

2025年臺灣國際科學展覽會

優勝作品專輯

作品編號	180025
參展科別	地球與環境科學
作品名稱	以底棲魚生物放大效應探討邊緣海區域性汞汙染 Marginal Sea Regional Mercury Pollution Revealed by Biomagnification Effects in Demersal Fish
得獎獎項	三等獎

就讀學校	臺北市立第一女子高級中學
指導教師	曾鈞懋 林郁梅
作者姓名	王禹喬

關鍵詞 底棲魚、邊緣海、汞汙染

作者簡介



我是北一女中高三科學班的王禹喬，因為對環境議題和生物學科有興趣，也喜愛探索我有興趣的現象的背後成因，所以在台大海洋研究所曾鈞懋教授的實驗室做研究，這次以海洋汞汙染與其生物放大效應的主題，參加地球科學與環境組的比賽。謝謝教授、實驗室學姊與學長、林郁梅老師、吳雅嵐老師，讓我能來國際科展開開眼界。

2025 台灣國際科學展覽會

研究報告

區 別：

科 別：地球與環境科學科

作品名稱：以底棲魚生物放大效應探討邊緣海區域性汞汙染

Marginal Sea Regional Mercury Pollution Revealed by
Biomagnification Effects in Demersal Fish

關 鍵 詞：底棲魚、邊緣海、汞汙染

編 號：

摘要

海洋中有許多重金屬汙染，其中汞元素因為濃度低很容易被忽略，但卻容易經由飲食進入人體，造成嚴重傷害。也因其濃度低不易被測量，現今也少有海洋中汞汙染的完整資料。然而，在生物體中汞濃度會因生物累積及放大作用而較海水的濃度來得高，故本研究利用魚體汞累積速率（MAR）當作追蹤海洋汙染之生物指標，此方法將魚體總汞濃度除以年齡得到的汞累積速率，以去除生長時間的影響因素。

本研究利用習性不常移動之底棲魚種之 MAR，分析與生物放大作用相關的掠食階級（Trophic Levels）之相關趨勢，經過篩選，研究分析了 31 篇過去於大西洋、太平洋及地中海採樣的文獻，將其中資料整理成趨勢圖，比較各區域汙染程度，發現各區的汙染程度呈現差異，同時提供觀測區域海汞汙染的新方法。

Abstract

The ocean contains numerous heavy metal pollutants, with mercury often overlooked due to its low concentration. However, mercury can easily enter the human body through food consumption, causing severe harm. Its low concentration also makes it difficult to measure, resulting in limited comprehensive data on mercury pollution in the ocean. However, in organisms, mercury concentrations are higher due to bioaccumulation and biomagnification, compared to seawater levels. This study utilizes the mercury accumulation rate (MAR) in fish as a biological indicator to track ocean pollution. The MAR is calculated by dividing the total mercury concentration in fish by their age, thus removing the influence of growth time.

This research focuses on the MAR of demersal fish species, which tend to stay in one area, to analyze trends in trophic levels related to biomagnification. After a thorough selection process, 31 studies conducted in the Atlantic, Pacific, and Mediterranean were analyzed, with the data organized into trend charts to compare pollution levels across regions. The findings reveal regional pollution differences and offer a new approach to monitoring mercury pollution in oceanic areas.

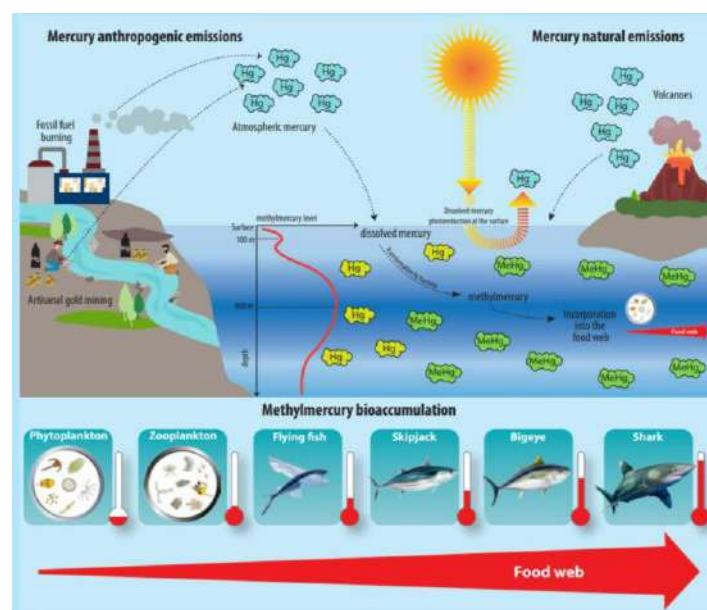
壹、前言

一、研究動機

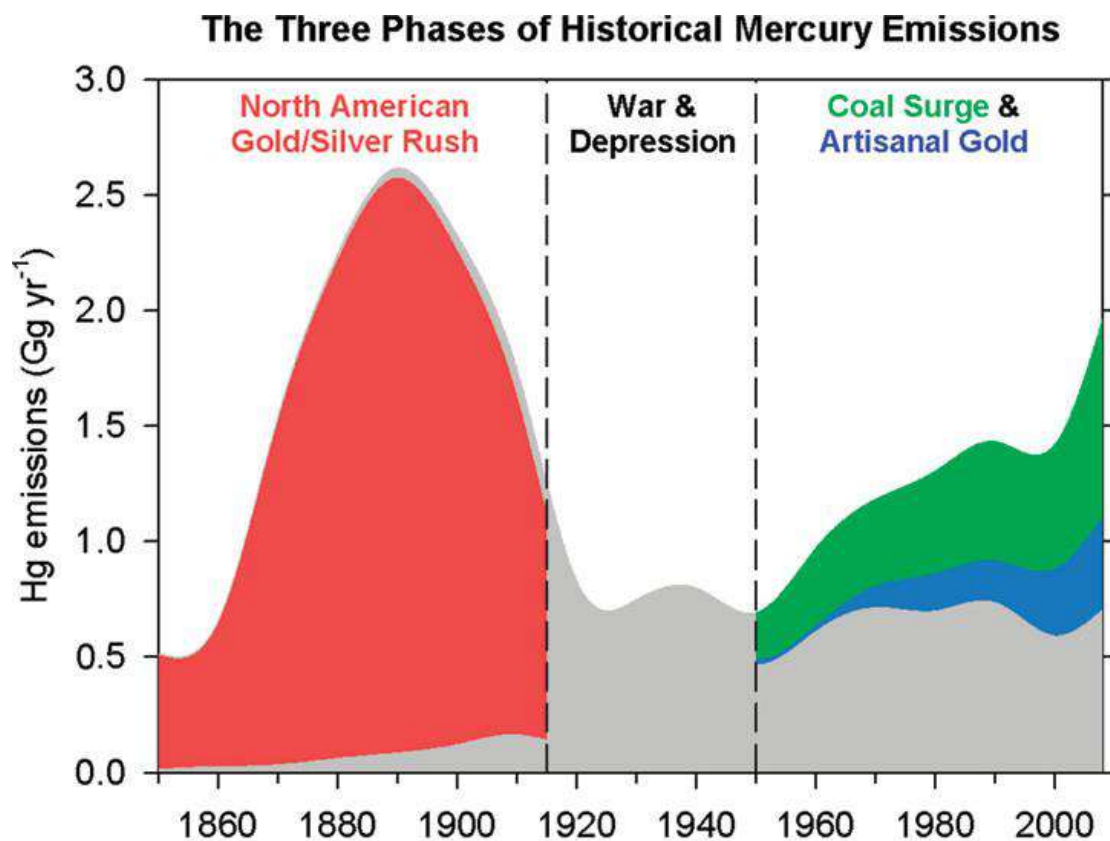
重金屬污染是海洋議題中備受關注的焦點，汞污染雖為其中之一，但相關研究卻較少，原因之一即為其在海水環境中的濃度極低，不易被精準測量，另外就是測量過程須用到金，成本昂貴。然而，汞的所有種類對人體皆是有毒的，尤其是在海洋中被生物轉換成的甲基汞（MeHg），汞作為一種神經毒素，攝取少量，即有可能對人體造成嚴重危害，比如步行困難、失智、痙攣、孕婦產下畸型胎兒，甚至嚴重可能致死。1950 年代，在日本水俣市發生的大規模汞中毒事件，亦展現汞對人類健康的嚴重影響。

在一般情況下，汞存在於自然環境中是一件極其正常的事情，如圖一所示，原先就存在於地殼中的汞，會藉由火山噴發、地殼變動等自然因素溢出到海洋及大氣，不過隨著人為開發、礦物開採、工業革命，採礦加速汞的溢出、工廠排放等人為因素也使得在環境中的總汞量隨之增加（圖二）。而這些汞會在海洋及大氣中進行海氣交換，也會隨生物體進入到食物鏈中，並因生物累積（bioaccumulation）、生物放大效應（biomagnification），汞濃度會隨著物種的營養階層（Trophic levels, TLs）越高而增加（圖三）。

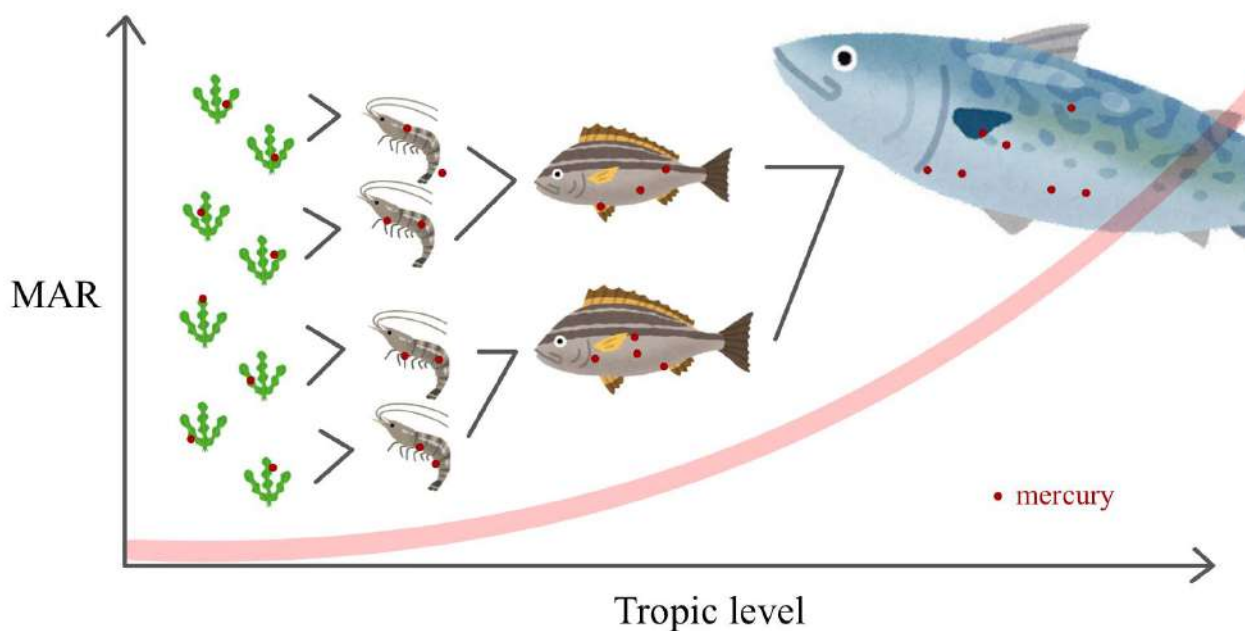
前面提到，海洋中的汞因濃度低，不易被精準測量，但經過生物放大效應會使汞濃度增加而變得更容易被測得，故本研究希望藉由廣泛彙整前人相關文獻研究中的數據資料，探討汞隨營養階層被放大的情況，以探討此方法的可行性，及比較海洋各區的汞污染程度。



圖一、汞在環境中的來源、循環與在海洋中的濃度分佈圖（來源：Pacific Community）



圖二、人為汞排放隨時間趨勢。第一次工業革命結束後，19 世紀末期紅色色塊表示人為排放汞因當時掏金熱出現高峰；而 20 世紀中至今的增加則是因綠色色塊的煤礦採集、藍色色塊的金礦採集有關。(*Environ. Sci. Technol.*2011, 45, 24, 10485-10491)

