

中華民國第 59 屆中小學科學展覽會
作品說明書

高級中等學校組 動物與醫學科

第三名

052010

馬陸的捲曲螺線形態與其防禦作用之研究

學校名稱：臺北市立麗山高級中學

作者： 高二 陳迦恩 高二 楊易庭	指導老師： 郭瓊華 林獻升
-------------------------	---------------------

關鍵詞：馬陸、形態防禦、化學防禦

摘要

馬陸遇險時會捲曲形成螺線狀，此種捲曲行為為一種次級防禦。我們分兩部分去探究。第一部分為研究捲曲過程與螺線形態，使用 ImageJ 做形態測量，GeoGebra 做繪圖分析，顯示捲曲的軌跡與形態符合螺距等寬的**阿基米德螺線**，不同於以往發表過鸚鵡螺殼或向日葵花的**黃金螺線**。第二部分為探討捲曲行為對形態防禦及化學防禦有何作用，發現捲曲成螺線狀後，脆弱部位與外界接觸長度變短，軀體受壓力擠壓後形變量變小，有助於形態防禦。接著利用分光光度計分析捲曲前後化學防禦物質的分泌量及物質成分，發現捲曲形態有助於將分泌孔露出分泌氰化氫、苯甲醛與苯醌等化學防禦物質，不同種馬陸分泌物成分有差異，同一種受到大小不同的刺激，分泌量也有所影響。

壹、研究動機

在一次生態考察時我們在道路旁的落葉堆附近看見有許多馬陸在地上，且多呈現捲旋狀一動也不動，而身旁正好有隻馬陸爬過，好奇的我們使用手去刺激了馬陸，馬陸有時會立刻捲起成捲旋狀，有時則不予理會，且手上有黃色的液體，手心傳來一股灼熱感。



(圖一) 生物界中各種動植物捲曲

回想起生物課本中曾介紹多種生物都會有此種捲曲行為或形態(圖一)，我們猜測此種行為是一種防禦作用，透過文獻探討得知，防禦作用分初級防禦與次級防禦，初級防禦不管捕食動物是否出現均在起作用，它有助於減少與捕食動物相遇的可能性。初級防禦有四種類型，即：穴居、隱蔽、警戒色和擬態。而**次級防禦**多只有當捕食動物出現之後才起作用，它可增加和捕食動物相遇後的逃脫機會，**次級防禦**主要分為三大類型，其一為**行為防禦**，動物使用動態行為來做自身防禦，如回撤、逃遁、威嚇、假死、轉移攻擊部位和反擊等六種方式。其二為**化學防禦**，動物利用身體不同的部位分泌有毒物質或難聞的化學物令攝食者退縮，

如黑眶蟾蜍眼後具有腺體能夠分泌有毒物質。其三為**型態防禦**，動物透過身體形態上差異來保護自己，如刺蝟背部具有尖刺。

			
出擊防禦：警戒色	出擊防禦：擬態	化學防禦：黑眶蟾蜍	型態防禦：刺蝟

(圖二) 初級防禦與次級防禦實際案例

然而我們發現，一種動物並不只具有一種防禦行為，如黑眶蟾蜍既有化學防禦，具有腺體能夠分泌有毒物質，又擁有初級防禦，保護色隱藏在水池邊。而馬陸則是所有防禦作用都有，馬陸擁有保護色或是警戒色幫助他躲於枯葉堆中不易被發現或是讓其他動物不敢靠近，此為其初級防禦，而馬陸背部具有堅硬的外殼為形態防禦，受到刺激時會分泌黃色的氰化物有毒液體為化學防禦，氰化物如果濃度大會抑制粒線體內膜上細胞色素氧化酶的活性，降低細胞的呼吸作用，造成虛弱、頭暈及呼吸急促、甚至奄奄一息的症狀。而受刺激後產生的捲曲形態非常特別，很像**蚊香螺旋形狀**，因此我們想要了解馬陸的捲曲行為與螺旋形狀，並了解這種行為與形態對牠的生存適應有何影響。

另外我們透過探討文獻得知，馬陸能夠分泌有毒的化學物質氰化物，但似乎並不是每次受到刺激都會分泌，而且分泌物的量也會有所不同，因此我們也想了解馬陸的捲曲行為與其所分泌化學物質有何種關係。

		
人為刺激馬陸	馬陸受刺激捲曲	馬陸分泌出黃色氰化物

(圖三) 馬陸受刺激捲曲並分泌有毒物質氰化物

貳、 研究目的

一、 研究目的：

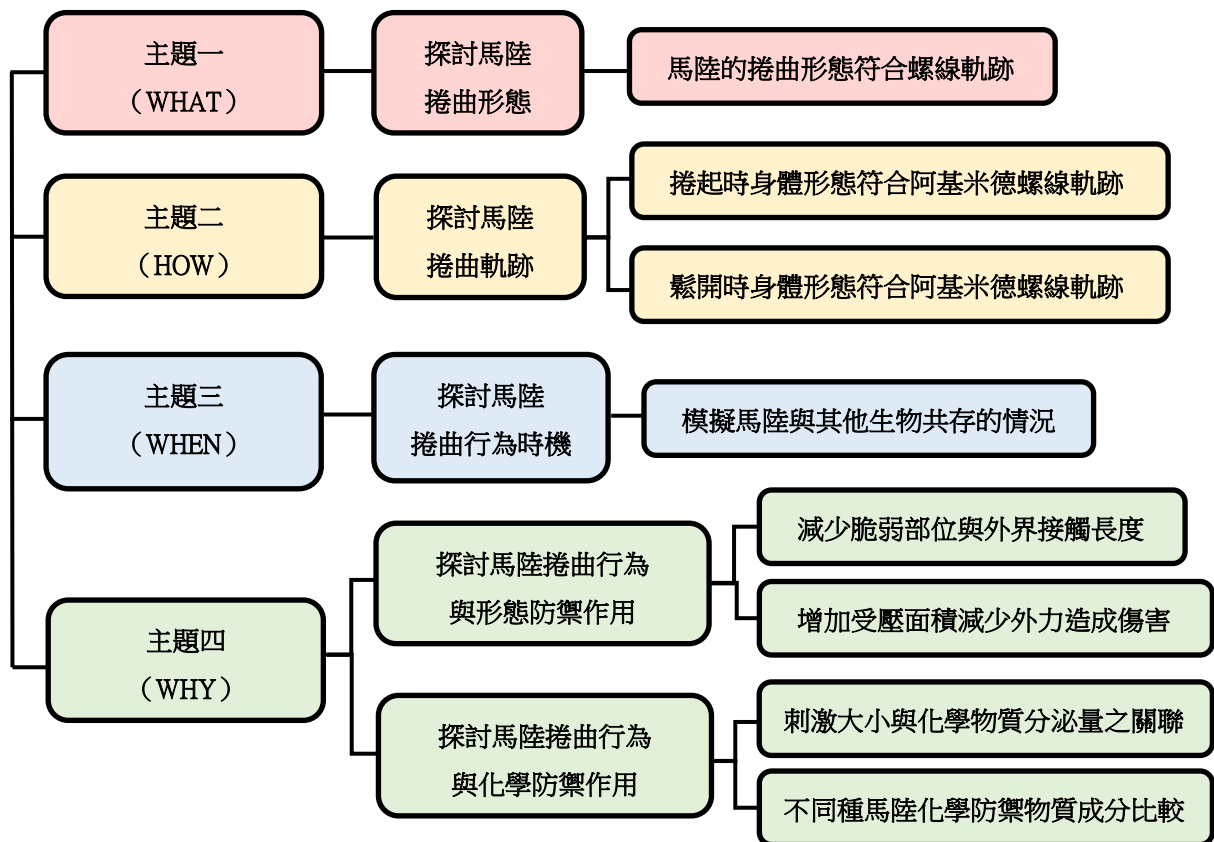
- (一) 探討馬陸的捲曲行為與捲曲後的螺線形態
- (二) 探討馬陸捲曲螺線形態與防禦作用的關聯

二、 研究問題：

再已具有保護色外殼此類初級防禦行為以及分泌氰化物此種次級防禦之外，為何馬陸還需要有捲曲行為？而此種螺線形態為對馬陸的防禦有何益處？

三、 研究假說：

馬陸會在重要部位受刺激時產生捲曲行為，並捲曲成螺線形態，且捲曲行為可減少其脆弱部位與外界接觸，並可以透過增加受力面積來減少外力所造成的傷害，另外捲曲的形態，有助於驅避腺分泌有毒的刺激性物質，讓掠食者不敢攻擊馬陸。




(圖四) 實驗流程圖

參、 研究設備及器材

一、 實驗物種：

馬陸（Millipede），又稱千足蟲，為倍足綱節肢動物的通稱，陸生。身體有多節，除第一節及最後一節外，絕大部分每一體節有兩對腳，一般物種大約有從 36 隻到 400 隻腳，頭部有觸角，頭四節為頭胸部，餘下為腹部。生活在潮濕地方，大多以枯枝落葉為食。遇襲擊時會呈現假死狀態，把自己蜷縮起來成為捲漩狀。會散發刺激性味臭，使鳥獸不會攻擊自己。馬陸體液及其分泌物含有一種藥物苯醌，可以發揮驅蚊作用。雌馬陸之生殖腺開口於第三體節之腹面中央，因此其第三體節的腹面部分會有很明顯的一大節空的部份。產卵時會將蛋生在土中，捲曲身體包覆蛋，以保護卵。

本實驗共採集三種不同馬陸進行實驗。

		
磚紅厚甲馬陸 <i>Trigoniuulus corallinus</i>	粗直形馬陸 <i>Asiomorpha coarctata</i>	姬馬陸 <i>Julidae sp.</i>

二、 研究器材：

（一）紫外光分光光度計（**Ultraviolet-visible spectroscopy, UV-Vis**）

以紫外線-可見光區域電磁波連續光譜作為光源照射樣品，研究物質分子對光吸收的相對強度方法。分析原理是利用可見光及紫外光之燈管做為光源，藉由樣本及空白水樣間所吸收之光能量差，與標準液之能量吸收值相比較，便可律定樣本中之待測物濃度。

（二）Geogebra 數學繪圖軟體

是自由且跨平台的動態數學軟體，包含幾何、代數、表格、圖形、統計和微積分，我們將圖片匯入進去，輸入方程式，並調整圖片與方程式係數，做精準的比對。

肆、 研究過程或方法

一、 馬陸樣本採集

我們在學校校園角落的落葉堆中採集馬陸，並取其身旁落葉裝於飼養箱中帶回實驗室做實驗。因此我們設計以下的實驗來證實我們的推論：野外實際採集馬陸示意圖



(一) 馬陸受刺激產生捲曲之身體型態(WHAT)

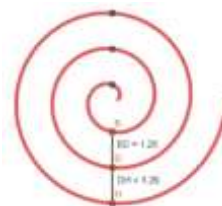
將受刺激已捲曲的馬陸拍照記錄，觀察馬陸身體的捲曲狀態為捲旋狀，我們也同時在鸚鵡螺的殼上找到相似的曲線在數學領域中，文獻提到有關於此曲線的數學方程式為螺線方程式(*Spiral*)。透過 Geogebra 繪圖軟體比對，找出與馬陸捲曲時身體曲線軌跡與哪一螺線最為相似，我們以形態最相似的兩種螺線探討螺線係數改變對應馬陸身體捲曲有何變化。

1. 數學方程式螺線介紹

(1) 阿基米德螺線(*Spiral of Archimedes*)

若一點動沿一直線均速度運動，而這一直線又以定角速度環繞這條線上的其中一點轉動時，轉動的軌跡為阿基米德螺線，亦為等速螺線。

螺線方程式： $r = a + b\theta$



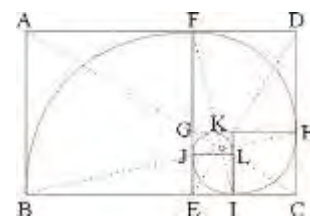
(圖八) 阿基米德螺線

(2) 對數螺線(*logarithmic spiral*)

對數螺線亦稱為黃金螺線，可透過黃金矩形畫出。

螺線方程式： $r = aeb\theta$

特色：間距漸增

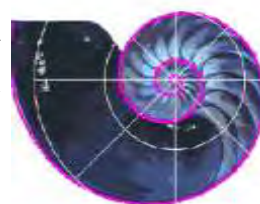


(圖九) 對數螺線

2. 現今已發現的生物之對數螺線構造

(1) 鸚鵡螺

螺殼每生長出一固定角度，鸚鵡螺身體就生長出固定比例，由於鸚鵡螺在生長時內圈與外圈分泌石灰質的量總為一定值造成的。因此，從螺旋形貝殼的形狀，我們可以清楚的看出殼內動物生長的速率。



(圖十) 對數螺線

(2) 向日葵

向日葵的和其他一些植物的種子在花盤上排列出的曲線就是等角曲線，這樣每顆種子受到周圍其他種子所分泌生長的抑製作用可以達到最小，同時當它們長大時可以保持形狀不變。



(圖十一) 向日葵蕊芯

3. 使用 Geogebra 繪圖軟體比對馬陸捲曲的形態

- (1) 將馬陸捲曲型態的照片匯入 Geogebra 繪圖軟體並以圖片的馬陸頭部中心點為比對螺線之起點。
- (2) 輸入兩種螺線方程式 $r=a+b\theta$ 阿基米得螺線、 $r=ae^{b\theta}$ 對數螺線。
- (3) 將螺線重疊於馬陸捲曲的照片做比對，並將結果分為三類（同種不同性別之馬陸，同種不同大小之馬陸、不同種之馬陸）

(二) 馬陸捲起與鬆開過程時身體螺線軌跡的變化 (HOW)

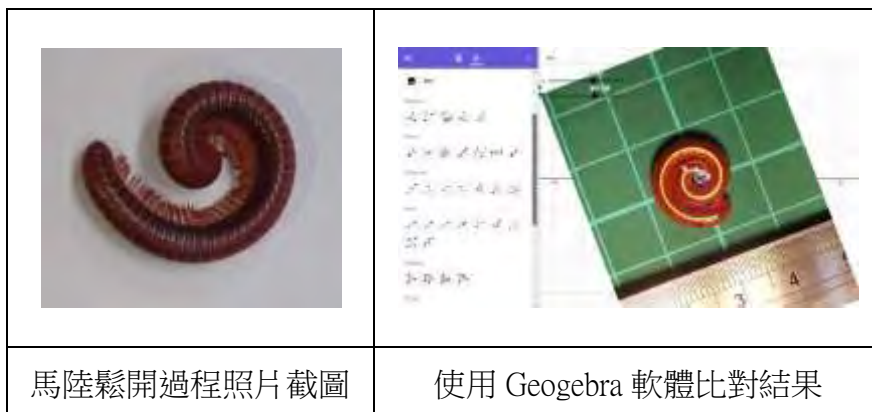
除了解馬陸捲曲型態為何種螺線，也想知道馬陸是如何從身體全直捲起到螺線形態，故設計實驗研究馬陸分別於捲起、捲開兩個過程中螺線軌跡如何變化，螺線方程式係數的變化有何趨勢。

1. 錄製馬陸受到刺激而產生捲曲行為之影片

將馬陸由直線型態到螺線型態全程錄製並將影片依馬陸捲起各型態截圖

2. 使用繪圖軟體 (Geogebra) 做繪圖分析

將螺線重疊於馬陸捲曲的照片做比對



(圖十三) 馬陸捲曲時身體螺線軌跡的變化

(三) 探討馬陸捲曲行為時機 (WHEN)

我們想了解馬陸在何種情況下會有捲曲行為，馬陸一般生活在潮濕的落葉堆，在此生活的捕食動物通常為兩棲類。我們將掠食者蟾蜍與馬陸放置在同一棲地內，觀察馬陸的行為反應，以了解捲曲行為是在何種時機下會產生，對馬陸防禦掠食者有何作用。

(四) 探討馬陸捲曲行為之防禦機制 (WHY)

透過數學和物理概念對馬陸捲曲行為做更深入的探討，將實驗分為兩大部分進行探討，其一，探討馬陸捲曲行為與形態防禦作用，其二，探討馬陸捲曲行為與化學防禦作用，分別探討馬陸捲曲行為與形態對於馬陸生存適應有何種影響。

1. 探討馬陸捲曲行為與形態防禦作用

(1) 馬陸捲曲可減少脆弱部位與外界接觸長度

將圖片匯入 ImageJ 測量馬陸捲曲前直線型態以及馬陸捲曲後螺線型態與身體與外界接觸長度。將數據整理，觀察捲曲前後馬陸軀體與外界接觸長度是否有顯著差異。

(2) 馬陸捲曲增加受壓面積進而減少外力所造成的傷害

我們將馬陸捲曲行為分為三個階段（直線型態、捲一半圈數之型態、全捲曲型態），並以黏土模擬製作馬陸模型，並透過定量外力施壓，觀察模型受壓後形變量，將其與比例尺拍照紀錄後，使用 Image J 繪圖軟體計算出模型形變量數據與模型的受壓面積，最後觀察其趨勢是否符合假說給予定量外力時，馬陸受壓面積增加，可減少外力給予的壓力，以此達到減少傷害的效果。

		$P = \frac{F}{A}$
實際測量情況	使用 ImageJ 繪圖軟體比對	壓力公式

(圖十四) 測量馬陸模型受壓情況

F 代表為馬陸模型所接受到的外力，A 代表模型的受壓面積，P 則代表外力作用於模型上所造成的壓力，我們推測當模型受壓面積增加時，所受到外力作用的壓力就會減小。

2. 探討馬陸捲曲行為與化學防禦作用

由於我們觀察到馬陸會有捲曲行為以及分泌驅拒物質，因此我們更深入的探討不同種類馬陸、不同電壓刺激對於馬陸捲曲行為的影響，並透過紫外光分光光度計，分析分泌物了解其驅避物的成分與分泌量。

(1) 分析不同種馬陸受到電壓刺激後所分泌之分泌物成分

先使用蒸餾水將馬陸身體表面沖乾淨後擦乾，避免有其他物質影響實驗結果，接著以鏢子輕微刺激馬陸使其產生捲曲行為且無分泌驅拒物質，再使用 6V 電壓刺激馬陸 10 秒使其分泌驅拒物，再以 pipet 吸取 1ml 蒸餾水沖洗馬陸，再將含有馬陸分泌物的蒸餾水收集，加入蒸餾水稀釋至 3ml，最後透過紫外光分光光度計分析分泌物在特定光波波段的吸光量，分析分泌物的濃度以及成分。

(2) 分析同種馬陸受到不同電壓刺激後所分泌之分泌物濃度

同樣先使用蒸餾水將馬陸身體表面沖乾淨後擦乾，避免有其他物質影響實驗結果，接著以鏢子輕微刺激馬陸使其產生捲曲行為且無分泌驅拒物質，再使用變壓器改變電壓大小，以 3V、6V、9V 電壓分別刺激馬陸 10 秒使其分泌驅拒物質，再以 pipet 吸取 1ml 蒸餾水沖洗馬陸，再將含有馬陸分泌物的蒸餾水收集，加入蒸餾水稀釋至 3ml，最後透過紫外光分光光度計分析分泌物在特定光波波段的吸光量，分析分泌物的濃度。

(3) 探討馬陸捲曲行為與刺激力道大小的關係

以鏢子輕微刺激馬陸使其產生捲曲行為，再使用變壓器改變電壓大小，以 3V、6V、9V 電壓分別刺激馬陸，了解更強烈刺激對馬陸捲曲行為有何影響。







(圖十五) 不同種馬陸受到電擊刺激而分泌氰化物

伍、 研究結果

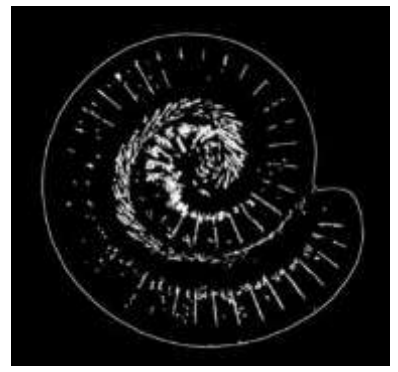

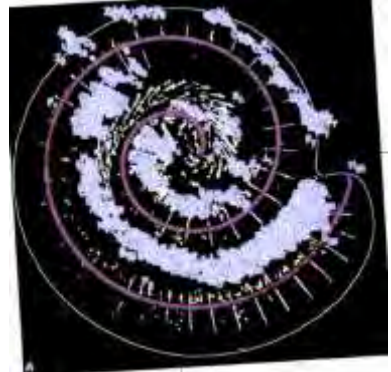
一、 探討馬陸受刺激產生捲曲之身體型態(WHAT)

