

國立東華大學自然資源管理研究所

碩士論文

指導教授：張世杰 博士

王巧萍 博士

棲蘭山區台灣扁柏細根分解作用研究

*Fine roots decomposition of a *Chamaecyparis obtusa* var. *formosana*
forest at Chi-Lan Mountain in Taiwan*



研究生：林天翊

中華民國 九十九 年 七 月

國立東華大學
學位論文授權書

※說明※

本授權書請撰寫並簽名後，裝訂於紙本論文書名頁之次頁。

本授權書所授權之論文為立書人在國立東華大學 自然資源管理研究 所

98 學年度第 2 學期取得 碩 士學位之論文。

論文名稱：棲蘭山區台灣扁柏細根分解作用研究

指導教授姓名：張世杰、王巧萍

學生姓名：林天翊

學號：69531010

授權事項：

一、立書人具有著作財產權之上列論文全文資料，基於資源共享理念、回饋社會與學術研究之目的，非專屬、無償授權國立東華大學及國家圖書館，得不限地域、時間與次數，以微縮、光碟或數位化等各種方式重製散布、發行或上載網路，提供讀者非營利性質之線上檢索、閱覽、下載或列印。

二、上述數位化公開方式如下：(若未勾選下表，立書人同意視同授權校內、外立即公開。)

| 校 內 | 校 外 | 說 明 |
|--|--|---|
| <input checked="" type="checkbox"/> 立即公開 <input type="checkbox"/> 於 1 年後公開 <input type="checkbox"/> 於 3 年後公開 | <input checked="" type="checkbox"/> 立即公開 <input type="checkbox"/> 於 1 年後公開 <input type="checkbox"/> 於 3 年後公開 | 未立即公開原因： <input type="checkbox"/> 申請專利 (案號：) <input type="checkbox"/> 因隱私權需要 (請指導教授附函說明特殊原因) |

三、授權內容均無須訂立讓與及授權契約書，授權之發行權為非專屬性發行權利。依本授權所為之收錄、重製、發行及學術研發利用均為無償。

具有本論文
著作財產權
人共同簽名
(親筆正楷)

林天翊

日期 中華民國 99 年 08 月 16 日

學位考試委員會審定書

國立東華大學 自然資源管理研究所
研究生 林天翊 君所提之論文

(題目)

棲蘭山區台灣扁柏細根分解作用研究

經本委員會審查並舉行口試，認為

符合碩士學位標準。

學位考試委員會召集人

林國鈺

簽章

委員

夏禹九

簽章

委員

王巧萍

簽章

委員

張世杰

簽章

指導教授

張世杰, 王巧萍

簽章

系主任
(所長)

劉宗三

簽章

中華民國 99 年 7 月 19 日

謝誌

能夠完成這本論文，在此最要感謝的便是張世杰老師與王巧萍老師，在這學習的四年期間，用最大的耐心包容我這個不認真的學生，且還是願意對我的論文以及實驗方面不遺餘力的用心教導與支持，平時也願意和我們打成一片，分享各種有趣心得和經驗，你們對於實驗以及學問的認真態度是我所應該要學習的。同時也要感謝在學期間所上的各位老師，在課堂上對於我的研究提供寶貴的意見，讓我能夠發現自己可能沒有注意到的問題，讓我對自己研究有更深入的瞭解，以及在平時的親切問候，使得以在自資所快樂的就讀。也要感謝口試時夏禹九老師及林國詮細心提出的建議與指正，讓我在最後的階段受益良多。

感謝在學期間陸域研究室的各位夥伴，因為有你們的支持我才能在歡笑中一步步完成各階段恐怖的專討以及實驗，並且對於花蓮的美景和美食有更棒的感受。志偉、昭豪、意婷、美娟、欣民、家欣、妍綾、銘哲、顥達、佳佳、乃綺、子喬、牧純、智欣、曉凡、佩玲、郁甯，謝謝你們。特別是顥達和銘哲，因為有你們才能組成陸域三寶這個天團，那段快樂的時光我是不會忘記的！還要感謝德國的合作夥伴 Bettina，以及林試所幫助我進行化學分析的助理們，也謝謝我的同班同學，我們一起上課，一起趕專討、看日出，也互相打氣，這也都是快樂的回憶。謝謝所有曾經幫助過我的人，謝謝我的朋友們，謝謝。

最後在這邊要感謝我最大的後盾，我的家人，因為你們無怨無悔的付出、關心和諒解，才讓我能夠走到這一步，雖然偶爾會不夠爭氣而感到灰心，也還是給我最大的鼓勵，讓我重新充滿動力，讓我能夠繼續唸書而不必感到擔憂，謝謝阿嬤、爸爸、媽媽、天翎、嫂嫂以及關心我的親戚們。還要感謝我最親密的戰友，靜莉，妳分享了我所有的快樂與煩惱，也給我最大的支持和包容，因為有妳和我的家人，我感到很幸福，由衷的感謝你們。

Abstract

The biogeochemical cycle of forest ecosystems is controlled by decomposition of plant litter and soil weathering. Fine roots of yellow cypress were selected to examine the decomposition process and nutrient dynamics at the Chi-Lan mountain site in northern Taiwan. The experiment was conducted by the litterbag method. Fine roots smaller than 2 mm were incubated in 20 cm X 20 cm nylon net (mesh size 0.5mm) bags. 72 litterbags were buried among humus and soil layer during July, 2007. Eight bags were retrieved at 28, 56, 113, 173, 231, 370, 570 days for dry weight determination and nutrient analysis. During decomposition, the loss of K was most pronounced, and K concentration in the remaining litter decreased strongly, The concentrations of C, Ca, Mg, Na, P increased during the early stage and then decreased gradually. N and lignin concentrations steadily increased at the first year, which resulted in the decrease in C/N ratio. The mass loss of the decomposing root after 570 days was rather low, leaving $72\pm 3\%$ of the initial root mass. The decomposition constant k was determined by using a single negative exponential decay model. The k values of the first year was 0.31, and 0.26 of the first 1.5 years. The k value was lower than that in tropical and subtropical forest of low latitude, but similar to that of temperate coniferous forests.

Keywords: *Chamaecyparis obtusa* var. *formosana*; fine root; decomposition; nutrient cycling; litterbag method

摘要

森林生態系碳氮及無機養分的循環，一方面由土壤化育與沉降物被植物根部和土壤微生物所吸收，另一方面則是由枯落物的分解所推動。為瞭解細根的分解速率及其養分釋放之動態，本研究以枯落物袋法於棲蘭山區台灣扁柏天然更新林進行細根分解試驗，在試驗開始後的第 28、56、113、173、231、370、570 天取回樣本，以分析細根重量與其所含養分之變化。細根分解過程中，除鉀濃度明顯隨時間迅速下降外，碳、鈣、鎂、鈉、磷等養分濃度在分解初期則呈上升趨勢而後才下降；氮與木質素濃度在分解一年內均持續增高，這也使得碳氮比隨時間而降低。扁柏細根經 570 天分解後，重量留存率為 $72\pm 3\%$ 顯示其分解速率甚低，唯其中鉀快速釋出，在半年內即流失 80%。以單一負指數模式求得台灣扁柏細根之分解常數 k ，第 1 年 k 值 0.31，第 1.5 年 k 值 0.26，遠低於低緯度的熱帶與亞熱帶林，而與溫帶針葉林類似。

關鍵字：台灣扁柏、細根、分解、養分循環、枯落物袋法

目錄

| | |
|----------------------------------|----|
| 1. 前言 | 1 |
| 2. 文獻回顧 | 3 |
| 2.1 細根在養分循環中所扮演的角色 | 3 |
| 2.2 細根的分解作用 | 4 |
| 2.2.1 影響細根分解作用的因子 | 5 |
| 2.3 細根分解作用量測方法 | 7 |
| 2.4 國內相關研究 | 8 |
| 3. 研究目的 | 9 |
| 4. 材料與方法 | 11 |
| 4.1 樣區概述 | 11 |
| 4.2 細根枯落物袋製作、設置、養分分析 | 13 |
| 4.2.1 細根枯落物袋取樣與製作 | 13 |
| 4.2.2 分解試驗設置 | 13 |
| 4.2.3 養分與組成成份分析 | 14 |
| 4.2.4 重量留存率、養分留存率與分解常數計算 | 15 |
| 5. 結果 | 17 |
| 5.1 扁柏細根初始化學成份分析 | 17 |
| 5.2 扁柏細根剩餘重量變化與分解速率 | 18 |
| 5.3 扁柏細根分解期間各養分濃度變化 | 19 |
| 5.4 扁柏細根分解期間各養分剩餘重量變化 | 22 |
| 5.5 各養分元素釋放速率常數 | 25 |
| 6. 討論 | 27 |
| 6.1 利用枯落物袋法進行分解作用研究可能產生的誤差 | 27 |
| 6.2 分解期間細根各養分濃度與剩餘重量變化 | 28 |
| 6.3 扁柏細根分解速率與國外森林之比較 | 30 |
| 6.4 細根本身物理性質與化學組成對分解速率影響 | 32 |
| 6.5 扁柏細根與綠葉分解速率與養分釋放比較 | 32 |
| 7. 結論與建議 | 35 |
| 8. 參考文獻 | 37 |

9. 附錄..... 43

圖目錄

| | |
|---------------------------------|----|
| 圖 1 棲蘭山樣區地理位置圖。..... | 11 |
| 圖 2 分解試驗期間棲蘭山樣區月雨量與月均溫。..... | 12 |
| 圖 3 分解期間扁柏細根剩餘乾重變化。..... | 18 |
| 圖 4 分解期間扁柏細根碳、氮、木質素與磷濃度變化。..... | 19 |
| 圖 5 分解期間扁柏細根鉀、鈉、鈣、鎂濃度變化。..... | 20 |
| 圖 6 分解期間扁柏細根木質素與碳剩餘重量變化。..... | 22 |
| 圖 7 分解期間扁柏細根氮剩餘重量與碳氮比變化。..... | 22 |
| 圖 8 分解期間扁柏細根磷、鉀、鈣、鎂剩餘重量變化..... | 23 |
| 圖 9 扁柏細根第一年分解速率與各養分元素釋放常數。..... | 26 |

表目錄

| | |
|---|----|
| 表 1 棲蘭山區台灣扁柏細根與其他樹種枯落物初始養分含量。..... | 17 |
| 表 2 扁柏細根分解期間各養分濃度變化。..... | 21 |
| 表 3 扁柏細根分解期間各養分重量留存率變化。..... | 24 |
| 表 4 扁柏細根第一年分解速率與各養分元素釋放常數， t_{50} ， t_{99} 。..... | 25 |
| 表 5 棲蘭山區台灣扁柏細根與國外研究細根第一年分解速率。..... | 31 |

附錄目錄

| | |
|---------------------------------|----|
| 附錄 1 扁柏細根分解期間各養分濃度。..... | 43 |
| 附錄 2 扁柏細根分解期間乾重與各養分的重量留存率。..... | 45 |

1. 前言

分解作用在森林生態系的養分循環過程中扮演相當重要的角色，森林生態系的養分主要儲存於植物體與土壤中，而植物體的有機質與養分則藉由枯落物(litter fall)、落木(timber fall)及枯死根系的分解作用，從植物體中釋放出來回歸至土壤中，所以在陸域生態系中，枯落物的分解是碳釋放與其他養分回歸生態系的主要途徑(Chapin III *et al.* 2002)，也因此間接影響土壤有機質(soil organic matter)的形成和生態系的初級生產力的多寡(Lambers *et al.* 1998)，故量化枯落物的分解速率與養分釋放量，可作為評估該生態系功能的一項重要指標。

細根佔地下部總生物量的比例並不高，據 Jackson *et al.*(1997)整理全球文獻的結果指出，細根約占總地下部生物量的 27%；而依據 Hendrick and Pregitzer(1996)與 Kalyn and Van Rees(2006)之估算，細根所分配到的能量可達森林生態系總初級生產力(gross primary production, GPP)的 50-75%。相較於地上部而言，細根每單位乾重所含的氮含量、水溶性養分與木質素亦皆遠較枝幹等木質部位高出許多(Berg and McClaugherty 2003)，可見細根在養分含量與初級生產量所佔的重要性遠較其在生物量所佔比例更為重要。

林木的細根有很高的年輸入量以及置換速率(turnover rate)，因此細根置換及生產是森林生態系養分循環非常重要的生態過程。在近 20 年的細根動態相關研究資料可知，溫帶地區森林生態系中細根置換過程中形成的土壤有機質貢獻量比地上部枯落物要高，Vogt *et al.*(1996)指出在某些溫帶森林生態系中，細根釋放到土壤中的碳與氮較地上部枯落物可多出 18-58%，因此如忽略細根的生長、死亡與分解，土壤有機質與養分的循環將被低估 20-80%。因此，對於森林生態系的養分循環與碳收支而言，細根的養分貯存量與分解作用是不可忽略的重點。

目前台灣對於霧林帶地下部養分循環的相關研究仍付之闕如，對林木細根分解期間的養份動態也不瞭解。台灣屬亞熱帶氣候，溫度高且降雨多，颱風影響頻繁，淋洗作用強的地區常使鹽基性離子流失而造成土壤養分缺乏，尤其棲蘭山地區降雨量高，土壤淺薄且酸性強，養分缺乏情形更明顯，因此枯落物分解所釋放的養分對於此生態系而言是重要的養分來源，觀察分解期間養分動態情形有助於對養分循環有更深入的了解。本樣區已由朱慧君(2005)進行過地下部養分含量調查，其研究所得扁柏地下部細根分佈與養分含量資料，提供細根分解作用研究良好基礎。故為進一步瞭解棲蘭山地區台灣扁柏森林生態系內地下部細根分解在整個森林生態系養分循環所扮演的角色，本研究選定台

灣扁柏更新林樣區，利用枯落物袋法觀察台灣扁柏細根的分解速率與養分釋放動態。

2. 文獻回顧

2.1 細根在養分循環中所扮演的角色

森林生態系中根系的死亡與分解，可生成土壤有機質以及釋放其內的養分，這些養分將由植物再度吸收利用，構成植物與土壤間的養分循環系統，並影響森林生態系的養分循環，因此地下部對養分循環來說是極為重要的一部份。在估算一個生態系中的養分循環的情形時，若缺少地下部的資料，將會對整個森林生態系養分循環過程的估算產生極大的誤差(Aber *et al.* 1985, Cairns *et al.* 1997, Lehmann and Zech 1998)。

根系位於土壤中，無法如葉片般能夠被直接觀測與量測，這使得根系的研究相較於林木地上部困難了許多，也使得根系的相關研究報告遠少於地上部。在全球每年淨初級生產量中，根系占了將近 33%(Jackson *et al.* 1997)，由此可知樹木根系在森林生態系的總生物量與碳儲存量，都佔有重要部份(Makkonen and Helmisaari 1998)。

細根為植物地下部的一部份，一般所指植物的地下部即為其根系，樹木根系的主要功能包括支持、吸收水分與養分、儲存碳水化合物等。其中根系可區分為粗根與細根，粗根即主根的部分，負責支持樹木；細根則負責水分與養分的吸收。成熟的裸子植物與雙子葉植物的根具二次生長的能力，產生後生組織(secondary tissue)後，不再具有吸收水分、養分能力，而僅有附著、固定與儲藏的功能。然而由於樹種不同，其根系發展的特質也不同，故分辨細根時不能只由根的徑級區分粗根或細根。就功能上而言，細根是指具有根尖(root tip)、直徑小且尚未有二次生長的根(Berg and McClaugherty 2003)。但因為在野外時不易區分細根是否有已二次生長的情形，為了研究時的操作方便，一般學者將細根定義為直徑小於等於 2 mm 的根，而大於 2 mm 者則為粗根(Vogt *et al.* 1996)。