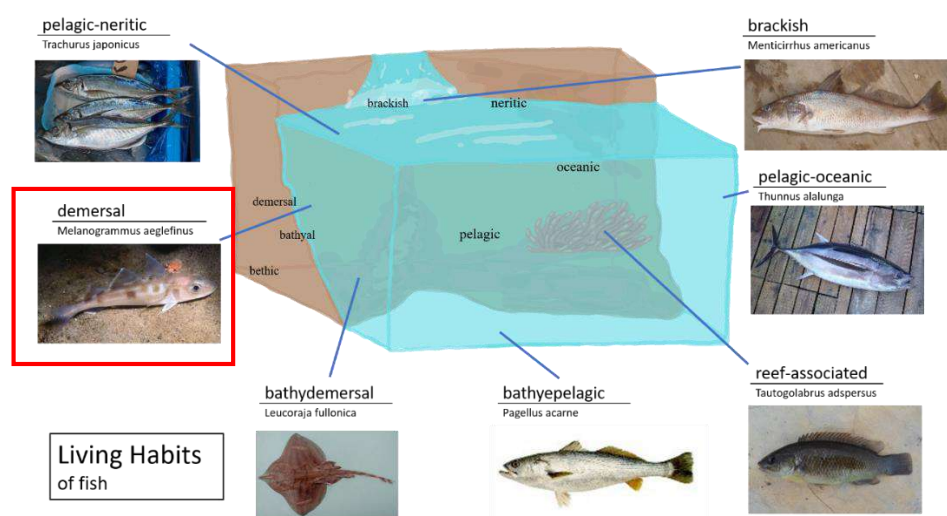


圖三、MAR 隨 TLs 呈指數增加，縱軸 MAR 為魚體汞濃度累積速率，亦是本研究判斷魚受汞污染嚴重程度的方法，文獻回顧中有更詳細的說明。(研究者繪，素材：いらすとや)

二、文獻探討

汞不易被生物體所代謝，具生物累積特性，所以生物體內汞濃度會隨著年齡而增加，故不可僅以魚體汞濃度作為判斷海洋汞污染的標準。為了消除年齡所造成的統計影響，Tseng, et al (2021) 提出總汞濃度 (THg, $\mu\text{g/g w.w.}$) 除以魚齡 (Age, yr) 得到魚的汞累積速率 (Mercury Accumulation Rate, MAR) 作為判斷依據，該篇利用迴游性魚類藍鰹鮪 (Bluefin tuna, BFT) 的 MAR 探討各大洋的污染程度及時序，發現了地中海汞濃度最高，不過有逐漸下降的趨勢，太平洋則逐漸上升。而後葉于愷 (2022) 也在其文章中用相同的方式，以五種鮪魚作為研究對象，探討各大洋的海洋污染趨勢。

上述前人研究多聚焦在大洋的趨勢比較，而本研究希望進一步探討大洋中小區域的污染情形，故使用生活習性多為棲息在海床附近，並不易進行長距離遷徙的底棲魚類 (demersal) 做為研究對象 (棲息地示意如圖四)。不過底棲魚不像鮪魚，在各大洋均有相同的物種分布，故物種間的差異會使即便在同一營養階層的底棲魚種 MAR 也可能有很大的不同，所以採用 MAR-TLs 作指數趨勢線擬合的方法，了解海域中生物放大效應程度，藉以回推及比較污染狀況。



圖四、生活習性示意圖。(研究者繪，照片及素材來源：Fishbase、いらすとや)

三、研究目的

- (一) 收集與彙整前人文獻關於底棲魚年齡、汞濃度等的數據資料。(詳見附錄)
- (二) 計算各區域底棲種的 MAR，畫出 MAR-TLs 趨勢圖後，利用擬合曲線的公式比較小範圍區域污染情形。

貳、研究設計

一、研究設備及器材

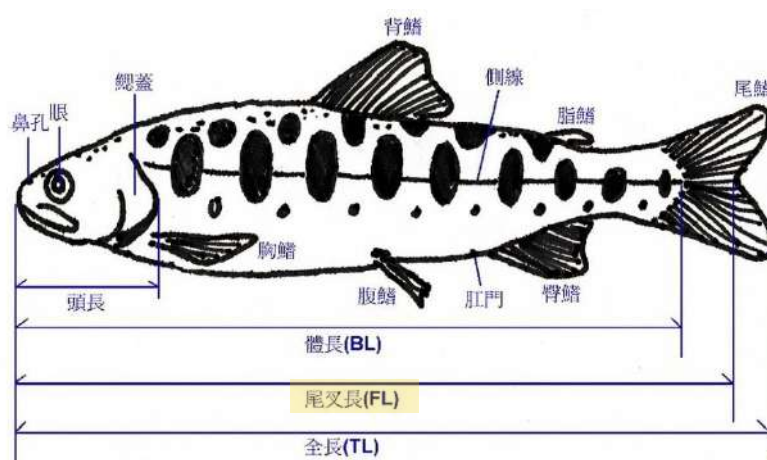
本研究性質屬文獻探討及整理，故研究過程中僅使用到紀錄用紙筆，以及計算、統計資料用的電腦。另外，使用的網路資源如下：

1. Fishbase (<https://fishbase.se/search.php>)：Fishbase 是一個全球共享的魚類資料庫，本研究裡用其中各項參數協助計算魚體年齡。
2. Webplot (<https://automeris.io/WebPlotDigitizer/>)：可藉由選取資料點的方式，從圖表中提取資料點數值（圖六）。
3. Google 搜尋引擎、學術搜尋：搜尋需要的文獻以提取資料。
4. Google Colaboratory：編寫、執行爬蟲程式，協助資料蒐集速度。

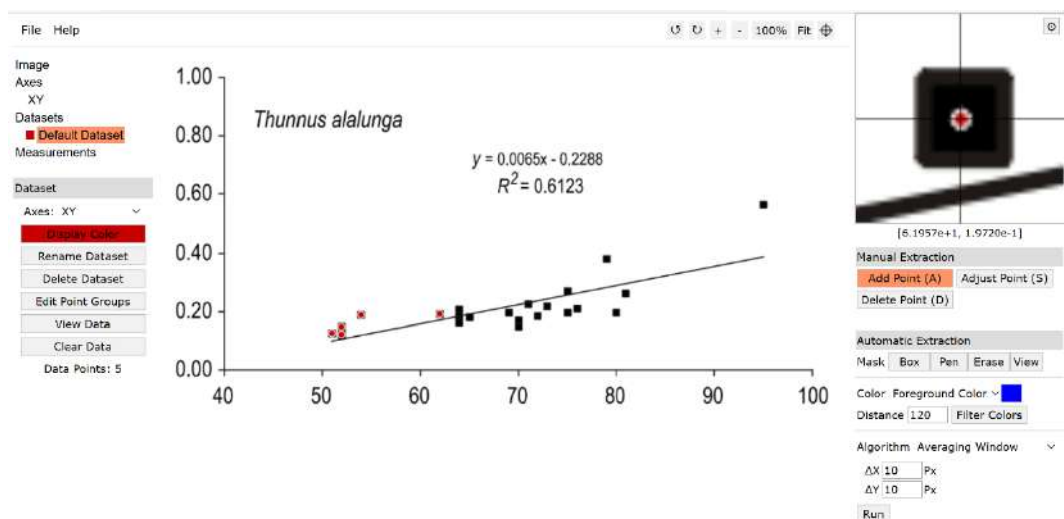
二、資料蒐集（表一）

首先搜索、整理與擷取文獻中所列資料：文獻採樣地及年份、魚種、魚體總汞濃度（THg，單位為 $\mu\text{g/g w.w.}$ ，其中 w.w.表示魚在濕重 wet weight 下的汞濃度）、Age（魚齡，year）、Lt（體長 cm，通常以尾叉長 fork length, FL 表示，如下圖五）、Weight（魚重，紀錄 w.w.濕重，非必要）。若資料以圖表呈現則用 webplot 取得資料點數據（如下圖六），並下載 CSV 檔，若文獻中資料為表格則直接繕打記錄。

接著視需求，於 Fishbase 網站查詢品種之 TLs（營養階層）、 t_0 （0 歲理論體長）、k（生長係數）、 L_∞ （理論極限體長）、重量體長換算常數（a,b）、生存環境、習性及食性等資料並記錄。



圖五、魚體長表示方法（來源：清大生命科學系，<https://dls.site.nthu.edu.tw/>）



圖六、以 Webplot 取得資料點數值方式。輸入坐標軸資訊後，點擊資料點即可取得對應的圖表數值。(來源：Webplot)

表一、蒐集資料來源。(研究者整理)

來源	前人文獻		Fishbase	
	資料名稱	單位	資料名稱	單位
必要資料	學名		生活習性	
	魚體總汞濃度 (THg)	$\mu\text{g/g w.w.}$	營養階層 (TLs)	
	魚齡 (Age)	years		
	採樣地及年份			
可用資料	體長 (Lt)	cm (FL)	0 歲理論體長 (t_0)	cm
	魚重 (W)	g (w.w.)	理論極限體長 (L_∞)	cm
			生長係數 (k)	
			重量體長換算常數 (a,b)	
			生存環境	
			食性	

三、資料處理與計算

(一) 資料篩選

區分魚種生活習性 (living habit) 為底棲魚 (demersal) 與非底棲魚 (brackish、benthopelagic、reef-associated 等) 後，非底棲魚種資料不計算 (包括同時具底棲及其他生活習性的魚種)，不過仍記錄該筆資料存在。

另外，為了加速研究的進行，試寫了一段程式，使用者輸入學名，即可在爬蟲程式的幫助下快速得知生活習性。爬蟲資料來源為 Fishbase，程式用 Colaboratory 執行，圖七為使用介面範例。



```

+ Code + Text
def main():
    scientific_name = input("Enter the scientific name of the fish species (e.g., Micropogonias undulatus): ")
    scientific_name = format_scientific_name(scientific_name)
    html_content = get_fishbase_html(scientific_name)
    if html_content:
        living_habits = extract_living_habits(html_content)
        print("Living habits:", ", ".join(living_habits))
    else:
        print("Failed to retrieve FishBase page for the species.")

if __name__ == "__main__":
    main()

Enter the scientific name of the fish species (e.g., Micropogonias undulatus): Micropogonias furnieri
Living habits: brackish, demersal

```

圖七、Colaboratory 生活習性爬蟲使用介面。點擊執行程式後，使用者須在彈出方框中輸入正確學名，確認後在下一行就會出現搜尋到的魚種生活習性。（來源：Colaboratory）

（二） 魚齡取得

文獻中若無魚齡數值而有體長資料，本研究藉 Panfili（2002）中的體長與魚齡的關係公式（Von Bertalanffy Growth Curve, VBGC）以體長推得魚齡，該關係公式如下：

$$t = t_0 - (1 - k) \ln\left[1 - \frac{Lt}{L_\infty}\right]$$

由此我們可以將其變換成以下公式並套入進行體長與年齡的換算：

$$Age = -\frac{LN\left(1 - \frac{Lt}{L_\infty}\right)}{k} + t_0$$

若文獻中無體長或魚齡資料，而有魚重資料時，則利用 fishbase 中魚重、體長換算常數（ a 、 b ），由以下公式進行計算，得到體長，再進一步回推魚齡。

$$W = a \cdot L^b$$

（三） MAR 取得（圖九）

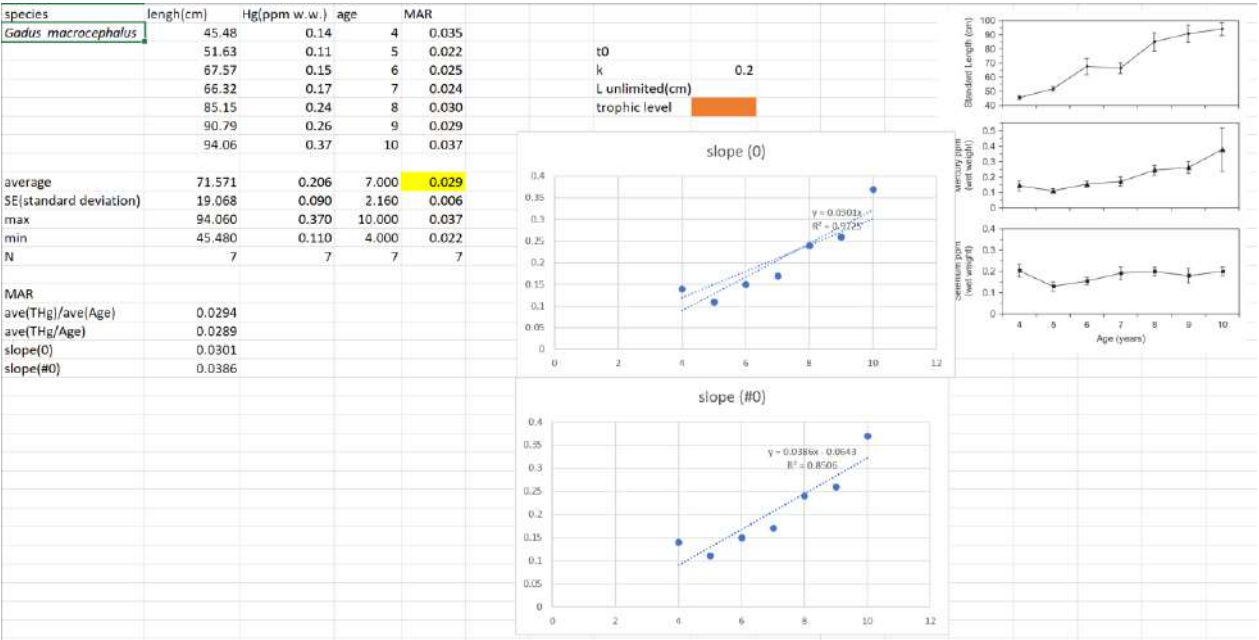
列出每一篇文獻每條魚的數據後，為方便統計，會計算同篇文獻中同一魚種各資料的 Ave（平均值）、SD（Standard deviation 標準差）、Min（最小值）、Max（最大值）、N（資料數量）。接著將一魚種所有樣本的汞濃度平均除以年齡平均，得一主要 MAR。

