



國立臺灣大學生命科學院漁業科學研究所

碩士論文

Institute of Fisheries Science

College of Life Science

National Taiwan University

Master Thesis

龜山島周遭海域底泥線蟲之群落

The study of nematode communities in the sediment
surrounding Turtle Island

林軒彤

Hsuan-Tung Lin

指導教授：楊姍樺 博士

Advisor: Shan-Hua Yang, Ph.D.

中華民國 112 年 8 月

August 2023



國立臺灣大學碩士學位論文
口試委員會審定書

MASTER'S THESIS ACCEPTANCE CERTIFICATE
NATIONAL TAIWAN UNIVERSITY

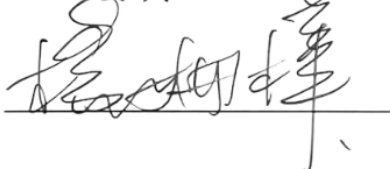
龜山島周遭海域底泥線蟲之群落

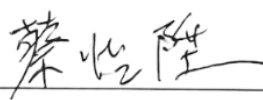
The study of nematode communities in the sediment surrounding Turtle Island

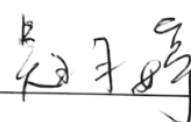
本論文係林軒彤(R10b45001)國立臺灣大學漁業科學研究所完成之碩士學位論文，於民國 112 年 6 月 27 日承下列考試委員審查通過及口試及格，特此證明。

The undersigned, appointed by the Institute of Fisheries science on 27th, June, 2023 have examined a Master's thesis entitled above presented by Hsuan-Tung, Lin (R10b45001) candidate and hereby certify that it is worthy of acceptance.

口試委員 Oral examination committee:





所長 Director: _____



謝辭



論文即將完成之際，終於有時間回顧我的碩士生涯，在這兩年的時間中，體驗了許多異想不到的經歷，雖然我很少表達我的想法，但我其實很感謝這一路上陪伴與幫助我的人，有你們的幫助我曾能撐下去。

謝謝我的指導老師楊姍樺老師，帶我踏入海洋研究的領域，並且不吝嗇地提供資源給學生，也時常關心學生的狀況，給予鼓勵。謝謝 406 的同仁們，芊儀、彥志、蒙蒙、競紋、晉德、祐祐、誠哥、海璿，很高興能與你們一起出差、一起爬山、一起看蛙蛙以及參與各式大大小小的活動，謝謝你們在這之中的各種包容與體諒，能夠待在如此熱絡的實驗室也讓我感到很幸運，更重要的是謝謝你們每季在龜山島不畏風浪的採樣，雖然我從未下水陪伴各位，但你們在海中搖曳的身姿讓我印象深刻且心中充滿敬佩。

首先，謝謝蒞臨漁科所參與口試的各位口試委員蔡怡陞老師、吳羽婷老師與楊爵因老師，感謝諸位對於論文的詳細指點，提供我各種改進的方向。謝謝劉安琪博士在分生實驗方面的提點；謝謝楊爵因博士在實驗初期提供的建議與資源；謝謝吳羽婷博士與蕭友晉博士協助化學成分的測量與儀器的借用，謝謝劉勃佑博士在生資方面提供的協助與教導；謝謝廖建翔博士與李宜謙學姐在海洋線蟲鑑定方面提供的協助，讓我知道走在這條路上並不孤單；謝謝新里宙也老師與胖妞學姐在日本的照顧，並且讓我對生資產生更高的興趣，在那邊生活的期間真的留下了很好的回憶；謝謝漁科所同學的陪伴，讓我在壓力很大的時候，能有一群夥伴一起奮鬥；最後也謝謝我的家人們無論何時何地的支持，特別是在突如其來的確診之際，讓我有時間可以休息。

最後，往後的未來我將成為更成熟、更好的人，而不愧對於大家一直以來的支持與協助。

摘要



海洋線蟲是海底沉積物當中數量最為豐富的小型底棲動物，他們會參與棲地的養分循環與食物網，作為微生物與大型底棲生物間的能量橋梁。因為海洋線蟲對於環境的變動相當敏感，所以可作為評估生態系統的生物指標。龜山島是一座火山島，龜山島的東南方具有多座淺海熱泉，相對地，龜山島的西方則是具有珊瑚礁生態系。從熱泉區到非熱泉區，龜山島大型底棲生物群落變動已有多份研究探討，然而小型底棲動物則未有調查。因此，本研究在環繞龜山島的 6 個地點進行不同時間點底泥的採集以探討其海洋線蟲群落。採樣地點包括 3 個熱泉生態系（近泉、遠泉與 CO₂ 泉）、1 個珊瑚礁生態系（龜尾）、2 個過渡地點位於熱泉與珊瑚礁之間（龜北、龜南）。底泥除了用於線蟲的分離外，還會進行粒徑大小的分析與底泥化學組成的分析。結果顯示，珊瑚礁環境的線蟲豐度會隨著時間變化，於春季與夏季豐度會呈現上升的趨勢。近泉與遠泉的線蟲數量無論時間點都非常少，但 CO₂ 泉的春季數量大增，並於夏季稍下降。地點不僅影響線蟲在不同時間點的變動情形，還會影響線蟲的群落組成。底泥的物化性質中底泥粒徑與 SO₄²⁻、Mg²⁺、Cl⁻是顯著造成線蟲群落組成差異的重要環境因子。CO₂ 泉以熱泉相關物種及耐受性強的周遭物種為主要組成；龜北獨有物種比例高，以適應粗顆粒的物種為主；龜尾則以適應細顆粒的物種為主。此外，龜尾、龜南到近遠泉則呈現豐度與組成上的連續性變化。

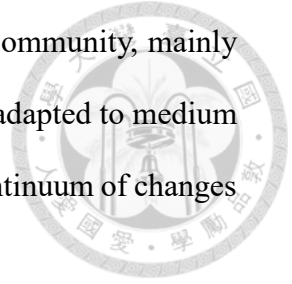
關鍵詞：小型底棲動物、海洋線蟲、龜山島、淺海熱泉、珊瑚礁

Abstract



Free-living marine nematodes are the most abundant meiobenthos in marine sediment. They participate in the nutrient cycle and the food web of the habitat, and serve as an energy bridge between macrobenthos and microorganisms. Because free-living marine nematodes are sensitive to environmental variations, they can be served as bioindicators to assess ecosystems. Turtle Island is a volcanic island, the southeastern of the island locates clusters of hydrothermal vents. By contrast, the western has no vent and contains a coral reef ecosystem. Several studies have investigated the composition of macrobenthos around hydrothermal vents of Turtle Island, but there is no survey about meiobenthos. Therefore, we collected sediment samples from 6 sampling sites surrounding Turtle Island each season for a year to investigate the free-living marine nematode communities. The sampling sites included 3 vent sites (Near vent, Far vent, and CO₂ vent), 1 coral reef ecosystem (Tail), and 2 buffer sites, between the vent sites and the coral reef (North and South). In addition to the extraction of nematodes, the sediment samples were also analyzed for grain size distribution and chemical ion composition. The results showed that the abundance of nematodes in the coral reef changed over time, with an increasing trend in spring and summer. The number of nematodes in Near vent and Far vent was quite low no matter the time point, but the number of nematodes in CO₂ vent increased greatly in spring and decreased slightly in summer. Sampling sites affected not only the temporal variation of the nematode abundance, but also had an impact on the nematode composition. Among the physical and chemical properties of sediment, grain size, SO₄²⁻, Mg²⁺, and Cl⁻ were crucial environmental factors that significantly caused differences in the composition of nematode communities. CO₂ vent were mainly composed of vent-related species and

surrounding species with strong tolerance. North had own special community, mainly species adapted to very coarse sand. Tail was dominated by species adapted to medium sand. Furthermore, Tail, South, Far vent, and Near vent showed a continuum of changes in the nematode abundance and composition.



Keywords: meiobenthos, marine nematode, Turtle Island, shallow-water hydrothermal vent, coral reef

目錄



口試委員審定書.....	i
謝辭.....	ii
摘要.....	iii
Abstract.....	iv
目錄.....	vi
圖目錄.....	ix
表目錄.....	x
壹、緒論.....	1
1.1. 海洋線蟲介紹.....	1
1.2. 海洋線蟲的功能群分類.....	2
1.3. 龜山島的環境特徵與生物群落.....	3
1.4. 淺海熱泉生態系與線蟲群落.....	4
1.5. 珊瑚礁生態系與線蟲群落.....	5
1.6. 線蟲群落隨時間之變動.....	7
1.7. 台灣的海洋線蟲研究.....	7
1.8. 研究目的.....	9
貳、材料與方法.....	11
2.1. 樣本採集.....	11
2.2. 線蟲分離.....	12
2.3. 線蟲之分子鑑定.....	12
2.3.1. DNA 粗萃取.....	12
2.3.2. 質體建構.....	13
2.3.3. 轉殖與質體萃取.....	14
2.3.4. 定序.....	15
2.4. 線蟲之型態鑑定.....	15

2.5. 線蟲功能群分類.....	16
2.6. 底泥性質分析.....	16
2.6.1. 化學組成分析.....	16
2.6.2. 粒徑分析.....	17
2.7. 數據分析.....	17
參、 結果.....	20
3.1. 底泥性質分析.....	20
3.1.1 粒徑分析.....	20
3.1.2 化學成分分析.....	21
3.2. 線蟲群落分析.....	22
3.2.1. 線蟲之分離與鑑定.....	22
3.2.2. 線蟲豐度於時間下的變動.....	23
3.2.3. 線蟲群落之 α 多樣性.....	23
3.2.4. 線蟲之群落組成.....	24
3.2.5. 線蟲之功能群組成.....	26
3.2.6. 環境因子對線蟲群落之影響.....	26
肆、 討論.....	28
4.1. 樣本採樣與定量問題.....	28
4.2. 環境因子對線蟲的影響.....	29
4.3. 線蟲數量的時間變動.....	30
4.4. 龜山島周遭海域的線蟲群落組成.....	30
4.4.1. 熱泉環境.....	30
4.4.2. 近遠泉.....	31
4.4.3. CO ₂ 泉.....	32
4.3.4. 龜北.....	33
4.3.5. 龜尾.....	34
4.3.6. 龜南.....	35
4.3.7. 線蟲之功能群分類.....	35

伍、	結論.....	37
陸、	圖與表.....	38
柒、	參考資料.....	79
捌、	附錄.....	88



圖目錄



圖 1、海洋線蟲之攝食群 (Feeding type) 分類 (Wieser, 1953)。	39
圖 2、龜山島周遭海域的採樣地點。	40
圖 3、不同採樣地點下底泥各粒徑範圍組成百分比的集群分析。	41
圖 4、各採樣地點離子含量的時間變動。	42
圖 5、線蟲豐度的時間變動。	43
圖 6、線蟲豐度與環境因子之間的關係。	44
圖 7、不同組別下的香農多樣性指數。	45
圖 8、以 UpSet plot 呈現採樣地點間線蟲物種之交集情形。	46
圖 9、各樣本之線蟲組成於科階層之相對豐度。	47
圖 10、前 20 個數量最高的線蟲屬之相對豐度。	48
圖 11、前 20 個數量最高的線蟲屬之絕對數量。	49
圖 12、各樣本線蟲功能群攝食群組成的相對豐度。	50
圖 13、各樣本線蟲 c-p value 組成的相對豐度。	51
圖 14、以 tb-RDA 探討環境因子與線蟲物種組成間的關係。	52

表目錄



表 1、採樣地點的位置與環境資訊。.....	53
表 2、採樣日期與線蟲分離所使用之採集瓶數量。.....	54
表 3、各樣本底泥之粒徑分析。.....	55
表 4、地點與時間點對底泥陰陽離子含量之影響。.....	56
表 5、龜尾與龜南的線蟲種類與數量。.....	57
表 6、龜北與近泉的線蟲種類與數量。.....	62
表 7、龜北與近泉的線蟲種類與數量。.....	67
表 8、各樣本之線蟲豐度、 α 多樣性、營養多樣性指數與成熟指標。.....	72
表 9、以簡單線性迴歸模型分析環境因子與線蟲豐度、香農多樣性間的關係。.....	74
表 10、以簡單線性迴歸模型分析環境因子與營養多樣性指數、成熟指標間的關係。.....	75
表 11、以 one-way ANOVA 進行不同組別內 (時間點、地點、底泥粒徑) 線蟲豐度、香農多樣性指標、營養多樣性指數及成熟指標之比較。.....	76
表 12、以 SIMPER 探討單一物種對組別間差異的貢獻度。.....	77

壹、緒論



1.1.海洋線蟲介紹

線蟲為體型細長、不分節的無脊椎動物，在分類上屬於線蟲動物 (Nematoda)，是地球上數量最為豐富的動物類群，目前已記錄的物種約 3 萬種，而據估計世界上現存的線蟲高達 100 萬種 (Hugot, Baujard, & Morand, 2001)。根據調查，地球土壤表層存在約 4.4×10^{20} 隻線蟲，相當於地球上每人平均能擁有 570 億隻土壤線蟲 (van den Hoogen et al., 2019)。線蟲的分布範圍非常廣泛，從陸域、淡水到海水，再從低緯的熱帶雨林到高緯寒冷的極圈，都可以發現線蟲的蹤跡。除此之外，線蟲還能適應地球上不同的極端環境，例如：高溫、低氧、高重金屬與硫化物的熱泉環境、低穩定、水流與物理擾動強的海底峽谷與高壓、低溫、無光的超深淵帶等 (Daniela Zeppilli et al., 2018)。為了適應地球上這些複雜的生態系統，線蟲發展出多樣的營養階層與生活史。根據線蟲獲取營養的方式，可以分成腐生、寄生、獵食、微生物攝食等不同類型 (Yeates, Bongers, De Goede, Freckman, & Georgieva, 1993)。於棲地，線蟲在生態系統中至關重要：參與當地的食物網、養分循環與調控微生物族群 (Ferris et al., 2012; Platt & Warwick, 1980)。

與陸域線蟲及寄生性線蟲相比，海洋非寄生性線蟲的研究相對不足 (Bik, Lamshead, Thomas, & Lunt, 2010)。海洋線蟲是海底沉積物中數量最多的後生生物 (Metazoa)，是底泥小型底棲生物 (Meiobenthos) 群落的優勢物種，目前已記載的海洋非寄生性線蟲有近 7000 種，預估還有 50000 種未被發現 (Appeltans et al., 2012)。基於線蟲的廣泛分布、高度豐富度與多樣性、多樣的營養方式以及對環境變化的高敏感度，在生態研究中已被認為是有效的生物指標 (Bioindicator)，且應用於多種面向的環境評估，包括石油洩漏、有機物增長、水產養殖污染、重金屬污染、物理擾動與生物群落變化 (Ridall & Ingels, 2021)。

現今線蟲動物門的分類架構衍生自 De Ley 與 Blaxter 所提出的分類系統，他們以小次單元核糖體 DNA (small subunit ribosomal DNA, SSU rDNA) 序列為依據，將線蟲分成兩大綱 Enoplea 與 Chromadorea，前者又可分成兩個亞綱 Enoplia 與 Dorylaima，其中 Dorylaima 不具有海洋線蟲物種 (De Ley & Blaxter, 2004)。而海洋非寄生性線蟲來自於分類系統中 Enoplea 下層的 Triplonchida 與 Enoplida，以及 Chromadorea 下層的 Plectida、Araeolaimida、Monhysterida、Desmodorida、Chromadorida 與 Desmoscolecida (Schmidt-Rhaesa, 2014)。

1.2. 海洋線蟲的功能群分類

根據口器的型態構造，Wieser (1953) 將線蟲劃分成四種攝食類型 (Feeding type；圖 1)：選擇性沉積物攝食者 (Selective deposit feeders；1A) 的口腔狹小且不具有牙齒，以細菌為主要食物來源；非選擇性沉積物攝食者 (Non-selective deposit feeders；1B) 也不具有牙齒，但口腔開口大，食物來源較廣，包括細菌、纖毛蟲與部分微藻；表生攝食者 (Epigrowth feeders；2A) 的口腔具有細小的牙齒，更可以從沉積物顆粒中刮取細菌與綠藻、矽藻等藻類，並破壞其細胞吸取養分；獵食者或雜食者 (Predators/Omnivores；2B) 具有較大的口腔與牙齒，可以以線蟲、寡毛類與其他碎屑為食 (Du, Gao, Warwick, & Hua, 2014)。由 Wieser (1953) 提出的攝食類型分類，可以進一步計算線蟲所在環境的營養多樣性指數 (Trophic diversity；TD)，計算方式為四種攝食類型相對豐度之平方和，TD 的數值範圍為 0.25 到 1，當數值越接近 0.25 時，四種攝食類型的豐度會越平均，營養多樣性越高；相反地，當數值越接近 1，代表其中一種攝食類型佔整體的比例較高，營養多樣性越低 (Heip, Vincx, & Vranken, 1985)。

在生存策略方面，Bongers (1990) 提出 c-p scale，根據線蟲在棲地定殖或持留的能力，將線蟲的每個分類群分成 c-p 1 到 c-p 5。c-p value 較低的類群屬於殖民者 (Colonizer)，也就是生存策略中的 R 策略者 (R-strategist)，此類線蟲的世代

短、繁殖率高，對於汙染物與其他物理干擾的耐受性較高，在環境適當的情況下能快速地定殖；相對地，c-p value 較高的類群屬於持留者 (Persister)，也就是 K 策略者 (K-strategist)，其世代長、繁殖率低、代謝速率慢、對於汙染物與其他干擾也較為敏感。此外，成熟指數 (Maturity index；MI) 為衡量環境干擾的生態指標，其計算方式為棲地所有線蟲物種 c-p value 的加權平均，MI 越高代表環境越穩定。

1.3. 龜山島的環境特徵與生物群落

龜山島 (Turtle island 又名 Guishan Island、Kueishan Island、Kueishan Tao) 是一座火山島，因外型近似浮龜而得名，龜山島位於沖繩海槽的西南端，屬於琉球火山島弧沿線 (Chiu, Sheng-Rong, Yu-Chung, & Chi-Xuan, 2010)。在龜首周遭，也就是龜山島東南方 1 公里左右的範圍，深度約 5 到 30 公尺的區域，有超過 30 個獨立的海底熱泉 (Hydrothermal vent) 座落，釋放高含量的 CO₂ 與 H₂S 之氣體、鐵、錳、砷、釷、鋇等重金屬以及硫化物，而噴液的 pH 值可低至 1.52，溫度可達 116 °C (C.-T. A. Chen et al., 2005; X.-G. Chen et al., 2018; Yang et al., 2005)。熱泉的釋放於龜首表層海水形成白色之擴散舌，成為特殊的牛奶海景觀。已有研究指出重金屬、硫化物的釋放與海洋酸化會影響龜山島週遭的生物群落，像是當浮游生物流經龜山島熱泉噴口時會出現大規模之死亡 (Dahms & Hwang, 2013)；熱泉噴液造成周遭海水酸化，會使麥螺 *Anachis misera* 的螺紋變薄，變異軸孔珊瑚 *Acropora valida* 的骨針結構也會受到影響 (Y. J. Chen, Wu, Chen, & Liu, 2015)。

先前研究調查發現，在龜山島淺海熱泉生態系棲息的大型底棲生物包括烏龜怪方蟹 *Xenograpsus testudinatus*、海葵 *Anthopleura* sp.、石鱉 *Ischnochiton comptus* 與 12 種腹足動物 (Chan et al., 2016; C. Chen, Chan, & Chan, 2018)。隨著距離熱泉噴口越遠，大型底棲動物的物種豐富度會逐漸上升，而群落結構也會有所轉變，噴口區的優勢物種為烏龜怪方蟹，到熱泉周邊區則轉變成海葵、2 種腹足類

Bostrycapulus aculeatus 與 *Dendropoma dragonella*，當到達距噴口區 300 公尺外時，這些熱泉相關物種會被其他物種所取代，像是不具有共生藻的管星珊瑚 *Tubastraea* sp. (Chan et al., 2016)。而 Wang 等 (2022) 進一步利用碳氮穩定同位素探討這些底棲動物的能量來源，結果顯示熱泉釋放所形成的物化梯度不僅會造成群落的變化，還會構成消費者營養來源的變動。

龜尾，也就是龜山島的西方，距離熱泉噴口超過 2 公里，由於黑潮會將熱泉流體帶往東或東北方 (Li et al., 2006)，龜尾受到熱泉的影響較小，周圍海域珊瑚礁的覆蓋率高，具有豐富且多樣的石珊瑚 (Scleractinian corals)、軟珊瑚 (Soft corals) 與菟葵 (Zoanthids)，也孕育了多樣珊瑚礁魚類，包括蝴蝶魚 *Heniochus acuminatus*、*Chaetodon vagabundus* 與 *Chaetodon auripes*、笛鯛 *Lutjanus kasmira*、二齒魨 *Diodon holocanthus* 以及隆頭魚 *Thalassoma lunare* (Chan et al., 2016)。

1.4. 淺海熱泉生態系與線蟲群落

淺海熱泉為深度小於 200 公尺的熱液系統，其形成通常與活躍的板塊邊界有關，因此多位於火山與地震活動頻繁的區域 (Tarasov et al., 1999)。熱泉的釋放往往會伴隨高溫與豐富的硫化物及金屬元素，使噴口周遭形成極端環境，也因而成為研究地球生地化循環的絕佳地點 (Bellec et al., 2020)。與完全仰賴化學合成作為能量來源的深海熱泉生態系不同，淺海熱泉生態系由於同時具有光的照射與地熱物質的釋出，能量來源涵蓋光學與化學合成的初級生產 (Tarasov, Gebruk, Mironov, & Moskalev, 2005)。儘管淺海熱泉普遍分布在板塊構造活躍的沿海區域，但至今在生物多樣性方面，淺海熱泉的探索不如深海熱泉，而相較於大型底棲生物群落，著重於小型底棲生物的研究也相對較少 (Baldrihi et al., 2020)。

從淺海熱泉噴口區向外延伸，小型底棲生物的物種豐度與功能群多樣性會增加，而線蟲是噴口區的優勢物種，其次為底棲橈足類 (Copepods)。功能群方面，攝食類型屬於 2A 與 2B 的線蟲相對豐度較高 (Baldrihi et al., 2020; Lichtschlag

et al., 2022; D. Zeppilli & Danovaro, 2009)，而高比例的 2A 暗示了淺海熱泉生態系對於光合作用營養源的依賴 (D. Zeppilli & Danovaro, 2009)。其中 Oncholaimidae 科經常在深海熱泉(Tchesunov, 2015; Daniela Zeppilli et al., 2015) 與淺海熱泉 (F. Thiermann, Akoumianaki, Hughes, & Giere, 1997; F Thiermann, Windoffer, & Giere, 1994; D. Zeppilli & Danovaro, 2009) 環境發現，因此被認為是熱泉相關物種。*Oncholaimus* 屬對於極端的地熱、高鹽與高硫化物具有耐受性，*O. campylocercoides* 已被證明在高硫化氫情況下會在表皮形成含元素硫之油滴，來降低環境中硫化氫的濃度與其生物毒性 (Frank, Bent, & Olav, 2000)。近年來有研究團隊由線蟲身上菌相的角度切入，想知道是否有細菌會協助 Oncholaimidae 生存於極端環境，他們使用 16S rRNA 序列分析 *Oncholaimus* sp.、*O. dyvae* 與 *Metoncholaimus albidus* 的細菌群落組成，並藉由掃描式電子顯微鏡 (Scanning Electron Microscope; SEM)、螢光原位雜合技術 (Fluorescence in situ hybridization; FISH) 觀察線蟲體表與腸道細菌，最後發現 *Oncholaimus* sp.、*O. dyvae* 與 *M. albidus* 與 *Gammaproteobacteria*、*Epsilonproteobacteria* 中的硫氧化菌存在可能的共生關係，可能有助於減少環境中硫化物之毒性，協助線蟲的生存 (Bellec et al., 2019; Bellec et al., 2020; Daniela Zeppilli et al., 2018)。

1.5. 珊瑚礁生態系與線蟲群落

珊瑚礁雖然只佔海洋面積的 0.2%，卻是地球上生產力最高、最多樣化的生態系統，孕育著約三分之一的海洋物種總數 (Adrianov, 2004; F. Semprucci et al., 2011)，然而現今正面臨著人為活動、全球暖化與海洋酸化等威脅。同樣地，相較於大型底棲生物群落的研究，珊瑚礁區域小型底棲生物的探討較少 (Ruiz-Abierno & Armenteros, 2017)。然而，小型底棲生物是將能量從細菌與藻類傳遞至更高營養階層的重要橋梁，並且小型底棲生物的活動如生物擾動或攝食，會改變一系列沉積物的物理、化學與生物特性，直接或間接地影響生態系統中的沉積物

穩定性、生地化循環、廢物清除和食物網動態 (Schratzberger & Ingels, 2018)，在珊瑚礁環境，線蟲也被發現是最為豐富的小型底棲動物，其次為橈足類 (Ruiz-Abierno & Armenteros, 2017)。

珊瑚礁環境的異質性相當高，由結構層面可分成外礁、礁頂、礁坪、瀉湖等；從底質層面可再分成植被軟底、裸沙、珊瑚碎石、硬底質等，而沉積物的特徵如平均粒徑、含氧量、大型植物覆蓋率、大型底棲生物的擾動等都是影響線蟲群落組成的因素 (Maickel Armenteros & Ruiz-Abierno, 2015; M. Raes et al., 2007; Ruiz-Abierno & Armenteros, 2017)。此外，季風引起的不同波浪強度也會影響馬爾地夫沙質後礁的平台線蟲群落組成，顯示線蟲群落對流體動力條件的高敏感度 (F. Semprucci et al., 2011)。屬於大堡礁一分子的戴維斯礁之礁頂、礁坪與瀉湖，也因波浪作用的差異呈現不同的線蟲密度與豐富度 (Alongi, 1986)。

珊瑚礁生態系常見的線蟲種類包括 Chromadoridae、Desmodoridae、Xyalidae、Draconematidae、Epsilonematidae、Cyatholaimidae、Desmoscolecidae 等 (Grassi et al., 2022; Pérez-García, Marzo-Pérez, & Armenteros, 2019; M. Raes et al., 2007; Ruiz-Abierno & Armenteros, 2017; F. Semprucci et al., 2013)，其中 Desmodoridae 是碳酸鹽沉積物中的優勢物種 (M. Raes et al., 2007; Federica Semprucci, Colantoni, Baldelli, Rocchi, & Balsamo, 2010)；Epsilonematidae 和 Draconematidae 是表層線蟲物種，其具有特化的剛毛、分泌腺與尾腺，因此能適應物理干擾，並在粗顆粒的底質上移動 (M. Raes, Decraemer, & Vanreusel, 2008)；而 Desmoscolecidae 通常存在於較深海域的珊瑚礁環境 (Maarten Raes & Vanreusel, 2006)。珊瑚退化區 (Coral degradation zone; CDZ) 通常位於後礁潟湖區，該處的底質會呈現珊瑚死亡後逐漸降解成碎片甚至碎屑的過程，而這種微棲地的變化也證實會改變線蟲群落的組成 (M. Raes et al., 2007)，隨著珊瑚礁保育意識的興起，CDZ 研究的關注度也逐漸增加，Grassi 等人探討了馬爾地夫 CDZ

人為活動、珊瑚礁地形與暴露、珊瑚礁坡度與深度對線蟲物種與功能群分類的影響，並建議將環境特徵與線蟲群落組成納入珊瑚礁生態評估 (Grassi et al., 2022)。



1.6. 線蟲群落隨時間之變動

線蟲群落在多種環境下的時序變動已被研究與報導，包括河口 (Brüchner-Hüttemann & Traunspurger, 2020; Hourston, Potter, Warwick, Valesini, & Clarke, 2009)、海灘 (Liu, Zhang, Fan, Hua, & Deng, 2008; Nicholas, 2001)、潮間帶 (Brannock, Sharma, Bik, Thomas, & Halanych, 2017)、潮下帶 (Fu et al., 2012)、海灣 (M. Moreno et al., 2008) 等區域，大多數地點在物種與功能群呈現了明顯的時序變化。Nicholas (2001) 於澳洲研究沙灘中海洋線蟲群落之季節變化，結果顯示線蟲數量在較溫暖的月份下會增加，並在冬天下降，且月份間物種組成具明顯的變化。除了溫度，食物來源及數量於不同時間下的變動也是影響線蟲組成的重要因素，春季澳洲西南部的天鵝河河口底棲微藻數量達高峰時，由於食藻類的 2A 線蟲大量增加，總線蟲密度也隨之提升 (Hourston et al., 2009)。在中國青島沙灘的研究中，2A 線蟲也因為春季藻華的發生而有較高的豐度，另外，由於春季結束後沉積物碎屑增加，導致夏季時 1B 線蟲的豐度更高 (Liu et al., 2008)。然而，也有一些研究顯示線蟲群落組成在不同時間、季節下沒有明顯的變化，這些研究地點通常位於熱帶或溫帶的半封閉海灣，由於溫度波動小、沉積物穩定或人為干擾強烈等因素影響，時間上的變動會較不明顯 (M. Armenteros et al., 2009; Fu et al., 2012; M. Moreno et al., 2008)。

1.7. 台灣的海洋線蟲研究

台灣海洋線蟲的研究數量不多，但依據研究主軸可以大致分成三類。其一，魚類寄生蟲安尼線蟲科 (Anisakidae) 的相關研究，安尼線蟲科是人畜共通的寄生蟲，人類雖然不是牠的主要寄主，但會經由生食或未煮熟之魚肉傳染，且感染

後會發生過敏、腹痛、噁心、嘔吐等症狀，台灣安尼線蟲科的研究主要探討了安尼線蟲科對不同經濟性魚類的感染、流行、傳播與偵測 (H.-Y. Chen & Shih, 2015; Chou et al., 2011; Luo, Chen, Chen, & Shih, 2016; Shih, Ku, & Wang, 2010)，並研究熱休克蛋白在安尼線蟲科於不同處理下的表達情形 (H.-Y. Chen, Cheng, Grabner, Chang, & Shih, 2014; H.-Y. Chen, Cheng, & Shih, 2015)。

其二，台灣周遭海域之線蟲群落結構，目前已有研究調查淡水河口及潮間帶 (Cai, Fu, Zhou, Tseng, & Hwang, 2020)、基隆潮境公園 (Ng et al., 2022)、綠島海草床 (Liao, Yeh, & Mok, 2015b)、屏東海口漁港海草床 (Liao, Yeh, & Mok, 2015a)、高屏海底峽谷 (Liao, Wei, & Yasuhara, 2020)。淡水河的研究顯示，線蟲是潮間帶到上游區的優勢類群，攝食類型以 1B 線蟲為主，並且鹽度與沉積物類型會影響線蟲群落組成 (Cai et al., 2020)。綠島海草床的研究中，海草床與無植被之沉積物環境間的線蟲群落組成存在顯著差異，並且採樣到的線蟲物種中約有 50 % 僅出現在海草床、6 % 僅出現在無植被之沉積物環境 (Liao et al., 2015b)，除此之外，Liao 等 (2015) 在採樣中發現了一種纖毛蟲新種 *Thecacinetia urceolata* sp. nov.，牠會附著在線蟲 *Desmodora pontica* 的體表。屏東海口漁港海草床的研究更進一步探討了不同海草床植被物種 *Thalassia hemprichii*、*Halodule uninervis*、*Halophila ovalis* 對線蟲群落組成的影響，結果顯示不同海草物種環境存在各自獨有之線蟲物種，並且 1A 與 2A 在海草床環境具有較高之相對豐度 (Liao et al., 2015a)。高屏海底峽谷與高屏溪相連，受到季節性降雨與頻繁之板塊構造活動的影響，高屏海底峽谷的沉積物豐富，另外高屏海底峽谷還受到強烈內潮之影響，又會導致沉積物的侵蝕與再懸浮，上述極端的物理條件使得高屏海底峽谷的線蟲功能多樣性、營養多樣性指數與成熟指數都顯著較低，這可能是因為高屏海底峽谷底部強烈的水流帶走富含有機物的細粒沉積物，進而抑制當地線蟲的多樣性，而一些可以快速恢復的物種 (c-p value 低) 如 *Sabatieria*、*Daptonema*、*Axonolaimus* 和 *Metadesmolaimus* 才能於此定殖 (Liao et al., 2020)。

基隆潮境公園為唯一屬於本研究關注之珊瑚礁生態系的地點，且與龜山島相同，位在台灣東北部。潮境公園位於望海巷潮境海灣資源保育區，其宗旨為解決過度捕撈並保護珊瑚礁環境，因此該研究的目的是在於調查保育區與周遭港灣海域之線蟲群落組成，並探討人類活動對於潮境公園的可能影響，結果顯示在保育區的珊瑚礁環境相較於其他受人類活動影響（港口運輸、住宅汙水）的環境具有較高的線蟲密度，其優勢物種 *Spilophorella* sp. 有作為環境健康指標的潛力，而出現在人類活動干擾較高之環境的特定線蟲物種如 *Daptonema*、*Innocuonema*、*Axonolaimus* sp. 和 *Pomponema* 則代表環境存在潛在的金屬、柴油和有機污染物 (Ng et al., 2022)。

其三，海洋非寄生性線蟲的全基因體與演化，Lee 等 (2023) 使用多重置換擴增反應 (Multiple Displacement Amplification; MDA) 與次世代定序平台 Illumina SmartSeq2，進行長片段序列之擴增與測序，並結合第三代定序技術 Oxford Nanopore Technologies (ONT) 之使用，成功從單一線蟲個體獲得全基因體序列與基因預測，並應用在 13 種海洋非寄生性線蟲的定序，提供有限生物樣本獲取序列資訊的新方法與流程之餘，也揭示了線蟲動物們的早期演化。

1.8. 研究目的

龜山島以特殊的地質景觀聞名，龜首的熱泉環境更是研究熱點，具有眾多熱液流體氣體、甲殼類和腹足類等大型底棲動物、微生物組成的相關研究，但較少研究是環繞龜山島周遭海域，從熱泉環境探討至龜尾的珊瑚礁環境，更是未有人進行相關小型底棲動物的群落調查。而於底棲生態系中，小型底棲動物為微生物與大型底棲生物之能量橋梁，彼此間存在緊密的交互作用 (Schratzberger & Ingels, 2018)，其中的優勢物種線蟲，作為地球上最為成功的後生動物之一，不僅普遍存在，還能夠生存於各種極端環境 (Daniela Zeppilli et al., 2018)。因此，本研究環繞龜山島海域，選擇了涵蓋熱泉與珊瑚礁生態系的 6 個地點，進行四季底泥的採

樣，並經過線蟲的分離、鑑定與底泥物化特性的測量，探討龜山島的周遭海域底泥的線蟲群落結構以及環境因子的影響。



貳、材料與方法



2.1. 樣本採集

本研究於龜山島周圍海域選擇 6 個採樣地點 (圖 2、表 1)，以船隻航行環繞龜山島進行採樣，各採樣地點以 GPS 定位於固定位置下錨，實際採樣位置為定錨處半徑約 20 公尺以內之範圍，故每次採樣的位置會有些許的誤差。6 個地點中的龜尾 (Tail; 24°50'30.0"N 121°56'17.1"E) 位於珊瑚礁區域，存在多樣的石珊瑚與軟珊瑚；龜北 (North; 24°51'08.1"N 121°57'00.0"E) 與龜南 (South; 24°50'04.2"N 121°57'00.0"E) 分別在龜山島的北方與南方，也具有珊瑚存在，但珊瑚覆蓋率較低；遠泉 (Far vent; 24°50'02.3"N 121°57'42.0"E) 與近泉 (Near vent; 24°50'02.6"N 121°57'42.8"E) 是同一座熱泉噴口周邊一近一遠的兩處，周遭可見特有種烏龜怪方蟹的存在，且當地可聞到硫化物的臭味，其中遠泉的位置是從近泉拉穿越線向外延伸 30 公尺處；CO₂ 泉 (CO₂ vent; 24°50'17.1"N 121°58'11.5"E) 是另一座推測以 CO₂ 為主要釋出成分的熱泉，不帶有明顯的臭味，且海底佈滿的白色菌毯。