森林生態系地下部枯落物量與地上部枯落物量具高度正相關，且細根年死亡量近似或甚至高於地上部枯落物量(Chapin III *et al.* 2002)。而由 Jackson *et al.*(1997)研究了 41 個估算地下部枯落物轉移至土壤的文獻結果可知，地下部枯落物的輸入主要來自細根，且地下部枯落物輸入量之範圍從美國新罕布夏(New Hampshire)北方闊葉林(northern hardwood)的 $100 \text{ g m}^{-2} \text{ year}^{-1}$ ，至華盛頓州太平洋冷杉(*Abies amabilis*)的 $1262 \text{ g m}^{-2} \text{ year}^{-1}$ ，平均值為 $436 \text{ g m}^{-2} \text{ year}^{-1}$ 。據 Vogt *et al.*(1996)研究指出在某些生態系中，細根釋放到土壤的碳與氮可比地上部枯落物多出 18—45%，如忽略細根的生長、死亡與分解，土壤有機質與養分的循環將被低估 20—80%。

在森林生態系中，枯落物的產生速率與掉落林地或土壤中的有機物分解速率相近與否，是觀察生態系的養分循環是否達到平衡的重要指標，當枯落物產生速率高於分解速率時，則有機物內的養分無法經礦質化作用被釋放回生態系中，造成養分循環速率低落，也使生態系生產力因而降低(Lambers *et al.* 1998)。細根之置換速度快，置換過程中細根會由植物體吸收初級生產量以提供基本生理需求，及由土壤中吸取養分，當其死亡時則會經礦質化作用及微生物分解，將養分釋出回到生態系統中，且細根也會因人為開發或環境改變造成的逆境有所反應，可作為生態系功能受損的指標(Kalyn and Van Rees 2006)，可見林木細根在森林生態系的養分循環上扮演重要的角色。

2.2 細根的分解作用

死亡細根也與其他植物體產生的枯落物相同，會經過淋洗(leaching)、破碎(fragmentation)等物理過程，及以土壤生物為主的化學過程，不同分解過程的共同作用，會逐漸將枯落物礦質化為較小的有機或無機分子進入土壤中。破碎化也是影響分解的重要作用，破碎化指完整的細根分解被成小碎塊的過程，而造成這個過程的原因如土壤生物的攝食或破壞，以及溫度和濕度改變影響。破碎化可以提供較大的表面積供微生物拓殖，增加微生物侵入的機會，加快分解的速率，細根表皮的次生增厚細胞壁中，木質素含量高對細根具有保護作用，而細根的破碎可藉由使微生物穿過保護層的阻礙、增加細根之表面積，促進分解作用進行(Chapin III *et al.* 2002)。

細根死亡之後，難分解的木質素、纖維素與單寧等，在微生物分泌的酵素作用下，參與微生物新陳代謝的緩慢降解過程。死亡細根的化學變化是細菌(bacteria)和真菌(fungi)活動的結果，但有些化學反應不需微生物作用即可自然發生(Chapin III *et al.* 2002)。

依據 Berg and McClaugherty (2003)整理枯落物分解模式，指出枯落物分解過程可區分為分解初期與分解晚期。分解初期的枯落物重量損失率高，且易受氣候、化學組成（可溶性養分）及枯落物型態結構的影響，水溶性化學物質及非木質素化碳水化合物(non-lignified carbohydrates)，如纖維素及半纖維素等會在這個階段進行分解。分解初期細根中的可溶性糖類與礦物質離子在雨水的作用下，被淋出帶到土壤中，此過程稱為淋洗，是細根分解最快的階段。由於淋洗作用主要受到土壤水分影響，因此淋洗強度會隨著降雨量增加而增大(Chapin III *et al.* 2002)。分解晚期枯落物內含的主要殘留物為結構

較為複雜之木質素及木質化纖維，此時枯落物的重量損失率低，分解速率受到木質素降解(decay)程度的影響。

2.2.1 影響細根分解作用的因子

枯落物掉落林地或土壤中經過一連串的物化及生物的作用後，其內的養分轉化成簡單的形式回歸到生態系之中。森林枯落物的分解速率與釋放的養分會受到外部環境條件、及本身化學特性的綜合影響。氣候條件已被公認為調控大尺度分解作用最重要的因子，在熱帶地區的分解速率也較其他地區快。一般大尺度下用以預測葉部枯落物的分解模式建議將氣候因子作為最佳的預測參數，而次預測分解速率參數則是枯落物基質本身的化學組成成份(Aerts 1997)，而這個結果不一定完全可用於細根的情況，因為細根位於土壤中，可能會緩衝氣候因子改變對於細根分解的影響，且也因分解環境不同，細根與葉部枯落物的分解情形也可能會有差異，且因細根的生理功能與葉部不同，其內含的養分與本身的物理性質也會有所差異(Andrén *et al.* 1992)，因此造成細根與葉部枯落物的分解與養分釋放情形不同。

而由地上部枯落物的研究發現分解的速率與初始化學組成有極大相關，如養分濃度、碳與養分比以及木質素與木質素與養分比(Melillo *et al.* 1982, Aber *et al.* 1985)。一般來說枯落物具有較低的碳氮比以及較低的木質素含量並且在高溫且高濕的環境中進行分解作用會有最高的分解與養分釋放速率。而在不同的觀測尺度下影響分解速率的因子會有所不同。學者回顧全球細根分解作用相關研究發現，根的化學組成與分解速率會因植物類型（針葉樹、闊葉樹及草本植物）不同而有所差異。而在根分解過程中，則以根的化學組成（鈣濃度及碳氮比）扮演最主要的控制因子，而年均溫與實際蒸發散量等環境因子則為其次(Silver and Miya 2001)。

植物類型差異使得細根內所含的養分成分與濃度不同，因此影響到細根的分解速率，所以不同森林類型中的細根分解第一年重量損失率會有很大的差異；而在相似的氣候條件下，兩樹種的分解速率差異大時，可知是因此兩樹種細根化學組成不同的緣故(Berg and McClaugherty 2003, Powers *et al.* 2009)；而同一樹種的不同徑級的細根之分解速率與養份變動情形也會不同，這是因為徑級不同而使得細根化學組成差異造成的結果(Berg 1984)。

細根化學組成影響分解速率的另一個原因是由於氮元素，因氮為提供土壤中微生物賴以生存能量的限制元素，氮濃度低會影響微生物生長，而在氮含量豐富的土壤中細根的分解較快，且根分解速率與碳氮比呈負相關。故 Ostertag and Hobbie(1999)的研究指出細根分解速率與起始的細根氮濃度呈正相關。隨著細根年齡增加，其直徑變粗，細根碳氮比增加，易於分解的細胞比例降低，所含單寧和木質素增加，導致分解速度較慢。

分解環境也會直接或間接影響細根的分解速率，如在土壤水分方面，過高或過低的溼度皆會抑制分解作用進行。水分含量過高時，氧氣供應不足會使微生物活動力降低，造成細根分解速率低落(Chapin III *et al.* 2002)。而當土壤含水量過低時（相對溼度小於30-50%），土壤顆粒表面水膜變薄，可溶性物質擴散到微生物的速度降低，使分解速率下降(Stark and Firestone 1995)，此外，乾濕交替可以促進細菌（生長速度快）對半纖維素(semi cellulose)等物質的分解，但會限制真菌（生長速度較緩慢）對木質素(lignin)的分解。而枯落物層中如有頻繁的溼度變化，會減少微生物族群，使分解速率降低。

土壤中的生物活動也會影響細根的分解速率，以食碎屑者為基礎的的地下食物鏈，包括微生物區系及小型、中型、大型動物區系等，而這些土壤生物對於分解速率有不同的影響。在土壤微生物中，真菌與細菌是最主要的初始分解者，共占總分解者生物量與呼吸量 80-90%。真菌可分泌酵素穿透細根皮層進入組織內部，在細胞間或細胞內部增生，分解木質素獲取細胞中的氮與其他可溶性化學成分，死亡後再將這些養分歸還給土壤。細菌從分解基質獲取可溶性物質，其生長分裂速度快，能迅速將細根的養分釋放到土壤中(Berg and McClaugherty 2003)。

微生物對細根分解作用的影響除了受制於其活性外，不同種類的真菌有不同的分解特性，例如：白腐菌(white root fungi)專門分解木質素，褐腐菌(brown root fungi)只能分解木質素苯酚的側鏈部分，剩下含有酚的部分，分解速度較白腐菌慢(Chapin III *et al.* 2002)。學者於美國的研究指出，白腐菌大多寄生在西部黃松(*Pinus ponderosa*)與柱松(*Pinus contora*)的根系；而褐腐菌大多在花旗松(*Pseudotsuga menziesii*)與西德加雲松(*Picea sitchensis*)的根系中發現，試驗觀測結果為西部黃松及柱松的分解速率較花旗松及西德加雲松快(Chen *et al.* 2001)。

2.3 細根分解作用量測方法

為量測細根的分解速率以及養分動態變化，因此發展出一些方法應用以進行研究，以下簡單介紹一些細根分解研究方法。

■ 枯落物袋法 (litter bag method)

枯落物袋法的操作過程為，將土壤中挖出的細根洗淨風乾、秤取一定重量後，裝入網袋放置於森林地表、或埋入土壤中進行分解，之後定期取樣進行分析，即可藉由測量重量留存率瞭解枯落物分解快慢，以及分析養分含量得出分解時的養分釋放情形，為一種操作簡便的試驗方式，因此許多枯落物分解研究採用本方法。

其優點是初始細根的生物量及養分含量可以測定。但此方法也存在許多缺點，包括：(1) 取樣和沖洗的動作會破壞細根表面的微生物相，另外取樣時也不可避免的丟掉部分細碎小細根，使得裝入枯落物袋的細根直徑比實際狀態大；(2) 由於網袋的存在，阻隔了袋內細根與林地土壤的接觸，並且阻礙土壤動物等分解者的進入，因此量測的細根分解速率會有低估的情形產生；(3) 研究中使用的死亡細根是人為切下活根導致死亡，並經過沖洗風乾等操作過程，與森林中實際細根死亡分解過程有極大差異，因此利用枯落物袋法得到的結果，數據的可信度可能與自然狀態下死亡細根有所差異 (Dornbush *et al.* 2002)。雖然有以上缺點，但枯落物袋法是細根分解研究中最廣泛利用的方法，另外在不同環境條件、不同樹種的分解數據可以相互比較，Silver and Miya (2001) 的回顧成果指出，在國外已發表的細根分解研究資料中，使用枯落物袋法的比例高達 87 %。

■ 原狀土蕊法 (intact-core method)

由於枯落物袋法較不易反映細根實際分解情形，學者提出一種新的試驗方法，即原狀土蕊法。此方法的實際操作過程為，採用一定內徑的土鑽鑽取土蕊，鑽取深度稍大於細根密集分布層，取出土蕊後將其裝入網袋中，再放回原鑽取地點進行分解，此後每隔一定時間進行取樣與分析 (Dornbush *et al.* 2002)。

此方法的優點是，與枯落物袋法相較之下，對根系周圍的物理環境與微生物干擾較少，由於截斷的細根、土壤及微生物相較接近原本狀態，因此得出的分解速率與自然情況下的細根分解較為接近。而原狀土蕊法的缺點為，由於森林類型的不同、鑽取地點的土壤空間變異等原因，每個土蕊之間細根量的差異可能很大，因此試驗初期需要鑽取

大量土蕊樣本，使之後每次取樣都有足夠樣本數來估算平均細根生物量，以獲得較準確的數據。Dornbush *et al.*(2002)以原狀土蕊法進行銀槭(*Acer saccharinum*)細根分解試驗，得出的分解速率較枯落物袋法高出 23%，氮的釋放量高出 29%。

2.4 國內相關研究

目前國內對於森林枯落物分解期間的分解速率與養分動態變化之相關研究多著重於地上部的部份，尚未有地下部枯落物分解動態的相關研究發表。而這些地上部枯落物分解作用研究所得結果與國外研究結果類似，如林國銓(2007)於福山的暖溫帶林中利用多種闊葉樹種葉片進行分解作用研究，發現不論何種樹種之葉片於分解初期都呈現乾重快速減少而後下降程度趨緩的兩階段分解情形，且碳氮比與木質素含量較高的葉片有較低的分解速率，而在其他森林與樹種的研究也有相同的結果(林國銓等 2002, 林國銓等 2007, 蕭英倫等 2007, 張至懿 2008)。

利用觀察得到的枯落物分解動態與分解期間養分釋放情形以及枯落物的生產量資料，可幫助釐清枯落物分解期間對森林生態系養分循環的貢獻程度。目前國內關於地上部枯落物分解對養分循環的貢獻，在某些森林已有相關的研究結果。如廖駿豪(2006)在墾丁高位珊瑚礁自然保留區的研究指出，地上部枯落物不同養分之分解速率依次為： $\text{Ca} > \text{Mg} > \text{N} > \text{Na} > \text{K} > \text{P} > \text{mass} > \text{C}$ ，而年養分輸入量則為：碳為 $221-4483 \text{ kg ha}^{-1}$ ；鈣為 $160-324 \text{ kg ha}^{-1}$ ；氮為 $58.6-123 \text{ kg ha}^{-1}$ ；鉀為 $24.7-41.7 \text{ kg ha}^{-1}$ ；鎂為 $16.2-30.6 \text{ kg ha}^{-1}$ ；鈉為 $5.35-25.0 \text{ kg ha}^{-1}$ ；磷為 $0.16-1.95 \text{ kg ha}^{-1}$ ，因此可知藉由整合森林的枯落物產量以及分解期間的養分釋放速率與釋放量資料，可用以計算出枯落物分解期間所釋放養分迴歸量，用以瞭解森林生態系的養分循環。

3. 研究目的

目前台灣未有關於森林生態系地下部的養分循環動態相關研究，而如果能夠對地下部養分循環有更深入的了解，可幫助理解生態系的整體養分循環情形，本研究樣區已有朱慧君(2005)進行過地下部養分含量調查，可提供關於地下部研究之基礎資料。為瞭解棲蘭山地區台灣扁柏森林生態系內地下部養分動態情形，選定台灣扁柏更新林樣區，利用枯落物袋法，觀察台灣扁柏細根的分解速率與養分釋放的情形。

4. 材料與方法

4.1 樣區概述

本試驗樣區位於台灣東北部棲蘭山台灣扁柏天然下種更新林(24°35'N, 121°24'E)(圖 1)，距離鴛鴦湖自然保留區約 2.5 公里，位於 100 號林道 14.5 公里處，海拔約 1,650 m。2003-2008 年的平均年雨量為 4350 mm，年均溫為 13.9°C。而根據樣區氣象資料顯示，分解試驗期間(2007 年 7 月至 2009 年 2 月)月雨量最低為 84 mm (2008 年 4 月)，最高為 1965 mm (2008 年 9 月)，月均溫最低為 6°C (2009 年 1 月)，最高為 20.5°C (2007 年 7 月)(圖 2)。且據 2003-2006 年之統計，雲霧籠罩時數高達全年總時數的 38% 為典型的雲霧森林(Chang *et al.* 2006)。樣區內有 17 科 26 屬 33 種維管束植物，其中以台灣扁柏最為優勢，其胸高斷面積佔所有樹種的 81.8%(陳耀德 2003)。