為確認資料的準確性，另以三種方式計算 MAR 做檢核：第一種方法是將每尾樣本的 dMAR (dMAR=THg/Age) 平均；另兩種方法則是繪製兩張以 Age 為 x 軸，THg 為 y 軸

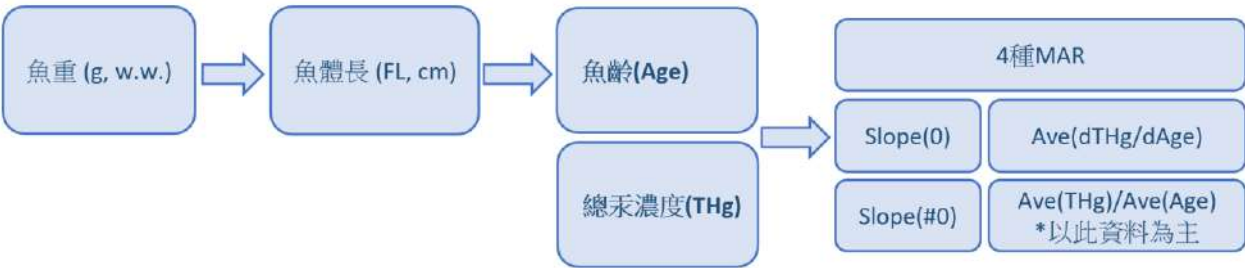
的散佈圖並繪製趨勢線，一張圖趨勢線截距不歸 0 作為對照， 另一張為了貼近理論 0 歲時 MAR 應為 0，故將截距歸 0，顯示趨勢線公式後記錄斜率。最後可獲得四種 MAR(單位 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}(\text{w.w.}) \cdot \text{yr}^{-1}$)，如圖八所示：

1. 總汞量平均/年齡平均（此方法計算出的數字為最後作圖時所用資料）
2. dMAR 的平均
3. 年齡對體長作圖，線性趨勢線截距歸零的斜率
4. 年齡對體長作圖，線性趨勢線截距不歸零的斜率

四種 MAR 在分析意義上皆屬於總汞濃度除以年齡，但因運用的數學方法不同，結果本身就會存在些微差異，但當四種 MAR 差距過大時會返回去檢視該魚群的計算是否有誤，或出現極端值等。後續的統計中會以第一種計算方式所得的 MAR 為主。



圖八、MAR 資料計算示範圖，以 Baeyens et al（2003）的資料為例



圖九、MAR 取得方法（研究者繪製）

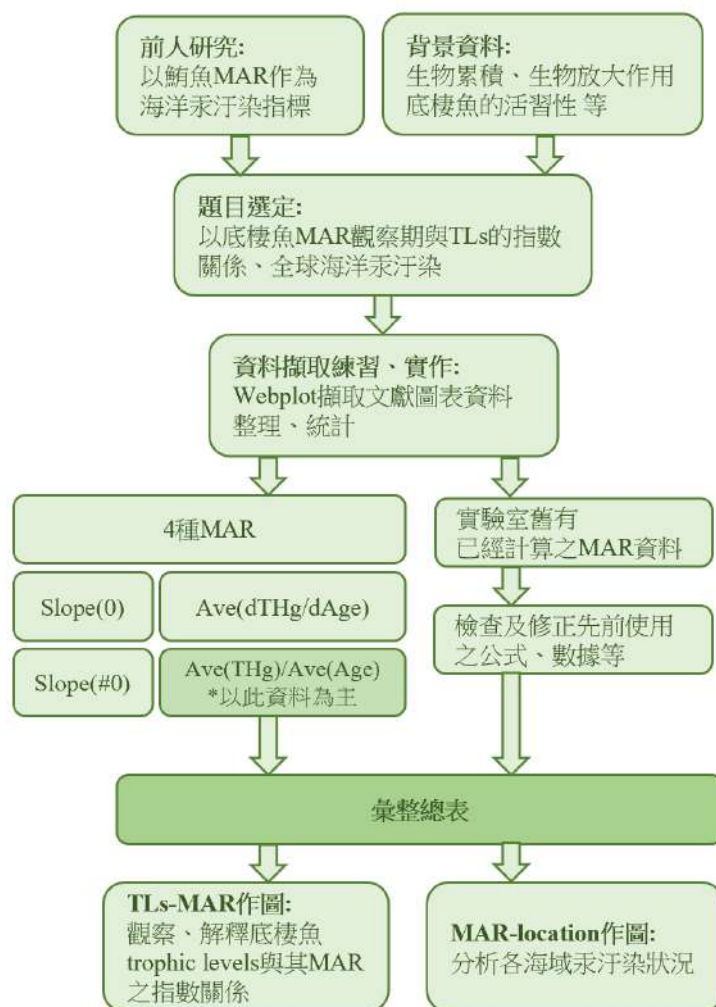
四、 TLs 對 MAR 作圖

整理文獻採樣地點，將地點相近的文獻數據歸為同一區（圖十一），以一種魚複數比資料的統計數值為一資料點，MAR 為 y 軸、TLs 為 x 軸作散佈圖，繪製指數曲線並記錄其公式（資料未超過四筆時判斷無法擬合出能夠準確表現該區污染趨勢的曲線，故該圖不繪製曲線）。指數函數常可用來描述自然界許多有關成長及衰退的模式，因此在跨掠食階層的汞累積速率分析上，採用指數函數進行分析，其形式如下：

$$y = ae^{\beta x}$$

其中 x 、 y 分別代表 TLs 和 MAR，從公式中我們會得到判定係數 R^2 及兩個數據： α 、 β 。其中 α 值代表回歸曲線截距，作為 TLs=0 時的 MAR，代表海域的背景值，但利用 MAR-TLs 方法主要目的以生物放大效應探討海洋污染程度，故觀察以尤拉數處理後的底數（公式中的 β ）判斷污染趨勢。

研究流程與方法架構如下圖十所示。

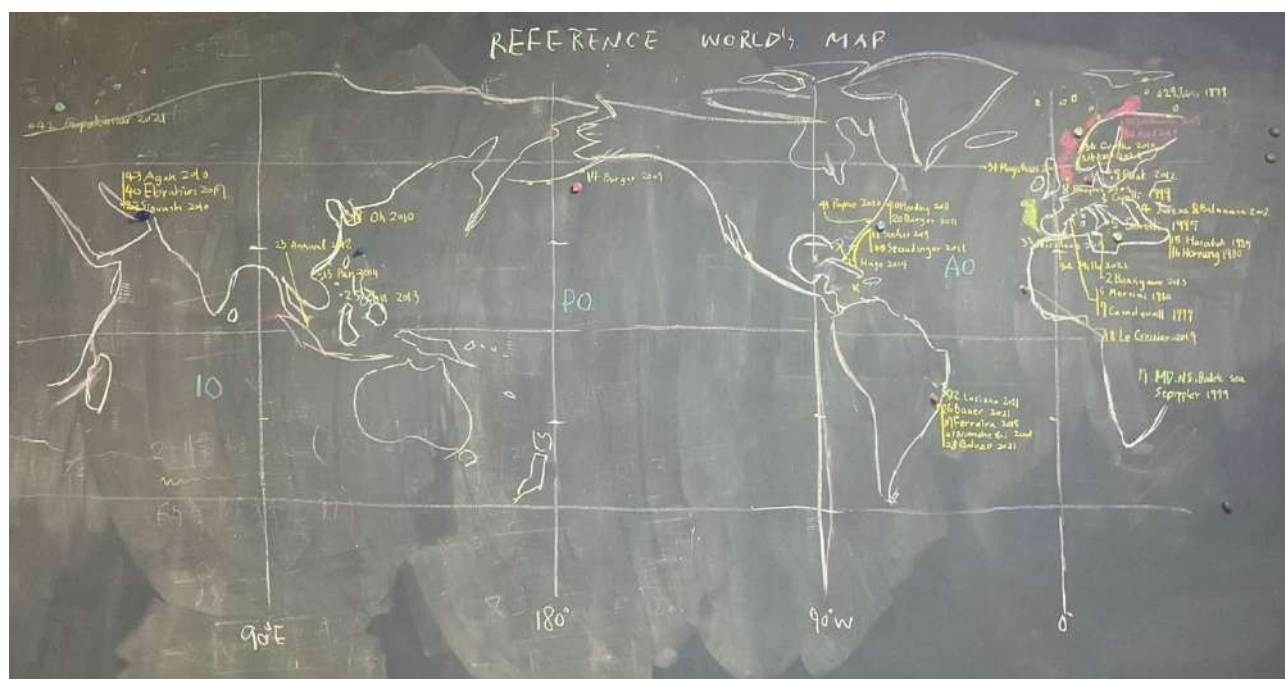


圖十、研究流程與方法架構圖（研究者繪）

參、研究結果

一、分析資料來源統計

研究初步蒐集了全球近 50 篇文獻，篩選掉資料不全的文獻後，全球各區（含太平洋、地中海、紅海、北海等）剩下 39 篇可計算的資料，並將採樣地點標示於地圖上，如圖十一。



圖十一、文獻採樣地點分布圖（研究者繪）

資料蒐集完成後，本研究嘗試計算地中海（Mediterranean Sea，MS）、太平洋（Pacific Ocean，PO）、北大西洋（North Atlantic Ocean，NAO）、南大西洋（South Atlantic Ocean，SAO）四大海域之資料，不僅因其具有相對較多的資料量，也因其為前人使用鮭魚追蹤汞污染時研究的海域。

本研究列出了參考資料的年分、魚種數量、文獻數量、樣本數量，以作為解釋資料時的參考，如下表二，總共整理了 1979 至 2018 年間，太平洋、南大西洋、北大西洋與地中海四片海域的 31 篇文獻、255 筆資料、5203 尾樣本。有些文獻因沒有底棲魚的資料、區域非本研究目標的四大海域或計算魚體汞濃度時為乾重（dry wet, d.w.）等因素，實際使用的資料有 22 篇文章、72 筆資料、1343 尾樣本。

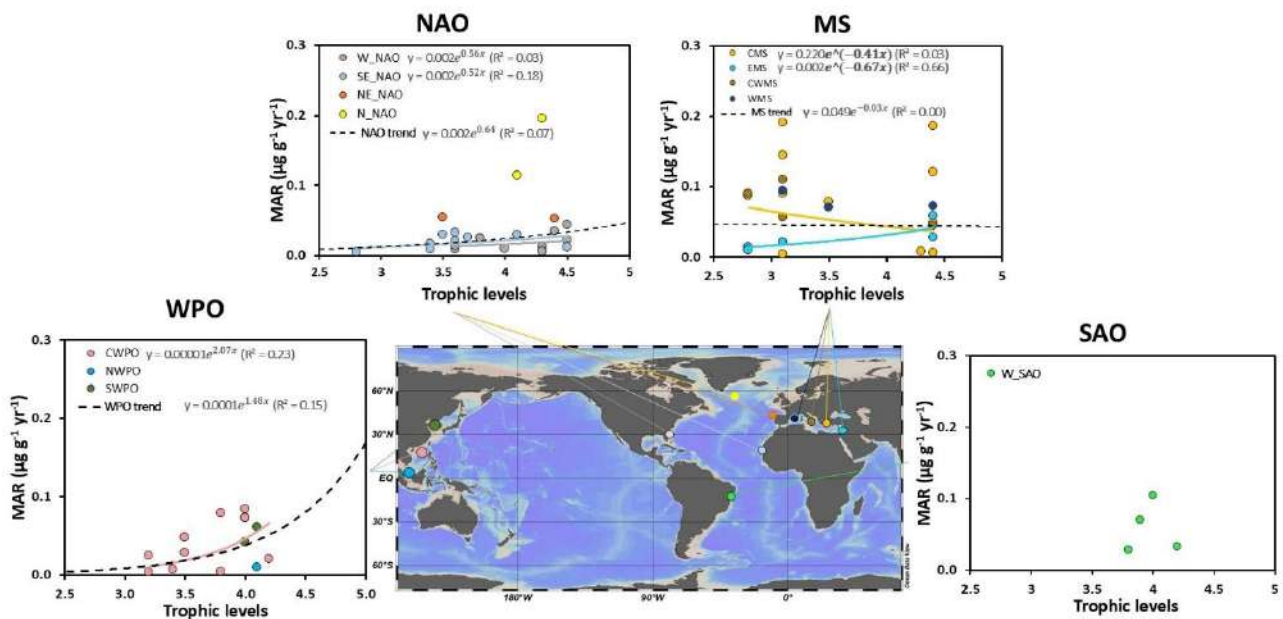
表二、本研究資料數量總計，斜線前代表可用資料數量，斜線後代表所有蒐集資料總計。
(研究者整理)

