

中華民國第 56 屆中小學科學展覽會
作品說明書

高級中等學校組 動物與醫學學科

第三名

052013

渦・光・食・色！群下的秘密

—探討渦蟲個體與群體的游泳行為

學校名稱：國立新竹女子高級中學

作者： 高二 彭慧文 高二 曾昀婷 高二 劉力文	指導老師： 張淳瑋 陳 馨
---	-----------------------------

關鍵詞：渦蟲、色光、群體

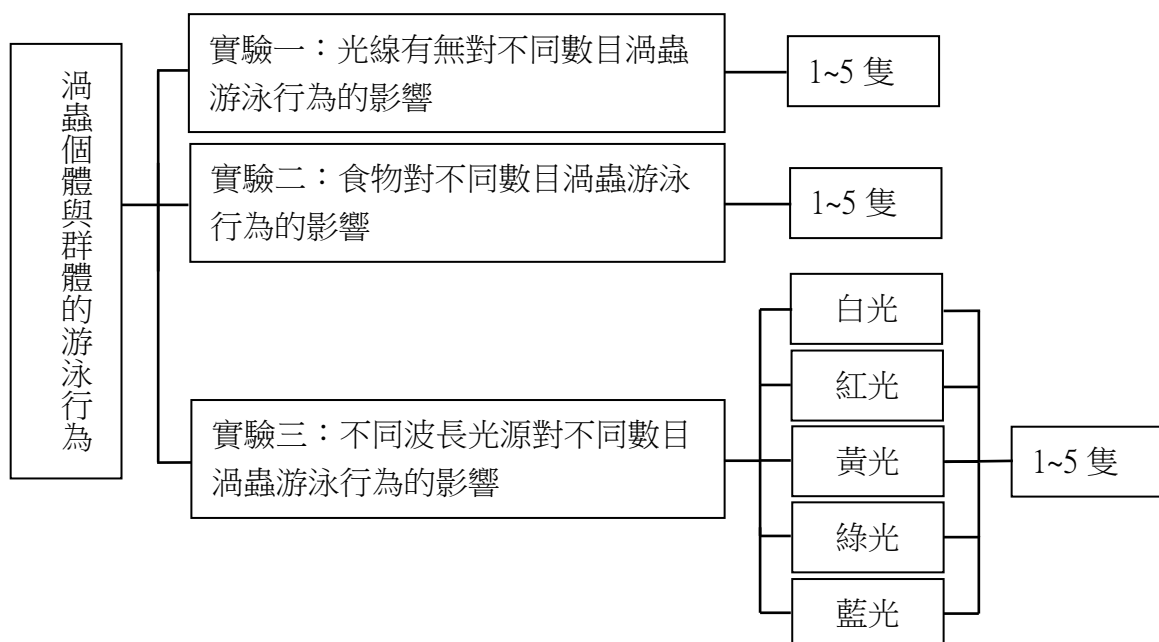
摘要

個體為生物生存的基本單位，而在群體的層次上，往往會導致個體在面對相同刺激時，產生更複雜的行為。在演化上，扁形動物門是首先發展出中樞神經系統(central nervous system)的類群，其中的渦蟲具有明顯的群體活動特性。然而，群體究竟影響了渦蟲的哪些行為？又代表什麼生存意義？我們發現在均勻光線刺激下，渦蟲不論個體或群體，皆會出現沿壁繞行、繞圈或繞 8 字形的游泳方式，可能為探勘環境的行為模式；我們也發現在食物刺激時，渦蟲可能出現群體分工；在不同能量的色光刺激時，渦蟲的游泳路徑、游泳速率、游泳週期和遠離程度皆呈現不同程度的改變。

壹、 研究動機

團結就是力量，群體生活能提高一個物種的存活率，同種的生物有時會為了生存，而捨棄競爭的行為，轉而合作。高一的生物課曾經飼養渦蟲，過程中我們發現渦蟲有群聚在容器壁的現象，便開始好奇「群體」是否影響了他們的行為？若面對相同的刺激，個體與群體所表現的行為會有什麼差異？又渦蟲群體中是否會有分工的現象？在好奇心的驅使之下，我們蒐集渦蟲的相關資料，得知其眼點可以感光，耳狀突起是嗅覺受器，因此設計了模擬各種變因的實驗裝置，探討在光線有無、食物和不同波長光源下，渦蟲個體與群體的游泳行為。

貳、 研究目的



參、 研究器材與設備

一、材料

日本三角渦蟲 (*Dugesia japonica*) 的基本認識

動物界 *Animalia*

扁形動物門 *Platyhelminthes*

渦蟲綱 *Turbellaria*

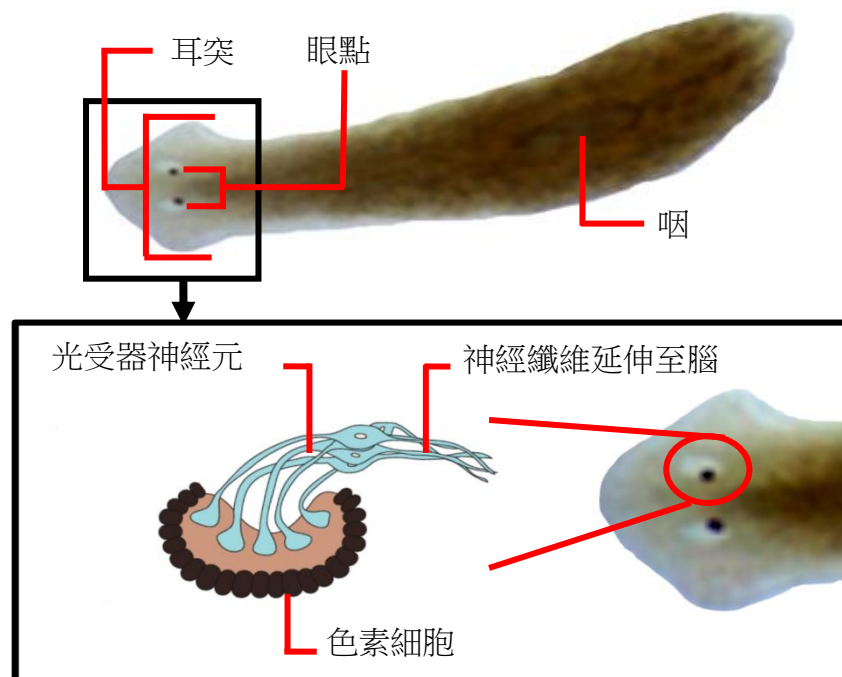
三腸目 *Tricladida*

三角頭渦蟲科 *Dugesiidae*

渦蟲屬 *Dugesia*

日本三角渦蟲 *Dugesia japonica*

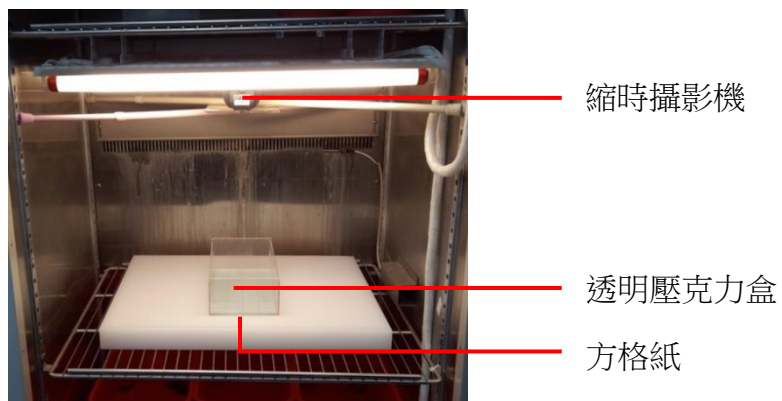
日本三角渦蟲的頭端具有眼點及耳狀突起各一對，眼點由色素細胞與具有光受器的神經元組成，能感受光的刺激（如圖一）[1]。耳狀突起是觸覺和嗅覺的受器，可以感覺空氣和水的震動，也可以感覺氣味分子。口位於腹部中央，咽頭為長形能伸展的管狀口器，攝食時，會從口伸出，將食物柔軟的部分撕成碎片吞嚥，不用時則縮入口腔中，不易看見。



圖一、日本三角渦蟲的眼點構造示意圖（改自[1]）

二、設備

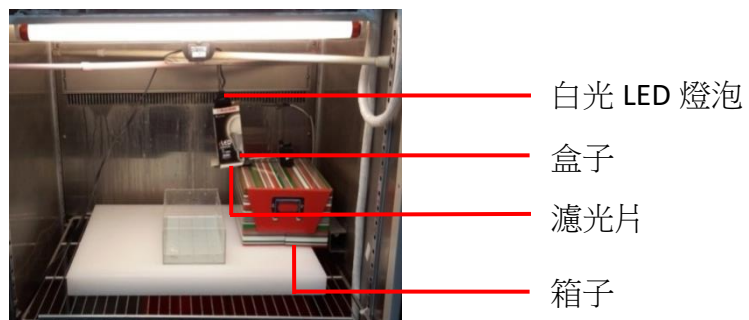
設備及軟體	數量	設備及軟體	數量
透明壓克力盒 (12*24 公分)	一個	光度計 (Lutron Lx-101)	一臺
縮時攝影機 (brinno TLC 200 Pro)	一臺	生長箱 (FIRSDEK GC-101H)	一臺
方格紙	數張	白光 LED 燈泡 (7W)	一顆
濾光片 (紅色、黃色、綠色、藍色)	各一片	蛋黃 (1 立方公分)	數顆
Tracker (Open Source Physics)		SigmaStat 3.5 (Systat Software Inc.)	



圖二、生長箱內的實驗裝置圖



圖三、透明壓克力盒俯視圖，實驗二與三的裝置，底部為方格紙，實驗時渦蟲放置於起點，控制變因置於刺激點



圖四、實驗三的裝置圖，將白光 LED 燈泡放在盒子裡，利用箱子將燈泡墊高，濾光片固定於盒子下方，使光線直射刺激點的位置

肆、 研究過程或方法

一、實驗一：光線有無對不同數目渦蟲游泳行為的影響

- (一) 取用餵食一天的渦蟲，將 1 隻渦蟲放入透明壓克力盒內，靜置於黑暗 3 小時，待渦蟲適應黑暗。
- (二) 利用定時開燈裝置，開啟日光燈，且自燈光開啟前 15 分鐘時，以縮時攝影機拍攝，連續拍攝 3 小時（如圖二），重複實驗至少 5 次。
- (三) 重覆步驟（一）～（二），將渦蟲數目改成 2 隻、3 隻、4 隻及 5 隻，進行實驗。
- (四) 觀察並記錄渦蟲的游泳路徑，並繪製成路徑圖。

二、實驗二：食物對不同數目渦蟲游泳行為的影響

- (一) 取用禁食一週的渦蟲，將 1 隻渦蟲放在透明壓克力盒的起點（如圖三），同時將 1 立方公分的蛋黃放在刺激點，以縮時攝影機連續拍攝 20 分鐘，重複實驗至少 5 次。
- (二) 利用 Tracker 軟體，每 3 秒紀錄渦蟲的橫向與縱向位置，並繪製成路徑圖，記錄至渦蟲觸及食物為止。
- (三) 計算渦蟲的平均速率，並進行統計分析。
- (四) 利用畢氏定理將位置數據換算成渦蟲與食物之直線距離，並繪製成折線圖。
- (五) 重覆步驟（一）～（四），將渦蟲數目改成 2 隻、3 隻、4 隻及 5 隻，進行實驗。

三、實驗三：不同波長光源對不同數目渦蟲游泳行為的影響

- (一) 取用餵食一天的渦蟲，將 1 隻渦蟲放入透明壓克力盒內，靜置於黑暗 1 分鐘。
- (二) 使用白光 LED 燈，並將光度調為 100 lux，將燈泡置於容器刺激點的正上方，使光線直射刺激點，實驗裝置如圖三和四。
- (三) 以縮時攝影機連續拍攝 30 分鐘，重複實驗至少 5 次。
- (四) 利用 Tracker 軟體，每 3 秒紀錄渦蟲的橫向與縱向位置，並繪製成路徑圖。
- (五) 計算渦蟲的平均速率，並進行統計分析。
- (六) 利用畢氏定理將位置數據換算成渦蟲與光源之直線距離，並繪製成折線圖。
- (七) 重覆步驟（一）～（六），並放上濾光片依次將光源置換為紅色、黃色、綠色及藍色；渦蟲數目改成 2 隻、3 隻、4 隻及 5 隻，進行實驗。

