

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

佳作

052007

蚘蚘學泳 - 睡蓮蚘適應水上生活的機制

學校名稱：國立臺南第一高級中學

作者： 高二 蔡崇德 高二 郭天睿 高二 陳彥翔	指導老師： 鄭楷騰 高翊靖
---	-----------------------------

關鍵詞：睡蓮蚘

摘要

睡蓮蚜是一種生活在水域環境的蚜蟲，而本研究證實：此種蚜蟲對水源和水中浮萍具有偏好性，並在水中具有勝過陸生黑豆蚜和玉米蚜的求生能力和登陸能力。睡蓮蚜的這些能力源自其異於其他蚜蟲的構造：較輕的質量和較長的腳使其能夠憑藉表面張力於水上站立和移動，並且在登岸時可以產生物理中的 Cheerios Effect 快速吸附陸地，水中生活的機動性因而極高。另外，睡蓮蚜的腳有彎曲的特徵，加強 Cheerios Effect 的效應，加強登岸能力。睡蓮蚜的腹面氣孔亦有朝兩側生長的現象，以適應水上腹面經常碰觸水面的生活。

壹、 研究動機

在學長培養的浮萍水域中，我們發現一種叫做睡蓮蚜(*Rhopalosiphum nymphaeae*)的蚜蟲。印象中蚜蟲大部分棲息於陸生植物的葉背或花苞，為何水生植物上也能發現它的身影呢?查詢資料後，發現和睡蓮蚜同屬的蚜蟲竟然都是陸生的，唯獨牠是水生。這表示牠們身體的構造和行為有什麼特別之處嗎？於是我們決定探討水蓮蚜能夠生存於水上的特殊機制。

要了解睡蓮蚜如何適應水上生活，首先得找出牠們和其他陸生蚜蟲的差異。為此，我們找了和睡蓮蚜親屬關係極近的玉米蚜和關係較遠的黑豆蚜進行比較。其中睡蓮蚜和玉米蚜乃是同一分支中第一和第二個演化出來的品種，差異應該極小，生態棲位卻大大不同，為什麼呢？那和不同屬的黑豆蚜又有何差異？這些都是我們想要了解的。



參、 研究設備與器材

一、 研究材料

青萍(*Lemna aequinoctialis*)、紫萍(*Spirodele punctata*)、睡蓮蚜(*Rhopalosiphum nymphaeae*)、黑豆蚜(*Aphis fabae*)、玉米蚜(*Rhopalosiphum maidis*)

(一) 來源

1. 睡蓮蚜和浮萍

文獻顯示睡蓮蚜(*Rhopalosiphum nymphaeae*)為一種在水域棲息的蚜蟲，因會棲息在睡蓮上而得名。主要生活在水生植物上或水面上，不常在水面下發現，不過沉入水中時可以形成空氣膜避免溺水。在美國加州地區因可以抑制有害稻米的浮萍生長而被用於生物防治上。本研究之睡蓮蚜和浮萍樣本來自浮萍生態池，捕撈之後模擬生態池的環境進行繁殖。

2. 黑豆蚜

黑豆蚜(*Aphis fabae*)在文獻介紹中為一種陸生的蚜蟲，可寄生的植物範圍極為廣泛。黑豆蚜是一種害蟲，對甜菜、豆類、菸草等都有危害。黑豆蚜來源為校園內的草地。

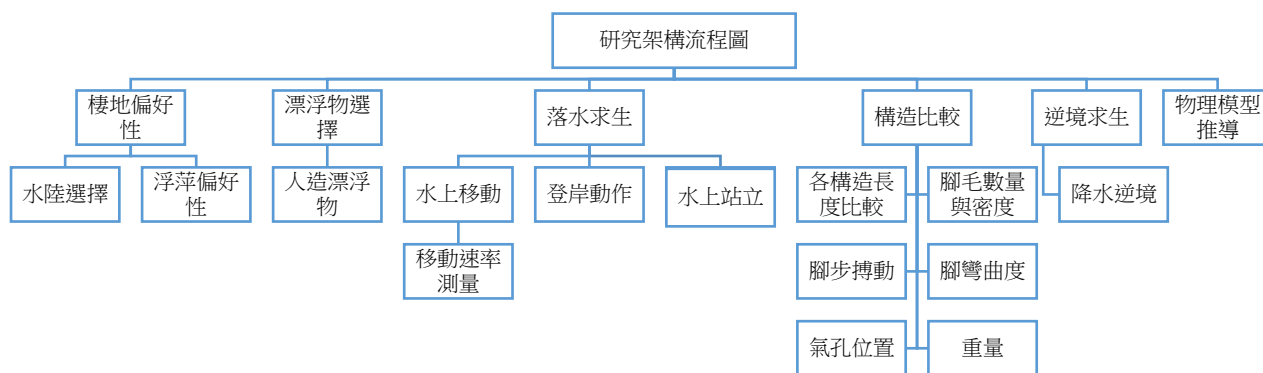
3. 玉米蚜

玉米蚜(*Rhopalosiphum maidis*)為陸生蚜蟲，對玉米等陸上農作物有害。其親緣關係和睡蓮蚜極為相近，如上方之親緣樹顯示。玉米蚜的來源為學校附近的玉米田。

二、 實驗器材

顯微鏡、載玻片、蓋玻片、二分盤、石蠟膜、黏土、水盆、過濾棉、有孔鐵盤、水管、計時器、計數器、手機、培養皿、顯微攝影裝置(Dino Capture 2.0)、目鏡測微器、載物臺測微器

肆、 研究過程與方法



一、 蚜蟲環境選擇實驗

(一) 裝置製作

將二分盤的一邊以紙黏土填滿至與中間的隔板同高，並以石蠟膜包覆，靜待一日使黏土乾燥硬化並確認黏土表面呈水平。

(二) 裝置照片



(三) 實驗方法

將二分盤有黏土的一邊作為陸地環境，在另一邊加入與黏土同高的水，作為水域環境。挑選十隻蚜蟲成蟲放於其中一個環境並靜置一段時間，觀察蚜蟲傾向往另一環境或是停留原地。因為我們觀察到睡蓮蚜偏好待在浮萍上，所以我們增加了有無浮萍與其他漂浮物的實驗。

1. 浮萍有無

將浮萍散布水面的水域環境作為操縱組，另一組水面不放置浮萍作為對照組，觀察蚜蟲是否會因為浮萍而有不同的水源偏好。

2. 浮萍與漂浮物

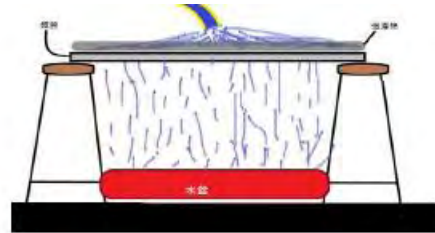
將塑膠膜切成等大的小塊作為其他漂浮物，並使其與浮萍混雜漂浮於水域環境。將實驗裝置靜置，且每 30 分鐘觀察一次，並記錄兩種漂浮物上的蚜蟲數量。

二、降雨逆境實驗

(一) 裝置製作

將穿孔鐵盤固定於兩椅子之間，並在上方置放潮濕過濾棉，使水在實驗進行時能均勻從所有孔洞流出。

(二) 裝置照片和示意圖



(三) 實驗方法

將十隻蚜蟲成蟲分別置放於固定大小的浮萍上。將水盆注入 4 公升的水，再將浮萍與蚜蟲置於水面，等待水面平靜後用水管朝鐵盤加水。在一分半鐘內注入 9.2 升的水，固定每次實驗的水量及降水強度。最後計算停留在浮萍上的蚜蟲數量並記錄。

三、蚜蟲落水登陸實驗

(一) 裝置製作

於培養皿中加入水至半滿，並將三片浮萍集中放置於中央，以免器壁的作用力干擾實驗。

(二) 裝置照片



(三) 實驗方法

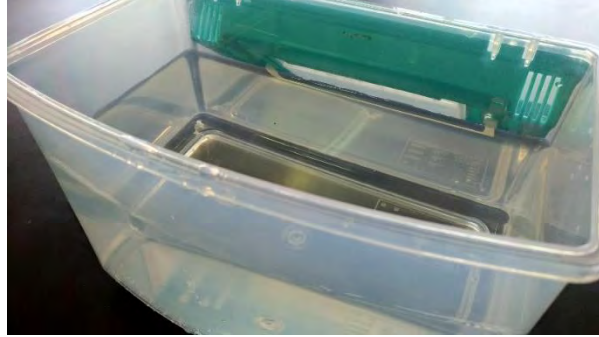
在無外力干擾的環境下放置蚜蟲，使蚜蟲初始移動方向面向浮萍，並用直尺量取蚜蟲與浮萍之間的距離，使兩者間隔 0.5、1.0、1.5、2.0、2.5、3.0 公分 6 種長度。若蚜蟲在兩分半內登上浮萍，則視為成功登陸。

四、蚜蟲水中移動實驗

(一) 裝置製作

加水至培養箱 3/4 滿。

(二) 裝置照片



(三) 實驗方法

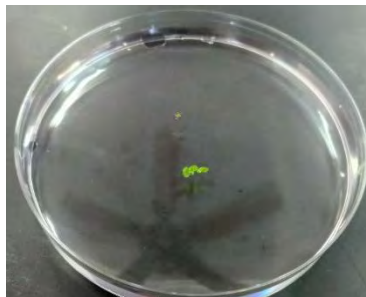
1. 將蚜蟲置於靜水中，觀察其移動過程，並拍攝影片以 Tracker 分析，再更換蚜蟲種類再進行一次實驗。
2. 拍攝蚜蟲於水中移動時照片，由側視、俯視角度拍攝，觀察不同種類蚜蟲的水中行為差異。

五、游向浮萍主動性實驗

(一) 裝置製作

加水至水盆 3/4 處，並放置三片浮萍於水盆中央。

(二) 裝置照片



(三) 實驗方法

放置蚜蟲於距離浮萍 0.5 公分處，並使蚜蟲初始面向浮萍，並開始計時，以 3 秒為單位，觀察其是否主動游向浮萍。

六、浮萍吸引力實驗

(一) 裝置製作

將培養皿加水至半滿，並分別將十片浮萍放置於培養皿兩端的水面。

(二) 裝置照片



(三) 實驗方法

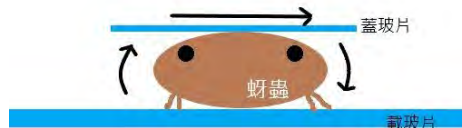
將蚜蟲放置於離浮萍 1 公分處，一開始使蚜蟲頭部朝向浮萍，觀察過程中其速度、加速度與動作變化。

七、蚜蟲構造觀察

(一) 裝置製作

將水彩筆沾濕，把蚜蟲挑到載玻片上用濾紙吸掉多餘的水分，並以蓋玻片蓋上，因為蓋玻片極輕，所以蚜蟲不會被壓傷。

(二) 裝置示意圖



(三) 實驗方法

將製做好的玻片樣本置於顯微鏡下觀察。

八、數據處理

(一) 標準差

將上述實驗的結果紀錄後，對同一實驗的多次結果進行標準差分析，並紀錄之。

(二) p 值

計算實驗組和對照組相對 p 值，若所得值小於 0.1，則視為兩組結果有明顯差異，於實驗結果圖表上標示*記號。

伍、 研究結果

一、 蚜蟲對有水環境的偏好性

在進行深入研究之前，我們想要確定睡蓮蚜是否確實對水源有偏好性，於是設計了以下實驗。

我們同時對玉米蚜和黑豆蚜進行相同的實驗，作為睡蓮蚜水源偏好的對照組，利用二分盤打造水域和陸地環境，並將蚜蟲置於陸地上，觀察其隨時間對兩者的選擇。

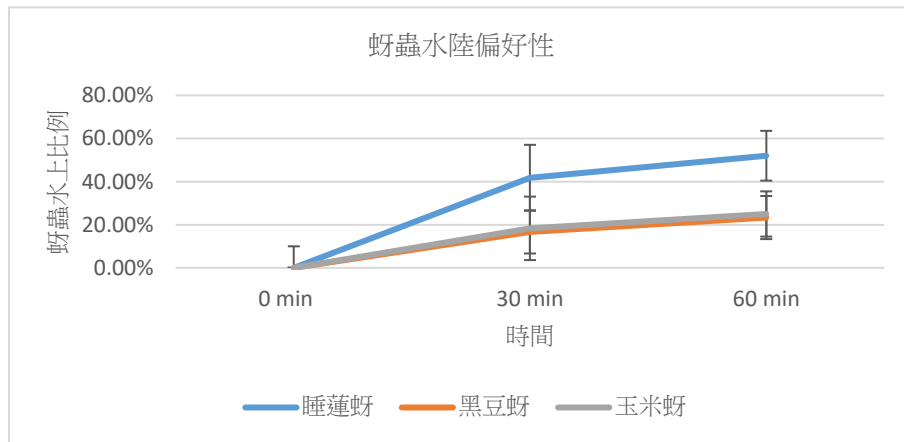


圖 1-1 蚜蟲對水陸環境的選擇(初始放在陸上)

結果顯示，當蚜蟲靜置在陸地上一小時後，睡蓮蚜已高達一半移到水域，但黑豆蚜和玉米蚜卻大約只有四分之一在水中。由此可知，睡蓮蚜移動到水上的比例極大，且大幅高過陸生的玉米蚜或黑豆蚜。因此我們得知**睡蓮蚜對水源具有偏好性**，但造成此偏好性的原因卻仍待釐清。

二、 睡蓮蚜對漂浮物的喜好

上述實驗證實睡蓮蚜偏好水域環境，而我們想知道這個偏好性是否是源自水域上的浮萍。

因此，我們將二分盤水源環境中的浮萍全數移除，觀察睡蓮蚜在這項實驗中會如何選擇棲地。

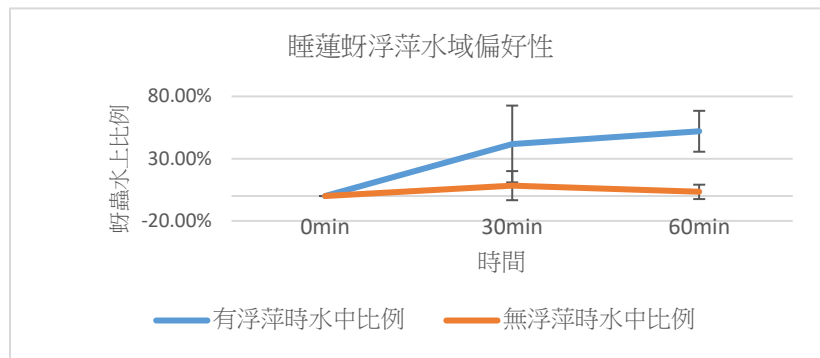


圖 2-1 水域有無浮萍對睡蓮蚜水陸偏好性的影響

由以上圖表可知，當水域沒有放置浮萍時，睡蓮蚜的進入水域環境的比例在一個小時當中都偏低，從未高過百分之十，和有浮萍時高達一半的結果有極大差異。因而得知浮萍的存在對睡蓮蚜的水域偏好性具有影響，當水中沒有浮萍時，睡蓮蚜移動到水中的比例會大幅降低。由此可見睡蓮蚜對水域環境的偏好乃建立於浮萍上。

三、 睡蓮蚜對浮萍和人造漂浮物的偏好性

上一個實驗中，我們得知睡蓮蚜會因為水中浮萍的有無影響水陸偏好性，但睡蓮蚜偏好浮萍的原因仍不清楚。蚜蟲是否是因為需要可以休息的漂浮物才較喜歡有浮萍的水域呢？如果是，那其他的漂浮物應該也會有相似的結果。

於是，我們在本實驗中將睡蓮蚜置於裝有水、浮萍和相似大小塑膠片的培養皿中，並一開始將蚜蟲全數放在塑膠片上，觀察半小時後蚜蟲在不同漂浮物間的選擇。

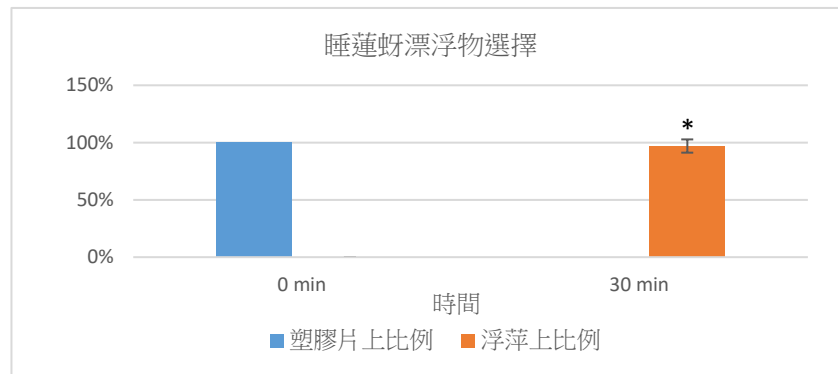


圖 3-1 睡蓮蚜對水中不同漂浮物的偏好性

結果顯示，睡蓮蚜在半個小時之後近乎全數移動到浮萍上方，可見睡蓮蚜對浮萍的偏好性是遠高過其他漂浮物。由此可知，睡蓮蚜偏好浮萍並非只因其為漂浮物。

四、 睡蓮蚜面對降雨困境的研究

睡蓮蚜偏好水源並喜愛在浮萍上生存，但是水域環境有降雨等許多難以應付的逆境。我們想知道睡蓮蚜是否有抵抗這種逆境的能力，於是進行以下實驗。

我們將三種蚜蟲置於水中的浮萍上面，在上方擺設有孔鐵板，將大量水穿透板子落到浮萍上，觀察蚜蟲是否會因此脫落浮萍。

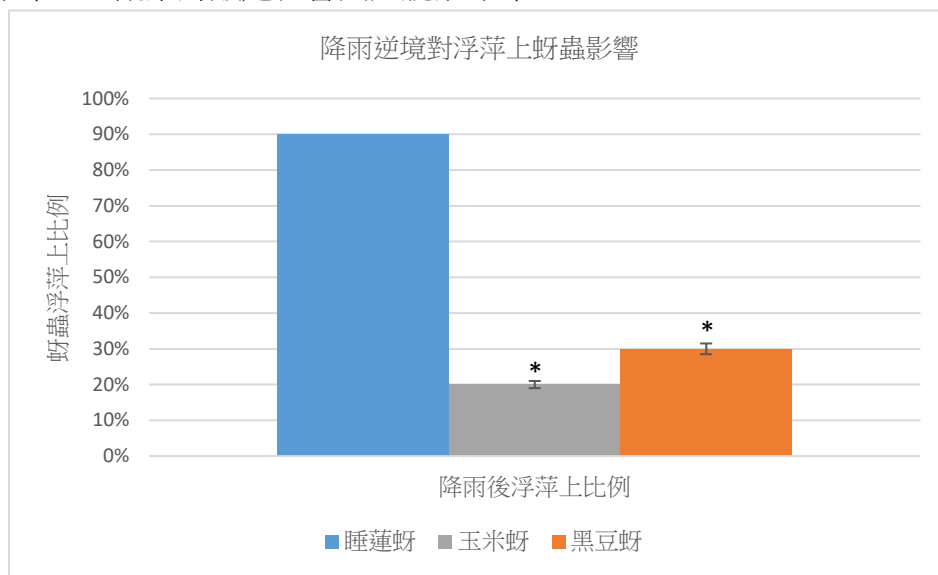


圖 4-1 蚜蟲降雨後停留浮萍上比例

結果顯示，睡蓮蚜在經歷降雨逆境後有九成都還在浮萍上，反觀黑豆蚜和玉米蚜僅剩二到三成。由此可見，**睡蓮蚜對水中浮萍附著力遠強過黑豆蚜或玉米蚜，能夠抵抗水域中的降雨逆境。**

