

研究報告

應用空間分析法評估紅檜人工林之立木均勻度

張起華¹、陳朝圳²、魏浚紘²

摘要

疏伐作業係透過伐木處理，將林分疏開與伐除生長狀態不佳之林木，以利保留木生長，為一重要的森林撫育作業。往昔疏伐木之選擇往往透過現場人員之經驗判斷，致使在空間規劃上缺少一套有系統的作業模式，進行立木空間管理及疏伐木伐採作業之模擬，本研究擬利用立木位空間位置分布圖，以地理資訊系統之空間分析，發展一套適用於疏伐作業之指標，提供經營者準確且快速之量化方式，進行疏伐作業規劃。研究結果顯示，林木均勻指標會隨著林木大小以及距離有所不同，當林木大小不變，但距離由1 m改變至5 m時，林木均勻指標由0.5690改變至2.8452；當林木距離不變，但其中一株胸高斷面積由10 cm²改變至50 cm²時，林木均勻指標由0.5690改變至0.1188。由此可知，當林木距離變大時，林木均勻指標會變大，表示越不集中；當林木胸高斷面積偏向一方時，即某一林木胸高斷面積較大，林木均勻指標會變小，表示立木越集中，其表示不利於紓解林木之生長競爭壓力。林木均勻指標可以解決疏伐作業之空間化與數量化之問題，透過本研究成果進行疏伐樣區之相關模擬，可供疏伐選木人員進行訓練時，提高疏伐木選擇之專業力的提升。

關鍵詞：地理單元、空間分析、立木度、林分均勻指標、疏伐

張起華、陳朝圳、魏浚紘。2024。應用空間分析法評估紅檜人工林之立木均勻度。台灣林業科學39(1):69-81。

¹ 國立屏東科技大學熱帶農業暨國際合作系，91201屏東縣內埔鄉學府路1號 Department of Tropical Agriculture and International Cooperation, National Pingtung University of Science and Technology, 1 Shuefu Rd., Neipu Township, Pingtung 91201, Taiwan.

² 國立屏東科技大學森林系，91201屏東縣內埔鄉學府路1號 Department of Forestry, National Pingtung University of Science and Technology, 1 Shuefu Rd., Neipu Township, Pingtung 91201, Taiwan.

通訊作者：魏浚紘 Corresponding author, Chun-Hung Wei, E-mail: aw711212@gmail.com

2023年11月送審2024年3月通過。Received November 2023, Accepted Mar 2024.

Research paper

Using Spatial Analysis to Assess Stand Uniform Index in a *Chamaecyparis formosensis* Plantation

Chi-Hua Chang,¹ Chaur-Tzuhn Chen,² Chun-Hung Wei²

ABSTRACT

Thinning is an important part of forest stand management which removes unhealthy and undesirable trees, benefiting the remaining trees. Selecting the trees to thin presents quantification and spatial distribution challenges for stand managers. In this study we created a model to guide thinning operations, named Stand Uniform Index (SUI). Managers can use this model to quickly choose the trees to remove in the planning of thinning operations. Our study discovered that Stand Uniform Index is affected by diameter at breast height (DBH) and the distances between trees. When DBH was a constant value, distances progressively rose from 1 to 5 m and the index ranged from 0.5690 to 2.8452. When the distances were constant, and DBH varied greatly from 10 to 50 cm among trees, the index varied from 0.5690 to 0.1188. This indicated that trees were concentrated in a sampling area where the Stand Uniform Index was great. The Stand Uniform Index resolved the problem of quantification and spatial distribution modeling for thinning operations. Simulation of thinning operations using this index provides the manager with better understanding of a stand to make thinning decisions. This study showed that using the Stand Uniform Index can assist with forest management policy and improve thinning operations.

Keywords: geographical unit, spatial analysis, stand density index, stand uniform index, thinning
Chang CH, Chen CT, Wei CH. 2024. Using Spatial Analysis to Assess Stand Uniform Index in a *Chamaecyparis formosensis* Plantation. Taiwan J For Sci 39(1):69-81 .

緒言

林分密度控制為造林之重要控制因子之一(Nyland 2016)，而林分密度會隨時間產生動態變化，而幼齡林通常在初期建立時，會有較大之密度，故林木間會於樹冠鬱閉時開始競爭，並隨著密度增加而加劇競爭壓力，故搜索競爭木之方式包括固定半徑搜尋法(Olivier et al. 2016)、搜索錐法(Search Cone Method)以 60° 仰角搜索(Seidel et al. 2015, Olivier et al. 2016)等。

林分之最大密度隨地位與林分結構產生差異(Ducey and Knapp 2010, Pretzsch and Biber 2016, Condes et al. 2017, Pretzsch and del Río 2020)。因此，多數研究分析了林分密度量化之方式(Zeide 2005)、或透過疏伐降低密度(Nyland 2016)、疏伐對林分生長之影響((Mäkinen and Isomäki 2004a, Mäkinen and Isomäki 2004b)，以及生長與密度之關係(Curtis et al. 1997, Zeide 2001)。

疏伐(Thinning)為森林作業方式之一，其目的以撫育為主，重點在於控制與改變林分密度，係將林分透過伐木處理，將其疏開與伐除受害木、被壓木與生長狀態不佳之林木，以利保留木生長，其中又可透過疏伐，以獲得主伐以外之部份收益；透過疏伐可保留良好林木，使其材積量增加、促進良好形質、提昇整體產量、維持適當蓄積及抵抗各種危害等(Yen 1993, Amateis et al. 1996)，故透過合適之疏伐作業調整林木間距為重要之工作。

疏伐之方式，大致可分成定性疏伐與定量疏伐兩類。定性疏伐主要係以森林經營之策略，選定應伐除何種類型之林木，再決定伐除量，通常依照樹冠級與胸高直徑級來施行，而疏伐木選定方式，可依照下層疏伐(Low Thinning)，按樹冠級低之樹種，如被壓木、傷害木、枯死木、瀕死木與生長狀態不佳木等予以伐除；而上層疏伐(High Thinning)，主要目的並非伐除全部優勢木，而是伐除樹冠擴張之優勢木或樹幹彎曲、分叉之上層木，促進下層生長健全之中庸木，可繼續維持生長，除此之外，亦伐除劣勢木與病害木；至於選擇疏伐(Selective Thinning)，擇係依照經營策略進

