

臺灣二〇〇七年國際科學展覽會

科 別：動物學

作 品 名 稱：蟲以食為天一線蟲覓食與攝食行為之探討

學校 / 作者：國立花蓮高級中學
國立花蓮高級中學

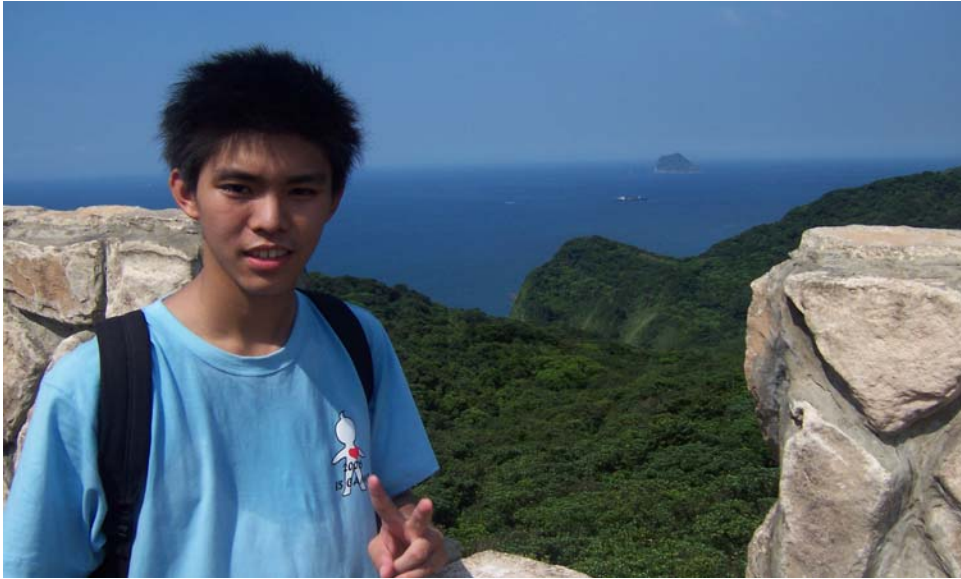
黃柏瑋
饒益品

作者簡介



哈囉！我名為黃柏瑋，就讀「花蓮一中」二年級，生活在依山傍海的美麗東部，小時常和家人出去踏青，因此喜愛大自然、對生物有興趣，平時喜歡打桌球、籃球，也喜歡拉小提琴放鬆自己。國中起就參與科展研究，國中以數學科代表東區。高中在實驗室中邂逅了秀麗隱桿線蟲美麗的倩影，便著手研究關於她的種種，並在此呈現。

作者簡介



大家好！我叫饒益品，目前就讀於花中二年級。從小，我最大的嗜好就是閱讀，莫名其妙就吸收了一大堆有用或無用的知識，也開啓了對科學的喜愛，平時在家除了書外，最愛的是音樂、跳舞及語言。上了國中、高中後，漸漸確立了自己對生物的狂熱喜愛，也在實驗室中找到了另一片精采的宇宙，特別是這個渺小、單純卻又奇妙的生物－秀麗隱桿線蟲！

摘要

秀麗隱桿線蟲(*Caenorhabditis elegans*)為在科學界備受矚目的模式生物，對於其生殖及發育過程已有諸多研究，然而對於其覓食及攝食行為的相關研究卻仍闕如；每一種生物都有其獨特的行為模式，而為了解線蟲發展出何種覓食與攝食的行為以適應自然的環境，因此著手進行研究。

本研究歸納出線蟲的七種一般行為：前進、探頭、偏移、擺頭、後退、轉向及拐彎行為，並探討其意義。其中，前進及探頭行為為恆常出現。偏移與轉向行為與攝食有關，在有菌環境中出現，可避免其遠離食物來源，而連續的後退及轉向行為也構成特殊行為之樹枝狀行為，推測應為幫助線蟲的消化所出現的行為。擺頭與拐彎行為與覓食有關，在無菌環境中出現。後退行為雖在有無菌環境中皆出現，但由後退後行為的不同可以了解後退行為在兩種環境下具有不同意義。在有菌環境中，後退後通常伴隨轉向行為；在無菌環境中，後退後通常伴隨拐彎行為，為逃離不適環境且藉以覓食的行為。

經過研究，發現線蟲的覓食機制為嗅覺，且對嗅覺有依賴性及專一性，在其他氣味存在的環境下會大大降低覓食的效率，但最後仍然能正確地找到食物來源。線蟲於覓食的過程中所出現的特殊行為之混亂行為，由實驗結果發現為是 *E. coli* 所釋放至培養基的化學物質所造成，化學物質濃度越濃，線蟲所表現出的混亂行為就越明顯。推測此種現象發生的原因，應為 *E. coli* 釋放化學物質以干擾線蟲，以避免本身受到捕食，然而，線蟲也演化出適應的能力，因此在發生混亂行為後仍然能抵達菌落，此種特殊的交互作用表現出線蟲與 *E. coli* 間的共演化現象。

Abstract

Cenorhabditis elegans has long been a model organism used for developmental biology studies. However, researches about its foraging and feeding behaviors are still limited. Every organism has its unique behaviors, and this research was conducted in order to understand more on what kind of foraging and feeding behaviors were developed by *C. elegans* and how they helped *C. elegans* to adapt to the environment in which it lives.

The research concluded with seven general behaviors of *C. elegans* : advancing, probing, slanting, swaying, backing, turning and bending, and the meanings of it. The advancing and probing behaviors are constant. The slanting and turning behaviors, which appear in presence of food, are feeding-associated behaviors, which help *C. elegans* avoid leaving the food source. Continuous backing and turning behaviors also make up the branching behavior, one of the special behaviors, which help *C. elegans*' digestion. Swaying and bending behaviors, which appear in absence of food, are foraging-associated behaviors. Although backing behavior appear both in presence and absence of food, the difference in post-backing behaviors show that there are distinct meanings of backing behavior in each environment. In presence of food, turning after backing is usually observed; in absence of food, bending after backing is usually observed, which indicates the act of escaping from unsuitable environment and searching for food.

Studies show that the foraging mechanism of *C. elegans* is by olfaction, and *C. elegans* is highly olfaction-dependent and specific: efficiency of foraging decreases significantly under environment with scents other than that of *E. coli*, but *C. elegans* is still able to locate the food. According the experiments, the chaos behavior, one of the special behaviors, appears during the foraging process of *C. elegans*, and is caused by chemicals released to the medium by *E. coli*. The density of the chemicals and the extent of chaos behavior is in direct proportion. The theory is *E. coli* secretes chemicals to disturb the worm to avoid being preyed upon. *C. elegans*, however, also evolved the ability to adapt to the chemical so that it can still reaches the food source even after chaos behavior appeared. This unique interaction is a manifestation of co-evolution between *C. elegans* and *E. coli*.

目錄

| | | |
|----|---------|-------|
| 壹、 | 研究動機 | P. 1 |
| 貳、 | 研究目的 | P. 1 |
| 參、 | 研究設備及器材 | P. 1 |
| 肆、 | 研究方法 | P. 2 |
| 伍、 | 研究結果 | P. 7 |
| 陸、 | 研究討論 | P. 19 |
| 柒、 | 結論 | P. 22 |
| 捌、 | 參考資料及其他 | P. 23 |

壹、研究動機

秀麗隱桿線蟲(*Caenorhabditis elegans*)，一種捕食性的線形動物，牠們原只是土中微不足道又無所不在的生物，卻一夕讓三人在 2002 年以關於發育生物學及計畫性細胞凋亡的重要研究獲頒諾貝爾生理醫學獎。而我們同樣迫不及待地想多瞭解這模式生物的風采。

此時，剛好有取得線蟲的管道，我們與線蟲的邂逅就此展開。在查閱相關資料後，我們發現有關線蟲的研究多在於基因操作及分子生物學方面。課本中有提到過，動物爲了覓食，會發展出各種行爲或特殊的構造，如蜜蜂的八字舞、蛇的熱感應器等，但是線蟲覓食與攝食的行爲模式，目前尚未被詳實地研究清楚。

此外，我們亦好奇生活在土壤中的線蟲，如何能在黑暗的環境中找到食物，文獻除了簡略提到線蟲靠嗅覺覓食之外，並無深入描述。我們想了解線蟲是否也有關覓食與攝食特定的行爲，因此決定著手探討，以期對線蟲有更深一層的認識。

貳、研究目的

- 一、線蟲基本行爲模式之觀察
- 二、線蟲在不同環境下行爲差異之探討
- 三、線蟲覓食行爲之探討
- 四、細菌釋放之化學物質對線蟲行爲影響之探討

參、研究設備及器材

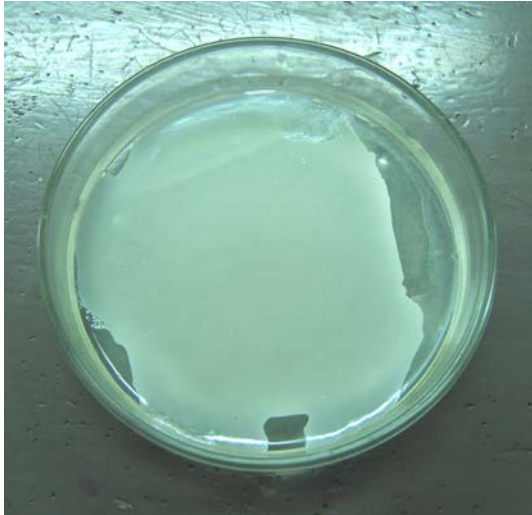
- | | | |
|-----------|------------|----------|
| 一、 秀麗隱桿線蟲 | 八、 量筒 | 十五、解剖顯微鏡 |
| 二、 洋菜 | 九、 玻璃培養皿 | 十六、複式顯微鏡 |
| 三、 蛋白脛 | 十、 攪拌加熱器 | 十七、pH 計 |
| 四、 酵母萃取物 | 十一、高溫高壓滅菌釜 | 十八、數位相機 |
| 五、 燒杯 | 十二、解剖針 | 十九、腳架 |
| 六、 玻棒 | 十三、解剖刀 | 二十、酒精燈 |
| 七、 滴管 | 十四、保鮮膜 | 二十一、 恆溫箱 |

