

第五届全国中尺度气象论坛

# 台风与海洋相互作用研究进展

国防科技大学气象海洋学院

费建芳 马占宏 程小平 刘磊 黄小刚 李湘成 何顺之 等

2023.08.10 银川



# 报告内容

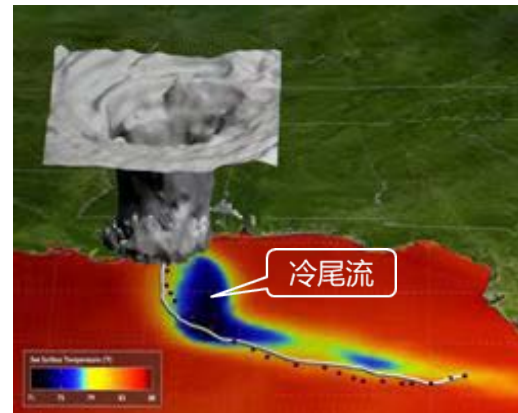
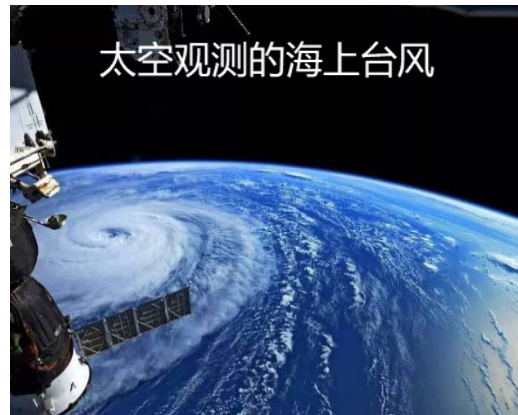
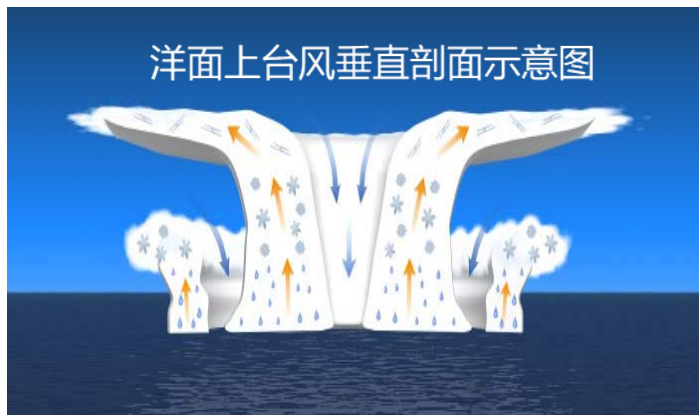
- 一、研究背景
- 二、资料与海气耦合台风模式
- 三、台风对海洋的影响
- 四、海洋对台风的影响
- 五、结论



# 台风与海洋相互作用强烈

海洋为台风发展提供了充沛的**水汽和热量**，是台风发生发展的主要能量来源。

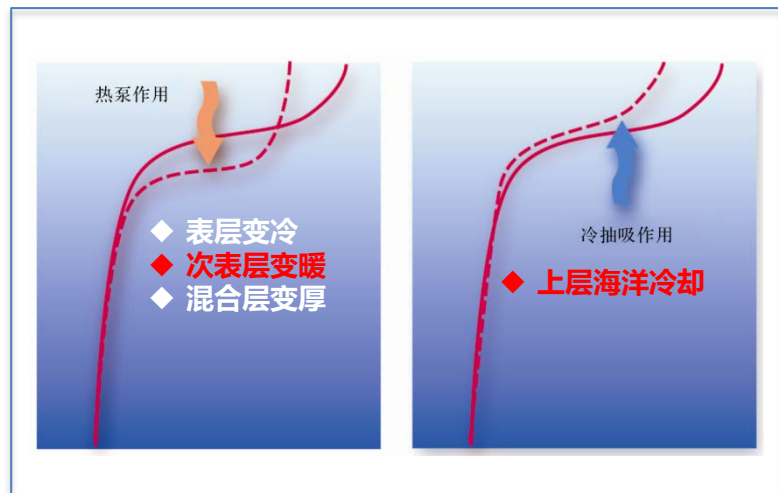
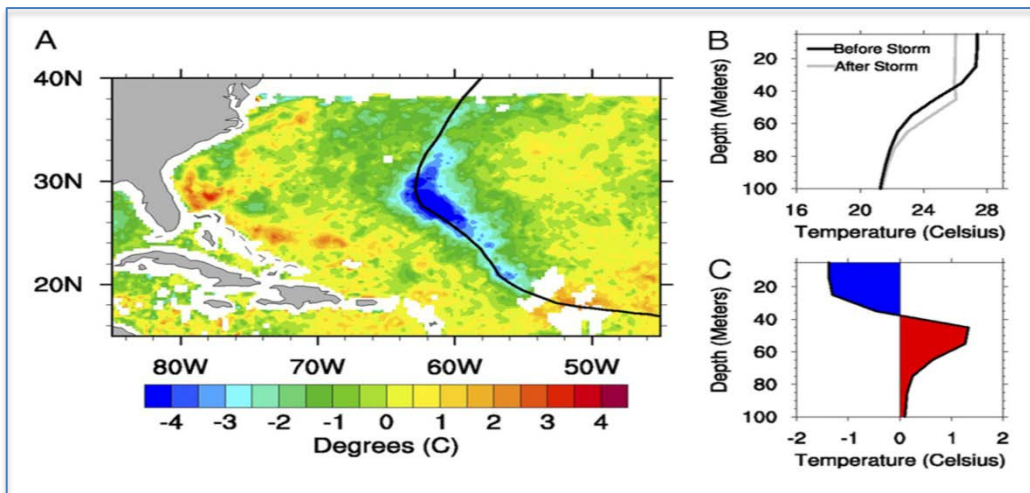
台风产生**巨浪和大量飞沫**，使海洋表层温度降低，在移动方向的右后方形成**冷尾流**，改变了海表特性。





# 台风对海洋的影响

## 夹卷和垂直混合、冷水上涌（上升流）、温盐流垂直结构调整



飓风Gert (1999) 路径、冷尾流、经过前后海洋温度垂直廓线  
(Srifer, 2013)

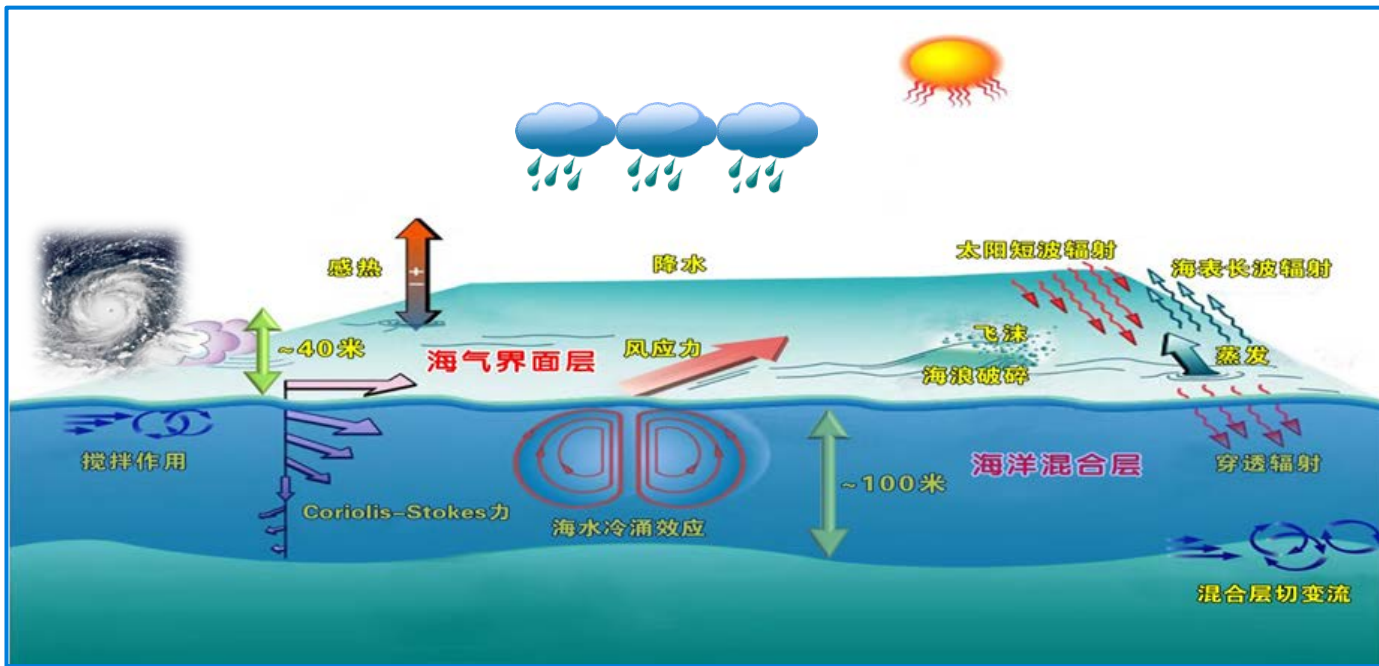
台风过程中“热泵”作用和“冷抽吸”作用  
(陈大可等, 2017)





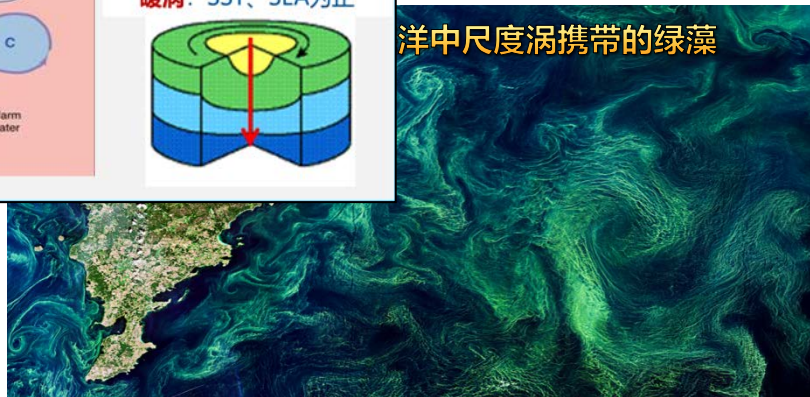
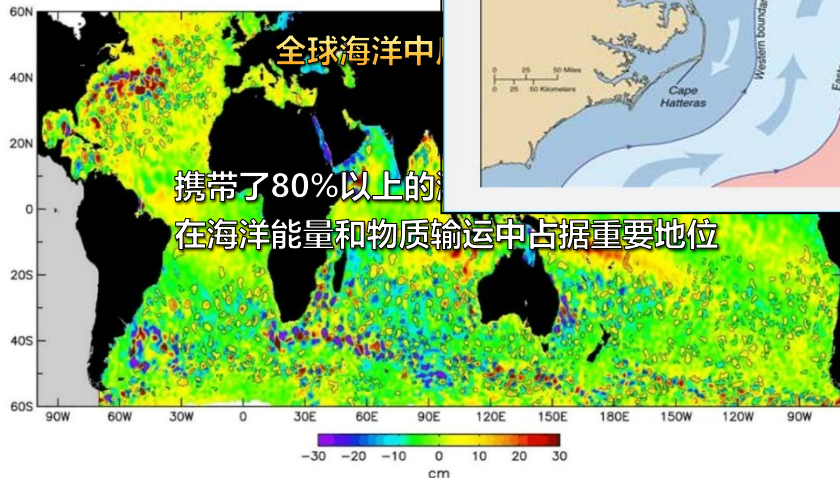
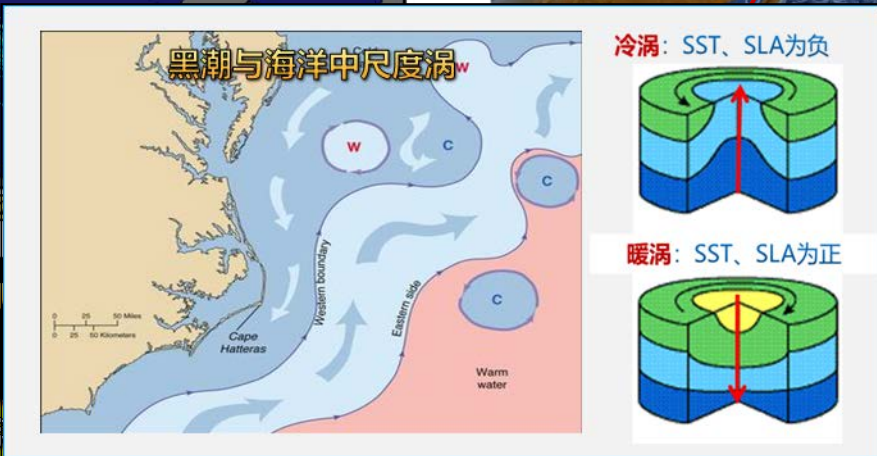
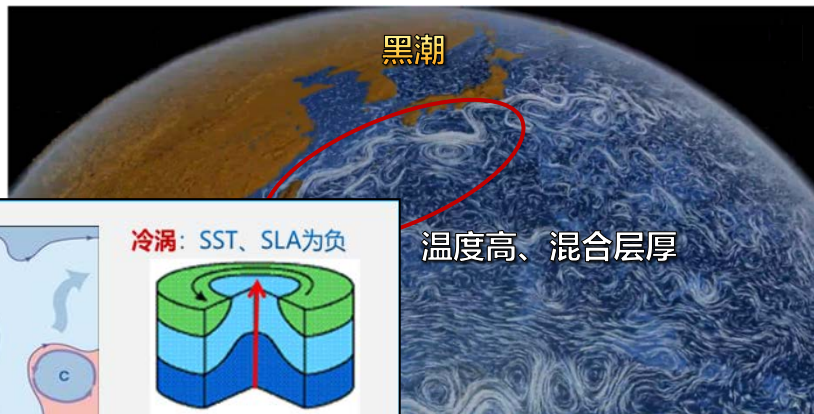
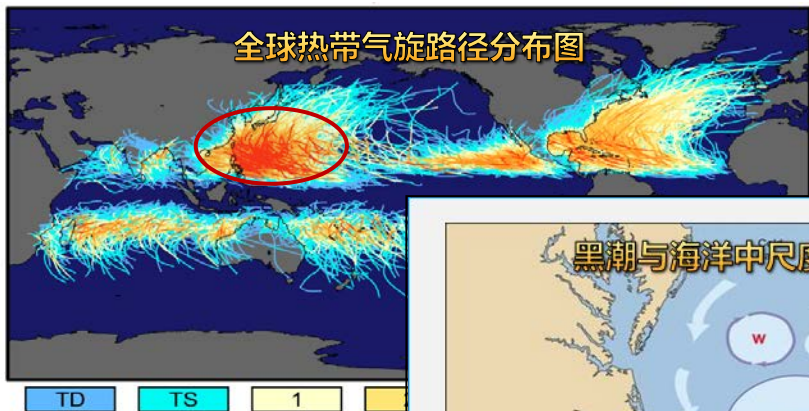
# 海洋对台风的影响

增强了动量、热量、水汽交换





# 台风与多尺度海洋系统的相互作用

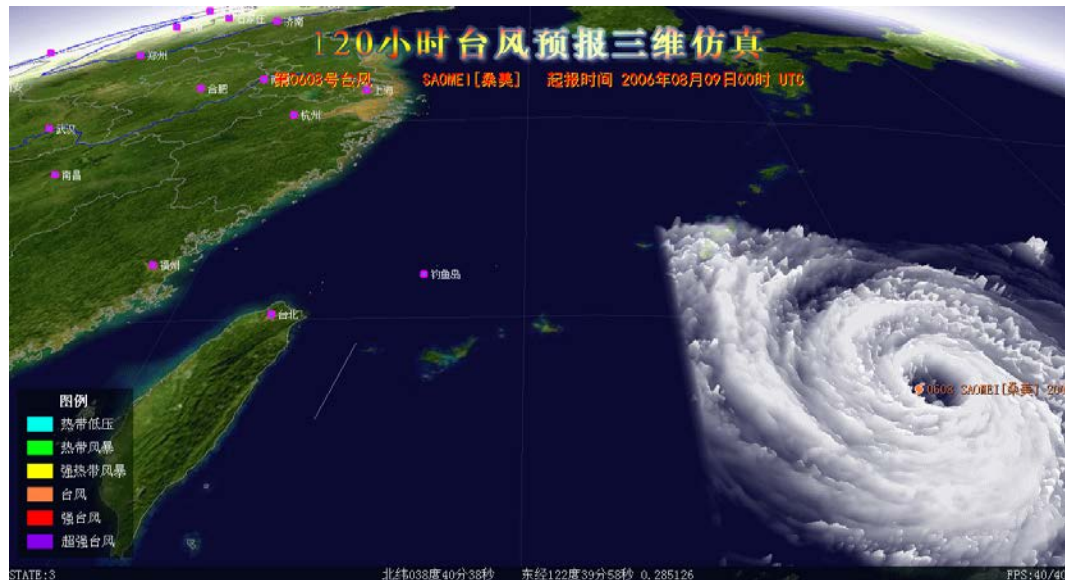




# 台风与海洋相互作用研究的科学问题

## 科学问题

- ◆ 台风对上层海洋热力和动力结构特征的影响?
- ◆ 海洋对台风路径、强度、结构的影响及机理?





