TRAMS at 120 h for heat tower.

4.3 “暹芭”生成的物理图像

基于 CMA-TRAMS 模式成功预报“暹芭”生成的模拟结果的分析，归纳总结“暹芭”生成的物理图像（图 16）：初始存在中尺度对流系统 MCS、位于低层正涡度的环境中，周边中小尺度正涡度系统（包含中尺度对流系统 MCSs 和中层涡旋 MCVs）发展旺盛，热塔在中层 MCV 正涡度环境中产生、聚集、合并及轴对称化发展，热塔的涡度、能量、水汽被中层 MCV 所吸收，促使中层 MCV 加强；MCSs 和 MCVs 趋近初始 MCS，与之合并，其涡度、能量和水汽等被吸收，组织化为较大规模的低压环流，形成低层辐合、高层辐散的形势；同时处于弱垂直风切变的环境，低压气旋性环流上下层协同性强，发展为近正压、较为直立的结构，若邻近周边存在 MCSs 和 MCVs，则可继续发生吸收、合并过程。低压中心近于垂直的低层辐合、高层辐散的形势促进近海表面气体的上升运动，气体上升过程中其气温高于周围大气形成暖心，

暖湿气体在中高层凝结、释放潜热、加热大气，进一步促进暖心加强、上升加强，底层低压中心半径缩小，气压梯度力增大、入流增强、底层降压，从而使低压发展、生成台风。

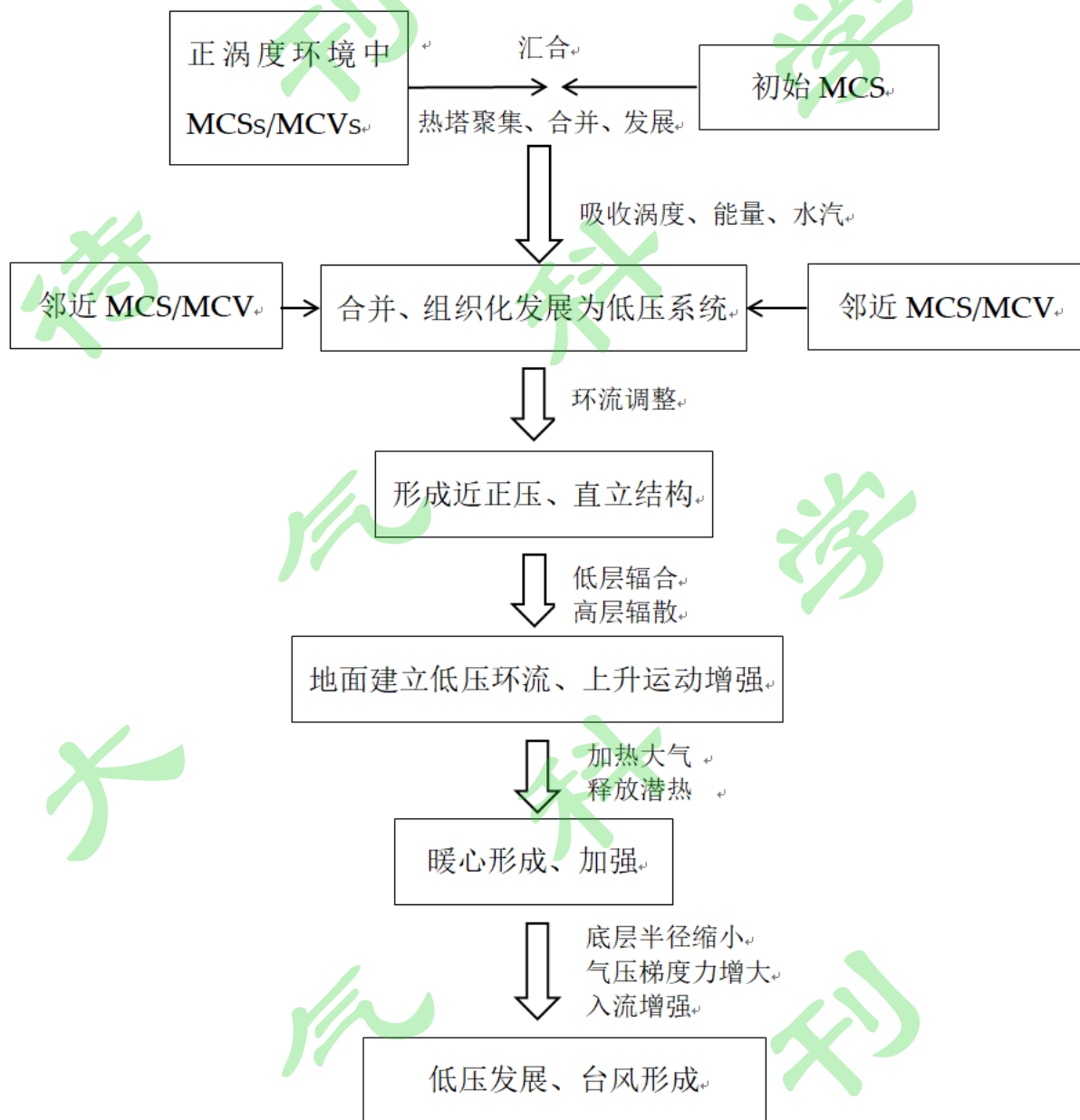


图 16 台风生成概念图

Figure 16 Conceptual graph of generation of tropical cyclone.

5. 总结和讨论

本文针对 2022 年 3 号台风“暹芭”，分析了南海台风模式 CMA-TRAMS 和 ECMWF 模式对台风生成的预报差异，从台风胚胎所处环境、胚胎内物理过程、胚胎结构等不同方面分析探讨了 CMA-TRAMS 模式成功预报“暹芭”生成的原因，得到如下结论：

