

DOI:10.11737/j.issn.1003-0239.2026.01.007

强台风“小犬”(2314)降水特征诊断及模拟分析

梅珺一^{1,2,3}, 许冬梅^{1,2*}, 刘德强², 孙启龙⁴, 陈嘉君¹, 沈菲菲^{1,2,5}

(1. 南京信息工程大学气象灾害教育部重点实验室/气候与环境变化国际合作联合实验室/气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 江苏南京 210044; 2. 福建省灾害天气重点实验室/中国气象局海峡灾害天气重点开放实验室, 福建福州 350000; 3. 中山大学大气科学学院, 广东珠海 519082; 4. 中科院重庆绿色智能技术研究院, 重庆 400714; 5. 中国气象局龙卷风重点开放实验室, 广东广州 510641)

摘要: 利用中尺天气预报模式(WRF)对2314号台风“小犬”途经我国广东省近海的过程进行数值模拟。在模拟结果与实际情况基本符合的基础上,对本次台风的演变及降水过程进行诊断分析。结果表明:台风与低层冷空气同向移动,对流层高、低层冷空气向台风内部输送,叠加纬向风的垂直切变,逐渐使得台风暖心结构崩溃、强度减弱,进而导致陆地降水强度较弱;广东省陆地上空水汽含量较高,水汽供应良好,但是缺少产生对流性强降水所需的水汽聚集条件,最终表现为较弱的层云降水;陆地上空对流层中低层大气层结趋于对流性稳定,上升运动弱,降水强度低。

关键词: 近海台风;数值模拟;诊断分析;冷空气;降水

中图分类号: P458.1+24 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2026)01-0067-12

0 引言

热带气旋是指发生在热带或副热带洋面上、具有组织性对流和确定气旋性环流的非锋面性涡旋,其强度可用海平面中心气压和底层中心附近最大风速来衡量。根据最大风速差异,可将其划分为以下等级:最大风速10.8~17.1 m/s为热带低压,17.2~24.4 m/s为热带风暴,24.5~32.6 m/s为强热带风暴,32.7~41.4 m/s为台风,41.5~50.9 m/s为强台风,超过51.0 m/s为超强台风^[1]。台风的发生发展往往伴随着暴雨、大风、风暴潮等剧烈的天气过程,严重时还会诱发山洪、泥石流等次生灾害^[2]。我国位于亚欧大陆东南部,是受台风影响较多的国家之一。根据历史统计资料,平均每年有7~10个台风在我国登陆^[3-4]。准确的台风预报是开展防灾减灾工作的

重要前提,研究和理解台风的演变过程,能为提升台风预报提供重要理论支撑与应用启发,具有重要的科学和社会经济意义。

冷空气是指会使所经地点气温下降的空气团,冷空气活动和台风及台风降水往往密切相关。冷空气对台风及降水的影响可以从强度和入侵位置进行分析,入侵位置又可以细分为入侵方位和入侵高度^[5]。陆佳麟等^[6]利用中尺天气预报模式(Weather Research and Forecasting Model, WRF)模拟了不同强度冷空气对0716号台风“罗莎”的影响。结果表明,冷空气强度较强或较弱都不利于台风发展,强度恰当的冷空气有助于台风内部斜压能量的积累和释放,有利于台风变性加强。钮学新等^[7]利用第五代中尺度模式(Mesoscale Model 5, MM5)模拟了0216号台风“森拉克”的降水过程,并通过改变

收稿日期: 2024-11-14。

基金项目: 国家自然科学基金项目(42475157, 41805070, 42205060);福建省灾害天气重点实验室和中国气象局海峡灾害天气重点开放实验室开放课题(2024KFKT04);中国气象局龙卷风重点开放实验室开放课题(TKL202306);柳州市元宝山地形暴雨重点实验室项目(柳气科2025ybssysm2、柳气科2025ybssysz1);内蒙古自治区科技创新重大示范项目(2025ZDSF0009)。

作者简介: 梅珺一(2002-),男,硕士在读,主要从事数值模拟研究。E-mail: 202083300269@nuist.edu.cn

*通信作者: 许冬梅(1984-),女,副教授,博士,主要从事数值模拟和资料同化研究。E-mail: dmxu@nuist.edu.cn

初始温度条件开展对照试验,定量研究了冷空气对台风降水的影响。结果表明,入侵到台风外围的弱冷空气对台风强度无明显影响,但会增加台风外围雨量;强冷空气侵入台风中心会使得台风填塞、强度减弱,但台风外围雨量仍会增加。张树民等^[8]通过对1323号台风“菲特”和1601号台风“尼伯特”的诊断分析,研究了不同高度冷空气对变性台风降水的影响,发现低层冷空气入侵台风残留低压后,叠加东风急流的水汽输送,会使大气层结变为条件性对称不稳定,激发出层积云混合型降水;对流层中层冷空气侵入残留低压会使得大气层结变为对流不稳定。韩瑛等^[9]利用MM5模式研究了冷空气对0428号台风“南玛都”的影响,梯度风关系证明,冷空气在不破坏台风暖心结构的情况下入侵台风外围,引起的温度梯度增长有利于台风发展。

上述研究案例多聚焦于冷空气对副热带台风及降水的影响,实际上,从南海海域向我国靠近的台风也经常受到陆地冷空气影响。例如,1409号台风“威马逊”在我国近海受冷空气作用强度急剧增加,给海南省带来严重的暴雨灾害^[10]。何洁琳^[11]的研究表明,当热带洋面上的台风与大陆冷空气相向而行时,增强的气压梯度会导致台风强度增加。迄今为止,关于冷空气与我国热带近海台风及台风降水的相关研究还相对较少,而南海海域恰好是我国台风24 h警戒区域^[12]。2314号台风“小犬”是典型的受冷空气影响的热带近海台风,其在冷空气背景下以5 km/h的超慢速度移动,成为南海区域移速最慢的西北太平洋台风之一,给我国广东沿海带来了持续80 h以上的风雨天气。过程中,该台风路径多次调整、强度频繁波动,显著增加了防御部署难度。前人研究指出,台风下游的湿热状况、环流特征及垂直抬升条件是影响台风活动及降水过程的重要因素^[13]。为此,本文通过模拟台风“小犬”掠过广东省近海的过程,从热动力条件、水汽条件和垂直运动条件等方面,诊断分析冷空气背景下台风及降水特征,旨在为后续“慢台风”的预报提供科学参考,助力相关防台风工作有序高效开展。本文结构如下:第1节介绍模式模拟方案的设计以及本次台风事件的基本信息,第2节对比模式模拟结果,第3节选择适宜的模式模拟结果,对台风及降雨过程进行诊断分析。

1 模式试验设计

1.1 资料及模拟方案

1.1.1 资料介绍

本次数值模拟选用美国国家环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)的全球预报系统(Global Forecast System, GFS)数据,其空间分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$,时间分辨率为6 h。台风实况资料源自温州台风网和美国国家海洋和大气管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA),其中台风实况路径资料源自温州台风网;模拟结果验证所用的实况资料为NOAA提供的台风最佳路径数据,记录时间间隔为3 h。降水观测数据选用卫星融合降水产品。