四、統計分析

以上實驗統計分析均利用 SigmaStat3.5 軟體的統計功能，比較兩組數據使用 T-test，比較三組以上數據使用 ANOVA，並以 Tukey test 做事後檢定， $p < 0.05$ 即認定其具有統計學上的顯著差異。

伍、 研究結果

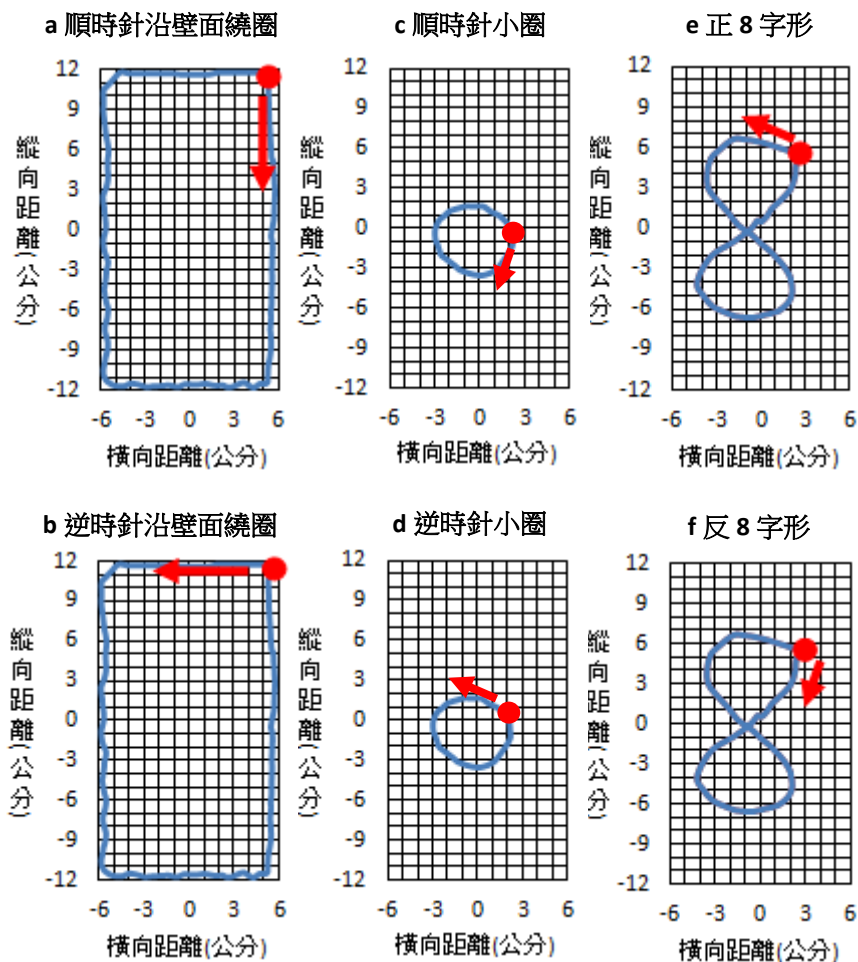
結果的圖文中出現的代號及文字，我們在此統一說明：

- (一) 游泳路徑圖中，以起點為基準，橫軸與縱軸之距離，數值為正代表靠近刺激點，數值為負代表遠離刺激點，圓點或方塊代表刺激點的位置，線條代表游泳的路徑。白色的扇形區域代表以起點到刺激點為半徑所畫出的接近區。
- (二) 渦蟲與刺激點的距離圖中，距離 0 ~ 15 公分是接近刺激點的區域，稱為接近區；15 ~ 30 公分是遠離刺激點的區域，稱為遠離區。
- (三) 實驗二：食物對不同數目渦蟲游泳行為的影響，a 代表一隻渦蟲實驗，b 代表兩隻渦蟲實驗，c 代表三隻渦蟲實驗，d 代表四隻渦蟲實驗，e 代表五隻渦蟲實驗，並以接觸到食物的先後依序定義為渦蟲 A 到 E。
- (四) 實驗三（一）：白光對不同數目渦蟲游泳行為的影響，a 代表 1 隻渦蟲實驗，b 代表 2 隻渦蟲實驗，c 代表 3 隻渦蟲實驗，d 代表 4 隻渦蟲實驗，e 代表 5 隻渦蟲實驗，並以平均速率大小依順序定義為渦蟲 A 到 E。
- (五) 實驗三（二）~（六）：不同波長光源對不同數目渦蟲游泳行為的影響，a 代表紅光，b 代表黃光，c 代表綠光，d 代表藍光，並以平均游泳速率大小依順序定義為渦蟲 A 到 E。

一、實驗一：光線有無對不同數目渦蟲游泳行為的影響

我們發現，渦蟲在燈光打開之後，會有沿壁繞圈及繞 8 字形的游泳路徑（如圖五）。因此我們定義：以觀測範圍之右上角為起點（以紅色圓點表示），渦蟲的游泳行為有三種：

- (一) 沿壁面繞圈： $\frac{\text{沿壁面游泳路徑長度}}{\text{全部壁面周長}} \geq \frac{4}{5}$ ，分成順時針與逆時針方向。
 - (二) 小圈： $\frac{\text{沿壁面游泳路徑長度}}{\text{全部壁面周長}} \leq \frac{4}{5}$ ，分成順時針與逆時針方向。
 - (三) 8 字形： $\frac{\text{沿壁面游泳路徑長度}}{\text{全部壁面周長}} \leq \frac{1}{2}$ ，且具有明顯 8 字形出現，分成正 8 字形與反 8 字形方向。
- (四) 我們統整出在 1 隻到 5 隻渦蟲實驗時，皆會交替出現下圖六種不同的路徑。

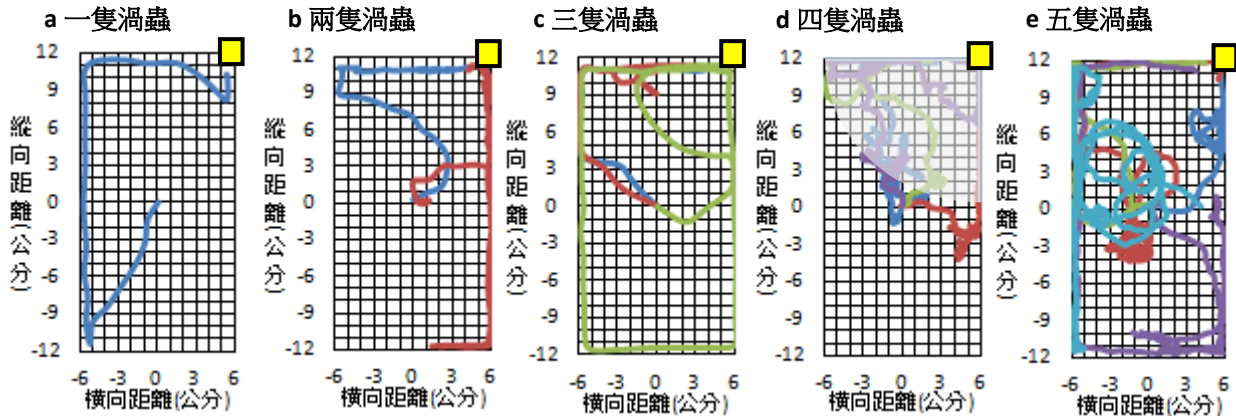


圖五、渦蟲游泳的路徑圖

二、實驗二：食物對不同數目渦蟲游泳行為的影響

我們將食物對不同數目渦蟲游泳路徑的影響，繪圖如圖六所示，在食物的影響下：

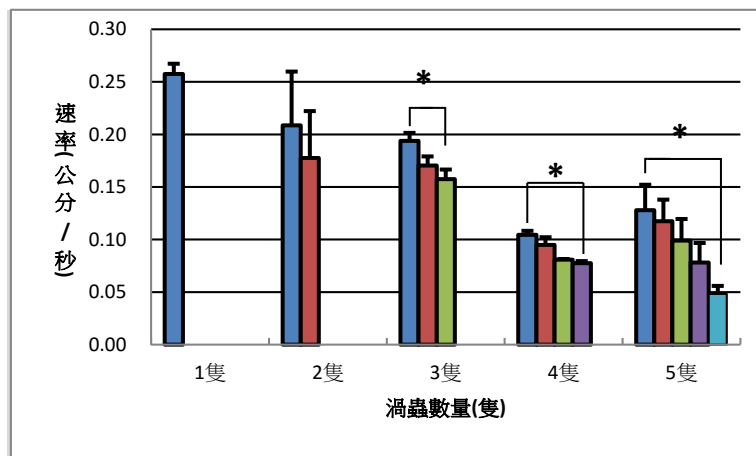
- (一) 1 隻到 5 隻渦蟲實驗中，渦蟲都會沿容器壁游向食物。
- (二) 1 隻到 3 隻渦蟲實驗中，較慢碰到食物的渦蟲皆會先遠離食物再沿壁接近，而在 4 隻到 5 隻渦蟲實驗時，渦蟲都會保持在與食物的接近區（白色扇形區塊）。



圖六、食物刺激下，不同數目渦蟲的游泳路徑

我們將不同數目渦蟲在食物影響下的位置，計算成平均游泳速率，如附錄表一及圖七所示。可發現：

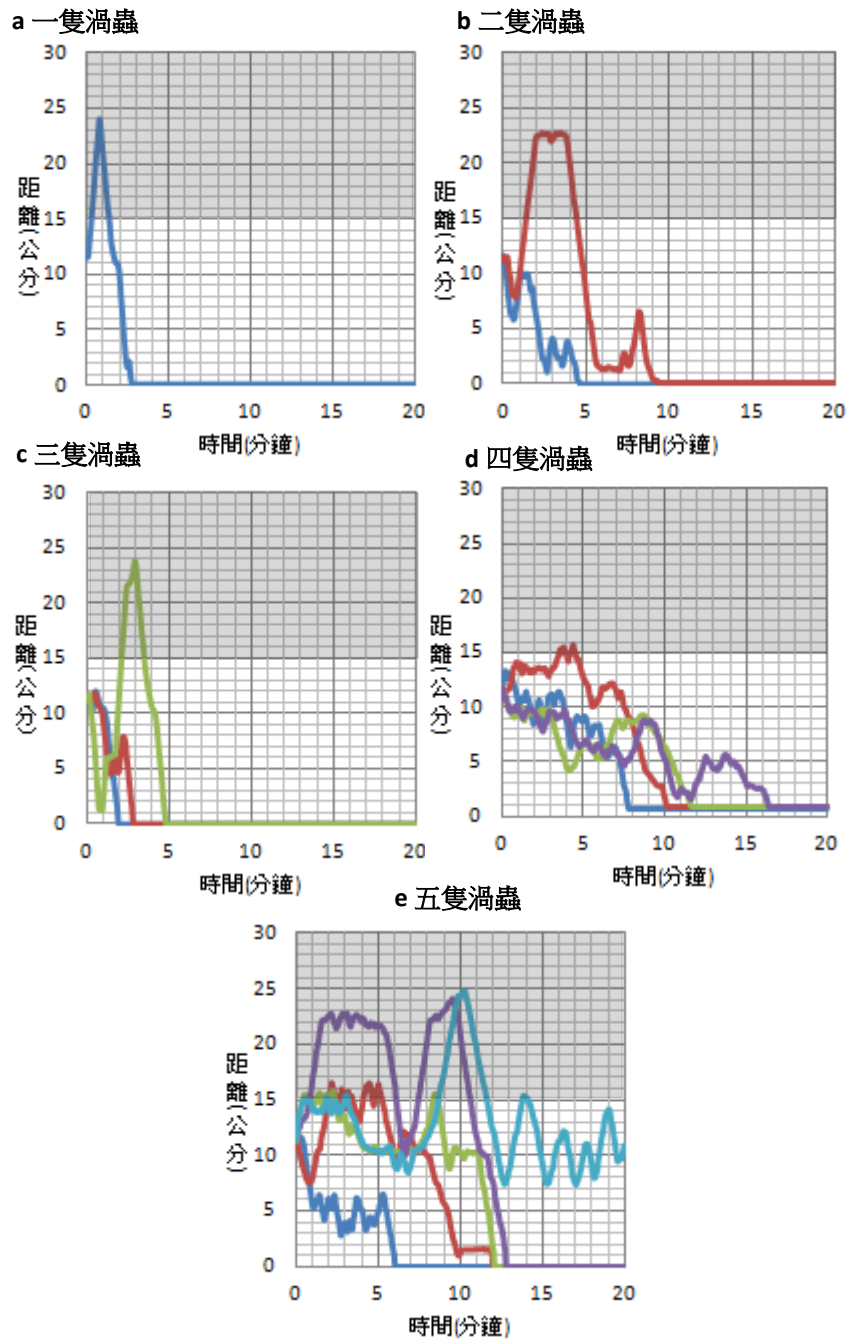
- (一) 渦蟲數目愈多，其平均游泳速率有愈慢的趨勢。
- (二) 3 隻到 5 隻實驗中，渦蟲 A 的游泳速率明顯比其餘渦蟲快。



