

OAC-114-022 (研究報告)

全球暖化對西北太平洋生態環境之影響

(成果報告)

海洋委員會補助研究

中華民國 114年9月

「本研究報告僅供海洋委員會施政參考，並不代表該會政策，該會保留採用與否之權利。」

OAC-114-022 (研究報告)

全球暖化對西北太平洋生態環境之影響

(成果報告)

學校：國立臺灣師範大學

指導教授：吳朝榮

學生：車晴恩

研究期程：中華民國114年4月1日至114年10月31日

研究經費：新臺幣玖萬伍仟伍佰元

海洋委員會補助研究

中華民國 114年9月

「本研究報告僅供海洋委員會施政參考，並不代表該會政策，該會保留採用與否之權利。」

「本研究報告絕無侵害他人智慧財產權之情事，如有違背願自負民、刑事責任。」

OAC-114-022 全球暖化對西北太平洋生態環境之影響 成果報告 海洋委員會

摘要

關鍵詞：全球暖化、西北太平洋、海溫異常、海洋熱浪、鰻魚生存、聖嬰現象

一、研究緣起

近四十年全球海洋熱浪頻率與持續時間顯著增加，西北太平洋作為西邊界流與暖池匯聚區，對暖化與年際氣候高度敏感。海洋熱浪不僅改變海洋熱含量與分層結構，亦可能影響經濟性物種之早期存活與捕獲量，本研究聚焦日本鰻 (*Anguilla japonica*)，評估海洋熱浪是否與沿岸捕撈量變動相關。

二、研究目的

- (一) 以一致方法辨識 1982 - 2025 年西北太平洋海洋熱浪的時空分布、頻率、強度與持續期，並彙整極端事件。
- (二) 建立 0 - 205m 次表層溫度的月尺度熱異常與垂直結構。
- (三) 量化產卵區 (12 - 15°N, 140 - 142°E) 前一年各月、各深度海溫與隔年四國 (日本、韓國、台灣、中國) 玻璃鰻捕獲量之統計關聯，鎖定敏感月份/深度層並檢視與海洋熱浪的重疊度。

三、研究方法及過程

表層採 NOAA OISST v2 (日、0.25°)，以 1983-2012 為基準期、滑動 11 日窗估計第 90 百分位閾值 (T90)，連續 ≥5 日超閾判定海洋熱浪；輸出事件指標與年統計。次表層採 GODAS 月平均潛在溫度 (5-205 m)，邏輯以月均溫跨越同月 T90、連續 ≥1 月判定事件，並分析 5-105/5-205 m 空間平均。捕撈資料為 1990-2023 年四國年報；以捕撈年對應前一年 (lag1) 之逐月/逐深度海溫，計算皮爾森相關係數，並與海洋熱浪年月對照。

四、重要發現

- (一) 表層海洋熱浪 (MHW) 顯著升高，1982 - 2025 年西太平洋暖池 (128 - 154°E、5 - 20°N) 之 MHW 在頻率、持續時間與強度皆呈上升。1999 - 2013 年全球暖化「停滯期」事件稀少，2014 年後全球暖化「加速期」極端事件顯著增多。ENSO 的年際調制清晰，反聖嬰 (La Niña) 時信風增強、暖水

西堆，背景 SST 更易跨越第 90 百分位門檻，使 MHW 更頻繁且時間更久。

(二) 次表層熱浪 GODAS 月資料顯示 5 - 45 m 與 55 - 95 m 自 1998 年後事件年數、強度、連月性皆上升，基線溫度多數年份 $>28^{\circ}\text{C}$ ；2008 年後淺層幾乎年年出現次表層熱浪。

(三) 多起低捕撈年與次表層 MHW (或持續偏暖) 之時間重疊，支持「暖背景 + 次表層熱異常」導致鰻魚捕獲量減少之風險組合假說。

(四) 鰻魚捕撈量與前一年 1-5 月、約 5-150 m 次表層溫度呈穩定負相關 (日本 $r\approx-0.43$ ；韓國 $r\approx-0.46$)。

五、結論與展望

結論為在全球暖化背景下，西北太平洋的表層與次表層海洋熱浪已由偶發轉為常態高風險。其中，前一年初春 (1 - 5 月) \times 5 - 150 m 的次表層增暖 / 次表層海洋熱浪，對隔年日本、韓國鰻苗量之下降具有穩定統計連結與合理物理—生態機制；展望為由統計關聯邁向因果證成，建議未來使用高解析度環流—粒子漂移，驗證「產卵—漂送—到岸」鏈條，強化漁撈時空統計與多資料源交叉驗證。

ABSTRACT

Keywords :global warming, Northwest Pacific, sea surface temperature anomalies, marine heatwaves, eel survival, ENSO

1. Research Background

Over the past four decades, the frequency and duration of marine heatwaves (MHWs) have increased markedly under global warming. The Northwest Pacific, as a confluence region of the western boundary currents and the warm pool, exhibits high sensitivity to both long-term warming trends and interannual climate variability. MHWs not only alter ocean heat content and stratification but may also affect the early survival and recruitment of economically significant species. This study focuses on the Japanese eel (*Anguilla japonica*), aiming to evaluate whether variations in marine heatwaves are statistically linked to fluctuations in coastal glass eel catches.

2. Research Objectives

(1) To systematically identify the spatiotemporal distribution, frequency, intensity, and duration of marine heatwaves in the Northwest Pacific during 1982–2025, and to summarize extreme events.

(2) To establish the monthly subsurface thermal anomalies and vertical structures from 0–205 m.

(3) To quantify the statistical associations between monthly and depth-resolved ocean temperatures in the spawning region (12–15°N, 140–142°E) during the preceding year and the annual glass eel catches of four countries (Japan, Korea, Taiwan, and China), with emphasis on identifying sensitive months and depth layers and examining their overlap with marine heatwave events.

3. Research Methods and Procedures

For the surface layer, NOAA OISST v2 (daily, 0.25° resolution) was employed, using 1983–2012 as the climatological baseline. A moving 11-day window was applied to estimate the 90th percentile threshold (T90), with events defined as ≥ 5 consecutive days above T90. Event metrics and annual statistics were computed. For the subsurface, NOAA GODAS monthly potential temperature (5–205 m) was used, where events were identified when monthly means exceeded the climatological T90 for at least one consecutive month. Depth-integrated averages (5–105 m and 5–205 m) were further analyzed. Catch data were compiled for 1990–2023 from annual reports of the four countries. Catch year was paired with the preceding year's

monthly/depth ocean temperatures (lag-1), and Pearson correlation coefficients were computed, with alignment to the timing of MHWs.

4. Key Findings

(1) Surface MHWs: In the Northwest Pacific warm pool (128–154°E, 5–20°N), MHW frequency, duration, and intensity all increased significantly during 1982–2025. A scarcity of events was observed during the “global warming hiatus” (1999–2013), whereas an accelerated phase of global warming post-2014 corresponded with a marked rise in extreme events. Strong modulation by ENSO was evident: during La Niña, enhanced trade winds pile up warm water westward, raising background SST and facilitating more frequent and longer-lasting MHWs as SST more easily surpasses the 90th percentile threshold.

(2) Subsurface MHWs: GODAS data revealed that from 1998 onward, subsurface layers (5–45 m and 55–95 m) experienced increases in the number of event years, intensity, and persistence. Baseline temperatures in most years exceeded 28 °C, and since 2008, shallow subsurface heatwaves have occurred almost annually.

(3) Biological overlap: Several years of low glass eel recruitment coincided with subsurface MHWs or prolonged subsurface warming, supporting the hypothesis that the “warm background plus subsurface anomaly” constitutes a risk combination that reduces eel catch.

(4) Bio-physical linkage: Significant and consistent negative correlations were found between subsurface temperatures in January–May (1–5 months prior to spawning transport) at depths of ~5–150 m and subsequent glass eel catches. For instance, Japan ($r \approx -0.43$) and Korea ($r \approx -0.46$) exhibited robust correlations.

5. Conclusions and Perspectives

The findings demonstrate that under global warming, marine heatwaves in the Northwest Pacific—both at the surface and subsurface—have shifted from episodic events to a persistent high-risk phenomenon. In particular, subsurface warming or subsurface marine heatwaves during the preceding spring (January–May) at 5–150 m depth show stable statistical linkages with the decline of Japanese and Korean glass eel recruitment, supported by plausible physical–ecological mechanisms. Looking forward, advancing from correlation toward causality is essential. Future research should incorporate high-resolution ocean circulation and particle-tracking simulations to validate the “spawning–drift–recruitment” pathway, and strengthen fishery time-series analyses with cross-validation from multiple datasets, including ENSO indices, western boundary current variability, and wind stress forcing.

目次

摘要	I
ABSTRACT	III
目次	V
表次	VIII
圖次	IX
第一章 緒論	1
第一節 研究緣起	1
第二節 問題背景與現況分析	1
第三節 研究目的與研究重點	5
第四節 預期目標	6
第五節 名詞釋義	7
第一項 海洋熱浪與全球背景	7
第二項 全球暖化	7
第三項 表層海洋熱浪	8
第四項 次表層海洋熱浪	8
第五項 西北太平洋	8
第六項 聖嬰現象	9
第七項 鰻魚	9
第二章 文獻探討	11
第一節 海洋熱浪定義	11
第二節 海洋熱浪檢測方法	13
第一項 表層海洋熱浪	13
第二項 次表層海洋熱浪	15
第三節 鰻魚產卵區	17
第四節 鰻魚的溫度適宜性	18

第五節 鰻魚垂直移動行為	20
第三章 研究資料與方法	21
第一節 研究資料.....	21
第二節 研究範圍.....	23
第三節 研究方法.....	25
第一項 表層海洋熱浪.....	25
第二項 次表層海洋熱浪.....	27
第三項 研究鰻魚捕獲量與海溫變異性.....	28
第四章 研究過程.....	30
第一節 研究架構.....	30
第二節 表層海洋熱浪.....	31
第一項 Hobday 定義與分析原則.....	31
第二項 OISST 資料處理與熱浪偵測.....	32
第三節 次表層海洋熱浪.....	32
第一項 GODAS 垂直剖面資料處理.....	32
第二項 月尺度熱浪事件判定與空間統計.....	32
第四節 海溫變異性與鰻魚捕獲量之關聯.....	33
第一項 捕獲資料整理與總量建構.....	33
第二項 時序比對與 Pearson 相關分析.....	33
第三項 產卵期海溫與資源變化探討.....	33
第四項 補充說明方法一致性.....	33
第五章 結果與討論	35
第一節 表層海洋熱浪.....	35
第一項 表層海洋熱浪統計.....	35
第二項 近二十年表層海洋熱浪分析.....	43
第三項 表層海洋熱浪與全球暖化關聯.....	47
第四項 表層海洋熱浪與聖嬰現象關聯.....	49
第二節 次表層海洋熱浪分析	53

第一項 次表層海洋熱浪統計.....	53
第二項 淺層海洋熱浪趨勢.....	58
第三節 海溫對捕獲量分析討論	61
第一項 東亞捕獲量和次表層海溫關係.....	62
第二項 次表層海溫和四國捕獲量關係.....	64
第三項 海溫空間平均值和總捕獲量相關性.....	66
第六章 結論.....	70
第一節 表層海洋熱浪發生趨勢	70
第二節 淺層次表層海洋熱浪趨勢.....	71
第三節 次表層海溫對鰻魚捕獲量之影響	71
第四節 未來工作.....	72
參考文獻	73

表次

表 2-1 日本鰻早期生命階段適宜溫度（本研究自行整理）	19
表 2-2 日本鰻早期生命階段的垂直分布、位移（本研究自行整理）	20

圖次

圖 1-1 全世界的海洋熱浪	3
圖 1-2 海溫異常值呈現上升趨勢	4
圖 1-3 日本鰻 (<i>Anguilla japonica</i>)	10
圖 2-1 海洋熱浪定義	13
圖 2-2 海洋熱浪標準化定義	15
圖 2-3 鰻魚產卵區與成長路徑	17
圖 2-4 鰻魚生長史	18
圖 3-1 海表溫度資料 OISST V2	22
圖 3-2 次表層溫度資料 GODAS	22
圖 3-3 西北太平洋範圍(90 - 180°E, 10 - 45°N)	23
圖 3-4 西太平洋暖池區且為颱風易生成區(128 - 180°E, 5 - 20°N)	23
圖 3-5 西太平洋暖池左側(128 - 154°E, 5 - 20°N)	24
圖 3-6 鰻魚產卵區(128 - 154°E, 5 - 20°N)	24
圖 3-7 表層海洋熱浪監測步驟	25
圖 3-8 表層海洋熱浪時間序列	27
圖 3-9 次表層海洋熱浪監測步驟	27
圖 3-10 鰻魚捕獲量與海溫變異性分析流程圖	28
圖 4-1 研究架構	31
圖 5-1 西太平洋暖池總海洋熱浪事件	35
圖 5-2 西太平洋暖池夏天(7-9月)總海洋熱浪事件	36
圖 5-3 西太平洋暖池總海洋熱浪事件對比夏天	37
圖 5-4 西太平洋暖池 1982 到 2025 年海洋熱浪時間序列	38
圖 5-5 1982 到 2025 年分成三個時期海洋熱浪時間序列	39
圖 5-6 1982 到 2025 年標記前 10 大海洋熱浪事件	40
圖 5-7 近期海洋熱浪事件以及最嚴重海洋熱浪	41
圖 5-8 近期海洋熱浪事件以及最嚴重海洋熱浪並加上分級	41
圖 5-9 海洋熱浪分級標準	42
圖 5-10 近十年海洋熱浪事件	43

圖 5-11 近五年海洋熱浪事件.....	44
圖 5-12 近 20 年海洋熱浪事件.....	45
圖 5-13 近 20 年海洋熱浪事件並標記前十大強度海洋熱浪事件.....	46
圖 5-14 近 20 年海洋表面溫度.....	46
圖 5-15 全球暖化變異性與西太平洋暖池區域海洋熱浪時序之關聯.....	48
圖 5-16 ENSO 和海洋熱浪.....	49
圖 5-17 La Niña (反聖嬰) 下的太平洋熱量與大氣環流變化.....	51
圖 5-18 海表以下 5-45 公尺次表層海洋熱浪.....	53
圖 5-19 海表以下 55-95 公尺次表層海洋熱浪.....	54
圖 5-20 海表以下 105-145 公尺次表層海洋熱浪.....	55
圖 5-21 海表以下 155-195 公尺次表層海洋熱浪.....	56
圖 5-22 海表以下 205 公尺次表層海洋熱浪.....	57
圖 5-23 海表以下 5-45 公尺次表層海洋熱浪發生趨勢.....	58
圖 5-24 海表以下 55-95 公尺次表層海洋熱浪發生趨勢.....	58
圖 5-25 海表以下 5 公尺次表層海洋熱浪.....	59
圖 5-26 海表以下 5 到 45 公尺平均的次表層海洋熱浪.....	60
圖 5-27 1990 年到 2023 年四國鰻魚捕獲量.....	61
圖 5-28 分析捕獲量與海溫關係流程圖.....	62
圖 5-29 次表層海溫 1-12 月各深度和東亞捕獲量之相關性.....	63
圖 5-30 次表層海溫空間平均 1-12 月和四國捕獲量之相關性.....	64
圖 5-31 次表層海溫 1-6 月各月份 5-205M 和日本捕獲量之相關性.....	65
圖 5-32 次表層海溫 1-6 月各月份 5-205M 和韓國捕獲量之相關性.....	66
圖 5-33 前一年產卵區海溫空間平均值和總捕獲量相關性.....	67
圖 5-34 四個國家捕獲量和前一年產卵區海溫空間平均值相關性.....	67
圖 5-35 日本和韓國的捕獲量和前一年產卵區海溫空間平均值相關性.....	68

第一章 緒論

第一節 研究緣起

海洋約佔地球表面的 72%，佔了地球上 97%的水資源，提供地球上 99%生物的生存空間，並且占地球初級生產量的一半，除此之外，海洋會吸收了氣候系統中 90%多餘的熱量，提供並調節地球上的水循環和天氣系統。隨著全球氣候變遷的持續與加速，且自 1900 年以來，全球海面溫度已升高近 1°C (IPCC AR6)，海洋表面溫度異常值逐年呈現上升趨勢，如圖 1-2 海溫異常值呈現上升趨勢(使用 NOAA OI SST V2 資料繪製)，近幾十年來，海洋溫度的極端升高事件對世界各地的海洋生物、海洋生態系統造成了更強烈和頻繁的影響，與大氣中的極端溫度事件類似，這些極端的海洋溫度事件被稱為「海洋熱浪」。

第二節 問題背景與現況分析

海洋熱浪是指海洋溫度異常溫暖的事件，且持續五天以上，溫度高於基於 30 年氣候海洋表面溫度數值第 90 個百分位氣候閾值(Hobday et al., 2016)，MHW 可以延伸數百到數千公里，持續時間長達數百天 (Gupta et al., 2020)。MHW 會受到大氣過程和海洋環流所驅動，例如 Gao 等人的研究 2016 年至 2018 年連續三年夏季的海洋熱浪，北半球夏季東海 (ECS) 和南黃海 (SYS)，受到短波輻射的增加與東亞夏季風 (EASM) 的影響(Gao et al., 2020)。MHW 可導致嚴重的環境和生態影響，例如海洋分層增加 (Nicholas A. Bond et al., 2015)、海洋物種的大規模死亡，如地中海西北部岩石底棲生物群(Garrabou et al., 2020) 和珊瑚礁魚死亡(Genin et al., 2020)，海洋表面葉綠素水準降低，並對漁業造成不利影響 (Barbeaux et al., 2020)。MHWs 也會影響區域氣候現象，研究發現，印度洋的海洋熱浪可以調節印度次大陸的季風和降雨，從而影響該地區的水和糧食安全；並且海洋熱浪可能和熱帶氣旋相互作用，並增加熱帶氣旋的強度，使其更具破壞性；海洋熱浪可能重創海洋生態系統，包括珊瑚礁大規模白化、海藻生長受損，包含脊椎動物、魚類、鳥類和海洋哺乳動物的大規模死亡事件(Smith et al., 2023)，導致氧氣供應的減少影響海洋生物的健康和生存能力，及海洋生物群聚的劇烈變化。這不僅破壞了海洋環境的穩定性，可能使得生態系統重組，還影響了依賴這些生態系統的物種生存，並產生深遠的社會經濟影響。

Oliver 等人提出從 1925 年到 2016 年，全球的平均海洋熱浪頻率和持續時間個別增加了 34%和 17% ，致使全球每年海洋熱浪天數增加了 54% ，在全球持續變暖的背景
下，可以預期海洋熱浪天數會持續增加(Oliver et al.,2018)，並對海洋生態系統和沿海社
會的經濟活動帶來威脅。近期有許多對海洋熱浪的研究，全球已發現許多具有不同物理
驅動因素的 MHWs，西部邊界流（WBC，Western boundary currents）及其擴展區是顯著
的海洋熱浪熱點(Holbrook et al., 2019)，如 2015/16 年澳大利亞東南部的塔斯曼海有史
無前例持續時間最長、強度最大的海洋熱浪 MHW，這次海洋熱浪持續了 251 天，最高
強度達到氣候高出 2.9°C(Oliver et al., 2017)、2012 年和 1993-2018 年期間的西北大西
洋(Scannell et al., 2016)和 2017 年的西南大西洋(Manta et al., 2018) 。最近，西北太平洋
的 MHW 也引起了廣泛關注，例如 Miyama 等人研究，2010-2016 年 Oyashio 地區發生
的夏季 MHWs 由於反氣旋渦流活動的增加(Miyama et al., 2016);Kuroda 和 Setou 研究
2021 年 7 月至 8 月在西北太平洋上空發生了 MHW，包括整個日本海和鄂霍次克海
的部分地區，是由大氣條件強迫的異常表面熱通量引起的(Kuroda et al., 2021)。深入研究
這些熱浪的形成與變化，有助於我們更好地了解全球變暖背景下極端氣候現象的發展。

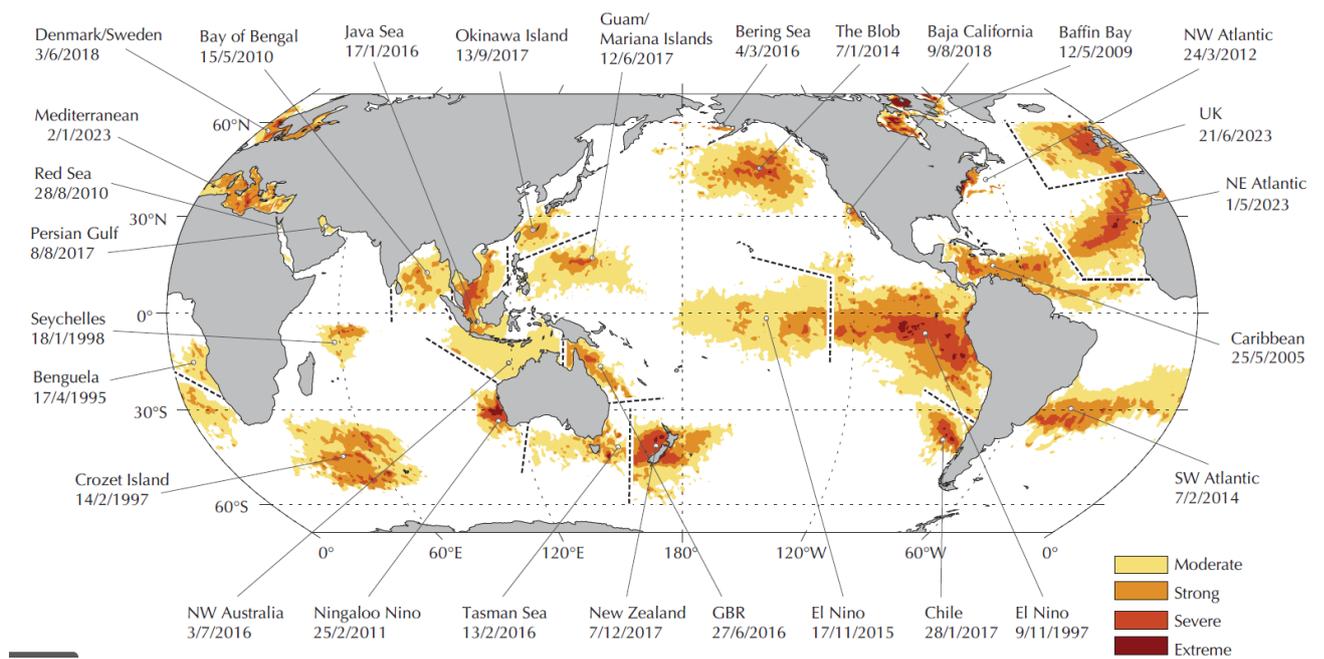


圖 1-1 全世界的海洋熱浪

圖中色標表示海洋熱浪強度分級，顏色越接近深色代表海洋熱浪事件越嚴重的區域

圖片來源:Marine Heat Wave Tracker

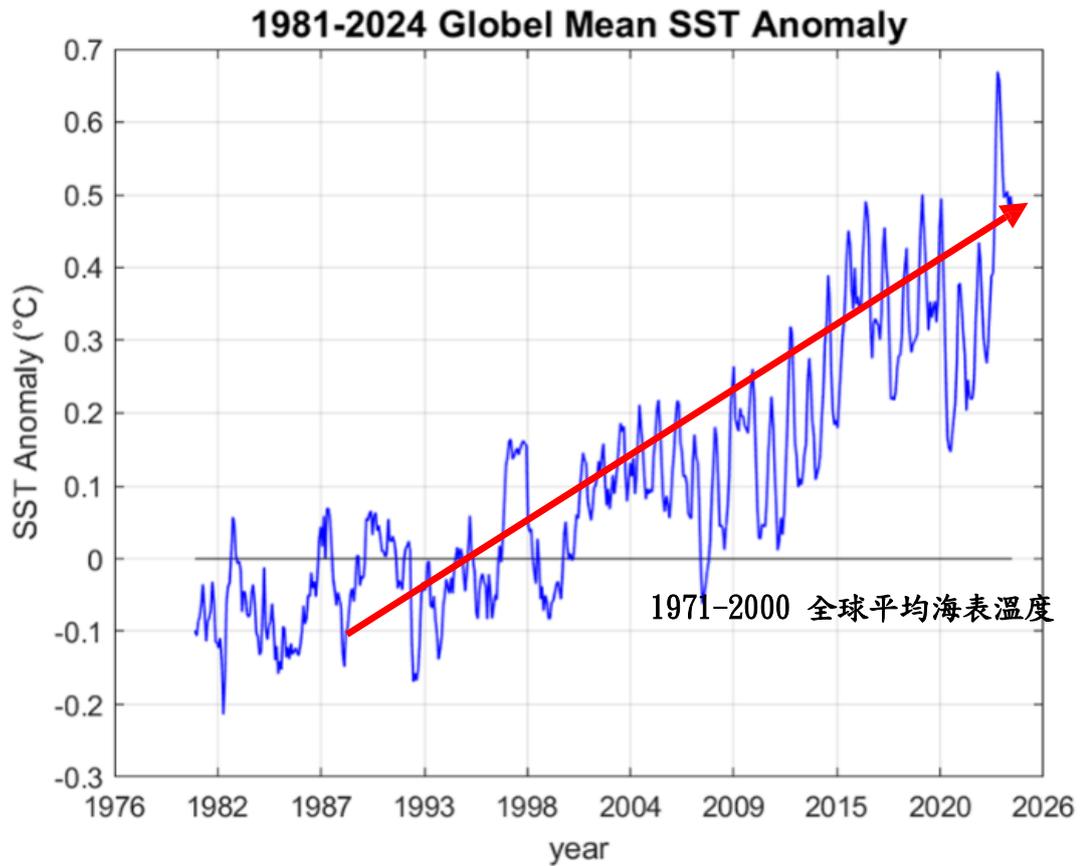


圖 1-2 海溫異常值呈現上升趨勢

藍色折線為 1981-2024 全球平均海表溫異常值

圖片來源:研究者繪製

第三節 研究目的與研究重點

本研究將針對西太平洋地區海洋熱浪 (Marine Heatwaves, MHWs) 事件進行分析，系統性辨識 1982–2025 年間發生的海洋熱浪，同時考慮次表層海洋溫度，以獲得 MHW 的垂直結構與延伸深度，探討海洋熱浪的長期與短期變化趨勢與潛在驅動原因。

實際應用層面上，分析海洋熱浪對於生物的影響，由於日本鰻 (*Anguilla japonica*) 作為亞洲的重要經濟物種且瀕臨絕種，對海洋溫度高度敏感，本研究亦探討表層與次表層海溫變異對日本、韓國、台灣、中國沿岸鰻魚捕撈量的影響。

- 一、建構 1982 – 2025 年西太平洋海洋熱浪時間序列，統計海洋熱浪發生次數、強度與持續時間，並且找出前十大極端海洋熱浪事件。
- 二、分析海洋熱浪並且探討其與全球暖化背景趨勢及聖嬰現象的關聯性，了解海洋熱浪的發生機制。
- 三、探討表層與次表層海洋熱浪的垂直結構特徵，除了海洋表面溫度，進一步分析 0–150 公尺次表層溫度異常，找出次表層海洋熱浪。
- 四、研究海溫變異對日本鰻魚捕撈量的影響，蒐集日本、韓國、台灣、中國四地 1990–2023 年鰻魚捕撈量資料，並與海溫條件比對，計算不同月份的海溫與各國捕獲量之間的相關性，篩選出與捕撈量高度相關的關鍵月份，進一步於該月份進行垂直結構分析，比較次表層不同水深的相關性，辨識對捕撈量最具影響力的代表性水層。
- 五、針對這些具高相關性的深度，檢視其是否曾發生海洋熱浪事件，進而推測 MHW 對鰻魚洄游生存率與沿岸捕撈量的潛在衝擊，分析海洋熱浪對日本鰻生存條件以及沿岸捕獲量的潛在影響。

本研究包含幾個核心重點。首先，透過過去近 40 年的海洋表面溫度 (SST) 資料，系統性辨識西北太平洋地區所發生的海洋熱浪 (Marine Heatwaves, MHWs)。在分析過程中發現，MHW 可能對魚類等海洋生物的生存造成潛在影響，而這種影響不僅限於表層水溫，次表層海洋熱浪 (subsurface MHWs) 亦可能對物種分布與存活產生影響。因此，本研究進一步聚焦於探討次表層海溫變化與鰻魚捕撈量之間的關聯性。