# 报告内容

- 一、研究背景
- 二、资料与海气耦合台风模式
- 三、台风对海洋台风的影响
- 四、海洋对台风的影响
- 五、结论





## 多源资料

### 热带气旋、气象、海洋资料

热带气旋数据	中国气象局: <a href="https://www.metoc.navy.mil/jtwc/">https://www.metoc.navy.mil/jtwc/</a> 美国联合台风警报中心: <a href="https://tcdata.typhoon.org/">https://tcdata.typhoon.org/</a> 日本气象厅: <a href="https://www.jma.go.jp/jma/index.html">https://www.jma.go.jp/jma/index.html</a>
海表温度数据	美国遥感系统实验室: <a href="https://www.remss.com/">https://www.remss.com/</a>
海气热通量数据	法国海洋开发研究院: <a href="https://oceanheatflux.ifemer.fr/">https://oceanheatflux.ifemer.fr/</a>
Argo浮标数据	中国Argo实时资料中心网: <a href="http://www.argo.org.cn/">http://www.argo.org.cn/</a>
气候态温盐数据	美国国家海洋大气局 (NOAA): <a href="https://www.ncei.noaa.gov/products/">https://www.ncei.noaa.gov/products/</a>
HYCOM数据	HYCOM再分析资料: <a href="https://tds.hycom.org/thredds/catalogs/GLBv0.08/">https://tds.hycom.org/thredds/catalogs/GLBv0.08/</a>
FNL数据	美国大气环境预报中心: <a href="http://rda.ucar.edu/datasets/ds083.2/">http://rda.ucar.edu/datasets/ds083.2/</a>
ERA5	欧洲中期天气预报中心: <a href="https://cds.climate.copernicus.eu/">https://cds.climate.copernicus.eu/</a>



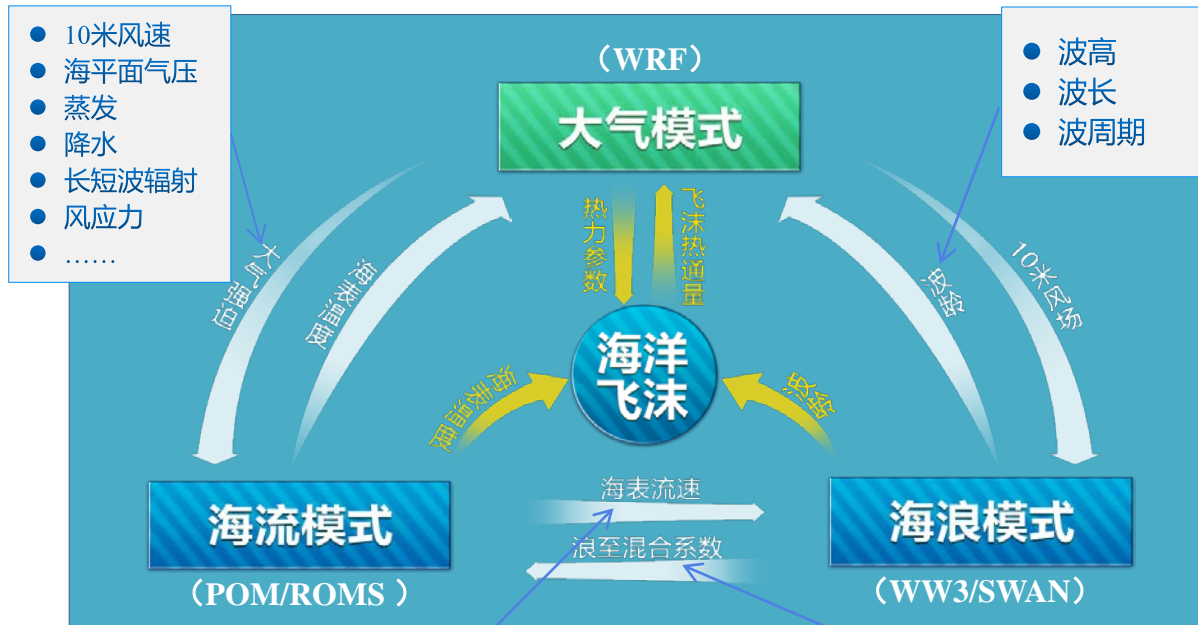
# 多源资料

## 气象、海洋卫星观测资料

海表面温度	Reynolds OI product (1998-2016)
洋面热通量	Version 4 of IFREMER (1998-2016)
降水资料	TRMM (1998-2016)
云量	OMI/Aura product (2005-2016)
近地面风场	QuikScat/SeaWinds product (1999-2009)
降水概率	QuikScat/SeaWinds product (1999-2009)
AVISO数据	法国空间局: <a href="https://www.avsisio.altimetry.fr/">https://www.avsisio.altimetry.fr/</a>



# 大气-海流-海浪耦合台风预报模式系统



**WRF:** Weather Research and Forecasting Model

**POM:** Princeton Ocean Model

**ROMS:** Regional Ocean Model System

**WWIII:** WAVEWATCH-III

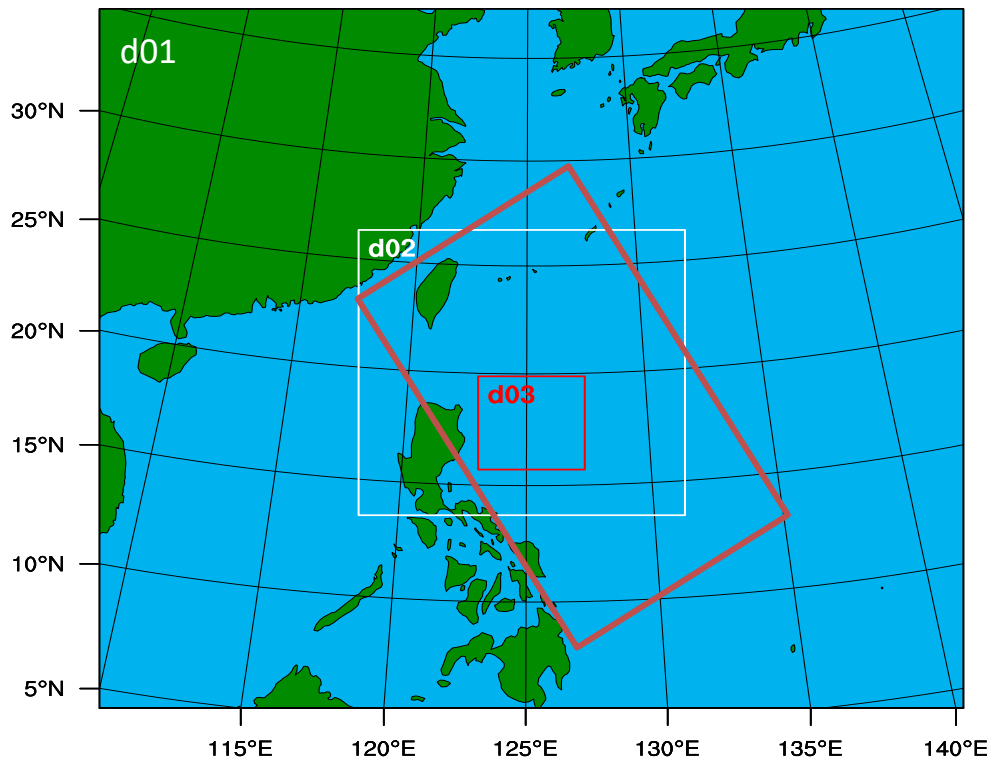
**SWAN:** Simulating Waves Nearshore

- Stokes漂移
- 地形
- 海表高度异常
- .....

- 波高、波长、波周期
- 白盖破碎能
- 摩擦耗散能
- 表面波破碎
- 椭圆速度
- .....



# 大气-海流-海浪耦合台风预报模式系统



- WRF 三层网格嵌套(15km, 5km, 1.67km), 最内层随TC移动
- ROMS/POM模式单层网格 (3km, 粗红框)
- SWAN/WWIII模式与ROMS网格相同
- 耦合器: MCT





# 报告内容

一、研究背景

二、资料与海气耦合台风模式

三、台风对海洋的影响

四、海洋对台风的影响

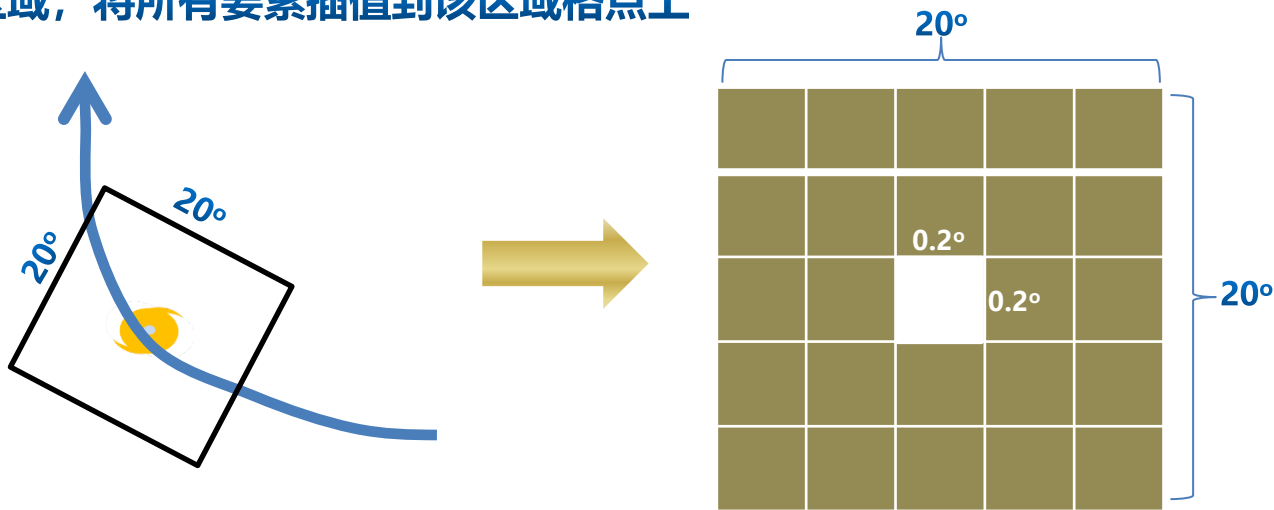
五、结论

1. 冷尾流
2. 海洋中尺度涡
3. 黑潮



# 1. 冷尾流与洋面焓通量

针对每一个6h间隔的TC中心，定义宽度为 $20^\circ \times 20^\circ$ ，分辨率为 $0.2^\circ \times 0.2^\circ$ 的方形区域，将所有要素插值到该区域格点上

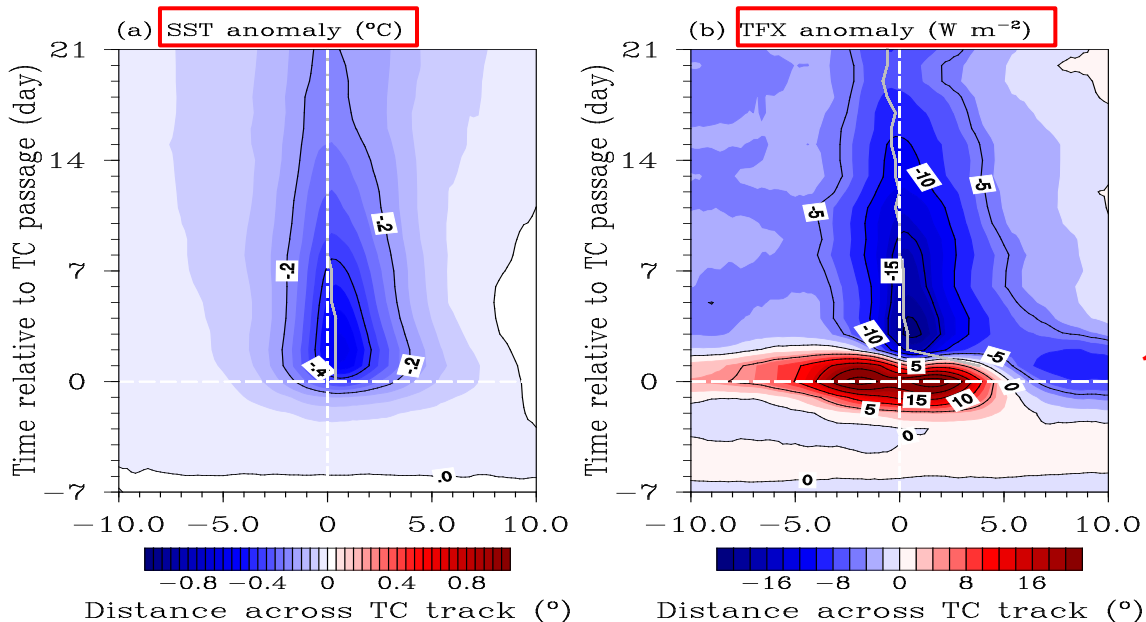


- ◆ 1998-2016年北半球共 **1317** 个 TC 个例，对应 **36488** 个方形区域
- ◆ 每个区域计算TC中心到达前**7天**至到达后**21天**的变量演变情况
- ◆ **变量距平**定义为 TC 移出后与来临前（5至7天）的差值