樣本採集為期一年，採樣時間依序為秋 (2021 年 11 月，海水表面月平均溫度：25.0°C)、冬 (2022 年 1 月，海水表面月平均溫度：21.8°C)、春 (2022 年 4 月，海水表面月平均溫度：23.1°C)、夏 (2022 年 8 月，海水表面月平均溫度：29.3°C)，海溫資料選自中央氣象局氣象資料開放平台 (<https://opendata.cwb.gov.tw/index>) 之龜山島浮標測站 (24°51'00.0"N 121°55'48.0"E)。

採樣方式是透過水肺潛水將各地點的底泥分別裝入容積為 1450 毫升的採集瓶。線蟲分離所使用之底泥樣本如表 2 所示，2021 年 11 月、2022 年 1 月使用 2 瓶總共 2900 毫升的底泥，而 2022 年 4 月、2022 年 8 月由於分離到的線蟲數量過多，因此只使用 1 瓶共 2900 毫升的底泥 (表 2)，線蟲分離前會將底泥放於實驗室內的室溫 (約 24.0)，並於三四天內完成分離。底泥樣本還會進行底泥物化性

質的分析，化學成分方面，各地點的底泥樣本會另外分裝至 15 毫升離心管，並於-20°C 保存。粒徑分析使用夏季的底泥樣本，並將部分事先風乾，再取 300 克進行實驗。



2.2. 線蟲分離

線蟲的分離採用懸浮網篩法，先將滅菌海水加入底泥並搖晃使顆粒懸浮，再將懸浮溶液倒入 20、40、200 目的篩網過篩，其中的 20 目篩網主要用於移除過大之顆粒，而 40 目與 200 目篩網上殘留之顆粒則會使用滅菌海水沖洗至 50 毫升離心管。觀察時將輕微搖晃離心管將樣本溶液倒入培養皿，再於解剖顯微鏡 (SZ61, Olympus Corporation, Japan) 視野下以挑針挑取線蟲個體至玻片，再將玻片移至複式顯微鏡 (BA210, Motic Scientific, Hong Kong) 於 40 倍、100 倍與 400 倍倍率下鏡檢與拍照 (TrueChrome Metrics, Tucsen, China)。

2.3. 線蟲之分子鑑定

2.3.1. DNA 粗萃取

拍照紀錄後之線蟲個體會隨機進行 DNA 的粗萃取。將線蟲個體挑入裝有 20 μ L 0.25 M NaOH 的 200 μ L PCR tube 浸泡 1 天，使用聚合酶連鎖反應器 (MiniAmp plus Thermal Cycler, Thermo Fisher Scientific, USA) 於 95°C 加熱 3 分鐘，依序加入 10 μ L 0.5 Tris-HCl (pH 8.0)、4 μ L 0.25 M HCl 與 5 μ L 2% triton X-100，再次於 95°C 加熱 3 分鐘，最後於-20°C 保存 (Floyd, Abebe, Papert, & Blaxter, 2002)。

目標片段增幅

分子鑑定之序列選用具高變異特性的 18S 核糖體核糖核酸 (18S rRNA) 片段，通用引子對採用 18S1.2a (5'-CGATCAGATACCGCCCTAG-3') 與 18Sr2b (5'-TACAAAGGGCAGGGACGTAAT-3')，序列增幅長度約為 635 bp (Bernard, Handoo, Powers, Donald, & Heinz, 2010; Vrain, Wakarchuk, Lévesque, & Hamilton, 1992)。

PCR 反應總體積為 25 μ L，包含 0.5 μ L 10 μ M 18S1.2a / 18Sr2b 引子對、0.1 μ L TaKaRa Ex Taq DNA Polymerase (Takara Bio, Japan)、2.5 μ L 10X Ex Taq buffer、2 μ L 0.25 mM dNTP、1-3 μ L DNA 粗萃取液，並加滅菌 ddH₂O 至 25 μ L，混合完成後使用 PCR 反應器增幅，條件為：首先在 94°C 加熱 5 分鐘，然後進行 30 個循環，循環包括 94°C 加熱 1 分鐘、55°C 加熱 1 分鐘、72°C 加熱 2 分鐘，最後於 72°C 加熱 10 分鐘 (Bellec et al., 2020)。

2.3.2. 質體建構

由於直接將 PCR 產物送定序的效果不佳，經測試容易有多重序列，所以定序前會額外將目標片段進行基因轉殖，以獲得更多且更純的目標片段，減少定序結果的不穩定，另外將目標片段殖入質體的另一個好處是避免目標片段出現品質不佳的部分，定序結果中最前端與最末端的部分品質通常較差，而質體在定序時會從質體本身之序列開始定序，目標片段會涵蓋在定序結果之中間部分，所以不容易受低品質部分的干擾，目標片段的解析度將更高。

PCR 產物接著注入 1.5 % Agarose gel 凹槽，進行膠體電泳，電泳結束後將膠體置於 MBE-200A BluView 藍光透照儀 (Major Science, Taiwan)，在藍光下以刀片切下目標片段，切下的膠體會放入 1.5 mL 微量離心管內，並使用 HiYield Gel/PCR DNA Fragments Extraction Kit (ARROWTEC life science, Taiwan) 進行切膠純化，再將產物置於-20°C 保存。使用 pGEM-T Easy Vector Systems (Promega Corporation, USA) 進行 TA cloning，將 1 μ L 純化 DNA 加入 200 μ L PCR 管內，並加入 1.66 μ L 2X Rapid Ligation Buffer、0.33 μ L pGEM-T Easy Vector、0.33 μ L T4 Ligase。混合均勻後，反應在 4°C 條件下進行 16 小時。。

2.3.3. 轉殖與質體萃取

將 ECOS 勝任細胞 (Yeastern Biotech, Taiwan) 從-80°C 冰箱取出，取 50 µL 至置於冰上的 1.5 mL 微量離心管，再加入 1 µL ligation product 並震盪 1 秒混合，接著將微量離心管放入 42°C 水浴槽加熱 45 秒，隨即置於冰上 5 分鐘，之後加入 100 µL LB broth，放入 37°C 培養箱以轉速 225 rpm 下震盪培養 1 小時。將混有 100 µg/ml Ampicillin 的 LB agar 滴加 40 µL 50 µg/ml IPTG、7 µL 20 µg/ml X-gal 與 23 µL LB broth 混合液進行塗盤，待勝任細胞培養結束，取 80 µL 進行塗盤，最後放置於 37°C 培養箱待菌落生成，白色菌落為可能的目標轉殖株。

為了確認目標片段是否成功插入質體，使用牙籤沾取可能的目標轉殖株菌落，加至事先配好的 PCR 反應混合液，以進行 colony PCR。PCR 反應混合液總體積為 10 µL，其中包含 5 µL 的 2X Taq DNA polymerase 2x Master Mix RED (Ampliqon A/S., Denmark)、0.5 µL 10µm M13F (-40) / M13R 質體引子對 (M13F (-40): 5'-GTTTTCCCAGTCACGAC-3'; M13R: 5'-TACAGGAAACAGCTATGACT-3')，以及 4 µL ddH₂O。混合均勻後，將反應溶液放入聚合酶連鎖反應器中進行 PCR。反應條件設定為：94°C 加熱 1 分鐘後，以 94°C 反應 30 分鐘、55°C 反應 30 分鐘、72°C 反應 45 分鐘為一個循環，重複 30 次，最後 72°C 加熱 1 分鐘。最後進行膠體電泳確認，目標增幅長度約為 938 bp (目標片段 635 bp 加質體的增幅長度 303 bp)，能夠產生此條帶的菌落將加入 3 mL 混有 100 µg/ml Ampicillin 的 LB broth，並於 37°C 培養箱以轉速 225 rpm 下震盪培養 16 小時，培養好的菌株使用 HiYield Plasmid Mini Kit (ARROWTEC life science, Taiwan) 進行質體的萃取，最後於-20°C 保存。

2.3.4. 定序

取 10 μ L 質體 DNA 與 10 μ L 引子 M13F (-40) 送至源資國際生物科技 (Tri-I Biotech Inc., Taiwan) 進行定序，其定序平台使用 ABI 3730 DNA Analyzer (Thermo Fisher Scientific, USA)，定序結果以 18S1.2a / 18Sr2b 引子對擷取目標片段序列，並使用 BLASTn 將所有蒐集之序列與 NCBI nt database 進行比對，比對結果主要會參考相同度、bitscore 與物種資訊，最後將比對結果與型態鑑定之結果相互對照。由於海洋線蟲的序列資料本身之不完整，以及本實驗使用的片段為 18S v5 到 v8 變異區而非全長，其解析度會比全長低，所以當比對結果較不明確時，例如相同度小於 95%或是比對到多組相同度高於 97%之結果時，會進一步對照型態鑑定之結果。

2.4. 線蟲之型態鑑定

由於分子鑑定為隨機進行，並非每一隻個體都會進行型態鑑定，數量少的物種完成型態鑑定的機率較低，所以物種鑑定主要會以型態鑑定為主，分子鑑定則為輔助，作為縮小範圍的依據。透過每隻線蟲個體的照片記錄，觀察線蟲之體長、體型、角質層構造、口器構造、頭部感受器之形狀與位置、食道膨大情形、雄蟲與雌蟲之生殖構造、尾部的形狀、剛毛的位置與數量等特徵，並以書籍 Handbook of Zoology Volume 2: Nematoda (Bain et al., 2013)和網站世界海洋物種目錄 (World Register of Marine Species: WoRMS) 作為參考資料 (Ahyong et al., 2023)，盡量每一隻個體分類到屬階層，若無法達到屬則以更高之階層替代。其中 WoRMS 致力於提供全面性的海洋物種目錄，可作為海洋生物分類文獻之指南，且同時整合 Nemys 世界線蟲資料庫 (Nemys: World Database of Nematodes) 的海洋線蟲物種 (Ahyong et al., 2023)。

2.5. 線蟲功能群分類

鑑定完成後的線蟲會根據文獻劃分其攝食類型與 c-p value。攝食類型依據口器型態構造分成 1A (選擇性沉積物攝食者)、1B (非選擇性沉積物攝食者)、2A (表生攝食者)、2B (獵食者或雜食者) (Wieser, 1953)，並計算各樣本之營養多樣性指數，其計算方式是各攝食類型相對豐度之平方和，公式如下， θ 為特定攝食類型相對豐度 (Heip et al., 1985; Liao et al., 2020)。

$$TD = \sum \theta^2$$

c-p value 根據生存策略屬於殖民者還是持留者，分成 c-p 1 至 c-p 5，c-p 1 屬於繁殖速率快容易在環境中定殖的殖民者，而 c-p 5 則是世代長、繁殖速率慢、對環境較敏感的持留者。各樣本的成熟指數 MI 由 c-p value 計算獲得，計算方式為所有線蟲物種 c-p value 的加權平均公式如下， S 為物種數， v 是特定物種的 c-p value， f 為該物種出現的頻率 (Bongers, 1990)。

$$MI = \sum_{i=1}^S vf$$

2.6. 底泥性質分析

2.6.1. 化學組成分析

底泥樣本首先使用熱水萃取法萃取其中的陰陽離子 (Shiau & Chiu, 2017)，每個地點重複三次，將 2 g 樣本與 10 mL ddH₂O 加入 15 mL 離心管，離心管放入 70°C 水浴槽加熱 18 小時，加熱後將離心管短暫震盪，再放入 Z326K 離心機 (HERMLE, Germany) 將樣品以轉速 13000 rpm 離心 5 分鐘，以使顆粒沉澱。接著，將液體使用 0.22 μ m 的過濾器進行過濾，按照適當倍率稀釋後於 -20°C 冰箱保存等待上機。陰離子的測量對象為 Cl⁻ 與 SO₄²⁻，測量方式是使用 Eco IC 離子

層析儀 (Metrohm, Switzerland)，層析管柱選用 Metrosep A Supp 17-150/4.0 (Metrohm, Switzerland)。為了節省層析管柱與儀器平衡更換所花費時間以及獲得最佳的解析度，陽離子測量方式是使用 Z-5300 原子吸收光譜儀 (Hitachi, Japan)，測量對象為 Na^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 。離子層析儀由臺灣大學生物環境系統工程學系蕭友晉老師實驗室提供使用，而原子吸收光譜儀則由屏東科技大學吳羽婷老師實驗室協助測量。

2.6.2. 粒徑分析

底泥粒徑分析採用乾篩法，將底泥風乾後，移除生物殘骸，取 300 g 乾重樣本放入 10、18、35、120、230 目的篩網過篩，並將篩網上殘留的顆粒收集與秤重，紀錄各粒徑範圍下之重量。由於 CO_2 泉的底泥顆粒明顯較大，其粒徑大於 2 mm 的顆粒會額外進行 2–4 mm、4–8 mm 與大於 8 mm 範圍的劃分與秤重。最後將數據填入 GRADISTAT v9.1 軟體以計算粒徑分布參數，包括底泥之平均粒徑 (Mean)、中值粒徑 (D_{50} ；累計粒徑分布百分比達 50% 時的粒徑)、分選度 (Sorting；粒徑之分散程度)、偏度 (Skewness；粒徑分布之對稱性)、峰度 (Kurtosis；粒徑分布的集中性)，其數學計算方式選用 Geometric Folk and Ward graphical measures (Blott & Pye, 2001)。平均粒徑會比對 GRADISTAT 內建的 modified Udden-Wenworth 分級標準 (附錄 1)，以獲得各採樣地點的底泥粒徑分類。

2.7. 數據分析

本研究之數據分析主要以 R 語言進行 (v.4.2.1)，統計部分使用 rstatix package (Kassambara, 2020)，群落分析使用 vegan package (Oksanen et al., 2007)。化學組成方面，由於資料並非常態分佈，不適使用 Two-way ANOVA，所以改用 PERMANOVA 計算地點與季節對離子含量的影響，確認地點與季節會顯造成影響後 ($p\text{-value} < 0.05$)，以 Kruskal-Wallis test 分別檢測特定地點不同季節間與特

定季節不同地點間是否存在顯著差異，再使用 Dunn test 進行事後比較，而結果則以 Python 繪製之長條圖呈現。

粒徑分析方面除了使用 GRADISTAT，各地點於不同粒徑分類的組成百分比還會計算歐氏距離，再以完全連結聚合演算法 (complete-linkage agglomerative algorithm) 進行集群分析 (Cluster analysis)，此部分也是透過 vegan 於 R 中完成。

線蟲群落方面，物種組成表會用來計算各樣本的總線蟲豐度與 α 多樣性，總線蟲豐度會依照分離線蟲所使用之底泥容積進行標準化， α 多樣性亦使用 vegan 計算，包含物種豐富度 (Species richness; SR)、香農多樣性指數 (Shannon's diversity index; H') 與皮洛均勻度指數 (Pielou's evenness index; J)。簡單線性迴歸模型 (Simple linear regression model) 會用來分別檢驗環境因子 (包含底泥 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 Na^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 之含量、平均粒徑、海面月均溫、深度) 與線蟲豐度、 α 多樣性、TD、MI 個別的關係，存在顯著線性關係者會使用 ggplot2 繪圖呈現 (Villanueva & Chen, 2019)。此外，各樣本會依照時間點、地點與粒徑分級三種方式分類，並以 ANOVA 確認不同組別間是否存在顯著差異，存在顯著差異的分類方式會以 Tukey's test 進行組別間的兩兩比較，並同樣地以 ggplot2 繪圖呈現。各地點是否具獨有物種以及地點間物種的共享情形則是使用 UpSet plot 呈現 (Lex, Gehlenborg, Strobel, Vuilleumot, & Pfister, 2014)。線蟲的群落組成還會依照科及屬階層繪製各線蟲分類之相對豐度圖或絕對豐度圖，並且繪製前會事先去除總線蟲數為 0 的樣本。

為了探討底泥物化性質對線蟲物種組成之影響，物種組成表會先去除總線蟲數為 0 的樣本，再進行 Hellinger 轉化，並對此距離矩陣進行 Transformation-based redundancy analysis (tb-RDA)，解釋變數 (Explanatory variables) 為底泥物化性質，用於解釋樣本群落結構之變異，包括底泥各陰陽離子含量、平均粒徑大小與底泥質地分類，但會事先去除變異數膨脹因子 (Variance Inflation Factor; VIF) 大於 10 的變數 (Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、平均粒徑)，以避免共線性的問題影響到模型的可信

度。另外，地點與季節會作為補充變數 (supplementary variables)，以 envfit 函數將其與前述之 tb-RDA 座標擬合，確認其是否對樣本群落結構之變異具有顯著影響。分析過程使用 vegan，而繪圖使用 ggplot2。

最後根據 tb-RDA 的分群情形，先去除線蟲稀少的近遠泉樣本，再將樣本分成龜北、CO₂ 泉、龜尾龜南三組，以相似程度貢獻分析法(Similarity Percentage；SIMPER) 評估單一物種之豐度對樣本變異的貢獻程度 (Claeke, 1993)。

參、 結果



3.1. 底泥性質分析

由於沉積物本身是影響線蟲群落的重要因素之一，因此本研究透過底泥粒徑分析與化學成分分析，先了解各地點的環境差異，再探討這些環境因子與線蟲群落間的關係。

3.1.1. 粒徑分析

本研究使用 GRADISTAT v9.1 進行 6 個地點底泥粒徑分布的分析與描述 (表 3)。平均粒徑最大的是 CO₂ 泉，底泥質地屬於細礫石 (Fine gravel)，其次為龜北，屬於極粗砂 (Very coarse sand)，接下來是近泉與遠泉，屬於粗砂 (Coarse sand)，最細的是龜南與龜尾，屬於中砂 (Medium sand)。分選係數方面，龜尾、龜南與遠泉的分選度差 (Poorly sorted)，代表底泥顆粒粒徑的差異大與分散範圍廣，CO₂ 泉的分選度好 (Well sorted)，代表顆粒粒徑差異較小，大部分顆粒集中在較窄的範圍內，而近泉與龜北界於之間，前者屬於分選度稍差 (Moderately Poorly Sorted)，後者屬於分選度稍好 (Moderately Well Sorted)。偏度方面，龜尾的粒徑分布較為對稱 (Symmetrical)，其他地點則都往較大粒徑的方向偏斜 (Very fine skewed)。峰度方面，龜尾的粒徑分布屬於中峰度 (Mesokurtic)，其粒徑分布曲線近似常態分布，其他地點屬於平頂峰度 (Very Platykurtic)，其粒徑較為分散，粒徑分布曲線較常態分佈低且平緩。

集群分析的目的為將上述的各地點底泥粒徑分布進行進一步的相似性確認與分群，結果與平均粒徑的分類大致呼應，CO₂ 泉首先會被分出，與其他地點差異甚遠，龜北、近泉與遠泉會劃分在一群，其中龜北與另外二者有較大的差異，而龜南與龜尾則被劃分在另一群 (圖 3)。



3.1.2. 化學成分分析

除了底泥的物理性質 (粒徑分布)，本研究也測定了各採樣點陰陽離子含量於時間下的變動 (圖 4、附錄 2)，根據 PERMANOVA 的結果，地點與時間會顯著影響各離子的含量，其中對於 Cl^- 、 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 而言，地點與時間存在交互作用 (表 4)。

底泥中 Cl^- 的濃度範圍約為 350 到 1350 ppm，於 2021 年 1 月，遠泉 (平均 1320.30 ppm) 顯著高於龜北 (平均 427.42 ppm)；於 2022 年 8 月，遠泉 (平均 1342.81 ppm) 顯著高於 CO_2 泉 (平均 367.39 ppm)。相同地點下，龜尾 2022 年 4 月 (平均 1328.73 ppm) 相較 2021 年 11 月 (平均 613.08 ppm) 顯著上升；而 CO_2 泉從 2022 年 4 月 (平均 1167.94 ppm) 到 2022 年 8 月 (平均 367.69 ppm) 顯著下降。各地點底泥 Cl^- 濃度時序變化如圖 4 與附錄 2，Kruskal-Wallis test 的結果如附錄 3-1，Dunn's test 結果如附錄 3-2 及 3-3。

底泥中 Na^+ 的濃度範圍約為 300 到 2000 ppm，於 2022 年 8 月，遠泉 (平均 2061.00 ppm) 顯著高於 CO_2 泉 (平均 168.17 ppm)。相同地點下，龜南 2022 年 8 月 (平均 1890.00 ppm) 相較 2021 年 11 月 (平均 679.00 ppm) 顯著上升。各地點底泥 Na^+ 濃度時序變化如圖 4 與附錄 2，Kruskal-Wallis test 的結果如附錄 3-1，Dunn's test 結果如附錄 3-2 及 3-3。

底泥中 SO_4^{2-} 的濃度範圍約為 70 到 200 ppm，從 2021 年 11 月到 2022 年 4 月， CO_2 泉的濃度皆高於其他地點，於 2021 年 11 月， CO_2 泉 (平均 124.76 ppm) 顯著高於龜北 (平均 61.66 ppm)；於 2022 年 4 月， CO_2 泉 (平均 197.09 ppm) 顯著高於近泉 (平均 83.27 ppm)；但於 2022 年 8 月，改以遠泉的濃度最高 (平均 185.52 ppm) 顯著高於龜北 (平均 89.96 ppm)。相同地點下，龜南 2022 年 8 月 (平均 149.37 ppm) 相較 2022 年 1 月 (平均 80.62 ppm) 顯著增加；龜尾 2022 年 4 月 (平均 193.66 ppm) 相較 2021 年 11 月 (平均 77.17 ppm) 顯著增加； CO_2 泉

2022 年 4 月 (平均 197.09 ppm) 相較 2022 年 11 月 (平均 124.76 ppm) 顯著增加。各地點底泥 SO_4^{2-} 濃度時序變化如圖 4 與附錄 2, Kruskal-Wallis test 的結果如附錄 3-1, Dunn's test 結果如附錄 3-2 及 3-3。

底泥中 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 的濃度皆較低, 濃度範圍分別為 10 到 170 ppm、3 到 140 ppm 及 5 到 130 ppm。 CO_2 泉 K^+ 與 Ca^{2+} 的濃度皆較低, 於 2022 年 4 月, CO_2 泉 K^+ 濃度 (平均 15.83 ppm) 顯著低於龜南 (平均 118.00 ppm); 於 2022 年 8 月, CO_2 泉 K^+ 濃度 (平均 16.60 ppm) 與 Ca^{2+} 濃度 (平均 3.20 ppm) 顯著低於遠泉 K^+ 濃度 (平均 162.00 ppm) 與 Ca^{2+} 濃度 (平均 116.50 ppm)。 Mg^{2+} 的濃度在相同地點不同時間點間與相同時間點不同季節間皆無顯著差異。各地點底泥 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 濃度時序變化如圖 4 與附錄 2, Kruskal-Wallis test 的結果如附錄 3-1, Dunn's test 結果如附錄 3-2 及 3-3。

3.2. 線蟲群落分析

3.2.1. 線蟲之分離與鑑定

在一年的採樣之中, 總共分離了 2607 隻海洋線蟲個體, 進一步透過型態鑑定為主、分子鑑定為輔的方式, 盡量將這些線蟲辨認至屬階層, 若無法辨認至屬階層會以較高階層替代, 當遇到屬相同但型態特徵仍有明顯差異時會以物種 1 (sp. 1)、物種 2 (sp. 2) 分開計算最終獲得 2 綱 6 目 19 科 54 屬 63 種。屬於 Chromadorea 的目有 5 個, 包括 Araeolaimida 中的 3 個科, Axonolaimidae、Comesomatidae 與 Diplopeltidae; Chromadorida 中的 3 個科, Chromadoridae、Cyatholaimidae、Selachinematidae; Desmodorida 中的 4 個科, Desmodoridae、Draconematidae、Epsilonematidae、Microlaimidae, Monhysterida 中的 3 個科 Linhomoeidae、Sphaerolaimidae、Xyalidae, Plectida 中的 2 個科 Plectina 與 Ceramonematina, 屬於 Enoplea 的目有 1 個為 Enoplida, 包含 5 個科 Enchelidiidae、Leptosomatidae、Oncholaimidae、Oxystominidae、Thoracostomopsidae, 各樣本分離之線蟲物種、

數量、攝食分類、c-p value 呈現於表 5-1、表 5-2、表 5-3，線蟲照片整理於附錄 4，主要呈現各物種之體型、口器構造、尾部形狀與生殖構造，而分子鑑定之結果整理於附錄 6，由於定序之線蟲個體為隨機挑選，只有常見的物種有分子鑑定的結果。

3.2.2. 線蟲豐度於時間下的變動

線蟲豐度在不同時間點呈現明顯的變動情形。整體而言，從 2021 年 11 月到 2022 年 8 月線蟲的豐度會逐漸上升，龜尾的線蟲豐度 (平均 169.14 ind./L) 通常會高於其他地點，除了 CO₂ 泉在 2022 年 4 月出現了突然的高峰 (585.52 ind./L)；無論時間點近泉與遠泉線蟲數量少，僅出現個位數隻線蟲，在時間點 (近泉：2021 年 11 月、2022 年 8 月；遠泉：2021 年 11 月、2022 年 1 月、2022 年 8 月) 甚至未分離到任何線蟲個體；龜南在 2021 年 11 月和 2022 年 1 月，僅有少數線蟲被分離出，而 2022 年 4 月亦未分到任何個體，但在 2022 年 8 月豐度有明顯提升 (圖 5)。

3.2.3. 線蟲群落之 α 多樣性

各採樣地點之 α 多樣性也呈現與豐度相似的變動情形，2022 年 4 月與 2022 年 8 月會有較高的物種豐富度，其中 2022 年 4 月 CO₂ 泉的物種豐富度最高，達 27 種。香農多樣性指數整體而言偏低，數值為 0 到 2.5，其中在 2022 年 4 月與 2022 年 8 月有較高的數值，於地點間比較，龜尾、CO₂ 泉與龜北具有較高的香農多樣性指數，數值可達 2，其次為龜南，數值皆不超過 2，而近遠泉最低，數值幾乎為 0。皮洛均勻度方面，由於皮洛均勻度的計算中需將取自然對數的物種數作為分母，當遇到樣本僅有一個物種時，分母會變成 0，而無法進行計算，所以

部分樣本無皮洛均勻度的紀錄。另外，相較於其他地點，龜尾的皮洛均勻度較為穩定，數值界於 0.42 到 0.66 (表 6)。

接著使用簡單線性迴歸模型探討環境因子與線蟲豐度及香農多樣性指數的關係，結果顯示 SO_4^{2-} 、 Mg^{2+} 分別與線蟲豐度具有正相關， R^2_{adjusted} 分別為 0.26 ($p\text{-value} = 0.006$ ；圖 6-A、表 7) 與 0.46 ($p\text{-value} < 0.001$ ；圖 6-B、表 7)；而所有環境因子 (底泥離子含量、平均粒徑、海面月均溫、深度) 皆與香農多樣性指數不具有線性關係 (表 7)。

進一步將 24 個樣本依照採樣地點、採樣時間點、底泥粒徑分級三種標準分組，再使用 one-way ANOVA 檢驗不同分組標準下各組間的線蟲豐度及香農多樣性指數是否存在顯著差異，結果顯示地點間的香農多樣性指數存在顯著差異 ($p\text{-value} = 0.0169$ ；表 9)，其中龜尾之香農多樣性指數顯著高於近泉 ($p\text{-value} = 0.038$ ；圖 7-A)；粒徑分級間的香農多樣性指數也存在顯著差異 ($p\text{-value} = 0.0158$ ；表 9)，中砂與極粗砂的香農多樣性指數顯著高於粗砂 ($p\text{-value} = 0.027$ ；圖 7-B)；而不同採樣時間點間香農多樣性指數不存在顯著差異 ($p\text{-value} = 0.272$ ；表 9)。此外，而線蟲豐度於地點間、時間點間與粒徑分級間皆無顯著差異 (表 9)。

3.2.4. 線蟲之群落組成

以 UpSet plot 比較採樣地點間物種的交集情形，龜北、龜尾與 CO_2 泉具有各自獨有的線蟲物種，其中龜北獨有的物種數量最高，數量大於 1 的物種包含 *Desmodora pontica*、*Rhyps* sp.、*Eubostrichus* sp.、*Epsilonema* sp.、*Prochaetosoma* sp.、*Abelbolla* sp.、*Prooncholaimus* sp.、*Enoplolaimus* sp.；龜尾獨有的物種有 11 種，包含 *Dorylaimopsis* sp.、*Linhystera* sp.、*Longicyatholaimus* sp.等；而 CO_2 泉獨有的物種有 4 種，包含 *Araeolaimus* sp.、*Desmolaimus* sp.、*Prochromadorella* sp.、與未辨認出之物種 *Nematoda* sp. 1。此外，龜南觀察到的線蟲物種都會與龜尾有所重疊 (圖 8)。

各採樣地點不同季節線蟲群相的相對豐度如圖 9 所示。在科階層下，龜尾以 Chromadoridae、Desmodoridae、Microlaimidae、Xyalidae 為主要組成，2021 年 11 月 Desmodoridae 相對豐度最高，但 2022 年之後改以 Chromadoridae、Microlaimidae 與 Xyalidae 有較高的相對豐度，其中 Xyalidae 具有較穩定之比例，而 2022 年 4 月及 8 月 Chromadoridae 的比例上升超越 Microlaimidae。龜南的線蟲組成以 Desmodoridae、Linhomoeidae、Xyalidae 為主，且 2022 年 8 月的組成與龜尾相似。龜北以 Chromadoridae、Desmodoridae、Enchelidiidae、Xyalidae 為主，與其他地點相比，具有較高比例的 Enchelidiidae，另外，Xyalidae 在 2022 年 1 月與 4 月的比例增加，相對豐度為 70%。CO₂ 泉以 Chromadoridae、Desmodoridae、Cyatholaimidae、Linhomoeidae、Oncholaimidae 為主，並具有較高比例之 Oncholaimidae。近泉與遠泉觀察到的線蟲包含 Chromadoridae、Desmodoridae、Oncholaimidae 與 Xyalidae，但觀察到的數量稀少，難以看出明顯的趨勢。

在數量最多的前 20 個屬中，龜尾 2021 年 11 月以 *Spirinia* 為主要組成，2022 年之後具有穩定高比例之 *Daptonema*，而 *Microlaimus*、*Ptycholaimellus*、*Dorylaimopsis* 的相對豐度也高但會在不同時間點間變動。龜南與龜尾相似，具有較高比例的 *Daptonema* 與 *Spirinia*，不同的是龜南在 2022 年 1 月有較高的 *Metalinhomoeus* 與 *Terschellingia*，在 2022 年 8 月有較高的 *Neochromadora*，而 2022 年 4 月未觀察到任何線蟲個體。龜北於所有時間點都有發現 *Abelbolla*、*Desmodora* 與 *Euchromadora* 的存在，其中 2022 年 1 月與 4 月的組成接近，都具有高比例的 *Theristus*，而在 2022 年 8 月有高比例的 *Spilophorella*，上述幾個屬都較少在其他地點出現。CO₂ 泉在 2022 年 4 月時 *Acanthonchus*、*Dichromadora*、*Linhomoeus*、*Metalinhomous*、*Neochromadora* 與 *Viscosia* 的數量暴增，而在 2022 年 8 月時數量減少，但仍為主要組成，其中 *Acanthonchus* 很少出現在其他地點，而 *Viscosia* 的豐度也相較其他地點高。而在近遠泉出現的屬包括 *Dichromadora*、

Theristus、*Metoncholaimus*、*Spirinia* 但數量都很少 (相對豐度：圖 10、絕對豐度：圖 11)。



3.2.5. 線蟲之功能群組成

各線蟲分類的攝食類型與 c-p value 呈現於表 5-1、5-2、5-3。攝食類型方面，大多數採樣地點的攝食類型以 1B、2A 為主，而 1A 的比例相當少，雖然 2021 年 11 月之龜北與 2022 年 1 月的龜南看似具有較高比例之 1A，然而實際 1A 線蟲數量僅為 2、3 隻。龜北與 CO₂ 泉有較高比例之 2B，前者是受到 *Abelbolla* 的影響，後者則是受到 *Eurystomina* 與 *Viscosia* 的影響 (圖 12)。根據各攝食類型的相對豐度，可進而計算各樣本的營養多樣性指數 TD，當樣本中僅有 1 種攝食類型時，TD 為 1，此種情況發生在線蟲數量稀少的樣本，其餘樣本的 TD 界於 0.35 到 0.91 之間 (表 6)。根據簡單線性迴歸模型的結果，所有環境因子與 TD 並未呈現線性關係 (表 8)。再根據 one-way ANOVA 的結果，採樣地點、採樣時間點與底泥粒徑這三種分組情形下，TD 於組間皆未有顯著差異 (表 9)。

生存策略方面，大多數樣本的線蟲群落主要由 c-p 2 與 c-p 3 所構成，其中 cp 2 與 cp-4 在龜北的比例稍高於其他地點。此外，所有樣本中並未觀察到 c-p 1 的存在，而 c-p 5 僅在龜尾春季出現 (圖 13)。成熟指數 MI 方面，樣本間的差異並不明顯，MI 多於 2-3 之間 (表 6)，並且與 TD 相同，所有環境因子與 MI 並未具有線性關係 (表 8)。同樣地，於採樣地點間、採樣時間點間、不同底泥粒徑分級間，MI 皆未呈現顯著差異 (表 9)。

3.2.6. 環境因子對線蟲群落之影響

以 tb-RDA 探討線蟲群落組成與底泥物化性質間的關係，根據 Permutation test 的結果，此 RDA 模型中的解釋變數 (Mg²⁺、SO₄²⁻、Cl⁻、與粒徑分級) 對物

種組成的變異具有顯著性 ($F = 1.7916$, $p = 0.002$)，其中 RDA1 與 RDA2 可分別解釋 18.84% 與 10.84% 的變異 (圖 14-A)。除了底泥物化性質外，我們也想探討地點與時間點對於線蟲群落的影響，因此基於上述的 tb-RDA 模型，再額外將地點與時間點作為補充變量進行分析，其中地點可顯著解釋樣本變異 ($r^2 = 0.7495$, $p = 0.001$ 、圖 14-B)，而時間點的解釋能力並不顯著 ($r^2 = 0.2223$, $p = 0.274$)。除了線蟲數量過少的近泉與遠泉，依據地點樣本在圖中可分成三群，龜北、CO₂ 泉與龜尾龜南，此分群趨勢與粒徑分級的分群結果相符 (圖 14-A、圖 14-B)。

最後，依據 tb-RDA 圖的分群結果，以 SIMPER 進一步探討造成組別間線蟲群落變異的主要物種。前 10 個造成 CO₂ 泉與龜尾龜南之間差異的主要物種依序為 *Daptonema* sp.、*Spirinia* sp.、*Acanthonchus* sp.、*Viscosia* sp. 2、*Dichromadora* sp.、*Ptycholaimellus* sp.、*Neochromadora* sp.、*Desmodora* sp. 2、*Microlaimus* sp. 與 *Terschellingia* sp. 1，其累計貢獻度為 84.1%，其中 *Acanthonchus* sp. 與 *Viscosia* sp. 2 於組別間具有顯著差異；前 10 個造成 CO₂ 泉與龜北之間差異的主要物種依序為 *Theristus* sp.、*Acanthonchus* sp.、*Dichromadora* sp.、*Desmodora* sp. 1、*Spilophorella* sp. 1、*Neochromadora* sp.、*Abelbolla* sp.、*Euchromadora* sp.、*Viscosia* sp. 2、*Eubostrichus* sp. 1，累計貢獻度為 82.4%，其中 *Desmodora* sp. 1、*Abelbolla* sp. 與 *Euchromadora* sp. 於組別間具有顯著差異；前 10 個造成 CO₂ 泉與龜北之間差異的主要物種依序為 *Theristus* sp.、*Daptonema* sp.、*Spirinia* sp.、*Desmodora* sp. 1、*Ptycholaimellus* sp.、*Spilophorella* sp. 1、*Abelbolla* sp.、*Microlaimus* sp.、*Euchromadora* sp.、*Dichromadora* sp.，累計貢獻度為 81.2%，其中 *Theristus* sp.、*Desmodora* sp. 1、*Abelbolla* sp.、*Euchromadora* sp. 於組別間具有顯著差異 (表 10)。