1.1.2 试验方案设计

本次数值模拟的时段为2023年10月7日18时(世界时,下同)—9日06时。水平方向设置两层嵌套:第一层嵌套水平分辨率为 $12 \text{ km} \times 12 \text{ km}$,水平网格数为 559×469 ,时间积分步长为30 s,模拟结果间隔6 h输出一次;第二层嵌套水平分辨率为 $4 \text{ km} \times 4 \text{ km}$,水平网格数为 502×469 ,时间积分步长为10 s,模拟结果间隔6 h输出一次。垂直层数设置为50层,模式层顶气压为50 hPa。模拟水平区域见图1。在第一层嵌套中,微物理过程选择WSM6方案,积云参数化方案选择改良的KF方案(Kain-Fritsch Cumulus Potential Scheme),近地面层方案选择MM5方案,长、短波辐射方案选用RRTMG方案,陆面过程选择U-Noah方案,边界层方案选择YSU方案。第二层嵌套启用的参数化方案与第一层嵌套中的一致。后续分析中,除较大空间尺度分析选取第一层嵌套输出数据外,其余分析均采用第二层嵌套数据。

1.2 个例介绍

台风“小犬”于2023年9月29日生成于西北太平洋洋面,随后朝西北方向移动,强度逐渐增强。10月2日,台风“小犬”加强为超强台风,继续向西北方向移动,于10月3日减弱为强台风;10月4日,其强度再次达到超强台风级。10月5日00时左右,其以强台风级在我国台湾登陆,之后向西移动进入我

国南海海域,强度逐渐减弱。10月6日,台风“小犬”再次加强为强台风,向西偏南移动并靠近我国广东省沿海地区;10月7日,以强台风级缓慢向西偏北方向移动,靠近我国珠江三角洲地区。10月8日,台风“小犬”向西南方向移动,擦过广东省南部沿海,于10月9日在广东西南部近海减弱为热带低压,当日12时停止编号,移动路径见图1。10月7日后,台风“小犬”移动速度减缓,给我东南沿海地区造成持续的风雨天气。

2 模拟结果分析

2.1 路径及强度

模式模拟路径与实况路径的对比结果显示(见

图2a),7日18时—8日06时,模式模拟的台风核心位置与实况较为接近,较好地再现了台风先向西北移动、随后向西南转向的特征。从模式模拟的中心10 m最大风速和中心最低气压的变化趋势来看(见图2b—2c),模式的中心气压较实况偏高,10 m最大风速总体低于实况,模拟的台风强度偏弱,但模式能够较好地体现台风强度随时间减弱的特征。

2.2 累计降水量

模式模拟的10月8日00时—9日00时24 h累计降水量(见图3)显示,降水中心位于珠江三角洲地区,与实况对应较好。模拟降水中心位于珠三角地区,24 h累计降水量超过100 mm;且模拟的暴雨区主体位于海面,与实况基本一致,但广州东部模

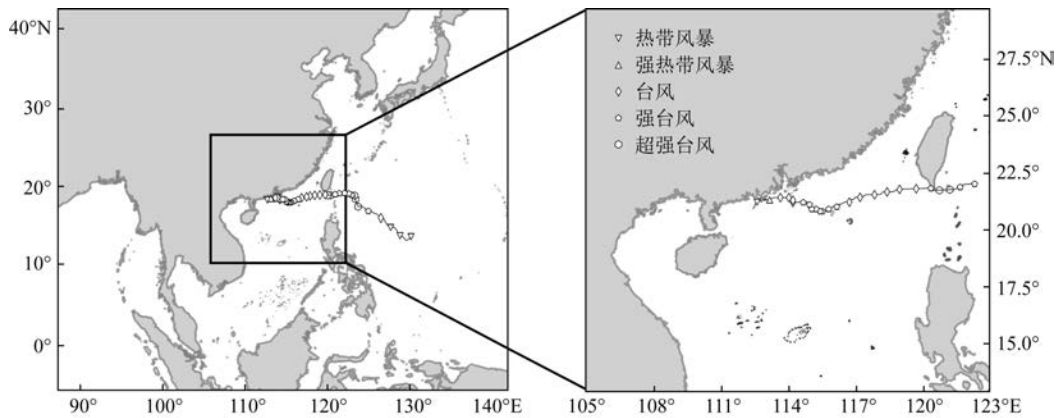
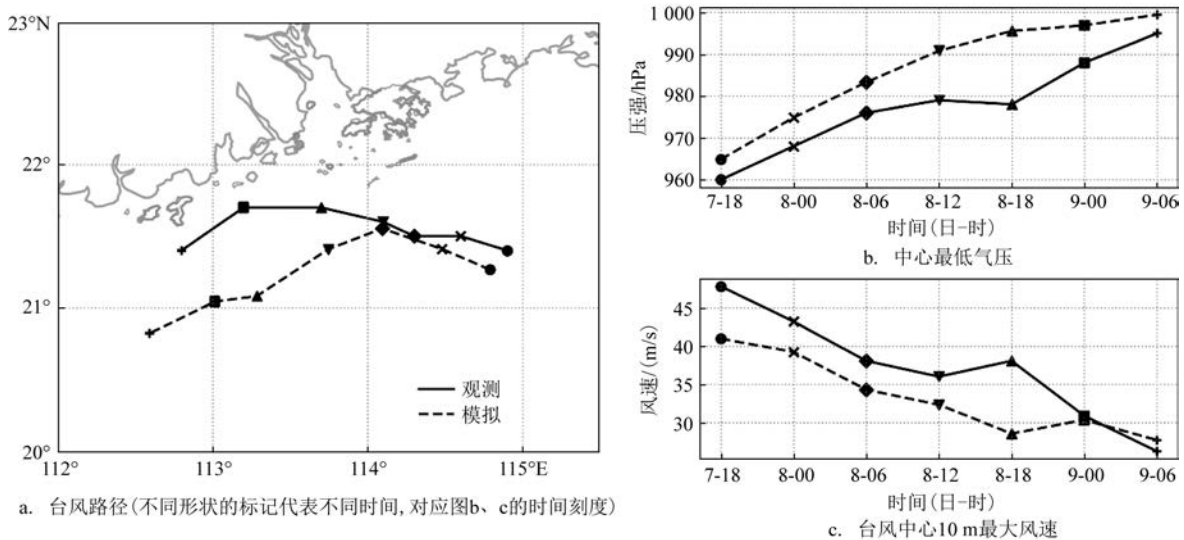


图1 模式模拟区域和台风实况路径

Fig.1 Simulated domain and the actual typhoon track



a. 台风路径(不同形状的标记代表不同时间,对应图b、c的时间刻度)

