

第二十三屆旺宏科學獎

成果報告書

參賽編號：SA23-397

隊伍名稱：快樂地科組

作品名稱：探討酸雨對不同性質農業用土中次量
元素之影響

參賽類別：地球科學

關鍵字：酸雨、土壤、次量元素

摘要

本研究欲探討酸雨對不同土壤中微量元素：硫、鎂、鈣三種物質的影響。土壤樣本選用臺北關渡平原土、陽明山土及培養土，使用 pH 值為 4.99 的人造酸雨進行實驗。實驗共分為兩個部分，第一部分將土壤進行連續 14 天澆灌酸雨與蒸餾水，第二部分種植地瓜葉並連續澆灌酸雨與蒸餾水 30 天，於每日排水後量測土壤中硫、鎂、鈣三種微量元素含量與酸鹼值，並分析最適合種植農作物的土壤種類。研究結果發現：關渡平原土在受到人造酸雨的澆灌 14 天後，硫含量上升，鎂、鈣則無顯著變化。綜合分析結果顯示：關渡平原的土壤最適合種植作物，其次是陽明山的土壤，而培養土則最不適合。第二部分實驗在 30 天實驗後顯示關渡平原的土壤性質較不易受酸雨影響，且地瓜葉在此土壤中吸收的鎂和鈣含量較多，因此認為是本研究中最適合種植作物的土壤。其次是陽明山的土壤；而培養土在經過人造酸雨澆灌後，地瓜葉所吸收的鎂和鈣含量明顯較少，整體評估結果顯示培養土是三種土壤中最不適合用於種植作物。

壹、研究動機

近年來隨著工業污染、汽機車排放廢氣量的增加，導致人為致酸物質增加。雨水受到二氧化硫（SO₂）及氮氧化物（NO_x）的汙染形成酸雨，此現象對土壤中的多種物質，如氮、磷、鉀等主要元素（major element）與微量元素（trace element），如硫、鎂、鈣（潘詩怡，2018）產生影響。美國來德大學（Rider University）研究指出，在阿帕拉山脈的土壤物質（鈣、鹼性陰離子、陽離子）會受酸化後的土壤影響，例如：鈣能夠使植物的氣孔關閉，缺鈣可能會造成植物的蒸散作用增加，進而導致植物用水量增加（泛科學，2021）。

此外，我們每天搭乘捷運上、下學的途中都會經過離學校最近的農業用地—臺北關渡平原，而學校內的小田園中利用培養土及陽明山土種植作物（如地瓜葉）。使我們好奇，如果這三種不同的農業用土在被酸雨澆灌後是否會有相同的結果？故本研究欲探討酸雨對臺北關渡平原土壤、培養土與陽明山土性質的影響，以及觀察土壤微量元素—硫、鎂、鈣含量及 pH 值的變化，並實際種植地瓜葉觀察其生長情形，評估三種農業用土何者最適合種植作物。

貳、研究目的

- 一、瞭解酸雨的成因及成分。
- 二、分析臺北關渡平原土壤、陽明山土及校園小田園培養土的性質與成分。
- 三、設計與製造人造酸雨，並模擬降雨澆灌土壤。
- 四、探討澆灌酸雨後土壤中 pH 值及硫、鎂、鈣含量的變化。
- 五、分析不同土壤受到酸雨澆灌後，何者較適合種植農作物。
- 六、種植地瓜葉，並分析在澆灌酸雨與蒸餾水後，土壤 pH 值及硫、鎂、鈣含量變化。

參、研究過程與方法

一、文獻回顧

(一) 酸雨的定義

「酸雨」顧名思義代表雨水呈現酸性，但並非 pH 值小於 7.0 時就稱為酸雨（商俊盛，無日期），因為自然界空氣中存在二氧化碳，故在自然界中的雨水並不會與純水一樣呈現中性，而是呈現 pH 值約為 5.6。而行政院環境屬 1990 年統一規定：當雨水的 pH 值 < 5.0 時，被稱為「酸雨」。酸雨又分為「濕沉降」與「乾沉降」兩類，濕沉降意指污染物以降水型態落至地面、而乾沉降則是指酸性物質在未降雨時以落塵方式落至地面。

(二) 酸雨的形成過程與對土壤的影響

造成雨水酸化的罪魁禍首是硝酸鹽 (NO_3^-) 及硫酸鹽 (SO_4^{2-}) 等物質。這些污染物滯留於空氣中時，與空氣中氧分子及水分子之間經過化學反應後產生硫酸、硝酸等酸性物質，這些酸性物質有時在雨滴形成初期即被吸收，或在降雨時伴隨雨滴降落，均會增加雨水的酸性，因而使得雨水較正常的雨水更進一步的酸化。

「酸雨」滲入土壤後，不僅會使植物生長所需營養物質流失，造成植物養不足，也會使原本存在土壤中的重金屬溶出，使植物吸收，再經由食物鏈進入人體，影響人體健康（葉琮裕，2019）。例如在彰化地區的葡萄果園就曾受大量酸雨侵襲葡萄植株和土壤，導致葡萄受到污染（自由時報，2017）。

(三) 硫、鎂、鈣三種物質在植物中的作用

1. 植物中硫的作用

Farm Easy (2016) 的研究中發現，硫參與植物許多基本代謝過程，在植物中硫量會隨著植物種類改變而有所不同，濃度約在 0.1~0.5%，例如：氨基酸和蛋白質合成、葉綠素合成及硫脢酶。硫元素通過根部從土壤吸收並運送至植物組織進行代謝，若缺乏硫會導致植物的葉子出現黃化現象。

2. 植物中鎂的作用

鎂是細胞分裂和蛋白質形成時必需的物質，在植物中含量約 0.1~0.4%，主要存在於葉綠體，若沒有鎂就無法吸收磷。若缺少鎂植物葉脈間的顏色會消失，嚴重缺乏的話則是葉子呈現紅紫色，導致植物生長緩慢 (Farm Easy, 2016)。

3. 植物中鈣的作用

土壤中常用鈣來調和土壤的酸鹼度，在植物中含量約 0.2%到 1.0%。鈣有助於豆科植物根部形成根瘤菌等對植物生長有益的微生物，若植物缺乏鈣會導致新葉生長緩慢和根變成深色，甚至使植物死亡 (Farm Easy, 2016)。

(四) 實驗土壤與實驗植物介紹

1. 關渡平原土

關渡平原是臺北最大的平原，曾發生大地震使地層陷落形成臺北大湖湖床。海水沿基隆河及關渡附近流入臺北盆地，後經水流切割形成關渡隘口。基隆河及淡水河繼續沖積而形成之關渡平原，自清代為臺北盆地的農業重地 (臺北市北投區公所, 2022)。

根據中央氣象署 1998 至 2006 年的資料指出，關渡平原區域平均年降雨量為 2,471 公釐，雨季集中在夏、秋季，佔年平均降雨量 70%。而關渡平原的年均溫約為 22°C，二月達最冷月均溫為 15°C；最高均溫則出現在七月，高達 28.5°C。關渡平原土土壤照片如圖一左所示。

2. 培養土

培養土(如圖一中)含有四種有效的添加物：石灰岩末、蛋殼、蠔殼和石灰岩屑。石灰岩末可以有效降低培養土的酸性；蛋殼、蠔殼和石灰岩屑則可以降低培養土的酸性並幫助排水（大華科技大學校園觀光農場，2018）。培養土土壤經過完全發酵，因此含有多種特殊且有益的微生物，有助於植物根系的生長，也能提高抗病性。

3. 陽明山土

陽明山土(如圖一右)含有珍珠石、椰纖土、蛭石及泥炭土。珍珠石本身不具吸水性，但可藉由在粒子之間吸附水分和肥料；濕潤的椰纖土保水性和通氣性好；泥炭土含有比較高的有機質，其吸水性較好（農傳媒，2022），故陽明山土可增加土壤排水及通氣性。

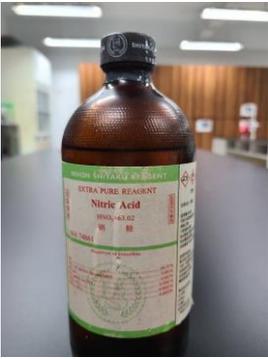


圖一、由左而右分別為關渡平原土壤、培養土土壤及陽明山土土壤。

（五）種植植物—地瓜葉

地瓜葉又稱番薯葉，生命力旺盛且容易栽種，又可多次採收，是早期農村社會常見的鄉土蔬菜。地瓜葉是校園小田園中常見作物，且全年四季皆可生產，與病蟲害抗性較佳，故不必使用農藥即可種植（農業部農業試驗所，2023），具普遍性、高經濟性特徵，故選擇作為本研究種植作物的對象。

二、研究設備與器材

關渡平原土壤 3000 克	陽明山土 3000 克	培養土 3000 克	硫酸 H_2SO_4	硝酸 HNO_3
				
花盆 6 個	燒杯 (1000ml) 6 個	去離子水	自動澆水器	手套
				
pH 值計	電子秤	量筒	濾紙	土壤養分檢測儀
				
鏟子	pH 值檢測計	容量瓶	塑膠盆	自動澆水器
				

三、酸雨製備

表一為交通部氣象局鞍部測站 2013 至 2022 年年平均雨水酸鹼度值資料，並使用表二 1：5 的比例用硫酸、硝酸和蒸餾水調出 pH 為 2.0 的酸雨，再加水稀釋至 pH 值 4.99，作為本研究的模擬酸雨。

表一、交通部氣象署鞍部測站 2013-2022 年之年平均雨水 pH 值數據表。(交通部氣象署)