肆、討論



本研究調查了龜山島周遭海域底泥於不同時間點之線蟲群落結構。結果顯示，除了近遠泉，線蟲的豐度與香農多樣性指數會受到時間的影響，於春季與夏季(2022 年 4 月與 8 月)時明顯上升，並且底泥中的 Mg^{2+} 與 SO_4^{2-} 含量與線蟲豐度具有正相關，而龜尾的香農多樣性指數顯著高於近泉。線蟲的群落主要由 Xyalidae、Chromadoridae、Desmodoridae 組成，受到地點的影響，線蟲的群落組成可分成龜北、 CO_2 泉與龜尾龜南三群，三群都具有獨有物種存在，而底泥物化性質中粒徑分級、 SO_4^{2-} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 是造成線蟲群落組成差異的重要環境因子。

4.1. 樣本採樣與定量問題

首先，必須一提的是本研究中的採樣方式可能使定量較不精確。本研究中的底泥採集是使用挖土的方式，過程極容易受到當天水流影響，而使線蟲與一些細緻的顆粒流失，導致線蟲數量的低估與粒徑分析上的誤差，尤其在水流強烈的地點(近泉與遠泉)受到的影響會更大，而水流的干擾也被發現會影響到線蟲群落之密度 (Alongi, 1986; F. Semprucci et al., 2011)。而大多數研究之取樣會傾向於使用打孔取樣的方式，直接深入底泥，避免額外之擾動，淺海可水肺潛水的區域可以使用切開的針筒作為取樣器材 (Cai et al., 2020; Liao et al., 2015b)、或是使用其他特製的塑膠製或不銹鋼之打孔器材 (Liao et al., 2015a; Ng et al., 2022)，至於深海則需要研究船配備其他的打孔設備，如 OSIL Multiple Corer (Liao et al., 2020)。雖然本研究存在定量上的誤差，但珊瑚礁區與熱泉區的差異以及季節間的變動是相當明顯，且可進一步探究的。未來龜山島周遭海域若要持續進行類似小型底棲動物之研究，則也需進行打孔取樣的方式，只是 CO_2 泉由於粒徑過大，需要另外設計其他採樣方式，因此可參考 Ruiz-Abierno (2017) 於加勒比海地區珊瑚礁環境的研究，他們為了因應不同的底質環境(海草床、裸沙、珊瑚碎石、藻類草皮)，

設計了不同的採樣方式，並且可以定量與比較，其中海草床與裸沙環境使用切開之針筒採樣；珊瑚碎石區會先圈出特定面積範圍，再將範圍中的碎石收集於採集罐；藻類草皮區由於是硬底質，所以使用 PVC 管搭配側窗與篩網刮取沉積物 (Ruiz-Abierno & Armenteros, 2017)。

4.2. 環境因子對線蟲的影響

沉積物的特性是影響小型底棲生物群落的決定性變數之一，本研究關注了底泥的物化性質對線蟲群落的影響，底泥粒徑是造成其分群的重要因素。許多研究也證實粒徑與線蟲組成間存在密切的關係。不同粒徑分類下的線蟲組合也常被描述，Semprucci 等 (2010) 於馬爾地夫的研究中 *Stylotheristus* 與 *Spirinia* 與細砂高度相關，*Eubostriechus* 與中砂相關，而在 Fonseca 等 (2014) 的研究中，*Terschellingia*、*Microlaimus*、*Sabatieria* 與 *Daptonema* 主要分布在細砂環境，*Theristus* 分布於粗砂，*Draconematidae* 分布於大於 1 mm 的大顆粒 (Fonseca et al., 2014)，這些結果與本研究的發現相符。

底泥化學組成方面，本研究僅測量了常見的陰陽離子種類，熱泉釋放的其他金屬並未偵測，這是實驗中的可惜之處，因為重金屬可能才是影響當地線蟲數量的重要因素 (Lichtschlag et al., 2022)，而底泥中的不同痕量金屬對生物引起不良反應之濃度範圍已有文獻記載 (Long, Macdonald, Smith, & Calder, 1995)，故可與重金屬濃度資料搭配並比較。與義大利拿坡里灣的 Secca delle Fumose 淺海熱泉系統的研究比較，他們不僅有陰陽離子及重金屬資料，還有測 S^{2-} 、溫度、pH 與總有機碳 (Total organic carbon; TOC)，並以 DistLM (Distance-based linear modelling) 評估環境變數對線蟲群落結構的影響，結果顯示 K^+ 、pH 與線蟲生物量顯著相關， NO_3^{2-} 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 與線蟲組成顯著相關， NO_3^{2-} 、 K^+ 、 S^{2-} 、溫度與線蟲多樣性指數顯著相關， NO_3^{2-} 、TOC、Cl 與營養多樣性指數指數顯著相關 (Baldrihi et al., 2020)。這與本研究的結果差異很大，因為本篇的結果顯示 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 與 Cl 是影

響龜山島海域底泥線蟲群落的因子，而重金屬、溫度、pH、TOC 的偵測未來應被包含進研究架構中。



4.3. 線蟲數量的時間變動

本研究中不同生態系呈現不一致的時間變動情形，於珊瑚礁生態系的龜尾、龜北與龜南，都是在春夏的時候線蟲數量增加，此波動趨勢與 Nicholas (2001) 的發現相似，也就是於溫暖的月份下線蟲的數量會增加，並於冬季下降。雖然結果中當所有樣本一起分析時，溫度與線蟲豐度並不存在正相關性，但當只分析珊瑚礁環境之樣本時，溫度與線蟲豐度便具有正相關性 (Adjusted $R^2 = 0.3304$; $F = 6.427$; $p\text{-value} = 0.0296$)，不過本研究中並未實際測得各地點於每次採樣的溫度，使用之溫度為海面月均溫，其參考性較低。

在熱泉環境，近泉與遠泉的線蟲數量四季上都一致地低，這應是受到熱泉釋放的影響，目前已有許多研究表示熱泉的活動會降低噴口當地的小型底棲動物數量、物種多樣性與功能群多樣性，熱泉的極端環境是重要的限制因素 (Alfaro-Lucas et al., 2020; Lichtschlag et al., 2022; D. Zeppilli & Danovaro, 2009)，當然先前所述之水流影響也可能是觀察到之線蟲數量少的部分原因。 CO_2 泉則呈現完全不同的趨勢，於 2021 年 11 月及 2022 年 1 月幾乎沒有觀察到線蟲，於 2022 年 4 月時數量暴增，並於 2022 年 8 月數量又減少，我們推測 CO_2 泉是受到非季節的事件性因素影響，此將於 4.4.3 章節結合群落組成做更詳細之討論。

4.4. 龜山島周遭海域的線蟲群落組成

4.4.1. 熱泉環境

先前研究指出龜山島有兩種熱泉類型，一種是黃泉，黃泉常呈現煙囪與硫磺土丘型態，會噴出含有元素硫的黃色液體，並且噴液流速較快，溫度較高 (92–116°C)、pH 值較低 (1.5–6.3)；另一種是白泉，白泉常位於岩石縫隙中，周遭不

會呈現黃色，並且噴液流速較慢，溫度較低 (48–62°C)、pH 值較高 (1.8–7.0) (Chan et al., 2016; C.-T. A. Chen et al., 2005; Yang et al., 2005)。由於本研究的熱泉採樣地點均未發現煙囪與土丘，且未見明顯之黃色，所以推測皆不屬於黃泉。而近泉的噴口位在大石塊區，不僅會噴出大量白色流體，還會散發明顯的硫化物的味道，因此推測近泉屬於白泉。而 CO₂ 泉為不斷冒出氣泡且由白色菌毯覆蓋的平地，周遭不會有明顯的硫磺味，溫度比近泉還要更低，因此推測非已知的黃泉與白泉，可能屬於其他熱泉環境，由於未曾於龜山島文獻中發現關於此 CO₂ 泉的研究，因此相關化學地質特徵需要有進一步的研究佐證。

值得一提的是，在本研究的採樣期間龜山島熱泉群曾發生強烈的大噴發，據新聞報導，2021 年 10 月 28 日開始龜首磺煙噴發頻繁，並於 2021 年 11 月 21 日噴發 24 年以來最大量之磺煙 (沈如峰，2021)，雖然不確定噴發的熱泉是否與我們的採樣地點重合，但鄰近區域像是近泉、遠泉、CO₂ 泉，甚至是龜南，可能都會受到影響，因此推測 2021 年 11 月與 2022 年 1 月的 CO₂ 泉與龜南線蟲數量少與此噴發可能有關。。

4.4.2. 近遠泉

近泉與遠泉發現的線蟲僅有 5 隻，這應該是受到熱泉噴發與採樣方式的影響，而如此稀少的樣本無法代表當地線蟲群落，難以進行進一步的討論。不過其中的 *Metoncholaimus* 屬於 Oncholaimidae，而 Oncholaimidae 是緒論提到之熱泉相關物種 (D. Zeppilli & Danovaro, 2009; Daniela Zeppilli et al., 2018)，*Metoncholaimus* 過去也有在淺海熱泉發現的紀錄 (Lichtschlag et al., 2022)。此外 *M. albidus* 的體表曾被發現有絲狀的 *Gammaproteobacteria* 與桿狀的 *Campylobacterota* 共生，且這兩株細菌與深海熱泉無脊椎動物的共生菌具有緊密的親緣關係，而外生細菌的存在可能有助於 *Metoncholaimus* 在熱泉環境的生存。多數熱泉相關的線蟲研究雖然顯示熱泉的線蟲豐度會比周遭低，但不至於沒有，

並且線蟲仍然是熱泉環境中小型底棲動物的優勢物種 (Alfaro-Lucas et al., 2020; Baldrigi et al., 2020)，因此，未來可以調整採樣方式並提高採樣的底泥量，再重新確認龜山島白泉的線蟲群落。



4.4.3. CO₂ 泉

CO₂ 泉與近遠泉呈現截然不同的數量變動與線蟲物種組成，雖然兩座熱泉都是龜山島淺海熱泉群的一員，但兩者的特性與周遭地貌差異甚遠，可直接視為不同的環境。義大利拿坡里灣 Secca delle Fumose 淺海熱泉研究中的 H 點與本研究的 CO₂ 泉都具有白色菌毯覆蓋，其沉積物由富含 TOC 的砂質組成，線蟲豐度也較非熱泉區低，但線蟲組成與本研究差異甚遠，其主要以 *Oncholaimus* 和 *Daptonema* 為優勢物種，並且攝食類型以 2B 為主 (Baldrigi et al., 2020)。

相較於其他地點，CO₂ 泉具有較高比例的 *Viscosia*，*Viscosia* 也是屬於 Oncholaimidae，且也有在淺海熱泉發現的紀錄 (Lichtschlag et al., 2022; D. Zeppilli & Danovaro, 2009)。與龜北 (28.6%) 及龜尾 (17.5%) 相比，CO₂ 泉 (6.3%) 獨有的線蟲比例較低，顯示 CO₂ 泉的線蟲群落組成與背景 (非熱泉區) 的物種具有高度的重疊。在淺海熱泉，這種情況是常見的，棲息在淺海熱泉噴口的線蟲包含生活在背景沉積物又可以在極端環境生存的物種 (Tarasov et al., 2005; D. Zeppilli & Danovaro, 2009)，相反地，在深海熱泉噴口生存的線蟲物種較少在背景沉積物中發現 (Copley, Flint, Ferrero, & Van Dover, 2007; Gollner, Riemer, Martínez Arbizu, Le Bris, & Bright, 2010)。

CO₂ 泉在 2022 年 4 月的線蟲數量與組成 2021 年 11 月及 2022 年 1 月相比發生很大的變化，於 2022 年 4 月除了熱泉相關物種 *Viscosia* 以外，還有其他 c-p 2 的物種大量增加，包括 *Acanthonchus*、*Dichromadora*、*Linhomoeus*、*Metalinhomoeus*、*Neochromadora*。根據此現象我們的推測是 2021 年 11 月及 2022 年 1 月的採樣受到 2021 年 10 月與 11 月頻繁的熱泉活動影響，使當地線蟲沉寂一段時間，而在

2022 年 4 月的採樣之前，水流或其他事件將食物、有機物甚至周遭的線蟲物種帶到 CO₂ 泉，其中較能適應熱泉環境的物種與對及極端環境較有耐受性的物種便在 CO₂ 泉大量繁殖，但由於熱泉的環境壓力持續存在，使得線蟲數量又開始下降。Gollner (2013) 的研究探討了海底火山噴發，岩漿覆蓋導致周遭生物大滅絕後，線蟲重新定殖的狀況，他們發現除了原本的熱泉優勢物種 (*Halomonhystera*、*Thalassomonhystera*) 外，原本屬於周遭環境的線蟲物種 (*Neochromadora*、*Linhomoeus*) 逃過一劫後，也會在熱泉環境定殖，而當中的 *Neochromadora* 與 *Linhomoeus* 剛好也是本篇研究中大量上升的屬。

4.3.4. 龜北

龜北在所有採樣地點中也非常特殊，因為其具有較多當地獨有的物種，包括 *Abelbolla*、*Eubostrichus*、*Laxus*、*Epsilonema*、*Prochaetosoma* 等。*Abelbolla* 為東亞區域的線蟲物種，主要發現於中國黃海與韓國 (Hong & Lee, 2014; Huang & Zhang, 2004)，*Eubostrichus* 與 *Laxus* 屬於亞科 Stilbonematinae，其特徵為體表具有硫氧化外共生菌 *Gammaproteobacteria* 覆蓋，Stilbonematinae 棲息於硫化物豐富的环境，能夠於有氧層與厭氧層來回穿梭，身上外共生菌可協助解毒並作為線蟲的食物來源，不同宿主物種會與不同的細菌共生，*Eubostrichus* 的外共生菌形狀為新月形，*Laxus* 則為桿狀細菌 (Hentschel, Berger, Bright, Felbeck, & Ott, 1999; Urbancik, Bauer-Nebelsick, & Ott, 1996)，雖然 Stilbonematinae 也曾在淺海熱泉環境中發現過 (Kamenev, Fadeev, Selin, Tarasov, & Malakhov, 1993; F. Thiermann et al., 1997)，但在本研究中僅存在於龜北。此外，根據觀察，在龜北生存的線蟲通常角質層較厚、環紋明顯，像是 *Desmodora*、*Euchromadora*、*Epsilonema*、*Prochaetosoma*，這些類型較能適應粗顆粒的環境，其中 *Epsilonema* 與 *Prochaetosoma* 分別屬於表層線蟲 Epsilonematidae 及 Draconematidae，牠們具有特化的剛毛構造，能夠在顆粒上爬行 (M. Raes et al., 2008)。雖然龜北的線蟲組成

與龜山島其他採樣點相比較為特殊，但上述許多線蟲物種也是馬爾地夫與加勒比海珊瑚礁環境的常見物種 (Grassi et al., 2022; Pérez-García et al., 2019)。



4.3.5. 龜尾

位於珊瑚礁生態系的龜尾線蟲數量較高，這可能與珊瑚礁生態系的高生產力相關 (Silveira et al., 2017)。珊瑚礁生態系的初級生產力可媲美熱帶雨林 (Odum & Odum, 1955; Silveira et al., 2017)，其有機碳來自於珊瑚的共生藻、內生藻、浮游植物、藻類草皮與大型藻類 (Hatcher, 1988)，而海綿與微生物可在珊瑚礁系統中有效地回收與轉移溶解有機物 (Dissolved organic matter ; DOC) (de Goeij et al., 2013; Silveira et al., 2017)，因此，雖然我們沒有測當地 TOC，但龜尾的有機碳來源應高於熱泉地點，進而豐富了當地的線蟲數量，也使當地營養階層的變動較為穩定。

在組成方面龜尾具有較高相對豐度的 *Sprinia*、*Daptonema*、*Microlaimus*、*Ptycholaimellus* 與 *Dorylaimopsis*，而龜尾出現的物種如 *Sprinia*、*Daptonema*、*Microlaimus*、*Terschellingia* 也是潮境公園與周遭海灣研究中的優勢物種 (Ng et al., 2022)。另外，龜尾的優勢物種有許多是生態研究中常見的環境壓力指標，例如 *Daptonema* 就被認為與石油污染與港口擾動有關 (Nanajkar & Ingole, 2007; Ng et al., 2022)，*Dorylaimopsis* 與有機物與重金屬污染有關 (Gyedu-Ababio & Baird, 2006; Hong et al., 2020)，然而龜尾又存在一些被認為是健康環境指標的物種，例如 *Microlaimus* 與 *Ptycholaimellus* (Mariapaola Moreno et al., 2011)。不過若是結合香農多樣性指數 (Moderate : $2.5 < H' < 3.5$; Poor : $1 < H' \leq 2.5$) 與成熟指數 (Moderate : $2.6 < MI < 2.4$; Poor : $2.4 < MI < 2.2$) 來看的話，整個龜山島的生態品質狀況 (Ecological quality status ; EQS) 屬於 Moderate 或是 Poor (Mariapaola Moreno et al., 2011)。而龜山島周遭環境其實原本就並不穩定，這不僅限於龜首的熱泉噴發，擴散舌 (牛奶海) 的流向、龜尾沉積物的堆積 (靈龜擺尾) 都可以從

衛星雲圖上看到它們的變化，這不只顯示了龜山島沉積物的不穩定性，也可能說明了為什麼 EQS 偏低。因此龜尾雖然不容易受到熱泉影響，但可能還是存在一些環境壓力。



4.3.6. 龜南

龜山島牛奶海受到潮汐與海流的影響，其範圍會有明顯的時空變動 (Chang et al., 2018)。從一些牛奶海的圖片可以看到，龜首噴發的物質是有可能帶往龜南，因此龜南於 2021 年 11 月、2022 年 1 月與 4 月可能是受到熱泉與季節影響，線蟲數量較少，但夏天線蟲數量增多時，龜南的線蟲群落組成與龜尾相似，其線蟲物種都會與龜尾共享，可能是因為地理位置相鄰且沉積物粒徑相近，使群落結構相似。此外，沿著龜尾、龜南、遠泉、近泉，線蟲數量、組成與多樣性皆呈現連續的變化，因此相較於龜北，龜南在線蟲相方面，是熱泉與珊瑚礁區的過渡地點。過去深海熱泉的相關研究也表明，受到熱泉流體影響與沒有受到影響的區域不應視為是單獨、不關聯的實體，而是生物與營養互相關聯的連續體 (Alfaro-Lucas et al., 2020)。

4.3.7. 線蟲之功能群分類

物種組成方面地點間呈現明顯的差異，但功能群方面，不論是攝食類型，還是生存策略類型都沒有明顯的差異，換算成營養多樣性指數與成熟指數更是如此，這可能與線蟲樣本數不足有關。在 Liao (2015) 海草床的研究中建議至少 300 隻個體才能可靠地確認線蟲群落的區域多樣性，而本研究的部分樣本遠少於 300 隻，因此後續的採樣對龜山島線蟲群落的調查會是非常重要的。

以現有的資料來說，CO₂ 泉仍是以 2A 線蟲為主，在深海的研究中，2B 線蟲於熱泉噴口會較為優勢 (Alfaro-Lucas et al., 2020)，也有淺海熱泉系統呈現此種

趨勢 (Baldrigi et al., 2020)，然而其他淺海熱泉的研究則顯示熱泉噴口 2A 與 2B 都會增加，其中 2A 的豐度會最高，這較符合本篇的結果 (Lichtschlag et al., 2022; D. Zeppilli & Danovaro, 2009)。這可能表示了淺海熱泉環境對光合作用營養源的依賴 (D. Zeppilli & Danovaro, 2009)，過去龜山島底棲群落的研究也顯示熱泉環境的食物鏈主要由光合自營生物驅使，其次為浮游生物，最後才是化學自營菌 (Wang et al., 2022)。不過其模型未包含線蟲等小型底棲動物，因此線蟲於龜山島熱泉的營養階層還可以更進一步的探討。

伍、 結論



本研究是第一篇探討龜山島周遭海域底泥線蟲群落結構的研究，也是少數有環繞龜山島，同時涵蓋熱泉系統與珊瑚礁環境的研究，提供未來台灣小型底棲生物研究之基礎。於珊瑚礁環境，線蟲豐度會在春季與夏季會呈現上升趨勢，珊瑚覆蓋率最高的環境（龜尾）的線蟲數量通常最多；而熱泉環境主要還是受到熱泉造成的環境壓力影響，線蟲數量稀少，除了 CO₂ 泉在 2022 年 4 月突然暴增。群落組成方面，地點是造成組成差異的重要原因，主要將樣本分成三群：龜北、CO₂ 泉、龜尾龜南，而底泥的物化性質也扮演著重要的角色，其中底泥粒徑對線蟲組成差異的貢獻尤其明顯。

綜觀各採樣地點的線蟲群落，龜北具有較為特殊的線蟲組成，其獨有物種占比最高，且主要由能夠適應極粗砂環境之線蟲物種組成；CO₂ 泉群落主要由熱泉相關物種 *Viscosia* 與 c-p 2 的線蟲組成，多數物種與其他地點重疊，所以其線蟲群落可能是由周遭環境而來；龜尾與龜南的組成相近，且主要由能夠適應細顆粒環境的物種組成，龜南雖然是珊瑚礁區但容易受到熱泉釋放的影響，從龜尾到龜南，再到遠泉與近泉，線蟲豐度的變動情形與群落組成皆呈現連續性的變化，故龜南是珊瑚礁環境與熱泉環境的過渡地點。

陸、圖與表



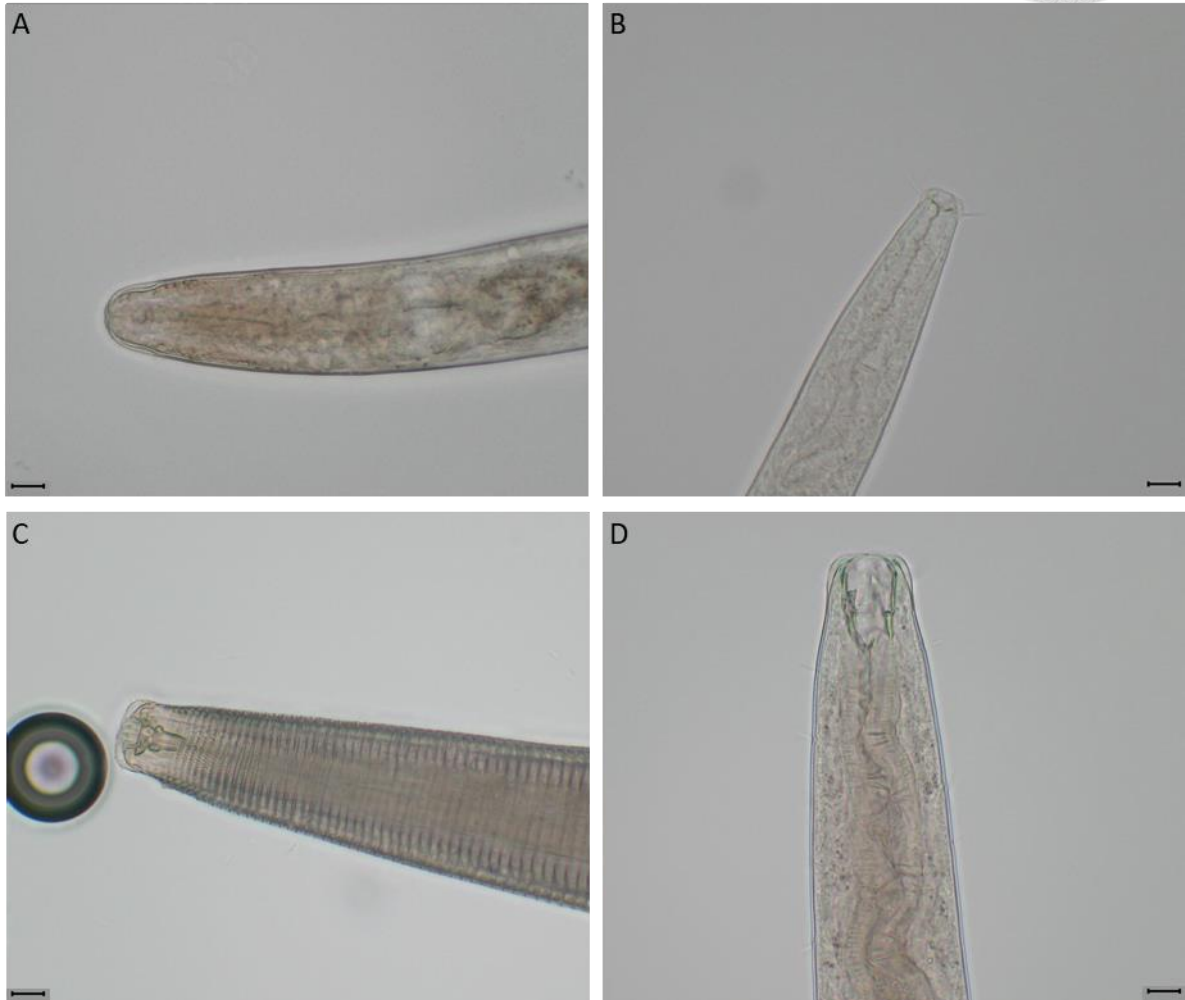


圖 1、海洋線蟲之攝食群 (Feeding type) 分類 (Wieser, 1953)。

(A) 選擇性沉積物攝食者 (Selective deposit feeders ; 1A) , *Terschellingia* sp. ; (B) 非選擇性沉積物攝食者 (Non-selective deposit feeders ; 1B) , *Daptonema* sp. ; (C) 表生攝食者 (Epigrowth feeders ; 2A) , *Euchromadora* sp. ; (D) 獵食者或雜食者 (Predators / Omnivores ; 2B) ; 比例尺為 10 μ m , *Viscosia* sp. 。

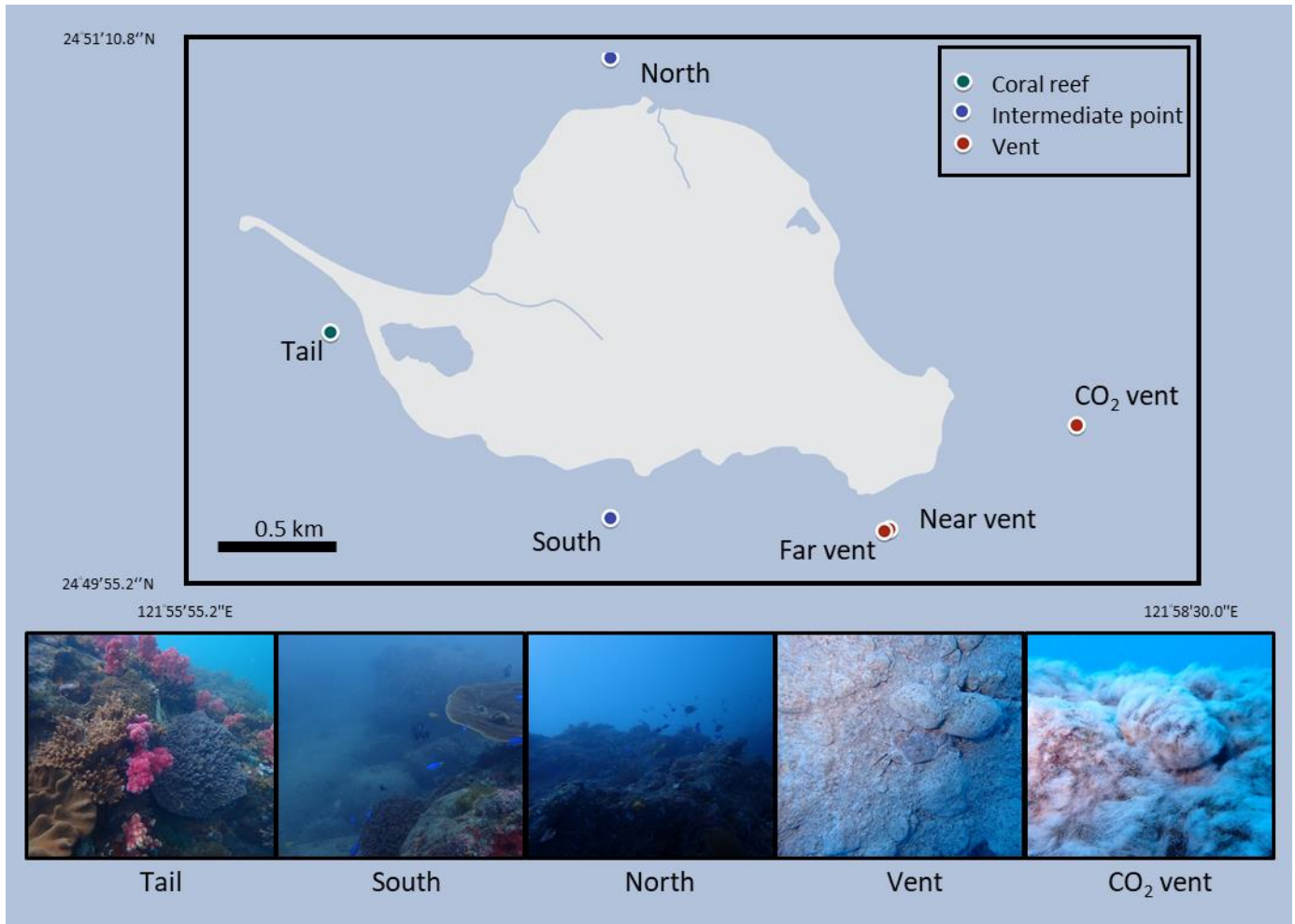


圖 2、龜山島周遭海域的採樣地點。

上方的地圖呈現各採樣地點的絕對位置，綠色標示為珊瑚礁區，紅色為熱泉區，藍色為珊瑚礁與熱泉間的過渡地點。下方的照片為各採樣地點的海底地貌，近泉與遠泉的地貌差異不大，故以一張照片呈現 (Vent)。

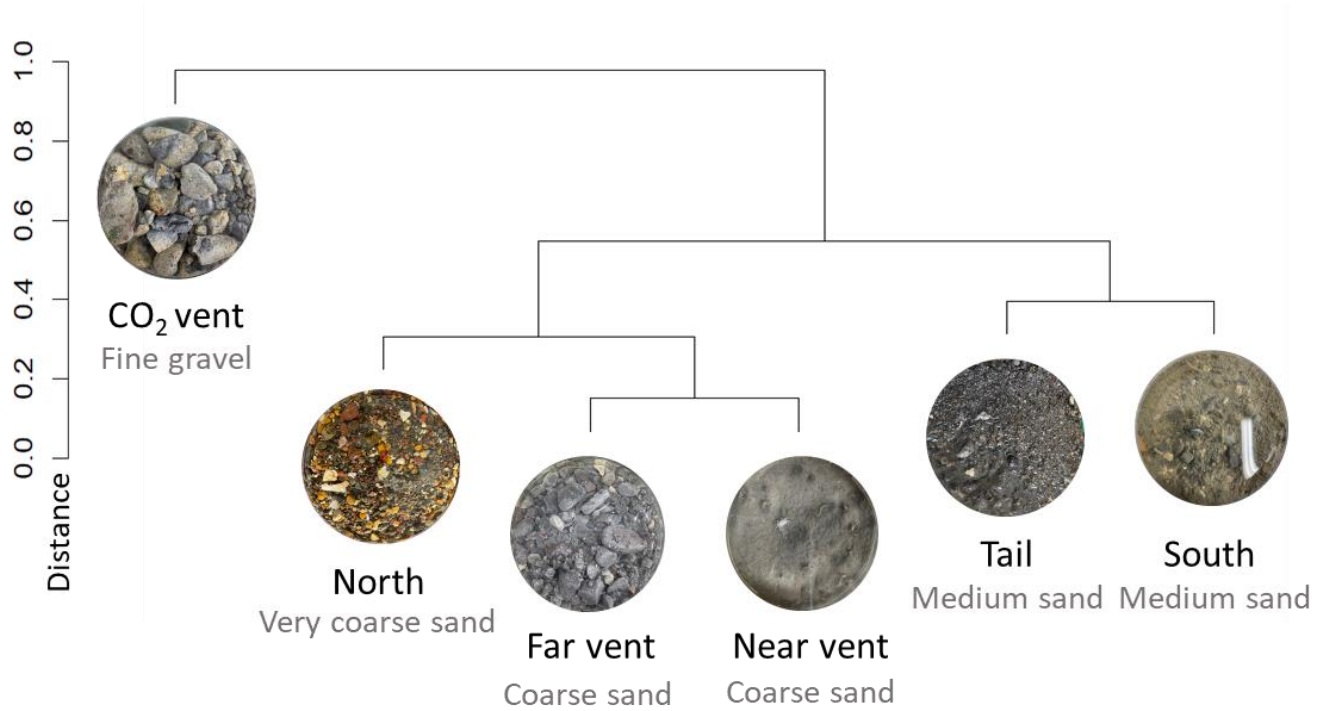


圖 3、不同採樣地點下底泥各粒徑範圍組成百分比的集群分析。

底泥樣本以乾篩法進行粒徑大小的分類與秤重，將重量換算成組成百分比後，使用完全連結聚合演算法完成分群，圖中照片為各地點之底泥樣本，灰色字為其粒徑分級。

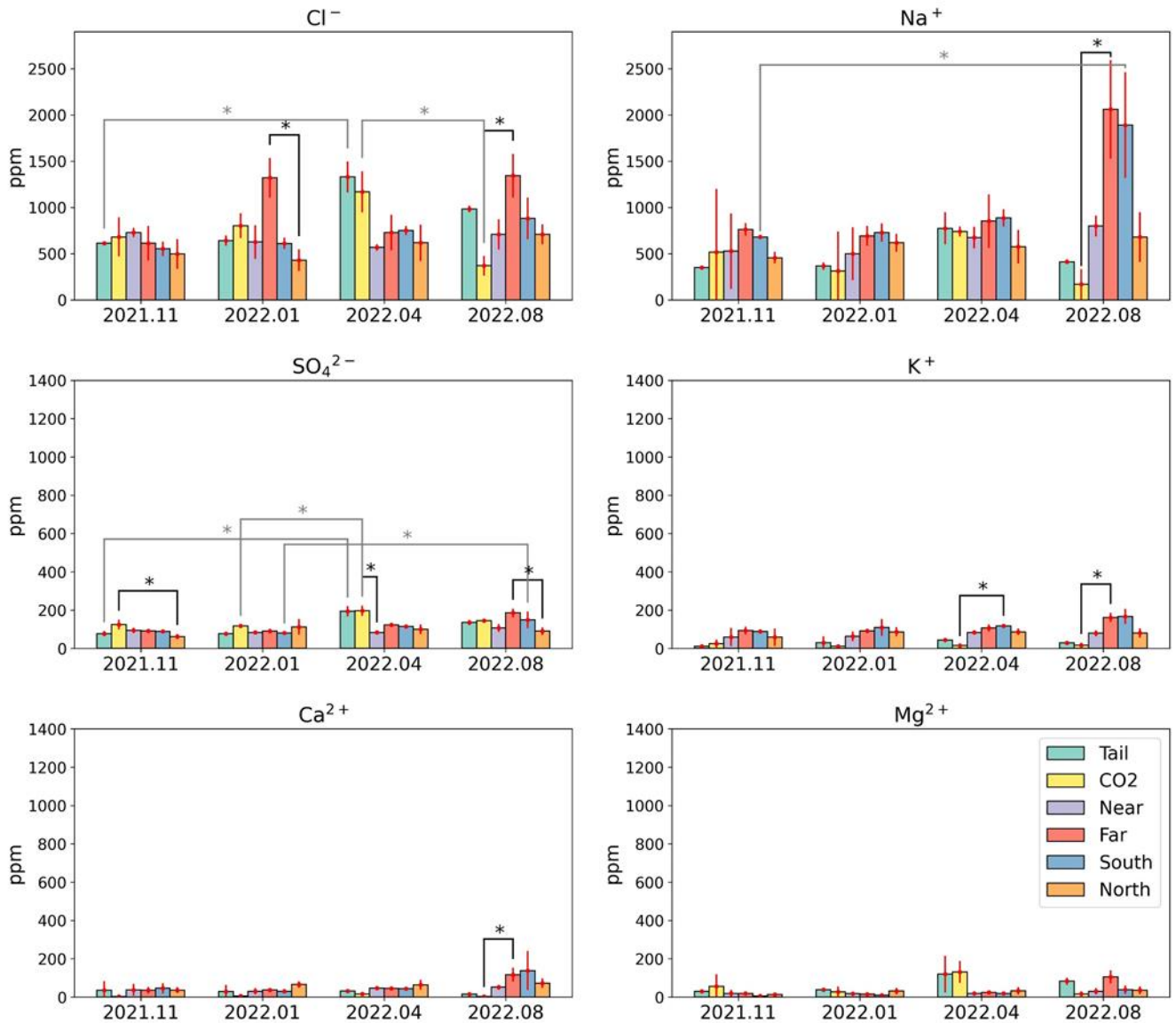


圖 4、各採樣地點離子含量的時間變動。

底泥以熱水萃取其陰陽離子，每個底泥樣本進行三重複，陰離子 (Cl^- 、 SO_4^{2-}) 使用離子層析儀測量，陽離子 (Na^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+}) 使用原子吸收光譜儀測量，濃度單位皆為 ppm。黑色線與星號標示表示相同時間點不同地點間具有顯著差異，而灰色線與星號標示表示相同地點不同時間點間具有顯著差異，紅色線為誤差線，數值範圍為平均值 $\pm$ 標準差。

