

NDVI 推估台灣森林葉面積指數之可行性評估

張仲鈞⁽¹⁾ 張勵婉⁽²⁾ 尤子豪⁽¹⁾ 許愷岐⁽¹⁾ 宋國彰^{(3)*}

摘要

¹不少國外研究早已確定植生的葉面積指數(leaf area index, LAI)與常態化差異植生指標(normalized difference vegetation index, NDVI)有高度相關，因此 NDVI 被廣泛應用在估算大面積地區的 LAI。然而這些國外研究的對象多是物種多樣性低的森林。近年來，無人機(unmanned aerial vehicle)技術的發展，讓研究人員可輕易取得及時且高解析度的空拍影像。本研究主要目的在於確認是否能利用無人機所得的高解析度 NDVI 來推估高物種多樣性森林的 LAI。研究樣區有兩處，一是國立中興大學占地 1.2 ha 且種植 10 多種針葉樹種的校園森林樣區(簡稱為校園樣區)；二是位於台灣南投 25 ha 且有 144 種樹種的蓮華池森林動態樣區(簡稱為森林樣區)。在近一年的期間，對這兩個樣區各進行三次實驗。每次實驗中，在校園與森林樣區內的固定取樣點(各 19 與 26 個)，以半球面攝影技術拍攝樹冠照片，以測量 LAI。同時以無人機上的多光譜波段相機拍攝多張空拍照片，最後處理成 NDVI 正射圖。結果顯示，不論是校園樣區與森林樣區，都無法全部實驗都成功，但都至少有一次成功的實驗。因此確定，高物種多樣性森林的 LAI 仍可用 NDVI 來推估，但不是所有透過無人機技術所獲得 NDVI 正射圖都適合用來推估 LAI。而無人機技術所產生的 NDVI 正射圖能否有用來推估 LAI，其關鍵在於 NDVI 正射圖是否正確地拼貼在一起。

(**關鍵詞**：半球面攝影；葉面積指數；多光譜相機；常態化差異植生指標；無人機)

Feasibility evaluation of using NDVI to estimate the leaf area index for Taiwan forests

Chung-Chun Chang⁽¹⁾ *Li-Wan Chang*⁽²⁾ *Tzu-Hao Yu*⁽¹⁾ *Kai-Chi Hsu*⁽¹⁾
Guo-Zhang Michael Song^{(3)*}

Master student⁽¹⁾, Assistant professor⁽³⁾, Department of Soil and Water Conservation, National Chung Hsing University, 402, Taichung, Taiwan

Associate researcher⁽²⁾, Taiwan Forestry Research Institute, Council of Agriculture, Executive Yuan, Taiwan

ABSTRACT

⁽¹⁾國立中興大學水土保持系 碩士

⁽²⁾行政院農業委員會林業試驗所 副研究員

⁽³⁾國立中興大學水土保持系 助理教授 *通訊作者 e-mail：mikesong@nchu.edu.tw

Normalized difference vegetation index (NDVI) is widely used to estimate leaf area index (LAI) for the vegetation of large areas because numerous foreign studies have shown that NDVI is highly correlated with LAI. Nevertheless, most studied objects of these studies are low species-diversity forests. In recent years, the development of unmanned aerial vehicle (UAV) technology enables researchers to acquire real-time and high-resolution aerial images. The main purpose of the present study was to confirm whether NDVI orthographic images generated with the UAV technique can be used to estimate LAI for forests with high species diversity. One of the two study sites was the 1.2-ha campus plantation (hereafter campus plot) located in National Chung Hsing University, in which there were more than 10 coniferous species. The other was the 25-ha Lienhuachih Forest Dynamics Plot (forest plot) in central Taiwan, which was a naturally-regenerated broad-leaved forest harboring 144 tree species. In a period of nearly one year, three image acquisition experiments were conducted for each of these two plots. In every experiment, canopy photographs were taken with the technique of hemispherical photography for every sample location in the plots (19 and 26 sample locations respectively for the campus and forest plots). Aerial photographs were taken simultaneously with multi-spectral band cameras mounted on unmanned aerial vehicles (UAVs). These aerial photographs were processed to NDVI orthographic images. Results showed that the significant correlation between LAI and NDVI were found in at least one experiment for the two plots. The present study confirmed that NDVI can be used to estimate LAI for high species-diversity forests, but not all NDVIs generated with the UAV technique are suitable for the LAI estimation. The approach of using UAV-generated NDVI to estimate LAI hinges on whether NDVI orthographic images are correctly stitched together.

(Key Words: hemispherical photography; LAI; multispectral camera; NDVI; unmanned aerial vehicle)

前言

樹木的樹冠在降低土壤沖蝕上扮演著重要的角色。樹冠的葉子能吸收雨滴對地表土壤的直接撞擊，也能將雨水留在葉面上(截留作用)(Carlyle-Moses and Gash, 2011)，減少地表逕流，進而降低雨水對土壤所造成的沖蝕(Norris, 2008; Levia et al., 2011)。因此樹葉的總面積是量化樹木在土壤沖蝕效應的指標(Zhang et al., 2011)。某一地區森林的葉子總

面積通常是以葉面積指數(leaf area index, LAI)來量化。LAI 是單位地表面積上所有葉片總面積的一半(Jonckheere et al., 2004)。上面定義中「一半」的來由是，一片葉子都會有葉上與葉下表面，而大部分的 LAI 測量方法(例如，半球面攝影 hemispherical photography, 又稱魚眼攝影)只測量葉子的某一表面。因此如果一塊 1.5 ha 森林的 LAI 是 3，那表示那塊森林的葉子總面積是 6 ha。由於葉子是植物行光合作用的器官，因此 LAI 也是常用來

量化某一地區植被的生產力(Watson, 1947)。

傳統地面測量 LAI 的方法不適用於大面積的植被，而遙測技術可滿足大面積植被 LAI 估算的需求。傳統地面測量 LAI 方法方式可分為直接與間接測量方法。直接測量方法是將葉子一一採下後，測量(主要是用掃描方式)所有葉子的面積 (Jonckheere et al., 2004)。這方法雖然最準確，但也最耗時，而且會傷害到植物。後續發展的間接測量方法(如半球面攝影)，會先對測量對象拍照，分析影像後，估算出 LAI (Jonckheere et al., 2004)。比起直接測量方法，雖然間接測量方法的準確度較低，但省時且不會傷害到植物，反而是目前常用的地面測量方法(Jonckheere et al., 2004)。然而既使是用間接地面方法測量一大塊森林的 LAI，依然是非常耗時，因為必須帶儀器走遍整個森林。因此地面測量方法不適用於大面積地區的 LAI 測量。由於 LAI 與植物對某些波長光線的反射率有顯著相關，晚近出現的遙測技術，才讓研究人員得以測量大面積地區的 LAI。

