

地面型光電場對土壤性質及土壤無脊椎動物的影響

張容慈¹ 蔡佳雯² 盧勇仁² 王巧萍^{3*}

摘 要

地面型太陽能光電為臺灣目前發展中的再生能源之一，但為生產電力的同時卻也直接衝擊著原本的生態環境。為了解地面型光電對於土壤生態的影響，本研究選擇花蓮縣瑞穗鄉及鳳林鎮的三個光電場為對象，並以光電場旁的人工林作為對照組，比較人工林、建構中與營運二年後光電板下方、光電板外側土壤性質及土壤無脊椎動物組成之差異。研究結果顯示，將人工林改建為光電場的整地與土木基礎工程，對土壤物理結構、化學性質及土壤無脊椎動物之衝擊強度視土壤性質而異。其中坵質壤土的光電場區，坵粒含量、電導度、碳濃度、氮濃度、土壤無脊椎動物密度及類群數等則均明顯降低，此一現象在砂質壤土地區則相對不顯著。在高含石量且土壤含砂量高的地區，建場工程使表層土壤含石量、容積密度與砂粒含量均明顯增加。隨著光電場營運後草本植被之重新建立，土壤有機碳與氮濃度有緩步回復之勢。而建場時之工程設計及營運期間的植被管理，應有助於降低光電場對土壤生態系服務功能之負面衝擊。

關鍵詞：地面型太陽能光電，再生能源，土壤品質，土壤碳庫，土壤無脊椎動物

1. 前 言

在氣候變遷的壓力下，能源轉型已是這個世代全人類必須共同面對的問題。太陽能光電可以生產大量電力，為主要的再生能源之一(Devabhaktuni *et al.*, 2013)，也是目前臺灣較為可行的再生能源(Chen *et al.*, 2010；Yue and Huang, 2011)。然而，除了水上型光電設施外，地面型光電場的設置所需要的空間，常常與農業生產所需的土地競爭，也改變當地原有的水文、植被與土壤生態系統(Calvert and Mabee, 2015；Delfanti *et al.*, 2016；Phillips, 2013)。在

臺灣地狹人稠的限制下，如何選擇可設置光電場的合適地點、建立光電場興建工程的規範，以及提高營運期間更友善動植物與土壤的管理技術，甚至為將來除役後能快速回復農業用途，以在能源轉型下盡力兼顧生態保護及農業生產，成了當今極為迫切的重要難題。

土壤為陸域生態系重要的一環，具有生產作物、提供生物棲地、養分循環、淨化水質、調節與支持人類活動等功能(Blum, 2005；Jónsson and Davíðsdóttir, 2016；Pereira *et al.*, 2018)。然而土地利用型態的轉變，除了改變土壤原有的物理、化學性質，也影響土壤微生物

¹國立東華大學自然資源與環境學系 學士生

²農業部林業試驗所育林組 研究助理

³農業部林業試驗所育林組 副研究員

*通訊作者，電話：02-23039978#2907，電郵：cpwang@tfri.gov.tw

收到日期: 2023年10月05日

修正日期: 2023年12月13日

接受日期: 2023年12月29日

物與無脊椎動物的組成與結構，進而影響前述各項的土壤生態系服務功能(Biro *et al.*, 2013；Celik, 2005；Pérez-Bote and Romero, 2012)。由前人的研究可知，光電場對土壤物理性質的影響，除了興建工程的碾壓以符合基礎工程之規範而導致的密實化作用，整地工程使土壤砂粒含量增加(Noor and Reeza, 2022)外，在營運期還包含光電板斜角設計形同集水功能而導致滴水線造成土壤侵蝕(Choi *et al.*, 2020)、光電板遮蔭效應使土壤溫度與含水率降低(Moscatelli *et al.*, 2022)，以及光電板取代原有的植生，使土壤有機質的輸入中斷，而導致光電場內土壤有機碳濃度和氮濃度大幅降低(Choi *et al.*, 2020；Hernandez *et al.*, 2014；Lambert *et al.*, 2021)、電導度明顯下降(Noor and Reeza, 2022)，而土壤酶的活性也因而降低(Lambert *et al.*, 2021；Moscatelli *et al.*, 2022)等。有些案場為管理場內的植物而使用除草劑(Montag *et al.*, 2016)，或為清潔電板上之塵垢而使用清潔劑(Patil *et al.*, 2017)，也引發光電板區域內土壤受污染的疑慮。

除了對上述的土壤物理、化學與微生物造成衝擊之外，Lambert *et al.* (2023)及Menta *et al.* (2023)的研究亦指出，光電板下的土壤無脊椎動物多樣性及豐度皆呈現下降的趨勢。由文獻可知，土壤無脊椎動物和土壤物理性質、化學性質有緊密的關連，其中土壤孔隙度、水分、有機質等都均直接影響其組成與豐度(Nielsen *et al.*, 2008)；反之，土壤無脊椎動物參與有機質分解及生態系養分循環的過程(Lavelle, 1996)，其活動也改變土壤孔隙度(Coleman and Wall, 2015)與土壤的有機碳與氮濃度。此外，植被組成與土壤無脊椎動物有著密切的交互作用，植物提供非肉食性土壤無脊椎動物所需的有機質及根分泌物，土壤無脊椎動物則透過取食、消化與分解作用，回饋植物所需的養分(Menta,

2012)。由於土壤無脊椎動物、土壤理化性質及植被間有著複雜的交互關係，土壤性質的改變或清除植被都會影響土壤無脊椎動物的族群密度和多樣性(Battigelli *et al.*, 2004；Déchéne and Buddle, 2009)，因此土壤無脊椎動物多樣性與豐度的變化，可被用於評估土地利用改變對於土壤品質影響的指標(Menta, 2012)，唯光電場建置與營運對土壤性質、植被改變、土壤無脊椎動物組成與結構等的整體影響，是否可由土壤無脊椎動物的多樣性指標予以評估，則仍在發展階段。

由許多土地利用型態變化與地上部節肢動物的相關研究已知，都市化以及農業發展改變了自然環境，因此剩餘的小型綠色空間就成了保護地上部節肢動物的重要場域(Gibb and Hochuli, 2002；Noordijk *et al.*, 2009)，而在適當的管理作業下，有利於地上部節肢動物豐度與多樣性的提升(Rupprecht *et al.*, 2015)。與地上部小型節肢動物的情形類似的是，Smith *et al.* (2006)在英國倫敦的研究發現，即使都市中的綠地空間被高度擾動，仍能提供部分土壤無脊椎動物重要的棲息空間，且相較於其他人為環境甚至更加有利土壤無脊椎動物族群的建立。地面型光電場的興建過程雖移除原有的植被，然而卻也可能在碎片化的地景上建構新的綠地，而成為地上部節肢動物的新聚點(Armstrong *et al.*, 2021；Randle-Boggis *et al.*, 2020)，唯地下部的土壤無脊椎動物是否符合此一情況，則所知有限。此外，如何協助地面型光電場在場址規劃階段及後續的營運管理中，營造出類似上述都市化後的綠色基盤，成為破碎化地景中人為擾動相對較低的綠地空間(Armstrong *et al.*, 2021；Randle-Boggis *et al.*, 2020)，而成為土壤無脊椎動物復育的潛在基地之一，目前仍缺乏相關的研究。

能源自給率僅3%的臺灣，在國際推動淨零

政策與能源轉型的壓力下，地面型光電的興建勢在必行，但也已成為臺灣當前重大環境衝突的肇因。地面型光電是一種全新的土地利用型態，雖然近年相關的研究快速發展，但臺灣亞熱帶的氣候與環境條件不同於多數文獻所研究的溫帶區域，因此本土化的研究自有其必要。由於地面型光電在臺灣才剛起步，因此能作研究的樣區選擇相當有限，本研究亦屬前導性質，旨在探討光電場設置初期對土壤生態所造成的影響。本研究以臨近光電場的人工林作為土壤參數變化前的基線，以對照建造中和已興建營運滿二年的光電板區內、外兩側土壤性質的差異，除供初步了解地面型光電建置對於土壤物理、化學性質及土壤無脊椎動物密度的影響，也在生態、能源及農業競合之際，尋思未來光電場建置的施工及營運是否有更友善土壤的規劃方式，以及將來光電場除役後土壤復育的可能。

2. 材料與方法

2.1 樣區設置

本研究選擇位於臺灣花蓮縣瑞穗鄉及鳳林鄉的三個光電場為試驗樣區(圖1)，分別是鳳林榮里的生豐光電場(2022年3月取樣時已完成整地及部分光電板水泥基座設置)、鳳林長橋里的辰亞光電場(以下稱辰亞-鳳林)，以及位於瑞穗富興村的辰亞光電場(以下稱辰亞-瑞穗)，並於各光電場選擇臨近的人工林作為相對應的對照組。依農業部農業試驗所(2022a、2022b)之資料顯示，此三個樣區分屬三種土系，其中生豐樣區屬不合農林經濟利用之礫石、乾河床等雜地；辰亞-鳳林樣區屬花東縱谷最大土系的瑞穗系(Juisui Series)，為片岩母質的極淺層較新沖積土，土色灰或棕灰，土壤質地為壤土至

