

中華民國第 53 屆中小學科學展覽會 作品說明書

國小組 化學科

第三名

080204

誰是鋤鬥大明星

學校名稱：彰化縣彰化市民生國民小學

作者： 小五 夏兆辰 小六 張綺方 小六 李 靈	指導老師： 鄭百宏
-----------------------------------	--------------

關鍵詞：鋤、牛糞、稻草桿

誰是鏷鬥大明星

摘要

為了受重金屬鏷污染土地尋求最友善的復育方法，我們嘗試在不同環境下，探討在模擬的鏷污染土壤，添加不同比例的天然資材對小白菜吸收重金屬情形，結果顯示，澆灌酸雨，添加「牛糞」或「稻草桿」堆肥後種植小白菜，可以促進受鏷污染土壤的鏷移除率，達到友善復育土地的效果。本實驗結果「稻草桿」及「牛糞」成為復育受鏷污染土壤的「鏷鬥大明星」。

壹、研究動機

鄉下阿公家旁邊有一片荒廢的農田，立著告示牌(如圖一)，阿公告訴我們這片農田，因長期遭受重金屬「鏷」污染，所以休耕，任其荒廢。於是激發了我們好奇心，幾個志同道合同學一起尋求老師指導後，透過上網蒐集相關資訊、翻閱相關書籍文章，探討究竟什麼是「鏷」？鏷污染來源，以及鏷污染的後遺症…等，進而了解「鏷」污染儼然已成為彰化著名且羞恥的環境問題，不僅使提昇國產農產品品質形象的努力遭挫折，對於環境生態而言更是一大衝擊。目前臺灣所管制土壤污染的8種重金屬中，「鏷」最容易被作物吸收，而且即使累積濃度較高時，植物外觀也看不出受毒害的徵狀，但其濃度卻足以致使食用該作物的人體受到重大傷害，且無可彌補。受重金屬污染土壤之復育技術有很多，於是我們請教在環保局工作的相叔叔阿姨們，他們說目前實務上多使用酸洗法或客土法，但並不一定可確實降低至可繼續作為原農地使用之目的，甚至致使土壤壞死或造成二次污染，且改善花費甚高。所以藉由文獻中許多天然資材再利用的可行性，使我們產生了利用許多材料來友善幫助受到鏷污染土地的點子，並期望能透過實驗，驗證此想法的可行性。



圖一 鄉下阿公家旁受重金屬「鏷」污染荒廢的農田

作品與教材之相關性：

年級	課程	單元	名稱	出版社
5上	自然與生活科技	第二單元之1	植物根、莖、葉的功能	康軒出版社
6上	自然與生活科技	第三單元之2	水溶液的酸鹼性	康軒出版社
6下	自然與生活科技	第三單元之1	生物生長的环境	康軒出版社
6下	自然與生活科技	第三單元之2	人類活動對环境的影響	康軒出版社

貳、研究目的

我們希望透過實驗比較，探討不同環境下，天然資材對受鎘污染土地復育之有效性，做為鎘污染土地之復育時施用量與管理上之參考，有助於重金屬污染整治的方法。為達成上述目的本研究分成下列幾部份進行實驗探討：

實驗名稱		目的
探討植物與環境關係實驗	種子發芽實驗	了解不同環境下如何影響植物生長
	天然資材堆肥化實驗	探討土壤堆肥作用影響種子發芽的情形
鎘移除率檢測分析實驗	飽和含水層的pH值實驗	探討不同澆灌水對植物生長的情形
	植物吸收鎘含量實驗	探討植物不同部位對鎘吸收情形
	土壤鎘移除率實驗	探討不同比例天然資材在土壤中鎘含量移除的反應

參、研究設備及器材

實驗名稱	實驗器材與材料
種子發芽率實驗	紅豆、培養皿、棉花、剪刀、滴管、白醋、熟石灰 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、鎘標準液(1000 mg/L)、pH計、pH試紙、重金屬水質測試紙條、磁石攪拌裝置。
天然資材堆肥化實驗	稻草桿、稻殼、竹炭、活性碳、果皮、樹葉、雞糞、牛糞、磷肥、培養土、種植盆、鑽孔機、鏟子、噴灑器、小白菜種籽、硝酸鎘($\text{Cd}(\text{NO}_3)_2$)、超純水、白醋、熟石灰 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、藥匙、秤紙、電子天平(精確至0.01g)。
飽和含水層的pH值和小白菜的生長量實驗	電子天平(精確至0.01g)、自來水、白醋、熟石灰、藥匙、秤紙、培養土、牛糞、稻草桿、活性碳、種植盆、鑽孔機、鏟子、小白菜種籽、育苗盆、噴灑器、磁石攪拌機、燒杯、pH計、剪刀、破碎機、土壤水分吸取器、試管、試管架、尺規、……等。
植物吸收鎘含量實驗	電子天平(精確至0.01g)、分光光度計(U-2000)、硝酸鎘標準液(1000 mg/L)、10 mm石英管、拭鏡紙、移液管、吸球、定量瓶、燒杯、簡易型檢測鎘溶液(Merck製)、試管架、塑膠試管15 mL、滴管……等。
土壤鎘移除率實驗	火焰式原子吸收光譜儀(AAS)、鎘標準液(1000 mg/L)、移液管、吸球、定量瓶、燒杯、試管架、鹽酸、硝酸、超純水、加熱冷凝管裝置、反應瓶250 mL、漏斗、濾紙(Whatman No. 40)……等

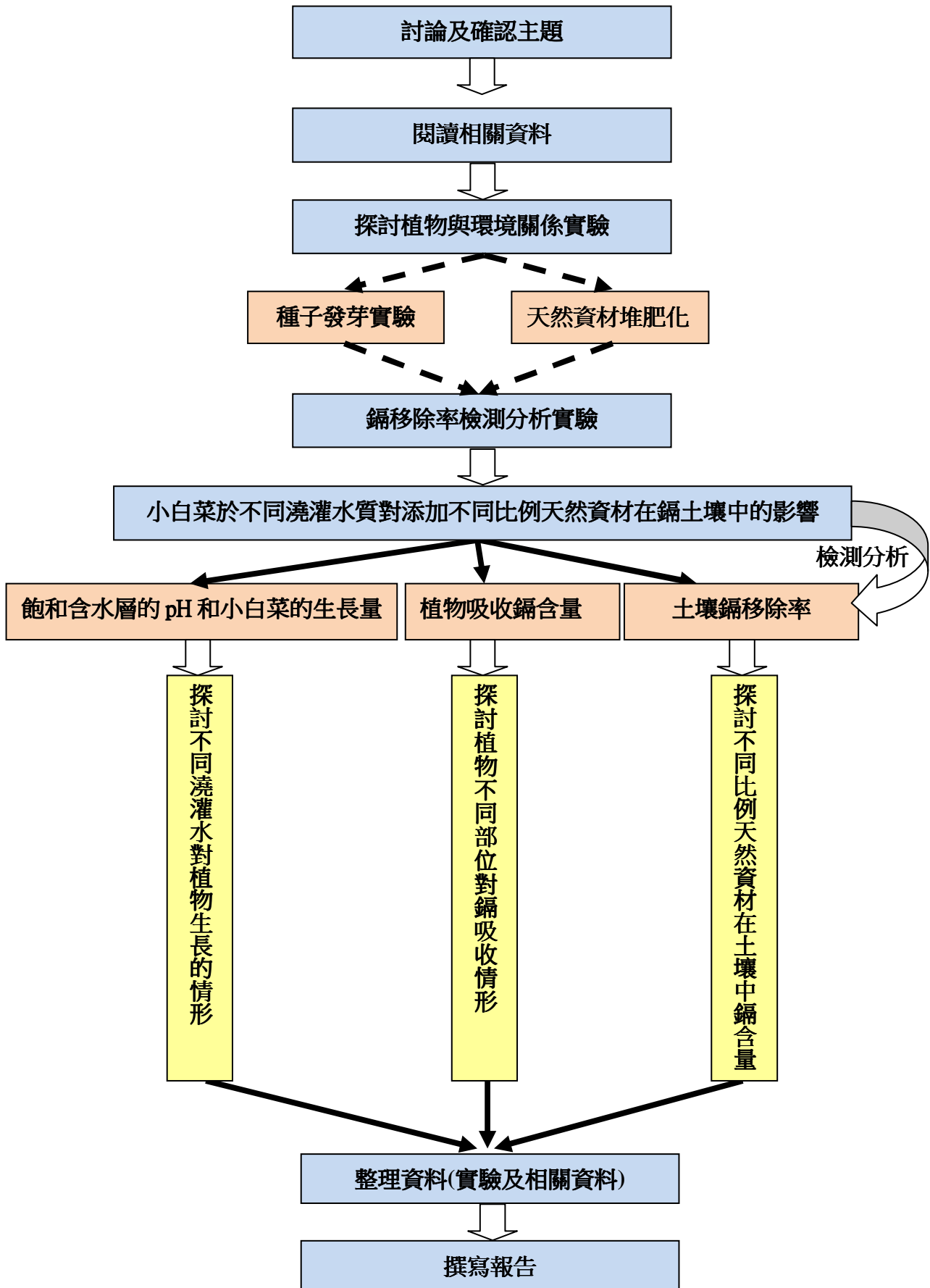
備註：

實驗安全注意事項

- 一、實驗過程指導老師均在現場，確實遵守實驗安全規範，若有危險實驗發生之虞，均由指導老師示範及確認後，再開始試驗。
- 二、重金屬廢棄物均回收集中儲存，依實驗室廢棄物處理法，統一交由環保單位處理。

肆、研究過程及方法

一、研究架構



二、文獻回顧

(一) 我們參考文獻「草」帥上陣，隔「鏷」不入「以發芽試驗與水耕栽培探討鏷對風傾草的影響」(2008年 高瞻計畫專題研究報告)希望在這基礎上有更多嘗試，於是提出許多假說的概念，設計本實驗，在各項「變因」上有許多差異，比較如下：

1. 以上實驗種子發芽率實驗部份以培養皿替代受污染的土壤，本實驗種子發芽率實驗分別以培養皿外並佐以實際土壤加入定量之硝酸鏷模擬污染土壤進行實驗。
2. 本實驗增加多項「操作變因」除了模擬酸、鹼、自來水模擬雨水灌溉，探討不同 pH 澆灌水對植物生長的情形、並添加不同物種不同比例(5%、10%及 20%)天然資材加入受鏷污染土壤中堆肥發酵過程，以探討天然資材對受鏷污染土地復育之生物有效性。
3. 該實驗以水耕試驗栽種風傾草來作為吸收土壤中重金屬鏷的植生復育植物，為期僅一周，本實驗則選擇生長快，生命力強的優勢—小白菜作為吸收土壤中重金屬鏷的植生復育植物，並延長植物週期至 35 天，再行採收，以滿足完整觀察期之條件。