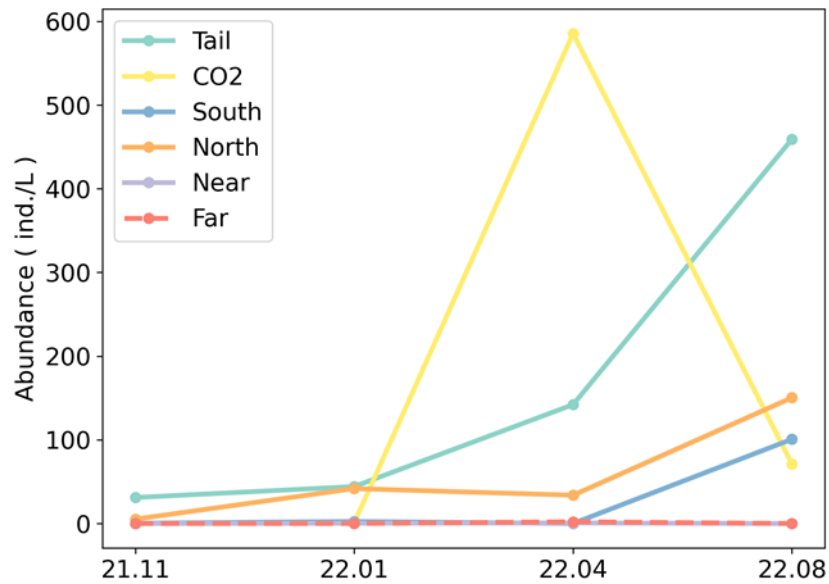


圖 5、線蟲豐度的時間變動。

底泥採樣後以懸浮網篩法進行線蟲的分離，於光學顯微鏡下獲得單一個體並以照片記錄，2021 年 11 月與 2022 年 1 月使用兩罐 1450 mL 的採集瓶分離線蟲，而 2022 年 4 月與 8 月由於線蟲數量太多改只觀察一罐採集瓶的線蟲，線蟲豐度會經由採集瓶的容積進行標準化，單位為 ind./L。

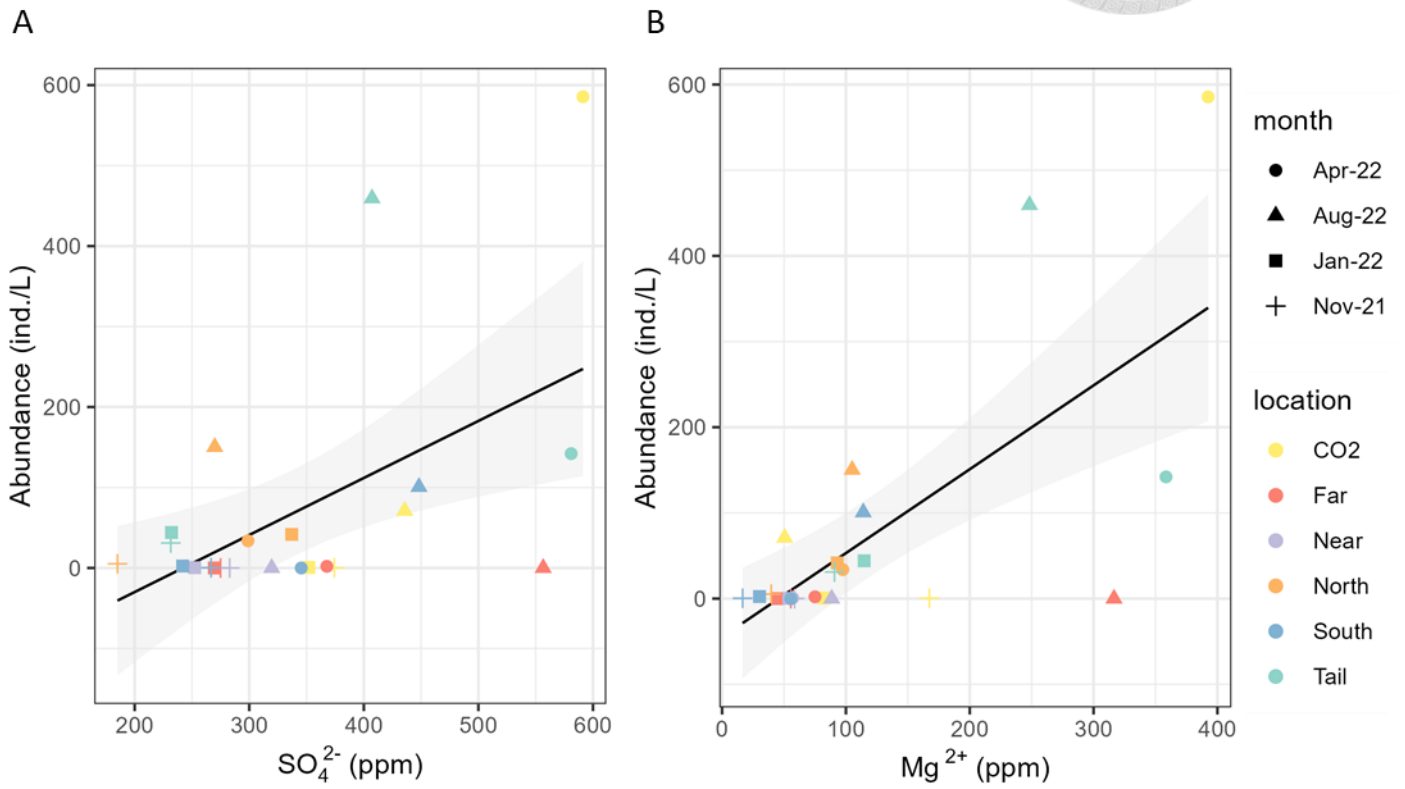


圖 6、線蟲豐度與環境因子之間的關係。

(A) 線蟲豐度與 SO_4^{2-} 的關係；(B) 線蟲豐度與 Mg^{2+} 的關係。以簡單線性迴歸模型檢驗線蟲豐度與環境因子 (SO_4^{2-} 及 Mg^{2+}) 與線蟲豐度的關係，黑線為迴歸線，灰色部分為信賴區間範圍。

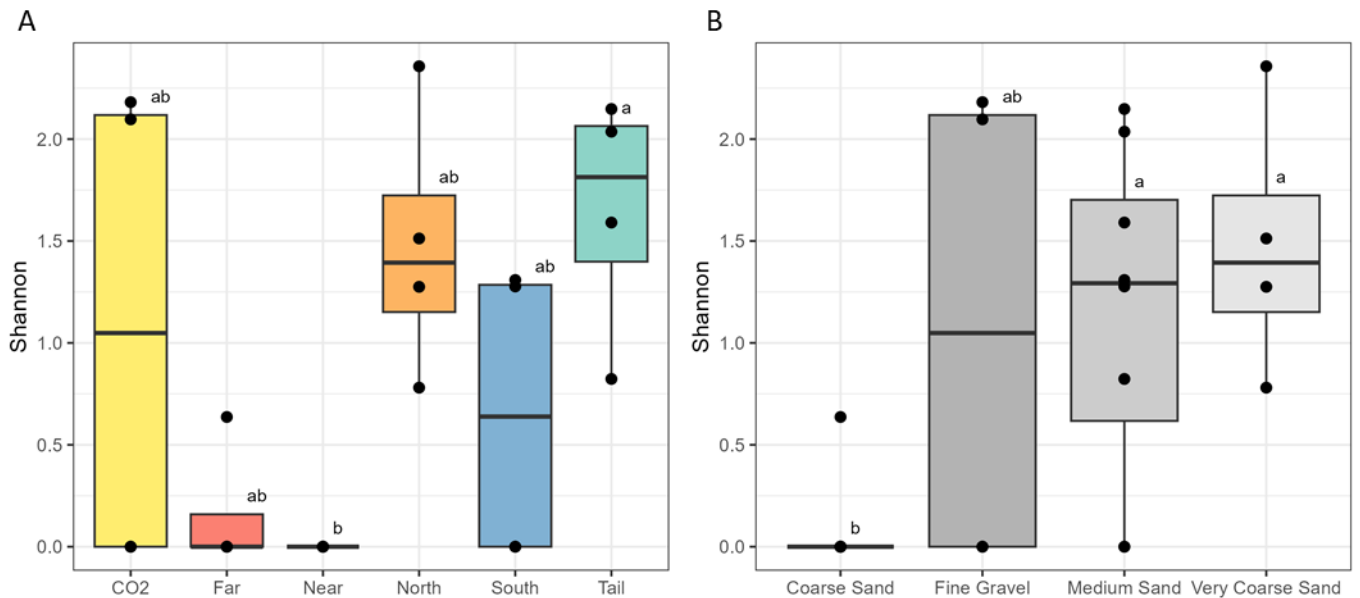


圖 7、不同組別下的香農多樣性指數。

(A) 各採樣地點的香農多樣性指數；(B) 各粒徑分級的香農多樣性指數。以 ANOVA 檢驗不同分組情形下（地點、粒徑分級）的香農多樣性指數在組間是否存在顯著差異，並使用 Tukey's test 事後檢定，以英文字母標示具有顯著差異的組別。

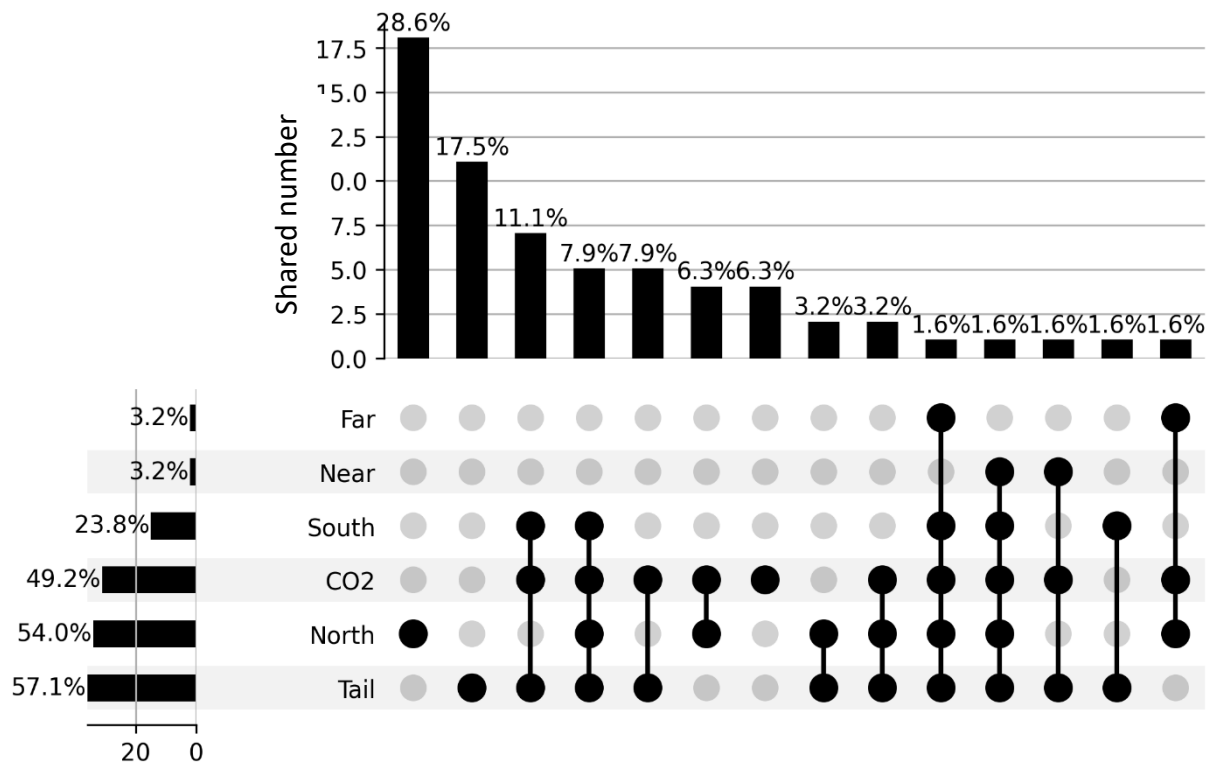


圖 8、以 UpSet plot 呈現採樣地點間線蟲物種之交集情形。

左方長條圖呈現各地點觀察到的物種數與其佔所有物種數的比例，右下方與由黑線串起的圓圈代表地點間不同的交集情形，右上方長條圖呈現的是符合下方交集情形的物種數與其佔所有物種數的比例。

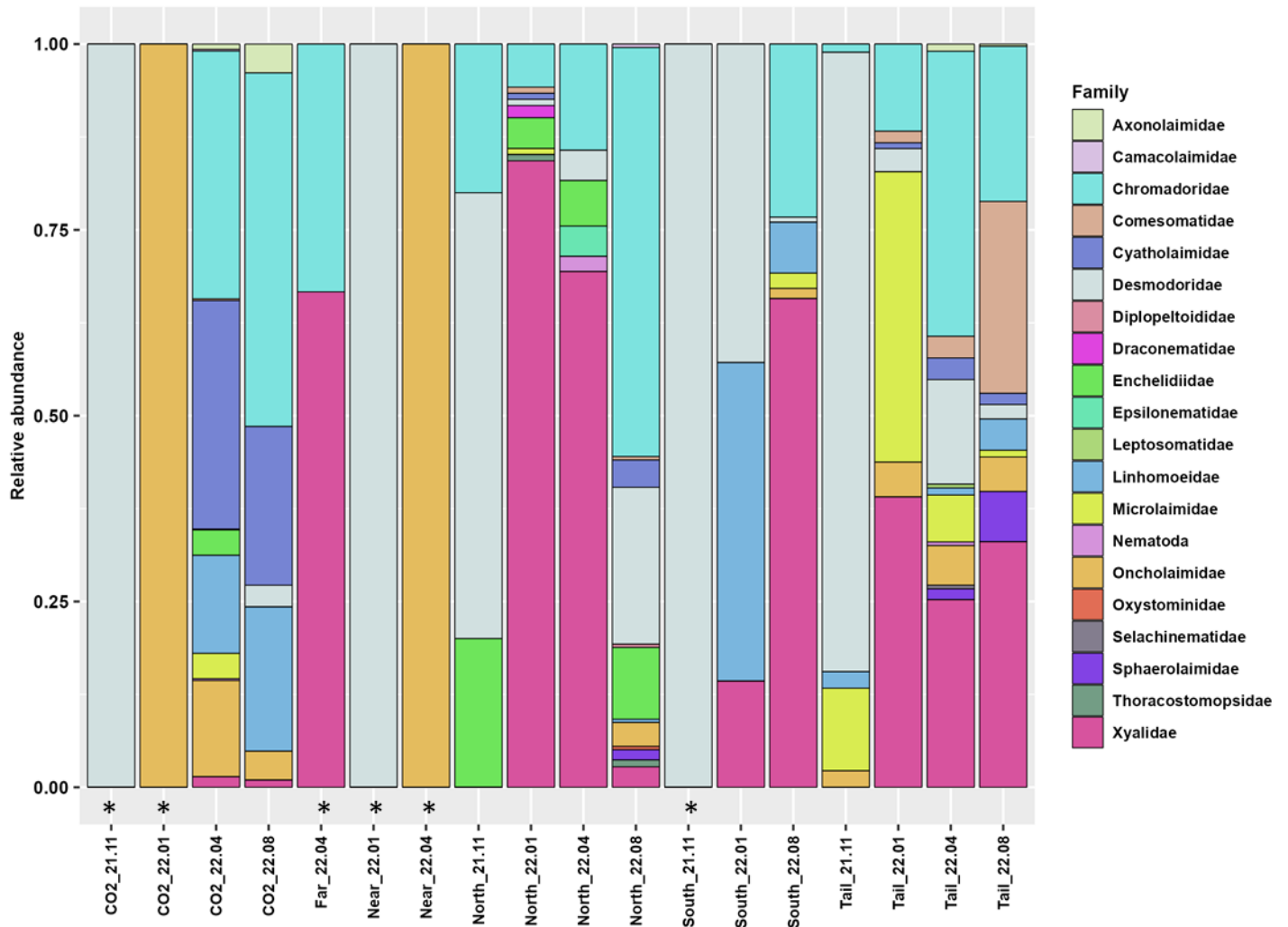


圖 9、各樣本之線蟲組成於科階層之相對豐度。

數量為 0 的樣本已去除，黑色星號標記代表線蟲數量小於 5 之樣本，其高相對豐度受到少數線蟲種類控制。

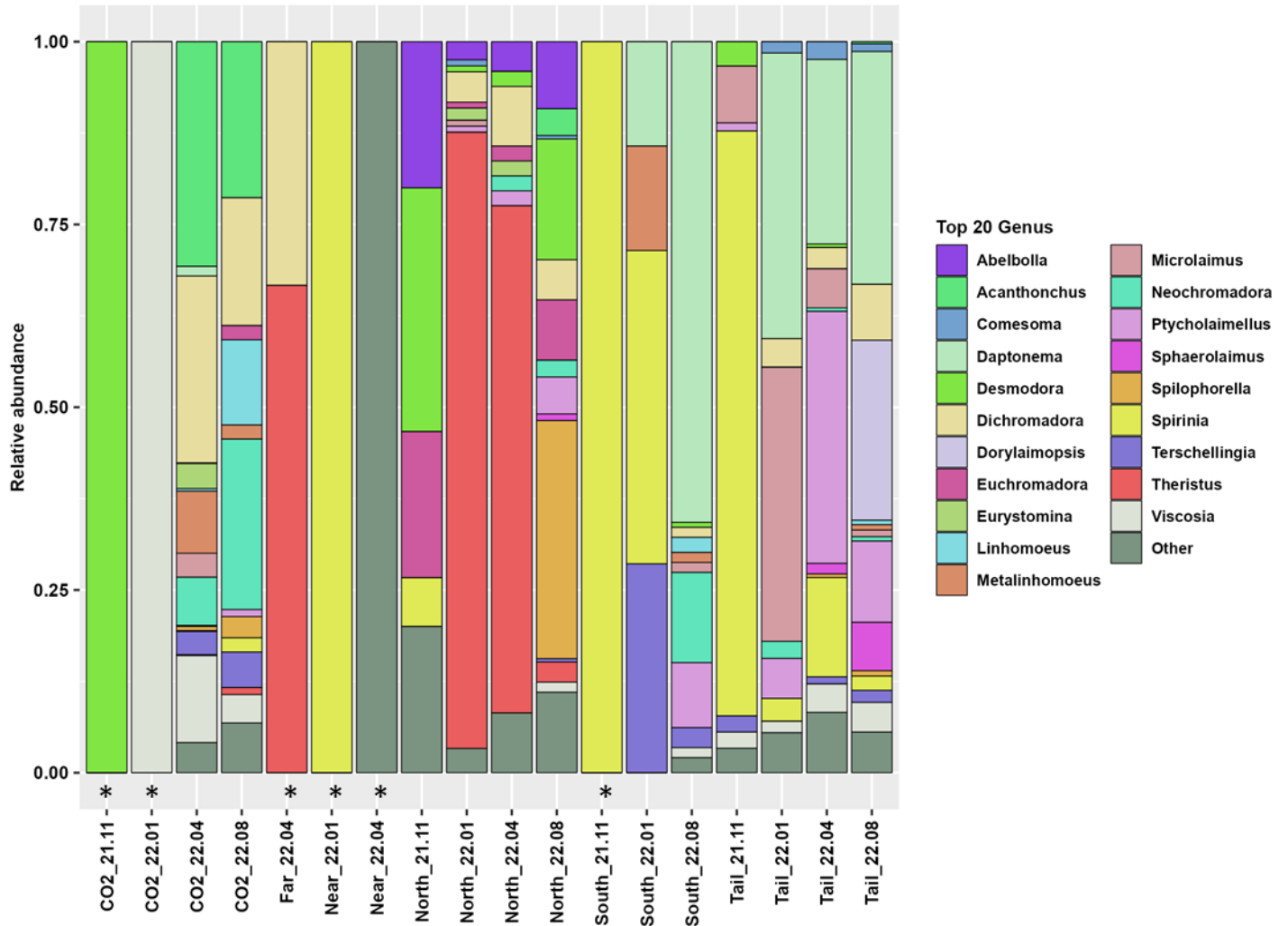


圖 10、前 20 個數量最高的線蟲屬之相對豐度。

僅列出總數量前 20 的屬，其餘併入其他 (Other)，數量為 0 的樣本已去除，黑色

星號標記代表線蟲數量小於 5 之樣本，其高相對豐度受到少數線蟲種類控制。

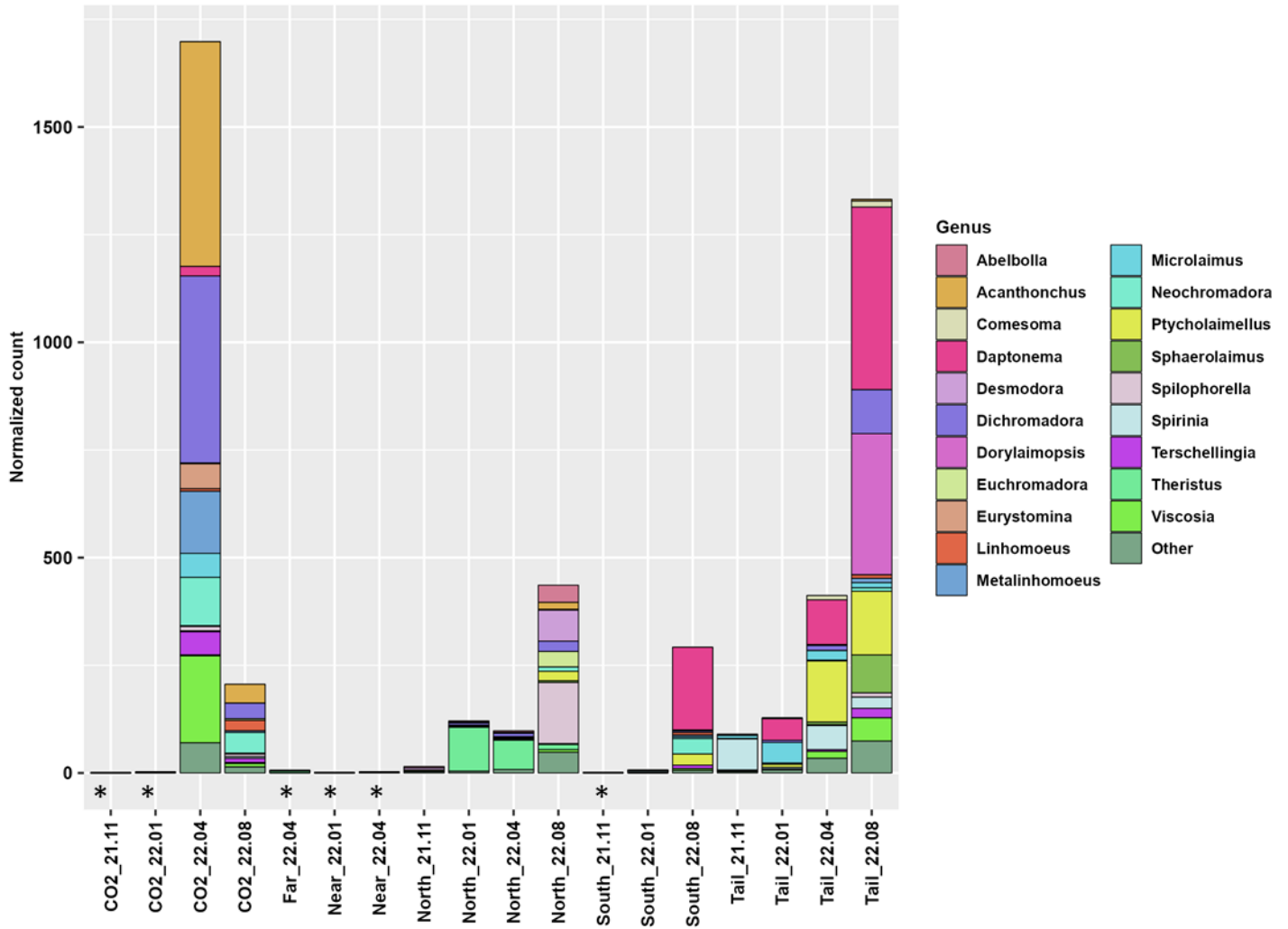


圖 11、前 20 個數量最高的線蟲屬之絕對數量。

此數量並未依底泥容積校正。僅列出總數量前 20 的屬，其餘併入其他 (Other)，數量為 0 的樣本已去除，黑色星號標記代表線蟲數量小於 5 之樣本。

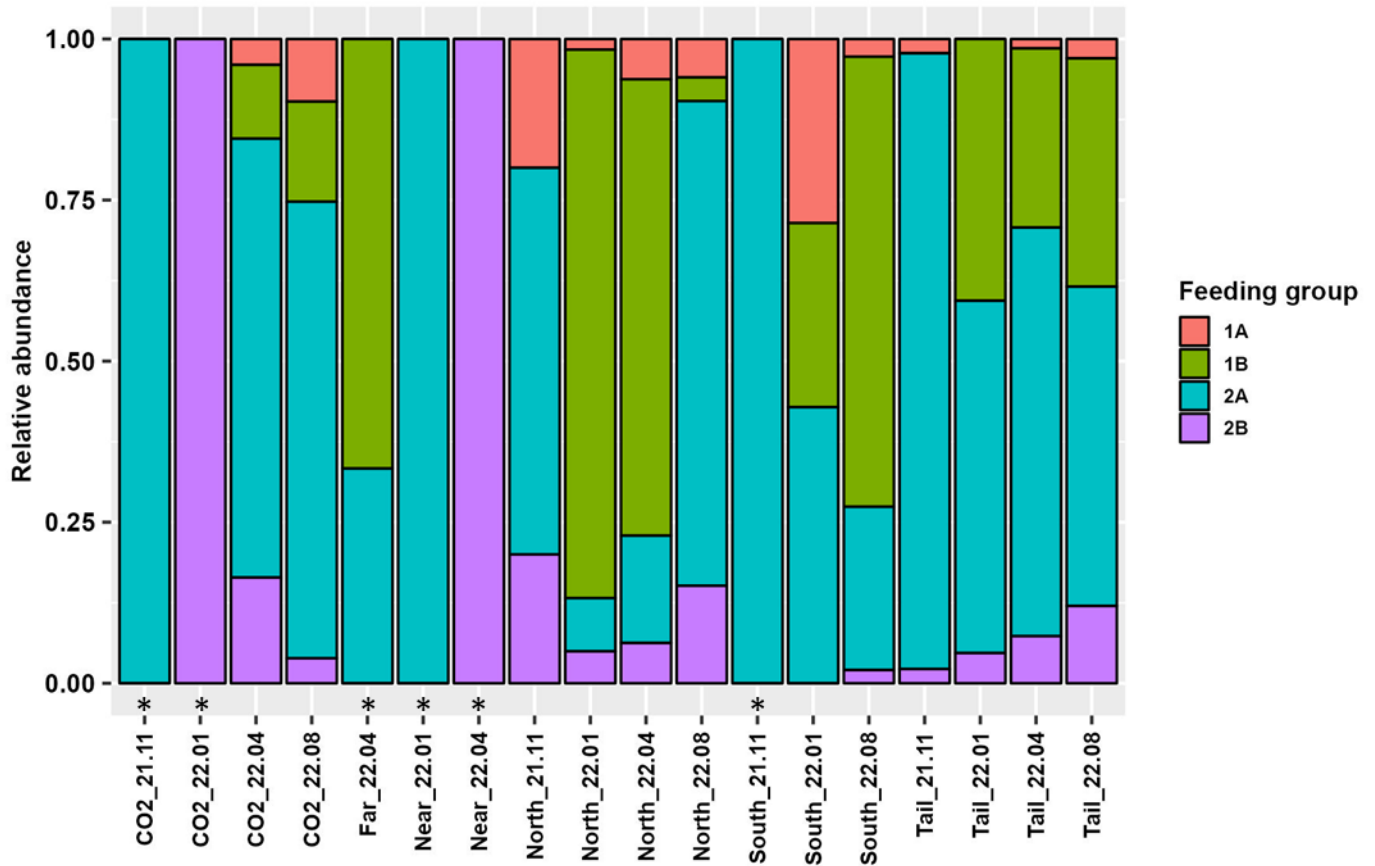


圖 12、各樣本線蟲功能群攝食群組成的相對豐度。

1A：選擇性沉積物攝食者 (Selective deposit feeders)；1B：非選擇性沉積物攝食者 (Non-selective deposit feeders)；2A：表生攝食者 (Epigrowth feeders)；2B 獵食者或雜食者 (Predators/Omnivores)，數量為 0 的樣本已去除，黑色星號標記代表線蟲數量小於 5 之樣本，其高相對豐度受到少數線蟲種類控制。

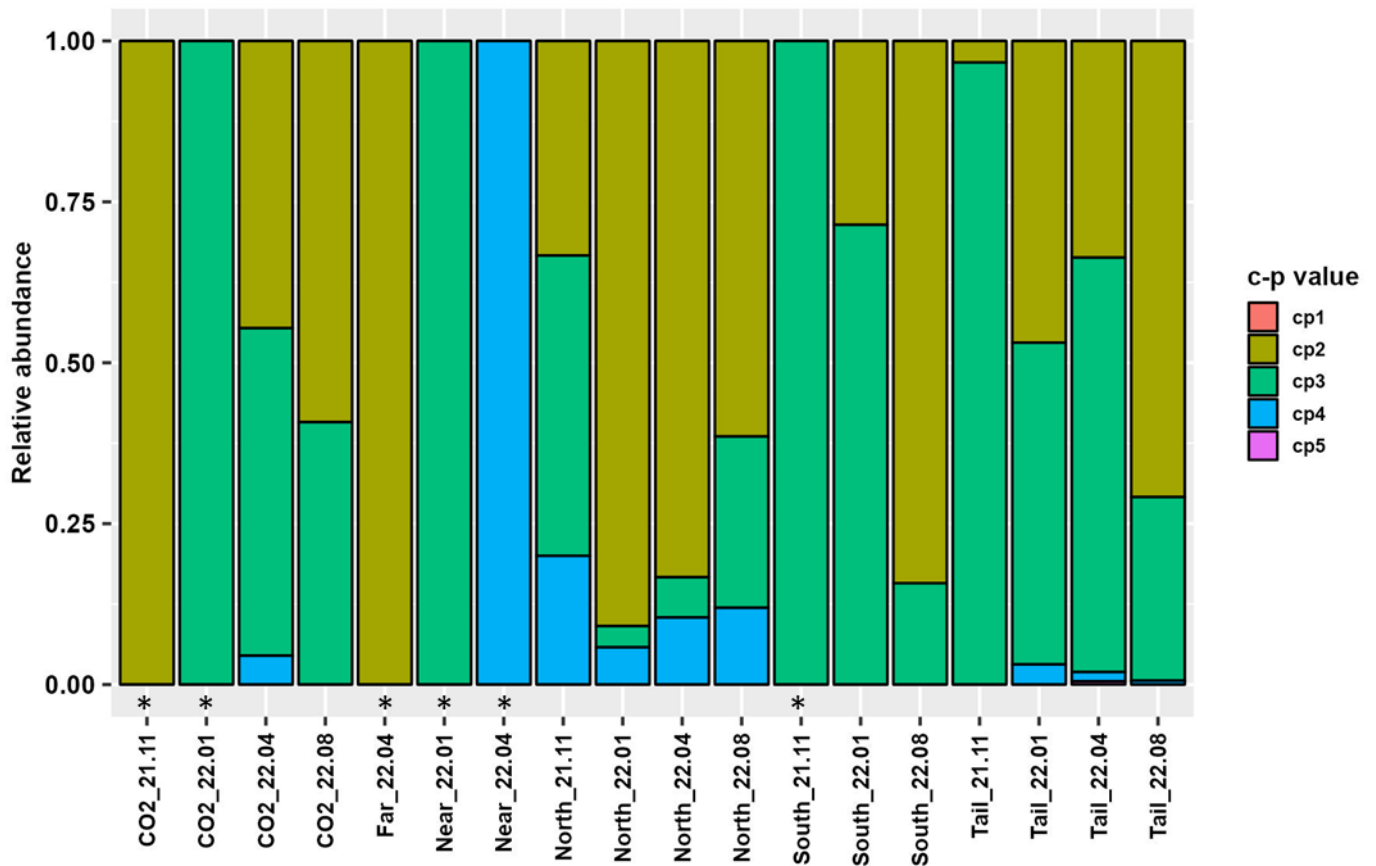
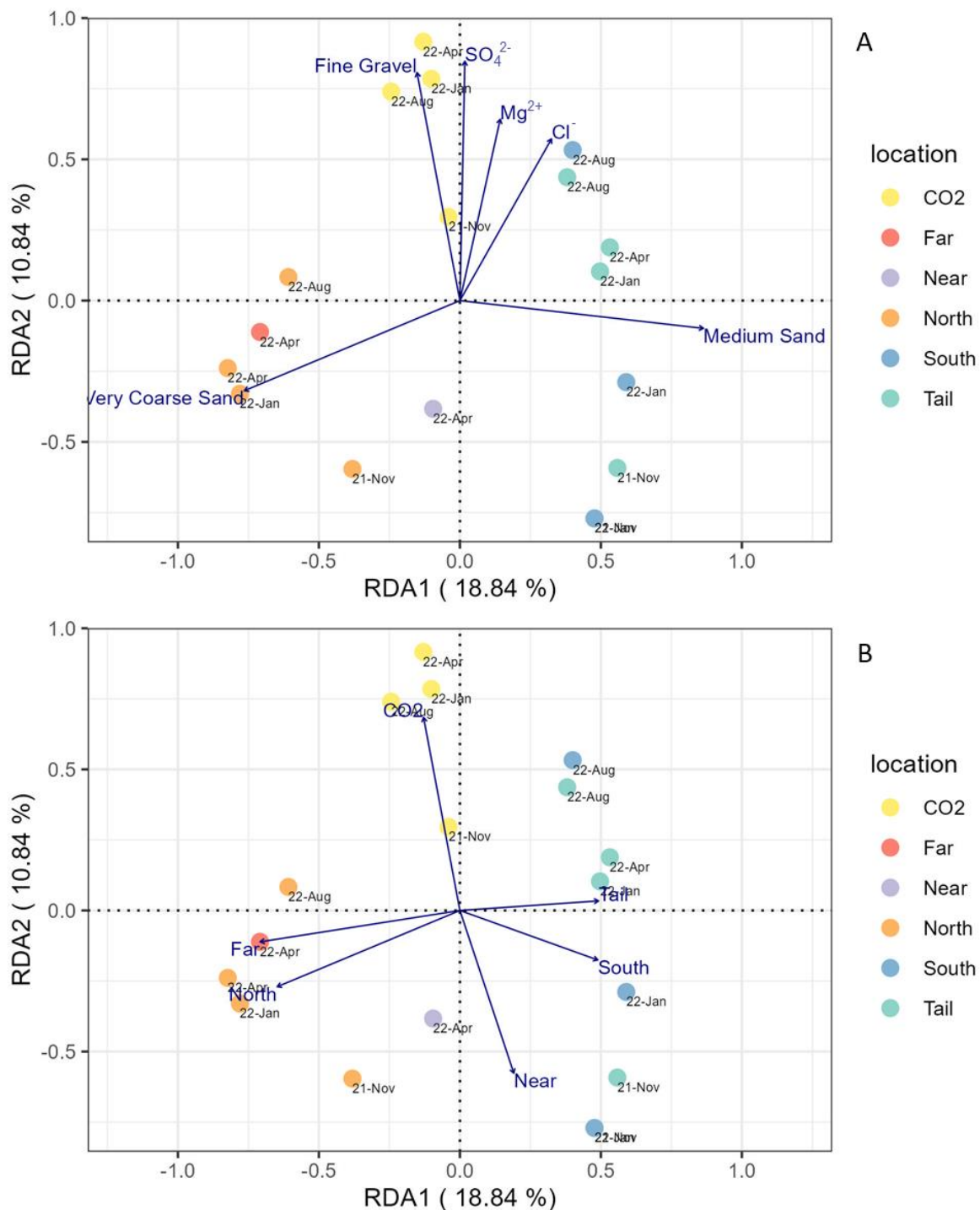