年份	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	平均
酸鹼值	5.1	4.6	4.8	4.8	4.7	4.9	5.1	5.2	5.4	5.3	4.99

表二、交通部氣象署鞍部測站 2013-2022 年之酸雨中 SO₂ 及 NO₂ 含量數據表。

年分	SO ₂ (ppb/小時)	NO ₂ (ppb/小時)
2013	3.42	15.44
2014	4.99	12.55
2015	2.71	11.64
2016	2.58	11.68
2017	2.62	10.48
2018	2.17	13.22
2019	1.91	10.83
2020	1.99	13.85
2021	1.61	12.91
2022	0.88	10.90
平均	2.49	12.35

四、鈣、鎂測定方式

(一) 配置土壤交換性鈣、鎂浸提劑

量取交換性鈣、鎂浸提劑固體 38.5 克，加入 500 毫升的蒸餾水。

(二) 配置土壤交換性鈣、鎂顯色劑

量取土壤交換性鈣、鎂顯色劑濃縮液 5 毫升並加入 15 毫升的蒸餾水搖勻。

(三) 土壤交換性鈣、鎂總量測定

首先取出土壤 10 克，加入鈣鎂浸提劑 50 毫升，於震盪器上震盪 5 分鐘並使用濾紙過濾後，此為土壤待測液。取出待測液 3 毫升並加入浸提劑 7 毫升，再加入 4 滴交換性鈣鎂掩蔽劑、3.5 毫升交換性鈣鎂助掩劑、0.03~0.04 克土壤交換性鈣鎂指示劑甲，搖勻後逐滴加入交換性鈣、鎂顯色劑，邊加邊搖動，滴至溶液由紅色恰好變藍為止，並記下所用顯色劑滴數 (d)。

(四) 土壤交換性鈣測定

取出土壤 10 克，加入鈣鎂浸提劑 50 毫升於震盪器上震盪 5 分鐘並使用濾紙過濾後，此為土壤待測液。取出待測液 3 毫升並加入浸提劑 7 毫升，再加入 4 滴交換性鈣鎂掩蔽劑、1 毫升交換性鈣鎂強色劑、0.03~0.04 克土壤交換性鈣鎂指示劑乙，搖勻後逐滴加入交換性鈣、鎂顯色劑，邊加邊搖動，滴至溶液由紅色恰好變藍為止，並記下所用顯色劑滴數 (d1)，將 d1 乘以 450 再除以 10 後即為所含鈣含量 (mg/kg)，鎂含量為 270 乘以 d-d1 再除以 10 後即為土壤所含鎂含量。

五、硫測定方式

(一) 配置土壤有效硫、氯浸提劑

取 2.12 克土壤有效硫、氯浸提劑固體，加入 500 毫升蒸餾水搖勻。

(二) 配置土壤有效硫標準液

取 1.0 毫升土壤有效硫標準儲備液，加入 100 毫升蒸餾水。

(三) 配置硫濾液

取 5 克新鮮土樣，加入 25 毫升土壤有效硫、氫浸提劑，震盪 5 分鐘後，以濾紙過濾。

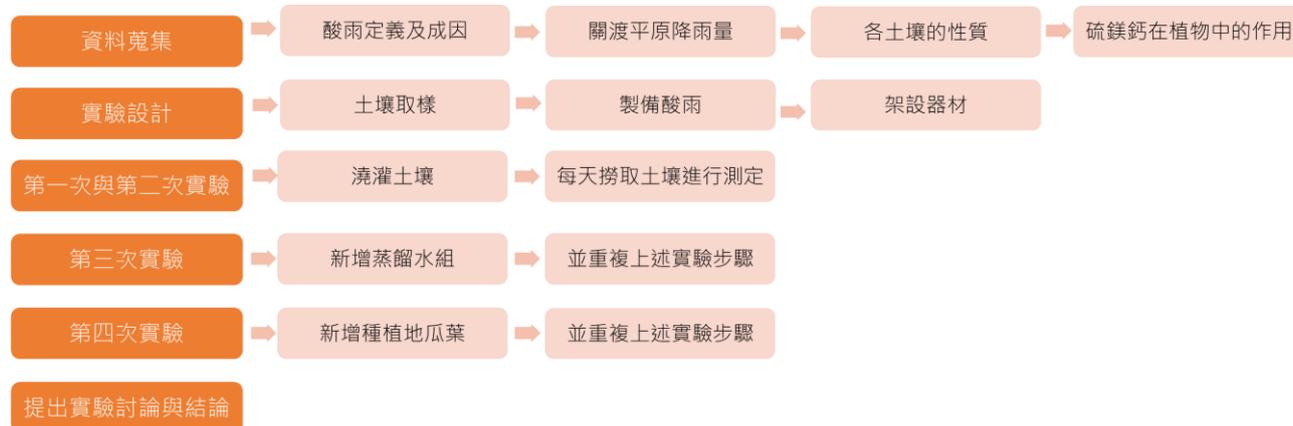
(四) 土壤有效待測液測定

取浸提劑，標準液，濾液各 2.0 毫升，置於三個不同的瓶子 中，每個瓶子分別加入土壤有效硫 1 號試劑 2 滴，土壤有效硫 2 號試劑 4 滴，土壤有效硫 3 號試劑 8 滴，每加一種試劑搖勻後再加下一種，靜置 5 分鐘後，即可上機測試。

肆、研究過程

一、研究流程架構與實驗分組

本研究流程架構如圖二，一開始先針對酸雨、實驗區域、土壤性質及硫、鎂與鈣對植物的影響做資料蒐集，再進行實驗設計、土壤取樣與製備酸雨，經過第一次和第二次的實驗後，在第三次實驗中加入蒸餾水組進行對照，而第四次實驗則是新增種植作物並進行觀察與分析。



圖二、研究流程圖。

二、研究設備設計與改良

(一) 使用馬達和澆水器

圖三和圖四為最初使用對土壤進行澆灌。將下方水桶內裝滿酸雨，通過水管上的澆水器以噴霧的方式對土壤進行澆灌。而後考量無法量化酸雨實際入土量，

與馬達開啟連續二十四小時無法循環補水，加上實驗須以噴霧的方式對土壤進行澆灌，馬達的馬力過大使出水過大無法進行實驗，故並未使用此方法。



圖三、馬達澆水器



圖四、馬達澆水器

(二) 使用寶特瓶和滴水器

圖五和圖六於寶特瓶上鑽孔並裝滴水器澆灌土壤，並用花盆取代塑膠盆讓土壤能排水。而後考量到澆水器雖然可調控出水的量，但仍無法精準確認每個孔洞的出水量是否相同，寶特瓶的水壓也會影響滴水器的出水量，故仍未用此方法。



圖五、寶特瓶滴水器



圖六、寶特瓶滴水器

(三) 使用點滴器（本研究最終選擇使用的實驗方法）

圖七和圖八為使用點滴器對土壤進行澆灌。因本研究時間設計為二十四小時連續澆灌，而點滴器可精準控制每小時的出水量，若將圖七中的紅色圓圈部分插入土壤，可讓酸雨澆灌整盆土壤，便不會僅有一部份的土壤受到影響，故點滴器的功能和本研究的實驗設計的需求最符合。



圖七、點滴器平放圖



圖八、點滴器示意圖

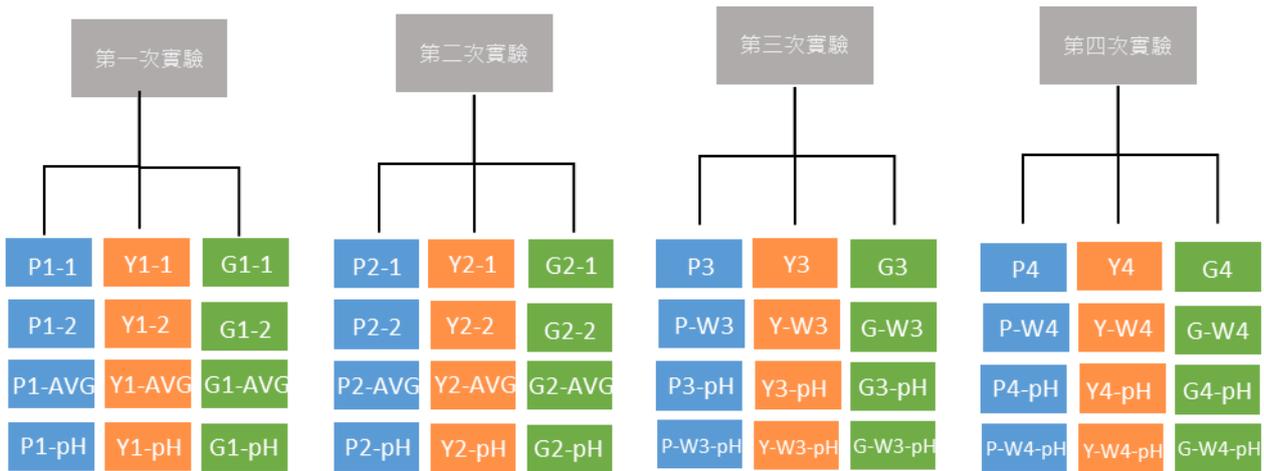
三、實驗與量測時間設計與改良

每次實驗中，每小時澆灌模擬酸雨 20mL，持續 14 天，開始澆灌為第 0 天。第 1 天起，每天撈取 20 g 土壤進行硫、鎂、鈣與 pH 值測定，若實驗天數適逢假日無法撈取土壤時，研究結果以無數據（空白）呈現。

