

2025年臺灣國際科學展覽會

優勝作品專輯

作品編號

180002

參展科別

地球與環境科學

作品名稱

線蟲土壤食物網監測模式建立與功能性調節

The Establishment of Nematode Food Web
Monitoring Model and Regulation of Soil
Functions

就讀學校

新北市私立竹林高級中學

指導教師

顏嘉怡

作者姓名

張丞博

關鍵詞

線蟲 動物門 、 土壤肥力 、 生態系服務

作者簡介



我是張丞博，來新北市竹林中學，很榮幸有機會在國際科展如此人才濟濟的賽事與大家分享與交流。參加科展的動機得從國一在社團時講起，那時聽從學長們的建議，而決定朝以線蟲為實驗動物的方向發展。線蟲常被用於研究衰老機制等較艱深的領域，因此初期並不被看好，組員也相繼退出。即便遭遇了許多挫折，我仍決定堅持自己的目標，並且在日後大大小小的比賽中確定了研究方向，雖然辛苦，但我樂在其中，並且受益良多。我得感謝導師，感謝他同意並默默支持我嘗試自己的理想；感謝父母無條件的支持與鼓勵；感謝新北政府教育局、專家老師以及評審們的教誨；更必須感謝指導老師對學生的尊重與包容，尊重我對某些觀點的執著，讓我朝著目標發展，解決大大小小的困難。

2025 年台灣國際科學展覽會

研究報告

區 別：北區

科 別：地球與環境科學科

作品名稱：

線蟲土壤食物網監測模式建立與功能性調節

The Establishment of Nematode Food Web Monitoring Model and Regulation of Soil Functions

關 鍵 詞：線蟲動物門、土壤肥力、生態系服務

編 號：

線蟲土壤食物網監測模式建立與功能性調節

摘要

為了永續利用土壤生態系服務，本研究分析線蟲族群變化監測土壤食物網，探討線蟲食物網與土壤養分調節相關性，實踐 SDGs 中第 2 項消除飢餓與第 15 項陸域生態。首先使用文獻分析法，建構模式觀察線蟲功能群演替，監測線蟲食物網組成評估土壤生態系服務，改善與結合過去僅探討環境干擾方式。觀察線蟲對土壤養分影響，結果顯示線蟲功能群多樣性、族群增長與交互作用(資源重疊與演替等)可能提升土壤無機氮；不過推測因族群交互作用減弱或微生物過度被捕食，氨化能力在食物網發展初期(六週提升 37%)與後期(六週僅提升 16%)不同，需探討如何延續其氨化能力。將結合植物生長觀察線蟲食物網對植物影響。期望未來新模式進一步評估與標準化，用於監測土壤線蟲食物網組成並調節土壤，在農業管理與生態復育方面做出貢獻，為土壤永續利用提出新的可能。

The Establishment of Nematode Food Web Monitoring Model and Regulation of Soil Functions

abstract

To promote sustainable use of soil ecosystem services, this study monitors nematode population changes within soil food webs, exploring their role in nutrient regulation—aligned with SDGs 2 (Zero Hunger) and 15 (Life on Land). Using literature analysis, the study models nematode functional group succession and examines food web composition to evaluate ecosystem services. Observing the impact of nematodes on soil nutrients, results suggest that nematode food webs complexity, population growth and populations interaction may significantly boost inorganic nitrogen levels, but ammonification efficiency varies across early (37%) and later (16%) stages. Future research aims to standardize monitoring methods for sustainable agriculture and soil restoration applications.

壹、前言

一、研究動機

全球汙染日益嚴重，環境永續發展是當今重要的議題，其中土地的經營尤其重要，聯合國永續發展目標 (SDGs) 中第 2 項消除飢餓 (ZERO HUNGER) 與第 15 項陸域生態 (LIFE ON LAND) (圖一) 等項目目標即提倡預防沙漠化或糧食有效生產等，皆與土地的永續經營與利用有密切關聯。土壤食物網描述了土壤中生命或族群



圖 (一) 聯合國永續發展目標

的相互影響與能量流動，藉食物網中不同族群的改變，能夠影響土壤中生物的功能與服務，並且觀察土壤食物網中特定營養階層的族群變化也有助於了解生態變動，進行土壤干擾的監測與預防，在生態學中具有多個層面的意義。而本研究提出藉由監測與調節土壤食物網，能夠調節生態系服務，實現土地的永續經營與利用。

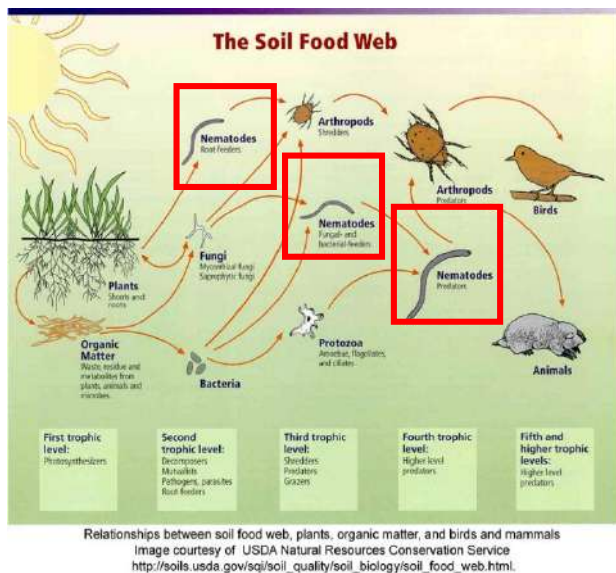


圖 (二) 土壤食物網示意圖 (取自美國農業部) 土壤食物網生態簡易食物網圖，線蟲扮演多種角色，圖中還未畫出雜食性線蟲。(紅框處為線蟲)

線蟲是於土壤中生物量大 (達 3 億公噸) (Hoogen *et al.*, 2022) 且物種豐富的微型生物，代表多個營養階層 (圖二)，並獨立形成食物網，深深影響土壤物質與能量流動。不同物種線蟲族群受環境擾動或恢復的反應不同，以食性與繁殖策略等可分成多個線蟲功能群 (nematode functional guild)，用於探討線蟲在生態中的功能與服務。因數量與生物量龐大，生態系中線蟲功能群的演替 (即線蟲食物網演替)，可用於表示土壤資源 (肥力)、能量與干擾的變化，加上廣大的生活領域 (如蘚苔、河川、沙漠或土壤)，線蟲有極高潛力用於土壤生態評估，並探討土壤肥力、潛在產能與物質流通速度等。

線蟲指數 (Nematode-based indices, NBIs)，此名詞由 Preez 在 2022 年報告中提出，是多種以線蟲監測環境的方式。這些監測方式通常使用同功群的變化進行生態評估。過去就曾以

線蟲 c-p 指數 (colonizer-persister indices) 評估土壤干擾，後來學者對線蟲在土壤中所扮演的角色更感興趣，使用線蟲功能群 (nematode functional guild) 進行土壤生態評估 (Ferris *et al.*, 2001)。本研究發現 NBIs (如成熟指數 MI) 通常探討環境擾動的頻率與大小，難以觀察線蟲食物網的結構上的改變，更難以直接判斷土壤肥力的增減 (Bongers & Bongers, 1998; Ferris *et al.*, 2001; Hoschitz & Kaufmann, 2004)。因此，本研究將利用文獻分析法，建立對土壤食物網組成進行監測的模式，並結合與應用過去 NBIs 中各類群的特性與概念，評估模式的可行性或缺陷。

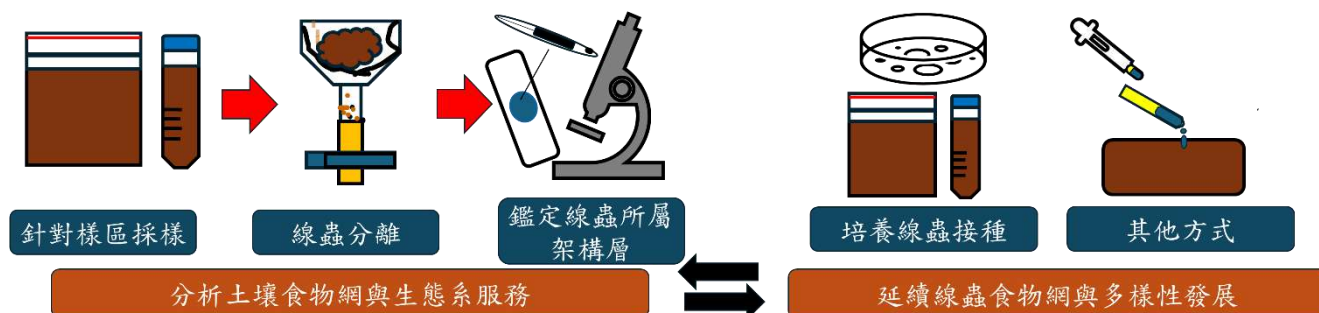
土壤的生態系服務多樣(圖三)(Lavelle & Spain, 2002)，皆與物質與營養的利用有著密切關連，在生物層面上更是深受土壤食物網的運作影響，因此調節土壤的養分或者土壤食物網組成，即等同於調節土壤生態系服務。不過工業革命與綠色革命後，土壤生態受到嚴重的影響，其中因為化肥的過度施用，使土壤過多的氮堆積而造成的水域優養化或肥力降低等狀況日益增加。



圖(三) 土壤主要生態系服務 (作者繪製)

過去針對土壤生產力的調節常用化學肥料或微生物肥料等等，但他們共同的缺點，便是需要長期的購入與施用，如化肥需視植物生長期，每二到三個月施用一次，土壤益生菌也需定期施用維持效力或仰賴共生進行，且皆不排除上述造成汙染的可能。本研究欲透過土壤食物網的組成與運作達成土壤的調節，使土壤肥力強化並具有長期效力。

線蟲在土壤中扮演重要的角色，且生物量與豐度 (abundance) 龐大，促成大部分土壤物質與養分流通，細菌與真菌食性線蟲本身所進行的土壤氮化作用 (Ferris, 2010) 便貢獻土壤總氮化量的 27% (Sun *et al.*, 2013)。本研究探討線蟲食物網 (線蟲功能群) 的演替與運作，和土壤無機氮變化與植物生長狀況關聯性，實現利用線蟲監測與調節土壤 (圖四)。



圖(四) 本研究理念與架構 (作者繪製)

要實現上述理念，土壤線蟲的分離與樣區線蟲組成調查是重要的基礎。柏門氏漏斗分離法雖然回收效果不佳（等待時間過長）且只可分離活動力較高線蟲，但較其他方式而言可以分離的線蟲大小範圍較廣、死亡率較低、可輕易改良。另外，因地區的不同，線蟲的組成常有極大差異，因此調查樣區土壤線蟲組成有助於日後的發展。而本實驗將對樣區線蟲分離與鑑定，做為日後發展的基礎。

二、文獻探討

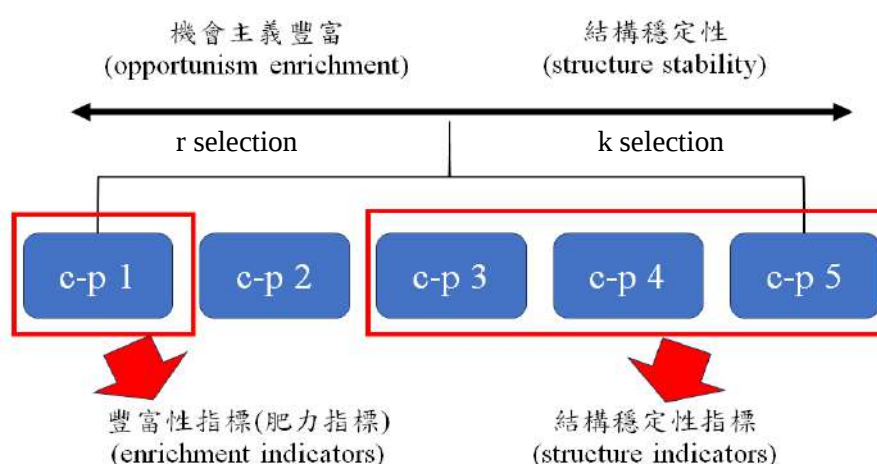
(一) 名詞定義與解釋

1. 擾動 (disturbance)

包括火災、疾病或人為的汙染等，使環境中生物與生態變動，破壞生物群集穩定性的生物或物理等因子。根據中度擾動假說，一般認為適度的擾動能維持並增加生物多樣性，但過高的擾動可能使生物無法承受而導致滅絕，而過低的干擾則會使優勢物種得到過度發展而限制生物多樣性。

2. c-p 指數分類 (colonizer-persister index) (Bongers & Bongers, 1998) (圖五)

此線蟲分類方式將對生態干擾或改變的反應(如污染敏感度)以及繁殖策略(r/k 選擇理論)相似的線蟲物種歸類於同一 c-p 分類，共分成 1-5 級(c-p1~c-p5)線蟲。



圖(五) 線蟲 colonizer-persister index (c-p) 所表意義(作者繪製)

