

應用大數據與環境指標探討氣候變遷下 台灣西南部海岸林帶變遷

APPLICATION OF BIG DATA AND ENVIRONMENTAL INDICATORS TO DISCUSS THE CHANGES
OF COASTAL FOREST BELTS IN SOUTHWESTERN TAIWAN UNDER CLIMATE CHANGE

國立宜蘭大學
森林暨自然資源學系
副教授

鍾智昕
Chih-Hsin Chung

國立屏東科技大學
水土保持系
助理教授

莊智瑋
Chih-Wei Chuang

林業試驗所
植物園組
副研究員

林煥宇
Huan-Yu Lin

德國地球科學研究中心
博士後研究員

楊啟見
Ci-Jian Yang

林業試驗所
集水區經營組
助理研究員

曾俊偉*
Chun-Wei Tseng

摘 要

海岸林具有防風、安定飛砂、減輕鹽霧侵蝕及保護農作物功能，是臺灣沿海地區抵抗天然災害之重要綠色防線，但受到生育地天然環境壓力、病蟲害及長期缺乏維護管理，逐漸呈現衰退現象，而林木天然更新不易，再加上人為干擾導致土壤鹽化，嚴重影響整體海岸林帶的環境保護功能。近年來因氣候變遷影響導致缺水與高溫日曬等環境壓力增強，更不利海岸林的生長，對海岸林的經營管理形成高難度挑戰，應透過科學方法，對海岸林應有的配置區位及其壓力來源予以釐清。本研究應用多時序衛星影像結合環境指標、氣候網格資料、IPCC 之 AR5 報告中之 RCP 情境及隨機森林模型，分析臺灣西南部之雲林縣、嘉義縣及臺南市的海岸林衰退及變遷原因並進行變遷趨勢模擬，探討氣候變遷對海岸林環境各層面的影響，提供擬訂因應策略之依據。研究結果顯示，3 縣市之海岸林帶面積均明顯不足，因應氣候變遷衝擊能力有限。以隨機森林模型推估結果，在考量人為與氣候因子模型中，NDBI 為最重要影響因子，而溫度與降雨是重要特徵因子。在 IPCC 之 AR5 中的 RCP 情境模擬中，模擬推估 2020 年至 2050 年之海岸林衰退及變遷結果，3 縣市總體的密生森林面積，在氣候變遷的狀態下是呈現增加趨勢，灌木、草生地或農作物面積則是呈現下降的趨勢。

關鍵詞：海岸林、氣候變遷、環境指標、氣候網格資料、隨機森林。

* 通訊作者，林業試驗所集水區經營組助理研究員
100051 臺北市中正區南海路 53 號，a1211@tfri.gov.tw

APPLICATION OF BIG DATA AND ENVIRONMENTAL INDICATORS TO DISCUSS THE CHANGES OF COASTAL FOREST BELTS IN SOUTHWESTERN TAIWAN UNDER CLIMATE CHANGE

Chih-Hsin Chung

National Ilan University
Department of Forestry and
Natural Resources

Chih-Wei Chuang

National Pingtung University of
Science and Technology
Department of Soil and Water
Conservation

Huan-Yu Lin

Taiwan Forestry Research
Institute
Division of Botanical Garden

Ci-Jian Yang

German Research Centre
for Geosciences

Chun-Wei Tseng*

Taiwan Forestry Research Institute
Division of Watershed Management

ABSTRACT

Coastal forest in Taiwan has functions of preventing wind, stabilizing sand, reducing salt fog erosion and protecting crops. Coastal forest is also an important “green defense line” against natural disasters in coastal areas. However, due to natural environmental stress, diseases and insect pests and lack of maintenance and management for while, coastal forest gradually decline, and natural regeneration of trees is not easy. Additionally, soil salinization caused by anthropogenic interference would affect the environmental protection of coastal forest belt. In recent years, due to climate change, the change in precipitation pattern and the increasing uncertainty in rainfall has led to the increase of environmental stress such as water shortage and high temperature and sun-exposure, which endamage to the growth of coastal forests and poses a difficult challenge to the management of coastal forests in various regions of Taiwan. Given this, it is necessary to clarify the proper allocation location and stress source of coastal forest through scientific methods. In this study, multi-temporal Landsat satellite images were used to identify coastal forest belts in three counties/cities in southwest Taiwan, such as Yunlin County, Chiayi County, and Tainan City. Combined with environmental indicators, gridded data of climate, RCP scenarios in AR5 in the , and Random Forest model, the causes for declining coastal forest were discussed To understand the uncertainty and far-reaching impact of climate change on coastal forest, we can also provide a phased response strategy, measures, and action plan. The results show that the area of coastal forest belts is insufficient in the study area, and the ability to cope with the impact of climate change is relatively limited. Based on the results of Random Forest model, NDBI is the most important controlling factor, and temperature and rainfall are important characteristic factors within the model for considering human and climate factors. Under the RCP scenario in AR5, the results showthat overall dense forest area of three counties/cities would increase, shrubs, grassland or crops would decrease from 2020 to 2050.

Keywords: Coastal forest, Climate change, Environmental indicator, Climate grid data, Random forest.

Chung, C.H., Chuang, C.W., Lin, H.Y., Yang, C.J., & Tseng, C.W.* (2022). “Application of big data and environmental indicators to discuss the changes of coastal forest belts in southwestern Taiwan under climate change.” *Journal of Taiwan Agricultural Engineering*, 68(3), 62-75. [https://doi.org/10.29974/JTAE.202209_68\(3\).0006](https://doi.org/10.29974/JTAE.202209_68(3).0006)

一、前言

臺灣位處近熱帶 (near tropical) 區域，土地範圍橫跨熱帶 (the tropics) 與亞熱帶 (the subtropics) 氣候區，四面環海，海岸線全長達 1,139 公里。因臺灣常年受季風及颱風的嚴重侵襲，海岸林即為保護沿海地區的第一道屏障，其具有防風定砂、減輕鹽霧侵蝕及保護農作物生產等功能，為減緩天然災害之重要綠色生物防線，經統計至 2019 年全台灣海岸林約 14,053 公頃 (林務局，2020)，約占全台灣面積 0.39 %。

由於海岸林生態環境特殊，生育地多屬貧瘠，且常遭受飛砂、強風、強日照、高鹽分及缺水等環境逆境 (environment stress) 影響，已不利於一般植物之生長 (陳財輝等，1990；鄧書麟、沈勇強，2006)，且海岸林之林地內欠缺枯落物的累積覆蓋，不易透過天然更新方式經營 (林睿思等，2009)；一般海岸林在成林 20-30 年時，應屬生長旺盛及良好狀態，但易受上述天然環境逆境影響，倘再遭受病蟲害及維護管理不佳時，將導致海岸林快速衰退，在衰退及天然更新不易的雙重衝擊下，海岸林帶將逐漸呈現破碎化及縮減情形，嚴重影響整體海岸林帶的環境保護功能，降低保護生活環境與維持農業生產的生態系統服務功能，難以達成海岸林永續經營之目標 (李祈德、林信輝，2015；鄧書麟、沈勇強，2006；鄧書麟等，2015)。

