

研究報告

台灣杉人工林碳吸存潛力及其成本效益分析

李國忠¹⁾ 林俊成^{2,3)} 陳麗琴²⁾

摘要

本研究以林業試驗所六龜試驗林台灣杉人工造林地 10 處，經由總蓄積量及生長潛力估測，藉碳吸存轉換模式： $C_{\text{plant}} = (N \times V_{\text{stem}}) \times V_{\text{whole/stem}} \times W_o/V_g \times C_{\text{con}}$ ，推估台灣杉人工林碳吸存量，並依其造林投資之成本效益，計算碳吸存量之適應成本。初步估算結果，目前不同造林地每公頃碳總吸存量在 32.58-133.05 Mg 間，平均每公頃為 76.8 Mg，由造林吸存碳的適應成本每公噸在 447.57-2509.09 元，碳吸存量及成本與林齡及造林地林地品質有關。由於造林地之林木尚未達成熟的狀態，仍持續生長中，因此如能提高林地生產力，將可提高碳的吸存。

關鍵詞：台灣杉、蓄積量、碳吸存。

李國忠、林俊成、陳麗琴。2000。台灣杉人工林碳吸存潛力及其成本效益分析。台灣林業科學 15(1): 115-23。

Research paper

The Potential of Carbon Sequestration and Its Cost-benefit Analysis for *Taiwania* PlantationsKouchung J. Lee,¹⁾ Jiunn-cheng Lin,^{2,3)} Lih-chin Chen²⁾

【 Summary 】

Current timber stocking and growth potential were estimated by regression equation for 10 *Taiwania* plantations between 16 and 23 years old in the Luikuei Experimental Forest. Their carbon sequestration potential was calculated with the model of $C_{\text{plant}} = (N \times V_{\text{stem}}) \times V_{\text{whole/stem}} \times W_o/V_g \times C_{\text{con}}$, and cost was analyzed. Results indicate that the carbon sequestration of these *Taiwania* plantations was within the range of 32.58 to 133.05 Mg/ha, with a mean of 76.8 Mg/ha. The cost of their sequestration was from 447.57 to 2509.09 NT\$/Mg depending on stand age and site conditions. Improvement of plantation productivity can enhance the potential of carbon sequestration in this forest.

Key words: *Taiwania cryptomerioides*, growing stock, carbon sequestration.

Lee KJ, Lin JC, Chen LC. 2000. The potential of carbon sequestration and its cost-benefit analysis for *Taiwania* plantations. Taiwan J For Sci 15(1):115-23.

¹⁾ 國立台灣大學森林研究所，台北市 106 羅斯福路四段 1 號 Graduate Institute of Forestry, National Taiwan University. 1 Sec. 4, Roosevelt Rd., Taipei 106, Taiwan.

²⁾ 行政院農業委員會林業試驗所林業經濟系，台北市 100 南海路 53 號 Division of Forest Economics, Taiwan Forestry Research Institute. 53 Nanhai Rd., Taipei 100, Taiwan.

³⁾ 通訊作者 Corresponding author

1999 年 8 月送審 1999 年 9 月通過 Received August 1999, Accepted September 1999.

緒言

人類大量使用石化燃料及森林土地利用改變(熱帶雨林大量開墾、伐木),造成大氣中二氧化碳濃度劇增,二氧化碳濃度已由工業革命前之280 ppm上升至現在的360 ppm,每年仍以0.5 ppm的速率快速增加。如不採取任何防治措施,則預估在2100年時,平均地面氣溫將比1990年增加1-3.5°C,海平面將上升15-95 cm,將使氣候系統發生變化(IPCC 1996)。欲減緩二氧化碳增加所產生的衝擊,可由二氧化碳減量(mitigation)及環境適應(adaptation)兩方面著手,而加強造林工作即屬於環境適應方式之一。由於森林為陸地生態系的主要生態系統,藉由植物本身的生理特性進行光合作用吸收大氣中二氧化碳,將二氧化碳轉化為有機碳成為生物量儲存於植物體中,所表現於外的形式則為植物的總蓄積,對減少大氣中二氧化碳濃度有所貢獻,因此在全球溫室效應及氣候變遷中,森林資源擔負二氧化碳貯存及吸收的重要角色。

