

考慮碳吸存機會成本下碳權價格之經濟分析

柳婉郁 (國立中興大學森林學系/永續農業創新研究中心)

江怡樺 (國立中興大學森林學系)

林信維 (國立台灣大學農業經濟系)

文章資訊

接受日期：2020.06

關鍵詞：

- 碳價格
- 碳抵銷
- 查驗頻率
- 收穫水準

內文摘要 (Abstract)

行政院環保署近年訂定溫室氣體抵換專案管理辦法，修訂與規範林業類型溫室氣體抵換專案，以作為未來溫室氣體總量管制與可能建立之碳交易制度之基礎。本研究延伸前人相關碳吸存之研究，在考量減少收穫之收入而產生的機會成本和碳認證成本(初始建立成本和確認成本及定期查驗費用)的情況下，分析我國杉木、臺灣杉、相思樹及大葉桃花心木等四種樹種之損益兩平碳權價格，並進行敏感度分析。四種樹種因生長特性、木材價值及碳儲量不同，而有不同的損益兩平碳權價格。在本研究之基準情境之設定下，以20年計畫為例，若減少收穫比例為50%時，杉木、臺灣杉、相思樹與大葉桃花心木之損益兩平碳權價格分別約為2,276元/ton CO₂、2,061元/ton CO₂、909元/ton CO₂，以及1,697元/ton CO₂。此外，隨著折現率或木材利用率之增加，碳權總成本在折現後會逐漸降低，而各樹種之損益兩平碳權價格亦將隨之降低。在相同市場碳權價格下，損益兩平碳權價格越低時，越適合執行減少收穫之碳計畫，以賺取更多碳權收益。

ECONOMIC ANALYSIS OF THE CARBON CREDIT PRICE CONSIDERING OPPORTUNITY COST OF THE CARBON SEQUESTRATION

Wan-Yu Liu (Department of Forestry, National Chung Hsing University)

Yi-Hwang Chiang (Department of Forestry, National Chung Hsing University)

Hsing-Wei Lin (Department of Agricultural Economics, National Taiwan University)

Information	Abstract
Accepted date : 2020.06 Keywords : <ul style="list-style-type: none">• Carbon price• Carbon offsets• Verification period• Harvest level	Environmental Protection Administration Executive Yuan promulgated "Greenhouse Gases Offset Projects Regulations", standardize the forest carbon plan project as the basis of the future cap and trade. Based on previous researches relate to carbon sequestration, this study considers opportunity cost due to harvest reduction and the carbon project cost, which contains initially cost of establishment plus validation cost, analysis break-even carbon credits prices of China fir (<i>Cunninghamia lanceolata</i>), Taiwania (<i>Taiwania cryptomerioides</i>), Taiwan acacia (<i>Acacia confuse</i>) and big-leaf mahogany (<i>Swietenia macrophylla</i>), and conducts sensitivity analysis. The results showed the four tree species have different break-even carbon credit prices due to different growth performances, wood value and carbon storage. Under the baseline scenario of this study, taking the 20-year plan as an example, if the reduced harvest level is 50%, the break-even carbon credit prices of China fir, Taiwania, Taiwan acacia and big-leaf mahogany are about NT\$ 2,276/ton CO ₂ 、NT\$ 2,061/ton CO ₂ 、NT\$ 909/ton CO ₂ 、and NT\$ 1,697/ton CO ₂ . The higher discount rate and timber utilization rate are, the lower present value of carbon credit cost is. Thus, the break-even carbon credit prices of each tree species will be lower. Under the same market price of carbon credit, the lower break-even carbon credit price is, the more suitable harvest reduction carbon project implements is.

壹、前言

聯合國氣候變遷小組 (Intergovernmental Panel on Climate Change · IPCC) 在2018年10月發布的《全球升溫1.5°C報告》(Global Warming of 1.5°C) 指出, 「若要使地球溫升回到1.5°C以內, 在2030年全球的二氧化碳淨排放量, 應比2010年的排放量少40%到60%; 2050年歸零」, 雖然2050年二氧化碳淨排放量歸零之深度減碳目標尚未成為全球共識, 但是, 各國對於碳排量必須減少是有共識的, 因此我國也有實施深度減碳政策的必要。我國的二氧化碳排放量逐年快速增加, 1990年燃料燃燒二氧化碳排放量為124 MtCO₂e (百萬噸二氧化碳當量) , 逐年持續增加, 2005年增加至267 MtCO₂e, 2016年則為279 MtCO₂e。面對逐年增加的二氧化碳排放量, 2015年7月我國公布施行《溫室氣體減量及管理法》, 明定我國「國家長期減量目標為2050年溫室氣體排放量降為2005年的百分之五十以下」, 確立我國因應氣候變遷減碳的決心。

政府間氣候變遷委員會 (Intergovernmental panel on climate change, IPCC) 報告指出, 全球大氣中二氧化碳和其他溫室氣體排放量增加¹, 將導致全球平均氣溫持續上升²。根據全球氣候模式 (global climate models, GCMs) 之預測, 相對於1850至1900年, 二十一世紀末之全球平均氣溫可能增加1.5°C至2°C (IPCC, 2013; Zarch et al., 2017) 。Nadeau et al. (2017) 亦指出, 由基因到生態系等生物系統, 正因氣候變遷而發生改變 (Scheffers et al., 2016) ; 氣候變遷可能在2100年左右導致六分之一的物種滅絕, 而剩餘物種的豐度和分布亦將隨之改變, 並產生新的生態群落 (Williams and Jackson, 2007; Urban, 2015) 。這些變化將徹底改變生活, 並對人類福祉 (human well-being) 產生巨大的影響 (Pecl et al., 2017) 。為使地球能適合當代及後代子孫居住, 已開發國家應立即實施大幅度減少總碳排放量之相關行動, 以減緩氣候變遷 (Anderson and Bows, 2011; Jacobson and Delucchi, 2011; World Bank, 2012; Geiger et al., 2017) 。但減緩氣候變遷的相關行動與政策措施通常都需要付出高昂的成本, 如減少減排政策與開發綠色技術 (Su and Moaniba, 2017) 。

為因應氣候變遷, 減少溫室效應對全球環境所造成的影響, 聯合國氣候變遷綱要公約 (United nations framework convention for climate change, UNFCCC) 第3屆締約國會議 (The third conference of the parties, COP3) 於1997年通過京都議定書 (Kyoto protocol, KP) 規範締約國於

¹ 全球平均大氣中二氧化碳濃度從工業化前的278 ppm增加至2011年的390 ppm, 約增加40%。

² 大多數科學家認為溫室氣體持續排放是造成氣候變遷的主要因素, 因此, 透過調節全球溫室氣體 (greenhouse gases, GHG) 排放量, 將可控制氣候變遷 (Oreskes, 2004) 。

2005年至2020年3之減碳責任，並作為其控制溫室氣體排放量依據。聯合國氣候變遷綱要公約第21屆締約國會議 (COP21) 於2015年12月12日正式通過巴黎協議 (Paris agreement, PA)，做為2020年後國際間執行溫室氣體減量與氣候調適工作的依據。巴黎協議期望透過締約國對於溫室氣體排放之控制，使全球平均氣溫，不高於工業化前全球平均氣溫 2°C (UNFCCC, 2015)。雖然大多數締約國同意 2°C 之目標，但該公約亦強調，期望能進一步達成不得高出工業化前全球平均氣溫 1.5°C 之標準 (McSweeney and Pidcock, 2015)。此外，巴黎協定亦規範各國應衡量自身減少溫室氣體排放可行之潛量貢獻後提交「國家自主貢獻」(Nationally determined contributions, NDCs)，並以每五年一次的頻率來進行通報及檢討 (鄭富霖、劉哲良，2016; 黃正忠，2016)。而由於二氧化碳 (CO_2) 是迄今為止排放量最多的全球溫室氣體 (United States Environmental Protection Agency, 2016)，因此，減少二氧化碳排放成為各國控制溫室氣體排放的重點之一。

森林具有吸收二氧化碳的功能 (碳吸存)，能減緩人類引起的全球暖化，因此，政府間氣候變遷委員會 (IPCC) 於2005年提出「減少因不當伐林與森林退化所造成的溫室氣體排放 (Reduced Emissions from Deforestation and Forest Degradation, REDD)」的概念，並於2009年進一步在REDD原有基礎上，加上森林復育與永續管理的概念，此即REDD+ (柳婉郁、林國慶，2012)。REDD+的主要運作方式之一，為透過碳交易制度，利用市場機制將營林產生的碳權⁴進行交易，進而達成溫室氣體減量之目標；其中，原本減排成本較高的碳權買家能以交易的方式，取得碳排放權，而生產碳權成本較低的碳權賣方，亦能以提供碳權而獲利。

一般而言，森林碳吸存經營策略可以分為兩大類：(1) 減少砍伐 (harvest reduction) 的策略與；(2) 增加森林生長的策略。其中，減少砍伐之策略在短期 (25~50年) 內具有較高碳吸存潛力，可產生較多碳權 (Man et al., 2013)。而在增加森林生長策略的部分，主要為利用施肥和基因改良等方式，使森林生長率增加到基準線以上；陶子婕和林俊成 (2014) 亦提出，透過改善森林經營 (improved forest management, IFM)，在既有的森林執行新的經營措施，提高林地生產，達到增加碳匯量之目的。然而，增加森林生長的策略所能產生的碳權明顯比減少收穫策略的所能產生的碳儲存量少 (Man et al., 2013)。

為確保財務可行性 (financial viability)，森林碳計畫應進行財務分析 (financial analysis) (Richards and Stokes, 2004; van Kooten et al., 2009)；而此時，估計損益兩平 (break-even) 碳權價格就成為文獻探討的重點之一。當考量執行森林碳計畫之淨收入，等於不考量執行森林碳計

³ 聯合國氣候變遷綱要公約第18屆締約國會議決議將京都議定書時效延長至2020年。

⁴ 溫室氣體減量相關工具的衡量單位為碳權，而吸存或減排1公噸二氧化碳當量可產生1單位的碳權 (1Mg of CO_2e)。

畫之淨收入時，即為森林碳計畫之損益平衡點。當市場上的碳權價格大於森林碳計畫的損益兩平碳權價格，則表示該計畫具有財務上的可行性；而若市場上的碳權價格小於森林碳計畫的損益兩平碳權價格，則表示該計畫不具有財務上的可行性。而透過折現率、林木收穫收益、碳權販售收益與相關的查證費用即可估算損益兩平碳權價格。

雖然我國無法直接參與UNFCCC，但仍主動積極遵循國際氣候公約。我國於2015年通過溫室氣體減量及管理法（簡稱溫管法），訂定國家溫室氣體減量目標，並呼應巴黎協定公布國家自主貢獻。其中，我國溫管法第18條提出：「中央主管機關應參酌聯合國氣候變化綱要公約與其協議或相關國際公約決議事項，因應國際溫室氣體減量規定，實施溫室氣體總量管制及排放交易制度。總量管制應於實施排放量盤查、查證、登錄制度，並建立核配額、抵換、拍賣、配售及交易制度...」。而我國行政院環保署亦於2015年底訂定溫室氣體抵換專案管理辦法，參考聯合國清潔發展機制，修訂與規範林業類型溫室氣體抵換專案；並於2018年修正該辦法，針對符合微型規模之抵換專案，大幅簡化其減量效益評估，降低中小企業參與溫室氣體抵換專案之門檻，並做為我國2025年前實施之碳排放總量管制，以及未來可能實施之碳交易制度之基礎。

過去我國相關文獻之討論，集中在不同碳權價格與政府碳給付等措施下，對於森林最適輪伐期與其他森林經營管理決策之影響（林國慶、柳婉郁，2007；柳婉郁、盧又銘、林國慶，2009；柳婉郁、徐寬，2017），或是政府碳給付措施對於社會福利之影響（李恒綺等，2009），其主要以政府相關決策者的角度分析相關議題；而以林業經營者為角度，分析損益兩平碳權價格之文獻則較為缺乏。本研究即假設未來建立碳權交易制度之情況下，討論我國森林碳吸存之損益兩平碳權價格，而本研究之貢獻主要為補充國內相關之研究缺口。為達成前述目的，本研究根據前人對臺灣主要造林樹種之碳吸存研究（林俊成等，2002；李國忠等，2000；林國銓等，2007、2009；邱祈榮等，2012；陳忠義等，2015），並參考Man et al. (2015) 計算損益兩平碳權價格之程序與方法，來評估與分析臺灣四種樹種實施森林碳計畫下之損益兩平之碳權價格。此外，本研究亦以折現率、木材利用率與碳權查驗頻率等因素，進行敏感度分析。透過本研究之估算結果，其於未來我國進行碳權交易制度事前評估與實施碳權交易制度之時，提供給政府相關決策單位參考。

貳、研究樹種及研究方法

本研究之目的在於評估臺灣四種樹種實施森林碳計畫下之損益兩平之碳權價格，而以下分別就研究樹種、損益兩平碳權價格估算方法，以及損益兩平碳權價格估算流程進行說明。

一、研究樹種

本研究以我國主要的獎勵造林樹種，杉木、臺灣杉、相思樹與大葉桃花心木作為森林碳計畫損益兩平碳權價格之研究樹種。本研究以下分別針對各樹種進行說明。

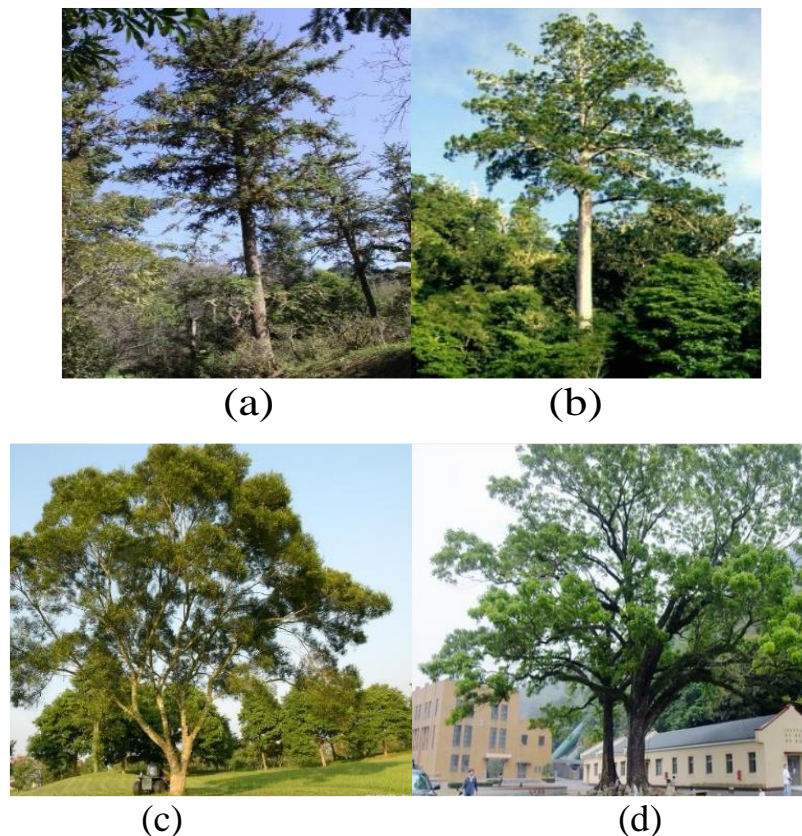


圖 1：樹型示意圖 (a) 杉木、(b) 臺灣杉、(c) 相思樹、(d) 大葉桃花心木

資料來源：

- (a) 杉木：參考自 <http://kplant.biodiv.tw/%E6%9D%89%E6%9C%A8/%E6%9D%89%E6%9C%A8.htm>
- (b) 臺灣杉：參考自 <http://transylva-accommodation.blogspot.tw/2008/08/blog-post.html>
- (c) 相思樹：參考自 <http://hs.yfms.tyc.edu.tw/site/plants/info/plants/52>
- (d) 大葉桃花心木：參考自 <http://mypaper.pchome.com.tw/068060/post/1320864313>

1. 杉木

杉木 (*Cunninghamia lanceolata*) 又名為福州杉，屬於杉科 (*Taxodiaceae*) 杉木屬 (*Cunninghamia*)，原產中國大陸長江以南，於1917年引進臺灣種植，迄今已馴化。為常綠針葉喬木，此樹種生長迅速，萌芽更新能力良好，栽培容易，輪伐期較短，而其樹幹通直，具有香氣又耐腐朽，因此木材極富有利用價值，用途甚廣，故栽植盛多，為臺灣重要造林樹種之

一 (劉業經等, 1979; 呂錦明, 1985; 高榕翎, 2013)。根據第四次臺灣森林資源調查結果顯示, 臺灣杉木人工林之面積約7,450公頃, 而杉木總蓄積量高達215萬立方公尺 (邱立文, 2015)。杉木為獎勵造林樹種之一, 根據全民造林運動建議杉木輪伐期為20年 (行政院農業委員會林務局, 1998; 李久先, 2001), 而林業統計也顯示杉木為臺灣針葉樹中主要生產木材樹種之一 (行政院農業委員會林務局, 2016)。