图2 台风路径和强度对比

Fig.2 Comparison of typhoon tracks and intensities

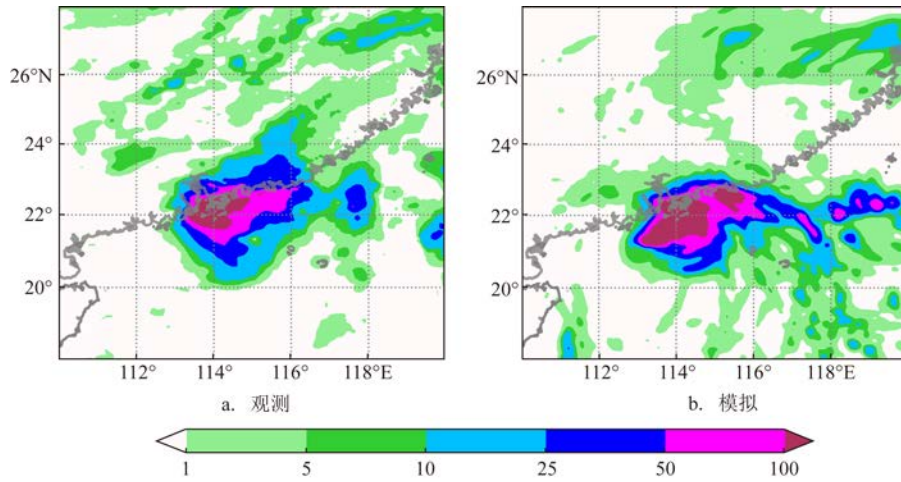


图3 观测与模拟2023年10月8日00时—9日00时累计降水量(单位:mm)

Fig.3 Precipitation from 0000 UTC 8 October 2023 to 0000 UTC 9 October 2023 (unit: mm)

拟降水量较观测值偏少。

在模式能够较好模拟台风位置、强度演变特征及降水过程的基础上,本文将基于模拟结果对台风系统及其降水特征开展进一步的分析与讨论。图4a为10月8日00时—9日00时模式台风降水的逐6h累计降水量变化,各个阶段的降水都呈现出明显的不对称性,降水集中于台风环流的东北侧。8日00—06时,台风外围东北侧海面上存在暴雨雨带,江西、福建省的降水主要在该时段产生;8日06—12时,暴雨雨带向珠江三角洲地区靠近,范围有所减

小,降水强度也在下降;8日12时—9日00时,台风外围雨带降水增强,降水落区位于海上。从8日00时—9日00时逐6h累计降水量来看,广东省近海海域普遍遭受了持续性强降水的侵袭,而沿海地区阶段性降水量则弱很多,基本未超过10mm。

模式模拟的850 hPa雷达反射率(见图4b)能较好地体现台风的环流形态,10月8日00时回波反射率具有较为对称的涡旋特征,06时西侧回波强度减弱,12时台风回波形态呈现出逗点状,18时回波已基本无法体现完整的环流特征。Zhang等^[14]和Chen

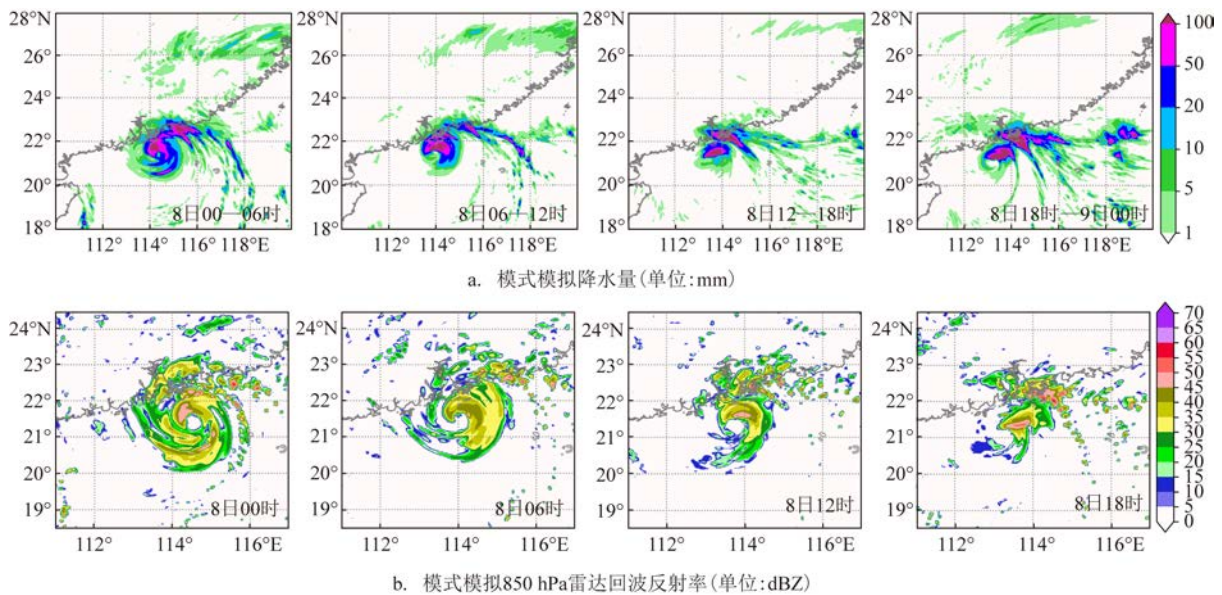


图4 模式模拟2023年10月8日逐6h降水量及850hPa雷达回波反射率

Fig.4 Model-simulated 6-hourly precipitation and radar reflectivity at 850hPa on 8 October 2023

等^[15]通过美国国家强风暴实验室(National Severe Storms Laboratory, NSSL)的雷达降水定量估算系统,根据雷达反射率等指标,将降水分为层云降雨、对流降雨、降雪、暖雨和冰雹5种类型。参考Zhang等^[14]和Chen等^[15]的分类标准,本文简单以40 dBZ为界,将回波强度在40 dBZ以下的降水归类为层云降水,40 dBZ以上的降水为对流降水。

从10月8日00时开始,台风西北侧海面上存在两个回波大值区域,强度超过50 dBZ,以对流性降水为主;沿岸陆地被较大面积的回波覆盖,平均回波强度在40 dBZ以下,以层云降水为主。06时,位于海上的强回波向陆地靠近,但是回波强度有所下降,同时陆地上的回波强度也在减弱。12时,陆地上出现微小范围的强回波,整体回波面积进一步缩小。18时,珠江三角洲近海海域出现强度超过50 dBZ的强回波区域,陆地上平均回波强度在30 dBZ以下,回波面积较上一时段继续缩减。整体看来,近海海面以对流降水为主,而陆地上则以持续性层云降水为主。台风外围的强回波区域在趋近陆地时呈减弱趋势,陆地上的平均回波强度未超过40 dBZ;且随着时间推移,陆地上的回波强度持续减弱,范围逐渐减小,意味着降水强度不断降低。

3 诊断分析

根据10月8日00时—9日00时的降水量变化可以发现,珠江三角洲地区受持续时间较长的弱降水影响,最终使得24 h累计降水量达到50 mm以上,而近海区域则始终有强降水天气发生。大气环境场是影响台风强度变化的主要因素之一^[16]。本节主要从热力、水汽和垂直运动等方面,分析台风“小犬”在近海减弱的过程中,大气环境场内各种物理参量的时空分布及变化特征,并尝试诊断广东省沿海地区陆地降水的形成原因。

3.1 热力、动力条件

台风强度是影响台风降水的主要因素之一^[13],而环境大气的热力、动力状态会对台风的强度产生显著影响。基于此,本节将讨论此次台风过程中大气热力、动力条件对台风的影响。10月8日00时850 hPa等压面(见图5a)上,位于我国青藏高原地区