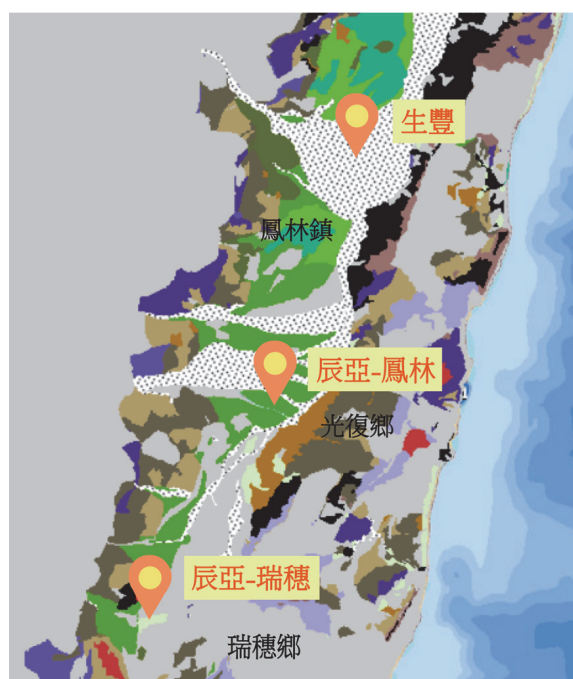


圖1 樣區土壤圖。白底黑點色塊為雜地，深綠色為瑞穗系，淺綠色為樂合系。資料來源：農業部農業試驗所(2023)

砂質壤土，深度約僅15-30 cm，10 cm下為礫石層；辰亞-瑞穗樣區則屬樂合系(Loho Series)，為中淺層(50-60 cm)東岸山脈母岩之沖積土(表1)。

2.2 土壤取樣與分析

本研究於2022年3月進行採樣，各樣區以土地利用類型分為人工林(forest plantation, FP)、光電板外(outside solar panel, SO，為場區內經整地後上方無光電板的區塊)、光電板下(under solar panel, SU，為光電板正下方，離板緣至少1 m)及光電板建造中(solar panel construction, SC)等四類。所有人工林均緊鄰光電場，其中生豐與辰亞-鳳林樣區旁之人工林均為大葉桃花心木(*Swietenia macrophylla*)純林，辰亞-瑞穗樣區旁則為樟樹(*Cinnamomum camphora*)人工造林地。前述各種類型分別隨機取3-5個樣點，取樣位置皆位樣區中心，樣點與樣點之間間隔10公尺以上，且避開不具有代表性之地形，如光電板下方之滴水線，或場區邊緣臨路位置等。

表1 各樣區基本資料

樣區	地點	經度緯度	土系	電場面積 (ha)	取樣時狀態 或併網日期*	土地利用類型及 圖表代碼		主要樹種 與植被覆 蓋狀態	樣本數
生豐	鳳林	121°29'E 23°47'N	雜地	66	興建中	人工林	FP	大葉桃 花心木	5
						綠帶	FP	光蠟樹	3
						建造中	SC	無植被 覆蓋	3
辰亞- 鳳林	鳳林	121°27'E 23°40'N	瑞穗系	3	2019/10/31	人工林	FP	大葉桃 花心木	4
						光電板外	SO	草本植物	4
						光電板下	SU	蕨類植物	4
辰亞- 瑞穗	瑞穗	121°23'E 23°34'N	樂合系	1	2019/10/20	人工林	FP	樟樹	3
						光電板外	SO	草本植物	4
						光電板下	SU	蕨類植物	4

*：併網日期為光電場啟用日期。生豐樣區之人工林FP包含臨近光電場的未受工程擾動的鬱閉人工林與光電廠外圍所保留的綠帶。因原預計10 m寬的綠帶林冠已破，可能與未擾動之鬱閉人工林帶所差異，故採樣時分開取樣。後由分析結果發現綠帶與人工林之各項土壤參數並無明顯差異，因此將此筆數據併入生豐FP處理，後續圖表呈現之生豐FP皆表示生豐樣區人工林及綠帶之數據。

取樣時為建構中的生豐樣區，其電廠外保留了10 m以光蠟樹(*Fraxinus griffithii*)為主要樹種的環狀雜木綠帶，故另取3個土壤樣本作為比較。總計34個樣點。

人工林各樣點先以直徑20 cm、深度10 cm之大型不鏽鋼圈，將地表枝葉層(O層)定面積依分解程度分層取樣，以徒手快速抓取不鏽鋼圈內的枝葉層樣本，較細小的枝葉碎片則以鑷子取出以計生物量，依分解程度放入不同的封口袋保存。因本研究地區為濕潤溫暖的低海拔平地，分解速度快而未累積已分解的Oh層，故僅取得Ol(未分解)及Of(半分解)樣品(Zanella *et al.*, 2011)。有機層取樣後，選用適合的鋼管於同位置依序垂直往下以土柱法(core method)採集土壤。其中表層0-5 cm土壤均以直徑5 cm、

深度5 cm的小型鋼管取得2個樣本，其中一管於化學分析前，先經土壤無脊椎動物萃取(如2.3所述)。5-15 cm土壤則以直徑9.5 cm、深度10 cm之中型鋼管取樣，然因多數光電場樣點含石率過高，難以用土柱法取樣，部分樣點改以小型鋼管分別取得5-10 cm及10-15 cm土壤樣本各2管，再混合以供分析。本研究假設光電板營運後因場區無大型木本植物生長的可能，土壤有機碳之變動短期內僅受再回復的草本植物為主，其影響深度有限，因此在以土柱法取得下層土之難度過高的狀況下，僅以不鏽鋼土鑽取得15-30 cm的下層土供土壤質地及化學分析，而未取得土壤容積密度以計算碳庫。前述樣本皆放置在封口袋內，於採樣當日寄送回實驗室。

枝葉層樣本於烘乾後，以式(1)計算枯落物生物量(Litter biomass)。土壤樣本則以40°C風乾，並挑除根和石頭，過2 mm篩網取得細土並稱重，同時取次樣品以105°C烘24 hr後測其絕乾重並計算含水率，供校正細土之絕乾重。石頭秤重後，以式(2)估算各樣本之含石率(Stone content)，並以式(3)計算總體容積密度(Bulk density, BD)。由於石頭不含有機碳，故依式(4)估算細土容積密度(Fine soil bulk density, BD_{fe})，以供估算各樣區之土壤有機碳庫。每樣區不同土地利用方式因各樣點之土樣總重量有限，故由各樣點各取20 g混合成一組樣本，以比重計法進行粒徑分析取得土壤質地。

$$\begin{aligned} \text{枯落物生物量(Litter biomass, ton/ha)} = \\ \text{枯落物重量(g)} \times 100 / \text{取樣面積(cm}^2\text{)} \quad (1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{含石率(Stone content, \%)} = \text{石重(g)} / \\ \text{總樣品乾重(g)} \quad (2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{總體容積密度(BD, g/cm}^3\text{)} = \text{土壤乾重(g)} \\ + \text{石重(g)} / \text{取樣體積(cm}^3\text{)} \quad (3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{細土容積密度(BD}_{fe}\text{, g/cm}^3\text{)} = \text{土壤乾重(g)} \\ / \text{取樣體積(cm}^3\text{)} \quad (4) \end{aligned}$$

初步粉碎的O層樣本以振動研磨機(Vibrating sample mill, TI-100, CMT co)細磨；小於2 mm土樣則以瑪瑙鉢研磨，並過0.18 mm篩網，以供分析其有機質含量(soil organic matter, SOM%)。由於花蓮土壤多含碳酸鹽類的無機碳(inorganic carbon)，無法直接以元素分析儀測得有機碳濃度，故改用乾燒法以高溫灰化爐設定400°C加熱8小時將樣本中的有機質灰化後，由式(5)計算SOM%濃度(Schulte and Hopkins, 1996)，再依式(6)有機質和有機碳之比率計算其土壤有機碳濃度(soil organic carbon, SOC%，(Minasny *et al.*, 2020；Nelson and Sommers,

1996)，再以式(7)估算出礦質土壤中的有機碳庫SOC_{stock} (ton/ha)。枯枝落葉的OI與Of層樣本則使用元素分析儀(Elemental analyzer, Elementar vario EL III, Elementar Analysensysteme GmbH)以乾燒法測定其全碳濃度(total carbon concentration, TC%)及全氮(TN%)濃度，分別乘以其生物量來估算林床枝葉層之碳庫(forest floor carbon stock, FFC_{stock})(式(8))。而FFC_{stock}與礦質土壤SOC_{stock}之總合即為總土壤有機碳庫(total soil organic carbon stock, TSOC_{stock})。

$$\begin{aligned} \text{土壤有機質含量(SOM, \%)} = (\text{樣品重(g)} \\ - \text{灰重(g)}) / \text{樣品重(g)} \times 100 \quad (5) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{土壤有機碳濃度(SOC, \%)} = \text{土壤有機質} \\ \text{含量(\%)} \times 0.58 \quad (6) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{礦質土壤有機碳庫(SOC}_{stock}\text{, ton/ha)} = \\ \text{土壤有機碳濃度(\%)} \times \text{細土容積密度(g/cm}^3\text{)} \\ \times \text{取樣深度 (cm)} \quad (7) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{林床枝葉層碳庫(FFC}_{stock}\text{, ton/ha)} = \\ \text{全碳濃度(\%)} \times \text{枯落物生物量(ton/ha)} \quad (8) \end{aligned}$$

