

# 2023 年臺灣國際科學展覽會 優勝作品專輯

作品編號	180003
參展科別	地球與環境科學
作品名稱	探討不同型態的海底峽谷對底棲動物群聚結構的影響
得獎獎項	一等獎 美國 ISEF 正選代表

就讀學校 臺北市立第一女子高級中學

指導教師 魏志潁、林郁梅

作者姓名 柯絲昀

關鍵詞 海底峽谷、多變量分析、生態結構

## 作者簡介



我是就讀北一女中三年級的柯絲昀一兩年前初升高中時，秉持對海研船的好奇參加了中山大學舉辦的海洋研究計劃競賽，也因此海洋研究路上越走越遠。很高興能參與今年的國際科展，與其他同學分享研究的樂趣與收穫，並以此為舞台將研究成果展現給更多人。

## 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%，其中有 6 個峽谷分佈在臺灣西南海域。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，探究西南海域高屏與枋寮峽谷的生態結構。

本研究應用生態統計分析，發現兩峽谷的主要差異為沉積物來源、粒徑分佈與物理性擾動強度不同，使兩峽谷的生物密度隨深度變化趨勢截然相反，生物組成亦存在顯著差異。接著藉由建立模型分析，驗證環境擾動與食物量為形塑區域性生態結構的主導因素，結果發現環境擾動對生物的影響幅度大於食物量，並討論了峽谷地形作為天然實驗室的潛力及未來研究發展。

## Abstract

Submarine canyons are common geomorphic features that incises into continental margins, characterized by complex hydrodynamic processes, heterogeneous spatial variations and steep topography. Globally, there are approximately 9000 submarine canyons, covering 11.2% of the world's continental margins, of which, 6 canyons are distributed along the continental margins of southwest Taiwan. This study conducted field sampling in SW Taiwan and integrated past data to gain insights on the benthic community structure of Gaoping Canyon, Fangliao Canyon and the adjacent slope via multivariate analysis techniques.

This research discovered that environmental differences between the two morphologically distinct canyons are mainly reflected in the variation of sediment characteristics and the intensity of physical disturbances. In result, two canyons display opposite patterns of macrofaunal density distribution and significantly dissimilar taxonomic composition. Through the construction of a structural equation model, this research identified physical disturbance and food supplies as the driving factor of community structure. Of which, the magnitude of physical disturbance is more influential than the abundance of food supplies. This study further discusses the potential of utilizing submarine canyons as natural laboratories of environmental shifts and the prospective development of canyon research.

# 壹、前言

## 一、研究動機

在構思參與國內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。過去前人研究多聚焦於峽谷的型態與沉積物運輸機制，對於峽谷內部生態結構研究則較有限。查閱文獻時更進一步發現，許多峽谷內生物密度與多樣性均遠高於外部環境，此現象激起了我的好奇，峽谷型態與地理特性使其內部環境因子與外部環境有何差異？環境差異對生物會造成什麼樣的影響？哪些因子最能反映區域性的生態結構特性？

## 二、文獻回顧與研究構想

海底峽谷為大陸邊緣上廣泛分佈的地質構造，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) 皆曾發現海底峽谷會形成區域性生物熱點，擁有明顯高於周遭環境的生物密度與多樣性，Fernandez-Arcaya et al. (2017) 更認為海底峽谷為「海洋生態多樣性的來源之一」。然而，海底峽谷型態多樣複雜，不同型態的峽谷對生物的影響有何差異仍不明確。曾有學者試以地貌特徵建立模型評估峽谷的棲地潛力，量化了包含源頭深度、平均斜率、分支數量等共 22 種地質參數 (Huang et al., 2018)，卻仍未能明確辨識出不同峽谷地貌與底棲生態結構的關聯性。

有別於以地質參數為核心的分析方式，本研究期以環境因子為主軸，辨識出影響生物群聚結構的主導因子並量化不同因子的影響力，再以地理資訊系統(QGIS)為輔針對峽谷地貌特徵進行討論，探討峽谷型態如何透過影響環境因子的方式間接形塑區域性生物群聚結構。

由於生物種類繁多，本研究選擇其中的大型底棲動物 (benthic macrofauna; >300 um)。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)。同時，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 (Stratmann et al., 2020)。此研究中，我想瞭解不同海底峽谷型態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

臺灣西南海域的六個峽谷中，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。其中，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 (Chiang et al., 2020)。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 (Lynch, 2004) 的呂宋海峽及恆春海脊，使高屏峽谷內部長期存在強烈內潮擾動，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，最終形成源頭嵌入大陸棚的型態 (Chiang et al., 2020)。由於未連接路上溪流，枋寮峽谷的陸源沉積物量相對有限，以季節性的颱風和峽谷自身結構崩塌的碎屑為主，枋寮峽谷內部發生濁流擾動的頻率亦明顯低於高屏峽谷 (Hale et al., 2012)。高屏與枋寮兩峽谷在沉積物來源、輸入量、物理性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（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各環境因子差異及其對生物群聚結構的影響。

### 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。
- （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及枋寮峽谷間生物群聚結構差異的關聯性。
- （四）建立模型量化研究結果，並檢驗先前提出的研究推論。



## 貳、研究器材及設備

### 一、研究材料

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

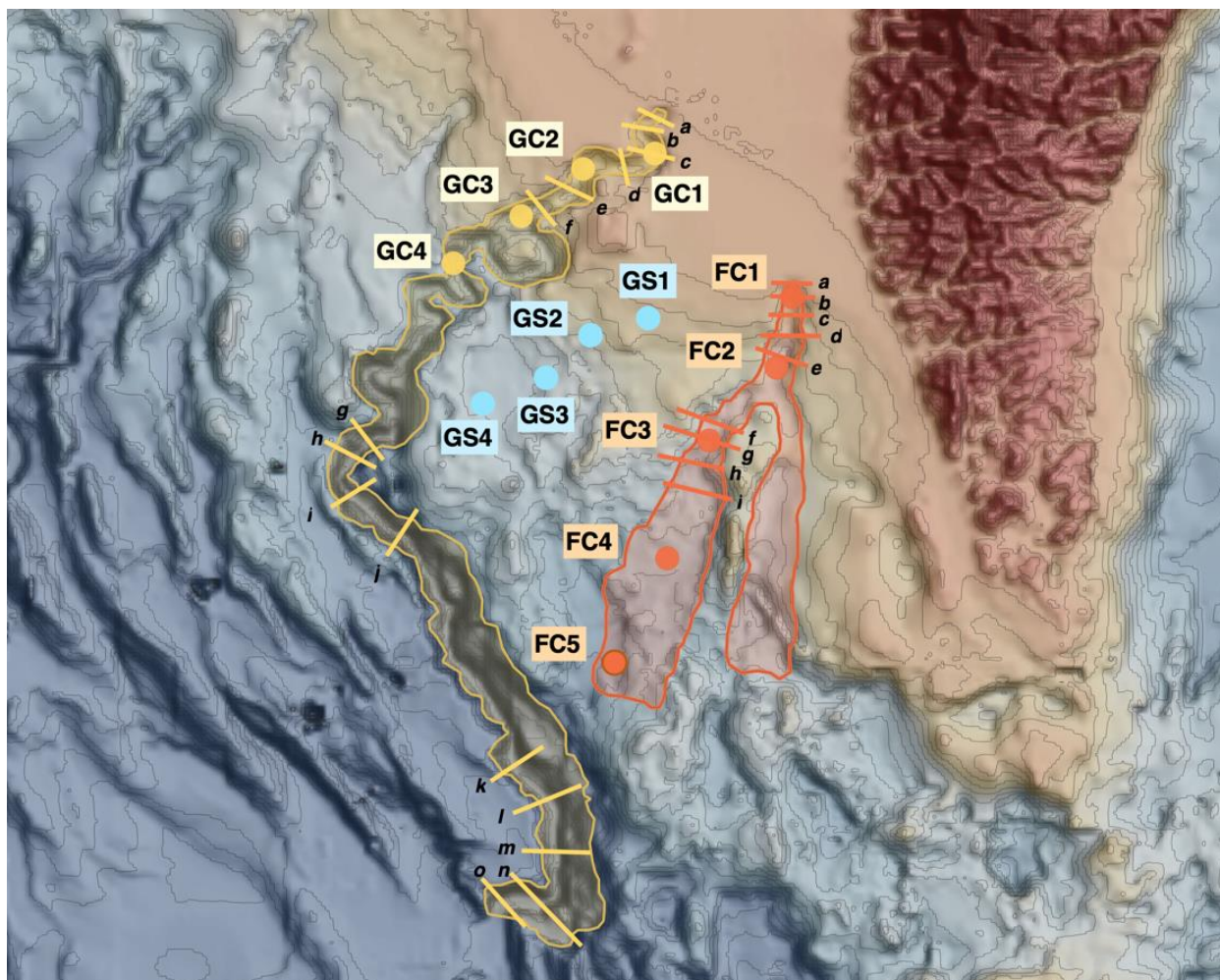
GEBCO (通用大洋水深圖) 為國際海道測量組織 (International Hydrographic Organization) 架設的海底地形資料數據庫, 提供全球範圍的水深網格資料。

#### (二) 研究船採樣

我參加國內海洋研究計畫競賽並於 2021 年獲得出海採樣機會, 於高屏峽谷上游與鄰近高雄港的斜坡進行採樣, 本研究採樣航次詳見附錄一(GC2A)。

#### (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 2018 年間反覆至臺灣西南海域進行生物採樣的資料, 每個測站 (測站位置見圖一與附錄一) 皆有水文及沉積物資料。



圖一、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。此圖為使用 QGIS 地理資訊系統處理 GEBCO 水深網格資料繪製而成。

## 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）皆使用 R 語言撰寫完成。

### (二) Microsoft Excel

用於實驗過程中的原始資料記錄、地形剖面分析與部分圖表繪製。

### (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

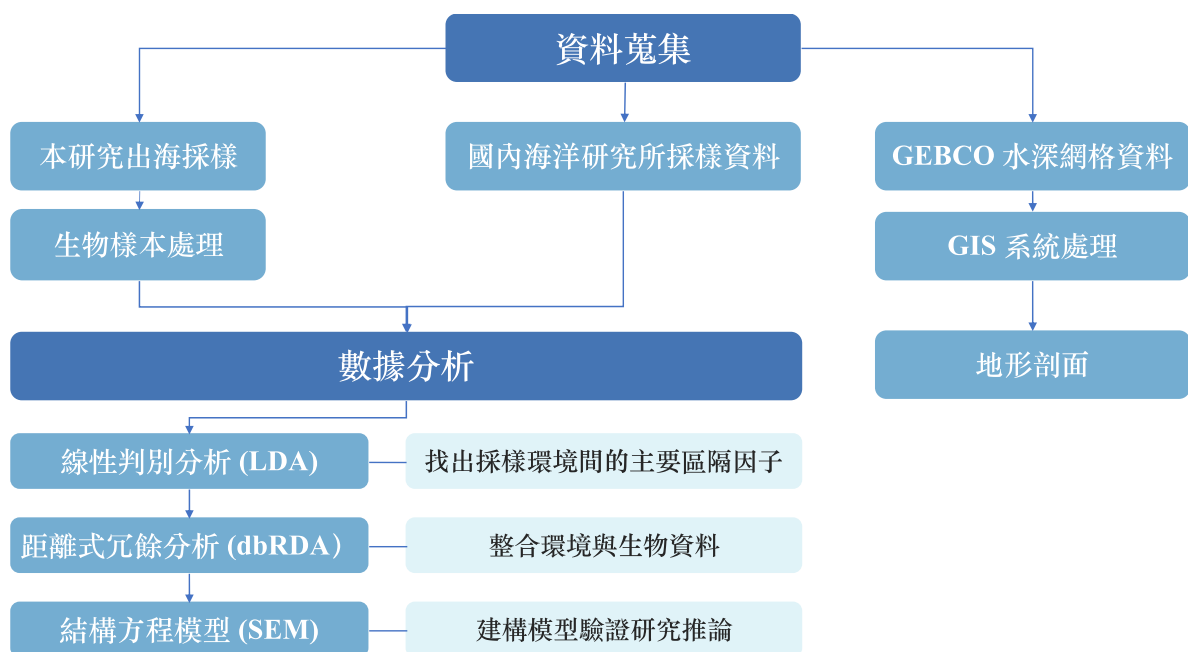
1. Shipek Grab Sampler 沉積物採樣器 (Wildco®860-A10)。