植物對於某些波長光線的反射率不同於其他地表物體(如岩石、水體)。遙測技術常將這類波長波段的光線反射率，透過特定公式，換算出可以量化植被特性的指數，通稱為植生指數(vegetation index)。例如，常用的常態化差異植生指數 (normalized difference vegetation index, NDVI)就是用地表對紅光 (red light; 波長介於 580-680 nm)與近紅外光 (near-infrared light; 波長介於 730-1100 nm)的反射率，透過公式($NDVI=(N-R)/(N+R)$), N 與 R 為近紅外光與紅光的反射率(Rouse et al., 1974; Tarpley et al., 1984)，所算出的植生指數。NDVI 的值會介於-1 到 1 間，且地表的植

被覆蓋率越高或越健康，NDVI 值會越接近 1。植物的葉綠素會吸收紅光但不吸收近紅外光，因此與其他物體相較下，植物的健康葉子對紅光的反射率低，但對近紅外光的反射率是差不多的(圖 1)。NDVI 就是利用植物與其他物體對這兩種光反射率的差異，透過公式的計算，量化植被的特性(如覆蓋度或健康程度)。目前遙測技術中，已有許多量化植被的植生指數，其表現不比 NDVI 差(Jiang et al., 2019)。雖然如此，這研究將著重在 LAI 與 NDVI 間的相關分析，因為無人機技術中，NDVI 是最容易收集到的植生指數(Hassan et al., 2019)。

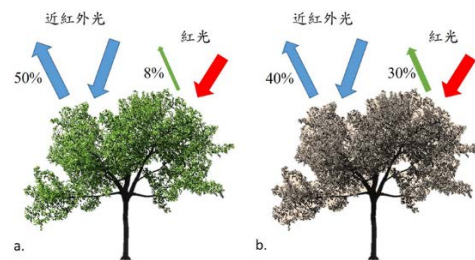


圖 1 NDVI 計算圖示。(a) NDVI 為 0.72 的健康植物；(b) NDVI 為 0.14 的不健康植物。

Figure 1 An example for NDVI calculation. (a) A healthy plant with NDVI of 0.72; (b) an unhealthy plant with NDVI of 0.14.

許多國外研究已確定 LAI 與 NDVI 間有高度相關(Carlson and Ripley, 1997; Pontailier et al., 2003; Heiskanen, 2006)，因此在建立兩者的迴歸公式後，可以用遙測所得的 NDVI 正射圖回推植被的 LAI。這個方法讓研究人員得以在短時間內獲得大面積地區的 LAI。然而，與台灣的亞熱帶森林相較下，國外所研究的森林的物種多樣性與樹冠分層數相對低

(Carlson and Ripley, 1997; Pontauiller et al., 2003; Heiskanen, 2006)。在臺灣森林的物種組成與結構相對複雜的情況下, LAI 與 NDVI 間是否有顯著相關, 仍待進一步的研究才能確定。

過去的 NDVI 正射圖的主要來源是衛星影像, 而目前則可用無人機(unmanned aerial vehicle, UAV)掛載特殊光譜波段相機獲得。由於近年來, 無人機軟硬體技術發展迅速, 硬體日趨平價, 加上所獲得的 NDVI 正射圖解析度高且即時, 無人機技術已是獲得 NDVI 正射圖的重要方法(Hashimoto et al., 2019; Hassan et al., 2019)。雖然如此, 與衛星影像相較之下, 無人機技術所獲得影像的品質會因時間與地點而異。主要原因是, 無人機技術必須要拍攝多張照片後, 經過拼接才能獲得大面積地區的正射影像。而在照片拍攝的過程中, 光源(太陽光)的質與量難免會有些變化。因此即使被攝物體表面的反光特性不變, 不同照片所記錄的光線反射率會隨太陽光質量的變化而異, 最終導致大張正射圖中各處的影像品質不一致的問題。因此, 到底無人機技術所獲得的 NDVI 正射圖是否能用於 LAI 的推估, 仍待確定。

本研究最終的目的是, 利用無人機搭載特殊光譜相機的技術, 在短時間內獲得大面積植被的 LAI。本研究將回答以下兩個問題: 1) 在高物種多樣性森林中, LAI 與 NDVI 是否有顯著相關? 2) 以無人機技術所獲得 NDVI 正射圖, 是否能用來推估 LAI?

研究方法與材料

本研究第一個樣區位於臺中市國立中興

大學校園中大門口西側的針葉林。此林於西元 1973 至 1974 年栽種而成, 今日稱「黑森林」。本研究在黑森林裡內規劃一處東西向長 120 m, 南北向寬 100 m 的矩形樣區(1.2 ha), 簡稱為校園樣區(圖 2)。校園樣區又進一步劃分成 $10 \times 10 \text{ m}^2$ 的小樣區, 總計有 120 個小樣區。並於 2018 年六月, 針對校園樣區進行樹木調查, 記錄所有胸高直徑(diameter at breast height, DBH)大於 1 cm 的喬木胸高直徑與所在位置。經調查後, 樣區內絕大部分由針葉樹種組成(張仲鈞, 2019)。第二個研究區域位於台灣中部南投縣魚池鄉, 由林業試驗所管理的蓮華池森林動態樣區(簡稱森林樣區)。此樣區面積為 25 ha (南北向長 500 m, 東西向寬 500 m), 海拔在 667 m 至 845 m 之間, 平均坡度為 35.3° (Chang et al., 2012)。森林樣區內有 150,000 多棵胸高直徑大於 1 cm 的木本植物, 樹種多達 144 種 (Chang et al., 2012)。

在校園和森林兩個樣區內分別設置有 19 和 26 個取樣點, 每一取樣點間彼此間距至少 20 m (圖 2)。每一次野外實驗都會在這些取樣點距地高度 1.3m 處對著樹冠進行半球面攝影。在 2018 年 6 月到 2019 年 5 月間, 校園和森林樣區都各進行了三次實驗(表 1)。使用儀器為 Nikon D5000 相機搭配 180° 視角的 SIGMA 4.5mm F2.8 EX DC HSM 魚眼鏡頭。拍攝過程中, 為避免過強的太陽光照亮部分葉子, 而導致這些葉子被誤判成天空, 因此總是在太陽處在低仰角處(清晨或黃昏)或天空雲層足以遮擋陽光直射的陰天下進行。每張照片都是使用最佳的方法來曝光, 也就是, 曝光值是即時在森林外地區對著天空測量得來的(Zhang et al., 2005; Song et al., 2014)。所得到的照片, 以 Gap Light

