

韦美闹,赵金彪,陈绍河,等.南海台风“韦帕”生成环境条件及移动转向成因分析[J].气象研究与应用,2021,42(4):20–25.

Wei Meinao,Zhao Jinbiao,Chen Shaohe,et al. Analysis on the formation environmental conditions and causes of movement and recurvature of Tropical Storm Wipha[J].Journal of Meteorological Research and Application,2021,42(4):20–25.

# 南海台风“韦帕”生成环境条件及移动转向成因分析

韦美闹<sup>1</sup>, 赵金彪<sup>2</sup>, 陈绍河<sup>3</sup>, 董雪晗<sup>2</sup>

(1.钦州市气象局, 广西 钦州 535000; 2.广西壮族自治区气象台, 南宁 530022;

3.防城港市气象局, 广西 防城港 538000)

**摘要:**利用华南区域常规观测站资料、静止卫星红外云图及 NCEP 格点再分析资料,对 2019 年第 7 号台风“韦帕”生成环境条件、移动转向的成因进行了分析。结果表明,台风“韦帕”生成于热带辐合带弱垂直风切变中心附近,高海温是其生成及发展的基础条件,强度维持与西南季风及越赤道气流卷入密切相关。感热通量和潜热通量变化显示,“韦帕”所获取的海表面热通量较少,这是其强度增强有限的主要原因;台风移动路径与引导气流密切相关,其不同阶段受不同层次引导气流影响,且引导气流弱,台风移动速度也较慢;台风“韦帕”发生停滞及转向,主要由于大尺度环境场发生明显改变,西太平洋副热带高压、南亚高压及东风波都起重要的影响;低层台风中心附近风速变化影响台风环流结构内力的方向大小,也会造成台风路径移向的变化,高层辐散区对台风中心移动有“引导”作用。

**关键词:**南海台风;环境条件;转向

**中图分类号:** P458.1+24

**文献标识码:** A

**doi:** 10.19849/j.cnki.CN45-1356/P.2021.4.04

**OSID:**

## 引言

南海台风生成地点距我国大陆较近,生成后往往在较短时间内就会影响到华南沿海,也可能生成时就开始影响南海海岛,而其生成发展、移动路径和强度变化仍是风雨落区预报的基础和前提,对减灾防灾至关重要<sup>[1]</sup>。研究表明,台风路径的影响因素非常多且复杂,其中大型流场的变化起主导作用<sup>[2-5]</sup>;许变等<sup>[6]</sup>在分析引导气流与台风路径变化关系时,发现中低层引导气流对台风路径变化有重要指示作用;仲荣根等<sup>[7]</sup>研究认为,台风主要在气压梯度力、地转偏向力及阻力等三个作用力的平衡与不平衡下运动,当三力不平衡时,台风将会加速移动,当三力平衡时,台风将减速移动。影响南海台风路径北折的环境因素通常认为有以下 5 情况:台风进入季风汇合线、东风波的重位作用、印缅槽东移、华南(或南海北部)高压的减弱、赤道高压加强和副热带高压南

落,有时是几种形势交叉出现<sup>[8-9]</sup>;另外台风环流本身的非对称结构也是导致南海台风北翘的原因之一<sup>[10-11]</sup>。而高拴柱等<sup>[12]</sup>分析指出:南海台风生成前的主要背景环流是赤道辐合带、西南季风或东风波等。

近年来随着观测技术、数值模拟和资料同化等技术的发展,以及对台风运动物理机制的深入研究,台风路径预报的准确率有了大幅提升<sup>[13-18]</sup>,但是对于突然性偏折等异常路径的预报目前仍然缺乏有效手段<sup>[19-20]</sup>。2019 年第 7 号台风“韦帕”在 8 月 1—2 日两天时间内先后在华南三省区沿海登陆,给三省区造成了较强的风雨影响和较大的经济损失。对“韦帕”停滞及转向的预报是预报业务和服务中的难点。

采用华南区域常规观测资料、静止卫星红外云图、NCEP1°×1°逐 6h 再分析资料及中国气象局上海台风研究所最佳路径资料,对台风“韦帕”生成发展环境条件、路径变化成因等进行分析研究,以期今后此类南海台风预报提供参考。