行疏伐；另機械疏伐(Mechanical Thinning)，乃依照一定之栽植距離，選擇伐採與保留之立木，形成條帶狀之疏伐方式。定量疏伐主要配合定性疏伐，所訂定之伐採量與量而施行，疏伐方式可依照株數、胸高直徑、林木間距、樹高、胸高斷面積來訂定(Yen 1993, Lin 1995, Wu 2001)。

定量疏伐作業中，首先需制訂疏伐量，可以材積量(Cutting Wood Volume)、立木度(Stand Density Index)或株數(Number)等方式制訂，後續將形質生長不良與不健康之林木伐除後，再選擇其他樣木伐採直到滿足該次疏伐量為止。根據上述概念，本研究以定量疏伐為基礎，期發展出一套屬於人工林疏伐樣區之林分均勻指標，在後續選擇其他需被伐採木之部分，可根據此指標來達到最佳之空間伐採選擇，使樣區達到空間最均勻之狀態。

地理單元(Geographical Unit)之空間分析(Spatial Analysis)

對一個樣區而言，以地理學之空間分布概念，樣區中的林木即其地理單元，而樣區大小則為所分布之空間。地理單元分布屬於地理統計(Geostatistics)與空間現象重要因子之一，故各學門各自發展出屬於其領域之地理指標。根據Weng and Tsai (2006)所彙整資料指出，部分度量集散之指標以空間自相關為基礎(Moran's I 與Getis's G)，而其他相關指標則以統計或景觀生態之方式，如最近鄰法(Nearest Neighbor Index)、方格法(Quadrat Index)、景觀聚集度指數(Contagion Index)、碎形(Fractal)、盒計數法(Box Counting Method)、平均距離(Mean Distance)、標準距離(Standard Distance)、空間離散指標(Spatial Dispersion Index, SDI；公式1)等。

根據Lee (2005)與Weng and Tsai (2006)討論地理單元分布於空間之問題時，需注意三項原則，即地理單元與分布空間之關係、地理單元大小以及地理單元間距離等。依據前述三項原則之概念且當地理單元數量相同時，會有三種狀態(Fig. 1)，第一為當地理單元大小與距離相同，但相同地理單元分布於不同分布空間時(Fig.1 B1與C1)，

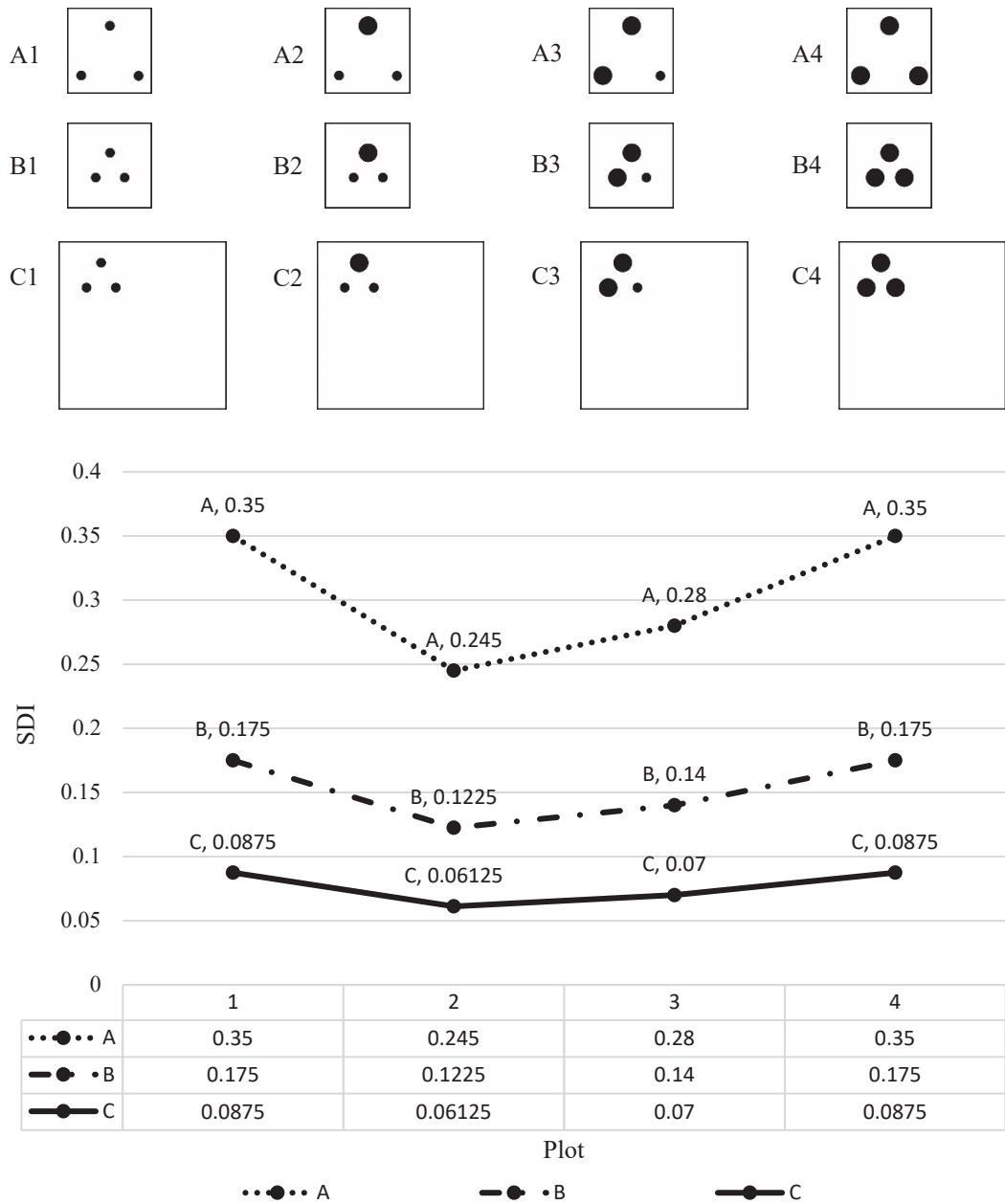


Fig. 1. A geographical unit distributed in space according to the three principles (A, B, C) (Modified from Weng and Tsai (2006))

