

中華民國第 54 屆中小學科學展覽會
作品說明書

高中組 生物（生命科學）科

佳作

040703

攔截記憶碼－探討渦蟲的學習與記憶

學校名稱：國立新竹高級中學

作者： 高二 黃靖博	指導老師： 許慶文
---------------	--------------

關鍵詞：渦蟲、學習、記憶

摘要

本研究透過電刺激使渦蟲改變其負趨光性，並透過量測渦蟲行為之改變觀察其學習與記憶。實驗發現，渦蟲之學習量有其上限，但可透過再刺激學習突破此上限。渦蟲在停止刺激後 3 小時內，其記憶量會迅速下降，最後將會保持一定值，形成記憶。本研究亦發現透過攝食已學習之渦蟲，可改變攝食者之學習行為，但此行為改變無法形成記憶，僅為暫時之行為改變。

透過上述實驗的結果，推測存在有一化學物質影響渦蟲之記憶行為，而此化學物質受到兩種產生機制之影響。其中機制 A 是透過電擊刺激啟動，啟動後就不會關閉；另一機制 C 則是受到電擊刺激啟動，但刺激結束後就會關閉。透過此兩機制的互動，形成渦蟲的學習和記憶模式。

壹、研究動機

記憶究竟是如何形成的?這個問題一直困擾著我，但一直找不到一個適合的生物進行實驗，直到發現學校的生態池裡有不少的渦蟲後，我才決定以渦蟲進行實驗。因為渦蟲在飼養上非常容易，且其神經結構並不複雜，相較於其他模式生物而言，其行為較容易控制。

貳、研究目的

- 一、電刺激對渦蟲學習、記憶之影響
- 二、攝食對渦蟲行為之影響
- 三、電刺激時間長短對渦蟲學習、記憶之影響
- 四、電刺激時間長短對渦蟲體內化學物質之影響
- 五、建立渦蟲的學習、記憶模型

參、研究設備及器材

使用生物	數量	器材	數量	器材	數量
渦蟲	800餘隻	自製學習箱	15個	鱷魚夾	40組
黑殼蝦	30餘隻	自製觀察箱	1個	計時器	1個
		黑色絕緣膠	1捲	滴管	1支
		培養皿	10個	塑膠瓦楞版	1片
		電源供應器	1台	飼養箱	5個
		定時器	1台	電線	若干
		日光燈	1組	單面刀片	一個

肆、研究過程和方法

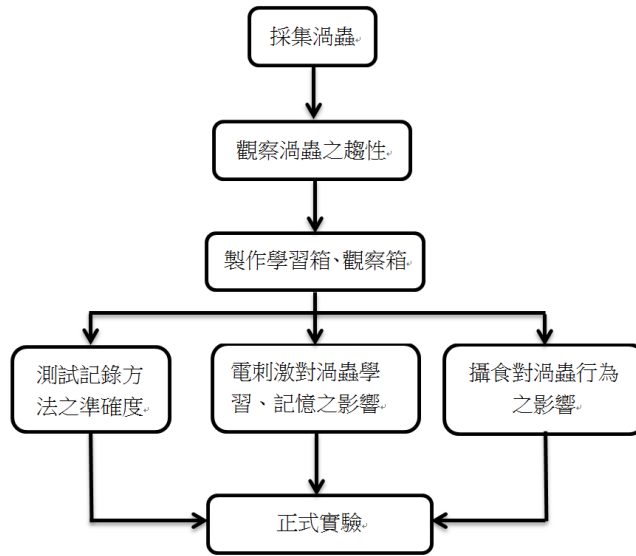


圖 0-1、準備實驗、前實驗流程圖

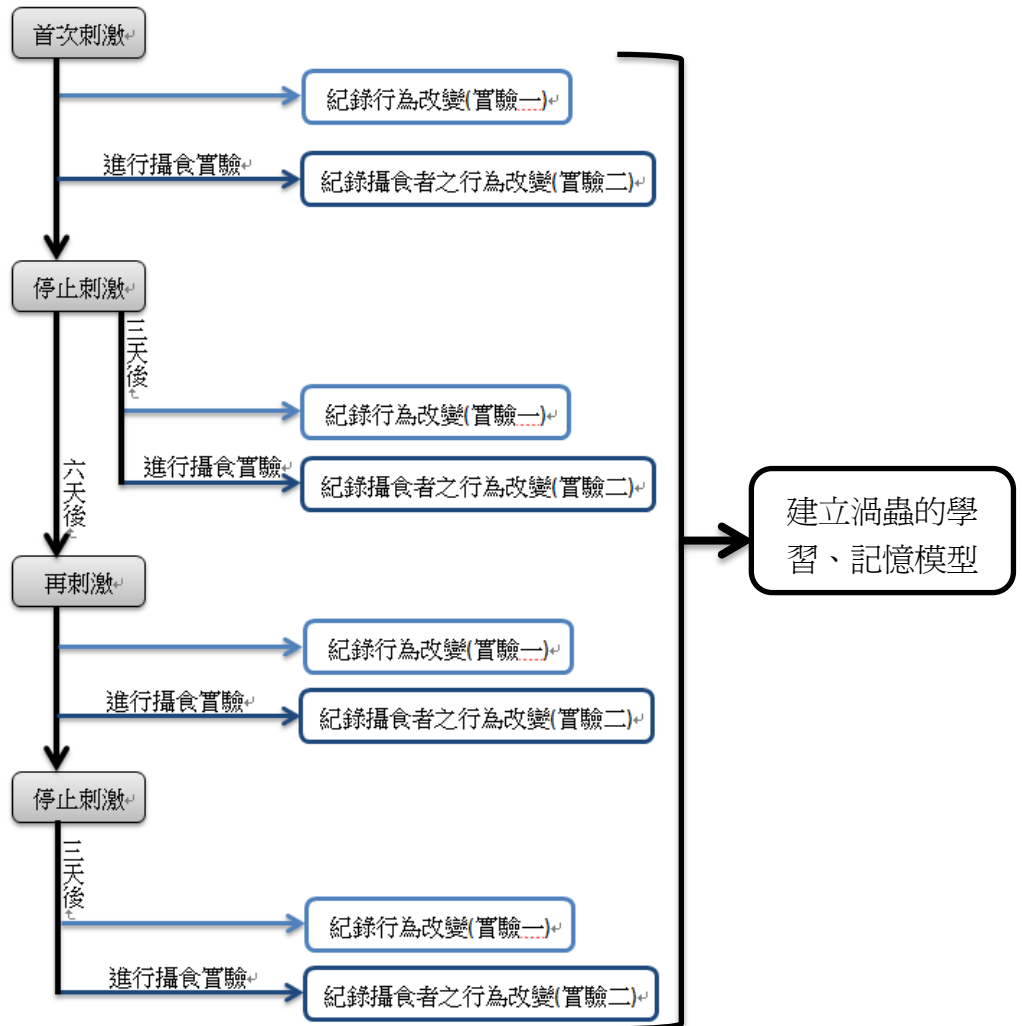


圖 0-2、正式實驗流程圖

準備實驗一：渦蟲趨性觀察---光線強度對渦蟲行為之影響

步驟：

1. 將 50 隻渦蟲置入長方形容器內。
2. 在長方形容器之一端上方放置光源(如圖 0-3 所示)。
3. 放置 30 分鐘後，觀察並記錄容器兩邊之渦蟲數量。
4. 在光源下方分別覆蓋 1、2、3 層白紙，降低光強度，重複上述步驟。



圖 0-3、實驗裝置圖

(右半邊為接近光源，左半邊為遠離光源)

結果：

表 0-1、光線強度對渦蟲行為之影響(單位:隻)

覆蓋層數	無	一	二	三
接近光源	0	2	17	24
遠離光源	50	48	33	26

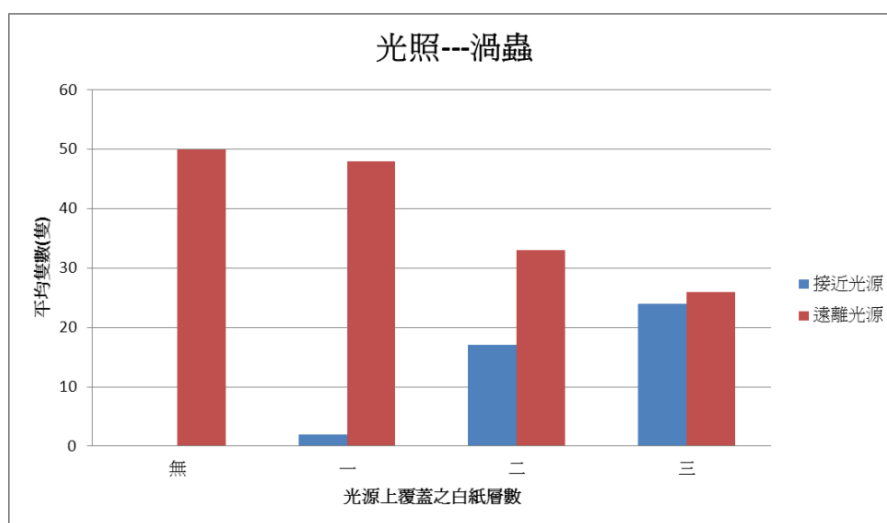


圖 0-4、光線強度對渦蟲行為之影響

由圖 0-4 可發現渦蟲對於光線有明顯之反應；而當光線減弱後，其反應較不明顯。

依據此結果，我設計了學習箱，此學習箱是基於渦蟲性喜生活於黑暗環境中，透過在黑暗處進行電擊刺激，使其對黑暗產生排斥反應，進而影響渦蟲在記錄箱行動時，由明亮處行進至暗處的時間，並以此時間之變化量代表行為改變量(實驗操作方法及記錄說明如附錄-壹)。

準備實驗二：記錄方法準確性之測量

因為渦蟲的外觀相似，個體間的辨識不易，所以無法以單一個體作為觀察紀錄的對象，故改以整個族群的平均表現來代表其行為量。由於每隻渦蟲都是獨立的個體，彼此間行為會有些差異，所以其整體學習行為表現需透過統計平均值來表達，為確認合理的每組渦蟲數，故安排此實驗。

