

## 研究報告

## 六龜台灣杉人工林碳和氮的累積和分布

林國銓<sup>1,4)</sup> 黃菊美<sup>2)</sup> 王巧萍<sup>3)</sup> 張乃航<sup>2)</sup>

## 摘要

估算林試所六龜試驗林的台灣杉人工林20和27年生兩林分的生物量，並推估其碳和氮的分布與累積。以兩林分28株樣木的胸高直徑所建立的自然對數迴歸式，樹體各部位及總生物量皆呈顯著相關。20年生林木生物量為204 ton ha<sup>-1</sup>，27年生則為254 ton ha<sup>-1</sup>，遠高於疏伐過的同齡林。全林分生物量大部分集中在林木。全林分碳和氮則主要分布在土壤，分別佔全林分的46~59和83~88%；土壤碳和氮皆集中在0~15 cm土層。由林木材積轉換成生物量的平均係數為0.42 (Mg m<sup>-3</sup>)，而材積轉換成地上部碳累積量的平均係數為0.22 (Mg m<sup>-3</sup>)。

關鍵詞：台灣杉、生物量、自然對數迴歸式、碳累積量、氮累積量。

林國銓、黃菊美、王巧萍、張乃航。2004。六龜台灣杉人工林碳和氮的累積和分布。台灣林業科學 19(3):225-35。

## Research paper

## Carbon and Nitrogen Accumulation and Distribution in Taiwania Plantations of the Liukuei Experimental Forest

Kuo-Chuan Lin,<sup>1,4)</sup> Chu-Mei Huang,<sup>2)</sup> Chiao-Ping Wang,<sup>3)</sup> Nan-Hang Chang<sup>2)</sup>

## 【 Summary 】

Two Taiwania (*Taiwania cryptomerioides* Hayata) plantations aged 20 and 27 yr in the Liukuei Experimental Forest were selected in order to estimate the biomass, carbon, and nitrogen accumulation and distribution. According to the allometric equation established by data from 28 harvested sample trees, the biomass of each component and the total biomass of trees were highly significantly related to the diameter at breast height (dbh). The estimated Taiwania biomass values were 204 and 254 ton ha<sup>-1</sup> for the 20- and 27-yr-old stands, respectively, which were higher than values of the thinned stand at the same ages. The major biomass of the stand was in Taiwania.

<sup>1)</sup> 行政院農業委員會林業試驗所主任秘書室，100台北市南海路53號 Chief Secretary Office, Taiwan Forestry Research Institute. 53 Nanhai Rd., Taipei 100 Taiwan.

<sup>2)</sup> 行政院農業委員會林業試驗所育林組，100台北市南海路53號 Division of Silviculture, Taiwan Forestry Research Institute. 53 Nanhai Rd., Taipei 100 Taiwan.

<sup>3)</sup> 行政院農業委員會林業試驗所福山研究中心，260宜蘭郵政132信箱 Fushan Research Center, Taiwan Forestry Research Institute. PO Box 132, Ilan 260 Taiwan.

<sup>4)</sup> 通訊作者 Corresponding author, e-mail: kuolin@serv.tfri.gov.tw

2004年3月送審 2004年6月通過 Received March 2004, Accepted June 2004.

Carbon and nitrogen of the stand accumulated primarily in the soil, comprising 46~59% and 83~88% of the total amount, respectively. In soil the majority of the carbon and nitrogen was stored in the first 0~15 cm of depth. The average conversion coefficient from timber volume to biomass was 0.42 ( $\text{Mg m}^{-3}$ ), while the average conversion coefficient from timber volume to aboveground carbon storage was 0.22 ( $\text{Mg m}^{-3}$ ).

**Key words:** *Taiwania*, biomass, allometric equation, carbon accumulation, nitrogen accumulation.

**Lin KC, Huang CM, Wang CP, NH Chang. 2004.** Carbon and nitrogen accumulation and distribution in *Taiwania* plantations of the Liukuei Experimental Forest. *Taiwan J For Sci* 19(3):225-35.

## 緒言

台灣未來森林的經營將以人工林為主，以森林生態系永續經營的理念應用在人工林的經營。加上溫室效應的發生，人工林對碳的貯存功能日益受到重視，因此人工林基本資料的建立，除了材積等生長資料外，更注重生物量與養分的分布與累積(Long and Turner 1975, Bargali and Singh 1997)。森林生態系除林木外，林下植物、枝葉層也能貯存養分，土壤更累積大量氮和碳(Malhi et al. 1999, Berger et al. 2002)。目前台灣人工林生長的研究仍以材積為主(Lin and Horng 1991, Chen et al. 1997)，只有少數生物量或養分累積量的研究(Horng et al. 1985, Chen and Lü 1988, Lin 1989)。林試所六龜試驗林建造約800 ha的台灣杉(*Taiwania cryptomerioides* Hayata)人工林(Chen et al. 1997)，但仍缺乏此人工生態系生物量和養分的資料，只有Lin et al. (2003)估算台灣杉人工林經疏伐6年後，20年生時林木生物量為155  $\text{ton ha}^{-1}$ ，27年生為169  $\text{ton ha}^{-1}$ 。但未經疏伐干擾的林分卻仍缺乏資料，故選取六龜試驗林未經疏伐的二個台灣杉林分，分析包含喬木、林下植物、枝葉層、土壤等各組成分的生物量、氮和碳的累積量，供日後森林經營各項施業的參考。

