

# 中華民國第 62 屆中小學科學展覽會 作品說明書

---

高級中等學校組 地球與行星科學科

第一名

051908

探討不同型態的海底峽谷對底棲動物群聚結構  
的影響

學校名稱：臺北市立第一女子高級中學

作者： 高二 柯絲昀	指導老師： 林郁梅 蘇南州
---------------	---------------------

關鍵詞：臺灣西南海域、海底峽谷、環境因子

# 得獎感言

## 追尋深海中的驚奇

### 意料之外的旅程

如果用一句話囊括這段研究歷程，「生命充滿美好意外」顯得無比貼切。兩年前老師在課堂中介紹了中山大學所舉辦的海洋研究競賽，秉著對海研船的好奇，我躍躍欲試的開始尋覓研究題目，並決定以海底峽谷為題進行探究。

研究過程中，從規劃研究路徑、研擬實驗方法、海研船上的任務執行都讓我深深體會到自然環境的變化多端，也因此格外珍視得來不易的研究機會。原以為這段獨特的研究歷程會在海洋研究競賽完結後劃上句號，但一次偶然的機會讓我踏上科展的旅程，並最終走到全國科展。

科學探究的過程並非一帆風順的，這段時間裡，我遭遇過各式各樣的挫折與困境，也意識到自己的渺小與不足，卻從未質疑自己做研究的目的。科學探究是一個追尋的過程，在沒有標準答案的未知領域，一切都充滿不確定性，但驚奇也無處不在，每一次小發現帶來的驚喜感，都會成為繼續探究的原動力。

除了追尋新發現以外，科學探究也是一個自我追尋的過程，追尋自己的熱忱、激發自己的潛力。那些曾經以為「不可能的任務」，最終在不懈的嘗試之下也能迎刃而解，這樣的經驗使我能更坦然面對未來的諸多挑戰，也期勉自己能夠保有探索未知的初心與堅持。

### 致謝

我想感謝中山大學海科系用心推廣的海洋研究競賽，提供我參與海洋研究的機會，並啟發我對海洋研究的興趣。感謝中山大學海科院張詠斌教授、新海研三號船員與技術員的協助與支持，讓我能順利完成出海採樣。

同時，萬分感謝臺大海洋研究所魏志瀕教授的指點與研究資料的提供，讓我能順利完成這件作品。感謝健翔學長一路以來悉心回覆問題、在我遭遇瓶頸時給予幫助與鼓勵，使我受益匪淺。感謝研究助理妍莉姐姐及實驗室學長姐在研究過程中的幫助與指導。在海研所的時光使我在各方面都有所成長，也留下許多快樂的回憶，再次致上最誠摯的感激。

謝謝南州老師，向我介紹了這個研究計畫。謝謝北一女中地科郁梅老師，願意給我參加校內科展的機會，讓我能一路走到現在。最後，謝謝始終支持我的家人，雖然是自己一個人做研究，但家人的陪伴讓我不曾感到孤獨。

回顧這段研究歷程，受到了許多人的熱情協助。沒有他們，我也無法完成這件作品，在此將這份成果獻給大家。



## 摘要

深海複雜多變的環境因子塑造了多樣的生態棲地，海底峽谷便是其中之一。全球 9000 個海底峽谷涵蓋了大陸斜坡總面積的 11.2% (Harris et al., 2014)，其中有 6 個峽谷分佈在臺灣西南海域。由於海底峽谷型態多樣、地理特性各異，本研究結合作者出海採得的樣本與國內海洋研究所的採樣資料，對西南海域高屏與枋寮峽谷的底棲動物群聚結構進行探究。

本研究應用生態統計分析兩峽谷與大陸斜坡的環境與生物群聚差異，發現除了海底峽谷環境有別於周遭斜坡外，兩型態不同的海底峽谷亦具有顯著的環境與生物群聚差異。食物量與環境擾動強度對兩峽谷間的生物群聚差異貢獻最大，其對應的環境因子（有機碳含量與透光度）有潛力作為未來區分具有不同生態結構的峽谷的主要依據。

## 壹、前言

### 一、研究動機

在構思參與國內某海洋研究競賽的出海提案過程中，我注意到臺灣西南海域是臺灣周遭海底峽谷的主要分佈區域之一，且擁有不同型態的海底峽谷。但過去許多前人研究多聚焦於海底峽谷的型態與沉積物運輸機制，對於峽谷內部生物群聚結構研究則較有限。在查閱文獻時更一步發現曾有學者指出海底峽谷內生物密度與多樣性均顯著高於周遭大陸斜坡，因此激起了我的好奇，環境因子是如何形塑海底峽谷中的生物群聚結構？不同峽谷間的環境差異對峽谷中的生物有何影響？以及是否可以從環境因子即區分出不同峽谷的棲地潛力？

### 二、前人研究回顧

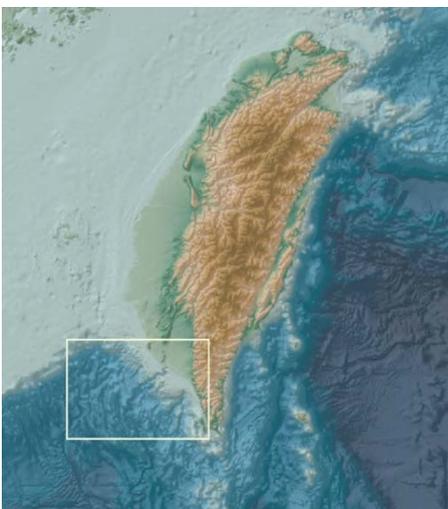
海底峽谷為大陸邊緣上常見的地質構造，其陡峭多變的地形不僅影響海流模式與沉積物的運輸，也為生物提供了多樣的棲地。目前全球約有 9000 個已發現的海底峽谷，其中有 6 個分佈於臺灣西南海域。許多前人研究 (Gunton et al., 2015; Wei et al., 2012; McClain and Barry, 2010; Robertson et al., 2020) 皆曾指出海底峽谷內生物密度與多樣性均顯著高於周遭大陸斜坡，Fernandez-Arcaya et al. (2017) 在其針對海底峽谷的文獻綜述中更總結了海底峽谷作為「區域性海洋生態多樣性的來源之一」的特性。由於生物種類繁多，本研究選擇大型底棲動物 (benthic macrofauna; >300 um) 作為研究對象。大型底棲動物多位於海底沉積物的表層，不僅構成海洋食物鏈的基礎，也對海洋碳氮硫循環、沉積物性質、污染物的代謝、次級生產等皆有所影響 (Snelgrove, 1998)。Stratmann et al. (2020) 更指出底棲動物具有生態系統工程師 (ecosystem engineer) 的特性，能調節其周遭環境並透過直接或間接的方式影響其他生物可利用的資源。此研究中，我想瞭解不同海底峽谷對各種環境因子的影響，以及大型底棲動物對環境因子變化的反應。

### 三、研究區域

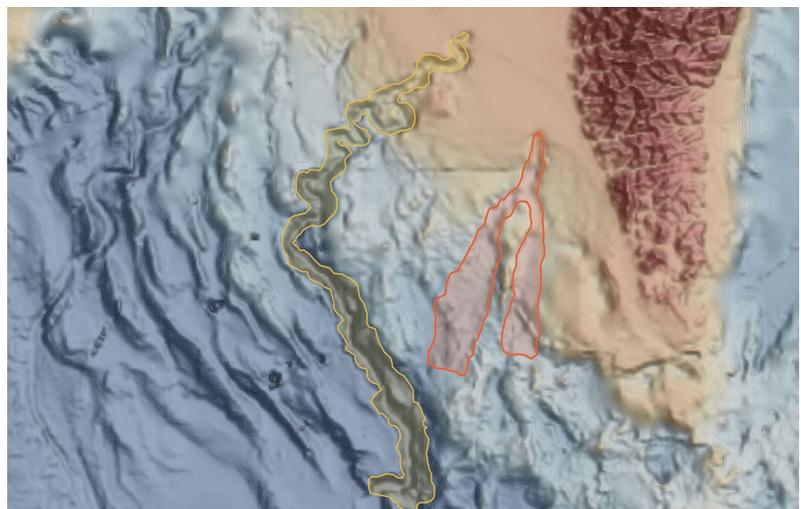
全球的 9000 個海底峽谷中，有 6 個分佈在臺灣西南海域，本研究聚焦於其中的高屏峽谷與枋寮峽谷。現行的峽谷分類系統 (Harris and Whiteway, 2011) 以峽谷源頭與大陸棚的相對位置將全球海底峽谷分為三種類型，而高屏與枋寮在此分類系統即為不同類型的峽谷 (Chiang et al., 2020)。

現行分類中，源頭連接陸地溪流系統的海底峽谷最為少見(僅佔所有海底峽谷的 2.6%)，其餘峽谷的源頭則皆嵌入大陸棚或侷限於大陸斜坡上。本研究中的高屏峽谷便是全球少數源頭連接陸地溪流系統的峽谷之一。高屏峽谷向上連接高屏溪流系統，高屏溪除了向高屏峽谷穩定輸入大量的陸源沉積物外，也使高屏峽谷擁有強烈而頻繁的濁流擾動。同時，高屏峽谷向下連接作為全球內潮主要生成地的呂宋海峽及恆春海脊 (Lynch, 2004)，這使高屏峽谷內部具有強烈內潮擾動，其高能量環境也使其成為「自然環境擾動」的重點研究區域 (Azpiroz-Zabala et al., 2017)。

枋寮峽谷雖然在演化初期與高屏峽谷型態相似，但因缺乏與陸上河流的連接，枋寮峽谷的陸源沉積物量相對有限，因此最終演化成源頭嵌入大陸棚的型態 (Chiang et al., 2020)。現階段仍缺乏枋寮峽谷內部的海流擾動觀測，前人研究 (Hale et al., 2012) 指出枋寮峽谷內部濁流擾動亦明顯弱於高屏峽谷。整體而言，高屏與枋寮兩峽谷在沉積物來源、沉積物輸入量、海流及濁流擾動強度等面向都有明顯的差異，本研究遂以高屏峽谷與枋寮峽谷(兩峽谷位置見圖一)為研究對象，探討同一海域中兩型態差異明顯的海底峽谷間的各環境因子差異及其對生物群聚結構的影響。



圖一、研究海域概覽  
(GEBCO 2021)



圖二、臺灣西南海域高屏峽谷(黃)與枋寮峽谷(橘)，  
圖為本研究以 QGIS 繪製。

#### 四、研究目的

- 一、透過水文及沉積物特性討論海底峽谷與大陸斜坡的環境差異，並以地形特性輔助討論高屏與枋寮峽谷的環境差異。
- 二、分別從生物密度與生物組成兩個面向討論高屏與枋寮峽谷的生物群聚結構差異。
- 三、討論各環境因子與高屏峽谷與枋寮峽谷間生物群聚結構差異的關聯性。

## 貳、研究器材及設備

#### 一、研究材料

##### (一) The General Bathymetric Chart of the Oceans (GEBCO) 2021 version

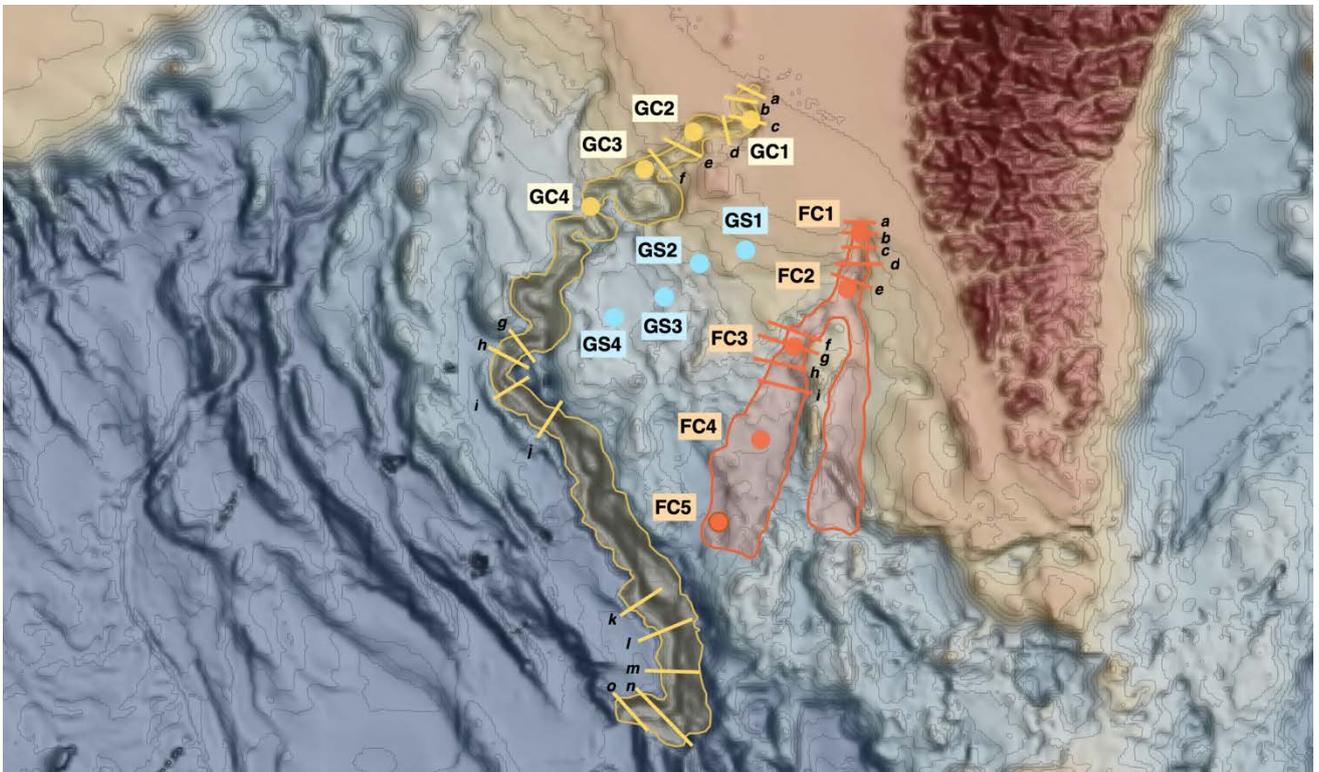
GEBCO (通用大洋水深圖) 為國際海道測量組織 (International Hydrographic Organization) 架設的海底地形資料數據庫，提供全球範圍的水深網格資料。

##### (二) 研究船採樣

我參加國內海洋研究計畫競賽並獲得出海採樣機會，於高屏峽谷與鄰近高雄港的斜坡進行採樣，本研究使用其中於高屏峽谷的採樣資料 (GC2A，表一)。

##### (三) 海洋研究所生物採樣資料

此資料為國內海洋研究所於 2015 到 2021 年間反覆至臺灣西南海域進行生物採樣的資料，每個測站 (測站位置見圖三與表一) 皆有水文及沉積物資料。



圖三、採樣測站標示。其中 GC 為高屏峽谷，GS 為大陸斜坡，FC 為枋寮峽谷，英文字母為地形剖面代號。

表一、測站資料。航次代碼 NOR3\_0068 為本研究自行採集，OR1 為某海洋研究所資料。

區域	環境類型	航次	測站	深度 (m)	日期	
高屏	峽谷	NOR3_0068	GC2A	220	2021-10-17	
			OR1_1126	GC1	318	2015-11-20
				GC2	487	2015-11-20
				GC3	655	2015-11-21
				GC4	1065	2015-11-21
枋寮	峽谷	OR1_1190	FC1	379	2018-03-30	
			FC2	664	2018-03-30	
			FC2A	682	2018-03-31	
			FC3	835	2018-04-01	
			FC4	962	2018-03-29	
			FC5	1106	2018-03-28	
高屏	斜坡	OR1_1126	GS1	277	2015-11-19	
			GS2	463	2015-11-19	
			GS3	690	2015-11-20	
			GS4	848	2015-11-21	