愈接近 c-p 1 之線蟲愈可表示環境資源的可用性，群集大小於養分豐富時快速成長；而愈接近 c-p 5 之線蟲則可表示環境結構穩定性，表示一生態穩定性、食物鏈複雜性等。

c-p 1: 壽命短，性腺占大部分體長，繁殖力高，主要為代謝活性高的菌食性線蟲，汙染耐受性高，在資源缺乏時形成 dauer (類似於休眠) 狀態。營養豐富時群落大量成長。

c-p 2: 壽命短，繁殖能力高，但較低於 c-p 1。主要為菌食性或真菌食性線蟲，汙染耐受性極強，但無法形成 dauer 狀態，營養豐富時族群成長幅度較 c-p 1 低，為基礎群落。

c-p 3: 壽命更長，對環境干擾更敏感，主要由菌食性、真菌食性和少部分獵食性線蟲組成。

c-p 4: 壽命較 c-p 3 長，角質層薄，對環境干擾敏感，以獵食性、雜食性與菌食性線蟲組成。

c-p 5: 壽命極長，代謝能力和活動力低，子代少而角質層可滲透，對汙染與環境干擾非常敏感。由大型雜食性與獵食性線蟲組成。

3. 線蟲功能群 (nematode functional guild) (Ferris , 2010)

此為結合同功群 (guild) 與生態功能群 (ecosystem functional group) 概念的分類方式，基於線蟲的非同種的線蟲可能存在很高的功能多樣性，不同物種間也可能以相同的方式利用資源或具有相同功能；而相同線蟲功能群的線蟲具有相似的生長、繁殖和代謝特徵並執行相同生態功能。線蟲功能群的分類基於食性與 c-p 分類，將線蟲鑑定至科層級並對照其 c-p 分類與食性後，即可分類線蟲的功能群。以下為五種線蟲功能群：

Pl_x : 植食性 (Plant feeder) ; Ba_x : 菌食性 (Bacteria feeder) ; Fu_x : 真菌食性 (Fungal feeder)

Ca_x : 獵食性 (Carnivores) ; Om_x : 雜食性 (Omnivores)

其中 x 表示線蟲的 c-p，如某種線蟲為獵食性，且為 c-p 4，則表示 Ca₄。

4. 線蟲指數 (NBIs) (Preez *et al.*, 2022)

此為多種以線蟲評估土壤生態健康或干擾程度的指數。

5. 成熟指數 (MI, Maturity Index) (Bongers & Bongers , 1998)

此為歷史最為悠久且最常被使用的 NBIs (Preez *et al.*, 2022)，用於衡量環境干擾，成熟指數越高，表示干擾程度越低，而成熟指數越低則表示干擾程度越高 (MI<2 高度干擾，2<MI<3 表示中度干擾，MI>3 表示低度干擾)。藉由 cp-1~c-p5 線蟲物種的占比初步運算，擾動的高低會影響不同 c-p 群線蟲的發展藉此造成成熟指數的提高或降低。成熟指數公式 (V= 此分屬線蟲 c-p 指數，f=此分屬之數在所有線蟲隻數的占比) : $MI = \sum_{i=1}^n V(i) \times f(i)$

(二)研究動物 (圖六)

線蟲為線蟲動物門(Nematoda)的總稱，至今還發展出「線蟲學(Nematology)」等研究領域，且物種豐度與多樣性極高，僅次於節肢動物門。

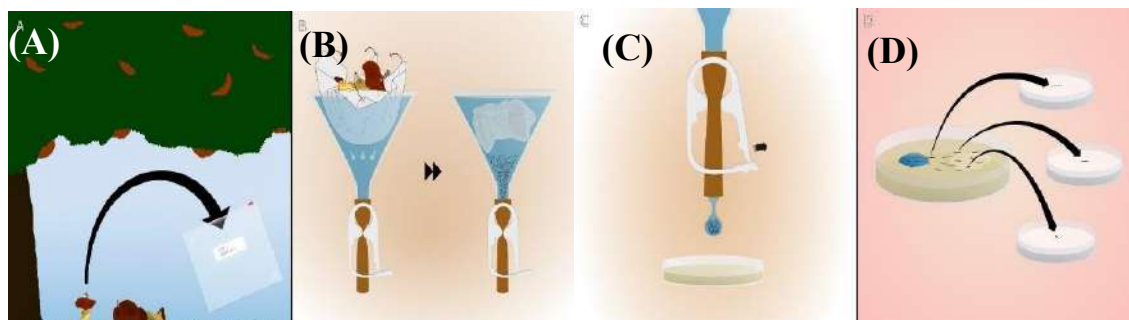


圖(六) 線蟲顯微鏡下形態(作者拍攝，圖中線蟲皆為 *Doryliamus. sp*)

而關於線蟲的選用與實踐土地發展上，考慮了多種優勢，包括其世代極短、適應力強與環境中生物量大等，大大提升其作為監測土壤食物網的優勢。

(三)柏門氏漏斗分離法 (Baermann funnel method) (Tintori *et al.*, 2022) (圖七)

此為使線蟲主動從介質中分離的分離方式，主要將樣本以過濾材質包覆後置於漏斗中，並加入蒸餾水並等待 24~48 小時，利用線蟲在水中游動與重力下沉的特性將線蟲與基質分離 (圖七)。本研究也將採用此分離方式。



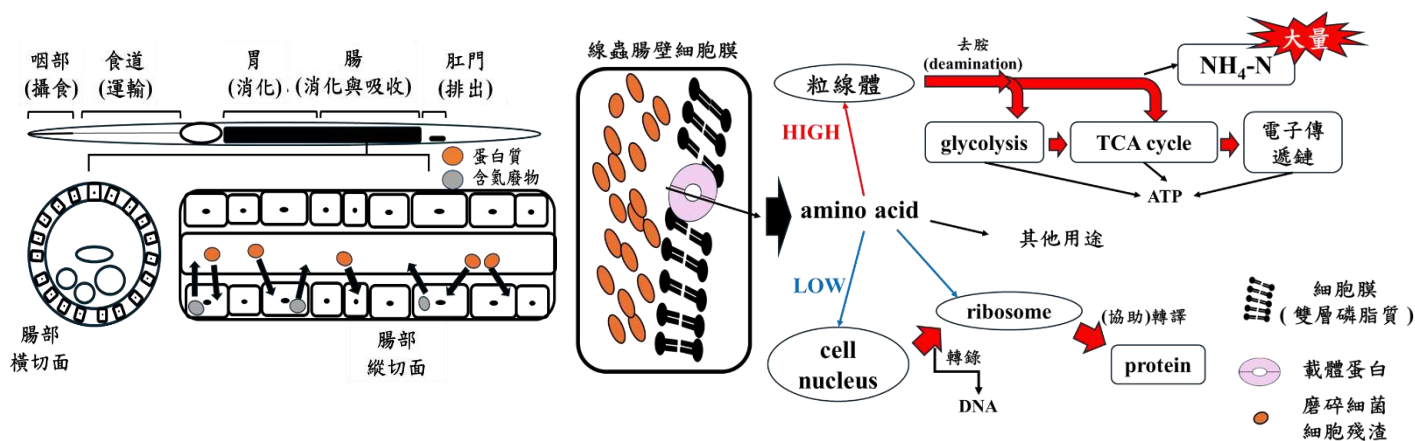
圖(七) 柏門氏漏斗分離法示意圖 (取自 Tintori *et al.*, 2022)

(A)採集目標樣本。(B)將樣本浸於漏斗中，待線蟲游出。(C)取出分離後含線蟲濁液。(D)將線蟲移至培養基。

(四) 線蟲對土壤資源的調節方式

1.直接調節(氮化)(圖八)

線蟲活動力強、生物量大與超過其代謝所須的食物攝取，協助土壤中的礦化作用。其中真菌與菌食性線蟲可大量取食並具高碳氮比 ($C:N=8\sim12$)，其低氮同化代謝途徑將氮以 NH_4^+ 或胺基酸等形式大量排出 (Ferris, 2010)，供給其他生物利用。

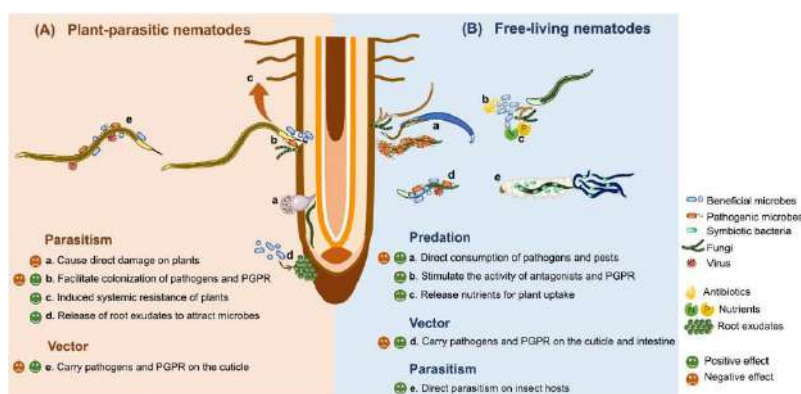


圖(八) 線蟲氮氨化機制圖(作者繪製)

相較其他生物而言，線蟲因其食物碳氮比較低而同化較少比例的氮。

2. 間接調節(氨化、固碳與固氮)(圖九)

線蟲的食性豐富，其中由細菌與真菌為食的線蟲，將透過與其獵物的交互作用及獵食壓力有效增加細菌與真菌(為填補缺失群體)在土壤中的豐度(氨氧化菌 AOB 等)(Xiao *et al.*, 2010) 與活性(Bouwman *et al.*, 1994)，藉此間接加快土壤中固碳、固氮與氨化作用的進行。



圖(九) 線蟲於土壤中功能 (圖取自 Li, 2023)

過去有多項研究證實線蟲的存在將可能顯著增長土壤氮或有機物質的可用性等(Shi *et al.*, 2023 ; Gebremikael, 2016)，而本研究則是旨在於探討線蟲對土壤肥力(以無機氮為例)的影響機制與食物網的關聯性，有助於未來發展模式。

(五) 肥料 (參考自台灣農業知識入口網)

1. 化學肥料 (無機肥料)

為人工合成，施用後可快速溶解，進而迅速而顯著地被植物所吸收，不過也因此需要一直施用，施用不當甚至容易產生危害，造成地下水污染或土壤酸化等問題；在生態系方面，

土壤中的微生物因養分快速被植物吸收而減少，若追肥順著流入水域，將破壞原有的營養平衡，創造部分微生物的生長優勢，破壞當地生態或造成優養化。目前人類所施用的化肥，其輸入的氮磷鉀含量已遠遠超標正常值，為全球環境問題一大隱憂。

2.有機肥料

增加土壤有機質含量以改善土壤肥力，對植物也相對較健康，於土壤中的殘效性也較長，不過養分供應遠低於化學肥料。值得一提的是，過量有機肥施用將使土壤有機質含量過高，對環境造成衝擊，且施用後大部分氮磷鉀等成分須經礦化後才能被植物所利用。

(七) 線蟲常用基本形態鑑定辨識特徵 (圖十)

重要辨識特徵包括口針 (stylet)、基部結球 (stylet knob) 與中部食道球 (median bulb)。



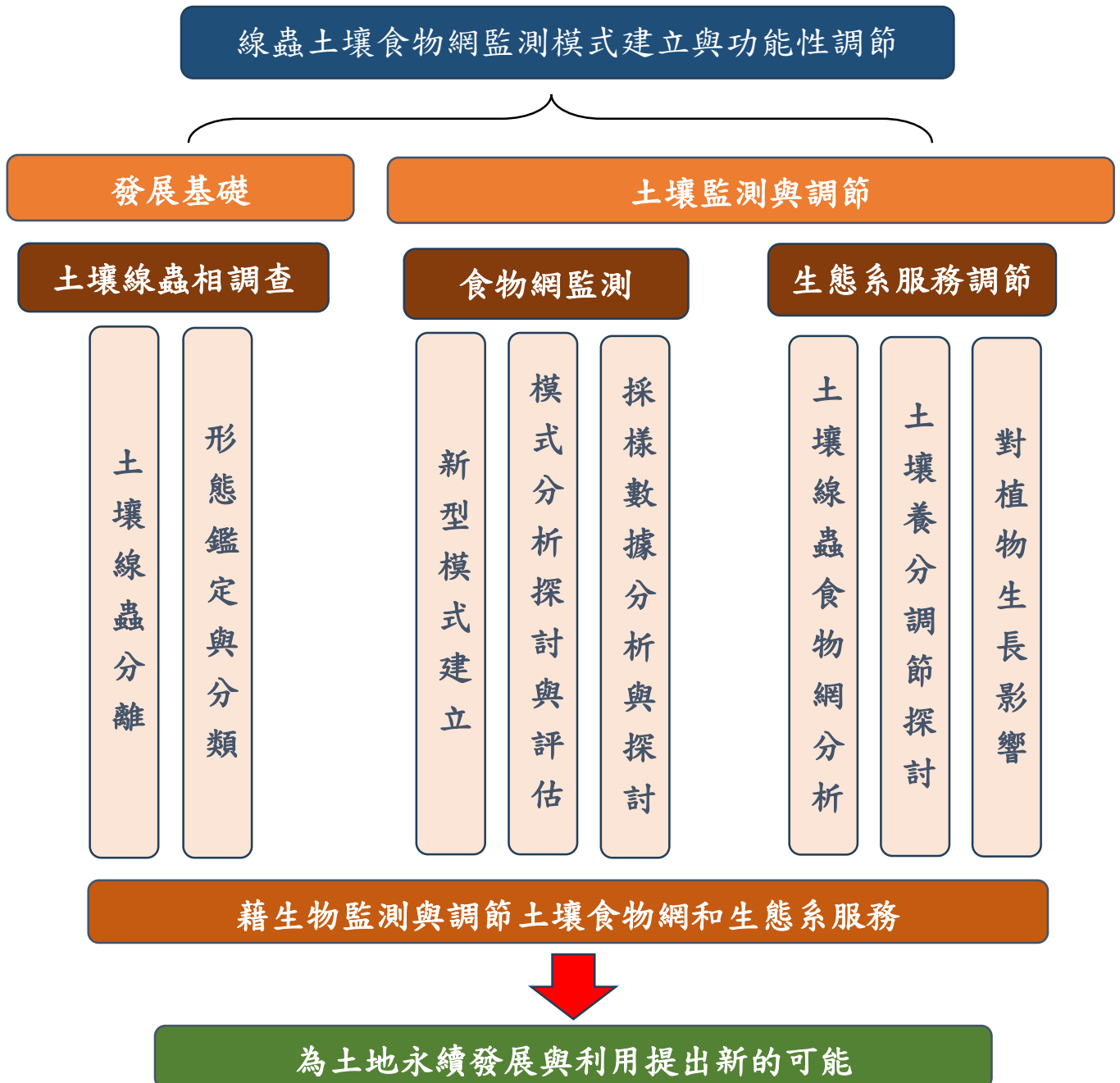
圖(十) 線蟲基礎形態鑑定特徵 (作者繪製)

