



國立臺灣大學生物資源暨農學院森林環境暨資源學系

碩士論文

School of Forestry and Resource Conservation

College of Bio-Resources and Agriculture

National Taiwan University

Master's Thesis

廢棄煤礦捨石山與鄰近次生林土壤之化育：

生物、母質與時間因子影響

Soil Developments in Coal Waste Heap and Adjacent
Secondary Forest : Influenced by Biological, Parent Material and
Time Factors

鄭勝榮

Sheng-Jung Cheng

指導教授：鄭智馨 博士

Advisor: Chih-Hsin Cheng, Ph.D

中華民國114年7月

July 2025

國立臺灣大學碩士學位論文
口試委員會審定書
MASTER'S THESIS ACCEPTANCE CERTIFICATE
NATIONAL TAIWAN UNIVERSITY

廢棄煤礦捨石山與鄰近次生林土壤之化育：
生物、母質與時間因子影響

Soil Development in Coal Waste Heap and Adjacent Secondary Forest: Influenced by
Biological, Parent Material and Time Factors

本論文係鄭勝榮(R10625038)在國立臺灣大學森林環境暨資源學系完成之碩士學位論文，於民國 114 年 7 月 25 日承下列考試委員審查通過及口試及格，特此證明。

口試委員 Oral examination committee:

鄭智榮

(指導教授 Advisor)

陳尊賢

許正一

系（所、學位學程）主管 Director: 丁宗霖

誌謝



一轉眼，在研究所的時間已經三年了，感謝指導教授鄭智馨老師這段時間以來的指導，讓轉換學習領域的我能有慢慢摸索學習研究的機會。在口試的過程中，承蒙陳尊賢老師及許正一老師對於土壤化育研究及不同思考方向上的指導。由於關於礦業棄土的研究在臺灣較少，希望本篇論文能提供後人參考價值。

感謝父母在這三年的支持，讓我生活上無溫飽的後顧之憂。感謝子穎學長在我初進入實驗室時，手把手教我如何配置藥品及操作實驗儀器，讓一開始連莫耳數都不懂的我，能逐漸能學會一個人獨立操作實驗。感謝同實驗室的學弟昇祐幫忙採樣，感謝樂恩及政珉彼此互相幫忙完成實驗，以及分享生活樂事，讓實驗室的生活不那麼苦悶。感謝不同研究室的家熙，協助我在進入森林系之前，對系上有初步的認識。感謝必憲、聿修、玉琳、陳儒、章秀及健昇，能接住我的情緒，讓好幾度有休學念頭的我能繼續走下去。最後感謝哆啦 A 夢群組的夥伴，陪伴我走過研究所後半段生涯，讓我生活不會感到無趣。

本來抱持想研究生態的我，誤打誤撞進入了臺大森林系，最後來到土壤生物地球化學實驗室，若不是韋煙灶老師土壤地理課程的啟蒙，我不會有機會踏上這條道路。很幸運能夠有機會學習新領域的事物，能帶著所學踏上未知的旅程。

摘要



煤礦曾是臺灣重要的採礦產業之一，為早期推動工業化的重要基礎。然而採礦過程，不僅破壞天然植被或改變地形而造成地表退化，其中地下採礦開採時挖掘出的石塊與棄土，因集中堆積形成小山丘狀的地形，而得捨石山之名。由於有關捨石山之土壤性質在自然演育下情況的研究較少，因此本文初步進行捨石山土壤之植生與物理化學性質調查，探討捨石山人為土壤經 30 餘年自然化育情況下，其土壤性質與鄰近非捨石山土壤之比較。實驗結果顯示，捨石山人為土壤剖面化育較為簡單，僅為 A-C 土壤層化育，並無化育 B 層。捨石山人為土壤含石率亦高，土壤含石率超過 50 %，下層土壤含石率甚至可達 80 %。然而，捨石山土壤呈現較暗顏色，其小於 2 mm 以下之土壤有機碳量與全氮量較鄰近次生林土壤高，土壤 pH 亦較次生林低，CEC 同樣呈現捨石山土壤高於次生林土壤。選擇性鐵鋁萃取數據顯示，捨石山土壤具有較低 Fe_o/Fe_d (無定型鐵與游離鐵比例) 數值與較高 Fe_d/Fe_t (游離鐵與全鐵比例) 數值，就風化程度而言，鐵鋁萃取數值結果顯示捨石山土壤具備一定程度風化作用，甚至高於鄰近次生林土壤。

儘管土壤野外調查結果顯示土壤剖面仍處於化育初始階段，然而上述土壤化學性質分析結果並不符合我們的預期，我們初步推測土壤分析結果僅為參與土壤化育性質的分析結果，並未實際考慮土壤母質差異之影響，因此我們進一步分析岩塊性質。從岩塊分析的結果可得知，捨石山岩塊與非捨石山之次生林區域岩塊性質亦有明顯差異，尤其是有機碳、全氮含量、 Fe_o/Fe_d 及 Fe_d/Fe_t 數值，顯示捨石山土壤高風化指數亦受到岩石本身所影響。由於捨石山與次生林土壤岩石母質並不相同，若直接比較捨石山與鄰近非捨石山土壤性質差異，可能忽略部分土壤生成因子的影響。我們的結果證明捨石山土壤化育性質除受時間影響外，亦受到生物與岩石母質的影響，且其土壤化學性質僅能說明部分參與土壤化育的結果，無法完全反應土壤風化程度。

[關鍵字]：礦土、煤礦、捨石山、土壤性質、土壤化育

Abstract



Coal mining once played a pivotal role in Taiwan's early industrial development.

However, such activities have resulted in substantial land surface degradation due to the disruption of vegetation and significant alterations to local topography. Among the anthropogenic landforms generated by coal mining, "Coal Waste Heap (Sheshishan)"—mounds or hills composed of waste rock and spoil materials excavated during subsurface mining operations, is one of the obvious landscape features. These geomorphic features, characterized by steep slopes and heterogeneous substrate composition, represent a unique form of anthropogenic geomorphology. Despite their ecological and pedological relevance, the soil formation processes and edaphic properties of coal waste heap landscapes remain understudied under natural post-mining succession.

This study intends to present a preliminary assessment of the vegetation structure and soil physicochemical properties developed within the coal waste heap approximately after three decades of natural succession. The objective is to elucidate the current state of soil development in these anthropogenic deposits and to compare their properties with adjacent secondary forest soils. Our results indicate that soils in coal waste heap exhibit incipient pedogenic development, with profiles primarily exhibiting



A–C horizon and lacking an illuvial B horizon, indicative of limited pedogenetic horizon differentiation. These soils are characterized by a high coarse fragment content, with lithic fragment volume exceeding 50% in the soils, even reaching up to 80% in some subsoil horizons. Nevertheless, surface horizons exhibit darker color, higher soil organic carbon (SOC) and total nitrogen (TN) contents relative to the adjacent secondary forest soils. Soil pH is comparatively lower, while cation exchange capacity (CEC) is higher, suggesting an accumulation of organic matter and increased colloidal activity in the coal waste heap soils. Selective extraction analyses of pedogenic iron and aluminum speciation further support ongoing weathering processes. Lower Fe_o/Fe_d ratios (oxalate-extractable to dithionite-extractable Fe) and higher Fe_d/Fe_t ratios (dithionite-extractable to total Fe) observed in coal waste heap soils suggest a relative dominance of crystalline over amorphous Fe phases, implying advanced mineral transformation and a notable degree of pedogenic weathering—potentially exceeding that of the adjacent secondary forest soils.

Our field observations suggest that the profile development remains in the early stages, while the chemical indices predominantly reflect the properties in the coal waste heap soils are not at the incipient development as we supposed. To further interpret the unexpected pedochemical trends, a geochemical analysis of the lithic fragments was



conducted. The results reveal significant differences in geochemical composition between the rocks from coal waste heap and those from adjacent secondary forest soils, particularly in SOC, TN, Fe_0/Fe_d , and Fe_d/Fe_t values. These differences indicate that the stronger weathering indices in coal waste heap soils are likely influenced not only by time factor but also by the intrinsic properties of the parent material, which differ lithologically from those of the surrounding landscape. This study concludes that the pedogenesis of coal waste heap soils is governed by a complex interplay between biotic factors, parent material heterogeneity, and environmental conditions. The chemical properties of the soil matrix reflect only the weathered fraction of the substrate, and thus cannot fully represent the weathering status of the entire soil body. These findings underscore the need for integrated geomorphic, pedologic, and geochemical approaches when assessing anthropogenic soil landscapes undergoing natural rehabilitation.

[Key Words] : mine soil, coal mining, coal waste heap, soil properties, pedogenesis

目次

口試委員會審定書.....	I
誌謝.....	II
中文摘要.....	III
ABSTRACT.....	IV
目次.....	VII
圖次.....	IX
表次.....	X
一、前言.....	1
二、文獻回顧.....	3
2.1 臺灣及平溪煤業歷史.....	3
2.2 捨石山的由來.....	3
2.3 國外煤礦業棄土化學性質的變化.....	3
2.4 國外煤礦業棄土植生的變化.....	4
2.5 土壤選擇性萃取鐵鋁與土壤風化程度的關係.....	4
三、材料與方法.....	6
3.1 樣區介紹.....	6
3.2 植群調查.....	11
3.3 土壤與岩石採樣方法.....	11
3.4 土壤總體密度(Bulk Density, BD)與土壤含石率.....	12
3.5 土壤質地分析.....	12
3.6 土壤與岩石 pH 值.....	13
3.7 土壤與岩石有機碳與全氮濃度.....	13
3.8 土壤有機碳儲存量 (Soil Organic Carbon Stock, SOC Stock).....	14

3.9 土壤陽離子交換容量(Cation exchange capacity, CEC)、交換性陽離子測定與土壤鹽基飽和度(Base Saturation, BS).....	14
3.10 土壤與岩石鐵、鋁選擇性萃取與全鐵、全鋁測定.....	14
3.11 經 Tiessen 修正的 Hedley 磷序列萃取法.....	15
3.12 統計分析.....	16
四、 結果.....	17
4.1 植被調查.....	17
4.2 土壤剖面.....	17
4.3 土壤基本性質.....	21
4.4 岩石基本性質.....	23
4.5 土壤與岩石鐵、鋁選擇性萃取.....	31
4.6 土壤磷含量與 Hedley 序列萃取.....	37
五、 討論.....	40
5.1 捨石山與次生林的植被差異.....	40
5.2 捨石山與次生林的土壤基本性質差異.....	40
5.3 捨石山與次生林的土壤鐵、鋁.....	41
5.4 捨石山與次生林土壤的序列磷性質.....	42
5.5 影響捨石山土壤化育的因子.....	43
六、 結論.....	45
七、 參考文獻.....	46
八、 附錄.....	54



圖次

圖 1、樣區地點分布地圖	8
圖 2、平溪地區地質圖	9
圖 3、捨石山變遷航照圖.....	10
圖 4-1、十分捨石山樣區土壤剖面.....	20
圖 4-2、十分次生林樣區土壤剖面.....	20
圖 4-3、菁桐捨石山樣區土壤剖面.....	20
圖 4-4、菁桐次生林樣區土壤剖面.....	20
圖 5、影響捨石山土壤化育因子圖.....	44
圖 6、捨石山與次生林土壤剖面示意圖.....	44



表次

表 1 樣區植被性質與多樣性指數	18
表 2 樣區土壤剖面性質	19
表 3 十分樣區土壤與岩石基本性質	24
表 4 菁桐樣區土壤與岩石基本性質	25
表 5 十分樣區土壤 CEC 與鹽基飽和度	26
表 6 菁桐樣區土壤 CEC 與鹽基飽和度	27
表 7 捨石山樣區土壤地質來源有機碳(Geogenic organic carbon, GOC)占比	28
表 8 十分樣區土壤有機碳儲存量	29
表 9 菁桐樣區土壤有機碳儲存量	30
表 10 十分樣區土壤與岩石選擇性鐵萃取性質	33
表 11 菁桐樣區土壤與岩石選擇性鐵萃取性質	34
表 12 十分樣區土壤與岩石選擇性鋁萃取性質	35
表 13 菁桐樣區土壤與岩石選擇性鋁萃取性質	36
表 14 十分樣區土壤與岩石磷序列萃取結果	38
表 15 土壤與岩石序列萃取磷不同分級磷濃度佔全磷之相對比例	39



一、前言

由於能源及原物料等需求，人類在世界各地開拓礦場以獲取各類礦產，而在挖礦的過程中，清除植被、挖掘地層將嚴重破壞環境，導致生態系統嚴重衰退。在礦源枯竭結束採礦後，地表會留下巨大的礦坑。因此許多盛產各類礦產的國家致力研究如何恢復礦區的棄土性質，根據 Martins et al. (2020)的研究，礦業棄土平均要在 28 年後才開始出現恢復的跡象，而近七成礦業棄土的研究是研究煤礦棄土(Miguel et al., 2023)。在復育礦業棄土的過程中，由於棄土是原來各土壤層土壤經過挖掘後混合堆積而成，因此原來的土壤結構遭受破壞，土壤組成及性質也劇烈改變，而回填棄土時，重機械及車輛造成的土壤壓實則是另一個衍生而出的問題。回填土壤後，接下來進行植生復育來加速恢復地表植被演替的過程，另外透過種植植物，也能因為植物根系生長及對地表增加有機物的輸入來改善土壤性質，因此多數研究著重於將探討植生復育過程對煤礦棄土物理、化學及生物性質的影響。

臺灣清領末期(1876 年)開始進行官方煤礦開採，礦田分布的範圍從北起基隆、東北角，南迄嘉義阿里山，多數煤田坐落於苗栗以北的淺山地區。煤炭的開採對台灣經濟發展貢獻甚大，但自 1980 年代後，煤礦開採受到經濟效益不佳與工安事故頻傳等因素而逐漸廢坑開採。在 1980 年代中期以後，臺灣各地的煤礦坑因停止開採而逐漸廢棄，在長時間採煤過程下，經洗煤的廢棄石塊長期堆積礦區外圍，形成地表光禿如惡地般小山丘的特殊地形，因而得名捨石山。跟國外相異的是，臺灣的煤礦棄土—捨石山，幾乎沒有人為介入植生復育，捨石山地形在經過長時間廢棄與自然演替後，其外觀逐漸從光禿石塊，草地灌木叢，現已形成鬱閉次生林。由於捨石山初始土壤性質應類似於國外煤礦田的棄土，以國外的礦區土壤為例，平均要經 28 年，才開始出現明顯植生恢復的跡象(Martins et al.,



2020)。然而平溪捨石山在歷經 30 年後，植生已快速生長恢復，若沒有導覽介紹，無法找出確切捨石山位置，因此，我們預測臺灣捨石山土壤化育過程將不同於國外案例，在高溫多雨與植生快速恢復下，預期捨石山土壤將有更快速的化育作用與土壤性質改變。我們有以下有幾點假設與探討：(1)捨石山的植被組成已經與鄰近次生林植被組成相似；(2)捨石山土壤有機碳與全氮低於或趨近於次生林土壤；(3)捨石山土壤交換性陽離子當量低於次生林土壤；(4)捨石山土壤鐵鋁風化指數低於次生林；(5)捨石山土壤序列磷性質較鄰近次生林的序列磷性質具明顯差異，捨石山磷型態以礦物型態與無機型態磷為主；(6)時間是影響捨石山土壤性質的主要因素。

本篇研究旨在探討捨石山人為土壤性質的化育與性質，並與鄰近非人為土壤相互比較。期許在未來若進一步進行有關臺灣捨石山的土壤性質研究時，能有類似的背景資料作為參考。



二、文獻回顧

2.1 臺灣及平溪煤業歷史

臺灣煤業開採的歷史可追溯自荷治時期，但直至 1876 清朝政府於基隆設置官營煤礦場，並引進英製採煤機，才代表官方開啟大規模且現代化採礦。直至日治時期，臺灣煤業才進入有規模的開採，並在第一次世界大戰時煤炭產量達到高峰。在 1960 年代中期，臺灣能源需求逐漸由石油取代，煤礦產量開始萎縮，並在 1980 年代因為礦災而導致大量礦場關閉，臺灣最後一個煤礦坑於 2000 年關閉，象徵臺灣煤礦產業正式走入歷史(陳威霖，2023)。

平溪地區在 1906 年發現煤層露頭，並在 1918 年臺北炭礦株式會社成立後開啟當地煤礦產業的序幕(洪偉豪，2012)，隨後不到 30 年，礦業成為當地主要的產業，並在 1967 年達到頂峰，當時從事礦業的就業人口比例達 75%，平溪人口亦在 1968 年達到高峰。隨著能源需求的轉變，以及臺灣煤礦市場的萎縮，平溪煤業從 1970 年代開始衰退，並於 1997 年重光煤礦收坑後(洪偉豪，2012)，正式宣告平溪煤業的結束。

2.2 捨石山的由來

捨石山一詞源自日本，其中捨石為礦業用語，其意為開採礦石時，所挖掘出剩下的土石和劣質礦物。在煤礦上，捨石即採煤及洗煤時，餘下的棄土、石塊及淘汰的劣質煤炭，這些土石經過長期堆積後，形成類似小山丘的錐狀地形，故名捨石山(九州官方旅遊導覽網站，2025)。

2.3 國外煤礦業棄土植生的變化

關於煤礦棄土上土壤植生的變化，國外研究大多著重於人為介入進行植被復育的結果，例如研究在植物根部接種叢枝菌根菌(顏江河，2008)，或是選擇特定植生物種，以修復煤礦礦土的土壤性質，關於煤礦棄土上天然植生的演替研究資

料較少。另外，根據 Frouz et al.(2015)在捷克的研究指出，欲進行人為植被復育的煤礦棄土多會經過整地，而未受干擾的煤礦棄土區則保有堆積的起伏地表，在植被演替早期，後者的冠層會較慢閉合，但在長期之下後者會因為空間的異質性更有利於樹木生長，例如生長在地表起伏處的樹木在夏季時能接受更多陽光，但同時跟又能汲取窪處的水分。該篇研究也指出，有無進行植被復育的煤礦棄土區，在前 20 年有明顯的樹冠覆蓋度與樹木生物量差異，但該差異在 20 年後逐漸消失。