肆、研究方法

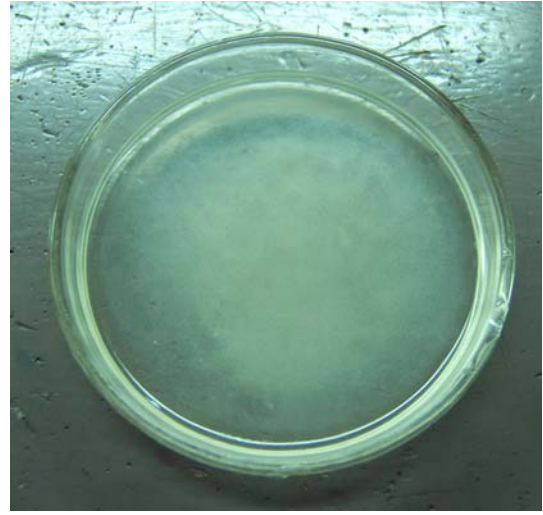
一、線蟲基本行爲模式之觀察

本實驗觀察並紀錄線蟲於培養基中覓食與攝食過程所出現的行爲。

- (一) 將一無菌培養基塗抹經滅菌水稀釋後的菌液，置於 31°C 恆溫箱培養至均勻長菌後取出（如圖一），並另取一無菌培養基，同時置入恆溫箱（如圖二）。
- (二) 有菌及無菌培養基分別置入一隻線蟲並觀察其行爲。每次十分鐘，重複十次。



圖一 有菌



圖二 無菌

二、線蟲在不同環境下行爲差異之探討

以有無菌、不同濃度及不同酸鹼值等三種操縱變因，探討不同環境下線蟲行爲的差異。

(一) 線蟲在有無菌培養基中行爲差異

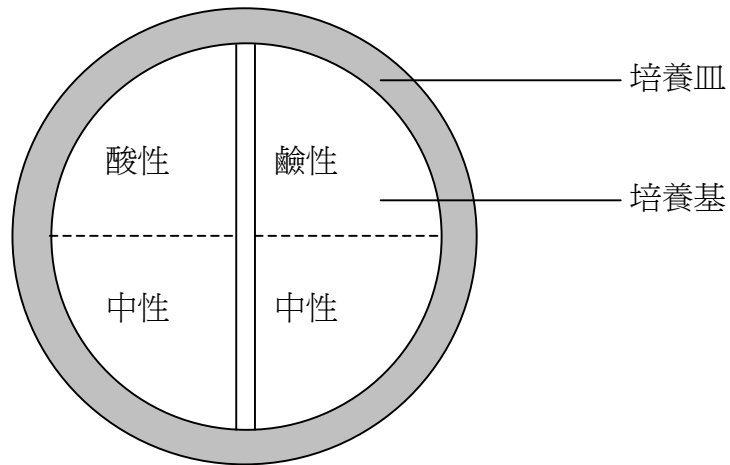
1. 同實驗一步驟（一）。
2. 於二個培養基中分別一次置入一隻線蟲並錄下行爲 2 分鐘，重複 10 次，以 Excel 整理行爲次數。

(二) 線蟲在不同濃度培養基中行爲差異

1. 同實驗一步驟（一）之有菌培養基，分別培養 12、24、48 小時後取出，以得到不同細菌濃度的培養基。
2. 同實驗（一）步驟 2。

(三) 線蟲在不同酸鹼值培養基中行爲差異

1. 取一無菌培養基，劃分成左右兩部分，左上半部塗 pH4.1 檸檬酸水溶液，右上半部塗 pH9.1 NaOH 水溶液（圖三）。
2. 同實驗（一）步驟 2。



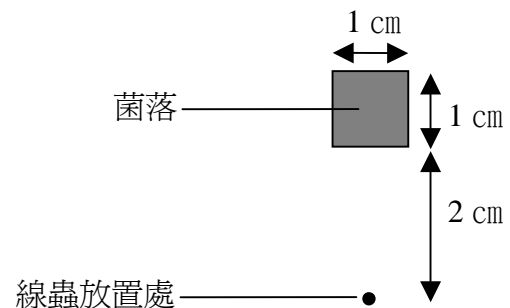
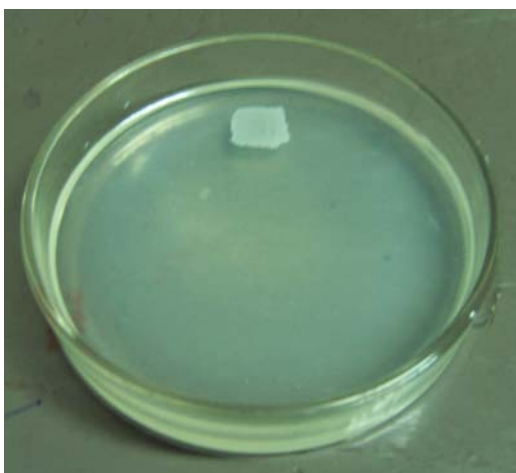
圖三 不同酸鹼度之培養基裝置圖

三、線蟲覓食行為之探討

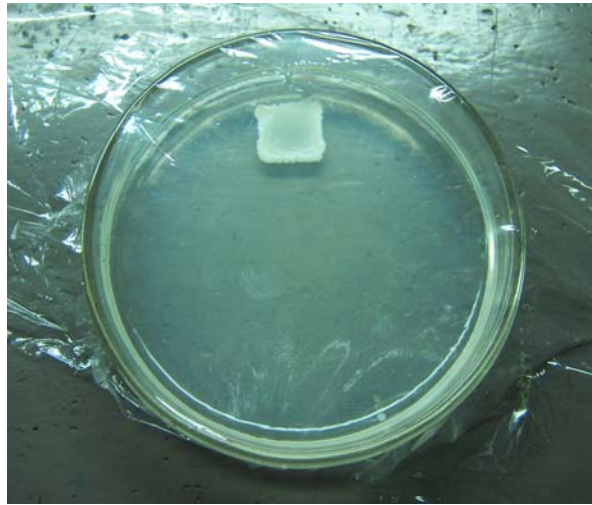
線蟲無視覺器官且生活於成份複雜的土壤中，此實驗在探討利用何種感官覓食。

(一) 線蟲覓食方法

1. 無菌培養基：取一無菌培養基，置入線蟲，觀察記錄其活動。
2. 開蓋培養基（圖四）：將 *E. coli* 塗在培養基一隅，長寬各 1cm，於恆溫箱培養 7 天，置入 1 隻線蟲於距菌落 2cm 處，並打開培養皿蓋記錄其活動，重複 7 次。
3. 閉蓋培養基（圖五）：同步驟 2，觀察時以保鮮膜將培養皿密封。



圖四 菌落與線蟲放置相關位置圖

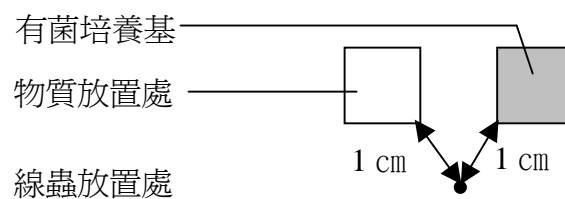


圖五 閉蓋培養基

(二) 其他氣味對線蟲覓食之影響

我們使用三種物質作為其他氣味來源：黴菌、酵母菌及泥土。

1. 取一無菌培養基切出合適大小之凹槽，置入長寬各 1 cm 之菌落，再以蓋玻片盛放上述物質置於旁，置入 1 隻線蟲距前二處各 1 cm 處，記錄其活動 10 分鐘，重複 10 次。
2. 重複上述步驟，但不置入菌落。

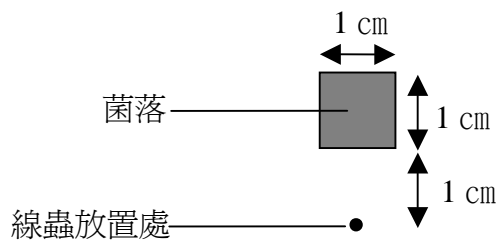
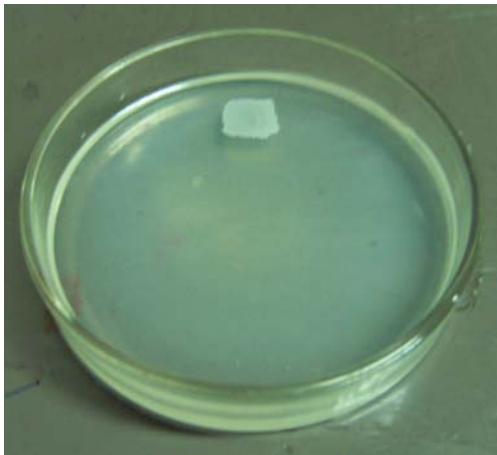