Analyzer 程式(Frazer et al., 1999)進行分析，計算出各取樣點的 LAI 與冠層開闊度 (canopy openness)。為了避免將樣區旁建築物也被計算成樹冠，LAI 分析時，並不包含圓形影像最外圈的部分(與天頂(zenith)夾角 72° 至 90° 間的影像)，也就是去掉最接近地平線的部分。

每一次野外實驗中，空拍會在進行半球面攝影的同一星期內完成。所使用的無人機為 DJI Phantom 3 Standard(深圳，中國)，多光譜相機為平價的 Survey3W Camera - Red+Green+NIR 及 Survey3W Camera - Orange+Cyan+NIR (MAPIR, San Diego, CA, USA)。這兩款相機的畫素皆為 1.2 千萬，水平視角為 87° 。由於前者在 2018 年 10 月的失事中遺失，且比起前者，後者有突顯植被與非植被區界線的優點

(<https://www.mapir.camera/pages/ocn-filter-improves-contrast-compared-to-rgn-filter>, 2019/07/01)，因此在實驗中途換成後者。為了讓相鄰照片的影像重疊率不低於 70%，空拍的飛行路線以 Litchi (UK) app 規劃。校園與森林樣區的拍攝高度各為離地 80 m 與 100 m。每次空拍前，都會拍攝反射校準板(MAPIR Camera Reflectance Calibration Ground Target Package (V2))，以校準對後續影像的反射率。整個空拍過程，每處的照片同時以 JPG 與 RAW 檔的格式儲存於記憶卡。事後，再以 MAPIR 提供的軟體 MAPIR Camera Control (MCC)，對 RAW 檔進行反射校準，再把 RAW 檔轉換成 TIFF 檔，同時將 JPG 裡的檔案資訊(拍攝時間、高度、光圈、快門和經緯度等)寫入 TIFF 檔。校園樣區與森林樣區各設了 4 個與

5 個地面控制點。

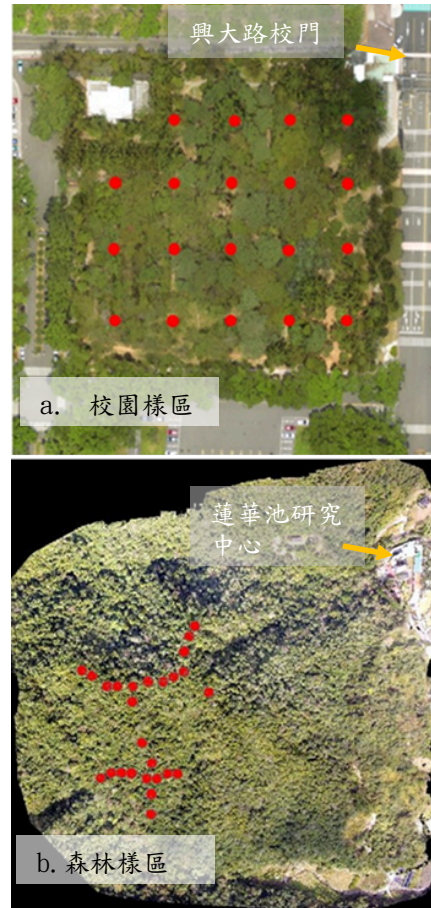


圖 2 (a)校園及(b)森林樣區的樹冠魚眼照片
拍攝地點

Figure 2 Sample locations for canopy
fisheye photographs in the campus and
forest plots

這些地面控制點的 Global Positioning System (GPS)點位，是在 2018 年 9 月 20 日利用 STONEX S3 GNSS Receiver (Milan, Italy) 透過接收衛星訊號量測而得。一張張的 TIFF 檔配合控制點點位，用 Pix4Dmapper 軟體 (Lausanne, Switzerland) 拼接成正射圖。之後以圖中的兩個特定光譜波段(紅光與近紅外光，

或橙光與近紅外光)進行運算，生成 NDVI 正射圖。利用 ArcGIS 軟體 (Environmental Systems Research Institute, Redlands, California, United States)以每個地面取樣點為中心，擷取出所需網格大小 (10 m、20 m 和

40 m)中的 NDVI 值。

LAI 與 NDVI 的相關分析與迴歸分析，是透過 PAST (Hammer et al., 2001)及 R (R Core Team, 2014)軟體完成。

表 1 NDVI 收集的條件與 LAI 與 NDVI 間相關程度。

Table 1 Conditions for NDVI collection and the LAI-NDVI correlations

地點	日期	拍攝時間	光線狀況	相機型號	NDVI 收集的條件			LAI 與 NDVI 間相關程度
					距地最小距離 (m)	照片張數	照片拍攝水平間距(m)	
校園樣區	2018.06.04	11:20-11:30	晴天	RGN	80	51	16.0	顯著
	2019.02.25	10:50-11:00	晴天	OCN	80	64	13.3	顯著
	2019.05.08	10:30-10:40	陰天	OCN	80	59	13.9	不顯著
森林樣區	2018.10.07	16:45-17:20	陰晴	RGN	100	182	31.9	不顯著
	2019.01.31	12:00-12:30	晴天	OCN	100	181	31.9	不顯著
						505	平均 14.8	顯著
						404	平均 17.3	顯著
	2019.05.04	11:00-12:00	陰天	OCN	100	303	平均 23.1	顯著
					202	平均 34.7	顯著	

結果

以 2018 年 6 月 4 日於校園樣區第一次魚眼照片所求得之 LAI 和樹冠破空度 (canopy openness)與不同網格大小(10 m、20 m 和 40 m)獲取的 NDVI 做相關與迴歸分析。結果可以看出，不論是 LAI 或樹冠破空度，用 20 m 網格大小時，Pearson correlation test 的 P-value 最低，且迴歸分析的 R² 最高 (表 2)。也就是說，20 m 網格大小最適用於 LAI 與 NDVI 的迴歸分析。因此本研究接下來的部分都是以 20 m 網格大小進行分析。雖然三次蒐集資料間隔長達近一年，但三次的 LAI 做兩兩相關性分析後，在校園樣區最

低的相關性仍高達 0.91 (P<0.001) (圖 3)，而森林樣區相關性最低仍有 0.80 (P<0.001) (圖 4)。與 LAI 相較之下，不只不同日期的 NDVI 相關性低，甚至出現不合理的負值(圖 3 與圖 4)。

表 2 NDVI 在不同網格大小下，與 LAI 及樹冠破空度之相關程度

Table 2 The LAI-NDVI and canopy openness-NDVI correlations under different window sizes of NDVI.