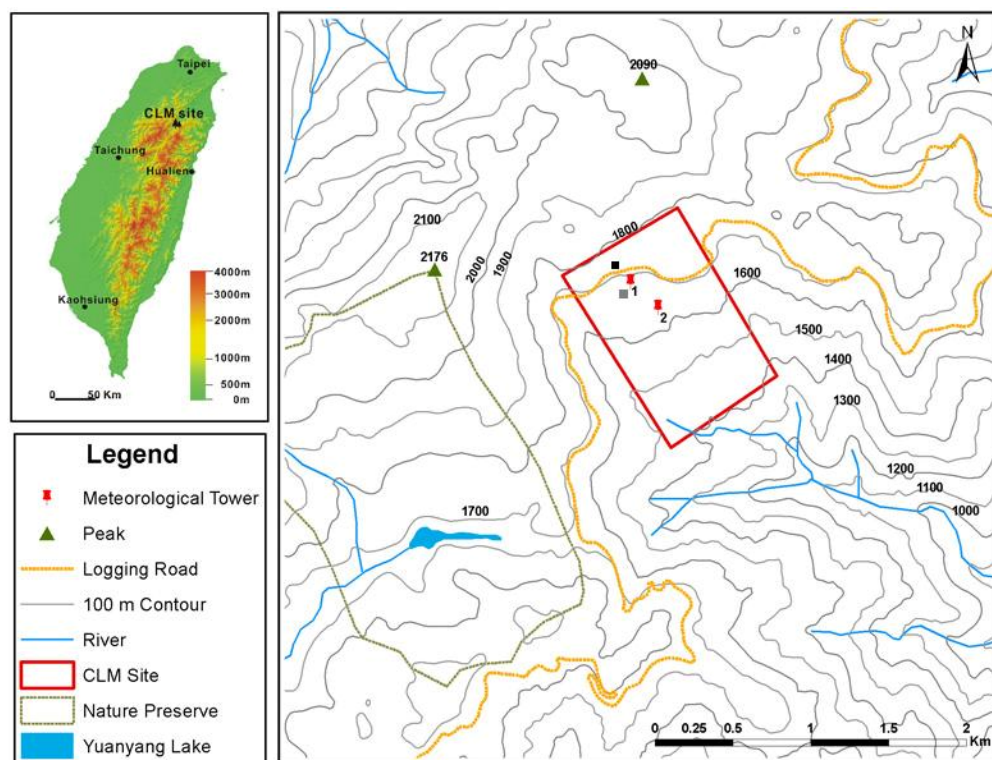


圖 1 棲蘭山樣區地理位置圖。

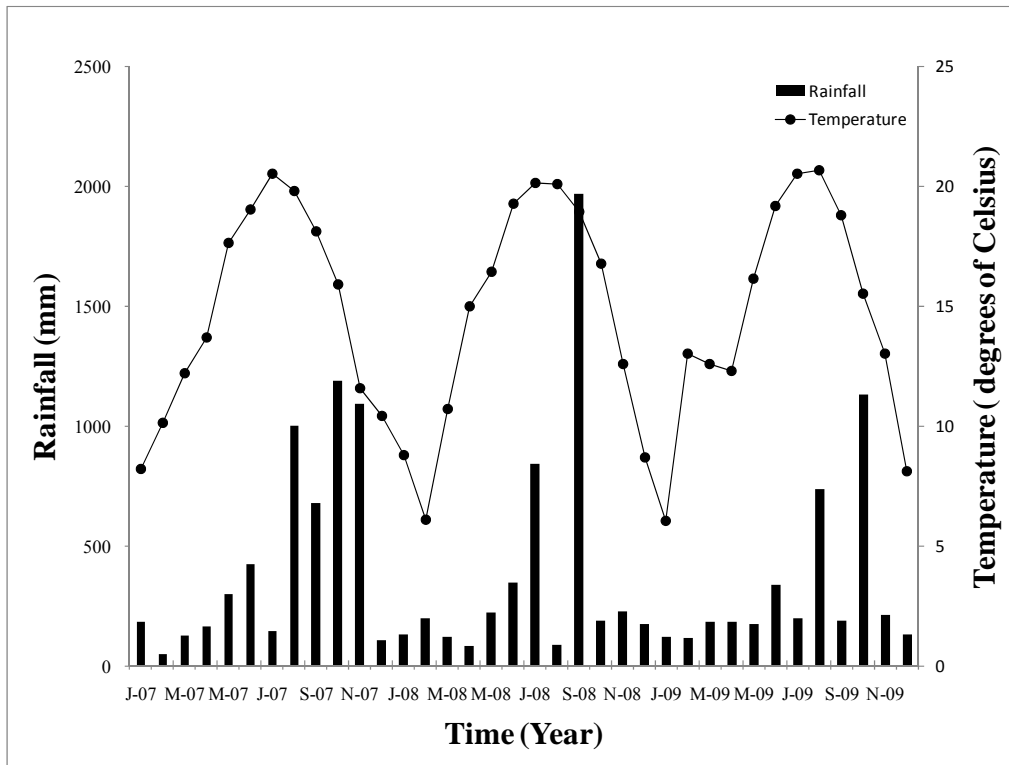


圖 2 分解試驗期間棲蘭山樣區月雨量與月均溫。

本試驗樣區之土壤是由變質板岩與石英岩發育而成 Lithic Leptosol 壤土，其中粗礦物(直徑>2 mm)含量達 80-90%。以 0.02 M CaCl₂ 測得之土壤 pH 值範圍從 2.8-3.2，呈極酸性；土壤可交換性陽離子 K⁺、Ca⁺²、Mg⁺² 等多限制在土表有機層與表層 0-5cm 的土壤中(Chang *et al.* 2007)。樣區中臺灣扁柏地上部生物量為 140 ton ha⁻¹，其中葉、枝與主幹分別為 12、12、76%(葉青峰 2004)；地下部總生物量為 76.6 ton ha⁻¹，其中 70.4 ton ha⁻¹ 為粗根，細根為 6.2 ton ha⁻¹。細根生物量隨土壤深度增加而下降，而細根所含的養分濃度則明顯較粗根為高(朱慧君 2005)。

4.2 細根枯落物袋製作、設置、養分分析

4.2.1 細根枯落物袋取樣與製作

本研究利用枯落物袋法(litterbag method)測定棲蘭山主要優勢樹種台灣扁柏細根分解速率以及養分元素於分解期間變動的情形，於 2007 年 3 月利用鋤頭、小鏟等工具自試驗地挖取扁柏細根，並在樣區附近以泉水約略清洗後帶回實驗室陰乾，再以刷子小心去除附著細根上的土壤粒子與有機質，並挑選出徑級小於 2 mm 的細根，細根樣本則各秤乾重 20 g 後，均勻放入以聚乙烯製成尺寸為 20*20 cm²，平均網孔為 0.5 mm 之枯落物袋中，同時取部份樣本以 105°C 烘乾 24 小時以測定其含水率。

4.2.2 分解試驗設置

2007 年 7 月於試區內選取 8 個樣點，於每個樣點的有機層與土壤 A 層間埋設 8 個枯落物袋，此為本樣區扁柏細根生物量分佈最高的位置(朱慧君 2005)。並配合兩週一次的例行採樣時間，在分解試驗開始後的第 28、56、113、173、231、370、570 天從各樣點取回一枯落物袋，一次取樣共有 8 重複，於樣區稍作清除表面土壤處理後，將枯落物袋帶回實驗室清除土壤及侵入的外來細根與腐植質，取少部份細根樣本以 105°C 烘乾 24 小時測定含水率，並利用含水率資料計算取回的細根樣本總乾重資料；剩餘的細根樣本則以 60 °C 烘乾 24 小時後保存於防潮箱中，供日後進行後續的養分與化學組成成份分析。

4.2.3 養分與組成成份分析

將烘乾秤重後的細根樣本磨粉後進行化學分析，先以 105°C 將細根樣本烘乾 24 小時後，接著將枯落物以滾筒式研磨機研磨成粉末狀，再取 0.50 g 樣本粉末利用微程式電腦控制高溫爐(Nabertherm,Nr.82628, Germany)，以 490°C 灰化，灰化後使其溶解於 2 N 的鹽酸(HCl)中，並定量成 50 ml，以 0.45 μ m 濾膜(cellulose acetate, Millipore, USA)過濾後以感應耦合電漿原子放射光譜儀(Inductively coupled plasma optical emission spectroscopy, ICP-OES, Jobin-Yvon Horiba group, JY2000, Edison USA)進行 K、Ca、Mg、Na、P 等元素濃度的測定。

總氮(total nitrogen, TN)與總碳(total carbon, TC)濃度是以錫囊包取 2 至 4 mg 粉末狀樣本後，利用元素分析儀 (Elemental analyzer, EA, Thermo Finnigan NA1500, Bremen Germany) 以乾燒法(dry combustion method)測得。

木質素含量則依照 CNS 14907 木材中酸不溶性木質素試驗法，分析細根內含的酸不溶性木質素含量。因為單一枯落物袋可供分析樣本不足，因此將磨粉之細根樣本依乾重比例 1:1 合併為一個樣本，故木質素每次取樣只有四重複。取 2.00g 的樣本以乙醇與甲苯的混合溶液(乙醇和甲苯以體積比 2:1 混合)萃取可溶性物質後，剩餘樣品加入 15ml 72% H₂SO₄ 溶解全纖維素等物質，在 20°C 中均勻攪拌 2 小時，使樣品充分浸濕且完全溶解後，加入蒸餾水將酸液稀釋至 3%，再以滅菌釜殺菌後過濾後，剩餘的不可溶性物質烘乾秤至恆重即為木質素，亦稱為卡拉森木質素(Klason lignin)。所有剩餘重量與濃度計算，都利用無灰分的乾重為準，以減少土壤粒子對數據的干擾(House and Stinner 1987)。

4.2.4 重量留存率、養分留存率與分解常數計算

重量留存率與養分留存率則利用實驗測得之乾重與養分濃度求得，計算公式分別為：重量留存率 = (當次餘重/原始乾重) x 100%，養分留存率 = [(當次餘重 x 當次濃度) / (原始乾重 x 原始濃度)] x 100%。

$$\text{Mass remaining (\%)} = (M_t/M_0) * 100\% \quad (\text{公式 1})$$

$$\text{Nutrient remaining (\%)} = [(M_t * C_t) / (M_0 * C_0)] * 100\% \quad (\text{公式 2})$$

M_0 ：初始根包的平均乾重

M_t ：根包分解 t 年後的平均乾重

C_t ：當次濃度

C_0 ：原始濃度

細根年分解速率利用單一負指數指數分解模式 $\ln (M_t / M_0) = -kt$ ，求得年分解常數 k 代表每年分解速率， M_0 為初始根包的平均乾重， M_t 為根包 t 年後的平均乾重 (Olson 1963)。此單一負指數方程式先由 Jenny *et al.* (1949) 提出，而後由 (Olson 1963) 對此方程式作更詳盡的闡述。本方程式主要假設於分解過程中枯落物樣本皆以相同的速率分解，而 Aber *et al.* (1990) 指出此方程式對於枯落物分解初期至重量留存率 20% 的擬合效果良好，本方程式較其他描述枯落物分解過程重量損失的方程式簡單，並對枯落物分解初期的擬合效果佳，因此被許多分解研究廣泛利用 (Gholz *et al.* 2000)。並可利用單一負指數模式所得到的分解常數，計算細根樣本分解重量達到 50% 與 99% 所需的時間，分別以 t_{50} 與 t_{99} 表示之，計算公式為 $t_{50} = (0.693/k)$ ； $t_{99} = (4.605/k)$ 。

$$\ln (M_t / M_0) = -kt \quad (\text{公式 3})$$

k ：年分解常數

t ：分解時間(年)

5. 結果

5.1 扁柏細根初始化學成份分析

比較本研究所得細根初始養分含量與 Rees *et al.*(2006)扁柏綠葉作分解作用研究中綠葉樣本之初始養分含量的結果，氮、鉀、鈣、鎂的初始濃度皆為扁柏綠葉的含量較高，其中扁柏綠葉的鉀濃度約為扁柏細根的兩倍，而扁柏綠葉的鈣濃度與鎂濃度皆約為扁柏細根的三倍，碳氮比則是扁柏細根的較高(表 1)，顯示扁柏細根相較於扁柏綠葉有較低的養分含量。

表 1 棲蘭山區台灣扁柏細根與其他樹種枯落物初始養分含量。

| Tree Species | litter type | C | N | lignin | P | K | Ca | Mg | C/N | k value | Reference |
|---|-------------|-------|------|--------|------|------|-------|------|--------|---------|---------------------------|
| | | | | | | | | | | | |
| <i>Chamaecyparis obtusa</i> var. <i>formosana</i> | greenleaf | 48.00 | 0.70 | - | - | 4.90 | 12.80 | 1.50 | 69.00 | 0.40 | Rees <i>et al.</i> (2006) |
| <i>Chamaecyparis obtusa</i> var. <i>formosana</i> | roots | 48.99 | 0.63 | 46.00 | 1.32 | 2.20 | 4.29 | 0.46 | 78.38 | 0.31 | This study |
| <i>Pinus Silvestris</i> | roots | 51.40 | 0.34 | - | 0.82 | 3.82 | 1.80 | 0.81 | 151.18 | 0.15 | Berg (1984) |
| <i>Calluna Vulgaris</i> | roots | 53.80 | 0.33 | - | 0.28 | 1.43 | 0.90 | 0.27 | 163.03 | 0.11 | Berg (1984) |
| <i>Vaccinium vitis-idea</i> | roots | 50.60 | 0.54 | - | 0.57 | 1.51 | 1.40 | 0.39 | 93.70 | 0.15 | Berg (1984) |
| <i>Pinus radiata</i> | roots | 45.40 | 0.64 | - | 0.78 | 3.50 | 3.43 | 1.04 | 70.94 | 0.86 | Ludovici and Kress (2006) |

5.2 扁柏細根剩餘重量變化與分解速率

本扁柏細根分解作用研究進行期間為 2007 年 7 月起設置至 2009 年 2 月結束，進行分解研究之枯落物袋共計收集七次，將分解期間之細根乾重與分解時間作圖，可看出隨著分解時間的增加，細根乾重呈現減少的趨勢，其中分解初期乾重快速下降，降低的趨勢隨時間增加而趨於緩慢，在分解 113 天時剩餘重量為 79%，大部分的乾重損失發生在這段時間內，而後細根分解呈停滯或忽高忽低的現象，而後重量緩慢下降，分解第 570 天剩餘重量仍含有 72%(圖 3)。

以單一負指數分解模式 $\ln(M_t/M_0) = -kt$ 求得細根的年分解常數 k ，第 1 年為 0.31，第 1.5 年為 0.26，第一年分解速率較快，分解速率隨時間增加而分解速率有下降情形。

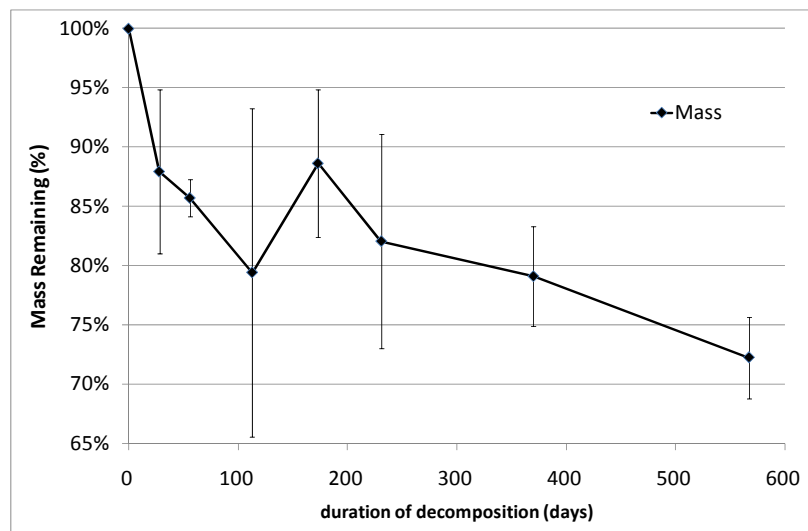


圖 3 分解期間扁柏細根剩餘乾重變化。

5.3 扁柏細根分解期間各養分濃度變化

本研究細根樣本於分解期間各養分濃度有不同的變動情形，其中木質素與氮濃度有較特殊的濃度上升情形，在細根分解期間木質素濃度呈現不斷上升的趨勢，分解至第 570 天時上升至 49.7%，且仍未有下降的情形，試驗結束濃度為初期濃度之 114%；在氮濃度也同樣直到實驗結束皆呈隨試驗時間增加而濃度不斷上升的情形，至試驗結束時氮濃度為初期濃度之 119%。而碳在分解期間相對其他元素而言其變化並不明顯，其濃度約在 49%至 50%之間變動。分解期間磷濃度有緩慢上升而後至第 113 天時濃度下降，至 231 天時濃度回升，試驗結束的濃度為初始濃度之 104.5%，磷元素也是分解期間濃度變化較小的元素。(圖 4，表 2)。

