

METHODOLOGY · SAMPLE SERIES · 002

# 台灣海峽場址篩選

多場址海氣象比較之參考方法

PFT-MS-002 · v1.0 · MAY 2026 · PUBLIC

# 目錄

本示範報告涵蓋的能力	2
如何使用本示範報告	2
免責聲明	3
重點發現	4
摘要	5
1. 場址與範圍	7
2. 方法學	9
2.1 資料來源	9
2.2 場址選取與空間內插	10
2.3 風波聯合分析的時間對齊	10
2.4 方向慣例	10
2.5 已知資料限制	10
3. 氣候特徵 — 風	11
3.1 年統計量 — 三段比較	11
3.2 季節循環 — 三段疊圖	11
3.3 風向 — 三段比較	12
4. 氣候特徵 — 波	13
4.1 年統計量 — 三段比較	13
4.2 季節循環 — 三段 Hs 疊圖	14
4.3 風波方向關係	14
4.4 Hs 與 Tp 聯合分布	16
4.5 頻譜分量分解 — 風生波 vs 湧浪	17
4.6 波浪氣候資料注意事項	19
5. 可作業性	19
5.1 聯合框架可作業性 — 三段比較	19
5.2 持續度連續長度分布	20
6. 跨段差異性分析	21
6.1 颱風暴露 — 三場址事件清單	21
6.2 關鍵參數差異性彙整	22
6.3 場址篩選綜合判讀	23
7. 與公開觀測資料的交叉驗證	24
7.1 季節循環一致性 — CWA WW3 10 年 vs WAVERYS 5 年三場址	25
7.2 CWA 浮標 / WAVERYS-NRT 於最近浮標之交叉檢核	26
7.3 綜合判讀	28
8. 限制與注意事項 (彙整)	28
8.1 來源資料準確度	29
8.2 空間與時間解析度	29
8.3 目錄與交叉驗證範圍	30
8.4 可作業性框架建模選擇	30
9. 資料來源、出處與授權	31
10. 可重現性	32
附錄 A — 圖目錄	33
附錄 B — 統計表目錄	33

## 本示範報告涵蓋的能力

本報告為 PF Tech 方法學示範系列 (Methodology Sample Series) 的第二篇，以台灣海峽離岸風電開發帶之三段場址跨段比較為對象，完整流程示範本公司之前期海氣象書面研究 (Level 1 Metocean Desktop Study) 整套做法。涵蓋六項能力：

- **多來源資料整合 (multi-source data integration)** — ERA5 single-levels (大氣 / 風 / SST) 與 CMEMS WAVERY5 多年再分析 (波浪)，整合為單一可重現之各場址資料萃取 (第 2.1、9 節)。
- **風與波浪氣候特徵 (wind and wave climatology)** — 三場址之年與季節統計量、百分位數、月循環、多面板風向風玫瑰圖 (第 3、4 節)。
- **可作業性門檻分析 (operability threshold analysis)** — 各場址 Hs / 風速聯合門檻框架 (A — 敏感型 / B — 標準型 / C — 穩健型)、各等級持續度連續時段長度分布 (第 5 節)。
- **跨段差異性分析** — 本場址篩選報告之核心輸出：哪些參數在三段間有實質差異、哪些彼此收斂，並附各場址 IBTrACS 颱風暴露事件清單 (第 6 節)。
- **替代來源交叉驗證 (alternative-source cross-validation)** — 各場址針對 CWA WW3 十年波浪後推資料 (季節循環一致性) 與 CWA 浮標 / WAVERY5-NRT (短窗同步) 之抽查比對，於兩處最近浮標執行 (第 7 節)。
- **注意事項與不確定性框架 (caveat and uncertainty framing)** — 依來源資料準確度、空間時間解析度、目錄範圍、可作業性框架選擇分組彙整的限制清單 (第 8 節)。

## 如何使用本示範報告

本報告為方法學示範，並非專案交付物。閱讀對象為評估 PF Tech 「前期書面研究 (Level 1 Metocean Desktop Study)」服務之潛在客戶：

- **本報告呈現什麼：**PF Tech Level 1 書面研究的分析深度、框架與限制紀律，以台灣海峽離岸風電開發帶之三段場址跨段比較為對象做完整流程示範。方法學架構與報告結構具長期參考價值；具體數值僅為示範。
- **適用情境：**前期場址篩選、技術選型、可行性階段範圍界定，以及與內部利害關係人之氣象時段規劃討論。
- **不適用情境：**作為特定專案的工程輸入。選取點為方法學示範用，並非實際專案位置；報告中所示數值不為場址特定設計值——本報告之範疇與責任界線請見次頁免責聲明。
- **如何委任專案版本：**請寄信至 [contact@pft-s.com.tw](mailto:contact@pft-s.com.tw)，附上場址座標、用途與時程，以洽談專案範疇。

表 1: 文件基本資料。

欄位	內容
製作單位	PF Tech Services Ltd. — 沛風科技服務有限公司
網站	<a href="https://pft-s.com.tw/">https://pft-s.com.tw/</a>
聯絡方式	contact@pft-s.com.tw
分析時段	2019-01-01 至 2023-12-31 (共 5 年, 主要分析採逐時資料)
長期背景	2004-01-01 至 2023-12-31 (共 20 年, ERA5 月資料)
場址	台灣海峽離岸風電開發帶之三個場址 — 北段 25.00°N / 120.44°E、中段 24.05°N / 119.80°E、南段 23.00°N / 119.57°E。為示範本方法學之完整流程而選定, 不代表 PF Tech 對任何具體既有或規劃中專案之意見。
文件版本	v1.0 — 2026 年 5 月
散布範圍	公開。© 2026 PF Tech Services Ltd. 保留所有權利; 惟本方法學示範可全部或部分轉散布, 須符合次頁「必要出處」之條件。

本文件為方法學示範。允許全部或部分轉散布, 惟轉散布時須保留:

- 文件標題與 PF Tech Services Ltd. 致謝;
- 第 2.1 節與第 9 節的資料來源出處 (CC-BY 4.0、CMEMS Licence、政府資料開放授權條款規定);
- 本免責聲明。

## 免責聲明

本報告由 PF Tech Services Ltd. — 沛風科技服務有限公司 — 編製, 旨在示範本公司之海氣象書面研究方法學。

**本報告不構成任何特定風場、港埠設施或海岸資產之設計依據。** 三個選取點 (列於前頁文件基本資料表) 為示範本方法學於跨段比較中的完整流程而選定, 座標僅為示範用途。報告中所示數值用以說明本方法學產出之分析內容, 並非場址特定之工程數值。

- 本分析就三場址特性所做之刻畫, 深度適合前期場址篩選、技術選型與可行性階段範圍界定。
- 工程設計、保險核保與專案融資決策通常仰賴額外輸入 — 正式極值分析 (EVA)、專案特定現地量測、設計載重計算 — PF Tech 透過另行界定範圍之委任案提供。
- 資料來源為公開可取得之再分析與觀測產品, 依各來源公布之授權條款使用 (完整出處詳見第 9 節)。
- 三個選取點皆位於台灣海峽離岸風電開發帶, 僅為方法學示範而選定; PF Tech 對任一座標是否落於任何具體既有或規劃中專案範圍內 (離岸風電、港埠、海岸工程或其他類型) 不作任何陳述。

PF Tech Services Ltd.、其管理階層、員工與代理人，對因依本報告所載資訊而做之決定、行動或不作為所致之一切後果，概不負責。如需特定專案之海氣象資料或分析，敬請直接洽詢 PF Tech 進行範圍界定之委任案。

## 重點發現

2019–2023 期間，台灣海峽三場址於風能、波浪、可作業時間、颱風暴露此四項面向各有所長，並無單一場址全面勝出；三段於場址初篩層級呈現一組明確之三向取捨。北段風能資源最強、於此 5 年事件清單中颱風通過頻率亦最低；中段於海峽通道效應 (channel funnelling；指海峽兩岸地形夾縮處之風場加速與方向集中現象，詳 §3.1 與 §4.1) 作用下，波浪極端值 (p99 Hs) 最高；南段於三個可作業等級之比例與不可作業時段持續度兩項皆領先，且於時間平均能量分量層級為湧浪領先 (§4.5；此為時間平均能量結構，並非極值或設計負載之主控量)。注意：單一事件極值 (如 5 年絕對最大 Hs、颱風最近通過距離) 為樣本期間相依量，不可等同於設計負載包絡線—本表數值之使用層級請見下方摘要之「使用分級框」。

本方法學跨三場址產出之六項關鍵數值：

表 2: 重點發現指標。波/風絕對極大值與颱風頻率排名為 2019–2023 期間之事件樣本，並非長期氣候穩定值。

指標	數值	註解
wind10 年平均 (北 → 中 → 南)	8.91 → 8.42 → 6.77 m/s	北至南遞減。北南差距於 10 m 高約 2.1 m/s、100 m 高擴大至約 3.0 m/s
Hs 年平均	北 1.60 ≈ 中 1.59、南 1.35 m	北中幾乎相同 (差 0.01 m)，兩者皆較南段高 16–17%
Hs p99 (北 → 中 → 南)	4.33 → 4.66 → 3.68 m	中段於 p99 極端值領先北段約 8% (海峽通道效應)；南段較北段低約 15%
B 等級可作業性 (Hs ≤ 2 m，wind ≤ 12 m/s)	北 67% / 中 68% / 南 80%	南段較中、北段高約 12–13 個百分點，相當於每年多約 45–48 個標準作業日 (詳 §5.1)
B 等級不可作業事件持續度 p90	南 63 h vs 北 90 h、中 106 h	南段 90% 之不可作業事件可於 63 h 內結束—較中、北段同一指標短 30–40% (詳 §5.2)。
熱帶氣旋暴露頻率 (TS+ 強度，200 km 範圍內，2019–2023)	北 0.6 次/年 vs 中 1.2、南 1.6	此頻率為本 5 年事件清單之計數，非長期氣候統計。北段頻率約為海峽中央之一半、南段最高；與台灣本島地形對海峽北端出口提供部分遮蔽之機制一致 (詳 §6.1)

支撐這些數字的詳細討論見下頁摘要與 §3 – §7。本方法學的限制、以及這些數字能與不能支撐什麼，見已結構化之第 8 節（共 15 項，分四個子節）。§9 載完整資料來源出處。

## 摘要

**本報告定位。**本報告之科學價值在於示範一套可重現之早期場址篩選方法，而非提供設計級氣候結論，亦非針對台灣海峽提出新的科學發現。下方各項數值請於此一框架下閱讀。

**本報告數值之使用分級。**本報告各數值並非皆可作同等用途，依嚴謹度分為三類：

- **適合作為場址初步篩選之比較依據：**年 / 月平均 wind10 與 Hs、季節循環、北 → 中 → 南整體排序、B 等級可作業相對比例、§4.5 分量能量比例。此類數值跨資料產品可重現，於 2019–2023 篩選窗下亦相對穩定，但仍受年際變化影響。
- **僅供參考、不可單獨作為決策依據：**p99 wind / Hs、2019–2023 期間之絕對極值、颱風事件期間 Hs、各場址最近通過最小值、§7.2 浮標 / WAWERYS-NRT 30 天 bias / RMSE。此類數值具實質單一事件或單一時間窗噪聲，於重抽樣時不保證穩定。
- **不適用於設計層級判斷：**正式極值分析 (EVA)、回歸期、設計負載包絡線、陣風基礎可作業性等級規格、動態敏感船舶包絡線分析，以及任何用於保險 / 專案融資承保之數值。此類數值之取得需另行委任案進行專門資料蒐集與分析，屬本書面研究階段範疇之外 — 詳 §8.4 第 13–15 項與 §7.3。

本研究於台灣海峽離岸風電開發帶沿線選取三個場址 — 北段 (25.00°N, 120.44°E)、中段 (24.05°N, 119.80°E)、南段 (23.00°N, 119.57°E) — 於 2019–2023 期間進行跨段海氣象比較，採用 ERA5 single-levels 與 CMEMS WAWERYS 多年再分析。三個場址皆刻意取於距台灣本島最近海岸點約 50 公里處 (geodesic 距離；方法詳 §2.2)，分布於開發帶之三個緯度。

研究之核心發現為：年平均風速排序為北 > 中 > 南，但年平均 Hs 於北、中段幾乎相同 (皆約 1.60 m)，且 Hs 之極端值 (p95、p99) 排序與年平均排序並不相同 — 中段於 p95 (3.78 m) 與 p99 (4.66 m) 皆領先北段約 8%，儘管中段年平均風速略低。此一波浪極端值之領先，與海峽中段之海峽通道效應一致：方向集中之風場偶發產生較大之波浪。北段年平均風速最高 (8.91 m/s)。南段年平均風速與 Hs 皆明顯最低 (風 6.77 m/s；Hs 1.35 m)，但本 5 年期間之絕對最大 Hs (7.65 m，歸因於 DOKSURI 2023 於 2023-07-27 以 62 km 最近通過 — 詳 §4.1 / §6.1) 與最長 Tp 週期皆出現於此 — 與南段位於澎湖以南、暴露於南向長週期湧浪 (swell) 傳播路徑之地理位置一致。

此發現對台灣離岸風電場址初步篩選具直接意涵：僅以年平均風速排序之單一參數判讀，會低估中段之 Hs 極端值暴露、以及南段之湧浪特徵。

此一發現於方法學上由以下方面所支撐：

- **風 — 年平均與季節：**10 公尺高度 wind10 年平均排序為北 > 中 > 南 (8.91 / 8.42 / 6.77 m/s)；100 公尺高度為 10.67 / 9.98 / 7.68 m/s。北、南段差距於 10 m 高約 2.1 m/s、100 m 高擴大至約 3.0 m/s。季節變化由夏季約 5 m/s 至冬季約 12 m/s；冬、夏兩季之跨段北南差皆約 2 m/s — 年均梯度主要由冬季信號主導 (§3.1、§3.2)。