# 1. 冷尾流与洋面焓通量

## SST距平和洋面焓通量(TFX)距平随时间演变情况



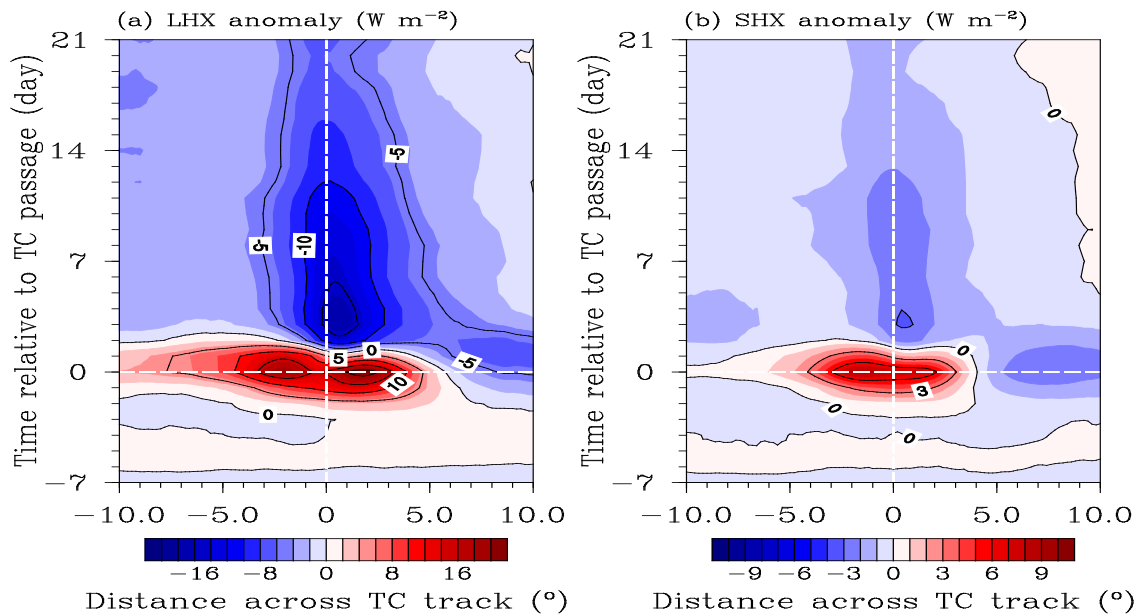
台风中心两侧  
各有1个峰值

- ◆ 冷尾流造成其上方的洋面焓通量减少
- ◆ 负的洋面焓通量距平水平分布广、持续时间长



# 1. 冷尾流与洋面焓通量

## 洋面潜热(LHX)和感热(SHX)通量距平随时间演变情况



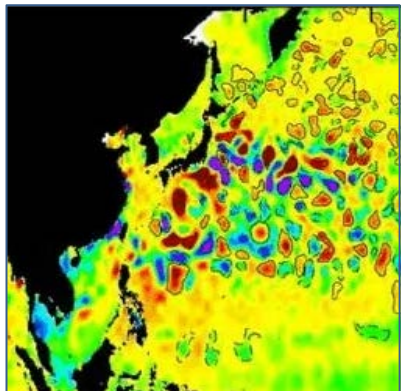
- ◆ 感热和潜热通量呈现相似的演变特征
- ◆ 冷尾流上方的水汽输送减少、热量输送削弱



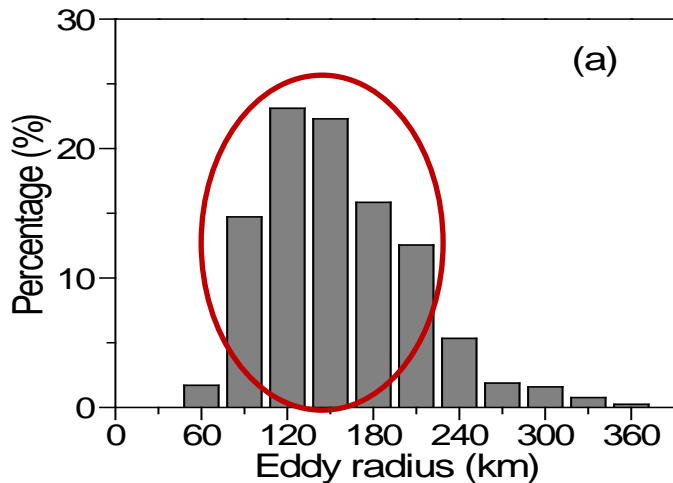


## 2. 海洋中尺度涡对台风的响应

### 西北太平洋海洋中尺度涡的统计特征

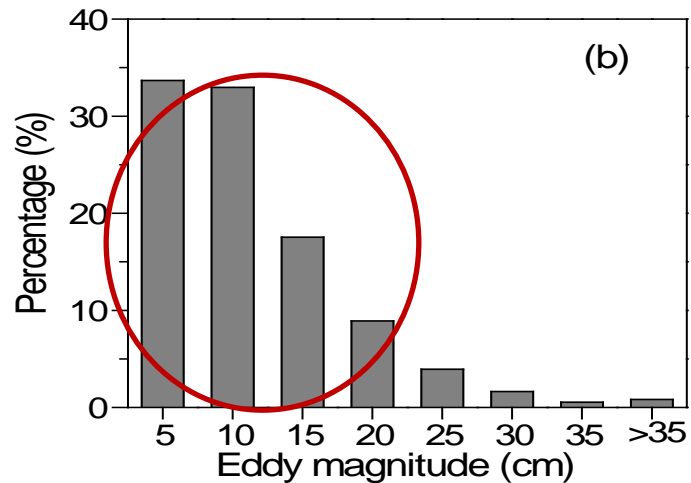


西北太平洋中尺度涡



海洋中尺度涡半径

- ◆ 平均半径80-220km
- ◆ 与台风内核尺度相近

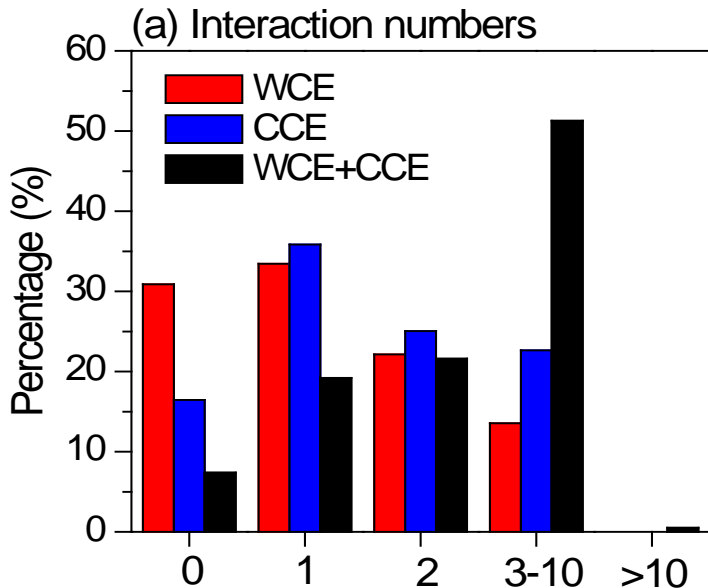


海洋中尺度涡强度

- ◆ SLA平均: 5-20cm

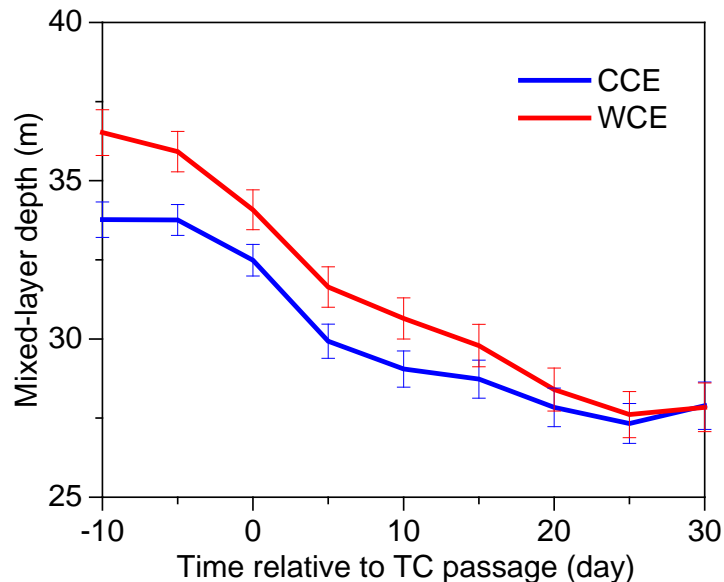


## 2. 海洋中尺度涡对台风的响应



台风经历冷涡(CCE)和暖涡(WCE)的数量

- ◆ 超过90%的台风在其生命史中遭遇了中尺度涡
- ◆ 经历冷涡和暖涡的比例相近



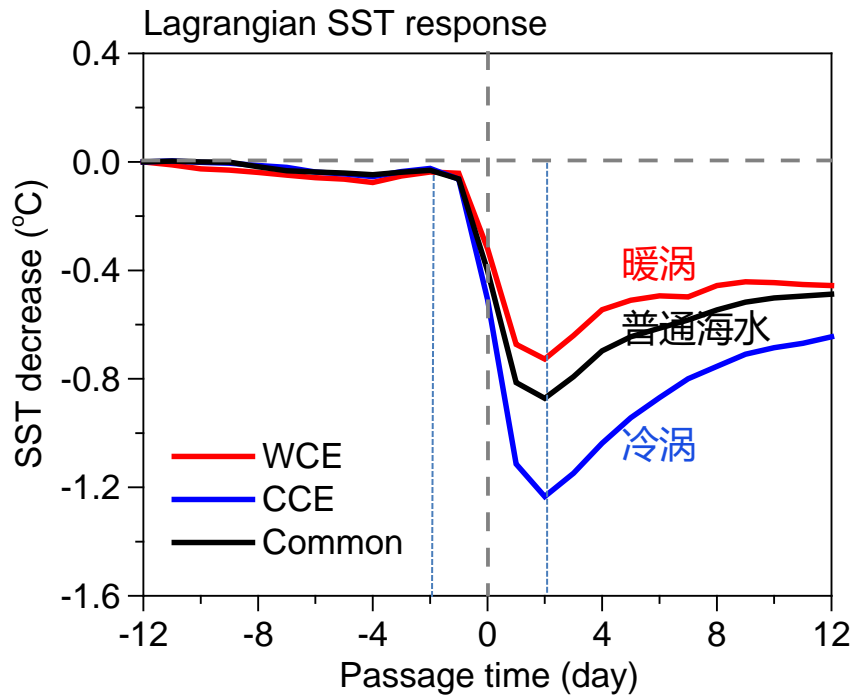
台风对冷涡、暖涡混合层厚度的影响

- ◆ 两者的混合层深度都在减小
- ◆ 暖涡比冷涡变化更强

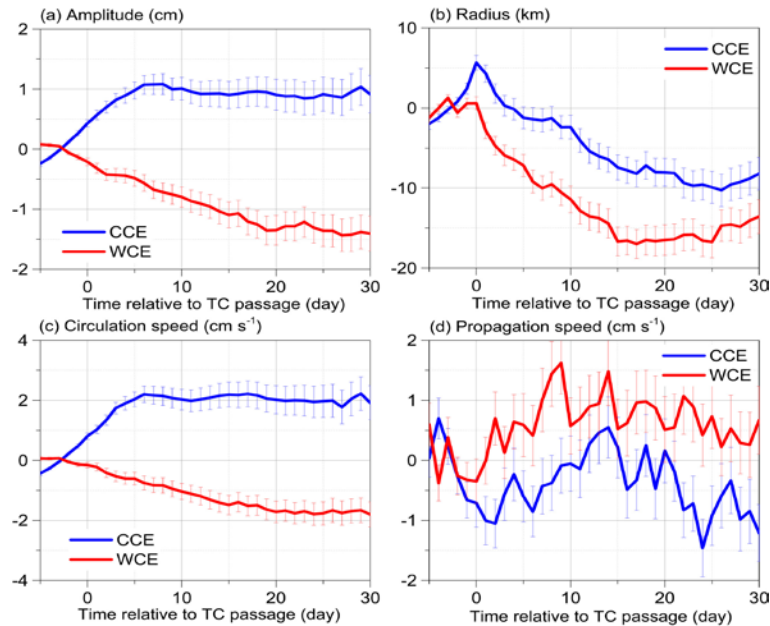


## 2. 海洋中尺度涡对台风的影响

台风通过暖涡、冷涡和普通海水时SST逐日变化



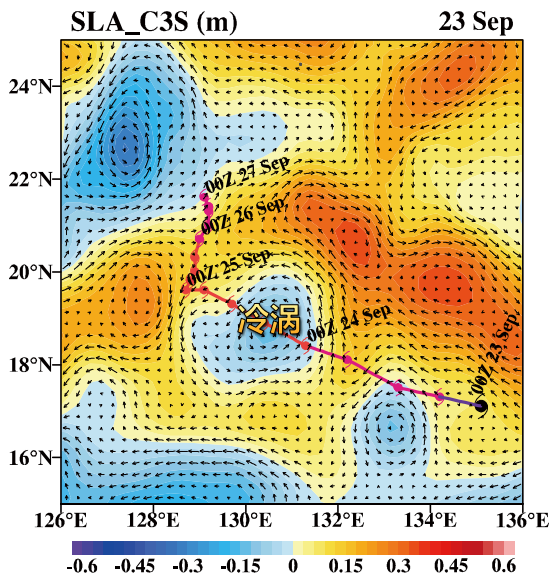
台风对冷涡和暖涡振幅、半径、环流和传播速度的影响



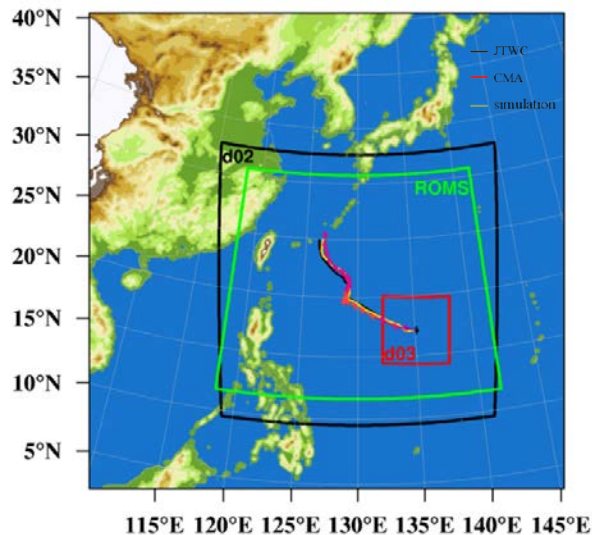


## 2. 海洋中尺度涡对台风的影响

### 个例模拟：台风潭美(2018)对海洋中尺度涡影响



- 2018年24号台风Trami (潭美) 路径
- 模拟起始时间 (9月23日) 海表面高度异常(SLA)分布



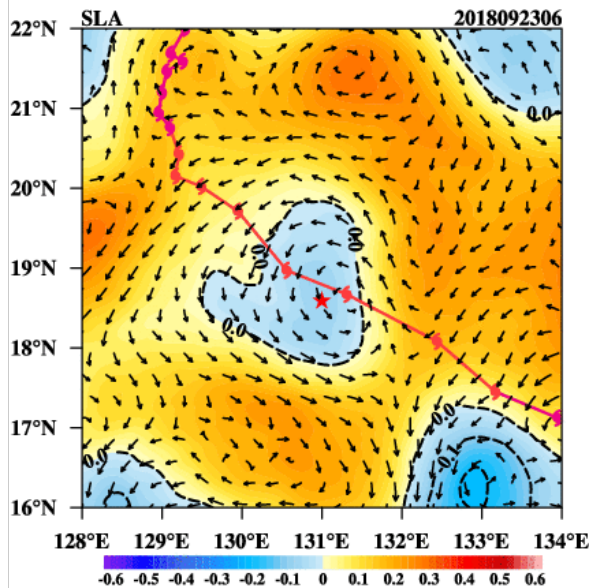
- WRF 三层网格嵌套(15km, 5km, 1.67km)
- ROMS模式单层网格 (5km, 粗绿框)
- 9月23日00时-10月3日00时 (UTC) , 10天