(二)國立中興大學境工程學系碩士論文「土壤污泥添加對小白菜生長及鏷累積量之影響」以種植小白菜於添加污泥之鏷污染土壤後，可增加土壤中的營養鹽，使小白菜地上部乾重增加 23%-43%，地上部鏷之累積含量增加約 14%-19%，結果顯示土壤添加污泥將明顯增加小白菜吸收能力，惟污泥係來自市鎮污泥廠，雖富含有機質及營養鹽，但污泥中恐含重金屬造成二度污染之虞。既然，有機質及營養鹽可以增加小白菜吸收鏷的能力，本實驗則採農村廢棄物「稻草桿」及「牛糞」做為替代作物之有機肥料，尤其以稻田收割後稻草桿經堆肥作為天然資材是我們的獨有的發想，除了友善復育土地外亦同時解決農村廢棄物的問題，對土壤永續利用及農村生活環境的維護有正面之意義。








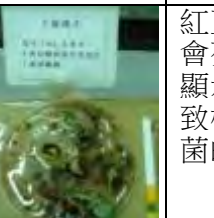











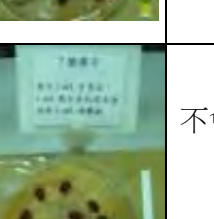
(三)國內環保刊物有系統的報導植生整治技術開發，從基礎的實驗室研究、田間大規模應用等，植生復育是一種符合經濟效益環境衝擊小的整治工法，但缺點為整治復育需要較長的時間，於是本實驗參考相關植生整治技術的概念，為提高復育效率，嘗試加入弱酸、弱鹼、自來水模擬雨水灌溉、並以不同物種不同比例(5%、10%及 20%)資材經發酵過程後加入受鏷污染土壤中，探討受鏷污染土地復育之生物有效性，有別於一般植生復育單一面向之探討。

三、探討植物與環境關係實驗

(一) 種子發芽實驗

不同雨水(中性、酸性或鹼性)的環境下，可能會影響種子的發芽生長，酸雨與鹼雨對環境的影響主要取決於雨水的成份及濃度，並與土壤的中和能力有密切的關係，所以我們把它跟重金屬反應看看，測試在這環境下的種子發芽情形。我們使用塑膠圓形碟子來作植物種植的容器，碟子內裝入等量的棉花，將每一個碟子分別放置 10 顆作物(紅豆)種子，並劃分施予不同 pH 種類的雨水灌溉如下〈表一〉：

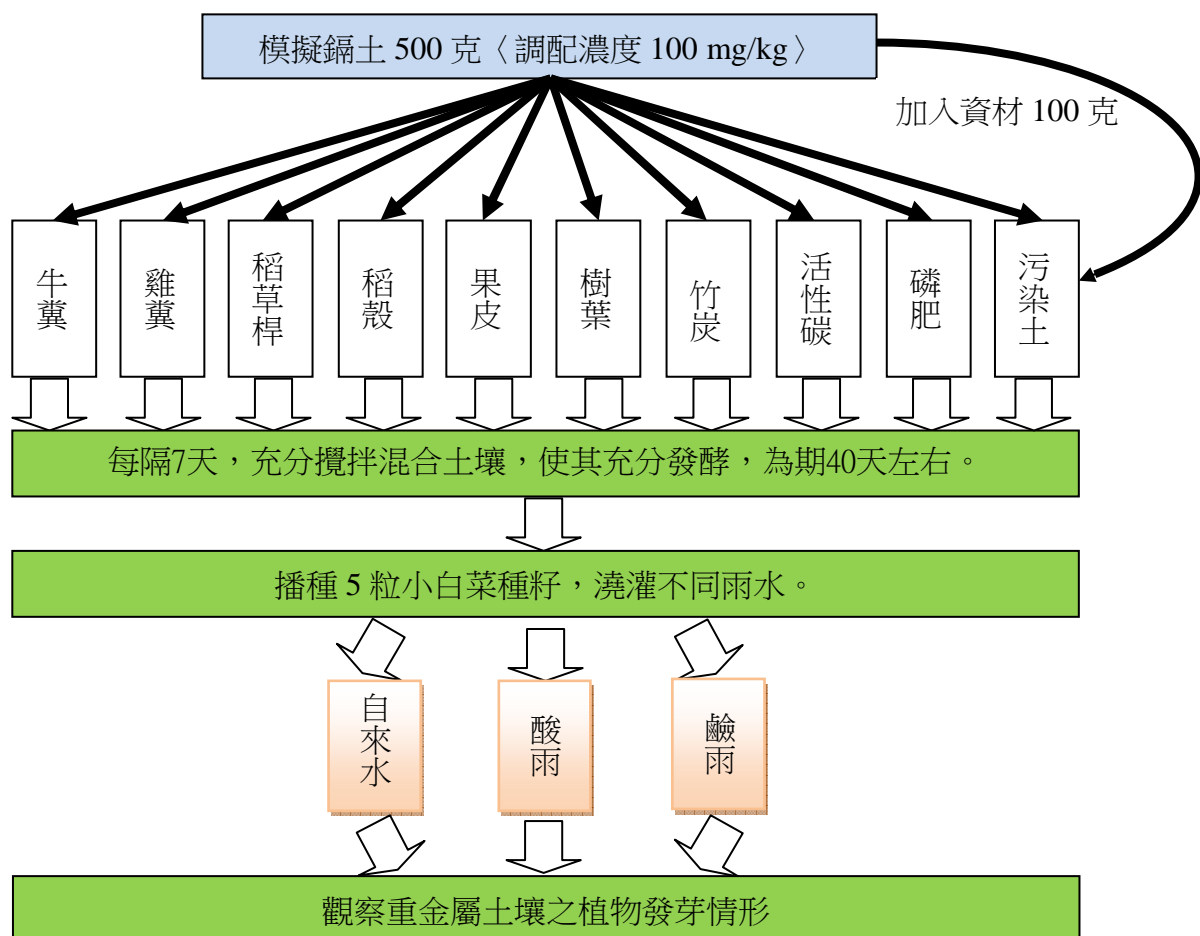
表一 生長實驗觀察紀錄

編號	實驗條件	第 1 天	第 7 天	第 14 天	發芽觀察情形	pH 變化
1	每次 3 mL 自來水				紅豆種子逐天成長，沒有死掉的現象。	pH 7 ↓ pH 7
2	每次 3 mL 自來水和 3 滴白醋的混合溶液				紅豆發芽生長情形比 1 號碟子較為緩慢，但沒有死亡的現象。	pH 4 ↓ pH 7
3	每次 3 mL 自來水、3 滴白醋的混合溶液和 3 滴硝酸鎘				紅豆一樣會發芽生長，不會死掉卻長了很多黴菌，顯示酸雨與硝酸鎘不會導致植物枯死，但會造成黴菌的生長。	pH 4 ↓ pH 7
4	每次 1 mL 自來水、1 mL 白醋的混合溶液和 1 mL 硝酸鎘				不會發芽生長。	pH 1 ↓ pH 1
5	每次 3 mL 自來水和 3 滴熟石灰的混合溶液				紅豆發芽生長情形比 1 號碟子較為緩慢，但沒有死亡的現象。	pH 9 ↓ pH 7
6	每次 3 mL 自來水、3 滴熟石灰的混合溶液和 3 滴硝酸鎘				紅豆一樣會發芽生長，不會死掉，卻長了很多黴菌，顯示鹼雨與硝酸鎘不會導致植物枯死，但會造成黴菌的生長。	pH 9 ↓ pH 7
7	每次 1 mL 自來水、1 mL 熟石灰的混合溶液和 1 mL 硝酸鎘				不會發芽生長。	pH 9 ↓ pH 1

(二)、天然資材堆肥化實驗

台灣農村主要有機廢棄物全年將近 3,000 萬公噸，其中豬糞、雞糞和牛糞，佔全國有機廢棄物的 50%以上；其次農產廢棄物為水稻收割後的稻殼和稻草桿；此外果菜市場廢棄物也佔有一定的比例(資料來源：農委會)。以上這些廢棄物因大部分均未妥善處理，隨意棄置或燃燒，造成農村生活環境嚴重污染。若從資源回收再利用的立場來看，農畜產廢棄物為有機質，是一寶貴資源，除了可將剩餘熱量回收利用外，亦可以回歸農地做為作物生產之有機肥料，此對農業生態的土壤保育及農村生活環境的維護與改善，具有重大意義。

天然資材堆肥化實驗流程圖一：



選擇10種天然資材	將資材稻草桿等逐一剪碎	秤100公克資材
		
將堆肥容器底部鑽洞暫以膠帶封住預備40天後植栽	調配鎘濃度 100 mg/kg 土壤	模擬鎘土500克加入資材100克後置入有蓋容器
		
每七天取出攪拌使其發酵均勻	40天後播種5粒小白菜種子，觀察重金屬土壤之植物發芽情形	澆灌不同雨水(自來水、酸雨及鹼雨)
		

因此，我們想利用它在土壤中的堆肥作用，評估受鎘污染土壤之生物有效性，所以我們利用天然資材在受鎘污染土壤中(模擬 100 mg/kg 污染土壤 500 克)堆肥化情形，是否影響小白菜發芽。本實驗利用 10 種資材(牛糞、雞糞、稻草桿、稻殼、果皮、樹葉、竹炭、活性碳及磷肥)堆肥後加入受鎘污染土壤中，澆灌不同雨水(自來水、酸雨及鹼雨)，來觀察小白菜在鎘污染土壤中發芽的情形。結果發現全部都有發芽，其中牛糞、稻草桿和樹葉、活性碳組，生長狀況良好，所以，我們就以物種性質相同的資材逐一剔除，選擇了不同比例牛糞、稻草桿兩項天然資材並選擇活性碳為對照組，作為小白菜復育受鎘土壤的添加劑，讓後續的實驗繼續探討一究竟誰是「鎘鬥大明星」。