- (1) 48 h 后两模式预报的垂直风切变、相对湿度和相对涡度均向有利于台风生成的条件转变；48-96 h 期间 CMA-TRAMS 预报的中层湿度、低层涡度和环境风切变条件比 ECMWF 更有利于台风生成。
- (2) 72-120 h 期间两模式预报菲律宾西侧的季风槽气旋式环流形势的显著差异，是造成两模式台风生成预报差异的直接原因。72 h ECMWF 模式未能报出 12° N 以北菲律宾附近由偏南风转为偏东风、后期偏东分量偏小，使扰动中心未能与季风槽环流汇合发展。
- (3) 在 96-120 h 台风发展生成的关键期，CMA-TRAMS 预报出多个中尺度对流系统 (MCSs) 或中尺度涡旋 (MCVs) 在正涡度环境下生成、发展、合并，并组织化发展，有效地促进低压中心区域环流的一体化发展和暖心结构形成，在台风“暹芭”的生成过程中发挥了重要支撑作用。这是其能够预报台风生成的主要原因。ECMWF 则未预报出这种多个 MCSs 或 MCVs 不断发展-汇合-合并的过程，扰动中心也未形成暖心结构。
- (4) 基于 CMA-TRAMS 模式的模拟结果，概括台风生成的物理图像：低层正涡度环境中存在初始扰动及 MCVs，MCVs 正涡度区域热塔产生、聚集、合并，提供涡度、能量和水汽促进 MCVs 加强，初始扰动持续与邻近 MCSs 或 MCVs 合并，组织化为近正压低压环流。低层气体上升凝结释放潜热、加热大气，促使暖心形成和加强，底层半径缩小、气压梯度力增大、入流增强，低压发展生成台风。

本文研究使我们认识到，菲律宾西侧季风槽的风场预报精度可能对南海台风生成的预报有重要影响，中尺度对流系统和中小尺度涡旋的不断汇合、合并及组织化是台风生成的重要物理过程。本研究结果加深了我们对台风生成主要物理过程的理解，增进了我们对数值模式台风生成预报影响因素的认识，并为模式台风生成预报改进提供线索。但本文关于菲律宾西侧季风槽风场预报对台风生成的影响还需要更多个例的分析验证，后续也可进一步开展数值敏感试验加以研究。

