

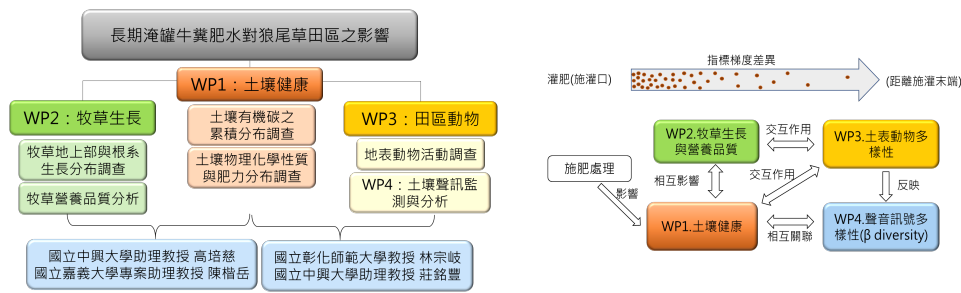
**跨領域永續研究整合型計畫：
臺灣國立大學系統年輕學者創新性合作計畫執行報告**

申請單位	國立中興大學
總計畫主持人	國立中興大學 高培慈
總計畫名稱 (中文)	農田土壤生態系統健康指標之跨領域研究
總計畫名稱 (英文)	Interdisciplinary research on health indicators of the agricultural soil ecosystems
子計畫 主持人	國立中興大學莊銘豐、國立嘉義大學陳楷岳、國立彰化師範大學林宗岐
中文摘要	狼尾草田長期接受畜產廢棄物(沼液、沼渣、牛糞)的投入，此管理方式除了能有效減緩廢棄物處理壓力亦能增加土壤有機質，並供應在地牧草的生長。本計畫之目的在透過長期施灌沼液沼渣與牛糞之狼尾草田，探究田區土壤特性與牧草生長以及田區微生態之空間分布差異，以歸納較具有代表性的農田健康指標。本計畫透過網格式採樣方式，於狼尾草田收集土壤有機碳、土壤總體密度、土壤質地、牧草地下部生長、牧草地上部生質與高度、地表無脊椎動物組成與土壤聲訊等隨空間分布不同之資料，透過歸納分析這些資料，本研究欲初步探究(一)經長期灌溉牛糞肥的狼尾草田各指標因施灌牛糞肥所產生的灌溉區域空間分布差異 (二)嘗試建立各指標之間之關聯性，並找出敏感度最高、最具有代表性的指標。
英文摘要	The purpose of this project is to investigate the differences in soil characteristics, forage growth, and micro-ecological distribution in fields of <i>Pennisetum purpureum</i> (elephant grass) subjected to long-term irrigation with biogas slurry, biogas residue, and cattle manure. Using a grid sampling method, data will be collected in the <i>Pennisetum</i> fields on soil organic carbon, soil bulk density, soil texture, below-ground forage growth, above-ground forage biomass and height, composition of surface invertebrates, and soil acoustics, reflecting spatial variability. Through an inductive analysis of these data, this study aims to (1) explore the spatial distribution differences in various indicators resulting from long-term irrigation with cattle manure and biogas slurry in the <i>Pennisetum</i> fields and (2) attempt to establish relationships

