

# 基于简单台风模型的台风“海马”强度变化机制研究

杨倩, 何海伦

(自然资源部第二海洋研究所 卫星海洋环境动力学国家重点实验室, 浙江 杭州 310012)

**摘要:** 台风强度预报误差较大, 相关物理机制有待深入研究。针对台风“海马”个例, 利用台风最佳路径数据集和欧洲中心再分析资料设定台风特征参数, 使用基于海-气相互作用理论的简单台风模型对台风“海马”进行数值模拟, 并针对焓交换系数与拖曳系数比值开展敏感性试验。控制试验结果表明, 在台风的成熟期, 台风的切向动能主要存在于眼壁外侧的云下层和对流层中下层, 而径向动能主要集中在对流层上部和眼壁外侧的云下层, 这些结果描述了台风成熟期的基本特征。敏感性试验表明, 当海洋表面焓交换系数与拖曳系数的比值增大时, 台风的主级环流与次级环流明显增强, 台风边界层的平均径向风速度分布更趋向中心, 且风速明显增加, 同时, 垂直上升速度增加, 台风切向动能明显增加, 台风强度增强。研究结果有助于理解海气交换对台风强度的影响。

**关键词:** 台风; 台风强度变化; 海表面焓交换系数; 数值模拟

中图分类号: P732.3, P444 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2023)7-0087-09

DOI: 10.11759/hyxx20220318002

台风的生成过程是热带扰动经调整发展, 形成具有暖心结构的低压系统过程。在这个过程中, 台风的气压、半径、最大风速等物理特征以及台风能量都发生显著变化。台风的强度变化一般用台风的中心最低气压、最大风速、半径距离等物理量刻画。研究认为水汽通量、海表面温度、高空急流以及台风底部的出流气流是中国近海台风增强与消亡的主要原因, 海洋这一下垫面对台风施加的强迫, 大气的环境场对台风的动力影响以及台风内核发生的热力过程被认为是台风强度变化的动力机制<sup>[1]</sup>。此外, 台风从海洋吸收的能量以及台风自身的能量平衡研究一直是台风研究的热点。开展台风能量物理机制研究有助于提高台风强度的预报精度, 具有重要的科学意义和应用价值。

海气界面上的动量通量、焓通量是洋面湍流交换过程的重要组成部分, 前者又称风应力, 风应力体现了海洋和大气间摩擦与拖曳的作用<sup>[2-3]</sup>。前人研究认为, 当边界层处于中性条件时, 联立近表层平均风速与高度的方程及块体公式后, 可得风应力系数与海面粗糙度成对应关系<sup>[4]</sup>。一般情况下, 数值模式通过表面 10 m 高度处的拖曳系数、焓通量系数和块体公式建立起海气界面的动量通量、焓通量与风速、温度、比湿、空气密度的关系, 其中水汽通量与热通量被称为湿空气焓通量。实验通过设定湍流

Prandtl 数来表征动量通量与焓通量在传输过程中的差异, 结果表明, 在台风影响下, 动量与焓的交换系数对该环境中海气动量通量及焓通量起决定性作用。

台风能量的相关研究中, Riehl<sup>[5]</sup>发现, 台风的能量有部分来自于海洋表面的蒸发过程。此后 Riehl<sup>[6]</sup>进一步提出, 将台风比喻为一台热机, 在台风眼壁周围呈上升的气流的温度高于环境大气的温度, 从而使得质量气团在台风的底层向其中心流入的过程中, 吸收来自海洋表面的焓。Malkus 等<sup>[7]</sup>认为, 环境场与台风的眼壁区域内侧存在的焓差值与台风中心海平面气压的下降也存在一定的对应关系。

在研究影响台风能量变化物理机制的过程中, 人们提出了两个经典理论: 第二类条件不稳定机制 (Conditional Instability of the Second Kind, 即 CISK 理论), 与海-气相互作用理论 (Air-Sea Interaction Instability, 即 ASII 理论, 又称 Wind-Induced Surface Heat

收稿日期: 2022-03-18; 修回日期: 2022-09-29

基金项目: 上海交通大学“深蓝计划”项目 (SL2020MS030); 卫星海洋环境动力学国家重点实验室资助项目 (SOEDZZ2206)

[Foundation: Oceanic Interdisciplinary Program of Shanghai Jiao Tong University, No. SL2020MS030; Project of State Key Laboratory of Satellite Ocean Environment Dynamics, Second Institute of Oceanography, No. SOEDZZ2206]

作者简介: 杨倩 (1996—), 女, 江西九江人, 硕士研究生, 主要从事海气相互作用研究, E-mail: crystal61f@hotmail.com; 何海伦 (1982—), 通信作者, 男, 江苏淮安人, 副研究员, 博士, 主要从事海气相互作用研究, E-mail: hehailun@sio.org.cn