## 材料與方法

### 一、生育地

林業試驗所六龜分所位於高雄縣六龜鄉，其轄內鳳崗山林區，海拔1,500至2,000 m，屬於

暖溫帶氣候，年降雨量達2,280 mm，降雨集中在5至9月，10至4月為明顯的乾季，雨量稀少，尤其是11、12月，月平均總降雨量在22 mm以下(TFRI 1998)。該林區在緯度上已屬熱帶地區，但受海拔高度影響，夏季平均最高溫度發生在7月，仍不及25°C，冬季平均最低溫度發生在1月，還不到10°C，顯示仍有季節性變化，尤其乾旱的冬季可能對林木生長造成影響。選擇樣區之海拔高度在1,500~1,695 m之間。

### 二、方法

#### (一)台灣杉樣區及樣木

於上述台灣杉人工林內選擇20及27年生之林分，各設立3個臨時樣區。每樣區面積為0.09 ha (30×30 m)。經調查20年生樣區的台灣杉胸高直徑(簡稱胸徑)為 $19.6 \pm 2.8$  cm (均數±標準差，以下同)，樹高為 $13.2 \pm 1.0$  m，每公頃株數 $2,110 \pm 430$ 株。至於27年生樣區台灣杉胸徑為 $24.3 \pm 1.3$  cm，樹高為 $17.2 \pm 0.5$  m，每公頃株數 $1,520 \pm 240$ 。比較此兩林分27年生台灣杉胸徑較大、樹高較高、株數較低，但統計上僅樹高有顯著差異( $p < 0.05$ )。以這些樣區資料分析胸徑之分布，將胸徑依5 cm分為一級，10 cm起至40 cm上共分7級，每胸徑級內選取2~5株樣木，供伐木取樣之用。於2001年底進行伐木取樣工作，共計伐取樣木28株，其中20年生12株，27年生16株。

#### 1. 樣木生物量之測定

將選定之樣木伐倒後，測定樹高，並於幹部1.3 m、枝下高處及前二者中間各取一個圓盤，稱其鮮重。而後取回實驗室測定其烘乾重(70°C)。伐倒木由地表至1.3 m為一段，自1.3 m胸高處算起，以2 m為一段，每段分別記錄其主幹重、死枝重、葉及小枝(著葉枝)重、枝條(除著葉枝外之枝條)重，並分別取死枝、葉及小枝、枝條的小樣本於實驗室中，測定其烘乾重。各株樣木皆可由攜回實驗室樣本之烘乾重及其鮮重推算出各樣本之烘乾重與鮮重比，並由烘乾重與鮮重比分別乘以各項鮮重，可推算各單株林木之生物量。

## 2. 樣區生物量之估算

以單株林木各部位生物量，或總量生物量與胸徑配置迴歸方程式，選擇最常用的自然對數式 $Y = a + b \ln(\text{dbh})$  (Dudley and Fownes 1992)，以求單株生物量與胸徑之關係式，式中 $Y$ 為各部位或總量之生物量(kg)， $\text{dbh}$ 為胸徑(cm)， $a$ 和 $b$ 為常數。同時，以上述迴歸式求胸徑與樹高之關係式。另外，常數 $a$ 需經校正係數( $cf$ )校正， $cf = (S_{y..})^2/2$ ， $S_{y..}$ 為估算標準誤，即 $a = c + cf$ ， $c$ 為 $Y = c(\text{dbh})^b$ 式中之常數。此外，二樹齡的樣木分別以不同迴歸式估算，再以總線型模式法(GLM)檢定此二組迴歸式的斜率( $b$ )及截距( $a$ )是否相同，以便決定此二樹齡的立木能否用一組迴歸式表示。單株林木的迴歸方程式選出後，以各樣區之立木資料估算出樣區之生物量，再換算成單位面積之各部位生物量和總生物量。

## (二) 林下植物

於上述兩造林地內，每樹齡各設立 $5 \times 5$  m之樣區3個。調查林內之灌木(樹高高於1.3 m)，及地被植物(樹高低於1.3 m之組成)。就樹種而言，林下植物中地被植物20年生以台灣樓梯草(*Elatostema herbaceifolium* Hayata)為主，覆蓋度達85%以上；27年生則以台灣樓梯草或牛膝(*Achyranthes bidentata* Blume)為主，覆蓋度較低。灌木20年生以天仙果(*Ficus formosana* Maxim)、樹杞(*Ardisia sieboldii* Miq.)、柃木類(*Eurya* spp.)、長葉木薑子(*Litsea acuminata*

(Blume) Kurata)等樹種為主；27年生則以樹杞、雞屎樹類(*Lasianthus* spp.)為主。取樣時，伐倒樣區內所有林下植物。灌木部分依台灣杉樣木生物量測定方法，測定其生物量，但植體分為幹、枝條與葉三部分，且不分單株和高度，只測全區總重。地被植物則不區分植體，只測總重。各植體分別取小樣本，攜回實驗室，測定其烘乾重。