數學螺線方程式中有許多種類，我們取兩個最相似於馬陸此捲旋狀的螺線來與馬陸做比對，發現『**阿基米德螺線**』最為符合馬陸的捲曲形態，於是我們利用 Geogebra 繪圖軟體將阿基米德螺線以及對數螺線與馬陸捲曲的圖片做比對。

比對阿基米德螺線		比對對數螺線	
			
磚紅厚甲馬陸	粗直形馬陸	磚紅厚甲馬陸	粗直形馬陸

(圖十九) 馬陸捲曲形態和螺線比對結果

將照片經特殊影像處理，去除背景、改變色階之後形成變成曲線圖，再將馬陸各體節的身體中點點出並連線，再與套用阿基米德螺線方程式所畫出的螺線進行比對證明，馬陸捲曲後的身體形態符合阿基米德螺線軌跡。

		
經影像處理	點出馬陸各體節身體中點	比對阿基米德螺線軌跡

(圖二十) 證實馬陸捲曲型態符合阿基米德螺線軌跡

綜合以上(圖十九)(圖二十)的比對結果，因馬陸身體從頭到尾等寬，且捲曲時腹部與背部緊緊貼合並無空隙，符合阿基米德之螺距等寬之特性，因此當阿基米德螺線軌跡可與馬陸身體中線重合，而得到**馬陸軀體的捲曲形態符合阿基米德螺線軌跡**此結果。馬陸不符合對數螺線的原因在於，對數螺線的軌跡螺距是越來越大，因此將對數螺線軌跡重疊於馬陸

捲曲的照片時，僅有前面一小部分能夠與馬陸身體中線重合，馬陸的體型（體寬）越小，對數螺線與馬陸身體中線重合的重疊度就會越大，因對數螺線會依照螺距的大小改變角速度，而造成螺距的改變。

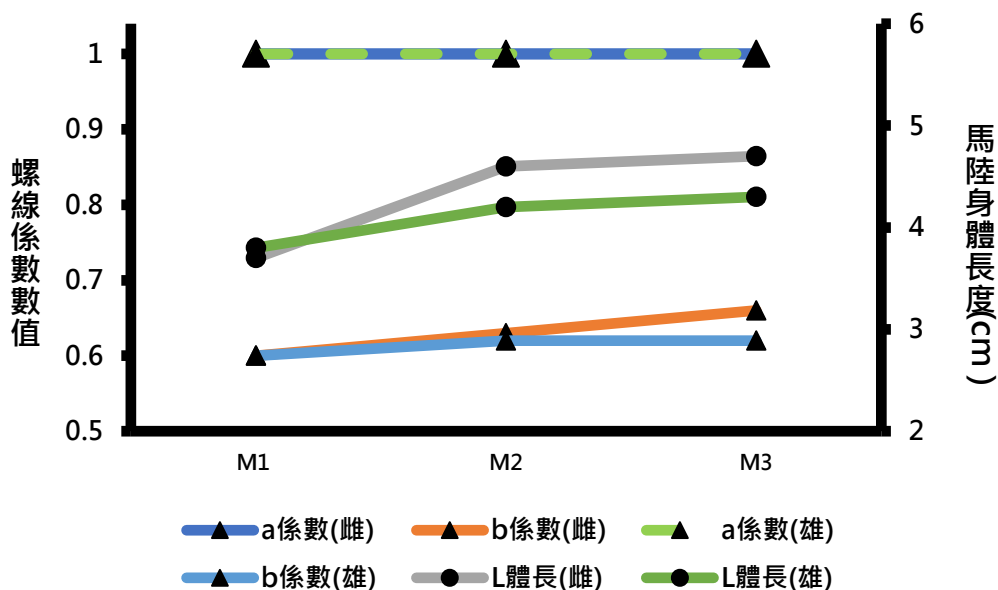
而在將阿基米德螺線軌跡與馬陸身體中線比對時，是需要透過改變螺線係數才可找到與馬陸捲曲型態相符的阿基米德螺線軌跡，我們發現 a 、 b 、 θ 這三個係數的改變與馬陸的體型是有關連性的， a 數值為 x 軸係數， b 數值為螺距， θ 數值為螺線圈數。

$$r = a + b \times \theta$$

a
X-axis coefficient
 b
Screw pitch
(The distance of each spiral)
 θ
Radian
(Number of turns)

(圖二十一) 阿基米德螺線係數對應馬陸身體形態的關聯

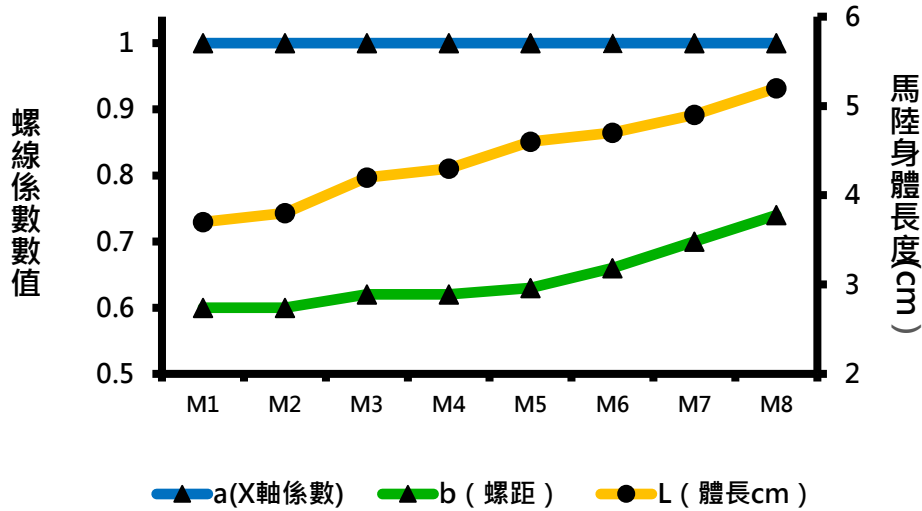
於是我們分別將馬陸分為同種不同性別且體型相近之馬陸、同種不同體型大小之馬陸、不同種之馬陸，此三大部份實驗進行。



(圖二十二) 利用阿基米德螺線比對同種之雌、雄馬陸的係數變化
(a 數值、 b 數值、 L 馬陸體長)

由於阿基米德螺線之螺線方程式為 $r = a + b\theta$ ， a 數值為 x 軸係數， b 數值為螺距， θ 數值為螺線圈數。實驗數據 (圖二十二) 顯示，以同種不同性別大小之磚紅厚甲馬陸比對阿基米德螺線時，阿基米德螺線之 a 係數的數值不變， b 係數的數值變大， θ 數值變大。

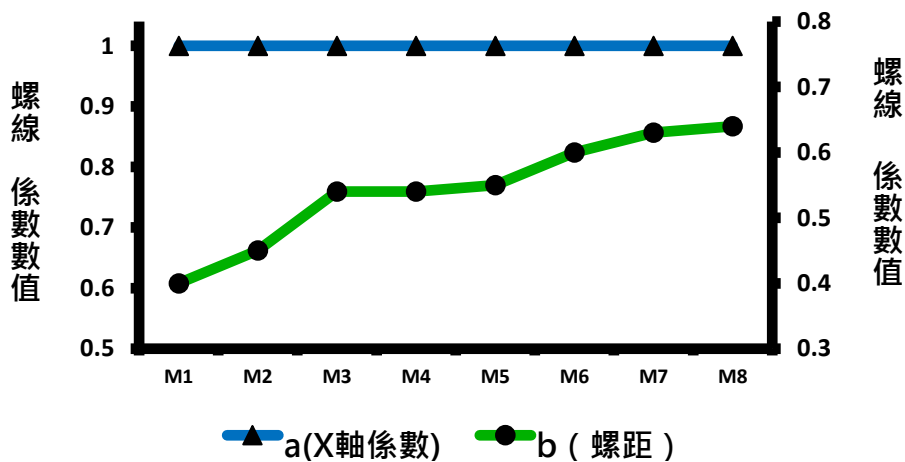
由以上實驗結果得知，a 係數皆無變化，因馬陸體形越大，造成螺距變大，所以 b 係數數值變大，而馬陸體長越長，自身纏繞的圈數越多，所以 θ 數值（螺線圈數）會越大，因此馬陸不同性別並不影響 a 係數的數值，螺線型態也相似。



(圖二十三) a 係數、b 係數與長度 L 係數變化之比較

由於阿基米德螺線之螺線方程式為 $r = a + b\theta$ ，a 數值為 x 軸係數，b 數值為螺距， θ 數值為螺線圈數。實驗數據（圖二十三）顯示，以同一種不同體形大小之磚紅厚甲馬陸比對阿基米德螺線時，阿基米德螺線之 a 係數的數值不變，b 係數的數值變大， θ 數值變大。

由以上實驗得知，a 係數無變化，b 係數因馬陸體形越大，造成螺距變大，所以數值變大，而馬陸體長越長，自身纏繞的圈數越多，所以 θ 數值（螺線圈數）會越大，因此馬陸之體型大小並不影響 a 係數的數值，螺線型態也相似。



(圖二十四) a 係數與 b 係數係數變化之比較

實驗數據（圖二十四）顯示，我們以八種不同種之馬陸捲曲照片比對阿基米德螺線軌跡，結果阿基米德螺線之 a 係數的數值不變，b 係數的數值變大。由上一實驗得知馬陸之體型大小並不影響 a 係數的數值，因此不考慮圖片中馬陸的體型大小。

由以上實驗得知，a 係數（x 軸係數）無變化，b 係數（螺距）因馬陸體形越大，造成螺距變大，所以數值變大，而馬陸體長越長，自身纏繞的圈數越多，所以 θ 數值（螺線圈數）會越大，因此馬陸不同種類並不影響 a 係數的數值，螺線型態也相似。

綜合以上三大部分實驗結果，不管是在改變馬陸的性別、體型以及種類都不會影響 a 係數（x 軸係數）的改變。然而 b 係數（體寬）的數值會隨著馬陸體型變大而增加，最後 θ 數值（螺線圈數）的數值，則會因為馬陸的體長越長，可纏繞的圈數增加而變大，因此馬陸在不同性別、不同體型（體長）與不同種類螺線型態都相似

二、 探討馬陸捲曲與鬆開之過程（HOW）

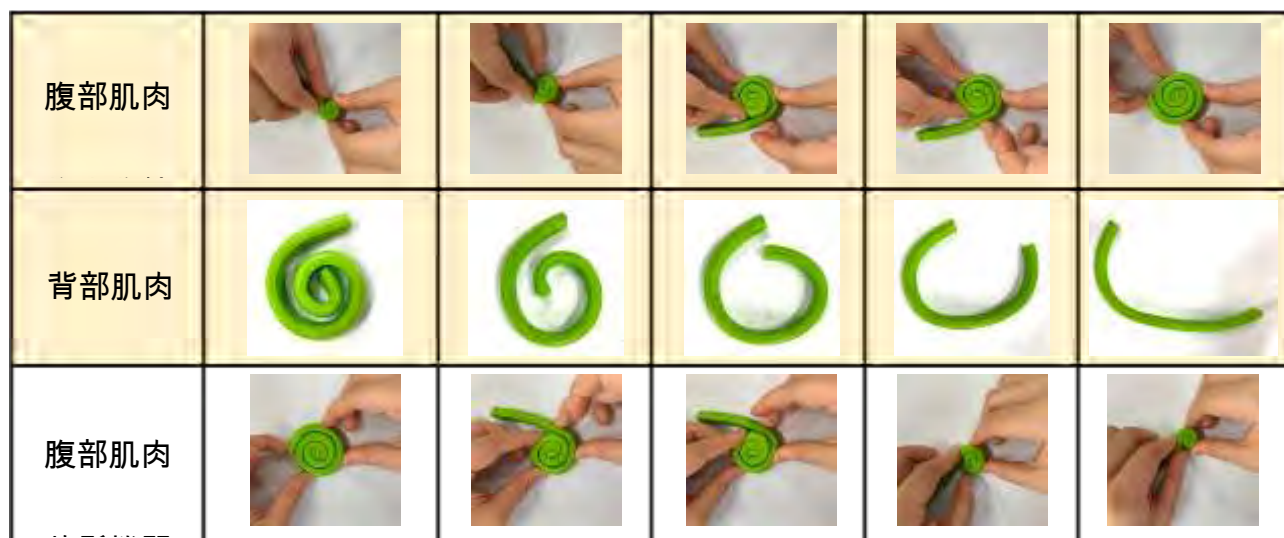
了解馬陸何時會捲曲以及捲成何種形式之後，我們想了解馬陸是如何捲起與鬆開的，我們將馬陸從刺激前的直線型態到受刺激後捲起的螺線型態過程全程錄影，將影片過程個時期截圖，使用 Geogebra 繪圖軟體將阿基米德螺線與馬陸捲曲的圖片做比對。

捲起							
	無螺線	a=1.6 b=1	a=1.6 b=1	a=1.6 b=1	a=1.6 b=1	a=1.6 b=1	
	鬆開						
		a=2.2 b=1	a=1.2 b=0.7	a=2.3 b=0.7	a=3.5 b=0.2	無螺線	無螺線

（圖二十五）馬陸捲起與捲開過程之影片截圖（由左至右，依序截圖）

根據數據（圖二十五）顯示，馬陸在捲起的過程中，馬陸捲曲的身體形態全程符合阿基米德螺線之軌跡，原因為馬陸是由頭部開始腹部與背部緊緊貼合地向內捲曲，又馬陸身體寬度從頭到尾相等，因此只要馬陸有捲起的部分，因為身體等寬的原因，符合阿基米德螺線之特色「螺距等寬」，又因螺距（b 係數）與馬陸體長（ θ 數值）並無改變，故 a 係數（X 軸係數）不會改變，因此馬陸捲起的過程中，全程符合阿基米德螺線之軌跡。

而馬陸於鬆開的過程中與捲起的方式不同，鬆開時為**頭部、尾部同時一起鬆開**，如此仍舊符合阿基米德螺線，原因為阿基米德螺線之螺距等寬，也就是說馬陸雖然一次頭尾都展開，但在此同時**身體間距也等比例放大**，故身體與身體之間的距離比例不會改變，故馬陸捲曲過程中之前半程符合阿基米德螺線螺距等寬之特性，然而因為馬陸在鬆開時螺距（ b 係數）變大但馬陸體長（ θ 數值）並無改變，因而在此狀況下螺線整體一起放大時， a 係數就會改變，且越變越大（起始點越往右移），一旦馬陸已捲開至不成捲旋狀時，即不構成阿基米德螺線之特性。



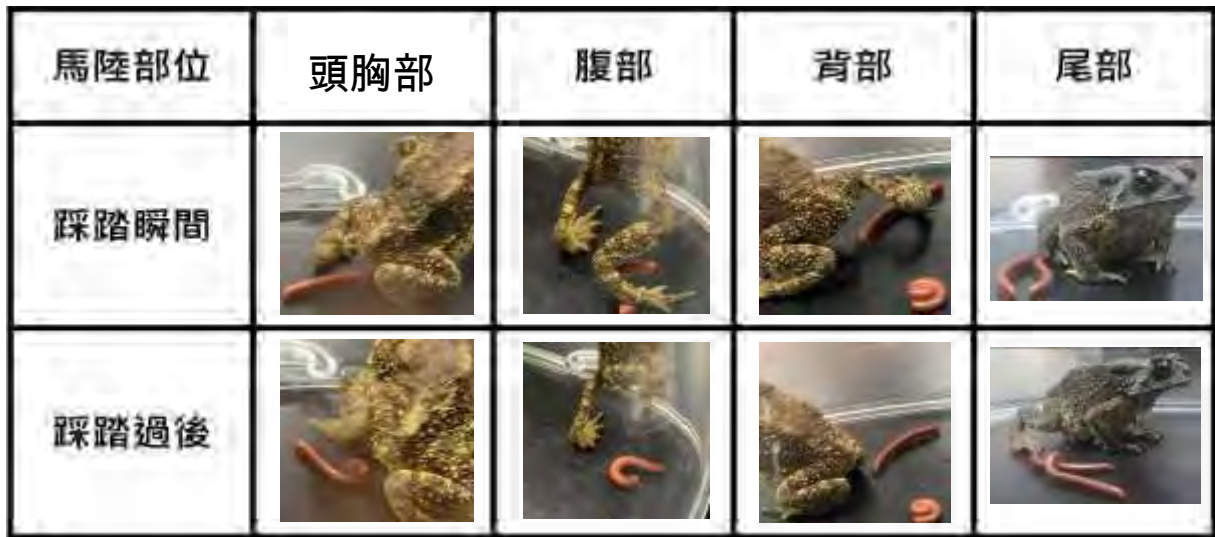
（圖二十六）馬陸捲起、鬆開、捲開方式模擬（隔音條）

由（圖二十六）模擬捲曲過程發現，馬陸捲起時以頭部為中心，全程透過肌肉結抗作用產生捲曲，即腹部的肌肉施力收縮，背部肌肉放鬆，將身體向內捲曲，全程身體形態符合阿基米德螺線軌跡。鬆開時腹部放鬆，背部收縮，身體快速鬆開，可使頭部最快探出，找到方向快速離開。最後我們**模擬馬陸腹部肌肉一段段自然放鬆**，捲開時會全程符合阿基米德螺線軌跡，但速度慢，對生存適應不利。

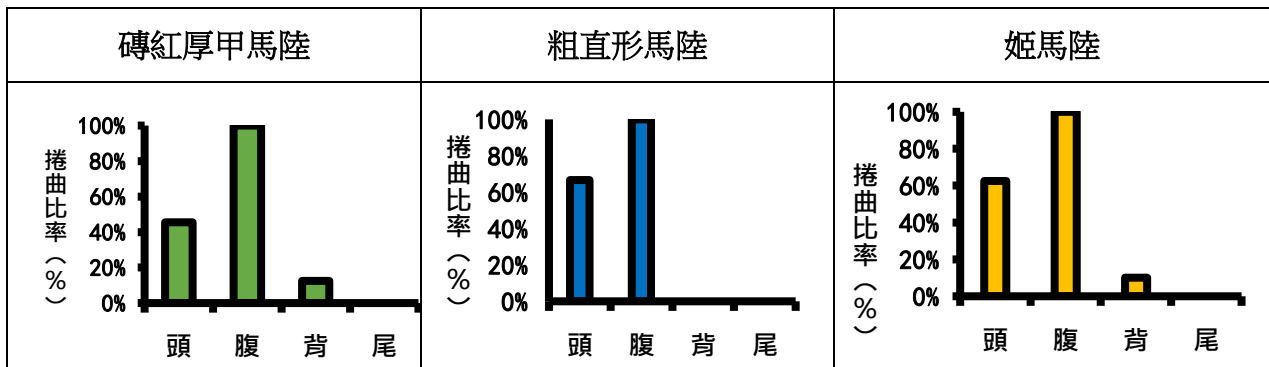
以上三大部分實驗探討馬陸身體部位受外力刺激後之捲曲行為（WHEN）、探討馬陸受刺激產生捲曲之身體型態(WHAT)與探討馬陸捲曲與鬆開之過程（HOW）皆為馬陸之**次級防禦**中所具有的**行為防禦**

三、 探討馬陸捲曲防禦的時機(WHEN)

我們觀察在共棲環境中蟾蜍不會捕食馬陸，而且馬陸還會移動至蟾蜍身邊被蟾蜍踩踏。馬陸各部位在受到蟾蜍踩踏後會有不同反應，在頭部與腹部受到刺激時皆有明顯捲曲行為，而在背部與尾部幾乎沒有任何反應，因此可以確認馬陸的頭部與腹部最為敏感，當此部位受到刺激時會引發馬陸捲曲行為發生，形成螺線形態，以進行次級防禦作用。