Exchange, 即 WISHE 理论)。Charney<sup>[8]</sup>提出 CISK 理论, 主张台风的发展是天气尺度下的热带扰动与积云对流相互建立正向反馈的过程。具体地说, 当一个热带扰动出现时, 在埃克曼层存在摩擦辐合的过程, 又称埃克曼抽吸。这个过程中潮湿空气被迫抬升, 积云对流开始发展, 释放凝结潜热, 洋面上空的气团被加热, 其底部气压下降, 由于气压差的存在, 形成了流入低压扰动中心的气流。依据绝对角动量的守恒原则, 此时低压中心的切向风速增强, 环流加强。加强的环流也促进了埃克曼抽吸的强度, 建立了正向的反馈, 同时来自边界层的气流不断上升, 形成具有暖心结构的热带气旋。WISHE 理论是构建海洋表面焓通量和风场之间的正反馈关系<sup>[9-11]</sup>。其中起到核心作用的是指向中心的漂移, 它减少了洋面上的反气旋式流出造成的焓损耗, 从而构建正反馈过程, 边界层的焓通过表面通量的向上传输来形成暖心结构。在该理论中, 认为整个台风的能量上限是一个从海水上层至对流层顶的理想热机能够提取的热量。除此之外, 二者的不同还在于 CISK 理论要求环境大气处于条件不稳定的情况, 而 WISHE 理论在中性大气中也适用。

2016 年第 22 号台风“海马”(Haima)为登陆我国的超强台风之一。研究发现, 台风“海马”的破坏力

极强, 对登陆附近地区带来了严重的经济损失, 且对该台风路径、强度与降水的预报都存在不足<sup>[12]</sup>。可见台风“海马”强度变化机制尚不清晰, 基于 WISHE 理论开展台风“海马”个例研究有助于理解台风强度变化的动力机制。为此, 本研究拟使用基于 WISHE 理论的 Emanuel<sup>[9-11]</sup>的简单台风模型对台风“海马”进行模拟, 分析输出场, 研究台风的强度变化, 并在此基础上开展海表面湍流交换系数的敏感性试验, 探讨海表面湍流交换系数对台风能量变化的影响。

焓交换系数表示台风通过海表吸收内能的效率, 拖曳系数表示台风行进过程中海表面对台风产生摩擦所耗散能量的效率。本文拟调节海表面焓交换系数( $C_e$ )与拖曳系数( $C_d$ )的比值, 研究台风在整个生命期中通过海洋表面吸收的热能与摩擦耗散的能量的变化, 以研究焓交换系数与拖曳系数的比值对台风结构的影响, 进而探索其原因。

## 1 概况

依据中国气象局 2016 年第 22 号台风“海马”的最佳路径数据<sup>[13-14]</sup>(数据时间间隔为 6 h, <http://tcdata.typhoon.org.cn/>; 图 1), 台风“海马”(Haima)于 10 月 15 日在菲律宾以东洋面生成, 在 16 日下午, 其中心

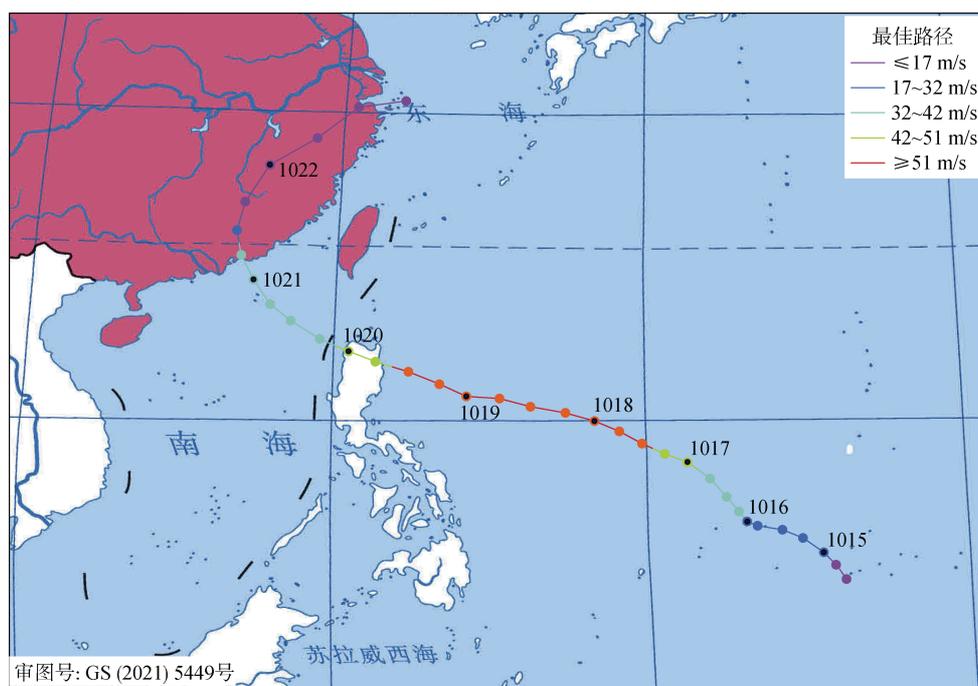


图 1 台风“海马”最佳路径轨迹示意图

Fig. 1 Best track of Typhoon Haima

注: 彩色圆点表示不同时刻台风中心位置, 黑色圆点表示对应日期协调世界时(UTC)00 时 00 分台风中心位置, 实线颜色表示当前时刻近台风中心最大持续风速所在范围, 时间间隔为 6 h

最大风速增大为 33 m/s(台风级), 之后快速加强, 17 日下午达到超强台风级, 18 日夜间强度达到其峰值强度(68 m/s), 在 19 日白天强度开始减弱。21 日夜间在广东沿海登陆, 登陆强度为 38 m/s(台风级)。该台风自生成后, 基本向西偏北方向移动, 在登陆后转向东北方向移动。

