

第二十三屆旺宏科學獎

成果報告書

參賽編號：SA23-190

隊伍名稱：探討 PVC 對蚤狀溞生理、生殖及 DVM 的影響

作品名稱：探討 PVC 對蚤狀溞生理、生殖及 DVM 的影響

參賽類別：生物

關鍵字：蚤狀溞、微塑膠、DVM

摘要

微塑膠在自然環境中普遍存在，甚至被生物攝取後進入食物鏈間傳遞。由於水蚤族群敏感性高，常作為監測水域環境變化的重要指標。我們以不同 PVC 濃度(0.01 mg/L 及 0.1 mg/L) 為變因，探討微塑膠對於水蚤的生理、生殖及晝夜垂直遷徙(DVM)行為影響。結果發現 0.01 mg/L、0.1 mg/L PVC 濃度環境，皆不會影響蚤狀蚤的存活率，但是會提高蚤狀蚤的心率及降低趨光行為。而 0.1 mg/L PVC 濃度環境會使蚤狀蚤提前進入生殖階段，子代數量明顯高於對照組，出生在 0.01 mg/L、0.1 mg/L PVC 濃度環境的初生蚤體長有離散程度大的趨勢。蚤狀蚤 DVM 屬於日間在深層、夜間在表層的 Nocturnal migration 模式，但在具有 PVC 的環境中，夜晚有較高比例停留在深層，此一行為改變，也會反應在食物鏈後端掠食者上，最終甚至可能影響魚獲，若在水面增設燈光照明可以改善蚤狀蚤夜晚停留在深層的現象。

壹、研究動機

經濟合作暨發展組織(OECD, 2022)指出，全球每年廢棄塑膠量僅有不到一成有效再利用，其他則透過各種途徑進入環境中。特別是小於 5 mm 的微塑膠、小於 1 μm 的奈米塑膠 (Rochman et al., 2016)，在自然環境中微塑膠可以長存，甚至被生物攝取進入食物鏈，累積在消費者身上，造成個體、族群、食物鏈和生態系的風險(Scherer et al., 2017)。蚤狀溞(*Daphnia pulex*) 屬於蜉蝣型節肢動物，為水域生態系中重要的初級消費者，扮演著生態系中物質循環及能量傳遞的要角，對水質變化敏感，因此族群狀況常作為監測水域環境變化的重要指標（張婷婷，2014）。因此我們選擇蚤狀溞進行實驗，探討 PVC 塑膠微粒對於圈養環境中蚤狀溞的生理、生殖及族群晝夜遷徙（Diel vertical migration）行為之影響，藉以評估對進入食物鏈可能的衝擊，並尋求改善解決的方法。

貳、研究目的

- 一、探討 PVC 對蚤狀溞生理（存活率、心跳率、趨光行為）的影響
- 二、探討 PVC 對蚤狀溞生殖（子代數量、子代體長）的影響
- 三、探討 PVC 對蚤狀溞晝夜垂直遷徙行為的影響及改善方式

參、文獻回顧

塑膠微粒在水中無法完全被分解，只能分為更小的微塑膠，附著在浮游生物的食物上被浮游生物和貝類吸收而進入食物鏈(Thompson, 2004)。常見的塑膠材質中，聚苯乙烯(PS)屬於「非結晶性原料」，可達到 90%的透光度，比聚氯乙烯(PVC) 73%的透光度高；密度(1.05 g/mL)小的 PS 懸浮於水中，而密度(1.35-1.5 g/mL)大的 PVC 則沉澱水中，不同塑膠材質在環境中的分布及造成的影響也不同。例如 12.5 $\mu\text{g/mL}$ PS 濃度會導致大型蚤(*D. magna*)的游泳活動顯著增加、趨光行為延長、後代的平均數量顯著增加(De Felice et al., 2019)。30 $\mu\text{g/mL}$ PS 濃度則會導致 *D. magna* 消化道阻塞、體型下降(Eltemsah and Bøhn, 2019)。若將大型蚤(*D. magna*)暴露於

2 μm 、100 nm 兩種粒徑的 PS (1 mg/L) 中 24 小時，兩種顆粒都很容易被攝入，但 2 μm 粒徑的攝取量是 100 nm 粒徑的五倍。奈米尺寸範圍內的顆粒對 *D. magna* 的潛在危害更大(Rist et al., 2017)。

生活於海洋、湖泊環境的生物，會在垂直的空間分布上，具有隨晝夜週期變化現象(DVM)。對於浮游生物而言，DVM 的目的可能在於避開可見光或紫外光的傷害、避免被捕食及尋找較適當的溫度利於生存，大概可歸納為三種模式，1. Nocturnal migration：日間在深層、夜間在表層；2. Twilight migration：晨昏在表層、其他時間在深層；3. Reverse migration：日間在表層、夜間在深層（張武昌，2000）。我們改以蚤狀溞(*Daphnia pulex*)為實驗對象，探討在 0.01 mg/L、0.1 mg/L PVC 濃度環境下，是否對蚤狀溞生理、生殖以及蚤狀溞晝夜遷徙行為有影響。

肆、研究設備及器材

項目名稱	型號及規格	用途
數位暨光學複試顯微鏡	品牌：Motic® 型號：BA210E	觀察水蚤
桌上型電腦	一般規格 安裝 Motic Images Plus 軟體	連結數位顯微鏡畫面，拍攝顯微照片及進行顯微測量
光學解剖顯微鏡	品牌：Nikon 型號：SMZ745T	觀察水蚤
藍牙溫照度記錄器	品牌：HOBO® 型號：MX2202	監測飼養環境條件
光譜儀	品牌：Vernier 型號：SpectroVis® Plus	評估小球藻生長情況
藍光觀測儀	品牌：Major Science 型號：MBE-300	照射染色後的 PVC，搭配 580 nm 的琥珀色濾片觀察
塑膠盒	尺寸 13.5 × 9.5 × 5.5 cm	飼養水蚤的容器
量筒	透明玻璃，容量 22 L，高 100 cm	水蚤垂直遷徙實驗的培養管
檯燈	最大亮度約 1800 lux	夜晚用於大型量筒照明設備
手電筒	最大亮度約 25000 lux	水蚤趨光性實驗的光源
小型撈網	網目大小約 0.25 mm	捕捉水蚤的工具

伍、研究過程及方法

一、預備實驗

（一）蚤狀溞(*Daphnia pulex*)養殖及觀察

1. 屬於枝角目(Cladocera)，溞科(Daphniidae)，由專業養殖水蚤市場取得，在複式顯微鏡下對比肛刺上的剛毛（圖 1）型態來確認物種（涂元賢，2001），而非其他同屬相似種。
2. 將蚤狀溞置於水量 300 mL，尺寸 13.5 × 9.5 × 5.5 cm 的塑膠盒內（圖 2），每日固定於 12：30 - 14：00 餵食 15 mL 小球藻，並拍照記錄蚤狀溞生活史。
3. 為了實驗的一致性（降低變因），每次實驗取 20 隻抱卵初期、後期的蚤狀溞培養獲得第一子代(F1)，繼續取 F1 抱卵初期或抱卵後期的蚤狀溞在相同環境培養獲得 F2，再繼續取 F2 抱卵初期或抱卵後期的蚤狀溞在相同環境培養獲得 F3，作為實驗樣本。



（圖 1）蚤狀溞肛刺的特徵（圈處有附櫛）



（圖 2）作為飼養容器的塑膠盒

（二）餌料小球藻(*Chlorella sp.*)的培養

由專業養殖水蚤市場取得做為餌料，以低溫保存，視實驗設計需求適當取量餵食。

(三) 微塑料的觀察

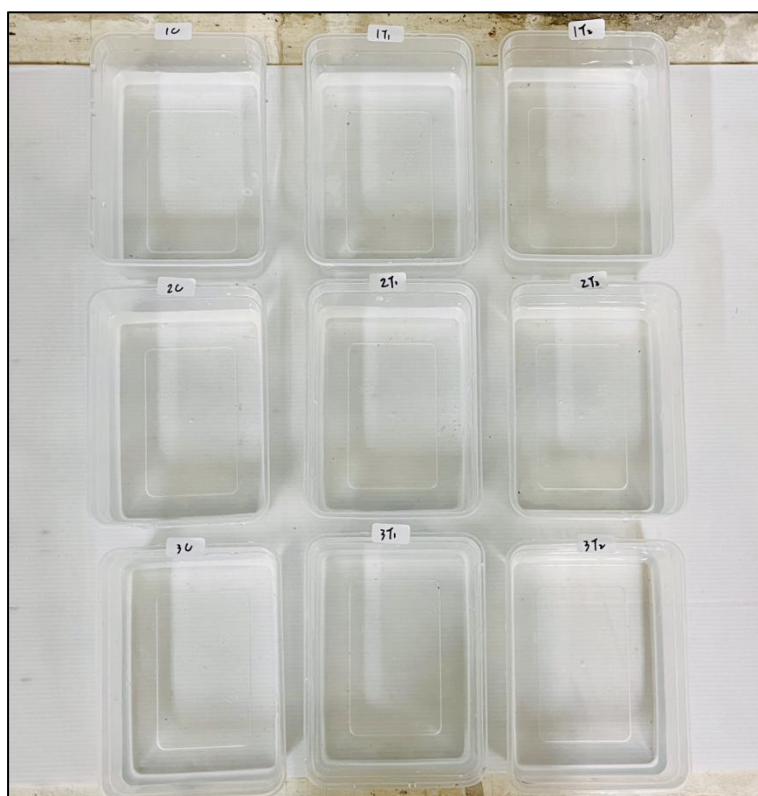
1. 取 2.5 mg 尼羅紅(Nile Red)溶在 100 mL 95%的酒精溶液中，配置完成後需立即用鋁箔紙包覆遮光。
2. 取 PVC 與尼羅紅染劑(2：1)加入試管中，並用鋁箔紙包覆遮光後，搖晃 10 分鐘以均勻染色。將均勻染色後的 PVC 置於玻片上，放在玻璃培養皿上用鋁箔紙包覆遮光，放入烘箱，以 45 °C 烘到玻片上水分乾燥即完成染色。
3. 隨機取 20-30 隻蚤狀蚤 加入 100 mL 的水置於飼養水蚤的塑膠盒(13.5 × 5.5 × 9.5 cm)內，以鋁箔紙包覆遮光，錫箔紙戳洞以便蚤狀蚤透氣。
4. 將烘乾後的 PVC 從玻片上刮下加以磨碎，並直接倒入 3.敘述的塑膠盒內，靜置一日，待蚤狀蚤攝入。
5. 24 小時後，取活著的蚤狀蚤，置於數位複式顯微鏡下，以藍光激發蚤狀蚤體表及體內的 PVC，上端覆蓋一層琥珀色濾鏡（45°角靠近物鏡）使 PVC 呈現紅色螢光，再以 Motic Images Plus 軟體拍照紀錄。

