

考慮價格波動與碳給付機制下地主 土地利用決策之研究-以臺灣杉木 為例

林國慶*、柳婉郁**

摘要

本研究主要分析價格不確定情形下，政府提供碳給付政策對地主土地利用決策之影響。本研究根據過去文獻設計四種可能的給付方式，包括一次給付、碳流量給付、碳存量給付以及事後給付方式，造林地主之土地利用決策選項包括維持成林、砍伐林木後轉作農用，及砍伐林木後重新造林。地主追求土地現值極大來進行決策，站在政府立場則是希望地主繼續維持成林。本研究之主要結論如下：(1) 若木材價格存在不確定因素，則農業收入及折現率影響私有地主土地利用決策之幅度最大。當農業收入或折現率減少時，私有地主參與造林之木材價格區間會增加，轉為農業用途之木材價格門檻會降低，而砍伐林木後重新造林之木材價格門檻會增加，也會延長維持造林之期間。(2) 無論政府採行何種碳給付機制，實施碳給付政策都會降低造林地轉為農業用途之木材價格門檻，增加地主造林之木材價格區間。(3) 在四種碳給付機制中，除了第二種機制之外，其他三種機制均會使得砍伐林木後重新造林之木材價格門檻降低，縮短維持造林之期間，亦即，碳給付政策之存在不一定會延長地主之輪伐期。除了第二種機制之外，其他三種機制均可能縮短地主之輪伐期。(4) 在政府未執行碳給付政策時，地主選擇繼續造林之木材價格

* 國立臺灣大學農業經濟學系教授。

** 真理大學觀光數位知識學系專任助理教授，本文聯繫作者。Email: nellyliu@gmail.com。

區間在第 18 年之後會越來越小。即使地主在第 18 年後繼續維持造林，最多也僅會種植到第 32 年。地主在第 32 年砍伐林木後是否會將農地轉作為農業用途或是重新造林，則視當時之木材價格而定。若每立方公尺之木材價格高於 5,100 元，農地地主會重新造林，低於 5,100 元，則會轉作為農業用途。(5) 地主參與碳給付政策後，其木材收入現值會減少，且隨著每單位碳給付水準之增加，減少的幅度將擴大。另外，碳收入現值佔地主總收入現值之比例會隨著每單位碳給付水準之增加而增加，而其中以第二種機制之碳收入現值佔總收入現值的比例最小。(6) 在相同政府支出之下，相較於其他三種給付機制，地主在第二種給付機制下繼續造林之價格區間最大，其輪伐期亦相對較長。整體而言，第二種給付機制之政策效果明顯優於其他三種機制。

關鍵詞：價格不確定、碳給付、最適輪伐期、土地利用決策

JEL 分類代號：Q15, Q23, Q28

考慮價格波動與碳給付機制下地主 土地利用決策之研究-以臺灣杉木 為例

林國慶、柳婉郁

壹、緒論

根據京都議定書內容的第3.3條與第3.4條之規範，森林產生之碳吸存可作為可交易排放單位 (tradable emission units)，即碳抵減 (carbon credits)，因此各國開始重視採用森林碳吸存方式來達成減量規範。然而，若社會期許林地經營目標之一為增加碳吸存量，則政府或社會必須針對森林所吸存的碳提供經濟誘因，以促使私有地主放棄部分經濟機會，增加森林碳吸存數量。換言之，政府或社會必須建立經濟誘因機制，使得森林碳吸存可轉為貨幣價值，增加農地地主造林誘因，促使私有地主提升森林的碳吸存能量。目前世界各國已經實施各種政策措施來增進森林的碳吸存功能，這些措施包括課稅、補貼與成本分擔等 (Cubbage, 2003)。政府鼓勵農民利用農地造林來增加碳吸存之方式亦成為各國之減量趨勢 (Thomassin, 2003)。

我國目前對於碳吸存與碳釋放並沒有進行補貼或課稅，但為了因應國際溫室氣體減量，無論未來可能建立的機制是課徵碳稅、碳吸存交易或給付碳補貼，相關機制所產生之效果是值得關注的問題¹。Bangsund and Leistritz (2008) 提出碳給付政策通常是由政府

¹ 為提升地主之造林誘因，鼓勵地主進行造林，因此近年來關於探討政府進行獎勵政策或課徵稅制對於地主造林決策影響之研究頗多，例如 Klemperer (1977)、Chang (1982, 1983)、Englin and Klan (1990) 及 Koskela and Ollikainen (2001) 等文獻。

主導（例如美國即由聯邦政府來主導碳給付政策）。有關碳給付之相關國外文獻很多（van Kooten et al., 1995; Romero et al., 1998; Appels, 2001; Murray, 2000, 2003; Lewandrowski et al., 2004; Chladná, 2007），例如 Parks and Hardie (1995)、Alig et al. (1997)、Plantinga et al. (1999)、Stavins (1999) 及 Lewandrowski et al. (2004) 是分析美國休耕保育管理計畫 (conservation reserve program, CRP) 下之農地造林補貼政策，並以碳吸存量作為基礎來進行給付，而 Antle et al. (2001) 及 McCarl and Schneider (2001) 則是以土地為基礎，分析政府之直接給付政策或政府碳給付政策。

不同的碳給付方式將會影響造林地主之土地利用以及造林砍伐決策，因此政府在規劃以碳量為基礎之碳給付政策時，有必要先對我國地主之土地利用決策進行瞭解。在過去探討地主土地利用決策之文獻中，van Kooten et al. (1995) 以林木確定模型 (deterministic model) 分析在不同的碳吸存收入與不同碳釋放程度下之社會最適輪伐期 (socially-optimal rotation length)；Romero et al. (1998) 以社會規劃者角度，採用確定模型 (deterministic model) 分析社會福利函數，以及林木砍伐收入與林木碳吸存收入間之抉擇，並估算使林木主達到最適輪伐期之最適碳給付金額；而 Sohngen and Mendelsohn (2003) 則是以確定的一般均衡模型 (deterministic general equilibrium model) 推導碳價格與木材價格之內生時間路徑。以上文獻均使用價格確定模型，也未考慮不同碳給付機制下對於土地利用決策之影響。Chladná (2007) 以實質選擇權模型分析木材價格與碳價格兩變數不確定下地主之最適輪伐期，然而 Chladná (2007) 僅考慮單一輪伐期之決策情形。就國內而言，類似的研究則相對較少，且國內文獻均以靜態分析為主，亦未考慮木材市場環境不確定下之地主決策²。

² 關於使用實質選擇權來分析造林決策之文獻並不多，Morck et al. (1989) 及 Thomson (1992) 最早將實質選擇權應用於森林資源上。Morck et al. (1989) 使用或有請求權 (contingent claims) 的方法計算不確定林木價格及不確定林木存量下森林的價值。晚近，實質選擇權方法逐漸應用在森林管理的研究，研究之間的差異通常是模型的設定，特別是不確定性的處理。研究大多假設木材價格、森林成長等為隨機變動。Thomson

在現實情況中，地主所面對的木材價格並非固定，根據 Chladná (2007) 之分析，不確定因素包括木材生長、木材價格或碳價格等，均會影響地主之砍伐決策。地主在作土地利用決策時，存在一門檻價格，當木材市場價格高於門檻價格時，地主會選擇將農地轉為造林用途，若木材市場價格低於門檻價格時，地主會選擇將農地轉作為農業用途。政府提供各項經濟誘因，例如實施碳給付政策，則等同於降低門檻價格，將會增加地主將農地轉作為造林用途的機會。

綜合前述，本研究即利用門檻價格分析地主之土地利用決策，並引入實質選擇權模型 (real option model) 來分析存在價格不確定下之地主最適土地利用決策。本研究延伸 Guthrie and Kumareswaran (2007) 之地主動態決策模型，並作部分修正。在 Guthrie and Kumareswaran (2007) 之理論與實證模型中，並沒有納入逐年之造林成本，且在其採用之三種給付機制中，第二、三種給付機制之結果十分類似，因此本研究除將三種給付模型一般化外，另建立第四種給付模式之理論模型。並進一步以我國為例，分析當政府進行碳給付政策時地主在面對木材市場價格不確定下之土地利用決策，包括分析農地轉為造林用途之門檻價格、政府如何透過補貼政策來降低門檻價格水準，以及分析四種給付機制對於降低門檻價格水準之誘因效果。最後以政府角度，分析四種碳給付機制對於農地轉為造林之政策效果與政策意涵。本研究共分五節，第一節為前言，第二節為碳給付政策下造林地主土地利用決策之理論模型，第三節為碳給付政策下造林地主土地利用決

(1992) 指出 Faustmann 將木材價格假設為常數，然而林木的價格存在劇烈的波動，因此設定其為對數常態的發散過程，與 Faustmann 模型的分析結果相比較發現過去依照 Faustmann 設定所採行的輪伐期普遍較長。Insley (2002) 以實質選擇權來分析最適林木收穫決策，選擇伐木的價值以動態規劃的方法來估計，此外也比較了對未來林木價格的假設不同之下的狀況，結果顯示選擇價值與最適伐木時間在木材價格為平均數回歸過程與幾何布朗運動的假設下有顯著的不同。Chladná (2007) 使用實質選擇權模型考慮價格不確定性下估計最適輪伐期，研究結果顯示輪伐期隨價格不同及碳價格不同而有所不同。

策之實證模型與變數估計，第四節為碳給付政策下造林地主土地利用決策之實證分析，第五節為結論與建議。

貳、碳給付政策下造林地主土地利用決策之理論模型

根據京都議定書之規範，第一承諾期間 (2008-2012) 中，附件一國家可採用以森林碳吸存方式來抵減碳排放量，包括土地利用改變以及林業相關活動 (land-use change and forestry activities, LUCF)，造林、再造林與伐林 (afforestation, reforestation and deforestation) 均可抵減該國溫室氣體之排放量。近年來各國已經開始重視以森林碳吸存作為排放減量之政策工具，而農地轉為造林地來增加碳吸存之方式，亦成為世界各國控制溫室氣體排放之趨勢。一般而言，在無政府協助下，農民主動參與造林的意願不高，多數農民會因造林之收入較低，而不願將土地作為造林使用 (Ferraro and Simpson, 2002)。因此政府若欲提升農民之造林誘因，可考慮建立相關之碳給付機制。碳給付機制為政府給付農民碳吸存之方式，包括給付時間、金額等。本研究探討之碳給付機制包括以下四種：一次給付機制 (lump-sum regime)、碳流量給付機制 (flows regime)、碳存量給付機制 (stocks regime)、及事後給付機制 (ex-post lump-sum regime)。

一、四種碳吸存給付機制

(一)一次給付機制

在此碳給付機制下，政府採用一次給付方式，亦即地主在造林期初可領取一筆碳吸存收入。若地主在伐期屆滿後砍伐林木，之後再重新造林，則地主可繼續保有這筆收入。

若地主在砍伐林木後不再繼續造林，則地主需將先前領取的碳吸存收入退回給政府，此給付方式之優點為在政策執行與實施上較為便利且簡易。

(二)碳流量給付機制

此機制由 van Kooten et al. (1995) 提出，在此機制下，政府每年依據地主之邊際碳流量來進行給付，亦即每年之碳給付金額反映出每年地主之造林土地所增加之碳吸存量。若在造林期間有碳吸存之流失（例如地主進行疏伐），則地主必須歸還該流失部分之碳給付。此機制假設地主在砍伐林木時，所有碳吸存將釋放回大氣中，因此地主必須歸還所有先前領到的碳吸存收入。若地主在砍伐林木後重新造林，則地主可以重新累積碳吸存，並逐年領取對應於該年所增加碳吸存量之碳收入。本研究進一步將此機制予以一般化，即將 van Kooten et al. (1995) 所考慮的離散時間單位修改成連續時間單位，亦即只要造林地主在微小時間內產生碳吸存量，則可以在微小時間內計算其碳吸存收入³。

(三)碳存量給付機制

森林資源所提供的貢獻為在林木成長過程中，可將大氣中的二氧化碳轉為碳，儲存在生物體中。而在林木砍伐之後，這些二氧化碳又將回歸至大氣中，因此，部分文獻指出，森林資源所增加之碳吸存只是短期效果。然而，亦有部分文獻提出，在林木成長過程中所產生之碳吸存仍然提供正面的環境外部性，因此，即使最後林木之碳吸存量會因砍伐而釋放，林木在成長過程中所儲存碳的貢獻仍不可忽略。此給付機制由 Sohngen and Mendelsohn (2003) 提出，即在林木成長過程中之碳吸存量及碳吸存累積之期間仍具有貢獻，因此地主在砍伐木材時不需支付碳釋放之碳支出。Sohngen and Mendelsohn (2003) 將碳給付視為碳儲存之租金給付，在此機制下，政府將依照造林地之碳吸存量多寡給付給

³ 此為理論上可操作，但在實際之給付上，政府較無法在微小時間內提供碳吸存收入，一般實際作法是，政府一般是計算一段時間內之碳吸存，再根據其吸存量給予給付。

地主，只要碳持續被儲存在林木生物體中，地主將會持續收到給付，而地主在砍伐木材時，地主不需另外支出碳支出。由於林木砍伐時之碳釋放程度與數量並不易計算，因此，此機制亦具有在政策執行上較為簡便之優點。

(四)事後給付機制

此機制為第一種與第三種機制之結合，第一種一次給付機制之優點在於政策執行簡便，政府不需隨時監測地主每年造林之碳吸存量，且地主在期初收到一筆碳吸存收入，可提升地主之造林誘因。且在砍伐木材時地主必須支付碳釋放之支出，故地主不至於在短時間內砍伐林木。此機制之缺點在於當木材價格波動過大時，可能產生道德風險的問題，例如木材市價過高時，地主可能會提早砍伐，再重新種植，以再次領取碳吸存收入；而當木材市價過低時，地主可能會提早砍伐，並將土地轉做為其他用途。而第三種機制為碳存量給付機制，即認為森林存續期間所提供之碳吸存效益具有貢獻，故地主砍伐時不需支付碳支出，然此機制之缺點在於政府必須隨時監測地主之林木碳吸存增量來給予給付。因此第四種機制即綜合第一種與第三種機制，造林地主在砍伐後才領到所有碳吸存收入，且不必支付碳釋放之支出。此機制之優點在於減少道德風險的問題，並考慮到森林存續期間提供之外部效益（即在地主砍伐木材後不需支付碳支出），同時，一次給付的方式在政策執行上較為簡便；不過此機制的缺點在於地主在造林初期沒有碳吸存收入，要到造林期間結束後才能領取，此將會降低地主參與造林之誘因。

二、考慮價格不確定與碳給付政策下土地利用決策之理論模型

假設在每個時點 t ，風險中立 (risk-neutral) 之造林地主會針對以下三種可能的土地利用方式做決策：(1) 砍伐林木後將土地轉做為其他用途（例如農用）；(2) 砍伐林木後重新種植林木；(3) 維持立木狀態，延後砍伐。因此，就林齡為時間 t 之造林地而言，其

地主之決策價值為：

$$F(P, t) = \max \{ \pi_t^a, \pi_t^r, \pi_t^d \} \quad (1)$$

決策價值 $F(P, t)$ 受到兩因素影響，包括木材價格 P 以及時間 t 。其中， π_t^a 為地主在時間 t 時砍伐林木且將土地轉做為其他用途之利潤收入 (payoff)， π_t^r 為地主在 t 時點砍伐林木後再重新種植林木之利潤現值， π_t^d 為地主在 t 時點進行延後砍伐決策之利潤現值，此三種利潤現值均為無窮期下之現值。

一般而言，地主會先進行決策，在一段時間後才真正執行此決策，此一緩衝期間，稱之為領先時間 (lead-time)。假設此領先期間為 \bar{T} ，若以砍伐林木且將土地轉做為其他用途之決策為例，當地主決定此決策後，則要過了 \bar{T} 時間後地主才會真正執行砍伐林木，並將土地轉做為其他用途。此時在 \bar{T} 期間內將會產生砍伐前之林木處理成本，假設其值為 δ ，因此假設地主為風險中立，就第一種土地利用方式而言，地主在 t 時點砍伐林木，且將土地做為其他用途之利潤現值如下式：

$$\pi_t^a = -\delta + \int_0^{\bar{T}} e^{-rs} \psi(t+s) ds + e^{-r\bar{T}} E \left[(1-T_c)(P_{t+\bar{T}} - h)V(t+\bar{T}) + \hat{Q}(t+\bar{T}) + S \right] \quad (2)$$