- **波浪 — 年平均與季節**：Hs 年平均於北、中段幾乎相同 (1.60 / 1.59 m)，南段為 1.35 m (較北段低約 16%)；Hs p99 排序為中 > 北 > 南 (4.66 / 4.33 / 3.68 m) — 中段於 p99 極端值領先北段約 8% (海峽通道效應)，南段較北段低約 15%。冬季月平均峰值於中段約 2.7 m、北段約 2.5 m、南段約 2.1 m (12 月)；夏季三場址最低值約 0.7–1.0 m，南段於盛夏略高於中段 (西南季風湧浪暴露所致) (§4.1、§4.2)。
- **波浪方向與頻譜結構** (§4.3、§4.4、§4.5)：三場址之總波方向皆與風向緊密對齊 (Hs 加權  $\Delta\theta +1.1^\circ$  至  $+2.9^\circ$ )，但**分量分解** (§4.5) 較總波方向或 Tp 高百分位指標更能呈現跨段差異。北段與中段以風生波 (wind-sea) 為主 (WW 分量 ~55%、SW1 分量 ~30%)，其 SW1 來向與當地 NE 風近乎同向，故無法以總波  $\Delta\theta$  指標分離；**南段以湧浪為主** (SW1 分量佔時間平均波能 47.9%，超過 WW 之 35.0%)，Hs 加權 SW1 方向為 **138° (SE)**，與當地 NNE 風實質偏軸。§4.4 之長週期樣本比例 (Tp ≥ 10 s；北 3.5% > 南 2.9% > 中 2.1%) 為較粗之湧浪指標，僅捕捉最長事件；§4.5 之分量分解為較乾淨之跨段差異呈現。
- **可作業性 (operability, §5)**：聯合框架 B 等級可作業性 (Hs ≤ 2 m 且 wind10 ≤ 12 m/s) 於南段為 80.3%、中段 67.9%、北段 67.2% — 南段約 12 個百分點之領先相當於每年多約 48 個標準作業日。於穩健型等級 (Hs ≤ 2.5 m, wind ≤ 15 m/s) 下，北、中段排序反轉：北段 81.0% > 中段 78.7%，反映海峽中央海峽通道效應推升波浪超過 2.5 m 之頻率高於海峽北端出口。不可作業事件持續度進一步支持上述發現：南段之不可作業事件中位數最短 (15 h，相對北段 21 h、中段 27 h)，不可作業事件持續度 p90 亦最短 (63 h，相對北段 90 h、中段 106 h)；中段於 2022 年中曾出現單一 2,535 小時持續可作業時段 (為目錄中最長者)，但屬離群事件，不改變中位數與 p90 之比較結論。
- **颱風暴露** (§6.1)：本研究自 IBTrACS v4r01 直接萃取 2019–2023 期間於三場址任一 200 km 範圍內通過、且生命週期峰值風速 ≥ 熱帶風暴 (Tropical Storm, TS) 級之熱帶氣旋 (Tropical Cyclone, TC)，共 9 個相異颱風 (萃取流程詳 §8.2 第 8 項)。各場址暴露次數：**北段 3 個 (0.6 次/年)、中段 6 個 (1.2 次/年)、南段 8 個 (1.6 次/年)**。北段頻率約為海峽中央之一半，與台灣本島對北端出口提供部分地形遮蔽之機制一致；北段亦為本事件清單中唯一通過之 Cat 5 颱風 (CHANTHU 2021，最近距離 189 km，生命週期峰值 155 kt) 所在。中段擁有 5 年樣本中最近通過距離最遠 (95 km) 之紀錄 — 2019–2023 期間無任何颱風通過中段 95 km 範圍以內。南段年率最高，且中位數最近通過距離 (81 km) 較中段 (131 km) 為近，包含 KOINU 2023 (Cat 4，生命週期峰值 120 kt，最近距離 100 km)。南段之 Hs max = 7.65 m 發生於 2023-07-27 18:00 UTC，歸因於 DOKSURI 2023 同時於 62 km 處通過。
- **跨段差異性彙整** (§6.2 / §6.3)：三場址呈現結構化之三向取捨。若僅依單一參數排名進行篩選層級判讀，極易誤導：北段於平均風能居首、颱風通過頻率最低；中段於颱風最近通過距離與可作業時段最大值兩項居首；南段於三個可作業等級、不可作業時段持續度、年平均 Hs 三項皆領先。以跨段差異性視角呈現，可使此一取捨**顯化**，而非埋藏於單一數值中。
- **替代來源交叉驗證** (§7)：以 CWA WW3 十年波浪後推資料與 WAVERYS 5 年季節循環於三場址交叉檢驗，平均 Hs 之 Pearson r = 0.98 / 0.97 / 0.77 (北 / 中 / 南)，系統性 +0.25 m 偏差可歸因於非重疊時間窗或 WAVERYS / MFWAM 中強度風生波範疇之溫和正偏；以 CWA 浮標 (0-B0075-002) 與 WAVERYS-NRT 進行 30 天比對於兩處 CWA 波浪浮標 (新竹、七美)，取得 Hs RMSE ≈ 0.23–0.25 m、Pearson r ≈ 0.85–0.88，支援 WAVERYS-family 於北段 (距新竹 36 km) 與南段 (距七美 22 km) 之可靠性。中段最近浮標距離 96 km，故 §7.2 於中段並非場址直接量測，而是以最近浮標 (七美，96 km 外) 之模式比對結果作為支援性參考；此一參考之效力取決於七美對中段之代表性，並因澎湖群島位於兩者之間而被進一步削弱。
- **颱風框架注意事項**：ERA5 風場對小尺度強烈熱帶氣旋之低估已有充分文獻記載 (峰值強度約低 20–40%；Hodges et al. 2017；Schenkel & Hart 2012)。本報告所用之 WAVERYS 多年再分

析透過同化測高 SWH (2017 年後並含 Sentinel-1 SAR 方向譜) 部分緩解此偏差，但測高衛星於眼牆尺度取樣稀疏，因此本報告中颱風相關 Hs 數值應視為**參考性質而非設計級**—於小尺度強烈熱帶氣旋條件下可能低估場址峰值。絕對極值之設計載重分析須採用較長之 20 年颱風目錄進行正式極值分析 (EVA)，需另行委任進行專門資料蒐集與分析，屬本書面研究階段範疇之外。

§3 至 §6 之數值與圖件詳載上述發現；§7 載入替代來源交叉驗證結果；已結構化之第 8 節 (共 15 項，分四個子節) 設定方法學邊界；§9 設定資料來源出處。

## 1. 場址與範圍

本研究於**台灣離岸風電開發帶沿台灣海峽**選取三個場址，進行跨段海氣象比較分析，作為場址篩選方法學示範：

表 3: 沿台灣西部離岸風電開發帶選取之三個場址，用於跨段場址篩選比較。三個點皆刻意取於距台灣本島最近海岸點約 50 公里 (geodesic 距離；方法詳 §2.2)，跨開發帶三個緯度，使跨段比較固定於一致之離岸距離。南段位於澎湖以南、海峽南部之開放海域，暴露於海峽南端與南海邊界處南向湧浪之傳播。

段位	緯度	經度	距 TW 最近岸點
北段	25.00°N	120.44°E	約 50 公里 (新竹/桃園外海)
中段	24.05°N	119.80°E	約 50 公里 (彰化外海)
南段	23.00°N	119.57°E	約 50 公里 (台南外海)，於澎湖以南

→ 空間位置詳見 **圖 1**。

## Taiwan Strait — three sites used in this study

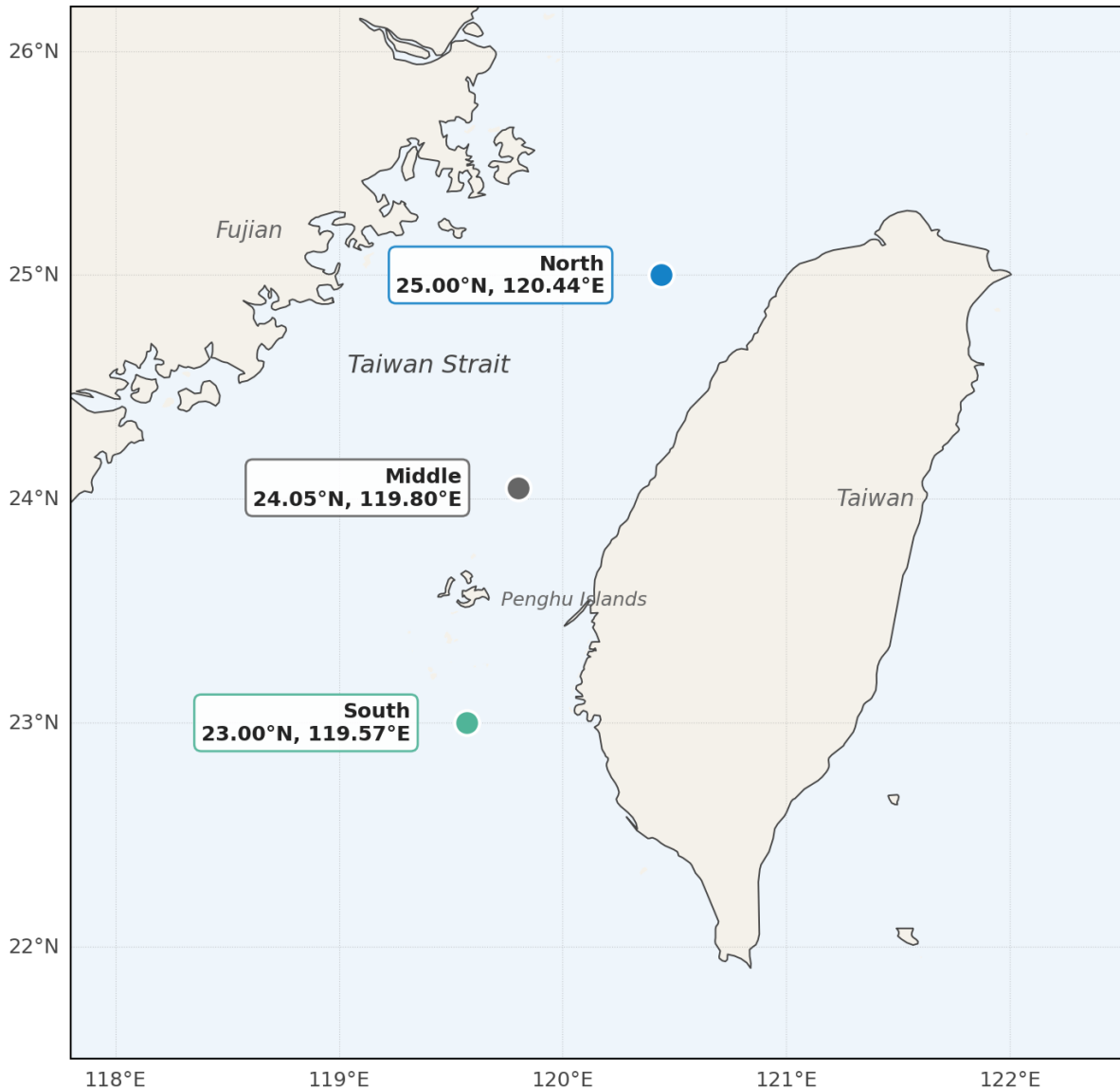


圖 1: 本研究三個場址之空間位置——北段 (25.00°N, 120.44°E, 藍)、中段 (24.05°N, 119.80°E, 灰)、南段 (23.00°N, 119.57°E, 綠)。海岸線取自 Natural Earth 1:10m 解析度。三個點皆距台灣本島最近海岸點約 50 公里：北段於新竹/桃園外海，接近海峽東北出口；中段於彰化外海，位於海峽中段；南段於台南外海、澎湖以南，暴露於南向湧浪之傳播。

**報告框架：**本研究於台灣離岸風電開發帶沿線選取三個場址，僅為方法學示範而選定。三個場址為三個緯度（北、中、南）之開放水域點，**並非場址推薦**，亦不應被解讀為對任何開發區域之背書。南段位於澎湖以南，屬離岸風電開發帶之南緣而非其核心，本研究將其納入作為跨段比較之對照點，並非代表性開發場址。PF Tech 對該等座標是否落於任何具體既有或規劃中專案範圍內不作陳述。**等距離岸原則：**各場址皆距台灣本島最近海岸點約 50 公里（詳 §2.2 距岸距離方法學），使跨段比較固定於一致之離岸距離。三組座標為**跨段比較之方法學錨點**，而非租賃區重心——不代表任何具體專案之代表點，任何具體開發區之底床地形 / 海岸線 / 澎湖遮蔽效應，須以場址特定之後續評估處理。報告所呈現之結果，為前期書面研究跨段篩選之示範性輸入。

**空間背景 (資料萃取範圍 22–26°N × 117–122°E)：**本萃取範圍涵蓋三個場址並於各方向皆保留數個格點之邊際，為各偏離格點座標提供雙線性內插所需之空間鄰域。此一範圍之選取使三個場址皆位於萃取格網之內部，因此空間內插方法獨立執行三次而採用同一組來源格網。

**時間範疇：**

- 主要分析期 2019-01-01 至 2023-12-31 (共 5 年)，風場與大氣變數採小時解析度。
- 長期背景 2004-01-01 至 2023-12-31 (共 20 年)，僅使用 ERA5 月平均彙總資料。
- 各場址颱風事件清單 (IBTrACS, 2019–2023)：\$6.1。
- 各場址公開觀測資料交叉驗證 (CWA WW3 十年波浪後推資料 + CWA 浮標 vs WAVERYS-NRT 30 天)：\$7。

**範圍之外 (將於範圍更廣之後續委任案處理)：**正式極值分析 (extreme value analysis, EVA)、回歸期分析、各場址方向性設計載重外包絡、數值模式精化 (SWAN / Delft3D / 結構反應)。

## 2. 方法學

### 2.1 資料來源

表 4: 本研究使用之資料來源。完整 DOI 與資料集版本 ID 詳見第 9 節。所採用之 22–26°N × 117–122°E 資料萃取範圍涵蓋本研究三個場址。

來源	變數	解析度	期間	授權
ERA5 single-levels (CDS)	u/v 10 m + 100 m, T2m, MSL, dewpoint, SST	0.25°, 逐時	2019-2023	CC-BY 4.0
ERA5 monthly aggregates	同上 8 個變數	0.25°, 月	2004-2023	CC-BY 4.0
CMEMS WAVERYS reanalysis	VHMO、VTPK、VMDR (及 partition Hs/Tp/dir、Stokes drift)	0.2°、3 小時	2019-2023	CMEMS Licence

完整出處、DOI、資料集版本、檔案 checksum 與存取日期皆記錄於案例 manifest，可依需求提供。

**必要出處 — 任何包含本節之轉散布皆須附上。** 本研究使用 ERA5 再分析資料 (Generated using Copernicus Climate Change Service Information [2026], CC-BY 4.0) 與 CMEMS WAVERYS 多年再分析 (Generated using E.U. Copernicus Marine Service Information; CMEMS Licence)。完整引用與 DOI 詳見第 9 節。

## 2.2 場址選取與空間內插

**距岸距離。**各場址座標皆刻意取於距台灣本島最近海岸點約 50 公里（以 WGS84 ellipsoid 計算 geodesic 距離）。海岸線取自 Natural Earth 1:10m physical land polygons，過濾出台灣本島（單一 polygon，範圍 21.9–25.3°N）。各場址之「海域」區域標籤（新竹外海 / 彰化外海 / 台南外海）由場址緯度決定，獨立於距岸距離指標。

**空間內插。**每項變數於三個場址處皆同時萃取雙線性內插（bilinear interpolation）（標準作法）與最近鄰（nearest-neighbour）數值。所有主要數字皆採用雙線性內插；最近鄰結果保留供敏感度分析。空間內插方法於同一組來源格網（ERA5 0.25° × 0.25° 及 WAVERYS 0.2° × 0.2°）上獨立執行三次，確保比較分析在方法層面上的一致性。

中段座標於先前同類分析中已驗證：方法選擇（雙線性 vs 最近鄰）對平均、中位數與 p95 之影響可忽略，僅於絕對極值上呈現數個百分點之差距。同一規律應適用於北段與南段；各場址明確之敏感度長條於後續輪次補充。

## 2.3 風波聯合分析的時間對齊

ERA5 逐時資料直接以時戳重新索引降採樣至 WAVERYS 3 小時格點（00, 03, 06, 09, 12, 15, 18, 21 UTC）。WAVERYS 為 3 小時瞬時值，故此屬直接對齊，並非時間平均。此為合理且可辯護之對齊作法——保留波浪模式之原生時戳，避免為波浪場捏造表面上的逐時解析度。

## 2.4 方向慣例

本報告所引用之風向與浪向皆採**來向慣例 (FROM convention)**——即風或浪是從哪個方向來，0° 為北、順時針為正，為氣象學標準作法。風向由 ERA5 之 u/v 分量計算；WAVERYS VMDR 經驗證亦使用同樣的來向慣例。兩者因此可直接比較、無須加上方向位移，§4 之方向性分析即依此基礎。

## 2.5 已知資料限制

本分析所依賴之來源資料具有下列已知限制：

- **ERA5 100 m 風速為模式診斷量**，並非同化變數；於穩定邊界層中相對於真實輪穀高度風存在偏差。專案特定之輪穀高度氣候特徵宜經氣象塔或更高解析度之中尺度模式驗證。本研究三個場址之年均風切比（100 m / 10 m）約為 1.13–1.19，對應幕律指數  $\alpha \approx 0.05–0.08$  — 低於 IEC 61400-3 參考值  $\alpha = 0.14$ ；此與 ERA5 模式衍生之垂直結構相符，在解讀輪穀高度數字時應視為已知之邊界層表徵注意事項。
- **ERA5 與 WAVERYS 共用大氣外力**（已驗證）。ERA5 風場對於小尺度強烈 TC 之低估已有文獻記載（峰值強度約低 20–40%；Hodges et al. 2017；Schenkel & Hart 2012）；本報告所用之 WAVERYS 多年再分析透過同化測高 SWH（2017 年後並含 Sentinel-1 SAR）部分緩解此 Hs 偏差，但測高衛星於眼牆尺度取樣稀疏。因此三個場址颱風期間之峰值 Hs 皆應視為**參考性質**，而非設計級；見 §8 彙整限制章節。
- **ERA5 SST 為再分析資料，並非衛星觀測**；近岸格點受陸地污染影響。本研究三個場址皆距岸足夠遠（ $\geq 30$  km），不受此影響；但若分析點向岸偏移則同一注意事項適用。