## 2 数据

### 2.1 模式介绍

本文使用 Emanuel<sup>[9]</sup>基于 WISHE 理论提出的简单飓风模型(以下简称 E89)。模型的初始状态处于条件中性大气环境, 大气被设定为梯度风平衡且静力平衡。模型使用了位势半径的坐标系。当角动量守恒时, 一个单位质量的空气团径向移动时将获得为零的切向速度的半径是位势半径, 它与每单位质量的绝对角动量的平方根成正比。

位势半径的定义为

$$\frac{f}{2}R^2 = rV + \frac{f}{2}r^2, \quad (1)$$

其中  $f$  为地转参数,  $r$  是以台风中心为起点的半径,  $V$  是切向速度。  $f=2\omega\sin\phi$ ,  $\omega$  为地球自转角速度,  $\phi$  为纬度(在该模式里  $\phi$  被认定为常数)。模型假设湿对流作用于角动量面使得大气处于中性状态, 而这也是 WISHE 理论适用的大气状态, 所以使用位势半径坐标, 且在该坐标中的径向平流仅由摩擦耗散引起。

Emanuel<sup>[11]</sup>对 E89 模型中对流参数化方案进行改进, 提出改进后的模型(简称 E95)。本文使用 E95 模型。E95 模型为轴对称模型, 主要分为云下层和被假定静力平衡与梯度风平衡的对流层, 在对流层中角动量平面以及位势半径平面内饱和熵为常数。模型的主要动力变量有云下层顶部和对流层的等势半径平面的半径  $r_b$ 、 $r_c$ , 对流层中部的平均质量流函数  $\psi$ , 边界层顶部的质量流函数  $\psi_0$  以及边界层顶部的对流上升与下沉的质量通量  $M_u$ 、 $M_d$ 。Emanuel<sup>[11]</sup>指出, 因云下层直接接收下垫面的热量输入, 热带的大多数对流在相对较薄的云下层中发生, 在这时处于热力不平衡的云下层和下垫面通过表面通量的交换以达到平衡状态。此外, 该模式考虑了云下层中存在的径向熵的平流, 在此过程中, 进入云下层的下沉气流的质量通量被认为平衡了地表通量和以及埃克曼流中的径向熵平流。E95 与 E89 相比, 在其顶层添加了动量扩散模块, 不考虑从对流层顶部到底部的向下熵平流, 并且焓的表面交换系数可以与表面拖曳系数不同。

E95 模式使用下式对切向速度进行计算:

$$V_b = \frac{1}{2} \frac{R^2 - r_b^2}{r_b^2}, \quad (2)$$

质量流函数则用下式进行调节:

$$\psi \rightarrow \frac{1}{2} C_{D0} \rho_s g x_s^{1/2} [\psi], \quad (3)$$

其中,  $C_{D0}$  是常数,  $\rho_s$  是地表空气平均密度,  $x_s$  是热力学不平衡参数,  $g$  是重力加速度,  $[\psi]$  为质量流函数的无量纲变量。模式中的径向速度和垂直速度均通过质量流函数和切向速度计算。

### 2.2 模式设置

根据最佳路径数据集的中心气压时间序列, 并利用欧洲中期天气预报中心提供的再分析数据(ERA-5)的海表面温度、海平面气压、地面 10 m 高度风场数据, 对 E95 模型的参数进行设定。具体参数包括: 模型的坐标系更新时间间隔设置为 3 h, 坐标系的最大半径距离设置为 500 km, 初始涡旋的最大风速则根据最佳路径数据集设置为 13 m/s, 涡旋的最大风速半径设置为 110 km, 台风整体的半径为最大风速半径的 5 倍。海表面温度则设定为 28 °C, 台风生成时的最高层气温设置为 -54 °C(参考 ERA-5 数据中 200 hPa 层面的气温), 近地表的环境气温相对湿度设定为 70%。低风速的地表拖曳相关系数值、拖曳系数限制值、熵交换系数与拖曳系数的比值、湍流混合长度、辐射弛豫时间、辐射冷却率限制振幅、对流调整时间尺度与对流熵下传至低对流层的百分比数则根据 Emanuel<sup>[9]</sup>设置。控制试验设定  $C_e/C_d=1.0$ 。

## 3 结果分析

### 3.1 控制试验结果

图 2 为最佳路径数据集和模式输出的台风最低气压。最佳路径数据集显示所选取的台风个例在第 5 天到达最低中心气压 905 hPa, 随后中心气压上升。与最佳路径数据集相比, 模拟的台风强度较弱, 模拟的最低中心气压为 943 hPa。对于中心气压的时间演变, 二者在前 60 h 内变化趋势大体一致, 在 60 h 后模拟出的台风的发展速度有所下降并且在 66 h 速度明显变缓, 趋于稳定, 在 99 h 发展平稳。中心气压约 940 hPa, 最大风速约为 53.5 m/s。模拟台风经过 126 h 的稳定期后, 于 225 h 以极大速度减弱。最佳路径数据集所显示的台风在 60 h 后依然在增强, 96 h 处于稳定状态, 该状态持续了 12 h, 此后快速衰减, 于 138 h 起有 12 h

的中心气压稳定期, 之后继续衰减至消亡。整体而言, E95 可以较好地模拟台风“海马”在发展阶段的中心气压的变化过程。同时, 模式中台风稳定状态(第 99 h 至 225 h)可用于研究成熟期台风的能量平衡机制。

