

# 氣候變遷對中西太平洋島國正鰹漁場及漁獲量潛能影響

嚴國維<sup>1</sup> · 蘇楠傑<sup>2</sup> · 呂學榮<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> 行政院農業委員會水產試驗所海洋漁業組

<sup>2</sup> 國立臺灣海洋大學環境生物與漁業科學學系

## 摘要

中西太平洋正鰹 (*Katsuwonus pelamis*) 是世界上重要漁業資源，在氣候變遷影響下，此資源漁獲量潛能、變動趨勢及永續性將直接影響海洋生態系統、全球經濟及人類糧食安全，故掌握該物種資源未來變動特徵，將可望降低物種受衝擊程度。已建立漁獲量潛能模型證實正鰹資源與初級生產力、聖嬰現象之關係，惟氣候變遷不同暖化程度對其影響尚未明確。本研究透過漁獲量潛能模型及氣候情境資訊，模擬研究區域初級生產力與未來正鰹資源豐度可能變動，綜合討論比較不同型態聖嬰現象對資源之影響。研究結果顯示，漁獲量潛能與初級生產力之變動存在空間上之差異，當正鰹受環境變動而轉換棲地，可能因此面臨生態系統無法支持之問題。相較於暖化程度較輕的情境，當暖化的狀況持續加劇下，正鰹漁業資源面對聖嬰現象之脆弱度將提高，漁獲量潛能亦將隨之降低。為降低正鰹資源受特殊氣候事件的傷害，除應落實該物種之漁業管理，並應設法減緩傷害之衝擊，以確保中西太平洋島國對正鰹資源之永續利用。

關鍵詞：正鰹、漁獲量潛能、中西太平洋、太平洋島國、氣候變遷

## 前言

聯合國下設立之政府間氣候變化專門委員會 (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) 近期發表 Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate (SROCC) 明確指出，海洋生態系統、食物鏈及依賴食物鏈之海洋漁業正受氣候變遷強烈威脅 (Boyd *et al.*, 2019)。在全球氣候變遷導致環境迅速變化之情形下，海洋生態系統及漁業資源生產力均造成重大影響 (Bindoff *et al.*, 2019)。此現象不僅會導致漁業經營成本與風險的激增 (Belhabib *et al.*, 2018)，也影響了人類從漁業水產品中獲取收入之能力 (Szabo *et al.*, 2016)。在有形及無形資源均受該因素影響而出現衰退之際 (Ramos and Garrido, 2014)，如何取得先機兼顧「漁業經濟」與「生態環境」，以建構永續

漁業，係當前最重要研究課題。

漁獲量排名全球第三之高度洄游性魚種—正鰹 (skipjack tuna, *Katsuwonus pelamis*) 分布於熱帶及亞熱帶地區海域 (FAO, 2018)。該魚種在三大洋 (太平洋、印度洋及大西洋) 均有分布，但中西太平洋正鰹之漁獲量佔全球之冠 (約全球 70%)，為世界最大正鰹漁場 (FAO, 2011)。而這其中又有 86% 之正鰹是來自鰹鮪圍網之漁具漁法 (Harley *et al.*, 2011)，因此中西太平洋鰹鮪圍網之漁業的過去、現在及未來皆十分重要，倘資源出現巨變，不僅將影響全球食物來源之穩定供應，也將衝擊人類的蛋白質來源。

中西太平洋海域包含島國之專屬經濟海域 (exclusive economic zone, EEZ) 及帶狀公海水域。遠洋漁業國家之船艦進入公海須遵守區域性管理組織—中西太平洋漁業委員會 (Western and Central Pacific Fisheries Commission, WCPFC) 之規範，而當進入 EEZ 捕魚，也須向太平洋島國繳交入漁費換取捕魚權，這些日益高漲的入漁費創造太平洋島國經濟收入 (Liao and Huang, 2016)，

\*通訊作者 / 基隆市中正區北寧路 2 號 TEL: (02)2462-2192 ext. 5033; Fax: 02-2463-2659; E-mail: hjlu@ntou.edu.tw

卻也造成鯉鮪圍網經營之成本壓力。因為入漁費的談判必須在前一年確定費率及入漁天數，但是來年魚群大量出沒的區域卻無法評估。因此，如果能夠具體掌握該海洋環境變遷對中西太平洋正鯉之影響，進而理解魚群的時空分布特性，無論是對區域的漁業管理、太平洋島國及漁業公司等方面，都有極大的幫助 (Rubio *et al.*, 2020)。

回顧過去研究發現，探討正鯉與氣候變遷之研究也常選用氣候指數的巨大波動定義之「特殊氣候事件」，並發現正鯉與特殊氣候事件之間的顯著相關性，此特殊氣候指數即為聖嬰現象 (*El Niño*) (Lehodey *et al.*, 1997; Lehodey *et al.*, 1998; Handayani *et al.*, 2019)。此外，亦有研究發現其資源規模及加入量也受到太平洋年代際振盪 (Pacific Decadal Oscillation, PDO) 指數所影響 (Lima and Naya, 2011)，顯示正鯉漁場及漁獲量潛能深受到氣候變遷與極端氣候的影響。

來自祕魯湧昇區的大洋環流，將富含營養鹽及低溫的海水帶往中太平洋，形成赤道太平洋冷水舌 (Pacific Equatorial Cold Tongue, PECT) 的海水表面特徵，在湧昇效應有利初級生產力發展下，食物塔底端的生物持續獲得能量的補充。而從中太平洋一路延伸到印度洋區域，有全世界最大的暖水團－西太平洋暖池 (Western Pacific Warm Pool, WPWP)，WPWP 的初級生產力較低，則為食物塔頂端的生物如正鯉等熱帶鮪類所棲息，透過洋流不斷將 PECT 往 WPWP 池方向推進，讓養分得以進入中西太平洋。當聖嬰現象發生時，會讓 WPWP 向東移動、PECT 向東退縮，影響了中西太平洋適合正鯉棲息的环境、也影響了初級生產力的注入 (Yen *et al.*, 2012)。而不僅是特殊氣候事件的影響，隨著全球暖化持續加劇，也讓全球洋流出現變化 (Gasser *et al.*, 2015; Yen *et al.*, 2017)。

研究發現，聖嬰現象存在有第二種型態過去較少被討論。經研究證實，過去傳統研究之聖嬰現象發生期間，海水表面溫度差 (sea surface temperature anomaly, SSTA) 的高值集中在東太平洋至中西太平洋海域 (Lehodey *et al.*, 1997)。科學家發現另有一種型態之聖嬰現象發生時，東太平洋水溫並無上升趨勢，僅有中太平洋之 SSTA 出現高值。這兩種不同的聖嬰現象搭配上海氣耦合系統的變動，在赤道太平洋之北赤道洋流 (North Equatorial Current, NEC)、北赤道反流

(North Equatorial Countercurrent, NECC)、南赤道洋流北支流 (Northern Branch of the South Equatorial Current, SECn) 及赤道潛流 (Equatorial Undercurrent, EUC) 等主要洋流，均獲證實在不同形態下之聖嬰現象會有顯著差異 (Wang and Wu, 2013)。也因此目前主流學者將發生在中太平洋之聖嬰現象定義為中太平洋聖嬰現象 (Central-Pacific *El Niño*) (Yeh *et al.*, 2009)，而傳統型聖嬰現象定義為東太平洋聖嬰現象 (Eastern-Pacific *El Niño*)。