2.4 國外煤礦業棄土化學性質的變化

根據 Martins et al. (2020)的研究，礦業棄土平均要在 28 年後才開始出現恢復的跡象，而近七成礦業棄土的研究是研究煤礦棄土(Miguel et al., 2023)。多數國外研究著重於如何透過生物、物理及化學方法改善煤礦棄土的土壤性質，較少研究煤礦棄土在自然演替下土壤性質變化的狀況，但 Šourková et al.(2005)在捷克索科洛夫(Sokolov)透過比較堆積棄置時間不同的煤礦棄土區的研究指出，煤礦棄土之土壤 pH 值及總體密度(Bulk Density, BD)與土壤全磷含量會隨時間下降，而土壤總碳量與總氮量則隨時間增加。

由於煤礦棄土區似剛歷經崩塌的地區，風化初期以大量岩石為主，缺乏有機碳和氮，限制植物生長，而且土壤有機碳累積速率不同地點間難以進行比較，因為碳的增加取決於植被和氣候等條件，而這些條件在不同的地點有所不同(Ahirwal et al., 2017)。因此國外有關煤礦棄土區有機碳的研究，由於多在溫帶地區或乾燥地區進行，可能不適用於推測臺灣煤礦棄土的有機碳變化。

2.5 土壤選擇性萃取鐵鋁與土壤風化程度的關係

土壤選擇性萃取鐵鋁可依不同萃取方法抽取出土壤游離態鐵鋁(Fe_d, Al_d)、無定型態鐵鋁(Fe_o, Al_o)及與有機物鍵結型態的鐵鋁(Fe_p, Al_p)。無定型鐵鋁與游離態鐵鋁的比值代表土壤鐵鋁氧化物的結晶程度，後者結晶程度較良好，前者則結

晶性較差，後者萃取出鐵鋁含量愈高，表示土壤受風化程度愈大(林哲郁，2016)。游離態鐵鋁與全鐵鋁(Fe_t, Al_t)的比值也可以判斷土壤的風化程度， Fe_d/Fe_t 、 Al_d/Al_t 值愈高，代表土壤鐵鋁離子大多以結晶程度較高的游離態形式存在，風化程度較高。 Fe_o/Fe_d 與 Al_o/Al_d 比值愈高，代表土壤鐵鋁以無定型鐵鋁佔多數，風化程度較低，比值愈低則代表土壤中結晶鐵佔主導地位，土壤風化程度較高(Tomohiro et al, 2018)。

Fe_p/Fe_o 與 Al_p/Al_o 的比值能判定土壤中活性鐵鋁的主要形態，當比值大於 0.5 表示土壤中的活性鐵鋁以有機鍵結形態為主，比值小於 0.5 則表示土壤中的活性鐵、鋁以無定形物質為主(林哲郁，2016)，土壤化育初期比值會較接近 0，而風化愈強烈或受有機物影響則比值會趨近 1。另外，通常土壤表層之 Fe_o, Al_o 與 Fe_p, Al_p 具有較高含量，顯示風化釋出的鐵鋁的結晶性受到土壤表層之有機物質影響而導致結晶性不良(簡士濠等，2009)。



三、材料與方法

3.1 樣區介紹

研究樣區位於新北市平溪區(圖 1)，分別位於臺鐵菁桐站與十分站北方，海拔高度約 200 - 300 公尺，地形屬西部衝上斷層山地加里山山脈五分山系，位於五分山山系東南側，地質為中新世沉積岩形成的南港層為主(圖 2)。南港層為海相地層，以厚層亞混濁砂岩或石灰質砂岩及灰黑色頁岩為主，且含有較多的海相化石(黃鑑水，1988)。而石底向斜軸大致沿基隆河河谷，呈東北東—西南西走向貫穿本區；本區的地層便大致以向斜軸為中心，向兩翼依次出露南莊層、南港層、石底層及大寮層(洪偉豪，2012；黃鑑水，1988)，南莊、石底是此區主要的含煤層，亦是臺灣主要的含煤層，地質白色或白灰色細粒至粗粒砂岩，與細砂岩、粉砂岩及頁岩所構成之薄頁互層為主，內夾雜煤炭或其他含煤物質(黃鑑水，1988)。軟硬岩互層為此區的地質特色，而含煤層的出露，在日治時期後，影響了此區的經濟發展(洪偉豪，2012)。

研究樣區大致可以分成石底煤礦及新平溪煤礦開採所堆砌出來的捨石山，前者位於今日臺鐵菁桐站北方、菁桐里與平溪里交界處，原屬於臺陽公司的礦坑，於 1979–1987 逐年停止開採，捨石山棄置約 40 餘年；後者位於臺鐵站十分站東北方，位於十分里境內，原屬於臺陽公司，後於 1978 年獨立為新平溪煤礦公司，並持續開採至 1997 年，才因基福公路隧道工程停採，捨石山棄置約近 30 年。兩者今日皆被茂密植被覆蓋(圖 3)，難以用肉眼與周遭次生林區域進行區分，不過，依據不同時間航照圖，約略可看出捨石山的地景變化，從裸露岩塊，逐漸變成芒草地，再逐步演替成次生林。

根據已於 2024 年 5 月撤站的火燒寮氣象站資料，此區 2023 年度年均溫為 20.2°C，年降水量為 2678.5 毫米，全年無明顯乾季(中央氣象局，2023)，屬於終年溫濕多雨的地區，因此利於植被生長。因此在捨石山外，分別在菁桐地區選擇

捨石山西方的薯榔尖地區次生林，以及在十分地區選擇捨石山南方的次生林作為對比樣區，探討捨石山在溫暖多雨的氣候下，其土壤性質化育的程度。



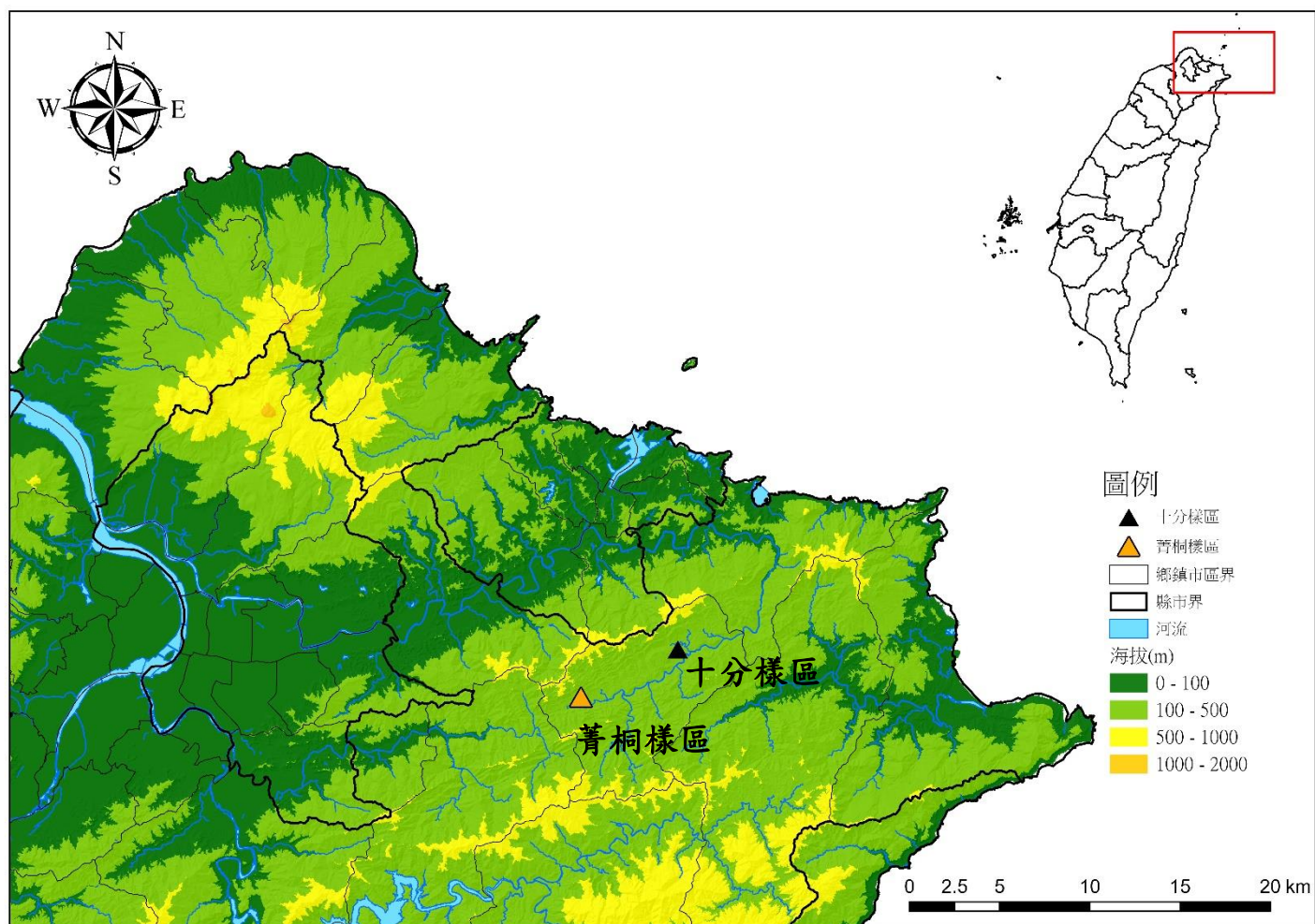


圖 1、樣區地點分布地圖

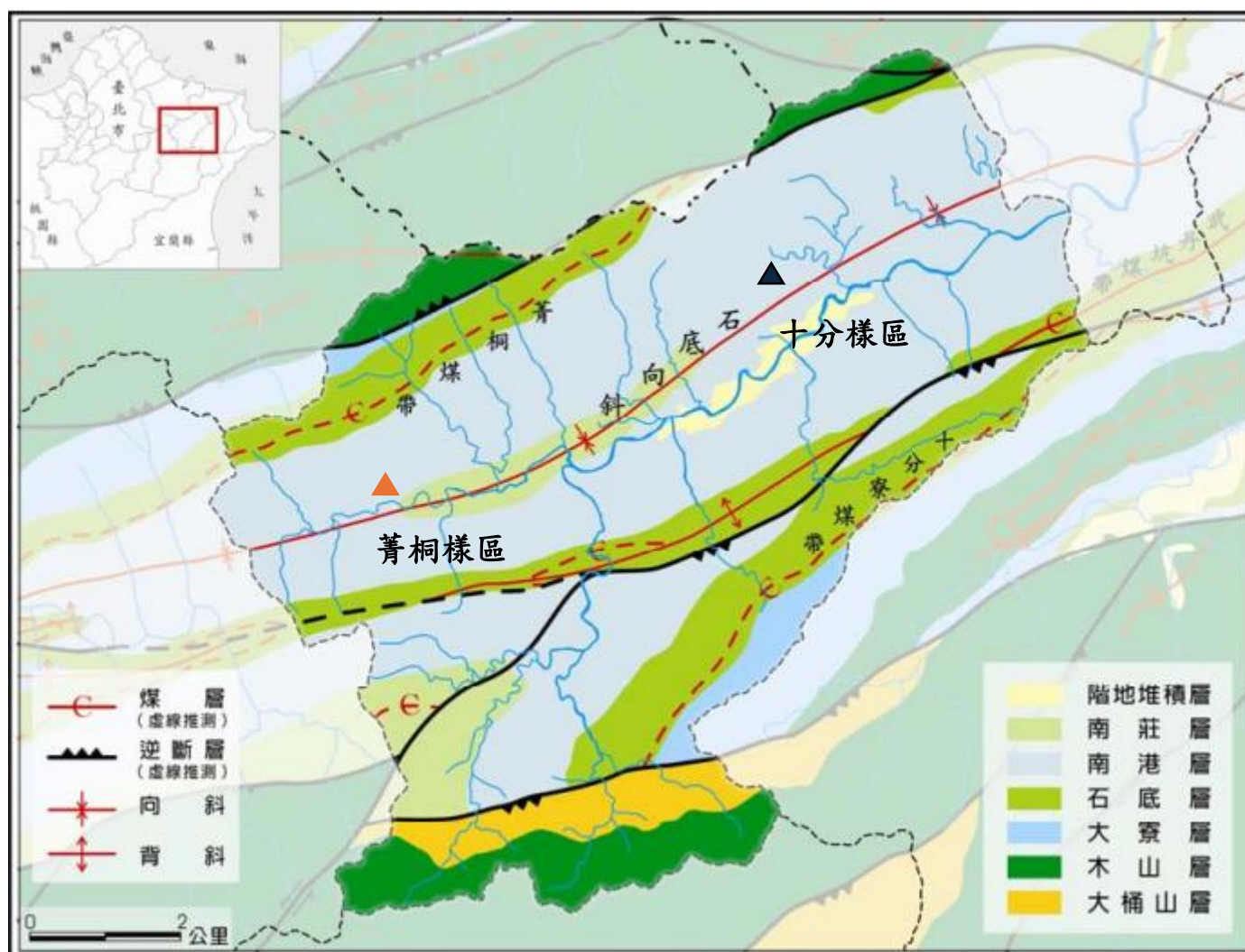


圖 2、平溪地區地質圖

資料來源：洪偉豪，2012。

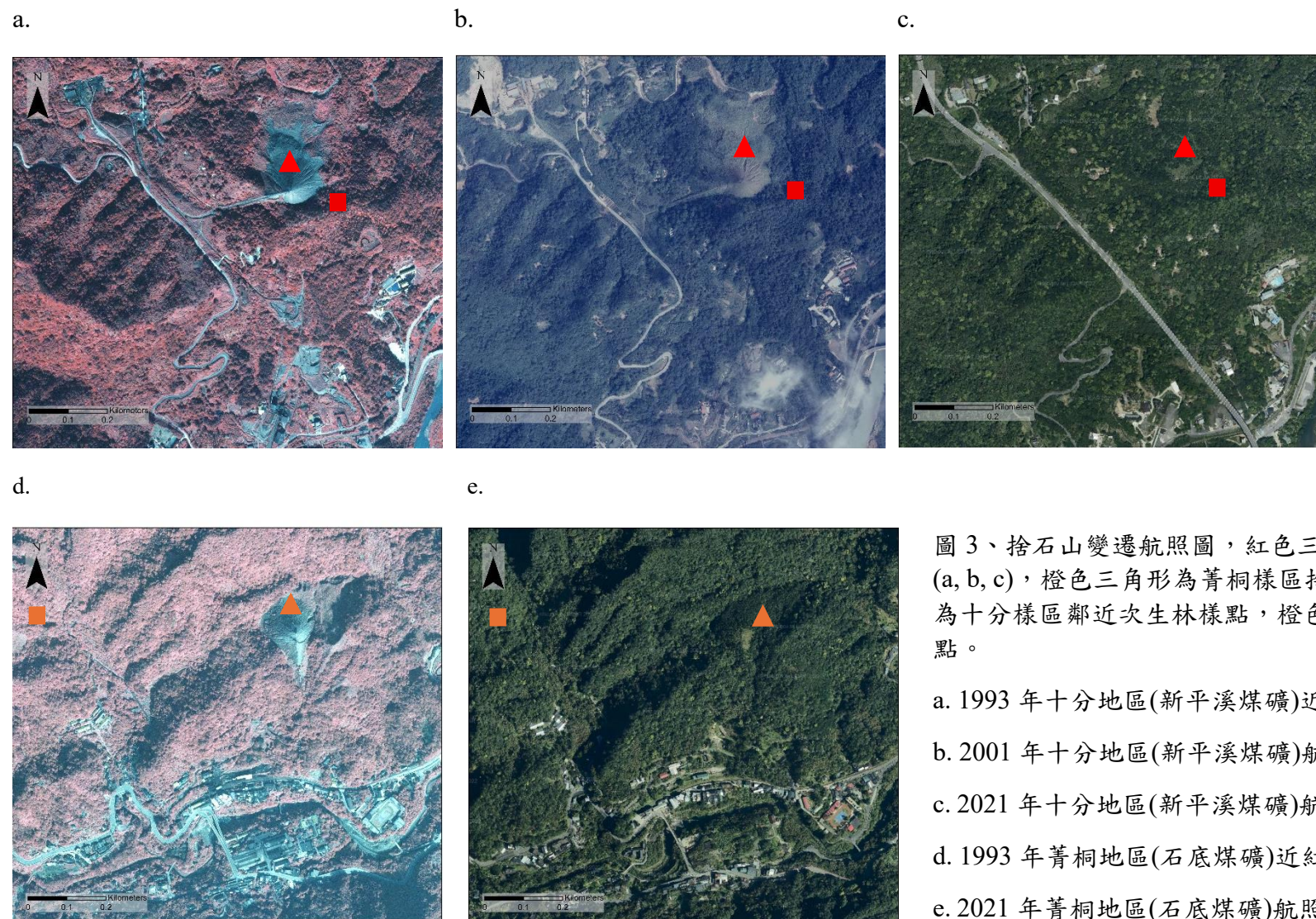


圖 3、捨石山變遷航照圖，紅色三角形為十分樣區捨石山樣點 (a, b, c)，橙色三角形為菁桐樣區捨石山樣點 (d, e)；紅色矩形為十分樣區鄰近次生林樣點，橙色矩形為經同樣區次生林樣點。

- a. 1993 年十分地區(新平溪煤礦)近紅外線航照圖
- b. 2001 年十分地區(新平溪煤礦)航照圖
- c. 2021 年十分地區(新平溪煤礦)航照圖
- d. 1993 年菁桐地區(石底煤礦)近紅外線航照圖
- e. 2021 年菁桐地區(石底煤礦)航照圖

3.2 植群調查

植群調查分別於 2023 年 5 月及 11 月進行，在每個土壤樣區透過測繩及塑膠地樁圍繞出 10 × 10 m 的正方形樣區，每個樣區面積為 100 m²，並將每個樣區內劃分四象限，紀錄量測各象限內所有胸高直徑(DBH) > 1 cm 的樹木的樹種種類(species)及 DBH。之後依據樹種數量與比例，計算樣區內樹木的胸高斷面積(Basal Area, BA)、物種豐富度(richness)、香農多樣性指數(Shannon-Wiener's Diversity Index)、均勻度(evenness)及辛普森多樣性指數(Simpson's Diversity Index)，其中豐富度等於物種數目(S)，胸高斷面積、香農多樣性指數、均勻度及辛普森多樣性指數分別由式(1)、式(2)、式(3)及式(4)得知。

胸高斷面積(BA)：

$$BA \text{ (m}^2 \text{ ha}^{-1}\text{)} = \sum \pi \times (\text{DBH} / 2)^2 / 10000 \quad \text{式(1)}$$