## 二、數據紀錄與分析

(一) R 語言 (R) 4.1.2 與 R Studio。

後續生態統計分析 (詳見研究過程與方法) 皆為本研究透過 R 語言撰寫完成。

(二) Microsoft Excel。

用於實驗過程中的原始資料記錄、分析時的原始資料處理與地形剖面繪圖。

(三) Quantum GIS (QGIS) 3.22.1 地理資訊系統。

用於兩峽谷地形剖面的擷取與地圖的繪製。

## 三、研究設備

(一) 底泥樣本採集

1. Shipek Grab Sampler 沉積物採樣器 (Wildco@860-A10)。

Shipek 採樣器可用於採集海底表層沉積物，採樣面積為 0.3 m<sup>2</sup>。

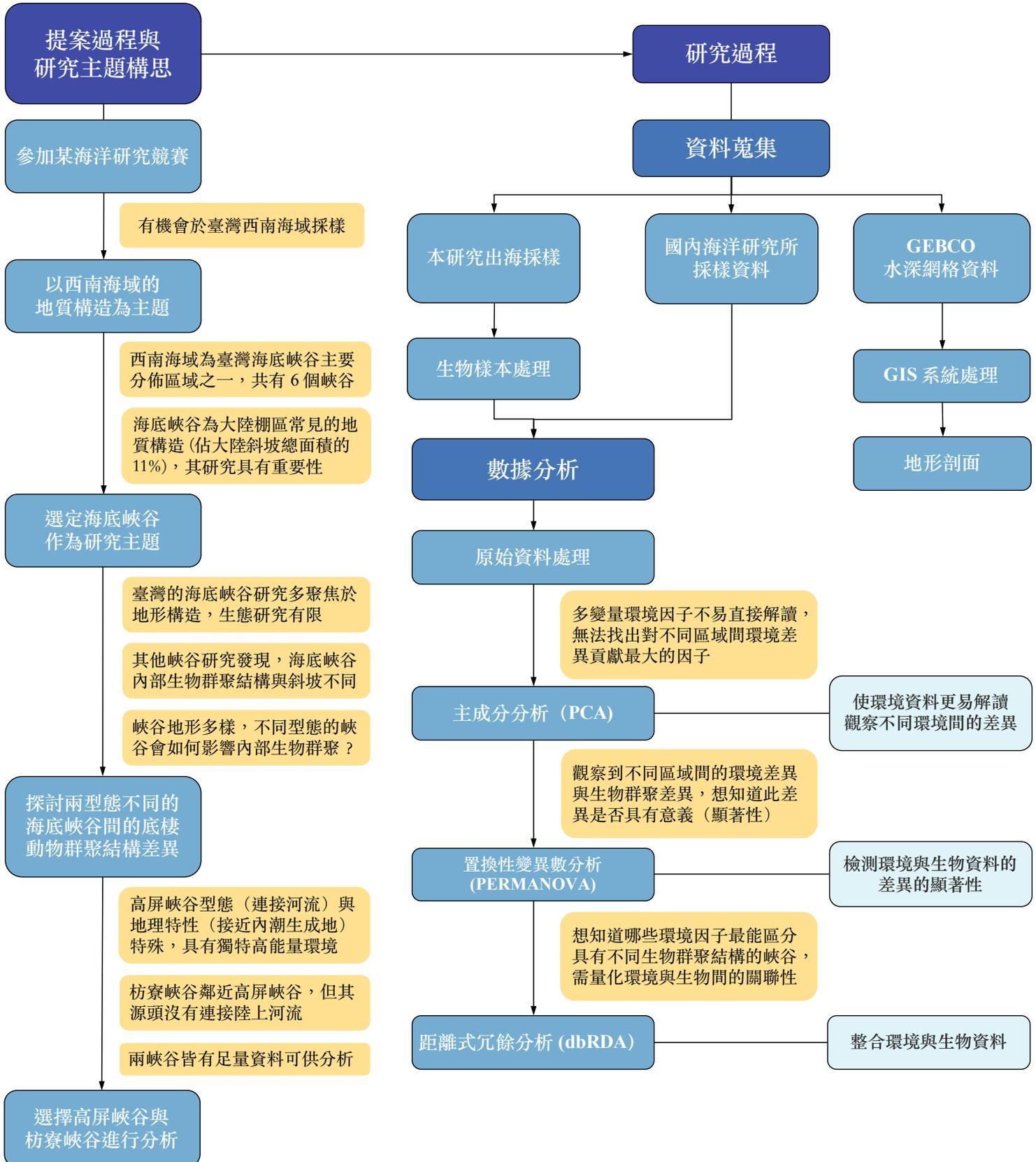
(二) 生物樣本處理

1. 器材：解剖顯微鏡 (Olympus@SZ61; 0.67–4.5X)、濾水壺、樣本瓶、試管架、鑷子、培養皿、297 μm 篩網、塑膠瓶、燒杯、勺子。

2. 藥品：酒精 (95%)、福馬林 (5%)、Rose Bengal 染劑。

## 參、研究過程與方法

本研究源於國內海洋研究競賽，並以此為主軸確立研究主題後便進行了資料蒐集與數據分析，主題構思流程與研究流程簡明呈現於圖四。



圖四、主題構思與研究過程流程圖。

## 一、樣本採集與處理

### (一) 研究船作業

1. 研究船抵達預定採樣點後，以單音束水深測量儀量測並記錄該點水深。
2. 確認站點無誤後，下放 Shipek 沉積物採樣器。
3. 採樣期間利用濾水壺（5  $\mu\text{m}$  濾芯）過濾海水中的雜質與浮游生物。
4. 利用過濾後的海水對福馬林進行稀釋，最終使福馬林濃度為 5%（圖六）。
5. 取得沉積物後，將其浸泡於福馬林中，並裝入塑膠瓶密封（圖六）。



圖五、本研究出海採樣（作者攝）。



圖六、船上底泥樣本處理（步驟 4、5）。

### (二) 實驗室作業 (Danovaro et al., 2009)

1. 以 297  $\mu\text{m}$  篩網過濾樣本（大型底棲動物 > 300  $\mu\text{m}$ ）。
2. 過濾後，將樣本浸泡於含有 Rose Bengal 染劑 ( $5\text{gL}^{-1}$ ) 的福馬林 (5%) 中，生物組織會被染成桃紅色以方便辨識，染色後以乙醇 (95%) 浸泡。
3. 樣本置於培養皿中以解剖顯微鏡進行分類群鑑定、長寬比測量與計數（圖七）。
4. 利用鑷子將觀察完畢的生物依分類群裝入樣本瓶，樣本瓶中加入乙醇。



圖七、解剖顯微鏡下的底棲動物。左圖為多毛類 (Polychaeta)，右圖為線蟲 (Nematoda)。

## 二、數據分析

本研究先個別討論了不同區域間的環境差異與生物群聚結構差異，最後再將兩者結合討論。本研究分析了各採樣點的九個環境因子與二十一種底棲動物分類群的密度資料，經過原始資料處理後，透過主成分分析適度簡化多變量資料以利解讀與繪圖，再透過 PERMANOVA 顯著性檢定檢測不同區域間環境與生物群聚差異的顯著性，最後透過距離式冗餘分析將環境與生物資料結合討論。本研究的數據統計皆由作者使用 R 語言撰寫程式完成。

### (一) 資料前置作業

#### 1. 環境資料

包含 9 個環境因子，分別為黏土 (Clay; %)、粉沙 (Silt; %)、沙粒 (Sand; %)、總有機碳 (Total Organic Carbon; %)、碳氮比 (CN ratio)、鹽度 (Salinity; psu)、溶氧量 (Dissolved Oxygen; mg/L)、溫度 (Temperature; °C) 與透光度 (Light transmission; %)。為了使上述資料符合常態分佈以適用後續分析方式，所有環境皆經過  $\log(1+x)$  轉換與標準化。(Greenacre and Primicerio, 2013)。

#### 2. 生物資料

將生物數量資料轉換為生物密度，生物組成資料經過四次方根轉換，以使稀有物種在後續計算中的比重提升。為同時考量「物種出現與否 (presence / absence)」及「各物種數量 (abundance)」，並避免兩樣本因多筆生物類群數量皆為零而被認定為「相異度低」(Ricotta and Podani, 2017)，本研究採用布雷—柯蒂斯相異度 (Bray-Curtis Dissimilarity) 計算採樣點之間的生物組成相異程度。

假設兩採樣面積相同的樣本分別為  $i$  及  $i'$ ，其中  $n_{i+}$  與  $n_{i'+}$  分別代表  $i$  及  $i'$  的生物總數， $j$  代表分類群 (即  $j = 1$  為第一個類群、 $j = 2$  為第二個...，共有  $J$  個類群)，兩樣本間生物組成的布雷—柯蒂斯相異度  $b_{ii'}$  為：

$$b_{ii'} = \frac{\sum_{j=1}^J |n_{ij} - n_{i'j}|}{n_{i+} + n_{i'+}}$$

若兩個測站的生物組成完全相同 ( $n_{ij} = n_{i'j}$  恆成立)，則  $b_{ii'} = 0$ 。反之，若生物組成完全不同 ( $n_{ij} > 0$  時  $n_{i'j} = 0$ )，則  $b_{ii'} = 1$ 。

## (二) 主成分分析 (Principal Component Analysis; PCA)

本研究欲歸納出不同區域間「環境差異」的來源，但由於環境資料包含了九個環境因子，因此無法直接進行解讀與製圖，為了降低解讀資料的難度，並量化各環境因子對不同區域間環境差異的貢獻，本研究對環境資料進行主成分分析 (Gunton et al., 2015; Donadi et al., 2015; Liao et al., 2017)。

主成分分析能在降低資料維度的同時，保留最多的資訊，並透過一系列特徵向量 (eigenvector) 的線性組合找出多變量資料中的主要變異量來源。本研究可藉此找出對不同區域間（如峽谷與斜坡、不同深度區間等）環境差異貢獻最大的環境因子。

## (三) 置換性變異數分析 (Permutational Analysis of Variance; PERMANOVA)

收集數據並簡略觀察後，發現不同測站間的環境因子資料與各生物分類群密度資料存在數值上的差異。然而，僅通過「觀察」無法得知這些數值差異是否具有顯著性。因此，本研究進行了 PERMANOVA 分析 (De Leo et al., 2014; Leduc, 2014; Donadi et al., 2015; Anderson, 2017; Liao et al., 2017; Robertson et al., 2020)。

PERMANOVA 為 ANOVA (Analysis of Variance) 的延伸，因為本研究生物組成資料以布雷-柯蒂斯相異度呈現，所以選擇進行 PERMANOVA 顯著性檢定，檢定  $p$  值  $< 0.05$  則可確定組間具顯著差異。

## (四) 距離式冗餘分析 (distance-based Redundancy Analysis; dbRDA)

此研究的最終目的是要討論兩型態相異的峽谷中的不同生物分類群與各種環境因子的分析，即需找出數個依變量（二十一種生物分類群）與數個預測因子（九個環境因子）之間的關係，因依變量與預測因子皆不只一個，所以使用冗餘分析 (Redundancy Analysis; RDA)。但因生物組成資料以布雷-柯蒂斯相異度呈現（不符合歐幾里德距離公設），因此需先以主座標分析 (Principal Coordinate Analysis; PCoA) 處理，PCoA 與 PCA 相似，皆可將資料維度降低，其中 PCoA 能同時將生物組成相異度資料轉換為歐幾里德座標，此後再與環境資料合併進行冗餘分析。統計學上，先以 PCoA 將資料座標化再進行冗餘分析的數據分析方式統稱距離式冗餘分析 (Anderson, 2008)。

### 三、地形資料處理與 GIS 系統的應用

本研究的環境因子中，並沒有海流擾動資料。然而討論兩峽谷的環境差異時，其內部環境擾動也是一關鍵因子。Chiou et al. (2011) 曾提出一高屏峽谷的內潮擾動模型，可作為計算底流流速的依據，但因本研究無法在枋寮峽谷內取得相同的海流資料，所以最終未將流速資料納入環境資料中。De Leo et al. (2014) 認為，地形剖面型態可作為環境擾動的間接證據，谷底剖面愈趨近 V 型，則底流產生的擾動愈強烈。基於此，本研究改用地形剖面作為間接推測擾動強度的依據，輔助後續研究結果的討論，但由於未能確定地形是否直接影響生物特性，或僅間接影響上述環境因子，所以本研究暫未將地形剖面量化納入數據分析。

本研究將 GEBCO 大洋通用水深圖的網格資料匯入 QGIS 地理資訊系統，進行山體投影、上色、等深線繪製等處理後，描繪出高屏與枋寮兩峽谷的區域，並分別從枋寮峽谷上下游、高屏峽谷上中下游擷取了數個地形剖面（編號對應圖三橫線）。

## 肆、研究結果

### 一、不同區域間的环境差異

本研究將各測站 9 個環境因子以歐幾里德距離 (Euclidean Distance) 進行 PERMANOVA 檢定後 (表二)，發現不同環境 (峽谷與斜坡) ( $pseudo-F=4.05, p=0.01$ )、不同地點 (即高屏峽谷、枋寮峽谷與大陸斜坡) ( $pseudo-F=2.86, p=0.04$ ) 及不同深度之間 ( $pseudo-F=2.88, p=0.02$ ) 的環境差異皆顯著。

表二、高屏峽谷、枋寮峽谷與大陸斜坡所有測站綜合各環境因子進行 PERMANOVA 檢定。表中 pseudo-F 值愈大則 p 值愈小， $p < 0.05$  代表顯著差異。