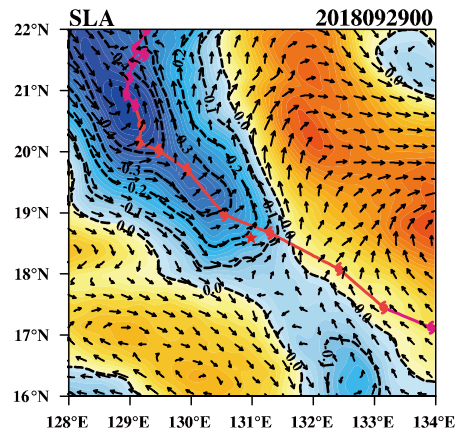
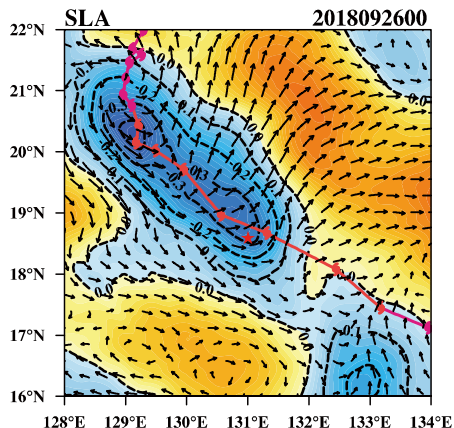
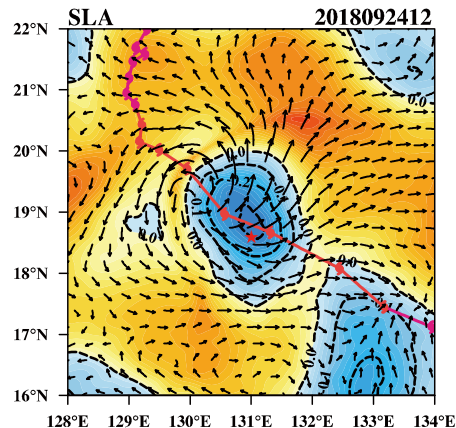
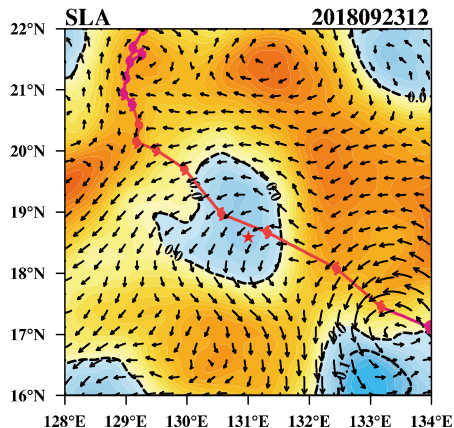


## 2. 海洋中尺度涡对台风的响应

### 海表面高度异常(SLA)



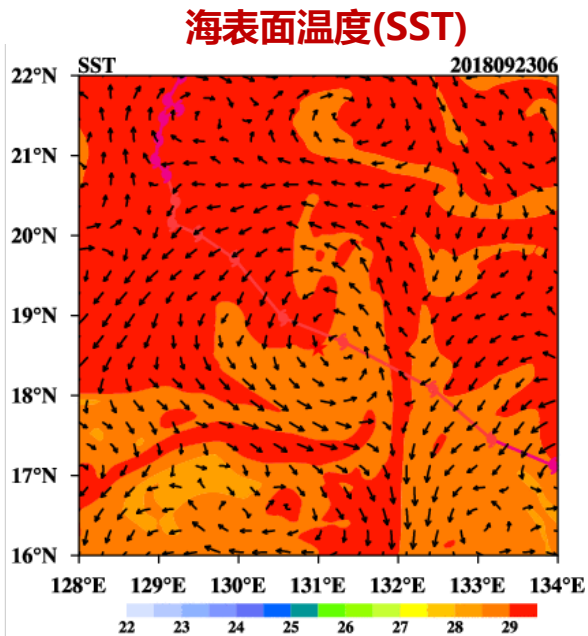
- ◆ 冷涡区域内SLA明显降低,冷涡强度得到增强
- ◆ 冷涡范围不断扩大,沿台风路径变形



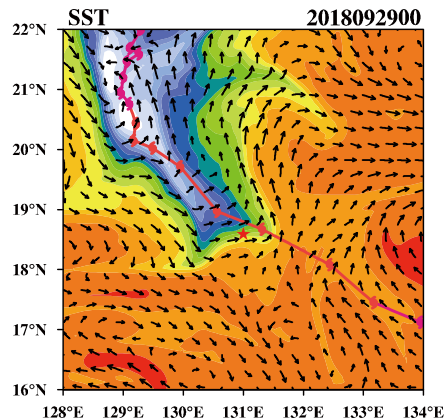
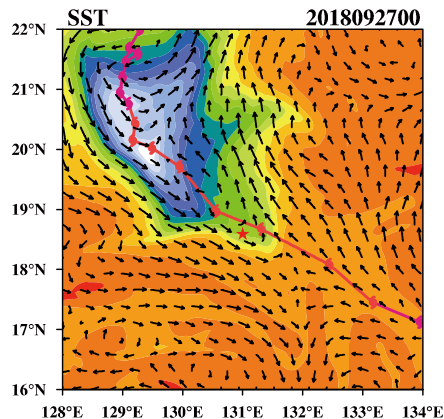
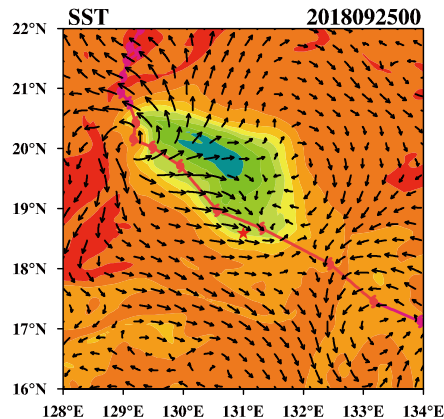
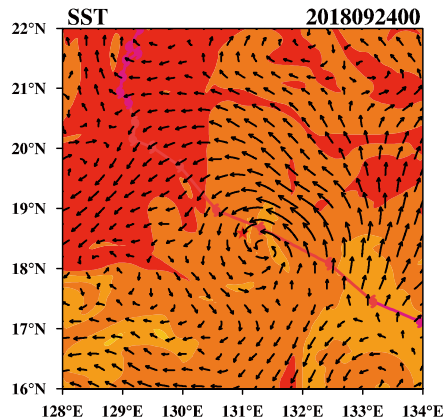
-0.6 -0.5 -0.4 -0.3 -0.2 -0.1 0 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6



## 2. 海洋中尺度涡对台风的影响



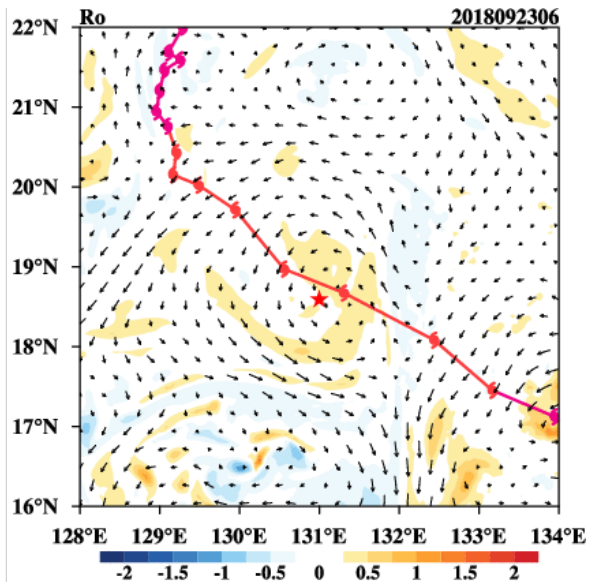
- ◆ 冷涡内冷水快速上浮海表, 形成梯度较大的SST锋面
- ◆ SST锋面受海流剪切影响 逐渐变形



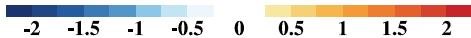
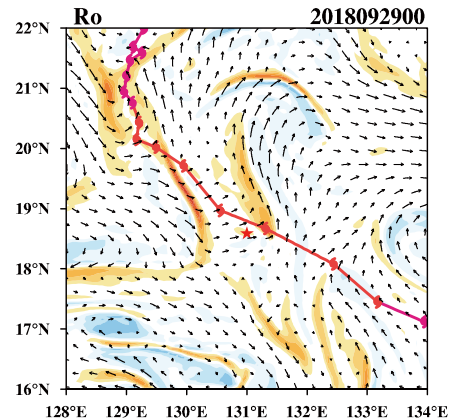
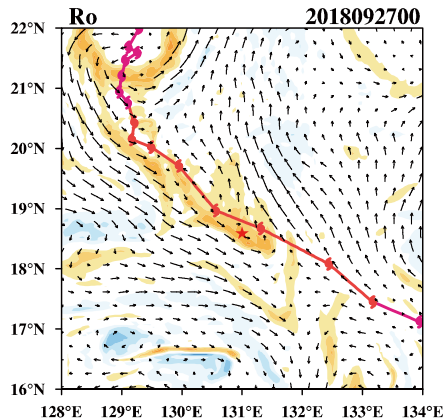
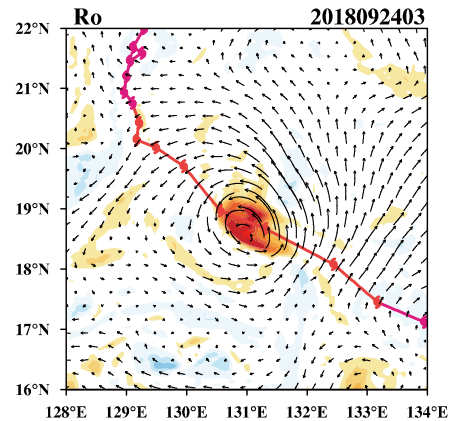
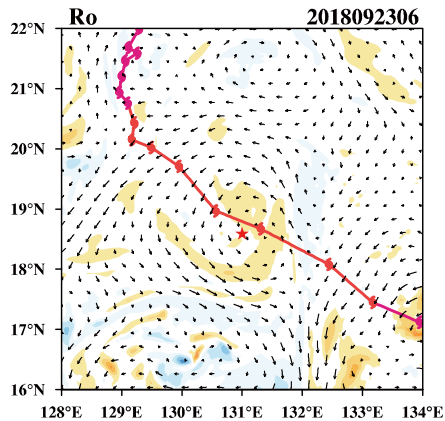


## 2. 海洋中尺度涡对台风的响应

### 海表面涡度



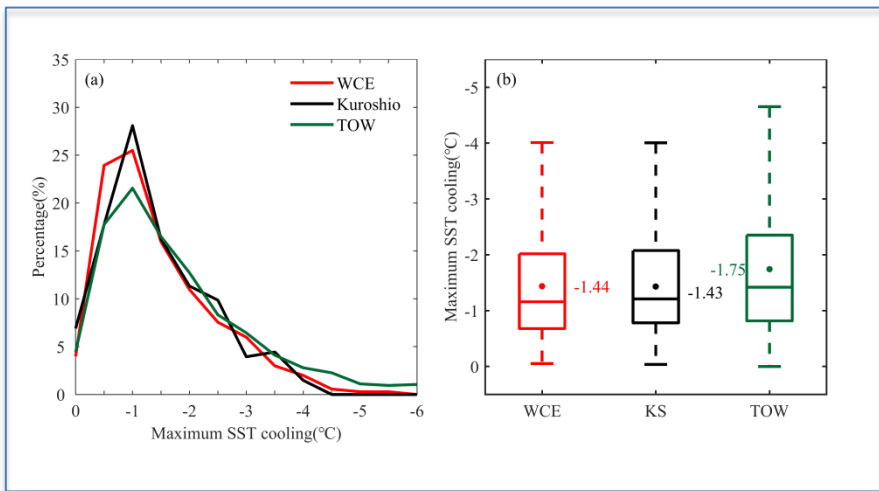
- ◆ 台风环流与冷涡环流方向一致，台风向冷涡注入较强涡度



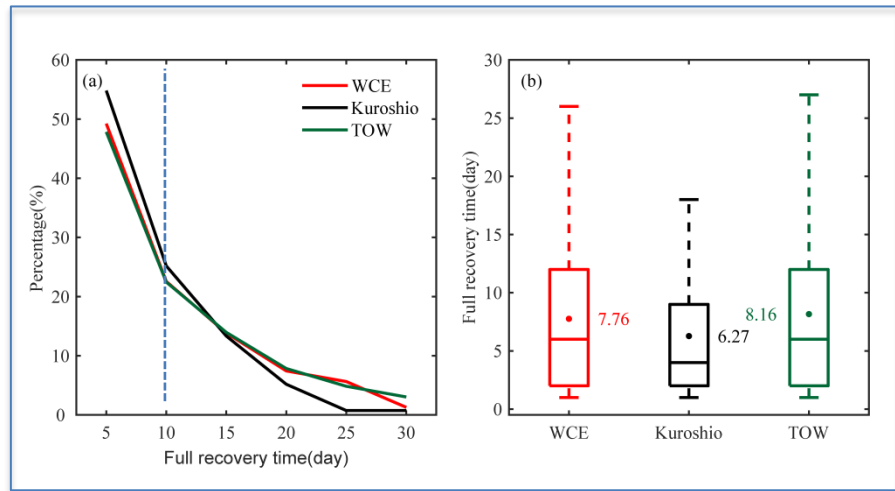


### 3. 黑潮对台风的热力学响应

#### 台风移经黑潮、暖涡和无涡潮区对SST的影响



最大海表降温比率

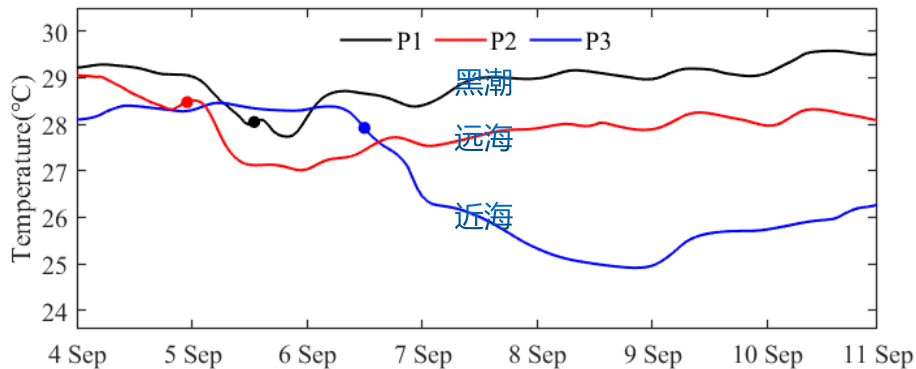
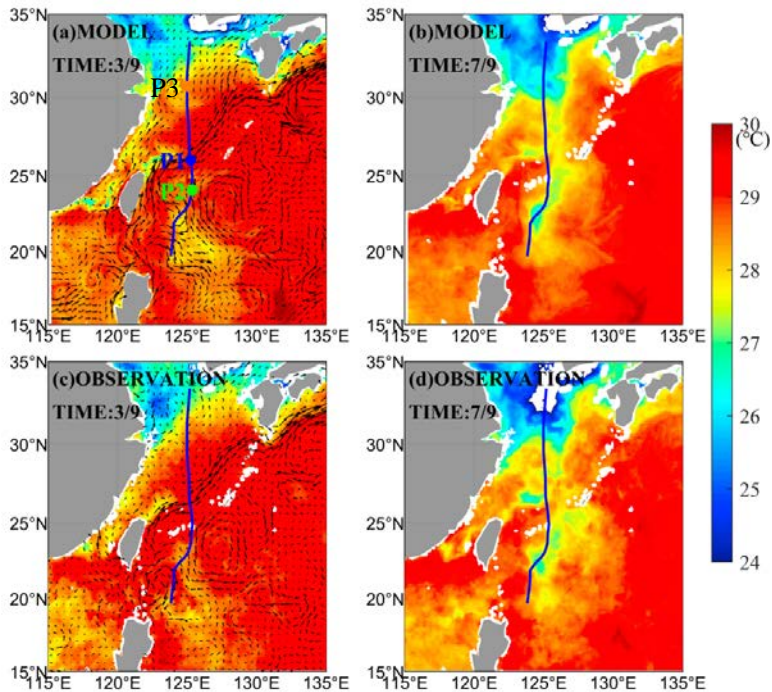