2.3 土壤無脊椎動物取樣及分析

置於封口袋並於當日以低溫宅配回實驗室的枝葉層及0-5 cm土壤樣本，分別放入Tullgren漏斗(Tullgren funnel)，於漏斗上方設置鎢絲發熱燈泡，以光和熱使土壤無脊椎動物掉入下方裝有酒精之離心管之乾萃取法方式，萃取土壤無脊椎動物3到7天，直到所有的樣品完全烘乾為止(Akoiyam *et al.*, 2014；Trägårdh, 1933)。土壤無脊椎動物以75%酒精保存，並在顯微鏡下計算個體數，並依照取樣面積換算為每單位面積的土壤無脊椎動物個體數(individual/m²)。進行分類至下列主要類群：彈尾綱、蟎(蜱蟎亞綱中非甲蟎亞目的類群)、甲蟎亞目、蜘蛛目、擬

蠍目、唇足綱、倍足綱、等足目、綜合綱、少足綱、原尾目、雙尾目、寡毛類、昆蟲綱、幼蟲及線蟲，並以該類群的個體數除以總個體數計算各類群的占比(莊俊逸等，2003)。

2.4 資料分析

土壤理化性質及土壤無脊椎動物密度與多樣性等資料，皆先以Shapiro-Wilk進行常態檢定。結果顯示部分資料不符合常態分布，且由於樣本數較小，因此所有資料皆以Kruskal-Wallis Test進行無母數分析；若因子顯著則以Dunn's Test進行事後檢定，顯著水準 α 值訂為 <0.05 。所有統計均以軟體R(版本4.1.2)進行分析。

3. 結 果

3.1 土壤理化性質

3.1.1 土壤物理

由本研究分析三個不同土系試驗地土壤質地的結果可知，較少受人為擾動所影響的人工林下，瑞穗系的辰亞-鳳林樣區與雜地的生豐樣區人工林均為玢質壤土，但在改建為光電場後，其表層30 cm均變成砂質壤土。興建光電場的土木工程對生豐及辰亞-鳳林樣區表層30 cm的黏粒含量影響不大，但其砂粒含量增加且玢粒含量減少。砂粒含量原本就極高的樂合系辰亞-瑞穗樣區，其人工林與光電場均為砂質壤土，整體而言變動不大，唯光電場建置後，表層30 cm內的黏粒及玢粒均增加(圖2)。

生豐及辰亞-鳳林樣區表層土的含石率、BD及BD₁₅在光電場建置後均顯著提高，其中含石率由0-10%上升至7.5-50.1%；BD由0.8-1.3 g/cm³上升至1.4-2.1 g/cm³；BD₁₅也由0.7-1.1 g/cm³

上升至0.7-1.5 g/cm³。未受擾動的辰亞-瑞穗樣區人工林含石率、BD與BD₁₅，原本即比另外兩個樣區高出許多，雖然光電場建置後平均BD略高於人工林者，但其變化尚未達統計顯著水準(圖3)。

3.1.2 土壤化學

整體而言，玢質壤土的生豐及辰亞-鳳林樣區人工林土壤pH值均呈鹼性(約7.7-8.5)，且隨土壤深度而顯著增高，砂質壤土的辰亞-瑞穗樣區人工林土壤則呈酸性(pH值約4.8-5.6)，且無分層差異。光電場土木工程使建構中的生豐樣區表層0-5及5-10 cm土壤pH明顯上升，而使原本土層間的差異消失。有趣的是，同樣由玢質壤土變成砂質壤土而營運二年後的辰亞-鳳林樣區，其光電板下外的土壤pH值則有不同的變化：光電板下方不同深度土壤pH值與建構中的生豐樣區類似，明顯高於人工林且無分層現象，但在光電板外的土壤則回復顯著的土壤深度變化，且與人工林無明顯差異。相對而言，酸性砂質壤土的辰亞-瑞穗樣區，其光電板外的土壤pH值變化與辰亞-鳳林樣區類似，在光電場營運二年後已與人工林無明顯差異，但在光電板下方的土壤pH值則反之明顯低於人工林者(表2)。

整體而言，鹼性土壤的生豐及辰亞-鳳林樣區之土壤EC值，皆明顯高於土壤偏酸性的辰亞-瑞穗樣區者，且人工林的土壤EC均呈現隨土壤深度增加而顯著降低的分層現象。由生豐樣區的結果可知，人工林土壤分層現象受光電場興建中的土木工程整地作業所擾動而消失。人工林土壤EC較高的生豐及辰亞-鳳林樣區，在改建成光電場後表土EC均明顯降低；但原本土壤EC就很低的辰亞-瑞穗樣區則無明顯變化。電場營運兩年後，辰亞-鳳林樣區光電板外的表土0-5 cm土壤EC值回復情形較電板下者明

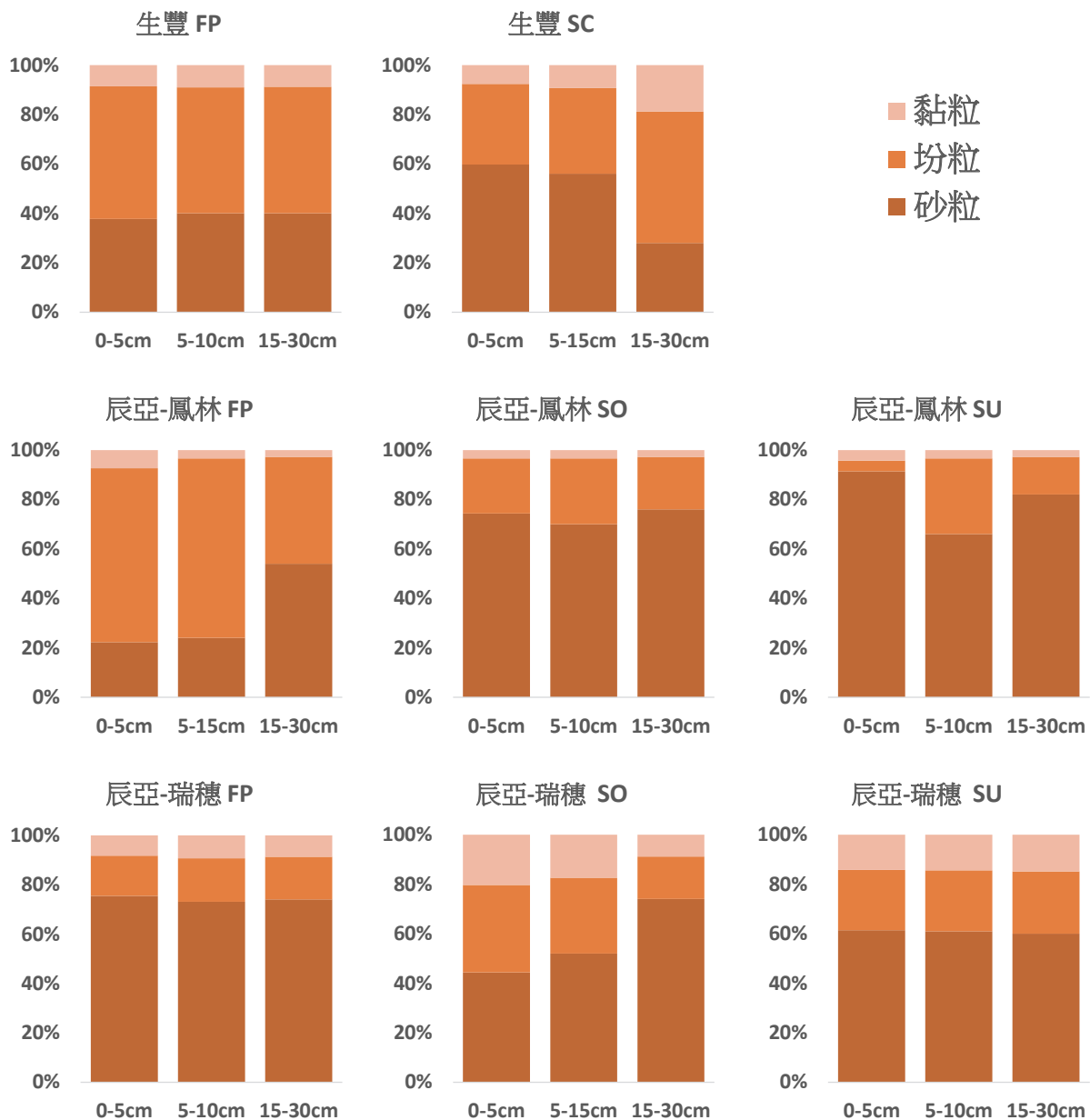


圖2 本研究中三種土系之人工林轉為光電場後，不同深度表層土壤中黏粒、粉粒與砂粒含量之變化。FP=人工林，SO=光電板外，SU=光電板下，SC=光電場建造中

顯；而辰亞-瑞穗樣區則可以看見光電板下方土壤EC仍無人工林的分層差異，但光電板外則回復顯著的土壤深度變化(表2)。

生豐、辰亞-鳳林及辰亞-瑞穗樣區人工林SOC%及N%皆呈現明顯分層，隨土壤深度增加而下降。而在光電場建置後，建造中的光電場(生豐)及光電板下方(辰亞-鳳林、辰亞-瑞穗)表層SOC%、N%均顯著降低，使原有的分層結構消失。而營運兩年後的辰亞-鳳林及辰亞-瑞穗