森林資源對碳貯存與吸收的研究, Yang (1997) 採用 IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change) 方法計算台灣地區森林之二氧化碳吸收量,以1994年第三次森林資源調查資料,闊葉樹林、針闊葉混淆林、針葉樹林和竹林之生長所吸收碳量約為9.62百萬公噸,換算成二氧化碳量為35.3百萬公噸。Sedjo (1989) 曾試算造林對碳的固定量,在普通人工林每公頃年平均生長量為15 m³的林地,1 m³可吸收0.26 Mg的碳。Dewar and Cannell (1992) 使用碳流動法估算英國人工林在不同收穫期、生長率、疏伐與否與疏伐程度、樹種特徵等影響因素之碳流動情形,並使用敏感度分析評估各變數之相互關係。Dixon et al. (1993b) 估算熱帶及溫帶地區在不同經營方式之碳吸存量,當輪伐期為50年,折現率為5%時,在熱帶地區經天然更新之林地碳吸存量為195 Mg/ha,農地造林碳吸存量為60-125 Mg/ha,跡地造林碳吸存量為65 Mg/ha,在溫帶地區之荒地造林或新植造林碳吸存量為120 Mg/ha,跡地造林碳吸存量為56 Mg/ha。不

同經營方式每公頃之碳吸存成本,寒帶地區之天然更新活動和人工造林碳吸存成本分別為5(4-11)美元、8(3-27)美元,溫帶地區之碳吸存成本為6(3-29)美元,其成本尚依立地情況、樹種、經營強度而異。Winjum et al. (1993) 分析不同國家以造林來貯存碳之成本,阿根廷在跡地造林每公噸約31美元,荒地造林或新植造林每公噸約18美元,澳大利亞在跡地造林每公噸約5美元,巴西跡地造林每公噸約10美元,加拿大跡地造林每公噸約11美元,天然更新每公噸6美元,中國大陸跡地造林每公噸約10美元,德國跡地造林每公噸約29美元,印度跡地造林每公噸約15美元,馬來西亞跡地造林每公噸約5美元,墨西哥跡地造林每公噸約4美元,南非跡地造林每公噸約9美元,蘇聯跡地造林每公噸約6美元,天然更新每公噸5美元,美國跡地造林每公噸約5美元,荒地造林或新植造林每公噸約2美元。Pedro et al. (1994) 分析馬來西亞 Sabah 地區大規模種植龍腦香科林木對碳的吸存效果,初步估計輪伐期如為60年,每公頃可吸收195 Mg。Nilsson and Schopfhauser (1995) 分析大規模造林在經濟上、政策上及技術上之適宜性,如利用造林和農地造林以達吸收碳的功能,造林面積在345百萬公頃時,種植後60年,將可收最大碳年固定率。Niskanen et al. (1996) 分析芬蘭和菲律賓兩國之林地不同生長收穫、輪伐期長短、最終產品使用的碳流動情形,以內在報酬率和淨現值法來分析碳吸收的經濟價值與造林的效益。芬蘭和菲律賓利用造林來吸存碳的成本分別為每公噸10.5-20.0美元和4.0-13.6美元。Maclaren (1996) 分析紐西蘭人工林地碳的吸存量,當輪伐期為20-50年時,平均每公頃碳的吸存量約在72-187 Mg之間。

本研究目的在分析造林對碳吸存潛力及其成本效益,以林業試驗所六龜試驗林台灣杉人工造林地10處為對象,經由總蓄積量及生長潛力估測,藉適當轉換係數,推估台灣杉人工林碳吸存量,並依其造林投資之成本效益,計算碳吸存成本。