- **ERA5 0.25° 平滑了通過臺灣海峽之東北季風低空噴流**；局地極大值略為低估，於三個場址之間此低估接近常數，因此不會偏倚跨段比較。
- **WAVERYYS 3 小時 vs ERA5 逐時的時間不匹配**已透過上述降採樣紀律處理。
- **5 年分析窗下之百分位統計**: ERA5 小時風場記錄（各場址 43,824 樣本）之 1% 與 5% 尾端各含約 440 與 2,200 個樣本；WAVERYYS 3 小時 Hs 記錄（各場址 14,608 樣本）之 1% 與 5% 尾端各含約 150 與 730 個樣本。兩者於年平均層級穩定，但對個別颱風事件是否落於分析窗內敏感。不同 5 年窗可能使單一場址之風速 p95 偏移 1–2 m/s、Hs p95 偏移 ~0.5 m。本注意事項適用於 §3.1 與 §4.1 之百分位數值。

### 3. 氣候特徵 — 風

#### 3.1 年統計量 — 三段比較

**百分位數註解。** p95 與 p99 為經驗分布之上端百分位數，分別約有 5% 與 1% 的時間序列樣本高於該值；以 ERA5 逐時資料估算，約相當於每年 18 天與 3–4 天。兩者描述的是分布上端條件，而非典型情境；容量因子取決於完整風速分布與風機功率曲線，並非由 p95 單獨決定。

表 5: 三場址年風速統計量 — 10 公尺與 100 公尺高度純量風速 |U|，由 ERA5 小時資料以雙線性內插至各場址座標。各場址 n = 43,824 個小時樣本，涵蓋 2019–2023 共 5 整年。風速採純量平均（於小時解析度計算 |U| 後再彙總）；向量平均會低估氣候，本報告不使用。

場址	n	wind10 平均 (m/s)	wind10 p95 (m/s)	wind100 平均 (m/s)	wind100 p95 (m/s)
北段 (25.00°N, 120.44°E)	43,824	8.91	15.82	10.67	18.96
中段 (24.05°N, 119.80°E)	43,824	8.42	16.19	9.98	19.87
南段 (23.00°N, 119.57°E)	43,824	6.77	13.64	7.68	15.98

年平均於兩高度皆呈現由北至南遞減之乾淨梯度（10 m: 8.91 → 8.42 → 6.77 m/s; 100 m: 10.67 → 9.98 → 7.68 m/s），與東北季風沿海峽向北增強之動力一致。此年均梯度主要為冬季信號 — 夏季時三段收斂於約 1.6 m/s 之內（見 §3.2）— 不應視為全年定值。10 公尺高度南段比北段低約 2.1 m/s（8.91 – 6.77 ≈ 2.1 m/s）；於 100 公尺高度差距擴大至約 3.0 m/s（10.67 – 7.68 ≈ 3.0 m/s）。中段於兩高度皆介於南北之間，較接近北段。p95 之排序與平均排序不同 — 中段於兩高度皆呈現最高之 p95，儘管平均較低（10 m p95 16.19 m/s vs 北段 15.82 m/s），顯示其尾端變異較大。方向性成份於 §3.3 檢視，中段於 NNE 區段呈現最集中之方向分佈 — 與海峽通道效應一致，即方向集中、極端事件偶發之風場驅動 p95 高於平均較高但方向分散較廣之北段。持續性成份留待後續輪次處理。

#### 3.2 季節循環 — 三段疊圖

三個場址之季節循環振幅均較大（夏季最小至冬季最大約相差 6–7 m/s），且各段相位一致 — 冬季最大值由東北季風主導，夏季最小值出現於西南季風轉換期。跨段北南差於冬夏兩季相近（冬季 12 月峰值北南差約 2 m/s，夏季 8 月最低值北南差約 2 m/s）。中段於冬季緊密貼近北段（12 月 12.7

vs 12.4 m/s)，於夏季介於北段與南段之間（8月 5.2 m/s，北 6.1、南 4.7）。南段於 9 月達年度最低值（約 4.7 m/s），然後於 10 月隨東北季風開始而急遽上升；此 10 月上升於三個場址皆可見，以北段絕對跳幅最大（9 月 7.2 → 10 月 12.0 m/s）。

→ 詳見圖 2。

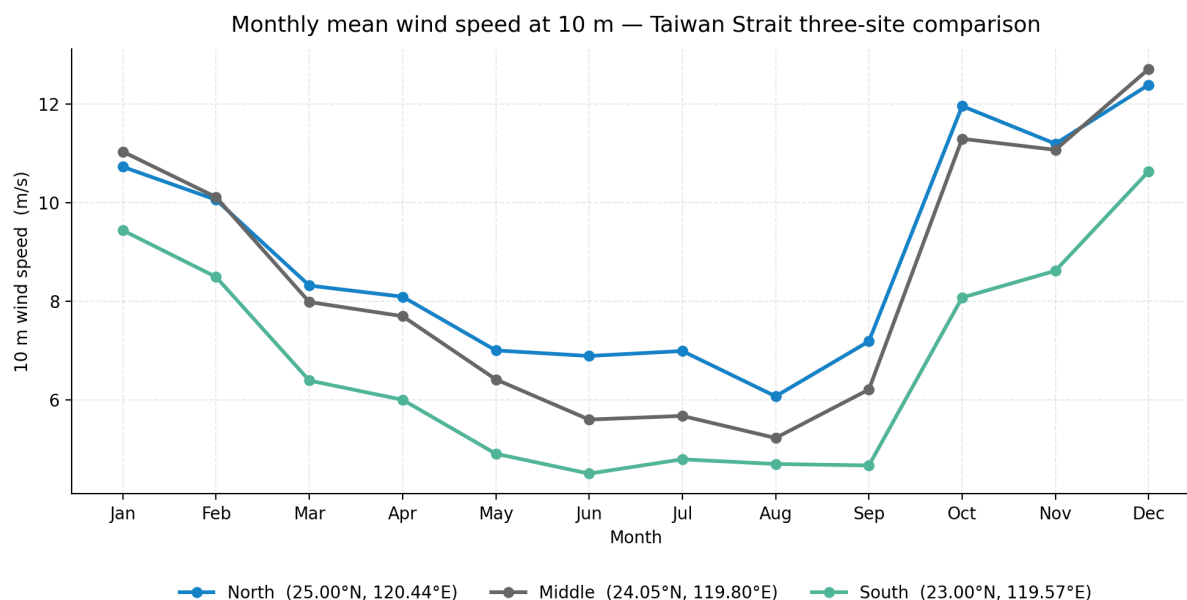


圖 2: 台灣海峽三段場址（北段 25.00°N、120.44°E，藍；中段 24.05°N、119.80°E，灰；南段 23.00°N、119.57°E，綠）10 公尺月平均風速。ERA5 小時 2019–2023 純量 |U| 於小時解析度計算後彙總為月均，各場址採雙線性內插。N→S 年均梯度乾淨，冬夏兩季 N-S 差距相近，皆與東北季風沿海峽向北增強一致。

### 3.3 風向 — 三段比較

三個場址皆以東北象限（N-NE 區段，FROM 方向約 10°–60°）為主，與東亞冬季東北季風一致。風向圓平均（FROM）約為北段 35°、中段 22°、南段 19° — 中、南兩段沿 NNE 水道軸線（~19–22°）對齊，北段方向則偏 N（較其他兩段偏 N 約 13°），位於海峽東北開放出口。

- 北段為三段中分散最廣者，有明顯西南分量（與海峽東北出口處夏季西南季風暴露相符），主導方向偏 N（~35° FROM），較其他兩段偏北。
- 中段為 NNE 區段最緊密集中者 — 最大單一扇區佔全年小時約 40% 以上，圓平均方向 ~22° FROM 沿水道軸線。
- 南段圓平均方向（~19° FROM）與中段相近，但整體量值較低，與南段海峽距東北季風源更遠、且對 NNE 入射風受澎湖部分遮蔽一致。

此方向結構與 §3.1 提出之海峽通道效應假說一致（中段平均較低但 p95 較高，反映其為方向集中、極端事件偶發之區段）。風向與浪向夾角表已於 §4.3 載入（ $\Delta\theta$  表）；更量化之方向穩定度指標（如主導扇區之變異佔比）需另行委任案處理，本範疇之外。

→ 詳見圖 3。

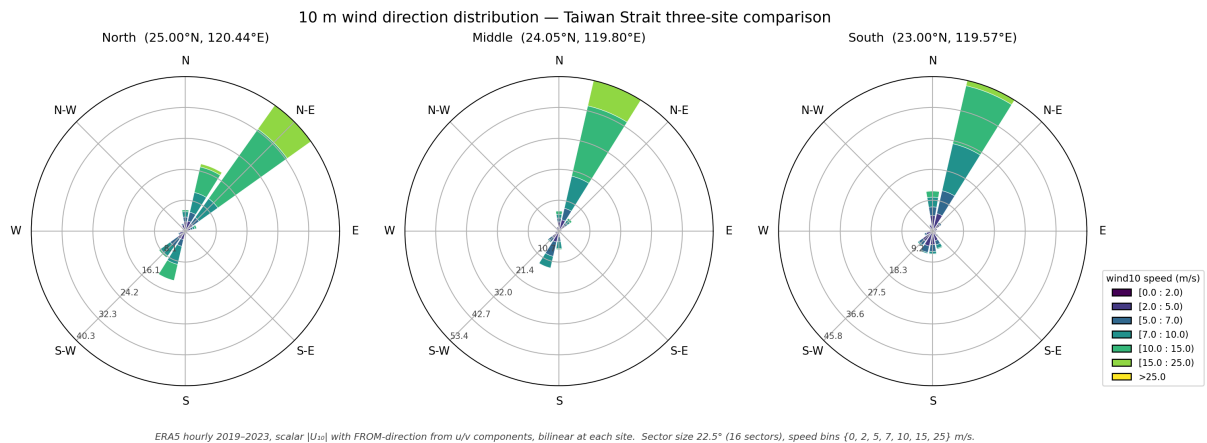


圖 3: 三場址 10 公尺風向風玫瑰圖—北段 (左, 25.00°N, 120.44°E)、中段 (中, 24.05°N, 119.80°E)、南段 (右, 23.00°N, 119.57°E)。ERA5 小時 2019–2023, 純量  $|U_{10}|$  配合由  $u/v$  分量計算之 FROM 風向, 各場址採雙線性內插。扇形大小 22.5° (共 16 扇區); 風速分箱為  $\{0, 2, 5, 7, 10, 15, 25\}$  m/s。

## 4. 氣候特徵—波

### 4.1 年統計量—三段比較

表 6: 三場址年波浪統計量—顯著波高  $H_s$  (WAVERYS VHMO) 與峰值週期  $T_p$  (WAVERYS VTPK), 3 小時資料以雙線性內插至各場址座標。各場址  $n = 14,608$  個 3 小時樣本, 涵蓋 2019–2023。

場址	n	$H_s$ 平均 (m)	$H_s$ p95 (m)	$H_s$ p99 (m)	$H_s$ 最大 (m)	$T_p$ 平均 (s)	$T_p$ p95 (s)
北段 (25.00°N, 120.44°E)	14,608	1.60	3.51	4.33	6.13	6.73	9.59
中段 (24.05°N, 119.80°E)	14,608	1.59	3.78	4.66	6.25	6.56	9.18
南段 (23.00°N, 119.57°E)	14,608	1.35	2.87	3.68	7.65	6.84	9.33

$H_s$  年平均於兩北段幾乎相同—北 (1.60)  $\approx$  中 (1.59) m—南段為 1.35 m (較北低約 16%)。於尾端北中排序反轉：中 (p99 4.66 m) > 北 (p99 4.33 m), 中段領先約 8%。此尾端排序反轉為 \$3.1 風 p95 亦見之海峽通道效應特徵：中段海峽通道效應處方向集中之風場驅動尾端較大之波浪, 儘管平均風速略低。較顯著之差距落在兩北段與南段之間, 南段於 p99 較北段低約 15%、p95 低約 18%。南段 5 年絕對最大  $H_s$  (7.65 m) 明顯高於北段 (6.13) 與中段 (6.25) —由時間戳對應歸因於 **DOKSURI 2023** 於 2023-07-27 18:00 UTC 通過南段 62 km 最近距離 (各場址事件清單詳 §6.1)。同步 WAVERYS 記錄之南段狀態為  $T_p = 11.8$  s、波 FROM 方向 159° (SSE); 此 SSE 方向與南海/巴士海峽於 **DOKSURI** 通過前後之長傳播路徑湧浪一致, 而非反映颱風相對於場址當下之即時位置。方法層級注意事項: WAVERYS 0.2° 於 23.00°N / 119.57°E 之雙線性內插模板涵蓋之格點可能部分重疊澎湖灘 (水深 ~20–40 m), 故 7.65 m 之極值可能部分受 0.2° 解析度未能完全解析之淺水增幅所形塑。

$T_p$  之場址依賴性與  $H_s$  不同。於平均，南 (6.84 s) > 北 (6.73 s) > 中 (6.56 s)；於 p95, 北 (9.59 s) > 南 (9.33 s) > 中 (9.18 s)。北段與南段兩端皆有相對較高之  $T_p$ ，與兩端場址之長週期湧浪暴露一致：北段位於海峽東北出口，開放於東海方向之湧浪傳播；南段位於澎湖以南，開放於海峽南端與南海邊界處之湧浪。中段位於海峽通道效應之中段，以局地生成之短風吹送風浪為主， $T_p$  分布較窄。直接釐清此點之方法為「分量  $T_p$ 」分析（分離風浪 VTM01\_WW 與湧浪 VTM01\_SW1）；詳見 §4.5 之各場址分量分解，呈現風浪 vs 湧浪能量分配與 SW1 來向玫瑰圖。

#### 4.2 季節循環 — 三段 $H_s$ 疊圖

$H_s$  季節循環（圖 4）顯示三段皆於 12 月達峰值（中 2.72 m、北 2.51 m、南 2.11 m 月平均），夏季最低值落於 6 月（中 0.74 m、南 0.85 m、北 0.95 m）。中段與北段於 10–3 月期間緊密相隨，中段於冬季最深月份較北段高約 0.2 m — 與 §4.1 之 p99 排序所示之海峽通道效應尾端特徵一致。南段於冬季持續低於前兩者（差距約 0.4 m），但於盛夏時節反而高於中段 — 南段 7–8 月為 1.02–1.18 m vs 中段 0.79–0.90 m，顯示南段於夏季受西南向湧浪暴露，而較被遮蔽之中段並無此暴露。專案作業期影響顯著：若程序偏向夏季，三段實質差異遠較年平均所示為小，且南段反而具最高夏季  $H_s$ 。