香農多樣性指數(H)：

$$H = -\sum_i^S [P_i * \ln(P_i)] \quad \text{式(2)}$$

P_i ：第 i 項物種分布所占全部物種的比例

均勻度(E)：

$$E = H / \ln(S) \quad \text{式(3)}$$

辛普森多樣性指數(1- D)

$$1 - D = \sum_i^S \left[\frac{n_i(n_i - 1)}{N(N - 1)} \right] \quad \text{式(4)}$$

n_i ：第 i 項物種的個體數

N ：樣區內物種的總個體數

另外為了探討捨石山植被組成是否會隨時間與次生林植被組成愈加相似，因此採用 Sørensen 相似度指數(Sørensen similarity index)分別計算十分與菁桐地區捨石山與次生林植被組成相似度，Sørensen 相似度指數由式(5)得知。

Sørensen 相似度指數(IS)

$$IS (\%) = 2C / (A + B) \times 100\% \quad \text{式(5)}$$

3.3 土壤與岩石採樣方法

土壤採樣工作於 2022 年秋季開始進行，並分次採樣至次年春季。每次採樣

分別在捨石山及鄰近的次生林取三重複，並在每個重複樣區採集三個小樣點的土壤樣本進行混合。採樣土壤共採集五個土壤深度，分別為 0 - 10 cm、10 - 20 cm、20 - 30 cm、30 - 50 cm 及 50 - 100 cm。採集後的樣本攜回實驗室，置於塑膠托盤上風乾一周，待土壤風乾後以玻璃瓶磨碎，並透過 2 mm 網目篩網過篩，裝進塑膠罐保存以進行後續化學分析。

岩石採樣工作於 2024 年 11 月及隔年 2 月進行，採集的岩石先用刷子清潔表面，風乾後用地質槌敲裂成小塊岩石，而後置入磨粉機將岩石磨碎成若土壤狀的岩石粉，並利用 2 mm 網目篩網過篩，讓 100 % 的岩石粉末均能通過篩網，並同樣進行岩石粉末後續化學分析。

3.4 土壤總體密度(Bulk Density, BD)與土壤含石率

土壤總體密度以土環法採樣，將土環垂直打入地表，取體積 100 cm³ 的土壤，分別採樣 0 - 10 cm 及 10 - 20 cm 深度的樣本。將土壤攜回實驗室後，以 105 °C 烘烤 24 小時後，秤重紀錄重量 W(g)，以式(6)得出土壤總體密度。土壤含石率則是從將風乾土壤過篩，將大於篩網網目 2 mm 的石塊挑出，將石塊重量除以未過篩之風乾土壤重量，再乘以百分比得出土壤含石率。

$$BD (g\ cm^{-3}) = W(g) / 100 \quad \text{式(6)}$$

3.5 土壤質地分析

土壤質地使用比重計法量測 (Gee and Or, 2002)，秤取 40 g 風乾過篩土壤樣品，放入不鏽鋼杯並加入 100 mL 體積濃度 5% 六偏磷酸鈉溶液 (Sodium Hexametaphosphate, HMP) 及 250 mL 純水，用攪拌機攪拌 5 分鐘，隨後移入沉降筒，用純水將溶液定量至 1000 mL，手動攪拌均勻後計時土壤顆粒沉降，以鮑氏比重計 (Standard hydrometer, ASTM no. 151 H, with Bouyoucos scale) 分別於靜置 40 秒及 7 小時後量測 P_{40s} 及 P_{7h} 數據，並製作空白樣本同樣量測沉降 40 秒及 7 小時量測 P_{BK40s} 及 P_{BK7h} 數據。將量測數值以下列三個公式計算出砂粒(sand)、粉粒(silt)及黏粒(clay)的比例，再以美國農業部 (United States Department of Agriculture, USDA) 的土壤質地三角分類圖判定判定土壤樣品的質地類別。

$$\text{sand (100\%)} = 100 - (P_{40s} - P_{BK40s}) \times (100/40)$$

$$\text{clay (100\%)} = (P_{7h} - P_{BK7h}) \times (100/40)$$

$$\text{silt (\%)} = 100 - (\text{sand} + \text{clay})$$



式(7)

式(8)

式(9)

3.6 土壤與岩石 pH 值

秤取 8 g 的土壤與岩石粉置於廣口瓶中，分別加入 20 mL 的純水與 1M 氯化鉀(KCl)溶液(土：水 1：2.5)，以 180 rpm 於室溫中搖晃半小時，在打開瓶蓋靜置半小時，帶土壤沉澱後，使用玻璃複合電極(Orion 9107BNMD, Thermo, Massachusetts, USA) 測量上清液 pH 值。

3.7 土壤與岩石有機碳(Soil organic carbon, SOC)與全氮濃度(Total nitrogen, TN)

將土壤及岩石粉樣品以球磨機 (MM 400, Retsch, Hann, Germany) 球磨成均質細粉末，秤取 15-25 mg 球磨樣品包入錫囊 (5 × 8 mm tin capsule, Elemental Microanalysis, UK)，利用元素分析儀 (2400 Series II, Perkin Elmer, Norwalk, CT, USA) 測得有機碳與全氮濃度。

另外為區分土壤有機碳是否受煤炭等地質來源有機碳影響(Geogenic organic carbon, GOC)，抽樣十分及菁桐地區土壤進行化學處理，方法採用改良至 Ussiri et al.(2008)提出的化學及熱處理法(Chemi-thermal Method)。先秤取 1g 經球磨過的土壤，置入鐵氟龍製的離心管，加入 10ml 的濃硝酸(HNO₃)進行震盪 15 分鐘，再離心 20 分鐘，捨去上清液，再加入去離子水淋洗 1 次，之後再加入濃度 1 N 的氫氧化鈉(NaOH)溶液震盪半小時，之後離心 20 分鐘，捨去上清液並重複加入氫氧化鈉步驟，最後再用去離子水淋洗 6 次，將土壤殘留的氫氧化鈉去除乾淨，並將土壤置入烘箱以 60 °C 烘乾 48 小時。從烘箱取出土壤後，將土壤置入灰化爐以 340 °C 加熱三小時，取出後的土壤以瑪瑙研鉢研磨，同樣秤取 15-25 mg 球磨樣品包入錫囊後利用元素分析儀測得地質來源有機碳的濃度。

3.8 土壤有機碳儲存量 (Soil Organic Carbon Stock, SOC Stock)

土壤有機碳的儲存量須將其總體密度及土壤含石率列入計算，而由於捨石山土壤有機碳部分來自地質來源有機碳(煤炭)，因此須扣除煤炭含量來計算土壤有機碳儲存量。各層的土壤有機碳儲存量 (ton C ha^{-1}) 計算公式如下：

$$\text{SOC Stock}_i = C_i \times D_i \times (1 - S) \times d \times (1 - G) \times 100 \quad \text{式(10)}$$

SOC Stock_i 為第 i 層的土壤有機碳儲存量 (ton C ha^{-1})； C_i 為第 i 層的土壤有機碳濃度 (%)； D 為總體密度 (g cm^{-3})； S 是土壤含石率 (%)； d 為所評估土壤層的厚度，以公尺 (m) 為單位； G 為地質來源有機碳比例 (%)；100 為單位轉換係數，將 SOC 儲存量的單位調整成 ton C ha^{-1} 。

3.9 土壤陽離子交換容量 (Cation exchange capacity, CEC)、交換性陽離子測定與土壤鹽基飽和度 (Base Saturation, BS)

土壤 CEC 的萃取以中性醋酸銨法 (Gregorich & Carter, 2007) 進行，秤取 2g 風乾過篩之土壤，以 1M 40 mL 的醋酸銨 (NH_4OAc) 淋洗，再將淋洗液定量至 100mL 後，使用原子吸收光譜儀 (Sens AA, GBC, Dandenong, Australia) 分別測定交換性鉀、鈣與鎂的含量 ($\text{cmole kg}^{-1} \text{ soil}$)。經過醋酸銨淋洗的土壤，隨後以 10mL 95% 酒精淋洗兩次，將土壤中多餘的醋酸銨溶液洗除，接著以 40mL 2M KCl 溶液淋洗土壤。洗出之溶液同樣定量至 100mL 後，使用銨離子選擇電極 (HI 4101, HANNA instrument, Woonsocket, USA) 測定淋洗液中的銨根離子含量，換算得土壤 CEC 值 ($\text{cmole kg}^{-1} \text{ soil}$)。將交換性鉀、鈣與鎂含量加總，除以土壤 CEC 值並乘上百分比後，得出土壤鹽基飽和度 (%)。

3.10 土壤與岩石鐵、鋁選擇性萃取與全鐵、全鋁測定

土壤鐵、鋁的形式與含量，利用以三種不同的土壤鐵鋁萃取方法，包括 DCB 法 (dithionite-citrate-bicarbonate, DCB)、酸性草酸銨法 (acid ammonium oxalate) 與焦磷酸鈉法 (sodium pyrophosphate) 等三種方法，萃取土壤中不同的鐵、鋁形式與含量，DCB 法可萃取得到土壤游離型態鐵鋁；酸性草酸銨法則可萃取無定型鐵鋁；焦磷酸鈉法萃取的鐵鋁為有機物鍵結的鐵鋁。土壤全鐵及全磷

則採用手持式 X 射線螢光光譜儀(Delta Handheld XRF, Olympus, Woburn, USA)測定。土壤鐵、鋁選擇性萃取各萃取劑的詳細作法如下：

(1)DCB 萃取法

秤取 1 g 的土壤置於 50 mL 的離心管中，加入 40 mL 的混合試劑，混合試劑為 0.3M 檸檬酸鈉與 1M 碳酸氫鈉以 8：1 比例混合。將離心管置於水浴機，以 80 °C 熱水浴加熱 10 分鐘，之後加入 1g 連亞硫酸鈉粉末($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$)，搖晃 15 分鐘後，加入 5 滴 0.4 % 聚丙烯醯胺(polyacrylamide)蓄聚劑，劇烈搖晃數秒後再度隔水加熱，再以 2000 rpm 離心 5 分鐘，以 Adventec2 濾紙過濾 (McKeague and Day, 1966)，之後再加入 40 mL 混合試劑重複上述步驟一次。濾液以原子吸收光譜儀 (Sens AA, GBC, Dandenong, Australia)測定所萃取溶液之鐵、鋁含量，該方法所萃取之鐵、鋁分別以 Fe_d 、 Al_d 表示。

(2)酸性草酸銨萃取法

秤取 0.5 g 土壤置於 50 mL 的離心管中，加入 40 mL 的 0.2 M 草酸銨($\text{pH} = 3.0$)，在黑暗中震盪 4 小時，之後加入 5 滴 0.4 % 聚丙烯醯胺，劇烈搖晃數秒，再以 2000 rpm 離心 20 分鐘，以 Adventec2 濾紙過濾 (McKeague and Day, 1966)。濾液以原子吸收光譜儀 (Sens AA, GBC, Dandenong, Australia)測定所萃取溶液之鐵、鋁含量，該方法所萃取之鐵、鋁分別以 Fe_o 、 Al_o 表示。

(3)焦磷酸鈉萃取法

秤取 0.5 g 土壤置於 50 mL 的離心管中，加入 40 mL 的 0.1 M 焦磷酸鈉($\text{pH} 10.0$)，在黑暗中震盪 4 小時，之後加入 5 滴 0.4 % 聚丙烯醯胺，劇烈搖晃數秒，再以 4500 rpm 離心 20 分鐘，以 Adventec2 濾紙過濾 (McKeague and Day, 1966)。濾液以原子吸收光譜儀 (Sens AA, GBC, Dandenong, Australia)測定所萃取溶液之鐵、鋁含量，該方法所萃取之鐵、鋁分別以 Fe_p 、 Al_p 表示。

3.11 經 Tiessen 修正的 Hedley 磷序列萃取法

土壤磷萃取採用經 Tiessen et al. (1993)修正的 Hedley 磷序列萃取法，Hedley

et al. (1982) 透過植物養分吸收觀點，將土壤中的無機與有機磷利用不同序列萃取劑予以劃分，該萃取方法經 Tiessen et al. (1993) 修正後，已被廣泛應用在土壤肥力與土壤性質分析上(張婷雅，2020)。該序列萃取法採用不同的萃取劑，萃取出土壤中不同植物可利用程度的磷，萃取劑依序包含 H_2O 、 NaHCO_3 、 NaOH 與 HCl 等溶液。其中， H_2O 和 0.5 M NaHCO_3 萃取的磷被歸類為不穩定、植物容易利用的無機磷； 0.1 M NaOH 萃取的磷主要是與鐵鋁氧化物吸附的磷酸鹽，為植物適度可利用的磷。而 1 M HCl 萃取的磷主要是包裹性的磷灰石類的磷酸鹽，為穩定、植物較不易利用的磷。

該萃取方法首先秤取 0.5 g 土壤置於 50 mL 的離心管中，依照序列萃取方法依序加入 30 mL 去離子水(H_2O)、 30 mL 的 0.5 M NaHCO_3 ($\text{pH} = 8.5$)、 30 mL 的 0.1 M NaOH 以與 30 mL 的 1 M HCl 進行萃取。每輪萃取皆震盪 16 小時，每次萃取後，土壤溶液以離心機 3500 rpm 離心 10 分鐘，分離上層澄清液進行磷含量分析，殘餘土樣則加入溶液進行下一輪萃取，重複序列萃取直至加入 1 M HCl 萃取，獲得不同溶液萃取之無機磷萃取液。另外， NaHCO_3 及 NaOH 的上層澄清萃取液，分別取 5 mL 加入 10 mL $0.9 \text{ M H}_2\text{SO}_4$ 及 1 g 過硫酸鉀，置於消化分解爐中用 100°C 進行分解消化，得到 NaHCO_3 及 NaOH 的全磷萃取液，由分光光度計量測全磷含量，得到的數值再減去無機磷值，即為有機磷含量。另外，再秤取 0.5 g 土壤，加入 5 mL 濃硫酸於 320°C 進行消化，冷卻後反覆加入 $30\% \text{ H}_2\text{O}_2$ 直至消化液呈澄清狀，定量至 50 mL 並以分光光度計量測，此為全磷含量。全磷含量減去各序列萃取所得的磷含量即為 Residual P 含量，也是剩餘沒能被萃取出來的磷。萃取液以鉬藍法分析 (Murphy and Riley, 1962)，呈色後以分光光度計 (V-630, Jasco, Tokyo, Japan) 分析各萃取液無機磷與全磷的濃度。

3.12 統計分析

使用獨立樣本 t 檢定(假設變異數不相等)，對十分和菁桐地區捨石山及次生林之間土壤性質進行比較，檢視數據間是否具有顯著差異 ($P \text{ value} < 0.05$)，並使用不同英文字母於圖表中區分。統計分析與圖表產出使用 Microsoft Excel 2019 進行。



四、結果

4.1 植被調查

表 1 顯示捨石山與鄰近次生林之植被調查結果。就 DBH 大於 1 cm 樹木數量而言，無論是十分還是菁桐地區，呈現捨石山樣區的樹木數量皆多於次生林樣區；但就樹木平均 DBH 而言，十分次生林樣區的樹木平均 DBH 大於捨石山樣區，而在菁桐捨石山及次生林樣區的樹木平均 DBH 趨近相等。若將 DBH 分為三個等級，分成 1-10 公分、10-20 公分及大於 20 公分以上，次生林樣區 DBH 大於 20 公分樹木的比例與數量皆大於捨石山樣區。而胸高斷面積的部分，捨石山樣區的 BA 數值，皆低於次生林樣區。

捨石山樣區森林植被的豐富度、均勻度、香農生物多樣性指數及辛普森生物多樣指數皆低於次生林樣區，其中豐富度是指樹木的種數，均勻度則是指樣區內不同樹種之相對數量的指數，即每一樹種數量相近的程度，均勻度愈接近 1 表示樣區內各樹種分布數量愈相近，香農生物多樣性指數則是用來估算樣區內樹種群落的多樣性高低，辛普森多樣性指數則是指從樣區隨機抽選兩棵樹木，兩棵樹木分屬不同樹種的機率，因此指數愈接近 1 代表樣區內樹種歧異度愈高，樹種的多樣性愈高。

在停止開採煤礦不到 30 年的平溪地區捨石山與次生林植被組成相似度約為 58%，停止開採煤礦約 40 年的菁桐地區捨石山與次生林植被組成相似度則為 70%，顯示隨著捨石山廢棄時間愈長，其植被會逐漸向週遭次生林演替。

4.2 土壤剖面

捨石山樣區土壤剖面 and 次生林樣區土壤剖面可以看到有相當程度的差異，捨石山土壤不僅具有較高比例石塊，其土壤分層亦不明顯，在深度 20 cm 左右時，僅能勉強以目視土壤顏色差異，而區分出 A 層與 C 層(圖 4-1、圖 4-3)；次生林樣區土壤剖面則無明顯石塊，表層有明顯深色的 A 層，以及在深度約 7-13 公分時，土壤顏色轉為亮褐黃色的 B 層(圖 4-2、圖 4-4)，次生林樣區 B 層土壤亦呈現黏粒洗入現象，十分樣區土壤黏粒含量從 A 層 22.5%增加到 B 層 32.5%，而菁桐樣區則從 10.0%增加至 20.0%。

表 1 樣區植被性質與多樣性指數



	Shifen		Jingtong	
	Coal waste heap	Secondary forest	Coal waste heap	Secondary forest
Ground cover (%)	80%	75%	40%	50%
Tree DBH (# ha ⁻¹)				
Total	4033	2567	5333	4833
1 – 10 cm	2700 (66.9%)	1633 (63.6%)	4167 (78.1%)	3767 (77.9%)
10 – 20 cm	1267 (31.4%)	567 (22.1%)	1000 (18.8%)	667 (13.8%)
> 20 cm	67 (1.7%)	367 (14.3%)	167 (3.1%)	400 (8.3%)
Mean DBH (cm)	7.9	10.8	7.4	7.4
BA (m ² ha ⁻¹)	27.0	45.5	34.4	37.7
Tree species diversity				
Richness	22	26	32	39
Shannon-Wiener's Diversity Index	1.87	2.79	2.71	3.21
Evenness	0.61	0.86	0.78	0.88
Simpson's Diversity Index	0.66	0.91	0.88	0.94
Sørensen similarity index	58.3%	-	70.4%	-