四、細菌釋放之化學物質對線蟲行為影響之探討

線蟲在接近菌落時覓食常受到干擾，推測為 *E. coli* 釋放之化學物質的影響，設計此實驗以探討之。

(一) 塊狀菌落 (圖六)

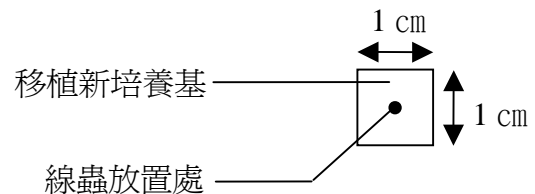
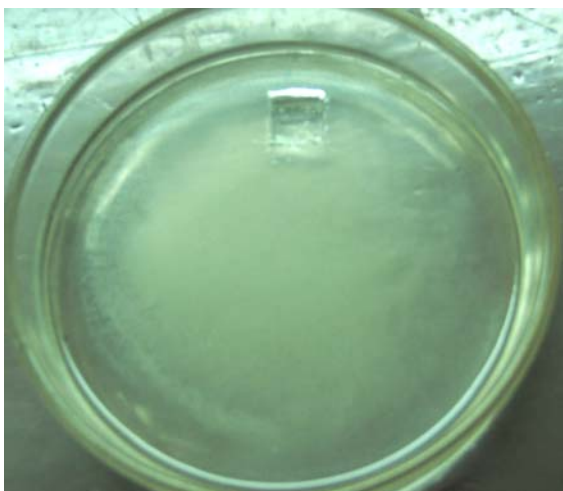
含 *E. coli* 釋放至空氣中之揮發性物質及培養基上之化學物質。將 *E. coli* 塗於培養基一隅，長寬 1 cm，置於恆溫箱分別培養 1 天、3 天及 7 天。置線蟲於距菌落 1 cm 處，觀察並記錄其活動，重複 10 次。



圖六 塊狀菌落

(二) 挖空菌落 (圖七)

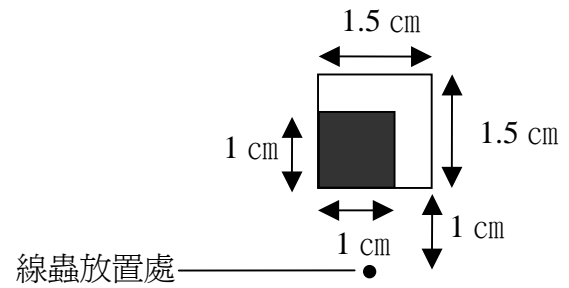
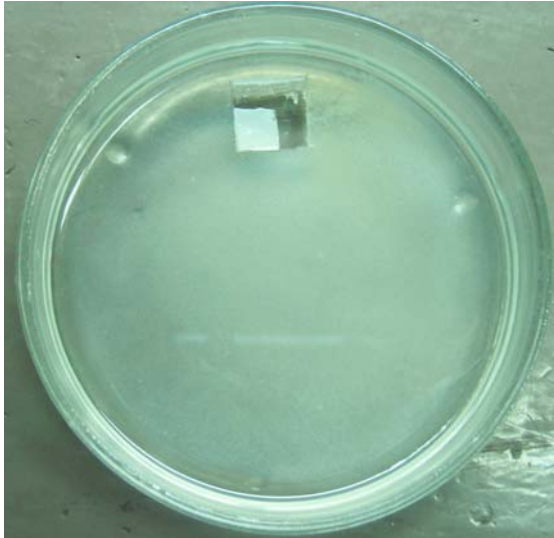
不含 *E. coli* 釋放至空氣中之揮發性物質但含培養基上之化學物質。同步驟四之(一)，實驗前切除菌落並置等大小的無菌培養基於空缺處使之密合，置線蟲於新培養基上，觀察並記錄其活動 10 分鐘，重複 10 次。



圖七 挖空菌落

(三) 移植菌落 (圖八)

含 *E. coli* 釋放至空氣中之揮發性物質但不含培養基上之化學物質。同步驟四之 (一)，實驗前切下菌落，並取無菌培養基切出合適大小之凹槽，再將菌落置於無菌培養基中使之密合，置線蟲於距菌落 1 cm 處，觀察並記錄其活動，重複 10 次。



圖八 移植菌落

伍、研究結果

一、線蟲基本行爲模式之觀察

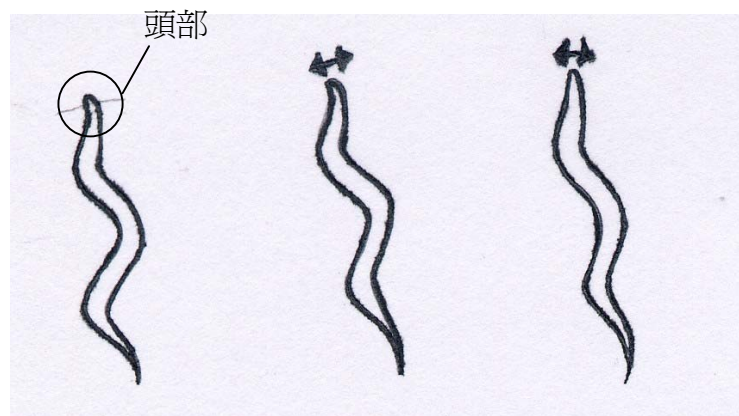
(一) 線蟲之一般行爲

1. 前進行爲 (圖九)：線蟲非以腹側朝下前進，而是側躺 (於 10×60 倍下可見陰門)，利用腹背側肌肉交替收縮放鬆前進，在培養基上形成似正弦的波形軌跡。身體通常呈現 3~4 個彎折，約 2 個正弦波長。



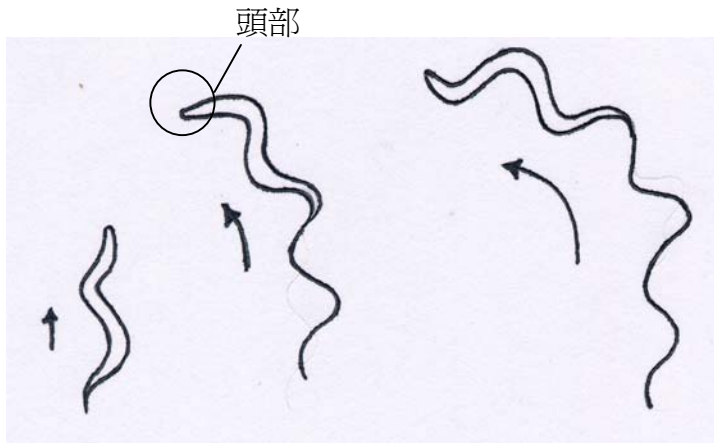
圖九 前進顯微圖

2. 探頭行爲 (圖十)：線蟲頭部最前端小幅度左右振動的行爲。爲恆常出現的行爲，在各培養基中皆持續高頻率地出現，約 3~4 次/秒。

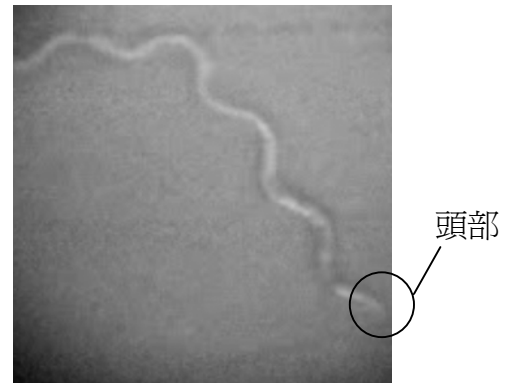


圖十 探頭示意圖

3. 偏移行爲 (圖十一-1、圖十一-2)：線蟲在移動的過程中，一種逐漸偏移其原移動軌跡的行爲，多出現於菌落中。當線蟲移動時，會朝固定時針方向偏轉。持續偏移會造成多圈非同心圓軌跡，直徑約 2~3 cm，命名爲「繞圈」現象。