此外，人們為求經濟發展，常於沿海地區設立工業區及濱海遊樂區，再加上養殖業者超抽地下水，造成地層下陷，導致海水倒灌，致使土壤鹽化，危害林木生長，更造成海岸林帶枯死殆盡 (鄧書麟、沈勇強，2006；Chen *et al.*, 2021)。另因沿海地區多以養殖業及農業為主要經濟收入來源，部分海岸林土地常被變更為魚塢、農耕地、房舍等非林地使用，直接減少了海岸林的土地面積及帶寬，降低海岸林的保護功能 (李祈德、林信輝，2015)。因此，在自然及人為因素的雙重影響下，瞭解海岸林的環境影響因子及變遷熱點已是現今重要課題。

近年來，氣候變遷所引起極端氣候在臺灣及世界各地已造成嚴重災損，帶給生態棲地、社會經濟及民眾生命財產安全極大威脅，如何因應極端天候進行調適已成為國家安全重要議題。地球暖化所造成降水型態改變與不確定性，使得缺水與高溫日曬等天然環境逆境增強，更不利於海岸林生長，對臺灣各地區之海岸林經營管理形成高難度挑戰。因此，若能充分的瞭解海岸林生態系統與植生變遷情形，將有助海岸林永續經營。海岸林生長受到生育地地質、周遭植被資

源、氣候條件及人為干擾等諸多因素影響，需長期進行監測並掌握其變動趨勢。有鑒於此，本研究應用遙測影像及環境指標分析方法，對海岸林配置區位及其壓力來源進行釐清。

本研究使用 2000-2019 年多時序 Landsat 衛星影像萃取臺灣西南部地區雲林縣、嘉義縣及臺南市等 3 縣市海岸林分布，應用 NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)、NDMI (Normalized Difference Moisture Index)、NDBI (Normalized Difference Built-up Index) 及 NDWI (Normalized Difference Water Index) 等環境指標分析海岸林地景結構及時空變遷 (Morresi, D. *et al.*, 2019)，並整合機器學習之隨機森林及氣候網格資料推估影響海岸林帶生長之人為與氣象因子，最後加入氣候變遷下不同 RCP 情境進行模擬，期望能瞭解未來在極端氣候下海岸林變遷及熱點區位，希冀研究成果可供日後相關單位於海岸林帶區位營造及經營管理參考之用。

二、材料與方法

2.1 研究區域概況

本研究自內政部 TGOS (Taiwan Geospatial One Stop, TGOS) 平台取得 2017 年海岸線資料，以臺灣西南部之雲林縣、嘉義縣及臺南市海岸線為中心，東西各延伸 10 公里範圍作為研究區域 (圖 1)，西南部海岸地形構造屬於隆起地形，在氣候分區上屬於夏雨型氣候，呈現夏季多雨、冬季乾燥的副熱帶季風氣候，臺南市全境位於北迴歸線之南，屬副熱帶季風氣候與熱帶氣候的過渡帶，年平均降雨量不到 1,250 mm，且

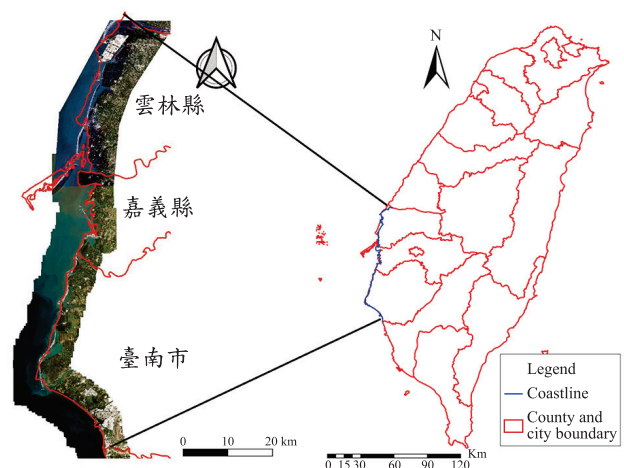


圖 1 研究區範圍圖

因受降雨時空分布不均，故旱季最長可達 7 個月，且以冬季為甚，濕潤指數介於 0-20，顯著偏低 (鄧書麟、沈勇強，2006)。

2.1.1 衛星影像取得及篩選

本研究利用 Taiwan open datacube 資料庫中所蒐集自 1984 年以來，由美國地質調查局 (United States Geological Survey, USGS) 所提供的 Landsat 系列的影像數據，影像解析度為 30 公尺 (Giuliani *et al.*, 2017)。本研究取得自 2000 年至 2019 年共 608 幅 ARD (Analysis Ready Data, ARD) 衛星影像，其中包含 Landsat 7 影像 457 幅與 Landsat 8 影像 151 幅。臺灣地區遙測影像極易受到雲層遮蔽，因此先以視覺判釋方式對影像資料進行篩選，以無雲層遮蔽影像為主要的分析對象，篩選後獲得無雲遮蔽之 Landsat 7 及 Landsat 8 影像各為 108 幅與 62 幅，共計 170 幅影像。將各影像的日期進行統計，各年度影像期數約 3-10 幅 (mean = 6.3, sd = 2.8)，其中以 2005 年受到雲層遮蔽的影響，僅有 1 幅無雲的影像。

2.1.2 氣候網格資料

本研究使用臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台 (Taiwan Climate Change Projection Information and Adaptation Knowledge Platform, TCCIP) 產製之 2.5 km × 2.5 km 逐日網格氣候觀測資料 (Hsu *et al.*, 2011; Weng and Yang, 2012)，取得之資料區間為 2000 年至 2018 年，氣象資料種類包含逐日之溫度 (t)、雨量 (rain)、相對溼度 (rh)、風場數據資料 (透過轉換公式計算為風速 (WSr) 與風向 (WDr))，作為輸入資料，配合衛星影像資料之時間解析度，將 TCCIP 氣象資料之逐日資料重新彙整為 1 個月 (mon) 及 3 個月 (3 mon) 資料形式，計算各別氣象因子的月最小值 (min)、最大值 (max)、平均值 (mean)、標準差 (sd) 與累計值 (sum)。期望藉由氣象資料配合前述植生指標，評估氣候對研究區域土地利用的影響。