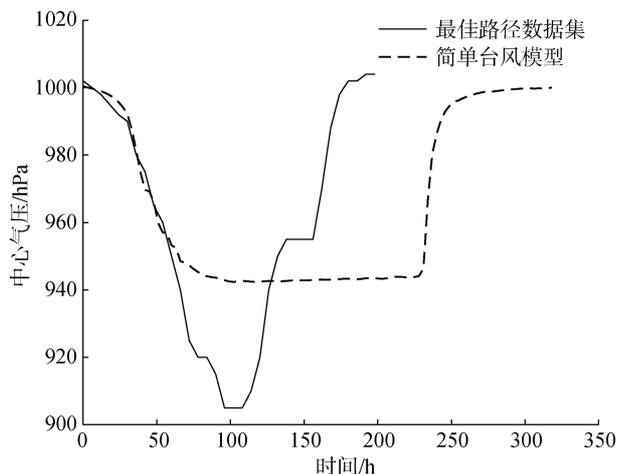


图 2 最佳路径数据集与 E95 模拟的中心气压的时间序列  
Fig. 2 Time series of the best track dataset and the central air pressure simulated by E95

对成熟阶段的台风动能进行平均处理(图 3)。可见, 在控制性试验中, 成熟期台风的切向动能主要存在于眼壁外侧的云下层与对流层中下层, 在垂直方向上的

变化梯度明显大于水平方向。从径向速度看, 径向速度的动能主要集中于对流层上部与眼壁外侧的云下层内, 且在对流层的上部呈随高度的增加有明显向外倾斜的趋势。总动能的分布特征与台风结构的分布特征相吻合, 且在对流层高层存在明显的范围大于台风底部的径向运动, 与台风高层出流相对应。

### 3.2 敏感性测试结果

为了研究海表面湍流交换系数对台风强度和结构变化, 设计了 2 组敏感性实验, 比较在焓交换系数 ( $C_e$ )与拖曳系数( $C_d$ )比值不同的情况下, 台风部分物理量的变化情况。图 4 显示, 当比值调至 0.85 时, 可以看出所模拟的台风虽然在整个发展期的变化趋势相一致, 但气旋开始加深的时间明显滞后于控制试验, 且强度明显偏弱, 发展速度慢、发展期时间延长, 成熟期维持时间明显减短。当比值继续降低至 0.70 时, 输出结果的变化趋势是一致的, 即: 较前一个试验, 台风发展开始时间更晚、加强速度更慢、发展期时间更长, 成熟期维持时间明显更短。这表明, 当海洋表面向热带气旋输送的焓通量减小而海洋表面的拖曳造成的损耗不变时, 气旋开始加深的时间点会滞后, 台风极值强度减弱, 且保持强度稳定的时间缩短。台风“海马”的生成期、发展期与成熟期的

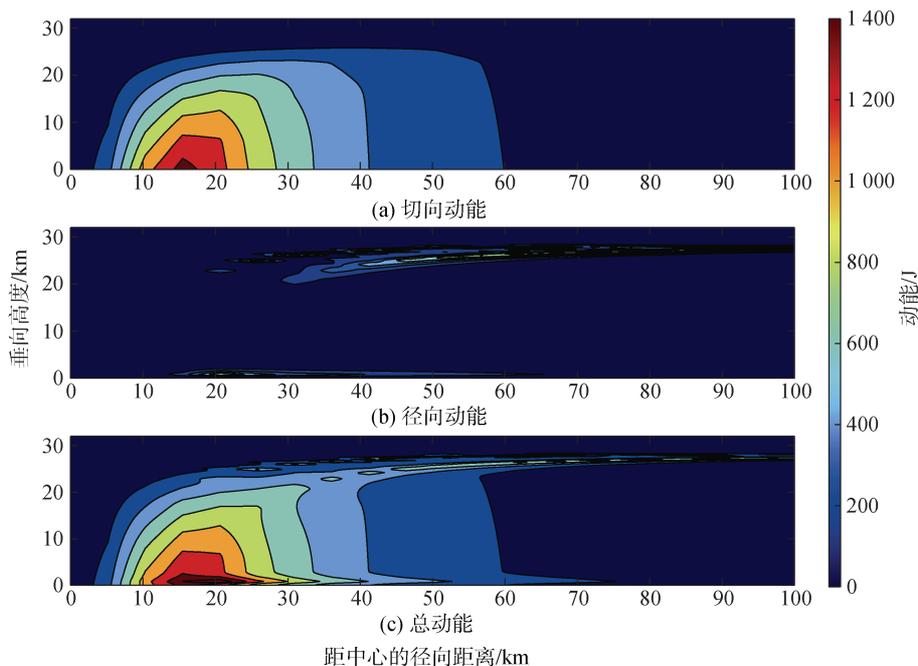


图 3 控制试验( $C_e/C_d=1$ )中动能的径向垂直分布  
Fig. 3 Radial vertical distribution of velocity kinetic energy in the control run ( $C_e/C_d = 1$ )  
注: 色差表示相应的动能

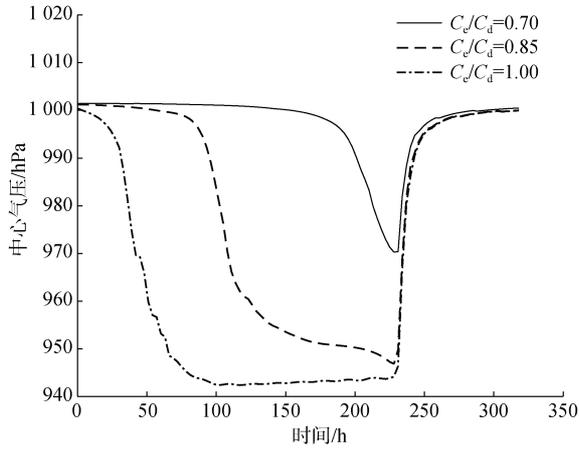


图 4 敏感试验中不同海表面焓交换系数与拖曳系数比值 ( $C_e/C_d$ ) 时 E95 模拟的中心气压时间序列

Fig. 4 Time series of central pressure simulated by E95 for different ratios of sea surface enthalpy exchange and drag coefficients ( $C_e/C_d$ ) from the sensitivity tests