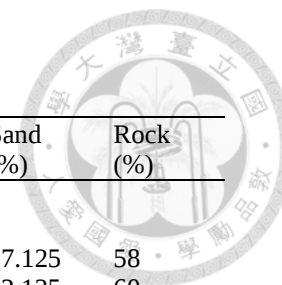


表 2 樣區土壤剖面性質

Horizon	Depth (cm)	Munsell soil color	Texture	Structure ¹	Consistence ²	Roots ³	Boundary ⁴	Clay (%)	Silt (%)	Sand (%)	Rock (%)
Shifen											
Coal waste heap											
A1	0-6	10YR 3/2	Loam	1fg	fr, ss&sp	Mf&sc	wg	20	42.875	37.125	58
A2	6-20	10YR 4/3	Loam	1msbk	fr, ss&sp	Sf, sm&sc	Wg	22.5	45.375	32.125	60
C1	20-35	10YR 4/3	Loam	Massive		Fm	C	22.6	39.9	37.5	81
C2	35-60	10YR 4/3	Loam	Massive		Vfm		20	44.925	35.075	83
Forest											
A	0-7	10YR 3/4	Silty Loam	1fg	Fr, ss&sp	Mf&sc	Sgradual	22.5	50.375	27.125	0
Bw1	7-25	10YR 4/4	Clay Loam	Massive	firm, block		Diffuse	32.5	45.375	22.125	0
Bw2	25-44	10YR 5/4	Clay Loam	Massive				32.5	45.75	21.75	0
Jingtong											
Coal waste heap											
A1	0-10	10YR 3/2	Silty Loam	fg	Fr, ss&sp	Mf&sf	Wg	7.5	50.95	41.55	66
A2	10-20	2.5Y 3/3	Loam	fg	Fr, ss&sp	Sf&sm	Wg	12.5	36.95	50.55	84
C1	20-40	2.5Y 3/2	Loam	Massive		Fm &vfc	c	12.5	39.45	48.05	76
C2	>40	10YR 4/2	Loam	massive		vfm		12.5	36.95	50.55	76
Forest											
A	0-13	10YR 4/2	Loam/Sandy Loam	1fg	Fr, ss&sp	Mf&Sm, sc	Sc	10	37.875	52.125	0
Bw1	13-32	10YR 5/4	Loam	Massive		Sm+sc	Diffuse	20	35.375	44.625	5
Bw2	32-50	10YR 5/6	Loam	Massive		Fc		20	40.375	39.625	10
C	>50	10YR 6/5	SandyLoam					15	31.95	53.05	20

¹1: weak, 2: moderate; vf: very fine, f: fine, m: medium; g: granular, sbk: subangular blocky

²1: loose, fr: friable, fi: firm; ns: non-sticky, ss: slightly sticky, np: non-plastic, sp: slightly plastic

³f: few, s: some, m: many; vf: very fine, f: fine, m: medium, c: coarse

⁴c: clear, a: abrupt, s: smooth, w: wavy, g: gradual, d: diffuse



圖 4-1、十分捨石山樣區土壤剖面



圖 4-2、十分次生林樣區土壤剖面



圖 4-3、菁桐捨石山樣區土壤剖面



圖 4-4、菁桐次生林樣區土壤剖面



4.3 土壤基本性質

本研究中十分和菁桐樣區具有不同土壤質地(表 2)，其中十分樣區土壤較菁桐樣區有較高黏粒含量，而兩樣區中次生林土壤亦較捨石山土壤具有較高黏粒含量。在十分捨石山樣區，土壤為壤土(Loam)，次生林樣區則為黏質壤土(Clay Loam)至粉質壤土(Silt Loam)；在菁桐捨石山樣區，土壤為壤土(Loam)至粉質壤土(Silt Loam)，次生林樣區則為壤土(Loam)或在下層土壤為砂質壤土(Sandy Loam)。在十分捨石山樣區，A 層土壤含石率約為 60%，C 層含石率則超過 80%，次生林樣區土壤含石率則趨近 0；在菁桐捨石山樣區，A 層及 C 層含石率約為 75%，次生林樣區土壤 A 層含石率趨近 0，B 層及 C 層土壤含石率則分別為 7.5% 及 20%。

在十分和菁桐兩樣區中，捨石山的土壤總體密度皆大於 1 g cm^{-3} ，高於次生林土壤，捨石山土壤總體密度大致坐落於 $1.02 \sim 1.21 \text{ g cm}^{-3}$ ，而次生林土壤總體密度則大致在 $0.75 \sim 1.01 \text{ g cm}^{-3}$ 。

無論是次生林還是捨石山，土壤都呈現強酸性，其中十分地區次生林土壤與捨石山土壤水溶液 pH 值差異較明顯，兩者差值可達 2，而菁桐地區次生林與捨石山土壤水溶液 pH 值差異則不明顯，菁桐次生林土壤水溶液 pH 值約為 4.2 左右，捨石山土壤水溶液 pH 值約為 3.9。十分及菁桐土壤氯化鉀溶液 pH 值皆低於 4，兩地區次生林土壤氯化鉀溶液 pH 值約為 3.8~3.9，捨石山土壤氯化鉀溶液 pH 值則為 3~3.3 左右(表 3、表 4)。

在土壤有機碳及全氮的部分，捨石山地區土壤有機碳及全氮含量顯著高於次生林土壤，捨石山土壤有機碳濃度約為 5%~8%，土壤全氮濃度約為 0.23%~0.35%，土壤有機碳與全氮濃度與土壤深度關係不顯著，即土壤有機碳與全氮含量並不隨土壤深度增加而減少。次生林土壤有機碳濃度約為 0.9%~4%，土壤全氮濃度約為 0.10%~0.36%，土壤有機碳與全氮濃度隨土壤深度降低。捨石山土壤碳氮比約為 20~33，且跟土壤深度關係不顯著，次生林土壤碳氮比約為 6~13，且隨土壤深度增加而降低。

捨石山與次生林土壤 CEC 皆隨深度降低，但次生林土壤 CEC 隨深度差異較捨石山土壤顯著，捨石山土壤 CEC 約為 $14 \sim 19 \text{ cmol kg}^{-1} \text{ soil}$ ，次生林土壤 CEC

為 $9 \sim 20 \text{ cmol kg}^{-1} \text{ soil}$ 。交換性鉀、鈣、鎂陽離子鹽基飽和度(BS)在捨石山與次生林間有顯著差異，十分地區捨石山土壤鹽基飽和度落在 $21 \% \sim 49 \%$ ，次生林土壤則落在 $10 \% \sim 25 \%$ ；菁桐捨石山土壤鹽基飽和度落在 $39 \% \sim 73 \%$ ，次生林土壤則落在 $12 \% \sim 19 \%$ ，無論是捨石山還是次生林樣區，土壤鹽基飽和度與土壤深度不呈相關(表 5、表 6)。

在經過改良的 Ussiri et al. (Ussiri et al., 2008) 化學熱處理方法的十分及菁桐捨石山土壤(表 7)，可以看到地質來源有機碳(煤炭)在土壤有機碳中平均佔比小於 15%，因此可以得知捨石山的土壤有機碳仍以新鮮植生有機物貢獻為主。

雖然捨石山土壤的整體有機碳濃度(植生與地質碳量)高於次生林土壤，而經過計算土壤有機碳儲存量(表 8、表 9)，可以看到由於捨石山土壤含石率高，因此縱使捨石山土壤有機碳濃度較次生林土壤高，但其土壤儲存的碳量並未較次生林高。在 0-30 cm 土壤中，十分捨石山土壤有機碳全量為 $63.71 \text{ ton C ha}^{-1}$ ，植生來源碳量為 $53.11 \text{ ton C ha}^{-1}$ ，鄰近次生林有機全碳量為 $67.97 \text{ ton C ha}^{-1}$ ；菁桐捨石山土壤有機碳全量為 $55.43 \text{ ton C ha}^{-1}$ ，植生來源碳量為 $48.13 \text{ ton C ha}^{-1}$ ，鄰近次生林有機全碳量為 $62.61 \text{ ton C ha}^{-1}$ 。



4.4 岩石基本性質

十分與菁桐捨石山與次生林磨碎岩石粉末水溶液 pH 值呈現不同趨勢，在十分樣區，捨石山岩石水溶液 pH 值平均為 4.6，次生林岩石水溶液 pH 值為 5.0 (表 3)；菁桐樣區次生林岩石水溶液 pH 值為 5.1，次生林岩石水溶液 pH 值為 4.8 (表 4)。十分與菁桐地區次生林岩石母質皆呈酸性母岩特性，且岩石 pH 值高於土壤水溶液 pH 值。

在岩石有機碳及全氮的部分，捨石山地區岩石之有機碳及全氮含量顯著高於次生林土壤，十分捨石山岩石有機碳濃度約為 2.1%，全氮濃度約為 0.12%，次生林岩石有機碳濃度則為 0.19%，全氮濃度約為 0.05% (表 3)；菁桐捨石山岩石有機碳濃度約為 1.7%，全氮濃度約為 0.10%，次生林岩石有機碳濃度約為 0.13%，全氮濃度約為 0.03% (表 4)。捨石山岩石碳氮比約為 17，次生林土壤碳氮比約為 4，捨石山岩石碳氮比大於次生林岩石，此趨勢跟土壤相同，且差異倍率較土壤大(表 3，表 4)。



表 3 十分樣區土壤與岩石基本性質

Shifen	Depth (cm)	BD (g cm ⁻³)	pH (H ₂ O)	pH (KCl)	SOC (%)	TN (%)	C/N
Coal waste heap	0-10	1.03±0.13 ^{A1}	3.81±0.25 ^A	3.34±0.12 ^A	5.63±3.13 ^A	0.28±0.14 ^A	20.35±1.58 ^A
	10-20	1.21±0.11 ^A	3.68±0.15 ^A	3.24±0.06 ^A	5.87±0.44 ^A	0.26±0.01 ^A	22.87±1.08 ^A
	20-30	1.21±0.10 ^A	3.53±0.09 ^A	3.15±0.03 ^A	5.27±1.62 ^A	0.24±0.07 ^A	21.94±2.28 ^A
	30-50	-	3.48±0.13 ^A	3.09±0.09 ^A	5.46±1.23 ^A	0.23±0.04 ^A	24.07±1.97 ^A
	50-100	-	3.35±0.10 ^A	3.02±0.08 ^A	6.54±2.42 ^A	0.26±0.08 ^A	25.47±2.46 ^A
Secondary forest	0-10	0.84±0.11 ^B	4.98±0.52 ^B	3.65±0.03 ^A	4.22±1.23 ^A	0.36±0.07 ^A	11.73±1.20 ^B
	10-20	0.96±0.08 ^B	5.47±0.64 ^A	3.74±0.06 ^B	2.03±0.75 ^B	0.21±0.04 ^A	9.50±1.57 ^B
	20-30	1.01±0.10 ^B	4.36±0.22 ^B	3.81±0.04 ^B	1.29±0.49 ^B	0.17±0.03 ^A	7.74±1.51 ^B
	30-50	-	5.68±0.76 ^A	3.78±0.02 ^B	0.89±0.18 ^B	0.14±0.02 ^A	6.21±0.63 ^B
	50-100	-	5.30±0.79 ^A	3.82±0.03 ^B	0.86±0.30 ^A	0.13±0.02 ^A	6.43±1.46 ^B
Rock of Coal waste heap	-	-	4.58±0.23 ^A	-	2.14±0.11 ^A	0.12±0.01 ^A	17.58±2.44 ^A
Rock of Secondary forest	-	-	4.97±0.37 ^A	-	0.19±0.02 ^B	0.05±0.01 ^B	3.73±0.61 ^A

¹ 數據以平均數±標準偏差表示，相同字母顯示土壤性質於該土層中，捨石山土壤與鄰近次生林土壤無顯著差異(P > 0.05)



表 4 菁桐樣區土壤與岩石基本性質

Jingtong	Depth (cm)	BD (g cm ⁻³)	pH (H ₂ O)	pH (KCl)	SOC (%)	TN (%)	C/N
Coal waste heap	0-10	1.02±0.17 ^{A1}	4.22±0.42 ^A	3.56±0.28 ^A	7.04±1.10 ^A	0.35±0.08 ^A	20.12±1.36 ^A
	10-20	1.14±0.15 ^A	3.96±0.43 ^A	3.33±0.21 ^A	5.54±2.22 ^A	0.22±0.07 ^A	25.18±2.50 ^A
	20-30	1.21±0.07 ^A	3.85±0.39 ^A	3.28±0.21 ^A	7.20±3.08 ^A	0.25±0.08 ^A	28.41±3.33 ^A
	30-50	-	3.84±0.71 ^A	3.25±0.33 ^A	7.63±3.61 ^A	0.23±0.07 ^A	33.17±8.31 ^A
	50-100	-	3.77±0.32 ^A	3.20±0.21 ^A	8.06±0.48 ^A	0.27±0.02 ^A	29.85±0.77 ^A
Secondary forest	0-10	0.75±0.14 ^B	4.19±0.01 ^A	3.76±0.08 ^A	3.72±0.65 ^B	0.29±0.03 ^A	12.98±1.41 ^B
	10-20	0.77±0.07 ^B	4.17±0.08 ^A	3.83±0.06 ^A	2.68±0.38 ^A	0.21±0.02 ^A	12.58±1.89 ^B
	20-30	0.88±0.09 ^B	4.14±0.08 ^A	3.88±0.04 ^B	1.77±0.07 ^A	0.15±0.01 ^A	11.52±1.08 ^B
	30-50	-	4.17±0.02 ^A	3.93±0.03 ^A	1.31±0.44 ^A	0.15±0.07 ^A	8.71±1.23 ^B
	50-100	-	4.16±0.10 ^A	3.94±0.02 ^B	0.92±0.25 ^B	0.10±0.03 ^B	8.90±1.08 ^B
Rock of Coal waste heap	-	-	5.08±0.66 ^A	-	1.72±0.25 ^A	0.10±0.01 ^A	16.84±1.29 ^A
Rock of Secondary forest	-	-	4.83±0.10 ^A	-	0.13±0.04 ^A	0.03±0.01 ^B	4.28±0.25 ^B

¹ 數據以平均數±標準偏差表示，相同字母顯示土壤性質於該土層中，捨石山土壤與鄰近次生林土壤無顯著差異(P > 0.05)

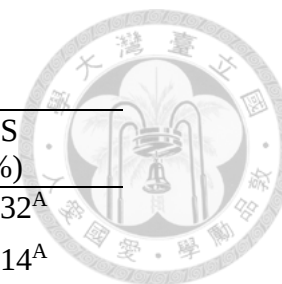


表 5 十分樣區土壤 CEC 與鹽基飽和度

Shifen	Depth (cm)	CEC (cmol kg ⁻¹ soil)	Exch. Ca (cmol kg ⁻¹ soil)	Exch. Mg (cmol kg ⁻¹ soil)	Exch. K (cmol kg ⁻¹ soil)	BS (%)
Coal waste heap	0-10	16.75±3.65 ^{A1}	1.46±0.52 ^A	6.10±3.75 ^A	0.29±0.03 ^A	49±32 ^A
	10-20	17.11±3.79 ^A	0.69±0.05 ^A	3.03±1.75 ^A	0.18±0.01 ^A	24±14 ^A
	20-30	17.29±1.83 ^A	0.50±0.08 ^A	2.96±2.10 ^A	0.21±0.07 ^A	21±9 ^A
	30-50	15.92±1.04 ^A	0.50±0.25 ^A	2.72±2.18 ^A	0.23±0.04 ^A	22±16 ^A
	50-100	14.19±1.58 ^A	1.16±1.25 ^A	2.41±1.20 ^A	0.18±0.04 ^A	26±15 ^A
Secondary forest	0-10	20.91±7.39 ^A	0.78±0.27 ^A	2.80±0.35 ^A	0.37±0.09 ^A	20±5 ^A
	10-20	17.42±4.45 ^A	0.37±0.05 ^B	4.13±5.23 ^A	0.28±0.18 ^A	25±23 ^A
	20-30	15.32±3.16 ^A	0.38±0.14 ^A	0.95±0.09 ^A	0.13±0.10 ^A	10±3 ^A
	30-50	14.78±4.02 ^A	0.40±0.07 ^A	0.96±0.19 ^A	0.30±0.19 ^A	12±2 ^A
	50-100	11.22±4.70 ^A	0.72±0.46 ^A	1.16±0.27 ^A	0.31±0.24 ^A	23±15 ^A

¹ 數據以平均數±標準偏差表示，相同字母顯示土壤性質於該土層中，捨石山土壤與鄰近次生林土壤無顯著差異(P > 0.05)

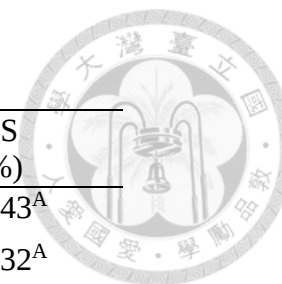


表 6 菁桐樣區土壤 CEC 與鹽基飽和度

Jingtong	Depth (cm)	CEC (cmol kg ⁻¹ soil)	Exch. Ca (cmol kg ⁻¹ soil)	Exch. Mg (cmol kg ⁻¹ soil)	Exch. K (cmol kg ⁻¹ soil)	BS (%)
Coal waste heap	0-10	19.47±2.34 ^{A1}	3.45±2.46 ^A	9.91±5.97 ^A	1.42±1.11 ^A	73±43 ^A
	10-20	17.32±0.52 ^A	1.82±1.82 ^A	7.84±4.24 ^A	0.76±0.93 ^A	61±32 ^A
	20-30	17.30±0.87 ^A	1.14±0.70 ^A	5.42±1.97 ^A	0.30±0.10 ^A	39±7 ^A
	30-50	14.71±1.64 ^A	1.51±1.73 ^A	6.88±2.98 ^A	0.25±0.08 ^A	58±20 ^A
	50-100	14.73±0.93 ^A	0.53±0.24 ^A	4.96±2.28 ^A	0.27±0.10 ^A	39±15 ^A
Secondary forest	0-10	18.35±5.24 ^A	0.75±0.47 ^A	1.89±0.27 ^A	0.37±0.05 ^A	18±7 ^A
	10-20	14.28±4.15 ^A	0.38±0.08 ^A	1.01±0.16 ^A	0.29±0.10 ^A	13±5 ^A
	20-30	12.21±4.09 ^A	0.31±0.05 ^A	0.74±0.02 ^A	0.29±0.04 ^A	12±4 ^B
	30-50	10.16±4.13 ^A	0.59±0.37 ^A	0.71±0.18 ^A	0.18±0.02 ^A	16±8 ^B
	50-100	9.02±3.88 ^A	0.58±0.48 ^A	0.73±0.26 ^A	0.23±0.03 ^A	19±13 ^A