2. 臺灣杉

臺灣杉 (*Taiwania cryptomerioides*) 又名為亞杉, 屬於杉科 (*Taxodiaceae*) 臺灣杉屬 (*Taiwania*), 是以臺灣為屬名之臺灣特有種。洪良斌 (1974) 於臺灣中南部調查試植成功之臺灣杉造林地, 發現同一地區其生長均較柳杉為佳, 顯示本土原生樹種 (native species) 臺灣杉在造林地上有其生長優勢。臺灣杉樹幹通直豐滿, 在天然林中樹高可高達60公尺, 且材質優良, 木材用途廣泛, 為臺灣重要造林樹種 (林照松、洪富文, 1991; 高榕翎, 2013)。根據第四次臺灣森林資源調查結果顯示, 臺灣杉人工林之面積約有3,831公頃 (邱立文, 2015)。而林務局推動之農地造林、全民造林及平地造林, 臺灣杉造林面積將近有200公頃 (劉興旺等, 2013)。臺灣杉同為獎勵造林樹種, 而根據全民造林運動建議臺灣杉輪伐期為30年 (行政院農業委員會林務局, 1998; 李久先, 2001)。

3. 相思樹

相思樹 (*Acacia confuse*) 屬於含羞草科 (*Mimosaceae*), 為常綠喬木。相思樹為陽性速生樹種, 生長快速, 6-10年生的相思樹, 已可砍伐利用, 再以萌芽更新育成新林。其根部能形成根瘤, 具有固碳作用, 故相思樹是短伐期樹種中適應力最強的固氮樹種, 為熱帶及荒山主要速生造林樹種。相思樹可作為枕木、生產用材及薪炭材, 更是作為養菇與靈芝用太空包的主要材料 (邱志明等, 2013)。吳俊賢等人 (2005) 研究指出, 相思樹碳吸存潛力大, 擁有良好之碳吸存效果與能源產出效率。並根據第四次臺灣森林資源調查結果顯示, 相思樹林面積約16,513公頃, 而總蓄積量高達154萬立方公尺, 是闊葉樹中二氧化碳總儲存量最多之樹種 (邱立文, 2015)。依據全民造林運動建議之輪伐期, 相思樹為20年 (行政院農業委員會林務局, 1998; 李久先, 2001)。

4. 大葉桃花心木

大葉桃花心木 (*Swietenia macrophylla*) 屬於楝科 (*Meliaceae*), 原產熱帶中南美洲地區, 為常綠喬木。大葉桃花心木樹幹通直, 分枝少, 為陽性樹種, 生長迅速且適應範圍廣。其木

材品質良好，帶有美麗紋路，且易加工，製板材耐腐耐用，亦能抵抗白蟻蝕害，在熱帶林木市場上具高經濟價值。除木材利用外，因其枝葉茂盛，樹型美觀，亦適合綠化景觀之行道樹。臺灣在引進大葉桃花心木試植並生長良好的情況下，大量推廣栽植於臺灣中南部低海拔地區，為主要造林樹種之一（劉宣誠等，1981；陳宜敏，2005；李培芬等，2006；馮豐隆等，2010；陳忠義等，2015；Grogan et al.,2005; Cordeiro et al., 2009）。從1997至2005年全民造林運動，以及2002至2005年平地造林運動，外加國有林班地統計資料，至2010年為止大葉桃花心木種植面積約有3,110.50公頃（馮豐隆，2010）。根據全民造林運動建議之輪伐期，大葉桃花心木為30年（行政院農業委員會林務局，1998；李久先，2001）。

二、損益兩平碳權價格估算方法

本研究使用Man et al. (2015) 之損益兩平碳權價格模型，推估杉木、臺灣杉、相思樹與大葉桃花心木森林碳計畫之損益兩平碳權價格。假若我國碳權交易制度正式實施，則對於林業經營者而言，其能選擇實施森林碳計畫並參與碳權交易，或是不參與碳權交易，此時林木將依原計畫進行收穫。而決定林業經營者是否實施森林碳計畫則與兩者之淨收入相關。

考慮無碳權交易之基準情境總收入淨現值 $TPNR_B$ ，如式(1)，與有碳權交易情境總收入淨現值 $TPNR_C$ ，如式(2)。有碳權交易基準情境與無碳權交易基準情境差別在於，在有碳權交易之基礎情境下，林業經營者可利用減少收穫產生碳權，此時，雖然販售碳權會獲得利潤，但也會產生減少收穫之機會成本（收穫木材淨利）。

$$TPNR_B = \sum_{t=0}^n \frac{H_{Bt} \cdot TNR}{(1+r)^t}, \quad (1)$$

$$TPNR_C = \sum_{t=0}^n \frac{H_{Ct} \cdot TNR + P_t \cdot C_t - CC_t}{(1+r)^t}, \quad (2)$$

在式(1)之中， $TPNR_B$ 為無碳權交易基準情境之總收入淨現值（元/公頃），其等於平均木材淨價格（即平均木材市場銷售價格（average timber revenue）與收穫成本間的差額） TNR （元/立方公尺），乘以 t 時之無碳權基準情境之收穫量 H_{Bt} （立方公尺/公頃/年），並以折現率 r ，進行折現加總；其中， n 為計劃期（年）。

而在式(2)之中， $TPNR_C$ 為有碳權交易基準情境之總收入淨現值（元/公頃），在分子主要分成三個部分，第一個部分為木材銷售收益，其為平均木材淨價格 TNR （元/立方公尺），乘以有碳權基準情境之收穫量 H_{Ct} （立方公尺/公頃/年）；第二個部分則是販賣碳權之收益，

其為t時單位碳權價格 P_t (元) · 乘以t時每公頃之碳權數量 C_t (ton CO₂/公頃) ; 第三個部分則是碳權認證成本 · 其為t時之每公頃之碳權數量 C_t · 乘以每公頃碳權認證成本 C (元/公頃) · 其中 · 每公頃碳權認證成本應包含初始建立成本和驗證成本 · 以及持續查驗成本 · 而每年的木材銷售收益加上販賣碳權收益 · 減去碳權認證成本 · 再以折現率 r 進行折現加總 · 即為有碳權交易基準情境之總收入淨現值 $TPNRC$ (元/公頃) · 其中 · H_{Bt} 為無碳權基準情境之收穫量 · 而 H_{Ct} 為碳權基準情境之收穫量 · 兩者間的差異在於是否將碳權的價值納入計算 · 由於林業經營者可利用減少收穫產生碳權 · 並透過販售碳權取得收入 ; 因此 · 一般而言 · 無碳權基準情境之收穫量 H_{Bt} 將高於碳權基準情境之收穫量 H_{Ct} ·

損益兩平意義為無碳權交易淨收入與有碳權交易淨收入相等 ; 因此 · 當達到損益平衡點時 · 執行森林碳計畫之淨收入與不進行森林碳計畫之淨收入將會相等 · 因此 · 若市場碳權價格大於損益平衡碳權價格 · 則森林碳計畫將有利可圖 · 而若碳權市場價格大於損益平衡碳權價格 · 若貿然實施森林碳計畫 · 可能會減損林地之收益 · 因此 · 若假設無碳權交易之基準情境總收入淨現值 ($TPNRB$) 與有碳權交易基準情境總收入淨現值 ($TPNRC$) 相等 · 則可進一步移項如式 (3) ·

$$\sum_{t=0}^n \frac{P_t \cdot C_t}{(1+r)^t} = \sum_{t=0}^n \frac{(H_{Bt} - H_{Ct}) \cdot TNR + CC_t}{(1+r)^t}, \quad (3)$$

式 (3) 可理解為販售碳權之收入淨現值 · 等於因碳權交易減少收穫所造成的損失及碳權認證成本兩者加總之淨現值 · 此時 · 若假設碳權價格 P_t 在 n 年內為固定不變的 · 則該碳權價格 P_t 即為損益兩平碳權價格 P (元/ton CO₂) · 而透過對式 (3) 之移項 · 可整理成式 (4) · 並計算出損益兩平碳權價格 P ·

$$P = \frac{\sum_{t=0}^n \frac{(H_{Bt} - H_{Ct}) \cdot TNR + CC_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=0}^n \frac{C_t}{(1+r)^t}}, \quad (4)$$

其中 · 式 (4)可拆解為兩大部分 · 分別為單位收穫淨價格 PH 之式 (5) · 與單位碳權認證價格 PCC 之式 (6) · 而總損益兩平碳權價格 P · 即為單位碳權收穫淨價格 PH 和單位碳權認證價格 PCC 的總和 ·

$$P_H = \frac{\sum_{t=0}^n \frac{(H_{Bt} - H_{Ct}) \cdot TNR}{(1+r)^t}}{\sum_{t=0}^n \frac{C_t}{(1+r)^t}}, \quad (5)$$

$$P_{CC} = \frac{\sum_{t=0}^n \frac{CC_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=0}^n \frac{C_t}{(1+r)^t}}, \quad (6)$$

三、損益兩平碳權價格估算流程

本研究參考Man et al. (2015) 計算損益兩平碳權價格之程序進行估算與分析，而整體估算流程如圖 2 所示。首先應了解森林碳計畫下之計畫相關內容，包括樹種與計入期程，並確認基準收穫量，以及決定減少收穫比例，進而推估留存於林分之林木材積（即為收穫基準乘以減少收穫比例）與碳儲存量。再利用因實施森林碳計畫而減少之收穫量，以及折現率，計算出可認證的總碳權數量、減少收穫木材淨利（即機會成本）及碳權認證費用。而將收穫淨利、碳權認證成本個別除以碳權數量，即能得到單位收穫淨價格 (PH) 及單位碳權認證價格 (PCC)。最後依據式 (6)，將兩者加總得到損益兩平碳權價格 (P)。

本研究以下分別就：固定收穫基準設定與減少收穫比例設定、林分材積生長推估、林地碳儲存推估、木材利用率推估、木材價格設定與伐採成本設定、碳權計算標準與碳權認證成本設定，以及折現率設定進行說明。

1. 固定收穫基準設定與減少收穫比例設定

收穫基準定義為在無碳權交易情況下，木材的收穫量。而為滿足永續經營森林資源的目標，必須確定最低可接受的採伐量。本研究參考Man et al. (2015) 之研究，依據無碳權交易情況之收穫基準，在假設減少收穫程度 (reduced harvest level, RHL) 為10%、20%、30%、40%、50%、60%、70%、80%、90%與100%下，估算其損益兩平的碳權價格。其中，經營限制（例如最小伐齡）與基準情境保持一致，而基準收穫量在整個計劃期間則維持不變。

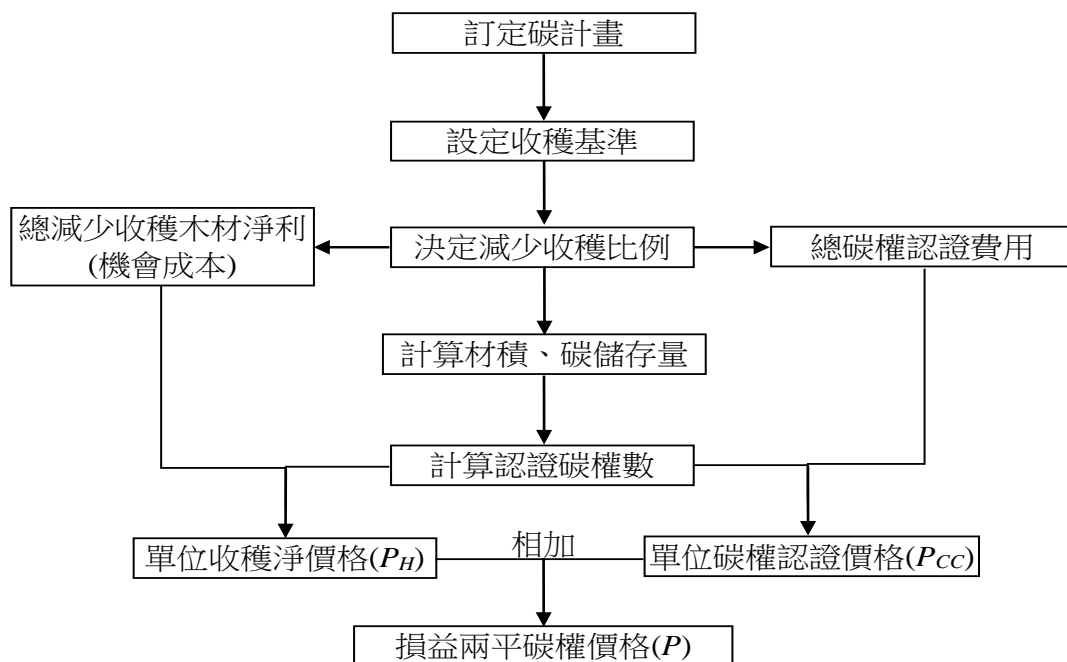


圖 2：推估損益兩平碳權價格流程圖

2. 林分材積生長推估

(1) 杉木

為求取杉木林分材積量，本研究採陳麗琴與黃進睦 (1992) 之杉木材積式，如式 (7) 所示。其中， $V_1(t)$ 為杉木林齡 t 年之林木材積 (立方公尺/公頃)， t 為林齡 (年)，以此式可估算單位面積不同林齡之杉木材積。

$$V_1(t) = \exp(3.9160 + 0.0690t), \quad (7)$$

(2) 臺灣杉

本研究參考劉浚明與鍾旭和 (1993) 之臺灣杉林齡與材積指數模型推估林分材積，如式 (8) 所示。其中 $V_2(t)$ 為臺灣杉林齡 t 年之林木材積 (立方公尺/公頃)， t 為林齡 (年)，以此模型可推估臺灣杉單位面積下之材積。

$$V_2(t) = 578.6851(1 - t^{-1.5402})^{54.3344}, \quad (8)$$

(3) 相思樹

本研究採劉慎孝與林子玉 (1968) 相思樹材積之迴歸式進行林分材積之推估，如式 (9) 所示。其中 $V_3(t)$ 為 t 年相思樹單位面積之材積 (立方公尺/公頃)， t 為林齡 (年)。

$$V_3(t) = -17.5150 + 6.5991t + 0.1549t^2, \quad (9)$$

(4) 大葉桃花心木

本研究採劉宣誠等人 (1981) 於六龜造林地之單株大葉桃花心木立木材積式推估林分材積，其中，栽植密度再參考邱志明等人 (2016) 所測得每公頃之株數 765 (株/公頃) 進行換算，如式(10) **錯誤! 找不到參照來源。** 所示。其中， $V_4(t)$ 為林齡 t 年之林木材積 (立方公尺/公頃)， t 為林齡 (年)。

$$V_4(t) = -23.3325 + 7.118t + 0.01094t^3, \quad (10)$$

3. 林地碳儲存推估

林木的碳儲存量推估模式可將林木材積藉由基礎木材密度換算出林木生物量，再利用林木生物量與地上部、地下部生物量的擴展係數與碳含量等轉換係數，估算出碳吸存量。本研究採用 IPCC (2006) 碳儲存量估算式，其如式 (11)。

$$C = V_t \times BD \times BEF \times (1 + R) \times CF, \quad (11)$$

其中， C (carbon storage) 為林木每公頃碳儲存量 (ton C/ha)， V_t 為林齡為 t 時每公頃之林木材積 (m^3/ha)， BD (basic wood density) 為基礎木材密度 (ton/m^3)， BEF (biomass expansion factors) 為林木生物量的擴展係數， R (ratio of below-ground biomass to above-ground biomass) 為根莖比， CF (carbon fraction) 為碳含量比率。四種樹種之各參數整理如表1所示。

表 1：杉木、臺灣杉、相思樹、大葉桃花心木之碳儲存量模式參數

樹種	Vt (m ³ /ha)	BD (ton/m ³)	BEF	R	CF
杉木	V_1	0.31	1.68	0.22	0.4832
臺灣杉	V_2	0.32	1.27	0.22	0.4832
相思樹	V_3	0.77	1.18	0.25	0.4717
大葉桃花心木	V_4	0.50	1.44	0.20	0.4726

資料來源：本研究整理，參考自IPCC (2006) · 林裕仁等 (2002) · 羅天祥、趙士洞 (1997) · 行政院環境保護署 (2016b) · 林國銓等 (2007、2009) · Monkay *et al.* (2006) · Kirby and Potvin (2007)。

在杉木的部分，林木材積 V_1 乃根據前述杉木材積式 (7) 所求得。而基礎木材密度 BD 則是根據林裕仁等人 (2002) 對臺灣地區針、闊葉樹材之測定結果，其指出杉木 BD 為0.31。生物量擴展係數 BEF 為依據羅天祥、趙士洞 (1997) 之研究，杉木 BEF 為1.68。根莖比 R 為根據羅天祥、趙士洞 (1997) 之計算，杉木 R 為0.22。至於碳含量比率 (CF) 則參考林裕仁等人(2002)研究，杉木 CF 為0.4832。