光電板外的碳、氮濃度則又回復分層差異，與pH及EC的變化趨勢相似(表2)。生豐及辰亞-鳳林樣區人工林的C/N比值呈明顯分層，且隨土壤深度增加而下降；建置中的生豐光電場則因整體的SOC%明顯減少，表層C/N比下降使分層現象消失。營運兩年後的辰亞-鳳林光電板下方仍無分層，而光電板外則有回復分層的趨勢。辰亞-瑞穗樣區則在三種土地利用類型間及土壤深度間均無明顯差異。

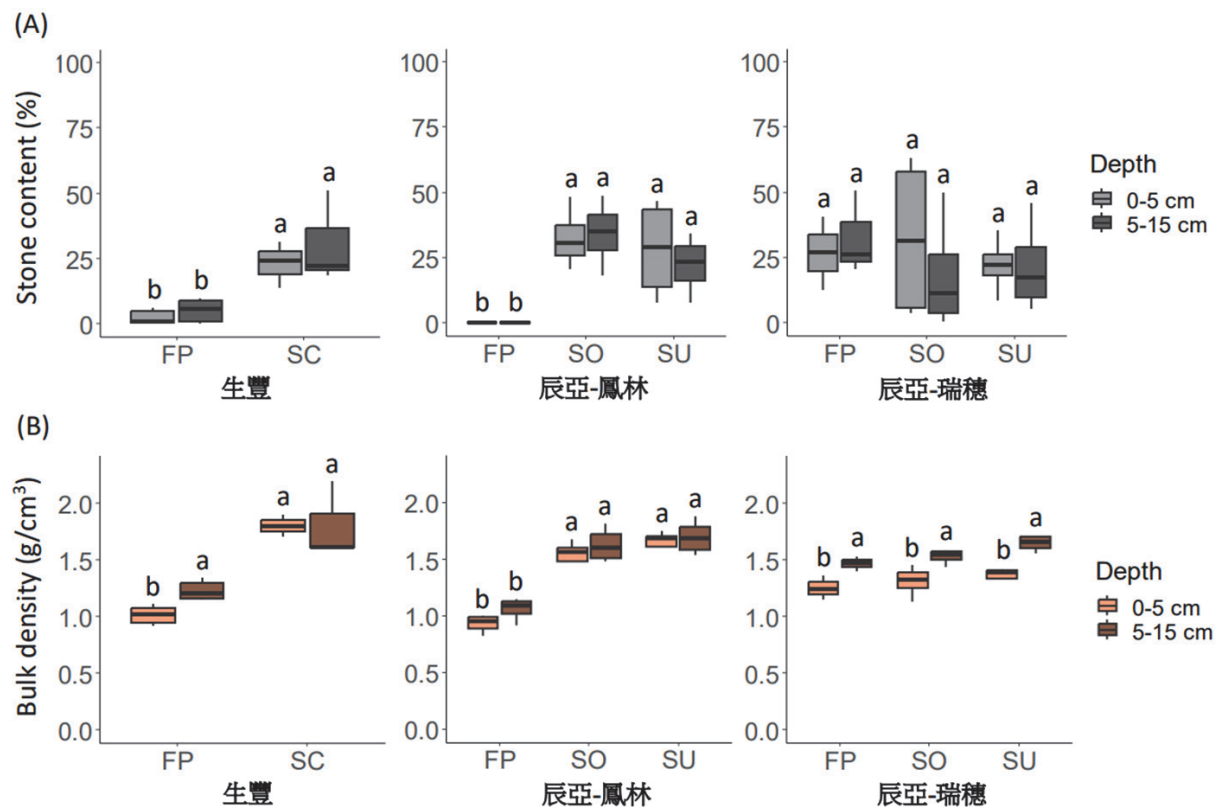


圖3 本研究中三種土系之人工林轉為光電場後，各樣區土壤含石率(A)與土壤容積密度(B)之變化。FP=人工林，SO=光電板外，SU=光電板下，SC=光電場建造中。分別比較各樣區中土地利用類型及深度的差異(Kruskal-Wallis Test)，並以小寫英文字母表示進行事後檢定(Dunn's Test)所得各樣本差異的顯著性($p < 0.05$)

雖然土壤C%在光電場建置後均呈下降趨勢，但由於 BD_{fc} 在光電場建置後上升之緣故，辰亞-鳳林及辰亞-瑞穗的 SOC_{stock} 於興建前後並無顯著差異(表2)，然而由於人工林仍有部分土壤碳庫存於枝落葉的 FFC_{stock} 中，因此整體而言 $TSOC_{stock}$ 比建置為光電場後高出許多。此外值得注意的是，興建中的生豐光電場因0-5及5-15 cm的SOC%於光電場興建後下降幅度較大，其 SOC_{stock} 在興建後呈顯著降低(圖4)。

3.2 土壤無脊椎動物

在總計15個人工林枝葉層樣本中總計取得14個類群、390隻土壤無脊椎動物個體；而在34個0-5 cm土壤樣本中，則總計取得13個類群、共197隻土壤無脊椎動物個體。生豐及辰亞-鳳林樣區0-5 cm土壤無脊椎動物平均密度因光電

場的建置而明顯降低，且因光電場缺少如人工林的枝葉層，而使其差異更加顯著。辰亞-瑞穗樣區0-5 cm土壤無脊椎動物密度則以人工林及光電板外明顯高於光電板下方，可見光電板外表層土壤無脊椎動物密度在建置兩年後有回復現象。然而因為電板外側仍然沒有枝葉層，因此整體的土壤無脊椎動物密度仍比建置前減少許多(圖5)。建置中之生豐光電場的土壤無脊椎動物類群數最少，僅捕獲在其他樣區出現頻度最高的彈尾綱及蟎類，辰亞-鳳林及辰亞-瑞穗光電板下方及電板外側則分別捕獲4及6個土壤無脊椎動物類群(表3)。三個樣區人工林0-5 cm所捕獲的土壤無脊椎動物分屬6-9個類群，而枝葉層則包含8-12個類群。整體而言，人工林的類群數最高，興建中的生豐樣區降至最低，而在營運後的辰亞-鳳林及辰亞-瑞穗樣區則在光

表2 本研究中三種土系之人工林轉為光電場後，不同深度表層土壤化學性質之變化。FP=人工林，SO=光電板外，SU=光電板下，SC=光電場建造中。分別比較各樣區中土地利用類型及深度的差異(Kruskal-Wallis Test)，並以小寫英文字母表示進行事後檢定(Dunn's Test)所得各樣本差異的顯著性($p < 0.05$)

Site	Land use	Depth	pH	EC ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	SOC (%)	N (%)	C/N
生豐	FP	0-5 cm	7.8 ± 0.1^c	120.4 ± 17.1^a	1.41 ± 0.42^a	0.18 ± 0.04^a	8.0 ± 0.7^a
		5-15 cm	8.1 ± 0.1^b	95.2 ± 16.4^b	0.68 ± 0.27^b	0.10 ± 0.03^b	6.9 ± 0.5^{ab}
		15-30 cm	8.3 ± 0.0^a	80.7 ± 12.2^c	0.32 ± 0.11^c	0.05 ± 0.01^c	6.0 ± 1.9^{ab}
	SC	0-5 cm	8.2 ± 0.2^{ab}	89.8 ± 10.9^{bc}	0.45 ± 0.17^c	0.06 ± 0.02^c	6.9 ± 0.2^{ab}
		5-15 cm	8.4 ± 0.1^a	87.0 ± 6.4^{bc}	0.31 ± 0.05^c	0.04 ± 0.00^c	6.9 ± 0.5^b
		15-30 cm	8.4 ± 0.0^a	87.2 ± 3.2^{bc}	0.28 ± 0.09^c	0.04 ± 0.01^c	7.0 ± 1.2^{ab}
辰亞-鳳林	FP	0-5 cm	7.9 ± 0.1^d	92.8 ± 9.7^a	0.98 ± 0.23^a	0.13 ± 0.03^a	7.5 ± 0.4^a
		5-15 cm	8.3 ± 0.0^{bcd}	76.5 ± 16.7^{ab}	0.34 ± 0.07^b	0.05 ± 0.01^b	6.6 ± 0.5^{ab}
		15-30 cm	8.5 ± 0.1^a	63.3 ± 8.3^b	0.19 ± 0.10^c	0.03 ± 0.01^c	5.8 ± 1.5^b
	SO	0-5 cm	8.1 ± 0.1^{cd}	88.7 ± 11.7^{ab}	0.48 ± 0.16^{ab}	0.07 ± 0.02^{ab}	6.8 ± 0.4^{ab}
		5-15 cm	8.4 ± 0.1^{ab}	77.5 ± 5.1^{ab}	0.31 ± 0.07^{bc}	0.05 ± 0.01^b	6.5 ± 0.4^b
		15-30 cm	8.5 ± 0.2^{ab}	74.7 ± 10.3^b	0.29 ± 0.09^{bc}	0.05 ± 0.01^b	6.3 ± 1.1^b
	SU	0-5 cm	8.3 ± 0.2^{abc}	73.7 ± 17.0^b	0.34 ± 0.18^{bc}	0.06 ± 0.03^b	5.8 ± 0.7^b
		5-15 cm	8.4 ± 0.1^{ab}	80.7 ± 11.9^b	0.31 ± 0.06^{bc}	0.05 ± 0.01^{bc}	6.6 ± 0.5^b
		15-30 cm	8.4 ± 0.2^{ab}	91.4 ± 40.8^{ab}	0.26 ± 0.07^{bc}	0.04 ± 0.01^{bc}	6.3 ± 0.3^b
辰亞-瑞穗	FP	0-5 cm	5.6 ± 0.2^a	32.6 ± 8.5^a	0.97 ± 0.27^a	0.13 ± 0.03^a	7.6 ± 0.6^b
		5-15 cm	5.2 ± 0.2^{ab}	26.7 ± 7.2^{abc}	0.66 ± 0.19^{ab}	0.09 ± 1.57^{ab}	6.9 ± 1.6^b
		15-30 cm	5.3 ± 0.3^{ab}	16.8 ± 0.8^d	0.55 ± 0.08^b	0.07 ± 0.00^b	7.8 ± 0.7^b
	SO	0-5 cm	5.4 ± 0.2^a	35.0 ± 5.5^{ab}	0.94 ± 0.18^a	0.11 ± 0.02^a	8.8 ± 0.2^a
		5-15 cm	5.1 ± 0.6^{bc}	25.4 ± 13.7^c	0.64 ± 0.19^{ab}	0.08 ± 0.03^{ab}	7.7 ± 0.1^b
		15-30 cm	5.3 ± 0.5^{ab}	17.3 ± 2.5^{cd}	0.49 ± 0.25^c	0.06 ± 0.03^b	7.6 ± 0.8^b
	SU	0-5 cm	4.8 ± 0.3^c	35.35 ± 22.93^{ab}	0.78 ± 0.16^{ab}	0.10 ± 0.02^{ab}	7.9 ± 0.1^b
		5-15 cm	4.9 ± 0.3^{bc}	21.91 ± 7.72^{bc}	0.67 ± 0.17^b	0.08 ± 0.01^b	8.2 ± 1.1^b
		15-30 cm	4.9 ± 0.19^{bc}	21.45 ± 5.26^{bc}	0.66 ± 0.32^b	0.08 ± 0.02^b	8.3 ± 2.2^{ab}

