

中華民國第 65 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
團隊合作獎

052005

「絲溼有幾種？」—以蜘蛛絲在環境濕度變化時的
電阻值差異來探究其生物學上的意義

學校名稱： 新北市私立金陵女子高級中學

作者： 高一 陳筱淇 高一 徐安育 高一 陳禹恩	指導老師： 楊金坤
---	------------------

關鍵詞： 蜘蛛絲、電阻值、溼度變化

摘要

本研究採用 11 種 53 隻蜘蛛的框架絲與築巢絲為材料，利用電學設備以電訊號偵測蜘蛛絲對環境濕度變化的電阻反應。實驗使用自行設計的器材與方法，將蜘蛛絲並聯後記錄其在相對溼度 40%至 90%的區間內的電阻值變化並作圖分析。結果發現所有蜘蛛絲在低濕度時電阻值都偏高，直到絕對溼度在 10 g/m^3 左右電阻才會開始下降。由實驗所得的數據發現不同種類蜘蛛絲的「電阻－溼度趨勢圖」都不同，此結果說明同為蛋白質材質的蜘蛛絲，在親緣關係相近的蜘蛛中，其蜘蛛絲的電阻特性與濕度反應也有很大的種間差異。希冀本實驗結果能對未來仿生學與生態演化生物學議題上，如蜘蛛絲在環境感測之應用與蜘蛛絲蛋白質特性之演化等相關研究做出貢獻。

壹、前言

一、研究動機

大家印象中的蜘蛛多半是靠織網捕食的織網型蜘蛛，但我們有次去郊遊時，卻突然發現到有些蜘蛛沒有乖乖在角落織網，而是滿地到處跑，詢問老師才知道這是不用靠織網來捕食的遊獵型蜘蛛。我們更進一步地查詢相關資料，發現兩種蜘蛛最大的不同在於捕獵方式和網的作用。織網型蜘蛛是靠織網來捕食；遊獵型蜘蛛則是會到處移動尋找獵物，雖然牠們不靠織網捕食，卻會織網來築巢、護幼。這時，我們突然想起了之前看到的一篇新聞中寫到，蜘蛛絲會因帶電使蜘蛛”飛”起來。感到好奇的我們想要深入了解，便去查閱了相關的文獻，結果發現蜘蛛絲真的會帶電（Morley & Robert, 2018）。在得知蜘蛛絲真的帶電之後，我們開始著手設計實驗想要驗證蜘蛛絲帶電這件事，首先採集了常見的擬幽靈蜘蛛絲來測試它對電訊號的反應，結果證實蜘蛛絲確實有電訊號變化，之後又引起我們的發想「每一種的蜘蛛絲都有電反應嗎？」於是我們挑選了幾種學校附近常見的蜘蛛絲來進行導電度（電阻）測試，看看牠們蜘蛛絲對電訊號的反應是否都一樣？實驗進行期間意外發現不同的溼度竟然會使蜘蛛絲的導電度發生變化！觀察到此現象後，我們便開始進行一連串的實驗，發現在溼度變化的情況下，各種蜘蛛絲的測試結果各不相同，蜘蛛絲主要由蛋白質所組成，因此我們猜想是否是因為各種蜘蛛在演化的過程中，因為各種因素而使各自的蜘蛛絲組成有了差異，進而影響了蜘蛛絲的電阻值，為了解答疑惑，我們決定進行更多的實驗，測試不同類型的蜘蛛絲在環境溼度變化時的電阻值差異，並嘗試探究其生物學上的意義。

二、目的

- (一) 測量並記錄織網型蜘蛛絲及遊獵型蜘蛛絲在不同溼度下其電阻的變化數值。
- (二) 製作分析織網型蜘蛛絲及遊獵型蜘蛛絲「電阻－溼度趨勢圖」的差異。
- (三) 探究織網型蜘蛛絲及遊獵型蜘蛛絲趨勢圖變化特性在生物學上的意義。

三、文獻回顧

(一) 蜘蛛與蜘蛛網的介紹

蜘蛛在分類上是屬於動物界（Animalia）、節肢動物門（Arthropoda）、蛛形綱（Arachnida）、蜘蛛目（Araneae）。其身體構造由頭胸部與腹部組成，頭胸部具有觸肢一對、步足四對，眼睛為多個單眼組成；腹部有書肺、生殖器開口位在基部，三對絲疣在尾端，各種蜘蛛絲就是從絲疣抽出形成，蛛絲蛋白以液態儲存在蜘蛛的絲腺中，經歷一系列物理和化學變化，觸發它們自組裝形成固體的絲纖維，這些物理化學變化包括 pH 值降低、離子強度增加以及蜘蛛噴絲頭施加的剪力與應力（Chang, 1998）。目前發現全世界蜘蛛的種類約有 5 萬多種，若以生態習性而言大致可分為二類，即織網型蜘蛛與遊獵型蜘蛛。織網型蜘蛛會織網來捕食獵物；遊獵型蜘蛛則不會織網，而是以四處遊走或就地偽裝的方式來捕食獵物。目前已知的織網型蜘蛛約有 2 萬種，織網型蜘蛛的蜘蛛網是由各種不同性質的各種蜘蛛絲所組成，主要有軸絲、框架絲和螺旋絲 3 種（李，1964）（圖 1-1）。

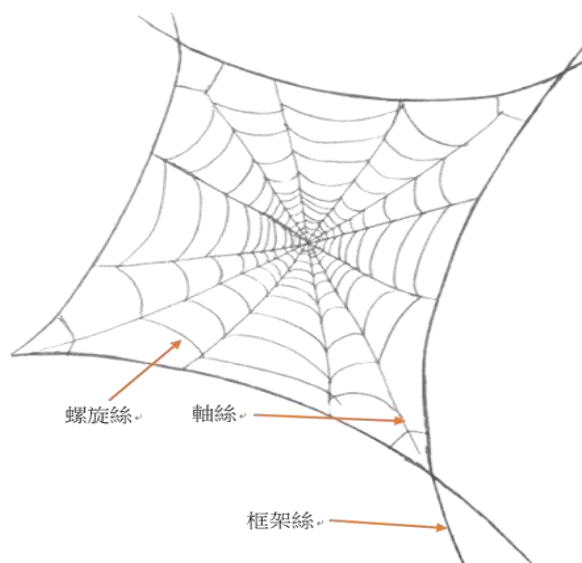


圖 1-1 蜘蛛網的基本架構
（圖由第三作者繪製）

我們實驗的蜘蛛有捕鳥蛛科（Tarantula）、金蛛科（Araneidae）、肖峭科（Tetragnathidae）、幽靈蛛科（Pholcidae），以下是實驗的 11 種蜘蛛的親緣關

係圖，此圖根據 Evolutionary Analysis (Herron & Freeman, 2014) 的方法繪製而成 (圖 1-2)。

(二) 蜘蛛網的化學物質成分

蜘蛛絲是一種出色的纖維生物材料，幾乎完全由蛋白質組成，絲纖維的拉伸強度與鋼相當。目前已知蜘蛛框架絲主要由 *Major Ampullate Spidroin 1(MaSp1)* 此基因的產物所組成 (Xu & Lewis, 1990)，*MaSp1* 基因產生的蛋白質 β -sheet 結構正是框架絲的彈性來源 (Winkler & Kaplan, 2000)。蜘蛛絲主要由大量非極性和疏水性氨基酸所組成，其中甘氨酸約占 40%、丙氨酸約占 20%，蛛絲蛋白含有高度重複的胺基酸序列，重複序列通常佔整個蛛絲蛋白的 90% 以上，由約 10~50 個氨基酸的短多肽鏈組成，這些基本序列可以在一個單獨的蛋白質中重複一百多次。因此，每個多肽重複序列都具有獨特的功能特徵，從而導致蜘蛛絲具有出色的機械性能 (Römer & Scheibel, 2008)。蜘蛛會分泌由含有 β -sheet 之結構蛋白質構成的絲纖維，這讓蜘蛛網可以伸展和彈回， β -sheet 位於彼此平行排列的兩個多肽鏈區域中，平行區域之間的氫鍵會把結構給維繫住 (Cambell *et al.*, 2021)。

(三) 功能化蜘蛛絲物理特性：電子和感測特性

根據文獻，蜘蛛絲絲纖維的導電率在相對溼度大約 35% 之前其導電率都偏低，在這之後隨著相對溼度的上升，導電率會開始穩定地呈現線性下降 (圖 1-3)，環境溼度的增加會造成框架絲的超收縮，進而造成框架絲長度的變化。框架絲優異的力學性能會產生強大的拉力，改變成拱形的彎曲度 (Steven *et al.*, 2011)。

在研究完這些文獻後，我們開始發想：「如果利用天然蜘蛛絲來實驗，是否能從不同蜘蛛絲的電訊號差異來辨別不同種類的蜘蛛」？於是我們便開始設計實驗。

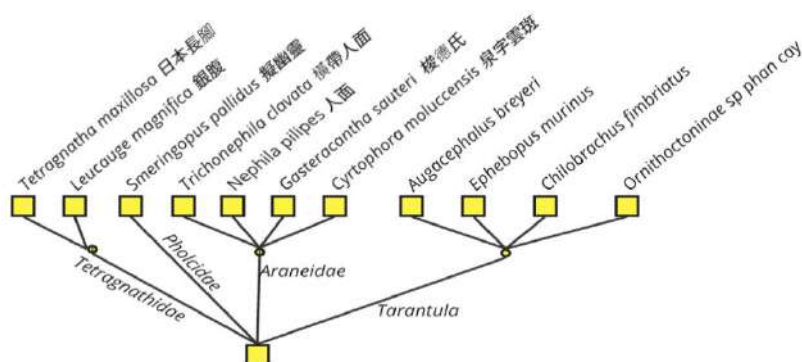


圖 1-2 蜘蛛親緣關係圖
(圖由第三作者繪製)

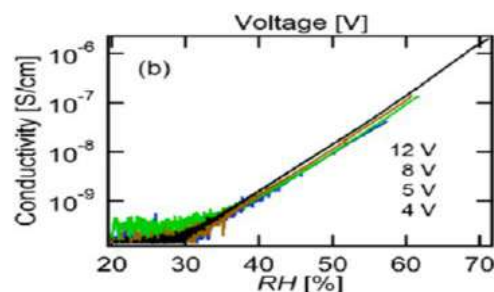


圖 1-3 蜘蛛絲纖維的相對溼度與導電率的關係圖
(圖引用自 Steven *et al.*, 2011)

貳、研究設備及器材



圖 2-1 除溼乾燥劑



圖 2-2 銅箔（測蜘蛛絲導電性用）



圖 2-3 蜘蛛絲測試壓克力座



圖 2-4 噴霧加溼器



圖 2-5 溫溼度計（TES1260）



圖 2-6 電阻測試儀（Hioki LCR meter IM3523）



圖 2-7 筆電



圖 2-8 複式顯微鏡

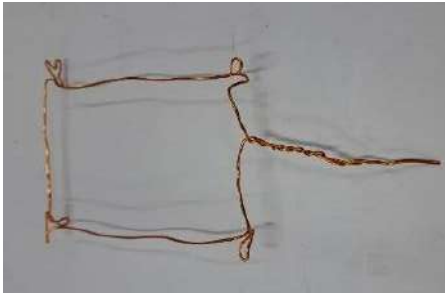


圖 2-9 蜘蛛絲採集器

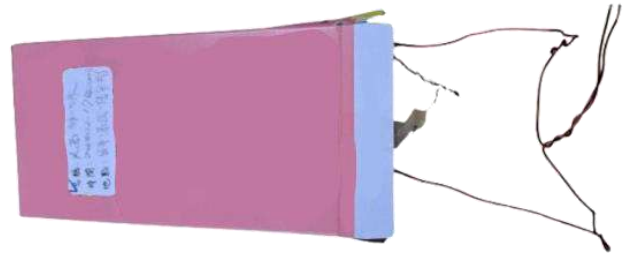


圖 2-10 蜘蛛絲採集器收納盒



圖 2-11 溼度加溼壓克力測試箱



圖 2-12 加溫燈泡



圖 2-13 攝影機

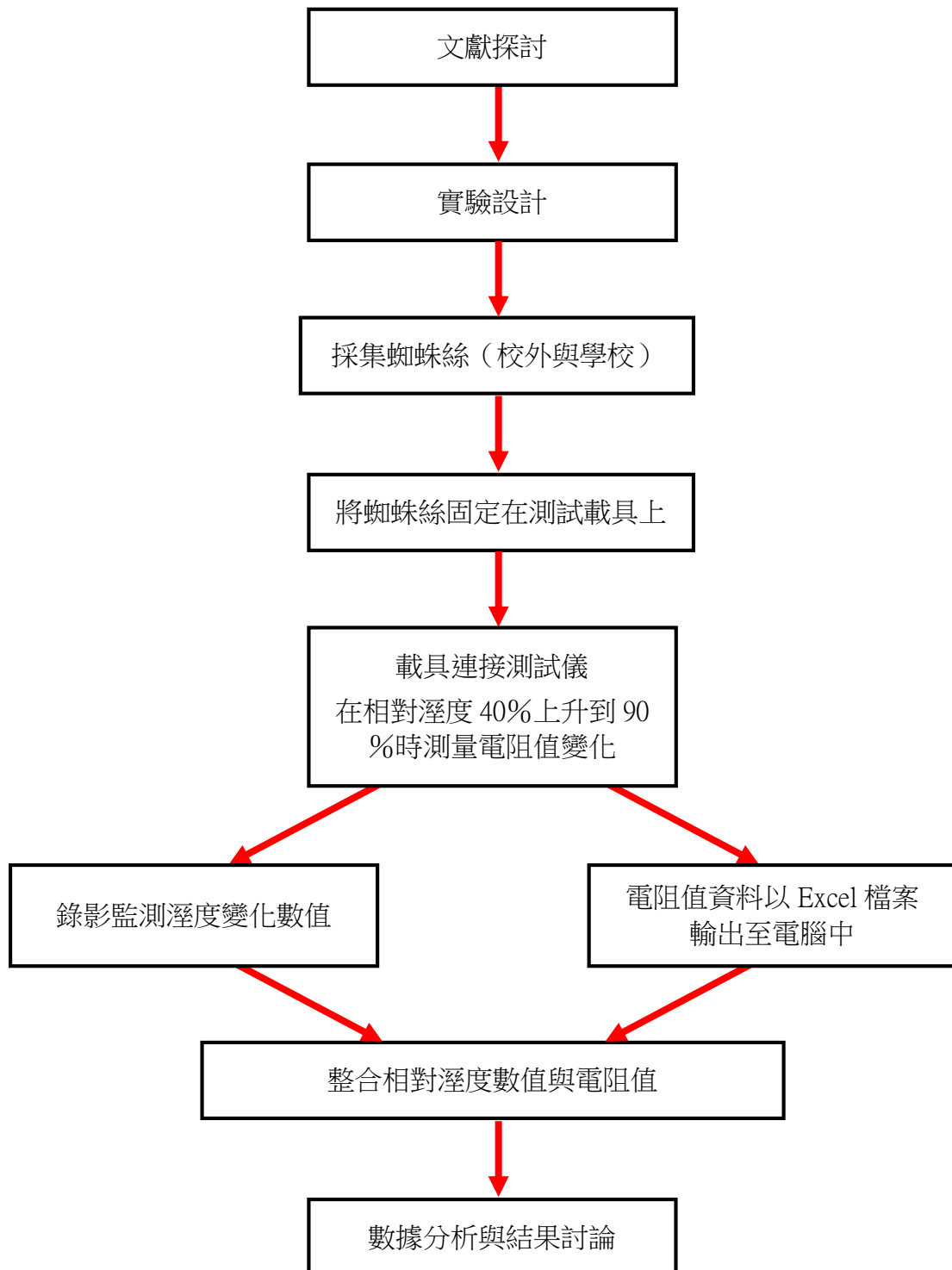


圖 2-14 除溼中的壓克力箱

(以上照片皆由第三作者拍攝)

參、研究過程或方法

一、實驗流程圖



二、實驗設計與進行步驟

(一) 實驗壓克力設計

1. 溼度測試箱

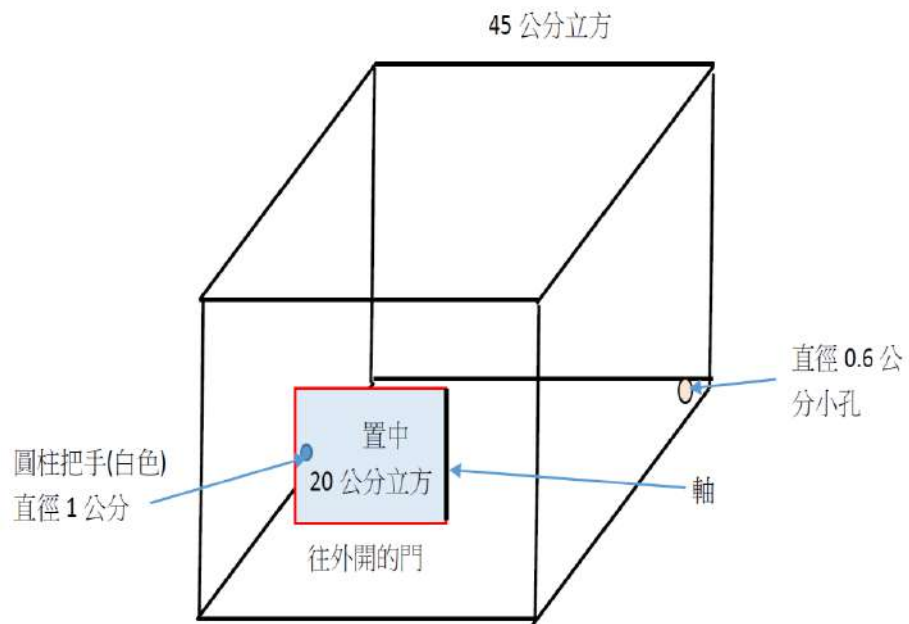


圖 3-1 溼度測試箱設計圖 (圖由第二作者繪製)

2. 蜘蛛絲測試壓克力載具設計

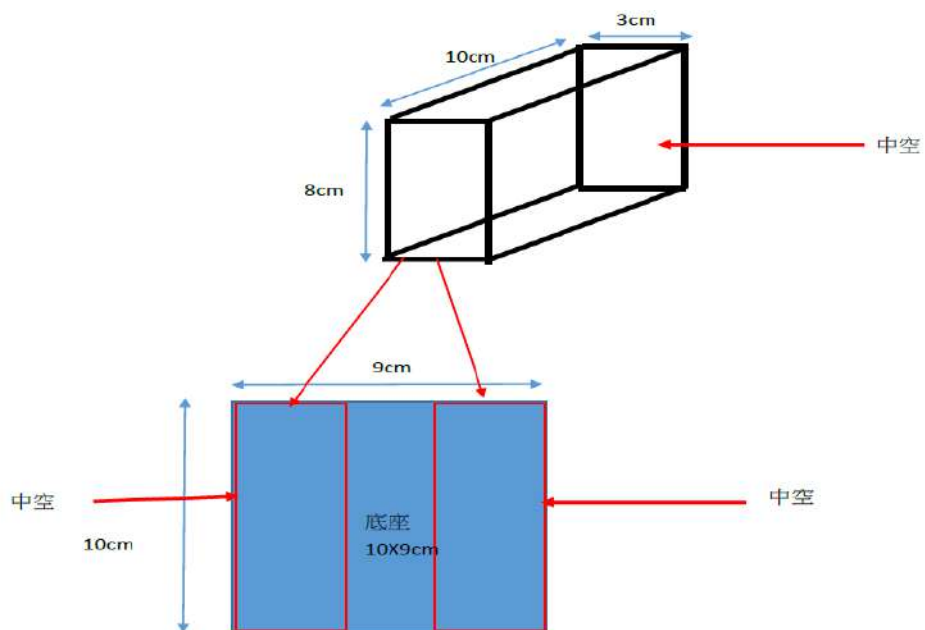


圖 3-2 蜘蛛絲測試壓克力載具設計圖 (圖由第一作者繪製)

(二) 蜘蛛絲電阻測試載具

1. 蜘蛛絲電阻測試載具上視圖

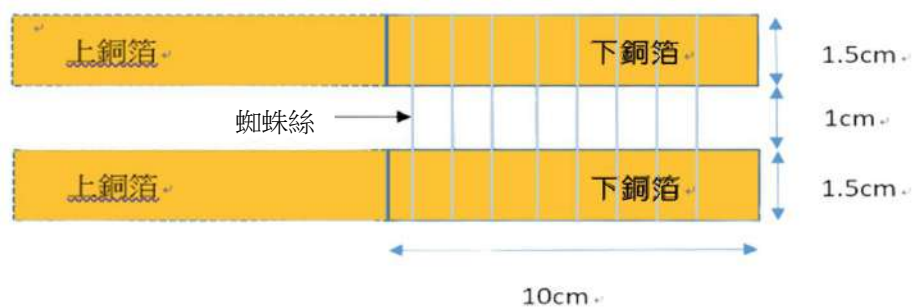


圖 3-3 蜘蛛絲電阻測試載具上視圖（圖由第二作者繪製）

2. 將上銅箔對折讓上下銅箔緊壓蜘蛛絲再夾上燕尾夾上視圖

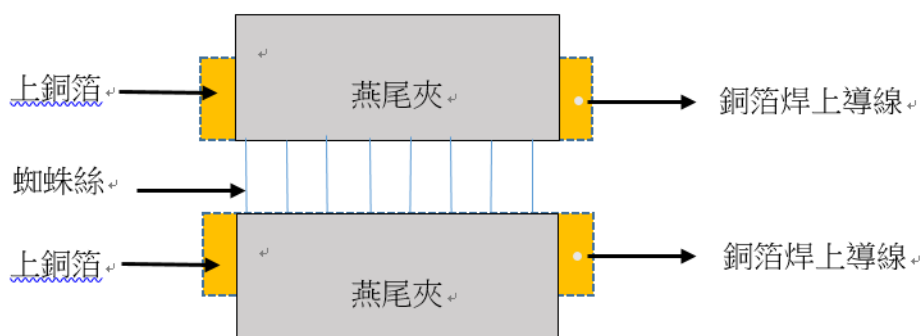


圖 3-4 蜘蛛絲電阻測試載具夾上燕尾夾上視圖（圖由第二作者繪製）

(三) 壓克力箱內整體測試圖（上視圖）

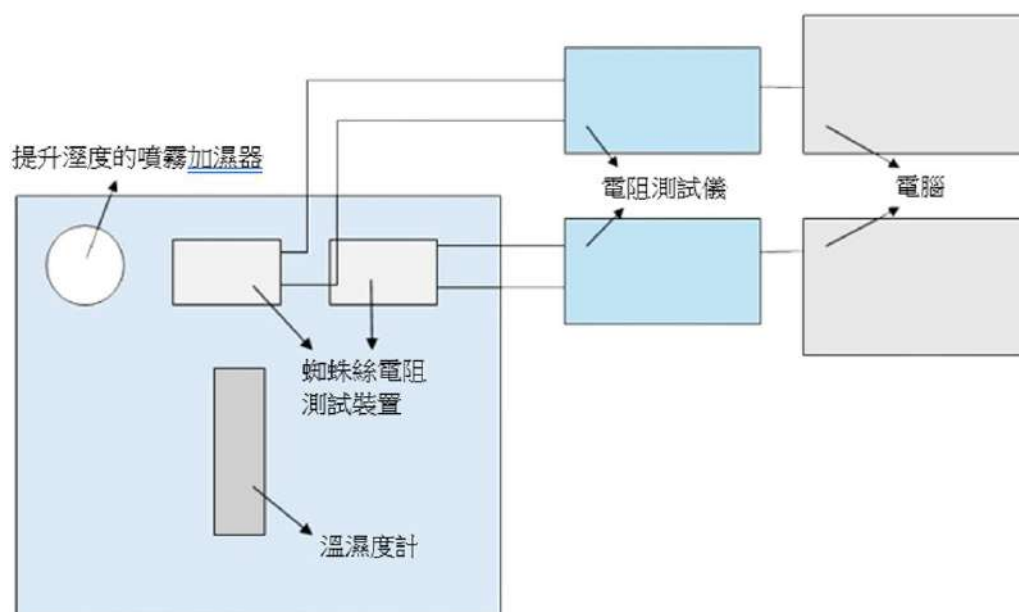


圖 3-5 壓克力箱內整體測試圖（圖由第二作者繪製）



圖 3-6 壓克力箱內整體測試照片（照片由第一作者拍攝）

（四）進行步驟

為了測試蜘蛛絲電阻值對溼度的變化率，我們訂製兩個 45cm×45cm×45cm 壓克力箱（圖 2-11、圖 3-1）用來容納實驗裝置，也訂製多座蜘蛛絲電阻值測試座（圖 2-3、圖 3-2）用來放置蜘蛛絲，將測試絲長全部設定為 1 公分（圖 3-3），使用導電的銅箔緊壓蜘蛛絲後再以燕尾夾固定（圖 3-4），將裝置好的測試座放入壓克力箱中，並在箱內放置噴霧式加溼器（圖 2-4），由相對溼度 40% 開始加溼，整體實驗測試配置如圖 3-5、圖 3-6 所示。使用 LCR 電阻測試儀（圖 2-6）在相對溼度 40%~90% 區間內記錄不同時間的溼度與電阻值數據，將資料輸出至筆電（圖 2-7）來做數據分析。詳細做法如下：