步驟：

1. 隨機挑選 200 隻渦蟲。
2. 分別置入記錄箱內進行記錄。
3. 將 200 組數據以 excel 之亂數打亂。
4. 依照打亂後之順序以 5 個數據為一組，取 10 組。
5. 計算此 10 組數據之變異係數(標準差*100% / 平均值)。
6. 將第 4 步驟改成以 10、15、20、30、40 個數據為一組。

結果：

表 0-2、記錄方法準確性之測量

一組的數據數(個)	5	10	15	20	30	40
變異係數(%)	18.39109	12.58397	8.613243	6.467863	4.145263	4.039922

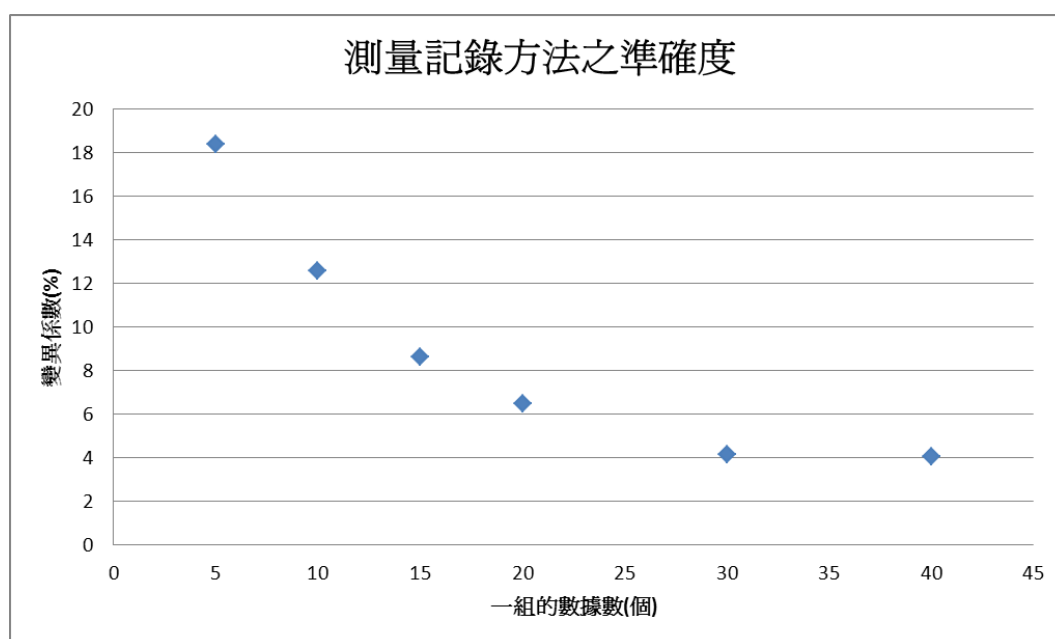


圖 0-5、測量記錄方法之準確度

由圖 0-5 可發現，當每組 30 隻左右，其變異係數降到約 4% 左右，且與 40 隻一組的結果接近，因此可以知道，每組 30 隻渦蟲已是較合理的配置，可量測到較為準確的數值。

※準備實驗結論：

1. 渦蟲具負趨光性。
2. 此紀錄方法每組渦蟲需 30 隻以上，其變異係數才能降至 4%。

※補充說明：

本研究將進行吞食實驗，預估約有 150 隻渦蟲會被其他渦蟲食用，若實驗失敗，則這些渦蟲的犧牲將是一種浪費。同時，若該隻渦蟲曾被電擊學習後，除非後續有其連續性實驗，否則就不能再用，若實驗失敗，則會損失約 640 隻渦蟲。基於尊重生命與節省渦蟲用量這兩個原因，決定先進行「前實驗」，確定攝食是否確實可以影響攝食者(僅 20 隻渦蟲被攝食犧牲);並以每組 10 隻渦蟲探究渦蟲的學習與記憶曲線趨勢(雖然準確性可能有所不足，但可先透過 140 隻左右之渦蟲確認可行性)，再進行每組 30 隻且準確性較高的「正式實驗」。

雖然所需耗費的實驗時間與精力將增加，但每一隻渦蟲的生命可以被尊重，其犧牲也才有價值。

為方便說明，先進行定義(此定義是根據第一階段實驗結果所訂)：

1. 學習量：首次電擊結束時，當下渦蟲行為之變化量。
2. 記憶保存量：首次電擊結束後，3 天後渦蟲行為之變化量。
3. 再刺激學習量：首次電擊結束後 6 天再次進行電擊(持續電擊 24 小時)，再次電擊結束後，當下渦蟲行為之變化量。
4. 再刺激記憶保存量：首次電擊結束後 6 天再次進行電擊(持續電擊 24 小時)，再次電擊結束後 3 天後渦蟲行為之變化量。
5. 行為改變量：渦蟲在攝食後其行為之變化量。
6. 遺忘量：學習量與記憶保存量之差值。
7. 再刺激遺忘量：再刺激學習量與再刺激記憶保存量之差值。
8. 再刺激記憶增加量：再刺激記憶保存量與記憶保存量之差值。

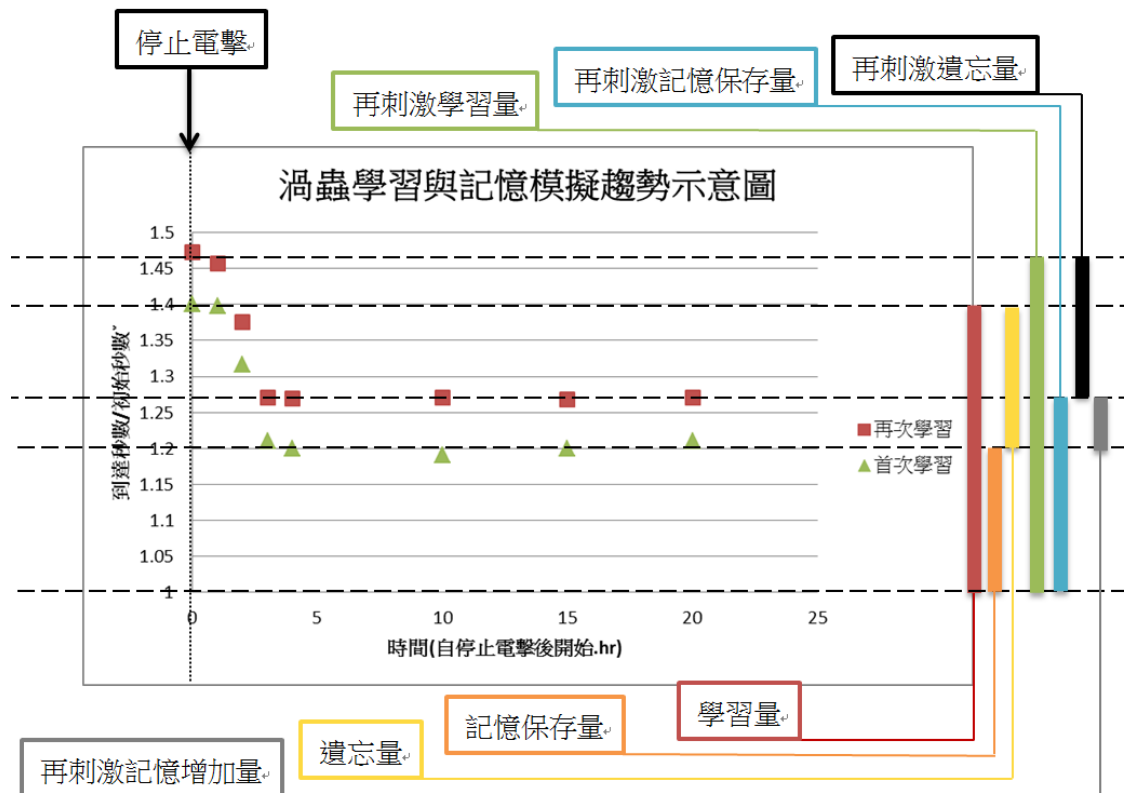


圖 0-6、渦蟲學習與記憶模擬趨勢示意圖

(紅線長:學習量；橘線長:記憶保存量；黃線長:遺忘量；綠線長:再刺激學習量；藍線長:再刺激記憶保存量；黑線長:再刺激遺忘量；灰線長:再刺激記憶增加量)

一、前實驗---定性實驗

(一) 電刺激對渦蟲之學習、記憶之影響

1. 電刺激對渦蟲學習之影響

步驟：

- (1) 將 3 組渦蟲(10 隻/組)分別置於記錄箱內。
- (2) 記錄電擊學習前之到達秒數(初始秒數)。
- (3) 將 3 組渦蟲(10 隻/組)分別移至學習箱內。
- (4) 開始電擊(其中一組為對照組不進行電擊。因為實驗場地之限制，無法 24 小時記錄，故實驗組 1 及實驗組 2 開始電擊之時間相差 12 小時，以此來填補實驗組 1 所缺少的 12 小時)。
- (5) 每 3 小時記錄一次。
- (6) 處理數據 (學習量=到達秒數/初始秒數)。

結果：

表 1-1、電刺激對渦蟲學習之影響---處理後數據
(平均到達秒數/平均初始秒數)

刺激時間(hr)	0	3	6	9	12	15	18	21	24
對照組	1.00	1.01	0.99	0.89	1.01				0.98
實驗組1	1.00	1.20	1.44	1.55	1.61				1.59
實驗組2	1.00				1.69	1.54	1.54	1.68	1.52
刺激時間(hr)	27	30	33	36	39	42	45	48	
對照組	0.89	0.97	1.03	0.99				1.04	
實驗組1	1.49	1.56	1.53	1.51				1.60	
實驗組2									

