

考量碳給付與病蟲害對土地期望價值之經濟分析

林佑儒*、柳婉郁**

摘要

病蟲害對環境資源管理與土地利用管理決策有著重大影響，根據前人文獻可知，臺灣關於病蟲害影響土地期望價值與最適輪伐期之著作付之闕如，因此本研究考慮病蟲害與碳給付影響土地期望價值與最適輪伐期之研究，將臺灣的林業現況應用於其中，模擬病蟲害對臺灣森林經營之最適輪伐期與最大土地期望價值的影響。由本研究之模擬結果顯示，與無病蟲害之情境相較，病蟲害存在之情境有較短的最適輪伐期與較低的最大土地期望價值。由本研究之敏感度分析顯示，在無病蟲害與病蟲害存在之情境下，碳價格、單位木材價格及伐採後地租收入（材積分收率）的提高將延長最適輪伐期與增加最大土地期望價值，伐採成本及伐採後碳釋放比例的提高將延長最適輪伐期與減少最大土地期望價值，折現率的提高將縮短最適輪伐期與減少最大土地期望價值；而在病蟲害存在之情境下發現感染率的提升不一定縮短最適輪伐期，但最大土地期望價值將會降低。

關鍵詞：病蟲害、碳給付、最適輪伐期、土地期望價值

JEL 分類代號：Q50、Q51、Q56

* 國立中興大學森林學系碩士生

** 國立中興大學森林學系專任教授，本文聯繫作者。E-mail：wylu@nchu.edu.tw；Tel：
+886-4-22850158。本研究成果感謝科技部計畫補助（計畫編號：108-2811-H-005-502）。

DOI: 10.3966/054696002020060107004

考量碳給付與病蟲害對土地期望價值之經濟分析

林佑儒、柳婉郁

壹、前言

森林提供許多生態系統服務 (ecosystem services)，例如水文的調節與碳循環 (Carvalho-Santos et al., 2014; Cudlín et al., 2013)；遊憩與美學的價值 (Nielsen et al., 2007; Ribe, 1989)；以及生物多樣性的保育 (Johansson et al., 2013)，森林也可以提供木材收益給林主。如同其他自然資源，森林面臨許多生存威脅，其中之一就是新型的病蟲害 (Gilligan et al., 2013)。氣候變遷 (Netherer and Schopf, 2010; Pautasso et al., 2010; Sturrock, 2012)、貿易全球化增加的交易植物物種與產品的總量和多樣性 (Gilligan et al., 2013; Work et al., 2005)，根據 Macpherson et al. (2017) 之研究，這些都只是病蟲害地理範圍增加的原因之一。由於這些因子在短期間不可能減少，對於多功能森林生態系統服務中，考慮病蟲害影響及如何經營是非常重要的。

許多文獻探討利用森林經營方法減緩氣候變遷對森林的影響 (Millar et al., 2007)，但氣候和病蟲害的影響錯綜複雜 (Loehle et al., 2016; Sturrock et al., 2011)，過去文獻分析的經營策略包括樹種多樣性 (Castagneyrol et al., 2014; Churchill et al., 2013; Jactel and Brockerhoff, 2007; Perry and Maghembe, 1989)、空間結構的改變 (Condeso and Meentemeyer, 2007) 以及適當的育林作業 (silvicultural practices) 如疏伐 (thinning) (Bauce and Fuentealba, 2013; D'Amato et al., 2011)，近期文獻如 Marzano et al. (2017) 找出 33 種適用於對抗松屬樹木之針葉枯病病原體松針紅斑病菌 (*Dothistroma septosporum*) 的

病蟲害管理方案，從增加病原體系統的知識到初步改變森林規劃與設計，例如較低的起始立木度 (tree stocking density)。但大多數森林經營策略是預防性的，並盡量減少首次感染病蟲害的風險，主要因素是一旦感染，只有少數樹種能對抗大部分病原體。輪伐期內的方案包括重度疏伐體系，例如對抗松針紅斑病菌；化學噴霧和生物防治，例如用尿素或生物防治作用如犬伏革菌 (*Phlebiopsis gigantea*) 處理根株可幫助抑制造成針葉樹根部腐朽的異擔孢子菌 (*Heterobasidion annosum*) 之空氣中擔孢子萌芽與生長 (Johansson et al., 2002)；以及病蟲害廣泛蔓延的情況採用提早皆伐 (clear felling)；在 2013 到 2014 年間，英國境內 575 個地方收到法定植物健康通知 (Statutory Plant Health Notice) 要求以招標方式砍伐總面積 4,800 公頃的森林以阻止病原體櫟樹疫黴猝死病菌 (*Phytophthora ramorum*) 的惡化 (Forestry Commission Scotland, 2015)，這種砍伐木材不僅造成收益損失而影響林主，而且還可能對非木材效益的供給產生負面影響，例如因棲地損失而干擾野生動物 (Appiah et al., 2004; Rizzo and Garbelotto, 2003)。以上文獻均為探討減緩病蟲害的損失，但提出合適的森林經營方法之前人文獻相對稀少，根據 Macpherson et al. (2017) 研究指出以上這些經營策略和決策不僅是對木材生產，對森林產生的非木材效益也有直接的影響。

臺灣 2014 年至 2017 年之林木疫情危害種類統計顯示 (行政院農業委員會林務局，2017)，病害類型之案件為最大宗，其次為非生物類型之案件，蟲害類型之案件為第三大種類臺灣常見之森林病蟲害如：褐根病，初期病症為全株黃化凋萎，最後枯死。發病樹木在接近地際部主莖及根部往往有黃色至深褐色菌絲面包圍其表面，但在根部的菌絲面常與泥沙結合而不明顯，此病原菌除了危害根部及地際部樹皮外，也造成該部位之木材白色腐朽，受感染之樹皮內面及木材組織呈不規則黃褐色網紋。主要存活傳染的來源是病殘根，其傳播途徑主要靠病根與健康根的接觸傳染，病原菌在春夏潮濕季節形成子實體，並產生擔孢子，隨風傳播，為此病原菌長距離傳播之初次感染源；杉木幼苗立枯病 (*Fusarium* spp., *Rhizoctonia solani* Kuhn, *Pythium* spp.)，感染之幼苗常導致根部或莖部腐敗而死亡，種子須用益樂汞 (Granosan M) 1,000 倍稀釋溶液浸泡 1 小時，陰乾後之種子即

可用於播種；杉木芽枯病 (*Helminthosporium* sp.)，初期於嫩葉發生淡黃色小點，病斑逐漸擴大顏色漸深，後期葉呈褐紫色凋萎，最後整個芽部呈黑褐色至黑色枯死，在感染之葉背面及芽上產生的黑色黴狀即是病菌的分生孢子及孢子柄，藉由空氣傳播。感染嚴重影響之苗木生長，樹勢 (tree vigour) 惡劣，而成不良苗。種子須用益樂汞 2,000 倍稀釋溶液浸泡 2 小時，陰乾後之種子即可用於播種 (益樂汞藥劑之使用，應專案報請農委會核准)；松毛蟲 (*Dendrolimus punctatus* Walker)，幼蟲會啃食針葉，老熟幼蟲在松葉間作繭化蛹，因純松林易受感染而適宜栽植混交林，可施用白殭菌、蘇力菌、毒素病原三種病原微生物，就發生蟲害之時期與害蟲密度，採取一種或兩種甚至三種同時施用的防治方式 (行政院農委會農業藥物毒物試驗所，2017；行政院農委會林業試驗所，2017)。以上只列舉其中四種臺灣常見病蟲害，由此可知國內也應重視病蟲害對多功能森林生態系統服務之影響，同時考量木材與非木材效益。

當病蟲害存在時，找出森林最適輪伐期對於林主而言是經濟上的重要決策，因為病蟲害的感染可能導致市場價值的損失，藉由：減少樹木生長，例如松針紅斑病菌造成顯著的凋零，可能大大降低生長率 (Mullett, 2014)；降低活木的木材品質，例如異擔子菌在根部侵蝕木材，這可能降低木材的價值 (Pratt, 2002; Redfern et al., 2010)；對二次感染的敏感性上升，例如白臘樹膜盤菌 (*Hymenoscyphus fraxineus*) 和櫟樹疫黴猝死病菌對樹皮和形成層造成顯著破壞，因而增加侵蝕木材之真菌的感染率 (Forestry Commission Scotland, 2015; Pautasso et al., 2013)；或在林分 (forest stand) 尺度上，病蟲害可能增加樹木死亡的比例因而造成木材腐朽，例如在歐洲雲杉八齒小蠹蟲 (*Ips typographus*) 已經破壞超過 9,000 公頃的歐洲雲杉林。在病蟲害蔓延的狀況下，大面積的純林 (monoculture forest) 可能為了阻止病蟲害擴散而同時被砍伐，例如目前在南威爾斯 (South Wales) 和蘇格蘭西南部 (South West Scotland) 為應對櫟樹猝死病菌對落葉松屬樹木的感染 (Forestry Commission Scotland, 2015)，因此大量的木材湧入當地鋸木廠可能造成擁擠和市場飽和。

儘管病蟲害對樹木有著重大影響以及有各種分析最適輪伐期的研究，然而觀看前人

文獻可知，臺灣關於病蟲害影響最適輪伐期之著作付之闕如。根據 Macpherson et al. (2018) 以一般生物經濟模型架構 (generalisable, bioeconomic model framework)，分析病蟲害對同齡林 (even-aged forest) 的最適輪伐期之影響，其結合流行病學區域模型 (epidemiological, compartmental model) 與單一輪伐期 Faustmann 模型 (single-rotation Faustmann model)，藉由造林成本和木材收益描述森林的淨現值 (net present value, NPV) (Amacher et al., 2009)。研究指出，林主常在「等待木材生長」和「感染擴散」間進行抉擇：當樹木被感染時若其木材價值較低，則林主之最適輪伐期將縮短，但當感染速度較快，且被感染樹木之木材價值不是零，則林主將延長輪伐期至無病蟲害情境之最適輪伐期長度，此為人工林之林主，經營決策只考慮木材生產 (不考慮非木材價值)。

然而，森林價值不僅只是木材；Faustmann 原始模型已延伸至考慮非木材產品的效益 (Hartman, 1976; Samuelson, 1976)，Hartman (1976) 指出應考慮非木材效益才能決定最適輪伐期。此後，考量非木材效益成為最適輪伐期分析的基礎，關於調查非木材效益的研究如：維持提供遊憩服務的成本 (Snyder and Bhattacharyya, 1990)；碳吸存 (carbon sequestration)、碳稅 (carbon taxes) 或補貼 (Englin and Callaway, 1993; Price and Willis, 2011; Van Kooten et al., 1995)；在單一森林中維持一特定等級的生物多樣性下之木材和碳吸存效益 (Nghiem, 2014)；以及相鄰的森林提供環境舒適服務之相互依賴性 (Koskela and Ollikainen, 2001; Swallow and Wear, 1993)。根據 Macpherson et al. (2017) 研究指出這些模型通常由描述時間變化下木材生產和非木材效益的函數決定。使用適當的樹種產出成長曲線來量化森林的木材價值是相對容易的，而木材價格可以由市場數據取得，非市場效益難以做到這點。但近年來已經發展評價非木材效益的技術如條件評估法 (contingent valuation)，可以輔助模型中描述非木材效益的函數 (Bishop, 1998)。病蟲害影響非木材效益可能藉由降低樹木生長率，如感染松屬樹木的松針紅斑病菌可能降低木材收益，但對於非木材效益的影響有限如生物多樣性與遊憩，然而與樹木成長關聯的碳吸存率可能受影響 (Hicke et al., 2012)；或者，像是感染榆屬樹木的榆樹枯萎病菌 (*Ophiostoma ulmi*) 及新榆樹枯萎病菌 (*O. novo-ulmi*) 或感染板栗的栗疫病菌 (*Cryphonectria parasitica*) 均造