有一高压系统,东南沿海和台风位于高压底前部。我国东北地区有一低压系统,低压底后部冷空气沿着高压外围南下,向西南方向输送。高压底前部的东北气流携带的冷空气经过台风“小犬”西北侧时被卷入环流,从台风的西偏南侧向台风中心输送。06时,高压系统略微东移,东北气流强度有所降低,冷空气持续沿高压外围边缘的东北气流向台风西北侧输送。12时,高压进一步东移,高压外围东北气流减弱,但是台风西北侧仍然有来自东北方的冷性气流经过,并以相同的方式卷入台风环流。18时,东北地区低压东移,高原地区高压南扩。台风环流减弱,西南侧风速明显降低。

温度平流是指由于冷、暖空气的水平运动而引起的某些地区的变冷和增暖现象,是决定局地区域温度变化的要素之一^[17]。王承伟等^[18]曾用温度平流的垂直剖面来研究1509号台风“灿鸿”倒槽附近的冷空气变化情况。在本次模拟试验中,2023年10月8日00—18时海平面气压及850 hPa等压面上温度平流的变化(见图5b)显示,00时,台风西南侧有明显的冷平流侵入台风环流内部,后续时段内台风的西侧和西南侧存在持续的冷平流。台风的东北侧,无论在海面还是陆地均有冷暖平流交汇,低层的冷暖平流交汇有助于空气的抬升。00—12时,台风“小犬”中心附近海平面气压等压线接近正圆形,18时台风中心等压线的正圆形状开始发生形变,说明台风进一步减弱,即将进入消亡阶段。

相当位温综合考虑了温度、水汽以及气压对气块热力状态的影响,可以用来表征台风的中心结构的变化。从2023年10月8日00—18时台风中心相当位温纬向垂直剖面(见图5c)可以看出,00时台风的暖心贯穿整个对流层,结构趋于竖直,此时台风中心西侧有冷空气活动,低层的冷空气活动中心与图5b中的冷平流位置对应较好。台风中心西侧与背景流呈现一致的东风,意味着水平方向上台风与冷空气同向而行,两者并未形成直接的对抗。高层的西风气流与低层气流形成明显的垂直切变,Riemer等^[19]的研究表明,这样的环境不利于台风暖心结构的维持。为了更直观地展示台风周围的垂直运动特征,图5c中垂直速度的量级被放大为原来的10倍,图中可看出在台风中心西侧的对流层中层有下沉运动,表明台风西侧有冷空气从对流层中层

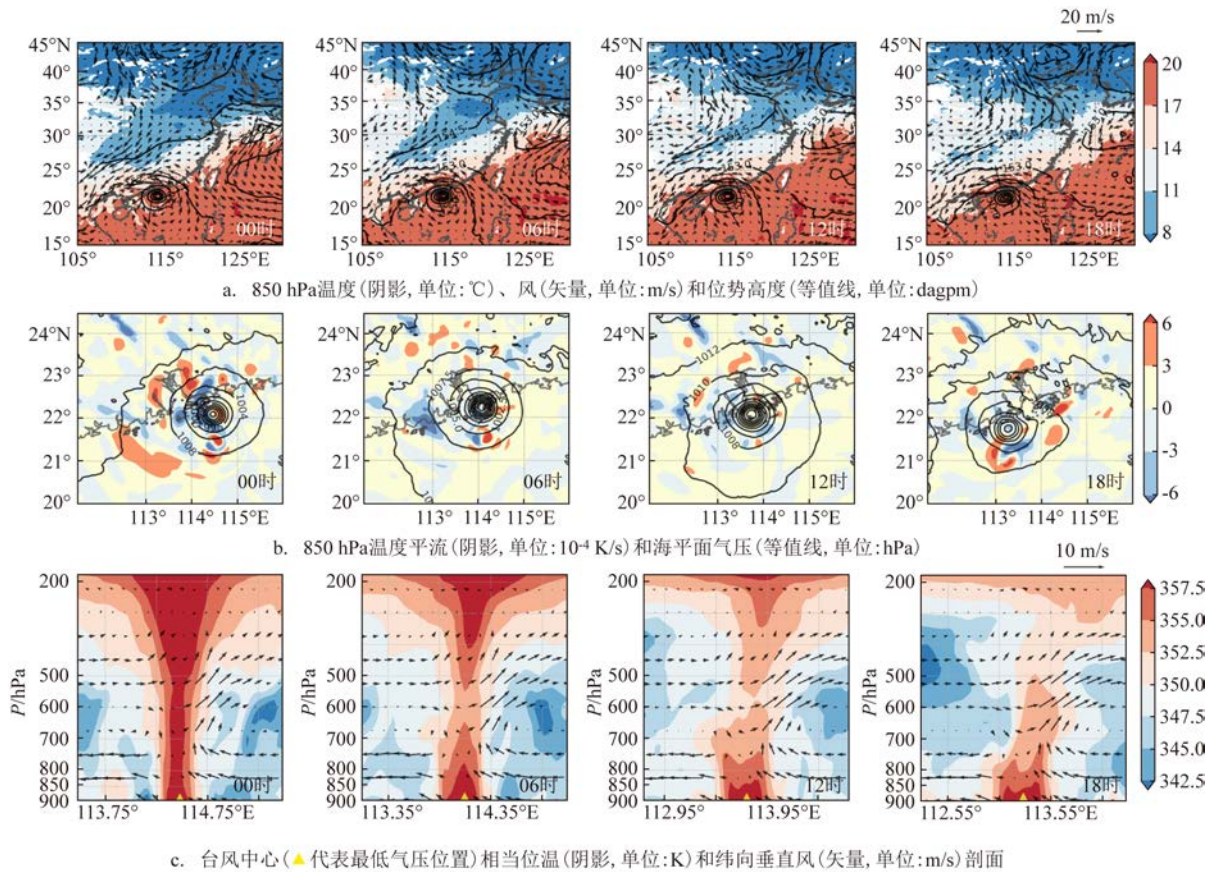


图5 模式模拟10月8日00—18时850 hPa要素场、海平面气压及台风中心垂直剖面

Fig.5 Sea level pressure, and vertical cross-section of the typhoon in the simulation at 850 hPa from 0000 to 1800 UTC 8 October

向下侵袭;而东侧体现为上升运动,对应台风中心降水集中在东侧。06时台风的暖心结构从对流层中层开始减弱,12时台风的暖心结构开始倾斜,18时台风的暖心结构完全崩溃,意味着台风趋于消亡。对流层中、低层有冷空气影响台风中心,配合垂直风切变破坏台风的垂直结构,这种环境配置导致台风强度下降,外围环流减弱。海面上的强降雨雨系统靠岸削弱和台风强度减弱有一定联系。

3.2 水汽条件

台风下游陆面的干湿状况及水汽通量对台风降水存在显著影响,强降雨台风通常伴随清晰的水汽输送通道与良好的水汽汇聚条件^[20]。基于此,本节将探讨此次台风过程中的环境水汽特征。相对湿度是指空气中实际的混合比与同温同压下相对于水面的饱和混合比,可以近似等于空气中的水汽压与相同温度下的饱和水汽压的比值,表示空气中