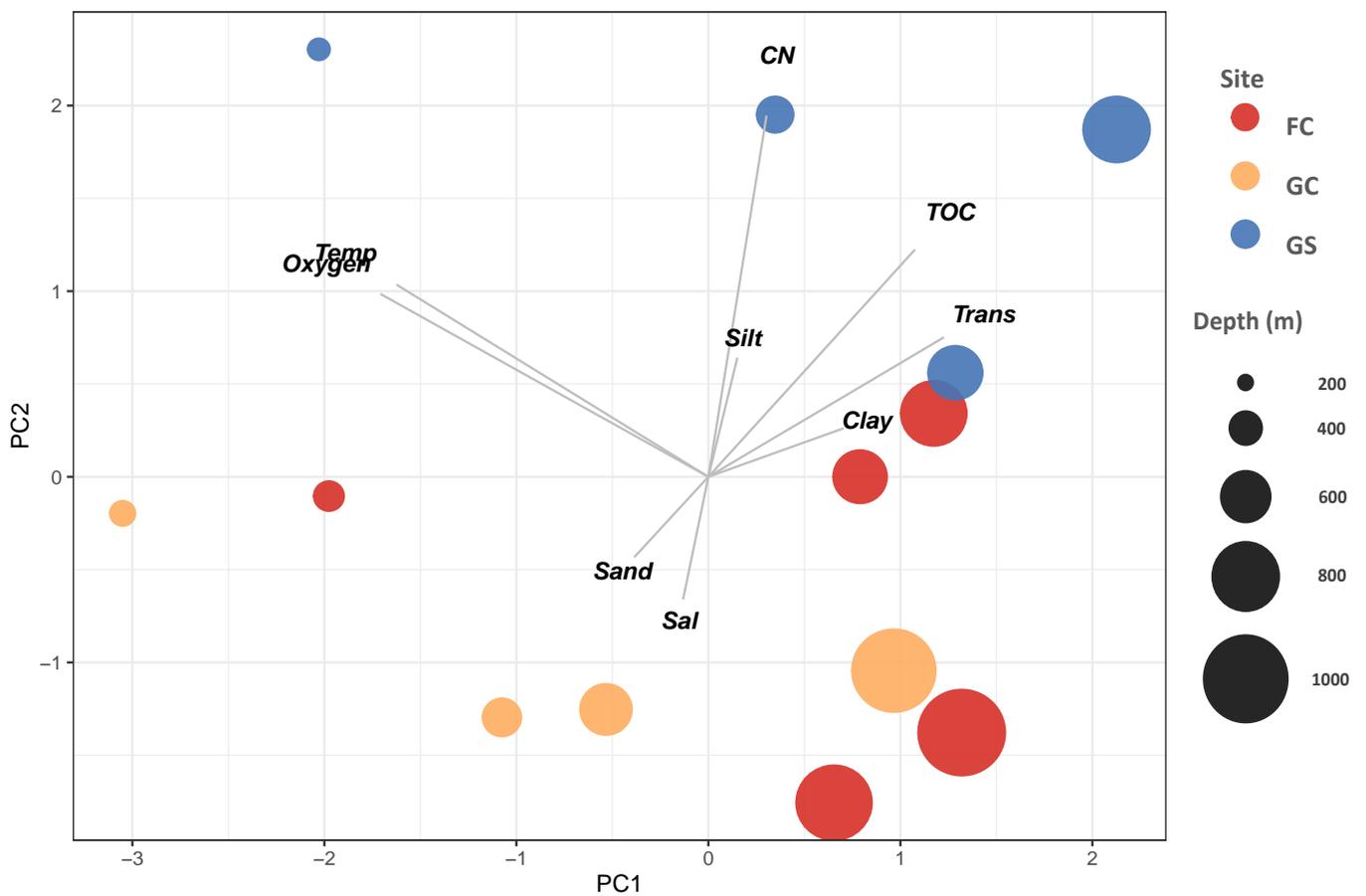
Source	離均差平方和 SS	均方和 MS	$R^2$	pseudo-F	P
環境 (habitat)	18.205	18.205	0.19773	4.0546	<b>0.0130</b>
地點 (site)	12.852	12.852	0.13959	2.8623	<b>0.0420</b>
深度 (depth)	38.803	12.9342	0.42146	2.8807	<b>0.0215</b>

由於表二的 PERMANOVA 檢定包含三個測站資料，為進一步確認高屏與枋寮兩型態不同的峽谷間的差異是否亦顯著，本研究單獨針對兩峽谷資料進行 PERMANOVA 檢定 (表三)。不同深度間 (不考慮採樣地點) 的環境差異不顯著 ( $F=1.77, p=0.137 > 0.05$ )，然兩峽谷之間的環境差異仍具顯著性 ( $F=2.86, p=0.034$ )。

表三、兩峽谷間綜合各環境因子進行 PERMANOVA 檢定。表中 pseudo-F 值愈大則 p 值愈小， $p < 0.05$  代表顯著差異。

Source	離均差平方和 SS	均方和 MS	$R^2$	pseudo-F	P
深度 (depth)	23.810	7.9366	0.45071	1.76763	0.137
地點 (site)	12.852	12.852	0.24327	2.86230	<b>0.034</b>

為了進一步釐清不同區域間環境差異的來源，本研究使用主成分分析簡化環境資料並找出對環境差異貢獻最大的環境因子，並將主成分分析結果呈現於圖八。



圖八、以主成分分析呈現兩峽谷與大陸斜坡之間的环境差異，此圖由作者以 R 語言繪製。圖中橫軸（主成分 1；PC1）與縱軸（主成分 2；PC2）皆為 9 個環境因子的線性組合。灰色線段為各環境因子的特徵向量，其投影於軸上的向量長度表示各環境因子對該軸（主成分）的貢獻度。環境因子為黏土 (Clay; %)、粉沙 (Silt; %)、沙粒 (Sand; %)、有機碳含量 (TOC; %)、碳氮比 (CN)、鹽度 (Sal; psu)、溶氧量 (Oxygen; mg/L)、溫度 (Temp; °C) 與透光度 (Trans; %)。資料點大小代表採樣點深度，以紅色代表枋寮峽谷、淡橘代表高屏峽谷、藍色代表斜坡。兩資料點相距愈遠，兩採樣點間的整體環境差異（綜合所有環境因子的差異）愈大。

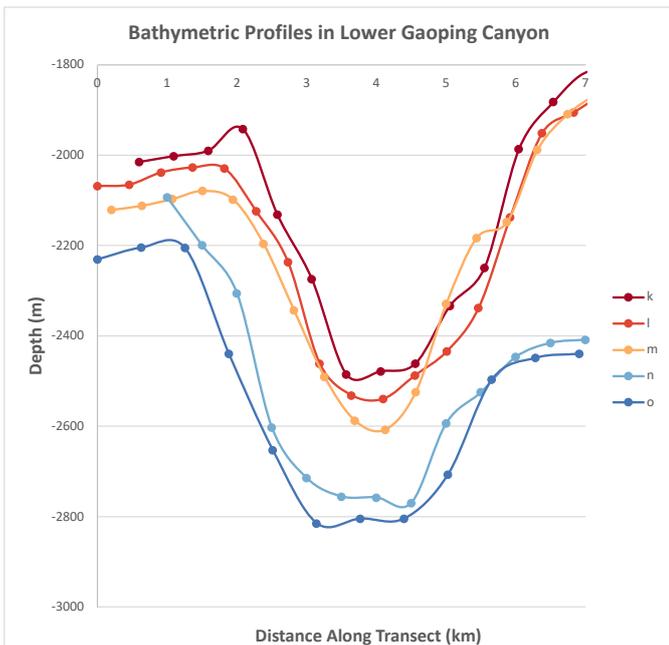
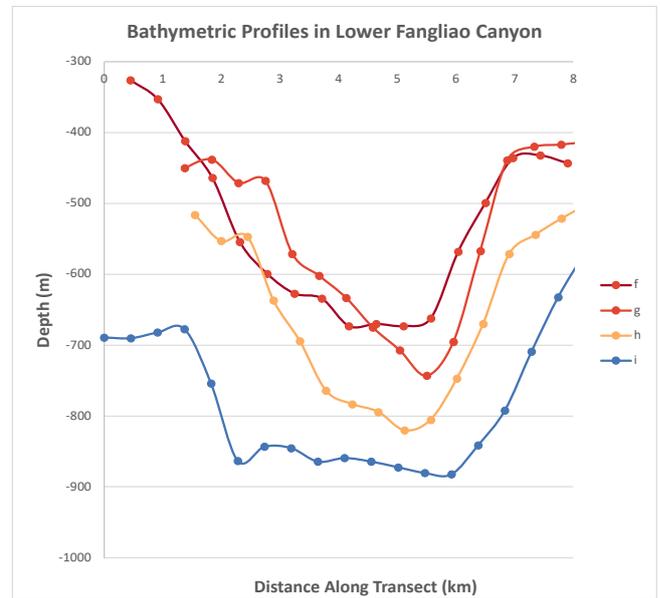
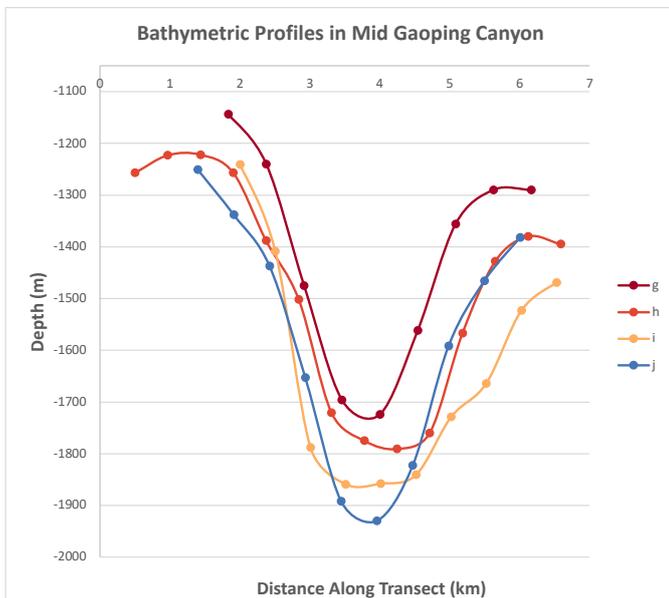
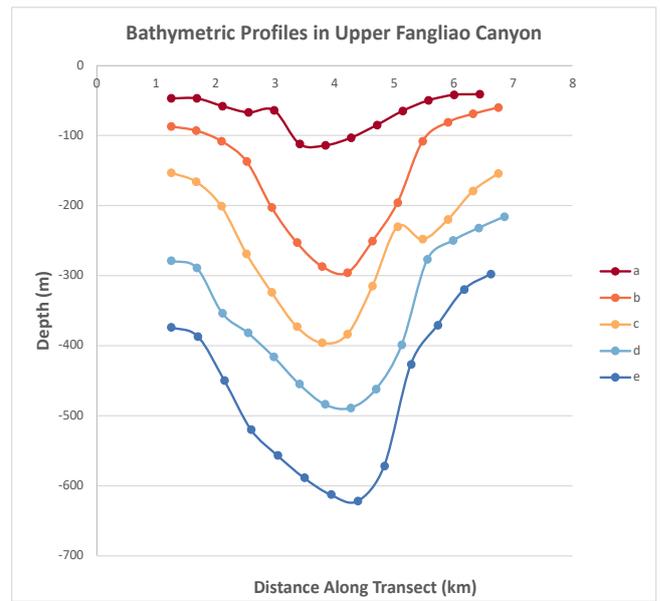
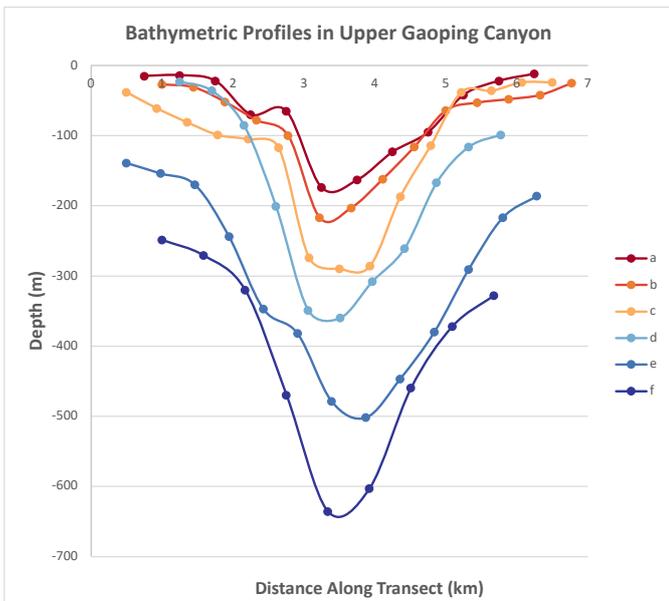
圖中 PC1 可表達 32.8% 的總變異量，PC2 則為 26.4%，因此，此 PCA 分析圖能詮釋總環境變異量的 59.2%。其中，溫度 (*Temp*)、溶氧量 (*Oxygen*)、有機碳含量 (*TOC*) 與透光度 (*Trans*) 對 PC1 貢獻較大。碳氮比 (*CN*) 與有機碳含量 (*TOC*) 對 PC2 的貢獻較大。

圖中可見，較大的資料點多趨向 PC1 正向，故 PC1 主要反映不同深度間的環境差異。圖中溶氧量 (*Oxygen*) 與溫度 (*Temp*) 皆對 PC1 有負向影響（其特徵向量向 PC1 負向延伸），代表溶氧量愈多、溫度愈高的資料點會愈趨向 PC1 負向，對應 PC1 負向皆集中較小的資料點（深度較淺），可知溶氧量與溫度皆由淺到深遞減。有機碳含量對 PC1 有正向影響，對應 PC1 集中較大的資料點，可知有機碳含量隨深度由淺到深遞增。

由 PCA 圖也可觀察到，枋寮峽谷除靠近源頭的測站外，幾乎所有資料點都分佈於 PC1 軸上 0.5 至 1.5 的區間內，峽谷內部的環境特性隨深度的變化較不明顯。反之，高屏峽谷於 PC1 上的分佈較廣，峽谷內部環境隨深度變化較明顯，推測可能是兩峽谷內部物理性擾動強度差異所造成。

由於無法取得兩峽谷內部的底流資料，本研究以峽谷中的地形剖面作為環境擾動的間接證據。De Leo et al. (2014) 認為峽谷剖面可作為判斷峽谷內部流場型態的依據，其中谷底剖面愈趨近 V 型，則底流產生的擾動愈強烈。本研究擷取高屏峽谷上、中、下游（圖九、十、十一）與枋寮峽谷上、下游（圖十二、十三）剖面（剖面代號對應位置見圖三）進行討論。

兩峽谷中，愈趨向下游，谷底剖面的 U 型特徵愈明顯，顯示兩峽谷源頭處底流擾動最強烈，愈往下游，底流擾動愈微弱。對比高屏與枋寮兩峽谷的剖面顯示，高屏峽谷上游（圖九）與中游（圖十）谷底 V 型特徵明顯，至峽谷下游（圖十一）才逐漸以 U 型谷為主，呼應前人研究 (Wang et al., 2008; Liu et al., 2010; Chiou et al., 2011) 中「高屏峽谷內部具強烈擾動」的研究結果。對比之下，枋寮峽谷上游谷壁雖較自身下游陡峭，但 V 型特徵已不明顯，較接近 U 形。枋寮峽谷下游則有明顯 U 型特徵。由此顯示，兩峽谷中擾動強度皆隨深度遞減，其中高屏峽谷的擾動較強烈。本研究的高屏峽谷內的採樣資料僅包括上中游（下游因水深太深，採樣難度高，因此現階段無可用資料），因此所分析的生物樣本受較強烈的環境擾動影響。枋寮峽谷的資料則上中下游皆有（圖三）。



圖九、(左上) 高屏峽谷上游地形剖面。  
 圖十、(左中) 高屏峽谷中游地形剖面。  
 圖十一、(左下) 高屏峽谷下游地形剖面。  
 圖十二、(右上) 枋寮峽谷上游地形剖面。  
 圖十三、(右中) 枋寮峽谷下游地形剖面。