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



圖二、研究流程簡圖。

## 一、樣本採集與處理

### (一) 研究船作業

1. 研究船（圖三）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%。
5. 取得沉積物後，將其浸泡於福馬林中，並裝入塑膠瓶密封（圖四）。



圖三、本研究出海採樣（作者攝）。



圖四、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（圖五）。
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。



圖五、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，共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。研究過程中，先對資料進行前置處理，再透過線性判別分析簡化多變量資料並分析區域間環境差異，最終建立結構方程模型檢驗先前推論。本研究的所有統計分析皆使用 R 語言完成。

### (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) 線性判別分析 (Linear Discriminant Analysis; LDA)

本研究希望討論高屏峽谷、枋寮峽谷與大陸斜坡間的環境差異，並找出區隔三採樣區域的主要環境因子。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，並找出對三區域間環境差異貢獻最大的因子，本研究採用線性判別分析處理環境資料。

線性判別分析利用「分組資訊」（本研究的資料點依採樣區域分成三個組別），在降低數據維度的同時，將資料的組內分散量 (within-class scatter) 最小化，組間分散量 (between-class scatter) 最大化。線性判別分析處理後的數據，同一組別的資料點在圖上會集中於同一區域，而不同組別的資料點則會相距較遠，以此區隔不同組別的資料點 (Hastie, Trevor, et al., 2017)。

## (三) 結構方程模型 (Structural Equation Model; SEM)

為驗證研究結論的適切性，本研究依研究結論建構了結構方程模型，欲以此歸納出潛在因子，並討論各因子和生物群聚結構間的關聯性。

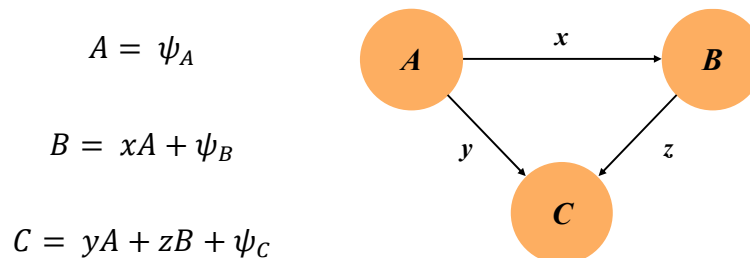
結構方程模型在生態學領域中被廣泛應用於驗證牽涉多個變量的假說及分析複雜的生態鏈關係 (Fan et al., 2016)，其結合了驗證性因子分析 (Confirmatory Factor Analysis) 量化潛在變量 (latent variable) 的方法與路徑分析 (Path Analysis) 找出各變量間的相互影響關係。潛在變量的量化是本研究選用結構方程模型的主要原因，其可將許多直接觀察的變量統合整理出一牽涉範圍廣泛且難以直接觀測的潛在因子（例如：由海平面上升、溫室氣體增加等可觀測的變量，歸納出「氣候變遷」為潛在變量）。

模型建立後，需以不同適配性指數從不同面向驗證該模型的適配性 (Fan et al., 2016)，本研究參考 (Kline, 2015) 之建議，採用下列指標：

1. Chi-Square Test ( $\chi^2$ ): 此指數為一顯著性檢定，其虛無假設 (null hypothesis) 為「模型之共變異數矩陣 (covariance matrix) 與實際資料之共變異數矩陣無顯著差異」，檢定 p 值  $< 0.05$  時即拒絕虛無假設（即模型的運算結果與實際觀測結果有顯著差異），因此，一適當的模型之 Chi-square 檢定 p 值應  $> 0.05$ ，但此檢定較易受樣本數量影響 (Bentler and Bonett, 1990; Mulaik et al. 1989; Hu and Bentler 1999)，為此，本研究同時檢驗 SRMR 指數。

2. Standardized root mean square residual (SRMR)：SRMR 值愈高，模型的適配度愈低，Hu and Bentler (1999) 認為  $SRMR < 0.09$  代表模型的適配性良好。

模型的結構示意圖如下（圖六），其中 **A**、**B**、**C** 皆為已知變數， $x$ 、 $y$ 、 $z$  為模型的參數，稱為路徑係數 (path coefficients)，每個變數都會搭配一獨立變量，分別為  $\psi_A$ 、 $\psi_B$ 、 $\psi_C$ ，用以衡量模型關係以外的殘餘變量 (residual influences)：



圖六、結構方程模型簡圖及其運算公式。

其中，路徑係數的解讀方式如下，正號的路徑係數表示隨著一單位的獨立變量 (independent variable) 增加，其對應的應變變量 (response variable) 會隨之增加，增加幅度與路徑係數之絕對值成比例，負值則代表獨立變量增加會導致應變變量減少，幅度亦與係數絕對值成比例 (McIntosh and Gonzalez-Lima, 1994)。

### 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（編號對應圖一橫線）。

## 肆、研究結果

### 一、不同區域間的環境差異

本研究曾透過 PERMANOVA 檢定發現高屏與枋寮兩峽谷的環境差異具有顯著意義（附錄四；表三），並利用主成分分析 (Principal Component Analysis; PCA) 分析高屏、枋寮與大陸斜坡之環境異同（附錄三），從中發現峽谷與斜坡環境之主要差異為碳氮比，反映沉積物來源的不同。同時，本研究亦發現高屏峽谷內部不同深度所呈現的環境變化明顯，枋寮峽谷內部各深度的環境特性皆十分相似，整體環境較為穩定。然而，先前主成分分析之結果未能判斷出高屏與枋寮兩峽谷主要環境差異的來源，為此，本研究進一步納入更多採樣資料進行分析，並選用為「找出組間差異之主要貢獻因子」而設計的線性判別分析(LDA)，更深入探討兩峽谷的環境特性之異同。

本研究利用線性判別分析將環境資料呈現於圖七，並藉此分析不同採樣區域間環境特性之異同，橫軸 LD1 與縱軸 LD2 分別詮釋了組間資料變異量的 89.2% 與 10.7%。圖七中，高屏峽谷（黃）、枋寮峽谷（紅）與大陸斜坡（藍）之資料點因環境因子的差異而在圖上聚集成三個獨立的資料群。其中，大陸斜坡與枋寮峽谷之資料點距離較近，且於 LD1 方向上有部分重疊 (LD1: -3 至 -1.5 區間)，由此推知枋寮峽谷之環境特性與大陸斜坡較相似，高屏峽谷則與另外兩區域有較明顯的環境差異。

環境因子特徵向量的長度反映該因子對不同區域間環境差異的貢獻，圖七中，有機碳含量 (TOC)、黏土百分比(Clay)與碳氮比(CN)與沙粒百分比(Sand) 等與沉積物組成相關的环境因子向量明顯較長，顯示三區域環境差異主要來自沉積物特性的不同。同時，若將高屏峽谷資料分佈中心與枋寮峽谷資料分佈中心連線，發現此連線方向幾乎與透光度(Trans)及碳氮比 (CN)之向量平行，顯示透光度與碳氮比為兩峽谷的主要區隔因子。透光度可作為物理性擾動強度的間接證據 (Liu et al., 2010)，強烈的物理性擾動會使海水中的懸浮沉積物濃度 (suspended sediment concentration) 偏高，在水中形成透光度低的混濁層 (benthic nepheloid layer)，圖八(h)中，大陸斜坡與枋寮峽谷的透光度在各深度皆相近且變動幅度小，推論環境擾動微弱。高屏峽谷的透光度則明顯低於其他兩區域，且呈現隨深度增加而遞增的趨勢，推論其源頭具有強烈擾動使懸浮沉積物濃度偏高，隨擾動強度漸減，懸浮沉積物濃度降低，透光

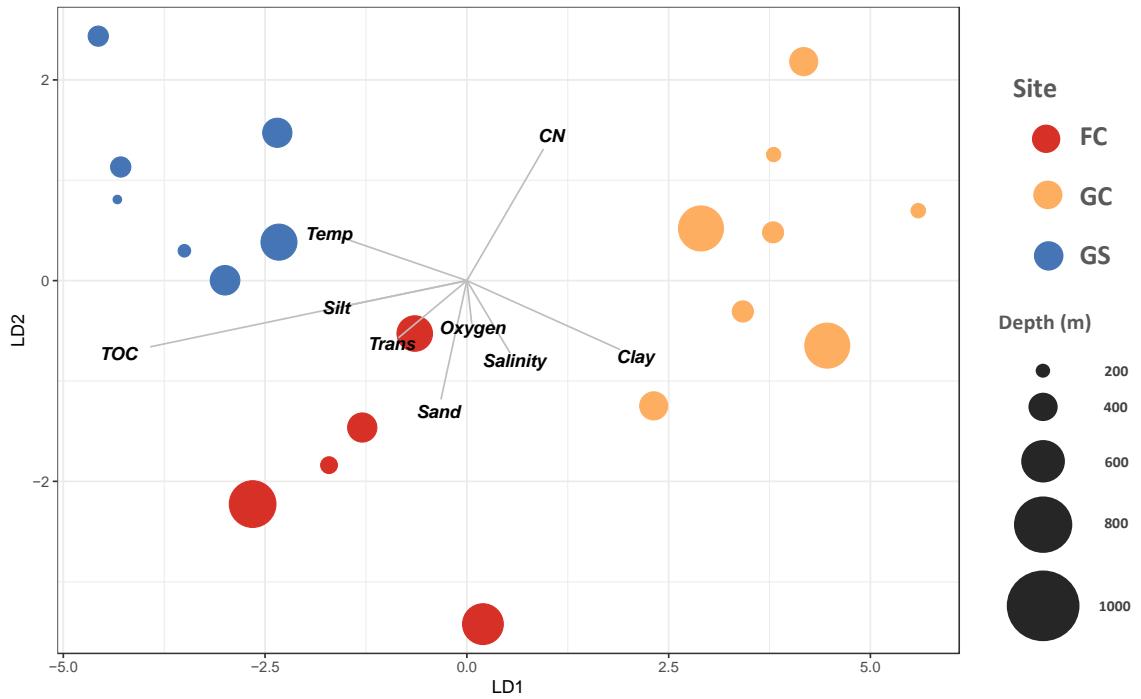
度逐漸回升。碳氮比可用於分析一區域的沉積物來源，陸生植物的碳氮比多為 12 以上，海生植物及浮游藻類的碳氮比則多介於 6 到 8 之間 (Lee et al., 2020)，此數值雖隨研究區域不同而略有差異，但整體而言，陸源沉積物之碳氮比普遍高於海源沉積物。圖八(b)中，高屏峽谷碳氮比整體高於枋寮峽谷，反映其因連接高屏溪而有大量陸源沉積物匯入的地理特性。