海表温度异常恢复时间





### 3. 黑潮对台风的热力学响应



黑潮 (P1)、远海 (P2) 和近海 (P3, 200米以浅) 的SST变化曲线图

2019年9月3日和7日台风“玲玲”影响下，  
模式模拟和卫星遥感观测的SST、海流



# 报告内容

一、研究背景

二、资料与海气耦合台风模式

三、台风对海洋的影响

四、海洋对台风的影响

五、结论

1. 感热、潜热的影响
2. 海浪的影响
3. 冷尾流的影响
4. 海洋飞沫的影响
5. 中尺度涡的影响
6. 海洋对双眼墙的影响





# 1. 海气间感热、潜热的影响

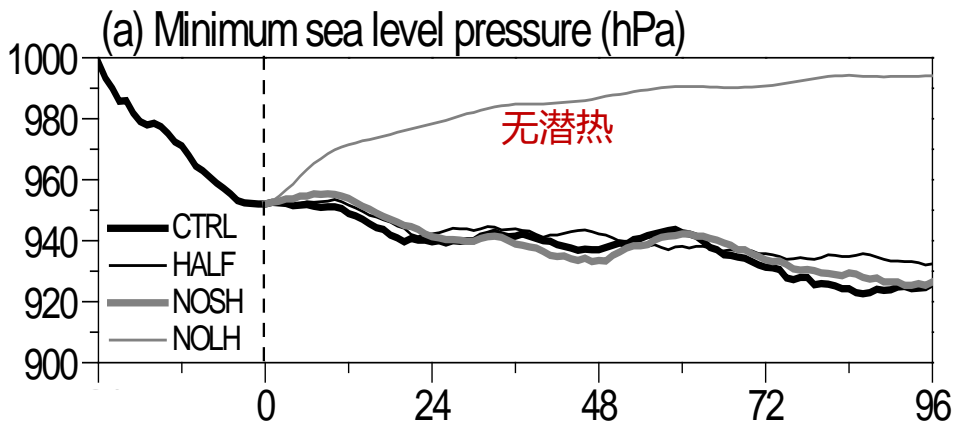
感热通量:  $HFX = \gamma \rho c_p C_h U_a (\theta_g - \theta_a)$

潜热通量:  $QFX = \beta \rho L_v C_q U_a (q_g - q_a)$

动量通量:  $\tau = \rho u_*^2 = \rho C_{d10} U_{10}^2$

## 试验方案

Expt.	$\gamma$ 值	$\beta$ 值
CTRL	1	1
HALF	0.5	1
NOSH	0	1
NOLH	1	0

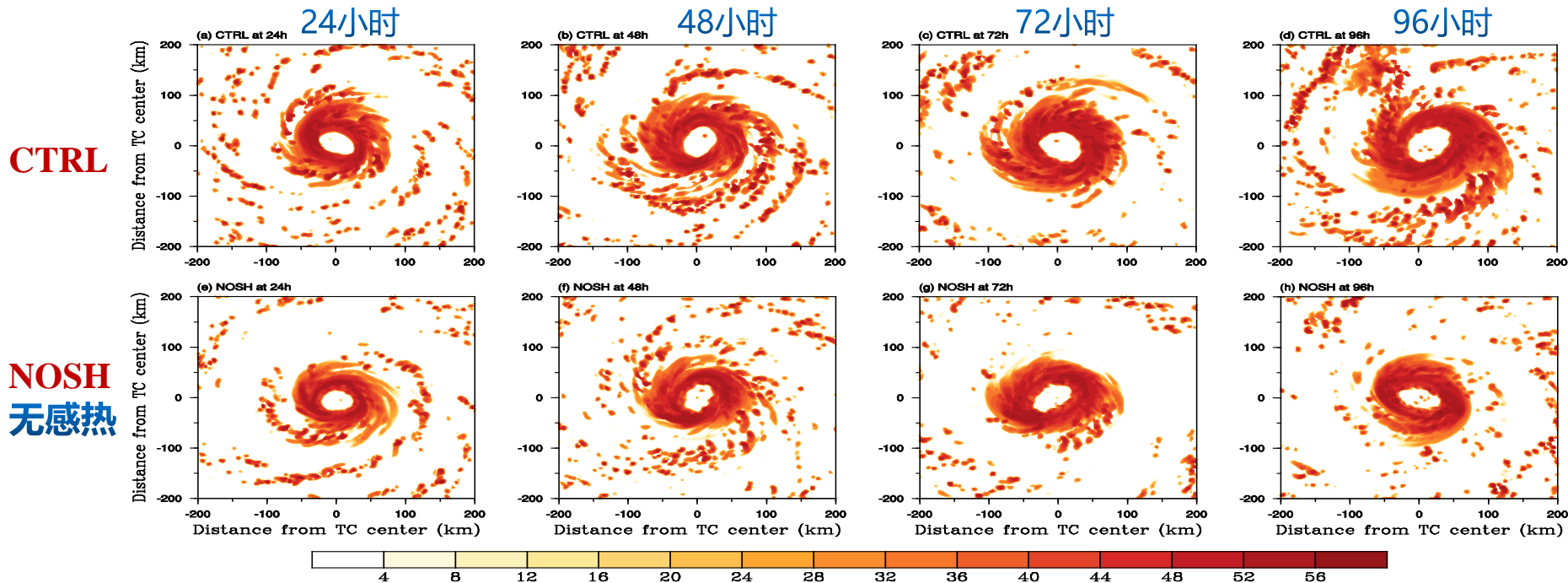


- ◆ 不考虑潜热通量, 台风迅速减弱消亡
- ◆ 潜热通量是台风发展的主要水汽和能量来源



# 1. 海气间感热、潜热的影响

## 模拟的雷达回波



不考虑感热通量，眼墙对流未受影响，但外围雨带减弱，台风尺度减小！



## 2. 海浪的影响



$$\beta = f(c_p / u_*^2) \rightarrow z_0 = \beta u_*^2 / g$$

$$z_0 = \max\{1.27 \times 10^{-7}, \min[z_w z_2 + (1 - z_w) z_1, 2.85 \times 10^{-3}]\},$$

$$z_w = \min(1, [\frac{u_*}{1.06}]^{0.3}),$$

$$z_1 = 0.011 \frac{u_*^2}{g} + 1.59 \times 10^{-5},$$

$$z_2 = \frac{10}{\exp(9.5 u_*^{-1/3})} + \frac{1.65 \times 10^{-6}}{\max(u_*, 0.01)}$$

$$z_0 = 0.0185 \frac{u_*^2}{g} + 1.59 \times 10^{-5}$$

$$Z_0 = 1.59 \times 10^{-5}$$

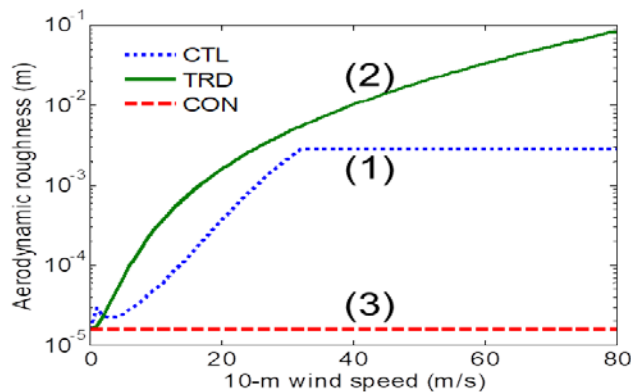
(1)

(2)

(3)

试验设置

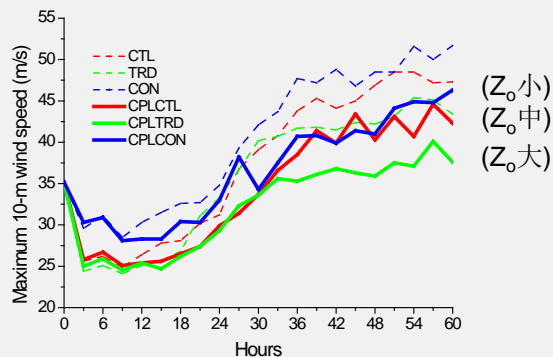
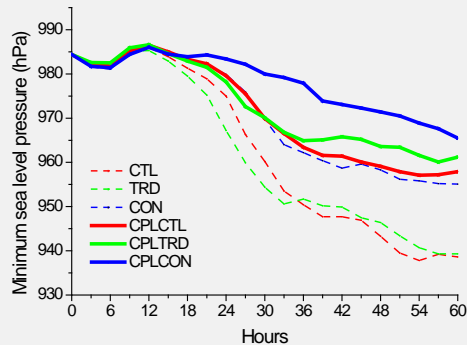
试验名称	Z <sub>0</sub>	是否耦合
CTL	(1)	No
CPLCTL	(1)	Yes
TRD	(2)	No
CPLTRD	(2)	Yes
CON	(3)	No
CPLCON	(3)	Yes





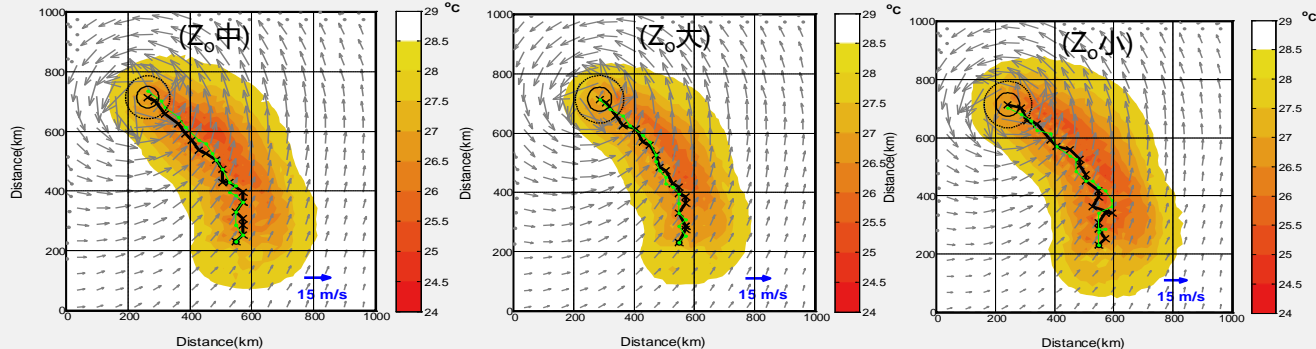
## 2. 海浪的影响

### 六个方案的台风强度变化



海表粗糙度越小，台风中心最低气压较高，而10米风速越大，风压关系改变越显著

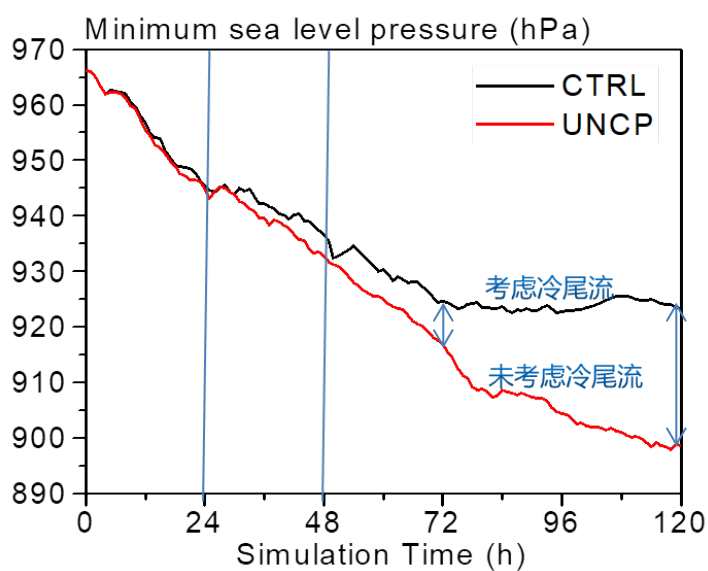
### 三个不同海表粗糙度方案的耦合模拟结果(阴影：海温)



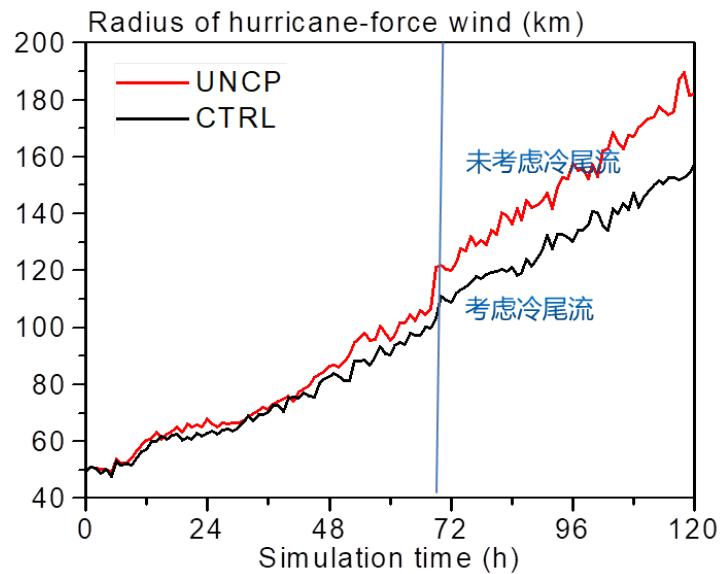
在较小的海表粗糙度作用下，较大的10米风速引起较大幅度的海水冷涌



### 3. 冷尾流的影响



最低中心气压

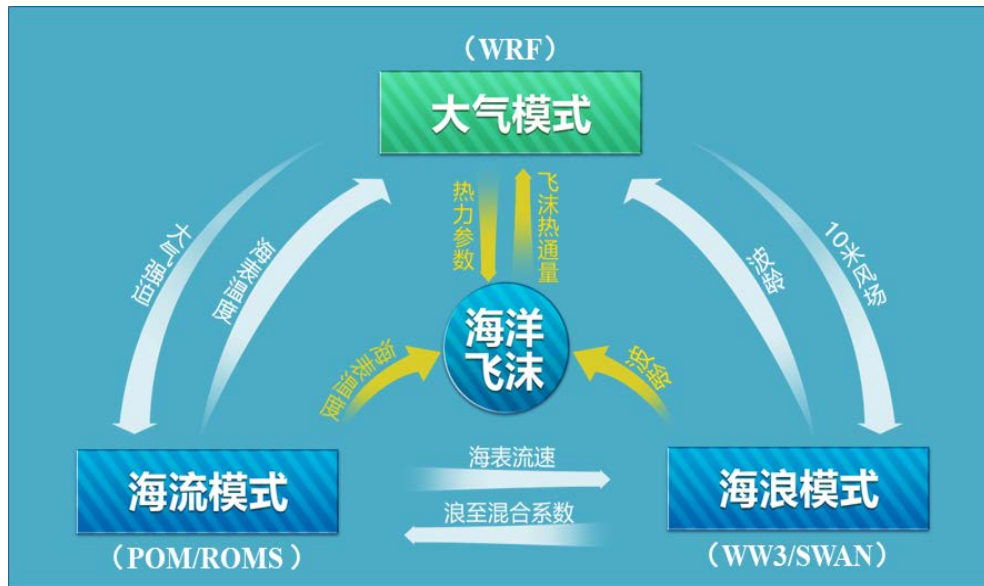


33 m/s半径

- ◆ 考虑冷尾流, 72h台风减弱约7hPa, 120h约26hPa
- ◆ 冷尾流使台风尺度减小



## 4. 海洋飞沫的影响



界面通量:

$$HSI = \rho c_p C_h U_a (\theta_g - \theta_a)$$

$$HLI = \rho L_v C_q U_a (q_g - q_a)$$

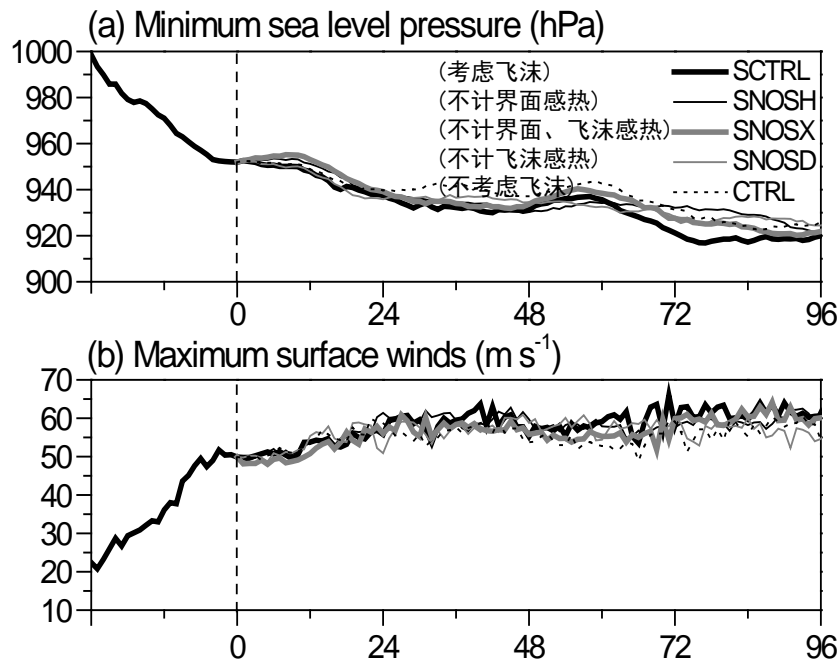
飞沫通量:

$$HSD = \frac{B}{1+B} 0.92 c_w M_f (T_g - T_w)$$

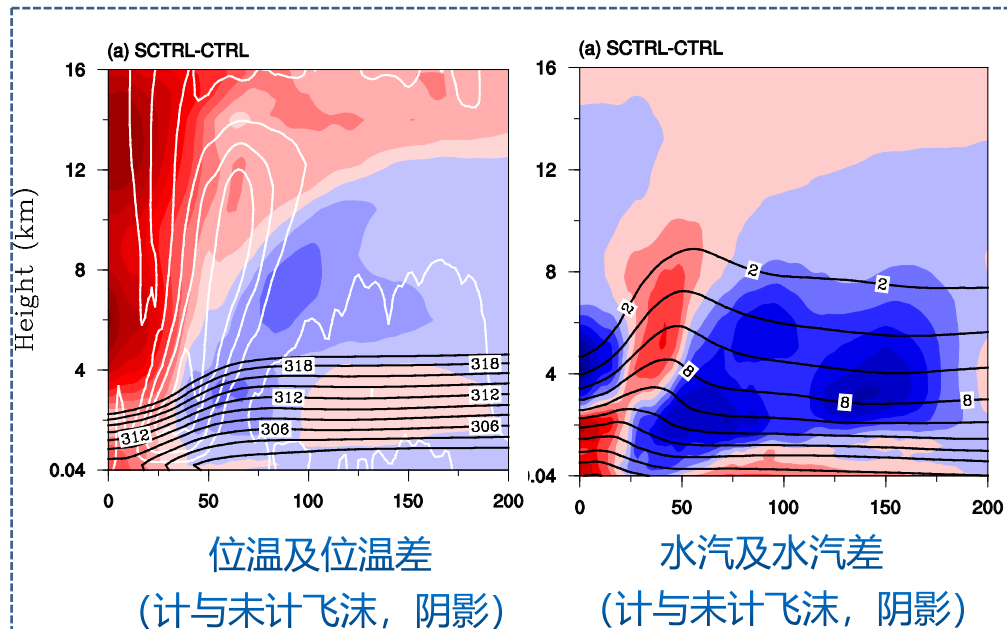
$$HLD' = L_v V_f [q_{sat}(T_a) - q_{sat}(T_w)]$$



## 4. 海洋飞沫的影响



海洋飞沫对台风有一定加强作用：几hPa



位温及位温差  
(计与未计飞沫, 阴影)

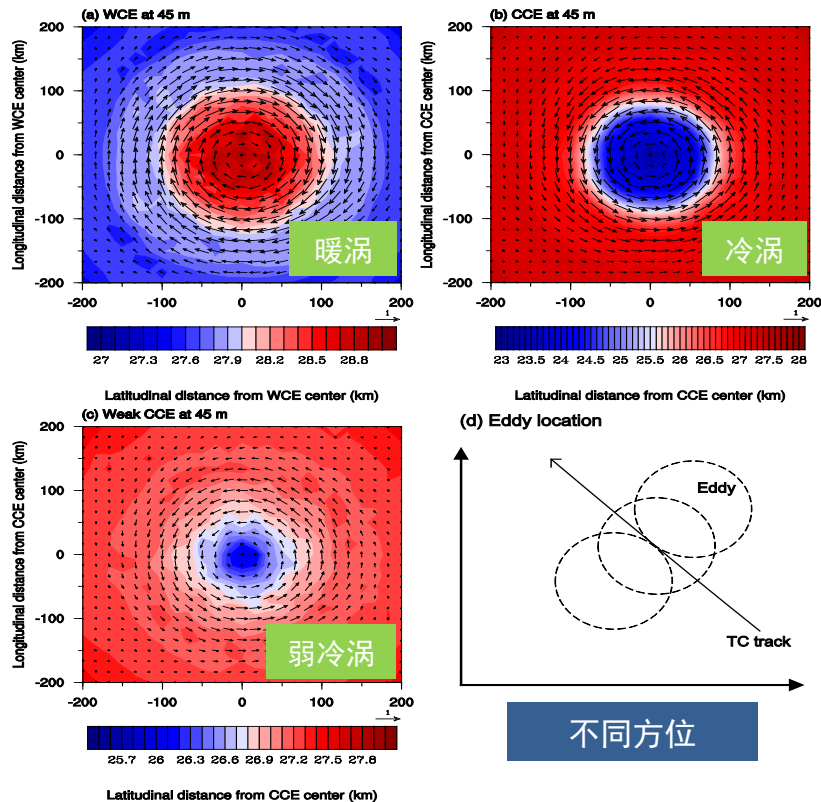
水汽及水汽差  
(计与未计飞沫, 阴影)

- ◆ 海洋飞沫加热内核, 冷却外核
- ◆ 海洋飞沫使边界层增湿





# 5. 海洋中尺度涡影响



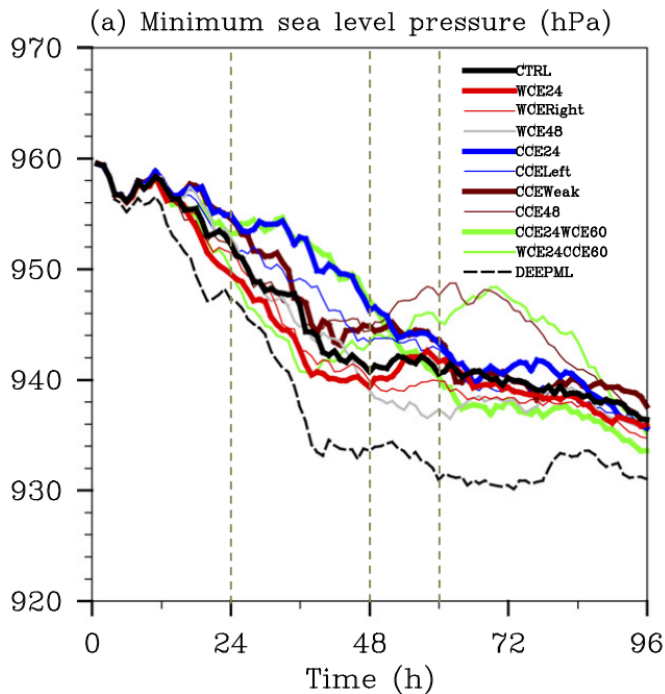
## 数值试验

	数值试验	
1	CTRL	控制试验为均匀海水
2	WCE24	24 h遇到暖涡
3	WCERight	24 h在台风右侧遇到暖涡
4	WCE48	48 h遇到暖涡
5	CCE24	24 h遇到冷涡
6	CCELeft	24 h在台风左侧遇到冷涡
7	CCEWeak	24 h遇到弱的冷涡
8	CCE48	48 h遇到冷涡
9	CCE24WCE60	24 h遇到冷涡, 60 h遇到暖涡
10	WCE24CCE60	24 h遇到暖涡, 60 h遇到冷涡
11	DEEPML	混合层厚度与暖涡中心一致

- ◆ 考虑不同发展阶段的台风经历冷涡、暖涡
- ◆ 不同强度、不同方位的中尺度涡
- ◆ 经历多个中尺度涡



## 5. 海洋中尺度涡影响



暖涡使TC增强，冷涡使TC减弱

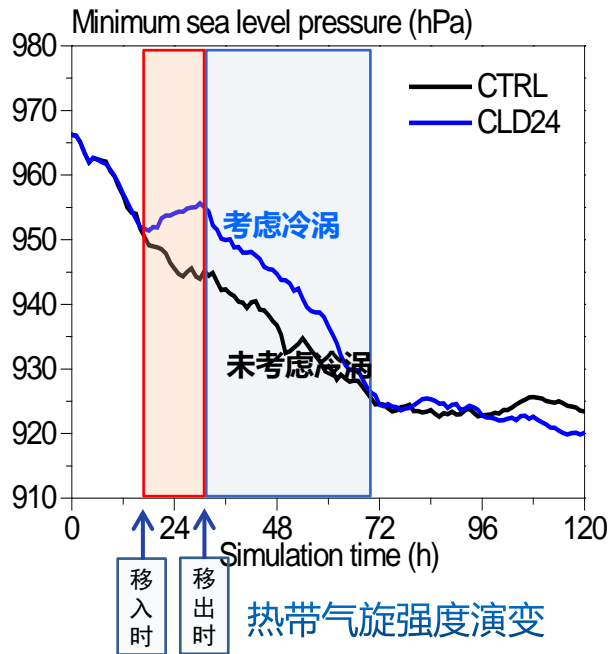
TC强度最强时与控制试验偏差

	试验名称	试验方案	$P_{\min} - P_{\text{控制试验}}$ (hPa)	模拟时间 (h)	滞后时间
1	WCE24	24 h遇到暖涡	4.1	36	12
2	WCERight	24 h在台风右侧遇到暖涡	4.1	36	12
3	WCE48	48 h遇到暖涡	5.3	57	9
4	CCE24	24 h遇到冷涡	-8.4	37	13
5	CCELeft	24 h在台风左侧遇到冷涡	-4.8	40	16
6	CCEWeak	24 h遇到弱的冷涡	-4.1	48	24
7	CCE48	48 h遇到冷涡	-8.0	69	21
8	CCE24WCE60	24 h遇到冷涡，60 h遇到暖涡	-9.0/3.2	41/69	17/9
9	WCE24CCE60	24 h遇到暖涡，60 h遇到冷涡	6.0/-8.5	36/71	12/11
10	DEEPM1	混合层厚度与暖涡中心一致	10.5	39	/

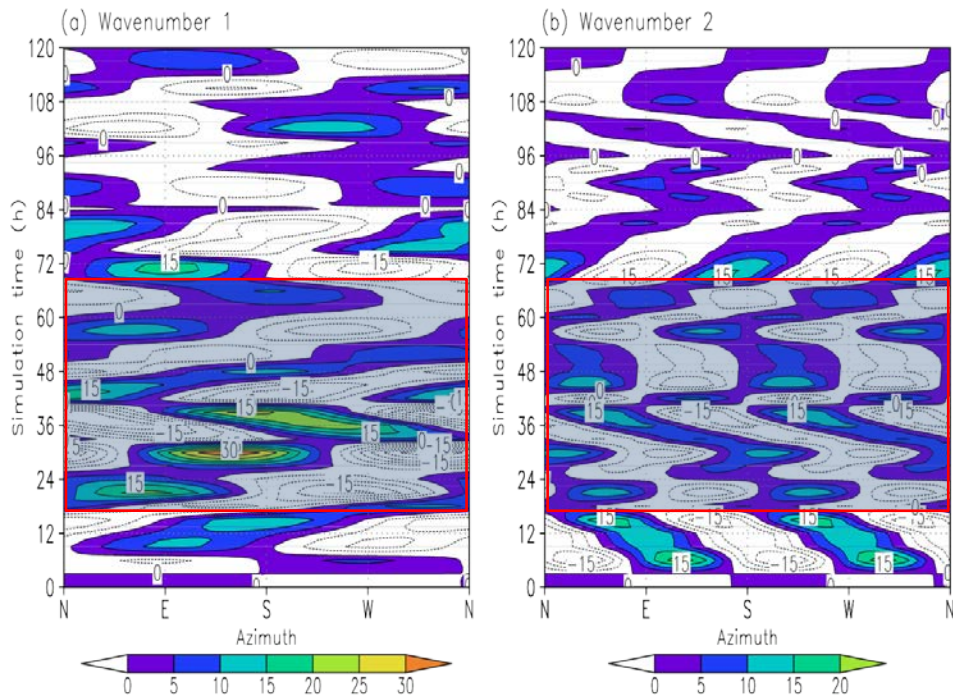
TC强度响应存在时间上的滞后性：暖涡12h、冷涡18h



## 5. 海洋中尺度涡影响



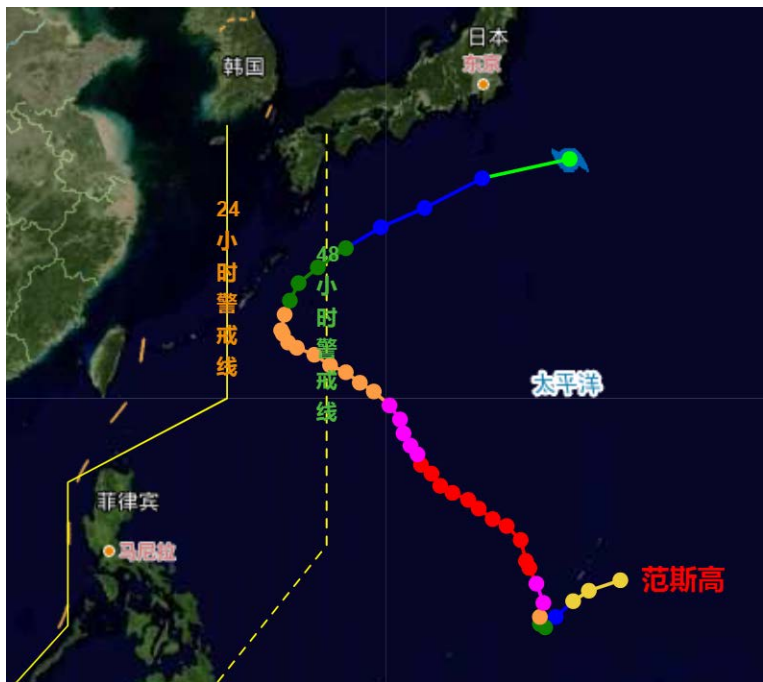
- ◆ 移入冷涡区时，强度减弱
- ◆ 移出冷涡前强度减弱最明显
- ◆ 移出冷涡35h，强度恢复



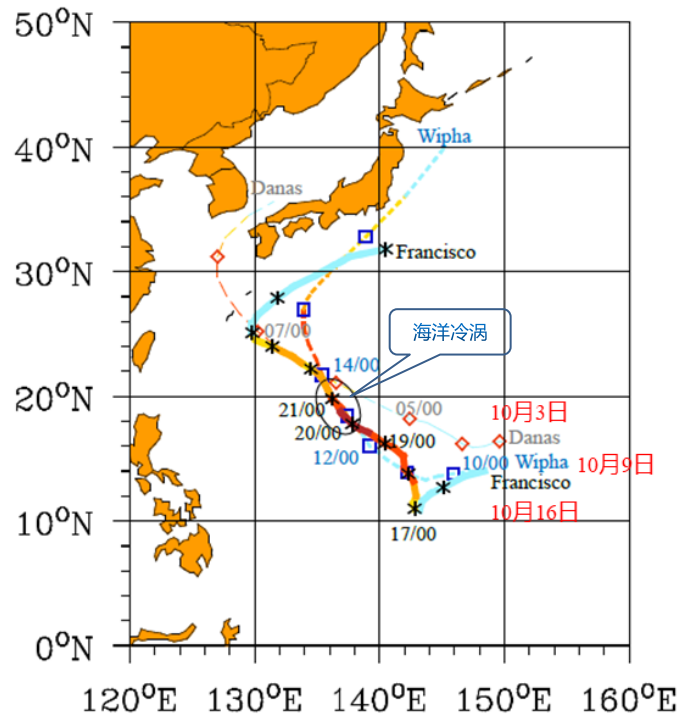
- ◆ 移入冷涡区后，非对称性增强；
- ◆ 移出冷涡之后，经历了约36-48h的恢复期，台风出现对称性结构