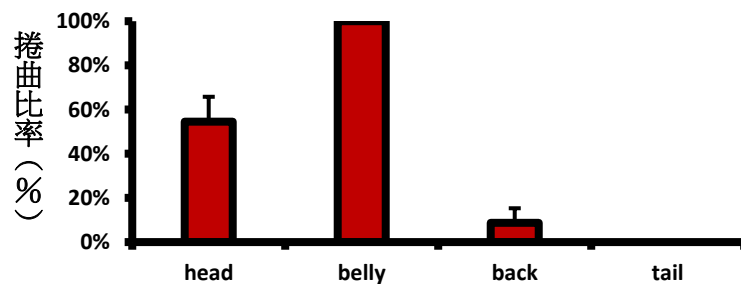


(圖二十七) 馬陸受到蟾蜍踩踏瞬間與踩踏之後身體反應比較



(圖二十八) 馬陸受到蟾蜍踩踏瞬間與踩踏過後之馬陸捲曲比率

將所有結果統整後，各種馬陸捲曲比率總和之平均，如下圖



(圖二十九) 各種馬陸捲曲比率統整

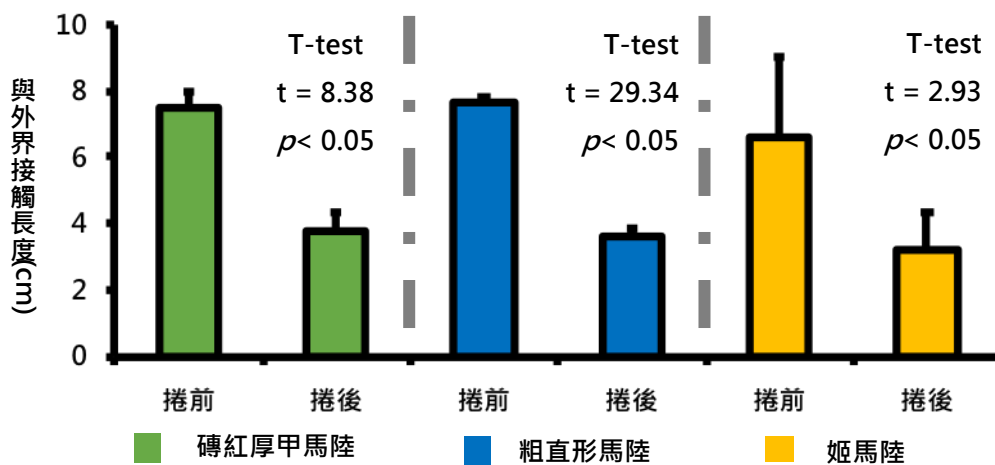
四、 探討馬陸捲曲行為之防禦機制(WHY)

根據前面實驗內容得知馬陸捲曲的行為防禦功能，我們想知道馬陸到底為何捲起，捲起又有何益處，於是我們將實驗分為兩個部分作為探討。

(一) 探討馬陸捲曲行為與形態防禦作用

(1) 馬陸捲曲可減少脆弱部位與外界接觸長度

我們分別作了以三種不同種類的馬陸，每種找五隻馬陸來測量其捲曲前直線型態與馬陸厚羅線型態與外界接觸之長度，與比例尺分別拍照，將結果輸入 ImageJ 繪圖軟體，最後精準算出馬陸身體與外界接觸長度。




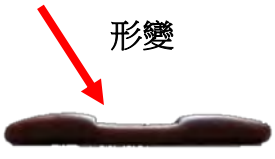




(圖三十) 馬陸捲曲前後和外界接觸長度比較

圖表中三種顏色各代表三種不同的馬陸物種，將每種馬陸捲曲前與捲曲後與外界接觸的長度做 T-test 分析，P 值皆小於 0.05，說明了馬陸身體捲曲前與外界接觸長和身體捲曲後與外界接觸長有顯著的差異。而再細看數據，馬陸在身體捲曲前與身體捲曲後與外界接觸的長度來看，長度大約是身體捲曲前與外界接觸的長度的一半。因此我們可以得出一個結果，馬陸捲曲可減少脆弱部位與外界接觸長度。

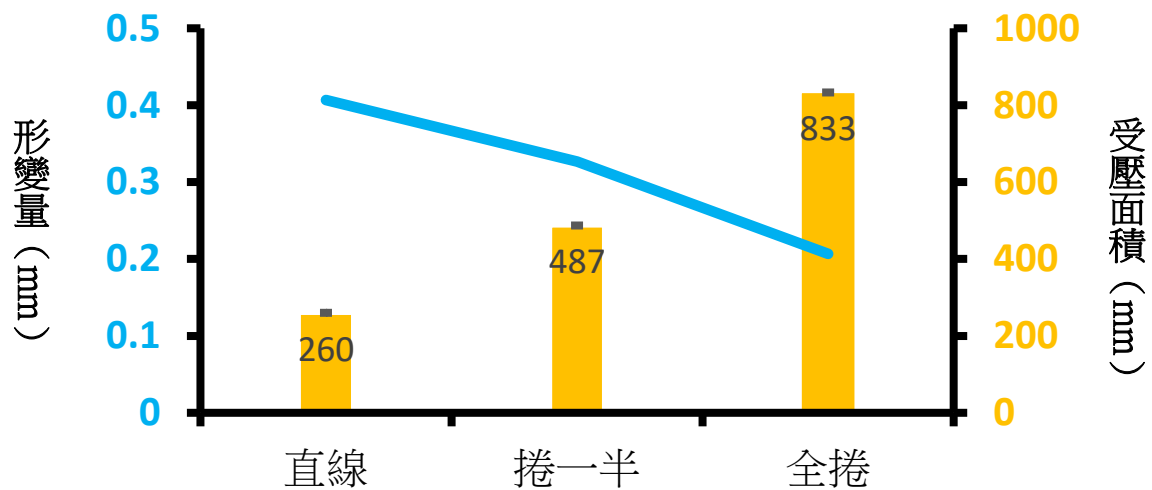
(2) 馬陸捲曲增加受壓面積進而減少外力所造成的傷害

我們將馬陸捲曲過程分為三個階段，以黏土模擬製作馬陸模型，並透過定量外力施壓，使用 ImageJ 繪圖軟體計算出模型形變量數據，後同樣使用 ImageJ 繪圖軟體計算出模型之受壓面積再計算模型的受壓面積，最後觀察其趨勢是否符合假說所提出，給予定量外力時，馬陸受壓面積增加，可減少外力給予的壓力。

馬陸身體形態	直線型態	捲一半圈數之型態	全捲曲型態
受壓前			
受壓後			

(圖三十一) 馬陸模型受壓前後比較

從結果上來看，可以從(圖三十一)圖片中看出，馬陸模型在直線型態下受到外力施壓後，非常明顯的凹陷，然而馬陸模型在全捲曲型態時，幾乎無形變量的改變。我們將每一型態之形變量數據與受壓面積數據，放在同一張圖內，觀察其變化趨勢的關聯性趨勢。



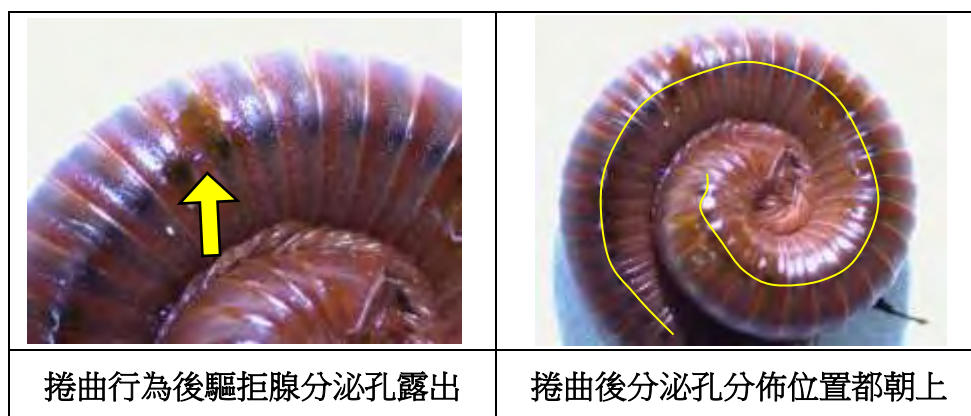
(圖三十二) 馬陸各捲曲狀態受壓面積與形變量之關係

重複上述受壓實驗三次，統計分析結果如(圖三十二)，可以看到當馬陸模型的受壓面積逐漸增加時，模型的形變量逐漸下降，甚至比尚未捲曲前減少一半的形變量。套回原本壓力公式，當固定外力時，馬陸因受壓面積增加，分散壓力導致馬陸受壓後形變量減少，以此達到減少傷害的效果。綜合以上兩實驗(測量馬陸軀體捲曲前後與外界接觸長度、測量馬陸模型在受到外力施壓時形態變化)可得出馬陸軀體捲曲行為，可減少脆弱部位與外界接觸長度，且可增加受壓面積進而減少外力所造成的傷害。

(二) 探討馬陸捲曲行為與化學防禦作用

(1) 馬陸分泌驅拒物質的位置與時機

透過文獻探討得知，馬陸身體兩側具有「驅拒腺」能夠分泌出化學防禦物質，而在馬陸產生捲曲行為後，分泌孔會露出分佈於身體上側，使分泌物更集中，且分泌物能覆蓋於身體上，形成一層「驅拒物保護膜」，並發出強烈味道，刺激捕食者不敢輕易捕食馬陸。



(圖三十三) 馬陸驅拒腺分佈狀態與氰化物分泌情形

我們想了解馬陸捲曲行為與分泌化學物質之間的關聯。我們固定馬陸的頭尾兩端使其無法捲曲，並刺激馬陸，刺激過後馬陸始終沒有分泌任何的分泌物。但是當我們不固定馬陸使其能夠自然捲曲時，給予相同大小刺激，馬陸卻分泌出許多黃色的驅拒物質。且在過程中也有觀察到，馬陸通常會將身體捲曲到最緊的螺線形態時，才會分泌出氰化物。

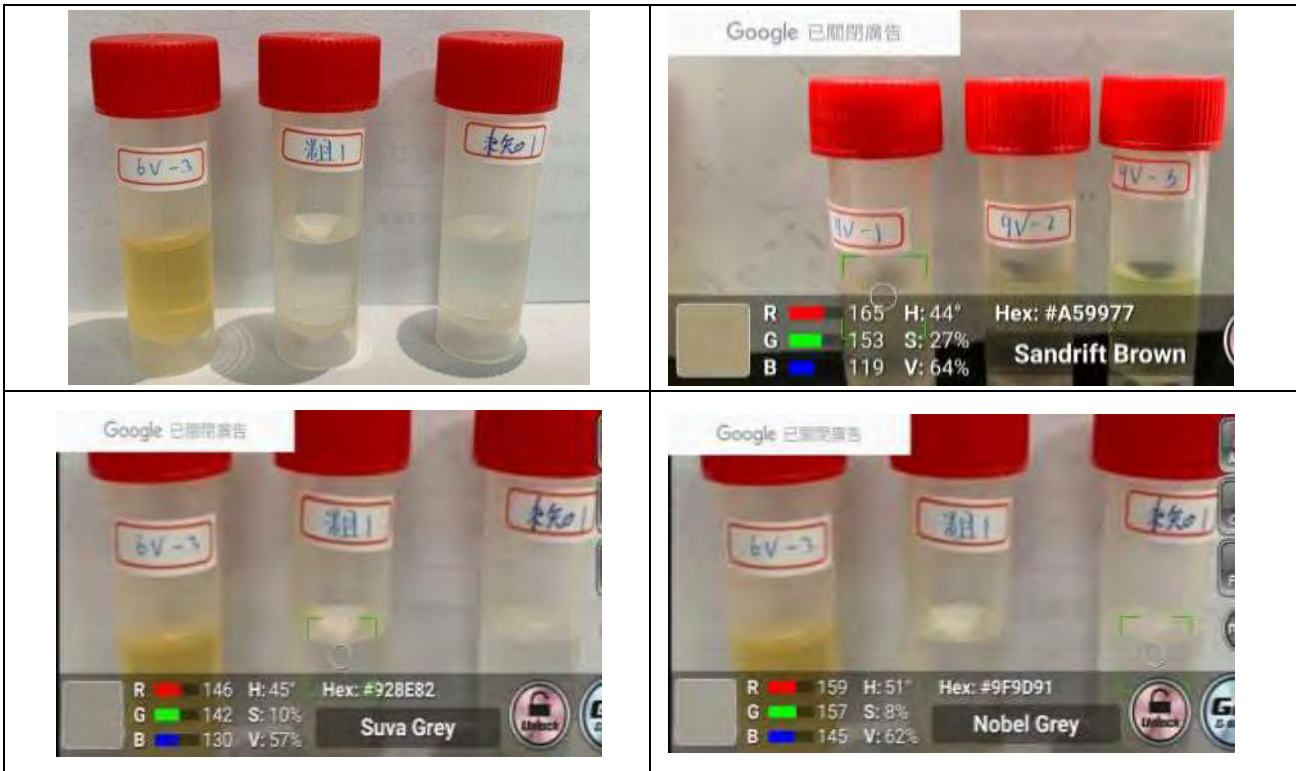


(圖三十四) 馬陸捲曲行為與分泌化學物質之間的關聯

由上述的實驗可以得到一個結論是馬陸的防禦作用有其順序性，先產生捲曲螺線形態，讓身體脆弱部位保護在最內側，若是被攻擊刺激，則會從體側的驅拒腺分泌有毒化學物質，產生化學防物作用。

(2) 分析不同種馬陸受到電壓刺激後所分泌之分泌物成分

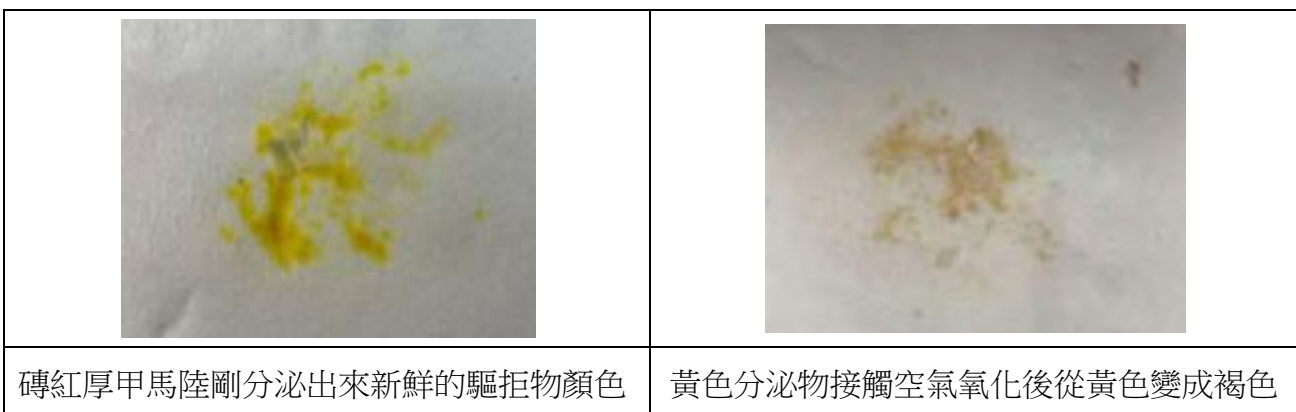
我們取三種不同種馬陸以 6V 電壓刺激並搜集分泌物，將不同種馬陸的分泌物利用相機拍照，使用手機顏色偵測 APP，分析比較不同溶液的顏色，以了解不同種馬陸分泌物的顏色有何差異。最後將不同馬陸分泌物使用分光光度計進行分析物質的吸光波長比較，了解物質種類。



(圖三十五) 磚紅厚甲馬陸(左)、粗直形馬陸(中)、未知種馬陸(右)分泌物顏色的比較

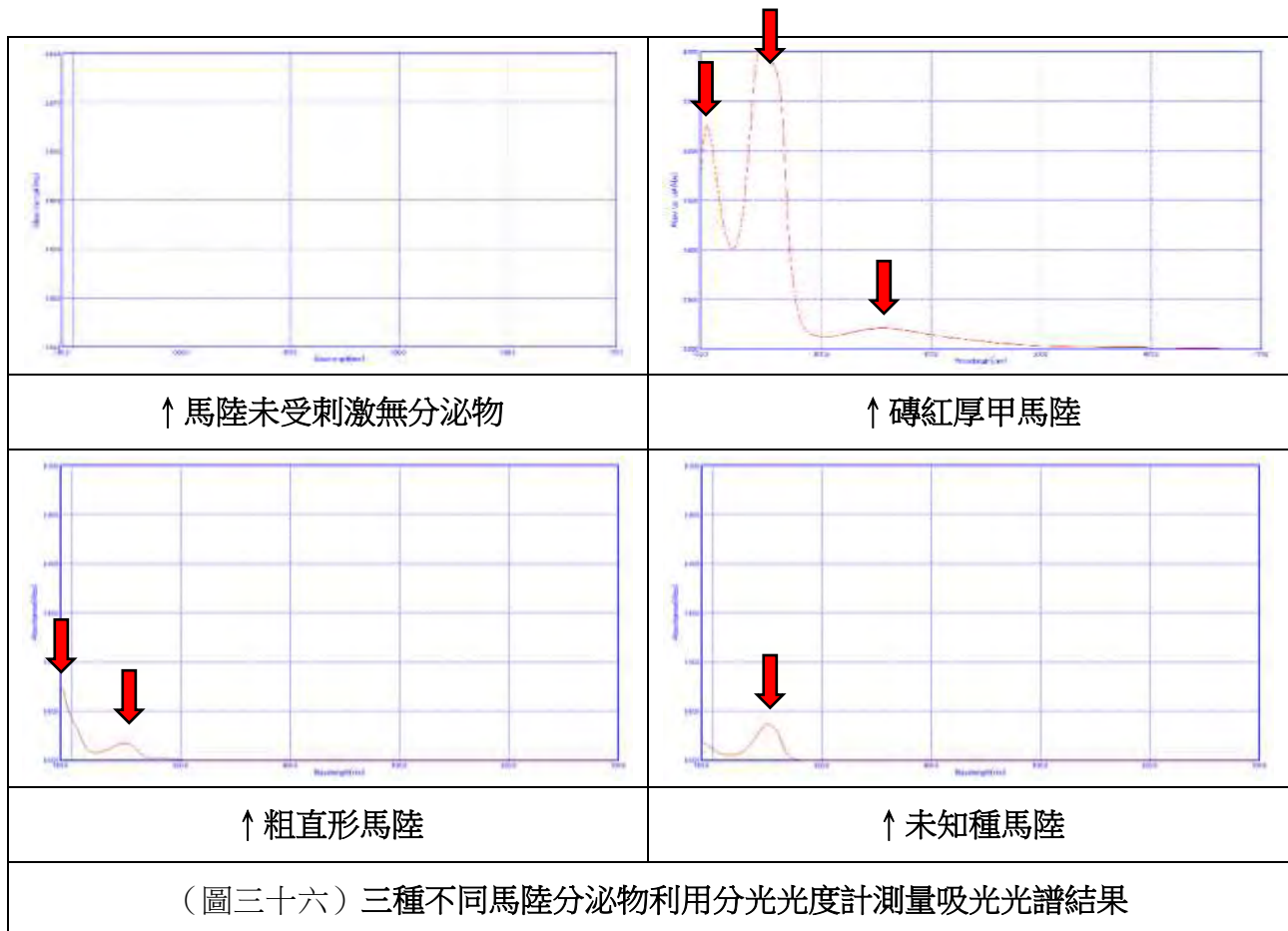
由圖三十五可以明顯看出磚紅厚甲馬陸（左管）的分泌物是黃色，APP 偵測後顯示 RGB 三種色光，藍光偏少，而粗直形馬陸（中管）與另一種馬陸（右管）分泌物經由 APP 顏色分析，顯示 RGB 三色數值差不多，應該分泌物應該是無色。