- 1.口針 (stylet) 位於線蟲頭部，口針是否存在通常被視為形態特徵鑑定的第一步。此器官通常被線蟲用於進食、獵捕或破壞植物組織以取食。
- 2.口針基部結球 (stylet knob，通常簡稱 knob)在線蟲口針的末端，通常被植食性等具強破壞力(尤其對植物組織)的線蟲擁有。
- 3.中部食道球 (median bulb)線蟲食道的中後段（與腸交界），造成吸力以助於線蟲攝食。

貳、研究目的與問題

一、研究方向架構圖（圖十一）

本研究主要分成兩部分：發展基礎，進行土壤線蟲分離試驗與土壤線蟲組成調查，奠定後須發展依據；而在土壤功能監測與調節中，將於自行設計監測模型後，觀察土壤線蟲食物網組成變化與土壤養分調節情形



圖(十一) 研究方向架構圖（作者繪製）

二、研究目的

(一) 發展基礎

1. 土壤線蟲分離試驗 - 找出適用的過濾材質與分離方式。
2. 土壤線蟲相調查 - 以形態鑑定樣區出現各線蟲物種與 c-p 分類。

(二) 土壤監測與調節

1. 土壤食物網監測
 - (1) 參考文獻建立新模型。
 - (2) 新模型探討與評估。
 - (3) 採樣與數據分析。
2. 土壤生態系服務調節
 - (2) 探討線蟲食物網與無機氮調節機制。
 - (3) 探討線蟲食物網對植物生長實際影響。

參、研究設備及器材

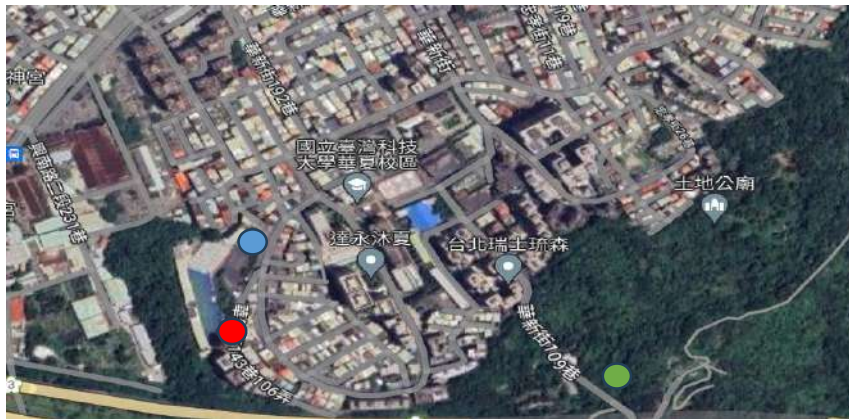
名稱	備註	名稱	備註
複式顯微鏡	Motic BA210	玻璃漏斗	直徑 90mm
Wifi CMOS 彩色相機	Moticam X ²	橡皮管	3 X 4.6mm
Cat eye 三眼實體顯微鏡		保鮮夾	作為橡皮管夾
UPMOST UPG309 影像 擷取器	購自瑞光儀器	脫脂紗布	購自東和衛生材料
電子秤		圓形培養皿	6mm, 9mm
PASCO PS-2230 測定儀	pH 值測定	拭鏡紙	KIMWIPES
Nichipet 微量吸取器	100~1000 μ L 10~100 μ L 1~10 μ L	甲醛	30%(體積百分比濃度)
園藝通用靚土	78.6%、全氮 0.6%、 全氧化鉀 0.7%	花卉用培養土	有機質 68.3%、全氮 1%、全 磷 0.8%、全氧化鉀 0.9%
土壤多功能檢測儀	購自矽新科技	G-250 染劑	-
10X PBS Buffer		BSA	
研鉢		綠豆種子	
超音波震盪破碎儀		分光光度儀	

肆、研究過程或方法

一、線蟲採樣方式與樣區標記 (圖十二, 圖十三)

1. 本實驗將分別於 3 個樣點進行採樣, 且每次採樣深度範圍為 1~5 公分。其中選擇校園步道 (A 樣區) 與休耕菜田 (B 樣區) 時的考慮為穩定且方便採樣的人為樣區, 而山中土地 (C 樣區) 的考慮為人為介入較低的自然樣區。

2. 每次採樣後以夾鏈袋包裝並帶回實驗室進行分析(表一)。



圖(十二) 土壤採集樣區標記 (擷自 Google Map)

● 為 A 樣區, ● 為 B 樣區, ● 為 C 樣區



圖(十三) 土壤採集樣區表示 (作者拍攝)

(A) A 樣區, 校園內步道。(B) B 樣區, 為休耕菜田。(C) C 樣區, 為山中土地。

表(一) 樣區平均土壤無機氮磷鉀

	校園步道	休耕菜田	山間土地
土壤無機氮	1 mg/kg	-	1 mg/kg
土壤無機磷	0.5 mg/kg	-	0.5 mg/kg
土壤無機鉀	2 mg/kg	-	3.5 mg/kg

二、土壤線蟲分離試驗 (圖十四)

線蟲生活於土壤的水膜之中，故需要將其從土壤分離才得以進行觀察。

【實驗步驟】

1. 將採樣後的土壤攪拌均勻後，取 10g 以拭鏡紙 (Kimwipes) 包覆，分成兩組並分別加入上述的兩種分離漏斗中。包覆，投入漏斗後，加入 100 mL 的蒸餾水，並等待 24 小時。
3. 取 10g 以拭鏡紙 (Kimwipes) 包覆。
4. 將包覆完畢的樣土置入漏斗中，加入 100 mL 的蒸餾水。
5. 於 28°C 下靜置 24 小時。
6. 分離結束後，打開橡皮管夾，使線蟲懸浮液流入培養皿中。



圖(十四) 分離漏斗
(作者拍攝)

三、土壤線蟲分布初調查

(一)線蟲鑑定與類群占比探討

線蟲將因氣候、地質等環境因子，數量或分布占比可能受影響，而本實驗於多個時間點進行 A、B 樣區採樣與鑑定，並探討其物種或 c-p 類群占比的變化。第一次、二次採樣探討長期變化，觀察較長期變化狀況，而後的採樣每 10 天採樣一次，觀察短期。

【實驗步驟】

1. 採樣後用柏門氏漏斗分離法分離線蟲，以微量吸管置於懸浮玻片。
2. 滴入 1 μ L，30%的甲醛，並等待 5 分鐘。
3. 至於光學顯微鏡下，以數位相機擷取重點型態辨識特徵。
4. 使用檢索表進行比對與鑑定，並在比對特徵描述後進行調整。
5. 以 c-p 與食性一覽表 (Cesarz, 2015) 作為依據分類食性與 c-p 並進行探討，並另外查詢 Nemaplex 中該屬線蟲食性，若不同，則以後者為準。

四、土壤食物網監測

(一)新型模式建立

參考文獻設並設計新型線蟲土壤食物網監測模式之模型。

【實驗步驟】

1. 據 Bongers 與 Bongers 1998 年以及 Ferris 等人 2001 年的設定、推論與學說設計 5 種指數。
2. 將各指數堆疊組成結構式立體模型表示線蟲於土壤中的組成架構。
3. 設計功能類群(層級)，並再次以 Bongers 與 Bongers 1998 年以及 Ferris 等人 2001 年的設定、推論與學說分類各指數與不同層級，以用於分析。
4. 因為植食性線蟲對於擾動的反應通常與非寄生性線蟲不同 (Ferris *et al.*,2001)，因此不納入模型考慮。

(二)新型模式探討與評估

本實驗將代入過去文獻採樣結果並做為參考進行對比。

【實驗步驟】

- 1.本實驗參考 Ettema 與 Bongers 於 1993 研究中記錄所採的線蟲數量與其 c-p 分類和食性。
- 2.代入所設計之模型計算，並用於探討線蟲功能群變化與模式可行性。

(三)採樣與數據分析

本實驗將考慮相對人為與自然 (A 校園步道與 C 山間土地)的環境進行線蟲採集，並代入個人採樣結果並進行探討。

【實驗步驟】

- 1.本實驗於樣區土壤採樣。其中樣區選擇 A (校園步道)、C 樣區(山間土地)，分別代表人為土地與自然土地。
- 2.以柏門氏漏斗分離法分離，並用前述實驗方式鑑定線蟲，並查詢所在 c-p 類群。
- 3.代入所建立之模型計算。

五、土壤養分調節-機制探討

(一)短期影響探討

使用含少量園線蟲的藝用靚土對比無線蟲的花卉培養土。觀察養分可用性與食物網組成變化，並進行探討。

【實驗步驟】

- 1.將 100g 的園藝靚土與花卉培養土置入盆栽中，並供水與曝氣靜置一週
- 2.每周以土壤多功能檢測器檢測土壤氮含量、濕度、導電度與 pH 值等，並保持土壤濕度。
- 3.於第六週取 10 g 土壤分離線蟲分析食物網組成。
- 4.相同流程進行三重複。

(二) 長期影響探討

以未處理園藝靚土與經乾熱滅菌之園藝靚土進行觀察，不過兩者皆經過更長時間的供水與靜置，比較食物網運作後期與養分可用性變化。

【實驗步驟】

1. 將 100g 的未處理的園藝靚土與經乾熱滅菌(170°C，1hr)園藝靚土置入盆栽中。
2. 水與曝氣靜置三週。
3. 其餘步驟與短期比較實驗相同。

六、土壤養分調節-植物實際生長影響探討

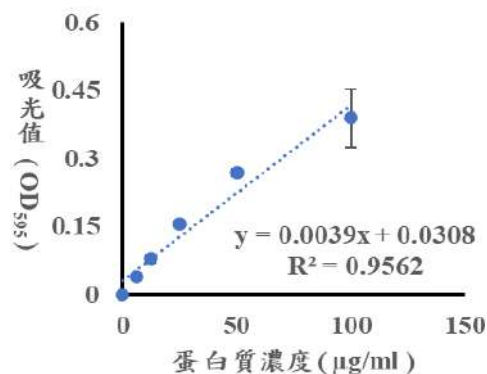
(一) 毛綠豆生長狀況探討

1. 將 100g 的未處理的園藝靚土與經乾熱滅菌(170°C，1hr)園藝靚土置入盆栽中，每個處理各三重複。
2. 播入毛綠豆種子，每盆播入 20 顆。
3. 觀察生長長度與發芽率，各盆每周皆取 5g 樣本與 10 ml ddH₂O 以研磨法破碎後混合均勻，作為萃取液使用，持續 6 周。
4. 萃取液蛋白質定量。

(1) 製備 Coomassie Brilliant Blue G-250 試劑，將 0.01 g Coomassie Brilliant Blue G-250、5 ml 95% Ethanol 與 10 ml 85% phosphoric acid 加入 100 ml ddH₂O 混合均勻。

(2) 以牛血清蛋白 (BSA) 作為標準品，並將 100 µg/ml BSA 稀釋為 50 µg/ml、25 µg/ml、12.5 µg/ml 與 6.25 µg/ml 的 BSA，將 BSA 標準液與 Coomassie Brilliant Blue G-250 試劑以 1 : 5 的比例混合均勻，反應 10 分鐘，紀錄 OD₅₉₅ 吸光值以繪製蛋白質檢量圖 (圖十五)