研究的初步構想是以日本鰻 (*Anguilla japonica*) 的產卵區為起點，追蹤其幼體洄游至台灣、中國、日本與韓國沿岸的過程，並估算從產卵地至捕撈地所需時間，以判斷產卵期間或途中是否遭遇高溫事件。然而，根據文獻資料，鰻魚從孵化至抵達沿岸的時間差異甚大 (約為 100 至 160 天)，誤差長達兩個月，導致該方法在推估時序關聯上缺乏足夠精度。

因此，研究轉向以年度為基礎進行每個月時序分析，即以捕撈年度前一整年的每月海溫資料為基礎，計算不同月份的海溫與各國捕獲量之間的相關性。藉此找出與鰻魚補撈量高度相關的月份，再進一步分析該月份不同深度 (表層至次表層) 之海溫，篩選出相關性較高代表具影響力的水層深度。

最後，針對這些具高相關性的深度，檢視其是否曾發生海洋熱浪事件，進而推測 MHW 對鰻魚洄游生存率與沿岸捕撈量的潛在衝擊。

第四節 預期目標

本研究預期先由海洋熱浪時序分析延伸至熱浪對海洋生物的影響探討。除辨識 1982–2025 年西北太平洋海洋熱浪 (Marine Heatwaves, MHWs) 的時序分布與強度變化外，亦延伸探討海溫異常對瀕危經濟物種——日本鰻 (*Anguilla japonica*) 補撈量的潛在影響。研究將以台灣、日本、韓國與中國之玻璃鰻捕撈資料為依據，進行跨區域、跨深度的分析整合。

以海表溫度 (SST) 系統性辨識 1982–2025 年 MHW，建立年際時間序列，計算發生頻率、持續時間、峰值強度與累積強度等指標，並依峰值強度排序，辨識最強與前十大極端熱浪事件及其時空特徵。

分析產卵區海溫變異和捕獲量之關聯性，針對西太平洋日本鰻產卵區 (140°–142°E、12°–15°N) 之次表層溫度進行分析，檢驗其對四個沿岸國家 (台灣、日本、韓國、中國) 玻璃鰻捕獲量的統計關聯。

辨識熱浪事件之垂直結構與潛在生態衝擊，檢視篩出的相關性高的月份與深度是否同時發生 MHW，辨識其是否垂直延伸至鰻魚洄游常經水層 (約 0–150 m)。透過次表層海溫和捕撈量變動的時序比對，推測海洋熱浪可能降低玻璃鰻生存率進而影響捕獲量。

第五節 名詞釋義

第一項 海洋熱浪與全球背景

海洋熱浪最常使用的定義為海洋表面溫度在連續達 5 日以上，高於以長期基線（常用 30 年）計算之季節性第 90 百分位的異常暖事件，是近十餘年來海洋氣候變異研究的關鍵議題（Hobday et al., 2016）。全球觀測與再分析顯示，自 20 世紀末以來，海洋熱浪的發生頻率、持續時間與強度呈系統性上升，與全球暖化趨勢一致（Oliver et al., 2018；IPCC AR6）。多個海域被辨識為海洋熱浪的熱點，尤以西邊界流及其延伸區（如黑潮、東澳流、灣流延伸）最為顯著，顯示動力作用與水平熱輸送對的形塑至關重要（Holbrook et al., 2019）。特徵案例包含塔斯曼海 2015/16 時間長且強烈的熱浪、北大西洋 2012 年事件與南大西洋 2017 年事件等，皆對生態與漁業造成重大影響（Oliver et al., 2017；Scannell et al., 2016；Manta et al., 2018）。綜合而言，MHW 已從「偶發極端」轉變為「變暖背景下的常見風險」。

第二項 全球暖化

全球暖化（Global Warming）指全球平均海表溫度與近地表氣溫在多年上的長期上升趨勢，主因為人為溫室氣體濃度增加所致。自 20 世紀中葉以來，全球氣候系統的暖化歷程並非線性增溫，而是呈現階段性變化。根據觀測與文獻分析（Wang & Wu, 2020），全球海表溫度變化大致可區分為三個主要階段 1950 年代至 1970 年代為增溫停滯期（hiatus），氣候趨勢相對平緩；1980 年代至 1998 年間則經歷快速暖化階段，受溫室氣體累積與太平洋年代際變異（PDO）正位相所驅動，全球平均溫度迅速升高；1999 年至 2013 年間，雖溫室氣體持續上升，但海洋表面增溫幅度趨緩，呈現「全球增溫停滯現象」。自 2014 年起，地球氣候再次進入「再加速暖化階段」，全球與區域海溫顯著上升，並帶來極端海洋氣候事件的急遽增加。

第三項 表層海洋熱浪

本研究所稱「表層」指海洋表面溫度 (Sea Surface Temperature, SST)，代表海水最上層數毫米至數公分的溫度。使用資料為 NOAA OISST v2 之格點日資料，空間解析度 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 、時間解析度為日，研究期 1982 - 2025。依 Hobday 等人方法 (Hobday et al., 2016)，以 30 年基線期 (本研究採 1983-2012) 建立逐日的季節性分位數氣候場，取第 90 百分位作為海洋熱浪門檻；當 SST 連續 ≥ 5 天 高於該門檻，即判定為一個 MHW 事件。

第四項 次表層海洋熱浪

本研究所稱「次表層海溫」代表海洋深度 5 公尺以下，次表層海洋熱浪為係將表層 MHW 的分位數門檻概念，延伸至水體下方的固定深度層 (本研究聚焦 0 - 200 m)。以 30 年基線期 (1983 - 2012) 為每一個深度層建立「逐曆月」的季節性第 90 百分位門檻；當該深度的溫度連續一段時間高於門檻，即視為次表層 MHW。此類事件可能與表層不同步，並呈現垂直延伸或分層結構 (Jacox et al., 2020)。使用資料為 GODAS 再分析之三維海溫，空間解析度經度約 1.0° 間距；緯度約 $1/3^{\circ}$ ，時間解析度，一月一筆資料為月平均。

第五項 西北太平洋

西北太平洋涵蓋南海、菲律賓海、台灣東方與琉球—日本南方外海包含北赤道洋流 (NEC)、黑潮、黑潮延伸區並與親潮交匯，此區為全球西邊界流系統典型的區域之一，海氣交互旺盛、熱含量大，是海洋熱浪與熱帶氣旋活動的熱點，暖水帶提供高海洋熱含量，為颱風生成熱點 ($SST \geq 26.5^{\circ}C$)，本研究區域採用 JTWC 聯合颱風警報中心定義之西北太平洋 ($10^{\circ}N-45^{\circ}N$ 、 $90^{\circ}E-180^{\circ}E$)。

第六項 聖嬰現象

與此氣候背景密切相關的，是赤道太平洋地區的聖嬰 - 南方振盪現象 (El Niño - Southern Oscillation, ENSO) 是具代表性的海氣耦合，對全球海洋溫度分布與大氣環流結構具有深遠影響。ENSO 主要分為兩種聖嬰 (El Niño) 與反聖嬰 (La Niña)。聖嬰事件發生時，東太平洋赤道區域的海面溫度 (Sea Surface Temperature, SST) 顯著升高，對流活動與降雨帶隨之東移，造成西太平洋地區大氣上升運動受抑與下沉加強，對應產生異常高壓系統，使得西太平洋副熱帶地區的雲量減少與短波輻射增加。此輻射強迫導致局部海洋能量積累，加上暖水堆積，使得該區出現正的溫度距平現象。

相對地，在反聖嬰期間，東太平洋呈現冷海溫異常，對流與降水活動偏向西太平洋，促使赤道西段水體溫度更高，暖池區域擴張，伴隨更強的海洋穩定層結與熱通量累積。該過程亦可能在西北太平洋中高緯度地區誘發強烈的穩定高壓場，減少雲量與風速，促進日照與熱通量輸入累積，從而觸發區域性的海洋熱浪現象。無論聖嬰或反聖嬰位相，ENSO 均可透過調控熱帶與副熱帶海氣交互作用，間接或直接地改變西太平洋暖池的熱能分布與大氣壓場狀態，進而影響該區 MHW 的時空分布與強度演變。

這些 ENSO 相關過程亦與西太平洋降雨模式變異密切相關。聖嬰時期西太平洋降雨減少、反聖嬰則可能導致西太平洋區域降雨增強，降雨變異本身會改變上層海水淡化與熱通量垂直交換效率，間接影響水柱穩定度與海洋熱含量調節能力。因而，ENSO 不僅是海表溫度的驅動因子，更透過其大氣環流調節作用與輻射平衡改變，可能在多層次尺度上影響海洋熱浪。

第七項 鰻魚

日本鰻 (*Anguilla japonica*) 為典型之溯河洄游魚類，其生命史可分為數個階段，成體於西馬里亞納海脊附近之鹽度鋒面產卵，卵孵化後產生扁葉狀之葉狀幼體 (leptocephalus)，幼體在表層隨北赤道洋流 (NEC) 向西漂送並進入黑潮後北上，經長距離輸送後逐漸變為透明的玻璃鰻 (glass eel)，抵達沿岸與河口後變態為幼鰻 (elver/yellow eel) 並進行內陸成長；成熟後之銀鰻 (silver eel) 回游至海域產卵完成一

生循環 (Tsukamoto, 1992; Aoyama et al., 2014)。耳石增長帶年輪分析顯示，從孵化到接近變態的年齡大致落在約 100–160 日之間，但個體與年度間變異顯著 (Arai et al., 1997; Cheng & Tzeng, 1996; Shinoda et al., 2011)，使得以單一定時滯來連結產卵區環境與沿岸到達時序具有不確定性。

經濟上，日本鰻在東亞具有高度經濟與文化價值，為日本、台灣、韓國與中國等地之重要養殖，目前養殖業仍高度仰賴野生幼體投入，導致漁業壓力與國際貿易需求增加。近數十年來，因過度捕撈、棲地破壞（河川截流、堤防）、污染、棲息地斷裂及氣候變遷（含海溫異常與洋流改變）等多重壓力，日本鰻族群呈現下降趨勢，已成為國際保育與漁業管理的重點對象 (Tsukamoto, 1992; Aoyama et al., 2014)。因此，理解海洋環境（包含表層與次表層溫度）對幼生輸送與存活的影响，對於制定補捕管理、人工繁殖技術推廣、以及區域性保育策略皆具有實務上與科學上的重要性。



圖 1-3 日本鰻 (*Anguilla japonica*)

圖片來源:維基百科

第二章 文獻探討

第一節 海洋熱浪定義

根據 Hobday 等人的定義 (Hobday et al., 2016) 在其開創性研究中，針對長期缺乏明確標準的海洋熱浪 (Marine Heatwaves, MHWs) 研究領域，首先提出了一個具概念性與操作性的定義架構。將海洋熱浪描述為「在特定地理位置所發生之異常高溫 (anomalously warm)、持續性的 (prolonged)、離散的 (discrete) 的事件。首先，海洋熱浪的偵測必須相對於長期氣候基準期 (climatology) 進行，基準期以 30 年歷史資料建構，並以日序 (day-of-year) 為基礎計算氣候均值與百分位數。亦即，每年中的每一天 (如 1 月 1 日、7 月 15 日等) 各自擁有獨立的長期溫度分布統計，從而反映季節內的自然變異。

再者，異常溫暖的判別閾值設定為該日序之第 90 百分位數 (90th percentile)。當某一日的實測海表溫度 (SST) 高於該日長期氣候分布的 90 個百分位值時，即被視為達到異常高溫狀態。此方法考量各地自然變異程度，避免單一絕對溫度閾值無法公平比較不同區域的問題，亦有助於捕捉對生態系統具有實質影響的溫度異常。

其次，關於持續性要求，定義要求海洋熱浪異常高溫必須連續持續五天以上，始可確認為一次 MHW 事件。因為研究發現，在熱帶地區持續時間短於 5 天的海溫異常溫暖事件比其他地方多得多，而持續時間超過 5 天的地區通常平均每年少於 1 個 MHW，研究建議在當前氣候條件下定義為 5 天，以實現相對均勻的全球 MHW 計數。若期間出現中斷 (即日 SST 降至 90 百分位以下)，但連續低於閾值的天數不超過兩天，則仍視為同一熱浪事件的一部分。此規則平衡了海洋自然短期擾動 (如內潮或天氣系統影響) 與真實熱浪事件持續性之判定需求。

對於離散的定義，是指每一次海洋熱浪事件具有明確且可界定的起始與結束時間。MHW 事件必須作為一個獨立單元存在，能清楚區分其發生與結束的時間點。然而，為考量海洋環境中短期自然變動的常態現象，該定義亦參考大氣熱浪的處理方式，對於熱浪期間出現的短暫冷卻間斷訂定。

具體而言，若兩次異常高溫期之間的低溫間隔不超過兩天，且低溫後仍接續有持續五天以上的異常高溫，則整段期間視為同一個連續的 MHW 事件。例如，若發生五天異常高溫後，接續兩天冷卻，再持續六天異常高溫，則整體將定義為一個連續 13 天的 MHW 事件 (5hot, 2cool, 6hot)。相反地，若異常高溫僅持續五天後，雖然冷卻期僅一天，但其後僅再出現兩天異常高溫，因後續異常期未達五天，則僅將首段五天視為完整的 MHW 事件 (5hot, 1cool, 2hot = 5 MHW days)；若順序為 2hot, 1cool, 5hot，同理也僅認定後段五天為新的 MHW 事件。

此外，若冷卻間隔超過兩天，例如發生五天異常高溫後接續四天冷卻，再出現六天異常高溫 (5hot, 4cool, 6hot)，則兩段異常高溫期將分別定義為兩個獨立的 MHW 事件，一個持續五天，一個持續六天。「離散性」的設計原則平衡了物理現象中的連續性與辨識上的一致性，既能保留事件的獨立特徵，又不因短期隨機擾動而破碎化長期異常高溫現象，有助於更真實地反映海洋極端事件的動態特性。

在量化層面上，Hobday 等人進一步提出層級化指標系統 (hierarchical metrics)，以描述每一個 MHW 的結構與強度變化。初級指標包括事件的持續時間 (Duration)、最大強度 (imax)、平均強度 (imean) 與累積強度 (icum)，用以比較不同事件的基本物理特徵；次級指標則涵蓋加熱速率 (ronset)、降溫速率 (rdecline) 以及空間範圍 (例如總面積 A 或海岸線長度 L)；三級指標則用於反映特定系統之預備條件 (preconditioning)，如前期水溫偏暖或暖期提前等，雖尚未納入正式定義，但對解釋生態衝擊有潛在參考價值。

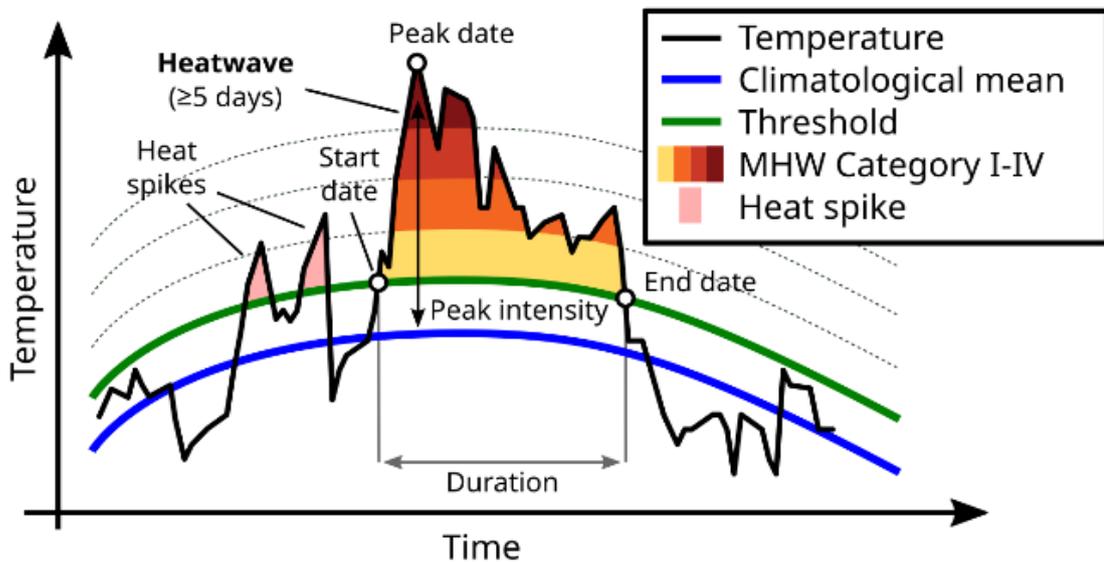


圖 2-1 海洋熱浪定義

圖片來源:marine heatwave tracker

第二節 海洋熱浪檢測方法

第一項 表層海洋熱浪

為建立一套具有跨區域可比性且具物理意涵的海洋熱浪 (Marine Heatwaves, MHWs) 識別準則，借鑑大氣熱浪研究的經驗，並參考 Perkins 和 Alexander (2013) 所提出的架構，Hobday (Hobday et al., 2016) 發展出一套結合統計氣候學與海洋物理特性的標準化檢測方法，已成為全球 MHW 研究的主流框架。該方法建構於一個核心概念之上，即將 MHW 定義為「特定地理位置上，持續發生的、異常溫暖的離散性水體事件」，並透過定量標準確保事件的可重複性與準確性。由於海洋的變率時間尺度遠長於大氣系統，因此該定義在事件持續時間與事件間間隔的設定上，較大氣熱浪定義略有不同，以反映海洋系統的物理特性。在定性層面上，MHW 定義本身不預設熱浪的驅動機制，也不預設其必然導致生態或經濟後果，而是作為一種靈活的框架，可依研究目的或實務需求進行延伸應用。例如在 2003 年地中海北部 (Garrabou et al., 2009)、2011 年澳洲西岸「寧加洛尼諾」(Ningaloo Niño) 事件 (Feng et al., 2013)，以及 2012 年西北大西洋 (Mills et al., 2013; Chen et al., 2014) 的熱浪中，可觀察到大氣加熱、陸地回饋與海洋環流等因

子可能共同驅動熱浪的發展，但其相對重要性依事件條件而異。因此，所提出之定義具有跨領域與跨區域應用的彈性，不僅能用於理論研究，也可支援如珊瑚礁監測、漁業資源評估等應用場景。

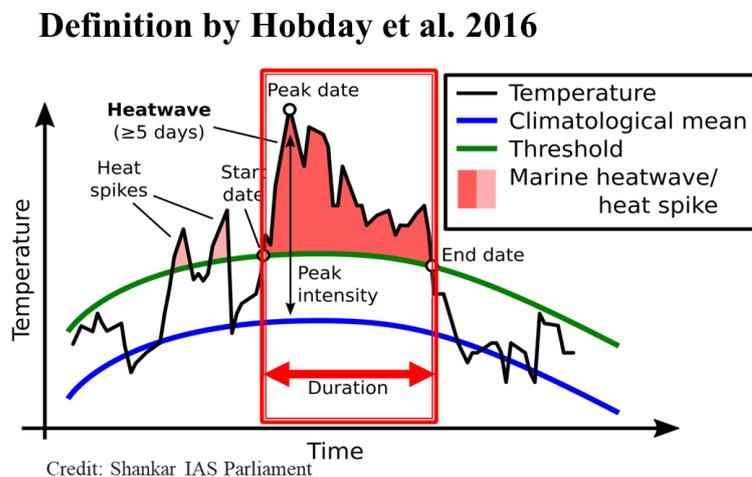
透過標準化的熱浪識別與量化方法，研究者得以系統性觀察熱浪事件的性質與發展，並據以推估其潛在衝擊。例如 2011 年 Ningaloo Niño 熱浪曾導致澳洲西岸經濟性甲殼類與軟體動物族群大量死亡 (Pearce et al., 2011; Hodgkinson et al., 2014)，顯示 MHW 監測不僅具生態研究價值，亦可作為漁業管理與災害預警之決策依據。

在建立氣候基準期方面，該方法建議使用至少 30 年的每日海洋表面溫度 (Sea Surface Temperature, SST) 資料，並依據「日序 (day-of-year)」進行統計處理。對於每一個日序，選取滑動視窗範圍內 (如 ± 5 天，共 11 天) 的所有歷年觀測數據，計算其氣候平均值與第 90 百分位數作為該日的氣候常態與異常溫度閾值。此作法兼顧年週期內的自然變異性與樣本統計穩定性，使得定義可靈活應用於不同緯度與季節的海域。此外，使用百分位數而非固定溫差 (如 $+2^{\circ}\text{C}$) 為門檻，具有跨區域可比性與生態敏感性，能更有效反映各地區生物群落對相對變異的響應。例如，對溫帶與熱帶地區來說， 1°C 的絕對變化可能具有截然不同的生態影響，因此相對百分位閾值更具普遍適用性。這種定義方式也避免對溫度變異較小的區域造成過度檢出，同時保留對高波動性區域的檢測靈敏度，因而成為目前 MHW 研究中最廣為採用的標準之一。

在異常溫暖條件的判定上，以每日海表溫度 (Sea Surface Temperature, SST) 的歷史分布資料為基礎，針對每一「日序 (day-of-year)」一年中第 n 天 (1 至 365/366) 計算其對應的溫度百分位數，並選擇第 90 百分位 (90th percentile) 作為判定閾值。此作法建立於氣候學常用的移動視窗概念上，通常以該日為中心前後各五天，共取十一天的歷史溫度樣本，進行多年 (建議至少 30 年) 為 1983 至 2012 年資料統計，以形成每日動態氣候基準。為避免短期天氣系統或內部海洋擾動造成事件片段化，該方法設有持續性條件：當異常高溫日持續五天以上，方可構成一次 MHW 事件；若異常期間出現一至兩天低於閾值的短暫中斷，且其後仍接續五日以上的異常溫暖狀態，則整段期間仍被視為

同一離散熱浪事件。這樣的條件設計反映海洋系統相對於大氣擁有更長熱慣性的物理特性，也提升事件識別的連貫性與穩健性。

海洋熱浪的空間範圍可透過網格化資料進行量化。使用 NOAA OISST 等格點資料集，在研究區域的每個空間網格點重複進行時間序列分析，逐日判斷該點是否符合 MHW 條件，並統計所有超過門檻的格點總面積，即可得到每日 MHW 覆蓋面積。透過此方式建立的每日空間指標，進一步可用於探討 MHW 對特定區域海洋生態系統的潛在影響，如珊瑚白化、浮游生物異常或漁業資源分布變遷。



異常溫暖
海洋表面溫度需高於30年[1983-2012]氣候值90%門檻值
持續性
異常溫度事件需連續發生五天以上
離散性
定義明確的起迄時間與中斷準則用以區分不同事件

圖 2-2 海洋熱浪標準化定義

圖片來源: Shankar IAS Parliament

第二項 次表層海洋熱浪

雖然 Hobday 等人 (Hobday et al., 2016) 所提出的海洋熱浪 (Marine Heatwaves, MHWs) 定義已被廣泛採納，並成為當代 MHW 研究的標準框架，其具體標準 (如日序百分位、5 天持續性、滑動視窗法等) 對於每日解析度的海表溫度資料具高度適用性。然而，當分析對象為次表層溫度 (如海表面以下 5 至 200 公尺) 時，實務上多倚賴衛星

無法直接觀測的再分析資料或實測剖面資料，而這些資料多為月平均值，解析度不足以支援 Hobday 架構中以日為單位的統計方法，若強行套用將導致時間細節失真與誤判偵測。

為因應此一限制，決定參照 Jacox 等人 (Jacox et al., 2020) 在其研究中，提出了一套建構於月尺度溫度資料之 MHW 偵測方法。方法邏輯為，首先，使用 1982 - 2011 為基準期，對每一個月份建立獨立的氣候平均值 (climatology)；再來，將月平均溫度扣除當月氣候均值，得到異常值；最後，透過三個月滑動視窗計算 90 百分位數作為當月門檻，判斷是否構成熱浪事件。Jacox 強調需將溫度資料進行線性去趨勢處理 (detrending)，以剔除長期暖化所造成的基線抬升，避免將氣候趨勢誤判為頻繁熱浪。

Jacox 的研究也指出，月尺度定義雖不及日資料細緻，但更能聚焦於具生態與管理意義的「主事件」(main events)，例如早期在定義大氣熱浪時，由於大氣的記憶性很小，通常被視為隨機的，而海洋中的相關時間尺度可以從幾天到一年以上，因此，Jacox 等人認為一個月的最短 MHW 持續時間相對於大氣熱浪定義來說是更合適的尺度，以及基於月度數據的 MHW 定義與報告的影響更加一致。

相較之下，Hobday 方法在偵測短期、瞬時型熱浪事件方面仍具優勢，特別適用於高時間解析度的日資料，能準確捕捉如颱風、風應變或海洋熱通量突變等造成的局部高溫異常，強調定點式異常分析，更能呈現區域暖化與極端事件之時序變異。因此，目前本研究在處理海表 MHW 時仍採用 Hobday 方法，以日序百分位與 5 日持續標準監測瞬時熱浪；但在探討次表層 MHW 時，為符合次表層資料解析度特性與生態研究需求，則採用 Jacox 方法進行月尺度延伸，作為延伸 Hobday 等人日尺度標準至月尺度次表層 MHW 偵測之依據，兼顧資料可行性與生態解釋能力。

第三節 鰻魚產卵區

本研究以 Lin 與 Wu (2019) 所界定之日本鰻 (*Anguilla japonica*) 海洋產卵場為核心區域，將西馬里亞納海脊西側 12–15°N、140–142°E (圖示紅框) 視為卵與初孵前葉狀幼生 (preleptocephali) 主要產出帶，位處北赤道流 (NEC) 與鹽度鋒面附近。早期幼生可能展現晝夜垂直遷移 (DVM) 之行為設定，在夜間深度 50 m、日間深度 150 m。在此物理—生態背景下，提出以下機制型假說：產卵區海溫 (含 0 m、50 m、150 m 層) 之年際異常，會透過影響卵／初期幼生存活率與發育時序，進而改變後續回游至沿岸 (臺灣、日本、韓國、中國) 之玻璃鰻補撈量；由於初期幼生以被動隨流為主，該影響將經由「存活—輸運—到達」鏈條，在約 6–18 個月 (視當年環流與發育速率而定) 後反映至各國漁區的年別產量。圖 2-3 中，產卵區位於西馬里亞納海脊西側鹽度鋒面附近 (紅框)，NEC 向西輸送使幼生隨後進入敏達那歐洋流 (MC) 與黑潮主幹 (Kuroshio) 側緣。若產卵季海溫異常偏高 (或垂向穩定度顯著加強) 降低卵／初孵存活，即可能造成在 1 個產季後於沿岸捕撈區呈現產量偏低。反之，適宜的熱環境與穩定的垂向結構，預期有利於高存活與準時輸運，對應次年較高的玻璃鰻捕獲。