磚紅厚甲馬陸分泌物剛分泌時呈現明顯黃色，但是此分泌物在空氣中經過一段時間，與氧接觸後變成褐色，類似蘋果的多酚物質經過氧化變成褐色物。



磚紅厚甲馬陸剛分泌出來新鮮的驅拒物顏色

黃色分泌物接觸空氣氧化後從黃色變成褐色

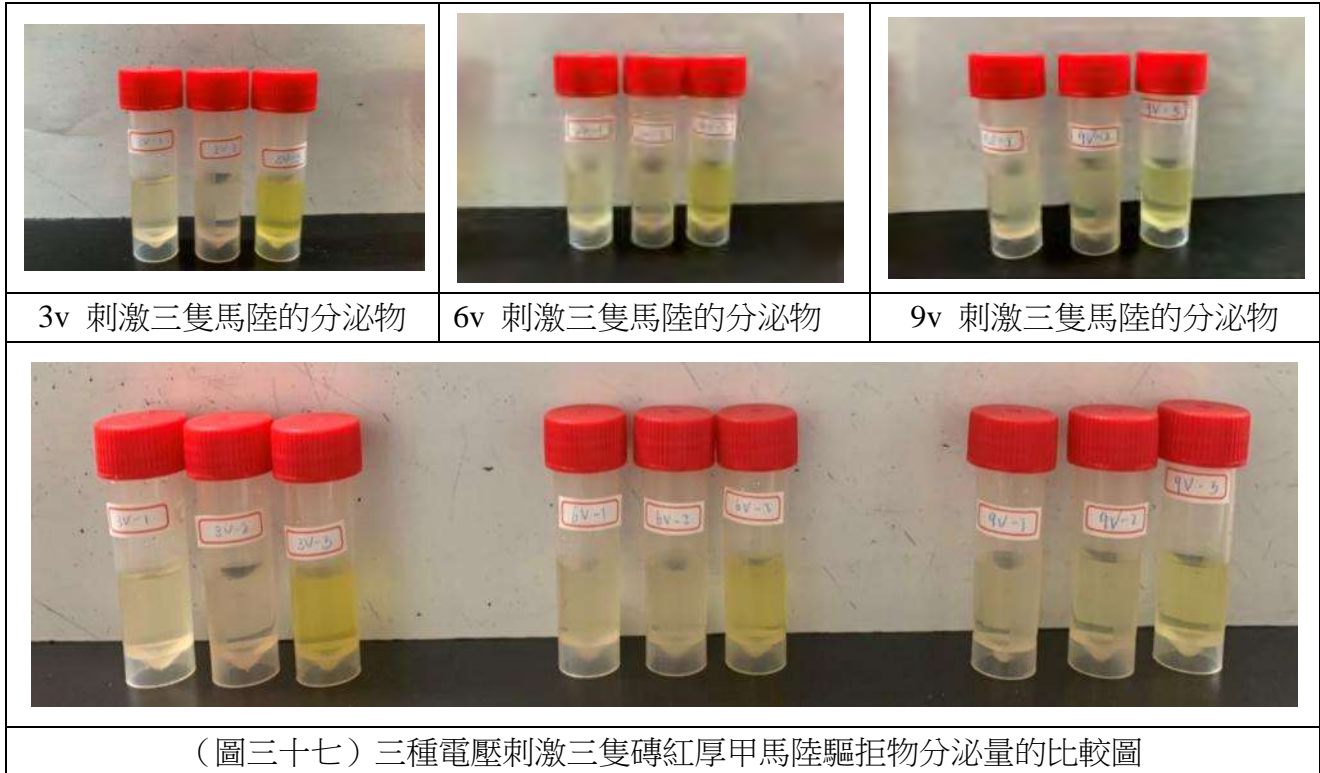


磚紅厚甲馬陸在受到 6V 刺激所分泌之分泌物，經分析後，能看到 352-359nm 有一個吸光值的高峰 0.208Abs，在 244-249nm 另一吸光值高峰 3.000Abs，以及在 195nm 吸光值的高峰 2.261Abs。而粗直形馬陸受到 6V 刺激後則是在 246-248nm 有一個吸光值的高峰 0.198Abs，在 192nm 另一吸光值高峰 1.507Abs。而未知種馬陸在受到 6V 刺激所分泌之分泌物，經分析後，能看到 250nm 有一個吸光值的高峰 0.369Abs，及在 195nm 吸光值的高峰 0.198 Abs。

我們在紫外光波段(190nm-300nm)，三種馬陸都能看到會有一個主要吸光值的高峰，而未知種馬陸雖在 190nm 雖然有一個吸光值的高峰但並沒有特別明顯。而磚紅厚甲馬陸則是多一個吸光值在 270~500nm，文獻指出，可以吸收此波長的物質，會吸收可見光中的紫光，因此我們肉眼能看到磚紅厚甲馬陸的分泌物呈黃色，然而其他種類的馬陸分泌物，在這段波長並無任何吸光值，也就是此分泌物無法吸收可見光波段的光波，因此我們肉眼能看到其他種類馬陸的分泌物皆呈無色。由此可知，不同種類馬陸的分泌物能夠吸收的光波波長會有所不同，且吸收量也會有所差異，也就是說不同種的馬陸其分泌物物質不同。

(3) 分析同種馬陸受到不同電壓刺激後所分泌之分泌物濃度

我們使用不同大小的電壓，刺激三隻磚紅厚甲馬陸使其分泌驅拒物，並將分泌物保存至小試管中，拍照後用利用手機顏色偵測 APP，分析不同溶液中的顏色數值變化。



(圖三十七) 三種電壓刺激三隻磚紅厚甲馬陸驅拒物分泌量的比較圖

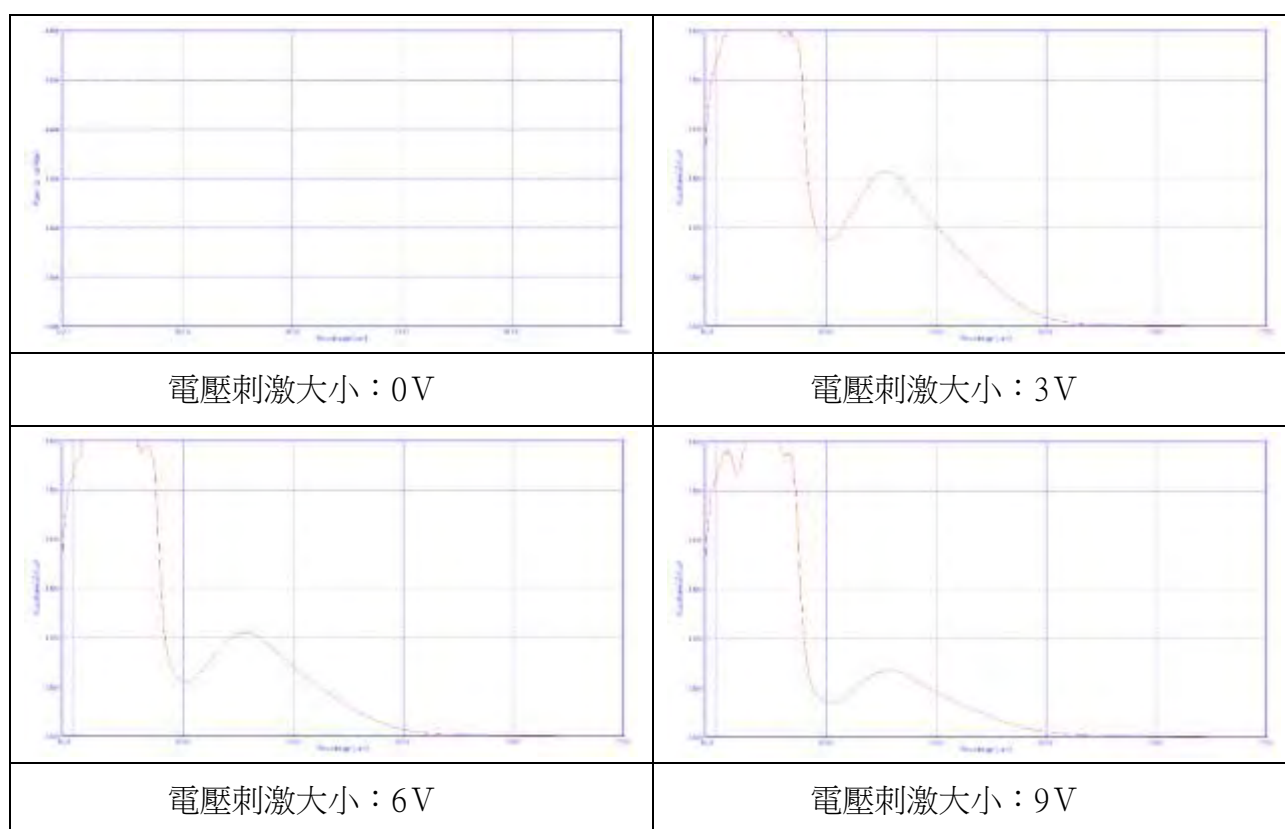
由圖三十七可以發現，第三隻馬陸在不同電壓下的溶液顏色都最黃，分泌物最多。



(圖三十八) 三隻磚紅厚甲馬陸在 6V 電壓刺激下的驅拒物溶液分析比較

我們使用手機 APP 分析三隻同樣是磚紅厚甲馬陸黃色分泌物溶液，以較不同溶液中的色調 (H)，飽和度 (S)，明度 (V) 之差異，發現第三隻馬陸黃色顏色的飽和度 S 數值最高，表是最黃，因此可知分泌量是最多的。但此手機 APP 只能偵測可見光的顏色，無法了解其他紫外光或紅外光的顏色，因此後續分析我們使用分光光度計進行全光譜掃描。

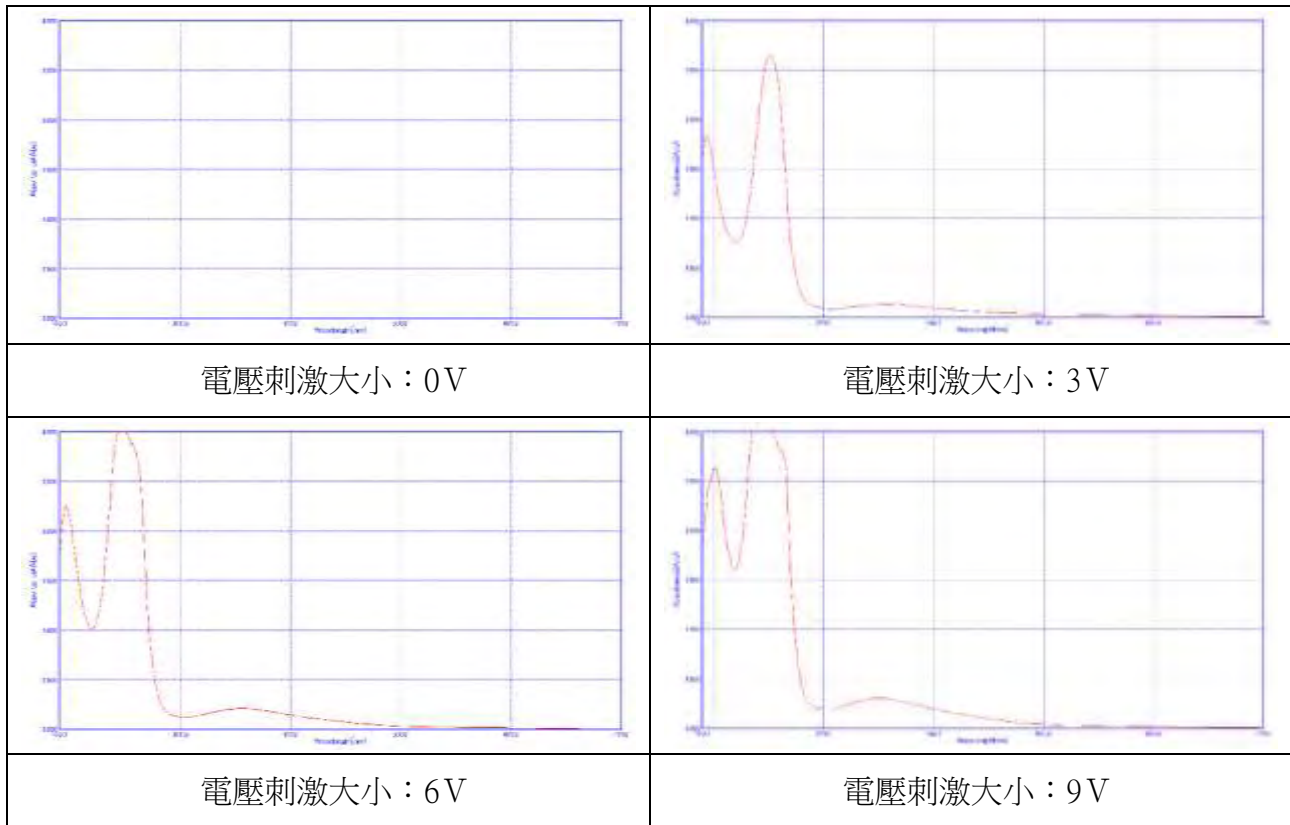
我們將不同電壓的分泌物以分光光度計分析物質吸收的光波波長以及吸收量，最後分析化學物質的成分以及分泌量，比較不同電壓刺激對馬陸分泌物的分泌有何影響。



(圖三十九) 磚紅厚甲馬陸第一隻分泌物經紫外分光光度計檢測數據

從(圖三十九)第一隻磚紅馬陸在受到 3V 刺激後分泌出分泌物，經過紫外光分光光度計分析後，能由圖中看到在 354nm 有一個吸光值的高峰 1.571Abs，在 210-257nm 另一吸光值高峰 3.000Abs。在受到 6V 刺激所分泌之分泌物，經分析後，能看到 356nm 有一個吸光值的高峰 1.056Abs，在 209-257nm 另一吸光值高峰 3.000Abs。在受到 9V 刺激所分泌之分泌物，經分析後，能看到 355-358nm 有一個吸光值的高峰 0.678Abs，在 226-255nm 另一吸光值高峰 3.000Abs，以及在 210nm 吸光值的高峰 2.922 Abs。

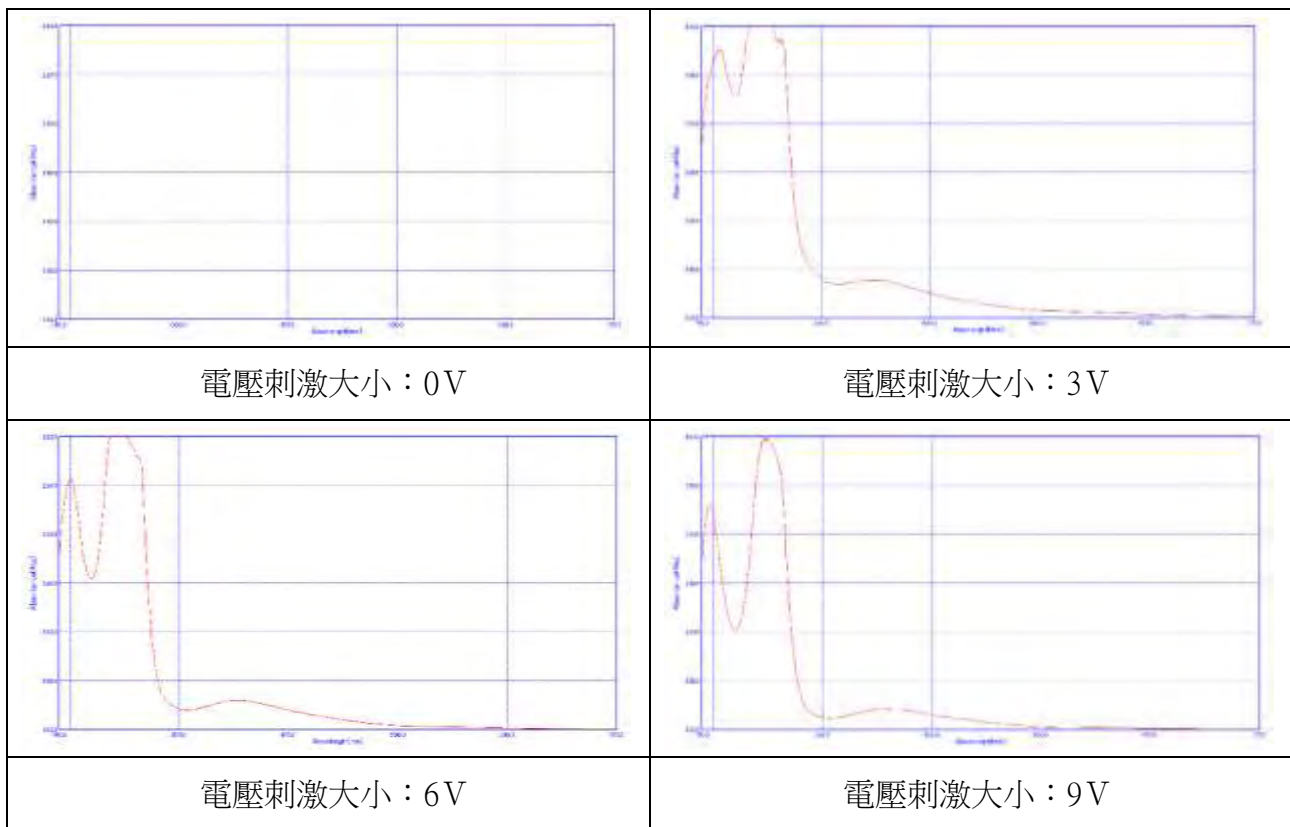
在電擊伏特愈大時，到達最高吸光波段愈低，也就表示其分泌物分泌量愈少，濃度就愈少。推測其第一次受到刺激分泌了較多的氰化物，使後兩次受刺激時分泌的量不夠，而愈來愈少。



(圖四十) 磚紅厚甲馬陸第二隻分泌物經紫外分光光度計檢測數據

我們以未刺激的分析結果為對照組，對照馬陸在不同電壓刺激下分泌物分泌量的變化，從(圖四十)第二隻磚紅馬陸在受到 3V 刺激後分泌出分泌物，經過紫外光分光光度計分析後，能由圖中看到在 355-358nm 有一個吸光值的高峰 0.132Abs，在 251nm 另一吸光值高 2.656Abs，以及在 194nm 吸光值的高峰 1.841Abs。在受到 6V 刺激所分泌之分泌物，經分析後，能看到 352-359nm 有一個吸光值的高峰 0.208Abs，在 244-249nm 另一吸光值高峰 3.000Abs，以及在 165nm 吸光值的高峰 2.261 Abs。在受到 9V 刺激所分泌之分泌物，經分析後，能看到 348-352nm 有一個吸光值的高峰 0.301Abs，在 235-251nm 另一吸光值高峰 3.000Abs，以及在 200、202nm 吸光值的高峰 2.636 Abs。

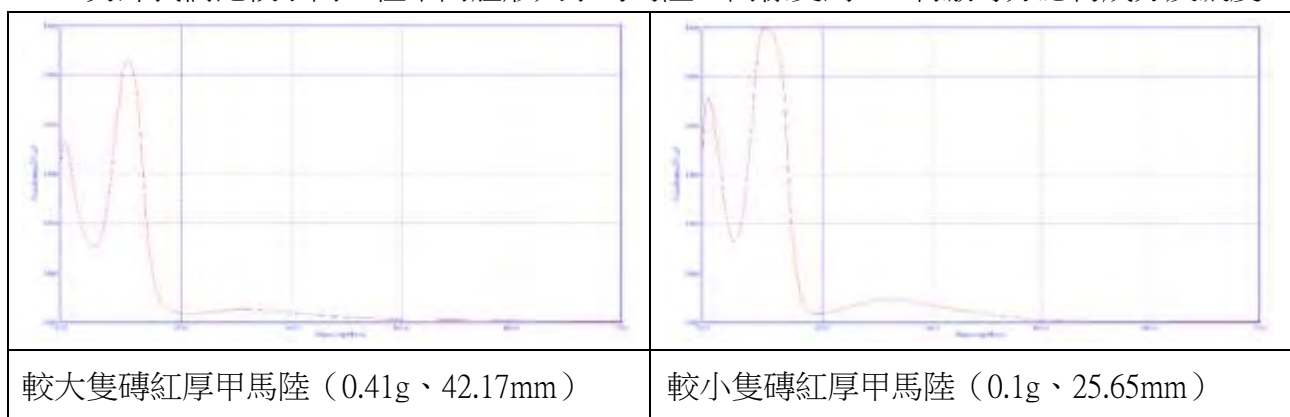
由圖四十中可以看出，在電擊伏特愈大時，到達最高吸光波段愈高，也就表示其分泌物分泌量愈多，濃度也愈高。另外隨著電壓刺激越大，到達吸光值 3.000Abs 的波段也越寬，也就是說，有可能在電壓刺激越大時，馬陸會分泌更多的化學物質來保護自身不受傷害。



(圖四十一) 磚紅厚甲馬陸第三隻分泌物經紫外分光光度計檢測數據

第三隻磚紅馬陸在電擊伏特愈大時，到達最高吸光波段明顯愈低愈窄，表示其分泌物量愈少，濃度也愈少，推測其第一次受到刺激分泌了較多的氰化物，使後兩次受刺激時分泌的量不夠，而愈來愈少。

另外我們比較了同一種不同體形大小的馬陸，同樣受到 3V 刺激時分泌物成分及濃度，

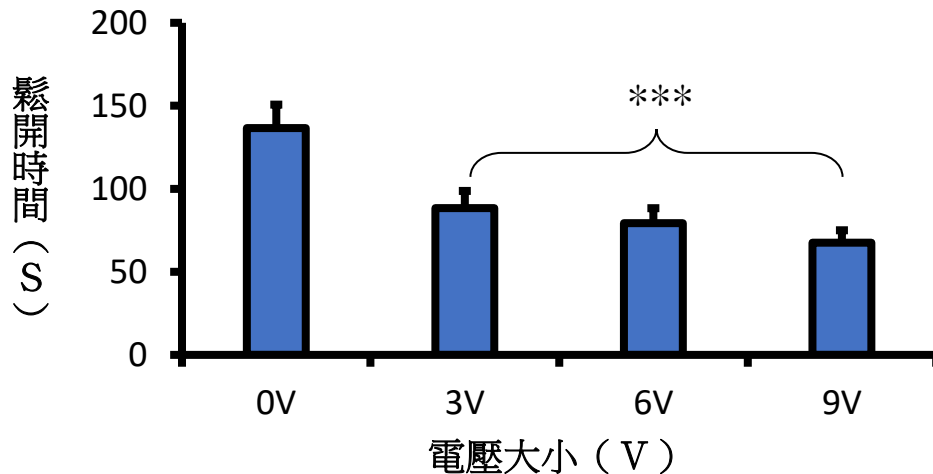


(圖四十二) 不同體型磚紅厚甲馬陸分泌物經紫外分光光度計檢測數據

吸光光譜結果顯示，在可見光與紫外光的吸光峰值類似，表示同一種馬陸不會因體型大小的不同，造成分泌物的種類有所改變，這些驅拒物的種類是固定存在於磚紅厚甲馬陸身上。

(4) 探討馬陸捲曲行為與刺激力道大小的關係

在馬陸受到刺激時會產生捲曲行為，持續受到刺激會分泌化學物質，但是再受到更重大的刺激時，如原本自然界不會遭遇的電流刺激，我們發現馬陸會選擇快速鬆開恢復成直線狀，逃離刺激物。因此我們使用變壓器改變電壓大小，刺激已經捲曲成螺線形態的馬陸，測量他由捲曲的螺線形態鬆開成直線型態所需的時間。