2.2 研究方法

2.2.1 海岸林環境指標建立

為瞭解海岸林環境特性，利用衛星影像光譜計算出研究區域之常態化差異建物指標 NDBI (Zha *et al.*, 2003)、常態化差異濕度指標 NDMI (USGS)、常態化差異水體指標 NDWI (Xu, 2006; McFeeters, 1996) 及常態化差異植生指標 NDVI (Rouse *et al.*, 1974) 等 4 項衛星影像光譜指標作為環境指標，用以描述海岸林與

周遭地景的變遷，並藉由空間統計技術、機器學習之隨機森林等統計方法進行海岸林多時相的環境偵測，據以瞭解海岸林健康狀況及變遷趨勢，再依據變化幅度情形萃取出變遷熱區。各指標的公式如下：

$$NDBI = (SWIR - NIR) / (SWIR + NIR) \dots\dots\dots(1)$$

式中，NIR 為近紅外光波段、SWIR 為短波紅外光。NDBI 主要反應地表上的人造建築，裸露土壤與道路等地景，常用來區分人造地物的常態化差異指標。

$$NDMI = (NIR - SWIR) / (NIR + SWIR) \dots\dots\dots(2)$$

式中，NIR 為近紅外光波段、SWIR 為短波紅外光。NDMI 主要反應地表上水體與高含水量區域，特別是水體，如河川湖泊或海洋，其數值越小則表示較乾燥的區域。

$$NDWI = (Green - NIR) / (Green + NIR) \dots\dots\dots(3)$$

式中，Green 為綠光段、NIR 為近紅外光波段。NDWI 反應植被冠層含水率多寡，當地表為土壤、裸露地或缺水狀態的植被時，其呈現指標數值越低，常用於強化 NDVI 分析結果。

$$NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED) \dots\dots\dots(4)$$

式中，NIR 為近紅外光波段、RED 為紅光段。NDVI 為評估地表植生狀況之常用指標，其對植物行光合作用吸收紅光變化敏感，可以反應綠色植生的生長與覆蓋程度。

2.2.2 海岸林時空變化與植生回復力分析

海岸林對沿海環境的保護作用主要為植被枝葉可減風、減鹽的生態系服務功能，帶狀密生的海岸森林完整性有助於改善沿海惡劣之生活環境。為瞭解海岸林隨著周遭環境的空間分布變化情形，應用空間統計技術，依海岸林分布區位與海岸線間的距離區分為 50 m、100 m、250 m、500 m、1000 m、2000 m 與 2500 m 等 7 個級距，分析 NDVI > 0.6 以上的區域的比率，以瞭解 3 個縣市海岸海岸林 (密生森林) 的空間分布狀況。本研究再結合 TCCIP 的氣候時間尺度與空間尺度，計算自 2000 年至 2019 年之 Landsat 影像的 NDVI 資料，先區分為 NDVI > 0.6 的密生森林與 NDVI 數值介於 0.6 到 0.1 的灌木、草生地或農作物等 2 種土地利用類型，以 TCCIP 的氣候網格範圍 (2.5 km × 2.5 km) 進行 2 種土地利用類型占有面積的計算，並將 NDVI 面積做為反應變數與時間進行迴歸

分析，所呈現的斜率可以代表該區植生變化的情形，當斜率為正值顯示該區的植生面積為增加的趨勢，植生回復力良好，當斜率為負值顯示該區植生面積呈現減少的趨勢，可能存在環境壓力。

2.2.3 影響海岸林地景結構與變遷因子分析

本研究為整合氣候資料及環境指標以探討影響海岸林地景結構及變遷因子，採用機器學習演算法之隨機森林 (Random Forest, RF) 作為建立模型工具，其為各研究領域廣泛使用的模型之一 (Chen, 2021; Alonso-Rego, 2021; Wang *et al.*, 2021; Ye *et al.*, 2021; Ayrey, 2021)。該方法係以決策樹 (decision tree) 為基礎，經由隨機而多重的決策樹組建與集成 (ensemble) 過程，建立反應變量 (response variable) 與眾多特徵值 (predictors) 的關係。決策樹是數據探勘常用的一種方法，以資料母群體為根節點，在每一層的分支點對各因子進行變異數分析，找出變異量最大的變項作為分割準則 (James *et al.*, 2013)。在這個方式的迭代進行下，將獲得樹型結構，樹中每個節點表示某個決策因子與其決策門檻值，而每個二元分支代表該決策對應之資料屬性值。最後，沿著根節點、分支點至枝條末端葉節點的過程，描述出了一組決策程序對應之數值分布或資料分類結果。隨機森林是一個包含多個決策樹的分類器，利用自助法 (bootstrap) 重複抽取樣本及變量組成訓練資料集 (training dataset) 與建構決策樹的多次重複過程，將各決策樹結果進行眾數計算 (voting)，經由合併每棵樹的預測結果來減少預測的方差，提高在測試資料集 (testing dataset) 的性能表現，是機器學習法 (machine learning) 用於分類和迴歸的最成功的模型之一。一個經過良好訓練的隨機森林模型，即可藉由新的特徵值導入，進而預測依據該統計關係推測生物的可能反應 (Rehfeldt *et al.*, 2012; Wang *et al.*, 2016; Lin *et al.*, 2020)。

本研究之隨機森林模型 (Breiman, 2001; Liaw & Wiener, 2002; Chen, Liaw, & Breiman, 2004) 為應用 R 統計軟體 (version 3.4) 之隨機森林模組 (Liaw & Wiener, 2002) 建立。在隨機森林模型，各因子可以透過建立決策樹形成隨機森林的過程，透過 Impurity/Gini 係數計算各因子的重要性，可提供作為特徵選取依據。本研究以 NDVI 植生指標值作為分類密生森林 (NDVI > 0.6 的像元) 與灌木、草地或農作物 (NDVI 介於 0.1 到 0.6, Montandon and Small, 2008) 2 種植被類別的依據。將 2 種類別面積變化分別作為應變數 (dependent variable)，將各因子輸入隨機森林，進行模型之建立。本研究期望透過對大量的數據

資料進行探索，運用交叉驗證 (Cross-validation) 進行資料精度測試，本研究使用 K-fold 交叉驗證 (k-fold cross-validation)，將全部樣本資料透過隨機方法平均分成 k 個集合，將某一個集合當做測試資料 (testing data)，剩下的 k-1 個集合做為訓練資料 (training data)，反覆進行到每一個集合都做過測試資料為止，並透過 RMSE 檢視模型精度，公式如次：

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y})^2}{n}} \dots\dots\dots (5)$$