## (三) 枝葉層及土壤

在台灣杉人工林上述二樹齡的造林地內，以逢機取樣方法各設置5個臨時樣區，每樣區為 $0.5 \times 0.5$  m，蒐集枝葉層，取回實驗室分別測定其烘乾重(70°C)，再依面積比例，換算為每公頃烘乾重。同時，在林地內每樣區附近，於土壤不同深度0~15, 15~30, 30~45 cm處，分別取一土樣，每樣區分別取5組土樣帶回實驗室。在室內以固定體積法，測定其總體密度(Lal and Kimble 2001)。

## (四) 含碳及氮量估算

於攜回實驗室各台灣杉樣木中選取14株，使其胸徑均勻分布於各直徑級，其中20年生5株，27年生9株，供化學分析之用。台灣杉樣木各部位植體、灌木和地被植物樣本的植體以及枝葉層之樣本磨成細粉(< 0.5 mm)，以乾燒法用元素分析儀(ELEMENTOR vario EL型)測定其氮及碳濃度(Sollins et al. 1999)。土壤磨細(< 0.5 mm)後，以元素分析儀做全碳含量及全氮量之測定。由迴歸法估算出台灣杉單位面積各部位之生物量乘以各部位之平均氮和碳濃度，可估算出林木氮和碳總貯存量。由林木氮和碳總貯存量，加上林下植物、枝葉層和森林土壤之氮和碳含量，可算出台灣杉人工林貯存的總氮和碳量。

## 結果

### 一、迴歸式

伐取的28株樣木基本資料列如Table 1。選取樣木之平均胸徑及樹高皆較樣區平均值高，

**Table 1. Characteristics of 28 sampled trees from the Taiwania plantations**

Item	20 yr old	27 yr old
Dbh (cm)	21.4 ± 6.7 <sup>1)</sup> (12.9~31.5) <sup>2)</sup>	28.2 ± 11.0 (10.9~48.4)
Tree height (m)	15.4 ± 2.7 (10.7~19.2)	18.2 ± 3.9 (10.9~24.6)
Crown diameter (m)	3.0 ± 1.2 (1.5~5.2)	3.1 ± 1.4 (1.4~6.2)
Crown length (m)	7.7 ± 3.1 (1.5~13.3)	8.0 ± 3.7 (2.7~14.8)
No. of trees	12	16

<sup>1)</sup> Mean ± standard deviation.

<sup>2)</sup> Numbers in parentheses are the range.

主要是以胸徑級取樣的影響，尤其27年生樣區樣木包含胸徑較大的喬木，因其影響林分生物量較大。而兩林分樹冠幅和樹冠長兩者相近，顯示兩林分已完全鬱閉，密度限制了樹冠的生長。另27年生林分枝下高為10.2 m，高於20年生的7.7 m，顯示林木枝條枯死隨樹高增加而上移。以兩樹齡的樣木分別建立兩組自然對數迴歸式，除20年生的死枝外，不論葉及小枝、枝條、27年生死枝、樹幹、總生物量或樹高與胸徑皆呈極顯著相關( $p < 0.01$ )，訂正決定係數( $R^2$ ) 在20年生林分為0.77~0.97；27年生則為0.74~0.98。比較20年生和27年生兩組迴歸式的斜率和截距，結果發現兩組迴歸式的斜率和截距統計上並無顯著差異( $p > 0.05$ )，表示葉及小枝、死枝、樹幹、總生物量或樹高與胸徑的迴歸式具有相同的斜率和截距(枝條除外)。因此二樹齡林分可用同一組迴歸式表示，為便於計算將枝條也合併成一組迴歸式，所有項目皆與胸徑成顯著相關( $p < 0.01$ )。其結果列如Table 2。由表中可知各迴歸式斜率皆為正值，顯示胸徑

增加，各部位生物量、總生物量、樹高皆隨之上升。

## 二、林分生物量

以Table 2之迴歸式配合各樣區之立木資料，估算出20年生林分台灣杉生物量達204 ton ha<sup>-1</sup>，27年生時上升至254 ton ha<sup>-1</sup>，以樹幹生物量最大，佔總量的83~85% (Table 3)。林下植物的生物量極低，為台灣杉生物量的0.7~2.4%，主要集中在地被植物；枝葉層生物量較高，為3.2~4.4%。兩林分相較，灌木生物量和枝葉層兩者相似，地被植物以20年生者高出許多。

## 三、林分養分累積量

台灣杉植體的碳濃度以樹幹較高，其餘組成相似。氮濃度則相反，以小枝及葉最高、枝條與死枝次之、樹幹最低。林下植物則以地被植物碳濃度較低，而氮濃度較高(Table 4)。土壤內全碳及氮濃度皆隨深度而下降，但總體密度隨深度而稍增加(Table 5)。

**Table 2. Regression coefficients and statistics of allometric equations ( $\ln Y = a + b \ln(\text{dbh})$ ) for predicting the aboveground biomass and height of trees**

Y	a	b	Adjusted $R^2$	SEE <sup>1)</sup>
Leaves and twigs	-7.3854	3.0665	0.85	0.513
Branches	-7.9273	1.1791	0.92	0.374
Dead branches	-4.3547	1.7466	0.54	0.625
Boles	-2.6800	2.3517	0.98	0.142
Total biomass	-2.7396	2.4254	0.97	0.160
Tree height	1.1327	0.5323	0.87	0.080

<sup>1)</sup> Standard error of estimates.