(圖四十三) 馬陸各捲曲狀態受壓面積與形變量之關係

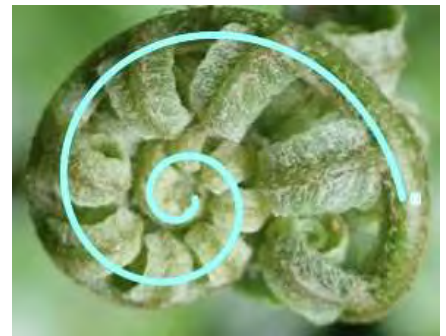
最左側 0V 為馬陸未受到電刺激時，由捲曲鬆開恢復直線形態所需的自然時間，以此作為實驗對照組。在受到電刺激時，馬陸從捲曲至鬆開的時間變短，有顯著差異 (ANOVA test, $F=39.4$, $P=0.00003 < 0.05$)，而且隨著刺激增加 (電壓增加) 馬陸鬆開的時間越短。也就是當馬陸遇到更大電刺激時，會更傾向採取快速移動方式，盡快離開刺激物，以免遭受更大傷害。

從電刺激實驗可知，馬陸的捲曲行為與螺線形態雖然可以幫助馬陸減少重要部位傷害，降低擠壓衝擊力，分泌驅拒物質，進行化學防禦，但是若是遭受更大刺激時，捲曲行為無法幫助馬陸防禦時，馬陸會選擇用快速移動方式躲避刺激。

陸、 討論

一、 馬陸捲曲符合阿基米德螺線軌跡

馬陸因從頭到尾體寬相同，且腹部背部緊緊貼合因此符合阿基米得的螺線軌跡。我們平日裡發現動植物都有類似的捲旋狀，但大多並不符合阿基米德螺線軌跡，而是符合對數螺線軌跡。舉例而言，如鸚鵡螺、向日葵都在他們的身長趨勢中可以找到螺線的蹤跡，對於他們而言，依照對數螺線之黃金比例係數生長，鸚鵡螺與向日葵可生長出最堅硬的外殼以及最緊實的花蕊，對於自身具有良好的防禦效果。另外蜈蚣也有捲曲行為，只是它的捲曲行為作用在於護卵行為，同樣也是捲曲行為中的另一防禦概念。但即使是許多文獻都有此種捲曲概念，蕨類幼葉的捲曲型態，有一部份也會符合對數螺線（如圖），因馬陸可透過此種方式保護脆弱的幼葉，由以上多種生物的行為我們可以得知，生物中透過捲曲行為，保護其或是卵最脆弱的柔軟部位。然而，雖然前面有很多實驗在探討螺線與生物之間的關係，但大多都以對數螺線為主，無人探討阿基米德螺線與生物之研究，本實驗為**第一個發現阿基米德螺線與生物防禦之間的關聯**。

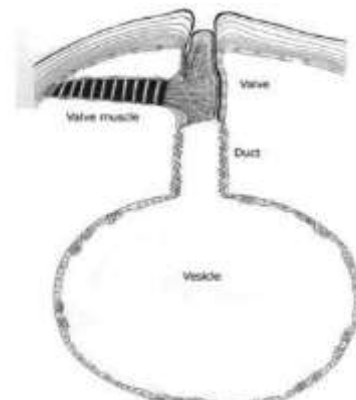


對數螺線與捲曲蕨類幼葉比對圖示

二、 馬陸先有捲曲行為才會分泌化學物質

我們觀察到馬陸一定先產生捲曲行為，才會分泌氰化物。William A. Shear, 2015 在文獻中提到，馬陸是透過環間肌肉組織的收縮，將驅避腺分泌孔打開，因此在捲曲過程中，氰化物會滲出或是被擠出，在捲曲後因體節之間被撐開，驅避腺分泌孔就能夠露出，增加化學物質的分泌量，因此馬陸的捲曲形態，有助於分泌化學物質進行防禦。

另外，因驅避腺是位於馬陸身體兩側，捲曲後側面分泌孔向上，分泌出的物質才會佈滿於馬陸身體上方，等同於在身上形成一層「氰化物保護膜」，有較好的防禦效果。如果馬陸為直線形態受到刺激時分泌氰化物，分泌孔的開口在兩側，分



驅拒腺構造示意圖



驅避腺位置示意圖

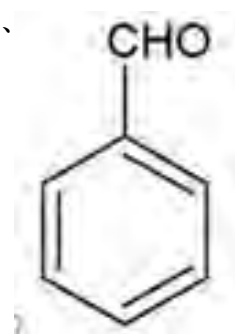
泌物會落在身體旁兩側，無法在身體上分佈，則防禦效果較差。

而我們後續也整理出了馬陸的防禦行為順序。首先，馬陸具有**保護色或是警戒色**使他能躲在適當環境中，**不易被天敵發現**，此為馬陸的**初級防禦**。當馬陸受到刺激時會產生**捲曲行為**，可以將**重要的頭部與脆弱的腹部包於內側**，將**堅硬外殼露於外側**，來減少傷害，此為次級防禦中的**行為防禦**。當他捲曲為**螺線型態**後，能夠達到**減少脆弱部位與外界接觸的長度**以及**增加受壓面積減少外力造成的傷害**，另外能夠將**分泌孔打開**，並使其分佈於**身體上側**，此為次級防禦中的**形態防禦**，當馬陸持續受到刺激時才會**分泌驅拒物**，為次級防禦中的**化學防禦**。當馬陸受到更大的刺激時，會選擇快速捲開並逃離，以**躲避刺激**的方式做最後的防禦。



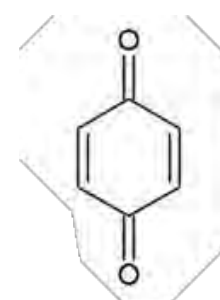
三、 馬陸會分泌有臭味的黃色化學物質

馬陸所產生的分泌物有許多種，如 Eisner, 1978 的文獻中提到**氰化氫**、**苯甲醛**、**苯酚**以及**1,4-苯醌**等等都為馬陸分泌物的物質，我們深入了解了其中幾項化學物質來做討論。如**苯甲醛** (C_6H_5CHO) 為苯的氫被醛基取代後形成的有機化合物。**苯甲醛**會吸收**279nm 波段的光波**，在室溫下其為無色液體，具有特殊的杏仁氣味。因此我們猜測馬陸分泌物的杏仁味道，是來自**苯甲醛**的特殊氣味。



苯甲醛結構式

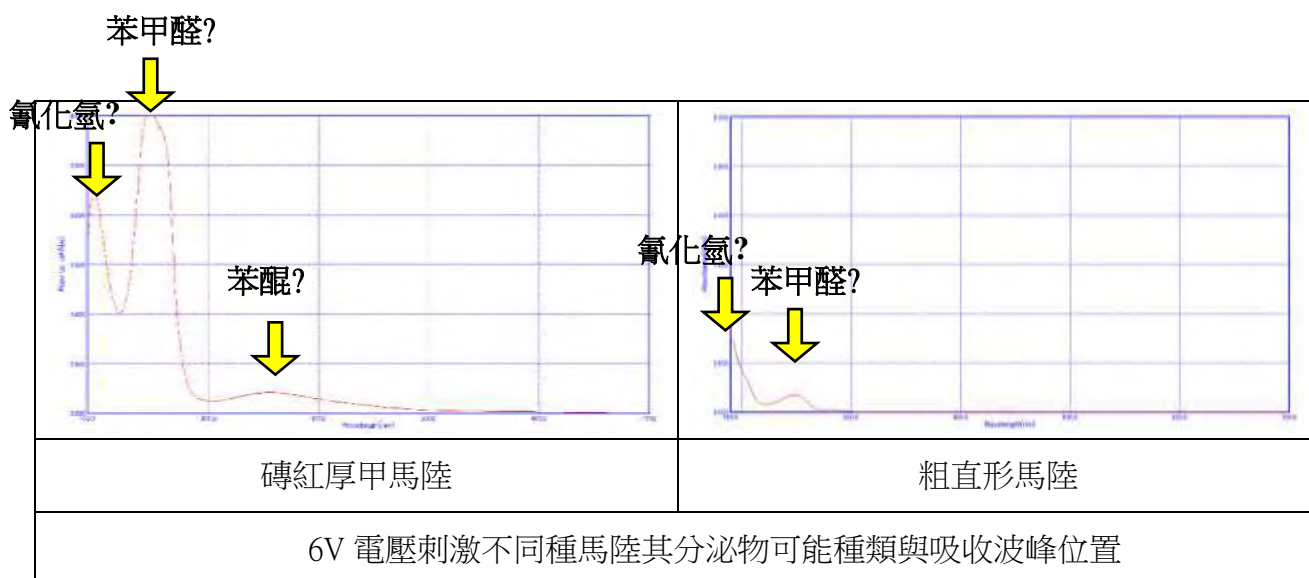
1,4-苯醌 ($C_6H_4O_2$) 純的對苯醌為亮黃色晶體，帶有與氯氣相似的刺激性氣味；不純的樣品常常由於醌氫醌的存在而顏色黯淡。對苯醌含有非芳香性的六元環，它是**氫醌**（對苯二酚）的氧化產物，對脊椎動物具有高度刺激性，因此我們猜測，這是某部分的馬陸，他們的分泌物會呈現**黃色**的原因。



對苯醌結構式

在我們的實驗中有三種不同的馬陸進行後續的化學實驗，在過程中觀察到有兩種不同的分泌物，大隻磚紅厚甲馬陸的分泌物，具有臭味且顏色為黃色，推測其具有**苯甲醛**與**苯醌**，而在紫外分光光度計測試中，也有在 **279nm** 光波波長看見有明顯的吸光值。然而小隻的粗直形馬陸則有些微差異，其分泌物有臭味但為透明無色，可從右圖中看出，此馬陸在可見光波段並無任何吸光，僅在紫外光波段有吸光，因此肉眼所看到的分泌物為透明物色。同時我們依然能看見其在 **279nm** 光波波長看見有吸光，因此推測其應具有**苯甲醛**（具有臭味）但沒有**1,4-苯醌**。

很多文獻都有提到馬陸的分泌物含有劇毒的**氰化氫**，氰化氫是一種劇毒且致命，無色並有淡淡的杏仁氣味的毒物，在三種馬陸的分泌物中，在紫外光波段有很複雜的吸光波形，我們推測此段吸光波中應該**氰化氫**存在。而在未來，我們將會利用標準品去做物質定性實驗，去深入探討不同馬陸分泌物物質的吸光波段，所對應的化學物質成分，以此找到不同種馬陸其分泌物的物質實際組成成份。



苯甲醛、苯醌與氰化氫等驅拒物都是馬陸用來防禦敵人的化學物質，此物質的分泌都有與捲曲成螺線形狀有關聯，因此馬陸的捲曲行為是對牠生存重要的防禦行為。

柒、 結論

- 一、 馬陸捲曲形態符合阿基米德螺線軌跡，因馬陸身體從頭到尾等寬，故以頭部為中心，向內實捲可符合阿基米德螺線之間距等寬之特性。
- 二、 馬陸的捲曲螺線軌跡不會因為性別、種類或體長的差異，而影響螺線形態，而螺線的形態只會因隨著馬陸體形越大，而所對應的螺線則越大圈。
- 三、 馬陸於捲起與鬆開的過程中全程符合阿基米德螺線軌跡，而馬陸選擇鬆開而不是捲開的原因為，捲開速度慢。對其生存適應不利
- 四、 馬陸的形態防禦作用為可有效地透過捲曲行為減少脆弱部位與外界接觸的長度；且馬陸捲曲後可增加接受外力施壓的面積，進而減少外力所造成的傷害。
- 五、 馬陸的化學防禦驅拒物質都在紫外光波段有明顯的吸光波形，成分可能苯甲醛與氰化氫。而不同種馬陸成分有差異，磚紅厚甲馬陸在可見光多一段吸光波形，可能是黃色的苯醌。
- 六、 馬陸受到電刺激越大，分泌物種類沒有變化，但分泌量會有增加趨勢。分泌物有總量限制，有些馬陸多次刺激後，分泌量會下降，最後不再分泌驅拒物質。
- 七、 馬陸的防禦順序是先以初級防禦作用為主，體色形成隱蔽色或警戒色，避免掠食者攻擊，若是遭遇攻擊時，會產生次級防禦作用，先產生捲曲行為，讓身體形態形成螺線狀，若持續刺激，再分泌驅拒物質，驅趕或毒害掠食者。最後更強烈刺激則馬陸不再捲曲，選擇以快速逃離的方式躲避敵害。

捌、參考資料及其他

一、期刊文獻：

龔瑞璋。2005。阿基米德的螺線。正修通識教育學報。(p.224-231)

William A. Shear. 2015. The chemical defenses of millipedes (diplopoda): Biochemistry, physiology and ecology. Biochemical Systematics and Ecology Volume 61, August 2015, Pages 78-117.

Eisner, T., Alsop, D., Hicks, K., Meinwald, J., 1978. Defensive secretions of millipedes. In: Bettini, Sergio (Ed.), Arthropod Venoms, Handbook of Experimental Pharmacology, vol. 48. Springer-Verlag, pp. 41e72.

二、書籍文獻：

黃金比例 1.618...世界上最美的數字。李維歐。2004。遠流出版事業有限公司。(p.152-161)

生物世界的數學遊戲。史都華、蔡信行。2000。天下遠見出版有限股份有限公司。(p.194-212)_

三、網路資料：

曲線家族：阿基米德螺線 http://www.mathsgreat.com/curve/curve_indiv_004.pdf

神奇的對數螺線 <http://web.lib.fcu.edu.tw/libstories/archives/1898>

對數螺線 http://www.mathsgreat.com/curve/curve_indiv_025.pdf

磚紅厚甲馬陸介紹 <http://digimuse.nmns.edu.tw/da/collections/az/ar/ku/0b00000181956fb1>

馬陸介紹 <https://goo.gl/WgrzNV>

馬陸捲曲 <https://goo.gl/1cXYSR>

對數螺線 <http://web.lib.fcu.edu.tw/libstories/archives/1898>

鸚鵡螺 <http://web.lib.fcu.edu.tw/libstories/archives/1898>

向日葵螺線 <https://reurl.cc/qmZm3>

蛇盤繞 <https://goo.gl/images/85NfgS>

紫外光分光光度計 <https://reurl.cc/m2epA>

數學軟體 GGB<https://reurl.cc/zLmEe>

【評語】 052010


本研究以 Imagel 作型態分析馬陸遇險時，其捲曲的軌跡與型態符合等距離寬之阿基米德螺絲，不同於以往發表之鸚鵡螺螺殼或向日葵花的黃金螺旋。

第二部分為探討捲曲行為，軀體受壓力後行變量變小，有助於型態防禦，同時捲曲型態有助於分泌氧化氫、苯甲醛及苯醌等化學防禦物質。

1. 阿基米德螺線之螺線方程式用於計算馬陸纏繞的圈數，和防禦機制之相關性何在？
2. 探討馬陸捲曲行為與化學防禦作用，似乎比較有潛力。
3. 進一步，若可以分析化學防禦機制內的成分或許比較有意義。

PREFACE

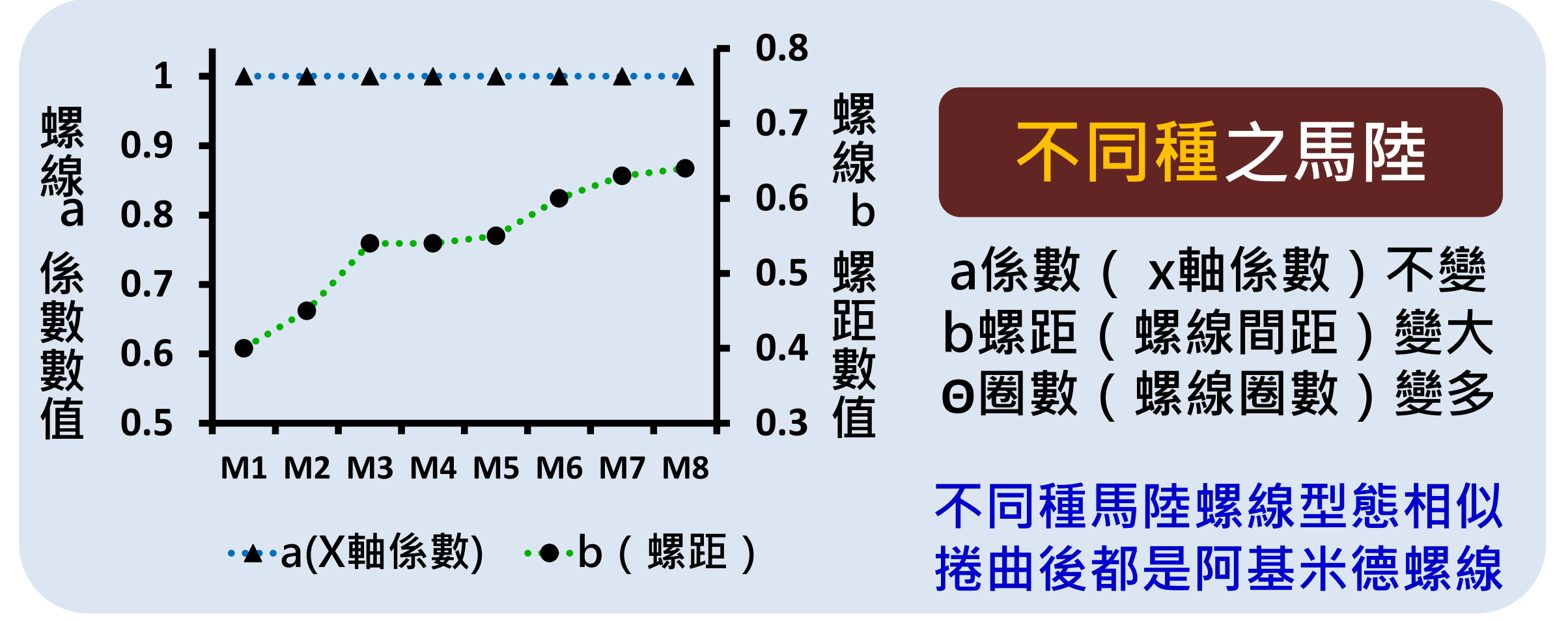
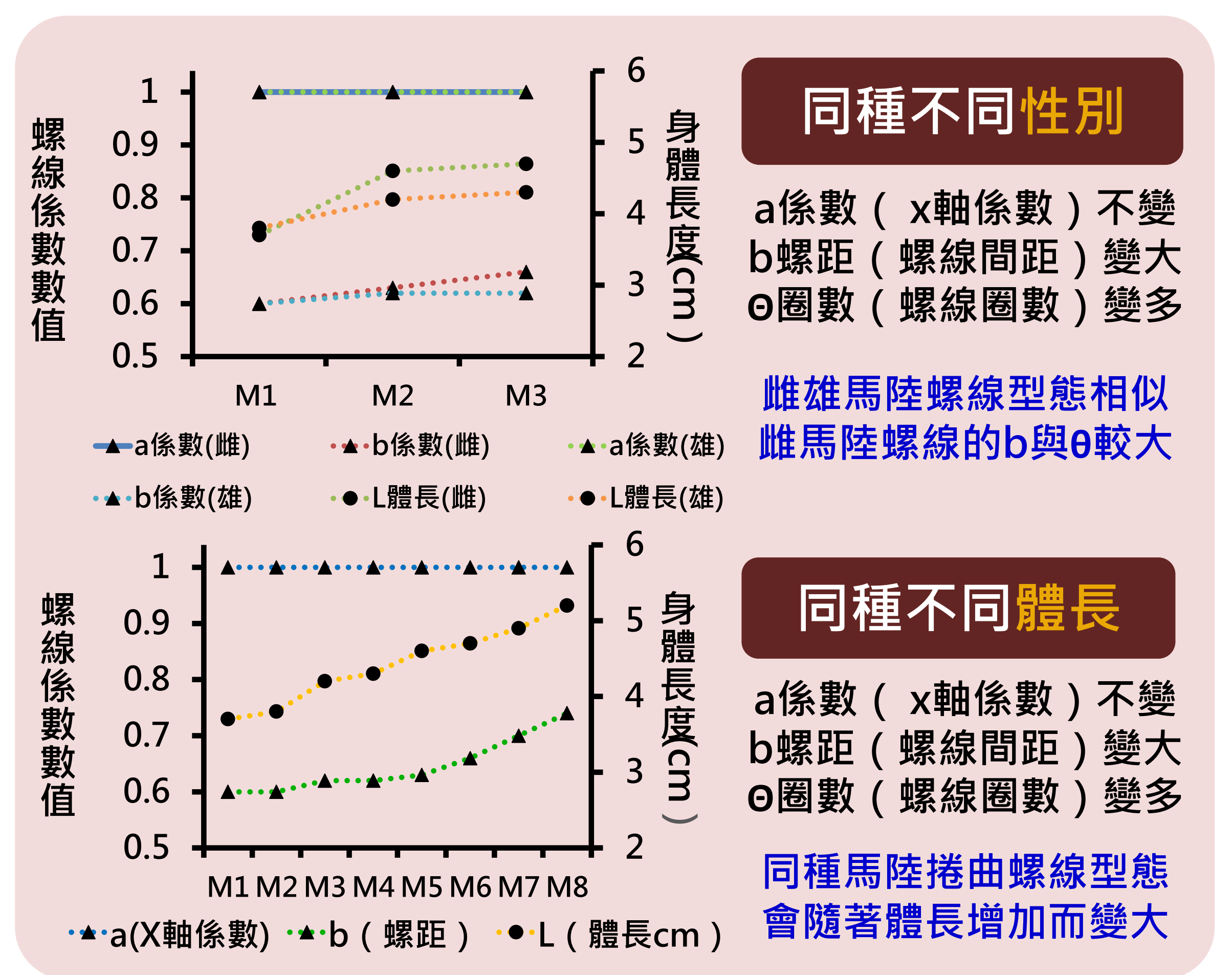
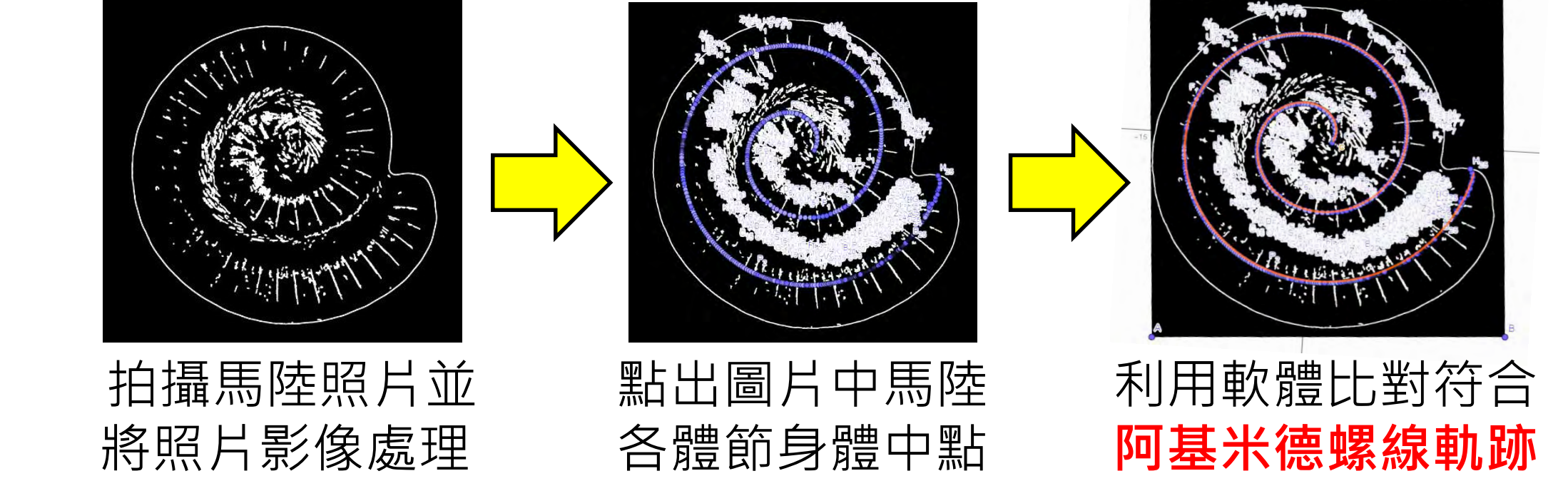
- 1.許多的生物都有捲曲的構造或行為
 - 2.蕨類植物幼葉捲曲以保護脆弱部位
 - 3.動物遇到危險時會捲起來保護自身
- 探討生物捲曲意義