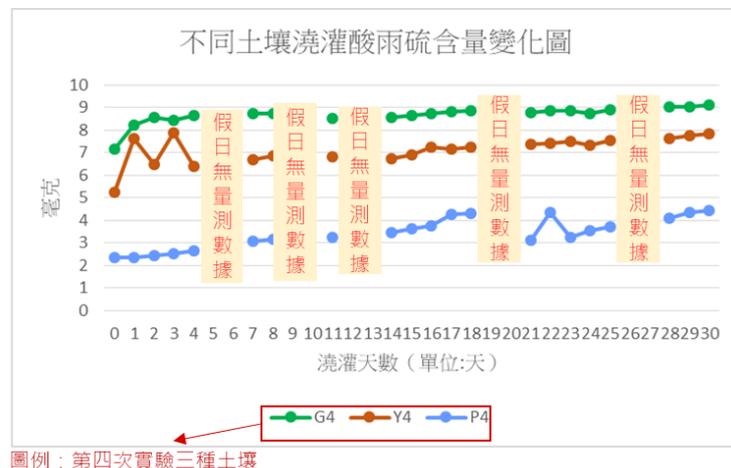
第四次實驗中，每小時澆灌模擬酸雨與蒸餾水 10mL，持續 28 天，降低每小時降雨量原因為在過去每小時降雨 20mL 會導致土壤過濕，在種植地瓜葉時可能導致根部窒息。實驗週期延長至 28 天的主要原因是為了增加樣本數，從而使數據更穩定，減少誤差，同時更方便觀察地瓜葉的生長情況。

伍、研究結果

本研究共進行四次實驗，實驗分組如圖九所示，為減少實驗數據誤差，在相同環境下進行兩組相同實驗，並將其數據平均。圖十則為實驗紀錄圖表圖例說明範例。第一次實驗中我們使用酸雨澆灌關渡平原土（G1-1、G1-2、G1-AVG）、陽明山土（Y1-1、Y1-2、Y1-AVG）、以及培養土（P1-1、P1-2、P1-AVG），分別測量其硫、鎂、鈣含量與 pH 值。第二次實驗的編碼分別為關渡平原土（G2-1、G2-2、G2-AVG）、陽明山土（Y2-1、Y2-2、Y2-AVG）、以及培養土（P2-1、P2-2、P2-AVG）。在第三次實驗中除了對土壤澆灌酸雨，另設計澆灌蒸餾水的土壤做為對照組進行比較，編碼為關渡平原土（G3、G-W3）、陽明山土（Y3、Y-W3）、以及培養土（P3、P-W3），並分別測量其硫、鎂、鈣含量與 pH 值。第四次實驗除對關渡平原土（G4、G-W4）、陽明山土（Y4、Y-W4）以及培養土（P4、P-W4）三種土分別測量其硫、鎂、鈣含量持續澆灌酸雨及蒸餾水外，新增實際種植地瓜葉進行分析。



圖九、實驗分組圖。

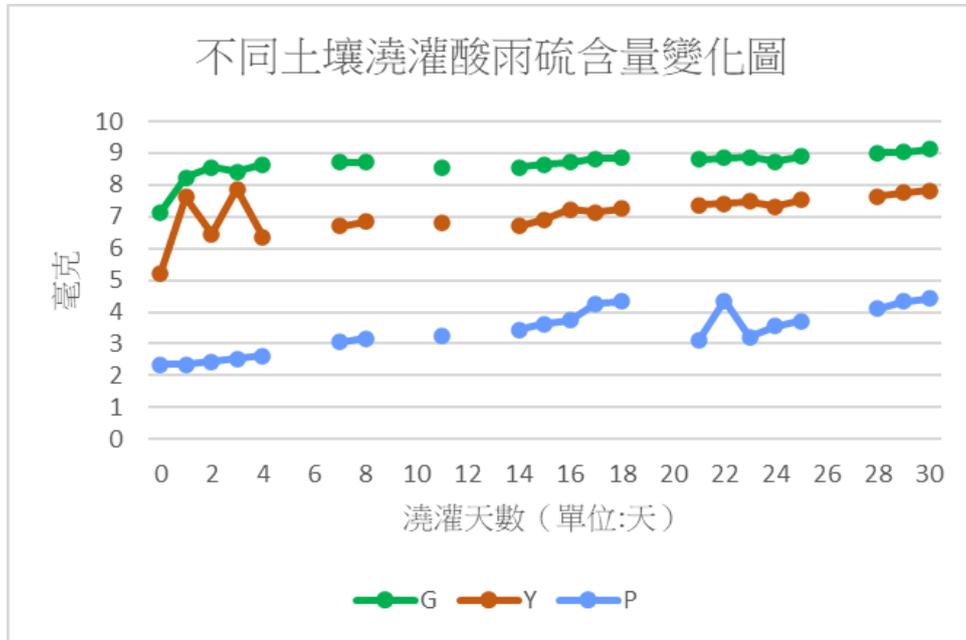


圖例：第四次實驗三種土壤

圖十、實驗紀錄圖表圖例說明。

一、不同土壤澆灌酸雨硫含量變化

從圖十一可以觀察到不論是關渡平原土壤、陽明山土土壤或是培養土土壤的硫含量在經過澆灌三十天的酸雨後，皆呈現較初始值上升的趨勢，而其中陽明山土在一開始出現了較為明顯的起伏。

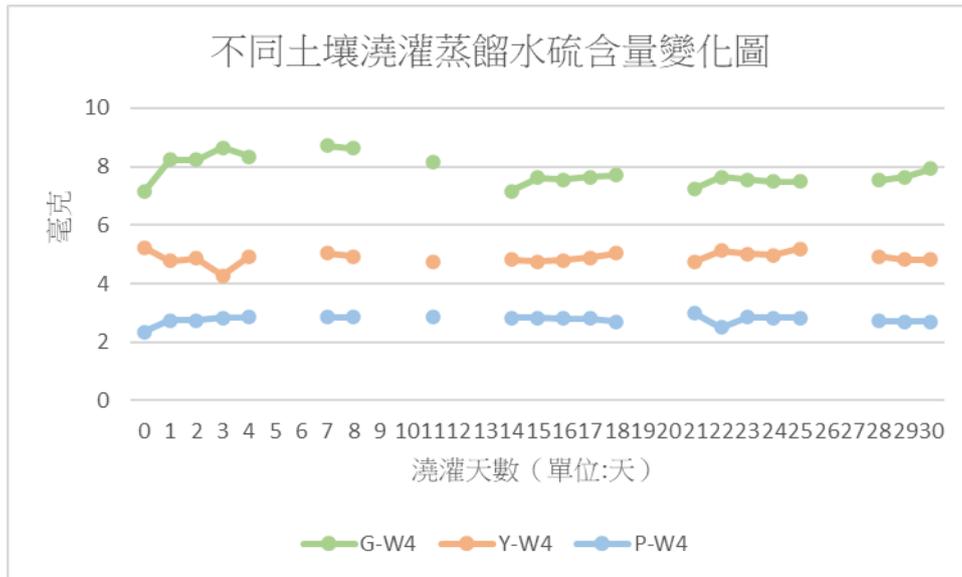


圖十一、不同土壤中硫含量變化圖。

綠線 G 為關渡平原土，紅線 Y 為陽明山土，藍線 P 為培養土。

二、不同土壤澆灌蒸餾水硫含量變化

從圖十二可以看到三種土壤在經過三十天蒸餾水的澆灌後，皆未呈現出明顯的變化，而其中硫含量多寡由多到少依序為關渡平原土土壤、陽明山土土壤及培養土土壤。

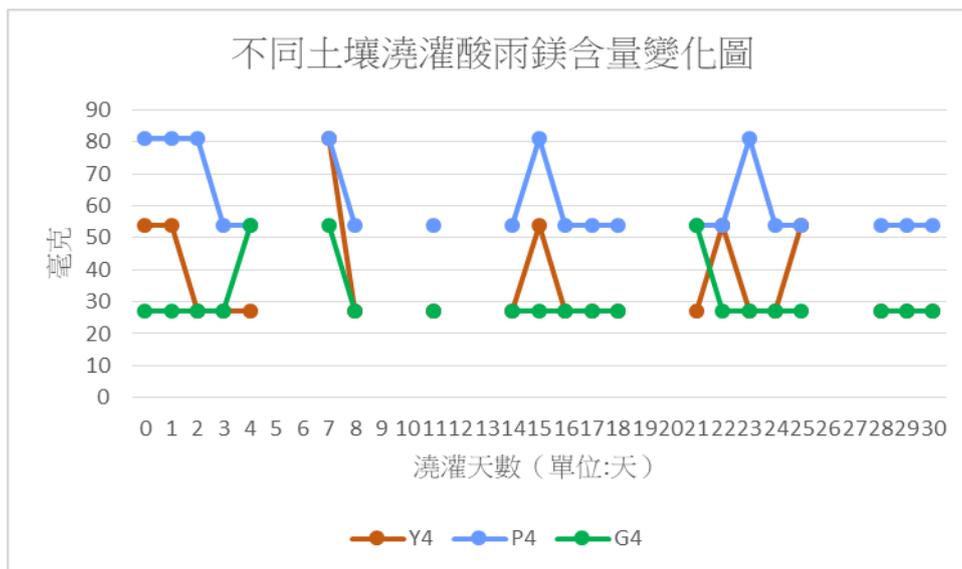


圖十二、不同土壤澆灌蒸餾水硫含量變化圖。

綠線 G 為關渡平原土，紅線 Y 為陽明山土，藍線 P 為培養土。

三、不同土壤澆灌酸雨鎂含量變化

由圖十三可以看到，三種土在經過一個月酸雨澆灌後均低於初始值或與初始值相同。陽明山土在實驗過程中鎂含量變化起伏較大，關渡平原土則是在實驗過程中變化相對穩定，最後數值與初始值相同，培養土則是整體變化不大，但仍低於初始值。

