

臺灣周邊海域暖化情境之區域動力降尺度模擬與颱風應用

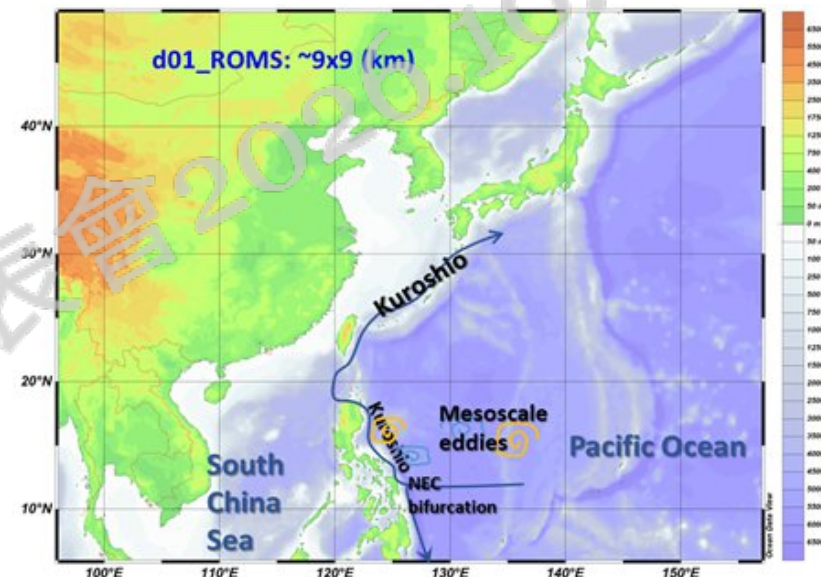
曾于恒、黃佑栩、郭怡君
國立臺灣大學 海洋研究所



1. 計劃執行重點

研究背景與重要性

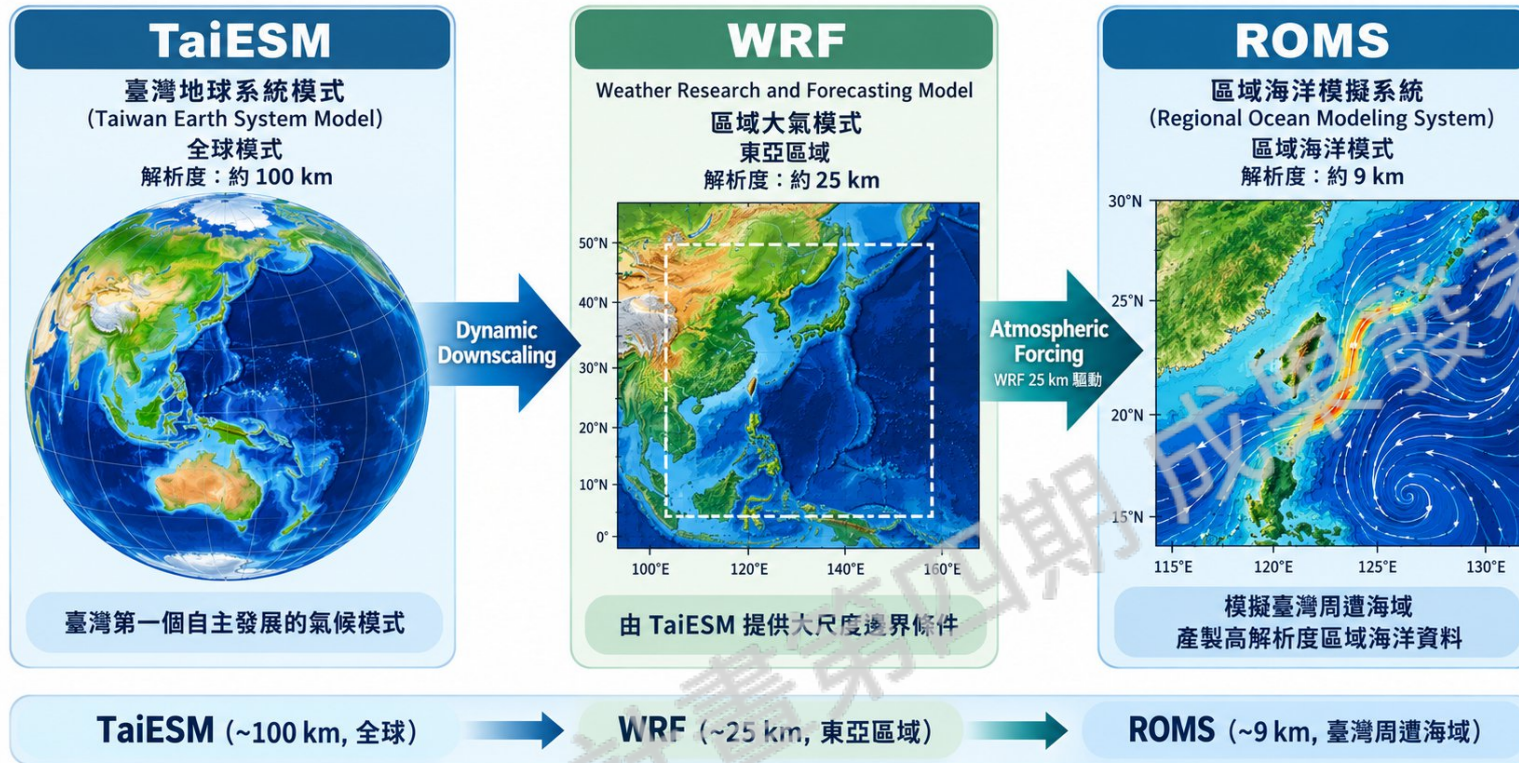
- 黑潮是西北太平洋重要的暖流，調節海洋熱量輸送，並影響季風、颱風活動及海洋生態系統
- 黑潮入侵南海的作用：透過呂宋海峽輸送熱量與動量，影響南海環流及太平洋與陸緣海之間的氣候變異傳遞
- 未來氣候變遷的關鍵：黑潮環流變化將顯著影響臺灣周遭海溫與海流，因此準確模擬其動力結構對未來海洋環境評估至關重要