然而，這些研究主要探討海洋學的部分，但對於正鯉之漁獲量潛能所造成之影響則探討較少。初級生產力與漁獲量皆屬生態系統運作過程之環節之一，兩者間存在連動關係 (Lehodey *et al.*, 1998)。中西太平洋區域正鯉資源正受到氣候變遷影響，並且有足夠證據指出這些資源的空間變動將對漁業造成顯著衝擊，並連帶影響該處漁業資源供應，造成當地國家入漁費的短收及國家糧食安全風險的增加 (Liao and Huang, 2016; Johnson *et al.*, 2020)，雖已有研究確立該區域在預測漁獲潛能之可行性 (Yen *et al.*, 2016; Kim *et al.*, 2020)，但由該等研究更可具體發現，正鯉漁獲量在人為開發及氣候變遷雙重影響下，近年來其時空特性已呈現劇烈變動情形。這些變動直接衝擊個別島國未來之生態環境及經濟收益，透過情境模擬之研究刻不容緩。爰此，本研究深入探討海洋環境變遷對中西太平洋島國正鯉資源之影響，提出長期漁業管理策略的可能架構，以期如此重要的資源得以永續經營。爰此，本研究透過資料庫的建立、統計分析、釐清過去正鯉與初級生產力及特殊氣候事件的關係等作為切入點，再接著透過漁獲量潛能模型建立，探索不同的情境下正鯉豐度改變及漁獲量潛能空間推移。

## 材料與方法

### 一、研究區域

中西太平洋環境的動態變化，主要是大氣及海洋耦合的結果，這個耦合機制，使洋流的速度及強度出現差異，這也使得在赤道太平洋上 PECT (Jin, 1996) 及 WPWP 的空間分布隨時間不斷變化。這個變化的周邊就是正鯉大量被漁獲，也正是本研究主要想了解的一個區塊。

Lehodey *et al.* (2010) 定義 WPWP 範圍約在緯度 10°N - 10°S 及經度 130°E - 165°E 之間、PECT 範圍約在緯度 10°N - 10°S 及經度 170°E - 130°W 之間，為了能涵蓋這兩個區域，及掌握中西太平洋正鰹的變動特性，本研究的研究區域將涵蓋這兩個區域。

## 二、漁業資料

2000 - 2014 年臺灣鰹鮪圍網漁獲日誌資料，取自中華民國對外漁業合作協會，這些資料記錄了漁船大小、作業時間、作業空間（經緯度）、船名、魚群（素群、人工集魚器群、流木群）、魚種別漁獲量及努力量。將這些資料整理成月別一度方格，計算月別單位努力漁獲量 (catch per unit of effort, CPUE)，該公式如下所示：

$$CPUE_{mij} = \frac{\sum C_{mij}}{\sum E_{mij}} \dots \dots \dots (1)$$

其中  $m$ 、 $i$  及  $j$  分別表示月份、緯度及經度； $CPUE_{mij}$  代表名目 CPUE (mt/net)； $\sum C_{mij}$  和  $\sum E_{mij}$  分別代表月漁獲量的加總 (mt) 及月下網次數的加總 (nets)。

## 三、環境資料

環境資料的部分，本研究選用海水表面溫度 (sea surface temperature, SST)、海水表面高度 (sea surface height, SSH)、混合層深度 (mixed layer depth, MLD)、海水表面葉綠素濃度 (sea surface chlorophyll-a, SSC)、海水表面鹽度 (sea surface salinity, SSS)、水下 105 m 水溫值、淨初級生產力 (net primary production, NPP) 及東西向的海流速度 (u-component of current, UCC)。這些衛星遙測的環境資料，下載自 NOAA Earth System Research Laboratory (<http://www.esrl.noaa.gov>)。資料庫系統為 Global Ocean Data Assimilation System，空間解析度為 0.333 緯度及 1.0 經度，時間解析度為月別。環境資料之使用年份為 2000 - 2014 年，資料擷取範圍為 130°E - 145°W 及 15°N - 15°S。

## 四、情境模擬資料

氣候變遷不同情境模擬資料取自 Program for

Climate Model Diagnosis and Intercomparison 網站 (<https://pcmdi.llnl.gov/>)。為配合 IPCC 第六次評估報告 (assessment report 6, AR6) 之發表，該網站已於 2018 年 12 月先發布 Coupled Model Intercomparison Project Phase6 (CMIP6) 資料，且已可公開使用與下載，惟 AR6 預計於 2021 - 2022 年方能發表。本研究採用 IPCC 目前最新版本評估報告 (assessment report 5, AR5) 對應之所推估之氣候模型 (IPSL-CM5 climate model) 所產製之資料，資料來源為 NOAA Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (<http://www.gfdl.noaa.gov>)。所用資料之空間解析度為 1 度方格，時間解析度為月別。情境模擬資料之使用年份為 2019 - 2055 年，資料擷取範圍同為 130°E - 80°W 及 20°N - 20°S。為探討不同暖化程度對漁獲量潛能的影響，本研究從中選擇暖化程度最低及最高的氣候情境 (RCP 2.6 及 RCP 8.5)，它們分別代表每平方公尺的輻射強迫力到 2100 年為止，跟 1750 年相比分別增加 2.6 及 8.5 瓦。

## 五、努力量、漁獲率與漁獲量潛能模型建立

為了建立努力量與 CPUE 的模型，並進一步了解漁獲量及延伸到未來的漁獲量，本研究應用 Yen *et al.* (2016) 所建構之廣義加成模型 (generalized additive model, GAM)，透過模型推算中西太平洋鰹鮪圍網漁獲正鰹的 CPUE 及漁獲努力量。所參考的因素包含漁船大小、月別、經度、緯度及魚群（素群、人工集魚器群、流木群），透過這些參數建立的 CPUE 模型及努力量模型，方程式可以寫作以下兩個，分別為：

$$\begin{aligned} \ln(CPUE+0.01) \sim & CTN + school + Month + s \\ & (Longitude) + s (Latitude) + s (NPP) + s \\ & (MLD) + s (SSC) + s (SST) + s (SSS) + s \\ & (SSH) + s (UCC) + s (S105) + \varepsilon \dots \dots \dots (2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \ln(Effort+0.01) \sim & CTN + school + Month + s \\ & (Longitude) + s (Latitude) + s (NPP) + s \\ & (MLD) + s (SSC) + s (SST) + s (SSS) + s \\ & (SSH) + s (UCC) + s (S105) + \varepsilon \dots \dots \dots (3) \end{aligned}$$

其中  $s()$  代表的是平滑函數 (smoothing spline function),  $\varepsilon$  代表誤差，在此假設為一個  $N(0, \sigma^2)$  常態分布的誤差數列，CTN 船隻噸位級代碼，

用來判斷漁船大小；school 代表不同的魚群型態(例如：天然流木群、人工流木群及素群)；S105 代表水下 105 m 的水溫值。CPUE 加上常數 (0.01) 以避免  $\ln(0)$  無意義的數值。

本研究選用 2000 - 2010 年的漁獲資訊與環境資訊，作為建立模型的資料 (training data)，選擇 2011 - 2014 年的漁獲資訊作為驗證資料，以環境資料套入本研究所建構的模型驗證該模型是否準確。所預測的變動率都以 2000 - 2010 年作為標準，以討論變動趨勢的增加及減少比例。分析工具的部分，本研究透過循序向後選擇法 (sequential backward selection) 及以 AIC 作為選擇標準，以進行模型選擇。AIC 作為環境因子篩選的準則，該準則會綜合評估統計模型的複雜度 (因子越少越好)，和衡量模型擬合資料之吻合度 (越高越好)。

透過模型化處理，讓 CPUE 及漁獲努力量與海洋環境變動產生連結，然而這兩個參數仍不算是漁獲量潛能，必須將 CPUE 及努力量連結，才可評估出未來的漁獲量潛能，期評估之推算公式如下所示：

$$\sum C_{mij} = CPUE_{mij} \times \sum E_{mij} \dots \dots \dots (4)$$

其中  $i$  表是經度、 $j$  表示緯度、 $m$  代表月份、 $\sum C_{mij}$  代表單位時間 ( $m$ ) 單位空間 ( $i, j$ ) 的漁獲量潛能。在此並假設，除了本研究所討論的變因之外，其他所有漁業條件 (如科技、政策等) 都與 2000 - 2010 年一致。