## 5. 海洋中尺度涡影响



2013年13号台风Francisco (范斯高) 路径

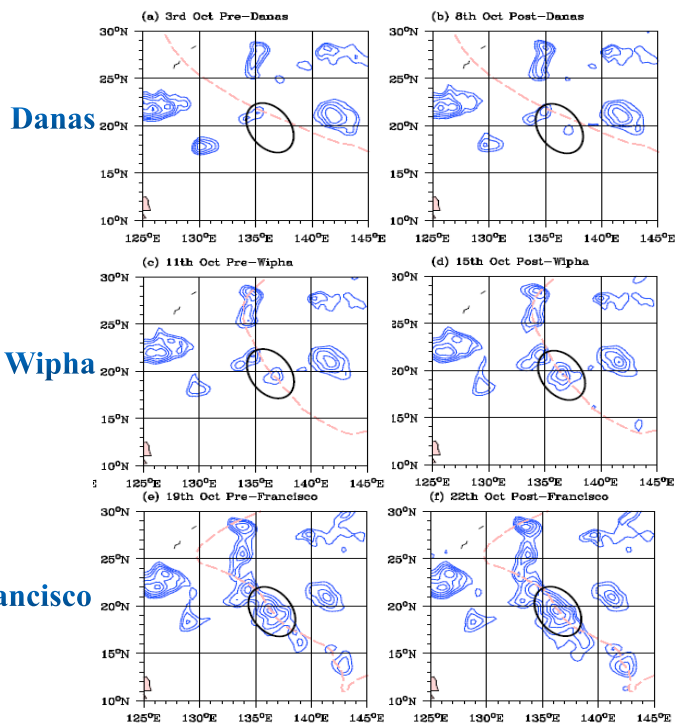


2013年10月, 3个台风Danas(1323)、Wipha (1325)、Francisco (1326)先后经历同一个海洋冷涡

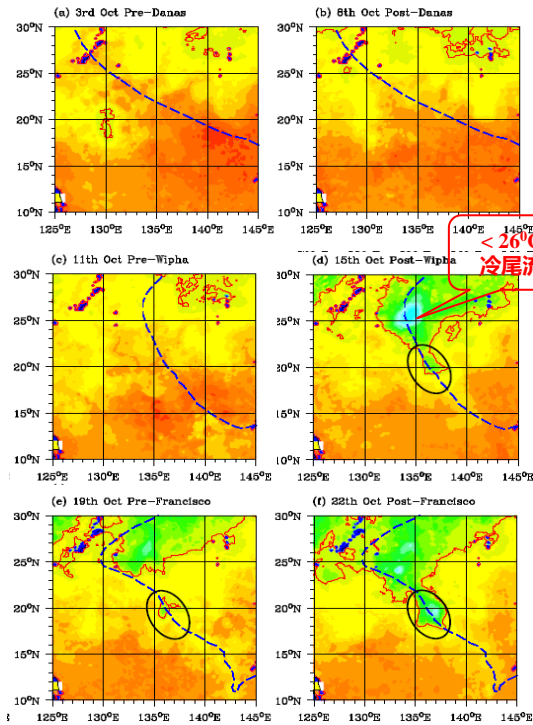


# 5. 海洋中尺度涡影响

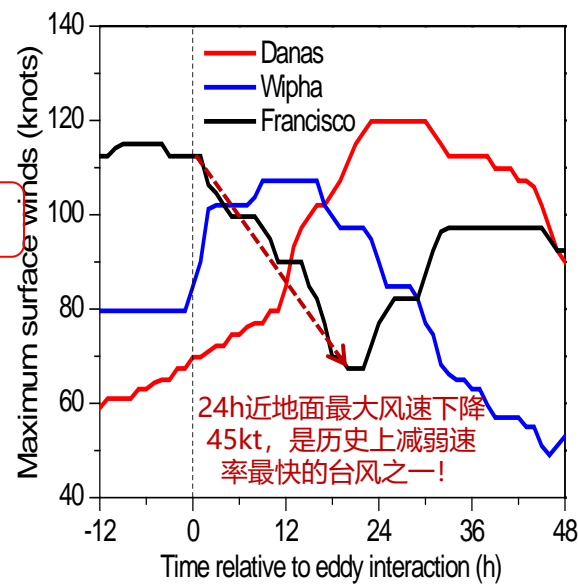
## 台风经过前后SLA的变化



## 台风经过前后SST的变化



## 台风经过冷涡前后的强度变化

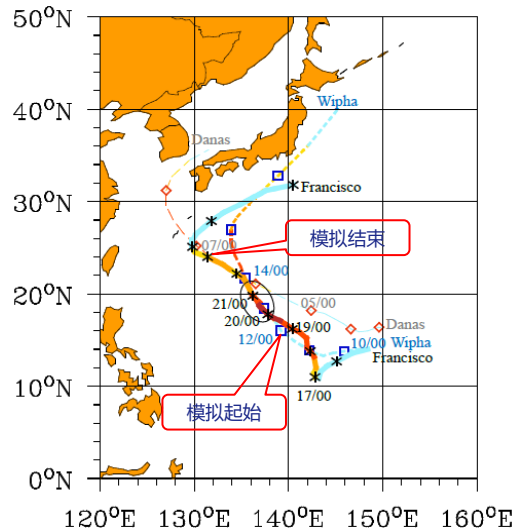


**3个台风使得海洋冷涡的尺度变大、强度加强!**





## 5. 海洋中尺度涡影响



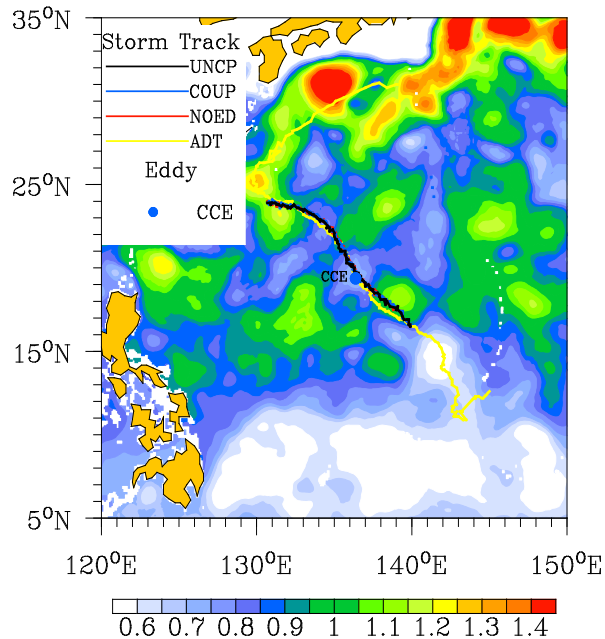
WRF模式		POM模式
两重嵌套分辨率	水平: 9、3km (随台风移动) 垂直: 48层	水平: 9km 垂直: 40层
网格点	350×402, 217×217	
物理方案	KF积云参数化方案(外层)、 Lin方案(内层)	
BL方案	YSU方案	

试验设置	
UNCP	非耦合试验 (单一大气模式)
COUP	耦合试验 (控制试验)
NOED	耦合试验 (移除冷涡试验)
模拟时间	10月19日00时-23日00时 (UTC)



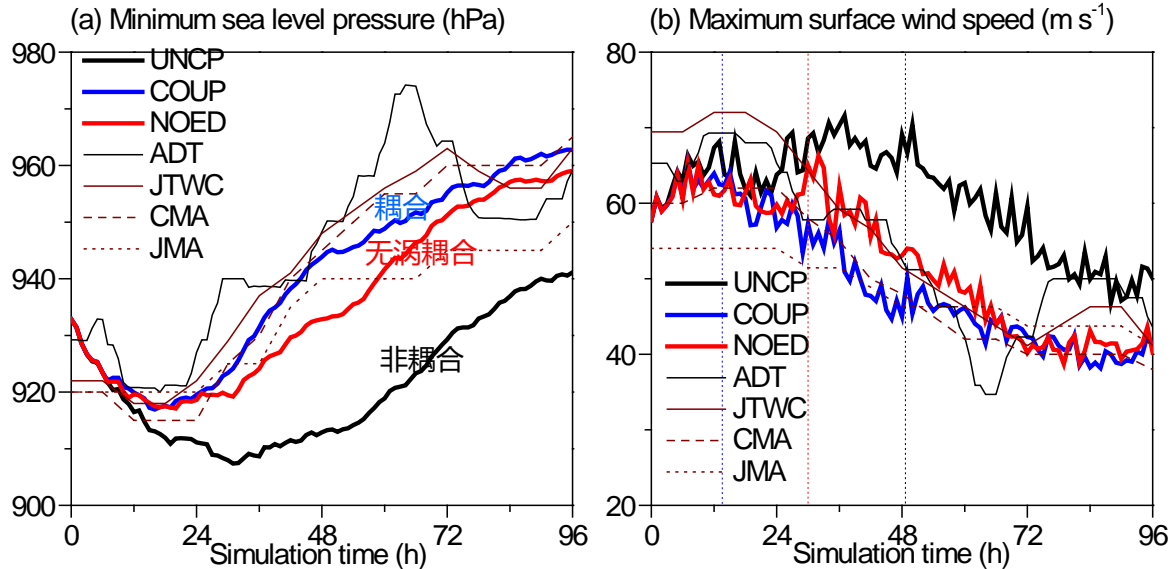
## 5. 海洋中尺度涡影响

观测、模拟路径, 初始海平面高度



模拟路径变化很小!

观测、模拟的强度

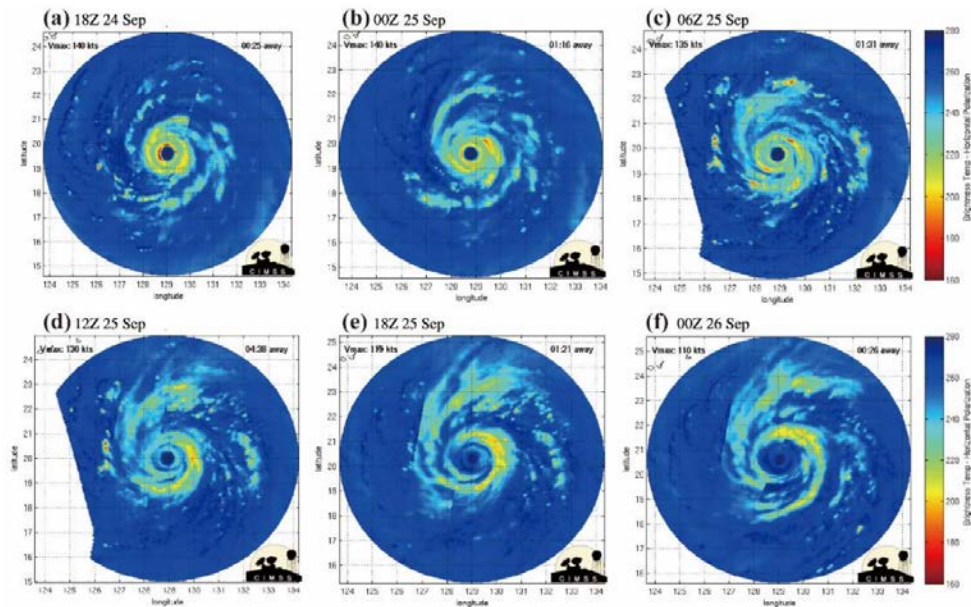
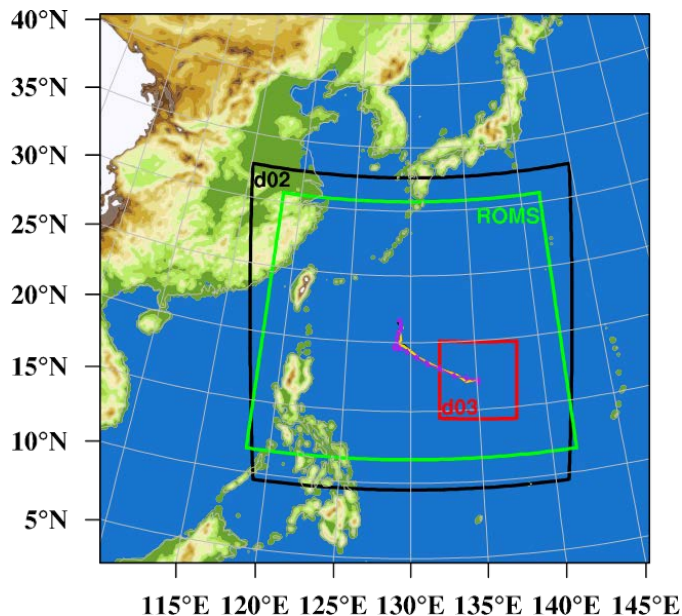


海洋冷尾流、冷涡的共同作用导致Francisco快速减弱!