¹ 數據以平均數±標準偏差表示，相同字母顯示土壤性質於該土層中，捨石山土壤與鄰近次生林土壤無顯著差異(P > 0.05)



表 7 捨石山樣區土壤地質來源有機碳(Geogenic organic carbon, GOC)占比

Coal waste heap	Depth (cm)	SOC (%)	BOC (%)	GOC (%)	BOC (% of SOC)	GOC (% of SOC)
Shifen	0-10	5.63	4.61	1.02	81.87	18.13
	50-100	6.54	5.67	0.87	86.65	13.35
	Average	6.09	5.13	0.96	84.26	15.74
Jingtong	0-10	7.04	6.11	0.93	86.76	13.24
	50-100	8.06	7.02	1.04	87.04	12.96
	Average	7.55	6.56	0.99	86.90	13.10

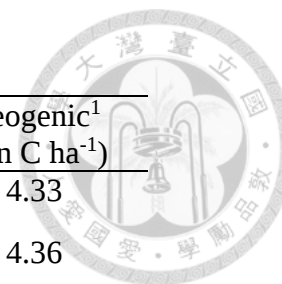


表 8 十分樣區土壤有機碳儲存量

Shifen	Depth (cm)	SOC (%)	BD (g cm ⁻³)	Rock (%)	SOC Stock (ton C ha ⁻¹)	Biological (ton C ha ⁻¹)	Geogenic ¹ (ton C ha ⁻¹)
Coal Waste Heap	0-10	5.63	1.03	58.8	23.89	19.56	4.33
	10-20	5.87	1.21	60	27.70	23.94	4.36
	20-30	5.27	1.21	81	12.12	10.21	1.91
	0 - 30				63.71	53.11	10.60
Secondary forest	0-10	4.22	0.84	0	35.45	35.45	0
	10-20	2.03	0.96	0	19.49	19.49	0
	20-30	1.29	1.01	0	13.03	13.03	0
	0-30				67.97	67.97	0

¹ 捨石山 10-20 cm 及 20-30 cm 土壤層 GOC 比例以 15.74%計算

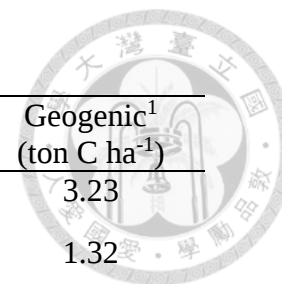


表 9 菁桐樣區土壤有機碳儲存量

Jingtong	Depth (cm)	SOC (%)	BD (g cm ⁻³)	Rock (%)	SOC Stock (ton C ha ⁻¹)	Biological (ton C ha ⁻¹)	Geogenic ¹ (ton C ha ⁻¹)
Coal Waste Heap	0-10	7.04	1.02	66	24.41	21.18	3.23
	10-20	5.54	1.14	84	10.10	8.78	1.32
	20-30	7.20	1.21	76	20.91	18.17	2.74
	0-30				55.43	48.13	7.30
Secondary forest	0-10	3.72	0.75	0	27.90	27.90	0
	10-20	2.68	0.77	3.5	19.91	19.91	0
	20-30	1.77	0.88	5	14.80	14.80	0
	0-30				62.61	62.61	0

¹ 捨石山 10-20 cm 及 20-30 cm 土壤層 GOC 比例以 13.10%計算



4.5 土壤與岩石鐵、鋁選擇性萃取

1.DCB 法萃取之鐵、鋁(Fe_d 、 Al_d)

土壤之 Fe_d 與 Al_d 含量如表 10 至表 13 所示，在十分及菁桐兩樣區，捨石山土壤 Fe_d 含量皆高於次生林土壤，而 Al_d 則低於次生林土壤。在十分樣區，捨石山土壤 Fe_d 介於 29 - 37 $mg\ g^{-1}\ soil$ 、 Al_d 介於 1.4 - 1.5 $mg\ g^{-1}\ soil$ ，次生林土壤 Fe_d 介於 21 - 27 $mg\ g^{-1}\ soil$ 、 Al_d 介於 5.8 - 6.3 $mg\ g^{-1}\ soil$ ；在菁桐樣區，捨石山土壤 Fe_d 介於 26 - 32 $mg\ g^{-1}\ soil$ 、 Al_d 介於 1.5 - 2.0 $mg\ g^{-1}\ soil$ ，次生林土壤 Fe_d 介於 17 - 22 $mg\ g^{-1}\ soil$ 、 Al_d 介於 4.9 - 6.9 $mg\ g^{-1}\ soil$ 。 Fe_d 與 Al_d 含量與土壤深度變化關係不明顯。

2.酸性草酸銨法萃取之鐵、鋁(Fe_o 、 Al_o)

土壤之 Fe_d 與 Al_d 含量如表 10 至表 13 所示，在十分及菁桐兩樣區，捨石山土壤 Fe_o 含量與次生林土壤 Fe_o 含量皆無顯著差異，而捨石山土壤 Al_o 則明顯低於次生林土壤 Al_o 。在十分樣區，捨石山與次生林土壤 Fe_o 含量皆介於 3.3 - 5.3 $mg\ g^{-1}\ soil$ ，而捨石山土壤 Al_o 含量介於 1.2 - 1.4 $mg\ g^{-1}\ soil$ ，次生林土壤 Al_o 介於 2.9 - 4.1 $mg\ g^{-1}\ soil$ ；在菁桐樣區，捨石山土壤 Fe_o 介於 3.8 - 5.3 $mg\ g^{-1}\ soil$ 、 Al_o 介於 1.2 - 1.7 $mg\ g^{-1}\ soil$ ，次生林土壤 Fe_o 介於 4.3 - 5.9 $mg\ g^{-1}\ soil$ 、 Al_o 介於 2.7 - 3.5 $mg\ g^{-1}\ soil$ 。除了捨石山土壤 Al_o 含量與土壤深度變化關係不明顯外，捨石山土壤 Fe_o 與次生林土壤 Fe_o 及 Al_o 隨土壤深度而逐漸減少。

3.焦磷酸鈉法萃取之鐵、鋁(Fe_p 、 Al_p)

土壤之 Fe_p 與 Al_p 含量如表 10 至表 13 所示，在十分及菁桐兩樣區，捨石山土壤 Fe_p 與 Al_p 含量皆顯著低於次生林土壤。在十分樣區，捨石山土壤 Fe_p 介於 0.4 - 1.8 $mg\ g^{-1}\ soil$ 、 Al_p 介於 0.7 - 0.8 $mg\ g^{-1}\ soil$ ，次生林土壤 Fe_p 介於 5.1 - 7.2 $mg\ g^{-1}\ soil$ 、 Al_p 介於 2.6 - 3.1 $mg\ g^{-1}\ soil$ ；在菁桐樣區，捨石山土壤 Fe_p 介於 0.4 - 2.3 $mg\ g^{-1}\ soil$ 、 Al_p 介於 0.4 - 1.1 $mg\ g^{-1}\ soil$ ，次生林土壤 Fe_p 介於 5.2 - 9.6 $mg\ g^{-1}\ soil$ 、 Al_o 介於 2.3 - 4.1 $mg\ g^{-1}\ soil$ 。捨石山與次生林土壤 Fe_p 及 Al_p 含量呈現隨土壤深度增加而逐漸減少的趨勢。



4.不同選擇性萃取所得鐵、鋁之比值

(1) Fe_d/Fe_t 、 Al_d/Al_t

土壤之 Fe_o/Fe_d 與 Al_o/Al_d 值如表 10 至表 13 所示，在十分與菁桐兩樣區，捨石山土壤呈現 Fe_d/Fe_t 比值高於次生林土壤，而 Al_d/Al_t 則低於次生林土壤。在十分樣區，捨石山土壤 Fe_d/Fe_t 介於 0.71~0.87、 Al_d/Al_t 約為 0.01，次生林土壤 Fe_d/Fe_t 介在 0.62~0.68、 Al_d/Al_t 落在 0.06~0.07；在菁桐樣區，捨石山土壤 Fe_d/Fe_t 介於 0.68~0.80、 Al_d/Al_t 約為 0.02，次生林土壤 Fe_d/Fe_t 介在 0.54~0.68、 Al_d/Al_t 落在 0.07~0.09。十分及菁桐樣區捨石山土壤與次生林土壤之 Fe_d/Fe_t 與 Al_d/Al_t 與土壤深度關係並不顯著。

(2) Fe_o/Fe_d 、 Al_o/Al_d

土壤之 Fe_o/Fe_d 與 Al_o/Al_d 值如表 10 至表 13 所示，在十分與菁桐兩樣區，捨石山土壤 Fe_o/Fe_d 皆低於次生林土壤，而 Al_o/Al_d 則高於次生林土壤。在十分樣區，捨石山土壤 Fe_o/Fe_d 落在 0.10~0.16、 Al_o/Al_d 落在 0.82~0.97，次生林土壤 Fe_o/Fe_d 落在 0.13~0.24、 Al_o/Al_d 落在 0.50~0.66；在菁桐樣區，捨石山土壤 Fe_o/Fe_d 落在 0.15~0.18、 Al_o/Al_d 落在 0.83~0.92，次生林土壤 Fe_o/Fe_d 落在 0.24~0.28、 Al_o/Al_d 落在 0.49~0.56。十分及菁桐樣區捨石山土壤與次生林土壤 Fe_o/Fe_d 隨土壤深度增加而降低，而 Al_o/Al_d 僅有十分次生林樣區與土壤深度呈相關，十分捨石山樣區與菁桐樣區 Al_o/Al_d 與土壤深度關係不顯著。

(3) Fe_p/Fe_o 、 Al_p/Al_o

土壤之 Fe_p/Fe_o 與 Al_p/Al_o 值如表 10 至表 13 所示，在十分與菁桐兩樣區，捨石山土壤 Fe_p/Fe_o 與 Al_p/Al_o 皆低於次生林土壤。在十分樣區，捨石山土壤 Fe_p/Fe_o 落在 0.11~0.33、 Al_p/Al_o 落在 0.50~0.67，捨石山土壤 Fe_p/Fe_o 落在 1.29~1.57、 Al_p/Al_o 落在 0.78~0.92；在菁桐樣區，捨石山土壤 Fe_p/Fe_o 落在 0.08~0.44、 Al_p/Al_o 落在 0.33~0.65，次生林土壤 Fe_p/Fe_o 落在 1.21~1.87、 Al_p/Al_o 落在 0.83~1.17。十分樣區捨石山土壤 Fe_p/Fe_o 、菁桐樣區捨石山土壤 Fe_p/Fe_o 及次生林土壤 Fe_p/Fe_o 與 Al_p/Al_o 值隨土壤深度增加而降低，十分樣區次生林土壤 Fe_p/Fe_o 、 Al_p/Al_o 值則隨土壤深度增加，十分及菁桐樣區捨石山土壤 Al_p/Al_o 與土壤深度不呈相關。

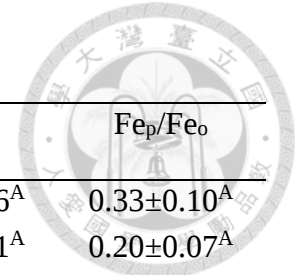


表 10 十分樣區土壤與岩石選擇性鐵萃取性質

Shifen	Depth (cm)	Fe _t (%)	Fe _d (mg/g)	Fe _o (mg/g)	Fe _p (mg/g)	Fe _d /Fe _t	Fe _o /Fe _d	Fe _p /Fe _o
Coal waste heap	0-10	3.89±0.42 ^{A1}	33.5±4.72 ^A	5.3±2.07 ^A	1.8±1.12 ^A	0.87±0.13 ^A	0.16±0.06 ^A	0.33±0.10 ^A
	10-20	4.56±0.42 ^A	35.9±3.80 ^A	4.3±0.63 ^A	0.9±0.46 ^A	0.79±0.01 ^A	0.12±0.01 ^A	0.20±0.07 ^A
	20-30	4.88±1.04 ^A	36.2±4.31 ^A	3.8±0.67 ^A	0.6±0.05 ^A	0.76±0.10 ^A	0.11±0.03 ^A	0.15±0.03 ^A
	30-50	4.46±0.56 ^A	33.3±4.07 ^A	3.3±0.16 ^A	0.4±0.08 ^A	0.75±0.01 ^A	0.10±0.01 ^A	0.12±0.02 ^A
	50-100	4.21±0.51 ^A	29.9±3.05 ^A	3.4±0.27 ^A	0.4±0.29 ^A	0.71±0.05 ^A	0.11±0.01 ^A	0.11±0.08 ^A
Secondary forest	0-10	3.48±0.09 ^A	21.5±0.81 ^B	5.2±0.67 ^A	6.6±1.64 ^B	0.62±0.01 ^A	0.24±0.04 ^A	1.29±0.40 ^A
	10-20	3.84±0.10 ^A	23.6±2.05 ^B	5.3±0.93 ^A	7.2±0.23 ^B	0.62±0.04 ^B	0.22±0.02 ^B	1.38±0.25 ^B
	20-30	3.90±0.08 ^A	25.2±0.70 ^B	4.7±1.22 ^A	6.2±0.78 ^B	0.65±0.03 ^A	0.19±0.05 ^A	1.36±0.21 ^B
	30-50	3.90±0.15 ^A	26.7±1.47 ^B	3.5±0.20 ^A	5.1±1.00 ^B	0.68±0.04 ^A	0.13±0.00 ^B	1.46±0.21 ^B
	50-100	3.88±0.14 ^A	24.5±2.44 ^A	3.3±0.45 ^A	5.1±2.30 ^B	0.63±0.07 ^A	0.13±0.01 ^A	1.57±0.69 ^A
Rock of Coal waste heap	-	3.82±1.04 ^A	22.4±2.15 ^A	3.9±1.46 ^A	0.3±0.31 ^A	0.63±0.13 ^A	0.19±0.09 ^A	0.07±0.06 ^A
Rock of Secondary forest	-	4.56±1.05 ^A	27.8±10.04 ^A	4.2±0.41 ^A	1.3±0.15 ^B	0.60±0.16 ^A	0.17±0.06 ^A	0.16±0.03 ^A

¹ 數據以平均數±標準偏差表示，相同字母顯示土壤性質於該土層中，捨石山土壤與鄰近次生林土壤無顯著差異(P > 0.05)

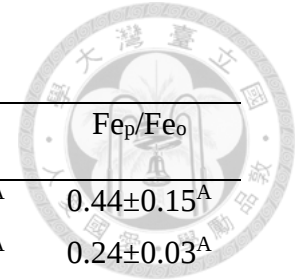


表 11 菁桐樣區土壤與岩石選擇性鐵萃取性質

Jingtong	Depth (cm)	Fe _t (%)	Fe _d (mg/g)	Fe _o (mg/g)	Fe _p (mg/g)	Fe _d /Fe _t	Fe _o /Fe _d	Fe _p /Fe _o
Coal waste heap	0-10	3.75±0.72 ^{A1}	30.4±9.67 ^A	5.3±1.12 ^A	2.3±0.61 ^A	0.80±0.11 ^A	0.18±0.04 ^A	0.44±0.15 ^A
	10-20	4.49±0.61 ^A	31.1±7.98 ^A	4.7±0.61 ^A	1.1±0.21 ^A	0.69±0.09 ^A	0.16±0.06 ^A	0.24±0.03 ^A
	20-30	4.42±0.63 ^A	31.5±6.89 ^A	4.7±1.02 ^A	1.0±0.25 ^A	0.71±0.08 ^A	0.16±0.07 ^A	0.21±0.01 ^A
	30-50	3.84±0.26 ^A	27.1±4.58 ^A	4.4±1.03 ^A	0.5±0.11 ^A	0.70±0.07 ^A	0.17±0.06 ^A	0.11±0.03 ^A
	50-100	3.86±0.35 ^A	26.3±4.42 ^A	3.8±0.76 ^A	0.4±0.32 ^A	0.68±0.06 ^A	0.15±0.01 ^A	0.08±0.07 ^A
Secondary forest	0-10	2.99±0.15 ^A	19.9±3.42 ^A	5.1±0.26 ^A	9.6±1.65 ^B	0.66±0.10 ^A	0.27±0.06 ^A	1.87±0.37 ^B
	10-20	3.18±0.14 ^A	21.5±3.40 ^A	5.9±0.33 ^A	9.2±1.65 ^B	0.68±0.10 ^A	0.28±0.04 ^A	1.57±0.27 ^B
	20-30	3.23±0.20 ^A	21.9±1.66 ^A	5.5±0.47 ^A	7.5±1.17 ^B	0.68±0.03 ^A	0.26±0.04 ^A	1.35±0.21 ^B
	30-50	3.34±0.14 ^A	19.9±0.21 ^A	5.2±0.49 ^A	8.0±1.67 ^B	0.60±0.03 ^A	0.26±0.03 ^A	1.55±0.45 ^B
	50-100	3.30±0.21 ^A	17.7±1.51 ^A	4.3±0.78 ^A	5.2±1.08 ^B	0.54±0.03 ^B	0.24±0.04 ^B	1.21±0.09 ^B
Rock of Coal waste heap	-	4.28±0.37 ^A	19.4±5.06 ^A	2.0±0.53 ^A	0.1±0.08 ^A	0.51±0.08 ^A	0.11±0.02 ^A	0.08±0.04 ^A
Rock of Secondary forest	-	3.52±0.18 ^B	15.6±2.56 ^A	3.5±0.33 ^B	0.4±0.26 ^A	0.45±0.05 ^A	0.23±0.06 ^A	0.12±0.07 ^A

¹ 數據以平均數±標準偏差表示，相同字母顯示土壤性質於該土層中，捨石山土壤與鄰近次生林土壤無顯著差異(P > 0.05)