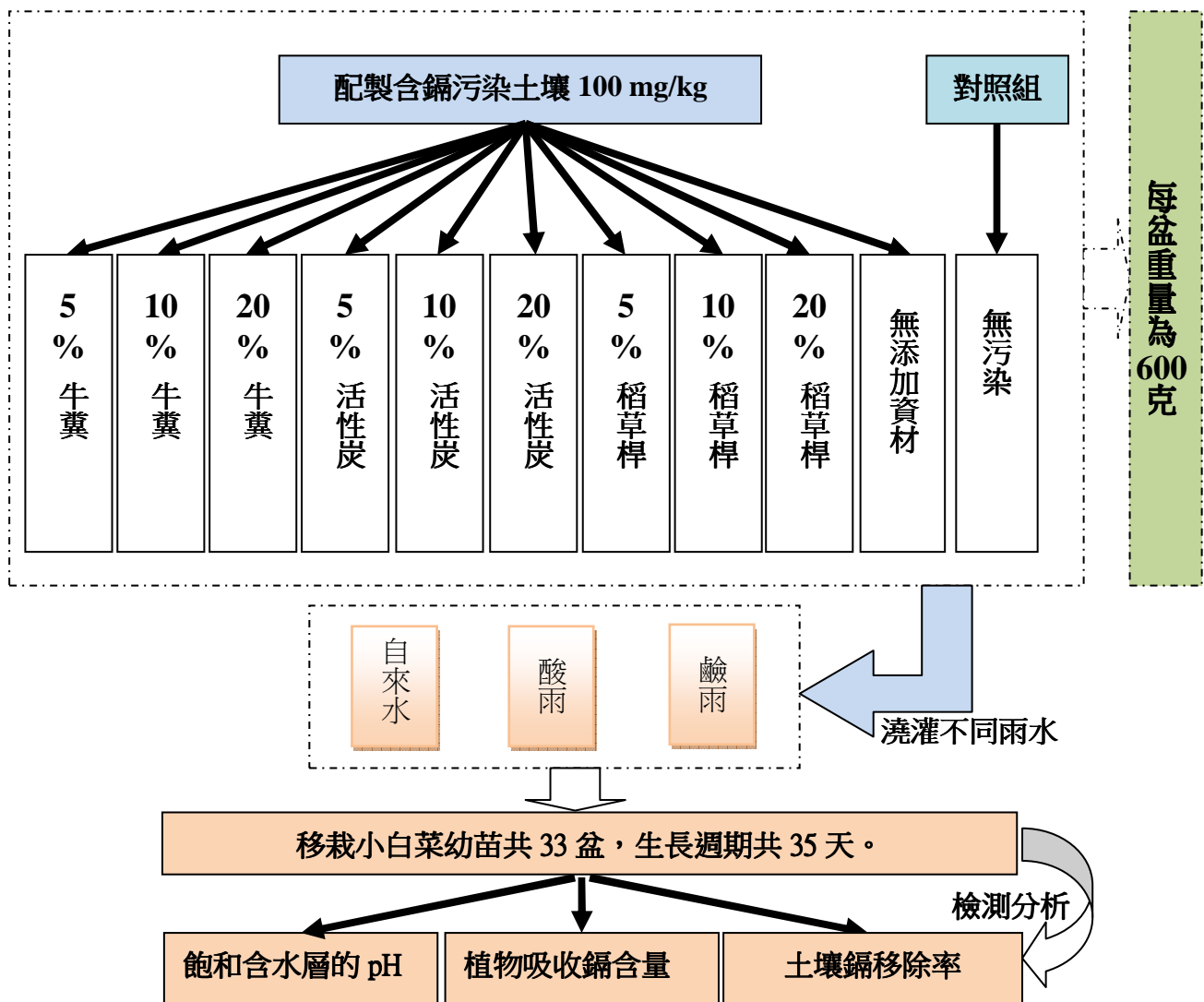
四、模擬鎘污染土壤經堆肥發酵後種植小白菜

我們完成「種子發芽率實驗」及「天然資材堆肥化」後，發現在不同環境下(酸雨、鹼雨與自來水)植物生長情形會有所不同。少量的酸雨、鹼雨或硝酸鎘(即微量的鎘污染)，不會影響植物發芽，但生長較為緩慢。在極高濃度的酸雨與硝酸鎘或鹼雨與硝酸鎘共存環境下，造成植物發芽生長的抑制，種子不會發芽。

接著，我們將牛糞、稻草桿及活性碳分別破碎均勻，取不同比例(5%、10%及20%)牛糞、稻草桿及活性碳加入模擬受鎘污染土壤中，並使其厭氧發酵40天做成堆肥，作為小白菜復育受鎘污染土壤的添加劑，希望能促進小白菜吸收鎘，並提高植物復育作用的吸收降解率。探討不同環境下小白菜吸收鎘的情形，觀察結果與分析實驗部份，共分為三項。

實驗步驟流程圖二：

探討不同澆灌水質於添加不同比例天然資材在土壤中對小白菜累積鎘濃度之影響



堆肥製造過程如流程圖一

五、堆肥製造過程實驗過程:

(1) 使用98%硝酸錳配製模擬受100 mg/kg錳污染土壤，以超純水定量後充分攪拌，靜置2小時後，以烘箱60°C乾燥。



(2) 使用高轉速離心破碎機，將牛糞、活性炭及稻草桿破碎均勻。



(3) 取不同比例的天材資材攪拌均勻，倒入盆栽內，標示種類名稱、堆肥發酵後種植小白菜



(4) 小白菜生長情形



種植第0天(植入小白菜幼苗)

種植第7天(全景)

種植第14天(全景)



種植第21天



種植第28天



種植第35天(即將採收)

伍、研究結果

鎘移除率檢測分析實驗一

一、飽和含水層的pH及小白菜的生長量

土壤酸鹼性對植物生長有很大的影響，各種植物對土壤酸鹼性的要求會不同，有些植物對pH值要求不嚴格，即使在很寬的pH值範圍內仍正常生長，而大多數植物在強酸或強鹼的情況下都難以生長。這些問題牽涉非常廣泛，讓我們想要深入研究，所以，做以下實驗來觀察。

我們分別使用白醋與熟石灰調配pH4.5±0.2的酸雨(圖二)及pH9.5±0.2的鹼雨(圖三)，澆灌小白菜復育重金屬實驗，希望觀察到重金屬從土壤中被移除，以達污染土壤復育的目的。因為許多研究中提到酸雨會影響土壤，同時土壤中的金屬元素因被酸雨溶解，造成礦物質大量流失，植物無法獲得充足的養分，終將枯萎、死亡。但土壤中因酸雨釋出的金屬也可能為植物吸收造成影響，這問題極其複雜，我們想做實驗得到真相。此外，空氣污染嚴重地區，若有水泥廠或肥料廠大量排放煙塵，造成細小的霧滴下降，形成鹼雨，也可能危害植物的生長。所以，我們觀察並紀錄不同澆灌水質添加不同比例的天然資材在土壤中pH值的變化(表二及圖七)及小白菜的生長量結果(表三及圖八)所示。



圖二 pH4.5±0.2的酸雨



圖三 pH9.5±0.2的鹼雨

飽和含水層的 pH 分析步驟

1. 我們使用微量土壤水分萃取管分別埋入於土壤中。(圖四)
2. 每隔 7 天以澆灌方式加入超純水於盆栽內，每盆都 100 mL。
3. 固定式抽起土壤中飽和含水層的水份。(圖五)
4. 以 pH 計量測土壤中飽和含水層的 pH 值，並紀錄。(圖六)
5. 我們彙整圖七為不同澆灌水質對添加不同比例天然資材在土壤中 pH 之影響