成樹木死亡而使木材與非木材效益降低，例如生物多樣性、碳儲存以及遊憩與美學價值的喪失 (Seung, 2007; Boyd et al., 2013; Gilligan et al., 2013; Hicke et al., 2012; 行政院環境保護署, 2015; 柳婉郁與徐寬, 2017)。

本研究延伸 Macpherson et al. (2017) 與 Macpherson et al. (2018) 之生物經濟模型，針對森林碳吸存功能將綠色給付 (green payment) 考量為碳給付，且與 Macpherson et al. (2017) 不同的是，本研究分析各種情境下輪伐期與土地期望價值分析，另外碳給付考量林地面積外，增加考慮林木二氧化碳儲存量亦影響碳給付，有別於原綠色給付之假設僅隨林地面積之增加而線性增加；且地租項設定非 0 情況，本研究設定不同材積分收率、木材價格以及不同地租進行分析，並進一步針對重要變數進行敏感度分析。傳統的最適輪伐期是考量多個輪伐期，換言之，考慮無窮期造林和收穫，因此等同涵蓋土地期望價值 (Amacher et al., 2009)，在過去研究中，分析單一個輪伐期下，病蟲害對最適輪伐期之影響，並使用地租 (land rent) 代表收穫後的未來效益。理論模型若考量病原體在多個輪伐期之間會互相感染的情境，即在收穫後，病原體是如何傳播至下一個輪伐期，由於病原體傳播的特性將增加理論模型模擬的複雜度，因此簡化為考量單一輪伐期。此外，儘管已使用多個輪伐期分析模擬其他災難事件 (例如：火災或風災) (Englin et al., 2000)，仍與病蟲害有許多不同之處，包括惡化速度、症狀、檢測出感染後的經營對策、對木材進行防治以及由於許多病原體在入侵後長期持續存在而導致的不可逆性。因此，本研究延續過去文獻之結果，採用收穫後之地租與單一輪伐期，並加入碳給付之考量，進而了解病蟲害與木材及非木材效益之關係。

本研究之目的為考慮病蟲害與碳給付影響最適輪伐期之研究，將臺灣的林業現況應用於其中，模擬病蟲害對臺灣森林經營之最適輪伐期與最大土地期望價值的影響。本研究亦延伸分析木材價格、伐採成本、碳給付、折現率、地租與碳釋放等最適輪伐期與最大土地期望價值之關鍵變數的影響，分別呈現考量病蟲害存在與否的最適輪伐期與最大土地期望價值之變化，以及分析病蟲害存在之情境中感染率與感染程度的影響，以供未來林業部門之經營決策與學術研究參考之用。

貳、理論模型

一、無病蟲害之最適輪伐期模型

本研究建立單一輪伐期 Hartman 模型 (single rotation Hartman model)，將綠色給付以碳給付為考量，碳給付不僅隨林地面積增加而提升，亦隨著林木之二氧化碳儲存量增加而提升，有別於原綠色給付之假設僅隨林地面積之增加而線性增加，其中同齡純林的 NPV 包含造林成本 (從裸露地開始造林)、木材收益、非木材效益之碳給付 (Hartman, 1976) 以及伐採後地租收入。林主決定輪伐期之目標函數如下所示 (Amacher et al., 2009; Macpherson et al., 2017)。在既定林地面積下之土地期望價值 $\hat{J}(T)$ 為：

$$\hat{J}(T) = M(L, T)e^{-rT} - W(L) + \int_0^T S(L, t)e^{-rt} dt + \int_T^\infty A(L)e^{-rt} dt \quad (1)$$

如上式， L 為林地總面積 (公頃)； $W(L) = w \times L$ ，此為林地總面積 L 下所需之造林成本， w 為單位面積之造林成本 (新台幣/公頃)； $M(L, T) = P_T \times f(T) \times L$ ，此為林地總面積 L 公頃下 T 時之木材收益，為單位木材價格 P_T (新台幣/立方公尺) 乘以林地總面積 L 之總材積 ($f(T) \times L$ ；立方公尺)， $f(T)$ 為在 T 時單位材積 (立方公尺/公頃)； $S(L, T) = s \times c(T) \times L$ ，此為林地總面積 L 下總碳給付， s 為單位碳給付 (新台幣/公噸二氧化碳)， $c(T)$ 為在 T 時之單位材積二氧化碳吸存量 (公噸二氧化碳/公頃)； $A(L) = a \times L$ ，此為林地總面積 L 下總地租收入， a 為單位面積之地租收入 (新台幣/公頃)，在 T 時林主砍伐林木後才有地租收入 $A(L)$ ； r 為折現率，將未來收益 (木材收穫、碳給付及地租) 折現至開始造林的時間點。土地期望價值 $\hat{J}(T)$ 為在 T 時砍伐之材積收益

淨現值 $M(L,T)e^{-rT}$ 扣除造林成本 $W(L)$ ，再加上 T 時前碳給付淨現值 $\int_0^T S(L,t)e^{-rt} dt$ 與 T 時後土地地租收入淨現值 $\int_T^\infty A(L)e^{-rt} dt$ 。

二、病蟲害存在之最適輪伐期模型

本研究進一步考慮病蟲害存在時對最適輪伐期的影響，與無病蟲害之最適輪伐期模型相同為單一輪伐期 Hartman 模型，將綠色給付以碳給付為考量，碳給付不僅隨林地面積增加而提升，亦隨著林木之二氧化碳儲存量增加而提升，有別於原綠色給付之假設僅隨林地面積之增加而線性增加，其中病蟲害存在之同齡純林的 NPV 包含造林成本（從裸露地開始造林）、木材收益、非木材效益之碳給付以及伐採後地租收入，並使用兩個參數（ $\tilde{L}_{TB}(T)$ 與 $\tilde{L}_{NTB}(T)$ ）來描述病蟲害之影響（Macpherson et al., 2017）。林主決定輪伐期之目標函數如下所示，在既定林地面積下之土地期望價值 $\hat{J}(T)$ 為：

$$\hat{J}(T) = M(\tilde{L}_{TB}(T), T)e^{-rT} - W(L) + \int_0^T S(\tilde{L}_{NTB}(t), t)e^{-rt} dt + \int_T^\infty A(L)e^{-rt} dt \quad (2)$$

$\tilde{L}_{TB}(T)$ 與 $\tilde{L}_{NTB}(T)$ 分別代表在病蟲害存在時，在 T 時供給木材與非木材效益的有效林地面積； $M(\tilde{L}_{TB}(T), T) = P_T \times f(T) \times \tilde{L}_{TB}(T)$ ，此為在病蟲害存在時，在 T 時供給木材效益的有效林地面積 $\tilde{L}_{TB}(T)$ 公頃下之木材收益，為單位木材價格 P_T （新台幣/立方公尺）乘以在 T 時有效林地面積 $\tilde{L}_{TB}(T)$ 之總材積（ $f(T) \times \tilde{L}_{TB}(T)$ ；立方公尺）， $f(T)$ 為在 T 時單位材積（立方公尺/公頃）； $S(\tilde{L}_{NTB}(T), t) = s \times c(T) \times \tilde{L}_{NTB}(T)$ ，此為在病蟲害存在時，在 T 時供給非木材效益之有效林地面積之碳給付， s 為單位碳給付（新台幣/公噸二氧化碳）， $c(T)$ 為在 T 時之單位材積二氧化碳吸存量（公噸二氧化碳/公頃）；造林成本與地租保持不變。土地期望價值 $\hat{J}(T)$ 為在 T 時砍伐之材積收益淨現值 $M(\tilde{L}_{TB}(T), T)e^{-rT}$ 扣除造林成本

$W(L)$ ，再加上 T 時前碳給付淨現值 $\int_0^T S(\tilde{L}_{NTB}(t), t)e^{-rt} dt$ 與 T 時後土地地租收入淨現值 $\int_T^\infty A(L)e^{-rt} dt$ 。

考慮病蟲害對木材效益的影響，木材收益可表示為：

$$M(\tilde{L}_{TB}(T), T) = P_T f(T) (\sum_{i=1}^N \rho_i x_i(T)) = P_T f(T) \tilde{L}_{TB}(T) \quad (3)$$

假設對於一般病原體，一棵樹木可以是 N 種感染類型的其中一種。 $x_i(T)$ 為在 T 時處於第 i 種感染類型的森林面積 ($1 \leq i \leq N$)，林地總面積 L 可表示為 $\sum_{i=1}^N x_i(T)$ 。本研究假設病蟲害會減少木材價值 (藉由降低品質或生長)， ρ 代表木材因不同類型之病蟲害而受不同的影響 ($0 \leq \rho_i \leq 1$)，因此在 T 時處於第 i 種感染類型之森林面積提供的木材收益為 $pf(T)\rho_i x_i(T)$ 。

故在 T 時，病蟲害存在且能供給木材效益的有效森林面積為：

$$\tilde{L}_{TB}(T) = \sum_{i=1}^N \rho_i x_i(T) \quad (4)$$

本研究根據 Macpherson et al. (2017) 假設 $d\tilde{L}_{TB}(T)/dT \leq 0$ ，因通常病蟲害對木材造成的破壞具永久的負面影響。

同樣地，考慮病蟲害對非木材效益的影響，非木材效益之碳給付可表示為：

$$\begin{aligned} S(\tilde{L}_{NTB}(T), t) &= s \times c(T) (\sum_{i=1}^N \sigma_i x_i(T)) \\ &= s \times c(T) \times \tilde{L}_{NTB}(T) \end{aligned} \quad (5)$$

σ 代表非木材效益因不同類型之病蟲害而受不同的影響 ($0 \leq \sigma_i \leq 1$)，因此在 T 時處於第 i 種感染類型之森林面積提供的碳給付為 $s \times c(T) \times \sigma_i x_i(T)$ 。

故在 T 時，病蟲害存在且能供給非木材效益的有效森林面積為：

$$\tilde{L}_{NTB}(T) = \sum_{i=1}^N \sigma_i x_i(T) \tag{6}$$

三、病蟲害存在時，不同情境下最適輪伐期之比較

本研究在病蟲害存在之情境下，分為病蟲害是否影響非木材效益，其中碳給付 $S(\tilde{L}_{NTB}(T), t)$ 、伐採後地租 $A(L)$ 、單位木材價格 P_T 、折現率 r 以及病蟲害共 8 種情境對最適輪伐期 (T^{**}) 的影響。若病蟲害存在時不影響非木材效益，則 $\sigma_i = 1 \forall i$ ，即 $\tilde{L}_{NTB}(T) = L$ ，對式 (2) 進行 T 的一階微分並整理可得：

$$\frac{1}{f(T^{**})} \frac{df}{dT} \Big|_{T=T^{**}} - r = \frac{1}{\tilde{L}_{TB}(T^{**})} \left(\left. \frac{d\tilde{L}_{TB}}{dT} \right|_{T=T^{**}} + \frac{A(L) - S(L, t)}{P_T f(T^{**})} \right) \tag{7}$$

此為病蟲害只影響木材效益情境下之最適輪伐期 ($T = T^{**}$) 條件， $\frac{1}{f(T^{**})} \frac{df}{dT} \Big|_{T=T^{**}}$ 為

延遲收穫之效益。本研究將分析結果呈現為表 1。

表 1 病蟲害存在時，不同情境下最適輪伐期之比較

模擬不同情境下 最適輪伐期之比較	若病蟲害存在時 將影響非木材效益 即 $\tilde{L}_{NTB}(T) < L$	若病蟲害存在時 不影響非木材效益 即 $\tilde{L}_{NTB}(T) = L$
碳給付 $S(T, t)$ 增加	延長	延長
伐採後地租收入 $A(L)$ 增加	縮短	縮短
單位木材價格 P_T 增加	延長	延長
折現率 r 增加	縮短	縮短

