

2025 年【科學探究競賽-這樣教我就懂】

普高組 成果報告

題目名稱：力不從鋅-水中鋅離子濃度對多齒米蝦肌肉能力之探討

一、摘要

河川污染長期受全球關注，為聯合國永續發展 6「淨水與衛生」的重要目標。而河川污染攸關本土水生生物的生存，因此我們決定探究河川污染對本土河川動物的影響。我們選擇多齒米蝦（*Caridina multidentata*）作為本土水生生物的代表，以鋅作為金屬離子污染的指標，並發現這種污染降低了蝦類肌肉組織的功能。我們進一步探討其在不同鋅濃度、鋅濃度變化幅度下的肌肉收縮能力，確認小幅改變水中鋅濃度確認多齒米蝦頭部及尾部肌肉對鋅之敏感度高於背部。而大幅改變水中鋅濃度使多齒米蝦肌肉收縮能力有所改變，在鋅濃度 15 ppm 升至 25 ppm 時肌肉收縮能力有顯著下降，在 25 ppm 降至 15 ppm 時肌肉收縮能力有顯著上升，發現其為可逆反應。期望未來能透過多齒米蝦的肌肉能力作為河川重金屬汙染的生物指標。

二、探究題目與動機

我們在各大新聞上看到河川重金屬汙染的報導，河川受汙染的模樣怵目驚心，我們進一步得知鋅離子是河川汙染源之一。鋅離子(Zn^{2+})在生命體內扮演重要角色，能夠參與體內恆定反應，但鋅離子在過量攝取時仍具一定程度的毒性。在廣泛查找文獻時我們得知金屬離子錳、鈷會導致生物肌肉活動能力下降，這使我們好奇鋅離子是否也會造成相似的影響，進一步搜尋中，發現有研究透過後抽運動測量多齒米蝦的肌肉收縮能力，多齒米蝦是台灣原生的溪蝦，正適合作為研究的對象，於是我們決定以多齒米蝦為研究對象，以後抽運動探討鋅離子對其肌肉收縮能力的影響。

三、探究目的與假設

目的

- (一)研究小幅度改變鋅離子環境，多齒米蝦肌肉收縮力的變化。
- (二)研究大幅度改變鋅離子環境，多齒米蝦肌肉收縮力的變化。
- (三)分析多齒米蝦各部位的肌肉對鋅離子敏感度是否有差異。

假設

- (一)環境鋅離子濃度上升使多齒米蝦之肌肉收縮力下降。
- (二)多齒米蝦之肌肉收縮力下降為可逆反應。

四、探究方法與驗證步驟

一、探究架構圖

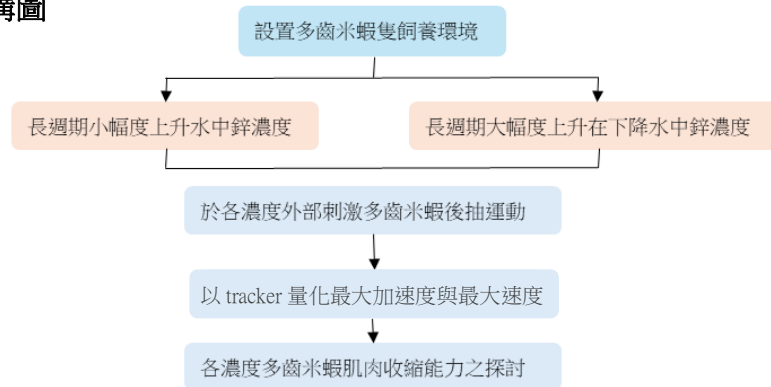


圖 1、探究架構圖

二、後抽運動實驗

實驗步驟:

- 1.將網內一隻多齒米蝦放入彈跳缸（長 19.5 cm*寬 14.8 cm *高 5 cm ）中，並記錄為何隻。
- 2.在彈跳缸後放置有刻度之墊板，以作為比例尺。
- 3.架設 JVC 錄影機（型號：GZ-RX500BTW），確保彈跳缸的底部於錄影機畫面內。
- 4.待多齒米蝦靜止於彈跳缸底部，手持玻璃滴管戳在多齒米蝦頭胸交接的凹槽處，以錄影機記錄後抽運動過程。
- 5.每隻重複三次。



圖 2(左)、後抽運動實驗示意圖

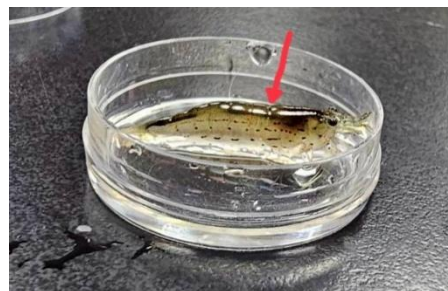


圖 3(右)、多齒米蝦頭胸交接的凹槽處示意圖

三、以 tracker 量化後抽運動之肌肉收縮能力

- 1.使用軟體:tracker 6.2.0
- 2.方法:
 - (1)坐標軸以玻璃滴管戳到多齒米蝦時多齒米蝦頭胸連接凹陷處為原點，調整坐標軸與水平方向夾角使之墊板坐標軸重和。
 - (2)以墊板的刻度為準設置校正桿(1.000E-2 m)。

(3)新增軌跡 track 質量，由玻璃滴管戳到多齒米蝦頭胸連接凹陷處至後射運動結束、多齒米蝦運動趨於平緩的過程，連續手動點擊多齒米蝦頭胸連接凹陷處，得到後抽運動於各個實驗情境的運動軌跡、加速度、速度數據。

3.後抽運動與肌肉收縮力的關係:

李等(2016)在研究中提及多齒米蝦後抽運動之機制為「藉由觸角來感應刺激→身體背側收縮，分別帶動前、後段體節，形成反作用力(推力)，身體開始後移，頭、尾節分別向擺動，增加推力，其中頭節提供向上的力，尾節提供向後的力，合力決定蝦子移動的方向與速度」，文中指出加速度代表背側肌肉收縮力，而速度則代表頭尾節及背側的肌肉收縮力因此我們以速度來代表多齒米蝦後抽運動肌肉施力之合力（包含頭尾節及背側肌肉），而以最大加速度來表示多齒米蝦背側肌肉施力量。

四、小幅上升水中鋅濃度

我們先以硫酸鋅七水合物 $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 調控鋅濃度，從 0 ppm、0.125 ppm、0.25 ppm、0.5 ppm、0.75 ppm、1.25 ppm 到 2.5 ppm，每一濃度區間間隔四日，並於更改濃度當日進行後射運動實驗，測量多齒米蝦在各濃度下後抽運動時的最大加速度及最大速度，透過 ANOVA 分析發現其後抽運動時的最大加速度及最大速度不具有顯著差異($P>0.05$)，顯示多齒米蝦在鋅濃度小幅度上升時後抽運動時的最大加速度及最大速度不受影響。