圖七、食物刺激下，不同數目渦蟲的平均游泳速率及標準差

我們將位置數據利用畢氏定理換算成渦蟲與食物的直線距離，如圖八，我們發現：

- (一) 在 1 隻到 3 隻渦蟲實驗中，最後接近食物的渦蟲皆呈現相同的路徑：先遠離食物至遠離區，約 20 到 25 公分處，再接近食物。
- (二) 在 4 隻渦蟲實驗中，4 隻渦蟲皆直接接近食物，不會游至遠離區。
- (三) 在 5 隻渦蟲實驗中，會有 1 隻渦蟲始終不接觸食物。



圖八、食物刺激下，不同數目渦蟲與食物的距離

三、實驗三：不同波長光源對不同數目渦蟲游泳行為的影響

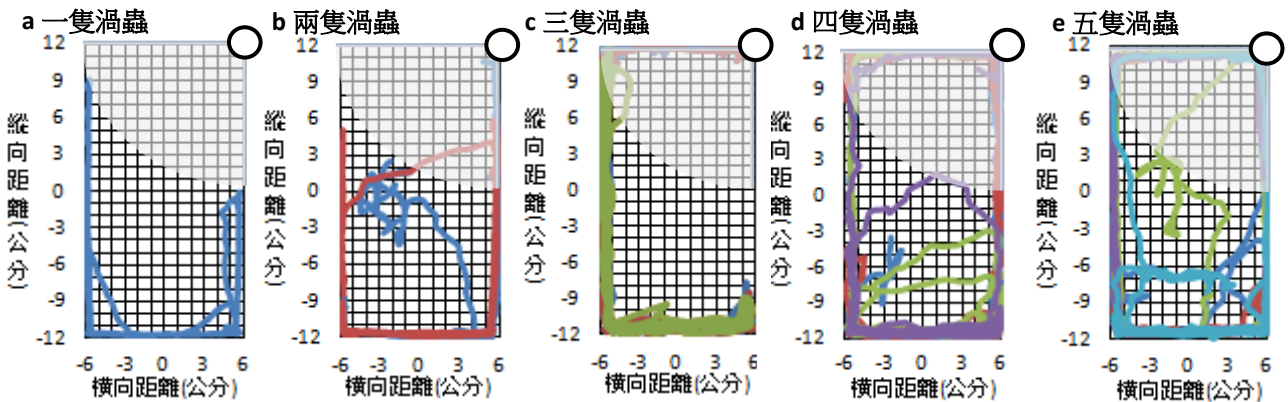
(一) 白光對不同數目渦蟲游泳行為的影響

我們將渦蟲在白光影響下的路徑畫成圖(如圖九)，並定義：

$$\text{沿壁面繞圈} : \frac{\text{沿壁面游泳路徑長度}}{\text{全部壁面周長}} \geq \frac{4}{5}$$

由圖九，可發現：

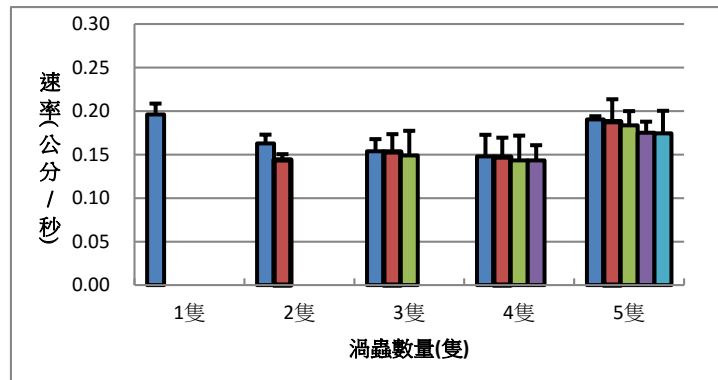
1. 1 到 3 隻渦蟲實驗中，渦蟲都不會沿壁面繞圈，且活動範圍皆在遠離區
2. 4 隻及 5 隻渦蟲實驗中，渦蟲則會沿壁面繞圈。



圖九、白光刺激下，不同數目渦蟲的游泳路徑

我們將渦蟲在白光下的位置計算成平均游泳速率，並繪製成長條圖，如附錄表二及圖十所示，可發現：

1. 在全部的實驗中，渦蟲的游泳速率皆分布在 0.15~0.20 公分/秒之間，渦蟲數目與平均游泳速率沒有明顯相關。
2. 各組內渦蟲的游泳速率沒有差異。

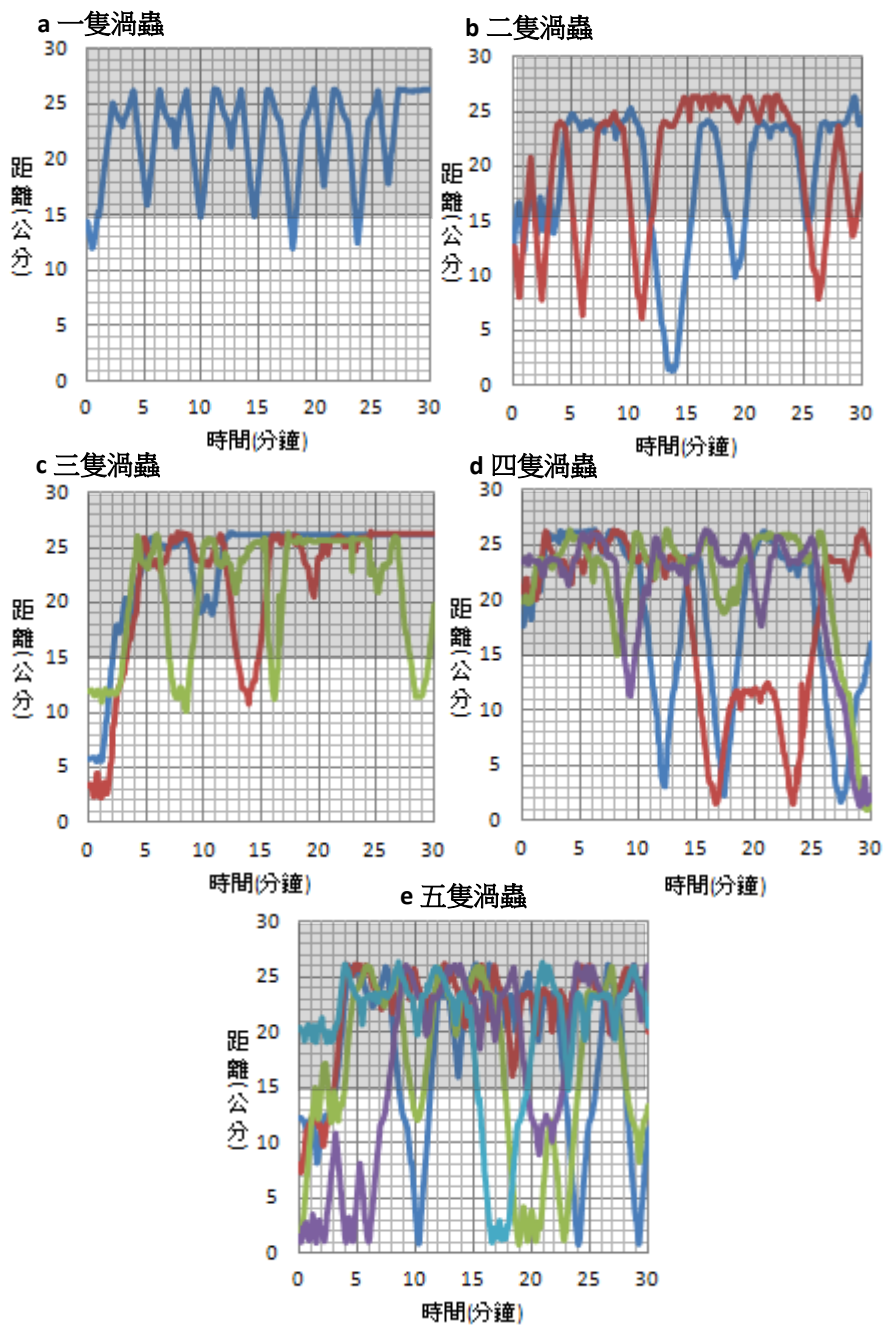


圖十、白光刺激下，不同數目渦蟲的平均游泳速率及標準差

我們將數據利用畢氏定理換算成渦蟲與光源之直線距離，如圖十一，可發現：

1. 在 3 隻渦蟲實驗時，有部分渦蟲會游泳到定點後停留至實驗結束，此定點在距離光源 26 公分處，為遠離區。

2. 我們計算渦蟲之平均遠離光源程度： $\frac{\text{停留於遠離區的時間}}{\text{實驗時間}} \times 100\%$ ，得知遠離程度依序為 1 隻實驗 (89%)，2 隻實驗 (82%)，3 隻實驗 (80%)，4 隻實驗 (80%)，5 隻實驗 (68%)，渦蟲數目越多有逐漸趨近光源的趨勢。