1. 採用莫桑比克黃金巴布(*Augarephalus breyeri*)、印度櫻毛蛛(*Chilobrachys fimbriatus*)、骨骼狼蛛(*Ephebopus murinus*)、幻影樹老虎捕鳥蛛(*Ornithoctoninae sp.phan cay*)等 4 種遊獵型蜘蛛的織巢絲，上述遊獵蛛屬於大型蜘蛛，非台灣原生物種，實驗用蛛絲取自養殖個體。織網型蜘蛛選取擬幽靈蜘蛛（*Smeringopus pallidus*）（圖 3-7）、人面蜘蛛（*Nephila pilipes*）（圖 3-8）、橫帶人面蜘蛛（*Trichonephila clavata*）（圖 3-9）、銀腹蜘蛛（*Leucauge magnifica*）（圖 3-10）、日本長腳蜘蛛（*Tetragnatha maxillosa*）（圖 3-11）、泉字雲斑蜘蛛（*Cyrtophora moluccensis*）（圖 3-12）、梭德氏棘蛛（*Gasteracantha sauteri*）（圖 3-13）7 種織網型蜘蛛的框架絲，**共計 11 種 53 個個體**的蜘蛛絲為材料，每次測試取**同種同個體**的蜘蛛絲 8 條來做測試（圖 3-21），記錄其在相對溼度 40%~90% 的電阻變化，共計 53 次，目前八種測試配置狀況如下：

測試一：測試 8 條並聯的遊獵型蜘蛛絲，共 4 種 5 個不同個體。

測試二：測試 8 條並聯的擬幽靈蜘蛛絲，共 9 個同種不同個體。

測試三：測試 8 條並聯的人面蜘蛛絲，共 9 個同種不同個體。

測試四：測試 8 條並聯的橫帶人面蜘蛛絲，共 6 個同種不同個體。

測試五：測試 8 條並聯的泉字雲斑蜘蛛絲，共 6 個同種不同個體。

測試六：測試 8 條並聯的銀腹蜘蛛絲，共 5 個同種不同個體。

測試七：測試 8 條並聯的梭德氏棘蛛蜘蛛絲，共 7 個同種不同個體。

測試八：測試 8 條並聯的日本長腳蜘蛛絲，共 6 個同種不同個體。

2. 用蜘蛛絲採集器（圖 2-9）採集到上述單獨個體的蜘蛛絲後，將採集器放入蜘蛛絲採集器收納盒（圖 2-10）並帶回實驗室，實驗前再將蛛絲從採集器上一條一條地放置在測試座（圖 2-3）上，每個個體放 8 條做測試。
3. 將放好蜘蛛絲的測試座放入箱中，實驗前使用市售乾燥劑（圖 2-1）對測試箱內除溼，將箱內的相對溼度降到 40% 左右，溫度則以空調與加熱燈泡控制在攝氏 20℃ 以上（圖 2-12）。
4. 將測試座的電線接至 LCR（圖 2-6），將 LCR 的訊號線接到筆電（圖 2-7）上，檢查線路（圖 3-5）是否正確。
5. 將筆電上的電腦軟體設定每 1 秒記錄一次電阻值，每次預設 1800 秒（30 分鐘）。
6. 開啟電阻測試儀紀錄相對溼度 40% 至 90% 區間電阻值的變化情況，同時箱內開啟噴霧式加溼器做溼度加溼，由相對溼度 40% 開始加溼至 90%，再以錄影機同時紀錄箱內溼度計溼度變化。
7. 當相對溼度達 90% 時停止測試，將溼度和電阻值的資料作成 Excel 檔案後進行分析。
8. 完成實驗後，將測試過的蜘蛛絲直接放在顯微鏡載物測微器玻片上，再用複式顯微鏡（圖 2-8）測量蜘蛛絲的直徑（圖 3-14-圖 3-21）。
9. 檢視每次錄影影片的相對溼度數據，配合電阻測試儀紀錄的電阻值做成新的檔案，將檔案中的原始電阻值資料取對數後再進行相對溼度對數作圖分析。

10. 最後將相對溼度換算成絕對溼度做絕對溼度的作圖分析。

絕對溼度換算的公式如下：

$$\text{絕對溼度} = \frac{216.7 \times 6.112 \times \exp\left(\frac{17.67 \times T}{T + 273.5}\right)}{T + 273.5} \times \frac{RH}{100}$$

T：溫度
RH：相對溼度

11. 下表整理了各種蜘蛛的中文名、學名、原產地以及蜘蛛絲的採集地（表 3-1）

表 3-1 蜘蛛及蜘蛛絲資料整理表格（表由第一作者整理製作）

中文名	學名	原產地	個體代號	採集地	海拔高度	環境描述	實驗日期	實驗時間	溫度
人面蜘蛛	<i>Nephila pilipes</i>	日本、中國、臺灣、越南、馬來西亞、新加坡、緬甸、泰國、菲律賓、斯里蘭卡、印度、巴布亞新幾內亞和澳大利亞北部	大人面蜘蛛1a	學校		樹林中 蕨類葉子下	2024.11.11	13:00	24.9
			大人面蜘蛛2b	太極嶺			2024.12.09	10:22	21.6
			大人面蜘蛛3c	太極嶺			2024.12.09	10:22	21.6
			大人面蜘蛛4	屏東	300m		2025.01.03	10:51	18.8
			大人面蜘蛛5d	屏東	400m		2025.01.03	16:42	18.8
			大人面蜘蛛6	屏東泰武偉村	600m		2025.01.10	17:22	21.9
			大人面蜘蛛7	屏東春日	400m		2025.01.10	17:22	21.9
			大人面蜘蛛8e	屏東泰武村	700m		2025.01.17	19:18	22
			大人面蜘蛛9	屏東萬安	450m		2025.01.17	16:43	20.9
橫帶人面蜘蛛	<i>Trichonephila clavata</i>	印度、日本、台灣、中國。主要生活於灌木叢	橫帶人面蜘蛛1a	產業道路		樹中	2024.12.09	20:08	21.8
			橫帶人面蜘蛛2b	產業道路		樹中	2024.12.06	09:07	24
			橫帶人面蜘蛛3c	太極嶺		樹中	2024.12.20	12:58	18.2
			橫帶人面蜘蛛4d	太極嶺		樹中	2025.01.06	13:11	19.8
			橫帶人面蜘蛛5	太極嶺			2025.01.22	14:16	20.5
			橫帶人面蜘蛛6e				2025.02.12	07:35	18.5
泉字雲斑蜘蛛	<i>Cyrtophora moluccensis</i>	印度、日本、大洋洲、台灣、中國。多見於山區樹林及果園	泉字雲斑蜘蛛1a	學校			2024.08.21	11:08	25.2
			泉字雲斑蜘蛛2b	學校			2024.11.11	10:51	25
			泉字雲斑蜘蛛3	屏東泰武	550		2025.05.02	13:15	25.5
			泉字雲斑蜘蛛4c	屏東	800		2025.05.02	12:00	25.7
			泉字雲斑蜘蛛5d	屏東	550		2025.05.02	12:00	25.7
			泉字雲斑蜘蛛6e	屏東	500		2025.05.02	13:15	25.5
擬幽靈蛛	<i>Smringopus pallidus</i>	全球分布、台灣、中國、香港	擬幽靈蛛1a	學校			X	X	X
			擬幽靈蛛2b	群英2F電梯口			2024.12.06	13:42	23.6
			擬幽靈蛛3c	厚生306教室前天花板			2024.12.06	13:42	23.6
			擬幽靈蛛4	後生樓樓梯間			2025.01.17	19:18	22
			擬幽靈蛛5d	綜合大樓1F飲水機旁			2025.01.17	16:43	20.9
			擬幽靈蛛6	厚生樓樓梯間			2025.01.22	14:16	20.5
			擬幽靈蛛7	學校地下室			2025.02.12	07:35	18.5
			擬幽靈蛛8	學校地下室			2025.02.12	11:24	20
			擬幽靈蛛9c	學校地下室			2025.02.12	11:24	20
梭德氏棘蛛	<i>Gasteracantha sauteri</i>	臺灣、中國、海南島、越南	梭德氏1a	北大武新登山口900m	900m		2024.11.11	13:00	24.9
			梭德氏2b	屏東萬安	510m		2025.01.03	16:42	18.8
			梭德氏3c	屏東德文觀望山	1100m		2025.01.03	10:51	18.8
			梭德氏4	屏東桑留字山			2025.01.06	14:39	20
			梭德氏5d	屏東德文觀望山	1000m		2025.01.06	14:39	20
			梭德氏6	三地門	400m		2025.01.10	17:20	21.4
			梭德氏7e	屏東留手山	900m		2025.01.10	17:20	21.4
銀腹蜘蛛	<i>Leucauge magnifica</i>	日本、朝鮮、台灣、中國	銀腹蜘蛛1a	太極嶺		樹中	2024.12.09	20:08	21.8
			銀腹蜘蛛2b	太極嶺		矮樹中	2024.12.06	09:07	24
			銀腹蜘蛛3c	太極嶺		菜園籬笆	2025.01.06	13:11	19.8
			銀腹蜘蛛4d	太極嶺		菜園籬笆	2025.01.22	14:08	20.5
			銀腹蜘蛛5c	太極嶺		菜園籬笆	2025.01.22	14:08	20.5
日本長腳蜘蛛	<i>Tetragnatha maxillosa</i>	南非、孟加拉國、台灣、中國	長腳蜘蛛1a	屏東		水邊	2024.12.20	10:06	18.1
			長腳蜘蛛2b	屏東		水邊	2024.12.20	10:06	18.1
			長腳蜘蛛3c	屏東		水槽	2024.02.07	16:19	19.9
			長腳蜘蛛4d	屏東		水槽	2024.02.07	19:59	20.9
			長腳蜘蛛5e	屏東		水邊果樹	2024.02.07	19:59	20.9
			長腳蜘蛛6	屏東			2024.02.07	16:19	19.9
遊獵型	<i>Epehebopus murinus</i>	巴西北部、法屬圭亞那和蘇利南	<i>Epehebopus murinus</i>	養殖			2024.10.14	09:49	26.1
	<i>Chilobrachus fimbriatus</i>	印度西部的熱帶地區，靠近海岸	<i>Chilobrachus fimbriatus</i>	養殖			2024.10.14	10:47	27.2
	<i>Augacephalus breyeri</i>	南非、莫三比克和史瓦濟蘭	<i>Augacephalus breyeri</i>	養殖			2024.10.14	10:53	27.2
	<i>Augacephalus breyeri</i>	南非、莫三比克和史瓦濟蘭	乾 <i>Augacephalus breyeri</i>	養殖		乾	2024.10.14	11:47	27.5
	<i>Ornithoctoninae sp phan cay</i> 越南		<i>Ornithoctoninae sp phan cay</i> 越南	養殖			2024.11.11	10:51	25



圖 3-7 擬幽靈蜘蛛
Smeringopus pallidus
(圖由第二作者拍攝)



圖 3-8 人面蜘蛛
Nephila pilipes
(圖由第二作者拍攝)



圖 3-9 橫帶人面蜘蛛
Trichonephila clavata
(圖由第一作者拍攝)



圖 3-10 銀腹蜘蛛
Leucauge magnifica
(圖由第一作者拍攝)



圖 3-11 日本長腳蜘蛛
Tetragnatha maxillosa
(圖由第三作者拍攝)



圖 3-12 泉字雲斑蜘蛛
Cyrtophora moluccensis
(圖由第三作者拍攝)



圖 3-13 梭德氏
Gasteracantha sauteri
(圖由第三作者拍攝)

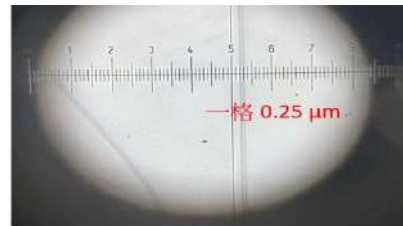


圖 3-14 顯微鏡下的
擬幽靈蜘蛛絲
(圖由第一作者拍攝)

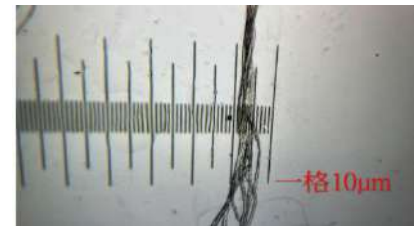


圖 3-15 顯微鏡下的
人面蜘蛛絲
(圖由第三作者拍攝)



圖 3-16 顯微鏡下的
橫帶人面蜘蛛絲
(圖由第三作者拍攝)



圖 3-17 顯微鏡下的
銀腹蜘蛛絲
(圖由第三作者拍攝)

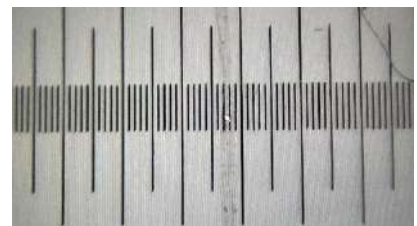


圖 3-18 顯微鏡下的
日本長腳蜘蛛絲
(圖由第一作者拍攝)



圖 3-19 顯微鏡下的
泉字雲斑蜘蛛絲
(圖由第一作者拍攝)



圖 3-20 顯微鏡下的
梭德氏棘蛛蜘蛛絲
(圖由第一作者拍攝)

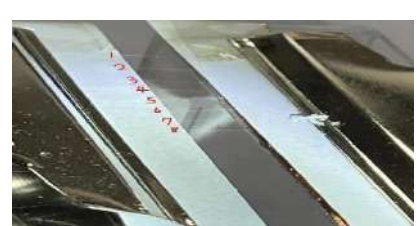


圖 3-21 8 條蜘蛛絲實驗配置
(圖由第三作者拍攝)

肆、研究結果

由於不同相對溼度（40%~90%）下蜘蛛絲電阻值差異很大（ $10^{14}\Omega \sim 10^6$ ），差了 10^8 倍，若將這些電阻值數據資料作圖時，在高溼度時低電阻的數據無法顯示出其差異，於是先將所有 53 筆測得的蜘蛛絲電阻值資料全部取對數後，以新的對數資料為縱座標配合橫坐標相對溼度與絕對溼度作圖。每一種蜘蛛個體都有各自的「**電阻 - 溼度趨勢圖**」，結果如下（圖 4-1-圖 4-2）。從圖中可知：

一、相對溼度分析

- （一）每種蜘蛛絲在低相對溼度（40%~50%）狀況下所測得的電阻值都是偏高（ $> 10^{10}\Omega$ ）。其中 4 種 5 個遊獵型蜘蛛絲差異很大，*Ephebopus murinus* 蜘蛛絲在超過相對溼度 45% 以上就開始慢慢下降，而 *Chilobrachys fimbriatus* 蜘蛛絲則都沒有下降的趨勢（圖 4-1 a），其他 3 個個體則是在相對溼度 65%~75% 間電阻值才開始下降。7 種織網型蜘蛛絲在相對溼度上升後電阻值開始下降的溼度也各有不同，其中泉字雲斑蜘蛛絲與梭德氏棘蛛蜘蛛絲一直在相對溼度上升到 80% 以上才開始下降（圖 4-1 e、圖 4-1 g）、人面蜘蛛絲和橫帶人面蜘蛛絲也是要超過相對溼度 65% 以上才開始下降（圖 4-1 c、圖 4-1 d），而擬幽靈蜘蛛絲和日本長腳蜘蛛絲則是在相對溼度 50% 左右就會開始下降（圖 4-1 b、圖 4-1 h），**就電阻值開始下降時的相對溼度值而言，擬幽靈蜘蛛絲和日本長腳蜘蛛絲明顯低於其他種類的織網型蜘蛛絲。**
- （二）多種蜘蛛絲隨著相對溼度上升後，電阻值在特定的相對溼度（40%~80%）時會開始慢慢下降，有些種類最低會降到 $10^6\Omega$ （圖 4-1 a、圖 4-1 b、圖 4-1 d、圖 4-1 f、圖 4-1 h）時就不會再往下降，但有些種類則是降至 $10^8\Omega$ 左右後就不再下降了（圖 4-1 a、圖 4-1 c、圖 4-1 e、圖 4-1 g），所以從高相對溼度（90%）下的最低電阻值也可以區分不同種類蜘蛛絲的差別。

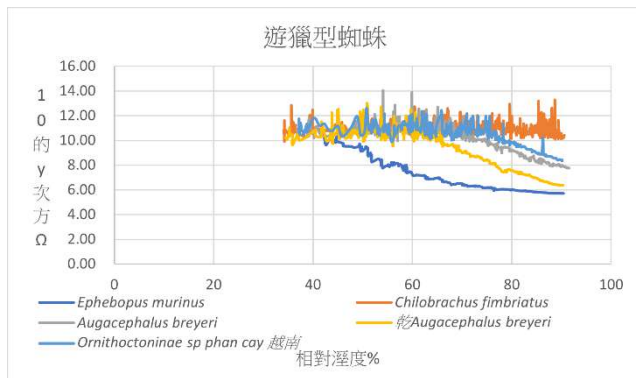


圖 4-1 a

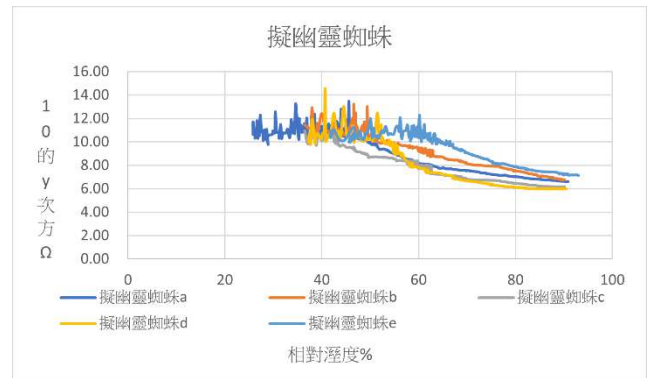


圖 4-1 b

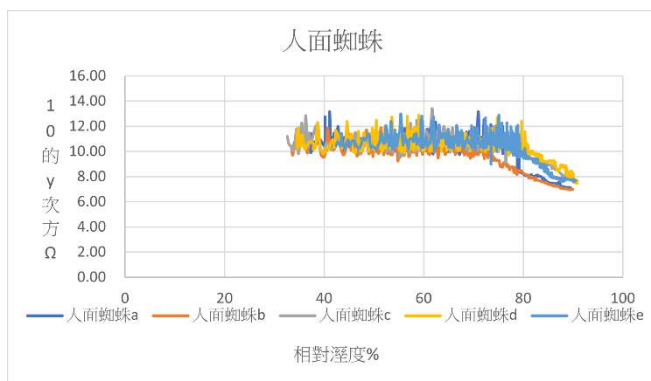


圖 4-1 c

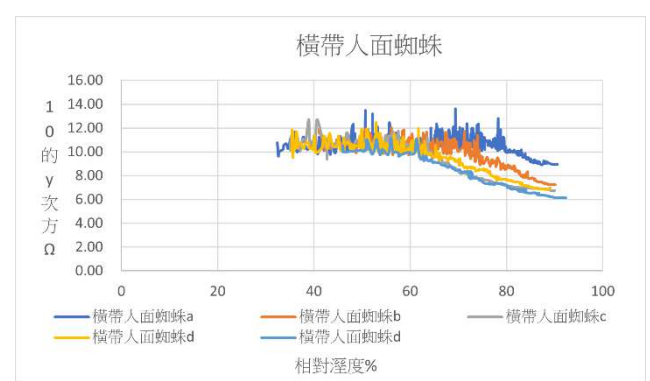


圖 4-1 d

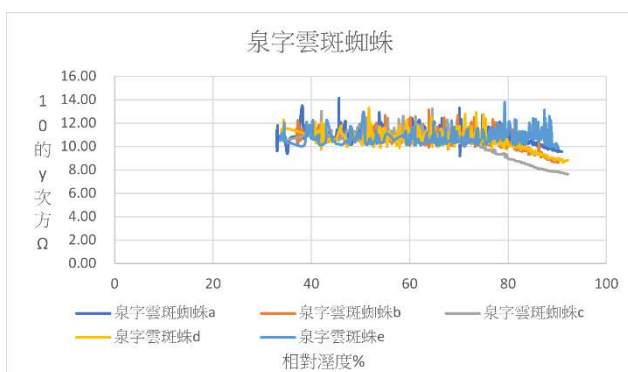


圖 4-1 e

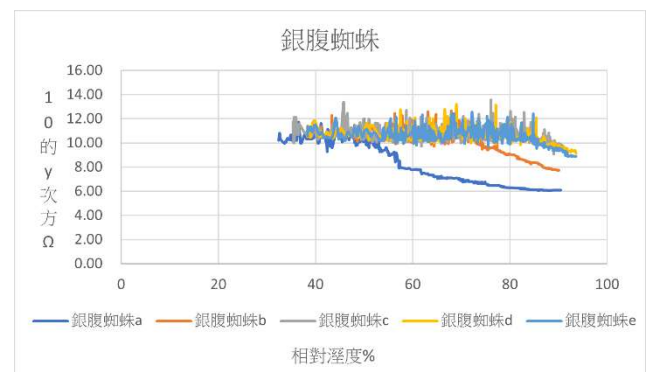


圖 4-1 f

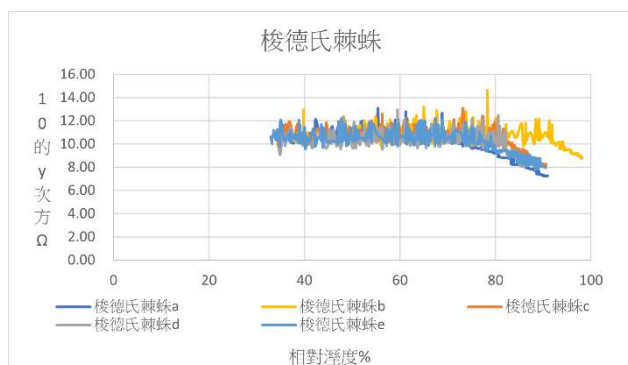


圖 4-1 g

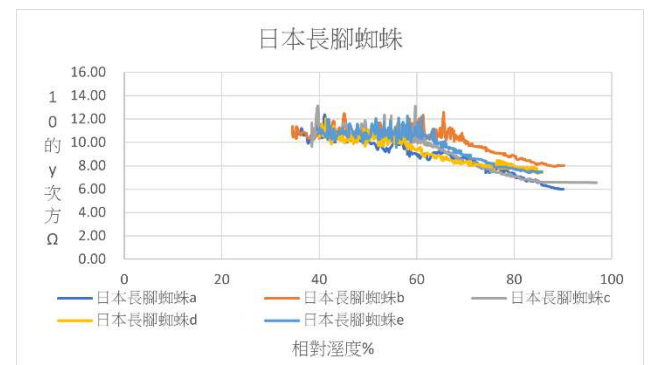


圖 4-1 h

圖 4-1 (a-h) 為本實驗各種蜘蛛絲的「電阻 - 相對溼度趨勢圖」(圖由第一作者整理製作)