二、PVC 對蚤狀蚤的生理影響

(一) 存活率

1. 取 3 組各 10 隻 F3 的初生蚤（一日齡），分別置於飼養盒(13.5 × 9.5 × 5.5 cm)加 300 mL 的水中培養，作為對照組(C)，第 5 天觀察並記錄蚤狀蚤存活數量。
2. 另取 3 組各 10 隻 F3 的初生蚤，分別置於 300 mL 濃度 0.01 mg/L 的 PVC 溶液飼養，作為實驗組(T1)，第 5 天觀察並記錄蚤狀蚤存活數量。
3. 再取 3 組各 10 隻 F3 的初生蚤，分別置於 300 mL 濃度 0.1 mg/L 的 PVC 溶液飼養，作為實驗組(T2)。第 5 天觀察並記錄蚤狀蚤存活數量。
4. 將上述飼養盒排列於通風窗台，提供自然光週期(圖 3)，實驗期間水溫介於 20 - 26 °C，

每日提供餌料 3 mL 小球藻培養液作為餌料，將各組結果以 T-test 比較分析。



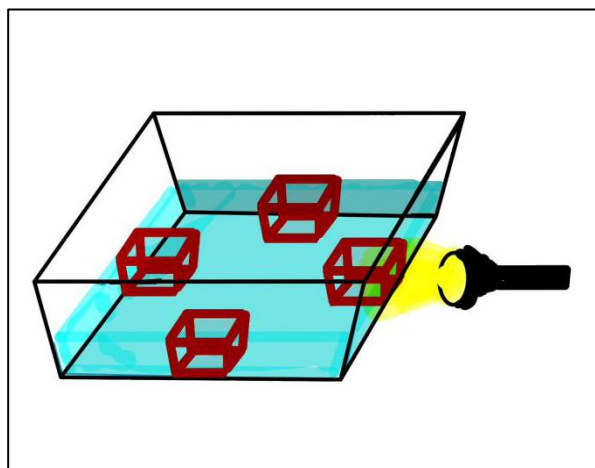
(圖 3) C、T1、T2 各 3 組飼養盒排列

(二) 心率

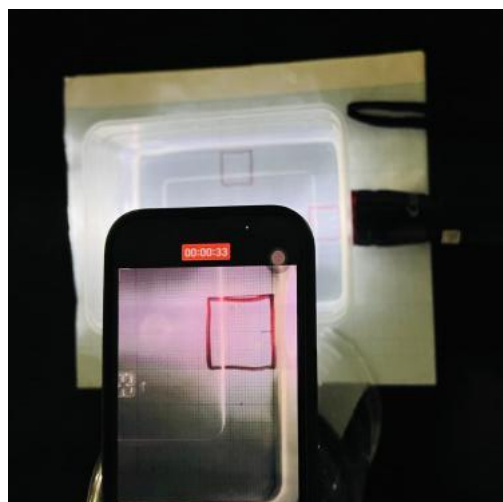
1. 取 3 組各 30 隻 F3 的初生蚤(一日齡)，分別置於飼養盒(13.5 × 9.5 × 5.5 cm)加 300 mL 的水中培養，作為對照組。在實驗進行第 2、第 4 日時，於各組分別隨機取樣 10 隻個體，在複試顯微鏡視野下對焦其心臟位置，利用 iphone13 攝影功能紀錄 10 秒鐘心搏畫面，將記錄到的畫面以 0.1 倍播放速度，計算期間心搏次數作為心率資料，單位(次/10 秒)。
2. 另取 3 組各 30 隻 F3 的初生蚤，分別置於 300 mL 濃度 0.01 mg/L 的 PVC 溶液飼養，作為實驗組(T1)，重複實驗步驟一。
3. 再取 3 組各 30 隻 F3 的初生蚤，分別置於 300 mL 濃度 0.1 mg/L 的 PVC 溶液飼養，作為實驗組(T2)，重複實驗步驟一。

(三) 趨光行為

1. 取 3 組各 10 隻 F3 的初生蚤，分別置於飼養盒(13.5 × 9.5 × 5.5 cm)加 300 mL 的水，水位約 4 cm 高，作為對照組，以方格紙做底部，在飼養盒四個邊中央圈出邊長 2 × 2 × 2 cm 的範圍做為計數區（圖 4），將光源（25000 lux 照度）置於計數區外緊貼盒壁，計數區正上方固定錄影設備紀錄（圖 5），分別於第 1、3、5 天進行趨光實驗，紀錄計數區在 10、25、40 秒時蚤狀蚤數量。
1. 另取 3 組各 10 隻 F3 的初生蚤置於 300 mL 濃度 0.01 mg/L 的 PVC 溶液飼養，重複步驟 1 做為實驗組(T1) 再取 3 組各 10 隻 F3 蚤狀蚤置於 300 mL 濃度 0.1 mg/L 的 PVC 溶液飼養，重複實驗步驟 1，做為實驗組(T2)，將各組結果以 T-test 比較分析。



（圖 4）飼養盒中趨光計數區體積示意圖
（紅色範圍為趨光區）



（圖 5）趨光行為實驗操作圖

三、PVC 對蚤狀蚤的生殖影響

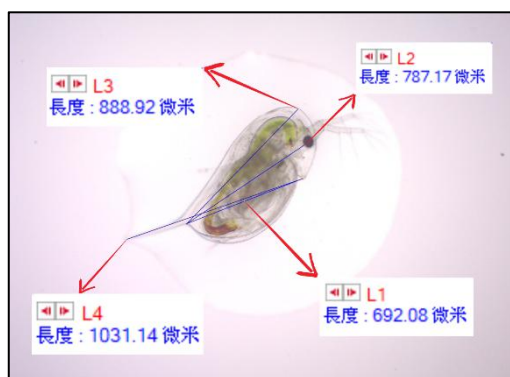
(一) 子代數量

1. 取 3 組各 10 隻 F3 的初生蚤加 300 mL 的水置於飼養盒培養，每日觀察，計數各組初生蚤數量，作為對照組。
2. 另取 3 組各 10 隻 F3 的初生蚤置於 300 mL 濃度 0.01 mg/L 的 PVC 溶液飼養，做為實驗組 (T1)。再取 3 組各 10 隻 F3 蚤狀蚤的初生蚤置於 300 mL 濃度 0.1 mg/L 的 PVC

溶液飼養，做為實驗組(T2)，重複實驗步驟 1。

(二) 子代體長

1. 取 3 組各 30 隻 F3 的初生蚤加 300 mL 的水置於飼養盒培養，於第 7 日在各組分別取樣 30 隻 F1 初生蚤（一日齡）個體，利用數位複式顯微鏡觀察拍攝，並以 Motic Image Plus 進行體長（吻-肛、眼-肛、頭-肛、吻-刺）測量（圖 6），紀錄分析結果（圖 7）。
2. 另取 3 組各 30 隻 F3 的初生蚤置於 300 mL 濃度 0.01 mg/L 的 PVC 溶液飼養，做為實驗組 T1。再取 3 組各 30 隻 F3 的初生蚤置於 300 mL 濃度 0.1 mg/L 的 PVC 溶液飼養，做為實驗組 T2，重複實驗步驟 1。
3. 為了解單一個體受環境影響的變化，自第 15 日起，取對照組、T1、T2 各 5 隻初生蚤，測量後標記並個別培養 4 天，每日測量每隻個體體長（吻-肛、眼-肛、頭-肛及吻-刺）變化。



(圖 6) 蚤狀溞測量部位
(L1:吻-肛、L2:眼-肛、L3:頭-肛、L4:吻-刺)



(圖 7) 選用蚤狀溞吻-肛長作為本研究體長

四、PVC 對蚤狀溞 DVM 模式的影響

(一) 溫度、照度

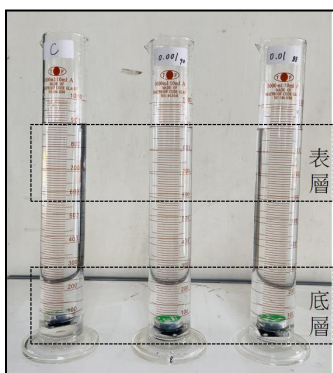
1. 取 10 隻 F3 的初生蚤，加 900 mL 水置於量筒中培養，放到陽光充足的陽台，固定每日中午餵食 3 mL 小球藻。
2. 將藍牙溫照度記錄器(HOBO, MX2202)以束帶固定不銹鋼片沉入量筒底部，每隔 1 小

時記錄培養管底層的溫度及照度，持續 5 天。

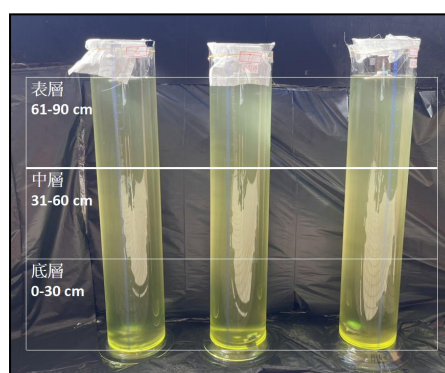
3. 另取 F3 取 10 隻 F3 的初生蚤，加 900mL 濃度 0.01 mg/L 的 PVC 溶液，置於量筒中做為實驗組(T1)，重複實驗步驟 2。再取 10 隻 F3 的初生蚤，加 900mL 濃度 0.1 mg/L 的 PVC 溶液，置於量筒中做為實驗組(T2)，重複實驗步驟 2。
4. 將 C、T1、T2 的溫度、日間照度（6:30-17:30，日出、日落之間）數據用 T-test 進行比較分析。