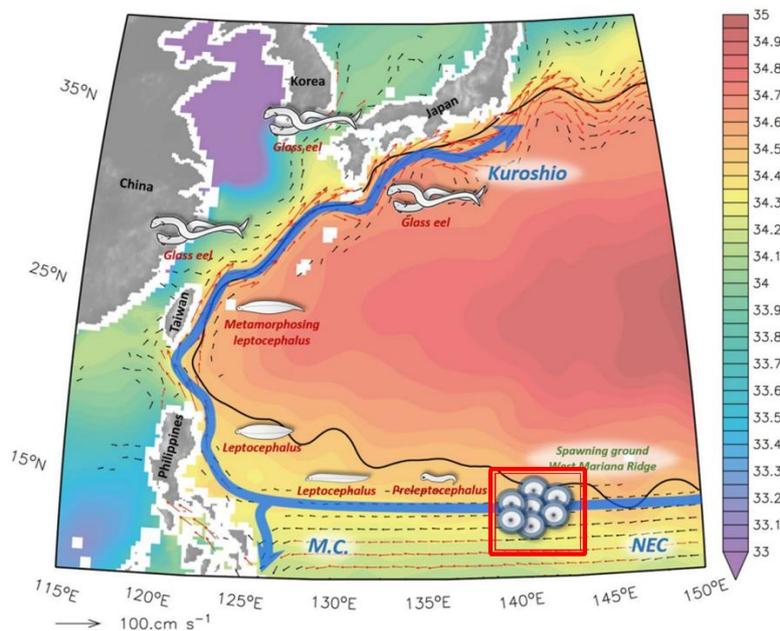


圖 2-3 鰻魚產卵區與成長路徑

圖片來源: Lin 與 Wu (2019) 文章

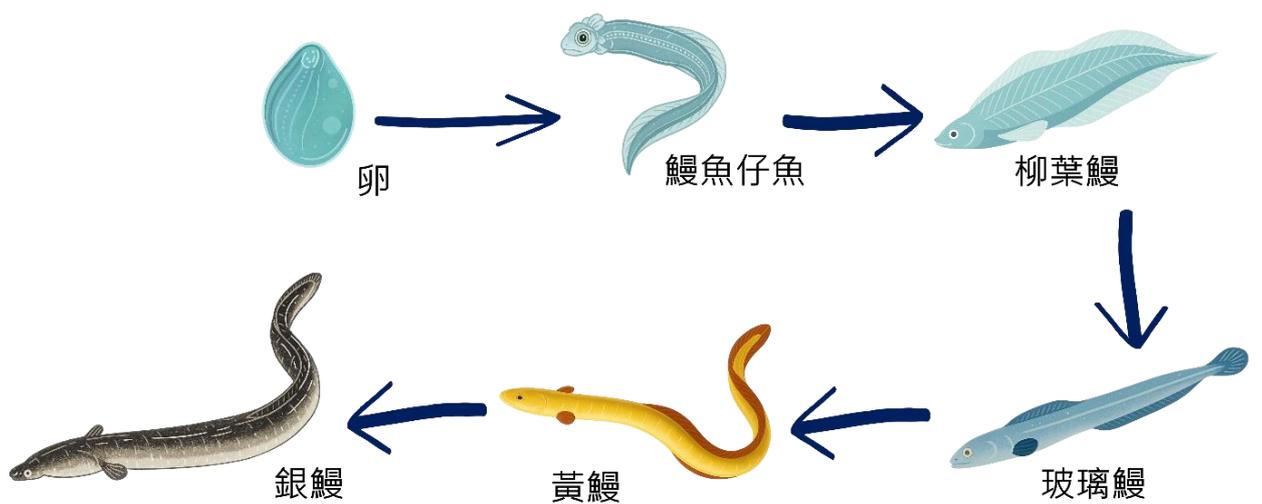


圖 2-4 鰻魚生長史

圖片來源:研究者自行整理繪製

第四節 鰻魚的溫度適宜性

日本鰻 (*Anguilla japonica*) 的產卵區位於西馬里亞納洋脊西側、約 $12 - 16^{\circ}\text{N}$ 的北赤道流 (NEC) 帶，卵與鰻魚仔魚 (pre-leptocephalus) 主要集中在溫躍層頂端約 150 - 180 m 的淺層水域，該層常見水溫約 $\sim 26^{\circ}\text{C}$ ，且與區域低鹽度鋒面位置同步變動 (Aoyama et al., 2014; Tsukamoto, 1992)。這些現地證據顯示日本鰻屬於「淺層產卵」，而非深海型繁殖，並利用鋒面/海山等海洋結構作為聚集與同步產卵的環境線索 (Aoyama et al., 2014; Tsukamoto, 1992)。

就「卵期實際經驗溫度」而論，根據採集卵的發育階段、卵上升速度與 CTD 剖面反推，卵自推定約 $\sim 230\text{ m}$ 的產卵深度上升至 150-180 m 聚集層時，所歷經之經驗/孵育溫度約為 $20 - 26^{\circ}\text{C}$ ；該估計亦吻合新月前的夜間產卵窗口 (Higuchi et al., 2020)。耳石 $\delta^{18}\text{O}$ 反演同樣指出卵/初孵仔魚主要位於上躍溫層 ($\sim 150\text{ m}$)、對應約 $25.5 - 27.3^{\circ}\text{C}$ 的環境條件 (Shirai et al., 2018)。因此，自然場域給出的「有利孵育」熱環境可概括為 $20 - 26^{\circ}\text{C}$ (Higuchi et al., 2020; Shirai et al., 2018)。

控制實驗提供了可直接引用的最佳溫度範圍與風險閾值：日本鰻卵在 22 - 28 °C 的區間具有較高孵化/早期存活率，24 - 26 °C 為「存活高+畸形率低」的品質最佳帶；而在低於 18 - 19 °C 或高於 30 - 31 °C 時孵化幾乎失敗（Okamura et al., 2007；Kurokawa et al., 2008；Ahn et al., 2012；亦見 Unuma et al., 2012 指示胚胎最適約 24 - 27 °C）。這些實驗性結果與產卵場推得之 20 - 26 °C 自然經驗溫度互相印證，提供評估「有利/不利熱環境」的定量依據（Okamura et al., 2007；Kurokawa et al., 2008；Ahn et al., 2012；Unuma et al., 2012）。

本研究在關注次表層海洋熱浪，即溫躍層頂端的異常增暖時，24-26°C 作為「最適核心帶」、20-26°C 作為「有利孵育帶」，Okamura 等人（Okamura et al., 2007）提到孵化與飼養日本鰻（*Anguilla japonica*）卵與未攝食仔魚的最適溫度約為 25-28°C，所以主要關注為≥28°C（持續多日）作為潛在熱/壓力門檻；當溫度上移或長期超出最適帶時，卵/初孵階段的存活率可能下降，進而透過輸送與補充量反映到後續的鰻線入河與漁獲。

表 2-1 日本鰻早期生命階段適宜溫度（本研究自行整理）

生命階段	適宜/經驗溫度(°C)	主要文獻
卵	經驗 20-26°C 最適 24-26°C <18/>31 °C 幾乎不孵化	Higuchi et al., 2020 Okamura et al., 2007
鰻魚仔魚	26-28°C	Higuchi et al., 2020 Ahn et al., 2012
柳葉鰻	24-28°C	Yamada et al., 2009 Kim et al., 2007

第五節 鰻魚垂直移動行為

在卵階段。日本鰻可能在~230 m 產卵，卵因正浮力以~3.69 m h⁻¹ 的速度上升，約 14–22 h 可抵達 150–180 m 的溫躍層頂端形成聚集層，淨垂直位移約 50–80 m；此上升歷程對應的「經驗溫度」為 20–26 °C (Higuchi et al., 2020；Aoyama et al., 2014)。

鰻魚仔魚／前期柳葉鰻 (pre-leptocephalus)。耳石 $\delta^{18}\text{O}$ 反演與現地樣本顯示，此階段主要分布在海表以下 ~150 m 的上躍溫層與其上緣 (約 25.5–27.3 °C)，短時間垂直位移幅度有限 (Shirai et al., 2018)。推論若次表層 MHW 使 ~26 °C 等溫面 顯著上移或擴張，會壓縮可用棲位厚度，直接影響早期生存 (Shirai et al., 2018)。

柳葉鰻 (leptocephalus) 階段。進入成長期後出現明顯的日週期垂直遷移夜間 50 – 100 m、白天 100 – 150 (至 200) m，日振幅約 50 – 150 m；夜間分布會隨體長成長而更趨淺化 (Otake et al., 1998；Kim, 2007；Yamada et al., 2009；Miller, 2017)。

基於上述垂直行為，本研究將 5 – 205 m 作為「次表層 MHW 影響層」將在深度×月份的框架中分別追蹤此區間的深度發生的海洋熱浪，以檢驗「次表層 MHW → 早期存活 → 捕獲量」的機制。

表 2-2 日本鰻早期生命階段的垂直分布、位移 (本研究自行整理)

生命階段	主要深度帶 (m)	垂直位移量	主要文獻
卵	230 → 150→180m	上升 50–80 m	Higuchi et al., 2020 Okamura et al., 2007
鰻魚仔魚	150→180m	≈ <10 m	Higuchi et al., 2020 Ahn et al., 2012
柳葉鰻	白天 100→150m 晚上 50→100m	日幅 50–75 m	Yamada et al., 2009 Kim et al., 2007

第三章 研究資料與方法

本研究聚焦於西北太平洋地區，此區域地處全球氣候系統的關鍵節點，採用 JTWC 聯合颱風警報中心定義之西北太平洋(10°N - 45°N、90°E - 180°E)，包含黑潮(Kuroshio Current) 主軸通過區、親潮(Oyashio Current) 南下區，以及黑潮與親潮交會所形成之黑潮-親潮延伸區(Kuroshio-Oyashio Extension, KOE)。該區域海洋熱力與動力過程活躍，海表溫度(Sea Surface Temperature, SST) 變異性顯著，且為熱帶氣旋生成、增強與轉向的重要場域，長期受到亞熱帶高壓與 ENSO 等大尺度氣候模態的調節。因此，此區域極端暖化事件如海洋熱浪(Marine Heatwaves, MHWs) 的發生，不僅影響區域海洋生態系統與漁業資源，更可能透過大氣-海洋耦合作用對整個北半球氣候產生迴饋影響。

為確保長期趨勢分析的完整性與統計穩定性，研究資料選取期間為 1982 年至 2025 年，共計 43 年。1982 年為 NOAA OISST v2 高解析度海表溫度資料的起始年。此長時間序列涵蓋了多次 ENSO 週期與全球暖化加速及停滯期，有助於觀察 MHW 在不同氣候背景下的演變特徵與潛在機制。

第一節 研究資料

本研究所使用的海表溫度資料為 NOAA Optimum Interpolation Sea Surface Temperature, Version 2 (OISST v2)，該資料集由美國國家海洋暨大氣總署(NOAA) 提供，資料解析度為每日、 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 格點，涵蓋自 1981 年 9 月以來的全球海域。此資料融合衛星觀測(AVHRR)、船舶與浮標等現地量測資料，並透過空間插值與品質控制程序進行最佳化處理，具備高時空解析度與長期一致性，廣泛應用於全球氣候監測與極端事件偵測。MHW 偵測將依據 Hobday 等人(Hobday et al., 2016) 所提出之標準化方法進行，包括氣候基準期的設定(1982 - 2011)、每日第 90 百分位異常溫度門檻計算、持續性判準(至少 5 日) 與事件指標量化。

鰻魚捕獲量資料為台灣大學漁業科學研究所 韓玉山教授 提供，1990-2023 年日本、台灣、韓國與中國之鰻魚捕獲量。

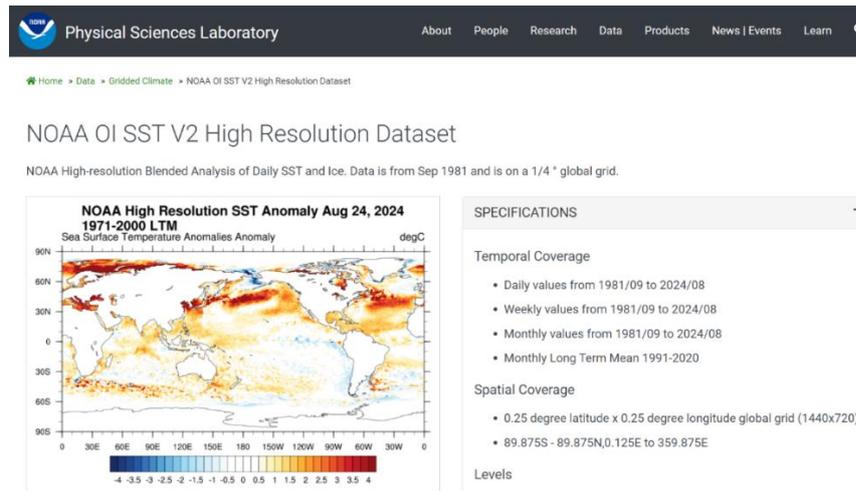


圖 3-1 海表溫度資料 OI SST V2

圖片來源: NOAA OI SST V2

本研究所使用的次表層海洋資料為 NCEP Global Ocean Data Assimilation System (GODAS)，由美國國家海洋暨大氣總署/國家環境預測中心 (NOAA/NCEP) 提供。該資料集自 1980 年 1 月起提供至今，時間解析度為逐月，空間解析度為 $0.333^{\circ} \times 1.0^{\circ}$ (緯度 \times 經度) 的全球格點。GODAS 為一多層次海洋同化系統，結合觀測與模式結果，涵蓋海洋溫度、鹽度、流場等物理變數，並透過同化程序改善模式模擬與觀測之間的偏差。由於 GODAS 提供自表層至深層的多層潛在溫度 (potential temperature) 資料，本研究選用其 5–205 公尺深度範圍的月平均潛在溫度，以探討次表層海洋熱浪 (MHWs) 的發生特徵。

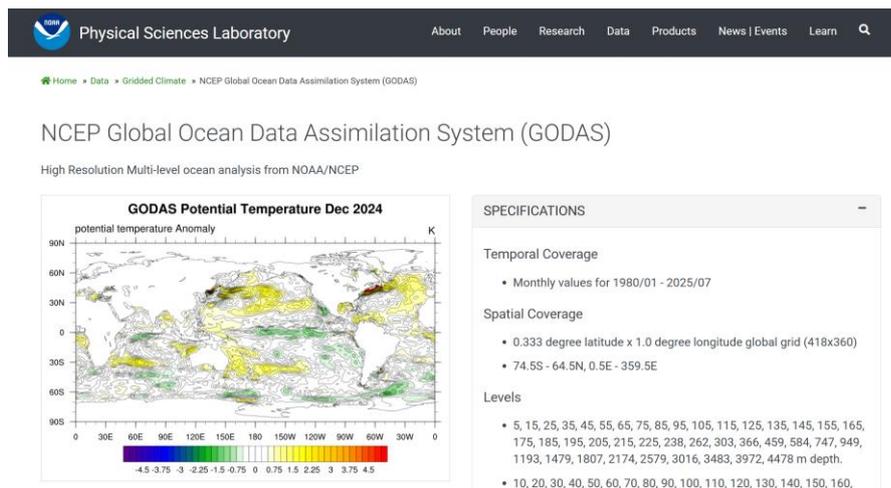


圖 3-2 次表層溫度資料 GODAS

圖片來源: NCEP GODAS

第二節 研究範圍

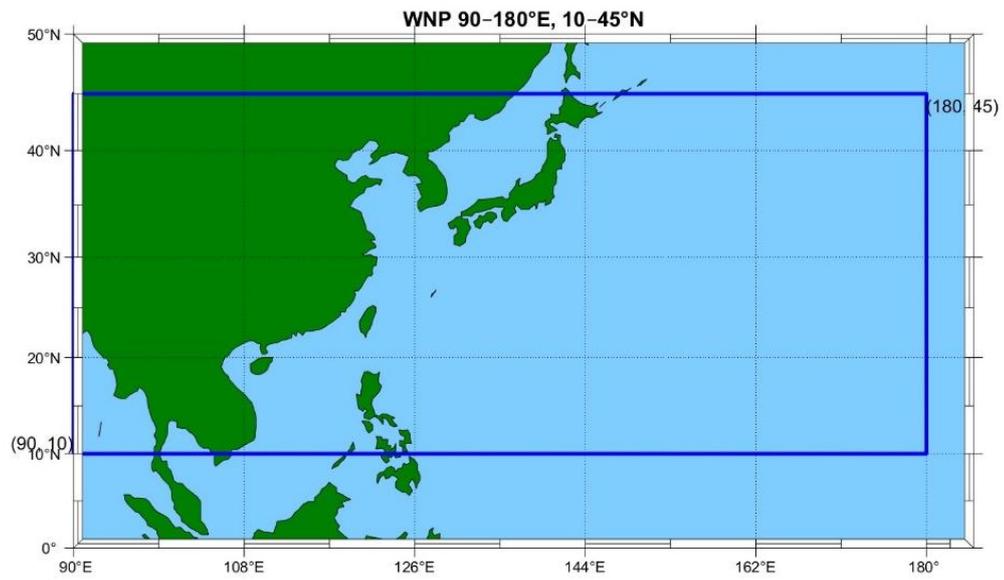


圖 3-3 西北太平洋範圍(90 - 180°E, 10 - 45°N)

圖片來源:研究者繪製

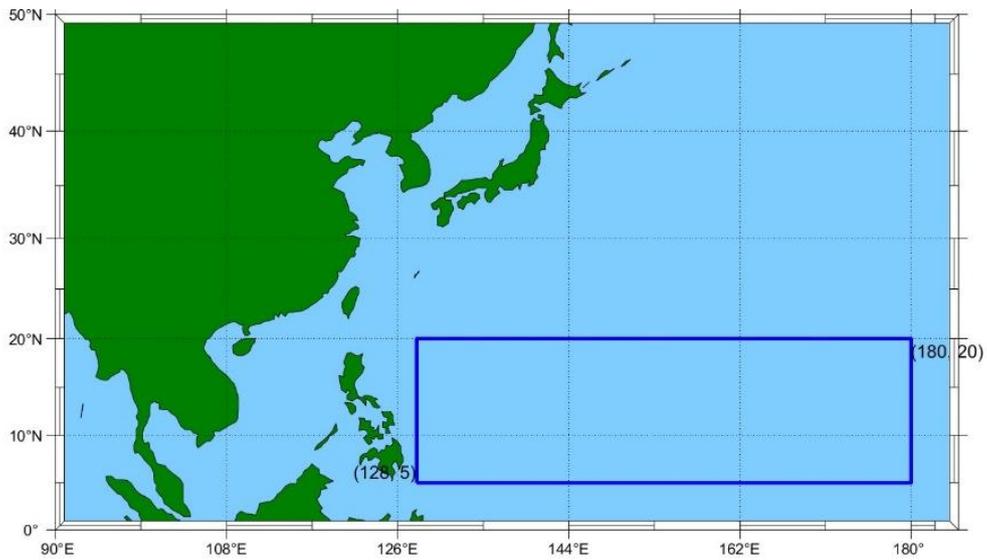


圖 3-4 西太平洋暖池區且為颱風易生成區(128 - 180°E, 5 - 20°N)

圖片來源:研究者繪製

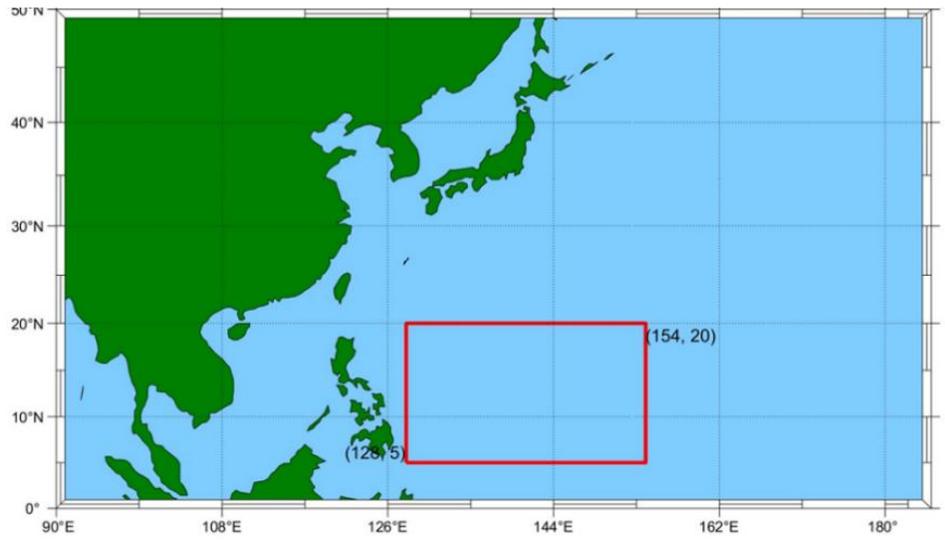


圖 3-5 西太平洋暖池左側(128 - 154°E, 5 - 20°N)

本次研究表層海洋熱浪選擇區域

圖片來源:研究者繪製



圖 3-6 鰻魚產卵區(128 - 154°E, 5 - 20°N)

本次研究表層海洋熱浪選擇區域

圖片來源:研究者繪製

第三節 研究方法

第一項 表層海洋熱浪



圖 3-7 表層海洋熱浪監測步驟

圖片來源:研究者自行整理

為探討西北太平洋地區近四十年來海洋熱浪 (Marine Heatwaves, MHWs) 之發生趨勢與特徵分布，本研究採用 Hobday (Hobday et al., 2016) 所提出之標準化檢測方法，進行事件識別與指標量化。該方法建構於大氣熱浪研究的理論基礎上，並針對海洋系統特性進行調整，特別強調 MHW 的離散性、持續性與相對異常性，使得該定義不僅具備物理一致性，也能廣泛應用於區域性與全球性的長期觀測資料分析。

在理論層面上，Hobday 等人 (Hobday et al., 2016) 將 MHW 定義為「在特定地理位置上，持續發生的異常溫暖水體事件」，此定義強調三個核心條件：其一，異常判定需相對於長期的氣候基準進行，避免因不同區域或季節的絕對溫度差異而造成誤判；其二，異常溫度需持續達一定時間，以區分短期自然波動與具生態意義的熱浪事件；其三，事件需具有明確的起訖時間與離散性，使其可作為分析單元納入統計與模型推估。

在具體操作上，本研究使用 NOAA 所提供之 OISST V2 日尺度海表溫度資料 ($0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 空間解析度)，資料期間為 1982 至 2025 年，涵蓋 44 年的觀測時序。為建立氣候基準期，選定 1983–2012 年共 30 年作為計算基礎，針對每一「日序」(day-of-year) 應用滑動視窗 (± 5 天，共 11 天) 取樣歷年該日的 SST 數據，使用 Oliver 所編寫的海洋熱浪模式 marineHeatWaves module，使用 python 程式，下載模式中 marineHeatWaves.py 套件，應用 Hobday 等人 (Hobday et al., 2016) 海洋熱浪定義，輸入海洋表面溫度以及時間向量，就可輸出所有檢測到的海洋熱浪，畫出海洋熱浪時間序列

計算出該日的氣候平均值 (T_m) 與第 90 百分位閾值 (T_{90})，此作法能有效反映年內變異性，並避免季節性升溫被誤判為熱浪。

在熱浪事件的識別上，若某一日實測 SST 超過其對應 T_{90} ，且此狀態連續持續五天或以上，則視為一次 MHW 事件。若中間出現一至兩天溫度略低於 T_{90} ，但前後皆為異常高溫期，則仍視為同一個事件的一部分。此一容許短期中斷的準則，考量了海洋系統中自然擾動（如天氣系統、潮汐或混合層深度變化）可能造成的短暫溫度波動，並維持事件的物理與統計連貫性。

對於每一筆偵測到的熱浪事件，本研究進一步量化其物理特徵，包含持續時間 (Duration) 即事件持續的總天數；以及最大強度代表事件期間 SST 與 T_m 之最大差值，並找出這 43 年間發生的強度前 10 大海洋熱浪。本研究亦將熱浪事件建立為時間序列資料，並針對西北太平洋整體區域與各子區進行年際與季節性統計分析。在時間維度方面，重點在於探討以下幾個問題，第一 MHW 事件是否呈現年際間變多、變強、變長的趨勢，第二是否具有季節性規律，如在夏季或秋季更常發生，第三是否在特定年份（如強 El Niño 年或極端暖年）中顯著增加，第四為進一步檢視氣候變遷對 MHW 的影響，亦將整個研究期間依年代劃分（如 1980s、1990s、2000s、2010s）進行對比，分析不同時期熱浪頻率與強度之變化，並以趨勢線評估潛在的加劇現象。

綜合而言，本研究透過 NOAA OISST 資料與 Hobday 檢測法的結合，建構出一套具備時間連續性與空間解析力的 MHW 分析框架，能有效揭示西北太平洋海洋熱浪的長期變異性與可能受 ENSO 調控的機制。透過標準化的熱浪偵測程序與指標分析，本研究可提升對極端海洋事件的認識和有效揭示在全球氣候變遷背景下，西北太平洋地區海洋熱浪活動的變化模式與潛在機制。

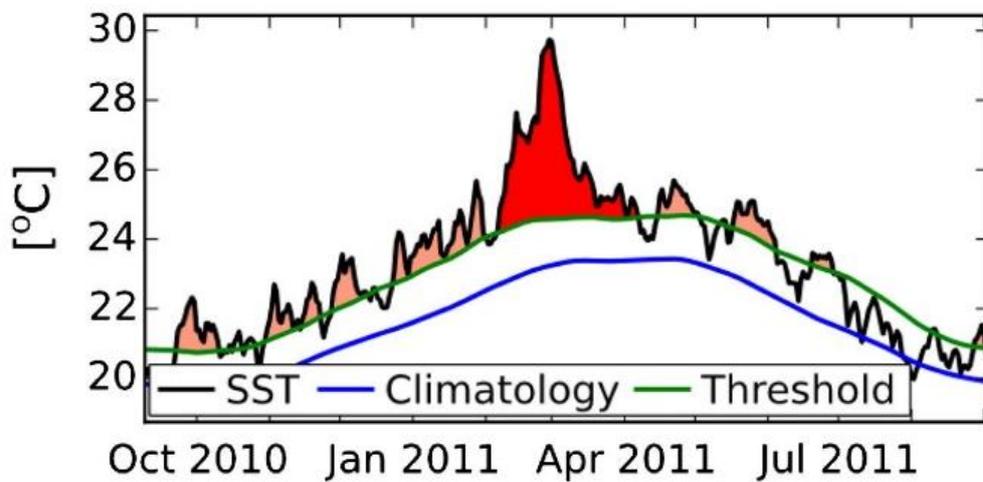


圖 3-8 表層海洋熱浪時間序列

圖片來源:Hobday et al.,2016

第二項 次表層海洋熱浪



圖 3-9 次表層海洋熱浪監測步驟

圖片來源:研究者自行整理

儘管 Hobday 等人(Hobday et al .,2016)提出之海洋熱浪定義已廣泛應用於全球 SST 資料之分析，但由於該定義主要建構於日尺度的海表溫度資料上，當應用於解析度較低或為月平均的次表層溫度資料時，可能將面臨偵測靈敏度不足與短期變異性喪失等挑戰。因此，本研究參考 Jacox 等人(Jacox et al .,2020)的方法，針對月尺度次表層溫度異常，

延伸 Hobday 框架至水下 5 - 205 公尺的次表層海域，進行月尺度海洋熱浪事件之判識與統計分析。

在資料來源方面，本研究使用美國 NOAA 提供之 GODAS 再分析資料，涵蓋 1980 - 2025 年共 46 年之月平均潛在溫度 (Potential Temperature, pottmp)，空間解析度為 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ ，垂直深度範圍為 5 - 205 公尺。針對西北太平洋產卵區域 ($12 - 15^{\circ}\text{N}$, $140 - 142^{\circ}\text{E}$)，本研究先將各深度層之溫度資料平均為區域月均溫，接著以 1983 - 2012 為基準期，計算每月的長期平均值 (climatology) 與第 90 百分位閾值 (T90)。若某年某月之月均溫高於 T90，且此狀態連續一個月以上，則視為一次月尺度 MHW 事件。

為反映次表層的整體熱含量變化，本研究亦針對 5 - 105 公尺、5 - 205 公尺等不同垂直範圍進行垂直平均，建立三維空間 (緯度 \times 經度 \times 深度) 與時間序列結合的熱浪資料集，進行不同深度層與不同季節的 MHW 活動統計。透過與表層熱浪事件之對比分析，進一步檢視次表層熱浪的持續性。

第三項 研究鰻魚捕獲量與海溫變異性

鰻魚捕獲量與海溫變異性分析



圖 3-10 鰻魚捕獲量與海溫變異性分析流程圖

圖片來源:研究者自行整理

為探討次表層海溫變異是否影響鰻魚生存與後期資源量，本研究整合四個主要東亞鰻魚生產國（台灣、日本、韓國與中國）之統計年報捕獲量資料（1990–2023），建立跨年度之總量資料集，並與西北太平洋鰻魚產卵區的海溫變化進行相關性分析。在方法設計上，分三個階段進行。

- 一、初步相關分析：針對每年 1–12 月、5–205 m 深度的月平均海溫（即前一年海溫）進行垂直剖面相關分析，計算不同月份與不同深度的海溫變異與隔年總捕獲量（Total Catch）的 Pearson correlation。結果以垂直剖面圖呈現相關係數 r 值與顯著性（ p 值），以辨識高相關月份與關鍵深度帶。
- 二、空間平均與分國分析：將產卵區（12–15°N, 140–142°E）於 5–105 m 深度的海溫資料進行三度空間平均（lat × lon × depth），建構出代表性溫度指標，設 28°C 設定為臨界值，因為參考 Okamura 等人研究所指出之日本鰻卵與鰻魚仔魚之最適溫範圍上限（Okamura et al., 2007，最適約 25–28°C），故直接用以評估熱浪事件與早期鰻魚生活史階段生理閾值之重疊情形，再與四個國家隔年捕獲量進行獨立相關性分析。進一步依國別呈現時間序列圖，顯示各國捕撈量與前一年海溫變化之相關趨勢。
- 三、熱浪事件交叉驗證：對於高相關月份與深度範圍，進一步比對是否出現 MHW 事件，並計算 MHW 年份與捕撈量變異之平均差異。此步驟將用以驗證熱浪是否為鰻魚捕獲量變動之潛在解釋因子。

本研究預期透過長期時序與多層深度的相關性分析，找出最具代表性的「指標月份」與「深度帶」，並與海洋熱浪事件交叉比對，推測鰻魚產卵後期與鰻魚仔魚階段的環境暴露是否受到熱浪擾動影響，推測是否影響早期死亡率與存活率，進而影響鰻魚捕獲量。