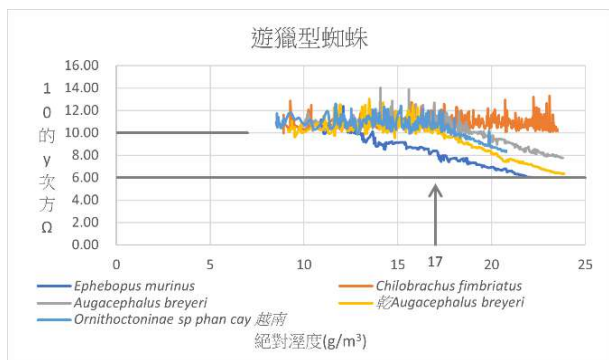


圖 4-2 a

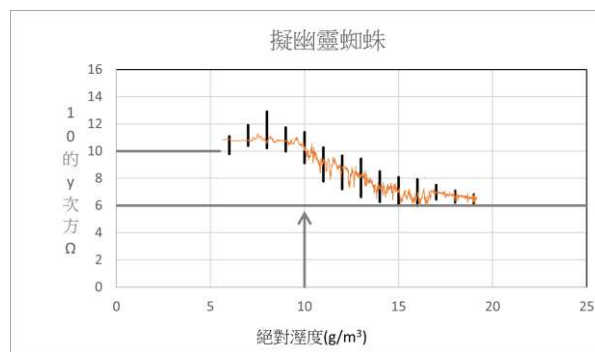


圖 4-2 b

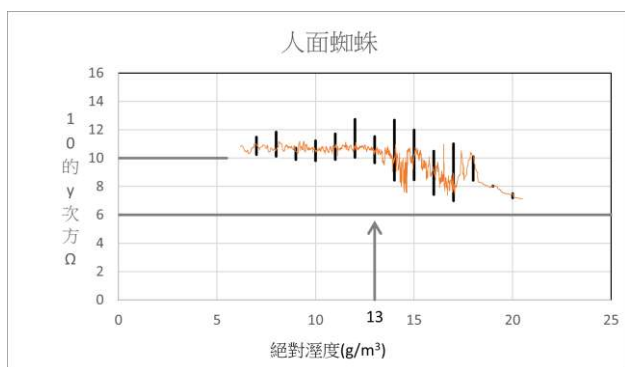


圖 4-2 c

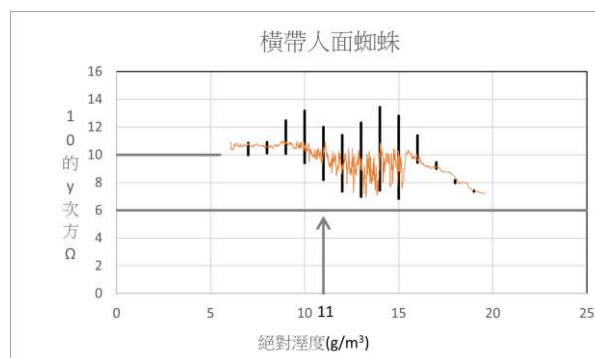


圖 4-2 d

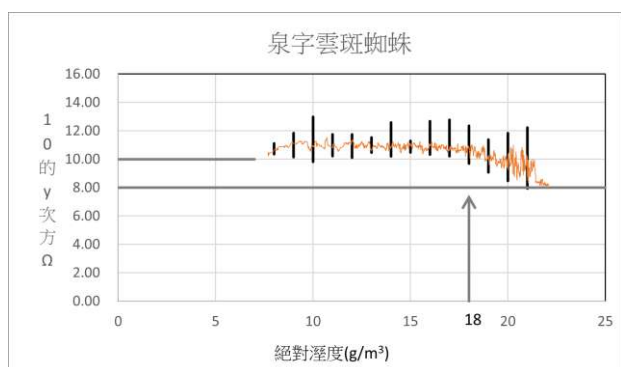


圖 4-2 e

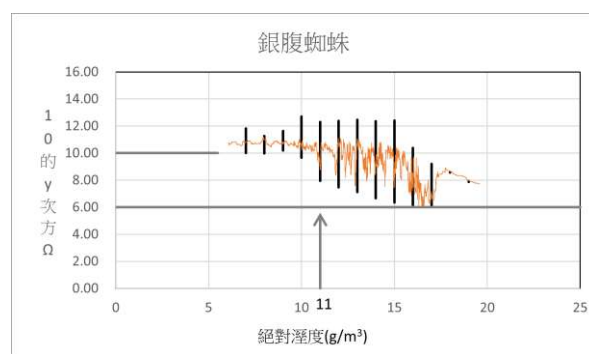


圖 4-2 f

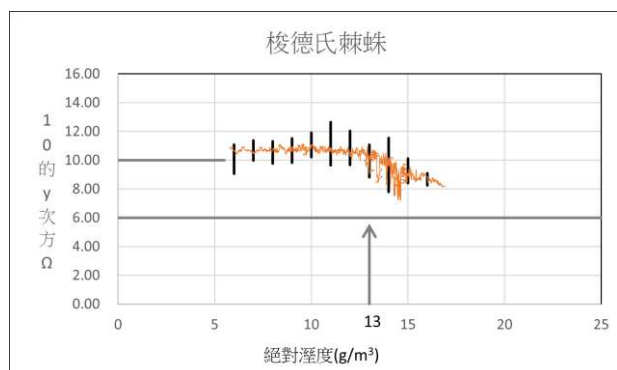


圖 4-2 g

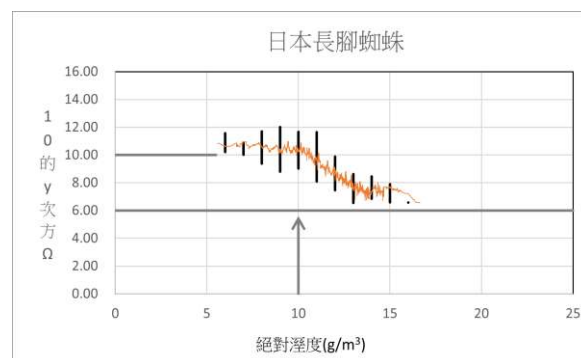


圖 4-2 h

圖 4-2 (a-h) 為本實驗各種蜘蛛絲的「電阻 - 絕對溼度趨勢圖」(圖由第三作者整理製作)

二、絕對溼度分析

- (一) 絕對溼度 10 g/m^3 以前，幾乎所有蜘蛛絲的電阻值都在 $10^{10} \Omega$ 以上，而當絕對溼度上升時電阻值才會往下降，在所有實驗的 53 個個體中，只有遊獵型蜘蛛 *Chilobrachys fimbriatus* 的蜘蛛絲電阻值沒有降至 $10^{10} \Omega$ 以下（圖 4-2 a）。7 種織網型蜘蛛絲在溼度上升後電阻值開始下降的溼度也各有不同，其中泉字雲斑蜘蛛絲一直在絕對溼度上升到 18 g/m^3 以上才開始慢慢下降（圖 4-2 e），人面蜘蛛絲和梭德氏棘蛛蜘蛛絲也是要超過絕對溼度 13 g/m^3 以上才開始下降（圖 4-2 c、圖 4-2 g），橫帶人面蜘蛛絲和銀腹蜘蛛絲則是在絕對溼度 11 g/m^3 左右下降（圖 4-2 d、圖 4-2 f），最後擬幽靈蜘蛛絲和日本長腳蜘蛛絲則是在絕對溼度 $< 10 \text{ g/m}^3$ 左右就會開始下降（圖 4-2 b、圖 4-2 h），就電阻值開始下降時的絕對溼度值而言，擬幽靈蜘蛛絲和日本長腳蜘蛛絲明顯低於其他種類的織網型蜘蛛絲。
- (二) 比較所有織網型蜘蛛「電阻 - 絕對溼度趨勢圖」後，利用趨勢圖中開始下降的絕對溼度值與最低電阻值的關係，我們將 7 種織網型蜘蛛絲的特性分析後得到一個簡單檢索表（圖 4-3），由此表我們可以簡單區分出這 7 種不同種類的織網型蜘蛛絲。



圖 4-3 蜘蛛絕對溼度和電阻值下降關係分類檢索表（表由第二作者繪製）

伍、討論

一、遊獵型蜘蛛

由於此類蜘蛛大多不會織網捕食，所以沒有框架絲，蜘蛛絲的來源為其織巢的絲。以目前的資料顯示 4 種 5 個個體蜘蛛絲的「電阻 - 溼度趨勢圖」差異很大，其中 *Ephebopus murinus* 蜘蛛絲在超過相對溼度 45%（絕對溼度 10 g/m^3 ）以上就會開始下降，而 *Chilobrachys fimbriatus* 蜘蛛絲則都沒有下降的趨勢，其他 3 個個體則是在相對溼度 65% ~ 75%（絕對溼度 $> 17 \text{ g/m}^3$ ）間電阻值才開始下降，但是在低溼度（40% ~ 50%）狀況下電阻值都是偏高，符合目前所有蜘蛛絲的相同特性（圖 4-1、圖 4-2）。此現象應該是不同蜘蛛絲成分不同所產生的差異，由此可知用此種偵測蜘蛛絲電阻值差別的方式可以區別出不同的遊獵型蜘蛛。

二、織網型蜘蛛

目前共有 7 種 48 個個體的織網型蜘蛛絲的「電阻 - 溼度趨勢圖」，在溼度上升後電阻值開始下降的溼度值也各有明顯不同，我們以開始下降的相對溼度數值大小做區隔，共分成三大類：

- （一）**高溼度下降群**：相對溼度 80%（絕對溼度 18 g/m^3 ）以上電阻值才會下降的蜘蛛絲。泉字雲斑蜘蛛絲與梭德氏棘蛛蜘蛛絲 2 種 10 個個體都是在相對溼度上升到 80% 以上電阻值才開始慢慢下降，而在相對溼度 80%（絕對溼度 18 g/m^3 ）之前電阻值都超過 $10^{10} \Omega$ 以上，相對而言這兩種蜘蛛的框架絲在一般正常的溼度環境會有不穩定的電特性（圖 4-1 e、圖 4-1 g）。
- （二）**中溼度下降群**：相對溼度在 50% ~ 80%（絕對溼度在 10 g/m^3 ~ 18 g/m^3 ）間電阻值下降的蜘蛛絲。人面蜘蛛絲、梭德氏棘蛛、橫帶人面蜘蛛絲與銀腹蜘蛛絲 4 種 20 個個體則是屬於第二種類別，牠們的框架絲在相對溼度 50%（絕對溼度在 10 g/m^3 ）以上才會開始下降。其中橫帶人面蜘蛛絲與銀腹蜘蛛在絕對溼度 11 g/m^3 電阻值開始下降，而人面蜘蛛絲與梭德氏棘蛛絲則是在絕對溼度 13 g/m^3 才開始下降，從開始下降的絕對溼度值可區分成兩群，再由下降的趨勢圖可再將其個別分開（圖 4-1 c、圖 4-1 e、圖 4-1 f、圖 4-1 g）。

(三) **低溼度下降群**：相對溼度在 50%（絕對溼度 10g/m^3 ）以下電阻值就會下降的蜘蛛絲。最後一類是從低溼度就開始下降的**擬幽靈蜘蛛**和**日本長腳蜘蛛**，大部分個體的框架絲在相對溼度 50%之前就開始穩定下降（圖 4-1 b、圖 4-1 h），有一個甚至在相對溼度 43%時電阻值就開始下降（圖 4-1 b），以電阻值下降時的相對溼度而言，擬幽靈蜘蛛絲和日本長腳蜘蛛絲明顯低於其他種類的織網型蜘蛛絲，這也顯示擬幽靈蜘蛛絲和日本長腳蜘蛛絲有最大的相對溼度（40%~90%）與電阻值（ $10^{10}\Omega \sim 10^6\Omega$ ）的變化區間。最後再利用這些差異做成一個簡單的檢索表（圖 4-3），利用此表可以區分出這 7 種不同的結網型蜘蛛。

三、實驗過程與結果探討

- (一) **低溼度（絕對溼度 $< 10\text{g/m}^3$ ）時期呈現電阻值偏高的狀況在所有測試的蜘蛛絲上都會發生，此種現象是蜘蛛絲材質的一種共同特性。**隨著溼度上升後，不同種蜘蛛絲的表現不同可以說是物種多樣性的結果，但有些同種蜘蛛絲不同個體在數據表現上卻有些差異（圖 4-1 c、圖 4-1 d、圖 4-1 f），就有可能是由於棲息地的環境因素或本身的遺傳多樣性所造成。有趣的是，如果以目前分類的狀況，同屬於肖峭科（Tetragnathidae）的**日本長腳蜘蛛**與**銀腹蜘蛛**（圖 1-2），親緣關係較接近的牠們在框架絲特性的趨勢圖應該比較相近，但我們的實驗結果卻顯示**日本長腳蜘蛛絲**反而與**幽靈蛛科（Pholcidae）的擬幽靈蜘蛛絲**的趨勢圖比較接近（圖 4-2 b、圖 4-2 f、圖 4-2 h）。和老師討論後，我們推測可能是環境因子所導致（類似同功器官的演化原理），至於是由何種環境因子造成？後續還需要更多的實驗來做驗證。
- (二) 從顯微鏡觀察可知，人面蜘蛛絲的框架絲是由 6 條較細的絲混織而成，總直徑約為 $25\mu\text{m}$ （圖 3-15）；幽靈蜘蛛絲的框架絲則是單獨由 1 條絲形成，直徑約為 $0.25\mu\text{m}$ （圖 3-14），所以人面蜘蛛絲線徑約為擬幽靈蜘蛛絲線徑的 100 倍，若依照電阻公式，在長度、溫溼度相同的條件下，擬幽靈蜘蛛絲的電阻值應該會比人面蜘蛛絲大 10000 倍，但是實際實驗結果在相同濕度的電阻值反而是擬幽靈蜘蛛絲（ $10^6\Omega$ ）小於人面蜘蛛絲（ $10^8\Omega$ ），說明擬幽靈蜘蛛絲的電阻係數遠小於人面蜘蛛絲的電阻係數（差約 100 倍），由此可知**擬幽靈蜘蛛絲的導電性比人面蜘蛛好**，所以此兩種蜘蛛的框架絲成分與形成方式一定存在很大的差異。至於人面蜘蛛絲為何需要如此大電阻的蜘蛛絲（ $10^8\Omega$ ），可能與人面蜘蛛生活環境多在室外有關。而其他蜘蛛絲的線徑也大不相同，一般是介於 $10\mu\text{m}$ 至 $40\mu\text{m}$ 之間（圖 3-16~圖 3-20）。

- (三) 遊獵型蜘蛛的織巢絲相對於織網型蜘蛛的框架絲而言明顯更細、更短且更易斷，此狀況很難用於本實驗的測試（圖 3-21），而且本土遊獵型蜘蛛的織巢絲相對於織網型蜘蛛的框架絲更難取得，也因為如此遊獵型蜘蛛目前暫時都只使用少數個體做測試，後續也可以再增加遊獵型蜘蛛的實驗數據。
- (四) 時序進入冬天後，實驗時發現溫度太低的狀況下在使用同樣的加溼效果，箱內的相對溼度很快就會上升至 90%，甚至接近飽和，這種情況在夏天時是不常見的。此時想起地球科學學過溫度過高時，隨著飽和水氣量增加，相同的相對溼度其實際水氣量（絕對溼度）會有所不同。而前人研究沒有換成絕對溼度來討論的原因，可能是其實驗器材有溫度控制系統，能保證所有實驗過程處於恆溫狀況，但我們實驗進行到冬天時發現溫度問題後卻只能用加溫系統補救，但其效果有限，所以我們只好找了換算公式，將所有原始相對溼度的資料全部轉換成絕對溼度，藉此排除溫度不同的變因，再以此資料做成溼度與電阻關係分類檢索表（圖 4-3）。
- (五) 使用 8 條蜘蛛絲並聯測試的原因是在並聯時可以讓我們測試更小的電阻值訊號，如此可以增加電阻值的變化量方便用來做實驗分析，但礙於每隻蜘蛛框架絲的絲量有限，所以無法作太多條絲的並聯測試，因此本實驗目前暫時使用 8 條絲來測試。

四、與前人研究比較探討

- (一) 實驗對數分析圖（圖 4-1）的電阻值變化與文獻回顧的圖 1-3 蛛絲纖維的溼度依賴性電導率相符合（Steven *et al.*, 2011），因為電阻值與導電率互為倒數，所以他們以導電率為縱座標的圖會隨溼度上升而往上，而我們的「電阻 - 溼度趨勢圖」則是往下，前期低溼度狀況下的電阻值一樣是偏高，隨著溼度上升後電阻值才會開始下降。
- (二) 在文獻回顧的圖 1-3 上有往復兩個箭頭（Steven *et al.*, 2011），代表其實驗除了溼度上升的實驗外也有做溼度下降的狀況，但是我們礙於實驗裝置的限制，所使用市售乾燥劑除溼降低溼度至 40% 需要至少 3 個小時以上，無法像用加溼器將溼度由 40%~90% 只需約 30 分鐘便可完成，所以我們只做溼度增加的實驗。

- (三) 野外研究人員在觀察蜘蛛行為時有發現一個特殊的現象，同樣生活在戶外的大人面蜘蛛與泉字雲斑蜘蛛在應對下雨時的行為策略完全不同，結大網的大人面蜘蛛在快下雨時會急忙將網收起，而結立體網的泉字雲斑蜘蛛則不會因為下雨而收網（童等，2005）。除了大人面蜘蛛網比較怕雨水附著而導致張力下降破損外，其蜘蛛絲電阻值在下雨時（絕對溼度 18 g/m^3 ）約為 $10^8 \Omega$ （圖 4-2 c），相對於泉字雲斑蜘蛛絲的 $10^{10} \Omega$ 明顯小很多（圖 4-2e），高電阻的泉字雲斑蜘蛛絲更能適應雷雨交加的天氣，所以本實驗對這兩種蜘蛛絲電阻值的測量結果符合其適應生態環境行為的應變。
- (四) 在前人研究中有提到蜘蛛絲的性質除了受基本基因（*MaSp1* 與 *MaSp2*）的影響外，蜘蛛本身捕捉的獵物不同也會影響其胺基酸成分比例而產生差異（Wu, 2005）。另有研究指出蜘蛛也會依據當季獵物的大小來調整其框架絲的胺基酸組成與絲的粗細來增加捕食效率（趙，2006）。綜合上述前人研究結果與本實驗研究結果比較分析後，發現不論在同種間的差異或是不同種間的差異，都可由其基因表現、獵物狀況與環境變化等因子來闡釋（Robert, 2015），而這些多種複雜因子所造成的差異在本實驗可使用簡單的方法獲得蜘蛛絲的電阻值來檢視，至於各種因子間的交互作用後是如何產生差異的機制，則有待後續更多實驗來釐清。

陸、結論

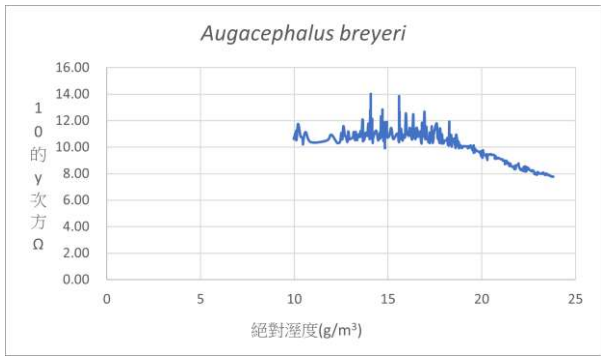
- 一、使用自己設計的實驗測試裝置與配置，可以檢測到各種蜘蛛絲在相同的相對溼度區間（40%~90%）內溼度上升時的電阻值變化。不論是遊獵型的織巢絲或是織網型的框架絲在低溼度區間（相對溼度 $< 50\%$ ；絕對溼度 $< 10 \text{ g/m}^3$ ）內電阻值都偏高（ $> 10^{10} \Omega$ ），一直要到絕對溼度在 10 g/m^3 左右，電阻值才會開始慢慢下降。
- 二、在相同的絕對溼度區間（ $10 \text{ g/m}^3 \sim 25 \text{ g/m}^3$ ）測試結果顯示，擬幽靈蜘蛛絲在此區間內電阻值變化量（ $10^{10} \Omega \sim 10^6 \Omega$ ）明顯高於其他種類的蜘蛛絲，而其他不同種類的蜘蛛絲也都有其獨特的「電阻 - 溼度趨勢圖」（圖 4-2），分析這些趨勢圖可以用來區別不同種類的蜘蛛（圖 4-3）。
- 三、由實驗所得的數據發現不同種類蜘蛛絲的「電阻 - 溼度趨勢圖」都不同，此結果說明同為蛋白質材質的蜘蛛絲，在親緣關係相近的蜘蛛中，其蜘蛛絲的電阻特性與濕度反應也有很大的種間差異，而造成此種差異產生的原因除了蜘蛛絲蛋白質成分不同外，蜘蛛絲線徑、蜘蛛食性、蜘蛛絲形成過程應力作用與各種環境因子也是其原因。
- 四、未來展望：
 - （一）將來我們會持續增加不同的蜘蛛種類與不同個體蜘蛛絲的測試，期望能建立蜘蛛絲「電阻 - 溼度趨勢圖」資料庫，未來蜘蛛絲只要經過簡單的電訊號測試後，利用實驗得到的趨勢圖交由 AI 到資料庫做分析比對，便可以很快知道這是何種蜘蛛的蜘蛛絲。也許將來也可以製作出像手機一般可攜式的小型檢測器，調查人員不用辛苦尋找個體，只要從環境中的蛛網擷取一小段蛛絲放入檢測，再將檢測數據連線資料庫比對即可得到結果。利用此方式不但可以減少生物多樣性調查的成本，也可以在避免傷害蜘蛛本體的狀況下了解該區的生物多樣性。另外資料庫中的各種蜘蛛絲的「電阻 - 溼度」相關資料，將來也可以為蜘蛛絲各種應用材料研究、刑事鑑定等方面做出貢獻。
 - （二）利用蜘蛛絲的「電阻 - 溼度」特性，將不同溼度狀況下蜘蛛絲所產生的電阻值訊號轉化成數字，可用來監測環境溼度的變化，為環境溼度感測器的製作提供新的材料與想法，將來若能成真，目前可以優先考慮使用擬幽靈蜘蛛絲，它在環境溼度的感測力是最好的。
 - （三）各種蜘蛛框架絲成分與形成方式的差異方面，將來條件許可時會將測試過的蜘蛛絲進行蛋白質的氨基酸成分分析，再將其結果與目前的實驗成果做對比，並配合前人的研究結果分析，期望能更清楚了解造成各種蜘蛛絲間差異的演化機制與生物學意義。

柒、參考文獻資料

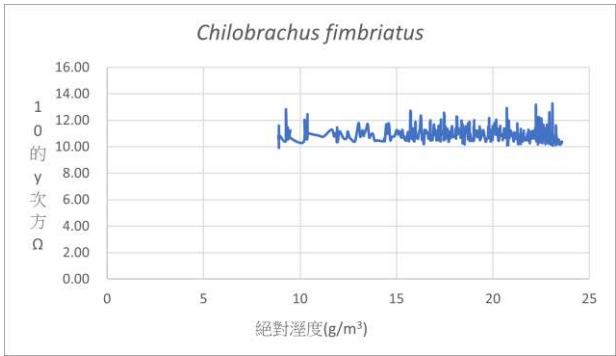
- 一、 李長林，（1964） 台灣之蜘蛛 5-6。
- 二、 童暉哲、林雍傑、林鈺書、鄧偉豪，（2005）”絲”路之旅——環境因子對蜘蛛絲張力之影響及胺基酸組成分析，中華民國第四十五屆中小學科學展覽會作品說明書，台中市。
- 三、 趙依祈，（2006） 人面蜘蛛藉調整絲基因表現及網結構促進捕食效率，臺灣二〇〇六年國際科學展覽會優勝作品專輯，台北市。
- 四、 Campbell N. A., Urry L. A., Cain M. L., Wasserman S. A., Minorsky P. V., Orr R. B. (2021) Biology: A Global Approach:Twelfth Edition. 128-129, 406-407, 542-543, 562-563.
- 五、 Chang Y. H. (1998) Taxonomic Study of Araneae (Arachnida: Araneae) of Taiwan. 1-3.
- 六、 Herron J. C., Freeman S.(2014) Evolutionary Analysis:Fifth Edition. 126-127.
- 七、 Morley E. L., Robert D. (2018) Electric Fields Elicit Ballooning in Spiders. Current Biology, 28: 2324-2330.
[https://www.cell.com/current-biology/fulltext/S0960-9822\(18\)30693-6](https://www.cell.com/current-biology/fulltext/S0960-9822(18)30693-6).
- 八、 Robert J. (2015) Genetics Analysis & Principles:Sixth Edition. 740-741.
- 九、 Römer L., Scheibel T. (2008) The elaborate structure of spider silk, Prion 2:4, 154-161.
<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC2658765/>.
- 十、 Steven E., Park J. G., Paravastu A., Lopes E. B., Brooks J. S., Englander O., Siegrist T., Kaner P., Alamo R. G. (2011) Physical characterization of functionalized spider silk: electronic and sensing properties. Science and Technology of Advanced Materials, 5: 1-13.
<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC5074434/>.
- 十一、 Winkler, S. & Kaplan, D. V. (2000) Molecular biology of spider silk. Reviews in Molecular Biotechnology, 74: 85-93.
<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/11763505/>
- 十二、 Wu H. C. (2005) Will giant wood spider *Nephila plipes* respond to diet variation by altering silk protein ? Evidence from field surveys and manipulative studies. Master thesis, Tunghsi University, Taiwan. Journal of Experimental Biology, 208(6): 1053-1061.
<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/15767307/>
- 十三、 Xu, M., & Lewis, R. V. (1990) Structure of a protein superfiber: spider dragline silk. Proceedings of the National Academy of Sciences, 87: 7120-7124.
<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/2402494/>