圖四 微量土壤水分萃取管



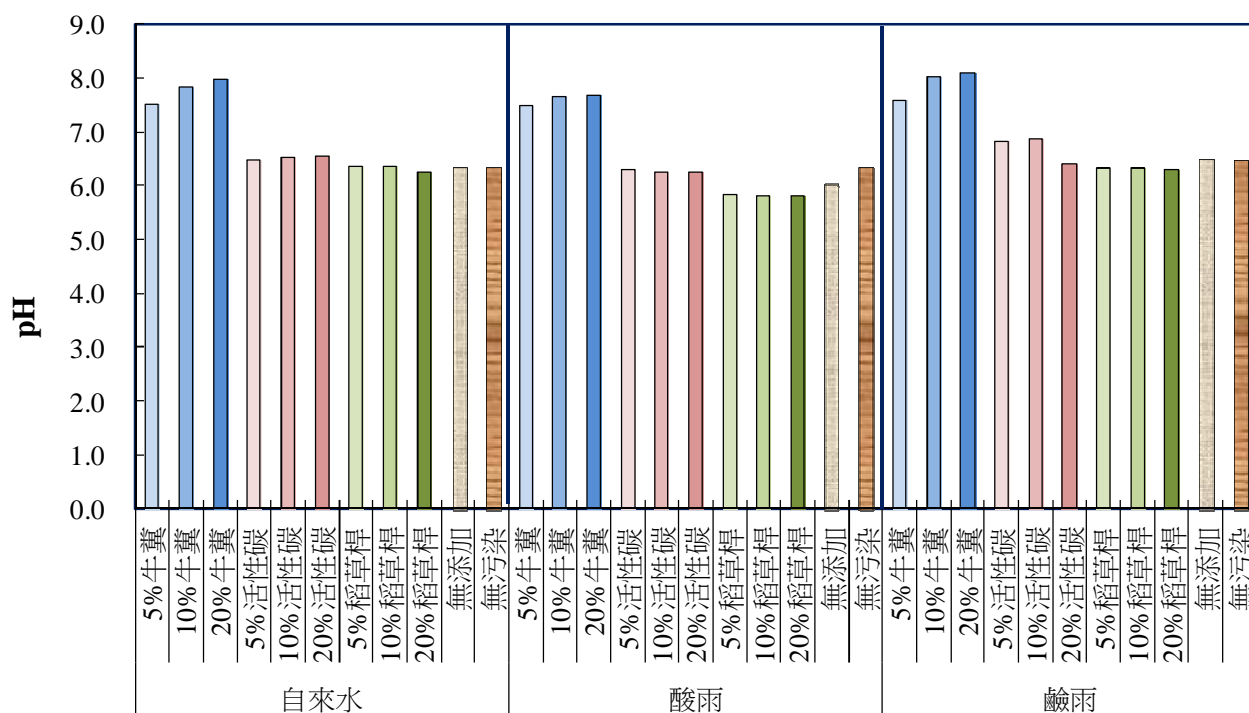
圖五 抽起飽和含水層的水份



圖六 pH計量測

表二 每週飽和含水層的pH值檢測結果

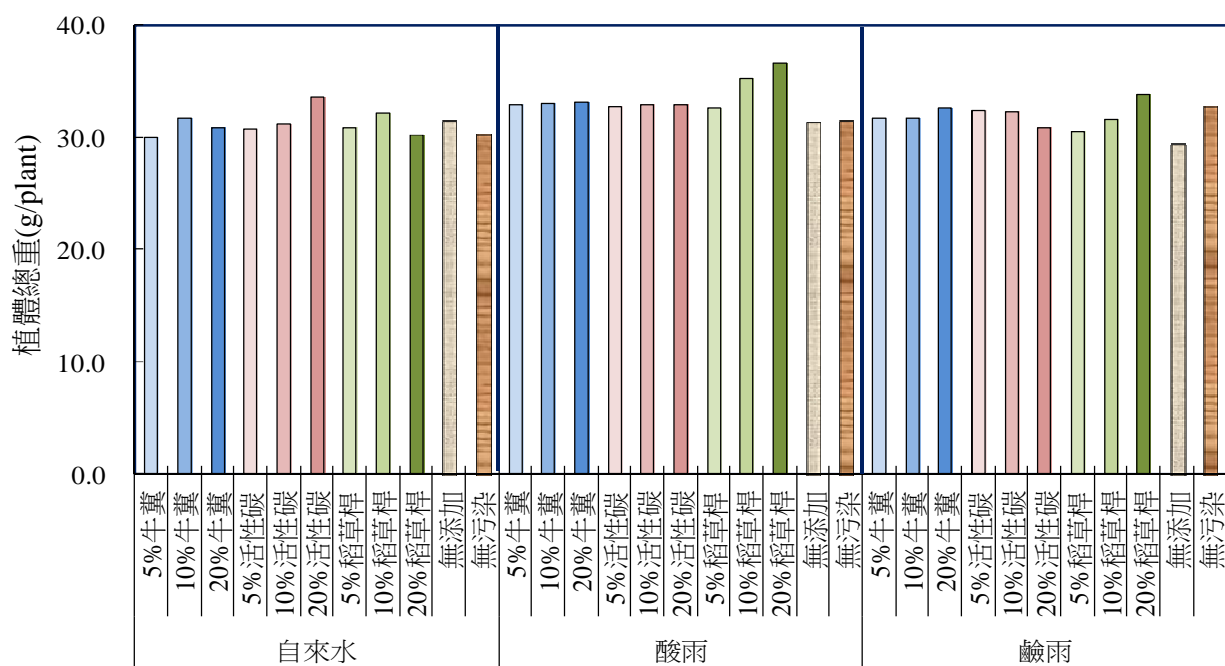
澆灌水質	添加型態	5%	10%	20%	5%	10%	20%	5%	10%	20%	無添加	無污染
		牛糞	牛糞	牛糞	% 活性碳	% 活性碳	% 活性碳	% 稻草桿	% 稻草桿	% 稻草桿		
自來水	第7天	7.56	8.01	8.12	6.41	6.47	6.51	6.40	6.36	6.28	6.48	6.48
	第14天	7.45	7.82	8.11	6.45	6.46	6.52	6.32	6.31	6.25	6.66	6.42
	第21天	7.66	7.78	8.05	6.42	6.55	6.56	6.38	6.32	6.23	6.56	6.38
	第28天	7.36	7.79	7.85	6.52	6.56	6.57	6.32	6.36	6.22	6.12	6.42
	第35天	7.46	7.68	7.77	6.52	6.55	6.60	6.38	6.34	6.24	6.02	6.16
	平均值	7.50	7.82	7.98	6.46	6.52	6.55	6.36	6.34	6.24	6.37	6.37
酸雨	第7天	7.92	8.00	8.08	6.38	6.40	6.32	6.18	6.15	6.23	6.22	6.48
	第14天	7.80	7.88	7.78	6.32	6.39	6.19	6.20	6.23	6.21	6.16	6.42
	第21天	7.56	7.66	7.69	6.28	6.22	6.26	5.99	5.86	6.03	6.08	6.33
	第28天	7.12	7.48	7.50	6.24	6.12	6.21	5.56	5.64	5.55	5.88	6.34
	第35天	7.02	7.25	7.31	6.25	6.17	6.24	5.23	5.14	4.98	5.91	6.28
	平均值	7.48	7.65	7.67	6.29	6.26	6.24	5.83	5.80	5.80	6.05	6.37
鹼雨	第7天	7.56	8.02	8.11	6.71	6.86	6.66	6.31	6.41	6.45	6.45	6.48
	第14天	7.58	8.03	8.11	6.82	6.84	6.72	6.32	6.34	6.33	6.54	6.48
	第21天	7.59	8.01	8.05	6.75	6.84	6.18	6.24	6.34	6.22	6.56	6.49
	第28天	7.57	8.04	8.13	6.84	6.88	6.25	6.36	6.29	6.24	6.51	6.46
	第35天	7.59	8.02	8.09	6.90	6.94	6.24	6.41	6.25	6.31	6.53	6.55
	平均值	7.58	8.02	8.10	6.80	6.87	6.41	6.33	6.33	6.31	6.52	6.49



圖七 不同澆灌水質對添加不同比例天然資材在鋤土壤中pH值之影響

表三 小白菜收成後的生長量(全株重)

澆灌水質	添加型態	5 % 牛糞	10 % 牛糞	20 % 牛糞	5 % 活性碳	10 % 活性碳	20 % 活性碳	5 % 稻草桿	10 % 稻草桿	20 % 稻草桿	無添加	無污染
		自來水	重量(g)	30.02	31.73	30.89	30.73	31.17	33.56	30.89	32.12	30.15
酸雨	重量(g)	32.95	32.99	33.11	32.75	32.94	32.96	32.61	35.22	36.62	31.42	31.52
鹼雨	重量(g)	31.77	31.75	32.54	32.33	32.23	30.81	30.53	31.64	33.81	29.50	32.86



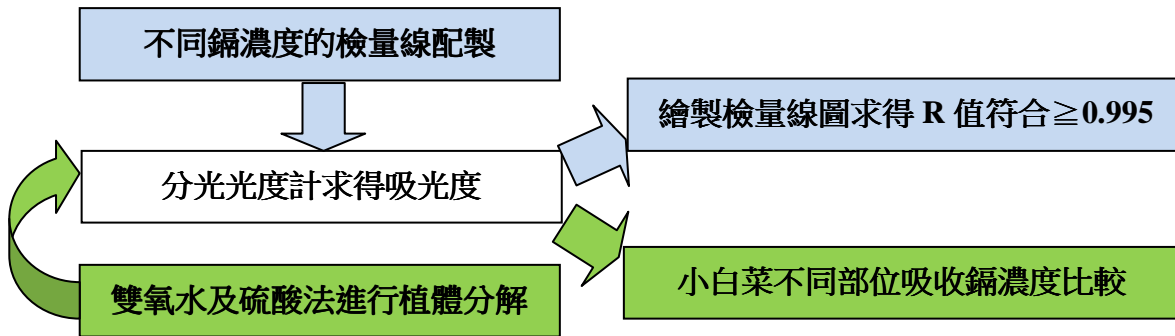
圖八 不同澆灌水質對添加不同比例天然資材在鋤土壤中小白菜的生長量

鎘去除率檢測分析實驗二

二、植物吸收鎘含量

本檢測分析實驗二之架構如流程圖三所示，主要分為兩部份，(一)不同鎘濃度的檢量線配製及(二)使用雙氧水及硫酸進行植體分解求得小白菜不同部位吸收鎘濃度的比較。

檢測分析實驗二之流程圖三



(一) 不同鎘濃度的檢量線配製

植體檢量線步驟如下:

1. 從已知的鎘標準品濃度為 1000 mg/L(MERCK)(圖九)，使用移液管吸取 10 mL 鎘標準品濃度為 1000 mg/L 的溶液置入 100 mL 定量瓶中，再以超純水定量混合均勻，此時濃度為 100 mg/L。直到最後配製完成濃度為 0、0.05、0.2、0.4、0.6、0.8 及 1 mg/L。

計算過程如下:

已知鎘濃度	×	吸取置入容積	=	得到濃度	×	使用定量瓶
1000 mg/L	×	10 mL	=	100 mg/L	×	100 mL
100 mg/L	×	10 mL	=	10 mg/L	×	100 mL
10 mg/L	×	10 mL	=	1 mg/L	×	100 mL
10 mg/L	×	8 mL	=	0.8 mg/L	×	100 mL
10 mg/L	×	6 mL	=	0.6 mg/L	×	100 mL
10 mg/L	×	4 mL	=	0.4 mg/L	×	100 mL
10 mg/L	×	2 mL	=	0.2 mg/L	×	100 mL
10 mg/L	×	0.5 mL	=	0.05 mg/L	×	100 mL
超純水	×	超純水	=	0.0 mg/L	×	100 mL

2. 使用簡易型檢測鎘溶液(Merck 製，圖十)共分為 3 瓶(Cd1、Cd2 及 Cd3)，依序加入 Cd1 為 0.25 mL，再從定量瓶中加入 2.5 mL 溶液、Cd2 為 0.05 mL 及 Cd3 為 1/4 匙，於檢測試管中，充分混合均勻後，使用 10 mm 石英槽搭配分光光度計，即求得不同濃度鎘吸光度的顏色變化(圖十一)。
3. 利用分光光度計檢測不同鎘濃度(表四)，繪製成檢量線圖，求得線性 $y=ax+b$ ，如圖十二。



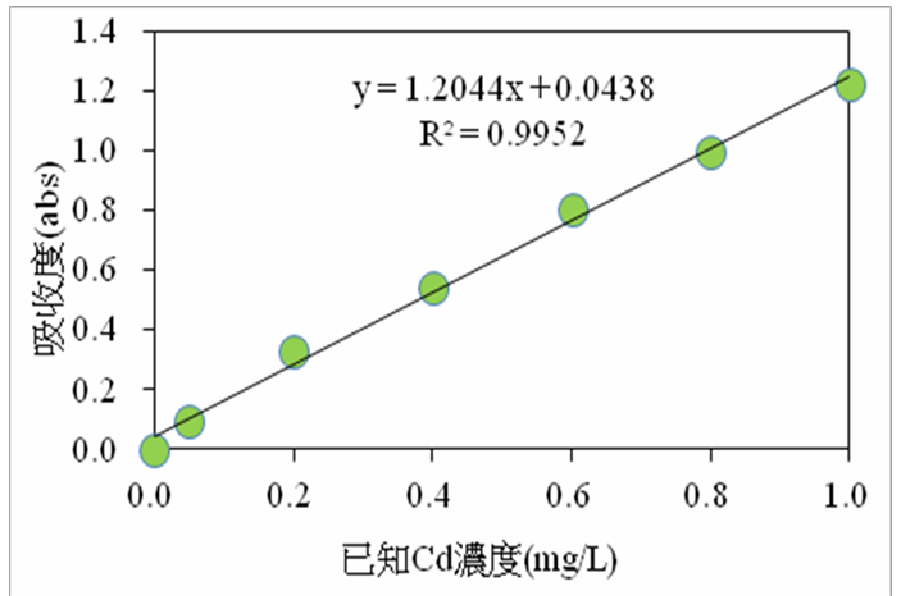
圖九 鎘標準品

圖十簡易型檢測鎘溶液

圖十一不同濃度鎘吸光度的顏色變化

表四簡易型檢測鎘溶液檢量線數據

mg/L	吸收強度 (abs)
0	0.000
0.05	0.093
0.2	0.327
0.4	0.539
0.6	0.802
0.8	0.998
1	1.221