	文獻數量	魚資數量	樣本數 (N)	年代區間(year range)
N_NAO	1/1	2/8	53/295	2007
NE_NAO	1/2	2/4	49/114	2020-2021
SE_NAO	1/1	10/11	55/60	2019
W_NAO	5/7	11/31	485/1797	2010-2018
NAO	8/11	25/54	642/2266	2007-2021
W_SAO	2/5	4/18	89/256	2001-2021
SAO	2/5	4/18	89/256	2001-2021
CWPO	2/2	12/74	100/847	2013-2014
NWPO	1/1	1/6	17/54	2010
SWPO	1/1	2/29	6/78	2018
WPO	4/4	15/109	123/979	2010-2018
NPO	0/1	0/1	0/46	2007
NPO	0/1	0/1	0/46	2007
PO	4/5	15/110	123/979	2007-2018
WMS	1/3	3/8	183/653	1979-2004
CMS	4/4	13/33	144/253	1985-2016
CWMS	1/1	4/7	33/36	1979
EMS	2/2	8/25	129/490	1980-1985
MS	8/10	28/73	489/1432	1979-2016
Total	22/31	72/255	1343/5203	1979-2018

二、 大西洋、太平洋、地中海汞汙染分佈分析

將前人文獻採樣地點標示於地圖上後，將採樣地點較密集的幾篇文獻分為同一區域，命名以方位+海域為原則，北大西洋共分五區：W_NAO、N_NAO、NE_NAO、SE_NAO；南大西洋共分一區：W_SAO；地中海分四區：WMS、CMS、CWMS、EMS；太平洋共分兩區：WPO（CWPO、NWPO、SWPO）、NPO（該區文獻中無底棲魚資料），所有資料做 TLs-MAR 圖如圖十二。

因北太平洋無資料，故後續以 WPO（西太平洋）表示本研究有探討到的太平洋區域。



圖十二、Trophic levels-MAR 趨勢圖。依照研究地點中的四大洋（西太平洋、地中海、南大西洋、北大西洋）繪製四張趨勢圖，再將各區內不同的分區依不同顏色標示。

（研究者繪，底圖：Ocean Data View）

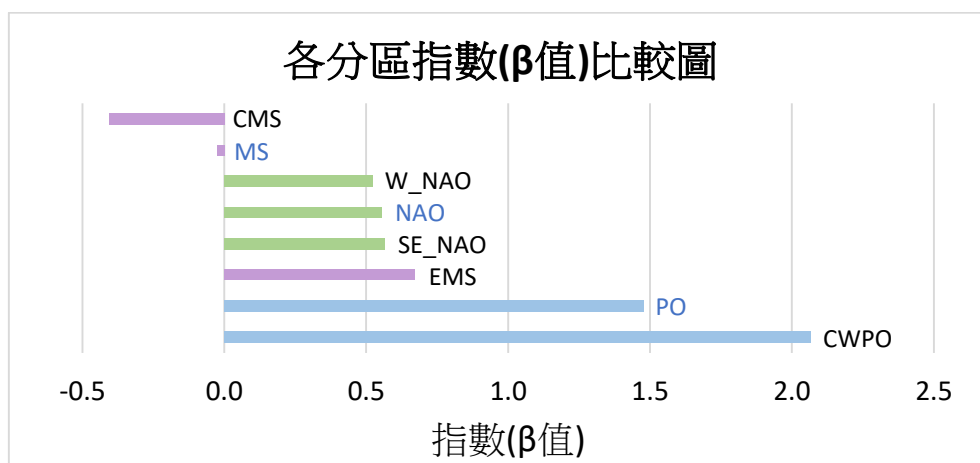
三、公式整理及比較

繪製各區的散佈圖與趨勢線後，將指數趨勢線的公式紀錄於下表三；而資料量不足，故無繪製趨勢線的區域則以短橫線表示該區無資料。

研究設計第四點提到：利用 MAR-TLs 方法主要目的以生物放大效應探討海洋污染程度，故觀察以尤拉數處理後的底數（公式中的 β ）判斷污染趨勢。故利用表三 β 資料整理出圖十九，以更清楚的比較各海域污染程度。

表三、各區域擬合曲線公式及參數表。藍字代表該資料為大洋的公式及參數，資料由上到下依 β 值小到大排序。（研究者整理）

區域	公式	R^2	α	β
CMS	$y = 0.220e^{-0.41x}$	$R^2 = 0.03$	0.220	-0.41
MS	$y = 0.049e^{-0.03x}$	$R^2 = 0.00$	0.049	-0.03
W_NAO	$y = 0.002e^{0.52x}$	$R^2 = 0.18$	0.002	0.52
NAO	$y = 0.003e^{0.56x}$	$R^2 = 0.04$	0.003	0.56
SE_NAO	$y = 0.002e^{0.56x}$	$R^2 = 0.03$	0.002	0.56
EMS	$y = 0.002e^{0.67x}$	$R^2 = 0.66$	0.002	0.67
PO	$y = 0.0001e^{1.48x}$	$R^2 = 0.15$	0.0001	1.48
CWPO	$y = 0.00001e^{2.07x}$	$R^2 = 0.23$	0.00001	2.07
NWPO	-	-	-	-
SWPO	-	-	-	-
W_SAO = SAO	-	-	-	-
N_NAO	-	-	-	-
NE_NAO	-	-	-	-
CWMS	-	-	-	-
WMS	-	-	-	-



圖十三、各海域 β 值比較。紫色為地中海區、綠色為大西洋區、藍色為太平洋區。本圖不包含因缺乏資料而沒畫曲線的海域。（研究者繪）

肆、討論

因海洋汞濃度不易直接測量，前人研究使用魚體中被生物放大過，比海洋更高的汞濃度間接探討海洋各地的汞污染分布，並藉汞增加速率（MAR）方法去除魚齡因素的影響。如 Tseng, et al.（2021）以洄游性魚類鮭魚的 MAR 作為指標，探討各大洋時序上的汞污染變化，發現太平洋的汞污染逐年升高中，且此污染趨勢正在從東亞轉移到南亞，故推測與工業興起有很大的關係；而大西洋污染程度呈現逐年下降的趨勢，則推測是因有效政策管制所致。

然而當欲採用海洋資源時，各大洋的污染趨勢不足以做為參考。舉例來說，我們難以從大西洋的資料判斷從挪威捕獲的鮭魚汞含量是否超標（世界衛生組織建議每克肉中的汞含量不宜超過 0.5 微克），此例說明以大洋研究結果判斷中小區域污染情形不夠準確。故本研究欲嘗試以另一種角度出發，比較各大洋中更小區域的汞污染。然而不像鮭魚在各大洋都有出現，要找到一魚種出現在生態環境不同的所有海洋區域是近乎不可能的事，更別說魚還會四處游動以致於我們無法確定捕獲的魚來自哪裡。因此，本研究蒐集許多前人研究的魚體汞濃度數據，資料篩選上，本研究從七種魚類生活習性選出不易四處游動、生活在大陸棚的底棲魚（Demersal）資料來觀察、比較各區邊緣海的污染程度差異（因為底棲魚生活在大陸棚內，故此研究區域主要位於邊緣海）。從上一章「參、研究結果」可得到以下發現：

一、汞污染分佈與解釋

本研究蒐集了三片海洋 31 篇文章中的數據，並將採樣地點較近的文章分為同區，共分 13 區，如表三中黑字區域：太平洋 4 區、北大西洋 4 區、南大西洋 1 區、地中海 4 區，其中有些分區因資料數量不足而無法得其趨勢，最後總共有 5 區繪製出趨勢線（表三中 CMS、W_NAO、SE_NAO、EMS、CWPO 區域），其中 4 區（表三中 CMS、W_NAO、SE_NAO、EMS 區域）呈現生物放大的趨勢，說明本研究方法可能具可行性，同時發現大西洋 2 區域間的污染程度無顯著差異（圖十二中 W_NAO、SE_NAO 區域）、太平洋西側（圖十二中 CWPO 區域）則污染最為嚴重。

本文章的前言第一點提到，自然或人為造成的因素皆有可能對汞污染程度造成影響。討論自然因素：

（一）溫鹽環流

周期大約是一千萬年，短期內無顯著影響，本研究不討論。

(二) 深度

汞在海洋中呈現不均勻的垂直分布，本研究使用棲息於大陸棚內的底棲魚，從圖十五得知，200 米內的汞濃度差距不大，故推測其的影響不顯著。

(三) 湧升流

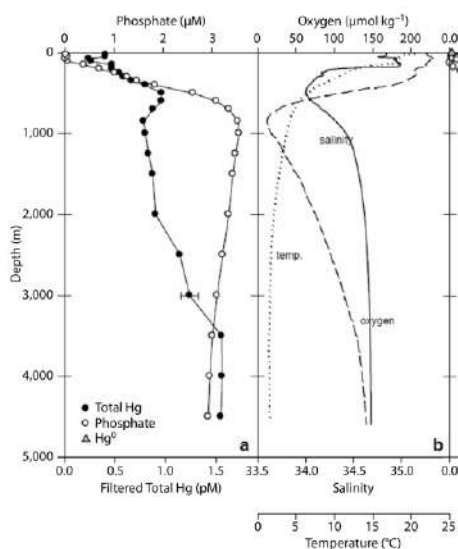
對應圖十四，本研究的 W_NAO、SE_NAO 海域為湧升流旺盛區域，此二區的 β 值分析結果彼此相差不大，將此二區與太平洋區的 β 值對照來看，會發現太平洋遠高於大西洋，因此推論，湧升流可能不會對汞污染造成顯著影響。

(四) 風向

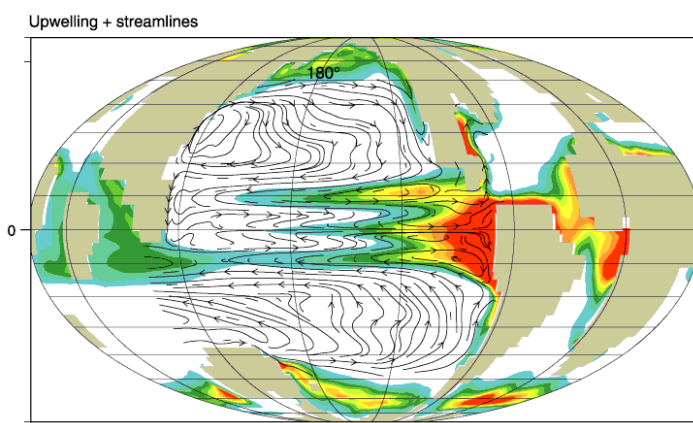
散逸的汞會循著風向移動，並經海氣交換沉降至海裡。長距離吹拂的風以行星風系為主，而東亞、非洲等地區會因季節性氣壓變化而受季風影響較顯著。圖十六顯示行星風系的風向，顯示 W_NAO 的污染可能來自美國、而 SE_NAO 的污染可能來自西非；而圖十七顯示東亞地區的季風，顯示 WPO 在冬季的污染可能來自中國內陸、夏季則可能來自東南亞地區。

(五) 火山

世界的火山分布如圖十八，顯示火山分布與 WPO、N_NAO 和 MS 重疊，而這些區域 MAR 普遍來說也較高，顯示火山可能確實會造成汞污染程度較高。

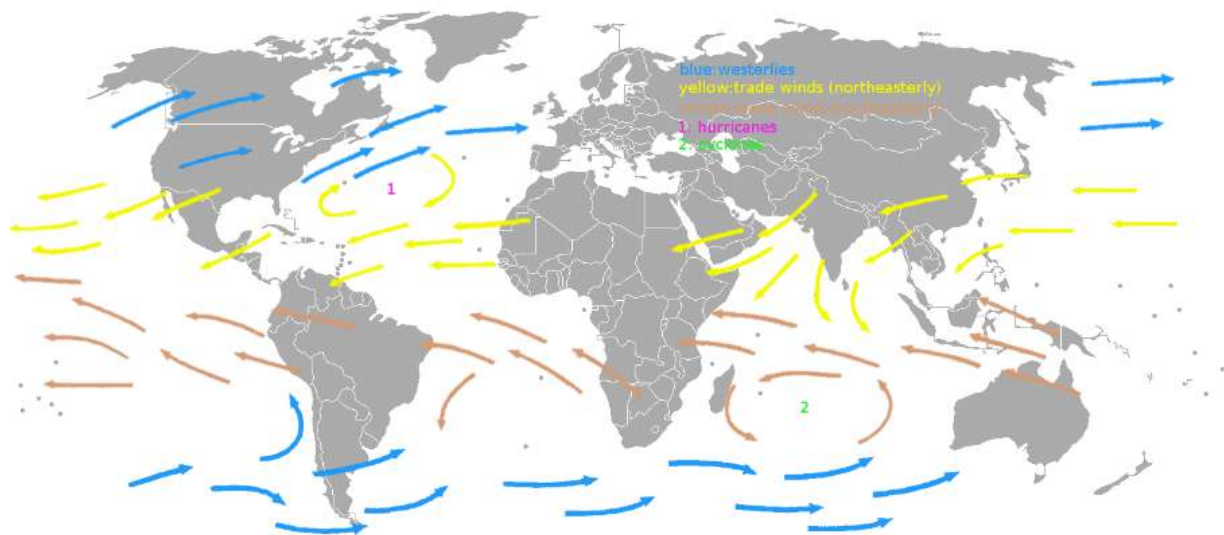


圖十四、汞與鹽度等在海洋中的垂直分布。(Oceangraphy 27, Laborg et al.)