臺灣杉的林木材積為 V_2 根據前述臺灣杉材積式 (8) 所求得。而基礎木材密度 BD 則是根據林裕仁等人 (2002) 對臺灣杉之測定結果，其指出臺灣杉 BD 為0.32。臺灣杉的生物量擴展係數 BEF 與根莖比 R ，主要依據2016國家溫室氣體排放清冊報告 (行政院環境保護署，2016b) 之內容，其中，臺灣杉 BEF 為1.27，而 R 為0.22。至於臺灣杉碳含量比率 CF 則參考林裕仁等人 (2002) 研究，臺灣杉 CF 為0.4832。

相思樹林木材積 V_3 為根據前述相思樹材積式 (9) 求得。而基礎木材密度 BD 則是根據林裕仁等人 (2002) 對相思樹之測定結果，其指出相思樹 BD 為0.77。本研究之相思樹生物量擴展係數 BEF 與根莖比 R ，採過去林國銓等人 (2007、2009) 所測得結果，其中， BEF 之測定結果分別為1.240與1.137，而本研究採兩者平均值為1.18；而 R 之測定結果則分別為0.204與0.296，本研究採兩者平均值0.25。至於碳含量比率 CF 為參考林裕仁等人 (2002) 研究，為0.4717。

大葉桃花心木之林木材積 V_4 為根據前述大葉桃花心木材積式 (9) 求得。而基礎木材密度 BD 則是根據林裕仁等人 (2002) 之測定結果，大葉桃花心木之 BD 為0.50。在生物量擴展係數 BEF 方面，乃依據IPCC (2006)之建議，大葉桃花心木 BEF 為1.44。根莖比 R ，則根據Monkay *et al.* (2006) 及Kirby and Potvin (2007) 之建議，為0.20。最後，大葉桃花心木之碳含量比率 CF ，為參考林裕仁等人 (2002) 研究，為0.4726。

4. 木材利用率推估

林木砍伐下來後製成木材，而若木材能進一步製成家具、板材等木製品，或建築材料，較能有效固碳。過去IPCCC的想法為一旦森林被伐採，則森林中的碳素就當作已排出；因此，其並不評價木材中碳素貯藏的部分。然而，這樣的想法目前已開始被檢討，並由UNFCCC的報告中提出如：蓄積變化法、生產法與大氣流動法等與木材輸出入碳素貯藏與排出的計算標準（王松永，2005）。而本研究基於檢討後的想法，在碳權計算時考慮木材的利用狀況，將能持續固碳於木製品中之二氧化碳將列入計算⁵。本研究參考王松永等人（2005）之原木製材利用率，若以板材做利用，原木製材利用率為38%。因此總碳權量即為減少收穫保留下來之林木碳權，加上砍伐下來之木材碳權乘以木材利用率，如(12)。

$$C_t = \alpha \times C_{Bt} + (1 - \alpha) \times \beta \times C_{Bt}, \quad (12)$$

其中， C_t 為 t 時碳權數量（ton CO₂/公頃），而 α 為減少收穫之材積保留比例（依據10種RHL模擬情境）， C_{Bt} 為 t 時收穫基準之碳權數量（ton CO₂/公頃）， β 為木材利用率。

5. 木材價格設定與伐採成本設定

本研究選擇四種樹種，分別為杉木、臺灣杉、相思樹及大葉桃花心木，並依照行政院農業委員會林務局之木材市價資訊系統公告價格，採用2016年1月至2017年8月此期間各樹種每月價格之平均值。而所得各樹種之木材價格則如表 2所示；其中，杉木材價為每立方公尺5,180元，臺灣杉材價為每立方公尺4,040元，相思樹材價為3,891元，大葉桃花心木材價為5,000元（行政院農業委員會林務局，2017）。伐採成本則根據鄭欽龍、施友元（2006）之研究，平均計算出伐採成本為每立方公尺1,493元。本研究選擇之四種樹種杉木、臺灣杉、相思樹及大葉桃花心木，皆採用相同伐採成本。

⁵ IPCC對於能持續固碳於木製品中之二氧化碳是否計算碳權持續討論中，本研究依據碳流量將其計算入碳權中，此為本研究之研究假設與限制。

表 2：杉木、臺灣杉、相思樹、大葉桃花心木木材價格

平均木材價格 (元/m ³) (2016/1-2017/8)	杉木 ¹	臺灣杉 ²	相思樹 ³	大葉桃花心木 ⁴
	5,180	4,040	3,891	5,000

資料來源:本研究整理，參考自行政院農業委員會林務局(2017)

註：1 杉木材價採全部林區、省產針葉、杉木1、規格3-6,>15之月平均材價

2 臺灣杉材價採全部林區、省產針葉、臺灣杉1、規格3-6,>15之月平均材價

3 相思樹材價採全部林區、省產闊葉、相思樹、通用規格之月平均材價

4 大葉桃花心木材價採全部林區、省產闊葉、桃花心木、通用規格之月平均材價

6. 碳權計算標準與碳權認證成本設定

由於碳權涉及眾多因素（例如計入期、基準決定和額外的證明、碳庫 (carbon pool) 排放量的估計、洩漏 (leakage)、風險評估 (risk assessment)、緩衝池 (buffer pool) 釋放時間、查驗頻率 (verification frequency)），使得評估碳權非常複雜 (British Columbia Ministry of Environment, 2011; Greig and Bull, 2011)。因此，其通常需要正式管制文件 (protocol document)，做為這些因素的計算指引，例如 Verified Carbon Standard, (2012a); British Columbia Ministry of Environment, (2011)，但每個協議都有不同的計算規則，使得不同協議下的碳權計算具有明顯的差異 (Newell and Stavins, 2000; Pearson *et. al.*, 2008; Galik and Cooley, 2012)。而由於不列顛哥倫比亞省制定森林碳抵消議定書 (The protocol for the creation of forest carbon offsets in British Columbia, FCOP) 已被國際認證碳標準 (Verified carbon standard, VCS) 認證 (Pacific Carbon Trust, 2012)，因此 Man *et al.* (2015) 之研究及採用 FCOP 用以指引估計碳權 (British Columbia Ministry of Environment, 2011)。

其中，碳庫及相關碳源應考慮內容包含：(1) 存活和死亡之森林碳庫、(2) 在採伐木材產品中使用或掩埋的碳吸存、(3) 生產石化燃料和車輛燃油、設備材料運輸、投入、及人員到現場造成的排放、(4) 加工砍伐的木材產品產生的排放、(5) 厭氧分解掩埋砍伐的木材產品所造成的排放、(6) 由於砍伐減少所造成外部收穫轉移。除了相關碳庫和碳源外，當森林受到自然干擾會減少森林生長和碳吸存，即有損失碳權量的可能，因此每個森林碳計畫都承擔著可能反而損失碳權的風險（簡稱逆轉風險）。而抵銷計劃則是為降低逆轉風險，創建一個對應於逆轉風險的碳權緩衝池。開發單位不能立即出售緩衝池中的碳權，其必須遵循緩衝池釋放時間表。舉例來說，VCS (Verified Carbon Standard, 2012a) 緩衝池的釋放時間為每5年可釋放緩衝池的15%。

Man *et al.* (2015) 指出，開發單位為了出售碳權，需要定期進行查驗。而為達到改善森林經營策略此目的，大部分抵銷計劃要求至少每5年有一次查驗 (Verified Carbon Standard, 2012b)。查驗期、支付策略 (事前或事後) 和支付時間表中每個具體項目，主要透過消費者和生產者之間的談判所協定。由於查驗頻率對碳權影響很大，並會顯著性的影響損益兩平碳權價格，所以進行兩個層次的查驗財務分析，即每1年查驗和每5年查驗。這兩個層次允許碳權在產生後立即出售 (1年查驗) 或累積5年間碳權再出售 (5年查驗)。

其中，碳計畫之碳權認證成本，包含初步建立成本、驗證成本，以及後續定期查驗之費用。目前臺灣尚未有國際認證碳標準 (VCS) 之相關林業查驗機構，亦沒有改善森林經營此種申請專案 (陶子婕、林俊成，2014)。Galik *et al.* (2012)曾整理過去文獻中之相關費用；而Man *et al.* (2015) 所採用的碳權認證費用標準，為Galik *et al.* (2012) 研究中，林地面積為1000公頃左右的碳計畫碳權認證費用。但考慮臺灣實施林地面積為10,000公頃以上之碳計畫的機會不大，故本研究採用Galik *et al.* (2012) 中，林地面積為100公頃碳計畫之碳權認證費用。其中，碳計畫初步建立成本和驗證成本約為每公頃7,748元，而定期查驗費用每次每公頃則為2,781元。而本研究選擇之四種樹種杉木、臺灣杉、相思樹及大葉桃花心木，皆採用相同之碳權認證費用。

7. 折現率設定

本研究欲計算於計畫初期總損益兩平之碳權價格 (P)，故計算損益兩平碳權價格時，木材獲利、碳權數量、造林成本、收穫成本及碳權認證成本皆須進行折現，而本研究之折現率根據造林貸款要點指出，採用現行造林貸款優惠利率，1.25% (行政院農業委員會農業金融局，2016)。

參、實證結果分析

本研究以臺灣四種重要造林樹種，杉木、臺灣杉、相思樹及大葉桃花心木進行實證分析。考量到杉木及相思樹建議之輪伐期為20年，而臺灣杉及大葉桃花心木建議之輪伐期為30年，故碳權計畫將以20年、25年及30年等三種計入期做分析。

一、收穫基準

收穫基準定為無碳權交易之基準情境下，在到達計畫之收穫林齡時，可獲得之收穫材積。杉木、臺灣杉、相思樹及大葉桃花心木之材積計算，分別依20年、25年及30年三種計劃

期之林齡依序帶入前述式 (7) 杉木材積式、式 (8) 之臺灣杉材積式、式 (9) 相思樹材積式及式 (10) 大葉桃花心木之材積式，可得四種樹種三種計入期之不同材積，如表3所示。其中，在20年計畫與25年計畫之中，臺灣杉有最高之林木材積，分別為336.81 m³/ha及394.45 m³/ha，而在30年計畫中，大葉桃花心木有最高林木材積，為485.59 m³/ha；在三種計劃中，林木材積最低者為相思樹，20年計畫的林木材積為176.43 m³/ha、25年計劃的林木材積為244.28 m³/ha、30年計劃的林木材積為319.87 m³/ha。

表 3：杉木、臺灣杉、相思樹、大葉桃花心木之材積

樹種	單位: (m ³ /ha)		
	20年	25年	30年
杉木	199.54	281.74	397.82
臺灣杉	336.81	394.45	433.36
相思樹	176.43	244.28	319.87
大葉桃花心木	206.55	325.56	485.59

資料來源:本研究整理

二、伐採成本

杉木、臺灣杉、相思樹及大葉桃花心木每公頃之伐採成本，則依前述之1,493 (元/立方公尺) 與材積相乘計算，如表 4所示。由於主要影響伐採成本因素為每單位面積上林木收穫之材積數量，故於20年與25年計畫中，臺灣杉的單位面積材積數量最多，所以其伐採成本亦最高；而相思木單位面積材積數量最少，其伐採成本亦最少。

表4：杉木、臺灣杉、相思樹、大葉桃花心木之伐採成本

樹種	單位:(元/ha)		
	20年	25年	30年
杉木	297,913	420,638	593,945
臺灣杉	502,857	588,914	647,006
相思樹	263,410	364,710	477,566
大葉桃花心木	308,379	486,061	724,986

資料來源:本研究整理

三、碳權數推估

利用前述IPCC之碳儲存量推估模型公式 (11) , 及表 1所整理杉木、臺灣杉、相思樹及大葉桃花心木之碳儲存量模型參數, 可推估出四種樹種每公頃之碳儲存量。將不同碳儲存量除於各林齡可得平均每年每公頃之碳吸存量, 而各樹種之碳儲存量及平均碳吸存量, 其結果如表5。

表 6

表6為三種計入期杉木、臺灣杉、相思樹及大葉桃花心木之碳權推估量。其為各計畫各樹種之碳儲存量, 除以碳原子量12, 再乘以二氧化碳分子量44而得。這部份僅為立木碳儲存量所換算出的碳權, 而不考量林木砍伐後, 木材製成建材家具的碳權數量。

在20年計畫裡, 林齡為20年的四種樹種之中, 相思樹的材積量最低, 為176.43 m³/ha, 但相思樹的碳儲存量為94.52 ton C/ha, 是四者碳儲存能力最高者, 因相思樹其基礎木材密度(BD) 0.77 ton/m³, 是四種樹種中BD最高者, 其次是大葉桃花心木之碳儲存量84.34 ton C/ha。根據林俊成等人於2002年所作之二氧化碳吸存潛力研究, 其結果顯示林齡20年中, 以相思樹之吸存潛力最好, 這部分與本研究之結果相同。在25年及30年計畫中, 碳權數生產最高者為大葉桃花心木, 分別為487.43 ton CO₂/ha及727.02 ton CO₂/ha, 次高者為相思樹分別為479.85 ton CO₂/ha及628.34 ton CO₂/ha。根據本研究之估算, 由於相思樹後期增長速率較大葉桃花心木來的低, 因此大葉桃花心木於第25年後碳儲存量開始大於相思樹。林國銓等人於2009年研究指出, 林地中二氧化碳累積量會受到樹種、生育地、密度等因素影響, 使得各林分間有所不同。而在三種不同計入期中, 杉木、臺灣杉、相思樹及大葉桃花心木相比下, 皆以闊葉樹種(相思樹、大葉桃花心木)之碳儲存量較優於針葉樹種(杉木、臺灣杉)之碳儲存量, 本研究結果同前人研究, 不同樹種之二氧化碳吸存量, 以闊葉樹種的二氧化碳吸存佳(林俊成等, 2002)。

表 6：杉木、臺灣杉、相思樹、大葉桃花心木碳儲存所換算的碳權推估量

樹種	單位:(ton CO ₂ /ha)		
	20年	25年	30年
杉木	224.63	317.16	447.83
臺灣杉	295.87	346.50	380.68
相思樹	346.57	479.85	628.34
大葉桃花心木	309.25	487.43	727.02

資料來源:本研究整理

四、基準情境之損益兩平碳權價格

在有碳權交易的狀況下，當減少收穫，並增加保留在林地上的林木時，這些留存林木可依IFM策略進行VCS碳權認證，並可依據該認證出售碳權，從碳權交易中獲利。在無碳權交易情境下，收入即為販售收穫之木材而獲取利潤；在有碳權交易情境下，收入則為木材收益加上碳權販售收益。在基準情境下，在碳權價格為損益兩平價格時，無碳權交易與有碳權交易兩者收入為相等的，而本研究即探討此損益兩平之碳權價格應為多少。當碳交易市場中碳權價格大於等於損益兩平之碳權價格時，森林經營就會施行減少收穫計畫，並保留部分林木以賺取更多碳權收益，但當碳權市價低於損益兩平碳權價格時，森林經營計畫基本上不會施行減少收穫，因減少收穫之利潤會較不減少收穫來的低。本文即根據Man et al. (2015) 計算損益兩平之碳權價格方式分析臺灣四種重要造林樹種，其中碳權價格 (P) 於式 (4) 中可拆解出兩部分，分別為 (因減少收穫產生木材收入機會成本) 單位收穫淨價格 (PH) (如式 (5))，及單位碳權認證價格 (PCC) (如式 (6))。

在基準情境之設定下，折現率為1.25%、木材利用率為38%，伐木成本為1,493元/立方公尺，碳計畫建立成本和驗證成本為7,748元/公頃，定期查驗成本每次為2,781元/公頃，而各樹種之木材市價則列於表 2。以式 (5) 與式 (6) 帶入上述參數後，可得單位收穫淨價格 (PH)、單位碳權認證價格 (PCC)，以及兩者相加之損益兩平碳權價格 (P)。本研究將四種樹種之計入期所計算出損益兩平碳權價格，整理至表7。

在20年計畫中，林木減少收穫比例由10%增加至100%，杉木損益兩平碳權價格 (P) 亦將由872.43元/ton CO₂逐步增加至3,052.40元/ton CO₂，而臺灣杉損益兩平碳權價格由769.91元/ton CO₂逐步增加至2,773.97元/ton CO₂，相思樹損益兩平碳權價格由391.60元/ton CO₂逐步增加至1,195.20元/ton CO₂，大葉桃花心木損益兩平碳權價格由652.06元/ton CO₂逐步增加至2,274.18元/ton CO₂。