圖十二 植體檢量線圖

(二) 檢測小白菜不同部位吸收鎘濃度的比較

為了探討種植於盆栽內的植物是否吸收重金屬並造成危害，所以將種植復育的植物分為根、莖及葉部逐一探討，以瞭解小白菜植體吸收鎘含量。

利用雙氧水/硫酸法進行植體分解。先磨碎植體後以 70°C 烘 24 小時，稱取 0.2 g 植體置於分解管中，加入 5 mL 濃硫酸(H₂SO₄)，靜置過夜。將分解管置於加熱爐中以 100°C 加熱，並以每 20 ~ 30 分鐘升溫 50°C 的速度加熱至 350°C，待固體完全分解且溶液呈黑色。取出分解管待冷卻至室溫，加入 2 mL 過氧化氫(H₂O₂)溶液，先以 350°C 加熱至溶液呈現澄清，再加熱至過氧化氫完全分解(約 20 分鐘)。若未澄清，則繼續重複此步驟至澄清為止。冷卻後，加入少許去超純水使溶液釋放出部分稀釋熱，溶液以濾紙過濾至 50 mL 定量瓶中，以超純水定量。

然後，我們使用簡易型檢測鎘溶液(Merck 製，圖十)共分為 3 瓶(Cd 1、Cd 2 及 Cd 3)，分別依序加入 Cd 1 為 0.25 mL，再加入定量後樣品 2.5 mL、Cd 2 為 0.05 mL 及 Cd 3 為 1/4 匙，於檢測試管中，充份混合均勻溶液，分別以分光光度計量測吸光度後，代入求得已知檢量線的線性關係，換算求得植物不同部位吸收鎘濃度(表五、表六及表七；圖十三、圖十四及圖十五)。

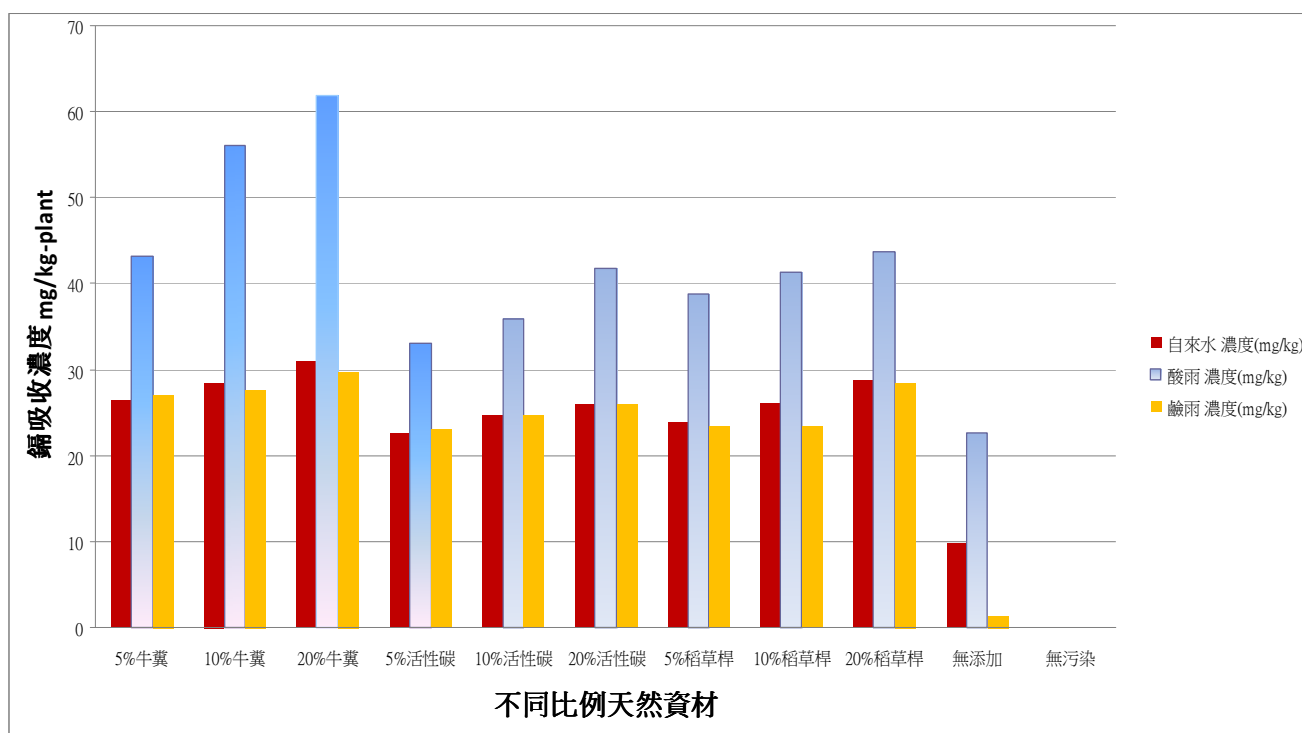
利用雙氧水/硫酸法進行植體分解流程：

1、將植體洗淨	2、分解植體後	3、以 70°C 烘 24 小時
		
4、秤取 0.2 g 植體	5、置於分解管中加入 5 mL 濃硫酸 H_2SO_4 ，靜置過夜	6、置加熱爐中加熱至固體完全分解，且溶液呈黑色
		
7、取出分解管待冷卻至室溫加入 2 mL 過氧化氫 (H_2O_2) 溶液。	8、溶液以濾紙過濾至 50 mL 定量瓶中，以超純水定量。	9、分別以分光光度計量測吸光度後求得植物不同部位吸收鎘濃度。
		

表五 檢測小白菜**根部**累積鎘含量的實驗結果

澆灌水質		添加型態	5 % 牛糞	10 % 牛糞	20 % 牛糞	5 % 活性碳	10 % 活性碳	20 % 活性碳	5 % 稻草桿	10 % 稻草桿	20 % 稻草桿	無添加	無污染
自來水	吸光度 (abs)		0.180	0.190	0.202	0.162	0.172	0.178	0.168	0.179	0.192	0.100	0.053
	濃度 (mg/kg)		26.41	28.49	30.98	22.68	24.75	26.00	23.92	26.21	28.90	9.81	0.05
酸雨	吸光度 (abs)		0.261	0.323	0.351	0.212	0.226	0.254	0.240	0.252	0.263	0.162	0.053
	濃度 (mg/kg)		43.23	56.10	61.91	33.06	35.96	41.77	38.87	41.36	43.64	22.68	0.05
鹼雨	吸光度 (abs)		0.183	0.186	0.196	0.164	0.172	0.178	0.166	0.166	0.190	0.060	0.053
	濃度 (mg/kg)		27.04	27.66	29.73	23.09	24.75	26.00	23.51	23.51	28.49	1.50	0.05