NDVI 網格大小(m)	LAI 與 NDVI 間		樹冠破空度與 NDVI 間	
	R ²	P-value	R ²	P-value
10	0.321	0.011	0.450	0.002
20	0.371	0.006	0.489	0.001
40	0.254	0.027	0.329	0.010

校園樣區的 LAI 與 NDVI 相關分析中，在除了 2019 年 5 月那次的 NDVI 外，其他兩次的 NDVI 與三次的 LAI 都有顯著的相關（圖 3）。而森林樣區只有在 2019 年 5 月那次的 LAI 與 NDVI 有出現顯著的相關（圖 4）。雖然森林樣區的三次實驗中，只有一次出現顯著相關，但這次的相關程度卻是六次實驗中最高的（ r 值最高為 0.75）（圖 3 與圖 4）。由此可確定，既使對象是物種多樣性高的闊葉林，仍可用 NDVI 來推估 LAI。

為了確定照片張數（影像重疊率）是否影響到 LAI 與 NDVI 間的相關性，我們將 2019 年 5 月所拍攝 505 張空拍照片，以每次減少 101 張的方式，產生了另外三組照片（分別是 404、303 與 202 張）後（表 1）。再用軟體拼接這四組照片，最後製作出四張 NDVI 正射圖。結果顯示，這四組正射圖在 26 個取樣點的 NDVI 值有高度的相關（相關係數 $r \geq 0.91$ ， $P < 0.001$ ），而且這四組 NDVI 數據與三次實驗所測得的 LAI 也有一定程度的相關（相關係數 $r \geq 0.55$ ， $P < 0.01$ ）（圖 4）。由這兩個結果確定，既使照片張數少到 202 張程度的影像重疊率下，LAI 與 NDVI 間的仍有相關。

討論

1. 影響 LAI 與 NDVI 相關性的可能原因

校園樣區與森林樣區的結果都顯示，三次不同日期測得的 LAI，彼此的相關性都很高（相關係數 $r \geq 0.8$ ， $P < 0.001$ ）（圖 3 與圖 4）。不同時間點測得的 LAI 有如此高度的相關，主要可以歸因於 2018 年整年並無任何颱風侵襲台灣。校園樣區內所生長的幾乎都是不會有季節性落葉的針葉常綠樹種（張仲鈞，2019）

；相對的，森林樣區內裡不乏有落葉樹種（如白柏）（Chang et al., 2012），造成 LAI 會因季節不同而有較大的變化。因此森林樣區 LAI 相關性低於校園樣區的。

六次實驗中，有三次 LAI 與 NDVI 間的相關是不顯著的（表 1、圖 3 與圖 4），這可歸因於 NDVI 正射圖的製作出問題。由於利用半球面攝影估算 LAI 的方法已非常成熟，加上最可能影響 LAI 的因子（照片曝光度），已用最好的方法（以對著陰天天空所測得的曝光值來曝光）加以控制（Zhang et al., 2005; Song et al., 2014），因此 LAI 測量出錯的可能性很低。而在校園與森林樣區，三次不同時間點所測得的 LAI 間都出現高度相關，這也間接證明了 LAI 測量的正確性（圖 3 與圖 4）。相對的，在同個樣區不同時間點所得到 NDVI 間的相關性卻很低（圖 3 與圖 4）。綜合以上結果，部分實驗中，LAI 與 NDVI 間的相關性低，其問題應該是出自於 NDVI，而不是 LAI。因此以下針對可能造成 NDVI 出錯的四項原因（晴陰天光線差異、兩款相機記錄的光譜波段差異、地表植物提高樹葉稀疏處的 NDVI 值及 NDVI 正射圖的拼接正確性）進行討論。

可能原因 1. 晴陰天的光線差異：NDVI 是被動式的遙測方式，其光源是直接或間接來自太陽。直射光是直接來自於太陽此發光星球所發散的光線。這類光線的行進方向很一致。而漫射光是陽光透過雲層的光線，以及由天空或其他物體所反射的光線。所以這類光線到達地表時，沒有一致的入射角度。晴天時（主要光源是直射光），物體表面亮度會因有無受直射光照射而有強烈反差，通常未受直射光照射處會明顯地陰暗許多。而陰天時主要光線是漫射光。在漫射光下，一個立體的物

體表面，會因光線來自於四面八方的特性，而不會發生陰影。除了入射角度的差異外，直射光與漫射光的光質也有所不同。比起前者，後者紅光與近紅外光的量都較少(Jiang et al.，