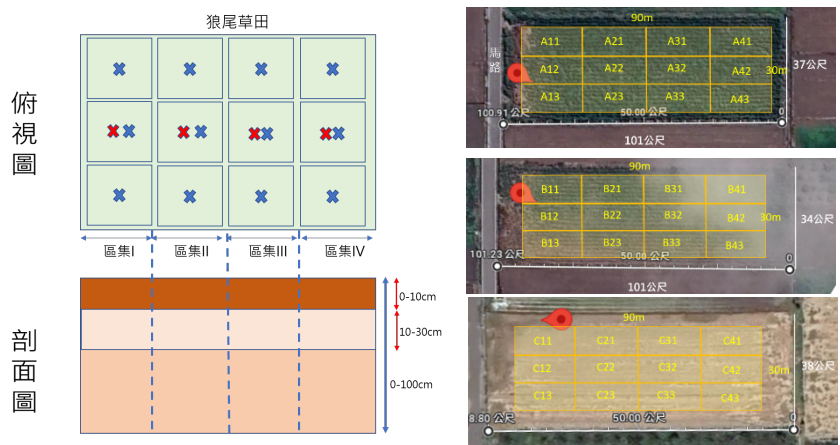
	between these indicators, identifying the most sensitive and representative indicators.
執行方法及步驟	執行期間透過不同子計畫主持人的討論與實驗室人力與資源的配合與合作(如圖一),於旱季與雨季至台南鹽水與佳里兩地區之農地進行樣品收集,實際進行了3個不同田區的採樣,每一田區大小與施灌方式相似,於採樣前3天與採樣後2天並未進行施灌作業。牧草田區皆種植狼尾草2號,牛糞肥施灌的頻率約是一個月2~3次,平均一個月會有約114噸/公頃的牛糞肥回到狼尾草田,此灌溉方式以維持約20年以上,田區面積約為100公尺x35公尺。採樣位點如圖(二)所示,原先假設田區會因為施灌沼液沼渣之方向而產生灌溉區域的差異,因此將每一田區依近端到遠端分割為四個灌溉區域(區集I, II, III, IV),每一灌溉區域內則有三個重複採樣點,藍色標記處為進行表土總體密度、無脊椎動物樣本、土壤聲訊收集之區域,紅色標記處為採集0-100cm樣本以分析土壤有機碳與植物根系分布的採樣區。無脊椎動物資料量化成「豐富度(Abundance)」、類群數量、及 Shannon diversity index (H' index)。聲訊部分則將每段錄音之訊號轉換為 ADI(Acoustic Diversity Index)以進行分析。資料分析部分,(1)首先利用變異數分析先評估灌溉區域對相關指標的影響程度,(2)再利用相關性分析量性指標之間的相關性,並評估最具有代表性之指標以作為未來相關研究之參考資料。
成果與績效	✓ 完成旱季與雨季的樣品收集,一共2次 ✓ 參與學生人數:大學部與碩士生一共7人 ✓ 資料分析:由於雨季採樣時遇到颱風干擾,因此在資料分析與討論部分將以第一季樣品為主。 ✓ 詳細結果與討論如附件二。 ✓ 計畫於2025年內將結果進行至少一篇學術文章發表。
對永續議題之貢獻	1. 農田樣品收集方法與分析項目是評估農田土壤健康的重要考量因素,本研究透過三個長期施用沼液沼渣牛糞的狼尾草田,評估了重要土壤性質隨施灌距離之變異性、田區間的差異以及隨深度的變化,可以提供未來進行相關研究上的參考,以降低採樣成本,能專注於重要的範圍內進行深入探索。 2. 農田土壤的評估及監測提供土壤的特性在時間及空間上的變化,也有助於土壤的管理能根據實際狀況進行策略上的調整,以維持農田系統中土壤的生產力。有鑑於電腦資訊處理能力的進步,節省了傳統上進行監測採集的人力大量

	消耗，透過監測儀器長期及大量蒐集資料將會是未來的趨勢。 3. 本實驗開創以土壤聲音訊號來反應土壤中無脊椎動物多樣性、土壤物理化學特性、作物生物量等之應用嘗試，建立一套多指標的監測模型。
結論與建議	✓ 狼尾草田表面會累積厚達數公分的有機質累積層，是未來相關研究需要仔細評估考量的潛在重要影響來源。 ✓ 田區施灌距離並非影響到土壤總體密度、質地、根系生長的顯著影響因子，田區間的差異較為顯著，未來應增加田區採樣數目，而田區內並不需要特別考慮施灌距離造成影響，可隨機採樣。 ✓ 大於 2mm 的根系生長分布集中在表土 0-15 公分內，欲探究根圈生物化學，應集中在此土層內進行探究。 ✓ 表土 0-15 公分土壤有機碳濃度與根系生長有顯著相關性。 ✓ 土壤表面有機質之長期累積，根據土層隨深度顏色變化，推測可以影響有機碳的分布達 45 公分深，此部分等待完整分析結果中。 ✓ 地下部生質量與地上部生長情形並無顯著關聯，推測為受到規律的、多次採收之影響。因此透過評估根系生長、影響根系生長的土壤特性較難以針對每一次收割的牧草生長與營養情形進行相關聯，若需探究建議需要透過盆栽試驗或是經過試驗設計規劃的狼尾草田較佳。 ✓ 狼尾草田表土主要無脊椎動物之組成為彈尾目及膜翅目這兩個分類群，也是唯二比例超過 5% 的優勢種，可供未來在探究土壤生物與其對土壤特性之功能的研究的基礎參考資料。 ✓ 聲訊在本次的研究結果並無法作為土壤無脊椎動物多樣性之代表，但是與土壤的有機質有相對較高的正相關，未來有機會成為土壤特定特徵的指標。
附件	附件一、計畫執行規劃與方法相關圖表 附件二、目前所獲資料之結果與討論