起始时刻与从海洋表面上传输的焓的通量密切相关，海洋提供的大量的焓对台风的强度有明显的正

向作用，也说明了在这一过程中 WISHE 物理机制起主要作用。值得注意的是，台风开始衰减的时间节点是一致的，这可能与设置的登陆时间这一参数有关。

进一步分析了敏感性试验中边界层平均径向风与对流层低层平均径向风速度的径向变化(图 5)。焓交换系数与拖曳系数比值越大，边界层与对流层低层的平均径向风速度越强。边界层平均径向风速度在比值由 0.85 变化至 1.00 时，最大平均径向风速度由约 2 m/s 变化至约 7.5 m/s；且观察到输出结果的第三个较为明显的折点向内移动，位置由径向距离 140 km 变化至 100 km，再到 90 km，即台风在边界层内的入流范围有所收缩，也反映了台风的半径的收缩，即体现强度的增加。在数值模式中，焓交换系数通过改变台风边界层内的主级环流强度以影响台风的强度。对流层低层平均径向风速度的变化则没有体现较大风速范围的收缩，但最大风速随系数比值的增加也有明显的增大，由 3.2 m/s 变化至 3.8 m/s，再到 8 m/s，也呈现了台风增强的过程。

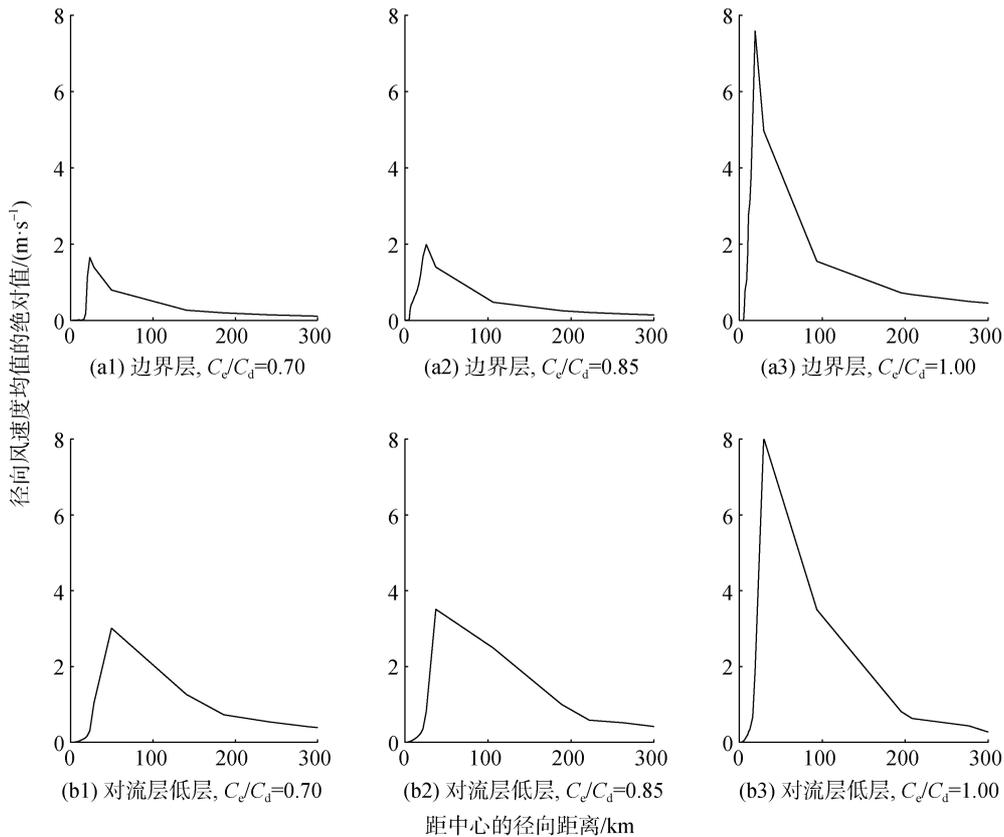


图 5 敏感试验中不同海表面焓交换系数与拖曳系数比值( $C_e/C_d$ )时边界层与对流层低层处径向风速度均值绝对值的径向分布  
Fig. 5 Radial distributions of absolute mean radial wind velocity at the boundary layer and lower troposphere for different ratios of sea surface enthalpy exchange and drag coefficients ( $C_e/C_d$ ) from the sensitivity tests

注:  $C_e/C_d$  分别为(a1, b1)0.70, (a2, b2)0.85, (a3, b3)1.00

对比不同比值条件下, 台风的上升气流速度与下降气流速度径向分布的模拟结果(图 6)。当比值越大时, 上升气流速度明显增加, 这表明焓交换系数可能主要通过影响台风的次级环流改变台风的强

度。对于下沉气流速度,  $C_e/C_d$  比值越大, 速度越快。整体看来, 在台风达到稳定的成熟期时, 台风内部的垂向气流整体呈下沉状, 上升气流的速度明显低于下沉气流的速度。