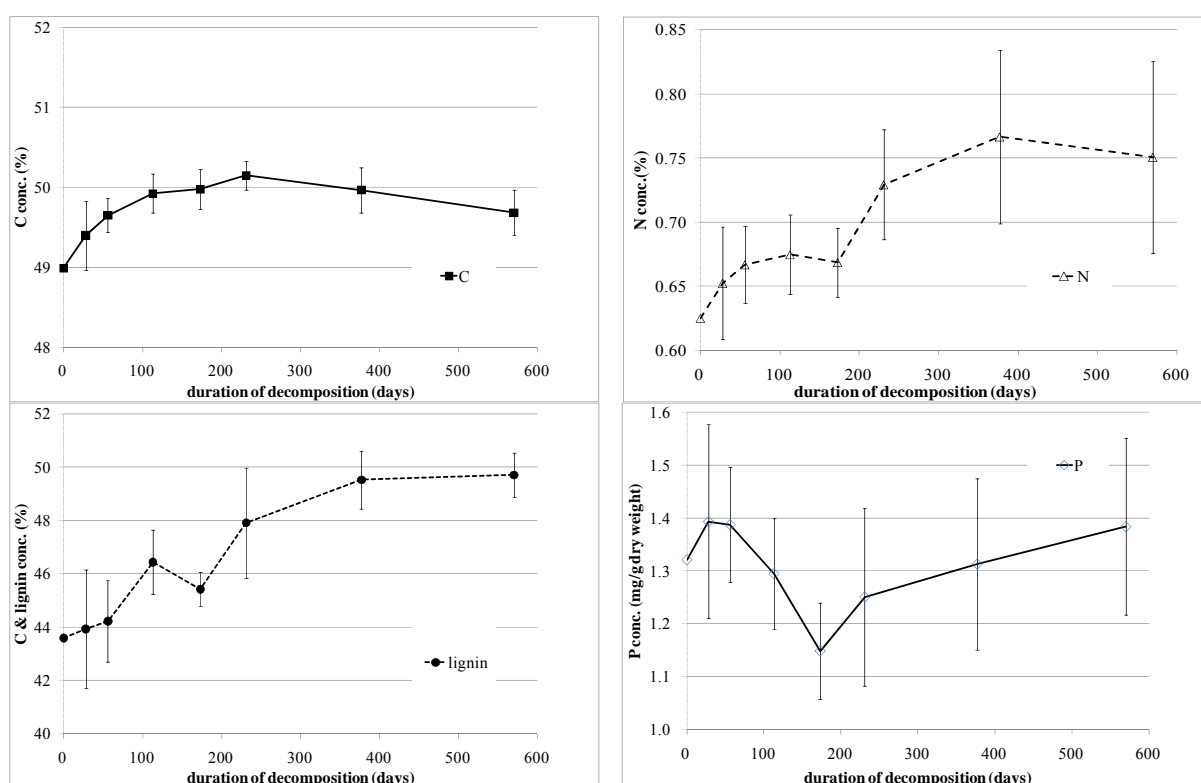


圖 4 分解期間扁柏細根碳、氮、木質素與磷濃度變化。

而較特殊的為鉀濃度於分解期間的變動趨勢，鉀濃度從分解開始變呈現濃度快速降低的趨勢，屬於養分濃度變動最明顯的元素，由初期的 2.20 (mg/g)到分解 570 天後降至 0.41(mg/g)，為初始濃度之 19%。而鈣濃度與鎂濃度於分解期間有相似的濃度變化趨勢，都可發現濃度先升後降的情形，分解期間鈣濃度自試驗開始上升至初始濃度的 147%而後快速下降，至試驗結束時濃度為初始濃度之 81%。鎂濃度自試驗開始後濃度上升至初始濃度的 152%而後快速下降，至試驗結束時濃度為初始濃度之 61%(圖 5，表 2)。

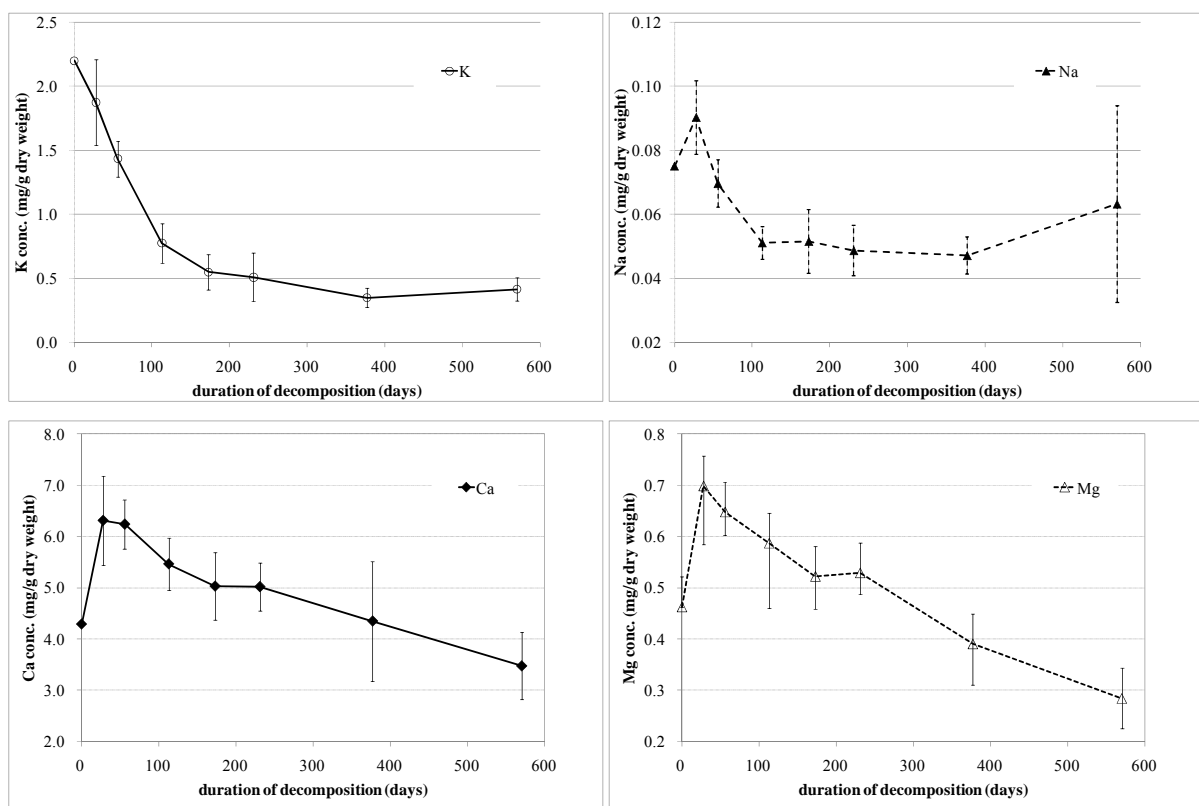


圖 5 分解期間扁柏細根鉀、鈉、鈣、鎂濃度變化。

表 2 扁柏細根分解期間各養分濃度變化。

| Sampling date | duration days | N | C | lignin | C/N | P | K | Ca | Mg | Na |
|---------------|---------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | | | | | | | | | | |
| 2007/7/19 | 0 | 0.63 | 48.99 | 43.58 | 78.38 | 1.32 | 2.20 | 4.29 | 0.46 | 0.08 |
| 2007/8/16 | 28 | 0.65 (0.04) | 49.40 (0.43) | 43.92 (2.22) | 76.01 (4.96) | 1.39 (0.18) | 1.87 (0.33) | 6.31 (0.87) | 0.70 (0.11) | 0.09 (0.01) |
| 2007/9/13 | 56 | 0.67 (0.03) | 49.65 (0.21) | 44.22 (1.53) | 74.59 (3.13) | 1.39 (0.11) | 1.43 (0.14) | 6.24 (0.48) | 0.65 (0.05) | 0.07 (0.01) |
| 2007/11/9 | 113 | 0.67 (0.03) | 49.92 (0.24) | 46.43 (1.22) | 74.14 (3.51) | 1.29 (0.10) | 0.77 (0.15) | 5.46 (0.50) | 0.59 (0.13) | 0.05 (0.01) |
| 2008/1/8 | 173 | 0.67 (0.03) | 49.98 (0.25) | 45.42 (0.65) | 74.86 (3.01) | 1.15 (0.09) | 0.55 (0.14) | 5.03 (0.65) | 0.52 (0.06) | 0.05 (0.01) |
| 2008/3/6 | 231 | 0.73 (0.04) | 50.15 (0.18) | 47.91 (2.07) | 68.99 (4.06) | 1.25 (0.17) | 0.51 (0.19) | 5.02 (0.46) | 0.53 (0.04) | 0.05 (0.01) |
| 2008/7/30 | 377 | 0.77 (0.07) | 49.97 (0.28) | 49.52 (1.09) | 65.59 (5.21) | 1.31 (0.16) | 0.35 (0.08) | 4.35 (1.17) | 0.39 (0.08) | 0.05 (0.01) |
| 2009/2/8 | 570 | 0.75 (0.08) | 49.68 (0.28) | 49.70 (0.83) | 65.26 (6.00) | 1.38 (0.17) | 0.41 (0.09) | 3.47 (0.66) | 0.28 (0.06) | 0.06 (0.03) |

5.4 扁柏細根分解期間各養分剩餘重量變化

木質素的剩餘重量在分解初期快速減少而後趨緩，分解 570 天後的木質素剩餘重量為 82%。碳剩餘重量隨著分解進行大致呈現下降趨勢，分解進行 570 天後的碳剩餘重量為 73%，且碳剩餘重量與乾重變化趨勢十分相似(圖 6，表 3)。

氮剩餘重量在分解期間先呈下降趨勢而後稍微升高，分解 570 天後剩餘的重量為 87%。而因氮元素的固定作用使得碳氮比在分解期間呈現下降趨勢，至試驗結束時碳氮比降至 67，較初期減少 14%(圖 7，表 2，表 3)。

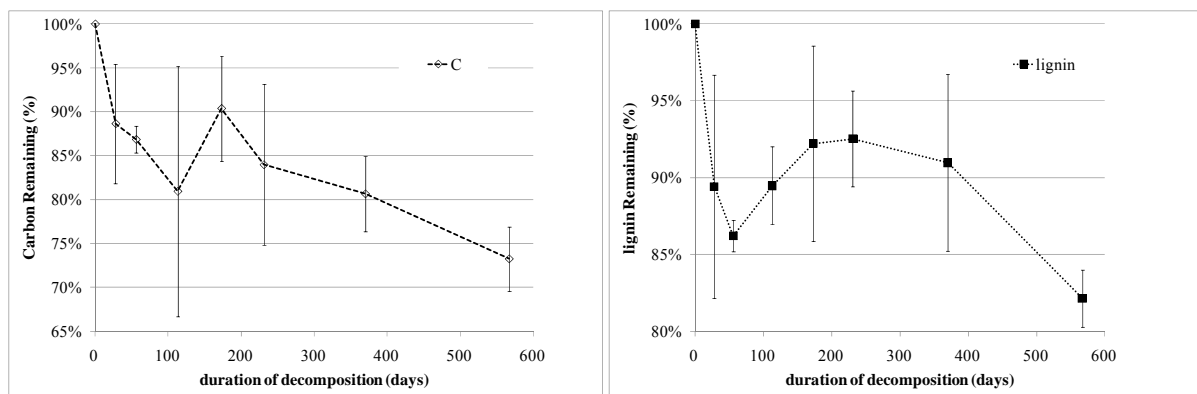


圖 6 分解期間扁柏細根木質素與碳剩餘重量變化。

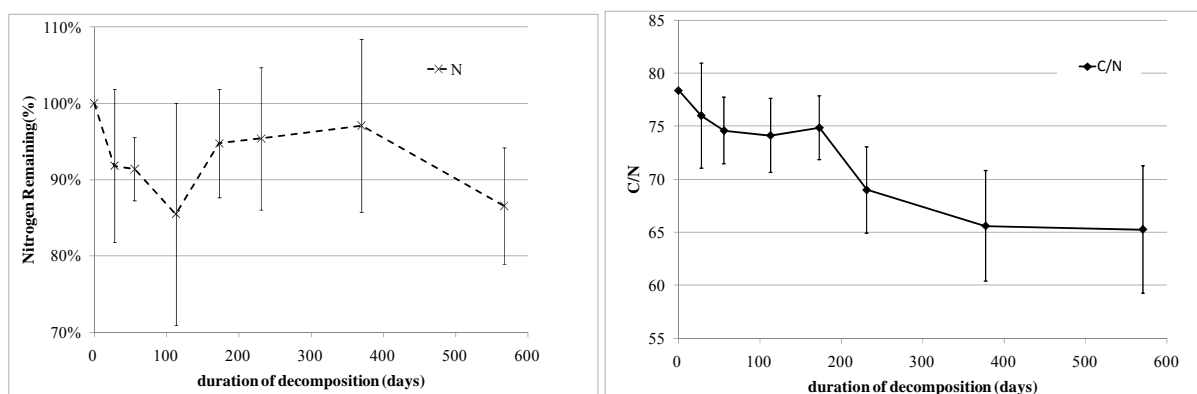


圖 7 分解期間扁柏細根氮剩餘重量與碳氮比變化。

磷剩餘重量在第 113 天時降至 78%，而後分解較緩慢幾乎停滯，於試驗最後的磷剩餘重量為 75%。鉀剩餘重量降低趨勢與濃度下降趨勢相似，試驗開始後剩餘重量便快速下降，大部分的剩餘重量損失發生於分解第 113 天時，至第 231 天只剩餘 18%，而後分解緩慢，至試驗結束時的鉀剩餘重量為 14%。而鈣剩餘重量則呈先升後降的情形，自分解 28 天後先增加至 129%而後快速下降，至試驗結束時的鈣剩餘重量為 58%。鎂剩餘重量則成先升後降的情形，自分解 28 天後先增加至 133%而後快速下降，至試驗結束時的鈣剩餘重量為 44% (圖 8，表 3)。