收稿日期: 2021-11-10

基金项目: 广西气象科学研究计划项目(桂气科 2013Z04)、广西台风与海洋预报服务创新团队项目、广西科技项目“桂科 AB19110020”

作者简介: 韦美闹,女,壮族,广西环江县人,工程师,主要从事天气预报与服务工作。E-mail:275476295@qq.com

\* 通讯作者: 赵金彪,男,壮族,广西大新县人,正高级工程师,主要从事天气预报与服务工作。E-mail:zjb0073@163.com

# 1 台风“韦帕”移动路径和降水特点

## 1.1 路径复杂、移动缓慢、登陆次数多

2019 年第 7 号台风“韦帕”于 7 月 31 日上午在南海北部海面生成,随后向西北方向移动(图 1)。8 月 1 日 01 时 50 分(北京时,下同)左右在海南省文昌市沿海登陆,在海南岛境内打转停滞近 7h 后转向偏北方向移动,并于 1 日 17 时 40 分左右在广东省湛江市坡头区沿海再次登陆。随后,“韦帕”折向西行穿过雷州半岛进入北部湾,2 日 21 时 20 分前后在防城港市沿海再次登陆,并折向西南进入越南,3 日 14 时减弱为热带低压。另外,“韦帕”靠近海南岛时其中心风速加强到  $23\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  后基本无变化,移动缓慢,在广西近海及陆地停留长达 25h。

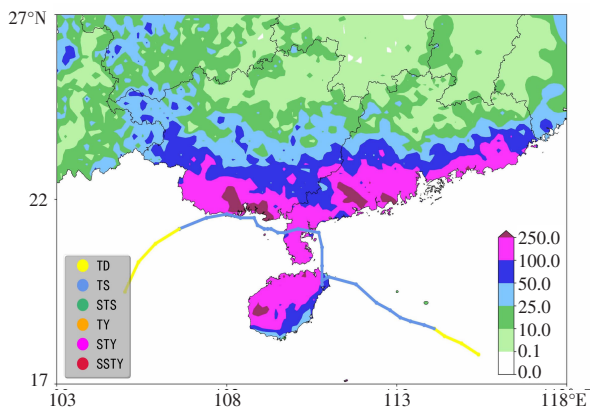


图 1 2019 年第 7 号台风“韦帕”移动路径及 7 月 30 日—8 月 3 日累积雨量(单位:mm)分布图

## 1.2 强风雨持续时间长,范围集中,局地累计雨量大

受“韦帕”影响,广东南部 and 西部沿海、广西南部 and 海南大部出现暴雨到大暴雨,局部特大暴雨。据统计,7 月 30 日 20 时—8 月 3 日 20 时共有 230 个站

过程总雨量大于 250mm,最大出现在斜阳岛 446mm,最大雨强为海口市秀英区遵潭镇达  $112\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ ;有 38 站出现 11 级以上阵风,其中 9 站出现 12 级以上阵风的大风天气。

# 2 台风发生发展环境条件

## 2.1 环境风垂直切变分析

已有研究表明,低层 850hPa 赤道季风辐合带是台风生成前扰动发展的主环流,台风生成前扰动中心常常处于其北侧风切变小而南侧风切变大的过渡带中<sup>[12]</sup>,少数扰动中心倾向于风切变小值中心附近。一般认为,弱的垂直风切变使积云所产生的凝结潜热集中于一个有限范围,有利于台风暖心结构的生成和维持,对于显著增强的登陆台风,其垂直风切变不会太大,平均在  $9\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  以下<sup>[21]</sup>。从图 2a 可看出,在“韦帕”发展为台风前,热带辐合带对流云系偏北活动,低层辐合线位于南海北部,南海北部处于垂直风切变低值区(图 2b),200hPa 与 850hPa 的垂直风切变值小于  $8\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,中心值小于  $4\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,非常有利于“韦帕”在该区域生成、发展。而与辐合线南侧对应的是大的垂直风切变区域带,这是由于低层西南季风气流加强向东推进,配合高层 200hPa 南亚高压东北辐散气流控制造成的,与文献[12]的研究结果是一致的。另外,从 31 日 20 时垂直风切分布情况可见,“韦帕”移动路径下游的海南岛东部海面到北部湾维持大范围的弱垂直风切变区,中心值小于  $4\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,也有利于“韦帕”移入该区域后强度得到加强和维持。