## 6. 海洋对台风双眼墙结构的影响

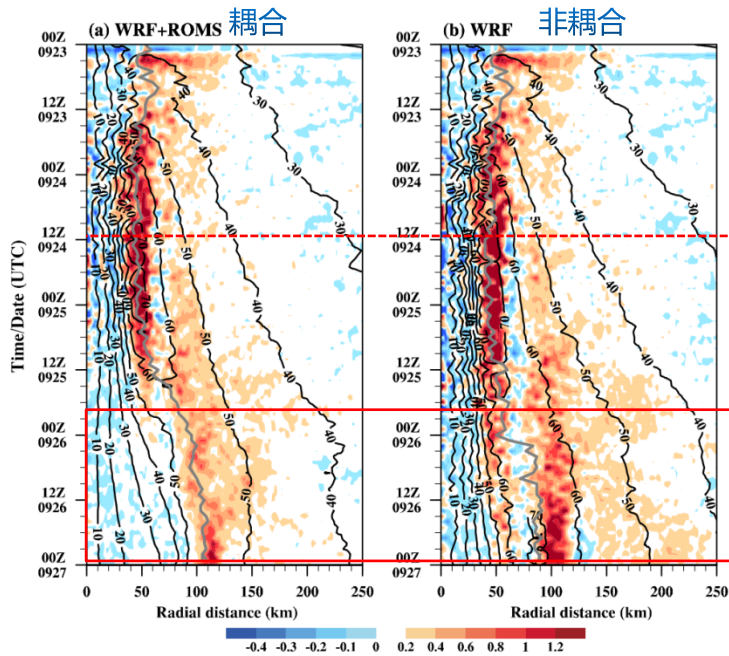


潭美 (2018)模拟时间: 9月23日00时-27日00时

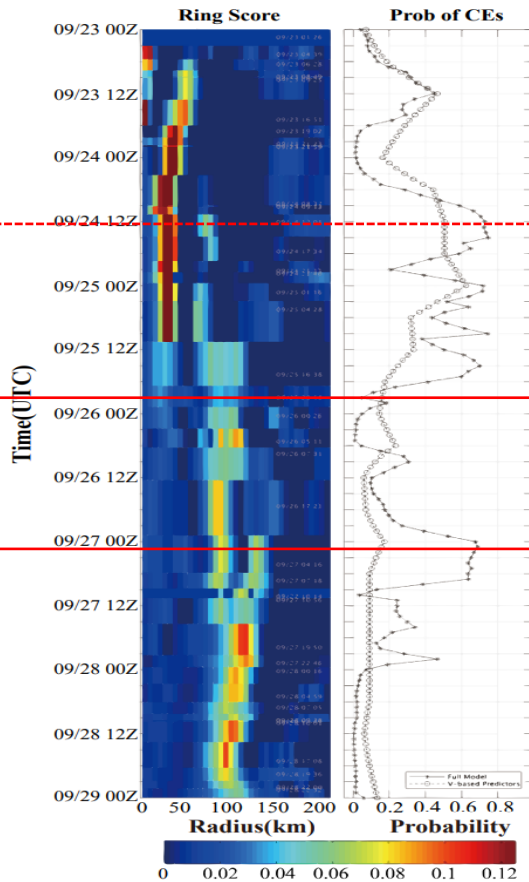
Trami (2018)卫星微波图像: 24日18时-26日00时



# 6. 海洋对台风双眼墙结构的影响



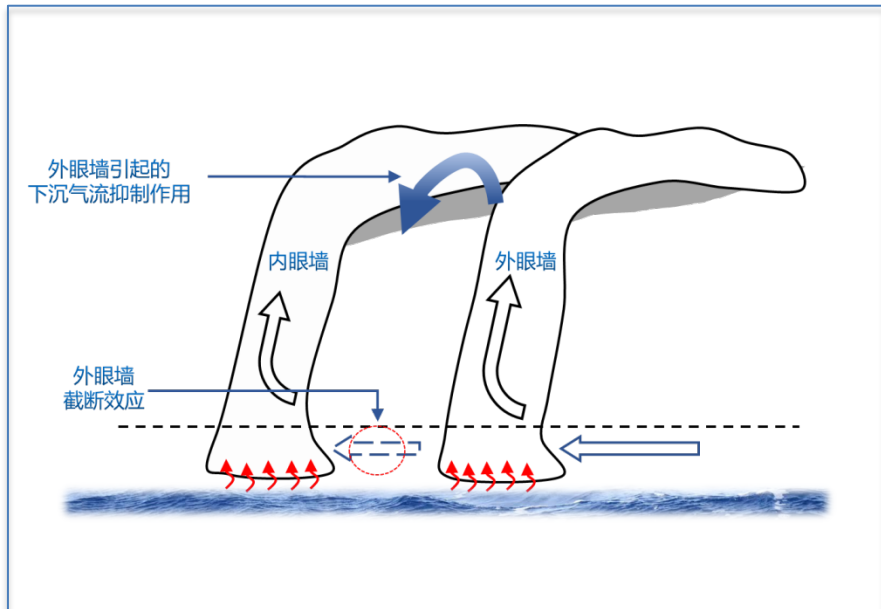
填色: 5km高度垂直速度  
等值线: 1km高度切向风



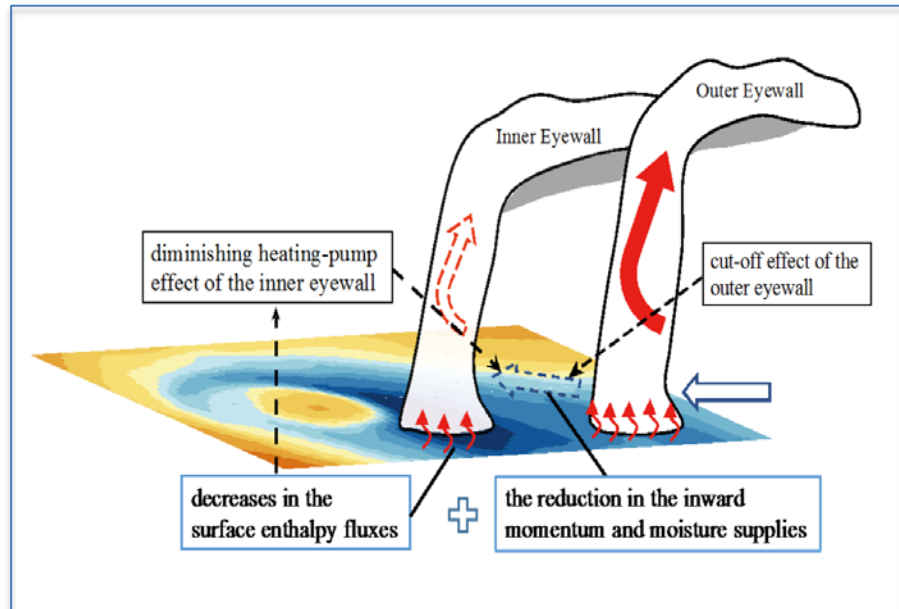
卫星微波观测



## 6. 海洋对台风双眼墙结构的影响



未考虑海气相互作用



考虑海气相互作用



## 6. 海洋对台风双眼墙结构的影响

Check for updates

RESEARCH HIGHLIGHTS

Nature Reviews Earth & Environment | <https://doi.org/10.1038/s43017-022-00291-y> | Published online: 05 April 2022

ATMOSPHERIC DYNAMICS

### Typhoon self-sabotage

The eyewall is the most dangerous and destructive part of a typhoon, with the strongest winds and heaviest rainfall. At sufficient intensity, concentric eyewalls form and replace the innermost eyewall, initiating the eyewall replacement cycle (ERC). Hence, the ERC is an important indicator for predicting changes in the intensity and structure of typhoons. However, previous studies have focused on these internal storm dynamics, while not adequately considering relationships to the sea surface.

Xiangcheng Li, at the College of Meteorology and Oceanography, National University of Defense Technology, Changsha, China, and colleagues, used a coupled atmosphere–ocean model to simulate Typhoon Trami. Trami was a slow-moving typhoon that formed in 2018, it produced notable sea surface cooling and swiftly dissipated. While uncoupled models produced unrealistic long-lived ERC, the coupled atmosphere–ocean model generates an ERC that matches observations. These numerical simulations suggest that typhoon-induced sea surface cooling weakened typhoon Trami and catalyzed a negative feedback loop, reducing the typhoon’s energy supply and ultimately led to its rapid termination.

Typhoons can be destructive, with potentially immediate and long-term impacts on human life. Despite being a case study for a slow-moving typhoon, the results highlight the importance of considering air–sea interactions in accurately forecasting ERCs and, in turn, typhoons. Future work should build on these findings by simulating additional cases of typhoons to further quantify the relationships between the sea surface cooling and ERCs, so that typhoon predictions can be improved.

Robert Ulrich  
Department of Earth, Planetary and Space Sciences,  
University of California,  
Los Angeles, CA, USA

**ORIGINAL ARTICLE** Li, X. et al. The modulation effect of sea surface cooling on the eyewall replacement in Typhoon Trami. *Mon. Weather Rev.* <https://doi.org/10.1175/MWR-D-21-0177.1> (2022)



Credit: The Asahi Shimbun / Contributor via Getty Images

- 《The Modulation Effect of Sea Surface Cooling on the Eyewall Replacement Cycle in Typhoon Trami (2018)》论文被 Nature 子刊《Nature Reviews Earth & Environment》(IF: 37.214)选为研究亮点进行专文报道
- 2023 年 1 月, 高被引论文



# 报告内容

- 一、研究背景
- 二、资料与海气耦合台风模式
- 三、台风对海洋的影响
- 四、海洋对台风的影响
- 五、结论





# 主要结论

## ◆ 海洋对台风响应非常敏感:

- 台风冷尾流引发海洋上层的温盐结构变化
- 台风显著改变海洋中尺度涡的热力和动力结构
- 黑潮对台风引起的海表降温具有更强抑制作用

## ◆ 海洋对台风强度、结构变化具有重要影响:

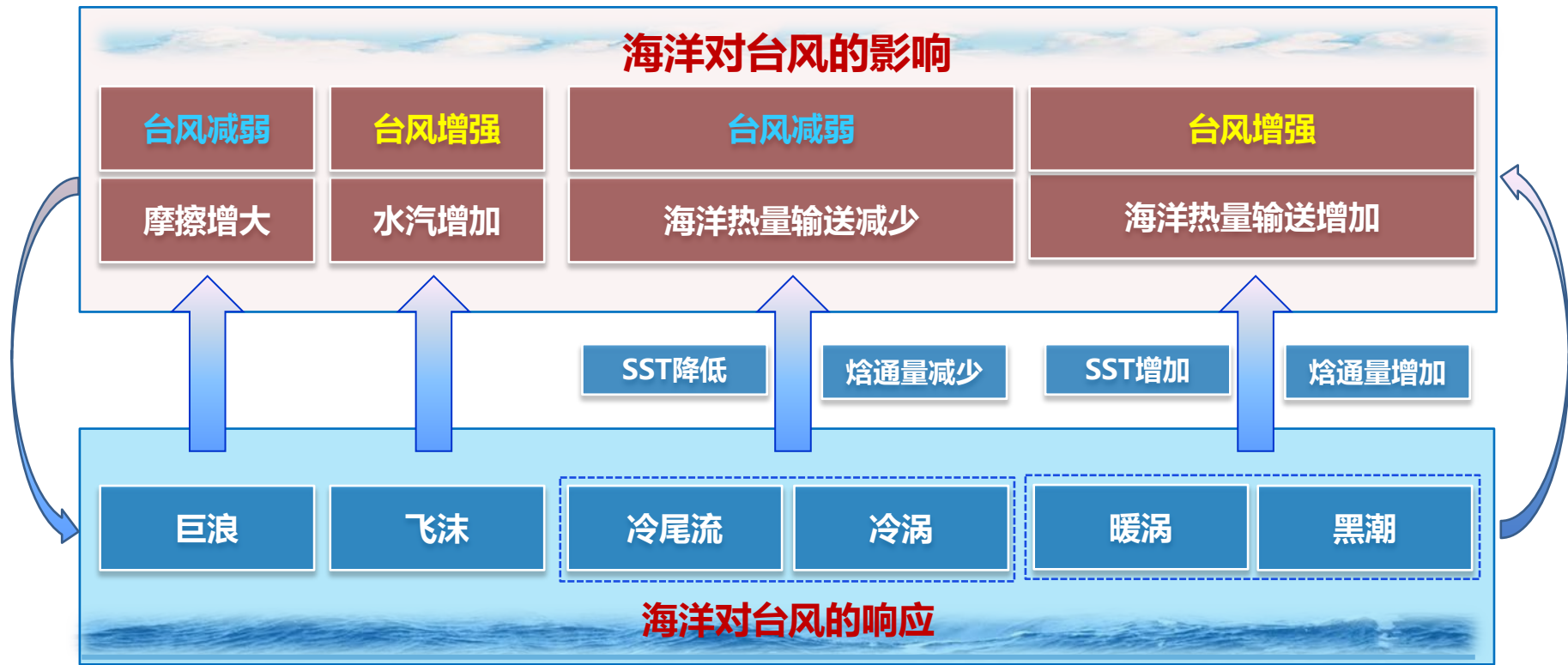
- 潜热影响台风发展，感热影响台风大小
- 海表粗糙度越小，10m风速越大，海水涌越强，台风越弱
- 海洋飞沫对台风有一定的加强作用
- 暖/冷涡使台风增强/减弱、非对称性增强
- 冷尾流使边界层趋于稳定，可使台风快速减弱
- 海气相互作用是影响台风双眼墙替换的重要原因之一





# 主要结论

## 台风与海洋相互作用示意图





# 发表的代表性成果

- Li X C, Cheng X P, Fei J F, Huang X G. The Modulation Effect of Sea Surface Cooling on the Eyewall Replacement Cycle in Typhoon Trami (2018). *Mon. Wea. Rev.*, 2022,150(6): 1417–1436.
- Li X C, Cheng X P, Fei J F, Huang X G. A Numerical Study on the Role of Mesoscale Cold-Core Eddy in Modulating the Upper Ocean Responses to Typhoon Trami (2018). *J. Phys. Oceanogr.*, 2022, 52(12): 3101-3122.
- Ma Z H, Fei J F. A Comparison between Moist and Dry Tropical Cyclones: The Low Effectiveness of Surface Sensible Heat Flux in Storm Intensification. *J. Atmos. Sci.*, 2022, 79(1): 355-377
- He S Z, Cheng X P, Fei J F, et al. Thermal Response to Tropical Cyclone over the Kuroshio. *Earth and Space Science*. 2022, 9(5): 2333-5084.
- Ma, Z., Zhang, Z., Fei, J., & Wang, H. Imprints of Tropical Cyclones on Structural Characteristics of Mesoscale Oceanic Eddies Over the Western North Pacific. *Geophys. Res. Letters*, 2021, 48(10).
- Ma Z H, Zhang Z L, Feign J F, et al. Imprints of Tropical Cyclones on Structural Characteristics of Mesoscale Oceanic Eddies Over the Western North Pacific. *Geophys. Res. Letters*, 2021, 48(10).
- Ma Z H, A study of the interaction between Typhoon Francisco (2013) and a cold-core eddy. Part I: Rapid weakening. *J. Atmos. Sci.*, 2020, 77(1): 355–377.
- Ma Z H, Fei J F, Huang X G, Cheng X P, and Liu L. A study of the interaction between Typhoon Francisco (2013) and a cold-core eddy. Part II: Boundary Layer Structures. *J. Atmos. Sci.*, 2020, 77(8): 2865–2883.
- Lu Yang, Xiaoping Cheng, Xiaogang Huang, Jianfang Fei, and Xiangcheng Li. Effects of air-sea interaction on the eyewall replacement cycle of Typhoon Sinlaku (2008). Part I: Verification of numerical simulation. *Earth and Space Science*, 2020.
- Lu Yang, Xiao Gang Huang, Jian Fang Fei, Xiao Ping Cheng, Ju Li Ding, Wen Li Shi. A Statistical Comparison of the Potential Intensity Index for Tropical Cyclones over the Western North Pacific. *Atmospheric Science Letters*, 2020.
- Ma Z H, Fei J F, Huang X G. A Definition of Rapid Weakening for Tropical Cyclones over the Western North Pacific. *Geophys. Res. Letters*, 2019, 46(20): 11471–11478.
- Ma Z H, Fei J F, Huang X G. Modulating Effects of Mesoscale Oceanic Eddies on Sea Surface Temperature Response to Tropical Cyclones Over the Western North Pacific. *J. Geophys. Res.*, 2018, 123(1): 367-379.
- Ma Z H, Fei J F, Liu L, Huang X G, and Yan L. An Investigation of the influence of Mesoscale Oceanic Eddies on Tropical Cyclone Intensities. *Monthly Weather Review*, 2017, 145(4):1181-1201.
- Ma Z H, Fei J F, Cheng X P. Contributions of Surface Sensible Heat Fluxes to Tropical Cyclone. Part II: The Sea Spray Processes. *J. Atmos. Sci.*, 2015, 72(11): 4218-4236
- Ma Z H, Fei J F, Huang X G. Contributions of Surface Sensible Heat Fluxes to Tropical Cyclone. Part I: Evolution of Tropical Cyclone Intensity and Structure. *J. Atmos. Sci.*, 2015, 72(1): 120-140.
- Lei Liu, Jianfang Fei, Xiaoping Cheng, Xiaoguang Huang. Effect of wind-current interaction on ocean response during Typhoon KAEMI (2006). *SCIENCE CHINA Earth Sciences*, 2013,56(3): 418-433.
- Ma Z H, Fei J F, Huang X G. The effects of ocean feedback on tropical cyclone energetics under idealized air-sea interaction conditions. *J. Geophys. Res.* 2013, 118(17): 9778-9788.

An aerial photograph of a geothermal landscape, likely the Grand Prismatic Spring in Yellowstone National Park. The image shows a large, circular, multi-colored mineral pool with a central geyser vent. The colors range from bright yellow and orange in the center to deep blue and purple towards the edges. The surrounding terrain is rugged and rocky, with patches of green grass and moss. The text "谢谢! 请批评指正!" is overlaid in the center of the image.

**谢谢! 请批评指正!**