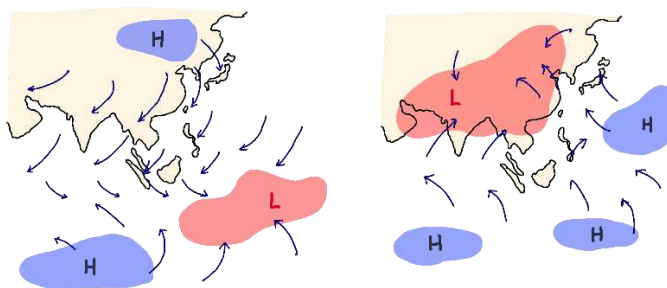


圖十五、全球湧升流分布，標示紅色海域湧升流強，而越往綠、藍則湧升流越弱。

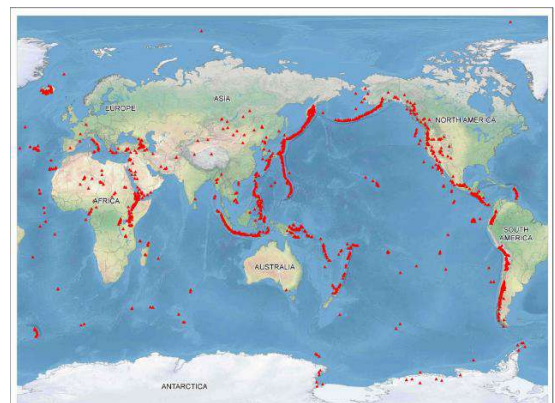
(Texas A&M University, <https://reurl.cc/0dr006>)



圖十六、信風（又稱貿易風，黃、棕色）與盛行西風（藍色）。（Wikipedia，KVDP）



圖十七、亞洲季風。左圖為冬季，右圖為夏季。
（研究者繪）



圖十八、全球火山分布圖。

（geographicanews，

<https://reurl.cc/yv38V8>）

本研究亦嘗試蒐集其他資料來討論人為因素：

（一）採礦業

圖十九展示了各大洲近年採礦業的成長率，顯示歐洲的採礦業從 2000 年即呈負成長，與圖二十歐洲的低汞排放量相呼應。此外亞洲急速成長的採礦業看似與圖二十相呼應，但圖二十為 2018 的資料，不符合圖十九 2020-2022 的年代，所以從採礦業我們只能初步推估歐洲的人為污染情形。

（二）各國排放統計數據

聯合國環境署（UNEP）統計了世界各國汞排放量，如圖二十，在汞排放較多的亞洲地區，有著比地中海、大西洋嚴重的污染趨勢；而地中海污染較大西洋嚴重的原因，則目前推論與前面討論自然因素的第五點，火山分布有關。

本結果亦與前人研究（葉于凱，2022）推論北大西洋周遭各國因政策限制汞的排放（尤其歐盟成員國，圖二十），減緩了汞溢出到環境的速率；以及與亞洲工業興起導致汞污染增加之趨勢相符。

△ 2000/2022 – declining production rates only in Europe since 2000



圖十九、2020-2022 採礦業成長率，僅歐洲呈負成長。（IOC，2024 World Mining Data）



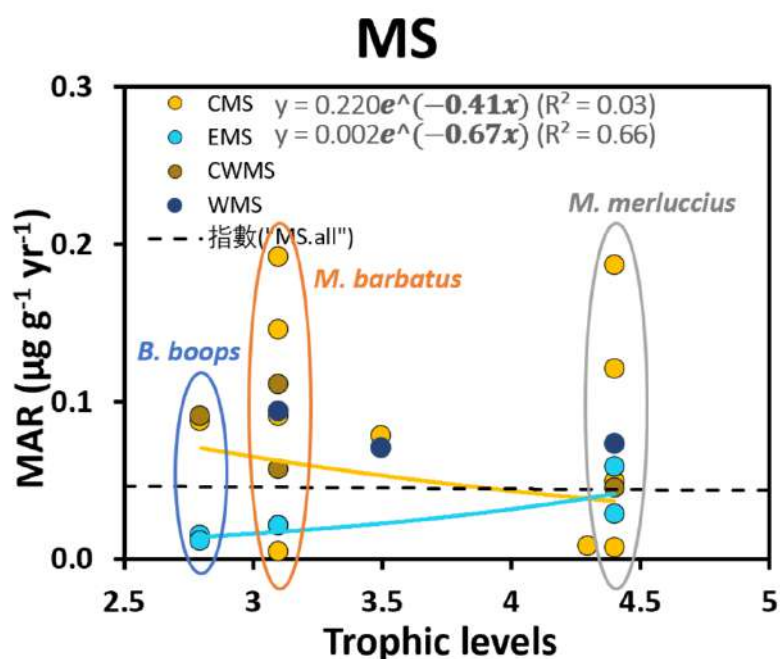
圖二十、2018 年各國汞排放量分布圖，顏色深者排放多。

（UNEP，<https://reurl.cc/DIV22R>）

上述資料與初步分析了太平洋與大西洋汞污染分布的成因，分多項討論可見其成因有許多可能性，可以以此為起源，後續朝分析全球汞污染成因繼續研究。而東地中海（圖十二中 EMS 區域）的資料則顯示該區污染介於太平洋和大西洋之間。而地中海中央一區（圖十二中 CMS 區域）則發現趨勢相反於生物放大效應，初步檢查資料後發現地中海資料來源橫跨年代廣，並各區有重複魚種，地中海詳細情形於第二點接續進行討論。

二、地中海區域資料討論

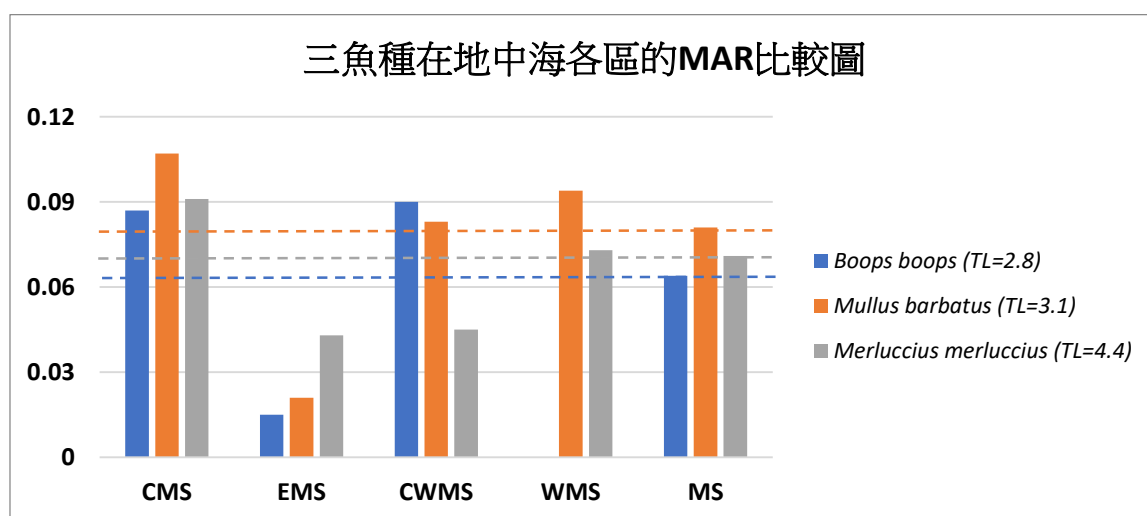
討論第一點提到地中海資料來源橫跨年代從 1979 到 2016 年，是所有研究區域中最廣的，而在不同年代的文章中，經常出現重複的魚種但有不同的 MAR 值，導致在 $TL_s=2.8$ 、3.1、4.4 有許多不同的 MAR 值，圖上資料點因此在 x 軸相同處呈現縱向展開，趨勢線亦隨之不穩定，甚至出現違反生物放大作用的負 β 值結果 (-0.026)，如圖二十一所示。



圖二十一、地中海總圖。圈選標示 MAR 呈縱向分布的魚種與位置（研究者繪）

不過既然各區出現相同物種，所以可以直接使用前人用同物種 MAR 比較的方式，推斷地中海各區污染情形。故參考圖十六的分佈後，選定地中海三魚種（*Boops boops*、*Mullus barbatus*、*Merluccius merluccius*），將各區的 MAR 平均後，繪製成下圖二十二。比較同魚種分布在地中海 4 區的 MAR 值後，從圖二十二可明顯得知 EMS 區域的污染程度是最低的，而 CMS，也就是愛琴海區域平均 MAR 最高，顯示該區污染為地中海最嚴重。

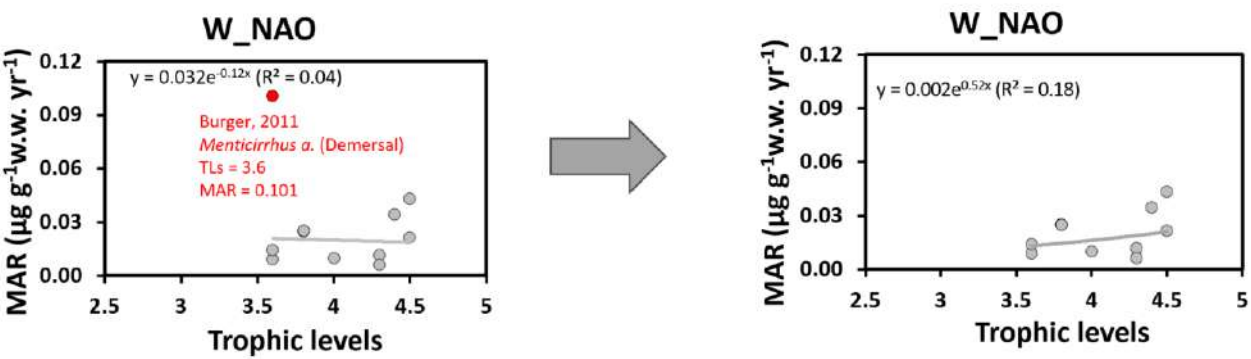
由於地中海區域有許多火山等地形，可能因此增加了該處資料的不定性，其探究方法仍有許多討論空間。



圖二十二、地中海各區捕獲之同種樣本 MAR 比較長條圖。虛線表該魚種 MAR 在地中海整體區域的平均值，WMS 缺乏 *Boops boops* 的資料。（研究者繪）

三、 極端值的討論

使用MAR及TLs繪製散佈圖並嘗試檢查各海域的圖後，於北大西洋西方（W_NAO）發現一筆異常高 MAR 的資料（來源：Burger, 2011），其不僅遠離趨勢線與其他資料甚遠，也高出同營養階層之其他魚資的 MAR 五倍以上。除此異常資料點外，可看出在該海域 TLs 與 MAR 之正相關性（圖十八右圖）。



圖二十三、W_NAO 極端值刪除前後比較圖。以紅色標示該異常資料及該筆資料的其他資訊。（研究者繪）

此外，CMS 中的一篇文章也發現過低的 MAR 值（來源：Graci et al., 2016），相較於同區、同種的資料，平均少了一到二級（10~100 倍）。該區資料擷取如下圖二十四。

Ocean	position	location	paper no.	author	launch year	Species	living habits	Sample no. (n)	depth	TLs(ave)	MAR<mean THg/mean Age> (µg g ⁻¹ yr ⁻¹ w.w.)
	C_MS	Augusta	2	Bonsignore et al.	2013	Boops boops	D	20	0-100	2.8	0.087
	C_MS	Augusta	2	Bonsignore et al.	2013	Serranus scriba	D	2	5-30	3.8	
	C_MS	Augusta	2	Bonsignore et al.	2013	Mullus barbatus	D	4	100-300	3.1	0.145
	C_MS	Augusta	2	Bonsignore et al.	2013	Mullus surmuletus	D	2	5-409	3.5	0.078
	C_MS	Augusta	2	Bonsignore et al.	2013	Scorpaena notata	D	5	10-700	3.7	
MS	C_MS	sicilian coast	ex3	Graci et al	2016	Conger conger	D	6	0-1171	4.3	0.008
	C_MS	sicilian coast	ex3	Graci et al	2016	Merluccius merluccius	D	15	70-400	4.4	0.007
	C_MS	sicilian coast	ex3	Graci et al	2016	Mullus barbatus	D	17	100-300	3.1	0.004
	C_MS	Adriatic sea	4	Juresa & Blanusa	2003	Merluccius merluccius	D	13	70-400	4.4	0.120
	C_MS	Ionian sea	5	Storelli	1985	Merluccius merluccius	D	23	70-400	4.4	0.049
	C_MS	Adriatic sea	5	Storelli	1985	Merluccius merluccius	D	16	70-400	4.4	0.186
	C_MS	Adriatic sea	5	Storelli	1985	Mullus barbatus	D	9	100-300	3.1	0.191
	C_MS	Ionian sea	5	Storelli	1985	Mullus barbatus	D	12	100-300	3.1	0.090