五、 睡蓮蚜落水後的登陸能力研究

前一項實驗證明睡蓮蚜面對降雨逆境能穩定待在浮萍上，但仍有一定的機率會掉到水裡，我們想要確認落水的睡蓮蚜是否有具有能力再度登岸。

於是在此實驗中，我們將三種蚜蟲放在水中距離浮萍 0.5 至 3.0 公分的位置，並觀察蚜蟲在不同距離成功登上浮萍的機率。



圖 5-1 蚜蟲不同距離登上浮萍機率裝置

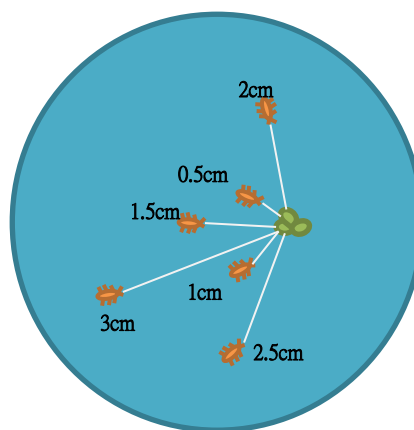


圖 5-2 蚜蟲不同距離登上浮萍機率實驗示意圖

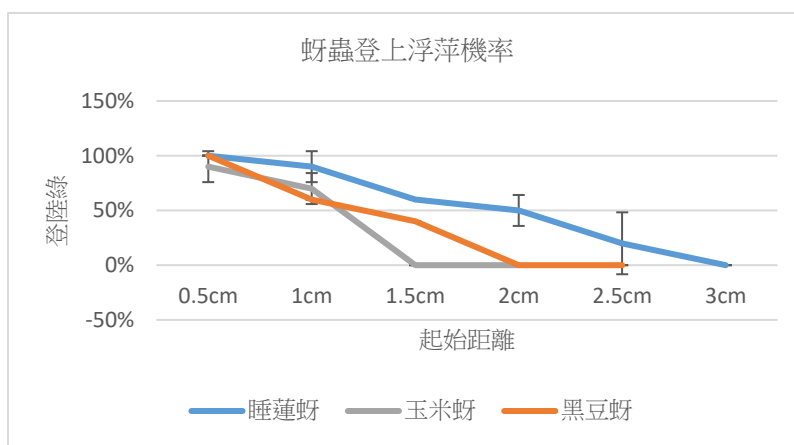


圖 5-3 蚜蟲不同距離登上浮萍機率

由上圖得知，睡蓮蚜在任何距離的登陸率都比黑豆蚜或玉米蚜高，甚至在距離浮萍 2.5 公分時都還有兩成的機會登上，反觀玉米蚜和黑豆蚜分別於距離浮萍 1.5 和 2 公分的位置便已無法成功登岸。顯然的，**睡蓮蚜落水後登上浮萍的能力遠遠勝過黑豆蚜和玉米蚜**。我們更進一步猜測睡蓮蚜在水中生活能夠辨識浮萍的存在，甚至主動往浮萍移動。

六、睡蓮蚜攀附浮萍的主動性和方向性

上述實驗驗證睡蓮蚜對浮萍的高度偏好性和攀附能力，也讓我們認為睡蓮蚜在水中可以有主動游向和登上浮萍。

為了驗證假設，我們將睡蓮蚜放在水中距離浮萍 0.5 公分的位置，並以三秒為單位，觀測其游動方向及頭部是否朝向浮萍。



圖 6-1 蚬蟲登上浮萍的主動性和方向性

結果顯示推翻我們的推測，睡蓮蚬**並不會主動游向浮萍**，甚至似乎是**被動吸附**。

我們推測這意味著睡蓮蚬會有如此高的登上浮萍機率另有其他原因。

七、 蚬蟲水中移動速率和路徑

上述實驗說明落水的睡蓮蚬登陸率比黑豆蚬和玉米蚬都好，卻無法主動登上浮萍。因此我們猜測睡蓮蚬在水中的移動能力是三種蚬蟲登陸率的影響因素。

我們將三種蚬蟲置於靜水中，並用 Tracker 測量其水中的移動速率和路徑。

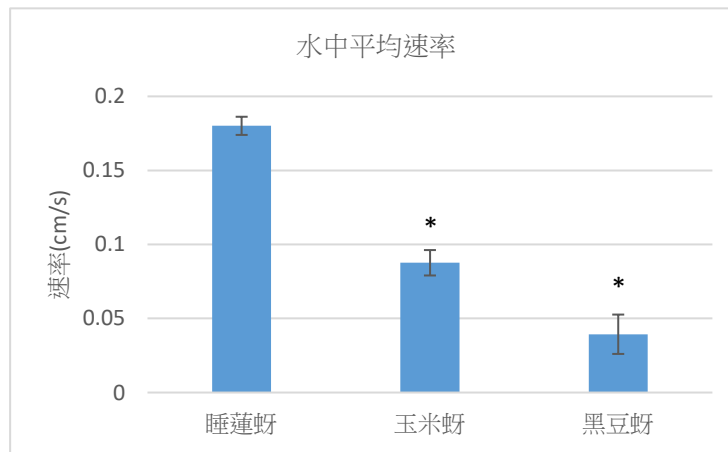


圖 7-1 蚬蟲水中平均速率

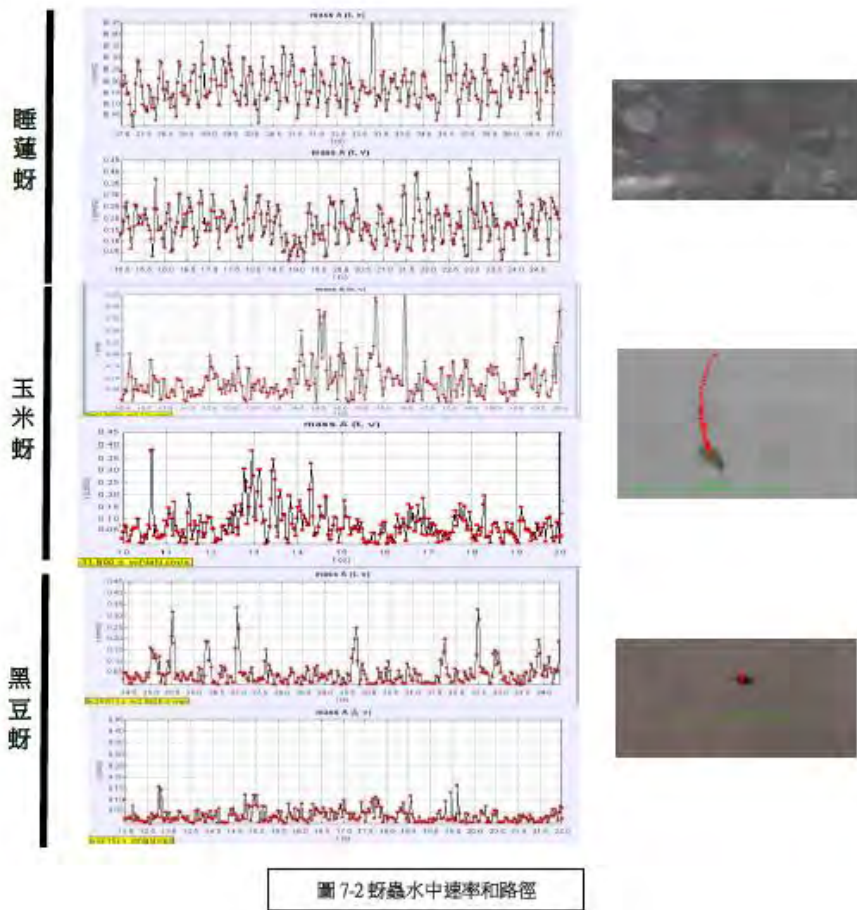


圖 7-2 蜉蟲水中速率和路徑

由上圖可知，**睡蓮蜉**在水中的**平均移動速率最快**，玉米蜉次之。此外，睡蓮蜉速率成週期性變化，和其特殊的移動方式有關：利用**反覆的左右擺盪前進**。這種運動模式可在其移動路徑圖的波浪狀軌跡清楚看見。相對地，玉米蜉在水中雖然可以固定方向前進，但移動能力卻遜色許多。而黑豆蜉更只能在**極小的範圍內做不規則的小幅移動**，**可見兩種陸生蜉蟲水中行動能力遠不如睡蓮蜉**。

八、 睡蓮蜉的水中站立和移動

(一) 動作觀察

上述實驗中可看見三種蜉蟲在水中的移動能力有很大的差距，我們認為這和牠們水中站立方式和移動動作有關。

在這項實驗裡，我們將三種蜉蟲在水中的移動和站立動作從各個角度拍攝，嘗試進行分析。

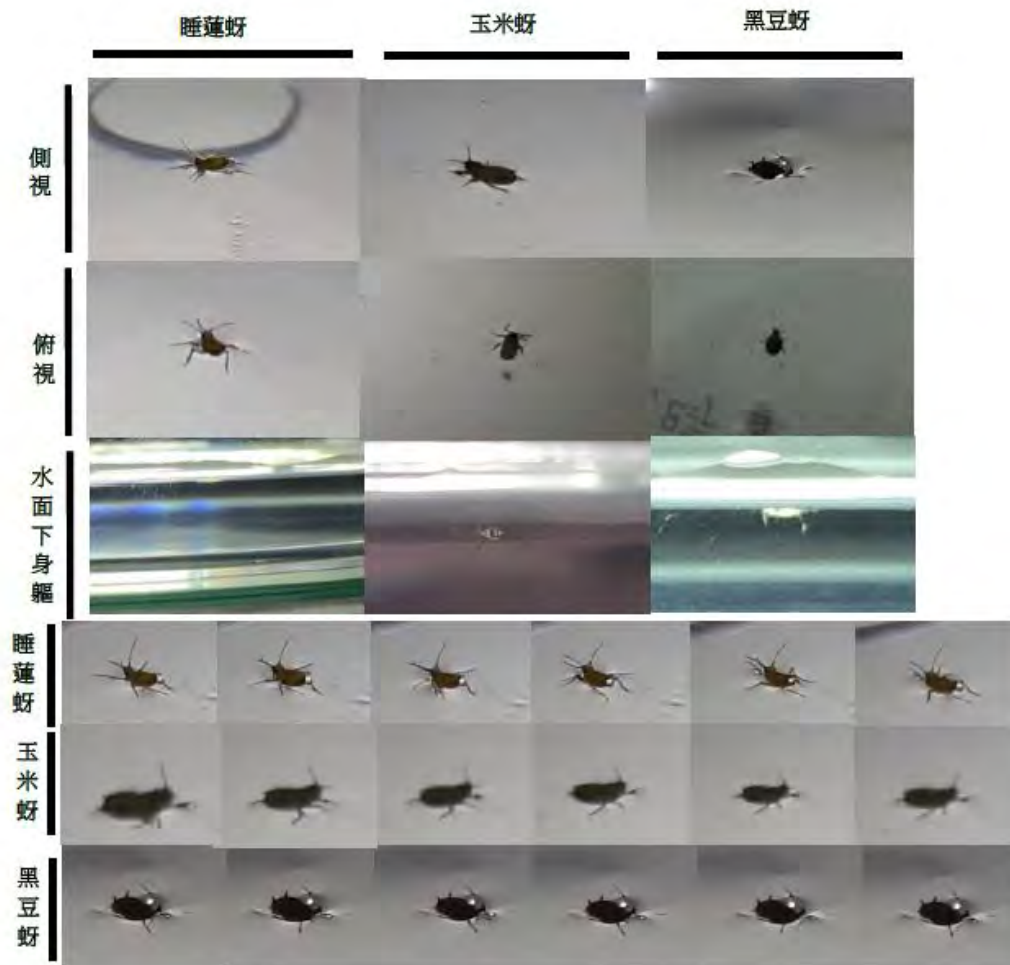


圖 8-1 蚜蟲水中移動動作

結果顯示，水中站立方面，睡蓮蚜的六腳和身軀幾乎都能支撐在水面上，而玉米蚜和黑豆蚜是前後腳貼在水上，第二對腳和腹部有一大部分則沉入水中。

水中移動方面，睡蓮蚜和玉米蚜都能夠以腳划水移動，睡蓮蚜的划水方式是：第三對腳跟第二對腳往後擺，同時第一對腳向前。接下來第三對腳跟第二對腳相繼向前，同時第一對腳向後。左右兩邊的擺動相差半個週期，因而導致之前實驗所見的左右擺盪現象。另外，當睡蓮蚜的腳往前划時還能抬出水面。玉米蚜的六隻腳都尚能划水，但不具明顯規律，且無法抬出水面，導致動力方向不斷改變，無法穩定在水中推進。而黑豆蚜在水中第一對腳跟第三對腳幾乎不會移動，完全仰賴水中的第二對腳划水，卻因為水中阻力而無法產生實質的動量。因此可以得知睡蓮蚜已經發展出相對較好的水中移動能力。

我們另外參考了關於水黽水中移動的文獻，發現**第二對腳對其水上運動十分重要**。我們的實驗結果似乎也驗證了這點，第二對腳**無法立於水面的黑豆蚜和玉米蚜移動效率較差**。

(二) 構造觀察

我們認為三種蚜蟲的身形構造是造成牠們水中站立和移動動作不同的主要因素。因此我們對三種蚜蟲的身形構造長度進行研究，得到以下結果：

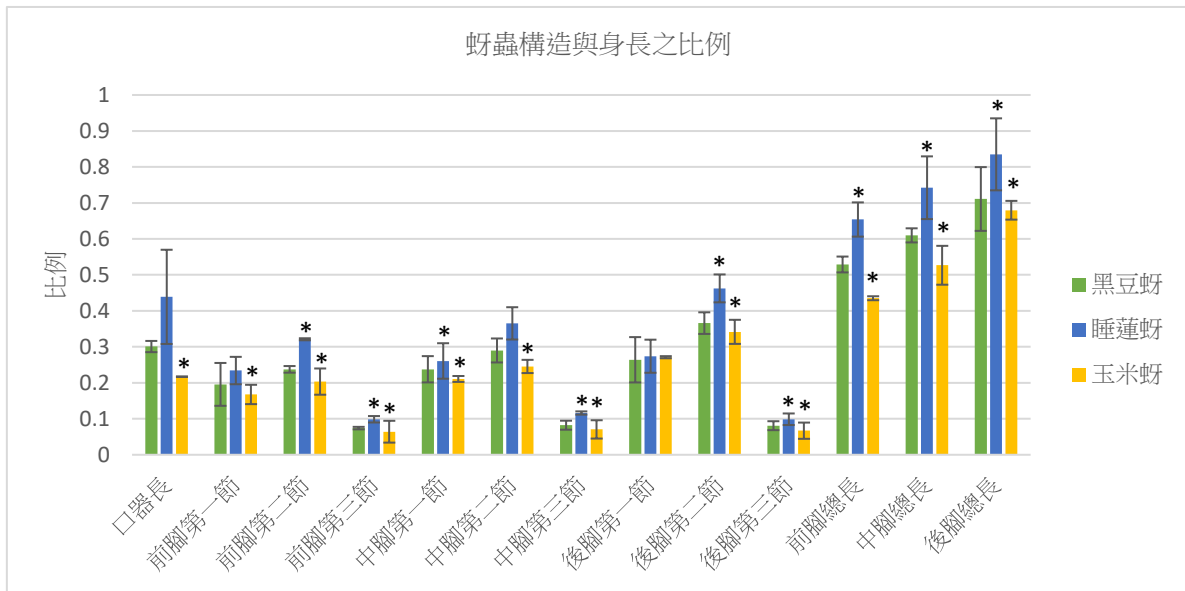


圖 8-2 蚜蟲構造長度對全身長比值

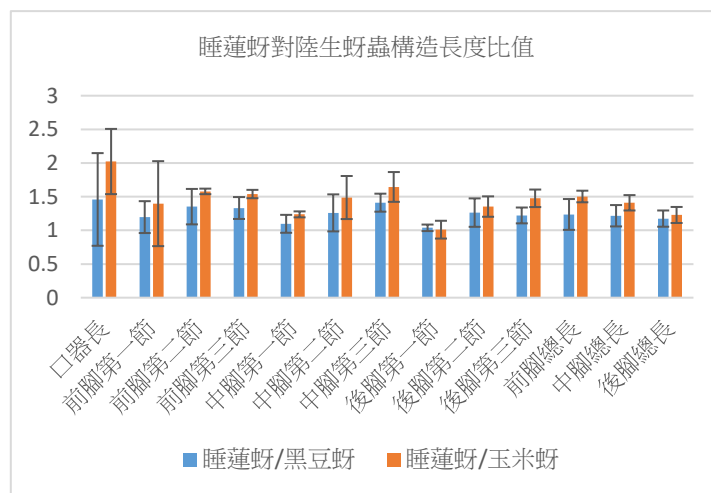


圖 8-3 睡蓮蚜與陸生蚜蟲構造對身長比例比值

上述結果可得知，睡蓮蚜的腳長度比例都高過黑豆蚜和玉米蚜，我們猜測這是造成移動和站立能力差異的一大因素，因此進行物理模型的推導，驗證我們的假設。

(三) 水中站立物理模型推導

我們認為腳長差異對於支撐蚜蟲重量的作用力會有所影響。

John W.M Bush and David L. Hu 在 2006 年的 Annual Review of Fluid Mechanics 中發表了一篇文章，對水生動物在水中靜止站立有相關的說明：

首先定義邦德數 Bo (Eo) 如下：

$$Eo = Bo = \frac{\Delta\rho g L^2}{\sigma}$$

其中 $\Delta\rho$ 為空氣和水的密度差， g 為重力加速度， L 為特徵長度（在此用蚜蟲最大可能長度的一半代入，即身長與前後腳長的和除以二）， σ 代表水的表面張力。而邦德數大小表示一浮體對表面張力支撐的依賴程度，小於 1 表示該物體主要依賴表面張力支撐。三種蚜蟲的邦德數計算結果如下：

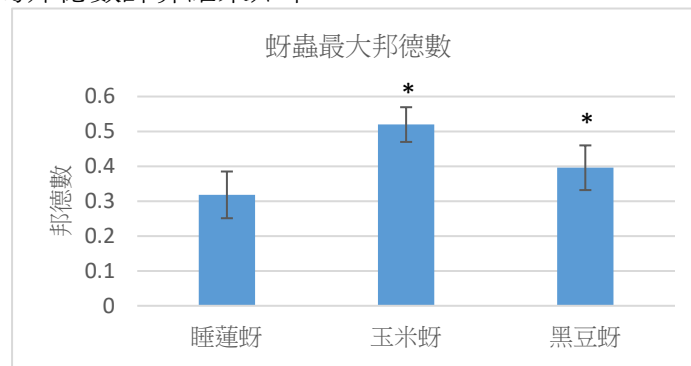


圖 8-4 睡蓮蚜、玉米蚜和黑豆蚜最大邦德數

如上圖顯示，三者的邦德數皆小於 1，這表示蚜蟲若在水面上，將主要仰賴表面張力作用，單位長度表面張力關係式如下：

$$F = 2\sigma \sin\theta$$

$\sin\theta$ 必不大於 1，故單位長表面張力的量值必不大於 2σ 。

藉此公式，我們將三種蚜蟲腳部的第三節總長代入（站立時觸水部分）（又黑豆蚜和玉米蚜第二對腳無法立於水面上，故不考慮其第二對腳第三節）。求出其表面張力最大值後和測量出來的蚜蟲重量比較，結果如下：