參、模擬分析

一、變數設定

(一)樹種選擇

杉木 (*Cunninghamia lanceolata*) 並非臺灣原生種，原產中國大陸長江流域及東南部各省，杉木海拔分布約為 500-1,800 公尺，為臺灣主要針葉樹種之一，更是臺灣低海拔地區主要造林樹種，漢人將杉木引進臺灣至今已有二百多年的歷史，最早的杉木造林紀錄始於 1917 年，由於其幼齡期生長快速以及木材利用價值高，其木材軟硬適中、幹材通直，適於加工，具有香氣且耐腐朽，是建築與傢俱等常見的木材之一，故臺灣對杉木有較多相關的研究，杉木為臺灣重要造林樹種之一，亦屬於全民造林政策與平地造林政策之獎勵樹種之一 (任憶安，1994；柳婉郁，2004；高榕翎，2013)，根據第四次森林資源調查報告 (行政院農業委員會林務局，2015) 指出杉木人工林之單位面積蓄積量為 222.57 立方公尺，且根據林業統計年報 (行政院農業委員會林務局，2017) 指出杉木用材之生產量為 8,750.15 立方公尺，為針葉樹生產用材第二名，因此本研究以杉木樹種為例進行模擬分析。

(二)材積函數 (立方公尺/公頃) $f(T)$

為計算杉木經濟林之土地期望價值 $\hat{J}(T)$ 與最適輪伐期，理論模型需要計算木材收穫價值，其中需要樹種的材積函數，因此必須取得杉木之生長收穫模式，本研究使用劉浚

明與鍾旭和 (1993) 所提出的生長收穫模式：

$$f(T) = 578.6851(1 - T^{-1.5402})^{54.3344} \quad (8)$$

$f(T)$ 為 T 時之材積 (立方公尺/公頃)； T 為林齡 (年)。透過杉木之生長收穫模式計算各林齡之總材積可得杉木之材積總生長曲線並推算邊際材積生長曲線，當杉木林齡達 9 年時，邊際材積生長量達最大值約 29.28 立方公尺/公頃/年。

(三) 木材價格 (新台幣/立方公尺) P_T

為計算木材收穫價值，必須取得樹種的木材價格，透過行政院農業委員會林務局木材市價資訊系統可以取得現今的杉木木材價格¹，其價格為每立方公尺 5,116 元新台幣²。由於木材會因其形質生長狀態而有不同的價格，因此杉木木材價格並非在所有林齡時皆適用此一價格，本研究使用林國慶與柳婉郁 (2007) 所建立的杉木木材價格函數：

$$P_T = 352.11 + 242.75T - 5.284T^2 \quad (9)$$

P_T 為 T 林齡之杉木木材價格 (新台幣/立方公尺)； T 為林齡 (年)。藉由此函數所得之杉木木材價格即可考量杉木之形質生長狀態，但由於此函數之木材價格於第 23 年後開始遞減，不符合實際情況，故本研究將 23 年後的木材價格維持在 5,116 元，並將函數原始價格乘以固定比例，使函數最大價格與現今木材價格 5,116 元相等，以符合目前市場行情。

¹ 行政院農業委員會林務局木材市價資訊系統：https://woodprice.forest.gov.tw/Summary/Q_SummarySingleWoodPrice.aspx，檢索日期：2017/8/16。

² 杉木材價為 2017 年 7 月之市場價格。

(四)造林成本 (新台幣/公頃) $W(L)$

本研究以杉木進行分析，建構林地需考量造林與撫育成本，達最適輪伐期而伐採林木時需考量伐採成本。造林成本根據柳婉郁等 (2009) 將其分為育苗、出栽、除草等成本。由於臺灣政府對於造林是有進行獎勵的，若苗木由林務機關提供，而出栽成本由承包商的承包價格來估算，林主須在第一年支付每公頃 30,000 元進行出栽；刈草成本根據行政院農委會林務局 (2011) 一年生造林地年施行刈草 2 次，每次每公頃 8 工；二年生造林地年施行刈草 3 次，每次每公頃 8 工；三年生造林地年施行刈草 3 次，每次每公頃 8 工；四年生造林地年施行刈草 2 次，每次每公頃 9 工；五至九年生造林地，五年生施行刈草 2 次，每次每公頃 9 工，六年生以後施行刈草 1 次，每次每公頃 10 工；刈草工人工資根據 2002 年農林字第 0910000477 號函釋 (行政院農業委員會林務局，2002) 為 1,500 元；延續六至九年生造林地施行刈草 1 次每公頃 10 工之 15,000 元作為十年生以後之造林地的年管理費用。

伐採成本根據鄭欽龍與施友元 (2006) 的計算，將南投林區管理處 46 筆國有林出租造林地的林木伐採作業成本及其作業狀況資料進行多元迴歸分析，以每筆承租林地的伐採成本為被解釋變數項，以伐採林木之利用材積、至最近木材市場之運輸距離與伐木工工資為解釋變數項，並將 46 筆資料之平均利用材積、平均運輸距離及平均伐木工工資代入，推估國有林出租造林地每立方公尺林木的平均伐採成本為 1,493 元 (新台幣/立方公尺)。

(五)碳給付 (新台幣/公頃) $S(L,T)$

本研究以杉木為例進行輪伐期分析，並以有效供給非木材效益之森林面積刻劃病蟲害對非木材效益之影響，近年來溫室氣體的排放增加被認為是氣候變遷的主要因素，而森林能夠提供吸收二氧化碳的碳儲存功能，亦是各國溫室氣體排放減量的重要途徑，因此本研究以二氧化碳儲存量 (公噸二氧化碳/公頃) 乘以碳價格 (新台幣/公噸二氧化碳)

作為碳給付之計算。本研究使用柳婉郁 (2008) 所建立的杉木碳吸存函數：

$$c(T) = 325.592 \times (1 - T^{-1.5402})^{45.098} \quad (10)$$

$c(T)$ 為杉木之碳吸存量 (公噸碳/公頃)； T 為林齡 (年)。林木中儲存之碳量轉換為二氧化碳之轉換係數為 3.67，因此杉木二氧化碳之碳吸存量為 $c(T)$ 乘以 3.67，可得杉木之二氧化碳吸存量曲線與二氧化碳邊際吸存量曲線。

由於臺灣目前無碳交易市場，故無碳價格 s ，因此本研究使用 Wang et al. (2001) 發表之臺灣建議碳價格 1,820 元 (新台幣/公噸二氧化碳)；本研究亦使用歐盟排放交易機制 (European Union emission trading scheme, EU ETS) 之碳價格進行模擬分析，其碳價格為 247.89 元 (新台幣³/公噸二氧化碳)⁴。

(六)折現率 r

本研究以淨現值模型分析達淨現值最大的最適輪伐期，需要將木材收穫價值、碳給付價值、收穫地租價值等折現，而影響需要折現的價值最重要的就是折現率，且林業為一長期的投資與經營計畫，折現率變化的分析亦是重要考量因子，本研究使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)。

(七)地租 (新台幣/年) $A(L)$

因本研究之理論模型為化簡病蟲害在輪伐期間傳播的複雜性，僅考慮單一輪伐期，收穫後林地的價格估算亦是影響淨現值達最大的關鍵變數，因此必須考量地租的變化以

³ 匯率依照臺灣銀行 2017 年 9 月 11 日牌告匯率換算。

⁴ 資料來源，EU ETS Carbon Pulse，<https://carbon-pulse.com/category/eu-ets/>，檢索日期 2017/09/11。

分析最適輪伐期，本研究根據國有林事業區出租造林地管理要點，租地造林除林道、木馬路為林務局所有外，其林產物分收率規定林木以立木材積分收，材積收穫之 1% 為林務局所有，材積收穫之 99% 為租地造林人所有（行政院農業委員會，2000），以此作為地租之基準值，故伐採後地租收入 $A(L)$ 為：

$$A(L) = P_T \times f(T) \times L / 100 \quad (11)$$

此為在 T 時，無病蟲害存在之伐採後地租收入 $A(L)$ ，為單位木材價格 P_T （新台幣/立方公尺）乘以林地總面積 L 之總材積（ $f(T) \times L$ ；立方公尺）的 1%， $f(T)$ 為在 T 時單位材積（立方公尺/公頃）。

$$A(L) = P_T \times f(T) \times \tilde{L}_{TB}(T) / 100 \quad (12)$$

此為在 T 時，病蟲害存在時將影響木材收益的伐採後地租收入 $A(L)$ ，為單位木材價格 P_T （新台幣/立方公尺）乘以在 T 時有效林地面積 $\tilde{L}_{TB}(T)$ 之總材積（ $f(T) \times \tilde{L}_{TB}(T)$ ；立方公尺）的 1%， $f(T)$ 為在 T 時之單位材積（立方公尺/公頃）。

(八)未感染-受感染之區域模型 (Susceptible-Infected Compartmental Model)

本研究根據 Macpherson et al. (2017) 之研究，使用未感染-受感染系統以簡化在病蟲害存在之最適輪伐期模型中的 N 種感染類型之假設，在 T 時的總森林面積 L 可表示為：

$$L = x(T) + y(T) \quad (13)$$

$x(T)$ 為未感染之森林面積（公頃）； $y(T)$ 為受感染之森林面積（公頃），因此未感染-受感染系統可表示為：

$$\frac{dx}{dT} = -\beta x(T)(y(T) + P) \quad (14a)$$

$$\frac{dy}{dT} = \beta x(T)(y(T) + P) \quad (14b)$$

P 為首次感染率，為控制外部感染壓力，例如從外來環境擴散進入森林的孢子； β 為二次感染率，為控制森林內感染的傳播，例如樹木感染自受感染之樹木。森林面積為一固定值，森林面積 L 對 T 微分為 0，故可表示為：

$$\frac{dL}{dT} = \frac{dx}{dT} + \frac{dy}{dT} = 0 \quad (15)$$

將式 (13) 代入式 (14a)：

$$\frac{dx}{dT} = -\beta x(T)(L - x(T) + P) \quad (16)$$

式 (16) 可求得未感染之森林面積 $x(T)$ ：

$$x(T) = \frac{L + P}{\frac{P}{L} e^{(L+P)\beta T} + 1} \quad (17)$$

根據 Macpherson et al. (2017) 之研究，使用未感染-受感染系統可將在病蟲害存在之最適輪伐期模型中 T 時供給木材與非木材效益的有效林地面積 $\tilde{L}_{TB}(T)$ 與 $\tilde{L}_{NTB}(T)$ 表示為：

$$\tilde{L}_{TB}(T) = x(T) + \rho(L - x(T)) \quad (18a)$$

$$\tilde{L}_{NTB}(T) = x(T) + \sigma(L - x(T)) \quad (18b)$$

ρ 代表受感染之樹木提供的木材效益比例 ($0 \leq \rho \leq 1$)； σ 代表受感染之樹木提供的非木材效益比例 ($0 \leq \sigma \leq 1$)。 $\rho = 1$ 表示病蟲害之感染不影響木材效益； $\sigma = 1$ 表示病蟲害之感染不影響非木材效益； $\rho = 0$ 表示受感染之樹木無提供木材效益； $\sigma = 0$ 表示受感染之樹木無提供非木材效益。