→ 詳見 圖 4。

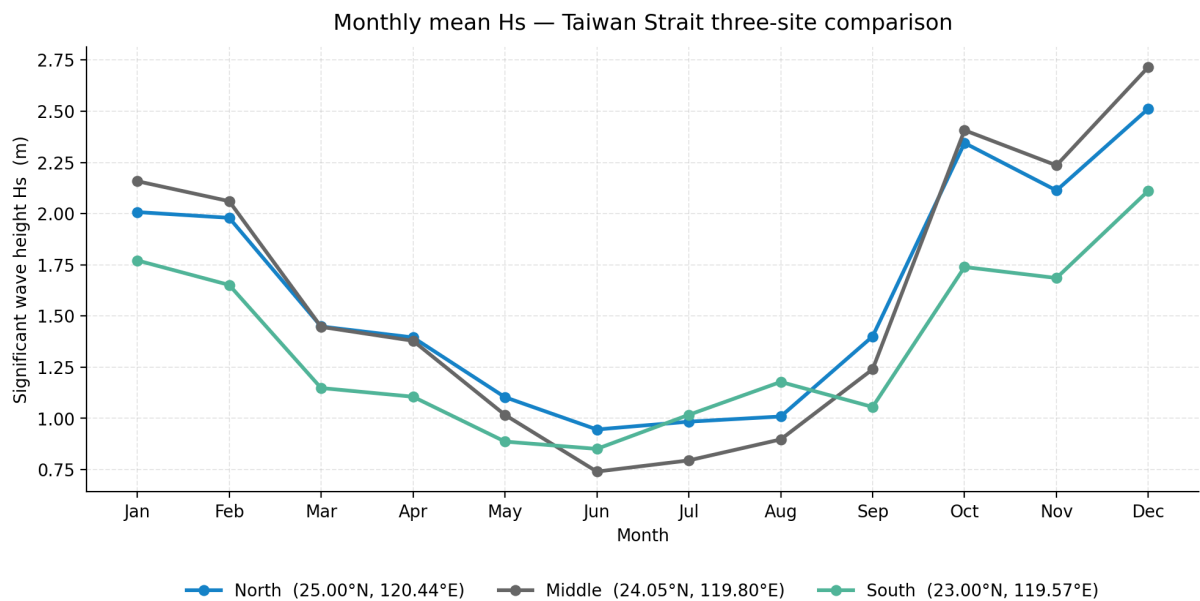


圖 4: 台灣海峽三段場址月平均  $H_s$  — 北段 (25.00°N, 120.44°E, 藍)、中段 (24.05°N, 119.80°E, 灰)、南段 (23.00°N, 119.57°E, 綠)。WAVERYS 多年再分析 3 小時 2019–2023，總  $H_s$  (VHMO) 於各場址採雙線性內插。冬季月平均峰值於中段約 2.7 m、北段約 2.5 m、南段約 2.1 m；夏季最低值約 0.7–1.0 m，南段於盛夏高於中段（西南季風湧浪暴露）。

#### 4.3 風波方向關係

R3 已建立之聯合風波對齊資料 (§2.3) 現使本輪可逐 3 小時樣本計算各場址之方向夾角  $\Delta\theta = \text{wave\_FROM} - \text{wind\_FROM}$ （於  $(-180^\circ, 180^\circ]$  內折回），再進行圓形平均。兩項量皆採用氣象學 FROM 慣例 (§2.4)，故  $\Delta\theta$  直接量化波場相對於外力風場之方向對齊程度。

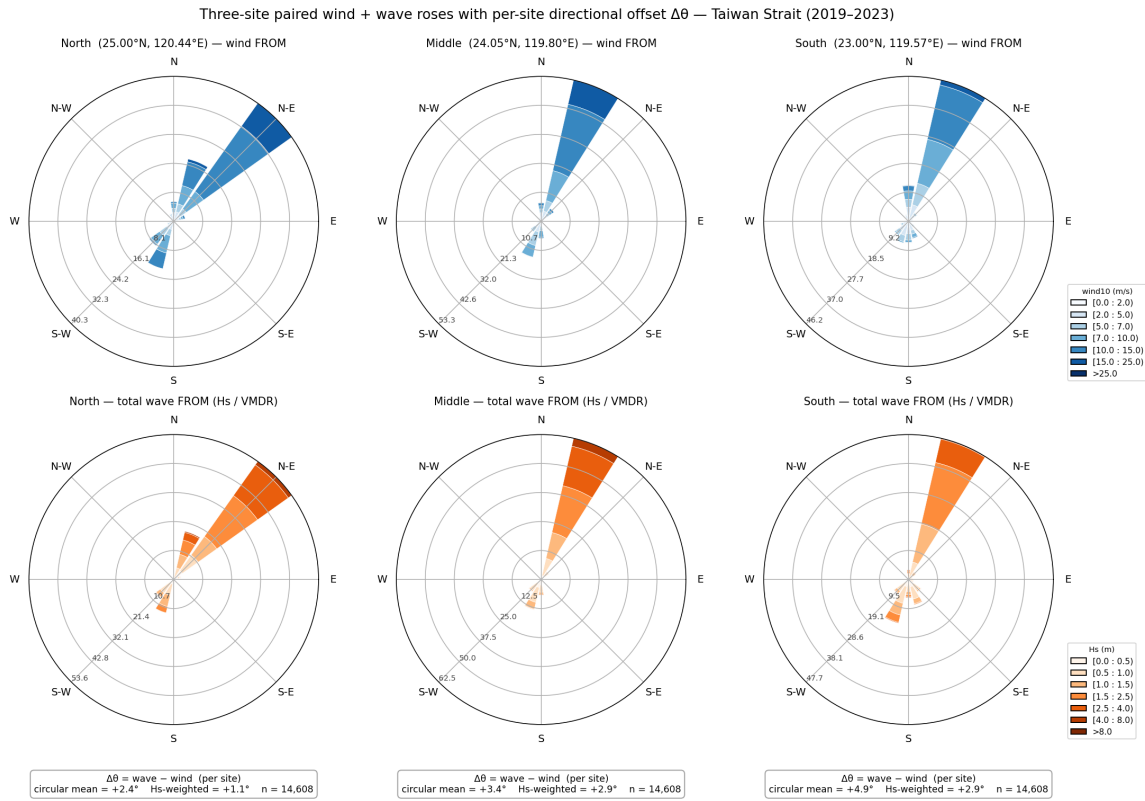
表 7: 各場址於 2019–2023 期間 3 小時樣本之  $\Delta\theta$  圓形平均。符號慣例：正值表示波 FROM 方向相對於風 FROM 方向順時針偏移。Hs 加權平均壓低低 Hs 湧浪情境之權重、強調紀錄中能量主導之部分。

場址	$\Delta\theta$ 圓形平均	$\Delta\theta$ Hs 加權平均
北段 (25.00°N, 120.44°E)	+2.4°	+1.1°
中段 (24.05°N, 119.80°E)	+3.4°	+2.9°
南段 (23.00°N, 119.57°E)	+4.9°	+2.9°

三個場址之總波場與外力風場呈現**緊密之方向對齊**： $\Delta\theta$  圓形平均介於 +2.4° 至 +4.9°，Hs 加權後更收斂為 +1.1° 至 +2.9°。 $\Delta\theta$  由北向南略微遞增之梯度落於本指標解析能力之邊界，較精簡之解讀為場址幾何、季節湧浪來源方向、樣本組成等多因素之共同結果，而非單一物理機制。

$\Delta\theta$  小並不代表場址無湧浪。它僅代表時間平均之波能方向與風向接近。事實上各場址  $\Delta\theta$  分布皆具長尾——北段 9.2%、中段 9.4%、南段 11.2% 之 3 小時樣本  $|\Delta\theta| > 90^\circ$ （近乎垂直或反向）；但此類樣本主要為**無風平靜時段**（平均 Hs 0.56–0.75 m、平均風 2.8–3.4 m/s），當下風場過弱無法對齊波場，殘留湧浪維持其原方向。Hs 加權正因此類時段 Hs 貢獻小而將其弱化，故未加權圓形平均（+2.4° 至 +4.9°）收斂為 Hs 加權之較小值（+1.1° 至 +2.9°）。於作業層級能量主導之部分，方向對齊故而緊密。於北段，東海湧浪由海峽東北出口進入時方向接近 NNE，與東北季風盛行風向接近，故同向湧浪即使具能量亦不會產生大幅  $\Delta\theta$ 。於南段，夏季西南季風湧浪事件（6–8 月低 Hs 月份）落入上述低 Hs 加權之同類情境，即使單一事件  $\Delta\theta$  較大，對 Hs 加權圓形平均之貢獻有限。總方向指標對於辨識**偏軸湧浪**有效，但不量測湧浪能量；§4.4 之長週期樣本比例，以及 §4.5 之分量平均週期診斷（分離風生波分量 VTM01\_WW 與湧浪分量 VTM01\_SW1）為能量方向資訊之載體——詳見 §4.5 各場址分量分解。客戶層級之分量感知可作業性框架（於可作業性等級定義中採用分量平均週期 VTM01\_SW1 取代單一總 Hs）需於後續委任案中執行。

→ 詳見 **圖 5** 雙玫瑰圖視覺化。



3-hourly joint wind-wave samples per site (n = 14,608 each). ERA5 hourly down-sampled to WAVEYS 3-hourly grid by direct timestamp alignment. Bilinear at each site; both directions in meteorological FROM convention.  $\Delta\theta \in [-180^\circ, 180^\circ]$ , computed per row then circularly averaged.

圖 5: 三場址成對風 + 波玫瑰圖，台灣海峽（2019–2023）。上排：ERA5 10 m 風 FROM，各場址。下排：WAVEYS 總波 FROM（VMDR、以 VHMO 加權），各場址。風速分箱 {0, 2, 5, 7, 10, 15, 25} m/s；Hs 分箱 {0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.5, 4.0, 8.0} m；16 方向扇區（22.5° 每扇）。各場址  $\Delta\theta$  統計（平均 + Hs 加權圓形平均）於各欄下方註記。三場址皆呈現 NNE 主導之風場與 NNE 主導之總波；方向對齊緊密（每場址  $\Delta\theta$  皆小）。

#### 4.4 Hs 與 Tp 聯合分布

各場址之顯著波高（Hs, VHMO）與峰值週期（Tp, VTPK）聯合 hexbin 密度圖，於 2019–2023 期間 14,608 個 3 小時樣本上評估。三個面板共用單一密度色標，並覆蓋逐 0.25 m Hs 帶之 Tp 中位數曲線；長週期湧浪區（ $T_p \geq 10$  s）以綠色帶狀標示。

表 8: 各場址 3 小時樣本中落於長週期湧浪區（ $T_p \geq 10$  s）之比例。北段居首；中段為三段最低；南段居間。

場址	長週期樣本比例（ $T_p \geq 10$ s）
北段 (25.00°N, 120.44°E)	3.5%
中段 (24.05°N, 119.80°E)	2.1%
南段 (23.00°N, 119.57°E)	2.9%

長週期比例排序為 北 > 南 > 中 — 與 §4.1 之  $T_p$  p95 排序一致（北 9.59 s > 南 9.33 s > 中 9.18 s），且與地理位置一致：- 北段位於海峽東北出口，暴露於東海湧浪傳播；- 南段位於澎湖以南，暴露於南

海與海峽南端邊界傳來之湧浪；- 中段位於海峽中央海峽通道效應主導區，為短取距風生波（就地產生）主導，長週期貢獻最小。

各場址之逐 Hs 帶 Tp 中位數曲線顯示：三場址於可作業相關 Hs 範圍 ( $\leq 2.5$  m) 內，各 Hs 帶 Tp 中位數未收斂至短取距風生波之週期極限——而是停留於 5–7 s 範圍。此一現象與背景湧浪持續存在、即使風生波較小仍能維持頻譜峰一致，亦與 §4.6 之 VTPK 混合海況切換行為一致（VTPK 為主導峰之週期，湧浪能量大於風生波時即取湧浪峰，與總 Hs 高低無關）。門檻說明：「 $T_p \geq 10$  s」為篩選用之經驗代理，非頻譜分波——於本緯度與取距下，東北季風強盛事件下完全發展之風生波 Tp 可達 9–11 s，故  $T_p \geq 10$  s 樣本比例為湧浪主導比例之上限，而非乾淨之湧浪 vs 風生波解構。§4.3 之方向分析發現各場址  $\Delta\theta$  皆小，結合本節 §4.4 發現可知：長週期湧浪（當其存在且能量主導時）來向與 NNE 風生波相近——為一個內嵌長週期結構之 NNE 總波場，而非偏軸湧浪訊號——但  $\Delta\theta$  小本身並不能排除 Hs 貢獻較低之其他湧浪來源方向（見 §4.3）。

→ 詳見 圖 6 各場址聯合分布圖。

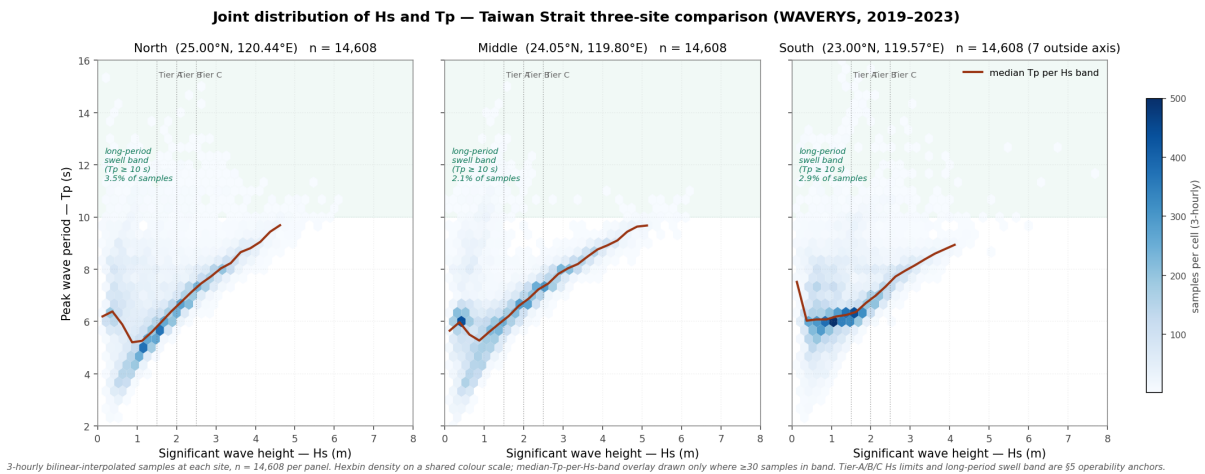


圖 6: Hs (VHMO) 與 Tp (VTPK) 聯合分布，台灣海峽三場址 (WAVERYs 2019–2023，每面板  $n = 14,608$ )。Hexbin 密度共用色標；橘線 = 逐 0.25 m Hs 帶 Tp 中位數（僅於帶內樣本  $\geq 30$  時繪製）。垂直點線：A/B/C 等級 Hs 可作業性門檻 (1.5 / 2.0 / 2.5 m)。各面板上方綠色帶：長週期湧浪區 ( $T_p \geq 10$  s)；各場址該區樣本比例於帶內註記。北段長週期湧浪比例最高 (3.5%)；中段最低 (2.1%)；南段居中 (2.9%)——與海峽東北出口 (北段)、中央風生波主導區 (中段)、澎湖以南湧浪暴露區 (南段) 之地理位置一致。

#### 4.5 頻譜分量分解——風生波 vs 湧浪

南段於設計負載層級並非「湧浪主導」——極值事件之負載仍預期由風生波驅動。本節之分量分解所揭示者為：南段於時間平均能量上有近一半來自南向湧浪，使週期敏感作業（吊裝、運動敏感船舶等）於南段較其他兩段對 Tp 變化更敏感；此一現象無法單從總 Hs 看出。

WAVERYs 提供各分量分波變數：風生波 (WW)、主要湧浪 (SW1)、次要湧浪 (SW2)。將總波場分解為各分量，提供 §4.3 總方向分析與 §4.4 長週期 ( $T_p \geq 10$  s) 比例皆無法呈現之湧浪跨段差異。

各場址波能分配（逐樣本 Hs<sup>2</sup> 各分量比例之年均，2019–2023）：

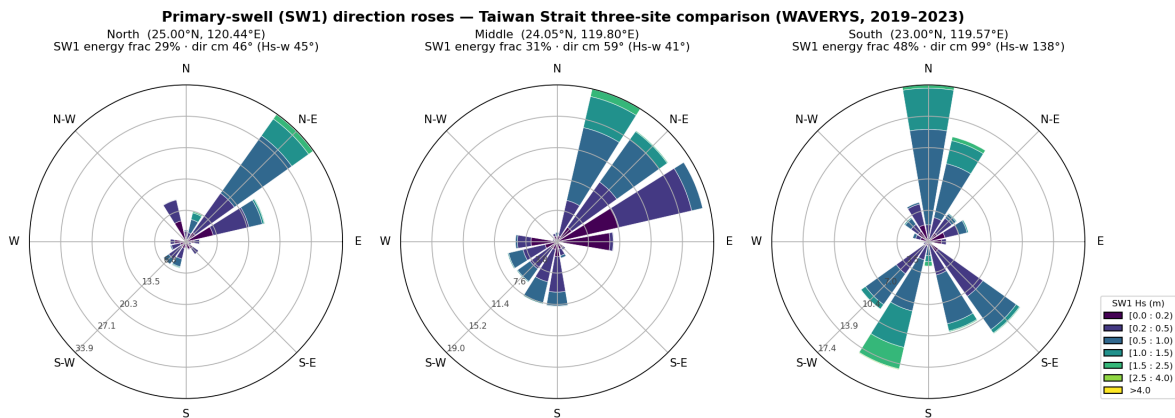
表 9: 各場址 WAVERYS 分波變數年統計 (VHMO\_WW / VHMO\_SW1 / VHMO\_SW2 + VMDR\_SW1 + VTM01\_SW1)。能量比例為逐樣本分量  $H_s^2 \div \text{總 } H_s^2$  之平均。三分量比例於各場址總和約 93% — 剩餘約 7% 為 §8.1 第 4 項所述之 WAM-family/WW3 頻譜分箱賦值行為 (非資料錯誤, 僅頻譜分波計算特性)。SW1 平均  $H_s$  與 Tm01 僅以 SW1 非零之樣本計算。