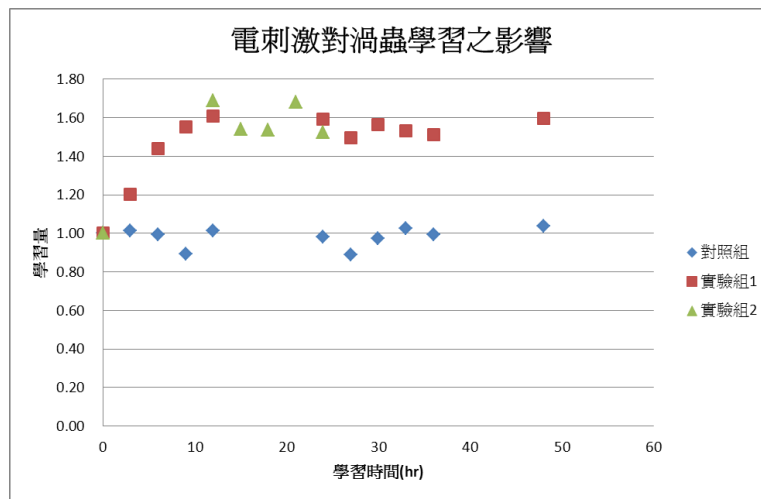


圖 1-1、電刺激對渦蟲學習之影響

由圖 1-1 可知，在刺激 0~12 小時間，學習量會隨著刺激時間的增加而增加，但在 12 小時之後，學習量則會達飽和狀態。此時，持續的外在刺激已無法明顯改變渦蟲的行為。

2. 電刺激對渦蟲記憶之影響

步驟：

- (1) 將渦蟲(10 隻/組)分別置於紀錄箱中，記錄電擊學習前之到達秒數 (初始秒數)。
- (2) 將渦蟲(10 隻/組)分別移至學習箱內。
- (3) 開始電擊(分成電擊 3、6、9、12、15、18、24、48、72、96 小時)。
- (4) 電擊結束後，移至記錄箱，並記錄到達秒數。
- (5) 將渦蟲置回學習箱內，停止電擊。
- (6) 每 3 小時記錄一次，重複紀錄 12 小時。
- (7) 處理數據 (記憶量=到達秒數/初始秒數)。

結果：

表 1-2、電刺激對渦蟲記憶之影響---處理後數據(自停止電擊後開始計時)

停止刺激後 之時間(hr)	0	3	6	9	12
對照組	1.01	0.99	1.06	1.02	1.08
3小時電擊組	1.11	1.11	1.12	1.13	1.15
6小時電擊組	1.12	1.14	1.13	1.11	1.12
9小時電擊組	1.13	1.09	1.07	1.07	1.10
12小時電擊組	1.22	1.09	1.09	1.00	1.05
15小時電擊組	1.26	1.14	1.08	1.07	1.13
18小時電擊組	1.26	1.05	1.13	1.09	1.03
21小時電擊組	1.40	1.20	1.16	1.14	1.14
24小時電擊組	1.55	1.23	1.28	1.21	1.25
48小時電擊組	1.41	1.27	1.17	1.28	1.28
72小時電擊組	1.56	1.30	1.26	1.26	1.29
96小時電擊組	1.47	1.29	1.30	1.24	1.29

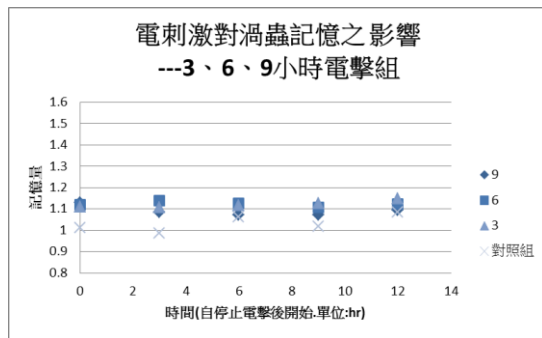


圖 1-2、電刺激對渦蟲記憶之影響
---3、6、9 小時電擊組

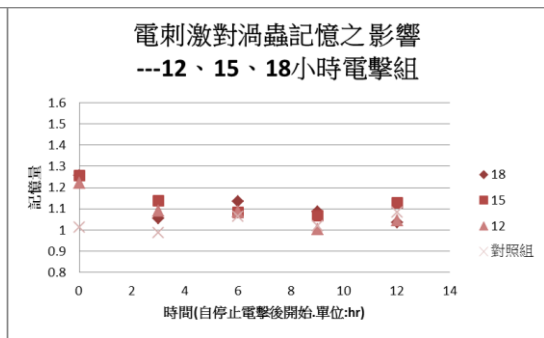


圖 1-3、電刺激對渦蟲記憶之影響
---12、15、18 小時電擊組

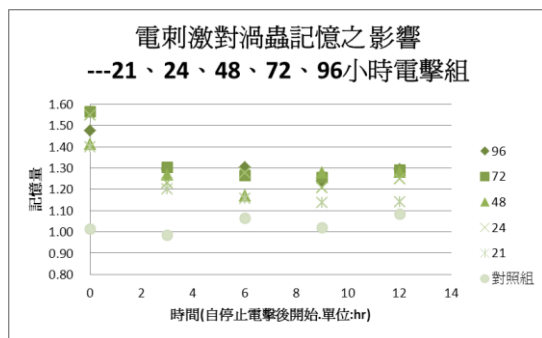


圖 1-4、電刺激對渦蟲記憶之影響
---21、24、48、72、96 小時電擊組

表 1-3、電刺激對渦蟲記憶之影響---結果

電擊時間(hr)	結果
3、6、9	記憶量與學習量相差不大，並無明顯下降(約在1.1左右)。
12、15、18	在電擊結束後之三小時內，記憶量下降， 三小時後維持穩定(約在1.1左右)。
24、48、72、96	在電擊結束後之三小時內，記憶量下降， 三小時後維持穩定(穩定值較電擊12、15、18小時高)。

爲了仔細觀察停止刺激後3小時內記憶量之變化，故以164小時電擊組進行實驗，在停止刺激後3小時內，以每隔1小時記錄一次來呈現其變化。

表 1-4、電刺激結束後時間對渦蟲記憶之影響---處理後數據

停止刺激後之時間(hr)	0	1	2	3	25	28
164小時電擊組	1.64	1.64	1.56	1.52	1.53	1.53

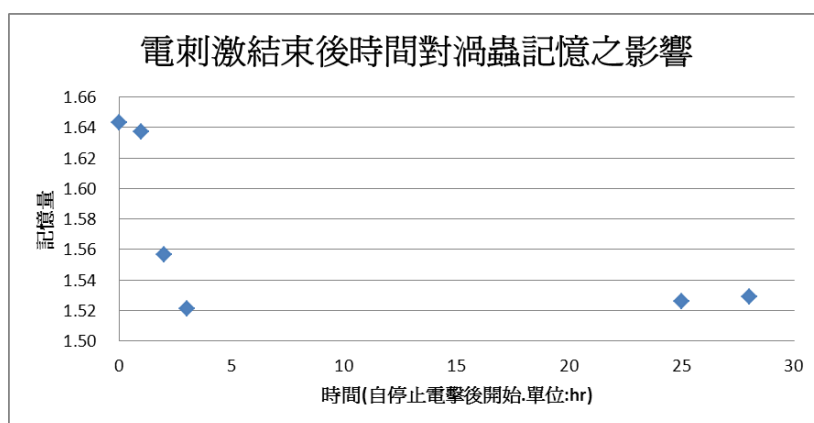


圖 1-5、電刺激結束後時間對渦蟲記憶之影響

由圖 1-5 可知，在停止刺激3小時內，隨著時間的增加，記憶量下降的幅度亦增加。

3. 探討渦蟲之長期記憶

步驟：

- (1) 將「電刺激對渦蟲記憶之影響」所用之渦蟲靜置180小時。
- (2) 靜置完畢後分別至於記錄箱內進行紀錄。
- (3) 處理數據，與記憶保存量(停止刺激後3~12小時內數據之平均值)進行比較。

結果：

表 1-5、長期記憶---處理後數據

	電擊結束後3~12小時數據平均值	電擊結束後180小時之數據
6小時電擊組	1.12	1.11
9小時電擊組	1.08	1.07
15小時電擊組	1.10	1.15
18小時電擊組	1.08	1.16
21小時電擊組	1.19	1.23
24小時電擊組	1.24	1.26
96小時電擊組	1.30	1.18

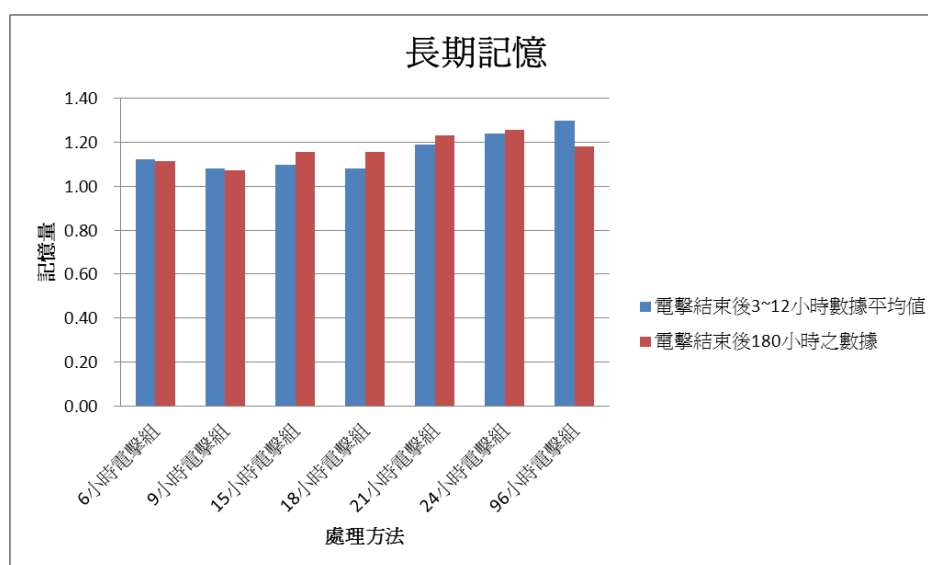


圖 1-6、長期記憶

由圖 1-6 可知，在停止刺激 180 小時後之記憶保存量變化不大，此時應已形成為長期記憶。

4. 電刺激對渦蟲再學習之影響

步驟：

- (1) 將「記錄渦蟲記憶之保存曲線」所用之渦蟲(停止電擊 180 小時後)再次施予電擊 24 小時。
- (2) 在電擊的 24 小時內，每 3 小時記錄一次。
- (3) 處理數據(再刺激學習量=到達秒數/初始秒數)。