第四章 研究過程

第一節 研究架構

本研究建構一套「由熱浪偵測到對海洋生物之影響」的整合框架，包含四個架構首先為表層海洋熱浪（以日資料 SST 依 Hobday 等人之定義偵測事件）、第二為次表層海洋熱浪（以月資料之潛在溫度延伸 Jacox 等人邏輯判定）、第三為海溫變異統計（跨月份、跨深度、跨年代的氣候態與異常量化），以及最後的鰻魚捕獲量比對（總量與分國別，進行時序與相關檢定）。透過一致的氣候基準與空間範圍聯結，研究時空範圍界定為 1982–2025 年、表層海洋熱浪監測範圍西太平洋暖池左側(128 – 154°E, 5 – 20°N)，本次研究表層海洋熱浪選擇區域，次表層海洋熱浪監測範圍西北太平洋 12–15°N、140–142°E（日本鰻主要產卵帶與其上游水團）。表層資料採用 NOAA OISST v2（日尺度、0.25°）；次表層採用 GODAS（月尺度，5–205 m 多層）；生物面資料整合 台灣、日本、韓國與中國 1990–2023 年玻璃鰻捕撈量年統計。整體架構以流程圖呈現資料來源 → 前處理 → 事件偵測/統計 → 與漁獲關聯檢定之關係。

資料處理依序為資料載入（缺值、時間座標轉換）→ 氣候基準建立 → 熱浪指標計算 → 年際/年代際趨勢評估 → 與捕獲量之皮爾森相關與顯著性檢定。工具採 Python（xarray、numpy、pandas、marineHeatWaves）、MATLAB（netCDF 讀寫與圖徵）、與 Excel（表格彙整）。基準與參數統一氣候基準期 1983–2012；分位數以滑動視窗估計；顯著性以雙尾檢定 $p < 0.05$ ，本研究一律將「捕撈年對應前一年海溫作為比較基礎。

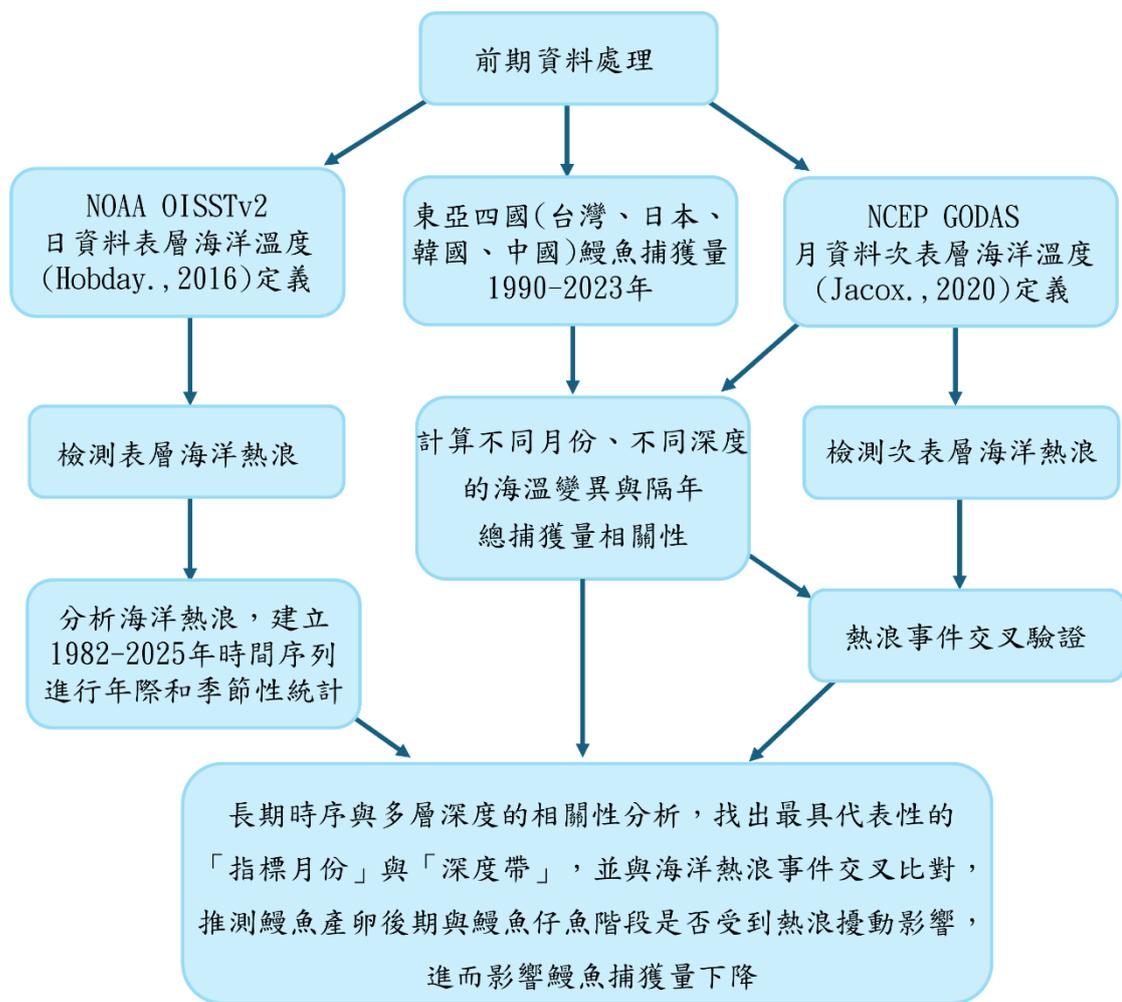


圖 4-1 研究架構

圖片來源:研究者自行整理

第二節 表層海洋熱浪

第一項 Hobday 定義與分析原則

本研究遵循 Hobday 等人(Hobday,2016)之 MHW 定義，在固定地點、日尺度的 SST 高於第 90 百分位（相對於季節性氣候態）且連續 ≥ 5 天，視為海洋熱浪。此定義兼顧相對異常性（避免以絕對溫度誤判不同季節/緯度）、持續性（排除短暫擾動）、與事件離散性（可計算起訖、強度、累積熱量等指標）。為捕捉極端、短週期事件，表層分析採日資料並維 ± 5 日（共 11 日）的季節滑動窗以估計每一日的氣候平均與第 90 百分

位閾值。實作上使用 marineHeatWaves.py 套件輸出事件表（起訖日、持續天數、最大/平均強度、累積強度等），再進行年際與年代際統計

第二項 OISST 資料處理與熱浪偵測

SST 來源為 NOAA OISST v2 (1982–2025, 0.25°)。先以 1983–2012 為基準期、對每一「年內日序」以 ± 5 日聚合法估計氣候平均與第 90 百分位閾值，再以實測日 SST 比對判定事件。允許事件內出現 1–2 日短暫跌破第 90 百分位閾值仍歸為同一事件，以避免天氣擾動造成的不連續。事件層級輸出後，彙整為年度頻率、總天數、最大/平均強度與極端事件排名等指標，並以年 (1980s/1990s/2000s/2010s/2020s) 比較趨勢，評估是否呈現更多、變強、變長之變化，並與 ENSO 年份對照。

第三節 次表層海洋熱浪

第一項 GODAS 垂直剖面資料處理

次表層溫度採 GODAS 月平均潛在溫度 (pottmp)，垂向取 5–205 m 多層，時間涵蓋 1980–2025。為對齊鰻魚生態層，本研究同時彙整 5–105 m、5–205 m 等垂直平均指標。空間上先對 12–15°N、140–142°E 進行格點平均，並以 1983–2012 為基準期，逐月建立氣候平均與第 90 百分位門檻。考量月尺度的平滑特性與資料解析度，次表層事件採用 Jacox 等人 (Jacox., 2020) 建議邏輯以月均溫為檢定量，判定是否跨越同月之第 90 百分位閾值 T90。

第二項 月尺度熱浪事件判定與空間統計

當任一深度層的月均溫高於對應月份 T90，且連續 ≥ 1 個月，即判定為一次次表層 MHW 事件；事件指標包含：持續月份數、最大/平均超閾溫差與事件覆蓋深度。進一步比較表層與次表層事件時序，辨識「潛伏熱浪」(表層不顯著、次表層顯著) 的案例，評估其對中上層生物之潛在影響。最後以剖面圖與等值線圖呈現 0–200 m 內 MHW 活動的垂直結構、季節性與年代際變化。

第四節 海溫變異性與鰻魚捕獲量之關聯

第一項 捕獲資料整理與總量建構

彙整 1990–2023 年台灣、日本、韓國與中國之玻璃鰻捕撈量年資料，建立分國別與四國總量序列。為反映捕撈制度差異與年際波動。由於捕撈季跨年（約 前一年的 11–12 月 + 當年的 1–5 月），分析時以捕撈年 Y 對應前一年（Y-1）整年的海溫條件，確保時序對齊。

第二項 時序比對與 Pearson 相關分析

以皮爾森積差相關係數評估海溫與捕獲量間的線性關聯。流程包含三層次

- 一、月×深度剖面：對前一年 1–12 月 × 5–205 m 的每一（月，深度）與隔年四國總量計算 r 值相關性與 p 值，繪製垂直相關剖面，標示 $p < 0.05$ 。
- 二、空間平均指標：將產卵區 (lat×lon×depth) 進行空間平均（如 5–105 m）得到代表性溫度指標，分別與各國捕獲量計算 r，比較國別差異（日本、韓國常呈顯著負相關）。
- 三、關鍵月份回溯：挑出月×深度剖面中之高相關區塊，回查該期是否同時出現表層或次表層 MHW，作為機制推論依據。

第三項 產卵期海溫與資源變化探討

依鰻魚繁殖與初期洄游時序，建立「產卵季海溫指標」：前一年 1–5 月（JFMAM）於 5–105 m 的體積平均溫度，作為影響卵孵化與早期幼生存活的代表量。將該指標與四國分別及總量之下一年捕撈量比對，呈現時間序列與相關值；另以年代切分（1990–1999、2000–2023）比較暖化前後之基線差異（2000 年後多數年份 $> 28^{\circ}\text{C}$ ）。綜合評估高溫與熱浪是否可能經由降低產卵成功率、改變幼生漂移路徑/時程或提高早期死亡率等機制，導致隔年資源量下降；並推測日本、韓國相較台灣、中國呈現更穩定負相關（黑潮分支動力、棲地差異與捕撈壓力等）。

第四項 補充說明方法一致性

- 一、缺值處理：OISST 與 GODAS 之極端負值（例如 $< -1\text{e}10$ ）均轉為 NaN。
- 二、時間對齊：GODAS NetCDF 時間以「days since 1800-01-01」轉換，OISST 以實際日期索引；所有相關性以「捕撈年對應前一年海溫 (lag1)」為準。

三、單位一致：GODAS 溫度從 K 轉 °C (-273.15)；OISST 為 °C。

四、圖表，月×深度相關剖面、國別雙軸圖（左：溫度，右：捕獲量）、年代平均線（如 28 °C 基線）等均遵循同一顏色與標示規則（顯著性以紅圈標註標示 $p < 0.05$ ）。

第五章 結果與討論

第一節 表層海洋熱浪

第一項 表層海洋熱浪統計

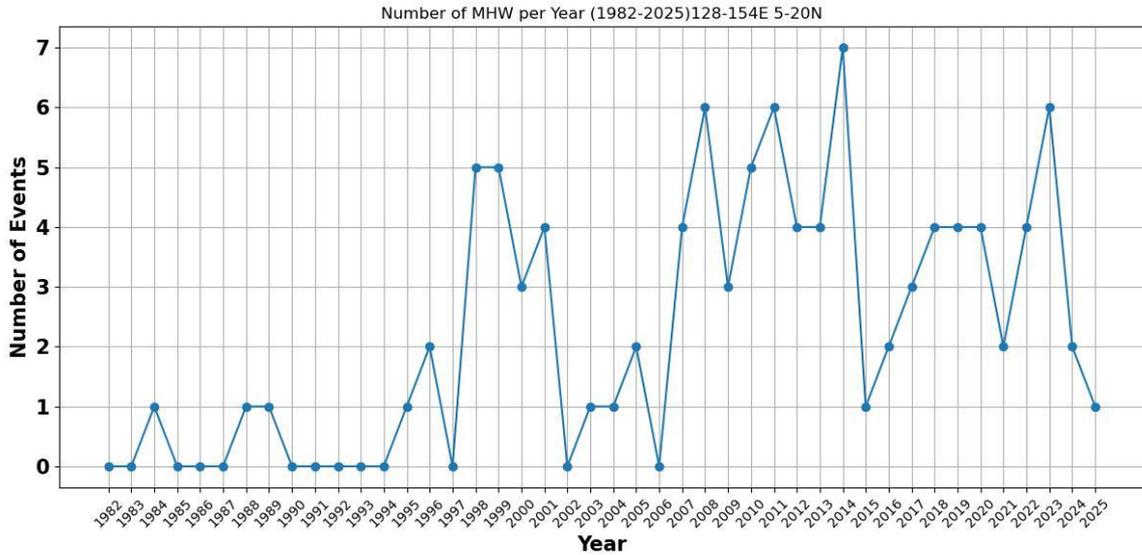


圖 5-1 西太平洋暖池總海洋熱浪事件

圖片來源:研究者繪製

圖 5-1 是西太平洋暖池左側區域 (128–154°E, 5–20°N) 自 1982 年至 2025 年間每年海洋熱浪 (Marine Heatwaves, MHWs) 事件共發生 92 起。橫軸為年份，縱軸為每年偵測到的 MHW 事件總數。圖中清楚顯示，該區域在過去四十餘年間，MHW 活動呈現出由低頻稀疏到高頻密集的顯著變化趨勢，且自 1998 年起，事件數量與變異幅度皆大幅提升。

在 1980 年代至 1990 年代初期 (1982–1996)，MHW 活動明顯稀少，每年事件數大多維持在 0 至 1 起之間，僅 1989 與 1996 年有稍微上升，顯示當時海表溫度 (SST) 尚未頻繁突破長期氣候門檻，第 90 百分位之基準值亦較穩定。然而，自 1997 年起，MHW

發生頻率明顯升高，1997 與 1998 年皆出現 5 起事件，為觀測期中首次出現的多起強烈海洋熱浪年。

2006–2013 年在此期間，多數年份事件數維持在 5–6 起之間，2013 年更達到圖中最高值 7 起，為整個觀測期內最為極端的一年。2015 年以後，MHW 事件雖有波動，但整體頻率仍偏高。例如 2017、2018、2019 四年間事件數皆維持在 4 起，呈現短期穩定。2021 與 2023 年分別再度出現 6 起事件，顯示在「再加速暖化期」背景下，該區域 MHW 已呈現多事件、多年重疊、強度持續的特徵。

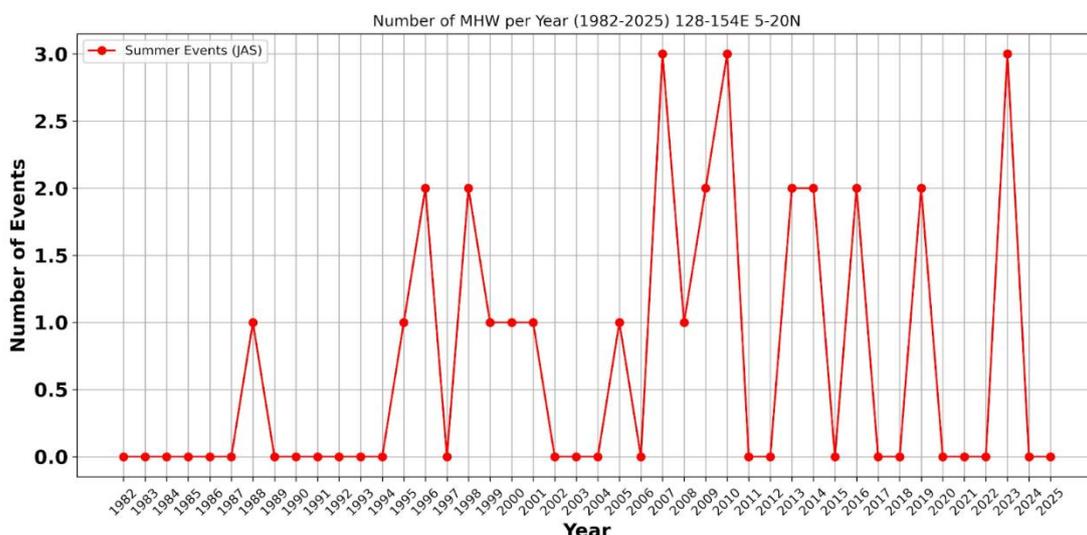


圖 5-2 西太平洋暖池夏天(7-9 月)總海洋熱浪事件

圖片來源:研究者繪製

圖 5-2 為西太平洋暖池左側區域 (128–154°E, 5–20°N) 在 1982 至 2025 年間夏季 (7 月、8 月、9 月) 所偵測到之海洋熱浪 (Marine Heatwaves, MHWs) 事件數統計圖。圖中橫軸表示年份，縱軸表示每年 7–9 月期間偵測到的 MHW 事件數。整體趨勢清楚呈現出自 1990 年代中後期以來，該區域夏季熱浪事件的頻率明顯增加，並呈現出數個重要的階段性變化。

首先，在 1980 年代至 1990 年代中期，夏季 MHW 發生極為稀少，多數年份事件數為 0，僅在 1988 年與 1995 年出現零星事件。此時期整體背景氣候仍較穩定，區域 SST

異常幅度較小，反映出熱浪事件的生成尚屬偶發性。進入 1997–2000 年後，熱浪事件數明顯上升。2006–2015 年為第二個明顯頻繁期。圖中顯示在 2006、2008 與 2010 年連續出現 3 起事件高峰，為圖中最高值。後續的 2011 至 2015 年間亦呈現每年 1 至 2 起事件的穩定頻率，反映出夏季海洋熱浪已從偶發轉為常態化現象。

2020 年再度出現 3 起夏季 MHW 事件，標誌著近年熱浪強度與頻率同步升高的現象。此與當年太平洋暖池異常擴展與西北太平洋 SST 升高有關，也可能受到區域性氣候模態與背景暖化共同驅動。值得注意的是，2023 年亦達 3 起事件，再次反映出西太平洋暖池已成為熱浪高風險區域。

至於 2021–2022 年雖事件為 0–1 起，但仍高於 1980 年代至 1990 年代基準平均，顯示即使在「非極端年」期間，區域仍具有熱浪生成潛勢，說明該區背景熱量狀態已有結構性提升。西太平洋暖池在夏季期間海洋熱浪事件從稀少轉為高頻的過程，反映出區域氣候系統已進入一個受全球暖化與內部氣候模態交互影響的熱力驅動新常態。未來若熱浪頻率與強度持續上升，該區之海洋生態系與漁業資源可能面臨更嚴峻之衝擊與調適挑戰。

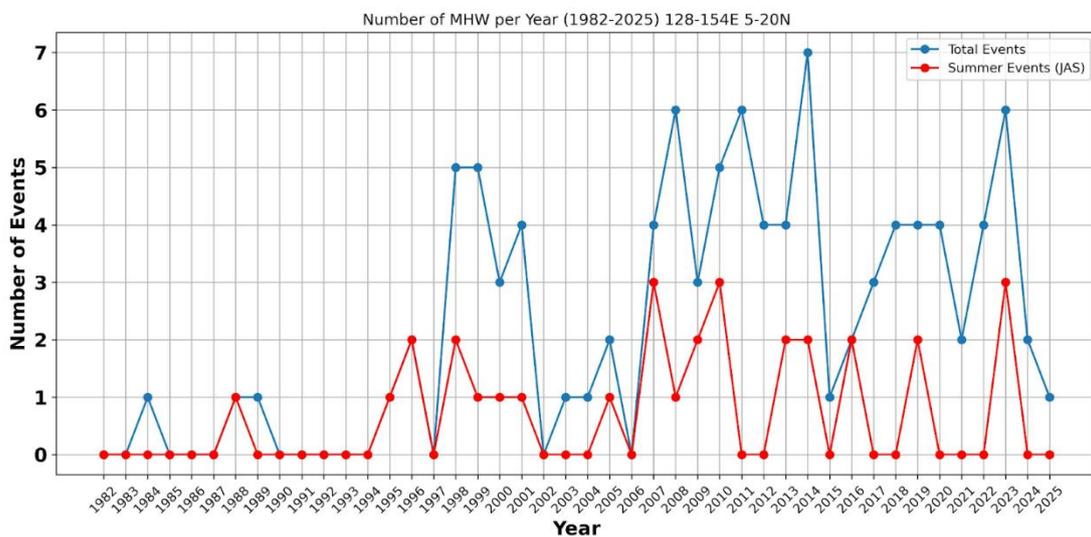


圖 5-3 西太平洋暖池總海洋熱浪事件對比夏天

圖片來源:研究者繪製

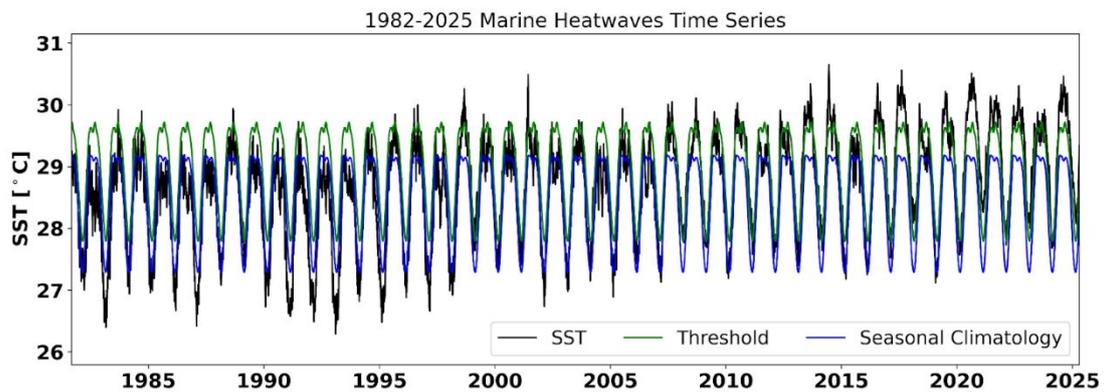


圖 5-4 西太平洋暖池 1982 到 2025 年海洋熱浪時間序列

圖片來源:研究者繪製

圖 5-3 為西太平洋暖池左側區域 (128–154°E, 5–20°N) 1982 到 2025 年海洋熱浪時間序列，圖中以黑線表示日平均 SST、藍線為 30 年氣候基準期 (climatology) 之季節氣候值，而綠線則為每日日序的第 90 百分位值 (threshold)，代表 MHW 的判定閾值。當 SST 超過此閾值且持續五天以上時，即定義為一個 MHW 事件。觀察可見，SST 呈現出明顯的年週期振盪，反映出區域性季節變化。然而，自 2010 年後，黑線頻繁超過綠線，特別在 2020 年以後更為明顯，顯示近年來 MHW 事件的頻率與強度明顯增加。這與氣候變遷導致的背景海溫上升密切相關。但因為 1982-2025/4/30 的時序圖太壅擠，故將圖分為三排，依序顯示 1982–1996、1996–2010、2010–2025 等三個時期的日海表溫度變化。

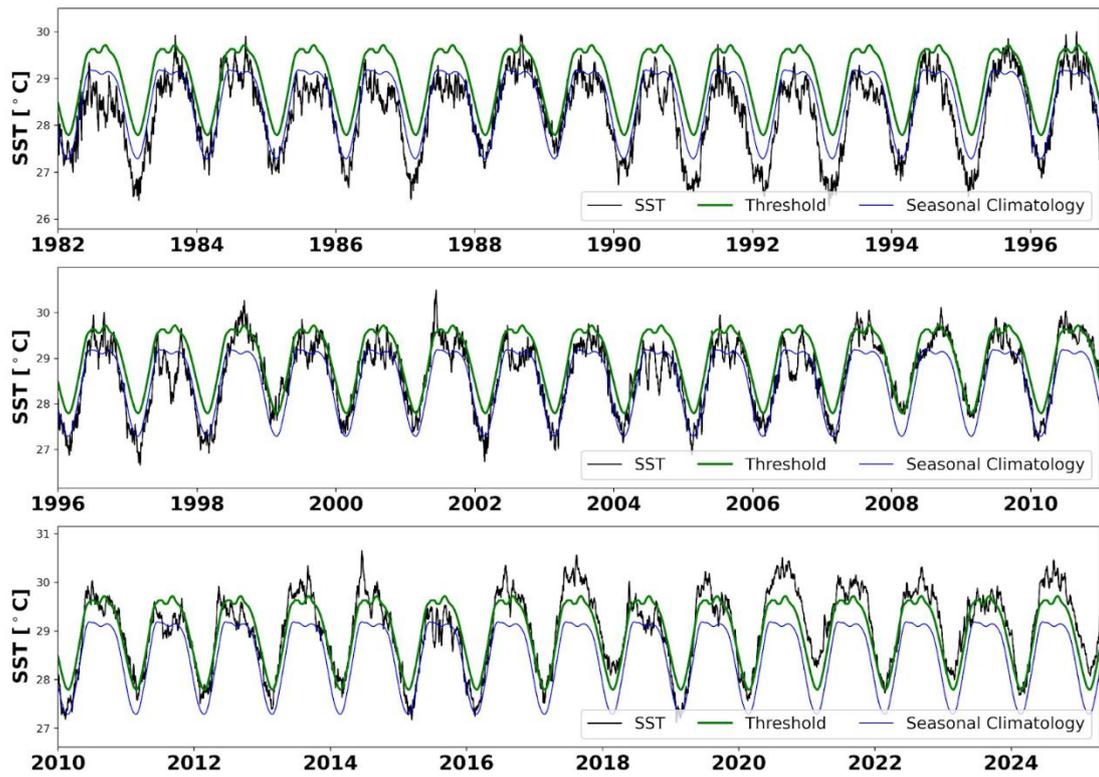


圖 5-5 1982 到 2025 年分成三個時期海洋熱浪時間序列

圖片來源:研究者繪製

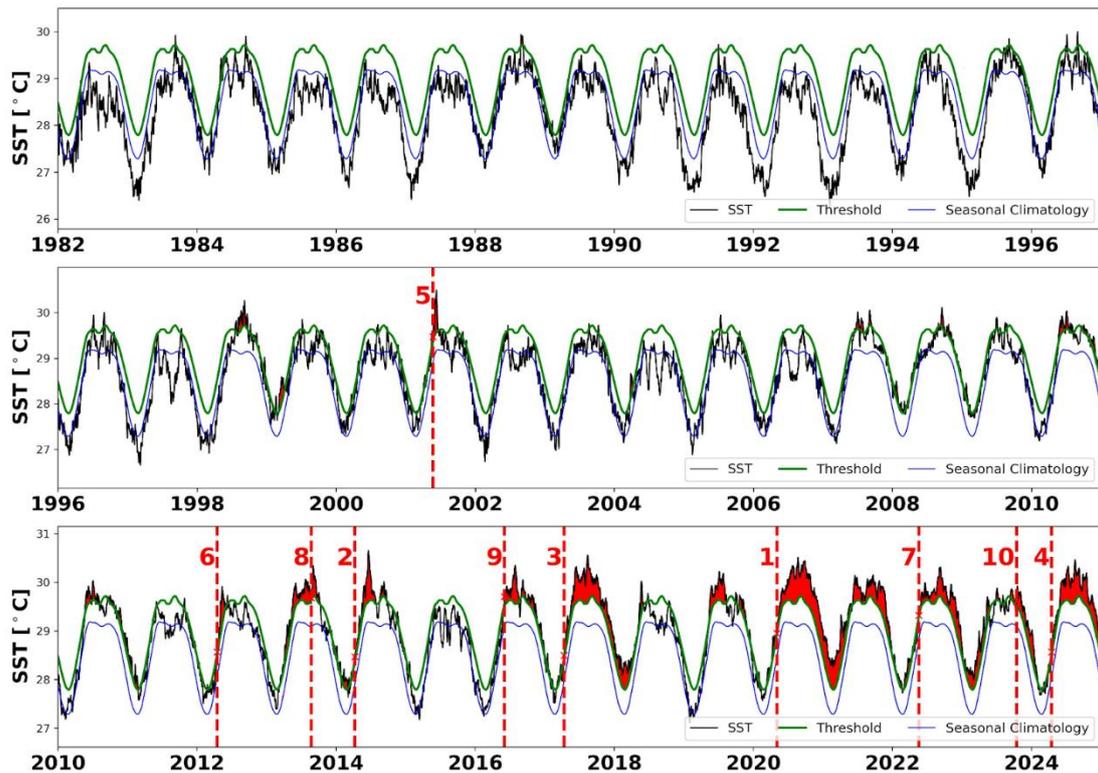


圖 5-6 1982 到 2025 年標記前 10 大海洋熱浪事件

圖片來源:研究者繪製

圖 5-6 以黑線表示日平均 SST、藍線為 30 年氣候基準期 (climatology) 之季節氣候值，而綠線則為每日日序的第 90 百分位值 (threshold)，代表 MHW 的判定閾值。當 SST 超過此閾值且持續五天以上時，即定義為一個 MHW 事件，並以紅色區域加以標註。