根部

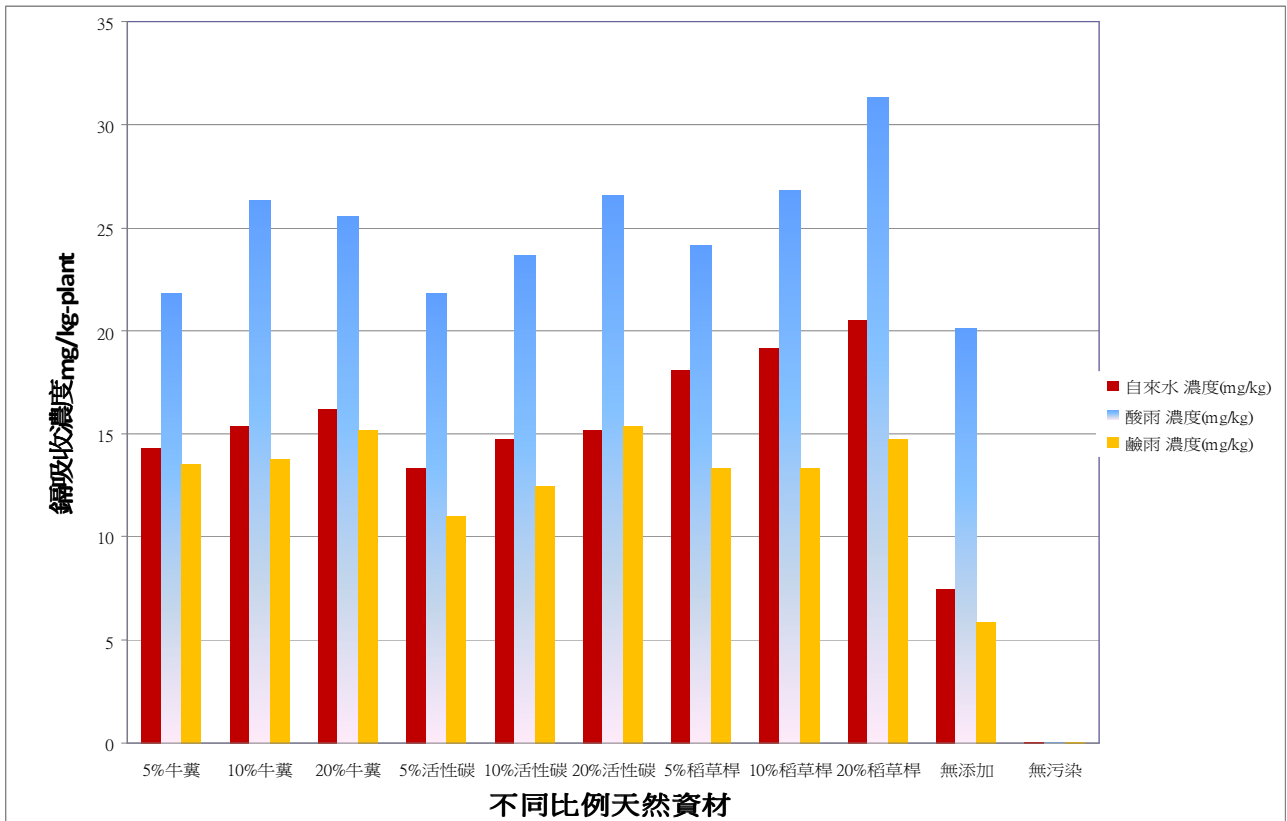


圖十三 不同澆灌水質於添加不同比例天然資材在土壤中對小白菜的**根部**累積鎘濃度之影響

表六 檢測小白菜**莖部**累積鎘含量的實驗結果

澆灌水質		添加型態		5 % 牛糞	10 % 牛糞	20 % 牛糞	5 % 活性碳	10 % 活性碳	20 % 活性碳	5 % 稻草桿	10 % 稻草桿	20 % 稻草桿	無添加	無污染
		吸光度 (abs)	濃度 (mg/kg)	吸光度 (abs)	濃度 (mg/kg)	吸光度 (abs)	濃度 (mg/kg)	吸光度 (abs)	濃度 (mg/kg)	吸光度 (abs)	濃度 (mg/kg)	吸光度 (abs)	濃度 (mg/kg)	吸光度 (abs)
自來水	吸光度 (abs)	0.122	0.127	0.131	0.117	0.124	0.126	0.140	0.145	0.152	0.089	0.053		
	濃度 (mg/kg)	14.37	15.41	16.24	13.34	14.79	15.20	18.11	19.15	20.60	7.52	0.05		
酸雨	吸光度 (abs)	0.158	0.180	0.176	0.158	0.167	0.181	0.169	0.182	0.204	0.150	0.053		
	濃度 (mg/kg)	21.85	26.41	25.58	21.85	23.71	26.62	24.13	26.83	31.39	20.19	0.05		
鹼雨	吸光度 (abs)	0.118	0.119	0.126	0.106	0.113	0.127	0.117	0.117	0.124	0.081	0.053		
	濃度 (mg/kg)	13.54	13.75	15.20	11.05	12.51	15.41	13.34	13.34	14.79	5.86	0.05		

莖部

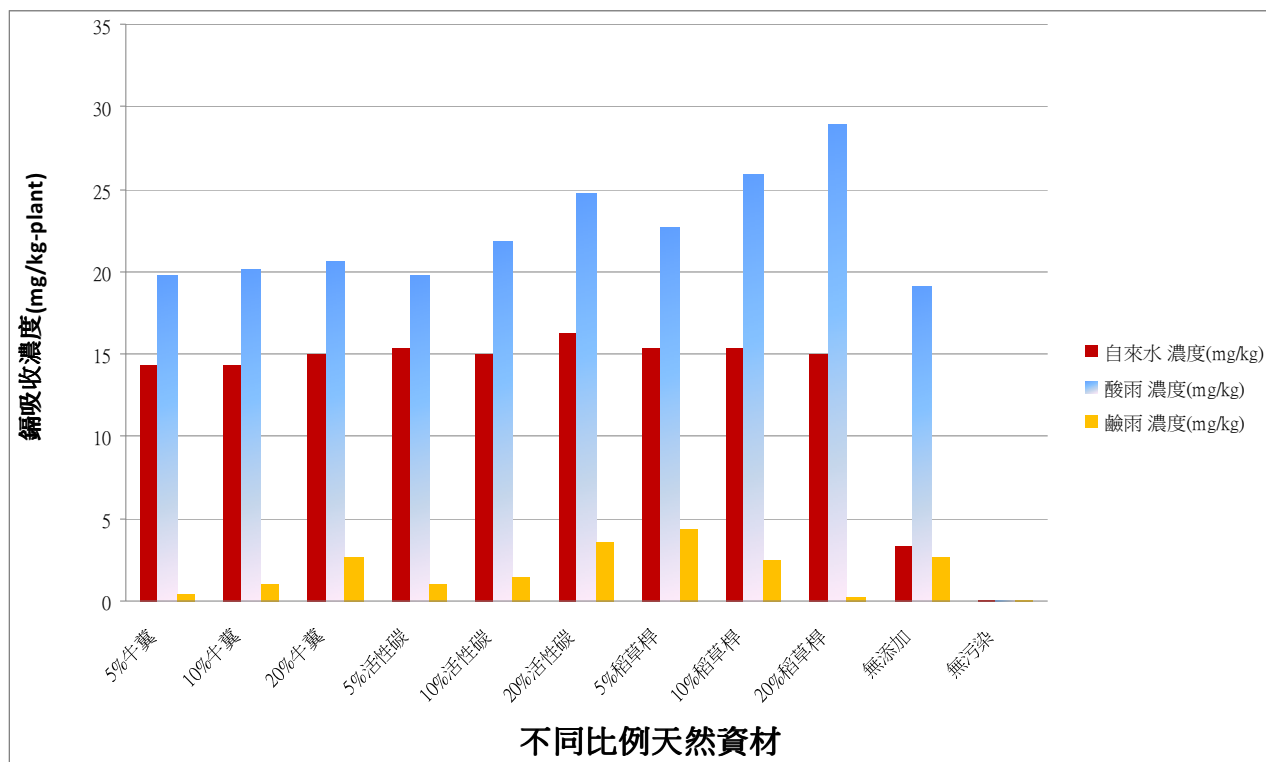


圖十四 不同澆灌水質於添加不同比例天然資材在土壤中對小白菜的**莖部**累積鎘濃度之影響

表七 檢測小白菜葉部累積鎘含量的實驗結果

澆灌水質	添加型態	5 % 牛糞	10 % 牛糞	20 % 牛糞	5 % 活性碳	10 % 活性碳	20 % 活性碳	5 % 稻草桿	10 % 稻草桿	20 % 稻草桿	無添加	無污染
		自來水	吸光度 (abs) 濃度 (mg/kg)	0.122 14.37	0.122 14.37	0.125 15.00	0.127 15.41	0.125 15.00	0.131 16.24	0.127 15.41	0.127 15.41	0.125 15.00
酸雨	吸光度 (abs) 濃度 (mg/kg)	0.148 19.78	0.15 20.19	0.152 20.6	0.148 19.78	0.158 21.85	0.172 24.75	0.162 22.68	0.178 26	0.192 28.9	0.145 19.15	0.053 0.05
鹼雨	吸光度 (abs) 濃度 (mg/kg)	0.055 0.47	0.058 1.09	0.066 2.75	0.058 1.09	0.06 1.50	0.07 3.58	0.074 4.41	0.065 2.54	0.054 0.26	0.066 2.75	0.053 0.05

葉部



圖十五 不同澆灌水質於添加不同比例天然資材在土壤中對小白菜的葉部累積鎘濃度之影響

鎘去除率檢測分析實驗三

三、土壤鎘去除率實驗

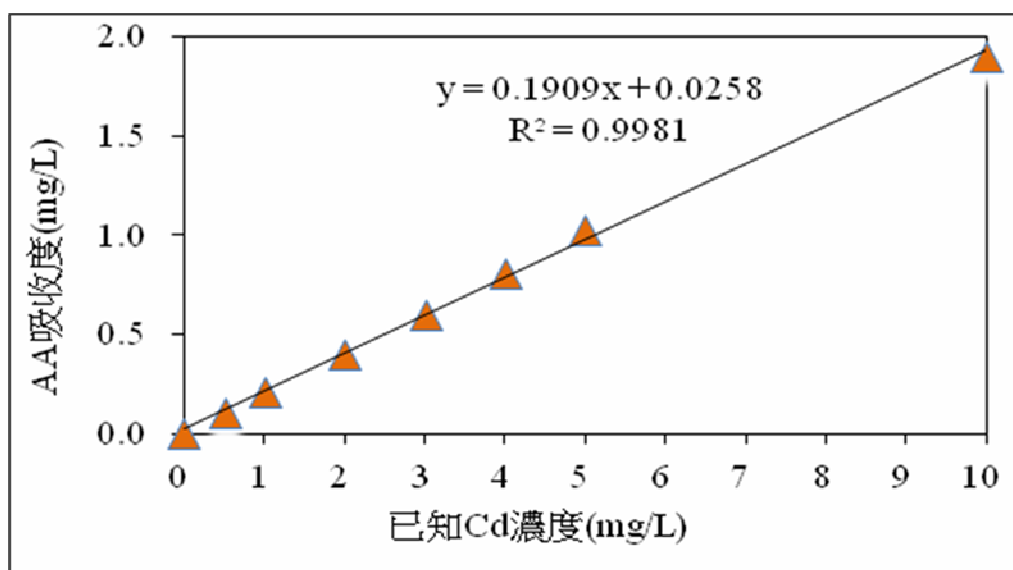
在進行添加不同比例資材的植生整治過程中，我們希望能夠探討不同環境下(自來水、酸與及鹼雨)資材對受鎘污染土地復育之有效性，最後求得土壤中鎘的濃度。我們利用行政院環境保護署環境檢驗所公告土壤中重金屬檢測方法－王水消化法(NIEA S321.63B)分析殘留於盆栽內剩下土壤中鎘濃度。

(一)土壤檢量線製作:

首先，使用100 mL定量瓶，先加入少許超純水，再加入21 mL 濃鹽酸及慢慢加入 7 mL 濃硝酸，從已知的鎘標準品濃度為1000 mg/L(MERCK)，分別配製完成鎘濃度為0、0.5、1、2、3、4、5及10 mg/L，搖盪充分混合均勻，以火焰式原子吸收光譜儀測定其吸光度(表八及圖十六)。

表八 火焰式原子吸收光譜儀檢量線數據

mg/L	吸收度 (abs)
0	0.000
0.5	0.112
1	0.208
2	0.406
3	0.606
4	0.811
5	1.030
10	1.900



圖十六 火焰式原子吸收光譜儀檢量線圖

(二)土壤樣品分析:

1. 秤取適量已經烘乾處理之土壤樣品(圖十七)，取土壤樣品約 3 g (精秤至 1 mg)，置於 250 mL 反應瓶中。
2. 先以 0.5 至 1 mL 水潤濕樣品。
3. 緩慢加入 21 mL 濃鹽酸，再慢慢加入 7 mL 濃硝酸，搖盪充分混合均勻。
4. 在室溫下靜置此裝置 16 小時，可適時將反應瓶搖晃使充分反應之。
5. 緩慢加熱溶液至迴流溫度，使溶液在沸騰狀態下維持約 2 小時。加熱程度保持迴流區域在冷凝管高度三分之一以下(圖十九)。
6. 冷卻樣品至室溫後，以約 10 mL 0.5 M 稀硝酸沖洗冷凝管，並收集於反應瓶中。
7. 將反應瓶中溶液倒入 50 mL 量瓶中，以 0.5 M 稀硝酸沖洗反應瓶，並收集於此量瓶中，再加水至標線，加蓋並搖勻。
8. 待不溶物沈降後，藉由過濾方法取上澄液分析(圖十八)。
9. 此樣品消化溶液，再以火焰式原子吸收光譜儀(圖二十)測定其吸光度，並由相對應檢量線上求得該鎘濃度，最後得知不同澆灌水質於不同添加比例天然資材的土壤鎘移除率(表九及圖二十一)。