分布空間越大則分布越集中，而分布空間越小則分布越分散；第二為當地理單元之分布空間與地理單元大小相同，但地理單元距離不同時(Fig.1 A1與B1)，地理單元相互距離越近則越集中，地

理單元相互距離越遠則越分散；第三為當地理單元之分布空間與地理單元距離相同，但地理單元間具有相對大小時(Fig.1 A1與A2)，則根據重心偏移概念，地理單元大小差距越大越集中(偏向重

心)，地理單元大小越平均則越分散。

$$SDI = \frac{1}{\sqrt{A} \times 2(n-1)} \sum \sum (a_i \% + a_j \%)$$

$$[(a_i \times d_i + a_j \times d_j) / (a_i + a_j)] \dots\dots\dots(1)$$

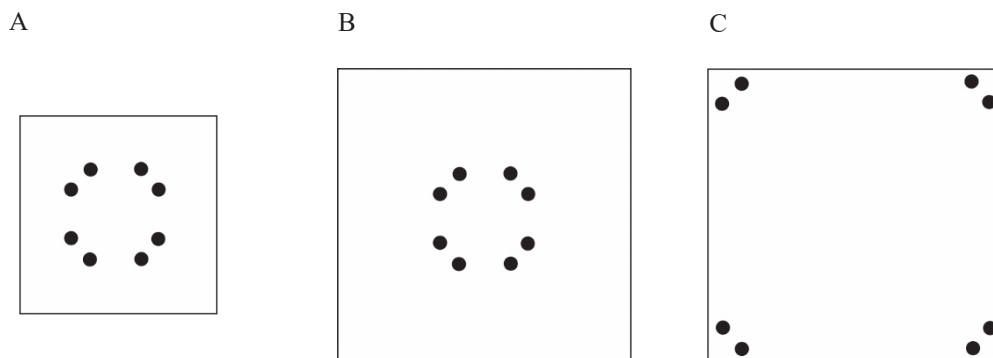
a_i = i地物面積； a_j = j地物面積； d_i = a_i 至 a_j 之重心距離(m)； d_j = a_j 至 a_i 之重心距離(m)； $a_i\%$ = i地物面積佔總地物面積之比率； $a_j\%$ = j地物面積佔總地物面積之比率； n = 地物數量； A = 單元面積

Weng and Tsai (2006)亦針對Moran's I (z)、Getis's G (z)、Nearest Neighbor Index (χ^2)、Quadrat Index、Contagion Index、Fractal (Box Counting Method)、Mean Distance、及Standard Distance等進行與SDI之比較(Fig. 2)，此八項指標

對於離散度的呈現效果均不佳，故該研究最後以推導出之SDI 將地物鄰近程度與單元面積納入考量，即可反應出不同狀態之離散程度。

疏伐樣木之選擇與計量法

經營者若以材積量作為定量疏伐之標準，則伐採木之總材積必須滿足總伐採量(公式2)，又伐採木之總材積(總伐採量)其中一部分為必須伐採木，包括形質生長不良、被壓木、分叉木、節過多或具有樹瘤之林木、不健康林木及過大之林木等，以確保保留木之狀態是屬於健康、生長狀態良好且林木間狀態大部分均相同，而此部分必須伐採木之伐採量稱必須伐採量，而另一部分為滿足總伐採量之樣木選擇，稱滿足伐採量。



	A	B	C
Moran's I (z)	-2.83	-2.83	-2.83
Getis's G (z)	-2.83	-2.83	-2.83
Nearest Neighbor Index (χ^2)	0.80	0.53	0.53
Quadrat Index	24.00	64.00	64.00
Contagion Index	85.59	92.57	92.57
Fractal (Box Counting Method)	2.00	2.00	2.00
Mean Distance	7.37	7.37	24.83
Standard Distance	5.15	5.15	17.73
SDI	0.18	0.12	0.41

Fig. 2. Comparisons of 3 element spatial distribution patterns according to 9 dispersion indices (Modified from Weng and Tsai (2006))

總伐採量 = 必須伐採量 + 滿足伐採量(2)

目前疏伐之方式為了使對環境更加友善且達到永續之目標，於調整空間時，應考慮該區域林木之生長量，自2017年林業及自然保育署將此年訂為國產材元年，並訂定2027年國產材自給率達5%，部分輪伐期較長之人工林樹種，於疏伐時除調整密度外，亦可搭配國產材疏伐木之小徑木利用，使木材自給率提升。

疏伐作業當中，除了必須疏伐量 \geq 總疏伐量，其餘狀況均必須考慮滿足疏伐量。在考慮滿足疏伐量的同時，由於林木間狀態皆屬接近之林木，故在伐採木選擇方面，除了達到疏伐量之外，又必須注意保留木之空間分布，達到疏伐作業後最均勻分布之狀態。

滿足總疏伐量之伐採木選擇上，具有許多排列組合。以 n 株林木之樣區來進行滿足伐採量之組合上，共有 $C_1^n + C_2^n + C_3^n + C_4^n \dots + C_n^n$ ，根據巴斯卡(Pascal Triangle)三角形公式(公式3)可知，此組合為其總和(公式4)。

$$C_m^n = \frac{n!}{(n-m)! \times m!} = \dots\dots\dots(3)$$

$$\text{保留木之排列組合} = \sum_{i=1}^n C_i^n \dots\dots\dots(4)$$

經由滿足疏伐量之數值或範圍，計算所有可能之排列組合後，再選出符合者，透過該排列組合進行林分均勻指標計算，藉以探討該組合保留木之空間分布是否均勻。根據巴斯卡三角形公式可知，當樣木數量(n)增加時，其排列組合總數會以 $2n$ 上升，若樣區內樣木若達到40株，大約有1.1兆種排列組合，除了透過滿足伐採量之數值或範圍進行篩選外，經營者可依照經營目標給予其他篩選條件，如本次經營目標希望可以獲取較多胸徑介於10 - 20 cm之林木，則可加入此條件進行篩選；透過許多篩選條件，可有效減少排列組合數量，於符合經營目標之排列組合內進行林分均勻指標計算，選擇最適伐採方式。