圖 13、各樣本線蟲 c-p value 組成的相對豐度。

c-p value 數值小屬於殖民者 (Colonizers；例如：c-p 2)，而 c-p value 數值大則屬於持留者 (Persisters；例如：c-p 4)。數量為 0 的樣本已去除，黑色星號標記代表線蟲數量小於 5 之樣本，其高相對豐度受到少數線蟲種類控制。



(A) 底泥物化性質與線蟲物種組成間的關係，tb-RDA 使用的解釋變數包括底泥的陰陽離子含量、平均粒徑與粒徑分級，其中變異數膨脹因子 (VIF) >10 的因子會事先去除；(B) 將地點作為 tbRDA 的補充變數探討地點與線蟲物種組成間的關係。



表 1、採樣地點的位置與環境資訊。

Location	GPS		Depth	Description
Tail	24°50'29.9"N	121°56'17.1"E	12 m	Coral reef ecosystem
South	24°50'04.2"N	121°57'00.0"E	17 m	Some coral
North	24°51'08.1"N	121°57'00.0"E	19.6 m	Some coral
Near vent	24°50'02.6"N	121°57'42.8"E	19 m	Hydrothermal vent with rotten egg smell
Far vent	24°50'02.3"N	121°57'42.0"E	18.9 m	Hydrothermal vent with rotten egg smell
CO ₂ vent	24°50'17.1"N	121°58'11.5"E	23 m	Hydrothermal vent with white bacterial mat

表 2、採樣日期與線蟲分離所使用之採集瓶數量。

2021.11.06	2022.01.04	2022.04.06	2022.08.09
2	2	1	1

(單位：瓶)





表 3、各樣本底泥之粒徑分析。

location	Mean (μm)	Classification	Median (μm)	Sorting		Skewness		Kurtosis	
Tail	290.6	Medium Sand	234.9	3.87	Poorly Sorted	0.07	Symmetrical	0.91	Mesokurtic
South	498.8	Medium Sand	1302.1	3.90	Poorly Sorted	-1.05	Very Fine Skewed	0.65	Very Platykurtic
North	1078.7	Very Coarse Sand	1105.0	1.53	Moderately Well Sorted	-0.27	Fine Skewed	0.54	Very Platykurtic
Near	976.1	Coarse Sand	1162.8	1.79	Moderately Sorted	-0.70	Very Fine Skewed	0.66	Very Platykurtic
Far	684.2	Coarse Sand	1043.3	2.40	Poorly Sorted	-0.78	Very Fine Skewed	0.56	Very Platykurtic
CO ₂	4264.2	Fine Gravel	10314.1	1.01	Very Well Sorted	-0.24	Fine Skewed	-0.52	Very Platykurtic

以篩網將不同粒徑大小的底泥顆粒分離並秤重，並將數據輸入 GRANDISTAT 進行分析，結果包含底泥之粒徑分級 (Classification)、平均粒徑 (Mean)、中值粒徑 (Median)、分選係數 (Sorting)、偏度係數 (Skewness) 與峰態係數 (Kurtosis) (Blott & Pye, 2001)。

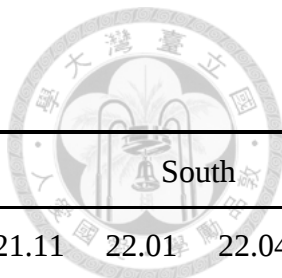


表 4、地點與時間點對底泥陰陽離子含量之影響。

	Cl ⁻			SO ₄ ²⁻			Na ⁺		
	F	p-value		F	p-value		F	p-value	
location	11.2809	< 0.001	***	24.2739	< 0.001	***	6.054	< 0.001	***
time	6.1025	0.002	**	30.0326	< 0.001	***	3.3607	0.003	**
location:time	6.0879	0.001	***	5.9422	< 0.001	***	1.5342	0.04	*
	Mg ²⁺			Ca ²⁺			K ⁺		
	F	p-value		F	p-value		F	p-value	
location	3.8265	< 0.001	***	10.734	< 0.001	***	22.4583	< 0.001	***
season	3.7056	0.003	**	3.7167	0.003	**	2.5556	0.04	*
location:time	2.1123	0.002	**	1.5351	0.054		1.4087	0.12	

顯著性標記：< 0.001：***；< 0.01：**；< 0.05：*。

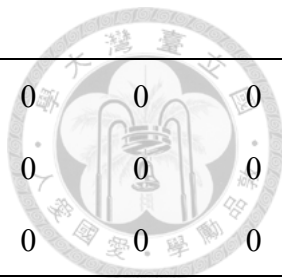
表 5、龜尾與龜南的線蟲種類與數量。



Family	Genus	Species	FT	CP	Tail							
					21.11	22.01	22.04	22.08	21.11	22.01	22.04	22.08
Axonolaimidae	<i>Araeolaimus</i>	<i>Araeolaimus</i> sp.	1A	3	0	0	0	0	0	0	0	0
	<i>Parodontophora</i>	<i>Parodontophora</i> sp.	2A	2	0	0	2	2	0	0	0	0
Camacolaimidae	<i>Onchium</i>	<i>Onchium</i> sp.	1A	3	0	0	0	0	0	0	0	0
Chromadoridae	<i>Dichromadora</i>	<i>Dichromadora</i> sp.	2A	2	0	5	6	51	0	0	0	2
	<i>Euchromadora</i>	<i>Euchromadora</i> sp.	2A	3	0	0	0	0	0	0	0	0
	<i>Halichoanolaimus</i>	<i>Halichoanolaimus</i> sp.	2B	3	0	0	0	5	0	0	0	1
	<i>Neochromadora</i>	<i>Neochromadora</i> sp.	2A	2	0	3	1	4	0	0	0	18
	<i>Prochromadorella</i>	<i>Prochromadorella</i> sp.	2A	3	0	0	0	0	0	0	0	0
	<i>Ptycholaimellus</i>	<i>Ptycholaimellus</i> sp.	2A	3	1	7	71	74	0	0	0	13
	<i>Rhips</i>	<i>Rhips</i> sp.	2A	3	0	0	0	0	0	0	0	0
	<i>Spilophorella</i>	<i>Spilophorella</i> sp. 1	2A	2	0	0	1	5	0	0	0	0

		<i>Spilophorella</i> sp. 2	2A	2	0	0	0	0	0	0	0	0
Comesomatidae	<i>Comesoma</i>	<i>Comesoma</i> sp.	1B	2	0	2	5	7	0	0	0	0
	<i>Dorylaimopsis</i>	<i>Dorylaimopsis</i> sp.	2A	2	0	0	0	164	0	0	0	0
	<i>Paracomesoma</i>	<i>Paracomesoma</i> sp.	2A	2	0	0	1	1	0	0	0	0
Cyatholaimidae	<i>Acanthonchus</i>	<i>Acanthonchus</i> sp.	2A	3	0	0	0	2	0	0	0	0
	<i>Cyatholaiminae</i>	<i>Cyatholaiminae</i> sp. 1	2A	3	0	0	0	0	0	0	0	0
	<i>Longicyatholaimus</i>	<i>Longicyatholaimus</i> sp.	2A	3	0	1	6	8	0	0	0	0
Desmodoridae	<i>Desmodora</i>	<i>Desmodora</i> sp. 1	2A	2	0	0	0	0	0	0	0	0
		<i>Desmodora</i> sp. 2	2A	2	3	0	1	0	0	0	0	1
	<i>Eubostrichus</i>	<i>Eubostrichus</i> sp. 1	1A	3	0	0	0	0	0	0	0	0
		<i>Eubostrichus</i> sp. 2	1A	3	0	0	0	0	0	0	0	0
	<i>Laxus</i>	<i>Laxus</i> sp.	1A	3	0	0	0	0	0	0	0	0
	<i>Onyx</i>	<i>Onyx</i> sp.	2B	3	0	0	0	0	0	0	0	0
	<i>Spirinia</i>	<i>Spirinia</i> sp.	2A	3	72	4	28	13	1	3	0	0
Diplopeltoididae	<i>Diplopeltoides</i>	<i>Diplopeltoides</i> sp.	1A	3	0	0	0	0	0	0	0	0

Draconematidae	<i>Prochaetosoma</i>	<i>Prochaetosoma</i> sp.	1A	4	0	0	0	0	0	0	0	0
Enchelidiidae	<i>Abelbolla</i>	<i>Abelbolla</i> sp.	2B	4	0	0	0	0	0	0	0	0
	<i>Calyptronema</i>	<i>Calyptronema</i> sp.	2B	4	0	0	0	0	0	0	0	0
	<i>Eurystomina</i>	<i>Eurystomina</i> sp.	2B	4	0	0	0	0	0	0	0	0
Epsilonematidae	<i>Epsilonema</i>	<i>Epsilonema</i> sp.	1A	4	0	0	0	0	0	0	0	0
Leptosomatidae	<i>Leptosomatides</i>	<i>Leptosomatides</i> sp.	1A	5	0	0	1	0	0	0	0	0
Linhomoeidae	<i>Anticyathus</i>	<i>Anticyathus</i> sp.	1B	2	0	0	0	6	0	0	0	1
	Desmolaiminae	Desmolaiminae sp. 1	1B	2	0	0	0	1	0	0	0	0
		Desmolaiminae sp. 2	1B	2	0	0	0	1	0	0	0	0
	<i>Desmolaimus</i>	<i>Desmolaimus</i> sp.	1B	2	0	0	0	0	0	0	0	0
Linhomoeidae	<i>Linhomoeus</i>	<i>Linhomoeus</i> sp.	1B	2	0	0	0	4	0	0	0	3
	<i>Metalinhomoeus</i>	<i>Metalinhomoeus</i> sp. 1	1B	2	0	0	0	4	0	1	0	2
	<i>Metalinhomoeus</i>	<i>Metalinhomoeus</i> sp. 2	1B	2	0	0	0	1	0	0	0	0
	<i>Terschellingia</i>	<i>Terschellingia</i> sp. 1	1A	3	2	0	2	11	0	2	0	4
		<i>Terschellingia</i> sp. 2	1A	3	0	0	0	0	0	0	0	0



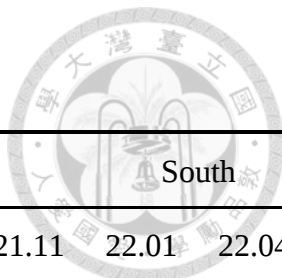
Microtrematidae	Microtrematidae	Microtrematidae sp. 1	2A	3	3	0	1	0	0	0	0	0
	<i>Microtrematus</i>	<i>Microtrematus</i> sp.	2A	3	7	48	11	6	0	0	0	2
Monoposthiidae	<i>Rhinema</i>	<i>Rhinema</i> sp.	2A	3	0	2	1	0	0	0	0	1
Oncholaimidae	<i>Metoncholaimus</i>	<i>Metoncholaimus</i> sp.	2B	4	0	1	0	0	0	0	0	0
	<i>Meyersia</i>	<i>Meyersia</i> sp.	2B	4	0	0	0	4	0	0	0	0
	<i>Oncholaimus</i>	<i>Oncholaimus</i> sp. 1	2B	4	0	1	0	0	0	0	0	0
		<i>Oncholaimus</i> sp. 2	2B	4	0	2	3	0	0	0	0	0
	<i>Prooncholaimus</i>	<i>Prooncholaimus</i> sp.	2B	4	0	0	0	0	0	0	0	0
	<i>Viscosia</i>	<i>Viscosia</i> sp. 1	2B	3	2	2	3	5	0	0	0	1
		<i>Viscosia</i> sp. 2	2B	3	0	0	5	22	0	0	0	1
Oxystominidae	<i>Litinium</i>	<i>Litinium</i> sp.	1A	4	0	0	0	0	0	0	0	0
Selachinematidae	<i>Synonchiella</i>	<i>Synonchiella</i> sp.	2B	3	0	0	1	0	0	0	0	0
Sphaerolaimidae	<i>Sphaerolaimus</i>	<i>Sphaerolaimus</i> sp.	2B	3	0	0	3	44	0	0	0	0
Thoracostomopsidae	<i>Enoplolaimus</i>	<i>Enoplolaimus</i> sp.	2B	2	0	0	0	0	0	0	0	0
Xyalidae	<i>Daptonema</i>	<i>Daptonema</i> sp.	1B	2	0	50	52	211	0	1	0	96



		<i>Daptonema</i> sp. 2	1B	2	0	0	0	1	0	0	0	0
	<i>Linhystra</i>	<i>Linhystra</i> sp.	1A	2	0	0	0	9	0	0	0	0
	<i>Paramphimonhystrella</i>	<i>Paramphimonhystrella</i> sp.	1B	3	0	0	0	0	0	0	0	0
	<i>Theristus</i>	<i>Theristus</i> sp.	1B	2	0	0	0	0	0	0	0	0
Nematoda	Nematoda	Nematoda sp. 1	-	-	0	0	0	0	0	0	0	0
		Nematoda sp. 2	-	-	0	0	0	0	0	0	0	0
		Nematoda sp. 3	-	-	0	0	1	0	0	0	0	0

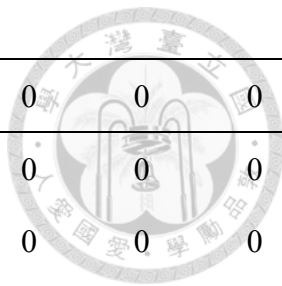
FT : Feeding type ; CP : c-p value ; - : cannot be classified °

表 6、龜北與近泉的線蟲種類與數量。

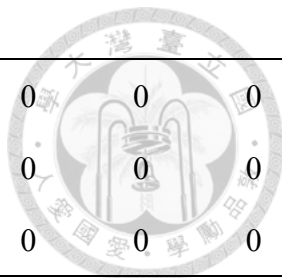


Family	Genus	Species	FT	CP	Tail							
					21.11	22.01	22.04	22.08	21.11	22.01	22.04	22.08
Axonolaimidae	<i>Araeolaimus</i>	<i>Araeolaimus</i> sp.	1A	3	0	0	0	0	0	0	0	0
	<i>Parodontophora</i>	<i>Parodontophora</i> sp.	2A	2	0	0	0	0	0	0	0	0
Camacolaimidae	<i>Onchium</i>	<i>Onchium</i> sp.	1A	3	0	0	0	1	0	0	0	0
Chromadoridae	<i>Dichromadora</i>	<i>Dichromadora</i> sp.	2A	2	0	5	4	12	0	0	0	0
	<i>Euchromadora</i>	<i>Euchromadora</i> sp.	2A	3	3	1	1	18	0	0	0	0
	<i>Halichoanolaimus</i>	<i>Halichoanolaimus</i> sp.	2B	3	0	0	0	0	0	0	0	0
	<i>Neochromadora</i>	<i>Neochromadora</i> sp.	2A	2	0	0	1	5	0	0	0	0
	<i>Prochromadorella</i>	<i>Prochromadorella</i> sp.	2A	3	0	0	0	0	0	0	0	0
	<i>Ptycholaimellus</i>	<i>Ptycholaimellus</i> sp.	2A	3	0	1	1	11	0	0	0	0
	<i>Rhips</i>	<i>Rhips</i> sp.	2A	3	0	0	0	2	0	0	0	0
	<i>Spilophorella</i>	<i>Spilophorella</i> sp. 1	2A	2	0	0	0	71	0	0	0	0

		<i>Spilophorella</i> sp. 2	2A	2	0	0	0	1	0	0	0	0
Comesomatidae	<i>Comesoma</i>	<i>Comesoma</i> sp.	1B	2	0	1	0	1	0	0	0	0
	<i>Dorylaimopsis</i>	<i>Dorylaimopsis</i> sp.	2A	2	0	0	0	0	0	0	0	0
	<i>Paracomesoma</i>	<i>Paracomesoma</i> sp.	2A	2	0	0	0	0	0	0	0	0
Cyatholaimidae	<i>Acanthonchus</i>	<i>Acanthonchus</i> sp.	2A	3	0	0	0	8	0	0	0	0
	<i>Cyatholaiminae</i>	<i>Cyatholaiminae</i> sp. 1	2A	3	0	1	0	0	0	0	0	0
	<i>Longicyatholaimus</i>	<i>Longicyatholaimus</i> sp.	2A	3	0	0	0	0	0	0	0	0
Desmodoridae	<i>Desmodora</i>	<i>Desmodora</i> sp. 1	2A	2	5	1	1	36	0	0	0	0
		<i>Desmodora</i> sp. 2	2A	2	0	0	0	0	0	0	0	0
	<i>Eubostrichus</i>	<i>Eubostrichus</i> sp. 1	1A	3	3	0	0	1	0	0	0	0
		<i>Eubostrichus</i> sp. 2	1A	3	0	0	1	7	0	0	0	0
	<i>Laxus</i>	<i>Laxus</i> sp.	1A	3	0	0	0	1	0	0	0	0
	<i>Onyx</i>	<i>Onyx</i> sp.	2B	3	0	0	0	1	0	0	0	0
	<i>Spirinia</i>	<i>Spirinia</i> sp.	2A	3	1	0	0	0	0	1	0	0
Diplopeltoididae	<i>Diplopeltoides</i>	<i>Diplopeltoides</i> sp.	1A	3	0	0	0	1	0	0	0	0



Draconematidae	<i>Prochaetosoma</i>	<i>Prochaetosoma</i> sp.	1A	4	0	2	0	0	0	0	0	0
Enchelidiidae	<i>Abelbolla</i>	<i>Abelbolla</i> sp.	2B	4	3	3	2	20	0	0	0	0
	<i>Calyptronema</i>	<i>Calyptronema</i> sp.	2B	4	0	0	0	1	0	0	0	0
	<i>Eurystomina</i>	<i>Eurystomina</i> sp.	2B	4	0	2	1	0	0	0	0	0
Epsilonematidae	<i>Epsilonema</i>	<i>Epsilonema</i> sp.	1A	4	0	0	2	0	0	0	0	0
Leptosomatidae	<i>Leptosomatides</i>	<i>Leptosomatides</i> sp.	1A	5	0	0	0	0	0	0	0	0
Linhomoeidae	<i>Anticyathus</i>	<i>Anticyathus</i> sp.	1B	2	0	0	0	0	0	0	0	0
	Desmolaiminae	Desmolaiminae sp. 1	1B	2	0	0	0	0	0	0	0	0
		Desmolaiminae sp. 2	1B	2	0	0	0	0	0	0	0	0
	<i>Desmolaimus</i>	<i>Desmolaimus</i> sp.	1B	2	0	0	0	0	0	0	0	0
Linhomoeidae	<i>Linhomoeus</i>	<i>Linhomoeus</i> sp.	1B	2	0	0	0	0	0	0	0	0
	<i>Metalinhomoeus</i>	<i>Metalinhomoeus</i> sp. 1	1B	2	0	0	0	0	0	0	0	0
	<i>Metalinhomoeus</i>	<i>Metalinhomoeus</i> sp. 2	1B	2	0	0	0	0	0	0	0	0
	<i>Terschellingia</i>	<i>Terschellingia</i> sp. 1	1A	3	0	0	0	0	0	0	0	0
		<i>Terschellingia</i> sp. 2	1A	3	0	0	0	1	0	0	0	0



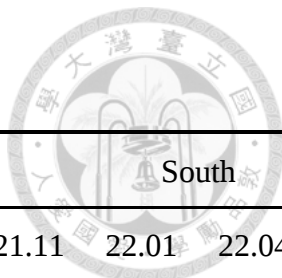
Microtrematidae	Microtrematidae	Microtrematidae sp. 1	2A	3	0	0	0	0	0	0	0	0
	<i>Microtrematus</i>	<i>Microtrematus</i> sp.	2A	3	0	1	0	0	0	0	0	0
Monoposthiidae	<i>Rhinema</i>	<i>Rhinema</i> sp.	2A	3	0	0	0	0	0	0	0	0
Oncholaimidae	<i>Metoncholaimus</i>	<i>Metoncholaimus</i> sp.	2B	4	0	0	0	0	0	0	1	0
	<i>Meyersia</i>	<i>Meyersia</i> sp.	2B	4	0	0	0	0	0	0	0	0
	<i>Oncholaimus</i>	<i>Oncholaimus</i> sp. 1	2B	4	0	0	0	0	0	0	0	0
		<i>Oncholaimus</i> sp. 2	2B	4	0	0	0	0	0	0	0	0
	<i>Prooncholaimus</i>	<i>Prooncholaimus</i> sp.	2B	4	0	0	0	4	0	0	0	0
	<i>Viscosia</i>	<i>Viscosia</i> sp. 1	2B	3	0	0	0	1	0	0	0	0
		<i>Viscosia</i> sp. 2	2B	3	0	0	0	2	0	0	0	0
Oxystominidae	<i>Litinium</i>	<i>Litinium</i> sp.	1A	4	0	0	0	1	0	0	0	0
Selachinematidae	<i>Synonchiella</i>	<i>Synonchiella</i> sp.	2B	3	0	0	0	0	0	0	0	0
Sphaerolaimidae	<i>Sphaerolaimus</i>	<i>Sphaerolaimus</i> sp.	2B	3	0	0	0	2	0	0	0	0
Thoracostomopsidae	<i>Enoplolaimus</i>	<i>Enoplolaimus</i> sp.	2B	2	0	1	0	2	0	0	0	0
Xyalidae	<i>Daptonema</i>	<i>Daptonema</i> sp.	1B	2	0	0	0	0	0	0	0	0



		<i>Daptonema</i> sp. 2	1B	2	0	0	0	0	0	0	0	0
	<i>Linhystra</i>	<i>Linhystra</i> sp.	1A	2	0	0	0	0	0	0	0	0
	<i>Paramphimonhystrella</i>	<i>Paramphimonhystrella</i> sp.	1B	3	0	0	0	1	0	0	0	0
	<i>Theristus</i>	<i>Theristus</i> sp.	1B	2	0	102	34	6	0	0	0	0
Nematoda	Nematoda	Nematoda sp. 1	-	-	0	0	0	0	0	0	0	0
		Nematoda sp. 2	-	-	0	0	1	0	0	0	0	0
		Nematoda sp. 3	-	-	0	0	0	0	0	0	0	0

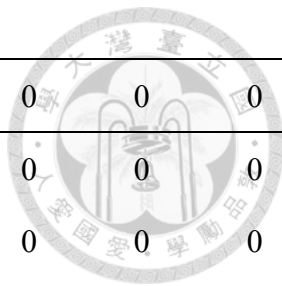
FT : Feeding type ; CP : c-p value ; - : cannot be classified °

表 7、龜北與近泉的線蟲種類與數量。



Family	Genus	Species	FT	CP	Tail							
					21.11	22.01	22.04	22.08	21.11	22.01	22.04	22.08
Axonolaimidae	<i>Araeolaimus</i>	<i>Araeolaimus</i> sp.	1A	3	0	0	0	0	0	0	5	4
	<i>Parodontophora</i>	<i>Parodontophora</i> sp.	2A	2	0	0	0	0	0	0	1	0
Camacolaimidae	<i>Onchium</i>	<i>Onchium</i> sp.	1A	3	0	0	0	0	0	0	2	0
Chromadoridae	<i>Dichromadora</i>	<i>Dichromadora</i> sp.	2A	2	0	0	1	0	0	0	217	18
	<i>Euchromadora</i>	<i>Euchromadora</i> sp.	2A	3	0	0	0	0	0	0	1	2
	<i>Halichoanolaimus</i>	<i>Halichoanolaimus</i> sp.	2B	3	0	0	0	0	0	0	0	0
	<i>Neochromadora</i>	<i>Neochromadora</i> sp.	2A	2	0	0	0	0	0	0	56	24
	<i>Prochromadorella</i>	<i>Prochromadorella</i> sp.	2A	3	0	0	0	0	0	0	3	1
	<i>Ptycholaimellus</i>	<i>Ptycholaimellus</i> sp.	2A	3	0	0	0	0	0	0	1	1
	<i>Rhips</i>	<i>Rhips</i> sp.	2A	3	0	0	0	0	0	0	0	0
	<i>Spilophorella</i>	<i>Spilophorella</i> sp. 1	2A	2	0	0	0	0	0	0	5	3

		<i>Spilophorella</i> sp. 2	2A	2	0	0	0	0	0	0	0	0
Comesomatidae	<i>Comesoma</i>	<i>Comesoma</i> sp.	1B	2	0	0	0	0	0	0	0	0
	<i>Dorylaimopsis</i>	<i>Dorylaimopsis</i> sp.	2A	2	0	0	0	0	0	0	0	0
	<i>Paracomesoma</i>	<i>Paracomesoma</i> sp.	2A	2	0	0	0	0	0	0	2	0
Cyatholaimidae	<i>Acanthonchus</i>	<i>Acanthonchus</i> sp.	2A	3	0	0	0	8	0	0	0	0
	<i>Cyatholaiminae</i>	<i>Cyatholaiminae</i> sp. 1	2A	3	0	1	0	0	0	0	0	0
	<i>Longicyatholaimus</i>	<i>Longicyatholaimus</i> sp.	2A	3	0	0	0	0	0	0	0	0
Desmodoridae	<i>Desmodora</i>	<i>Desmodora</i> sp. 1	2A	2	0	0	0	0	0	0	0	0
		<i>Desmodora</i> sp. 2	2A	2	0	0	0	0	1	0	0	0
	<i>Eubostrichus</i>	<i>Eubostrichus</i> sp. 1	1A	3	0	0	0	0	0	0	0	0
		<i>Eubostrichus</i> sp. 2	1A	3	0	0	0	0	0	0	0	1
	<i>Laxus</i>	<i>Laxus</i> sp.	1A	3	0	0	0	0	0	0	0	0
	<i>Onyx</i>	<i>Onyx</i> sp.	2B	3	0	0	0	0	0	0	0	0
	<i>Spirinia</i>	<i>Spirinia</i> sp.	2A	3	0	0	0	0	0	0	1	2
Diplopeltoididae	<i>Diplopeltoides</i>	<i>Diplopeltoides</i> sp.	1A	3	0	0	0	0	0	0	0	0



Draconematidae	<i>Prochaetosoma</i>	<i>Prochaetosoma</i> sp.	1A	4	0	0	0	0	0	0	0	0
Enchelidiidae	<i>Abelbolla</i>	<i>Abelbolla</i> sp.	2B	4	0	0	0	0	0	0	0	0
	<i>Calyptronema</i>	<i>Calyptronema</i> sp.	2B	4	0	0	0	0	0	0	0	0
	<i>Eurystomina</i>	<i>Eurystomina</i> sp.	2B	4	0	0	0	0	0	0	29	0
Epsilonematidae	<i>Epsilonema</i>	<i>Epsilonema</i> sp.	1A	4	0	0	0	0	0	0	0	0
Leptosomatidae	<i>Leptosomatides</i>	<i>Leptosomatides</i> sp.	1A	5	0	0	0	0	0	0	0	0
Linhomoeidae	<i>Anticyathus</i>	<i>Anticyathus</i> sp.	1B	2	0	0	0	0	0	0	4	1
	Desmolaiminae	Desmolaiminae sp. 1	1B	2	0	0	0	0	0	0	0	0
		Desmolaiminae sp. 2	1B	2	0	0	0	0	0	0	0	0
	<i>Desmolaimus</i>	<i>Desmolaimus</i> sp.	1B	2	0	0	0	0	0	0	6	0
Linhomoeidae	<i>Linhomoeus</i>	<i>Linhomoeus</i> sp.	1B	2	0	0	0	0	0	0	3	12
	<i>Metalinhomoeus</i>	<i>Metalinhomoeus</i> sp. 1	1B	2	0	0	0	0	0	0	72	2
	<i>Metalinhomoeus</i>	<i>Metalinhomoeus</i> sp. 2	1B	2	0	0	0	0	0	0	0	0
	<i>Terschellingia</i>	<i>Terschellingia</i> sp. 1	1A	3	0	0	0	0	0	0	27	5
		<i>Terschellingia</i> sp. 2	1A	3	0	0	0	0	0	0	0	0

Microtrematidae	Microtrematidae	Microtrematidae sp. 1	2A	3	0	0	0	0	0	0	0	0
	<i>Microtrematus</i>	<i>Microtrematus</i> sp.	2A	3	0	0	0	0	0	0	28	0
Monoposthiidae	<i>Rhinema</i>	<i>Rhinema</i> sp.	2A	3	0	0	0	0	0	0	0	0
Oncholaimidae	<i>Metoncholaimus</i>	<i>Metoncholaimus</i> sp.	2B	4	0	0	0	0	0	0	5	0
	<i>Meyersia</i>	<i>Meyersia</i> sp.	2B	4	0	0	0	0	0	0	1	0
	<i>Oncholaimus</i>	<i>Oncholaimus</i> sp. 1	2B	4	0	0	0	0	0	0	1	0
		<i>Oncholaimus</i> sp. 2	2B	4	0	0	0	0	0	0	2	0
	<i>Prooncholaimus</i>	<i>Prooncholaimus</i> sp.	2B	4	0	0	0	0	0	0	0	0
	<i>Viscosia</i>	<i>Viscosia</i> sp. 1	2B	3	0	0	0	0	0	0	10	0
		<i>Viscosia</i> sp. 2	2B	3	0	0	0	0	0	2	91	4
Oxystominidae	<i>Litinium</i>	<i>Litinium</i> sp.	1A	4	0	0	0	0	0	0	0	0
Selachinematidae	<i>Synonchiella</i>	<i>Synonchiella</i> sp.	2B	3	0	0	0	0	0	0	0	0
Sphaerolaimidae	<i>Sphaerolaimus</i>	<i>Sphaerolaimus</i> sp.	2B	3	0	0	0	0	0	0	0	0
Thoracostomopsidae	<i>Enoplolaimus</i>	<i>Enoplolaimus</i> sp.	2B	2	0	0	0	0	0	0	0	0
Xyalidae	<i>Daptonema</i>	<i>Daptonema</i> sp.	1B	2	0	0	0	0	0	0	11	0



		<i>Daptonema</i> sp. 2	1B	2	0	0	0	0	0	0	0	0
	<i>Linhystera</i>	<i>Linhystera</i> sp.	1A	2	0	0	0	0	0	0	0	0
	<i>Paramphimonhystrella</i>	<i>Paramphimonhystrella</i> sp.	1B	3	0	0	0	0	0	0	0	0
	<i>Theristus</i>	<i>Theristus</i> sp.	1B	2	0	0	2	0	0	0	1	1
Nematoda	Nematoda	Nematoda sp. 1	-	-	0	0	0	0	0	0	2	0
		Nematoda sp. 2	-	-	0	0	0	0	0	0	0	0
		Nematoda sp. 3	-	-	0	0	0	0	0	0	0	0

FT : Feeding type ; CP : c-p value ; - : cannot be classified °

表 8、各樣本之線蟲豐度、 α 多樣性、營養多樣性指數與成熟指標。

Sample	Abundance	SR	H'	J	TD	MI
CO2_21.11	0.34	1	0.00	-	1.00	2.00
CO2_22.01	0.69	1	0.00	-	1.00	3.00
CO2_22.04	585.52	29	2.10	0.62	0.50	2.59
CO2_22.08	71.03	16	2.18	0.79	0.54	2.41
Far_21.11	0.00	0	0.00	-	-	-
Far_22.01	0.00	0	0.00	-	-	-
Far_22.04	2.07	2	0.64	0.92	0.56	2.00
Far_22.08	0.00	0	0.00	-	-	-
Near_21.11	0.00	0	0.00	-	-	-
Near_22.01	0.34	1	0.00	-	1.00	3.00
Near_22.04	0.69	1	0.00	-	1.00	4.00
Near_22.08	0.00	0	0.00	-	-	-
North_21.11	5.17	5	1.51	0.94	0.44	2.87
North_22.01	41.72	12	0.78	0.31	0.73	2.15
North_22.04	33.79	11	1.28	0.53	0.52	2.22
North_22.08	150.34	27	2.36	0.72	0.59	2.50
South_21.11	0.34	1	0.00	-	1.00	3.00
South_22.01	2.41	4	1.28	0.92	0.35	2.71
South_22.04	0.00	0	0.00	-	-	-
South_22.08	100.69	14	1.31	0.50	0.55	2.16
Tail_21.11	31.03	7	0.82	0.42	0.91	2.97
Tail_22.01	44.14	13	1.59	0.62	0.47	2.56

Tail_22.04	142.07	22	2.04	0.66	0.48	2.67
Tail_22.08	459.31	27	2.15	0.65	0.39	2.30