2019)。然而，對於本研究而言，晴陰天的光線質與量的差異不是影響到 LAI 與 NDVI 間相關的主要因子，因為晴陰天都各有出現顯著與不顯著的結果(表 1)。

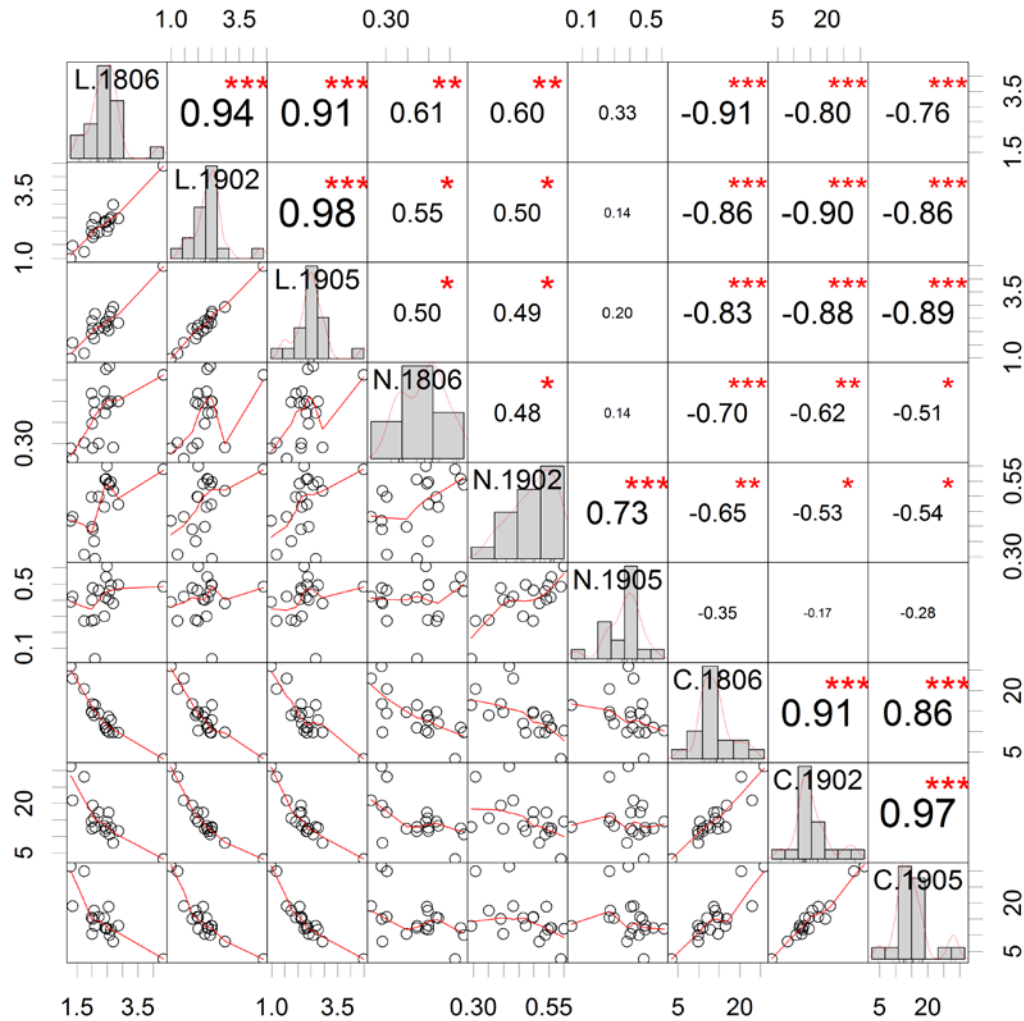


圖 3 校園樣區 LAI 與 NDVI 在不同研究日期的相關程度。圖中英文字母 L 是 LAI 葉面積指數，N 是 NDVI 常態化差異植生指標，C 是 canopy openness 樹冠開闊度(%)；四碼數字是年與月份(如 1905 表示 2019 年五月)。方格內的數字為 Spearman 相關係數 r 。* $p < 0.05$ 、** $p < 0.01$ 與 *** $p < 0.001$ 。

Figure 3 The correlations between LAI and NDVI acquired in different dates in the campus

plot. L represents LAI, N represents NDVI and C represents canopy openness (%); the four digit numbers represent the year and month (e.g. 1902 represent Feb. of 2019). Values in grids are correlation coefficient r . * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$.

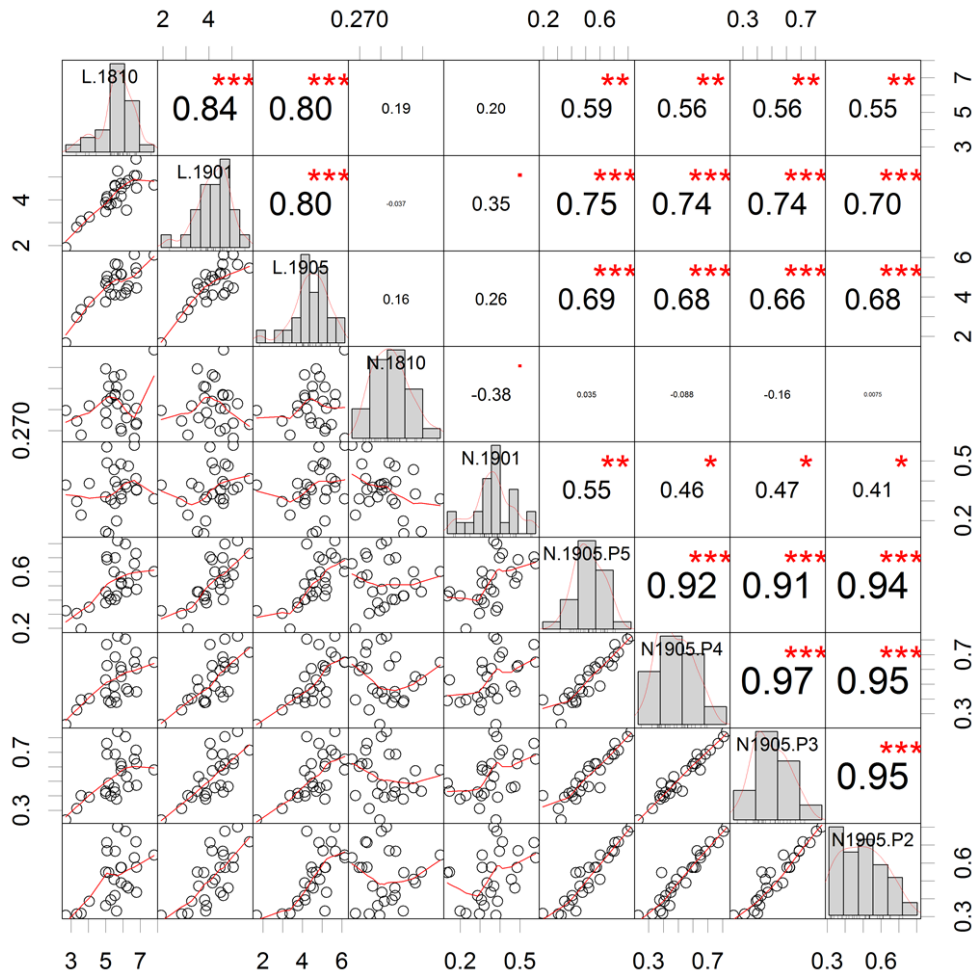


圖 4 森林樣區 LAI 與 NDVI 在不同研究日期的相關程度。圖中英文字母 L 是 LAI 葉面積指數，N 是 NDVI 常態化差異植生指標，C 是 canopy openness 樹冠開闊度(%)；四碼數字是年與月份(如 1905 表示 2019 年五月)；P2、P3...P5 則表示在製作 NDVI 正射圖時，各使用了 200、300...500 多張空拍照片。方格內的數字為 Spearman 相關係數 r 。* $p < 0.05$ 、** $p < 0.01$ 與 *** $p < 0.001$ 。

Figure 4 The correlations between LAI and NDVI acquired in different dates in the forest plot. L represents LAI, N represents NDVI and C represents canopy openness (%); the four digit

numbers represent the year and month (e.g. 1902 represent Feb. of 2019) ; P2、P3…P5 indicate 200, 300…500 aerial photographs were used respectively for constructing NDVI images. Values in grids are correlation coefficient r . * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$.