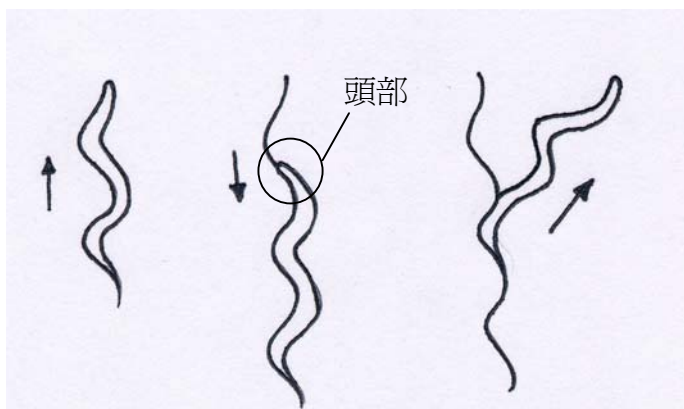


圖十一-1 偏移示意圖

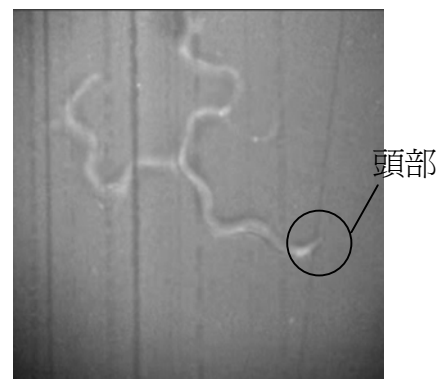


圖十一-2 偏移顯微圖

4. 轉向行爲 (圖十二-1、圖十二-2)：發生於線蟲在長距後退行爲後，以異於原路徑的方向前進的行爲。線蟲平均轉向角度約 72° 。

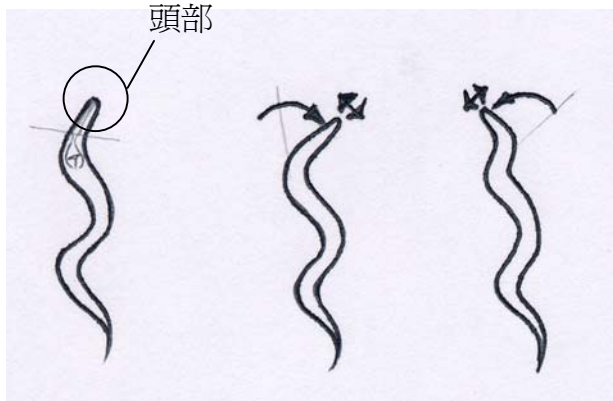


圖十二-1 轉向示意圖

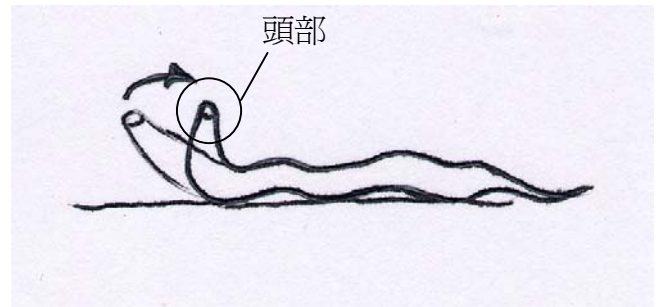


圖十二-2 轉向顯微圖

5. 擺頭行爲 (圖十三-1)：線蟲頭部(口到食道泡後段)以食道泡爲圓心朝多向擺動的行爲。除了在培養基表面進行擺頭也會抬起頭部在立體空間中擺動 (圖十三-2)。在擺頭行爲的同時，亦進行探頭行爲。

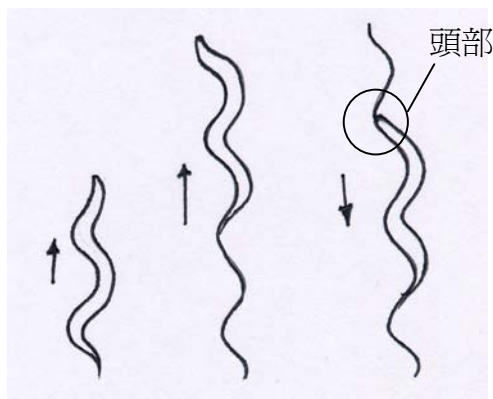


圖十三-1 擺頭示意圖



圖十三-2 擺頭示意圖

6. 後退行爲 (圖十四-1、圖十四-2)：線蟲沿原路徑反方向移動，頭尾方向不變。我們將之分爲兩種：
- (1) 短距後退：後退 1/10 倍身長以下，約佔後退行爲 20%，之後通常繼續沿原路徑前進或後退。
 - (2) 長距後退：後退 1/10 倍身長以上，約佔後退行爲 80%，之後跟隨著轉向或拐彎行爲。在長距後退時，線蟲有時會快速向後滑動，且約有 9.5% 的機率尾部會偏離原路徑，命名爲「尾偏移」現象，之後均跟隨著拐彎行爲。



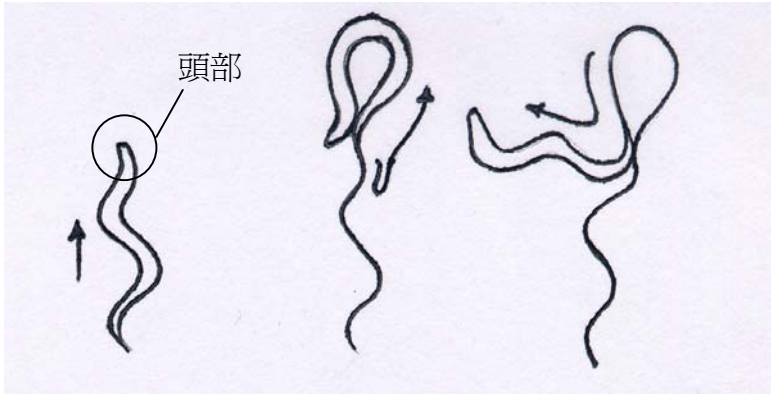
圖十四-1 後退示意圖



圖十四-2 後退顯微圖

7. 拐彎行爲：發生在長距後退後的行爲，線蟲頭部先向尾端迴轉約 180°，再朝另一方向轉出去。我們將之分爲三種：

(1) 觸身拐彎（圖十五-1、圖十五-2）：頭部在迴轉後與身體接觸，約佔拐彎行爲 43%。

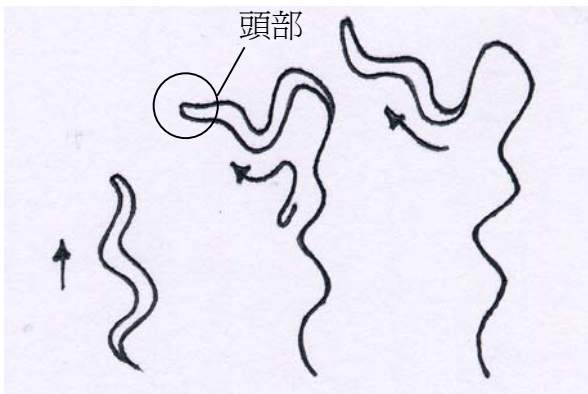


圖十五-1 觸身拐彎示意圖

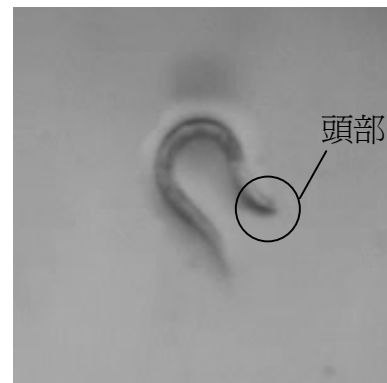


圖十五-2 觸身拐彎顯微圖

(2) 近身拐彎（圖十六-1、圖十六-2）：頭部在迴轉後不與身體接觸，只靠近約三倍身寬的距離就轉出去，約佔拐彎行爲 47%。

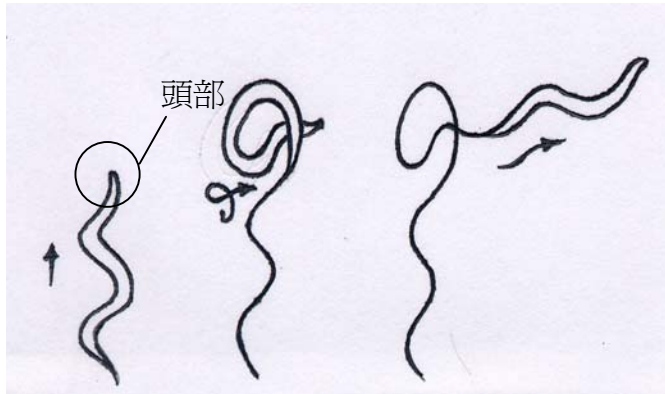


圖十六-1 近身拐彎示意圖

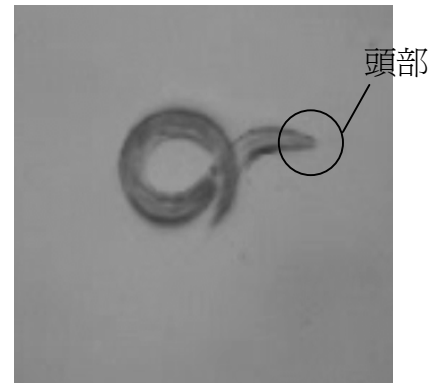


圖十六-2 近身拐彎顯微圖

- (3) 穿過拐彎（圖十七-1、圖十七-2）：頭部在迴轉觸碰身體後，從上或下方穿過，形成一個圈環再轉出去，約佔拐彎行為 10%。



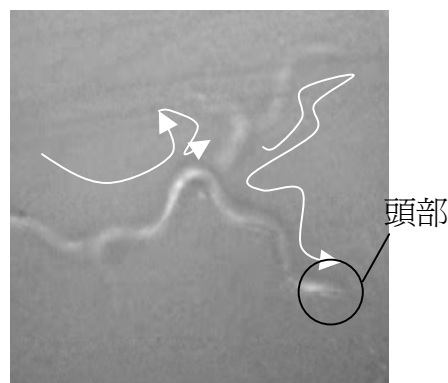
圖十七-1 穿過拐彎示意圖



圖十七-2 穿過拐彎顯微圖

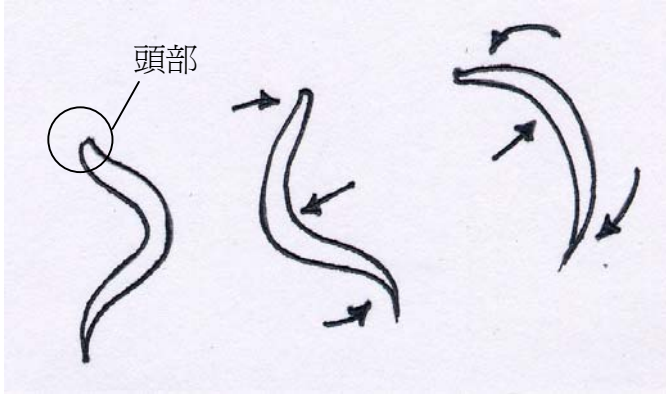
(二) 線蟲之特殊行為描述

1. 混亂行為：綜合許多一般行為，主要是長距後退和各種拐彎。此行為是線蟲一時失去前進的方向性，而在一個範圍內前後移動或不斷改變方向。在實驗觀察中，常出現在酸性環境與覓食過程中（參見結果三）。
2. 樹枝狀行為（圖十八）：出現於有菌環境中。分為兩種情形：一為原地連續朝多個方向試探，另一為在前進中途後退一小段，再往另一方向繼續前進，重覆數次。多次轉向行為綜合的結果，形成類似樹枝狀的軌跡。在樹枝狀行為中，後退後有 31.7% 進行轉向、8.2% 進行拐彎、60.2% 繼續前進或後退。