如第 (2) 式所示， δ 為砍伐前之處理成本， r 為折現率， $\psi(t+s)$ 為碳吸存給付收入 (元/公頃)， $\int_0^{\bar{T}} e^{-rs} \psi(t+s) ds$ 為領先時間 \bar{T} 內 (即從決策始點 t 時點到決策執行期間) 之累積碳吸存收入現值 (元/公頃)， T_c 為木材營收之稅率， $P_{t+\bar{T}}$ 為林齡為 $t+\bar{T}$ 時之木材價格 (元/立方公尺)， h 為木材砍伐成本 (元/公頃)， $V(t+\bar{T})$ 為林齡為 $t+\bar{T}$ 時之木材材積 (立方公尺/公頃)，因此 $(1-T_c)(P_{t+\bar{T}} - h)V(t+\bar{T})$ 為地主砍伐林木之稅後木材收入 (元/公頃)， $\hat{Q}(t+\bar{T})$ 為在林齡為 $t+\bar{T}$ 時砍伐林木所必須支付之碳支出 (元/公頃)， S 為地主砍伐後將土地轉做為其他用途之未來利潤現值 (元/公頃)。由於 $P_{t+\bar{T}}$ 為隨機變數，因

此取期望值為 $E\left[(1-T_c)(P_{t+\bar{T}}-h)V(t+\bar{T})+\hat{Q}(t+\bar{T})+S\right]$ 。

就第二種土地利用方式而言，在 t 時點進行砍伐林木，且重新種植林木之利潤現值如下式：

$$\pi_t^r = -\delta + \int_0^{\bar{T}} e^{-rs} \psi(t+s) ds + e^{-r\bar{T}} E\left[(1-T_c)(P_{t+\bar{T}}-h)V(t+\bar{T})+\hat{Q}(t+\bar{T})+F(P_{t+\bar{T}}, 0)\right] \quad (3)$$

此第 (3) 式類似第 (2) 式，只是在第 (2) 式中地主在砍伐林木後將土地轉做為其他用途，而在第 (2) 式中地主在砍伐林木後重新種植林木，土地繼續作林業用途。因此第 (2) 式的 S 改成 $F(P_{t+\bar{T}}, 0)$ ，即可得林木砍伐之後再重新造林之決策價值。

就第三種土地利用方式而言，假設地主在 t 時點選擇維持立木狀態，不予以砍伐，則地主在 t 時點進行延後砍伐之利潤現值如下式：

$$\pi_t^d = \psi(t)dt + e^{-rdt} E[F(P+dP, t+dt)] \quad (4)$$

根據第 (4) 式，地主在 t 時點進行延後砍伐決策之利潤現值包括兩個部分，第一部份為 $\psi(t)dt$ ，即在微小時間 dt 內之碳吸存收入現值，第二部份為 $E[F(P+dP, t+dt)]$ ，即在微小時間 dt 內現存林木之決策價值，其折現因子為 e^{-rdt} ，且此決策價值受到時間點 $(t+dt)$ 以及木材價格 $(P+dP)$ 之影響。

假設目前的林木林齡為 t ，則在 t 時點每公頃之木材材積為 $V(t)$ ，假設木材單位價格為 P ，且 P 遵循著伊藤過程 (Ito process)⁴，即：

⁴ 一般考慮價格不確定，大多假設價格分配依循伊藤過程 (Ito process)，其相關內容可以參考 Dixit and Pindyck (1994) 之內容。

$$dP = \mu(P)dt + \sigma Pdz \quad (5)$$

其中 $\mu(P)$ 為一木材價格函數漂移項 (drift term)， σ 為固定常數，其值為正， z 服從溫拿過程 (Wiener process)。本研究假設存在一固定常數 k 使得每一單位之木材存量有一便利收益 (convenience yield) 為 kP ，木材價格之風險中立過程為下式⁵：

$$dP = (r - k)Pdt + \sigma Pdz \quad (6)$$

其中 r 為無風險狀態下之利率。

若將第 (4) 式使用伊藤法則 (Ito's lemma)，再結合第 (6) 式 $dP = (r - k)Pdt + \sigma Pdz$ ，則 (4) 式可改寫成：

$$\begin{aligned} \pi_t^d &= \psi(t)dt + e^{-rdt} E[F(P + dP, t + dt)] \Big|_{dP=0, dt=0} + d \left(e^{-rdt} E[F(P + dP, t + dt)] \right) \Big|_{dP=0, dt=0} dt \\ &= \psi(t)dt + F(P, t) + \left(\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{1}{2} \sigma^2 P^2 \frac{\partial^2 F}{\partial P^2} + (r - k)P \frac{\partial F}{\partial P} - rF \right) dt \end{aligned} \quad (7)$$

若地主進行第三種決策，則表示 $F(P, t) = \pi_t^d$ 為最佳選擇，因此 $F(P, t) = \pi_t^d$ ，將此式代入第 (7) 式可得：

$$\psi(t) + \left(\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{1}{2} \sigma^2 P^2 \frac{\partial^2 F}{\partial P^2} + (r - k)P \frac{\partial F}{\partial P} - rF \right) = 0 \quad (8)$$

由於在模型中，木材價格為唯一的隨機變數，因此，關於地主之土地利用決策可由門檻價格來分析之，假設有 $P^a(t)$ 與 $P^r(t)$ 兩個門檻價格，此價格均為時間 t 的函數。林木林齡為時間 t 時，若木材價格低於 $P^a(t)$ ，則地主會進行砍伐與販售林木之決策，且土地

⁵ 關於在評價中的風險中立過程之相關內容可以參考 Dixit and Pindyck (1994) 之內容。

不再造林，而轉做為其他用途；林木之林齡在時間 t 時，若木材價格高於 $P^r(t)$ ，則地主會將林木砍伐與販售後再重新造林；林木之林齡在時間 t 時，若木材價格介於 $P^a(t)$ 與 $P^r(t)$ 之間，則地主將會選擇繼續維持立木狀態，即進行延後砍伐之決策。換言之，地主之土地利用決策函式可表示如下：

$$F = \begin{cases} \pi_t^a, & \text{if } P \leq P^a(t) \\ \pi_t^d, & \text{if } P^a(t) < P < P^r(t) \\ \pi_t^r, & \text{if } P \geq P^r(t) \end{cases} \quad (9)$$

根據上述，在每個微小增加的時間 dt 內，林齡為 t 時之造林地主可以收到稅後現金流量 $\psi(t)dt$ 。在本研究模型中，此現金流量包括碳給付收入扣除造林費用，而其四種碳給付機制之給付方式如表 1。如表 1 所示，各機制之碳收入為 $Q(t)$ ，碳支出為 $C(t)$ 。在一次給付機制下，地主在期初一次收到預期碳吸存量之收入為 x^l ，而在砍伐時支付先前領到的碳吸存收入為 x^l 。在碳流量給付機制下，依據碳吸存量之增量（流量）地主隨時有碳給付之收入， $B(t)$ 為林齡為 t 時之碳吸存流量， x^f 為單位碳流量之碳給付價格，故地主在每個時間點可領到 $x^f \cdot B(t)$ 之碳收入，而林木砍伐時地主必須支付先前所領取之碳吸存收入。在碳存量給付機制下，相當於政府每年對地主提供碳租金，故地主每年可領取碳收入，且在林木砍伐時地主不需要支付碳支出。 x^s 為單位碳流量之碳給付價格，故對於林齡為 t 時之林木，地主在 t 時所收到之碳吸存收入為 $x^s \cdot B(t)$ ，即政府每年監測林木碳吸存之存量，進而提供地主碳吸存給付，直到地主砍伐林木為止，在砍伐時地主不必支付碳釋放之支出。在事後給付機制下， $B(t)$ 為林齡為 t 時之碳吸存之存量， x^h 為單位碳存量之碳給付價格。地主在砍伐林木時（ T^* 時）將收到森林存續期間所產生碳吸存量所對應之碳吸存收入 $x^h \cdot B(t)$ ，而在砍伐時地主不需支付碳支出。

表1 四種碳給付機制之碳給付流量

單位：元/公頃

機制	$Q(t)$	$\widehat{Q}(t)$	比較
一次給付機制	$\begin{cases} x^l & \text{if } t=0 \\ 0 & \text{if } t>0 \end{cases}$	$-x^l$	優點：一次給付，政策簡化。 缺點：未考慮森林存續期間之價值。
碳流量給付機制	$x^f \cdot B'(t)$	$-x^f (B(t) - B(0))$	優點：按照碳流量給付，符合經濟意義。 缺點：政府必須充分監測掌握地主各種土地各樹種之碳吸存量變化。
碳存量給付機制	$x^s \cdot B(t)$	0	優點：按照碳流量給付，符合經濟意義。地主砍伐林木後不必返還先前領取之碳給付，考慮森林存續期間之價值。 缺點：政府必須充分監測掌握地主各種土地各樹種之碳吸存量變化。
事後給付機制	$\begin{cases} 0 & \text{if } t < T^* \\ x^h \cdot B(t) & \text{if } t = T^* \end{cases}$	0	優點：一次給付，政策簡化考慮森林存續期間之價值。 缺點：地主造林結束後才領取給付，降低地主之造林誘因。

資料來源：本研究整理。

註： x^l 為在一次給付機制下之單位碳給付價格， x^f 為在碳流量給付機制下之單位碳給付價格， x^s 為碳存量給付機制下之單位碳給付價格， x^h 為事後給付機制下之單位碳給付價格； $B(t)$ 為林齡為時間 t 時林木碳吸存之存量， $B'(t)$ 為林齡為時間 t 時之碳吸存流量。 $Q(t)$ 一欄表示林木在林齡 t 時之碳現金流量（流入）， $\widehat{Q}(t)$ 一欄表示林木在林齡 t 時之碳現金流量（流出），故為負值。另外表中的 T^* 表示砍伐時點。

參、碳給付政策下造林地主土地利用決策之 實證模型與變數估計

根據上述可知，本研究可由門檻價格來分析地主之土地利用決策行為，然而上述模型的選擇權定價問題 (option pricing problem) 缺乏封閉解 (closed-form solution)，因此本研究依循 Guthrie and Kumareswaran (2007) 之模型，進一步使用數值分析方法求出離散 (discrete) 近似解 (approximate solution) 進行模擬。

一、碳給付政策下土地利用決策之實證模型

由於選擇權定價問題缺乏收斂解，因此本研究使用數值方法中的顯性有限差分方法 (explicit finite difference method) 來求解。本研究在實證部分以 C 語言進行程式撰寫與模擬，其求解之過程詳見附錄，相關變數與設定、求解如附錄中的第 (A1) 式至第 (A9) 式所示。本研究在實證部分假定共有五個輪伐期⁶，換言之，在第五個輪伐期結束後地主必須放棄林業活動，因此，當 $k = 5$ ，且 $t_j = 40$ 時，地主只能進行砍伐林木，且將土地轉做為其他用途：

$$F_{i,j}^5 = \pi_{i,j}^{a,k} \quad (10)$$

其中第 (10) 式之 $\pi_{i,j}^{a,k}$ 則由附錄中的第 (A7) 式決定之。一旦第五個輪伐期之森林最

⁶ 在一般的模擬分析中，為求精確，會模擬多個循環，在本研究中一個循環為一個輪伐期之意，本研究若只評估一個輪伐期則顯過少，而透過本研究多次循環模擬之結果亦發現，五個以上輪伐期之近似解與五個輪伐期之解差異不大，因此本研究設定五個輪伐期來進行模擬。

終決策價值決定，則其他時間點之決策價值即可透過逆向歸納法 (backward induction) 來推算。因為模型假定輪伐期共五個，故在第五個輪伐期 ($k = 5$) 時，地主無法進行砍伐林木後重新造林之決策，因此當 $k = 5$ ， $t_j < 40$ 時，則地主可進行砍伐林木，並將土地轉做為其他用途，以及延緩砍伐兩種決策，即：

$$F_{i,j}^5 = \max \{ \pi_{i,j}^{d,5}, \pi_{i,j}^{a,5} \} \quad (11)$$

第 (11) 式的 $\pi_{i,j}^{d,5}$ 由附錄中的第 (A3) 式決定。

同理，在第一個至第四個輪伐期中，即 $k = 1, 2, 3, 4$ ，而 $t_j = 40$ 時，則地主能進行砍伐林木，且將土地轉做為其他用途，或者重新種植林木，無法延緩砍伐（因為設定輪伐期最長為 40 年），因此：

$$F_{i,j}^k = \max \{ \pi_{i,j}^{r,k}, \pi_{i,j}^{a,k} \} \quad (12)$$

其中 $\pi_{i,j}^{r,k}$ 由附錄第 (A9) 式所決定。

同理，若 $k = 1, 2, 3, 4$ ，而 $t_j < 40$ 時，則地主能進行砍伐林木，且將土地轉做為其他用途，重新種植林木，或延緩砍伐之決策，因此：

$$F_{i,j}^k = \max \{ \pi_{i,j}^{d,k}, \pi_{i,j}^{r,k}, \pi_{i,j}^{a,k} \} \quad (13)$$

上述各種情形整理如下表 2。根據以上的模型推導，本研究以我國為例，使用 C 語言撰寫程式進行模擬，並在考慮木材價格變動情形下，實證分析在存在碳給付政策後，農地地主之土地利用決策。

表 2 各輪伐期下地主之可行決策選擇

輪伐期	時間	可行之決策選擇
第一個輪伐期 ($k = 1$)	$t_j < 40$	$F_{i,j}^k = \max \{ \pi_{i,j}^{d,k}, \pi_{i,j}^{r,k}, \pi_{i,j}^{a,k} \}$
	$t_j = 40$	$F_{i,j}^k = \max \{ \pi_{i,j}^{r,k}, \pi_{i,j}^{a,k} \}$
第二個輪伐期 ($k = 2$)	$t_j < 40$	$F_{i,j}^k = \max \{ \pi_{i,j}^{d,k}, \pi_{i,j}^{r,k}, \pi_{i,j}^{a,k} \}$
	$t_j = 40$	$F_{i,j}^k = \max \{ \pi_{i,j}^{r,k}, \pi_{i,j}^{a,k} \}$
第三個輪伐期 ($k = 3$)	$t_j < 40$	$F_{i,j}^k = \max \{ \pi_{i,j}^{d,k}, \pi_{i,j}^{r,k}, \pi_{i,j}^{a,k} \}$
	$t_j = 40$	$F_{i,j}^k = \max \{ \pi_{i,j}^{r,k}, \pi_{i,j}^{a,k} \}$
第四個輪伐期 ($k = 4$)	$t_j < 40$	$F_{i,j}^k = \max \{ \pi_{i,j}^{d,k}, \pi_{i,j}^{r,k}, \pi_{i,j}^{a,k} \}$
	$t_j = 40$	$F_{i,j}^k = \max \{ \pi_{i,j}^{r,k}, \pi_{i,j}^{a,k} \}$
第五個輪伐期 ($k = 5$)	$t_j < 40$	$F_{i,j}^5 = \max \{ \pi_{i,j}^{d,5}, \pi_{i,j}^{a,5} \}$
	$t_j = 40$	$F_{i,j}^5 = \pi_{i,j}^{a,k}$

資料來源：本研究整理。

註：本研究設定每個輪伐期最多不得超過 40 年，共五個輪伐期。另外，杉木在過去法定輪伐期為 20 年，因此林齡為 20 年以上之杉木應已具市場價值。

二、碳給付政策模型之變數估計

我國重要造林樹種之一為杉木 (*Cunninghamia lanceolata*)，亦是國內產材交易量最大的樹種，屬於全民造林政策與平地造林政策之獎勵樹種之一，資料亦較為完整，因此本研究以杉木做為代表樹種來進行分析。本研究在實證分析中僅選定杉木，主要是因為我國林業相關資料十分不足，尤其本研究之實證模擬過程需要原木價格與林齡的函數關係，以及造林成本、碳吸存量等資料，故本研究僅以杉木為例，此為本研究之研究限制。