以地理資訊系統，將初級生產力及漁獲量潛能資料套疊入中西太平洋各個 EEZ，分別比較不同 EEZ 間之個時序變化。而為具體展現目前未來情況與現況之增加或減少幅度，本研究也以 2000 - 2010 年之漁獲量潛能與 NPP 作為標準，與預估值做比較，其相對變化 (relative change) 計算公式如下所示：

$$\text{Relative Change} = \frac{V_{(future)} - V_{(2000-2010)}}{V_{(2000-2010)}}$$

其中 Relative Change 代表未來相對於現況的增減比率， $V_{(future)}$  代表未來之預估值， $V_{(2000-2010)}$  則代表 2000 - 2010 年之平均水平。

## 六、聖嬰現象的分類

本研究透過經驗正交函數迴歸分析整個熱帶太平洋海水表面溫度之變動主成分，作為聖嬰現象分類之標準 (Kao and Yu, 2009; Yen *et al.*, 2017)。迴歸公式如下所示：

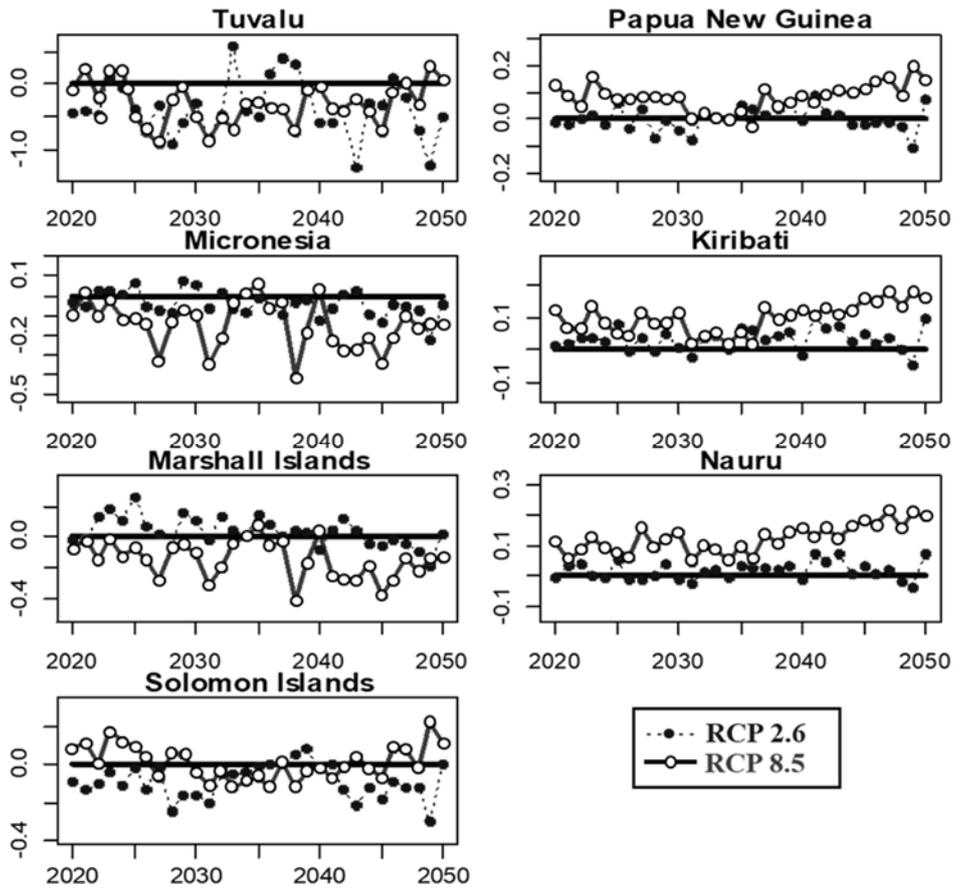
$$SST_{xy}(t) = \overline{SST_{xy}} + \sum_{i=1}^{10} eof_{ixy} \times pc_i(t) \dots (5)$$

其中  $SST_{xy}(t)$  代表隨時間 ( $t$ ) 序列，不同經度 ( $x$ ) 及緯度 ( $y$ ) 之海水表面溫度變化； $\overline{SST_{xy}}$  代表研究期間的不同經緯度之平均水溫陣列。 $i$  代表設定之主成分數量 (本研究設定之主成分為 1 至 10)； $eof_{ixy}$  代表第  $i$  個主成分之不同經緯度空間變動特徵值。 $pc_i(t)$  代表第  $i$  個主成分，隨時間之變動特性回歸值。Yen *et al.* (2017) 已證實以此法分析之第 1 及第 2 主成分之空間變動分別與東太平洋聖嬰現象及中太平洋聖嬰現象之變動相符。本研究將代表東太平洋聖嬰現象及中太平洋聖嬰的  $pc_i(t)$ ，分別取離均差，再以高出標準差 1 倍的時段，作為辨識聖嬰現象種類的依據 (Yen *et al.*, 2017)。而根據 Yen and Lu (2016) 之研究顯示，初級生產力對正鯉之生活史影響甚鉅。爰此，本研究亦採該物種之漁獲量潛能與初級生產力進行比對。

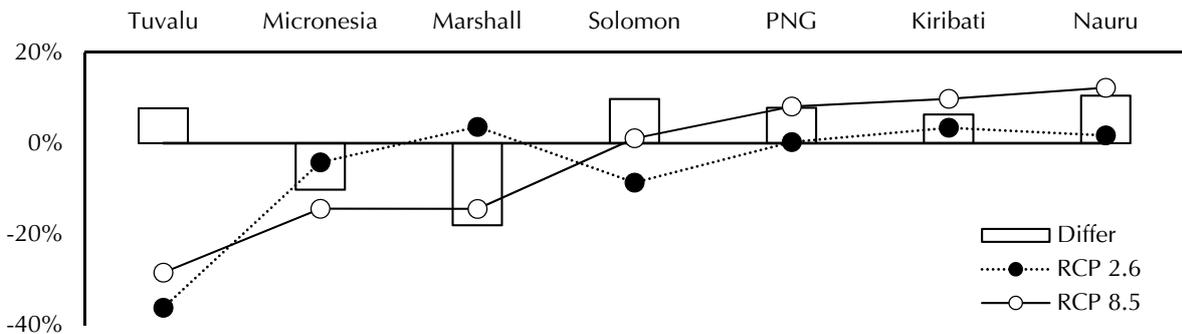
## 結 果

### 一、中西太平洋初級生產力的變動特性

如 Fig. 1 所示，吐瓦魯 EEZ 在 RCP 2.6 情境下，僅於 2030 - 2040 年間有四年高於平均值外，其餘年份之 NPP 皆低於目前之平均標準，其相對變化約介於 -0.03 至 0.1 之間，並分別在 2040 及 2049 年降至 -0.1 以下。而在 RCP 8.5 之情境下，在 2025 - 2045 年間 NPP 均有衰退嚴重之趨勢，研究期間僅有 5 年高於平均值。密克羅尼西亞與馬紹爾群島這兩個國家之 EEZ 所呈現的趨勢較為一致，在 RCP 2.6 情境下，NPP 之後續變動約略與現況接近。但若在 RCP 8.5 情境下，在往後數年將出現較大震盪，且有數年有非常顯著之衰退情形。而索羅門群島 EEZ 之趨勢則在兩個情境於不同時期互有消長，其變動幅度較其他國家為低。另一方面，巴布亞紐幾內亞、吉里巴斯及諾魯等國，則可



**Fig. 1** Future change of net primary production (relative to the 2000-2010 average) in the exclusive economic zone waters of the Pacific island countries in the Western and Central Pacific Ocean.