上圖中，橫軸為沿剖面起始點的距離 (km)，  
 縱軸為水深 (m)，剖面位置詳見 (圖三)。  
 地形網格資料來自 GEBCO 並以 QGIS 處理。

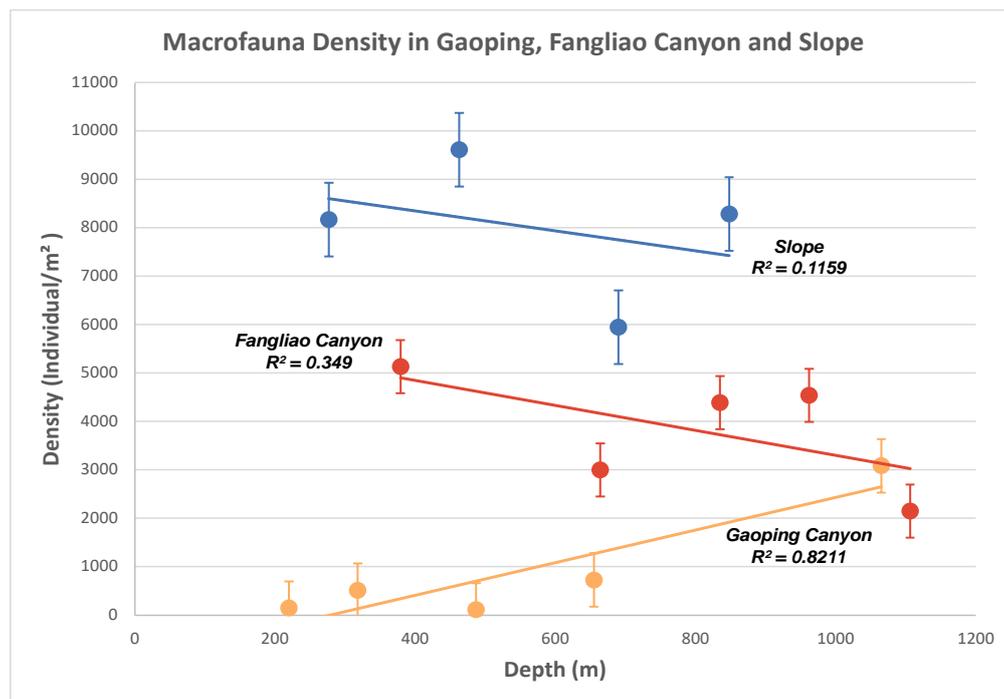
## 二、不同區域間的生物群聚結構差異

根據檢定結果（表四），就生物密度而言，不同環境（即峽谷與斜坡）間 ( $F=20.0980$ ,  $p=0.00854$ )與不同地點（即高屏峽谷、枋寮峽谷與大陸斜坡）之間的差異皆顯著 ( $F=11.8733$ ,  $p=0.02609$ )。不同深度（不考慮採樣點）間則沒有顯著的生物密度差異 ( $p=0.05453 > 0.05$ )。

表四、高屏峽谷、枋寮峽谷與大陸斜坡所有測站生物密度的 PERMANOVA 顯著性檢定。表中 pseudo-F 值愈大則 p 值愈小， $p < 0.05$  代表顯著差異。

Source	離均差平方和 SS	均方和 MS	$R^2$	pseudo-F	P
環境 (habitat)	0.56587	0.56587	0.27960	20.0980	<b>0.00854</b>
深度 (depth)	0.59917	0.19972	0.29606	7.0936	0.05453
地點 (site)	0.33430	0.33430	0.16518	11.8733	<b>0.02609</b>

為進一步觀察不同區域間的生物密度差異，本研究將各採樣區域之生物密度隨深度變化繪製如圖十四。圖中，枋寮峽谷與大陸斜坡的生物密度大致皆隨深度漸減，而高屏峽谷的生物密度卻隨深度漸增，兩者趨勢相反。其中，高屏峽谷中生物密度與深度的關聯性最高 ( $R^2 = 0.82$ )，顯示環境擾動對高屏峽谷的生物密度影響最大（水深愈深，距離源頭愈遠，環境擾動愈微弱）。圖十四顯示，斜坡的生物密度普遍最高，其次為枋寮，而高屏峽谷的生物密度最低。



圖十四、各採樣區域之生物密度隨深度變化趨勢線及  $R^2$  值。以紅色代表枋寮峽谷、黃色代表高屏峽谷、藍色代表大陸斜坡。

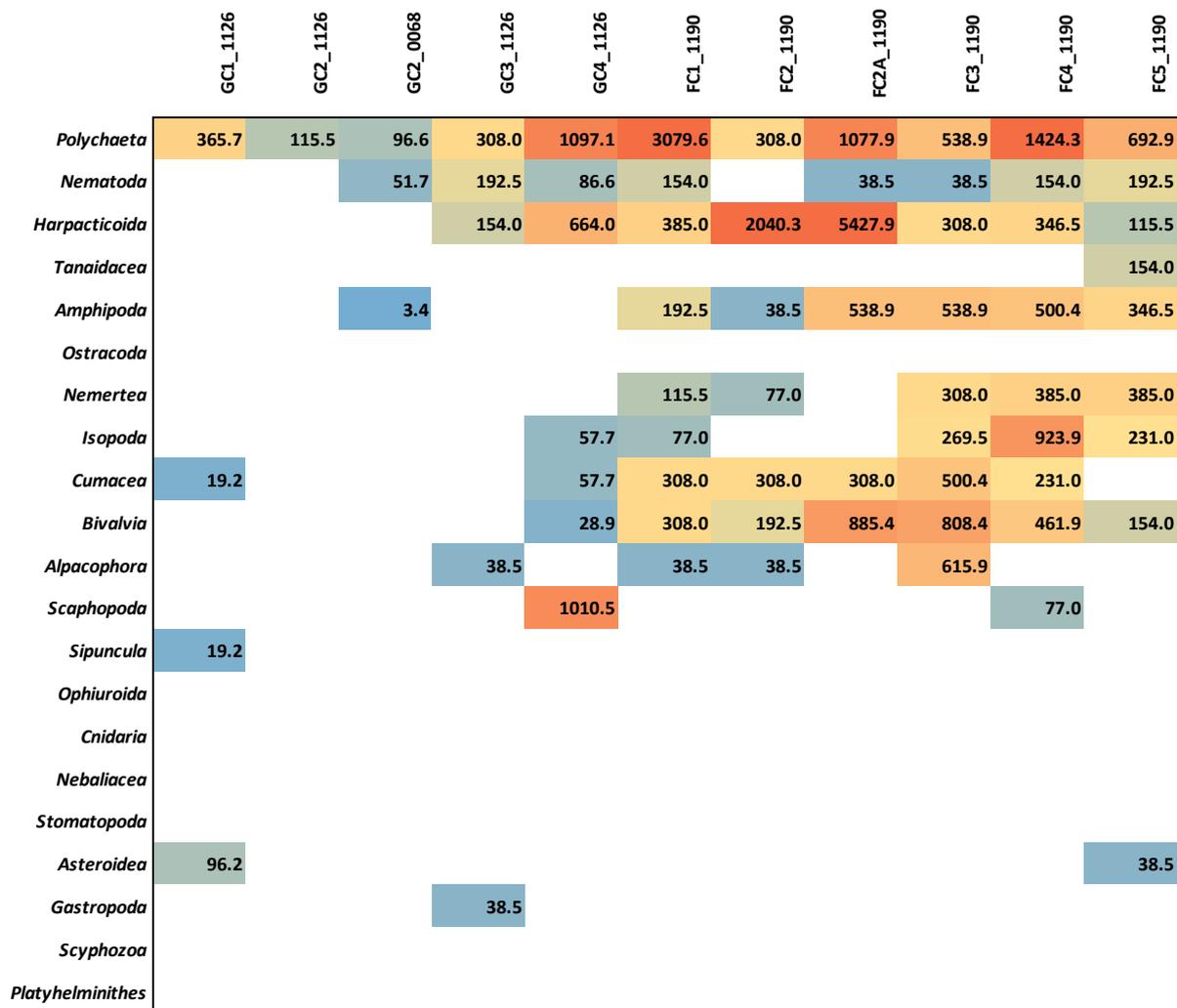
許多前人研究 (Liao et al., 2017; Robertson et al., 2020; De Leo et al., 2014; Leduc et al., 2014) 皆發現峽谷與斜坡間的生物組成有顯著的差異，且許多其他峽谷的生態研究皆發現海底峽谷是生物密度與多樣性的熱點 (De Leo et al., 2014; McClain and Barry, 2010; Robertson et al., 2020; Gunton et al., 2015; De Leo et al., 2010; Wei et al., 2012)，本研究則聚焦於兩型態不同的海底峽谷間的生物群聚差異，因此不另外進行峽谷與斜坡的生物組成討論。

過去許多底棲生物研究皆採用較細（如屬、種等）的分類階層 (De Leo et al., 2014; Leduc et al., 2014)，然 Liao et al. (2017) 認為臺灣西南海域的區域性生物組成變化於較高的分類階層（如門、綱、目等）便已明顯，本研究參考其底棲動物的分類方式。PERMANOVA 檢定（表五）顯示，不同深度間的生物組成 ( $F=4.1043$ ,  $p=0.01461$ ) 與兩峽谷的生物組成 ( $F=4.3917$ ,  $p=0.01061$ ) 皆有顯著差異。

表五、針對高屏峽谷與枋寮峽谷的生物組成進行 PERMANOVA 顯著性檢定。表中 pseudo-F 值愈大則 p 值愈小， $p < 0.05$  代表顯著差異。

Source	離均差平方和 SS	均方和 MS	$R^2$	pseudo-F	P
深度 (depth)	0.38674	0.38674	0.23836	4.1043	<b>0.01461</b>
地點 (site)	0.41382	0.41382	0.25505	4.3917	<b>0.01061</b>

本研究將高屏與枋寮峽谷中各測站樣本中的生物進行分類後繪製成熱圖（圖十五）。圖十五顯示，高屏峽谷測站 (GC) 中，生物分類群數目 (number of taxa) 與單一類群生物密度皆較枋寮峽谷 (FC) 低。其中紐形動物門 (Nemertea)、囊蝦總目 (Peracarid crustaceans) 中的端足目 (Amphipoda) 與等足目 (Isopoda) 及軟體動物 (Mollusks) 中的雙殼綱 (Bivalvia) 在高屏峽谷中數量幾乎為零，或只出現在深度較深（距源頭較遠）的採樣點，在枋寮峽谷中則較穩定存在。多毛類 (Polychaeta) 在所有採樣點都有發現，然在高屏峽谷中多毛類的數量仍較低。線蟲 (Nematoda) 在兩峽谷中皆較穩定存在（僅三個測站中數量為零），數量上的差距也較小，但整體數量較多毛類 (Polychaeta) 低，推測有可能是篩網尺寸選擇造成（線蟲體型普遍較小，大部分被歸類為小型底棲動物 meiofauna）。

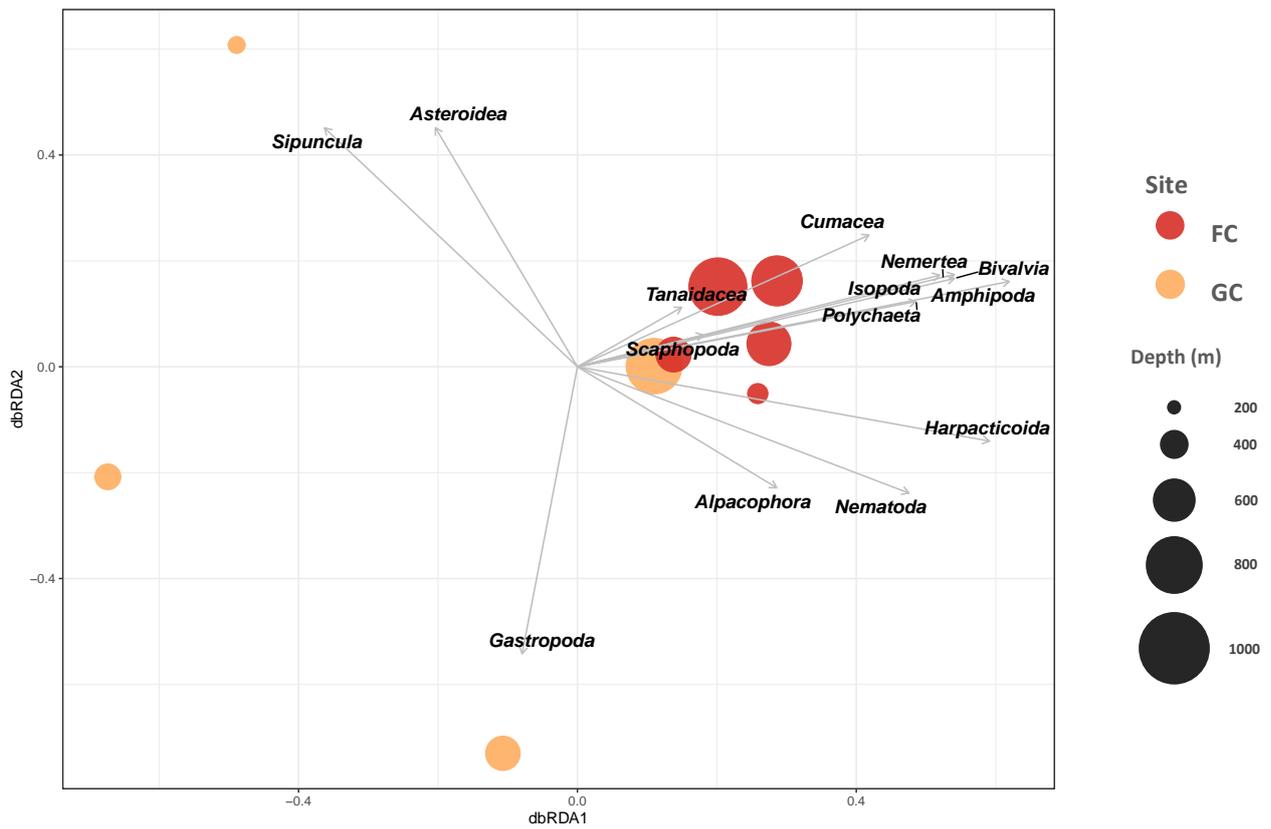


圖十五、各測站（橫軸）之生物組成（縱軸）圖。格中數字代表每平方公尺內的生物密度，空白處為 0。測站代號中，GC 為高屏峽谷，FC 為枋寮峽谷，數字為航次代號（表一）。