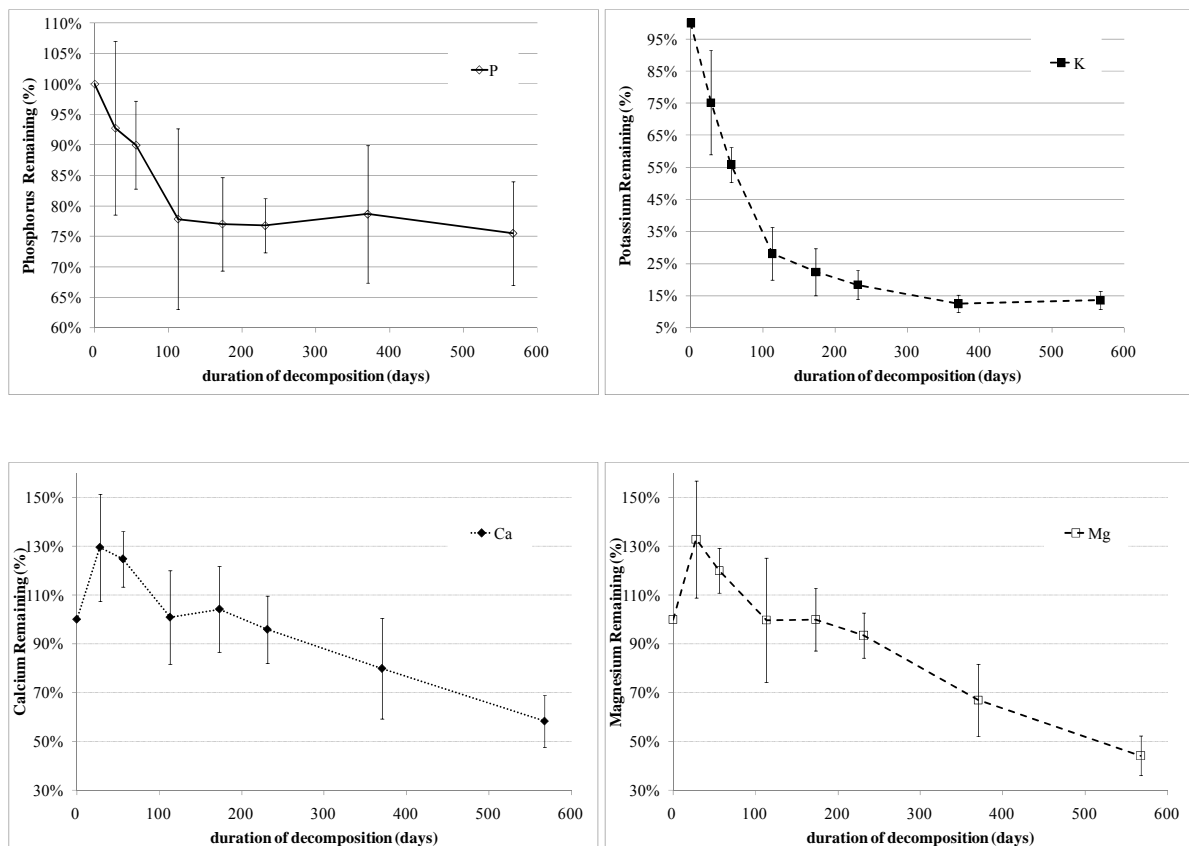


圖 8 分解期間扁柏細根磷、鉀、鈣、鎂剩餘重量變化

表 3 扁柏細根分解期間各養分重量留存率變化。

| Sampling date | duration days | Mass | C | lignin | N | K | Ca | Mg | P | Na |
|---------------|---------------|------------------|------------------|-----------------|------------------|------------------|-------------------|-------------------|------------------|-------------------|
| | | % | | | | | | | | |
| 2007/7/19 | 0 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 |
| 2007/8/16 | 28 | 87.92 (6.91) | 88.64 (6.80) | 89.42 (7.28) | 91.82 (10.02) | 75.18 (16.20) | 129.48 (22.00) | 132.86 (24.03) | 92.77 (14.26) | 106.28 (20.19) |
| 2007/9/13 | 56 | 85.68 (1.58) | 86.84 (1.51) | 86.21 (1.02) | 91.39 (4.17) | 55.86 (5.42) | 124.73 (11.36) | 120.03 (9.05) | 89.98 (7.24) | 79.41 (8.25) |
| 2007/11/9 | 113 | 79.39 (13.85) | 80.93 (14.25) | 89.48 (2.53) | 85.48 (14.60) | 28.13 (8.23) | 100.86 (19.04) | 99.74 (25.49) | 77.84 (14.80) | 53.67 (9.44) |
| 2008/1/8 | 173 | 88.61 (6.21) | 90.38 (5.98) | 92.20 (6.37) | 94.75 (7.09) | 22.42 (7.33) | 104.16 (17.54) | 99.92 (12.85) | 77.02 (7.64) | 61.07 (13.28) |
| 2008/3/6 | 231 | 82.04 (9.05) | 83.97 (9.17) | 92.53 (3.14) | 95.39 (9.30) | 18.41 (4.50) | 95.88 (13.84) | 93.43 (9.28) | 76.76 (4.44) | 53.09 (10.30) |
| 2008/7/30 | 377 | 79.07 (4.20) | 80.64 (4.29) | 90.97 (5.76) | 97.09 (11.34) | 12.52 (2.79) | 79.86 (20.65) | 66.92 (14.91) | 78.64 (11.23) | 49.39 (4.10) |
| 2009/2/8 | 570 | 72.21 (3.46) | 73.24 (3.65) | 82.14 (1.86) | 86.56 (7.62) | 13.57 (2.76) | 58.30 (10.64) | 44.17 (8.13) | 75.49 (8.48) | 61.16 (31.43) |

5.5 各養分元素釋放速率常數

細根的各養分元素因枯落物性質以及該元素的可移動性不同而有不同的釋放速率，其釋放速率依序為：鉀>磷>乾重>碳>鎂>氮>鈣，其中鉀元素具有最高的養分釋放速率，與釋放速率最低的氮元素達近 40 倍的差異（圖 9）。 t_{50} 與 t_{90} 為該元素釋放 50% 與 95% 的重量所需的時間（表 4）。

表 4 扁柏細根第一年分解速率與各養分元素釋放常數， t_{50} ， t_{99} 。

| | mass | C | N | P | K | Ca | Mg |
|---------------|-------|-------|-------|-------|------|-------|-------|
| K (yr) | 0.31 | 0.28 | 0.09 | 0.38 | 3.44 | 0.08 | 0.18 |
| t_{50} (yr) | 2.23 | 2.50 | 7.83 | 1.81 | 0.20 | 8.52 | 3.78 |
| t_{99} (yr) | 14.84 | 16.60 | 52.06 | 12.06 | 1.34 | 56.60 | 25.13 |

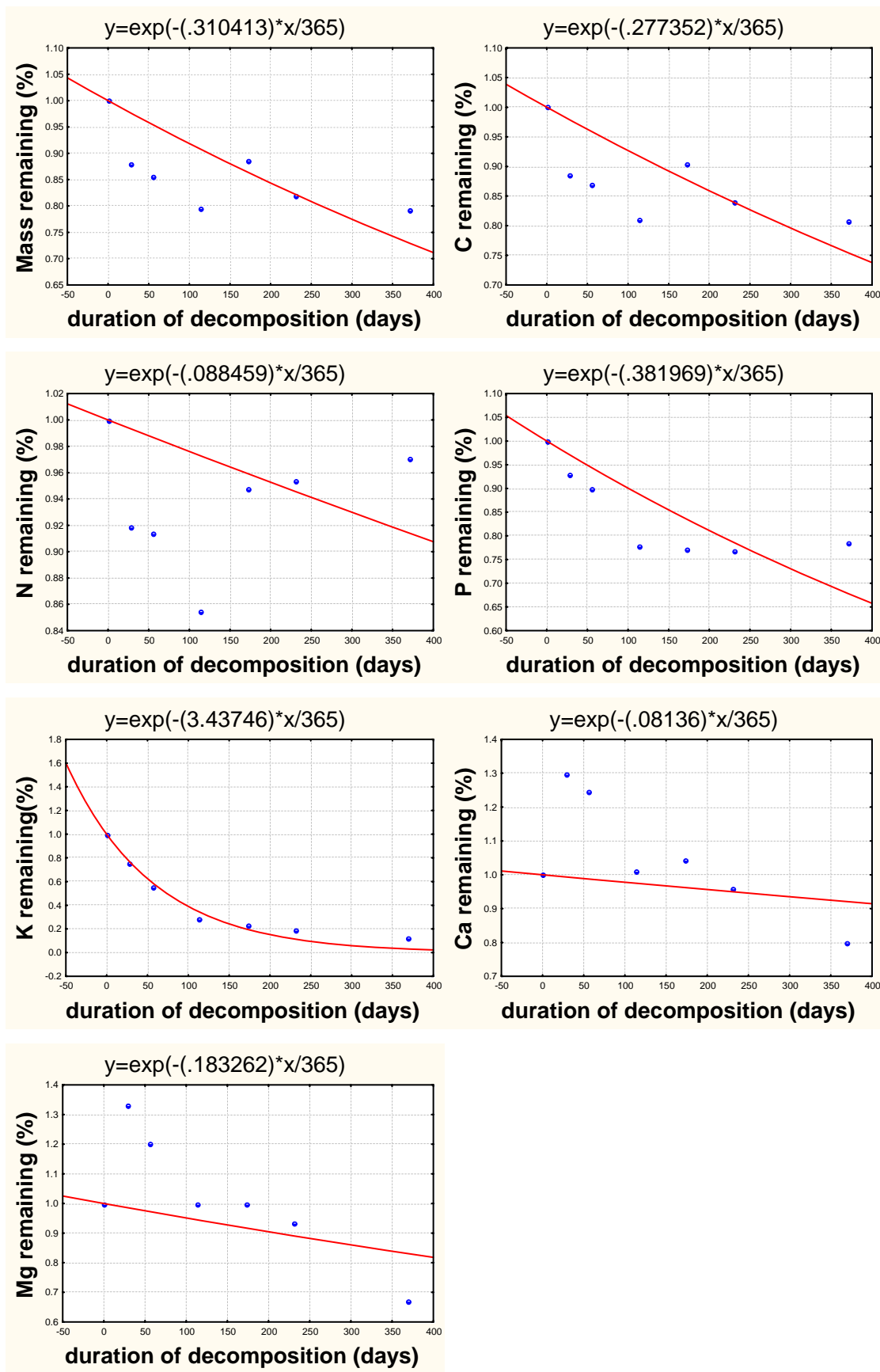


圖 9 扁柏細根第一年分解速率與各養分元素釋放常數。

6. 討論

6.1 利用枯落物袋法進行分解作用研究可能產生的誤差

利用枯落物袋進行分解作用的研究所得到的結果可能會與自然狀態下的分解動態有所差異。自土壤中挖取細根樣本時難以確定為新生或衰老的細根，且自然衰老細根的物理及化學性質會與新鮮細根有所差異，特別是衰老細根的可移動性養分含量如鉀、鈣、鎂可能較新鮮細根含量低，且衰老細根其物理結構可能較鬆散。準備實驗所需細根樣本的處理也會移除或殺死原本附著其上的土壤生物，處理過程中經陰乾以及區分徑級的動作，也會影響細根的含水狀態，改變其物理性質，所以細根樣本會因這些前處理的過程使得細根於分解時養分元素的釋放情形會與自然死亡細根不同(Ludovici and Kress 2006)，因此可能與自然狀態下分解作用有所差異。

將細根樣本擺放在並非完全密封且具有網孔的枯落物袋中之後，為模擬細根於自然環境中的分解作用，需將枯落物袋置於有機層與土壤層之間，因此在分解作用進行期間可能會有外來細根、真菌的菌絲、節肢動物糞便、土壤顆粒等有機或無機物質進入枯落物袋中，而造成細根樣本的剩餘乾重數據誤差。通常在實驗初期樣本完整性較高，如有外來根系或物質進入枯落物袋中尚容易以目視分辨並與樣本分開，因此分解初期乾重數據較不會因外來物質污染而受影響；但當分解進行一段時間後，細根樣本多已破碎且顏色改變，外來細根與真菌菌根也長入枯落物袋中並纏附於樣本上，不易由外表區辨以及清除，因此分解晚期較易受因外來有機與無機物質進入影響分解速率以及養分分析的數據。雖然礦質土壤顆粒等無機顆粒可以由檢測灰份量求得無灰分重(Ash-free Weight)來去除無機物質對乾重數據的干擾，但目前仍沒有去除有機物污染的標準方法。

枯落物袋的網孔可能延遲真菌菌根侵入時間，阻隔大型的土壤生物通過，使這些土壤生物難以對細根樣本進行破碎化作用，因此會低估了細根在自然環境下的分解速率。Powers *et al.*(2009)同時在多個未受干擾的熱帶潮濕森林中，利用不同網孔大小的枯落物袋進行細根分解作用研究，以釐清節肢動物對分解速率的影響，結果顯示可供節肢動物進入的網孔處理之分解速率最大，較隔離節肢動物的網孔處理高至兩倍之多，且在各森林都有一樣的效應，表示在熱帶潮濕森林中研究分解作用時，土壤生物相是影響細根分解速率很重要的因子，隔絕土壤生物對細根樣本進行破碎化作用會明顯的降低分解速率。棲蘭山樣區的土壤因雨量大而一直維持在潮濕的狀態，且土壤溫度不常降至零度以下，故造成細根枯落物破碎的凍融與乾濕變化的非生物性破碎化作用較不明顯，在本樣區造

成破碎化的最主要因子應為土壤生物的活動，但目前本樣區缺乏土壤生物相之相關研究資料，因此無法得知本研究所使用的 0.5 mm 網孔對於土壤生物的隔離效果以及低估的分解速率為何，需進行進一步的操作研究。

雖然利用枯落物袋進行分解作用研究可能會因隔離土壤生物作用以及容易因有機物質污染而影響估算分解速率的準確性，但因本方法簡單易操作且成本低廉，因此細根分解作用相關研究利用枯落物袋法的比例可達 87%(Silver and Miya 2001)，仍是進行分解作用研究最常被使用的方法。

6.2 分解期間細根各養分濃度與剩餘重量變化

本研究細根樣本的木質素與各養分於分解期間的濃度及其剩餘重量有不同的變動趨勢，顯示各養分元素在本樣區所扮演的角色不同。

木質素於分解期間呈現濃度升高的情形，應為分解初期一些移動性較高的養分以及結構較簡單的組成因淋洗而流失或被微生物分解礦化，相對結構較複雜的木質素分解較慢而留存較多於細根中，因此會觀察到濃度增加的情形。木質素在分解初期可觀察到重量減少的情形，顯示木質素於初期便已開始分解，因此分解期間剩餘重量有緩慢下降的情形。

細根樣本碳剩餘重量與乾重變化趨勢十分相似，因碳為植體構成的主要元素，所以才會在分解過程觀察到這個情形。

一般而言細根氮含量常被作為預測分解速率的重要參數。本研究細根樣本分解期間氮濃度不斷上升，顯示分解期間氮元素的生物固定作用不斷進行，此一氮累積情況應與細根的初始氮濃度或碳氮比有關，本研究細根樣本的初始碳氮比為 78，Berg and Staaf(1981)指出當枯落物之氮濃度小於 0.70 %或碳氮比超過 30 時，微生物為進行分解作用或由外界環境固定氮元素以供分解所需的養分，會有氮累積現象發生，而氮剩餘重量於分解初期下降而後升高的情形可能為可溶性的含氮成份受淋洗流失，而後增加的重量為微生物行固定作用或真菌的輸入而來，也使碳氮比於分解期間逐漸下降； Berg and Staaf(1981)指出分解期間氮的動態可以分成三個時期，分解初期因淋洗作用使水可溶性含氮化合物流失造成細根氮含量降低，接著由微生物行固定作用或真菌由環境中輸入氮至細根中，此時細根的氮濃度與氮含量逐漸增加，並降低細根碳氮比，分解作用呈現緩

慢或停滯的情形，當細根所含氮量累積足夠進行分解作用時，再開始進行分解並將氮礦化並減少細根中的氮含量。此一分解期間的氮動態情形在其他的細根分解作用研究中也發現，而氮累積程度依細根的初始氮含量而定。Berg(1984)利用初始氮含量不同的樺樹細根進行分解研究發現，初始氮含量較低的細根，於分解期間累積的氮量是最高的，顯示當分解者要分解養分含量較低的細根時，需要自環境中獲取足夠養分才能繼續進行分解作用。本研究細根氮含量於分解期間不斷增加顯示分解者缺乏足夠養分繼續進行分解作用，因此氮含量於試驗結束時仍未有開始下降的情形出現。

磷的重量留存率於分解除其便呈現釋放的情形，磷濃度於分解期間變化也不大。雖然磷一般被認為也是枯落物分解速率的限制因子之一(Gower 1987)，當微生物缺乏足夠磷元素進行正常生理作用時，也會自環境中固定磷元素以繼續進行細根的分解，某些研究指出，當磷元素的可獲得性低時，也會影響溫帶森林生態系中的枯落物分解以及淨初級生產力，而本研究細根分解期間微生物沒有進行固定作用的情形，是較為特殊的現象。