換算求得土壤鎘移除率(%) = **【100 mg/kg - (相對應檢量線上求得該鎘濃度)】 × 100%**



圖十七 土壤烘乾



圖十八 過濾方法取上澄液分析



圖十九 加熱冷凝管裝置

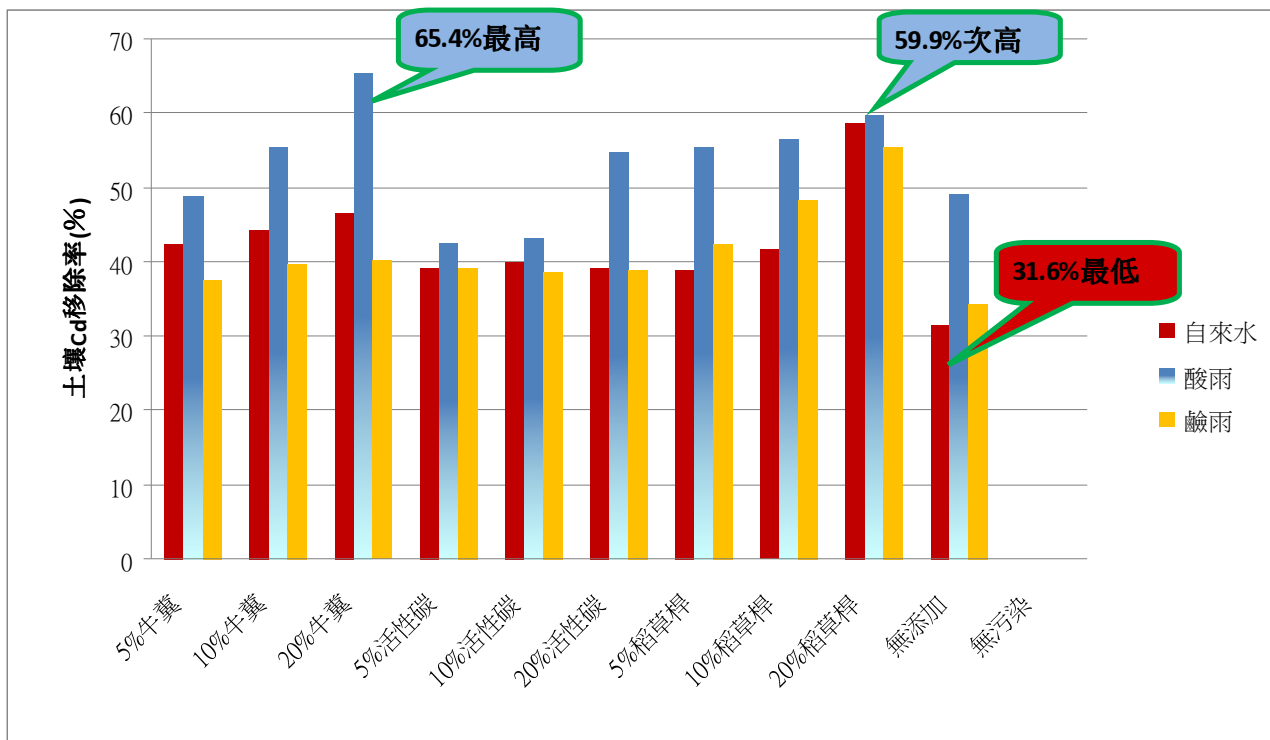


圖二十 火焰式原子吸收光譜儀

表九、不同澆灌水質於不同添加比例天然資材的土壤鎘移除的實驗結果

澆灌水質		添加型態	5 % 牛糞	10 % 牛糞	20 % 牛糞	5 % 活性碳	10 % 活性碳	20 % 活性碳	5 % 稻草桿	10 % 稻草桿	20 % 稻草桿	無添加	無污染
		自來水	吸光度 (abs)	0.664	0.642	0.618	0.702	0.692	0.701	0.705	0.671	0.478	0.788
		濃度 (mg/kg)	57.5	55.6	53.5	60.9	60.0	60.8	61.1	58.2	41.3	68.4	0.1
		移除率 (%)	42.5	44.4	46.5	39.1	40.0	39.2	38.9	41.8	58.7	31.6	- ^a
酸雨		吸光度 (abs)	0.591	0.513	0.401	0.665	0.653	0.523	0.515	0.502	0.464	0.588	0.007
		濃度 (mg/kg)	51.2	44.4	34.6	57.6	56.6	45.2	44.5	43.4	40.1	50.9	0.2
		移除率 (%)	48.8	55.6	65.4	42.4	43.4	54.8	55.5	56.6	59.9	49.1	- ^a
鹼雨		吸光度 (abs)	0.717	0.694	0.690	0.701	0.707	0.704	0.663	0.596	0.514	0.756	0.005
		濃度 (mg/kg)	62.2	60.2	59.8	60.8	61.3	61.0	57.5	51.6	44.4	65.6	0.0
		移除率 (%)	37.8	39.8	40.2	39.2	38.7	39.0	42.5	48.4	55.6	34.4	- ^a

^a 不論在自來水、酸雨及鹼雨的無污染土壤都沒有受鎘污染，所以不能以移除率一同計算。



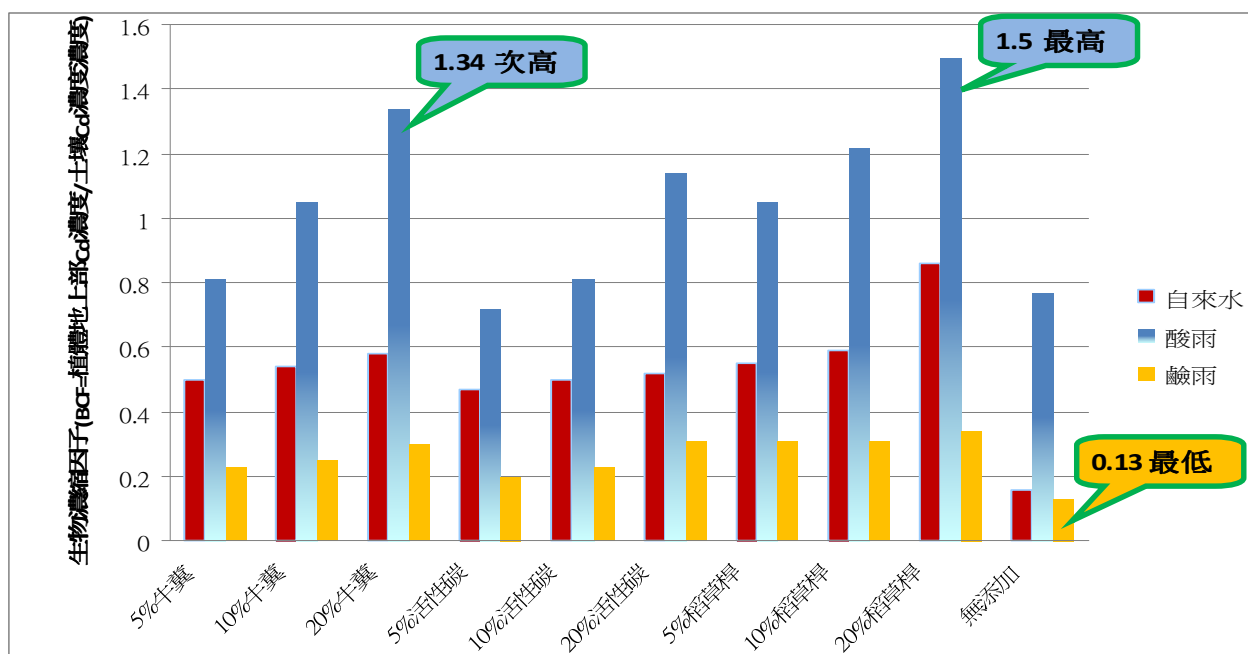
圖二十一 不同澆灌水質於不同添加比例天然資材的土壤鎘移除率

除此之外，為完整觀察植物的生長週期，我們選用了小白菜(十字花科植物)作為累積重金屬能力評估，期望十字花科植物能像其他植物做為鎘的復育污染指標，以下我們用一種方法來評估植物體中污染物與環境中污染物濃度的比值，可指出生物體對污染物的累積效應，這叫做「生物濃縮因子(BCF)」，計算公式為 $BCF = \text{植物地上部(莖和葉)鎘濃度} / \text{土壤鎘濃度}$ 。結果顯示，如表十、圖二十二所示。

表十 不同澆灌水質於添加不同比例天然資材的 BCF 變化的實驗結果

澆灌水質	添加型態	5 % 牛糞	10 % 牛糞	20 % 牛糞	5 % 活性碳	10 % 活性碳	20 % 活性碳	5 % 稻草桿	10 % 稻草桿	20 % 稻草桿	無添加
		自來水	28.75	29.79	31.24	28.75	29.79	31.45	33.52	34.56	
自來水	地上部濃度(莖+葉)	28.75	29.79	31.24	28.75	29.79	31.45	33.52	34.56	35.60	10.90
	土壤鎘濃度	57.54	55.62	53.52	60.86	59.99	60.77	61.12	58.15	41.30	68.37
	生物濃縮因子	0.50	0.54	0.58	0.47	0.50	0.52	0.55	0.59	0.86	0.16
酸雨	地上部濃度(莖+葉)	41.63	46.6	46.18	41.63	45.56	51.37	46.81	52.83	60.29	39.34
	土壤鎘濃度	51.17	44.36	34.58	57.63	56.58	45.23	44.53	43.40	40.08	50.91
	生物濃縮因子	0.81	1.05	1.34	0.72	0.81	1.14	1.05	1.22	1.5	0.77
鹼雨	地上部濃度(莖+葉)	14.01	14.84	17.95	12.14	14.01	18.99	17.75	15.88	15.05	8.61
	土壤鎘濃度	62.17	60.16	59.81	60.77	61.30	61.03	57.45	51.60	44.45	65.57
	生物濃縮因子	0.23	0.25	0.30	0.20	0.23	0.31	0.31	0.31	0.34	0.13