式中 y_i 為觀測值， $\hat{y}$ 為預測值， n 為樣本個數

透過隨機森林工具分別建立估計密生植生與灌木、草地或農作物的面積，本研究所稱之面積係以 TCCIP 氣候資料解析度的網格所涵蓋的 Landsat 影像中各類別土地利用所佔的像素，再乘上 Landsat 的 pixel size 所計算的面積總和，即為該 TCCIP 氣候資料網格內密生森林與灌木、草地或農作物的面積。本研究中亦考量人為與自然氣候因素之影響，將 NDBI > 0.2 的像元抽出表示建物 (Uddin *et al.*, 2010) 與 NDWI > 0.3 的像元抽出表示水體 (Gao, 1996; McFeeters, 1996; Stuart K. McFeeters, 2013)。由於 Landsat 影像屬於較粗的解析度影像資料 (coarse resolution)，會使得在同一網格中含有不同地表特徵，形成混合像元。故本研究將像元依植生指標分類完成後，復以 2019 年時間相近的航照圖，於影像中將各植生指標各隨機選取 100 點，進行 NDBI、NDWI、以及 NDVI_g (灌木、草地或農作物) 與 NDVI_f (密生森林) 分類結果正確性的驗證，並完成混淆矩陣如表 1 所示。驗證結果顯示，整體精度達 86%，Kappa 為 0.82，顯示利用植生指標的分類精度尚佳，可作為後續分析之應用。本研究將代表建築物的 NDBI 作為人為影響因子，放入隨機森林模型中分析，分別建立「考量人為與自然氣候因素影響」之模型與「僅考量自然氣候因素影響」之模型等 2 種模型。

表 1 NDBI、NDWI、NDVI_g 及 NDVI_f 分類驗證之混淆矩陣

	NDBI	NDVI _g	NDVI _f	NDWI	總和	使用者精度
NDBI	81	13	2	2	98	82.7
NDVI _g	14	80	12	0	106	75.5
NDVI _f	0	5	86	0	91	94.5
NDWI	5	2	0	98	105	93.3
總和	100	100	100	100	Overall Accuracy	0.86
生產者精度	81.0	80.0	86.0	98.0	Kappa	0.82

2.2.4 氣候變遷下之海岸林未來生長趨勢變化模擬

聯合國跨政府氣候變遷委員會(IPCC)針對全球氣候變遷現象已出版 5 份評估報告 (AR1 ~ AR5)，2018 年 10 月上旬已公佈 1.5°C 特別報告，顯示依現行狀況至 2050 年前即可能提前上升。為瞭解研究區之海岸林植被變動的未來趨勢，本研究依據 IPCC 在 AR5 評估報告中所定義之 4 組代表濃度途徑 (Representative Concentration Pathway, RCP) 情境，提供氣候模式進行數值模擬(未來氣候推估)的規範。4 種 RCP 代表不同溫室氣體排放、空氣污染排放和土地使用條件下的情境，分別為 RCP 2.6 是極低輻射強迫的減緩情境；RCP 4.5 與 RCP 6.0 是中等穩定化的情境；RCP 8.5 是溫室氣體高度排放的情境。

本研究使用密生森林與灌木、草生地或農作物等 2 種土地利用類型，計算出 2000 年到 2018 年間每一網格 (2.5 km × 2.5 km) 之土地利用面積百分比，並使用 TCCIP 所產製的氣候變遷下不同情境條件下的預測氣溫與降雨資料，利用隨機森林模擬海岸林密生植生與灌木、草生地或農作物自 2020 年至 2050 年間的面積改變狀況。其中隨機森林在建立模型的過程，研究中透過 1,000 次的隨機抽樣所建立的決策樹，可瞭解各因子對於預測結果的重要性，再根據評估密生植生與灌木、草生地或農作物面積變化的隨機森林模型，進行 2 種土地利用類型面積改變在不同情境下的變化推估。

三、結果與討論

3.1 海岸林環境指標分析及篩選

環境指標可顯示研究區域內建物、濕度、水體與植生空間分布，故可依據前述指標定義，進行各種地景分布百分比分析。植生動態監測可透過植生指標加值計算求得，自然環境變化則可透過遙測光譜值轉換成反映植生、水域或環境的指標，人為影響的部分本研究嘗試使用 NDBI 做為反映人為影響指標，掌握建物增加對海岸林產生之壓力，進而瞭解海岸林與地景間關係。為先瞭解本研究區域長期的平均趨勢，將 170 幅影像資料進行網格式資料統計分析獲取每一個網格位置的 NDBI、NDMI、NDVI 與 NDWI 之 20 年平均值。由於各指標間不適合進行疊加來做為表示總體的地貌百分比，故就各個指標所表現的地景進行描述。分析結果如圖 2 及說明如下所示：

1. NDBI 分析：將 NDBI > 0.2 的像元抽出表示建物，

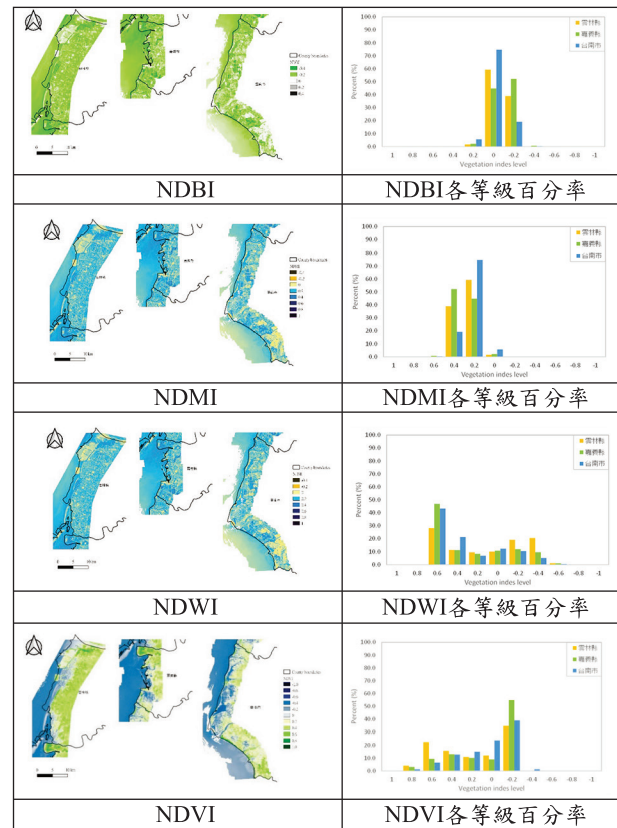


圖 2 研究樣區 NDBI、NDMI、NDWI 及 NDVI 之 20 年平均
均值空間分布及各等級百分率

並進行百分率之計算，雲林縣在沿海 10 公里範圍內的建物比例最低為 1.6%，嘉義縣次之建物比例最低為 2.2%，台南市的建物比例最高為 5.6%。

2. NDVI 分析：將 NDVI > 0.6 的像元抽出視為密生森林，雲林縣在沿海 10 公里範圍內的密生森林比例最高為 26.4%，嘉義縣次之為 12.7%，台南市的比例最低為 7.8%。NDVI 數值介於 0.6 到 0.1 代表灌木、草生地或農作物，雲林縣比例 26.6%，嘉義縣的比例為 23.3%，台南市的比例最高為 27.9%。
3. NDMI 分析：NDMI 的變化比例較不像其他指標具有一致性，3 個縣市的變化差異相當大，較不適合作為描述地景之依據。
4. NDWI 分析：將 NDWI > 0.3 的像元抽出視為水體，雲林縣在沿海 10 公里範圍內的水體比例最低為 49.1%，嘉義縣次之為 66.6%，台南市的比例為 71.6%。