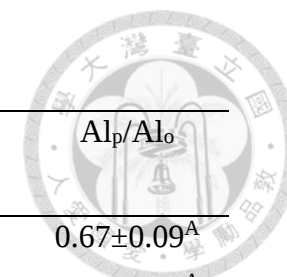


表 12 十分樣區土壤與岩石選擇性鋁萃取性質

Shifen	Depth (cm)	Al _t (%)	Al _d (mg/g)	Al _o (mg/g)	Al _p (mg/g)	Al _d /Al _t	Al _o /Al _d	Al _p /Al _o
Coal waste heap	0-10	10.47±0.37 ^{A1}	1.4±0.30 ^A	1.2±0.49 ^A	0.8±0.22 ^A	0.01±0.00 ^A	0.82±0.17 ^A	0.67±0.09 ^A
	10-20	10.23±0.35 ^A	1.4±0.22 ^A	1.3±0.24 ^A	0.8±0.12 ^A	0.01±0.00 ^A	0.89±0.06 ^A	0.60±0.04 ^A
	20-30	10.17±0.08 ^A	1.5±0.08 ^A	1.4±0.16 ^A	0.7±0.02 ^A	0.01±0.00 ^A	0.97±0.06 ^A	0.50±0.08 ^A
	30-50	10.34±0.71 ^A	1.4±0.19 ^A	1.3±0.26 ^A	0.7±0.06 ^A	0.01±0.00 ^A	0.89±0.08 ^A	0.58±0.08 ^A
	50-100	10.72±0.11 ^A	1.4±0.22 ^A	1.2±0.32 ^A	0.7±0.11 ^A	0.01±0.00 ^A	0.88±0.13 ^A	0.59±0.07 ^A
Secondary forest	0-10	8.79±0.37 ^B	6.1±0.13 ^B	4.0±0.42 ^B	3.1±0.66 ^B	0.07±0.00 ^B	0.66±0.08 ^A	0.78±0.22 ^A
	10-20	9.08±0.49 ^B	6.3±0.24 ^B	4.1±0.35 ^B	3.1±0.14 ^B	0.07±0.01 ^B	0.65±0.05 ^B	0.78±0.09 ^A
	20-30	9.83±0.29 ^A	6.3±0.40 ^B	3.7±0.42 ^B	2.9±0.17 ^B	0.06±0.00 ^B	0.58±0.04 ^B	0.81±0.12 ^B
	30-50	10.03±0.36 ^A	6.2±0.37 ^B	3.1±0.20 ^B	2.6±0.10 ^B	0.06±0.00 ^B	0.50±0.02 ^B	0.86±0.04 ^B
	50-100	10.00±0.36 ^A	5.8±0.36 ^B	2.9±0.30 ^B	2.6±0.68 ^B	0.06±0.00 ^B	0.50±0.04 ^B	0.92±0.25 ^A
Rock of Coal waste heap	-	10.16±1.15 ^A	0.9±0.05 ^A	0.7±0.02 ^A	0.6±0.07 ^A	0.01±0.00 ^A	0.75±0.02 ^A	0.82±0.06 ^A
Rock of Secondary forest	-	11.18±1.23 ^A	3.7±0.81 ^B	2.5±0.19 ^B	1.3±0.15 ^B	0.03±0.01 ^A	0.68±0.14 ^A	0.52±0.03 ^B

¹ 數據以平均數±標準偏差表示，相同字母顯示土壤性質於該土層中，捨石山土壤與鄰近次生林土壤無顯著差異(P > 0.05)

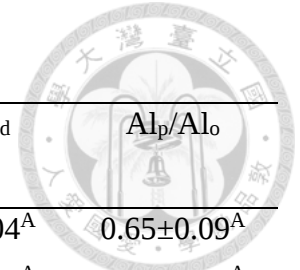


表 13 菁桐樣區土壤與岩石選擇性鋁萃取性質

Jingtong	Depth (cm)	Al _t (%)	Al _d (mg/g)	Al _o (mg/g)	Al _p (mg/g)	Al _d /Al _t	Al _o /Al _d	Al _p /Al _o
Coal waste heap	0-10	9.34±0.43 ^{A1}	2.0±0.30 ^A	1.7±0.17 ^A	1.1±0.25 ^A	0.02±0.00 ^A	0.84±0.04 ^A	0.65±0.09 ^A
	10-20	9.83±0.30 ^A	1.7±0.34 ^A	1.5±0.23 ^A	0.8±0.16 ^A	0.02±0.00 ^A	0.92±0.13 ^A	0.53±0.08 ^A
	20-30	9.70±0.23 ^A	1.8±0.22 ^A	1.6±0.13 ^A	0.8±0.04 ^A	0.02±0.00 ^A	0.89±0.05 ^A	0.50±0.05 ^A
	30-50	9.31±0.83 ^A	1.5±0.24 ^A	1.2±0.13 ^A	0.4±0.36 ^A	0.02±0.00 ^A	0.84±0.04 ^A	0.33±0.26 ^A
	50-100	9.97±0.29 ^A	1.9±0.36 ^A	1.6±0.31 ^A	0.8±0.09 ^A	0.02±0.00 ^A	0.83±0.05 ^A	0.50±0.08 ^A
Secondary forest	0-10	7.14±0.07 ^B	6.7±0.91 ^B	3.5±0.23 ^B	4.1±0.73 ^B	0.09±0.01 ^B	0.54±0.09 ^B	1.17±0.21 ^B
	10-20	7.80±0.44 ^B	6.8±0.76 ^B	3.5±0.09 ^B	3.8±0.37 ^B	0.09±0.01 ^B	0.52±0.07 ^B	1.09±0.13 ^B
	20-30	8.03±0.28 ^B	6.9±0.68 ^B	3.3±0.26 ^B	3.5±0.60 ^B	0.09±0.01 ^B	0.49±0.09 ^B	1.07±0.25 ^A
	30-50	8.43±0.53 ^A	5.7±0.42 ^B	3.1±0.24 ^B	2.9±0.44 ^B	0.07±0.01 ^B	0.54±0.03 ^B	0.93±0.12 ^B
	50-100	8.70±0.33 ^B	4.9±0.88 ^B	2.7±0.48 ^B	2.3±0.50 ^B	0.07±0.01 ^B	0.56±0.02 ^B	0.83±0.07 ^B
Rock of Coal waste heap	-	11.39±0.04 ^A	0.9±0.17 ^A	0.7±0.16 ^A	0.5±0.10 ^A	0.01±0.00 ^A	0.82±0.04 ^A	0.74±0.03 ^A
Rock of Secondary forest	-	9.67±0.77 ^B	2.7±0.36 ^B	1.7±0.14 ^B	0.8±0.05 ^B	0.03±0.00 ^B	0.65±0.13 ^A	0.50±0.07 ^B

¹ 數據以平均數±標準偏差表示，相同字母顯示土壤性質於該土層中，捨石山土壤與鄰近次生林土壤無顯著差異(P > 0.05)

4.6 土壤磷含量與 Hedley 序列萃取

該方法僅針對十分樣區進行實驗，從實驗結果可知(表 14)，捨石山樣區與次生林樣區土壤全磷含量在深度 0 - 20 公分時無顯著差異，全磷含量約介於 1100 - 1300 mg P kg⁻¹。捨石山土壤在深度 20 - 30、30 - 50 及 50 - 100 公分時，全磷含量仍介於 1100 - 1300 mg P kg⁻¹ 之間，土壤全磷含量差異與土壤深度關係並不明顯；次生林土壤在深度 20 - 30、30 - 50 及 50 - 100 公分時，全磷含量逐漸下降至 700 - 800 mg P kg⁻¹ 左右，土壤全磷含量隨土壤深度增加而逐漸降低。

Hedley 磷序列萃取結果顯示，無論是捨石山還是次生林，土壤磷型態皆以無法被 Hedley 序列法萃取液萃取的 Residual P 為主，捨石山樣區土壤 Residual P 佔全磷含量介於 90% - 94% 間(表 15)，次生林土壤 Residual P 佔全磷含量介於 87% - 92%。在可被萃取出來的磷中，捨石山以 NaOH-P_i(NaOH 無機磷)為主，佔比約為 2.8% - 4.2%，隨後則以 NaOH-P_o(NaOH 有機磷)、NaHCO₃-P_o、HCl-P_i、NaHCO₃-P_i 及 H₂O-P_i 次之；次生林土壤以 NaOH-P_o 為主，佔比介於 4.5% - 7.3%，接下來則以 NaOH-P_i、NaHCO₃-P_o、NaHCO₃-P_i、HCl-P_i 及 H₂O-P_i 次之，無論是捨石山還是次生林皆以 H₂O-P_i 最低，純水幾乎無法萃取出土壤中的磷。植物容易利用的磷(H₂O-P_i、NaHCO₃-P_i、NaHCO₃-P_o 總和)在兩樣區土壤皆僅佔全磷的 1% - 3%，而植物不易利用的磷(HCl-P_i、Residual P 總和)則佔土壤全磷 88% - 95%。

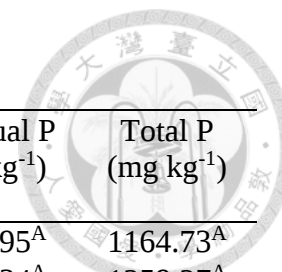


表 14 十分樣區土壤與岩石磷序列萃取結果

Shifen	Depth (cm)	H ₂ O-P _i (mg kg ⁻¹)	NaHCO ₃ -P _i (mg kg ⁻¹)	NaHCO ₃ - P _o (mg kg ⁻¹)	NaOH-P _i (mg kg ⁻¹)	NaOH-P _o (mg kg ⁻¹)	HCl-P _i (mg kg ⁻¹)	Residual P (mg kg ⁻¹)	Total P (mg kg ⁻¹)
Coal waste heap	0-10	0.77 ^{A1}	7.68 ^A	24.32 ^A	38.06 ^A	36.95 ^A	13.32 ^A	1055.95 ^A	1164.73 ^A
	10-20	0.74 ^A	2.46 ^A	12.44 ^A	35.24 ^A	27.11 ^A	8.94 ^A	1172.34 ^A	1259.27 ^A
	20-30	2.13 ^A	4.1 ^A	15.6 ^A	48.98 ^A	22.77 ^A	9.98 ^A	1070.10 ^A	1166.07 ^A
	30-50	1.05 ^A	4.06 ^A	11.29 ^A	49.16 ^A	16.07 ^A	6.76 ^A	1207.57 ^A	1290.60 ^A
	50-100	1.47 ^A	3.06 ^A	12.74 ^A	41.62 ^A	11.78 ^A	5.82 ^A	1104.38 ^A	1180.87 ^A
Secondary forest	0-10	0.98 ^A	10.64 ^A	16.41 ^A	38.98 ^A	78.87 ^A	3.34 ^B	1115.85 ^A	1265.07 ^A
	10-20	0.4 ^A	5.92 ^B	14.98 ^A	22.44 ^A	57.06 ^A	2.82 ^B	1170.51 ^A	1274.13 ^A
	20-30	0.00 ^A	4.2 ^A	14.4 ^A	17.68 ^A	58.91 ^A	2.76 ^A	713.78 ^A	811.73 ^A
	30-50	0.27 ^A	3.6 ^A	17.7 ^A	19.56 ^B	55.96 ^B	3.26 ^B	718.18 ^B	818.53 ^B
	50-100	0.00 ^A	5.02 ^A	16.03 ^A	16.18 ^B	47.53 ^B	3.56 ^B	620.61 ^A	708.93 ^A
Rock of Coal waste heap	-	0.80	0.25	0.00	70.74	0.00	26.09	1141.76	1239.63 ^A
Rock of Secondary forest	-	-	-	-	-	-	-	-	955.27 ^A

¹ 相同字母顯示土壤性質於該土層中，捨石山土壤與鄰近次生林土壤無顯著差異(P > 0.05)

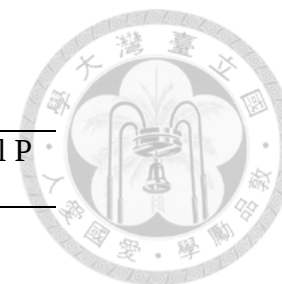


表 15 土壤與岩石序列萃取磷不同分級磷濃度佔全磷之相對比例

Shifen	Depth (cm)	H ₂ O-P _i (%)	NaHCO ₃ -P _i (%)	NaHCO ₃ -P _o (%)	NaOH-P _i (%)	NaOH-P _o (%)	HCl-P _i (%)	Residual P (%)
Coal waste heap	0-10	0.07	0.66	2.09	3.27	3.17	1.14	90.66
	10-20	0.06	0.20	0.99	2.80	2.15	0.71	93.10
	20-30	0.18	0.35	1.34	4.20	1.95	0.86	91.77
	30-50	0.08	0.31	0.87	3.81	1.24	0.52	93.57
	50-100	0.12	0.26	1.08	3.52	1.00	0.49	93.52
Secondary forest	0-10	0.08	0.84	1.30	3.08	6.23	0.26	88.20
	10-20	0.03	0.46	1.18	1.76	4.48	0.22	91.87
	20-30	0.00	0.52	1.77	2.18	7.26	0.34	87.93
	30-50	0.03	0.44	2.16	2.39	6.84	0.40	87.74
	50-100	0.00	0.71	2.26	2.28	6.70	0.50	87.54
Rock of Coal waste heap	-	0.06	0.02	0.00	5.71	0.00	2.10	92.10



五、討論

5.1 捨石山與次生林的植被差異

從十分及菁桐的航照圖可以看到，捨石山的地表從光禿的地貌，經過數十年的轉變，已被樹林覆蓋，難以區分捨石山跟次生林的範圍。但根據植被調查的結果，可以看到捨石山森林組成與週遭原生次生林組成仍有差異，在十分地區，捨石山的優勢樹種為森氏紅淡比，在 DBH 大於 1 公分的樹種中佔了 60%，而十分次生林地區，其植被優勢樹種為森氏紅淡比及米碎桫欏木，佔了近 40% 左右；在菁桐地區，捨石山的優勢樹種為燈稱花及森氏紅淡比，在 DBH 大於 1 公分的樹種中約佔 46%，而次生林地區的植被優勢樹種為奧氏虎皮楠及大明橘，佔約 28%。而以樹木數量而言，無論是十分還是菁桐地區，捨石山樣區樹木株數皆多於次生林樣區，但捨石山樣區樹木物種種數則少於次生林樣區，顯示捨石山樣區樹木豐富度低於次生林樣區。以其他生物多樣性指標來看，也能發現捨石山植被的多樣性低於次生林植被，無論是香農多樣性指數、均勻度及辛普森多樣性指數，皆可看到次生林植被的生物多樣性指標高於捨石山植被，顯示捨石山植被雖然經過數十年演替，但其植被結構仍跟次生林有異，植被多樣性仍遜於次生林。不過相較於十分樣區，廢棄歷史約 40 年的菁桐捨石山樣區中植被的均勻度、香農多樣性指數及辛普森多樣性指數數值與次生林樣區數值差異較小，且捨石山與次生林植被組成的物種相似度更高，顯示植被的生物多樣性隨時間持續增加，且捨石山的植被組成會逐漸演替趨向周遭的次生林。

5.2 捨石山與次生林的土壤剖面與基本性質差異

從土壤剖面可以看到，捨石山土壤縱使經過三、四十餘年的時間，其土壤剖面仍呈化育初始階段，僅化育出 A 層及 C 層，跟次生林土壤剖面具有 B 層、且土壤層更厚，有明顯差異。從肉眼可見土壤剖面顏色差異外，也可以看到捨石山土壤剖面含有大量石頭，進一步測量可以發現捨石山土壤含石率高達 60%~85%，且捨石山土壤質地與次生林土壤質地相比，前者砂粒含量較高且黏粒含量較低。

然而捨石山土壤具具有較低 pH、較高土壤有機碳氮含量與 CEC，這些數值

指出捨石山土壤化學性質相較於次生林土壤並非處於風化初始階段，而是具有一定土壤化育，此結果並不符合捨石山土壤風化指數較低的假設。我們認為這些土壤性質主要受到復育植生影響，即捨石山生長快速與數量豐富的年輕樹木植株與地面植被，可以製造較多的有機物輸入土壤，有機酸使土壤 pH 值下降，增加土壤有機碳氮與 CEC。此外，楊蕙綺(2000)指出菁桐地區礦區土壤因含有黃鐵礦等含硫礦物，無機態硫含量高，因此造成土壤呈現強酸性，雖然實地採樣並未見到黃鐵礦，但土壤 pH 值測定同樣呈現強酸。值得注意的是，菁桐地區土壤 pH 值跟許曉琪(2003)研究結果相比，土壤 pH 值呈現上升的趨勢，此結果與多數礦業棄土的研究不符，多數報告指出礦區棄土會因時間風化影響，導致 pH 值隨時間降低。菁桐土壤 pH 值相較許曉琪(2003)研究上升，可能肇因於空間變異的結果，或是實驗儀器及操作上的誤差。

捨石山土壤有機碳、全氮及碳氮比值皆高於次生林土壤，且不隨土壤深度呈現顯著差異，其差異可能是土壤有機質的不同，捨石山主要受到顆粒有機物 (Particulate organic matter, POM) 的影響，而次生林土壤主要受到礦化有機物 (Mineral associated organic matter, MAOM) 的影響，前者平均存留的時間較短，主要來自植物與真菌碎屑形成，碳氮比約為 10 - 40；後者平均存留的時間較長，來源除植物外亦與微生物相關，碳氮比約為 8 - 13，相較於 POM 更容易被植物利用 (Lavallee et al., 2019)。另外，捨石山與次生林樣區的植被物種差異，也可能導致後續 POM 跟 MAOM 的差異。此外，除了有機質形式不同的影響外，土壤全氮亦受到母質影響，捨石山的岩石較次生林的岩石擁有更高的全氮，其岩石性質的差異可能影響後續土壤化育的性質。

土壤 CEC 值在捨石山與次生林土壤也呈現不同趨勢，前者 CEC 值不隨土壤深度降低，CEC 值在各土壤層間無顯著差異，跟許曉琪(2002)與其他前人研究相比，捨石山 CEC 值略為下降，但仍屬於中級(15-25 cmol kg⁻¹)。相較於顏江河(1996)及楊蕙綺(2000)的研究，CEC 值則有明顯上升。

5.3 捨石山與次生林的土壤鐵、鋁

捨石山土壤的全鐵及全鋁含量高於次生林土壤，但在土壤選擇性萃取鐵鋁

中，鐵和鋁卻呈現不一致的風化指數趨勢。其中捨石山土壤 Fe_d 高於次生林土壤 Fe_d ，但 Al_d 卻相反，捨石山土壤 Fe_o 與次生林土壤 Fe_o 含量無顯著差異，但次生林土壤 Al_o 顯著高於捨石山土壤 Al_o ，僅與有機物鍵結的無定型鐵 Fe_p 、鋁 Al_p 皆是次生林土壤顯著高於次生林土壤。 Fe_o/Fe_d 與 Fe_d/Fe_t 常被視為土壤風化的重要指標，捨石山土壤擁有較低的 Fe_o/Fe_d 與較高的 Fe_d/Fe_t 數值，表示土壤鐵多以游離鐵的形式存在，且結晶程度較高，擁有較高的風化指數(Tomohiro et al, 2018)。不過，此結果與預期不符，且跟 Al_o/Al_d 、 Al_d/Al_t 相反。經進一步測定岩石的鐵、鋁含量之後，發現岩石鐵鋁含量結果與土壤萃取結果相似，因此捨石山較次生林擁有較低的 Fe_o/Fe_d 與較高的 Fe_d/Fe_t 數值可能起源於母質的差異，因此土壤的選擇性萃取鐵、鋁結果不宜直接作為判斷捨石山土壤的風化指標，特別是來自不同母質差異之影響。