圖十一、白光刺激下，不同數目渦蟲與光源的距離

(二) 不同波長光源對 1 隻渦蟲游泳行為的影響

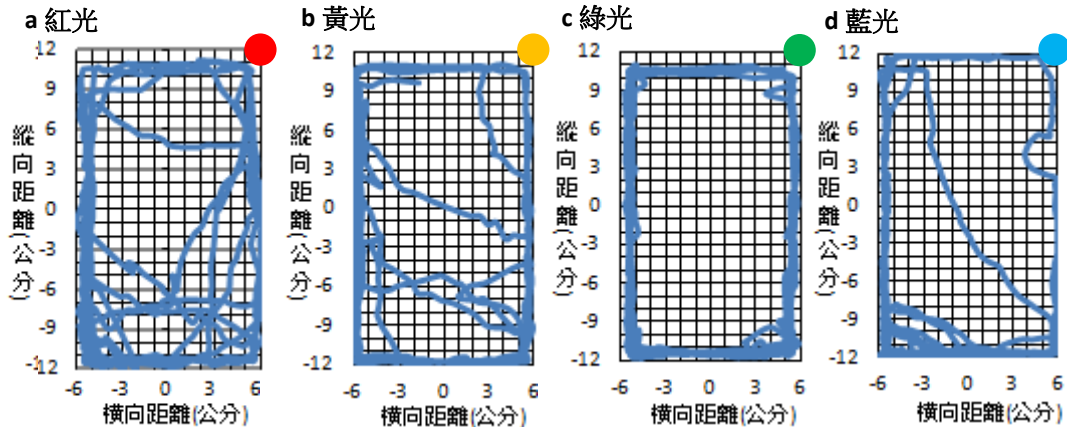
我們分別觀測不同單一色光下，1 隻渦蟲的游泳路徑，如圖十二。我們發現：

1. 渦蟲皆會沿壁面繞圈，為量化渦蟲沿壁面繞圈的程度，我們定義偏好沿壁面繞圈的程度：

程度： $\frac{\text{沿壁面繞圈的時間}}{\text{實驗時間}} \times 100\%$ ，經計算後發現渦蟲偏好沿壁面繞圈程度依

序為綠光（100%）> 藍光（86%），黃光（85%），紅光（79%）。

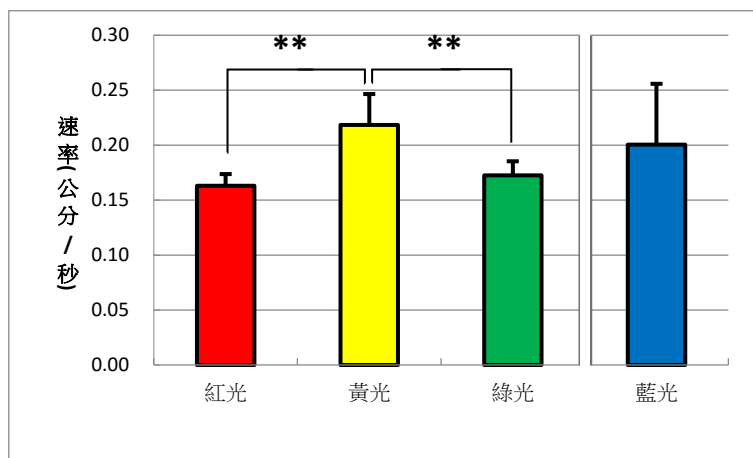
2. 綠光實驗中，渦蟲會完全（100%）沿壁面繞圈。



圖十二、不同波長光源刺激下，1 隻渦蟲的游泳路徑

我們將渦蟲在不同色光的位置計算成平均游泳速率，並繪製呈長條圖，如附錄表三及圖十三所示，可發現：

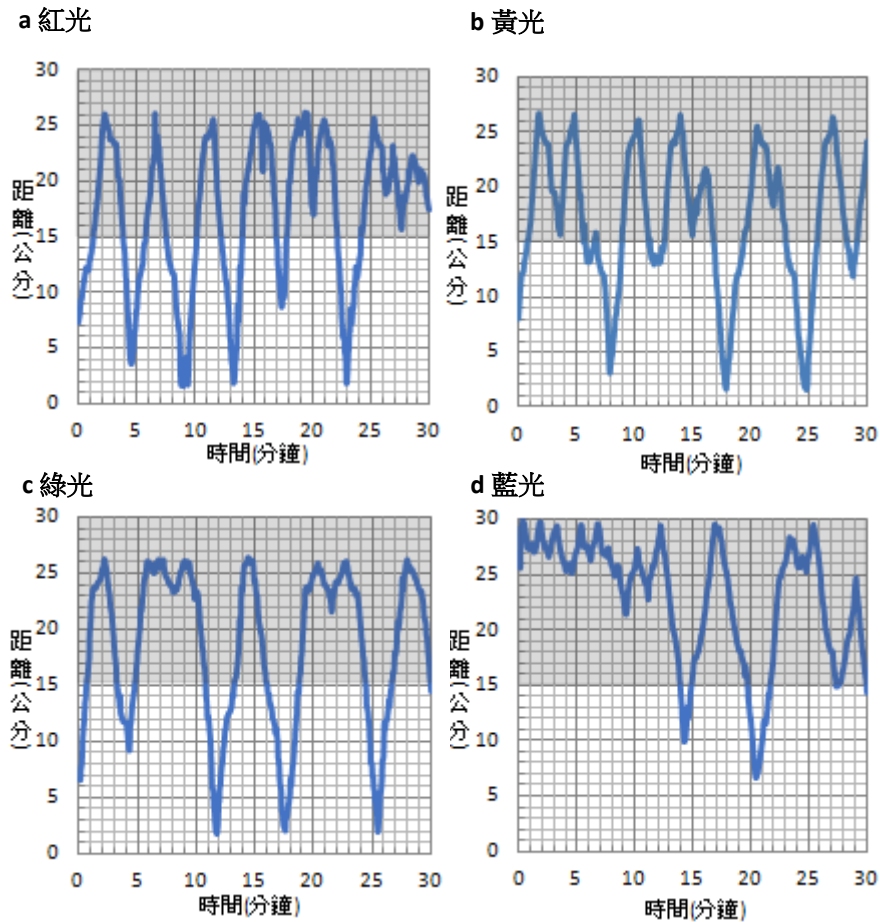
1. 渦蟲在不同色光下的平均游泳速率依序為黃光>綠光，紅光。
2. 在綠光和紅光實驗中，渦蟲的平均游泳速率相近。
3. 藍光實驗中，渦蟲的平均游泳速率差異極大。



圖十三、不同波長光源刺激下，1 隻渦蟲的平均游泳速率及標準差

我們將數據利用畢氏定理換算成渦蟲與光源之直線距離，如圖十四，可發現：

1. 渦蟲在紅光、黃光與綠光下，其與光源的直線距離會呈現週期性變化，唯在藍光下則無。週期長短依序為紅光（週期 5.5 分鐘），黃光（週期 5.2 分鐘），綠光（週期 5.1 分鐘），三者週期相近。
2. 渦蟲之平均遠離程度依序為藍光（93%），黃光（73%），綠光（65%），紅光（60%），相較其他波長的光源，在藍光下 1 隻渦蟲有 93% 的時間待在遠離區。

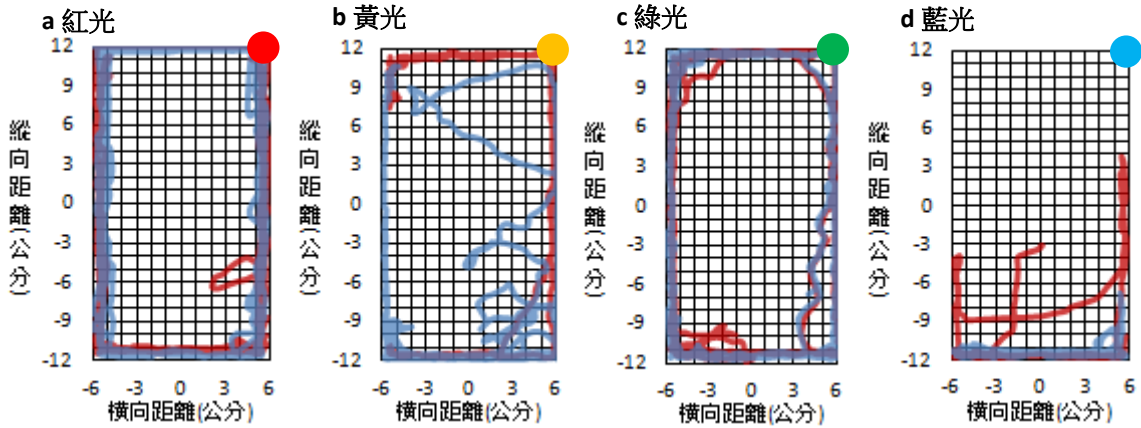


圖十四、不同波長光源刺激下，1 隻渦蟲與光源的距離

(三) 不同波長光源對 2 隻渦蟲游泳行為的影響

我們將不同單一色光下，2 隻渦蟲的游泳路徑，如圖十五。由各圖所知：

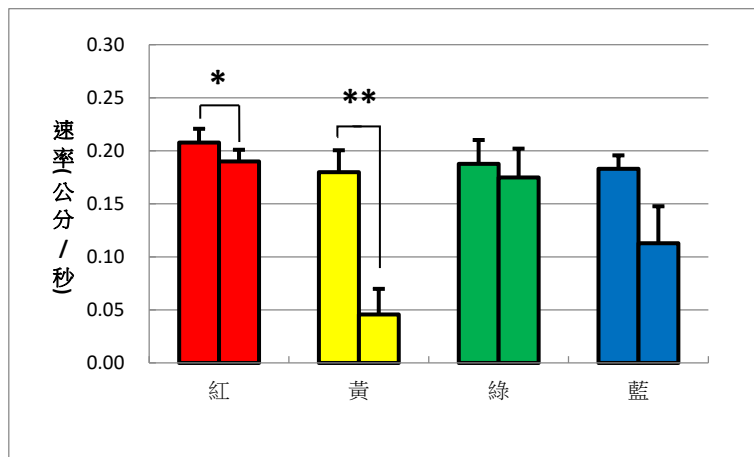
1. 渦蟲於紅光和綠光下，皆會沿壁面繞圈，而在黃光和藍光下則無。
2. 渦蟲在藍光下，其游泳範圍皆 100%集中在遠離區。



圖十五、不同波長光源刺激下，2 隻渦蟲的游泳路徑

我們將渦蟲在不同色光的位置計算成平均游泳速率，並繪製成長條圖，如附錄表四及圖十六所示，可發現：

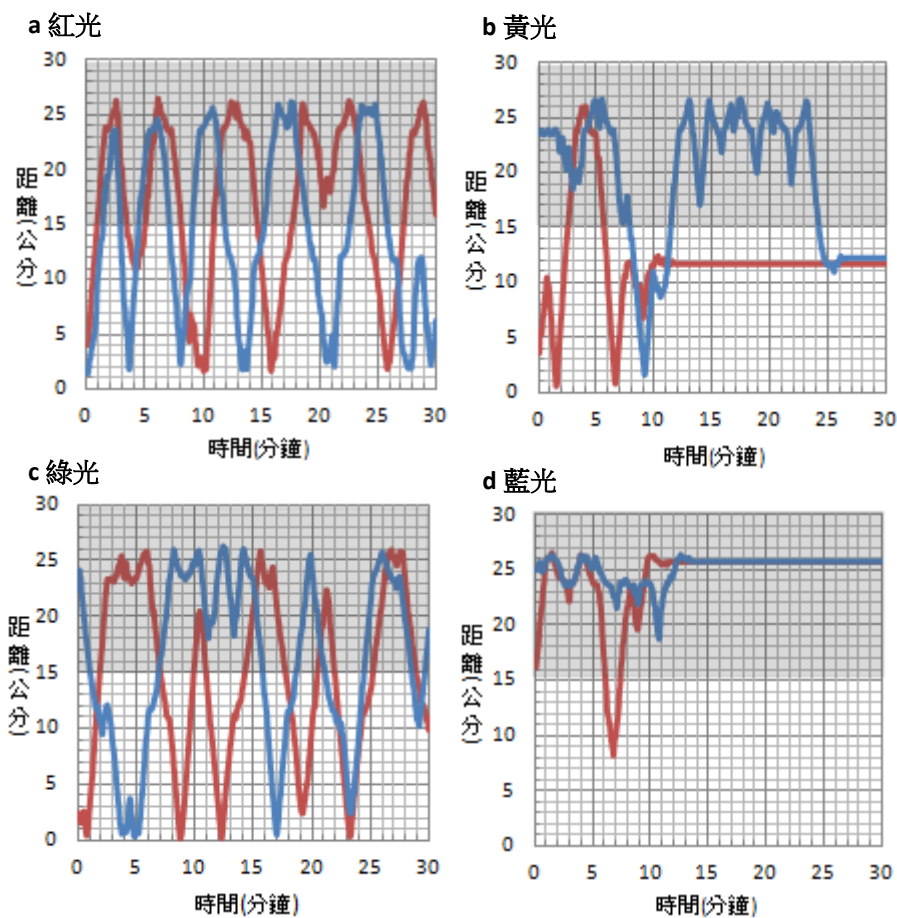
1. 在不同色光下，無論是渦蟲 A 還是渦蟲 B，平均游泳速率依序皆為紅光，綠光，藍光，黃光。
2. 在紅光與黃光實驗中，渦蟲 A 與 B 的平均游泳速率具有顯著快慢差異。