材料與方法

一、樣區概述

林業試驗所六龜分所試驗林位於台灣南部，荖濃溪以東，中央山脈西側之狹長地帶（東經 120°39'59" 至 120°45'2" 及北緯 22°50'2" 至 23°00'3" 之間），行政區劃屬高雄縣茂林鄉與六龜鄉，整個地形為南北走向。水系由荖濃溪各支流所組成，最大水系為濁口溪，濁口溪流貫其中，致分成二個不同走向之地形。地質岩層除南端海拔 2000 m 以上嶺線為中生代之下部粘板岩外，絕大部份屬中生代上部粘板岩層。在扇平附近之土壤多為濕潤性底淺乾性之紅黃棕色森林土，以扇平為中心之三合河流域屬紅黃色灰化土，土壤呈酸性，濁口溪水系則為灰棕色灰化土，土壤大部分發育為砂質土壤呈中酸性反應。境內地形複雜，加上海拔高相差 2000 m 以上者，區內局部氣候差異甚大。北半部嶺線東側及南面，因日照量較多，故較乾燥，西側及面北之區域則較濕潤。南半部三面環山，中央為谷地，故較其他地區更為潮濕。由氣象資料可知海拔高的地區雨量、濕度均較低海拔地區為高，溫度則較低。六龜試驗林轄區面積為 9616.19 ha，立木地佔全試驗林面積之 97.87%，計 9411.46 ha，其中天然林面積共有 8083.24 ha，人工林面積有 1328.22 ha。天然林以闊葉樹林型為主，面積為 7421.39 ha，分布於試驗林之北部和中部。針葉樹林型面有 98.12 ha，針闊葉混淆林型面積有 563.72 ha，兩者分布於試驗林南端。人工林以針葉樹林型所佔面積最多，為 940.69 ha，集中於試驗林北部及西南部，包括檜木、台灣

杉、香杉和其他針葉樹種。針闊葉混淆林型面積為 153.83 ha，闊葉樹林型面積為 233.69 ha，以台灣檫、台灣赤楊、光臘樹為主要樹種 (TFRI 1989)。

台灣杉 (*Taiwania cryptomerioides*) 是本省具經濟價值之重要造林樹種，樹形通直豐滿，木材用途廣泛，與紅檜、台灣肖楠、台灣扁柏、香杉合稱為台灣省產針葉樹五木。農委會林業試驗所六龜分所自 1972 年起開始大量台灣杉造林，其造林地點在海拔高 820-1800 m 左右。

本研究為分析造林木對吸存碳量潛力及其成本效益，選定不同造林年度 (1975-1986) 未經後續撫育工作 (疏伐、修枝) 之台灣杉人工林造林地共 10 處進行分析，林齡為 13 至 23 年生 (至 1998 年)，樣區總面積為 175.9 ha，樣區之造林地號、造林面積、造林年度、造林經費總支出金額、每公頃平均支出金額如 Table 1 所示。

二、研究方法

(一)台灣杉人工林總蓄積量推估

六龜試驗林台灣杉人工林總蓄積量的推估已有多人進行研究及分析，並建立台灣杉人工林總蓄積量推估模式，本研究即引用其單株林木立木材積與林齡迴歸方程式進行推估，其參考模式為：

1. Liu et al. (1984) 六龜地區台灣杉造林木生長與材質之研究。

$$六 龜 : V = 0.0682 + 0.0008A^2$$

Table 1. Plantation area, age, and expenditure¹⁾

Site	Plantation area (ha)	Plantation age (yr)	Expenditure (\$NT)	Average expenditure (\$NT/ha)
14-64-1	41.3	1975	1,558,004	37,724
12-68-3	23.7	1979	2,121,202	89,502
10-69-11	9.0	1980	782,907	86,990
12-70-2	18.5	1980	1,319,754	71,338
10-71-1	7.2	1982	479,252	66,563
12-72-1	15.0	1983	1,403,459	93,564
18-74-8	8.5	1985	931,536	109,592
18-74-9	8.6	1985	932,172	108,392
20-74-5	22.7	1985	3,038,748	133,866
20-74-6	21.4	1985	2,864,686	133,864
Total	175.9		15,431,720	87,730

¹⁾ Source: Liukuei Experimental Forest.

$$R^2 = 0.633 \quad (1)$$

$$\text{鳳崗山：} V = -0.1378 + 0.0181A + 0.0009A^2$$

$$R^2 = 0.961 \quad (2)$$

$$\text{扇平：} V = -0.0273 + 0.0096A + 0.0003A^2$$

$$R^2 = 0.953 \quad (3)$$

2. Lin and Horng (1991) 六龜地區台灣杉人工林之生長研究。

$$\ln V = -6.6915 + 1.7532 \ln A$$

$$r = 0.851 \quad (4)$$

3. Chen et al. (1997) 六龜試驗林台灣杉人工林蓄積量及生長估測之研究。

$$\ln V = -0.02464 - 26.9716(1/A)$$

$$R^2 = 0.43 \quad (5)$$

式中：V 為單株材積，A 為林齡。

每公頃之材積估測則依 Chen et al. (1996) 之不同造林地台灣杉生長存活株數預測模式 (如式 6)，估測造林地不同林齡之每公頃存活株數，再與單株林木立木材積與林齡迴歸方程式所推估之單株材積相乘積，推估出不同造林地每公頃總蓄積量。