致谢：感谢陈德辉研究员、冯业荣研究员的宝贵建议和吴凯昕助研对本文研究的帮助！

参考文献

白莉娜,王元.2009. 南海源地热带气旋生成和登陆频数的气候变异[J].南京大学学报(自然科学版), 45(06):

- 757-768. Bai L N, Wang Y. 2009. Climatic variation of the occurring and landing frequencies of tropical cyclones initiated from South China Sea. *Journal of Nanjing University (natural sciences)* (in Chinese), 45(06): 757-768.
- Balsamo G, Viterbo P, Beljaars A, et al. 2009. A revised hydrology for the ECMWF model: Verification from field site to terrestrial water storage and impact in the Integrated Forecast System [J]. *J Hydrometeorol*, 10, 623-643.
- Bartels D L, Maddox R A. 1991. Midlevel cyclonic vortices generated by mesoscale convective systems [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 119: 104-118.
- Bechtold P, Koehler M, Jung T, et al. 2008. Advances in predicting atmospheric variability with the ECMWF model: From synoptic to decadal time-scales [J]. *Q J R Meteorol Soc*, 134(634), 1337-1351.
- Bechtold P, Semane N, Lopez P, et al. 2014. Representing equilibrium and non-equilibrium convection in large-scale models. *J. Atmos. Sci.*, 71(2), 734-753.
- Bister M, Emanuel K. 1997. The genesis of Hurricane Guillermo: TEXMEX analyses and a modeling study[J]. *Mon Wea Rev*, 125(10): 2 662-2 682.
- Chanh Q K, Zhang D L. 2008. Genesis of tropical storm eugene(2005) from merging vortices associated with ITCZ breakdowns. Part I: observational and modeling analyses[J]. *J Atmos Sci*, 65(11): 3 419-3 439.
- Charney J G, Eliassen A. 1964. On the growth of the hurricane depression[J].*J Atmos Sci*, 21:68—75.
- 陈德辉, 沈学顺, 2006. 新一代数值预报系统GRAPES研究进展[J]. *应用气象学报*, 17 (6): 773-777. Chen D H, Shen X S, 2006. Recent progress on GRAPES research and application [J]. *J Appl Meteor* (in Chinese), 17(6): 773-777.
- 陈联寿, 丁一汇. 1979. 西太平洋台风概论 [M]. 北京: 科学出版社. Chen Lianshou, Ding Yihui. 1979. *The Generality of Typhoon in the Western Pacific*[M]. Beijing: Science Press(in Chinese).
- 陈子通, 徐道生, 戴光丰等. 2020. 热带高分辨率模式(TRAMS-V3.0)技术方案及其系统预报性能[J]. *热带气象学报*, 36(04):444-454. Chen Z. T, D. Xu, G. Dai, Y. Zhang, S. Zhong, Y. Huang, 2020. Technical scheme and operational system of tropical high-resolution moel (TRAMS-V3.0), *J Trop Meteor*(in Chinese), 36(4): 444-454. DOI:10.16032/j.issn.1004-4965.2020.041.
- 陈贞璇, 陈科艺, 希爽, 等. 2024. 风云三号C星微波湿度计资料全天候同化对台风玛莉亚预报的影响[J]. *大气科学*, 48(4): 1457-1477. CHEN Zhenxuan, CHEN Keyi, XI Shuang, et al. 2024. Effects of Assimilating Microwave Humidity Sounders Data from FengYun-3C Satellite under All-Sky Conditions on the Forecasts of Typhoon Maria [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 48 (4): 1457-1477. doi:10.3878/j.issn.10069895.2302.22085
- Craig G C, Gray S L. 1996. CISK or WISHE as the mechanism for tropical cyclone intensification [J]. *J atmos Sci*, 53(3):3528-3540.
- 端义宏, 余晖, 伍荣生, 2005. 热带气旋强度变化研究进展[J]. *气象学报*, 63 (5): 636 -645. Duan Yih on g H,