場址	風生波 (WW)	主要湧浪 (SW1)	次要湧浪 (SW2)	SW1 圓形平均方向	SW1 $H_s$ 加權平均方向	SW1 平均 $H_s$ (m)	SW1 平均 Tm01(s)
北段	58.3%	29.2%	6.4%	46°(NE)	45°(NE)	0.48	7.22
中段	54.1%	31.3%	7.8%	59°(NE)	41°(NE)	0.46	6.86
南段	35.0%	47.9%	10.3%	99°(E)	138°(SE)	0.67	6.60

核心差異發生於南段：主要湧浪分量 SW1 佔時間平均波能 47.9%，超過風生波分量 (35.0%)，使 SW1 為南段於 2019–2023 紀錄中之最大單一能量分量。北段與中段相對之下為風生波領先 (WW ~55%)、SW1 約 30%。南段之「湧浪領先」特徵描述 5 年時間平均之能量配比，於作業關鍵之冬季季風與颱風事件中，風生波分量仍預期主導即時  $H_s$  (詳下方「相互調和」段)，故此為湧浪特徵之訊號，並非陳述湧浪驅動南段之設計負載包絡線。

SW1 來向亦支持此一發現。北段與中段之 SW1 來向接近 NE (圓形平均 46° 與 59°； $H_s$  加權 45° 與 41°) — 與盛行 NNE 風向 (§3.3) 接近，故於 §4.3 之總波  $\Delta\theta$  指標下無法與風生波分離。南段之 SW1 圓形平均方向為 99° (E)， $H_s$  加權則為 138° (SE) — 與當地 NNE 風 (~19°) 實質偏軸。 $H_s$  加權之 SE 來向與湧浪自海峽南端與南海邊界進入南端海峽之物理機制一致，且正符合南段位於澎湖以南之地理位置所暗示之湧浪暴露格局。

→ 詳見 圖 7 各場址 SW1 來向玫瑰圖。



WAVERYS partition variables: VMDR\_SW1 (primary-swell FROM direction), VHMO\_SW1 (primary-swell Hs). 16 directional sectors (22.5° each); Hs bins {0, 0.25, 0.5, 1.0, 1.5, 2.5, 4.0} m. Energy fraction = mean per-sample VHMO\_SW1 / VHMO<sup>2</sup> over 2019-2023.

圖 7: 三場址 SW1 (主要湧浪) 來向玫瑰圖，WAVERYS 2019–2023。每面板呈現各場址分波 VHMO\_SW1 / VMDR\_SW1 之 16 方向扇區 (22.5° 每扇)、 $H_s$  分箱 {0, 0.25, 0.5, 1.0, 1.5, 2.5, 4.0} m 分布。面板標題列出 SW1 能量比例 (逐樣本  $VHMO\_SW1^2 / VHMO^2$  之平均) 與 SW1 方向圓形平均 (平均與  $H_s$  加權)。北段與中段皆呈 NE 集中之 SW1 (大致與當地 NNE 風向同向, §3.3)；南段呈現顯著較廣之方向分布，包含 S、SSE、SE、E 等扇區之實質貢獻 — 物理上與海峽南端開放南海邊界之湧浪暴露一致。

§4.3、§4.4 與 §4.5 之相互調和。讀者或會察覺 (a) §4.3 三場址  $H_s$  加權總波  $\Delta\theta$  皆小 ( $\leq +2.9^\circ$ )、(b)

§4.4 長週期  $T_p \geq 10$  s 樣本比例不大 (2.1–3.5%)、與 (c) §4.5 南段 SW1 為最大單一能量分量 (47.9%，超過 WW 之 35.0%) 三項結論之間似有張力。事實上三者一致。總波方向為所有波分量之能量加權平均，若風生波與 SW1 來向相近 (如北段與中段)，即使 SW1 攜帶 30% 能量，總方向仍緊鄰風向。於南段，SW1 攜帶 48% 能量，但其 Hs 加權平均方向為 SE ( $\sim 138^\circ$ )，與 NNE 風生波幾近垂直——然而能量最大之樣本仍為颱風與冬季季風事件，此時風生波與風驅湧浪共同產生 NNE 對齊波，該等事件主導 Hs 加權  $\Delta\theta$ ，儘管 SW1 湧浪為全紀錄之最大能量分量。§4.4 長週期 ( $T_p \geq 10$  s) 門檻則為峰值週期判斷 (VTPK)；南段 SW1 平均  $T_{m01} = 6.60$  s，多落於 10 s 峰值門檻以下。具湧浪感知之可作業性框架 (超出 Level 1 範疇，見 §8.4 第 15 項) 應直接採用分量能量與分量週期欄位，而非單純 VTPK。

## 4.6 波浪氣候資料注意事項

§4.1 與 §4.2 之 Hs 數值為總顯著波高 (WAVERY VHM0)。§4.1 之  $T_p$  為 WAVERY VTPK，即頻譜峰值週期。**對動態敏感作業之  $T_p$  指標注意事項**：於混合海況 (風湧浪能量相當共存——此一情境恰為 §4.5 所揭示之三場址常態，尤其南段)，VTPK 可於風浪峰與湧浪峰之間切換，而總 Hs 幾乎不變——故 VTPK 單獨可能錯誤表示船舶實際反應之週期。對動態敏感作業 (吊裝包絡、CTV 接駁、浮式資產反應) 而言，較乾淨之描述子為分量平均週期 (如 §4.5 之  $V_{TM01\_SW1}$ )，或運動相關之  $T_e / T_{m-1,0}$  積分週期。VTPK 在此用作標準快速頻譜描述子；分量變數已存於各場址 Parquet 中，並已於 §4.5 使用。

§2.5 颱風時段注意事項提醒：三個場址颱風通過期間之峰值 Hs 值，因 ERA5 對小尺度強烈 TC 風場已知低估，應視為**參考性質而非設計級**。

## 5. 可作業性

### 5.1 聯合框架可作業性——三段比較

「可作業性 (operability；符合風速與波高門檻、可從事施工 / 作業之時間比例)」於各場址 2019–2023 年 3 小時聯合風波樣本 (每場址  $n = 14,608$ ) 中，**同時**滿足 Hs 與 wind10 門檻之年比例，以三個示範性離岸風電作業等級呈現。

表 10: 各場址年可作業比例及等值年可作業日數 ( $\approx 365$  d/yr  $\times$  pct)。南段於三個等級皆領先。北段與中段排序在穩健型等級反轉：A 與 B 等級下中段略勝北段；C 等級下北段反超中段——反映中段海峽中央海峽通道效應下風場推升波浪超過 2.5 m 之頻率高於海峽北端出口。B 等級 ( $H_s \leq 2$  m,  $wind10 \leq 12$  m/s) 為本報告採用之離岸風電標準型作業門檻；南段約 12 個百分點之領先 (每年多約 48 個標準作業日) 即為可作業性核心發現。

等級	Hs 門檻	wind10 門檻	北段% (可作業日數 / 年)	中段% (可作業日數 / 年)	南段% (可作業日數 / 年)
A — 敏感型作業	$\leq 1.5$ m	$\leq 10$ m/s	50.1%(183)	55.8%(204)	<b>63.9%(233)</b>
B — 標準型作業	$\leq 2.0$ m	$\leq 12$ m/s	67.2%(245)	67.9%(248)	<b>80.3%(293)</b>
C — 穩健型作業	$\leq 2.5$ m	$\leq 15$ m/s	81.0%(296)	78.7%(287)	<b>90.5%(331)</b>

## 5.2 持續度連續長度分布

下方百分位數係**個別連續時段之持續度** (每個 3 小時樣本連續段 = 一個事件, 事件持續時數為一個資料點;  $p90$  = 所有事件持續度之 90 百分位)。§5.1 之可作業百分比隱藏時間結構 — 56% 之可作業比例若分散為許多短窗, 其作業意義遠不如同樣比例以長期段交付。於 B 等級 (標準型作業,  $H_s \leq 2 \text{ m}$  AND  $wind10 \leq 12 \text{ m/s}$ ) 下:

表 11: B 等級下各場址 2019–2023 年可作業時段與不可作業時段連續長度統計 ( $H_s \leq 2 \text{ m}$  AND  $wind10 \leq 12 \text{ m/s}$ , 3 小時樣本)。「不可作業時段」係指海況超過操作門檻、無法執行海事作業 (CTV 接駁、吊裝、維護等) 之連續時段, **非指風機本身停轉**。所有數值單位皆為小時;  $n$  為相異連續時段之計數。

場址	可作業時段 (n、中位數 h、 $p90$ h、最大 h)	不可作業時段 (n、中位數 h、 $p90$ h、最大 h)
北段	349, 36, 197, 1,119	350, 21, 90, 558
中段	287, 36, 204, <b>2,535</b>	288, 27, 106, 531
南段	310, <b>39, 298</b> , 1,206	311, <b>15, 63</b> , 291

南段除「單一最長可作業時段」一項外, 於各持續度統計皆居首。南段不可作業事件中位數為 **~15 小時** (約 5 個連續 3 小時樣本), 北段為 21 h、中段為 27 h — 即南段之**典型一場 bad-weather** 通常於一個工作日內即可結束。南段不可作業事件持續度  $p90$  為 **63 小時**, 北段 90 h、中段 106 h — 即南段 90% 之不可作業事件可於 63 h 內結束, 較中、北段同一指標短 30–40%。中段持有事件清單中最長之單次不中斷可作業時段 (2,535 小時, ~106 天, 2022 年中之異常平靜期), 但屬離群值; 中位數與  $p90$  之比較仍以南段為佳。

→ 詳見 圖 8 各等級之存活曲線。

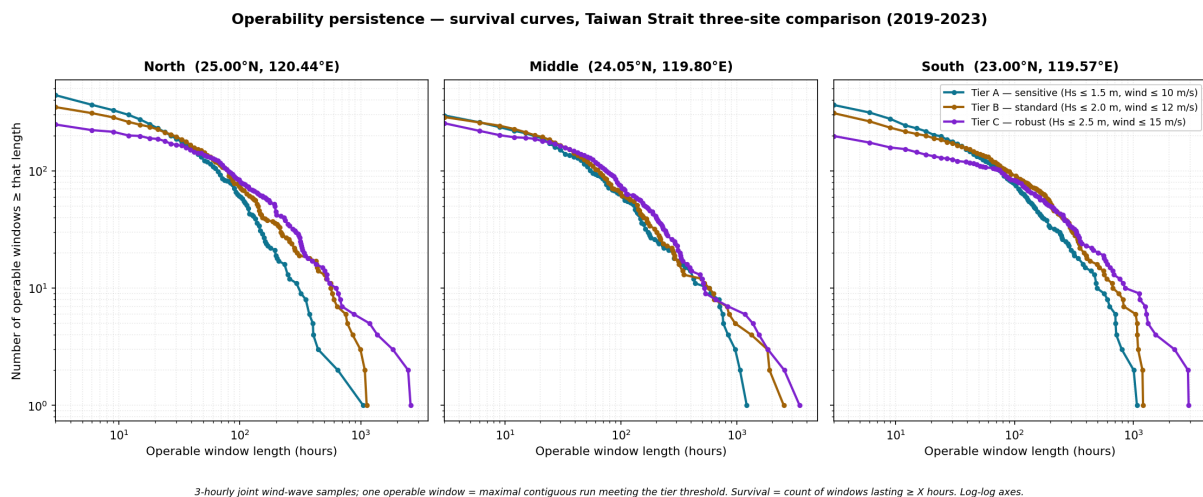


圖 8: 可作業性持續度 — 三段台灣海峽場址之存活曲線 (2019–2023)。每場址一個子圖, 內含三條等級曲線: A 等級 (敏感型, 藍綠色)、B 等級 (標準型, 橙褐色)、C 等級 (穩健型, 紫色)。雙對數軸; 一個可作業窗 = 滿足等級門檻之最大連續 3 小時樣本段。南段曲線於上端位置一致地較北段與中段右移 (更多長持續可作業窗); 中段於三等級皆呈現最長之單一事件尾部 (可見之最右側平台)。

## 6. 跨段差異性分析

### 6.1 颱風暴露 — 三場址事件清單

IBTrACS v4r01 颱風軌跡資料篩選為：於 2019–2023 期間軌跡通過任一場址 200 km 以內、且生命週期峰值強度  $\geq$  熱帶風暴 (34 kt) 之系統。距離度量採用 haversine 大圓距離。提取流程直接讀取完整 IBTrACS 檔案 (無空間預篩選)，於颱風層面套用流域 (西太平洋，依首筆軌跡點判斷)、季節、生命週期峰值、200 km 等篩選；此一方法避免北、南兩段 200 km 篩選圓於空間範圍預篩選下之涵蓋缺口。Saffir-Simpson 等級採 JTWC 1 分鐘持續風速基準 (IBTrACS usa\_wind 欄位 — 為 SS 等級之標準 1 分鐘基準)，而非 WMO 10 分鐘基準。目錄涵蓋邊界詳 §8.2 第 8 項。

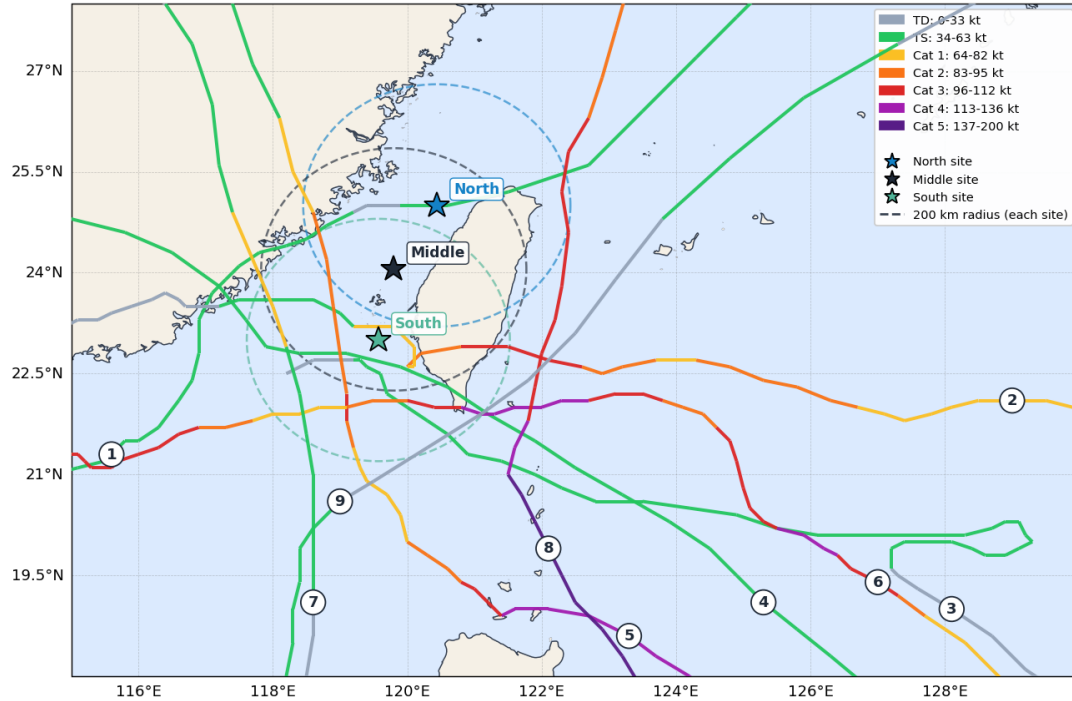
表 12: 三場址颱風暴露目錄。三場址聯集共 9 個相異颱風：LUPIT 2021 與 DOKSURI 2023 觸及三段；HAIKUI 2023、ATSANI 2020、BAILU 2019、MEKKHALA 2020 觸及中段與南段；CHANTHU 2021 (生命週期峰值 Cat 5) 僅觸及北段；CHOI-WAN 2021 與 KOINU 2023 (Cat 4 峰值，100 km 最近通過) 僅觸及南段。