**Fig. 2** Average change rates of net primary production by country under the 2 scenarios. PNG: Papua New Guinea.

發現在 RCP 2.6 情境下 NPP 變動與現況較為接近，相對變化增減幅度約在 0.05 以內。但當 RCP 8.5 情境發生時，NPP 有顯著高於 RCP 2.6 情境之情況，其相對變化介於 -0.1 至 -0.4 之間。將各 EEZ 之 NPP 於不同情境下之變化情形比較於 Fig. 2 時可發現，吐瓦魯在未來無論於何種情境下，其 NPP 都將有顯著的下降情形。密克羅尼西亞與馬紹爾群島兩國之 EEZ 當暖化情況加劇時，將出現較大

的下降趨勢，其中又以馬紹爾群島之情況最為嚴重。索羅門群島在 RCP 2.6 情境下，其 NPP 有微幅下滑的趨勢，但在 RCP 8.5 情境下，NPP 約與現況接近。巴布亞紐幾內亞、吉里巴斯及諾魯等國之 EEZ，在 RCP 2.6 情境下 NPP 無顯著改變（相對變化約介於 -0.02 至 0.05 間），但在則在 RCP 8.5 情境下，其 NPP 有微幅上升之趨勢，其相對變化將於 0.05 及 0.2 間震盪。

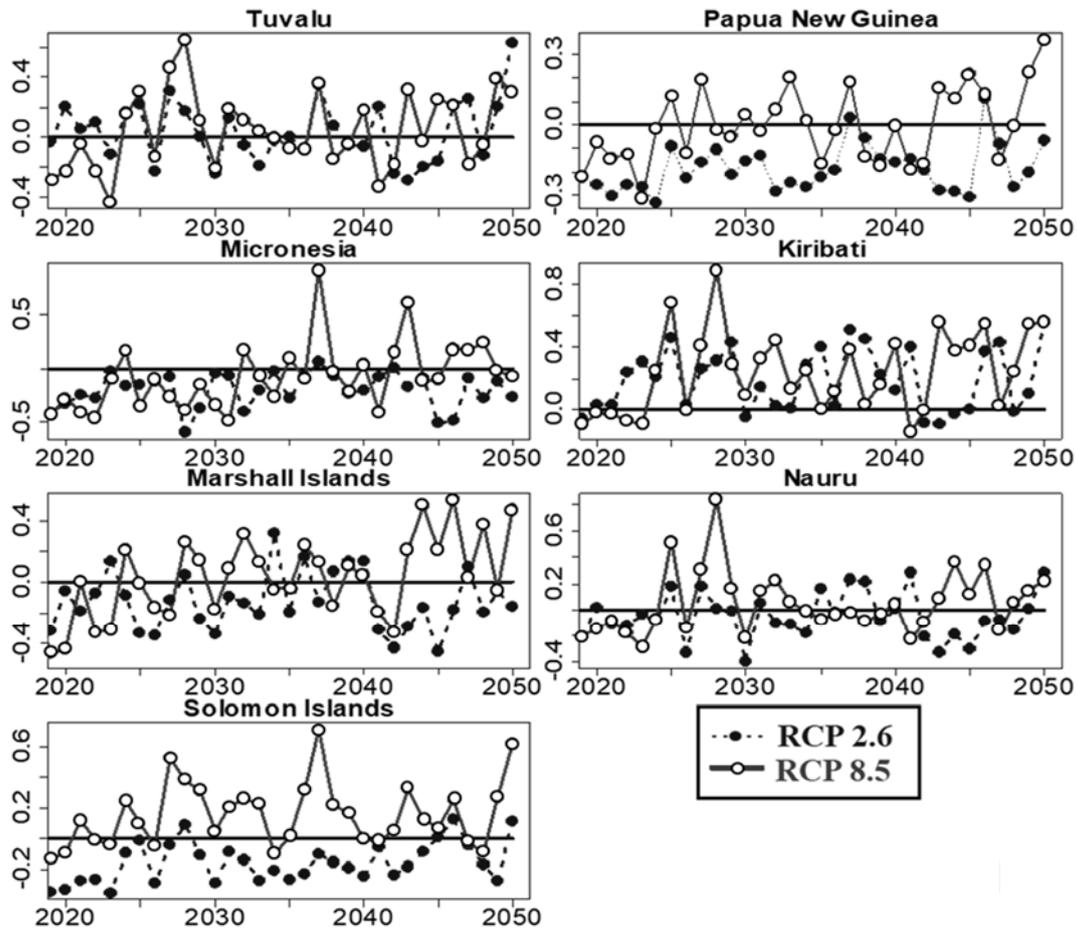


Fig. 3 Future change of catch potential (relative to the 2000-2010 average) in the exclusive economic zone waters of the Pacific island countries in the Western and Central Pacific Ocean.

## 二、中西太平洋正鱈之漁獲量潛能

Yen *et al.* (2016) 完成中西太平洋正鱈漁獲量潛能模型之相關驗證，經該文獻圖表可確定，所建模型對本研究所需模擬之漁獲量潛能時空特徵具有可行性。本研究爰應用該等模型，具體探討個太平洋島國 EEZ 之漁獲量潛能特性。如 Fig. 3 所示，吐瓦魯、密克羅尼西亞及諾魯等三國之 EEZ 在 RCP 2.6 及 RCP 8.5 情境下，雖在特定期間有漁獲量潛能突然升高，相對變化可能增加超過 0.4，但於往後數一至二年間即恢復目前之漁獲水準，其整體漁獲量潛能趨勢與現況接近，且兩情境變動並無顯著差異。馬紹爾群島之 EEZ 在 2040 年前之漁獲量潛能同樣呈現上下震盪趨勢，但於 2040 年後之 RCP 8.5 情境，其漁獲量潛能趨勢鮮少有低於 0 之相對變化，此現象顯示該時段馬紹爾群島漁獲量潛能較佳。索羅門群島與巴布亞紐幾內亞兩國

EEZ 之漁獲量潛能變動在不同情境下出現顯著的差異，如於 RCP 2.6 情境下，漁獲量潛能將略低於目前水準 (平均 Relative Change 為 -0.2)，倘若於 RCP 8.5 情境下，則漁獲量潛能有增加之趨勢，其 Relative Change 將在 -0.05 至 0.4 間震盪。吉里巴斯 EEZ 之漁獲量潛能變動，在未來無論是 RCP 2.6 或 RCP 8.5 均呈現上升趨勢，Relative Change 主要介於 0 至 0.6 間。Fig. 4 比較兩情境之平均漁獲量潛能變化率在不同 EEZ 之數值可發現，在未來情況下，無論任何情境，漁獲量潛能均可能增加的 EEZ 國家包含吐瓦魯、吉里巴斯及諾魯。無論任何情境下，EEZ 漁獲量潛能皆可能顯著下滑的國家則有密克羅尼西亞即馬紹爾群島兩國。兩種情境呈現正負不同趨勢的國家則是索羅門群島及巴布亞紐幾內亞，這兩國之漁獲量潛能均是 RCP 8.5 情境優於 RCP 2.6 的現象，其中又以索羅門群島之差異最大。