可能原因 2. 兩款相機記錄的光譜波段差異：本研究使用了兩款相機。2018 年所使用 RGN 相機是記錄紅、綠與近紅外光，而 2019 年使用 OCN 相機則是記錄橙、青與近紅外光。以 OCN 相機所得到的影像，是使用橙光波段代替傳統的紅光波段，得到 NDVI 正射圖。雖然橙光的波長異於紅光的，但使用這兩款相機時，都各有出現 LAI 與 NDVI 間顯著及不顯著結果(表 1)。因此相機記錄的光譜波段差異也不是決定 LAI 與 NDVI 間相關性的因子。

可能原因 3. 地表植物提高樹葉稀疏處的 NDVI 值：魚眼照片是在距地 1.3m 高處往上拍攝，因此低於此拍攝高度的地表植被並不會納入 LAI 的估算。相對的，從空中往下拍攝的 NDVI 照片可以同時記錄到樹冠及樹冠間隙下方的地表植被。因為這兩者紀錄的對象有差異，因而可能會影響 LAI 與 NDVI 間的相關性。在兩樣區的前兩次資料蒐集與分析結果中，顯示在校園樣區是可以利用本研究的方法找出合適 LAI 與 NDVI 間迴歸公式，而在森林樣區則無法找出相關(表 1、圖 3 與圖 4)。所以當初以為這是地面有無茂密地表植物所造成的結果(Chang et al., 2019)。Chang et al. (2019) 認為，在校園樣區中，因林下嚴重人為干擾(如鋪碎木步道)造成地表沒有植被。這種狀況下，當上方沒有樹冠稀疏時(也就是 LAI 低時)，這區會因沒有任何植被吸收紅光(也就是大部分紅光被反射到空中)，造成的 NDVI 值偏低，因此可反映出 LAI 與 NDVI 之間的相關。但在森林樣區中，則因樹

冠層間隙底下仍有茂盛的地表植被，也就是說樹冠稀疏地區，還是有地表植被吸收紅光，造成 NDVI 值還是維持在很高的程度。因此地被植物的干擾，會讓森林地區的 LAI 與 NDVI 之間沒有顯著相關(Heiskanen, 2006; Chang et al., 2019)。然而森林樣區的第三次實驗結果(2019 年 5 月)中駁斥了 Chang et al. (2019)的論點，因為那次實驗 LAI 與 NDVI 間出現了的顯著相關(圖 4)。因此，決定 LAI 與 NDVI 間相關性的關鍵因子並不是地被植物。

可能原因 4. NDVI 正射圖的拼接正確性：本研究中，三次實驗 LAI 與 NDVI 間相關性很低的結果，很可能是照片沒有正確地拼接成正射圖所導致。一張無人機所收集到的空拍照片通常不足以涵蓋整個調查區域。因此需要拍攝多張照片，經過拼接才能生成一張涵蓋整個區域的正射圖。而在這研究中，照片張數太少(影像重疊率太低)、影像拼接參考點太少及紅光與近紅外光光譜影像反差太小，都可能導致正射圖拼接的錯誤。因此以下再細分成三點討論。

可能原因 4-1. 照片張數太少(影像重疊率太低)：正射圖是否正確拼接與影像重疊率有很大的關係(Aber et al., 2010)。通常是重疊率越高，正射圖拼接的正確率也越高(Aber et al., 2010)。2019 年 5 月的第三次森林樣區實驗中，因為添購了額外無人機電池，讓空拍時間得以加長，也使照片數量大幅度地從先前的 180 幾張增加到 500 多張(表 1)。而這次也是三次森林樣區實驗中，唯一一次出現 LAI 與 NDVI 間的顯著相關。原先以為是照片張數的

大幅增加，提高影像重疊率，讓 NDVI 正射圖得以正確拼接，而最終導致 LAI 與 NDVI 間的相關顯著。但在將照片拼接張數從 505 張，分三個階段，每階段抽掉 101 張，直到降至 202 多張時(也就是接近之前相關性不顯著時的 180 多張照片)，卻發現每個階段所獲得的 NDVI 都與 LAI 相關性顯著(表 1)。這些結果顯示，200 張左右的照片仍能足夠正確拼接出 NDVI 的正射圖。因此照片張數也不是影響本研究 LAI 與 NDVI 相關性的因子。

可能原因 4-2. 影像拼接參考點太少：排除上面幾個原因的可能性後，影像拼接參考點的多寡很可能是決定本研究 LAI 與 NDVI 間是否相關的主要因子。當空拍照片要拼接成正射圖時，拼接軟體會找出幾張相鄰照片中同時記錄到某幾個物體，以這些物體影像當成是參考點，將這些照片拼接在一起(Aber et al., 2010)。然而森林中大部分樹冠外型變異不大，加上紅光與近紅外光光譜所記錄的影像往往明暗反差不大(圖 5b)，因此可用於照片拼接的參考點不多。根據過去的經驗，常常被拼接軟體自動挑出的影像參考點是枯木或落葉的樹枝，但這類物體在本研究的校園與森林樣區很少。另一個森林影像參考點少的間接證據是，我們過去的經驗顯示，即使照片的重疊度相同的情況下，森林可見光正射圖的拼接正確性及立體點雲圖的點數往往都不如有建築物分布的地區。森林樣區的 2019 年 5 月實驗中，出現 LAI 與 NDVI 間高度相關的結果(圖 4)，這很可能是因為影像拼接參考點突然增加。在紅光與近紅外光光譜影像中，花的色調淺於綠葉的，因此開花的樹冠是很好的影像參考點(圖 5b)。2019 年 5 月剛好是遇上森林樣區大量開花的季節(圖 5a)，這讓

影像拼接參考點的增加，提高了正射圖拼接的正確性，最終提高了 LAI 與 NDVI 間的相關性。

可能原因 4-3. 紅光與近紅外光光譜影像反差太小：這個因子也決定 LAI 與 NDVI 間相關性的另一個重要因子。台灣森林中大部分樹冠是綠的，用紅光與近紅外光光譜所記錄的影像，其影像反差很小(圖 5)。影像反差小會衍生三個問題，而導致正射圖拼接錯誤。第一，反差小的影像中，可用的影像參考點也就少，因此提高了照片錯誤拼接的機率。第二，即使正射圖拼接出來，也因為影像反差小，我們難以用肉眼檢視出正射圖的拼接是否出錯。第三，我們也曾試圖透過人工訂定影像參考點的方式，來提高正射圖拼接的正確性，但都因為影像反差小，無法用肉眼找到參考點而作罷。

總之，不是所有無人機技術所得的 NDVI 正射圖都能用來推估 LAI。而 NDVI 正射圖拼接的正確程度是決定這項技術能否能用的關鍵。

2. 為何 NDVI 推估 LAI 的方法，也可適用於生物多樣性高且 LAI 高的闊葉林？

過去研究都指出，森林的 LAI 一旦高於某一定值(通常是 4)，即使 LAI 增加了，NDVI 的值不會再隨之增加(Carlson and Ripley, 1997; Hashimoto et al., 2019)。但我們的結果卻顯示，即使森林樣區有過半數的 LAI 超過 4，LAI 與 NDVI 間仍有顯著的相關(圖 4)。本研究結果之所以會不同於過去的，我們將之歸因於，針葉林與闊葉林中，決定 LAI 與 NDVI 大小的因子是不同(表 3)。之前研究的對象多為針葉林，其 LAI 與植株密度(=相鄰