研究目標與方法

- 建立高解析度海洋模式：建置西北太平洋可解析中尺度渦旋（eddy-resolving）模擬，改善全球氣候模式解析度不足的限制
 - 推估未來海洋變化：透過高解析區域動力降尺度，分析不同暖化情境下臺灣周遭海溫、海流及黑潮環流的變遷
 - 探討颱風與海氣交互作用：利用海氣耦合模式，評估暖化下海洋動力變異對颱風發展及強度的影響
- 提供高解析度海洋氣候資訊，作為海洋生態、漁業資源及極端天氣風險評估的科學依據

2. 區域海洋動力降尺度模擬：TaiESM-ROMS



9km高解析度區域海洋資料產製

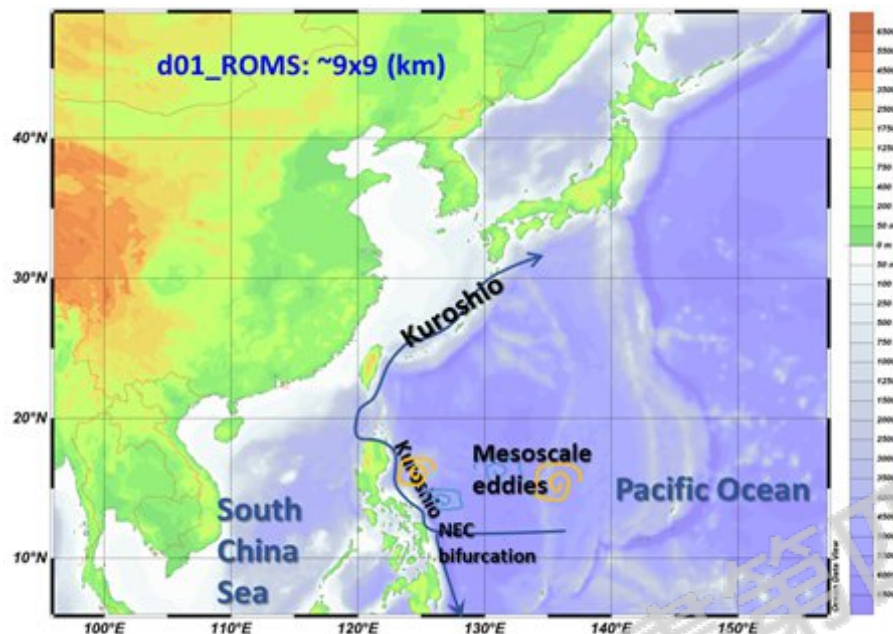
- 臺灣地球系統模式 (Taiwan Earth System Model, TaiESM:)
- 天氣研究與預報模式 (Weather Research and Forecasting Model, WRF)
- 區域海洋模擬系統 (Regional Ocean Modeling System, ROMS)

本計劃完成CMIP6 TaiESM1 (Taiwan Earth System Model version 1) 動力降尺度資料 TaiESM-ROMS 第三版產製與分析，包含歷史 (historical) 與 CMIP6 未來暖化情境模擬 (SSP245, SSP585)

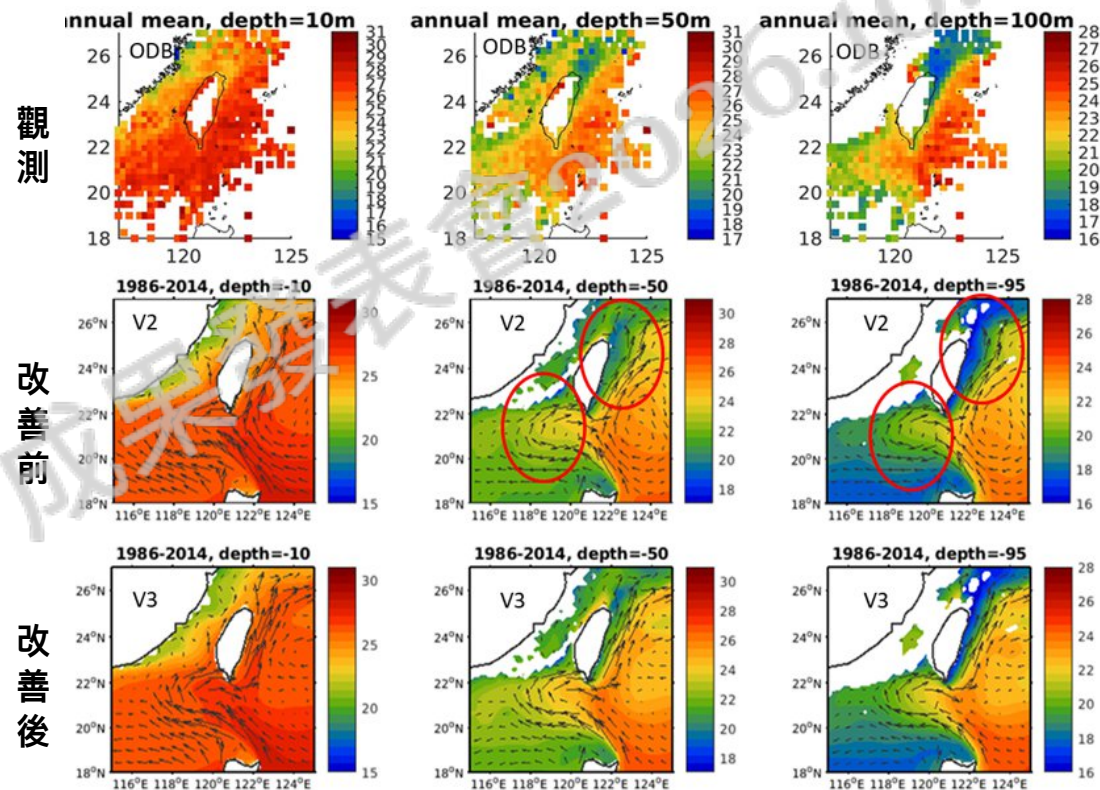
TaiESM file variable	TaiESM-WRF file variable	Unit
U10;V10	UAS;VAS	m/s
T2	T2	K $\ll$ C
q2	HURS	0~1 $\ll$ %
mean SLP	PSL	Pa $\ll$ mb
precipitation	PR	kg/m ² /s
Shortwave /longwave radiation flux	RSDS/RLDSc	Downward ,W/ m ²