（二）蚤狀蚤在表層、底層的分布

1. 在實驗(一)期間，每天的日出時間（約 6:30）、日落時間（約 17:30）、中午（約 12:00）及夜間（約 20:00）4 個時段，紀錄三組(C、T1、T2) 量筒表層、底層的個體數量，持續五天。再用卡方檢定進行數據分析比較，量筒上的刻度 0mL-300mL 為底層；601ml-900mL 為表層如（圖 8）。
2. 為了提升使實驗數據的信度，改用垂直空間尺度更大 100cm 高，水量約 22 L 的量筒按刻度分為表層(61-90 cm)、中層(31-60 cm)、底層(0-30 mm)如（圖 9），每一組量筒內放入的初生蚤增加為 30 隻，重複進行前述 1. 的實驗操作。



（圖 8） DVM 實驗量筒(40 cm)



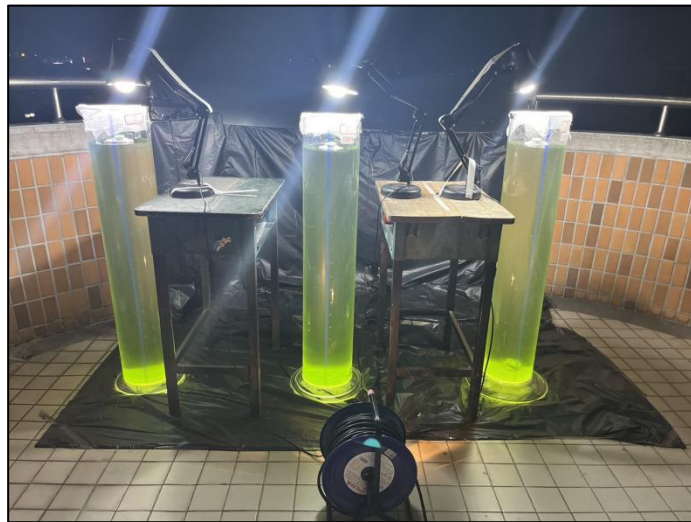
（圖 9） DVM 實驗量筒(100 cm)

（三）小球藻的生長

在實驗(一)期間，每天的日落時間（約 17:30），以取 3 組(C、T1、T2)表層、底層各 3 mL 的水體，利用光譜儀檢測 680nm 的吸光值(OD680)，作為小球藻生長參考資料（蘇惠美等，2012），持續 5 天，再用 T-test 進行數據分析比較。

（四）夜間照明

在前述實驗中，已確認環境中的 PVC 會使蚤狀溞夜晚有較高比例停留在中、深層後，基於蚤狀溞趨光的特性，我們在實驗(二) 2. 的設置中，增加了照度 1800 lux 的燈源，在夜間時開起（圖 10），在開燈前即開燈後 30 分鐘，分別記錄表層、中層、底層的蚤狀溞個體數量，持續 5 天了解額外的光源是否能刺激停留在中、深層的個體游到表層。



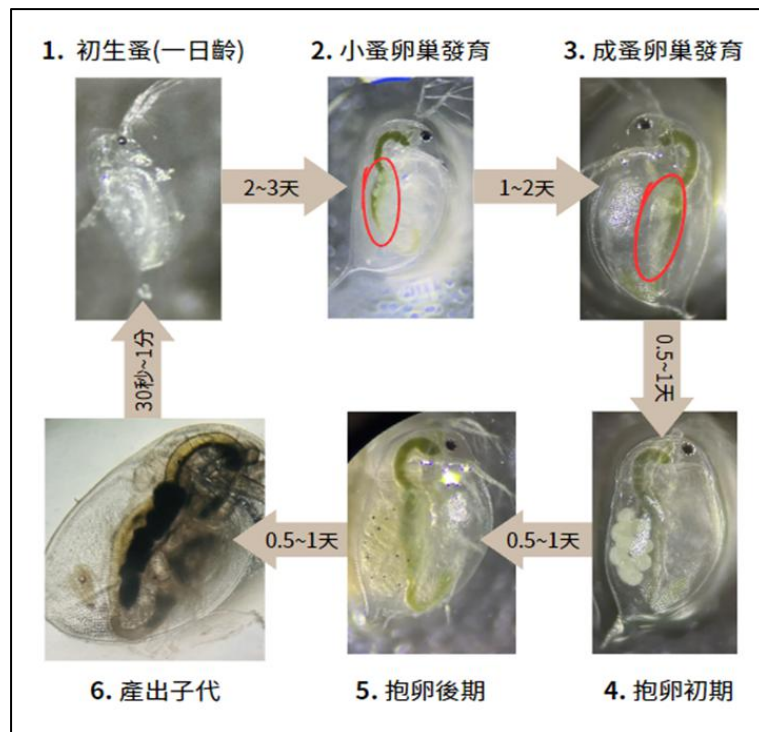
（圖 10）夜間增加照度 1800 lux 的燈源於量筒上方

陸、研究結果

一、預備實驗

（一）蚤狀溞(*Daphnia pulex*)養殖及觀察結果

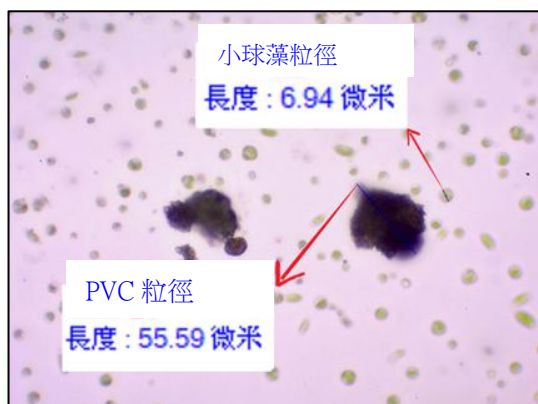
我們將蚤狀溞生活史分為 1.初生蚤、2.小蚤卵巢（紅色圈選）發育、3.成蚤卵巢（紅色圈選）發育、4.抱卵初期、5.抱卵後期、6.產出子代等 6 階段，約 5-7 天一個世代（圖 11），做為未來觀察蚤狀溞生長及生殖階段之參考。



（圖 11）本研究觀察之蚤狀溞生活史 6 階段

（二）餌料小球藻(*Chlorella* sp.)的培養結果

小球藻大小介於 4-8 μm ，可以附著於大顆粒的 PVC 上生長（圖 12），而 PVC 都比蚤狀溞小，可以附著於蚤狀溞體表或被吞食（圖 13）。



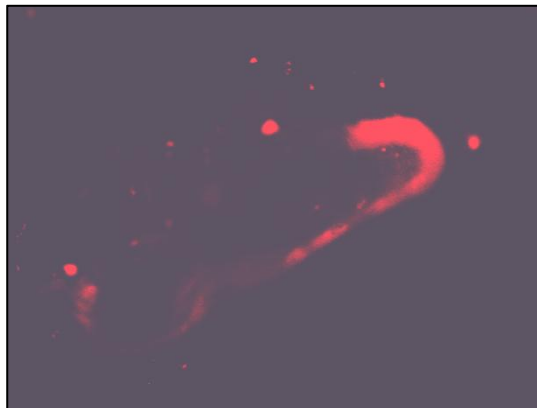
(圖 12) 小球藻及 PVC 長度對比 (400 X)



(圖 13) 蚤狀溞、PVC 及小球藻長度對比 (40 X)

(三) 微塑料的觀察結果

水中 PVC 經攪拌後並不會完全分離，顆粒介於 5 - 500 μm 之間，蚤狀溞體長則介於 1000 - 2000 μm 之間。在光學顯微鏡下可觀察到蚤狀溞吞食 PVC 顆粒，經由尼羅紅染色檢測確認攝入其體內（圖 14）。

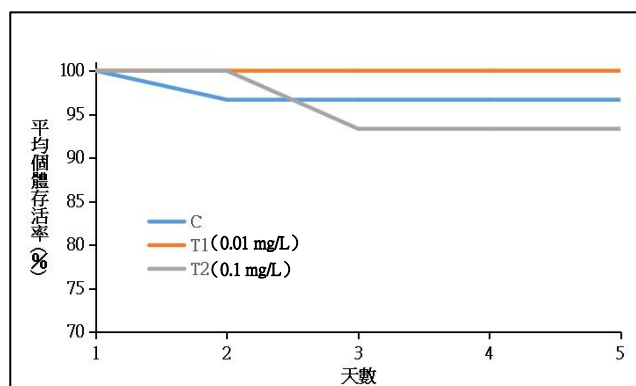


(圖 14) 一般光源、藍光下蚤狀溞攝入 PVC 畫面 (40 X)

二、PVC 對蚤狀蚤的生理影響

(一) 存活率

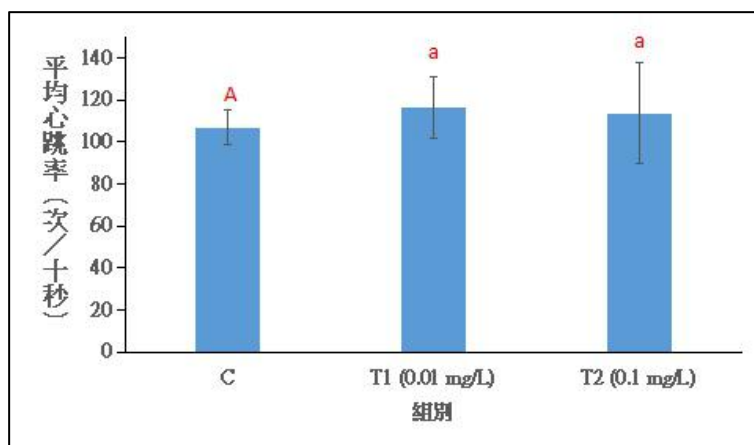
蚤狀蚤的初生蚤暴露在不同濃度 PVC 環境 5 天後，平均個體存活率分別為對照組 (C) 96.7%、實驗組(T1) 100.0%、實驗組(T2) 93.3% (圖 15)，各組間並無明顯差異 ($p > 0.05$)。