結果：

表 1-6、電刺激對渦蟲再學習之影響---處理後數據

再刺激時間(hr)	0	3	6	9	12	24
對照組	1.00	1.04	1.04	1.06	1.06	1.11
18小時電擊組	1.16	1.28	1.46	1.51	1.46	1.50
21小時電擊組	1.23	1.34	1.45	1.63	1.73	1.71
24小時電擊組	1.26	1.53	1.62	1.77	1.81	1.81
96小時電擊組	1.18	1.46	1.78	1.89	1.87	1.83

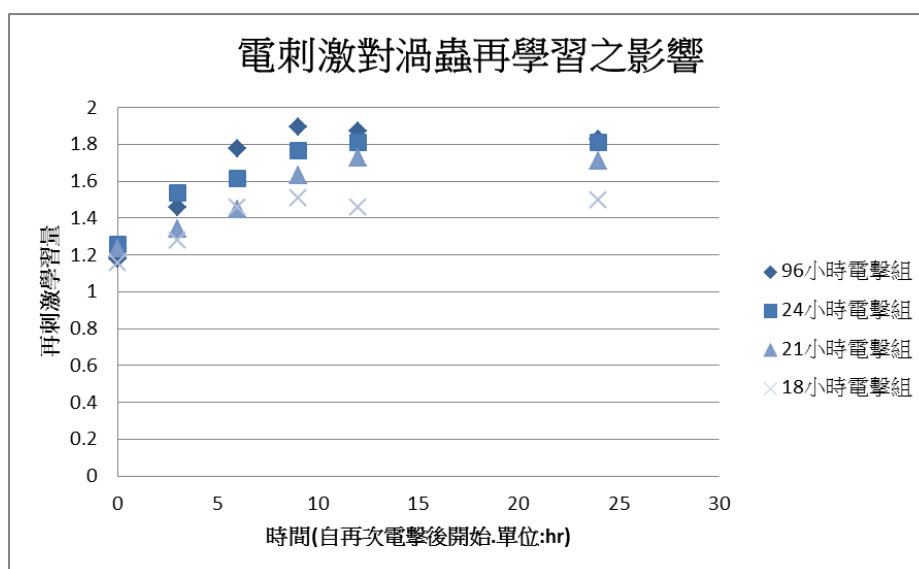


圖 1-7、電刺激對渦蟲再學習之影響

由圖 1-7 可知,再次的電擊學習可增加其學習效果,原電擊時間愈長者,再學習之增加效果愈好。而且,與圖 1-1 相同,在約 12 小時的學習之後,其學習量又幾乎不會有明顯的增加,形成飽和狀態。

(二) 攝食對渦蟲行為之影響

1. 攝食已學習之渦蟲對攝食者行為之影響

(1) 事前準備

a. 被食用之渦蟲

- 取 4 組(5 隻/組)渦蟲分別置於記錄箱內。
- 記錄電擊學習前之到達秒數(初始秒數)。
- 將 4 組渦蟲分別移至學習箱內。
- 開始電擊(分成未電擊、電擊 72hr、電擊 96hr)。
- 電擊結束後,移至紀錄箱,並記錄到達秒數。
- 處理數據(學習量=到達秒數/初始秒數)。

b. 攝食者

(a) 取 4 組(5 隻/組)未學習之渦蟲，分別置於記錄箱中，記錄到達秒數 (初始秒數)。

(b) 停止餵食一週。

(2) 實驗步驟

a. 將被食用之渦蟲製作成乾燥標本並磨碎之，分別置於未學習渦蟲的培養皿內。

b. 24、74 小時後記錄未學習之渦蟲到達秒數。

c. 處理數據(行為改變量=到達秒數/初始秒數)。

結果：

表 1-7、被食用之渦蟲學習量

---處理後數據

	電擊後
未學習	1.00
72hr電擊組	1.29
96hr電擊組	1.24

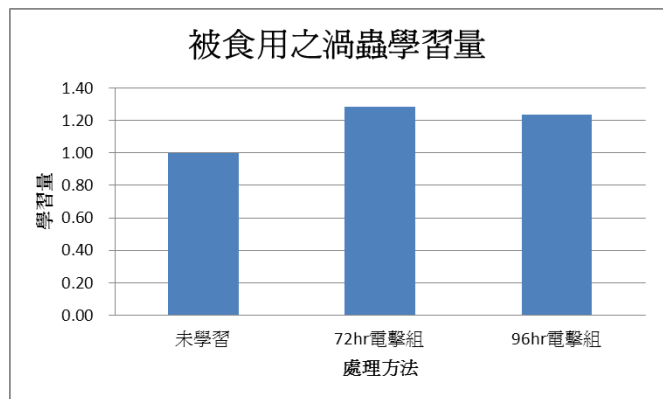


圖 1-8、被食用之渦蟲學習量

表 1-8、攝食相同物種對攝食者行為改變量之影響---處理後數據

攝食後之時間(hr)	0	24	74
72小時電擊組	1.00	1.20	0.96
96小時電擊組	1.00	1.18	1.01
未食用	1.00	1.00	0.97
未學習	1.00	1.04	0.97

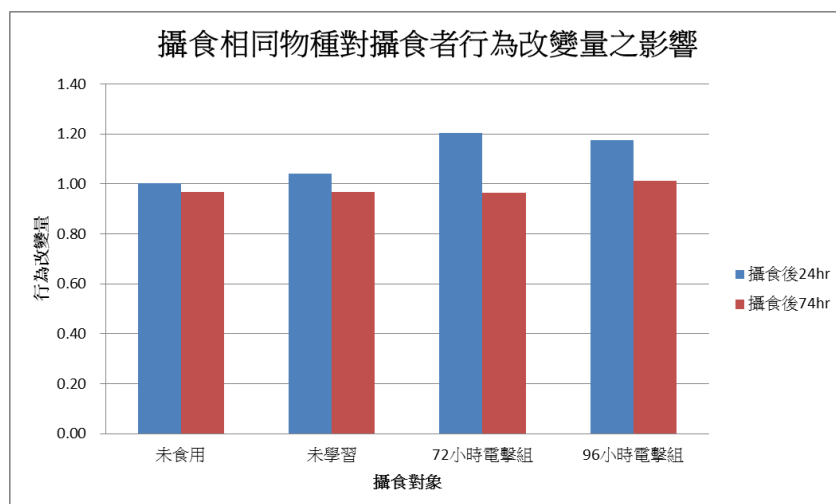


圖 1-9、攝食相同物種對攝食者行為改變量之影響

由圖 1-9 可知，在攝食已學習之渦蟲 24 小時後，攝食者本身之行為會有所改變，且其改變趨勢與被食用之渦蟲學習量十分相似。但在攝食後 74 小時，攝食者行為已不受影響，回復到初始狀態。

2. 攝食不同物種(黑殼蝦)對攝食者行為之影響

1. 事前準備

(1) 被食用之黑殼蝦

- 取 2 組(5 隻/組)黑殼蝦，分別置於記錄箱內，以錄影之方式記錄 5 分鐘內黑殼蝦在光亮處停留之平均秒數。
- 將 2 組黑殼蝦分別移至學習箱內。
- 開始電擊(分成未電擊、電擊 24 小時)。
- 電擊結束後，分別移至記錄箱內，記錄 5 分鐘內在光亮處之平均停留秒數。

(2) 攝食者

- 取 2 組(5 隻/組)未學習之渦蟲，分別置於記錄箱中，記錄到達秒數(初始秒數)。
- 停止餵食一週。

2. 實驗步驟

- 將被食用之黑殼蝦置於冰塊上，待其麻痺後以刀片切割成兩半(自頭胸部後一節)，將頭胸部置於未學習之渦蟲之培養皿內。

- (2) 24、48、72 小時後記錄未學習之渦蟲到達秒數。
- (3) 處理數據(行為改變量=到達秒數/初始秒數)。

結果：

表 1-9、被吃之黑殼蝦學習量---處理後數據

刺激時間(hr)	0	24
對照組	1.00	0.87
電擊24小時	1.00	4.16

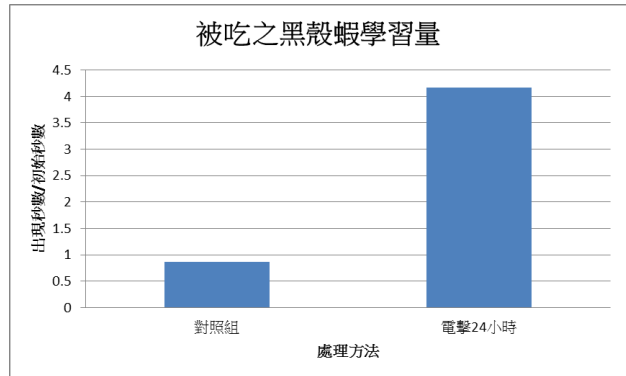


圖 1-10、被吃之黑殼蝦學習量

表 1-10、攝食不同物種對行為之影響---處理後數據

攝食後之時間(hr)	0	24	72
未學習	1.00	1.11	0.94
24小時電擊組	1.00	1.54	1.03
未食用	1.00	0.96	0.97

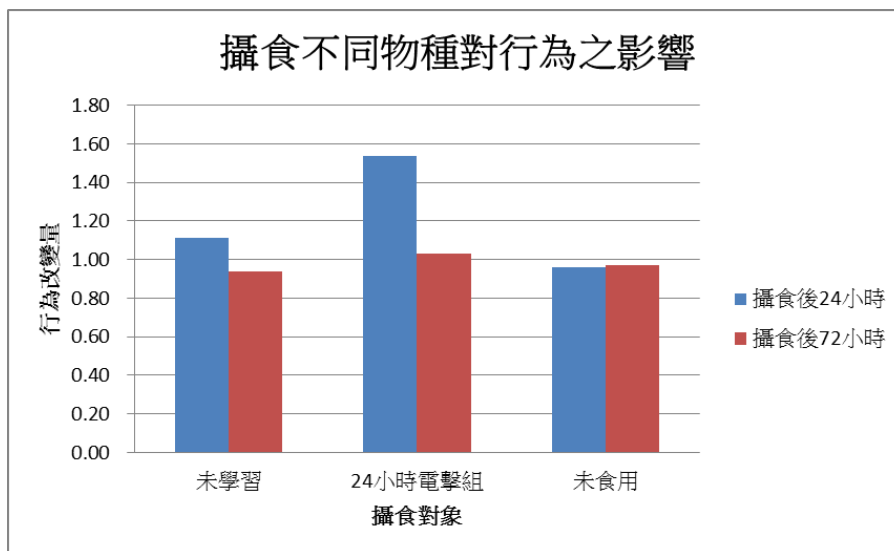


圖 1-11、攝食不同物種(黑殼蝦)對行為之影響

由圖 1-11 可知，食用已學習之黑殼蝦 24 小時後，攝食者本身之行為亦會改變。但在攝食後 72 小時，其行為已不受影響，回復到初始狀態。此跨物種攝食情形與攝食相同物種(圖 1-9)之狀況相似。