附件一、計畫執行規劃與方法相關圖表



圖一、計畫概念圖與各指標關聯示意圖



圖二、(左)網格式採樣在空間與深度分布上差異之示意圖 (右)採樣田區空拍圖

表一、實際採樣細節

採 樣 日 期	樣品收集地點與座標	所收集之樣品	所進行之分析	參與人員
113.1.27- 113.2.2	鹽水一區(A)：23°14'46.9"N 120°14'13.3"E 鹽水三區(B)：23°15'05.0"N 120°15'10.2"E 佳里二區(C)：23°09'52.8"N 120°12'30.0"E	表 土 (0-10cm, 10-30cm) 總 體 密度、0-100cm 土壤內狼尾草 根系生質量、一 米框內狼尾草 高度、生質量、 表土無脊椎動 物、表土聲訊資 料。	牧草地上部總 生物質量、地上 部礫濃度、地下 部生質量、土壤 總體密度、土壤 質地、土壤有機 碳濃度、表土無 脊椎動物組成、 表土聲訊資料。	台南農改場：毛 壬杰 中興大學：高培 慈、莊銘豐、林 沅慶、范綱宇、 毛雪柔、劉建 欣、楊思韻 嘉義大學：陳愷 岳、黃名志
113.7.22- 113.7.29	鹽水三區(B)：23°15'05.0"N 120°15'10.2"E 鹽水二區(A')：23°14'49.7"N 120°13'52.8"E 佳里二區(C)：23°09'52.8"N 120°12'30.0"E	表 土 (0-10cm, 10-30cm)、表土 無脊椎動物、表 土聲訊資料、田 區空拍圖。	表土溫度、表土 水分含量、表土 無脊椎動物組 成、表土聲訊資 料、田區綠覆 率。	採樣 台南農改場：毛 壬杰 中興大學：毛雪 柔、楊思韻、朱 益賢

附件二、目前所獲資料之結果與討論

1. 目標狼尾草田區觀察

圖一	圖二
	
圖三	圖四
	

於現場觀測發現狼尾草田植體生長狀況如上圖一所示，同一田區內之牧草生長階段差異大，主要受到收割時間不一致且狼尾草為多年生草種之緣故。另外，長期施用牛糞、沼液沼渣，導致田土表面累積可以厚達數公分的有機質殘體累積層(如圖二所示)，影響到後續的土壤樣本的採集，土壤樣本採集方法是將表面的有機質殘體撥開至質地較為接近土壤的表面後再往下採集，此有機質累積層可能為許多田間無脊椎動物的存在位置，亦可能對於土壤表面性質的改變扮演重要的角色，是本次計畫採樣前沒有預期的發現，因此沒有收集此層樣品的狀態下之分析結果，可能有所偏誤，是未來可以再仔細思考與探究的部分。表土 30 公分的分層變化如圖(三)所示，表面 5~10 公分內有肉眼明顯可見的有機質累積，往下至 15~20 公分之顏色明顯偏深黑色，顯示較多的有機質累積，20 公分以下顯現原始土壤母質所化育之土壤礦物顏色，顏色偏黃棕色。採集深達 120 公分的土壤樣品帶回實驗室，以每 15 公分為一層進行分層並利用孟氏色卡比較土壤顏色變化，如圖(四)所示，發現深度 45 公