**Table 3. Estimates of aboveground biomass (ton ha<sup>-1</sup>) among strata and litter layer for 2 Taiwania plantations**

Stratum	20 yr old	27 yr old
Taiwania		
Leaves and twigs	14.53 ± 3.24 <sup>1)</sup> (7.1) <sup>2)</sup>	20.61 ± 2.15 (8.1)
Branches	12.04 ± 2.85 (5.9)	17.49 ± 1.90 (6.9)
Dead branches	5.01 ± 0.42 (2.5)	5.35 ± 0.49 (2.1)
Boles	172.30 ± 24.12 (84.5)	210.11 ± 18.50 (82.9)
Total	203.88 ± 30.40 (100)	253.56 ± 22.66 (100)
Understory vegetation		
Shrubs	0.37 ± 0.43 (7.4)	0.37 ± 0.20 (20.7)
Ground cover	4.62 ± 3.28 (92.6)	1.42 ± 0.75 (79.3)
Total	4.99 ± 3.71 (100)	1.79 ± 0.63 (100)
Litter layer	9.00 ± 2.11	8.18 ± 3.77

<sup>1)</sup> Mean ± standard deviation.

<sup>2)</sup> Numbers in parentheses are the percentage of the total.

**Table 4. Carbon and nitrogen concentration (%) among components of the sample trees, understory vegetation, and litter layer**

Component	20 yr old		27 yr old	
	C	N	C	N
Taiwania				
Leaves and twigs	50.28 ± 1.08 <sup>1)</sup>	1.73 ± 0.16	49.88 ± 0.80	1.95 ± 0.24
Branches	50.80 ± 0.69	0.73 ± 0.14	50.83 ± 0.43	0.81 ± 0.18
Dead branches	49.94 ± 0.51	0.56 ± 0.07	50.88 ± 0.64	0.62 ± 0.10
Boles	51.90 ± 0.42	0.45 ± 0.06	52.33 ± 0.72	0.48 ± 0.06
Understory vegetation				
Shrub				
Leaves	50.54 ± 1.70	2.53 ± 0.16	48.31 ± 1.33	2.02 ± 0.15
Branches	47.40 ± 1.81	1.41 ± 0.49	47.29 ± 0.82	1.23 ± 0.22
Boles	47.73 ± 0.83	0.94 ± 0.32	46.99 ± 0.24	0.72 ± 0.18
Ground cover	46.83 ± 2.06	3.32 ± 0.31	47.23 ± 0.73	2.22 ± 0.79
Litter layer	47.65 ± 4.29	1.52 ± 0.05	45.96 ± 1.00	1.43 ± 0.14

<sup>1)</sup> Mean ± standard deviation.

至於台灣杉林分的碳貯存量，20年生林分，台灣杉林木約佔51%，土壤佔46%；27年生林分，則土壤佔59%，台灣杉林木佔40%，林下植物和枝葉層在此兩年齡所佔的比例都很低，僅佔0.3~2.0% (Table 6)。對台灣杉林木而言，生物量大部分集中在樹幹，碳有83~85%貯存在此。土壤中的碳有40%以上貯存在0~15 cm

土層中，尤其是27年生林分約57%的碳集中於此。氮在林分內的分布則與碳不同，大部分的氮都保存在土壤，佔全林分的83~88%，台灣杉林木的氮量只佔11~14%。土壤內氮仍以表層(0~15 cm)貯存量最大，佔土壤含氮量的40%以上 (Table 7)。台灣杉林木則因小枝及葉氮濃度高、樹幹氮濃度低，致樹幹氮貯存量僅佔林木

**Table 5. Bulk density ( $\text{g cm}^{-3}$ ), total carbon, and nitrogen concentration (%) at various soil depths**

Age (yr)	Depth (cm)	Bulk density	C	N
20	0~15	0.37	$7.42 \pm 5.61^{1)}$	$0.52 \pm 0.35$
	15~30	0.42	$4.27 \pm 2.49$	$0.33 \pm 0.16$
	30~45	0.49	$3.64 \pm 1.54$	$0.28 \pm 0.09$
27	0~15	0.59	$12.52 \pm 5.01$	$0.64 \pm 0.10$
	15~30	0.58	$5.38 \pm 0.21$	$0.42 \pm 0.02$
	30~45	0.61	$3.92 \pm 0.19$	$0.33 \pm 0.02$

<sup>1)</sup> Mean  $\pm$  standard deviation.