从图 2a 也可看出,7 月 30 日在低层季风辐合带东段  $135^\circ\text{E}$  附近存在一个扰动中心,对应 500hPa 环流有一个东风波。

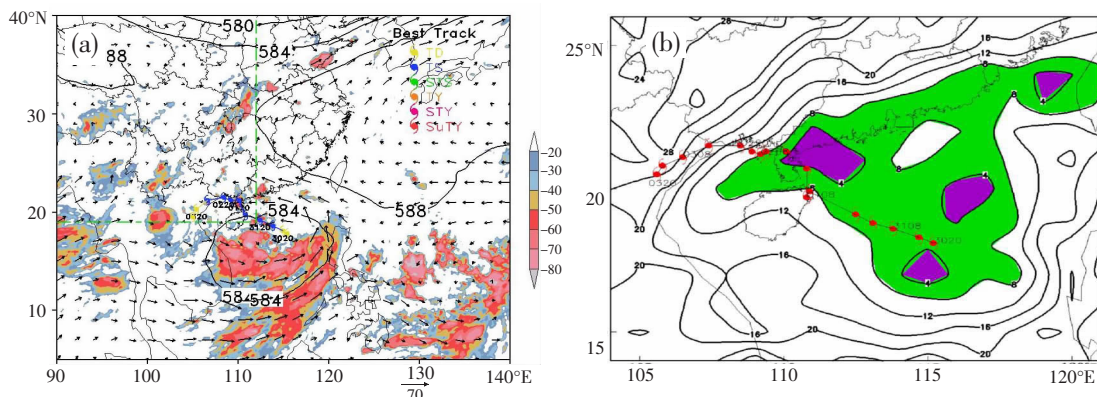


图 2 (a)7 月 30 日 08 时 500hPa 高度(实线)、850hPa 风场和 14 时 FY4A 红外云图(阴影:  $\text{TBB} \leq -20^\circ\text{C}$ ); (b)7 月 29 日 20 时 200~500hPa 垂直风切变(单位:  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )及台风路径图

## 2.2 热力条件分析

计算“韦帕”活动期间的平均海表面温度发现,其经过的海域海温均在  $29\sim 31^{\circ}\text{C}$  之间(图 3a),特别是北部湾及海南东部海表温度都在  $30^{\circ}\text{C}$  以上,高值中心达  $31.5^{\circ}\text{C}$ ,较常年平均偏高  $1^{\circ}\text{C}$  以上,暖海面上空潮湿空气的辐合上升会释放大量的凝结潜热,为台风的发展提供了更多的水汽和能量,有利于其形成及加强。另外,进一步计算了逐 6h 以台风中心 5 个经纬度范围内的海表面感热通量及 850hPa 潜热通量<sup>[22]</sup>(图 3b)。从图 3b 可看出,“韦帕”在热带低压至热带风暴阶段,感热通量及潜热通量持续增强,其中感热通量于 31 日 02 时达到  $43\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ,潜热通量于 31 日 14 时达到最大,为  $520\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ,此时“韦帕”中心最大风速达  $23\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。此后至登陆海南阶段,感热通量和潜热通量都开始下降,但潜热通量强度维

持在  $400\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$  左右,感热通量则降至  $5\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 。“韦帕”沿雷州半岛东部沿海北上至折向西进入北部湾期间,感热通量和潜热通量又稳步增强,2 日 14 时感热通量为  $15\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ,潜热通量为  $300\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ;之后感热通量和潜热通量均表现为急剧下降的特征,感热通量降为  $-10\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ,潜热通量降至  $110\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ,直到“韦帕”减弱消失,潜热通量维持在  $100\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$  以上,感热通量小于 0,对应此阶段“韦帕”强度逐渐减弱。

以上分析表明,高海温为“韦帕”的生成及发展提供了基础条件。感热和潜热与“韦帕”生成及发展关系比较密切,生成阶段及发展初期两者均起重要作用,后期在北部湾活动期间感热通量显著减小,潜热通量维持较高值,可见潜热起主要作用。“韦帕”近海生成,所获取的海表面感热和潜热通量较少,这是其强度增强有限的主要原因。