分為明顯顏色變化的約略分界位置，45 公分以上土壤偏深棕色，以下的顏色較沒有那麼深，初步認為有機質長期的累積可影響土壤有機碳的累積達上下 45 公分。

2. 樣本空間變異性造成之影響

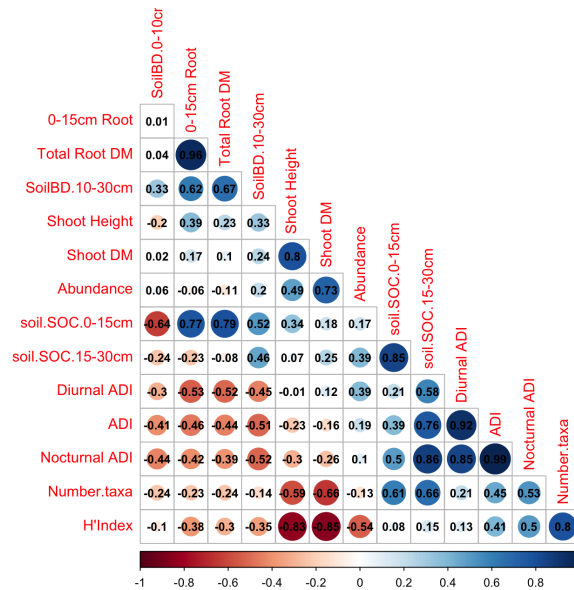
根據土壤總體密度與狼尾草地上部和地下部生長量結果所進行的變異數分析結果(表一)，施灌沼液沼渣之區域(Zone)對各指標之影響並沒有達到統計上的顯著效果，而田區(Field)之間造成的變異則相對顯著，此結果顯示，在探究各項指標對牧草生長之影響時，(1)需盡可能增加不同田區的樣品收集，以妥善評估田區造成的變異，(2)同一田區內的牧草生長程度與土壤總體密度不易受沼液沼渣施灌方向所形成之灌溉影響，因此在評估各項指標時，同一田區之採樣位置不需特別考慮隨施灌口之距離，建議隨機採集後混合即可，反而應該增加不同田區的採樣數量，(3)承(2)由於隨沼液沼渣施灌口之距離並未形成對於土壤總體密度、狼尾草地上部或是地下不知生長量之顯著影響，因此並不適合透過此方式來評估長期施灌沼液沼渣對狼尾草生長的影響，若要評估此影響，仍然需要透過找尋或設立並未施灌沼液沼渣的對照田區，或是利用控制環境的盆栽試驗(但無法評估長期效果以及其他田間變因)較佳。

表一. The impact of variations of sampling field and zone on the growth and root and shoot and soil bulk density

Field	Zone	Total Root DM (g)			Shoot growth			Soil bulk density	
		0-100cm	0-30cm	30-100cm	Total dry matter (g/m ²)	Plant height (cm)	Grass P concentration (mg/kg)	0-10 cm (g/cm ³)	10-30 cm (g/cm ³)
A	I	0.28	0.21	0.07	7285	100	5758	1.44	1.7
	II	0.80	0.46	0.34	67490	177	3775	1.32	1.65
	III	0.42	0.42	0.00	39668	115	5362	1.44	1.66
	IV	0.56	0.38	0.18	28974	147	5099	1.24	1.55
B	I	0.69	0.52	0.16	37726	162	4674	1.15	1.71
	II	2.79	2.56	0.24	82017	242	3636	0.91	1.64
	III	3.19	3.19	0.00	104988	238	3273	1.06	1.73
	IV	0.52	0.52	0.00	82013	216	5438	1.22	1.76
C	I	0.39	0.39	0.00	47080	146	5772	0.87	1.53
	II	0.27	0.26	0.01	30671	154	6491	1.07	1.62
	III	0.53	0.51	0.02	39905	132	4341	1.26	1.62
	IV	0.58	0.49	0.09	32640	145	4588	1.12	1.54
ANOVA	Field	0.027*	0.027*	0.443	0.010**	<0.001*	0.116	-	-
A test	Zone	0.841	0.778	0.646	0.312	**	0.658	0.8205	0.8912

3. 各指標之間的關聯性

我們將土壤性質、狼尾草生物量、無脊椎動物多樣性、聲訊多樣性這四個類別的各種指標以 linear model 進行相關性檢定。在這四大項的各項指標之中，發現(1)無脊椎動物的「數量豐富度」、「類群數量」以及「多樣性指數」，與作物的「地上部高度」及「地上部乾重」有相對較強烈的相關性，狼尾草的地上部生物量愈高，無脊椎動物的數量也愈高。但無脊椎動物的類群數量及多樣性指數則是相反的會愈低。(2)聲音訊號的歧異度(ADI)無法反映無脊椎動物的各項多樣性指標。(3)結果發現土壤的有機質(SOC)含量會與聲訊多樣性及無脊椎動物類群的豐度有相對較強的正相關，也暗示著未來以聲訊或無脊椎動物代表特定土壤特性的潛在發展。