※前實驗結論：

(一) 電刺激對渦蟲之學習、記憶之影響

1. 電刺激確實可使渦蟲發生行為改變，且能留下記憶。而其學習量在長時間刺激後會達到飽和而無法增加。
2. 在電擊停止後 3 小時內，記憶量會下降，且隨著刺激時間的增加，下降的幅度亦增加。
3. 電擊停止 3 小時後，記憶量漸趨穩定。換言之，學習被保存下來形成記憶。且此記憶可長期存在(至少維持 180 小時)。
4. 再度電刺激可增加渦蟲之學習效果。

(二) 攝食對渦蟲行為之影響

1. 透過攝食已學習之渦蟲能改變攝食者之行為，且其行為改變與被食用之渦蟲學習量趨勢相似。
2. 攝食後三天，攝食者之行為已不受影響。可推測透過攝食而取得之影響攝食者行為改變的化學物質無法影響攝食者神經迴路之改變。
3. 攝食不同物種(黑殼蝦)對攝食者行為之影響亦相同。

二、正式實驗

(一) 電刺激時間長短對渦蟲學習、記憶之影響

步驟：

1. 電刺激時間長短對渦蟲學習量之影響
 - (1) 取 11 組(30 隻/組)渦蟲分別置於記錄箱內。
 - (2) 記錄電擊學習前之到達秒數(初始秒數)。
 - (3) 將 11 組渦蟲分別移至學習箱內。
 - (4) 開始電擊(分成電擊 3、6、9、12、15、18、21、24、48、72、96 小時)。
 - (5) 電擊結束後，分別移至記錄箱內，記錄電擊學習後之到達秒數。
 - (6) 處理數據(學習量=到達秒數/初始秒數)。
2. 電刺激時間長短對渦蟲記憶保存量之影響
 - (1) 延續「電刺激時間長短對渦蟲學習量之影響」所用之渦蟲。在電擊結束後，將其靜置 3 天。
 - (2) 靜置 3 天後，將 11 組渦蟲分別移至記錄箱內，記錄其到達秒數。
 - (3) 處理數據(記憶保存量=到達秒數/初始秒數)。
3. 電刺激時間長短對渦蟲再刺激學習量之影響
 - (1) 延續「電刺激時間長短對渦蟲記憶保存量之影響」所用之渦蟲。在實驗結束後，將其再靜置 3 天。
 - (2) 將 11 組渦蟲分別移至學習箱內。
 - (3) 開始電擊(皆電擊 24 小時)。
 - (4) 電擊結束後，將 11 組渦蟲分別移至記錄箱內，記錄其到達秒數。
 - (5) 處理數據(再刺激學習量=到達秒數/初始秒數)。
4. 電刺激時間長短對渦蟲再刺激記憶保存量之影響
 - (1) 延續「電刺激時間長短對渦蟲再刺激學習量之影響」所用之渦蟲。在實驗結束後，將其再靜置 3 天。
 - (2) 靜置 3 天後，將 11 組渦蟲分別移至記錄箱內，記錄其到達秒數。
 - (3) 處理數據(記憶保存量=到達秒數/初始秒數)。

(二) 電刺激時間長短對渦蟲體內化學物質之影響

步驟：

1. 被食用之渦蟲(學習量階段)
 - (1) 取 7 組 (5 隻/組)未學習之渦蟲。
 - (2) 分別將其至於學習箱內。
 - (3) 開始電擊(分成電擊 6、12、18、24、48、72、96 小時)。

2. 實驗對象
 - (1) 取 7 組(5 隻/組)未學習之渦蟲，分別置於記錄箱中，記錄到達秒數 (初始秒數)。
 - (2) 停止餵食一週。

3. 實驗步驟
 - (1) 將被食用之渦蟲製作成乾燥標本並磨碎之，分別置於未學習渦蟲的培養皿內。
 - (2) 24 小時後記錄未學習之渦蟲到達秒數。
 - (3) 處理數據(行為改變量=到達秒數/初始秒數)。
 - (4) 將被食用之渦蟲改成
 - a. 記憶保存量階段：
實驗方法同上，但在電擊結束後 3 天才進行攝食之實驗。
 - b. 再刺激學習量階段：
實驗方法同上，但在電擊結束後 6 天，再次施予電擊(皆電擊 24 小時)，電擊結束後才進行攝食之實驗。
 - c. 再刺激記憶保存量階段：
實驗方法同上，但在電擊結束後 6 天，再次施予電擊(皆電擊 24 小時)，電擊結束後 3 天才進行攝食之實驗。
 - (5) 重複上述步驟。

(三) 建立渦蟲的學習、記憶模型

步驟：

1. 首次刺激時間對遺忘量、再刺激遺忘量之影響
 - (1) 利用「電刺激時間長短對渦蟲學習、記憶之影響」之數據。
 - (2) 處理數據：
 - a. $\text{遺忘量} = \text{學習量} - \text{記憶保存量}$
 - b. $\text{再刺激遺忘量} = \text{再刺激學習量} - \text{再刺激記憶保存量}$
2. 首次刺激時間對再刺激記憶增加量之影響
 - (1) 利用「電刺激時間長短對渦蟲學習、記憶之影響」之數據。
 - (2) 處理數據： $\text{再刺激記憶增加量} = \text{再刺激記憶保存量} - \text{記憶保存量}$
3. 比較各階段間渦蟲體內化學物質含量之變化
 - (1) 利用「電刺激時間長短對渦蟲體內化學物質之影響」之數據。
 - (2) 處理數據：
 - a. $\text{學習量階段} - \text{記憶保存量階段}$
 - b. $\text{再刺激學習量階段} - \text{再刺激記憶保存量階段}$
 - c. $\text{再刺激記憶保存量階段} - \text{記憶保存量階段}$
4. 利用以上所有實驗之數據進行交叉比對建立記憶形成模型。

伍、實驗結果---正式實驗

一、電刺激時間長短對渦蟲學習、記憶之影響

表 2-1、電刺激時間長短對渦蟲學習、記憶之影響---處理後數據

刺激時間(hr)	學習量	記憶保存量	再刺激學習量	再刺激記憶保存量
3	1.03	1.01	1.17	1.11
6	1.04	1.02	1.18	1.12
9	1.05	1.03	1.18	1.13
12	1.09	1.06	1.24	1.17
15	1.13	1.10	1.20	1.18
18	1.20	1.14	1.22	1.20
21	1.22	1.16	1.23	1.20
24	1.21	1.19	1.25	1.20
48	1.27	1.20	1.29	1.28
72	1.27	1.20	1.34	1.26
96	1.28	1.22	1.45	1.31

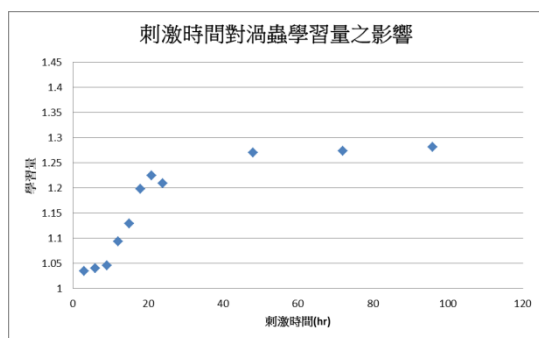


圖 2-1、刺激時間對渦蟲學習量之影響

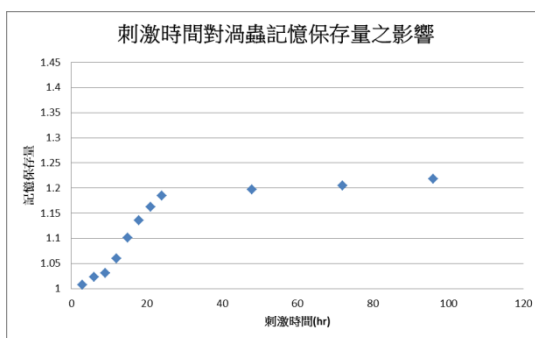


圖 2-2、刺激時間對渦蟲記憶保存量之影響

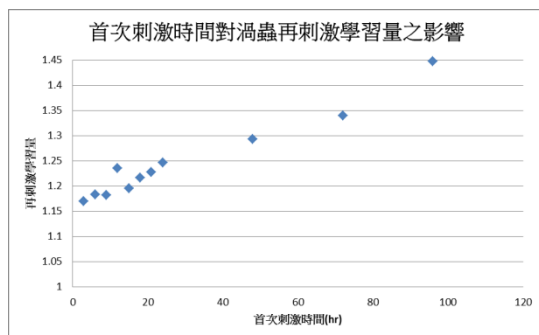


圖 2-3、首次刺激時間對渦蟲再刺激學習量之影響

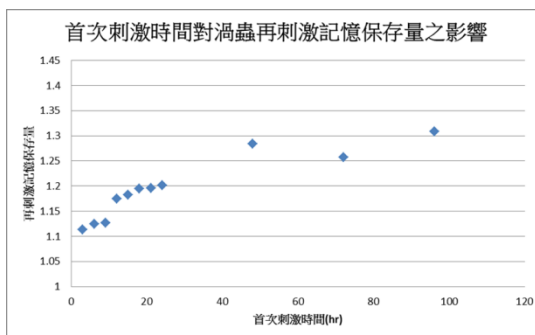


圖 2-4、首次刺激時間對渦蟲再刺激記憶保存量之影響

由圖 2-1、圖 2-2、圖 2-3、圖 2-4 可知，學習量、記憶保存量、再刺激學習量、再刺激記憶保存量之趨勢皆為隨著首次刺激時間增長，其值亦增加。表 2-2 為此四圖之細部變化結果。