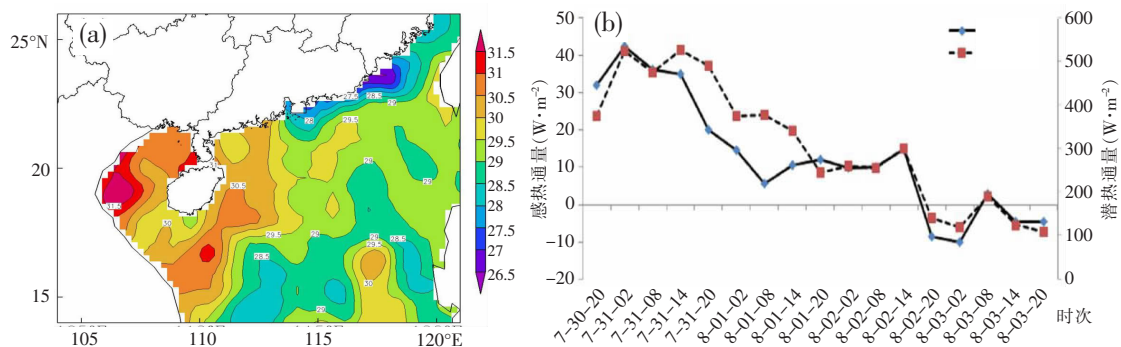


图 3 (a)平均海表面温度;(b)850hPa 感热通量和潜热通量

## 2.3 季风影响

水汽和能量得到及时补充是台风移动过程中维持和增强的重要条件<sup>[23-24]</sup>。从上节分析可得,热带辐合线南侧的大垂直风切变区域带与低层西南季风气流加强向东推进有明显相对应。分析 7 月 30 日—8

月 2 日 975~900hPa 平均水汽通量和平均风场(图 4)逐日演变,纵观“韦帕”在南海活动期间,台风南侧始终有一条水汽通量大于  $20\text{g}\cdot(\text{s}\cdot\text{cm}\cdot\text{hPa})^{-1}$  的西南东北向水汽输送带与台风环流东侧连接,从平均风矢来看,该水汽输送带主要是来自孟加拉湾的西南季

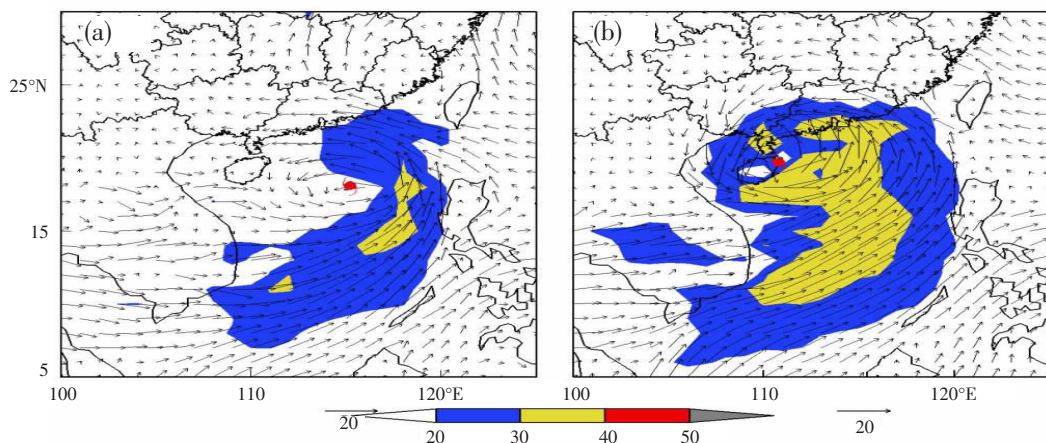


图 4 7 月 30 日—8 月 2 日 975~900hPa 平均水汽通量和平均风场



风向东输送与来自  $105^{\circ}\sim 110^{\circ}\text{E}$  的越赤道气流汇合而成。台风进入北部湾后台风环流东南侧的西南季风气流持续将南海上的水汽和能量输送到广西上空。以上分析表明,“韦帕”强度维持与西南季风及越赤道气流是密切相关。

另外从图 4 可看出,1 日 08 时 975~900hPa 低层台风中心南侧的偏西风大值区不断向东向北延伸,在台风环流东侧形成较大区域的西南风到偏南风的大值区,最大风速达  $22\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,而台风北侧的偏东风和西北侧的东北风相对较小,台风偏向北分量的内力加大,有利于台风向北移动。