SR：物種豐富度；H'：香農多樣性指標；J：皮洛均勻度；TD：營養多樣性指數指標；MI：成熟指標；-：無法計算。

表 9、以簡單線性迴歸模型分析環境因子與線蟲豐度、香農多樣性間的關係。

Response variables	Explanatory variables	df	F	p-value	R ² _{adjusted}
Abundance	Na ⁺	1, 22	0.050	0.826	-0.043
	Cl ⁻	1, 22	3.965	0.059	0.114
	SO ₄ ²⁻	1, 22	9.158	0.006	0.262
	K ⁺	1, 22	2.989	0.098	0.080
	Ca ²⁺	1, 22	0.641	0.432	-0.016
	Mg ²⁺	1, 22	20.320	< 0.001	0.457
	Mean grain size	1, 22	1.362	0.256	0.015
	monthly SST	1, 22	0.906	0.351	-0.004
	depth	1, 22	0.142	0.710	-0.039
Shannon's diversity index (H')	Na ⁺	1, 22	0.650	0.429	-0.015
	Cl ⁻	1, 22	0.059	0.810	-0.043
	SO ₄ ²⁻	1, 22	1.192	0.287	0.008
	K ⁺	1, 22	2.173	0.155	0.049
	Ca ²⁺	1, 22	0.113	0.739	-0.040
	Mg ²⁺	1, 22	4.146	0.054	0.120
	Mean grain size	1, 22	0.143	0.709	-0.039
	monthly SST	1, 22	1.549	0.226	0.023
	depth	1, 22	1.192	0.287	0.008

monthly SST 為採樣月份之海面平均溫度。

表 10、以簡單線性迴歸模型分析環境因子與營養多樣性指數、成熟指標間的關係。

Response variables	Explanatory variables	df	F	p-value	R ² _{adjusted}
Trophic diversity (TD)	Na ⁺	0.447	0.513	-0.034	0.447
	Cl ⁻	1.336	0.265	0.019	1.336
	SO ₄ ²⁻	1.183	0.293	0.011	1.183
	K ⁺	0.406	0.533	-0.036	0.406
	Ca ²⁺	0.230	0.638	-0.047	0.230
	Mg ²⁺	1.782	0.201	0.044	1.782
	Mean grain size	0.954	0.343	-0.003	0.954
	monthly SST	0.863	0.367	-0.008	0.863
	depth	1.278	0.275	0.016	1.278
Maturity index (MI)	Na ⁺	1, 16	0.803	0.384	-0.012
	Cl ⁻	1, 16	0.230	0.638	-0.047
	SO ₄ ²⁻	1, 16	2.508	0.133	0.081
	K ⁺	1, 16	0.279	0.605	-0.044
	Ca ²⁺	1, 16	0.423	0.525	-0.035
	Mg ²⁺	1, 16	0.858	0.368	-0.008
	Mean grain size	1, 16	0.209	0.654	-0.049
	monthly SST	1, 16	1.331	0.266	0.019
	depth	1, 16	0.096	0.761	-0.056

線蟲總數為 0 的樣本已去除，monthly SST 為採樣月份之海面平均溫度。

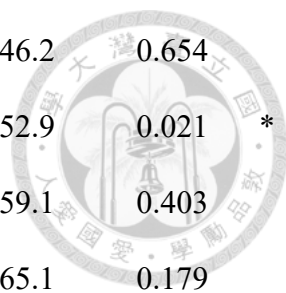
表 11、以 one-way ANOVA 進行不同組別內（時間點、地點、底泥粒徑）線蟲豐度、香農多樣性指標、營養多樣性指數及成熟指標之比較。

Abundance			Shannon's diversity index		
Group	F	p-value	F	p-value	
location	1.160	0.366	3.745	0.0169	*
time	1.346	0.288	1.399	0.272	
sediment grain size	1.286	0.306	4.386	0.0158	*
Trophic diversity			Maturity index		
Group	F	p-value	F	p-value	
location	1.264	0.341	2.641	0.0781	
time	1.361	0.295	0.5	0.688	
sediment grain size	1.224	0.338	0.851	0.489	

顯著性標記：< 0.001：***；< 0.01：**；< 0.05：*。

表 12、以 SIMPER 探討單一物種對組別間差異的貢獻度。

Comparison	Rank	Species	AC (%)	CC (%)	p-value	
CO ₂ vs Tail +South	1	<i>Daptonema</i> sp.	15.1	15.8	0.360	
	2	<i>Spirinia</i> sp.	12.9	29.2	0.294	
	3	<i>Acanthonchus</i> sp.	9.9	39.6	0.047	*
	4	<i>Viscosia</i> sp. 2	9.2	49.2	0.034	*
	5	<i>Dichromadora</i> sp.	8.9	58.6	0.084	
	6	<i>Ptycholaimellus</i> sp.	5.5	64.3	0.563	
	7	<i>Neochromadora</i> sp.	5.5	70.1	0.075	
	8	<i>Desmodora</i> sp. 2	5.4	75.8	0.053	
	9	<i>Microlaimus</i> sp.	4.8	80.8	0.411	
	10	<i>Terschellingia</i> sp. 1	3.2	84.1	0.146	
CO ₂ vs North	1	<i>Theristus</i> sp.	24.4	25.3	0.052	
	2	<i>Acanthonchus</i> sp.	10.3	36.0	0.090	
	3	<i>Dichromadora</i> sp.	9.8	46.2	0.073	
	4	<i>Desmodora</i> sp. 1	7.5	54.0	0.044	*
	5	<i>Spilophorella</i> sp. 1	6.2	60.5	0.239	
	6	<i>Neochromadora</i> sp.	5.2	65.9	0.207	
	7	<i>Abelbolla</i> sp.	5.1	71.2	0.011	*
	8	<i>Euchromadora</i> sp.	4.2	75.5	0.045	*
	9	<i>Viscosia</i> sp. 2	4.1	79.8	0.345	
	10	<i>Eubostrichus</i> sp. 1	2.5	82.4	0.107	
North	1	<i>Theristus</i> sp.	22.3	23.0	0.027	*
vs	2	<i>Daptonema</i> sp.	14.4	37.9	0.441	



Tail +South	3	<i>Spirinia</i> sp.	8.1	46.2	0.654	
	4	<i>Desmodora</i> sp. 1	6.5	52.9	0.021	*
	5	<i>Ptycholaimellus</i> sp.	6.0	59.1	0.403	
	6	<i>Spilophorella</i> sp. 1	5.8	65.1	0.179	
	7	<i>Abelbolla</i> sp.	4.4	69.7	0.007	**
	8	<i>Microlaimus</i> sp.	4.2	74.0	0.526	
	9	<i>Euchromadora</i> sp.	3.8	77.9	0.017	*
	10	<i>Dichromadora</i> sp.	3.2	81.2	0.946	

AC：平均貢獻度 (Average contribution)；CC：累計貢獻度 (cumulative contribution)；

顯著性標記：< 0.001：***；< 0.01：***；< 0.05：*。

柒、參考資料



沈如峰 (2021)。龜山島磺煙噴發 24 年最大量連宜蘭都可見。中央通訊社。

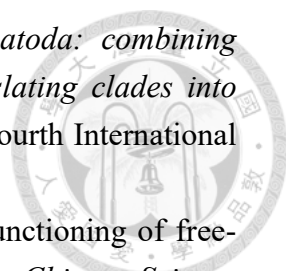
2023 年 6 月 2 日，取自：<https://www.cna.com.tw/news/firstnews/2021112>

10115.aspx

- Adrianov, A. (2004). Current problems in marine biodiversity studies. *Russian Journal of Marine Biology*, 30, S1-S16.
- Ahyong, S., Boyko, C. B., Bailly, N., Bernot, J., Bieler, R., Brandão, S. N., . . . Zullini, A. (2023). World Register of Marine Species (WoRMS). Retrieved 2023-06-02, from WoRMS Editorial Board <https://www.marinespecies.org>
- Alfaro-Lucas, J. M., Pradillon, F., Zeppilli, D., Michel, L. N., Martinez-Arbizu, P., Tanaka, H., . . . Sarrazin, J. (2020). High environmental stress and productivity increase functional diversity along a deep-sea hydrothermal vent gradient. *Ecology*, 101(11), e03144.
- Alongi, D. M. (1986). Population structure and trophic composition of the free-living nematodes inhabiting carbonate sands of Davies Reef, Great Barrier Reef, Australia. *Marine and Freshwater Research*, 37(5), 609-619.
- Appeltans, W., Ahyong, S. T., Anderson, G., Angel, M. V., Artois, T., Bailly, N., . . . Costello, M. J. (2012). The magnitude of global marine species diversity. *Current Biology*, 22(23), 2189-2202.
- Armenteros, M., & Ruiz-Abierno, A. (2015). Body size distribution of free-living marine nematodes from a Caribbean coral reef. *Nematology*, 17(10), 1153-1164.
- Armenteros, M., Ruiz-Abierno, A., Fernández-Garcés, R., Pérez-García, J. A., Díaz-Asencio, L., Vincx, M., & Decraemer, W. (2009). Biodiversity patterns of free-living marine nematodes in a tropical bay: Cienfuegos, Caribbean Sea. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 85(2), 179-189.
- Bain, O., Baldwin, J. G., Beveridge, I., Bezerra, T. C., Braeckman, U., Coomans, A., . . . Fonseca, G. (2013). *Nematoda* (Vol. 2). Berlin, Germany: Walter De Gruyter.
- Baldrighi, E., Zeppilli, D., Appolloni, L., Donnarumma, L., Chianese, E., Russo, G. F., & Sandulli, R. (2020). Meiofaunal communities and nematode diversity characterizing the Secca delle Fumose shallow vent area (Gulf of Naples, Italy). *PeerJ*, 8, e9058.
- Bellec, L., Bonavita, M.-A. C., Hourdez, S., Jebbar, M., Tasiemski, A., Durand, L., . . . Zeppilli, D. (2019). Chemosynthetic ectosymbionts associated with a shallow-

- water marine nematode. *Scientific Reports*, 9(1), 7019.
- Bellec, L., Cambon-Bonavita, M.-A., Durand, L., Aube, J., Gayet, N., Sandulli, R., . . . Zeppilli, D. (2020). Microbial communities of the shallow-water hydrothermal vent near Naples, Italy, and chemosynthetic symbionts associated with a free-living marine nematode. *Frontiers in Microbiology*, 11.
- Bernard, E., Handoo, Z., Powers, T., Donald, P., & Heinz, R. (2010). *Vittatidera zeaphila* (Nematoda: Heteroderidae), a new genus and species of cyst nematode parasitic on corn (*Zea mays*). *Journal of nematology*, 42, 139-150.
- Bik, H. M., Lamshead, P. J. D., Thomas, W. K., & Lunt, D. H. (2010). Moving towards a complete molecular framework of the Nematoda: a focus on the Enoplida and early-branching clades. *BMC Evolutionary Biology*, 10(1), 353.
- Blott, S. J., & Pye, K. (2001). GRADISTAT: a grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments. *Earth Surface Processes and Landforms*, 26(11), 1237-1248.
- Bongers, T. (1990). The maturity index: an ecological measure of environmental disturbance based on nematode species composition. *Oecologia*, 83, 14-19.
- Brüchner-Hüttemann, H., & Traunspurger, W. (2020). Seasonal distribution of abundance, biomass and secondary production of free-living nematodes and their community composition in different stream micro-habitats. *Nematology*, 22(4), 401-422.
- Brannock, P. M., Sharma, J., Bik, H. M., Thomas, W. K., & Halanych, K. M. (2017). Spatial and temporal variation of intertidal nematodes in the northern Gulf of Mexico after the Deepwater Horizon oil spill. *Marine Environmental Research*, 130, 200-212.
- Cai, L., Fu, S., Zhou, X., Tseng, L.-C., & Hwang, J.-S. (2020). Benthic meiofauna with emphasis on nematode assemblage response to environmental variation in the intertidal zone of the Danshuei River estuary, northwest Taiwan. *Ecological Research*, 35(5), 857-870.
- Chan, B. K. K., Wang, T.-W., Chen, P.-C., Lin, C.-W., Chan, T.-Y., & Tsang, L. M. (2016). Community structure of macrobiota and environmental parameters in shallow water hydrothermal vents off Kueishan Island, Taiwan. *PLOS ONE*, 11(2), e0148675.
- Chang, N.-N., Lin, L.-H., Tu, T.-H., Jeng, M.-S., Chikaraishi, Y., & Wang, P.-L. (2018). Trophic structure and energy flow in a shallow-water hydrothermal vent: Insights from a stable isotope approach. *PLOS ONE*, 13(10), e0204753.
- Chen, C.-T. A., Zeng, Z., Kuo, F.-W., Yang, T. F., Wang, B.-J., & Tu, Y.-Y. (2005). Tide-influenced acidic hydrothermal system offshore NE Taiwan. *Chemical Geology*, 224(1), 69-81.

- Chen, C., Chan, T.-Y., & Chan, B. K. K. (2018). Molluscan diversity in shallow water hydrothermal vents off Kueishan Island, Taiwan. *Marine Biodiversity*, 48(1), 709-714.
- Chen, H.-Y., Cheng, Y.-S., Grabner, D. S., Chang, S.-H., & Shih, H.-H. (2014). Effect of different temperatures on the expression of the newly characterized heat shock protein 90 (Hsp90) in L3 of *Anisakis* spp. isolated from *Scomber australasicus*. *Veterinary Parasitology*, 205(3), 540-550.
- Chen, H.-Y., Cheng, Y.-S., & Shih, H.-H. (2015). Expression patterns and structural modelling of Hsp70 and Hsp90 in a fish-borne zoonotic nematode *Anisakis pegreffii*. *Veterinary Parasitology*, 212(3), 281-291.
- Chen, H.-Y., & Shih, H.-H. (2015). Occurrence and prevalence of fish-borne *Anisakis* larvae in the spotted mackerel *Scomber australasicus* from Taiwanese waters. *Acta Tropica*, 145, 61-67.
- Chen, X.-G., Lyu, S.-S., Garbe-Schönberg, D., Lebrato, M., Li, X., Zhang, H.-Y., . . . Ye, Y. (2018). Heavy metals from Kueishantao shallow-sea hydrothermal vents, offshore northeast Taiwan. *Journal of Marine Systems*, 180, 211-219.
- Chen, Y. J., Wu, J. Y., Chen, C. T. A., & Liu, L. L. (2015). Effects of low-pH stress on shell traits of the dove snail, *Anachis misera*, inhabiting shallow-vent environments off Kueishan Islet, Taiwan. *Biogeosciences*, 12(9), 2631-2639.
- Chiu, C.-L., Sheng-Rong, S., Yu-Chung, H., & Chi-Xuan, C. (2010). Volcanic characteristics of Kueishantao in northeast Taiwan and their implications. *TAO: Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 21(3), 5.
- Chou, Y.-Y., Wang, C.-S., Chen, H.-G., Chen, H.-Y., Chen, S.-N., & Shih, H.-H. (2011). Parasitism between *Anisakis simplex* (Nematoda: Anisakidae) third-stage larvae and the spotted mackerel *Scomber australasicus* with regard to the application of stock identification. *Veterinary Parasitology*, 177(3), 324-331.
- Claeke, K. R. (1993). Non-parametric multivariate analyses of changes in community structure. *Australian Journal of Ecology*, 18(1), 117-143.
- Copley, J., Flint, H., Ferrero, T., & Van Dover, C. (2007). Diversity of meiofauna and free-living nematodes in hydrothermal vent mussel beds on the northern and southern East Pacific Rise. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 87(5), 1141-1152.
- Dahms, H.-U., & Hwang, J.-S. (2013). Mortality in the ocean-with lessons from hydrothermal vents off Kueishan Tao, Ne-Taiwan. *Journal of Marine Science and Technology*, 21(6), 12.
- de Goeij, J. M., van Oevelen, D., Vermeij, M. J., Osinga, R., Middelburg, J. J., de Goeij, A. F., & Admiraal, W. (2013). Surviving in a marine desert: the sponge loop retains resources within coral reefs. *Science*, 342(6154), 108-110.

- 
- De Ley, P., & Blaxter, M. L. (2004). *A new system for Nematoda: combining morphological characters with molecular trees, and translating clades into ranks and taxa*. Paper presented at the Proceedings of the Fourth International Congress of Nematology, 8-13 June 2002, Tenerife, Spain.
- Du, Y., Gao, S., Warwick, R. M., & Hua, E. (2014). Ecological functioning of free-living marine nematodes in coastal wetlands: an overview. *Chinese Science Bulletin*, 59(34), 4692-4704.
- Ferris, H., Griffiths, B. S., Porazinska, D. L., Powers, T. O., Wang, K.-H., & Tenuta, M. (2012). Reflections on plant and soil nematode ecology: past, present and future. *Journal of nematology*, 44(2), 115.
- Floyd, R., Abebe, E., Papert, A., & Blaxter, M. (2002). Molecular barcodes for soil nematode identification. *Molecular ecology*, 11(4), 839-850.
- Fonseca, G., Maria, T. F., Kandratavicius, N., Venekey, V., Gheller, P. F., & Gallucci, F. (2014). Testing for nematode–granulometry relationships. *Marine Biodiversity*, 44(3), 435-443.
- Frank, T., Bent, V., & Olav, G. (2000). Sulphide tolerance of the marine nematode *Oncholaimus campylocercoides*--a result of internal sulphur formation? *Marine Ecology Progress Series*, 193, 251-259.
- Fu, S. J., Cai, L. Z., Yang, J., Zhou, X. P., Peng, X., & Cao, J. (2012). Spatial and seasonal variations of subtidal free-living nematode assemblages in the northern Beibu Gulf, South China Sea. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 92(2), 255-264.
- Gollner, S., Miljutina, M., & Bright, M. (2013). Nematode succession at deep-sea hydrothermal vents after a recent volcanic eruption with the description of two dominant species. *Organisms Diversity & Evolution*, 13(3), 349-371.
- Gollner, S., Riemer, B., Martínez Arbizu, P., Le Bris, N., & Bright, M. (2010). Diversity of meiofauna from the 9°50'N East Pacific Rise across a gradient of hydrothermal fluid emissions. *PLOS ONE*, 5(8), e12321.
- Grassi, E., Montefalcone, M., Cesaroni, L., Guidi, L., Balsamo, M., & Semprucci, F. (2022). Taxonomic and functional nematode diversity in Maldivian coral degradation zones: patterns across reef typologies and depths. *PeerJ*, 10, e13644.
- Gyedu-Ababio, T. K., & Baird, D. (2006). Response of meiofauna and nematode communities to increased levels of contaminants in a laboratory microcosm experiment. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 63(3), 443-450.
- Hatcher, B. G. (1988). Coral reef primary productivity: a beggar's banquet. *Trends in Ecology & Evolution*, 3(5), 106-111.
- Heip, C., Vincx, M., & Vranken, G. (1985). The ecology of marine nematodes.

- Hentschel, U., Berger, E. C., Bright, M., Felbeck, H., & Ott, J. A. (1999). Metabolism of nitrogen and sulfur in ectosymbiotic bacteria of marine nematodes (Nematoda, Stilbonematinae). *Marine Ecology Progress Series*, 183, 149-158.
- Hong, J.-H., & Lee, W. (2014). Two new species of free-living marine nematodes (Nematoda: Oncholaimida: Enchelidiidae) from Maemul Island, Korea. *Zootaxa*, 3785(3), 419-437.
- Hong, J.-H., Semprucci, F., Jeong, R., Kim, K., Lee, S., Jeon, D., . . . Lee, W. (2020). Meiobenthic nematodes in the assessment of the relative impact of human activities on coastal marine ecosystem. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192(2), 81.
- Hourston, M., Potter, I. C., Warwick, R. M., Valesini, F. J., & Clarke, K. R. (2009). Spatial and seasonal variations in the ecological characteristics of the free-living nematode assemblages in a large microtidal estuary. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 82(2), 309-322.
- Huang, Y., & Zhang, Z. (2004). A new genus and three new species of free-living marine nematodes (Nematoda: Enoplida: Enchelidiidae) from the Yellow Sea, China. *CBM-Cahiers de Biologie Marine.*, 45(4), 343-354.
- Hugot, J.-P., Baujard, P., & Morand, S. (2001). Biodiversity in helminths and nematodes as a field of study: an overview. *Nematology*, 3(3), 199-208.
- Kamenev, G., Fadeev, V., Selin, N., Tarasov, V., & Malakhov, V. (1993). Composition and distribution of macro-and meiobenthos around sublittoral hydrothermal vents in the Bay of Plenty, New Zealand. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*, 27(4), 407-418.
- Kassambara, A. (2020). *Pipe-friendly framework for basic statistical tests [R package rstatix version 0.6.0]*.
- Lee, Y.-C., Lee, H.-H., Ke, H.-M., Liu, Y.-C., Wang, M.-C., Tseng, Y.-C., . . . Tsai, I. J. (2023). Single worm long read sequencing reveals genome diversity in free-living nematodes. *bioRxiv*, 2023.2004.2017.537128.
- Lex, A., Gehlenborg, N., Strobel, H., Vuillemot, R., & Pfister, H. (2014). UpSet: visualization of intersecting sets. *IEEE Trans Vis Comput Graph*, 20(12), 1983-1992.
- Li, G., Han, X., Yue, S., Wen, G., Rongmin, Y., & Kusky, T. (2006). Monthly variations of water masses in the East China Seas. *Continental Shelf Research*, 26(16), 1954-1970.
- Liao, J.-X., & Dovgal, I. (2015). A new *Thecacineta* species (Ciliophora, Suctorea) on *Desmodora pontica* (Nematoda, Des-modorida) from a seagrass bed in Taiwan. *Protistology*, 9, 75-78.

- Liao, J.-X., Wei, C.-L., & Yasuhara, M. (2020). Species and functional diversity of deep-sea nematodes in a high energy submarine canyon. *Frontiers in Marine Science*, 7.
- Liao, J.-X., Yeh, H.-M., & Mok, H.-K. (2015a). Do the abundance, diversity, and community structure of sediment meiofauna differ among seagrass species? *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, -1, 1-11.
- Liao, J.-X., Yeh, H.-M., & Mok, H.-K. (2015b). Meiofaunal communities in a tropical seagrass bed and adjacent unvegetated sediments with note on sufficient sample size for determining local diversity indices. *Zoological Studies*, 54(1), 14.
- Lichtschlag, A., Braeckman, U., Guilini, K., Ahmerkamp, S., James, R. H., & de Beer, D. (2022). Impact of shallow-water hydrothermal seepage on benthic biogeochemical cycling, nutrient availability, and meiobenthic communities in a tropical coral reef. *Limnology and Oceanography*, 67(3), 567-584.
- Liu, H., Zhang, Z., Fan, S., Hua, E., & Deng, K. (2008). Seasonal variability in free-living marine nematode community structure in a sandy beach of the Taiping Bay of Qingdao, China. *Acta Oceanologica Sinica*, 27, 102-115.
- Long, E. R., Macdonald, D. D., Smith, S. L., & Calder, F. D. (1995). Incidence of adverse biological effects within ranges of chemical concentrations in marine and estuarine sediments. *Environmental Management*, 19(1), 81-97.
- Luo, H.-Y., Chen, H.-Y., Chen, H.-G., & Shih, H.-H. (2016). Scavenging hagfish as a transport host of Anisakid nematodes. *Veterinary Parasitology*, 218, 15-21.
- Moreno, M., Ferrero, T. J., Gallizia, I., Vezzulli, L., Albertelli, G., & Fabiano, M. (2008). An assessment of the spatial heterogeneity of environmental disturbance within an enclosed harbour through the analysis of meiofauna and nematode assemblages. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 77(4), 565-576.
- Moreno, M., Semprucci, F., Vezzulli, L., Balsamo, M., Fabiano, M., & Albertelli, G. (2011). The use of nematodes in assessing ecological quality status in the Mediterranean coastal ecosystems. *Ecological Indicators*, 11(2), 328-336.
- Nanajkar, M. R., & Ingole, B. S. (2007). Nematode species diversity as indicator of stressed benthic environment along the central west coast of India. In P. V. Desai & R. Roy (Eds.), *Nematode species diversity as indicator of stressed benthic environment along the central west coast of India* (pp. 42-52). India: Goa University.
- Ng, W.-L., Chen, C.-A., Mustafa, S., Soo, C.-L., Liao, Y.-C., & Shih, T.-W. (2022). Free-living marine nematodes community structure in the conservation area (Chaojing Park) and its adjacent area of Keelung, Taiwan. *PLOS ONE*, 17(5),
- Nicholas, W. L. (2001). Seasonal variations in nematode assemblages on an Australian temperate ocean beach; the effect of heavy seas and unusually high tides.

Hydrobiologia, 464(1), 17-26.

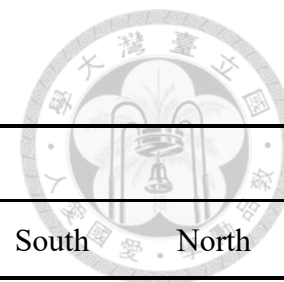
- Odum, H. T., & Odum, E. P. (1955). Trophic structure and productivity of a windward coral reef community on Eniwetok Atoll. *Ecological monographs*, 25(3), 291-320.
- Oksanen, J., Kindt, R., Legendre, P., O'Hara, B., Stevens, M. H. H., Oksanen, M. J., & Suggests, M. (2007). The vegan package. *Community ecology package*, 10(631-637), 719.
- Pérez-García, J. A., Marzo-Pérez, D., & Armenteros, M. (2019). Spatial scale influences diversity patterns of free-living nematode assemblages in coral degradation zones from the Caribbean Sea. *Marine Biodiversity*, 49(4), 1831-1842.
- Platt, H. M., & Warwick, R. M. (1980). The significance of free-living nematodes to the littoral ecosystem. In J. H. Price, D. E. G. Irvine, & W. F. Farnham (Eds.), *The shore environment. Vol. 2. Ecosystems*. Cambridge, UK: Academic Press.
- Raes, M., De Troch, M., Ndaro, S. G. M., Muthumbi, A., Guilini, K., & Vanreusel, A. (2007). The structuring role of microhabitat type in coral degradation zones: a case study with marine nematodes from Kenya and Zanzibar. *Coral Reefs*, 26(1), 113-126.
- Raes, M., Decraemer, W., & Vanreusel, A. (2008). Walking with worms: coral-associated epifaunal nematodes. *Journal of Biogeography*, 35(12), 2207-2222.
- Raes, M., & Vanreusel, A. (2006). Microhabitat type determines the composition of nematode communities associated with sediment-clogged cold-water coral framework in the Porcupine Seabight (NE Atlantic). *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 53(12), 1880-1894.
- Ridall, A., & Ingels, J. (2021). Suitability of free-living marine nematodes as bioindicators: Status and future considerations. *Frontiers in Marine Science*, 8, 685327.
- Ruiz-Abierno, A., & Armenteros, M. (2017). Coral reef habitats strongly influence the diversity of macro- and meiobenthos in the Caribbean. *Marine Biodiversity*, 47(1), 101-111.
- Schmidt-Rhaesa, A. (2014). *Gastrotricha, cycloneuralia and gnathifera. Volume 2, Nematoda* (A. Schmidt-Rhaesa Ed.). Berlin: De Gruyter.
- Schratzberger, M., & Ingels, J. (2018). Meiofauna matters: The roles of meiofauna in benthic ecosystems. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 502, 12-25.
- Semprucci, F., Colantoni, P., Baldelli, G., Rocchi, M., & Balsamo, M. (2010). The distribution of meiofauna on back-reef sandy platforms in the Maldives (Indian Ocean). *Marine Ecology*, 31(4), 592-607.

- Semprucci, F., Colantoni, P., Baldelli, G., Sbrocca, C., Rocchi, M., & Balsamo, M. (2013). Meiofauna associated with coral sediments in the Maldivian subtidal habitats (Indian Ocean). *Marine Biodiversity*, 43(3), 189-198.
- Semprucci, F., Colantoni, P., Sbrocca, C., Baldelli, G., Rocchi, M., & Balsamo, M. (2011). Meiofauna in sandy back-reef platforms differently exposed to the monsoons in the Maldives (Indian Ocean). *Journal of Marine Systems*, 87(3), 208-215.
- Shiau, Y.-J., & Chiu, C.-Y. (2017). Changes in soil biochemical properties in a cedar plantation invaded by Moso bamboo. *Forests*, 8(7), 222.
- Shih, H.-H., Ku, C.-C., & Wang, C.-S. (2010). *Anisakis simplex* (Nematoda: Anisakidae) third-stage larval infections of marine cage cultured cobia, *Rachycentron canadum* L., in Taiwan. *Veterinary Parasitology*, 171(3), 277-285.
- Silveira, C. B., Cavalcanti, G. S., Walter, J. M., Silva-Lima, A. W., Dinsdale, E. A., Bourne, D. G., . . . Thompson, F. L. (2017). Microbial processes driving coral reef organic carbon flow. *FEMS Microbiology Reviews*, 41(4), 575-595.
- Tarasov, V. G., Gebruk, A. V., Mironov, A. N., & Moskalev, L. I. (2005). Deep-sea and shallow-water hydrothermal vent communities: Two different phenomena? *Chemical Geology*, 224(1), 5-39.
- Tarasov, V. G., Gebruk, A. V., Shulkin, V. M., Kamenev, G. M., Fadeev, V. I., Kosmynin, V. N., . . . Obzhairov, A. I. (1999). Effect of shallow-water hydrothermal venting on the biota of Matupi Harbour (Rabaul Caldera, New Britain Island, Papua New Guinea). *Continental Shelf Research*, 19(1), 79-116.
- Tchesunov, A. V. (2015). Free-living nematode species (Nematoda) dwelling in hydrothermal sites of the North Mid-Atlantic Ridge. *Helgoland Marine Research*, 69(4), 343-384.
- Thiermann, F., Akoumianaki, I., Hughes, J. A., & Giere, O. (1997). Benthic fauna of a shallow-water gaseohydrothermal vent area in the Aegean Sea (Milos, Greece). *Marine Biology*, 128(1), 149-159.
- Thiermann, F., Windoffer, R., & Giere, O. (1994). Selected meiofauna around shallow water hydrothermal vents off Milos (Greece): ecological and ultrastructural aspects. *Vie et Milieu-Life and Environment*, 215-226.
- Urbancik, W., Bauer-Nebelsick, M., & Ott, J. A. (1996). The ultrastructure of the cuticle of Nematoda. *Zoomorphology*, 116(2), 51-64.
- van den Hoogen, J., Geisen, S., Routh, D., Ferris, H., Traunspurger, W., Wardle, D. A., . . . Crowther, T. W. (2019). Soil nematode abundance and functional group composition at a global scale. *Nature*, 572(7768), 194-198.
- Villanueva, R. A. M., & Chen, Z. J. (2019). ggplot2: elegant graphics for data analysis. In: Taylor & Francis.

- Vrain, T. C., Wakarchuk, D., Lévesque, A. C., & Hamilton, R. (1992). Intraspecific rDNA Restriction Fragment Length Polymorphism in the *Xiphinema americanum* group. *Fundamental and Applied Nematology*, 15.
- Wang, T.-W., Lau, D. C. P., Chan, T.-Y., & Chan, B. K. K. (2022). Autochthony and isotopic niches of benthic fauna at shallow-water hydrothermal vents. *Scientific Reports*, 12(1), 6248.
- Wieser, W. (1953). Die beziehung zwischen mundhohlengestalt, ernahrungsweise und vorkommen bei fre lebenden marmen nernatoden. *Arkiv for zoologi*, 4, 439-484.
- Yang, T. F., Lan, T. F., Lee, H.-F., Fu, C.-C., Chuang, P.-C., Lo, C.-H., . . . Lee, C.-S. (2005). Gas compositions and helium isotopic ratios of fluid samples around Kueishantao, NE offshore Taiwan and its tectonic implications. *Geochemical Journal*, 39(5), 469-480.
- Yeates, G. W., Bongers, T., De Goede, R. G., Freckman, D. W., & Georgieva, S. S. (1993). Feeding habits in soil nematode families and genera-an outline for soil ecologists. *Journal of nematology*, 25(3), 315-331.
- Zeppilli, D., & Danovaro, R. (2009). Meiofaunal diversity and assemblage structure in a shallow-water hydrothermal vent in the Pacific Ocean. *Aquatic Biology*, 5(1), 75-84.
- Zeppilli, D., Leduc, D., Fontanier, C., Fontaneto, D., Fuchs, S., Gooday, A. J., . . . Fernandes, D. (2018). Characteristics of meiofauna in extreme marine ecosystems: a review. *Marine Biodiversity*, 48(1), 35-71.
- Zeppilli, D., Vanreusel, A., Pradillon, F., Fuchs, S., Mandon, P., James, T., & Sarrazin, J. (2015). Rapid colonisation by nematodes on organic and inorganic substrata deployed at the deep-sea Lucky Strike hydrothermal vent field (Mid-Atlantic Ridge). *Marine Biodiversity*, 45(3), 489-504.