表 2-2、電刺激時間長短對渦蟲學習、記憶之影響---結果

首次刺激時間(hr)	3~9	12~24	>24
學習量	緩慢增加	增加迅速	達飽和
記憶保存量	緩慢增加	增加迅速	達飽和
再刺激學習量	斜直線		
再刺激記憶保存量	緩慢增加	緩慢增加	達飽和

(備註：再刺激記憶保存量非漸進式增加，三階段之落差明顯)

二、電刺激時間長短對渦蟲體內化學物質之影響

由第一階段實驗「觀察渦蟲能否透過攝食取得記憶」中發現渦蟲可透過攝食改變行為，為探討此影響攝食者行為之化學物質在不同學習階段(學習量、記憶保存量、再刺激學習量、再刺激記憶保存量)時的含量，將處於不同學習階段之渦蟲餵食給未學習之渦蟲，透過觀察其行為改變量之變化，間接判斷此化學物質在不同學習階段時在渦蟲體內之變化。

表 2-3、刺激時間長短對渦蟲體內化學物質之影響---不同階段---處理後數據

攝食對象之刺激時間(hr)	6	12	18	24	48	72	96
學習量階段	1.13	1.18	1.24	1.28	1.43	1.49	1.47
記憶保存量階段	1.08	1.10	1.16	1.17	1.20	1.22	1.24
再刺激學習量階段	1.18	1.19	1.20	1.22	1.37	1.42	1.47
再刺激記憶保存量階段	1.17	1.18	1.17	1.18	1.28	1.32	1.34

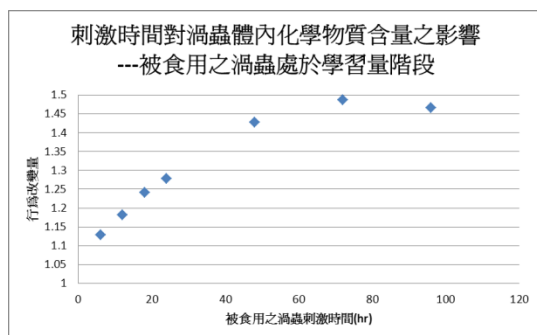


圖 2-5、刺激時間對渦蟲體內化學物質之影響
---被食用者處於學習量階段

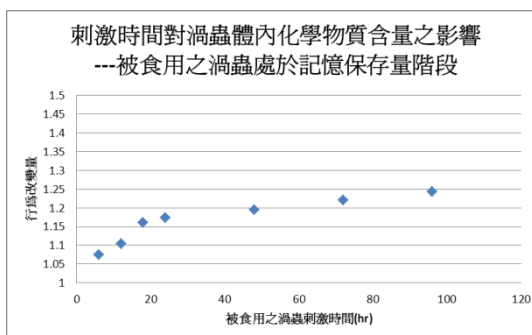


圖 2-6、刺激時間對渦蟲體內化學物質之影響
---被食用者處於記憶保存量階段

由圖 2-5、圖 2-6 可知，食用處於學習量階段或記憶保存量階段之渦蟲，攝食者之行為改變將隨著被食用者的學習時間增加而增加，但最後會達到飽和。

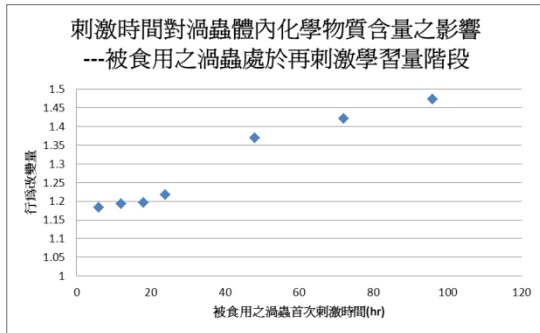


圖 2-7、刺激時間對渦蟲體內化學物質之影響
---被食用者處於再刺激學習量階段

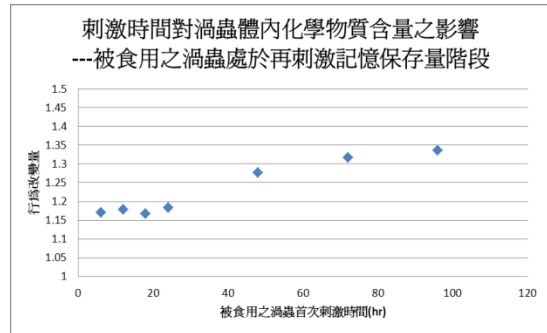


圖 2-8、刺激時間對渦蟲體內化學物質之影響
---被食用者處於再刺激記憶保存量階段

由圖 2-7 可知，食用再刺激學習量階段之渦蟲後，攝食者之行爲改變會隨著被食用者的學習時間增加而增加，但在實驗範圍內則未見有飽和現象。

由圖 2-8 可知，食用再刺激記憶保存量階段之渦蟲後，攝食者之行爲改變隨著被食用者的學習時間增加而增加，但最後會達到飽和。

三、建立渦蟲的學習、記憶模型

(一) 首次刺激時間對遺忘量、再刺激遺忘量之影響

表 3-1、首次刺激時間對遺忘量、再刺激遺忘量之影響

刺激時間(hr)	3	6	9	12	15	18
遺忘量	0.03	0.02	0.02	0.03	0.03	0.06
再刺激遺忘量	0.06	0.06	0.06	0.06	0.01	0.02
刺激時間(hr)	21	24	48	72	96	
遺忘量	0.06	0.02	0.07	0.07	0.06	
再刺激遺忘量	0.03	0.05	0.01	0.08	0.14	

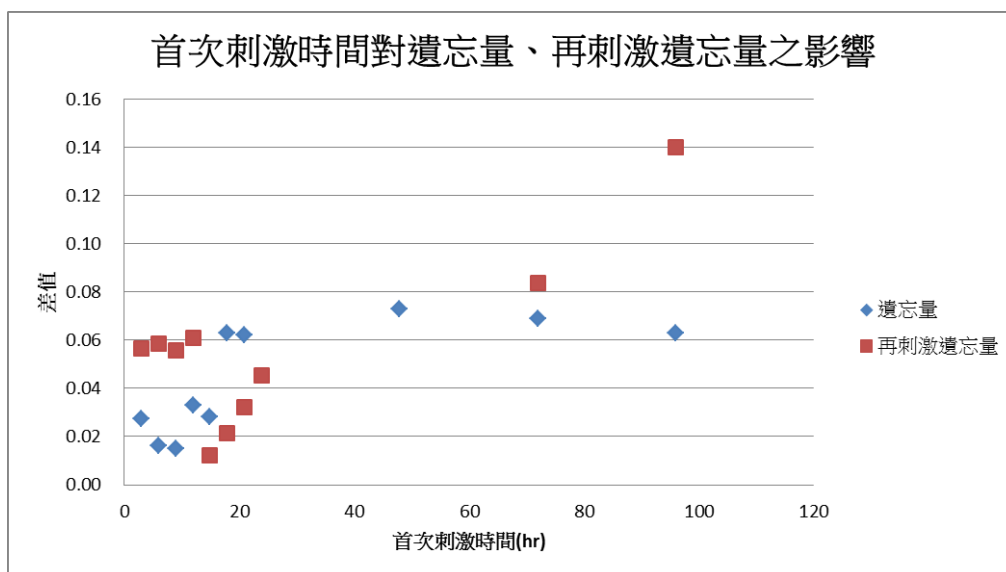


圖 3-1、首次刺激時間對遺忘量、再刺激遺忘量之影響

遺忘量之 24 小時數值偏低，其原因為圖 2-1 之 24 小時之值偏低造成；而再刺激遺忘量之 48 小時數值偏低，其原因為圖 2-4 之 48 小時之值偏高。兩者應為量測上之誤差，為方便分析，所以未置入圖中。

表 3-2、首次刺激時間對遺忘量、再刺激遺忘量之影響---結果

	結果	
遺忘量	隨著刺激時間增加，遺忘量越高，但在長時間刺激後有達飽和之現象。	
再刺激遺忘量	首次刺激時間 \leq 12hr	首次刺激時間 $>$ 12hr
	再刺激遺忘量為定值，約為0.06	隨著刺激時間增加，再刺激遺忘量越高

(二) 首次刺激時間對再刺激記憶增加量之影響

表 3-3、首次刺激時間對再刺激記憶增加量之影響

刺激時間(hr)	3	6	9	12	15	18
再刺激記憶增加量	0.11	0.10	0.10	0.11	0.08	0.06
刺激時間(hr)	21	24	48	72	96	
再刺激記憶增加量	0.03	0.02	0.09	0.05	0.09	

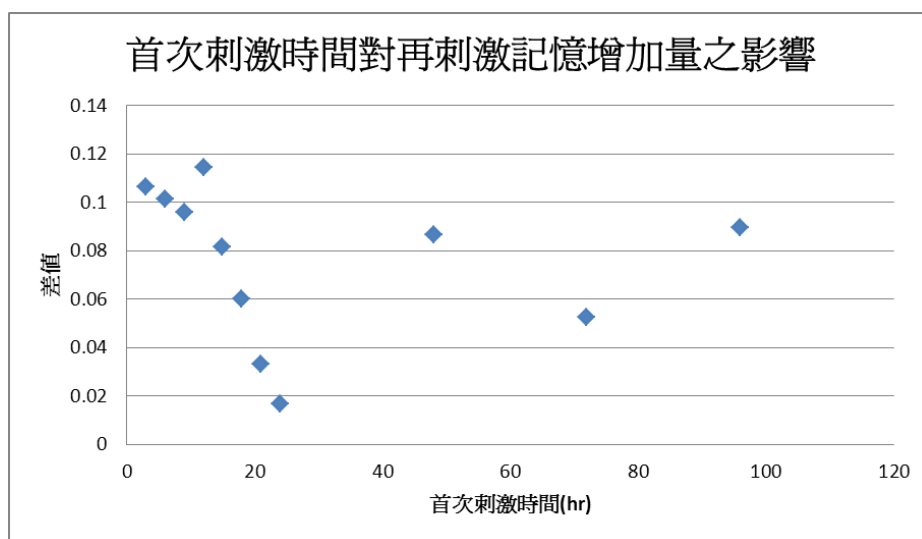


圖 3-2、首次刺激時間對再刺激記憶增加量之影響

表 3-4、首次刺激時間對再刺激記憶增加量之影響---結果

	首次刺激時間 $<$ 24hr	首次刺激時間 $>$ 24hr
結果	隨著首次刺激時間之增加而下降	隨著首次刺激時間之增加而增加 在長時間刺激後有達飽和之現象。

(三) 比較各階段間渦蟲體內化學物質含量之變化

為觀察各階段間此影響攝食者行為之化學物質含量之變化，將「透過攝食改變行為觀察化學物質在渦蟲體內之含量」之數據交叉相減，將此行為改變量差視為化學物質含量的變化，進行比對。