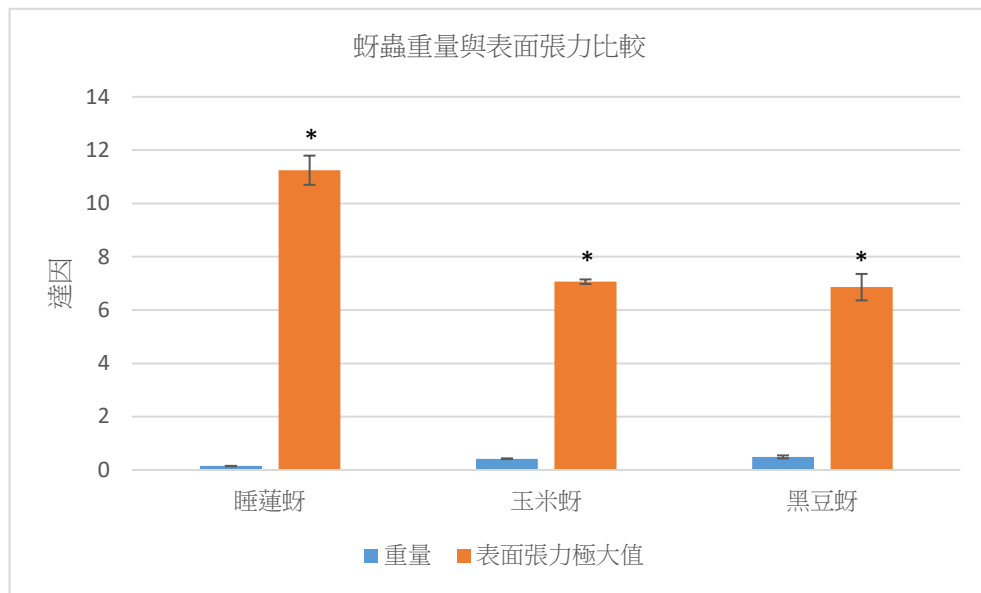


圖 8-5 蚜蟲最大表面張力和重量比較

結果出乎我們意料之外，三種蚜蟲看似都有充分的表面張力支撐牠們的重量，推翻了我們之前的假設。

我們推測黑豆蚜和玉米蚜在有產生巨大表面張力的潛力卻無法站立的原因如下：雖然黑豆蚜的表面張力足以支撐重量，但是由於其第二對腳無法立於水上。黑豆蚜只能憑藉四隻腳站立，導致水中同時支撐和平衡重量難度增高，因此我們推測行為方面的演化才是水中站立的關鍵。

(四) 水中移動物理模型推導

Bush and Hu 在同一篇文章說明水生昆蟲移動的動力來源之一為水的阻力，因此我們決定從這方面著手研究三種蚜蟲動力差異的原因。

阻力公式如下：

$$F_D = \frac{1}{2} \rho v^2 C_D A$$

其中 ρ 是水的密度， C_D 是係數， A 是垂直移動方向截面積， v 為移動速度。

由此公式分析蚜蟲的腳划水產生的向前推力，首先假設 A 和腳長成正比，且腳划水時進行以腳長為半徑的圓周運動。則可以得到下方關係式：

$$F_D \propto L \times v^2$$

又若腳的運動為末端速度 v 的圓周運動，可進一步得下方關係式：

$$F_D \propto \int_0^L \left(\frac{v}{L} \times x\right)^2 dx \propto \frac{1}{3} \times v^2 \times L$$

若將蚜蟲移動方向對準 y 軸，其 y 方向阻力的完整關係式 F_{Dy} 為：

$$F_{Dy} = -\frac{1}{6} \times \rho \times C_D \times w \times v \times v_y \times L$$

其中 w 為假設的截面積對 L 的比值， v 為速度量值， v_y 為 y 方向速度分量。前方負值表示 D_y 和 v_y 方向相反。

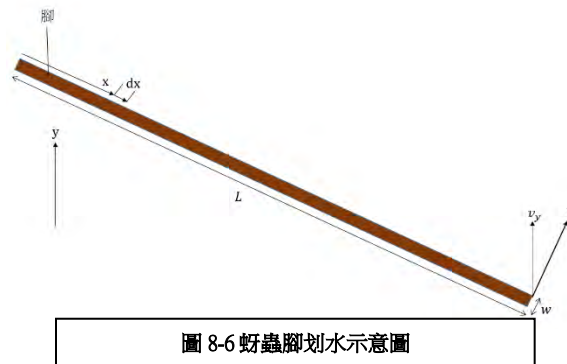


圖 8-6 蚜蟲腳划水示意圖

將三種蚜蟲 $-v \times v_y \times L$ 的值利用 Tracker 分析腳擺動速率求出，結果如下：

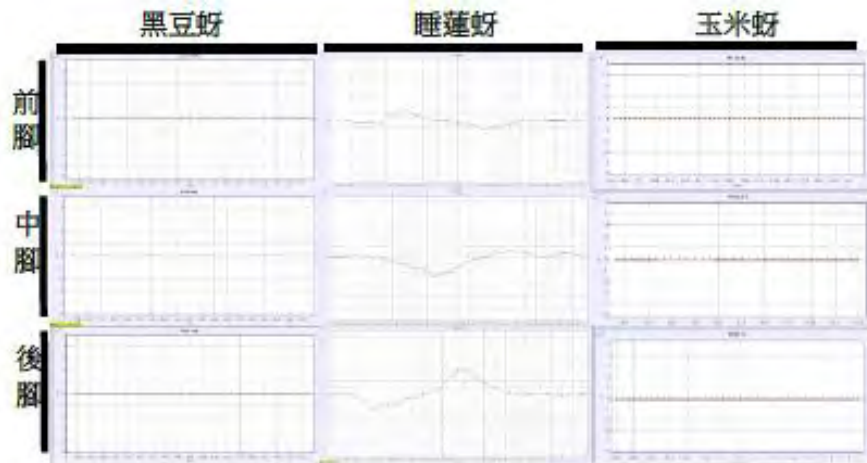


圖 8-7 蚜蟲各腳產生的推力

由以上結果得知，睡蓮蚜在腳部向後划的時候可以產生巨大推力，而向前划時雖然會產生向後的阻力，可是先前觀察結果發現睡蓮蚜向前划時會將腳部抬出水面，減少此阻力。另外，結果也顯示睡蓮蚜的腳部划水有明顯的前後週期性。反觀黑豆蚜和玉米蚜，划水產生的動力相對小很多，划水動作亦無明顯規律性。我們認為這是這三種蚜蟲水中移動能力差異的主要因素之一。

九、 睡蓮蚜落水後的登陸吸引力研究

(一) 睡蓮蚜登陸加速度觀察

浮萍對睡蓮蚜的水陸偏好性有如此大的影響，且睡蓮蚜在水域時大多數活動在浮萍上，卻無法主動往浮萍方向攀附。我們推測除了水中移動速率之外，在水裡的蚜蟲登上浮萍的過程和方式也是影響登陸機率的因素。

為了驗證假設，我們將睡蓮蚜置於盛水的培養皿並且靠近浮萍，將其登上浮萍的過程進行錄影和 Tracker 分析加速度和受力。為了有比較依據，我們同時對黑豆蚜和玉米蚜進行相同實驗。

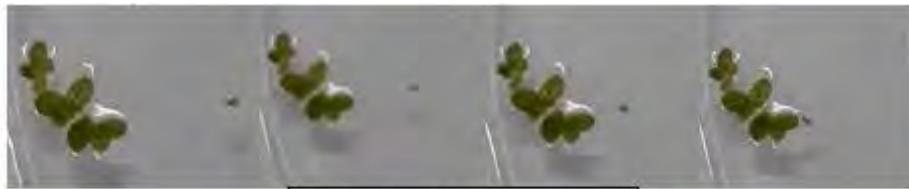


圖 9-1 蚜蟲登上浮萍過程

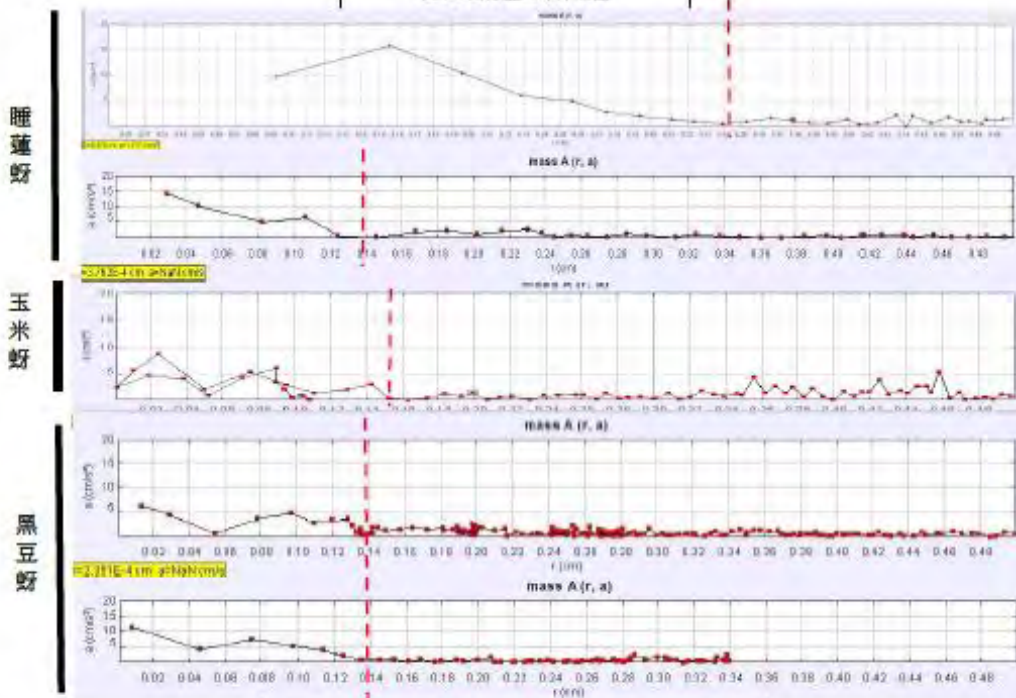


圖 9-2 蚜蟲登上浮萍過程加速度(紅色虛線標示加速位置)

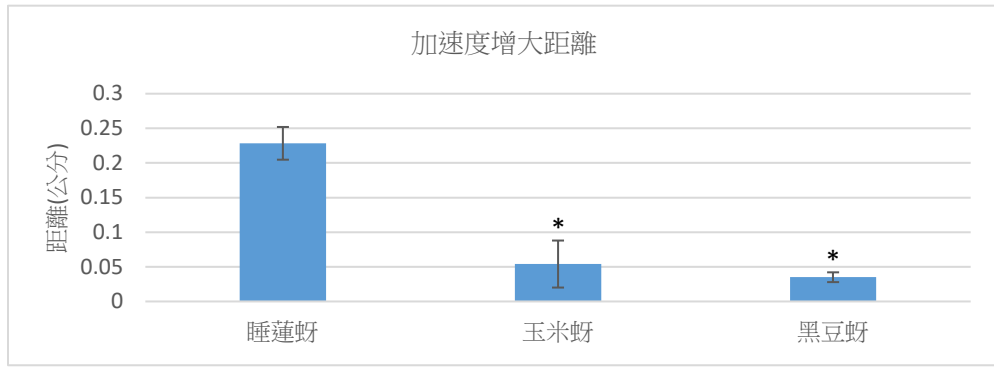
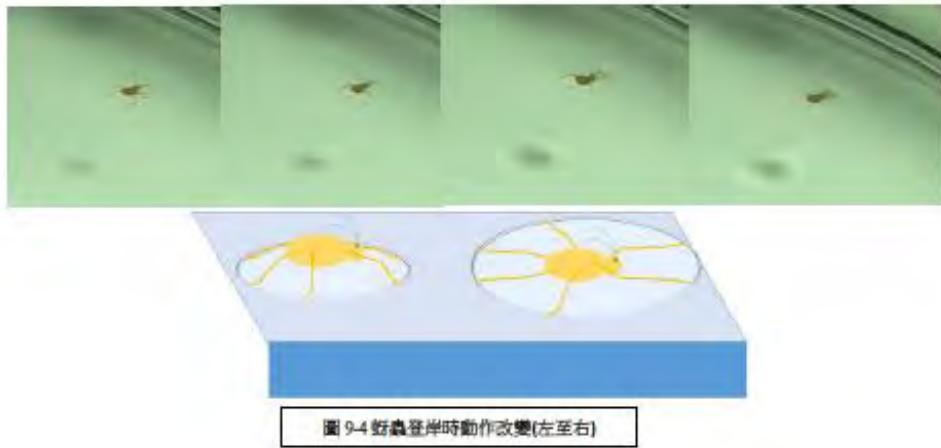


圖 9-3 蚜蟲加速度增至每秒平方五公分的距離

由上表可知，黑豆蚜在距浮萍 0.13 公分左右處開始加速，玉米蚜大約在 0.16 公分，睡蓮蚜卻有兩種可能性：有時在 0.3 公分左右便會開始加速，有時卻得到約 0.13 公分，和玉米蚜及黑豆蚜差不多。此項結果暗示著睡蓮蚜和浮萍間的吸引力有一些變動的因素控制，而我們猜測此因素和牠的登陸姿勢和身形構造有關聯。

(二) 睡蓮蚜登陸動作觀察

睡蓮蚜登上浮萍產生加速度的距離主要有兩個區間，為了得知造成這個現象的原因，我們對睡蓮蚜的登陸動作進行觀察。



如上圖，可以看到睡蓮蚜在幾次登岸前會做出特殊動作(因而導致水底暗影突然加深加大)，第一對腳第三對腳向前後伸長，隨即產生極大加速度登岸。然而此動作是由睡蓮蚜隨機作出，並非每次登岸都有，也不一定在登岸時才出現，進一步證實睡蓮蚜無法主動辨識或登上漂浮物。由此可知，當睡蓮蚜做出上述動作時，可以在距岸邊較遙遠處迅速被吸附上岸，而當牠未做出這個動作時，被吸附上岸的距離變得跟陸生蚜蟲差不多，即前一個實驗中觀察到兩個加速距離區間的現象。不過黑豆蚜和睡蓮蚜卻

完全沒有觀察到類似的動作，我們猜測是不同蚜蟲身形構造的差異影響作出特殊登岸動作的能力。

(三) 登陸時特殊動作物理模型推導

查閱文獻後，我們猜測睡蓮蚜的特殊登岸動作和一個叫 Cheerios Effect 的物理效應有關，此效應說明水中兩物體造成的半月形水面扭曲之間的吸引力。我們認為睡蓮蚜的特殊動作有助於增加其 Cheerios Effect 的吸引力，因此打算利用物理原理加以證明。

Vella and Mahadevan 在 The American Journal of Physics 中對各種 Cheerios Effect 的模型有非常詳盡的推導，其中兩個水中物體的吸引力如下：

$$F(l) = -\frac{dE}{dl} = -\frac{\gamma}{2} B^2 C^2 \exp\left(-\frac{l}{L_c}\right)$$

其中 B 為邦德數， l 為兩漂浮物間距離， γ 為水的表面張力係數，而 C 的定義如下：

$$z'_c \approx \frac{B}{2} \left(\pi(D-1) + \theta - \frac{1}{2} \sin 2\theta \right) \equiv \frac{BC}{2}$$

當中的 $D = \rho_s/\rho$ ，即漂浮物的密度和水密度的比值。

另外 $L_c = \sqrt{\gamma/\rho g}$ 。

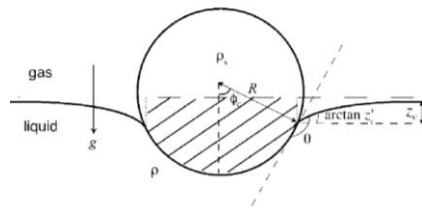


圖 9-5 蚜蟲水中漂浮示意圖(Vella and Mahvedan,2005)

假設三種蚜蟲的 D 一致，又 L_c 和 γ 在相同水域環境為常數，則 $F(l)$ 在相同距離的情況下主要和 Z'_c 的平方成正比。

我們同時發現睡蓮蚜的前腳第二節有黑豆蚜和玉米蚜沒有的彎曲形狀，我們推測此形狀將影響 Z_c' 的值，示意圖如下：

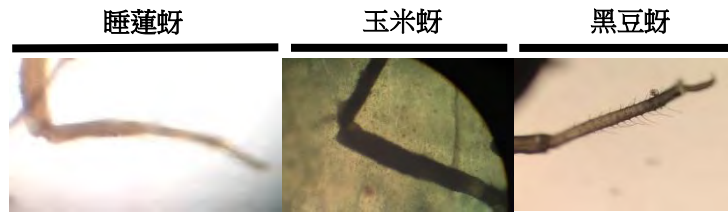


圖 9-6 蚜蟲前腳第二節

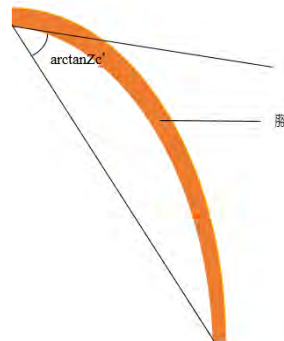


圖 9-7 蚜蟲前腳彎曲與 Z_c' 關係圖

Z_c' 可由此彎曲度進行推算，得到的 Z_c' 平方如下：

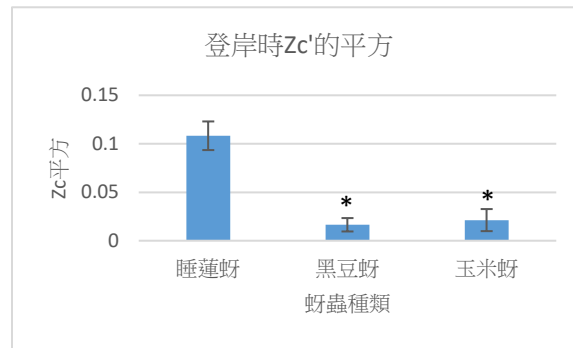


圖 9-8 蚜蟲登岸時 Z_c' 的平方

結果顯示，睡蓮蚜在即將登岸時，前腳彎曲造成的 Z_c' 平方增大使睡蓮蚜的登岸吸引力為黑豆蚜和玉米蚜的**五至七倍**，也因此能夠在**較遙遠的距離迅速登岸**。而無法作出特殊登岸動作且無適當構造演化的黑豆蚜和玉米蚜，便**不具備此能力**。