(一)木材價格之估計

本研究採用杉木做為代表樹種，其木材價格資料取自林業統計之1997年1月至2008年1月的月資料來進行估計。根據第(6)式，本研究對於木材價格取自然對數，即 $p = \ln P$ ，再根據 Ornstein-Uhlenbeck 之隨機過程 (Uhlenbeck and Ornstein, 1930) 可得下式：

$$dp = a(b - p)dt + \sigma dz \quad dp = a(b - p)dt + \sigma dz \quad (14)$$

其中 a 為平均值迴歸率 (rate of mean-reversion)， b 為 $\ln P$ 之長期平均水準，因此根據 Guthrie and Kumareswaran (2007)，此過程可利用 AR(1) 過程改寫成離散型態：

$$p_t = \alpha + \beta p_{t-1} + u_t, \quad u_t \sim N(0, \phi^2) \quad (15)$$

如 (15) 式所示， ϕ 為 u_t 常態分配之標準差。因此將木材價格月資料 (1997 年 1 月至 2008 年 1 月) 代入第 (15) 式，利用迴歸估計即可求出 α 、 β 與 ϕ 之估計值 $\hat{\alpha}$ 、 $\hat{\beta}$ 及 $\hat{\phi}$ ，其結果為 0.39、0.95 及 0.04。求出 α 與 β 之估計值後，即可藉下列公式求出第 (14) 式的參數 \hat{a} 、 \hat{b} 及 $\hat{\sigma}$ ：

$$\hat{a} = \frac{-\log \hat{\beta}}{\Delta t}, \quad \hat{b} = \frac{\hat{\alpha}}{1 - \hat{\beta}}, \quad \hat{\sigma} = \hat{\phi} \sqrt{\frac{-2 \log \hat{\beta}}{(1 - \hat{\beta}^2) \Delta t}} \quad (16)$$

其中 Δt 之值為 $1/4^7$ ，其參數 \hat{a} 、 \hat{b} 及 $\hat{\sigma}$ 之估計值分別為 0.59、8.17 以及 0.14⁸。

⁷ Δt 之值為 $1/4$ ，設定之相關內容可參考 Dixit and Pindyck (1994)。

⁸ 其 \hat{a} 、 \hat{b} 及 $\hat{\sigma}$ 之 p 值分別為 0.0057、0.0031 與 0.0201。

(二)木材材積之估計

根據陳麗琴與黃進睦 (1992) 及劉浚明與鍾旭和 (1993) 對於杉木人工林生長收穫的研究結果，推估其杉木材積式如下式：

$$v(t) = 578.6851(1 - t^{-1.5402})^{54.3344} \quad (17)$$

其杉木成長收穫函數為 t 年的函數， $v(t)$ 為林齡 t 年時的蓄積量（立方公尺/公頃）。本研究依據此迴歸式之成長率來推估第 1-7 年及第 21 年以上的原木材積，以求能更接近實際情況。

(三)造林碳吸存量之估計

根據 Cacho et al. (2003) 之研究，林木生物量為材積之函數，可寫成下式：

$$w(t) = \delta \cdot v(t) \quad (18)$$

$w(t)$ 為林木莖部碳量 (biomass content of stemwood) (噸/公頃)； δ 為單位碳含量 (噸/立方公尺)， $v(t)$ 為林木之材積 (立方公尺/公頃)。在第 (18) 式， $w(t)$ 為林木莖部之碳量，包括樹枝、樹葉以及土壤之碳量，已涵蓋森林碳吸存量之 70%，故根據 Kischbaum (2000) 所推導的碳吸存函數如下式：

$$B(t) = \phi [(\delta \cdot \theta_v)^\mu \cdot w(t)]^{1/\mu} \quad (19)$$

$B(t)$ 為林木之碳吸存量 (噸/公頃)， θ_v 、 μ 、 ϕ 則是乃隨著不同樹種與不同林齡而改變之參數。值得注意的是 $B(t)$ 僅包含林木莖部之碳量，不包括土壤與根部之碳量 (Kischbaum, 2000)。本研究經由 Cacho et al. (2003) 之研究，將 (19) 式中透過 θ_v 、 μ 、 ϕ 之

值代入，再代入 (17) 與 (18) 式後，得到下列碳吸存量函數實證式：

$$\begin{aligned}
 B(t) &= 1.429[(0.378 \cdot 842.87)^{0.2} \cdot w(t)]^{1/1+0.2} \\
 &= 1.429[(0.378 \cdot 842.87)^{0.2} \cdot 0.378 \cdot v(t)]^{1/1+0.2} \\
 &= 1.659 \cdot [578.6851 \cdot (1-t^{-1.5402})^{54.3344}]^{0.83} \\
 &= 325.592 \cdot (1-t^{-1.5402})^{45.098}
 \end{aligned} \tag{20}$$

根據 (17) 式，可得到杉木材積，透過杉木材積可得到林木之碳吸存量 $B(t)$ 。林木中儲存之碳量轉換成二氧化碳量，其分子轉換係數為 v ， v 值為 3.67。因此進一步透過 v 之轉換，可得到二氧化碳之碳吸存量為 $B(t) \cdot v$ 。

(四)造林成本與砍伐成本之估計

本研究參考自劉浚明 (1997) 種植杉木之設定，造林成本包括育苗成本、出栽成本、除草成本等，其中育苗成本一般由林務機關提供；出栽成本可以承包商的承包價格來估算，每公頃為 30,000 元；除草成本是根據栽植後前六年估算，每年除草三次，每次每公頃 4,000 元，總共每公頃 72,000 元。而前六年間地主必須支出林地維護管理費，每年每公頃之管理費用 450 元（劉浚明，1997）。另外本研究假設造林過程中無疏伐或間伐之收入；而砍伐成本是根據 2008 年林業統計之國有林砍伐費用，取整數每公頃為 19,592 元⁹。

⁹ 由於我國之林業統計並沒有對於各樹種在造林期間之造林成本進行統計，過去專家學者研究中，所計算造林成本均是特定地點之特定樹種，因此本研究先採劉浚明 (1997) 所設定造林成本計算基礎情境，而在後面，本研究進行造林成本變動之敏感度分析，以強化本研究模擬之客觀性。

表 3 碳給付政策實證模型之參數估計

參數	估計值	意 義
\hat{a}	0.59	木材價格之估計參數
\hat{b}	8.17	木材價格之估計參數
$\hat{\sigma}$	0.14	木材價格之估計參數
r	0.03	折現率
κ	0.08	固定常數
T_c	0.00	木材營收之稅率 ¹
S	1,800,000.00	作為農業用途之利潤現值 ²
δ	0.00	砍伐前之相關成本 ³
h	19,592.00	砍伐成本

資料來源：本研究整理。

註：1. 1989 年開始，臺灣之農民、漁民、畜牧業、林業、礦業所得免納所得稅。

2. 本研究設定地主砍伐林木後，將土地轉作為其他用途之其他用途為「農業用途」，而以「特殊休耕地」之休耕獎勵金額作為農地造林之其他用途收益，即每年每公頃 54,000 元，故無窮期下之獎勵金現值為每公頃 1,800,000 元。
3. 本研究將進行砍伐前之前置成本假設為零，換言之，所有砍伐成本僅發生在砍伐之時點。

(五)土地做為其他用途之利潤現值

就我國而言，可用來造林的土地包括林地與農地，一般而言，農地造林之機會成本相對比林地高，可能用來造林之農地為邊際農地，因為邊際農地之農業生產力較低。本研究將土地利用決策分為農業用途與林業用途，因此若地主在砍伐林木後，將土地做為其他用途，則其他用途為「農業用途」。農地除造林之外，其他用途為休耕與種植農作物，本研究採用休耕補貼作為農地之收益，以避免造林機會成本的低估。本研究採用「特殊休耕地」之休耕獎勵金額作為農地造林之其他用途收益，即每年每公頃 54,000 元，因

此估計出在無窮期下之農業收入現值為 1,800,000 元¹⁰。

(六)折現率與稅率

在折現率方面，就造林供給方面而言，造林計畫之投資時間較長，且其生產過程連續不斷，故受利率影響較大。本研究設定投資造林者為私有地主，故以現行造林貸款優惠利率 3.0% 為基準，假設風險貼水為 2%，長期通貨膨脹率為 2%，因此實質折現率為 3%。另外就林業營收稅率而言，從 1989 年開始，我國政府對於全國所有農業、漁業、畜牧業、林業、礦業之所得，一律免課徵所得稅，故設定稅率為零。

肆、碳給付政策下造林地主土地利用決策之實證分析

根據本研究設定之理論與實證模型，本節就政府為實施碳給付政策，以及在實施不同碳給付機制下之造林地主土地利用決策作實證分析，並以未實施碳給付政策之結果作為基礎情境，與不同碳給付機制下之實證分析結果作比較。

一、政府未實施碳給付政策下造林地主土地利用決策之實證分析

假設有一代表性地主，種植代表性樹種，則面對不同價格將有不同的土地利用決策方式。其土地利用決策有三種，一為將林木砍伐並將土地作為農用；二為將林木砍伐再

¹⁰ 考慮一年農業收入為 54,000 元，折現率在 3% 假設下，其無窮期下之農業收入現值計算方式為 $54,000 \text{ 元} / 0.03 = 1,800,000 \text{ 元}$ 。

重新造林；三為繼續造林，延後砍伐。根據上一節之變數估計，再利用數值方法之實證模型，由附錄 (A7) 式與前述 (10) 式求出邊界解，再利用 (11) 式至 (13) 式求出不同價格、不同時間點與不同輪伐期下格子點之決策價值，進一步可得到我國地主在面對木材價格不確定下，政府有無執行碳給付政策對地主土地利用決策之影響。本研究利用門檻價格 (P^r 與 P^a) 來分析土地利用決策，即地主以追求利潤極大為目標下，在木材價格為隨機下，地主在各時間點，將會循著第 (13) 式的模式進行最適的土地利用決策。在面對價格不確定下，政府未實施碳給付政策時地主土地利用決策之實證結果如圖 1。

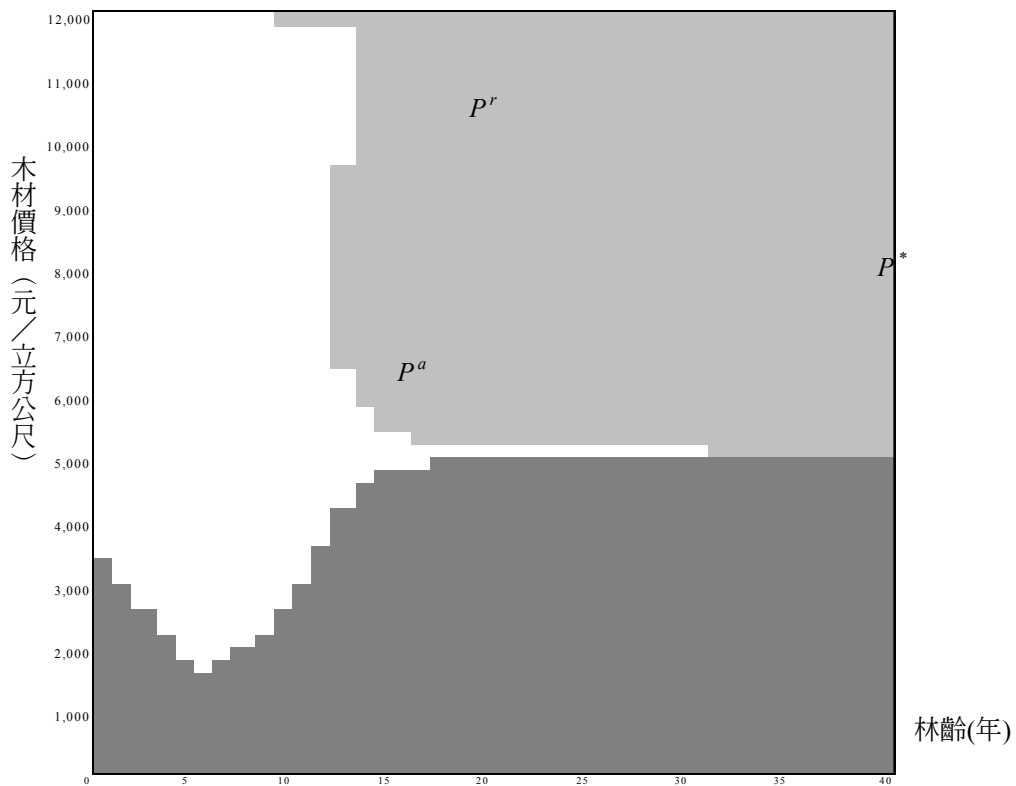


圖 1 政府未執行碳給付政策下造林地主之土地利用決策 (基礎情境)

根據圖 1，橫軸為林木之林齡（年），縱軸為木材價格（元/立方公尺），在面對價格不確定與波動下，圖 1 中空白之區域表示地主在此價格區域中，所進行之土地利用決策為繼續造林而不砍伐；圖中的深灰色區域表示地主將會伐木後不再造林，而將土地作為農用；淺灰色區域則表示地主會選擇伐木後重新造林。圖 1 中淺灰色區域的邊緣為 P' 曲線，表示地主進行「砍伐林木後重新造林決策」之門檻價格曲線。換言之，地主在各時間點，只要木材價格在 P' 曲線以上，則地主將會選擇砍伐林木後重新造林；同理，深灰色區域的邊緣為 P^a 曲線，表示地主進行「砍伐林木後將土地轉作為農用決策」之門檻價格曲線。換言之，地主在各時間點，只要觀察之木材價格在 P^a 曲線以下，則地主將會選擇砍伐林木後將土地轉作為農用。地主在各時間點觀察木材價格，並進行決策。以第 15 年為例，在沒有碳補貼機制下，若觀察之木材價格在每立方公尺 4,800 元以下，則地主會選擇砍伐林木，並將土地轉作農業用途；若木材觀察價格在每立方公尺 5,600 元以上，則地主會選擇砍伐林木後重新造林。

圖 1 的 P^* 價格為基準價格 (trigger price)，為每立方公尺 5,100 元。在 P^* 價格所對應之時間點，地主必定會選擇砍伐林木。而砍伐林木之決策有兩種，「砍伐林木後將土地轉作為農用」或是「砍伐林木後重新造林」。砍伐林木後是否重新造林，或是將土地轉作為農用則需視當時的木材市價而定。就本研究之模擬而言， P^* 價格為每立方公尺 5,100 元，其對應之時間點為第 32 年。換言之，在政府未執行任何補貼政策下，在 32 年之後，地主必定會砍伐林木。若第 32 年時之木材單位價格在 5,100 元以上，地主將會砍伐林木後重新造林；若第 32 年時之木材單位價格在 5,100 元以下，則地主將會砍伐林木後將土地轉作為農用，因此 P^* 將是使地主在第 32 年進行農業用途與林業用途兩種決策抉擇之邊界價格水準。另外，由圖 1 亦可看出，在沒有實施碳給付政策下，在林齡為 32 年之前，農民將可能採取三種決策，包括繼續造林、砍伐木材後轉作為農用與砍伐木材後重新造林。但在 32 年後，地主必會選擇砍伐林木，故此年份必定做出砍伐之決策。值得一提的是，地主從第 18 年到第 31 年，繼續造林而不砍伐林木之木材價格區間相當狹小。換言之，在第 18 年至第 31 年間，地主只有在木材價格為每立方公尺 5,200 元時才會繼續維持立木狀態而不砍伐，呈現「剃刀邊緣 (knife edge)」的情況，除了在木材價格為每立方公尺 5,200 元之外，在其他大部分的價格下，地主在第 18 年會砍伐林木。

為更嚴謹估計，本研究調整重要變數，包括折現率、其他土地使用價值、造林成本以及砍伐成本變數，以瞭解各變數變動後對於地主土地利用決策之影響。其敏感度分析結果如圖 2。農業收入之敏感度分析如圖 2 (a) 與 (b)，圖 2 中之實線為基礎情境中的門檻價格線。隨著農業收入的增加，其必砍年份有延長之趨勢。當農業收入減少 50% 時，則兩條價格門檻線往下移。以第 15 年為例，地主採取砍伐林木，且將土地轉作為農用之價格門檻由 4,800 元減少至 2,600 元（減少 45.83%），地主採取砍伐且重新造林之價格門檻由 5,600 元減少至 3,400 元（減少 39.29%）；而當農業收入增加 50% 時，價格門檻線往上移。另外以木材價格每立方公尺為 6,000 元為例，則在農業收入增加下會提前砍伐，並不再造林，農業收入減少下，則是提早砍伐但會繼續造林。