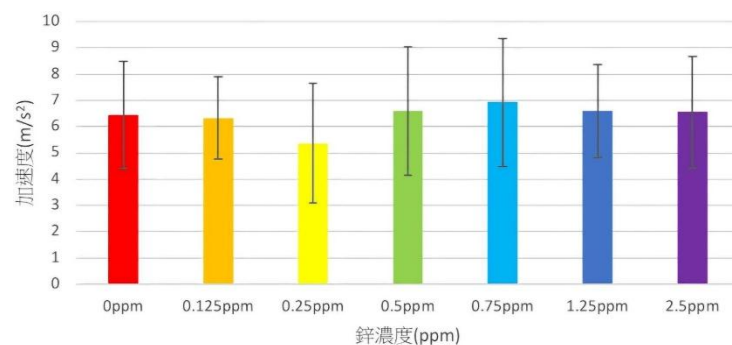


圖 4、鋅濃度小幅上升對最大加速度之影響

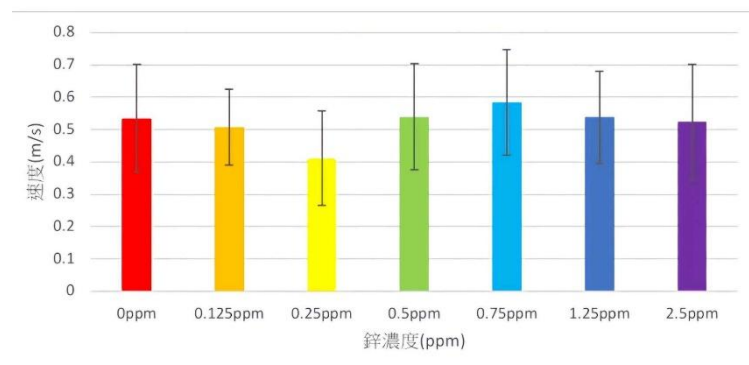


圖 5、鋅濃度小幅上升對最大速度之影響

實驗結果顯示微量鋅離子對多齒米蝦肌肉背側收縮力（以後抽運動加速度判讀）並無顯著影響，我們推測可能是累積金屬濃度尚在多齒米蝦可以自行代謝的額度內，所以要當超過閾值濃度（吸收量超過調節能力）才能看出影響。

而外部總合力（以後抽運動速度判斷）P 值為 0.09 接近顯著性門檻，暗示可能存在影響趨勢，這是在加入考慮頭部及尾部之肌肉收縮力之下，可見頭部及尾部肌肉對鋅離子敏感度高於背部。不同組織累積金屬能力的能力有所不同，像是腮和肝胰腺通常相較其他組織有較高的金屬累積（Liu et al. 2020），而我們的實驗發現鋅離子濃度不僅會因為組織而異，還會因組織所在的位置而對鋅的敏感度不同。

五、大幅上升再下降水中鋅濃度

1. 水中鋅濃度上升

我們將小幅上升水中鋅濃度實驗無顯著差異歸因於低濃度鋅離子並不足以影響多齒米蝦的後抽運動，於是我們將濃度調升的幅度加大，測量在 0 ppm、2.5 ppm、7.5 ppm、15 ppm、25 ppm 鋅濃度遞增處理下多齒米蝦後抽運動的最大加速度與最大速度，透過 ANOVA 分析發現其後抽運動時的最大加速度與最大速度有顯著差異($P < 0.05$)，顯示多齒米蝦後抽運動時的最大加速度與最大速度受鋅濃度大幅上升影響。另外，我們對鋅濃度各兩組濃度間多齒米蝦後抽運動的最大加速度與最大速度進行 t 檢定，發現鋅濃度 15 ppm-25 ppm 有顯著差異($P < 0.05$)，其餘則沒有，顯示鋅濃度在 15 ppm-25 ppm 對後抽運動最大加速度與最大速度有顯著影響。