圖十六、不同波長光源刺激下，2 隻渦蟲的平均游泳速率及標準差

我們將數據利用畢氏定理換算成渦蟲與光源之直線距離，如圖十七，可發現：

1. 在紅光與綠光實驗中，渦蟲與光源的直線距離會呈現週期性變化。週期性長短依序為：紅光（週期 5.5 分鐘），綠光（週期 5 分鐘），兩者週期相近。
2. 紅光實驗中，渦蟲 B 會跟隨渦蟲 A 的游泳路徑。
3. 渦蟲在黃光與藍光下，會游泳到定點後停留至實驗結束。黃光下，渦蟲會停留在距離光源 12 公分處，為接近區；藍光下，渦蟲則會停留在 26 公分處，為遠離區。
4. 渦蟲之平均遠離光源程度依序為藍光（95%），紅光（66%），綠光（59%），黃光（36%），相較其他波長的光源，渦蟲於藍光下在遠離區的時間最久。

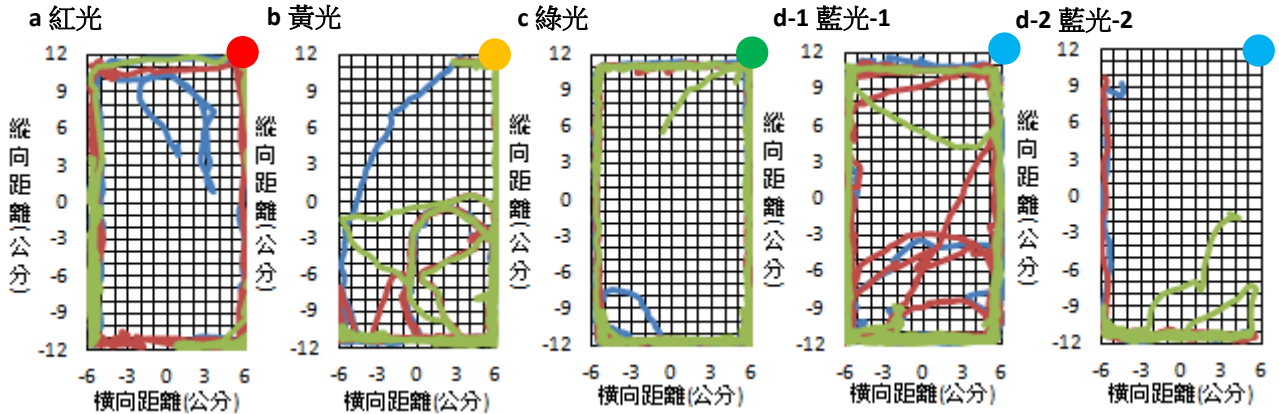


圖十七、不同波長光源刺激下，2 隻渦蟲與光源的距離

(四) 不同波長光源對 3 隻渦蟲游泳行為的影響

我們分別觀測不同單一色光下，3 隻渦蟲的游泳路徑，如圖十八。由圖可知：

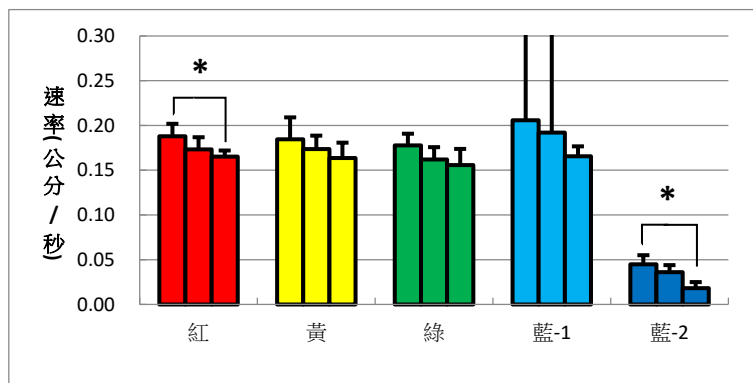
1. 渦蟲於紅光和綠光下皆會沿壁面繞圈，在黃光下則無。
2. 渦蟲在藍光下會有兩種不同的游泳路徑，一種是游泳範圍會集中在遠離區，另一種是沿壁面繞圈，游泳路徑最複雜，因此我們分別記錄為藍光-1 及藍光-2。



圖十八、不同波長光源刺激下，3 隻渦蟲的游泳路徑

我們將渦蟲在不同色光的位置計算成平均游泳速率，並繪製成長條圖，如附錄表五及圖十九所示，可發現：

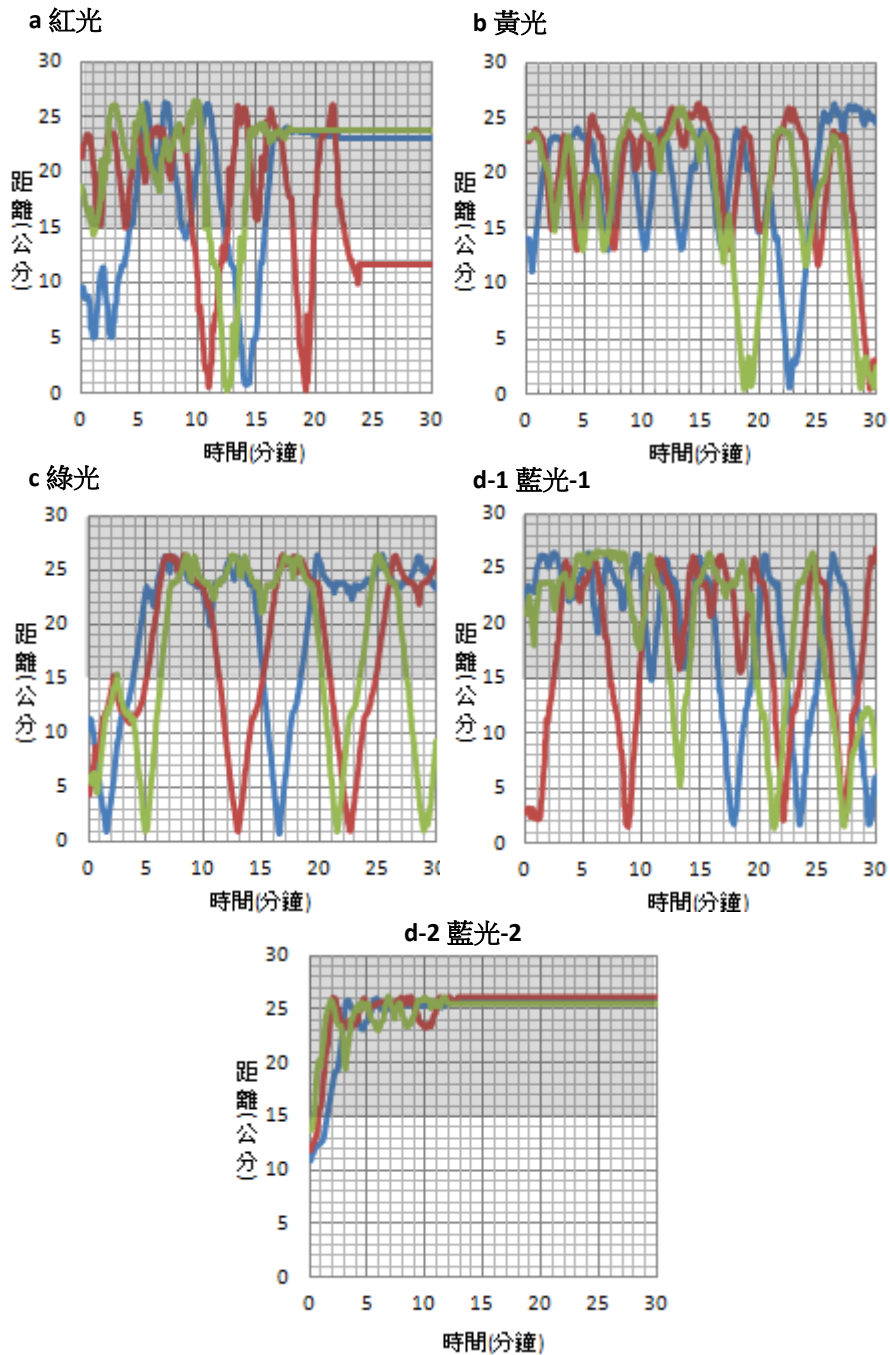
1. 3 隻渦蟲在不同色光下的平均游泳速率為藍光-1，紅光，黃光，綠光，藍光-2。每次藍光實驗中，渦蟲的平均游泳速率皆穩定度較低，因此標準差較大。
2. 平均游泳速率較快的渦蟲 A，在不同波長光源下的游泳速率依序為：藍-1 > 紅光，黃光 > 綠光，藍-2。
3. 渦蟲在藍-2 實驗中，平均游泳速率有比其他色光低的趨勢。
4. 在紅光實驗中，渦蟲 A 的平均游泳速率顯著快於組內平均游泳速率慢者。



圖十九、不同波長光源刺激下，3 隻渦蟲的平均游泳速率及標準差

我們將觀察數據利用畢氏定理換算成渦蟲與光源之直線距離，如圖二十所示：

1. 在紅光與綠光實驗中，3 隻渦蟲與光源的直線距離失去原有的週期性。
2. 渦蟲之平均遠離光源程度依序為藍光-2（96%），藍光-1（70%），黃光（67%），紅光（66%），綠光（65%）。
3. 無論是藍光-1 或是藍光-2，在遠離區的比例都較其他波長的光源高。