討論地理單元分布於空間之狀態，以集中或分散作為討論重點，屬不同地區或相同地區之

前後相比之相對概念，而本研究發展一套屬於疏伐樣區林分監測之均勻度指標，稱林分均勻指標(Stand Uniform Index, SUI)，一方面以空間離散指標進行不同地區或相同地區前後之相對比較，而除了進行相對比較外，另一方面亦可探討其絕對均勻程度。爰此，本研究目的為探討此指標是否可於疏伐作業時，作為調整參考之指標，並以此指標量化疏伐區域以了解作業前後之差異，並著重於林分均勻指標之解算與成果分析。

材料與方法

研究材料與研究區概況

研究區域位於小關山林道，隸屬屏東林管處老濃溪事業區六龜工作站。小關山林道屬亞熱帶型氣候區，全年平均溫度等溫線，以20°C等溫線與海拔1,000 m等高線相疊合，10°C等溫線與海拔2,500 m等高線相疊合，而1,000 m以下則隨季節變化常在20°C上下之間。年雨量約3,333.5 mm，年平均降雨天數約140天，5 - 9月為雨季，降雨量佔全年總雨量85%，10月至翌年4月為乾旱季，雨量相當集中，降雨分布不均，降雨量隨海拔高度提昇而增加(Fig. 3)。

紅檜(*Chamaecyparis formosensis*)為柏科扁柏屬，別名薄皮、松蘿、梧松、臺灣花柏、水古杉，為臺灣特有種，是臺灣中海拔山區中的主要樹種，北部生長海拔範圍約900 - 2,500 m，南部生長海拔範圍約2,200 - 2,500 m，最盛生長海拔範圍約1,300 - 2,100 m，為早期臺灣主要伐木的樹種之一，曾為臺灣帶來相當豐富的經濟效益。紅檜樹皮呈現灰紅色至紅褐色，皮孔不明顯，樹皮薄且平滑，常以長條片狀剝落，溝裂較淺，剝落之樹皮於樹的周圍長期累積，即堆積出鬆軟而厚的腐植層。

臺灣檜木人工林栽植面積僅次於松類人工林與柳杉人工林，位居第三，而紅檜係屬優良木材，其材質佳、木理通直且有特殊香氣，與臺灣扁柏(*Chamaecyparis obtusa* var. *formosana*)、臺灣杉(*Taiwania cryptomerioides*)、香杉(*Cunninghamia*

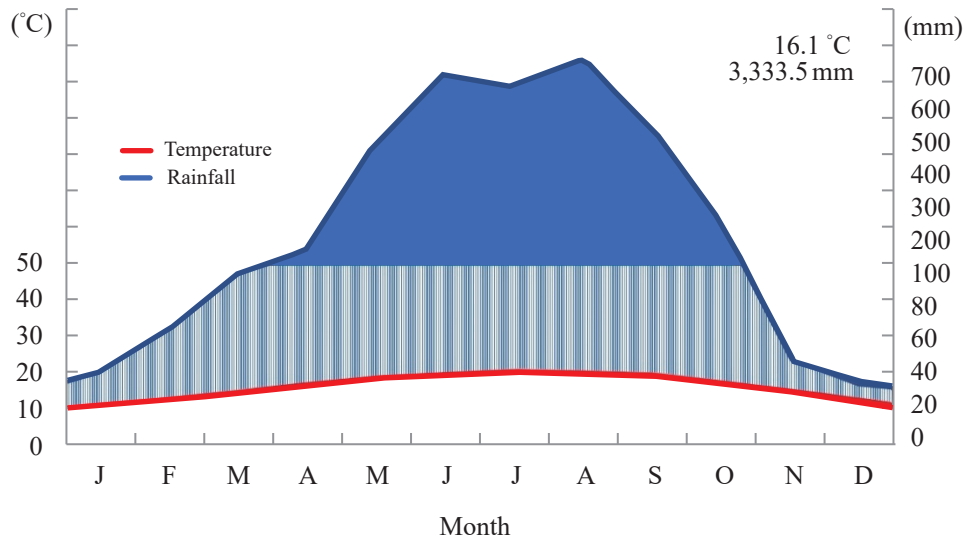


Fig. 3. Climograph of the study area along Xiaoguanshan forest road

lanceolata)與臺灣肖楠(*Calocedrus formosana*)等並列為臺灣珍貴針葉五木，均屬於上等木材，可用於建築、家具或精緻工業品，且可萃取精油，製成其他相關產品，缺點是紅檜生長速度相當緩慢。

本研究分別於六龜地區小關山林道，進行地面樣區設置，而調查資料包括樹種、立木位置、樹高、胸徑、枝下高、樹冠幅(Crown Diameter)、樹冠覆蓋度(Crown Coverage)與孔隙位置及物理環境參數等，目標樹種為紅檜人工林，透過高精度GPS定位樣區邊界，再配合雷射測距儀，取得每木相對位置，以繪製每木位置圖，最後將地真資料予以彙整計算，並以GIS建立研究區域之林分型態值圖層資料，包括樣區邊界、立木位置圖等。

胸徑測量方式，以地面垂直向上1.3 m為標準，透過胸高直徑尺進行直徑測量，並記錄數據至小數點第二位，若有藤本或附生植物應予去除後，再進行測量。當林木生長特殊時，必須配合生長方式進行測量，大致可分成林木分岔、根株萌芽、基部膨大、胸高直徑處生長不規則、生長於斜坡、林木傾斜與樹幹剝皮凹陷等。