四種樹種之單位收穫淨價格 (PH)，杉木PH為670.38元/ton CO₂至2,963.10元/ton CO₂，臺灣杉PH為611.78/ton CO₂至2704.07元/ton CO₂，相思樹PH為256.94/ton CO₂至1,135.68元/ton CO₂，大葉桃花心木PH為499.24/ton CO₂至2,206.64元/ton CO₂。依減少收穫程度越高，四種樹種之單位碳權認證價格 (PCC) 為逐漸降低趨勢，杉木PCC為89.30/ton CO₂至202.04元/ton CO₂，臺灣杉PCC為69.89/ton CO₂至158.13元/ton CO₂，相思樹PCC為59.52/ton CO₂至134.66元/ton CO₂，大葉桃花心木PCC為67.54/ton CO₂至152.82元/ton CO₂。以20年計畫為例，從實證分析結果可發現，由於同計入期間之查驗次數相同，碳權認證成本相同，PCC變動僅受到分母碳權數 (Ct) 影響；當減少收穫比例越高，碳權數也隨之增加，(碳權認證成本) 分子固定

(碳權數)分母增加，整體值呈下降趨勢(如圖3)；因此減少收穫程度越高，PCC將會越小。而四種樹種之PH變動與PCC變動的方向則相反；由於PH變動受到分子損失木材淨收益(機會成本)與分母Ct影響，減少收穫比例越高，損失木材淨收益增加速率會大於碳權增加速率，並使PH越來越大(如圖4)。

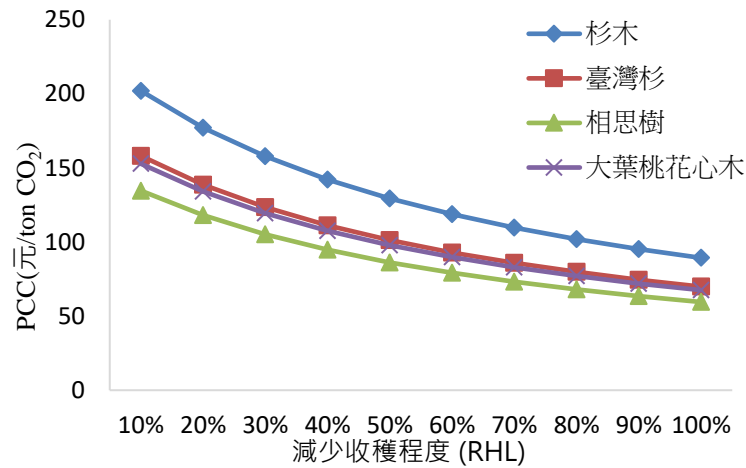


圖 3：(20年計入期) 杉木、臺灣杉、相思樹、大葉桃花心木之單位碳權認證價格 (PCC)

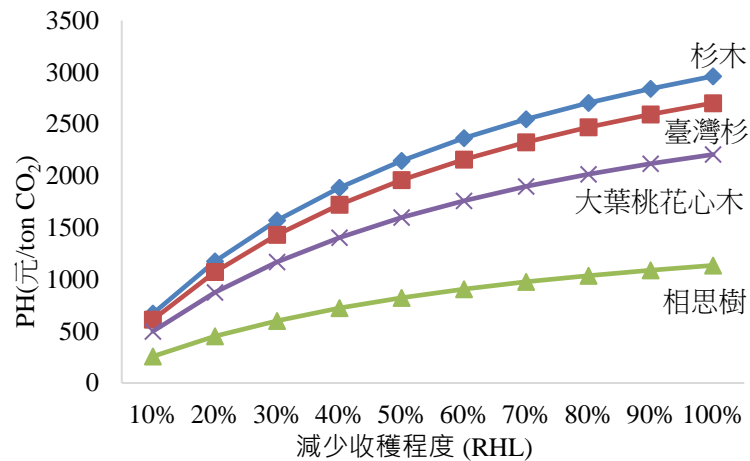


圖4：(20年計入期) 杉木、臺灣杉、相思樹、大葉桃花心木之單位收穫淨價格 (PH)

就PH在P中所占的比例(簡稱PH/P比)而言，於20年計畫中，杉木的PH/P比超過77%，臺灣杉的PH/P比超過79%，相思樹PH/P比則超過66%，大葉桃花心木PH/P比亦超過77%。PH與PCC兩者變動皆會影響P，但PH變動幅度大於PCC，PH在P佔比又比較高，故PH為主要影響P之因素。因此，如圖5所示，減少收穫程度越高，P越大。

相同減少收穫程度，四種樹種之PCC差異，主要是因為各樹種能產生之碳權數不同而產生的差異；PCC最低者為相思樹，因其產生碳權數最多。而由於木材價格、材積及碳權數等三種因子為PH的函數，所以四種樹種之PH差異，受到樹種材價、收穫材積、碳權量所影響，在20年計畫中，杉木所產生的權數最少，但由於材價為四種樹種中最高者，分子木材收益較大，而分母碳權數較小，進而使杉木之PH在四者中最大。

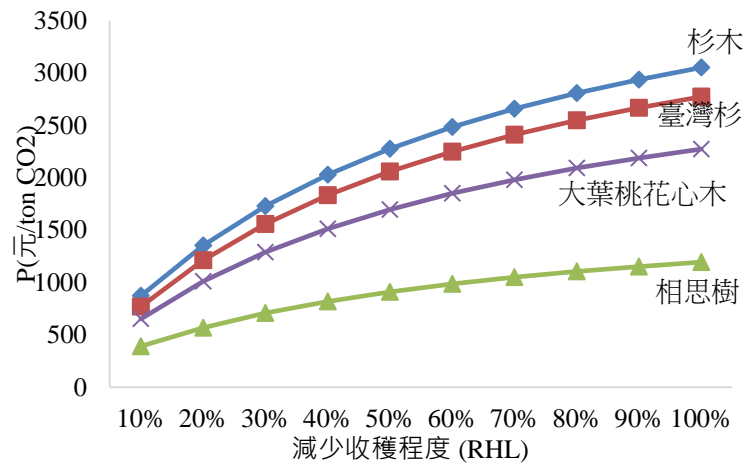


圖5：(20年計入期) 杉木、臺灣杉、相思樹、大葉桃花心木之損益兩平碳權價格 (P)

表 7：基準情境下杉木、臺灣杉、相思樹及大葉桃花心木損益兩平碳權價格 (折現率1.25%、木材利用率38%)

RHL*	杉木			臺灣杉			相思樹			大葉桃花心木		
	PH(元/ton CO ₂)	Pcc(元/ton CO ₂)	P(元/ton CO ₂)	PH(元/ton CO ₂)	Pcc(元/ton CO ₂)	P(元/ton CO ₂)	PH(元/ton CO ₂)	Pcc(元/ton CO ₂)	P(元/ton CO ₂)	PH(元/ton CO ₂)	Pcc(元/ton CO ₂)	P(元/ton CO ₂)
20年												
0.1	670.38	202.04	872.43	611.78	158.13	769.91	256.94	134.66	391.60	499.24	152.82	652.06
0.2	1,175.83	177.19	1,353.02	1,073.05	138.67	1,211.72	450.67	118.09	568.76	875.65	134.02	1,009.67
0.3	1,570.55	157.78	1,728.33	1,433.25	123.48	1,556.74	601.95	105.16	707.11	1,169.60	119.34	1,288.93
0.4	1,887.33	142.20	2,029.53	1,722.34	111.29	1,833.63	723.36	94.78	818.14	1,405.50	107.56	1,513.06
0.5	2,147.17	129.42	2,276.60	1,959.47	101.29	2,060.77	822.95	86.26	909.21	1,599.01	97.89	1,696.91
0.6	2,364.18	118.75	2,482.93	2,157.51	92.94	2,250.45	906.13	79.15	985.27	1,760.62	89.82	1,850.44
0.7	2,548.12	109.71	2,657.83	2,325.37	85.86	2,411.23	976.63	73.12	1,049.75	1,897.60	82.98	1,980.58
0.8	2,706.03	101.94	2,807.97	2,469.47	79.79	2,549.26	1,037.15	67.94	1,105.09	2,015.20	77.11	2,092.30
0.9	2,843.06	95.21	2,938.27	2,594.53	74.51	2,669.04	1,089.67	63.45	1,153.12	2,117.24	72.01	2,189.25
1.0	2,963.10	89.30	3,052.40	2,704.07	69.89	2,773.97	1,135.68	59.52	1,195.20	2,206.64	67.54	2,274.18
25年												
0.1	658.79	167.27	826.06	585.51	153.71	739.22	250.21	112.65	362.86	489.71	113.13	602.84
0.2	1,155.49	146.69	1,302.18	1,026.96	134.80	1,161.76	438.85	98.80	537.65	858.94	99.21	958.15
0.3	1,543.38	130.62	1,674.00	1,371.70	120.03	1,491.74	586.17	87.97	674.15	1,147.28	88.34	1,235.62
0.4	1,854.68	117.73	1,972.40	1,648.37	108.18	1,756.56	704.40	79.29	783.69	1,378.68	79.62	1,458.30
0.5	2,110.03	107.15	2,217.18	1,875.32	98.46	1,973.79	801.38	72.16	873.55	1,568.50	72.47	1,640.96
0.6	2,323.28	98.31	2,421.59	2,064.85	90.35	2,155.19	882.37	66.21	948.59	1,727.02	66.49	1,793.51
0.7	2,504.04	90.83	2,594.87	2,225.51	83.46	2,308.97	951.03	61.17	1,012.20	1,861.39	61.43	1,922.81
0.8	2,659.22	84.40	2,743.61	2,363.42	77.56	2,440.98	1,009.96	56.84	1,066.80	1,976.74	57.08	2,033.82
0.9	2,793.88	78.82	2,872.70	2,483.10	72.43	2,555.53	1,061.11	53.08	1,114.19	2,076.84	53.31	2,130.14
1.0	2,911.84	73.93	2,985.77	2,587.94	67.94	2,655.88	1,105.91	49.79	1,155.70	2,164.53	50.00	2,214.53
30年												
0.1	650.33	136.77	787.10	558.32	156.03	714.35	243.70	98.00	341.69	481.08	87.14	568.22
0.2	1,140.67	119.94	1,260.61	979.28	136.84	1,116.12	427.43	85.94	513.38	843.80	76.42	920.22
0.3	1,523.58	106.80	1,630.38	1,308.02	121.85	1,429.86	570.92	76.53	647.45	1,127.06	68.05	1,195.11
0.4	1,830.88	96.26	1,927.14	1,571.84	109.82	1,681.66	686.07	68.97	755.05	1,354.39	61.33	1,415.72

0.5	2,082.96	87.61	2,170.56	1,788.25	99.95	1,888.20	780.53	62.78	843.31	1,540.86	55.82	1,596.68
0.6	2,293.47	80.39	2,373.85	1,968.98	91.71	2,060.69	859.41	57.60	917.02	1,696.59	51.22	1,747.80
0.7	2,471.91	74.26	2,546.17	2,122.18	84.72	2,206.90	926.28	53.21	979.50	1,828.59	47.32	1,875.91
0.8	2,625.09	69.01	2,694.10	2,253.69	78.73	2,332.42	983.68	49.45	1,033.13	1,941.91	43.97	1,985.87
0.9	2,758.03	64.45	2,822.47	2,367.82	73.52	2,441.34	1,033.50	46.18	1,079.68	2,040.24	41.06	2,081.31
1.0	2,874.48	60.45	2,934.93	2,467.79	68.96	2,536.76	1,077.13	43.32	1,120.45	2,126.39	38.52	2,164.90

資料來源:本研究整理

*註：RHL，reduced harvest level，對於收穫基準量之減少收穫比例。

四種樹種中，以損益兩平碳權價格最高者杉木為例，林木減少收穫比例在10%時，於20年、25年及30年三種計入期中，杉木損益兩平碳權價格 (P) 分別為872.43元/ton CO₂、826.06元/ton CO₂、787.10元/ton CO₂；PH分別為670.38元/ton CO₂、658.79元/ton CO₂、650.33元/ton CO₂；而PCC分別為202.04元/ton CO₂、167.27元/ton CO₂、136.77元/ton CO₂，結果顯示杉木依據不同年限之計畫，越長之計入期P、PH及PCC越低，整體依年限增加，損益兩平碳權價格呈現下降之趨勢。故就單一樹種結果顯示，隨著計入期越長，各樹種之P、PH及PCC大多呈現下降趨勢，意即當計入期拉長，材積會有所增長，使得各樹種碳權數增加。此外，由於碳權增加速率大於機會成本、認證成本增加速率，因此隨著計入期增加，碳權價格會呈現降低之趨勢。

五、碳權收益分析

目前臺灣尚未有公定碳權市價，但依據溫管法第28條，超量排放二氧化碳，而又沒有在碳交易市場上購買碳權抵銷，每多排放1公噸二氧化碳最高要被罰1,500元，故實際臺灣市場上之碳權價格應小於等於1,500元。本研究以1,500元作為碳權交易價格，以評估杉木、臺灣杉、相思樹及大葉桃花心木在不同減少收穫程度 (RHL) 下之獲利情況，結果如表8所示。

以20年計畫來看，杉木及臺灣杉需在RHL 20%以內才有獲利；相思樹則是所有減少收穫程度皆有收益，因其損益兩平碳權價格最低，且皆不超過碳權交易價格1,500元；而大葉桃花心木，僅有在RHL 30%以內有收益。因較長計入期之損益兩平碳權價格會有所下降，所以25年、30年計劃中，臺灣杉於RHL 30%以內皆有碳權利潤，而大葉花心木則是RHL於40%以內有碳權收益。結果顯示四種樹種皆在減少收穫程度為10%時，獲利最大，因RHL增加，雖然碳權數會增加，但損益兩平碳權價格亦會有所增加，而每單位碳權的收益則會減少；由於其減少收益速率大於碳權增加速率，提高減少收穫程度，將會使碳權收益下降。此外，由於收穫淨利較高之樹種，損益兩平碳權價格也會較高，而若其損益兩平碳權價格高於碳權交易之市價，將導致有碳交易之獲利，會比無碳交易之獲利來的低，此時，森林經營者會傾向無碳交易。因此，可藉由降低機會成本 (收穫淨利)，讓 P_H 降低，使整體損益兩平碳權價格降至碳權市價以下。

表8：基準情境下杉木、臺灣杉、相思樹及大葉桃花心木之碳權收益

(碳權交易價格 1,500 元/ton CO₂)

RHL*	杉木		臺灣杉		相思樹		大葉桃花心木	
	P (元/ton CO ₂)	收益(元/ha)	P (元/ton CO ₂)	收益(元/ha)	P (元/ton CO ₂)	收益(元/ha)	P (元/ton CO ₂)	收益(元/ha)
20年								
0.1	872.43	53,720.75	769.91	79,853.64	391.60	142,359.08	652.06	95,966.19
0.2	1,353.02	14,346.25	1,211.72	35,953.43	568.76	136,382.50	1,009.67	63,277.51
0.3	1,728.33	-25,028.25	1,556.74	-7,946.78	707.11	130,405.92	1,288.93	30,588.83
0.4	2,029.53	-64,402.76	1,833.63	-51,846.99	818.14	124,429.35	1,513.06	-2,099.84
0.5	2,276.60	-103,777.26	2,060.77	-95,747.21	909.21	118,452.77	1,696.91	-34,788.52
0.6	2,482.93	-143,151.77	2,250.45	-139,647.42	985.27	112,476.20	1,850.44	-67,477.19
0.7	2,657.83	-182,526.27	2,411.23	-183,547.63	1,049.75	106,499.62	1,980.58	-100,165.87
0.8	2,807.97	-221,900.78	2,549.26	-227,447.84	1,105.09	100,523.05	2,092.30	-132,854.54
0.9	2,938.27	-261,275.28	2,669.04	-271,348.05	1,153.12	94,546.47	2,189.25	-165,543.22
1	3,052.40	-300,649.79	2,773.97	-315,248.26	1,195.20	88,569.89	2,274.18	-198,231.89
25年								
0.1	826.06	77,897.58	739.22	95,691.40	362.86	195,154.23	602.84	153,328.01
0.2	1,302.18	26,071.66	1,161.76	48,511.17	537.65	188,324.09	958.15	105,593.94
0.3	1,674.00	-25,754.26	1,491.74	1,330.93	674.15	181,493.94	1,235.62	57,859.88
0.4	1,972.40	-77,580.18	1,756.56	-45,849.30	783.69	174,663.79	1,458.30	10,125.81
0.5	2,217.18	-129,406.10	1,973.79	-93,029.53	873.55	167,833.64	1,640.96	-37,608.26
0.6	2,421.59	-181,232.02	2,155.19	-140,209.77	948.59	161,003.49	1,793.51	-85,342.33
0.7	2,594.87	-233,057.94	2,308.97	-187,390.00	1,012.20	154,173.35	1,922.81	-133,076.39
0.8	2,743.61	-284,883.86	2,440.98	-234,570.23	1,066.80	147,343.20	2,033.82	-180,810.46
0.9	2,872.70	-336,709.78	2,555.53	-281,750.46	1,114.19	140,513.05	2,130.14	-228,544.53
1	2,985.77	-388,535.70	2,655.88	-328,930.70	1,155.70	133,682.90	2,214.53	-276,278.60
30年								
0.1	787.10	110,764.58	714.35	106,996.18	341.69	251,158.29	568.22	227,220.09
0.2	1,260.61	42,412.31	1,116.12	59,613.90	513.38	243,940.34	920.22	161,214.01
0.3	1,630.38	-25,939.96	1,429.86	12,231.62	647.45	236,722.40	1,195.11	95,207.93
0.4	1,927.14	-94,292.24	1,681.66	-35,150.65	755.05	229,504.45	1,415.72	29,201.84
0.5	2,170.56	-162,644.51	1,888.20	-82,532.93	843.31	222,286.51	1,596.68	-36,804.24
0.6	2,373.85	-230,996.78	2,060.69	-129,915.21	917.02	215,068.56	1,747.80	-102,810.32
0.7	2,546.17	-299,349.06	2,206.90	-177,297.49	979.50	207,850.61	1,875.91	-168,816.41
0.8	2,694.10	-367,701.33	2,332.42	-224,679.77	1,033.13	200,632.67	1,985.87	-234,822.49
0.9	2,822.47	-436,053.60	2,441.34	-272,062.05	1,079.68	193,414.72	2,081.31	-300,828.57
1	2,934.93	-504,405.87	2,536.76	-319,444.32	1,120.45	186,196.78	2,164.90	-366,834.66