$$N = 1314.8028e^{[-1204894/PD^2 + (4.835693/A)]}$$

$$R^2 = 0.94 \quad (6)$$

式中：N：每公頃存活株數，PD：每公頃栽植密度，A：林齡。

另 Liu and Chung (1993) 之「台灣杉非線性收穫模式建立之研究」中，建立林齡與每公頃材積之迴歸方程式為：

$$V_t = 578.6851(1 - A^{-1.5402})^{54.3344}$$

$$R^2 = 0.72 \quad (7)$$

式中：V_t 為每公頃材積，A 為林齡。

依 1 至 7 式，可分別算出每一造林地號每公頃的總蓄積量。

(二) 碳吸存量估測

台灣杉人工林總蓄積量推估，所得總蓄積量主要為幹材部分，但因林木吸存碳量的部分，除幹材外，尚包括林木之枝、根、葉等部

分。一般全株 (含幹、枝、根、葉) 材積約為幹材材積之 1.3-2.0 倍 (Brown et al. 1986, Sedjo 1989, Winjum et al. 1998)，本研究以幹材材積與全株材積之平均值 1.65 倍估算。材積與重量轉換則依 Liu et al. (1984) 分析台灣杉幼齡木之比重為 0.32-0.41，成熟材為 0.37，因此取其平均值 0.368 來推估。重量與碳含量轉換係數，則以 50% 計算 (Brown et al. 1986, Dewar and Cannell 1992, Niskanen et al. 1996)。每公頃碳吸存量估測模式如下：

$$C_{\text{plant}} = (N \times V_{\text{stem}}) \times V_{\text{whole/stem}} \times W_0/V_g \times C_{\text{con}} \quad (8)$$

式中：C_{plant}：林木每公頃碳吸存量，N：每公頃存活株數，V_{stem}：單株材積，V_{whole/stem}：幹材材積與全株材積轉換係數 (1.65)，W₀/V_g：生材比重 (0.368)，C_{con}：重量與碳含量轉換係數 (50%)。

(三) 成本效益分析

本研究以造林所需成本費用與所吸存碳量分析其成本效益。造林成本費用，依六龜分所造林台帳各年度造林經費支出金額，換算為 1998 年之現值，換算方式為各年度造林支出金額依不同折現率求算造林成本，將各項成本折算為 1998 年現值，由於林業投資期間長，且生產過程連續不斷，故以複利計算。

結果與討論

一、台灣杉人工林總蓄積量

依 1 至 7 式分別算出每一造林地號每公頃的總蓄積量，各造林地每公頃材積平均值及中位數如 Table 2，不同模式的估算結果有所差異，因此平均值可能易受極端值之影響，為分析上的方便，使用中位數所得數值來分析，平均值僅列為參考。以齡級 23 年生 (造林地號 14-64-1) 造林地總蓄積量最高，為 438.24 m³/ha，以齡級 16 年生 (造林地號 10-71-1) 造林地總蓄積量最低，為 107.32 m³/ha，不同造林地號由於齡級不同，在林分總蓄積有很大的不同，在同一齡級間也有差異，如同一齡級之造林地號

Table 2. Current timber stocking of different ages in the Liukuei Experimental Forest

Site	Age (yr)	Mean (m ³ /ha)	Median (m ³ /ha)	Site	Age (yr)	Mean (m ³ /ha)	Median (m ³ /ha)
14-64-1	23	553.63	438.24	12-72-1	15	195.76	186.54
12-68-3	19	272.91	254.39	18-74-8	13	141.53	136.37
10-69-11	18	236.04	216.05	18-74-9	13	159.74	159.38
12-70-2	17	310.13	281.80	20-74-5	13	179.43	178.32
10-71-1	16	135.01	107.32	20-74-6	13	146.73	142.94

18-74-8，18-74-9，20-74-5，20-74-6 等四號造林地，總蓄積量在 136.37-178.32 m³/ha。此可能與生長環境(如海拔高、方位、坡度)，經營管理(如受害情形、可到達狀況、撫育方式)等因素有關。一般而言，生長狀況不好之造林地，其單位存活株數較低及單株總蓄積較低(Chen et al. 1997)，且因目前台灣杉人工林尚屬中、幼齡林狀態，其生長將隨林齡持續增加。