十、 蚜蟲的身形分析

我們猜測睡蓮蚜具有其他特殊身形結構以適應水中生活，於是決定詳細對三種蚜蟲的身形進行比較。我們利用複式顯微鏡分析其構造上微小的差異，得到以下幾份結果。

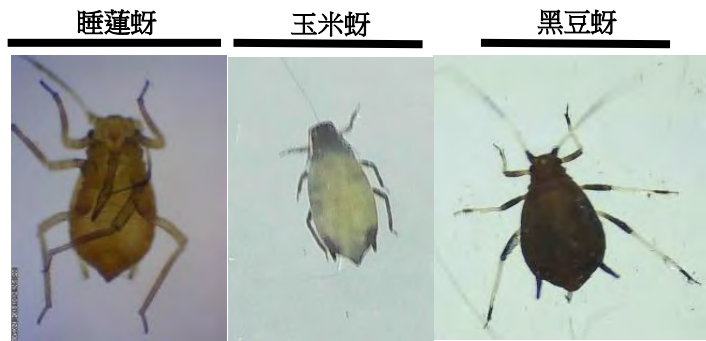


圖 10-1 蚜蟲全身圖

(一) 睡蓮蚜、玉米蚜與黑豆蚜腹部氣孔分析

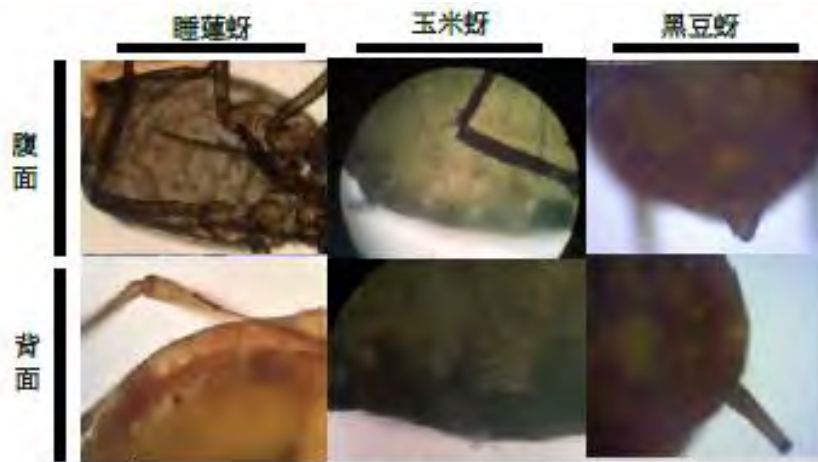


圖 10-2 蚜蟲氣孔分布圖

由上方照片可知，黑豆蚜和玉米蚜的背面和腹面都有氣孔存在，而睡蓮蚜腹面氣孔有朝身體兩側移動的現象。我們認為這是因睡蓮蚜腹面接觸水面機會高而演化出來的適應機制。

(二) 蚜蟲腳部構造分析

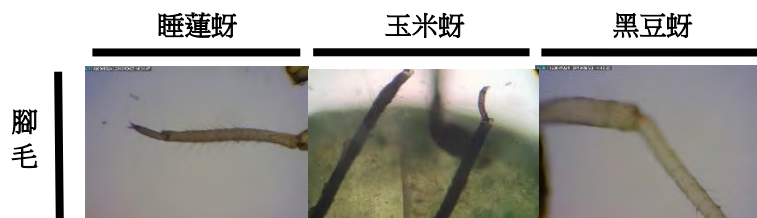


圖 10-3 蚜蟲腳毛構造

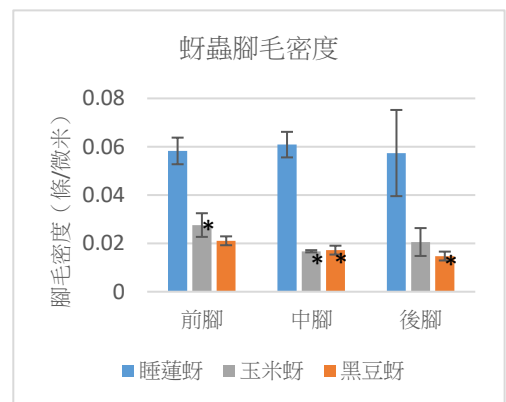


圖 10-4 蚜蟲腳毛密度

我們觀察發現，三種蚜蟲的腳部都具有腳毛構造，但**睡蓮蚜的腳毛密度和數量都遠高於玉米蚜和黑豆蚜**。這是**增進睡蓮蚜水中活動能力的因素，增加水中站立表面張力**。

(三) 腳部特殊搏動構造觀察



我們在蚜蟲的腳發現特殊的搏動構造，我們認為這個構造應有助於養分的運送，而因為水中移動較需耗費能量，所以我們認為睡蓮蚜的這個構造會特別發達，及搏動速率應較高。

然而觀察結果不符合我們的假設，玉米蚜的搏動構造比睡蓮蚜和黑豆蚜都要來的發達。因此我們推測**此構造和在水中生活的機制較無關聯**。

陸、 討論

一、 蚜蟲第二對腳分析

文獻指出，在水中生活的水黽第二對腳相對第三對腳有演化漸長的趨勢。而實驗結果中睡蓮蚜相較於黑豆蚜和玉米蚜，第二對腳的相對長度比例有所增長，而且增加的比第三對腳多。我們認為**這表示第二對腳對於適應水中生活十分重要**。

上方實驗比較睡蓮蚜與玉米蚜和黑豆蚜的第二對腳時也發現了同樣的趨勢。睡蓮蚜的第二對腳的確有較明顯的加長。

此外，玉米蚜和黑豆蚜的第二對腳沒有能力抬出水面，導致在足夠表面張力的情況下身體仍不易維持平衡，前進的推力也大幅降低。相對的，睡蓮蚜在水面上的第二對腳可以**產生顯著的表面張力**，划水前進時還可以適時抬出水面，**增加前進的效率**。尤其當睡蓮蚜做出登岸動作時，全身的重量幾乎也都需憑藉第二對腳進行支撐。因此黑豆蚜和玉米蚜無法做出特殊動作而有效從水中登岸也和其第二對腳沉入水中有關。上述種種

因素使我們認為第二對腳對於水上的生活有特別顯著的地位，其能否抬至水面以上乃至否能適應水上生活的演化分歧點。

二、 蚜蟲的腳部分析

水黽等水生昆蟲的腳長都有明顯演化增長的趨勢，實驗結果顯示睡蓮蚜也是如此。我們推測這是因為表面張力大小和划水動力相對腳的長度有正相關關係，故造成了這個演化機制。

睡蓮蚜相較黑豆蚜和玉米蚜的腳毛亦明顯增多。調查後發現有文獻指出這有助於增加表面張力。這些增加水中表面張力的機制，讓睡蓮蚜能夠成功立於水面。

三、 蚜蟲腳部的搏動構造

上方實驗結果發現三種蚜蟲的腳部具有搏動構造。我們推測這個構造有助於運輸到腳的養分。

查詢到 Pass 在 Annual Review of Entomology 的文章，發現蚜蟲所屬的半翅目動物腳部具有「副心」構造，包含一個隔膜將腳部的血淋巴腔區分為兩個竇，而「幫浦肌肉」則造成這個隔膜輪流壓縮兩個竇，促進腳部和胸部的血淋巴交換。因此我們認為腳部副心構造對腳部養分運輸十分重要，尤其蚜蟲的開放式循環效率本身不高。不過最後的實驗結果卻顯示水生的睡蓮蚜副心並沒有比較發達，因此我們推測副心發達程度的演化可能和適應水上生活較不相關。

柒、 結論

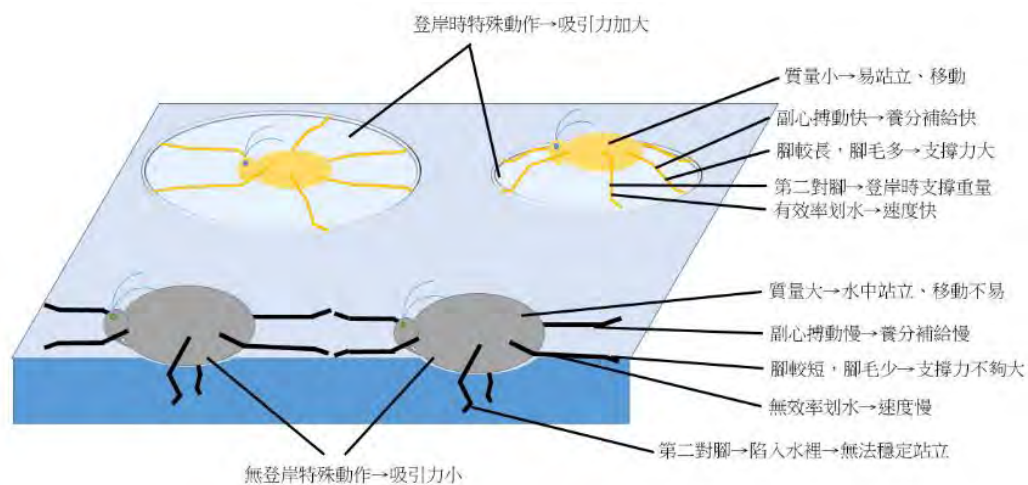
實驗結果中我們發現，睡蓮蚜對水域環境有極強的偏好性，遠遠勝過生活在陸地上的黑豆蚜或玉米蚜。進一步研究則發現睡蓮蚜對水域偏好的因素來自於水中漂浮的浮萍，浮萍的存在大大的影響睡蓮蚜對水域的選擇。由此可見，睡蓮蚜在水域環境生活並非巧合或意外，而是演化適應的結果。

在面對水中諸如落水或是降雨逆境時，睡蓮蚜也展現強大的適應能力。不論落水後登陸的最遠距離或比例，睡蓮蚜都相對較佳。在降雨後，睡蓮蚜也比較能夠維持在浮萍上。此外，雖然睡蓮蚜無法主動朝向浮萍登岸，但是牠們在水中較佳的移動能力和特殊的登岸動作讓牠們在水中具有較高的機動性，距離漂浮物較遠時，仍能順利地吸附其上。

從三種蚜蟲的構造則可以發現睡蓮蚜適應水中生活的方式。在腳長及腳毛密度方面的增加，使的睡蓮蚜腳部能夠產生的表面張力大幅增加，再加上較輕的重量，讓牠們能夠單憑表面張力站立在水面上，而黑豆蚜和玉米蚜則沒有這個能力。這個差異造成在水中移動能力的巨大懸殊，也是黑豆蚜和玉米蚜無法像睡蓮蚜作出登岸動作的原因。

從物理理論切入，證實三種蚜蟲的表面張力支撐能力差異甚大。另外腳部的划水推進，也是睡蓮蚜產生的動力較大，可以說明牠們在水中具有較高的移動速率。最後分析睡蓮蚜特殊的登陸動作，乃是運用兩個半月形水面相吸的原理，使他們能夠加速登岸。

綜合上述結論，睡蓮蚜在身形方面已經演化出適應水中生活的構造，並且運用物理的原理，不論水中站立、移動或是登岸的能力都完整具備。也因為這些方面的演化，使他們對水域環境有較大的偏好性。



捌、 參考文獻及其他

1. Vella, D., Mahadevan, L. (2005). The “Cheerios effect”, *American Journal of Physics*, 73(9), 817-825.
2. Xue, Y., Yuan, H., Su, W., Shi, Y., Duan, H. (2014). Enhanced load-carrying capacity of hairy surfaces floating on water, *Proceedings of the Royal Society A* 470.
3. Pass, G. (2000). Accessory pulsatile organs : evolutionary innovations in insects, *Annual Review of Entomology*, 45, 495-518
4. Bush, J.W.M., Hu, D.L. (2006). Walking on water : biolocomotion at the interface, *Annual Review of Fluid Mechanics*, 38, 339–369

5. Refki, P.N., et al., Emergence of tissue sensitivity to Hox protein levels underlies the evolution of an adaptive morphological trait, *Journal of Developmental Biology* (2014). Retrieved March 29, 2019, from [http : //dx.doi.org/10.1016/j.ydbio.2014.05.021](http://dx.doi.org/10.1016/j.ydbio.2014.05.021)
6. Kim, H., Lee, S., Jang, Y., *Macroevolutionary Patterns in the Aphidini Aphids (Hemiptera: Aphididae): Diversification, Host Association, and Biogeographic Origins*. Retrieved March 29, 2019, from <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0024749>

【評語】 052007

觀察睡蓮蚱在水域環境的生存環境，比較陸生的黑豆芽及玉米蚱，證實睡蓮蚱對水源和水中浮萍的偏好性，利用物理模型推導睡蓮蚱其水中阻力及水中移動能力相對於黑豆芽及玉米蚱之優勢，睡蓮蚱登陸時特殊動作的物理模型推導有助於對其身體構造演化觀察的說明，實驗觀察結果說明睡蓮蚱在身形方面已經演化出適應水中生活的構造，不論水中站立、移動或是登岸的能力都完整具備。後續可以再加以探討，不必只侷限於生態及演化之觀察探究，可以將其觀察及模型推導延伸於仿生學上之應用，未來在團隊分工上及實驗記錄本的撰寫可以再加強。

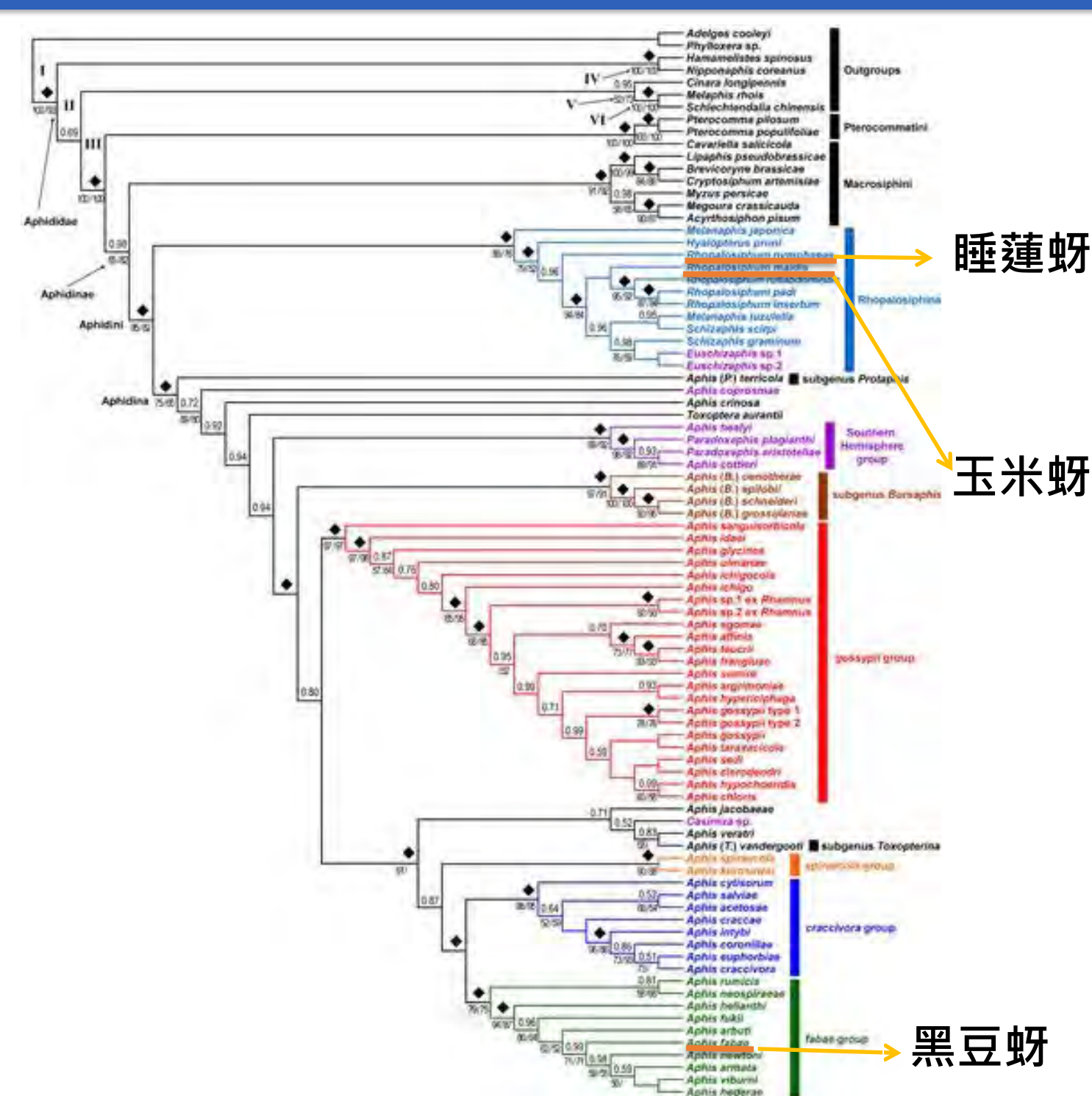
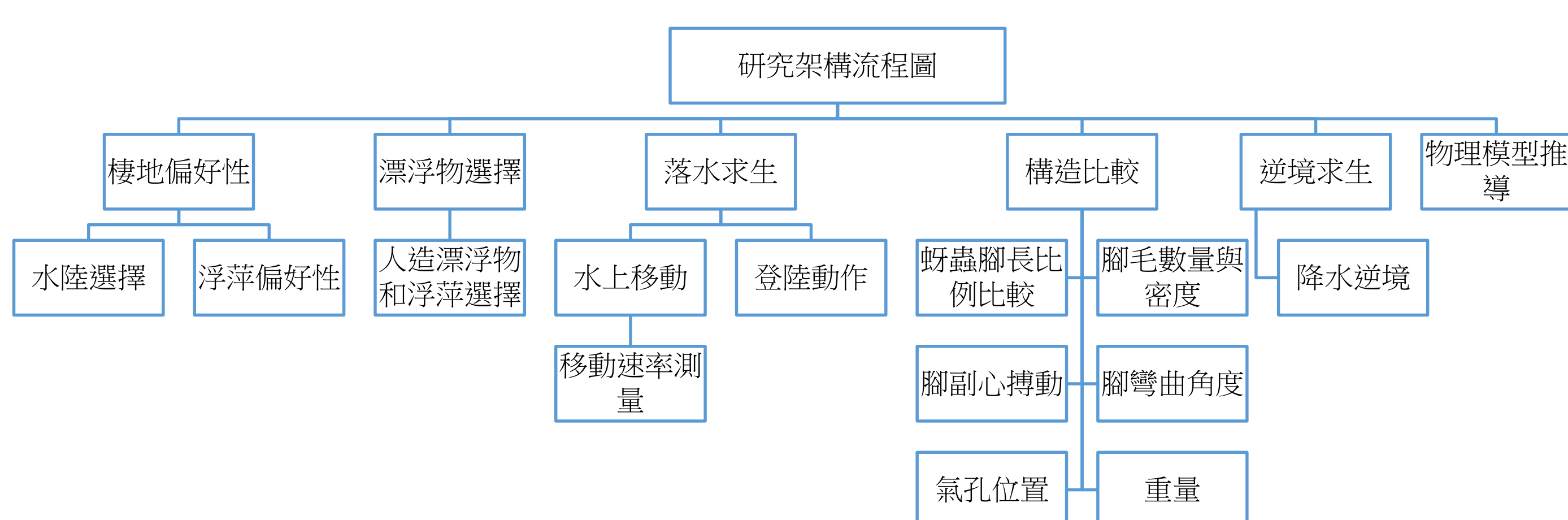
摘要

有一個特殊品種的蚜蟲生活在水上，而本研究證實：此種蚜蟲對水源和水中浮萍具有偏好性，並在水中具有勝過黑豆蚜的求生能力和登陸能力。睡蓮蚜的這些能力源自於其異於其他蚜蟲的構造：較輕的質量、適當腳毛密度和較長的腳，使其能夠憑藉表面張力水中站立和移動，並且在要登岸時可以產生物理中的Cheerios Effect快速吸上陸地，水中生活的機動性因而極高。睡蓮蚜的腳另外有弓形彎曲的特徵，加強Cheerios Effect 的效應，適應水中的運動模式。睡蓮蚜的腹面氣孔亦有側移現象，以適應水上腹面經常碰觸水面的生活。

壹、研究動機

我們在培養的浮萍上發現一種叫做睡蓮蚜的蚜蟲。一般情況下，大部分蚜蟲棲息於陸生植物的葉背或花苞，為何水生植物上也能發現它的蹤跡呢？於是我們著手於這種水生蚜蟲與陸生蚜蟲間差異的比較，探討其能夠生存於水上的特殊機制。