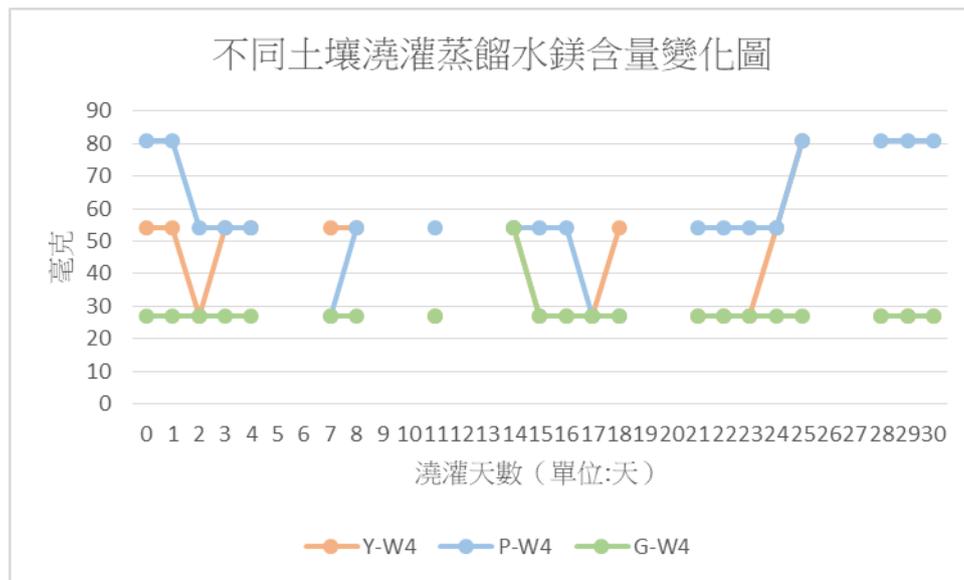


圖十三、不同土壤澆灌酸雨鎂含量變化圖。

綠線 G 為關渡平原土，紅線 Y 為陽明山土，藍線 P 為培養土。

四、不同土壤澆灌蒸餾水鎂含量變化

由圖十四可知，三種土在經蒸餾水澆灌一個月後與初始值差異均不大。陽明山土在經過蒸餾水澆灌後有些微變化，但在最後幾天數值是低於初始值至 27 毫克。培養土在實驗過程中起伏較大，在第一週達到最低值，但在最後一週才漸漸回升。關渡平原土則是在過程中幾乎沒有變化，只有些微起伏，最終數值與初始值相同。

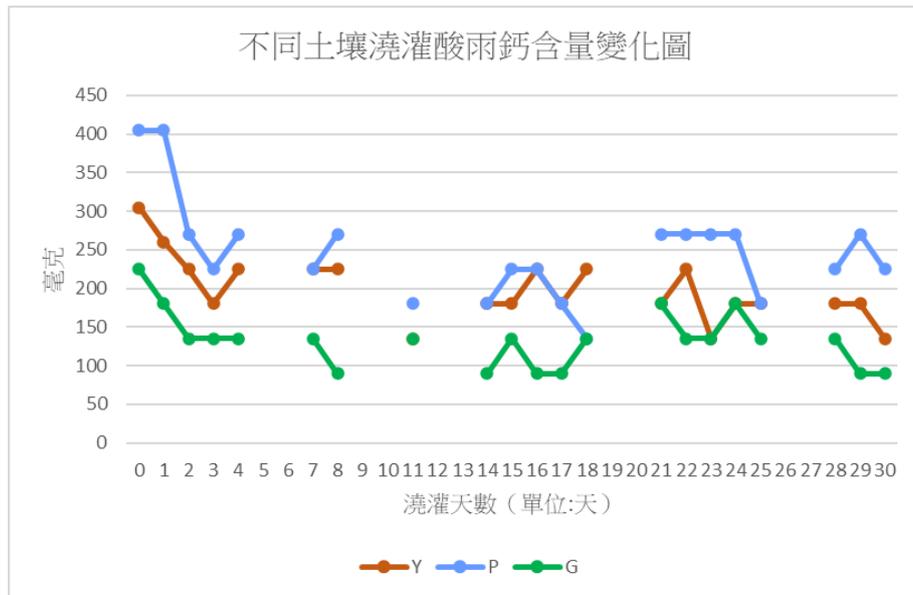


圖十四、不同土壤澆灌蒸餾水鎂含量變化圖。

綠線 G 為關渡平原土，紅線 Y 為陽明山土，藍線 P 為培養土。

五、不同土壤澆灌酸雨鈣含量變化

由圖十五中可以觀察到陽明山土、培養土、關渡平原土這三種土皆在經過一個月澆灌後鈣含量低於初始值，在陽明山土的結果上看到，鈣含量在第一週數值在下降後略回升，而後些微起伏但整體仍呈下降趨勢。在培養土數據中可以看到在實驗前兩週呈下降趨勢，而在近第三週末時則有些微回升，但仍無超過初始值。最後在關渡平原土 G 線看到實驗過程中略有起伏且整體呈下降趨勢。

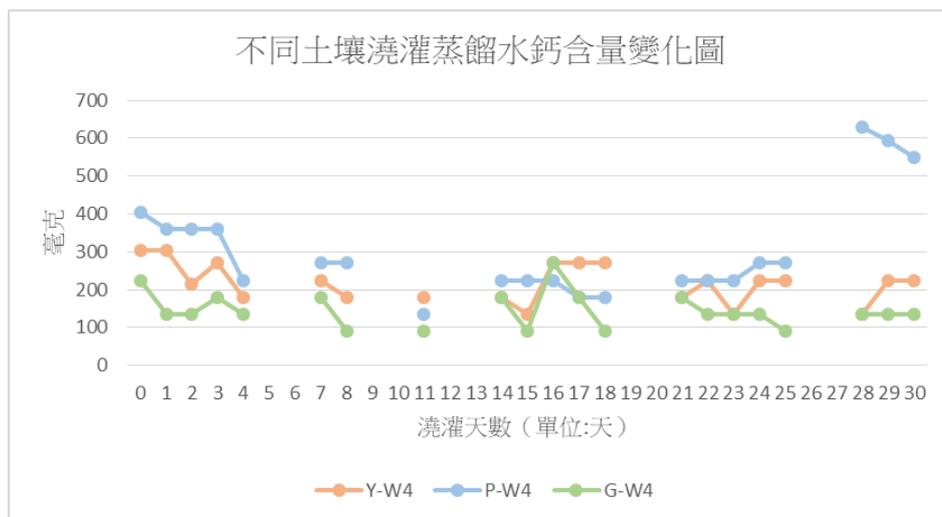


圖十五、不同土壤澆灌酸雨鈣含量變化圖。

綠線 G 為關渡平原土，紅線 Y 為陽明山土，藍線 P 為培養土。

六、不同土壤澆灌蒸餾水鈣含量變化

由圖十六可以發現，陽明山的鈣含量土在經過一個月的蒸餾水澆灌後降至低於初始值，但差異不大。而從培養土的结果可以看到在實驗前三週皆呈現下降趨勢，到了實驗結束前三天又升至高於初始值。在關渡平原土的數據可以看到在經過一個月蒸餾水的澆灌後，整體鈣含量些微下降，但與初始值差異不大，且實驗過程數值變化相對穩定。