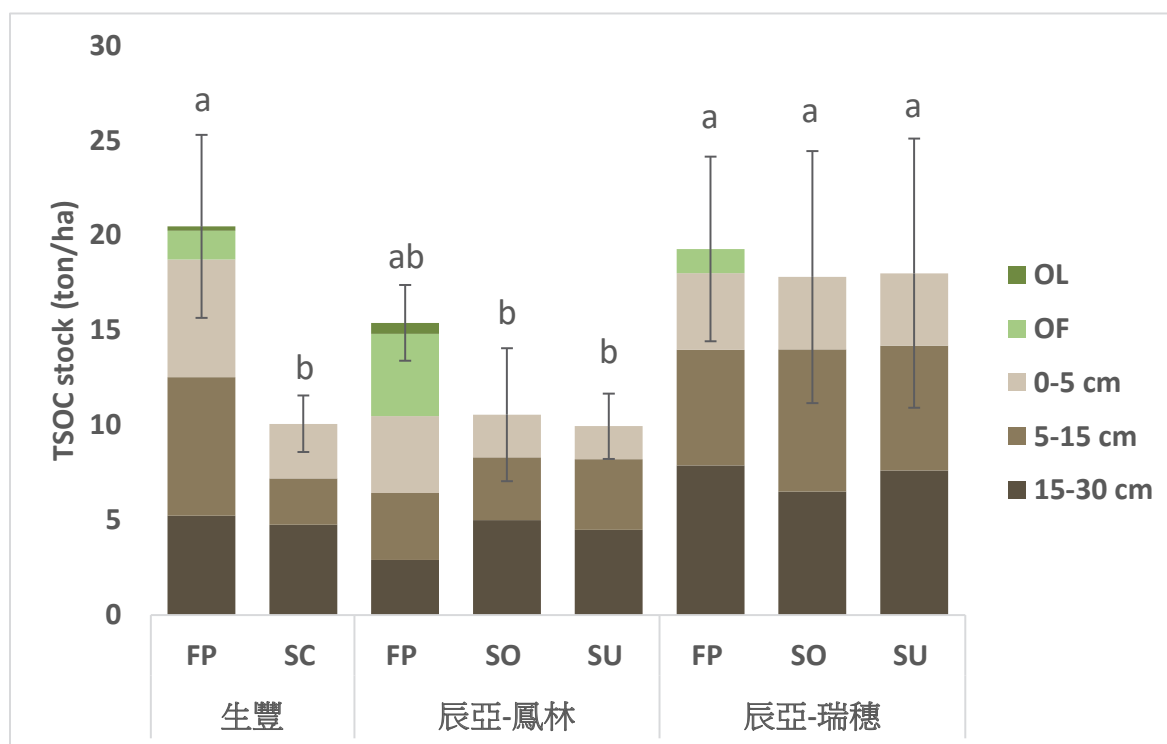


圖4 本研究中三種土系之人工林轉為光電場後，不同深度之土壤碳庫及總碳庫之差異。FP=人工林，SO=光電板外，SU=光電板下，SC=光電場建造中。誤差線為總土壤有機碳庫(TSOCstock)之標準偏差。並以不同小寫英文字母表示進行事後檢定(Dunn's Test)所得土壤總碳庫差異的顯著性($p < 0.05$)

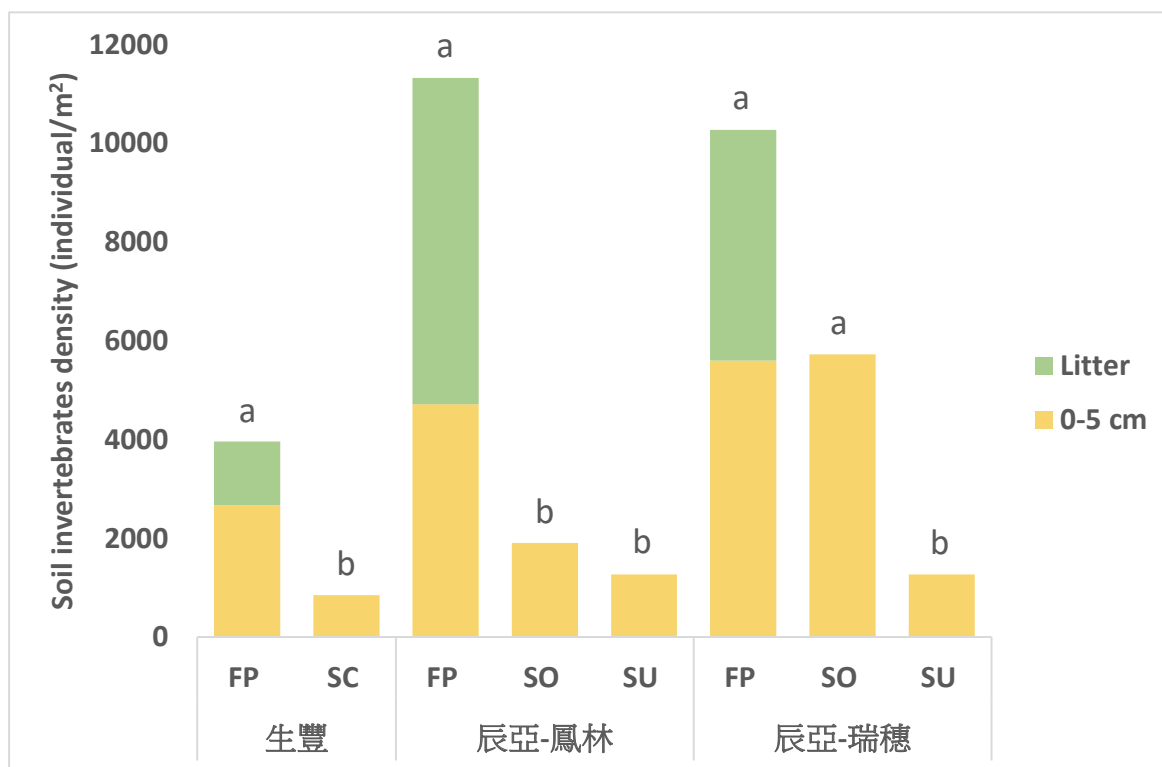


圖5 花蓮三個光電場樣區與臨近之人工林枝葉層及表土土壤無脊椎動物的平均密度。FP=人工林，SO=光電板外，SU=光電板下，SC=光電場建造中。並以不同小寫英文字母表示進行事後檢定(Dunn's Test)所得土壤無脊椎動物密度差異的顯著性($p < 0.05$)