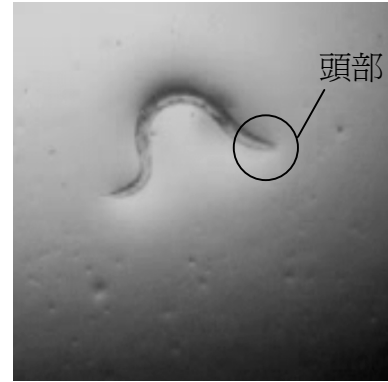


圖十八 樹枝狀行為顯微圖

3. 水中行爲 (圖十九-1、圖十九-2)：在液態環境中(水、甲基纖維液等)，線蟲身體只呈現一個彎折，來回大幅度地扭動，雖然頻率及幅度皆很大，但前進速率卻相當慢。



圖十九-1 水中行爲示意圖



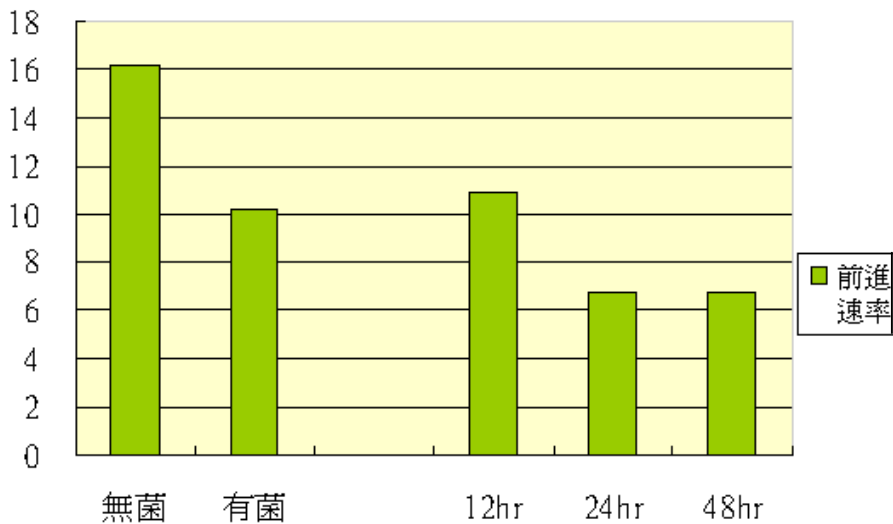
圖十九-2 水中行爲顯微圖

二、線蟲在不同因子下行爲差異之探討

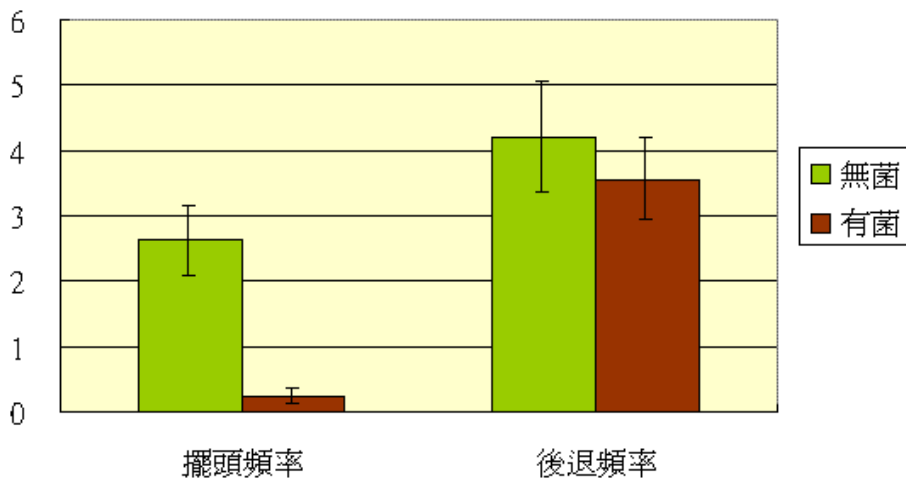
(一) 線蟲在有無菌培養基中行爲差異

1. 線蟲在無菌培養基中前進速率較快，平均爲 16.2 個波長/分，而有菌培養基中則爲 10.2 個波長/分(圖表二-1); 12hr 濃度培養基中爲 10.85 波長/分，24hr 濃度培養基中爲 6.82 波長/分，48hr 濃度培養基中爲 6.75 波長/分。
2. 線蟲在無菌培養基中擺頭行爲頻率較高，平均爲 2.64 ± 0.53 次/分，而有菌培養基中則爲 0.25 ± 0.11 次/分(圖表二-2)。
3. 線蟲在無菌培養基中後退行爲頻率平均爲 4.21 ± 0.83 次/分，而有菌培養基中爲 3.57 ± 0.64 次/分，差異不大(圖表二-2)。
4. 在有菌培養基中，線蟲後退後有 59.8% 接著轉向行爲、14.9% 接著拐彎行爲。在無菌培養基中，有 28.5% 接著轉向行爲、51.0% 接著拐彎行爲(圖表二-3)。

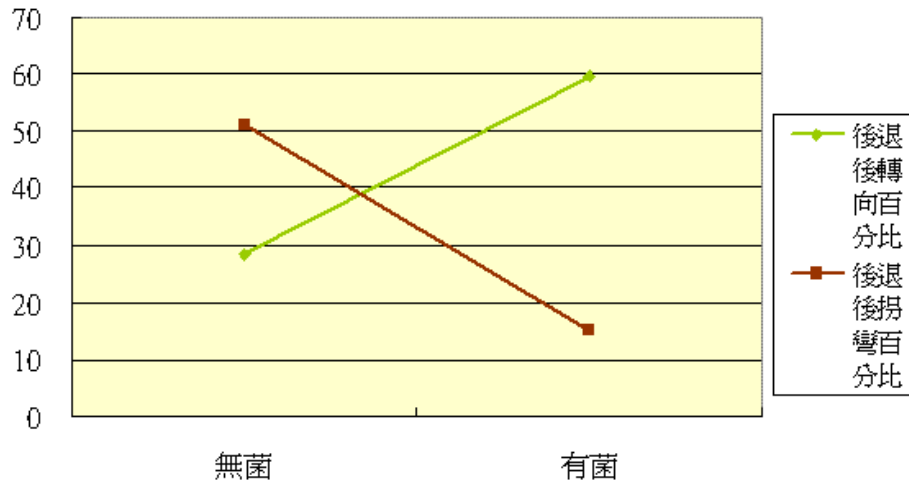
圖表二-1



圖表二-2



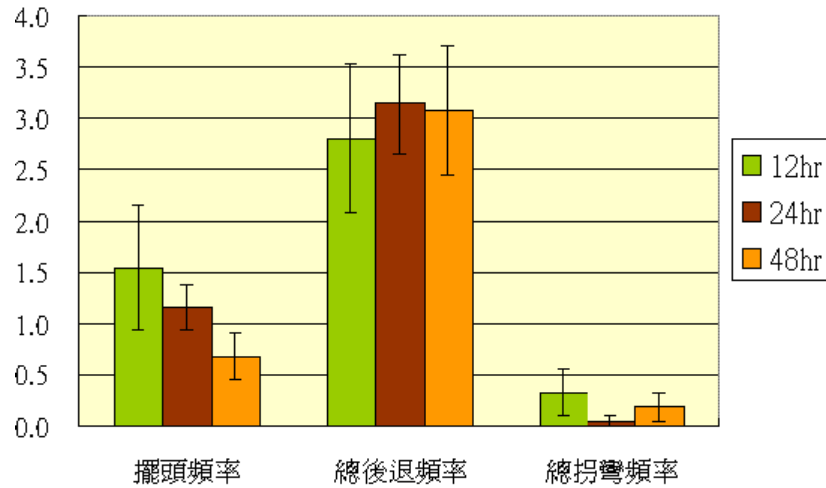
圖表二-3



(二) 線蟲在不同濃度培養基中行爲差異 (圖表二-4)

1. 線蟲在 12hr 濃度培養基中擺頭行為頻率平均為 1.54 ± 0.60 次/分，而 24hr 濃度培養基中為 1.16 ± 0.22 次/分、48hr 濃度培養基中為 0.68 ± 0.23 次/分。
2. 線蟲在 12hr 濃度培養基中後退行為頻率平均為 2.80 ± 0.73 次/分，而 24hr 濃度培養基中為 3.14 ± 0.48 次/分、48hr 濃度培養基中為 3.07 ± 0.63 次/分。
3. 線蟲在 12hr 濃度培養基中拐彎行為頻率平均為 0.33 ± 0.23 次/分，而 24hr 濃度培養基中為 0.05 ± 0.05 次/分、48hr 濃度培養基中為 0.20 ± 0.14 次/分。