3. 關鍵成果分享 I：歷史氣候平均場評估

(a) Simulated domain of TaiESM-ROMS



(b)

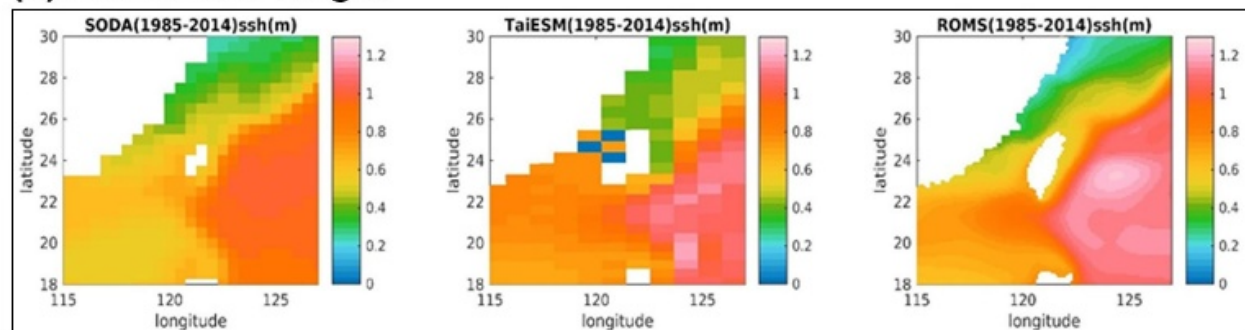


TaiESM-ROMS 模式調校與評估

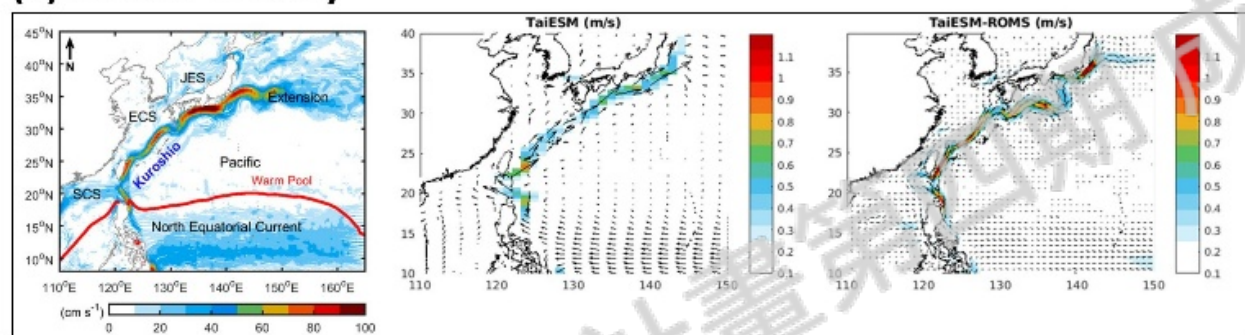
- 採用 Mellor-Yamada 2.5 turbulence closure, 改善中尺度渦旋動能偏低的問題, 使日本東側及黑潮延伸流附近的渦旋動能更接近觀測
- 採用 Smagorinsky mixing, 依據流場應變率調整黏滯係數, 更合理地模擬渦旋能量串級及黑潮與中尺度渦旋的交互作用
- 海底地形處理: 優化地形平滑化參數, 改善局部海流與地形的交互作用