場址	2019–2023 颱風數	年率 (per yr)	最近通過中位數 (km)	最近通過最小值 (km)	峰值風速中位數 (kt)	峰值風速最大值 (kt)
北段	3	0.6	186	16	130	155
中段	6	1.2	131	95	65	130
南段	8	1.6	81	23	65	130

北段為三場址中**颱風暴露頻率最低者** (0.6 颱風/年，中段 1.2、南段 1.6 — 約為中、南段海峽中央與南端比例之一半)；此於物理上合理 — 台灣本島為來自東南方向之西太平洋颱風路徑提供地形障礙，而於西太平洋上發生轉向之颱風則沿台灣以東路徑進入東海、不行經海峽北端。當颱風確實逼近北段時 (LUPIT 2021，最近通過 16 km)，其逼近距離與強度可極為突出 — 北段亦為本目錄中唯一之 Cat 5 颱風 (CHANTHU 2021, 生命週期峰值 155 kt；颱風於北段最近通過 (189 km) 當下之強度應低於生命週期峰值，因該時系統可能已減弱或距峰值遙遠 — §6.2 表 11 之 SS 等級分布皆指生命週期峰值，除非另行註明) 所在。低暴露頻率不蘊含低單一事件負載。中段擁有**本 5 年目錄中最近通過距離最遠 (95 km)**：於 2019–2023 期間無任何颱風通過中段 95 km 範圍以內。此「最小值之最小值」比較對樣本數敏感 — 中段最小值取自六個事件、北段三個、南段八個 — 不應解讀為穩定之幾何「屏蔽」結論。南段為三場址中**颱風暴露頻率最高者** (1.6 颱風/年)，且最近通過中位數最近 (81 km)，目錄中最近之 HAIKUI 2023 (23 km) 亦發生於南段；KOINU 2023 (Cat 4 生命週期峰值 120 kt) 通過南段 100 km 以內，進一步證實海峽南端較強之颱風暴露。

→ 詳見 **圖 9** 區域軌跡圖。

**Typhoon tracks within 200 km of any study site — Taiwan Strait three-site comparison (IBTrACS, 2019–2023)**



**STORM INDEX (number on map = the storm's track entry point into the map) · N/M/S = within 200 km of that site:**

- |  |  |
|--|--|
| 1. LUPIT 2021 · peak 45 kt · touches: N/M/S    | 6. KOINU 2023 · peak 120 kt · touches: S     |
| 2. HAIKUI 2023 · peak 105 kt · touches: M/S    | 7. MEKKHALA 2020 · peak 70 kt · touches: M/S |
| 3. ATSANI 2020 · peak 50 kt · touches: M/S     | 8. CHANTHU 2021 · peak 155 kt · touches: N   |
| 4. BAILU 2019 · peak 60 kt · touches: M/S      | 9. CHOI-WAN 2021 · peak 45 kt · touches: S   |
| 5. DOKSURI 2023 · peak 130 kt · touches: N/M/S |  |

Track colour = 1-min sustained wind (kt), Saffir-Simpson-style. Filter: lifetime peak  $\geq$  TS (34 kt) AND  $\geq$  1 track point within 200 km of any site. 9 storms in 2019-2023. Coastlines: Natural Earth. IBTrACS v4r01.

圖 9: 三個研究場址之任一 200 km 內之颱風軌跡 (IBTrACS v4r01, 2019–2023, 篩選條件: 生命週期峰值強度達到  $\geq$  TS 34 kt 之颱風)。圖示九個相異颱風; 軌跡顏色 = 1 分鐘持續風速 (kt), 薩菲爾-辛普森 (Saffir-Simpson) 風格分級, 依各別軌跡點當下之強度上色 — 故符合條件之颱風之強化前路段會以 TD 色帶 (0–33 kt) 呈現, 但所有顯示軌跡之颱風皆滿足生命週期峰值篩選。三場址以星形標示 (北段藍、中段深灰、南段綠), 搭配與各場址相同顏色之 200 km 虛線篩選圓。編號標記直接放置於每條軌跡進入地圖之第一個點上, 用以對應底部颱風索引列出之名稱 + 年份 + 峰值強度 + 該颱風觸及之場址 (N/M/S)。海岸線來自 Natural Earth。

## 6.2 關鍵參數差異性彙整

§3–§5 結果與 §6.1 目錄彙整於下列單一排名表。跨段差距% =  $(\max - \min) / \text{中位數} \times 100$ , 為三場址於各參數差異程度之量級代理。目標方向標示「最佳」之方向 ( $\max$  = 越大越佳, 例如風能資源;  $\min$  = 越小越佳, 例如極值負載)。各列粗體 = 該參數用途下排名第一。

表 13: 跨段關鍵參數差異性彙整，依各參數用途排序。粗體 = 該參數用途下排名第一。wind p95 與 wind p99 之 Intent 方向相反，因其對應不同決策面向：p95 代表運轉面之上端尾段（越多時間接近或高於額定風速，代表額定功率附近或以上風速區間的出現程度較高；max 較佳），而 p99 代表高風條件下的結構負載暴露（min = 較輕負載）。容量因子本身取決於完整風速分布與風機功率曲線，並非由上端尾段單獨決定。「B 等級可作業時段最大值」（中段 2,535 h、北段 1,119 h、南段 1,206 h）刻意排除於本表 — 其跨段差距% 受中段單一 2022 年中離群事件驅動，非與中位數類指標直接可比；該統計於 §5.2 表單獨呈現。颱風「最近通過最小值」之跨段差距% 顯著偏高，因其於不同樣本數下比較最小值（北段 N=3 vs 中段 N=6 vs 南段 N=8）— 應解讀為目錄期內之相對序、而非氣候學長期序。

參數	單位	目標方向			跨段差距%	最佳場址	
		北段	中段	南段			
年平均 wind10	m/s	max	<b>8.91</b>	8.42	6.77	25.4	<b>N</b>
wind10 p95	m/s	max	15.82	<b>16.19</b>	13.64	16.2	<b>M</b>
wind10 p99	m/s	min	17.52	18.24	<b>15.74</b>	14.1	<b>S</b>
wind10 五年絕對最大值	m/s	min	<b>23.79</b>	24.09	25.56	7.3	<b>N</b>
年平均 Hs	m	min	1.60	1.59	<b>1.35</b>	15.9	<b>S</b>
Hs p99	m	min	4.33	4.66	<b>3.68</b>	22.7	<b>S</b>
Hs 五年絕對最大值	m	min	<b>6.13</b>	6.25	7.65	24.3	<b>N</b>
A 等級可作業性	%	max	50.1	55.8	<b>63.9</b>	24.7	<b>S</b>
B 等級可作業性	%	max	67.2	67.9	<b>80.3</b>	19.3	<b>S</b>
C 等級可作業性	%	max	81.0	78.7	<b>90.5</b>	14.6	<b>S</b>
B 等級可作業時段中位數	h	max	36	36	<b>39</b>	8.3	<b>S</b>
B 等級不可作業事件持續度 p90	h	min	90	106	<b>63</b>	47.7	<b>S</b>
颱風暴露頻率	/yr	min	<b>0.6</b>	1.2	1.6	83.3	<b>N</b>
颱風最近通過最小值	km	max	16	<b>95</b>	23	335.6	<b>M</b>

### 6.3 場址篩選綜合判讀

三場址無「總體最佳」者：北段風最強、本期內颱風次數最少；南段最平靜、可作業時間最長、但颱風次數最多；中段於大部分軸向居中、惟 p99 Hs 因海峽通道效應為三段中最大。哪個場址最適合，取決於專案最在意哪一軸 — 正確讀法是跨段取捨思維，而非單一參數排名。

無任一場址於所有軸向同時佔優。單一參數排名於篩選層級具誤導性 — 整體呈現為三向結構化取捨。

- 北段於平均風能資源（8.91 m/s，較中段高約 5%、較南段高約 32%）與颱風暴露頻率（~0.6 颱風/年，約為中段 1.2 之一半、南段 1.6 之 40%）兩項居首。亦於兩個 5 年絕對最大值同列居首：Hs max（6.13 m，僅微低於中段 6.25 m）與 wind10 max（23.79 m/s，較中段低約 0.3 m/s、較南段低約 1.8 m/s）— 惟絕對最大值排序屬單一事件統計，具高不確定性（§8.2 第 10 項）。取捨：北段於敏感型與標準型等級之可作業比例為三段中最低，且 5 年窗內近 Cat 4 或以上

之兩個颱風（LUPIT 2021 16 km、CHANTHU 2021 189 km 峰值 155 kt—本目錄中唯一 Cat 5）顯示低暴露頻率不蘊含低單一事件負載。北段為「**風能資源型場址**」。

- **中段**承載最大  $p95/p99$  風尾段與海峽通道效應  $H_s$  尾段特徵（ $p99 H_s$  最高，4.66 m）。中段擁有事件清單中最長之單次 B 等級可作業時段（2,535 小時，2022 年中之離群事件），且於本 5 年事件清單中最近通過最小值最大（95 km）—於 2019–2023 期間無任何颱風通過中段 95 km 範圍以內（此指標對樣本數敏感：中段取自六個事件、北段三個、南段八個）。取捨： $p99 H_s$  最高，且颱風年率為第二高，構成本段之主導負載特徵；最近通過最小值之距離緩衝為軟性指標，而非穩定之幾何屏蔽。
- **南段**於可作業性軸向全面領先：三個可作業等級皆居首、可作業時段中位數居首、不可作業事件持續度居首（不可作業中位數 15 h；事件持續度  $p90$  63 h，較北段 90 h 縮短約 30%、較中段 106 h 縮短約 40%）。南段亦為年平均  $H_s$  最低者（1.35 m）。取捨：南段於時間平均能量層級為湧浪領先場址（SW1 分量佔時間平均波能 47.9%、超過風生波 35.0%；§4.5）， $H_s$  加權湧浪來向 138°（SE）—與當地 NNE 風實質偏軸，使動態敏感作業之週期敏感度高於  $H_s$  量值本身所呈現之程度（極值事件之設計負載仍預期由風生波主導，詳 §4.5「相互調和」段）。 $H_s$  五年絕對最大值最高（7.65 m，歸因於 DOKSURI 2023 於 2023-07-27 以 62 km 最近通過—詳 §4.1；§4.6 已說明 WAVERYS 0.2° 模板於南段可能部分重疊澎湖灘底床地形—淺水增幅理論上可能存在，但本解析度未能直接解析，故本處不作主動歸因），且**颱風年率最高（1.6 次/年）**；颱風進入海峽南端時逼近距離較中段為近（中位數 81 km vs 中段 131 km），其中 KOINU 2023（Cat 4，100 km 最近通過）為南段第二近之 Cat-4 等級以上事件。

**篩選層級意涵。**僅依平均風能產出之開發決策選擇北段；僅依標準型可作業比例之決策選擇南段；僅依颱風暴露頻率之決策亦選擇北段；僅依 2019–2023 樣本中之最近通過距離緩衝之決策選擇中段。單一參數排名結論相互不一致，而此正為跨段差異性檢視於篩選層級之價值所在：其使得取捨顯化而非埋藏於單一數值。以上各項皆非正式設計負載包絡線—後者須有逐事件 TC 歸因與極值分析，本範疇之外。下一層級之精化（逐事件熱帶氣旋歸因；分波分量  $T_p$  之湧浪 vs 風生波解構；南段逐場址底床地形敏感性；設計負載之正式極值分析）均屬本書面研究階段範疇之外，需另行委任案進行專門資料蒐集與分析。

## 7. 與公開觀測資料的交叉驗證

本節之目的，在於確認 §3–§6 所用之 WAVERYS 數值是否整體合理。作法為與獨立之 10 年氣候資料（CWA WW3）以及兩處 CWA 浮標近 30 天紀錄做交叉檢核。結論為：**季節型態可靠**；絕對量級與極值則不在此一檢核之保證範圍內—該層級之驗證需採用場址處之現場浮標資料配合正式極值分析，屬本書面研究階段範疇之外。

本節為**一致性檢核（consistency check）**，**非正式模式驗證（model validation）**或**偏差校正（bias correction）**。將 §3–§6 採用之 WAVERYS 多年再分析  $H_s$ ，與兩項中央氣象署（CWA）開放授權資料來源比對：§7.1 為與 CWA WW3 十年波浪後推資料於三場址之模式對模式季節循環一致性檢核；§7.2 為三場址最近 CWA 波浪浮標兩處之模式對觀測比對。兩項檢查均維持「**支援 / 一致**」之語氣紀律，而非「**驗證 / 正確表徵**」—因（a）比對涉及非重疊時間窗與不同模式變體，（b）場址歷史浮標資料非 CWA OpenData 免費階層之範疇（範圍詳 §8.3 第 12 項），以及（c）正式驗證須對研究場址處之現場儀器進行逐事件偏差校正比對，需另行委任案進行。

## 7.1 季節循環一致性 — CWA WW3 10 年 vs WAVERYS 5 年三場址

CWA C-B0086-001 台灣海域波候統計（2008–2017 月平均 / 中位數 / 最大 Hs，0.25° 網格，CWB 以 WaveWatch III 模擬）以雙線性內插至各研究場址座標，再與 §4 取得之 WAVERYS 2019–2023 場址月聚合比較。兩個獨立波浪後推資料（hindcast）（模式碼 WW3 vs MFWAM、外力 CWB 內部 vs ERA5、十年窗不同）— 季節循環之高度相關（Pearson  $r \geq 0.97$  於北、中段； $r = 0.77$  於南段）為 WAVERYS 再分析能於三場址重現台灣海峽波浪季節型態之方法層級證據，但不延伸支援絕對量級之驗證（兩產品間存在 ~0.25 m 系統性 bias，非可忽略），亦不構成極值驗證。

表 14: CWA WW3 10 年（2008–2017）與 WAVERYS 5 年（2019–2023）各場址月 Hs 交叉檢核。bias 與 RMSE 以對應月計算（W - C）；Pearson r 以 12 月季節循環計算。最大 Hs 比對不於本表呈現，因非重疊時間窗下單一事件極值本質性高噪聲。

場址	統計量	bias(W - C,m)	RMSE(m)	Pearson r (12 月週期)
北段 (25.00°N, 120.44°E)	平均 Hs	+0.24	0.27	<b>0.981</b>
北段	中位數 Hs	+0.23	0.26	0.968
中段 (24.05°N, 119.80°E)	平均 Hs	+0.25	0.32	<b>0.970</b>
中段	中位數 Hs	+0.21	0.27	0.964
南段 (23.00°N, 119.57°E)	平均 Hs	+0.29	0.40	<b>0.771</b>
南段	中位數 Hs	+0.29	0.40	0.902

三場址平均與中位數 Hs 之季節循環一致皆強。平均 Hs  $r = 0.98$ （北）/  $0.97$ （中）/  $0.77$ （南）：海峽南北端兩場址（北端東北出口、南端澎湖以南）以及中央海峽，於兩個後報中均重現同一以東北季風主導（10–3 月）、夏季西南季風為極小（6–8 月）之季節循環。南段  $r = 0.77$  較北、中段  $r \approx 0.97-0.98$  為低，但仍顯示強相關之季節循環；此差距與南段較大之夏季西南季風湧浪貢獻（詳 §4.5 分量分解）、對 2008–2017（CWA）與 2019–2023（WAVERYS）兩窗間之西南季風年際變動較敏感一致。