3.2 海岸林時空變化與植生回復力

本研究將海岸林分布區位與海岸線間的距離區分為 50 m、100 m、250 m、500 m、1,000 m、2,000 m

與 2,500 m 等 7 個級距，應用空間統計分析海岸密生森林所占各縣市海岸林百分比之結果如圖 3 所示。海岸密生森林在雲林縣僅占 3.1 %、嘉義縣為 3.5 %、臺南市為 2.6 %，顯示海岸林帶在 3 個縣市皆相當不足，對於減風、減鹽效果有限，日後因應氣候變遷風險能力恐無法具有保護功能。在海岸林第一線部分(距海岸線 50 m)，各縣市海岸密生森林百分比僅 1.2 % ~ 2.3 %，顯示無法對於沿海地區提供足夠保護；另再分析各縣市海岸密生森林最高百分比及距海岸線位置，雲林縣、嘉義縣及臺南市分位處於

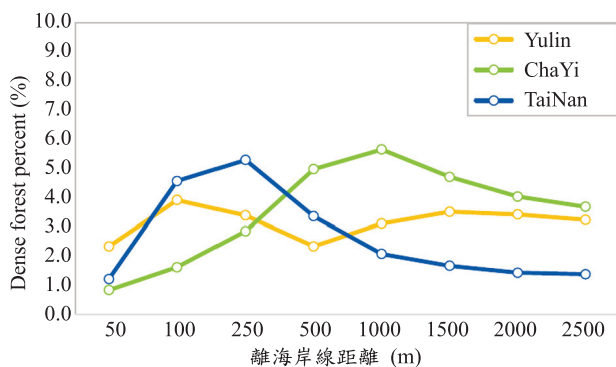


圖 3 雲林縣、嘉義縣、臺南市距離海岸線 NDVI > 0.6 之百分率

100 m、1000 m 及 250 m 處，最高百分比分為 3.9 %、5.6 %及 2.6 %。

密生森林與灌木、草地或農作物等 2 種植被態樣與 NDVI 面積迴歸分析之斜率變化空間分布如圖 4，顯示密生森林在雲林縣沿海地區有比較多網格呈現斜率負值，表示該區的植被有面積減少的趨勢，在嘉義縣及臺南市沿海地區則是零星的負趨勢分布，較多的部分為趨勢斜率接近於零，正趨勢多分布於內陸或是局部的丘陵地區。灌木、草地或農作物面積變化負的趨勢，同樣出現在雲林縣沿海地區較多，約占 1/3 的研究區域面積，在雲林縣南部沿海地區的部分，此區域是水產養殖區，所以此處的密生植生與灌木、草地或農作物相對較少，因此本區域的面積是呈現負的變化趨勢。另外雲林縣北部沿海地區亦呈現負的區域，本區為麥寮工業區與水產養殖區，相當缺乏海岸植生保護帶，推測可能是北區沿海地區灌木、草地或農作物面積也呈現負斜率的原因。

3.3 影響海岸林地景結構與變遷因子分析

本研究考量人為與自然氣候因素影響，將代表建築物的 NDBI 與水域的 NDWI 作為因子，放入隨機

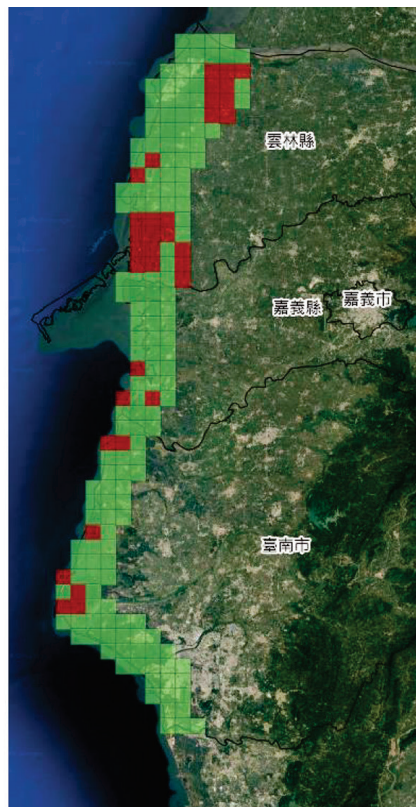
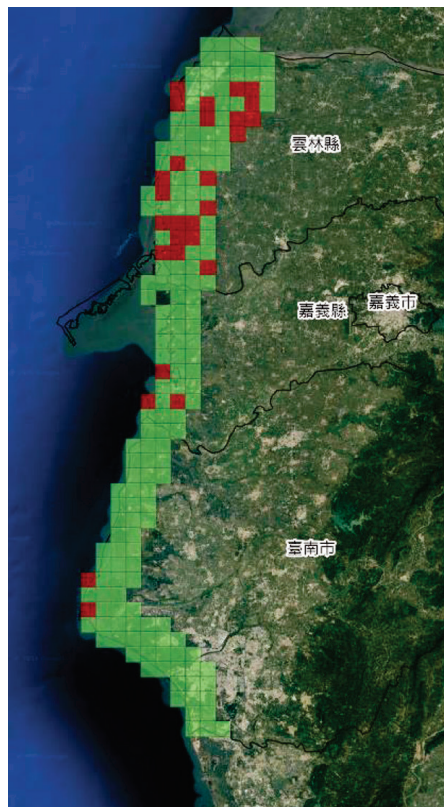


圖 4 密生森林與灌木、草地或農作物之斜率變化空間分布 (2000 年至 2019 年)