(3) 將 BSA 標準液與 64 倍稀釋後之綠豆萃取液以 5 : 1 的比例混合均勻並反應 10 分鐘紀錄 OD₅₉₅ 吸光值並換算蛋白質濃度。



圖(十五) 蛋白質檢量圖
(作者繪製)

七、數據分析方式

(一) 一般資料分析

以回歸分析、T 檢定(t-test)、單因子獨立變異數分析 (One-way ANOVA)、皮爾森相關係數 (PPMCC) 分析數據 ($p < 0.05$ 為顯著差異, $p < 0.01$ 為極顯著差異, $\pm 1 < P < \pm 0.6$ 為高度相關)

(二) 生物資料

用於生物資料的分析方法, 本研究中的功能群等分類也將以下列方式運算與分析。

1. 布雷—柯蒂斯相異度 (參考自柯, 2023)

考量「物種出現與否 (presence / absence)」及「豐度 (生物總數) (abundance)」, 且避免多筆生物類群數量皆為零的兩樣本被認定「相異度低」, 採用布雷—柯蒂斯相異度 (BrayCurtis Dissimilarity) 計算採樣點之間或不同時間點採樣的生物組成相異程度。

BC_{jk} 為 j 與 k 樣區相異度, C_{ij} 為 j、k 兩樣區比較物種的生物總數較小值, N_j 與 N_k 分別為 j 與 k 各樣區的生物總數, p 為分類群 (即 p=1 為第一群、p=2 為第二群.....共 p 群), 假設今 j 樣區有 A、B、C 物種各 6、7、4 隻, k 樣區有 A、B、C 物種各 10、0、6 隻, 則 $C_{jk} = 6 + 0 + 4 = 10$, $N_j = 6 + 7 + 4 = 17$, $N_k = 10 + 0 + 6 = 16$, $B_{jk} = 0.39$ (若 j 與 k 生物組成完全相同, 則 $BC_{jk} = 0$, 完全不同則 $BC_{jk} = 1$, 引此 BC_{jk} 若越大, 物種相異度越高)。相異度公式為:

$$BC_{jk} = 1 - \frac{2 \sum_{i=1}^p |N_{ij} - N_{ik}|}{\sum_{i=1}^p (N_{ij} + N_{ik})} = 1 - \frac{2C_{jk}}{N_j + N_k}$$

2. 物種優勢度指數

將用於運算物種於樣區或採樣時間下的相對優勢。優勢度公式:

$$\text{物種相對優勢度} = \frac{\text{物種覆蓋率}}{\text{總生物覆蓋率}}$$

3. Schoener 指數 (Schoener Index)

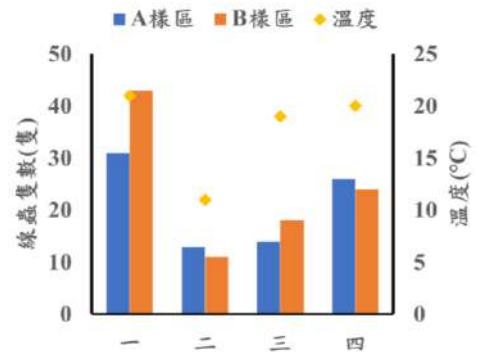
因為本研究中無法得知個別物種在無競爭下的發展能力, 故使用此指數描述物種間資源利用重疊率, 以表示競爭關係。模型中 O 表重疊率 (0~1), p_{Ai} 與 p_{Bi} 分別表示物種 A 與 B 的相對豐度 (即該資源類別的資源利用率), n 表示資源類別總數, 在本研究中共定義三種資源類別, 分別為土壤有機質 (間接競爭)、食物源 (直接競爭) 與被捕食壓力 (掠食者存在時), 表示掠食者或雜食性者存在、線蟲同食性時的競爭更強。指數公式 (此指數在運算上對數據質量依賴性過高, 且過於簡略, 本研究僅用於量化與比較相對競爭強度) ($1 > \text{重疊率} > 0.6$ 為高度重疊, 重疊率 = 1 為完全重疊, 重疊率 = 0 為不重疊):

$$O = 1 - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n |p_{Ai} - p_{Bi}|$$

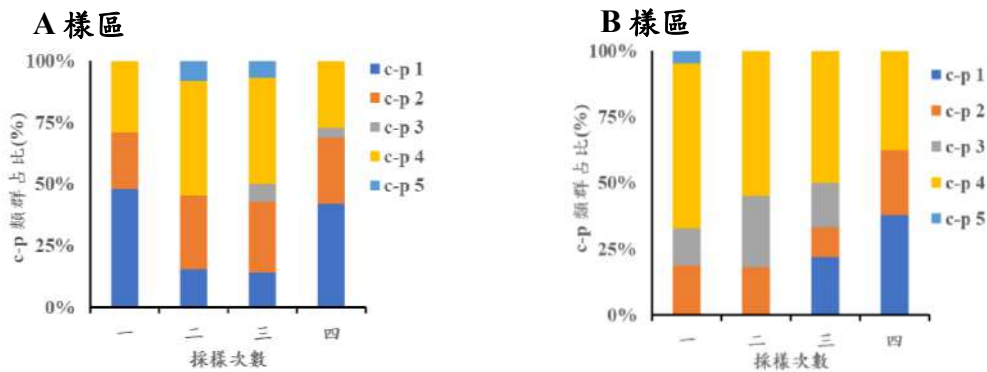
伍、研究結果

一、土壤線蟲分布初調查 (圖十六, 圖十七)

本實驗共四次於不同時間點在 A、B (校園內步道與休耕菜田) 樣區採樣, 其中第一次和第二次採樣探討長期變化 (50 日), 而之後的採樣每 10 天採樣一次。分別為, 其線蟲隻數分別為 A 樣區: 31、13、14、26 隻, B 樣區: 43、18、11、24 隻。



圖(十六) 各採樣次數線蟲隻數 (作者繪製)



圖(十七) 各採樣次數線蟲隻數 (作者繪製)

三、土壤功能監測

表(二) 研究背景與理念-線蟲功能群之概念參考來源與分類 (作者繪製)

架構層	NSMI (c-p)	功能群	物種科名(種數) (-表無資料)	架構層	NSMI (c-p)	功能群	物種科名(種數) (-表無資料)
基底架構層	NSMI-1 (c-p 2)	Ba2	Rhabditidae (482)	頂端架構層	NSMI-3 (c-p 3)	Fu3	-
			Cephalobidae (319)			Ca3	-
			Plectidae (165)			Om3	-
		Fu2	Aphelenchidae (26)		Ba4	Aliamidae (-)	
Aphelenchoidiae (-)	Fu4		Leptonchidae (115)				
機會架構層	NSMI-2 (c-p 1)	Ba1	Bunonematidae (53)		NSMI-4 (c-p 4)	Ca4	Mononchidae (125)
			Mohysteridae (301)			Om4	Doryliamoides (-) Qudsianematidae (419)
		Fu1	-			Ca5	Discoiamidae (-)
頂端架構層	NSMI-3 (c-p 3)	Ba3	Diplopeltidae (142)		NSMI-5 (c-p 5)	Om5	Aporceliamidae (-)
			Odontoliamidae (-)				Thornenemisiae (-)
			Prismatoliamida (-)				
			Teratocephalidae (24)				

概念參考基準: Bongers 和 Bongers 於 1998 的線蟲生活型態概述

(一)模式設計 (圖十八，圖十九)

搭配 c-p 指數與食性，設計了一套指數與一組監測模型，組合成為新的模式，將此模式稱為線蟲土壤架構監測 (Nematode soil Architecture Monitoring , NSM)，其組成為用線蟲土壤架構監測指數 (Nematode soil Architecture Monitoring Index , NSMI) 用階層排列而成的模型：線蟲土壤架構監測指數金字塔 (Nematode soil Architecture Monitoring Pyramid , NSMP)，其中額外分類各指數所屬的「架構層」。

本模式所使用新創名詞：

線蟲土壤架構監測 (Nematode soil Architecture Monitoring , NSM)：，由 NSMI 指數和 NSMP 模型等多種功能與圖表所組成，用以監測土壤架構的模式。

線蟲土壤架構監測指數(Nematode soil Architecture Monitoring Index , NSMI):模型組成指數。

線蟲土壤架構監測指數金字塔(Nematode soil Architecture Monitoring Pyramid , NSMP)：用於分析土壤組成架構與多種指標的分析模型。

Architecture Level：架構層級，建立在模型上的層級分類，每個層級都向上影響上方層級，其從下到上依序為：基底架構層、機會架構層與頂端架構層。此設計將利於一次觀察三種生活方式不同的線蟲群集大小變化。

另外，以金字塔的厚度表示相對線蟲隻數，用以輔助評估。但礙於設計軟體上的室礙難行，尚未應用於本研究中

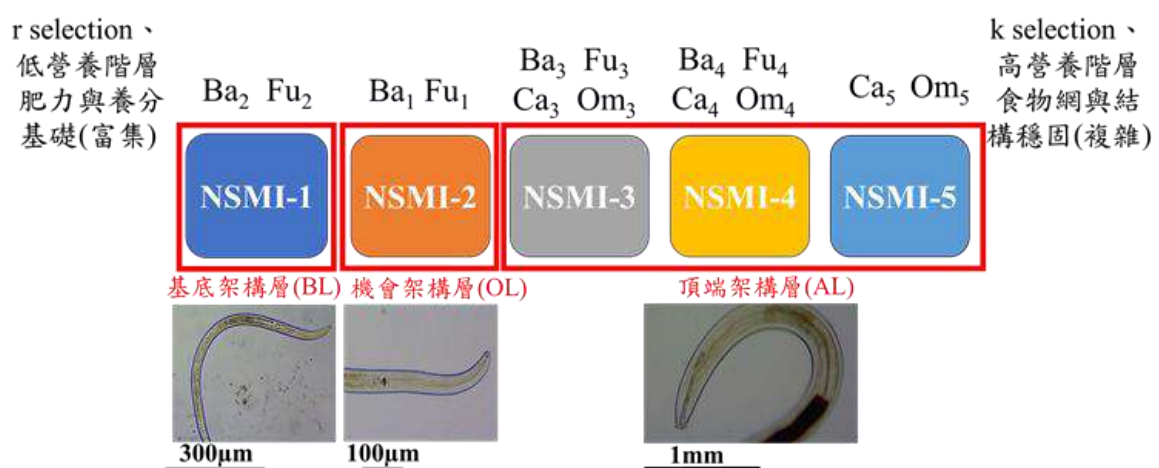


圖 (十八) 各 NSMI 利用 c-p 與食性和功能類群分類示意圖 (作者繪製)
本研究之分析方式(模型)，以四種指數組成。圖中標上各指數所利用 c-p 類群大致食性組成

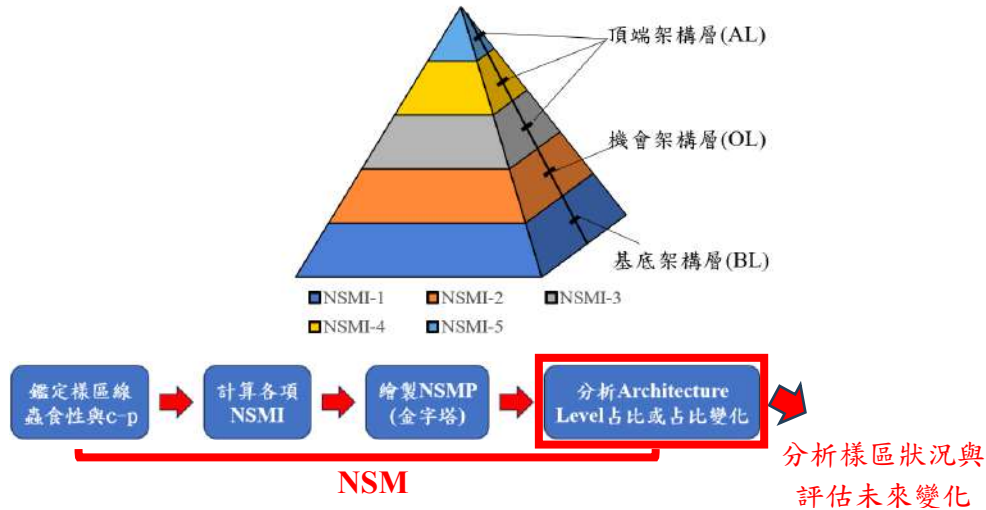


圖 (十九) NSMP 模型概念示意圖與 NSM 模式進行流程示意圖 (作者繪製)

各 NSMI 所表意義 (Ba=菌食性、Fu=真菌食性、Pl=植食性、Ca=獵食性、Om=雜食性)：

NSMI-1 : c-p 2，菌食性與真菌食性組成運算。公式：

$$NSMI-1 = \frac{c-p 2 \text{ 隻數} - Pl \text{ 隻數}}{\text{樣區線蟲隻數} - Pl \text{ 隻數}} \times 100\%$$

NSMI-2 : c-p 1，菌食性與真菌食性所組成運算。公式：

$$NSMI-2 = \frac{c-p 1 \text{ 隻數} - Pl \text{ 隻數}}{\text{樣區線蟲隻數} - Pl \text{ 隻數}} \times 100\%$$