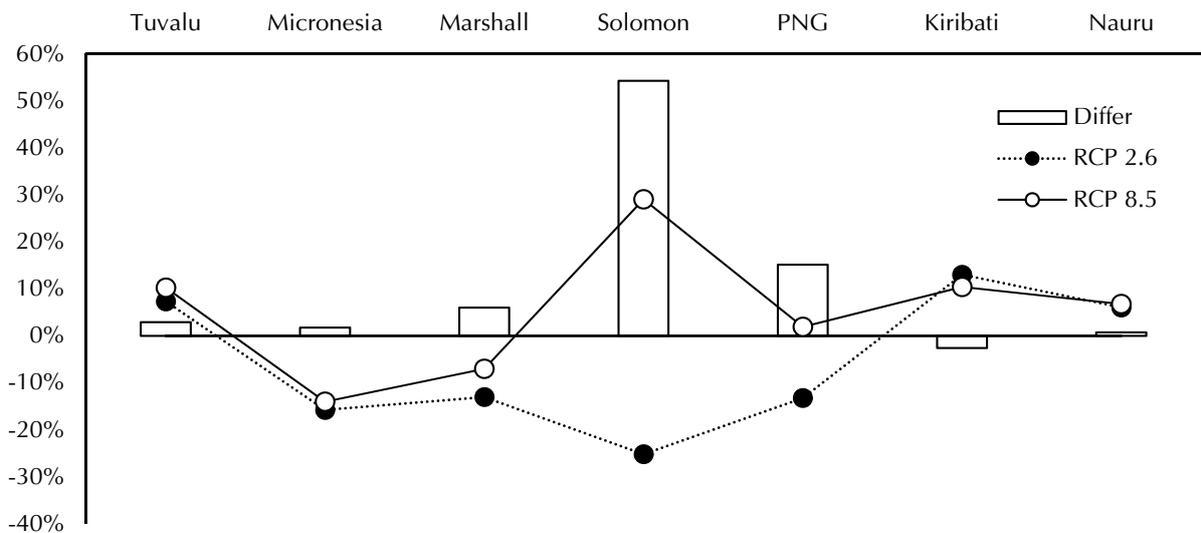


Fig. 4 Average change rates of catch potential by country under the 2 scenarios. PNG: Papua New Guinea.

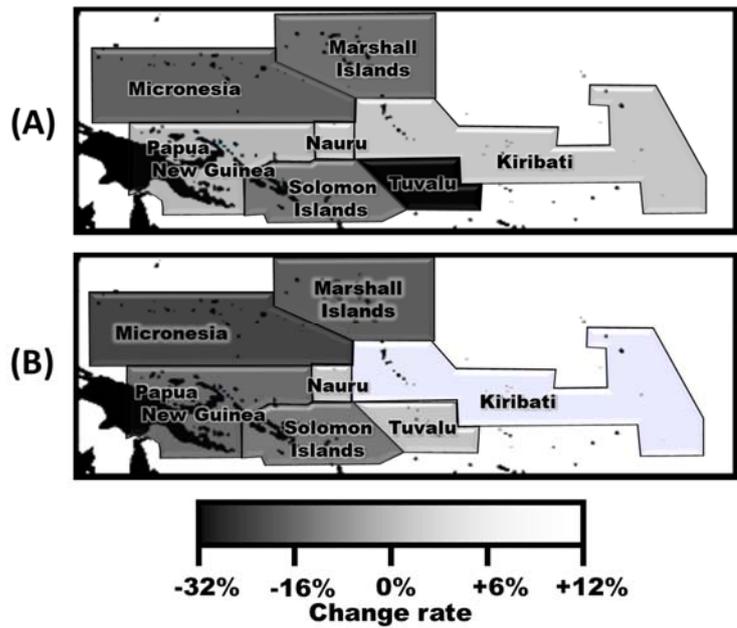
短期 (2020 - 2030 年) 看來, 在 RCP 2.6 情境下受到負面影響較為顯著的 EEZ 包含吐瓦魯及索羅門群島, 有較明顯增加的 EEZ 則為馬紹爾群島, 其他國家影響較低。中期 (2030 - 2040 年) 除有顯著增加外, 其餘 EEZ 與現況相似。本研究的晚期 (2040 - 2050 年) 看來, 在此情境下除了吐瓦魯及索羅門群島有較大的降幅外, 其餘 EEZ 與現況相符。反觀在 RCP 8.5 情境下, 近期吐瓦魯、密克羅尼西亞及馬紹爾群島屬於生產力下降的週期, 在中期下降幅度將增加, 直至晚期略微收斂。巴布亞紐幾內亞、吉里巴斯、諾魯及索羅門群島在早期將增加, 中期巴布亞紐幾內亞、吉里巴斯及諾魯將降至與目前水準略高的趨勢, 索羅門群島之趨勢則會略低于目前水準。在晚期巴布亞紐幾內亞、吉里巴斯及諾魯呈現大幅增加的趨勢, 索羅門群島在晚期雖也有增加, 但程度不及前述三個 EEZ。

### 三、初級生產力與漁獲量潛能空間比較

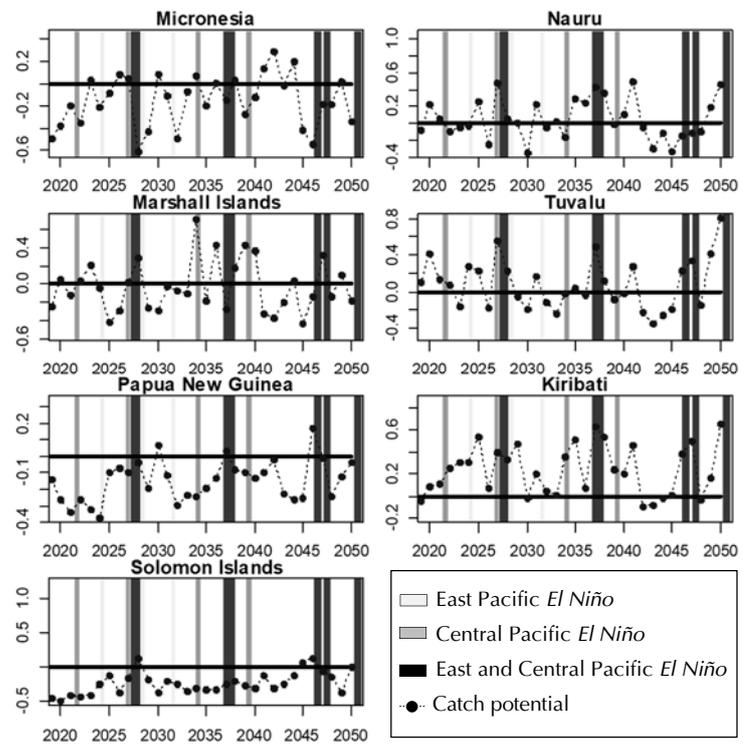
比較 Fig. 2 及 Fig. 4 兩圖可以發現, 在屬於中西太平洋東半部的國家如吉里巴斯及諾魯等 EEZ, 其漁獲量潛能與初級生產力的變動皆為上升趨勢, 相信該處生態系統之初級生產力將可維持正鯉系群資源的維持。索羅門群島在 RCP 8.5 的情境下, 依照模式其漁獲量潛能將大增, 但若觀測其初級生產力可發現, 該區域初級生產力約略與現況接近, 因此未必能支持該處之漁獲量潛能增高。

吐瓦魯在未來任何情境下, 其漁獲量潛能都將增加約 10%, 然而該區域之初級生產力則在未來情境下將下降 30 - 40%, 由此可見, 該區域即便棲地環境適合正鯉資源大量生長, 但在初級生產力下降的情境下, 然可能對資源造成負面影響, 其漁獲量潛能恐怕將不如預期。Fig. 5 進一步將 RCP 8.5 情境之數據套入地理資訊系統可發現, 高度暖化的環境下, 將使接近赤道國家 EEZ 之初級生產力增加, 使中西太平洋緯度較高的國家初級生產力下降。但在同一情境下, 漁獲量潛能之反應卻不完全一致。在本研究之模式下, 主要漁獲量潛能增加的國家將位於中西太平洋東邊的三個國家。但馬紹爾群島、密克羅尼西亞、巴布亞紐幾內亞及索羅門群島這四國漁獲量潛能將下修。