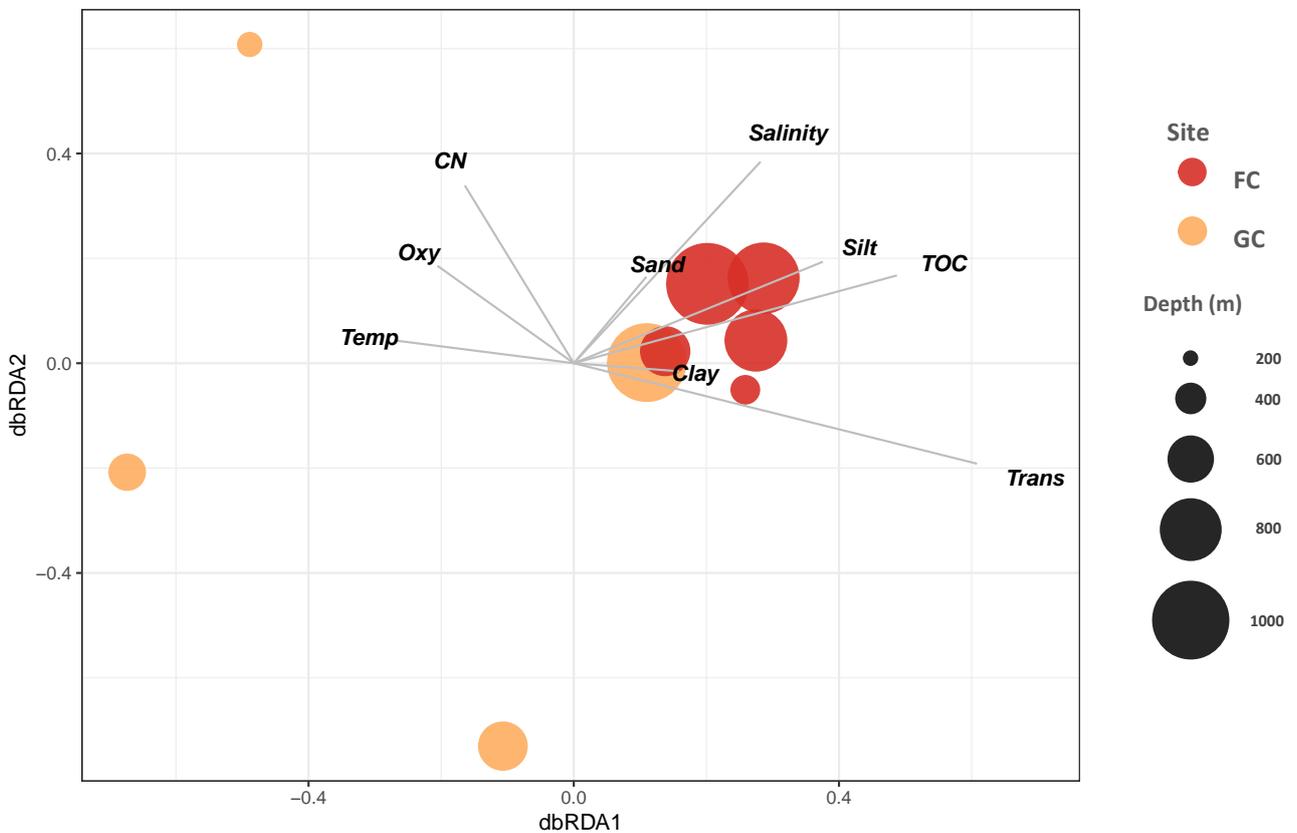
### 三、環境差異與生物群聚結構差異的綜合分析

本研究使用距離式冗餘分析討論兩峽谷的各環境因子對生物群聚結構的影響，先利用主座標分析將各生物分類群的密度資料降維為圖十六與圖十七中的兩軸（即橫軸 dbRDA1 與縱軸 dbRDA2），再以冗餘分析量化九個環境因子對兩峽谷間生物群聚結構差異的貢獻，並將其以環境因子特徵向量的形式呈現於圖十七。

橫軸 dbRDA1 表達總生物組成變異量的 73.8%，dbRDA2 則為 21.4%，圖十六能詮釋生物群聚資料總變異量的 95.2%。圖中，dbRDA1 反映兩個峽谷間的生物群聚差異（枋寮峽谷資料集中於 dbRDA1 正向，高屏峽谷資料則分散於 dbRDA1 負向），由高屏峽谷的資料點推測 dbRDA2 反映不同深度間的生物組成差異（深度較淺的高屏峽谷資料點位於 dbRDA2 正向），然此部分僅由三個資料點觀察，規律較不明確。



圖十六、兩峽谷生物組成與各生物分類群關係圖。資料點大小代表深度，紅色為枋寮峽谷，淡橘為高屏峽谷。灰色箭頭為各生物分類群之特徵向量，可分解成平行 dbRDA1 與 dbRDA2 的兩個子向量，分別表示分類群對兩軸的貢獻度。



圖十七、兩峽谷生物組成與環境因子關係圖。兩軸同圖十六。資料點大小代表深度，紅色為枋寮峽谷，淡橘為高屏峽谷。灰色箭頭為各環境因子之特徵向量，向量長度對應該因子對兩峽谷生物群聚結構差異的貢獻。

兩圖中，資料點間的距離可代表其生物組成的相異程度，枋寮峽谷的所有採樣點皆較集中，不同深度之間的生物組成相異度低，高屏峽谷中的資料點則較為分散，不同深度間的生物組成相異度較高。其中，高屏峽谷中深度最深的資料點與枋寮峽谷的資料點距離較近，推測高屏峽谷深度較深處的環境與枋寮峽谷較接近，也因此有較相似的生物組成。

由圖十六可見，dbRDA1 主要受紐形動物門 (Nemertea)、囊蝦總目 (Peracarid crustaceans) 中的端足目 (Amphipoda) 與等足目 (Isopoda)、軟體動物 (Mollusks) 中的雙殼綱 (Bivalvia) 與甲殼動物亞門中的猛水蚤目 (Harpacticoida) 影響，可見上述分類群為主要區分枋寮與高屏峽谷的依據，與圖十五呼應。

圖中，透光度 (*Trans*) 與有機碳含量 (*TOC*) 為對 dbRDA1 貢獻度最高的環境因子，推測也是主要造成兩峽谷生物組成差異的環境因子。鹽度 (*Salinity*) 與碳氮比 (*CN*) 則對 dbRDA2 的貢獻度較高。

圖十六與圖十七中，生物資料向量與環境資料向量的方向可判斷兩者間的關聯性正負，對比圖十六與圖十七可見，大部分分類群（除 Sipuncula, Gastropoda 與 Asteroidea 外）皆與有機碳量 (*TOC*) 與透光度 (*Trans*) 呈正相關（生物類群向量與 *TOC* 向量及 *Trans* 向量夾銳角）。

## 伍、討論

### 一、不同區域間的环境差異

此研究主要以水文與沉積物特性等 9 個環境因子分析兩峽谷差異，環境擾動 (environmental disturbances) 會影響數個不同的環境因子，如透光度、粒徑大小（黏土、粉沙、沙粒百分比）、沉積物來源（碳氮比）等，這些因子的變化也可作為衡量擾動強度的依據。

本研究主要透過地形剖面作為長期物理性擾動的間接證據。附錄一中的透光度隨深度變化圖亦可作為擾動的證據 (Liu et al., 2010)，峽谷內部物理性擾動使懸浮沉積物濃度 (suspended sediment concentration) 偏高時，往往會在水中形成透光度低的混濁層 (benthic nepheloid layer)。附錄一中，大陸斜坡與枋寮峽谷的透光度都幾乎不隨深度改變，然而高屏峽谷的透光度卻隨深度漸增，推測可能是源頭強烈擾動使大量沉積物懸浮進而導致透光度降低，隨深度增加，距離峽谷源頭愈遠，擾動愈微弱，懸浮沉積物濃度下降，使得透光度漸增。此現象與地形剖面變化呼應，皆代表枋寮峽谷的擾動較高屏微弱。

然而，上述觀察也僅能反映環境擾動的其中一個面向。Harris (2014) 曾針對「物理擾動」進行分類，其中「壓迫性擾動」(press disturbance) 為長期的連續性擾動（例如：持續長時間或季節性的濁流），「脈動性擾動」(pulse disturbance) 則為短期突發性擾動（例如：熱帶風暴）。此研究中，地形剖面較能反映持續性底流壓迫性擾動 (De Leo et al., 2010)，然而突發性事件（如地震、颱風）引發的脈動性擾動，如邊坡破壞 (slope failure)、谷壁坍塌 (slumps)、岩屑流 (debris flows)、濁流 (turbidity current) 等則較難納入考量。

由圖八與表二可知，峽谷與斜坡之間存在著顯著的環境差異，主要由碳氮比 (CN) 與有機碳含量 (TOC) 造成。圖八中，有機碳含量隨深度遞增，同時，大陸斜坡的黏土 (Clay) 與粉沙 (Silt) 百分比普遍較高，其中黏土百分比大致隨深度漸增。整體而言，斜坡的沉積物粒徑較小（沙粒百分比低），峽谷內部粒徑較小的沉積物多集中於距源頭較遠（深度較深）的區域。推測峽谷中的沉積物淘選作用 (sorting effects) 會於水深較淺處匯集粒徑較大、有機碳含量較低的沉積物，將有機碳侷限於距源頭較遠的區域 (Liao et al., 2017)。此規律與峽谷源頭擾動較強烈一致（圖九、十二），推測為擾動造成。

碳氮比可用於分析一區域的沉積物來源，陸生植物的碳氮比多為 12 以上，海生植物（如浮游藻類）的碳氮比則多介於 6 到 8 之間 (Lee et al., 2020)，圖八中可見，斜坡環境的 CN 較高，即大陸斜坡的陸源沉積物比例較峽谷環境高，不同深度間的 CN 變化則不明顯。

環境擾動為影響區域性生態變化的關鍵因素 (Harris, 2014)，除了直接影響生物群聚以外，也會間接影響沉積物分佈，進而影響生物的食物供應。高屏與枋寮峽谷的地形差異（例如：是否連接陸上溪流系統、峽谷壁陡峭程度、源頭距大陸遠近等）則為造成兩峽谷環境差異與生物群聚結構不同的主因。

## 二、不同區域間生物群聚結構差異

透過 PERMANOVA 檢定，本研究確定高屏峽谷、枋寮峽谷與大陸斜坡之間具有顯著的生物密度與組成差異，其中生物密度以大陸斜坡最高，高屏峽谷最低。圖十四的趨勢線顯示，枋寮峽谷內部的生物密度隨深度增加而遞減，此規律與多數峽谷相同 (De Leo et al., 2010)，推測為隨深度增加，沉降至海底的有機顆粒物 (phytodetritus) 減少 (Wei et al., 2010)。然高屏峽谷的生物密度則呈相反規律，推測高屏峽谷內部的擾動強度對生物密度的負面影響勝過有

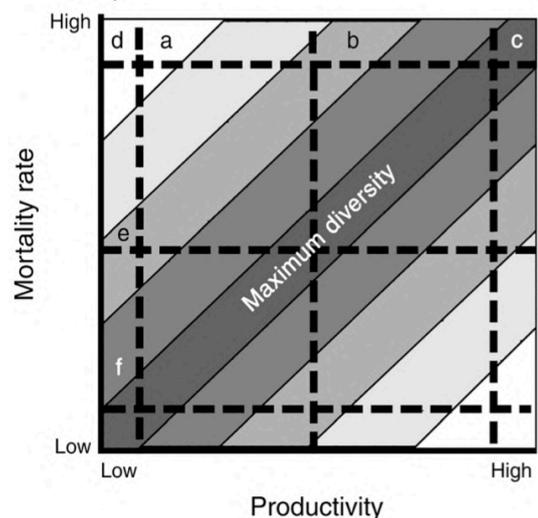
機物累積的正面影響，且高屏峽谷內強烈的擾動也可能將有機物帶至深海而難以在峽谷內累積 (Liao et al., 2017)。

兩峽谷的對比中，枋寮峽谷的生物組成明顯較高屏峽谷豐富，但與前人研究 (Liao et al., 2017) 對照後發現，有少數在斜坡中穩定存在的生物在枋寮峽谷中卻數量極低或為零，此結果與許多其他峽谷的研究結果相異，高屏與枋寮皆不是生物密度與多樣性的熱點。其中有機碳含量與透光度對生物組成的影響最明顯，推測有機碳含量對應食物量，透光度對應擾動強度。囊蝦總目在兩峽谷內的差異十分明顯，於枋寮峽谷內較能穩定存在。囊蝦總目為淺底棲性 (epibenthic) 生物，無法棲於底泥較深處減少受擾動的影響 (Aller, 1997)，因此對環境擾動的反應最為明顯，也成為區分兩峽谷的主要生物群。枋寮峽谷與大陸斜坡皆穩定有囊蝦總目存在，唯原足目 (Tanaidacea) 幾乎僅於斜坡上發現，推測枋寮峽谷內部仍有一定程度的環境擾動，可能為強度較弱的濁流與谷壁坍塌產生的局部性擾動 (Hale et al., 2012)。

### 三、環境差異與生物群聚結構差異的綜合討論

根據動態平衡理論 (Dynamic Equilibrium Model) (Huston, 2014)，環境擾動與生產力間的交互作用為形塑一區域生物群聚結構的主要因素，兩者達平衡時，該群聚的多樣性達最大值 (圖十八)。

圖十八中，縱軸以死亡率代表「會導致生物死亡的擾動」(mortality-causing disturbance)，橫軸則為生產力，本研究中以有機碳量 (levels of organic input) 衡量。高屏峽谷源頭的極端擾動環境對生物群聚的影響使其內部需有極高的生產力才能達到與斜坡環境相同的生物豐富度，然因其擾動產生的淘選作用又同時使有機碳含量高的沉積顆粒聚集於峽谷中下游，因此在峽谷上游所觀察到的生物組成較為單調。



圖十八、動態平衡理論(Huston, 2014)。

圖十六、十七顯示，高屏峽谷中距源頭較遠的測站 GC4 生物組成與枋寮峽谷相似，推測是因 GC4 的擾動較微弱，有機碳含量高的顆粒比例也較高，綜合使得其生物組成較為豐富，推測高屏峽谷深處的環境擾動與枋寮峽谷整體環境相似。

過去研究中，有連接陸上河流的海底峽谷 (Wei et al., 2012; De Leo et al., 2010) 常因大量的陸源有機物注入而成為生物密度與多樣性的熱點。若以動態平衡理論解釋，陸源有機物提高了生產力，而其他峽谷的擾動強度較高屏峽谷微弱，能較接近圖中的 *maximum diversity*。高屏峽谷地理上鄰近呂宋海峽 (Luzon strait) 及恆春海脊 (Hengchun Ridge)，此區域為全球海域中內潮 (*internal tides*) 的主要生成地之一 (Lynch et al., 2004)，峽谷狹窄的地形使內潮沿峽谷深泓線往峽谷源頭增強 (Wang et al., 2008; Liu et al., 2010; Chiou et al., 2011)。

本研究認為高屏峽谷的內潮擾動與較頻繁的突發性擾動（地震、降雨、颱風等）引發的濁流，使其擁有有別於其他峽谷的極端擾動環境，也造就其內部獨特的生物群聚。

枋寮峽谷的生物組成與高屏峽谷較深處相似，皆非生物密度與多樣性的熱點。就我們所知，目前仍未有關於枋寮峽谷底流型態的直接測量資料，但因枋寮峽谷內部生物密度仍由上游隨深度漸減，因此推測環境擾動並非主要影響枋寮生物群聚的因素。枋寮峽谷沉積物來源主要為季節性颱風 (Hale et al., 2012)，雖然峽谷內泥貫入體活動提高了其谷壁塌陷的頻率，但枋寮峽谷內部的沉積物量仍十分有限 (Chiang et al., 2020)。本研究認為枋寮峽谷內部擾動應不足以使其生物量低，推測枋寮峽谷內部生物群聚主要受食物量影響。

#### 四、研究的應用

本研究使用多變量統計方式 (*multivariate analysis*) 進行兩型態相異的海底峽谷間的環境與生物群聚探究。過去許多研究認為海底峽谷是深海的生物熱點，峽谷內部生物密度與多樣性皆高於周遭大陸斜坡區域，本研究卻發現不同型態的海底峽谷可能擁有截然不同的生物群聚結構，且並非所有海底峽谷都有「生物熱點」的特質。本研究發現如高屏峽谷般連接陸上溪流與內潮發源地的高能量峽谷內部的強烈擾動對生物群聚產生明顯的負面影響，直接（使生物無法穩定生存）與間接（影響食物分佈）的使得峽谷內部整體生物密度極低、組成亦單調。枋寮峽谷雖然沒有強烈的環境擾動，但卻因其源頭距陸地較遠，陸源沉積物的輸入量有限，而亦無生物熱點的特質。本研究認為，若欲針對峽谷環境內部的生物群聚結構進行分析，現行的峽谷分類方式可能無法適用（詳見未來展望），使用多變量環境因子的分析應能取得較準確的結果。環境因子的多變量分析可區隔出具有不同生態群聚的海底峽谷，在眾多環境因子中，本研究認為有機碳含量與透光度為兩個最適合用於生物群聚評估的環境因子。