3. 關鍵成果分享 I：歷史氣候平均場評估

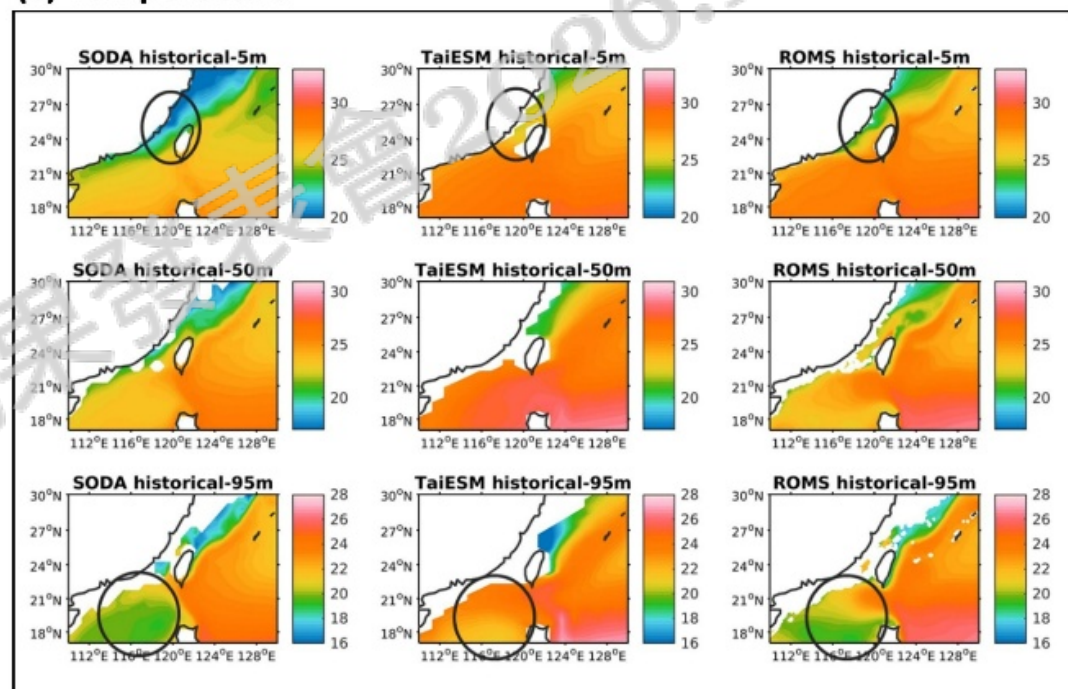
(a) Sea Surface Height



(b) Surface Velocity



(c) Temperature

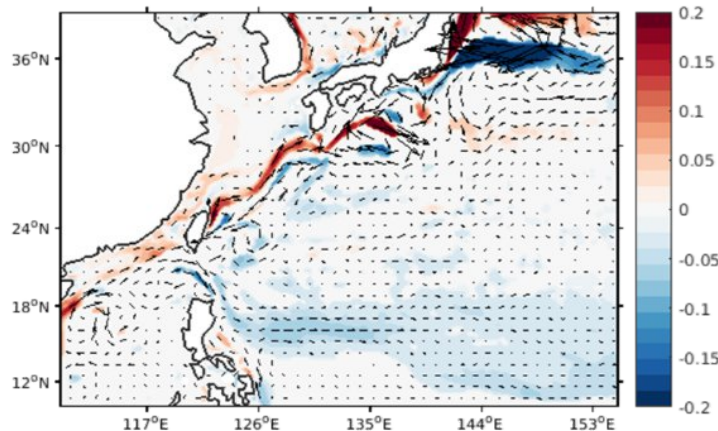


- 降尺度改善海溫結構：相較於 TaiESM1, TaiESM-ROMS 更合理地重現北南海、臺灣海峽及中國大陸沿岸的次表層溫度分布，與 SODA 再分析資料更為一致
- 高解析度海洋動力的重要性：透過改善黑潮入侵、區域海流及中尺度海洋動力過程，提升臺灣周遭海域溫度與水文結構的模擬能力
- ◉ 整體模擬表現提升，改善黑潮流速、流軸位置及季節變化的模擬偏差，提升區域海洋環流的穩定性與觀測一致性，提高區域高解析海洋資料及未來推估可信度

關鍵成果分享 I：SSP暖化情境平均場評估

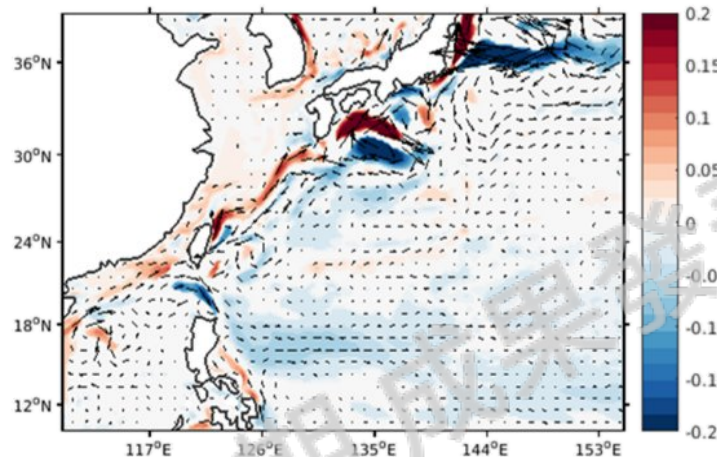
SSP245 (2060-2074)

Surface flow change (significance >95% confidence level)



SSP585 (2060-2074)

Surface flow change (significance >95% confidence level)



TaiESM-ROMS 暖化情境下的黑潮環流變化

- SSP2-4.5 與 SSP5-8.5 情境下，SST 增溫趨勢及空間分布與 CMIP6 模式結果一致 (Jin et al., 2023)

- 臺灣以南上層黑潮傳輸減弱；臺灣以北受跨黑潮密度梯度增強影響，上層斜壓流速增加，但大尺度風應力旋度減弱使整體傳輸量下降

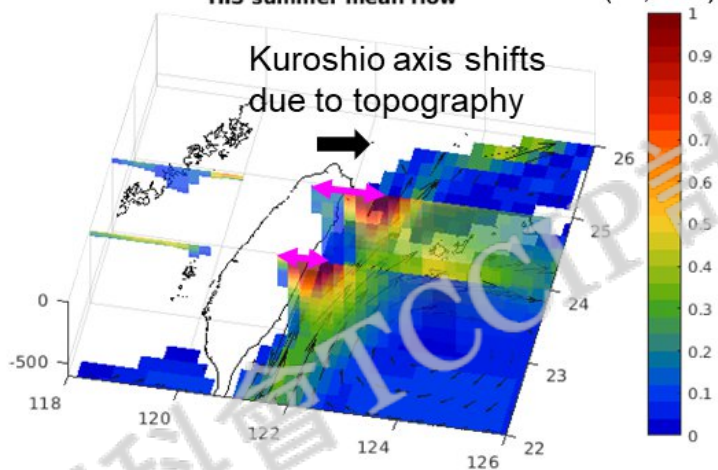
- 黑潮延伸流呈現北遷及變異度增加的趨勢，與 CMIP6 模擬結果一致 (Huang et al., 2024)

- 夏季西風變異可能部分抑制入侵，並伴隨呂宋海峽次表層鋒面位移及臺灣西南海域增溫

HIS summer mean flow

(U , m/s)