的水汽接近饱和程度^[21]。参考唐卫亚等^[22]对不同层次干、湿区的分类,本文将相对湿度超过70%的区域视为湿区。10月8日00—18时700 hPa和850 hPa上相对湿度的空间分布(见图6a—6b)表明,广东省陆地上空相对湿度几乎始终维持在70%以上,水汽饱和程度较高,水汽条件较好。700 hPa高空(见图6a),有较强的干空气从高原地区向东移动。由该等压面上8日00时干湿空气的分布可以推断,在此之前已经有部分干空气从西北地区分裂南下并被卷入台风环流中。干空气沿台风西南侧进入环流,绕台风一圈被输送至台风东北侧地区,部分干空气到达陆地。850 hPa层(见图6b),有干空气随着西北气流南下,其移动路径和850 hPa冷空气相似。和700 hPa层类似,低层的较干空气进入台风环流后,仅绕着台风外圈的气流移动,没有侵入台风中心。从中不难发现,700 hPa向台风输送的空气较850 hPa处更干燥,相对湿度更小。总之,在整个过程中,广

东省沿岸地区对流层中低层具有良好的水汽条件。少许绕流至台风环流东北侧的干空气对广东省南部地区有一定影响。

水汽通量是指在单位面积上单位时间流过的水汽质量,有时又被称作水汽输送量,用于反映大气水汽输送的强弱。按照定义,其可以分为水平方向的输送量和垂直方向的输送量。一般所说的水汽通量是指水平方向上的水汽通量。计算公式为:

$$\text{水汽通量} = \frac{1}{g} (qu\vec{i} + qv\vec{j}) \quad (1)$$

式中: g 为地球引力常量; q 为比湿; u 、 v 分别为经向、纬向风分量。水汽通量的方向和大小仅能反映水汽的来源和输送程度,对于输送的水汽是否能形成降水还需要考虑水汽是否能在某区域聚集起来。

水汽通量散度是表征大气中水汽汇聚程度的物理量,它能体现出单位体积内的水汽在单位时间内的辐合、辐散情况。本文对水汽通量散度的计算结果取相反数,即正值代表水汽辐合,负值代表水汽辐散,其表达式为:

$$A = -\nabla \cdot \left(\frac{1}{g} q \vec{V} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{g} uq \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{g} vq \right) \quad (2)$$

式中: A 表示水汽通量负散度; \vec{V} 为水平风;其余物理量与式(1)中一致^[23]。

850 hPa等压面上水汽通量(见图6c)表明,各个时段均有水汽从台风环流北侧和东北侧向广东南部陆地输送,除此以外没有其他系统向该地输送水汽。也就是说,本次陆地降水的水汽仅来自处于减弱状态的台风自身的环流。8日00时,台风环流的

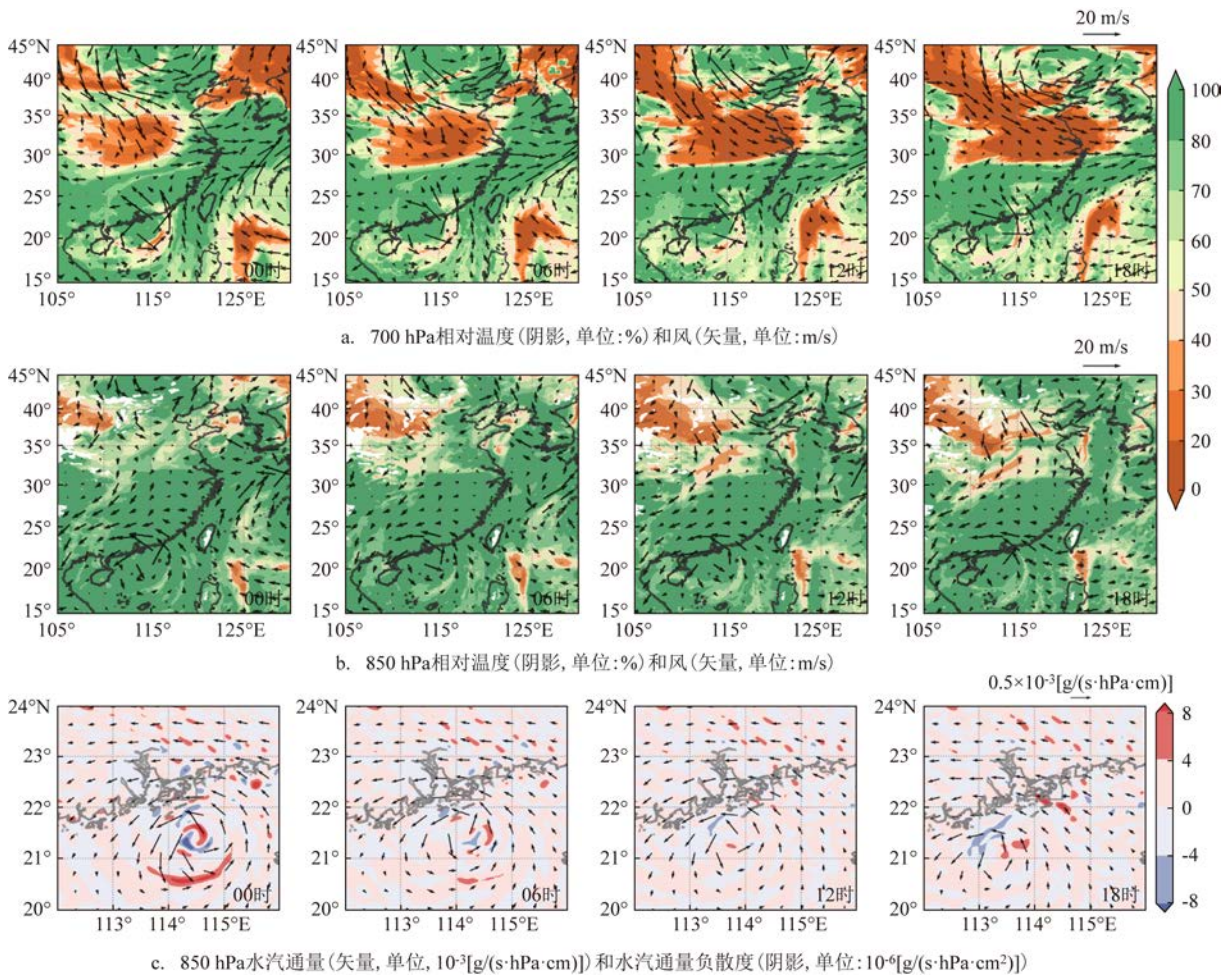


图6 模式模拟10月8日00—18时相对湿度、风、水汽通量和水汽通量负散度

Fig.6 Relative humidity, wind, water vapor flux, and negative divergence of water vapor flux in the simulation from 0000 to 1800 UTC 8 October

东北侧海面上有较强的水汽通量辐合,与模拟的强降水区域相匹配;06时,辐合区向陆地移动,但是辐合强度有所降低;18时,珠江三角洲近海海面再次产生较强的水汽通量辐合,与海面上的强降水相对应。整个过程中,台风的外围环流主要在地势较为平坦的珠江三角洲地区,缺少地形的抬升作用。自高压前南下的气流与台风北侧的气流在陆地上汇合时呈现一致的偏东风,水平风切变弱,导致没有良好的水汽辐合条件,不利于气流的抬升。总而言之,陆地和海面均有来自台风环流的水汽供应,但是陆地上没有良好的辐合条件,水汽无法汇聚,使得陆地各个时间段内降水强度弱。