本研究現階段僅分析了高屏與枋寮兩個海底峽谷，但採用的研究流程與數據分析架構亦可推廣為多個型態相異的峽谷或不同海域的峽谷間的統合分析，亦可納入更多環境因子或使用更細的生物分類方式進行分析，對於多變量環境因子與生物群聚結構間的關聯性研究具有參考價值。

## 五、未來展望

本研究討論了高屏與枋寮兩海底峽谷對生物群聚結構的影響。現行海底峽谷分類系統 (Harris and Whiteway, 2011) 將海底峽谷依源頭與大陸斜坡的相對位置分為三類，高屏連接陸上河流，枋寮嵌入大陸棚，兩者為不同類型的海底峽谷。然而，與其他研究對照對照後發現，此分類難應用於區分出生物群聚結構不同的峽谷。Huang et al. (2018), Pearman et al. (2020) 以 GIS 系統計算出的地質參數建構了用於評估海底峽谷棲地潛力的模型，綜合生物密度與多樣性評估一峽谷作為生物棲地的能力。本研究其實已完成兩峽谷地質參數的計算，未來可試將現有模型應用於臺灣西南海域的海底峽谷，並以高屏與枋寮峽谷的生物群聚進行驗證。棲地潛力的準確評估仍需經過許多其他採樣資料的驗證與修飾，未來有望應用於海洋保護區域的規劃與資源的妥善分配。

近年來氣候變遷加劇，生物群聚結構於極端環境下的變化也備受關注。全球 9000 個海底峽谷中，亦有其他具有強烈環境擾動的海底峽谷 (Azpiroz-Zabala et al., 2017)，部分已有相似的底棲動物研究。未來可將其資料與本研究資料結合進行統合分析 (meta-analysis)，討論極端擾動環境下底棲動物群聚結構變化。也可將「自然擾動環境」與「人為擾動」(如拖網捕撈、石油外洩等) 對底棲動物的影響進行詳細比較討論，以探討環境極端化與人為活動對深海生態系的影響。

## 陸、結論

- 一、峽谷與斜坡的環境差異顯著，高屏與枋寮兩個型態不同的峽谷的環境差異亦顯著。峽谷與斜坡的環境差異主要來自碳氮比與有機碳含量，兩峽谷的環境差異主要來自擾動強度的不同。
- 二、兩峽谷的生物群聚結構具有顯著差異且兩峽谷的生物密度隨深度變化的趨勢相反。高屏峽谷內部生物密度普遍低於枋寮峽谷，生物組成亦較單調。
- 三、環境擾動（對應透光度）與食物量（對應有機碳含量）是主要影響生物群聚結構的環境因子。其中，高屏峽谷主要受環境擾動影響，枋寮峽谷則受有限的食物量影響。

## 柒、參考文獻資料

- Aller, J. Y. (1997). Benthic community response to temporal and spatial gradients in physical disturbance within a deep-sea western boundary region. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 44(1), 39–69. [https://doi.org/10.1016/s0967-0637\(96\)00092-1](https://doi.org/10.1016/s0967-0637(96)00092-1)
- Anderson M.J., Gorley R.N. & Clarke K.R. 2008. *PERMANOVA+ for PRIMER: Guide to Software and Statistical Methods*. PRIMER-E: Plymouth, UK.
- Anderson, M. J. (2017). Permutational Multivariate Analysis of Variance (PERMANOVA). *Wiley StatsRef: Statistics Reference Online*, 1–15. <https://doi.org/10.1002/9781118445112.stat07841>
- Azpiroz-Zabala, M., Cartigny, M. J. B., Talling, P. J., Parsons, D. R., Sumner, E. J., Clare, M. A., Simmons, S. M., Cooper, C., & Pope, E. L. (2017). Newly recognized turbidity current structure can explain prolonged flushing of submarine canyons. *Science Advances*, 3(10), e1700200. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700200>
- Chiang, C.-S., Hsiung, K.-H., Yu, H.-S., & Chen, S.-C. (2020). Three types of modern submarine canyons on the tectonically active continental margin offshore southwestern Taiwan. *Marine Geophysical Research*, 41(1). <https://doi.org/10.1007/s11001-020-09403-z>
- Chiou, M.-D., Jan, S., Wang, J., Lien, R.-C., & Chien, H. (2011). Sources of baroclinic tidal energy in the Gaoping Submarine Canyon off southwestern Taiwan. *Journal of Geophysical Research*, 116(C12). <https://doi.org/10.1029/2011jc007366>
- Danovaro, R. (Ed.). (2009). *Methods for the Study of Deep-Sea Sediments, Their Functioning and Biodiversity*. <https://doi.org/10.1201/9781439811382>
- De Leo, F. C., Smith, C. R., Rowden, A. A., Bowden, D. A., & Clark, M. R. (2010). Submarine

canyons: hotspots of benthic biomass and productivity in the deep sea. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 277(1695), 2783–2792.

<https://doi.org/10.1098/rspb.2010.0462>

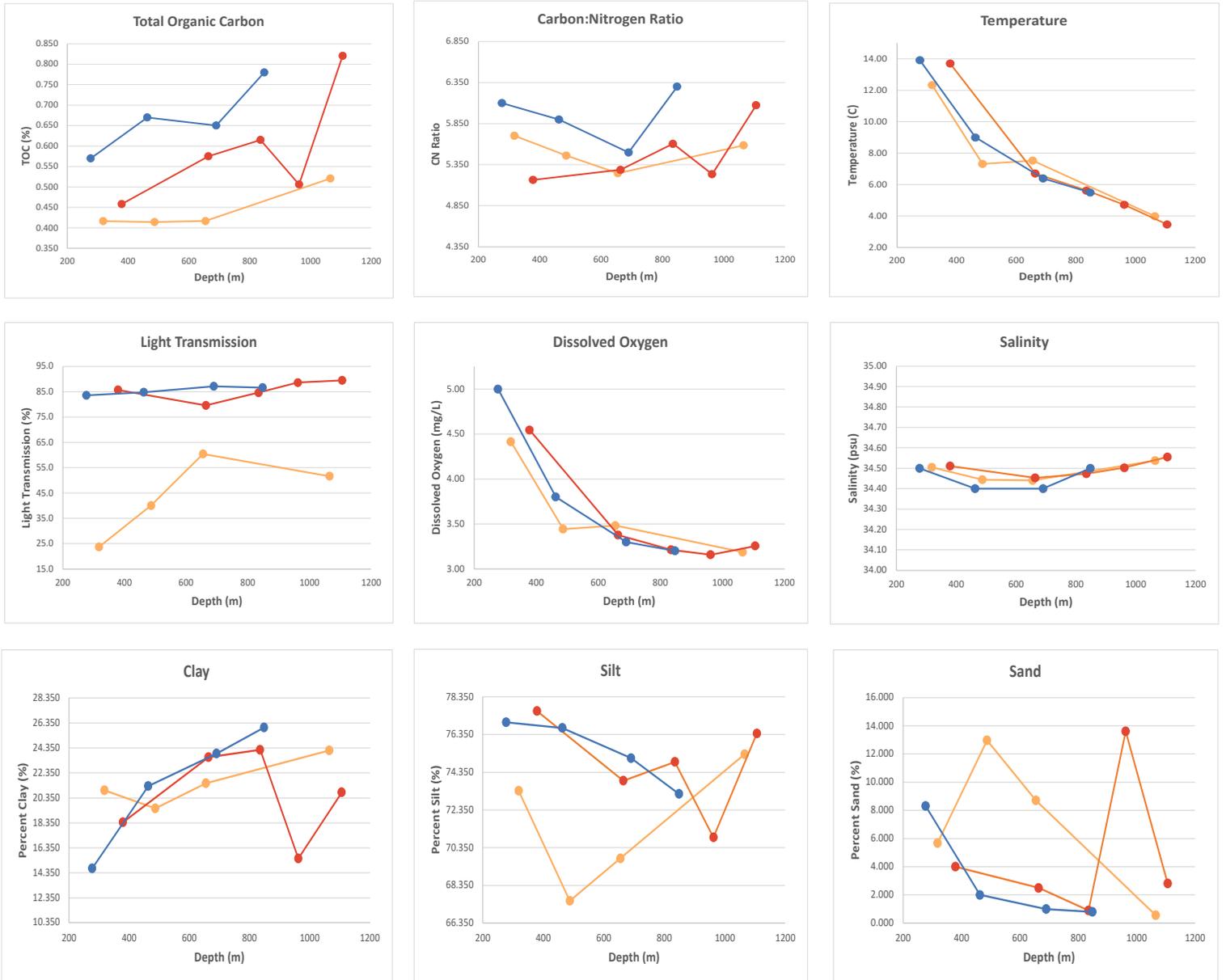
- De Leo, F. C., Vetter, E. W., Smith, C. R., Rowden, A. A., & McGranaghan, M. (2014). Spatial scale-dependent habitat heterogeneity influences submarine canyon macrofaunal abundance and diversity off the Main and Northwest Hawaiian Islands. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 104, 267–290. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2013.06.015>
- Donadi, S., Eriksson, B. K., Lettmann, K. A., Hodapp, D., Wolff, J.-O., & Hillebrand, H. (2015). The body-size structure of macrobenthos changes predictably along gradients of hydrodynamic stress and organic enrichment. *Marine Biology*, 162(3), 675–685. <https://doi.org/10.1007/s00227-015-2614-z>
- Fernandez-Arcaya, U., Ramirez-Llodra, E., Aguzzi, J., Allcock, A. L., Davies, J. S., Dissanayake, A., Harris, P., Howell, K., Huvenne, V. A. I., Macmillan-Lawler, M., Martín, J., Menot, L., Nizinski, M., Puig, P., Rowden, A. A., Sanchez, F., & Van den Beld, I. M. J. (2017). Ecological Role of Submarine Canyons and Need for Canyon Conservation: A Review. *Frontiers in Marine Science*, 4. <https://doi.org/10.3389/fmars.2017.00005>
- Greenacre, M., & Primicerio, R. (2013). *Multivariate Analysis of Ecological Data*. [www.multivariatestatistics.org](http://www.multivariatestatistics.org)
- Gunton, L. M., Gooday, A. J., Glover, A. G., & Bett, B. J. (2015). Macrofaunal abundance and community composition at lower bathyal depths in different branches of the Whittard Canyon and on the adjacent slope (3500 m; NE Atlantic). *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 97, 29–39. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2014.11.010>
- Hale, R. P., Nittrouer, C. A., Liu, J. T., Keil, R. G., & Ogston, A. S. (2012). Effects of a major typhoon on sediment accumulation in Fangliao Submarine Canyon, SW Taiwan. *Marine Geology*, 326–328, 116–130. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2012.07.008>
- Harris, P. T. (2014). Shelf and deep-sea sedimentary environments and physical benthic disturbance regimes: A review and synthesis. *Marine Geology*, 353, 169–184. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2014.03.023>
- Harris, P. T., & Whiteway, T. (2011). Global distribution of large submarine canyons: Geomorphic differences between active and passive continental margins. *Marine Geology*, 285(1-4), 69–86. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2011.05.008>
- Huang, Z., Nichol, S. L., Harris, P. T., & Caley, M. J. (2014). Classification of submarine canyons of the Australian continental margin. *Marine Geology*, 357, 362–383. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2014.07.007>
- Huang, Z., Schlacher, T., Nichol, S., Williams, A., Althaus, F., & Kloser, R. J. (2018). A conceptual

- surrogacy framework to evaluate the habitat potential of submarine canyons. *Progress in Oceanography*. <https://doi.org/10.1016/J.POCEAN.2017.11.007>
- Huston, M. A. (2014). Disturbance, productivity, and species diversity: empiricism vs. logic in ecological theory. *Ecology*, *95*(9), 2382–2396. <https://doi.org/10.1890/13-1397.1>
- International Hydrographic Organization. (n.d.). *GEBCO - The General Bathymetric Chart of the Oceans 2021*. GEBCO.
- Jupke, J. F., & Schäfer, R. B. (2020). Should ecologists prefer model- over distance-based multivariate methods? *Ecology and Evolution*, *10*(5), 2417–2435. <https://doi.org/10.1002/ece3.6059>
- J. F. Lynch, S. R. Ramp, Ching-Sang Chiu, Tswen Yung Tang, Y. . -J. Yang and J. A. Simmen, "Research highlights from the Asian Seas International Acoustics Experiment in the South China Sea," in *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 29, no. 4, pp. 1067-1074, Oct. 2004, doi: 10.1109/JOE.2005.843162.
- Leduc, D., Rowden, A. A., Nodder, S. D., Berkenbusch, K., Probert, P. K., & Hadfield, M. G. (2014). Unusually high food availability in Kaikoura Canyon linked to distinct deep-sea nematode community. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, *104*, 310–318. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2013.06.003>
- Lee, S.-A., Kim, T.-H., & Kim, G. (2020). Tracing terrestrial versus marine sources of dissolved organic carbon in a coastal bay using stable carbon isotopes. *Biogeosciences*, *17*(1), 135–144. <https://doi.org/10.5194/bg-17-135-2020>
- Legendre, P., & Anderson, M. J. (1999). DISTANCE-BASED REDUNDANCY ANALYSIS: TESTING MULTISPECIES RESPONSES IN MULTIFACTORIAL ECOLOGICAL EXPERIMENTS. *Ecological Monographs*, *69*(1), 1–24. [https://doi.org/10.1890/0012-9615\(1999\)069\[0001:dbratm\]2.0.co;2](https://doi.org/10.1890/0012-9615(1999)069[0001:dbratm]2.0.co;2)
- Liao, J.-X., Chen, G.-M., Chiou, M.-D., Jan, S., & Wei, C.-L. (2017). Internal tides affect benthic community structure in an energetic submarine canyon off SW Taiwan. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, *125*, 147–160. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2017.05.014>
- Liu, J. T., Wang, Y. H., Lee, I-Huan., & Hsu, R. T. (2010). Quantifying tidal signatures of the benthic nepheloid layer in Gaoping Submarine Canyon in Southern Taiwan. *Marine Geology*, *271*(1-2), 119–130. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2010.01.016>
- McClain, C. R., & Barry, J. P. (2010). Habitat heterogeneity, disturbance, and productivity work in concert to regulate biodiversity in deep submarine canyons. *Ecology*, *91*(4), 964–976. <https://doi.org/10.1890/09-0087.1>
- Oksanen, J., Blanchet, F., Friendly, M., Kindt, R., Legendre, P., Mcglinn, D., Minchin, P., O'hara,

- R., Simpson, G., Solymos, P., Henry, M., Stevens, H., Szoecs, E., & Maintainer, H. (2020). *Package "vegan" Title Community Ecology Package Version 2.5-7*. <https://cran.r-project.org/web/packages/vegan/vegan.pdf>
- Pearman, T. R. R., Robert, K., Callaway, A., Hall, R., Lo Iacono, C., & Huvenne, V. A. I. (2020). Improving the predictive capability of benthic species distribution models by incorporating oceanographic data – Towards holistic ecological modelling of a submarine canyon. *Progress in Oceanography*, *184*, 102338. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2020.102338>
- Ricotta, C., & Podani, J. (2017). On some properties of the Bray-Curtis dissimilarity and their ecological meaning. *Ecological Complexity*, *31*, 201–205. <https://doi.org/10.1016/j.ecocom.2017.07.003>
- Ringnér, M. (2008). What is principal component analysis? *Nature Biotechnology*, *26*(3), 303–304. <https://doi.org/10.1038/nbt0308-303>
- Robertson, C. M., Demopoulos, A. W. J., Bourque, J. R., Mienis, F., Duineveld, G. C. A., Lavaleye, M. S. S., Koivisto, R. K. K., Brooke, S. D., Ross, S. W., Rhode, M., & Davies, A. J. (2020). Submarine canyons influence macrofaunal diversity and density patterns in the deep-sea benthos. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, *159*, 103249. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2020.103249>
- Snelgrove, P. V. R. (1998). The biodiversity of macrofaunal organisms in marine sediments. *Biodiversity and Conservation*, *7*(9), 1123–1132. <https://doi.org/10.1023/a:1008867313340>
- Wang, Y. H., Lee, I. H., & Liu, J. T. (2008). Observation of internal tidal currents in the Kaoping Canyon off southwestern Taiwan. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, *80*(1), 153–160. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2008.07.016>
- Wei, C.-L., Rowe, G. T., Escobar-Briones, E., Boetius, A., Soltwedel, T., Caley, M. J., Soliman, Y., Huettmann, F., Qu, F., Yu, Z., Pitcher, C. R., Haedrich, R. L., Wicksten, M. K., Rex, M. A., Baguley, J. G., Sharma, J., Danovaro, R., MacDonald, I. R., Nunnally, C. C., & Deming, J. W. (2010). Global Patterns and Predictions of Seafloor Biomass Using Random Forests. *PLoS ONE*, *5*(12), e15323. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0015323>
- Wei, C.-L., Rowe, G. T., Escobar-Briones, E., Nunnally, C., Soliman, Y., & Ellis, N. (2012). Standing stocks and body size of deep-sea macrofauna: Predicting the baseline of 2010 Deepwater Horizon oil spill in the northern Gulf of Mexico. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, *69*, 82–99. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2012.07.008>
- Wickham H (2016). *ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis*. Springer-Verlag New York. ISBN 978-3-319-24277-4, <https://ggplot2.tidyverse.org>.