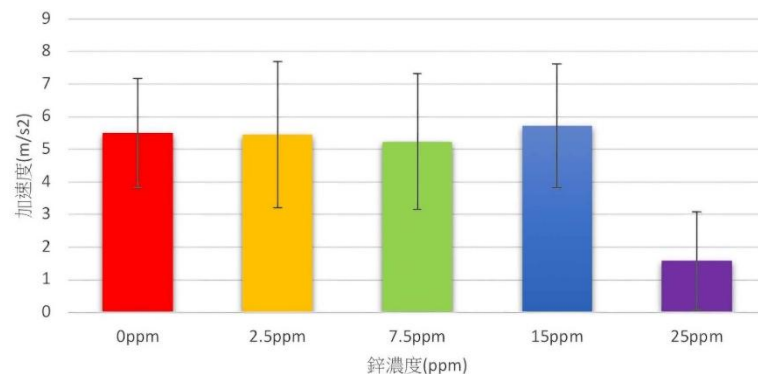


圖 6、鋅濃度大幅上升對最大加速度之影響

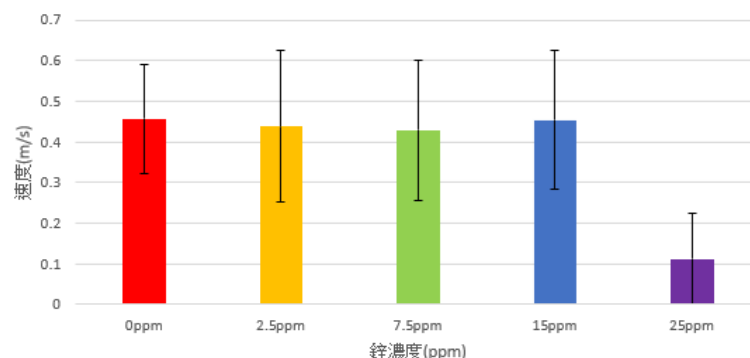


圖 7、鋅濃度大幅上升對最大速度之影響

2.水中鋅濃度下降

為了檢測多齒米蝦在受到高濃度鋅影響後是否能夠回到原有的背側肌肉收縮能力，我們將鋅濃度上升後從 25 ppm 逐步調降，測量多齒米蝦在鋅濃度遞減處理下後抽運動時的最大加速度與最大速度，結果發現鋅濃度從 25 ppm 降至 15 ppm 時，最大加速度與最大速度有顯著改變，且透過 ANOVA 分析發現其後抽運動時的最大加速度與最大速度有顯著差異 ($P < 0.05$)，顯示多齒米蝦後抽運動時的最大加速度與最大速度受鋅濃度下降影響。

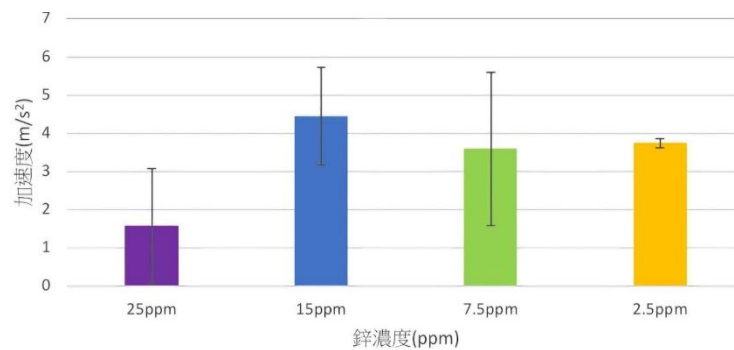


圖 8、鋅濃度遞減對最大加速度的影響

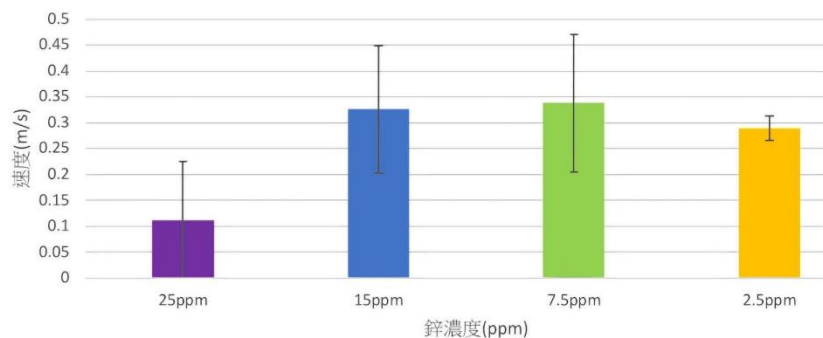


圖 9、鋅濃度遞減對最大速度的影響

我們對鋅濃度上升時與下降時的兩組 2.5 ppm、7.5 ppm、15 ppm 時多齒米蝦後抽運動的最大速度進行 t 檢定，發現各濃度的兩組均沒有顯著差異，顯示鋅濃度對後抽運動最大速度的影響具有可逆性。