森林模型中，並同時建立僅考量自然因素的模型。隨機森林所估計的各因子重要性，有同時考量人為與自然因素的模型，各因子的重要性，將最重要的前 10 個因子列出，可以從圖 5 發現 NDBI 為影響植生指標最重要的因子，其他因子重要性分別為 1 個月最低氣溫 (min_cli_t)、3 個月的降雨量標準差 (sd_cli_rain_3mon)、3 個月的最大降雨量 (max_cli_rain_3mon)、1 個月最高氣溫 (max_cli_t)、3 個月最高氣溫 (max_cli_t_3mon)、溫度累計值 (sum_cli_t)、3 個月的風向標準差 (sd_cli_WDr_3mon)、1 個月平均氣溫 (mean_cli_t)、1 個月的降雨量標準差 (sd_cli_rain)。若僅考量氣候的隨機模型各因子的重要性 (圖 6)，分別為 3 個月的降雨量標準差 (sd_cli_rain_3mon)、1 個月最低氣溫 (min_cli_t)、3 個月平均氣溫 (mean_cli_t_3mon)、3 個月的風向標準差 (sd_cli_WDr_3mon)、3 個月的最大降雨量 (max_cli_rain_3mon)、1 個月的降雨量標準差 (sd_cli_rain)、3 個月最低氣溫 (min_cli_t_3mon)、3 個月最高氣溫 (max_cli_t_3mon)、1 個月溫度累計值 (sum_cli_t)、3 個月的最小風向 (min_cli_WDr_3mon)。

(sd_cli_rain)、3 個月最低氣溫 (min_cli_t_3mon)、3 個月最高氣溫 (max_cli_t_3mon)、溫度累計值 (sum_cli_t)、3 個月的最小風向 (min_cli_WDr_3mon)。

在眾多因子中，相對溼度與風速因子並未在隨機森林模型中提供較高預測能力權重，而顯示出溫度與降雨是重要的特徵因子，並且可以觀察到氣候因子的多個月平均與累積資料皆是重要的因子，顯示植物受到氣候的影響，並非當月的反應，而是具有逐漸累積效應。圖 7 及圖 8 分別顯示估計密生森林與灌木、草地或農作物面積模型之各因子重要性，模型相關的解釋力如表 2 所示，PSEUDO-R² 是將資料分為訓練資料與測試資料集，由訓練資料及所建立的模型，透過測試資料進行模型好壞的評估，各模型中，以估計 NDVI 的效果最好，推估面積的隨機森林模型較不理想。所建立的模型將作為後續瞭解海岸林衰退及變遷之基礎。