同時，資料群於圖上的位置及環境相量之相對延伸方向反映某區域的環境因子表現：以高屏峽谷之資料分佈為例，其資料點集中於圖七的右上方，而有機碳含量(TOC)向量往圖的左偏下方延伸（顯示愈趨左下方的資料點，沉積物碳含量愈高），高屏峽谷資料分布區域與碳含量向量延伸方向相反，推知高屏峽谷整體沉積物之有機碳含量(TOC)低於大陸斜坡（分佈於圖的最左方）與枋寮峽谷（分佈於圖的左下方），同理顯示，高屏峽谷之碳氮比 (CN) 整體高於枋寮峽谷，透光度 (Trans) 低於枋寮峽谷，上述結果皆與圖八相符。

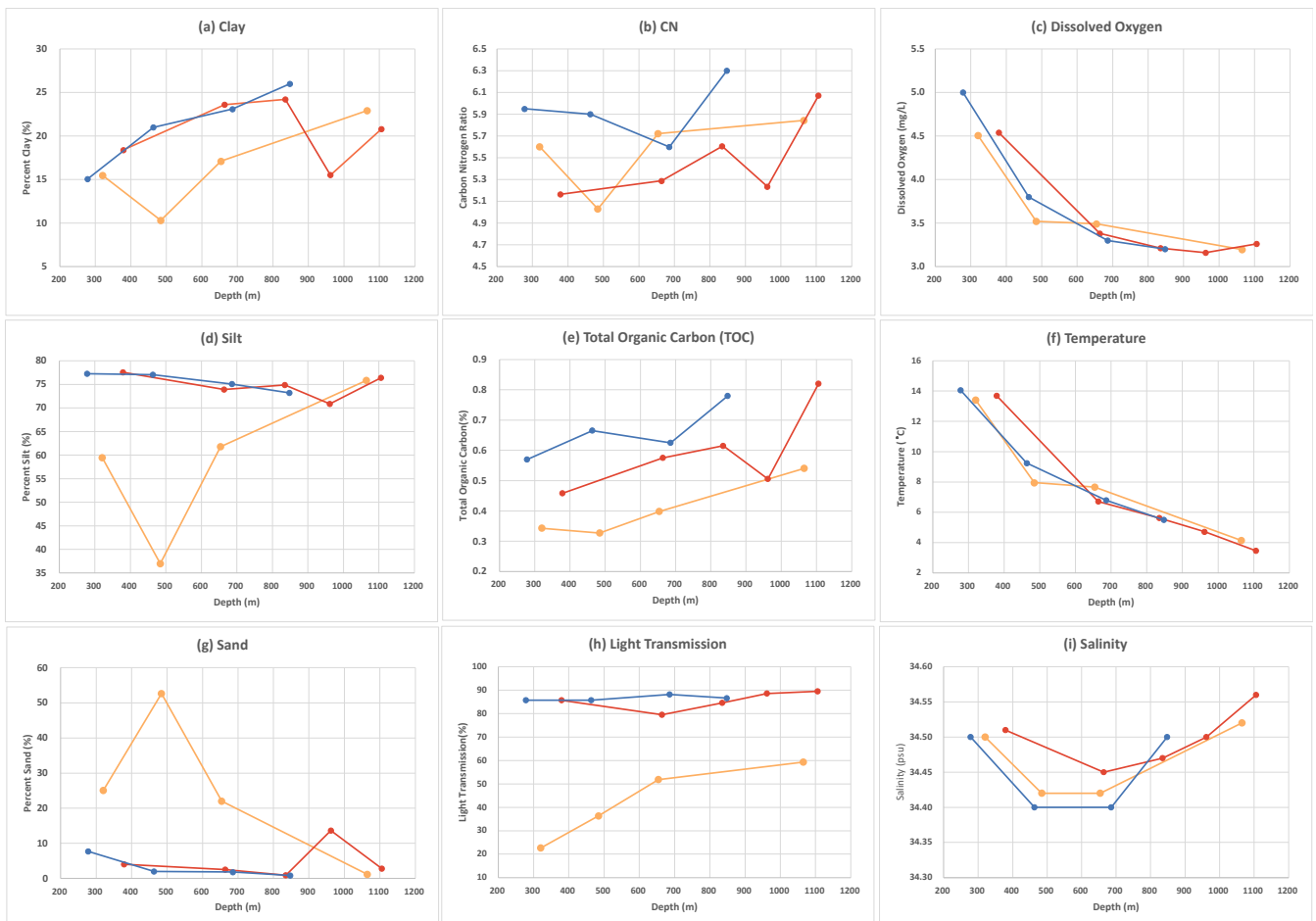
然而，本研究發現黏土百分比(Clay)與沙粒百分比(Sand)兩因子於圖七與圖八的分析結果有所出入。圖八(a, g)分別顯示枋寮與斜坡之黏土佔比在各深度皆相近、高屏峽谷黏土佔比最低且高屏峽谷之沙粒佔比明顯高於其他兩區域，然此現象無法從圖七上觀察到。對此，本研究推測，因本研究在進行線性判別分析前曾先透過對數轉換處理環境資料，此轉換會弱化 (de-emphasize) 極端數值在分析中的影響 (Metcalf & Casey, 2016)。以高屏峽谷之沙粒百分比 (Sand) 為例，附錄二中，航次 1126 資料點的沙粒佔比約在 0~13%之間，與枋寮峽谷之數值範圍相同，然而航次 1102 資料點的沙粒佔比卻介於 35~93%，此差異大幅影響圖八(g)之沙粒佔比平均值，然基於數值方法之差異，此極大數值對圖八的影響明顯大於圖七。

本研究推測，航次 1126 與 1102 之採樣月份不同，而高屏溪乾溼季之流量與沉積物組成差異使高屏峽谷之沉積物特性有大幅的季節性變化 (Liu et al., 2016)，由於數據前置處理弱化了此差異，使線性判別分析在沉積物特性的呈現較為失真。由於季節性變化亦反映了高屏峽谷之環境特性，且可能對生物存在重要影響，故本研究以圖八(a, d, g)之分析結果為主討論沉積物特性（即沙粒、粉沙與黏土佔比三個因子），發現高屏峽谷上游以大粒徑沉積物（沙粒）為主，黏土與粉沙之佔比皆略低於其他兩區域，大陸斜坡與枋寮峽谷之沉積物特性則在各深度皆相似。





圖七、環境因子線性判別分析圖。圖中藍色代表大陸斜坡、黃色代表高屏峽谷、紅色代表枋寮峽谷，資料點大小代表採樣水深。兩軸分別為所有環境因子向量的線性組合，向量代表環境因子，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 (Salinity; psu)、溶氧量 (Oxygen; mg/L)、溫度 (Temp; °C) 與透光度 (Trans; %)。



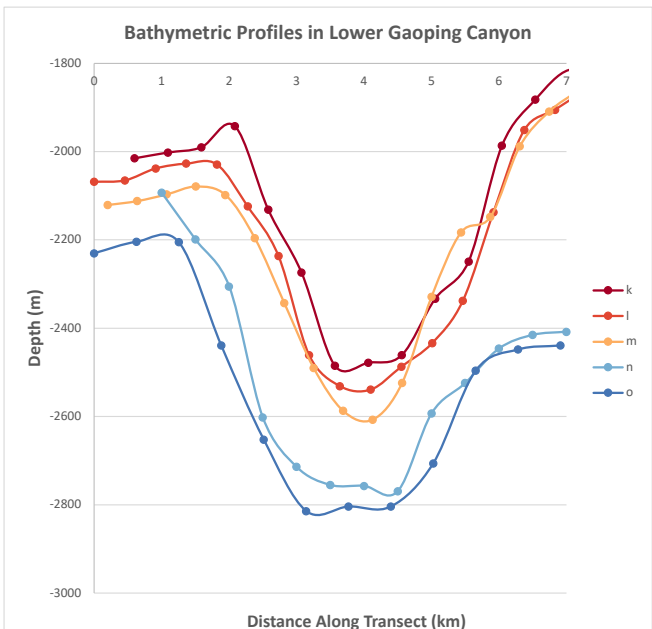
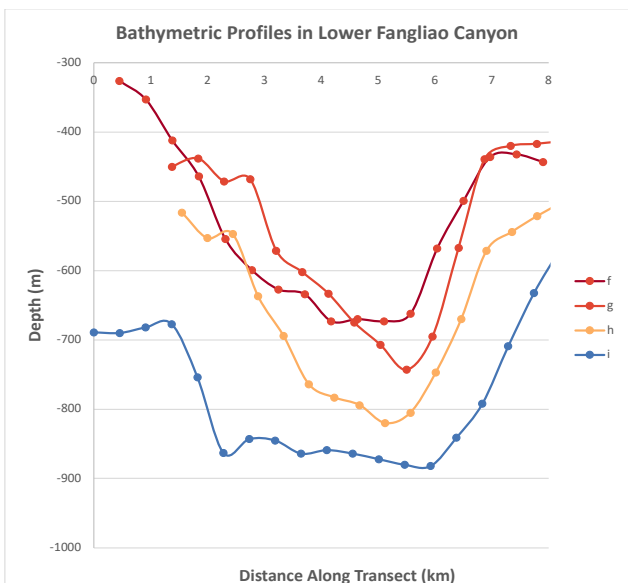
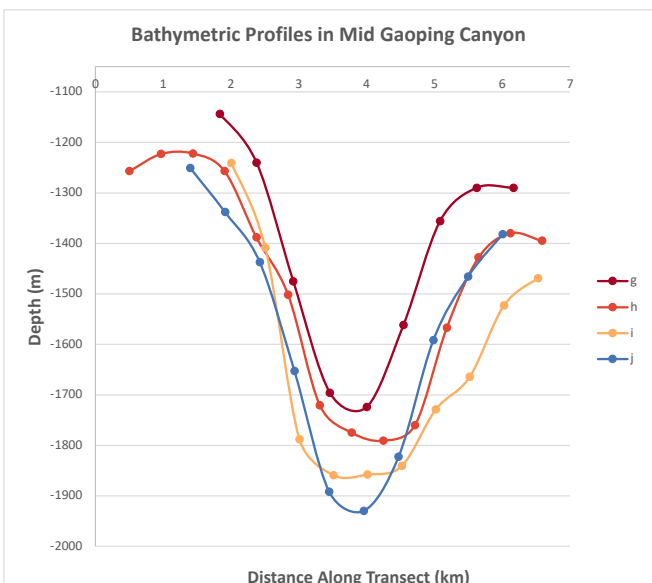
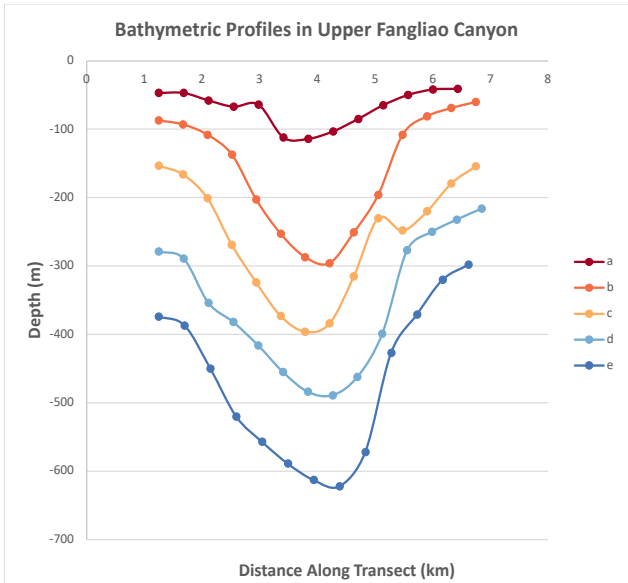
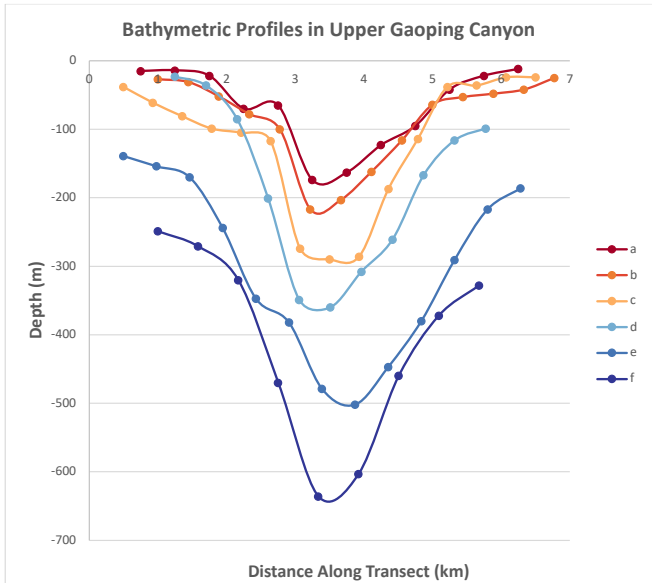
圖八、各環境因子隨深度變化折線圖。藍色為大陸斜坡、黃色為高屏峽谷、紅色為枋寮峽谷。