細根分解初期鉀濃度便呈現快速降低的情形，鉀剩餘重量降低趨勢與濃度下降趨勢相似，也在試驗開始後便呈剩餘重量便快速下降，顯示大部分的剩餘重量損失發生於分解初期，鉀離子快速流失的現象是因鉀為可移動性最高的陽離子，容易溶於水中而被淋洗離開枯落物，因此可觀察到快速流失的情形。

鈣元素為植物細胞壁的主要成份之一，移動性較弱，故鈣的釋放多是因生物分解作用造成，並不是受淋洗作用而釋出(Ribeiro *et al.* 2002)；本研究細根鈣濃度於分解期間呈現先升後降的趨勢，自試驗開始後濃度上升至初始濃度的 147%而後快速下降，於分解初期的濃度上升現象應與微生物的固定作用有關係，至試驗結束時最後濃度較初始濃度減少 19%。鈣剩餘重量則成先升後降的情形，自分解 28 天後先增加至 129%而後快速下降，至試驗結束時的鈣剩餘重量為 58%，顯示分解期間微生物由外界吸收鈣元素以進行分解作用。

鎂離子屬於移動性強的離子，但不若鉀離子在分解初期便因淋洗作用快速流失，乃是因鉀元素較少與植體有機質形成較穩定的化合物，但鎂可與有機質結合，當鎂含量不足時也會因微生物作用而累積，所以釋放速率會較鉀元素稍慢(Staaf and Berg 1982)。

6.3 扁柏細根分解速率與國外森林之比較

分解過程中細根受各種作用影響而釋出養分並改變結構，最常見且容易表示分解速率的方式便是觀察其重量變化，由重量留存率的變化來得知細根的分解情形，並利用單一負指數方程式估算出年分解速率。

在本研究中細根剩餘重量呈現兩階段的變化情形，與其他森林中研究所得結果類似。且細根分解速率會因所在區域不同或是生活型不同而有很大的差異。本研究細根分解速率明顯較同緯度的研究結果為低，相近緯度的針葉樹細根分解速率約為扁柏細根的3倍，而與相近緯度之闊葉樹種細根分解速率之差異則可達5倍之多，扁柏細根之分解速率則與較高緯度之針葉樹種較為相近(表 5)。

細根的分解速率也會受分解環境影響，如土壤濕度、含氧量、pH 值、以及微生物族群對於無機養分的可獲得性等(Chapin III *et al.* 2002)，本樣區年降雨量達 4350 mm，土壤常為處於潮濕狀態，而當土壤水分含量過高時，氧氣供應不足會使微生物活動力降低(曾桂香 2006)，扁柏細根樣本埋設於有機層與土壤層間，可能長期保持潮濕的狀態，造成分解組織缺氧的現象，因而使扁柏細根分解速率低落。

細根分解過程中所形成的有機物質以及釋放的養分多寡，會依不同生態系及樹種不同，使得其對於森林養分循環的貢獻比例有差異。因為細根枯落物本身的化學性質差異及分解環境影響，生態系土壤中的各元素養分有效性不同，或是各元素的移動性強弱，使不同生態系中細根枯落物於分解期間養分釋放速率有所差異。如 Tripathi and Singh(1992)於印度的熱帶乾燥稀樹草原竹子細根分解作用研究發現，於竹子細根分解期間各養分元素的釋放速率依序為鉀>碳>磷>鈣>氮；而 Ludovici and Kress(2006)於 13 年生的火炬松(*Pinus taeda* L.)森林進行施肥研究，檢測土壤有效性對火炬松細根分解時養分釋放情形的影響，發現於土壤有效性較高樣區生長的細根有較高的初始養分含量以及較多的鉀、磷、氮、鎂的養分釋放量；Moretto and Distel (2003) 於阿根廷的半乾燥草原利用兩種初始養分含量有明顯差異的草本植物細根進行分解研究，發現這兩種初始養分含量不同的草本植物細根與其氮與磷元素的於分解期間有完全不同的變動情形。而棲蘭山樣區土壤酸度高，陽離子養分(K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+})也很貧瘠(Chang *et al.* 2007)，可能也是造成細根分解速率低的原因。

表 5 棲蘭山區台灣扁柏細根與國外研究細根第一年分解速率。

| Latitude (°N) | Life form | Mean annual rainfall (mm) | Mean annual temperatures (°C) | Diameter class(es) | Method | Mesh size(s) (mm) | k value | References |
|---------------|-----------|---------------------------|-------------------------------|--------------------|--------------|-------------------|-------------|----------------------------------|
| 14 | B | 580 | 26.2 | F, M | Litterbags | 1 | 0.55-1.27 | Fujimaki <i>et al.</i> (2008) |
| 9 | C, G, B | 2692 | 27.2 | - | Litterbags | 0.1 | 0.81 | Cusack <i>et al.</i> (2009) |
| 10 | C, G, B | 2685 | 17.7 | - | Litterbags | 0.1 | 0.5 | Cusack <i>et al.</i> (2009) |
| 10 | C, G, B | 4100 | 26.2 | - | Litterbags | 0.1 | 0.62 | Cusack <i>et al.</i> (2009) |
| 17 | C, G, B | 508 | 26.4 | - | Litterbags | 0.1 | 0.42 | Cusack <i>et al.</i> (2009) |
| 18 | B | 4000 | 21 | F | Litterbags | 1.5 | 0.60-1.6 | Bloomfield <i>et al.</i> (1993) |
| 18 | B | 3500 | - | F | Trench plots | - | 0.4-0.9 | Silver and Vogt (1993) |
| 18 | C, G, B | 3363 | 23.5 | - | Litterbags | 0.1 | 1.06 | Cusack <i>et al.</i> (2009) |
| 19 | B | 2500 | 16 | F | Litterbags | 0.3 | 0.261-0.483 | Ostertag and Hobbie (1999) |
| 24 | C | 4350 | 13.9 | F | Litterbags | 0.5 | 0.31 | This study |
| 25 | B | 1829 | 15 | F | Litterbags | 1 | 1.62-1.74 | Arunachalam <i>et al.</i> (1996) |
| 25 | C | 2054 | 17.3 | F | Litterbags | 2 | 0.81-0.94 | John <i>et al.</i> (2002) |
| 32 | G | 225 | - | F | Litterbags | 1 | 0.13-0.60 | Mun and Whitford (1998) |
| 38(S) | G | 375 | 15 | N | Litterbags | 0.35 | 0.20-0.31 | Moretto and Distel (2003) |
| 39 | G | 830 | - | F | Litterbags | Pool 1.0, 3.0 | 0.13-0.66 | Seastedt <i>et al.</i> (1992) |
| 44 | B | 1060 | - | F, M | Litterbags | 2 | 0.191-0.736 | Burke and Raynal (1994) |
| 60 | C, B | 609 | 3.8 | F, M, L | Litterbags | 1 | 0.080-0.195 | Berg (1984) |
| O | B | 4000 | 22 | F | Litterbags | 1.5 | 0.60-0.83 | Bloomfield and Vogt (1993) |
| 56-66 | C | 425-1079 | -10.5 | F, M | Litterbags | 1 | 0.287-0.510 | Berg <i>et al.</i> (1998) |

Note: Life form: graminoid (G), conifer (C), broadleaf (B); Diameter classes: fine (F; < 2 mm), medium (M; 2-5 mm), large (L; >5 mm)。

6.4 細根本身物理性質與化學組成對分解速率影響

因為化學組成可以當作理解枯落物的易分解程度的指標(Melillo *et al.* 1982, Berg 1984)，枯落物的初始化學組成常被用來預測分解速率，如木質素、碳氮比、多酚類含量等。當枯落物的木質素濃度高或氮濃度低時，表示該種枯落物所含養分量較低或難分解組成成份較高，並會間接影響細根分解速率(Berg 1984)。土壤中的分解者如真菌與細菌為了取得能將枯落物礦化作用的養分，會從土壤中固定所需氮元素，待固定足夠養分後，才繼續進行分解作用，因此通常碳氮比高的枯落物的分解速率都會比較低。

Berg and Staaf(1981)指出當枯落物之氮濃度小於 0.70%，或碳氮比超過 30 時，微生物為進行分解作用會由外界環境固定氮元素以供分解所需的養分。本研究細根樣本的初始碳氮比為 78，也於分解期間呈現氮固定作用，顯示細根樣本養分含量低，因此微生物會自外界固定以取得繼續分解細根所需的養分，直至分解結束仍在進行氮元素的固定作用，顯示微生物尚未取得足夠養分以繼續分解作用，因此造成扁柏分解速率極低情形。

6.5 扁柏細根與綠葉分解速率與養分釋放比較

不同的森林生態系其細根與落葉分解時釋放的養分對該森林養分循環的貢獻程度會有所不同，且根的分解以及礦化作用動態可能因其本身的化學性質及分解環境不同，與地上部會有不同的分解動態情形(Bloomfield *et al.* 1993)。Burke and Raynal (1994)在美國紐約州亞迪隆達克山區(Adirondack)杭丁頓(Huntington)落葉林的研究指出，細根每年的分解量約為 0.9 t ha^{-1} ，而其在每年養分循環的貢獻方面，鈣約為 $4.5\text{--}6.1 \text{ kg ha}^{-1}$ ，鎂 $1.1\text{--}1.4 \text{ kg ha}^{-1}$ ，鉀 $0.3\text{--}0.4 \text{ kg ha}^{-1}$ ，磷 $1.2\text{--}1.7 \text{ kg ha}^{-1}$ ，氮 $20.3\text{--}27.3 \text{ kg ha}^{-1}$ ，硫 $1.8\text{--}2.4 \text{ kg ha}^{-1}$ ；發現細根分解所釋放的鈣與鎂較樹葉枯落物少，但在氮、磷、鉀、硫方面則與樹葉枯落物相近。

一般細根與葉的初始養分含量通常會非常相近，但因所處分解環境不同，常會有分解速率或分解情形不同的情況出現(Berg and McLaugherty 2003)。影響同一物種的地上部與地下部枯落物分解速率的控制因子會有所不同(Moretto and Distel 2003)，因此造成養分循環的貢獻程度不同的結果。比較在相同試驗地扁柏綠葉分解動態研究結果，發現扁柏之細根與綠葉的分解動態與養分釋放情形類似，且扁柏綠葉分解速率較細根為

高。

Rees *et al.*(2006)於鴛鴦湖地區利用枯落物袋法，測定台灣扁柏葉部枯落物分解過程所得解果顯示，綠葉的剩餘重量在分解試驗進行 16 個月後流失 35%，鈣流失 39%，鉀與鎂的流失分別為起始狀態之 86%與 60%。生物量的流失在分解進行 496 天後非常低，留下的生物量為起始的 65%。鉀、鈣與鎂的流失過程非常不同，鈣流失情形與生物量流失相近；鎂流失快速，分解後約只剩下 40%；鉀於分解後僅剩下起始含量的 14%。

比較本研究的細根樣本與 Rees *et al.*(2006)扁柏綠葉分解作用研究結果發現，細根有較綠葉更高的初始碳氮比，及較低的養分濃度，此差異可能會造成分解速率的不同。因此當扁柏綠葉經過 469 天的分解後，剩餘的重量為 65%；而細根經 570 天的分解後的剩餘重量為 72%。扁柏細根與綠葉皆可觀察到的氮濃度增加，在試驗結束後仍沒有出現氮釋放情形，顯示細根與綠葉皆缺少足夠的氮元素供分解者利用，基質如有較高碳氮比時會有氮的固定（immobilization）情形出現(Berg and McClaugherty 2003)，因此在棲蘭山地區扁柏的細根與綠葉可能都在分解作用中扮演碳庫的角色。

要比較扁柏細根以及綠葉何者於分解期間所釋放的養分量較高，在棲蘭山區扁柏森林的養分循環佔較重要的角色，則需要扁柏細根與綠葉年枯落物量的資料，才能夠確定分解所釋放的養分絕對量，朱慧君(2005)於本研究樣區實驗獲得之扁柏葉部的年枯落物量為 $3803 \text{ kg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ ，可供估算扁柏葉部枯落物分解時所釋放的養分量，但因 Rees *et al.*(2006)所選取的實驗材料為扁柏綠葉，因此在計算葉部枯落物的年養分釋放量時可能會有高估的情形，扁柏綠葉之各養分釋放常數分別為碳 0.35 yr^{-1} ，氮 0.22 yr^{-1} ，鈣 0.35 yr^{-1} ，鎂 1.16 yr^{-1} ，鉀 1.89 yr^{-1} ，則扁柏綠葉年養分釋放量分別為碳 $638.74 \text{ kg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ ，氮 $5.86 \text{ kg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ ，鈣 $17.04 \text{ kg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ ，鎂 $6.62 \text{ kg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ ，鉀 $35.22 \text{ kg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 。本樣區目前缺乏細根年枯落物量之研究資料，Burton *et al.*(1997)回顧溫帶地區多種森林年枯落物量研究指出，地上部與地下部的年枯落物量相近，因此為估算扁柏細根年養分釋放量，利用朱慧君(2005)所估計之扁柏葉年枯落物量計算，結果顯示則扁柏細根年養分釋放量分別為碳 $521.67 \text{ kg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ ，氮 $2.14 \text{ kg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ ，鈣 $1.30 \text{ kg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ ，鎂 $0.18 \text{ kg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ ，鉀 $28.76 \text{ kg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ ，磷為 $1.91 \text{ kg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ ，可發現分解期間扁柏綠葉皆較扁柏細根的釋放量高，顯示扁柏綠葉對養分循環的貢獻較扁柏細根為高，而極低的分解速率以及氮釋放速率顯示細根對森林中的有機質以及氮的留存佔了很大的部份。

7. 結論與建議

本研究以枯落物袋法於棲蘭山區台灣扁柏天然更新林進行細根分解試驗，在分解試驗開始後的第 28、56、113、173、231、370、570 天從各樣點取回細根樣本，以分析細根重量與其所含養分之變化。細根分解過程中，除鉀濃度明顯隨時間迅速下降外，碳、鈣、鎂、鈉、磷等養分濃度在分解初期則呈上升趨勢而後才下降，氮與木質素濃度在分解一年內均持續增高，這也使得碳氮比隨時間而降低。扁柏細根經 570 天分解後，重量留存率為 $72\pm 3\%$ 顯示其分解速率甚低，唯其中鉀快速釋出，在半年內即流失 80%。以單一負指數模式求得台灣扁柏細根之分解常數 k ，第 1 年 k 值 0.31，第 1.5 年 k 值 0.26，遠低於低緯度的熱帶與亞熱帶林，而與溫帶針葉林類似。

由於本樣區缺乏優勢樹種台灣扁柏細根年枯落物量的相關資料，使我們無法確實地估算細根分解對生態系整體養分循環的貢獻量。建議往後可進行細根枯落物量調查以用於細根分解貢獻養分量之估算；此外，關於細根分解速率、養分釋放速率的研究時間並不長，因而缺乏細根經長期分解作用過程成為土壤有機質的詳盡了解。分解晚期的養分動態變化與分解初期不同，對養分循環的影響也會有差異，棲蘭山地區扁柏細根因分解環境與枯落物品質關係，使得土壤中的有機質含量高，因此建議往後可對細根分解作用進行更加長期且連續性的研究，以幫助瞭解土壤有機質形成過程。

8. 參考文獻

- 朱慧君。2005。台灣扁柏森林生態系養分存量與枯落物養分流量之研究。國立東華大學自然資源管理研究所碩士論文，花蓮縣。
- 林國銓、張乃航、王巧萍和劉瓊霏。2002。福山闊葉林四樹種綠葉的分解及氮動態變化。臺灣林業科學 17卷1期:75-85。
- 林國銓、黃菊美和杜清澤。2007。不同綠葉在福山闊葉林之分解和養分動態變化。臺灣大學生物資源暨農學院實驗林研究報告 21卷1期:15-27。
- 張至懿。2008。福山永久樣區優勢樹種凋落物養分釋出及土壤氮礦化之季節性變動。國立臺灣大學農業化學研究所碩士論文，台北市。
- 陳耀德。2003。鴛鴦湖森林生態系大氣養份輸入之探討。國立東華大學自然資源管理研究所碩士論文，花蓮縣。
- 曾桂香。2006。棲蘭山區臺灣扁柏森林土壤呼吸之探討。國立東華大學自然資源管理研究所碩士論文，花蓮縣。
- 葉青峰。2004。估算台灣扁柏森林的生物量及雲霧沈降量。國立東華大學自然資源管理研究所碩士論文，花蓮縣。
- 廖駿豪。2006。墾丁高位珊瑚礁自然保留區森林生態系中凋落物量與土壤養分動態之關係。屏東科技大學環境工程與科學系碩士論文，屏東縣。
- 蕭英倫、林世宗、王國鼎和柯淳涵。2007。環山地區台灣二葉松地面松針分解動態變化。中華林學季刊 40卷2期:219-228。
- Aber, J. D., J. M. Melillo and C. A. McLaugherty. 1990. Predicting long-term patterns of mass-loss, nitrogen dynamics, and soil organic-matter formation from initial fine litter chemistry in temperate forest ecosystems. *Canadian Journal of Botany* 68:2201-2208.
- Aber, J. D., J. M. Mellio, K. J. Nadelhoffer, C. A. McLaugherty and J. Pastor. 1985. Fine root turnover in forest ecosystems in relation to quantity and form of nitrogen availability: a comparison of two methods. *Oecologia* 66:317-321.
- Aerts, R. 1997. Climate, leaf litter chemistry and leaf litter decomposition in terrestrial ecosystems: a triangular relationship. *Oikos* 79:439-449.
- Andrén, O., E. Steen and K. Rajkai. 1992. Modelling the effects of moisture on barley straw and root decomposition in the field. *Soil Biology and Biochemistry* 24:727-736.