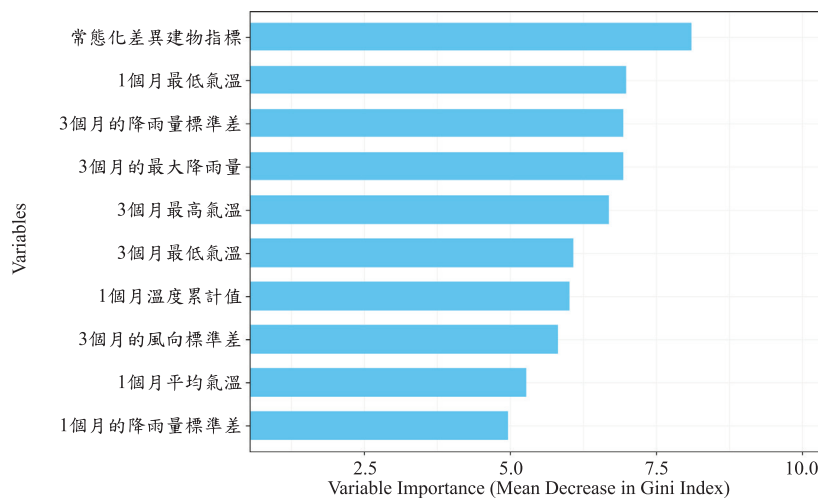


圖 5 考量人為與氣候因子影響之隨機森林模型因子重要性

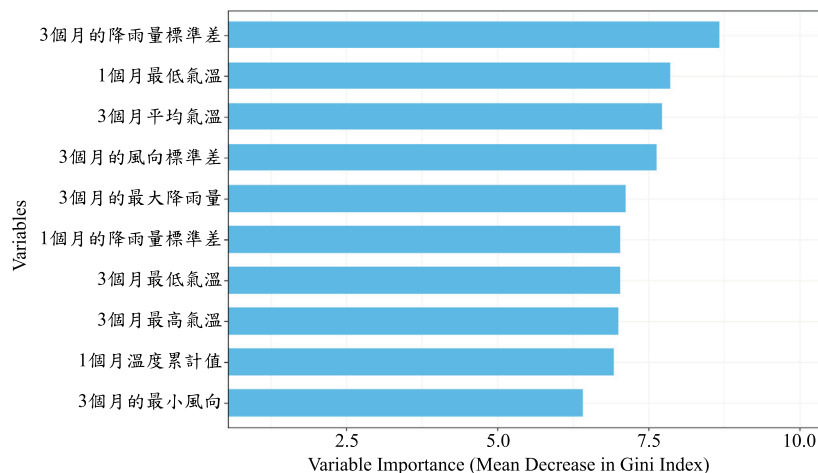


圖 6 僅考量氣候因子影響之隨機森林模型因子重要性

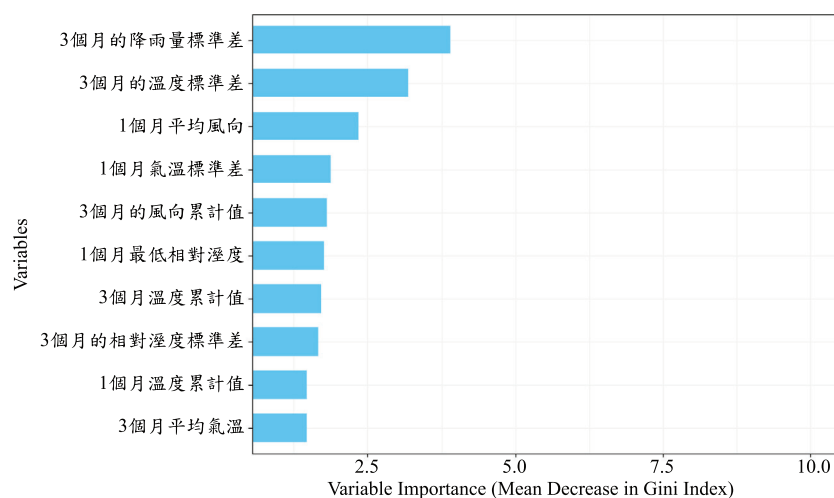


圖 7 密生植生面積之隨機森林模型因子重要性

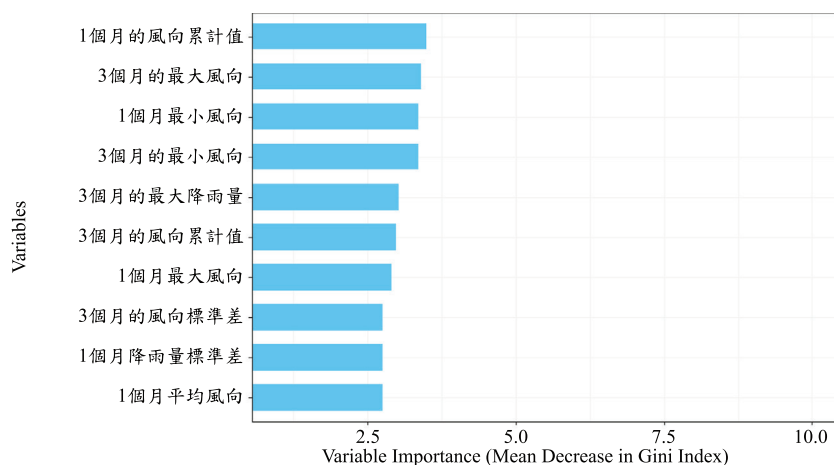


圖 8 灌木、草地或農作物面積之隨機森林模型因子重要性

表 2 隨機森林模型率定分析

反應變數	RMSE	PSEUDO-R ²
NDVI	0.074	0.824
NDVI (考量人為或氣候)	0.063	0.733
灌木、草地或農作物面積 (NDVI 值介於 0.1 到 0.6)	0.251	0.675
密生森林面積 (NDVI > 0.6)	0.356	0.573

3.4 氣候變遷下之海岸林未來生長趨勢變化模擬

本研究利用建立之評估海岸林密生森林與灌木、草地或農作物面積變化的隨機森林模型，推估 2020 年至 2050 年期間在不同 RCP 情境下之 2 種土地利用類型面積的變化趨勢如圖 9 所示。3 個縣市總體的密生森林面積，在氣候變遷的狀態下是呈現增加的趨勢，灌木、草地或農作物面積則是呈現下降的趨

勢。在雲林縣的下降幅度是 3 個區中較多的一區，在 RCP 2.6 的情境下約下降 1.7%，RCP4.0 的情境下約下降 1.9%，RCP 6.5 的情境下約下降 2.9%，RCP 8.5 極端的氣候變遷狀況下約下降 3.0%。嘉義縣則是在各個 RCP 情境下維持穩定的灌木、草地或農作物面積。台南市的下降幅度在 RCP 2.6 的情境下約下降 2.9%，RCP 4.0 的情境下約下降 3.3%，RCP 6.5 的情境下約下降 3.0%，RCP 8.5 極端的氣候變遷狀況下，趨勢亦維持較為平穩的變化趨勢。Borrelli *et al.*, (2020) 運用全球土壤沖蝕模型 (Global Soil Erosion Modeling)，觀測全世界尺度在不同氣候條件下，未來土壤侵蝕的空間分佈，會受到集中的強降雨事件影響，土壤侵蝕似乎威脅到大規模開墾地區，以及全年植被覆蓋普遍稀疏的地區。

本研究亦利用隨機森林所建立的評估模型結果，繪製海岸林衰退及變遷圖，藉以瞭解不同 RCP 情境下至 2050 年時的面積變化的空間分布趨勢，圖 10 呈

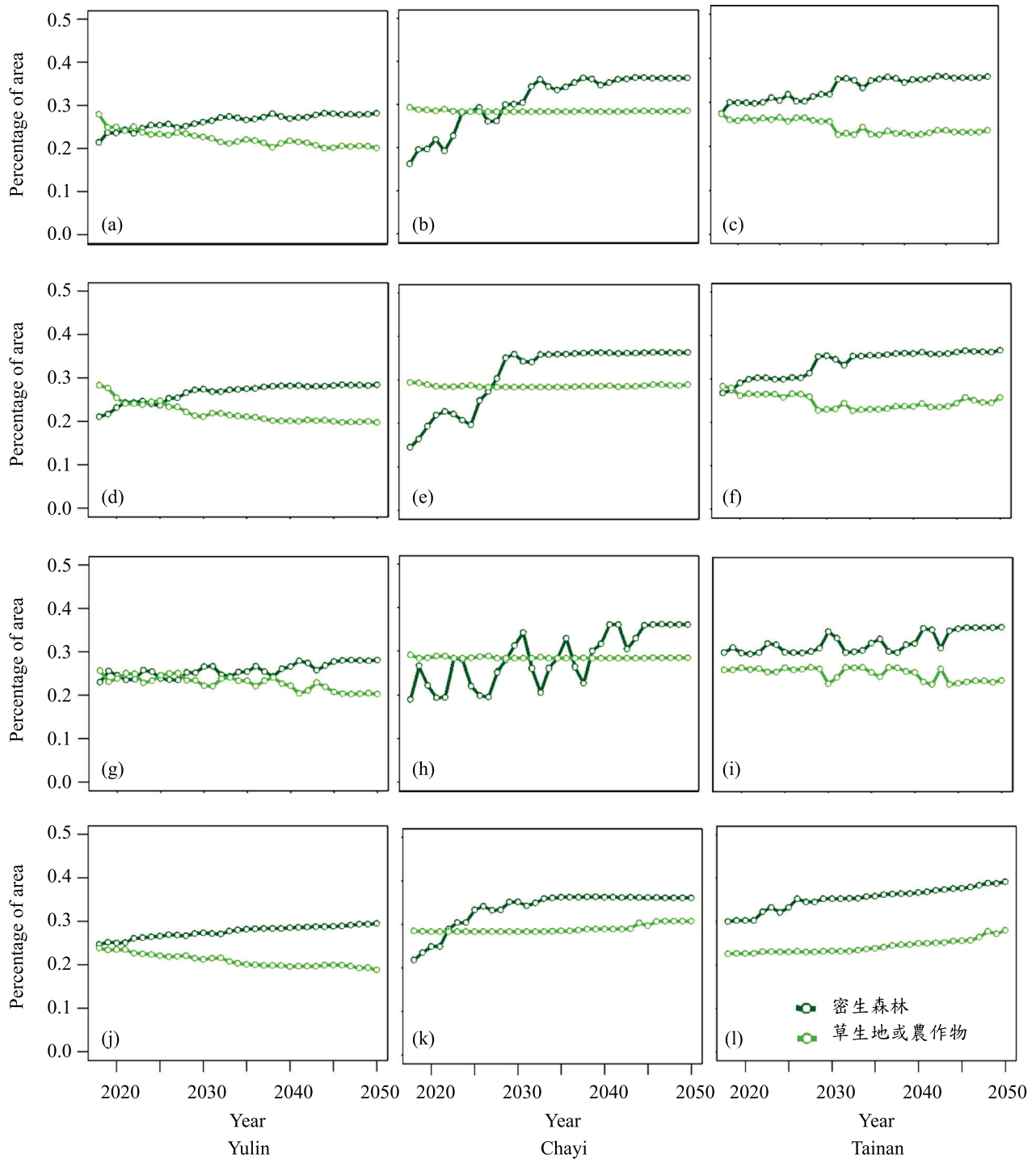


圖 9 不同 RCP 情境下評估密生植生與灌木、草地或農作物面積變化趨勢，雲林縣分別為(a)RCP 2.6、(d) RCP 4.0、(g) RCP 6.5、(j) RCP 8.5; 嘉義縣分別為(b)RCP 2.6、(e) RCP 4.0、(h) RCP 6.5、(k) RCP 8.5; 台南市分別為(c)RCP 2.6、(f) RCP 4.0、(i) RCP 6.5、(l) RCP 8.5。