WAVERYS 於三場址皆系統性高於 CWA WW3 10 年氣候值（bias +0.24 至 +0.29 m）。兩個非排他性解釋：（a）2019–2023 之東北季風強度相對於 2008–2017 異常偏強（各場址表之 10–12 月冬季 Hs 貢獻最大 bias 部分）；（b）WAVERYS / MFWAM 對中強度風生波範疇有已知溫和正偏（Stopa 2018，以衛星測高 SWH 比對多個波浪後報之研究；Copernicus Marine Service WAVERYS QUID for GLOBAL\_MULTIYEAR\_WAV\_001\_032）。三場址 bias 量級一致（±0.03 m），支持方法層級之解讀：此為模式族 / 時間窗差異而非場址特定問題。

→ 詳見 圖 10 各場址月平均 Hs 比較。

WAVERYS 5-yr (2019-2023) vs CWA WW3 10-yr (2008-2017) — monthly mean Hs at three Taiwan Strait sites

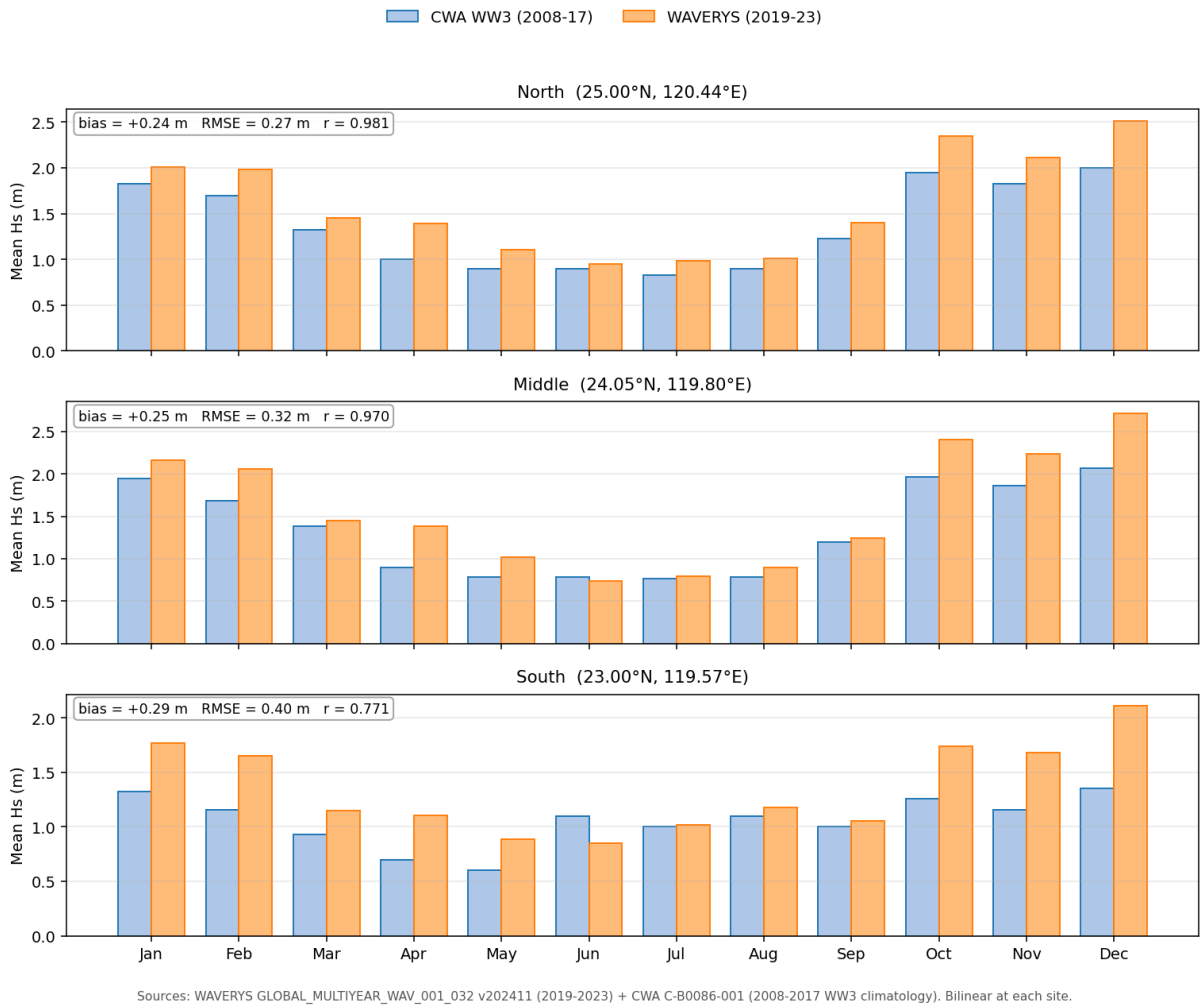


圖 10: 各場址月平均 Hs 交叉檢核：WAVERYS 多年再分析 (2019–2023, 橙) vs CWA WW3 氣候值 (2008–2017, 藍)，雙線性內插至各研究場址。上：北段 (25.00°N, 120.44°E)；中：中段 (24.05°N, 119.80°E)；下：南段 (23.00°N, 119.57°E)。各面板統計框：bias、RMSE、Pearson r 於 12 月季節循環。WAVERYS 於三場址皆系統性高於 CWA WW3 (~0.25 m bias)，北、中段季節循環 Pearson r ≥ 0.97，南段 r = 0.77。

## 7.2 CWA 浮標 / WAVERYS-NRT 於最近浮標之交叉檢核

**時間窗注意：**下方 §7.2 統計量取自 2026-04-06 → 2026-05-06 之 30 天滾動窗 (0-B0075-002 免費階層 — 唯一無 申購 之階層)。此窗落於**春季過渡期** (東北季風峰後、西南季風尚未建立)，Hs 分布以低至中等值為主，故下方 bias / RMSE / r 反映之為 WAVERYS-family 於該情境下之能力，**並非**驅動 §3–§6 氣候尾部之東北季風冬季情境。後續以不同 30 天窗重跑將產生不同浮標統計值；此點已記於 §8.3 第 12d 項。

於此 30 天窗內，具 ≥ 80% 波浪覆蓋率之 CWA 波浪浮標有兩處：

表 15: CWA 浮標 vs WAVERYS 分析預報 (cmems\_mod\_glo\_wav\_anfc\_0.083deg\_PT3H-i,3 小時、0.083°) 於兩處 30 天覆蓋足夠之浮標之交叉檢核。新竹浮標於 WAVERYS 萃取落於沿岸陸地 / 淺水 mask；改取最近有效海洋格點 (24.75, 120.75) — 距浮標位置 9.7 km 偏移。七美以雙線性直接於浮標座標內插。

浮標	站號	座標	n (3 小時對齊)	bias(W - C,m)	RMSE(m)	Pearson r
新竹	46757B	24.76°N, 120.84°E	229	-0.01	0.25	0.847
七美	C6W10	23.19°N, 119.65°E	226	+0.05	0.23	0.883

各研究場址之最近 CWA 波浪浮標：

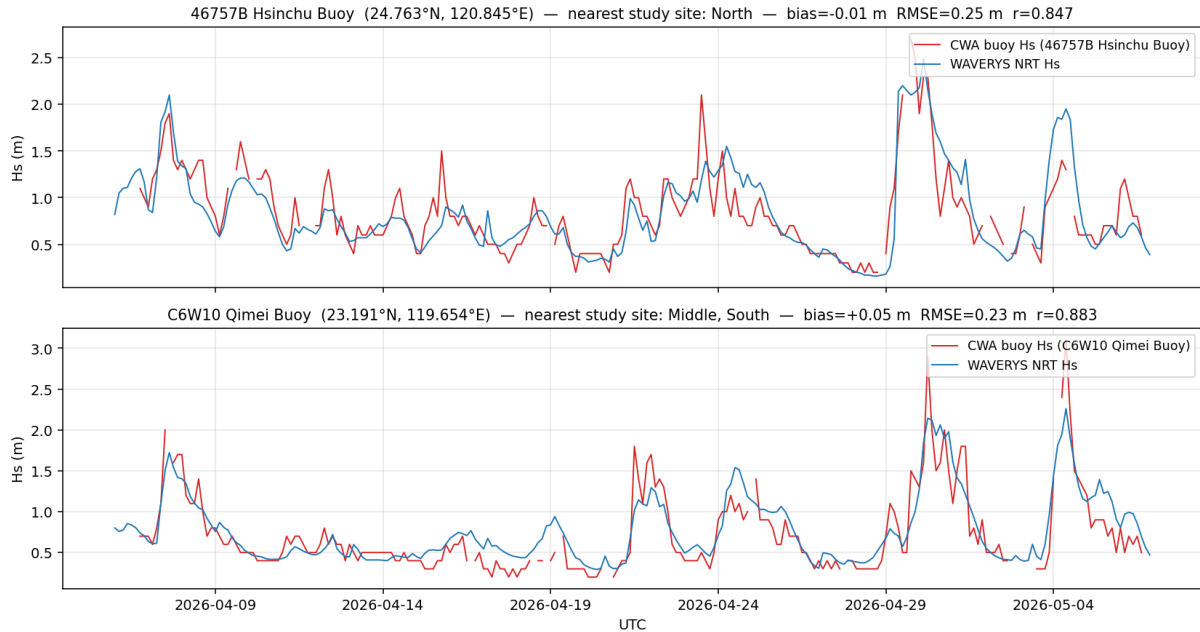
表 16: 各場址至兩處 CWA 波浪浮標之直線距離。南段距七美 ~22 km — 本報告所載最接近之現場觀測檢查。北段距新竹 ~36 km — 亦為可用之現場觀測檢查。中段最近 CWA 波浪浮標距離 ~96 km — §7.2 最近浮標結果為中央海峽 WAVERYS 可靠性之支援性參考，並非場址直接量測，其強度視七美 96 km 距離與澎湖群島之遮蔽程度而定 (§8.3 第 12 項)。

場址	最近 CWA 波浪浮標	距離	次近	距離
北段	新竹 46757B	~36 km	七美	~221 km
中段	七美 C6W10	~96 km	新竹	~132 km
南段	七美 C6W10	~22 km	新竹	~219 km

兩處浮標於 30 天窗內與 WAVERYS-NRT Hs 緊密一致：新竹 RMSE 0.25 m、bias 近零 (統計量取自 WAVERYS 離岸萃取點 (24.75°N, 120.75°E)，距浮標 9.7 km 西側 — 詳表 caption)；七美 RMSE 0.23 m、bias +0.05 m (直接於浮標座標讀取)。Pearson r 於 3 小時對齊網格為 0.85–0.88，代表兩處浮標於 30 天窗內良好追蹤同步 Hs 變動之時間結構；此一結果支援模式族於季節背景下之變動性，不延伸至絕對量級驗證或極值驗證。注意事項：§7.2 所用 WAVERYS 分析預報變體與 §3–§6 所用多年再分析變體於同化與外力時間窗不同，故 §7.2 浮標 / 模式一致度反映的是 WAVERYS / MFWAM 整體模式系列之合理性，並非浮標處 reanalysis 變體之 bias 數值。§7.1 氣候比對使用 §3–§6 之同一再分析，屬較直接之再分析證據線。

→ 詳見 圖 11 兩浮標 30 天 Hs 追蹤時間序列。

CWA buoy vs WAWERYS NRT Hs — 30-d window, with nearest study site flagged per panel



Source: CWA O-B0075-002 (free, rolling 30 d) + CMEMS WAWERYS analysis-forecast ('cmems\_mod\_glo\_wav\_anfc\_0.083deg\_PT3H-i', 0.083° 3-hourly). Period 2026-04-06 → 2026-05-06.

圖 11: CWA 浮標 Hs vs WAWERYS 分析預報 Hs, 30 天窗 2026-04-06 → 2026-05-06, 3 小時對齊。上：新竹 46757B (北段最近 CWA 波浪浮標, ~36 km 離岸)。下：七美 C6W10 (南段最近 ~22 km、中段最近 ~96 km)。各面板統計註記; 面板標題「nearest study site」標示該浮標為哪些研究場址之最近 CWA 波浪浮標。中段距七美 96 km — 七美結果用以對中段提供支援性參考、並非直接量測, 範圍詳 §8.3 第 12 項。

### 7.3 綜合判讀

§7.1 三場址季節循環一致 (平均 Hs  $r \geq 0.97$  於北 + 中,  $r = 0.77$  於南) 支援 §3 – §6 之 WAWERYS-based 氣候特徵描述。~0.25 m 之系統性 WAWERYS 正 bias 於三場址一致, 方法層級可歸因於東北季風時間窗差異 (2019–2023 vs 2008–2017) 或 WAWERYS / MFWAM 於中強度風生波範圍之已知溫和正偏。§7.2 浮標層級模式一致度 (新竹、七美 RMSE  $\approx 0.23$ – $0.25$  m、 $r \approx 0.85$ – $0.88$ ) 為北段、南段 WAWERYS-family 可靠性之佐證 — 中段因無近距離浮標, 七美結果僅為較弱之支援性參考、並非場址直接驗證。§7.1、§7.2 均不構成正式之設計負載驗證; 絕對極值統計與場址歷史浮標驗證須採用購買之 CWA 歷史浮標時間序列進行正式極值分析, 屬本書面研究階段範疇之外。

## 8. 限制與注意事項 (彙整)

§3 – §7 每個數字皆位於一組明確之限制框架之中: 來源資料能或不能捕捉什麼、分析方法能或不能解析什麼、5 年期間能或不能告訴讀者什麼、可作業性等級於實務上代表什麼。以下 15 項限制將這些邊界於前置揭示, 使讀者得以對每個重點數字判斷其可信程度; 本章節並非報告之弱點清單, 而是讓本報告於篩選層級得以實用之揭露紀律。各項按主題分組, 便於導覽, 而非以平鋪清單呈現。

## 8.1 來源資料準確度

1. **再分析資料對小尺度強烈 TC 峰值之低估。**再分析熱帶氣旋強度低估幅度 20–40% 已有充分文獻記載 (Hodges et al. 2017; Schenkel & Hart 2012)。ERA5 (Hersbach et al. 2020) 較 ERA-Interim / JRA-55 具更高原生解析度與 4D-Var 同化，但仍未能消除小尺度強烈氣旋之偏差。本研究所用 WAVERYS 多年再分析另透過同化測高 SWH (及 2017 年後 Sentinel-1 SAR 方向譜) 部分緩解風驅 Hs 偏差，但測高衛星於眼牆尺度取樣稀疏—故小尺度強烈 TC 通過時之各場址 Hs 應視為**參考性而非設計級**。絕對極值颱風分析需偏差校正或不同資料來源，屬本書面研究階段範疇之外。
2. **ERA5 100 m 風為模式診斷量，並非同化變數。**穩定邊界層下存在偏差風險；各場址之輪穀高氣候特徵建議以氣象桅或更高解析度中尺度模式進行驗證。
3. **ERA5 0.25° 對東北季風低空噴流之平滑。**海峽內局部海峽通道效應未完整解析；10–20 m/s 範圍之平均風速略偏低估，此一未解析效應適用於三場址，以海峽中央海峽通道效應最明顯處影響最大 (與 §3.1 中段 p95 領先一致)。
4. **WAVERYS 分波 Hs 可略高於總 Hs (約 6%，於約 0.002% 之網格點)**—源自已知 WAM-family/WW3 頻譜分箱賦值行為。非資料錯誤；若分波 VHMO 超過總 VHMO，該時間戳請回退至使用總 VHMO。
5. **ERA5 SST 陸地污染**於資料萃取範圍沿岸格點。三場址座標皆未落於含陸地之格點內，且各場址之雙線性內插模板皆落於台灣海峽開放海域格點，與福建岸線及台灣本島海岸線之最近距離皆  $\geq 30$  km。對完整 22–26°N / 117–122°E 範圍進行空間平均之計算，則涵蓋福建沿岸與台灣沿岸之格點，須套用 sea-only mask。本報告中之各場址時間序列僅採用雙線性內插，不於任一場址處傳遞陸地污染。