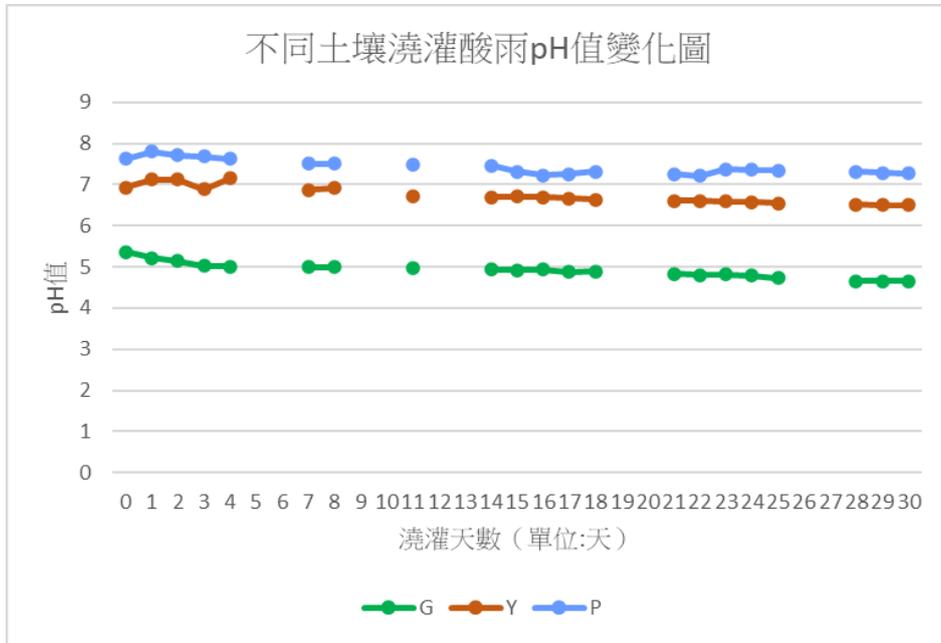


圖十六、不同土壤澆灌蒸餾水鈣含量變化圖。

綠線 G 為關渡平原土，紅線 Y 為陽明山土，藍線 P 為培養土。

七、不同土壤澆灌酸雨 pH 值變化

從圖十七可以發現，在經過三十天酸雨的澆灌後，三種土壤的 pH 值皆呈現出些微下降的趨勢，其中土壤 pH 值由酸性到鹼性分別為關渡平原土、陽明山土、培養土。

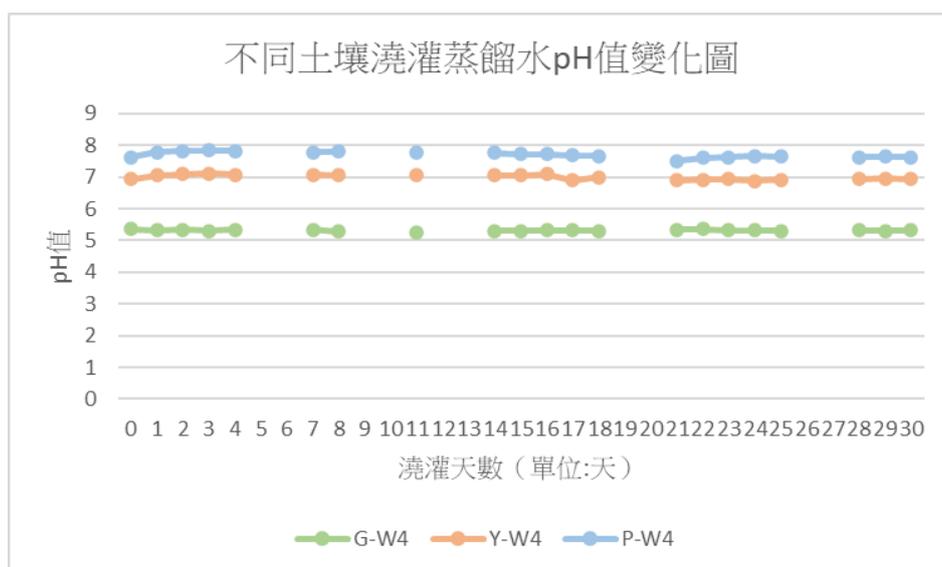


圖十七、不同土壤澆灌酸雨 pH 值變化圖。

綠線 G 為關渡平原土，紅線 Y 為陽明山土，藍線 P 為培養土。

八、不同土壤澆灌蒸餾水 pH 值變化

從圖十八可以看到，三種土壤在經過澆灌蒸餾水三十天後皆未出現明顯的變化，且與初始值幾乎相同，其中土壤 pH 值由酸性到鹼性分別為關渡平原土、陽明山土、培養土。



圖十八、不同土壤澆灌蒸餾水 pH 值變化圖。

綠線 G 為關渡平原土，紅線 Y 為陽明山土，藍線 P 為培養土。

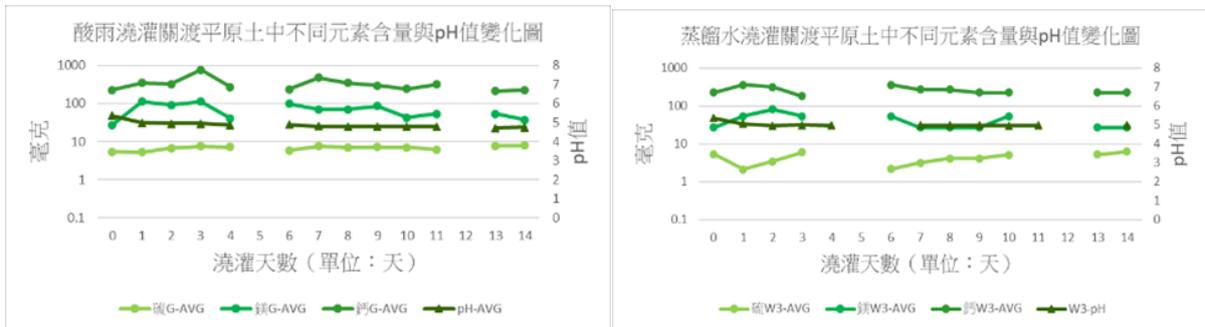
陸、討論

本研究將四次實驗之數據做交叉比對，以折線圖呈現，結果如圖十九至圖二十一所示。討論第一部分為前三次實驗關渡平原土、陽明山土、培養土三種土壤，分開比較澆灌酸雨和蒸餾水後硫、鎂、鈣和 pH 值變化。第二部分為第四次實驗關渡平原土、陽明山土、培養土三種土壤，分開比較澆灌酸雨和蒸餾水後硫、鎂、鈣和 pH 值變化。第三部分為比較第四次實驗與前三次實驗不同土壤澆灌酸雨及蒸餾水物質含量變化。第四部份為實際種植地瓜葉之圖像分析。

一、比較前三次實驗酸雨和蒸餾水澆灌關渡平原土中不同物質含量與 pH 值變化

由圖十九（左）可以看到關渡平原土壤在澆灌酸雨後硫含量呈現上升的趨勢，推測原因為酸雨中含有二氧化硫，因此硫含量上升符合預期。其中土壤中 pH 值經過酸雨澆灌後 pH 值呈現微幅下降趨勢，推測為澆灌酸雨所致。在圖十九亦可得知不論是澆灌蒸餾水還是酸雨，在 14 天中鎂含量的變化較其他物質更為劇烈，但在第 14 天時的數據僅些微低於初始值，並未呈現出明顯的變化；鈣含量的變化皆不明顯，但呈現出些微降低。根據孟賽爾土壤色系表(Munsell Soil Color Charts)，關渡平原土的色碼為 10YR 5/4，根據梁鉅榮、周昌藝於 1969 的研究指出，此種土壤的陽離子交換能力 (Cation

Exchange Capacity, CEC) 較高，代表可以吸附和保留土壤中的陽離子，因此本研究推測此為關渡平原土壤中的鈣、鎂含量較無明顯變化的原因。

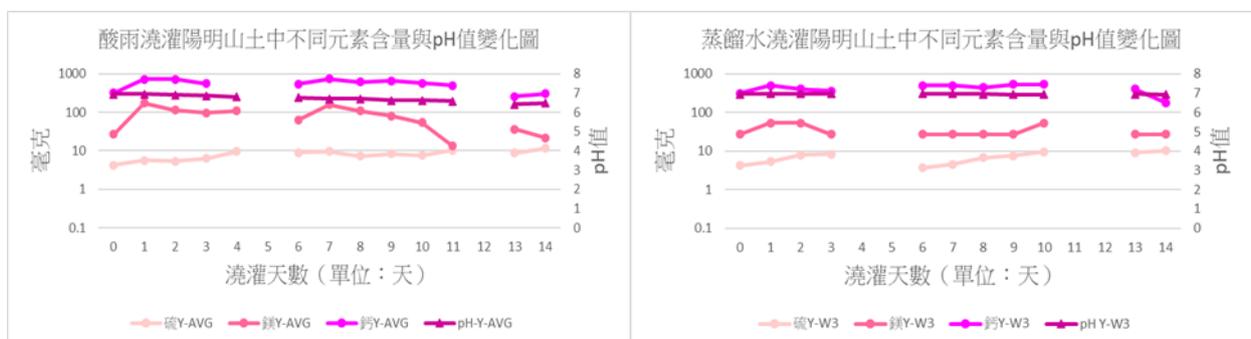


圖十九、(左) 酸雨與 (右) 蒸餾水澆灌關渡平原土中不同物質含量與 pH 值變化圖。

橫座標為澆灌天數 (單位: 天)、縱座標為毫克與 pH 值。

二、比較前三次實驗酸雨和蒸餾水澆灌陽明山土中不同物質含量與 pH 值變化

根據圖二十 (左)，可以得知變化最大的是酸雨澆灌後的鎂含量，其第一天和第十四天的數值差異甚大，約從 200 毫克降至 10 毫克左右，而且我們知道鎂為葉綠素合成的重要條件，故可推得，若土壤經酸雨澆灌，陽明山土種植的作物可能造成葉脈間顏色消失，甚至會使葉片變成紅紫色。而根據孟賽爾土壤色系表可知，陽明山土為 2.5Y 5/3，且 CEC 偏低 (梁鉅榮、周昌藝，1969)，因此本研究推測，陽明山土較難留住土壤中的鈣、鎂，其中澆灌酸雨的鎂含量較澆灌蒸餾水的鎂含量變化 (圖二十右) 更劇烈，推測其原因為蒸餾水是去離子水，故澆灌蒸餾水的組別鎂含量變化較穩定。硫含量及 pH 值變化原因推測皆與前述相同。

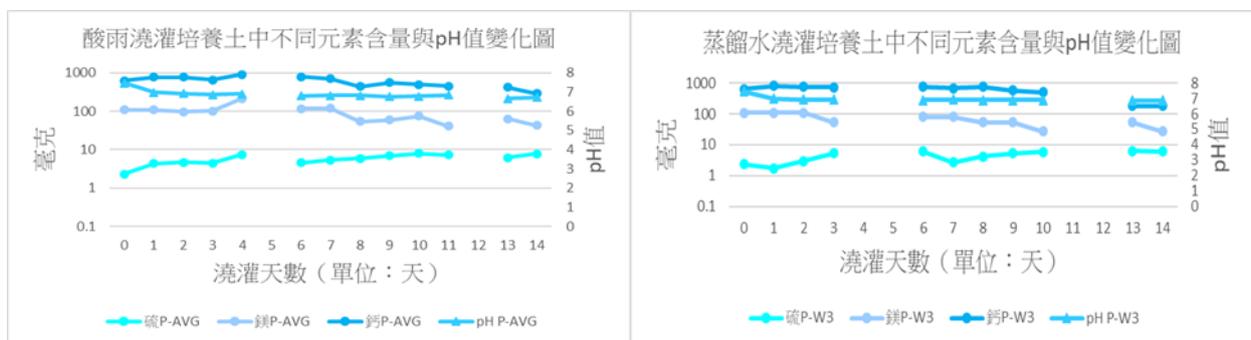


圖二十、(左) 酸雨與 (右) 蒸餾水澆灌陽明山土中不同物質含量與 pH 值變化圖。

橫座標為澆灌天數 (單位: 天)、縱座標為毫克與 pH 值。

三、比較前三次實驗酸雨和蒸餾水澆灌培養土中不同物質含量與 pH 值變化

由圖二十一，可以發現不論是澆灌酸雨或是蒸餾水的培養土壤中，鎂、鈣含量皆低於第一天的數值，而且蒸餾水澆灌後的鈣含量約從 800 毫克降至 200 毫克，差距甚大，故可知酸雨和蒸餾水會讓鈣、鎂含量降低。在實驗過程中，培養土在經澆灌後排出的溶液量皆較其他兩種土壤的量多，推測其原因為澆灌蒸餾水的培養土之淋溶作用較澆灌酸雨的組別更旺盛，因此培養土在經過蒸餾水的澆灌後，物質含量變化皆較澆灌酸雨的組別更為顯著。硫含量及 pH 值變化原因推測皆與前述相同。