圖二十四、地中海魚資表（CMS 部分截圖）。黃色標出有疑慮的文章資料（來源：Graci et al., 2016）。（研究者製）

四、 數據點過少

參照線性回歸的限制，資料少於四筆的海域於本研究中不進行指數擬合分析，故整理出下表以統計本研究分析的海域與數量。

表四、可、不可進行指數擬合分析的海域與占比統計（研究者整理）

可擬合分析（不含總圖）	不可擬合分析	描述
CMS、W_NAO、SE_NAO、 EMS、CWPO	NWPO、SWPO、W_SAO、 N_NAO、NE_NAO、 CWMS、WMS	共 12 區海域 約 41.7%可分析
5 區	7 區	

由表四的統計資料可發現，縱使資料彙整近四十年的採樣分析資料，能只有不到一半（41.7%）的範圍海域可分析。

五、 年齡修正

確認及校對前人研究的資料時，最容易出現問題的是魚齡問題，有些文章有提供直接以耳石測得的魚齡，但可能與用體長計算所測得有些需差異，故當文獻有提及魚齡時，會以文章提供的魚齡為主，以展示生物的真實情況。

另外在計算 MAR 時發現少數情況下四種 MAR 值具有較明顯的差異，經分析而嘗試忽略不計年齡小於 1 之幼魚後，四組 MAR 會較接近，故推測較小年齡的魚因代謝能力及食量都不穩定，以致於較無法看出汞累積速率的趨勢，而後在進行相關統計時大多將幼魚魚資忽略不計。

六、 Fishbase 資料更新

如先前研究方法所述，本研究利用 Fishbase 網站查詢物種基本參數如生長係數及掠食階層等。然而，Fishbase 會因有新的文章計算結果而改變網站資料，故本研究應定期更改公式中的參數，進而得到新的 MAR 值，不過在大多數情況下，更改了計算公式中的參數，MAR 值變動幅度仍然不大。

在研究該魚種生長係數 k 的文獻列表中，計算優先選用採樣地點相近的生長係數作為計算魚齡時的參數，其次條件為使用尾叉長（Fork length, FL）紀錄魚長者。另外為求統一，本研究優先使用 Fishbase 提供的 TLs 資料計算，而非文章提供的 TLs 數據。

七、 研究應用價值及未來發展

前人研究有許多研究魚體中汞濃度及體長關係的資料，未來希望繼續分析其他區域的邊緣海資料，藉由相同的研究方法，逐步建立全球的 MAR-TLs 數學模型，以整理及善用前人的數據資料。

以底棲魚作為污染指標的原因除了生物放大作用、生活習性，更重要的是魚類與人的飲食，有很大的關係。常說「吃什麼，像什麼。」研究魚類體內的汞，不僅僅對於海洋污染有很大的研究貢獻，未來除增加資料量外，後續更希望能夠藉由建立資料庫，應用到提供大眾在吃魚的時候一個安全的指標，在取食海鮮的時候能有更健康、更安全的意識選擇。

伍、結論

為探討小區域的海洋汞污染，本研究嘗試彙整前人研究資料，篩選底棲魚且將資料換算成汞累積速率 MAR，並藉由生物放大效應探討各海域的汞污染程度並比較之，發現整體而言，太平洋汞污染較大西洋嚴重，此結果與前人研究相符。

此外，本研究初步嘗試以生物放大效應觀察海洋汞污染，在大部分圖中發現隨營養階層升高而增加的 MAR 趨勢，如西太平洋、北大西洋東南方等，顯示此方法或許有機會成功作為探討小區域海洋污染的新途徑。

而在某些不適用此方法的區域，如地中海，則可能可以利用前人直接比較同物種 MAR 的方式探討，甚至進一步可獲得發現東側大西洋（敘利亞、黎巴嫩、以色列西岸）污染程度是最低的；而中央地中海（愛琴海）可能因為封閉海域，該區污染顯示為地中海最嚴重。

希望日後能夠有更多資料，逐步在全球各海域建立 TLs-MAR 的模型，以提供取用海洋資源時一個更精確的指標。

陸、參考文獻資料

- [1] Bonsignore, M., Manta, D. S., Oliveri, E., Sprovieri, M., Basilone, G., Bonanno, A., ... & Mazzola, S. (2013). Mercury in fishes from Augusta Bay (southern Italy): risk assessment and health implication. *Food and Chemical Toxicology*, 56, 184-194.
- [2] Anual, Z. F., Maher, W., Krikowa, F., Hakim, L., Ahmad, N. I., & Foster, S. (2018). Mercury and risk assessment from consumption of crustaceans, cephalopods and fish from West Peninsular Malaysia. *Microchemical journal*, 140, 214-221.
- [3] Bauer, A. D. B., Paiva, T. D. C., Barboza, C. A. D. M., Malm, O., & Fischer, L. G. (2021). Mercury concentrations in four marine fishery resources from Rio de Janeiro coast, SW Atlantic, and potential human health risk via fish consumption. *Biological Trace Element Research*, 199(12), 4772-4781.
- [4] Bua, D. G., Annuario, G., Albergamo, A., Cicero, N., & Dugo, G. (2016). Heavy metals in aromatic spices by inductively coupled plasma-mass spectrometry. *Food Additives & Contaminants: Part B*, 9(3), 210-216.
- [5] Burger, J., & Gochfeld, M. (2007). Risk to consumers from mercury in Pacific cod (*Gadus macrocephalus*) from the Aleutians: Fish age and size effects. *Environmental research*, 105(2), 276-284.
- [6] Burger, J., & Gochfeld, M. (2011). Mercury and selenium levels in 19 species of saltwater fish from New Jersey as a function of species, size, and season. *Science of the Total Environment*, 409(8), 1418-1429.
- [7] Capelli, R., Drava, G., Siccardi, C., De Pellegrini, R., & Minganti, V. (2004). Study of the Distribution of Trace Elements in Six Species of Marine Organisms of the Ligurian Sea (North-Western Mediterranean)—Comparison with Previous Findings. *Annali di Chimica: Journal of Analytical, Environmental and Cultural Heritage Chemistry*, 94(7-8), 533-546.
- [8] Casadevall, M., Rodríguez Prieto, C., & Torres Antón, Ò. (2017). The importance of the age when evaluating mercury pollution in fishes: the case of *Diplodus sargus* (Pisces, Sparidae) in the NW Mediterranean. *AIMS Environmental Science*, 2017, vo. 4, núm. 1, p. 17-26.
- [9] Ferreira, M. S., Marques, A. N., Ribeiro, R. O. R., Conte, C. A., Carneiro, C. S., Santelli, R. E., ... & Mársico, E. T. (2015). Total mercury in carnivorous fish from Brazilian southeast. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 95, 18-24.
- [10] Galvao, P., Sus, B., Lailson-Brito, J., Azevedo, A., Malm, O., & Bisi, T. (2021). An upwelling area as a hot spot for mercury biomonitoring in a climate change scenario: A case study with large demersal fishes from Southeast Atlantic (SE-Brazil). *Chemosphere*, 269, 128718.
- [11] Graci, S., Collura, R., Cammilleri, G., Buscemi, M. D., Giangrosso, G., Principato, D., ... & Ferrantelli, V. (2017). Mercury accumulation in Mediterranean Fish and Cephalopods Species of Sicilian coasts: Correlation between pollution and the presence of *Anisakis* parasites. *Natural product research*, 31(10), 1156-1162.

- [12]Harakeh, M. S., Acra, A., Jurdi, M., & Karahagopian, Y. Mercury Levels in Some Species of Fish from the Coast.
- [13]Harding, G., Dalziel, J., & Vass, P. (2018). Bioaccumulation of methylmercury within the marine food web of the outer Bay of Fundy, Gulf of Maine.PloS one,13(7), e0197220.
- [14]Hornung, H., Zismann, L., & Oren, O. H. (1980). Mercury in twelve Mediterranean trawl fishes of Israel.Environment International,3(3), 243-248.
- [15]Huge, D. H., Schofield, P. J., Jacoby, C. A., & Frazer, T. K. (2014). Total mercury concentrations in lionfish (*Pterois volitans/miles*) from the Florida Keys National Marine Sanctuary, USA.Marine pollution bulletin,78(1-2), 51-55.
- [16]Jureša, D., & Blanuša, M. (2003). Mercury, arsenic, lead and cadmium in fish and shellfish from the Adriatic Sea.Food Additives & Contaminants,20(3), 241-246.
- [17]Le Croizier, G., Schaal, G., Point, D., Le Loc'h, F., Machu, E., Fall, M., ... & De Morais, L. T. (2019). Stable isotope analyses revealed the influence of foraging habitat on mercury accumulation in tropical coastal marine fish.Science of the Total Environment,650, 2129-2140.
- [18]Magalhães, M. C., Costa, V., Menezes, G. M., Pinho, M. R., Santos, R. S., & Monteiro, L. R. (2007). Intra-and inter-specific variability in total and methylmercury bioaccumulation by eight marine fish species from the Azores.Marine Pollution Bulletin,54(10), 1654-1662.
- [19]Merciai, R., Rodríguez-Prieto, C., Torres, J., & Casadevall, M. (2018). Bioaccumulation of mercury and other trace elements in bottom-dwelling omnivorous fishes: the case of *Diplodus sargus* (L.)(Osteichthyes: Sparidae).Marine pollution bulletin,136, 10-21.
- [20]Mille, T., Bisch, A., Caill-Milly, N., Cresson, P., Deborde, J., Gueux, A., ... & Monperrus, M. (2021). Distribution of mercury species in different tissues and trophic levels of commonly consumed fish species from the south Bay of Biscay (France).Marine Pollution Bulletin,166, 112172.
- [21]Naccari, C., Cicero, N., Ferrantelli, V., Giangrosso, G., Vella, A., Macaluso, A., ... & Dugo, G. (2015). Toxic metals in pelagic, benthic and demersal fish species from Mediterranean FAO zone 37.Bulletin of environmental contamination and toxicology,95, 567-573.
- [22]Nicolaus, E. M., Barry, J., Bolam, T. P., Lorange, P., Marandel, F., Phillips, S. R. M., ... & Ellis, J. R. (2017). Concentrations of mercury and other trace elements in two offshore skates: sandy ray *Leucoraja circularis* and shagreen ray *L. fullonica*.Marine Pollution Bulletin,123(1-2), 387-394.
- [23]Niencheski, L. F., Windom, H. L., Baraj, B., Wells, D., & Smith, R. (2001). Mercury in fish from Patos and Mirim lagoons, Southern Brazil.Marine Pollution Bulletin,42(12), 1403-1406.
- [24]Oh, S., Kim, M. K., Yi, S. M., & Zoh, K. D. (2010). Distributions of total mercury and methylmercury in surface sediments and fishes in Lake Shihwa, Korea.Science of the total environment,408(5), 1059-1068.

- [25]Pan, K., Chan, H., Tam, Y. K., & Wang, W. X. (2014). Low mercury levels in marine fish from estuarine and coastal environments in southern China. *Environmental pollution*, 185, 250-257.
- [26]Panfili, J., de Pontual, H., Troadec, H., & Wright, P. J. (2002). Manual of fish sclerochronology (pp. 464-p+). Ifremer-IRD coedition.
- [27]Payne, E. J., & Taylor, D. L. (2010). Effects of diet composition and trophic structure on mercury bioaccumulation in temperate flatfishes. *Archives of environmental contamination and toxicology*, 58, 431-443.
- [28]Peterson, C. L., Klawe, W. L., & Sharp, G. D. (1973). Mercury in tunas: a review. *Fish Bull*, 71(3), 603-613.
- [29]Salvo, A., Potorti, A. G., Cicero, N., Bruno, M., Turco, V. L., Bella, G. D., & Dugo, G. (2014). Statistical characterisation of heavy metal contents in *Paracentrotus lividus* from Mediterranean Sea. *Natural Product Research*, 28(10), 718-726.
- [30]Santos, L. N., Neves, R. A., Koureiche, A. C., & Lailson-Brito, J. (2021). Mercury concentration in the sentinel fish species *Orthopristis ruber*: Effects of environmental and biological factors and human risk assessment. *Marine Pollution Bulletin*, 169, 112508.
- [31]Sinkus, W., Shervette, V., Ballenger, J., Reed, L. A., Plante, C., & White, B. (2017). Mercury bioaccumulation in offshore reef fishes from waters of the Southeastern USA. *Environmental Pollution*, 228, 222-233.
- [32]Staudinger, M. D. (2011). Species-and size-specific variability of mercury concentrations in four commercially important finfish and their prey from the northwest Atlantic. *Marine pollution bulletin*, 62(4), 734-740.
- [33]Stoeppler, M., & Nürnberg, H. W. (1979). Comparative studies on trace metal levels in marine biota: III. Typical levels and accumulation of toxic trace metals in muscle tissue and organs of marine organisms from different European seas. *Ecotoxicology and environmental Safety*, 3(4), 335-351.
- [34]Storelli, M. M., Storelli, A., Giacomini-Stuffler, R., & Marcotrigiano, G. O. (2005). Mercury speciation in the muscle of two commercially important fish, hake (*Merluccius merluccius*) and striped mullet (*Mullus barbatus*) from the Mediterranean sea: estimated weekly intake. *Food chemistry*, 89(2), 295-300.
- [35]Tseng, C. M., Ang, S. J., Chen, Y. S., Shiao, J. C., Lamborg, C. H., He, X., & Reinfelder, J. R. (2021). Bluefin tuna reveal global patterns of mercury pollution and bioavailability in the world's oceans. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 118(38), e2111205118.
- [36]Zhu, A., Zhang, W., Xu, Z., Huang, L., & Wang, W. X. (2013). Methylmercury in fish from the South China Sea: geographical distribution and biomagnification. *Marine pollution bulletin*, 77(1-2), 437-444.
- [37] 葉于凱(2022)。大洋鯖魚探討全球海洋汞污染時序變化 Tunas reveal temporal trends of mercury pollution in the oceans 。〔碩士論文。國立臺灣大學〕

捌、附錄(魚資表)

註一：THg: $\mu\text{g/g}$ wet weight (w.w.)