## 8.2 空間與時間解析度

6. **三個偏離格點之場址；各場址處皆進行雙線性內插。**場址選取方法 (§2.2) 於同一組 ERA5 0.25° × 0.25° 與 WAVERYS 0.2° × 0.2° 格網上獨立執行三次。北段 (25.00°N, 120.44°E) 於兩產品之兩維度皆偏離格點。中段 (24.05°N, 119.80°E) 於 WAVERYS 經度為格點上 (WAVERYS 採 0.2° 原生)，於 ERA5 兩維度皆偏離格點。南段 (23.00°N, 119.57°E) 於兩產品之兩維度皆偏離格點。
7. **雙線性 vs 最近鄰之敏感度。**中段座標於先前同類分析已驗證 (平均、中位數、p95 之影響可忽略，絕對極值有數個百分點之差距)。北段與南段之沿岸資料範圍幾何類似，預期適用同一規律；明確之逐場址敏感度長條留待後續輪次處理，預期不致改變核心排名。
8. **IBTrACS 目錄完整性—提取方法。**§6.1 目錄之建立方式為直接讀取完整 IBTrACS v4r01 檔案、於颱風層面套用篩選：(a) 首筆軌跡點屬西太平洋流域、(b) 季節 2019–2023、(c) 生命週期峰值 USA 1 分鐘持續風速  $\geq 34$  kt、(d) 任一軌跡點落於三場址任一 200 km 以內。此一方法避免任何空間範圍預篩選下之涵蓋缺口 (尤其北、南兩段 200 km 篩選圓邊緣)。本分析無法直接驗證之剩餘完整性邊界：(i) 首筆軌跡點被分類為非西太平洋流域、但其後進入研究區之系統 (於本緯度帶與西太平洋路徑氣候學中風險可忽略，但未直接驗證)、(ii) IBTrACS 檔案本身對未登錄系統之邊界—於 TS+ 強度層級與多機構聯合通報之西太平洋環境下，假設可忽略。
9. **3 小時聯合框架對齊**：ERA5 逐時與 WAVERYS 3 小時間之對齊以 WAVERYS 時戳直接降採樣 (§2.3)。WAVERYS 樣本之間之亞 3 小時 Hs 尖峰，於聯合框架中本質上無法捕捉；此為

WAVERYS 取樣時間刻度之內在性質，適用於三場址。§5.2 持續度統計量（B 等級可作業時段中位數 36–39 小時）遠高於 3 小時量化下限，不受實質影響。

10. **5 年窗下 p95 / p99 穩定性。** §3.1 各場址 wind10 p95/p99 與 §4.1 Hs p95/p99 之年百分位數，基於各場址  $n = 43,824$  風場逐時樣本與  $n = 14,608$  Hs 3 小時樣本。5 年窗以高精度解析 p95，以中等取樣噪聲解析 p99；p99 跨三場址之排序穩定。經驗 p99 之約 5–10% 區間為獨立樣本啟發式估計；本紀錄中強烈之事件聚集（Hs 於多日季風與颱風事件內部高度自相關）實質降低有效獨立樣本數，故真實 p99 不確定區間較單純 5–10% 估計為寬。絕對 5 年最大值（南段 Hs max 7.65 m、各場址 wind10 max）為單一事件統計量，繼承顯著較大不確定性 — 絕對最大值之排序與樣本相關。

### 8.3 目錄與交叉驗證範圍

11. **IBTrACS 目錄篩選與最近通過最小值之樣本敏感性。** §6.1 目錄篩選為 (a) 軌跡通過三場址任一 200 km 半徑內、且 (b) 系統生命週期峰值風速達熱帶風暴強度以上 ( $\geq 34$  kt)。各場址樣本數不對稱：北段  $n = 3$ 、中段  $n = 6$ 、南段  $n = 8$ 。三場址之最近通過最小值比較對此不對稱樣本數敏感（見 §6.1 prose 與 §6.2 表格註腳）。熱帶低壓系統排除；低能量事件之篩選應放寬此條件。
12. **本書面研究階段之交叉驗證範疇。** §7.1 (CWA WW3 10 年 vs WAVERYS 5 年三場址季節循環檢查) 與 §7.2 (CWA 浮標 vs WAVERYS-NRT 於新竹、七美兩浮標 30 天 Hs 追蹤) 為本報告承載之交叉驗證證據。三項結構性限制：(a) §7.1 比對**非重疊時間窗** (2008–2017 CWA vs 2019–2023 WAVERYS), 0.1–0.3 m 系統性 bias 可能部分反映年際間外力變動而非模式對模式偏差；(b) §7.2 採用 WAVERYS **分析預報** 變體於近期 30 天滾動窗，非 §3–§6 所用多年再分析變體 — bias 量級反映的是 WAVERYS / MFWAM 整體模式系列之合理性，並非 reanalysis 變體本身之 bias 值；(c) 中段最近 CWA 波浪浮標距離 ~96 km（詳 §7.2 場址距離表），且**澎湖群島位於七美浮標（澎湖以南）與中段（海峽中央、澎湖以北）之間**，構成波浪傳播之部分地形 / 水深障礙 — 故 §7.2 浮標結果對中段而言為**支援性參考**（其強度視七美 96 km 距離與澎湖遮蔽程度而定），並非場址直接驗證；且 96 km 之直線距離低估了實際海洋功能性隔離；(d) §7.2 30 天窗 2026-04-06 → 2026-05-06 落於**春季過渡期**（東北季風峰後、西南季風尚未建立），Hs 以低至中等為主；§7.2 RMSE / r 值反映 WAVERYS-family 於此平靜情境下之能力，非驅動 §3–§6 氣候尾部與 §5.1 可作業性比例之東北季風冬季情境。場址歷史 CWA 浮標時間序列（CWA 之申購階層）與正式極值分析屬本範疇之外。

### 8.4 可作業性框架建模選擇

13. **可作業等級風場門檻採用平均風速，非陣風。** 三場址之 ERA5 海面 3 秒陣風於**東北季風常態條件**下，通常為平均風速之 1.3–1.5 倍。**颱風眼牆條件**下，海面陣風因子可達 1.5–1.7 倍以上，須另行評估。對客戶面之可作業性，應以實際船舶 / 吊裝包絡之陣風門檻重新製表；§5.1 之 A/B/C 等級比例為平均風基礎。
14. **邊際分布統計無法線性合併為聯合可作業性。** 三場址於東北季風期 Hs 與 wind10 強相關（風暴時段共同發生），於西南季風期較接近相互獨立。A/B/C 等級可作業比例為對所報告之特定門檻之聯合計算；不能由 §3 / §4 邊際分布針對其他未明確計算之門檻重建。
15. **長週期湧浪未納入 §5 可作業性判斷。** §5.1 等級僅使用 Hs 與 wind10；§4.4 之長週期 ( $T_p \geq 10$  s) 樣本比例（北 3.5% / 中 2.1% / 南 2.9%）、§4.5 分量分解（南段 SW1 佔波能 47.9%），以及

§4.6 VTPK 於混合海況下切換之注意事項，皆未折入等級定義。對動態敏感作業（吊裝包絡、CTV 接駁、浮式資產反應）而言，具湧浪週期感知之可作業性框架 — 以及採用分波平均週期（VTM01\_SW1）或運動相關  $T_e / T_m - 1,0$  之客戶特定等級規格 — 為較乾淨之描述子。分量變數已備齊於各場址 WAWERYS Parquet，以供該客戶特定 build-out 使用。

此明確之限制揭露為書面研究姿態之一部分：於 Level 1 範疇內清楚說明本分析能與不能承擔之內容。

## 9. 資料來源、出處與授權

**關於本節格式的說明。**本節下方各英文出處段落（ERA5、Copernicus Marine WAWERYS）為各資料提供者授權條款（CC-BY 4.0、CMEMS Licence）所明定須逐字保留之屬名 / 致謝文字，不得翻譯或改寫；於本報告（中 / 英文版）任何形式之轉散布時，這些英文出處段落必須維持原樣。本中文導言段落與下方「引用文獻」段落為 PF Tech 自行加入之說明與學術慣例引用，不在「逐字保留」範圍內，重製者可依需要調整或翻譯。讀者若需各條目之中文摘要，可參考第 2.1 節資料來源表（已附中文說明）。

ERA5 reanalysis: Generated using Copernicus Climate Change Service Information [2026]. Licence: CC-BY 4.0. Source: Climate Data Store (cds.climate.copernicus.eu). Hourly: DOI 10.24381/cds.adbb2d47. Monthly: DOI 10.24381/cds.f17050d7.

Copernicus Marine WAWERYS (GLOBAL\_MULTIYEAR\_WAV\_001\_032 v202411): Generated using E.U. Copernicus Marine Service Information; DOI 10.48670/moi-00022. Licence: CMEMS Licence.

IBTrACS (International Best Track Archive for Climate Stewardship), v4r01: NOAA NCEI 公開領域 (public domain) 之全球熱帶氣旋最佳路徑檔案 (Knapp et al. 2010, DOI 10.1175/2009BAMS2755.1)。用於 §6.1 各場址颱風暴露目錄，2019–2023 窗，西太平洋盆地。檔案屬公開領域；出處標示為禮貌性而非強制性。

CWA OpenData C-B0086-001 (台灣海域波候統計，2008–2017 月 Hs 氣候值，0.25° 網格，中央氣象署 CWB / CWA 以 WaveWatch III 模擬)：用於 §7.1 作為獨立十年季節循環參考。開放授權：政府資料開放授權條款第 1 版。資料來源：opendata.cwa.gov.tw。

CWA OpenData 0-B0075-002 (海象觀測資料-海面氣象站浮標即時，滾動 30 天窗)：用於 §7.2 與新竹 (46757B)、七美 (C6W10) 浮標之 WAWERYS-NRT 交叉檢核。同上開放授權。資料來源：opendata.cwa.gov.tw。

CMEMS WAWERYS 分析預報變體 (cmems\_mod\_glo\_wav\_anfc\_0.083deg\_PT3H-i)：用於 §7.2 (NRT 變體) 作為 30 天浮標 / 模式比對窗之 WAWERYS 模式族產品。Generated using E.U. Copernicus Marine Service Information; DOI 10.48670/moi-00017。授權：CMEMS Licence。本變體與 §3–§6 採用之 GLOBAL\_MULTIYEAR\_WAV\_001\_032 再分析變體於同化串與外力時間窗不同 (詳 §7.2 注意事項)。

Coastlines (圖 1 場址位置圖與 圖 9 颱風軌跡圖)：Natural Earth via cartopy。

### 引用文獻

- Hersbach, H., et al. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(730), 1999-2049. DOI 10.1002/qj.3803.
- Hodges, K., Cobb, A., & Vidale, P. L. (2017). How well are tropical cyclones represented in reanalysis datasets? *Journal of Climate*, 30(14), 5243-5264. DOI 10.1175/JCLI-D-16-0557.1.
- Schenkel, B. A., & Hart, R. E. (2012). An examination of tropical cyclone position, intensity, and intensity life cycle within atmospheric reanalysis datasets. *Journal of Climate*, 25(10), 3453-3475. DOI 10.1175/2011JCLI4208.1.
- Knapp, K. R., Kruk, M. C., Levinson, D. H., Diamond, H. J., & Neumann, C. J. (2010). The International Best Track Archive for Climate Stewardship (IBTrACS): Unifying tropical cyclone data. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 91(3), 363-376. DOI 10.1175/2009BAMS2755.1.
- Stopa, J. E. (2018). Wind forcing calibration and wave hindcast comparison using multiple reanalysis and merged satellite wind data. *Ocean Modelling*, 127, 55-69. DOI 10.1016/j.ocemod.2018.04.008.
- Copernicus Marine Service. Quality Information Document (QUID) for the WAVERYs Global Wave Reanalysis product (GLOBAL\_MULTIYEAR\_WAV\_001\_032). Available via the Copernicus Marine product catalogue.

各資料集存取日期、原始檔案 checksum 與下載 / 處理工作流之版本控制 commit ID 皆記錄於案例 manifest，可依需求提供。

## 10. 可重現性

本報告之每項數值與圖件均可由版本控管之分析流程重新產出。本流程包含：

1. **資料擷取**：來源資料皆從各提供者擷取（ERA5 取自 CDS、WAVERYs 取自 Copernicus Marine；採用之 22–26°N × 117–122°E 資料萃取範圍涵蓋三個場址）。各來源檔案之 SHA-256 checksum 皆記錄於案例 manifest。
2. **場址萃取**：於各選取點進行雙線性內插，跨變數時間索引驗證以防止靜默 NaN-padding。
3. **統計分析**：月與年氣候特徵、聯合門檻可作業性等級、可作業時段持續度（連續長度分布）。
4. **交叉驗證**：對替代來源開放授權產品之各場址抽查比對 — CWA WW3 十年波浪後推資料（C-B0086-001）用於季節循環一致性，以及 CWA 即時浮標（O-B0075-002）+ WAVERYs 分析預報於兩處最近浮標之同步 Hs 追蹤。詳見第 7 節。
5. **視覺化**：各圖件皆透過可重現之製圖工作流產出；圖目錄列於附錄 A。
6. **品質保證**：對下載資料就預期維度、邊界與 manifest checksum 進行驗證。

**製作流程**。本報告經由 AI 輔助工作流產出。資料擷取、分析設計、圖件產出與報告撰寫皆於上述可重現之流程中執行；方法學假設、解讀性主張與限制皆於行文間明示。本工作流著重來源可追溯性與可重現性 — 每一個圖說、表格數值與章節發現皆可追溯至特定資料產品與處理步驟。（獨立於產出方法之、適用於任何前期書面研究之範疇限制，皆於免責聲明與第 8 節中載明。）

**取得方式**。完整程式碼、manifest 與重現指引可依需求提供 — [contact@pft-s.com.tw](mailto:contact@pft-s.com.tw)。

## 附錄 A — 圖目錄

表 17: 圖目錄。

圖	章節	描述
1	1	本研究三個場址之空間位置圖
2	3.2	台灣海峽三段場址 10 公尺月平均風速疊圖
3	3.3	台灣海峽三段場址 10 公尺風向風玫瑰圖（三段比較）
4	4.2	台灣海峽三段場址月平均 Hs 疊圖
5	4.3	三場址成對風 + 波玫瑰圖，內含各場址方向夾角 $\Delta\theta$
6	4.4	三場址 Hs 與 Tp 聯合分布 — hexbin 密度
7	4.5	三場址主要湧浪（SW1）來向玫瑰圖 — 分量分解
8	5.2	可作業性持續度存活曲線 — 三場址三等級子圖
9	6.1	三個研究場址之任一 200 km 內之颱風軌跡（IBTrACS 2019–2023）區域圖
10	7.1	CWA WW3 10 年 vs WAVERYS 5 年三場址月平均 Hs 交叉檢核
11	7.2	CWA 浮標 vs WAVERYS-NRT 於新竹與七美兩浮標之 30 天 Hs 追蹤

所有圖件皆由可重現分析工作流產出，流程紀錄於案例 manifest（可依需求提供）。

## 附錄 B — 統計表目錄

表 18: 統計表目錄。

#	表
B-1	各場址月平均 / 百分位 wind10 統計表 — §3.1 之延伸明細
B-2	各場址月平均 / 百分位 Hs / Tp 統計表 — §4.1 之延伸明細
B-3	各場址聯合框架可作業比例，所有等級 × 月 + 年 — §5.1 之延伸明細
B-4	各場址 A / B / C 等級可作業 + 不可作業時段連續長度分布（年） — §5.2 之延伸明細
B-5	各場址 IBTrACS 颱風目錄（颱風 × 場址，2019–2023, TS+ 於 200 km 內） — §6.1 之延伸明細
B-6	跨段關鍵參數差異性彙整（長型：參數 × 場址列，含排名與跨段差距） — §6.2 之延伸明細
B-7	各場址 CWA WW3 vs WAVERYS 月 Hs 交叉檢核表（平均 / 中位數 / 最大值 + 各月各場址 bias / RMSE / r） — §7.1 之延伸明細
B-8	各場址 CWA 浮標 vs WAVERYS-NRT 30 天 Hs 交叉檢核表（各浮標 n / 平均 / bias / RMSE / r + 各場址至最近浮標距離） — §7.2 之延伸明細