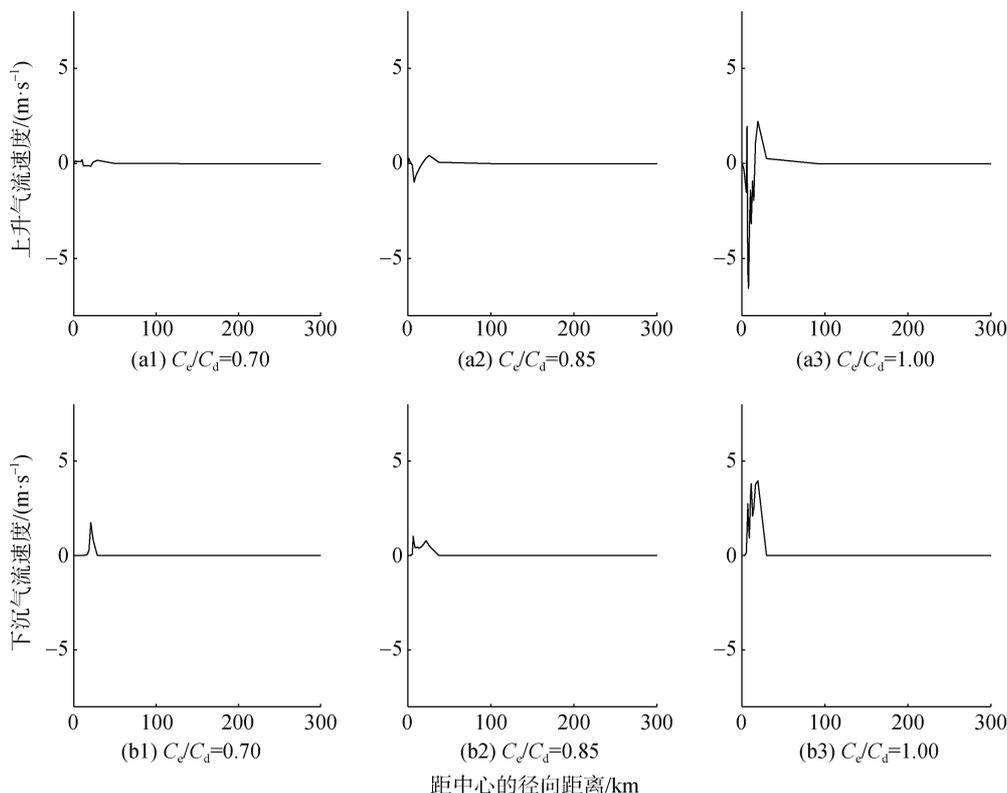


图 6 敏感试验中不同海表面焓交换系数与拖曳系数比值( $C_e/C_d$ )时上升速度与下沉速度的径向分布

Fig. 6 Radial distribution of the upward and downward velocities at the boundary layer and lower troposphere for different ratios of sea surface enthalpy exchange and drag coefficients ( $C_e/C_d$ ) from the sensitivity tests

图 7 表明, 随着海表面的焓交换系数与拖曳系数的比值增加时, 中低对流层及云下层处眼壁范围内的总动能均有增加, 模式顶部靠近眼壁中心区域的动能也有少许的增加, 这表明了当焓通量增加的幅度相比拖曳造成的耗散程度更大时, 显著地影响台风眼壁附近动能, 使其增加, 增量主要分布于云下层。温暖洋面在海气交换界面提供更多的湍流热能通量, 部分转化的动能随台风眼壁的上升气流向上传输, 加强模式顶部的径向气流速度, 使其动能增加。

图 8 为在不同比值下相当位能的径向垂直分布。随着比值的增大, 台风向内收缩, 眼区的空气团内能明显增加, 暖心位置明显上抬, 这与 Ming 等<sup>[15]</sup>指出数值模拟中台风的强度对焓交换系数与拖曳系数敏感, 且二者对暖心产生显著影响的结果一致。在剖

面范围内, 整体的相当位温均有不同程度的增加, 眼壁范围的温度梯度明显加大。在模式的顶层存在非常明显的大气逆温层。但大气稳定度的分布无明显变化, 焓通量相比于拖曳耗散的增加, 主要起到沿眼壁向上输送热能的作用, 升高气团的温度, 增加气团的内能, 使大气更不稳定, 为台风的维持提供能量的正向收入。

## 4 结论

本文利用简单台风模型探讨 WISHE 物理机制对台风“海马”强度变化的解译。控制试验表现的台风最低中心气压的变化与最佳路径数据所展现的基本一致, 能较好表征台风发展期与衰减期过程, 模拟的稳定状态可用于研究台风的成熟期能量平衡机制。