### 3 台风移动转向原因分析

#### 3.1 引导气流与台风环流结构

将距离台风中心 5 个经纬度矩形环内的平均气流作为台风的引导气流<sup>[22]</sup>,同时计算逐 6h 以台风为中心的 5 个格点各层物理量平均值,7 月 30 日—8 月 3 日“韦帕”中心平均涡度、散度垂直分布、各层引导气流随时间的演变情况。从图可看出,“韦帕”从生成到登陆海南岛前从低层 850hPa 到高层 300hPa 各层的引导气流均以东南风为主,强度大于  $4\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,此时“韦帕”西北行,移动速度较快。“韦帕”登陆海南岛后移动速度减慢并转向北移动,此期间 850hPa 到高层 300hPa 的引导气流为弱的偏南气流;至 1 日 20 时,中低层(600~850hPa)的引导气流转为东南偏东方向,而高层的偏东气流下沉到 400hPa,表明高层的引导气流对台风移动开始起主导作用;2 日 20 时中高层(600~100hPa)的引导气流转为东北偏东风,此时“韦帕”又开始折向西南移动进入越南北部。整个台风生命史各层的引导气流都比较弱,因此其移动速度相对应比较慢。以上分析表明,台风移动路径与引导气流密切相关,其不同阶段受不同层次引导气流影响,且引导气流的强度与台风的移动速度有直接的联系。

1 日 17 时台风登陆湛江后,台风中心南侧的偏西气流和东侧的偏南气流都明显减弱,而台风中心北侧的偏东气流则明显加大,有利于台风登陆后转向西行。2 日 2 时之后,台风北侧的偏东气流减弱,南侧的偏西气流再次加强,台风环流由非对称结构向对称结构转变,台风移速将减慢缓行<sup>[25]</sup>。综上所述,在中层周围背景场较弱无明显引导气流时,台风低层环流结构分布对台风移向有较好的指示作用。

#### 3.2 西太平洋副热带高压及东风波的影响

西太平洋副热带高压(以下简称副高)被认为是影响台风移动的主要大尺度环流系统<sup>[7]</sup>。从图 2a 可看出,“韦帕”在生成发展阶段,华北到蒙古一带为低槽区,500hPa 副高中心强度达 592dagpm,呈斜方头状,其脊线位于  $29^{\circ}\text{N}$  附近,西脊点西伸至  $110^{\circ}\text{E}$  以西,588dagpm 线覆盖华南东部和江南地区,台风在副高的西南侧偏东南气流引导下向西偏北方向移动靠近海南岛,移动路径总体较稳定。1 日 02 时随着 500hPa 华北冷槽东移,副高开始减弱东退到长江口一带,台风距离副高渐行渐远,副高的东南风引导气流明显减弱,加上登陆海南后所受的摩擦力变大,导致“韦帕”登陆海南后停滞打转 6h。1 日 08—20 时,华北槽槽底向西南方向伸展至  $30^{\circ}\text{N}$  附近,槽前较强的西南气流和台风东侧外围的东南气流连接,槽底距台风中心仅有 11 个纬距左右,有利于“韦帕”转向北移动。

选取  $24^{\circ}\sim 26^{\circ}\text{N}$  经向 V 风速剖面图(图略),分析东风波及其相邻高压脊随时间演变。显然,中高层(500~300hPa)存在比较明显的波动,东风波在西移过程中经历了加强-减弱的过程,而东风波槽前的副高脊区随时间的推移逐渐减弱,而  $110^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E}$  间南风不断加强,因此“韦帕”在海南岛停滞在偏南气流的推动下转向北移动。1 日 14—20 时,东风波移到台湾岛( $120^{\circ}\text{E}$ )附近,槽前的东北气流促使台风北侧的偏东气流 U 明显增强到  $20\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,在高层偏东风引导气流的共同作用下,“韦帕”逐渐转向西进入北部湾。