- Yu Hui, Wu Rongsheng R S, 2005. Review of the research in the intensity change of tropical cyclone [J]. *Acta Meteor Sin* (in Chinese), 63(5): 636-645.
- Dunkerton T J, Montgomer M T, Wang Z. 2009. Tropical cyclogenesis in a tropical wave critical layer: Easterly waves[J]. *Atmos Chem Phys*, 9(15): 5 587–5 646.
- Emanuel K A. 2003. Tropical cyclone[J]. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 31(1): 75-104.
- Emanuel K A. 1986. An air-sea interaction theory for tropical cyclone.Part I :Steady state maintenance[J].*J Atmos Sci*, 43: 585—604.
- 冯文,黄伟健,谭绮婷,等.2016. 一种基于多物理量阈值定义的热带气旋生成预报方法及在ECMWF全球模式中的应用验证[J].*热带气象学报*,32(06):908-917. Feng W, Huang W J, Tan Q T, et al. 2016. Tropical cyclone genesis forecasting based on thresholds of multiple physical parameters and verification of performance using ECMWF model. [J]. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 32(06):908-917.DOI:10.16032/j.issn.1004-4965.2016.06.012.
- Forbes R M and Tompkins A M. 2011. An improved representation of cloud and precipitation. ECMWF Newsletter No. 129, pp. 13-18.
- Gray W M. 1975. Tropicalcyclonegenesis [J] .*Atmospheric Science Paper*, 234: 1-121.
- Gray W M. 1998. The formation of tropical cyclones[J].*Meteorol Atmos Phys*, 67:37—69.
- 郝赛, 毛江玉. 2015. 西北太平洋与南海热带气旋活动季节变化的差异及可能原因 [J]. *气候与环境研究*, 20 (4): 380–392. Hao Sai, Mao Jiangyu. 2015. Differences of the seasonal variations of tropical cyclone activities over the South China Sea and the western North Pacific and the possible causes [J]. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 20 (4): 380–392, doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2014.14063
- Halperin D J, Fuelberg H E, Hart R E, et al. 2016. Verification of tropical cyclone genesis forecasts from global numerical models: Comparisons between the North Atlantic and Eastern North Pacific Basins [J]. *Weather and Forecasting*, 31(3): 947–955, <https://doi.org/10.1175/WAF-D-15-0157.1>
- Halperin D J, Pennya B, Hart R E. 2020. A comparison of tropical cyclone genesis forecast verification from three Global Forecast System (GFS) operational configurations [J]. *Weather and Forecasting*, 35(5): 1801–1815, <https://doi.org/10.1175/WAF-D-20-0043.1>
- Harr P A, Kalafsky M S, Elsberry R L. 1998. Environmental conditions prior to formation of a midget tropical storm during TCM-93[J]. *Mon Wea Rev*, 124(8): 1 693-1 710.
- Hendricks E A, Montgomery M T, Davis C A. 2004. The role of "vortical" hot towers in the formation of tropical cyclone Diana(1984)[J]. *J Atmos Sci*, 61(11): 1 209-1 232.
- Iacono M, Delamere J, Mlawer E, et al. 2008. Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: Calculations with the AER radiative transfer models [J]. *J Geophys Res*, 113(D13). Doi:10.1029/2008JD009944.
- 雷小途,李永平,于润玲,等 2019.新一代区域海-气-浪耦合台风预报系统[J].*海洋学报*, 41(06): 123-134. Lei X T, Li Y P, Yu R L, et al, 2019. A new generation of regional air-sea-wave coupled typhoon prediction system [J]. *Acta Ocea Sin* (in Chinese), 41(06): 123-134.