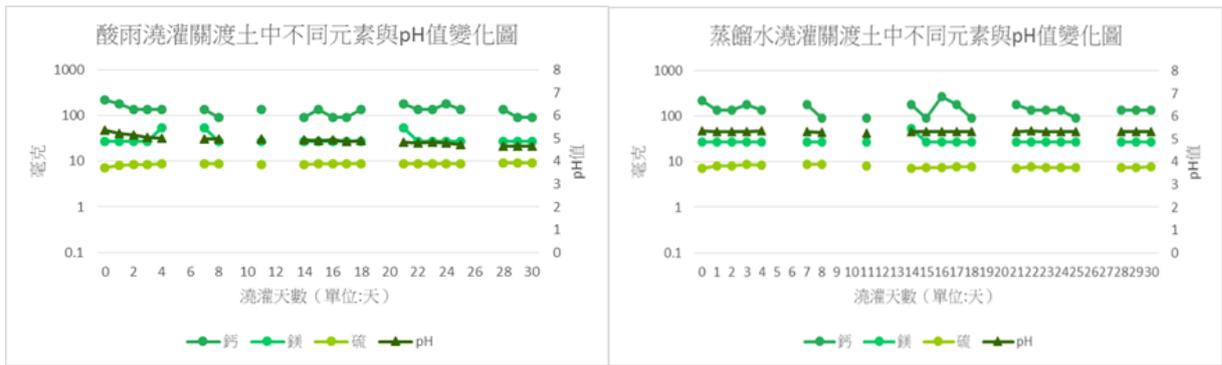


圖二十一、(左) 酸雨與 (右) 蒸餾水澆灌培養土中不同物質含量與 pH 值變化圖。

橫座標為澆灌天數 (單位: 天)、縱座標為毫克與 pH 值。

四、比較第四次實驗酸雨和蒸餾水澆灌關渡平原土中不同物質含量與 pH 值變化

由圖二十二可以看到，關渡平原土壤在澆灌酸雨後硫含量呈現上升的趨勢，推測原因為酸雨中含有二氧化硫，因此硫含量上升符合預期。其中土壤中 pH 值經過酸雨澆灌後 pH 值呈現微幅下降趨勢，推測為澆灌酸雨所致。在圖中亦可得知不論是澆灌蒸餾水還是酸雨，在實驗中鎂含量並未出現明顯變化且含量少，推測其原因為關渡平原土受到地瓜葉生長所吸收而含量少；鈣含量呈現出些微降低。根據孟賽爾土壤色系表(Munsell Soil Color Charts)，本研究使用的關渡平原土的色碼為 10YR 5/4，此種土壤的陽離子交換能力 (Cation Exchange Capacity, CEC) 較高，已知土壤 CEC 較高，代表可以吸附和保留土壤中的陽離子 (梁鉅榮、周昌藝，1969)，因此本研究推測此為關渡平原土壤中的鈣、鎂含量較無明顯變化的原因。

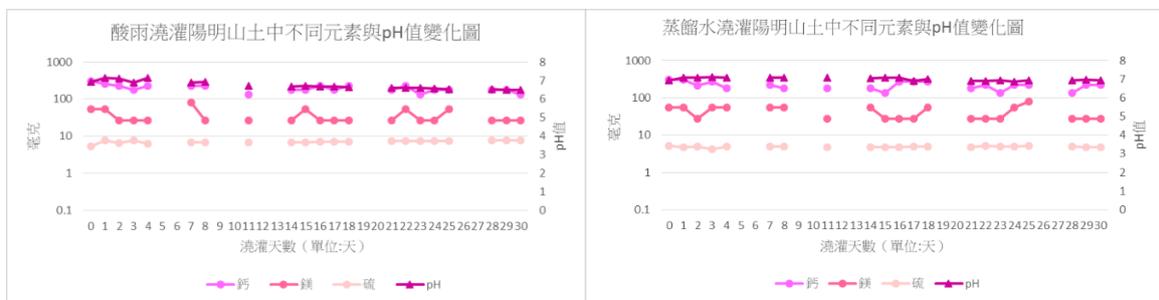


圖二十二、(左)酸雨與(右)蒸餾水澆灌關渡平原土中不同物質含量與 pH 值變化圖。

橫座標為澆灌天數(單位:天)、縱座標為毫克與 pH 值。

五、比較第四次實驗酸雨和蒸餾水澆灌陽明山土中不同物質含量與 pH 值變化

由圖二十三中我們可以看到陽明山土土壤在經過澆灌酸雨三十天後，鎂、鈣含量皆呈現下降的趨勢，而鎂含量數值變化更為明顯，根據文獻推測原因為土壤交換性鈣離子對土壤的吸附力較鎂離子強所致，而其中又以澆灌酸雨的土壤下降趨勢較為明顯，推測原因為酸雨會加快植物中元素流失，但和澆灌蒸餾水組別並未呈現出顯著差異，根據文獻指出推測其無明顯差異原因為植物生長吸收。而鎂元素為植物合成葉綠素所需重要元素，故可推得植物可能出現葉片黃化或是葉脈間色彩消失的情形。根據孟賽爾土壤色系表可知，本實驗使用的陽明山土為 2.5Y 5/3，且 CEC 偏低(梁鉅榮、周昌藝，1969)，因此本研究推測，陽明山土較難留住土壤中的鈣、鎂，其中澆灌酸雨的鎂含量較澆灌的蒸餾水的鎂含量變化更劇烈，推測其原因為蒸餾水是去離子水，故澆灌蒸餾水的組別鎂含量變化較穩定。硫含量及 pH 值變化原因推測皆與前述相同。

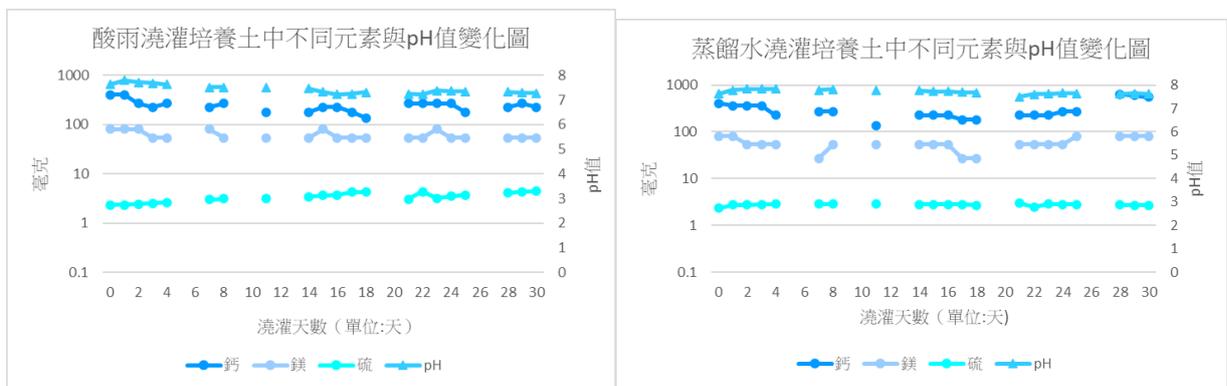


圖二十三、(左)酸雨與(右)蒸餾水澆灌陽明山土中不同物質含量與 pH 值變化圖。

橫座標為澆灌天數(單位:天)、縱座標為毫克與 pH 值。

六、比較第四次實驗酸雨和蒸餾水澆灌培養土中不同物質含量與 pH 值變化

由圖二十四，可以發現無論是澆灌酸雨或是蒸餾水的培養土中鎂含量皆低於初始值，我們知道澆灌酸雨會讓土壤變酸，加上地瓜葉生長吸收，進而降低鈣，鎂含量。而鈣含量在澆灌蒸餾水後第四週上升，酸雨會使鈣，鎂含量降低，其中鈣含量變化又較鎂含量變化更為明顯，其中鈣含量變化又較鎂含量變化更為明顯，推論原因為培養土中含有蛭石所致，根據文獻指出蛭石對於鎂離子相對於鈣離子有較高的偏好性，故推論蛭石為影響鈣鎂數值差異原因。而我們知道鈣、鎂為地瓜葉生長的必要吸收的元素，而地瓜葉在經過蒸餾水澆灌後第四週死亡，不再吸收，故鎂，鈣含量在最後上升。在實驗過程中，培養土在經澆灌後排出的溶液量皆較其他兩種土壤的量多，推測其原因為澆灌蒸餾水的培養土之淋溶作用較澆灌酸雨組別更為旺盛所致，因此培養土在經過蒸餾水的澆灌後，物質含量變化皆較澆灌酸雨的組別更為顯著。硫含量及 pH 值變化原因推測皆與前述相同。根據孟賽爾土壤色系表，本研究使用的關渡平原土的色碼為 10YR 3/2，此種土壤陽離子交換能力（CEC）較高，已知土壤 CEC 較高，代表可以吸附和保留土壤中的陽離子（梁鉅榮、周昌藝，1969），因此本研究推測此為關渡平原土壤中的鈣、鎂含量較無明顯變化的原因。