 = 保護色 + 捲曲行為 + 驅避物



WHAT

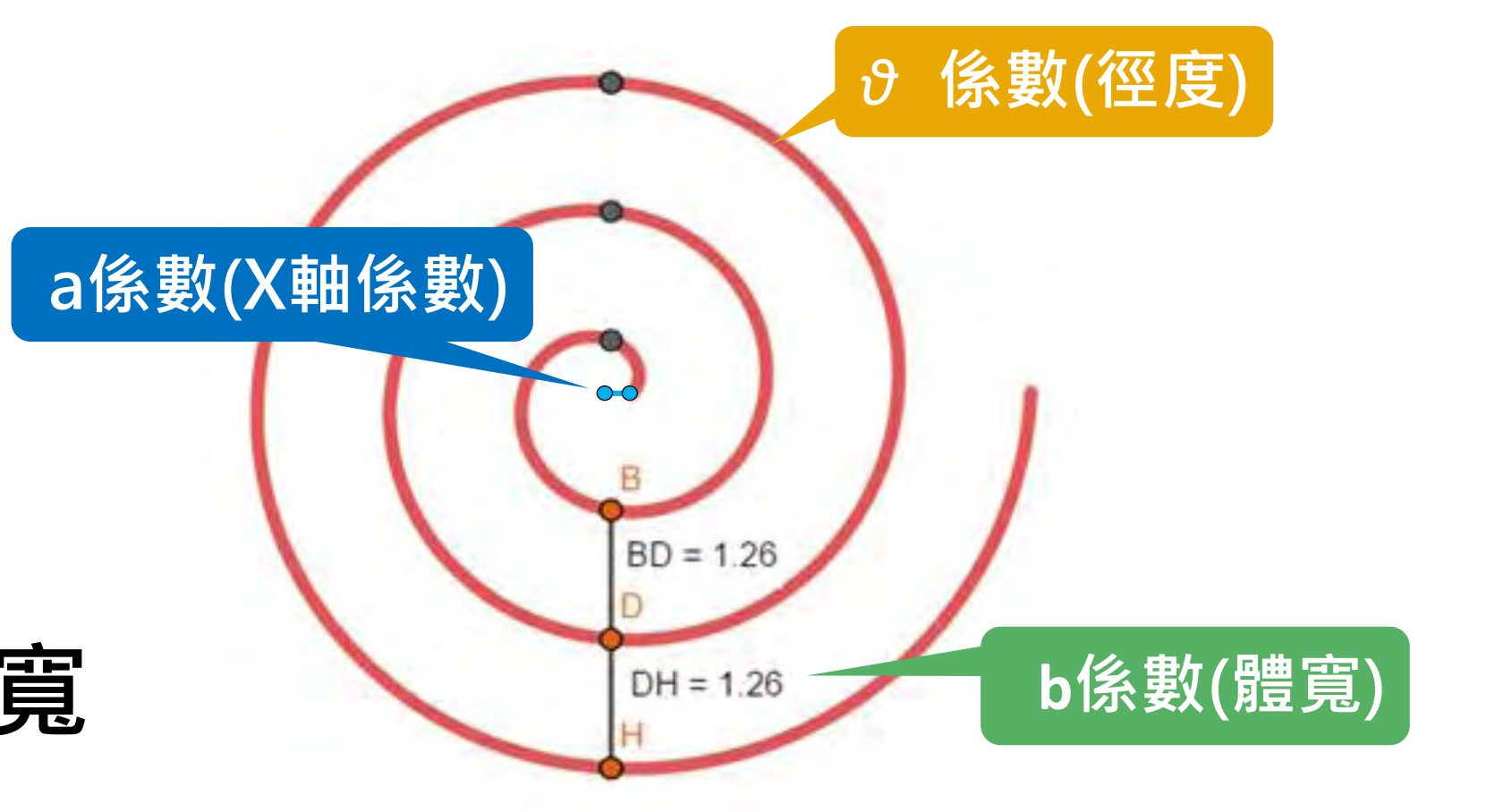
比對「阿基米德」螺線		比對「對數」螺線	
磚紅厚甲馬陸	粗直形馬陸	磚紅厚甲馬陸	粗直形馬陸



阿基米德螺線方程式各係數所代表意義

$$r = a + b \vartheta$$

a 係數 (X軸係數) b 螺距 (體寬) ϑ 係數 (徑度)



特色：
螺距等寬

HOW

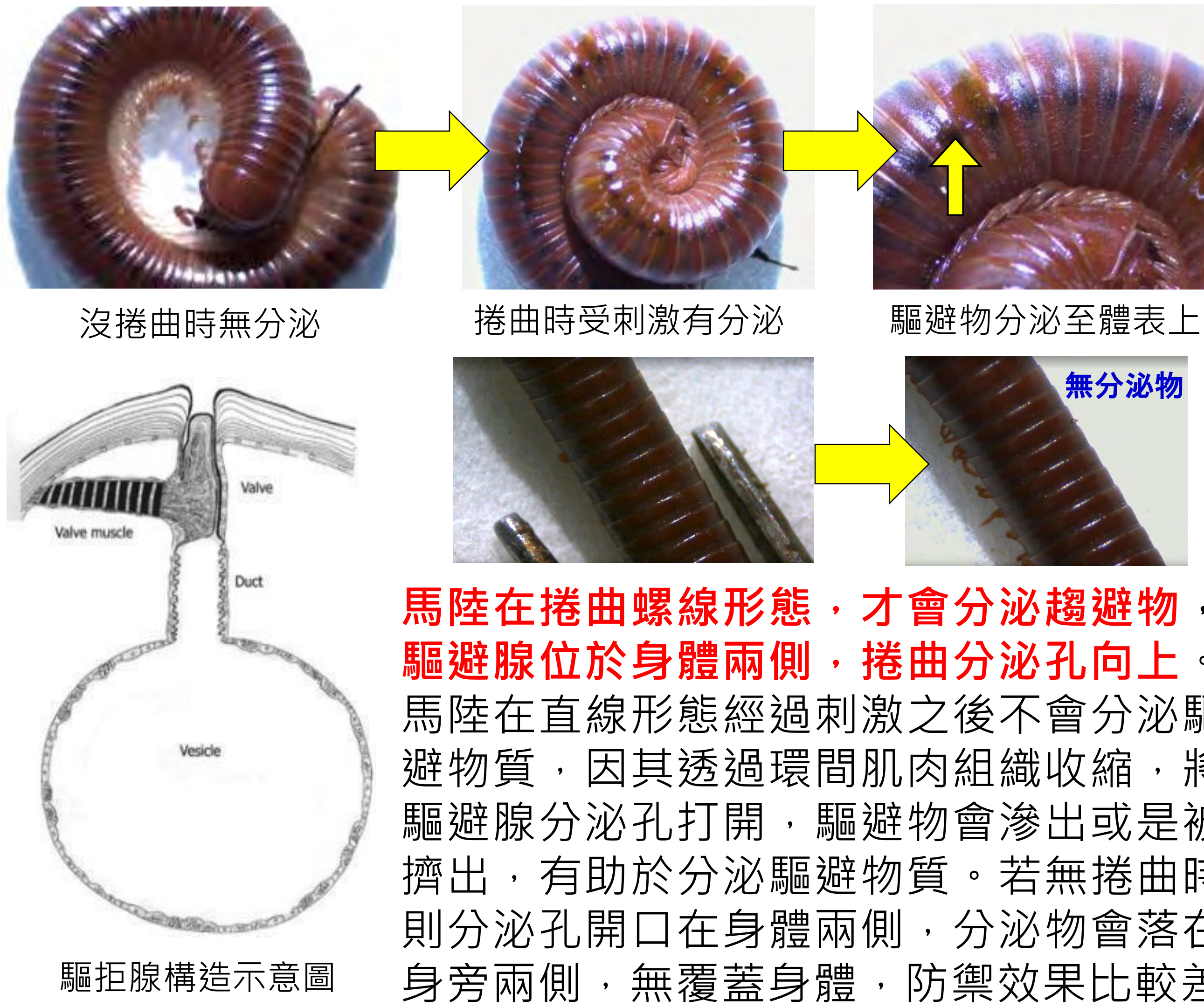
馬陸捲起時以**頭部為螺線中心**，逐漸將身體捲曲縮小，腹部與背部之間並無留下空隙，且馬陸身體寬度從頭到尾相等，符合阿基米德螺線之特色「螺距等寬」，故捲曲全程符合阿基米德螺線之軌跡。而馬陸鬆開時則不同，馬陸會以**頭尾兩端同時逐漸鬆開**，同時身體間距也等比例放大，身體與身體之間的距離比例不會改變，故馬陸鬆開前期雖符合阿基米德螺線之螺距等寬的特性，但螺線型態會持續改變。最後馬陸鬆開至不捲旋圓弧狀之後，就沒有符合任何螺線軌跡。

捲起						
	無螺線	$a=1.6 \quad b=1$ 捲曲過程螺線型態沒有改變			螺線圈數逐漸增加	
鬆開						
	$a=1.2 \quad b=0.2$	$a=2.2 \quad b=0.5$	$a=2.3 \quad b=1.0$	不捲旋 圓弧狀 無螺線軌跡		

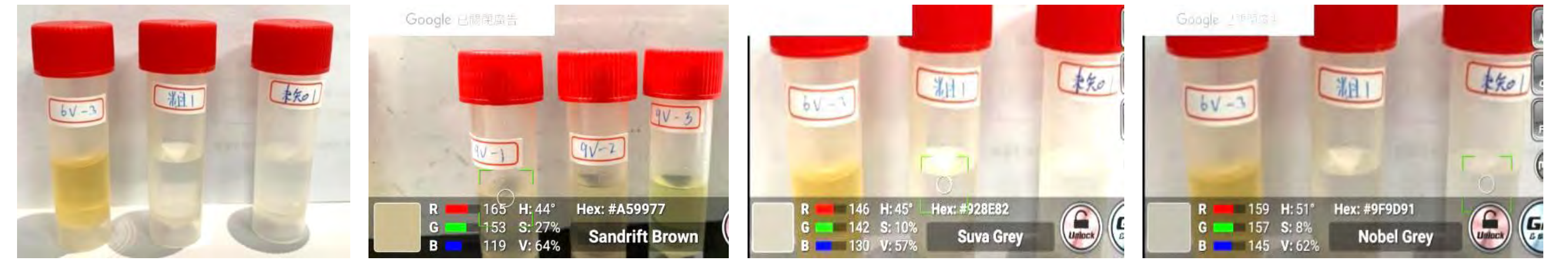
實際馬陸捲曲過程，捲起時以一端為螺線中心，往另一端一段一段推擠收縮後將身體逐漸捲起。實際馬陸鬆開過程，兩側同時快速放鬆，可使頭部最快離開螺線中心，身體恢復直線快速離開。模擬馬陸捲開過程，以尾部為起始點逐漸往頭部一段一段鬆開，全程雖符合螺線，但耗時甚久。

有利於防禦與逃離 不利於逃離危害	實際馬陸捲起過程 一段一段收縮捲起						
	實際馬陸鬆開過程 頭尾同時鬆開回復						
	模擬馬陸捲開過程 一段一段放鬆捲開						