實驗結果顯示在長週期大幅上升或下降後，後抽運動的速度或加速度於各濃度鋅離子環境中皆有顯著差異，表示肌肉的收縮能力會因為鋅離子濃度長週期大幅改變而有所不同。而我們也藉由鋅離子濃度升降的過程發現，多齒米蝦以速度也就是頭尾節及背側肌肉判斷，在上升並下降回同一個濃度的兩次收縮能力並無顯著差異，因此我們推測鋅離子對多齒米蝦肌肉收縮力的影響為可逆反應。Fränzle 和 Blind(2022)也曾證實生物體內的可逆金屬反應，雖然這項研究的重點是幾丁質，但它表明金屬離子可以透過氧化還原反應和配體交換過程與生物聚合物（例如金屬硫蛋白等解毒蛋白）結合，然後從生物聚合物中釋放，而我們的實驗結果證實

金屬結合在幾丁質中可逆的反應也出現於肌肉組織中。另外，文獻（Waqas et al. 2024）也指出如果減少或消除重金屬暴露，甲殼類動物可以激活修復機制來逆轉這些金屬引起的一些生化和結構損傷，目前關於重金屬可逆反應的研究甚少，值得深入探討。

五、結論與生活應用

一、結論

- (一) 小幅改變水中鋅濃度對多齒米蝦之背側肌肉收縮能力影響有限。
- (二) 多齒米蝦頭部及尾部肌肉對鋅之敏感度高於背部。
- (三) 大幅改變水中鋅濃度影響多齒米蝦之肌肉收縮能力，且為可逆反應。

二、生活應用

(一) 河川重金屬污染之生物指標

我們的實驗證實了多齒米蝦在高濃度鋅離子環境下(大於 2.5 ppm)四天以上時，肌肉收縮力會顯著下降。而我國的河川，像是曾文溪就曾於 2024 年 1 月測出 2.84 ppm 的鋅離子濃度（中華民國養殖漁業生產區發展協會, 2024），而目前根據國家環境研究院提供的資訊檢測方法是使用火焰式原子吸收光譜法，此方法要價不斐且過程繁複，可以嘗試以多齒米蝦肌肉收縮能力輔助判斷，若發現顯著的肌肉性能差異，即可判定約為 2.5 ppm 以上，作為河川重金屬污染的生物指標。

參考資料

【期刊文章】

- 李采娟、侯光哲、謝依均 (2015)。水中魅影 - 蝦子後抽運動機制之研究。
- Fränzle, S., & Blind, F. (2022). Reversible Metal Ion/Complex Binding to Chitin Controlled by Ligand, Redox, and Photochemical Reactions and Active Movement of Chitin on Aquatic Arthropods. *Polysaccharides*, 3(3), 515-543.
- Liu, Q., Liao, Y., Xu, X., Shi, X., Zeng, J., Chen, Q., & Shou, L. (2020). Heavy metal concentrations in tissues of marine fish and crab collected from the middle coast of Zhejiang Province, China. *Environmental monitoring and assessment*, 192, 1-12.
- Waqas, W., Yuan, Y., Ali, S., Zhang, M., Shafiq, M., Ali, W., Chen, Y., Xiang, Z., Chen, R., Ikhwanuddin, M., & Ma, H. (2024). Toxic effects of heavy metals on crustaceans and associated health risks in humans: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 22(3), 1391-1411.

【網路資料】

中華民國養殖漁業生產區發展協會(2024 年 3 月 22 日)。環境部 113 年第 1 季河川水質重金屬監測結果未符合地面水體分類及水質標準資料。

取自:<https://www.fish1996.com.tw/news-detail-3602276.html>