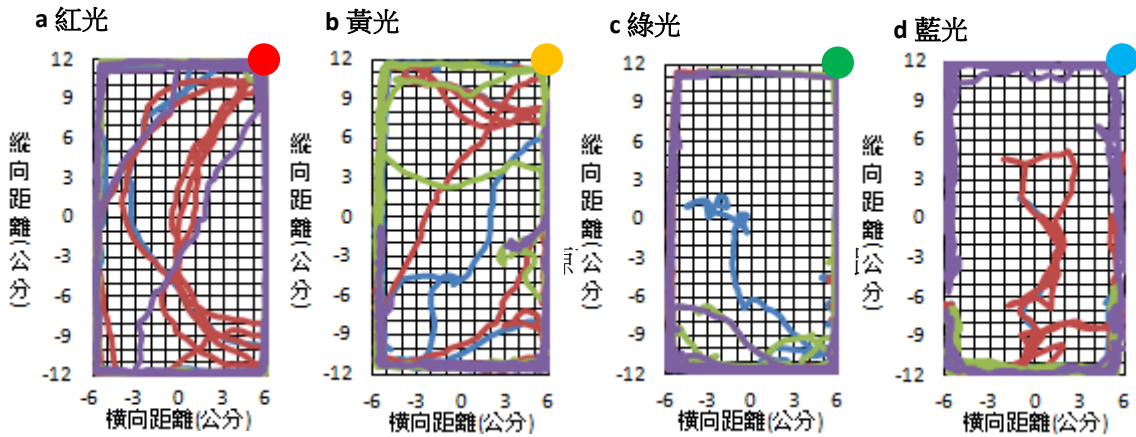


圖二十、不同波長光源刺激下，3 隻渦蟲與光源的距離

(五) 不同波長光源對 4 隻渦蟲游泳行為的影響

我們分別觀測不同單一色光下，4 隻渦蟲的游泳路徑，如圖二十一，可知：

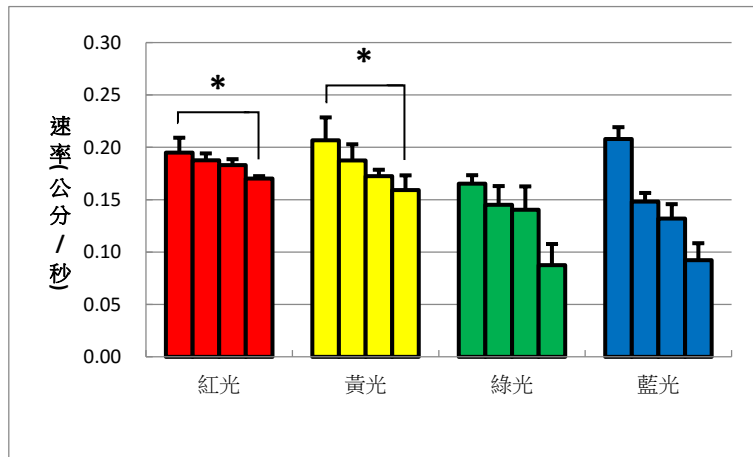
4 隻渦蟲於單一色光下，至少有 1 隻會沿壁面繞圈。



圖二十一、不同波長光源刺激下，4 隻渦蟲的游泳路徑

我們將渦蟲在不同色光的位置計算成平均游泳速率，並繪製成長條圖，如附錄表六及圖二十二所示，可發現：

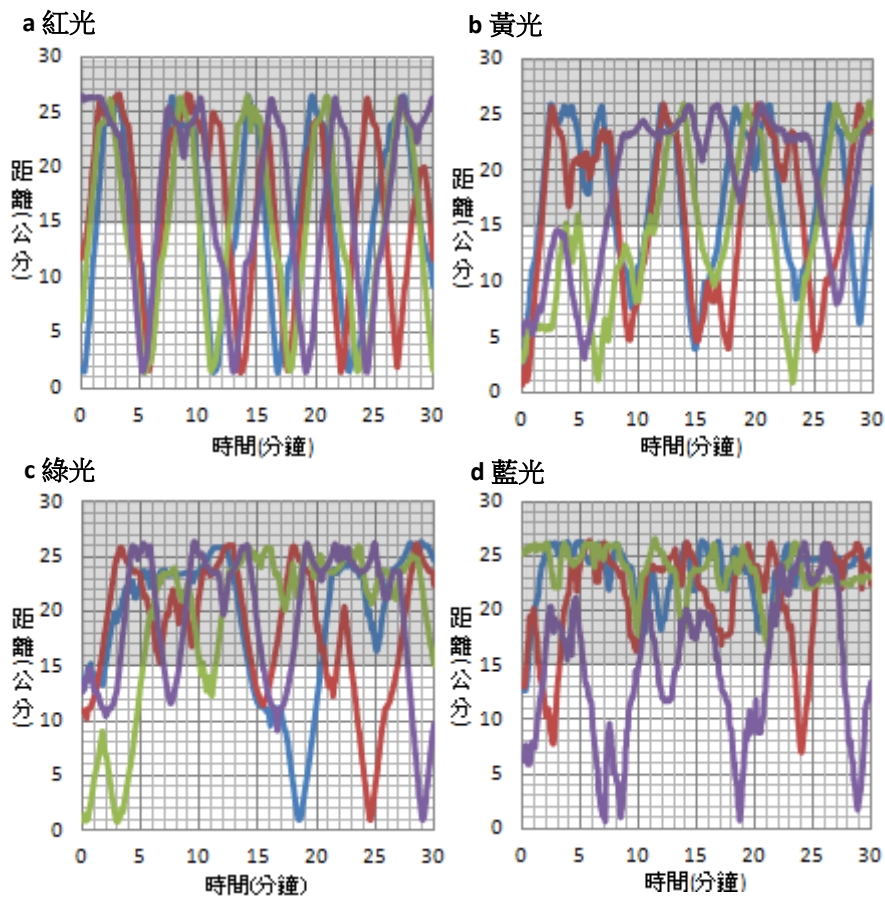
1. 渦蟲 A 的平均游泳速率由快至慢依序為：藍光 > 黃光，紅光 > 綠光。
2. 渦蟲 B 的平均游泳速率由快至慢依序為：紅光，黃光 > 藍光 > 綠光。
3. 在紅光與黃光實驗中，渦蟲 A 的平均游泳速率顯著快於組內平均游泳速率慢者。



圖二十二、不同波長光源刺激下，4 隻渦蟲的平均游泳速率及標準差

我們將觀察數據利用畢氏定理換算成渦蟲與光源之直線距離，如圖二十三所示，由圖可發現：

1. 渦蟲於紅光下，其與光源的直線距離會恢復週期性變化，其週期為 5.7 分鐘。
2. 在藍光下，渦蟲偏好待在遠離區，渦蟲之平均遠離光源程度依序為藍光（79%），綠光（68%），紅光（60%），黃光（60%）。
3. 在藍光實驗中，除了其中 1 隻渦蟲會呈現每 10 分鐘一次的週期外，其餘 3 隻會在遠離區內徘徊。

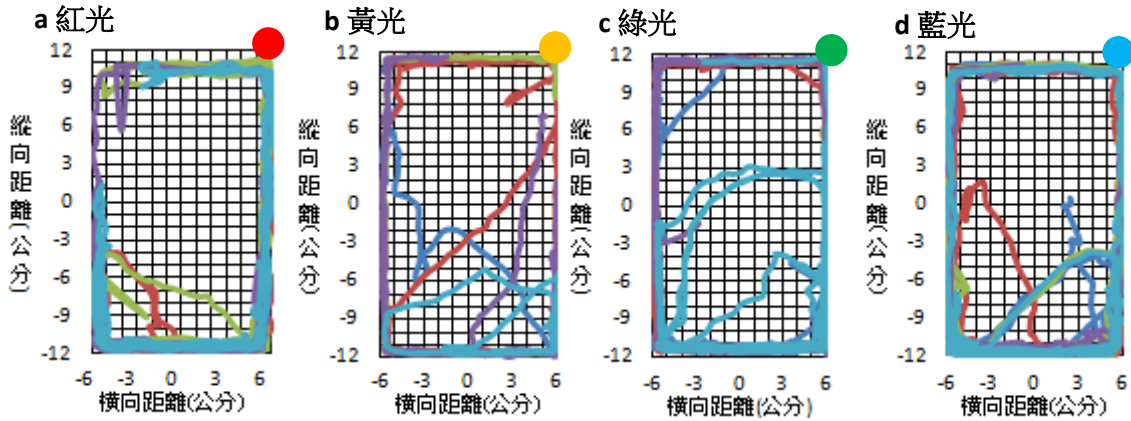


圖二十三、不同波長光源刺激下，四隻渦蟲與光源的距離

(六) 不同波長光源對 5 隻渦蟲游泳行為的影響

我們分別觀測不同單一色光下，5 隻渦蟲的游泳路徑，如圖二十四。可知：

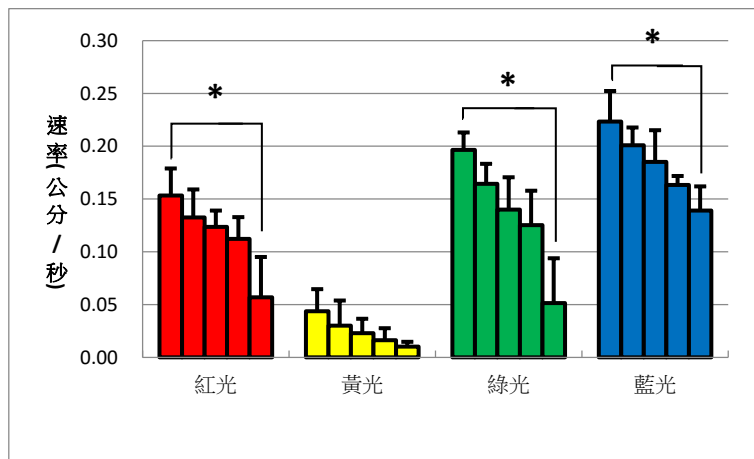
5 隻渦蟲於單一色光下皆會沿壁面繞圈。



圖二十四、不同波長光源刺激下，5 隻渦蟲的游泳路徑

我們將渦蟲在不同色光的位置計算成平均游泳速率，並繪製成長條圖，如附錄表七及圖二十五所示，可發現：

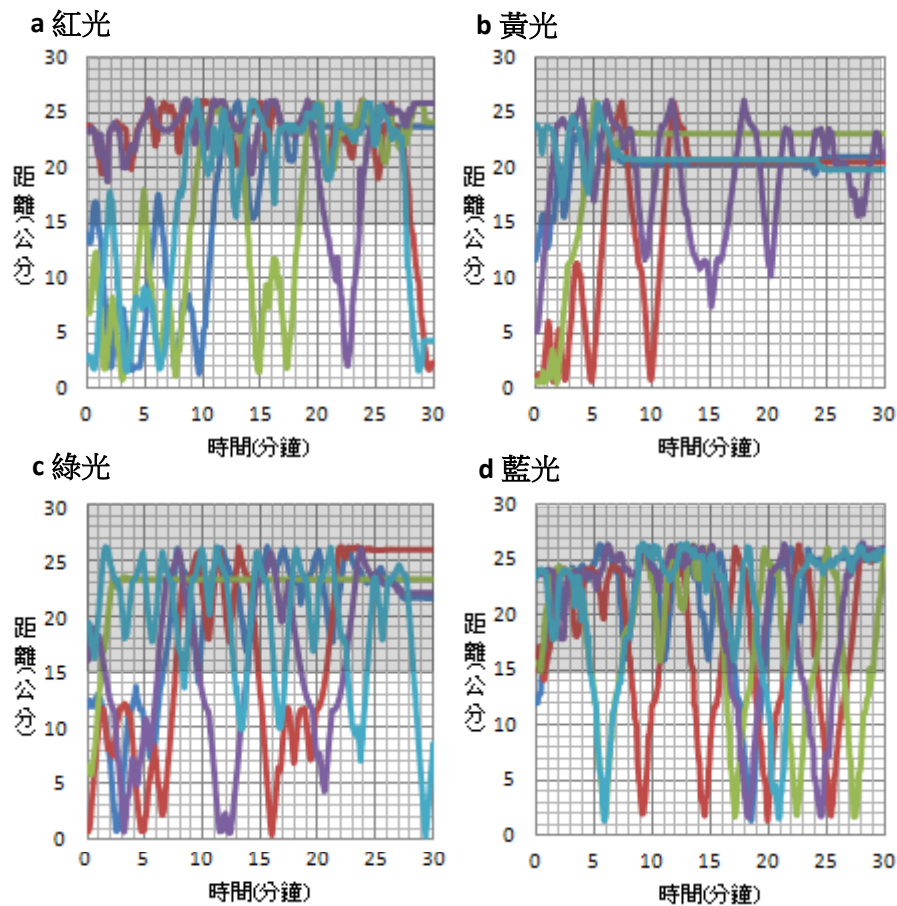
1. 渦蟲 A 到渦蟲 D 的平均游泳速率，快慢依序皆為：藍光，綠光，紅光 > 黃光，而渦蟲 E 的平均游泳速率快慢依序為：藍光 > 紅光，綠光，黃光，渦蟲在藍光實驗中，平均游泳速率最快。
2. 渦蟲在黃光實驗中，平均游泳速率明顯最慢，在紅光與綠光的實驗中，平均游泳速率相近。
3. 在黃光、綠光與藍光的實驗中，渦蟲 A 的平均游泳速率顯著快於組內平均游泳速率慢者。



圖二十五、不同波長光源刺激下，5 隻渦蟲的平均游泳速率及標準差

我們將數據利用畢氏定理換算成渦蟲與光源之直線距離，如圖二十六，發現：

1. 在藍光下，渦蟲的游泳路徑出現週期性。
2. 5 隻渦蟲在黃光下有明顯不游動的現象，在實驗開始 9~11 分鐘後，渦蟲與燈光的距離就不再改變，停留在遠離區。
3. 下圖為渦蟲與燈光的遠離程度最具代表性的圖，渦蟲之平均遠離光源程度依序為黃光（90%），藍光（76%），紅光（73%），綠光（63%）。
4. 在紅光、黃光及綠光實驗中，有至少 1 隻渦蟲會游泳到定點後停留至實驗結束，皆為遠離區，唯藍光則無。



圖二十六、不同波長光源刺激下，5 隻渦蟲與光源的距離

陸、 討論

渦蟲是一種常見的模式生物，其生活環境介於水生與陸生之間，過去的研究大多以渦蟲的再生、學習、記憶和吸附行為等為主，儘管有些關於行為的研究，但缺乏量化渦蟲運動行為的方法，且探討層次局限於個體。動物行為的觀測實屬不易，需要耗費長時間觀察，為了縮短觀察時間，我們利用縮時攝影機記錄，並重複多次實驗，再以簡易的追蹤軟體分析渦蟲的動態行為，用人工方式標記移動之位置，形成連續的動態資料點。而群體行為的觀測更是困難，在缺乏標記不同個體技術的情況下，我們必須逐次分析一個實驗中不同個體的游泳路徑，隨著群體規模越來越大，產生的資料點越來越複雜，更加重我們數據處理的困難。但因為有如此踏實的資料分析方式，我們才得以歸納出渦蟲在單獨與群體中的行為模式變化。當我們把量測與分析系統建立好後，發現在不同環境因子的刺激下，單獨或群體中渦蟲所展現的行為會出現以下差異，包含偏好沿壁面(wall preference)繞圈的程度、游泳的速率、接近或遠離刺激源(如畏光性 photophobia)的比例等。值得強調的是，渦蟲通常是靠眼點偵測光線刺激，眼點則是動物演化中非常原始的感光構造，過去研究中，眼點被視為探討眼睛發育與演化時的絕佳題材，我們針對不同色光刺激對渦蟲群體行為影響的研究，亦能連結動物眼睛和群體生活在演化上的關係。接下來，我們要分別探討不同環境刺激對渦蟲群體行為的影響以及推測其在生理和環境適應上的意義。