(圖 15) 蚤狀蚤於不同濃度 PVC 環境中的平均存活率

(二) 心率

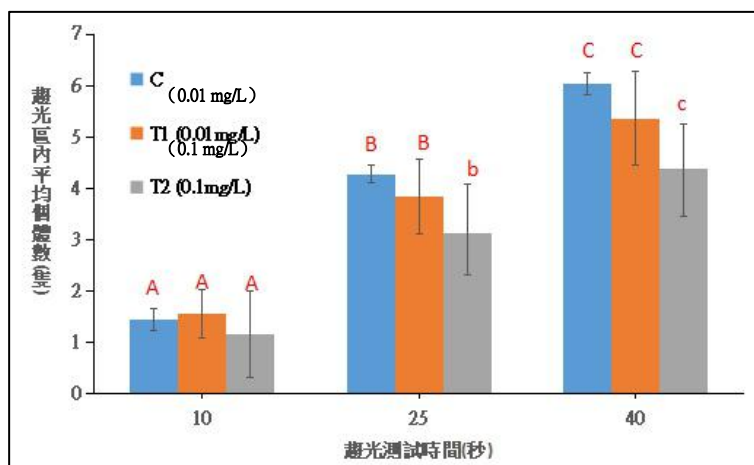
蚤狀蚤初生蚤暴露於不同濃度環境下，平均心跳率對照組(106.9 次／10 秒)明顯低於實驗組 T1(116.4 次／10 秒)、實驗組 T2(113.7 次／10 秒)，有明顯差異($P < 0.05$ ；圖 16)。而實驗組 T1、T2 之間，則沒有明顯差異($P > 0.05$)。



(圖 16) 蚤狀蚤於不同濃度 PVC 環境中的平均心跳率

(三) 趨光行為

蚤狀蚤在暴露於不同濃度 PVC 環境下進行的趨光測試中，各組間在每次測試進入趨光區的個體數量如附表 1。其中將 3 天的測試結果合併計算（圖 17），在測試進行第 25 秒時，實驗組 (T2) 的 3.1 隻明顯低於對照組 (C) 的 4.3 隻；第 40 秒時，實驗組(T2) 的 4.4 隻明顯低於對照組 (C) 的 6.0 隻 (T-test, $p < 0.05$)。

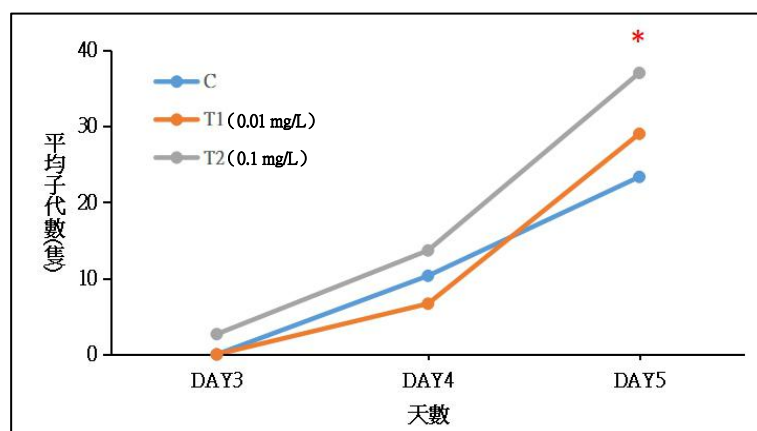


(圖 17) 蚤狀蚤於不同濃度 PVC 環境進入趨光區的平均個體數

三、PVC 對蚤狀蚤的生殖影響

(一) 子代數量

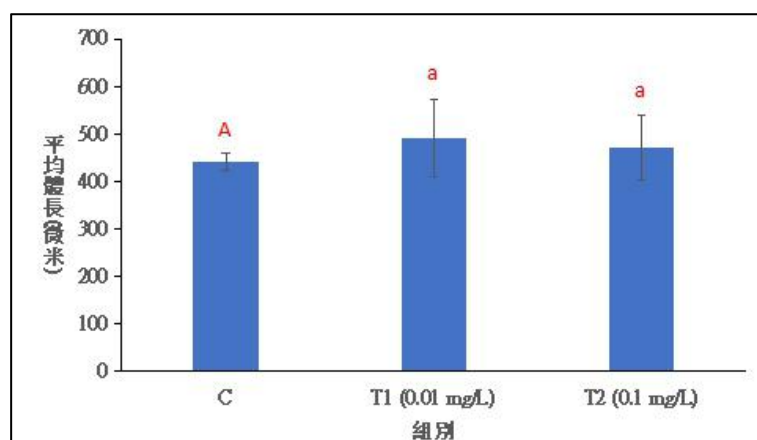
實驗組(T2)的初生蚤自暴露第 3 天即進入抱卵後期開始產出子代，實驗組(T1)與對照組(C)則在第 4 天開始進入抱卵後期產出子代（圖 18）。第 5 天時，平均累計子代(F4)數量 C 為 23.3 隻、T1 為 29.0 隻、T2 為 37.0 隻，其中 T2 明顯多於 C ($p < 0.05$)。



(圖 18) 蚤狀溞於不同濃度 PVC 環境平均子代數量變化

(二) 子代體長

蚤狀溞暴露於不同濃度 PVC 環境第 7 天後，新初生蚤平均體長，對照組(440.5 μm)明顯小於實驗組 T1(491.2 μm)、實驗組 T2(471.8 μm)，有顯著差異 ($p < 0.05$ ；圖 19)。而實驗組 T1、T2 之間，則沒有明顯差異($P > 0.05$)。



(圖 19) 蚤狀溞於不同濃度 PVC 環境產下初生蚤的平均體長

在第 15 日起，每組各取 5 隻 F4 初生蚤標記後，連續 4 天測量其體長變化，C、T1、T2 間平均體長在此 4 天皆無明顯差別（表 1）。

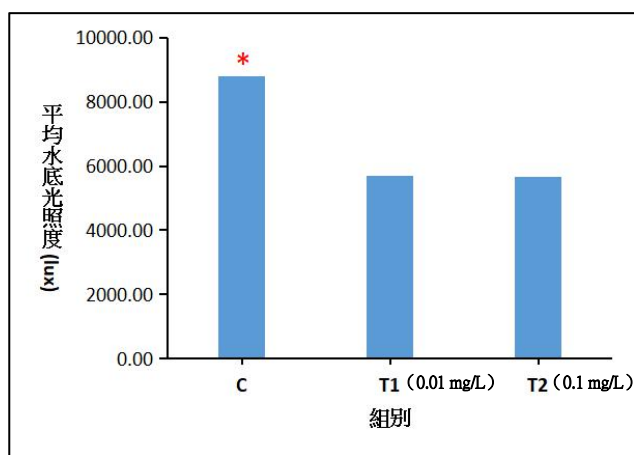
(表 1) 蚤狀溞於不同濃度 PVC 環境子代平均體長變化

組別	N	平均吻肛長 (μm)			
		Day15	Day16	Day17	Day18
C	4-5	684.70	871.58	1112.19	1415.84
T1	(0.01 mg/L)	652.11	826.19	1080.52	1396.47
T2	(0.1 mg/L)	658.55	871.51	1192.85	1465.73

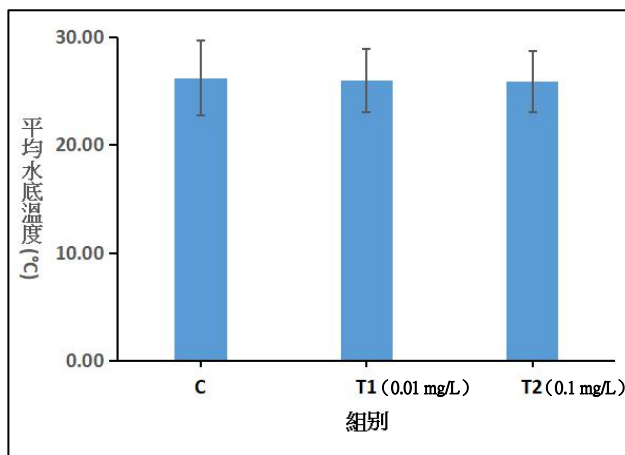
四、PVC 對蚤狀蚤 DVM 模式的影響

(一) 溫度、照度

觀察期間之底層環境溫、照度監測結果如附表 4 及附圖 1。平均日間照度（圖 20）實驗組(T1) 為 5690.3 lux、實驗組(T2)為 5654.4 lux，皆明顯低於對照組(C)的 8785.0 lux ($p < 0.05$)。平均溫度（圖 21）分別為對照組 26.2 °C、T1 為 25.9 °C、T2 為 26.0 °C，各組間無明顯不同($p > 0.05$)。