樹木間間隔呈正相關(Eklundh et al., 2001)。而這類森林地表的草本植物覆蓋度低(有些是可以看裸露地表土壤)，當植株密度越高 (= 樹木間隔越小時)，LAI 就越高，也因為越多裸露地表被樹冠遮蔽，NDVI 也就越高。但植株密度高過某一程度時(例如 LAI 到 4 時(Carlson and Ripley, 1997))，地表就會完全被

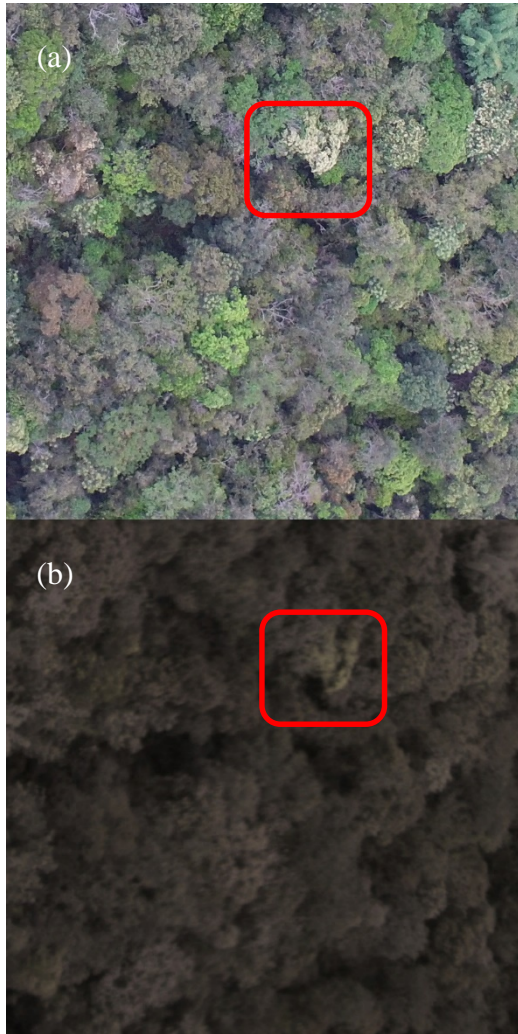


圖 5 (a)可見光影像及(b)紅光和近紅外光影像比對。這兩張照片都是 2019 年 5 月 4 月攝於森林樣區。紅框中是開滿花的樹冠。

Figure 5 Comparison for (a) a visible-light

image and (b) a red near-infrared-light image. These two images were taken in the forest plot in May 4, 2019. The red squares mark a canopy covered by flowers.

樹冠遮蔽，造成 NDVI 不再隨著植株密度而增加。相對的，本研究中天然闊葉林的 LAI 是決定於森林垂直結構中樹冠的分層數量。森林最上層樹冠(林冠層)的高度越高時，下方出現的分層(如次林冠層、灌木層)就越多，LAI 就越大。我們推測 NDVI 與林冠層高度呈正相關，最終導致 LAI 既使大於 4，仍與 NDVI 相關(圖 4)。而 NDVI 之所以會與林冠高度呈正相關，可能與林隙(canopy gap)在森林林冠表面所造成的凹洞有關。林隙是由大樹死亡後，在森林林冠層所造成的破洞。少了林冠層的葉子，因此林隙區的 LAI 會較非林隙區低。也因此林隙區內樹冠高度是低於周遭非林隙區的。由高空中往下看，被非林隙區所包圍的林隙區看起來就像一個個凹洞。而林隙區對於紅光與近紅外光的反射率可能不同於非林隙區的，最終導致林隙區凹洞中的 NDVI 值低於非林隙區的來得低。這些種種因素最終讓 LAI 與 NDVI 間產生正相關。以上這些推論，仍待進一步的研究來證實。

表 3 影響針葉林與闊葉林 LAI 與 NDVI 的可能因子

Table 3 Factors influencing LAI and NDVI of coniferous and broad-leaved forests.

	針葉林	闊葉林
LAI	植株密度	樹冠層數
NDVI	裸露地表面積比例	林隙面積比例

3. 操作建議

之後若要將無人機獲得的 NDVI 運用在台灣這類高物種多樣性森林的 LAI 估算，依

本研究的結果及過去的野外經驗，有兩個重點建議。

建議 1. 增加影像拼接參考點或提高影像重疊度，以增加正射圖拼接的正確性。原則上，可以在 LAI 取樣點附近，設置地面控制點。這些明顯的地面控制點就可以增加影像拼接時的參考點。如果遇到森林太鬱閉，無處可設置地面控制點時，就要設法提高影像重疊度。增加影像重疊度的方法有兩種，一是空拍時的距地高度不變，但增加照片數量。這方法會花上更多空拍時間，因此適用於無人機的電池或燃料足夠時。第二種方法是照片數量不變，但提高空拍時的距地高度。依我們過去的經驗，使用第二種方法，不太會增加空拍所花費的時間，但增加正射圖拼接正確性的效果不亞於第一方法。第二種方法適用在無人機的電池或燃料受限，且不需要超高解析度影像時。依我們過去的經驗，使用 MAPIR Survey3W 系列的相機，在 200 m 距地高度所獲得的 NDVI 正射影像解析度(地面採樣距離 ground sampling distance 為 9.1 cm/ pixel)，就足夠用來做 LAI 的估算。

建議 2. 最好要為每次的實驗建立新的迴歸公式。可能受到空拍當時的光線(上面討論到的晴陰天光線差異)與葉綠素活性(受溫度與土壤水分影響)變化的影響，我們幾次不同實驗中所得的 NDVI 值域，彼此相差不小。因此將某次實驗所建立的 LAI 與 NDVI 迴歸公式套用到其他不同日期的實驗中，是不妥當的作法。不只是時間，LAI 與 NDVI 迴歸公式也會因實驗地點而異。因此我們建議，每次實驗中，在研究地區內至少取樣 10 個點，以地面方式的測量 LAI。而且最好能取樣到那個樣區的 LAI 極端值，也就是要測

量到樹冠很鬱閉及很稀疏地點的 LAI。用這些取樣點的 LAI 與 NDVI 建立迴歸公式後，再以整個地區的 NDVI 正射圖，搭配迴歸公式去推估出整個地區的 LAI。一旦這麼做，就可以避免迴歸公式因時間或地點不同，所造成的 LAI 推估失準的問題。