NSMI-3 : c-p 3，菌食性、真菌食性、植食性、獵食性與雜食性組成運算。公式：

$$NSMI-3 = \frac{c-p 3 \text{ 隻數} - Pl \text{ 隻數}}{\text{樣區線蟲隻數} - Pl \text{ 隻數}} \times 100\%$$

NSMI-4 : c-p 4，獵食性與雜食性所組成。公式：

$$NSMI-4 = \frac{c-p 4 \text{ 隻數} - Pl \text{ 隻數}}{\text{樣區線蟲隻數} - Pl \text{ 隻數}} \times 100\%$$

NSMI-5 : c-p 5，獵食性與雜食性所組成。公式：

$$NSMI-5 = \frac{c-p 5 \text{ 隻數} - Pl \text{ 隻數}}{\text{樣區線蟲隻數} - Pl \text{ 隻數}} \times 100\%$$

各架構層所表意義：

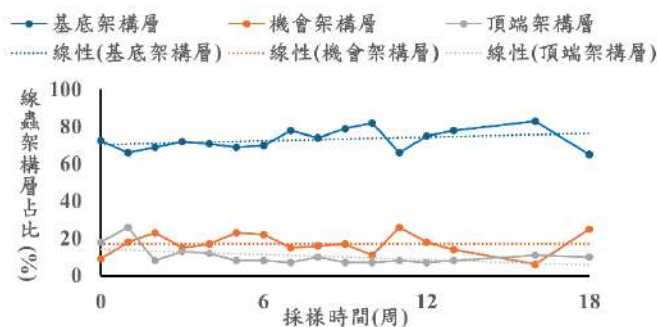
基底架構層 (Basal Level, BL): 由 NSMI-1 組成, 模型的基礎, 能夠生存於環境汙染或干擾高的環境, 族群的變動通常不大。此架構層的縮小影響其上方層級, 也顯示一地受到極強干擾或資源匱乏。

機會架構層 (Opportunity Level, OL): 由 NSMI-2 組成在土壤可用資源增加時, 能夠爆炸性的成長, 而在環境資源缺乏時, 進入休眠期或者族群銳減, 架構層的縮小可能影響其上方層級並代表環境資源的減少。

頂端架構層 (Apex Level, AL): 由 NSMI-3、NSMI-4 與 NSMI-5 組成, 層級受下方層級影響, 在環境變動或受干擾, 時可能最先受到影響, 而環境資源缺乏則最後受到影響。

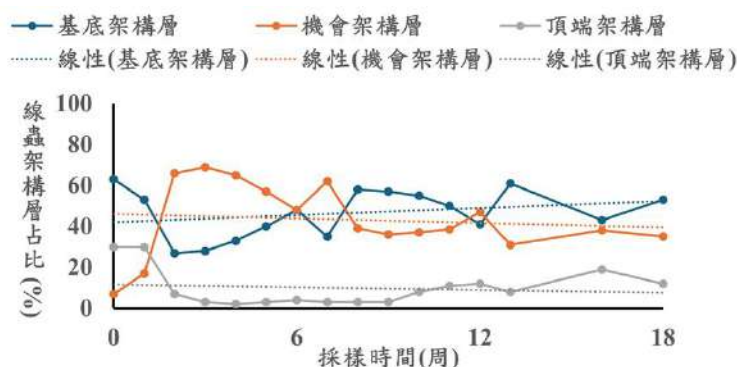
四、新型模式探討與評估

圖(二十)為分析文獻數據中將一土壤樣區未經處理第 0~18 週內各架構層級占比變化圖 (BL 為基底架構層, OL 為機會架構層, AL 為頂端架構層)。



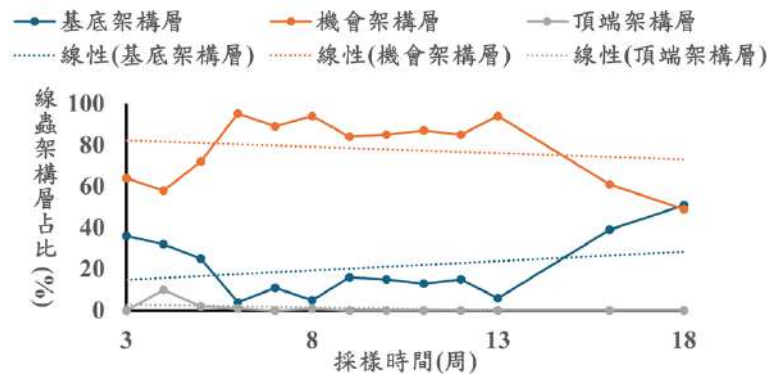
圖(二十) 樣區經牛糞施肥後初期線蟲各架構層占比變化(原始數據源自 Ettema & Bongers, 1993, 表二)
(BL 為基底架構層, OL 為機會架構層, AL 為頂端架構層)。(作者繪製)

圖(二十一)為分析文獻數據中將一土壤樣區進行粉狀牛糞施肥後, 第 0~18 週內各架構層級占比變化圖 (BL 為基底架構層, OL 為機會架構層, AL 為頂端架構層)。



圖(二十一) 樣區經牛糞施肥後初期線蟲各架構層占比變化(原始數據源自 Ettema & Bongers, 1993, 表二)
(BL 為基底架構層, OL 為機會架構層, AL 為頂端架構層)。(作者繪製)

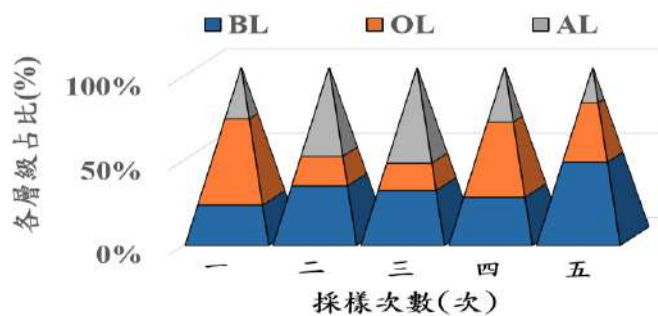
圖(二十二)析文獻數據中為一土壤樣區進行燻蒸處理後,3~18週內線蟲個架構層級占比變化圖。(BL為基底架構層,OL為機會架構層,AL為頂端架構層)。



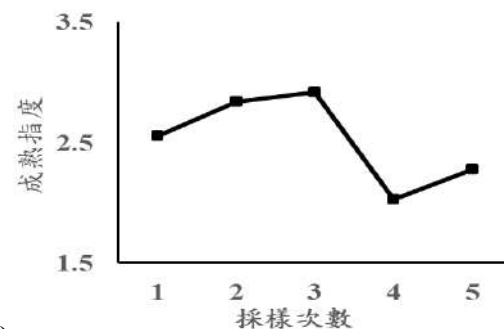
圖(二十二) 樣區經燻蒸後初期線蟲各架構層占比變化(原始數據源自 Ettema & Bongers, 1993, 表三)
(BL為基底架構層,OL為機會架構層,AL為頂端架構層)。(作者繪製)

五、個人採樣數據代入模型

下圖為A樣區(校園步道)的五次的採樣結果與其成熟指數變化,其中OL不穩定變化壓迫AL。(MI<2 高度干擾, 2<MI<3 表示中度干擾, MI>3 表示低度干擾)

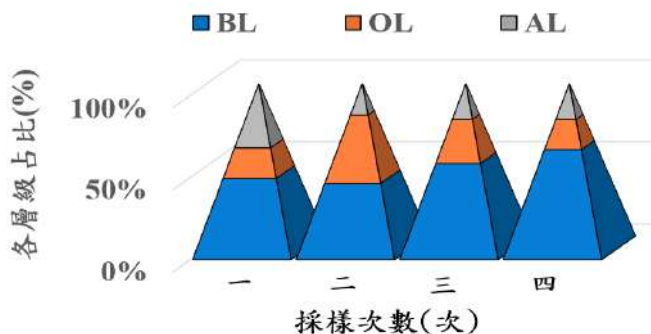


圖(二十三) 人為樣區線蟲各架構層占比變化(作者繪製)
(BL為基底架構層,OL為機會架構層,AL為頂端架構層)。

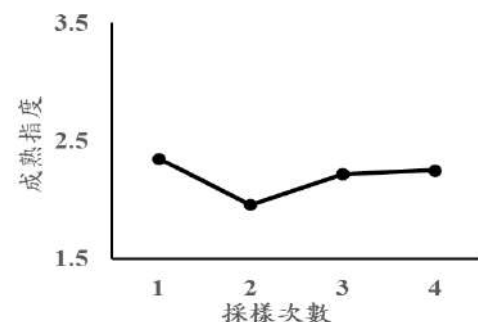


圖(二十四) A樣區成熟指數變化
(作者繪製)

下圖為C(山間土地)樣區的四次採樣結果與其成熟指數變化,因非人為樣區,物種發展與多樣性受到的限制較小。(MI<2 高度干擾, 2<MI<3 表示中度干擾, MI>3 表示低度干擾)



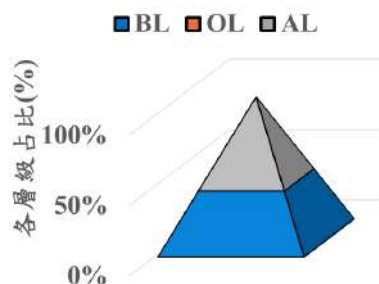
圖(二十五) 自然樣區線蟲各架構層占比變化(作者繪製)
(BL為基底架構層,OL為機會架構層,AL為頂端架構層)。



圖(二十六) C樣區成熟指數變化
(作者繪製)

六、土壤生態系服務調節探討-預備實驗

在此預備實驗中針對園藝用靚土進行分離並分析其食物網。而圖(二十七)為食物網的分析結果。(MI<2 高度干擾, 2<MI<3 表示中度干擾, MI>3 表示低度干擾)

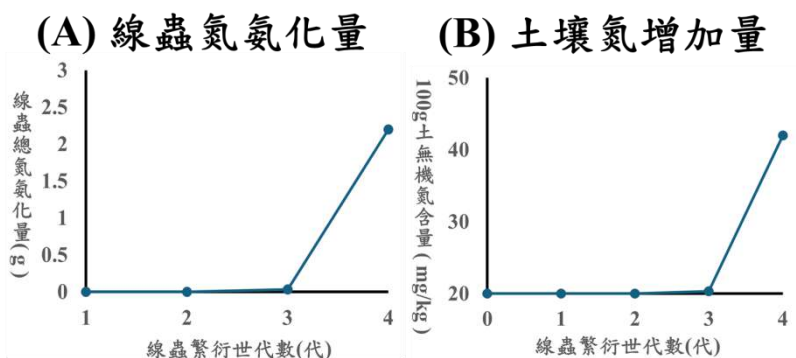


圖(二十七) 園藝用靚土線蟲個架構層占比 (成熟指數 = 3.17) (作者繪製)
(BL 為基底架構層, OL 為機會架構層, AL 為頂端架構層)。

七、土壤養分調節

線蟲的碳氮比 (C:N = 8~12) 通常高於其食物 (C:N = 4~8) (Anderson, 1983), 因此其攝入的氮高於自身生理所需, 會將氮轉為含氮廢物氮之後大量排出。Ferris 在 1998 的報告中所測量的單一菌食性線蟲一日最低氮礦化量為 $0.0012 \mu\text{g}$ ($0.0012 \mu\text{g-N nematode}^{-1} \text{d}^{-1}$), 為了預測線蟲氮化土壤氮的成效, 本研究初步設立了公式, 以得知理想狀況下土壤氮的增加效果: (Nem=起始線蟲數量, N=總氮氮化量, n=世代數。以上公式尚未考慮線蟲乾重、氮周轉率與環境因子等細節, 將於日後深入探討)

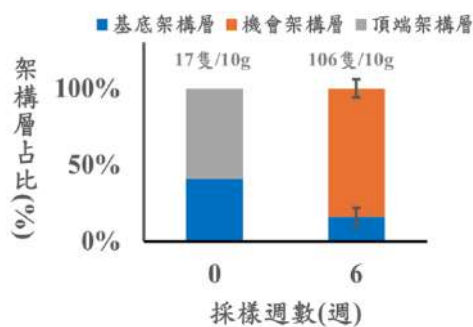
$$\Delta N = \sum_{i=1}^n 0.0012(i) \times \text{Nem}(i) \times f^{(n-1)}(i) \times d(i)$$



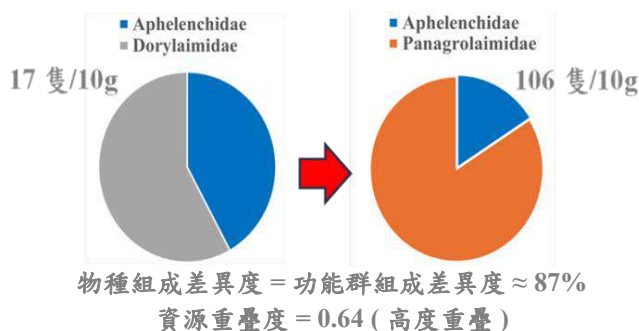
圖(二十八) 理想土壤無機氮含量變化
(生理機制參考 Panagrolaimidae) (作者繪製)