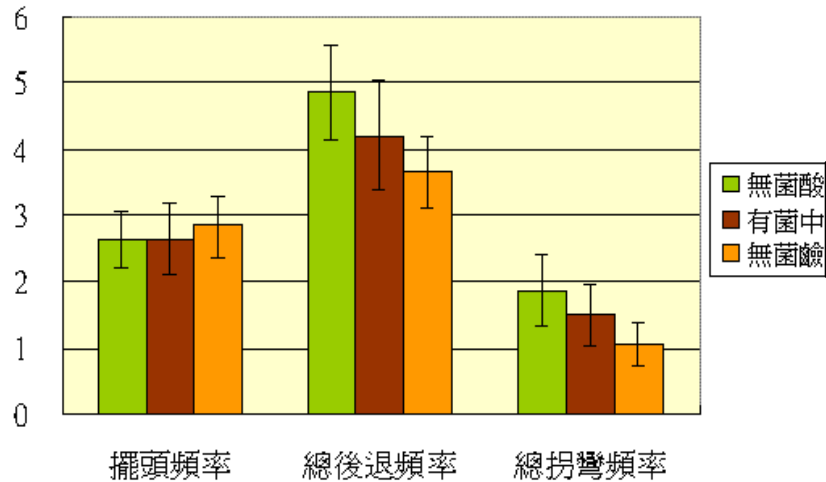
圖表二-4



(三) 線蟲在不同酸鹼值培養基中行爲差異 (圖表二-5)

1. 線蟲在酸性培養基中擺頭行爲頻率平均爲 2.63 ± 0.42 次/分，而中性培養基中爲 2.64 ± 0.53 次/分、鹼性培養基中爲 2.84 ± 0.47 次/分，無明顯差異。
2. 線蟲在酸性培養基中後退行爲頻率平均爲 4.86 ± 0.72 次/分，而中性培養基中爲 4.21 ± 0.83 次/分、鹼性培養基中爲 3.65 ± 0.54 次/分。
3. 線蟲在酸性培養基中拐彎行爲頻率平均爲 1.86 ± 0.55 次/分，而中性培養基中爲 1.49 ± 0.47 次/分、鹼性培養基中爲 1.05 ± 0.34 次/分。

圖表二-5

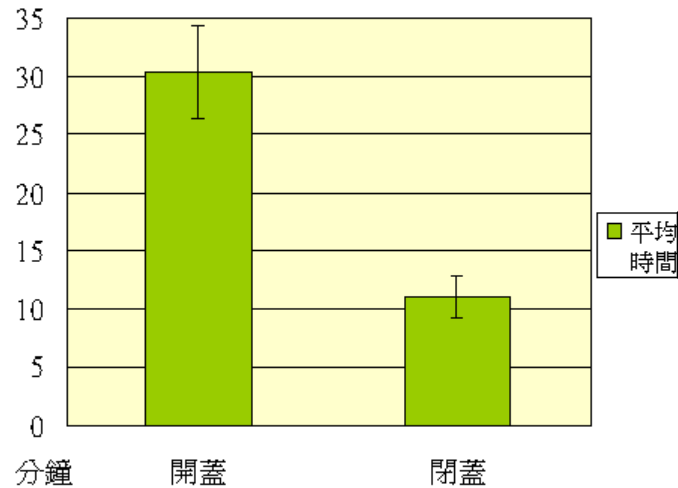


三、線蟲覓食行爲之探討

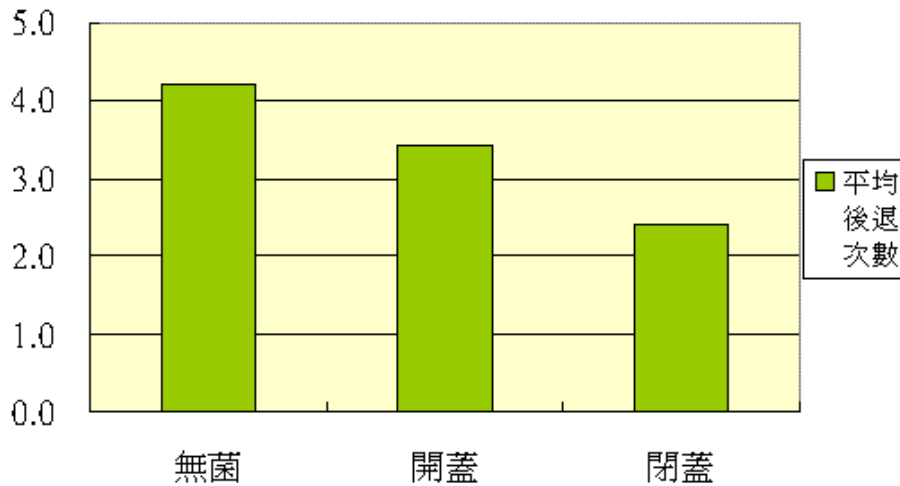
(一) 線蟲覓食方法

1. 無菌培養基中，線蟲在覓食過程中線蟲會持續擺頭，且無特定的移動方向。
2. 線蟲於開蓋培養基 (圖表三-1) 中，可判斷菌落的大致方向，並朝菌落移動。平均抵達菌落所需時間爲 30.4 ± 3.93 分鐘。
3. 線蟲於閉蓋培養基中抵達菌落時間較開蓋培養基快，平均抵達菌落所需時間爲 11.1 ± 1.86 分鐘。
4. 在無菌培養基中，線蟲平均後退次數爲 4.21 次，開蓋培養基中爲 3.43 次，閉蓋培養基中爲 2.42 次 (圖表三-2)。

圖表三-1



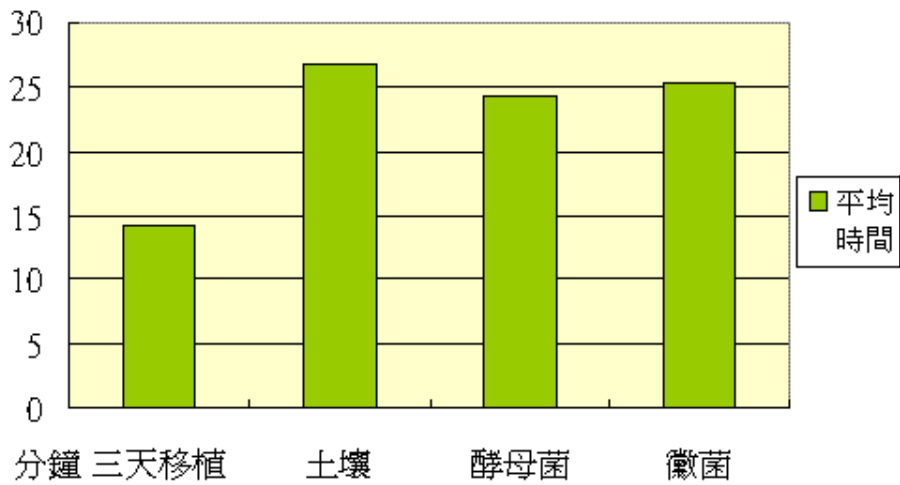
圖表三-2



(二) 其他氣味對線蟲覓食行為之影響

1. 線蟲在培養基中不斷擺頭，但並不會移動到其他物質位置，皆能向菌落所在位置移動。線蟲覓食所需時間，在土壤干擾下為 26.7 分鐘，在酵母菌干擾下為 24.3 分鐘，在黴菌干擾下為 25.3 分鐘（圖三-3），相對於對照組的 14.2 分鐘，將近多一倍的時間。
2. 在無菌落之實驗中，三種物質皆不對線蟲造成吸引，即使線蟲十分接近其他物質無混亂行為的發生。線蟲在土壤實驗中，平均後退次數為 1.7 次，與酵母菌中的次數相同，黴菌實驗中為 0.3 次；土壤實驗中拐彎行為次數平均為 2.7 次，酵母菌實驗中的 0.3 次 黴菌實驗中為 1 次。

圖表三-3

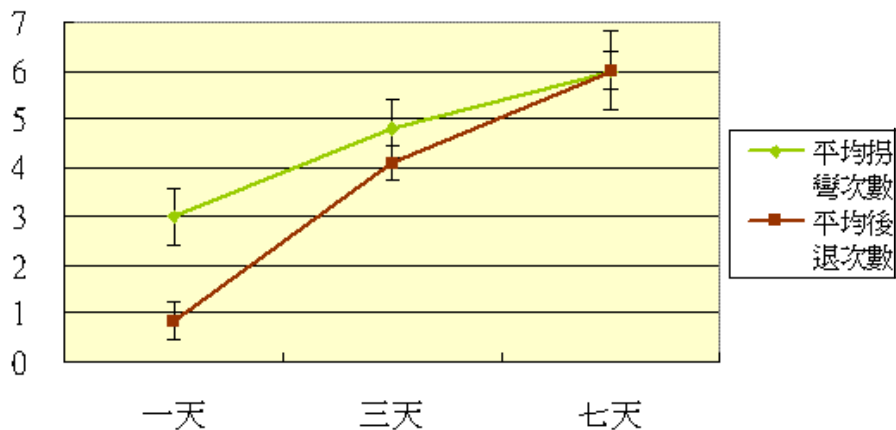


四、細菌釋放之化學物質對線蟲行為影響之探討

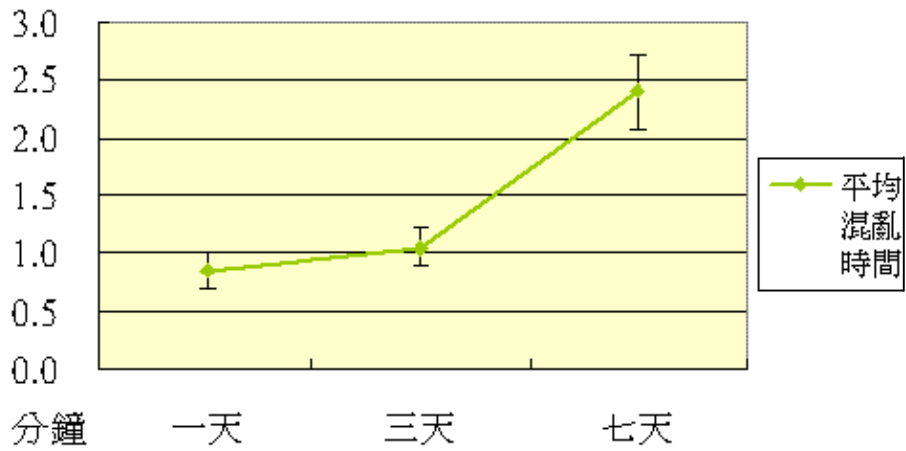
(一) 塊狀菌落 (圖表四-1、圖表四-2)