附錄：

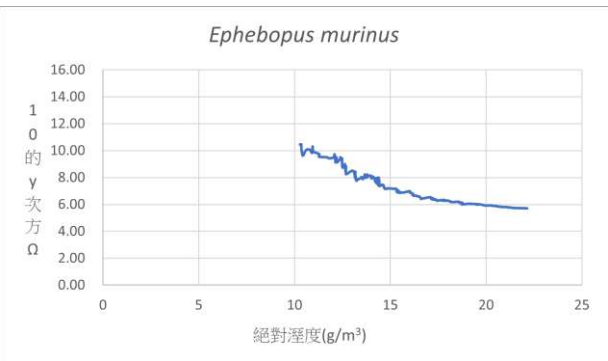
S1.遊獵型蜘蛛絲個別分析圖與絕對溼度總圖



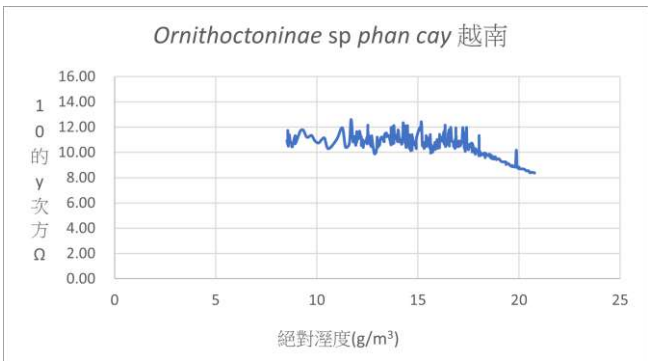
1-a



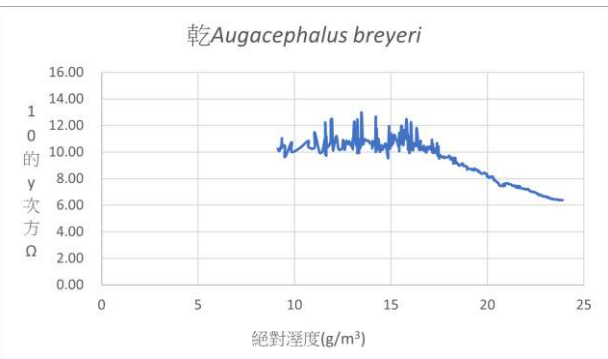
1-b



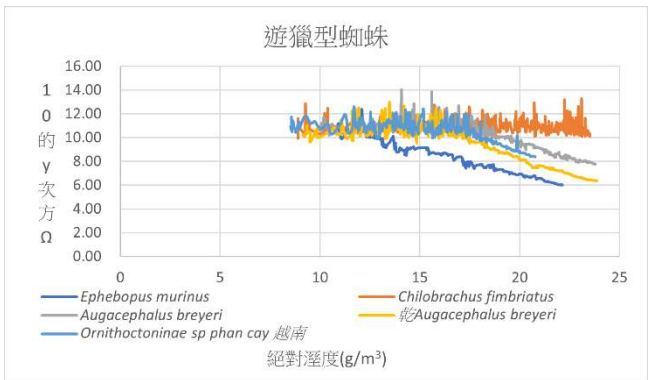
1-c



1-d



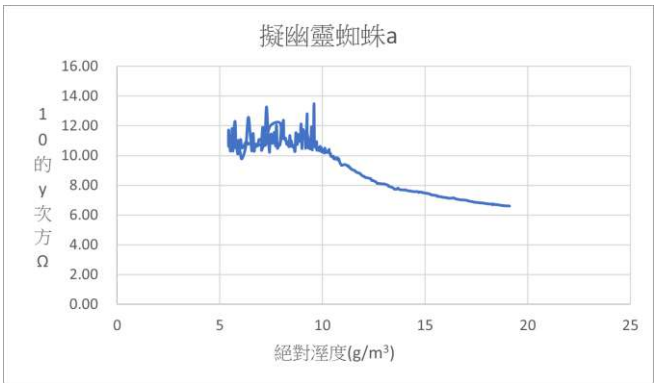
1-e



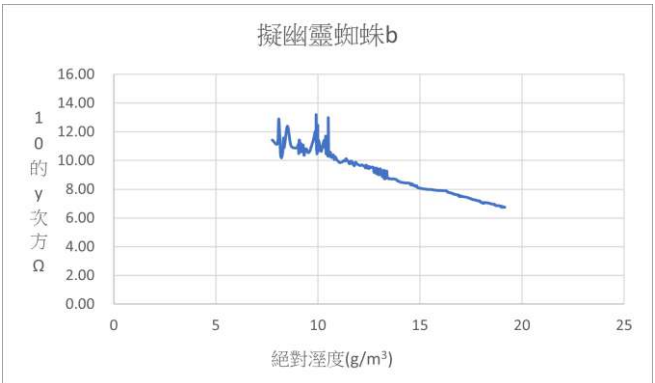
1-f

(以上圖皆由第二作者整理製作)

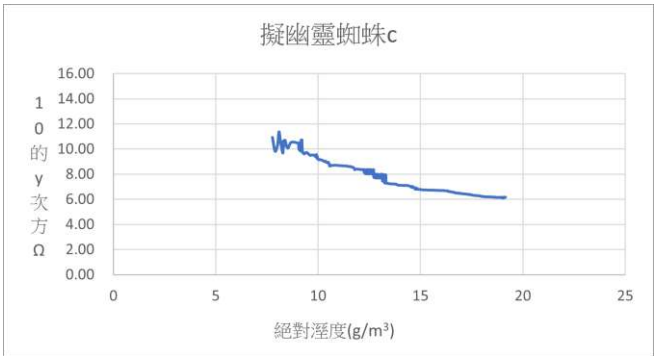
S2.擬幽靈蜘蛛絲個別分析圖與絕對溼度總圖



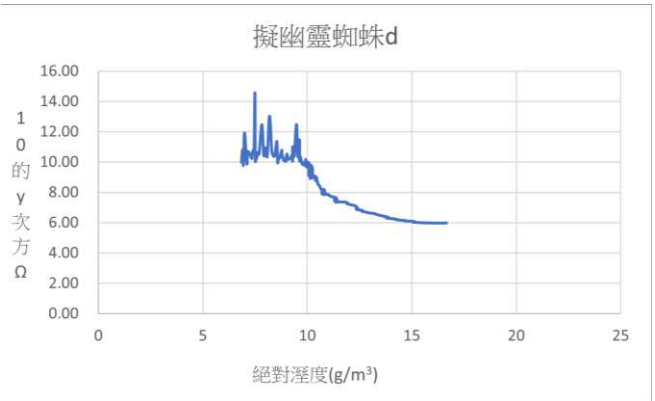
2-a



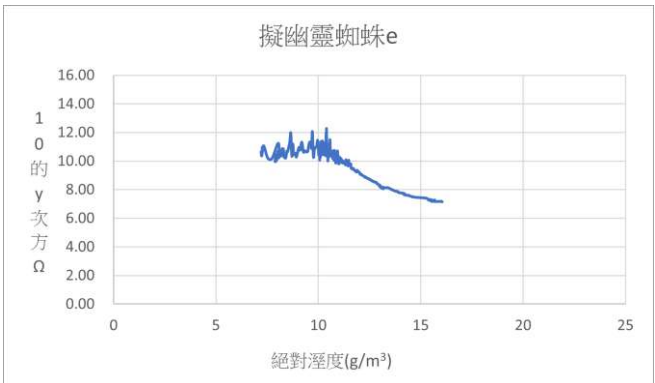
2-b



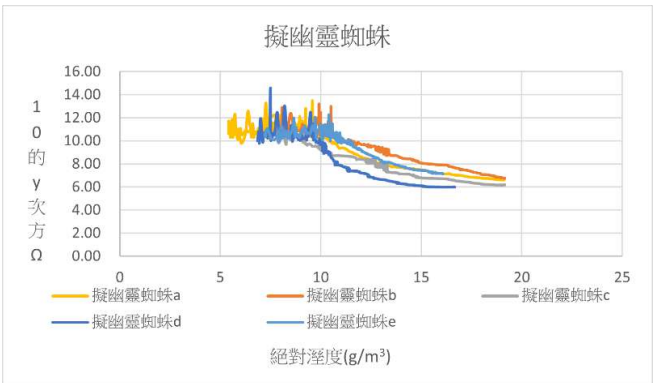
2-c



2-d



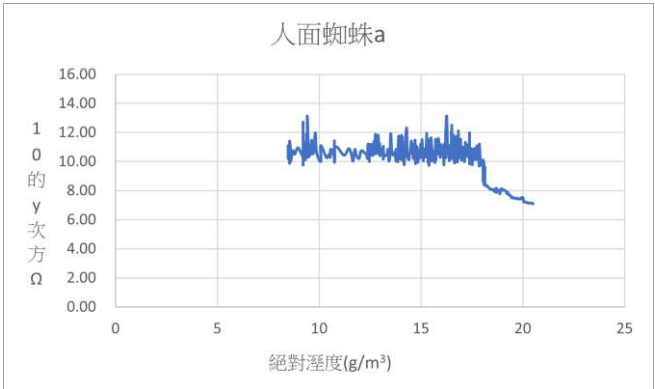
2-e



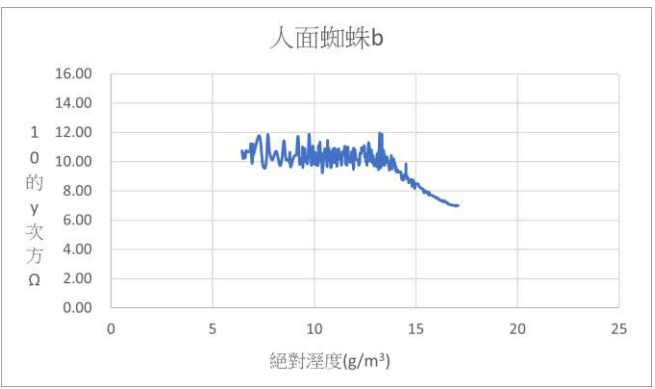
2-f

(以上圖皆由第二作者整理製作)

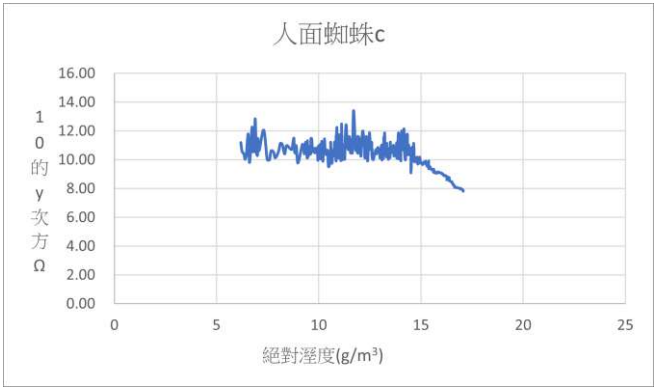
S3.人面蜘蛛絲個別分析圖與絕對溼度總圖



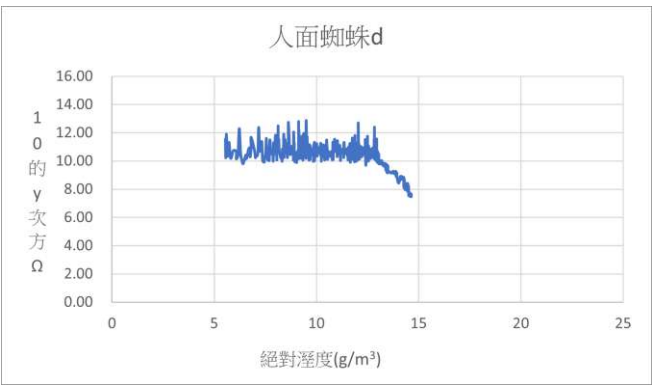
3-a



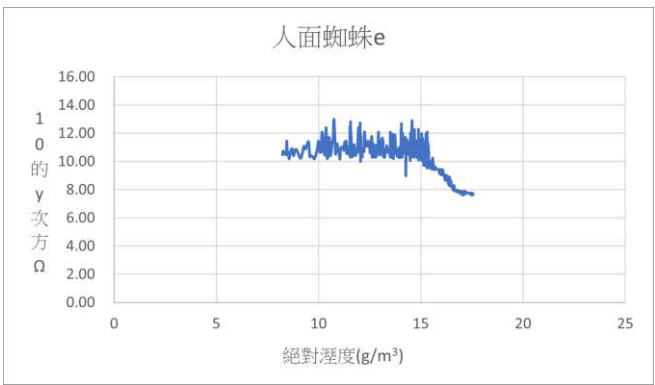
3-b



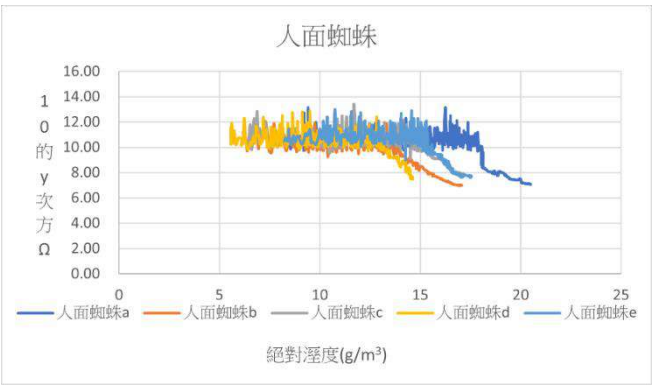
3-c



3-d



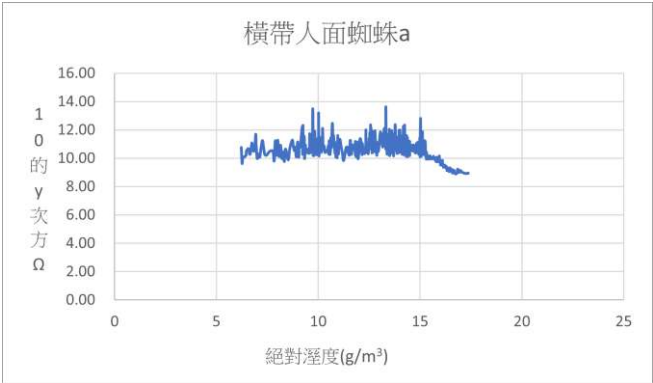
3-e



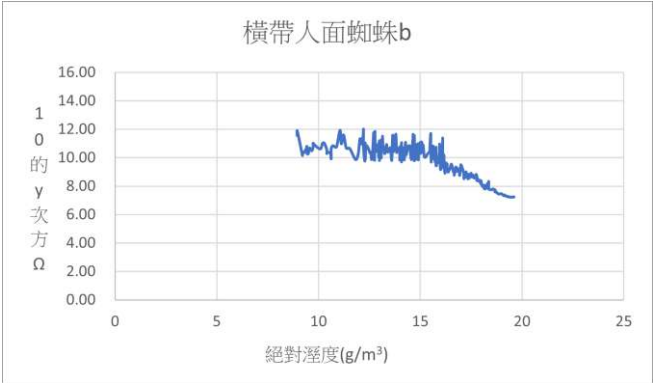
3-f

(以上圖皆由第二作者整理製作)

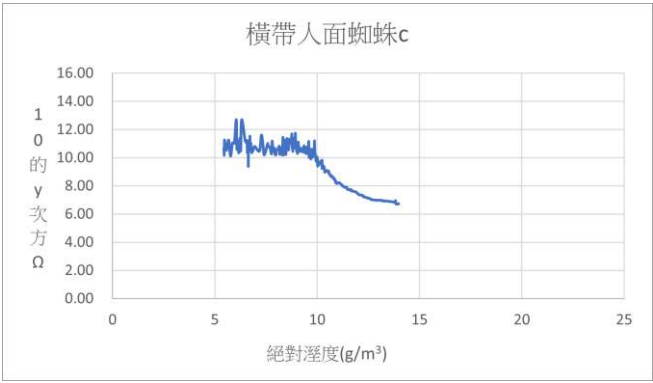
S4.橫帶人面蜘蛛絲個別分析圖與絕對溼度總圖



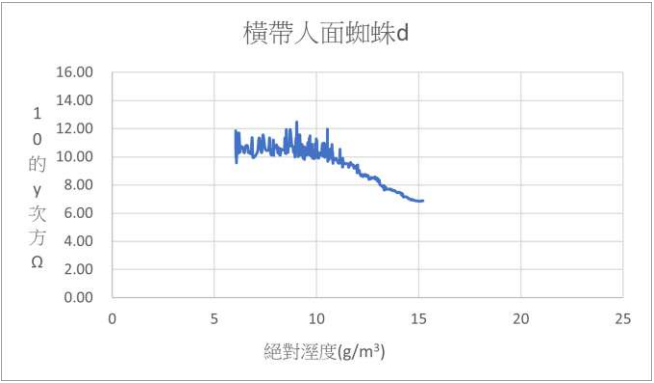
4-a



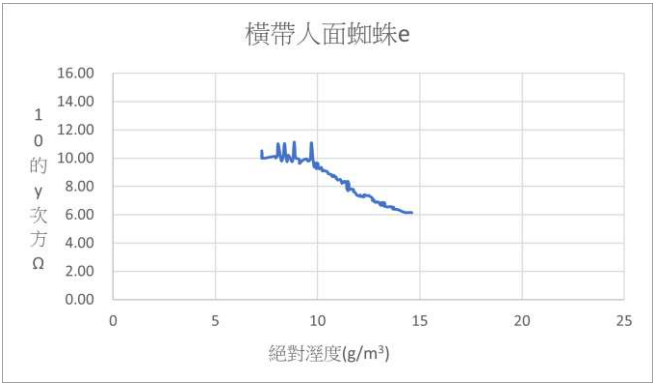
4-b



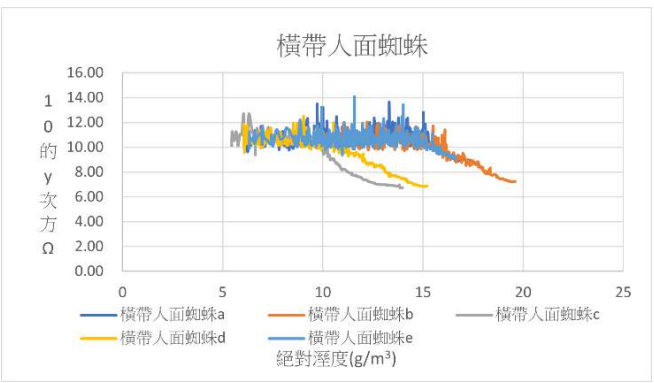
4-c



4-d



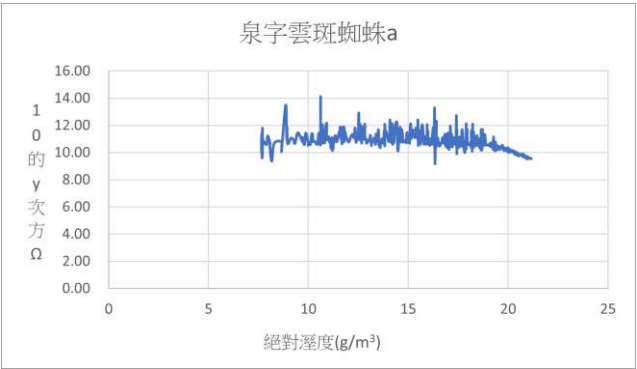
4-e



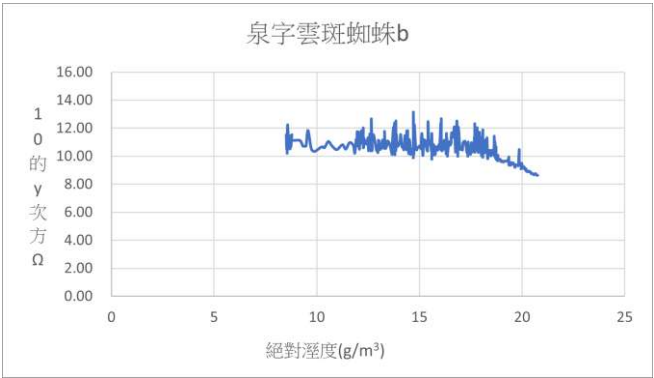
4-f

(以上圖皆由第二作者整理製作)

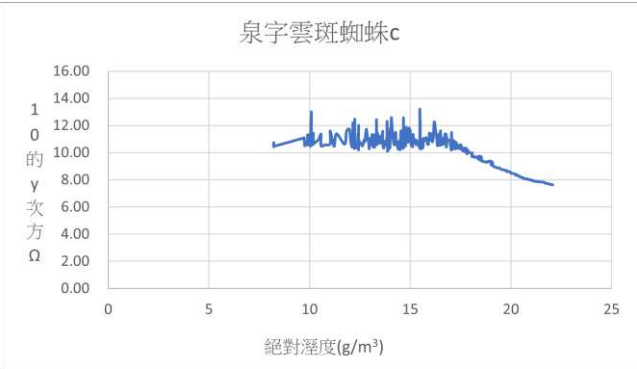
S5. 泉字雲斑蜘蛛絲個別分析圖與絕對溼度總圖



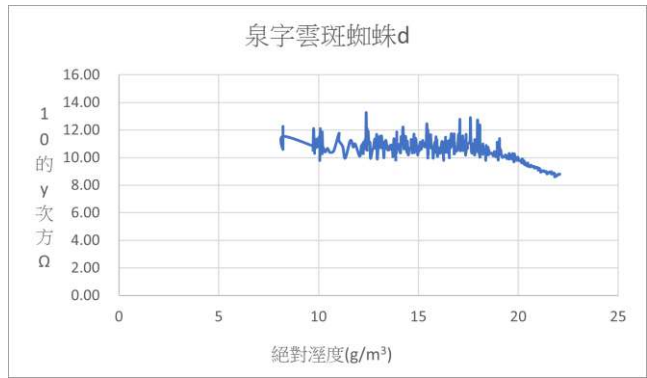
5-a



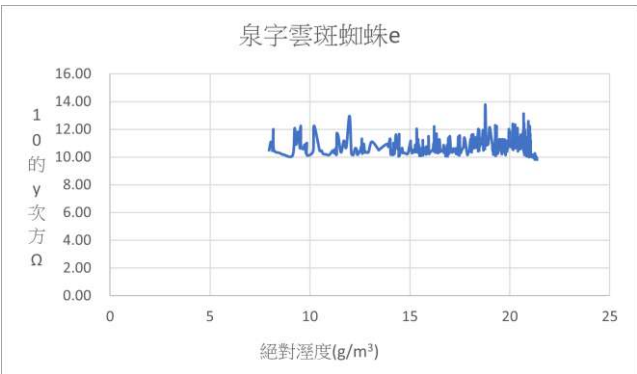
5-b



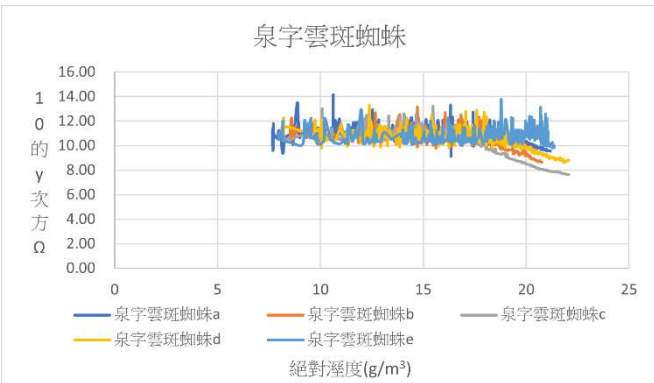
5-c



5-d



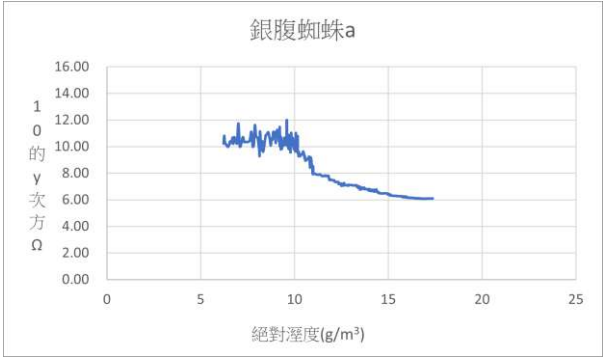
5-e



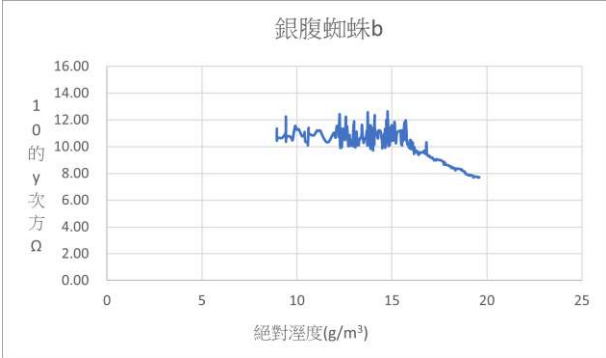
5-f

(以上圖皆由第二作者整理製作)