資料來源:本研究整理

*註：RHL · reduced harvest level · 對於基準收穫量之減少收穫比例。

以20年計畫，減少收穫程度為50%情況為例（碳權市場價格為1,500元），圖6結果顯示，未減少收穫淨利(0%)情況下，僅有相思樹損益兩平碳權價格低於碳權市價；而從表8基準情境下杉木、臺灣杉、相思樹及大葉桃花心木之碳權收益，也可看出每公頃僅有相思樹可獲利118,452.77元。只有在木材收穫淨利（機會成本）降低的情況下，杉木、臺灣杉及大葉桃花心木才會因販售碳權而增加收益。如圖6所示，當杉木及臺灣杉木材收穫淨利減少比例高

於40%時，才能由販售碳權增加收益，而大葉桃花心木的部份，木材收穫淨利減少比例則須高於20%，才能由販售碳權而增加收益。故現行杉木、臺灣杉、大葉桃花心木，必須等待碳權市場價格上漲或木材價格下降，才能由碳權交易增加其收益，亦較利於施行碳計畫。而森林收穫利潤相對較低的樹種下（類似於相思樹），森林經營者應考慮立即施行改善森林經營計畫，以賺取碳權收益。

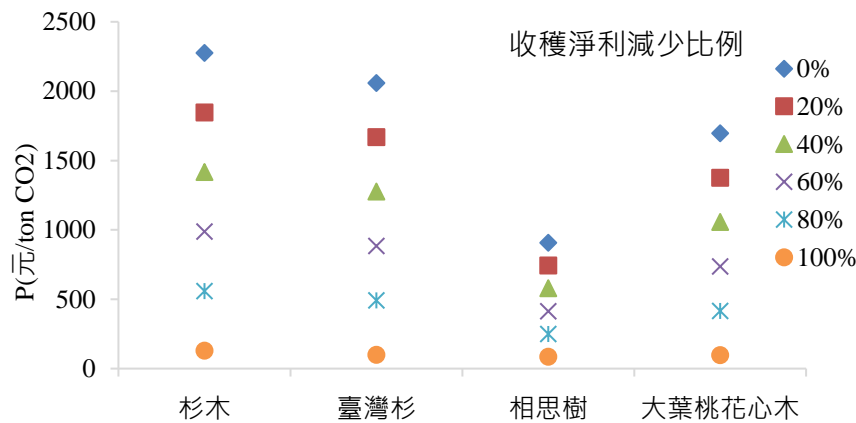


圖 6：降低收穫淨利 (0%-100%) 損益兩平碳權價格變化
(20年計畫，減少收穫程度50%)

六、損益兩平碳權價格之折現率敏感度分析

依現行造林貸款利率，本研究之基準情境折現率採1.25%，考慮折現率有變動之可能性，故進行單因素敏感度分析。本研究即在木材利用率為38%與其他條件不變下，進行1.00-6.00%折現率敏感度分析，以了解折現率對此損益兩平碳權價格的變動影響。本研究將折現率對於杉木、臺灣杉、相思樹、大葉桃花心木四種樹種損益兩平價格之影響整理至表 9、表 10、表 11與表 12。

在20年計畫，林木減少收穫比例為10%時，當折現率在1.00%至6.00%變動時，杉木的損益兩平碳權價格 (P) 之變動幅度為424.60元/ton CO₂至909.81元/ton CO₂，臺灣杉損益兩平碳權價格 (P) 之變動幅度為367.13元/ton CO₂至803.58元/ton CO₂，相思樹損益兩平碳權價格 (P) 之變動幅度為207.09元/ton CO₂至406.89元/ton CO₂，大葉桃花心木損益兩平碳權價格 (P) 之變動幅度為318.03元/ton CO₂至679.93元/ton CO₂；而在P_H的部份，杉木為267.98元/ton CO₂至704.36元/ton CO₂，臺灣杉為244.56元/ton CO₂至642.79元/ton CO₂，相思樹為102.71元/ton CO₂至269.96元/ton CO₂，大葉桃花心木為199.57元/ton CO₂至524.54元/ton CO₂；在P_{CC}的部份，杉木為156.62元/ton CO₂至205.44元/ton CO₂，臺灣杉為122.57元/ton CO₂至160.79元/ton CO₂，相

思樹為104.38元/ton CO₂至136.93元/ton CO₂，大葉桃花心木為118.46元/ton CO₂至155.39元/ton CO₂。

以折現率進行損益兩平碳權價格之敏感度分析結果顯示，在單一樹種，相同計入期內，同一減少收穫程度的情況下，當折現率逐漸上升時，損益兩平碳權價格會逐漸減少，如圖7所示。此外，由於折現率越大，收穫淨利（機會成本）及認證成本折現後會變得越小，因此，當折現率逐漸上升時，各樹種PH、PCC皆同呈下降之趨勢。

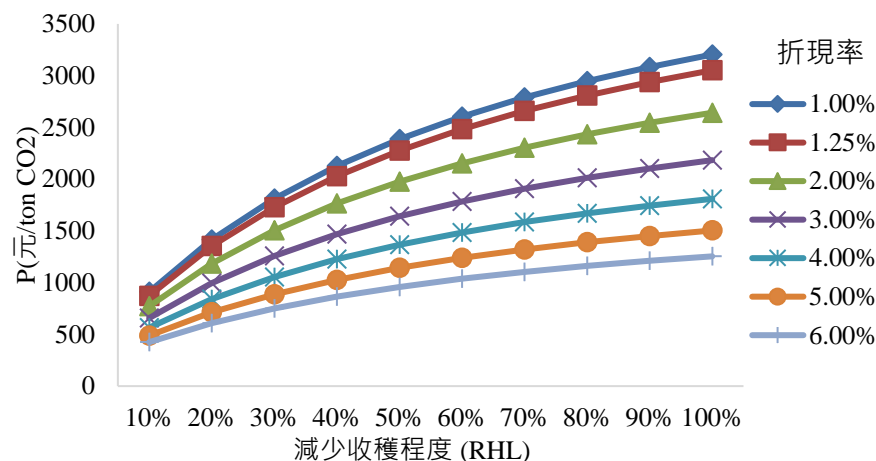


圖7：(20年計入期) 杉木折現率敏感度分析之損益兩平碳權價格

另一方面，在四種樹種中，P、PH及PCC價格越高的樹種，受折現率影響越大，其中，價格變動最大者為杉木。在相同減少收穫程度下，若市場上碳交易價格不隨折現率改變而變動為一固定值，當折現率越高時，森林經營計畫會傾向減少收穫，以賺取更大利潤。

七、碳權價格之木材利用率敏感度分析

碳權數會受到減少收穫之保留林木及收穫下來之木材利用影響，考慮到木材具有多種用途，每種樹種之木材用途又有所差異，而二氧化碳是否能持續儲存於木材中，受到林木利用之影響而變動，因此，本研究針對木材利用率進行損益兩平碳權價格的敏感度分析。本研究將在其他條件不變之情況下，以0-100%之木材利用率進行敏感度分析，探討木材利用率如何使損益兩平碳權價格產生變動，本研究將杉木、臺灣杉、相思樹、大葉桃花心木四種樹種之分析結果繪製如圖8。在20年計畫，林木減少收穫比例為10%時，當木材利用率由0%變動至100%，杉木損益兩平碳權價格 (P) 變動幅度為385.61元/ton CO₂至3,856.13元/ton CO₂，臺灣杉損益兩平碳權價格 (P) 為340.30元/ton CO₂至3,402.99元/ton CO₂，相思樹損益兩平碳權價格

(P) 為173.09元/ton CO₂至1,730.87元/ton CO₂，大葉桃花心木損益兩平碳權價格 (P) 為288.21元/ton CO₂至2,882.09元/ton CO₂。在 P_H 的部份，杉木為296.31元/ton CO₂至2,963.10元/ton CO₂，臺灣杉為270.41元/ton CO₂至2,704.07元/ton CO₂，相思樹為113.57元/ton CO₂至1,135.68元/ton CO₂，大葉桃花心木為220.66元/ton CO₂至2,206.64元/ton CO₂。 P_{CC} 的部份，杉木為89.30元/ton CO₂至893.03元/ton CO₂，臺灣杉為69.89元/ton CO₂至698.92元/ton CO₂，相思樹為59.52元/ton CO₂至595.19元/ton CO₂，大葉桃花心木為67.54元/ton CO₂至675.45元/ton CO₂。

以木材利用率進行損益兩平碳權價格之敏感度分析結果顯示，在單一樹種，同計入期，相同減少收穫程度(RHL不為100%)的情況下，當木材利用率逐漸上升時，損益兩平碳權價格會逐漸降低，如圖8所示。由於木材利用率越高，代表碳權數越多，而當分母碳權數 (C_i) 越高，整體價格就會越低，使得各樹種之 P 、 P_H 、 P_{CC} 皆呈下降之趨勢。因此，在相同減少收穫程度下，若市場碳交易價格不隨木材利用率改變而變動為一定值，則當木材利用率越高時，損益兩平之碳權價格將會越低，並且能獲得更大利潤，故各種樹種使用於家具、板材等木材利用率提高，能增加碳權收益。

當收穫下來之木材非用於持久固碳之木製品，或碳權認證未包含收穫下來之木材利用（認證碳權數僅計算留存於林地上之林木碳權），在這兩種情況下，損益兩平之碳權價格皆為木材利用率為0%的結果。此兩種情況中，同計入期下，當減少收穫程度變動時， P_H 為定值，而主要影響 P 變動為 P_{CC} ，但由於 P_H 在 P 占比較大，故 P 變動不會太大。而 P_H 為一定值，是因為分子收穫淨利之變動速率與分母碳權數變動速率相同，使得在同一計畫中，單一樹種之不同程度RHL， P_H 皆相同。同一計入期，碳權認證費相同，故減少收穫程度越多，分母碳權數越多，因而 P_{CC} 會逐漸降低。此研究結果與Man et al. (2015) 所顯示結果相同。

在木材利用率為100%之理想狀態下，此為收穫木材能保存所有碳，故單一樹種，在相同計入期中，不管何種程度之收穫，認證之碳權數皆相同，分子認證成本與分母碳權數都為定值，使得整體 P_{CC} 也為一定值。而同一計入期，木材利用率為100%時，減少收穫程度越高，分子收穫淨利（機會成本）會逐漸增加，分母碳權數則為一定值，整體 P_H 會呈現增長之趨勢。此狀況下 P_{CC} 不變，主要影響 P 變動為 P_H ， P_H 越小之樹種， P 也越小，結果顯示損益兩平碳權價格最低者為相思樹。

三種計畫中，各樹種當減少收穫程度為100%時，代表林木全保留於林地上沒有收穫，故完全不需考量木材利用率，此時，不管木材利用率為何， P 、 P_H 、 P_{CC} 皆為定值。

0.8	2,827.19	70.85	2,898.04	2,625.09	69.01	2,694.10	2,103.73	64.03	2,167.76	1,569.93	58.50	1,628.43	1,174.89	53.99	1,228.88	881.69	50.29	931.98	663.47	47.21	710.68
0.9	2,970.36	66.17	3,036.53	2,758.03	64.45	2,822.47	2,210.27	59.80	2,270.06	1,649.43	54.64	1,704.06	1,234.38	50.43	1,284.81	926.34	46.96	973.30	697.07	44.09	741.16
1	3,095.77	62.07	3,157.84	2,874.48	60.45	2,934.93	2,303.59	56.09	2,359.68	1,719.07	51.25	1,770.32	1,286.50	47.30	1,333.80	965.45	44.05	1,009.50	726.50	41.36	767.86

資料來源:本研究整理

*註：RHL · reduced harvest level · 對於收穫基準量之減少收穫比例。

表10：臺灣杉碳權價格之折現率敏感度分析

RHL*	折現率																					
	1.00%		1.25%		2.00%		3.00%		4.00%		5.00%		6.00%									
	P _H (元/t CO ₂)	P _{CC} (元/t CO ₂)	P(元/t CO ₂)	P _H (元/t CO ₂)	P _{CC} (元/t CO ₂)	P(元/t CO ₂)	P _H (元/t CO ₂)	P _{CC} (元/t CO ₂)	P(元/t CO ₂)	P _H (元/t CO ₂)	P _{CC} (元/t CO ₂)	P(元/t CO ₂)	P _H (元/t CO ₂)	P _{CC} (元/t CO ₂)	P(元/t CO ₂)	P _H (元/t CO ₂)	P _{CC} (元/t CO ₂)	P(元/t CO ₂)	P _H (元/t CO ₂)	P _{CC} (元/t CO ₂)	P(元/t CO ₂)	
20年																						
0.1	642.79	160.79	803.58	611.78	158.13	769.91	527.83	150.73	678.56	434.26	142.09	576.35	357.96	134.64	492.59	295.60	128.18	423.79	244.56	122.57	367.13	
0.2	1,127.43	141.01	1,268.44	1,073.05	138.67	1,211.72	925.80	132.19	1,057.98	761.68	124.61	886.29	627.84	118.07	745.92	518.48	112.42	630.90	428.94	107.50	536.44	
0.3	1,505.90	125.56	1,631.46	1,433.25	123.48	1,556.74	1,236.58	117.71	1,354.28	1,017.37	110.96	1,128.33	838.60	105.14	943.75	692.53	100.10	792.63	572.94	95.72	668.66	
0.4	1,809.64	113.17	1,922.81	1,722.34	111.29	1,833.63	1,485.99	106.09	1,592.08	1,222.57	100.01	1,322.58	1,007.75	94.76	1,102.51	832.21	90.22	922.43	688.50	86.27	774.77	
0.5	2,058.79	103.00	2,161.79	1,959.47	101.29	2,060.77	1,690.58	96.55	1,787.14	1,390.90	91.02	1,481.92	1,146.50	86.25	1,232.74	946.79	82.11	1,028.90	783.29	78.52	861.81	
0.6	2,266.86	94.51	2,361.37	2,157.51	92.94	2,250.45	1,861.44	88.59	1,950.03	1,531.47	83.52	1,614.98	1,262.37	79.14	1,341.50	1,042.48	75.34	1,117.82	862.45	72.05	934.50	
0.7	2,443.24	87.31	2,530.54	2,325.37	85.86	2,411.23	2,006.27	81.85	2,088.12	1,650.62	77.15	1,727.78	1,360.59	73.11	1,433.69	1,123.59	69.60	1,193.19	929.56	66.56	996.11	
0.8	2,594.64	81.13	2,675.77	2,469.47	79.79	2,549.26	2,130.60	76.05	2,206.65	1,752.91	71.69	1,824.61	1,444.90	67.93	1,512.84	1,193.22	64.68	1,257.89	987.16	61.85	1,049.01	
0.9	2,726.03	75.77	2,801.80	2,594.53	74.51	2,669.04	2,238.49	71.03	2,309.52	1,841.68	66.95	1,908.64	1,518.07	63.44	1,581.51	1,253.64	60.40	1,314.04	1,037.15	57.76	1,094.91	
1	2,841.13	71.07	2,912.20	2,704.07	69.89	2,773.97	2,333.01	66.62	2,399.63	1,919.44	62.80	1,982.24	1,582.17	59.51	1,641.68	1,306.57	56.66	1,363.23	1,080.94	54.18	1,135.12	
25年																						
0.1	622.84	157.06	779.89	585.51	153.71	739.22	486.86	144.55	631.41	381.49	134.12	515.60	299.62	125.37	424.99	235.87	117.99	353.87	186.11	111.74	297.85	
0.2	1,092.44	137.74	1,230.17	1,026.96	134.80	1,161.76	853.94	126.77	980.70	669.11	117.62	786.73	525.53	109.95	635.48	413.71	103.48	517.19	326.43	97.99	424.42	
0.3	1,459.15	122.65	1,581.80	1,371.70	120.03	1,491.74	1,140.59	112.88	1,253.47	893.73	104.73	998.46	701.94	97.90	799.85	552.59	92.14	644.73	436.00	87.26	523.26	
0.4	1,753.46	110.54	1,864.00	1,648.37	108.18	1,756.56	1,370.65	101.74	1,472.39	1,073.99	94.39	1,168.39	843.52	88.24	931.76	664.05	83.05	747.09	523.94	78.64	602.59	
0.5	1,994.88	100.61	2,095.49	1,875.32	98.46	1,973.79	1,559.36	92.59	1,651.96	1,221.86	85.91	1,307.77	959.66	80.31	1,039.97	755.47	75.58	831.06	596.08	71.58	667.66	
0.6	2,196.49	92.31	2,288.81	2,064.85	90.35	2,155.19	1,716.96	84.96	1,801.92	1,345.34	78.83	1,424.17	1,056.65	73.69	1,130.34	831.82	69.35	901.18	656.32	65.68	722.00	
0.7	2,367.39	85.28	2,452.67	2,225.51	83.46	2,308.97	1,850.55	78.49	1,929.04	1,450.02	72.83	1,522.84	1,138.86	68.08	1,206.94	896.54	64.07	960.62	707.39	60.67	768.06	
0.8	2,514.10	79.25	2,593.34	2,363.42	77.56	2,440.98	1,965.23	72.93	2,038.16	1,539.88	67.67	1,607.55	1,209.44	63.26	1,272.69	952.10	59.54	1,011.64	751.22	56.38	807.60	
0.9	2,641.41	74.01	2,715.42	2,483.10	72.43	2,555.53	2,064.74	68.11	2,132.86	1,617.86	63.20	1,681.05	1,270.68	59.08	1,329.76	1,000.32	55.60	1,055.92	789.27	52.65	841.92	