1. 培養 1 天的培養基中，線蟲平均後退行為次數為 0.85 ± 0.37 次、平均拐彎行為次數為 3 ± 0.60 次、平均混亂行為時間為 0.85 ± 0.15 分鐘。
2. 培養 3 天的培養基中，線蟲平均後退行為次數為 4.1 ± 0.35 次、平均拐彎行為次數為 4.8 ± 0.59 次、平均混亂行為時間為 1.05 ± 0.17 分鐘。
3. 培養 7 天的培養基中，線蟲平均後退行為次數為 6.0 ± 0.39 次、平均拐彎行為次數為 6.0 ± 0.83 次、平均混亂行為時間為 2.4 ± 0.33 分鐘。

圖表四-1



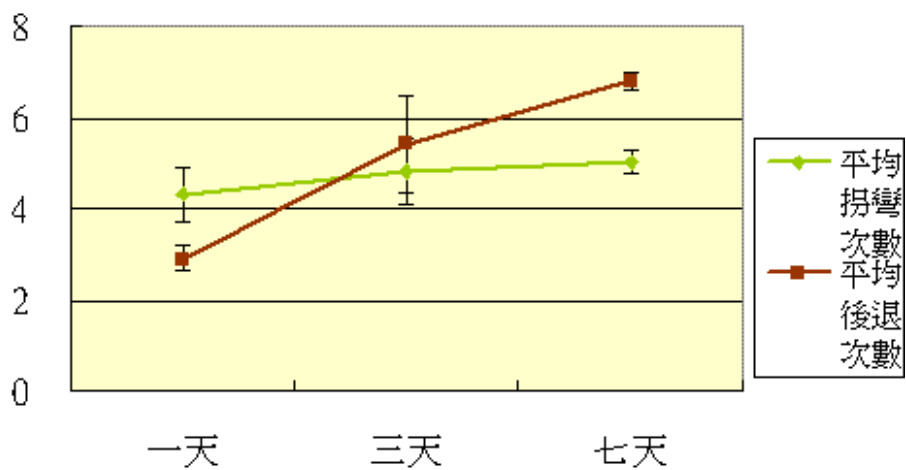
圖表四-2



(二) 挖空菌落 (圖表四-3)

1. 培養 1 天的培養基中，線蟲平均後退行為次數為 2.9 ± 0.28 次、平均拐彎行為次數為 4.3 ± 0.6 次。
2. 培養 3 天的培養基中，線蟲平均後退行為次數為 5.4 ± 1.06 次、平均拐彎行為次數為 4.8 ± 0.7 次。
3. 培養 7 天的培養基中，線蟲平均後退行為次數為 6.8 ± 0.20 次、平均拐彎行為次數為 5.0 ± 0.26 次。

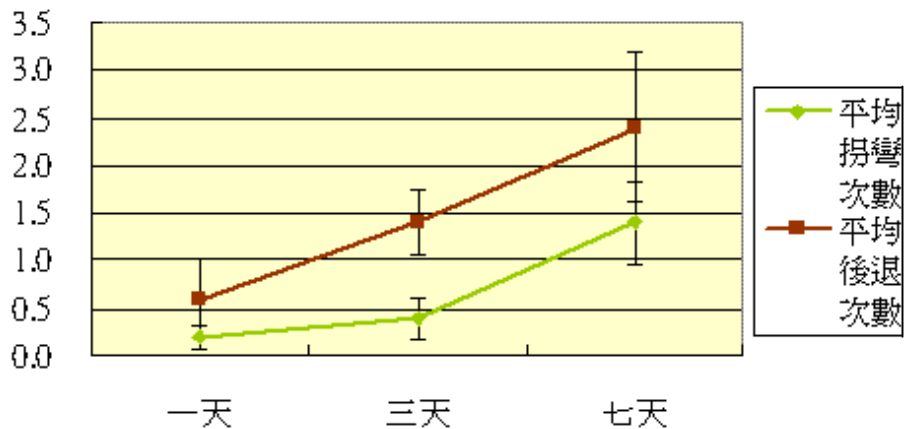
圖表四-3



(三) 移植菌落 (圖表四-4)

1. 培養 1 天的培養基中，線蟲平均後退行為次數為 0.6 ± 0.4 次、平均拐彎行為次數為 0.2 ± 0.13 次。
2. 培養 3 天的培養基中，線蟲平均後退行為次數為 1.4 ± 0.34 次、平均拐彎行為次數為 0.4 ± 0.22 次。
3. 培養 7 天的培養基中，線蟲平均後退行為次數為 2.4 ± 0.78 次、平均拐彎行為次數為 1.4 ± 0.43 次。

圖表四-4



陸、研究討論

一、線蟲基本行為模式之觀察

(一) 線蟲之一般行為

在此先探討線蟲前進、探頭、偏移、轉向等行為的意義，擺頭、後退、拐彎等行為的意義將於第二部分討論。

1. 前進行為：毛毛蟲及蚯蚓有環形肌，且具真體腔，可利用液壓式骨骼前進，而線蟲只有縱向肌，且只具假體腔，腸道周圍無肌肉，因此必須靠背腹側肌肉交替收縮放鬆而在平面上前進，呈現出正弦波形的軌跡。其原理與蛇類似，但並非腹面向下，而是側面向下，推測原因是為了露出陰門與肛門以便產卵、排泄。
2. 探頭行為：恆常的行為，無論在何種環境中皆頻繁出現。我們推測此行為與攝食並無直接關聯，而是為了有效增加線蟲移動時頭部前端所能觸及的範圍。
3. 偏移行為：此種朝同一時針方向偏轉而造成大尺度下的繞圈現象的行為，不出現於無菌環境中，因此我們推測為線蟲在有菌環境中，因無需大幅度改變方向以覓食而出現的行為，可避免一直朝同一方向前進而離開食物來源。
4. 轉向行為：出現於有菌環境中，是後退後出現的行為之一。我們推測此為線蟲改變方向，以避免離開食物，維持於有菌環境中的行為。另外，連續的後退及轉向所構成的樹枝狀行為，可幫助線蟲消化。

(二) 線蟲之特殊行爲

1. 混亂行爲：我們發現混亂行爲會出現在三種情況下：接近菌落外圍、剛置入菌海內及酸性環境中。根據文獻指出，線蟲不喜歡酸性環境，因此推測此種在酸性環境下出現的混亂行爲，為表現不適的行爲。在菌落外圍時，線蟲也會出現相同的行爲，我們推測這是由於細菌放出化學物質，使線蟲產生不適的行爲，而避免本身被捕食。將線蟲置入菌落中後，線蟲亦因接觸化學物質而發生混亂行爲，但此行爲持續一段時間後就會停止且不會再次出現，而且線蟲在菌落外圍發生混亂行爲後，仍可抵達菌落，我們推測這是因為線蟲可逐漸適應此種化學物質，而實驗結果指出，適應所需時間與化學物質的濃度成正相關。
2. 樹枝狀行爲：經觀察發現，線蟲並非靜止於一處攝食，而是一邊前進一邊攝食，並表現出樹枝狀行爲，且文獻指出線蟲腸道並無肌肉組織，需靠身體肌肉收縮以幫助消化，又因為後退時肌肉收縮方式與前進時相反，可使食物在腸道內來回循環，所以我們推測此行爲有助於線蟲的消化作用。
3. 水中行爲：在液態環境中，線蟲因為沒有可供身體附著施力的地方，因此無法有效率地移動，但為了移動，會盡可能地大幅扭動身體。