式 (17) 顯示，未感染之森林面積 $x(T)$ 是由首次感染率 P 及二次感染率 β 控制其動態，根據 Macpherson et al. (2017) 之研究，當二次感染率 β 為外生變數，以病蟲害感染整座森林之一半的樹木所需的時間 $t_{0.5}$ 刻劃首次感染率 P 。將 $x(t_{0.5}) = 0.5L$ 代入式 (17) 可得出 $t_{0.5}$ ：

$$t_{0.5} = \frac{\ln\left(\frac{L}{P} + 2\right)}{(L+P)\beta} \quad (19)$$

為了解首次感染率 P 之變化的影響，根據 Macpherson et al. (2017) 之研究，將 $t_{0.5}$ 作為無病蟲害存在之輪伐期，例如以 $t_{0.5}$ 作為無病蟲害存在之最適輪伐期 (T^*)，即至無病蟲害存在之最適輪伐期 (T^*) 時，已有整座森林之一半的樹木被病蟲害感染。根據 Macpherson et al. (2017) 之研究，使用 5 個首次感染率 P 與二次感染率 β 之組合以刻劃不同病蟲害的感染特性，如表 2 所示。

表 2 首次感染率 P 與二次感染率 β 之組合

病蟲害之動態分析 ($P-\beta$)	首次感染率 P	二次感染率 β	$t_{0.5}$
高—中	0.1600	0.044	$t_{0.5} = T^*$
高—慢	0.1600	0.022	$t_{0.5} = 2T^*$
高—快	0.1600 ¹	0.100 ¹	$t_{0.5} = T^* / 2$
中—快	0.0190	0.100	$t_{0.5} = T^*$
低—快	0.0003	0.100	$t_{0.5} = 2T^*$

註：¹為首次感染率 P 與二次感染率 β 之基準值。

二、基礎情境下之模擬結果

本研究之無病蟲害基礎情境為土地期望價值 $\hat{J}(T)$ 等於在 T 時砍伐之材積收益淨現值 $M(L, T)e^{-rT}$ 扣除造林成本 $W(L)$ ，加上 T 時後土地地租收入淨現值 $\int_T^{\infty} A(L)e^{-rt} dt$ ，其結果顯示最大土地期望價值 $\hat{J}(T)$ 為 2,433,447 元/公頃，最適輪伐期為 39 年。

本研究之病蟲害存在基礎情境為土地期望價值 $\hat{J}(T)$ 等於在 T 時砍伐之材積收益淨現值 $M(\tilde{L}_{TB}(T), T)e^{-rT}$ 扣除造林成本 $W(L)$ ，加上 T 時後土地地租收入淨現值 $\int_T^{\infty} A(L)e^{-rt} dt$ ； ρ 代表受感染之樹木提供的木材效益比例 ($0 \leq \rho \leq 1$)，以 $\rho = 0.8$ 為基準值； σ 代表受感染之樹木提供的非木材效益比例 ($0 \leq \sigma \leq 1$)，以 $\sigma = 0.8$ 為基準值。其結果顯示最大土地期望價值 $\hat{J}(T)$ 為 1,902,303 元/公頃，最適輪伐期為 32 年。

本研究將無病蟲害與病蟲害存在之基礎情境下土地期望價值之時間曲線呈現為圖 1。在無病蟲害之基礎情境下，收入部分林主只需考量森林之木材收穫與伐採後地租收入，隨著輪伐期延長，木材收穫及伐採後地租收入增加，因此最適輪伐期較長；而在病蟲害存在之基礎情境下，林主除了考量木材收穫與伐採後地租收入外，應當考慮病蟲害對森林之木材效益的影響會因輪伐期的延長而加劇，故最大土地期望價值 $\hat{J}(T)$ 由 2,433,447 元/公頃減少為 1,902,303 元/公頃，大約減少 21.83%，最適輪伐期也由 39 年縮短至 32 年。

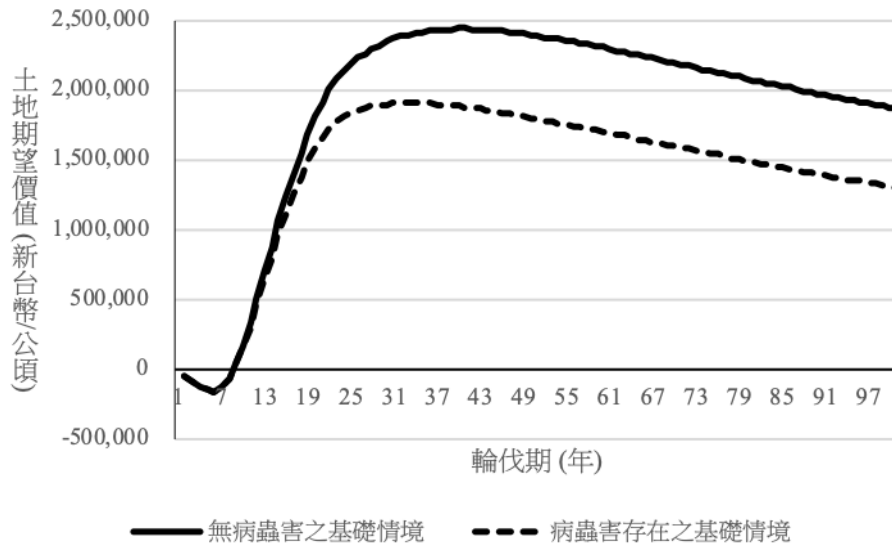


圖 1 無病蟲害與病蟲害存在之基礎情境下土地期望價值

三、碳價格之敏感度分析

本研究將最大土地期望價值 $\hat{J}(T)$ 與最適輪伐期對碳價格之敏感度分析結果整理為表 3。在無病蟲害與病蟲害存在之情境下考慮碳價格之存在，隨著碳價格的提升，最適輪伐期為延長的趨勢，但在病蟲害存在之情境下的最適輪伐期較無病蟲害之情境縮短約 7 至 10 年。根據最大土地期望價值 $\hat{J}(T)$ 對碳價格之敏感度分析，在無病蟲害與病蟲害存在之情境下考慮碳價格之存在，隨著碳價格的提升，最大土地期望價值 $\hat{J}(T)$ 為增加的趨勢，但在病蟲害存在之情境與無病蟲害之情境相較，最大土地期望價值 $\hat{J}(T)$ 差額由 539,747 元/公頃增至 2,345,839 元/公頃。

表 3 最大土地期望價值 $\hat{J}(T)$ 與最適輪伐期對碳價格之敏感度分析結果

碳價格 (NTD/t CO ₂)	無病蟲害之情境		病蟲害存在之情境	
	$\hat{J}(T)$ (NTD/ha)	輪伐期 (年)	$\hat{J}(T)$ (NTD/ha)	輪伐期 (年)
50	2,475,391	39	1,935,644	32
100	2,517,484	40	1,968,985	32
247.89 ¹	2,642,108	40	2,067,710	33
500	2,854,969	41	2,236,567	33
1,000	3,279,004	42	2,572,316	34
1,820 ²	3,979,038	45	3,125,808	36
3,000	4,994,617	47	3,927,726	37
4,000	5,861,047	50	4,611,780	40
5,000	6,731,736	52	5,299,527	43
6,000	7,605,882	54	5,990,661	45
7,000	8,482,947	55	6,684,786	47
8,000	9,362,617	57	7,381,597	49
9,000	10,244,390	59	8,080,804	51
10,000	11,127,974	60	8,782,135	53

註：¹為歐盟排放交易機制之碳價格；²為 Wang et al. (2001) 發表之臺灣建議碳價格。

由於病蟲害對森林之木材與非木材效益的負面影響，形成無病蟲害與病蟲害存在之情境下，最適輪伐期及土地期望價值 $\hat{J}(T)$ 之差距，隨著輪伐期的延長，森林能夠提供木材與非木材效益之有效面積均減少，因而使最適輪伐期較無病蟲害之情境短，亦使得林主在木材收穫及碳給付上均不及無病蟲害之情境，因此最大土地期望價值 $\hat{J}(T)$ 較無病蟲害之情境低，但兩種情境之最大土地期望價值 $\hat{J}(T)$ 與最適輪伐期和基礎情境之結果相較，碳給付的存在將提供誘因使林主延長最適輪伐期，最大土地期望價值 $\hat{J}(T)$ 增加。

四、木材價格之敏感度分析

本研究將最大土地期望價值 $\hat{J}(T)$ 與最適輪伐期對單位木材價格之敏感度分析結果整理為表 4。根據最適輪伐期對單位木材價格之敏感度分析，在碳價格為 1,820 與 247.89 元/公噸二氧化碳下，無病蟲害與病蟲害存在之情境下考慮單位木材價格的變動，隨著單位木材價格的提升，最適輪伐期為延長的趨勢；隨著單位木材價格的提升，當碳價格為 1,820 元/公噸二氧化碳時，無病蟲害情境之最適輪伐期較病蟲害存在之情境延長 7 至 15 年，由於無病蟲害之情境對單位木材價格之提升較不敏感，僅由 41 年上升至 45 年，而病蟲害存在之情境較為敏感，因此最適輪伐期之差距逐漸縮小，而碳價格為 247.89 元/公噸二氧化碳時，無病蟲害與病蟲害存在之情境在單位木材價格為 250、500、1,000 元/立方公尺時，因其價格太低而導致林主無法經營，無病蟲害之情境下直到單位木材價格約 1,120 元/立方公尺以上才無虧損，病蟲害存在之情境下則為單位木材價格約 1,223 元/立方公尺以上才無虧損，而無病蟲害情境之最適輪伐期較病蟲害存在之情境延長 6 至 8 年；隨著單位木材價格的提升，當碳價格為 1,820 元/公噸二氧化碳時，在碳價格為 247.89 元/公噸二氧化碳時無法經營的狀況之外，無病蟲害之情境的最適輪伐期相較於碳價格為 247.89 元/公噸二氧化碳之情境延長 2 至 11 年，且因碳價格為 247.89 元/公噸二氧化碳下無病蟲害之情境對單位木材價格的提升較敏感，兩者之最適輪伐期差距有縮小的趨勢，而病蟲害存在之情境則延長 1 至 6 年，亦因碳價格為 247.89 元/公噸二氧化碳下病蟲害存在之情境對單位木材價格的提升較敏感，兩者之最適輪伐期差距逐漸縮小。

根據最大土地期望價值 $\hat{J}(T)$ 對單位木材價格之敏感度分析，分別在碳價格為 1,820 與 247.89 元/公噸二氧化碳下，無病蟲害與病蟲害存在之情境下考慮單位木材價格的變動，隨著單位木材價格的提升，最大土地期望價值 $\hat{J}(T)$ 為增加的趨勢；隨著單位木材價格的提升，當碳價格為 1,820 元/公噸二氧化碳時，無病蟲害情境之最大土地期望價值 $\hat{J}(T)$ 較病蟲害存在之情境增加 201,452 至 2,130,209 元/公頃，當碳價格為 247.89 元/公噸二氧

化碳時，則增加 162,465 至 1,854,030 元/公頃；隨著單位木材價格的提升，當碳價格為 1,820 元/公噸二氧化碳時，在碳價格為 247.89 元/公噸二氧化碳時無法經營的狀況之外，無病蟲害之情境之最大土地期望價值 $\hat{J}(T)$ 較碳價格為 247.89 元/公噸二氧化碳之情境增加 1,313,761 至 1,346,348 元/公頃，病蟲害存在之情境則增加 1,031,445 至 1,070,169 元/公頃。此外，在碳價格為 247.89 元/公噸二氧化碳下的無病蟲害情境，在單位木材價格約高於 8,997 元/立方公尺後，最大土地期望價值 $\hat{J}(T)$ 將超越碳價格為 1,820 元/公噸二氧化碳下的病蟲害存在之情境。