**Table 6. Estimates of carbon storage ( $\text{ton ha}^{-1}$ ) among components with respect to strata in 2 *Taiwania* plantations**

Component	20 yr old	27 yr old
<i>Taiwania</i>		
Leaves and twigs	$7.30 \pm 1.63^{1)}$ (6.9) <sup>2)</sup>	$10.28 \pm 1.07$ (7.8)
Branches	$6.12 \pm 1.45$ (5.8)	$8.89 \pm 0.97$ (6.7)
Dead branches	$2.50 \pm 0.21$ (2.4)	$2.72 \pm 0.25$ (2.1)
Boles	$84.94 \pm 12.52$ (84.9)	$109.96 \pm 9.68$ (83.4)
Subtotal	$105.35 \pm 15.69$ (100) ( <u>50.9</u> ) <sup>3)</sup>	$131.85 \pm 11.78$ (100) ( <u>40.0</u> )
Understory vegetation		
Shrubs	$0.18 \pm 0.21$ (7.7)	$0.18 \pm 0.09$ (21.2)
Ground cover	$2.17 \pm 1.54$ (92.3)	$0.67 \pm 0.35$ (78.8)
Subtotal	$2.35 \pm 1.75$ (100) ( <u>1.1</u> )	$0.85 \pm 0.29$ (100) ( <u>0.3</u> )
Litter layer	$4.25 \pm 0.81$ ( <u>2.0</u> )	$3.73 \pm 1.65$ ( <u>1.1</u> )
Soil		
0~15 cm	$41.20$ (43.4)	$110.83$ (57.3)
15~30 cm	$26.92$ (28.4)	$46.81$ (24.2)
30~45 cm	$26.75$ (28.2)	$35.84$ (18.5)
Subtotal	$94.88$ (100) ( <u>45.9</u> )	$193.48$ (100) ( <u>58.6</u> )
Total	$206.83$ ( <u>100</u> )	$329.91$ ( <u>100</u> )

<sup>1)</sup> Mean  $\pm$  standard deviation.

<sup>2)</sup> Numbers in parentheses are the percentages of the subtotal.

<sup>3)</sup> Underlined numbers in parentheses are the percentages of the total.

氮量的64~68%，小枝及葉則佔22~25%，此一分布與碳明顯不同。隨樹齡的增加，林木累積碳和氮量皆上升。但就林分而言，林木碳和氮

所佔比例卻不一定會上升。由於27年生林分土壤內累積大量碳和氮，林木碳和氮所佔比例反而較低。

**Table 7. Estimates of nitrogen storage ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) among components with respect to strata in 2 Taiwania plantations**

Component	20 yr old	27 yr old
Taiwania		
Leaves and twigs	252 ± 56 <sup>1)</sup> (22.0) <sup>2)</sup>	401 ± 56 (25.2)
Branches	88 ± 21 (7.7)	143 ± 15 (8.9)
Dead branches	28 ± 2 (2.4)	33 ± 3 (2.1)
Boles	776 ± 107 (67.9)	1015 ± 89 (63.8)
Subtotal	1144 ± 186 (100) (13.7) <sup>3)</sup>	1592 ± 146 (100) (11.3)
Understory vegetation		
Shrubs	5 ± 6 (3.8)	5 ± 3 (11.4)
Ground cover	128 ± 91 (96.2)	39 ± 21 (88.6)
Subtotal	133 ± 97 (100) (1.6)	44 ± 19 (100) (0.3)
Litter layer	136 ± 29 (1.6)	114 ± 47 (0.8)
Soil		
0~15 cm	2886 (41.4)	5664 (45.8)
15~30 cm	2058 (29.6)	3680 (29.8)
30~45 cm	2021 (29.0)	3016 (24.4)
Subtotal	6965 (100) (83.1)	12360 (100) (87.6)
Total	8378 (100)	14110 (100)

<sup>1)</sup> Mean ± standard deviation.

<sup>2)</sup> Numbers in parentheses are the percentages of the subtotal.

<sup>3)</sup> Underline numbers in parentheses are the percentages of the total.

## 討論

台灣杉林木生物量隨樹齡增加而上升，不但總生物量增加，各部位生物量也增加。當樹冠鬱閉時，可能會影響枝條及葉的生長，使樹冠生物量呈穩定狀態，如美國西北部花旗松 (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco.) 林分在 40~50 年生時達穩定狀態 (Long and Turner 1975, Turner and Long 1975)。美國西南部德達松 (*Pinus taeda* L.) 在 9~10 年生時針葉及枝條達最大量 (Switzer and Nelson 1972, Nemeth 1973)。六龜地區台灣杉林分於 14 年生已達鬱閉 (Hung 1974)，27 年生時葉及小枝和枝條生物量仍較 20 年生者增加，係因樹高增加之故。以迴歸式中的 b 值 (斜率) 分析 (Table 2)，各部位 b 值以葉

及小枝最大，樹幹次之，枝條最小，故隨胸徑上升，葉及小枝增加最速，枝條最小。因此隨胸徑增加，優勢木將形成更多的葉和小枝，使樹冠更鬱閉，造成死枝增加速度高於枝條者。前已述及樹幹是生物量增加的主因，但樹幹生物量所佔比例卻因樹幹生物量增加速率低於葉及小枝者，其所佔的比例會下降。美國花旗松林分也有類似情況，在幼年期隨胸徑的增加，可能因老葉的增加，使葉生物量增加，樹幹在總生物量中所佔的比例下降 (Webber 1977)。挪威雲杉 (*Picea abies* (L.) Karst) 林分也隨胸徑增加，樹冠生物量上升，死枝也明顯增加 (Jokela et al. 1986)。這些林分與台灣杉林分相似。台灣杉葉生物量在 27 年生仍保持上升趨勢，有利於樹體繼續累積生物量，而其葉枝比由 20 年生的