相較於初級生產力在短中晚期變動趨勢明顯, 漁獲量潛能的部分則可以發現在未來三個時期於每一個 EEZ 都呈現其獨特的趨勢, 例如吐瓦魯與諾魯於兩個情境下在早期變動較大, 在中期振幅下降, 至晚期又有變動幅度增加的趨勢。密克羅尼西亞除了有數個零星的年度出現較高的漁獲潛能外, 其變動在兩個情境下之趨勢是接近的。馬紹爾群島在早期與中期兩情境差異不大, 但在晚期, RCP 8.5 情境下之漁獲量潛能將大增, RCP 2.6 情境下漁獲潛能將減少。索羅門群島之變動在三個時期差異不大, 兩個情境分別表現出顯著差異的漁獲量潛能, RCP 8.5 增加、RCP 2.6 減少, 巴布亞紐幾內亞也出現類似現象。吉里巴斯在三個



**Fig. 5** Change rates of the net primary production (A) and catch potential (B) as of 50 years later under the RCP 8.5 scenario.



**Fig. 6** Changes of catch potential and various *El Niño* events in time series under the RCP 2.6 scenario.

時期差異同樣不大，在兩情境都顯示出增加漁獲量潛能的趨勢。

Figure 5 揭示了暖化對初級生產力與正鯉資源空間影響不一致之特性，也進一步顯示吐瓦魯處於不一致特性最為顯著之位置。當正鯉受環境變動而轉換棲地至此，可能將面臨生態系統無法支持之問題，也因此該區域之生態系統及正鯉資源變動應受更高之關注。

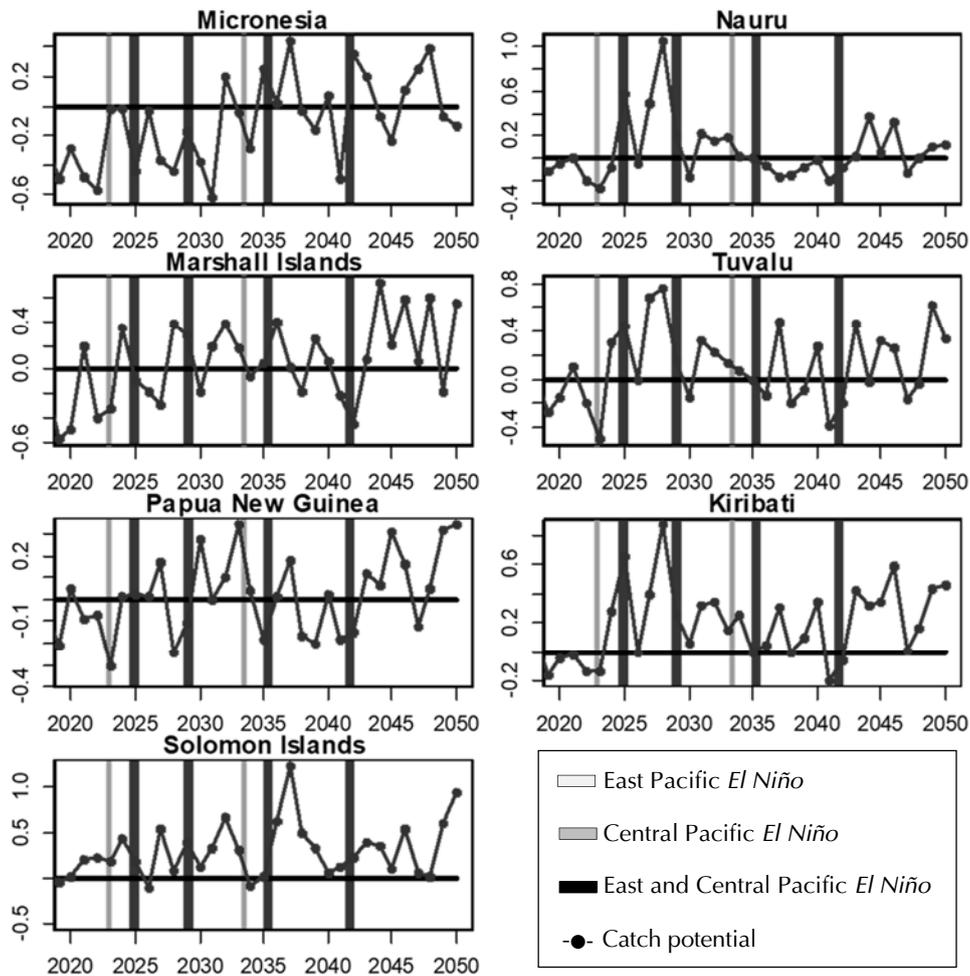
#### 四、未來中西太平洋正鯉與聖嬰現象

Figure 6 顯示在 RCP 2.6 情境下漁獲量潛能與不同型態聖嬰現象之關係。如圖所示，各國 EEZ 之正鯉漁獲量潛能，在經歷不同型態聖嬰現象之反應各有不同。主要原因來自於正鯉對棲地選擇敏感，當不同型態聖嬰現象事件發生時，對於海洋環境造成差異的影響，也導致各 EEZ 之正鯉棲

**Table 1** Catch potential trend forecast of exclusive economic zones in various *El Niño* situations under the 2 scenarios

	Micronesia	Papua New Guinea	Solomon	Marshall	Nauru	Kiribati	Tuvalu
RCP 2.6							
EP	↓	↓	-	-	↑	↑	↑
CP	↓	↓	-	-	↓	-	↓
EP&CP	-	↓	-	-	↑	↑	↑
RCP 8.5							
EP	?	?	?	?	?	?	?
CP	↓	-	↓	↓	↓	-	-
EP&CP	↓	↓	-	↓	↓	↓	↓

Note: ↑ positive effect; ↓ negative effect; - no significant effect; ? unknown (no data); EP: East Pacific; CP: Central Pacific.



**Fig. 7** Changes of catch potential and various *El Niño* events in time series under the RCP 8.5 scenario.

地適合度顯著改變。有部分國家之 EEZ 會因聖嬰現象發生而增加或減少，有部分期間則無顯著之反應 (Table 1)，馬紹爾群島及索羅門群島的 EEZ 面對各種型態的聖嬰現象，其資源均無顯著變動之特性；密克羅尼西亞及巴布亞紐幾內亞無論遭遇到任何型態之聖嬰現象則正鯉漁獲量潛能皆有

顯著下降之情形。諾魯、吉里巴斯及吐瓦魯等三國之 EEZ，在遇到東太平洋聖嬰現象事件發生，或東太平洋聖嬰現象及中太平洋聖嬰現象共伴之天氣形態下，其漁獲量潛能有顯著增加的趨勢。諾魯與吐瓦魯在經歷中太平洋聖嬰現象時，漁獲量潛能顯著下降，但吉里巴斯則無受到顯著影響。

但觀察 RCP 8.5 情境則可以發現，在 2020 – 2050 的此情境下沒有出現任何一次東太平洋聖嬰現象 (Fig. 7)，但是兩種型態聖嬰現象共伴的機率變高了。另外，在此情境下遭遇到任何一種聖嬰現象時，都沒有任何一個 EEZ 出現資源增加情況 (Table 1)，並且有多數的 EEZ 在遇到聖嬰現象時都出現大幅度衰退，這些衰退還包含在 RCP 2.6 情境下不受影響的馬紹爾群島及索羅門群島的 EEZ。由此可見，雖然正鯷漁獲量潛能分析認定暖化程度較高的 RCP 8.5 情境，可以讓正鯷漁獲量潛能微幅上升，但資源遭遇到特殊氣候事件時的脆弱度將顯著的提高。反觀 RCP 2.6 的情境下，當巴布亞紐幾內亞及密克羅尼西亞的正鯷漁獲量潛能衰退時，吉里巴斯及諾魯的漁獲量潛能上升了，相對 RCP 8.5 情境下的全面衰退，此分析結果顯示資源在不同太平洋島國的空間效應不盡相同。