表 4 最大土地期望價值 $\hat{J}(T)$ 與最適輪伐期對單位木材價格之敏感度分析結果

單位木材 價格 (NTD/m ³)	Wang et al. (2001) 臺灣建議碳價格 1,820 元 (NTD/t CO ₂)				歐盟排放交易機制 247.89 元 (NTD/t CO ₂)			
	無病蟲害之情境		病蟲害存在之情境		無病蟲害之情境		病蟲害存在之情境	
	$\hat{J}(T)$ (NTD/ha)	輪伐期 (年)	$\hat{J}(T)$ (NTD/ha)	輪伐期 (年)	$\hat{J}(T)$ (NTD/ha)	輪伐期 (年)	$\hat{J}(T)$ (NTD/ha)	輪伐期 (年)
250	688,517	41	487,065	26	-54,000	1	-54,000	1
500	857,218	42	618,857	28	-54,000	1	-54,000	1
1,000	1,195,032	43	885,938	30	-54,000	1	-54,000	1
2,000	1,871,190	44	1,426,409	32	557,429	33	394,964	26
3,140 ¹	2,642,436	44	2,046,883	34	1,314,380	37	999,789	29
4,000	3,224,106	44	2,516,076	35	1,890,980	39	1,463,026	31
5,116 ²	3,979,038	45	3,125,808	36	2,642,108	40	2,067,710	33
6,000	4,577,157	45	3,609,129	36	3,238,131	41	2,548,395	33
8,000	5,930,368	45	4,703,495	37	4,588,389	42	3,638,882	35
10,000	7,283,579	45	5,798,188	38	5,939,674	43	4,731,264	36
12,000	8,636,789	45	6,893,472	38	7,291,908	43	5,824,750	36
15,000	10,666,606	45	8,536,397	38	9,320,258	43	7,466,228	37

註：¹為林國慶與柳婉郁 (2007) 所建立的杉木木材價格函數最大值；²為行政院農業委員會林務局木材市價資訊系統之杉木木材價格。

由杉木之邊際材積生長曲線可知邊際材積生長量逐漸降低，林主延長最適輪伐期所獲得的木材邊際收穫逐漸減少，不如提早伐採獲得木材收益與伐採後地租收入，因此最適輪伐期不會無限延長。由於單位木材價格的提升，增加木材收益與伐採後地租收入，因此將提升森林之最大土地期望價值 $\hat{J}(T)$ ，考慮病蟲害對木材效益之影響時，最適輪伐期較短，最大土地期望價值 $\hat{J}(T)$ 亦較低。

五、感染率之敏感度分析

(一)二次感染率 β 之敏感度分析

本研究將最大土地期望價值 $\hat{J}(T)$ 與最適輪伐期對二次感染率 β 之敏感度分析結果整理為表 5。根據最適輪伐期對二次感染率 β 之敏感度分析，在首次感染率 P 為基準值 0.16 時，考慮二次感染率 β 的變動，隨著二次感染率 β 的提升，碳價格為 1,820 與 247.89 元/公噸二氧化碳情境之最適輪伐期均有先降後升且最終趨於一固定值的趨勢，且碳價格為 1,820 元/公噸二氧化碳情境之最適輪伐期較碳價格為 247.89 元/公噸二氧化碳之情境延長 1 至 5 年；碳價格為 1,820 元/公噸二氧化碳之情境在二次感染率 β 約為 0.08 時，最適輪伐期由遞減轉為遞增，而二次感染率 β 約高於 0.2 後，最適輪伐期對二次感染率 β 之敏感性極低而維持在 43 年；碳價格為 247.89 元/公噸二氧化碳之情境在二次感染率 β 約為 0.11 時，最適輪伐期由遞減轉為遞增，而二次感染率 β 約高於 0.16 後，最適輪伐期對二次感染率 β 之敏感性極低而維持在 38 年。

根據最大土地期望價值 $\hat{J}(T)$ 對二次感染率 β 之敏感度分析，在首次感染率 P 為基準值 0.16 時，考慮二次感染率 β 的變動，隨著二次感染率 β 的提升，碳價格為 1,820 與 247.89 元/公噸二氧化碳情境之最大土地期望價值 $\hat{J}(T)$ 均為減少並漸趨一固定值的趨勢，且碳價

格為 247.89 元/公噸二氧化碳情境之最大土地期望價值 $\hat{J}(T)$ 較碳價格為 1,820 元/公噸二氧化碳之情境減少 33 至 35%；碳價格為 1,820 元/公噸二氧化碳情境之最大土地期望價值 $\hat{J}(T)$ 最終將趨於 3,061,289 元/公頃，而碳價格為 247.89 元/公噸二氧化碳之情境則為 1,999,545 元/公頃，最大土地期望價值 $\hat{J}(T)$ 對二次感染率 β 之敏感性變為極低，與最適輪伐期對二次感染率 β 之敏感性變為極低時相同。

表 5 最大土地期望價值 $\hat{J}(T)$ 與最適輪伐期對二次感染率 β 之敏感度分析結果

二次感染率 β	Wang et al. (2001) 臺灣建議碳價格 1,820 元 (NTD/t CO ₂)		歐盟排放交易機制 247.89 元 (NTD/t CO ₂)	
	$\hat{J}(T)$ (NTD/ha)	輪伐期 (年)	$\hat{J}(T)$ (NTD/ha)	輪伐期 (年)
0.000	3,979,038	45	2,642,108	40
0.022 ¹	3,788,077	40	2,522,422	37
0.044 ¹	3,552,590	35	2,369,454	34
0.060	3,391,925	34	2,261,411	32
0.080	3,229,112	33	2,147,064	31
0.100 ¹	3,125,808	36	2,067,710	33
0.200	3,061,604	42	2,000,233	38
0.300	3,061,291	43	1,999,554	38
0.400	3,061,289	43	1,999,545	38
0.500	3,061,289	43	1,999,545	38
0.600	3,061,289	43	1,999,545	38
0.700	3,061,289	43	1,999,545	38
0.800	3,061,289	43	1,999,545	38
0.900	3,061,289	43	1,999,545	38
1.000	3,061,289	43	1,999,545	38

註：¹ 為根據 Macpherson et al. (2017) 之研究，使用 5 個首次感染率 P 與二次感染率 β 之組合以刻劃不同病蟲害的感染特性。

起初隨著二次感染率 β 的提升而縮短最適輪伐期，因病蟲害在森林內傳播的速率較慢，採用縮短輪伐期的經營決策能保有較多的未感染之森林面積；然而二次感染率 β 繼續提升，病蟲害在森林內傳播的速率逐漸提高，若採取縮短最適輪伐期的經營決策將使碳給付收入及木材收穫減少，因此林主將延長最適輪伐期以領取碳給付及增加木材收穫，且較高的碳價格提供更大的誘因使林主延長最適輪伐期，因此碳價格為 1,820 元/公噸二氧化碳之情境有較長的最適輪伐期與較高的最大土地期望價值 $\hat{J}(T)$ 。本研究設定受感染樹木提供木材效益比例 ρ 與非木材效益比例 σ 等於 0.8 為基準值，隨著二次感染率 β 的提升，病蟲害在森林內傳播的速率逐漸提高，森林最終能提供木材與非木材效益之有效單位面積將趨近於 0.8 公頃，因此碳價格為 1,820 元/公噸二氧化碳情境之最大土地期望價值 $\hat{J}(T)$ 最終將趨於 3,061,289 元/公頃，而碳價格為 247.89 元/公噸二氧化碳之情境則為 1,999,545 元/公頃。

(二) 首次感染率 P 之敏感度分析

本研究將最大土地期望價值 $\hat{J}(T)$ 與最適輪伐期對首次感染率 P 之敏感度分析結果整理為表 6。根據最適輪伐期對首次感染率 P 之敏感度分析，在二次感染率 β 為基準值 0.1 時，考慮首次感染率 P 的變動，隨著首次感染率 P 的提升，碳價格為 1,820 與 247.89 元/公噸二氧化碳情境之最適輪伐期均有先降後升且最終趨於一固定值的趨勢，且碳價格為 1,820 元/公噸二氧化碳情境之最適輪伐期較碳價格為 247.89 元/公噸二氧化碳之情境延長 1 至 5 年；碳價格為 1,820 元/公噸二氧化碳之情境在首次感染率 P 約為 0.12 時，最適輪伐期由遞減轉為遞增，而首次感染率 P 約高於 0.43 後，最適輪伐期對首次感染率 P 之敏感性極低而維持在 42 年；碳價格為 247.89 元/公噸二氧化碳之情境在首次感染率 P 約為 0.09 時，最適輪伐期由遞減轉為遞增，而首次感染率 P 約高於 0.53 後，最適輪伐期對首次感染率 P 之敏感性極低而維持在 38 年。

根據最大土地期望價值 $\hat{J}(T)$ 對首次感染率 P 之敏感度分析，在二次感染率 β 為基準值 0.1 時，考慮首次感染率 P 的變動，隨著首次感染率 P 的提升，碳價格為 1,820 與 247.89 元/公噸二氧化碳情境之最大土地期望價值 $\hat{J}(T)$ 均為減少並漸趨一固定值的趨勢，且碳價格為 247.89 元/公噸二氧化碳情境之最大土地期望價值 $\hat{J}(T)$ 較碳價格為 1,820 元/公噸二氧化碳之情境減少約 33 至 35%；碳價格為 1,820 元/公噸二氧化碳情境之最大土地期望價值 $\hat{J}(T)$ 最終將趨於 3,061,626 元/公頃，而碳價格為 247.89 元/公噸二氧化碳之情境則為 2,000,185 元/公頃，最大土地期望價值 $\hat{J}(T)$ 對首次感染率 P 之敏感性變為極低，與最適輪伐期對首次感染率 P 之敏感性變為極低時相同。

首次感染率 P 之敏感度分析結果與二次感染率 β 之敏感度分析結果相似，首次感染率 P 為 0 相當於無病蟲害之情境，起初隨著首次感染率 P 的提升而縮短最適輪伐期，因病蟲害感染森林的能力較低，採用縮短輪伐期的經營決策能保有較多的未感染之森林面積；然而首次感染率 P 繼續提升，病蟲害感染森林的能力逐漸提高，若採取縮短最適輪伐期的經營決策將使碳給付收入及木材收穫減少，因此林主將延長最適輪伐期以領取碳給付及增加木材收穫，且較高的碳價格提供更大的誘因使林主延長最適輪伐期，因此碳價格為 1,820 元/公噸二氧化碳之情境有較長的最適輪伐期與較高的最大土地期望價值 $\hat{J}(T)$ 。本研究設定受感染樹木提供木材效益比例 ρ 與非木材效益比例 σ 等於 0.8 為基準值，隨著首次感染率 P 的提升，病蟲害感染森林的能力逐漸提高，森林最終能提供木材與非木材效益之有效單位面積將趨近於 0.8 公頃，因此碳價格為 1,820 元/公噸二氧化碳情境之最大土地期望價值 $\hat{J}(T)$ 最終將趨於 3,061,626 元/公頃，而碳價格為 247.89 元/公噸二氧化碳之情境則為 2,000,185 元/公頃。

表 6 最大土地期望價值 $\hat{J}(T)$ 與最適輪伐期對首次感染率 P 之敏感度分析結果

首次感染率 P	Wang et al. (2001) 臺灣建議碳價格 1,820 元 (NTD/t CO ₂)		歐盟排放交易機制 247.89 元 (NTD/t CO ₂)	
	$\hat{J}(T)$ (NTD/ha)	輪伐期 (年)	$\hat{J}(T)$ (NTD/ha)	輪伐期 (年)
0.0000	3,979,038	45	2,642,108	40
0.0003 ¹	3,958,344	43	2,632,199	39
0.0190 ¹	3,576,322	33	2,394,028	32
0.0400	3,410,431	31	2,280,315	30
0.0600	3,314,052	31	2,212,431	30
0.0800	3,248,147	32	2,164,458	30
0.1000	3,201,153	33	2,129,401	31
0.1600 ¹	3,125,808	36	2,067,710	33
0.2000	3,103,291	38	2,046,621	34
0.3000	3,079,193	40	2,021,261	36
0.4000	3,070,283	41	2,011,037	37
0.5000	3,066,234	42	2,006,033	37
0.6000	3,064,151	42	2,003,434	38
0.7000	3,062,974	42	2,001,971	38
0.8000	3,062,286	42	2,001,084	38
0.9000	3,061,875	42	2,000,533	38
1.0000	3,061,626	43	2,000,185	38