從圖中可明顯觀察到海洋熱浪事件大部分集中於圖下方 (2010 年以後) 時段，特別是在 2012 年至 2024 年間，MHW 的出現次數、強度與持續時間明顯增加。圖中紅色標記之熱浪事件數字即為該期間內偵測到的最強十大事件 (Top 10 MHWs)，相較之下，1980 至 2000 年間僅出現零星、短期的 MHW 現象，且強度與頻率皆遠低於近十年。這一趨勢明確顯示，西北太平洋地區海洋熱浪事件自 2010 年後呈現顯著強化，最強 10 大事件皆發生在近二十年間，符合 IPCC AR6 對極端海洋氣候事件頻率上升的預測。

Hobday 方法可有效捕捉極端海溫異常之時序變異性，並提供量化分析基礎以支持後續的機制探討與生態衝擊評估。

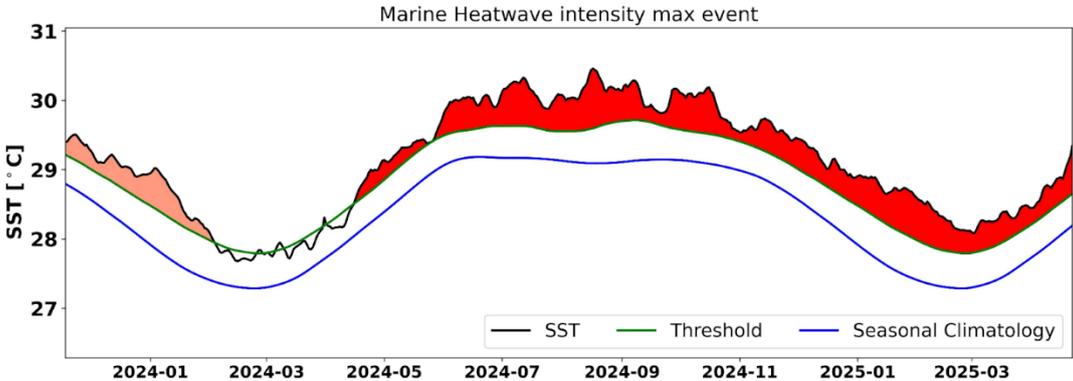


圖 5-7 近期海洋熱浪事件以及最嚴重海洋熱浪

圖片來源:研究者繪製

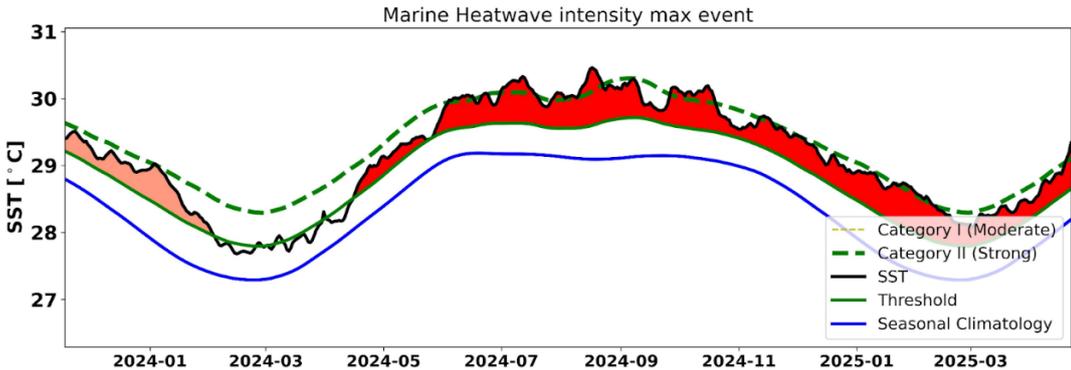


圖 5-8 近期海洋熱浪事件以及最嚴重海洋熱浪並加上分級

圖片來源:研究者繪製

圖 5-7 顯示 2024 年至 2025 年期間，發生於西太平洋暖池區域之最強海洋熱浪事件 (MHW intensity max event) 的日海表溫度 (SST) 變化及分級強度判定結果。橫軸為時間 (2024 年 1 月–2025 年 4 月)，縱軸為海表溫度 (°C)。圖中包含四條主要指標線與分

級色帶，分別為：實測每日 SST (黑線)、90 百分位閾值 (綠線)、季節性氣候均值 (藍線)、以及海洋熱浪等級判定線 (黃虛線與綠虛線) 對應 Category I 與 II。

從圖中可明顯看出，此次熱浪事件發展時間長達近一年，整體紅色陰影範圍表示 SST 持續超過氣候門檻，構成 MHW 條件，其中深紅色區域更代表超過 Category II (Strong) 標準，顯示為高強度等級熱浪事件。進一步觀察熱浪強度可見，事件中段(2024 年 7 月至 10 月) SST 約穩定維持在 30°C 附近，明顯高於同季節氣候值 (約 28.5°C) 及 90 百分位門檻 (約 29.5°C)，最大異常幅度接近 1.2°C，持續時間亦遠超 Hobday 等人(Hobday et al.,2016)定義之五日門檻，屬典型持久性、強度高之夏秋型極端熱浪事件。2025 年初雖事件強度有所緩解，但 SST 仍於數月內維持接近門檻，顯示即便未進入正式 MHW 定義，其海洋背景狀態仍處於偏暖狀態，反映出該區域背景熱含量顯著提高，具有跨季節熱浪潛勢。

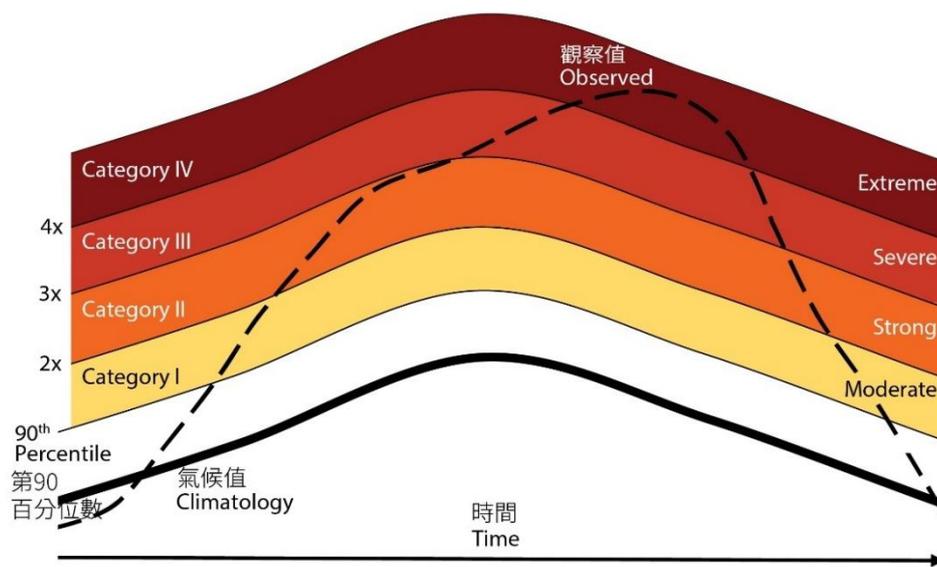


圖 5-9 海洋熱浪分級標準

圖片來源:ODB

圖 5-9 為海洋熱浪分級標準，依據 Hobday 等人 (Hobday et al., 2018) 分級方法，每月 SST 距平值超過門檻值 2 倍以下、2 倍至 3 倍之間、3 倍至 4 倍之間、4 倍以上，其分級為中等 (Moderate)、強烈 (Strong)、嚴重 (Severe)、極端 (Extreme)，共四個級別。

第二項 近二十年表層海洋熱浪分析

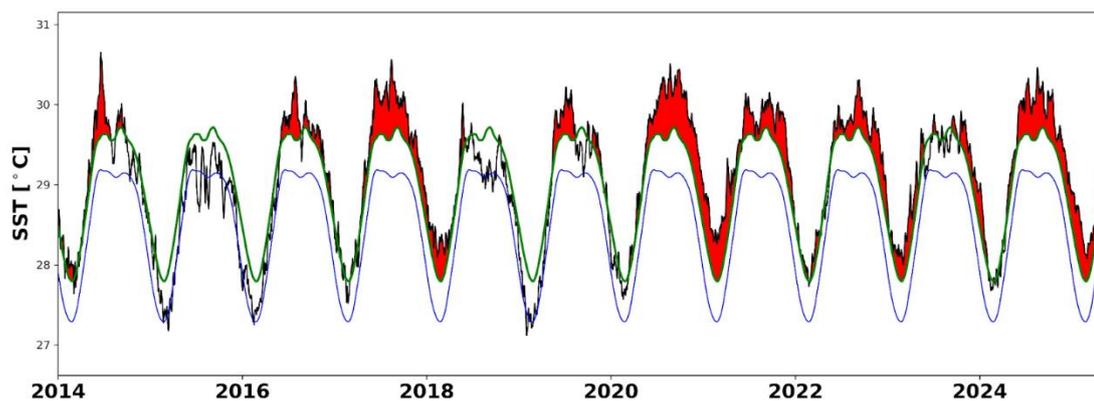


圖 5-10 近十年海洋熱浪事件

圖片來源:研究者繪製

圖 5-10 呈現 2014 年至 2025 年之間，西太平洋暖池區域 (128–154°E, 5–20°N) 每日海表溫度 (Sea Surface Temperature, SST) 時間序列，並以紅色陰影標示符合 Hobday 等人 (Hobday et al., 2016) 定義之海洋熱浪 (Marine Heatwaves, MHWs) 事件。圖中黑線為實測 SST，綠線為第 90 百分位門檻，藍線則代表 30 年氣候基準期的季節性氣候平均值。

從圖中可明顯觀察到，自 2014 年以來，該區域的海洋熱浪活動呈現高頻次、長持續與穩定強度等特徵，顯示出在全球暖化與區域暖池擴張背景下，極端暖水事件已在此區域常態化。MHW 事件多集中於每年 6 月至 10 月，與該區 SST 年內最高值時段一致，顯示熱浪與季節性升溫密切同步。

在 2014–2016 年初期階段，熱浪事件雖已出現，但紅色區域分布相對零散，表示該時段 MHW 強度與持續性較短。然而，從 2017 年起至 2025 年，熱浪事件明顯加劇，紅色區域範圍擴大、顏色加深，說明熱浪不僅頻繁發生，且強度與異常幅度皆有提升。

2020、2021 與 2024 年為圖中最为顯著的強熱浪年份，此三年中 SST 長時間高於門檻，並持續超過 3 個月，顯示為典型的高強度長期熱浪事件。2023 年與 2025 年儘管強度稍弱，但依然顯示出背景熱含量的持續累積現象，熱浪已成為每年海洋熱力條件中的基本組成部分。

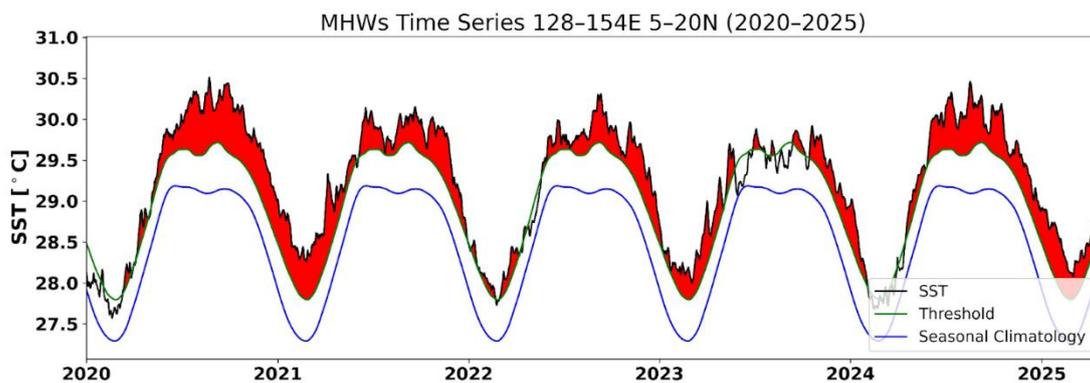


圖 5-11 近五年海洋熱浪事件

圖片來源:研究者繪製

圖 5-11 呈現 2020 年至 2025 年間，西太平洋暖池區域（128–154°E，5–20°N）每日海表溫度（SST）的時間序列資料，並以紅色陰影標示符合 Hobday 等人（2016）定義之海洋熱浪（Marine Heatwaves, MHWs）事件。圖中包含三條主要曲線：實測日 SST（黑線）、第 90 百分位熱浪門檻（綠線）與 30 年氣候基準期的日序季節性氣候均值（藍線）。該區域自 2020 年以來每年均出現長時間且強度顯著的海洋熱浪。熱浪主要集中在每年

6 月至 10 月。2020、2021 與 2024 年之熱浪事件尤為明顯，不僅 SST 長期高於門檻值，紅色陰影區域範圍亦最大，代表熱浪強度高、持續時間長，顯示該區域在此期間經歷多次強烈熱浪活動。

進一步觀察五年間 MHW 的分布可見，其發生頻率呈年度連續性，即無明顯中斷或“熱浪空窗期”，每年皆出現 2-3 個月以上的持續熱浪，反映該區域已進入極端高溫事件之常態化狀態。此外，2023 與 2025 年雖熱浪範圍相較其他年份略小，但仍顯著高於氣候均值與熱浪門檻，顯示即使強度略弱，MHW 現象依然持續存在。部分年份如 2021 與 2024，SST 提早在 4-5 月即開始接近門檻值，提前觸發熱浪事件的潛勢，顯示背景暖化與區域海洋蓄熱加強可能改變 MHW 的季節性結構，導致「春末預熱-夏季極端」的雙峰熱浪格局。

此一時序特徵可能顯示西太平洋暖池已成為熱浪發展核心區（MHW core region），而其連續性與高熱含量特性，亦為該區域生態與氣候系統帶來長期性影響。

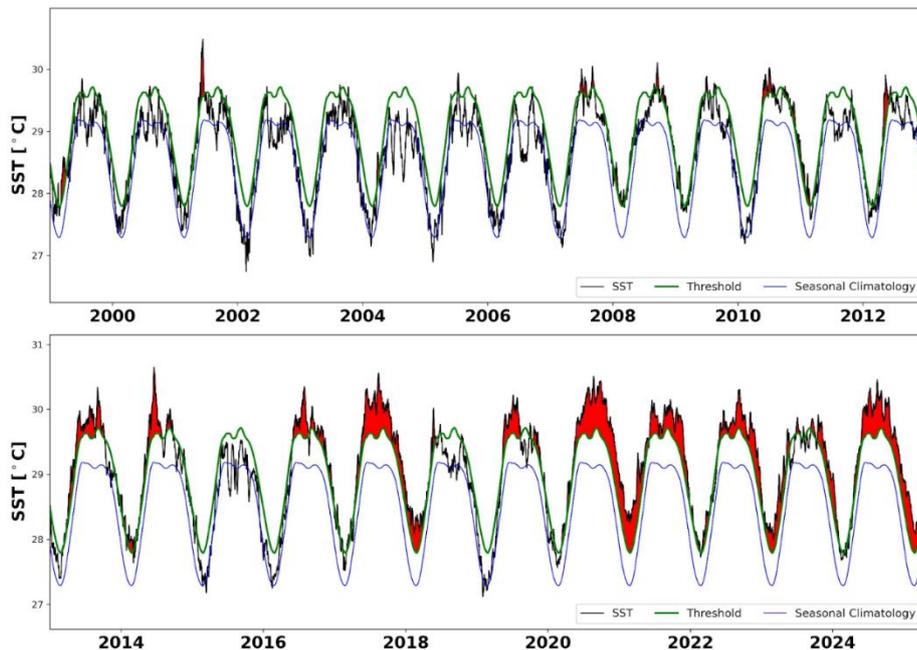


圖 5-12 近 20 年海洋熱浪事件

圖片來源:研究者繪製

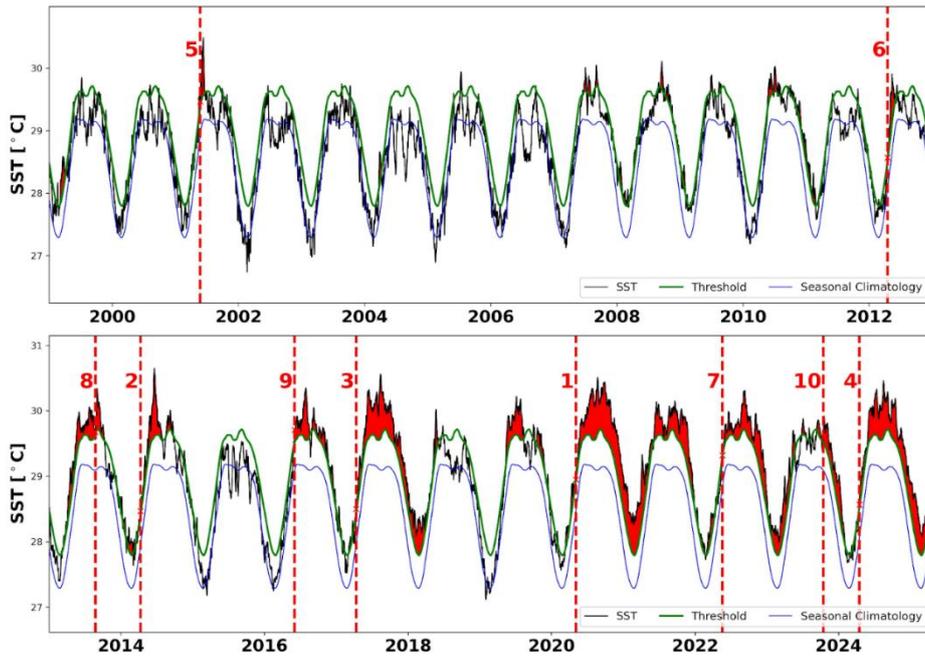


圖 5-13 近 20 年海洋熱浪事件並標記前十大強度海洋熱浪事件

圖片來源:研究者繪製

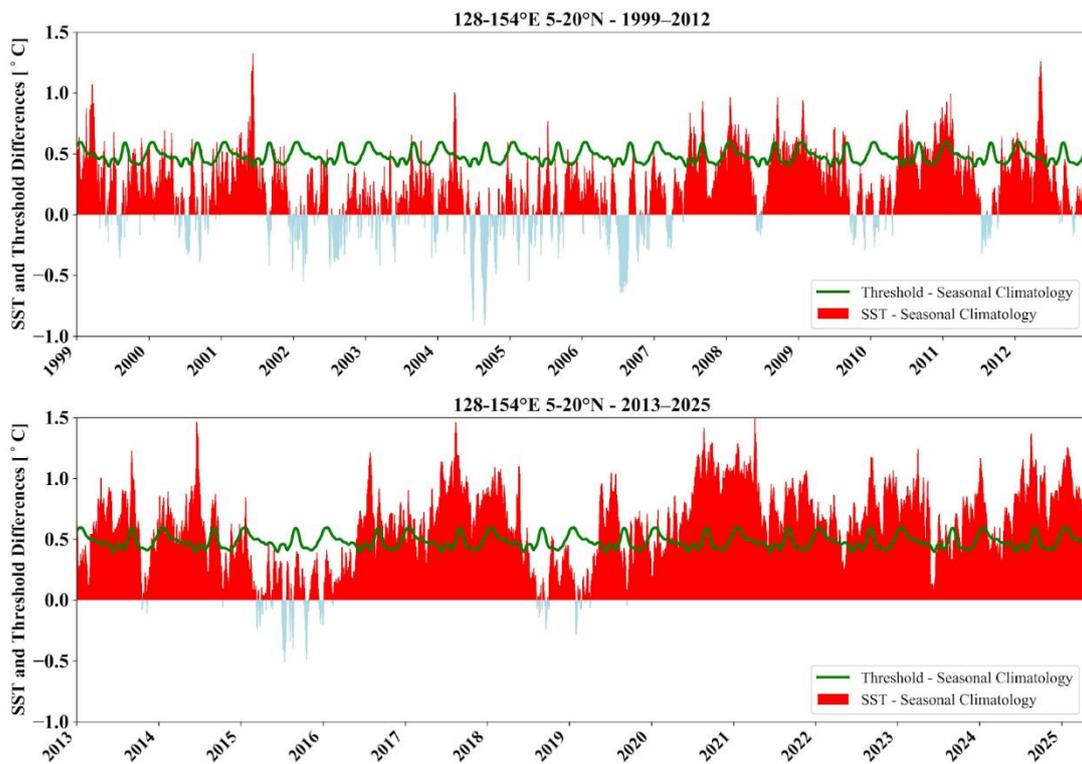


圖 5-14 近 20 年海洋表面溫度

圖片來源:研究者繪製

第三項 表層海洋熱浪與全球暖化關聯

圖 5-13 為 1999 年至 2025 年間，西太平洋暖池區域（128–154°E，5–20°N）每日海表溫度（SST）時間序列與海洋熱浪（Marine Heatwaves, MHWs）分布狀況，並標註出根據強度排序的前十強熱浪事件。圖中黑線為實測 SST，綠線為 90 百分位門檻，藍線為氣候基準平均值，紅色陰影區代表 MHW 事件，紅色虛線及編號（1–10）則對應該區域歷年來最強十起 MHW 事件之發生年份。

事件集中在 2014 年之後：前十強熱浪事件中，有 8 起（編號 1、2、3、4、7、8、9、10）發生於 2014 年以後，顯示該區域自進入「再加速暖化期」以來，MHW 不僅更頻繁，且極端事件的強度與持續性也同步提升，反映區域海洋熱含量與氣候背景熱力條件之大幅改變。

最強事件發生於 2020 年（編號 1）：該年熱浪期間 SST 顯著高於氣候閾值，紅色陰影面積最廣，持續時間亦長，為圖中最大熱異常事件。其發生時間跨越春、夏、秋三季，屬典型長期高強度熱浪，可視為近年來區域氣候與海洋極端異常的重要代表。

早期事件相對稀少且強度有限：僅 2001 年（編號 5）與 2012 年（編號 6）進入前十名，說明在全球暖化尚未顯著加劇的情境下，該區熱浪雖可能發生，但其強度與規模不若近十年明顯。

近年連續出現強熱浪年：2020（編號 1）、2022（編號 7）、2024（編號 10）幾乎呈現 2 年一發的週期性，也反映出強熱浪事件已不再為偶發現象，而具備某種背景穩定結構支撐。

整體而言，本圖不僅凸顯出熱浪活動的年際變異，也展現出極端事件明顯聚集於氣候暖化加劇期的時間軸特徵。透過排序與定位這些最大事件，將有助於後續探討其與 ENSO 之關聯性，並釐清其對區域性海洋生態系統與漁業資源的潛在衝擊。

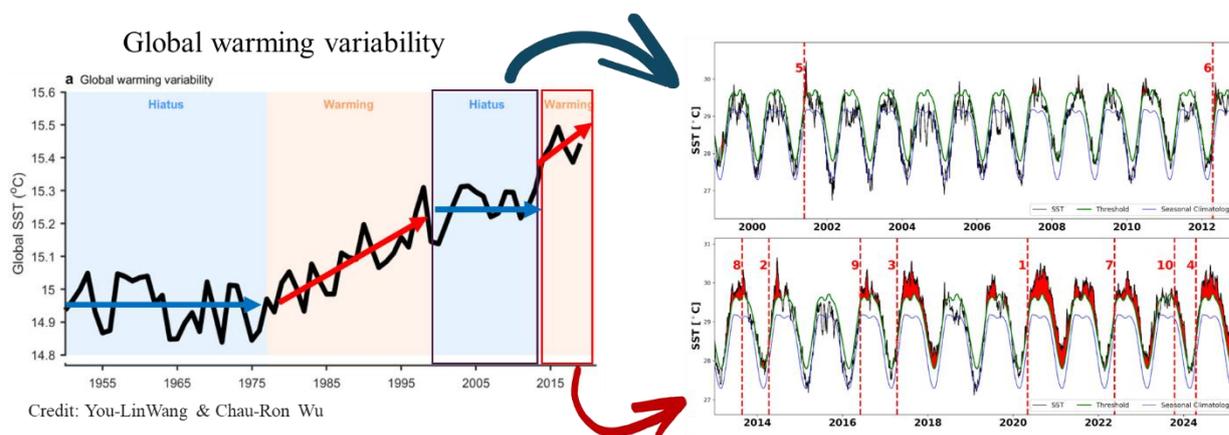


圖 5-15 全球暖化變異性與西太平洋暖池區域海洋熱浪時序之關聯

圖片來源:左圖為 (Wang & Wu, 2020) 右圖為研究者繪製

圖 5-15 整合了全球氣候變遷中的不同暖化節奏階段 (左圖) 與西太平洋暖池區域 (128–154°E, 5–20°N) 在 2000–2025 年間的海表溫度 (SST) 與海洋熱浪 (Marine Heatwaves, MHWs) 觀測結果 (右圖), 呈現出全球與區域氣候變異之時間對應性。

左圖顯示自 1950 年代以來的全球平均海表溫度變化趨勢, 可分為四個主要階段, 第一 1950s–1970, 為第一個增溫停滯期 (Hiatus), 全球 SST 變化緩慢; 第二 1980s–1998 為快速暖化期 (Warming), 升溫明顯加速; 第三 1999–2013 為第二個停滯期 (Hiatus), 儘管溫室氣體濃度持續上升, SST 上升趨勢趨緩; 第四自 2014 年以後為再加速暖化階段 (Warming), 海溫急遽上升。

右圖為西太平洋暖池區域每日 SST 資料與 MHW 偵測結果。黑線代表實測 SST, 綠線為 90 百分位熱浪門檻, 藍線為 30 年氣候平均值, 紅色陰影區域為符合 Hobday et al. (2016) 標準之 MHW 事件。圖中亦以紅色虛線與編號標示出該區域近年最強十大 MHW 事件的發生時間與順序。

比較結果顯示, 在 1999–2013 的停滯期中, 該區熱浪活動相對稀少且強度有限, 僅有少數年份突破門檻線, 顯示該區在全球熱力背景抑制下, MHW 活動亦隨之受限。然自 2014 年全球暖化再加速以來, 西太平洋暖池的熱浪活動大幅增強。2018、2020、2022 與 2024 年皆出現強度高、持續久、面積廣的極端事件, 顯示暖池區域背景溫度上升與熱容量積累已達到支持頻繁強熱浪的臨界狀態。區域 MHW 活動受全球暖化節奏調控: MHW 年際頻率與強度與全球 SST 變化節奏高度一致, 顯示西太平洋暖池作為熱收支中心, 對氣候背景變化具有顯著靈敏度與回應性。極端熱浪事件從異常轉為常態: 自 2014

年起，MHW 事件成為每年規律性出現的氣候現象，紅色陰影區幾乎年年出現，且強度排名前十的事件多集中於此期，顯示熱浪不再是偶發現象，而是持續升溫下的氣候新常態。可推測西太平洋暖池已轉化為全球暖化下 MHW 頻發與加劇的熱點區，從海溫長期升溫趨勢、極端事件頻率與強度變化皆可印證。其時間序列表現與全球暖化密切相連。