1.21略微下降至27年生的1.18 (Table 3)，顯示需要更大的枝條以支撐葉及小枝的生長。美國花旗松林分也有類似的情形(Bartelink 1996)。

以迴歸式法估計生物量是目前最常用的方法，以減少伐取太多樣木。對台灣杉而言，兩林分各植體迴歸式大都無差異，顯示生育地對迴歸式的建立沒有影響(Rayachhetry et al. 2001)。Bartelink (1996)發現花旗松胸徑與樹幹的迴歸式與林分無關，不同林分可用同一迴歸式表示，但胸徑與葉和枝條的迴歸式與林分有關。本研究的結果似乎顯示台灣杉迴歸式的建立與生育地無關，至少在六龜地區，可用同一組迴歸式推估台灣杉的生物量。Hung (1974)的研究發現台灣杉的材積生長年生長量於30~32年達最高峰，Liu et al. (1984)也獲得六龜地區台灣杉於39年生林木生長開始衰退的結果。本研究生物量的累積也顯示由20至27年生，呈上升趨勢。與六龜同年齡但已疏伐六年的林分相比，20年生林分株數為疏伐林分者的2.20倍，故其林木生物量亦高出許多，為疏伐林分的1.32倍；27年生林分亦相似，株數為1.55倍，生物量為1.50倍，皆因株數較多使未疏伐林分生物量高於疏伐者(Lin et al. 2003)。若以單株相比，則疏伐林分林木單株具較高生物量，尤其是20年生者疏伐林分的林木單株總生物量為未疏伐者的1.64倍。

林下植物的組成和密度受到樹冠特性如開放至鬱閉以及喬木間競爭的影響。如35年生溪頭柳杉(*Cryptomeria japonica* D. Don)密度由353 trees ha<sup>-1</sup>上升至1,613 trees ha<sup>-1</sup>，林下植物佔喬木的比例由2.35%下降至0.50% (Lin 1989)。一般而言，樹冠鬱閉後，林下植物的生物量所佔比例會明顯下降(Nemeth 1973, Turner and Long 1975)。而林下植物總生物量會隨樹齡增加而減少(Long and Turner 1975)。台灣杉林分林下植物其生物量所佔比例極低，且林下植物生物量隨年齡而下降(Table 3)，此二現象與溪頭柳杉林分者相似(Lin 1989)。又台灣杉林分地被植物生物量變異極大，顯示地被植物的侵入極不均勻，影響其生物量的分佈。

台灣杉和林下植物各部位植體的氮濃度，

以葉最高，枝條次之，樹幹最低(Table 4)。前述之35年生柳杉也有類似的結果，且其各部位之氮濃度皆低於本研究之台灣杉者，僅樹幹者相近(Lin 1989)。就林分不同植物層而言，氮濃度在地被植物最高，灌木的葉與台灣杉的葉及小枝相近。而灌木的枝條及樹幹其氮濃度也高於台灣杉者(Table 4)，此與印度北部的展葉松(*Pinus patula* Schlecht. et Cham)人工林相似(Bargali and Singh 1997)。另外，隨樹齡增加，植體養分濃度會下降，這是因為生物量隨年齡而增加，植物為提高養分的效率，故降低其枝條及幹部的養分濃度(Ranger et al. 1995)。葉部則因保存更多老葉，利用回輸作用(retranslocation)，使氮濃度下降(Webber 1977)。但本研究的台灣杉並無此現象，甚至27年生葉及小枝氮濃度較高(Table 4)，是否因葉與小枝不易區分而影響葉的濃度，尚待進一步證實。

土壤中碳和氮濃度隨深度增加而下降，如在美國大煙山(Great Smoky Mountains)的紅雲杉(*Picea rubens* Sarg.)林分，碳濃度由0~9 cm的46 mg g<sup>-1</sup>，下降至38~49 cm的17 mg g<sup>-1</sup>；氮濃度在同樣深度也由6 mg g<sup>-1</sup>下降至1.5 mg g<sup>-1</sup> (Johnson et al. 1991)。而奧地利的挪威雲杉純林碳和氮濃度也明顯地隨深度下降(Berger et al. 2002)。台灣杉土壤內碳和氮亦如此(Table 5)。

植物養分的累積量主要受生物量及養分濃度的影響。由於台灣杉植體各部位養分濃度有差異，故養分累積量的比例與生物量不同。但樹齡間各部位養分濃度無差異，27年生林分植物地上部因生物量較大，累積較多的碳和氮(Tables 6, 7)。台灣杉林木27年生各部位貯存的碳和氮皆高於20年生者。不似花旗松林分在樹冠鬱閉時，葉的氮累積量保持穩定不再增高(Turner 1981)。而六龜台灣杉的生物量雖比前述35年生的柳杉低，由於各部位氮濃度皆較高，故林木累積的氮量(1,144~1,592 kg ha<sup>-1</sup>)高於柳杉林者(235~477 kg ha<sup>-1</sup>) (Lin 1989)。要注意的是土壤通常累積了最大的碳和養分，如美國德達松造林地土壤氮儲存量佔整個生態系的73.6% (Wells and Jorgensen 1975)，上述紅雲杉