3.3 垂直运动条件

垂直速度能够直观地体现出大气的上升、下沉运动状况。8日00时,台风西北侧洋面上出现对流降水区并伴随着较强的模拟雷达反射率,陆地的雷达回波则体现出层状云降水回波特征。本文分别在海、陆选取一处具有代表性的区域(见图7a),并对其上空的雷达反射率和垂直速度作经向剖面。从剖面中可以看出,陆地地区(见图7b)整层的雷达回波强度均在50 dBZ以下,对应上升运动较弱。

22.7°N、114.3°~114.5°E地区800 hPa以下最大回波强度超过40 dBZ,达到对流降水回波强度,但是该地区强回波中心区域为下沉运动,上升运动则出现在114.5°E处700 hPa上空。114.3°E以西中层和低层几乎全为下沉运动;114.3°E以东地区距离海岸更近,受台风外围环流影响更显著,因此对流层中层出现上升运动,而低层为下沉运动可能是因为大气在垂直方向上的抬升作用较弱,同时还有降水的拖曳作用。水汽凝结下落的拖曳作用也是导致114.3°E以西地区上空呈现下沉运动的主要原因。海面上(见图7c),强回波区域对应强的上升运动,其中22.4°N、115.4°E和22.4°N、115.8°E两个区域的回波强度达到50 dBZ以上。在强回波区,整个对流层中层低层都体现出强烈的上升运动,低层的垂直速度可达-45 Pa/s,中层最大垂直速度超过-60 Pa/s。根据以上分析,我们可以认为被弱回波覆盖的陆地地区上空上升运动强度较弱。

假相当位温是气块经过假绝热过程上升,当水汽完全凝结脱落后沿干绝热过程下降至1 000 hPa高度的温度,记作 θ_{se} ,可以表征空气的干湿状况。气层内假相当位温随气压 p 的变化可以作为对流性不稳定的判据^[24]。判别方法为:

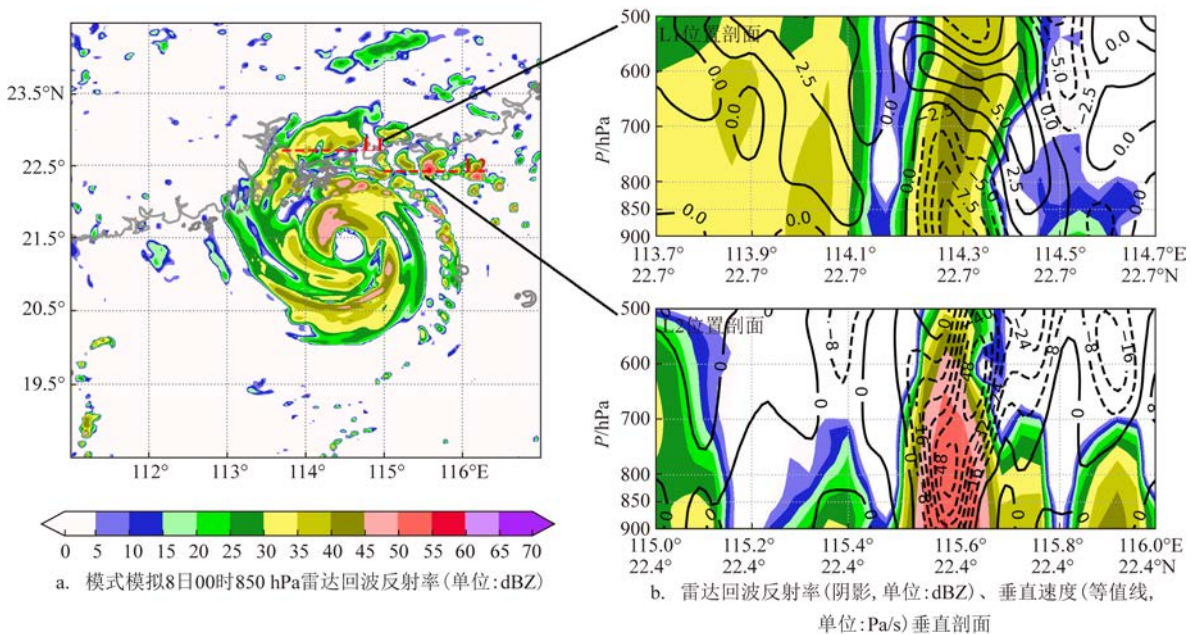


图7 模式模拟10月8日00时850 hPa雷达回波反射率、垂直速度及雷达反射率垂直剖面

Fig.7 Radar reflectivity at 850 hPa and vertical cross-section of vertical velocity and radar reflectivity in the simulation at 0000 UTC 8 October

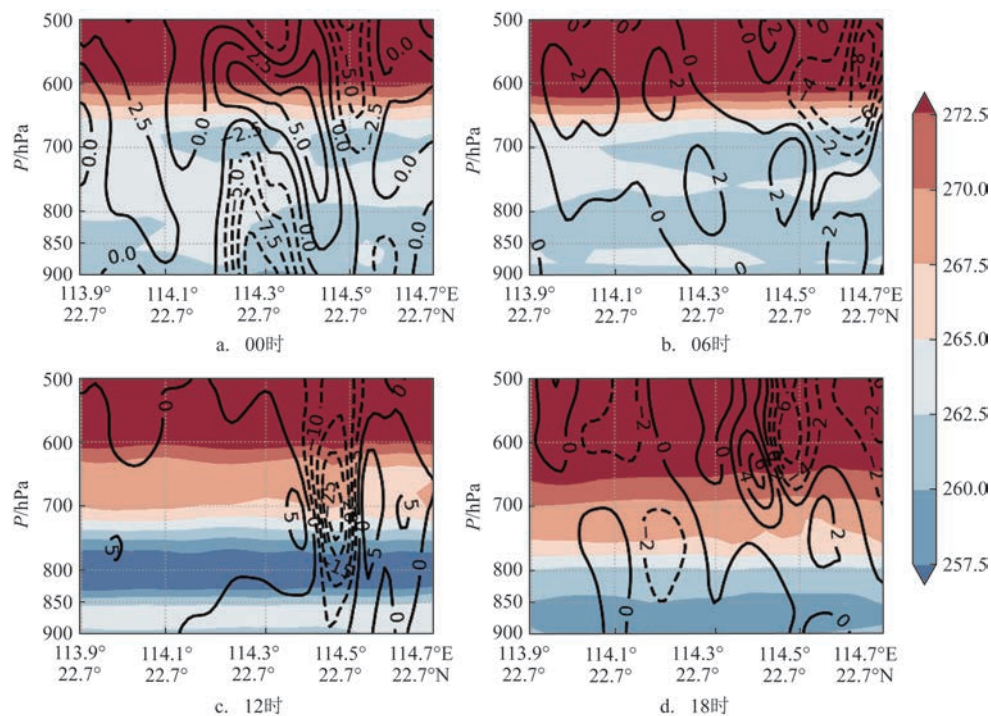
$$\frac{\partial \theta_{se}}{\partial p} \begin{cases} < 0 & \text{对流性稳定} \\ = 0 & \text{对流性中性} \\ > 0 & \text{对流性不稳定} \end{cases} \quad (3)$$