第四項 表層海洋熱浪與聖嬰現象關聯

ENSO index

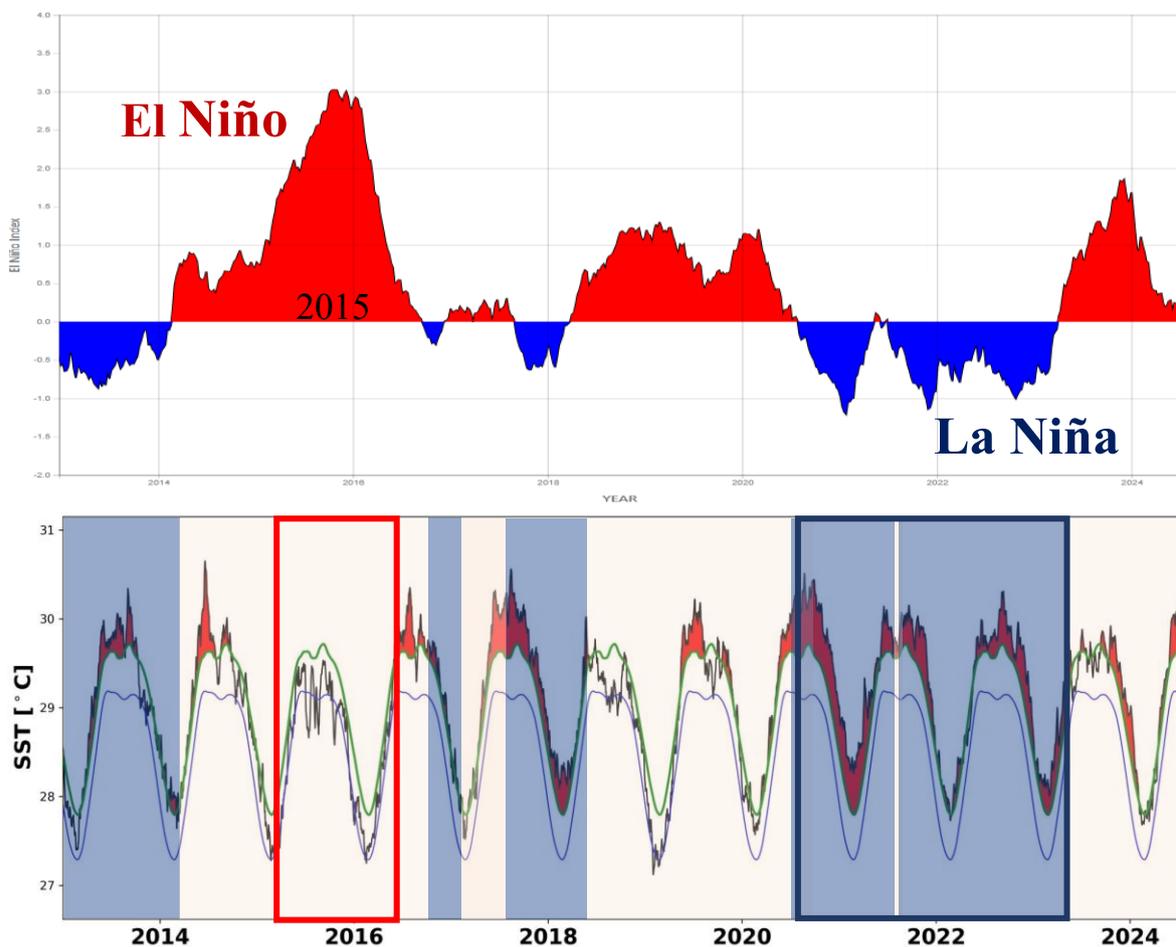
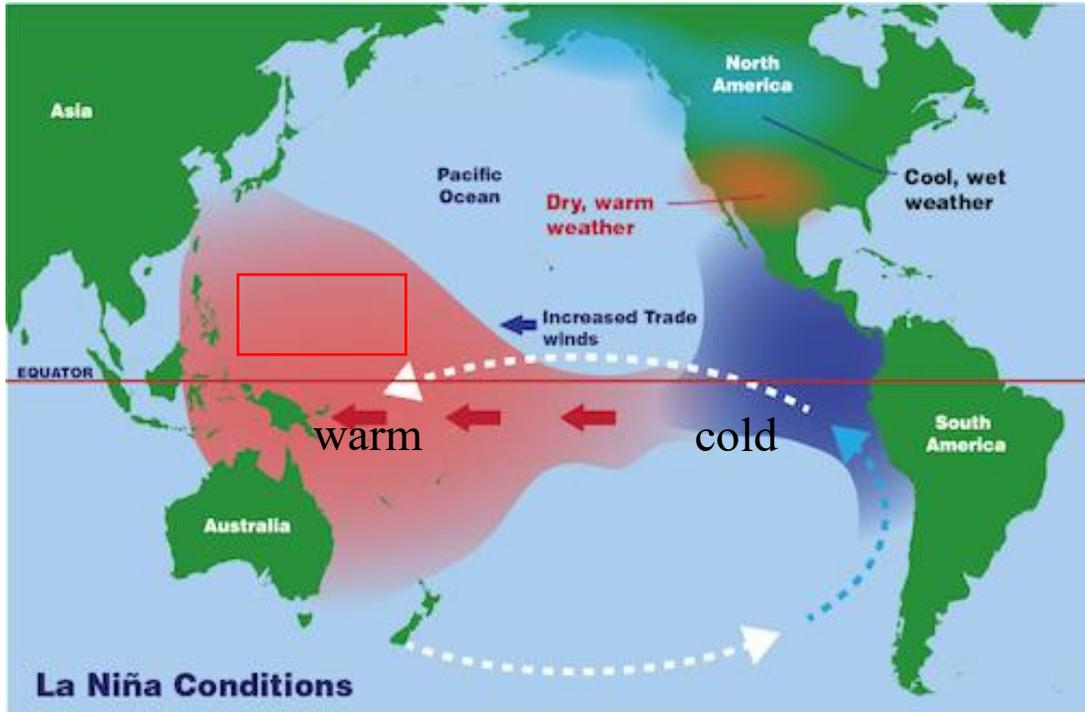


圖 5-16 ENSO 和海洋熱浪

圖片來源:上圖為 NOAA 下圖為研究者繪製

圖 5-16 整合了聖嬰 - 反聖嬰現象的強度指標(上圖) 與 西太平洋暖池區域(128 - 154°E, 5 - 20°N) 之每日海表溫度 (SST) 與海洋熱浪 (MHWs) 分布 (下圖), 可用以說明反聖嬰 (La Niña) 如何增強海洋熱浪活動 (MHWs) 的機制。上圖 ENSO 指數 (El Niño / La Niña) 變化, 紅色區域代表聖嬰事件 (El Niño), 如 2015 年強烈反聖嬰事件。藍色區域則表示反聖嬰事件 (La Niña), 如 2017 - 2018、2020 - 2021、2022 年。下圖為西太平洋暖池區 MHW, 黑線每日實測 SST, 綠線為 MHW 的 90 百分位門檻, 藍線是 30 年氣候平均 (climatology)。紅色區域為依據 Hobday et al. (2016) 偵測的 MHW 事件。藍色底影代表反聖嬰時期, 紅色底影標出為聖嬰時期。

在反聖嬰期間 (如 2017、2020、2022 年), 增強的信風將暖水持續向西堆積, 西太平洋暖水積聚加劇, 使得西太平洋暖池海溫異常偏高, 背景水溫已接近或超過 MHW 門檻, 推測反聖嬰會增強西太平洋暖池的 MHW 活動。反聖嬰階段中, 西太平洋氣候轉趨濕熱且穩定, 上升氣流與降水活躍, 增強水氣與對流活動, 使海洋表層熱含量持續蓄積即使只有短期輕微異常, 也容易跨越熱浪門檻而形成持續性 MHW。反聖嬰雖是「冷事件」的表現對東太平洋, 但對西太平洋暖池而言卻產生「熱效應」。透過信風強化與暖水往西堆積機制, 反聖嬰促使暖池區域背景水溫升高, 創造出更容易觸發與持續 MHW 的條件。



← Increase trade winds

圖 5-17 La Niña (反聖嬰) 下的太平洋熱量與大氣環流變化

圖片來源:NOAA

在 La Niña (反聖嬰) 位相下，赤道附近之信風 (貿易風) 顯著增強，持續將表層暖水推向西太平洋，導致西太平洋—菲律賓海一帶之暖池 (warm pool) 面積擴張與海表溫度 (SST) 升高；同時東太平洋赤道處出現冷舌 (cold tongue)，形成東冷西暖的鮮明緯度帶狀梯度。此一變化伴隨 Walker 環流之強化，使對流與降水活動集中於暖池區域；推測活躍的對流與增強的水氣回饋又降低表層熱量散失，進一步促成暖池熱含量 (upper-ocean heat content) 之累積。圖中以箭頭與色域示意的即為上述熱量與環流再分配之空間格局。

該熱力背景對海洋熱浪 (MHWs) 具有顯著的調動效果。當西太平洋暖池之背景 SST 或上層熱含量已接近或超越 MHW 閾值 (以 30 年基線第 90 百分位衡量) 時, 信風驅動的暖水向西堆積與對流之交互作用, 推測會降低暫時性冷卻之頻率並放大短期異常的長效性, 使得日—週尺度的正向溫度擾動更容易突破閾值並演變為持續性的 MHW (在近年強烈的 La Niña 年份, 例如 2017、2020、2022 年, 即觀察到西太平洋 MHW 發生頻率或強度的上升), 尤其在 2022 年為強烈反聖嬰年可參考圖 5-16, 發生了強度最高的海洋熱浪, 且持續時間很長。

第二節 次表層海洋熱浪分析

第一項 次表層海洋熱浪統計

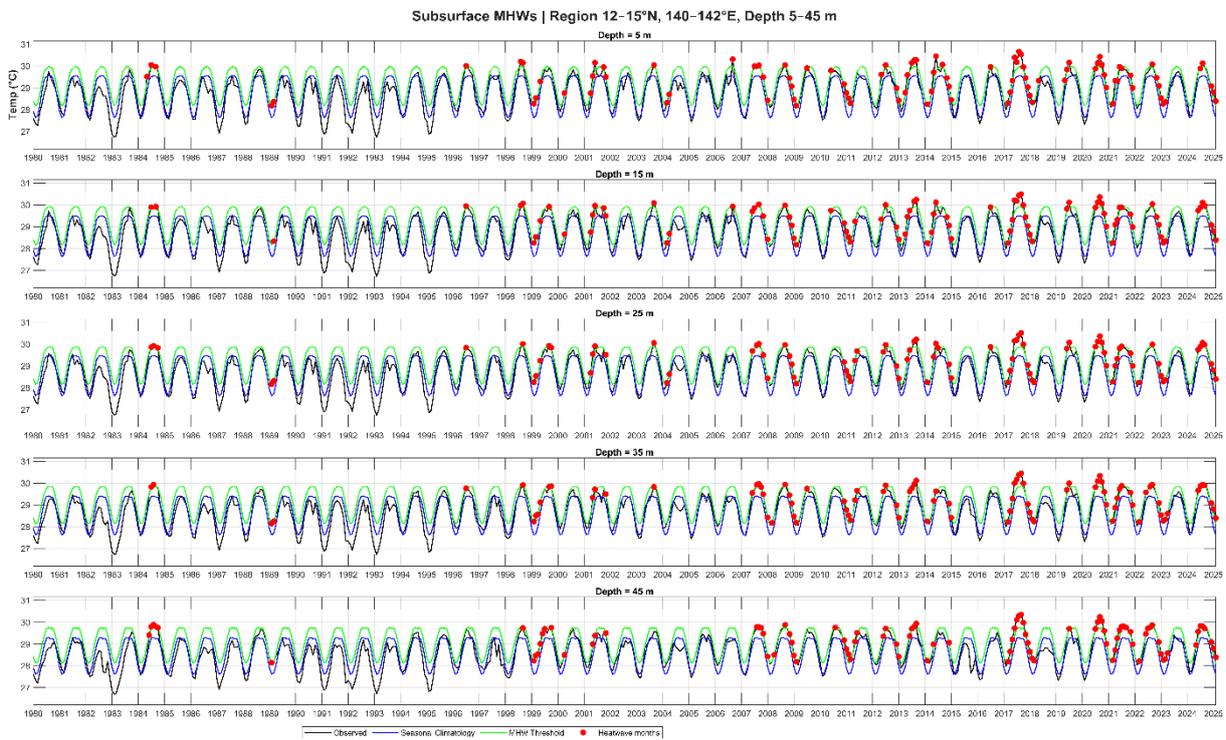


圖 5-18 海表以下 5-45 公尺次表層海洋熱浪

圖片來源:研究者繪製

圖 5-18 西北太平洋研究區鰻魚的產卵區，(12–15°N、140–142°E) 0–45 m 次表層海溫月序列與次表層海洋熱浪 (Subsurface MHW) 偵測結果。橫軸為年份，縱軸為次表層海溫(攝氏)，每一列為不同深度 (自上而下：5、15、25、35、45 m) 的月份次表層海洋溫度時序 (黑線)，藍線為該格點逐月的 30 年季節性氣候平均，綠線為以 30 年基線 (1983–2012) 計算之第 90 百分位門檻；紅色標記表示被判定為 MHW 的月份 (格內標題亦指出各深度偵測到之事件數)，如標示於 5 m 旁的「43」代表 5 m 深度在所有對應月份合計被標記為 MHW 的次數中，已出現 43 次 (即 1980–2025 間每年被判定為 MHW 的累計次數為 43 次)。整體時序顯示自 1998 年起各深度 MHW 發生頻率顯著上升。圖中可見自 1998 年起各深度皆出現熱浪頻率的明顯增加，尤其在 2010 年代以後發生次數與強度更為集中，顯示區域性背景溫度與上層熱含量提升使得短期正

向溫度異常更容易突破 MHW 閾值並演變為持續事件。圖例註記可用於比較不同深度之熱浪發生時序、頻率與垂直分布特徵。

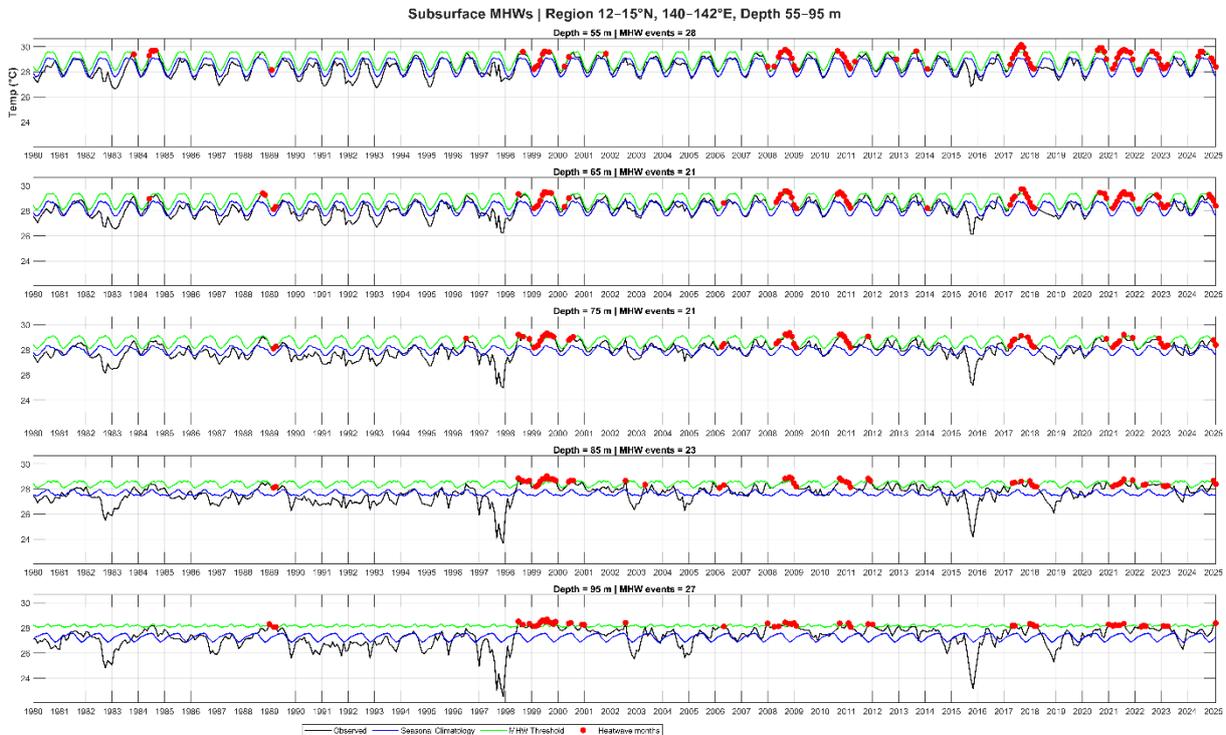


圖 5-19 海表以下 55-95 公尺次表層海洋熱浪

圖片來源:研究者繪製

圖 5-19 為鰻魚的產卵區 ($12 - 15^{\circ}\text{N}$ 、 $140 - 142^{\circ}\text{E}$) 次表層 (55 - 95 m) 月度溫度時序與次表層海洋熱浪 (Subsurface MHW) 偵測結果。橫軸為年份，縱軸為次表層海溫 (攝氏)，每一列對應一固定深度 (自上而下依序為 55、65、75、85、95 m)；黑線為觀測月平均溫度，藍線為逐月之季節性氣候均值，綠線為以 1982 - 2011 年 30 年基線計算之第 90 百分位門檻；紅點標示被判定為 MHW 的月份 (紅點堆疊處示意事件持續)。標題中深度旁邊之整數為該深度在分析期間 (1980 - 2025/2 月) 內累計偵測到之 MHW 事件次數；55 m = 28 件、65 m = 21 件、75 m = 21 件、85 m = 23 件、95 m = 27 件。

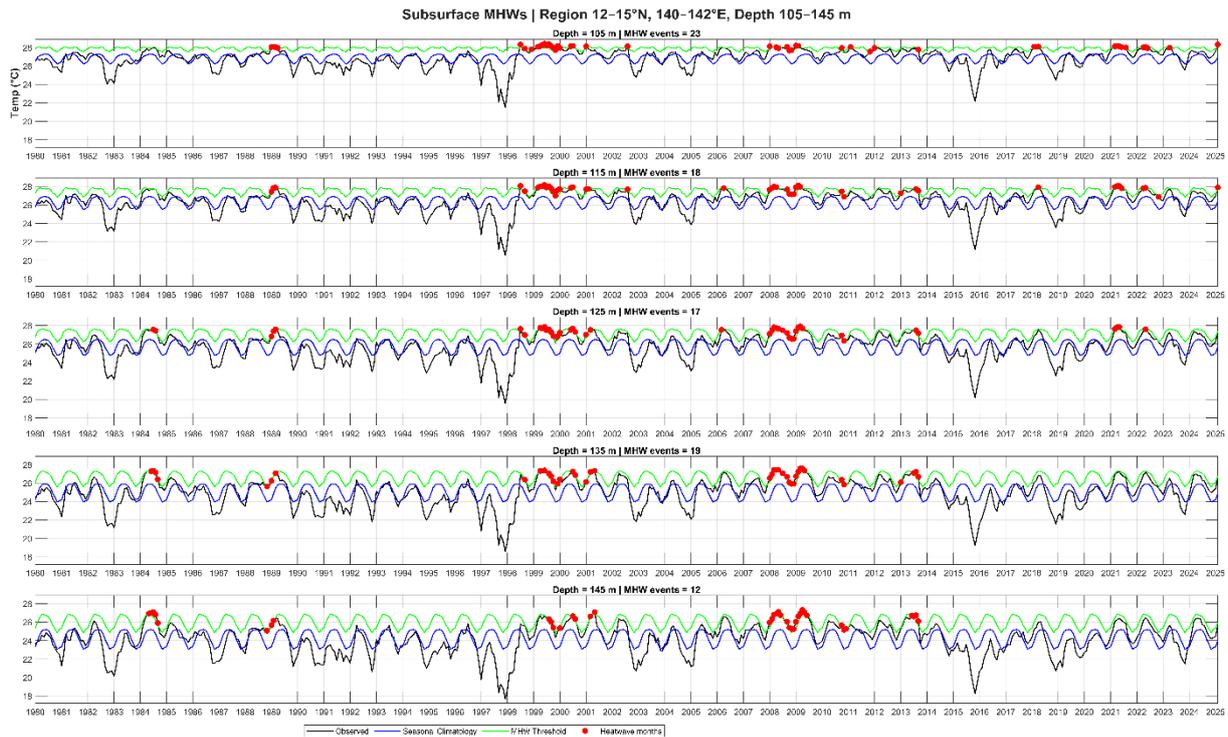


圖 5-20 海表以下 105-145 公尺次表層海洋熱浪

圖片來源:研究者繪製

圖 5-20 為西北太平洋日本鰻產卵區 (12 - 15°N、140 - 142°E) 次表層月度溫度時序與次表層海洋熱浪 (Subsurface MHW) 偵測結果 (深度 105 - 145 m)。橫軸為年份，縱軸為次表層海溫(攝氏)，每一列對應一固定深度 (自上而下依序為 105、115、125、135、145 m)；黑線表示觀測月平均溫度，藍線為對應月份之 30 年季節性氣候均值，綠線為以 30 年基線 (1983 - 2012) 計算之逐月第 90 百分位門檻；紅點標示在該月、該深度被判定為 MHW 的月份。面板標題所示之整數為該深度在分析期間 (1980 年 1 月 - 2025 年 2 月) 內累計偵測到之 MHW 事件次數：105 m = 23 件、115 m = 18 件、125 m = 17 件、135 m = 19 件、145 m = 12 件。圖中可見於較深層 (105-145 m) 事件頻率較淺層為低，但仍有若干強事件於特定年份垂直延伸至 100 m 以上。

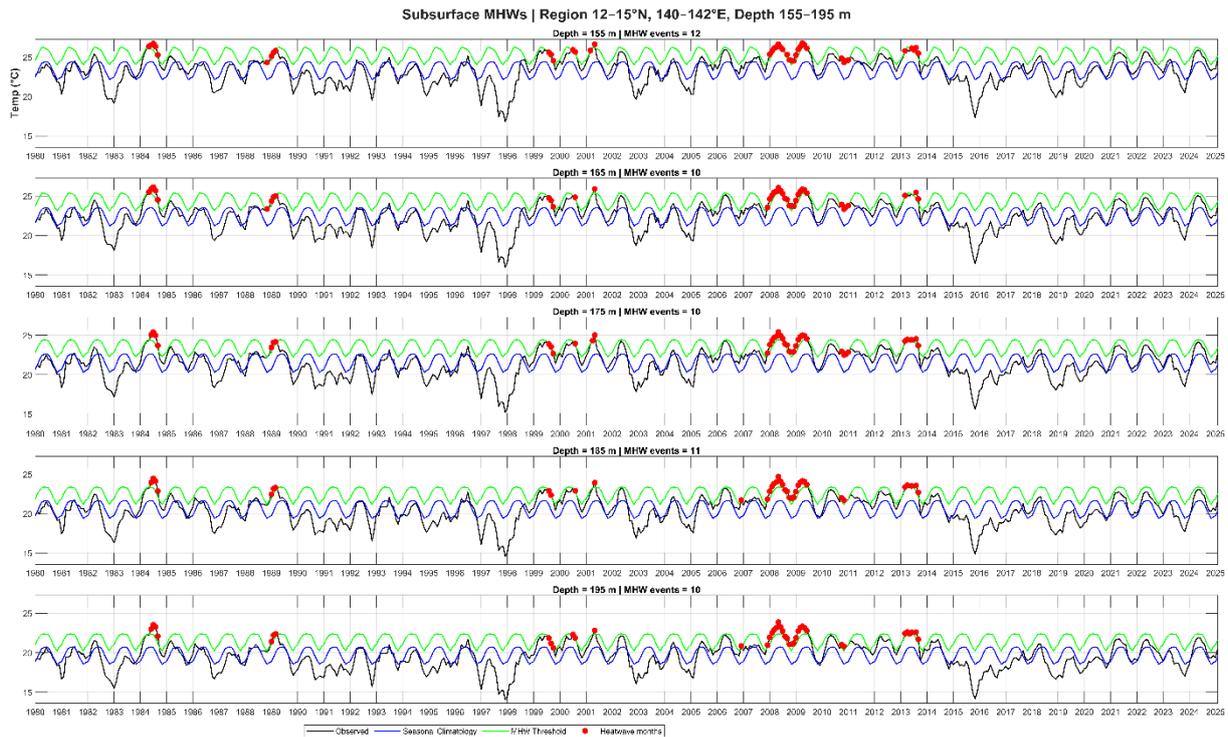


圖 5-21 海表以下 155-195 公尺次表層海洋熱浪

圖片來源:研究者繪製

圖 5-21 顯示研究區 (12–15°N、140–142°E) 深層次表層 (155–195 m) 之月度溫度時序與次表層海洋熱浪 (Subsurface MHW) 偵測結果。橫軸為年份，縱軸為次表層海溫 (攝氏)，每一列代表一固定深度 (由上而下：155、165、175、185、195 m)；黑色曲線為觀測的月平均溫度，藍色曲線為對應月份之 30 年季節性氣候均值，綠色曲線為以 1983–2012 年基線計算之逐月第 90 百分位門檻；紅色點標示在該月與該深度被判定為 MHW 的月份。標題中所示整數為該深度在分析期間 (1980 年 1 月–2025 年 2 月) 內累計偵測到之 MHW 事件次數：155 m = 12、165 m = 10、175 m = 10、185 m = 11、195 m = 10。

整體結果顯示，於 155–195 m 深度範圍內 MHW 事件數明顯少於上層 (如 5–45 m 或 55–95 m)，且事件分布較為分散；然而仍觀察到在某些年代 (特別是自 1999 年後) 出現較為集中或較強的事件，顯示強烈熱浪在特定情況下可垂直延伸至此深度區間。

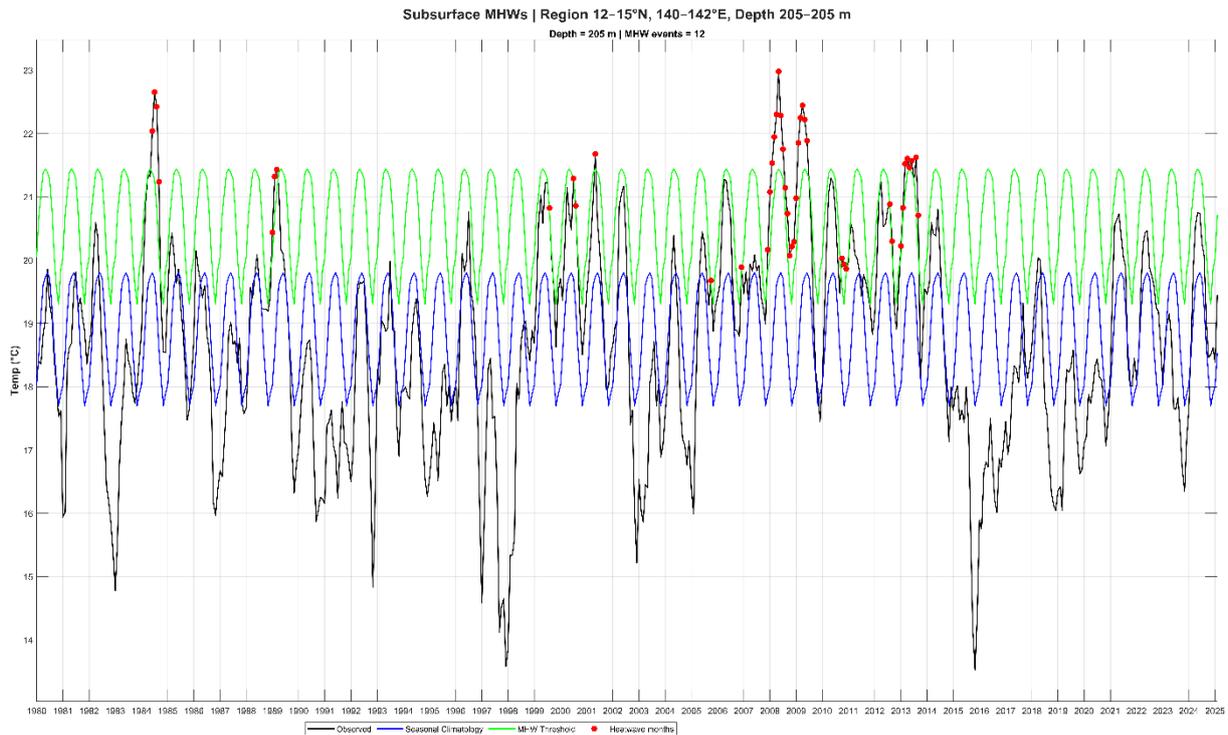


圖 5-22 海表以下 205 公尺次表層海洋熱浪

圖片來源:研究者繪製

西北太平洋研究域 (12–15°N、140–142°E) 205 m 深度次表層月度溫度時序與次表層海洋熱浪 (Subsurface MHW) 偵測結果 (分析期間: 1980 年 1 月–2025 年 2 月)。橫軸為年份, 縱軸為次表層海溫(攝氏), 黑線為觀測月平均溫度, 藍線為對應月份之 30 年季節性氣候平均值, 綠線為以 30 年基線(1983–2012)計算之逐月第 90 百分位門檻; 紅點標示被判定為 MHW 的月份。面板標題顯示該深度在分析期間內累計偵測到之 MHW 事件次數為 12 次。圖中可見深層 (205 m) 之熱浪事件較淺層稀少且分布較為集中, 主要出現在 2000 年代中後期至 2010 年代, 推論可能只有在特定極端暖化或熱含量累積條件下, 熱浪才垂直延伸至此深度。