註：¹為根據 Macpherson et al. (2017) 之研究，使用 5 個首次感染率 P 與二次感染率 β 之組合以刻劃不同病蟲害的感染特性。

六、感染程度之敏感度分析

(一)受感染樹木提供非木材效益比例 σ 之敏感度分析

本研究將最大土地期望價值 $\hat{J}(T)$ 與最適輪伐期對受感染樹木提供非木材效益比例 σ 之敏感度分析結果整理為表 7。根據最適輪伐期對受感染樹木提供非木材效益比例 σ 之敏感度分析，在受感染樹木提供木材效益比例 ρ 為基準值 0.8 時，考慮受感染樹木提供非木材效益比例 σ 的變動，隨著受感染樹木提供非木材效益比例 σ 的提高，碳價格為 1,820 與 247.89 元/公噸二氧化碳情境之最適輪伐期均有延長的趨勢，且碳價格為 1,820 元/公噸二氧化碳情境之最適輪伐期對受感染樹木提供非木材效益比例 σ 之敏感性較碳價格為 247.89 元/公噸二氧化碳之情境高，在受感染樹木提供非木材效益比例 σ 約高於 0.65 後，碳價格為 1,820 元/公噸二氧化碳情境之最適輪伐期將超越碳價格為 247.89 元/公噸二氧化碳之情境。

根據最大土地期望價值 $\hat{J}(T)$ 對受感染樹木提供非木材效益比例 σ 之敏感度分析，在受感染樹木提供木材效益比例 ρ 為基準值 0.8 時，考慮受感染樹木提供非木材效益比例 σ 的變動，隨著受感染樹木提供非木材效益比例 σ 的提高，碳價格為 1,820 元/公噸二氧化碳情境之最大土地期望價值 $\hat{J}(T)$ 為增加的趨勢，而碳價格為 247.89 元/公噸二氧化碳之情境幾乎沒有變化；碳價格為 247.89 元/公噸二氧化碳情境之最大土地期望價值 $\hat{J}(T)$ 較碳價格為 1,820 元/公噸二氧化碳之情境減少約 14.29 至 38.25%。

受感染樹木提供非木材效益比例 σ 為 0 代表感染的樹木無提供任何非木材效益，而受感染樹木提供非木材效益比例 σ 為 1 代表病蟲害不影響樹木提供非木材效益。本研究之碳給付設定為森林的碳吸存價值，由於受感染樹木提供非木材效益比例 σ 為 0 時，受感染之樹木無法提供任何碳吸存能力，且病蟲害對森林的影響隨著輪伐期的延長而加

劇，林主爲了降低受感染森林的面積而縮短最適輪伐期；隨著受感染樹木提供非木材效益比例 σ 的提高，被病蟲害感染的樹木能提供林主更多碳給付收入，因此最適輪伐期將延長；而在碳價格爲 247.89 元/公噸二氧化碳之情境下，由於碳給付收入佔林主收入之比例較低，因此最適輪伐期在受感染樹木提供非木材效益比例 σ 約 0.65 之前較碳價格爲 1,820 元/公噸二氧化碳之情境長，以增加更多的木材收穫。而隨著受感染樹木提供非木材效益比例 σ 的提高，碳價格爲 1,820 元/公噸二氧化碳之情境所領取的碳給付較碳價格爲 247.89 元/公噸二氧化碳之情境高出許多，因此兩者之最大土地期望價值 $\hat{J}(T)$ 差距增加。

表 7 最大土地期望價值 $\hat{J}(T)$ 與最適輪伐期對受感染樹木提供非木材效益比例 σ 之敏感度分析結果

受感染樹木提供 非木材效益比例 σ	Wang et al. (2001) 臺灣建議碳價格 1,820 元 (NTD/t CO ₂)		歐盟排放交易機制 247.89 元 (NTD/t CO ₂)	
	$\hat{J}(T)$ (NTD/ha)	輪伐期 (年)	$\hat{J}(T)$ (NTD/ha)	輪伐期 (年)
0.0	2,258,327	23	1,935,605	30
0.1	2,345,491	24	1,951,482	30
0.2	2,437,725	25	1,967,734	31
0.3	2,535,477	26	1,984,109	31
0.4	2,639,768	28	2,000,485	31
0.5	2,750,557	29	2,017,079	32
0.6	2,868,735	31	2,033,919	32
0.7	2,993,997	34	2,050,760	32
0.8 ¹	3,125,808	36	2,067,710	33
0.9	3,262,973	38	2,084,983	33
1.0	3,404,363	40	2,102,256	33

註：¹爲本研究設定之基準值。

(二)受感染樹木提供木材效益比例 ρ 之敏感度分析

本研究將最大土地期望價值 $\hat{J}(T)$ 與最適輪伐期對受感染樹木提供木材效益比例 ρ 之敏感度分析結果整理為表 8。根據最適輪伐期對受感染樹木提供木材效益比例 ρ 之敏感度分析，在受感染樹木提供非木材效益比例 σ 為基準值 0.8 時，考慮受感染樹木提供木材效益比例 ρ 的變動，隨著受感染樹木提供木材效益比例 ρ 的提升，碳價格為 1,820 與 247.89 元/公噸二氧化碳情境之最適輪伐期均有延長的趨勢，碳價格為 1,820 元/公噸二氧化碳情境之最適輪伐期較碳價格為 247.89 元/公噸二氧化碳之情境延長 1 至 4 年。

根據最大土地期望價值 $\hat{J}(T)$ 對受感染樹木提供木材效益比例 ρ 之敏感度分析，在受感染樹木提供非木材效益比例 σ 為基準值 0.8 時，考慮受感染樹木提供木材效益比例 ρ 的變動，隨著受感染樹木提供木材效益比例 ρ 的提升，碳價格為 1,820 與 247.89 元/公噸二氧化碳情境之最大土地期望價值 $\hat{J}(T)$ 均為增加的趨勢，碳價格為 1,820 元/公噸二氧化碳情境之最大土地期望價值 $\hat{J}(T)$ 較碳價格為 247.89 元/公噸二氧化碳之情境增加 884,626 至 1,079,686 元/公頃。

受感染樹木提供木材效益比例 ρ 為 0 代表感染的樹木無提供任何木材效益，而受感染樹木提供木材效益比例 ρ 為 1 代表病蟲害不影響樹木提供木材效益。由於病蟲害對森林的影響是隨著輪伐期的延長而加劇，林主為了降低病蟲害對木材收益的影響，因此縮短最適輪伐期，而隨著受感染樹木提供木材效益比例 ρ 的提升，病蟲害對樹木之木材效益之影響減少，被病蟲害感染的樹木能提供林主更多木材收穫，最適輪伐期逐漸延長，較高碳價格亦提供更大誘因使林主延長最適輪伐期，最大土地期望價值 $\hat{J}(T)$ 亦較高。

表 8 最大土地期望價值 $\hat{J}(T)$ 與最適輪伐期對受感染樹木提供木材效益比例 ρ 之敏感度分析結果

受感染樹木提供木材效益比例 ρ	Wang et al. (2001) 臺灣建議碳價格 1,820 元 (NTD/t CO ₂)		歐盟排放交易機制 247.89 元 (NTD/t CO ₂)	
	$\hat{J}(T)$ (NTD/ha)	輪伐期 (年)	$\hat{J}(T)$ (NTD/ha)	輪伐期 (年)
0.0	1,700,815	19	816,189	18
0.1	1,827,012	20	919,652	19
0.2	1,963,777	21	1,035,642	20
0.3	2,111,827	22	1,165,054	21
0.4	2,270,909	23	1,307,902	22
0.5	2,445,582	25	1,463,308	23
0.6	2,644,155	28	1,634,557	25
0.7	2,871,029	32	1,834,621	28
0.8 ¹	3,125,808	36	2,067,710	33
0.9	3,399,202	39	2,327,685	37
1.0	3,682,774	42	2,603,088	40

註：¹為本研究設定之基準值。

肆、結論與建議

一、結論

儘管病蟲害對樹木有著重大影響以及有各種分析最適輪伐期的研究，然而觀看前人文獻可知，臺灣關於病蟲害影響最適輪伐期之著作付之闕如，因此本研究考慮病蟲害與碳給付影響最適輪伐期之研究，將臺灣的林業現況應用於其中，模擬病蟲害對臺灣森林

經營之最適輪伐期的影響，分析碳給付、伐採成本、單位木材價格、折現率、伐採後地租收入（材積分收率）以及伐採後碳釋放比例等最適輪伐期之關鍵變數的影響，分別呈現考量病蟲害存在與否的最適輪伐期與最大土地期望價值 $\hat{J}(T)$ 之變化，以及分析病蟲害存在之情境中感染率與感染程度的影響，以供未來林業部門之經營決策與學術研究參考之用。

基礎情境下之模擬結果顯示，病蟲害的存在將影響森林提供木材與非木材效益之有效面積，與無病蟲害之情境相較，病蟲害存在之情境有較短的最適輪伐期與較低的最大土地期望價值 $\hat{J}(T)$ 。敏感度分析顯示，在無病蟲害與病蟲害存在之情境下，越高的碳價格能提供更大的誘因使林主延長最適輪伐期，最大土地期望價值 $\hat{J}(T)$ 增加；越高的伐採成本將使林主延長最適輪伐期以領取碳給付及增加木材收穫，但最大土地期望價值 $\hat{J}(T)$ 將逐漸減少；越高的單位木材價格增加木材收益與伐採後地租收入，因此將提升森林之最大土地期望價值 $\hat{J}(T)$ ，但邊際材積生長量逐漸降低，林主延長最適輪伐期所獲得的木材邊際收穫逐漸減少，因此最適輪伐期不會無限延長；折現率的提高代表林主經營森林的風險越高，未來現金流量的現值越低，因而使林主縮短輪伐期以減少經營的風險，最大土地期望價值 $\hat{J}(T)$ 亦減少，在折現率的變動下，考慮病蟲害的存在與較高的碳價格有助於穩定最大土地期望價值 $\hat{J}(T)$ ；伐採後地租收入（材積分收率）提高代表林主以木材收益乘以材積分收率作為土地出租之收入越高，因此為了提高森林之木材收穫，林主將延長最適輪伐期，最大土地期望價值 $\hat{J}(T)$ 增加；較高的伐採後碳釋放比例將提高伐採森林的機會成本，林主將延長最適輪伐期領取碳給付及增加木材收穫，但最大土地期望價值 $\hat{J}(T)$ 仍逐漸減少。

若在病蟲害存在的情境中考慮感染率的變動，起初隨著二次感染率 β 的提升採用縮短輪伐期的經營決策能保有較多的未感染之森林面積，然而二次感染率 β 繼續提升，病蟲害在森林內傳播的速率逐漸提高，若採取縮短最適輪伐期的經營決策將使碳給付收入