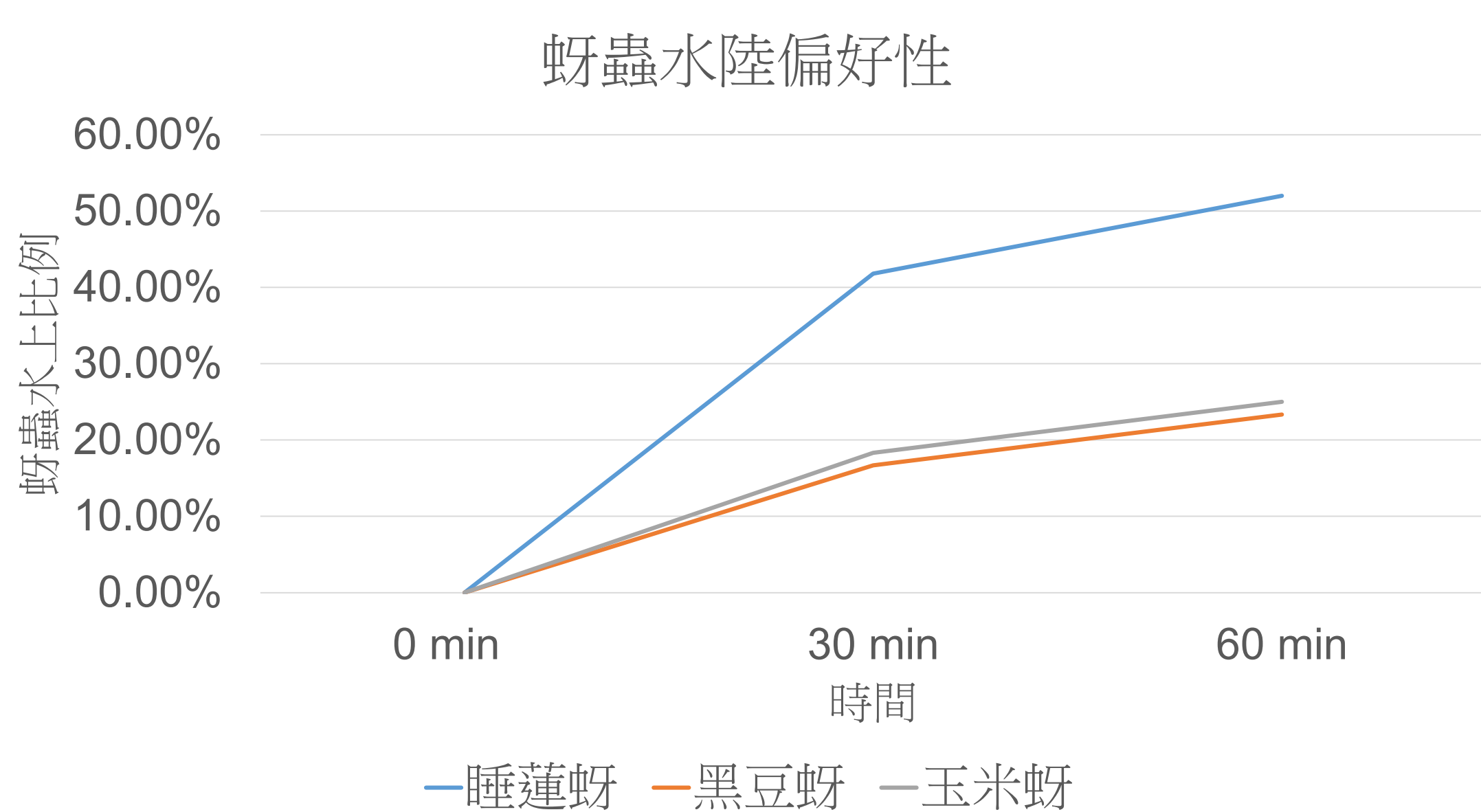
貳、研究目的與過程



參、研究結果

水陸選擇

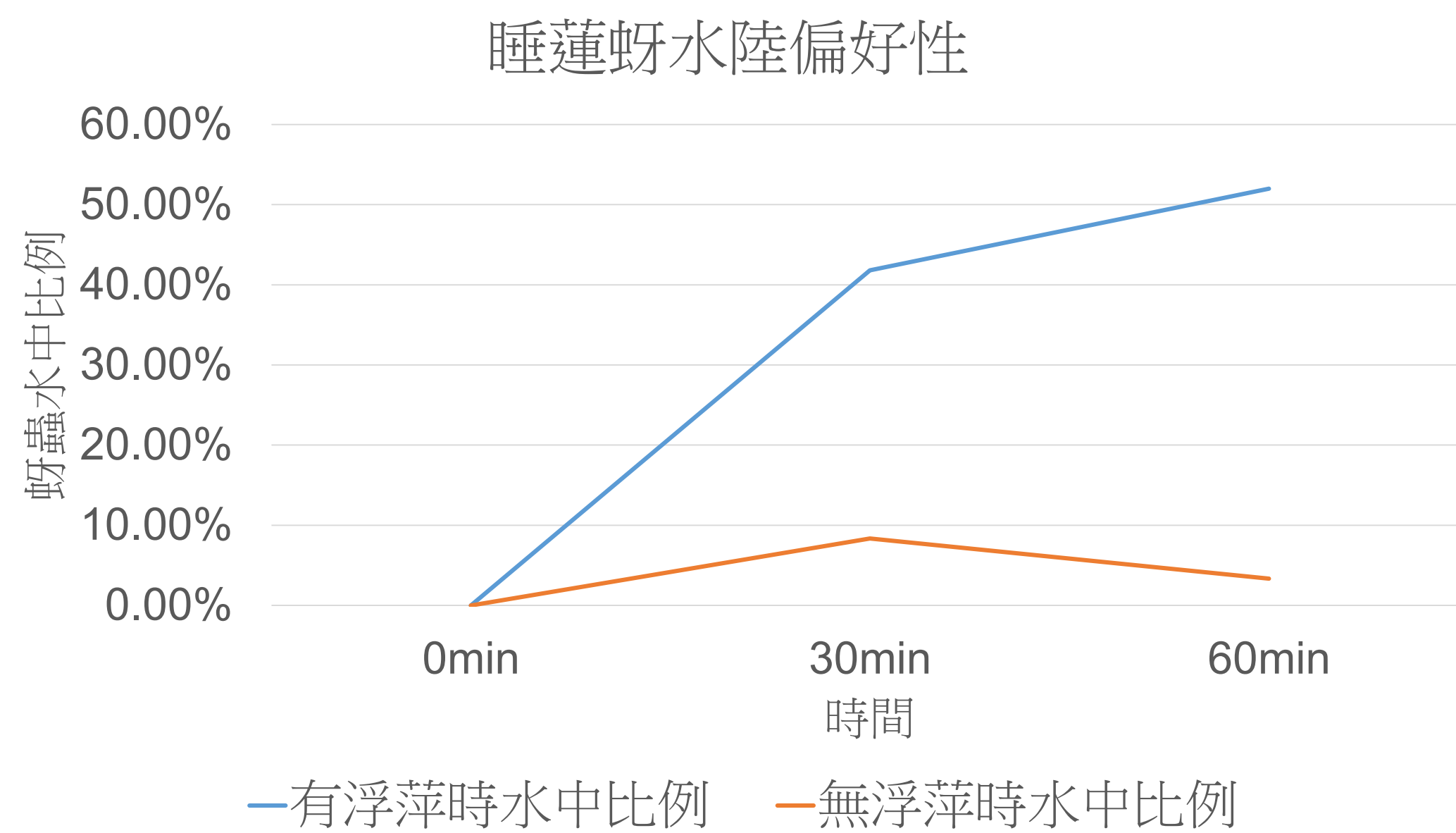
目的：確認睡蓮蚜的水域偏好性



結果：睡蓮蚜對水源的偏好性較陸生蚜蟲高

浮萍偏好性

目的：睡蓮蚜水域偏好性是否源自浮萍



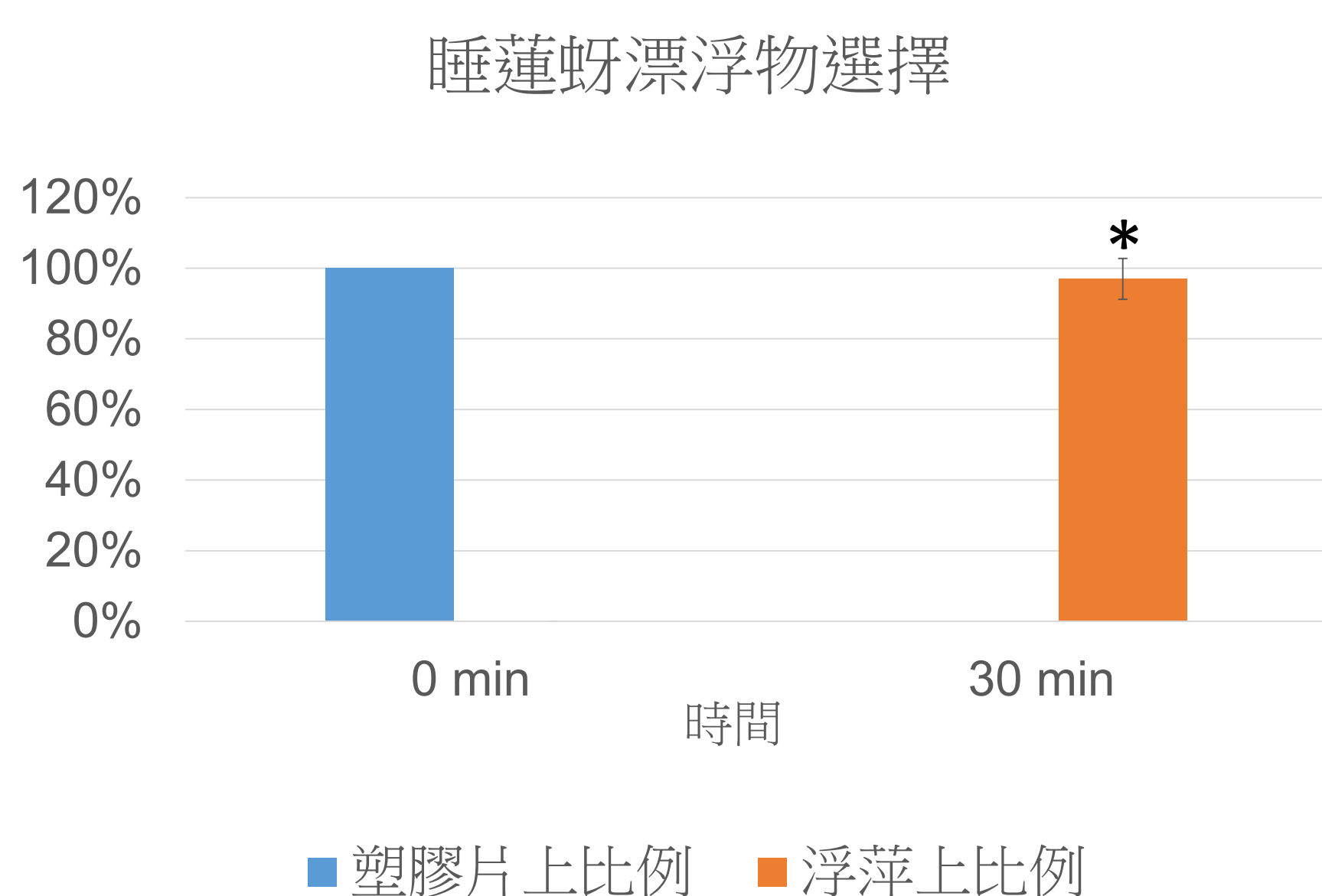
結果：睡蓮蚜較偏好有浮萍的水域環境

睡蓮蚜對浮萍和人造漂浮物的偏好性

目的：了解睡蓮蚜對浮萍與人造漂浮物的偏好性



不同漂浮物偏好性實驗裝置



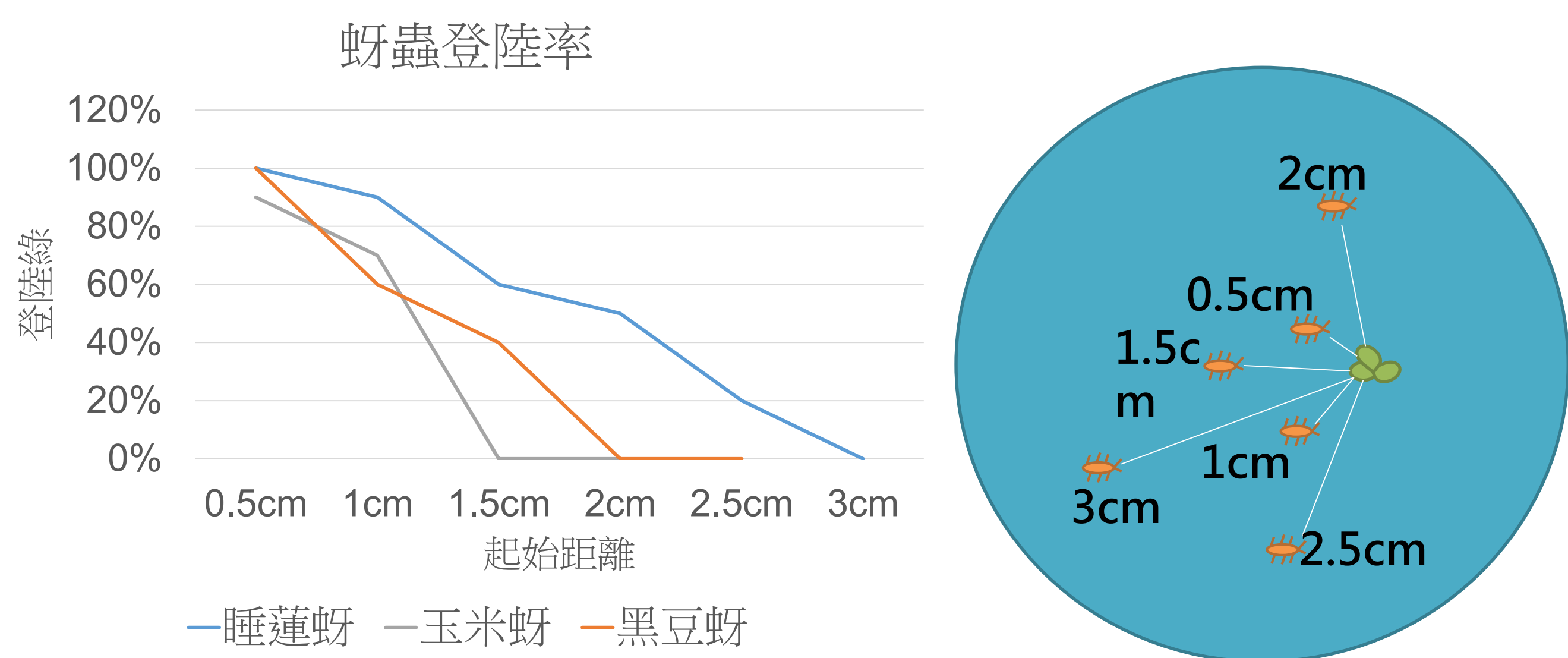
結果顯示，睡蓮蚜在半個小時之後全數移動到浮萍上，可見睡蓮蚜對浮萍的偏好性遠高過其他漂浮物。由此可知，睡蓮蚜是偏好浮萍並非只因其為漂浮物。