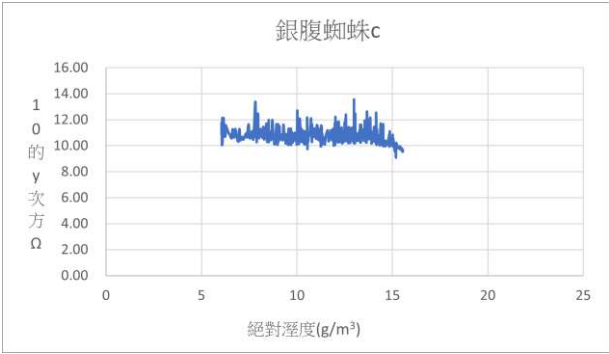
S6.銀腹蜘蛛絲個別分析圖與絕對溼度總圖



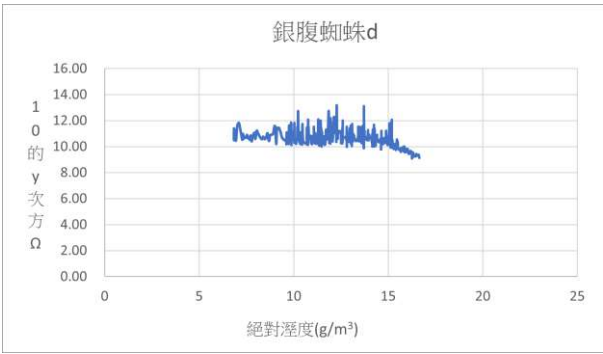
6-a



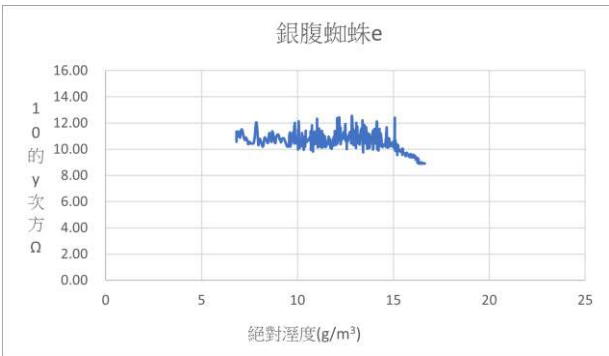
6-b



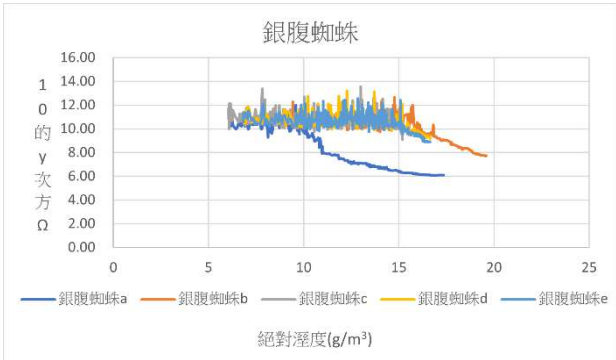
6-c



6-d



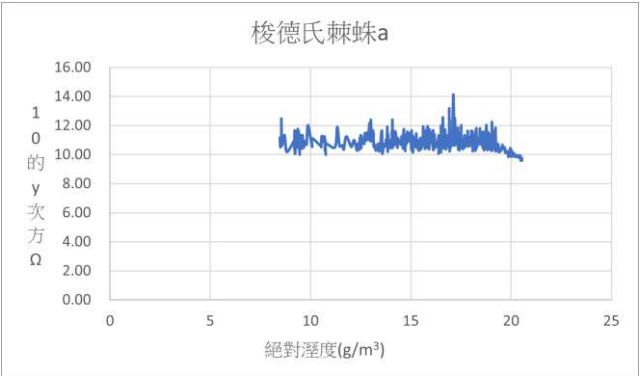
6-e



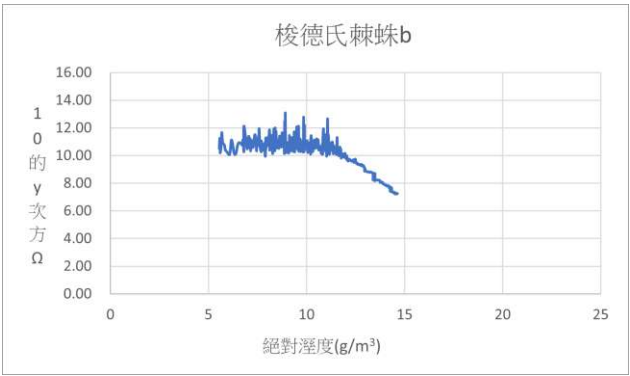
6-f

(以上圖皆由第二作者整理製作)

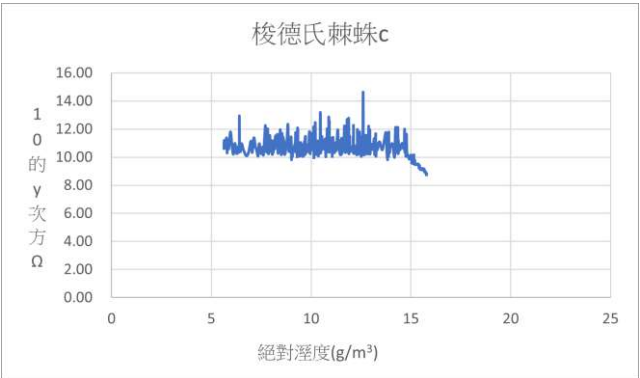
S7.梭德氏棘蛛絲個別分析圖與絕對溼度總圖



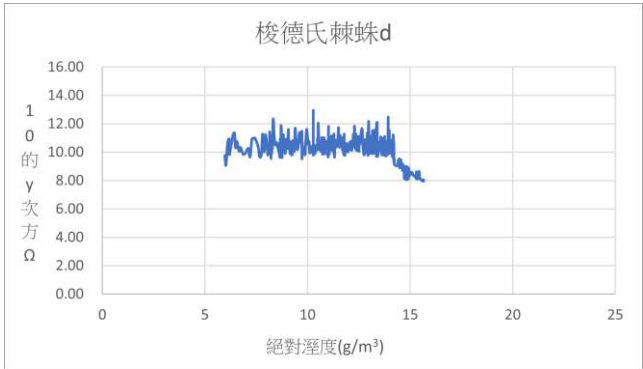
7-a



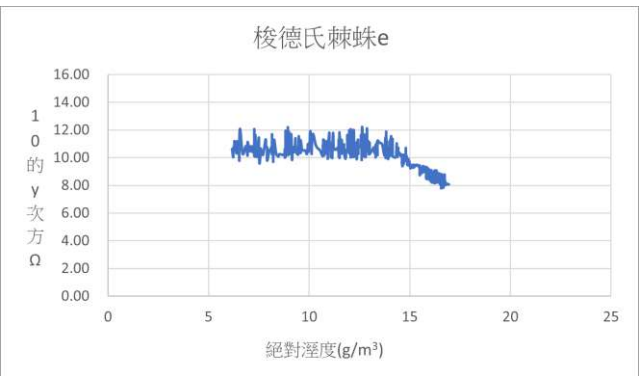
7-b



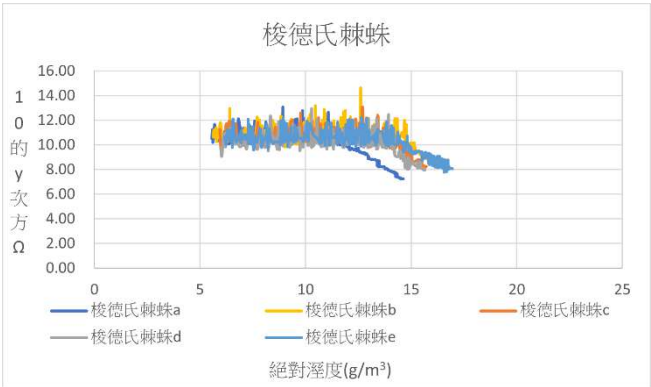
7-c



7-d



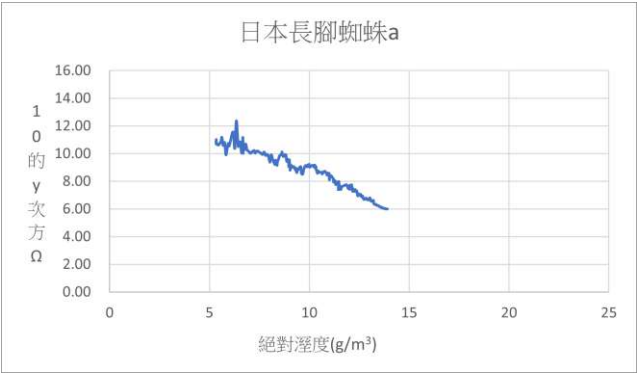
7-e



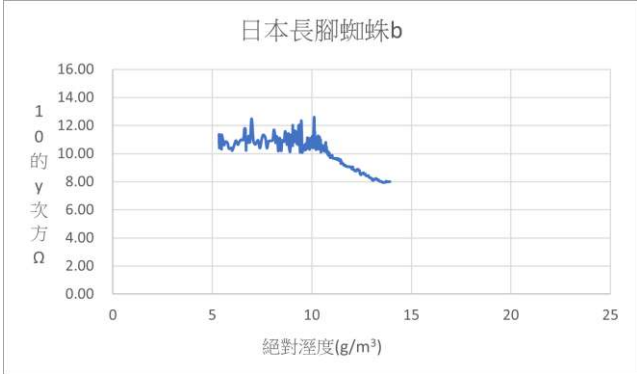
7-f

(以上圖皆由第二作者整理製作)

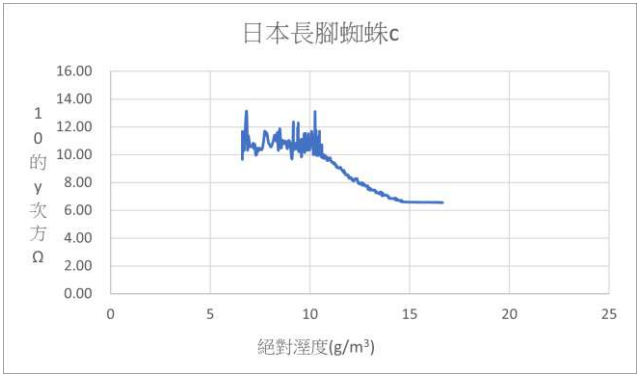
S8.日本長腳蜘蛛絲個別分析圖與絕對溼度總圖



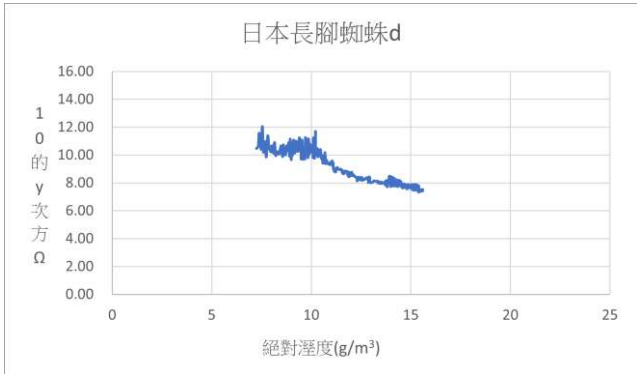
8-a



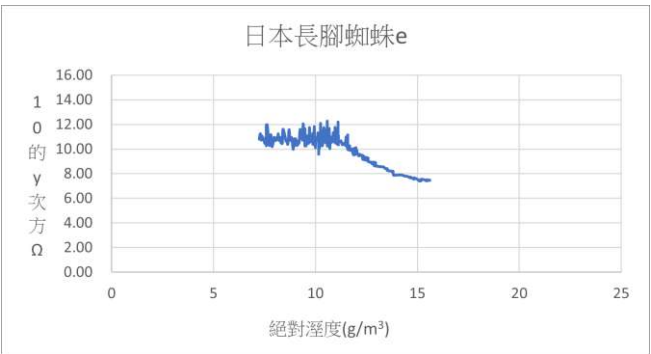
8-b



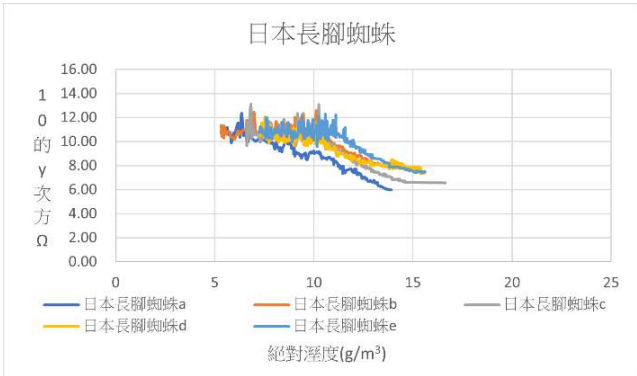
8-c



8-d



8-e



8-f

(以上圖皆由第二作者整理製作)

【評語】 052005

本研究採用自行設計的器材與方法，將蜘蛛絲進行並聯後記錄其電阻值，從電學角度出發，透過測量蜘蛛絲在不同環境濕度下的電阻值變化，研究發現所有蜘蛛絲在低濕度時電阻值偏高，直到絕對濕度約 10g/m^3 時電阻才開始下降，揭示了蜘蛛絲對濕度變化的普遍響應趨勢，此外，不同種類蜘蛛（包括親緣關係相近者）的「電阻-濕度趨勢圖」也存在顯著差異。本研究採集了 11 種共 53 隻蜘蛛的框架絲與築巢絲作為實驗材料，較大的樣本量有助於提升研究結果的普適性和可靠性。本研究將電學測量與動物學、生物物理、演化多樣性結合，主題創新。結果為未來在仿生學（如環境感測器開發）和生態演化生物學（如蜘蛛絲蛋白質特性演化）等領域的相關研究提供了有趣並重要的見解。

本研究相當有趣，但仍有一些建議與疑問如下：

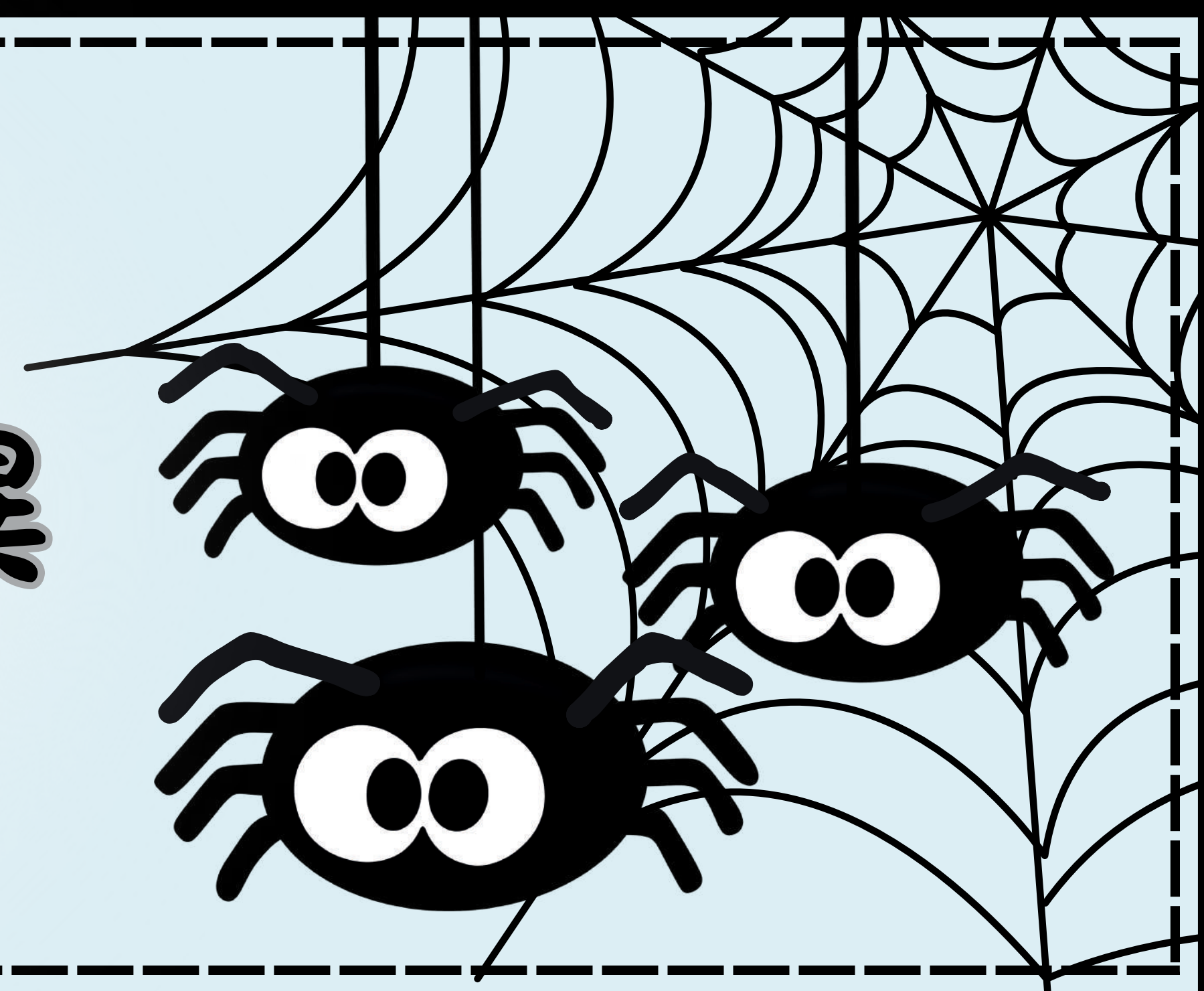
1. 研究主要停留在宏觀電阻值變化的層面，對於導致這些電阻變化的蜘蛛絲蛋白質的具體分子結構、微觀物理化學性質或其感濕的深層機制，並未進行深入探討。

2. 從蜘蛛絲採集、載具設計、箱體控制到數據的自動記錄與分析（批次登入 Excel、圖形化），展現高度動手與設計能力。儘管使用了自製設備，但在精確控制並維持不同濕度範圍（如相對濕度 40%至 90%）的穩定性，以及排除溫度等其他環境因素的潛在干擾方面，仍可能存在技術挑戰，影響數據的精確性。環境控制與樣品一致性也待加強：有些遊獵蛛個體樣本數偏少，且遊獵蛛框架絲物理性質易斷，測值不如織網蛛穩定。部分電阻值影響解析未深究，對於絲徑、蛋白質組成、取向、外來離子（如箱內微量污染）、表面張力等潛在影響缺詳細控制實驗。
3. 研究中僅提及「作圖分析」，但未提供詳細的數據分析方法（例如使用的統計學模型、誤差分析方式等），這可能會影響讀者對研究結果可靠性的全面評估。如能做系統性分析與分類檢索，將結果標準化為絕對溼度作圖，製作「電阻—溼度」檢索表，未來資料庫建置、AI 判讀應用可行。

4. 雖然研究目的希望在探究其「生物學上的意義」，但本研究實際內容更多是關於電學特性的發現，其深層的生物演化生物學意義（例如：電阻值的變化如何具體幫助蜘蛛適應環境、或如何影響其生存策略）仍需更直接的證據和深入的闡釋。

作品海報

「絲溼有幾種？」—以蜘蛛絲
在環境濕度變化時的電阻值差異
來探究其生物學上的意義



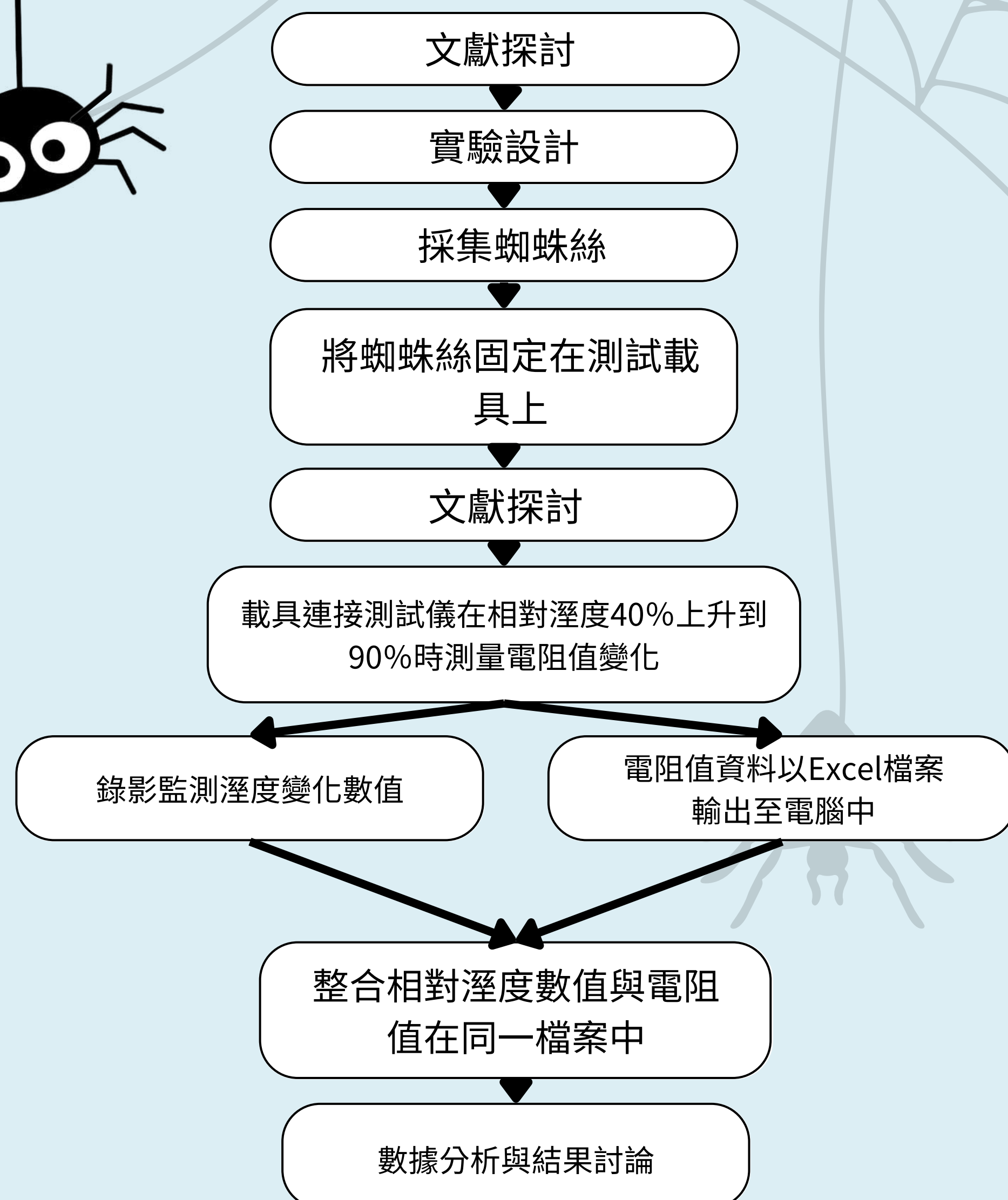
摘要

本研究採用11種53隻蜘蛛的框架絲與築巢絲為材料，利用電學設備以電訊號偵測蜘蛛絲對環境濕度變化的電阻反應。實驗使用自行設計的器材與方法，將蜘蛛絲並聯後記錄其在相對溼度40%至90%的區間內的電阻值變化並作圖分析。結果發現所有蜘蛛絲在低濕度時電阻值都偏高，直到絕對溼度在10 g/ m³左右電阻才會開始下降。由實驗所得的數據發現不同種類蜘蛛絲的「電阻-溼度趨勢圖」都不同，此結果說明同為蛋白質材質的蜘蛛絲，在親緣關係相近的蜘蛛中，其蜘蛛絲的電阻特性與濕度反應也有很大的種間差異。希冀本實驗結果能對未來仿生學與生態演化生物學議題上，如蜘蛛絲在環境感測之應用與蜘蛛絲蛋白質特性之演化等相關研究做出貢獻。