本研究之各樣區座標係以樣區中心點為基

準，進行座標獲取，而立木位置，係以公分級精度之即時動態測量之GPS，配合公分級精度之電子全站儀(Electronic Total Station)，進行樣區立木位置測定，若樣區於遮蔽較高之林地，則必須於空曠處，透過即時動態測量之GPS量測，配合已知之全國三角控制點分布位置作為參考，進行地面控制基準點獲取，再透過雷射測距經緯儀以導線法，進行其他控制點座標之引測。

研究方法

本研究均比較多時期之疏伐樣區，疏伐前後樣區大小不變，故可不考慮分布空間，但若需比較不同分布空間之疏伐樣區，其林分空間均勻狀態時，則需要考慮分布空間，故根據Weng and Tsai (2006)之概念及公式，將樣木胸高斷面積為地理單元，樣區大小為分布空間，樣木間距離為地理單元間距離，但根據Fig. 1可知，SDI公式於同面積範圍內隨著地物面積變大其指標均相等(A1與A4；B1與B4；C1與C4)，係因此公式以兩地物中心為距離計算，故隨地物面積增加其距離不變，但若以此概念以林木為目標，相同面積內，隨林木增長斷面積增加，樣區內林木會呈現較為緊密(集中)之現象，故指標應下降，而非

如同SDI指數屬相同數值，根據此概念，將兩林木中心距離必須扣除兩林木半徑和，使其距離減少，修正指數才可反映真實狀態，故將其公式修正為下列公式5至11。

$$a_i = (DBH_i / 2)^2 \times \pi \dots\dots\dots (5)$$

$$a_j = (DBH_j / 2)^2 \times \pi \dots\dots\dots (6)$$

$$d_i = a_i / (a_i + a_j) \times D_{ij} \dots\dots\dots (7)$$

$$d_j = a_j / (a_i + a_j) \times D_{ij} \dots\dots\dots (8)$$

$$a_i \% = a_i / \sum a_i \times 100 \dots\dots\dots (9)$$

$$a_j \% = a_j / \sum a_j \times 100 \dots\dots\dots (10)$$

$$SUI = \frac{1}{\sqrt{A} \times 2(k-1)} \sum (a_i \% + a_j \%) \\ [(a_i \times d_i + a_j \times d_j) / (a_i + a_j)] \dots\dots\dots (11)$$

a_i = 樣木*i*胸高斷面積(m)； a_j = 樣木*j*胸高斷面積(m)； DBH_i = 樣木*i*之胸徑(m)； DBH_j = 樣木*j*之胸徑(m)； d_i = 樣木*i*至*j*之重心距離(m)； d_j = 樣木*j*至*i*之重心距離(m)； D_{ij} = 樣木*i*至*j*之距離- $0.5 \times (DBH_i + DBH_j)$ (非兩樣木中心距離，而是兩樣木相近之邊界距離，故兩樣木中心距離需扣各自半徑)； $a_i \%$ = 樣木*i*之胸高斷面積佔總胸高斷面積之比率； $a_j \%$ = 樣木*j*之胸高斷面積佔總胸高斷面積之比率； k = 樣木數量； A = 樣區大小(m²)

(一)林分均勻指標案例計算

林分均勻指標計算假設樣區面積大小相同(0.01ha；10 m×10 m；樣木距離邊界2 m；Fig. 4)且樣區內林木大小皆相同時，樣木間距離由3 m開始遞減，每次遞減0.5 m至1 m止，並觀察其指標變化狀況，透過上述方式探討此指標應用於林業上之可行性。

(二)模擬不同林分之林分均勻指標

第一階段林分模擬測試主要根據上述公式11，本研究依紅檜人工林之幼齡林胸徑模擬不同林分密度(2,500株 ha⁻¹、1,700株 ha⁻¹、1,156株 ha⁻¹以及625株 ha⁻¹)與不同林木分布狀況(等間距分布、集中分布(向中心集中25%)以及集中分布(向中心集中50%))模擬各種林分均勻指標情形，而林

木平均胸徑則參考Chiu and Lo-Cho (2002)紅檜人工林之幼齡林平均胸徑6 cm，以探討各種情況之林分均勻指標之高低，各種模擬情形如Table 1。

第二階段則以小關山林道紅檜人工林疏伐前、疏伐後當年、以及疏伐後四年樣區資料進行實際疏伐樣區林分均勻指標計算，並比較不同時間林分均勻指標之差異。

結果與討論

模擬不同林分分布之林分均勻指標

(一)林分均勻指標案例計算

結果顯示(Fig. 4)，林木均勻指標會隨著林木大小以及距離有所不同，當林木大小不變，但距離由3 m改變至1 m時，林木均勻指標由0.2536改變至0.2425。由此可知，當林木距離變小時，林木均勻指標會變小，表示越集中。

根據Weng and Tsai (2006)提出之空間離散指標(SDI)，並與Moran's I (z) (Moran 1948, 1950)、Getis's G (z) (Getis and Ord 1992)、Nearest Neighbor Index (χ^2) (Clark and Evans 1954)、Quadrat Index (Myllymaki et al. 1971)、Contagion Index (O'Neill et al. 1988)、Fractal (Box Counting Method)、Mean Distance以及Standard Distance等，進行空間離散之比較，該指標相較於其他離散度評估指標具有幾點優點，如相同分布空間、相同地理單元大小，但地理單元間距離不同時，Moran's I (z)、Getis's G (z)、Nearest Neighbor Index (χ^2)、Quadrat Index、Contagion Index、Fractal (Box Counting Method)等均相等，但在地理空間分布上卻是不同的空間離散程度，即本研究中之均勻度，故上述五種指標於探討林分空間分布問題時，無法區分明確判定結果；又當相同地理單元大小、相同地理單元間距離，但分布空間不同時，Moran's I (z)、Getis's G (z)、Fractal (Box Counting Method)、Mean Distance、Standard Distance等均相等，即分布空間不同時，上述五種指標亦無法區分明確判定結果，而SDI則適用於上述各種情形。