第二項 淺層海洋熱浪趨勢

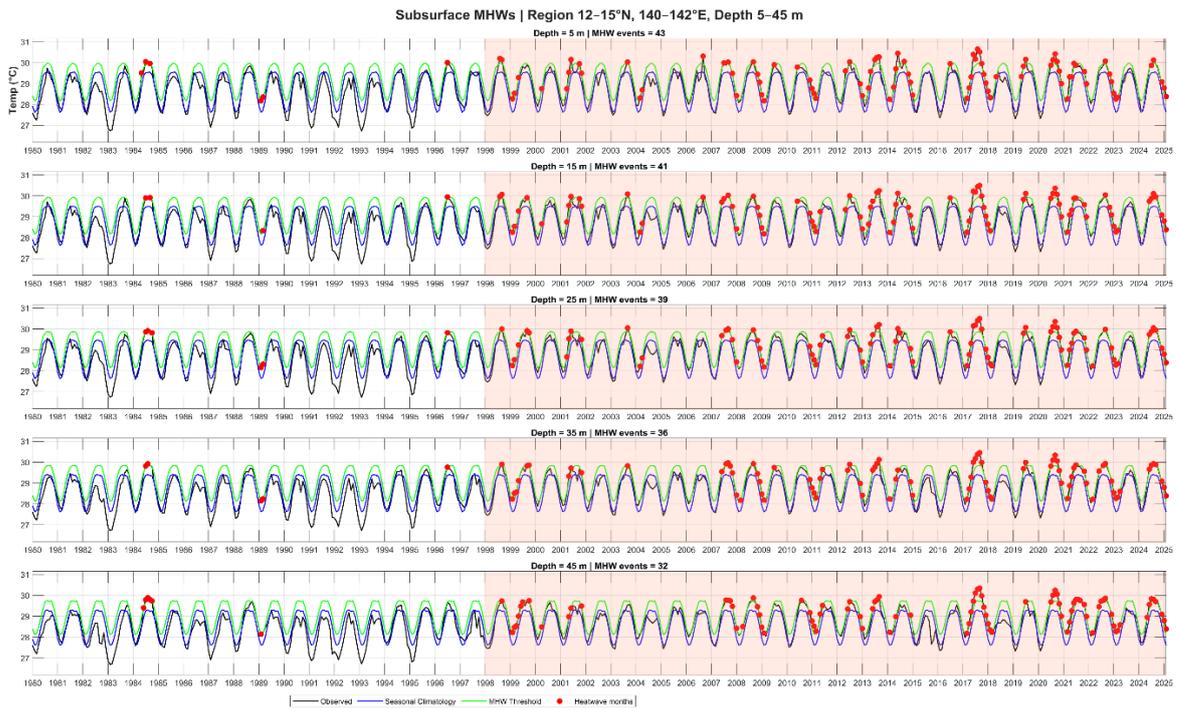


圖 5-23 海表以下 5-45 公尺次表層海洋熱浪發生趨勢

圖片來源:研究者繪製

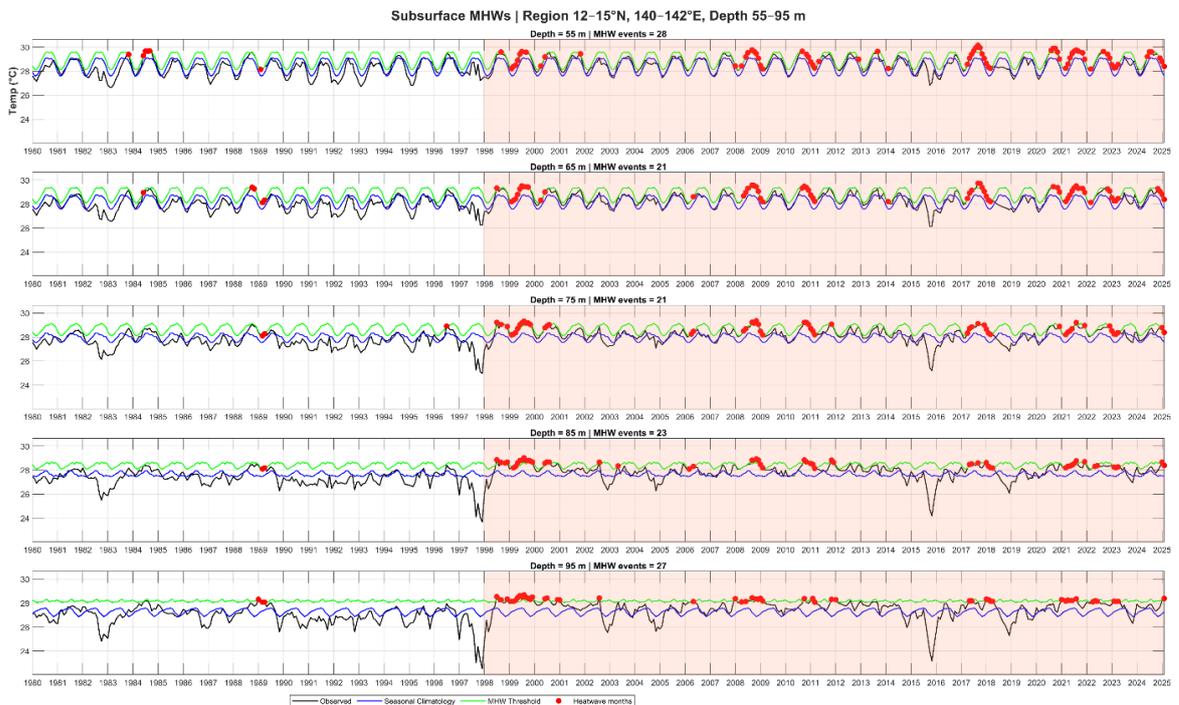


圖 5-24 海表以下 55-95 公尺次表層海洋熱浪發生趨勢

西北太平洋日本鰻產卵區 (12–15°N、140–142°E) 次表層月度溫度時序與次表層海洋熱浪 (MHW)。圖中紅色半透明陰影區域標示為 1998 年 (包含該年) 之後的時段，用以凸顯該時段 MHW 事件頻率與強度的結構性變化。視覺檢視顯示：1998 年為一個分界點，之後淺層 (5–25 m) 與中淺層 (55–95 m) 出現 MHW 的年數與強度明顯上升；進一步，在約 2008 年以後的年代，淺層 MHW 幾乎以年為單位反覆出現 (圖中紅點在近年分布密集)，代表該區域背景溫度與上層熱含量的累積使得短期正向溫度擾動更容易突破第 90 百分位之門檻並演變為持續事件。

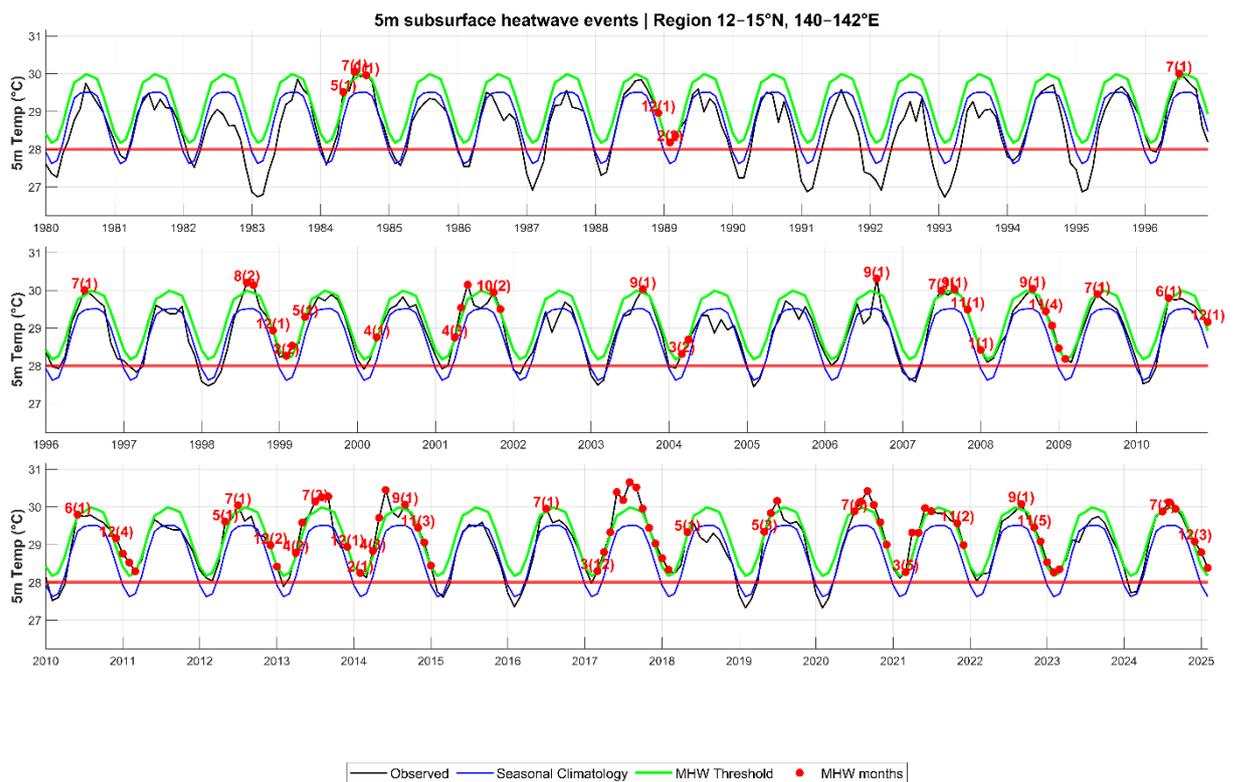


圖 5-25 海表以下 5 公尺次表層海洋熱浪

紅色線標誌 28 度海洋溫度

圖片來源:研究者繪製

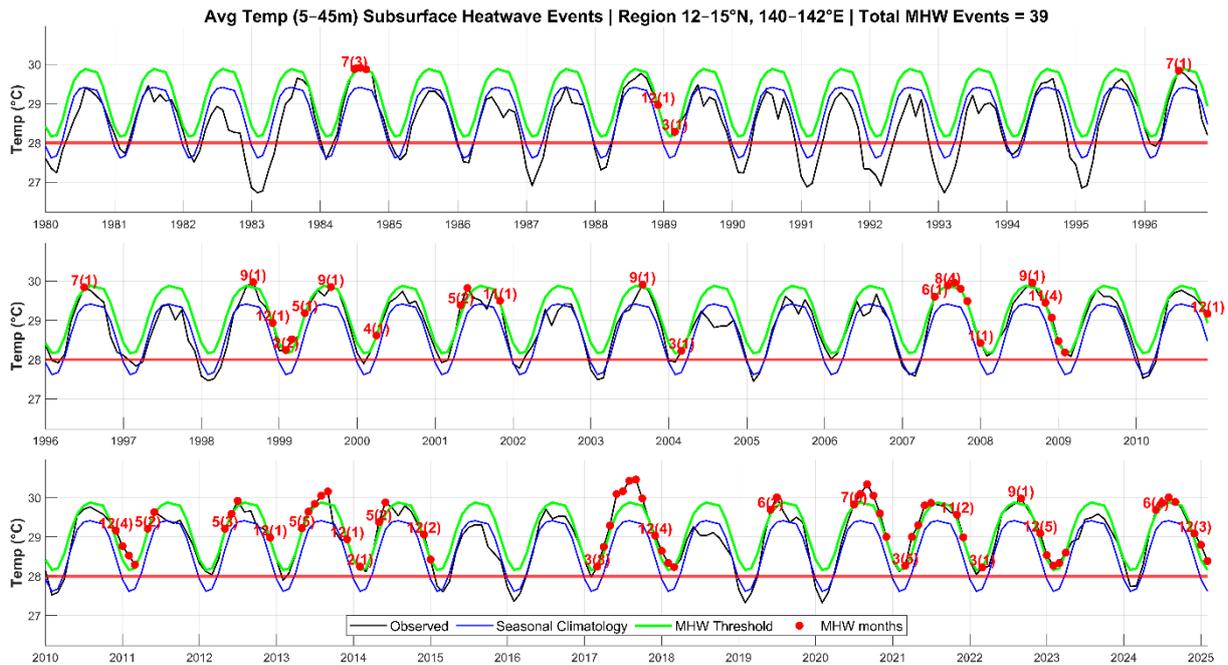


圖 5-26 海表以下 5 到 45 公尺平均的次表層海洋熱浪

紅色線標誌 28 度海洋溫度

圖片來源:研究者繪製

圖 5-25 為 5 m 次表層（月均）溫度時序與次表層海洋熱浪（MHW）偵測結果，研究域為日本鰻產卵區近域（12–15°N、140–142°E），分析期間 1980 年 1 月至 2025 年 2 月。圖分別呈現三個年代段（1980–1996、1997–2010、2011–2025），便於直觀比較熱浪頻率與強度之年代變化。黑線為觀測月平均溫度；藍線為對應月份之 30 年季節性氣候平均值；綠線為以 30 年基線（1983–2012）計算之逐月第 90 百分位門檻；紅色實心點標示被判定為 MHW 的月份。圖中並以紅色橫線標示 28°C 設定為臨界值，因為參考文獻所指出之日本鰻卵與鰻魚仔魚之最適溫範圍上限（Okamura et al., 2007，最適約 25–28°C），故可直接用以評估熱浪事件與早期鰻魚生活史階段生理閾值之重疊情形。

意味著近年產卵區上層環境不僅更常出現 MHW，且在多次事件中水溫已抵達或超越早期發育階段之生理上限，可能會增加鰻魚幼體孵化與早期存活的風險。

第三節 海溫對捕獲量分析討論

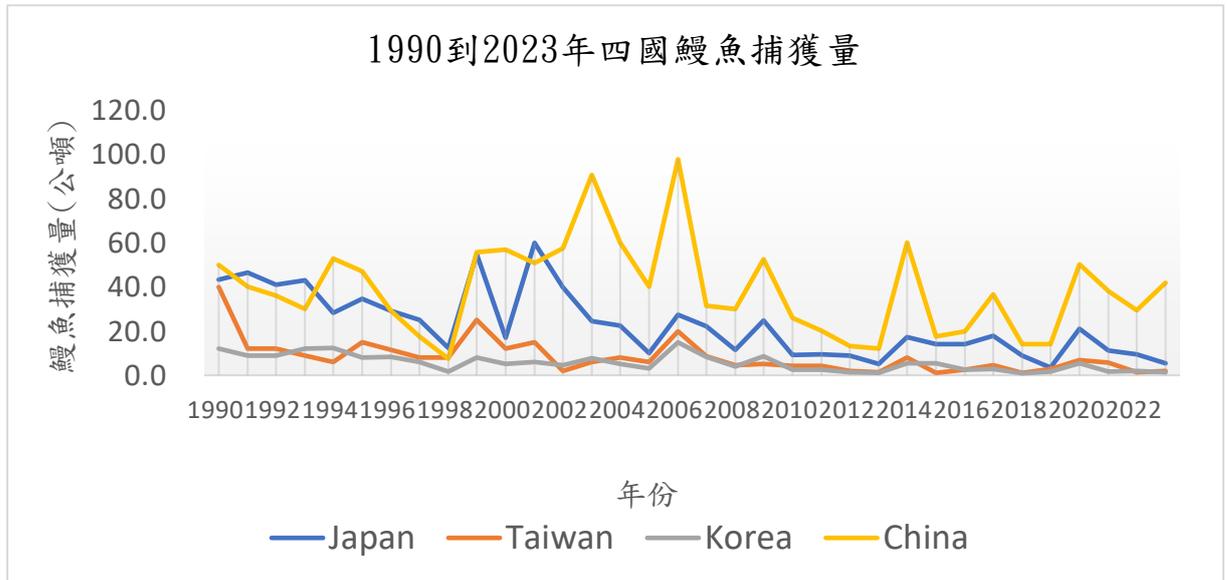


圖 5-27 1990 年到 2023 年四國鰻魚捕獲量

圖片來源:研究者繪製

圖 5-27 為 1990–2023 年日本、台灣、韓國與中國之鰻魚 (glass eel) 年度捕獲量時序圖 (單位:公噸)。線條顏色分別代表各國:藍=日本、橘=台灣、灰=韓國、黃=中國;橫軸為年份,縱軸為年總捕獲量 (ton)。可見各國捕獲量在年代間存在明顯差異,中國與日本為主要捕獲國且呈現多次高峰期;台灣與韓國量較小但亦有年代變動。資料為年度匯總值,鰻魚捕獲量資料來源為台灣大學漁業科學研究所 韓玉山教授提供。



圖 5-28 分析捕獲量與海溫關係流程圖

圖片來源:研究者繪製

為探討海溫變異對日本鰻 (*Anguilla japonica*) 捕撈量的潛在影響，本研究從海洋熱浪與次表層溫度異常的時空特徵出發，進行以下分析步驟。首先，針對 1990–2023 年間四個主要鰻魚捕撈國家（日本、台灣、韓國、中國）的玻璃鰻捕撈數據，分別與前一年度每月（1–12 月）不同深度（5–205 m）海溫（SST 與 subsurface T）進行 Pearson 相關分析，初步掌握各月份、各深度與鰻魚資源間的統計關聯。針對產卵區（12–15°N, 140–142°E）進行三維海溫平均處理，分別計算每月 5–105 m 深度的三度空間平均海溫，再與各國捕撈量進行相關性分析，以確認來自產卵源區的溫度訊號是否影響各地的玻璃鰻資源量。進一步，針對高相關性的月份與水層，回溯分析其是否出現海洋熱浪（Marine Heatwave, MHW）事件，以辨識是否存在極端海溫事件與生物資源變化之時間重疊性。

第一項 東亞捕獲量和次表層海溫關係

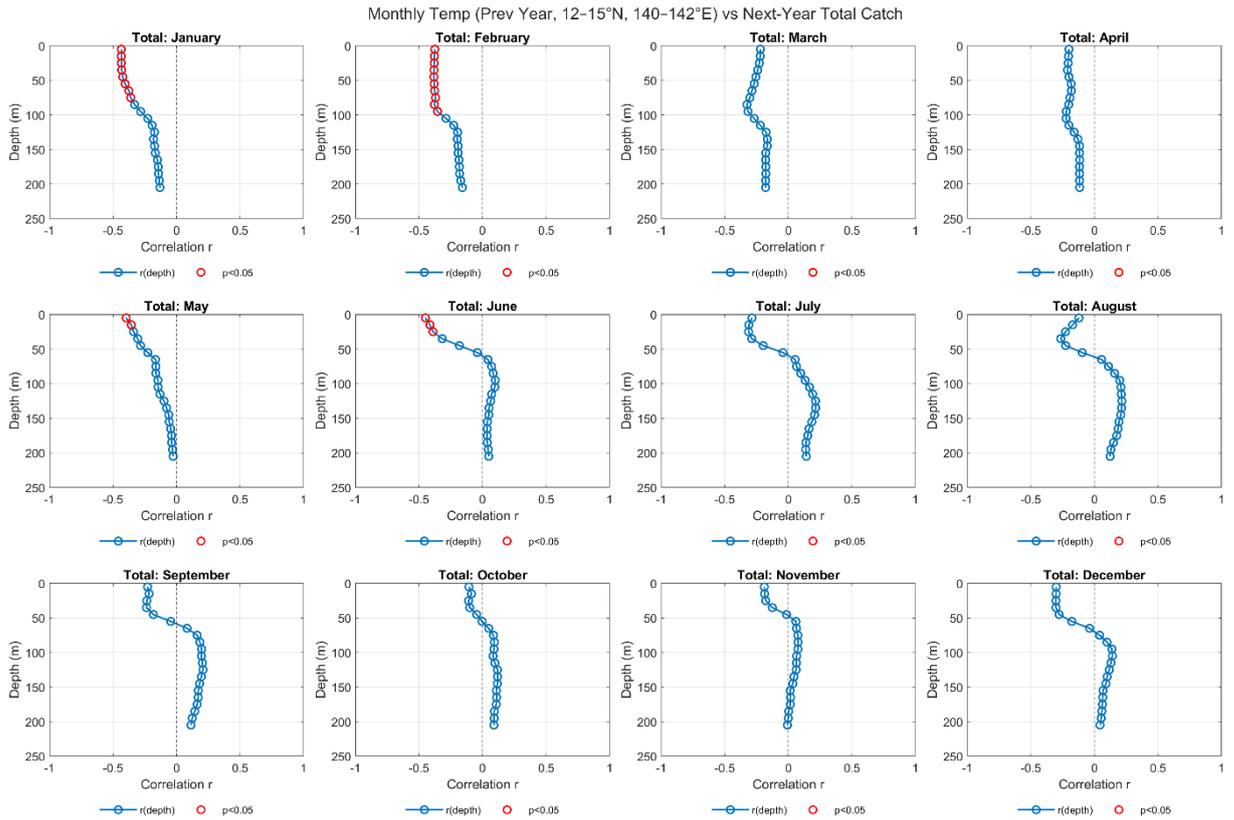


圖 5-29 次表層海溫 1-12 月各深度和東亞捕獲量之相關性

圖片來源:研究者繪製

圖 5-29 為前一年各月份 (1-12 月) 不同深度 (5-205 m) 海溫與次年東亞地區 (日本、台灣、韓國、中國) 鰻魚總捕獲量之 Pearson 相關係數大小。橫軸為相關係數 (r 值)，縱軸為深度 (公尺)，紅色空心圓表示在顯著水準 $p < 0.05$ 下具統計顯著性之相關。各圖分別顯示當年 12 個月份平均海溫 (12-15°N, 140-142°E) 與隔年總捕撈量之相關性垂直剖面。可觀察到 1-2 月、5 月與 6 月等月份在 55-105 m 深度範圍內呈現顯著負相關，顯示次表層水溫異常可能對玻璃鰻早期生存與遷移造成潛在影響。進一步研究次表層海溫空間平均，將產卵區和深度 5-105m 做空間平均，計算 1-12 月和四國捕獲量之相關性。

第二項 次表層海溫 and 四國捕獲量關係

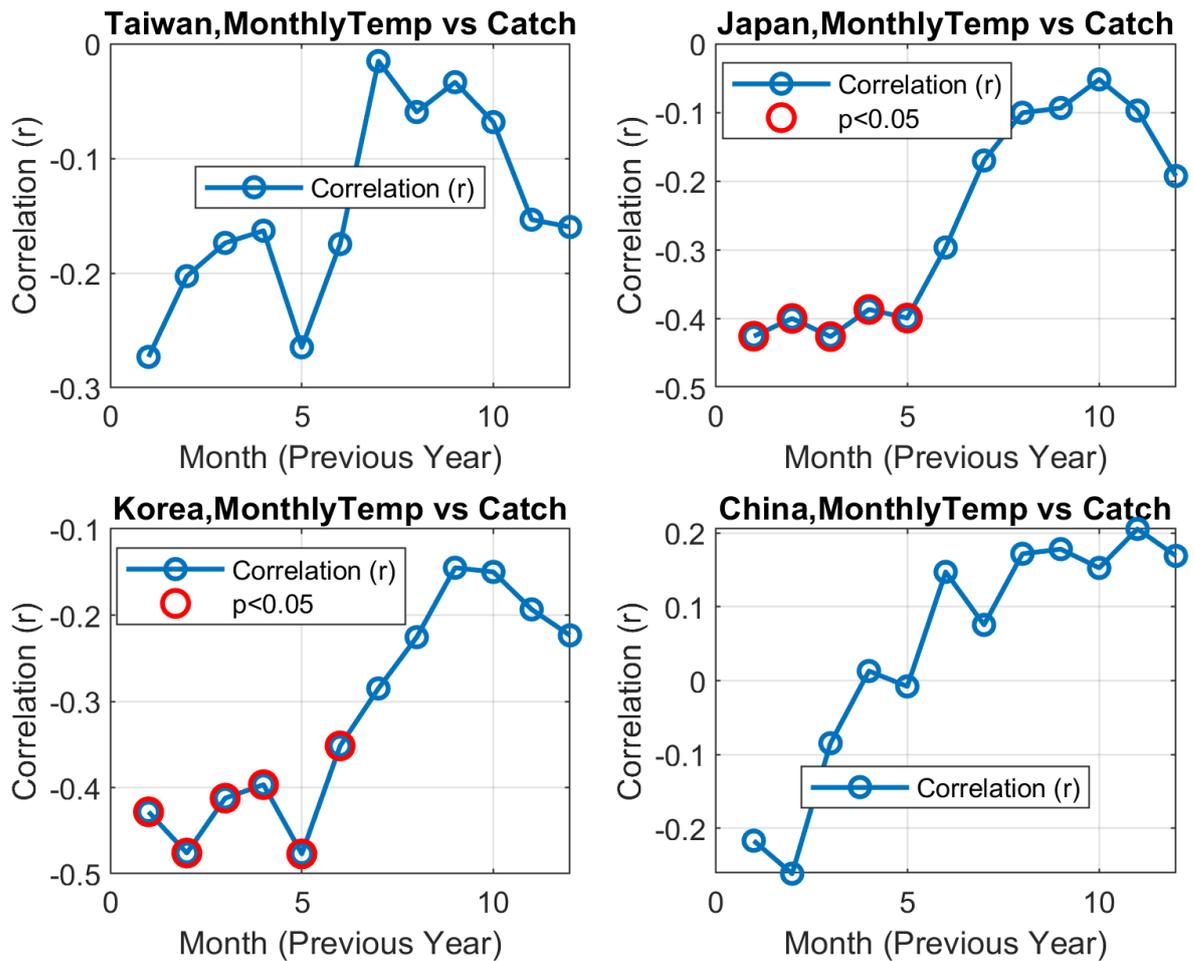


圖 5-30 次表層海溫空間平均 1-12 月和四國捕獲量之相關性

圖片來源:研究者繪製

圖 5-30 為一年不同月份海溫與隔年鰻魚捕獲量的四國相關性分析，四張子圖分別顯示台灣、日本、韓國與中國之總鰻魚捕撈量，與產卵區 (12–15°N, 140–142°E) 5–105 m 深度三度空間平均溫度在前一年各月的 Pearson 相關係數 (r 值)。紅色空心圓代表在顯著水準 $p < 0.05$ 下具統計顯著性之相關。結果顯示日本與韓國的捕獲量與前一年 1–5 月的次表層海溫存在顯著負相關，代表海溫越高可能導致捕獲量越低，尤其以 2 月為最強；而中國與台灣則呈現正相關，故所以之後會特別針對日本和韓國的相關性做深入研究。

Depth-wise Correlation Between Previous-Year Monthly Temperature (5-205 m) and Next-Year Japan Catch

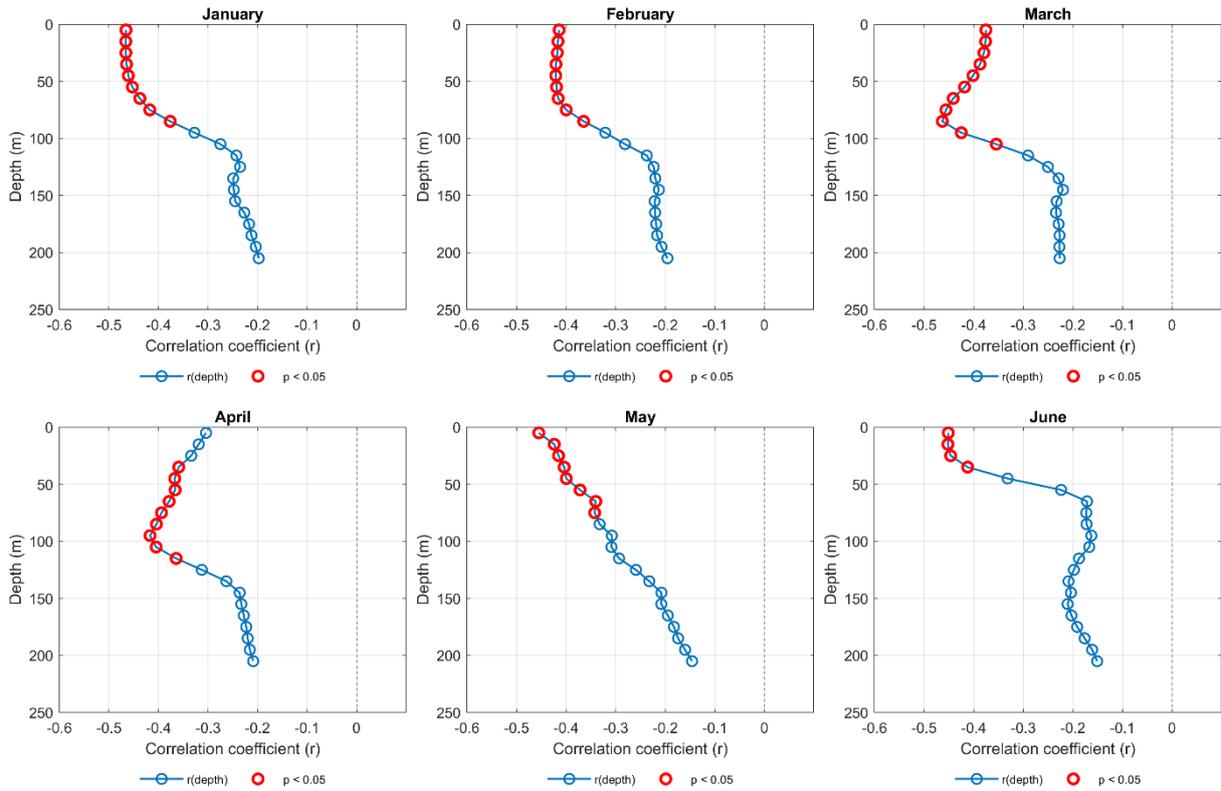


圖 5-31 次表層海溫 1-6 月各月份 5-205M 和日本捕獲量之相關性

圖片來源:研究者繪製

圖 5-31 為日本鰻捕撈量與前一年 1-6 月不同深度(5-205 公尺)海溫之相關性分析。呈現前一年每月 (1 至 6 月) 在日本鰻主要產卵區 (12-15°N, 140-142°E) 垂直深度 5-205 m 之月均溫度, 與隔年日本總鰻魚捕獲量之 Pearson 相關係數 (r)。藍線表示各深度之相關性, 紅圈代表統計顯著 ($p < 0.05$)。