環境擾動之定義為能夠改變生態系統結構與空間分佈之環境變化，包含物理性（如海流、內潮、濁流、熱帶性風暴、突發性大量降雨等等）、化學性（如重金屬離子、污染事件等等）及人為擾動（如拖網捕魚、天然氣採集、海洋垃圾等），對生態系統亦存在顯著影響（Robertson et al., 2020）。本研究聚焦於物理性擾動的分析討論，由於難以取得流場觀測資料，本研究以峽谷中的地形剖面作為環境物理性的間接證據。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。故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一）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）才逐漸出現 U 型谷的型態，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。其中，本研究採樣區域分佈於水深 1000 公尺內，為 V 型谷特徵最明顯之上游區域，推知本研究中的生物密度及組成皆受強烈擾動的影響。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。

Gunton et al. (2015) 曾於愛爾蘭沿海的懷塔特峽谷（Whittard Canyon）中下游（lower baythal depth; 水深約 3000 公尺以上）進行相似的底棲研究，並發現懷塔特峽谷環境擾動程度中偏弱，不足以對生物構成負面影響，本研究對照其峽谷剖面型態（附錄六），發現懷塔特峽谷各分支的底部剖面與枋寮峽谷下游相似度高，U 型特徵極為明顯。由此推測，枋寮峽谷之環境擾動強度應亦趨中偏弱，與高屏峽谷有明顯差異。

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，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（圖一），並透過與其他峽谷的比較推測枋寮峽谷擾動偏弱。



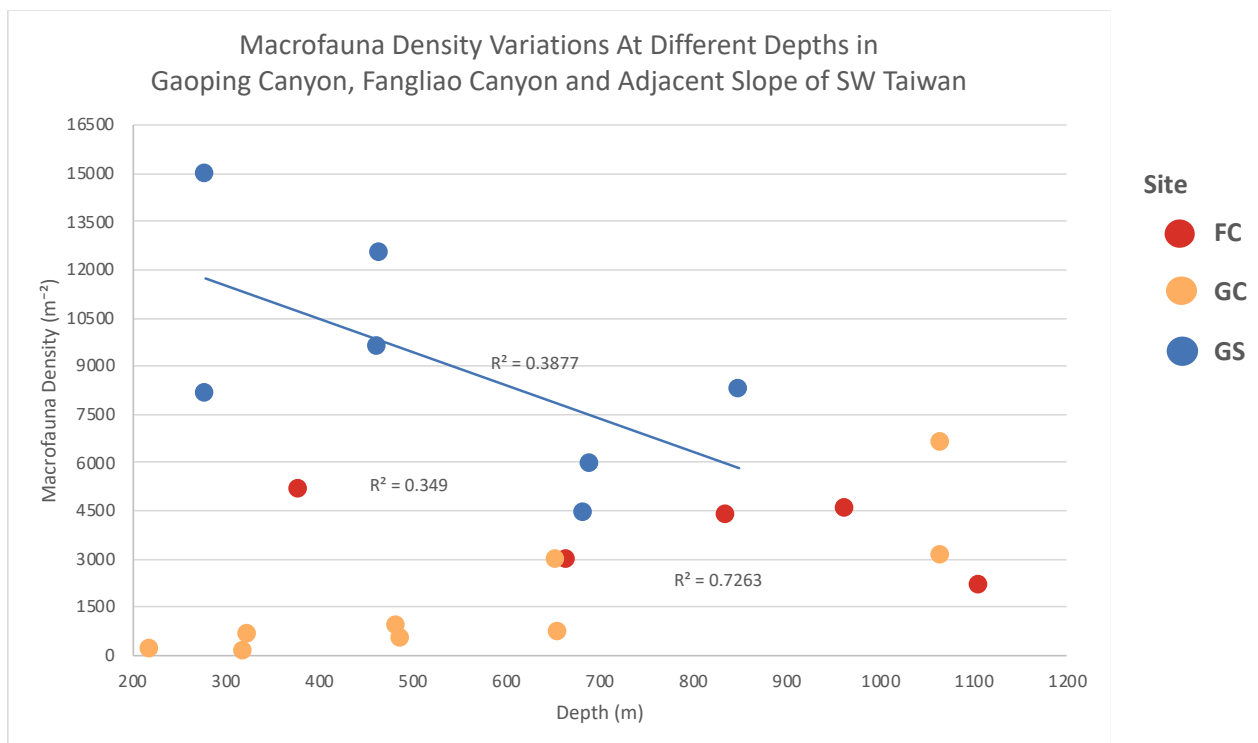
圖九、（左上）高屏峽谷上游地形剖面。  
 圖十、（左中）高屏峽谷中游地形剖面。  
 圖十一、（左下）高屏峽谷下游地形剖面。  
 圖十二、（右上）枋寮峽谷上游地形剖面。  
 圖十三、（右中）枋寮峽谷下游地形剖面。

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（圖一）。  
 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

本研究將高屏峽谷、枋寮峽谷與大陸斜坡的生物密度隨深度變化圖呈現於圖十四。圖中可見，大陸斜坡與枋寮峽谷的生物密度皆是隨深度增加而遞減，反之，高屏峽谷的生物密度則是隨深度增加而遞增。其中，高屏峽谷的生物密度與深度的關聯性 ( $R^2 = 0.73$ ) 明顯高於其他兩個採樣區域，推測因環境擾動強度會隨水深變化，使水深與生物密度有較高的關聯性，隨水深增加，採樣點與峽谷源頭的距離愈遠，其內部物理性擾動愈微弱，生物密度隨之增加。

同時，高屏峽谷與枋寮峽谷的趨勢線於水深約 900 m 處相交。高屏峽谷上游處，整體生物密度明顯低於枋寮峽谷與大陸斜坡，而隨其生物密度逐漸遞增，高屏峽谷下游處的生物密度已有略高於枋寮峽谷的現象。



圖十四、生物密度隨深度變化圖。藍色為大陸斜坡、黃色為高屏峽谷、紅色為枋寮峽谷。

本研究曾透過 PERMANOVA 顯著性檢定發現兩峽谷的生物組成差異存在統計上的顯著性（附錄四，表五）。本研究續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略低。線蟲 (Nematoda) 在兩峽谷中皆能穩定存在（僅五個測站中數量為零），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）。

Taxa	GCI_1126	GCI_1102	GCI_0068	GCI_1126	GCI_1102	GCI_1126	GCI_1102	GCI_1126	GCI_1102	FCI_1190	FCI_1190	FCI_1190	FCI_1190	FCI_1190	FCI_1190
Polychaeta	366	551	97	115	643	308	1194	1097	551	3080	308	1078	539	1424	693
Nematoda			52		92	192	643	87		154		38	38	154	192
Harpacticoida					92	154	459	664		385	2040	5428	308	346	115
Tanaidacea															154
Amphipoda			3							192	38	539	539	500	346
Ostracoda															
Nemertea										115	77		308	385	385
Isopoda								58		77			269	924	231
Cumacea	19							58		308	308	308	500	231	
Bivalvia							275	29	184	308	192	885	808	462	154
Alpacophora						38				38	38		616		
Scaphopoda								1011	4408					77	
Sipuncula	19								551						
Ophiuroida															
Cnidaria															
Nebaliacea															
Stomatopoda															
Asteroidea	96														38
Gastropoda						38									
Scyphozoa															
Platyhelminthes															

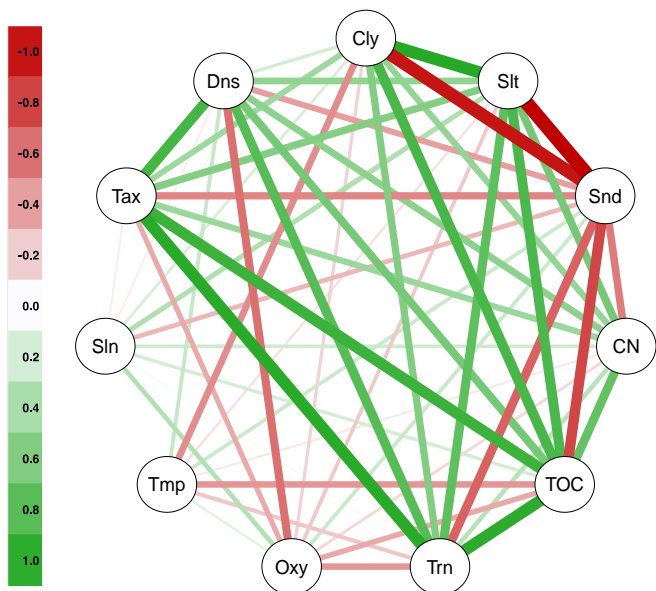
圖十五、生物組成熱圖。縱軸為生物類群名，橫軸為採樣航次（對照附錄一），採樣航次代號中，GC 為高屏峽谷，FC 為枋寮峽谷，格中數字為每平方公尺的生物密度。

### 三、理論驗證：影響生物群聚結構的直接與潛在因子

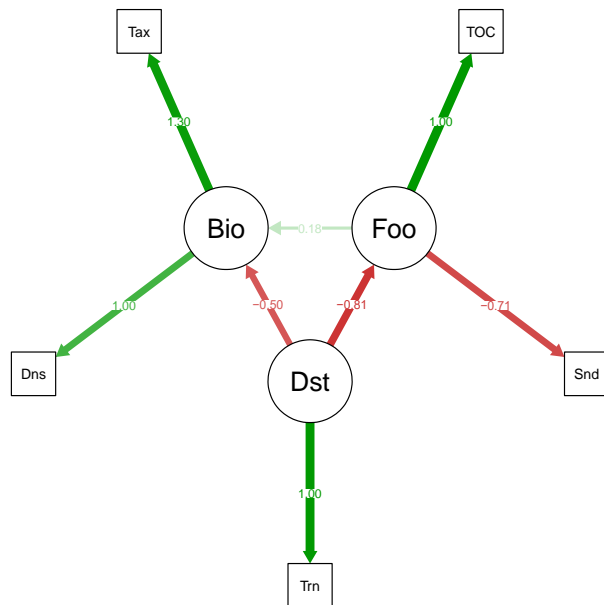
本研究先前曾採用距離式冗余分析 (distance-based Redundancy Analysis; dbRDA) 分析生物類群與環境因子間的關聯性，歸結出有機碳含量與透光度兩因子對兩峽谷生物群聚差異間的貢獻度最高（附錄五，圖二十），並推論「透光度可反映環境擾動強度，有機碳含量反映食物量，兩者為形塑生物群聚的主導因素，其中環境擾動可能同時影響生物與食物量」。然而，本研究僅能從冗余分析中判斷出主要的關聯因子，卻無法量化不同因子間的影響幅度（例如：本研究先前無法確認環境擾動與食物量是否等幅度影響生物，亦或者其中一個因素擁有較大的影響力）。