結果：睡蓮蚜偏好浮萍並非只因其為漂浮物

落水求生

登陸率比較

目的 驗證睡蓮蚜落水後能否再度上岸



由上圖得知睡蓮蚜能在離浮萍較遠的位置吸附上浮萍，驗證睡蓮蚜有比其他陸生蚜蟲更大的水上適應力。

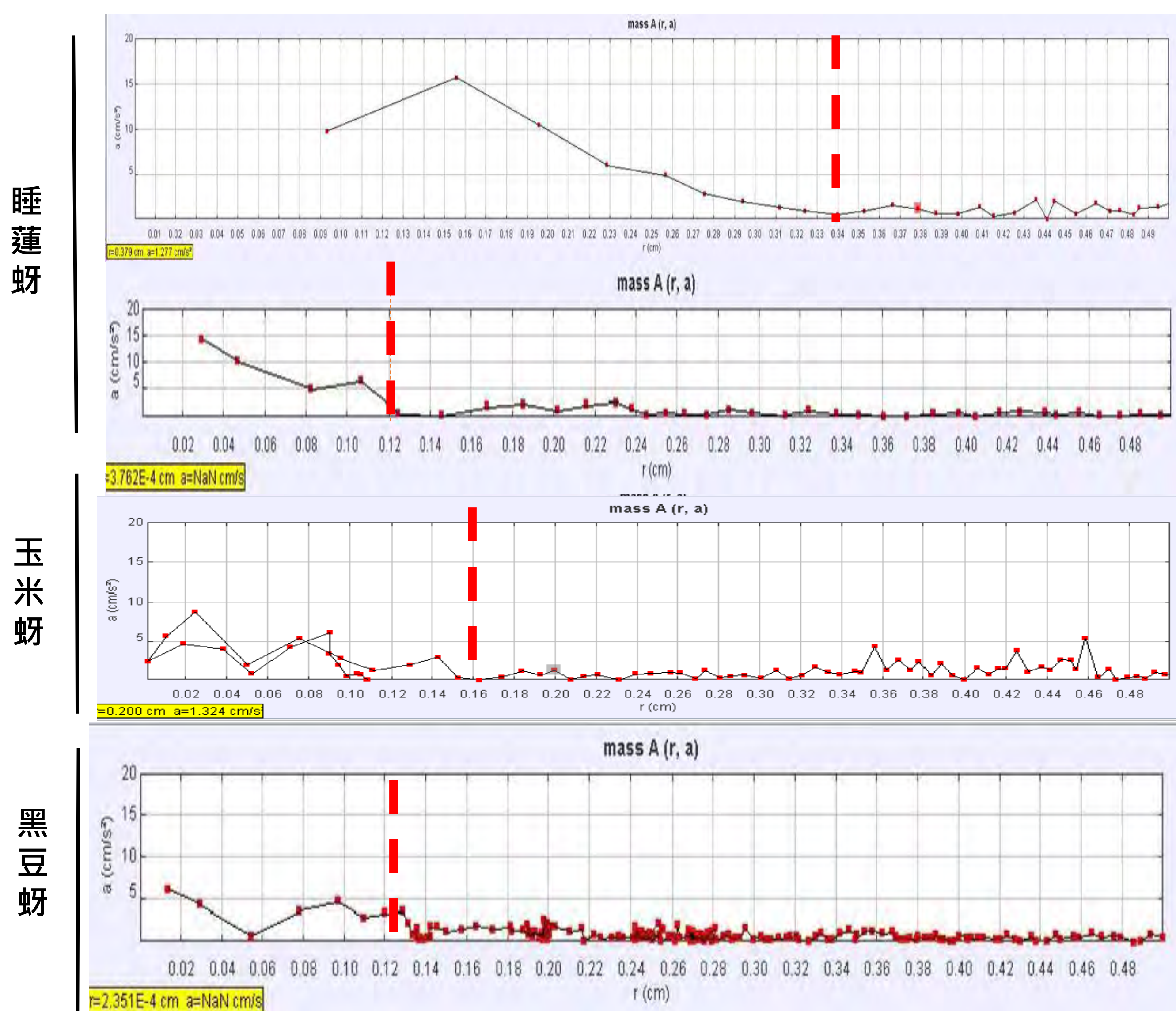
登陸時的特殊動作

目的 驗證這兩種可能是由睡蓮蚜的特殊動作造成

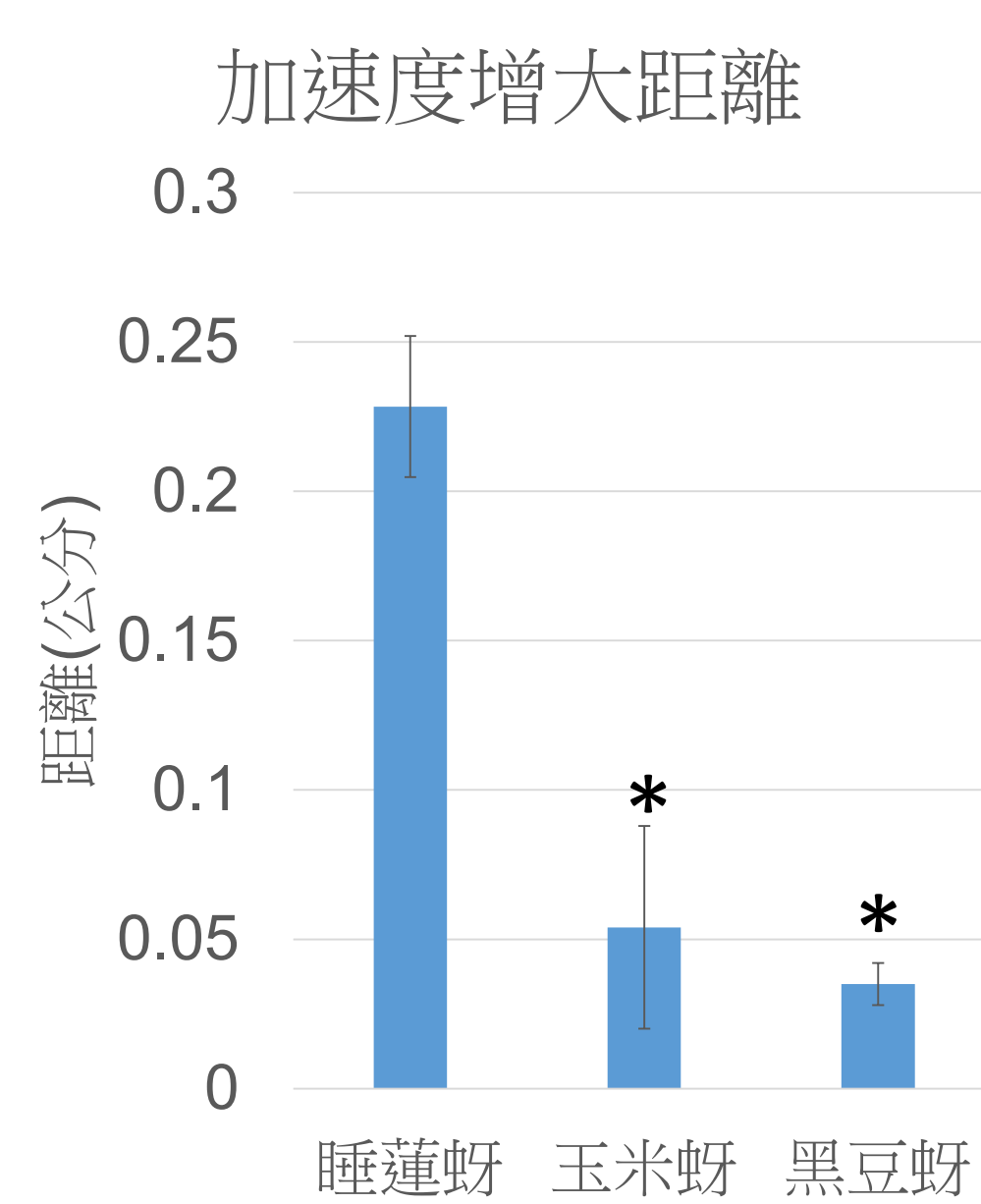


見上圖，經過多次試驗，我們觀察到當睡蓮蚜做出上述動作時，可以在距岸邊較遙遠處迅速被吸附上岸，而當牠未做出這個動作時，被吸附上岸的距離變得跟黑豆蚜和玉米蚜差不多。而此動作是由睡蓮蚜隨機作出，並非每次登岸都有，也不一定在登岸時才出現。

登陸和吸引力研究

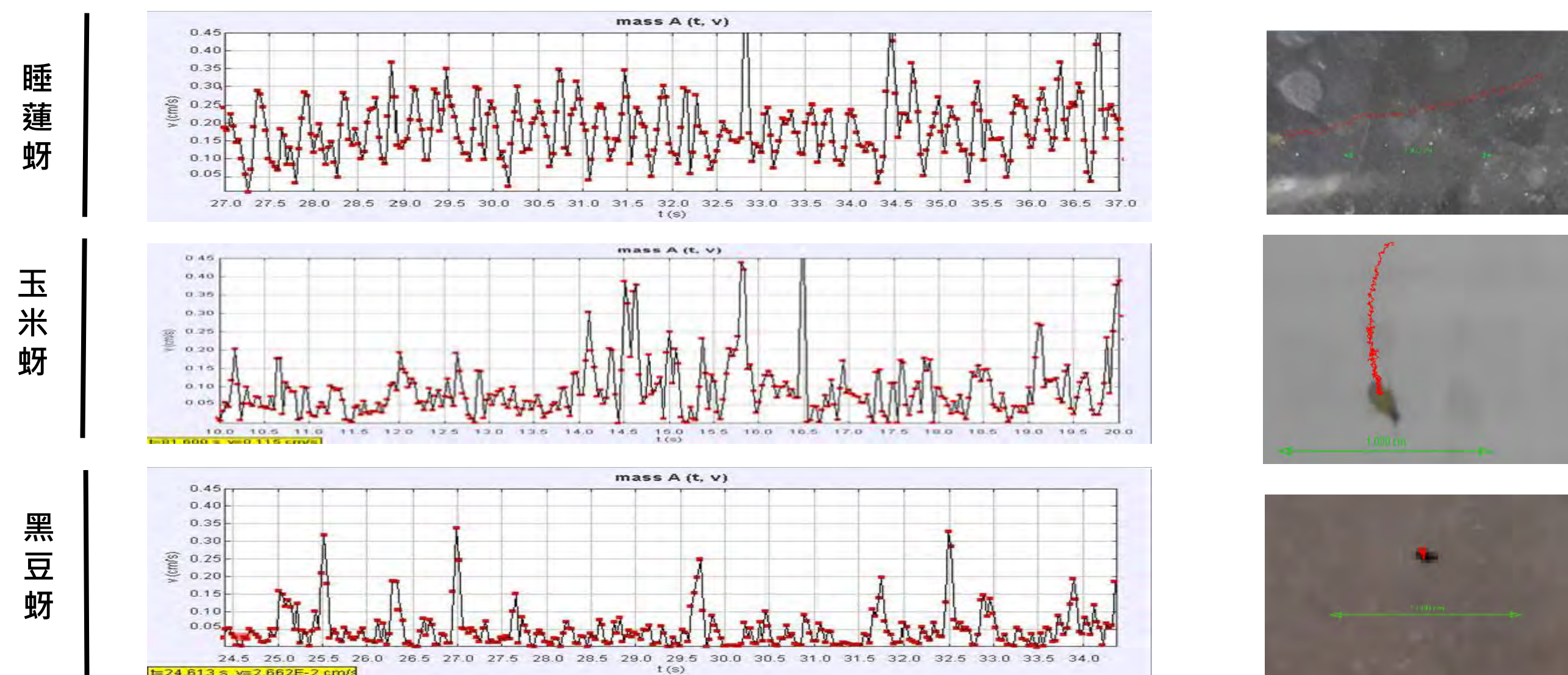


由上圖可知，黑豆蚜與玉米蚜分別在0.13公分和0.16左右產生加速度，睡蓮蚜卻有兩種可能性：有時在0.3公分左右便可產生巨大加速度，有時卻得到0.13公分左右才會有加速度。

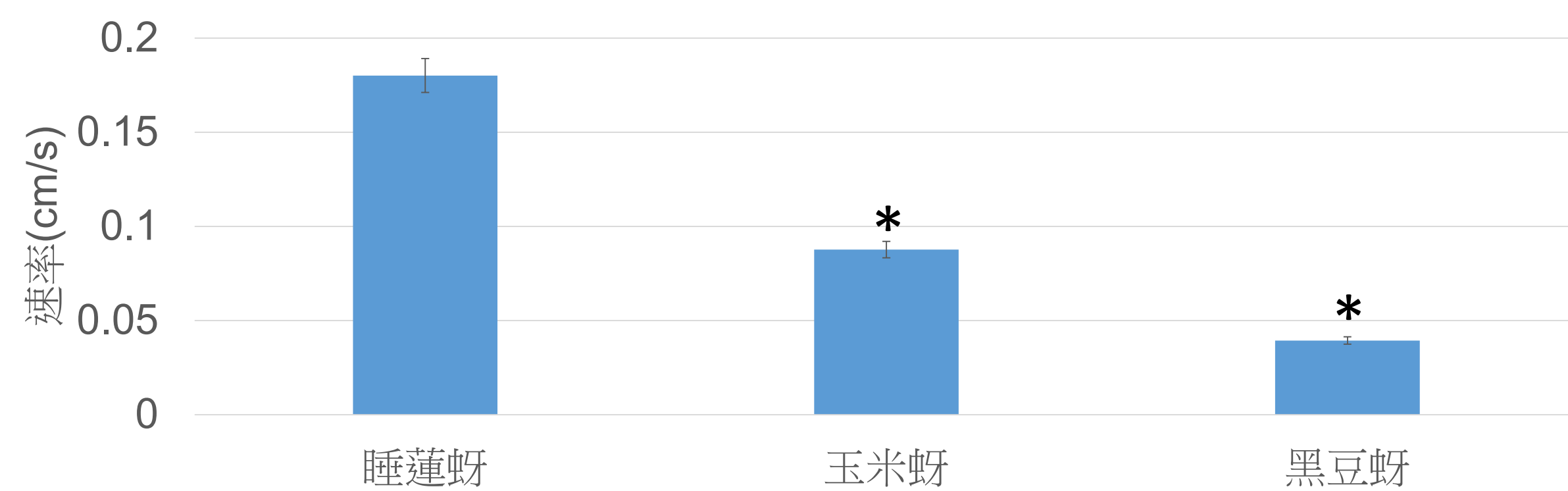


移動速率比較

目的 觀察蚜蟲的水中移動速率，分析移動能力

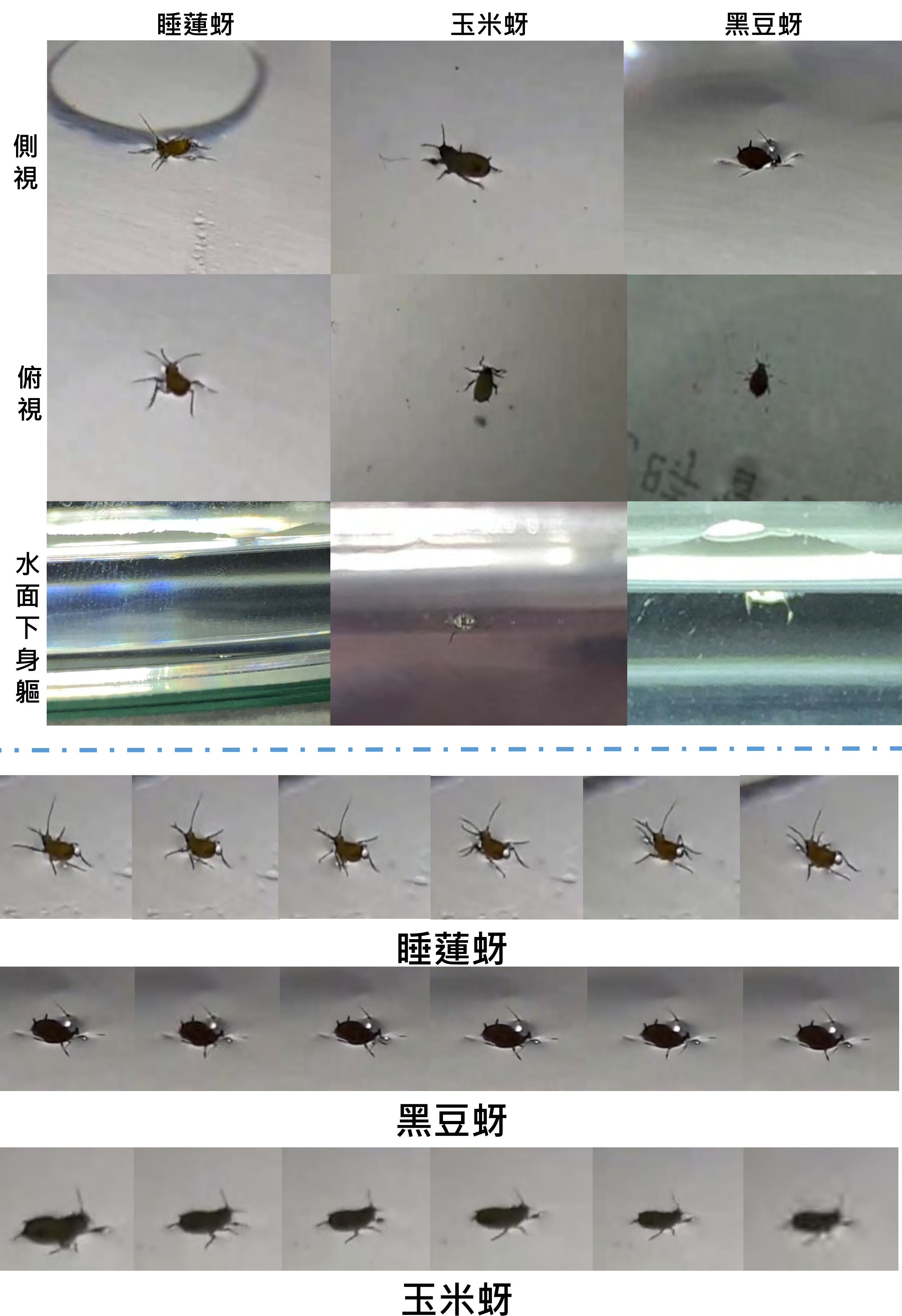


水中平均速率



水中站立姿勢與移動動作

目的 探討睡蓮蚜在水上移動的機制



結果顯示，睡蓮蚜靠六隻腳划水前進，兩邊的擺動相差半個週期，導致之前所見的左右擺盪現象。而黑豆蚜和玉米蚜只仰賴水中的第二對腳划水，卻因為水中阻力而無法產生實質的速度。

攀附浮萍的主動性和方向性

目的 驗證睡蓮蚜是否能夠感測浮萍，並主動朝浮萍方向游去。

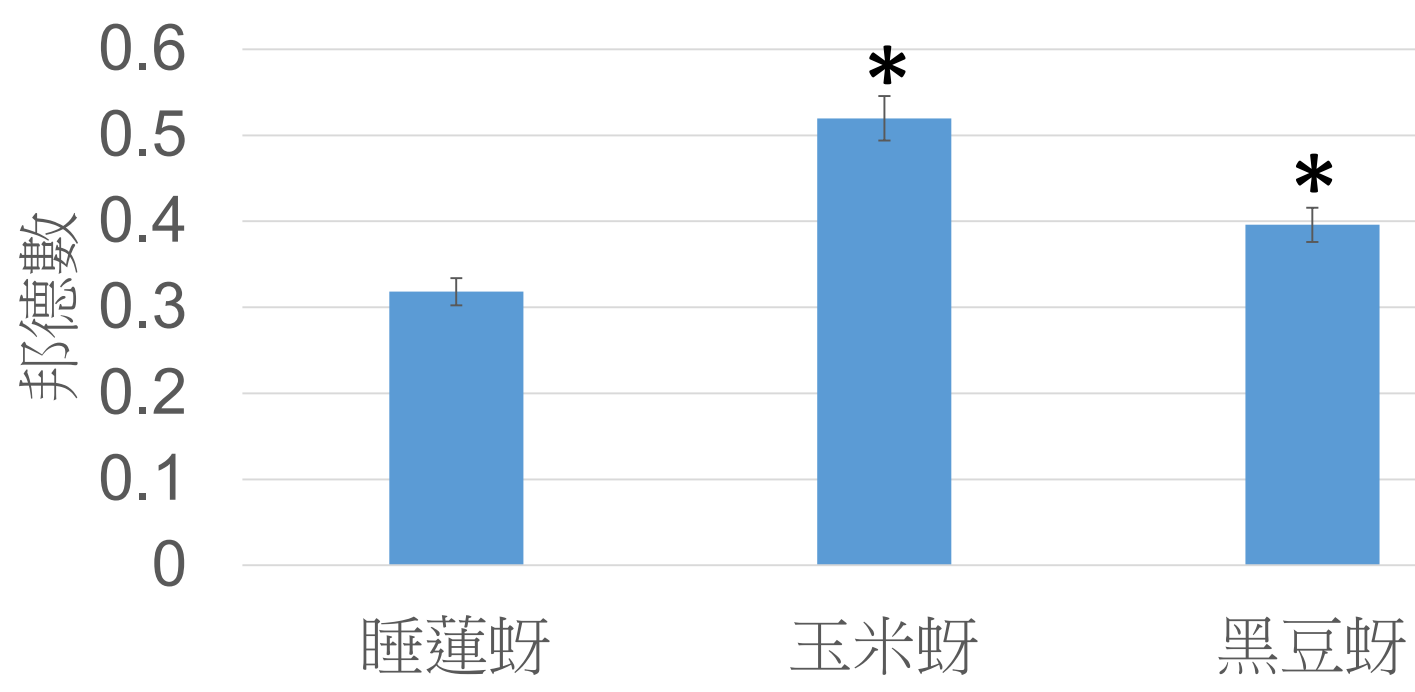
將睡蓮蚜放置於距浮萍0.5公分處，結果睡蓮蚜並不會主動游向浮萍

物理模型推導

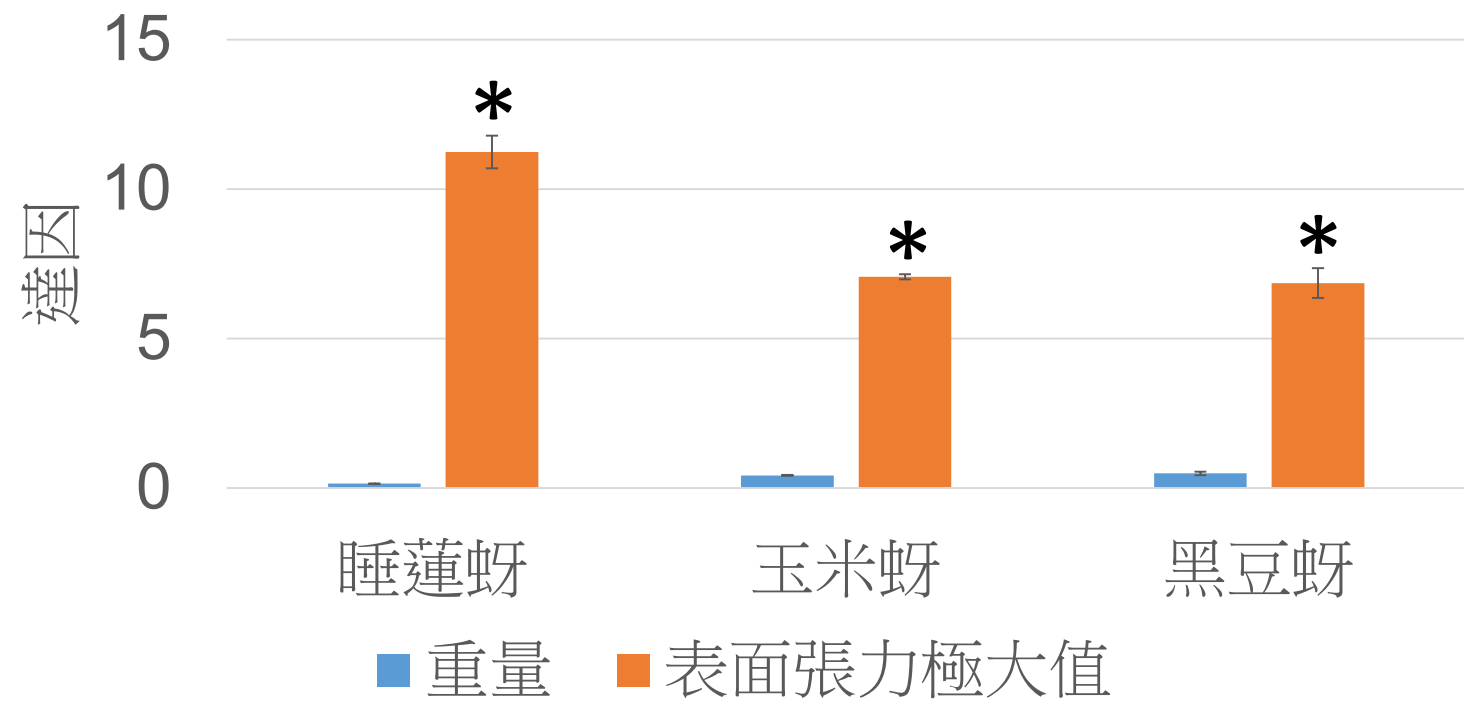
水中站立分析

定義邦德數 $Bo = \frac{\Delta\rho g L^3}{\sigma}$ ，邦德數大小表示浮體對表面張力支撐的依賴程度。而兩者的邦德數皆小於1，這表示這兩者主要仰賴表面張力 $F = 2\sigma L \sin\theta$ ，而 $\sin\theta \leq 1$ ，故單位長表面張力的量值 $\leq 2\sigma$ ，依此公式求出最大表面張力，發現三種蚜蟲的表面張力皆足以支撐自身體重，所以我們推論水中站立能力差異是動作方面演化造成。