註二：living habits 縮寫:

living habits	縮寫	中文	備註
demersal	D	底棲	本研究之目標魚種
reef-associated	RA	珊瑚礁	
brackish	B /BK	淡鹹水	
benthopelagic	BP	底棲	底棲次深
pelagic-neritic	PN	大洋淺海	
pelagic-oceanic	PO	大洋性	
bathydemersal	BD	深海底棲	底棲最深

PO 太平洋區域								
position	author	Species	living habits	N	Trophic level	Age (yr)	THg	MAR
WPO	Pan (2014)	Cynoglossus puncticeps	BK; D	5	3.3±0.44	10.68	0.010	0.001
		Cynoglossus arel	BK; D	8	3.5±0.1	1.38	0.022	0.016
		Leiognathus brevirostris	BK; D	8	3.0±0.33	5.01	0.034	0.007
		Liza macrolepis	BK; D	4	2.6±0.26	0.89	0.010	0.011
		Mugil cephalus	BP; BK	9	2.5±0.17	1.06	0.010	0.010
		Johnius belangerii	BK; D	50	3.3±0.34			0.049
		Pennahia anea	D	3	4.0±0.69	0.32	0.027	0.084
		Inimicus japonicus	D	12	4.2±0.73	2.58	0.053	0.021
		Nematalosa come	PN	8	2.8±0.28			
		Valamugil formosae	RA	6	-			
		Platycephalus indicus	RA; BK	22	3.6±0.6			
		Plotosus lineatus	RA; BK	2	3.6±0.3			
		Dendrophysa russelii	BK; D	10	3.6±0.4			
		Nibea albiflora	BP	2	4.0±0.7			
		Epinephelus awoara	RA	18	3.6±0.55			
		Epinephelus bruneus	RA	8	4.0±0.66			
		Siganus fuscescens	RA; BK	37	2.0±0.1			
		Pampus argenteus	BP	11	3.3±0.1			
SWPO	Anual et al. (2018)	Otolithoides biauritus ^{*1}	D	1	4.1±0.63	0.22	0.144	
		Nemipterus bathybius ^{*1}	D	1	4.0±0.55		0.322	
		Nemipterus japonicus	D	5	4.1±0.76	2.14	0.132	0.062
		Nemipterus nematophorus ^{*1}	D	1	3.8±0.5		0.645	
		Selaroides leptolepis	RA	3	3.5±0.41			
		Selar boops ^{*1}	D	1	4.1±0.6	2.31	0.195	
		Seriola dumerili	RA; BK	1	3.8±0.2			
		Decapterus russelli	BP	1	3.7±0.4			
		Megalaspis cordyla	RA; BK	4	3.9±0.57			

		Parastromateus niger	RA; BK	5	2.9±0.35			
		Rastrelliger kanagurta	PN	2	3.3±0.38			
		Rastrelliger brachysoma	BK; PN	2	2.7±0.31			
		Scomberomorus guttatus	BK; PN	6	4.3±0.67			
		Scomberomorus commerson	PN	4	4.5±0.4			
		Rastrelliger faughni	PN	3	3.4±0.45			
		Scomber australasicus	PN	3	4.2±0.5			
		Gymnosarda unicolor	RA	2	4.5±0.75			
		Tunnus tonggol	PN	1	4.5±0.6			
		Euthynnus affinis	PN	2	4.5±0.0			
		Lutjanus argentimaculatus	RA; BK	3	3.6±0.5			
		Lutjanus sebae	RA; BK	3	4.1±0.4			
		Lutjanus malabaricus	RA; BK	5	4.5±0.5			
		Lutjanus russellii	RA; BK	1	4.1±0.4			
		Lates calcarifer	BK; D	4	3.8±0.60			
		Himantura gerrardi	BK; D	2	3.7±0.5			
		Himantura uarnak	RA; BK; D	1	3.6±0.6			
		Dasyatis kuhlii	RA	4	3.3±0.3			
		Nibea soldado	BK; D	6	3.9±0.59			
		Otolithoides ruber	B; BP	1	3.6±0.6			
NPO	Burger et al. (2007)	Gadus macrocephalus	BK; D	46	4.2±0.1			
WPO	Zhu (2013)	Clupanodon thrissa	BK; PN	7	3.1±0.3			
		Decapterus maruadsi	RA	6	3.4±0.45			
		Dipturus kwangtungensis	D	7	3.8±0.6	0.39	0.031	0.079
		Hyporhamphus dussumieri	RA	5	3.5±0.48			
		Johnius belangerii	BK; D	50	3.3±0.32			
		Nemipterus virgatus	D	6	4.0±0.57	0.94	0.069	0.073
		Paraplagusia japonica	D	10	3.2±0.40	0.72	0.018	0.025
		Pardachirus pavoninus	RA	10	3.1±0.26			
		Pleuronichthys cornutus	D	3	3.2±0.4	2.63	0.009	0.004
		Scorpaena neglecta	D	8	3.8±0.2	1.18	0.006	0.005
		Siganus canaliculatus	RA; BK	18	2.8±0.31			
		Sillago sihama	RA; BK	11	3.3±0.1			
		Thamnaconus hypargyreus	D	8	3.4±0.44	2.60	0.018	0.007
		Trypauchen vagina	PN	12	3.5±0.50			
		Iniistius verrens *2	D	7	3.5±0.5		0.055	
		Acentrogobius chlorostigmatoides	BK; D	33	3.4±0.4			
		Coilia mystus	BK; PN	14	3.2±0.4			
		Konosirus punctatus	BK; PN	12	2.9±0.24			
		Lateolabrax japonicus	RA; BK	4	3.1±0.3			
		Mugil cephalus	BP; BK	9	2.5±0.18	1.06	0.010	0.010
		Odontamblyopus lacepedii	BK; BP	23	3.9±0.5			
		Onigocia macrolepis	D	3	3.6±0.0			

		<i>Sardinella albella</i>	BK; PN	13	2.6±0.14			
		<i>Siganus canaliculatus</i>	RA; BK	19	2.8±0.32			
		<i>Sillago sihama</i>	RA; BK	11	3.3±0.2			
		<i>Taenioides anguillaris</i>	BK; D	5	4.0±0.6			
		<i>Trypauchen vagina</i>	BK; D	13	3.5±0.51			
		<i>Branchiostegus argentatus</i>	D	25	3.5±0.5	1.10	0.125	0.029
		<i>Decapterus maruadsi</i>	RA	7	3.4±0.46			
		<i>Evynnis cardinalis</i>	RA	14	3.3±0.39			
		<i>Exocoetus volitans</i>	PN	17	3.0±0.09			
		<i>Nemipterus virgatus</i>	D	6	4.0±0.58	0.94	0.274	0.122
		<i>Sphyaena pinguis</i>	PN	8	4.5±0.8			
		<i>Siganus canaliculatus</i>	RA; BK	20	2.8±0.33			
		<i>Psenopsis anomala</i>	BP	12	4.0±0.28			
		<i>Trachurus japonicus</i>	PN	14	3.4±0.45			
		<i>Ariomma indicum</i>	BP	6	3.6±0.50			
		<i>Branchiostegus auratus</i>	D	6	3.5±0.50	0.79	0.151	0.048
		<i>Decapterus maruadsi</i>	RA	8	3.4±0.47			
		<i>Evynnis cardinalis</i>	RA	15	3.3±0.40			
		<i>Johnius belangerii</i>	BK; D	50	3.3±0.33			
		<i>Konosirus punctatus</i>	BK; PN	12	2.9±0.25			
		<i>Mene maculata</i>	RA; BK	9	3.5±0.41			
		<i>Nemipterus virgatus</i>	D	6	4.0±0.59	0.94	0.274	0.158
		<i>Polydactylus sextarius</i>	BK; D	12	3.8±0.57			
		<i>Sargocentron caudimaculatum</i>	RA	9	3.9±0.67			
		<i>Siganus canaliculatus</i>	RA; BK	21	2.8±0.34			
		<i>Terapon theraps</i>	RA; BK	11	3.5±0.47			
		<i>Amblyglyphidodon curacao</i>	RA; D	1	2.6±0.1			
		<i>Caesio caerulea</i>	RA	1	3.4±0.45			
		<i>Chaetodon rafflesii</i>	RA; BK	1	4.3±0.0			
		<i>Gnathodentex aureolineatus</i>	RA	1	3.7±0.57			
		<i>Zanclus cornutus</i>	RA; BP	1	2.5±0.00			
		<i>Gnathodentex aureolineatus</i>	RA	2	3.7±0.58			
		<i>Cephalopholis spiloparaea</i>	RA	1	4.0±0.7			
		<i>Parapercis pacifica</i>	BP	1	3.6±0.4			
NWPO	Oh (2010)	<i>Sebastes schlegeli</i>	D	17	4.1±0.6	1.80	0.017	0.009
		<i>Konosirus punctatus</i>	BK; PN	12	2.9±0.26			0.004
		<i>Lateolabrax japonicus</i>	RA; BK	5	3.1±0.4			
		<i>Agrammus agrammus</i> *3	D	1	3.3±0.2		0.027	
		<i>Mugil cephalus</i>	BP; BK	9	2.5±0.19	1.06	0.010	0.010
		<i>Acanthogobius hasta</i>	BK; D	10	3.8±0.6	6.35	0.035	0.005

*1: 四筆魚資採樣數皆僅有一筆，加上極限體長、理論出生體長等常數的不足，故此四筆資料不採用。

*2: Zhu(2013)中的 *Iniistius venrens* 僅提及體長，fishbase 無收錄足夠的常數提供年齡換算，此資料不採用。

*3: Oh(2010)中的 *Agrammus agrammus* 僅提及體長，fishbase 無收錄足夠的常數提供年齡換算，此資料不採用。

AO 大西洋區域								
position	author	Species	living habits	N	Trophic level	Age (yr)	THg	MAR
W_SAO	Bauer (2021)	<i>Cynoscion guatucupa</i>	BP	30	3.7±0.60	2.64	0.054±0.024	0.020
		<i>Cynoscion jamaicensis</i>	D	30	3.8±0.66	1.74	0.049±0.046	0.028
		<i>Percophis brasiliensis</i>	D	34	4.2±0.56	2.53	0.083±0.087	0.033
		<i>Priacanthus arenatus</i>	RA	30	4.0±0.0	0.63	0.027±0.011	0.043
	Ferreria (2015)	<i>Micropogonias furnieri</i>	B; D	32	3.1±0.1	3.66	0.110±0.052	0.030
		<i>Trichiurus lepturus</i>	BP	33	4.4±0.4	3.41	0.075±0.028	0.022
	Galavo (2021)	<i>Epinephelus marginatus</i>	RA	9	4.4±0.0	11.48	0.55	0.048
		<i>Epinephelus nigritus</i>	D	8	4.0±0.61	6.50	0.675	0.104
		<i>Pseudopercis numida</i>	D	17	3.9±0.5	5.69	0.4	0.070
	Luciano et al (2021)	<i>Orthopristis ruber</i> ^{*1}	B; D	34	3.6±0.2	0.82	0.034±10.9	0.043
		<i>Orthopristis ruber</i> ^{*1}	B; D	22	3.6±0.2			
		<i>Orthopristis ruber</i> ^{*1}	B; D	20	3.6±0.2		-	
		<i>Orthopristis ruber</i> ^{*1}	B; D	20	3.6±0.2		-	
		<i>Orthopristis ruber</i> ^{*1}	B; D	12	3.6±0.2		15.6±8.7	
		<i>Orthopristis ruber</i> ^{*1}	B; D	90	3.6±0.2		60±10	
		<i>Orthopristis ruber</i> ^{*1}	B; D	88	3.6±0.2		60±10	
		<i>Orthopristis ruber</i> ^{*1}	B; D	2	3.6±0.2		50±20	
	Niencheski (2001)	<i>Micropogonias furnieri</i>	B; D	15	3.1±0.1	2.25	0.09	0.041
W_NAO	Burger (2011)	<i>Cynoscion regalis</i>	B; D	60	3.8±0.2		0.15±0.01	
		<i>Menticirrhus americanus</i>	B	23	3.5±0.0	2.74	0.17±0.08	0.062
		<i>Menticirrhus saxatilis</i>	D	72	3.6±0.5	1.49	0.15±0.18	0.101
		<i>Micropogonias undulatus</i>	B	63	4.0±0.50	4.09	0.12±0.07	0.029
		<i>Molva molva</i>	D	39	4.4±0.2	1.16	0.04±0.01	0.034
		<i>Morone saxatilis</i>	B; D	178	4.7 ±0.2		0.39±0.02	
		<i>Paralichthys dentatus</i>	BK; D	260	4.5±0.3	3.83	0.14±0.08	0.037
		<i>Pseudopleuronectes americanus</i>	D	58	3.6±0.1	6.58	0.06±0.03	0.009
		<i>Scophthalmus aquosus</i>	B	48	3.7±0.2	4.15	0.18±0.10	0.043
		<i>Stenotomus chrysops</i>	D	27	3.8±0.1	3.59	0.09±0.08	0.025
	Harding et al (2018)	<i>Gadus morhua</i>	B; BP	19	4.1±0.2	2.7	0.035±0.016	0.013
		<i>Melanogrammus aeglefinus</i>	D	25	4.0±0.1	3.3	0.033±0.012	0.010
		<i>Pollachius virens</i>	D	10	4.3±0.4	1.6	0.019±0.007	0.012
		<i>Tautoglabrus adspersus</i>	RA	9	3.7±0.2	5.7	0.080±0.028	0.014
		<i>Urophycis tenuis</i>	D	10	4.3 ±0.5	4.7	0.029±0.006	0.006
	Huge (2014)	<i>Sciaenops ocellatus</i>	B; D	10	3.7±0.57	1.94	0.5	0.258
	Luciano et al (2021)	<i>Orthopristis chrysoptera</i> ^{*2}	B; D	1	3.4±0.0			
		<i>Orthopristis chrysoptera</i> ^{*2}	B; D	3	3.4±0.0			
		<i>Orthopristis chrysoptera</i> ^{*2}	B; D	6	3.4±0.0			