同時，對生物的影響因素中，往往包含多個環境因子的貢獻（例如：有機碳含量、沙粒百分比、碳氮比等因子可共同反映「食物量」的多寡），若能將性質相似的因子歸納整合，將可提升分析的精確性。為此，本研究進一步建構結構方程模型檢驗先前的推論，為能成功建立模型，本研究亦納入更多航次的採樣資料進行分析。



圖十六、環境因子與生物密度及組成相關係數圖。此圖採用皮爾森相關係數。由於此程式僅能使用三碼代號，故環境因子代號為黏土 (Cly; %)、粉沙 (Slt; %)、沙粒 (Snd; %)、有機碳含量 (TOC; %)、碳氮比 (CN)、鹽度 (Sln; psu)、溶氧量 (Oxy; mg/L)、溫度 (Tmp; °C) 與透光度 (Trn; %)。生物因子為生物密度 (Dns; individuals/m<sup>2</sup>)、生物類群數 (Tax)。



圖十七、環境與生物變量之結構方程模型。環境因子為沙粒 (Snd; %)、有機碳含量 (TOC; %) 與透光度 (Trn; %)。由於透光度實為環境擾動之反指標，本研究於此模型中取透光度之負值。生物因子為生物密度 (Dns individuals/m<sup>2</sup>)、生物類群數 (Tax)。潛在因子為食物量 (Foo)、物理性擾動 (Dst) 及生物群聚結構 (Bio)。路徑係數之解讀詳見 (數據分析)。

圖十六中，有機碳含量 (TOC)與碳氮比(CN)、黏土佔比 (Cly)、粉沙佔比 (Slt) 皆呈中度正相關，並與沙粒佔比 (Snd) 呈中度負相關，沙粒佔比 (Snd) 亦與黏土 (Cly) 及粉沙佔比 (Slt) 呈高度負相關。前人研究 (Liao et al., 2017) 顯示，粒徑較大的沉積物（如沙粒）之碳含量與有機顆粒量普遍低於細顆粒沉積物（如黏土及粉沙），故大粒徑沉積物之佔比亦為生物食物量之關鍵指標，因此，本研究從有機碳含量 (TOC) 與沙粒佔比 (Snd) 兩因子歸納出「食物量 (Foo)」之潛在因子。同時，由於本研究以透光度 (Trn) 作為環境擾動的間接證據，透光度愈高、海水中懸浮沉積物濃度愈低、環境擾動愈微弱，故透光度為環境擾動之反指標，為使模型呈現更為直觀，本研究將透光度取負值後作為環境擾動 (Dst) 的貢獻因子。最後，本研究將生物密度 (Dns) 與生物類群數 (Tax) 整合為「生物群聚結構 (Bio)」。

圖十七為本研究依上述設定建立的結構方程模型，其中，圓形變量 (Bio、 Foo 和 Dst) 為潛在變量，由直接觀測的數據歸納而得，環境 (TOC、 Snd、 Trn) 與生物因子 (Tax、 Dns) 則以方框表示。潛在變量 (圓形) 與環境及生物因子 (方框) 間的係數反映該因子對潛在變量的貢獻。以食物量 (Foo) 為例，有機碳含量 (TOC) 對食物量的貢獻略高於沙粒 (係數絕對值  $|1.00| > |-0.71|$ )，且有機碳含量愈高，食物量愈高 (係數  $1.00 > 0$ )，沙粒佔比愈多，食物量愈低 (係數  $-0.71 < 0$ )。路徑係數表示獨立變量單位變化對應變變量的影響，以環境擾動 (Dst) 為例，環境擾動與生物群聚間的路徑係數為  $-0.50$ ，代表擾動強度 (Dst) 每增加一單位，生物群聚 (Bio) 會隨之減少  $-0.50$  單位。其中，線性方程模型之路徑係數絕對值  $< 0.1$  代表影響微弱，數值  $= 0.3$  代表中度影響， $> 0.50$  之路徑係數則為明顯影響 (Suhr, 2006)。

由此可見，食物量 (Foo) 對生物群聚結構 (Bio) 存在中偏弱的正面影響 (兩者間之間路徑係數  $0.18 > 0$ )，環境擾動 (Dst) 對生物群聚 (Bio) 存在明顯負面影響 (路徑係數  $-0.50 < 0$ )，且環境擾動對生物的影響幅度明顯大於食物量對生物的影響 (路徑係數絕對值  $|-0.50| > |0.18|$ )。同時，環境擾動亦對食物量存在強烈的負向影響，顯示環境擾動可能成為形塑生物群聚的關鍵主導因素，擾動與食物量對生物群聚的影響幅度存在明顯落差。

## 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，環境擾動會影響數個不同的環境因子，如透光度、粒徑分佈等，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與透光度變化作為長期物理性擾動の間接證據。除了本研究的峽谷外，前人研究 (Gunton et al., 2015; De Leo et al., 2014) 結果亦顯示多數峽谷源頭 V 型特徵皆較為明顯 (或者介於 V 型和 U 型間)，多在上偏中游處 (水深多介於 500~600 公尺) 便已出現 U 型為主的剖面型態 (附錄六)。然而，高屏峽谷除了接近源頭處出現極明顯的陡峭 V 型谷外，至中游 (水深近 2000 公尺) 仍維持明顯 V 型剖面，直至下游接近峽谷出口 (水深約 2800 公尺) 才穩定呈現 U 型谷底，可見其物理性擾動之強烈。

圖七顯示，有機碳含量(TOC)是區分三區域的主要因子之一，且高屏峽谷為三區域中有機碳含量最低者。由於高屏峽谷有大量陸源沉積物匯入，本研究推測其有機碳含量較低的原因並非因峽谷內沉積物實際有機顆粒少，可能是因採樣點集中在高屏峽谷上游至中游區域，上游的強烈物理性擾動對沉積物產生淘選效應 (sorting effects)，使有機顆粒含量低的大粒徑沉積物（如沙粒）匯集於上游 (Liao et al., 2017)，因而產生「高屏峽谷內部有機碳含量低」的環境分析結果。由圖八可見，枋寮峽谷與大陸斜坡各深度的沉積物粒徑分佈皆十分相近，但高屏峽谷內上游的沙粒佔比明顯較高，向下游呈遞減趨勢，此現象在約 500 m 的區域尤其明顯。

本研究為能成功建立生物與環境間的量化模型，納入了更多航次的採樣資料進行分析。也因此發現高屏峽谷具有明顯季節性變化的特質。前人研究 (Liu et al., 2016) 顯示，受季風氣候與颱風影響，高屏溪沿海平原 (Gaoping coastal plain) 年度降雨有七成發生在六月初至九月底的濕季 (flood season)，此期間高屏溪向外海輸出的沉積物量高達每年度輸出量的九成。本研究推測，航次 OR1\_1126 與 NOR3\_0068 於濕季剛結束的十月、十一月進行採樣，由於濕季期間大量陸源沉積物注入，採樣時有機顆粒含量高的小粒徑沉積物（如黏土與粉沙）佔比較高，有機碳含量亦較高；航次 OR1\_1102 在四月採樣，此時高屏溪約已經歷半年之乾季，陸源有機沉積物輸入量長期偏低，加上峽谷底流擾動產生的持淘選作用又使小顆粒沉積物持續往深海移動，使大顆粒沉積物在上游佔比明顯較高，有機碳含量亦低 (1126 航次的有機碳含量約介於 0.4~0.5，1102 航次則多介於 0.2~0.4)。由此顯示高屏峽谷是環境變化劇烈的區域，峽谷內部不同深度的環境特性、不同季節的環境特性等等皆有明顯差異，本研究透過比對線性判別分析 (LDA)、主成分分析 (PCA)、環境因子隨深度變化折線圖、環境因子原始資料並參考前人研究才得以完善對高屏峽谷的分析。

環境擾動為影響區域性生態變化的關鍵因素 (Harris, 2014)，本研究認為，環境擾動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。而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、生物群聚結構差異

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)。然而，高屏峽谷的生物密度則呈相反規律，且高屏與枋寮兩峽谷的生物密度隨深度變化趨勢線於水深約 900m 處相交。

依據生態學的動態平衡理論(Dynamic Equilibrium Model; DEM) (Huston, 2014)，生產力 (productivity) 與環境擾動為形塑一區域生態結構的主導因素 (附錄七)，本研究認為，高屏峽谷源頭的強烈擾動使生物難以在上游生存，並同時將有機物集中於中下游，使高屏峽谷大量陸源沉積物對生物的正面影響無法在上游體現，卻隨深度增加而逐漸累積，在中下游處，環境擾動強度不足以影響沉積物分佈、對生物的直接威脅減小時，高屏峽谷的有機物帶來的生存優勢才得以充分顯現。

雖然目前仍缺乏枋寮峽谷流場的直接觀測資料，但其峽谷剖面以 U 型為主，且其透光度與大陸斜坡相近，推測內部物理性擾動微弱。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)。因此，雖然物理性擾動微弱，但有限的食物量也使枋寮峽谷的生物密度隨深度漸減，其下游生物密度可能因此低於高屏峽谷下游。

枋寮峽谷的生物組成較高屏峽谷豐富。囊蝦總目在兩峽谷內的差異尤其明顯，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。由此可見，不同生物類群對環境變動的反應皆有所差異，生物群聚特性亦可能反映區域環境特性。

### 三、海底峽谷生態研究的綜合討論與比較

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)，即海底峽谷內部的生物密度與生物多樣性皆顯著高於外部環境。推測峽谷中的流場會降低有機顆粒沉降的速率或使沉降至底部的 POM (particulate organic matter; 泛指生物性的浮游藻類、細菌等和非生物性的有機碎屑) 再向上懸浮循環，使峽谷水層中的有機物含量高於周遭地區，提高其初級生產力 (primary productivity) (Bosley et al., 2004)。同時，峽谷的棲地多樣性 (habitat heterogeneity) 亦會使生物的多樣性提升，由於峽谷內部地形複雜，同一區域往往含有泥土、沙土、岩石壁等多樣化的棲地，為更多種類的生物提供有利的生存條件 (De Leo et al., 2014)。

然而，本研究中，兩峽谷的生物密度都整體低於周遭斜坡環境，且大部分的生物類群皆無法穩定存在高屏峽谷內部，與前人研究 (Liao et al., 2017) 比較後發現，枋寮峽谷的生物多樣性亦未高於大陸斜坡，這樣的發現有別於其他峽谷的研究。本研究認為，峽谷需具備沉積物輸入量穩定且充足、地理環境沒有強烈物理性擾動影響等基本條件，才能使峽谷流場的循環效應與底質多樣性等因素體現於生物群聚的變化。以本研究的枋寮峽谷為例，其源頭距離陸地較遙遠，季節性颱風與谷壁坍塌等偶發性事件 (Hale et al., 2012) 也難以提供穩定的沉積物輸入，即使峽谷流場能促進有機顆粒的循環利用、地形提供較為多樣的棲地，也無法使食物量有限的枋寮峽谷成為生物熱點。