蚜蟲最大邦德數



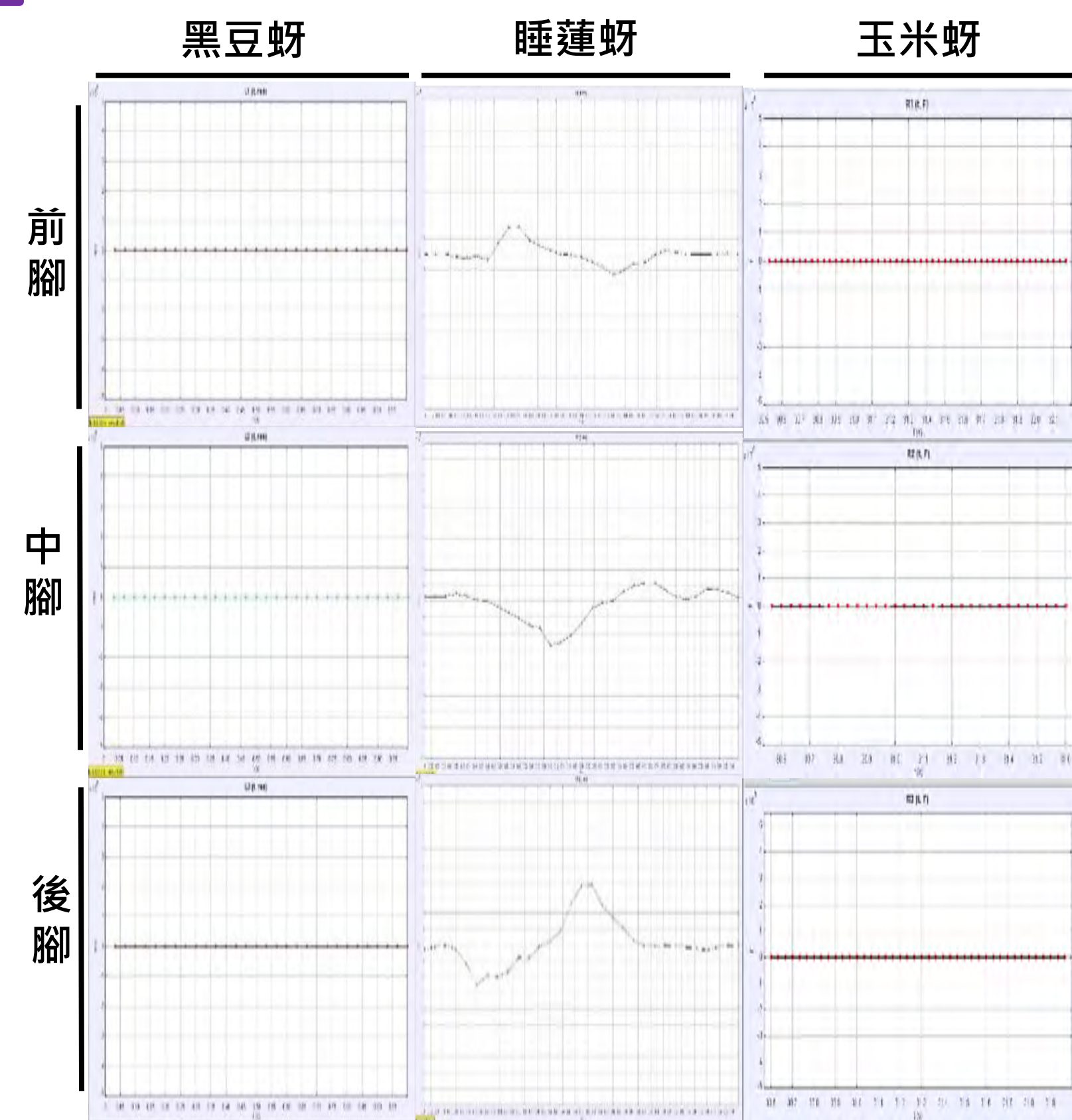
蚜蟲重量與表面張力比較



水中移動能力分析

由阻力公式： $F_D = \frac{1}{2}\rho v^2 \cdot C_D A$ ，經推導得 $F_{Dy} = -\frac{1}{6}\rho C_D w v \cdot v_y L$ 。將三種蚜蟲的 $-v \cdot v_y L$ 值利用 tracker 測量後得知睡蓮蚜的划水動作能產生足夠推力使其移動，而其餘蚜蟲的動力明顯不足。

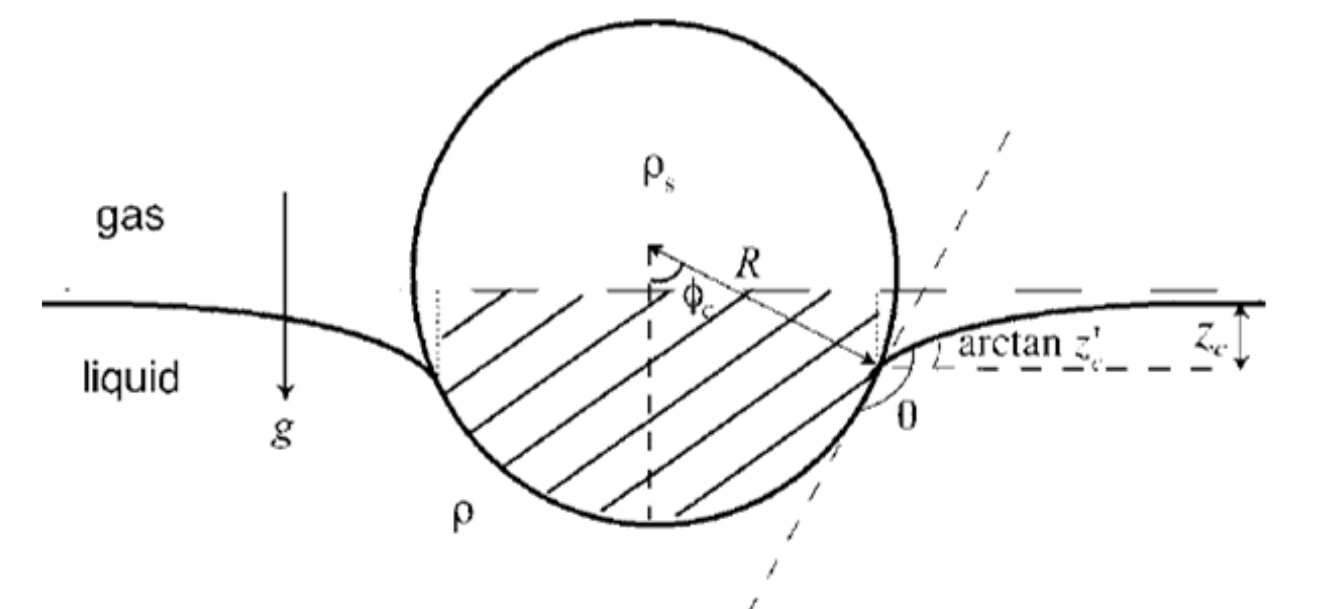
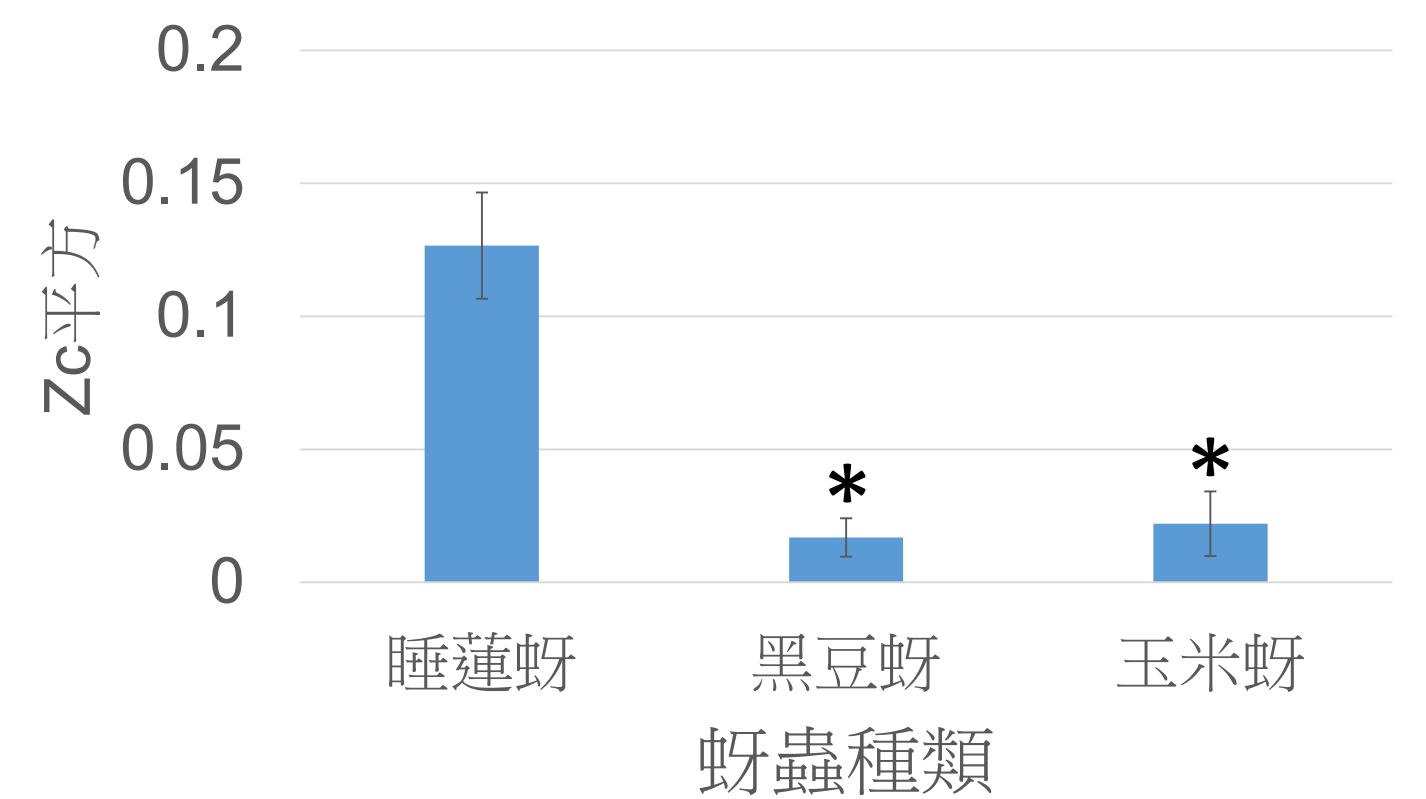
蚜蟲划水產生的推力



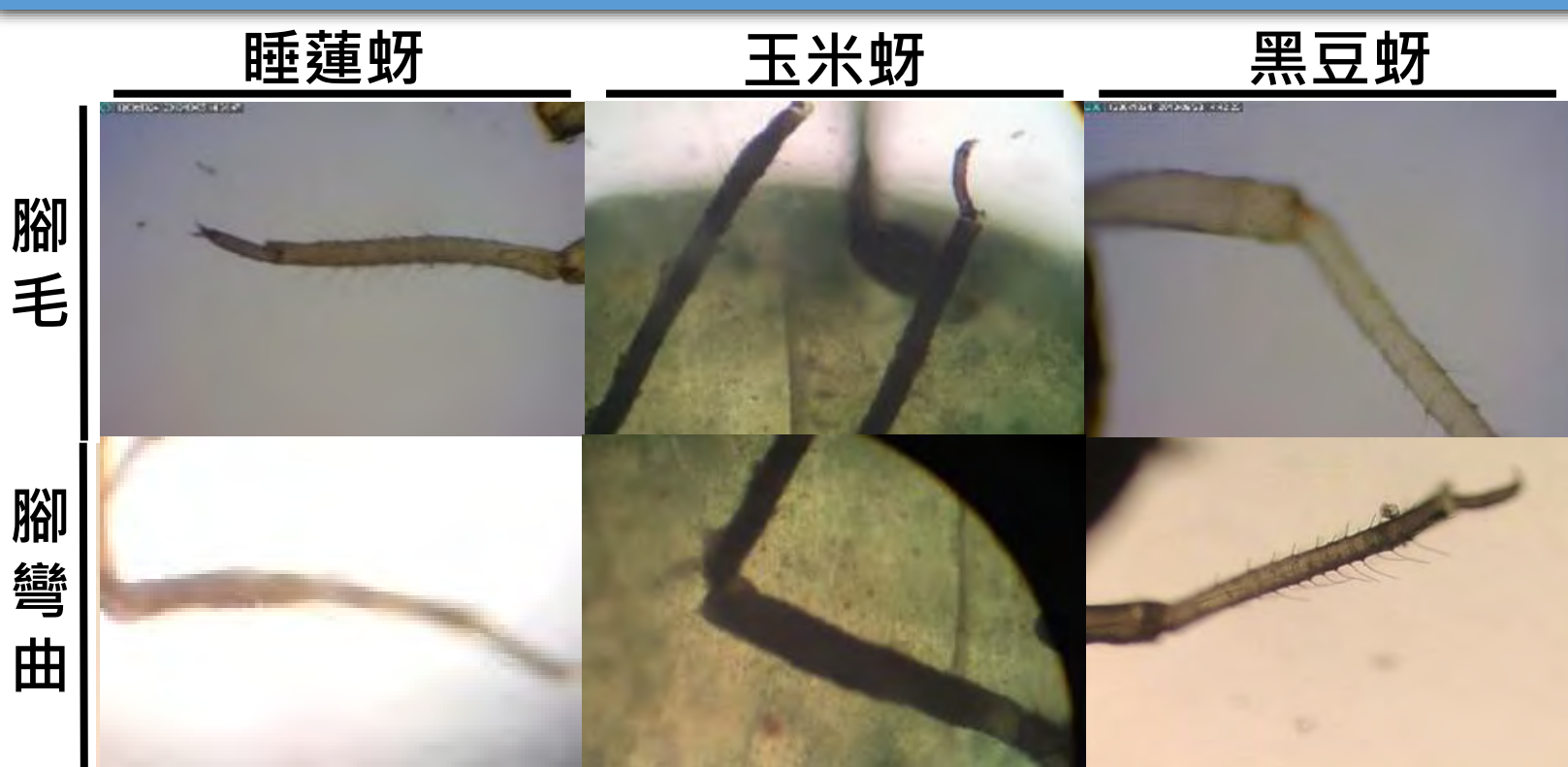
登岸能力分析

兩個水中物體的吸引力如下： $F(l) = -\frac{dE}{dl} = -\frac{\gamma}{2} Z_c'^2 \exp(-\frac{l}{L_c})$ ，觀察三種蚜蟲的腳，測量彎曲角度，推導出 $Z_c'^2$ ，而 $Z_c'^2$ 與登岸吸引力成正比，結果顯示，相對於腳部無明顯彎曲的黑豆蚜和玉米蚜，睡蓮蚜能夠在較遠的距離登岸。