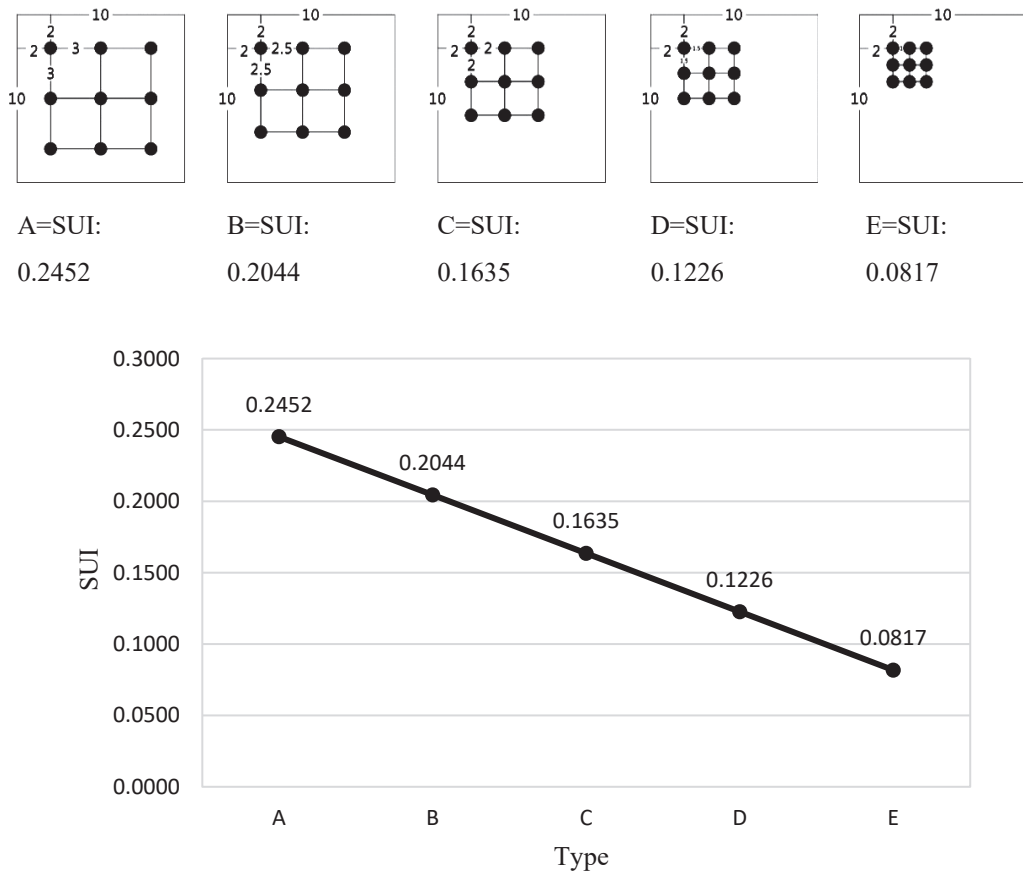


Fig. 4. Five different standard uniform index calculation results (assuming equal plots sizes: 0.01 ha, 10 m × 10 m, 2 m gap from sample tree to boundary, and planting distance gaps from 3 m to 1 m)

Table 1. Comparisons of designed simulation projects

Tree data		Equal distribution	Concentration distribution	
Stand density (trees ha ⁻¹)	Tree Mean DBH (cm)	Tree Distance (m)	Concentration to Center 25% (m)	Concentration to Center 50% (m)
2,500	6	2 × 2	1.50 × 1.50	1.0 × 1.0
1,700	6	2 × 3	1.50 × 2.25	1.0 × 1.5
1,156	6	3 × 3	2.25 × 2.25	1.5 × 1.5
625	6	4 × 4	3 × 3	2 × 2

本研究發展之林分均勻指標(SUI)與SDI所考慮之變因均相等，並以林木競爭生長之重要變數胸高斷面積以及林木間距離作為因子來探討林木空間均勻度，但透過研究結果可知，不論是

SUI或SDI均屬於相對比較的成果。

(二)模擬不同林分之林分均勻指標

根據本研究模擬紅檜人工林幼齡林之五種栽植情形，結果(Table 3)顯示，當等間距分布

時，625株 ha^{-1} 之樣區，其林分均勻指標最大(0.0835)，1,156株 ha^{-1} 次之(0.0460)，而2,500株 ha^{-1} 之樣區最小(0.0209)，林分均勻指標隨栽植密度遞減，表示從集中變成均勻分散；另外，當同一栽植密度之林分，其林木分布向中心聚集時，集中比例越高，而林分均勻指標會依比例改變，如林分密度2,500株 ha^{-1} 之樣區，其等間距分布之林分均勻指標為0.0209，向中心集中25%時，林分均勻指標為0.0156，向中心集中50%時，林分均勻指標為0.0104。根據本研究所發展的公式可知，林木間距離與林分均勻指標成正比，當越集中表示距離越近，則林分均勻指標依照其比例進行改變。由此上述結果可知，林分均勻指標越大表示林木間群聚情形越分散，林分均勻指標越小表示林木間群聚情形越集中。林分均勻指標在疏伐樣區之監測上，確實可代表該樣區之林木分布狀況。

林分密度管理主要係以密度與生長建立出林分密度關係式，可依照林分生長狀況進行不同密度之控制，以及疏伐量、收穫量之預測，可有效經營人工林(Curtis et al. 1997, Zeide 2001, Mäkinen

and Isomäki 2004a, Mäkinen and Isomäki 2004b, Zeide 2005, Nyland 2016)。人工林經營於幼齡林時，採用較高密度栽植，主要考量為存活率，以及林木於苗木時期，其對生長空間與環境要求較低之故；此時，較高密度栽植，可將有限資源充分發揮，但相同林齡之人工純林，在環境條件相同之下，林分密度越高，平均單木材積越小，主要原因為林木間之競爭與自我疏伐(Chiu and Lo-Cho, 2002)，故隨著林木的增長，部分林木會因生長條件死亡或生長不良，生長一段時間後，必須進行疏伐作業，使保留木擁有更多的空間與養分進行生長。