林分土壤含氮量佔66.3% (Johnson et al. 1991)，花旗松林分更高達88~94% (Webber 1977, Fogel and Hunt 1983)，台灣杉則佔83.1~87.6%介於其間 (Table 7)。土壤含碳的比例則較低，台灣杉林分土壤碳約其佔總量的45.9~58.6% (Table 6)，高於一般熱帶林的45% (Malhi et al. 1999)。

林木根部亦累積大量生物量，但因測定困難，一般可用地上部生物量以固定比例加以推估。根部生物量佔地上部生物量的比例，熱帶林平均為0.24，寒帶林為0.27，而針葉樹的平均值為0.26 (Cairns et al. 1997)。此一比例受許多因素影響，包含年齡、密度、生育地狀況等，如40年生花旗松地下部生物量佔地上部生物量比例可由0.19到0.23之間，主要受生育地影響 (Keyes and Grier 1981)。本研究未調查台灣杉林分地下部生物量，但以針葉樹其平均值0.26為準，推估地下部生物量，20和27年生分別約為53.0和65.9 ton ha<sup>-1</sup>。若以此一比例推估林木根部碳和氮貯存量，則20年生林木貯存27.4 ton ha<sup>-1</sup>碳和297 kg ha<sup>-1</sup>氮；27年生貯存34.3 ton ha<sup>-1</sup>碳和414 kg ha<sup>-1</sup>氮。若以上述花旗松較低的比例0.19估算，20年生林木累積生物量38.7 ton ha<sup>-1</sup>、碳20.0 ton ha<sup>-1</sup>、氮217 kg ha<sup>-1</sup>，27年生林木則累積生物量48.2 ton ha<sup>-1</sup>、碳25.1 ton ha<sup>-1</sup>、氮302 kg ha<sup>-1</sup>。故地下部累積的生物量、碳或氮的量遠高於林下植物和枝葉層者，在生態系中佔有重要地位。

以林分內所有植物合計，由20至27年生其植物碳儲存量，增加25.0 ton ha<sup>-1</sup>，平均每年增加3.6 ton ha<sup>-1</sup>，顯示隨生物量的累積植物會貯存碳，即將二氧化碳固定，具有減低大氣中二氧化碳的作用。Lee et al. (2000)曾以材積式再加上碳吸存量轉換模式，估算六龜台灣杉碳吸存量，其中19年生林分估算值為77.2 ton ha<sup>-1</sup>，比本研究結果低 (Table 6)。一般林木全株材積約為幹材材積之1.3~2.0倍 (Brown et al. 1986)，但此全株材積包含地下部部分。以台灣杉樣本估算，全株生物量與樹幹生物量之比，樹齡間無差異，故全株生物量與樹幹生物量之比平均為1.19，屬上述比例之低者。若以第三次森林資

源調查所用之台灣杉材積式估算樣木材積 (Kuan and Chi 1995)，與生物量比較所得之材積轉換係數與胸徑無關，且樹齡間無差異，故由材積轉換成生物量之平均係數為0.416 (Mg m<sup>-3</sup>)。此值低於生長在日本的柳杉其係數為0.55 (Mg m<sup>-3</sup>) 和日本紅檜 (*Chamaecyparis obtusa* Endl.) 的0.62 (Mg m<sup>-3</sup>) (Fukuda et al. 2003)。另以喬木植體各部位碳濃度，依生物量比例求其平均值。兩林分植體平均碳濃度為51.8%。故台灣杉林木以材積換算成地上部碳累積量的轉換係數為0.22 (Mg m<sup>-3</sup>)。

## 引用文獻

- Anonymous 1998.** Climate data of Liu Kuei station, TFRI, Taipei, Taiwan: TFRI Extension Series No. 89. 517 p. [in Chinese].
- Bargali SS, Singh RP. 1997.** *Pinus patula* plantations in Kumaun Himalaya. II. Nutrient dynamics. *J Trop For Sci* 10(1):101-114.
- Bartelink HH. 1996.** Allometric relationships on biomass and needle area of Douglas-fir. *For Ecol Mgmt* 86:193-203.
- Berger TW, Neubauer C, Glatzel G. 2002.** Factors controlling soil carbon and nitrogen stores in pure stands of Norway spruce (*Picea abies*) and mixed species stands in Austria. *For Ecol Mgmt* 159:3-14.
- 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.
- Cairns MA, Brown S, Helmer EH, Baumgardner GA. 1997.** Root biomass allocation in the world's upland forests. *Oecologia* 111:1-11.
- Chen LC, Huang GM, Lin JS, Chiou CR. 1997.** Growing stock and growth estimation of Taiwan plantations in the Liukuei area. *Taiwan J For Sci* 12(3):319-27. [in Chinese with English summary].
- Chen TF, Lü CM. 1988.** The growth and