及木材收穫減少，因此林主將延長最適輪伐期以領取碳給付及增加木材收穫，且較高的碳價格提供更大的誘因使林主延長最適輪伐期，但最大土地期望價值 $\hat{J}(T)$ 逐漸降低；考慮首次感染率 P 的變動，其結果與二次感染率 β 之分析結果相似。若考慮感染程度的變動，受感染樹木提供非木材效益比例 σ 的降低將使受感染樹木之非木材效益減少，林主為了降低受感染森林的面積而縮短最適輪伐期，最大土地期望價值 $\hat{J}(T)$ 亦減少；受感染樹木提供木材效益比例 ρ 的降低將使受感染樹木之木材效益減少，林主為了降低受感染森林的面積而縮短最適輪伐期，最大土地期望價值 $\hat{J}(T)$ 亦減少。

根據本研究之模擬計算結果與分析，顯示病蟲害對於森林經營之最適輪伐期與土地期望價值有一定的影響，欲研擬實際情況的森林經營決策勢必無法忽視病蟲害的存在與影響。若病蟲害已感染森林，根據本研究之模擬計算結果與分析，提升碳價格、單位木材價格與伐採後地租收入，降低伐採成本、折現率與伐採後碳釋放比例，以上方式皆有助於增加森林之土地期望價值；若病蟲害的感染率高，採取縮短最適輪伐期以避免感染的經營決策並不管用，為確保木材收穫與碳給付須維持一定的輪伐期；若病蟲害破壞林木之木材與非木材效益程度大，在感染率不變的前提下，縮短最適輪伐期有助於提升森林之土地期望價值。

二、建議

本研究延伸過去病蟲害與碳給付影響最適輪伐期之研究，將臺灣的林業現況應用於其中，由於臺灣對於森林病蟲害之感染率以及對輪伐期影響之相關研究付之闕如，對於本研究在變數設定上相對困難，因而延續 Macpherson et al. (2017) 研究中以病蟲害感染整座森林之一半的樹木所需的時間 $t_{0.5}$ 反推首次感染率 P 與二次感染率 β 之基準值，因此本研究建議未來臺灣林業部門與研究學者能建立並整合森林病蟲害資訊與數據之資料庫，不只讓考慮病蟲害對森林影響之模擬分析結果能更符合臺灣之林業現況，亦可達到

增進森林病蟲害相關知識之普及與發展。

本研究為模擬病蟲害發生時，林主該如何決定最適輪伐期，使已感染的森林之經營效益最佳化，故本研究進行各項變數的敏感度分析，讓讀者了解不同情境下的最適輪伐期與土地期望價值之變動趨勢，但尚未考量森林病蟲害之防治技術，若將病蟲害防治技術與成本納入森林經營決策之考量，將使森林經營的規劃與判斷更為全面且完整，林主的經營方向與選擇也將更為多元。但森林病蟲害之防治成本以及病蟲害之抗藥性方面的文獻與資料較少，且抗藥性的考量將使本研究之模擬更為複雜，建議後續研究可以特定病蟲害的方向進行更加完善的模擬，如感染狀況、感染率、專一性、防治技術等。

本研究之模型是簡化為假設同齡純林之經營模式，並於最適輪伐期採用皆伐作業進行木材收穫，皆伐後並未進行更新造林，而是以伐採後之地租收穫計算無窮期折現，此研究結果僅能供單一輪伐期之同齡純林經營決策參考，並未考量多個輪伐期間病蟲害如何傳播，且同齡純林之生態效益與生物多樣性低、病蟲害感染率高，搭配大面積皆伐作業常伴隨林地大面積裸露、土壤易遭受充實而流失與動、植物棲息地的破壞，較不符合森林的永續經營理念，建議後續研究可將森林之永續經營與輪伐期後的更新造林納入考量，結合病蟲害之模擬，對於臺灣之林業經營有更全面的助益。

此外，由本研究之基礎情境模擬結果與碳價格之敏感度分析結果顯示，建立碳交易市場對於最適輪伐期有延長的助益，可以提升最大土地期望價值，且將病蟲害對森林之影響納入經營決策之考量有助於穩定最大土地期望價值，因此本研究建議未來臺灣政府建立完善的碳交易制度，不僅增加林主之收益，活絡臺灣林業市場，更強調森林為碳排放減量的重要途徑，在增加臺灣森林覆蓋面積與臺灣森林碳匯的同時，若結合病蟲害之模擬，將病蟲害之影響納入碳吸存效益之考量，將使臺灣森林經營之決策考量更為周全。

(收件日期為民國 107 年 3 月 9 日；接受日期為民國 107 年 11 月 21 日)

參考文獻

一、中文部分

- 任憶安，1994，「臺灣杉木私有林造林生產之回顧與展望」，林業試驗所研究報告季刊，9：235-240。(Jen, I. A., 1994, "Outlook and Historical Review of Chinese Fir (Cunninghamia lanceolata) Timber Production in the Taiwan Private Forests", *Bulletin of Taiwan Forestry Research Institute*, 9: 235-240.)
- 行政院農業委員會林務局，2000，「國有林事業區出租造林地管理要點」，植根法律網，取自 <https://goo.gl/VTULzH>，檢索日期：2017/08/16。(Forestry Bureau, Council of Agricultural, Executive Yuan, 2000, "Guidelines for Management of National Forest Working Circle of National Forest Leased Reforestation", Rootlaw, Retrieved August 16, 2017, from <https://goo.gl/VTULzH>.)
- 行政院農業委員會林務局，2002，「農林字第 0910000477 號函釋」，函釋查詢系統，取自 <https://goo.gl/x36iKu>，檢索日期：2017/09/11。(Forestry Bureau, Council of Agricultural, Executive Yuan, 2002, "Letter Interpretation of Nonglinzi No. 0910000477", Letter Interpretation System, Retrieved September 11, 2017, from <https://goo.gl/x36iKu>.)
- 行政院農業委員會林務局，2011，「一般造林地區、海岸林造林、國有崩場地植生復育、離島造林海岸林育苗工程表」，宜蘭：林務局羅東林區管理處。(Forestry Bureau, Council of Agricultural, Executive Yuan, 2011, "Worksheets for Reforestation, Coastal Forest Afforestation, Reforestation of Landslide Areas in National Forest and Outlying Island Afforestation and Coastal Forest Nursery", Yilan: Luodong Forest District Office, Forestry Bureau, Council of Agricultural.)
- 行政院農業委員會林務局，2015，第四次森林資源調查報告，台北：行政院農業委員會

林務局，取自 <https://goo.gl/75Xpd5>，檢索日期：2018/09/07。(Forestry Bureau, Council of Agricultural, Executive Yuan, 2015, *The Fourth Forest Resource Survey Report*, Taipei: Forestry Bureau, Council of Agricultural, Executive Yuan, Retrieved September 07, 2018, from <https://goo.gl/75Xpd5>.)

行政院農業委員會林務局，2017，林業統計年報，台北：行政院農業委員會林務局，取自 <https://goo.gl/4LH2M6>，檢索日期：2017/09/07。(Forestry Bureau, Council of Agricultural, Executive Yuan, 2017, *Forestry Statistics Annual Report*, Taipei: Forestry Bureau, Council of Agricultural, Executive Yuan, Retrieved September 07, 2017, from <https://goo.gl/4LH2M6>.)

行政院農業委員會林業試驗所，2017，「危害種類案件統計表」，林木疫情鑑定與資訊中心，取自 <https://goo.gl/p2GkcG>，檢索日期：2017/12/11。(Taiwan Forestry Research Institute, Council of Agricultural, Executive Yuan, 2017, “Hazard Type Case Statistics Table”, Forest Disease Information Center, Retrieved December 11, 2017, from <https://goo.gl/p2GkcG>.)

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，取自 <https://goo.gl/iGyhGw>，檢索日期：2017/08/16。(Bureau of Agricultural Finance, Council of Agricultural, Executive Yuan, 2016, “Key Points of Afforestation Loan”, Agricultural Development Fund Loan, Retrieved August 16, 2017, from <https://goo.gl/iGyhGw>.)

行政院農業委員會農業藥物毒物試驗所，2017，「森林病蟲害」，植物保護手冊，取自 <http://farmer.iyard.org/ppm/ppm.htm#cat7>，檢索日期：2017/12/11。(Taiwan Agricultural Chemicals and Toxic Substances Research Institute, Council of Agriculture, Executive Yuan, 2017, “Forest Pests”, Plant Protection Handbook, Retrieved December 11, 2017, from <http://farmer.iyard.org/ppm/ppm.htm#cat7>.)

行政院環境保護署，2015，「溫室氣體減量及管理法」，取自 <https://goo.gl/Gaijp3>，檢索日期：2017/08/16。(Environmental Protection Administration Executive Yuan, 2015, “Greenhouse Gas Reduction and Management Act”, Retrieved August 16, 2017, from <https://goo.gl/Gaijp3>.)

- 林國慶與柳婉郁，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，12：1-35。(Lin, K. C. and W. Y. Liu, 2007, "An Analysis of Optimal Rotation and Expected Land Values under Carbon Pricing in Taiwan", *Taiwanese Agricultural Economic Review*, 12: 1-35.)
- 柳婉郁，2004，「最適造林獎勵金之研究」，國立臺灣大學農業經濟學研究所碩士論文。(Liu, W. Y., 2004, *A Study on the Optimal Subsidy of Reforestation*, Master's Thesis, Department of Agricultural Economics, National Taiwan University.)
- 柳婉郁，2008，「地主參與碳匯方案與機制之經濟分析」，國立臺灣大學農業經濟學研究所博士論文。(Liu, W. Y., 2008, *The Economic Analysis of Landowners' Participation in Carbon Sequestration Programs and Mechanisms*, Master's Thesis, Department of Agricultural Economics, National Taiwan University.)
- 柳婉郁、盧又銘與林國慶，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，15：1-35。(Liu, W. Y., Y. M. Lu, and K. C. Lin, 2009, "Measuring the Optimal Rotation Period under Carbon Price and Timber Price Uncertainty", *Taiwanese Agricultural Economic Review*, 15: 1-35.)
- 柳婉郁與徐寬，2017，「森林碳給付政策之經濟分析」，農業與經濟，59：1-48。(Liu, W. Y. and K. Hsu, 2017, "An Economic Analysis of Forest Carbon Payment Policy", *Agriculture and Economics*, 59: 1-48.)
- 高榕翎，2013，「臺灣與大陸杉木人工林生長之研究比較」，國立臺灣大學森林環境暨資源學研究所碩士論文。(Kuo, J. L., 2013, *The Comparison of the Growth of Cunninghamia lanceolata Plantation in Taiwan and China*, Master's Thesis, Department of Forestry and Resources Conservation, National Taiwan University.)
- 劉浚明與鍾旭和，1993，「臺灣杉非線性收穫模式之建立」，中華林學季刊，26：39-49。(Liu, C. M. and H. H. Chung, 1993, "Taiwan Cryptomerioides Nonlinear Yield Function", *Quarterly Journal of Chinese Forestry*, 26: 39-49.)
- 鄭欽龍與施友元，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，39：315-327。(Zheng, C. L. and Y. Y. Shih, 2006, "An Analysis of the Timber Logging Cost

of Leased Forestland in Nantou”, *Quarterly Journal of Chinese Forestry*, 39: 315-327.)