同時，雖然在高屏上游觀測到的生物密度與多樣性明顯較低，但本研究認為高屏峽谷有潛力成為深海的生物密度與多樣性熱點。過去研究顯示，有連接陸上河流的海底峽谷 (Wei et al., 2012; De Leo et al., 2010) 多因接收河流的大量陸源沉積物，使其生物密度與多樣性不但高於大陸斜坡，也整體高於其他作為生物熱點的海底峽谷。高屏峽谷所連結的高屏溪是臺灣流域最廣、輸沙量 (suspended sediment load) 次高的溪流 (Liu et al., 2016)，使高屏峽谷匯集大量陸源沉積物，雖然其物理性擾動使源頭不利於生物生存，但隨環境擾動減弱與有機物的逐漸累積，高屏峽谷生物密度隨著深度逐漸遞增。圖十三中，高屏峽谷下游深度可達近 3000 公尺深，可見本研究所討論的高屏峽谷仍侷限於上游區域，但也已出現高屏峽谷生物密度逐漸超越枋寮峽谷的趨勢。同時，高屏峽谷其地形蜿蜒 (sinuous)、不同區段陡峭程度差異明顯、



包含許多壑溝地形 (gullies)、底質種類多元，是地質多樣性 (geodiversity) 極高的環境 (Chiang et al., 2021)，能為生物提供極多樣的棲地。綜合上述觀察與前人研究，雖然現階段受限於採樣技術而無法直接分析高屏下游的生物群聚，但本研究推測其下游可能在貧瘠的深海環境中成為生物密度與多樣性的熱點。

全球 9000 個海底峽谷中，除了高屏峽谷外，亦有其他具有強烈物理性擾動的高能量峽谷環境。美國加利福尼亞海域的 Monterey Canyon (Xu et al., 2004)、Hueneme Canyon 和 Mugu Canyon (Xu et al., 2010) 及非洲連接剛果河的剛果峽谷 (Congo Canyon) 皆曾觀測過最大流速與高屏峽谷相當的物理性擾動，其中剛果峽谷的濁流流體結構特殊，擾動持續時間曾超過 160 小時，強度更是高於高屏峽谷 (Azpiroz-Zabala et al., 2017)。或許在持續的探索下，會發現更多具有強烈環境擾動的峽谷，若能將相似的研究結果進行統合分析，應能更完善的解釋生態系統面對物理性擾動的變化與適應。

#### 四、現階段的研究限制

本研究聚焦討論了海底峽谷內部的物理性擾動對生物的影響，並利用透光度與底部剖面型態等間接證據進行比較討論。然而，上述觀察也僅能反映物理性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) 等則難納入考慮。

除了物理性擾動以外，拖網捕魚 (bottom trawling)、天然氣採集、海洋垃圾、化學污染等等人為活動亦會對深海的生物群聚產生威脅 (anthropogenic threats)。以拖網捕魚為例，過去數十年間，隨著漁業技術發展擴張，全球沿海峽谷上游至中下游區間的拖網捕魚活動愈發活躍 (Martín et al., 2014)，由於許多深海生物的生長率、繁殖率皆較低 (Norse et al., 2012)，深海生態系統尤其容易受相關人為活動影響。由於人為活動的種類與形式繁多，涉及的地域範圍極廣，對環境的影響也不盡相同，因此將人為活動與污染準確的量化分析十分困難，也使其往往成為被忽略的考慮因素，也成為此類生態系統研究的限制之一。

同時，本研究建構的結構方程模型中，現階段仍缺乏量化物理性擾動的直接證據。本研究在構思研究流程時，曾規劃以 ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler; 聲學都卜勒流速剖面儀) 量測流場數據，透過最大流速、平均流速與粒子散射程度 (particle backscatter) 等數據推算峽谷內部物理性擾動強度，但由於測量時儀器狀態略有異常，且無法在所有採樣點都取得相關測量數據，因此最終並未採納。本研究亦曾參考 Chiou et al. (2011) 所建立的高屏峽谷內潮物理模型，但由於枋寮峽谷並無相似的流場模型，因此也無法納入分析。同時，本研究曾嘗試應用 Huang et al. (2018) 與 De Leo et al. (2014) 量化剖面型態的方法，利用 GIS 系統計算谷底切線角度正切值與平均谷壁斜率，彌補缺乏流場資料的不足，但由於水深網格資料解析度不夠高，誤差範圍過大，因此最終僅以「透光度」作為擾動的量化因子。雖然透光度與生物密度、類群數、有機碳含量等關鍵指標皆呈中高度相關，模型檢驗指數亦顯示適配性良好，但若能將流場資料等直接證據納入模型，必能使模型更加完善。

環境分析中，高屏峽谷大幅的季節性變化亦導致本研究的線性判別分析結果在沉積物組成的部分略有失真。除了數據前置作業的原因外，由於線性判別分析需「最小化組內差異」、「最大化組間差異」，故較適用同一組別因子表現相近的資料（例如：枋寮峽谷內部不同深度環境特性皆相似），對於同一組別內因子有大幅變化的資料（如高屏峽谷）則較易失真，對此，本研究採用多方參照、相互比較的方法，利用不同分析方式處理相同資料，再搭配理論與前人研究進行剖析。

就生物分析而言，本研究主要討論對象為大型底棲動物，大型底棲動物作為食物鏈的基礎，能在一定程度上反映區域性的生態環境。由於不同類型的生物對環境的反應不盡相同，部分研究會採用同時比較多種生物的方式，更全方位瞭解環境因子變化對生物的影響，例如，Liao et al. (2017) 研究內潮擾動的高能量環境中的大型與小型底棲動物，Donadi et al. (2015) 以生物體的長寬比為分類依據討論各長寬區間生物對環境變化的反應。以本研究為例，因為只研究大型底棲生物，在分析生物組成時，便難以確認線蟲數量低於多毛類是否為體型落差造成，若未來有望納入更多元的生物資料進行分析，將能使本研究更加完整。

## 五、研究的應用與未來展望

本研究使用多變量統計方式進行找出不同型態峽谷環境的主要區隔因子，並建立模型量化環境因子間的交互作用及環境對生物的影響。同時，本研究針對枋寮峽谷的底棲動物結構進行分析，就本研究所知，枋寮峽谷過去未曾有過類似的生態研究。

海底峽谷的複雜地形使環境因子變化多端，使其成為獨特的天然實驗室 (natural laboratory)，透過峽谷研究能觀察到許多生物類群對不同環境變異的反應，也能觀察到不同環境因子的變化模式。本研究中的高屏峽谷尤其具備天然實驗室的特性，Liu et al. (2009) 曾指出高屏峽谷的地質特性使其成為研究陸源沉積物來源、移動途徑、運輸過程與最終匯集處的理想環境；Liao et al. (2017) 認為，高屏峽谷與內潮發源地相鄰的地理特性使其成為研究高能量環境的天然實驗室。本研究發現，高屏峽谷內部環境變化的幅度極大，從源頭強烈擾動抑制生態發展，中游擾動強度與有機物累積的兩作用漸達平衡，到下游趨弱的擾動與累積的有機物使其具備成為深海生物熱點的潛力。同時，高屏峽谷內部明顯的環境因子變化，例如遠低於外部環境的透光度、大粒徑沉積物佔比隨深度增加而劇烈下降等，使本研究能從多變量分析中歸納出主導高屏峽谷內環境變化的因素—物理性擾動，並找出使高屏峽谷有別於其他峽谷的區隔因子。綜合上述特質，本研究認為高屏峽谷亦具成為生態平衡與穩定性的天然實驗室之潛力。

峽谷研究除了有助於瞭解峽谷本身內部的生態結構外，也可作為天然實驗室檢驗不同環境因子對生態的影響，以高屏峽谷為例，由於峽谷連接陸上河流，因此尤其容易受陸上活動（如大量降雨、溪水暴漲、地震、颱風等等）影響，造就了一劇烈變化的強烈擾動環境，透過研究峽谷上游的生態變化，本研究能觀察底棲生態在極端擾動下的結構變異，藉以瞭解劇烈環境擾動對生物群聚的影響規模，哪些生物類群對擾動的反應最明顯？有哪些生物類群可能在極端環境中受益？哪些環境因子的監測對生態群聚評估最具重要性與代表性？這些理解對於氣候變遷下極端氣候現象頻發的現代尤其重要。

本研究亦認為，高屏峽谷內部的大幅度環境變化亦有助於生態學理論的驗證與討論，以動態平衡模型 (DEM) 為例 (附錄七)，DEM 推論生產力 (即本研究討論的食物量) 與環境擾動強度恰達平衡時，生物多樣性會出現最大值，兩者等幅度影響生物群聚，然本研究發現

環境擾動達一定強度後，會間接影響食物分佈，並建模驗證擾動對生物的影響力可能比食物量更為顯著，以此推論動態平衡模型可能不適用於劇烈擾動環境的討論。

在生物分析中，本研究發現部分生物類群（如線蟲、多毛類等）能穩定存在兩峽谷中，亦歸結出淺底棲性的囊蝦總目（端足目、等足目等）因棲於底泥最表層而受擾動的衝擊最大，幾乎無法於高屏峽谷中生存。本研究目前聚焦於分析各類環境變化對生物的影響，亦發現不同生物類群對環境變化的反應有明顯的差異，若未來此類生物研究能更臻成熟，生物群聚結構是否能成為反映環境特性的一重要指標？同時，前人研究(Stratmann et al., 2020)顯示底棲動物具有調節周遭環境特性的能力，能改變沉積物組成、刺激微生物群進行養分再生等等，除了本研究所討論的環境影響生物外，生物與環境特性間是否存在交互作用，亦能進一步探討。

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討論，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。

## 陸、結論

- 一、透過枋寮峽谷及大陸斜坡的環境與生物分析，結合現有的動態平衡模型理論，本研究認為，一般環境下，環境擾動與食物量兩因素共同等幅影響區域性生態系統。然觀測高屏峽谷發現，擁有劇烈擾動的高能量環境中，環境擾動足以改變沉積物分佈型態，藉此間接影響食物量供應，並成為形塑生物群聚結構的關鍵主導因素，
- 二、承上，由此推論，現有生態學理論未必適用極端環境之討論。本研究認為，環境因子複雜多變的海底峽谷深具成為自然實驗室的條件，其研究將有助於生態學說的檢驗與調整，也能藉此探究極端環境變化下的生態結構變異。
- 三、高屏峽谷上游生物密度極低，明顯低於枋寮峽谷，然高屏峽谷生物密度隨深度遞增，並於中游處超越枋寮峽谷。由於高屏峽谷接收大量陸源沉積物、地質多樣性極高且下游趨弱的擾動使有機物得以逐漸累積，本研究認為其下游可能在貧瘠的深海環境中成為生物密度與多樣性的熱點，形成獨特的生態系統。

## 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.
- 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>
- Bentler, P. M. (1990). Comparative fit indexes in structural models. *Psychological bulletin*, 107(2), 238.
- Bentler PM, Chou CP (1987) Practical issues in structural modeling. *Socio Meth Res* 16(1):78–117
- Bosley, K. L., Lavelle, J. W., Brodeur, R. D., Wakefield, W. W., Emmett, R. L., Baker, E. T., et al. (2004). Biological and physical processes in and around Astoria submarine Canyon, Oregon, USA. *J. Mar. Syst.* 50, 21–37. doi: 10.1016/j.jmarsys.2003.06.006
- 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>
- Chiang, C.-S., & Yu, H.-S. (2021). Morphological Significance and Relation of Ecosystems of Submarine Canyons off SW Taiwan. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(11), 1296. <https://doi.org/10.3390/jmse9111296>
- 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>
- Fan, Y., Chen, J., Shirkey, G., John, R., Wu, S. R., Park, H., & Shao, C. (2016). Applications of structural equation modeling (SEM) in ecological studies: an updated review. *Ecological Processes*, 5(1). <https://doi.org/10.1186/s13717-016-0063-3>
- 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., Macmillan-Lawler, M., Rupp, J., and Baker, E. (2014). Geomorphology of the oceans. *Mar. Geol.* 352, 4–24. doi: 10.1016/j.margeo.2014.01.011
- 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>
- Hastie, Trevor, et al. “4.3 Linear Discriminant Analysis.” *The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction*, Springer, New York, 2017, pp. 106–113.