#### 3.3 南亚高压环流的影响

从 7 月 31 日 20 时 200hPa 高度场(图略)可看到,南亚高压呈东西带状,大于 1252dagpm 区域从青藏高原向东横跨整个长江流域上空直至日本以东海面,在北面形成高压坝。此后,随着南亚高压北侧的长波槽东移南伸,南亚高压断裂呈东西两个中心,1 日 08 时南亚高压环流则西退到云南上空,长波槽进一步南伸到贵州上空,“韦帕”处在东环高压西侧,高层出流为偏北方向,有利于台风北上移动;1 日 20 时随着长波槽东移北收,南亚高压环流往东扩展控制华南、长江一带地区,重新形成高压坝,阻挡“韦帕”继续北进,而台风位于南亚高压南侧偏东气流中,有利于台风向西移动<sup>[26]</sup>。分析高层散度合成场,发现 1 日 08 时台风北侧有强辐散中心对应高层强流出流区,对台风涡旋移动有“引导”作用<sup>[26-27]</sup>,利于台

风向北移动;1日20时,强辐散中心则转到了台风西侧,从图5可发现,由于南亚高压东伸,台风中心高层开始出现正散度区,即辐散出流加强,同时偏东风引导气流也逐渐下传增强,引导台风在登陆湛江之后转向西移动。

## 4 结论

探讨了2019年第7号台风“韦帕”的生成发展环境条件及其路径移动转向的成因,得出以下主要结论。

(1) 台风“韦帕”生成于热带辐合带中对应弱的垂直风切变中心附近,高海温是其生成及发展的基础条件,强度维持与西南季风及越赤道气流卷入密切相关。感热通量和潜热通量变化显示,“韦帕”近海生成,所获取的海表面感热潜热较少,这是其强度增强有限的主要原因。

(2) 台风移动路径与引导气流密切相关,其不同阶段受不同层次引导气流影响,且引导气流弱,台风移动速度也较慢。

(3) 台风“韦帕”发生停滞及转向,主要由于大尺度环境场发生明显改变,西太平洋副热带高压、南亚高压及东风波都起重要的影响。

(4) 低层台风中心附近风速变化影响台风环流结构内力的方向大小,也会造成台风路径移向的变化;另外,高层辐散区对应强出流区,对台风中心移动有“引导”作用。

### 参考文献:

- [1] 吴影,陈佩燕,雷小途.登陆热带气旋路径和强度预报的效益评估初步研究[J].热带气象学报,2017,33(5):675-682.
- [2] 韩慎友,陈伟斌,陈见.超强台风“天鸽”(1713)近海急剧加强特征及诊断分析[J].气象研究与应用,2020,41(1):70-74.
- [3] 李紫甜,古明悦,黄莉,等.台风“山神”(1809)残涡再度入海加强成因分析[J].气象研究与应用,2021,42(3):94.
- [4] 姚才,罗小莉,张成扬,等.7-9月登陆华南台风气候变化特征及大尺度环流系统分析[J].气象研究与应用,2019,40(1):1-6,10.
- [5] 倪钟萍,吴立广,张玲.2005~2010年台风突变路径的预报误差及其环流背景[J].气象,2013,39(6):719-727.
- [6] 麻素红,吴俞,瞿安祥,等.T213与T639模式热带气旋预报误差对比[J].应用气象学报,2012,23(2):167-173.
- [7] 朱乾根,林锦瑞,寿绍文,等.天气学原理和方法(修订

本)[M].北京:气象出版社,1992,734-748.