# 附錄

## 附錄一、環境因子隨深度變化折線圖



圖十九、9 個環境因子隨深度變化折線圖。圖中藍色代表斜坡、紅色代表枋寮峽谷、黃色代表高屏峽谷。

## 【評語】 051908

1. 計畫概述：本研究對於海底峽谷的生物群及地貌有興趣。同時也了解到海底峽谷有不同的地形地貌種類，這是一般人不會這麼深入觀察及思考的，很特殊。作者參加了國內海洋計畫的研究船，並參與採樣分析，進行了科學家團隊的專業分析，包括了樣本前處理、顯微鏡觀察、生物資料統計學分析等。並從分析結果探討不同峽谷（高屏、枋寮）在生物群的異同及化學因子。

2. 綜評：

(1) 報告撰寫非常的完整。這是一個非常特別的研究，高中生可以參加國內海洋研究團隊，實際進行海洋研究船的海上工作，並參與各類的分析，並進行結果的科學討論。這是一個科學專業團隊的研究。可以看得出來，本研究作者參與並學習到了科學家在做最先進研究的各項歷程，應該是個非常難得的經驗，收穫很多。是個很不錯專業的科學專題研究。

(2) 投影片的製作上，簡明扼要，易讀易懂。

(3) 口頭報告：很有大將之風，言詞清晰，科學分析及結果娓娓道來，簡要不失科學複雜性。

(4) 實驗日誌：紀錄的很詳細很豐富，包括了海上作業、顯微鏡觀察、生物及化學分析、GIS 分析比較等，圖文並茂很生動，彩色的設計很有藝術感。

### 3. 建議：

- (1) 在投影片的製作上，如果可以加上海洋研究船上的工作照片，及實驗室工作的儀器及顯微鏡觀察照片，會更生動。
- (2) 同學在海洋峽谷的認識及科學探討，已經進入了專業科學之門了，了解的東西很多，持續努力，前途不可限量。

## 作品簡報

# 探討不同型態的海底峽谷對 底棲動物群聚結構的影響

科別：地球與行星科學  
組別：高級中等學校組

# 簡介

## 研究動機

- 獲得使用國內海洋研究船於臺灣西南海域進行採樣的機會
- 西南海域是臺灣周遭海底峽谷的主要分佈區域之一
- 臺灣的海底峽谷生物群聚結構研究有限
- 底棲動物為海洋食物鏈的基礎，其研究具有生態價值

## 研究目的



- 討論海底峽谷與周遭斜坡的環境差異
- 討論高屏峽谷與枋寮峽谷的環境差異
- 從生物密度與多樣性討論兩峽谷生物群聚結構差異
- 討論不同環境因子對兩峽谷生物群聚結構的影響

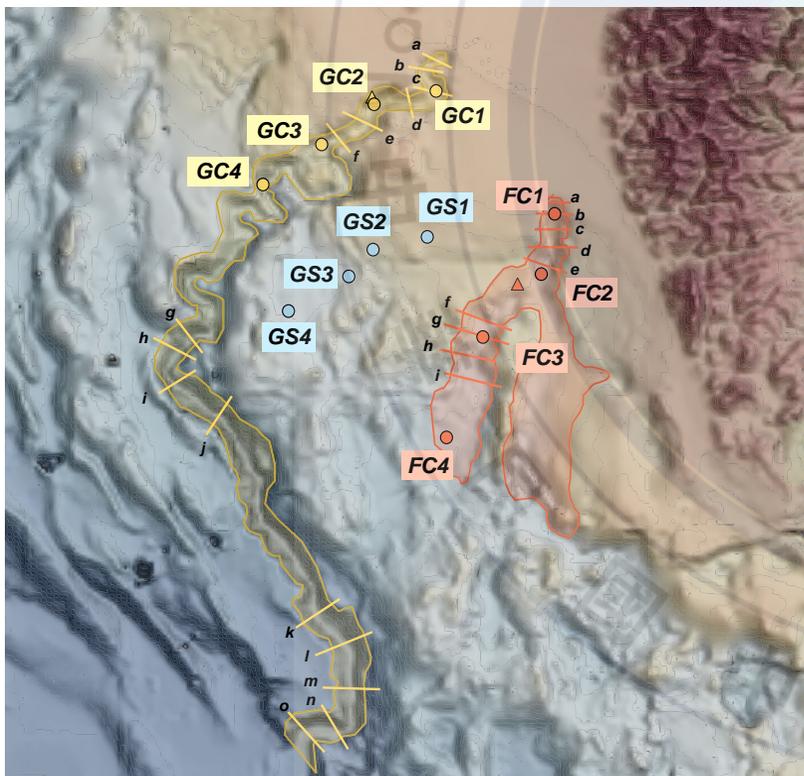
# 研究材料與區域

## 研究材料

- 使用研究船出海採樣
- 國內海洋研究所歷年生物採樣與環境資料

## 研究區域

- 臺灣西南海域高屏峽谷與枋寮峽谷



	高屏峽谷	枋寮峽谷
地理特性	<ul style="list-style-type: none"><li>• 源頭連接高屏溪</li><li>• 下游連接呂宋海峽與恆春海脊 [1]</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• 源頭距陸地較遠</li><li>• 嵌入大陸棚</li></ul>
沉積物	<ul style="list-style-type: none"><li>• 高屏溪注入大量的陸源沉積物</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• 自身結構崩塌</li><li>• 季節性颱風 [4]</li><li>• 沉積物量有限</li></ul>
環境擾動	<ul style="list-style-type: none"><li>• 易受陸上活動影響</li><li>• 突發性擾動頻發</li><li>• 內潮擾動強烈 [2][3]</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• 較缺乏觀測資料</li></ul>