- 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>
- Hu LT, Bentler PM (1999) Cutoff criteria for fit indexes in covariance structure analysis: conventional criteria versus new alternatives. *Struct Equ Modeling* 6(1):1–55
- 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.
- 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.
- Kline, R. B. (2015). Principles and practice of structural equation modeling. Guilford publications.
- 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., Hung, J.-J., Lin, H.-L., Huh, C.-A., Lee, C.-L., Hsu, R. T., Huang, Y.-W., & Chu, J. C. (2009). From suspended particles to strata: The fate of terrestrial substances in the Gaoping (Kaoping) submarine canyon. *Journal of Marine Systems*, 76(4), 417–432. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2008.01.010>
- 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>
- Liu, J. T., Hsu, R. T., Hung, J.-J., Chang, Y.-P., Wang, Y.-H., Rendle-Bühring, R. H., Lee, C.-L., Huh, C.-A., & Yang, R. J. (2016). From the highest to the deepest: The Gaoping River–

- Gaoping Submarine Canyon dispersal system. *Earth-Science Reviews*, 153, 274–300.  
<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2015.10.012>
- Martín, J., Puig, P., Palanques, A., and Giamportone, A. (2014). Commercial bottom trawling as a driver of sediment dynamics and deep seascape evolution in the Anthropocene. *Anthropocene* 7, 1–15. doi: 10.1016/j.ancene.2015.01.002
- 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>
- Metcalf, L., & Casey, W. (2016). Introduction to data analysis. *Cybersecurity and Applied Mathematics*, 43–65. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-804452-0.00004-x>
- McIntosh A, R., Gonzalez-Lima F (1994) Structural equation modeling and its application to network analysis in functional brain imaging. *Hum Brain Mapp* 2.
- Mulaik SA, James LR, Van Alstine J, Bennett N, Lind S, Stilwell CD (1989) Evaluation of goodness-of-fit indices for structural equation models. *Psychol Bull* 105(3):430–445
- Norse, E. A., Brooke, S., Cheung, W. W. L., Clark, M. R., Ekeland, I., Froese, R., et al. (2012). Sustainability of deep-sea fisheries. *Mar. Policy* 36, 307–320. doi: 10.1016/j.marpol.2011.06.008
- 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>
- 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>
- Stratmann, T., van Oevelen, D., Martínez Arbizu, P., Wei, C.-L., Liao, J.-X., Cusson, M., Scrosati, R. A., Archambault, P., Snelgrove, P. V. R., Ramey-Balci, P. A., Burd, B. J., Kenchington, E., Gilkinson, K., Belley, R., & Soetaert, K. (2020). The BenBioDen database, a global database for meio-, macro- and megabenthic biomass and densities. *Scientific Data*, 7(1), 206. <https://doi.org/10.1038/s41597-020-0551-2>
- Suhr, Diana. (2006). *The Basics of Structural Equation Modeling*.

- 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>
- Xu, J. P., Noble, M. A., & Rosenfeld, L. K. (2004). In-situ measurements of velocity structure within turbidity currents. *Geophysical Research Letters*, 31(9), n/a-n/a. <https://doi.org/10.1029/2004gl019718>
- Xu, J. P., Peter W. Swarzenski, Marlene Noble, An-Chun Li, Event-driven sediment flux in Hueneme and Mugu submarine canyons, southern California, *Marine Geology*, Volume 269, Issues 1–2, 2010, Pages 74–88, ISSN 0025-3227, <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2009.12.007>.

## 捌、附錄

### 附錄一、採樣紀錄與測站基本資料

表一、採樣紀錄及測站資料。表中航次代號 NOR3\_0068 為本研究出海採樣，其餘航次 (OR1\_1126、OR1\_1102) 為國內海洋研究所採樣資料，測站代號對應圖一。

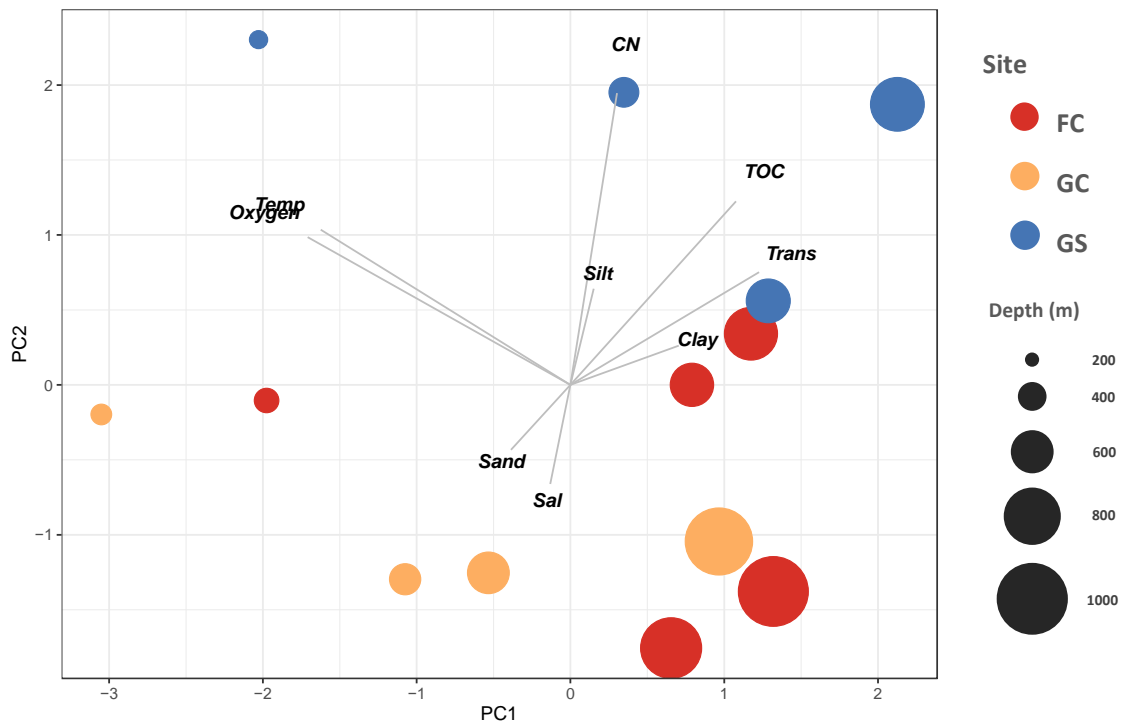
區域	環境類型	航次	測站代號	採樣水深 (m)	日期		
高屏	峽谷	NOR3_0068	GC2A	220	2021-10-17		
			OR1_1126	GC1	318	2015-11-20	
				GC2	487	2015-11-20	
				GC3	655	2015-11-21	
		GC4		1065	2015-11-21		
		OR1_1102	GC1	323	2015-04-06		
			GC2	482	2015-04-06		
			GC3	653	2015-04-06		
			GC4	1065	2015-04-06		
		枋寮	峽谷	OR1_1190	FC1	379	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		
		OR1_1102	GS1	279	2015-04-06		
			GS2	464	2015-04-06		
			GS3	682	2015-04-06		

## 附錄二、各測站環境因子資料

表二、測站環境基本資料，代號為黏土 (*Clay*; %)、粉沙 (*Silt*; %)、沙粒 (*Sand*; %)、有機碳含量 (*TOC*; %)、碳氮比 (*CN*)、鹽度 (*Salinity*; psu)、溶氧量 (*Oxygen*; mg/L)、溫度 (*Temp*; °C) 與透光度 (*Trans*; %)。

Station	Depth (m)	Clay (%)	Silt (%)	Sand (%)	CN	TOC (%)	Trans (%)	Oxygen (mg/L)	Temp (°C)	Salinity (psu)
GC1_1126	318	20.95	73.37	5.68	5.70	0.42	23.7	4.4	12.3	34.50
GC1_1102	323	10.00	45.60	44.40	5.50	0.27	21.6	4.6	14.5	34.50
GC2_1126	487	19.50	67.54	12.97	5.46	0.41	40.1	3.4	7.3	34.44
GC2_1102	482	1.10	6.40	92.40	4.60	0.24	32.6	3.6	8.6	34.40
GC3_1126	655	21.52	69.78	8.70	5.25	0.42	60.4	3.5	7.5	34.44
GC3_1102	653	12.70	53.80	35.30	6.20	0.38	43.3	3.5	7.8	34.40
GC4_1126	1065	24.15	75.30	0.55	5.59	0.52	51.7	3.2	4.0	34.54
GC4_1102	1065	21.70	76.40	1.80	6.10	0.56	66.8	3.2	4.3	34.50
FC1_1190	379	18.40	77.60	4.00	5.16	0.46	85.7	4.5	13.7	34.51
FC2_1190	664	23.60	73.90	2.50	5.29	0.58	79.5	3.4	6.7	34.45
FC3_1190	835	24.20	74.90	0.90	5.61	0.62	84.6	3.2	5.6	34.47
FC4_1190	962	15.50	70.90	13.60	5.23	0.51	88.6	3.2	4.7	34.50
FC5_1190	1106	20.80	76.40	2.80	6.07	0.82	89.5	3.3	3.5	34.56
GS1_1102	279	15.40	77.50	7.10	5.80	0.57	87.9	5.0	14.2	34.50
GS2_1102	464	20.70	77.40	1.90	5.90	0.66	86.7	3.8	9.5	34.40
GS3_1102	682	22.30	75.10	2.60	5.70	0.60	89.2	3.3	7.2	34.40
GS1_1126	277	14.70	77.00	8.30	6.10	0.57	83.6	5.0	13.9	34.50
GS2_1126	463	21.30	76.70	2.00	5.90	0.67	84.8	3.8	9.0	34.40
GS3_1126	690	23.90	75.10	1.00	5.50	0.65	87.1	3.3	6.4	34.40
GS4_1126	848	26.00	73.20	0.80	6.30	0.78	86.6	3.2	5.5	34.50

## 附錄三、各環境因子主成分分析 (全國科展)



圖十八、環境差異主成分分析圖。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，於軸上的投影長度表示因子在該軸中的佔比。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。

#### 附錄四、環境與生物差異之 PERMANOVA 顯著性檢定 (全國科展)

表三、兩峽谷間綜合各環境因子進行 PERMANOVA 檢定。表中 F-statistic 值愈大則 p 值愈小， $p < 0.05$  代表顯著差異。地點 (site) 之檢定  $p=0.034 < 0.05$ ，顯示高屏與枋寮兩區域之環境差異存在統計學上的顯著性 (significance)。

Source	離均差平方和 SS	均方和 MS	$R^2$	F-statistic	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>

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 F-statistic 值愈大則 p 值愈小， $p < 0.05$  代表顯著差異。地點 (site) 之檢定  $p=0.026 < 0.05$  顯示三區域之生物密度存在統計學上的顯著性，環境 (habitat) 之檢定  $p=0.008$  顯示斜坡與峽谷具有顯著不同的生物密度。