- 李春晖,刘春霞,程正泉.2007. 近50年南海热带气旋时空分布特征及其海洋影响因子[J].热带气象学报,23(4):341-347. Li Chunhui, Liu Chunxia, Cheng Zhengquan. 2007. The characteristics of temporal and spatial distribution of tropical cyclone frequencies over the South China Sea and its affecting oceanic factors in the past 50yrs [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 23 (4): 341–347.
- 李宪之.1983. 论台风[M].北京: 气象出版社:19-28,100-112. Li X Z. 1983. On typhoons [M]. Beijing: Meteorological Press (in Chinese).
- 李雪,任福民,杨修群,等. 2010. 南海和西北太平洋热带气旋活动的区域性差异分析[J].气候与环境研究, 15(04): 504-510. Li X, Ren F M, Yang X Q, et al. 2010. A study of the regional differences of the tropical cyclone activities over the South China Sea and the Western North Pacific. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 15(04): 504-510.
- 李泽椿,张玲,钱奇峰,等, 2020. 中央气象台台风预报业务的发展及思考[J]. 大气科学学报, 43(1): 10-19. Li Z C, Zhang L, Qian Q F, et al, 2020. The development and consideration of typhoon forecast operation of National Meteorological Center [J]. Trans Atmos Sci (in Chinese), 43(1): 10-19.
- Li M J, Chen Z T, Dai G F, et al. 2024. An Evaluation of Tropical Cyclone Genesis Forecast over the Western North Pacific and the South China Sea from the CMA-TRAMS [J]. Journal of Tropical Meteorology, 30 (1): 20-28, <https://doi.org/10.3724/j.1006-8775.2024.003>
- Montgomery M T, Nicholls M E, Cram T A, et al. 2006. A vortical hot tower route to tropical cyclogenesis [J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 63(1): 355–386, <https://doi.org/10.1175/JAS3604.1>
- Nielsen E R, Schumacher R S. 2018. Dynamical insights into extreme short-term precipitation associated with supercells and mesovortices [J]. Atmos. Sci., 75: 2983-3009.
- Pasch R J, Harr P A, Avila L A, et al. 2006. An Evaluation and Comparison of Predictions of Tropical Cyclogenesis by Three Global Forecast Models [Z]. Miami: NOAA/NWS/ NCEP/TPC.
- 钱奇峰,王川,徐雅静,等. 2021.一种基于深度学习的台风强度估测技术[J].气象,47(5):601-608. Qian Q F, Wang C, Xu Y J, et al. 2021. A deep learning technique of typhoon intensity estimation [J]. Meteor Mon (in Chinese),47(5) :601-608.
- Ritchie E A, Holland G J. 1999. Large-scale patterns associated with tropical cyclogenesis in the western pacific[J]. Mon Wea Rev, 127(9): 2 027-2 043.
- Tang B H, Fang J, Bentley A, et al. 2020. Recent advances in research on tropical cyclogenesis [J]. Tropical Cyclone Research and Review, 9(2):87-105, <https://doi.org/10.1016/j.tcr.2020.04.004>
- Trier S B, Davis C A, Tuttle J D. 2000. Long-lived mesoconvective vortices and their environment. Part I: Observations from the central United States during the 1998 warm season [J]. Mon. Wea. Rev., 128: 3376–3395.
- 王会军, 范可. 2006. 西北太平洋台风生成频次与南极涛动的关系 [J].科学通报, 51 (24): 2910 – 2914. Wang H J, Fan K. 2006. Relationship between the Antarctic oscillation and the western North Pacific typhoon frequency [J]. Chinese Science Bulletin (in Chinese), 51 (24): 2910–2914.