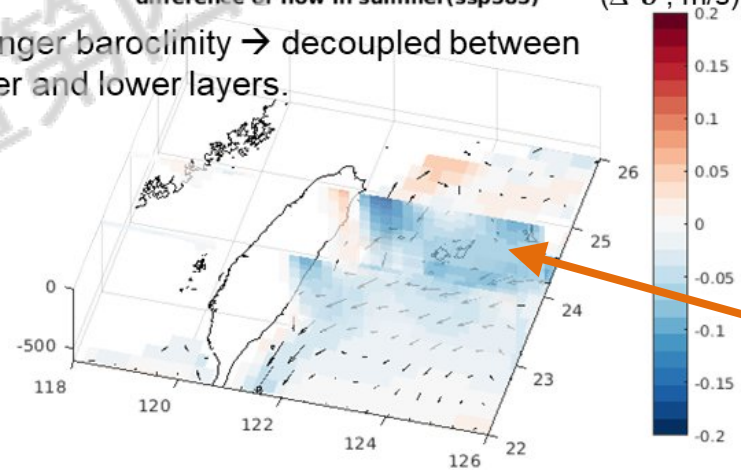
Kuroshio axis shifts due to topography



difference of flow in summer(ssp585)

(ΔU , m/s)

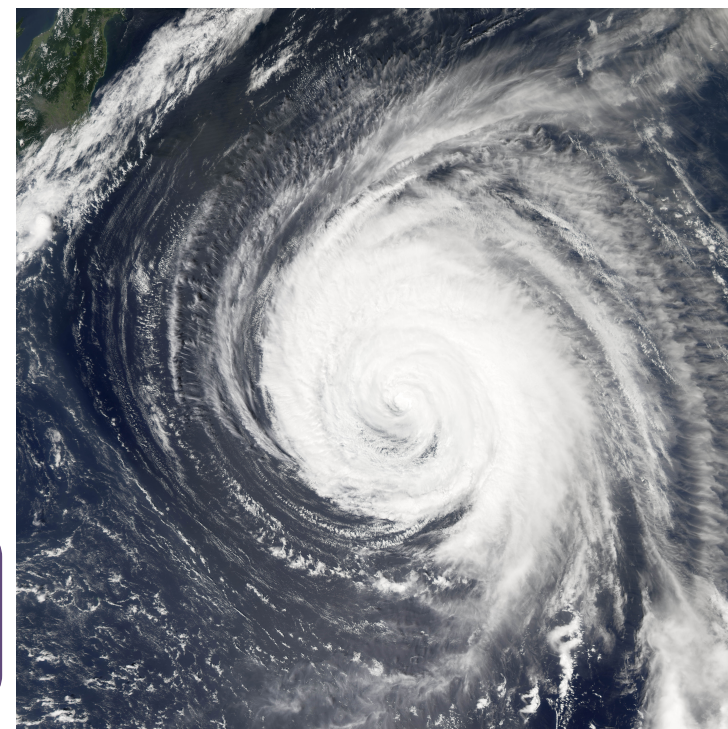
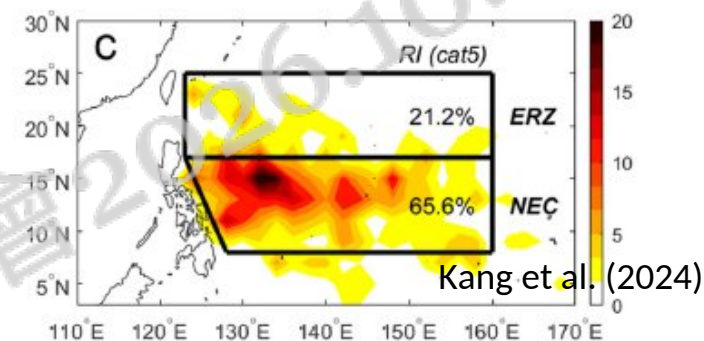
Stronger baroclinity $\rightarrow$ decoupled between upper and lower layers.



關鍵成果分享 II：海表溫、層化與颱風間的交互作用

暖化情境下的海洋變化與颱風增強/抑制機制

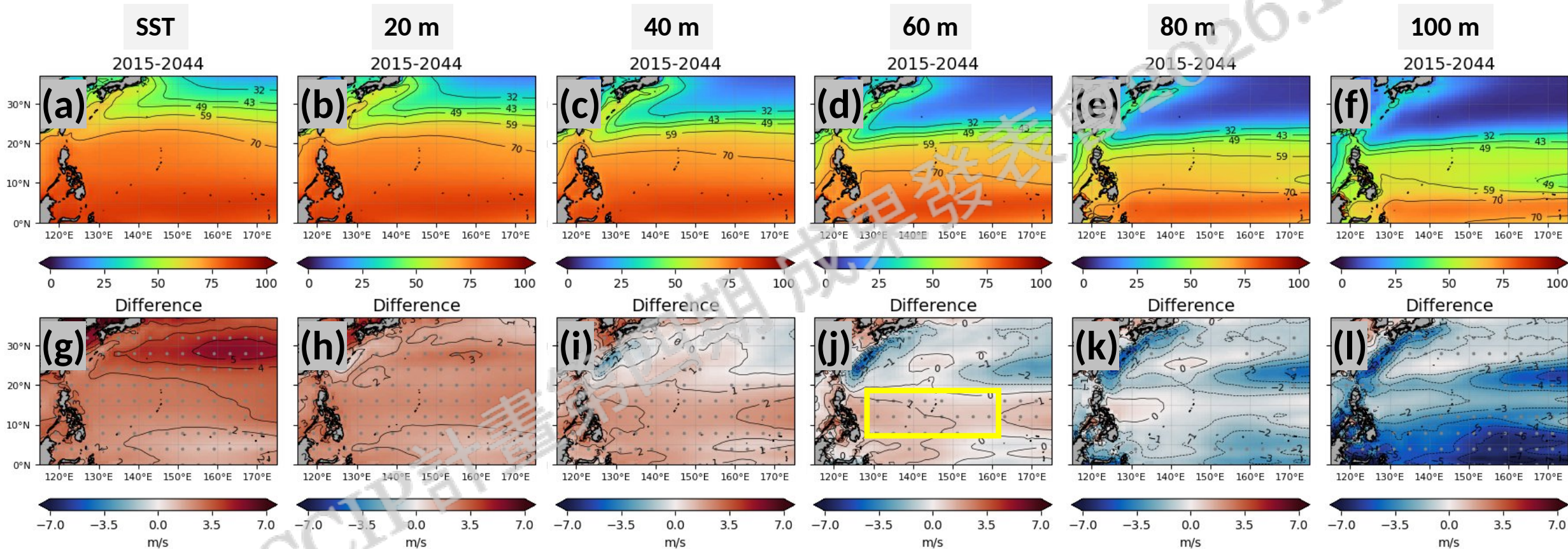
- 北赤道洋流（NEC）暖化下海洋熱含量增加、颱風增強速率上升，可能提高強颱發展及長浪對臺灣沿岸的威脅（Kang et al., 2024）
- 溫、鹽度層化的競爭效應：暖化增強溫度層化，可能加劇颱風引發的海表降溫；降雨增加造成的鹽度層化則抑制垂直混合（Huang et al., 2015；Balaguru et al., 2016）
- 南海特殊的颱風抑制機制：強烈內潮與颱風近慣性波的非線性交互作用，促進垂直混合與冷水湧升，造成強烈的海表降溫及海氣熱通量減少，抑制颱風快速增強（Guan et al., 2024）