二、英文部分

- Amacher, G. S., M. Ollikainen, and E. Koskela, 2009, *Economics of Forest Resources*, Cambridge: The MIT Press.
- Appiah, A. A., P. Jennings, and J. A. Turner, 2004, “Phytophthora Ramorum: One Pathogen and Many Diseases, an Emerging Threat to Forest Ecosystems and Ornamental Plant Life”, *Mycologist*, 18: 145-150.
- Bauce, É. and A. Fuentealba, 2013, “Interactions between Stand Thinning, Site Quality and Host Tree Species on Spruce Budworm Biological Performance and Host Tree Resistance Over a 6 Year Period after Thinning”, *Forest Ecology and Management*, 304: 212-223.
- Bishop, J. T., 1998, *The Economics of Non-timber Forest Benefits: An Overview*, London: International Institute for Environment and Development.
- Boyd, I. L., P. H. Freer-Smith, C. A. Gilligan, and H. C. J. Godfray, 2013, “The Consequence of Tree Pests and Diseases for Ecosystem Services”, *Science*, 342: 823.
- Carvalho-Santos, C., J. P. Honrado, and L. Hein, 2014, “Hydrological Services and the Role of Forests: Conceptualization and Indicator-based Analysis with an Illustration at a Regional Scale”, *Ecological Complexity*, 20: 69-80.
- Castagneyrol, B., H. Jactel, C. Vacher, E. G. Brockerhoff, and J. Koricheva, 2014, “Effects of Plant Phylogenetic Diversity on Herbivory Depend on Herbivore Specialization”, *Journal of Applied Ecology*, 51: 134-141.
- Churchill, D. J., A. J. Larson, M. C. Dahlgreen, J. F. Franklin, P. F. Hessburg, and J. A. Lutz, 2013, “Restoring Forest Resilience: From Reference Spatial Patterns to Silvicultural Prescriptions and Monitoring”, *Forest Ecology and Management*, 291: 442-457.
- Condeso, T. E. and R. K. Meentemeyer, 2007, “Effects of Landscape Heterogeneity on the Emerging Forest Disease Sudden Oak Death”, *Journal of Ecology*, 95: 364-375.
- Cudlín, P., J. Seják, J. Pokorný, J. Albrechtová, O. Bastian, and M. Marek, 2013, “Forest

- Ecosystem Services under Climate Change and Air Pollution”, *Developments in Environmental Science*, 13: 521-546.
- D’Amato, A. W., S. J. Troumbly, M. R. Saunders, K. J. Puettmann, and M. A. Albers, 2011, “Growth and Survival of *Picea Glauca* Following Thinning of Plantations Affected by Eastern Spruce Budworm”, *Northern Journal of Applied Forestry*, 28: 72-78.
- Englin, J., P. Boxall, and G. Hauer, 2000, “An Empirical Examination of Optimal Rotations in a Multiple-use Forest in the Presence of Fire Risk”, *Journal of Agricultural and Resource Economics*, 25: 14-27.
- Englin, J. and J. M. Callaway, 1993, “Global Climate Change and Optimal Forest Management”, *Natural Resource Modeling*, 7: 191-202.
- Forestry Commission Scotland, 2015, *Ramorum (on Larch) Action Plan for Scotland*, Forestry Commission Scotland, Retrieved August 16, 2017, from <https://scotland.forestry.gov.uk/images/corporate/pdf/phytophthora-ramorum-action-plan.pdf>.
- Gilligan, C., R. Fraser, C. Godfray, N. Hanley, S. Leather, T. Meagher, J. Mumford, J. Petts, N. Pidgeon, C. Potter, M. Shaw, J. G. Unger, S. Woodward, and M. Jeger, 2013, *Tree Health and Plant Biosecurity Expert Taskforce: Final Report*, London: Department for the Environment, Food and Rural Affairs.
- Hartman, R., 1976, “The Harvesting Decision when a Standing Forest Has Value”, *Economic Inquiry*, 14: 52-58.
- Hicke, J. A., C. D. Allen, A. R. Desai, M. C. Dietze, R. J. Hall, E. H. Hogg, D. M. Kashian, D. Moore, K. F. Raffa, N. A. Sturrock, and J. Vogelmann, 2012, “Effects of Biotic Disturbances on Forest Carbon Cycling in The United States and Canada”, *Global Change Biology*, 18: 7-34.
- Jactel, H. and E. G. Brockerhoff, 2007, “Tree Diversity Reduces Herbivory by Forest Insects”, *Ecology Letters*, 10: 835-848.
- Johansson, T., J. Hjältén, J. de Jong, and H. von Stedingk, 2013, “Environmental Considerations from Legislation and Certification in Managed Forest Stands: A Review of Their Importance for Biodiversity”, *Forest Ecology and Management*, 303: 98-112.
- Johansson, S. M., J. E. Pratt, and F. O. Asiegbu, 2002, “Treatment of Norway Spruce and Scots

- Pine Stumps with Urea against the Root and Butt Rot Fungus *Heterobasidion Annosum* Possible Modes of Action”, *Forest Ecology and Management*, 157: 87-100.
- Koskela, E. and M. Ollikainen, 2001, “Optimal Private and Public Harvesting under Spatial and Temporal Interdependence”, *Forest Science*, 47: 484-496.
- Loehle, C., C. Idso, and T. B. Wigley, 2016, “Physiological and Ecological Factors Influencing Recent Trends in United States Forest Health Responses to Climate Change”, *Forest Ecology and Management*, 363: 179-189.
- Macpherson, M. F., A. Kleczkowski, J. R. Healey, and N. Hanley, 2017, “Payment for Multiple Forest Benefits Alters the Effect of Tree Disease on Optimal Forest Rotation Length”, *Ecological Economics*, 134: 82-94.
- Macpherson, M. F., A. Kleczkowski, J. R. Healey, and N. Hanley, 2018, “The Effects of Disease on Optimal Forest Rotation: A Generalisable Analytical Framework”, *Environmental and Resource Economics*, 70: 565-588.
- Marzano, M., L. Fuller, and C. P. Quine, 2017, “Barriers to Management of Tree Diseases: Framing Perspectives of Pinewood Managers around *Dothistroma* Needle Blight”, *Journal of Environmental Management*, 188: 238-245.
- Millar, C. I., N. L. Stephenson, and S. L. Stephens, 2007, “Climate Change and Forests of the Future: Managing in the Face of Uncertainty”, *Ecological Applications*, 17: 2145-2151.
- Mullett, M. S., 2014, *The Epidemiology of Dothistroma Needle Blight in Britain*, PhD Thesis, Imperial College London.
- Netherer, S. and A. Schopf, 2010, “Potential Effects of Climate Change on Insect Herbivores in European Forests-general Aspects and the Pine Processionary Moth as Specific Example”, *Forest Ecology and Management*, 259: 831-838.
- Nghiem, N., 2014, “Optimal Rotation Age for Carbon Sequestration and Biodiversity Conservation in Vietnam”, *Forest Policy and Economics*, 38: 56-64.
- Nielsen, A. B., S. B. Olsen, and T. Lundhede, 2007, “An Economic Valuation of the Recreational Benefits Associated with Nature-based Forest Management Practices”, *Landscape and Urban Planning*, 80: 63-71.
- Pautasso, M., G. Aas, V. Queloz, and O. Holdenrieder, 2013, “European Ash (*Fraxinus*

- Excelsior) Dieback - A Conservation Biology Challenge”, *Biological Conservation*, 158: 37-49.
- Pautasso, M., K. Dehnen-Schmutz, O. Holdenrieder, S. Pietravalle, N. Salama, M. J. Jeger, E. Lange, and S. Hehl-Lange, 2010, “Plant Health and Global Change—Some Implications for Landscape Management”, *Biological Reviews*, 85: 729-755.
- Perry, D. A. and J. Maghembe, 1989, “Ecosystem Concepts and Current Trends in Forest Management: Time for Reappraisal”, *Forest Ecology and Management*, 26: 123-140.
- Pratt, J., 2002, “Stump Treatment against Fomes”, in Forest Research, eds., *Forest Research Annual Report and Accounts 2001-2002*, 76-85, Edinburgh: The Stationery Office Press.
- Price, C. and R. Willis, 2011, “The Multiple Effects of Carbon Values on Optimal Rotation”, *Journal of Forest Economics*, 17: 298-306.
- Redfern, D. B., J. E. Pratt, S. J. Hendry, and J. D. Low, 2010, “Development of a Policy and Strategy for Controlling Infection by *Heterobasidion Annosum* in British Forests: A Review of Supporting Research”, *Forestry: An International Journal of Forest Research*, 83: 207-218.
- Ribe, R. G., 1989, “The Aesthetics of Forestry: What Has Empirical Preference Research Taught Us?”, *Environmental Management*, 13: 55-74.
- Rizzo, D. M. and M. Garbelotto, 2003, “Sudden Oak Death: Endangering California and Oregon Forest Ecosystems”, *Frontiers in Ecology and the Environment*, 1: 197-204.
- Samuelson, P. A., 1976, “Economics of Forestry in an Evolving Society”, *Economic Inquiry*, 14: 466-492.
- Seung, J. P., 2007, “A Carbon Tax or an Environmental Tax Reform: Difficult Decision for Japan”, in Proceeding of *The Eighth Global Conference on Environmental Taxation*, German, Munich.
- Snyder, D. L. and R. N. Bhattacharyya, 1990, “A More General Dynamic Economic Model of the Optimal Rotation of Multiple-use Forests”, *Journal of Environmental Economics and Management*, 18: 168-175.
- Sturrock, R. N., 2012, “Climate Change and Forest Diseases: Using Today’s Knowledge to Address Future Challenges”, *Forest Systems*, 21: 329-336.

- Sturrock, R. N., S. J. Frankel, A. V. Brown, P. E. Hennon, J. T. Kliejunas, K. J. Lewis, and A. J. Woods, 2011, "Climate Change and Forest Diseases", *Plant Pathology*, 60: 133-149.
- Swallow, S. K. and D. N. Wear, 1993, "Spatial Interactions in Multiple-use Forestry and Substitution and Wealth Effects for the Single Stand", *Journal of Environmental Economics and Management*, 25: 103-120.
- Van Kooten, G. C., C. S. Binkley, and G. Delcourt, 1995, "Effect of Carbon Taxes and Subsidies on Optimal Forest Rotation Age and Supply of Carbon Services", *American Journal of Agricultural Economics*, 77: 365-374.
- Wang, T. F., P. C. Lee, and C. Y. Tseng, 2001, "The Economic Impact Analysis of Air Pollution Prevention in Taiwan: The Application of a CGE Model", in *Proceedings of 2001 Academic Symposium of Environmental Resource Economics, Management and System Analysis*, Taipei.
- Work, T. T., D. G. McCullough, J. F. Cavey, and R. Komsa, 2005, "Arrival Rate of Nonindigenous Insect Species into the United States through Foreign Trade", *Biological Invasions*, 7: 323-332.

The Effects of the Pests and Diseases on the Optimal Forest Rotation and Land Expected Value Considering the Payment of Environmental Services

Yow-Ru Lin* and Wan-Yu Liu**

Abstract

Pests and disease have many impacts on the environmental management and land use decision-making. Previous works less discussed about the effect of disease and carbon payment on the optimal rotation length. This study models the effect of disease on the optimal rotation length and the maximum land expectation value of Taiwan forest management. In the empirical analysis of this study, the situation of disease has a shorter optimal rotation length and a lower maximum land expectation value than the situation of no disease. In the sensitivity analysis of this study, at the both of the situation of no disease and disease, the increase of the carbon price, per-cubic-metre price of timber and land rent after harvesting (distribution rate of timber volume) will increase the optimal rotation length and maximum land expectation value. The increase of the timber logging cost and carbon release rate after harvesting will increase the optimal rotation length and decrease the maximum land expectation value. The increase of the

* Department of Forestry, National Chung Hsing University.

** Department of Forestry, National Chung Hsing University. E-mail: wyliau@nchu.edu.tw.

This work has been supported in part by the Ministry of Science and Technology, Taiwan, under Grant MOST 108-2811-H-005-502.

DOI: 10.3966/054696002020060107004

discount rate will decrease the optimal rotation length and maximum land expectation value. In the situation of disease, the increase of the infection rate will not necessarily decrease the optimal rotation length, but the maximum land expectation value will be decreased.

Keywords: Disease, Carbon Payment, Optimal Rotation Length, Maximum Land Expectation Value

JEL Classification: Q50, Q51, Q56