- stand biomass of casuarina plantation at Miao-Li coastal sand-dune. *Bull Taiwan For Res Inst New Series* 3(1):333-43.
- Dudley NS, Fownes JH. 1992.** Preliminary biomass equations for eight species of fast-growing tropical trees. *J Trop For Sci* 5(1):68-73.
- Fogel R, Hunt G. 1983.** Contribution of mycorrhizae and soil fungi to nutrient cycling in a Douglas-fir ecosystem. *Can J For Res* 13:219-32.
- Fukuda M, Iehara T, Matsumoto M. 2003.** Carbon stock estimates for sugi and hinoki forests in Japan. *For Ecol Mgmt* 184:1-16.
- Hornng FW, Sun JC, Hwang SG. 1985.** Aboveground biomass distribution of China-fir plantations with respect to age at Lien-Hua-Chi. Taipei, Taiwan: Bull TFRI No. 444. 12 p. [in Chinese with English summary].
- Hung LP. 1974.** Study on the stands' growth of Taiwania plantation established by test of planting on different forest districts in Taiwan. Taipei, Taiwan: Bull TFRI No. 375. 20 p. [in Chinese with English summary].
- Johnson DW, Van Miegroet H, Lindberg SE, Todd DE, Harrison RB. 1991.** Nutrient cycling in red spruce forests of the Great Smoky Mountains. *Can J For Res* 21:769-87.
- Jokela EJ, Van Gorp KP, Briggs RD, White EH. 1986.** Biomass estimation equations for Norway spruce in New York. *Can J For Res* 16:413-5.
- Keyes MR, Grier CC. 1981.** Above- and below-ground net production in 40-year-old Douglas-fir stands on low and high productivity sites. *Can J For Res* 11:599-605.
- Kuan LH, Chi LM. 1995.** The third forest resources and land use inventory in Taiwan. Taipei, Taiwan: Forestry Bureau. 258 p. [in Chinese].
- Lal R, Kimble JM. 2001.** Importance of soil bulk density and methods of its importance. In: Lal R, Kimble JM, Follett RF, Stewart BA, editors. *Assessment methods for soil carbon*. New York: Lewis Publishers. p 31-44.
- 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. [in Chinese with English summary].
- Lin CS, Hornng FW. 1991.** The growth of *Taiwania cryptomerioides* at Liu-Kuei area. *Bull Taiwan For Res Inst New Series* 6(3):229-48. [in Chinese with English summary].
- Lin KC, Wang CP, Huang CM, Hornng FW, Chiu CM. 2003.** Estimates of biomass and carbon storage in two Taiwania plantations of the Liukuei Experimental Forest. *Taiwan J For Sci* 18(2):85-94.
- Lin ST. 1989.** Studies on the growth and nutrient dynamics of Japanese cedar (*Cryptomeria japonica*) plantation under different spacing [PhD dissertation]. Taipei, Taiwan: National Taiwan Univ. 120 p. [in Chinese with English summary].
- Liu SC, Lin KC, Tang JL. 1984.** Growth and wood properties of planted *Taiwania cryptomerioides* at Liu-Kuei. Taipei, Taiwan: Bull TFRI No. 408. 25 p. [in Chinese with English summary].
- Long JN, Turner J. 1975.** Aboveground biomass of understorey and overstorey in an age sequence of four Douglas-fir stands. *J Appl Ecol* 12:179-88.
- Malhi Y, Baldocchi DD, Jarvis PG. 1999.** The carbon balance of tropical, temperate and boreal forests. *Plant Cell Environ* 22:715-40.
- Nemeth JC. 1973.** Dry matter production in young loblolly (*Pinus taeda* L.) and slash pine (*Pinus elliottii* Engelm.) plantations. *Ecol Monogr* 43(1):21-41.
- Ranger J, Marques R, Colin-Belgrand M, Flammang N, Gelhaye D. 1995.** The dynamics of biomass and nutrient accumulation in a Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii* Franco)

stand studied using a chronosequence approach. For *Ecol Mgmt* 72:167-83.

**Rayachhetry MB, Van TK, Center TD, Laroche F. 2001.** Dry weight estimation of the aboveground components of *Melaleuca quinquenervia* trees in southern Florida. For *Ecol Mgmt* 142:281-90.

**Sollins P, Glassman C, Paul EA, Swanston C, Lajtha K, Heil JW, Elliott ET. 1999.** Soil carbon and nitrogen: pools and fractions. In: Robertson GP, Coleman DC, Bledsoe CS, Sollins P, editors. *Standard soil methods for long-term ecological research*. New York: Oxford Univ Press, p 89-105.

**Switzer GL, Nelson LE. 1972.** Nutrient accumulation and cycling in loblolly pine (*Pinus*

*taeda* L.) plantation ecosystems: the first twenty years. *Soil Sci Soc Am Proc* 36:143-7.

**Turner J. 1981.** Nutrient cycling in an age sequence of western Washington Douglas-fir stands. *Ann Bot* 48:159-69.

**Turner J, Long JN. 1975.** Accumulation of organic matter in a series of Douglas-fir stands. *Can J For Res* 5:681-90.

**Webber BD. 1977.** Biomass and nutrient distribution patterns in a young *Pseudotsuga menziesii* ecosystem. *Can J For Res* 7:326-34.

**Wells CG, Jorgensen JR. 1975.** Nutrient cycling in loblolly pine plantations. In: Bernier B, Winget CH, editors. *Forest soils and forest land management*. Québec: Les Presses de L'Univ Laval, p 137-58.