☾ 未來黑潮環流及暖水入侵南海的變化，是否改變上層海洋熱力結構與冷卻負回饋，進而影響颱風增強潛勢？

關鍵成果分享 II：暖化情境海洋對颱風強度的推估

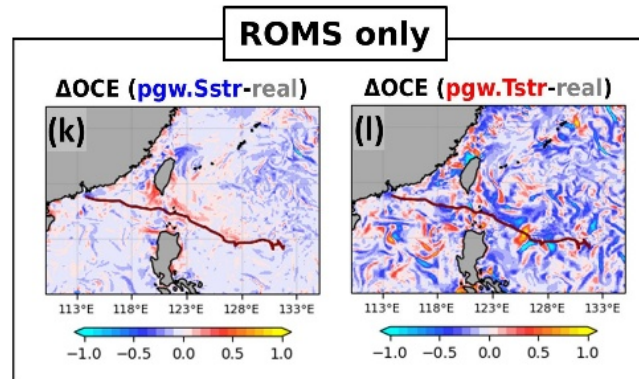
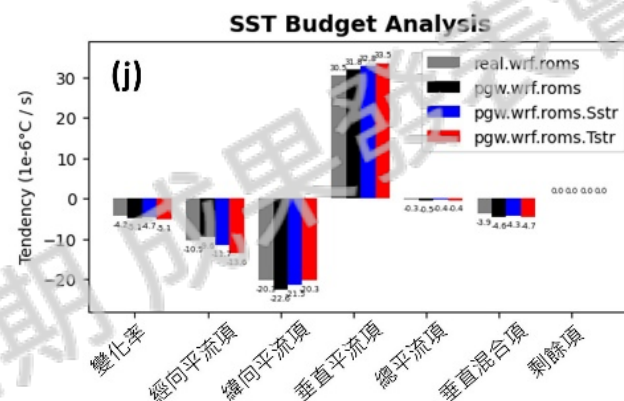
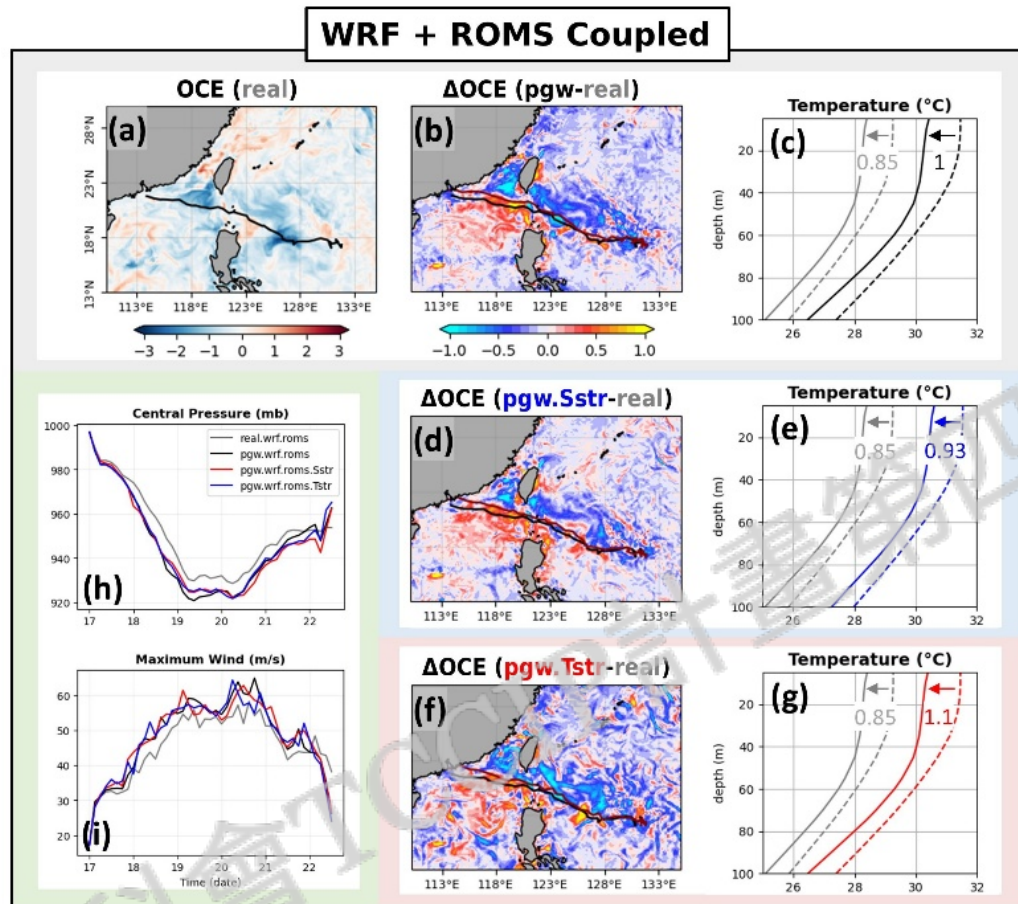
Potential Intensity calculated based on near surface temperature (SST to 100 m)