- [8] 许雯,崔晓鹏,高守亭,等.台风“鲇鱼”(1013)路径突变过程的成因分析[J].大气科学学报,2015,38(5):658-669.
- [9] 仲荣根,张旭,刘梅.台风的结构变化与台风移动的关系[J].海洋学报(中文版),1993,15(5):46-49.
- [10] 简茂球,王婷,朱晓蕾,等.登陆我国的热带风暴近海异常路径的统计分析[J].中山大学学报(自然科学版),2003,42(2):93-96.
- [11] 张中锋,刘启汉,拓瑞芳.台风Maggie路径异常的数值研究[J].热带气象学报,2006,22(1):55-59.
- [12] 李勋,李择椿,赵升蓉,等.“珍珠”(0601)异常路急翘和内核结构变化的诊断及数值研究[J].气象,2010,36(9):1-8.
- [13] 张胜军,陈联寿,徐祥德.Helen台风(9505)异常路径的诊断分析与数值模拟[J].大气科学,2005,29(6):937-946.
- [14] 高拴柱,张胜军,吕心艳,等.南海台风生成前48h环流特征及热力与动力条件[J].应用气象学报,2021,32(3):272-288.
- [15] 徐亚钦,翟国庆,李国平,等.WRF模式对高影响浙江型台风微物理和边界层参数化方案的优化试验[J].热带气象学报,2017,33(2):201-211.
- [16] 张进,麻素红,陈德辉,等.GRAPES\_TYM改进及其在2013年西北太平洋和南海台风预报的表现[J].热带气象学报,2017,33(1):64-73.
- [17] 王晓峰,许晓林,杨续超,等.数值模式对强台风“菲特”登陆期间预报能力评述[J].大气科学学报,2017,40(5):609-618.
- [18] 曾小团,黄海洪,罗建英,等.台风“芭玛”(2009)近海突然加强的模拟研究[J].气象研究与应用,2018,39(3):1-6.
- [19] 肖志祥,姚才,赵金彪,等.广西热带气旋预报业务和研究进展[J].气象研究与应用,2020,41(4):20-27.
- [20] 钱传海,端义宏,麻素红,等.我国台风业务现状及其关键技术[J].气象科技进展,2012,2(5):36-43.
- [21] 徐明,余锦华,赖安伟,等.环境风垂直切变与登陆台风强度变化关系的统计分析[J].暴雨灾害,2009,28(4):339-344.
- [22] 陈伟斌,黄荣成,屈梅芳,等.快速台风“海鸥”强度、路径特点及成因分析[J].中国农学通报,2015,31(26):200-209.
- [23] 林良勋,梁巧倩,黄忠.华南近海急剧加强热带气旋及其环流综合分析[J].气象,2006,32(2):14-18.
- [24] 陈见,覃月凤,翟舒楠,等.“白鹿”台风(1911)残涡造成广西大范围暴雨成因分析[J].气象研究与应用,2020,41(1):139-148.
- [25] 谷秀杰,张霞,苏艳华,等.台风“温比亚”停滞少动及转

- 向机理探究[J].热带气象学报, 2019, 35(6): 780–788. (1): 84–91.
- [26] 陈联寿, 徐祥德, 解以扬, 等. 台风异常运动及其外区热力不稳定非对称结构的影响效应[J]. 大气科学, 1997, 21
- [27] 黄先伦, 郭圳勉, 殷宏南, 等. 超强台风“尤特”近海北翘的原因分析[J]. 广东气象, 2016, 38(6): 1–5.

## Analysis on the formation environmental conditions and causes of movement and recurvature of Tropical Storm Wipha

Wei Meinao<sup>1</sup>, Zhao Jinbiao<sup>2\*</sup>, Chen Shaohe<sup>3</sup>, Dong Xuehan<sup>2</sup>

(1. Qinzhou Meteorological Bureau, Qinzhou Guangxi 535000, China;

2. Guangxi Meteorological Observatory, Nanning Guangxi 530022, China;

3. Fangchenggang Meteorological Bureau, Fangchenggang Guangxi 538000, China)

**Abstract:** Based on the data of conventional observation stations in South China, geostationary satellite infrared cloud images and NCEP grid reanalysis data, the environmental conditions and causes of movement and recurvature of Tropical Storm Wipha in 2019 were analyzed. The results show that (1) Tropical Storm Wipha was generated near the weak vertical wind shear center of the tropical convergence zone. High sea temperature is the basic condition for its generation and development, and the intensity maintenance is closely related to the southwest monsoon and the involvement of cross equatorial airflow. The changes of sensible heat flux and latent heat flux show that the heat flux from the sea surface obtained by Wipha was less, which is the main reason for the limited enhancement of its intensity. (2) The movement path of a typhoon is closely related to the guided airflow, and its different stages are affected by different levels of guided airflow. The weaker the guided airflow is, the slower the typhoon moves. (3) Weipa stagnated and turned, mainly due to significant changes in the large-scale environmental field. The West Pacific subtropical high, South Asia high and easterly wave all played an important role. (4) The change of wind speed near the low-level typhoon center will not only affect the direction of internal force of typhoon circulation structure, but also cause the change of typhoon path; the high-level divergence area can guide the movement of typhoon center.

**Key words:** South China Sea typhoon; environmental conditions; recurvature; cause analysis