研究目的

- 一、測量並記錄織網型蜘蛛絲及遊獵型蜘蛛絲在不同溼度下其電阻的變化數值。
- 二、製作分析織網型蜘蛛絲及遊獵型蜘蛛絲「電阻-溼度趨勢圖」的差異。
- 三、探究織網型蜘蛛絲及遊獵型蜘蛛絲趨勢圖變化特性在生物學上的意義。

流程圖



實驗過程及方法

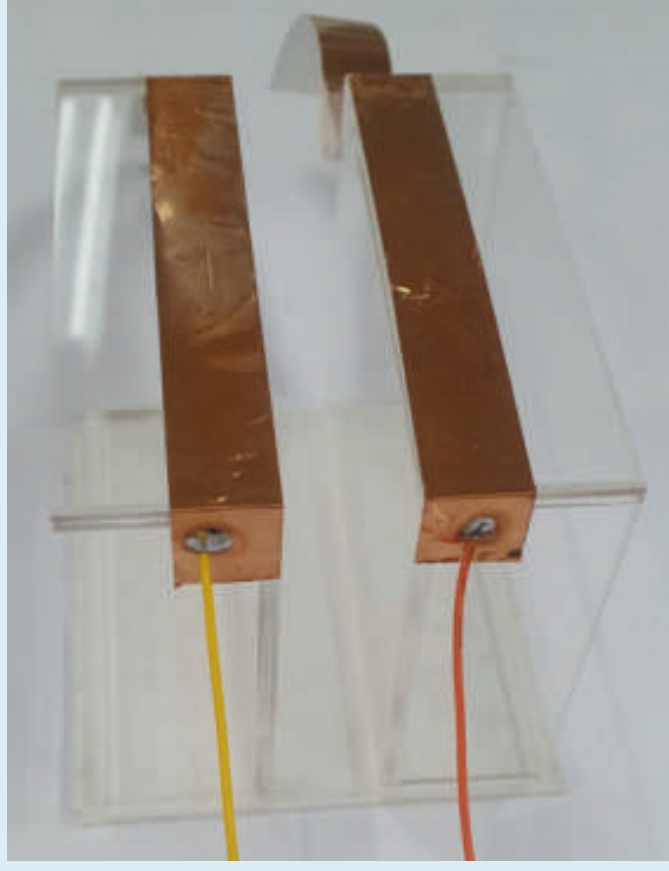
● 實驗器材(圖皆為自製)



溼度加溼壓克力測試箱



除溼乾燥劑



蜘蛛絲測試壓克力座



溫溼度計



蜘蛛絲採集器



採集器收納盒



電阻測試儀 (Hioki LCR meter IM3523)



複式顯微鏡

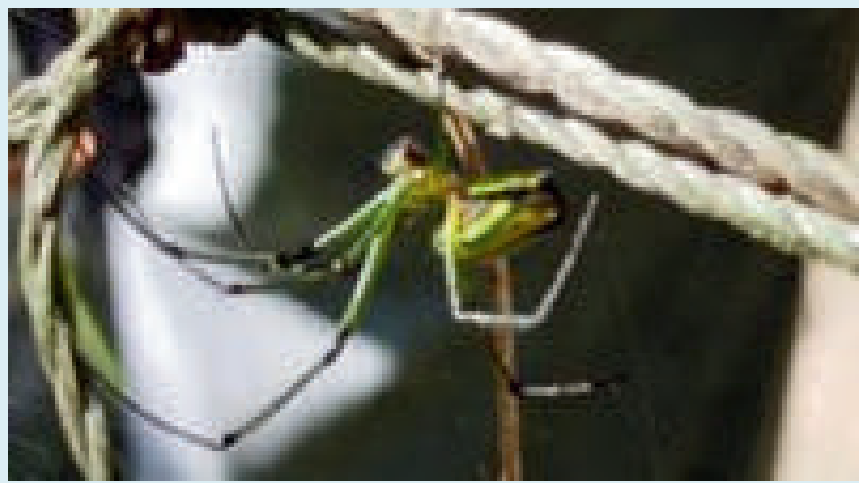


筆電

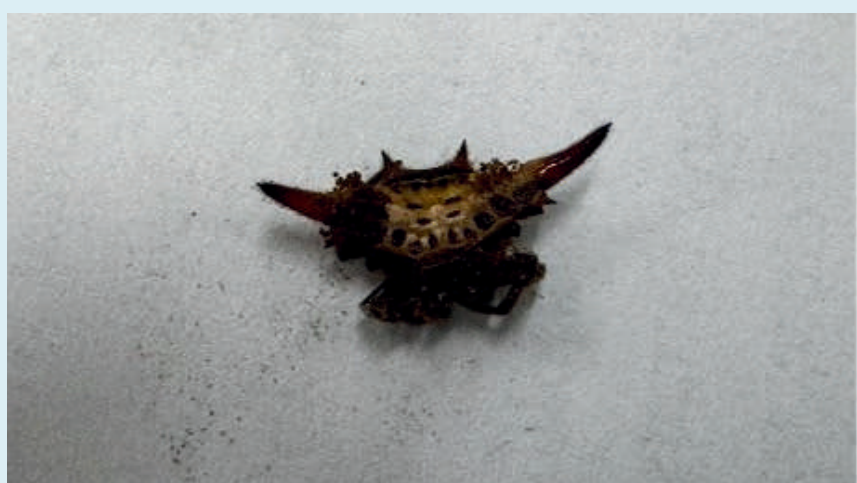


攝影機

● 實驗用蜘蛛照片(圖皆為自製)



銀腹蜘蛛
Leucauge magnifica



梭德氏棘蛛
Gasteracantha sauteri



泉字雲斑蜘蛛
Cyrtophora moluccensis



擬幽靈蜘蛛
Smeringopus pallidus



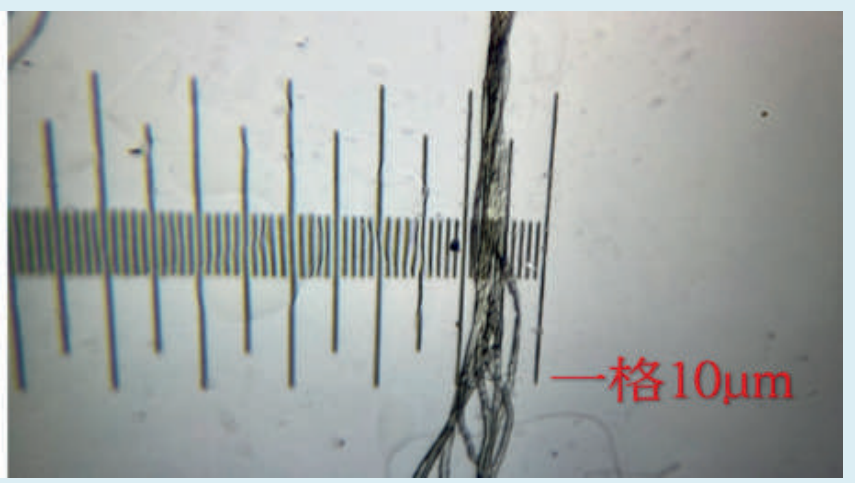
人面蜘蛛
Nephila pilipes



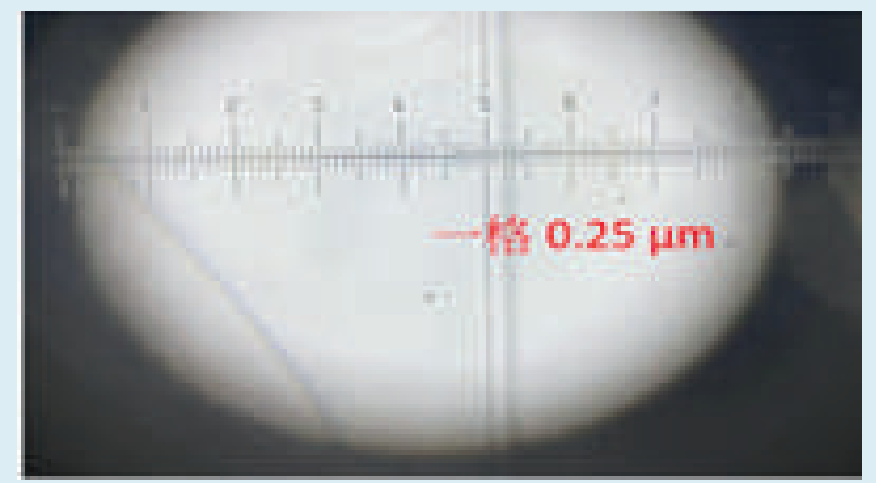
日本長腳蜘蛛
Tetragnatha maxillosa



橫帶人面蜘蛛
Trichonephila clavata



顯微鏡下的擬幽靈蜘蛛絲



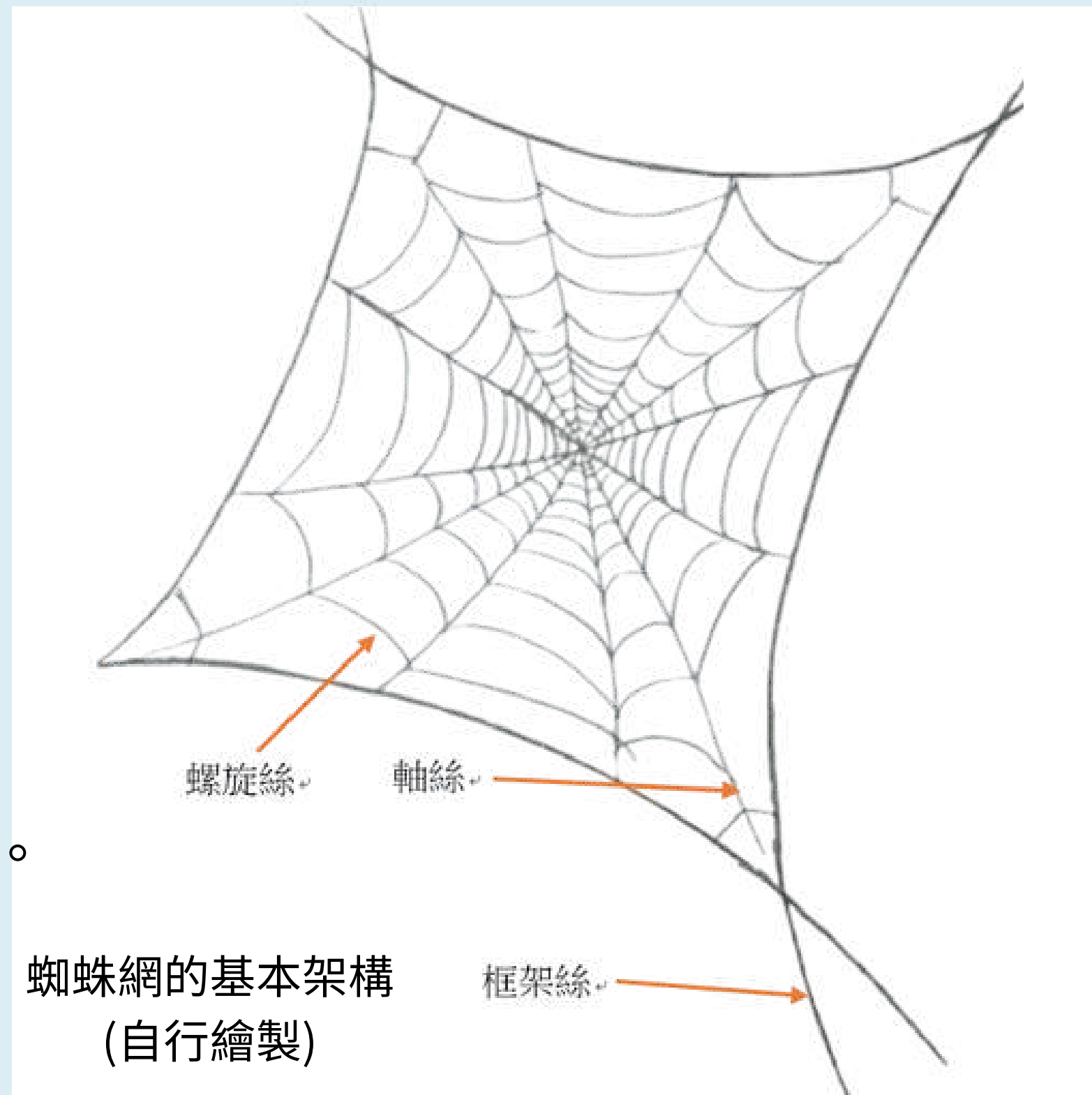
顯微鏡下的人面蜘蛛絲

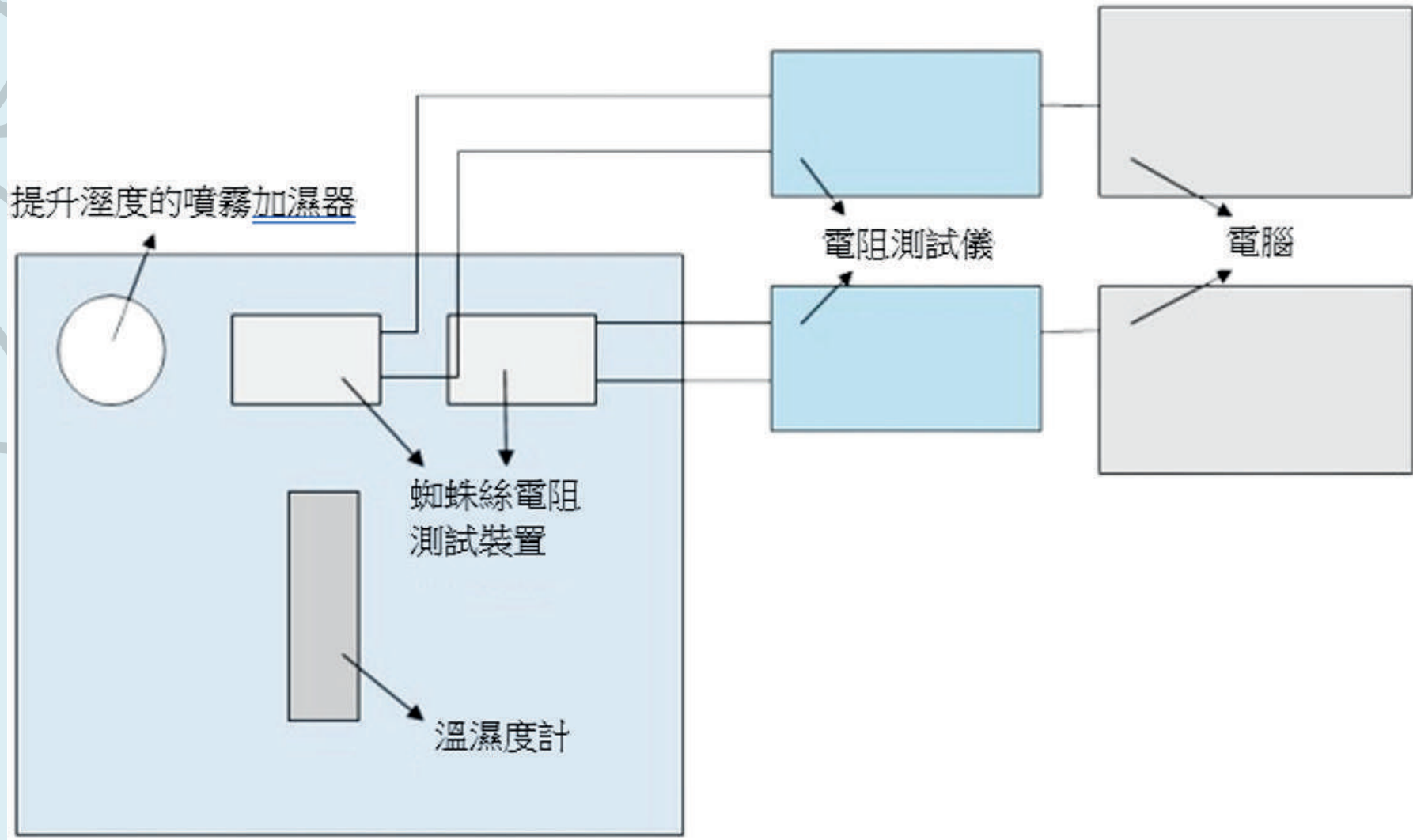


8條蜘蛛絲實驗配置

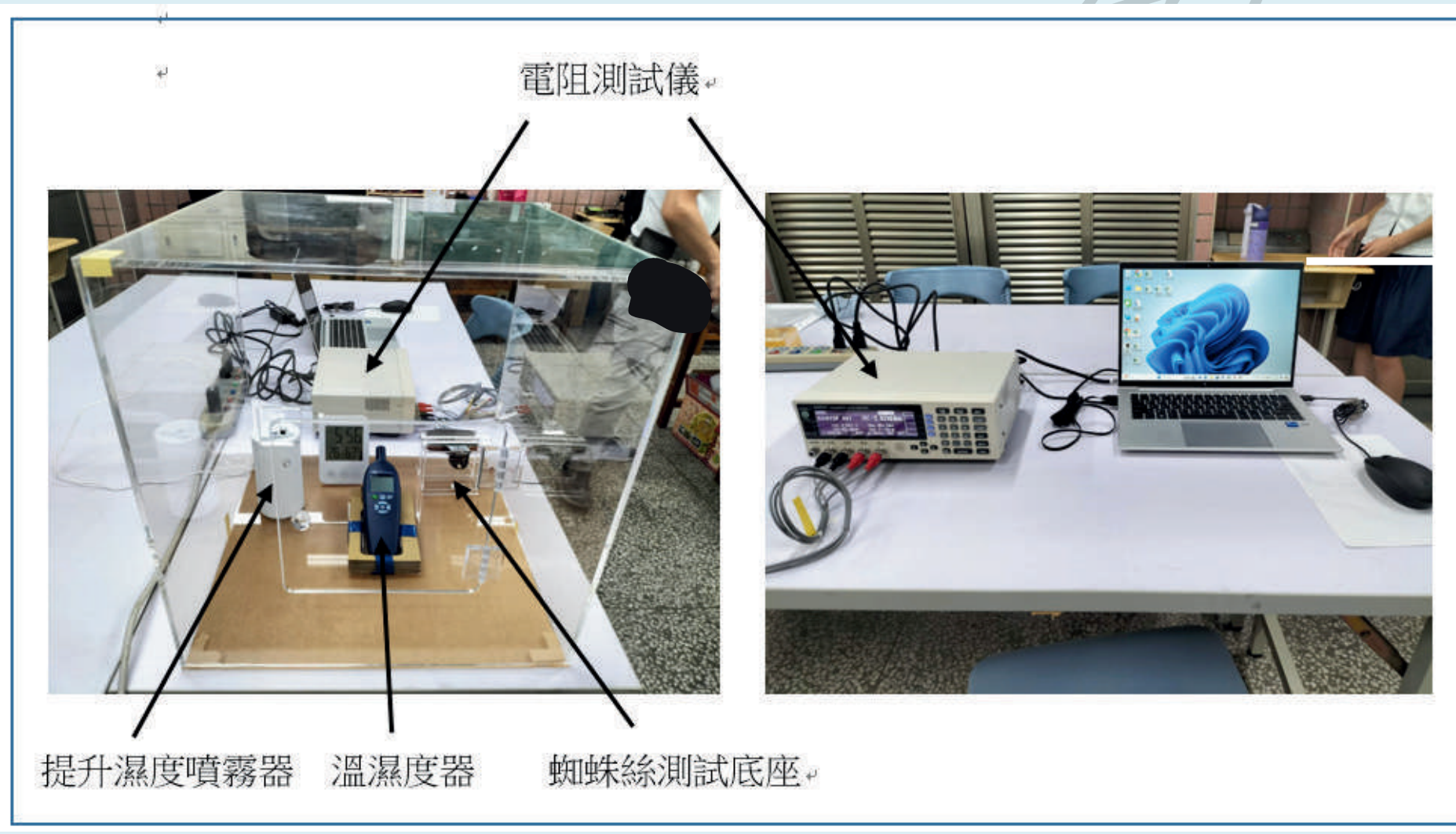
● 研究方法(圖皆為自製)

- 一、用蜘蛛絲採集器採集到上述單獨個體的蜘蛛絲後，將採集器放入蜘蛛絲採集器收納盒並帶回實驗室，實驗前將蛛絲放置在測試座上，每個個體放8條做測試。
- 二、將放好蜘蛛絲的測試座以及溫濕度計放入箱中，實驗前使用市售乾燥劑對測試箱內除溼，將箱內的相對溼度降到40%左右便可以開始實驗，溫度則以空調與加熱燈泡控制在20°C以上。
- 三、將測試座的電線通過壓克力箱上的小孔接至LCR電阻測試儀，將LCR的訊號線接到筆電上，檢查線路是否正確。
- 四、將筆電上的電腦軟體設定每1秒記錄一次電阻值，每次預設1800秒（30分鐘）。
- 五、開啟電阻測試儀紀錄相對溼度40%至90%區間電阻值的變化情況，同時箱內開啟噴霧式加溼器做溼度加溼，由溼度40%開始加溼至90%，再以錄影機同時紀錄箱內溼度計溼度變化。
- 六、當相對溼度達90%時停止測試，將溼度和電阻值的資料作成Excel檔案後進行分析。
- 七、檢視每次錄影影片的相對溼度數據，配合LCR電阻測試儀紀錄的電阻值做成新的檔案，將檔案中的原始電阻值資料取對數後再進行相對溼度對數作圖分析。
- 八、將相對溼度換算成絕對溼度做絕對溼度的作圖分析。