二、碳吸存量估測

碳吸存量可由台灣杉人工林總蓄積量推估，由式 8 估算，得各造林地每公頃之碳吸存量(見 Table 3)在 32.58-133.05 Mg/ha。依各造林面積與每公頃碳吸存量，算出總面積為 175.9 ha 之造林地，至 1998 年為止，碳總吸存量為 13508.27 Mg，每公頃約為 76.8 Mg。

各造林地林齡與碳吸存量的關係，如 Fig. 1 所示。在中、幼齡林狀態，碳吸存量大致隨林齡增加而遞增，不同造林地增加情形也不同，以造林地號 14-64-1 號的碳吸存量最高，造林地號 10-71-1 號的碳吸存量最低。由總碳

Table 3. Carbon sequestration in the Liukuei Experimental Forest

Site	Mean (m ³ /ha)	Median (m ³ /ha)	Site	Mean (m ³ /ha)	Median (m ³ /ha)
14-64-1	168.08	133.05	12-72-1	59.43	56.63
12-68-3	82.86	77.23	18-74-8	42.97	41.40
10-69-11	71.66	65.59	18-74-9	48.50	48.39
12-70-2	94.16	85.56	20-74-5	54.47	54.14
10-71-1	40.99	32.58	20-74-6	44.55	43.40

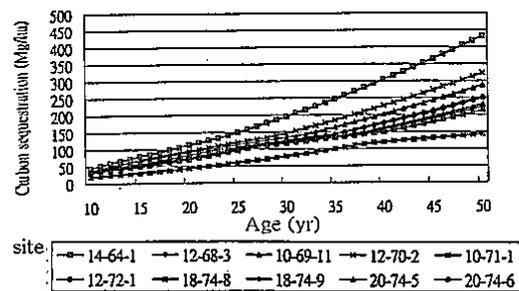


Fig. 1. Carbon sequestration at different ages in different sites.

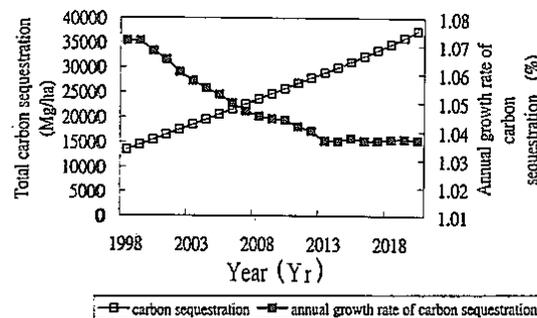


Fig. 2. Annual growth rate of total carbon sequestration.

吸存量來看，在中、幼齡林狀態，則大致隨林齡增加而呈上升趨勢，但年增率(年碳吸存增加量與總量之比)則呈微幅下降，範圍在 0.07-0.03% 間(見 Fig. 2)。

三、造林地現況之碳吸存成本

造林成本費用，依造林地造林台帳中之各年度造林經費支出金額，換算為 1998 年之現值，做為碳吸存所需成本，結果如 Table 4，折現率的使用影響其成本效益的結果，不同折

Table 4. Plantation costs with different discount rates

Unit:\$NT/ha

Discount rate(%)	Site										Mean
	14-64-1	12-68-3	10-69-11	12-70-2	10-71-1	12-72-1	18-74-8	18-74-9	20-74-5	20-74-6	
0	37,724	89,502	86,990	71,338	66,563	93,564	109,593	108,392	133,866	133,864	87,730
3	71,309	139,638	139,715	115,254	100,810	138,678	146,005	144,571	180,406	180,404	130,133
6	132,772	218,321	221,843	183,996	151,254	203,671	194,260	192,548	242,748	242,746	194,511
9	243,636	341,125	348,425	290,413	224,908	296,513	257,989	255,950	325,958	325,956	292,729
12	440,837	531,546	541,574	453,430	331,544	428,065	341,840	339,411	436,590	436,587	443,167

Table 5. Carbon sequestration costs in current plantations

Unit:\$NT/Mg

Site	Mean	Median	Site	Mean	Median
14-64-1	424.26	535.96	12-72-1	2333.46	2448.84
12-68-3	1685.23	1808.08	18-74-8	3397.83	3526.68
10-69-11	1949.70	2103.13	18-74-9	2980.84	2987.61
12-70-2	1224.02	1347.05	20-74-5	3312.02	3332.21
10-71-1	2459.37	3094.22	20-74-6	4049.47	4156.77