次生林土壤較捨石山土壤擁有較高的 Fe_p 、 Al_p ，顯示次生林土壤有機物(SOM)多與鐵、鋁等礦物結合，捨石山土壤則否，進一步驗證捨石山土壤有機物以 POM 為主，次生林土壤有機物則以 MAOM 為主。另外，次生林各層土壤之 Fe_p/Fe_o 、 Al_p/Al_o 值多大於 1，說明酸性草酸銨法可能無法有效萃取部分土壤之游離性鐵、鋁(陳震菖，2016)，此研究與前人結果相符。此結果也顯示次生林土壤之 Fe_o/Fe_d 可能是被低估的，次生林土壤中結晶鐵的比例可能高於捨石山土壤。

5.4 捨石山與次生林土壤的序列磷性質

由於今日捨石山已被茂密植被覆蓋，不再是裸露土地，但植被的組成仍與鄰近次生林有差異，因此與次生林土壤進行比較，探討目前土壤磷的組成及含量有何差異，由於十分捨石山廢棄時間較短，與鄰近次生林植被組成差異較大，因此僅選定十分土壤進行序列磷的抽樣檢測。其中在無機磷的部分，捨石山與次生林在植物直接可利用的無機磷(H_2O-P_i 、 $NaHCO_3-P_i$)無顯著差異，植物適度可利用的無機磷($NaOH-P_i$)及植物不易利用的磷($HCl-P_i$)則是捨石山高於次生林。其中，在 pH 值低、土壤呈強酸的情況下，土壤鐵、鋁氧化物會與磷酸根產生吸附作用，形成吸附性鐵、鋁磷酸鹽，亦或形成沉澱鐵、鋁磷酸鹽。Martínez et al. (1996) 的研究結果同樣指出在煤礦棄土區域的酸性土壤中，主要磷的吸收形式是來自於於

鐵或鋁的複合物，對磷有強烈固定作用，使得有效性磷很低(楊蕙綺，2000；許曉琪，2003)，而鐵、鋁離子又與 NaOH-P_i 相關性最強(張婷雅，2020)，此篇研究結果符合在土壤呈強酸的性質下，鐵、鋁氧化物與磷高度結合形成鐵、鋁磷酸鹽，在 Hedley 磷序列測定中，以 NaOH 所萃取出磷含量高於其他萃取出液。另外，捨石山土壤植物不易利用的磷(HCl-P_i)高於次生林土壤，符合捨石山植被的多樣性指數低於次生林，且代表土壤風化程度較低，相對較為年輕(張婷雅，2020)，但磷仍可能來自母質差異的影響，只不過我們並未對次生林岩石進行 Hedley 磷序列萃取。

Hedley 萃取出有機磷的部分， $\text{NaHCO}_3\text{-P}_o$ 在捨石山與次生林土壤含量多於無機磷($\text{NaHCO}_3\text{-P}_i$)，但兩者間差異不顯著。 NaOH-P_o 次生林顯著高於捨石山土壤，可能是因為次生林含有更多的根系生物量及土壤微生物，可提升有機物含量(張婷雅，2020)，且次生林土壤有機物是以 MAOM 為主，捨石山土壤有機物則以 POM 為主，後者土壤有機物與礦物結合礦化比例較低，因此捨石山土壤磷分級以 NaOH-P_i 主，次生林土壤則是以 NaOH-P_o 為主。

5.5 影響捨石山土壤化育的因子

綜合以上討論，我們認為平溪地區捨石山土壤化育並不單單受到時間因子的影響，也同時受到生物與地質(母質)因子的影響，圖 5 列舉生物、地質與時間等土壤化育因子所影響之土壤性質。

就不同化育因子對土壤化育程度之影響，以生物因子影響較快，經歷 30 年自然化育後，造成捨石山樣區這些土壤性質與鄰近次生林無顯著差異。相反地，土壤剖面化育過程，則明顯看出捨石山土壤與次生林土壤的明顯差異，反應出土壤剖面化育所需要長時間的礦物風化與淋洗作用，圖 6 列舉捨石山土壤含石率較高，土壤分層不明顯，因此淋洗作用較次生林快，影響如 SOC、TN 及交換性鎂離子等性質。部分的土壤化學性質則受到母質影響，地質來源的不同，造成捨石山土壤仍具有一些母岩的特性。

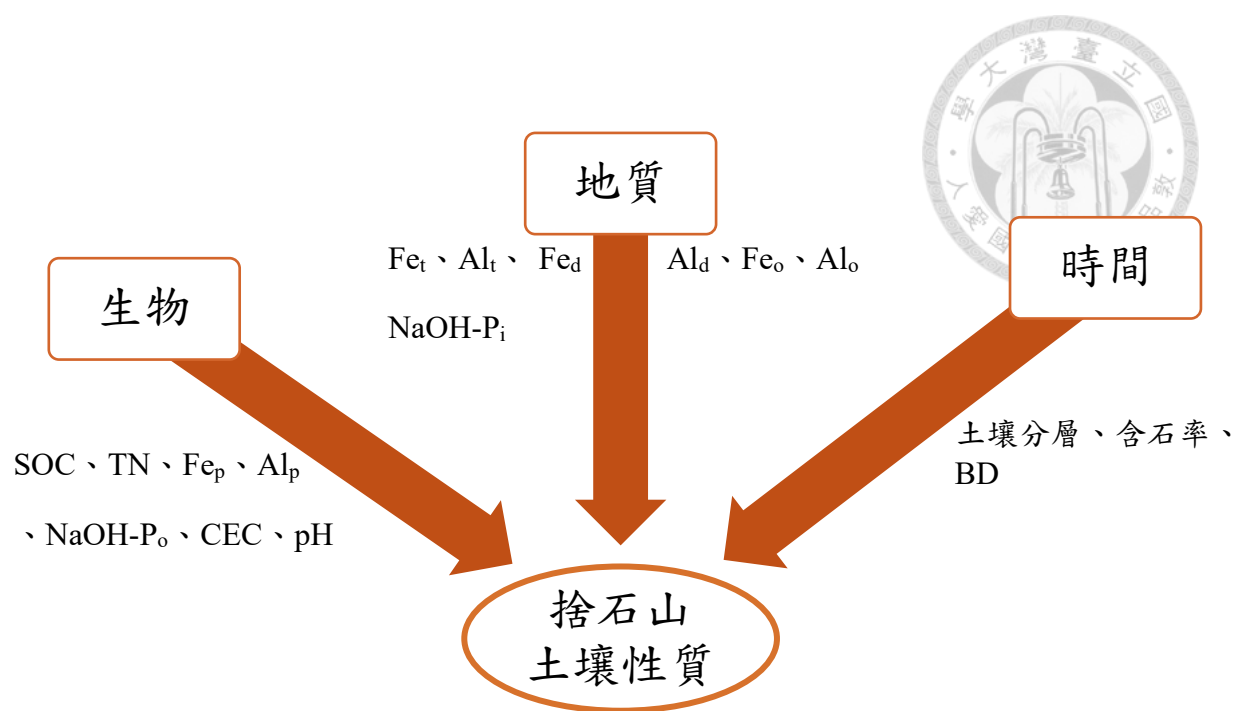


圖 5、影響捨石山土壤化育因子圖

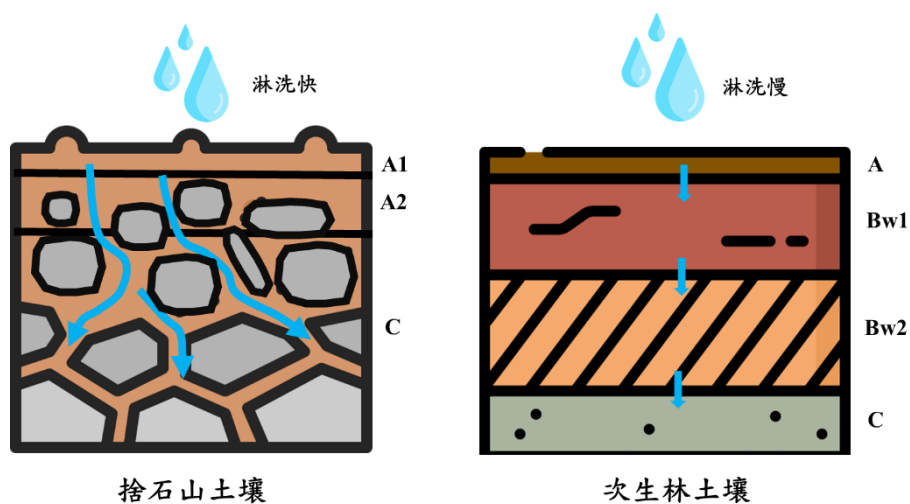


圖 6、捨石山與次生林土壤剖面示意圖



六、結論

今日從地表及航照圖已難以判斷捨石山所在區域，因此進行簡易的植被調查與進一步分析土壤性質，探討捨石山在自然情況化育下，經過三十甚至四十餘年後，土壤與植生是否能恢復至與鄰近次生林相似的性質。從植被調查結果顯示，廢棄時間較短的十分捨石山植被的樹木數量雖多於次生林，但樹木種數、平均 DBH、BA 及生物多樣性指數仍明顯低於次生林；廢棄時間較長的菁桐捨石山，樹木平均 DBH 與次生林相同，且其他多生物多樣性指數與次生林間的差異較小。土壤剖面顯示捨石山土壤仍屬於化育初期階段，尚未化育出 B 層土壤且土壤含石率高，次生林土壤土壤層較厚，黏粒含量較高，土壤深度在 50 - 100 公分時含石率仍低甚至趨近於零。土壤基本化學性質顯示，捨石山較次生林具有較低的 pH 值、較高的 SOC、TN 及 CEC，選擇性萃取鐵也顯示捨石山的 Fe_d/Fe_t 及較低的 Fe_o/Fe_d ，這些數值顯示捨石山的風化程度高於次生林，並不符合次生林應有較高風化指標的預期。因此進一步採集岩石測定，岩石的 TN 及選擇性萃取鐵、鋁結果顯示，捨石山與次生林從化育母質上就有化學性質差異，顯示捨石山之土壤化育不僅受時間影響，地質亦是重要因子。另外，捨石山由於樹木植株數量較多，貢獻較多新鮮有機物使 SOC 濃度較高及 pH 值較低，說明生物因子也是影響捨石山土壤的重要因子。

從 Hedley 磷序列結果顯示，捨石山與次生林的磷型態除了 Residual P 以外皆以 NaOH-P 為主，與鐵、鋁離子結合形成鐵、鋁磷酸鹽，捨石山的 NaOH-P 以無機態為主，次生林則以有機態為主，結合土壤 SOC、TN 及 C/N 數據來看，捨石山及次生林 SOM 型態並不同，前者以 POM 為主，後者則以 MAOM 為主。而全磷的部分，捨石山不若次生林全磷含量隨土壤深度減少，顯示土壤化育時間較短，磷尚未被植物吸收利用或風化而減少。

有關捨石山或煤礦棄土在自然演育下性質變化的研究較少，本研究初步指出，捨石山土壤化育不僅單受時間影響，生物與母質的影響同樣重要，由於母質的不同，不宜直接將捨石山土壤性質與鄰近地區土壤做比較判斷風化程度。由於土壤化學性質僅能說明部分參與土壤化育的結果，因此宜在檢測土壤化學性質外同時探討岩石母質化學性質，加以判斷捨石山土壤的化育程度。

七、參考文獻

- 中央氣象署 (2023) 觀測資料查詢系統，CWB Observation Data Inquire System。
- 平溪鄉志編輯委員會 (1997) 平溪鄉志。臺北縣。
- 向萬勝、黃敏、李學垣 (2004) 土壤磷素的化學組分及其植物有效性。植物營養與肥料學報 10(6)：663-670。
- 呂惠靖 (2005) 以 DCB 法萃取土壤中游離氧化鐵之探討。國立臺灣大學農業化學研究所碩士論文。
- 林苡涵 (2017) 臺灣農地廢耕造林對土壤有機碳儲存量及形態劃分的影響。國立臺灣大學森林環境暨資源學研究所碩士論文。
- 林信輝、巫建達、呂金誠 (1992) 石灰石礦區捨石場植生特性之研究。中華水土保持學報 23(2)：57-72。
- 林哲郁 (2016)。台灣北部烘爐山森林土壤之特性化育與分類。國立臺灣大學農業化學研究所碩士論文。
- 周耀裕 (2007) 煤礦產業與地方社會--以台北土城地區為例(1897~1989)。國立中央大學歷史研究所碩士在職專班論文。
- 洪偉豪 (2012) 平溪地區的聚落發展與資源開發 (1820-1969)。國立臺灣師範大學地理學研究所碩士論文。
- 徐仲禹 (2009) 土壤中鐵錳結核對鉻的氧化還原反應之影響。國立臺灣大學農業化學研究所碩士論文。
- 陳威霖 (2023) 臺灣煤礦工人勞動與歷史文化初探。勞動及職業安全衛生研究季刊 31(3)：110-132。
- 張婷雅 (2020) 不同土地利用之土壤磷含量與型態。國立臺灣大學森林環境暨資源學研究所碩士論文。
- 陳震菖 (2016) 鄰近火成岩與沉積岩母質化育土壤之性質與碳儲存量差異。國立臺灣大學森林環境暨資源學研究所碩士論文。
- 黃鑑水 (1988) 《五萬分之一 臺灣地質圖說明書 圖幅第四號 臺北》，臺北：經濟部中央地質調查所。
- 黃鑑水、胡賢能、陳文政 (1990) 臺灣北部南港-坪林間之地質。經濟部中央地質



- 調查所彙刊 6：1-11。
- 許曉琪 (2003) 煤礦棄土琉球松造林地中游離固氮潛能與土壤溶液之季節變動。
國立中興大學森林學研究所碩士論文。
- 楊蕙綺 (2000) 琉球松菌根對煤礦棄土地土壤化學與微生物性質之影響。國立中興大學森林學研究所碩士論文。
- 魏子穎 (2024) 以物理分餾與穩定同位素分析檢視臺灣平地造林之土壤有機碳動態。國立臺灣大學森林環境暨資源學研究所碩士論文。
- 簡士濠、邱志郁、陳財輝 (2009)。台灣中部低海拔森林土壤之性質與化育作用。
台灣林業科學 24(1)：27-40。
- 顏江河 (1996) 彩色豆馬勃琉球松菌根在煤礦棄土對土壤溶液。國立臺灣大學森林學研究所博士論文。
- 顏江河 (2008) 菌根與煤礦棄土地的復舊造林。林業研究專訊 15(1)：14-17。
- Abdelrhman, A. A., Gao, L., Li, S., Lu, J., Song, X., Zhang, M., Zheng, F. & Wu, H. (2021) Long-Term Application of Organic Wastes Improves Soil Carbon and Structural Properties in Dryland Affected by Coal Mining Activity. Sustainability, 13(10), 5686.
- Ahirwal, J. & Maiti, S. K. (2016). Assessment of soil properties of different land uses generated due to surface coal mining activities in tropical Sal (*Shorea robusta*) forest, India. Catena, 140, 155-163.
- Ahirwal, J., Maiti, S. K. & Reddy, M. S. (2017) Development of carbon, nitrogen and phosphate stocks of reclaimed coal mine soil within 8 years after forestation with *Prosopis juliflora* (Sw.) Dc. Catena, 156, 42-50.
- Amichev, B. Y., Burger, J. A. & Rodrigue, J. A. (2008). Carbon sequestration by forests and soils on mined land in the Midwestern and Appalachian coalfields of the U.S. Forest Ecology and Management, 256(11), 1949-1959
- Barral, M. T., Arias, M. & Guérif, J. (1998). Effects of iron and organic matter on the

porosity and structural stability of soil aggregates. *Soil & Tillage Research*, 46(3-4), 261-272.



Barrow, N. J., Debnath, A. & Sen, A. (2023). Investigating the dissolution of soil Phosphate. *Plant and Soil*, 490, 591-599.

Barrow, N. J., Sen, A., Roy, N. & Debnath, A. (2021). The soil phosphate fractionation fallacy. *Plant and Soil*, 459, 1-11.

Don, A., Schumacher, J. & Freibauer, A. (2011) Impact of tropical land-use change on soil organic carbon stocks – a meta-analysis. *Global Change Biology*, 17(4), 1658-1670.

Doorn, M. v., Rotterdam, D. v., Ros, G., Koopmans, G. F., Smolders, E. & Vries, W. d. (2024). The phosphorus saturation degree as a universal agronomic and environmental soil P test. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 54(5), 385-404.

Feng, Y., Wang, J., Bai, Z. & Reading, L. (2019). Effects of surface coal mining and land reclamation on soil properties: A review. *Earth-Science Reviews*, 191, 12-25.

Frouz, J., Dvorščík, P., Vávrová, A., Doušová, O., Kadochová, Š. & Matějíček, L. (2015). Development of canopy cover and woody vegetation biomass on reclaimed and unreclaimed post-mining sites. *Ecological Engineering*, 84, 233-239.

Frouz, J., Kalčík, J. & Velichová, V. (2011). Factors causing spatial heterogeneity in soil properties, plant cover, and soil fauna in a non-reclaimed post-mining site. *Ecological Engineering*, 37(11), 1910-1913.