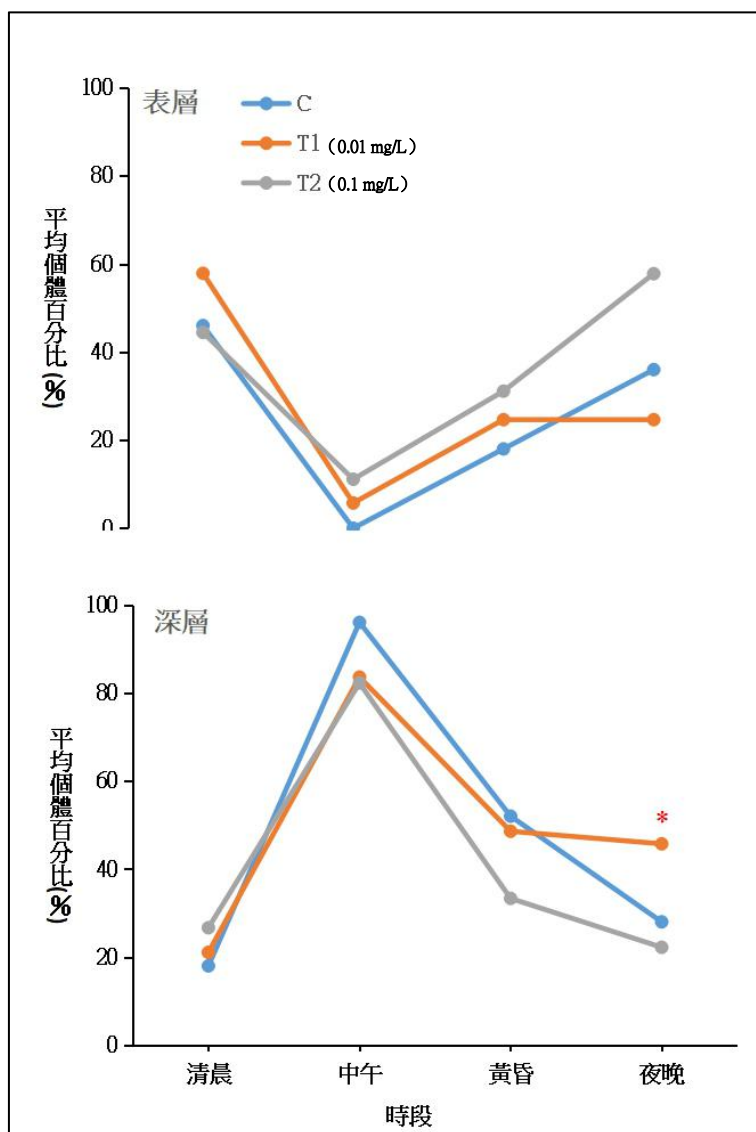
（圖 20）不同濃度 PVC 培養管底層平均水底光照度



（圖 21）不同濃度 PVC 培養管底層平均溫度

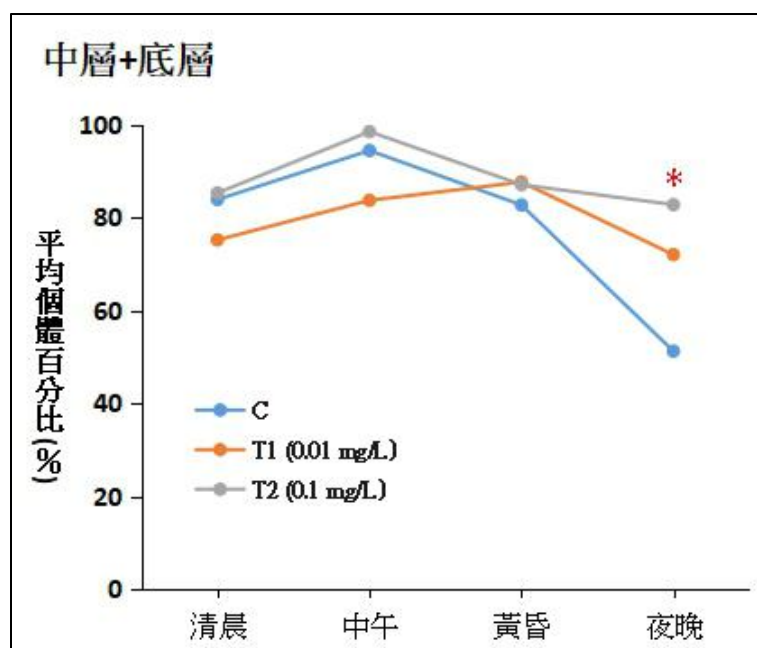
(二) 蚤狀蚤在表層、底層的分布

在 40cm 高垂直空間分布實驗中，蚤狀蚤不同時段停留在表層、底層個體比例如（圖 22），每日分布其況如附表 5，其中在夜間時段，停留在底層的比例實驗組(T1)為 45.7 % 明顯高於對照組(C)的 28.0 % (Chi-Squared Test, $p < 0.05$)。



(圖 22) 蚤狀蚤於不同濃度 PVC 環境各時段分布在不同位置的個體百分比

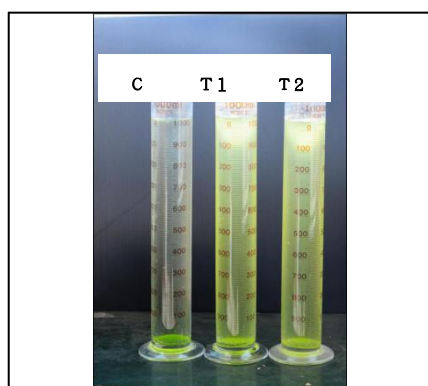
在 100cm 高垂直空間分布實驗中，蚤狀溞在不同時段停留在中、底層個體比例如（圖 23），每日分布其況如附表 6，在夜間時段，停留在中、底層的比例實驗組(T2)為 82.7 % 明顯高於對照組(C)的 51.2 % (Chi-Squared Test, $p < 0.05$)，而實驗組(T1)為 72.0 % 高於對照組(C)但未達顯著。



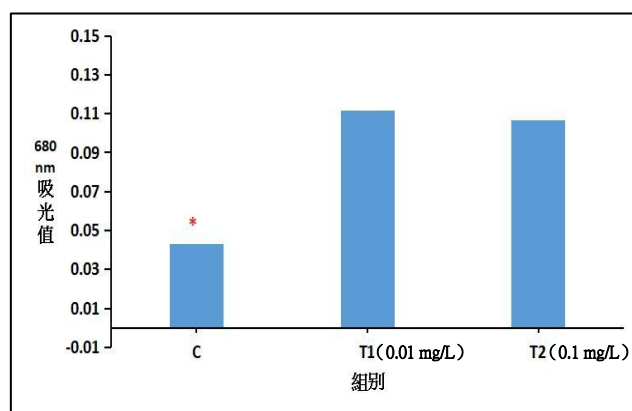
（圖 23）蚤狀溞於 100cm 高量筒分布在中、底層的個體百分比

（三）小球藻的生長

透過監測 680nm 平均吸光值評估小球藻的生長結果（圖 24、25），對照組(0.04 A) 明顯低於實驗組 T1(0.11 A)、T2(0.10 A)($p < 0.05$)。



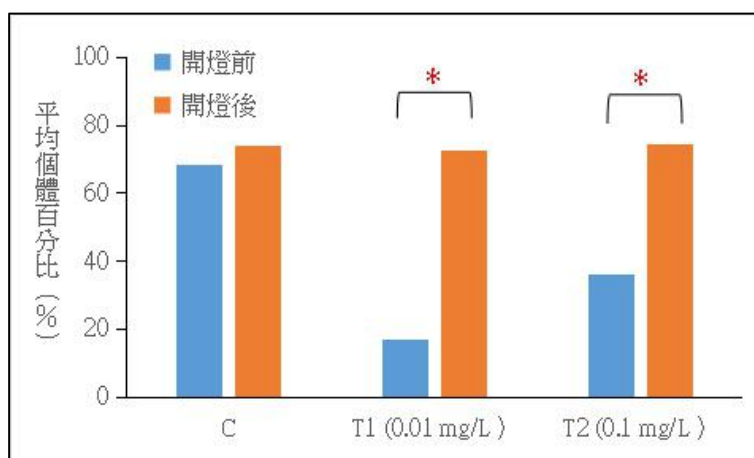
（圖 24）不同濃度 PVC 小球藻的生長結果



（圖 25）不同濃度 PVC 培養管中平均 OD680

(四) 夜晚照明

在夜晚開燈後 30 分鐘，表層個體比例實驗組(T1)為 72.4%，實驗組(T2)為 74.2%，皆明顯高於開燈前 T1: 17.0%；T2: 36.1% (Chi-Squared Test, $p < 0.05$)。對照組(C)在開燈前後則無明顯不同（圖 26）。



(圖 26) 蚤狀溞於大型量筒中，夜間開燈前、後表層平均個體比例

柒、討論與應用

一、PVC 對蚤狀蚤的生理影響

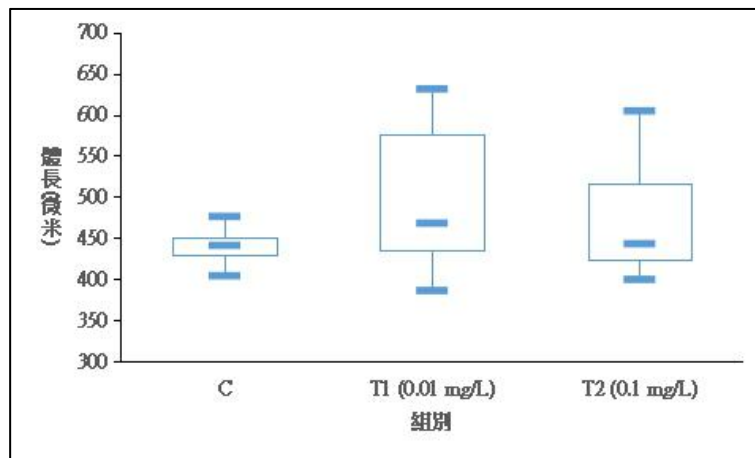
蚤狀蚤 (*Daphnia pulex*) F3 的初生蚤暴露於 0.01 mg/L、0.1 mg/L 濃度的 PVC 一週，各組存活率並沒有差異。這結果相較於相同濃度的 PS，會造成大型蚤 (*Daphnia magna*) 存活率降低 (Martins and Guilhermino, 2018) 不一樣。推測可能與 PS、PVC 的物理、化學性質或蚤狀蚤與大型蚤的物種差異存在相關，必須進一步進行實驗交叉比對才能確認。