Table 6. Carbon sequestration and costs at 30 years

Site	Carbon sequestration (Mg/ha)	Cost (\$NT/Mg)	Site	Carbon sequestration (Mg/ha)	Cost (\$NT/Mg)
14-64-1	195.95	447.57	12-72-1	124.946	1678.91
12-68-3	125.96	1534.55	18-74-8	116.4	2073.23
10-69-11	120.62	1651.47	18-74-9	124.94	1912.54
12-70-2	146.63	1120.67	20-74-5	134.1	2223.59
10-71-1	78.39	1945.19	20-74-6	118.84	2509.09

現率間有很大的差異，當折現率為0%時平均造林成本費用為87730元，當折現率為3%時平均造林成本費用為130133元，當折現率為12%時平均造林成本費用高達為443167元。

van Kooten et al. (1993) 認為在森林投資的社會折現率應等於政府證券的實質利潤率，如加拿大折現率為2.5-5%。為進行碳吸存適應成本的比較，折現率的選擇則依Yang (1985) 研究結果，依公共部門歷年資本報酬率計算台灣國公有林育林投資適當折現率為3%及造林貸款計畫中貸款利率為3%，故引用3%為比較其成本效益。根據每公頃造林成本與碳吸存量可估算貯存每公噸碳所需成本，結果如Table 5，以造林地號14-64-1(齡級23年生)最低，中位數為535.96元，造林地號20-74-6(齡級13年生)最高，中位數為4,156.77元，總造林地之碳吸存成本之中位數平均值為2,207.82元。和國外相關研究比較，van

Kooten et al. (1992) 使用前人研究資料估算貯存每公噸二氧化碳的邊際成本為5-45美元，這尚包括使用農業土地的機會成本。Winjum et al. (1993) 分析不同國家以造林計畫來貯存碳時有不同的成本，其吸存每公噸碳的成本在2-31美元。Dixon et al. (1993a) 分析六個國家共八個造林計畫，每公噸碳吸存成本在1-30美元。Dixon et al. (1993b) 當輪伐期為50年，折現率為5%時，分析33國家的每公噸碳的成本在0.5-77.9美元。Dudek and LeBlanc (1990) 分析在Conservation Reserve Program (CRP) 造林計畫中，吸存每公噸的成本在26-43美元。本研究結果，每公噸碳吸存成本中位數在535.96-4156.77元間，總造林地之每公噸碳吸存成本之平均值為2207.82元，換算為美元約為16-124.06美元，平均值為65.9美元(1998年台幣與美元匯率為1:33.505)，和國外研究比較則偏高，此與林地狀況、林齡大小及

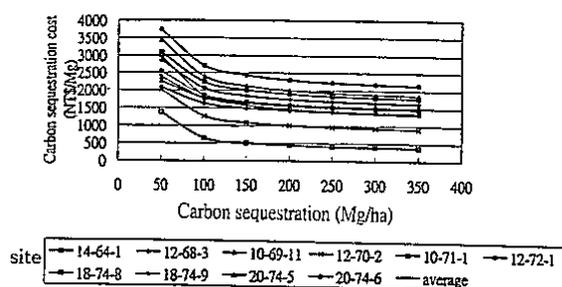


Fig. 3. Carbon sequestration cost in different sites.

工資高低有關，由於造林地之林木尚未達成熟的狀態，仍持續生長中，因此碳吸存成本較高，如能提高林地生產力，將可提高碳吸存量及降低碳吸存成本。

四、成本效益分析

各造林地當齡級相同時，其碳吸存成本效益為何？依不同造林地號，假設在林齡同為30年時，計算其碳吸存量結果如 Table 6，此與總蓄積有關。就估算結果來看，以中位數來看則差異較大，最高為 195.95 Mg/ha(造林地號 14-64-1)，最低為 78.3 Mg-byte/ha(造林地號 10-71-1)，可見林分的生長情形差異頗大，因此如能對生產力低之林地進行後續撫育應可增加碳吸存量。碳吸存成本每公頃在 447.57-2509.09 元，其金額高低與林地生產力有關。