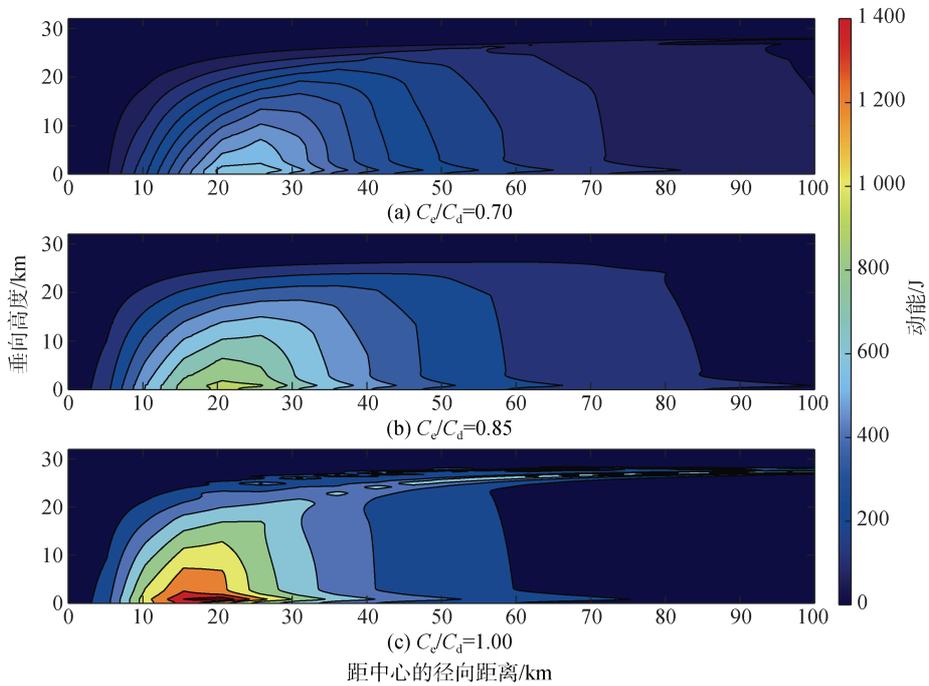


图 7 敏感试验中不同海表面焓交换系数与拖曳系数比值( $C_e/C_d$ )时总动能的径向垂直分布

Fig. 7 Radial vertical distribution of total velocity kinetic energy for different ratios of sea surface enthalpy exchange and drag coefficients ( $C_e/C_d$ ) from the sensitivity tests

注: 色差表示总动能

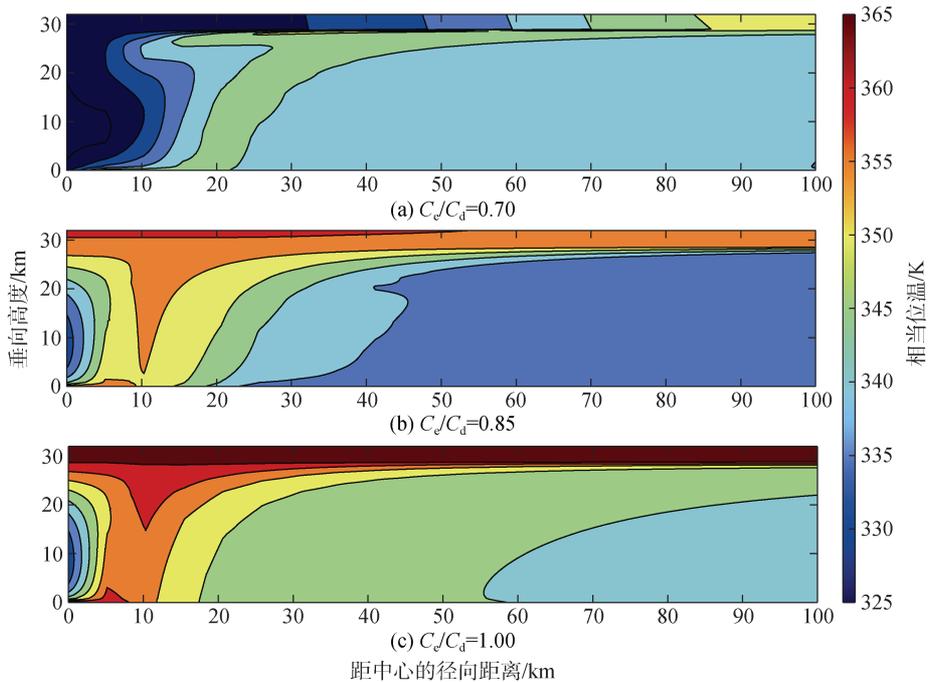


图 8 敏感试验中不同海表面焓交换系数与拖曳系数比值( $C_e/C_d$ )时相当位温的径向垂直分布

Fig. 8 Radial vertical distribution of equivalent potential temperature for different ratios of sea surface enthalpy exchange and drag coefficients ( $C_e/C_d$ ) from the sensitivity tests

通过修改焓交换系数与拖曳系数比值开展敏感性试验, 结果显示: 当焓交换系数与拖曳系数的比

值增加时, (1)边界层的出流区域的径向风速的径向分布向中心靠近, 风速明显加强, 说明焓交换系数

通过改变台风边界层的主级环流以达到使台风径向收缩,有利于台风加强;(2)台风的上升气流速度与总垂直速度增加,表示焓交换系数也通过影响台风垂向的次级环流进而影响台风强度;(3)总动能的变化主要分布于云下层与对流层中下层的近台风眼区范围,总动能增加,说明台风从海洋表面吸收的热量部分转化为台风动能;(4)眼壁区域的相当位温逐渐增加,且水平方向的梯度增大,表明台风从海表面吸收的热量存在部分沿眼壁向上传输。这些特征变化证实了模式模拟的台风“海马”在发展至成熟阶段时,WISHE物理机制在其中起重要作用。