捌、 附錄

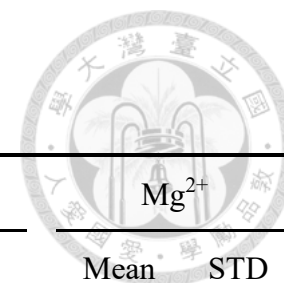




附錄 1、粒徑分級標準與各採樣地點底泥之重量紀錄

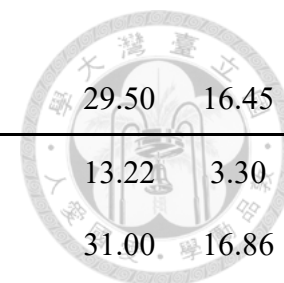
Classification			Grain size	Weight (g)					
				CO ₂	Tail	Near	Far	South	North
Coarse	Gravel	> 16 mm	179.616	-	-	-	-	-	
Medium		8 mm -16 mm	38.27	-	-	-	-	-	
Fine		4 mm - 8 mm	33.369	-	-	-	-	-	
Very fine		2 mm - 4 mm	16.242	19.061	65.081	78.721	132.634	28.168	
Very coarse	Sand	1 mm - 2 mm	11.3	43.512	111.333	74.481	25.875	142.607	
Coarse		500 μm - 1 mm	8.462	44.043	77.104	45.903	7.097	120.575	
Medium		250 μm- 500 μm	5.647	36.372	30.458	38.286	6.936	6.920	
Fine		125 μm - 250 μm	5.105	73.384	16.645	40.097	25.021	1.551	
Very fine		63 μm -125 μm	2.368	57.835	3.144	14.724	68.773	0.443	
Very coarse	Silt	< 63 μm	1.964	24.958	0.601	5.085	30.973	0.189	
(Blott and Pye, 2001)			Total	301.423	301.526	305.173	300.614	301.603	300.861

- ：未測量，由於 CO₂ 泉的底泥顆粒明顯較大，所以額外進行大顆粒的劃分。



附錄 2、各底泥樣本之化學組成與含量 (單位：ppm)。

	SO ₄ ²⁻		Cl ⁻		Na ⁺		K ⁺		Ca ²⁺		Mg ²⁺	
	Mean	STD	Mean	STD	Mean	STD	Mean	STD	Mean	STD	Mean	STD
CO2_21.11	124.76	25.58	680.48	209.83	516.67	683.38	24.47	22.25	3.32	3.02	55.78	63.41
CO2_22.01	117.32	6.41	802.16	134.75	313.33	426.84	11.02	3.29	6.00	5.73	27.40	26.51
CO2_22.04	197.09	27.32	1167.94	222.12	739.17	52.46	15.83	3.15	17.03	4.63	130.83	57.57
CO2_22.08	145.21	5.11	367.69	106.83	168.17	165.27	16.60	13.15	3.20	3.21	16.83	12.99
Far_21.11	91.65	6.58	610.97	186.09	762.00	68.61	93.00	20.29	36.00	17.04	18.48	7.72
Far_22.01	89.85	12.30	1320.30	212.69	691.00	107.43	91.50	11.32	37.00	3.12	14.98	5.21
Far_22.04	122.57	10.31	727.90	190.90	852.00	288.19	107.00	18.99	45.50	8.53	25.00	10.64
Far_22.08	185.52	22.17	1342.81	235.75	2061.00	532.46	162.00	24.14	116.50	36.29	105.50	33.75
Near_21.11	94.31	14.11	729.23	48.39	526.00	407.13	59.00	47.30	37.50	31.32	19.50	16.70
Near_22.01	84.12	3.74	625.24	182.91	500.00	285.57	63.00	26.02	30.00	16.22	17.97	9.31
Near_22.04	83.27	6.34	565.57	34.91	673.00	116.09	84.00	3.97	47.00	10.54	19.00	6.76



Near_22.08	106.53	21.01	707.50	163.77	799.00	112.74	79.00	15.76	51.50	13.11	29.50	16.45
North_21.11	61.66	14.03	494.95	160.98	455.00	63.38	58.50	46.21	36.00	15.80	13.22	3.30
North_22.01	112.35	40.88	427.42	118.73	617.00	97.87	87.00	24.14	65.00	16.73	31.00	16.86
North_22.04	99.63	24.25	616.43	195.75	574.00	182.00	86.50	17.06	64.00	26.42	32.48	18.90
North_22.08	89.96	20.01	706.90	107.36	679.00	268.67	80.50	24.25	72.00	24.78	35.00	20.14
South_21.11	88.89	7.31	551.65	78.42	679.00	22.72	89.00	3.12	46.00	26.68	5.52	3.15
South_22.01	80.62	3.30	610.28	60.13	728.00	99.74	110.00	43.79	29.50	12.12	10.07	8.27
South_22.04	115.13	2.60	749.54	49.37	886.00	91.99	118.00	7.55	43.50	7.79	18.50	8.26
South_22.08	149.37	44.03	881.08	224.86	1890.00	572.33	166.50	39.43	138.00	101.77	38.00	21.70
Tail_21.11	77.17	14.13	613.08	14.24	349.50	13.89	11.00	3.46	35.75	46.98	30.25	5.73
Tail_22.01	77.38	3.02	639.95	56.36	365.50	40.46	31.00	31.69	28.75	33.61	38.25	7.83
Tail_22.04	193.66	26.87	1328.73	167.77	774.00	173.95	44.75	10.35	30.75	7.23	119.50	96.38
Tail_22.08	135.73	13.68	982.61	35.82	411.50	25.16	29.00	2.63	15.25	5.43	82.75	18.74

STD：標準差。



附錄 3-1、各地點底泥離子含量於不同時間點之比較 (Kruskal-Wallis test)。

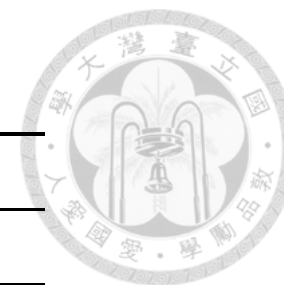
		Na ⁺			Cl ⁻			SO ₄ ²⁻	
Effect		x ²	p-value		x ²	p-value		x ²	p-value
CO ₂	Time	2.282	0.516		8.333	0.040	*	8.077	0.044
Far	Time	6.897	0.075		8.641	0.034	*	9.359	0.025
Near	Time	3.513	0.319		2.590	0.459		3.513	0.319
North	Time	2.282	0.516		5.256	0.154		7.308	0.063
South	Time	8.897	0.031	*	8.641	0.034	*	9.974	0.019
Tail	Time	8.736	0.033	*	9.462	0.024	*	9.462	0.024

		K ⁺		Ca ²⁺		Mg ²⁺	
Effect		x ²	p-value	x ²	p-value	x ²	p-value
CO ₂	Time	1.711	0.635	2	5.872	0.118	6.590
Far	Time	7.205	0.066	3	7.450	0.059	7.605

Near	Time	1.438	0.697	6	2.106	0.551	1.154	0.764
North	Time	1.123	0.772	1	4.315	0.229	3.525	0.318
South	Time	5.821	0.121	4	7.009	0.072	7.552	0.056

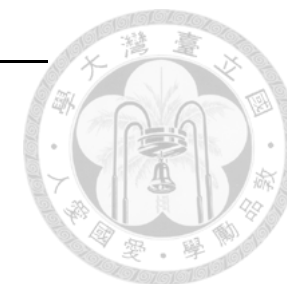


顯著性標記：< 0.001：***；< 0.01：***；< 0.05：*。



附錄 3-2、各地點底泥離子含量於不同時間點之兩兩比較 (Dunn's test)。

Na ⁺						Cl ⁻					
	Effect	Group1	Group2	Z	p _{adjusted}		Effect	Group1	Group2	Z	p _{adjusted}
South	Time	21.11	22.01	-0.453	1.000	CO2	Time	21.11	22.01	-0.566	1.000
	Time	21.11	22.04	-1.585	0.678		Time	21.11	22.04	-1.698	0.537
	Time	21.11	22.08	-2.717	0.039 *		Time	21.11	22.08	1.132	1.000
	Time	22.01	22.04	1.132	1.000		Time	22.01	22.04	1.132	1.000
	Time	22.01	22.08	2.265	0.141		Time	22.01	22.08	-1.698	0.537
	Time	22.04	22.08	-1.132	1.000		Time	22.04	22.08	2.831	0.028 *
Tail	Time	21.11	22.01	-0.113	1.000	Far	Time	21.11	22.01	-2.265	0.141
	Time	21.11	22.04	-2.552	0.064		Time	21.11	22.04	-0.566	1.000
	Time	21.11	22.08	-1.418	0.937		Time	21.11	22.08	-2.378	0.105
	Time	22.01	22.04	1.134	1.000		Time	22.01	22.04	-1.698	0.537
	Time	22.01	22.08	2.439	0.088		Time	22.01	22.08	0.113	1.000
	Time	22.04	22.08	1.304	1.000		Time	22.04	22.08	-1.812	0.420



SO ₄ ²⁻					
	Effect	G1	G2	Z	p _{adjusted}
CO ₂	Time	21.11	22.01	0.679	1.000
	Time	21.11	22.04	-2.038	0.249
	Time	21.11	22.08	-0.679	1.000
	Time	22.01	22.04	2.717	0.039 *
	Time	22.01	22.08	1.359	1.000
	Time	22.04	22.08	1.359	1.000
Far	Time	21.11	22.01	0.113	1.000
	Time	21.11	22.04	-1.472	0.846
	Time	21.11	22.08	-2.491	0.076
	Time	22.01	22.04	1.585	0.678
	Time	22.01	22.08	2.604	0.055
	Time	22.04	22.08	-1.019	1.000
South	Time	21.11	22.01	0.793	1.000

South	Time	21.11	22.01	-0.566	1.000
	Time	21.11	22.04	-2.265	0.141
	Time	21.11	22.08	-2.378	0.105
	Time	22.01	22.04	1.698	0.537
	Time	22.01	22.08	1.812	0.420
	Time	22.04	22.08	-0.113	1.000
Tail	Time	21.11	22.01	-0.340	1.000
	Time	21.11	22.04	-2.717	0.039 *
	Time	21.11	22.08	-1.698	0.537
	Time	22.01	22.04	2.378	0.105
	Time	22.01	22.08	1.359	1.000
	Time	22.04	22.08	1.019	1.000
SO ₄ ²⁻					
	Effect	G1	G2	Z	p _{adjusted}
Tail	Time	21.11	22.01	-0.340	1.000

Time	21.11	22.04	-1.132	1.000	
Time	21.11	22.08	-2.151	0.189	
Time	22.01	22.04	1.925	0.325	
Time	22.01	22.08	2.944	0.019	*
Time	22.04	22.08	-1.019	1.000	

Time	21.11	22.04	-2.717	0.039	*
Time	21.11	22.08	-1.698	0.537	
Time	22.01	22.04	2.378	0.105	
Time	22.01	22.08	1.359	1.000	
Time	22.04	22.08	1.019	1.000	



顯著性標記：< 0.001：***；< 0.01：***；< 0.05：*。

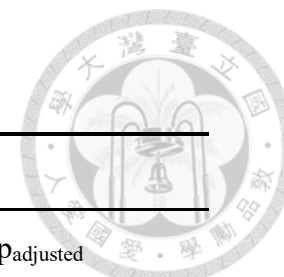


附錄 3-3、各時間點底泥離子含量於不同地點之比較 (Kruskal-Wallis test)。

		Na ⁺			Cl ⁻			SO ₄ ²⁻		
Effect		x ²	p-value		x ²	p-value		x ²	p-value	
21.11	Location	6.053	0.301		6.848	0.232		11.292	0.046 *	
22.01	Location	6.053	0.301		12.789	0.025 *		11.573	0.041 *	
22.04	Location	6.099	0.297		12.696	0.026 *		14.076	0.015 *	
22.08	Location	15.175	0.010 **		14.053	0.015 *		13.398	0.020 *	

		K ⁺			Ca ²⁺			Mg ²⁺		
Effect		x ²	p-value		x ²	p-value		x ²	p-value	
21.11	Location	9.501	0.091		6.247	0.283		9.683	0.085	
22.01	Location	12.517	0.028 *		10.321	0.067		7.222	0.205	
22.04	Location	14.635	0.012 *		10.989	0.052		9.655	0.085	
22.08	Location	15.520	0.008 **		14.635	0.012 *		11.848	0.037 *	

顯著性標記：< 0.001：***；< 0.01：***；< 0.05：*。



附錄 3-4、各時間點底泥離子含量於不同地點之兩兩比較 (Dunn's test)。

Na ²⁺						Cl ⁻					
	Effect	Group1	Group2	Z	p _{adjusted}		Effect	Group1	Group2	Z	p _{adjusted}
22.01	Location	CO ₂	Far	-0.994	1.000	21.11	Location	CO ₂	Far	1.224	1.000
	Location	CO ₂	Near	1.071	1.000		Location	CO ₂	Near	1.300	1.000
	Location	CO ₂	North	2.294	0.327		Location	CO ₂	North	3.135	0.026 *
	Location	CO ₂	South	1.300	1.000		Location	CO ₂	South	1.453	1.000
	Location	CO ₂	Tail	0.688	1.000		Location	CO ₂	Tail	2.294	0.327
	Location	Far	Near	2.065	0.584		Location	Far	Near	0.076	1.000
	Location	Far	North	3.288	0.015 *		Location	Far	North	1.912	0.839
	Location	Far	South	2.294	0.327		Location	Far	South	0.229	1.000
	Location	Far	Tail	1.682	1.000		Location	Far	Tail	1.071	1.000
	Location	Near	North	1.224	1.000		Location	Near	North	1.835	0.997
	Location	Near	South	0.229	1.000		Location	Near	South	0.153	1.000
	Location	Near	Tail	-0.382	1.000		Location	Near	Tail	0.994	1.000



	Location	North	South	-0.994	1.000
	Location	North	Tail	-1.606	1.000
	Location	South	Tail	-0.612	1.000
22.04	Location	CO ₂	Far	1.606	1.000
	Location	CO ₂	Near	2.447	0.216
	Location	CO ₂	North	1.988	0.702
	Location	CO ₂	South	1.453	1.000
	Location	CO ₂	Tail	-0.382	1.000
	Location	Far	Near	0.841	1.000
	Location	Far	North	0.382	1.000
	Location	Far	South	-0.153	1.000
	Location	Far	Tail	-1.988	0.702
	Location	Near	North	-0.459	1.000
	Location	Near	South	-0.994	1.000
	Location	Near	Tail	-2.829	0.070

	Location	North	South	-1.682	1.000
	Location	North	Tail	-0.841	1.000
	Location	South	Tail	0.841	1.000
22.01	Location	CO ₂	Far	1.453	1.000
	Location	CO ₂	Near	1.606	1.000
	Location	CO ₂	North	0.612	1.000
	Location	CO ₂	South	2.371	0.266
	Location	CO ₂	Tail	2.906	0.055
	Location	Far	Near	0.153	1.000
	Location	Far	North	-0.841	1.000
	Location	Far	South	0.918	1.000
	Location	Far	Tail	1.453	1.000
	Location	Near	North	-0.994	1.000
	Location	Near	South	0.765	1.000
	Location	Near	Tail	1.300	1.000



	Location	North	South	-0.535	1.000			Location	North	South	1.759	1.000
	Location	North	Tail	-2.371	0.266			Location	North	Tail	2.294	0.327
	Location	South	Tail	-1.835	0.997			Location	South	Tail	0.535	1.000
22.08	Location	CO ₂	Far	0.001	0.009	*	22.04	Location	CO ₂	Far	1.529	1.000
	Location	CO ₂	Near	0.169	1.000			Location	CO ₂	Near	3.059	0.033
	Location	CO ₂	North	0.251	1.000			Location	CO ₂	North	2.294	0.327
	Location	CO ₂	South	0.066	0.997			Location	CO ₂	South	1.835	0.997
	Location	CO ₂	Tail	0.012	0.174			Location	CO ₂	Tail	0.229	1.000
	Location	Far	Near	0.039	0.584			Location	Far	Near	1.529	1.000
	Location	Far	North	0.022	0.327			Location	Far	North	0.765	1.000
	Location	Far	South	0.108	1.000			Location	Far	South	0.306	1.000
	Location	Far	Tail	0.359	1.000			Location	Far	Tail	-1.300	1.000
	Location	Near	North	0.819	1.000			Location	Near	North	-0.765	1.000
	Location	Near	South	0.646	1.000			Location	Near	South	-1.224	1.000
	Location	Near	Tail	0.251	1.000			Location	Near	Tail	-2.829	0.070



	Location	North	South	0.491	1.000	
	Location	North	Tail	0.169	1.000	
	Location	South	Tail	0.491	1.000	
SO ₄ ²⁻						
	Effect	Group1	Group2	Z	padjusted	
21.11	Location	CO ₂	Far	1.224	1.000	
	Location	CO ₂	Near	1.300	1.000	*
	Location	CO ₂	North	3.135	0.026	
	Location	CO ₂	South	1.453	1.000	
	Location	CO ₂	Tail	2.294	0.327	
	Location	Far	Near	0.076	1.000	
	Location	Far	North	1.912	0.839	
	Location	Far	South	0.229	1.000	
	Location	Far	Tail	1.071	1.000	
	Location	Near	North	1.835	0.997	

	Location	North	South	-0.459	1.000	
	Location	North	Tail	-2.065	0.584	
	Location	South	Tail	-1.606	1.000	
22.08	Location	CO ₂	Far	-0.994	1.000	
	Location	CO ₂	Near	1.606	1.000	
	Location	CO ₂	North	2.218	0.399	
	Location	CO ₂	South	0.306	1.000	
	Location	CO ₂	Tail	0.306	1.000	
	Location	Far	Near	2.600	0.140	
	Location	Far	North	3.212	0.020	*
	Location	Far	South	1.300	1.000	
	Location	Far	Tail	1.300	1.000	
	Location	Near	North	0.612	1.000	
	Location	Near	South	-1.300	1.000	
	Location	Near	Tail	-1.300	1.000	



	Location	Near	South	0.153	1.000
	Location	Near	Tail	0.994	1.000
	Location	North	South	-1.682	1.000
	Location	North	Tail	-0.841	1.000
	Location	South	Tail	0.841	1.000
22.01	Location	CO ₂	Far	1.453	1.000
	Location	CO ₂	Near	1.606	1.000
	Location	CO ₂	North	0.612	1.000
	Location	CO ₂	South	2.371	0.266
	Location	CO ₂	Tail	2.906	0.055
	Location	Far	Near	0.153	1.000
	Location	Far	North	-0.841	1.000
	Location	Far	South	0.918	1.000
	Location	Far	Tail	1.453	1.000
	Location	Near	North	-0.994	1.000

	Location	North	South	-1.912	0.839
	Location	North	Tail	-1.912	0.839
	Location	South	Tail	0.000	1.000
K ⁺					
	Effect	Group1	Group2	Z	padjusted
22.01	Location	CO ₂	Far	-2.564	0.155
	Location	CO ₂	Near	-1.531	1.000
	Location	CO ₂	North	-2.067	0.581
	Location	CO ₂	South	-2.756	0.088
	Location	CO ₂	Tail	-0.498	1.000
	Location	Far	Near	1.033	1.000
	Location	Far	North	0.498	1.000
	Location	Far	South	-0.191	1.000
	Location	Far	Tail	2.067	0.581
	Location	Near	North	-0.536	1.000



	Location	Near	South	0.765	1.000			Location	Near	South	-1.225	1.000
	Location	Near	Tail	1.300	1.000			Location	Near	Tail	1.033	1.000
	Location	North	South	1.759	1.000			Location	North	South	-0.689	1.000
	Location	North	Tail	2.294	0.327			Location	North	Tail	1.569	1.000
	Location	South	Tail	0.535	1.000			Location	South	Tail	2.258	0.359
22.04	Location	CO ₂	Far	1.529	1.000	*	22.04	Location	CO ₂	Far	-2.716	0.099
	Location	CO ₂	Near	3.059	0.033			Location	CO ₂	Near	-1.722	1.000
	Location	CO ₂	North	2.294	0.327			Location	CO ₂	North	-1.989	0.700
	Location	CO ₂	South	1.835	0.997			Location	CO ₂	South	-3.213	0.020
	Location	CO ₂	Tail	0.229	1.000			Location	CO ₂	Tail	-0.689	1.000
	Location	Far	Near	1.529	1.000			Location	Far	Near	0.995	1.000
	Location	Far	North	0.765	1.000			Location	Far	North	0.727	1.000
	Location	Far	South	0.306	1.000			Location	Far	South	-0.497	1.000
	Location	Far	Tail	-1.300	1.000			Location	Far	Tail	2.028	0.639
	Location	Near	North	-0.765	1.000			Location	Near	North	-0.268	1.000



	Location	Near	South	-1.224	1.000			Location	Near	South	-1.492	1.000	
	Location	Near	Tail	-2.829	0.070			Location	Near	Tail	1.033	1.000	
	Location	North	South	-0.459	1.000			Location	North	South	-1.224	1.000	
	Location	North	Tail	-2.065	0.584			Location	North	Tail	1.301	1.000	
	Location	South	Tail	-1.606	1.000			Location	South	Tail	2.525	0.174	
22.08	Location	CO2	Far	-0.994	1.000			22.08	Location	CO ₂	Far	-3.065	0.033
	Location	CO2	Near	1.606	1.000			Location	CO ₂	Near	-1.609	1.000	
	Location	CO2	North	2.218	0.399			Location	CO ₂	North	-1.686	1.000	
	Location	CO2	South	0.306	1.000			Location	CO ₂	South	-2.989	0.042	
	Location	CO2	Tail	0.306	1.000			Location	CO ₂	Tail	-0.536	1.000	
	Location	Far	Near	2.600	0.140	*		Location	Far	Near	1.456	1.000	
	Location	Far	North	3.212	0.020			Location	Far	North	1.379	1.000	
	Location	Far	South	1.300	1.000			Location	Far	South	0.077	1.000	
	Location	Far	Tail	1.300	1.000			Location	Far	Tail	2.529	0.172	
	Location	Near	North	0.612	1.000			Location	Near	North	-0.077	1.000	



Location	Near	South	-1.300	1.000
Location	Near	Tail	-1.300	1.000
Location	North	South	-1.912	0.839
Location	North	Tail	-1.912	0.839
Location	South	Tail	0.000	1.000

Location	Near	South	-1.379	1.000
Location	Near	Tail	1.073	1.000
Location	North	South	-1.303	1.000
Location	North	Tail	1.149	1.000
Location	South	Tail	2.452	0.213

Ca²⁺

Mg²⁺

	Effect	Group1	Group2	Z	padjusted	
22.01	Location	CO ₂	Far	-3.099	0.029	*
	Location	CO ₂	Near	-1.607	1.000	
	Location	CO ₂	North	-2.104	0.531	
	Location	CO ₂	South	-2.831	0.070	
	Location	CO ₂	Tail	-0.689	1.000	
	Location	Far	Near	1.492	1.000	
	Location	Far	North	0.995	1.000	
	Location	Far	South	0.268	1.000	

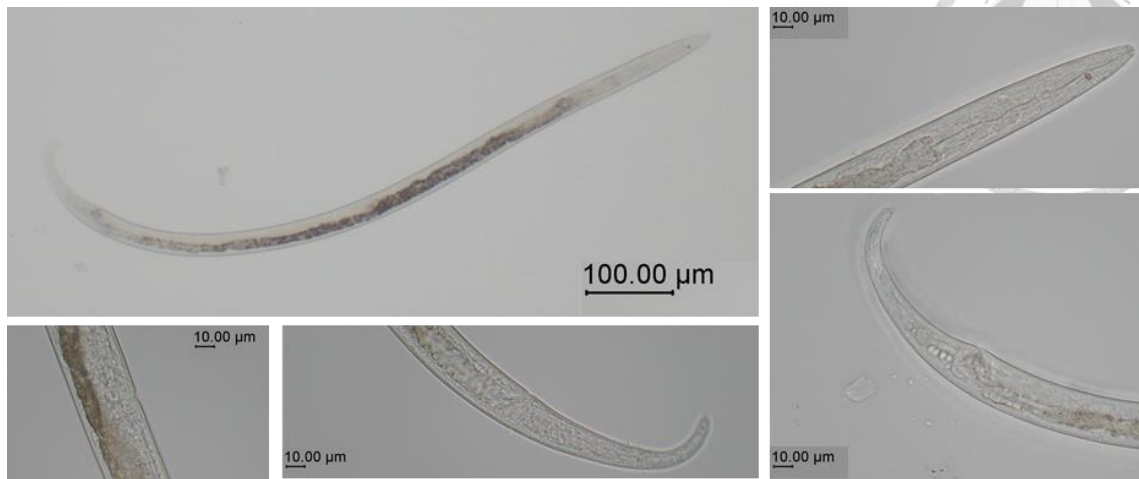
	Effect	Group1	Group2	Z	padjusted	
22.01	Location	CO ₂	Far	-2.678	0.111	
	Location	CO ₂	Near	-0.421	1.000	
	Location	CO ₂	North	-0.689	1.000	
	Location	CO ₂	South	-0.956	1.000	
	Location	CO ₂	Tail	-2.372	0.265	
	Location	Far	Near	2.257	0.360	
	Location	Far	North	1.989	0.700	
	Location	Far	South	1.722	1.000	

Location	Far	Tail	2.410	0.239
Location	Near	North	-0.497	1.000
Location	Near	South	-1.224	1.000
Location	Near	Tail	0.918	1.000
Location	North	South	-0.727	1.000
Location	North	Tail	1.415	1.000
Location	South	Tail	2.142	0.483

Location	Far	Tail	0.306	1.000
Location	Near	North	-0.268	1.000
Location	Near	South	-0.536	1.000
Location	Near	Tail	-1.951	0.766
Location	North	South	-0.268	1.000
Location	North	Tail	-1.683	1.000
Location	South	Tail	-1.415	1.000



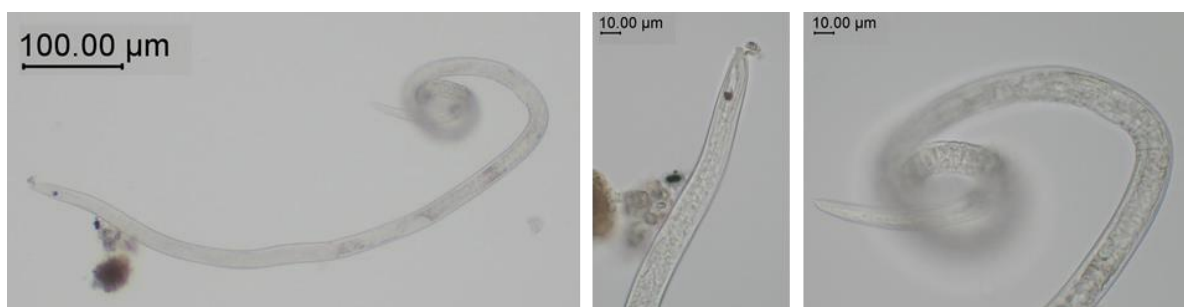
顯著性標記：< 0.001：***；< 0.01：**；< 0.05：*。



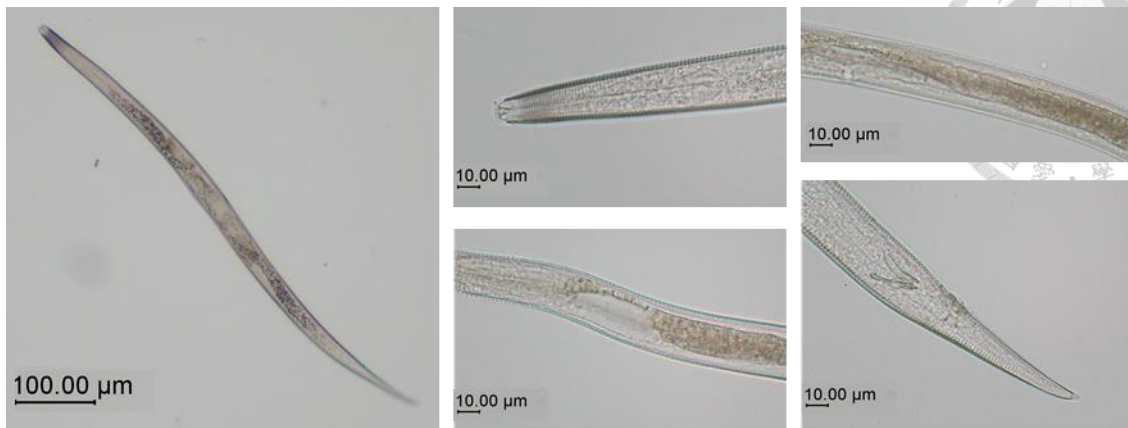
附錄 4-1、*Araeolaimus* sp.



附錄 4-2、*Parodontophora* sp.



附錄 4-3、*Onchium* sp.



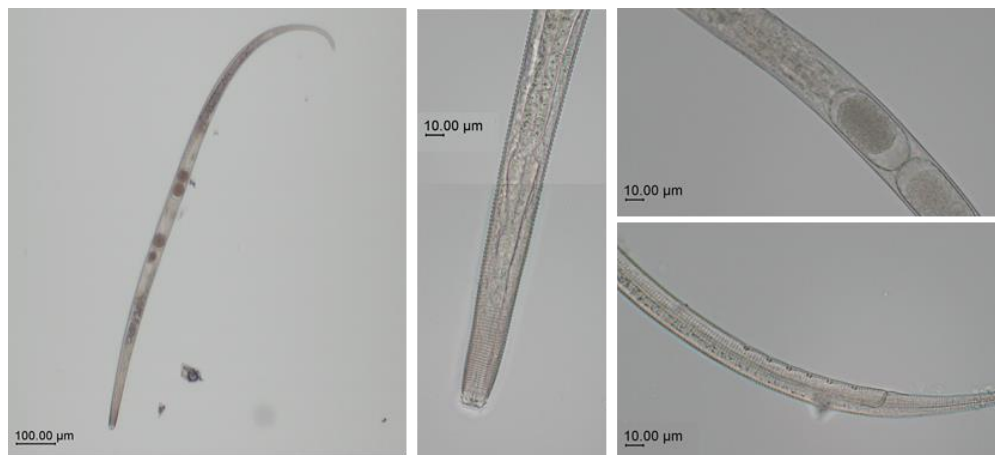
附錄 4-4、*Dichromadora* sp.



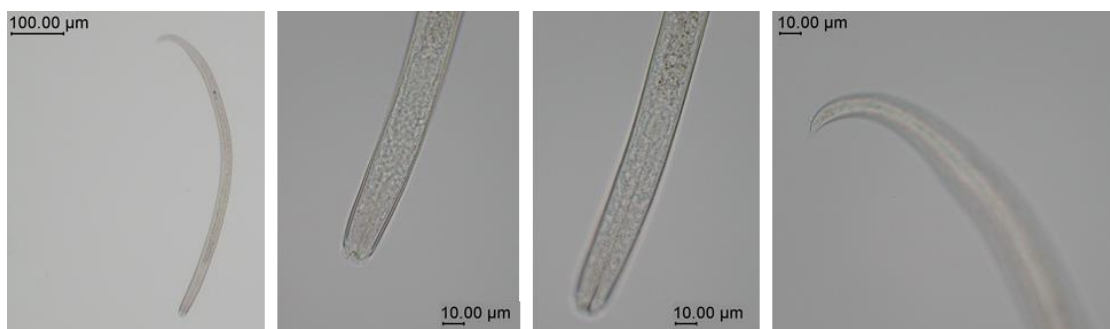
附錄 4-5、*Euchromadora* sp.



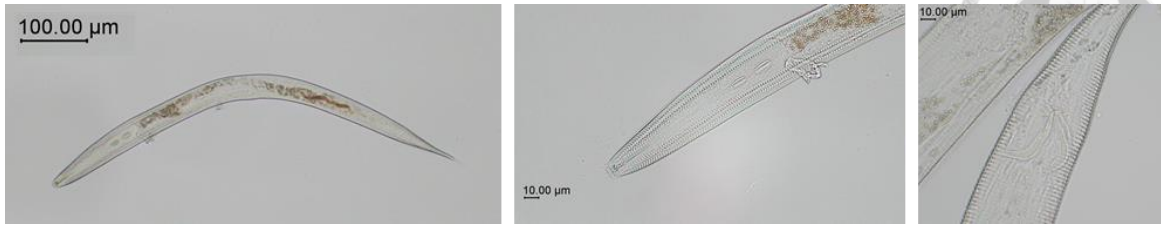
附錄 4-6、*Halichoanolaimus* sp.



附錄 4-7、*Neochromadora* sp.



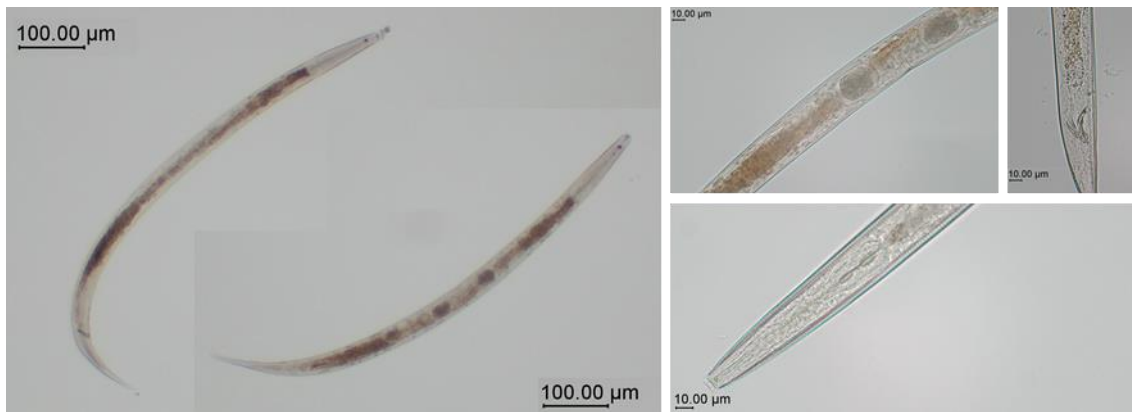
附錄 4-8、*Prochromadorella* sp.



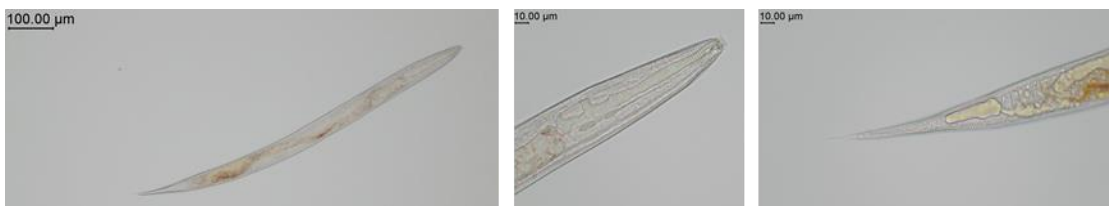
附錄 4-9、*Ptycholaimellus* sp.



附錄 4-10、*Rhips* sp.



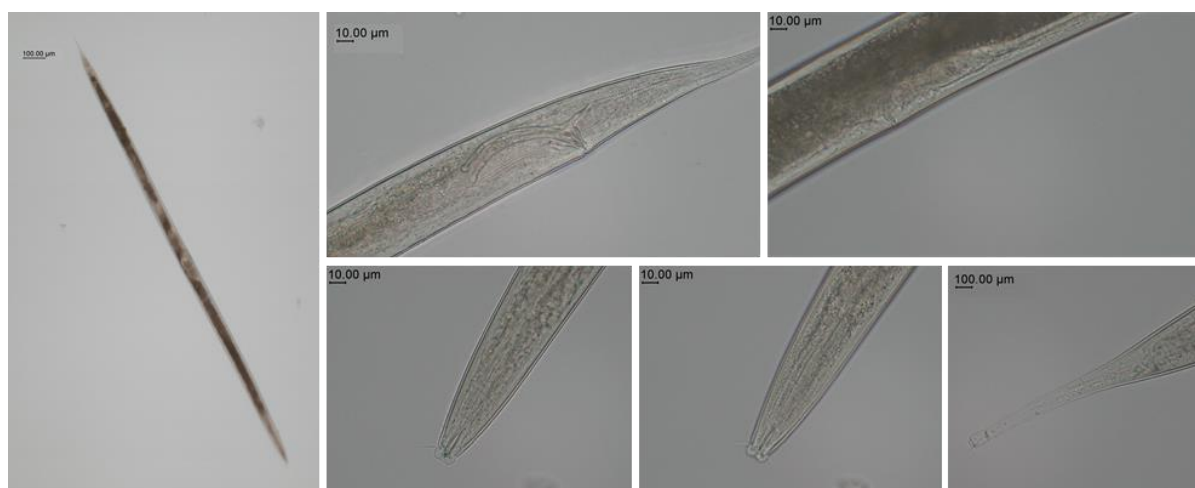
附錄 4-11、*Spilophorella* sp. 1



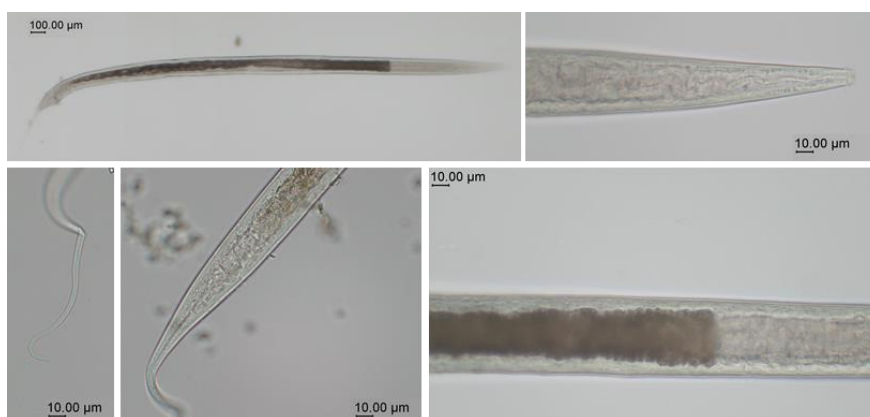
附錄 4-12、*Spilophorella* sp. 2



附錄 4-13、*Comesoma* sp.



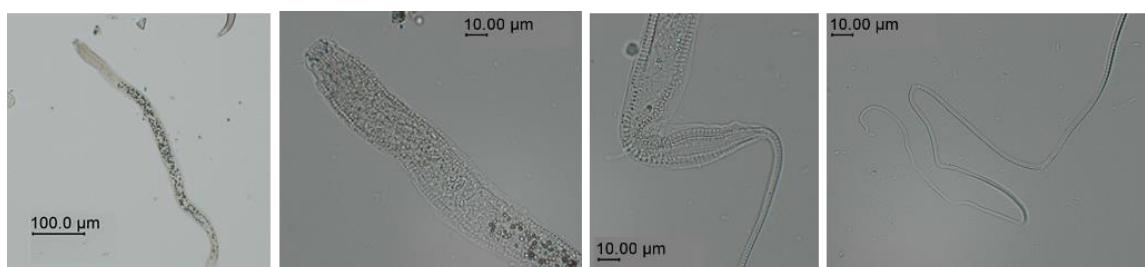
附錄 4-14、*Dorylaimopsis* sp.



附錄 4-15、*Paracomesoma* sp.



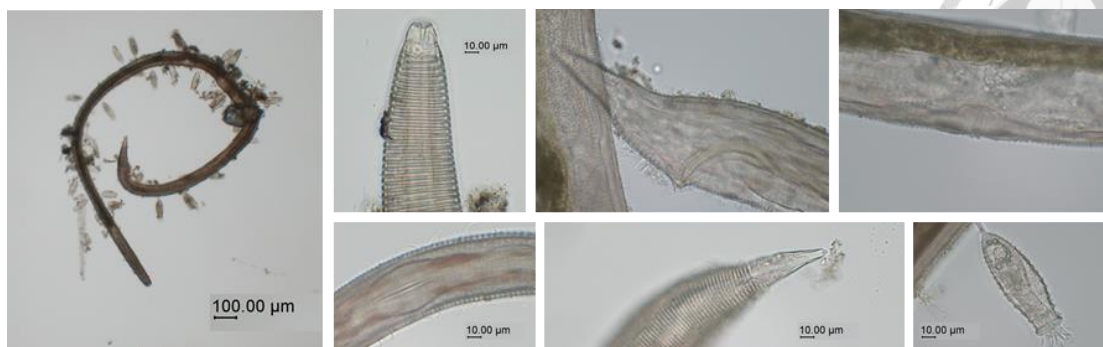
附錄 4-16、*Acanthonchus* sp.