- Wang B, Murakami H. 2020. Dynamic genesis potential index for diagnosing present-day and future global tropical cyclonegenesis [J]. Environmental Research Letters, 15,114008,https://doi.org/10.1088/1748-9326/abbb01.
- Wang Z, Montgomery M T, Dunkerton T J. 2009. A dynamically based method for forecasting tropical cyclogenesis location in the Atlantic sector using global model products[J]. Geophys Res Lett, 36, L03801, doi:10.1029/2008GL035586.
- 徐道生, 张邦林, 曾庆存, 等. 2019. 一种基于分析增量更新技术的台风初始化方案[J]. 气象学报, 77 (6): 1053-10661. Xu D S, Zhang B L, Zeng Q C, et al. 2019. A typhoon initialization scheme based on incremental analysis updates technology [J]. Acta Meteor Sin (in Chinese), 77 (6): 1053-10661.
- 徐道生, 张艳霞, 王刚, 等. 2015. meso-SAS对流参数化方案的改进及其在9km分辨率模式中的应用[J]. 热带气象学报, 31(05):608-618. Xu D S, Zhang Y X, Wang G, et al. 2015. Improvement of MESO-SAS cumulus parameterization scheme and its application in a model of 9 km resolution [J]. J Trop Meteor, 31(05):608-618. DOI:10.16032/j.issn.1004-4965.2015.05.004(in Chinese).
- Zehr R M. 1992. Tropical Cyclogenesis in the Western North Pacific[R]. NOAA Tech Rep. NESDIS 61, 181.
- 张端禹, 王俊超, 王晓芳, 等. 2024. 高、低空急流耦合对山东“利奇马”台风暴雨增幅影响的诊断研究[J]. 大气科学, 48(2): 445-462. ZHANG Duanyu, WANG Junchao, WANG Xiaofang, et al. 2024. Diagnostic Research on Heavy Rain Growth in Shandong Province Influenced by Landing Typhoon Lekima due to the Coupling of Upper- and Low-level Jet Streams [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 48(2): 445-462. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2301.22002
- 张庆红, 郭春蕊. 2008. 热带气旋生成机制的研究进展[J]. 海洋学报(中文版), 30 (04):1-11. Zhang Q H, Guo C L. 2008. Overview of the studies on tropical cyclone genesis [J]. Acta Oceanologica Sinica (in Chinese), 30 (04):1-11.
- 张文龙, 崔晓鹏. 2013. 热带气旋生成问题研究综述[J]. 热带气象学报, 29(2): 337-346. Zhang W L, Cui X P. 2013. Review of the studies on tropical cyclone genesis [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 29(2): 337-346.
- 张文龙, 崔晓鹏, 王昂生, 等. 2008a. 2001年台风榴莲生成前期对流“热塔”的数值模拟[J]. 热带气象学报, 24(6): 619-628. Zhang W L, Cui X P, Wang A S, et al. 2008. Numerical simulation of hot towers during pre-genesis stage of typhoon Durian (2001), Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 24(6): 619-628.
- 张文龙, 王昂生, 崔晓鹏. 2008b. 对流层中层中尺度涡旋在台风榴莲生成中的作用——数值模拟及验证[J]. 大气科学, 32(5): 1 197-1 209. Zhang W L, Wang A S, Cui X P. 2008. The role of the middle tropospheric mesoscale convective vortex in the genesis of typhoon Durian (2001) — Simulation and verification. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 32(5): 1 197-1 209.
- 张文龙, 张大林, 王昂生, 等. 2009. 台风榴莲(2001)在季风槽中生成的机制探讨[J]. 气象学报, 67(5): 811-827. Zhang W L, Zhang D L, Wang A S, et al. 2009. An investigation of the genesis of typhoon Durian

from a monsoon trough. *Acta Meteorologica Sinica*, 67(5): 811-827.

张文龙, 崔晓鹏, 董剑希. 2010. 对流层中层中尺度对流涡旋在台风榴莲(2001)生成中的作用——模拟
针对分析[J]. 大气科学, 34(1): 45—57. Zhang Wenlong, Cui Xiaopeng, Dong Jianxi. 2010. The role of
middle tropospheric mesoscale convective vortex in the genesis of typhoon Durian (2001) —Diagnostic
analysis of simulated data [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 34(1): 45—57.
Zhang D L, Bao N. 1996. Oceanic cyclogenesis as induced by a mesoscale convective system moving offshore.
Part II: Genesis and thermodynamic transformation[J]. *Mon Wea Rev*, 124(10): 2 206-2 226.