- Arunachalam, A., H. N. Pandey, R. S. Tripathi and K. Maithani. 1996. Fine root decomposition and nutrient mineralization patterns in a subtropical humid forest following tree cutting. *Forest Ecology and Management* 86:141-150.
- Berg, B. 1984. Decomposition of root litter and some factors regulating the process: long-term root litter decomposition in a Scots pine forest. *Soil Biology and Biochemistry* 16:609-617.
- Berg, B., M. B. Johansson, V. Meentemeyer and W. Kratz. 1998. Decomposition of tree root litter in a climatic transect of coniferous forests in northern Europe: a synthesis. *Scandinavian Journal of Forest Research* 13:402-412.
- Berg, B. and C. McClaugherty. 2003. *Plant litter*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, New York.
- Berg, B. and H. Staaf. 1981. Leaching, accumulation and release of nitrogen in decomposing forest litter. *Ecological Bulletin* 33:163-178.
- Bloomfield, J., K. A. Vogt and D. J. Vogt. 1993. Decay rate and substrate quality of fine roots and foliage of two tropical tree species in the Luquillo Experimental Forest, Puerto Rico. *Plant and Soil* 150:233-245.
- Burke, M. K. and D. J. Raynal. 1994. Fine root growth phenology, production, and turnover in a northern hardwood forest ecosystem. *Plant and Soil* 162:135-146.
- Burton, V. B., R. Z. Donald, R. D. Shirley and H. S. Stephen. 1997. *Forest Ecology*, 4 edition. John Wiley & Sons Inc., New York.
- Cairns, M. A., S. Brown, E. H. Helmer and G. A. Baumgardner. 1997. Root biomass allocation in the world's upland forests. *Oecologia* 111:1-11.
- Chang, S. C., C. P. Wang, C. M. Feng, R. Rees, U. Hell and E. Matzner. 2007. Soil fluxes of mineral elements and dissolved organic matter following manipulation of leaf litter input in a Taiwan *Chamaecyparis* forest. *Forest Ecology and Management* 242:133-141.
- Chang, S. C., C. F. Yeh, M. J. Wu, Y. J. Hsia and J. T. Wu. 2006. Quantifying fog water deposition by in situ exposure experiments in a mountainous coniferous forest in Taiwan. *Forest Ecology and Management* 224:11-18.

- Chapin III, F. S., P. A. Maston and H. A. Mooney. 2002. Principle of Terrestrial Ecosystem Ecology. Springer-Verlag Inc., New York.
- Chen, H., M. E. Harmon and R. P. Griffiths. 2001. Decomposition and nitrogen release from decomposing woody roots in coniferous forests of the Pacific Northwest: a chronosequence approach. *Canadian Journal of Forest Research* 31:246-260.
- Cusack, D. F., W. W. Chou, W. H. Yang, M. E. Harmon, W. L. Silver and L. Team. 2009. Controls on long-term root and leaf litter decomposition in neotropical forests. *Global Change Biology* 15:1339-1355.
- Dornbush, M. E., T. M. Isenhardt and J. W. Raich. 2002. Quantifying fine-root decomposition: an alternative to buried litterbags. *Ecology* 83:2985-2990.
- Fujimaki, R., H. Takeda and D. Wiwatiwitaya. 2008. Fine root decomposition in tropical dry evergreen and dry deciduous forests in Thailand. *Journal of Forest Research* 13:338-346.
- Gholz, H. L., D. A. Wedin, S. M. Smitherman, M. E. Harmon and W. J. Parton. 2000. Long-term dynamics of pine and hardwood litter in contrasting environments: toward a global model of decomposition. *Global Change Biology* 6:751-765.
- Gower, S. T. 1987. Relations between mineral nutrient availability and fine root biomass in two Costa Rican tropical wet forests: a hypothesis. *Biotropica* 19:171-175.
- Hendrick, R. L. and K. S. Pregitzer. 1996. Temporal and depth-related patterns of fine root dynamics in northern hardwood forests. *Journal of Ecology* 84:167-176.
- House, G. J. and R. E. Stinner. 1987. Decomposition of plant residues in no-tillage agroecosystems: influence of litter bag mesh size and soil arthropods. *Pedobiologia* 30:351-360.
- Jackson, R. B., H. A. Mooney and E. D. Schulze. 1997. A global budget for fine root biomass, surface area, and nutrient contents. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 94:7362-7366.
- Jenny, H., S. P. Gessel and F. T. Bingham. 1949. Comparative study of decomposition rates of organic matter in temperate and tropical regions. *Soil Science* 68:419-432.
- John, B., H. N. Pandey and R. S. Tripathi. 2002. Decomposition of fine roots of *Pinus kesiya* and turnover of organic matter, N and P of coarse and fine pine roots and herbaceous

- roots and rhizomes in subtropical pine forest stands of different ages. *Biology and Fertility of Soils* 35:238-246.
- Kalyn, A. L. and K. C. J. Van Rees. 2006. Contribution of fine roots to ecosystem biomass and net primary production in black spruce, aspen, and jack pine forests in Saskatchewan. *Agricultural and Forest Meteorology* 140:236-243.
- Lambers, H., F. S. Chapin III and T. Pons. 1998. *Plant Physiological Ecology*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, New York.
- York. Lehmann, J. and W. Zech. 1998. Fine root turnover of irrigated hedgerow intercropping in Northern Kenya. *Plant and Soil* 198:19-31.
- Ludovici, K. H. and L. W. Kress. 2006. Decomposition and nutrient release from fresh and dried pine roots under two fertilizer regimes. *Canadian Journal of Forest Research* 36:105-111.
- Makkonen, K. and H. S. Helmisaari. 1998. Seasonal and yearly variations of fine-root biomass and necromass in a Scots pine (*Pinus sylvestris* L) stand. *Forest Ecology and Management* 102:283-290.
- Melillo, J. M., J. D. Aber and J. F. Muratore. 1982. Nitrogen and lignin control of hardwood leaf litter decomposition dynamics. *Ecology* 63:621-626.
- Moretto, A. S. and R. A. Distel. 2003. Decomposition of and nutrient dynamics in leaf litter and roots of *Poa ligularis* and *Stipa gyneriodes*. *Journal of Arid Environments* 55:503-514.
- Mun, H. and W. Whitford. 1998. Changes in mass and chemistry of plant roots during long-term decomposition on a Chihuahuan Desert watershed. *Biology and Fertility of Soils* 26:16-22.
- Olson, J. S. 1963. Energy storage and the balance of producers and decomposers in ecosystems. *Ecology* 44:322-331.
- Ostertag, R. and S. E. Hobbie. 1999. Early stages of root and leaf decomposition in Hawaiian forests: effects of nutrient availability. *Oecologia* 121:564-573.
- Powers, J. S., R. A. Montgomery, E. C. Adair, F. Q. Brearley, S. J. DeWalt, C. T. Castanho, J. Chave, E. Deinert, J. U. Ganzhorn, M. E. Gilbert, J. A. Gonzalez-Iturbe, S.

- Bunyavejchewin, H. R. Grau, K. E. Harms, A. Hiremath, S. Iriarte-Vivar, E. Manzano, A. A. de Oliveira, L. Poorter, J. B. Ramanamanjato, C. Salk, A. Varela, G. D. Weiblen and M. T. Lerdau. 2009. Decomposition in tropical forests: a pan-tropical study of the effects of litter type, litter placement and mesofaunal exclusion across a precipitation gradient. *Journal of Ecology* 97:801-811.
- Rees, R., S. C. Chang, C. P. Wang and E. Matzner. 2006. Release of nutrients and dissolved organic carbon during decomposition of *Chamaecyparis obtusa* var. *formosana* leaves in a mountain forest in Taiwan. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 169:792-798.
- Ribeiro, C., M. Madeira and M. C. Araujo. 2002. Decomposition and nutrient release from leaf litter of *Eucalyptus globulus* grown under different water and nutrient regimes. *Forest Ecology and Management* 171:31-41.
- Seastedt, T. R., W. J. Parton and D. S. Ojima. 1992. Mass loss and nitrogen dynamics of decaying litter of grasslands: the apparent low nitrogen immobilization potential of root detritus. *Canadian Journal of Botany* 70:384-391.
- Silver, W. L. and R. K. Miya. 2001. Global patterns in root decomposition: comparisons of climate and litter quality effects. *Oecologia* 129:407-419.
- Silver, W. L. and K. A. Vogt. 1993. Fine root dynamics following single and multiple disturbances in a subtropical wet forest ecosystem. *Journal of Ecology* 81:729-738.
- Staaf, H. and B. Berg. 1982. Accumulation and release of plant nutrients in decomposing Scots pine needle litter. Long-term decomposition in a Scots pine forest. *Canadian Journal of Botany* 60:1561-1568.
- Stark, J. M. and M. K. Firestone. 1995. Mechanisms for soil moisture effects on activity of nitrifying bacteria. *Applied Environmental Microbiology* 61:218-221.
- Tripathi, S. K. and K. P. Singh. 1992. Nutrient immobilization and release patterns during plant decomposition in a dry tropical bamboo savanna, India. *Biology and Fertility of Soils* 14:191-199.
- Vogt, K. A., D. J. Vogt, P. A. Palmiotto, P. Boon, J. OHara and H. Asbjornsen. 1996. Review of root dynamics in forest ecosystems grouped by climate, climatic forest type and species. *Plant and Soil* 187:159-219.

9. 附錄

附錄 1 扁柏細根分解期間各養分濃度。

| Sampling time | Duration days | litterbag number | Total dry weight in litterbag (g) | N | C | Lignin | P | K | Ca | Mg | Na |
|---------------|---------------|------------------|--------------------------------------|------|-------|--------|------|------|------|------|------|
| | | | | % | | | mg/g | | | | |
| 2007/7/19 | 0 | initial | 20.00 | 0.63 | 48.99 | 43.58 | 1.32 | 2.20 | 4.29 | 0.46 | 0.08 |
| 2007/8/16 | 28 | RL1-1 | 20.29 | 0.66 | 48.98 | | 1.47 | 2.23 | 6.94 | 0.73 | 0.11 |
| 2007/8/16 | 28 | RL2-1 | 18.60 | 0.69 | 49.89 | 46.56 | 1.43 | 1.86 | 5.29 | 0.79 | 0.08 |
| 2007/8/16 | 28 | RL3-7 | 16.54 | 0.57 | 48.80 | | 1.07 | 1.48 | 7.27 | 0.53 | 0.07 |
| 2007/8/16 | 28 | RL4-2 | 18.24 | 0.60 | 48.93 | 42.53 | 1.22 | 1.70 | 7.38 | 0.60 | 0.10 |
| 2007/8/16 | 28 | RL5-1 | 16.01 | 0.67 | 49.47 | | 1.51 | 2.00 | 6.66 | 0.84 | 0.09 |
| 2007/8/16 | 28 | RL6-7 | 17.12 | 0.67 | 49.70 | 41.70 | 1.37 | 1.85 | 5.46 | 0.63 | 0.09 |
| 2007/8/16 | 28 | RL7-5 | 16.91 | 0.68 | 49.79 | | 1.68 | 2.40 | 6.15 | 0.82 | 0.10 |
| 2007/8/16 | 28 | RL8-1 | 16.96 | 0.68 | 49.62 | 44.91 | 1.40 | 1.47 | 5.33 | 0.64 | 0.08 |
| 2007/9/13 | 56 | RL1-2 | 17.35 | 0.63 | 49.41 | | 1.26 | 1.55 | 6.17 | 0.65 | 0.07 |
| 2007/9/13 | 56 | RL2-2 | 17.36 | 0.64 | 49.69 | 43.20 | 1.42 | 1.50 | 6.48 | 0.67 | 0.06 |
| 2007/9/13 | 56 | RL3-5 | 17.37 | 0.72 | 49.83 | | 1.58 | 1.53 | 6.85 | 0.61 | 0.08 |
| 2007/9/13 | 56 | RL4-1 | 16.53 | 0.67 | 49.74 | 45.73 | 1.33 | 1.40 | 5.17 | 0.58 | 0.07 |
| 2007/9/13 | 56 | RL5-3 | 17.18 | 0.66 | 49.54 | | 1.33 | 1.40 | 6.45 | 0.60 | 0.08 |
| 2007/9/13 | 56 | RL6-2 | 17.36 | 0.66 | 49.71 | 42.63 | 1.33 | 1.21 | 6.28 | 0.65 | 0.06 |
| 2007/9/13 | 56 | RL7-1 | 17.18 | 0.67 | 49.34 | | 1.34 | 1.27 | 6.26 | 0.71 | 0.07 |
| 2007/9/13 | 56 | RL8-3 | 16.78 | 0.69 | 49.95 | 45.31 | 1.51 | 1.60 | 6.23 | 0.70 | 0.07 |
| 2007/11/9 | 113 | RL1-4 | 16.09 | 0.71 | 49.89 | | 1.47 | 0.82 | 6.29 | 0.72 | 0.05 |
| 2007/11/9 | 113 | RL2-5 | 17.13 | 0.66 | 50.14 | 47.05 | 1.23 | 0.99 | 5.76 | 0.60 | 0.05 |
| 2007/11/9 | 113 | RL3-3 | 17.45 | 0.70 | 50.11 | | 1.29 | 0.99 | 5.38 | 0.51 | 0.05 |
| 2007/11/9 | 113 | RL4-5 | 16.07 | 0.64 | 49.53 | 47.77 | 1.41 | 0.55 | 4.65 | 0.39 | 0.05 |
| 2007/11/9 | 113 | RL5-2 | 17.13 | 0.70 | 49.74 | | 1.32 | 0.72 | 5.64 | 0.74 | 0.06 |
| 2007/11/9 | 113 | RL6-5 | 17.21 | 0.65 | 50.08 | 45.85 | 1.14 | 0.65 | 4.97 | 0.46 | 0.04 |
| 2007/11/9 | 113 | RL7-3 | 9.14 | 0.70 | 49.71 | | 1.25 | 0.73 | 5.68 | 0.68 | 0.06 |
| 2007/11/9 | 113 | RL8-2 | 16.80 | 0.64 | 50.19 | 45.05 | 1.25 | 0.75 | 5.33 | 0.60 | 0.05 |
| 2008/1/8 | 173 | RL1-3 | 16.96 | 0.69 | 50.18 | | 1.21 | 0.47 | 5.76 | 0.59 | 0.05 |
| 2008/1/8 | 173 | RL2-4 | 17.09 | 0.70 | 50.22 | 44.57 | 1.12 | 0.39 | 4.18 | 0.41 | 0.03 |
| 2008/1/8 | 173 | RL3-6 | 20.09 | 0.66 | 49.84 | | 1.12 | 0.83 | 5.87 | 0.47 | 0.06 |
| 2008/1/8 | 173 | RL4-3 | 17.48 | 0.67 | 49.93 | 46.05 | 1.22 | 0.50 | 5.33 | 0.62 | 0.06 |
| 2008/1/8 | 173 | RL5-7 | 16.99 | 0.65 | 50.17 | | 1.27 | 0.46 | 5.47 | 0.53 | 0.06 |
| 2008/1/8 | 173 | RL6-1 | 19.27 | 0.67 | 49.46 | 45.76 | 1.15 | 0.65 | 4.62 | 0.54 | 0.06 |
| 2008/1/8 | 173 | RL7-2 | 16.97 | 0.62 | 49.94 | | 0.97 | 0.57 | 4.55 | 0.53 | 0.06 |
| 2008/1/8 | 173 | RL8-4 | 16.92 | 0.70 | 50.08 | 45.30 | 1.13 | 0.52 | 4.43 | 0.50 | 0.04 |