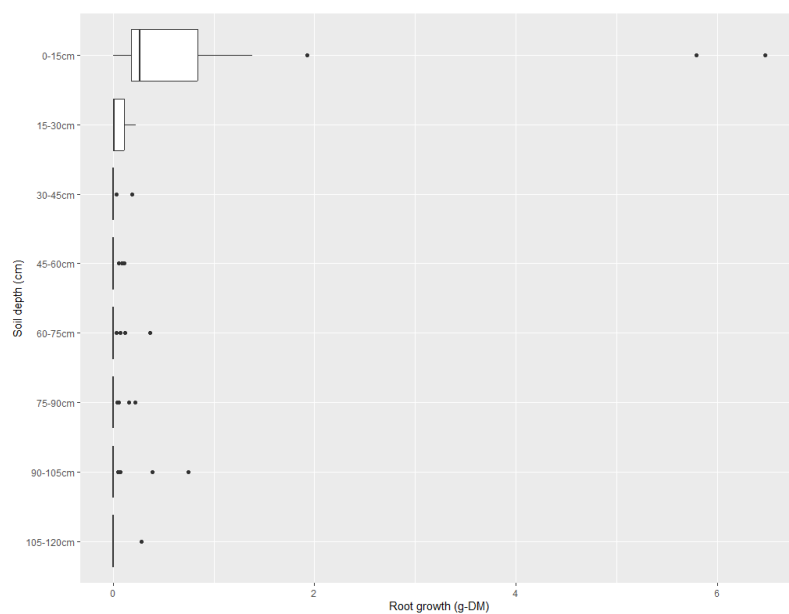
圖五、狼尾草田中各項土壤指標、作物生物量指標、無脊椎動物多樣性、聲訊多樣性之兩兩相關性檢定。

3.1 不同土壤深度狼尾草根系生長量

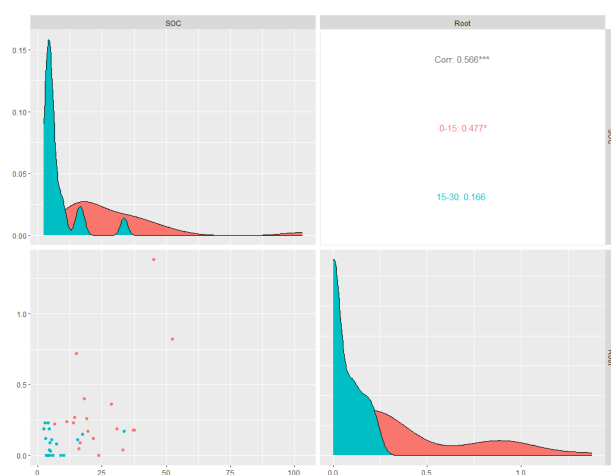
在評估土壤性質與狼尾草生長間之關聯性前，我們先量化了狼尾草地下部的生長(以>2mm 之生質量為代表)隨土層深度的分布，以確認後續在分析土壤性質時所需要關注的土壤深度。雖然(Canadell et al., 1996)指出，熱帶型牧草汁根系平均最大生長深度為 15 公尺深，但根據生質量之評估結果顯示(圖六)，根系生長多集中在表土(0-30 公分)之範圍內，且以 0-15 公分分布最為密集。此結果說明，雖然狼尾草為多年生牧草，其根系仍然傾向聚集於表層，而並不會因為長期灌溉沼液沼渣(超過 20 年)而增加底層土壤的根系分布。

3.2 表土有機碳與狼尾草根系生長量之關係

土壤有機碳為評估土壤健康常用的指標之一(Karlen et al., 2021)，其可以用來換算土壤有機質，土壤有機質是土壤性質當中對農田生產影響層面最廣的指標之一(Lehmann et al., 2020)。根據所收集的資料結果顯示(圖七)，的確土壤有機碳與狼尾草地下部的生長之間存在統計上的正相關性，其中又以 0-15 公分最為顯著，15-30 公分內之地下部生長勢之分布並不顯著。此結果顯示 0-15 公分內之土壤有機碳為可預估狼尾草地下部生長勢的評估指標之一。