表 3-5、比較各階段間渦蟲體內化學物質含量之變化

被食用者刺激時間(hr)	6	12	18	24	48	72	96
學習量-記憶保存量	0.05	0.08	0.08	0.10	0.23	0.27	0.22
再刺激學習量-再刺激記憶保存量	0.01	0.01	0.03	0.03	0.09	0.11	0.14
再記憶保存量-記憶保存量	0.10	0.07	0.01	0.01	0.08	0.10	0.09

1. 學習量階段與記憶保存量階段之差

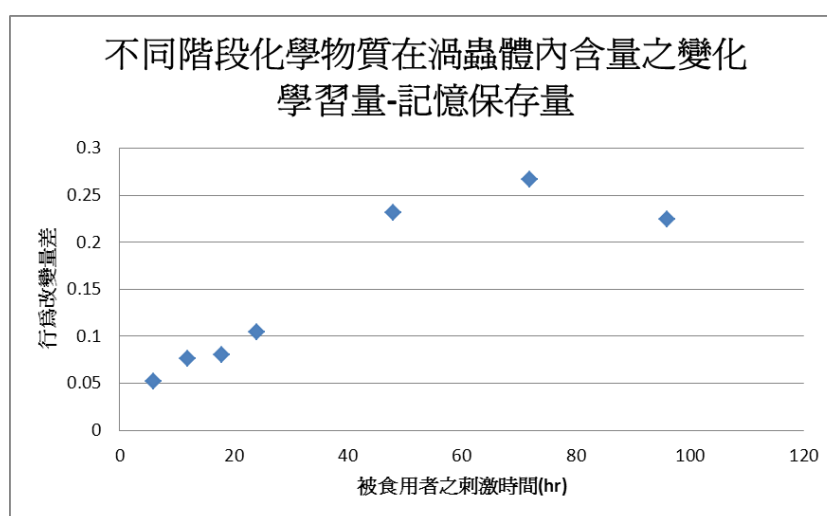


圖 3-3、學習量階段與記憶保存量階段之差

由圖 3-3 可知，隨著刺激時間之增加，在停止電擊後攝食者行為改變量差(化學物質減少的量)亦增加。

2. 再刺激學習量階段與再刺激記憶保存量階段之差

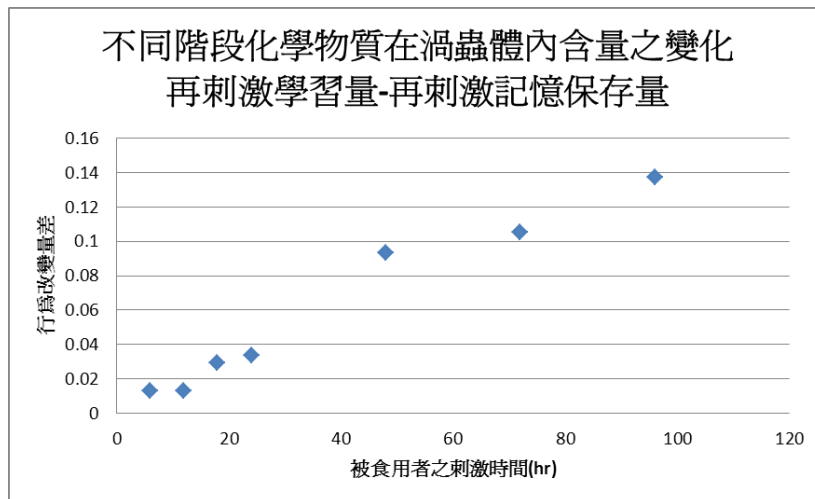


圖 3-4、再刺激學習量階段與再刺激記憶保存量之差

由圖 3-4 可知，隨著被食用者首次刺激時間之增加，當再刺激停止後攝食者行為改變量差(化學物質減少的量)亦增加。

3. 再刺激記憶保存量階段與記憶保存量階段之差

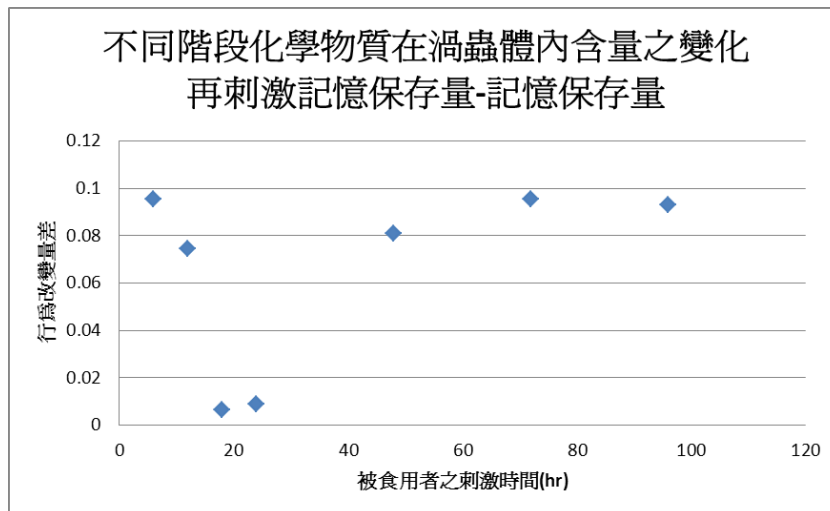


圖 3-5、再刺激記憶保存量階段與記憶保存量階段之差

由圖 3-5 可知，被食用者首次刺激時間小於 24 小時之組別，攝食者之行為改變量差(化學物質增加的量)隨著被食用者首次刺激時間之增加而減小；被食用者首次刺激時間大於 24 小時之組別，攝食者之行為改變量差(化學物質增加的量)隨著被食用者首次刺激時間增加而增加，而其增加量有上限。

陸、模型建立之推論

爲方便討論進行，先定義名詞(此處僅說明三者之關係)：

- (1) 化學物質 B(簡稱爲化 B)：影響攝食者行爲之化學物質。
- (2) 機制 A：爲一連串之生理反應，其主要功能爲製造化學物質 B。透過電擊開啓，但電擊結束後其功能仍存在。
- (3) 機制 C：其主要功能爲製造化學物質 B，但電擊結束後其功能即被關閉。

(一) 化學物質 B

由圖 2-1、圖 2-2、圖 2-3、圖 2-4 比較圖 2-5、圖 2-6、圖 2-7、圖 2-8 可知，攝食者之行爲改變與被食用者之學習量、記憶保存量、再刺激學習量、再刺激記憶保存量之趨勢相似；且在「比較各階段間渦蟲體內化學物質含量之變化」中，各圖表之趨勢皆與其相對應之「被食用渦蟲行爲改變之趨勢」相似(見附錄-貳)。推測此現象是化學物質 B 在渦蟲體內含量之變動所造成。

(二) 機制 A

1. 認爲其存在之原因

由圖 1-9 可知，攝食者在攝食後三天，影響其行爲之化學物質 B 已被代謝完畢；但由圖 2-6 推知，攝食處於記憶保存量階段(電擊停止後三天)之渦蟲，亦可改變攝食者之行爲，代表被食用之渦蟲體內之化學物質 B 仍存在。可推測應有一機制(機制 A)製造化學物質 B，使其在渦蟲體內達成動態平衡。

由以上推論可將圖 2-2 與圖 2-4 視爲渦蟲在該階段時機制 A 所製造出之化學物質 B 量的大小。

2. 對於刺激之反應

在觀察圖 2-2 及圖 2-4 後，可將機制 A 對於刺激之反應分爲三階段：

- (1) 緩慢增長階段：刺激時間 $\leq 9\text{hr}$
- (2) 迅速增長階段： $9\text{hr} < \text{刺激時間} \leq 24\text{hr}$
- (3) 飽和階段(飽和值約 1.2)：刺激時間 $> 24\text{hr}$

3. 對於再刺激之反應

由圖 2-4 可知，再刺激後，若首次刺激處於：

- (1) 緩慢增長階段：對於再刺激之反應將降低。(約在 1.13)
(機制 A 所能製造之化學物質 B 上限量降低)

- (2) 迅速增長階段：對於再刺激之反應不變。(約在 1.2)
(機制 A 所能製造之化學物質 B 上限量不變)
- (3) 飽和階段：對於再刺激之反應將上升。(約在 1.25)
(機制 A 所能製造之化學物質 B 上限量提升)

(三) 機制 C

1. 認為其存在之原因

由「電刺激對渦蟲記憶之影響」可知，在電擊停止後三小時，渦蟲之記憶量將迅速下降，三小時後即不再下降。可推論除了與記憶有關的機制 A 製造化學物質 B 外，應有另一機制(機制 C)在製造化學物質 B，而在電擊停止後，機制 C 不再製造化學物質 B，而化學物質 B 在這三小時內被代謝消失，使得化學物質 B 含量迅速下降。根據以上論述，可將遺忘量及再刺激遺忘量視為該階段機制 C 所製造出之化學物質 B 量的大小。

2. 對於刺激之反應

觀察圖 3-1 後，可將機制 C 對於刺激之反應分為三階段：

- (1) 未開啓階段(刺激時間 \leq 12hr)：反應不明顯
- (2) 開啓階段(12hr<刺激時間 \leq 24hr)：反應隨時間之增加而增加。
- (3) 已開啓階段(刺激時間>24hr)：反應明顯且達飽和。(飽和值約 0.06)