應用於多時期疏伐樣區監測時，其在樣區之分布空間上均相等，可採用Moran's $I(z)$ 、Getis's $G(z)$ 、Fractal (Box Counting Method)、Mean Distance、Standard Distance以及SUI進行林分空間均勻度探討，但未來若必須比較不同樣區大小之林分均勻度時，則必須使用SUI指標。雖然SUI可比較樣區之間集中與分散程度，但因各階段林齡對於空間之需求有所差異，故在使用上必須注意樣區之林齡，避免無意義之比較。

Table 2. Stand uniform index simulation results according to different tree distances and different concentration distributions

Tree data		Equal distribution		Concentration distribution			
	Tree Mean DBH (cm)	Tree Distance (m)	Stand Uniform Index	Concentration to Center 25% (m)	Stand Uniform Index	Concentration to Center 50% (m)	Stand Uniform Index
2,500	6	2 × 2	0.0209	1.50 × 1.50	0.0156	1.0 × 1.0	0.0104
1,700	6	2 × 3	0.0310	1.50 × 2.25	0.0232	1.0 × 1.5	0.0155
1,156	6	3 × 3	0.0460	2.25 × 2.25	0.0345	1.5 × 1.5	0.0230
625	6	4 × 4	0.0835	3.00 × 3.00	0.0626	2.0 × 2.0	0.0417

Table 3. Comparison of stand uniform index results in different plantation stages

	Before Thinning	Year after Thinning	Thinning Simulation	Thinning after 4 Years
Mean stand uniform index	0.4461	0.8547	0.8344	0.8628
Standard deviation	0.0481	0.2799	0.0726	0.2909

小關山紅檜人工林疏伐樣區之林分均勻指標

根據三次樣區林木資料調查結果(Table 3)，疏伐前平均林分均勻指標 0.4461 ± 0.0481 ，疏伐後當年平均林分均勻指標 0.8547 ± 0.2799 ，疏伐後四年平均林分均勻指標 0.8628 ± 0.2909 ；顯示經過疏伐作業，其林分均勻指標由 0.4461 變為 0.8628 ，即表示林木之空間分布由集中趨向於分散，但比較SUI大小僅能判斷林木空間分布變為集中或分散，無法確定林木分布是否均勻，故必須配合空間分布圖，以及林木間之距離變異數加以探討。因此，本研究依照Li (2010)所定義紅檜人工林之疏伐強度來決定樣區之疏伐強度，該文指出未疏伐株數為 $1,420 - 1,680$ 株 ha^{-1} ，強度疏伐單位面積株數保留率為 $47.62\% - 56.34\%$ (保留 800 株 ha^{-1})，中度疏伐為 $59.52\% - 70.42\%$ (保留 $1,000$ 株 ha^{-1})。本研究疏伐前胸高斷面積為 $65,395.57 \text{ cm}^2$ ，疏伐後為 $39,569.09 \text{ cm}^2$ ，單位面積株數保留率為 58.70% ，故本研究疏伐強度介於中度疏伐與強度疏伐之間。

根據本研究樣區疏伐強度(株數保留率為 58.70%)進行疏伐規劃，希望調整樣木於樣區中最佳空間分布情形(平均分布)，並以林木間之距離(包括樣區邊界四點到各樣木距離)進行調整，透過樣區中林木間距離之變異數來探討林木空間分布之狀態，當變異數越大時，表示林木間之距離有較大的變化。若為滿足伐採量之數值或範圍，進行計算所有可能之排列組合，再選出符合之最佳組合，此作業流程浩大，在全面性計算上有所困難，故將程式設定為自動找出第一組滿足條件者作為疏伐模擬之代表樣區。

分析結果顯示，疏伐前胸高斷面積為 $65,395.57 \text{ cm}^2$ ，疏伐後胸高斷面積為 $39,569.09 \text{ cm}^2$ ，林木間之距離變異數為 15.55 ，而模擬結果疏伐後胸高斷面積為 $47,193.93 \text{ cm}^2$ ，模擬後林木間之距離變異數為 15.39 。透過模擬結果可知，確實使林木間之距離變異數變小，使林木空間分布均勻、徑級分布均勻，以及保留較多大徑木，使其有更佳的生長空間。

實際疏伐作業所砍伐之林木徑級較大，故樣

區內保留徑級較小之林木，且林木空間分布較不均勻且緊密，致使疏伐後依然產生林木競爭；而透過疏伐作業模擬，伐採徑級較小之林木，保留較大徑級之林木，使林木空間分布較為均勻，可增加保留木生長空間，使其持續生長，並減少競爭產生。由Table 4可知，疏伐前樣區之間SUI標準偏差不大，但經過傳統疏伐作業後，造成疏伐後與疏伐後四年樣區間標準偏差變大，由此可知傳統疏伐作業之規劃較無法分配林木於空間中之均勻分布之狀態，透過疏伐模擬結果，可有效降低樣區間之標準偏差。

疏伐作業會因其目的，而在選木上有所差異，無論何種疏伐主要目的還是伐除生長不良之林木，若沒有特別的形質要求，還是需給予保留木更加的生長空間，使其持續生長。本研究以調查資料進行疏伐作業模擬，發現透過模擬確實在量化與空間化上做最佳調整。

結論

透過本研究之分析之成果可知，原SDI指標對於相同範圍大小以及林木間距狀態之下，隨林木增加但指標前後不改變(Fig.1 A1與A4)，此概念與林木生長後反應之現象不一致，隨林木增長，相同範圍大小以及林木間距狀態之下，該林地應該反映更加擁擠(集中)，故修正SDI公式使其轉變成SUI指標較能貼近現實狀態。透過SDI為基礎發展出之SUI均勻度指標，其可用於不同樣區大小、不同林木間距離、以及不同林木大小之樣區，並區分各種樣區之林木空間分布集中或分散之狀態。

透過模擬不同林分之林分均勻指標，亦可得到相同之驗證結果，當等間距分布時，栽植密度越低，其林分均勻指標最大，但隨增值密度增加，指標則逐漸下降，林分均勻指標與栽植密度呈現負相關；而當栽植林木分布向中心聚集時，集中比例越高，而林分均勻指標會依栽植集中比例改變由大至小，即可了解目前栽植狀態相較之下屬較為集中。