暴露於 0.01 mg/L、0.1 mg/L PVC 濃度中，造成蚤狀蚤平均心跳率明顯上升。這與蔡清浩等 (2017) 研究結果，水蚤的生存環境發生變化 (溫度變化、營養狀況變差，或者遭受到有毒物質的影響..等)，會導致其心率和代謝速率上升符合。長期處於這種狀態甚至可能會導致水蚤的壽命縮短，或者影響其繁殖能力 (蔡清浩等，2017)。

暴露於 0.01 mg/L PVC 濃度時，蚤狀蚤趨光行為有明顯的下降，此結果與 PS 會影響大型蚤活動能力相符合 (Zebrowski et al., 2022)。推測蚤狀蚤攝入 PVC 微塑膠後，雖不立即致死，但趨光行為下降，可能造成被捕食機會改變，影響微塑膠進入食物鏈流轉。

二、PVC 對蚤狀蚤的生殖影響

蚤狀蚤在 0.1 mg/L 濃度 PVC 環境中培養 (T2)，提前進入生殖階段，子代數量高於對照組，這與生物遭遇環境變化時，可能改變生殖策略來增加族群的適應能力相符合 (Zebrowski et al., 2022)。從體長資料分布來分析，實驗組 T1、T2 的子代體長較對照組有離散程度更大的趨勢 (圖 27)。我們認為，蚤狀蚤在 0.1 mg/L 濃度 PVC 中，會以子代數量增加、體型差異性變大的生殖策略，來提高族群適應機會。

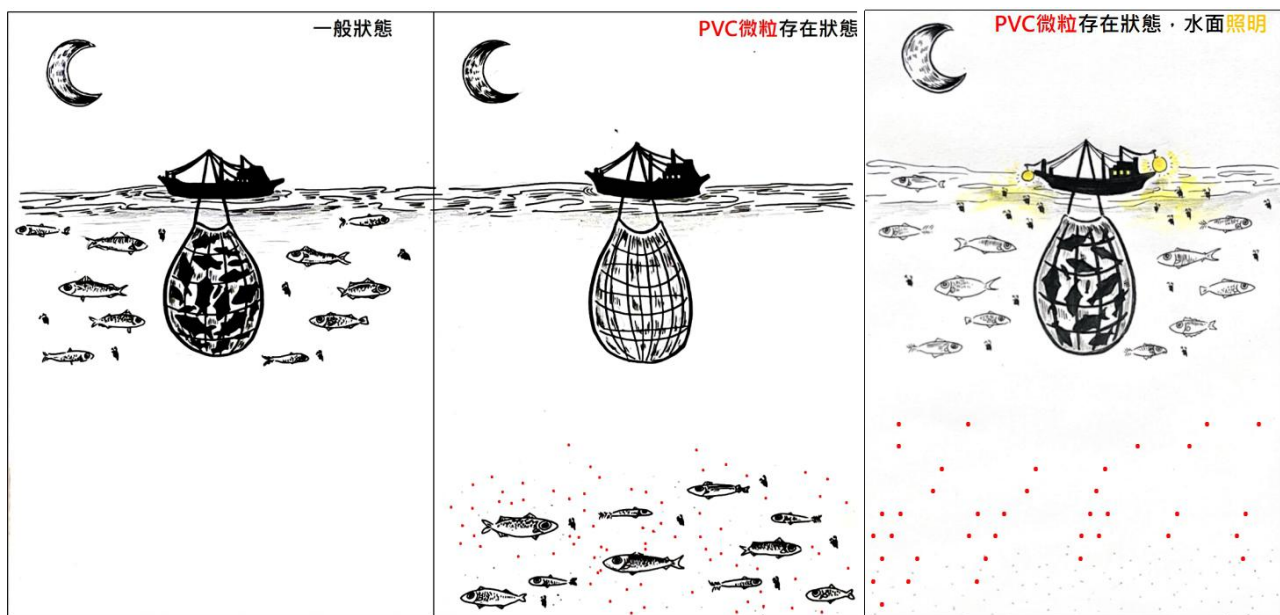


(圖 27) 蚤狀蚤於不同濃度 PVC 環境 7 天初生蚤體長分布

三、PVC 對蚤狀蚤 DVM 模式的影響

蚤狀蚤在夜晚有較高比例分布於培養管表層、日間則傾向於底層，屬於 Nocturnal migration 之 DVM 模式（張武昌，2000）。在有 PVC 的環境中，蚤狀蚤夜晚分布於培養管表層比例較低，中、底層的分布卻明顯高於對照組。這可能與小球藻生長狀況較盛，且會附著在屬於沉澱型微塑膠 PVC 上，導致蚤狀蚤夜晚有較高比例停留在底層，其他研究也有發現當環境中出現適當濃度的微塑膠有促進藻類生長現象（Canniff and Hoang, 2018）。

本研究發現當水中出現 PVC 微粒會影響了小球藻的生長與分布，直接地改變了蚤狀蚤的 DVM 模式，這種改變水中生物分布的效應，有機會延伸到食物鏈後端高級的消費者分布模式，進而造成漁獲量減少的可能，但是根據最後夜間照明實驗結果發現，若在水面增加照明，可刺激 PVC 環境中停留在底層的蚤狀蚤向上移動，似乎有助改善因環境 PVC 汙染所帶來降低漁獲的問題（圖 28）。



(圖 28) PVC 微粒改變水中生物分布的效應對於漁業潛在的影響及可能的改善措施

捌、結論

- 一、0.01mg/L 、0.1mg/L PVC 濃度環境不會影響蚤狀蚤的存活率、但會使其心跳率上升，而 0.1mg/L PVC 濃度會降低蚤狀蚤的趨光行為。
- 二、0.1mg/L PVC 濃度環境會使蚤狀蚤提前進入生殖階段，子代數量高於對照組，且 0.01mg/L 、0.1mg/L PVC 濃度環境的初生蚤體長有離散程度大的趨勢。
- 三、蚤狀蚤 DVM 屬於日間在深層、夜間在表層的 Nocturnal migration 模式，但在 PVC 環境中，蚤狀蚤夜晚較高比例於中、底層，而光照可改善此現象。

玖、參考文獻資料

- 涂元賢（2001）。台灣淡水產枝角類之分類研究〔未出版之碩士論文〕。國立新竹師範學院。
- 張婷婷（2014）。以水蚤毒性試驗評估不同氨氮、TMAH 濃度與環境因子之相關性研究。' 創新水科技研發服務網。
- <https://www.itriwater.org.tw/Eng/Technology/More?id=70>
- 張武昌（2000）。浮游動物的晝夜垂直遷移。海洋科學，24(11)，18-21。
- 梁光裕等（1995）。高中生物科實驗教學手冊生物活體培養技術。台灣省教育廳。159-177。
- 蔡清浩、何文輝、彭自然、李鮮鮮、崔麗香、張奧（2017）。pH 和鹽度對大型蚤心率和攝食行為的影響。上海海洋大學學報 26(3)，415-421。
- 蘇惠美、鄭凱澤、王淑欣、陳紫嫻（2012）。以吸光值推估擬球藻之乾重。水產研究 20(2)，49-57。
- Canniff, P. M., & Hoang, T. C. (2018). Microplastic ingestion by *Daphnia magna* and its enhancement on algal growth. Sci. Total Environ, 633, 500-507.
- De Felice, B., & Sabatini, V., & Antenucci, S., & Gattoni, G., & Santo, N., & Bacchetta, R., & Ortenzi, M.A., & Parolini, M. (2019). Polystyrene microplastics ingestion induced behavioral effects to the cladoceran *Daphnia magna*. Chemosphere, 231, 423-431.
- Eltemsah, Y. S., & Bøhn, T. (2019). Acute and chronic effects of polystyrene microplastics on juvenile and adult *Daphnia magna* Environ. Pollut, 254, 112919.
- Martins, A., & Guilhermino, L. (2018). Transgenerational effects and recovery of microplastics exposure in model populations of the freshwater cladoceran *Daphnia magna* Straus. Science of The Total

Environment, 631, 421-428.

Organization for Economic Co-operation and Development. (2022). Global plastics outlook: Economic drivers, environmental impacts and policy options. Paris: OECD Publishing.

Rist, S., & Baun, A., & Hartmann, N. B. (2017). Ingestion of Micro- and Nanoplastics in *Daphnia Magna* - Quantification of Body Burdens and Assessment of Feeding Rates and Reproduction, Environ. Pollut, 228, 398-407.

Rochman, C. M., & Browne, M. A., & Underwood, A. J., & van Franeker, J. A., & Thompson, R. C., & Amaral-Zettler, L. A. (2016). The ecological impacts of marine debris: unraveling the demonstrated evidence from what is perceived. Ecology, 97(2), 302-312.

Saeedi, M. (2023). How microplastics interact with food chain: a short overview of fate and impacts. J. Food Sci. Technol, 2023, 1-11.

Scherer, C., & Brennholt, N., & Reifferscheid, G., & Wagner, M. (2017). Feeding type and development drive the ingestion of microplastics by freshwater invertebrates Sci. Rep., 7(1), 17006.

Thompson, R. C. (2004). Lost at sea: where is all the plastic? Science, 304 (5672), 838,.

Zebrowski, M. L., & Babkiewicz, E., & Błażejewska, A., & Pukos, S., & Wawrzeńczak, J., & Wilczynski, W., & Zebrowski, J., & Ślusarczyk, M., & Maszczyk, P. (2022). The Effect of Microplastics on the Interspecific Competition of *Daphnia*. Environ. Pollut, 313, 120-121.