表3 不同土地利用類型之土壤無脊椎動物各類群占比(%), FP=人工林, SO=光電板外, SU=光電板下, SC=光電場建造中

Taxa	生豐			辰亞-鳳林				辰亞-瑞穗			
	FP		SC	FP		SO	SU	FP		SO	SU
	Litter	0-5 cm	0-5 cm	Litter	0-5 cm	0-5 cm	0-5 cm	Litter	0-5 cm	0-5 cm	0-5 cm
彈尾綱	19.8	14.3	20.0	20.2	-	14.9	54.4	64.3	27.3	51.6	54.4
蟎	21.6	54.8	80.0	50.8	24.0	37.3	21.7	22.3	33.3	30.5	21.7
甲蟎亞目	16.7	2.4	-	23.0	8.0	22.4	-	1.6	6.1	11.7	-
蜘蛛目	2.2	-	-	1.7	-	-	-	1.4	-	-	-
擬蠍目	0.9	2.4	-	0.5	-	-	-	-	-	-	-
唇足綱	-	-	-	0.2	-	-	-	-	-	-	-
倍足綱	4.6	-	-	1.7	-	-	-	4.8	15.2	2.4	-
等足目	0.9	-	-	-	-	-	-	-	-	2.4	-
綜合綱	0.3	2.4	-	-	-	-	21.7	-	-	-	21.7
少足綱	-	2.4	-	-	4.0	-	-	-	3.0	-	-
原尾目	-	11.9	-	0.4	44.0	14.9	-	-	9.1	-	-
寡毛類	8.3	2.4	-	-	-	-	-	0.5	-	-	-
昆蟲綱	7.7	-	-	1.0	12.0	3.0	2.2	2.3	-	1.4	2.2
昆蟲幼蟲	15.7	-	-	0.6	-	-	-	3.0	6.1	-	-
線蟲動物門	1.2	7.1	-	-	8.0	7.5	-	-	-	-	-

電板外及光電板下方此呈現出不同回復程度(表3)。

4. 討 論

4.1 土壤理化性質

光電場建場的整地工程，往往需進行大面積的挖填作業，使得下層土壤與石塊翻攪至表層；而為了提高土壤剪力強度與承載力以符合架設電板所需基礎工程的夯實度，案場多需

以重機具進行碾實工程，進而導致表土的含石率及土壤容積密度增加(da Silva *et al.*, 1997；Singh *et al.*, 2015；Slesak *et al.*, 2017)。本研究中位於花東縱谷的三個樣區，原本即是含石量極高的地區，也因此整地工程使生豐及辰亞-鳳林光電場表層含石率均明顯高於人工林，亦是可預期的結果。Choi *et al.* (2020；2023)於美國克羅拉多州及明尼蘇達州的研究顯示，相較於作為對照組的草地，光電板區域含有較大於2 mm的粗顆粒及較高的平均粒徑(Choi *et al.*, 2020；Choi *et al.*, 2023)；Noor and Reeza (2022)

於馬來西亞彭亨的研究亦發現，光電場內的含砂量變高。本研究，質地原為粉質壤土的生豐及辰亞-鳳林樣區在光電場建置後，表層土中的含砂量增加而粉粒含量減少的現象，與上述兩處的研究結果相似；而造成此一現象的原因與前述清除植被、挖填及重機具壓實等擾動，導致粉粒及黏粒流失有關(Hernandez *et al.*, 2014)。砂質壤土的辰亞-瑞穗人工林表層0-30 cm土壤含砂量均超過75%，粉粒及黏粒含量極低，在光電場建置後雖然質地分類上仍屬砂質壤土，砂粒含量沒有明顯變化，此一現象與學者於中國甘肅省古浪縣的研究結果相似(Shang *et al.*, 2023)。本研究中辰亞-瑞穗光電樣區原為農田用地，在挖填整地作業時，下方犁底層中的黏粉質細顆粒被翻至表層，以致粉粒及黏粒含量都明顯增多，呈現出與生豐及辰亞-鳳林樣區不同的變動狀態。

土壤養分和植被的豐度、多樣性、生物量等均有密切關係，當植被及土壤物理性質的遭受劇烈變化，勢必影響土壤的化學性質(Milleret *et al.*, 2009；Van der Putten *et al.*, 2013)。誠如上述，興建光電場的土木工程明顯導致土壤密實化、增加含石率，並改變土壤質地，均為導致土壤化學性質改變等原因。除了光電場的興建需移除原有的植被外，基礎工程要求的夯實度亦導致土壤BD顯著上升(Choi *et al.*, 2023)，且往往超過不利植物根系生長的範圍($BD > 1.4 \text{ g/cm}^3$, Kozłowski, 1999)。在本研究中，雖然在營運二年後的辰亞-鳳林及辰亞-瑞穗兩處光電場內，已有草本植物及蕨類等重新建立族群，唯可能因其生物量遠不及人工林每年由枯落物而回歸土壤的養分量，再加上蕨類與草本植物根系僅及表層土而難以深入下層土壤，因此在缺少植被的枯落物及根系養分輸入下，使得光電場內的EC、SOC%、N%等皆遠低於人工林(表2)，此結果與許多國外相關研究結果相符

(Choi *et al.*, 2020；Choi *et al.*, 2023；Moscatelli *et al.*, 2022；Noor and Reeza, 2022；Shang *et al.*, 2023)。有趣的是，在營運二年後的場區內，電板內、外的土壤化學性質雖無統計上的顯著差異，但光電板外的平均土壤EC、SOC%、N%均略高於光電板下方者(表2)，而此一趨勢也與農試所於林邊、佳冬、東石之非營農式太陽能光電案場進行SOM%監測的結果相似(蔡耀賢，2019)，顯見光電場區植被經營可利於土壤化學性質的回復。唯各研究中所調查之光電場區天然環境條件不一，經營目標亦各有考量，因此，究竟天然的植群動態與人工經營植被對土壤理化性質改善有何差異，或要如何經營植被以利提高土壤品質，以及光電設施下之植物管理是否會成為農業害蟲潛藏的場域等，均需要適地適種的進一步的試驗研究。

在建置光電場的輾壓工程下，因 BD_{fc} 顯著上升，因此即使SOC%明顯降低，兩者相乘所得的 SOC_{stock} 變動不大，然而由於光電場缺乏 FFC_{stock} ，因此其 $TSOC_{stock}$ 仍遠低於人工林的土壤總碳庫(圖4)。Walston *et al.*使用InVEST模型評估了美國中西部太陽能光電場在不同情境下的生態系服務功能，並由地上部、地下部、土壤有機碳及枝葉殘體碳濃度等來估算整體的碳庫，結果顯示種植原生植物情境下的碳庫存為129.3 ton/ha，分別比農地及一般草坪管理高出65%及35% (Walston *et al.*, 2021)。因此若要加速土壤碳、氮、其他養分的回復，以提高光電場內土壤碳匯的能力及土壤總碳庫，可能需要適當的植群建立與維護。

4.2 土壤無脊椎動物

由於土壤無脊椎動物的多樣性與豐度和地上部植物生產力呈正相關(Van der Wal *et al.*, 2009)，因此光電場興建過程移除植被以及後續缺乏植生及有機質輸入的狀態，均可使土壤無

脊椎動物族群密度大幅下降。此外興建過程的壓實使土壤孔隙變小，土壤無脊椎動物的生活空間因而被壓縮(Beylich *et al.*, 2010)；壓實導致的積水使土壤中氧氣減少，成為厭氧環境之後亦不利於土壤無脊椎動物生存(Whalley *et al.*, 1995)，亦為土壤無脊椎動物密度降低之原因。在土壤有機質的大量流失下，加上密實化的BD過高，光電場區中的土壤無脊椎動物密度明顯比人工林為低(圖5)，是可以預期的狀況。然而，從本研究比較建造中與營運二年後光電場土壤無脊椎動物組成與群聚的差異來看，雖然建場工程使多數土壤無脊椎動物類群消失，只剩下個體數極低的彈尾綱及蟎類可存活(表3)，但在營運後，因光電板外多有草本覆蓋，而低光的電板下方亦有旺盛的蕨類與耐陰的草本植物生長，光電場的土壤無脊椎動物密度及類群數均有明顯回復的趨勢。向為民等(2019)於南臺灣非營農式光電場的研究結果及現，只要能在非陽光照射區能維持適當的植物以維持土壤濕度，並增加有機質，即有利於增加光電板下土壤中的蟎類以及光電板外跳蟲的數量。本研究所調查之案場均未主動進行植生植栽，且亦未施用除草劑，場區多僅定期以除草機維持植物高度。由本研究之調查成果推測，在光電場完工後之擾動減少，陸續自然回復的植被雖然無法在短期內改變土壤理化性質，卻能提供活動於地表的土壤無脊椎動物生存空間；而植物殘體及根系導入土壤中的養分，亦可提供土壤無脊椎動物食物來源。唯與人工林相較之下，因缺乏大量的森林枯落物及土壤有機質，其土壤小型無脊椎動物類群數與族群量仍有極大的成長空間。

Menta *et al.* (2023)於義大利北部調查兩個光電場在不同的植被管理方式下，光電板下方、外側、周圍的土壤節肢動物的密度及多樣性，並分析土壤生物品質指數(Soil Biological