其次，折現率變動之敏感度分析如圖 2(c) 與 (d)。隨著折現率增加，則價格門檻曲線也上移，不過折現率變動之影響明顯比農業收入變動來得大。且隨著折現率增加，則必砍年份將縮短。當折現率減少 50%，第 15 年時地主採取砍伐林木，且將土地轉作為農用之價格門檻由 4,800 元減少至 1,600 元（減少 66.67%），而地主重新造林之價格門檻由 5,600 元減少為 3,200 元（減少 42.86%）；而當折現率增加 50% 時，第 15 年時地主已經沒有砍伐林木後，轉作為農業用途之門檻價格，亦即第 14 年之後，無論觀察價格為多少，地主均會採取砍伐林木，並將土地轉作為農業用途之決策。在此情況下地主重新造林之價格門檻則相當高，主要是因為此情境之折現率過高，因此在面對價格不確定之環境下，即使未來價值增加，換算成現值之價值仍會大幅度縮水，因此，地主寧可選擇砍伐林木，並將土地轉作為農業用途。砍伐成本變動之敏感度分析如圖 2(e) 與 (f)。砍伐成本增加對於價格門檻曲線之變動方向不固定，由圖 2(f) 可看出隨著砍伐成本增加，地主轉為農用之誘因降低，必砍年份有延後的趨勢。當砍伐成本減少 50%，在第 15 年時地主將採取砍伐林木之決策，且將土地轉作為農用價格門檻由 4,800 元減少至 4,600 元（減少 4.17%），地主採取砍伐林木，且重新造林之價格門檻維持不變，為 5,600 元；而砍伐成本增加 50% 時，在第 15 年時地主將砍伐林木，且將土地轉作為農用之價格門檻維持不變，為 4,800 元，而地主採取砍伐林木，且重新造林之價格門檻由 5,600 元增加至 5,800 元（增加 3.57%）。最後，造林成本變動之敏感度分析如圖 2(g) 與 (h)。隨著造林成本

增加，則價格門檻曲線往上移，且必砍年份延長。例如當造林成本減少 50% 時，在第 15 年時地主將採取砍伐林木之決策，且將土地轉作為農用之價格門檻由 4,800 元減少至 4,400 元（減少 8.33%），地主採取砍伐木材，且重新造林之價格門檻由 5,600 元減少至 5,200 元（減少 7.14%）；由上述可知，農業收入與折現率兩個變數對於地主土地利用決策之影響幅度較大，尤其以折現率之影響更大，而砍伐成本與造林成本兩個變數之變動對於地主之土地利用決策之影響則較小。

上述四個變數敏感度分析之詳細模擬結果如表 4，表中的 $P^a(15)$ 表示在第 15 年時地主採取砍伐林木，且將土地轉作為農用之門檻價格， $P^r(15)$ 表示林齡在第 15 年時地主採取砍伐林木，且重新造林之門檻價格。亦即第 15 年之觀察價格 P 若超過 $P^r(15)$ ，則造林地主會砍伐林木，並重新造林；第 15 年之觀察價格 P 若低於 $P^a(15)$ ，則造林地主將會砍伐林木，並將土地轉作為農用；第 15 年之觀察價格 P 若介於 $P^a(15)$ 與 $P^r(15)$ 之間，則地主將會繼續造林；而表中的 P^* 表示「基準價格 (trigger price)」，即持續造林至該輪伐期結束後，地主選擇轉作農用或重新造林之邊界價格，若在該時間點之木材觀察價格在 P^* 以上，則地主將會進行重新造林，若觀察價格在 P^* 以下，則地主將會將土地轉作為農用。

表 4 中第五欄至第九欄為不同時間點之決策價值 $F(P, t)$ ，其中 P 採用我國近五年 (2003/1-2008/1) 杉木價格之平均，即每立方公尺 3,707.88 元，其意涵為我國地主在不同時點，木材觀察價格為每立方公尺 3,707.88 元之決策價值現值。由圖 2 可以發現，以第 15 年為例，當農業收入、折現率、砍伐成本與造林成本增加時，則門檻價格 P^a 與 P^r 均會增加，而 P^* 也會增加。就決策價值而言（表 4 中第五欄至第九欄），當農業收入增加時，則各時點之決策價值均會增加；其次當折現率增加時，則決策價值之增或減則不一定，例如當時間在第 0, 5, 10 年時，則無論折現率增加或減少，其決策價值均增加；然而，在第 15 年時則決策價值之變化不一定。當砍伐成本變化時亦會影響地主決策價值之變化，隨著砍伐成本與造林成本增加，無論在那個時點，地主之決策價值均會減少，此符合理論預期。

表 4 政府未實施碳給付政策下地主土地利用決策之敏感度分析

	$P^c(15)$ (元/m ³)	$P^c(15)$ (元/m ³)	P^* (元/m ³)	$F(P,0)$ (元/公頃)	$F(P,5)$ (元/公頃)	$F(P,10)$ (元/公頃)	$F(P,15)$ (元/公頃)	$F(P,20)$ (元/公頃)
農業收入(S)								
50%	2,600	3,400	2,900	1,045,496	1,365,276	1,662,698	2,003,935	2,266,707
100%	4,800	5,600	5,100	1,685,369	1,992,574	2,363,471	2,747,135	3,009,907
150%	8,000	8,800	8,500	2,558,704	2,747,097	3,219,228	3,620,536	3,883,308
折現率(r)								
50%	1,600	3,200	2,100	2,393,919	2,731,943	3,022,699	3,339,080	3,607,832
100%	4,800	5,600	5,100	1,685,369	1,992,574	2,363,471	2,747,135	3,009,907
150%	-	-	-	2,306,051	2,698,430	2,955,356	1,659,611	-
砍伐成本(d)								
50%	4,600	5,600	5,100	1,695,164	2,001,371	2,373,118	2,756,931	3,019,703
100%	4,800	5,600	5,100	1,685,369	1,992,574	2,363,471	2,747,135	3,009,907
150%	4,800	5,800	5,300	1,675,573	1,983,816	2,353,856	2,737,339	3,000,111
造林成本(c)								
50%	4,400	5,200	4,700	1,706,272	2,004,809	2,367,203	2,747,357	3,010,129
100%	4,800	5,600	5,100	1,685,369	1,992,574	2,363,471	2,747,135	3,009,907
150%	5,200	6,200	5,700	1,664,513	1,981,970	2,361,283	2,746,913	3,009,685

資料來源：本研究估算。

註： $P^c(15)$ 表示林齡在第 15 年時，地主採取砍伐林木，且將土地轉作為農業使用之價格門檻， $P^c(15)$ 表示林齡在第 15 年時，地主採取砍伐林木，且重新造林之價格門檻， P^* 表示基準價格，即時續造林至該輪伐期結束後進行農用或重新造林之邊界價格。若在該時間點之木材觀察價格在 P^* 以上，則地主將會進行重新造林，若觀察價格在 P^* 以下，則地主將會將土地作為農用。第五欄至第九欄為不同時間點之決策價值 $F(P,t)$ ， P 採用我國近五年 (2003/1-2008/1) 杉木價格之平均值，即每立方公尺 3,707.88 元。

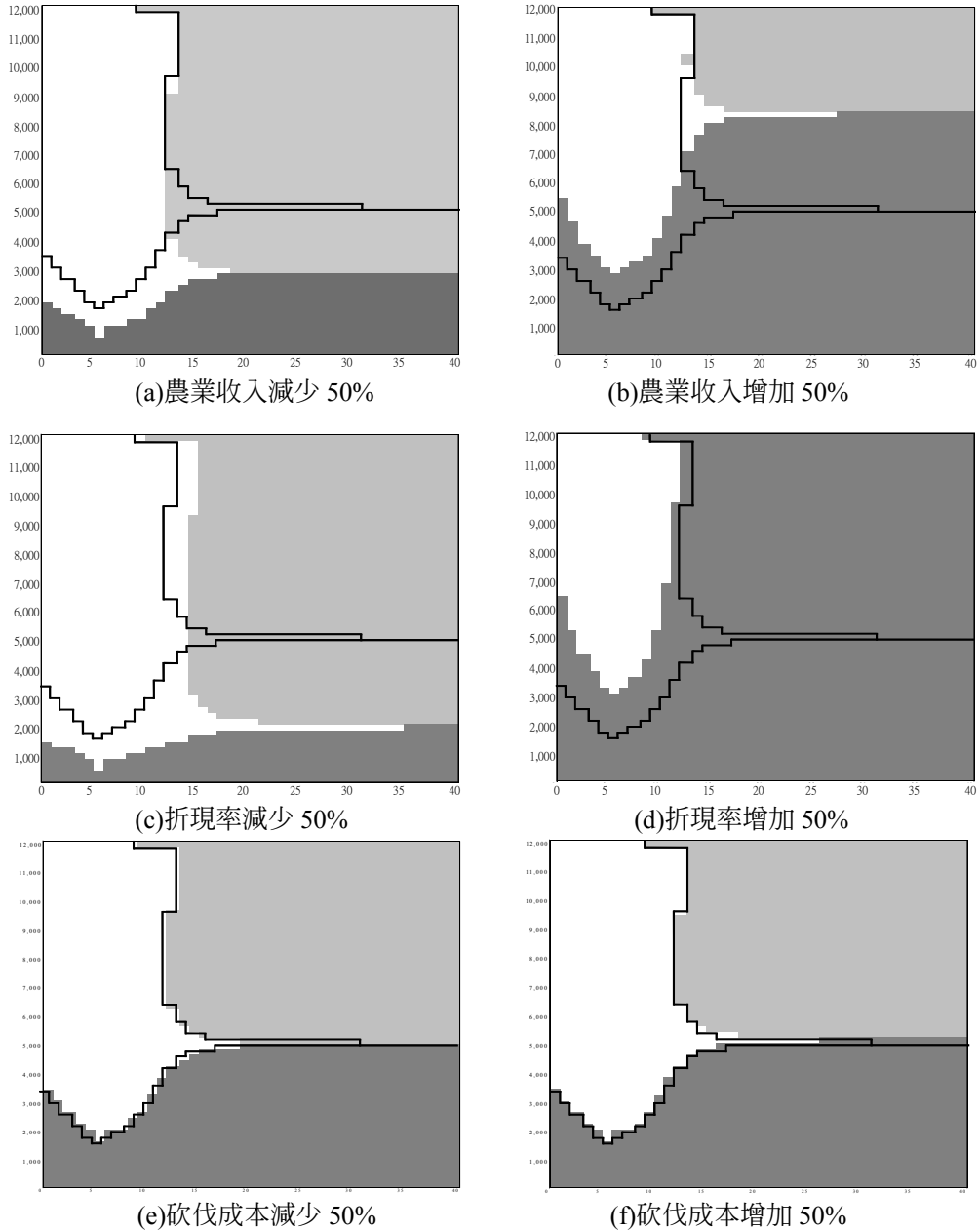


圖 2 政府未執行碳給付政策下造林地主土地利用決策之敏感度分析

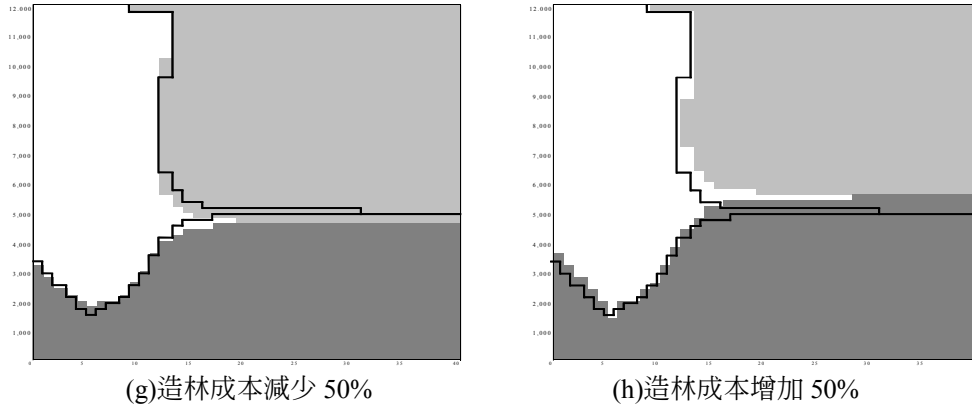


圖 2 政府未執行碳給付政策下造林地主土地利用決策之敏感度分析 (續)

二、政府實施碳給付政策下造林地主土地利用決策之實證分析

由上一節分析可得政府在未實施碳給付政策下地主土地利用決策之門檻價格，若政府實施碳給付政策，則在不同碳給付機制下之不同給付金額對於地主土地利用決策有何影響？本研究在此節將進一步分析一次給付、碳流量給付、碳存量給付以及事後給付四種機制對於地主土地利用決策之影響。

(一)一次給付機制下造林地主土地利用決策之實證結果

一次給付機制為地主在造林期初就一次收到碳吸存給付，而在砍伐時將歸還先前領取的碳吸存收入。根據本研究之實證模擬，其結果如圖 3，在一次給付機制下，隨著單位碳給付水準之增加，門檻價格曲線會下移（包括 P^a 與 P^r 曲線）。換言之，在此機制下，造林地主將會減少砍伐林木，並將土地轉作為農用之機率，但會增加提前砍伐林木，並重新造林之機率。例如在無碳給付政策下，第 15 年時，造林地主選擇繼續造林，而不砍

伐之價格區間為每立方公尺 4,800 元至 5,600 元。在政府實施一次給付政策後，若提供每公頃 10 萬元之給付，則在第 15 年時，造林地主選擇繼續造林之價格區間擴大為每立方公尺 4,400 元至 5,400 元；若政府提供每公頃 40 萬元之給付，則在第 15 年時，造林地主選擇繼續造林之價格區間為每立方公尺 3,800 元至 4,600 元。若政府提供的給付提升至每公頃 160 萬元，則林齡為 15 年時，木材價格在每立方公尺 800 元以下或是 1,600 元以上，造林地主均會採取砍伐林木。由上述可知，在一次給付機制下，造林地主將減少將土地轉作為其他用途之機率，但進行重新造林之伐木決策將會提早，且隨著給付金額增加，必砍年份將會縮短。

(二)碳流量給付機制下造林地主土地利用決策之實證結果

在碳流量給付機制下，政府依據地主造林之碳流量多寡來給予碳給付，而在砍伐林木時地主必須支付碳支出。本研究之實證結果如圖 4，隨著單位碳給付水準之增加，砍伐林木後再重新造林之門檻價格 P^r 差異不大，而砍伐作為農用之門檻價格 P^a 將會降低，因此，政府實施碳流量給付政策將會降低地主砍伐林木後轉作為農用之誘因，但不會增加砍伐林木後重新造林之誘因。若政府提供每噸為 2,000 元的碳給付價格，則地主在第 15 年時選擇繼續造林之價格區間擴大為每立方公尺 4,400 元至 5,600 元；若政府提供每噸為 6,000 元的碳給付價格，則地主在第 15 年時選擇繼續造林之價格區間會擴大為每立方公尺 3,200 元至 5,600 元。若與一次給付政策作比較，在碳流量給付機制下造林地主進行「繼續造林決策」的價格區間較大，而必砍年份也相對較晚。

(三)碳存量給付機制下造林地主土地利用決策之實證結果

在碳存量給付機制下，政府依據地主造林之碳流量多寡來給予碳給付，而在砍伐林木時地主不需支付碳支出。本研究之實證結果如圖 5，隨著單位碳給付水準增加，砍伐林木後再重新造林之門檻價格 P^r 曲線會下移，而砍伐林木後轉作為農用之門檻價格 P^a 曲線亦會下移，在必砍年份之前地主砍伐林木之誘因會降低。例如政府實施碳存量給付政策，提供每單位碳價格為 2,000 元，則地主在第 15 年時選擇繼續造林之價格區間為每立方公