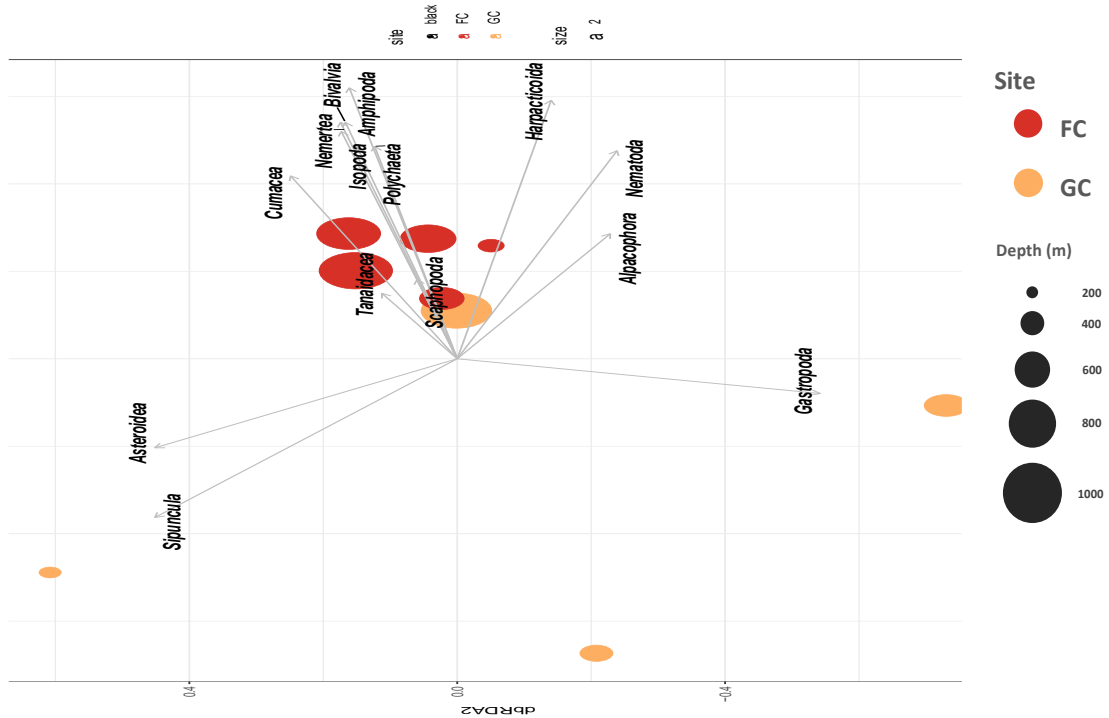
Source	離均差平方和 SS	均方和 MS	$R^2$	F-statistic	P
環境 (habitat)	0.56587	0.56587	0.27960	20.0980	<b>0.00854</b>
深度 (depth)	0.59917	0.19972	0.29606	7.0936	0.05453
地點 (site)	0.33430	0.33430	0.16518	11.8733	<b>0.02609</b>

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 F-statistic 值愈大則 p 值愈小， $p < 0.05$  代表顯著差異。地點 (site) 之檢定  $p=0.01 < 0.05$  顯示高屏與枋寮之生物組成存在顯著差異。

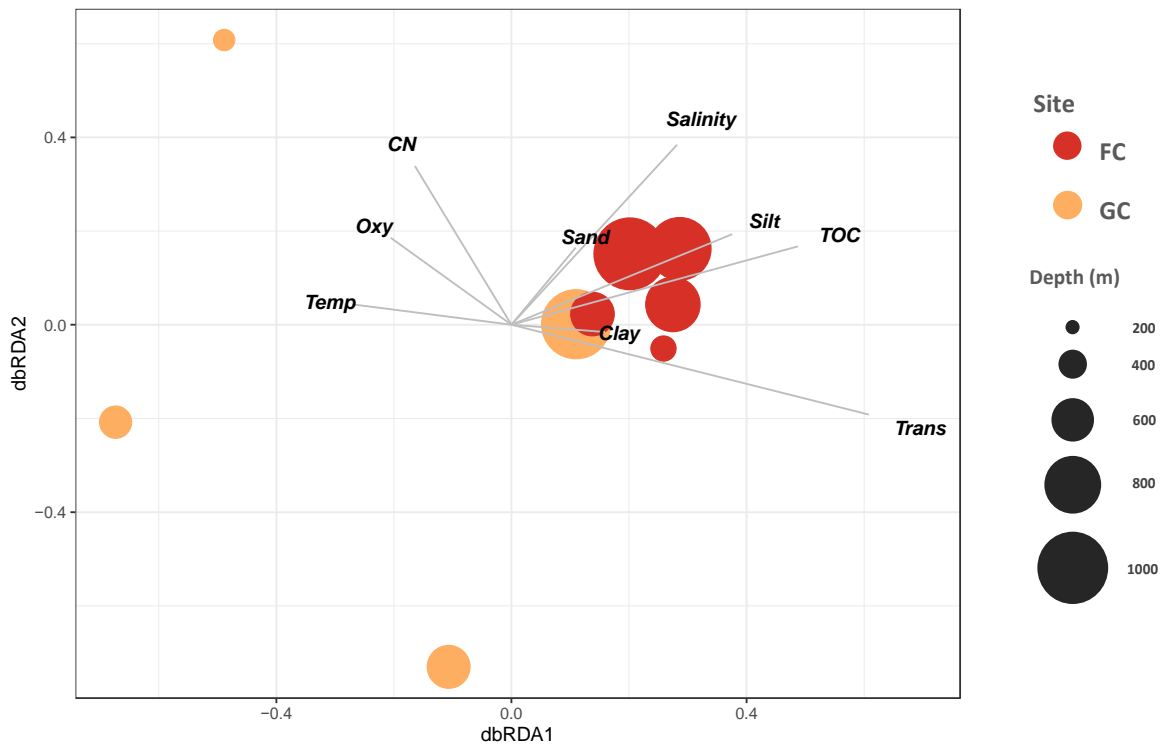
Source	離均差平方和 SS	均方和 MS	$R^2$	F-statistic	P
深度 (depth)	0.38674	0.38674	0.23836	4.1043	<b>0.01461</b>
地點 (site)	0.41382	0.41382	0.25505	4.3917	<b>0.01061</b>



附錄五、環境與生物之距離式冗余分析 (dbRDA) (全國科展)

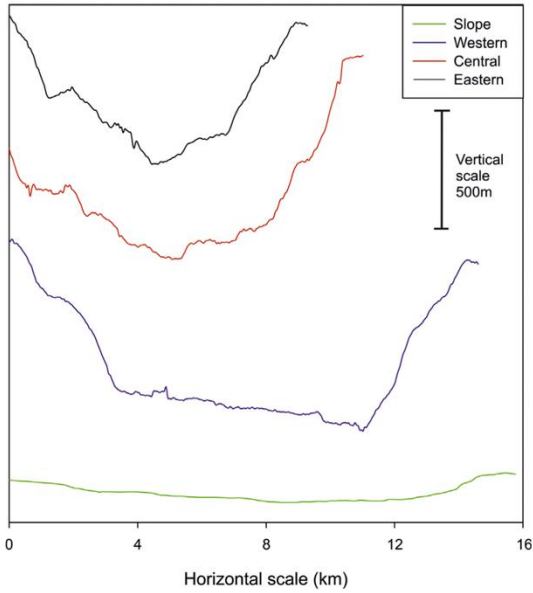


圖十九、兩峽谷生物組成與各生物分類群關係圖。橫軸 dbRDA1 表達總生物組成變異量的 73.8%，dbRDA2 則為 21.4%，資料點大小代表深度，紅色為枋寮峽谷，淡橘為高屏峽谷。灰色箭頭為各生物分類群之特徵向量，其於兩軸的投影長度分別表示分類群對兩軸的貢獻度。

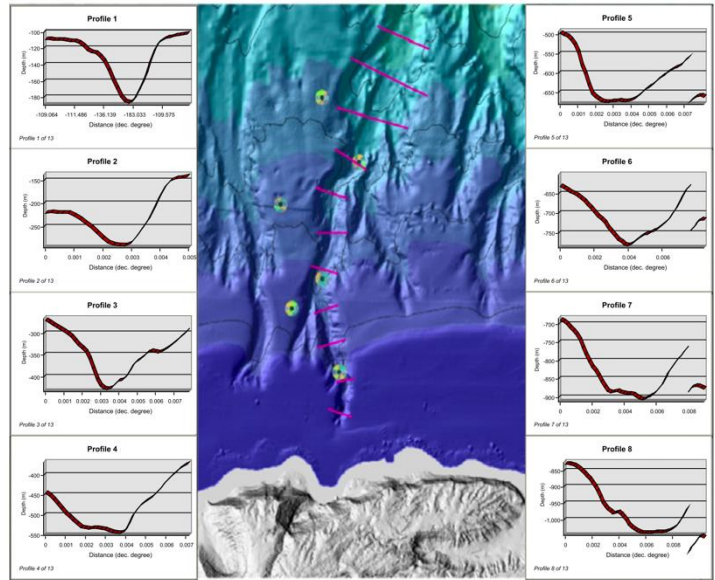


圖二十、兩峽谷生物組成與環境因子關係圖。兩軸同圖十九。資料點大小代表深度，紅色為枋寮峽谷，淡橘為高屏峽谷。灰色箭頭為各環境因子之特徵向量，向量長度對應該因子對兩峽谷生物群聚結構差異的貢獻。透光度 (Trans) 與有機碳含量 (TOC) 為對 dbRDA1 貢獻度最高的環境因子，因 dbRDA 詮釋了生物資料變異量的七成，故透光度與有機碳含量與兩峽谷生物組成差異關聯性最高。

附錄六、前人研究之峽谷剖面型態對照

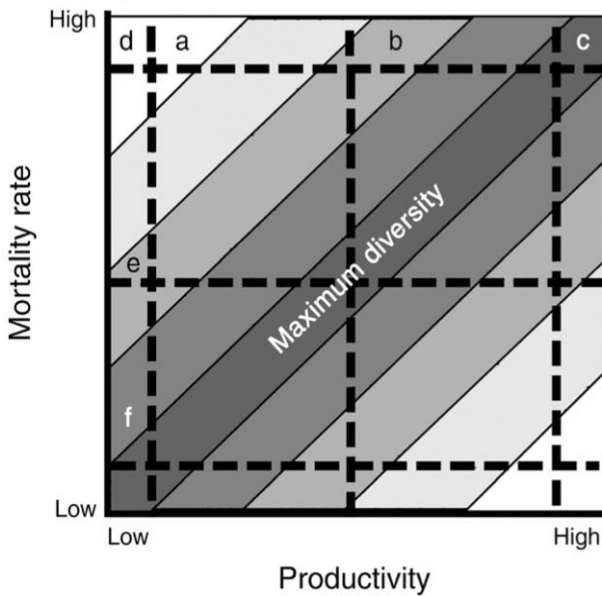


圖二十一、Gunton et al. (2015) 繪製之懷塔特峽谷(Whittard Canyon)東部、中央與西部分支底部剖面圖，Slope 為周遭斜坡之對照剖面。



圖二十二、De Leo et al.(2014) 於美國夏威夷州摩洛凱島(Moloka'i Island)沿海峽谷繪製之地形剖面圖。縱軸為水深 (m)，橫軸為沿剖面起始端之距離 (dec. degree)。

附錄七、動態平衡模型 (Dynamic Equilibrium Model; DEM)



圖二十三、動態平衡理論(Huston, 2014)。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。模型顯示，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。

## 【評語】 180003

作品應用生態統計分析高屏與枋寮峽谷的生態結構。發現兩峽谷的沉積物來源，粒徑分布與物理性擾動強度不同，造成生物密度隨深度變化趨勢截然不同，生物組成亦存在顯著差異。分析亦顯示環境擾動對生物的影響大於食物量。作品結構與文獻整理完整，邏輯清晰值得鼓勵。很有深入繼續研究之潛力。