圖六、狼尾草地下部生質量隨土壤深度之分布



圖七、表土土壤有機碳與狼尾草地下部生質量相關性分析結果

3.4 表土無脊椎動物多樣性及聲音訊號在不同區集之變化

比較在不同區集的無脊椎動物多樣性集聲訊多樣性，結果發現大部分變數並沒有在區集間有顯著差異，但是豐富度卻在區集間有 ANOVA 顯著差異，事後比較發現在第 II 區的無脊椎動物豐富度顯著高於其他區集。我們原本推測在最近端(區集 I)應該要有最高的營養以及動物多樣性指標，但現場發現因為灌排時區集 I 最容易淹水並維持最久時間，使得區集 I 之中有較為裸露的地表，也就是比較少的作物生長。因此反而是區集 II 有較高的狼尾草生長或是灌肥的累積，提供無脊椎動物的躲藏點，因此推測造成區集 II 有最高的無脊椎數量豐富度。

表二、無脊椎動物多樣性與聲訊多樣性在不同區集間的變異數分析比較(mean $\pm$ SD)

Zone	I	II	III	IV	ANOV A F	p- value
Abundance	281 $\pm$ 162a	441 $\pm$ 254b	327 $\pm$ 39ab	238 $\pm$ 118a	12.91	0.001
# of taxa	10.3 $\pm$ 2.3	8.7 $\pm$ 2.9	9.3 $\pm$ 3.1	9 $\pm$ 3	0.21	0.888
H' index	1.31 $\pm$ 0.18	0.91 $\pm$ 0.72	1.21 $\pm$ 0.55	1.04 $\pm$ 0.49	0.33	0.801
Diurnal ADI	0.1 $\pm$ 0.09	0.19 $\pm$ 0.14	0.07 $\pm$ 0.07	0.12 $\pm$ 0.1	0.77	0.543
Nocturnal ADI	0.28 $\pm$ 0.24	0.33 $\pm$ 0.33	0.14 $\pm$ 0.11	0.25 $\pm$ 0.39	0.22	0.879
ADI	0.19 $\pm$ 0.17	0.26 $\pm$ 0.23	0.11 $\pm$ 0.09	0.18 $\pm$ 0.24	0.32	0.808

ADI: Acoustic Diversity Index

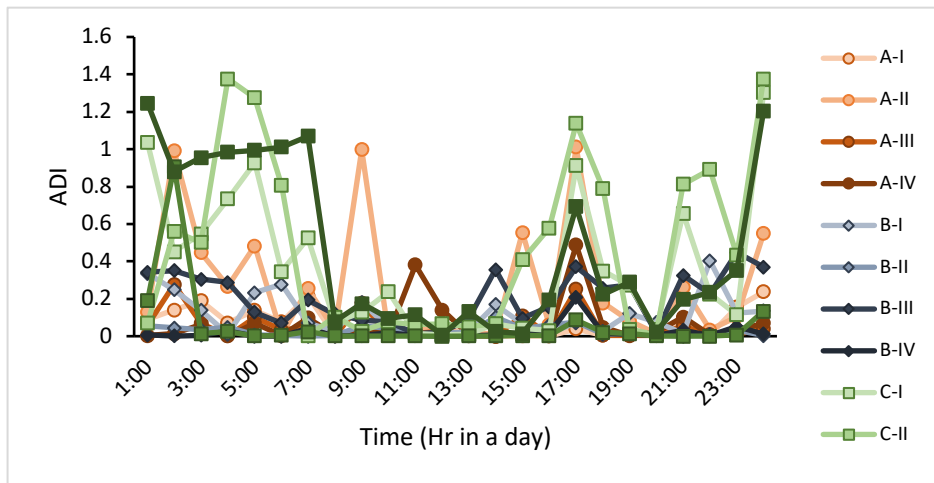
3.5 聲訊資料之比較

將錄音檔取出完整一天之連續錄音做分析，每 1 小時的錄音檔轉換為一份 ADI 數據，不如預期地，聲音訊號並無法代表無脊椎動物的多樣性。然而我們有發現聲音訊號在一天之中的變化，夜間的聲音訊號多樣性比白天高，另外在傍晚入夜之前也會有一段聲訊多樣性較高的時間(圖八)。因此我們將 ADI 分成白天(6am – 18pm)以及晚上(18pm – 6am)兩個組別來進行比較，結果顯示晚上的 ADI 值是 0.25 $\pm$ 0.26，比白天的 ADI 值 (0.12 $\pm$ 0.1)顯著地來的高(Paired t-test, $t=-2.45$, $p=0.032$)(圖九)。