尺 3,000 元至 3,800 元；若政府提供每單位碳給付價格為 3,000 元，則地主在第 15 年時選擇繼續造林之價格區間為每立方公尺 2,200 元至 2,800 元。若政府提供每單位碳給付價格為 4,000 元，則地主在第 15 年時選擇繼續造林之價格區間為每立方公尺 1,400 元至 1,800 元。由圖 5 亦可知，在碳存量給付政策下，隨著碳給付金額越高，則必砍年份越早。與前述第一種與第二種碳給付政策比較可知，在第三種碳存量之給付機制下，雖然門檻價格較低，使得地主砍伐林木後轉作為農用之誘因降低，但卻提升地主砍伐林木後重新造林之機率，而提早必砍年份之時間。

(四)事後給付機制下造林地主土地利用決策之實證結果

在事後給付機制下，地主在造林結束後才能領取碳給付，且政府提供之碳給付是依據造林期間之碳存量來支付，在伐木後地主不需要支付碳釋放之支出。本研究之實證結果如圖 6，隨著單位碳給付水準增加，則砍伐林木後再重新造林之門檻價格 P' 曲線會下移，而砍伐林木後轉作為農用之門檻價格 P'' 曲線亦會往下移。在碳給付政策下，在必砍年份前地主砍伐林木之誘因會降低。例如政府提供的碳給付價格每單位為 2,000 元時，則地主在第 15 年時選擇繼續造林之價格區間為每立方公尺 3,400 元至 4,000 元；若政府提供的碳給付價格為每單位 4,000 元，則在第 15 年時，地主選擇繼續造林之價格區間將縮小為每立方公尺 2,000 元至 2,200 元。若政府提供的碳給付價格為每單位 5,000 元時，則在第 15 年時，地主選擇繼續造林之價格區間將擴大為每立方公尺 1,200 元至 1,400 元。由圖 6 可知，隨著給付金額增加，則必砍年份會提早；與前述第一種、第二種與第三種碳給付政策比較可知，在第四種事後給付機制下，雖然必砍年份會提早，但是在必砍年份之前，造林地主較不易受到價格波動影響而進行砍伐林木之決策，「繼續造林決策」的價格區間較大。不過必砍年份屆滿後，地主選擇繼續造林之決策機率較小，甚至等於零，亦即輪伐期屆滿之後，不論價格為何，地主均採取砍伐林木之決策。