1. 短期影響探討 (圖二十九, 圖三十)

於六週後採收並分離園藝靚土，圖為土壤食物網、線蟲隻數與物種變化，物種組成差異度 = 功能群組成差異度 $\approx 87\%$ ，優勢物種由 Doryliamidae 轉為 Panagrolaimidae，且第 6 週時 Aphelenchidae 與 Panagrolaimidae (即機會架構層與基底架構層) 的資源重疊率 = 0.64，顯示兩族群仍間接高度競爭。



圖(二十九) 園藝靚土食物網組成變化
(作者繪製)

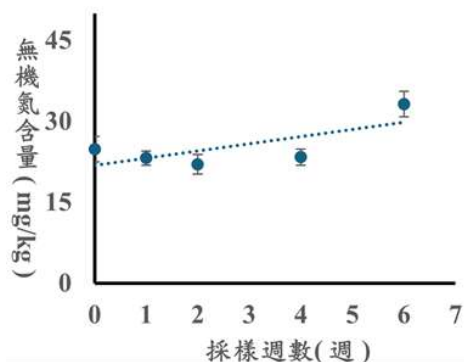


圖(三十) 線蟲物種占比與隻數變化圖
(作者繪製)

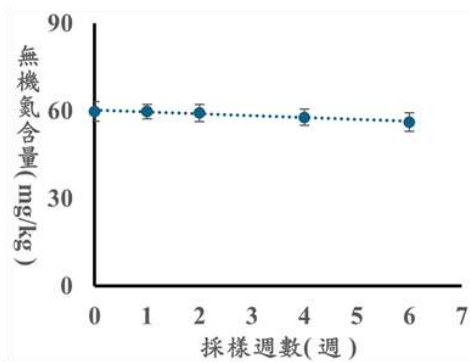
在每週進行土壤無機氮監測之後以圖表分析，下圖分別為園藝靚土與花卉培養土的無機氮變化。

根據公式，下圖為理想線蟲土壤氮氮化能力圖與實際結果之比較。

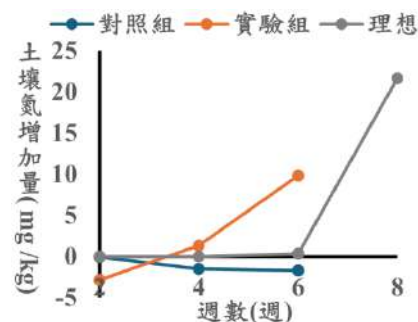
園藝靚土(實驗組)



花卉培養土(對照組)



圖(三十一) 土壤無機氮含量變化 (作者繪製)



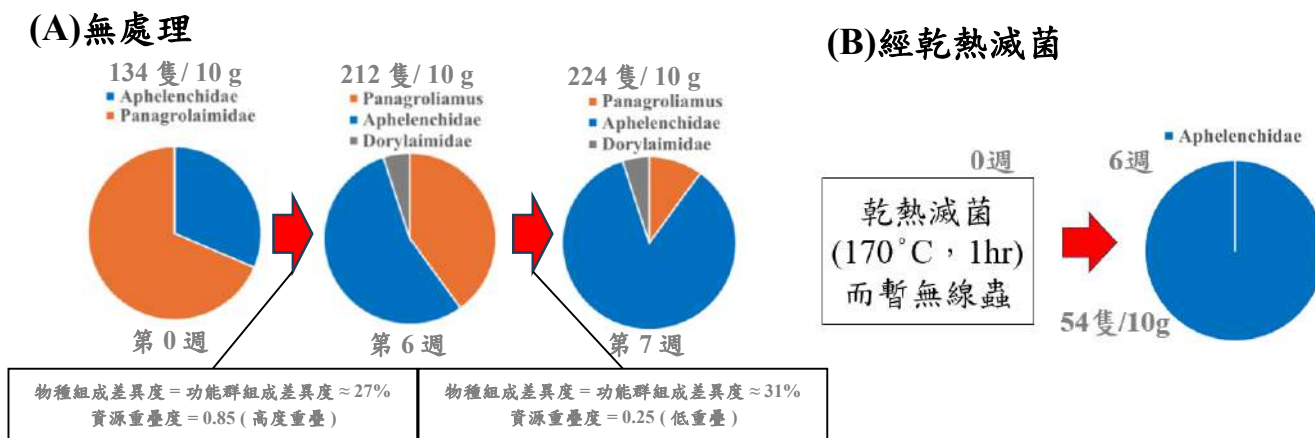
圖(三十二) 理想與實際土壤無機氮含量變化比較 (作者繪製)

2. 長期影響探討

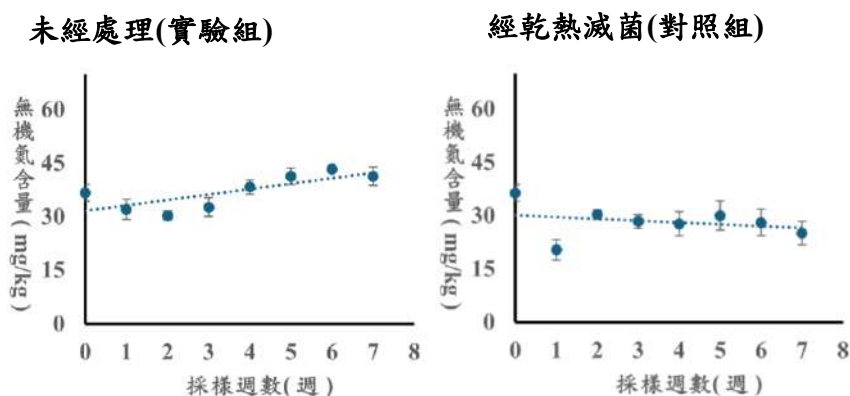
於六週後採收並分離園藝靚土，圖為土壤食物網、線蟲隻數與物種變化，由於結果較複雜，採分段討論。第 0 週與第 6 週的物種組成差異度 = 功能群組成差異度 $\approx 27\%$ ，優勢種由 Panagrolaimidae 轉為 Aphelenchidae，且第六周 Aphelenchidae 與 Panagrolaimidae (即機會架構層與基底架構層) 的資源重疊率 = 0.85 (考慮雜食性者給予的獵食壓力)，兩族群間接高度競爭，不過造成的族群演替較不明顯；第 6 週至第 7 週物種組成差異度 = 功能群組成差異度 $\approx 31\%$ ，且第 6 週 Aphelenchidae 與 Panagrolaimidae (即機會架構層與基底架構層) 的資

源重疊率 = 0.25 (考慮雜食性者給予的獵食壓力)，競爭轉弱，不過族群演替稍微增高。以上雜食性者 Dorylaimidae 共同競爭其他資源，可能造成結果誤差。目前正持續進行更長時間的觀測與探討。

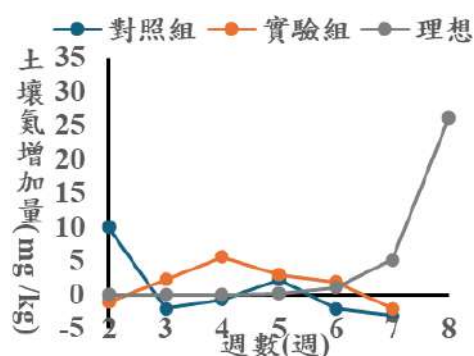
經乾熱滅菌隻土壤在第 6 週後發展出線蟲族群，但僅具單一物種與功能群，不構成食物網，故不討論族群間競爭與物種相異度等，但不排除種內的競爭狀況。



圖(三十三) 線蟲物種占比與隻數變化圖 (作者繪製)



圖(三十四) 土壤無機氮含量變化 (作者繪製)

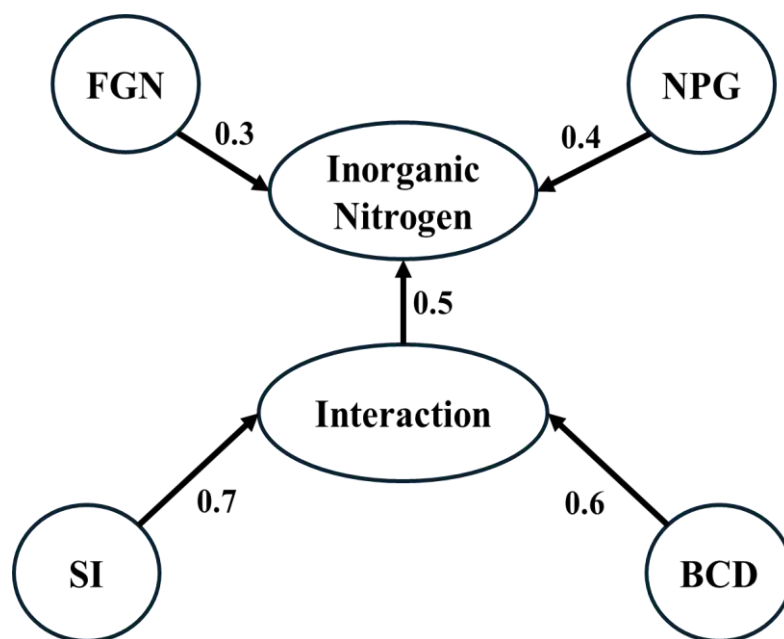


圖(三十五) 理想與實際土壤無機氮含量變化比較 (作者繪製)

2. 相關性比較 (圖三十六)

結合上述兩種實驗，繪製各種變因對土壤無機氮的影響模型圖，假設潛在的變因有線蟲的競爭強弱 (Interaction)、線蟲族群大小成長數 (Nematode Population Growth, NPG) 與線蟲功能群數 (Functional Groups Number, FGN)，並且定義交互作用為物種組成相異度 (Bray-Curtis dissimilarity, BCD) 與資源重疊率 (Schoener Index, SI) 的綜合結果。此結果的前提於土質組成不會顯著影響土壤無機氮含量，且將線蟲透過影響細菌活性、競爭與豐度所間接造成的影響定義為直接的影響 (即未討論中介因子)。數字為因子間的皮爾森相關係數，結果顯示線蟲的交互作用、族群大小與功能群數目 (食物網複雜程度) 皆與土壤無機氮

有正相關關係，其中又以交互作用最為明顯，且促成競爭強弱的主導因子為資源重疊率，即競爭強度將影響土壤無機氮的供應。



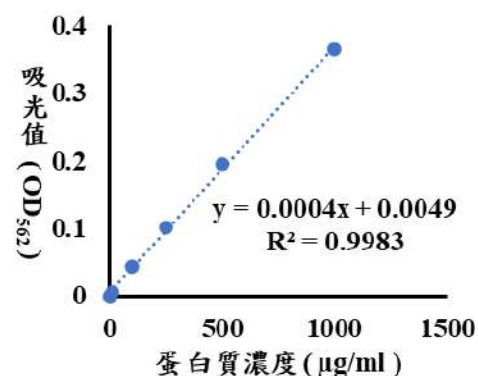
圖(三十六) 土壤無機氮與相關變因相關性模型(作者繪製)

FG: 線蟲功能群數；NPG:線蟲族群大小成長數

BCD: 交互作用為物種組成相異度；SI:資源重疊率

八、植物實際生長影響探討-預備實驗(圖三十七)

為測試毛綠豆在研磨破碎的效果，先行利用超音波破碎儀進行破碎，並在 8 倍稀釋後使用 Elisa Reader 以 BCA Protein Assay kit 進行蛋白質定量作為標準，方便日後對照作為參考值使用，以免過大的誤差發生。



圖(三十七) 蛋白質檢量圖
(作者繪製)

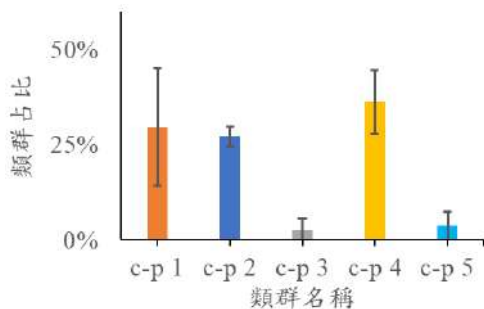
陸、討論

一、土壤線蟲相調查

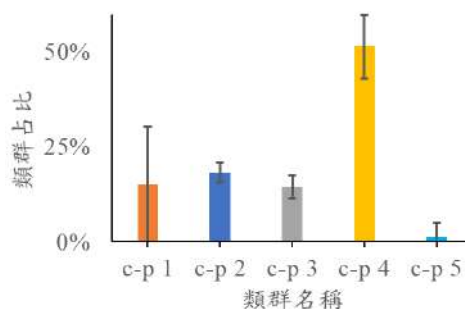
從圖(十六)可以得知，線蟲總數將隨不同日期之溫度等環境因子而變化。線蟲可能因溫度降低，而在溫度驟降後幾天中族群量縮減或活動力下降(難以被分離)。

二、土壤線蟲分布之探討 (圖三十八, 圖三十九, 圖四十)