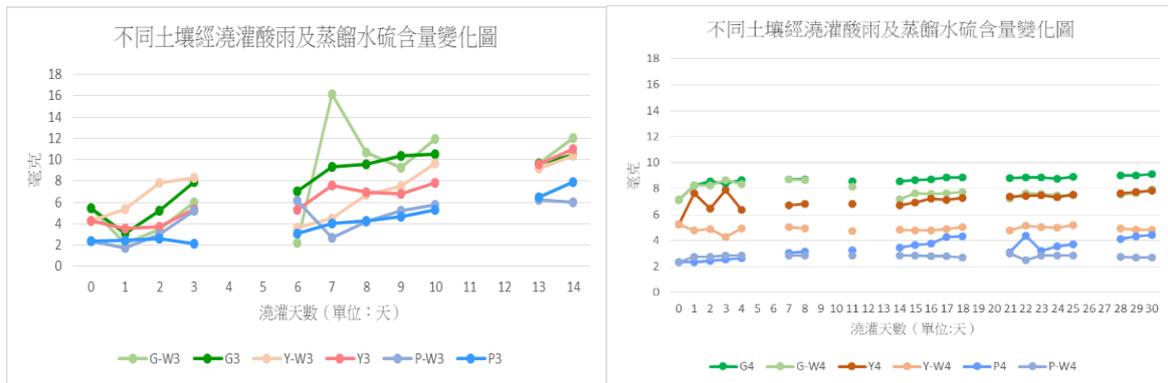


圖二十四、(左) 酸雨與 (右) 蒸餾水澆灌培養土中不同物質含量與 pH 值變化圖。

橫座標為澆灌天數 (單位：天)、縱座標為毫克與 pH 值。

七、比較前三次實驗與第四次實驗不同土壤澆灌酸雨及蒸餾水硫含量變化圖

從圖二十五中我們可以發現，不論是澆灌酸雨還是蒸餾水組別中右圖硫含量的前十四天變化較左圖的變化更為穩定，根據文獻指出植物生長會吸收土壤中營養元素，故推論第四次實驗中硫含量上升較前三次實驗穩定原因為植物吸收所致，而硫含量呈現上升的趨勢，推測原因為酸雨中含有硫酸的成分。由右圖我們也可以看到若於十四天後持續澆灌酸雨，硫含量會呈現些微穩定上升的趨勢，推測原因為酸雨中含有硫酸成分所造成，而澆灌蒸餾水組別則是相對於澆灌酸雨組別無明顯差異變化。

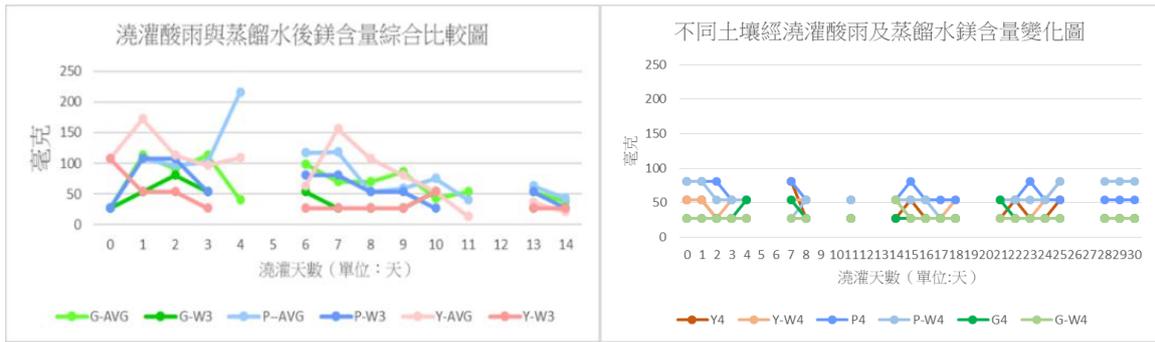


圖二十五、(左)前三次實驗(右)第四次實驗不同土壤澆灌酸雨及蒸餾水硫含量變化圖。

橫座標為澆灌天數(單位:天)、縱座標為毫克。

八、比較前三次實驗與第四次實驗不同土壤澆灌酸雨及蒸餾水鎂含量變化圖

由圖二十六中可以看到在澆灌酸雨與蒸餾水十四天後左圖和右圖差異明顯，推測原因為種植地瓜葉所導致。在右圖新增種植地瓜葉組別中，可以看到無論是澆灌酸雨或蒸餾水在三十天後，三種土壤鎂含量變化都不大，根據文獻指出植物生長需吸收營養元素，故推測原因為地瓜葉生長需要鎂元素所導致。而培養土右圖澆灌酸雨與蒸餾水兩個組別中，因第四週地瓜葉死亡，不再需要吸收鎂元素，因此鎂含量有回升的跡象，其中蒸餾水組別回升至與初始值相同。

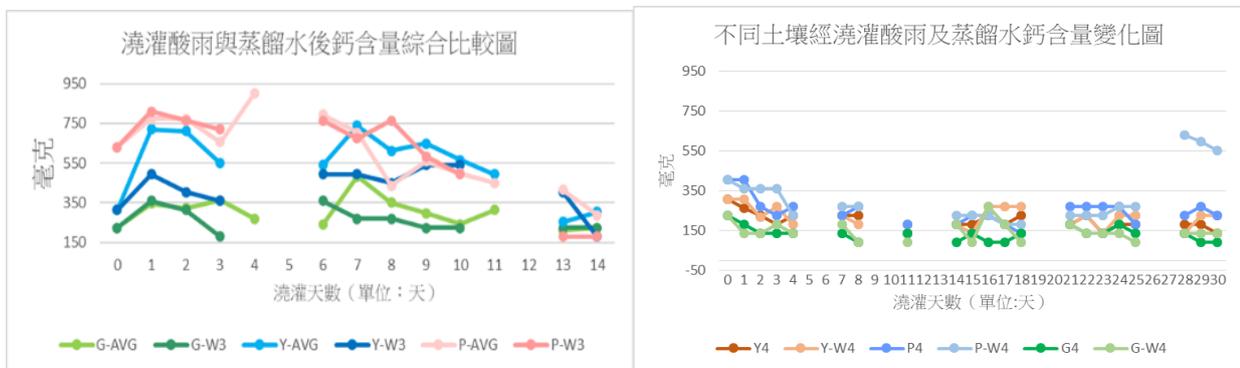


圖二十六、(左)前三次實驗(右)第四次實驗不同土壤澆灌酸雨及蒸餾水鎂含量變化圖。

橫座標為澆灌天數(單位:天)、縱座標為毫克。

九、比較前三次實驗與第四次實驗不同土壤澆灌酸雨及蒸餾水鈣含量變化圖

由圖二十七可以發現，經酸雨及蒸餾水澆灌的陽明山土壤與培養土土壤的鈣含量皆出現明顯降低的現象，根據文獻指出植物生需吸收營養元素，故推論鈣、鎂降低原因為種植地瓜葉所造成。而在右圖中可以看到鈣含量在三種土中起伏不大，但多些微低於初始值，推測其原因為地瓜葉生長而吸收所導致，而培養土經蒸餾水澆灌組別所種植地瓜葉於第四週死亡，因此不再需要吸收鈣元素，而鈣含量回升皆有超過初始值。

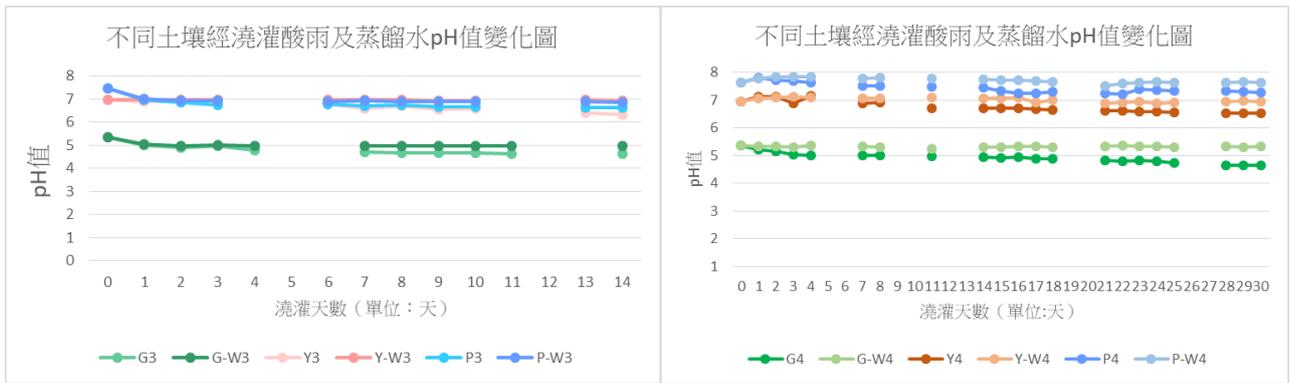


圖二十七、(左)第四次實驗(右)前三次實驗不同土壤澆灌酸雨及蒸餾水鈣含量變化圖。

橫座標為澆灌天數(單位:天)、縱座標為毫克。

十、比較前三次實驗與第四次實驗不同土壤澆灌酸雨及蒸餾水 pH 值變化圖

由圖二十八可以發現，三種土壤在經過酸雨的澆灌後皆呈現下降趨勢，推測原因為澆灌酸雨所造成。由右圖也可以發現在經過澆灌酸雨十四天後對土壤持續澆灌，土壤的 pH 值持續呈現下降趨勢，而澆灌蒸餾水的組別 pH 值變化和前十四天並無明顯差異。