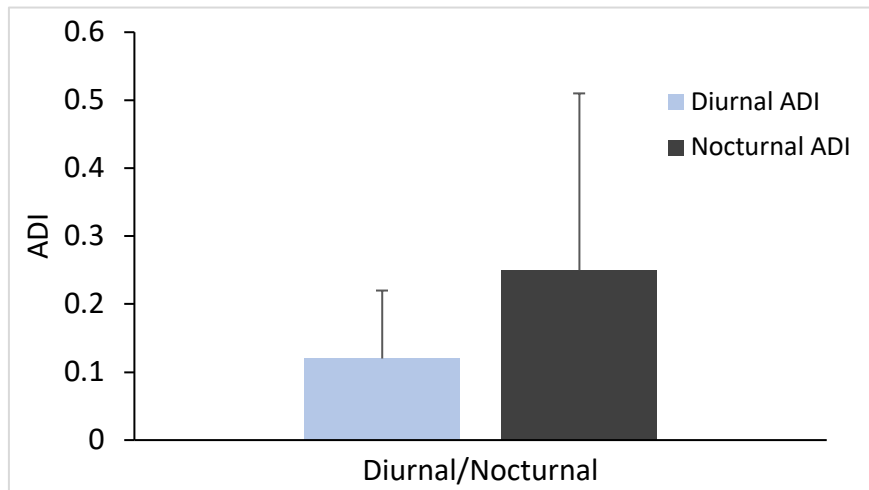
4 所遭遇之困難與建議

於田間採樣以評估狼尾草田各項指標與牧草生長量與品質之相關性時，遇到最大的挑戰為台灣狼尾草田之管理方式所造成的變異。臺灣狼尾草田的管理相對粗放，且多年生的狼尾草其為配合酪農所需，即使是同一塊田區，也並非統一時間進行採集，採集時間受到當時牛隻需求量、牧草生長勢之影響，因此同一塊田區，可能被分為不同時間進行收割，也因此造成田間狼尾草生長勢變異程度極大的狀況！因此可能造成因子與因子之間的相關性受到干擾，這是後續在討論各指標之間關聯性時，需要特別注意到的！

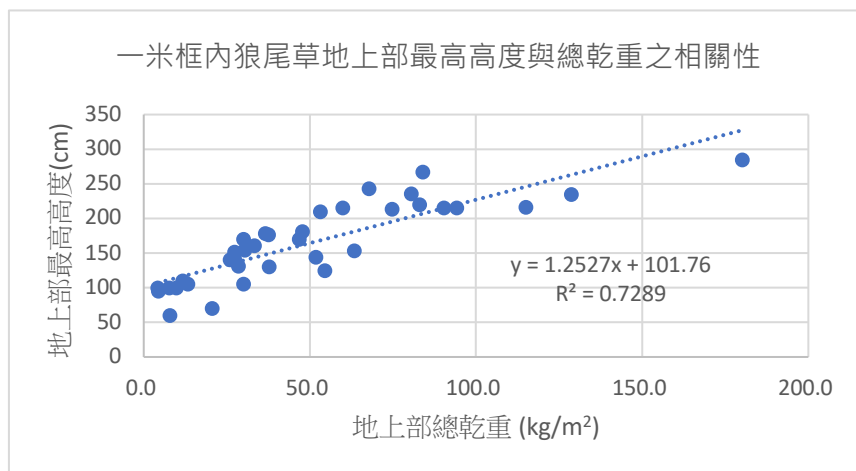
未來若要進行此類多年生作物田區內相關指標之間的關聯性評估，建議採集相同生長勢的田區。由於狼尾草的地上部高度(通常用以作為狼尾草生長齡判斷依據)與地上部的總乾重之間存在良好的相關性(圖十)，因此或許可以在無法取得相同生長勢之狼尾草樣品之前提下，透過所收集之總乾重進行生長階段的劃分。



圖八、三塊狼尾草田(A、B、C)中不同區集(I-IV)之聲訊多樣性。



圖九、晚上的 ADI



圖十、狼尾草於一米框內之地上部最高高度與地上部總乾重之間的相關性