結論

1. NDVI 可用來推估高物種多樣性森林的 LAI。
2. 利用無人機搭配多光譜相機，所得到的高解析度 NDVI 正射圖是可以用來推估 LAI。但不是所有透過無人機技術所獲得 NDVI 正射圖都適合用來推估 LAI。
3. 本研究檢視了四項影響到 LAI 與 NDVI 間相關性的因子，包括地表的植物覆蓋度、晴陰天的光線差異、相機所記錄的光譜波段差異及 NDVI 正射圖的拼接正確性。而最後一項是決定 NDVI 正射圖能否用來推估 LAI 的關鍵因子。

誌謝

本研究由科技部計畫「複合式災害現場試驗監測與資料開放整合—子計畫：影響淺層崩塌之關鍵植生特性(II)」(MOST106-2625-M-005-009)之經費補助完成，在此致上誠摯的感謝。

參考文獻

1. 張仲鈞 (2019), 「常態化差異植生指數是否能用來推估高物種多樣性森林的葉面積指數?」, 國立中興大學水土保持

- 持學系碩士論文。
2. Aber, J.S., I. Marzloff and J. Ries (2010), *Small-Format Aerial Photography: Principles, techniques and geoscience applications*, Elsevier.
 3. Carlson, T.N. and D.A. Ripley (1997), "On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index", *Remote Sens. Environ.* 62(3): 241-52.
 4. Carlyle-Moses, D.E. and J.H.C. Gash (2011), Rainfall interception loss by forest canopies, In: Levia DF, Carlyle-Moses D and Tanaka T, editors. *Forest hydrology and biogeochemistry: Synthesis of past research and future directions*, Springer, Dordrecht ; New York.
 5. Chang, C.-C., G.-Z.M. Song, Y.-C. Chao, K.-C. Hsu, C.-W. Chen, H.-T. Lee and H.-Y. Hu (2019), Using normalized difference vegetation index to estimate leaf area index of forests doesn't work for sites where understory vegetation grow vigorously, In. *EGU General Assembly 2019*; 7-12 April; Vienna, Austria.
 6. Chang, L.-W., J.-L. Hwong, Y.-T. Chen, C.-Y. Yeh, H.-C. Lin, C.-C. Kuo, C.-C. Lin, I.-F. Sun, K.-C. Yang, Z.-S. Chen and H.-H. Wang (2012), *Lienhuachih subtropical evergreen broadleaf Forest Dynamics Plot: Tree species characteristics and distribution patterns*, Taiwan Forest Research Institute, Taipei.
 7. Eklundh, L., L. Harrie and A. Kuusk (2001), "Investigating relationships between Landsat ETM+ sensor data and leaf area index in a boreal conifer forest", *Remote Sens. Environ.* 78(3): 239-51.
 8. Frazer, G. W., C. D. Canham, and K. P. Lertzman. 1999. *Gap Light Analyzer (GLA), Version 2.0: Imaging software to extract canopy structure and gap light transmission indices from true-colour fisheye photographs*, users manual and program documentation.
 9. Hammer, Ø., D.A.T. Harper and P.D. Ryan (2001), "PAST: Paleontological statistics software package for education and data analysis", *Palaeontol. Electronica*(4): 9.
 10. Hashimoto, N., Y. Saito, M. Maki and K. Homma (2019), "Simulation of reflectance and vegetation indices for unmanned aerial vehicle (UAV) monitoring of paddy fields", *Remote Sensing* 11(18): 2119.
 11. Hassan, M.A., M. Yang, A. Rasheed, G. Yang, M. Reynolds, X. Xia, Y. Xiao and Z. He (2019), "A rapid monitoring of NDVI across the wheat growth cycle for grain yield prediction using a multi-spectral UAV platform", *Plant science* 282: 95-103.
 12. Heiskanen, J. (2006), "Estimating aboveground tree biomass and leaf area index in a mountain birch forest using ASTER satellite data", *Int. J. Remote Sens.* 27(6): 1135-58.
 13. Jiang, H., S. Wang, X. Cao, C. Yang, Z. Zhang and X. Wang (2019), "A shadow-eliminated vegetation index (SEVI) for removal of self and cast shadow effects on vegetation in rugged terrains", *International Journal of Digital Earth* 12(9): 1013-29.
 14. Jonckheere, I., S. Fleck, K. Nackaerts, B. Muys, P. Coppin, M. Weiss and F. Baret (2004), "Review of methods for in situ leaf

- area index determination - Part I. Theories, sensors and hemispherical photography", *Agric. For. Meteorol.* 121(1-2): 19-35.
15. Levia, D.F., D. Carlyle-Moses and T. Tanaka (2011), *Forest hydrology and biogeochemistry : Synthesis of past research and future directions*, Springer, Dordrecht ; New York.
 16. Norris, J.E. (2008), *Slope stability and erosion control : Ecotechnological solutions*, Springer, Dordrecht.
 17. Pontailier, J.-Y., G.J. Hymus and B.G. Drake (2003), "Estimation of leaf area index using ground-based remote sensed NDVI measurements: validation and comparison with two indirect techniques", *Canadian Journal of Remote Sensing: Journal canadien de télédétection* 29(3): 381-7.
 18. R Core Team (2014), *R: A language and environment for statistical computing*, R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
 19. Rouse, J.W., R.H. Haas, J.A. Schell and D.W. Deering (1974), *Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS*, In: Freden SC, Mercanti EP and Becker MA, editors. *Third Earth Resources Technology Satellite—1 Symposium*; Washington, D.C.: National Aeronautics and Space Administration. p.
 20. Song, G.-Z.M., D. Doley, D.J. Yates, K.-J. Chao and C.-F. Hsieh (2014), "Improving accuracy of canopy hemispherical photography by a constant threshold value derived from an unobscured overcast sky", *Can. J. For. Res.* 44(1): 17-27.
 21. Tarpley, J.D., S.R. Schneider and R.L. Money (1984), "Global Vegetation Indices from the NOAA-7 Meteorological Satellite", *Journal of Climate and Applied Meteorology* 23(3): 491-4.
 22. Watson, D.J. (1947), "Comparative physiological studies on the growth of field crops: I. Variation in net assimilation rate and leaf area between species and varieties, and within and between years", *Ann. Bot.* 11(41): 41-76.
 23. Zhang, W., D. Yu, X. Shi, H. Wang, Z. Gu, X. Zhang and M. Tan (2011), "The suitability of using leaf area index to quantify soil loss under vegetation cover", *Journal of Mountain Science* 8(4): 564-70.
 24. Zhang, Y.Q., J.M. Chen and J.R. Miller (2005), "Determining digital hemispherical photograph exposure for leaf area index estimation", *Agric. For. Meteorol.* 133(1-4): 166-81.

水土保持學報 50 (4): 2627–2642 (2020)

Journal of Soil and Water Conservation, 50 (4): 2627–2642 (2020)

109 年 7 月 27 日收稿

109 年 8 月 11 日修改

109 年 8 月 21 日接受