Frouz, J., Livečková, M., Albrechtová, J., Chroňáková, A., Cajthaml, T., Pižl, V., Háněl, L., Starý, J., Baldrian, P., Lhotáková, Z., Šimáčková, H. & Cepáková, Š. (2013). Is the effect of trees on soil properties mediated by soil fauna? A case study from

- 
- post-mining sites. *Forest Ecology and Management*, 309, 87-95.
- Frouz, J., Prach, K., Pižl, V., Háněl, L., Starý, J., Tajovský, K., Materna, J., Balík, V., Kalčík, J. & Řehouňková, K. (2008). Interactions between soil development, vegetation and soil fauna during spontaneous succession in post mining sites. *European Journal of Soil Biology*, 44(1), 109-121.
- Gorsira, B. & Risenhoover, K. L. (1994). An evaluation of woodland reclamation on strip-mined lands in east Texas. *Environmental Management*, 18, 787-793.
- Gunathunga, S. U., Gagen, E. J., Evans, P. N., Erskine, P. D. & Southam, G. (2023). Anthropologenesis in coal mine overburden; the need for a comprehensive, fundamental biogeochemical approach. *Science of the Total Environment*, 892, 164515.
- Kompała-Bąba, A., Bierza, W., Sierka, E., Błońska, A., Besenyei, L. & Woźniak, G. (2021). The role of plants and soil properties in the enzyme activities of substrates on hard coal mine spoil heaps. *Scientific Reports*, 11 ,5155.
- Kompała-Bąba, A., Bierza, W., Błońska, A., Sierka, E., Magurno, F., Chmura, D., Besenyei, L., Radosz, Ł. & Woźniak, G. (2019). Vegetation diversity on coal mine spoil heaps – how important is the texture of the soil substrate? *Biologia*, 74, 419-436.
- Kompała-Bąba, A., Sierka, E., Dyderski, M. K., Bierza, W., Magurno, F., Besenyei, L., Błońska, A., Ryś, K., Jagodziński, A. M. & Woźniak, G. (2020). Do the dominant plant species impact the substrate and vegetation composition of post-coal mining spoil heaps? *Ecological Engineering*, 143, 105685.
- Lavallee, J. M., Soong, J. L., & Cotrufo, M. F. (2020). Conceptualizing soil organic matter into particulate and mineral-associated forms to address global change in

the 21st century. *Global Change Biology*, 26(1), 261-273.

Liu, X., Bai, Z., Zhou, W., Cao, Y. & Zhang, G. (2017) Changes in soil properties in the soil profile after mining and reclamation in an opencast coal mine on the Loess Plateau, China. *Ecological Engineering*, 98, 228-239.

Markowicz, A., Woźniak, G., Borymski, S., Piotrowska-Seget, Z. & Chmura, D. (2015). Links in the functional diversity between soil microorganisms and plant communities during natural succession in coal mine spoil heaps. *Ecological Research*, 30, 1005-1014.

Martínez, C. M., Marcos, M. L. F. & Rodríguez, E. A. (1996). Factors influencing phosphorus adsorption in mine soils in Galicia, Spain. *Science of the Total Environment*, 180(2), 137-145.

Martins, W. B. R., Lima, M. D. R., Junior, U. de O. B., Villas-Boas Amorim, L. S., Oliveira, F. de A. & Schwartz, G. (2020). Ecological methods and indicators for recovering and monitoring ecosystems after mining: A global literature review. *Ecological Engineering*, 145, 105707.

Miguel, P., Stumpf, L., Pinto, L. F. S., Pauletto, E. A., Rodrigues, M. F., Barboza, L. S., Leidemer, J. D., Duarte, T. B., Pinto, M. A. B., De Garcia Fernandez, M. B., Islabão, L. O., da Silveira, L. M. & Rocha, J. V. P. (2023). Physical restoration of a minesoil after 10.6 years of revegetation. *Soil & Tillage Research*, 227, 105599.

Mudrák, O., Doležal, J. & Frouz, J. (2016). Initial species composition predicts the progress in the spontaneous succession on post-mining sites. *Ecological Engineering*, 95, 665-670.

Mukhopadhyay, S., Masto, R. E., Yadav, A., George, J., Ram, L. C. & Shukla, S. P. (2016). Soil quality index for evaluation of reclaimed coal mine spoil. *Science of*



- the Total Environment, 542, 540-550.
- Nishigaki, T., Sugihara, S., Kobayashi, K., Hashimoto, Y., Kilasara, M., Tanaka, H., Watanabe, T. & Funakawa, S. (2018). Fractionation of phosphorus in soils with different geological and soil physicochemical properties in southern Tanzania. *Soil Science and Plant Nutrition*, 64(3), 291-299.
- Rahmonov, O., Czajka, A., Nádudvari, Á., Fajer, M., Spórna, T. & Szypuła, B. (2022). Soil and Vegetation Development on Coal-Waste Dump in Southern Poland. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(15), 9167.
- Rahmonov, O., Krzysztofik, R., Środek, D. & Smolarek-Lach, J. (2020). Vegetation- and Environmental Changes on Non-Reclaimed Spoil Heaps in Southern Poland. *Biology*, 9(7), 164.
- Rumpel, C., Knicker, H., Kögel-Knabner, I., Skjemstad, J. O. & Hüttl, R. F. (1998). Types and chemical composition of organic matter in reforested lignite-rich mine soils. *Geoderma*, 86(1-2), 123-142.
- Sena, K. L., Yeager, K. M., Barton, C. D., Lhotka, J. M., Bond, W. E. & Schindler, K. J. (2021). Development of Mine Soils in a Chronosequence of Forestry-Reclaimed Sites in Eastern Kentucky. *Minerals*, 11, 422.
- Soremi, A. O., Adetunji, M. T., Azeez, J. O., Adejuyigbe, C. O. & Bodunde, J. G. (2017). Speciation and dynamics of phosphorus in some organically amended soils of southwestern Nigeria. *Chemical Speciation & Bioavailability*, 29(1), 42-53.
- Šourková, M., Frouz, J. & Šantrůčková, H. (2005). Accumulation of carbon, nitrogen and phosphorus during soil formation on alder spoil heaps after brown-coal mining, near Sokolov (Czech Republic). *Geoderma*, 124(1-2), 203-214.
- Spasić, M., Drábek, O., Borůvka, L. & Tejnecký, V. (2023). Trends of Global Scientific

Research on Reclaimed Coal Mine Sites between 2015 and 2020. *Applied Sciences*, 13(14), 8412.

Stumpf, L., Pauletto, E. A. & Pinto, L. F. S. (2016). Soil aggregation and root growth of perennial grasses in a constructed clay minesoil. *Soil & Tillage Research*, 161, 71-78.

Ussiri, D. A. N., Jacinthe, P. & Lal, R. (2014) Methods for determination of coal carbon in reclaimed minesoils: A review. *Geoderma*, 214-215, 155-167.

Ussiri, D.A.N. & Lal, R. (2008) Method for Determining Coal Carbon in the Reclaimed Minesoils Contaminated with Coal. *Soil Science Society of America Journal*, 72, 231-237.

Wang, J., Wang, H., Cao, Y., Bai, Z. & Qin, Q. (2016). Effects of soil and topographic factors on vegetation restoration in opencast coal mine dumps located in a loess area. *Scientific Reports*, 6, 22058.

Wang, J., Wu, Y., Zhou, J., Bing, H. & Sun, H. (2016). Carbon demand drives microbial mineralization of organic phosphorus during the early stage of soil development. *Biology and Fertility of Soils*, 52, 825-839.

Woś, B., Nezhad, M. T. K., Mustafa, A., Pietrzykowski, M. & Frouz, J. (2023). Soil carbon storage in unreclaimed post mining sites estimated by a chronosequence approach and comparison with historical data. *Catena*, 220, 106664.

Yu, W., Huang, W., Weintraub-Leff, S. R. & Hall, S. J. (2022). Where and why do particulate organic matter (POM) and mineral-associated organic matter (MAOM) differ among diverse soils? *Soil Biology and Biochemistry*, 172, 108756.

Zhao, Z., Shahrour, I., Bai, Z., Fan, W., Feng, L. & Li, H. (2013). Soils development in opencast coal mine spoils reclaimed for 1–13 years in the West-Northern Loess

Plateau of China. *European Journal of Soil Biology*, 55, 40-46.

Zipper, C. E., Burger, J. A., Skousen, J. G., Angel, P. N., Barton, C. D., Davis V. & Franklin, J. A. (2011). Restoring Forests and Associated Ecosystem Services on Appalachian Coal Surface Mines. *Environmental Management*, 47, 751-765.



八、附錄

樣區植被調查紀錄表

Shifen	
Coal waste heap	Secondary forest
漆樹科 Anacardiaceae	冬青科 Aquifoliaceae
羅氏鹽膚木 <i>Rhus chinensis</i> var. <i>roxburghii</i> (133)	燈稱花 <i>Ilex asprella</i> (67)
冬青科 Aquifoliaceae	鐵冬青 <i>Ilex rotunda</i> (33)
燈稱花 <i>Ilex asprella</i> (167)	五加科 Araliaceae
五加科 Araliaceae	樹參 <i>Dendropanax dentiger</i> (33)
樹參 <i>Dendropanax dentiger</i> (100)	江某 <i>Schefflera octophylla</i> (67)
江某 <i>Schefflera octophylla</i> (167)	椰子 Arecaceae
忍冬科 Caprifoliaceae	未知種 Unknow Species (33)
呂宋英蓀 <i>Viburnum luzonicum</i> (33)	虎皮楠科 Daphniphyllaceae
虎皮楠科 Daphniphyllaceae	奧氏虎皮楠 <i>Daphniphyllum</i>
奧氏虎皮楠 <i>Daphniphyllum</i>	<i>glaucescens</i> ssp. <i>oldhamii</i> (100)
<i>glaucescens</i> ssp. <i>oldhamii</i> (100)	柿樹科 Ebenaceae
杜英科 Elaeocarpaceae	山紅柿 <i>Diospyros morrisiana</i> (100)
薯豆 <i>Elaeocarpus japonicus</i> (67)	杜英科 Elaeocarpaceae
大戟科 Euphorbiaceae	薯豆 <i>Elaeocarpus japonicus</i> (100)
油桐 <i>Aleurites fordii</i> (133)	杜英 <i>Elaeocarpus sylvestris</i> (33)
白匏子 <i>Mailouts paniculatus</i> (233)	大戟科 Euphorbiaceae
烏柏 <i>Sapium sebiferum</i> (33)	油桐 <i>Aleurites fordii</i> (33)
樟科 Lauraceae	刺杜密 <i>Bridelia balansae</i> (100)
紅楠 <i>Machilus thunbergii</i> (100)	細葉饅頭果 <i>Glochidion rubrum</i> (33)
桑科 Moraceae	白匏子 <i>Mailouts paniculatus</i> (100)
水同木 <i>Ficus fistulosa</i> (33)	樟科 Lauraceae
牛奶榕	紅楠 <i>Machilus thunbergii</i> (133)
<i>Ficus erecta</i> var. <i>beeheyana</i> (33)	楊梅科 Myricaceae
紫金牛科 Myrsinaceae	楊梅 <i>Myrica rubra</i> (33)
樹杞 <i>Ardisia sieboldii</i> (67)	紫金牛科 Myrsinaceae
茜草科 Rubiaceae	樹杞 <i>Ardisia sieboldii</i> (100)
圓葉雞屎樹	臺灣山桂花 <i>Maesa perlaria</i> var. <i>formosana</i> (33)
<i>Lasianthus wallichii</i> (33)	茜草科 Rubiaceae
水冬瓜 <i>Sinoadina racemose</i> (33)	
水金京 <i>Wendlandia formosana</i> (33)	

清風藤科 Sabiaceae

綠樟 *Meliosma squamulata* (33)

虎耳草科 Saxifragaceae

鼠刺 *Itea oldhamii* (67)

灰木科 Symplocaceae

山羊耳 *Symplocos glauca* (33)

茶科 Theaceae

森氏紅淡比 *Cleyera japonica* var. *morii* (400)

米碎桫欏木 *Eurya chinensis* (600)

九節木 *Psychotria rubra* (33)

水金京 *Wendlandia formosana* (67)

虎耳草科 Saxifragaceae

鼠刺 *Itea oldhamii* (100)

省沽油科 Staphyleaceae

野鴉椿 *Euscaphis japonica* (100)

灰木科 Symplocaceae

山羊耳 *Symplocos glauca* (33)

茶科 Theaceae

森氏紅淡比 *Cleyera japonica* var. *morii* (400)

米碎桫欏木 *Eurya chinensis* (600)

未知 Unknow

未知種 Unknow Species (33)

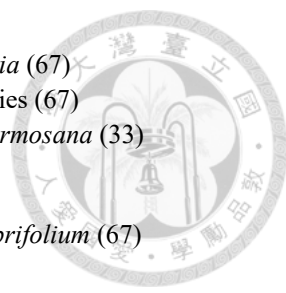
馬鞭草科 Verbenaceae

大青 *Clerodendrum cyrtophyllum* (67)



Jingtong	
Coal waste heap	Secondary forest
冬青科 Aquifoliaceae	冬青科 Aquifoliaceae
燈檉花 <i>Ilex asprella</i> (1267)	燈檉花 <i>Ilex asprella</i> (67)
五加科 Araliaceae	台灣糊樗 <i>Ilex ficoidea</i> (133)
樹參 <i>Dendropanax dentiger</i> (67)	五加科 Araliaceae
江某 <i>Schefflera octophylla</i> (500)	江某 <i>Schefflera octophylla</i> (300)
忍冬科 Caprifoliaceae	忍冬科 Caprifoliaceae
呂宋英蓮 <i>Viburnum luzonicum</i> (67)	呂宋英蓮 <i>Viburnum luzonicum</i> (33)
虎皮楠科 Daphniphyllaceae	虎皮楠科 Daphniphyllaceae
奧氏虎皮楠 <i>Daphniphyllum glaucescens</i> ssp. <i>oldhamii</i> (100)	奧氏虎皮楠 <i>Daphniphyllum glaucescens</i> ssp. <i>oldhamii</i> (833)
柿樹科 Ebenaceae	柿樹科 Ebenaceae
山紅柿 <i>Diospyros morrisiana</i> (67)	山紅柿 <i>Diospyros morrisiana</i> (100)
杜英科 Elaeocarpaceae	杜英科 Elaeocarpaceae
薯豆 <i>Elaeocarpus japonicus</i> (67)	薯豆 <i>Elaeocarpus japonicus</i> (100)
大戟科 Euphorbiaceae	大戟科 Euphorbiaceae
細葉饅頭果 <i>Glochidion rubrum</i> (67)	密花五月茶 <i>Antidesma japonicum</i> var. <i>densiflorum</i> (33)
白匏子 <i>Mallotus paniculatus</i> (167)	細葉饅頭果 <i>Glochidion rubrum</i> (33)
豆科 Fabaceae	白匏子 <i>Mallotus paniculatus</i> (133)
相思樹 <i>Acacia confuse</i> (33)	殼斗科 Fagaceae
殼斗科 Fagaceae	長尾栲 <i>Castanopsis cuspidata</i> var. <i>carlesii</i> (33)
青剛櫟 <i>Cyclobalanopsis glauca</i> (67)	樟科 Lauraceae
樟科 Lauraceae	紅楠 <i>Machilus thunbergii</i> (267)
大葉楠 <i>Machilus japonica</i> var. <i>kusanoi</i> (100)	野牡丹科 Melastomataceae
紅楠 <i>Machilus thunbergii</i> (167)	柏拉木 <i>Blastus cochinchinensis</i> (33)
野牡丹科 Melastomataceae	野牡丹 <i>Melastoma septemnerium</i> (33)
野牡丹 <i>Melastoma septemnerium</i> (67)	桑科 Moraceae
桑科 Moraceae	水同木 <i>Ficus fistulosa</i> (100)
牛奶榕	紫金牛科 Myrsinaceae
<i>Ficus erecta</i> var. <i>beeheyana</i> (67)	小葉樹杞 <i>Ardisia quinqueгона</i> (100)
水同木 <i>Ficus fistulosa</i> (67)	樹杞 <i>Ardisia sieboldii</i> (233)
小葉桑 <i>Morus australis</i> (67)	臺灣山桂花 <i>Maesa peralaria</i> var. <i>formosana</i> (33)
紫金牛科 Myrsinaceae	大明橘 <i>Myrsine seguinii</i> (500)
樹杞 <i>Ardisia sieboldii</i> (67)	桃金娘科 Myrtaceae
臺灣山桂花 <i>Maesa peralaria</i> var. <i>formosana</i> (33)	小葉赤楠
大明橘 <i>Myrsine seguinii</i> (67)	<i>Syzygium buxifolium</i> (33)
薔薇科 Rosaceae	山龍眼科 Proteaceae
墨點櫻桃 <i>Prunus phaeosticta</i> (33)	紅葉樹 <i>Helicia cochinchinensis</i> (167)
茜草科 Rubiaceae	薔薇科 Rosaceae
九節木 <i>Psychotria rubra</i> (233)	墨點櫻桃 <i>Prunus phaeosticta</i> (167)
茜草樹 <i>Randia cochinchinensis</i> (33)	茜草科 Rubiaceae
水冬瓜 <i>Sinoadina racemose</i> (33)	山黃梔 <i>Gardenia jasminoides</i> (33)
水金京 <i>Wendlandia formosana</i> (33)	圓葉雞屎樹
省沽油科 Staphyleaceae	<i>Lasianthus wallichii</i> (67)
山香圓 <i>Turpinia formosana</i> (100)	九節木 <i>Psychotria rubra</i> (200)
灰木科 Symplocaceae	茜草樹 <i>Randia cochinchinensis</i> (167)
	水冬瓜 <i>Sinoadina racemose</i> (33)

山羊耳 *Symplocos glauca* (67)
茶科 Theaceae
森氏紅淡比 *Cleyera japonica* var. *morii*
(1167)
米碎衿木 *Eurya chinensis* (133)
大頭茶 *Polyspora axillaris* (133)
蕁麻科 Urticaceae
長梗紫麻 *Oreocnide pedunculata* (67)
馬鞭草科 Verbenaceae
大青 *Clerodendrum cyrtophyllum* (133)



狗骨仔 *Tricalysia dubia* (67)
未知種 Unknow Species (67)
水金京 *Wendlandia formosana* (33)
芸香科 Rutaceae
賊仔樹 *Tetradium glabrifolium* (67)
清風藤科 Sabiaceae
筆羅子 *Meliosma rigida* (33)
虎耳草科 Saxifragaceae
小花鼠刺 *Itea parviflora* (67)
省沽油科 Staphyleaceae
山香圓 *Turpinia formosana* (100)
茶科 Theaceae
森氏紅淡比 *Cleyera japonica* var. *morii* (100)
米碎衿木 *Eurya chinensis* (33)
大頭茶 *Polyspora axillaris* (67)
蕁麻科 Urticaceae
長梗紫麻 *Oreocnide pedunculata* (67)
馬鞭草科 Verbenaceae
大青 *Clerodendrum cyrtophyllum* (167)