3. 對於再刺激之反應

由圖 3-1 可知，再刺激後，若首次刺激處於：

(1) 未開啓階段：

再刺激遺忘量約在 0.06，其值與遺忘量之已開啓階段之值差不多。而由「機制 C 對於刺激之反應」之討論可知，在首次刺激 \leq 12hr 時，機制 C 並未被正式開啓，故當再刺激 24 小時後，其值會與遺忘量已開啓階段之值差不多。

(2) 開啓、已開啓階段：

再刺激遺忘量隨著首次刺激時間之增加而增加，但在首次刺激 $<$ 24hr 之數據皆小於首次刺激達已開啓階段之值(0.06 左右)，推測是因為當首次刺激達到開啓階段後，機制 C 製造化 B 之能力將被定型，而其定型後之能力隨首次刺激時間(使其定型之刺激時間)增加而增加，故呈現此現象。

柒、討論

一、準備實驗

- (一) 由圖 0-4 可知，渦蟲具負趨光性，但需有足夠強度之光線(覆蓋三層白紙時已幾乎沒有光線)，渦蟲之負趨光性才能明顯表現。故在實驗進行時，需穩定的給予適度之光線。
- (二) 由圖 0-5 之實驗可知，樣本數大於 30 隻時，各族群間之差異甚小。而渦蟲間個體差異大，故本實驗之數據皆以族群平均值作為比較之依據，雖然族群內之變異係數無法比較(數據是以比值呈現)，但族群間之變異係數僅有 4%，故仍可作為比較之依據。

二、前實驗

- (一) 在攝食已學習之渦蟲後之反應與攝食已學習之黑殼蝦後之反應相似，推測化學物質 B 可能普遍存在於生物體間。
- (二) 渦蟲與黑殼蝦之親緣關係甚遠，推測化學物質 B 應不是 DNA 或 RNA。

三、電刺激時間長短對渦蟲學習、記憶之影響

將圖 1-1 與圖 2-1 比較可發現此二圖就趨勢而言是相似的。但仍有所差異，推測其原因在於渦蟲大小尺寸差異所致。在「前實驗」時，所用的渦蟲平均尺寸較正式實驗為大(依據渦蟲體型尺寸與學習量關係之量測結果(見附錄-伍)，可發現體型較大者其學習量也會較高)。

捌、結論

---第二階段實驗

(一) 電刺激時間長短對渦蟲學習、記憶之影響

1. 隨著首次電擊時間之增加，其學習量、記憶保存量、再刺激記憶保存量皆增加且在長時間刺激後會達到飽和而無法上升。
2. 再刺激學習量隨著首次電擊時間之增加而增加，但無達飽和之趨勢。

(二) 電刺激時間長短對渦蟲體內化學物質之影響

1. 首次刺激時間越長，無論被食用者處於何階段，化 B 含量皆增加。
2. 化 B 含量之變動會造成渦蟲之行爲改變。
3. 應存在機制 A，其功能為製造化 B。

(三) 建立渦蟲的學習、記憶模型

※概論：

渦蟲之行爲改變主要透過化學物質 B 含量變動所造成，而化學物質 B 有兩個製造來源：機制 A 與機制 C。但化學物質 B 將被持續代謝，故渦蟲體內化學物質 B 的量取決於製造速率與代謝速率之差，最終形成一動態平衡。機制 A 與機制 C 皆由電刺激開啓，但機制 A 在電擊停止後其功能並未停止；而機制 C 在電擊停止後其功能即停止。換言之，機制 A 造成所謂的記憶；而在學習時的行爲表現則是由機制 A 與機制 C 共同造成。

綜合以上討論與結論，得到以下記憶形成模型：

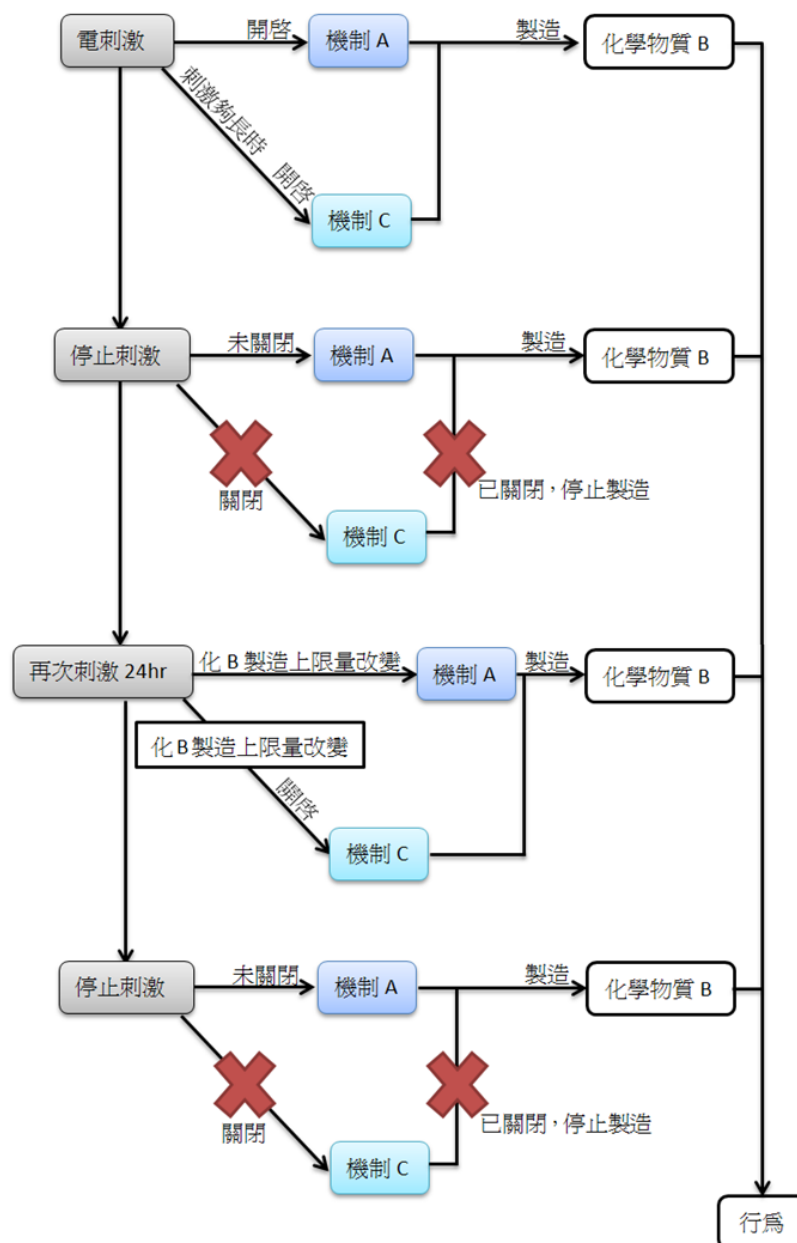


圖 3-6、渦蟲學習、記憶模型

1. 機制 A

(1) 主要功能：製造化學物質 B。

(2) 反應：

- a. 透過電擊開啓，且電擊結束後其功能仍存在。
- b. 其所能製造之化 B 量可依首次電擊時間分爲三階段：
 - (a) 緩慢增長階段 (刺激時間 \leq 9hr)：製造量變化不大。
 - (b) 迅速增長階段 (9hr<刺激時間 \leq 24hr)：製造量快速上升。
 - (c) 飽和階段 (刺激時間 $>$ 24hr)：化 B 製造量已達其上限量，刺激時間增長，亦無法增加。
- c. 再刺激後之影響：
 - (a) 首次刺激時間處於緩慢增長階段：所能製造之化 B 上限量降低。
 - (b) 首次刺激時間處於迅速增長階段：所能製造之化 B 上限量不變。
 - (c) 首次刺激時間處於飽和階段：所能製造之化 B 上限量提升。

2. 機制 C

(1) 主要功能：製造化學物質 B。

(2) 反應：

- a. 透過電擊(須 $>$ 15hr)開啓，但電擊結束後其功能即消失。
- b. 其所能製造之化 B 量可依首次電擊時間分成三階段：
 - (a) 未開啓階段(刺激時間 \leq 12hr)：化 B 製造量不明顯
 - (b) 開啓階段(12hr<刺激時間 \leq 24hr)：化 B 製造量上升。
 - (c) 已開啓階段(刺激時間 $>$ 24hr)：化 B 製造量已達其上限量，刺激時間增長，亦無法增加。
- c. 再刺激後之影響
 - (a) 首次刺激時間處於未開啓階段：因首次刺激未開啓機制 C，機制 C 在此時屬於首次開啓，將會提升至已開啓階段之化 B 製造上限量。
 - (b) 首次刺激時間處於開啓階段、已開啓階段：製造化 B 之機制被定型，製造化 B 之能力隨首次刺激時間之增加而增加。

3. 化學物質 B

(1) 功能：影響行爲。

(2) 反應：產出後 3 小時內即被代謝完畢。

玖、未來展望

- 一、探討再刺激後，機制 C 所能製造之化 B 量是否有上限。若有上限，需再刺激多長才會達到上限？
- 二、觀察攝食已學習之渦蟲後，再給予電刺激是否會改變其學習及記憶之能力。
- 三、探討多次刺激後渦蟲機制 A 與機制 C 之反應。
- 四、探討化學物質 B 是否普遍存在於各種生物間。

壹拾、參考資料

- 一、唐僑志、李昱甫、劉希哲、廖奕翔(民 94)。身首異處，記憶猶存！？。中華民國第四十五屆中小學科學展覽會，高中組 生物(生命科學)科。
- 二、劉雅安、王凌音、藍文蔓、廖啓卉(民 96)。愛的教育，鐵的紀律--果蠅的學習與記憶能力。中華民國第四十七屆中小學科學展覽會，高中組 生物(生命科學)科。
- 三、Shomrat T, Levin M.(2013).An automated training paradigm reveals long-term memory in planarians and its persistence through head regeneration. *J. Exp. Biol.* 216 : 3799-3810.

【評語】 040703

1. 實驗設計方法能清楚解析渦蟲的學習行為，值得嘉許。
2. 電擊條件為何？為什麼設定在這樣的電擊條件(合適刺激)？需要交代清楚。
3. 攝食已學習個體成分影響行為表現結果很重要，但依本研究可釐清事實是否可推導疑似成分的代謝機制有過度疑慮！