总体而言,当焓通量(相对于动量通量)增加时,台风的强度增强,超强台风维持时间增长。边界层内台风入流区域径向收缩,平均入流风速增加,台风的垂直上升速度明显增加,整体的垂向速度呈下沉趋势,略有增加,表明焓交换系数通过影响台风位于边界层内的主级环流与垂向次级环流以影响台风强度变化。位于台风眼壁附近的云下层及对流层中下区域的动能有明显增加,眼壁附近相当位温梯度增大,暖心位置略抬升,体现焓通量在眼壁附近随上升气流向台风传输能量,并有部分被转化为动能以加强台风强度。

#### 参考文献:

- [1] 郑峰. 中国近海台风突然增强和衰亡的研究[D]. 北京: 中国气象科学研究院, 2015.  
ZHENG Feng. A study of rapid intensification and dissipation of typhoons over coastal water of China[D]. Beijing: Chinese Academy of Meteorological Sciences, 2015.
- [2] 冯兴如, 李水清, 尹宝树. 海气动量通量研究综述[J]. 海洋科学, 2018, 42(10): 103-109.  
FENG Xingru, LI Shuiqing, YIN Baoshu. Review of research on momentum flux through air-sea interface[J]. Marine Sciences, 2018, 42(10): 103-109.
- [3] ZHAO J, WU L X. Seasonal variation of turbulent diapycnal mixing in the northwestern Pacific stirred by wind stress[J]. Geophysical Research Letters, 2010, 37(23): L23604.
- [4] 赵中阔. 台风环境中海-气动量与焓交换观测研究及应用进展[J]. 热带气象学报, 2016, 32(6): 918-924.  
ZHAO Zhongkuo. Progresses in measurement and applications of air-sea momentum and enthalpy exchanges in tropical cyclone environments[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2016, 32(6): 918-924.
- [5] RIEHL H. A Model of hurricane formation[J]. Journal of Applied Physics, 1950, 21(9): 917-925..
- [6] RIEHL H. Tropical meteorology[J]. Geographical Review, 1954. DOI: 10.2307/211904.
- [7] MALKUS J S, RIEHL H. On the dynamics and energy transformations in steady-state hurricanes[J]. Tellus, 1960, 12(1): 1-20.
- [8] CHARNEY J G. On the growth of the hurricane depression[J]. Journal of Atmospheric Sciences, 1964, 21(1): 68-75.
- [9] EMANUEL K A. An air-sea interaction theory for tropical cyclones. Part I: steady-state maintenance[J]. Journal of Atmospheric Sciences, 1986, 43(6): 585-605.
- [10] EMANUEL K A. The finite-amplitude nature of tropical cyclogenesis[J]. Journal of Atmospheric Sciences, 1989, 46(22): 3431-3456.
- [11] EMANUEL K A. Sensitivity of tropical cyclones to surface exchange coefficients and a revised steady-state model incorporating eye dynamics[J]. Journal of Atmospheric Sciences, 1995, 52(22): 3969-3976.
- [12] 甘海, 单雪珂, 于平, 等. 深秋季台风“海马”特征分析[J]. 气象研究与应用, 2017, 38(A01): 28-31.  
GAN Hai, SHAN Xueke, YU Ping, et al. Feature analysis of typhoon Haima in autumn[J]. Journal of Meteorological Research and Application, 2017, 38(A01): 28-31.
- [13] YING M, ZHANG W, YU H, et al. An overview of the china meteorological administration tropical cyclone database[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2014, 31(2): 287-301.
- [14] LU X Q, YU H, YING M, et al. Western North Pacific tropical cyclone database created by the China Meteorological Administration[J]. Advances in atmospheric Sciences, 2021, 38(4): 690-699.
- [15] MING J, ZHANG J N. Effects of surface flux parameterization on the numerically simulated intensity and structure of Typhoon Morakot (2009)[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2016, 33(1): 58-72.

# Physical mechanism of the intensity change of Typhoon Haima based on a simple typhoon model

YANG Qian, HE Hai-lun

(State Key Laboratory of Satellite Ocean Environment Dynamics, Second Institute of Oceanography, MNR, Hangzhou 310012, China)

**Received:** Mar. 18, 2022

**Key words:** typhoon; typhoon intensity change; sea surface enthalpy exchange coefficient; numerical simulation

**Abstract:** Typhoon intensity forecast errors are generally large. The physical mechanism related to typhoon intensity variation warrants further investigation. In this work, the best track dataset and ECMWF reanalysis were employed to set the parameters of a typhoon and a simple typhoon model based on wind-induced surface heat exchange was adopted to simulate Typhoon Haima. Furthermore, sensitivity tests on the surface enthalpy exchange and drag coefficients were conducted to study the effect of air-sea exchange on the intensity variation of Typhoon Haima. The findings revealed that in the mature stage of the typhoon, the tangential velocity kinetic energy is mainly concentrated in the subcloud layer, which is outside the eye wall, and the middle and lower tropospheres. Meanwhile, the radial velocity kinetic energy is mainly concentrated in the upper troposphere and the subcloud layer, which is outside the eye wall. These results reflect the basic characteristics of the typhoon in the mature stage. The sensitivity experiments of the surface turbulence exchange coefficient show that when the ratio of surface enthalpy exchange and drag coefficients increases, the primary and secondary circulations of the typhoon are considerably intensified, the mean radial wind velocity in the boundary layer tends to be centralized, the wind speed considerably increases, vertical ascent velocity increases, tangential kinetic energy considerably increases, and typhoon intensity increases. In summary, this work would help understand the influence of air-sea exchange on the variation in typhoon intensity.

(本文编辑: 丛培秀)