1	2,752.94	69.42	2,822.36	2,587.94	67.94	2,655.88	2,151.92	63.89	2,215.81	1,686.17	59.28	1,745.44	1,324.33	55.41	1,379.75	1,042.55	52.15	1,094.71	822.59	49.39	871.98
30年																					
0.1	601.31	160.20	761.51	558.32	156.03	714.35	447.44	144.77	592.21	333.90	132.28	466.18	249.88	122.08	371.97	187.52	113.70	301.23	141.11	106.75	247.87
0.2	1,054.67	140.50	1,195.17	979.28	136.84	1,116.12	784.79	126.96	911.75	585.66	116.01	701.66	438.29	107.07	545.35	328.91	99.71	428.63	247.50	93.62	341.13
0.3	1,408.71	125.11	1,533.82	1,308.02	121.85	1,429.86	1,048.24	113.06	1,161.29	782.25	103.30	885.55	585.42	95.34	680.75	439.32	88.79	528.12	330.59	83.37	413.96
0.4	1,692.85	112.76	1,805.61	1,571.84	109.82	1,681.66	1,259.66	101.89	1,361.56	940.03	93.10	1,033.13	703.49	85.93	789.42	527.94	80.03	607.96	397.27	75.14	472.40
0.5	1,925.92	102.62	2,028.55	1,788.25	99.95	1,888.20	1,433.10	92.74	1,525.83	1,069.46	84.74	1,154.19	800.35	78.21	878.56	600.62	72.83	673.46	451.96	68.38	520.35
0.6	2,120.56	94.16	2,214.73	1,968.98	91.71	2,060.69	1,577.93	85.09	1,663.02	1,177.54	77.75	1,255.29	881.24	71.76	952.99	661.32	66.83	728.15	497.64	62.75	560.39
0.7	2,285.56	86.99	2,372.55	2,122.18	84.72	2,206.90	1,700.70	78.61	1,779.31	1,269.16	71.83	1,340.99	949.80	66.29	1,016.09	712.78	61.74	774.52	536.36	57.97	594.33
0.8	2,427.19	80.83	2,508.02	2,253.69	78.73	2,332.42	1,806.09	73.05	1,879.14	1,347.81	66.74	1,414.55	1,008.66	61.60	1,070.26	756.95	57.37	814.32	569.60	53.86	623.46
0.9	2,550.10	75.49	2,625.59	2,367.82	73.52	2,441.34	1,897.55	68.22	1,965.77	1,416.06	62.33	1,478.39	1,059.74	57.53	1,117.27	795.28	53.58	848.86	598.44	50.30	648.75
1	2,657.77	70.81	2,728.58	2,467.79	68.96	2,536.76	1,977.67	63.99	2,041.66	1,475.85	58.47	1,534.32	1,104.48	53.96	1,158.44	828.86	50.26	879.11	623.71	47.19	670.90

資料來源:本研究整理

*註：RHL，reduced harvest level，對於收穫基準量之減少收穫比例。

表11：相思樹碳權價格之折現率敏感度分析

RHL*	折現率																				
	1.00%		1.25%		2.00%		3.00%		4.00%		5.00%		6.00%								
	P _H (元/t CO ₂)	P _{CC} (元/t CO ₂)	P(元/t CO ₂)	P _H (元/t CO ₂)	P _{CC} (元/t CO ₂)	P(元/t CO ₂)	P _H (元/t CO ₂)	P _{CC} (元/t CO ₂)	P(元/t CO ₂)	P _H (元/t CO ₂)	P _{CC} (元/t CO ₂)	P(元/t CO ₂)	P _H (元/t CO ₂)	P _{CC} (元/t CO ₂)	P(元/t CO ₂)	P _H (元/t CO ₂)	P _{CC} (元/t CO ₂)	P(元/t CO ₂)	P _H (元/t CO ₂)	P _{CC} (元/t CO ₂)	P(元/t CO ₂)
20年																					
0.1	269.96	136.93	406.89	256.94	134.66	391.60	221.68	128.36	350.04	182.38	121.00	303.39	150.34	114.66	264.99	124.15	109.16	233.31	102.71	104.38	207.09
0.2	473.51	120.08	593.59	450.67	118.09	568.76	388.82	112.57	501.39	319.90	106.12	426.01	263.69	100.55	364.24	217.76	95.73	313.49	180.15	91.54	271.69
0.3	632.46	106.93	739.39	601.95	105.16	707.11	519.35	100.24	619.58	427.28	94.49	521.78	352.20	89.54	441.74	290.85	85.25	376.10	240.63	81.51	322.14
0.4	760.03	96.37	856.40	723.36	94.78	818.14	624.10	90.34	714.44	513.47	85.16	598.63	423.24	80.70	503.94	349.52	76.83	426.35	289.16	73.47	362.63
0.5	864.67	87.71	952.38	822.95	86.26	909.21	710.02	82.22	792.25	584.16	77.51	661.67	481.51	73.45	554.96	397.64	69.93	467.57	328.97	66.87	395.84
0.6	952.05	80.48	1,032.53	906.13	79.15	985.27	781.78	75.45	857.23	643.20	71.12	714.32	530.18	67.39	597.57	437.83	64.16	501.99	362.22	61.35	423.57
0.7	1,026.13	74.35	1,100.48	976.63	73.12	1,049.75	842.61	69.70	912.31	693.24	65.70	758.95	571.43	62.26	633.69	471.89	59.27	531.17	390.40	56.68	447.08
0.8	1,089.72	69.09	1,158.81	1,037.15	67.94	1,105.09	894.82	64.77	959.59	736.20	61.05	797.26	606.84	57.85	664.69	501.14	55.08	556.21	414.60	52.67	467.26
0.9	1,144.90	64.52	1,209.42	1,089.67	63.45	1,153.12	940.14	60.49	1,000.62	773.48	57.02	830.50	637.57	54.03	691.60	526.51	51.44	577.95	435.59	49.19	484.78
1	1,193.24	60.52	1,253.76	1,135.68	59.52	1,195.20	979.83	56.74	1,036.57	806.14	53.48	859.62	664.49	50.68	715.17	548.74	48.25	596.99	453.98	46.14	500.12
25年																					
0.1	266.16	115.11	381.27	250.21	112.65	362.86	208.05	105.94	313.99	163.02	98.30	261.32	128.04	91.88	219.92	100.80	86.48	187.27	79.53	81.89	161.42

0.2	466.83	100.95	567.78	438.85	98.80	537.65	364.91	92.91	457.82	285.93	86.20	372.14	224.57	80.58	305.16	176.79	75.84	252.63	139.49	71.82	211.31
0.3	623.54	89.89	713.43	586.17	87.97	674.15	487.41	82.73	570.14	381.92	76.76	458.68	299.96	71.75	371.72	236.14	67.53	303.67	186.32	63.95	250.27
0.4	749.31	81.02	830.33	704.40	79.29	783.69	585.72	74.56	660.28	458.95	69.18	528.13	360.46	64.67	425.13	283.77	60.87	344.63	223.90	57.64	281.54
0.5	852.48	73.74	926.21	801.38	72.16	873.55	666.36	67.86	734.23	522.14	62.97	585.10	410.09	58.86	468.95	322.84	55.40	378.23	254.72	52.46	307.18
0.6	938.63	67.66	1,006.29	882.37	66.21	948.59	733.71	62.27	795.98	574.91	57.77	632.68	451.54	54.01	505.55	355.46	50.83	406.29	280.47	48.13	328.60
0.7	1,011.66	62.50	1,074.16	951.03	61.17	1,012.20	790.80	57.52	848.32	619.64	53.37	673.01	486.67	49.89	536.56	383.12	46.96	430.08	302.29	44.47	346.76
0.8	1,074.35	58.08	1,132.43	1,009.96	56.84	1,066.80	839.80	53.45	893.26	658.04	49.60	707.63	516.83	46.36	563.19	406.86	43.63	450.50	321.02	41.32	362.34
0.9	1,128.76	54.24	1,183.00	1,061.11	53.08	1,114.19	882.33	49.92	932.25	691.36	46.32	737.68	543.00	43.30	586.30	427.47	40.75	468.22	337.28	38.59	375.87
1	1,176.42	50.88	1,227.29	1,105.91	49.79	1,155.70	919.58	46.83	966.41	720.55	43.45	764.00	565.93	40.61	606.54	445.52	38.22	483.74	351.52	36.20	387.72
30年																					
0.1	262.46	100.62	363.08	243.70	98.00	341.69	195.30	90.93	286.23	145.74	83.08	228.82	109.07	76.68	185.75	81.85	71.41	153.26	61.59	67.05	128.64
0.2	460.34	88.24	548.58	427.43	85.94	513.38	342.54	79.74	422.29	255.62	72.86	328.49	191.30	67.25	258.55	143.56	62.63	206.19	108.03	58.80	166.83
0.3	614.87	78.58	693.45	570.92	76.53	647.45	457.53	71.01	528.54	341.44	64.88	406.32	255.52	59.88	315.40	191.75	55.77	247.52	144.29	52.36	196.66
0.4	738.89	70.82	809.71	686.07	68.97	755.05	549.81	64.00	613.81	410.30	58.48	468.78	307.06	53.97	361.03	230.43	50.26	280.69	173.40	47.19	220.59
0.5	840.62	64.46	905.08	780.53	62.78	843.31	625.51	58.25	683.76	466.79	53.22	520.01	349.33	49.12	398.45	262.16	45.75	307.90	197.27	42.95	240.22
0.6	925.58	59.14	984.72	859.41	57.60	917.02	688.73	53.45	742.17	513.97	48.83	562.80	384.64	45.07	429.71	288.65	41.97	330.63	217.21	39.41	256.62
0.7	997.59	54.64	1,052.23	926.28	53.21	979.50	742.32	49.37	791.69	553.96	45.11	599.07	414.57	41.64	456.20	311.11	38.78	349.89	234.11	36.41	270.52
0.8	1,059.41	50.77	1,110.18	983.68	49.45	1,033.13	788.32	45.88	834.20	588.29	41.92	630.21	440.26	38.69	478.95	330.39	36.03	366.42	248.62	33.83	282.45
0.9	1,113.06	47.41	1,160.48	1,033.50	46.18	1,079.68	828.24	42.85	871.09	618.08	39.15	657.23	462.55	36.13	498.68	347.12	33.65	380.77	261.21	31.60	292.80
1	1,160.06	44.47	1,204.53	1,077.13	43.32	1,120.45	863.21	40.19	903.40	644.17	36.72	680.90	482.08	33.89	515.97	361.78	31.56	393.34	272.24	29.64	301.87

資料來源:本研究整理

*註：RHL，reduced harvest level，對於收穫基準量之減少收穫比例。

表12：大葉桃花心木碳權價格之折現率敏感度分析

RHL*	折現率																				
	1.00%		1.25%		2.00%		3.00%		4.00%		5.00%		6.00%								
	P _H (元/t CO ₂)	P _{CC} (元/t CO ₂)	P(元/t CO ₂)	P _H (元/t CO ₂)	P _{CC} (元/t CO ₂)	P(元/t CO ₂)	P _H (元/t CO ₂)	P _{CC} (元/t CO ₂)	P(元/t CO ₂)	P _H (元/t CO ₂)	P _{CC} (元/t CO ₂)	P(元/t CO ₂)	P _H (元/t CO ₂)	P _{CC} (元/t CO ₂)	P(元/t CO ₂)	P _H (元/t CO ₂)	P _{CC} (元/t CO ₂)	P(元/t CO ₂)	P _H (元/t CO ₂)	P _{CC} (元/t CO ₂)	P(元/t CO ₂)
20年																					
0.1	524.54	155.39	679.93	499.24	152.82	652.06	430.73	145.67	576.40	354.38	137.32	491.70	292.11	130.12	422.22	241.23	123.88	365.11	199.57	118.46	318.03
0.2	920.03	136.27	1,056.31	875.65	134.02	1,009.67	755.49	127.75	883.24	621.57	120.43	741.99	512.35	114.11	626.46	423.10	108.64	531.74	350.04	103.89	453.92
0.3	1,228.88	121.35	1,350.23	1,169.60	119.34	1,288.93	1,009.10	113.76	1,122.85	830.22	107.23	937.45	684.34	101.61	785.95	565.13	96.74	661.87	467.54	92.51	560.05
0.4	1,476.74	109.37	1,586.11	1,405.50	107.56	1,513.06	1,212.63	102.52	1,315.16	997.67	96.65	1,094.32	822.37	91.58	913.95	679.12	87.19	766.31	561.84	83.37	645.22