Quality index, QBS-ar)，結果指出光電場建置對於土壤無脊椎動物產生的負面影響，與本研究之結果相符。該研究亦觀察到因為光電板外側的土壤無脊椎動物各項指標皆優於光電板下方，因此提出若能在光電板間的綠色區域進行適當的植被管理，有機會塑造土壤無脊椎動物的熱點(Menta *et al.*, 2023)。此外，Lambert *et al.* (2023)以法國南部的十個太陽能光電場為研究對象，探討光電場作為半天然草原(semi-natural grasslands，指未密集耕種或施肥的草地，有天然植被覆蓋)的可能性。他們由跳蟲、蟎類及微生物的調查結果，發現光電板的遮陰效果對土壤食物網具負面衝擊，因此建議若要在光電場經營半天然草原以維持原有的生物多樣性，則需透過增加光電板間的距離等方式達到目的(Lambert *et al.*, 2023)。有趣的是，Lambert *et al.* (2023)、Menta *et al.* (2023)與本研究的結果均發現，光電板外側有較高的土壤無脊椎動物密度與多樣性。相較來看，向為民等(2019)在屏東縣林邊鄉、佳冬鄉與嘉義縣東石鄉的三個非營農式太陽能光電案場，分別引入高狐草、馬蹄金、類地毯草、心葉水薄荷、地毯草、蔓花生、大豆、田菁及太陽麻等植物進行植被復育，故跳蟲與蟎類的數量則以有植被栽種的光電板下比光電板外側為高。整體而言，只要能在光電場區維持適當的植被，除了可維持土壤濕度、提高土壤有機質，均有利於土壤無脊椎動物的生存(向為民等，2019)，而植物殘體經土壤無脊椎動物分解後亦可增加土壤之養分及碳匯，有助於提升光電場內土壤品質(Frouz, 2018；Ontl and Schulte, 2012)。

5. 結 論

本研究比較花蓮三處不同土系的人工林與光電場之土壤理化與土壤無脊椎動物資料顯

示，光電場建置後土壤容積密度、含石率及砂粒含量上升，粉粒含量、電導度、碳濃度、氮濃度、土壤總碳庫、土壤無脊椎動物密度及類群數下降。光電場建置過程中移除植被、對表土的擾動以及土壤壓實等操作，對於土壤物理性質、化學性質及土壤無脊椎動物皆有直接而負面的影響，唯在電場營運後，因蕨類與草本植物族群之重新建立，前述多項土壤參數在表土中均有緩慢回復的現象，且以光電板外可生長多樣草本及木本植物的土壤回復情形，優於多以蕨類和耐陰性草本為主的光電板下土壤。而如何在符合工程規範需求下儘量降低土壤的過度擾動及密實化衝擊土壤品質，並藉由適當的植被管理，或發展其他更友善土壤的規劃與工程模式，使光電場營運期間仍保有一定程度的土壤生態系服務功能，且在未來電場除役後能儘速達成土壤復育，均仍有待進一步的研究。

謝 誌

本研究承蒙國立東華大學生態及永續科學跨領域研究中心(CIRES)之行政支援，及友達光電、生豐光電場、辰亞光電場於野外採樣工作上的協助。本研究經費由行政院國家科學及技術委員會112-2621-M-259-004-計畫支持，在此致謝。

參考文獻

向為民、石憲宗、蘇俊峰、蔡耀賢、關政平與曾清山，2019。非營農型光電綠能設施土壤管理與環境復育之研究。行政院農業委員會農業試驗所108年度科技計畫研究報告，108農科-25.2.2-農-C1。

莊俊逸、袁孝維與王亞男，2003。塔塔加地區

土壤動物之初步研究。國立臺灣大學生物資源暨農學院實驗林研究報告，17(4)，239-245。

農業部農業試驗所，2022a。土壤資料庫系統擴展與國土保安應用網站。https://taiwansoil.tari.gov.tw/Web.Net2008/index_1/main1-3.aspx。(取於2022年10月6日)

農業部農業試驗所，2022b。土壤資源空間資料標準。<https://www-ws.gov.taipei/001/Upload/551/refile/27045/3925341/31299345671.pdf>。(取於2022年10月6日)

農業部農業試驗所，2023。土壤資料供應查詢平台。<https://tssurgo.tari.gov.tw/Tssurgo/>。(取於2023年8月16日)

蔡耀賢，2020。非營農型光電綠能設施土壤管理與環境復育之研究。行政院農業委員會農業試驗所109年度科技計畫研究報告。109農科-20.2.2-農-C1

Akoijam, R., B. Bhattacharyya and L. Mrangmei, 2014. Tullgren funnel—an efficient device for extracting soil microarthropods. *Environment and Ecology*, 32(2), 474-476.

Armstrong, J. H., A. J. Kulikowski and S. M. Philpott, 2021. Urban renewable energy and ecosystems: integrating vegetation with ground-mounted solar arrays increases arthropod abundance of key functional groups. *Urban Ecosystems*, 24(3), 621-631. <https://doi.org/10.1007/s11252-020-01063-6>

Battigelli, J. P., J. R. Spence, D. W. Langor and S. M. Berch, 2004. Short-term impact of forest soil compaction and organic matter removal on soil mesofauna density and oribatid mite diversity. *Canadian Journal of Forest Research*, 34(5), 1136-1149. <https://doi.org/10.1139/x03-267>

- Beylich, A., H.-R. Oberholzer, S. Schrader, H. Höper and B.-M. Wilke, 2010. Evaluation of soil compaction effects on soil biota and soil biological processes in soils. *Soil and Tillage Research*, 109(2), 133-143. <https://doi.org/10.1016/j.still.2010.05.010>
- Biro, K., B. Pradhan, M. Buchroithner and F. Makeschin, 2013. Land use/land cover change analysis and its impact on soil properties in the northern part of Gadarif region, Sudan. *Land Degradation & Development*, 24(1), 90-102. <https://doi.org/10.1002/ldr.1116>
- Blum, W. E., 2005. Functions of soil for society and the environment. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 4, 75-79. <https://doi.org/10.1007/s11157-005-2236-x>
- Calvert, K. and W. Mabee, 2015. More solar farms or more bioenergy crops? Mapping and assessing potential land-use conflicts among renewable energy technologies in eastern Ontario, Canada. *Applied Geography*, 56, 209-221. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2014.11.028>
- Celik, I., 2005. Land-use effects on organic matter and physical properties of soil in a southern Mediterranean highland of Turkey. *Soil and Tillage Research*, 83(2), 270-277. <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.08.001>
- Chen, F., S.-M. Lu, K.-T. Tseng, S.-C. Lee and E. Wang, 2010. Assessment of renewable energy reserves in Taiwan. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(9), 2511-2528. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.06.021>
- Choi, C. S., A. E. Cagle, J. Macknick, D. E. Bloom, J. S. Caplan and S. Ravi, 2020. Effects of revegetation on soil physical and chemical properties in solar photovoltaic infrastructure. *Frontiers in Environmental Science*, 8, 140. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2020.00140>
- Choi, C. S., J. Macknick, Y. Li, Bloom, J. McCall and S. Ravi, 2023. Environmental Co-Benefits of Maintaining Native Vegetation With Solar Photovoltaic Infrastructure. *Earth's Future*, 11(6), e2023EF003542.
- Coleman, D. C. and D. H. Wall, 2015. Soil fauna: Occurrence, biodiversity, and roles in ecosystem function. *Soil Microbiology, Ecology and Biochemistry*, 4, 111-149. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-415955-6.00005-0>
- Déchêne, A. D. and C. M. Buddle, 2009. Effects of experimental forest harvesting on oribatid mite biodiversity. *Forest ecology and management*, 258(7), 1331-1341. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.06.033>
- da Silva, A. P., B. Kay and E. Perfect, 1997. Management versus inherent soil properties effects on bulk density and relative compaction. *Soil and Tillage Research*, 44(1-2), 81-93. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(97\)00044-5](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(97)00044-5)
- Delfanti, L., A. Colantoni, F. Recanatesi, M. Bencardino, A. Sateriano, I. Zambon and L. Salvati, 2016. Solar plants, environmental degradation and local socioeconomic contexts: A case study in a Mediterranean country. *Environmental Impact Assessment Review*, 61, 88-93. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2016.07.003>
- Devabhaktuni, V., M. Alam, S. S. S. R. Depuru, R. C. Green II, D. Nims and C. Near, 2013. Solar

- energy: Trends and enabling technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 19, 555-564. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.11.024>
- Frouz, J., 2018. Effects of soil macro-and mesofauna on litter decomposition and soil organic matter stabilization. *Geoderma*, 332, 161-172. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.08.039>
- Gibb, H. and D. F. Hochuli, 2002. Habitat fragmentation in an urban environment: large and small fragments support different arthropod assemblages. *Biological Conservation*, 106(1), 91-100. <https://doi.org/10.1191/0309133305pp443ra>
- Hernandez, R. R., S. Easter, M. L. Murphy-Mariscal, F. T. Maestre, M. Tavassoli, E. B. Allen, C. W. Barrows, J. Belnap, R. Ochoa-Hueso and S. Ravi, 2014. Environmental impacts of utility-scale solar energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 29, 766-779. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.041>
- Jónsson, J. Ö. G. and B. Davíðsdóttir, 2016. Classification and valuation of soil ecosystem services. *Agricultural Systems*, 145, 24-38. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2016.02.010>
- Kozłowski, T. (1999). Soil compaction and growth of woody plants. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 14(6), 596-619.
- Lambert, Q., A. Bischoff, A. Cluchier, S. Cuffe and R. Gros, 2021. Effects of solar parks on soil quality, CO₂ effluxes and vegetation under Mediterranean climate. *Authorea Preprints*. <https://doi.org/doi.org/10.1002/ldr.4101>
- Lambert, Q., A. Bischoff, M. Enea and R. Gros, 2023. Photovoltaic power stations: an opportunity to promote European semi-natural grasslands? *Frontiers in Environmental Science*, 11, 1137845.
- Lavelle, P., 1996. Diversity of soil fauna and ecosystem function. *Biology International*, 33(3.16).
- Menta, C., 2012. Soil fauna diversity-function, soil degradation, biological indices, soil restoration. *Biodiversity conservation and utilization in a diverse world*, 284. <https://doi.org/10.5772/51091>
- Menta, C., S. Remelli, M. Andreoni, F. Gatti and V. Sergi, 2023. Can Grasslands in Photovoltaic Parks Play a Role in Conserving Soil Arthropod Biodiversity? *Life*, 13(7), 1536.
- Milleret, R., R.-C. Le Bayon and J.-M. Gobat, 2009. Root, mycorrhiza and earthworm interactions: their effects on soil structuring processes, plant and soil nutrient concentration and plant biomass. *Plant and Soil*, 316, 1-12. <https://doi.org/10.1007/s11104-008-9753-7>
- Minasny, B., A. B. McBratney, A. M.-C. Wadoux, E. N. Akeeb and T. Sabrina, 2020. Precocious 19th century soil carbon science. *Geoderma Regional*, 22, e00306. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2020.e00306>
- Montag, H., G. Parker and T. Clarkson, 2016. The effects of solar farms on local biodiversity: a comparative study. *Clarkson and Woods and Wychwood Biodiversity*.
- Moscattelli, M. C., R. Marabottini, L. Massaccesi and S. Marinari, 2022. Soil properties changes after seven years of ground mounted photovoltaic panels in Central Italy coastal area. *Geoderma Regional*, 29, e00500. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2022.e00500>