本文对图7a中L1区域10月8日00—18时的垂直速度和假相当位温进行垂直剖面(见图8),以研究陆地上空垂直运动状况和大气层结状况随时间的演变特征。00时,该地从对流层低层到中层假相当位温随高度增加而增大,大气层结呈对流性稳定状态;仅114.1°E以东区域700 hPa附近存在微弱的不稳定特征,这和整个中低层未出现明显上升运动的特征相吻合。06时,114.6°E附近对流层中层上升运动区域扩大,这一现象可能与随台风环流向陆地靠近的强对流区有关;而对流层低层大气受向东缓慢移动的冷性高压影响,仍维持下沉运动。此时,114.1°E以东区域700 hPa附近弱不稳定区域范围扩大,推测原因是700 hPa的较干空气向台风东北部输送,造成上层大气较下层更干燥。12时,114.3°E以东地区的整个对流层中低层呈上升运动,低层上升速度可达-10 Pa/s以上,但远未达到海面

强对流系统的强度;114.3°E以西地区低层主要为下沉运动,中层部分地区存在弱上升运动。同上一时段相比,该时段850 hPa附近出现对流性不稳定层结,且不稳定层厚度偏薄。18时,114.5°E以东地区上空有较明显的上升运动,其余地区上升运动较弱,整个对流层中低层恢复至对流性稳定状态。总体来说,8日00—08时,陆地上空大气层结较为稳定;12时对流层低层附近出现不稳定层结,但不稳定层较薄。除东部沿海地区上空受台风外围对流系统影响,上升运动较强外,其余地区受高原地区冷性高压控制和降水拖曳作用的影响,没有体现出明显的上升运动。

4 总结与讨论

本文利用WRF模式对2023年近海减弱未登陆的第14号台风“小犬”途经我国广东省南部近海的过程进行了数值模拟,从热力条件、动力条件、水汽条件和垂直运动条件4个方面,分析了冷空气活动



注:剖面位置同图7b

图8 模式模拟10月8日00—18时垂直速度(等值线,单位:Pa/s)与假相当位温(阴影,单位:K)垂直剖面

Fig.8 Vertical velocity and pseudo-equivalent potential temperature vertical cross-sections in the simulation from 0000 to 1800

UTC 8 October

背景下台风及台风降水的演变特征。结果表明:

①台风与陆地高压底前部冷空气同向移动,低层冷空气通过台风环流不断向台风内部平流,对流层中层空气向低层输送,叠加纬向风垂直切变,逐渐使得台风强度减弱、暖心结构崩溃,西北侧强对流系统在近岸减弱,间接导致陆地降水强度偏弱。

②本次台风过程中,广东省陆地上空水汽含量较高,水汽供应良好,但因缺少地形抬升和水平风切变等条件,无法形成对流性强降水所需的水汽聚集效应,最终体现为较弱的层云降水。

③整个过程中,陆地上空对流层中低层大气层结趋于对流性稳定,上升运动弱,不具备产生对流性强降水的大气层结条件和垂直运动条件。

在实际台风降水预报中,如果陆地出现缓慢东移的高压系统,且冷空气沿着高压前缘南下、与近海未登陆的台风移动方向一致,同时陆地上空大气层结稳定,则短时预报更多考虑较弱的层云降水;而较长时间的短期预报需关注降水积累效应,其总量可能达到暴雨级别。但需要注意的是,本结论或许不适用于台风登陆的情形。

与以往台风过程相比,本次台风的特点为:来自陆地高压底前部的冷空气南下,在东南沿海地区上空形成屏障,且冷空气未与台风发生直接对抗,而是通过台风自身环流向其内部平流,最终导致台风逐渐减弱直至消亡。然而,具备相似特征的冷空气达到何种强度才能有效削弱台风并阻止其登陆,仍需更多案例进一步研究。此外,台风降水是多尺度天气系统相互叠加、相互作用的结果^[25]。本文仅重点分析了对流层中、低层部分环境要素的变化,考虑因素尚不够全面,云、海温、台风内部结构等因素对本次台风过程的影响同样值得深入研究。鉴于本研究为个例分析,所得结论不具有普遍性。若要提升相似台风的预报效果,仍需开展更多相似台风案例的对比研究来进一步讨论。

致谢:本论文的数值计算得到了南京信息工程大学高性能计算中心的计算支持和帮助。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国标准化管理委员会. GB/T 19201-2006 热带气旋等级[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- [2] 张璟, 李泓, 段晚锁, 等. 台风集合预报研究进展[J]. 大气科学学报, 2022, 45(5): 713-727.
- [3] 许冬梅, 沈菲菲, 李泓, 等. 新一代静止气象卫星葵花8号的晴空红外辐射率资料同化对台风“天鸽”的预报影响研究[J]. 海洋学报, 2022, 44(3): 40-52.
- [4] 沈菲菲, 许冬梅, 闵锦忠, 等. 云尺度雷达资料的混合同化对台风“桑美”的数值模拟研究[J]. 海洋学报, 2018, 40(5): 48-61.
- [5] 于玉斌, 彭思越, 赵大军. 干冷空气活动对热带气旋强度变化影响的研究进展与展望[J]. 气象, 2024, 50(2): 133-143.
- [6] 陆佳麟, 郭品文. 入侵冷空气强度对台风变性过程的影响[J]. 气象科学, 2012, 32(4): 355-364.
- [7] 钮学新, 杜惠良, 刘建勇. 0216号台风降水及其影响降水机制的数值模拟试验[J]. 气象学报, 2005, 63(1): 57-68.
- [8] 张树民, 吴海英, 陈聪, 等. 不同高度冷空气侵入登陆台风暴雨过程对比分析[J]. 中国农学通报, 2020, 36(17): 108-117.
- [9] 韩瑛, 伍荣生. 冷空气入侵对热带气旋发生发展的影响[J]. 地球物理学报, 2008, 51(5): 1321-1332.
- [10] 张璟, 李泓, 段晚锁, 等. 台风集合预报研究进展[J]. 大气科学学报, 2022, 45(5): 713-727.
- [11] 许冬梅, 沈菲菲, 李泓, 等. 新一代静止气象卫星葵花8号的晴空红外辐射率资料同化对台风“天鸽”的预报影响研究[J]. 海洋学报, 2022, 44(3): 40-52.
- [12] 沈菲菲, 许冬梅, 闵锦忠, 等. 云尺度雷达资料的混合同化对台风“桑美”的数值模拟研究[J]. 海洋学报, 2018, 40(5): 48-61.
- [13] 于玉斌, 彭思越, 赵大军. 干冷空气活动对热带气旋强度变化影响的研究进展与展望[J]. 气象, 2024, 50(2): 133-143.
- [14] 陆佳麟, 郭品文. 入侵冷空气强度对台风变性过程的影响[J]. 气象科学, 2012, 32(4): 355-364.
- [15] 钮学新, 杜惠良, 刘建勇. 0216号台风降水及其影响降水机制的数值模拟试验[J]. 气象学报, 2005, 63(1): 57-68.
- [16] 张树民, 吴海英, 陈聪, 等. 不同高度冷空气侵入登陆台风暴雨过程对比分析[J]. 中国农学通报, 2020, 36(17): 108-117.
- [17] 韩瑛, 伍荣生. 冷空气入侵对热带气旋发生发展的影响[J]. 地球物理学报, 2008, 51(5): 1321-1332.