^a不論在自來水、酸雨及鹼雨的無污染土壤都沒有受鎘污染，所以不能以移除率一同計算。



圖二十二 不同澆灌水質於添加不同比例天然資材的BCF變化

陸、討論

- 一、為了解植物對於鎘的耐受度及不同 pH 值澆灌水是否影響植物生長情形？除了查閱文獻外，我們希望藉由「種子發芽率實驗」實際測試，作為後續實驗之準則，結果發現少量酸雨或鹼雨不會造成植物發芽的傷害，甚至含有少許硝酸鎘的碟子裡，也都不會造成植物發芽生長的抑制。但是含有鎘、酸、鹼極端環境下，卻會影響種子的發芽。從這實驗我們決定模擬鎘土 500 克(調配鎘濃度 100 mg/kg)及分別使用白醋與熟石灰調配 pH4.5±0.2 的酸雨及 pH9.5±0.2 的鹼雨，及自來水作為澆灌水。
- 二、從農業相關書籍我們知道，堆肥可有效改善土壤物化性質，所以透過「天然資材堆肥化實驗」，我們設計一些天然資材(牛糞、雞糞、稻草桿、稻殼、果皮、樹葉、竹炭、活性碳及磷肥)添加到受鎘污染土壤中並種植小白菜，觀察其反應，結果發現全部都有發芽。使用資材堆肥化後能在不同環境下(酸雨、鹼雨與自來水)促使植物正常的生長茁壯。其中以牛糞、稻草桿和樹葉、活性碳組，生長狀況相對良好，於是我們選用了不同比例(5%、10%及 20%)牛糞、稻草桿及活性碳作後續實驗，種植小白菜的土壤的添加劑，以觀察不同比例資材對植物吸收鎘的差異。
- 三、「飽和含水層的pH值」檢測，不同比例的天然資材加入受鎘污染土壤中，澆灌不同水質的雨水後發現，添加牛糞的土壤pH值改變為鹼性。
- 四、「小白菜的生長量」檢測，不同澆灌水質對添加不同比例天然資材對小白菜的生長量有其差異（植重最重為澆灌酸雨的20%稻草桿36.62g，最輕為澆灌鹼雨的無添加29.05g），根據文獻指出，因堆肥含有豐富營養鹽及有機質，可有效改善土壤物化性質及植株生長量、增加作物產量。由此推論本實驗係添加天然資材經堆肥後之營養促使生長量提高。
- 五、「植物吸收鎘含量」檢測，不同澆灌水質於添加不同比例天然資材對受鎘污染土壤上，在『根部』的吸收能力，累積濃度範圍1.50~61.91 mg/kg，相較之下酸雨比鹼雨和自來水為佳，因為酸雨有利鎘的釋出，而被作物吸收。在相同比例的天然資材同組別裏，以酸雨澆灌之累積鎘濃度為最高，其中更以的20%牛糞高達61.91 mg/kg；在『莖部』的吸收能力，累積濃度範圍5.86~31.39 mg/kg，澆灌酸雨的稻草桿有較高累積鎘含量；在『葉部』的吸收能力，累積濃度範圍0.47~28.9 mg/kg，相較之下酸雨比鹼雨和自來水好，鹼雨有抑制植物吸收鎘的現象，數值都相對低。在添加不同比例的稻草桿有較高累積鎘含量。從這個實驗，我們發現：

- (一)對於不同澆灌水質的比較結果，酸雨>自來水>鹼雨。
- (二) 添加不同比例天然資材的方面，根部為牛糞>稻草桿>活性炭。
- (三)莖部為稻草桿>牛糞>活性炭。
- (四)葉部為稻草桿>活性炭>牛糞。

以上檢測結果我們得知添加牛糞與稻草桿資材有利植物吸收鎘，我們推測牛糞及稻草桿經堆肥後使土壤含有豐富營養鹽及有機質，所以可有效改善土壤及植株生長量，以提高植體吸收鎘。除此之外，稻草桿質量則較為膨鬆且具疏水及排水性，更有助於植體根部伸展，及澆灌水充分滲透。並依據環保署環境檢測所(第七期電子報)內容指出「綜合植物之基本生理作用，加上植物酵素之分泌、土壤根系微生物之參與作用，而逐漸將污染物消化降解」，所以植生也是功不可沒。

六、實驗進行「土壤鎘移除率」檢測結果，我們發現：

- (一)、在不同澆灌水質的方面比較，以酸雨最好。
- (二)、在不同比例天然資材添加的方面，最高移除率為澆灌酸雨的 20%牛糞(65.4%)，次高移除率為澆灌酸雨的 20%稻草桿(59.9%)，最低移除率為澆灌自來水的無添加(31.6%)。

七、由表十結果顯示，在無添加任何天然資材情況下，生物濃縮因子為最低，但添加稻草桿和牛糞可以提高許多，以澆灌酸雨的 20%稻草桿(1.5)為最高，澆灌酸雨的 20%牛糞(1.34)為次高，顯示添加這兩種天然資材可以促進植物吸收鎘生長。從試驗結果發現，小白菜種植於受鎘污染之土壤 35 天後，小白菜生長正常，代表小白菜為可忍受鎘之作物；牛糞及稻草桿堆肥可提供小白菜所需的營養鹽，促使小白菜生長量增加，而提昇小白菜吸收鎘並累積，因而植體地上部累積較多的鎘濃度，土壤中的鎘亦降低。本實驗生物濃縮因子(BCF)值較高，表示可增加小白菜累積鎘之能力。攝取過量則造成生物體之健康危害(例如痛痛病)。故與受鎘汙染之農田共用灌溉溝之田地應謹慎考量不宜種植食用的小白菜。

八、未來展望：

- (一)、本實驗最令人興奮的發現添加稻草桿和牛糞兩種天然資材，可以促進植物吸收鎘生長。我們希望藉由土地農畜產廢棄物牛糞及稻草桿為有機質，回歸農地做為作物生產之有機肥料，對農業發展及鎘污染土壤復育整治提供友善的實務參考。

(二)、本實驗利用酸雨+牛糞或酸雨+稻草桿可以讓小白菜生長量增加，吸收鎘之能力亦提升，證實以此添加之植生復育法能有效增強移除受鎘污染土壤中的鎘，符合我們當初的實驗構想。我們期望將來這議題上再做各種不同面向的延伸：

1、本實驗以鎘 100 mg/kg 濃度模擬受污染土壤作為「控制」變因，將來嘗試將不同鎘濃度土壤作為「操作」變因，低於或高於本實驗模擬土鎘 100 mg/kg 濃度，比較其差異及變化。

2、以長時間重覆本實驗，使各項數據呈現「再現性」。

2、探討以「鎘」鬥明星組合，嘗試是否同樣可以去除其他重金屬。

3、選用種植不同於小白菜的各種根系觀賞花科植物或草類植物，作為植生復育之比較。

4、探討天然資材經堆肥發酵後於土壤內物化之學理、甚至了解資材堆肥發酵前後土壤微生物作用與重金屬降解之因果關係。

(三)再回收使用：為達到整治效果，植體吸收重金屬後必須進行銷毀，由於重金屬開採不易，屬於不可更新資源，未來我們希望探討其回收再利用之可行性。

柒、結論

一、完成本次實驗後發現：

(一)在不同澆灌水質對受鎘污染土壤移除率的方面比較，酸雨>自來水>鹼雨。

(二)在不同天然資材對受鎘污染土壤移除率的方面比較，牛糞 \geq 稻草桿>活性炭>無添加。

顯示酸雨對植物澆灌可以改善受鎘污染土壤中的鎘移除，在加入牛糞與稻草桿更可以促進植物吸收重金屬，再將植體採收、銷毀、焚化以達到植生復育鎘污染土壤。

二、從本次實驗中得知，牛糞及稻草桿經堆肥後使土壤含有豐富營養鹽及有機質，是一寶貴資源，應該鼓勵農民多多利用此項天然資材，不用花大錢購買化學肥料，且添加牛糞可以提升土壤中的 pH，對土壤達到自淨復育作用。

三、我們模擬不同環境下，添加不同比例天然資材對受鎘污染土壤的復育作用，結果顯示酸雨+牛糞或酸雨+稻草桿可以有效移除受鎘污染土壤中的鎘，讓我們在這實驗中聯想到，很多整治重金屬污染土地，實務上多使用強酸淋洗方式，即使達到快速整治效果，但同時亦付出土壤壞死的代價、尤其是低濃度大面積的流布，也可能造成二次污染，影響到地下水層，破壞生態。若是可以使用弱酸(pH4~5)搭配添加牛糞或稻草桿，將可成功而有效率的達成友善復育土地的目的。

四、雖然本實驗必須經由堆肥植栽復育之過程稍較繁複、但在環境保護及經濟效益前提下，本實驗方法具有高效率、自然、經濟、大面積整治之優點，亦是對於土地最友善之方法，具有實用價值，是值得推展的觀念。

捌、參考文獻

- 一、桃園縣政府環保局全國資訊網 <http://www.tyepb.gov.tw>
- 二、王一雄，陳尊賢，李達源 (1995) ” 土壤污染學” ，國立空中大學印行。
- 三、王正雄 (2007) ” 持久性有機污染物之植生整治” ，工業污染防治，第 101 期，1-14。
- 四、高瞻計畫專題研究報告，作品名稱：「草」帥上陣，隔「鏽」不入—「以發芽試驗水耕栽培探討鏽對風傾草的影響」
- 五、邱奕龍 (2009) “土壤污泥添加對小白菜生長及鏽累積量之影響” ，碩士論文，國立中興大學境工程學系，台中。
- 六、行政院環保署 (2012) 土壤及地下水污染整治網
- 七、行政院環保署 (2003) 土壤中重金屬檢測方法—王水消化法(NIEA S321.63B)。
- 八、胡紹華 (2005) ” 重金屬污泥處理技術探討” ，資源與環境學術研討會，花蓮。
- 九、翁仁憲、許苑培、郭孚耀、林文助 (1999) ” 氣象因子對小白菜生長速率之影響” ，中華農業氣象，第一期，7-13。
- 十、陳尊賢 (2003) ” 受重金屬污染農地土壤之整治技術與相關問題分析” ，台灣土壤及地下水環境保護協會簡訊，第9期，2-9。

【評語】 080204

1. 可應用植物生長吸水量差異，比較土壤總重量的改變，簡易測出土壤中重金屬含量在植物生長過程中的改變。
2. 報告撰寫的正確度需留意。