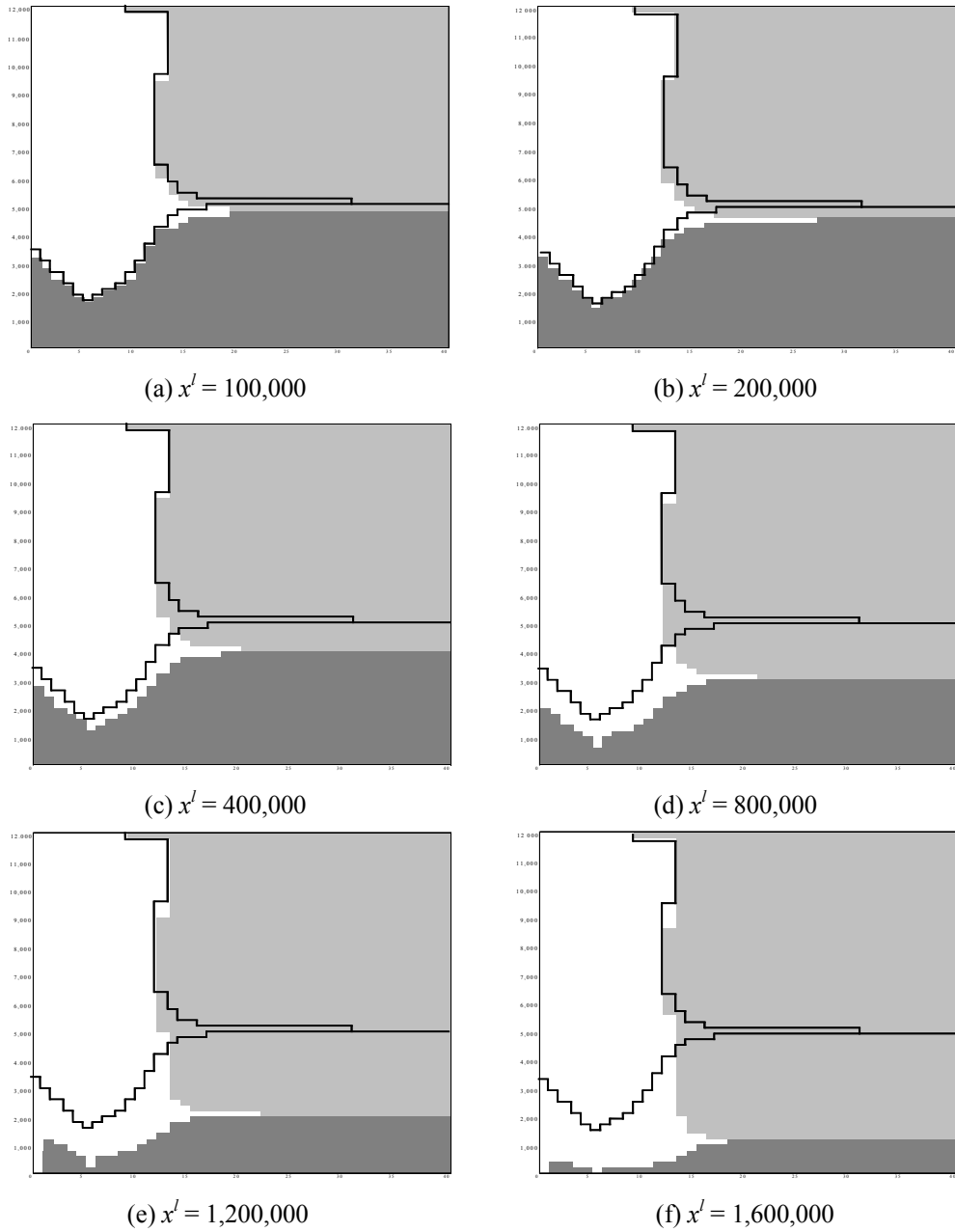


圖3 政府實施一次給付政策下造林地主之土地利用決策

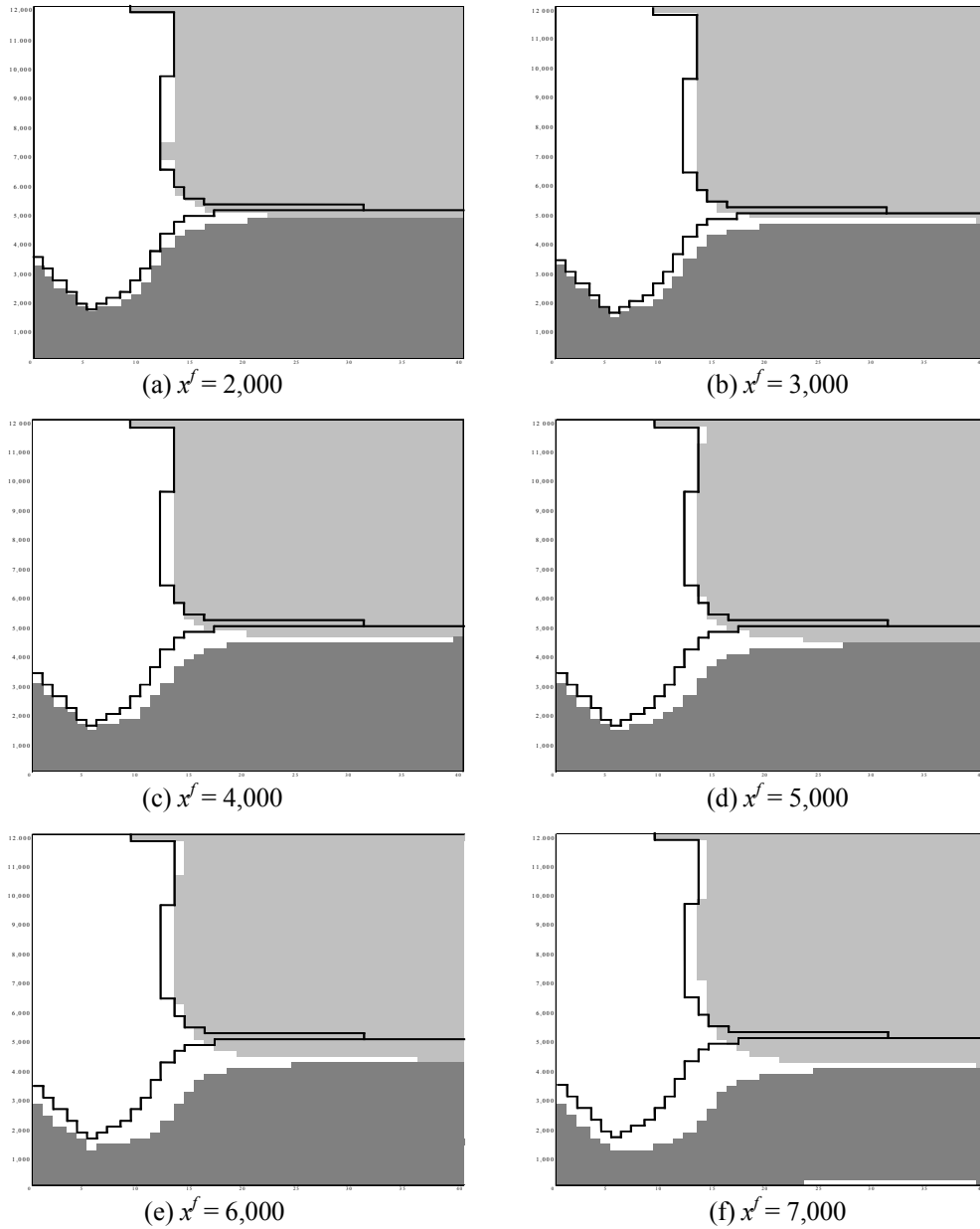


圖 4 政府實施碳流量給付政策下造林地主之土地利用決策

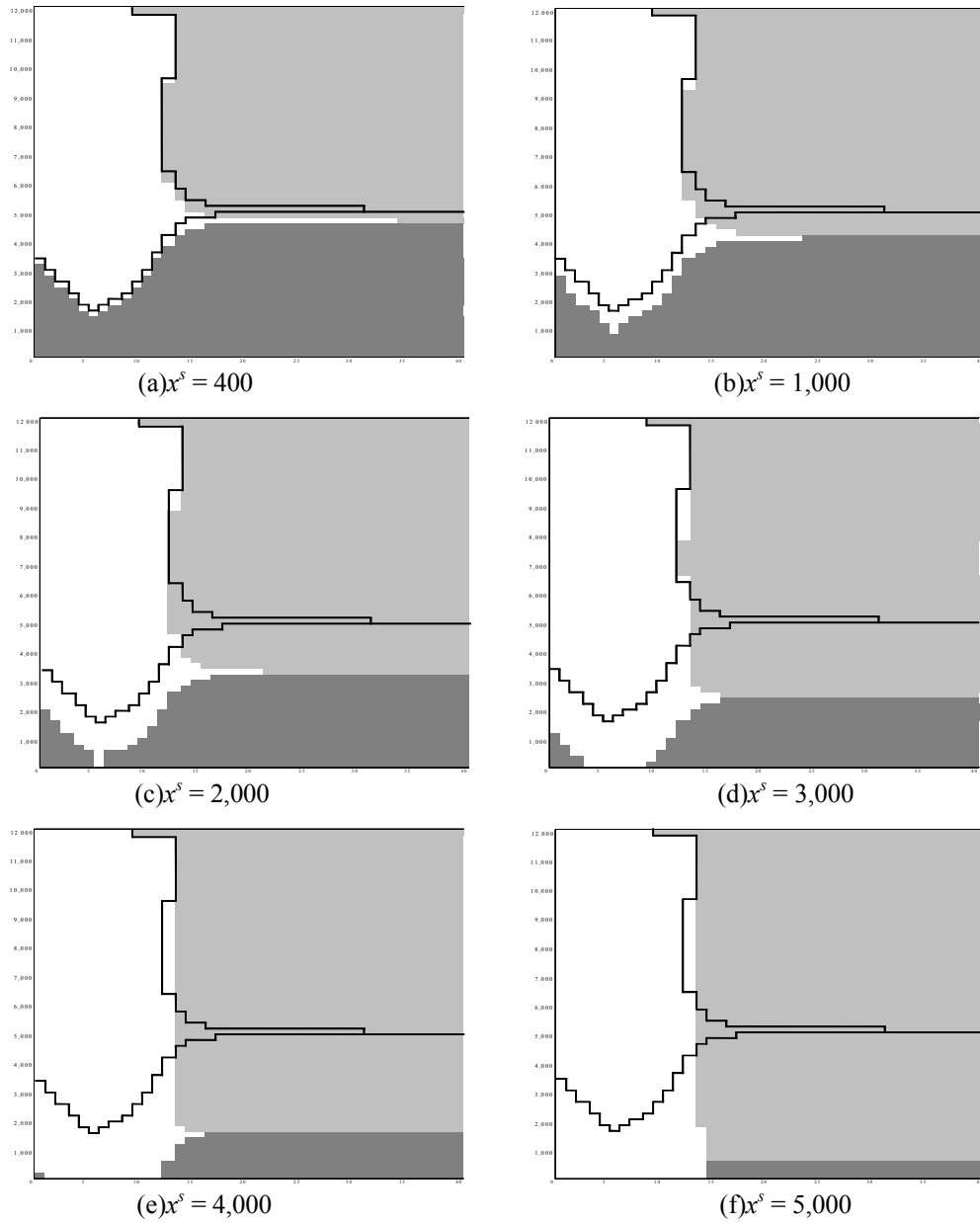


圖 5 政府實施碳存量給付政策下造林地主之土地利用決策

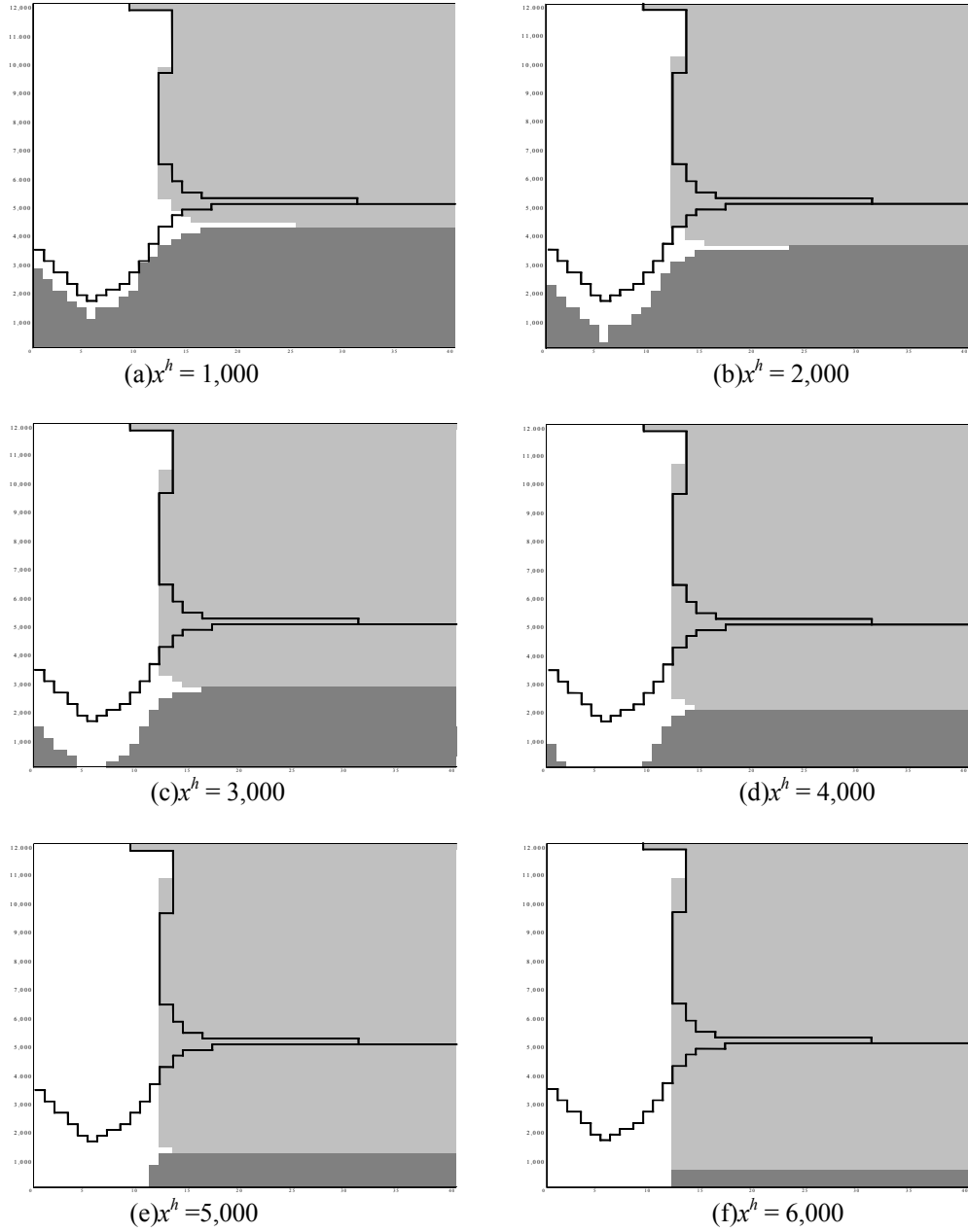


圖 6 政府實施事後給付政策下造林地主之土地利用決策

三、不同碳給付機制下造林地主之碳吸存收入與木材收入

爲更清楚瞭解地主在每個時點決策價值之內涵，因此進一步將決策價值 $F(P, t)$ 區分爲兩部分，包括碳吸存給付收入現值以及林木出售收入現值，如下式：

$$F = F^Q + F^W \quad (21)$$

其中 F^Q 表示碳吸存收入之現值，而 F^W 表示未來林木出售收入之現值，四種碳吸存給付機制之碳吸存收入與木材收入結果如表 5 與表 6。當單位碳吸存價格增加時，碳吸存收入 F^Q 會增加，而決策價值 F 也會增加，不過由於木材收入 F^W 會減少，所以使得決策價值增加之幅度比碳吸存收入增加的少；當單位碳吸存價格增加時，木材收入現值將減少，此意味著當存在碳給付政策後，地主將會進行次佳之林木生產 (sub-optimal wood production)，而非最高的林木生產總值（即不存在補貼機制下之木材生產總值）；且隨著單位碳吸存價格增加，則次佳之林木價值與最高林木價值之差距亦會拉大，且其差距隨著碳給付機制不同而有所不同。在政府實施一次給付政策下，當單位碳流量之碳給付價格 x^f 爲每單位 400,000 元時，每公頃之碳吸存收入現值爲 126,792.55 元，但造林地主之決策價值僅增加 59,143.17 元，其差距爲 67,649.38 元，此即爲木材價值減少的部分。

另外由表 6 亦可看出在各給付機制下之碳收入現值佔總決策價值之比例，其中以第二種給付機制之碳收入現值佔總決策價值的比例最小。碳收入現值佔總決策價值之比例會隨著單位碳吸存價格增加而增加，例如在一次給付政策下，當碳給付金額由每公頃 100,000 元增加爲 400,000 元時，則碳收入現值佔總決策價值的比例將由 0.18% 增加至 7.27%；而在碳流量給付政策下，當碳給付金額由每噸 3,000 元增加至每噸 5,000 元時，則碳收入現值佔總決策價值的比例將由 0.59% 增加至 3.44%。在碳存量給付政策下，當碳給付金額由每噸 3,000 元增加至每噸 5,000 元時，則碳收入現值佔總決策價值的比例將由 28.67% 增加至 59.50%；在事後給付政策下，當碳給付金額由每噸 3,000 元增加至每噸 5,000 元時，則碳收入現值佔總決策價值的比例將由 22.67% 增加至 46.82%。然而就碳收入現值增加量佔總決策價值增加量之比例而言，則隨著不同給付機制而有不同的趨

勢。在本研究所模擬之情境中，以碳流量給付政策而言，單位碳吸存價格為 3,000 元時，碳吸存收入現值增加量佔地主總決策價值增加量之比例最大。若與沒有碳給付之情形作比較，每公頃之碳吸存收入現值增加 9,895.99 元，但因每公頃之木材價值減少 8,268.04 元，故每公頃之總決策價值僅增加 1,627.95 元，亦即碳吸存收入增加量超過總決策價值增加量，且碳吸存收入增加量為總決策價值的 6.08 倍。除了此情境之外，其他情境之碳吸存收入增加量約是決策價值增加量的 1 倍至 4 倍之間。

四、以政府角度分析碳給付政策之內涵

政府實施碳吸存給付政策的目的是為提升碳吸存量，延長地主之輪伐期，降低土地轉為其他用途之誘因。換言之，政府希望重新造林之價格門檻 P' 越高越好，放棄造林並將土地作為農用之價格門檻 P^a 越低越好，政府之碳吸存支出 F^Q 越低越好。政府根據政策目標決定最佳的碳給付政策以及碳給付水準，其政策目標亦可用兩項價格門檻來加以分析。假設政府（政策制訂者）追求效用極大，則其效用函數可寫成 $U(F^Q, P^a, P')$ ，效用 U 由三個變數決定，包括 F^Q （碳吸存收入之現值）、 P^a （地主砍伐林木後將土地轉作為農用之價格門檻）、 P' （地主砍伐林木後重新造林之價格門檻）。其中效用函數 U 為 F^Q 與 P^a 之遞減函數，為 P' 之遞增函數。政策制訂者將根據效用極大化原則選擇最佳的給付機制，進而制訂一個最適的給付價格水準 x 。地主進一步再根據政府制訂的給付水準，決定其最適的林木砍伐時點，碳給付收入現值 F^Q 以及土地利用決策下之 P^a 及 P' 。根據本研究之實證結果，如圖 7，橫軸為政府支出之碳給付金額，縱軸是 P^a 及 P' 門檻價格。若根據上述效用極大之定義，以政府角度而言，在同樣的碳給付支出 F^Q 下，政府希望 P^a 價格越高越好， P' 價格越低越好，亦即以增加 P^a 及 P' 之差距，來增加地主繼續造林之機率。就圖 8 可知，在政府每公頃土地之碳給付支出 F^Q 低於 20 萬元時，第二種碳流量給付政策明顯優於其他碳給付政策；而政府的碳給付支出介於每公頃 20 萬元至 160 萬元之間時，則除了第二種碳流量給付政策之外，一次給付政策之政策效果也明顯優於其他政策。

表5 政府實施不同碳給付政策下地主土地利用決策之實證結果

x (元/公頃)	P^0 (元/公頃)	$P(15)$ (元/公頃)	P (元/公頃)	$F(P; 0)$ (元/公頃)	$F(P; 5)$ (元/公頃)	$F(P; 10)$ (元/公頃)	$F(P; 15)$ (元/公頃)	$F(P; 20)$ (元/公頃)	$F''(P; 0)$ (元/公頃)	$F^0(P; 0)$ (元/公頃)
一次給付										
$x^1=0$	4,800.00	5,600.00	5,100.00	1,685,368.54	1,992,573.62	2,363,470.85	2,747,135.01	3,009,907.02	1,685,368.54	0.00
$x^1=100,000$	4,400.00	5,400.00	4,900.00	1,688,366.61	1,914,439.87	2,273,378.75	2,650,090.46	2,912,862.47	1,685,341.94	3,024.67
$x^1=200,000$	4,200.00	5,200.00	4,700.00	1,696,411.15	1,837,866.51	2,185,187.49	2,553,045.91	2,815,817.91	1,673,852.15	22,559.00
$x^1=400,000$	3,800.00	4,600.00	4,100.00	1,744,511.71	1,690,197.07	2,016,363.35	2,358,956.79	2,621,728.81	1,617,719.15	126,792.55
$x^1=800,000$	2,800.00	3,600.00	3,100.00	1,899,666.42	1,423,997.80	1,723,831.12	2,088,092.63	2,320,864.63	1,543,939.35	355,727.08
$x^1=1,200,000$	1,800.00	2,600.00	2,100.00	2,101,194.98	1,212,657.50	1,509,612.18	1,859,023.80	2,121,795.81	1,417,657.05	683,537.93
$x^1=1,600,000$	800.00	1,600.00	1,300.00	2,361,382.77	1,070,234.85	1,367,376.46	1,714,524.38	1,977,296.39	1,180,130.39	1,181,252.39
碳流量給付										
$x^1=0$	4,800.00	5,600.00	5,100.00	1,685,368.54	1,992,573.62	2,363,470.85	2,747,135.01	3,009,907.02	1,685,368.54	0.00
$x^1=2,000$	4,400.00	5,600.00	4,900.00	1,685,403.12	1,992,415.89	2,179,291.45	2,412,481.33	2,593,453.49	1,685,339.25	63.88
$x^1=3,000$	4,200.00	5,600.00	4,700.00	1,686,996.50	1,994,949.34	2,090,542.48	2,245,154.49	2,385,226.73	1,677,100.50	9,895.99
$x^1=4,000$	3,800.00	5,400.00	4,700.00	1,691,061.60	1,999,594.95	2,004,484.44	2,077,827.65	2,176,999.96	1,670,421.87	20,639.73
$x^1=5,000$	3,600.00	5,400.00	4,500.00	1,700,329.37	2,006,725.85	1,921,567.18	1,910,916.62	1,968,773.20	1,641,814.23	58,515.13
$x^1=6,000$	3,200.00	5,600.00	4,300.00	1,714,630.81	2,016,847.55	1,842,375.23	1,747,939.71	1,760,546.44	1,611,528.85	103,101.97
$x^1=7,000$	2,600.00	5,600.00	4,100.00	1,734,256.09	2,030,685.11	1,767,713.54	1,591,420.92	1,552,319.67	1,577,226.99	157,029.10
碳存量給付										
$x^1=0$	4,800.00	5,600.00	5,100.00	1,685,368.54	1,992,573.62	2,363,470.85	2,747,135.01	3,009,907.02	1,685,368.54	0.00
$x^1=400$	4,400.00	5,200.00	4,700.00	1,686,821.84	2,039,870.30	2,382,871.95	2,751,122.73	3,012,390.89	1,677,840.84	8,981.00
$x^1=1,000$	3,800.00	4,800.00	4,300.00	1,726,868.14	2,119,055.36	2,421,497.06	2,757,104.33	3,016,116.69	1,617,983.59	108,884.55
$x^1=2,000$	3,000.00	3,800.00	3,300.00	1,864,764.67	2,277,019.77	2,522,941.58	2,821,383.19	3,076,147.38	1,549,939.51	314,825.16
$x^1=3,000$	2,200.00	2,800.00	2,500.00	2,039,977.96	2,477,909.97	2,688,399.60	2,995,893.87	3,247,386.95	1,455,092.71	584,885.25
$x^1=4,000$	1,400.00	1,800.00	1,700.00	2,258,841.88	2,733,812.77	2,917,571.87	3,211,091.71	3,458,825.15	1,279,028.77	979,813.11
$x^1=5,000$	600.00	800.00	700.00	2,531,469.13	3,046,065.11	3,198,505.66	3,475,427.69	3,719,401.48	1,025,244.76	1,506,224.37

表 5 政府實施不同碳給付政策下地主土地利用決策之實證結果 (續)

x (元/公頃)	$P^0(15)$ (元/m ³)	$F(15)$ (元/m ³)	P^* (元/m ³)	$F(P;0)$ (元/公頃)	$F(P;5)$ (元/公頃)	$F(P;10)$ (元/公頃)	$F(P;15)$ (元/公頃)	$F(P;20)$ (元/公頃)	$F^*(P;0)$ (元/公頃)	$F^0(P;0)$ (元/公頃)
事後給付										
$x^0 = 0$	4,800.00	5,600.00	5,100.00	1,685,368.54	1,992,573.62	2,363,470.85	2,747,135.01	3,009,907.02	1,685,368.54	0.00
$x^0 = 1,000$	4,000.00	4,800.00	4,300.00	1,713,370.98	2,115,431.24	2,509,068.65	2,924,421.11	3,224,344.93	1,630,562.23	82,808.75
$x^0 = 2,000$	3,400.00	4,000.00	3,700.00	1,822,085.68	2,257,457.92	2,680,584.13	3,121,360.40	3,454,810.73	1,572,316.04	249,769.64
$x^0 = 3,000$	2,600.00	3,000.00	2,900.00	1,958,139.76	2,426,151.85	2,895,897.57	3,420,716.90	3,794,944.34	1,514,234.66	443,905.10
$x^0 = 4,000$	2,000.00	2,200.00	2,100.00	2,120,871.55	2,631,288.96	3,161,652.95	3,750,514.79	4,161,894.03	1,406,576.62	714,294.93
$x^0 = 5,000$	1,200.00	1,400.00	1,300.00	2,318,537.15	2,877,677.85	3,465,974.36	4,111,640.48	4,560,171.54	1,233,050.79	1,085,486.36
$x^0 = 6,000$	600.00	800.00	700.00	2,554,484.42	3,161,297.50	3,804,243.38	4,506,923.01	4,992,605.88	1,038,833.72	1,515,650.70

資料來源：本研究整理。

註：在此表中， $P^0(15)$ 表示林齡在第 15 年時，地主採取砍伐林木，且將土地轉作為農業使用之價格門檻， $P^*(15)$ 表示林齡在第 15 年時，地主採取砍伐林木，且重新造林之價格門檻， P^* 表示若持續造林至該輪伐期結束後進行農用或重新造林之邊界價格，亦即在輪伐期結束後，若觀察價格在 P^* 以上，則地主將會進行重新造林，若輪伐期結束後之觀察木材價格在 P^* 以下，則地主將會將土地作為農用。第五欄至第八欄之決策價值 $F(P,t)$ 的價格 P 採用我國近五年 (2003/1-2008/1) 杉木價格之平均值，即每立方公尺 3,707.88 元。

表6 造林地主在不同碳給付政策下之價格門檻與碳收入之比例

X (元/公頃；元/噸)	門檻差距 (元/噸) $P^f(15) - P^a(15)$	碳收入增加量佔總決策價值 增加量之比例 $\Delta F^Q(P; 0) / \Delta F(P; 0)$	碳收入佔總決策價值 之比例 $F^Q(P; 0) / F(P; 0)$
一次給付政策			
$x^l = 0$	800.00	-	0.00%
$x^l = 100,000$	1,000.00	100.89%	0.18%
$x^l = 200,000$	1,000.00	204.29%	1.33%
$x^l = 400,000$	800.00	214.38%	7.27%
$x^l = 800,000$	800.00	166.00%	18.73%
$x^l = 1,200,000$	800.00	164.38%	32.53%
$x^l = 1,600,000$	800.00	174.74%	50.02%
碳流量給付政策			
$x^f = 0$	800.00	-	0.00%
$x^f = 2,000$	1,200.00	184.73%	0.00%
$x^f = 3,000$	1,400.00	607.88%	0.59%
$x^f = 4,000$	1,600.00	362.54%	1.22%
$x^f = 5,000$	1,800.00	391.12%	3.44%
$x^f = 6,000$	2,400.00	352.34%	6.01%
$x^f = 7,000$	3,000.00	321.20%	9.05%
碳存量給付政策			
$x^s = 0$	800.00	-	0.00%
$x^s = 400$	800.00	-	0.53%
$x^s = 1,000$	1,000.00	271.90%	6.31%
$x^s = 2,000$	800.00	176.92%	16.88%
$x^s = 3,000$	600.00	165.62%	28.67%
$x^s = 4,000$	400.00	171.29%	43.38%
$x^s = 5,000$	200.00	178.33%	59.50%
事後給付政策			
$x^h = 0$	800.00	-	0.00%
$x^h = 1,000$	800.00	295.72%	4.83%
$x^h = 2,000$	600.00	182.69%	13.71%
$x^h = 3,000$	400.00	162.74%	22.67%
$x^h = 4,000$	200.00	164.02%	33.68%
$x^h = 5,000$	200.00	171.44%	46.82%
$x^h = 6,000$	200.00	174.39%	59.33%