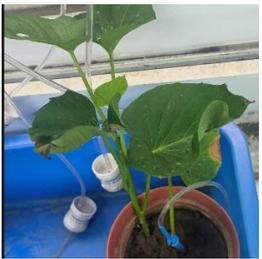
圖二十八、(左)前三次實驗(右)第四次實驗不同土壤澆灌酸雨及蒸餾水鈣含量變化圖。

橫座標為澆灌天數(單位:天)、縱座標為 pH 值。

十一、關渡平原土壤實際種植地瓜葉圖像分析(表三)

根據關渡平原土酸雨從第零天至第三十天圖中可以看到，葉片在第二十天葉緣部分開始出現黃化，而後展至葉脈間，但葉脈仍為綠色而呈網狀，我們知道酸雨會使土壤中元素流失，若植物缺乏鎂則會導致此情況。而根據關渡平原土澆灌蒸餾水圖像可以看到，關渡平原土澆灌蒸餾水組別僅在第三十天時葉片出現些微黃化的現象，乃生長最好的組別。

表三、關渡平原土壤澆灌酸雨和蒸餾水種植地瓜葉之圖像

	第 0 天	第 10 天	第 20 天	第 30 天
關渡平原土 + 酸雨				
關渡平原土 + 蒸餾水				

十二、陽明山土土壤實際種植地瓜葉圖像分析（表四）

根據陽明山土澆灌酸雨組別從第零天至第三十天圖中，可以看到地瓜葉葉片在第二十天出現黃化的現象，我們知道酸雨會使土壤中元素流失，若植物缺乏鎂會導致葉片壞死，缺乏鈣會導致葉片捲曲。而根據陽明山土蒸餾水圖可以看到在第三十天時地瓜葉葉脈成網狀，而推測原因為缺乏鎂元素所導致之結果。

表四、陽明山土土壤澆灌酸雨和蒸餾水種植地瓜葉之圖像

	第 0 天	第 10 天	第 20 天	第 30 天
陽明山土 + 酸雨				



十三、培養土土壤實際種植地瓜葉圖像分析（表五）

根據培養土澆灌酸雨由第零天至第三十天圖中可以看到，培養土土壤澆灌酸雨組別葉片與莖逐漸枯萎，我們知道酸雨會使土壤中微量元素流失，若植物缺乏鎂會導致葉片呈現褐色、甚至枯萎，而植物若缺乏鈣元素會導致葉片捲曲。根據培養土澆灌蒸餾水圖可以看到在第十天時地瓜葉葉片出現黃化，而後長出新葉。於第三十天死亡，推測其原因為受到淋溶作用所影響，缺乏鎂元素所造成。

表五、培養土土壤澆灌酸雨和蒸餾水種植地瓜葉之圖像

	第 0 天	第 10 天	第 20 天	第 30 天
培養 土 + 酸雨				
培養 土 + 蒸餾 水				

十四、綜合比較結果

綜合上述比較，本研究以表六至八呈現討論之結果。藉由觀察三種不同土壤澆灌酸雨後硫、鎂、鈣與 pH 值變化趨勢及實際種植地瓜葉之生長情形，歸納出：綠色為表現最穩定的項目，黃色為普通，紅色為最不穩定的項目。關渡平原土整體而言表現最為穩定，為本研究最推薦種植農作物的土壤。

表六、前三次實驗土壤適合種植作物比較總表。

	關渡平原土	培養土	陽明山土
硫	穩定上升	呈上升趨勢	呈上升趨勢
鎂	呈下降趨勢	呈下降趨勢	起伏最大
鈣	略為起伏	起伏最大	居中
pH 值	平穩	略為下降	平穩

表七、第四次實驗土壤適合種植作物比較總表。

	關渡平原土	陽明山土	培養土
硫	穩定上升	呈上升趨勢	呈上升趨勢
鎂	吸收量最多	吸收量其次	吸收量最少
鈣	吸收量最多	吸收量最少	吸收量其次
pH 值	略為下降	略為下降	略為下降

表八、第四次實驗種植地瓜葉土壤適合種植作物比較總表。

	關渡平原土	陽明山土	培養土
酸雨	葉脈呈網狀	葉片黃化	植物死亡
蒸餾水	葉片些微黃化	葉脈呈網狀	植物死亡

十五、實驗誤差來源分析

本實驗所使用地瓜葉來源為小田園中摘取，而摘取植株雖皆為同植株但無法確認澆灌酸雨或蒸餾水後，地瓜葉植株生長情況是否與原本植株所含營養無關，今雖放置於同區且室內環境。因此在未來實驗中，本研究將改良使用地瓜葉種子進行種植，以降低實驗無差。而測定硫、鎂、鈣的所有試劑皆須人工施作，待測液顏色也必須由人工辨識，並無法確認完全精準且無誤差。因此在未來實驗中，會選擇使用滴定管進行試劑添加，降低實驗誤差，並且會使用影像記錄待測液變色的瞬間來提高土壤中物質量測精準度。

柒、結論及應用

本研究認為最適合種植作物的土壤為臺北關渡平原土壤，因其地瓜葉生長情況為三種土壤中最優，而其中經酸雨和蒸餾水澆灌的硫、鎂、鈣含量差異皆較其他兩種土壤小，推測原因為關渡平原土 CEC 含量較高所致，但因其 pH 值為 4 至 5 間的較酸性土壤，因此若想使用關渡平原土種植作物需多加留意作物是否可適應此種酸性環境。

其次是陽明山土，因其鎂、鈣含量皆在澆灌酸雨後出現較關渡平原土壤明顯，尤其鎂含量降低較鈣含量明顯，推論原因為土壤交換性鈣離子對土壤吸附力較弱所致，而陽明山土的 pH 值為 6-7 之間，為偏中性土壤，故若想使用陽明山土進行實驗須留意鎂元素含量變化。

最後為培養土，因其地瓜葉之生長情況為三種土壤中地瓜葉死亡時間最早，而其鈣、鎂含量變化又較其他兩種土壤更為明顯，其中鈣含量變化又較鎂含量變化明顯，推測原因為培養土中含有蛭石，且蛭石相對於鈣離子較容易吸收鎂離子所致。

另外，在第三次與第四次實驗中，硫、鎂、鈣三種物質皆在種植作物後更為穩定，推測原因為植物生長吸收土壤中元素所致。

在應用方面，本研究除未來可應用於提供農業工作者在酸雨環境下選用更適合的土壤種植作物外，也實際使用酸雨來種植作物，為使用不同土壤進行種植的農業工作者提供更實質性的建議，使作物生長環境不易受酸雨的影響，以全人類零飢餓為永續發展目標。

捌、參考資料

Farm Easy (2016年3月17日)。硫、鈣、鎂是植物營養的「次量元素」。取自

<https://reurl.cc/a17GKQ>

中央氣象局 110 氣候年報。取自

https://www.cwb.gov.tw/Data/service/notice/download/Publish_20220826110436.pdf

泛科學 (2021)。酸雨可能會讓森林更口渴？。取自

<https://pansci.asia/archives/204804>

何為酸雨。科學研習月刊 46-4。取自

<https://www.ntsec.gov.tw/article/FileAtt.ashx?id=5379>

林仁政、洪國榮 (2002)。酸雨及鹽分危害之風化材保存特性。林業研究季刊 24：1 期。取自 <https://ssur.cc/XSjzNXf>

郭朝禎《科學發展》(2015)。512 期 044~51 頁。取自

<https://scitechvista.nat.gov.tw/Article/c000008/detail?ID=e9d9d57f-0114-4bde-9fa9-1bc2dea4ee64>

陳冠備 (2017 年 12 月 7 月)。巨峰葡萄慘變葡萄乾 農民質疑空污酸雨惹禍。自由時報。取自 <https://reurl.cc/a1E2AD>

梁鉅榮、周昌藝 (1969)。臺灣之土壤。取自

<https://pse.is/5nl83q>

國立中興大學土壤試驗中心 (2017 年) 10 月月刊。取自

<https://pse.is/5nl8u4>

農傳媒 (2023 年 10 月 8 日)。家庭園藝入門指南 栽培介質如何選擇？。取自

<https://reurl.cc/q0r60q>

酸雨監測分析資料。環境資源資料庫。行政院環境環保署。取自

<https://airtw.epa.gov.tw/CHT/Query/DataDownload.aspx>

關渡平原降雨量資料。交通部中央氣象局。取自

<https://e-service.cwb.gov.tw/HistoryDataQuery/index.jsp>

關渡平原簡介。臺北市北投區公所。取自

https://btido.gov.taipei/News_Content.aspx?n=B154724D802DC488&s=9E4A5535EE009A1F

關渡平原簡介。關渡平原水田土壤砷種類與水稻植體濃度關係探討。取自

<http://www.twaes.org.tw/ae/htmldata/05402060.pdf>

關渡平原衛星雲圖（2023）。Google Map。取自

<https://reurl.cc/6Ne7v5>

臺灣大學。陽離子吸持。取自

<http://teacher.ac.ntu.edu.tw/xhr/archive/download?file=625ae4c6f1781c1d7025bdf8>

臺灣大學。植物中的養分與運輸。取自

<http://ecaaser5.ecaa.ntu.edu.tw/Biology/37chap.htm>