0.5	1,680.06	99.54	1,779.60	1,599.01	97.89	1,696.91	1,379.59	93.31	1,472.90	1,135.03	87.96	1,223.00	935.59	83.35	1,018.94	772.62	79.35	851.98	639.20	75.88	715.08
0.6	1,849.86	91.33	1,941.19	1,760.62	89.82	1,850.44	1,519.01	85.62	1,604.63	1,249.74	80.71	1,330.45	1,030.15	76.48	1,106.62	850.71	72.81	923.52	703.80	69.63	773.42
0.7	1,993.78	84.38	2,078.16	1,897.60	82.98	1,980.58	1,637.20	79.10	1,716.30	1,346.98	74.56	1,421.54	1,110.30	70.65	1,180.95	916.90	67.27	984.16	758.56	64.32	822.88
0.8	2,117.34	78.40	2,195.74	2,015.20	77.11	2,092.30	1,738.66	73.50	1,812.16	1,430.45	69.29	1,499.74	1,179.10	65.65	1,244.75	973.72	62.51	1,036.22	805.57	59.77	865.34
0.9	2,224.56	73.22	2,297.78	2,117.24	72.01	2,189.25	1,826.70	68.64	1,895.35	1,502.89	64.71	1,567.60	1,238.81	61.31	1,300.12	1,023.02	58.37	1,081.40	846.36	55.82	902.18
1	2,318.49	68.68	2,387.17	2,206.64	67.54	2,274.18	1,903.83	64.39	1,968.22	1,566.35	60.69	1,627.04	1,291.12	57.51	1,348.63	1,066.22	54.75	1,120.97	882.09	52.36	934.45
25年																					
0.1	520.93	115.59	636.52	489.71	113.13	602.84	407.20	106.38	513.59	319.07	98.71	417.78	250.60	92.27	342.87	197.28	86.84	284.12	155.66	82.24	237.89
0.2	913.70	101.37	1,015.07	858.94	99.21	958.15	714.22	93.30	807.52	559.64	86.56	646.20	439.55	80.92	520.46	346.02	76.16	422.18	273.02	72.12	345.14
0.3	1,220.42	90.27	1,310.69	1,147.28	88.34	1,235.62	953.98	83.08	1,037.06	747.50	77.08	824.58	587.10	72.05	659.15	462.18	67.82	530.00	364.67	64.22	428.89
0.4	1,466.58	81.35	1,547.93	1,378.68	79.62	1,458.30	1,146.40	74.87	1,221.27	898.27	69.47	967.74	705.51	64.94	770.45	555.40	61.12	616.52	438.22	57.88	496.10
0.5	1,668.50	74.04	1,742.54	1,568.50	72.47	1,640.96	1,304.23	68.15	1,372.38	1,021.95	63.23	1,085.18	802.65	59.11	861.76	631.87	55.63	687.50	498.55	52.68	551.23
0.6	1,837.12	67.94	1,905.06	1,727.02	66.49	1,793.51	1,436.04	62.53	1,498.57	1,125.23	58.02	1,183.25	883.77	54.23	938.00	695.73	51.04	746.77	548.94	48.34	597.28
0.7	1,980.06	62.77	2,042.82	1,861.39	61.43	1,922.81	1,547.78	57.77	1,605.54	1,212.78	53.60	1,266.38	952.53	50.10	1,002.63	749.86	47.15	797.01	591.65	44.65	636.31
0.8	2,102.76	58.32	2,161.08	1,976.74	57.08	2,033.82	1,643.69	53.68	1,697.37	1,287.93	49.80	1,337.74	1,011.56	46.56	1,058.11	796.33	43.82	840.14	628.32	41.49	669.81
0.9	2,209.25	54.47	2,263.71	2,076.84	53.31	2,130.14	1,726.93	50.13	1,777.06	1,353.16	46.51	1,399.67	1,062.78	43.48	1,106.26	836.65	40.92	877.57	660.13	38.75	698.88
1	2,302.52	51.09	2,353.62	2,164.53	50.00	2,214.53	1,799.84	47.02	1,846.86	1,410.29	43.63	1,453.92	1,107.66	40.78	1,148.44	871.98	38.38	910.36	688.01	36.35	724.35
30年																					
0.1	518.12	89.47	607.59	481.08	87.14	568.22	385.54	80.85	466.39	287.71	73.88	361.58	215.31	68.18	283.50	161.58	63.50	225.08	121.59	59.62	181.21
0.2	908.77	78.46	987.23	843.80	76.42	920.22	676.22	70.91	747.13	504.63	64.79	569.42	377.65	59.79	437.45	283.41	55.69	339.10	213.26	52.29	265.55
0.3	1,213.83	69.87	1,283.70	1,127.06	68.05	1,195.11	903.22	63.14	966.36	674.03	57.69	731.72	504.43	53.24	557.67	378.55	49.59	428.13	284.85	46.56	331.41
0.4	1,458.65	62.97	1,521.63	1,354.39	61.33	1,415.72	1,085.40	56.91	1,142.30	809.98	52.00	861.98	606.17	47.99	654.16	454.90	44.69	499.59	342.31	41.96	384.27
0.5	1,659.48	57.31	1,716.80	1,540.86	55.82	1,596.68	1,234.84	51.79	1,286.63	921.50	47.32	968.83	689.63	43.68	733.30	517.53	40.68	558.21	389.44	38.19	427.63
0.6	1,827.20	52.59	1,879.79	1,696.59	51.22	1,747.80	1,359.63	47.52	1,407.16	1,014.64	43.42	1,058.06	759.32	40.07	799.40	569.83	37.32	607.16	428.80	35.04	463.84
0.7	1,969.36	48.58	2,017.95	1,828.59	47.32	1,875.91	1,465.42	43.90	1,509.32	1,093.58	40.11	1,133.69	818.40	37.02	855.42	614.17	34.48	648.65	462.16	32.37	494.53
0.8	2,091.40	45.14	2,136.55	1,941.91	43.97	1,985.87	1,556.23	40.80	1,597.03	1,161.35	37.28	1,198.62	869.12	34.40	903.52	652.23	32.04	684.27	490.80	30.08	520.88
0.9	2,197.31	42.16	2,239.47	2,040.24	41.06	2,081.31	1,635.04	38.10	1,673.14	1,220.16	34.81	1,254.97	913.13	32.13	945.26	685.26	29.92	715.18	515.65	28.09	543.75
1	2,290.09	39.55	2,329.63	2,126.39	38.52	2,164.90	1,704.07	35.74	1,739.81	1,271.68	32.65	1,304.33	951.68	30.14	981.82	714.19	28.07	742.26	537.42	26.35	563.78

資料來源:本研究整理

*註：RHL · reduced harvest level · 對於收穫基準量之減少收穫比例。

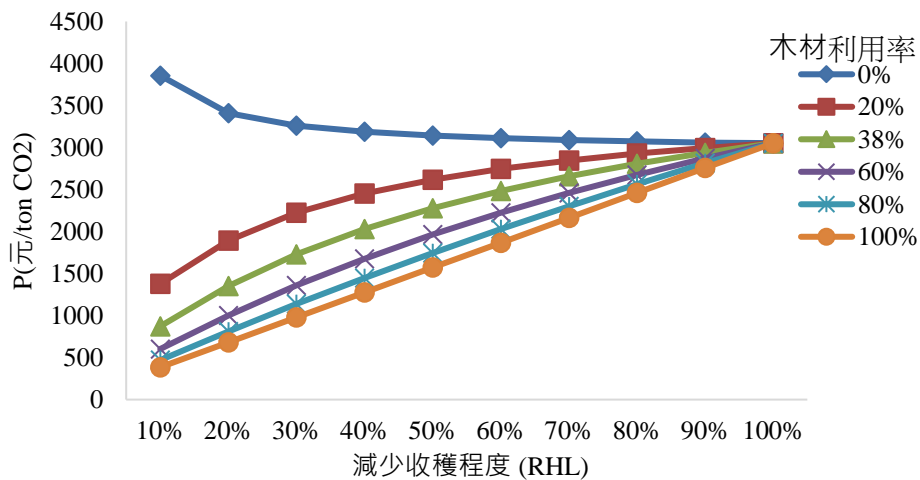


圖1：(20年計入期) 杉木木材利用率敏感度分析之損益兩平碳權價格

八、查驗頻率分析

碳計畫初期需進行驗證，而後需有定期查驗，經查驗認證後的碳權才可以出售。大部分碳計畫要求至少每5年進行一次查驗，而本研究之基準情境為每5年進行一次查驗，即碳權每累積5年經認證後可出售。但若為補償收穫減少所產生的機會成本，則可採行1年一次的查證頻率，並且每年出售碳權。但若採行每1年進行查驗，碳權認證成本會有所增加，使得 P_{CC} 提高，使整體損益兩平碳權價格(P)提高；本研究將定期查驗由5年調整至1年，並將其損益兩平碳權價格增幅整理至表13。

在20年計畫，減少收穫程度為10%的條件下，當定期查驗由5年調整至1年，杉木的損益兩平碳權價格增加317.07元，是四種樹種中增加金額最多者，增幅比例為36%；而相思樹的損益兩平碳權價格增加209.82元，是四種樹種中增加金額最少者，但增幅比例為54%，為四種樹種中增幅比例最大者。導致這種結果的主要因為，相同認證成本下，碳權數的多寡會影響 P_{CC} ，產生碳權數越少者， P_{CC} 越大，而產生碳權數越多者， P_{CC} 越小，所以碳權數最多的相思樹， P 增加的金額才會最少。而增幅比例則是需要看 P_{CC} 在 P 中佔比多寡，因相思樹收穫淨利相對較低， P_H 與 P_{CC} 金額相差不會太大，相思樹 P_{CC} 在 P 中佔比高，因此當認證成本增加 P_{CC} 變動時，相對杉木、臺灣杉、大葉桃花心木 P 增幅比例較多。本研究此種 P_{CC} 在 P 中佔比高，使得碳權價格增幅比例多的結果，與Man *et al.* (2015) 研究顯示相同。如欲採取每1年查驗頻率，因選取 P_{CC} 在 P 中佔比較小之樹種，因增加的查驗成本 (P_{CC} 增加) 對總損益兩平碳權價格 (P) 僅極少幅度變動。但本研究杉木、臺灣杉、相思樹、大葉桃花心木的 P_{CC} 在損益兩平碳權

價格中佔比算大，如改成每年查驗，四種樹種的碳權收益皆會較每5年查驗來的少。可藉由降低查驗成本使得 P_{CC} 在 P 中佔比降低，來達到改以每1年進行查驗時，能提高獲利的目的。

表13：每1年查驗相較每5年查驗之損益兩平碳權價格差異

(計入期 20、25、30年)

RHL*	杉木		臺灣杉		相思樹		大葉桃花心木	
	+P (元/ton CO ₂)	+%	+P (元/ton CO ₂)	+%	+P (元/ton CO ₂)	+%	+P (元/ton CO ₂)	+%
20年								
0.1	317.07	36%	237.15	31%	209.82	54%	233.40	36%
0.2	269.70	20%	195.27	16%	179.26	32%	195.30	19%
0.3	232.70	13%	162.56	10%	155.39	22%	165.54	13%
0.4	203.02	10%	136.31	7%	136.24	17%	141.66	9%
0.5	178.66	8%	114.78	6%	120.52	13%	122.07	7%
0.6	158.32	6%	96.79	4%	107.40	11%	105.71	6%
0.7	141.08	5%	81.55	3%	96.28	9%	91.84	5%
0.8	126.28	4%	68.46	3%	86.73	8%	79.94	4%
0.9	113.44	4%	57.11	2%	78.45	7%	69.61	3%
1	102.19	3%	47.16	2%	71.19	6%	60.56	3%
25年								
0.1	301.37	36%	269.46	36%	203.09	56%	198.58	33%
0.2	254.75	20%	223.95	19%	173.31	32%	164.69	17%
0.3	218.34	13%	188.41	13%	150.06	22%	138.22	11%
0.4	189.12	10%	159.88	9%	131.39	17%	116.98	8%
0.5	165.16	7%	136.48	7%	116.09	13%	99.55	6%
0.6	145.14	6%	116.94	5%	103.30	11%	85.00	5%
0.7	128.17	5%	100.38	4%	92.46	9%	72.67	4%
0.8	113.61	4%	86.16	4%	83.16	8%	62.08	3%
0.9	100.97	4%	73.82	3%	75.09	7%	52.89	2%
1	89.90	3%	63.01	2%	68.02	6%	44.84	2%
30年								
0.1	269.59	34%	304.57	43%	194.95	57%	167.37	29%
0.2	226.05	18%	255.22	23%	166.19	32%	137.33	15%
0.3	192.04	12%	216.68	15%	143.73	22%	113.86	10%
0.4	164.76	9%	185.75	11%	125.71	17%	95.03	7%
0.5	142.37	7%	160.38	8%	110.93	13%	79.58	5%
0.6	123.68	5%	139.20	7%	98.58	11%	66.68	4%
0.7	107.83	4%	121.24	5%	88.12	9%	55.74	3%
0.8	94.23	3%	105.82	5%	79.13	8%	46.35	2%
0.9	82.42	3%	92.44	4%	71.34	7%	38.21	2%
1	72.08	2%	80.72	3%	64.51	6%	31.07	1%

資料來源:本研究整理

*註：RHL· reduced harvest level· 對於基準收穫量之減少收穫比例。

肆、結論與建議

為因應全球日益嚴重的氣候變遷，我國響應國際趨勢，於2015年公布施行溫室氣體減量及管理法，以期未來能透過調節溫室氣體排放量，減緩氣候變遷的影響。目前我國尚未建立碳權交易制度，政府機關亦未公告國內的碳權交易價格。若未來林業經營者欲參與碳權交易制度，則需有新的經營策略，有關機構亦應提出相關的碳權認證方法。本研究參考我國過去相關文獻，估算林分的碳吸存能力，並參考Man *et al.* (2015)，以減少收穫的森林經營策略，在考慮減少收穫所損失木材淨利的機會成本下，估算出森林碳計畫損益兩平之碳權價格。

本研究分析四種獎勵造林樹種，分別為兩種針葉樹 - 杉木、臺灣杉，與另外兩種闊葉樹 - 相思樹、大葉桃花心木。此四種樹種木材用途及價值不同，並具有不同之材價。因生長特性的差異，各樹種生長材積有所差別，結果顯示四種樹種中材積生長最慢者為相思樹，於三種計劃期中分別為20年176.43 m³/ha、25年244.28 m³/ha、30年319.87 m³/ha。在碳吸存方面，各樹種固定大氣中的二氧化碳能力不同，產生的碳權數會因碳吸存能力具有差異，其中，前期以相思樹碳吸存能力最佳，相思樹20年碳儲存為94.52 ton C/ha，而闊葉樹種（相思樹、大葉桃花心木）碳吸存能力又優於針葉樹種（杉木、臺灣杉），與前人研究結果相似。

從基礎情境實證分析結果可發現，在四種樹種之中，針葉樹(杉木、臺灣杉)的損益兩平碳權價格較高，而最低者為相思樹。整體而言，四種樹種在20年計入期，減少收穫比例為10%~100%時，損益兩平碳權價格為391.60元-2,704.07元/ton CO₂。其中，當減少收穫比例由10%增加至100%時，杉木損益兩平碳權價格將由872.4元/ton CO₂增加至3,052.40元/ton CO₂，臺灣杉損益兩平碳權價格將由769.9元/ton CO₂增加至2,773.97元/ton CO₂，相思樹損益兩平碳權價格將由391.60元/ton CO₂增加至1,195.20元/ton CO₂，而大葉桃花心木損益兩平碳權價格將由652.06元/ton CO₂增加至2,274.18元/ton CO₂。就單一樹種結果顯示，由於碳權增加速率大於收穫之機會成本與認證成本之增加速率，因此各樹種之損益兩平碳權價格，隨著計入期程拉長，大多呈現下降趨勢。本研究亦顯示，在考慮到機會成本（收穫利潤）時，收穫淨利較高樹種，損益兩平碳權價格也較高，此與Man *et al.* (2015) 研究之結果相似。

在碳權價格之折現率敏感度分析中，就單一樹種同計入期內，相同減少收穫比例下，折現率越大，收穫淨利（機會成本）及認證費用折現後會變得越小，並使得各樹種損益兩平碳權價格呈下降之趨勢；而價格越高之樹種，其損益兩平碳權價格受折現率影響變動亦越大。此外，由折現率敏感度分析之結果可得知，在相同減少收穫比例之下，若市場上之碳價格不隨折現率改變而為一固定值，則當折現率越高時，損益兩平碳權價格將會越低，而森林經營計畫亦會傾向減少收穫，以賺取更大的利潤。而碳權價格之木材利用率敏感度分析結果顯

示，就單一樹種，在相同減少收穫比例與碳權價格之下，當木材利用率逐漸上升時，產生之碳權數將越多，而此將使各樹種損益兩平碳權價格下降。因此，當各種樹種使用於家具、板材等木材利用率提高，將能增加碳權收益。

碳計畫初期需進行驗證，而後需有定期查驗，經查驗認證後的碳權才可以出售。大部分碳計畫要求至少每5年進行一次查驗，而為了降低收穫減少所產生的風險，並增加碳權收益，查證頻率可採1年一次，以每年出售碳權。然而，從本研究查驗頻率結果分析中可看出，由於小規模之查驗成本占總成本的比例較大，若改以每年進行查驗，碳權認證費用之增加，將使得單位碳權認證價格提高，整體損益兩平碳權價格將隨之增加，林業經營者的淨收入折現值亦將會隨之下降，因此不宜採行1年查驗一次。

最後，若損益兩平碳權價格若高於碳權市價，將導致有碳交易收益會比無碳交易收益來的低，而森林經營者會傾向維持原來以收穫為主的經營策略，而不採取減少收穫之森林碳計畫。故現行杉木、臺灣杉、大葉桃花心木，較需等待「碳權市場價格上漲」或「木材價格下降」，才有利於實施減少收穫之森林碳計畫。而森林收穫利潤相對較低的樹種下（如相思樹），森林經營者則可考慮立即實施森林碳計畫，以賺取碳權收益。

致謝及說明

The authors appreciate two anonymous referees and editors for their valuable comments and the Council of Agriculture, Environmental Protection Administration, and Ministry of Science and Technology, Executive Yuan for the research funding support. If there are any mistakes in the article, the authors will be respondent for those。

參考文獻

一、中文文獻：

1. 王松永、張豐丞、李怡真、楊賜霖、林法 (2005)，「柳杉疏伐木有效利用之探討」，*《臺灣大學生物資源暨農學院實驗林研究報告》*，19(4)，293-300。
2. 王松永 (2005)，「森林與木材對二氧化碳涵存之貢獻」，*《臺灣林業》*，31(3)，20-