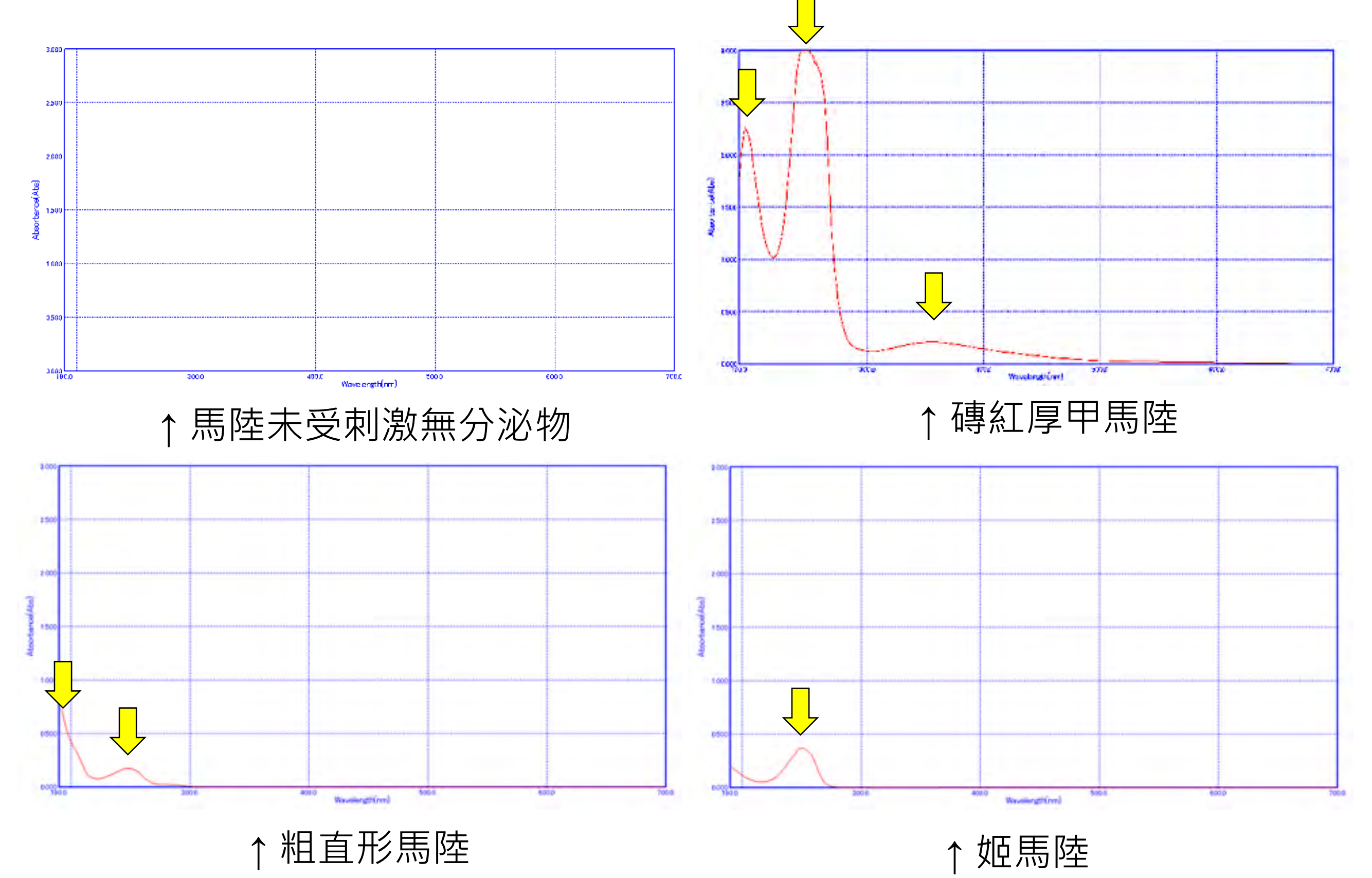
一、馬陸分泌驅避物質的位置與時機



二、不同種馬陸受電壓刺激後所分泌之分泌物成分

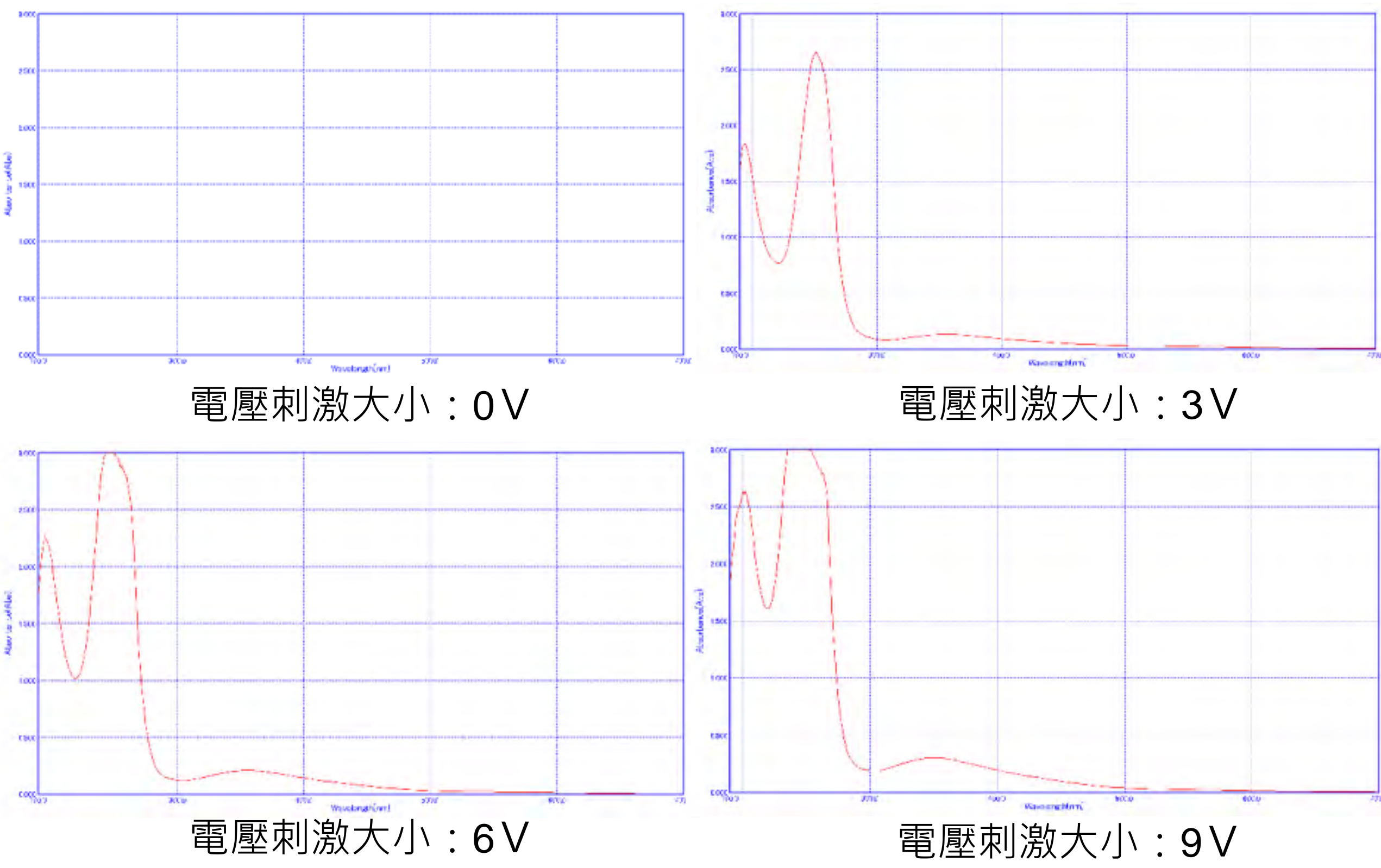
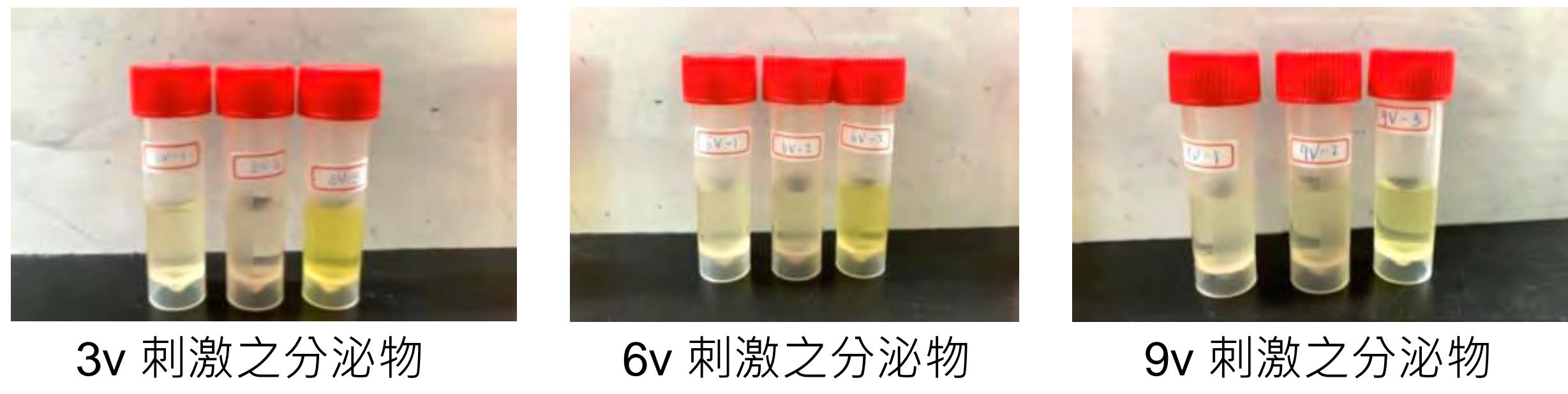


可以明顯看出**磚紅厚甲馬陸**的分泌物是**黃色**，APP偵測後顯示RGB三種色光，藍光偏少。而**粗直形馬陸**與**姬馬陸**的分泌物經APP顏色分析，顯示之RGB三色數值相似，分泌物都呈現**無色**



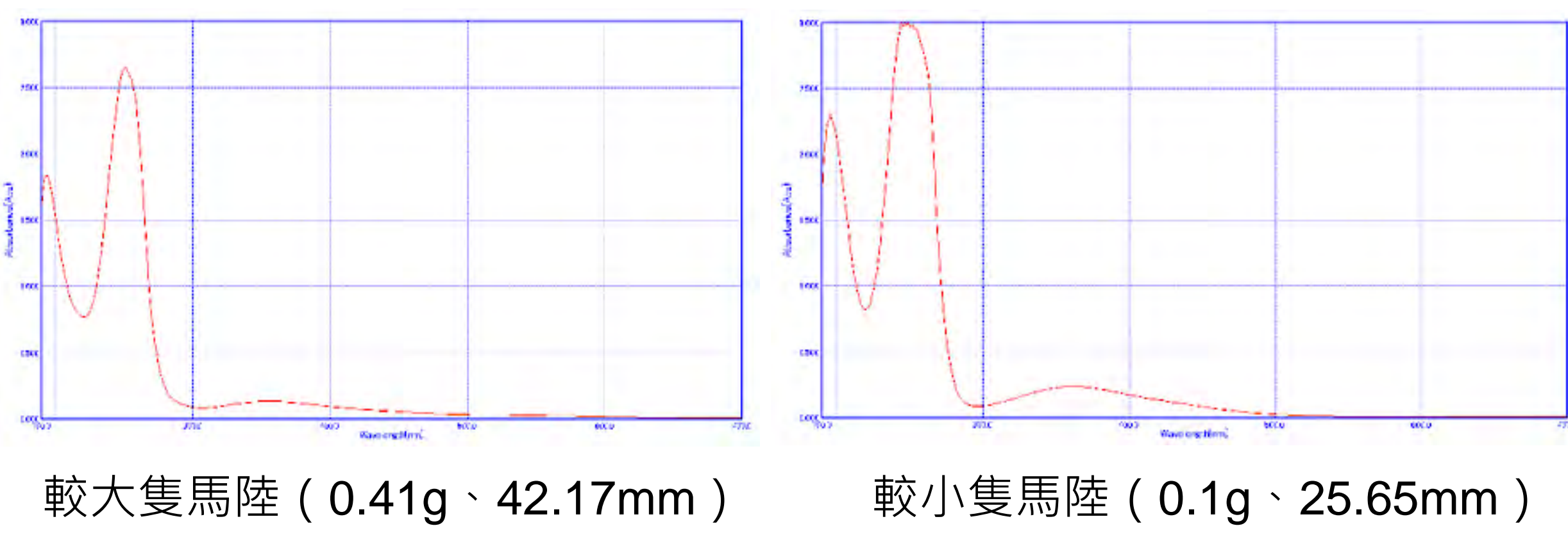
三種馬陸在**紫外光波段**都有主要吸光值的高峰，**磚紅厚甲馬陸**則多吸收**可見光的藍紫光**，故分泌物呈黃色。而其他種馬陸則無此吸光波段，因此得知**不同種類馬陸的分泌物物質有所不同**

三、同種馬陸受到不同電壓刺激後所分泌之分泌物

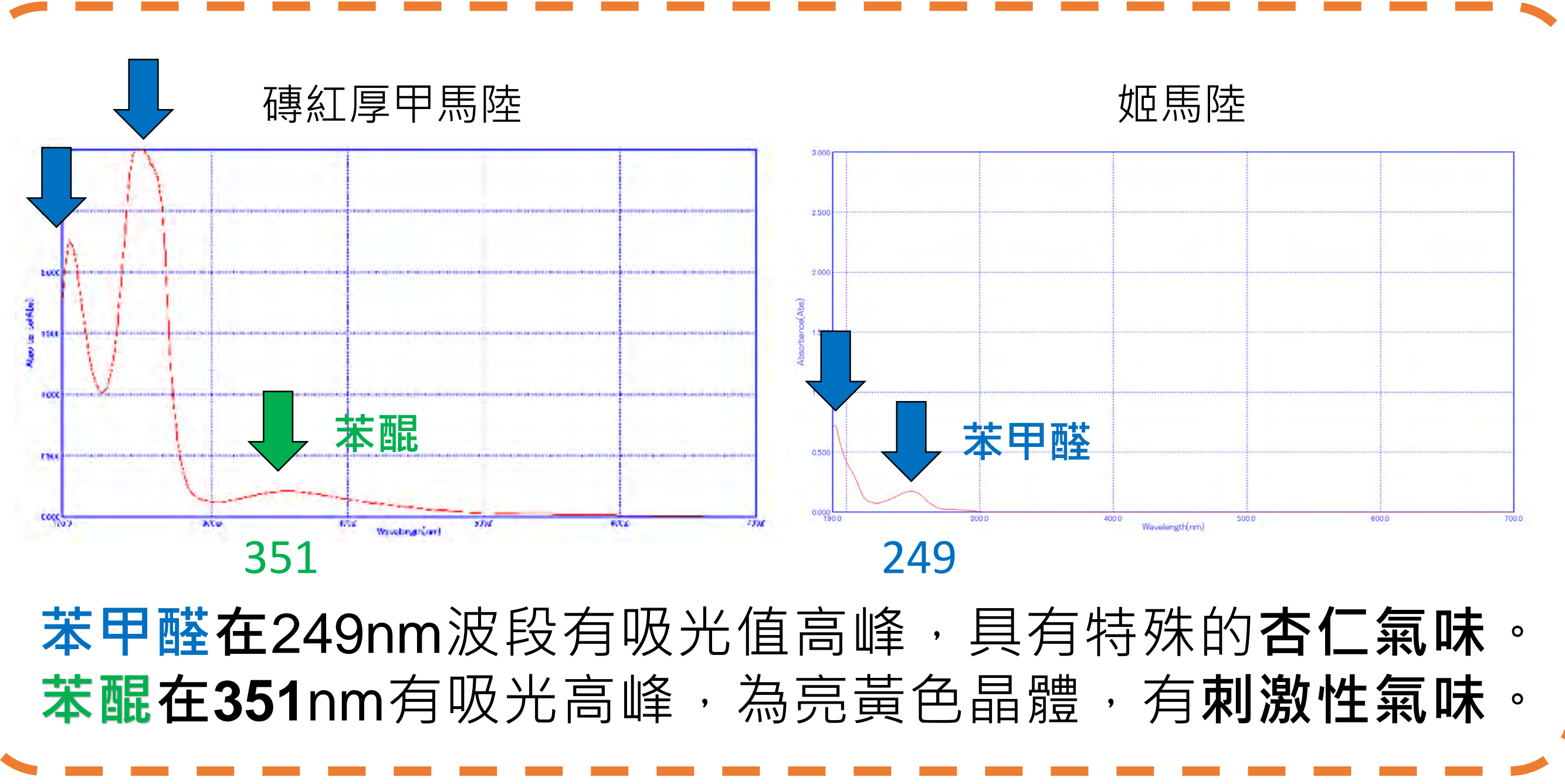


電擊伏特愈大，到達最高吸光波段愈高，分泌物量愈多，濃度愈高。另外到達最大吸光值的波段範圍也越寬，因此刺激越大時，會**分泌更大量**化學物質來保護自身不受傷害

比較不同體形大小的磚紅厚甲馬陸受到相同刺激的分泌物

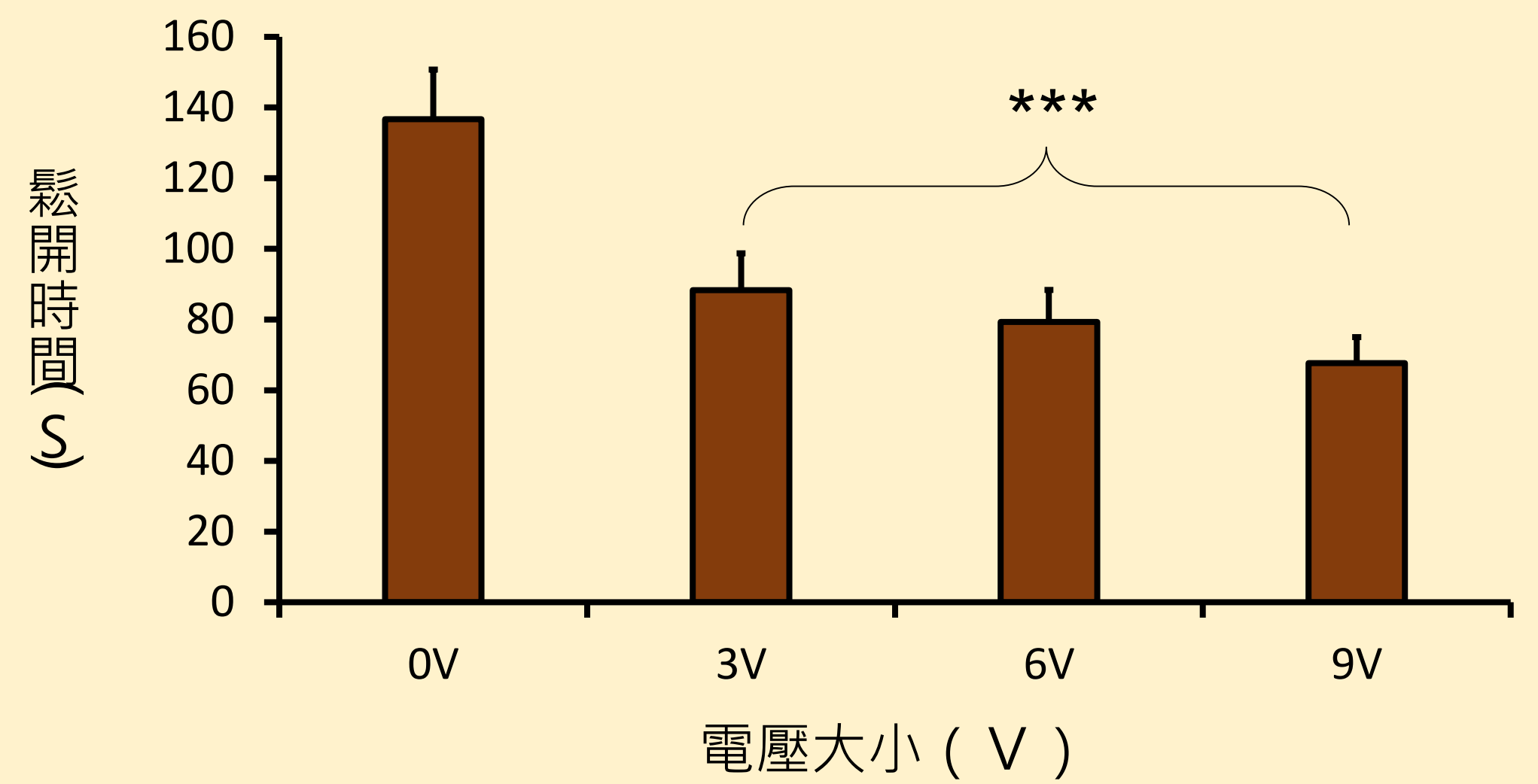


在可見光與紫外光波段的吸光峰值類似，表示同一種馬陸**不會因其體形大小或重量的不同，造成分泌物的種類有所改變**



苯甲醛在249nm波段有吸光值高峰，具有特殊的杏仁氣味。**苯醌**在351nm有吸光高峰，為亮黃色晶體，有刺激性氣味。

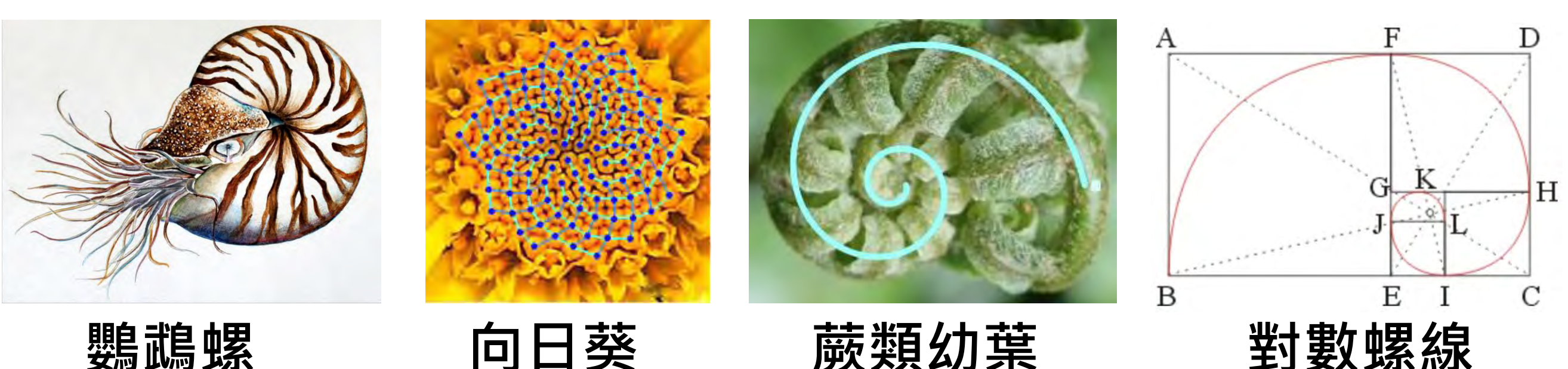
探討馬陸捲曲行為與刺激力道大小的關係



在受到更大的電壓刺激時，馬陸從捲曲螺線形態鬆開至直線形態所需時間變短。故可得知**馬陸遇到更大刺激時，會快速鬆開至直線形態，改以逃離的方式避敵**，以免遭受更大傷害

DISCUSSION

生活中有許多動、植物都有類似的捲旋狀構造如鸚鵡螺的外殼、向日葵的蕊芯、蕨類的幼葉生長模式就是依照**對數螺線之黃金比例係數生長**。由此可知，在生物界中有許多生物的生長模式都是有一定的數學規律，都具有特定含義



早期研究多都以研究**黃金比例的對數螺線**為主，本實驗是**第一個發現阿基米德螺線與生物防禦之間的關聯性**，且由本實驗結果可以得知，生物會透過特殊的螺線形態，保護其最重要、脆弱的敏感部位，以此來達到最佳的保護效果

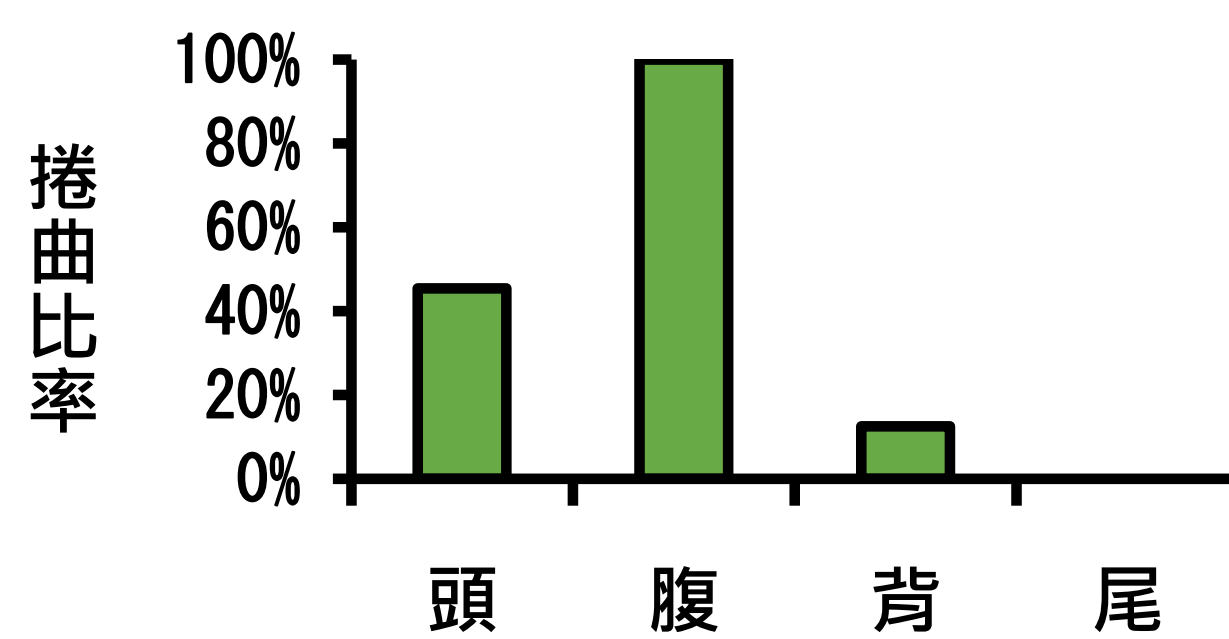
初級 保護體色	次級 捲曲行為	次級 螺線形態	次級 驅拒物質

馬陸具有保護色使其躲在適當環境中，此為**初級防禦**；其次為**次級防禦**受到刺激時會產生捲曲行為，將頭部與腹部包於內側，堅硬外殼露於外側來減少傷害，此為**行為防禦**；捲曲成螺線型態後，能夠達到減少脆弱部位與外界接觸的長度並增加受壓面積減少外力造成的傷害，且能將分泌孔打開，使其分佈於上側，為**形態防禦**，持續受到刺激時才會分泌驅拒物，為**化學防禦**。當受到更大刺激時，會選擇快速鬆開並逃離，以此做最後的防禦