二、線蟲在不同因子下行爲差異之探討

透過有無菌、不同濃度、不同酸鹼值等操縱變因的實驗，進一步探討線蟲前進速率、擺頭、後退、拐彎等行爲的意義。

- (一) 前進速率 (圖表二-2)：在實驗二之一中，線蟲於無菌環境中的前進速率比有菌中快，但在實驗二之二中，線蟲前進速率無明顯差異。我們推測線蟲在菌落中因為有攝食行爲而使得前進速率較慢，而在無菌環境下，線蟲表現覓食行爲，因此前進速率越快越有利。
- (二) 擺頭行爲：在無菌環境中擺頭頻率高過有菌環境中很多，約增加 2.4 次/分。在實驗二之二中，當細菌濃度越高時，擺頭頻率越低，而擺頭頻率雖在實驗二之三中無明顯差異，但相對於有菌培養基而言都較高，所以我們推測擺頭行爲與覓食有關，為偵測食物氣味分子的行爲。
- (三) 後退行爲：在實驗二之三中，後退頻率有隨著 pH 值的增加而遞減的趨勢，在線蟲處於較不適環境中時出現頻率較高，然而在實驗二之一中，線蟲的後退頻率並沒有明顯差異，但後退後出現之行爲則有差別 (圖表二-3)：在有菌環境中，後退後轉向行爲比例較高，而在無菌環境中，後退後拐彎行爲比例較高。我們據此推測，後退行爲在不同的環境下有不同的意義：在有菌環境中，後退後轉向可避免離開食物來源及幫助消化，而在無菌環境中，後退後拐彎可離開不適環境或覓食。
- (四) 拐彎行爲：在實驗二之一中，有菌環境中的拐彎頻率約比無菌環境中低了 1.05 次/分。在實驗二之二中，拐彎頻率無明顯差異。在實驗二之三中，拐彎頻率有隨著 pH 值的增加而遞減的趨勢。文獻指出線蟲較不喜歡酸性環境，而拐彎行爲在線蟲處於較不適環境及無菌環境中時出現頻率較高，因此推測拐彎行爲是線蟲離開不適環境或覓食的行爲。

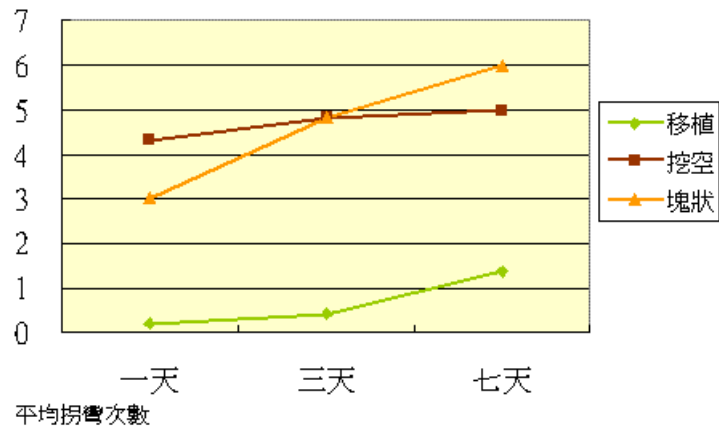
三、線蟲覓食行爲之探討

- (一) 生物可以視覺、聽覺、嗅覺或隨機觸覺等方式覓食，但已知線蟲無視覺、發聲或聽覺之構造，而實驗結果發現，線蟲在沒有 *E. coli* 存在的環境中較常出現擺頭、後退、拐彎等行爲，與有 *E. coli* 存在的環境中不同，因此可得知線蟲並非以隨機方式，而是以嗅覺方式覓食。
- (二) 經由實驗（圖表三-1）發現，線蟲在閉蓋培養基中抵達菌落時間較開蓋中短。我們推測線蟲覓食的機制為感應 *E. coli* 釋放之揮發性物質，因此環境中揮發性物質濃度越高，線蟲的嗅覺覓食效率就越高。
- (三) 線蟲後退次數隨著揮發性物質濃度增加而減少（圖表三-2）。我們推測 *E. coli* 釋放之揮發性物質濃度越高，線蟲越能判定食物位置，因此後退後拐彎或轉向以改變方向的需求減少。
- (四) 線蟲在覓食過程中，距菌落約 0.5cm 處出現混亂行爲，推測 *E. coli* 釋放至培養基表面之化學物質會影響線蟲行爲，使線蟲覓食效率降低。
- (五) 在其他氣味存在的環境中，線蟲覓食所需時間均增加（圖表三-3），但最終仍能正確地找到菌落，因此推測線蟲的嗅覺有專一偏好與依賴，受到干擾會降低其覓食的效率，但不會影響其判斷的正確與否。

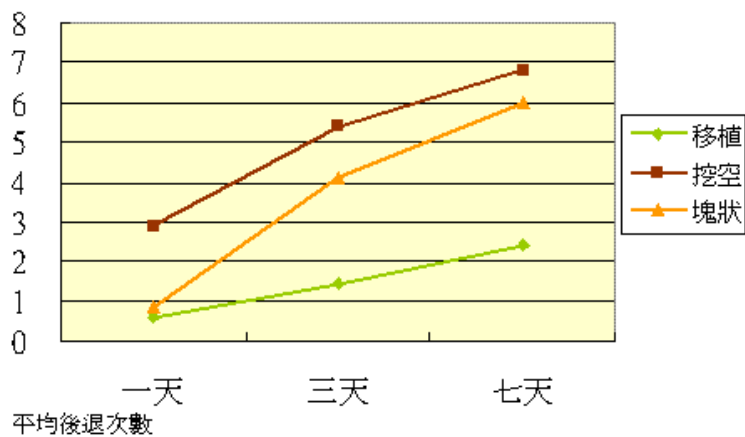
四、細菌釋放之化學物質對線蟲行爲影響之探討

- (一) 塊狀菌落中（圖表四-1、四-2），線蟲均出現混亂行爲，且混亂時間與細菌培養時間呈正相關。此外，在挖空菌落中（圖表四-3），當線蟲移至含化學物質的區塊（菌落邊緣約 0.5 cm 範圍區）時，亦出現混亂行爲。但移植菌落中（圖表四-4），後退行爲及拐彎行爲次數均較塊狀菌落及挖空菌落中少，且隨細菌培養時間只呈稍微增加之趨勢。我們推測化學物質為線蟲出現混亂行爲的主因，而非揮發性物質。
- (二) 如下圖表四-5，我們進一步發現化學物質決定了混亂行爲中的拐彎行爲的有無，但揮發性物質與化學物質同時存在的環境中，兩者交互作用會使線蟲混亂行爲中的拐彎行爲次數有增加的趨勢。
- (三) 如下圖表四-6，我們進一步發現線蟲混亂行爲中的後退行爲主要受化學物質影響。

圖表四-5



圖表四-6



柒、結論

- 一、線蟲有『前進』、『探頭』、『擺頭』、『偏移』、『轉向』、『後退』、『拐彎』等與覓食及攝食相關的基本行為，恆常出現的有『前進』、『探頭』，與覓食相關的有『擺頭』、『拐彎』，與攝食相關的有『偏移』、『轉向』。
- 二、擺頭行為是與覓食有關的行為之一，因在菌落中線蟲不需偵測食物位置，擺頭頻率較低。
- 三、轉向與偏移均有助於維持線蟲在一定的範圍內攝食，持續在菌落中活動。
- 四、線蟲在攝食過程中移動速率較覓食時慢，且出現樹枝狀行為，以促使食物在腸道中循環，幫助消化。
- 五、線蟲在不同環境下具有不同的後退後行為。在有菌環境中，後退後伴隨轉向行為以避免離開菌落、並出現樹枝狀行為以幫助消化；在無菌環境中，後退後伴隨拐彎行為，以快速改變方向，離開不適環境並覓食。
- 六、後退、拐彎行為的頻率與線蟲所處環境的適宜度有關。線蟲處於較適宜的環境中，後退、拐彎行為較少。

- 七、揮發性物質的存在與否、濃度與種類皆影響線蟲覓食的時間，顯示線蟲覓食方式並非隨機，而是相當地依賴嗅覺。
- 八、E. coli 會釋放化學物質使線蟲出現混亂行爲。根據實驗結果，E. coli 釋放至培養基上的化學物質爲引起混亂行爲的主因，而揮發性物質較無影響。然而，化學物質及揮發性物質同時存在的環境中，兩者的交互作用可提高混亂行爲中拐彎行爲的次數。推測此種行爲的出現，是因爲細菌釋放出化學物質並干擾線蟲的行爲，以降低本身被捕食的機率。然而，線蟲也演化出了對此種化學物質的適應現象，此兩種生物盼特殊的交互作用，呈現出一共演化現象。
- 九、未來可更深入研究之方向爲更深入分析細菌所釋放之兩種化學成分，並探討其對線蟲混亂行爲所引發的不同影響。

捌、參考資料及其他

- 一、施河：高中生物下冊，第九章，台南市，南一出版社。
- 二、楊冠政：高中生命科學下冊，第六章，台北縣，龍騰文化事業股份有限公司。
- 三、Campbell、Reece(2005)：生物學。偉明圖書有限公司發行。
- 四、Nystul、Roth(2005)：暫時停止生命。科學人雜誌，2005年7月號。
- 五、Wood(1988)：C. elegans II。Cold Spring Harbor Laboratory Press。
- 六、<http://www.wormbook.org/> ISSN : 1551-8507
- 七、<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/> NCBI
- 八、<http://www.textpresso.org/cgi-bin/wb/textpressoforwormbase.cgi> WormBase Literature Search
- 九、<http://zh.wikipedia.org/wiki/秀麗隱桿線蟲> 維基百科－秀麗隱桿線蟲
- 十、<http://www.bio.unc.edu/faculty/goldstein/lab/movies.html> C. elegans Movies

評語

本作品係以培養細菌成長過程及未含細菌之環境來探討秀麗隱桿線蟲之運動或覓食行爲。作品實驗過程觀察詳細，唯，對觀察結果所下的結論，不能善盡科學的說服能力，應可改善。研究的討論認爲線蟲覓食最重要的是嗅覺，但其實驗設計卻不能充分的表現嗅覺的主導性。本作品之實驗設計應予改進，使作品能更具說服力。