資料來源：本研究整理。

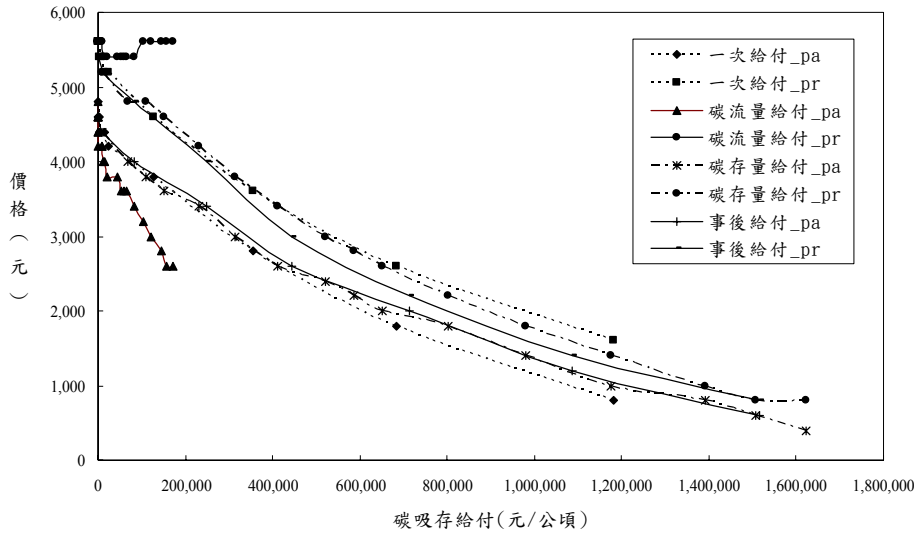


圖 7 各種碳給付政策下造林地主土地利用之價格門檻曲線

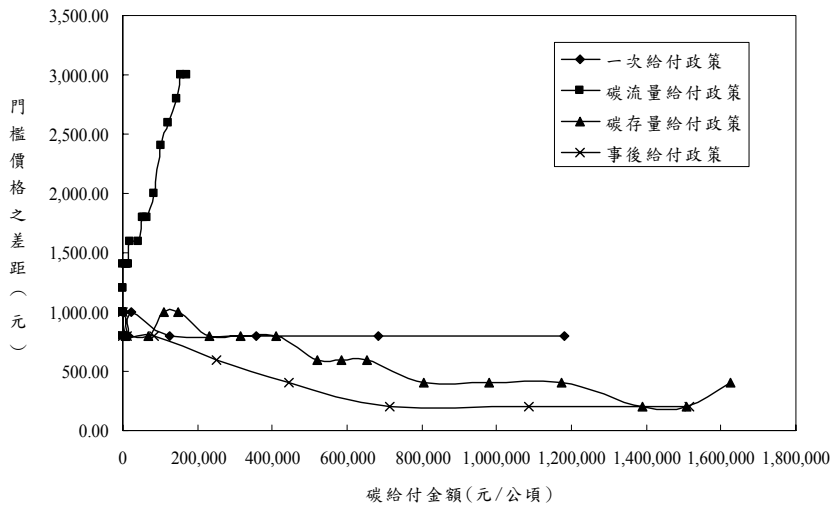


圖 8 各種碳給付政策下造林地主土地利用決策之門檻價格差距 ($t=15$)

若以政府角度而言，在同樣的碳給付支出下較大的價格門檻差距將可達到較高之政策效益，因此本研究進一步分析政府提供相同碳給付支出下，哪一個碳給付政策之門檻價格 (P^a 及 P^r) 的差距較大。根據本研究之結果，以第15年為例，在相同的碳給付支出下，以第二種碳流量給付政策之價格門檻差距最大，且地主之輪伐期最長，一次給付政策次之，碳存量政策與事後給付政策之價格門檻差距較小。其次，根據圖9可知，隨著政府碳吸存支出增加，則木材收入現值減少，反映出政府在實施碳給付政策之後，造林地主決定之木材生產值並非最高的木材生產總值。隨著碳給付金額的增加，地主木材收入現值亦隨之減少。由圖9、圖10與圖11可知，在四種碳給付機制下，隨著碳給付金額增加，木材收入現值將減少、地主決策價值將增加，而碳吸存收入佔地主收入之比例也會增加。在政府實施四種不同碳給付機制之下，其木材收入現值、地主決策價值以及碳吸存收入佔地主收入比例之變化幅度差異不大。

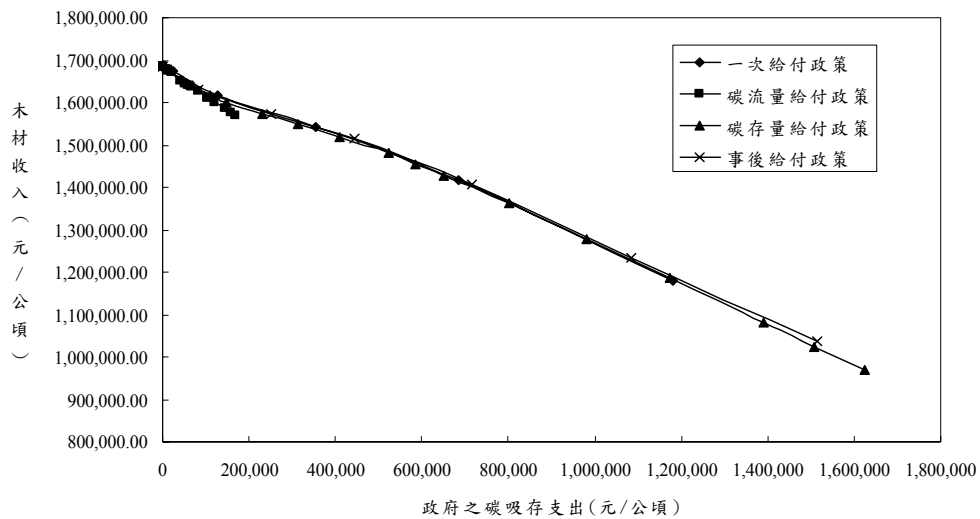


圖9 各種碳給付政策下造林地主碳吸存收入與木材收入之比較

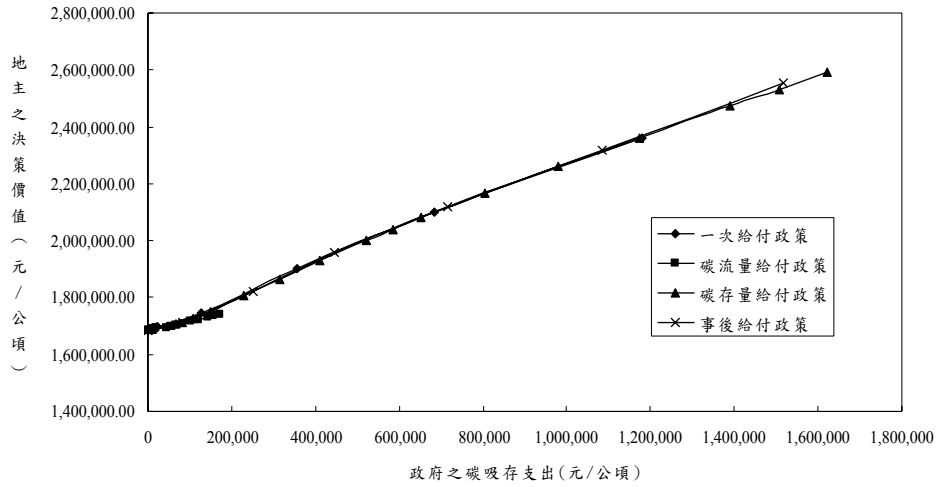


圖 10 各種碳給付政策下造林地主碳吸存收入與總決策價值之關係

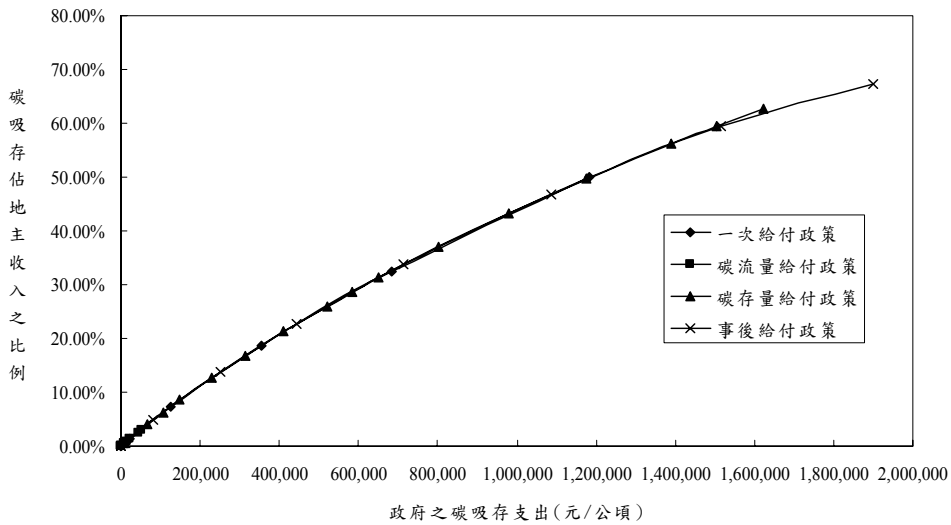


圖 11 各種碳給付政策下地主碳吸存收入與總收入之關係

伍、結論與建議

近年來世界各國十分重視溫室氣體減量之問題，1997年聯合國氣候變化綱要公約之第三次締約國大會通過「京都議定書」(Kyoto Protocol)，以具有法定約束力的國際協定來規範先進國家的減量工作，此公約在2005年2月16日正式生效並開始實施。採用造林來增進碳吸存普遍被認為是成本較低的減量方式，各國已開始重視以森林碳吸存，並以農地造林作為減量之政策工具。當農地為私人所有時，政府必須對地主提供適當的經濟誘因以鼓勵農民造林。本研究首先建立造林地主之土地利用決策模型以及建立四種給付機制，包括一次給付機制、碳流量機制、碳存量機制及事後給付機制，並進一步將木材價格不確定因素引入理論模型中，延伸修正 Guthrie and Kumareswaran (2007) 之實質選擇權模型，並改進 Chladná (2007) 僅考慮單一輪伐期之問題，以動態規劃之逆推法推論數值解。在模擬分析我國部分，以考慮五個輪伐期，模擬分析在木材價格不確定下政府實施不同碳給付方案對於地主土地利用決策之影響，以及比較分析四種給付機制之政策效果。

根據本研究之實證結果，若政府未執行碳給付政策，則在第15年時，若木材價格在每立方公尺4,800元以下，我國地主會選擇砍伐林木，並在砍伐林木後將土地轉作為農用。若木材價格在每立方公尺5,600元以上，則地主會選擇砍伐林木，並在伐木後重新造林。無論木材價格在任何水準，地主在第32年都會選擇砍伐林木，而砍伐林木之後是否會重新造林，則視當時木材價格而定。若木材價格在每立方公尺5,100元以上，地主將會在砍伐林木後重新造林，若木材價格在每立方公尺5,100元以下，則地主會在砍伐林木後將土地轉作為農用。不過，分析結果亦顯示，在第18年至第31年間，我國地主只有在木材價格為每立方公尺5,200元時才會選擇繼續造林而不砍伐林木。因此，在大部分的木材價格下，地主在第18年時就會選擇砍伐林木。本研究進一步針對重要變數進行敏感度分析，研究結果發現農業收入與折現率對於地主土地利用決策之影響幅度較大。

在政府實施碳給付制度之後，無論政府採行何種碳給付機制，實施碳給付政策都會

降低造林地轉為農業用途之木材價格門檻，增加地主造林之木材價格區間。就第一種一次給付機制而言，碳給付政策會使必砍年份提早，且隨著給付金額增加，必砍年份將會越來越早。在第二種碳流量給付機制下，地主造林之木材價格區間較大，而必砍年份也較晚。在第三種碳存量給付機制下，隨著碳給付金額越高，必砍年份越早。而就第四種事後給付機制而言，隨著碳給付金額增加，必砍年份亦隨之縮短。所不同的是在此機制下，必砍年份雖然提早，但在必砍年份屆滿前，造林地主較不易受到價格波動而進行砍伐決策。整體而言，在四種碳給付機制中，除了第二種機制之外，其他三種機制均會使得砍伐後重新造林之價格門檻降低，縮短維持造林之期間，亦即，碳給付政策之存在不一定會延長必砍年份。除了第二種機制之外，其他三種機制均可能使必砍年份提早。

就四個碳給付機制而言，在相同政府支出之下，相較於其他三種給付機制，第二種給付機制下地主繼續造林之價格區間最大，其必砍年份也相對較晚。整體而言，第二種給付機制之政策效果明顯優於其他三種機制。以第 15 年為例，在相同的碳給付支出下，碳流量給付機制之價格門檻差距較大，一次給付機制次之，碳存量機制與事後給付機制之價格門檻差距較小。若進一步將地主之收入區分為木材收入與碳吸存收入，根據模擬結果，當單位碳給付金額增加時，地主之碳收入現值會增加，木材收入現值會減少。由於碳吸存收入增加量大於木材收入減少量，故地主之總收入現值仍會增加，但增加量將小於碳吸存收入增加量。此意味著，當政府實施碳給付政策後，參與碳給付政策之地主之木材生產將為次佳之生產方式 (sub-optimal wood production)，其木材收入現值會低於沒有參與碳給付政策之地主林木收入現值。當碳給付金額越高，木材收入現值與未參與碳給付政策之木材收入現值之差距將越大，且其差距大小隨著碳給付機制不同而有所不同。另外，隨著政府碳給付金額的增加，碳吸存收入現值佔地主收入現值之比例將隨之增加。

台灣目前並沒有碳價格存在，但為因應國際溫室氣體減量，未來可能建立的相關碳價格機制下，未來政府應先考慮建構完整的監測檢驗系統，以及建立具公信力之檢測碳量方法與運作機制，此為碳給付機制能順利進行之前提；其次，在碳給付機制實施前，

政府亦應先完成碳匯認證與財產權歸屬之相關事宜，在前述之監測系統順利建構後，政府可採取碳流量之碳給付機制，亦即採取一年給付一次，每次給付金額依照碳流量而定，符合經濟之理論基礎。本研究爲了方便估計，作部分簡化假設，例如僅考慮木材價格之不確定性因素。若要更接近實際情況，除了木材價格之外，應考慮木材生長量與碳價格之不確定因素。若在模型中同時考慮三個變數之不確定因素，則將增加模型與數值求解之複雜度，此可作爲未來研究的方向。另外，本研究之模型爲部份均衡模型，然在現實生活中，政府實施碳給付機制，將會影響木材市場之供需，進而影響木材價格以及碳價格。Sohngen and Mendelsohn (2003) 提到政府實施碳給付機制之初期，木材價格將會增加，實施一段時間後，木材價格將會降低。因此將木材之供需以及數個不確定因素同時考慮在模型中，進一步作模擬分析，將會是未來的研究範疇。

(收件日期爲民國99年11月20日，接受日期爲民國100年9月1日)

附 錄

本研究在理論模型部分，將研究問題之定義域視為一個三維空間，其中 x 軸、 y 軸、 z 軸分別表示價格 P 、時間 t 、與輪伐期。顯性有限差分方法主要是將此定義域空間以切割成有限個格子節點 (Grid Node) 來表示。假設共存在五個輪伐期，每個輪伐期最長不得超過 40 年¹¹。本研究利用 (P_i, t_j) 來標示每一個輪伐期之價格為 P_i ，且時間為 t_j 之格子節點，其中 $P_i = i\Delta P$ ，而 $t_j = (j-1)\Delta t - \bar{T}$ 。令 $\Delta P = 5$ ，而 $\Delta t = 0.0025$ ，因此在 P 軸共有 60 個格子節點，而 t 軸共有 16,401 個格子節點。若地主選擇砍伐決策，則砍伐行為只會發生在 $\bar{T} = 1$ 時。