| Sampling time | Duration days | litterbag number | Total dry weight in litterbag | N | C | Lignin | P | K | Ca | Mg | Na |
|---------------|---------------|------------------|-------------------------------|------|-------|--------|------|------|------|------|------|
| | | | (g) | | | | | | | | |
| 2008/3/6 | 231 | RL1-5 | 16.96 | 0.71 | 50.10 | | 1.32 | 0.48 | 5.19 | 0.55 | 0.06 |
| 2008/3/6 | 231 | RL2-3 | 16.86 | 0.70 | 50.52 | 46.22 | 1.13 | 0.35 | 4.84 | 0.49 | 0.05 |
| 2008/3/6 | 231 | RL3-4 | 18.08 | 0.72 | 49.99 | | 1.11 | 0.54 | 5.72 | 0.50 | 0.04 |
| 2008/3/6 | 231 | RL4-4 | 17.42 | 0.75 | 50.07 | 46.59 | 1.18 | 0.54 | 4.24 | 0.54 | 0.05 |
| 2008/3/6 | 231 | RL5-5 | 16.73 | 0.72 | 49.96 | | 1.18 | 0.43 | 5.25 | 0.56 | 0.04 |
| 2008/3/6 | 231 | RL6-3 | 16.50 | 0.67 | 50.14 | 48.07 | 1.16 | 0.35 | 5.11 | 0.46 | 0.04 |
| 2008/3/6 | 231 | RL7-4 | 12.11 | 0.80 | 50.29 | | 1.62 | 0.94 | 5.25 | 0.59 | 0.05 |
| 2008/3/6 | 231 | RL8-5 | 16.59 | 0.77 | 50.14 | 50.77 | 1.29 | 0.42 | 4.55 | 0.53 | 0.05 |
| 2008/7/30 | 370 | RL1-6 | 15.43 | 0.81 | 50.17 | | 1.44 | 0.38 | 4.52 | 0.43 | 0.05 |
| 2008/7/30 | 370 | RL2-6 | 16.51 | 0.90 | 50.20 | 50.86 | 1.49 | 0.40 | 3.75 | 0.42 | 0.05 |
| 2008/7/30 | 370 | RL3-1 | 16.51 | 0.80 | 50.35 | | 1.55 | 0.43 | 5.28 | 0.51 | 0.04 |
| 2008/7/30 | 370 | RL4-7 | 14.96 | 0.70 | 49.86 | 49.56 | 1.24 | 0.46 | 4.27 | 0.29 | 0.05 |
| 2008/7/30 | 370 | RL5-6 | 15.02 | 0.78 | 50.10 | | 1.22 | 0.29 | 3.40 | 0.29 | 0.05 |
| 2008/7/30 | 370 | RL6-4 | 15.34 | 0.73 | 49.84 | 49.46 | 1.28 | 0.30 | 6.63 | 0.46 | 0.05 |
| 2008/7/30 | 370 | RL7-7 | 15.48 | 0.71 | 49.62 | | 1.19 | 0.26 | 4.02 | 0.40 | 0.05 |
| 2008/7/30 | 370 | RL8-6 | 17.27 | 0.72 | 49.58 | 48.19 | 1.10 | 0.27 | 2.91 | 0.32 | 0.04 |
| 2009/2/8 | 570 | RL1-7 | 13.66 | 0.84 | 49.56 | | 1.42 | 0.45 | 3.63 | 0.34 | 0.05 |
| 2009/2/8 | 570 | RL2-7 | 14.76 | 0.71 | 49.60 | 49.00 | 1.17 | 0.32 | 4.08 | 0.28 | 0.05 |
| 2009/2/8 | 570 | RL3-2 | 15.50 | 0.70 | 50.05 | | 1.35 | 0.36 | 2.86 | 0.26 | 0.05 |
| 2009/2/8 | 570 | RL4-6 | 14.02 | 0.78 | 49.66 | 49.64 | 1.69 | 0.60 | 3.73 | 0.32 | 0.06 |
| 2009/2/8 | 570 | RL5-4 | 13.69 | 0.82 | 49.34 | | 1.29 | 0.34 | 3.97 | 0.37 | 0.04 |
| 2009/2/8 | 570 | RL6-8 | 13.97 | 0.69 | 50.10 | 50.89 | 1.49 | 0.44 | 3.28 | 0.20 | 0.07 |
| 2009/2/8 | 570 | RL7-6 | 15.04 | 0.82 | 49.36 | | 1.44 | 0.44 | 4.02 | 0.28 | 0.14 |
| 2009/2/8 | 570 | RL8-8 | 14.89 | 0.64 | 49.78 | 49.27 | 1.22 | 0.38 | 2.21 | 0.22 | 0.05 |

附錄 2 扁柏細根分解期間乾重與各養分的重量留存率。

| Sampling time | Duration days | litterbag number | Total dry weight in litterbag (g) | Mass | N | C | lignin | P | K | Ca | Mg | Na |
|---------------|---------------|------------------|-----------------------------------|------|------|------|--------|------|------|------|------|------|
| | | | | % | | | | | | | | |
| 2007/7/19 | 0 | initial | 20.00 | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% |
| 2007/8/16 | 28 | RL1-1 | 20.29 | 101% | 108% | 101% | | 113% | 103% | 164% | 161% | 146% |
| 2007/8/16 | 28 | RL2-1 | 18.60 | 93% | 102% | 95% | 99% | 100% | 79% | 115% | 158% | 103% |
| 2007/8/16 | 28 | RL3-7 | 16.54 | 83% | 75% | 82% | | 67% | 56% | 140% | 94% | 81% |
| 2007/8/16 | 28 | RL4-2 | 18.24 | 91% | 88% | 91% | 89% | 84% | 70% | 157% | 119% | 121% |
| 2007/8/16 | 28 | RL5-1 | 16.01 | 80% | 86% | 81% | | 91% | 73% | 124% | 146% | 99% |
| 2007/8/16 | 28 | RL6-7 | 17.12 | 86% | 91% | 87% | 82% | 89% | 72% | 109% | 117% | 101% |
| 2007/8/16 | 28 | RL7-5 | 16.91 | 85% | 92% | 86% | | 108% | 92% | 121% | 150% | 110% |
| 2007/8/16 | 28 | RL8-1 | 16.96 | 85% | 92% | 86% | 87% | 90% | 57% | 105% | 118% | 89% |
| 2007/9/13 | 56 | RL1-2 | 17.35 | 87% | 87% | 87% | | 83% | 61% | 125% | 121% | 80% |
| 2007/9/13 | 56 | RL2-2 | 17.36 | 87% | 89% | 88% | 86% | 94% | 59% | 131% | 126% | 75% |
| 2007/9/13 | 56 | RL3-5 | 17.37 | 87% | 100% | 88% | | 104% | 60% | 139% | 115% | 91% |
| 2007/9/13 | 56 | RL4-1 | 16.53 | 83% | 88% | 84% | 87% | 83% | 53% | 100% | 104% | 80% |
| 2007/9/13 | 56 | RL5-3 | 17.18 | 86% | 91% | 87% | | 86% | 55% | 129% | 112% | 87% |
| 2007/9/13 | 56 | RL6-2 | 17.36 | 87% | 91% | 88% | 85% | 87% | 48% | 127% | 123% | 64% |
| 2007/9/13 | 56 | RL7-1 | 17.18 | 86% | 92% | 86% | | 87% | 50% | 125% | 131% | 76% |
| 2007/9/13 | 56 | RL8-3 | 16.78 | 84% | 93% | 86% | 87% | 96% | 61% | 122% | 127% | 81% |
| 2007/11/9 | 113 | RL1-4 | 16.09 | 80% | 91% | 82% | | 90% | 30% | 118% | 125% | 58% |
| 2007/11/9 | 113 | RL2-5 | 17.13 | 86% | 90% | 88% | 92% | 80% | 39% | 115% | 111% | 54% |
| 2007/11/9 | 113 | RL3-3 | 17.45 | 87% | 97% | 89% | | 85% | 39% | 109% | 96% | 62% |
| 2007/11/9 | 113 | RL4-5 | 16.07 | 80% | 82% | 81% | 88% | 86% | 20% | 87% | 67% | 56% |
| 2007/11/9 | 113 | RL5-2 | 17.13 | 86% | 96% | 87% | | 85% | 28% | 113% | 137% | 63% |
| 2007/11/9 | 113 | RL6-5 | 17.21 | 86% | 89% | 88% | 91% | 74% | 26% | 100% | 85% | 46% |
| 2007/11/9 | 113 | RL7-3 | 9.14 | 46% | 52% | 46% | | 43% | 15% | 61% | 67% | 34% |
| 2007/11/9 | 113 | RL8-2 | 16.80 | 84% | 86% | 86% | 87% | 79% | 29% | 104% | 109% | 56% |
| 2008/1/8 | 173 | RL1-3 | 16.96 | 85% | 93% | 87% | | 78% | 18% | 114% | 107% | 56% |
| 2008/1/8 | 173 | RL2-4 | 17.09 | 85% | 95% | 88% | 87% | 72% | 15% | 83% | 76% | 39% |
| 2008/1/8 | 173 | RL3-6 | 20.09 | 100% | 106% | 102% | | 85% | 38% | 137% | 103% | 74% |
| 2008/1/8 | 173 | RL4-3 | 17.48 | 87% | 94% | 89% | 92% | 81% | 20% | 109% | 116% | 67% |
| 2008/1/8 | 173 | RL5-7 | 16.99 | 85% | 88% | 87% | | 82% | 18% | 108% | 97% | 69% |
| 2008/1/8 | 173 | RL6-1 | 19.27 | 96% | 103% | 97% | 101% | 84% | 28% | 104% | 112% | 72% |
| 2008/1/8 | 173 | RL7-2 | 16.97 | 85% | 84% | 87% | | 62% | 22% | 90% | 97% | 67% |
| 2008/1/8 | 173 | RL8-4 | 16.92 | 85% | 95% | 87% | 88% | 72% | 20% | 87% | 91% | 44% |

| Sampling time | Duration days | litterbag number | Total dry weight in litterbag (g) | % | | | | | | | | |
|---------------|---------------|------------------|-----------------------------------|------|------|-----|--------|-----|-----|------|------|------|
| | | | | Mass | N | C | lignin | P | K | Ca | Mg | Na |
| 2008/3/6 | 231 | RL1-5 | 16.96 | 85% | 96% | 87% | | 85% | 19% | 103% | 101% | 73% |
| 2008/3/6 | 231 | RL2-3 | 16.86 | 84% | 94% | 87% | 89% | 72% | 14% | 95% | 89% | 53% |
| 2008/3/6 | 231 | RL3-4 | 18.08 | 90% | 104% | 92% | | 76% | 22% | 121% | 98% | 54% |
| 2008/3/6 | 231 | RL4-4 | 17.42 | 87% | 105% | 89% | 93% | 78% | 22% | 86% | 103% | 60% |
| 2008/3/6 | 231 | RL5-5 | 16.73 | 84% | 97% | 85% | | 75% | 16% | 102% | 101% | 45% |
| 2008/3/6 | 231 | RL6-3 | 16.50 | 82% | 88% | 84% | 91% | 73% | 13% | 98% | 83% | 45% |
| 2008/3/6 | 231 | RL7-4 | 12.11 | 61% | 77% | 62% | | 74% | 26% | 74% | 78% | 41% |
| 2008/3/6 | 231 | RL8-5 | 16.59 | 83% | 103% | 85% | 97% | 81% | 16% | 88% | 96% | 54% |
| 2008/7/30 | 370 | RL1-6 | 15.43 | 77% | 100% | 79% | | 84% | 13% | 81% | 71% | 46% |
| 2008/7/30 | 370 | RL2-6 | 16.51 | 83% | 118% | 85% | 96% | 93% | 15% | 72% | 75% | 51% |
| 2008/7/30 | 370 | RL3-1 | 16.51 | 83% | 106% | 85% | | 97% | 16% | 102% | 91% | 43% |
| 2008/7/30 | 370 | RL4-7 | 14.96 | 75% | 83% | 76% | 85% | 70% | 16% | 74% | 47% | 54% |
| 2008/7/30 | 370 | RL5-6 | 15.02 | 75% | 93% | 77% | | 69% | 10% | 60% | 48% | 54% |
| 2008/7/30 | 370 | RL6-4 | 15.34 | 77% | 89% | 78% | 87% | 74% | 11% | 119% | 76% | 50% |
| 2008/7/30 | 370 | RL7-7 | 15.48 | 77% | 88% | 78% | | 70% | 9% | 73% | 67% | 51% |
| 2008/7/30 | 370 | RL8-6 | 17.27 | 86% | 99% | 87% | 95% | 72% | 11% | 59% | 60% | 46% |
| 2009/2/8 | 570 | RL1-7 | 13.66 | 68% | 92% | 69% | | 73% | 14% | 58% | 50% | 48% |
| 2009/2/8 | 570 | RL2-7 | 14.76 | 74% | 84% | 75% | 83% | 65% | 11% | 70% | 45% | 51% |
| 2009/2/8 | 570 | RL3-2 | 15.50 | 78% | 87% | 79% | | 79% | 13% | 52% | 43% | 49% |
| 2009/2/8 | 570 | RL4-6 | 14.02 | 70% | 87% | 71% | 80% | 90% | 19% | 61% | 49% | 55% |
| 2009/2/8 | 570 | RL5-4 | 13.69 | 68% | 90% | 69% | | 67% | 11% | 63% | 55% | 40% |
| 2009/2/8 | 570 | RL6-8 | 13.97 | 70% | 77% | 71% | 82% | 79% | 14% | 53% | 30% | 62% |
| 2009/2/8 | 570 | RL7-6 | 15.04 | 75% | 99% | 76% | | 82% | 15% | 71% | 46% | 137% |
| 2009/2/8 | 570 | RL8-8 | 14.89 | 74% | 76% | 76% | 84% | 69% | 13% | 38% | 35% | 48% |