最後將此指標代入實際疏伐之試驗區域，進

行SUI計算結果可知，疏伐前樣區之間SUI標準偏差不大，但經過傳統疏伐作業後，造成疏伐後與疏伐後四年樣區間標準偏差變大，由此可知傳統疏伐作業之規劃較無法分配林木於空間中之均勻分布之狀態，透過疏伐模擬結果，可有效降低樣區間之標準偏差。

未來在使用SUI指標時，可先於疏伐作業之前，計算SUI指數，並透過現地調查將必要疏伐之林木扣除後，即可討論各種情況下保留林木之SUI變化情形，並紀錄其指標，而隨林木增長，在時空變化後，亦可再次計算，了解疏伐前後之林木空間分布狀況。目前所遇到之最大困難點分成兩部分，第一部分為疏伐木選擇之排列組合過多，若需要全部求解後再尋找最佳解需要耗費許多時間，第二部分為SUI之變動性，由於不同的樹種、不同林齡所需要的生長空間與條件皆不相同，在疏伐作業規劃上，經營者必須考慮疏伐木之樹種、疏伐強度以及林齡等影響因子，方可決定最佳空間配置，故SUI會隨上述因子進行變動，但可以確定的是SUI確實可以在相同位置進行各樣態林木離散或集中情況之比較。

現階段雖然無法以SUI確定是否屬於最佳空間分布，但透過疏伐作業確實可使樣區林木之空間分布由集中變成分散，使林木獲得較多生長空間，而未來研究重點會朝向如何找到各狀態之最佳空間配置，即最佳SUI作為首要探討項目之一。

引用文獻

- Amateis RL, Radtke PJ, Burkhart HE. 1996.** Growth and yield of thinned and unthinned plantation. *J For* 94:19-23.
- Chiu CM, Lo-Cho CN. 2002.** Studies on stand density of young red cypress (*Chamaecyparis formosensis* Matsum) plantation. *Taiwan J For Sci* 17:205-17.
- Clark PJ, Evans FC. 1954.** Distance to nearest neighbor as a measure of spatial relationships in populations. *Ecology* 35:445-53.
- Condés S, Vallet P, Bielak K, Bravo-Oviedo A, Coll L, Ducey MJ, et al. 2017.** Climate influences on the maximum size-density relationship in Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) and European beech (*Fagus sylvatica* L.) stands. *For Ecol Manag* 385:295-307.
- Curtis RO, Marshall DD, Bell JF. 1997.** LOGS: A pioneering example of silvicultural research in coast Douglas-fir. *J For* 95:19-25.
- Ducey MJ, and Knapp RA. 2010.** A stand density index for complex mixed species forests in the northeastern United States. *For Ecol Manag* 260:1613-22.
- Getis A, Ord JK. 1992.** The analysis of spatial association by use of distance statistics. *Geographical Analysis* 24:189-206.
- Lee CC. 2005.** Application of fractal theory on land cover dynamics —The case of the distribution pattern of built-up area in Taiwan. A Thesis Submitted To The Graduate Institute Of The National Taiwan University In Partial Fulfillment Of The Requirement For The Degree Of Master Of Science In Geography. 113 p.
- Li LE. 2010.** The thinning effects on tree and stand levels for Taiwan red cypress (*Chamaecyparis formosensis*) plantations— An illustration of thinning demonstration zones in central Taiwan. Department of Forestry, National Chung-Hsing University Master Thesis. 86 p.
- Lin MJ. 1995.** The effect of diverse thinning and site to Chinese-Fir growth. Department of Forestry, National Chung-Hsing University Master Thesis. 74 p.
- Mäkinen H, Isomäki A. 2004a.** Thinning intensity and growth of Norway spruce stands in Finland. *Forestry* 77:349-64.
- Mäkinen H, Isomäki A. 2004b.** Thinning intensity and growth of Scots pine stands in

Finland. *Forest Eco Manag* 201:311-25.

Moran PAP. 1948. The interpretation of statistical maps. *Journal of the Royal Statistical Society Series B* 10:243-51.

Moran PAP. 1950. Notes on continuous stochastic phenomena. *Biometrika* 37:17-23.

Myllymaki A, Paasikallio A, Pankakoski E, Kanervo V. 1971. Removal experiments on small quadrats as a means of rapid assessment of the abundance of small mammals. *Ann Zool Fenn* 8:177-85.

Nyland RD. 2016. *Silviculture: concepts and applications*. Waveland Press, Long Grove, 682 p.

O'Neill RV, Krummel JR, Gardner RH, Sugihara G, Jackson B, DeAngelis DL, et al. 1988. Indices of landscape pattern. *Landscape Ecol* 1:153-62.

Olivier MD, Robert S, Fournier RA. 2016. Response of sugar maple (*Acer saccharum*, Marsh.) tree crown structure to competition in pure versus mixed stands. *For Ecol Manag*, 374:20-32.

Pretzsch H, Biber P. 2016. Tree species mixing can increase maximum stand density. *Can J For Res* 46:1179-93.

Pretzsch H, del Río M. 2020. Density regulation of mixed and mono-specific forest

stands as a continuum: a new concept based on species-specific coefficients for density equivalence and density modification. *Forestry* 93:1-15.

Seidel D, Hoffmann N, Ehbrecht M, Juchheim J, Ammer C. 2015. How neighborhood affects tree diameter increment— New insights from terrestrial laser scanning and some methodical considerations. *For Ecol Manag*, 336: 119-28.

Weng PW, Tsai BW. 2006. Spatial dispersion index: old conception, new formula. *Journal of Taiwan Geogr Inf Sci* 4:1-12.

Wu HP. 2001. Work study on thinning of *Cryptomeria* plantations in Hsin-chu forest district. A Thesis Presented to the Faculty of the Graduate Institute of Forestry National Taiwan University in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Science. 99 p.

Yen TM. 1993. Studies on the effects of growth for *Chamaecyparis formosensis* plantations by different thinning intensity. Department of Forestry, National Chung-Hsing University Master Thesis. 77 p.

Zeide B. 2001. Thinning and growth: a full turnaround. *J For* 99:20-5.