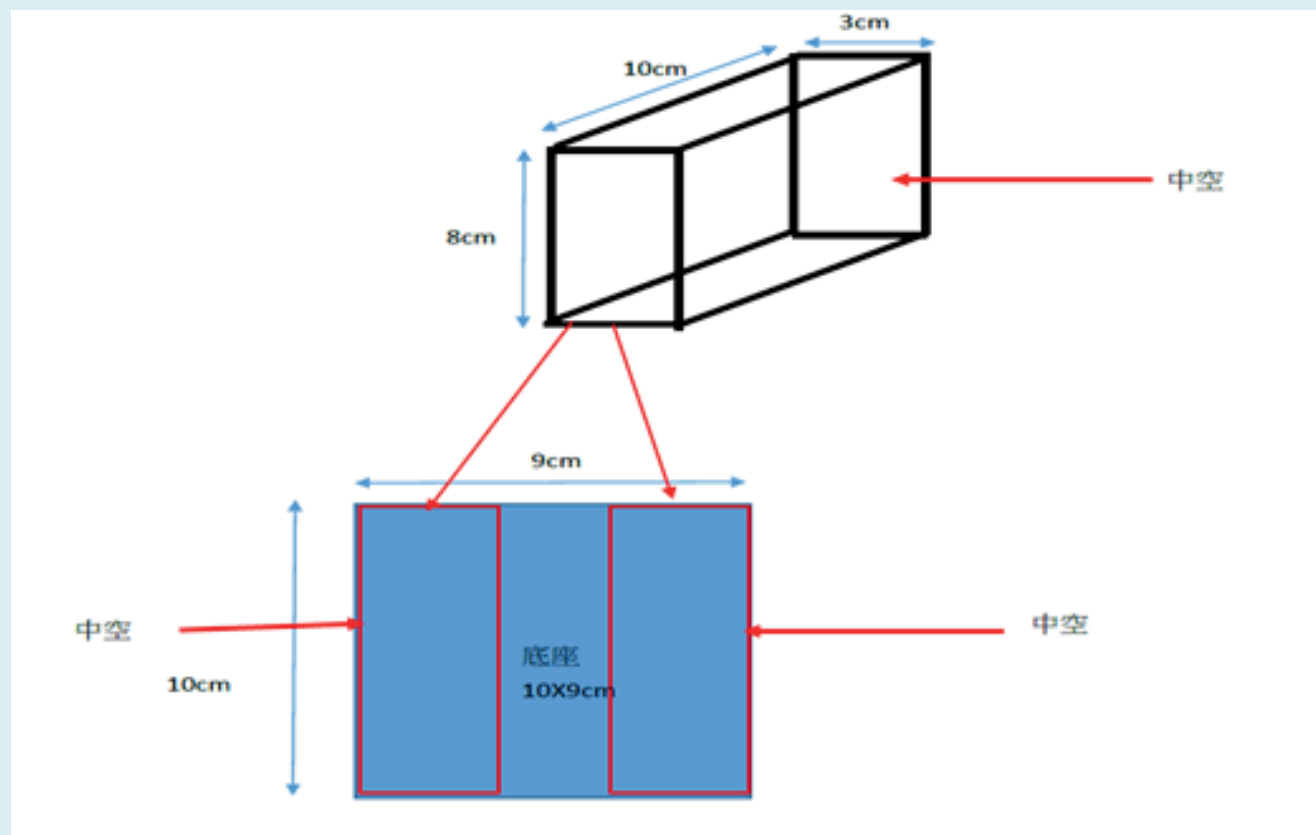




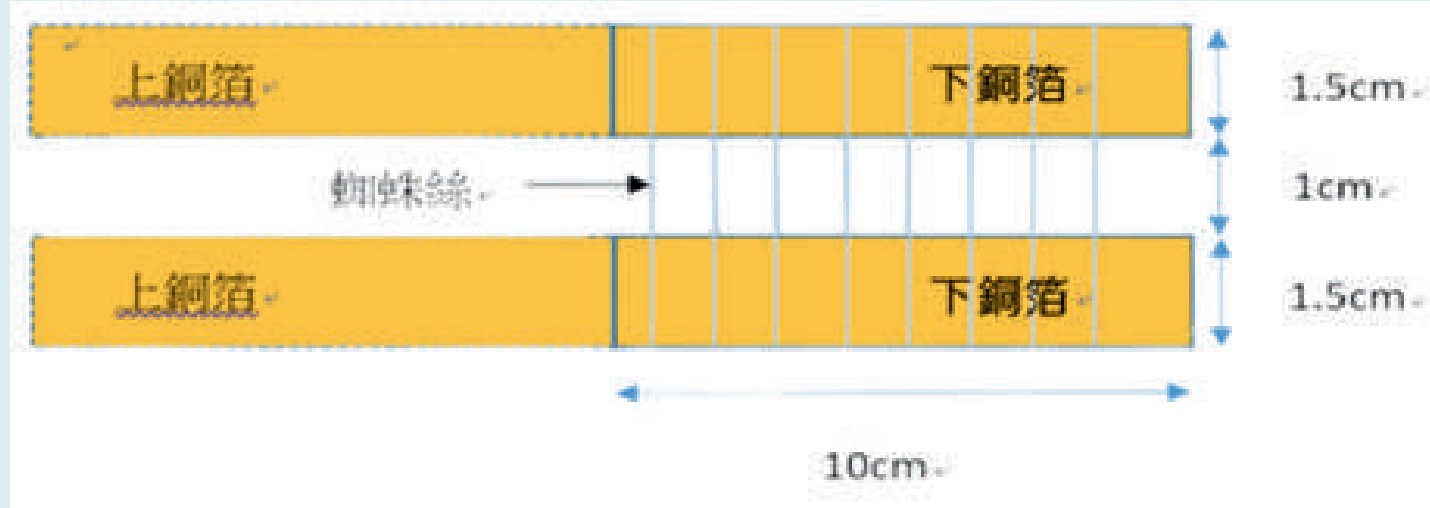
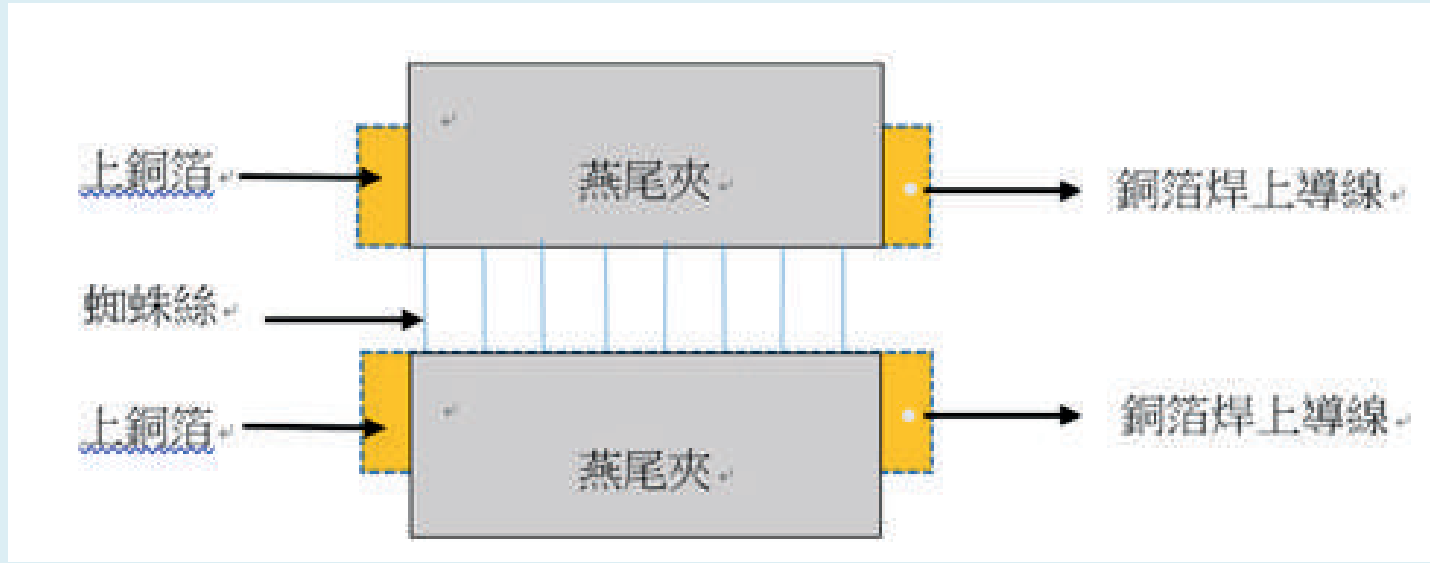
壓克力箱內整體測試圖 (上視圖)



壓克力箱內整體測試照片

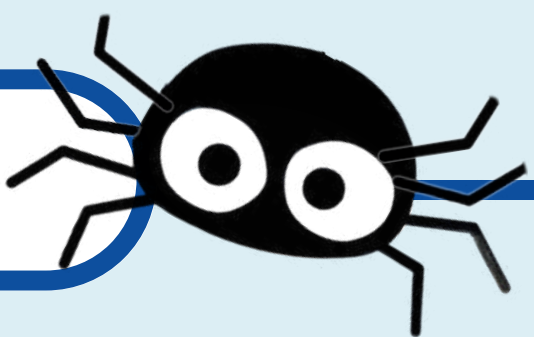


蜘蛛絲測試壓克力載具設計圖

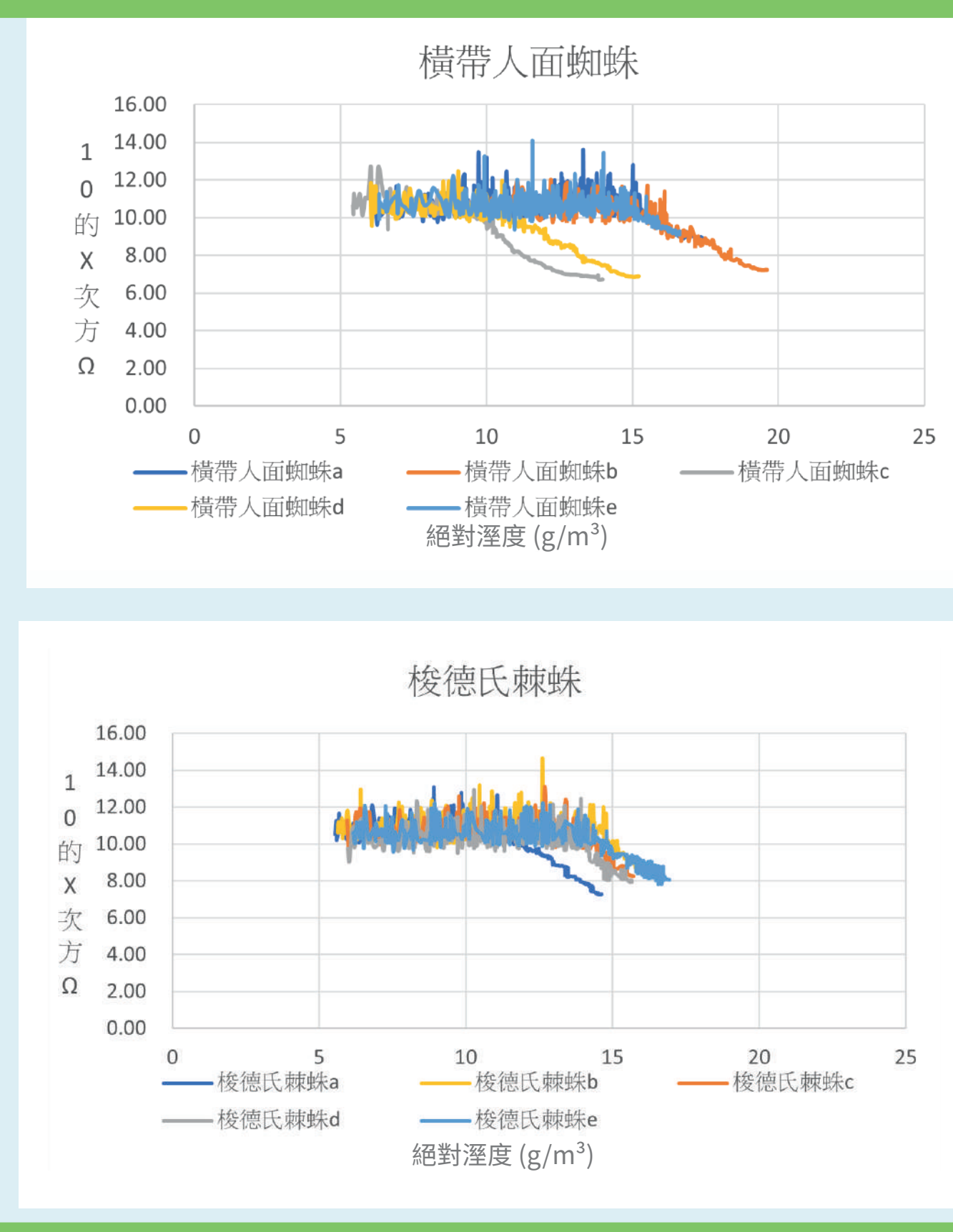
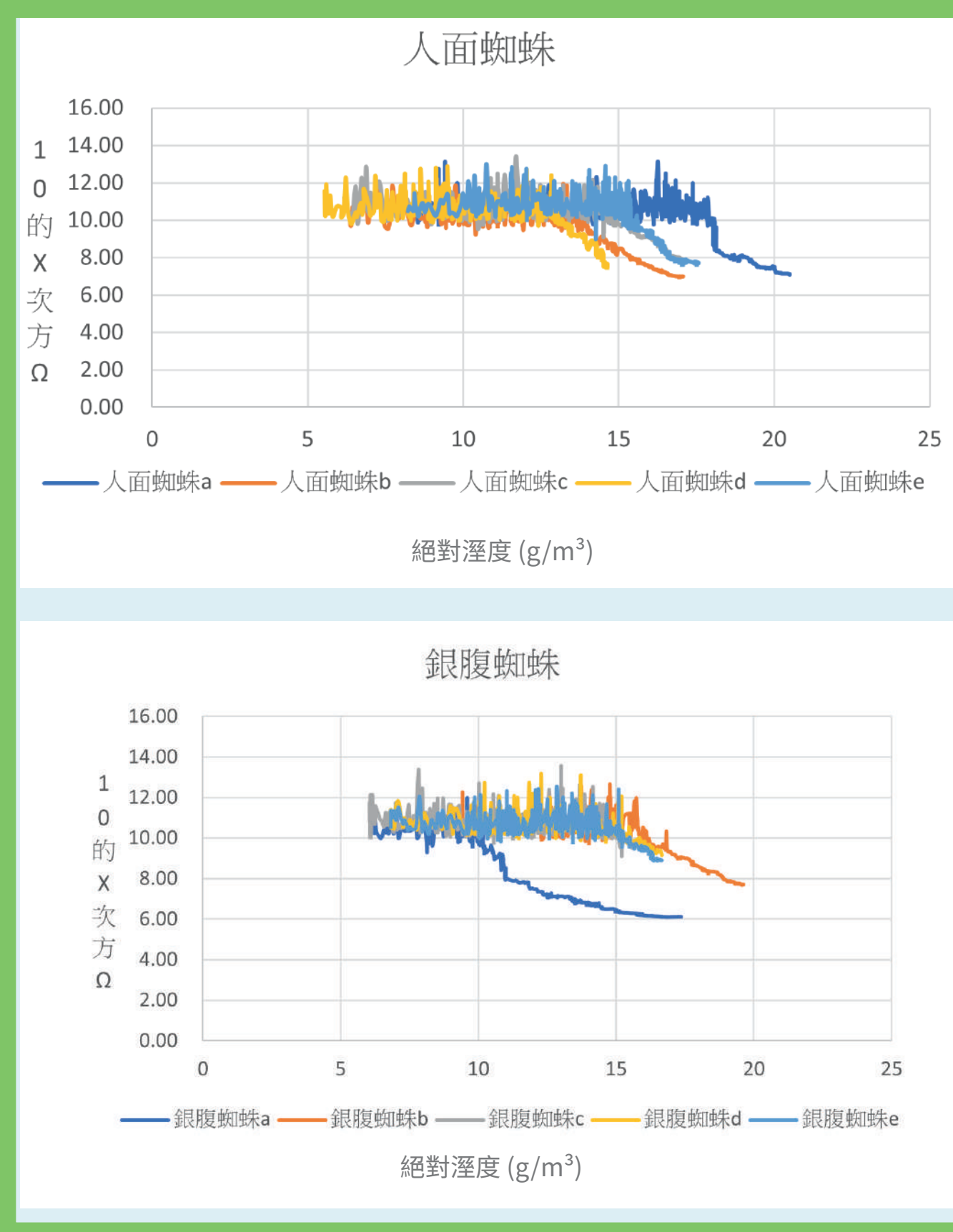
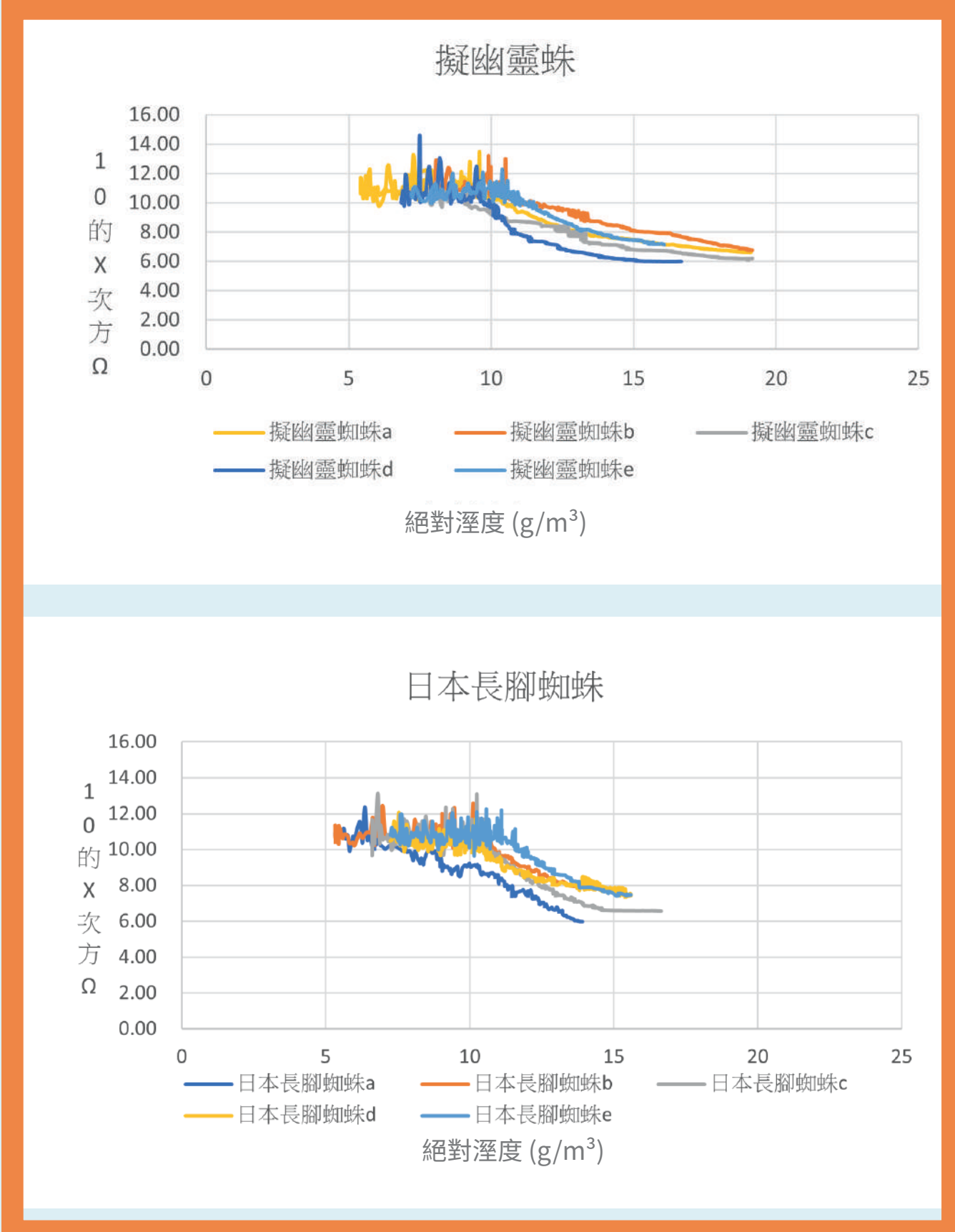
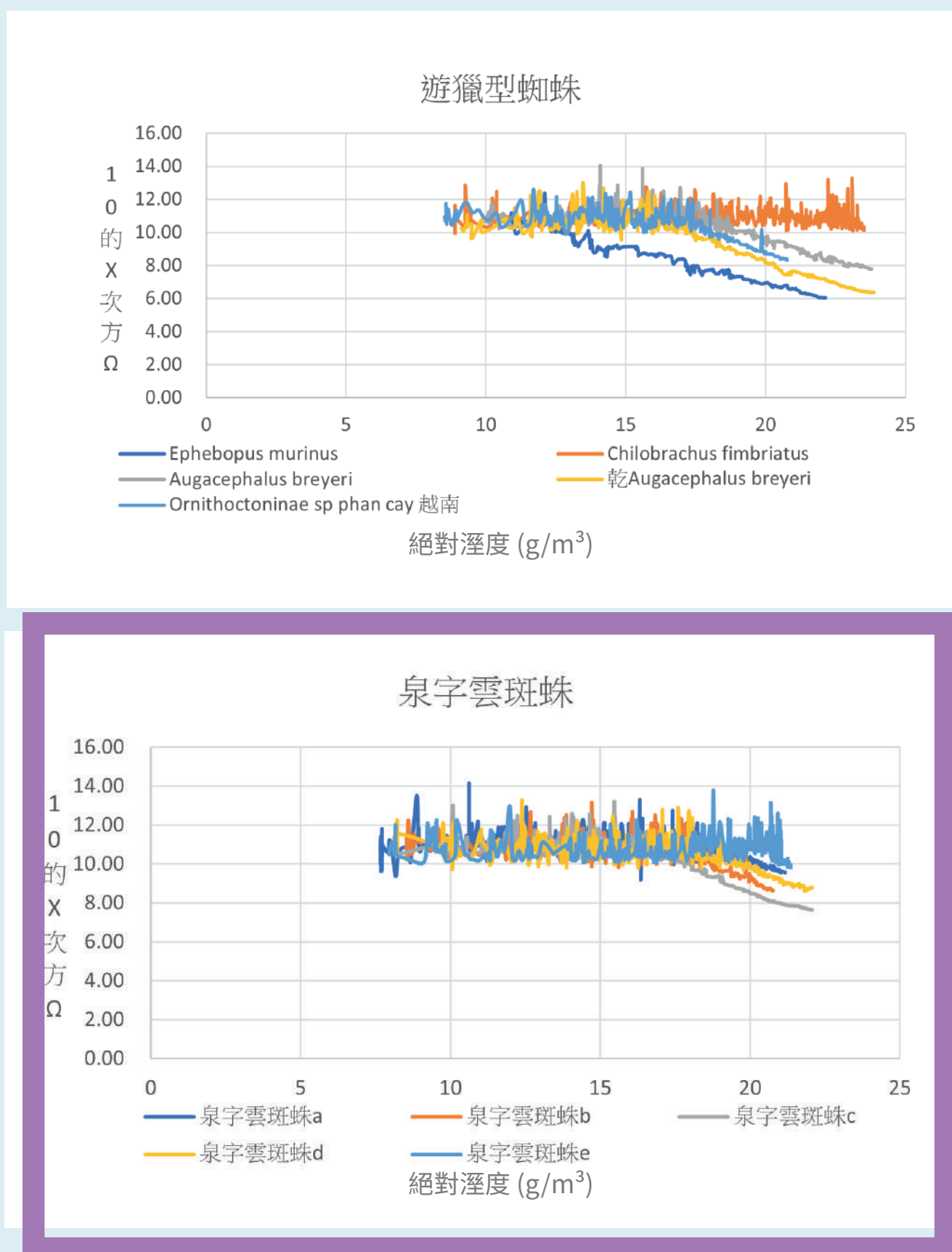


蜘蛛絲電阻測試載具上視圖

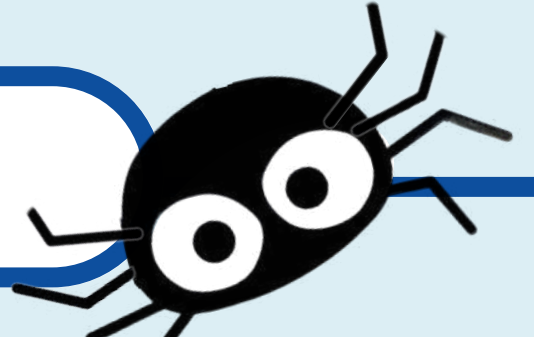
絕對溼度對數分析圖



(以下圖皆為自行整理製作)