本研究令 $F_{i,j}^k = F(P_i, t_j; k)$ 來表示在 (P_i, t_j) 格子節點下第 k 個輪伐期之決策價值，將 $F_{i,j}^k = F(P_i, t_j; k)$ ， $P_i = i\Delta P$ ， $t_j = (j-1)\Delta t - \bar{T}$ 以及 $\bar{T} = 1$ 代入正文第 (8) 式，則第 (8) 式可改成有限差分方程式。(8) 式之原式為 $\psi(t) + \left(\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{1}{2} \sigma^2 P^2 \frac{\partial^2 F}{\partial P^2} + (r - \kappa) P \frac{\partial F}{\partial P} - rF \right) = 0$ ，利用前向差分法 (forward difference) 來代入 $\frac{\partial F}{\partial t}$ 和 $\frac{\partial F}{\partial P}$ ，且利用中央差分法 (central difference) 來代入 $\frac{\partial^2 F}{\partial P^2}$ ，則原式可得：

¹¹ 在一般的模擬分析中，為求精確，會模擬多個循環，在本研究中一個循環為一個輪伐期之意，本研究若只評估一個輪伐期則顯過少，而透過本研究多次循環模擬之結果亦發現，五個以上輪伐期之近似解與五個輪伐期之解差異不大，因此本研究設定五個輪伐期來進行模擬。

$$\begin{aligned} \psi(t_{j+1}) + \left[\frac{F_{i,(j+1)}^k - F_{i,j}^k}{\Delta t} + \frac{1}{2} \sigma^2 (i^2 \Delta P^2) \frac{F_{(i+1),(j+1)}^k - 2F_{i,(j+1)}^k + F_{(i-1),(j+1)}^k}{(\Delta P)^2} \right. \\ \left. + (r - \kappa) i \Delta P \frac{F_{(i+1),(j+1)}^k - F_{i,(j+1)}^k}{\Delta P} - r F_{i,(j+1)}^k \right] = 0 \end{aligned} \quad (A1)$$

又 $\Delta i = 1$ 代入上式，整理後可求解出在 (P_i, t_j) 格子節點中第 k 個輪伐期之時點，進行延後砍伐（即 d 決策，繼續維持立木狀態）決策之決策價值 $\pi_{i,j}^{d,k}$ 如下：

$$\begin{aligned} F_{i,j}^k = \frac{\Delta t}{2} (\sigma^2 i^2 - (r - \kappa) i) F_{i-1,j+1}^k + (1 - \Delta t (\sigma^2 i^2 + r)) F_{i,j+1}^k \\ + \frac{\Delta t}{2} (\sigma^2 i^2 + (r - \kappa) i) F_{i+1,j+1}^k + \psi(t_{j+1}) \Delta t \end{aligned} \quad (A2)$$

令 $\psi_j = \psi(t_j) \Delta t$ ，透過第 (A2) 式，本研究可求解出在 (P_i, t_j) 格子節點中第 k 個輪伐期之時點，若進行延後砍伐（即繼續維持立木狀態）決策之決策價值 $\pi_{i,j}^{d,k}$ 如下：

$$\begin{aligned} \pi_{i,j}^{d,k} = \frac{\Delta t}{2} (\sigma^2 i^2 - (r - \kappa) i) F_{i-1,j+1}^k + (1 - \Delta t (\sigma^2 i^2 + r)) F_{i,j+1}^k \\ + \frac{\Delta t}{2} (\sigma^2 i^2 + (r - \kappa) i) F_{i+1,j+1}^k + \psi_{j+1} \end{aligned} \quad (A3)$$

由正文第 (6) 式，等號兩邊同除以 P ，可得：

$$\frac{dP}{P} = (r - \kappa) dt + \sigma dz \quad ,$$

對兩邊同時取積分， $\int \frac{1}{P} dP = \int (r - \kappa) dt + \int \sigma dz$ ，則 $\ln P = (r - \kappa)t + \sigma z + \ln C$ ，可求得

$$P_t = C e^{(r - \kappa)t + \sigma z} \quad (A4)$$

其中 C 為某個常數。若木材價格符合風險中立過程，則地主在 t 時點預期在 $t + \bar{T}$ 之木材價格可以期望值來表示。將第 (A4) 式取在時間 $t + \bar{T}$ 的期望值，可得：

$$E_t[P_{t+\bar{T}}] = E_t[Ce^{(r-k)(t+\bar{T})+\sigma z}] = E_t[(Ce^{(r-k)t+\sigma z})e^{(r-k)\bar{T}}] = E_t[P_t e^{(r-k)\bar{T}}] = P_t e^{(r-k)\bar{T}}$$

因此，

$$E_t[P_{t+\bar{T}}] = P_t e^{(r-k)\bar{T}} \quad (\text{A5})$$

將第 (A5) 式代入正文第 (2) 式可得：

$$\pi_t^a = -\delta + \int_0^{\bar{T}} e^{-rs} \psi(t+s) ds + e^{-r\bar{T}} \left[(1-T_c)(P_t e^{(r-k)\bar{T}} - h)V(t+\bar{T}) + \widehat{Q}(t+\bar{T}) + S \right] \quad (\text{A6})$$

其中 t 為林木之林齡， P_t 為 t 時木材價格，故可在此點 $(P_t, t_j; k)$ 進行求解：

$$\pi_{i,j}^{a,k} = -\delta + \sum_{n=0}^{\bar{T}/\Delta t - 1} e^{-rn\Delta t} \psi_{i+n} + e^{-r\bar{T}} \left[(1-T_c)(P_t e^{(r-k)\bar{T}} - h)V(t_j + \bar{T}) + \widehat{Q}(t_j + \bar{T}) + S \right] \quad (\text{A7})$$

同理，可以同樣方式來求正文第 (3) 式之近似解：

$$\begin{aligned} \pi_t^r &= -\delta + \int_0^{\bar{T}} e^{-rs} \psi(t+s) ds + e^{-r\bar{T}} E \left[(1-T_c)(P_{t+\bar{T}} - h)V(t+\bar{T}) + \widehat{Q}(t+\bar{T}) + F(P_{t+\bar{T}}, 0) \right] \\ &= -\delta + \int_0^{\bar{T}} e^{-rs} \psi(t+s) ds + e^{-r\bar{T}} \left[(1-T_c)(E(P_{t+\bar{T}}) - h)V(t+\bar{T}) + \widehat{Q}(t+\bar{T}) \right] \\ &\quad + e^{-r\bar{T}} F(P_{t+\bar{T}}, 0) \\ \pi^{r,k} &= -\delta + \int_0^{\bar{T}} e^{-rs} \psi(t+s) ds + e^{-r\bar{T}} \left[(1-T_c)(P_t e^{(r-k)\bar{T}} - h)V(t+\bar{T}) + \widehat{Q}(t+\bar{T}) \right] \\ &\quad + F(P, -\bar{T}; k+1) \end{aligned} \quad (\text{A8})$$

根據 (A8) 式，砍伐時所屬之輪伐期為第 k 個輪伐期，而 $F(P, -\bar{T}; k+1)$ 為將林木砍

伐後下一個輪伐期之價值，因此可以下式為近似解：

$$\pi_{i,j}^{r,k} = -\delta + \sum_{n=0}^{\bar{T}/\Delta t - 1} e^{-rn\Delta t} \psi_{i+n} + e^{-t\bar{T}} \left[(1 - T_c)(Pe^{(r-k)\bar{T}} - h)V(t + \bar{T}) + \hat{Q}(t + \bar{T}) \right] + F_{i,l}^{k+1} \quad (A9)$$

參考文獻

(1)中文部分

陳麗琴與黃進陸，1992，「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，7：221-230。

劉浚明，1997，「疏伐作業影響輪伐期長短之研究」，中華林學季刊，30：71-84。

劉浚明與鍾旭和，1993，「台灣杉非線性收穫模式之建立」，中華林學季刊，26：39-49。

(2)英文部分

Alig, R., D. Adams, B. A. McCarl, J. M. Callaway, and S. M. Winnett, 1997, "Assessing Effects of Mitigation Strategies for Global Climate Change with an Intertemporal Model of the US Forest and Agricultural Sectors," *Environmental and Resource Economics*, 9: 259-274.

Antle, J., S. Capalbo, S. Mooney, E. Elliot, and K. Paustian, 2001, "Economic Analysis of Agricultural Soil Carbon Sequestration: An Integrated Assessment Approach," *Journal of Agricultural and Resource Economics*, 26: 344-367.

Appels, D. C., 2001, "Forest Rotation Lengths under Carbon Sequestration Payments," Paper presented at the Conference of Economists, University of Western Australia, Perth.

- Bangsund, D. A. and F. L. Leistritz, 2008, "Review of Literature on Economics and Policy of Carbon Sequestration in Agricultural Soils," *Management of Environmental Quality: An International Journal*, 19: 85-99.
- Cacho, O. J., R. L. Hean, and R. M. Wise, 2003, "Carbon-accounting Methods and Reforestation Incentives," *Australian Journal of Agricultural and Resource Economics*, 47: 153-179.
- Chang, S. J., 1982, "An Economic Analysis of Forest Taxation's Impact on Optimal Rotation Age," *Land Economics*, 58: 310-323.
- Chang, S. J., 1983, "Rotation Age, Management Intensity, and the Economic Factors of Timber Production: Do Changes in Stumpage Price, Interest Rate, Regeneration Cost, and Forest Taxation Matter?" *Forest Science*, 29: 267-278.
- Chladna, Z., 2007, "Determination of Optimal Rotation Period under Stochastic Wood and Carbon Prices," *Forest Policy and Economics*, 9: 1031-1045.
- Cubbage, F. W., 2003, "The Value of Foresters," *Forest Landowner*, 62: 16-19.
- Dixit, A. K. and R. S. Pindyck, 1994, *Investment under Uncertainty*, New Jersey: Princeton University Press.
- Englin, J. E. and M. S. Klan, 1990, "Optimal Taxation: Timber and Externalities," *Journal of Environmental Economics and Management*, 18: 263-275.
- Ferraro, P. J. and R. D. Simpson, 2002, "The Cost-effectiveness of Conservation Performance Payments," *Land Economics*, 78: 339-353.
- Guthrie G. A. and D. K. Kumareswaran, 2007, "Carbon Subsidies, Taxes and Optimal Forest Management," *Working Paper*, Social Science Research Network.
- Insley, M., 2002, "A Real Options Approach to the Valuation of a Forestry Investment," *Journal of Environmental Economics and Management*, 44: 471-492.
- Kischbaum, M. U. F., 2000, "What Contribution Can Tree Plantations Make towards Meeting Australia's Commitments under the Kyoto Protocol?" *Environmental Science Policy*, 3: 83-90.
- Klemperer, W. D., 1977, "Forest Income Valuation Revisited," *Real Estate Aaiser*, 43: 18-24.
- Koskela, E. and M. Ollikainen, 2001, "Forest Taxation and Rotation Age under Private

- Amenity Valuation: New Results,” *Journal of Environmental Economics and Management*, 42: 374-384.
- Lewandrowski, J., M. Peters, C. Jones, R. House, M. Sperow, M. Eve, and K. H. Paustian, 2004, “Economics of Sequestering Carbon in the U.S. Agricultural Sector: ERS Technical Bulletin,” No. TB1909, Economic Research Service, United States Department of Agriculture, Washington, DC.
- McCarl, B. A. and U. A. Schneider, 2001, “The Cost of Greenhouse Gas Mitigation in U.S. Agriculture and Forestry,” *Science*, 294: 2481-2482.
- Morck, R., E. Schwartz, and D. Stangeland, 1989, “The Valuation of Forestry Resources under Stochastic Prices and Inventories,” *The Journal of Financial and Quantitative Analysis*, 24: 473-487.
- Murray, B. C., 2000, “Carbon Values, Reforestation, and Perverse Incentives under the Kyoto Protocol: An Empirical Analysis,” *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 5: 271-295.
- Murray, B. C., 2003, “Economics of Forest Carbon Sequestration,” in Sills, E. O. and K. L. Abt, ed., *Forests in a Market Economy*, 221-238, Netherlands: Kluwer Academic Publishers.
- Parks, P. J. and I. W. Hardie, 1995, “Least-cost Forest Carbon Reserves: Cost-effective Subsidies to Convert Marginal Agricultural Land to Forests,” *Land Economics*, 71: 122-136.
- Plantinga, A. J., T. Mauldin, and D. J. Miller, 1999, “An Econometric Analysis of the Costs of Sequestering Carbon in Forests,” *American Journal of Agricultural Economics*, 81: 812-824.
- Romero, C., V. Ros, and L. Daz-Balteiro, 1998, “Optimal Forest Rotation Age When Carbon Capture Is Considered: Theory and Applications,” *Journal of Operational Research Society*, 49: 121-131.
- Sohngen, B. and R. Mendelsohn, 2003, “An Optimal Control Model of Forest Carbon Sequestration,” *American Journal of Agricultural Economics*, 85: 448-457.
- Stavins, R. N., 1999, “The Costs of Carbon Sequestration: A Revealed-preference Approach,”

American Economic Review, 89: 994-1009.

Thomassin, P. J., 2003, "Canadian Agriculture and the Development of a Carbon Trading and Offset System," *American Journal of Agricultural Economics*, 85: 1171-1177.

Thomson, T. A., 1992, "Optimal Forest Rotation When Stumpage Prices Follow a Diffusion Process," *Land Economics*, 68: 329-342.

Uhlenbeck, G. E. and L. S. Ornstein, 1930, "On the Theory of Brownian Motion," *Physical Review*, 36: 823-841.

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 Agriculture Economics*, 77: 365-374.

A Study on the Effect of Price Uncertainty and Carbon Payment Schemes on Landowners' Land Use Decisions- A Case of *Cunnignhania lancelata*

Kuo-Ching Lin* and Wan-Yu Liu**

Abstract

This study analyzes the impacts of carbon payment mechanisms on landowners' land use decisions under timber price uncertainty. The carbon payment policies (or carbon subsidies mechanisms) considered in this study consist of four regimes, such as the lump-sum regime, flows regime, stocks regime, and ex-post lump-sum regime. The possible options for foresters' land use decisions are as follows: maintaining forests, harvesting forests and then switching to farming, or harvesting and then reforesting again. Under different carbon payment regimes, at each period of time the land owners will make land use decision in order to maximize the present value of land. The important decision made by foresters is the timing of harvesting timber and after that whether to reforest it again. Main conclusions of this study are as follows: (1) When there exists timber price uncertainty, the farm income and the discount rate contribute the most in influencing landowners' land use decisions. As the farm income or discount rate decreases, the timber price interval for the “maintaining forests” decision will

* Professor, Department of Agricultural Economics, National Taiwan University.

** Assistant Professor, Department of Applied Tourism Information, Aletheia University, Taiwan. Corresponding Author. Email: nellyliu@gmail.com.

become wider, i.e., the price upper bound for the “switching to farming” decision will fall and the price lower bound for the “harvesting and then reforestation” decision will increase. (2) No matter which carbon payment mechanism is implemented by the government, the timber price interval for the “maintaining forests” decision will become wider. (3) Among the four carbon payment regimes, except for the second one, the other three carbon payment regimes implemented by the government will decrease the forest rotation length. That is, when landowners participate in forest carbon payment mechanisms or carbon subsidy policies, they may not always lengthen their forest rotation period. (4) If the government does not implement any carbon payment mechanisms, the timing for harvesting timber will be around the 32nd year. The land use decision options after the 32nd year will be determined by the level of timber price. If the timber price is higher than \$5,100/m³, then landowners will choose to reforest; otherwise, landowners will choose to switch to farming. (5) When landowners participate in the carbon payment policies, the amount of profits generated by the harvested timber will decrease. The amount of reduction will increase with the increases of carbon price level. In addition, the ratio of the carbon profits to the total profits will increase along with the increases of the carbon price level. Among four mechanisms, the ratio for the second mechanism is the lowest. (6) Under the same governmental budget constraints, the timber price interval for the “maintaining forests” decision for the second mechanism is the widest. According to our analysis, when evaluated by policy effectiveness, among four mechanisms the second one is considered the best.

Keywords: Price Uncertainty, Carbon Payment, Optimal Forest Rotation, Land Use Decision

JEL Classification: Q15, Q23, Q28