- 隨混合深度增加，深層海水增溫有限，使颱風潛在強度的增幅減小，部分海域甚至轉為負值
- **NEC 成為未來颱風發展的潛在熱點**：當混合深度達約 60 m 時，僅 NEC 附近仍維持正向 PI 變化，顯示該區未來可能更有利於強颱發展與強度維持

關鍵成果分享 III：暖化情境海洋和颱風的交互作用

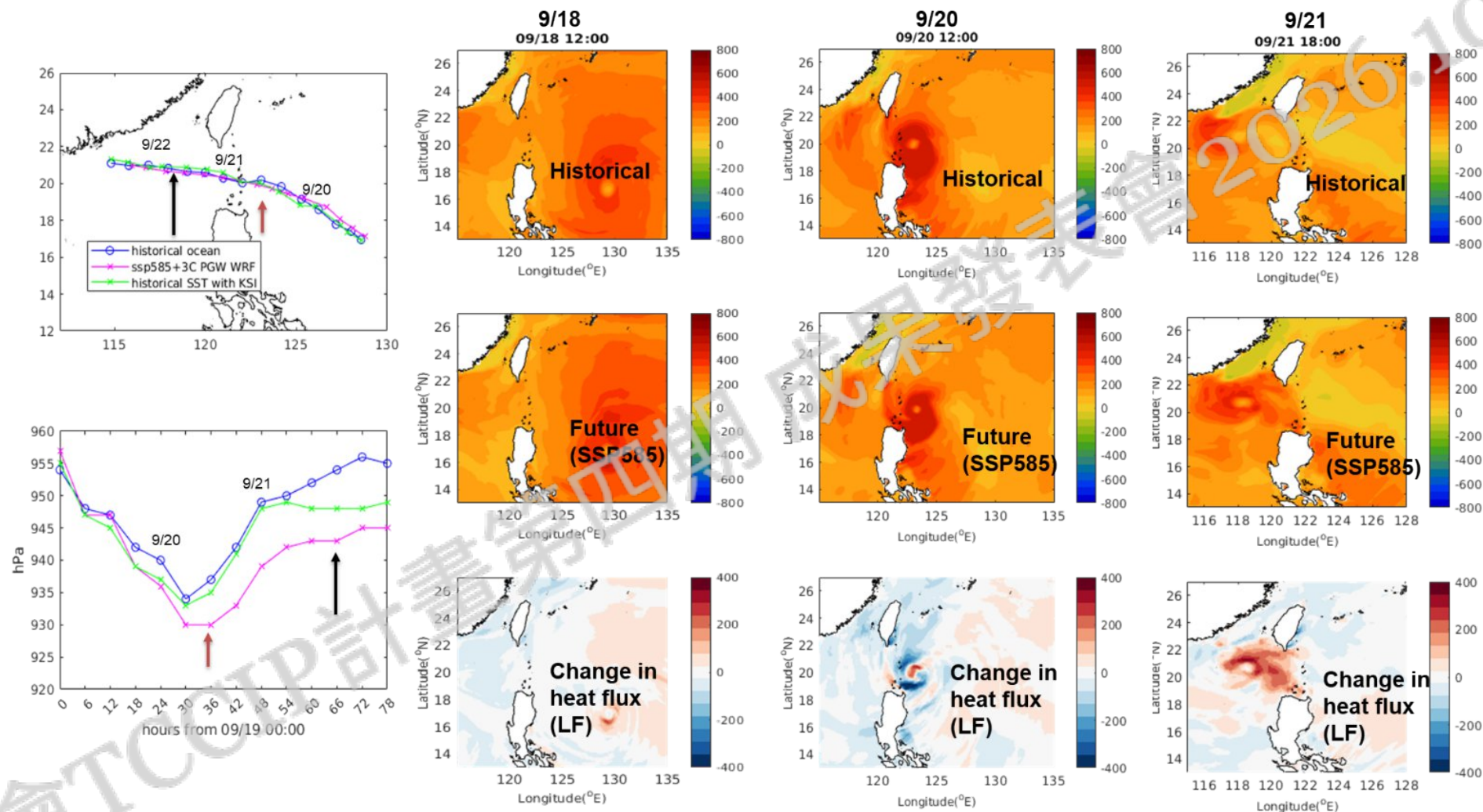
Pesudo Global Warming WRF-ROMS: 探討暖化情境下，個案颱風的強度變化受到ocean cooling effect 會影響多少？溫、鹽層化扮演的角色？



- 過去一維純海洋混合模式之文獻指出未來鹽度層化可抑制海表降溫效應。透過三維海氣耦合模式驗證鹽度層化使海表降溫效應加劇。

- 但在完全耦合的系統中，颱風因暖化環境場變化而增強，引發更劇烈的海水垂直混合及海表降溫效應。其作用超過鹽度層化對海表降溫效應的抑制效果，顯示颱風本身強度也會影響鹽度層化OCE的效果。