從生態系統的邏輯上來看，RCP 2.6 情境下的正鯷資源僅是轉移至較適環境棲息 (Fig. 5B)，但在 RCP 8.5 情境下正鯷資源洄游的空間無法掌控，全面性的衰退現象可能是正鯷自然死亡率提高或轉移到更遠的漁場，因此資源的風險及脆弱度相對提高，而資源的回復力也倍受挑戰。惟 RCP 8.5 的氣候情境是前所未有過的氣候情境，本研究結果也顯示在此氣候變遷情境下，很難斷定資源是否可在特殊氣候事件結束後恢復。

## 討論與結論

中西太平洋正鯷是世界上糧食供應的重要來源，為確保資源可永續的供應及利用，仍須持續關注並研究此中西太平洋正鯷資源的生產潛能。本研究探討了初級生產力、海洋環境、特殊氣候事件及氣候變遷等因素與正鯷之間的關係，同時應用模型讓這些關係可以更容易被發現及理解。相關評估方法及模型與新分析技術 (如：社會科學及經濟學等) 也可與本研究結合，透過正確的分析方法，有效回應各項漁業的議題以落實中西太平洋正鯷資源永續經營之目標。

Lehodey *et al.* (1997) 確立了氣候變遷對中西太平洋正鯷資源之漁場重心之顯著影響，過程中

持續導致海洋生地化出現變化，並透過食物鏈的循環影響到正鯷資源 (Lehodey *et al.*, 1998)。這種大規模的變動雖可透過簡單的回歸方式去推演 (Lima and Naya, 2011)，但若涵蓋確立空間上的差異，透過模型將情境模擬參數推估漁獲潛能也是重要的研究方向 (Yen *et al.*, 2016)。Kim *et al.* (2020) 透過 1990 – 2014 年正鯷漁獲量與環境變量 (水溫、鹽度、海流、降雨) 之間的關係進行一系列之回歸，探討各項環境變量在不同氣候情境下對漁獲量之可預測性。研究結果顯示，水下 100 m 之溫度與海表 (水深 5 m) 之鹽度對於漁獲量變動皆有顯著影響，換言之，這些環境變量在預測正鯷漁獲量潛能上存在顯著可預測能力。相較於本篇研究引用 Yen *et al.* (2016) 之模型 [式 (2) 及 (3)]，在環境變量選擇上亦選出相似之環境參數 (SSS 及 S105)。

此外，Yen *et al.* (2016) 之模型還考量到支撐生態系統之生產力部分 (NPP)，及影響圍網漁獲率關鍵的環境因子 (MLD)，這些參數可能直接或間接在未來扮演影響漁獲量潛能之關鍵角色。例如 Kim *et al.* (2020) 所揭示的這兩個環境參數可能就代表正鯷對於環境之選擇，當環境變動至不適合該物種棲息，其豐度自然大量降低。NPP 代表是否有足夠的餌料生物供給正鯷資源生存，因為環境事宜對高度洄游性物種固然重要，但是否能支撐大量生物棲息仍是豐度是否可以維持的關鍵因素。正鯷是一種表層性魚種，習慣棲息於 MLD 以淺之水域。當 MLD 過深，將使正鯷垂直分布的空間變大，並導致正鯷立體空間密度降低，這個現象將使得有限深度的圍網遭遇到密度較低的魚群，此現象雖非氣候變遷造成資源量驟降，但仍可能降低漁獲效率造成漁獲量潛能之減少，此方向在漁獲量潛能分析上亦不容忽視。

另一方面，在不同型態聖嬰現象之海洋特性逐漸被發現的同時 (Kao and Yu, 2009; Kug *et al.*, 2010; Wang and Wu, 2013)，確定該海洋區域主要物種所受影響之情況也極為重要 (Yen *et al.*, 2017)，因為正鯷在全球不容忽視的重要漁業資源，其漁獲量潛能將牽動許多國家的漁業經濟 (Liao and Huang, 2016)。為了維持該資源漁獲量潛能，總結以下數點因應策略：

- (一)透過衛星遙測數據、最新的情境模擬資訊及漁獲量潛能模型掌握中西太平洋正鯷資源的過去、現在及未來資源時空變動趨勢，並確保資源在遭遇氣候變遷衝擊而轉移的過程，不會受到過高的漁獲死亡而導致資源無法永續經營。
- (二)將漁獲量潛能的時空變動趨勢與中西太平洋初級生產力的時空分布特性進行比對，確認新的高漁獲量潛能熱區有相應的初級生產力可供應正鯷資源的繁殖及成長。
- (三)透過衛星遙測 SST 數據掌握各種不同聖嬰現象的發生，對不同的聖嬰現象建立不同的警示並進行作業海域空間的調整。
- (四)在極端氣候不斷變化的情況下，應將氣候風險納入預警管理的一部分，持續創造新的應對方法，以增加中西太平洋正鯷的回復力及永續性。

在不考慮初級生產力的變動及特殊氣候事件的發生，單就氣候未來的變動特性與正鯷漁獲量潛能的關係可以得知，未來資源的潛能將維持在原本的水準，或者微幅上升，高漁獲的熱區將往中太平洋移動 (Fig. 5B)。然而，本研究結果亦表明正鯷漁獲量潛能的不確定性仍然很高，主要是由於未來的暖化程度仍是很大的未知數 (Bindoff *et al.*, 2019)。為降低正鯷資源受特殊氣候事件的傷害，除應落實該物種之漁業管理，並應設法減緩資源受特殊氣候事件的傷害，例如強化進行更進一步的相關情境模擬研究，並加強各個分區的資源監控，當部分區域資源量短時間內驟降，應加強漁場管理及減少區域內漁獲壓力，特別是在此區域之遠洋漁業國家 (如臺灣、中國、韓國、日本及美國等) 應與太平洋島國家合作以限制漁獲努力量，以確保資源永續、島國經濟與糧食安全 (Liao and Huang, 2016)。面對一個大尺度且具有高度不確定性的氣候變遷議題，可透過國際漁業管理組織、太平洋島國及漁業船隊共同的努力，建立具有科學依據的因應策略，並透過程序參與及透明的管道決定之漁業管理方法，發展治理機制的權力，讓管理規範能有效提升，並增進中西太平洋正鯷資源之永續性。