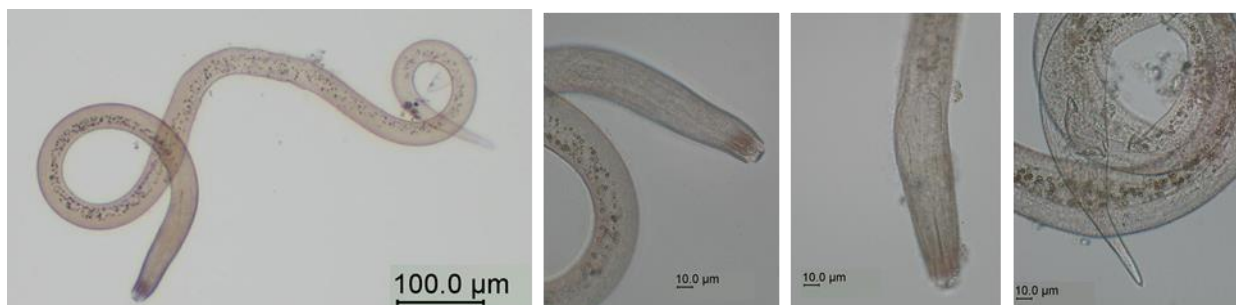
附錄 4-17、*Cyatholaiminae* sp. 1



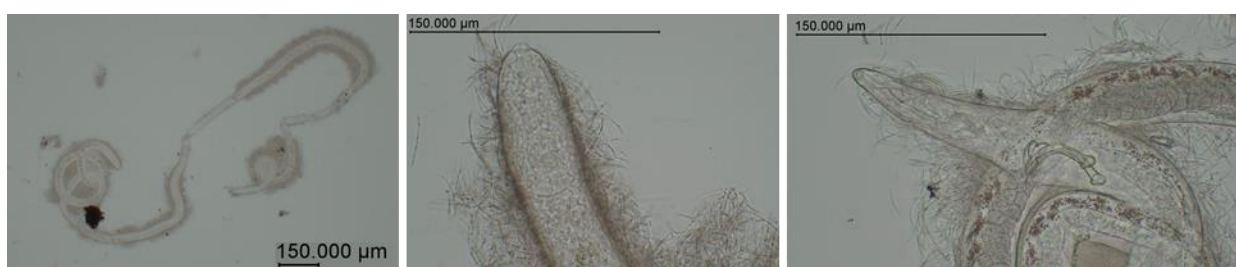
附錄 4-18、*Longicyatholaimu* sp.



附錄 4-19、*Desmodora* sp. 1



附錄 4-20、*Desmodora* sp. 2



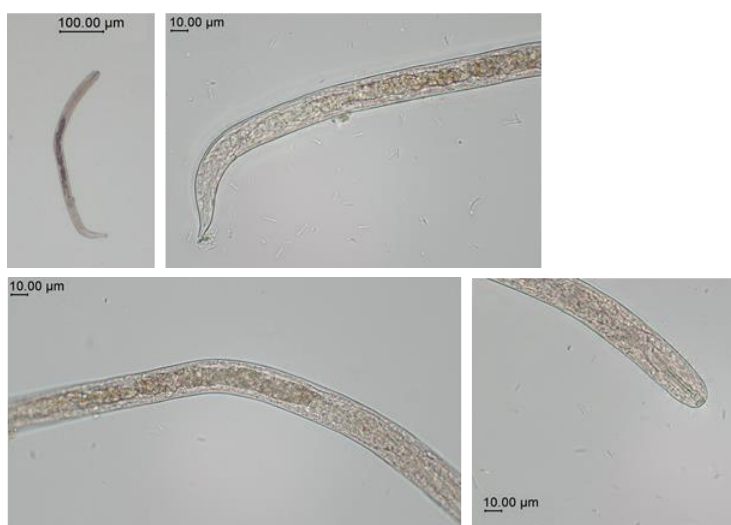
附錄 4-21、*Eubostrichus* sp. 1



附錄 4-22、*Eubostrichus* sp. 2



附錄 4-23、*Laxus* sp.



附錄 4-24、*Onyx* sp.



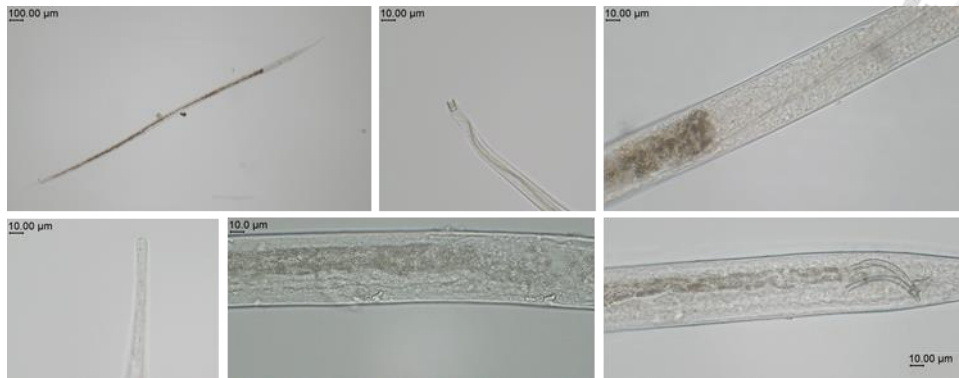
附錄 4-25、*Spirinia* sp.



附錄 4-26、*Diplopeltoides* sp.



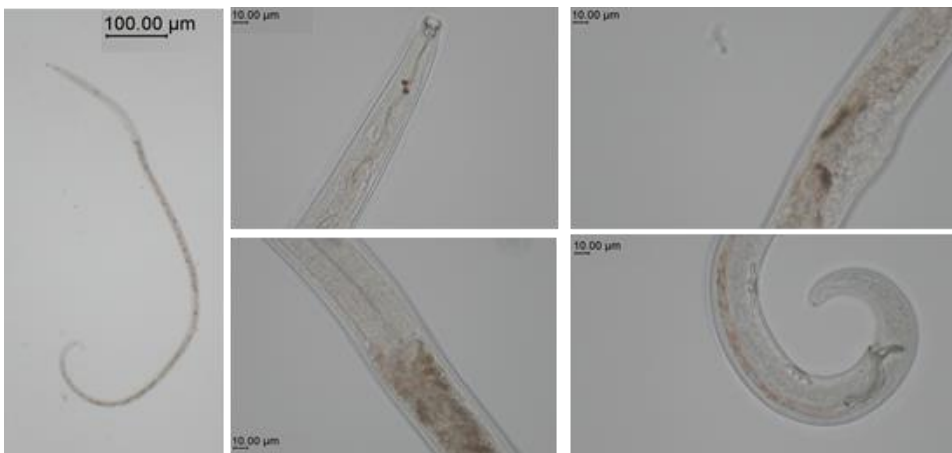
附錄 4-27、*Prochaetosoma* sp.



附錄 4-28、*Abelbolla* sp.



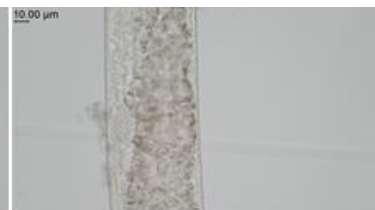
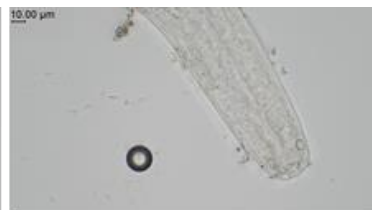
附錄 4-29、*Calyptonema* sp.



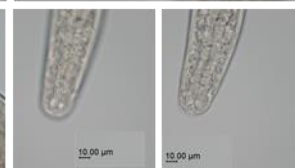
附錄 4-30、*Eurystomina* sp.



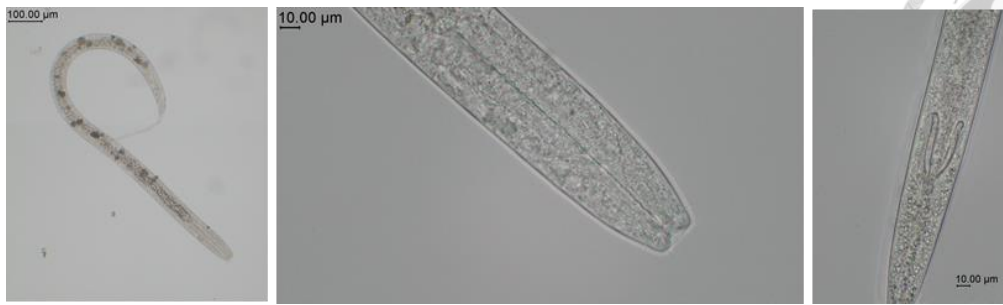
附錄 4-31、*Epsilonema* sp.



附錄 4-32、*Leptosomatidessp.*



附錄 4-33、*Anticyathus* sp.



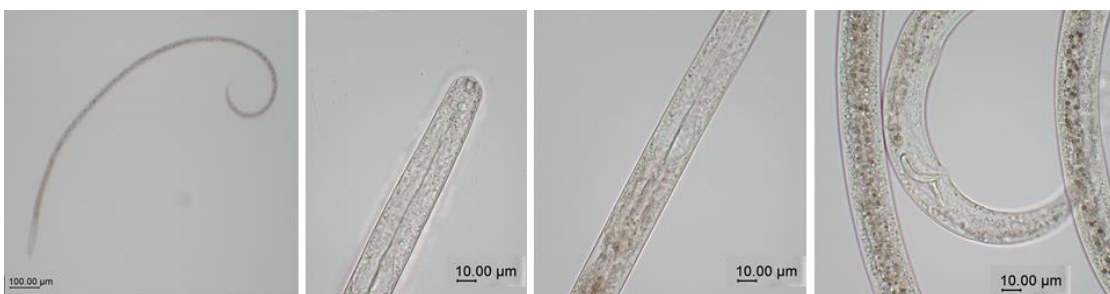
附錄 4-34、*Desmolaiminae* sp. 1



附錄 4-35、*Desmolaiminae* sp. 2



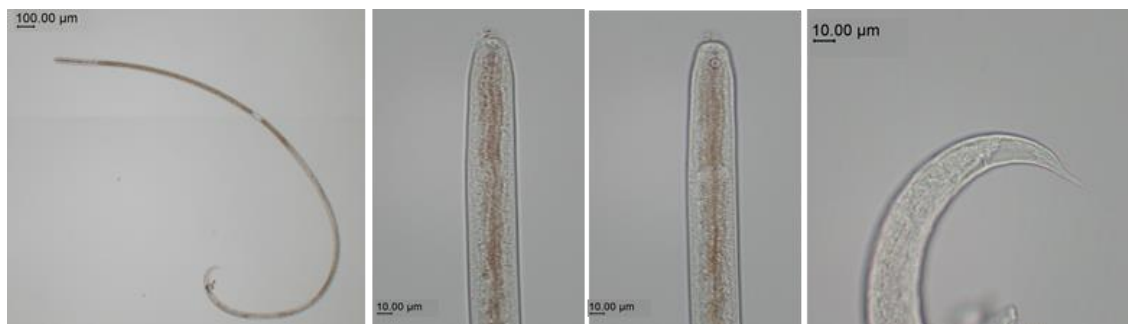
附錄 4-36、*Desmolaimus* sp.



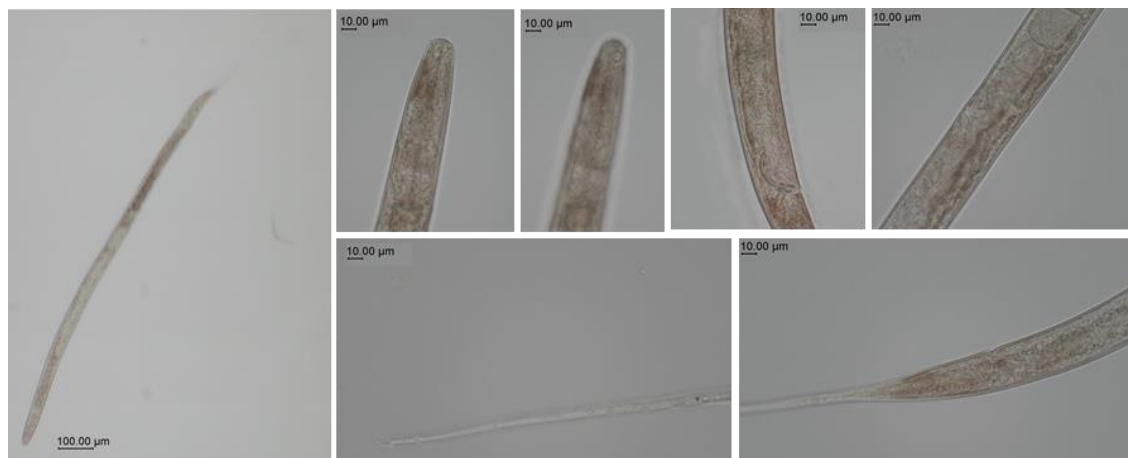
附錄 4-37、*Linhomoeus* sp.



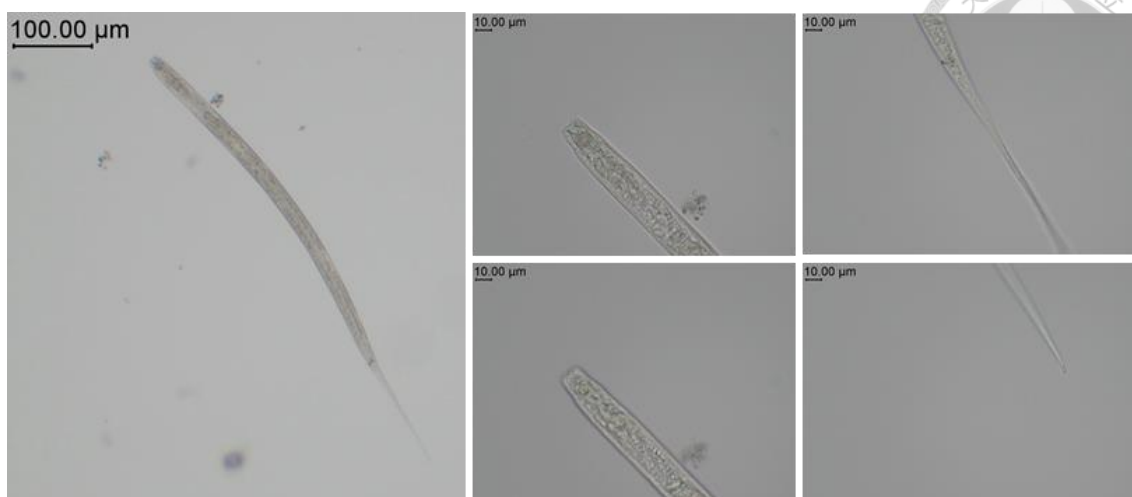
附錄 4-38、*Metalinhomoeus* sp. 1



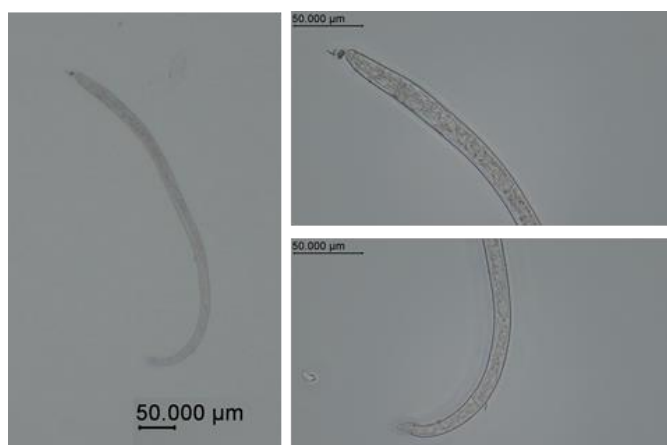
附錄 4-39、*Metalinhomoeus* sp. 2



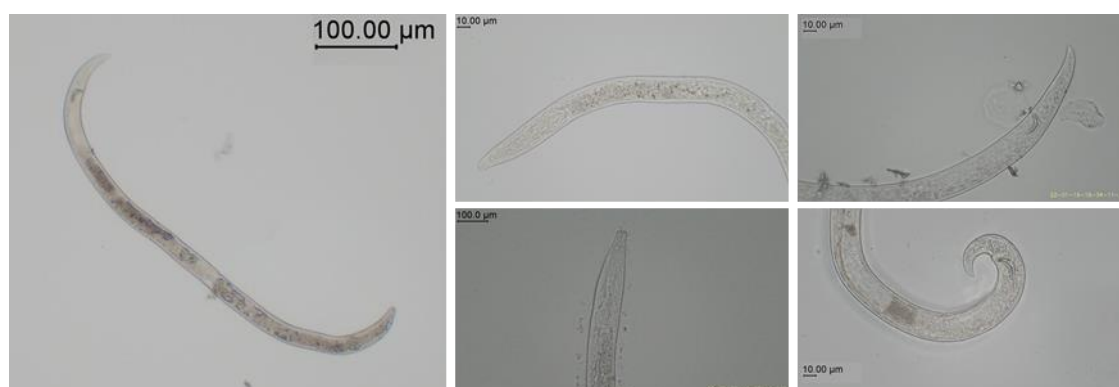
附錄 4-40、*Terschellingia* sp. 1



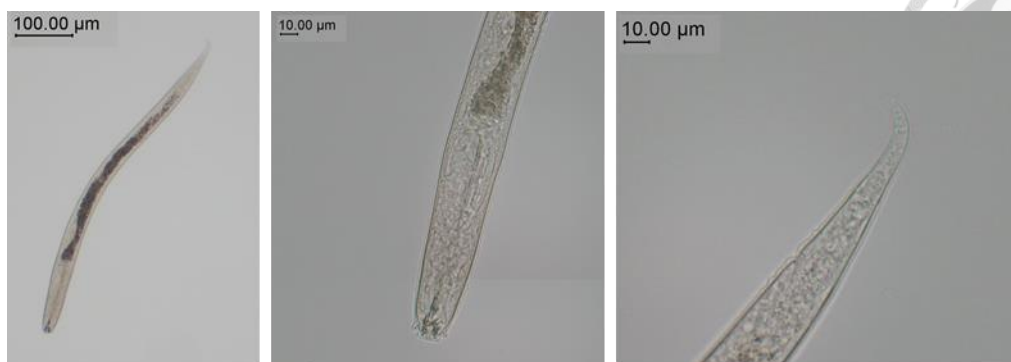
附錄 4-41、*Terschellingia* sp. 2



附錄 4-42、*Microlaimidae* sp. 1



附錄 4-43、*Microlaimus* sp.



附錄 4-44、*Rhinema* sp.



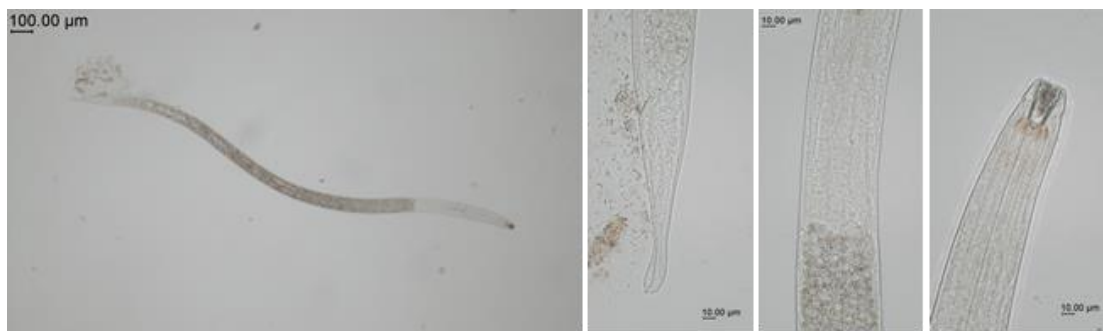
附錄 4-45、*Metoncholaimus* sp.



附錄 4-46、*Meyersia* sp.



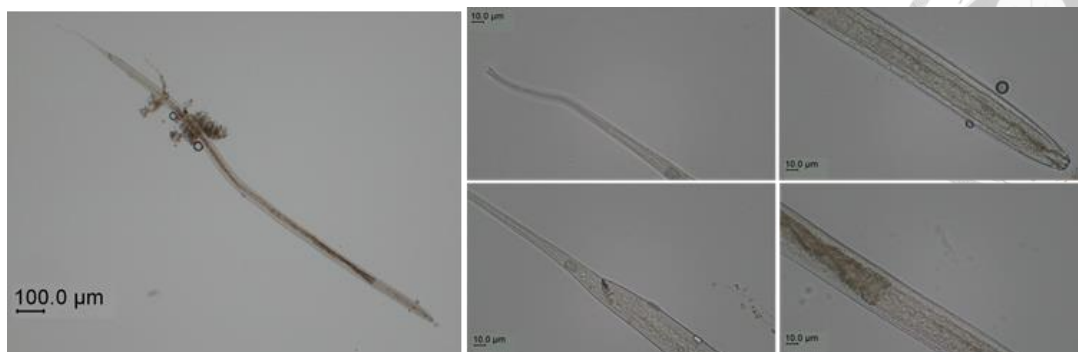
附錄 4-47、*Oncholaimus* sp. 1



附錄 4-48、*Oncholaimus* sp. 2



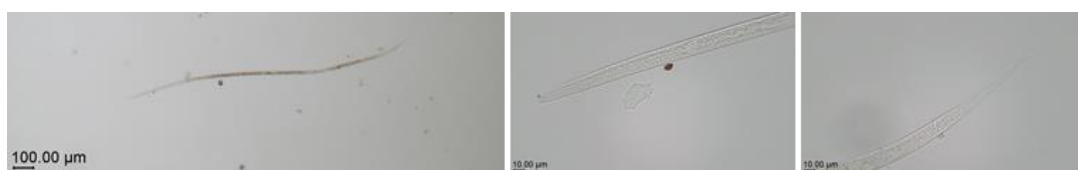
附錄 4-49、*Prooncholaimus* sp.



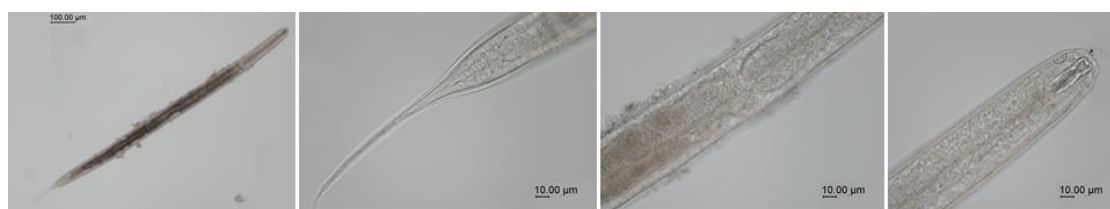
附錄 4-50、*Viscosia* sp. 1



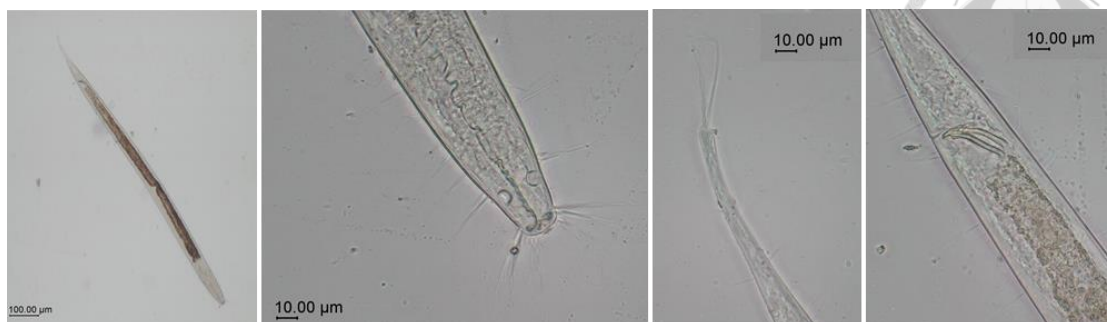
附錄 4-51、*Viscosia* sp. 2



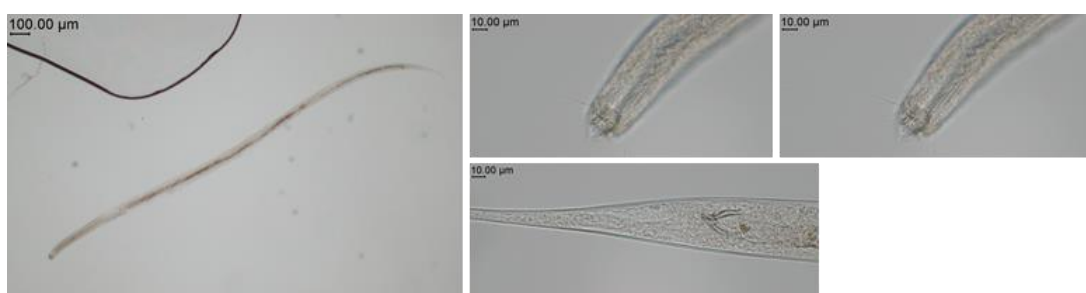
附錄 4-52、*Litinium* sp.



附錄 4-53、*Synonchiella* sp.



附錄 4-54、*Sphaerolaimus* sp.



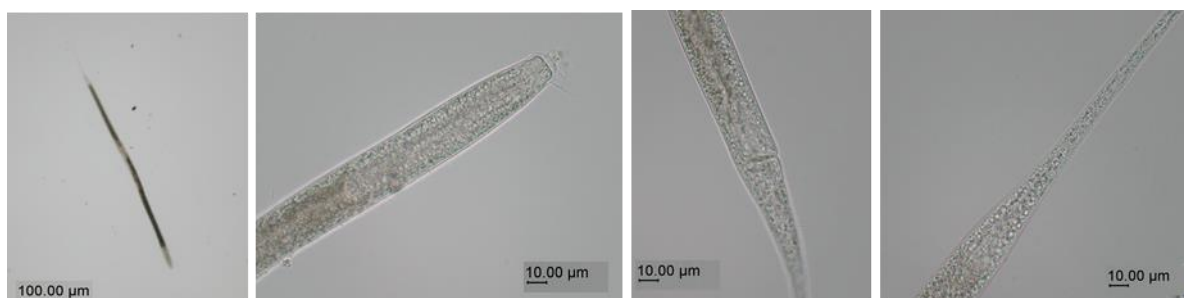
附錄 4-55、*Enoplolaimus* sp.



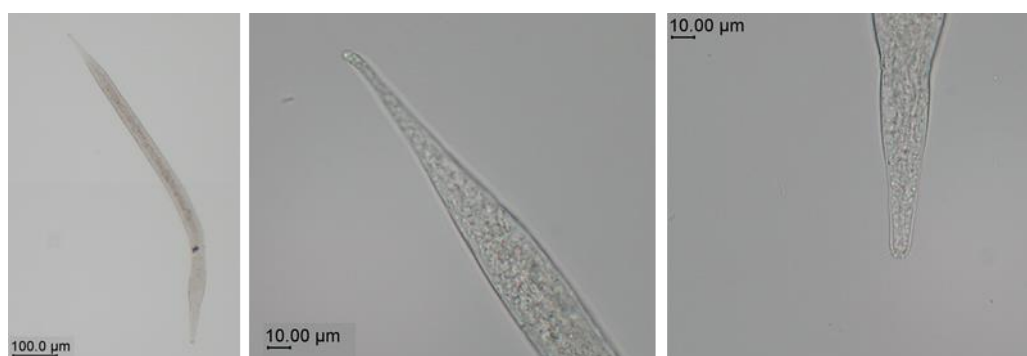
附錄 4-56、*Daptonema* sp.



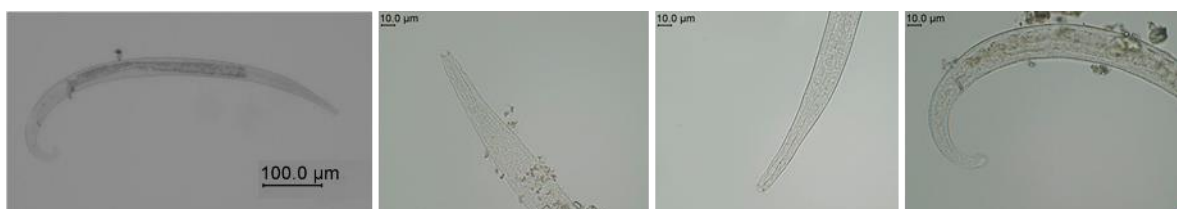
附錄 4-57、*Daptonema* sp. 2



附錄 4-58、*Linhystera* sp.



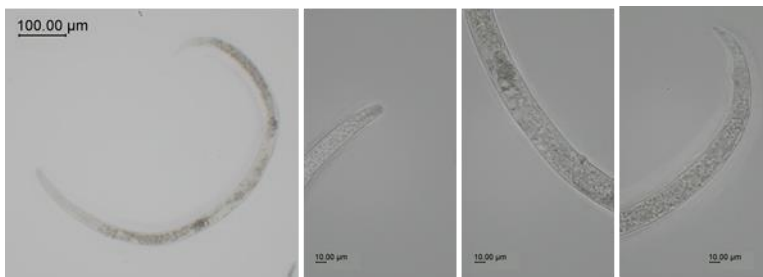
附錄 4-59、*Paramphimonhystrella* sp. 2



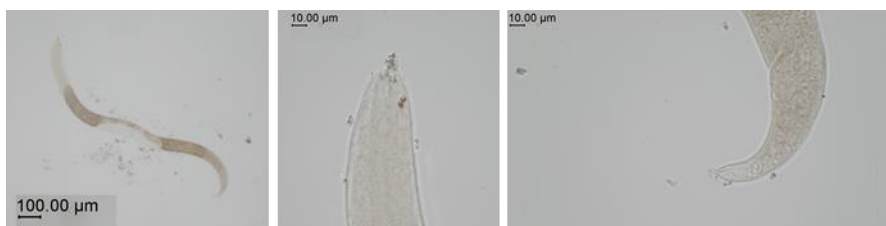
附錄 4-60、*Theristus* sp.



附錄 4-61、Nematoda sp. 1



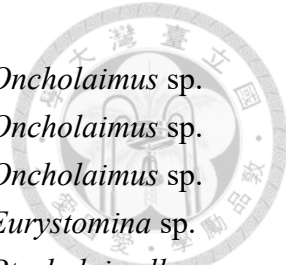
附錄 4-62、Nematoda sp. 2



附錄 4-63、Nematoda sp. 3

附錄 5、經由 BLASTn 進行分子鑑定之結果。

Query	Subject	Identity (%)	Subject information	Coverage (%)	E-value	Bitscore	Morphological identification
1	gb OM415705.1	98.742	<i>Comesoma</i> sp. Beihai1	100	0	1131	<i>Comesoma</i> sp.
2	gb OM415705.1	98.899	<i>Comesoma</i> sp. Beihai1	100	0	1136	<i>Comesoma</i> sp.
3	gb OQ396726.1	98.265	<i>Daptonema alternum</i> isolate 26a	100	0	1110	<i>Daptonema</i> sp. 1
4	gb OQ396726.1	99.685	<i>Daptonema alternum</i> isolate 26a	100	0	1160	<i>Daptonema</i> sp. 1
5	gb OQ396726.1	99.527	<i>Daptonema alternum</i> isolate 26a	100	0	1155	<i>Daptonema</i> sp. 1
6	gb OQ396726.1	99.527	<i>Daptonema alternum</i> isolate 26a	100	0	1155	<i>Daptonema</i> sp. 1
7	gb MN250101.1	98.901	<i>Euchromadora</i> sp. Nem.208	100	0	1138	<i>Euchromadora</i> sp.
8	gb MN250101.1	98.896	<i>Euchromadora</i> sp. Nem.208	99	0	1133	<i>Euchromadora</i> sp.
9	gb MN250101.1	98.901	<i>Euchromadora</i> sp. Nem.208	99	0	1138	<i>Euchromadora</i> sp.
10	gb MH587715.1	98.103	<i>Metoncholaimus albidus</i> isolate Ra2	95	0	1011	<i>Metoncholaimus</i> sp.
11	gb MH587715.1	98.097	<i>Metoncholaimus albidus</i> isolate Ra2	95	0	1007	<i>Metoncholaimus</i> sp.
12	gb MH587715.1	98.094	<i>Metoncholaimus albidus</i> isolate Ra2	95	0	1005	<i>Metoncholaimus</i> sp.
13	gb KR265042.1	99.684	<i>Meyersia</i> sp. AS328	89	0	1157	<i>Meyersia</i> sp.
14	gb MN250137.1	98.898	Microilaimidae sp. 3 TJP-2019 voucher NPRB.45	100	0	1134	<i>Microilaimus</i> sp.
15	gb MN250137.1	98.74	Microilaimidae sp. 3 TJP-2019 voucher NPRB.45	100	0	1129	<i>Microilaimus</i> sp.
16	gb MN250137.1	98.583	Microilaimidae sp. 3 TJP-2019 voucher NPRB.45	100	0	1123	<i>Microilaimus</i> sp.



17	gb HM564475.1	96.994	<i>Oncholaimus</i> sp. AUK36	100	0	1062	<i>Oncholaimus</i> sp.
18	gb HM564475.1	96.835	<i>Oncholaimus</i> sp. AUK36	89	0	1055	<i>Oncholaimus</i> sp.
19	gb HM564594.1	97.627	<i>Oncholaimus</i> sp. SBA5	99	0	1083	<i>Oncholaimus</i> sp.
20	gb HM564435.1	99.051	<i>Pareurystomina</i> sp. NUS1	100	0	1134	<i>Eurystomina</i> sp.
21	gb OQ538290.1	99.843	<i>Ptycholaimellus ocellatus</i> isolate 12a	100	0	1168	<i>Ptycholaimellus</i> sp.
22	gb MN250079.1	91.704	<i>Sphaerolaimus</i> sp. Nem.139	100	0	894	<i>Sphaerolaimus</i> sp.
23	gb MW078524.1	98.736	<i>Spirinia</i> sp. S228-7	100	0	1125	<i>Spirinia</i> sp.
24	gb MW078524.1	98.578	<i>Spirinia</i> sp. S228-7	100	0	1120	<i>Spirinia</i> sp.
25	gb MW078524.1	98.104	<i>Spirinia</i> sp. S228-7	100	0	1103	<i>Spirinia</i> sp.
26	gb OQ396731.1	96.833	<i>Calyptronema acuminatum</i> isolate 13a	99	0	1003	<i>Prooncholaimus</i> sp.
27	gb OQ538292.1	93.719	<i>Desmolaimus brasiliensis</i> isolate 30a	99	0	900	<i>Metalinhomoeus</i> sp. 1
28	gb OQ396744.1	98.898	<i>Neochromadora bilineata</i> isolate 28a	100	0	1134	<i>Dichromadora</i> sp.
29	gb OQ396744.1	99.055	<i>Neochromadora bilineata</i> isolate 28a	100	0	1140	<i>Dichromadora</i> sp.
30	gb KX671110.1	99.054	<i>Odontophora atrox</i> isolate NNCNZ_3240	100	0	1136	<i>Parodontophora</i> sp.
31	gb OL388466.1	93.218	<i>Terschellingia</i> sp. HBP215_6	100	0	931	Desmolaiminae sp. 1
32	gb FJ040474.1	98.11	Chromadoridae sp. MHMH-2008	100	0	1107	<i>Theristus</i> sp.
33	gb FJ040474.1	97.956	Chromadoridae sp. MHMH-2008	100	0	1101	<i>Theristus</i> sp.

此表事先去除相同度低於 90%與過多重複之比對結果，灰底部分為分子與型態結果不一致，後續分析採用型態之結果。