- Geophysics, 2008, 51(5): 1321-1332.
- [10] 李华实, 廖胜石, 李露芳, 等. 1409 超强台风“威马逊”近海急剧加强特征及成因分析[J]. 气象研究与应用, 2016, 37(1): 47-51.
LI H S, LIAO S S, LI L F, et al. Characteristics and cause analysis of super typhoon (NO.1409) "Rammason" rapid strengthening in offshore area[J]. Journal of Meteorological Research and Application, 2016, 37(1): 47-51.
- [11] 何洁琳. 冬季登陆我国热带气旋的性质及其成因研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2006.
HE J L. On the characteristics and genesis of wintertime tropical cyclones that landed China[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2006.
- [12] 段昊书, 贾静浙, 李一鹏, 等. 我国台风 24 小时警戒区涵盖中国南海全海域[N]. 中国气象报, 2014-6-30.
DUAN H S, JIA J X, LI Y P, et al. China's 24 - hour typhoon warning zone covers the entire South China Sea[N]. China Meteorological News, 2014-6-30.
- [13] 钮学新, 杜惠良, 滕代高, 等. 影响登陆台风降水量的主要因素分析[J]. 暴雨灾害, 2010, 29(1): 76-80.
NIU X X, DU H L, TENG D G, et al. Main factors affecting the rainfall caused by landing typhoons[J]. Torrential Rain and Disasters, 2010, 29(1): 76-80.
- [14] ZHANG J, HOWARD K, LANGSTON C, et al. National mosaic and multi-sensor QPE (NMQ) system: description, results, and future plans[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2011, 92(10): 1321-1338.
- [15] CHEN S, ZHANG J, MULLENS E, et al. Mapping the precipitation type distribution over the contiguous United States using NOAA/NSSL national multi-sensor mosaic QPE[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2015, 53(8): 4434-4443.
- [16] 端义宏, 余晖, 伍荣生. 热带气旋强度变化研究进展 [J]. 气象学报, 2005, 63(5): 636-645.
DUAN Y H, YU H, WU R S. Review of the research in the intensity change of tropical cyclone[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2005, 63(5): 636-645.
- [17] ZHANG B E, LINZ M, CHEN G. Interpreting observed temperature probability distributions using a relationship between temperature and temperature advection[J]. Journal of Climate, 2022, 35(2): 705-724.
- [18] 王承伟, 齐铎, 徐玥, 等. 冷空气入侵台风“灿鸿”引发的东北暴雨分析[J]. 高原气象, 2017, 36(5): 1257-1266.
WANG C W, QI D, XU Y, et al. Analysis of rainstorm induced by interaction between Typhoon "Chan-hom" (2015) and cold air in northeast China[J]. Plateau Meteorology, 2017, 36(5): 1257-1266.
- [19] RIEMER M, MONTGOMERY M T, NICHOLLS M E. A new paradigm for intensity modification of tropical cyclones: thermodynamic impact of vertical wind shear on the inflow layer [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2010, 10(7): 3163-3188.
- [20] 程正泉, 陈联寿, 李英. 登陆台风降水的大尺度环流诊断分析 [J]. 气象学报, 2009, 67(5): 840-850.
CHENG Z Q, CHEN L S, LI Y. Diagnostic analysis of large-scale circulation features associated with strong and weak landfalling typhoon precipitation events[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2009, 67(5): 840-850.
- [21] 银燕, 刁一伟, 刘超, 等. 大气物理学[M]. 北京: 气象出版社, 2018: 10-16.
YIN Y, DIAO Y W, LIU C, et al. Atmospheric physics[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2018: 10-16.
- [22] 唐卫亚, 王丽娟, 徐菊艳, 等. 天气学分析基础[M]. 北京: 气象出版社, 2016: 189-191.
TANG W Y, WANG L J, XU J Y, et al. Synoptic meteorology analysis foundation[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2016: 189-191.
- [23] 杜银, 谢志清, 王永青. 现代天气学动力诊断分析及其应用[M]. 北京: 气象出版社, 2020: 42-47.
DU Y, XIE Z Q, WANG Y Q, et al. Modern synoptic dynamics diagnosis analysis and its application[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2020: 42-47.
- [24] 盛裴轩, 毛节泰, 李建国, 等. 大气物理学[M]. 2 版. 北京: 北京大学出版社, 2013: 154-167.
SHENG P X, MAO J T, LI J G, et al. Atmospheric physics[M]. 2nd ed. Beijing: Peking University Press, 2013: 154-167.
- [25] YU R, GAO S, SUN L Y, et al. Multiscale mechanisms for the modulation of the Pacific Meridional Mode on tropical cyclone genesis over the western North Pacific: a comparison between 2004 and 2011[J]. Climate Dynamics, 2023, 60(11): 3241-3259.

Diagnosis and simulation of precipitation of strong Typhoon "Koinu" (2314)

MEI Junyi^{1,2,3}, XU Dongmei^{1,2*}, LIU Deqiang², SUN Qilong⁴, CHEN Jiajun¹, SHEN Feifei^{1,2,5}

(1. Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education / Joint International Research Laboratory of Climate and Environment Change / Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2. Fujian Key Laboratory of Severe Weather and Key Laboratory of Straits Severe Weather, China Meteorological Administration, Fuzhou 350001, China; 3. School of Atmospheric Sciences, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519082, China; 4. Chongqing Institute of Green and Intelligent Technology, Chinese Academy of Sciences, Chongqing 400714, 5. China; China Meteorological Administration Tornado Key Laboratory, Guangzhou 510641, China)

Abstract: In this paper, the mesoscale weather forecasting model (Weather Research and Forecasting Model, WRF) is used to numerically simulate the process of Typhoon "Koinu" (2314) passing through the offshore area of Guangdong Province, China. On the basis of that the simulation results are basically consistent with the actual situation, a diagnostic analysis is conducted on the evolution and precipitation process of this typhoon. The results show that: The typhoon and the low-level cold air move in the same direction, and the cold air in the upper and lower layers of the troposphere is transported into the typhoon. Together with the vertical shear of the zonal wind, it gradually causes the collapse of the typhoon's warm core structure and the weakening of its intensity, indirectly leading to a weak precipitation intensity on land. The water vapor content over the land of Guangdong Province is high, and there is also a good water vapor supply, but the conditions for water vapor aggregation to generate convective heavy precipitation are lacking, eventually resulting in weak stratus cloud precipitation. The atmospheric stratification in the middle and lower troposphere over the land tends to be convectively stable, with weak upward movement and low precipitation intensity.

Key words: offshore typhoon; numerical simulation; diagnostic analysis; cold air; precipitation