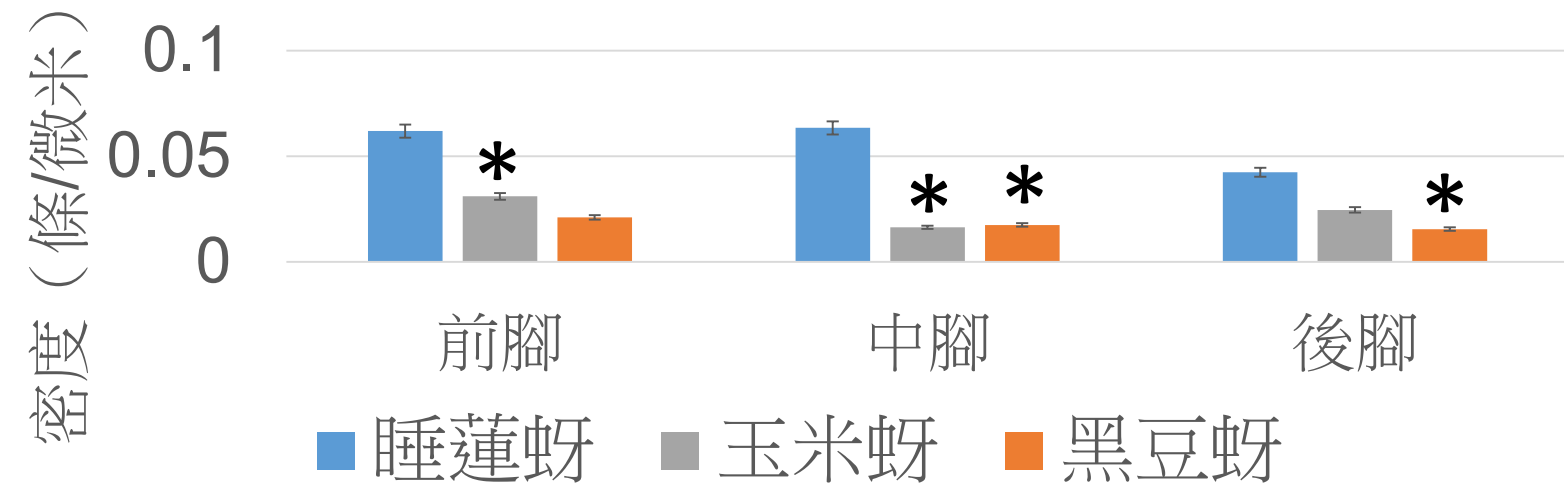
Z_c' 值的平方



腳毛密度對水中站立的影響



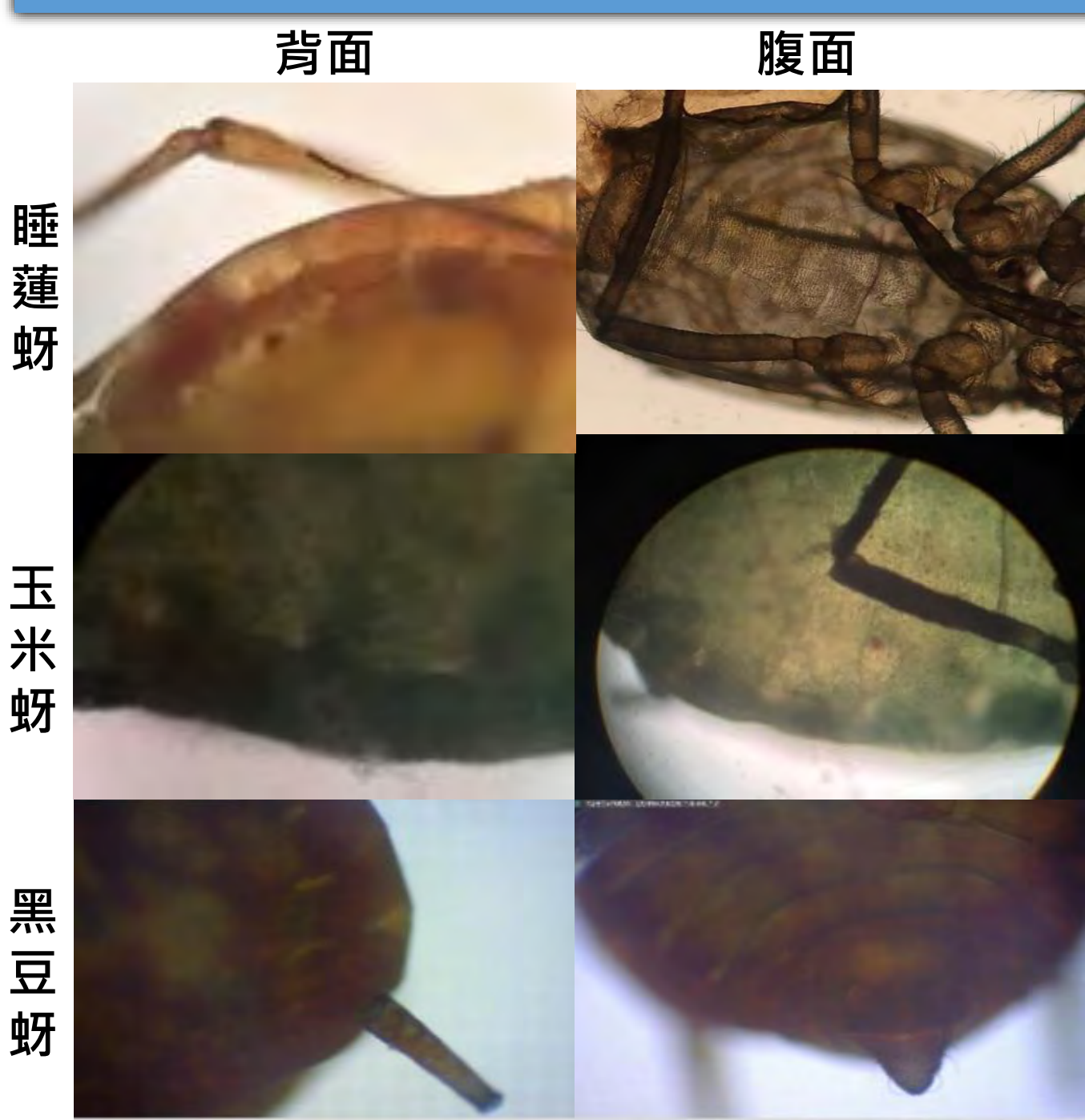
蚜蟲腳毛密度



睡蓮蚜的腳毛數量與密度使睡蓮蚜成功在水上站立

蚜蟲結構觀察

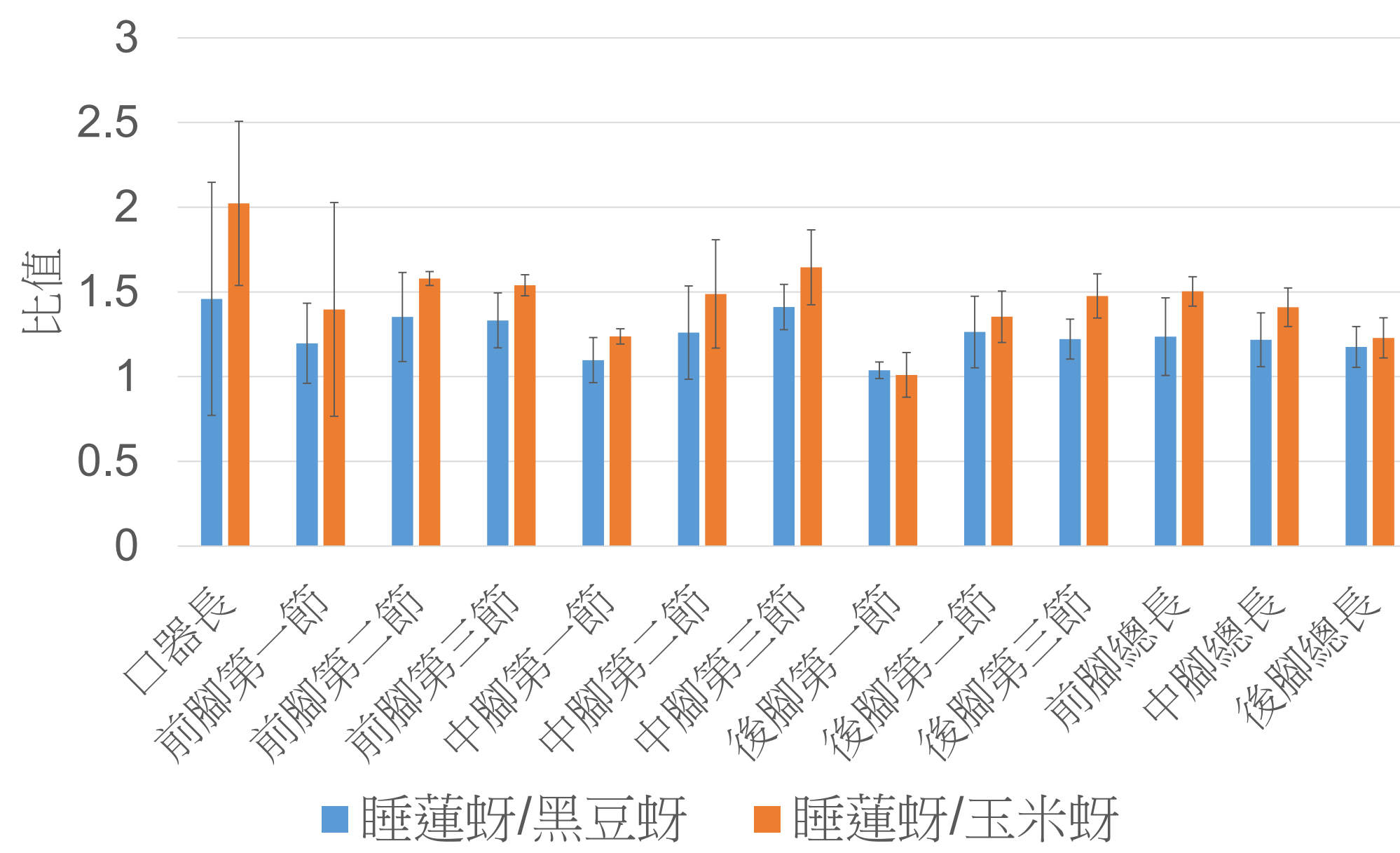
氣孔位置



睡蓮蚜腹面氣孔側移，但黑豆蚜和玉米蚜無此現象

身體結構長度比較

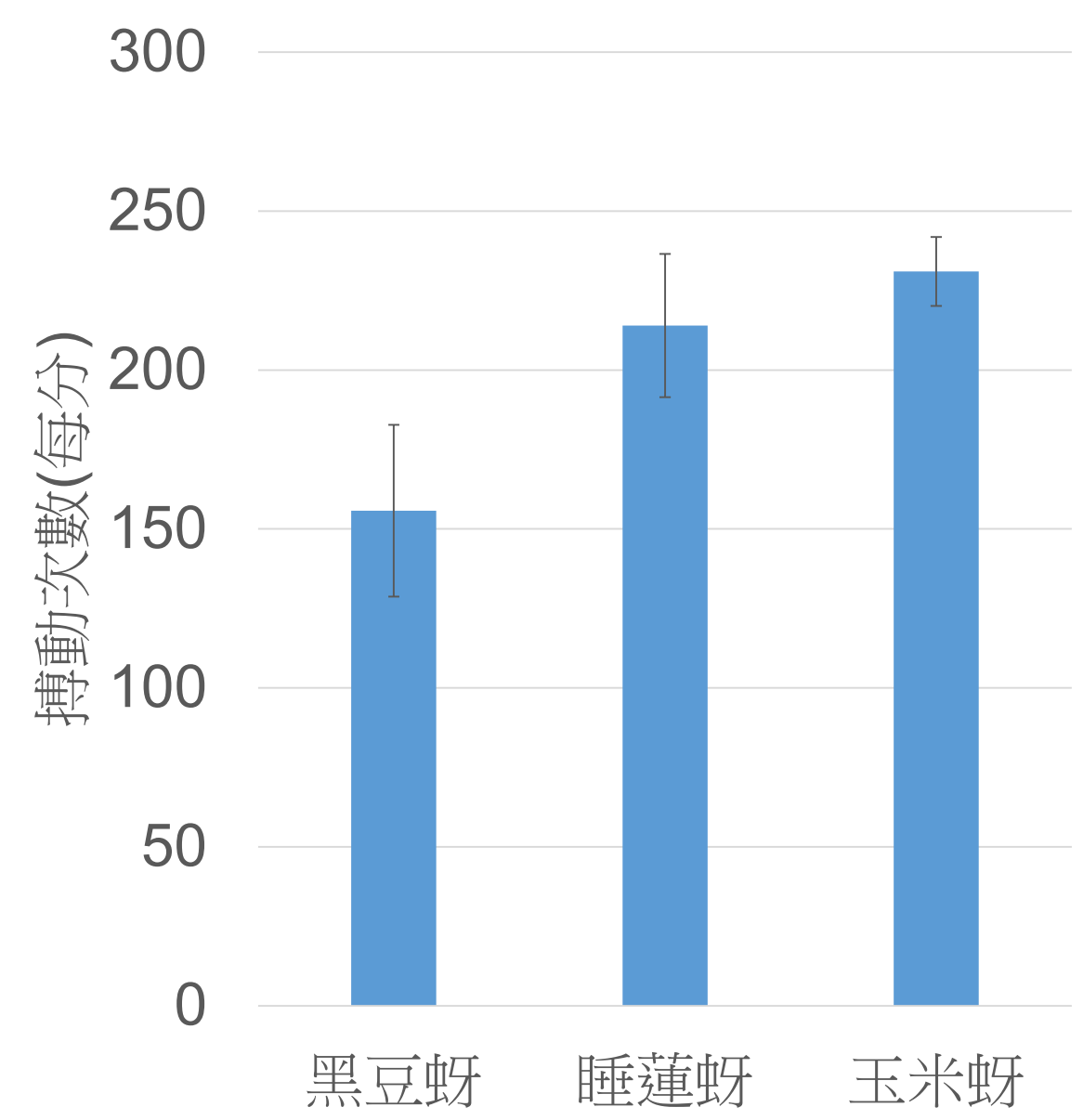
睡蓮蚜對陸生蚜蟲構造長度比值



睡蓮蚜的腳相對較長，有助於水中站立和移動

副心

蚜蟲副心搏動速率



副心構造和適應水上生活無明顯關聯

蚜蟲質量比較

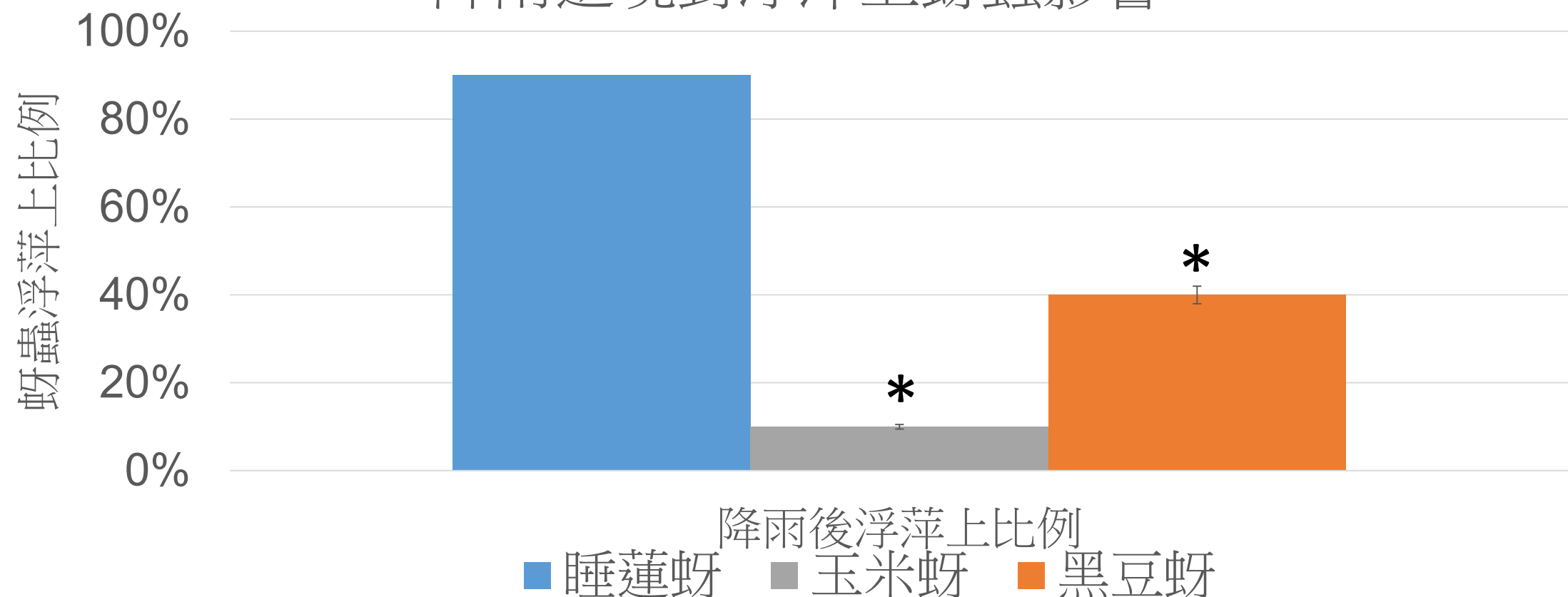
黑豆蚜和玉米蚜的質量約為睡蓮蚜的三倍，維持水中站立較困難。

逆境實驗

降水逆境

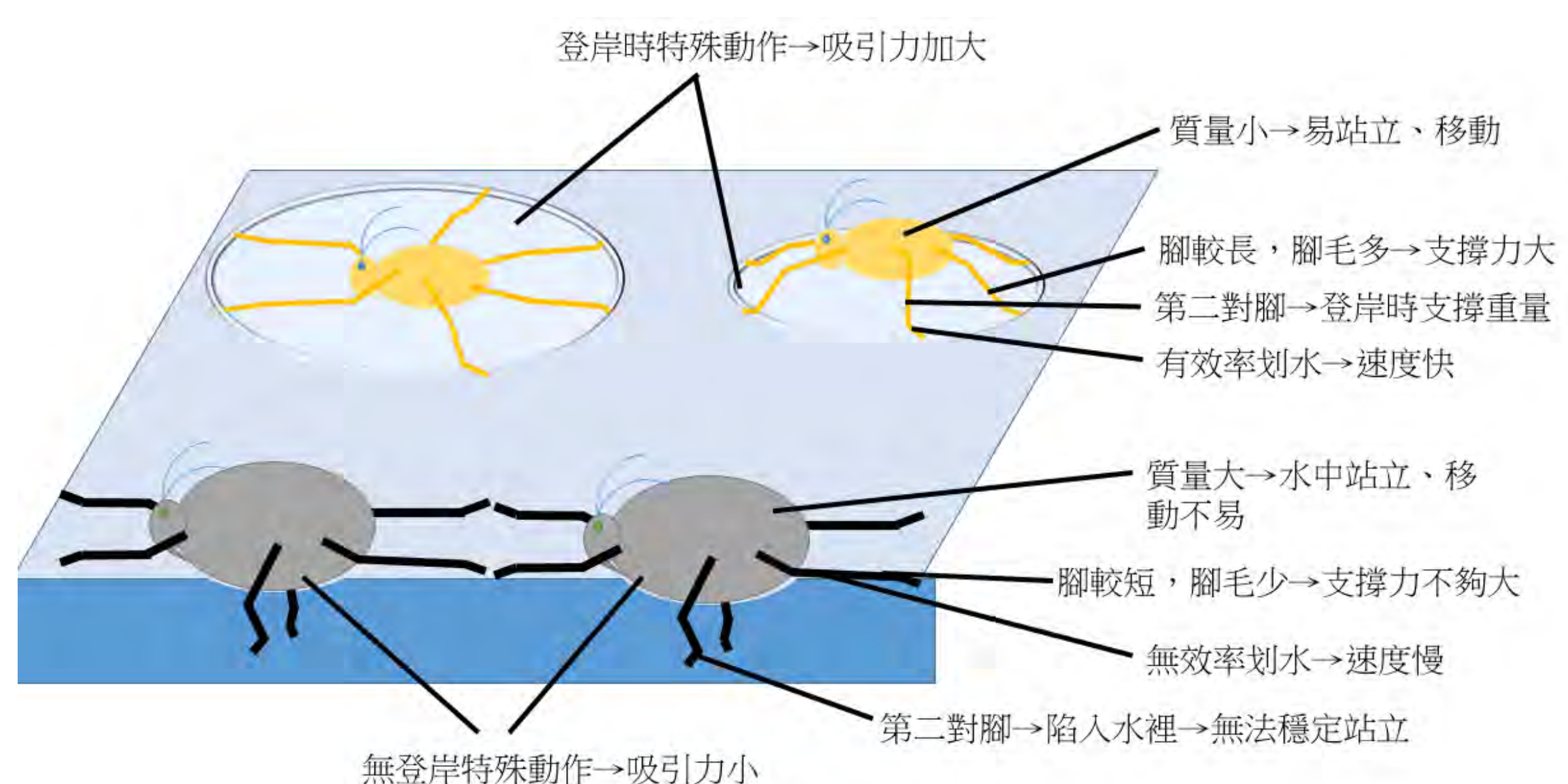
目的 比較兩種蚜蟲對抗降水逆境的能力

降雨逆境對浮萍上蚜蟲影響



結果 睡蓮蚜能夠穩定停留在浮萍上

肆、結論



伍、參考文獻

- Vella, D., Mahadevan, L. (2005). The "Cheerios effect". *American Journal of Physics*, 73(9), 817-825.
- Xue, Y., Yuan, H., Su, W., Shi, Y., Duan, H. (2014). Enhanced load-carrying capacity of hairy surfaces floating on water. *Proceedings of the Royal Society A* 470.
- Pass, G. (2000). Accessory pulsatile organs: evolutionary innovations in insects. *Annual Review of Entomology*, 45, 495-518.
- Bush, J.W.M., Hu, D.L. (2006). Walking on water: biocompensation at the interface. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 38, 339-369.
- Refki, P.N., et al. (2019). Emergence of tissue sensitivity to Hox protein levels underlies the evolution of an adaptive morphological trait. *Journal of Developmental Biology* (2014). Retrieved March 29, 2019, from <http://dx.doi.org/10.1016/j.ydbio.2014.05.021>
- Kim, H., Lee, S., Jang, Y., *Macroevolutionary Patterns in the Aphidini Aphids (Hemiptera: Aphididae): Diversification, Host Association, and Biogeographic Origins*. Retrieved March 29, 2019, from <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0024749>