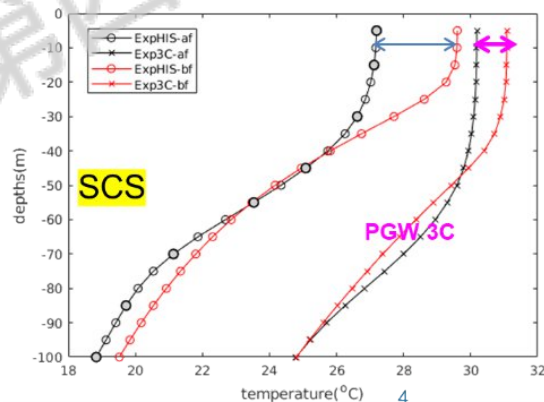
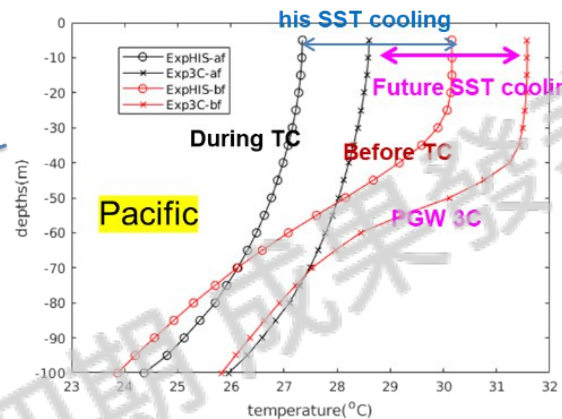
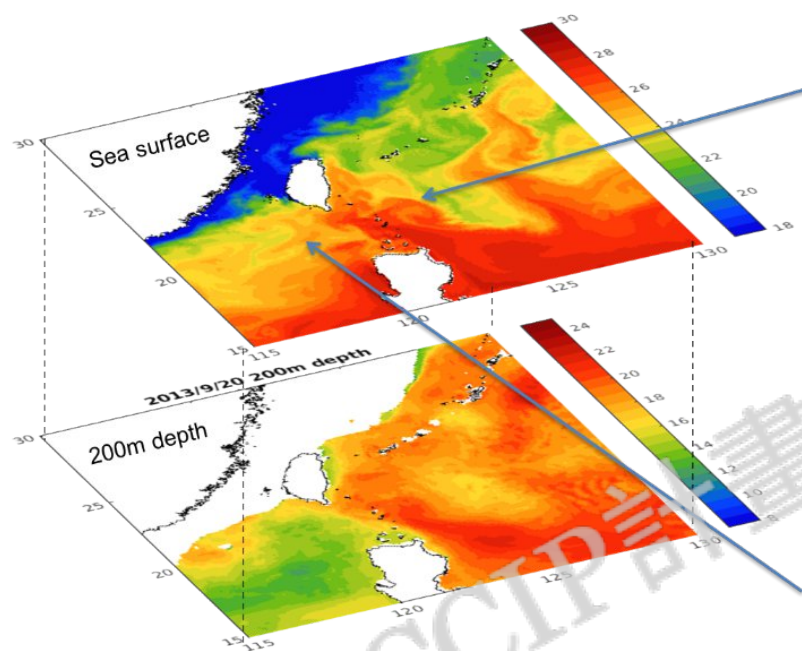
關鍵成果分享 IV：暖化情境海洋和颱風的交互作用



區域海流變異 + 颱風本體增強提升局部潛熱通量: PWG模擬南海區域的「向上潛熱通量 (latent heat flux)」顯著增加。黑潮入侵變異伴隨的海洋熱量分布變化, 在南海為颱風提供持續的熱力通量補給

關鍵成果分享 IV：暖化情境海洋和颱風的交互作用

黑潮入侵加劇對颱風強度的影響結合相關歷史颱風個案（2013天兔、2024山陀兒、2025丹納斯等）進行海氣耦合模擬與分析



- **區域海表降溫差異**：太平洋海域颱風降溫幅度較一致，而南海因強烈垂直混合與冷水湧升
- **暖化與冷水湧升的競爭效應**：南海深層冷水的混合與湧升仍可能抵銷暖化及黑潮暖水入侵帶來的熱量增益
- **颱風增強具有強度門檻**：較弱颱風難以有效利用深層暖水，仍受海表降溫的負回饋限制，因此歷史與PGW 情境下的強度差異有限
- **強颱增強潛勢提高**：臺灣西南側及南海的強烈颱風，較可能受益於未來深厚海洋熱含量增加，展現更高的增強潛勢

計劃成果總結

1. TaiESM-ROMS SSP 暖化情境降尺度模擬重點結果

- **改善區域海洋模擬能力：**優化水平與垂直混合參數化及地形處理，更合理地重現黑潮流軸、中尺度渦旋與海溫鋒面結構
- **未來海洋增溫推估：**SSP2-4.5 與 SSP5-8.5 情境下，臺灣周遭海溫分別增加約 1-2°C 與 2-3°C
- **黑潮環流結構改變：**黑潮整體傳輸量減弱，但臺灣東北側上層流速增強，呈現明顯的區域及垂直差異
- **黑潮入侵南海增強：**呂宋島東側黑潮減弱，可能促使呂宋海峽黑潮套流入侵更加頻繁

2. 高解析度 ROMS 揭示暖化情境下颱風與海洋交互作用

- **颱風與海洋動力回饋：**暖化下颱風強度增加可能強化海洋垂直混合，使颱風引發的海表降溫加劇
- **深層冷水湧升效應：**南海內潮與颱風交互作用可促進冷水湧升，形成抑制颱風增強的負回饋
- **黑潮暖水入侵的影響：**SSP5-8.5 情境下，黑潮暖水入侵可能減弱海表降溫、增加潛熱通量，提高颱風增強潛勢
- **颱風增強具有強度門檻：**黑潮暖水的增強效應取決於颱風強度及海洋層化
 - ◉ 顯示未來颱風風險評估在全球模式上需納入區域高解析度海洋動力與非線性海氣交互作用

謝謝聆聽
敬請指教

TCCiP 臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台
Taiwan Climate Change Projection Information and Adaptation Knowledge Platform

NSTC 國家科學及技術委員會
National Science and Technology Council

NCDR 國家災害防救科技中心
National Science and Technology Center
for Disaster Reduction