附件

附表 1、蚤狀蚤在不同濃度 PVC 環境的第 1、3、5 天各趨光區個體數

暴露 天數	組別	飼養盒	進入趨光區個體數											
			10秒				25秒				40秒			
			左	上	右	下	左	上	右	下	左	上	右	下
1	C	1	3	1	1	2	5	5	7	3	8	8	7	5
		2	4	2	0	1	5	5	4	5	8	6	6	6
		3	1	0	2	2	2	0	5	3	3	4	5	4
	T1	1	1	1	1	1	5	2	3	2	7	2	5	3
		2	5	1	2	0	8	6	4	1	8	6	6	5
		3	0	1	2	0	1	4	3	2	3	7	4	4
	T2	1	2	0	0	0	5	1	4	2	6	2	4	2
		2	2	0	0	1	2	1	2	4	3	3	3	4
		3	0	1	2	0	2	2	3	0	5	4	4	2
3	C	1	2	0	0	3	7	6	3	5	8	9	5	7
		2	0	1	1	1	5	5	3	4	5	5	6	5
		3	0	3	2	1	3	5	3	3	5	7	4	6
	T1	1	0	0	1	1	2	2	3	3	3	5	4	5
		2	0	1	0	3	3	4	3	5	4	5	5	6
		3	1	1	2	1	2	4	4	3	4	5	6	5
	T2	1	1	0	0	2	1	3	4	3	3	3	5	4
		2	3	1	2	2	4	5	5	2	5	6	7	3
		3	2	1	1	0	2	3	4	4	2	6	4	4
5	C	1	3	1	1	1	4	6	3	5	7	8	5	8
		2	0	1	3	2	4	4	3	4	4	5	4	5
		3	0	4	1	2	4	6	5	5	6	8	8	7
	T1	1	5	3	1	3	7	4	4	6	7	6	5	7
		2	0	2	3	2	3	5	5	5	4	8	6	6
		3	3	3	3	2	4	5	5	6	5	7	7	8
	T2	1	1	1	0	2	2	5	2	4	4	6	4	6
		2	2	3	0	2	5	5	4	5	7	7	6	6
		3	3	2	1	2	3	3	5	2	4	5	5	4

附表 2、蚤狀溲蚤狀溲在不同濃度 PVC 環境第 7 天初生蚤吻肛長

組別	C	T1	T2
	467.1	466.8	566.1
	410.0	469.2	558.0
	476.1	405.5	548.3
	417.3	618.8	495.1
	428.6	599.7	434.9
	442.6	475.9	446.3
	455.4	388.3	454.4
	429.4	390.9	413.0
	468.2	605.4	418.4
	419.0	445.0	415.4
	438.0	478.6	399.6
	443.3	492.7	450.1
	450.5	432.8	432.2
	440.6	446.8	599.1
吻肛長	463.5	445.4	411.4
(μ m)	409.5	429.1	429.4
	435.6	492.5	604.5
	443.1	447.2	474.7
	449.0	572.4	422.8
	450.1	395.4	430.8
	433.5	438.6	466.0
	434.6	577.7	411.9
	436.2	386.0	439.6
	466.6	442.5	434.0
	427.3	590.2	447.4
	454.7	398.7	590.0
	441.5	631.1	602.3
	404.1	625.0	423.6
	448.7	573.4	522.3
	431.8	576.0	412.7
平均值	440.5	491.2	471.8
標準差	± 18.2	± 82.0	± 67.3

附表 3、蚤狀溼在不同濃度 PVC 環境的初生蚤吻肛長變化

組別	個體 序號	吻肛長 (μm)				成長量 (μm)
		Day15	Day16	Day17	Day18	
C	1	732.78	920.02	死亡	死亡	-
	2	692.08	888.67	1120.75	1441.85	749.77
	3	695.76	834.25	1133.16	1430	734.24
	4	652.73	833.47	1093.87	1392.69	739.96
	5	650.13	881.48	1100.97	1398.83	748.7
T1	1	630.19	797.5	1040.63	1362.65	732.46
	2	666.5	833.71	1070.72	1388.59	722.09
	3	623.02	789.83	1045.66	1341.84	718.82
	4	686.29	866.25	1151.87	1467.29	781
	5	654.54	843.68	1093.7	1421.98	767.44
T2	1	633.75	926.18	1169.69	1408.29	774.54
	2	739.47	933.45	1247.38	1479.03	739.56
	3	721.13	896.81	1163.05	1431.91	710.78
	4	602.53	795.23	1319.53	1617.3	1014.77
	5	595.86	805.86	1064.62	1392.14	796.28

附表 4、晝夜遷徙行為觀察期間之底層環境溫、照度監測結果 (a)

日期	時間(h)	照度(lux)			溫度(°C)		
		C	T1	T2	C	T1	T2
12月26日	00:00	0	0	0	23.72	23.81	23.85
	01:00	0	0	0	23.68	23.72	23.72
	02:00	0	0	0	23.21	23.34	23.34
	03:00	0	0	0	23.16	23.21	23.25
	04:00	0	0	0	23.08	23.21	23.12
	05:00	0	0	0	23.03	23.12	23.12
	06:00	0.77	0.76	0.58	23.03	23.12	23.12
	07:00	539.84	424.48	449.12	23.03	23.03	23.08
	08:00	1827.2	1444.48	1536	23.21	23.21	23.25
	09:00	6282.24	4830.72	4673.28	24.28	24.06	24.06
	10:00	31057.92	16947.2	16517.12	28.18	26.64	26.51
	11:00	11432.96	9041.92	9646.08	29.04	27.92	28.05
	12:00	9720.32	7616	8412.16	29.21	28.61	28.74
	13:00	13086.72	10572.8	16701.44	28.95	28.65	28.95
	14:00	8967.68	6824.96	8849.92	29.04	28.95	29.13
	15:00	5946.88	4401.92	5475.84	28.74	28.7	28.74
	16:00	2135.68	1531.52	1958.4	28.35	28.48	28.57
	17:00	266.4	193.36	221.04	26.81	26.94	26.9
	18:00	8.59	4.4	2.33	26.08	26.17	26.21
	19:00	0.58	0.19	0	25.57	25.69	25.74
	20:00	1.55	0.38	0.77	25.18	25.27	25.31
	21:00	1.16	0.38	0.77	25.09	25.14	25.18
	22:00	0	0	0	24.66	24.75	24.79
	23:00	0	0	0	24.66	24.71	24.66
12月27日	00:00	0	0	0	24.19	24.24	24.32
	01:00	0	0	0	24.19	24.28	24.28
	02:00	0	0	0	23.89	24.02	23.98
	03:00	0	0	0	23.16	23.34	23.34
	04:00	0	0	0	22.86	22.99	22.99
	05:00	0	0	0	22.61	22.78	22.78
	06:00	0.58	0.38	0.38	22.56	22.69	22.69
	07:00	584.64	402.08	491.04	22.82	22.91	22.86
	08:00	3141.12	2106.24	2540.8	23.51	23.42	23.46
	09:00	24576	25538.56	13358.08	29.9	28.27	27.15
	10:00	37468.16	12605.44	15011.84	34.66	30.07	29.47
	11:00	14187.52	10946.56	16302.08	33.16	30.92	30.84
	12:00	9640.96	8258.56	11197.44	32.52	31.79	32.04
	13:00	5445.12	3063.04	7769.6	32.09	31.92	32.22
	14:00	4177.92	2268.16	5007.36	31.27	31.27	31.53
	15:00	4040.96	2703.36	5501.44	30.93	30.89	31.1
	16:00	2578.56	1196.16	2419.2	30.2	30.2	30.5
	17:00	208.56	88.56	120.72	28.27	28.48	28.48
	18:00	0.19	0	0	27.15	27.24	27.24
	19:00	1.55	0.57	1.16	26.25	26.42	26.47
	20:00	0	0	0	25.61	25.74	25.78
	21:00	0	0	0	24.75	24.88	24.88
	22:00	0	0	0	24.45	24.54	24.54
	23:00	0	0	0	24.11	24.15	24.11
12月28日	00:00	0	0	0	23.68	23.76	23.81
	01:00	0	0	0	23.72	23.85	23.85
	02:00	0	0	0	23.59	23.72	23.76
	03:00	0	0	0	23.08	23.25	23.25
	04:00	0	0	0	22.73	22.91	22.86
	05:00	0	0	0	22.52	22.69	22.69
	06:00	1.16	0.57	0.77	22.56	22.73	22.73
	07:00	2212.48	1217.6	1772.8	23.12	22.99	23.12
	08:00	16015.36	7252.48	7191.04	28.31	25.99	26.17
	09:00	30760.96	20244.48	12467.2	32.94	28.83	29.17
	10:00	44769.28	11258.88	11217.92	36.38	30.16	30.24
	11:00	11632.64	9379.84	12625.92	32.94	30.71	30.93
	12:00	6289.92	4995.84	6087.68	31.1	30.59	31.06
	13:00	6947.84	6464	4512	30.54	30.59	31.01
	14:00	4099.84	4056.32	5611.52	29.98	30.16	30.59
	15:00	3073.28	2990.08	5818.88	29.6	29.81	30.24
	16:00	1877.12	1750.4	2542.72	28.65	28.87	29.26
	17:00	187.36	168.64	173.12	26.85	27.11	27.28
	18:00	3.11	2.68	3.31	25.69	25.87	25.99
	19:00	0	0	0	25.39	25.52	25.57
	20:00	0	0	0	24.79	24.97	25.01
	21:00	0	0	0	24.06	24.32	24.41
	22:00	0	0	0	23.68	23.81	23.85
	23:00	0	0	0	23.34	23.42	25.51

附表 4、晝夜遷徙行為觀察期間之底層環境溫、照度監測結果 (b)