每公頃碳吸存量與每公頃碳吸存成本，隨著碳吸存量的增加，每公頃碳吸存成本也隨之降低，但不同造林地則有較大的差異(見 Fig. 3)，如當每公頃碳吸存量為 150 Mg 時，每公頃碳吸存成本則在 503.12-2430.45 元範圍內，如以整體樣區來看，其每公頃碳吸存成本約為 1578.02 元，每公頃碳吸存量與每公頃碳吸存成本的關係如式 9。當在某一吸存量時，則每公頃碳吸存成本將大致呈一平穩的趨勢。

$$\ln C_{total} = 47.3168(1/Cost) + 7.04848$$

$$R^2 = 0.97 \quad (9)$$

C_{total} : 每公頃碳吸存量, Cost: 每公頃碳吸存成本

結論與建議

一、以林業試驗所六龜試驗林台灣杉人工造林地 10 處為對象，各造林地每公頃碳吸存量在 32.58-133.05 Mg 間，總碳吸存量為 13508.27 Mg，平均每公頃為 76.8 Mg，在中、幼齡林狀態，每公頃碳吸存量的多寡大致與林齡呈正比，但不同造林地間的碳吸存量也有所差異。

二、使用折現率為 3% 時，比較其成本效益，根據每公頃造林成本與碳吸存量可估算貯存每公噸碳所需成本，以造林地號 14-64-1(齡級 23 年生)最低為 535.96 元，造林地號 20-74-6(齡級 13 年生)最高為 4156.77 元，所有造林地之平均值為 2207.82 元。由於造林地之林木尚未達成熟的狀態，仍持續生長中，因此適應成本較高。

三、假設造林地在林齡同為 30 年時，計算其碳吸存量及單位成本，最高為 195.95 Mg/ha，最低為 78.3 Mg/ha，可見林分的生長情形差異頗大，因此如能對生產力低之林地進行後續撫育應可增加碳吸存量。

四、二氧化碳的減量上，從林業的角度來看，可延長林木輪伐期、林下栽植、大規模造林、增加中小徑木的使用、減少伐採量、改進森林經營制度等應為可行。因此以全民造林運動來增加造林面積應是值得鼓勵的。另現存林地應加強後期撫育工作，以增加碳的吸存量。在輪伐期的決定時，除考慮經濟上的林木利潤外，應同時考慮林木對公益性價值的貢獻(如碳吸存量)。

五、在受益者付費原則下，應對造林行為給予補助。如考慮徵收碳稅時，如能將造林所吸存的量併入計算，將有助於造林行為。Binkley and van Kooten (1994) 建議碳稅可反應在森林經營活動上，經由增加林分的生物量，將可相增加碳的貯存量。

六、聯合國氣候變化綱要公約第三次締約國大

會 (The Third Meeting of the Conference of the Parties; COP3) 通過「京都議定書」，對造林吸存碳的貢獻有所肯定，規定 1990 年以後所進行之造林、再造林及森林採伐之二氧化碳吸收或排放之淨值，可併入排放減量值計算。同時確認碳排放權交易制度，建立「清潔發展機制」(Clean Development Mechanism; CDM)，此機制之設立，為另一種形式的共同減量，如美國的起始跨國減量計畫 (United States Initiative on Joint Implementation; USIJI)，提供經費與技術，協助開發中國家進行造林，以達碳吸存的效果，其二氧化碳的貯存價格在每公噸為 10-16 美元，相當貯存每公噸碳為 36.6-58.6 美元 (Ramirez and Gomez 1998)。由於碳排放權可交易及藉造林來吸存碳皆可列入本國的削減量，因此造林行為應值得重視。