		<i>Orthopristis chrysoptera</i> ^{*2}	B; D	151	3.4±0.0			
		<i>Orthopristis chrysoptera</i> ^{*2}	B; D	56	3.4±0.0			
Payne	Paralichthys dentatus	BK; D	115	4.5±0.3	3.20	0.1	0.031	
(2010)	Pseudopleuronectes americanus	D	122	3.6±0.1	2.40	0.029	0.012	
Sinkus et	Caulolatilus microps	D	62	3.8±0.5	15.2	0.38±0.17	0.025	
al (2017)	Lutjanus campechanus	RA	116	3.9±0.72	4.00	0.18	0.045	
	Mycteroperca microlepis	RA; B	97	3.7±0.4	3.30	0.2	0.061	
	Serioli dumerili	RA	42	4.5±0.1	5.80	0.45	0.078	
Staudinger	Lophius americanus	D	36	4.5±0.3	2.7	0.115±0.101	0.043	
(2011)	Merluccius bilinearis	D	24	4.5±0.4	2.4	0.052±0.051	0.021	
	Paralichthys dentatus	BK; D	34	4.5±0.3	3.2	0.136±0.072	0.042	
	Pomatomus saltatrix	B; PO	21	4.5±0.3	3.4	0.473±0.284	0.128	
SE_NAO	Le Croizier	Boops boops	D	5	2.8±0.0	4.26	0.14	0.005
	et al (2019)	Chelidonichthys gabonensis	D	5	3.7±0.2	2.44	0.37	0.025
		Dentex canariensis	D	5	3.6±0.59	1.25	0.24	0.021
		Dicologlossa hexophthalma	D	5	3.4±0.4	5.26	0.42	0.017
		Galeoides decadactylus	B; D	5	3.6±0.67	0.61	0.08	0.016
		Merluccius senegalensis	D	5	4.5±0.80	2.81	0.22	0.012
		Plectorhinchus mediterraneus	D	5	3.5±0.52	2.40	0.27	0.030
		Pseudupeneus prayensis	D	10	3.6±0.50	1.81	0.21	0.033
		Pterothrissus belloci	D	5	3.0±0.17	3.30	0.08	0.024
		Selene dorsalis	D	5	4.1±0.69	1.42	0.23	0.030
		Umbrina canariensis	D	5	3.4±0.44	1.44	0.09	0.009
N_NAO	Magalhaes	Conger conger	D	39	4.3±0.4	9.50	1.86±0.19	0.196
	(2007)	Lepidopus caudatus	BP	55	3.8±0.3	3.39	1.44±0.12	0.425
		Mora moro	BP	42	3.8±0.55	11.26	3.70±0.37	0.328
		Pagellus acarne	BP	24	3.8±0.0	3.85	0.92±0.1	0.239
		Phycis blennoides	BP	17	3.7±0.66	8.58	0.69±0.05	0.080
		Phycis phycis	BP	56	4.3±0.3	5.46	0.59±0.05	0.108
		Polyprion americanus	D	14	4.1±0.64	10.8	1.23±0.23	0.114
		Trachurus picturatus	BP	48	3.3±0.42	6.31	0.72±0.08	0.114
NE_NAO	Mille	Merluccius merluccius	D	32	4.4±0.0	5.06	0.268±0.155	0.053
	(2021)	Mullus surmuletus	D	17	3.5±0.3	6.19	0.338±0.101	0.055
		Solea solea	B; D	41	3.2±0.1	5.44	0.118±0.064	0.022
	Nicolaus	Leucoraja fullonica	BD	24	3.5±0.37	3.7	0.133±0.136	0.036
	(2020)							

*1: Luciano et al. (2021) 中出現多筆相同魚種(*Orthopristis ruber*)之資料，但在不同範圍海域捕獲，故魚資分開紀錄。

*2 Luciano et al. (2021) 中出現多筆相同魚種(*Orthopristis chrysoptera*)之資料，但在不同範圍海域捕獲，故魚資分開紀錄。

position	author	Species	living habits	N	Trophic level	Age (yr)	THg	MAR
C_MS	Bonsignore et al. (2013)	Diplodus annularis	BK; BP	5	3.6±0.0	2.17	0.731±0.188	0.200
		Pagellus erythrinus	BP	8	3.5±0.1	2.96	0.367±0.087	0.119
		Trachurus trachurus	PN	4	3.7±0.0	0.39	0.102±0.144	0.115
		Sardina pilchardus	BK; PN	5	3.1±0.1	2.11	0.086±0.019	0.026
		Engraulis encrasicolus	BK; PN	4	3.1±0.36	1.83	0.058±0.018	0.031
		Boops boops	D	20	2.8±0.0	1.37	0.120±0.049	0.087
		Diplodus vulgaris	BP	3	3.5±0.1	2.30	0.643	0.279
		Sphyaena sphyaena	PN	1	4.0±0.51	-	2.269	-
		Caranx rhonchus	BK; BP	1	3.6±0.59	4.10	1.701	0.415
		Pagellus acarne	BP	12	3.8±0.0	2.28	0.254	0.111
		Pagellus bogaraveo	BP	2	4.2±0.6	1.50	0.266	0.177
		Serranus scriba	D	2	3.8±0.3	-	2.165±0.044	-
		Mullus barbatus	D	4	3.1±0.1	5.62	0.815±0.777	0.145
		Mullus surmuletus	D	2	3.5±0.3	8.48	0.662±0.089	0.078
		Scorpaena scrofa	BK; D	4	4.3±0.5	-	1.082	
		Scorpaena notata	D	5	3.7±0.2	-	1.340±0.380	-
		Illex coindetii	查無	6	-	-	-	-
		Sepia officinalis	頭足類	3	-	-	-	-
		Octopus vulgaris	章魚	8	-	-	-	-
		Murena helena	RA	1	4.2±0.61	-	-	-
	Juresa & Blanus	Merluccius merccius	D	13	4.4±0.0	3.58	0.41±0.20	0.120
	Storelli (1985)	Merluccius merluccius	D	23	4.4±0.0	0.9	0.19±0.12	0.049
		Merluccius merluccius	D	16	4.4±0.0	1.4	0.09±0.07	0.186
		Mullus barbatus	D	9	3.1±0.1	2.4	0.46±0.51	0.191
		Mullus barbatus	D	12	3.1±0.1	4.4	0.39±0.42	0.090
	Graci et al (2016)	Conger conger	D	6	4.3±0.4	2.52	0.02021	0.008
		Loligo vulgaris	查無	7	-	-	0.00934	-
Merluccius merluccius		D	15	4.4±0.0	1.26	0.00841	0.007	
Mullus barbatus		D	17	3.1±0.1	2.27	0.00921	0.004	
Sardina pilchardus		BK; PN	12	3.1±0.1	1.81	0.00541	0.003	
Scomber scombrus		BK; PN	6	3.6±0.2	1.79	0.00848	0.005	
Todarodes sagittatus		查無	8	-	-	0.00942		
Trachurus trachurus	PN	9	3.7±0.0	2.36	0.02217	0.009		
W_MS	Capelliet al. (2004)	Nephrops norvegicus	蝦子	190	-	-	-	-
		Engraulis encrasicolus	BK; PN	70	3.1±0.36	-	-	-
		Mullus barbatus	D	78	3.1±0.1	2.13	0.200	0.094
		Mullus surmuletus	D	47	3.5±0.3	2.99	0.210	0.070
		Merluccius merluccius	D	58	4.4±0.0	2.21	0.160	0.073
		Sarda sarda	BK; PN	90	4.5±0.0	-	-	-

	Merciai et al. (1980)	Diplodus sargus	BK; D	81	3.4±0.1	-	-	-
	Casadevall et al. (1979)	Diplodus sargus	BK; D	39	3.4±0.1	-	-	-
E_MS	Harakeh (1985)	Boops boops	D	16	2.8±0.0	2.47	0.036±0.025	0.015
		Holocentrum rubrum	RA	2	3.6±0.3	-	0.039±0.011	-
		Lithognathus mormyrus	BK; D	7	3.5±0.39	0.41	0.032±0.028	
		Merluccius merluccius	D	29	4.4±0.0	1.58	0.044±0.027	0.028
		Mugil cephalus	BP; BK	24	2.5±0.17	1.38	0.049±0.022	-
		Mullus barbatus	D	30	3.1±0.1	2.61	0.054±0.025	0.021
		Pagellus acarne	BP	15	3.8±0.0	2.97	0.032±0.014	0.011
		Pagellus erythrinus	BP	28	3.5 ±0.1	1.84	0.042±0.023	1.843
		Sardina pilchardus	BK; PN	7	3.1±0.1	-	0.033±0.016	-
		Siganus rivulatus	RA; BK	43	2.0±0.0	-	0.028±0.018	-
		Sparisoma cretense	RA	40	2.9±0.27	1.48	0.040±0.028	1.477
		Trachurus trachurus	PN	16	3.7±0.0	1.61	0.045±0.019	0.028
		Xyrichtys novacula	RA	9	3.5±0.1	2.42	0.051±0.022	0.021
	Hornung (1980)	Saurida undosquamis	RA	62	4.5±0.4	-	-	-
		Merluccius merluccius	D	3	4.4±0.0	1.93	0.112	0.058
		Trachurus mediterraneus	BK; PN	11	3.8±0.3	-	0.106	
		Mullus barbatus	D	50	3.1±0.1	6.18	0.128	0.021
		Mullus surmuletus	D	-	3.5±0.3	3.80	-	-
		Upeneus moluccensis	RA; BK	39	3.6±0.3	-	-	-
		Boops boops	D	1	2.8±0.0	3.81	0.04	0.010
		Pagellus acarne	BP	2	3.8±0.0	-	-	-
		Pagellus erythrinus	BP	48	3.5±0.1	-	-	-
		Sphyaena chrysotaenia	PN	3	3.9±0.7	-	-	-
		Sphyaena sphyraena	PN	5	4.0±0.51	-	-	-
		Chelidonichthys lucernus	D	-	4.0±0.0	-	0.086	-
CW_MS	Stoeppler (1979)	Mytilus galloprovincialis	貽貝	-	-	-	-	-
		Sepia officinalis	頭足類	-	-	-	-	-
		Mullus barbatus	D	14	3.1±0.1	2.05	0.226	0.110
		Mullus barbatus	D	14	3.1±0.1	4.36	0.246	0.056
		Boops boops	D	2	2.8±0.0	2.11	0.19	0.090
		Merluccius merluccius	D	3	4.4±0.0	2.46	0.11	0.045
		Scomber scombrus	BK; PN	3	3.6±0.2	2.11	0.15	-
CPO	Peterson	Makaira mazara	PO	27	-	-	4.78	-
WNAO	(1973)	Tetrapturus albidus	PO	1	-	-	1.34	-
EPO		Squalus acanthias	PO	206	-	-	0.1-1.96	-

【評語】180025

本件作品作者應用大量文獻收集，整理出全球海洋底棲魚類的汞調查樣本，共計 1343 尾魚樣本，非常不容易。文獻收集完整，具有成熟的科學訓練。研究討論中，引用溫鹽環流、湧升流、風向、火山活動、採礦活動、各國排放統計數據，討論可能原因，結論清楚呈現研究探討的發現，具良好邏輯探索能力。由於樣本是收集來自於各種研究發表文獻，無法主動的進行研究變項的控制。應依據不同的限制，再進一步設計分析的內容。