## 參考文獻

- Belhabib, D., R. Dridi, A. Padilla, M. Ang and P. Le Billon (2018) Impacts of anthropogenic and natural "extreme events" on global fisheries. *Fish Fish.*, 19 (6): 1092-1109.
- Bindoff, N. L., W. W. L. Cheung, J. G. Kairo, J. Arístegui, V. A. Guinder, R. Hallberg, N. Hilmi, N. Jiao, M. S. Karim, L. Levin, S. O'Donoghue, S. R. Purca Cuicapusa, B. Rinkevich, T. Suga, A. Tagliabue, and P. Williamson (2019) Changing ocean, marine Ecosystems, and dependent communities. *In* IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate (H. O. Pörtner, D. C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N. M. Weyer eds.), 447-546.
- Boyd, P. W., H. Claustre, M. Levy, D. A. Siegel and T. Weber (2019) Multi-faceted particle pumps drive carbon sequestration in the ocean. *Nature*, 568 (7752): 327.
- FAO (2011) Review of the State of World Marine Fishery Resources. FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper No. 569, Rome, 334 pp.
- FAO (2018) The State of the World Fisheries and Aquaculture 2018 – Meeting the Sustainable Development Goals. FAO, Rome, 210 pp.
- Gasser, T., C. Guivarch, K. Tachiiri, C. D. Jones and P. Ciais (2015) Negative emissions physically needed to keep global warming below 2°C. *Nature Commun.*, 6: 1-7.
- Handayani, C., A. Soepardjo and E. Aldrian (2019) Impact of a El-Nino Southern Oscillation (ENSO) to fluctuation of skipjack catch production in southern east Java. *J. Physics: Conf. Ser.*, 1217 (1): 012170.
- Harley, S., P. Williams, S. Nicol and J. Hampton (2011) The Western and Central Pacific Tuna Fishery: 2010 Overview and Status of Stocks. *Tuna Fisheries Assessment Report 11*, 31 pp.
- Jin, F. F. (1996) Tropical ocean-atmosphere interaction, the Pacific cold tongue, and the El Nino-Southern Oscillation. *Science*, 274 (5284): 76-78.
- Johnson, J. E., V. Allain, B. Basel, J. D. Bell, A. Chin, L. X. Dutra, E. Hooper, D. Loubser, J. Lough and B. R. Moore (2020) Impacts of climate change on marine resources in the Pacific island region. *In* Climate Change and Impacts in the Pacific (L. Kumar ed.), Springer, Cham, 359-402.

- Kao, H. Y. and J. Y. Yu (2009) Contrasting Eastern-Pacific and Central-Pacific types of ENSO. *J. Climate*, 22(3): 615-632.
- Kim, J., H. Na, Y. G. Park, and Y. H. Kim (2020) Potential predictability of skipjack tuna (*Katsuwonus pelamis*) catches in the Western Central Pacific. *Sci. Rep.*, 10(1): 3193.
- Kug, J. S., J. Choi, S. I. An, F. F. Jin and A. T. Wittenberg (2010) Warm pool and cold tongue El Niño events as simulated by the GFDL 2.1 coupled GCM. *J. Climate*, 23(5): 1226-1239.
- Lehodey, P., J. M. Andre, M. Bertignac, J. Hampton, A. Stoens, C. Menkes, L. Memery, and N. Grima (1998) Predicting skipjack tuna forage distributions in the equatorial Pacific using a coupled dynamical bio-geochemical model. *Fish. Oceanogr.*, 7(3-4): 317-325.
- Lehodey, P., M. Bertignac, J. Hampton, A. Lewis and J. Picaut (1997) El Niño Southern Oscillation and tuna in the Western Pacific. *Nature*, 389 (6652): 715-718.
- Lehodey, P., I. Senina, J. Sibert, L. Bopp, B. Calmettes, J. Hampton and R. Murtugudde (2010) Preliminary forecasts of Pacific bigeye tuna population trends under the A2 IPCC scenario. *Prog. Oceanogr.*, 86(1-2): 302-315.
- Liao, C. P. and H. W. Huang (2016) The cooperation strategies of fisheries between Taiwanese purse seiners and Pacific Island Countries. *Mar. Policy*, 66: 67-74.
- Lima, M. and D. E. Naya (2011) Large-scale climatic variability affects the dynamics of tropical skipjack tuna in the Western Pacific Ocean. *Ecography*, 34(4): 597-605.
- Ramos, E. and D. Garrido (2014) Territorial rural development strategies based on rural specificities. The case of the rural quality mark in Spain. *Revista De Estudios Regionales*, 100: 101-129.
- Rubio, I., U. Ganzedo, A. J. Hobday and E. Ojea (2020) Southward re-distribution of tropical tuna fisheries activity can be explained by technological and management change. *Fish. Fish.*, 21(3): 511-521.
- Szabo, S., R. J. Nicholls, B. Neumann, F. G. Renaud, Z. Matthews, Z. Sebesvari, A. AghaKouchak, R. Bales, C. W. Ruktanonchai and J. Kloos (2016) Making SDGs work for climate change hotspots. *Environ.: Sci. Policy Sustain. Dev.*, 58(6): 24-33.
- Wang, L. C. and C. R. Wu (2013) Contrasting the flow patterns in the equatorial Pacific between two types of *El Niño*. *Atmos.-Ocean*, 51(1): 60-74.
- Yeh, S. W., J. S. Kug, B. Dewitte, M. H. Kwon, B. P. Kirtman and F. F. Jin (2009) *El Niño* in a changing climate. *Nature*, 461(7263): 511-514.
- Yen, K. W. and H. J. Lu (2016) Spatial-temporal variations in primary productivity and population dynamics of skipjack tuna *Katsuwonus pelamis* in the western and central Pacific Ocean. *Fish. Sci.*, 82(4): 563-571.
- Yen, K. W., H. J. Lu, and C. H. Hsieh (2012) Using remote sensing and catch data to detect ocean hot spots for skipjacks in the Western Central Pacific Ocean. *J. Fish. Soc. Taiwan*, 39(4): 235-246.
- Yen, K. W., N. J. Su, T. Teemari, M. A. Lee and H. J. Lu (2016) Predicting the catch potential of skipjack tuna in the Western and Central Pacific Ocean under different climate change scenarios. *J. Mar. Sci. Tech.-Taiwan*, 24(6): 1053-1062.
- Yen, K. W., G. Wang and H. J. Lu (2017) Evaluating habitat suitability and relative abundance of skipjack (*Katsuwonus pelamis*) in the Western and Central Pacific during various *El Niño* events. *Ocean Coast. Manage.*, 139: 153-160.

# Impact of Climate Change on Skipjack Tuna Fishing Grounds and Catch Potential for the Pacific Island Countries in the Western and Central Pacific Ocean

Kuo-Wei Yen<sup>1</sup>, Nan-Jay Su<sup>2</sup> and Hsueh-Jung Lu<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Marine Fisheries Division, Fisheries Research Institute

<sup>2</sup>Department of Environmental Biology and Fisheries Science, National Taiwan Ocean University

## ABSTRACT

The skipjack tuna (*Katsuwonus pelamis*) is an important fishery resource worldwide, but particularly in the western and central Pacific Ocean. Under the influence of global warming and climate change, the catch potential and the use of this resource directly affect the marine ecosystem, as well as the global economy and food security. Relatedly, investigating the characteristics of future changes in species resources could lead to improved understanding and possibly reduce any negative impacts. The relationships between skipjack abundance and primary productivity on different *El Niño* events have been confirmed through the catch potential model established. However, the impact of climate change and warming on resources remains unknown. In this study, we demonstrated primary productivity and skipjack catch potential through scenario simulations, and compared the future impacts due to different types of *El Niño* events, in order to examine the trends of future resource abundance. The results showed that future changes in catch potential and primary productivity with spatial differences are evident. When skipjacks relocate due to environmental changes, the ecosystem might be stressed beyond its limits. Compared to situations involving minor warming, those with continuously intensifying warming result in the increased vulnerability of skipjack fishery resources to the *El Niño* phenomenon, as well as decreased catch potential. To mitigate potential damage from climate change, we should control and reduce greenhouse gas emissions, which could improve the sustainability and use of skipjack resources by the Pacific island countries in the western and central Pacific Ocean.

**Key words:** skipjack tuna, catch potential, Western and Central Pacific Ocean, Pacific island countries, climate change

---

\*Correspondence: No. 2, Beining Rd., Zhongzheng Dist., Keelung City 20224, Taiwan. TEL: 02-24622192 ext. 5033; Fax: 02-2463-2659; E-mail: hjlu@ntou.edu.tw