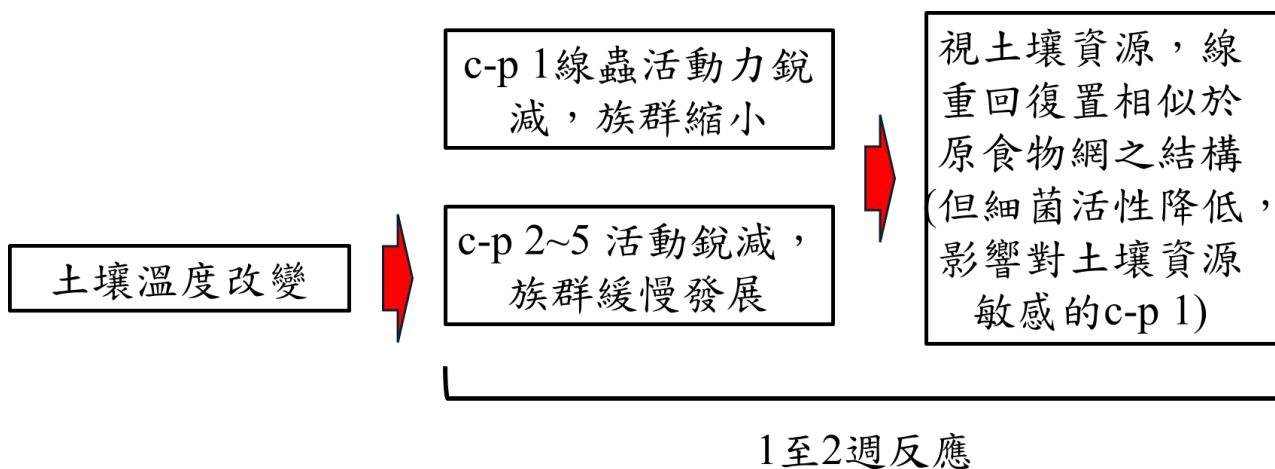
從圖可以得知, 群落變化以 c-p 2 相對穩定, c-p 1 則隨著日期不同有著顯著的變化, 而 c-p 5 則是時有時無的出現, 以上狀況已幾乎符合 Bongers 或 Ferris 等人對於 c-p 指數與類群的假設與論點。但是, 結果中較無法解釋的, c-p 3 與 c-p 4 作為 k 策略線蟲, 族群的繁衍與死亡短期內變化並應該要相對穩定。猜測其占比減少原因可能為 c-p 1 的快速成長或 c-p 2 的些微成長, 壓縮 c-p 3 與 c-p 4 的占比。



圖(三十八) A 樣區類群占比 (作者繪製)
其中個類群占比占比為圖(十五)中四次採樣平均值



圖(三十九) B 樣區類群占比 (作者繪製)
其中個類群占比為圖(十六)中四次採樣平均值



圖(四十) 線蟲對溫度變化反應機制推測

五、模式建立

本研究使用了一種新的模式, 用於統整樣區出現的線蟲功能群, 但不討論植食性線蟲的方式呈現, 以此種方式運算隻依據為 Bongers 在多篇報告中提出的論點, 他表示植食性隻線蟲對於環境干擾, 所做出的反應往往異於其他食性。另外, 此模型以立體金字塔圖的形式呈現, 並將 c-p 2 歸類於基底架構層, 安排在模型的最底端, 顯現生態架構之組成。

五、新型模式探討與評估 (表三)

本研究代入了文獻 (Ettema & Bongers, 1993) 的初始數據。其中，使用此模型的優勢，在於可顯著觀察族群架構組成上的變化。在原始報告中的數據，以 MI 變化折線圖分析，雖然可以直接了解干擾與成熟度的變化，但難以觀察線蟲功能群組成的改變 (如圖三十二，A) ；另外，在代入文獻中經燻蒸處理 (圖二十二) 的土壤採樣結果時，**土壤肥力沒有顯著增加，機會架構層占比卻爆發性的提升，因此推測過高的擾動可能阻礙模式的運作。**

表(三) 新建立模式與過去模式差異 (作者繪製)

分析方向	優勢	劣勢	參考資料
連續性土壤食物網組成 (功能群) 變化	可預測結構變化並擴展功能	需要長期採樣且分析在過高或過低的擾動下受影響	本研究
環境擾動變化	通常具加權	通常無法觀察土壤食物網組成變化並預測	如 Bongers, 1998 Ferris <i>et.al</i> , 2001 等

六、採樣與數據分析

本實驗於樣區進行採集與分離，並初步代入模型。結果中，A 樣區可視的主要占比變化為機會架構層，但其實因為被壓縮僅只有頂端層的占比，證明基底層族群也在成長，但不如機會層占比那般不穩定，這符合過去關於線蟲各 c-p 類群特性的敘述，在資源沒有大量增加的狀況下，機會層不穩定變化，而基底層作為主要由菌食性與真菌食性組成的線蟲，則可能跟著緩慢成長，推測樣區架構狀況穩定，但相較於前人研究顯示的數據，基底層之占比略顯不足，養分並不富集。C 樣區分析結果與前人數據代入的圖形較為接近，推測是因為其為非人為環境，受人為物種多樣性的限制較小。另外，未來對於以二名法與學名歸類線蟲的方式應該減少，而是以功能群等在生態中具相同功能與生活方式的分類方法以方便模式的使用。

七、土壤功能性調控探討-預備實驗

而針對圖 (二十七) 的食物網架構，可發現肥力極高的靚土卻缺乏機會架構層的出現，推論人為環境中的干擾過低而助長優勢線蟲物種的發展，使後期物種 (以本研究為例如 *Dorylaimus .sp*) 取代先鋒物種，也再次驗證了個人數據帶入中對校園步道等人為環境 (多過度穩定) 生物多樣性低所做出的假設。

八、土壤養分調節探討

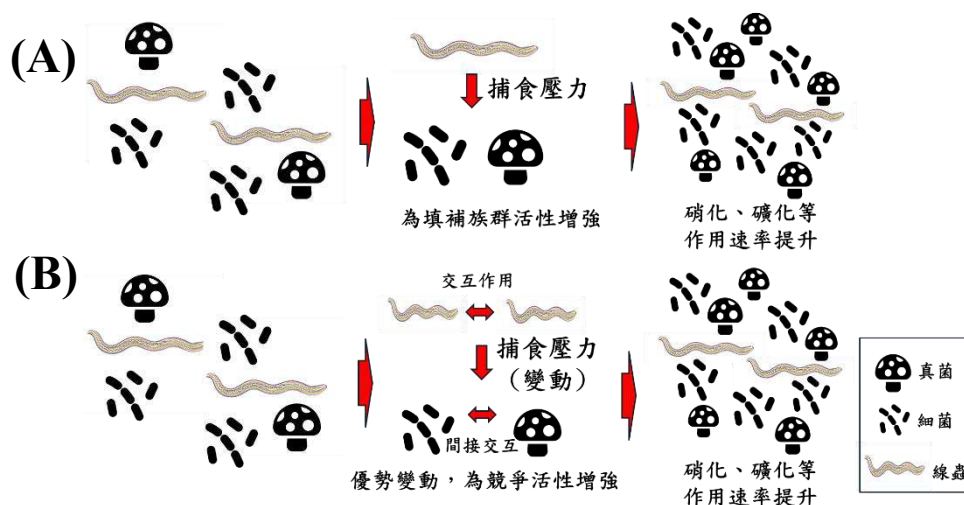
首次實驗結果中，含線蟲的園藝靚土的土壤無機氮含量一直呈下降趨勢，直至第四週才有顯著的增長，且於六週內提升約 37% 。而在土壤食物網的組成變化中，六週來線蟲優勢科由 *Dorylaimidae* (Om₄) 轉為 *Panagrolaimidae* (Ba₄) ，生物組成差異約 87 % ，顯示線蟲相的改變巨大，資源重疊率約 0.64，族群間存在顯著競爭。結合預測結果，受極大干擾 (平均含

水量從不足 2% 增加至 30% 以上，曝氣) 後的土壤，線蟲的食物網運作重新發展至特定時段時能顯著提升土壤無機氮，機制上不清楚。另外，在不具線蟲的土壤中，無機氮雖無大量損失，但也緩慢下降，可能為被利用或固氮的結果。透過以上結果，推測優勢取代的時間點或機會架構層族群大小的成長為影響線蟲族群氮化能力提升的關鍵因素之一。假設線蟲的交互作用、食物網複雜性與族群大小能夠主導土壤無機氮的變化，並且由結果已可得知由先鋒物種(pioneer species) 菌食性 c-p 1 線蟲 (Ba₁) 主導的食物網結果能在短期內變化，需探討食物網運作在演替後期的成效。關於線蟲族群的優勢取代，推測為土壤原本缺乏微生物且為乾燥環境 (HUM < 2%)，使原本存在於土壤中的 Panagrolaimidae 進入 dauer 狀態 (滯育期)，不過在環境資源充足後恢復活動並大量繁殖 (該物種為極端 r 選擇物種)，使線蟲豐度由 17 隻/10 g 提升至 106 隻/10 g。若假設為真，此機制可應用在環境貧脊的土壤，復育同時可藉由干擾或其他途徑加強線蟲食物網的運作。

在第二次實驗結果中，由於土壤經更長時間的前處理與靜置，展示了由相對後期物種線蟲 (Fu₂) 主導食物網的結果，並可以得知在 0~6 週土壤無機氮仍可緩慢提升，不過於第 7 週之後便開始下降。在土壤食物網組成變化中，可觀察到由先鋒物種逐漸由先鋒物種 (Panagrolaimidae , Ba₁) 失去災後群系 (disaster taxon) 之優勢後的結果。0~6 週生物組成差異皆不大，但從主要物種間資源重疊率達 0.85 能得知其顯著競爭。此次實驗結果，土壤無機氮無大量成長的情況 (六週內提升 16%)，從初始無機氮濃度可推測已經大量過成長一段時間；而線蟲的組成尚未達到巔峰群集，仍持續在演替，日後可觀察不再演替的狀況。有趣的是，在對照組已利用乾熱滅菌高溫殺死生物的結果中，在第 6 週時仍有線蟲出現，但僅一個科別，一個功能群，食物網運作不完全。透過此實驗、較短期的實驗與對照組結果，可驗證先前的假說；並且透過相關係數分析，能發現土壤無機氮含量與交互作用、食物網複雜性與族群大小皆呈正相關，其中又以交互作用的影響最明顯 ($P \approx 0.5$)，且影響交互作用強弱的主因為資源競爭強度 ($P \approx 0.7$)，其次為演替的物種相異度 ($P \approx 0.6$)。

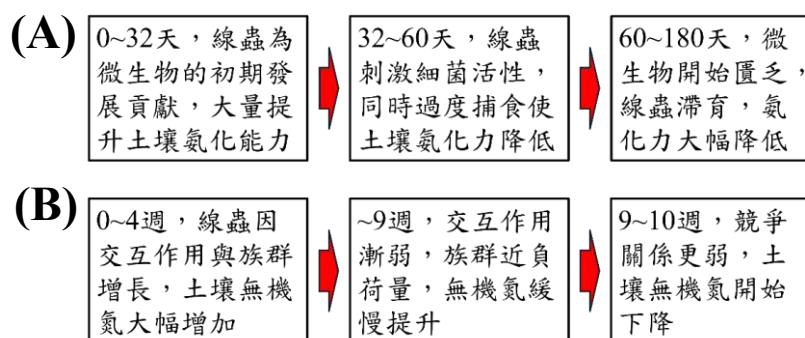
過去研究皆顯示線蟲的「存在 (presence)」顯著了影響土壤有效氮， (Bouwman *et al.*, 1994 ; Fu *et al.*, 2005 ; Gebremikael *et al.*, 2016 ; Shi *et al.*, 2023 ; Xiao *et al.*, 2010)。線蟲原本便藉施加捕食壓力強化細菌活性與豐度，以本研究實驗來看，推測真菌與細菌食性線蟲間的交互作用影響細菌與真菌間受到的捕食壓力，間接更激烈的競爭與分解土壤養分 (硝化增強)，並改變細菌群落，但是否並非土壤氮影響線蟲交互作用仍待實驗探討。在 Bouwman 等人得研究指出，線蟲存在的土壤在前兩個月總氮化量顯著增加，而後減少，並進一步分類不同時間下的影響，如前 32 日透過直接氮化提升微生物的定殖，32~60 日，雖給予微生物獵食壓力刺激活性，不過也因過度攝食使氮化量降低，且在此時段之後 60 日若無外來資源導入，

微生物可能變得匱乏，線蟲減少，氮化能力大幅降低。相比與前人針對微生物與線蟲間的關係，本研究則觀察土壤食物網的運作趨勢提出另一種看法，並且得到相近的結果，不同之處在於氮化量的降低不一定為線蟲減少，也可能是物種演替的幅度降低。



圖(四十一) 前人與本研究推測土壤線蟲間接氮化機制比較 (作者繪製)

(A)前人結果(Bouwman *et al.* , 1994)。(B)本研究推測機制



圖(四十二) 前人研究與本研究主要結果 (作者繪製)