28。

3. 行政院農業委員會林務局 (1998) , 《全民造林運動手冊》 , 31 , 臺北 : 臺灣省林務局編印。
4. 行政院農業委員會林務局 (2001) , 《臺灣地區林業統計》 , 18-51 。
5. 行政院農業委員會林務局 (2015) , 《第四次森林資源調查報告》 , 1-78 , 臺北 : 行政院農業委員會林務局。
6. 行政院農業委員會林務局 (2016) , 《林業統計》 , 臺北 : 行政院農業委員會林務局編印。 <http://www.forest.gov.tw/statistics>
7. 行政院農業委員會林務局 (2017) , 「木材市價查詢系統」 。 <http://woodprice.forest.gov.tw/>
8. 行政院農業委員會農業金融局 (2016) , 「造林貸款要點」 , 農業發展基金貸款。 <http://www.boaf.gov.tw/boafwww/index.jsp?a=ct&xItem=538679&ctNode=240>
9. 行政院環境保護署 (2016a) , 「溫室氣體減量及管理法」 。 <https://www.epa.gov.tw/cpDownloadCtl.asp?id=43270>
10. 行政院環境保護署 (2016b) , 「土地利用、土地利用變化及林業部門」 , 《2016年中華民國國家溫室氣體排放清冊報告》 , 6.1-6.15 。
11. 吳俊賢、林俊成、李國忠、陳溢宏、林麗貞、林瑞進 (2005) , 「森林能源作物之二氧化碳吸存效果與能源產出效率」 , 《台大實驗林研究報告》 , 19(1) : 43-53 。
12. 呂錦明 (1985) , 「杉木之萌芽更新」 , 《現代育林》 , 1(1) : 33-46 。
13. 李久先、顏添明 (2001) , 「全民造林運動造林樹種之經濟價值探討」 , 《林業研究季刊》 , 23(2) : 35-46 。
14. 李恒綺、吳珮瑛、沈芝貝、劉哲良 , 2009 。 「造林獎勵與碳吸存補貼對台灣造林與社會福利之影響」 , 《農業經濟叢刊》 , 14(2) : 65-109 。
15. 李國忠、林俊成、陳麗琴 (2000) , 「臺灣杉人工林碳吸存潛力及其成本效益分析」 , 《臺灣林業科學》 , 15(1) : 115-123 。
16. 李培芬、陳宛均、徐秀君、黃佩俐、莊聖儀、余忠翰、許裕裕、連裕益、李依紋、蕭人瑄、賴均、陳韻如、劉益忠 (2006) , 「森林生產與效益」 , 《臺灣的自然資源與生態資料庫—III 農林漁牧》 , 107-117 , 臺北 : 行政院農業委員會林務局。
17. 林俊成、鄭美如、劉淑芬、李國忠 (2002) , 「全民造林運動二氧化碳吸存潛力之經濟效益評估」 , 《臺灣林業科學》 , 17(3) : 311-321 。

18. 林國銓、杜清澤、黃菊美 (2007)。「苗栗地區相思樹和木油桐人工林碳和氮累積量及生產量之估算」，《中華林學季刊》，40(2)：201-218。
19. 林國銓、杜清澤、黃菊美 (2009)。「台東地區相思樹與楓香兩人工林碳累積量」，《林業研究季刊》，31(3)：55-68。
20. 林國慶、柳婉郁 (2007)。「考慮碳吸存價格下最適輪伐期與土地期望價分析」，《農業經濟叢刊》，13(2)：1-35。
21. 林照松、洪富文 (1991)。「六龜地區台灣杉人工林之生長」，《林試所研究報告》，6(3)：229-248。
22. 林裕仁、劉瓊霏、林俊成 (2002)。「臺灣地區主要用材比重與碳含量測定」，《臺灣林業科學》，17(3)：291-299。
23. 邱立文、黃群修、吳俊奇、謝小恬 (2015)。「第4次全國森林資源調查成果概要」，《臺灣林業》，41(4)：3-13。
24. 邱志明、王瀛生、吳孟玲、許原瑞、游漢明、莊鈴木、張乃航、簡慶德 (2013)。「短期經濟造林技術手冊」，《林業叢刊》，247：1-121。
25. 邱志明、鍾智昕、唐盛林、彭炳勳 (2016)。「平地造林混合林生長之探討」，《2016年平地造林試驗及監測研討會論文集》，1-8，臺北：行政院農業委員會林業試驗所。
26. 邱祈榮、鄭智馨、林俊成、詹為巽 (2012)。「廢耕檳榔園再造林之碳儲存變化推估—以種植桃花心木為例」，《中華林學季刊》，45(1)：97-108。
27. 洪良斌 (1974)。「臺灣杉人工林分生長之研究」，《林業試驗所研究報告》，第236號。
28. 柳婉郁、盧又銘、林國慶 (2009)。「同時考慮碳價格與木材價格不確定下最適輪伐期之決定」，《農業經濟叢刊》，15(1)：115-145。
29. 柳婉郁、林國慶 (2012)。「REDD緣起與運作機制之分析」，《臺灣林業期刊》，38(6)：15-19。
30. 柳婉郁、徐寬 (2017)。「森林碳給付政策之經濟分析」，《農業與經濟》，59：1-48。
31. 高榕翎 (2013)。「臺灣與大陸杉木人工林生長之研究比較」，碩士論文臺灣大學森林環境暨資源學研究所碩士論文。

32. 陳宜敏 (2005)。「大葉桃花心木與小葉桃花心木苗木生態生理之研究」，國立中興大學森林學研究所碩士論文。
33. 陳忠義、余瑞珠、王亞男 (2015)。「屏東萬隆農場大葉桃花心木之成長及CO₂吸存量」，《中華林學季刊》，48(4)：331-341。
34. 陳麗琴、黃進睦 (1992)。「Weibull機率密度函數於蓮華池杉木人工林原木經濟價值之研究」，《林業試驗所研究報告季刊》，7(3)：221-230。
35. 陶子婕、林俊成 (2014)。「平地造林溫室氣體抵換專案減量方法之研擬」，《農業與經濟》，52：113-138。
36. 馮豐隆 (2010)。「99年度林木生長模式應用於常見平地造林樹種之碳吸存量推估」，行政院農業委員會林務局委託研究計畫系列，1-83。
37. 馮豐隆、張愷玲、張鈞媛 (2010)。「大葉桃花心木的生物、生態與利用」，《生物科學》，52(2)：15-24。
38. 黃正忠 (2016)。「對我國政府因應聯合國氣候公約巴黎協議的政策建言」，《會計研究月刊》，364：27-31。
39. 劉宣誠、林銘輝、曲俊麒 (1981)。「臺灣大葉桃花心木造林木之生長及木材性質之研究」，《林業試驗所研究報告》，第351號。
40. 劉浚明、鍾旭和 (1993)。「臺灣杉非線性收穫模式之建立」，《中華林學季刊》，26(2)：39-49。
41. 劉慎孝、林子玉 (1968)。「臺灣中南部相思樹林分收穫表及材積表」，國立中興大學森林學系。
42. 劉業經、林文鎮、林維治 (1979)。「臺灣經濟樹木育林學(一)」，國立中興大學，1-110。
43. 劉興旺、黃聖焜、關秉宗、王亞男 (2013)。「臺灣中部地區人工林臺灣杉樹輪生長特性」，《台大實驗林研究報告》，27(4)：263-272。
44. 鄭富霖、劉哲良 (2016)。「COP21巴黎協定：全球減碳目標及其法律拘束力」，《經濟前瞻》，163：107-111。
45. 鄭欽龍、施友元 (2006)。「南投地區承租造林地林木伐採成本之分析」，《中華林學季刊》39(3)：315-327。

46. 羅天祥、趙士洞 (1997) · 「中國杉木生物生產力格局及其數學模型」 · 《植物生態學》 · 21(5) : 403-415 。

二、英文文獻：

1. Anderson, K. and Bows, A. (2011), “Beyond “dangerous” climate change: Emission scenarios for a new world,” *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 369(1934), 20-44.
2. Boyland, M. (2006), “The economics of using forests to increase carbon storage,” *Canadian Journal of Forest Research*, 36(9), 2223–2234.
3. British Columbia Ministry of Environment (2011), “The protocol for the creation of forest carbon offsets in British Columbia”. www.env.gov.bc.ca/cas/mitigation/fcop.html (accessed 07 February 2013).
4. Bull, G. Q. (2010), “Requirements for forest carbon credit financing in British Columbia: An analysis. B.C. Ministry of Forests and Range, Victoria, B.C.”
5. Cordeiro, Y. E. M., Pinheiro, H. A., Santos Filho, B. G., Corrêa, S. S., Silva, J. R. R. and Dias-Filho, M. B. (2009), “Physiological and morphological responses of young mahogany (*Swietenia macrophylla* King) plants to drought,” *Forest Ecology and Management*, 258, 1449-1455.
6. Galik, C. S. and Cooley, D. M. (2012), “What makes carbon work? A sensitivity analysis of factors affecting forest offset viability,” *Forest Science*, 58, 540–548.
7. Galik, C. S., Cooley, D. M. and Baker, J. S. (2012), “Analysis of the production and transaction costs of forest carbon offset projects in the USA,” *Journal of Environmental Management*, 112, 128–136.
8. Geiger, N., Swim, J. K. and Fraser, J. (2017), “Creating a climate for change: Interventions, efficacy and public discussion about climate change,” *Journal of Environmental Psychology*, 51, 104-116.
9. Golden, D. M., Smith, M. A., Colombo, S. J. (2011), “Forest carbon management and carbontrading: a review of Canadian forest options for climate change mitigation,” *The Forestry Chronicle*, 87, 625–635.
10. Greig, M. and Bull, G. (2011), “Carbon management in British Columbia's forests: an update on opportunities and challenges,” *BC Journal of Ecosystems and Management*, 12 (3), 35–53.
11. Grogan, J., Landis, R. M., Ashton, M. S. and Galvão, J. (2005), “Growth response by big-leaf mahogany (*Swietenia macrophylla*) advance seedling regeneration to overhead canopy release in southeast Pará, Brazil,” *Forest Ecology and Management*, 204, 399-412.
12. Harmon, M. E. and Marks, B. (2002), “Effects of silvicultural practices on Carbon stores in Douglas-fir–Western Hemlock forests in the Pacific Northwest, USA: results from a simulation model,” *Canadian Journal of Forest Research*, 32, 863–877.
13. Harmon, M. E., Moreno, A. and Domingo, J. B. (2009), “Effects of partial harvest on the carbon stores in Douglas-fir/Western Hemlock forests: a simulation study,” *Ecosystems*, 12, 777–791.
14. Huang, C. and Kronrad, G. (2001), “The cost of sequestering carbon on private forest lands,” *Forest Policy and Economics*, 2, 133-142.
15. IPCC (2006), “2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories,” IPCC/IGES.

- Hayama. Japan. URL: <http://www.ipccnggip.iges.or.jp/>
16. IPCC (2013), “Summary for Policymakers. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change,” [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
 17. Jacobson, M. Z. and Delucchi, M. A. (2011), “Providing all global energy with wind, water, and solar power, Part I: Technologies, energy resources, quantities and areas of infrastructure, and materials,” *Energy Policy*, 39(3), 1154-1169.
 18. Kirby, K. R. and Potvin, C. (2007), “Variation in carbon storage among tree species: implications for the management of a smallscale carbon sink project,” *Forest Ecology and Management*, 246,208-221.
 19. Man, C. D., Lyons, K. C., Nelson, J. D. and Bull, G. Q. (2013), “Potential of alternate forest management practices to sequester and store Carbon in two forest estates in British Columbia, Canada,” *Forest Ecology and Management*, 305, 239-247.
 20. Man, C. D., Lyons, K. C., Nelson, J. D. and Bull, G. Q. (2015), “Cost to produce Carbon credits by reducing the harvest level in British Columbia, Canada,” *Forest Policy and Economics*, 52, 9-17.
 21. McSweeney, R. and Pidcock, R. (2015), “Scientists discuss the 1.5C limit to global temperature rise.” URL: <https://www.carbonbrief.org/scientists-discuss-the-1-5c-limit-to-global-temperature-rise>
 22. Monkey, K., Raison, R. J. and Prokushkin, A. S. (2006), “Critical analysis of root: shoot ratios in terrestrial biomes,” *Global Change Biology*, 12, 84-96.
 23. Nadeau, C. P., Urban, M. C. and Bridle, J. R. (2017), “Climates past, present, and yet-to-come shape climate change vulnerabilities,” *Trends in Ecology and Evolution*, 32(10), 786-800.
 24. Newell, R. and Stavins, R. (2000), “Climate change and forest sinks: factors affecting the costs of carbon sequestration,” *Journal of Environmental Economics and Management*, 40, 211-235.
 25. Nunery, J. S. and Keeton, W. S. (2010), “Forest carbon storage in the northeastern United States: net effects of harvesting frequency, post-harvest retention, and wood products,” *Forest Ecology and Management*, 259, 1363-1375.
 26. Oreskes, N. (2004), “Beyond the ivory tower: the scientific consensus on climate change,” *Science*, 306, p.1686.
 27. Pacific Carbon Trust, (2012), “B.C. offset protocol undergoes international validation. Information bulletin PCT-B 12-001.” At. <http://pacificcarbontrust.com/assets/Uploads/News-Releases/Offset-Protocol-Validation.pdf>.
 28. Pearson, T. R. H., Brown, S. and Andrasko, K. (2008), “Comparison of registry methodologies for reporting carbon benefits for afforestation projects in the United States” *Environmental Science & Policy*, 11, 490-504.
 29. Pecl, G. T., Araujo, M. B., Bell, J. D., Blanchard, J., Bonebrake, T. C., Chen, I.-C., Clark, T. D., Colwell, R. K., Danielsen, F., Evengard, B., Falconi, L., Ferrier, S., Frusher, S., Garcia, R. A., Griffis, R. B., Hobday, A. J., Janion-Scheepers, C., Jarzyna, M. A., Jennings, S., Lenoir, J., Linnetved, H. I., Martin, V. Y., McCormack, P. C., McDonald, J., Mitchell, N. J., Mustonen, T., Pandolfi, J. M., Pettorelli, N., Popova, E., Robinson, S. A., Scheffers, B. R., Shaw, J. D., Sorte, C. J. B., Strugnell, J. M., Sunday, J. M., Tuanmu, M.-N., Verges, A., Villanueva, C., Wenberg, T., Wapstra, E. and Williams, S. E. (2017), “Biodiversity redistribution under climate change: impacts on ecosystems and human well-being,” *Science*, 355, 1389-1399.

30. Peng, C., Jiang, H., Apps, M. and Zhang, Y. (2002), "Effects of harvesting regimes on carbon and nitrogen dynamics of boreal forests in central Canada: a process model simulation," *Ecological Modelling*, 155, 177-189.
31. Peters-Stanley, M., Gonzalez, G. and Yin, D. (2013), "State of the forest carbon markets 2013, covering new ground," *Forest trends*. URL: <http://www.forest-trends.org/documents/files/SOFCM-full-report.pdf>
32. Richards, K. and Stokes, C. (2004), "A review of forest carbon sequestration cost studies: a dozen years of research," *Climatic Change*, 63, 1-48.
33. Scheffers, B. R., De Meester, L., Bridge, Tom C. L., Hoffmann, A. A., Pandolfi, J. M., Corlett, R. T., Butchart, S. H. M., Pearce-Kelly, P., Kovacs, K. M., Dudgeon, D., Pacifici, M., Rondinini, C., Foden, W. B., Martin, T. G., Mora, C., Bickford, D. and Watson, J. E. M. (2016), "The broad footprint of climate change from genes to biomes to people," *Science*, 354, 719-730.
34. Seely, B., Welham, C. and Kimmins, H. (2002), "Carbon sequestration in a boreal forest ecosystem: results from the ecosystem simulation model, forecast," *Forest Ecology and Management*, 169, 123-135.
35. Su, H. N. and Moaniba, I. M. (2017), "Does innovation respond to climate change? Empirical evidence from patents and greenhouse gas emissions," *Technological Forecasting & Social Change*, 122, 49-62.
36. UNFCCC (2015), "Historic Paris Agreement on Climate Change 195 Nations Set Path to Keep Temperature Rise Well Below 2 Degrees Celsius," UNFCCC. URL: <http://newsroom.unfccc.int/unfccc-newsroom/finale-cop21/>
37. United States Environmental Protection Agency (2016), "Global greenhouse gas emissions data," Glob. Greenh. Gas Emiss. URL: <https://www3.epa.gov/climatechange/ghgemissions/global.html>
38. Urban, M. C. (2015), "Accelerating extinction risk from climate change," *Science*, 348, 571-573.
39. van Kooten, G. C., Laaksonen-Craig, S. and Wang, Y. (2009), "A meta-regression analysis of forest carbon offset costs," *Canadian Journal of Forest Research*, 39, 2153-2167.
40. Verified Carbon Standard (2012a), "VCS Standard v3.3." URL: <http://www.v-c-s.org/>
41. Verified Carbon Standard (2012b), "Registration and issuance process." URL: <http://www.v-c-s.org/>
42. Williams, J. W. and Jackson, S. T. (2007), "Novel climates, no-analog communities, and ecological surprises," *Frontiers in Ecology and the Environment*, 5, 475-482.
43. World Bank (2012), "Turn down the heat: Why a 4°C warmer world must be avoided (No. 74455)," *The World Bank*. URL: <http://documents.worldbank.org/curated/en/2012/11/17097815/turn-down-heat-4%C2%B0c-warmer-worldmust-avoided>.
44. Zarch, M. A. A., Sivakumar, B., Malekinezhad, H. and Sharma, A. (2017), "Future aridity under conditions of global climate change," *Journal of Hydrology*, DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.08.043>