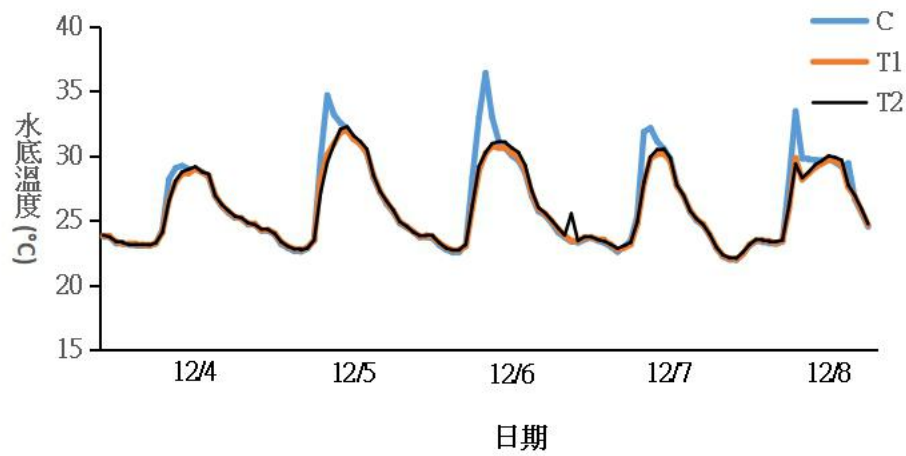
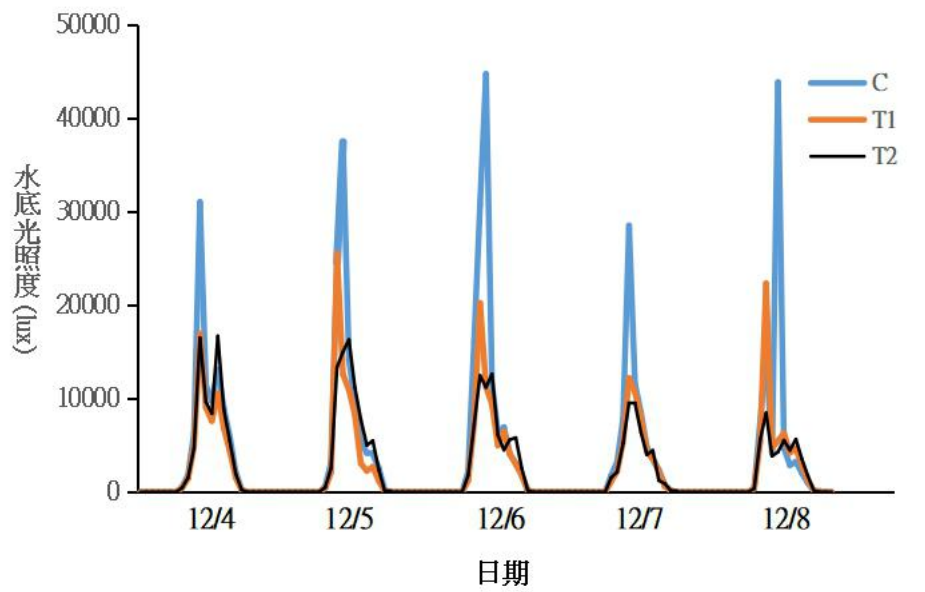
12月29日	00:00	0	0	0	23.25	23.38	23.42
	01:00	0	0	0	23.51	23.68	23.72
	02:00	0	0	0	23.64	23.72	23.72
	03:00	0	0	0	23.42	23.51	23.51
	04:00	0	0	0	23.25	23.42	23.38
	05:00	0	0	0	22.95	23.12	23.12
	06:00	0.58	0.38	0.38	22.56	22.73	22.82
	07:00	1784.96	1125.76	1546.24	22.95	22.86	23.03
	08:00	3205.4	2217.6	2149.76	23.42	23.12	23.29
	09:00	7846.4	5411.84	5200.64	25.35	24.71	24.88
	10:00	28538.88	12200.96	9533.44	31.83	27.8	27.93
	11:00	11601.92	10695.68	9520.64	32.13	29.77	29.9
	12:00	8529.92	7959.04	6387.2	31.1	30.11	30.46
	13:00	4792.32	4294.4	4006.4	30.54	30.16	30.54
	14:00	3592.96	3511.04	4446.72	29.77	29.56	29.81
	15:00	2382.08	2188.8	1239.36	27.75	27.62	27.71
	16:00	794.88	601.12	904.96	26.85	26.9	26.94
	17:00	167.68	150.96	138.84	25.65	25.78	25.74
	18:00	0	0	0	24.97	25.09	25.09
	19:00	0	0	0	24.58	24.71	24.66
	20:00	0	0	0	23.81	23.89	23.89
	21:00	0	0	0	22.82	22.91	22.91
	22:00	0	0	0	22.18	22.26	22.31
	23:00	0	0	0	21.96	22.05	22.09
12月30日	00:00	0	0	0	21.92	21.96	22.05
	01:00	0	0	0	22.39	22.39	22.52
	02:00	0	0	0	23.03	23.12	23.12
	03:00	0	0	0	23.38	23.46	23.51
	04:00	0	0	0	23.29	23.42	23.42
	05:00	0	0	0	23.21	23.38	23.34
	06:00	0.19	0.38	0.19	23.16	23.25	23.34
	07:00	362.24	422.08	369.12	23.34	23.42	23.46
	08:00	7516.16	5352.96	5583.36	28.05	25.87	26.12
	09:00	14822.4	22343.68	8468.48	33.42	29.81	29.34
	10:00	4190.72	4714.24	3847.68	29.77	28.14	28.27
	11:00	43880.16	5501.44	4296.96	29.68	28.61	28.74
	12:00	4707.84	6297.6	5532.16	29.64	29.08	29.3
	13:00	2880	4217.6	4490.24	29.56	29.38	29.6
	14:00	3243.52	4668.16	5657.6	29.77	29.64	29.98
	15:00	2044.16	2888.96	3548.16	29.47	29.56	29.86
	16:00	983.04	1278.08	1754.24	29.13	29.3	29.64
	17:00	128.52	165.6	161.64	29.41	27.54	27.71
	18:00	0.19	0	0	26.6	26.81	26.9
	19:00	0.19	0	0	25.57	25.74	25.87
	20:00	0	0	0	24.49	24.62	24.71

附表 5、蚤狀溲在各時段分布於培養管各層的個體比例

暴露 天數	組別	表層				中層				底層				N
		清晨	中午	黃昏	夜晚	清晨	中午	黃昏	夜晚	清晨	中午	黃昏	夜晚	
1	C	20.0	0.0	0.0	40.0	60.0	0.0	30.0	50.0	20.0	100.0	70.0	10.0	10
	T1	25.0	0.0	25.0	37.5	25.0	0.0	37.5	25.0	50.0	100.0	37.5	37.5	8
	T2	11.1	0.0	22.2	66.7	55.6	0.0	33.3	22.2	22.2	100.0	44.4	11.1	9
2	C	50.0	0.0	50.0	100.0	50.0	10.0	30.0	0.0	0.0	90.0	20.0	0.0	10
	T1	50.0	0.0	12.5	0.0	37.5	25.0	25.0	37.5	12.5	75.0	62.5	62.5	8
	T2	100.0	55.6	100.0	100.0	0.0	33.0	0.0	0.0	0.0	11.1	0.0	0.0	9
3	C	80.0	0.0	10.0	0.0	20.0	0.0	40.0	70.0	0.0	100.0	50.0	30.0	10
	T1	85.7	0.0	28.6	14.3	14.3	0.0	28.6	28.6	0.0	100.0	42.9	57.1	7
	T2	66.7	0.0	0.0	55.6	11.1	0.0	66.7	22.2	22.2	100.0	33.3	22.2	9
4	C	80.0	0.0	10.0	0.0	10.0	0.0	20.0	40.0	10.0	100.0	70.0	60.0	10
	T1	22.2	0.0	57.1	14.3	33.3	0.0	14.3	14.3	44.4	100.0	28.6	71.4	7
	T2	100.0	0.0	22.2	22.2	0.0	0.0	55.6	44.4	0.0	100.0	22.2	33.3	9
5	C	0.0	0.0	20.0	40.0	40.0	10.0	30.0	20.0	60.0	90.0	50.0	40.0	10
	T1	28.6	28.6	0.0	57.1	28.6	28.6	28.6	42.9	42.9	42.9	71.4	0.0	7
	T2	22.2	0.0	11.1	44.4	33.3	0.0	22.2	11.1	44.4	100.0	66.7	44.4	9

附表 6、蚤狀溲在大型量筒中各時段分布於培養管各層的個體比例

暴露 天數	組別	表層				中層				底層				N
		清晨	中午	黃昏	夜晚	清晨	中午	黃昏	夜晚	清晨	中午	黃昏	夜晚	
1	C	0.0	0.0	0.0	5.0	44.4	33.3	22.2	10.0	55.6	66.7	77.8	85.0	C: 13-146
	T1	6.7	6.7	0.0	11.1	40.0	20.0	6.7	16.7	53.3	73.3	93.3	72.2	
	T2	0.0	0.0	6.3	5.3	37.5	6.3	0.0	5.3	62.5	93.8	93.8	89.5	
2	C	46.7	18.4	43.1	34.0	30.7	53.2	29.9	21.7	22.6	28.3	27.1	44.3	
	T1	58.0	48.7	22.6	38.5	18.2	33.6	20.8	15.4	23.9	17.7	56.6	46.2	
	T2	41.1	6.2	18.0	5.9	14.3	21.6	65.6	23.5	44.6	72.2	16.4	70.6	
3	C				88.5				11.5				0.0	T1: 10-88
	T1		-		41.7		-		4.2		-		54.2	
	T2				37.5				20.8				41.7	
4	C	0.0	4.0	4.3	53.3	38.5	8.0	8.7	13.3	61.5	88.0	87.0	33.3	T2: 9-61
	T1	0.0	10.0	0.0	16.7	20.0	20.0	29.2	33.3	80.0	70.0	70.8	50.0	
	T2	0.0	0.0	8.3	14.8	26.7	22.2	16.7	14.8	73.3	77.8	75.0	70.4	
5	C	17.9	0.0	21.9	63.2	53.6	8.3	40.6	23.7	28.6	91.7	37.5	13.2	
	T1	34.8	0.0	26.9	32.1	47.8	44.4	53.8	10.7	17.4	55.6	19.2	57.1	
	T2	17.9	0.0	19.2	22.9	53.6	26.7	50.0	25.7	28.6	73.3	30.8	51.4	



附圖 1、晝夜遷徙行為觀察期間之底層環境溫、照度監測結果