# 研究過程

不同的峽谷型態

1

## 主成分分析

- 簡化多變量環境因子資料
- 量化兩型態不同峽谷間的環境差異

影響

2

## 生物密度變化圖與 生物組成熱圖

- 觀察兩型態不同峽谷間  
的生物群聚結構差異

影響

環境因子

關聯性

生物群聚結構

3

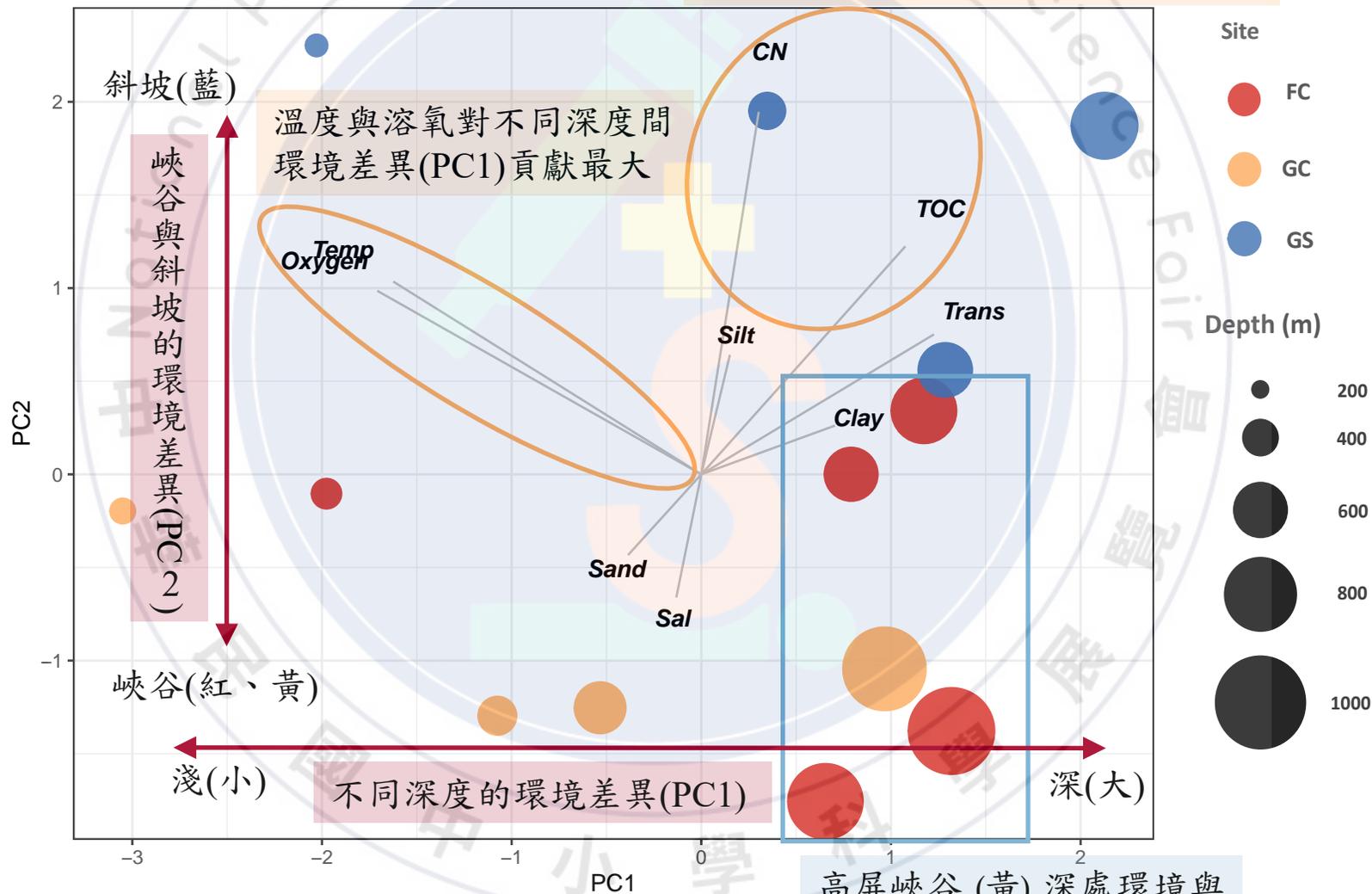
## 距離式冗餘分析

- 量化各環境因子對生物群  
聚結構的影響

# 研究結果：環境差異

## 環境因子主成分分析

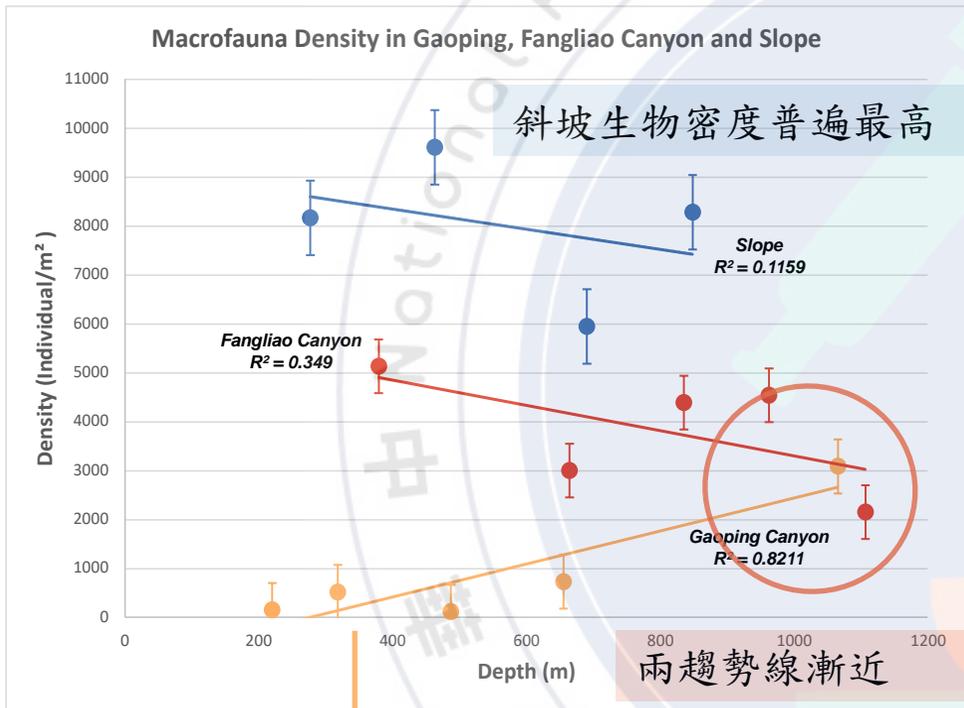
碳氮比與有機碳含量對峽谷與斜坡的環境差異(PC2)貢獻最大



高屏峽谷(黃)深處環境與枋寮峽谷(紅)整體相似

# 研究結果：生物群聚結構差異

## 生物密度隨深度變化圖



高屏峽谷生物密度隨深度遞增與枋寮峽谷及斜坡相反

此規律也與多數其他峽谷相反

推測與上游環境擾動強烈有關

## 各測站生物組成圖

枋寮峽谷生物組成較豐富  
單一類群生物密度亦較高

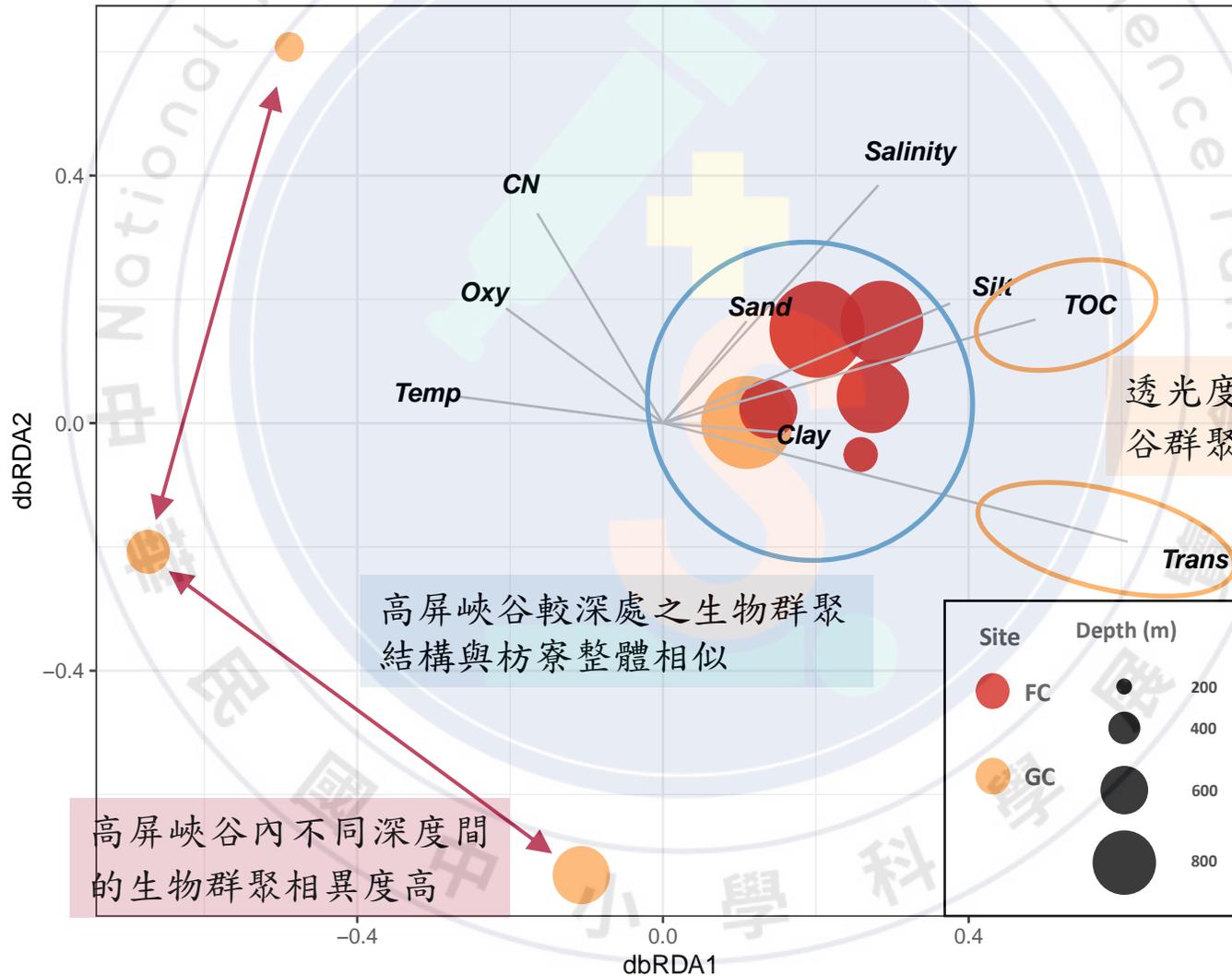
僅在枋寮穩定存在的類群

	GC1_1126	GC2_1126	GC2_0068	GC3_1126	GC4_1126	FC1_1190	FC2_1190	FC2A_1190	FC3_1190	FC4_1190	FC5_1190
Polychaeta	365.7	115.5	96.6	308.0	1097.1	3079.6	308.0	1077.9	538.9	1424.3	692.9
Nematoda			51.7	192.5	86.6	154.0		38.5	38.5	154.0	192.5
Harpacticoida				154.0	664.0	385.0	2040.3	5427.9	308.0	346.5	115.5
Tanaidacea											154.0
Amphipoda			3.4								
Ostracoda						192.5	38.5	538.9	538.9	500.4	346.5
Nemertea						115.5	77.0		308.0	385.0	385.0
Isopoda					57.7	77.0			269.5	923.9	231.0
Cumacea	19.2				57.7	308.0	308.0	308.0	500.4	231.0	
Bivalvia				28.9		308.0	192.5	885.4	808.4	461.9	154.0
Alpacophora				38.5		38.5	38.5		615.9		
Scaphopoda					1010.5						77.0
Sipuncula	19.2										
Ophiuroida											
Cnidaria											
Nebaliacea											
Stomatopoda											
Asterioida	96.2										38.5
Gastropoda				38.5							
Scyphozoa											
Platyhelminthes											

高屏峽谷生物組成單調  
許多生物類群無法穩定存在

# 研究結果：環境對生物群聚結構的影響

## 距離式冗餘分析圖



# 討論：研究結果的解釋

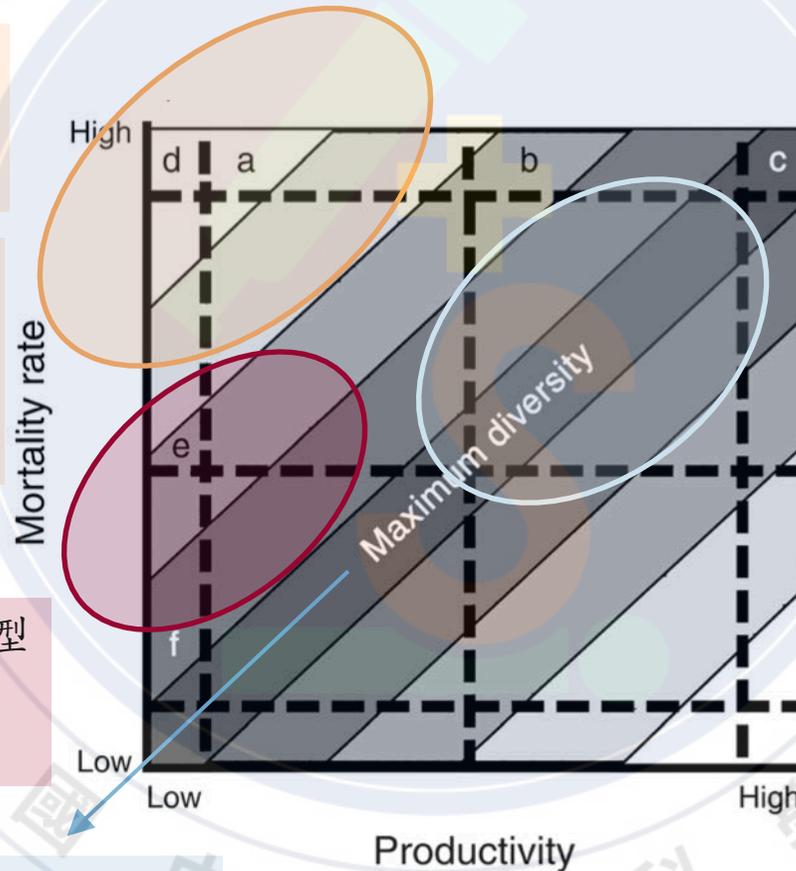
## 動態平衡模型 (Dynamic Equilibrium Model) [5]

高屏峽谷環境擾動極強  
因此需極高生產力才能達到  
maximum diversity

雖有陸源沉積物注入，  
但擾動造成淘選作用 [6] 使  
有機顆粒含量高的沉積物集  
中於中下游

由生物密度變化趨勢與剖面型  
態推論枋寮峽谷擾動較微弱  
但沉積物輸入有限

生物組成豐富且密度高



多數海底峽谷擾動適中  
且具有較高的生產力

多數峽谷為生物熱點  
具極高的生物密度與多樣性  
[7] [8] [9][10]

# 結論

## 環境差異

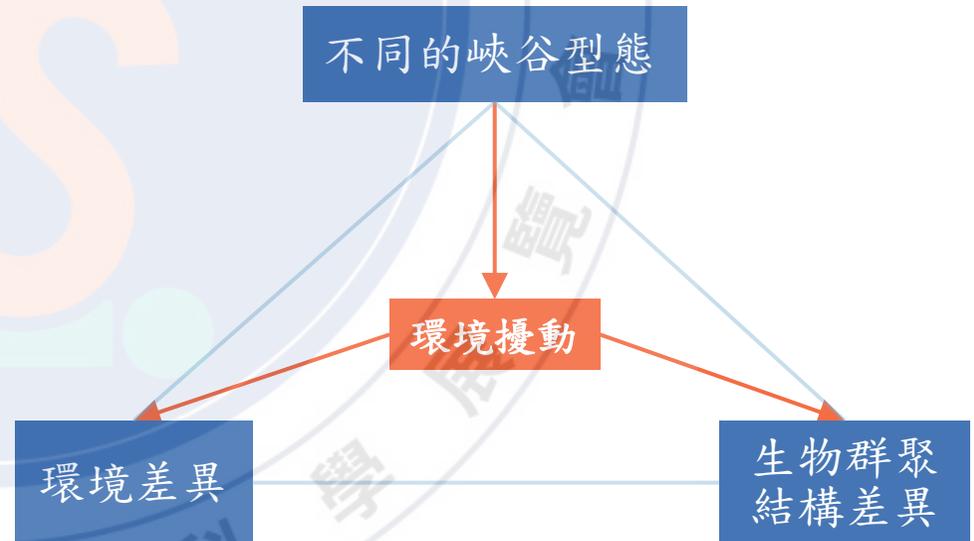
- 峽谷與斜坡的環境差異主要來自沉積物來源 (碳氮比) 與有機沉積物量(有機碳含量) 的不同。
- 兩峽谷的環境差異主要來自擾動強度的不同。
- 環境擾動會影響數個不同的環境因子，如透光度與沉積物粒徑分佈。
- 高屏峽谷上游環境與枋寮峽谷相異度高，中下游環境則與枋寮峽谷較相似

## 生物群聚結構差異

- 兩峽谷的生物密度隨深度變化的趨勢相反，高屏峽谷內部生物密度普遍低於枋寮峽谷。
- 許多在枋寮峽谷內穩定存在的生物類群皆無法穩定生存於高屏峽谷上游。
- 高屏峽谷中下游生物群聚結構與枋寮峽谷相似。

## 環境對生物群聚的影響

- 環境擾動強度 (對應透光度) 與食物量 (有機碳含量)與兩峽谷生物群聚結構差異的關聯性最高。
- 高屏峽谷生物群聚主要受環境擾動影響。
- 枋寮峽谷生物群聚受限於食物量。



# 研究的價值、應用與未來展望

## 研究價值

- 以往的底棲動物研究多以海底峽谷與周遭斜坡環境的比較為主，本研究結合現行峽谷分類系統 [11] 討論兩不同型態峽谷的群聚結構差異。
- 高屏峽谷為源頭連接陸地溪流的峽谷，此類峽谷僅佔全球海底峽谷的**2.6%**，具有**稀少性**。
- 高屏峽谷連接內潮主要生成地，為「**自然環境擾動**」與「**高能量環境**」的重點研究區域 [12]。
- **枋寮峽谷**內部環境擾動、環境因子變化與底棲動物群聚結構之**相關研究較缺乏**。
- 有別於過往研究，本研究發現不同型態的海底峽谷可能擁有截然不同的生物群聚結構，且**並非所有海底峽谷都有高生物密度與多樣性**。

## 研究的應用

- 未來可利用多變量分析區隔出具有不同生態群聚結構的海底峽谷。
- 找出較有潛力應用於生物群聚評估的環境因子：有機碳含量與透光度。
- 底棲動物為**海洋食物鏈的基礎**，其群聚結構研究能增進對區域性海洋生態的瞭解。

## 未來展望

- 未來可將此研究推廣並應用於**棲地潛力評估模型**的建構，有利於**海洋保護區**的規劃。
- 可與其他擾動環境下的底棲研究進行**統合分析**，討論極端擾動對底棲動物之影響。

# 參考資料

- [1] J. F. Lynch, S. R. Ramp, Ching-Sang Chiu, Tswen Yung Tang, Y. . -J. Yang and J. A. Simmen, "Research highlights from the Asian Seas International Acoustics Experiment in the South China Sea," in *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 29, no. 4, pp. 1067-1074, Oct. 2004, doi: 10.1109/JOE.2005.843162.
- [2] Wang, Y. H., Lee, I. H., & Liu, J. T. (2008). Observation of internal tidal currents in the Kaoping Canyon off southwestern Taiwan. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 80(1), 153–160. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2008.07.016>
- [3] Liu, J. T., Wang, Y. H., Lee, I-Huan., & Hsu, R. T. (2010). Quantifying tidal signatures of the benthic nepheloid layer in Gaoping Submarine Canyon in Southern Taiwan. *Marine Geology*, 271(1-2), 119–130. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2010.01.016>
- [4] Hale, R. P., Nittrouer, C. A., Liu, J. T., Keil, R. G., & Ogston, A. S. (2012). Effects of a major typhoon on sediment accumulation in Fangliao Submarine Canyon, SW Taiwan. *Marine Geology*, 326-328, 116–130. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2012.07.008>
- [5] Huston, M. A. (2014). Disturbance, productivity, and species diversity: empiricism vs. logic in ecological theory. *Ecology*, 95(9), 2382–2396. <https://doi.org/10.1890/13-1397.1>
- [6] Liao, J.-X., Chen, G.-M., Chiou, M.-D., Jan, S., & Wei, C.-L. (2017). Internal tides affect benthic community structure in an energetic submarine canyon off SW Taiwan. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 125, 147–160. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2017.05.014>
- [7] Robertson, C. M., Demopoulos, A. W. J., Bourque, J. R., Mienis, F., Duineveld, G. C. A., Lavaleye, M. S. S., Koivisto, R. K. K., Brooke, S. D., Ross, S. W., Rhode, M., & Davies, A. J. (2020). Submarine canyons influence macrofaunal diversity and density patterns in the deep-sea benthos. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 159, 103249. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2020.103249>
- [8] McClain, C. R., & Barry, J. P. (2010). Habitat heterogeneity, disturbance, and productivity work in concert to regulate biodiversity in deep submarine canyons. *Ecology*, 91(4), 964–976. <https://doi.org/10.1890/09-0087.1>
- [9] Wei, C.-L., Rowe, G. T., Escobar-Briones, E., Nunnally, C., Soliman, Y., & Ellis, N. (2012). Standing stocks and body size of deep-sea macrofauna: Predicting the baseline of 2010 Deepwater Horizon oil spill in the northern Gulf of Mexico. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 69, 82–99. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2012.07.008>
- [10] Gunton, L. M., Gooday, A. J., Glover, A. G., & Bett, B. J. (2015). Macrofaunal abundance and community composition at lower bathyal depths in different branches of the Whittard Canyon and on the adjacent slope (3500 m; NE Atlantic). *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 97, 29–39. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2014.11.010>
- [11] Harris, P. T., & Whiteway, T. (2011). Global distribution of large submarine canyons: Geomorphic differences between active and passive continental margins. *Marine Geology*, 285(1-4), 69–86. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2011.05.008>
- [12] Azpiroz-Zabala, M., Cartigny, M. J. B., Talling, P. J., Parsons, D. R., Sumner, E. J., Clare, M. A., Simmons, S. M., Cooper, C., & Pope, E. L. (2017). Newly recognized turbidity current structure can explain prolonged flushing of submarine canyons. *Science Advances*, 3(10), e1700200. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700200>