引用文獻

- Binkley CS, van Kooten GC. 1994.** Integrating climatic change and forests: economic and cologic assessments. *Clim Change* 28:91-110.
- Brown S, Lugo AE, Chapman J. 1986.** Biomass of tropical tree plantations and its implications for the global carbon budget. *Can J For Res* 16:390-4.
- Chen LC, Huang GM, Lin JS, Chiou CR. 1997.** Growing stock and growth estimation of *Taiwania* plantations in the Liukuei area. *Taiwan J For Sci* 12(3):319-27. [in Chinese with English summary].
- Chen LC, Huang GM, Chang TY, Horng FW. 1996.** The effect of planting density on the growth of Taiwan-fir plantations at Lukuei area. *Taiwan J For Sci* 11(1):1-11. [in Chinese with English summary].
- Dewar RC, Cannell MGR. 1992.** Carbon sequestration in the tree, products and soils of forest plantations: an analysis using UK examples. *Tree Physiol* 11:49-71.
- Dixon RK, Andrasko KJ, Sussman FG, Lavinson MA, Trexler MC, Vinson TS. 1993a.** Forest sector carbon offset projects: near-term opportunities to mitigate greenhouse gas emissions. *Water Air Soil Pollut* 70:561-77.
- Dixon RK, Winjum JK, Schroeder PE. 1993b.** Conservation and sequestration of carbon. *Global Environ Change* 3(2):159-73.
- Dudek DJ, LeBlanc A. 1990.** Offsetting new CO₂ emission: a rational first greenhouse policy step. *Contemp Policy Issues* 8:29-42.
- IPCC. 1996.** Climate change 1995: the science of climate change. Cambridge, UK : Cambridge Univ. Press, 572 p.
- Lin CS, Horng FW. 1991.** The growth of *Taiwania cryptomerioides* at Lukuei area. *Bull Taiwan For Inst New Series* 6(3):229-48. [in Chinese with English summary].
- Liu SC, Lin KC, Tang JL. 1984.** Growth and wood properties of planted *Taiwania cryptomerioides* at Lukuei. *Taiwan For Res Inst Bull* No. 408, 32 p. [in Chinese with English summary].
- Liu CM, Chung HH. 1993.** Nonlinear yield models for *Taiwania* plantations. *Q J Chin For* 26(2):39-49. [in Chinese with English summary].
- Maclaren, JP. 1996.** Plantation forestry-its role as a carbon sink: conclusions from calculations based on New Zealand's planted forest estate. In: Apps MJ, Price DT, editors. *Forest Ecosystems, forest management and the global carbon cycle*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag. p 257-70.
- Nilsson S, Schopfhauser W. 1995.** The carbon-sequestration potential of a global afforestation program. *Clim Change* 30:267-93.
- Niskanen A, Saastamoinen O, Rantala T. 1996.** Economic impacts of carbon sequestration in reforestation: examples from boreal and moist tropical conditions. *Silva Fennica* 30(2-

3): 269-80.

Pedro MC, Yap SW, Albert G. 1994. Large scale enrichment planting with Dipterocarps as an alternative for carbon offset. In: IUFRO, editor: Sustainable forest managements. Proceedings of IUFRO International Workshop on Sustainable Forest Managements; 1994 Oct 17-21; Furano, Hokkaido, Japan. p 135-45.

Ramirez OA, Gomez M. 1998. Economic value of the carbon sink services of Costa Rica's forestry plantations. In: Sassa K, editor. Environmental forest science. London: Kluwer Academic Publishers. p 129-38.

Sedjo RA. 1989. Forest to offset the greenhouse effect. *J For* 87(7):12-5.

Taiwan Forestry Research Institute [TFRI]. 1989. Lukuei station management plan (1989.07-1999.06). 89 p. [in Chinese].

van Kooten GC, Thompson WA, Vertinsky I. 1993. Economics of reforestation in British Columbia when benefits of CO₂ reduction are taken into account. In: Adamowicz WL, White W, Phillips WE, editors. Forestry and the envi-

ronment: economic perspectives. Willingford (UK): C.A.B. International. p 227-47.

van Kooten GC, Arthur LM, Wilson WR. 1992. Potential to sequester carbon in Canadian forests: economic considerations. *Can Public Policy* 18(8):127-38.

Winjum JK, Dixon RK, Schroeder PE. 1993. Forest management and carbon storage: an analysis of 12 key forest nations. *Water Air Soil Pollut* 70:239-57.

Winjum JK, Brown S, Schlamadinger B. 1998. Forest harvests and wood products: sources and sinks of atmospheric carbon dioxide. *For Sci* 44(2):272-84.

Yang HK. 1985. Determination of appropriate discount rate for public silvicultural investment in Taiwan [MSc thesis]. Dept. of Forestry, National Taiwan Univ. 62 p. [in Chinese with English summary].

Yang SS. 1997. Estimation of carbon dioxide assimilation of forests in Taiwan. *J Biomass Energy Soc China* 16(1-2): 1-10. [in Chinese with English summary].