結果顯示, 1 至 5 月在 5-105 m 間存在明顯負相關, 表明該期間次表層海溫升高可能對日本鰻幼生生存率構成不利影響, 進而反映於隔年沿岸捕撈量之下降。此分析突顯次表層熱異常事件在早期發育階段的潛在生態影響。

Depth-Wise Correlation Between Previous-Year Monthly Temperature (5–205 m) and Next-Year Korea Catch

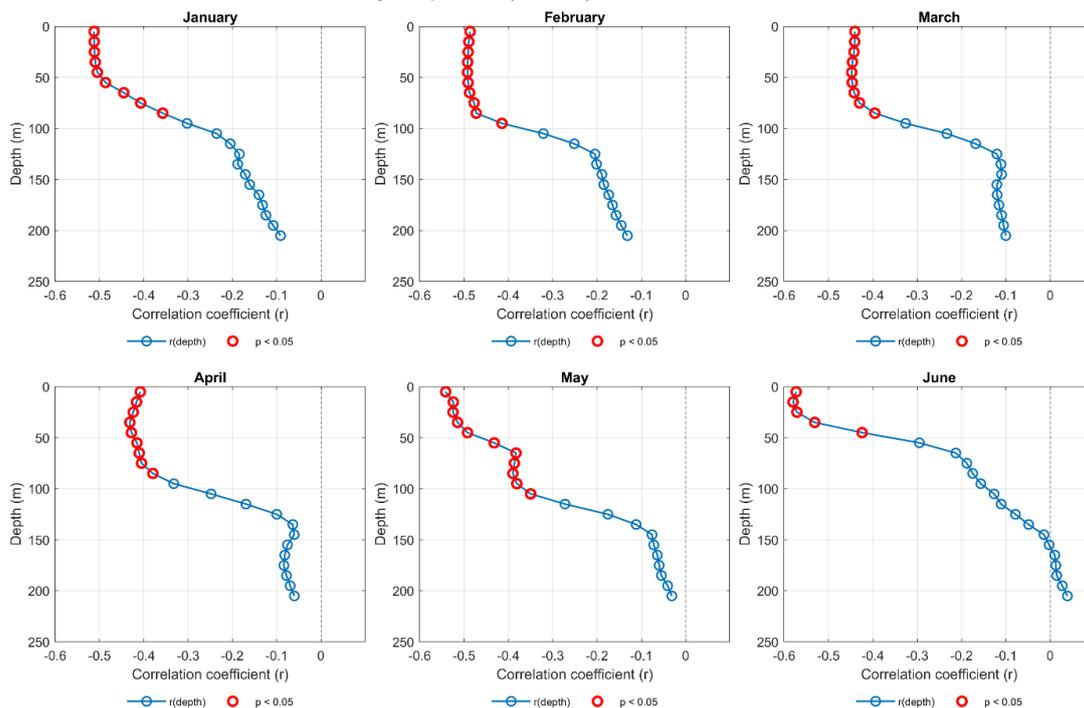


圖 5-32 次表層海溫 1-6 月各月份 5-205M 和韓國捕獲量之相關性

呈現前一年每月（1–6 月）不同水層深度（5–205 m）之月均海溫，與隔年韓國總捕撈量間的皮爾森相關係數。藍色曲線為各深度的相關值，紅圈標示達顯著水準（ $p < 0.05$ ）者。1–6 月間多數水層與捕獲量呈顯著負相關，尤以 5–105 m 間最為明顯，和日本結果類似。

第三項 海溫空間平均值和總捕獲量相關性

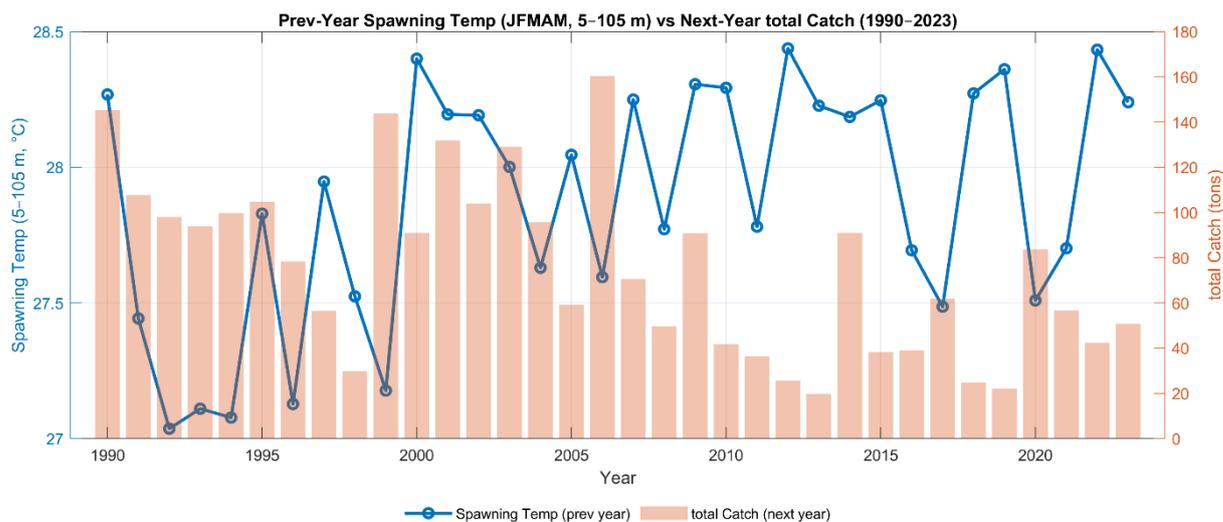


圖 5-33 前一年產卵區海溫空間平均值和總捕獲量相關性

圖片來源:研究者繪製

圖 5-33 前一年產 (1-5 月) 產卵區 (12-15°N, 140-142°E) 5-105 m 深度海溫空間平均值與隔年總捕獲量 (1990-2023) 之關係。

藍色線條表示前一年產卵區次表層 (5-105 m) 溫度在產卵季月份 (JFMAM) 之空間平均, 橘色長條則代表隔年台灣、日本、韓國與中國四國之總鰻魚捕獲量。

可觀察到, 在部分年份如 1998、2010、2020 年, 當前一年產卵區海溫顯著偏低時, 對應隔年捕獲量亦呈現下降趨勢, 顯示產卵期間的次表層溫度變異可能與鰻魚生殖成功率與仔稚魚存活率密切相關, 進而影響沿岸補撈成果。



圖 5-34 四個國家捕獲量和前一年產卵區海溫空間平均值相關性

圖片來源:研究者繪製

圖 5-34 每張子圖顯示不同國家（台灣、日本、韓國、中國）之總捕獲量（橘色長條）與對應前一年產卵季（JFMAM）期間產卵區（12–15°N，140–142°E）5–105 m 次表層平均海溫（藍色折線）之變化趨勢。標題右側標示各國海溫與捕獲量之皮爾森相關係數（ r ）。其中日本與韓國的相關性較高（ $r = -0.43, -0.46$ ），代表當產卵季海溫升高時，隔年捕撈量明顯下降，推測高溫可能降低鰻魚繁殖成功率或仔魚存活率；而台灣與中國則呈現較低相關性，可能與棲地特性、漁業壓力有關。此結果顯示區域性差異對於海溫對漁獲關聯的重要影響。

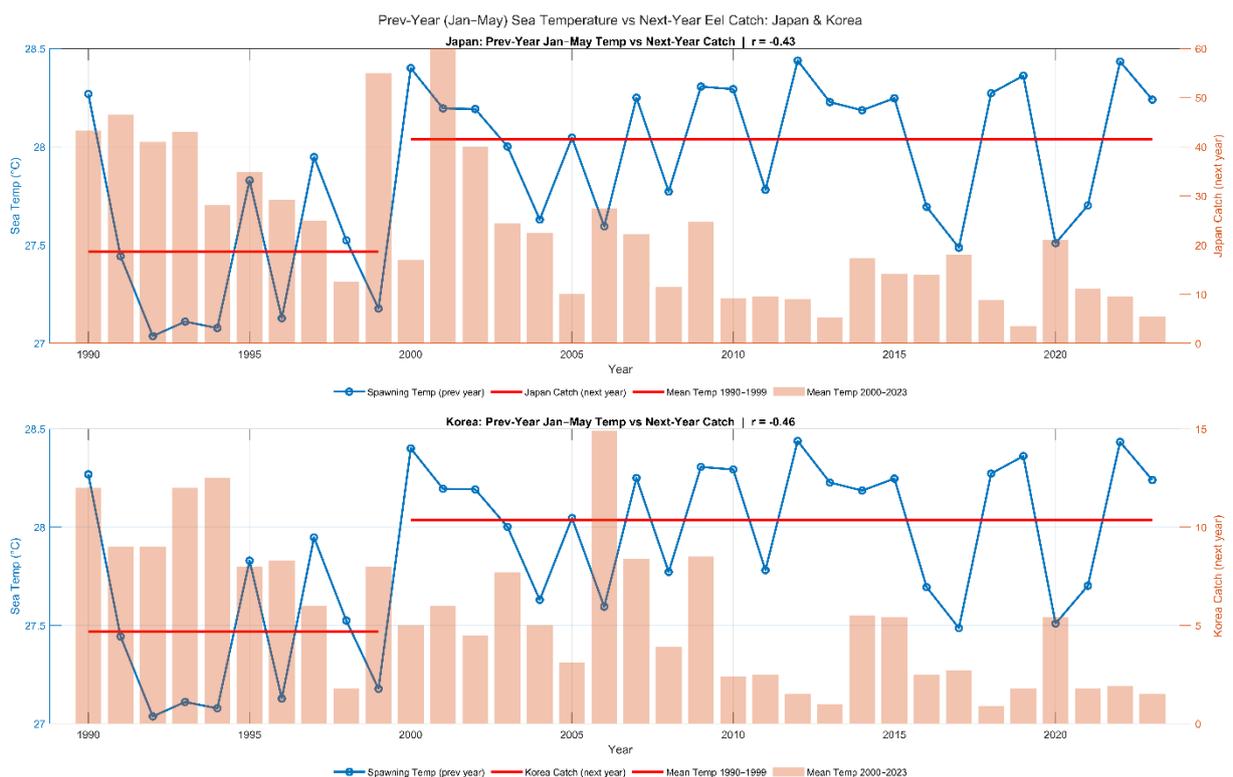


圖 5-35 日本和韓國的捕獲量和前一年產卵區海溫空間平均值相關性

圖片來源:研究者繪製

前一年產卵區海溫（1–5 月，5–105 m 空間平均）與隔年日本與韓國鰻魚捕獲量之關係（1990–2023）。圖中以藍色折線表示前一年產卵期海溫（JFMAM），以橘色長條表示隔年日本（上）與韓國（下）鰻魚捕撈量變化。紅色橫線分別代表 1990–1999 年（低溫期）與 2000–2023 年（暖化期）兩階段之平均溫度基準，可見自 2000 年後海溫多數年份均高於 28 °C。資料顯示捕獲量與前一年海溫變化呈顯著負相關（日本 $r = -0.43$ ；

韓國 $r = -0.46$)，過高的溫度可能抑制鰻魚繁殖成功或影響幼生早期存活，進而造成後一年鰻魚捕獲量下降，此結果指出暖化背景下，海洋熱浪或持續高溫可能成為鰻魚資源衰退的潛在關鍵因子。

第六章 結論

本研究結合 OISST(日尺度、 0.25°) 與 GODAS(月尺度、0–205 m 次表層溫度)，系統性辨識 1982–2025 年西北太平洋表層與次表層海洋熱浪 (MHWs)，並以 1990–2023 年東亞四國玻璃鰻捕撈量(日本、韓國、台灣、中國)建立由「熱浪偵測 → 垂直結構 → 海洋生物生存」的聯結框架。綜合分析結果與機制推論，得到以下結論與建議。

第一節 表層海洋熱浪發生趨勢

依據日尺度 OISST (0.25°) 並採 Hobday et al. (2016) 方法，對西太平洋暖池 ($128\text{--}154^{\circ}\text{E}$ 、 $5\text{--}20^{\circ}\text{N}$) 進行 1982–2025 年的表層海洋熱浪 (MHW) 檢測，結果顯示長期暖化基線十年際氣候調制共同塑造了近年顯著升高的 MHW 風險。

一、長期背景：暖化節奏 (對應圖 5-15)

自 1950 年代起，全球海溫可概分為「停滯—加速—停滯—再加速」四階段。這種全球暖化的節奏在西太平洋暖池中有清楚映射：1999–2013 年第二次停滯期內，MHW 活動相對稀少、強度有限；但自 2014 年起的再加速期，MHW 明顯轉為頻繁且強烈，2018、2020、2022、2024 年皆出現高強度、長持續、廣覆蓋的極端事件。此趨勢反映暖池背景海溫抬升與熱含量累積，使得即便短期擾動也更容易跨越第 90 百分位門檻，極端熱浪正由「例外」走向「常態」。圖中前十大事件亦多集中於再加速期，佐證此結論。

二、年際調制：ENSO 對 MHW 的影響 (對應圖 5-16)

將 ENSO 指數與 MHW 疊合可見，反聖嬰 (La Niña) 年份對暖池影響，增強的信風把暖水持續向西堆積，使背景海溫接近或超過 MHW 門檻，熱浪更易觸發且持續更久。雖然反聖嬰在東太平洋表現為「冷事件」，但在西太平洋卻透過東風強化—暖水西移—熱含量蓄積的機制，提高 MHW 的頻率與強度。因此，推測近年的高頻 MHW 是全球暖化基線抬升與 ENSO 年際調制疊加的結果。

第二節 淺層次表層海洋熱浪趨勢

以日本鰻產卵區 (12 - 15°N、140 - 142°E) GODAS 月資料檢視 5 - 45 m 與 55 - 95 m 的次表層 MHW，可見 1998 年為明顯分界：其後熱浪事件的發生年數、強度與持續性均顯著上升。進一步在 2008 年後，淺層 (5 - 25 m) MHW 幾乎年年出現，顯示上層熱含量與背景水溫已抬升到「只需小幅擾動即可跨越第 90 百分位門檻」的臨界狀態。中淺層 (55 - 95 m) 亦呈相同方向的增強，但表現為較長的連月持續。

一、 臨界溫度與事件重疊 (圖 5-25、圖 5-26)

5 m 單層與 5 - 45 m 平均時序顯示，28 °C (文獻指稱卵與仔魚最適上限) 近年被更頻繁且更長時間越過；多起 MHW 月份與 28 °C 閾值同步重疊，說明熱浪不僅更常見，實際熱暴露強度也顯著升高。這種「頻率提升 + 強度抬升」的雙重變化，意味早期生命史更可能遭遇超出生理耐受的高溫。

二、 機制含意

55 - 95 m 之次表層熱異常連月維持，造成幼生 (常於 50 - 150 m 日夜遷移) 長時段熱暴露。此「表層觸發 + 次表層維持」機制，與在產卵季前後辨識到的高敏感月份 (1 - 6 月) × 高敏感深度 (約 50 - 150 m) 相互呼應。

第三節 次表層海溫對鰻魚捕獲量之影響

本研究以產卵區 (12 - 15°N, 140 - 142°E) 之次表層海溫為主軸，結合 1990 - 2023 年四國玻璃鰻捕撈資料，系統檢驗「前一年每月 (1 - 12 月)、各深度 (5 - 205 m) 海溫」與「隔年捕獲量」的線性關聯。

一、 四國捕獲量分析

日本與韓國對次表層熱異常高度敏感：前一年 1-5 月、約 50-150 m 的溫度與隔年捕獲量呈顯著負相關；以產卵季 JFMAM (1-5 月) 5-105 m 體積平均指標觀察，負 (日本 $r \approx -0.43$ 、韓國 $r \approx -0.46$)。這表示偏暖的次表層環境，可能反映早期鰻魚卵和仔魚的生存瓶頸，日本鰻仔魚主要在約 50 - 150 m 的水層漂移，若產卵區在 (一到五月) JFMAM 期間偏暖或出現 (次表層) 熱浪，推測會提高初期生存率，因而在長距離漂送至日本 / 韓國 (黑潮 - 親潮交匯區) 前就已決定當屆族群量級。距離較遠、漂送時間更長，已經

長為玻璃鰻不需要仰賴洋流移動，能自主移動不再是像浮游生物一般，所以推測最後的捕獲量是受到一開始鰻魚仔魚的生存率影響，讓「產卵區海溫 → 隔年捕撈量」的負相關訊號更清楚。

相對地，台灣與中國處在黑潮主幹與邊緣沿岸區，運輸動力學的年際變化（黑潮強弱、路徑擺動、NEC 分歧緯度）更容易改變鰻魚的到達時機與入沿岸數量；同時，近岸背景因素（沿岸混合、河川逕流、風場、漁撈行為與管理制度差異）會稀釋單一「產卵區溫度」的訊號，導致相關性較弱、較不穩定。因此可推測：日本／韓國較受產卵區早期環境所制約；台灣／中國則更受運輸與近岸環境背景調制。

二、年代差異明顯

2000 年後產卵季次表層基線溫度多數年份 $>28^{\circ}\text{C}$ ，在較高暖背景下，只要短期異常便更易跨越生態臨界，與海洋熱浪出現月份/深度的時序重疊，支持「暖背景 + 次表層熱浪」為鰻魚捕獲量下滑的重要風險組合。

第四節 未來工作

鑒於 OISST 網格化、GODAS 再分析與垂直混合參數化均有限制；捕撈量受漁撈行為、管理制度影響。未來加強因果驗證與統計強化，本研究揭示統計關聯，非因果證成。建議結合高解析度環流—粒子漂移模擬（含 50–150 m 垂向行為），將生理—餌源場耦合納入（如攝食、代謝、存活率）。多變量迴歸將運輸指標（黑潮輸送量、路徑擺動、渦旋動能、NEC 分歧緯度）與熱環境指標同時納入，評估相對貢獻與交互作用。拉格朗日漂移與路徑驗證高解析度環流—粒子追蹤：以再分析或區域海模（含 3D 流場）釋放虛擬幼生，設定 50–150 m 的日夜垂向遷移，估算抵達沿岸的粒子比例與到達時序。

參考文獻

一、中文參考資料

1. 網站資料

國立臺灣海洋大學網站，〈海大辦 2024 漁業面對氣候變遷之衝擊與調適國際研討會〉（2024 年）。<https://mprp.ntou.edu.tw/p/404-1017-105063.php?Lang=zh-tw>（檢索日期：2025 年 4 月）。

臺灣環境部氣候變遷署網站，〈環境部氣候變遷署〉（無日期）。<https://www.cca.gov.tw/affairs/adaptation-and-resilience/sectors/oceans-and-coasts/2085.html>（檢索日期：2025 年 4 月）。

臺灣氣候變遷資訊與應用中心網站，〈TCCIP 電子報 072 期〉（2024 年 6 月 13 日）。https://tccip.ncdr.nat.gov.tw/km_newsletter_one.aspx?nid=20240613100751（檢索日期：2025 年 4 月）。

台灣醒報網站，〈海水不斷升溫 影響魚類繁殖〉（2020 年 7 月 6 日）。<https://anntw.com/articles/20200706-ezup>（檢索日期：2025 年 5 月）。

鰻魚情報站網頁，〈鰻魚情報站〉（無日期）。<https://homepage.ntu.edu.tw/~yshan/index.html>（檢索日期：2025 年 7 月）。

二、外文參考資料

1. 外文文獻

- Ahn, H., Yamada, Y., Okamura, A., et al., “Effect of water temperature on embryonic development and hatching time of the Japanese eel *Anguilla japonica*,” *Aquaculture* 330–333 (2012): 100–105.
- Aoyama, J., Watanabe, S., Miller, M. J., et al., “Spawning sites of the Japanese eel in relation to oceanographic structure and the West Mariana Ridge,” *PLOS ONE* 9 (2014): e88759.
- Barbeaux, S. J., Holsman, K., and Zador, S., “Marine heatwave stress test of ecosystem-based fisheries management in the Gulf of Alaska Pacific cod fishery,” *Frontiers in Marine Science* 7 (2020): Article 703.
- Gao, G., Marin, M., Feng, M., Yin, B., Yang, D., Feng, X., Ding, Y., and Song, D., “Drivers of marine heatwaves in the East China Sea and the South Yellow Sea in three consecutive summers during 2016–2018,” *Journal of Geophysical Research: Oceans* 125, no. 8 (Aug. 2020): e2020JC016518.
- Garrabou, J., Coma, R., Bensoussan, N., and Bally, M., “Mass mortality in Northwestern Mediterranean rocky benthic communities: Effects of the 2003 heat wave,” *Global Change Biology* 15, no. 5 (May 2009): 1090–1103.
- Genin, A., Levy, L., Sharon, G., and Diamant, A., “Rapid onsets of warming events trigger mass mortality of coral reef fish,” *Proceedings of the National Academy of Sciences* 117, no. 41 (Oct. 2020): 25378–25385.
- Higuchi, T., Yamada, Y., Watanabe, S., Ishikawa, S., Tanaka, H., and Tsukamoto, K., “Estimation of the spawning time of Japanese eels in the open ocean,” *Scientific Reports* 10 (2020): 4172.
- Hobday, A. J., Alexander, L. V., Perkins, S. E., Smale, D. A., Straub, S. C., Oliver, E. C. J., Benthuisen, J. A., Burrows, M. T., Donat, M. G., Feng, M., Holbrook, N. J., Moore, P. J., Scannell, H. A., Sen Gupta, A., and Wernberg, T., “A hierarchical approach to defining marine heatwaves,” *Progress in Oceanography* 141, no. 1 (Dec. 2016): 227–238.
- Holbrook, N. J., Sen Gupta, A., and Wernberg, T., “Keeping pace with marine heatwaves,” *Nature Reviews Earth & Environment* 1, no. 1 (2020): 482–493.
- Hong, H.-J., and Hsu, H.-H., “Remote tropical central Pacific influence on driving sea surface temperature variability in the Northeast Pacific,” *Environmental Research Letters* 18, no. 4 (Apr. 2023): 044005.
- Jacox, M. G., Alexander, M. A., Bograd, S. J., and Scott, J. D., “Thermal displacement by marine heatwaves,” *Nature* 584 (2020): 82–86.

- Kim, H., Kimura, S., Shinoda, A., et al., “Effect of El Niño on migration and larval transport of the Japanese eel (*Anguilla japonica*),” *ICES Journal of Marine Science* 64 (2007): 1387–1395.
- Kurokawa, T., Okamoto, T., Gen, K., et al., “Influence of water temperature on morphological deformities in cultured larvae of Japanese eel, *Anguilla japonica*, at completion of yolk resorption,” *Journal of the World Aquaculture Society* 39 (2008): 726–735.
- Li, C., Huang, J., Liu, X., Ding, L., He, Y., and Xie, Y., “The ocean losing its breath under the heatwaves,” *Nature Communications* 15, no. 1 (2024): Article 6840.
- Lin, I.-I., Wu, C.-C., Emanuel, K. A., Lee, I.-H., Wu, C.-R., and Pun, I.-F., “The interaction of Supertyphoon Maemi (2003) with a warm ocean eddy,” *Monthly Weather Review* 133, no. 9 (Sept. 2005): 2635–2649.
- Lin, Y.-F., and Wu, C.-R., “Non-stationary modulation of the Kuroshio by the spawning latitude of the Japanese eel: Evidence from tracer experiments,” *Scientific Reports* 9 (2019): 2021.
- Noh, E., Kim, J., and Kim, H.-G., “Atmospheric pathway of marine heatwaves over the Northwestern Pacific,” *Scientific Reports* 13, no. 1 (2023): 22821.
- Okamura, A., Yamada, Y., Horie, N., et al., “Effects of water temperature on early development of Japanese eel *Anguilla japonica*,” *Fisheries Science* 73 (2007): 1241–1248.
- Oliver, E. C. J., Donat, M. G., Burrows, M. T., Moore, P. J., Smale, D. A., Alexander, L. V., Benthuisen, J. A., Feng, M., Sen Gupta, A., Hobday, A. J., Holbrook, N. J., Perkins-Kirkpatrick, S. E., Scannell, H. A., Straub, S. C., and Wernberg, T., “Longer and more frequent marine heatwaves over the past century,” *Nature Communications* 9, no. 1 (2018): Article 1324.
- Otake, T., Inagaki, T., Hasumoto, H., Mochioka, N., and Tsukamoto, K., “Diel vertical distribution of *Anguilla japonica* leptocephali,” *Ichthyological Research* 45 (1998): 208–211.
- Radfar, S., Moftakhari, H., and Moradkhani, H., “Rapid intensification of tropical cyclones in the Gulf of Mexico is more likely during marine heatwaves,” *Communications Earth & Environment* 5, no. 1 (2024): Article 421.
- Sato, H., Takemura, K., and Nakamura, H., “Impact of an unprecedented marine heatwave on extremely hot summer over Northern Japan in 2023,” *Scientific Reports* 14, no. 1 (2024): 16100.
- Sen Gupta, A., Thomsen, M., Smale, D. A., et al., “Drivers and impacts of the most extreme marine heatwave events,” *Scientific Reports* 10 (2020): 19359.

- Shirai, K., Otake, T., Amano, Y., et al., “Temperature and depth distribution of Japanese eel eggs estimated using otolith oxygen stable isotopes,” *Geochimica et Cosmochimica Acta* 236 (2018): 373–383.
- Smith, K. E., Burrows, M. T., Hobday, A. J., King, N. G., Moore, P. J., Sen Gupta, A., Thomsen, M. S., Wernberg, T., and Smale, D. A., “Biological impacts of marine heatwaves,” *Annual Review of Marine Science* 15, no. 1 (Jan. 2023): 119–144.
- Sun, D., Li, F., and Zhang, B., “Frequent marine heatwaves hidden below the surface of the global ocean,” *Nature Geoscience* 16, no. 1 (2023): 1099–1104.
- Tsukamoto, K., “Discovery of the spawning area for Japanese eel,” *Nature* 356 (1992): 789–791.
- Villaseñor-Derbez, J. C., Arafteh-Dalmau, N., and Micheli, F., “Past and future impacts of marine heatwaves on small-scale fisheries in Baja California, Mexico,” *Communications Earth & Environment* 5, no. 1 (2024): Article 623.
- Yamada, Y., Okamura, A., Mikawa, N., et al., “Ontogenetic changes in phototactic behavior during metamorphosis of artificially reared Japanese eel *Anguilla japonica* larvae,” *Marine Ecology Progress Series* 379 (2009): 241–251.
- Zhang, Y., Du, Y., and Hobday, A. J., “Vertical structures of marine heatwaves,” *Nature Communications* 14, no. 1 (2023): Article 6483.

2. 網站資料

- “Marine Heat Waves (MHW),” Shankar IAS Parliament Website, 無日期, <https://www.shankariasparliament.com/current-affairs/gs-i/marine-heat-waves-mhw> (檢
索日期：2025年7月30日)。
- “Marine Heatwaves Tracker,” MarineHeatWaves.org, 無日期, <https://www.marineheatwaves.org/tracker.html> (檢
索日期：2025年8月3日)。
- “IPCC Sixth Assessment Report (AR6),” Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Website, 無日期, <https://www.ipcc.ch/assessment-report/ar6/> (檢
索日期：2025年8月15日)。