一、實驗一：光線有無對不同數目渦蟲游泳行為的影響

在 1 隻到 5 隻渦蟲的實驗中，渦蟲皆會有繞圈的游泳路徑，且時常出現沿壁面繞圈游泳的行為。文獻中提及沿壁面偏好(wall preference)是一種對於適應環境的重要行為，渦蟲會持續直行，於碰壁時轉彎，並且沿壁繞行，可以幫助渦蟲在自然界中躲避天敵〔2〕。且文獻指出，渦蟲的腹面會分泌吸附性黏液與釋酸性黏液，使渦蟲能夠自由地吸附及脫離物體表面，渦蟲的吸附能力會隨著吸附表面的粗糙程度而改變，越是粗糙的表面，渦蟲的吸附能力越佳〔3〕。渦蟲的原生環境為水流清澈且湍急的河川上游，沿岸與石頭壁提供渦蟲良好的吸附環境，使渦蟲不易隨波逐流。綜合以上觀點：我們推論渦蟲偏好沿壁面繞圈游泳的情形是基於安全考量，容器壁及容器角落相較其他地方壁面多且粗糙，增加了渦蟲沿壁偏好行為，也可能為探勘陌生環境。

除此之外，我們進一步還發現渦蟲會出現繞 8 字形的游泳路徑，我們推測此行為能使渦蟲全面搜尋生活環境，8 字形能夠利用最短路徑進行最大面積的搜索。綜合以上推論，渦蟲的本能行為為一方面沿壁面游泳，探勘相對粗糙與相對安全的環境，一方面探查生活環境的其他因子，如食物等，如此才能有較大的生存機會。

二、實驗二：食物對不同數目渦蟲游泳行為的影響

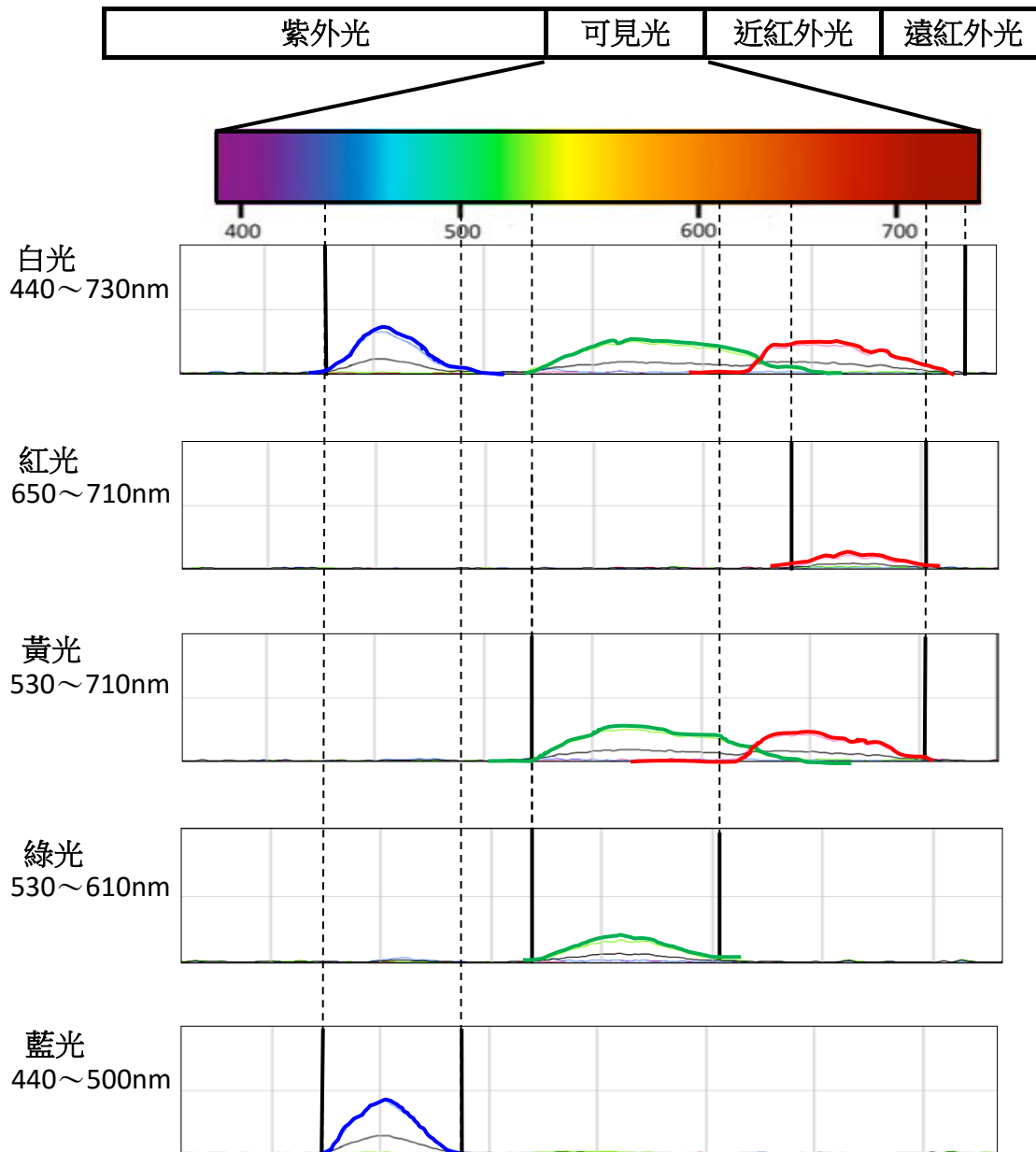
在食物刺激的實驗中，當空間中有 1 到 3 隻渦蟲時，有 1 隻渦蟲會先遠離食物再接近食物；當 4 隻渦蟲時，4 隻渦蟲皆會直接接近食物；5 隻渦蟲時，只有 1 隻渦蟲不會接近食物，且當空間中出現越多隻渦蟲時，渦蟲的平均游泳速率就越慢。我們推測當此空間出現 2 隻以上渦蟲時即會出現群體行為，2 隻與 3 隻渦蟲時，先遠離食物再接近食物的那隻渦蟲會成為群體間墊後的角色。4 隻時，渦蟲會互相爭奪食物，而出現 4 隻渦蟲皆直接接近食物的情形。當 5 隻同時存在時，則出現群體分配的現象，一次僅 4 隻渦蟲攝食，且剩下的 1 隻渦蟲會停留於定點，隨後其餘渦蟲也會停留於此。我們推測未攝食的那隻渦蟲可能在渦蟲群體中扮演尋找棲地的角色。

根據漢米爾頓法則的理論〔4〕，我們知道親屬關係會直接影響利他行為的發生，渦蟲大多為無性生殖，基因相似度高，更增加了利他主義發生的機率，而渦蟲已經有簡單的腦部構造，應該有能力發展出群體行為，因此我們推論渦蟲有群體分配是合理的。有文獻指出，對於群體中的個體，利己主義（egoism）勝過利他主義（altruism），然而利他主義的群體遠比自私自利的群體有更多機會在自然界中生存〔5〕。當渦蟲個體數少於 4 隻時，每隻渦蟲皆趨向利己主義，多於 4 隻便出現能分工的利他主義群體。群體能分配的食物雖少，但是覓食成功機率卻相對高，為在資源獲得和競爭兩方面取得平衡，自然界的分工是生物生存十分重要的一環。

許多生物皆出現群體合作及分工的現象。文獻中提到：大肚魚大多數時候維持在一個可看見同伴的距離而會互相跟隨，獨立的大肚魚個體傾向游向同伴一起尋找食物，群體也較個體更能清楚作出選擇，且覓食效率較高，證明群體的決策品質優於個體〔6〕。雖然渦蟲視角較小，眼點也位於背部，但我們認為渦蟲有類似大肚魚的群聚行為，實驗中也觀察到渦蟲有互相跟隨與互相接觸的行為，暗示在渦蟲群體中，這可能是牠們的溝通方式。

三、實驗三：不同波長光源對不同數目渦蟲游泳行為的影響

我們使用不同的濾光片製造出不同波長的色光，經分光光度計檢測後，得知本實驗所使用的各種色光波長，如圖二十七所示。以下我們分別對不同的色光進行討論。



圖二十七、實驗三個單色光源的波長 (nm)

(橫軸：波長 nm；縱軸：能量相對強度)

(一) 白光

我們觀察到在白光下，渦蟲的游泳速率明顯較慢，且渦蟲個體數越少，徘徊在遠離區的比例高，具畏光性。我們推測因為白光能量高，對渦蟲而言相當於白天強光的狀態，所以渦蟲群體畏光性明顯高於其他色光，這行為有助於渦蟲躲避危險，尋求安全的棲地。

(二) 紅光

我們觀察到在紅光刺激下，渦蟲的游泳行為較穩定且一致，無論個體或群體皆會沿壁游泳，且至少有 1 隻渦蟲會有沿壁繞圈的現象。有文獻中提及紅光對於渦蟲的畏光性較沒有干擾，也最不排斥〔1〕，甚至會游泳穿越紅光，與本實驗結果相符。綜合上述觀點，我們推論紅光的波長較長且能量較低，最接近夜晚散發的遠紅外光，渦蟲認為此環境是安全的，所以行為穩定一致。

(三) 黃光

在黃光實驗中，渦蟲沒有出現明顯的差異性，不如紅光與綠光具週期性及沿壁面繞圈的現象，也沒有如白光與藍光，在遠離區的比例高。我們推測是因為本實驗所使用的黃光的波長範圍涵蓋了紅光及綠光（如圖二十七），能量又介於綠光與白光之間，因此所表現的行為模式與其他單色光源比較，沒有特別偏好。

(四) 綠光

在綠光實驗中，渦蟲的行為與紅光實驗類似，穩定且一致，皆會沿壁游泳。我們推測渦蟲眼點的感光機制是與光的能量大小有關，在渦蟲的原生環境中，綠光可能表示溪流上方有陸域的植物相遮蔽，環境的光相對較弱，也代表相對安全，所以無論是個體或群體，渦蟲皆表現出穩定的行為。

(五) 藍光

在藍光實驗中，當空間中只有 1 隻到 4 隻渦蟲時，渦蟲的活動範圍皆位於遠離區，顯示渦蟲對藍光有較高的畏光性，且游泳路徑複雜，平均游泳速率變異大。根據文獻指出，當渦蟲經紫外光照射 30 分鐘後，其頭部的眼點會消失，過度照射紫外光也會使渦蟲大量死亡〔7〕。渦蟲眼點上的神經元具有光受器，受到能量過強的光照射時會受損〔1〕。本實驗所使用的藍光能量最高，相較其他色光最接近紫外光，對於渦蟲可能是個危險的警示。渦蟲的眼點構造簡單，色素細胞外無如人類角膜細胞的保護構造，因此在遭遇強光時，色素細胞是相當脆弱的，所以無論是渦蟲個體或群體對能量高的光皆出現畏光性，此種保護自身的行為對其生存具有重要意義。