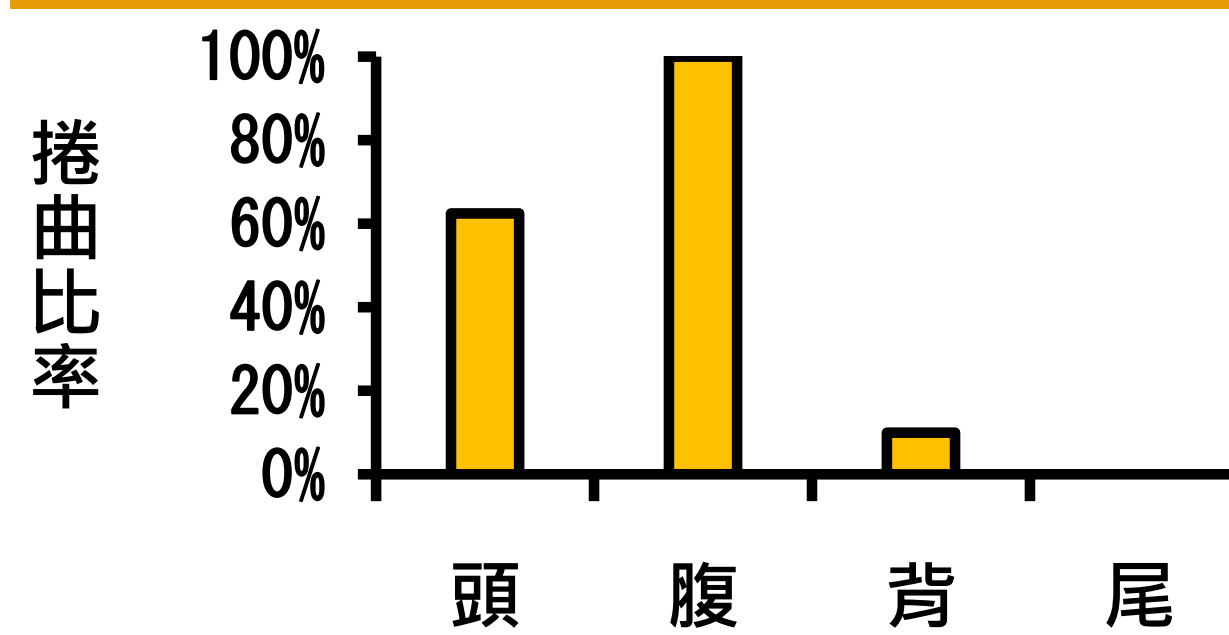
WHEN

馬陸部位	踩踏瞬間	踩踏過後
頭部		
腹部		
背部		
尾部		

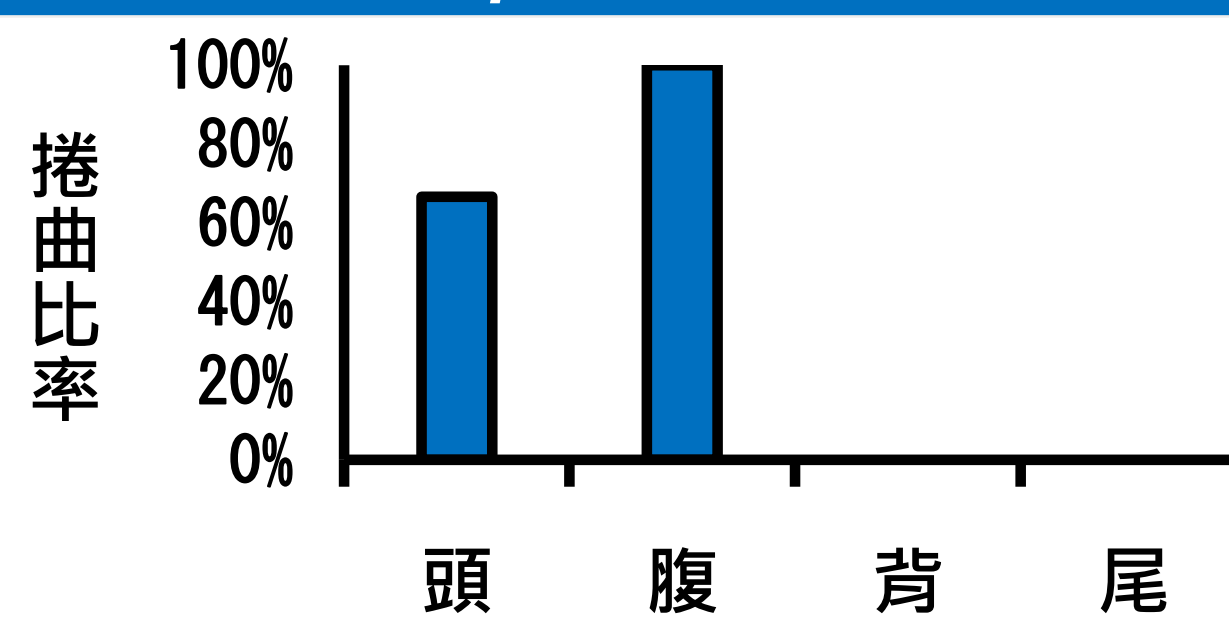
Trigoniulus corallinus



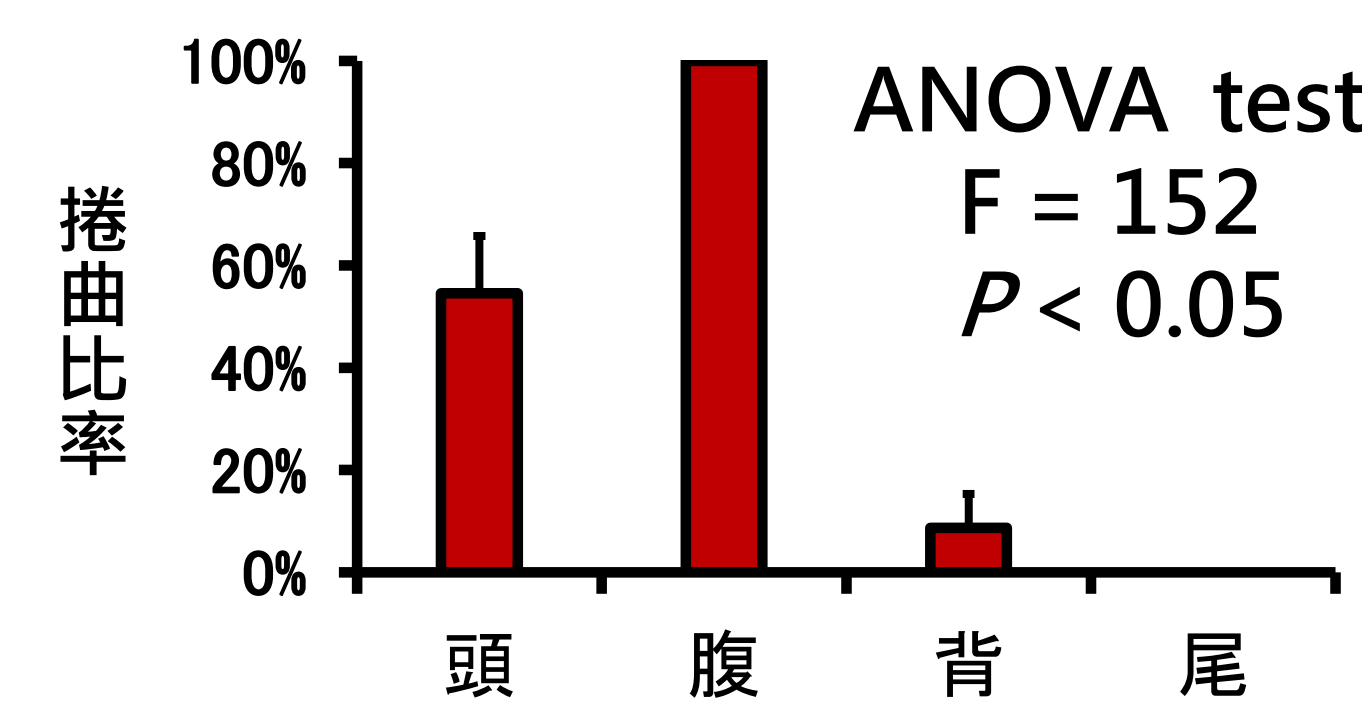
Julidae sp.



Asiomorpha coarctata



三種馬陸實驗結果

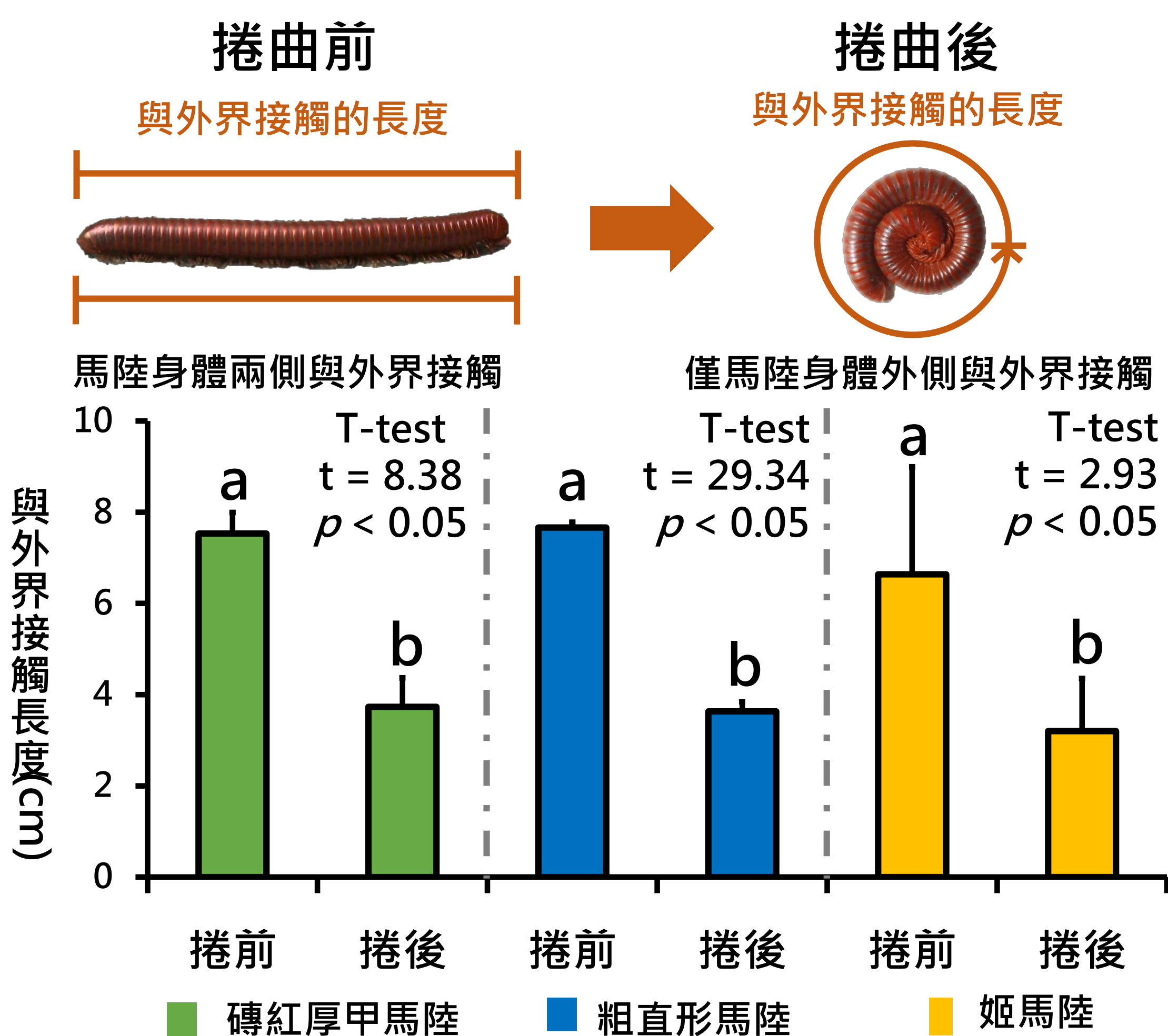


- 馬陸主要棲息於**落葉堆或泥土淺層**，容易被棲息在相同環境的動物行走或跳躍踩踏傷害
- 馬陸各部位在受到蟾蜍踩踏後會有不同反應，**頭部與腹部受到刺激時皆有明顯捲曲行為**，而在背部與尾部幾乎沒有任何反應。因此可以確認，馬陸的頭部與腹部最為敏感，當兩部位受到刺激時，會引發馬陸捲曲行為，使其身體形成螺線形態，以此進行次級防禦的作用

BENEFIT--PHYSICS

1. 減少脆弱部位與外界接觸的長度

以三種馬陸進行實驗，測量捲曲前直線形態與捲曲後螺線形態，背腹部位與外界接觸長度，以了解捲曲螺線形態對馬陸防禦作用之效益。



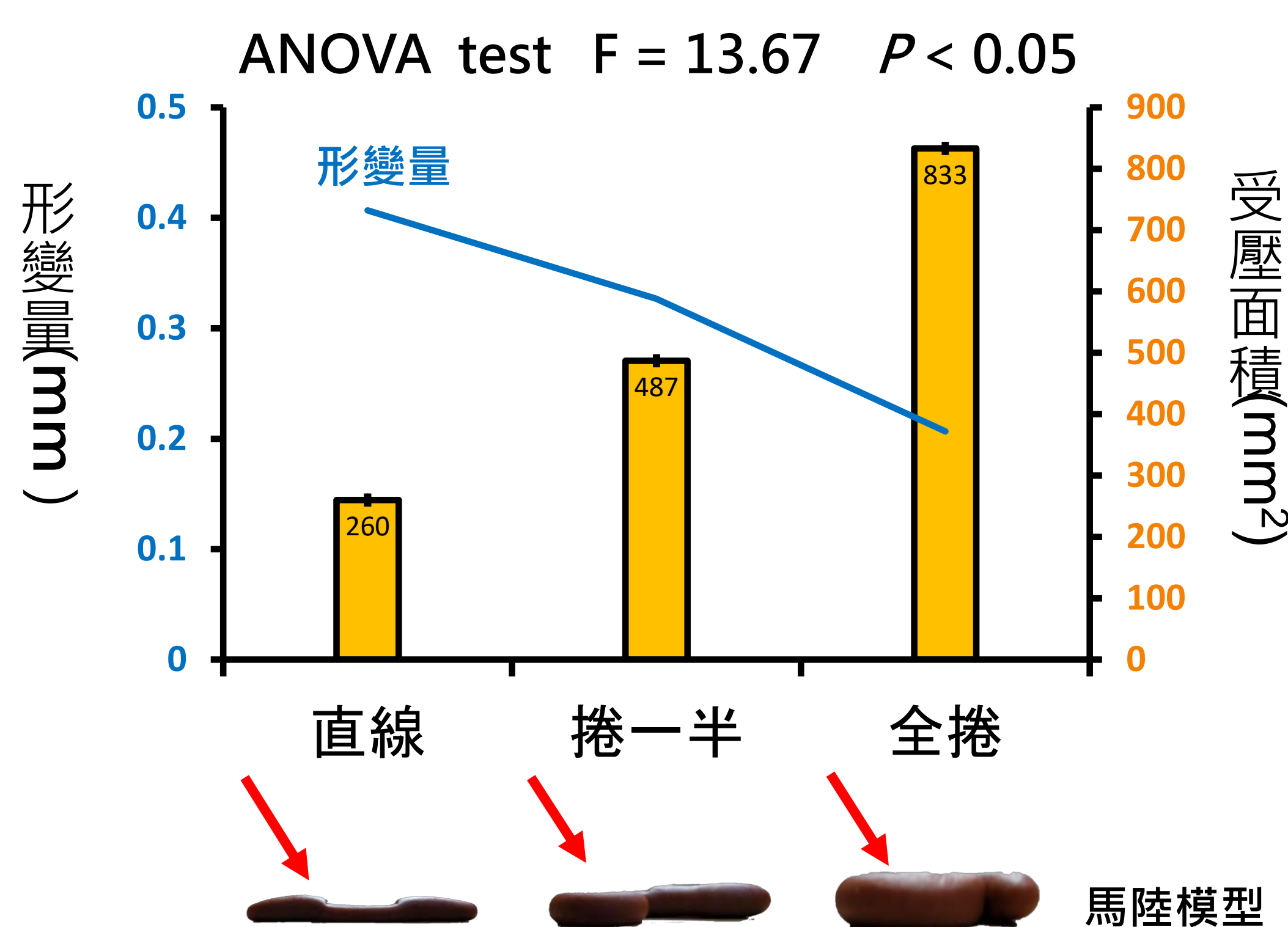
馬陸身體捲曲時與外界接觸長度大約為直線狀長度的一半，故螺線形態可將脆弱頭部及腹部捲縮保護住

2. 增加受壓面積以減少外力造成的傷害

以黏土製作馬陸模型，模擬馬陸受到定量外力施壓，計算馬陸模型之受壓面積與形變量數據，進而了解馬陸受到外力施壓造成的壓力變化

$$P = \frac{F}{A}$$

固定外力 F
受壓面積 A 增加
壓力 P 減少



馬陸模型的受壓面積逐漸增加而形變量則逐漸下降，相較於未捲曲直線形態，馬陸於捲曲後螺線形態減少一半的形變量。故當固定外力時馬陸因為受壓面積增加，分散壓力導致馬陸受壓後形變量減少，以此來達到減少傷害的效果

CONCLUSION

- 馬陸捲曲形態符合**阿基米德螺線軌跡**，因馬陸身體從頭到尾等寬，故以頭部為中心，向內實捲可符合阿基米德螺線之間距等寬之特性。
- 馬陸的捲曲螺線軌跡**不會因為性別、體長或種類的差異**，進而影響螺線型態，都是阿基米德螺線。但螺線的大小會受體長的影響，馬陸體形越大，所對應的圈數越多，螺線型態越大。
- 馬陸於**捲起全程與鬆開前半部過程**符合阿基米德螺線軌跡，而馬陸選擇「鬆開」而不是「捲開」的原因為，捲開速度慢，頭部無法快速離開螺線中心，逃離傷害，對其生存適應較不利。
- 馬陸的次級防禦作用為可有效地透過**捲曲行為減少脆弱部位與外界接觸的長度**；而且馬陸捲曲後的螺線形態可增加受壓面積，進而減少外力施壓所造成的傷害。
- 馬陸的**化學防禦驅拒物**都在紫外光波段有明顯的吸光波形，比對文獻吸光譜，成分可能是**苯甲醛**。而不同種馬陸成分有差異，磚紅厚甲馬陸的**黃色分泌物**在可見光多一段吸光波形，可能是**苯醌**。
- 馬陸受到電刺激越大，**分泌物種類沒有變化，但分泌量會有增加趨勢**。分泌物有總量限制，有些馬陸多次刺激後，分泌量會下降，最後不再分泌驅拒物質。
- 馬陸的防禦順序是先以**初級防禦作用**為主，體色形成隱蔽色或警戒色，避免掠食者攻擊。若是遭遇攻擊時，會產生次級防禦作用，先產生**捲曲行為**，讓身體形態形成螺線狀，若持續刺激，再分泌驅拒化學物質，驅趕或毒害掠食者。更強烈刺激則馬陸不再捲曲，選擇以**快速逃離**的方式躲避敵害。