(A)前人結果 (Bouwman *et al.*, 1994)。(B)本研究結果 (時間尺度包含靜置 3 週的時間)。

柒、結論

建立以觀察土壤線蟲功能群組成、交互作用與群集大小，分析土壤食物網組成的模式，但過高的成熟指數 ($MI > 3$) 下可能影響模式分析。發現土壤中線蟲的交互作用、族群大小與功能群數量與土壤的無機氮含量有正相關關係，線蟲可能藉食物網運作以直接與間接氮化的方式顯著加快土壤中的氮流動效率，不過氮化能力在食物網發展初期 (六週內提升 37%) 與後期 (六週內僅提升 16%) 不同，可能與族群的交互作用減弱或微生物過度被捕食有關。如何將以上這些機制與結果用於農業管理、土壤優化或生態保育上，了解土壤潛在資源與提供土壤持續性生產力將會是未來的發展方向。

捌、未來展望

希望未來能夠在更長期的實驗中實踐以線蟲監測並調節土壤食物網的方式，探討如何更快速且長效的利用線蟲生態系服務調節土壤與分析土壤食物網，改善模式的分析在擾動過高或過低造成影響的問題，並且以接種實驗驗證線蟲食物網的運作確實能有效協助植物生長與土壤養分流動，使線蟲可長時間地監測與提升土壤生產力。

另外，全球尚有 2.8 億的飢餓人口，約 33% 的土壤生物多樣性遺失等問題，期望未來深入探討並建立標準化模式，實際以線蟲監測並調節土壤生態系服務，並協助農夫、生態學家與保育學家利用，真正實踐土地的永續發展與利用。

玖、參考資料文獻

一、期刊、報告、論文、書籍

- (一) 李彥廷 (2012)。分離鑑定食真菌性線蟲並評估其生物防治潛力 (學士論文)。台灣博碩士論文加值系統。
- (二) 林宏澤 (2019)。線蟲捕捉菌中高保守性但具可塑性之獵物感受訊息傳遞系統。國立台灣大學基因體與系統生物學學系。
- (三) 何姿穎 (2012)。台灣中部土壤線蟲豐度與多樣性的海拔分布。國立成功大學生命科學系。
- (四) 吳秀珍 (2009)。線蟲作為河川污染生物指標之模式建立。國立中興大學植物病理學系。
- (五) 柯絲昀 (2023)。2023 年台灣國際科學展覽會作品說明書：探討不同型態的海底峽谷對底棲動物群聚結構的影響。
- (六) Anderson, R. V., Gould, W. D., Woods, L. E., Cambardella, C., Ingham, R. E., & Coleman, D. C. (1983). Organic and inorganic nitrogenous losses by microbivorous nematodes in soil. *Oikos*, 75-80.
- (七) Asiedu, O., Kwoseh, C. K., Melakeberhan, H., & Adjei-Gyapong, T. (2019). Nematode distribution in cultivated and undisturbed soils of Guinea Savannah and Semi-deciduous Forest zones of Ghana. *Geoscience Frontiers*, 10(2), 381-387.
- (八) Austin, E., Semmens, K., Parsons, C., & Treonis, A. (2009). Granite rock outcrops: an extreme environment for soil nematodes?. *Journal of nematology*, 41(1), 84.
- (九) Bogale, M., Baniya, A., & DiGennaro, P. (2020). Nematode Identification Techniques and Recent Advances. *Plants (Basel, Switzerland)*, 9(10), 1260.
- (十) Bongers, T., & Bongers, M. (1998). Functional diversity of nematodes. *Applied soil ecology*, 10(3), 239-251.

- (十一) Bongers, T., & Ferris, H. (1999). Nematode community structure as a bioindicator in environmental monitoring. *Trends in Ecology & Evolution*, 14(6), 224-228.
- (十二) Bongers, T., van der Meulen, H., & Korthals, G. (1997). Inverse relationship between the nematode maturity index and plant parasite index under enriched nutrient conditions. *Applied Soil Ecology*, 6(2), 195-199.
- (十三) Bouwman, L. A., Bloem, J., Van den Boogert, P. H. J. F., Bremer, F., Hoenderboom, G. H. J., & De Ruiter, P. C. (1994). Short-term and long-term effects of bacterivorous nematodes and nematophagous fungi on carbon and nitrogen mineralization in microcosms. *Biology and Fertility of Soils*, 17, 249-256.
- (十四) Carta, L. K., & Li, S. (2018). Improved 18S small subunit rDNA primers for problematic nematode amplification. *Journal of Nematology*, 50(4), 533-542.
- (十五) Cesarz, S., Eva Schulz, A., Beugnon, R., & Eisenhauer, N. (2019). Testing soil nematode extraction efficiency using different variations of the Baermann-funnel method. *Soil organisms*, 91(2), 61-72.
- (十六) Cesarz, S., Reich, P. B., Scheu, S., Ruess, L., Schaefer, M., & Eisenhauer, N. (2015). Nematode functional guilds, not trophic groups, reflect shifts in soil food webs and processes in response to interacting global change factors. *Pedobiologia*, 58(1), 23-32.
- (十七) Van Den Hoogen, J., Geisen, S., Routh, D., Ferris, H., Traunspurger, W., Wardle, D. A., ... & Crowther, T. W. (2019). Soil nematode abundance and functional group composition at a global scale. *Nature*, 572(7768), 194-198.
- (二十) De Goede, R. G. M., Georgieva, S. S., Verschoor, B. C., & Kamerman, J. W. (1993). Changes in nematode community structure in a primary succession of blown-out areas in a drift sand landscape. *Fundamental and applied nematology*, 16(6), 501-513.
- (十八) Du Preez, G., Daneel, M., De Goede, R., Du Toit, M. J., Ferris, H., Fourie, H., ... & Schmidt, J. H. (2022). Nematode-based indices in soil ecology: Application, utility, and future directions. *Soil Biology and Biochemistry*, 169, 108640.
- (十九) Ettema, C. H., & Bongers, T. (1993). Characterization of nematode colonization and succession in disturbed soil using the Maturity Index. *Biology and Fertility of Soils*, 16, 79-85.
- (二十) Ferris, H., Lau, S., & Venette, R. (1995). Population energetics of bacterial-feeding nematodes: respiration and metabolic rates based on CO₂ production. *Soil Biology and Biochemistry*, 27(3), 319-330.
- (二十一) Ferris, H. V. R. C., Venette, R. C., Van Der Meulen, H. R., & Lau, S. S. (1998). Nitrogen mineralization by bacterial-feeding nematodes: verification and measurement. *Plant and Soil*, 203, 159-171.
- (二十二) Ferris, H., Bongers, T., & de Goede, R. G. (2001). A framework for soil food web diagnostics: extension of the nematode faunal analysis concept. *Applied soil ecology*, 18(1), 13-29.
- (二十三) Ferris H. (2010). Contribution of nematodes to the structure and function of the soil food web. *Journal of nematology*, 42(1), 63-67.

- (二十四) Fu, S., Ferris, H., Brown, D., & Plant, R. (2005). Does the positive feedback effect of nematodes on the biomass and activity of their bacteria prey vary with nematode species and population size?. *Soil Biology and Biochemistry*, 37(11), 1979-1987.
- (二十五) Gebremikael, M. T., Steel, H., Buchan, D., Bert, W., & De Neve, S. (2016). Nematodes enhance plant growth and nutrient uptake under C and N-rich conditions. *Scientific reports*, 6, 32862.
- (二十六) Hoschitz, M., & Kaufmann, R. (2004). Soil nematode communities of Alpine summits—site differentiation and microclimatic influences. *Pedobiologia*, 48(4), 313-320.
- (二十七) Hyvönen, R., & Persson, T. (1990). Effects of acidification and liming on feeding groups of nematodes in coniferous forest soils. *Biology and Fertility of Soils*, 9, 205-210.
- (二十八) Khan, Z., & Kim, Y. H. (2007). A review on the role of predatory soil nematodes in the biological control of plant parasitic nematodes. *Applied soil ecology*, 35(2), 370-379.
- (二十九) Lavelle, P., & Spain, A. (2002). Soil ecology. Springer Science & Business Media.
- (三十) Lewis, E. E., Grewal, P. S., & Sardanelli, S. (2001). Interactions between the *Steinernema feltiae*–*Xenorhabdus bovienii* insect pathogen complex and the root-knot nematode *Meloidogyne incognita*. *Biological Control*, 21(1), 55-62.
- (三十一) Li, G., Liu, T., Whalen, J. K., & Wei, Z. (2024). Nematodes: an overlooked tiny engineer of plant health. *Trends in Plant Science*, 29(1), 52-63.
- (三十二) Masciandaro, G., Macci, C., Peruzzi, E., & Doni, S. (2018). Soil carbon in the world: ecosystem services linked to soil carbon in forest and agricultural soils. In *The future of soil carbon* (pp. 1-38). Academic Press.
- (三十三) McSorley, R., & Frederick, J. J. (2004). Effect of extraction method on perceived composition of the soil nematode community. *Applied Soil Ecology*, 27(1), 55-63.
- (三十四) Nie, X., Shi, Y., Wang, L., Abudurehman, W., Yang, J., & Lin, C. (2024). Study on the mechanism of magnesium calcium alloys/mineralized collagen composites mediating macrophage polarization to promote bone repair. *Heliyon*, 10(9),
- (三十五) Obed Asiedu et al.(2019) ◦ Nematode distribution in cultivated and undisturbed soils of Guinea ◦ Savannah and Semi-deciduous Forest zones of GhanaGeoscience Frontiers Volume 10,Issue 2,381-387 ◦
- (三十六) Schmidt, J. H., Hallmann, J., & Finckh, M. R. (2020). Bacterivorous nematodes correlate with soil fertility and improved crop production in an organic minimum tillage system. *Sustainability*, 12(17), 6730.
- (三十七) Shi, G., Luan, L., Zhu, G., Zeng, Z., Zheng, J., Shi, Y., ... & Jiang, Y. (2023). Interaction between nematodes and bacteria enhances soil carbon sequestration under organic material amendments. *Frontiers in Microbiology*, 14, 1155088.
- (三十八) Sun, X., Zhang, X., Zhang, S., Dai, G., Han, S., & Liang, W. (2013). Soil nematode responses to increases in nitrogen deposition and precipitation in a temperate forest. *PloS one*, 8(12).

- (三十九) Tintori, S. C., Sloat, S. A., & Rockman, M. V. (2022). Rapid isolation of wild nematodes by Baermann funnel. *JoVE (Journal of Visualized Experiments)*, (179), e63287.
- (四十) Treonis, A. M., Unangst, S. K., Kepler, R. M., Buyer, J. S., Cavigelli, M. A., Mirsky, S. B., & Maul, J. E. (2018). Characterization of soil nematode communities in three cropping systems through morphological and DNA metabarcoding approaches. *Scientific reports*, 8(1), 2004.
- (四十一) Tsai, B. Y., & Yeh, H. L. (1995). Effect of *Steinernema carpocapsae* Weiser on the Infectivity of *Pratylenchus coffeae* (Zimmermann) Filipjev & Schuurmans Stekhoven and *Meloidogyne javanica* (Treub) Chitwood. 植物病理學會刊, 4(3), 106-110.
- (四十二) Xiao, H., Griffiths, B., Chen, X., Liu, M., Jiao, J., Hu, F., & Li, H. (2010). Influence of bacterial-feeding nematodes on nitrification and the ammonia-oxidizing bacteria (AOB) community composition. *Applied Soil Ecology*, 45(3), 131-137.
- (四十三) Yeates, G. W., Bongers, T., De Goede, R. G., Freckman, D. W., & Georgieva, S. (1993). Feeding habits in soil nematode families and genera—an outline for soil ecologists. *Journal of nematology*, 25(3), 315.
- (四十四) Yeates, G. W., & Bongers, T. (1999). Nematode diversity in agroecosystems. In *Invertebrate biodiversity as bioindicators of sustainable landscapes* (pp. 113-135). Elsevier.

二、網站

- (一) Nematode world。2023 年 12 月，取自 <https://nematode.unl.edu/index.html>
- (二) UNL Nematology Lab。Interactive Diagnostic Key to Plant Parasitic, Freelifving and Predaceous Nematodes。2024 年 1 月，取自 <https://nematode.unl.edu/key/nemakey.htm>
- (三) Nemaplex。2024 年 2 月，取自 <http://nemaplex.ucdavis.edu>
- (四) 化學、有機質、微生物肥料，怎麼選？摸透肥料的個性，對症下料。台灣農業知識入口網。2024 年五月，取自 https://kmweb.moa.gov.tw/theme_data.php?theme=news&sub_theme=variety&id=55556

【評語】 180002

本研究建立以觀察土壤線蟲功能群組成、交互作用與群集大小，分析土壤食物網組成的模式。發現土壤中線蟲的交互作用、族群大小與功能群數量與土壤的無機氮含量有正相關關係，線蟲可能藉食物網運作以直接與間接氮化的方式顯著加快土壤中的氮流動效率，不過氮化能力在食物網發展初期(六週內提升 37%)與後期(六週內僅提升 16%)不同，可能與族群的交互作用減弱或微生物過度被捕食有關。如何將以上這些機制與結果用於農業管理、土壤優化或生態保育上，了解土壤潛在資源與提供土壤持續性生產力將會是未來可以發展方向。