- doi.org/10.1016/j.geodrs.2022.e00500
- Nelson, D. W. and L. E. Sommers, 1996. Total carbon, organic carbon, and organic matter. *Methods of soil analysis: Part 3 Chemical methods*, 5, 961-1010. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.3.c34>
- Nielsen, U. N., G. H. Osler, R. van der Wal, C. D. Campbell and D. F. Burslem, 2008. Soil pore volume and the abundance of soil mites in two contrasting habitats. *Soil Biology and Biochemistry*, 40(6), 1538-1541. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2007.12.029>
- Noor, N. and A. Reeza, 2022. Effects of solar photovoltaic installation on microclimate and soil properties in UiTM 50MWac Solar Park, Malaysia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1059, 012031. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1059/1/012031>
- Noordijk, J., I. Raemakers, A. Schaffers and K. Sýkora, 2009. Arthropod richness in roadside verges in the Netherlands. *Terrestrial Arthropod Reviews*, 2(1), 63-76. <https://doi.org/10.1163/187498309x440085>
- Ontl, T. A. and L. A. Schulte, 2012. Soil carbon storage. *Nature Education Knowledge*, 3(10).
- Pérez-Bote, J. and A. Romero, 2012. Epigeic soil arthropod abundance under different agricultural land uses. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 10(1), 55-61. <https://doi.org/10.5424/sjar/2012101-202-11>
- Patil, P., J. Bagi and M. Wagh, 2017. A review on cleaning mechanism of solar photovoltaic panel. 2017 International Conference on Energy, Communication, Data Analytics and Soft Computing (ICECDS).
- Pereira, P., I. Bogunovic, M. Muñoz-Rojas and E. C. Brevik, 2018. Soil ecosystem services, sustainability, valuation and management. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 5, 7-13. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2017.12.003>
- Phillips, J., 2013. Determining the sustainability of large-scale photovoltaic solar power plants. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 27, 435-444. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.07.003>
- Randle-Boggis, R., P. C. L. White, J. Cruz, G. Parker, H. Montag, J. Scurlock and A. Armstrong, 2020. Realising co-benefits for natural capital and ecosystem services from solar parks: a co-developed, evidence-based approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 125, 109775. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109775>
- Rupprecht, C. D., J. A. Byrne, J. G. Garden and J.-M. Hero 2015. Informal urban green space: A trilingual systematic review of its role for biodiversity and trends in the literature. *Urban Forestry & Urban Greening*, 14(4), 883-908. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2015.08.009>
- Schulte, E. and B. Hopkins, 1996. Estimation of soil organic matter by weight loss-on-ignition. *Soil Organic Matter: Analysis and Interpretation*, 46, 21-31. <https://doi.org/10.2136/sssaspecpub46.c3>
- Shang, W., Z. Zhang, G. Fu, Q. Wang, Y. Li and L. Chang, 2023. Spatial Heterogeneity of Vegetation Communities and Soil Properties in a Desert Solar Photovoltaic Power Station of the Hexi Corridor, Northwestern China. *Polish Journal of Environmental Studies*, 32(3), 2795-2807.

- Singh, J., A. Salaria and A. Kaul, 2015. Impact of soil compaction on soil physical properties and root growth: A review. *International Journal of Food, Agriculture and Veterinary Sciences*, 5(1), 23-32.
- Slesak, R. A., B. J. Palik, A. W. D'Amato and V. J. Kurth, 2017. Changes in soil physical and chemical properties following organic matter removal and compaction: 20-year response of the aspen Lake-States Long Term Soil Productivity installations. *Forest Ecology and Management*, 392, 68-77. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.03.005>
- Smith, J., A. Chapman and P. Eggleton, 2006. Baseline biodiversity surveys of the soil macrofauna of London's green spaces. *Urban Ecosystems*, 9, 337-349. <https://doi.org/10.1007/s11252-006-0001-8>
- Trägårdh, I., 1933. Methods of automatic collecting for studying the fauna of the soil. *Bulletin of Entomological Research*, 24(2), 203-214. <https://doi.org/10.1017/S0007485300031370>
- Van der Putten, W. H. , R. D. Bardgett, J. D. Bever, T. M. Bezemer, B. B. Casper, T. Fukami, P. Kardol, J. N. Klironomos, A. Kulmatiski and J. A. Schweitzer, 2013. Plant-soil feedbacks: the past, the present and future challenges. *Journal of Ecology*, 101(2), 265-276. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.12054>
- Van der Wal, A., R. Geerts, H. Korevaar, A. Schouten, G. J. op Akkerhuis, M. Rutgers and C. Mulder, 2009. Dissimilar response of plant and soil biota communities to long-term nutrient addition in grasslands. *Biology and Fertility of Soils*, 45, 663-667. <https://doi.org/10.1007/s00374-009-0371-1>
- Walston, L. J., Y. Li, H. M. Hartmann, J. Macknick, A. Hanson, C. Nootenboom, E. Lonsdorf and J. Hellmann, 2021. Modeling the ecosystem services of native vegetation management practices at solar energy facilities in the Midwestern United States. *Ecosystem Services*, 47, 101227.
- Whalley, W. R., E. Dumitru and A. Dexter, 1995. Biological effects of soil compaction. *Soil and Tillage Research*, 35(1-2), 53-68. [https://doi.org/10.1016/0167-1987\(95\)00473-6](https://doi.org/10.1016/0167-1987(95)00473-6)
- Yue, C.-D. and G.-R. Huang, 2011. An evaluation of domestic solar energy potential in Taiwan incorporating land use analysis. *Energy Policy*, 39(12), 7988-8002. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.09.054>
- Zanella, A., B. Jabiol, J.-F. Ponge, G. Sartori, R. De Waal, B. Van Delft, U. Graefe, N. Cools, K. Katzensteiner and H. Hager, 2011. European humus forms reference base.

Effects of Solar Parks on Soil Properties and Soil Invertebrates

Rong-Ci Chang¹ Chia-Wen Tsai² Yung-Jen Lu² Chiao-Ping Wang^{3*}

ABSTRACT

The ground-mounted photovoltaic power is one of the developing renewable energy in Taiwan. However, it may negatively affect the environmental quality and agriculture and ecosystems. In order to understand the impact of solar panels on soil quality and soil invertebrates, soils from three photovoltaic sites in Hualien, Taiwan were collected, where one at Juisui which was under construction, and two at Fenglin, which had been in operation for 2 years. We compare the chemical, physical and the soil invertebrates among soils beneath and outside the solar panels and their adjacent forest plantations. The effects of the change of land use type from forest plantations to photovoltaic parks on soil properties varied with soil texture. In the silt loam sites, the construction of solar parks increased the soil bulk density and sand content, while the silt content, electrical conductivity, carbon concentration, nitrogen concentration, soil fauna density, and the number of soil fauna taxa all decreased significantly. However, those impacts were not significant in the sandy loam site. As some ferns and grasses re-establish naturally in the solar park after 2 years of operation, soil carbon, nitrogen and fauna density tended to increase gradually, where the increasement was more significant in the soils from outside than under the solar panels. The results indicate that a proper management of vegetation and a better design of the solar park might reduce the impacts on soil ecosystem function and services.

Keywords: Ground-mounted solar panels, Renewable energy, Soil quality, Soil carbon stock, Soil invertebrates.

¹ National Dong Hwa University, Department of Natural Resources and Environmental Studies, Undergraduate student.

² Taiwan Forest Research Institute, Silviculture Division, Research Assistant.

³ Taiwan Forest Research Institute, Silviculture Division, Associate Researcher.

*Corresponding Author, Phone: +886-(0)2-23039978#2907, E-mail: cpwang@tfri.gov.tw

Received Date: October 05, 2023

Revised Date: December 13, 2023

Accepted Date: December 29, 2023