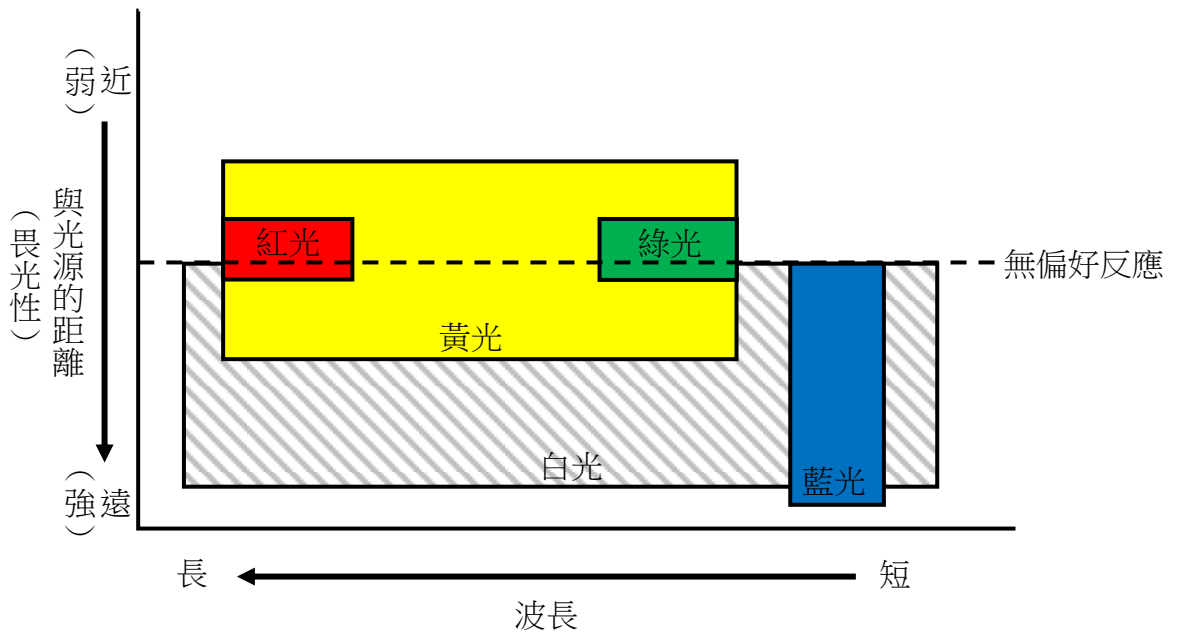
(六) 不同能量光源對渦蟲群體游泳行為的影響

我們將不同能量色光對渦蟲群體游泳行為的影響綜合比較於表九，且將不同色光能量對渦蟲畏光性的影響繪於圖二十八。我們推測渦蟲群體的游泳行為與色光的能量有關，本次實驗所使用的紅光與綠光能量較低，可觀察到渦蟲皆沿壁面繞圈且具有週期性，游泳行為相當穩定且一致；白光與藍光能量較高，可觀測到渦蟲在遠離區的比例較高且畏光性較強；而黃光能量居中，所以渦蟲的群體行為在我們探討的範圍內較無特色。

表九、不同波長色光對渦蟲群體游泳行為的影響

	白光	紅光	黃光	綠光	藍光
1.沿壁游泳	V	V	V	V	V
2.沿壁面繞圈		V		V	
3.週期性		V		V	
4.遠離區比例高	V				V

V 代表全部有此反應



圖二十八、不同能量的光源對渦蟲與光源距離的關係

(七) 不同數目的渦蟲對光的反應

有文獻指出，許多動物對不同波長的光有不同的行為反應。例如：斑馬魚會游向紫外光、藍光和紅光，但僅受綠光微弱的吸引。相反地，水蛭對紫外光和綠光有複雜的負趨光反應，且對紫外光反應最激烈。果蠅幼蟲對藍光、紫光和紫外光有負趨光性，綠光和紅光則無〔1〕。本實驗研究發現，渦蟲對於不同波長的光源具不同的反應，並且我們更進一步發現，不同數目的群體在不同光源下各種複雜的游泳行為。

在紅光與綠光實驗中，渦蟲只有在 1 隻和 2 隻時具有週期性，由此可見渦蟲個數的確對渦蟲的行為有影響。值得一提的是，空間內渦蟲的隻數增加時，個體之間的接觸頻率也會增加。由以上兩點，我們推測渦蟲群體間具有溝通的機制。

在藍光與白光實驗中，當空間中有 1 到 4 隻渦蟲時，游泳路徑複雜，平均游泳速率變異大；當出現 5 隻渦蟲時，渦蟲與藍光的直線距離開始產生週期性的變化，速率也趨於穩定，我們認為此現象可能與前人大肚魚群體的研究類似，群體的對於大肚魚決策具有影響力，能使大肚魚更有效選擇避開危險〔6〕。我們推測當空間中出現 5 隻渦蟲時，群體會使每個個體更能面對藍光這個能量強，也代表相對危險的環境。

在 4 隻及 5 隻實驗中，無論在任何波長光源的實驗，皆會至少有 1 隻渦蟲沿壁面繞圈，因此我們推測群體中已出現分工行為，而沿壁面繞圈之渦蟲為群體中的探勘者。

四、綜合討論

由實驗二和實驗三發現容器中的渦蟲為 5 隻時，平均游泳速率最慢的渦蟲會首先停留於定點至實驗結束，且其餘渦蟲亦會停留於此定點。由此現象我們推測：平均游泳速率最慢的渦蟲有尋找棲所的能力，再次表現渦蟲群體可能有分工的現象。

五、未來展望實驗

- (一) 實驗假食物對不同數目渦蟲游泳行為的影響，研究嗅覺在群體中對游泳行為的影響。
- (二) 紅外光及紫外光對不同數目渦蟲游泳行為的影響。
- (三) 增加渦蟲的群體數目。

柒、 結論

- 一、渦蟲游泳會以沿壁繞行、繞圈和繞 8 字形路徑探勘陌生環境。
- 二、食物刺激下，當渦蟲個體數少於 4 隻時，每隻渦蟲可能趨向利己主義，多於 4 隻便出現能分工的利他主義群體。
- 三、渦蟲的溝通方式可能是互相跟隨與互相接觸。
- 四、紅光的能量為可見光中最低，相當於接近夜晚，渦蟲的游泳行為較一致，速率較穩定。
- 五、綠光相當於生活環境上方具有遮蔽的植物，因此渦蟲的游泳行為較一致，速率較穩定。
- 六、藍光的能量相對大，對於渦蟲是一種危險的警示，渦蟲的游泳行為最複雜，游泳速率變異大，且表現出較強的畏光性。
- 七、渦蟲眼點的感光機制與光的能量大小有關，渦蟲對能量較強的藍光及白光畏光性較強；對能量較弱的紅光及綠光則畏光性較弱。
- 八、渦蟲數目增加時，其畏光性漸弱，游泳路徑具週期性，個體之間的接觸頻率會增加，開始出現群體分工的現象。

捌、 參考資料與其他

- [1] Taylor R. Paskin , John Jellies , Jessica Bacher , and Wendy S. Beane (2014 December 10) . Planarian Phototactic Assay Reveals Differential Behavioral Responses Based on Wavelength from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4262426/>
- [2] Yoshitaro Akiyama , Kiyokazu Agata , Takeshi Inoue (2015) . Spontaneous Behaviors and Wall-Curvature Lead to Apparent Wall Preference in Planarian. PLOS one. from <http://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0142214#abstract0>
- [3] 陳奕安 (第十屆旺宏科學獎 優勝 成果報告書) • 渦貼－探討渦蟲吸附及釋放行為 • 取自 http://www.mxeduc.org.tw/ScienceAward/history/projectDoc/10th/doc/SA10-503_final.pdf
- [4] Hamilton, W.D. (1964). The genetical evolution of social behaviour I and II. — Journal of Theoretical Biology 7: 1-16 and 17-52.
- [5] 米爾斯基 (2009) • 群體有什麼好處？ • 科學人，84，20。
- [6] 郭東穎 (中華民國第 54 屆中小學科學展覽會 第一名 作品說明書) • 生物的群聚行為與生存優勢－大肚魚的群體決策行為研究及電腦模擬 • 取自 <http://activity.ntsec.gov.tw/activity/race-1/54/pdf/030319.pdf>
- [7] 鍾佩軒 (第三屆旺宏科學獎 成果報告書) • 渦蟲生態初探 • 取自 <http://www.mxeduc.org.tw/ScienceAward/3rd/doc/SA3-200.pdf>

附錄：於不同實驗中，渦蟲平均游泳速率的原始數據

AV 為平均游泳速率（公分/秒），SD 為標準差

表二：食物刺激下，不同數目渦蟲與光源的平均游泳速率及標準差

渦蟲 個數	1 隻		2 隻		3 隻		4 隻		5 隻	
	AV	SD	AV	SD	AV	SD	AV	SD	AV	SD
A	0.257	0.010	0.209	0.051	0.194	0.008	0.104	0.004	0.128	0.024
B			0.178	0.045	0.170	0.009	0.095	0.007	0.118	0.021
C					0.157	0.009	0.081	0.001	0.078	0.019
D							0.078	0.002	0.048	0.008
E									0.099	0.021

表三：白光下，不同數目渦蟲的平均游泳速率及標準差

渦蟲 個數	1 隻		2 隻		3 隻		4 隻		5 隻	
	AV	SD	AV	SD	AV	SD	AV	SD	AV	SD
A	0.196	0.012	0.163	0.010	0.154	0.014	0.148	0.025	0.190	0.004
B			0.144	0.007	0.153	0.021	0.147	0.022	0.188	0.026
C					0.149	0.028	0.143	0.029	0.184	0.016
D							0.143	0.018	0.175	0.013
E									0.175	0.026

表四：不同波長光源下，單隻渦蟲的平均游泳速率及標準差

光源 顏色	紅色		黃色		綠色		藍色	
	AV	SD	AV	SD	AV	SD	AV	SD
A	0.163	0.011	0.218	0.028	0.173	0.013	0.201	0.055

表五：不同波長光源下，2 隻渦蟲的平均游泳速率及標準差

光源 顏色	紅色		黃色		綠色		藍色	
	AV	SD	AV	SD	AV	SD	AV	SD
A	0.208	0.013	0.180	0.021	0.188	0.023	0.183	0.013
B	0.190	0.011	0.046	0.024	0.175	0.027	0.113	0.035

表六：不同波長光源下，3 隻渦蟲的平均游泳速率及標準差

渦蟲 個數	紅色		黃色		綠色		藍色-1		藍色-2	
	AV	SD	AV	SD	AV	SD	AV	SD	AV	SD
A	0.188	0.014	0.184	0.025	0.178	0.013	0.206	0.206	0.045	0.010
B	0.173	0.014	0.174	0.015	0.162	0.014	0.192	0.192	0.036	0.008
C	0.165	0.007	0.164	0.017	0.156	0.018	0.166	0.011	0.018	0.007

表七：不同波長光源下，4 隻渦蟲的平均游泳速率及標準差

光源 顏色	紅色		黃色		綠色		藍色	
	AV	SD	AV	SD	AV	SD	AV	SD
A	0.195	0.014	0.207	0.022	0.165	0.008	0.208	0.011
B	0.188	0.007	0.187	0.016	0.145	0.018	0.148	0.008
C	0.183	0.006	0.172	0.06	0.140	0.022	0.132	0.014
D	0.170	0.002	0.159	0.014	0.088	0.020	0.092	0.016

表八：不同波長光源下，5 隻渦蟲的平均游泳速率及標準差

光源 顏色	紅色		黃色		綠色		藍色	
	AV	SD	AV	SD	AV	SD	AV	SD
A	0.153	0.026	0.044	0.021	0.197	0.016	0.223	0.029
B	0.133	0.027	0.030	0.024	0.164	0.019	0.201	0.017
C	0.124	0.016	0.023	0.014	0.140	0.031	0.185	0.030
D	0.112	0.021	0.016	0.011	0.125	0.033	0.163	0.009
E	0.057	0.038	0.010	0.004	0.051	0.042	0.139	0.023

【評語】 052013

本計畫探討渦蟲（為扁形動物）為首先發展出神經系統，本研究發現於均勻光線刺激下，渦蟲於個體或群體，均具沿壁繞行繞圈或8字形游泳方式；可能為探測環境行為模式，同時於食物刺激下，渦蟲呈群體分工，同時不同能量的色光刺激下，其游泳速率週期及遠離程度有不同之改變。