絕對溼度對數趨勢圖

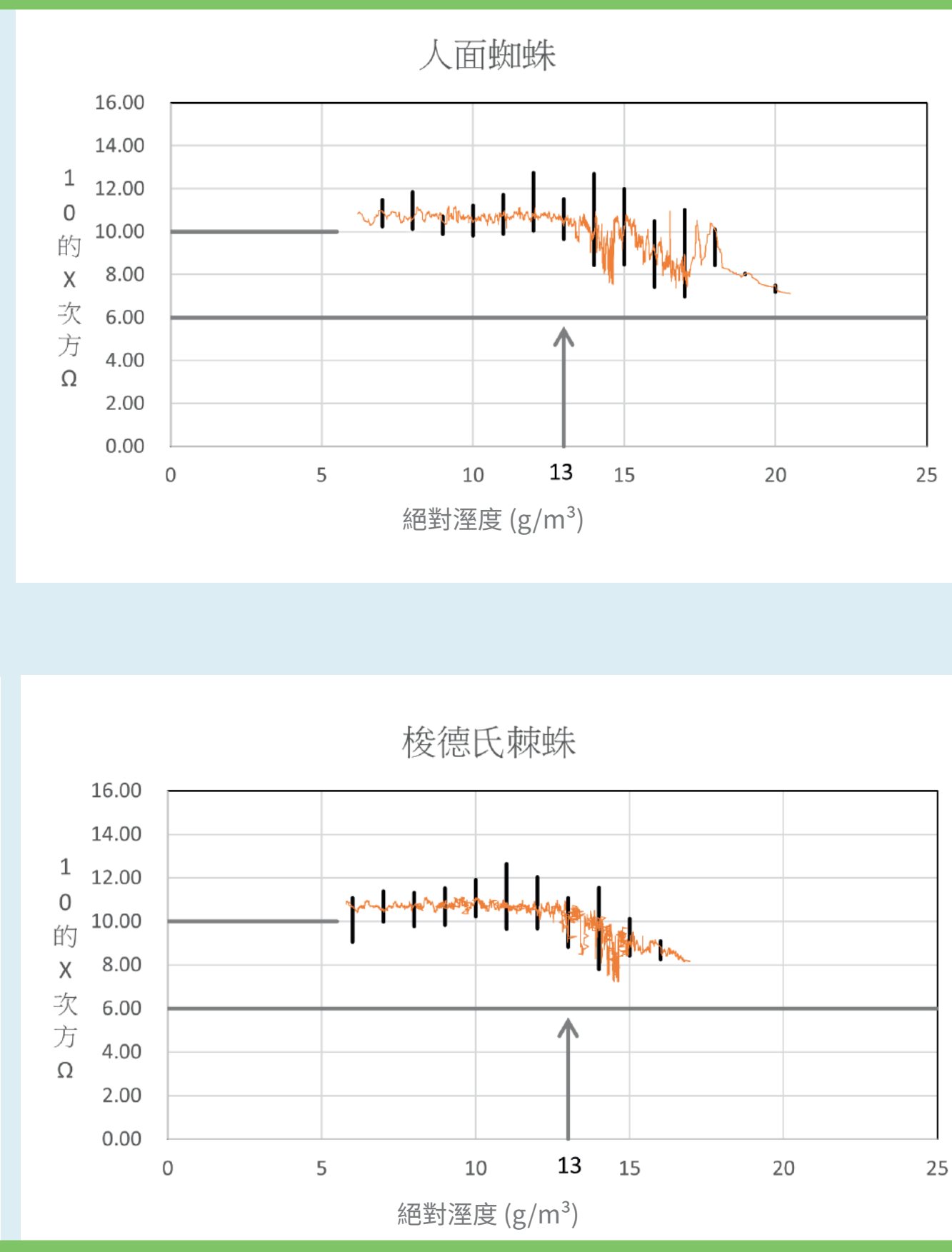
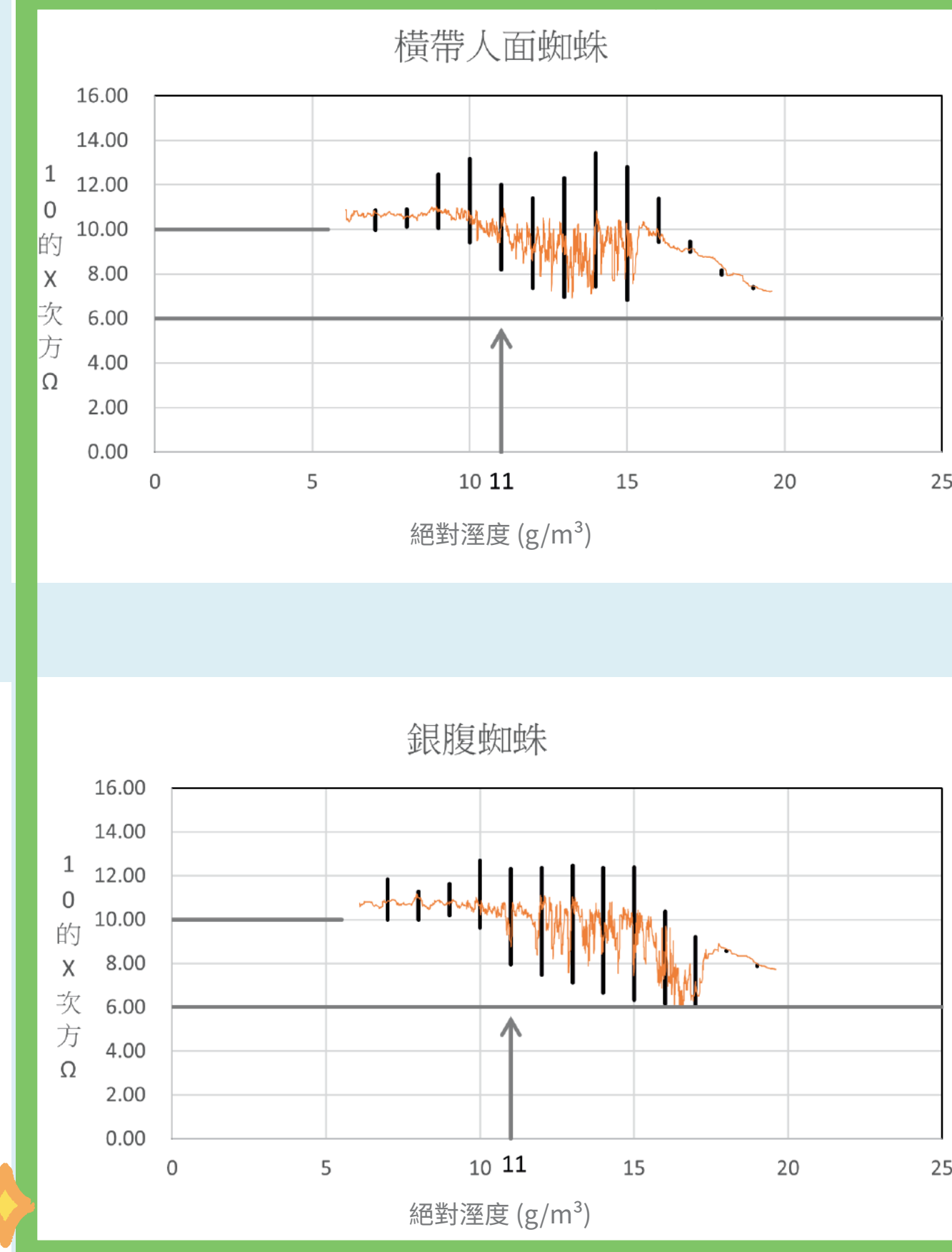
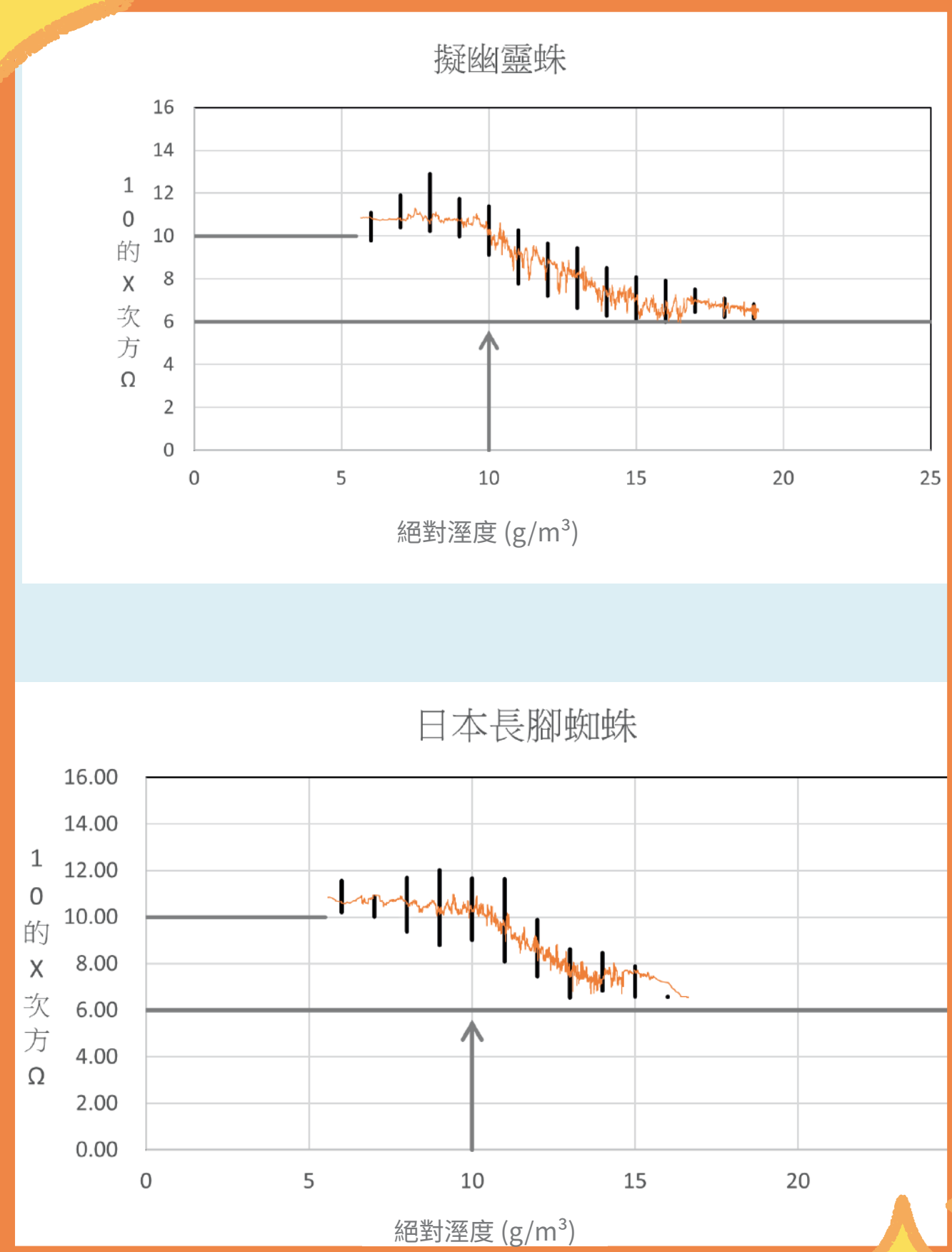
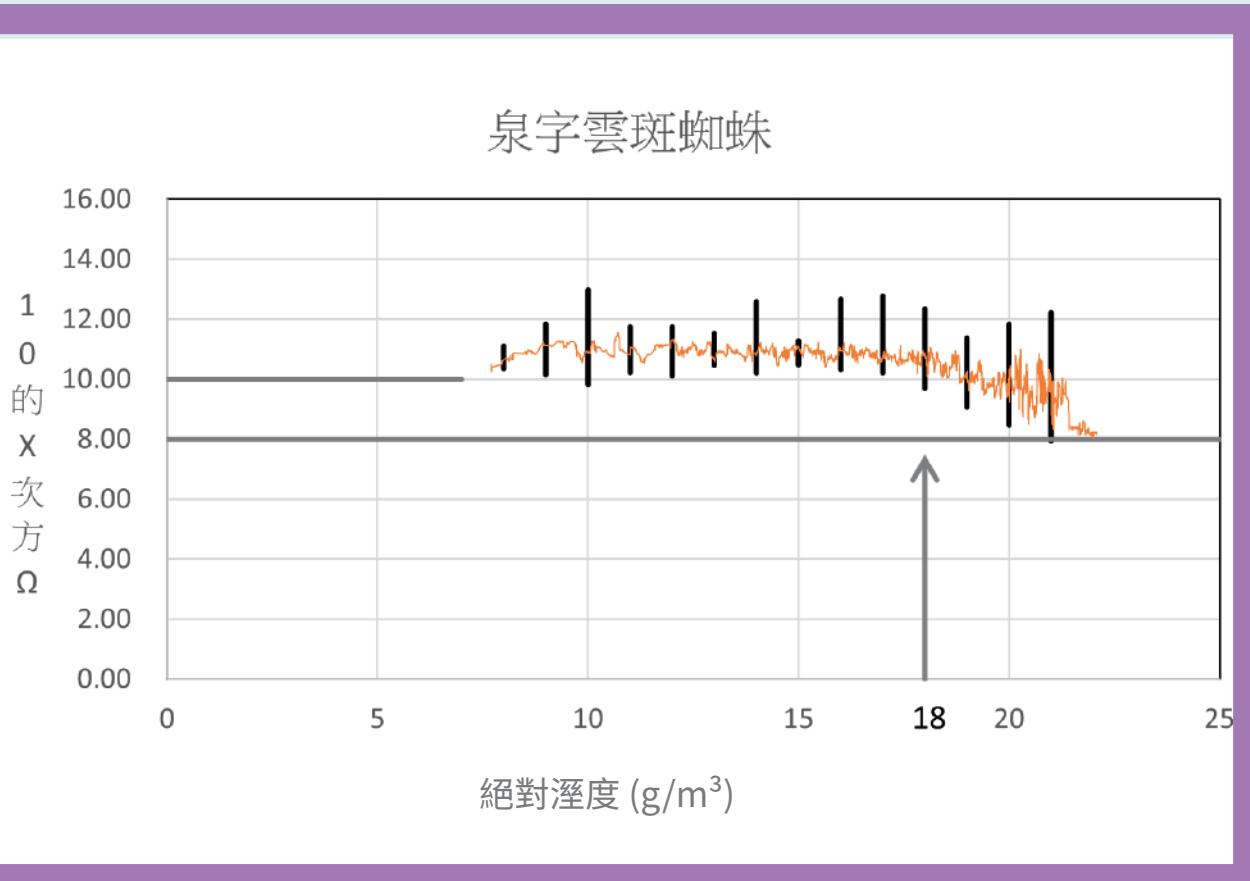


(以下圖皆為自行整理製作)

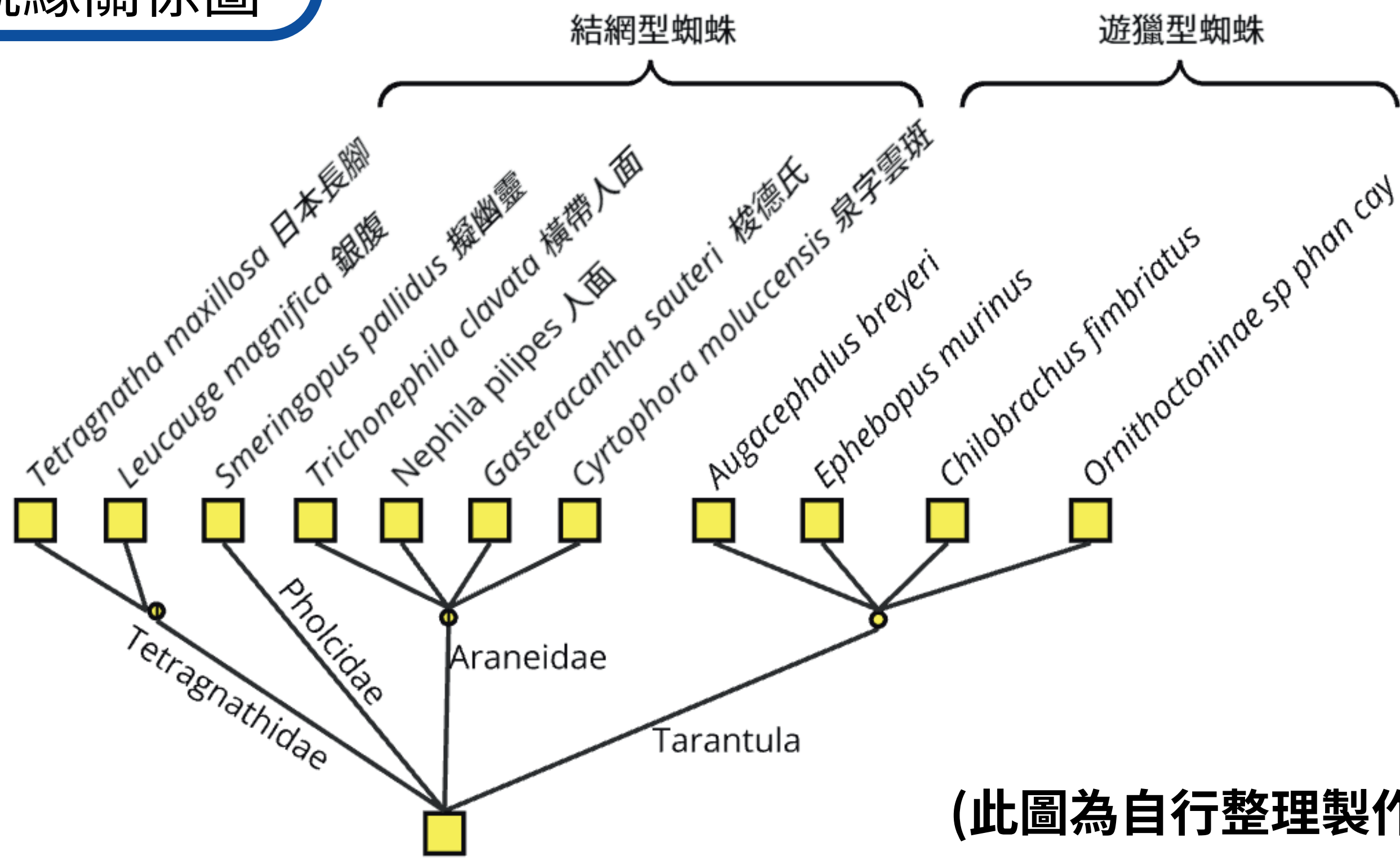
低溼度下降群
對溼度靈敏度最高
有最多的電阻值變化

中溼度下降群

高溼度下降群
在正常環境溼度之下
電阻值不穩定



親緣關係圖



(此圖為自行整理製作)

檢索表



(此圖為自行整理製作)

討論

一、親緣關係圖

目前共有7種48個個體的織網型蜘蛛絲的「電阻-溼度趨勢圖」，在溼度上升後電阻值開始下降的溼度值也各有明顯不同，我們以**開始下降的相對溼度數值大小做區隔**，共分成三大類：

(一)高溼度下降群：相對溼度80%（絕對溼度18g/m³）以上電阻值才會下降的蜘蛛絲。

(二)中溼度下降群：相對溼度在50%～80%（絕對溼度在10g/m³～18 g/m³）間電阻值下降的蜘蛛絲。

(三)低溼度下降群：相對溼度在50%（絕對溼度10g/m³）以下電阻值就會下降的蜘蛛絲。

二、結果討論

(一)人面蜘蛛絲線徑約為擬幽靈蜘蛛絲線徑的100倍，依照電阻公式，人面蜘蛛絲的線徑比擬幽靈蜘蛛絲大，照理來說人面蜘蛛絲電阻值應比較小，但結果卻相反，由此可知，**這兩種蜘蛛的框架絲的成分與形成方式一定存在很大的差異**。

(二)因為遊獵型蜘蛛的絲更細更容易斷，且不易取得，因此都只用一個個體來做測試，後續可以再加強實驗數據。

(三)使用8條蜘蛛絲並聯測試是因為並聯時可以讓我們測到更小的電阻值訊號，方使用來做實驗分析，但礙於每隻蜘蛛框架絲的絲量及測試座大小，所以無法作太多條絲的並聯測試。

(四)隨著飽和水氣量增加，相同的相對溼度其實際水氣量（絕對溼度）會因溫度而有所不同。我們實驗進行到冬天時發現溫度問題後嘗試用加溫系統補救，但其效果有限，所以我們只好找了換算公式，將所有原始相對溼度的資料全部轉換成絕對溼度，藉此排除溫度不同的變因。

電阻公式 $R = \rho L / S$ S:導體的截面積(m²) ρ:電阻率(Ω·m)
R:電阻(Ω) L:導體的長度(m)

$$\text{絕對溼度} = \frac{216.7 \times 6.112 \times \exp\left(\frac{17.67 \times T}{T + 273.5}\right)}{T + 273.5} \times \frac{RH}{100}$$

T: 溫度
RH: 相對溼度

與前人研究比較探討

一、實驗對數分析圖的電阻值變化與前人研究的蛛絲纖維的溼度依賴性電導率相符（Steven *et al.*, 2011），前期低溼度狀況下的電阻值一樣是偏高，隨著溼度上升後電阻值才會開始下降。

二、同樣生活在戶外的大人面蜘蛛與泉字雲斑蜘蛛在應對下雨時的行為策略完全不同，結大網的大人面蜘蛛在快下雨時會將網收起，而結立體網的泉字雲斑蜘蛛則不會因下雨而收網（童等，2005）。大人面蜘蛛絲電阻值在下雨（絕對溼度18 g/m³）約為10⁸Ω，相對於泉字雲斑蜘蛛絲的10¹⁰Ω明顯小很多，**高電阻的泉字雲斑蜘蛛絲更能適應雷雨交加的天氣，所以本實驗對這兩種蜘蛛絲電阻值的測量結果符合其適應生態環境行為的應變**。

三、蜘蛛絲的性質除了受基本基因（MaSp1與MaSp2）的影響外，蜘蛛本身捕捉的獵物不同也會影響其胺基酸成分比例而產生差異（Wu, 2005）。另有研究指出蜘蛛也會依據當季獵物的大小來調整其框架絲的胺基酸組成與絲的粗細來增加捕食效率（趙，2006）。綜合上述前人研究結果與本實驗研究結果比較分析後，發現不論在同種間的差異或是不同種間的差異，都可由其基因表現、獵物狀況與環境變化等因子來闡釋（Robert, 2015），而這些多種複雜因子所造成的差異在本實驗可使用簡單的方法獲得蜘蛛絲的電阻值來檢視。



結論

一、不論是遊獵型的織巢絲或是織網型的框架絲在低溼度區間（相對溼度<50%；絕對溼度<10 g/m³）內電阻值都偏高（>10¹⁰Ω），一直要到絕對溼度在10 g/m³左右，電阻值才會開始慢慢下降。

二、在相同的絕對溼度區間（10 g/m³～25 g/m³）測試結果顯示，擬幽靈蜘蛛絲在此區間內電阻值變化量（10¹⁰Ω～10⁶Ω）明顯高於其他種類的蜘蛛絲，而其他**不同種類的蜘蛛絲也都有其獨特的「電阻-溼度趨勢圖」**。

三、不同種類蜘蛛絲的「電阻-溼度趨勢圖」都不同，此結果說明同為蛋白質材質的蜘蛛絲，在親緣關係相近的蜘蛛中，其蜘蛛絲的電阻特性與濕度反應也有很大的種間差異，**除了蜘蛛絲蛋白質成分不同外，蜘蛛絲線徑、蜘蛛食性、蜘蛛絲形成過程應力作用與各種環境因子也是其原因**。

未來展望

一、建立蜘蛛絲**「電阻-溼度趨勢圖」資料庫**，減少生物多樣性調查的成本，也可以在避免傷害蜘蛛本體的狀況下了解該區的生物多樣性。另外資料庫中的各種蜘蛛絲的**「電阻-溼度」**相關資料，將來也可以為蜘蛛絲各種應用材料研究、刑事鑑定等方面做出貢獻。

二、各種蜘蛛框架絲成分與形成方式的差異方面，將來會將測試過的蜘蛛絲進行蛋白質的胺基酸成分分析，再將其結果與目前的實驗成果做對比，期望能更清楚了解造成各種蜘蛛絲間差異的演化機制與生物學意義。

三、利用蜘蛛絲的**「電阻-溼度」**特性，將不同溼度狀況下蜘蛛絲所產生的電阻值訊號轉化成數字，可用來監測環境溼度的變化，為環境溼度感測器的製作提供新的材料與想法。

參考文獻

- 童曉哲、林雍傑、林鈺書、鄧偉豪，(2005) ”絲”路之旅——環境因子對蜘蛛絲張力之影響及胺基酸組成分析，中華民國第四十五屆中小學科學展覽會作品說明書，台中市。
- 趙依祈，(2006) 人面蜘蛛藉調整絲基因表現及網結構促進捕食效率，臺灣二〇〇六年國際科學展覽會優勝作品專輯，台北市。
- Robert J. (2015) Genetics Analysis & Principles:Sixth Edition. 740-741.
- Steven E., Park J. G., Paravastu A., Lopes E. B., Brooks J. S., Englander O., Siegrist T., Kaner P., Alamo R. G. (2011) Physical characterization of functionalized spider silk: electronic and sensing properties.https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC5074434/.
- Wu H. C. (2002) Will giant wood spider Nephila plipes respond to diet variation by altering silk protein ? Evidence from field surveys and manipulative studies. Master thesis, Tunghsi University, Taiwan.