現密生植生 RCP 2.6 與 RCP 8.5 情境模擬結果；圖 11 呈現灌木、草地或農作物 RCP 2.6 與 RCP 8.5 情境模擬結果。由圖 10 可以觀察到密生植生沿海的面積呈現下降趨勢的區域較多，特別是在雲林縣沿海，當 RCP 情境較為嚴峻時，台南市沿海密生植生亦會出現

較多下降趨勢的區域 (圖 10，左)。由圖 11 可以觀察到灌木、草地或農作物同樣較多下降趨勢出現在雲林縣境內沿海區域，與前述分析相同的是嘉義縣的灌木、草地或農作物區域在不同的情境下皆維持較為穩定的情況，台南市在七股區與安南區則會呈現較多

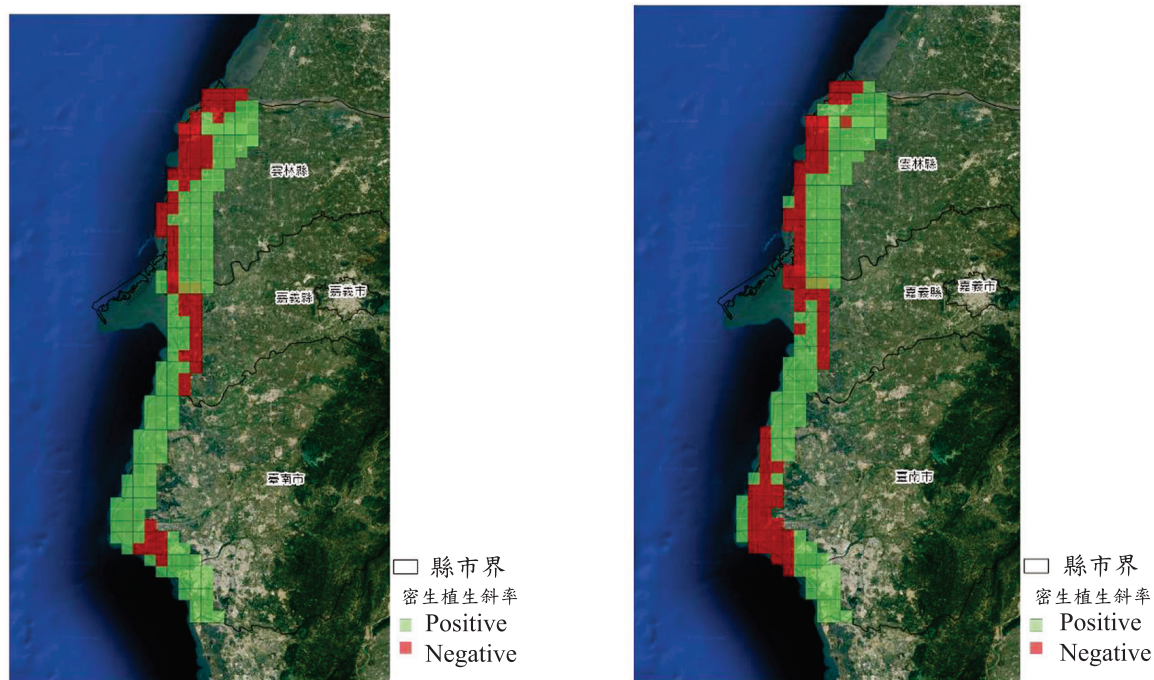


圖 10 RCP 2.6 (左) 與 RCP 8.5 (右) 情境模擬密生植生面積變化

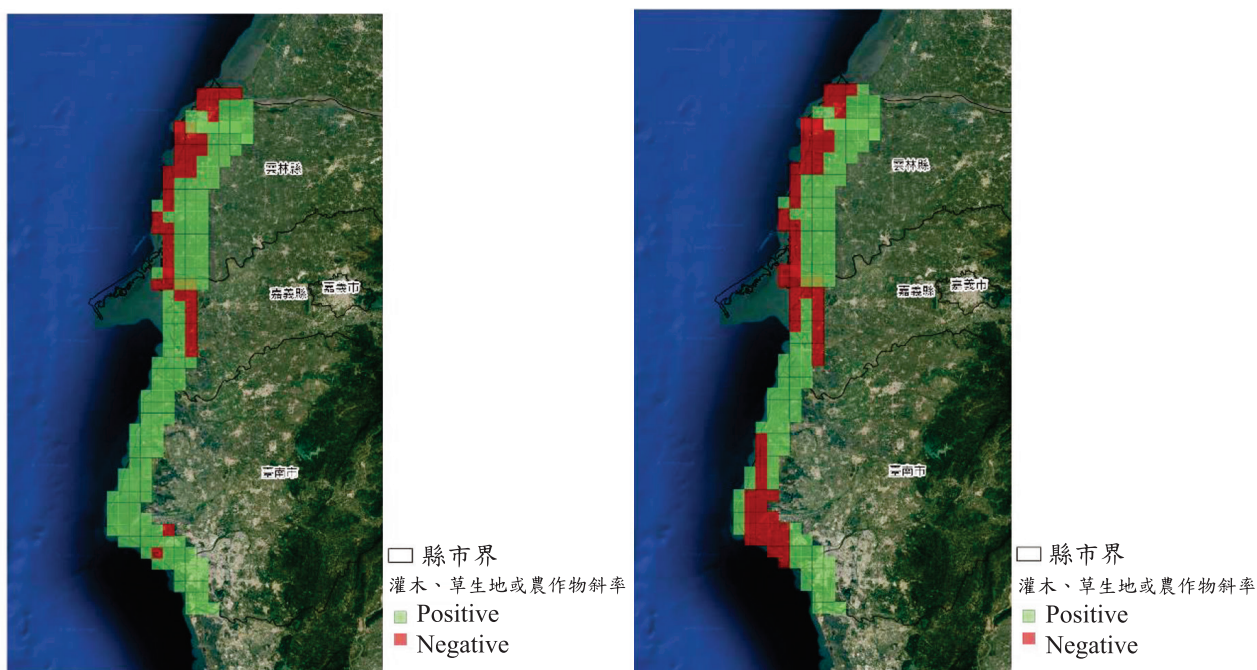


圖 11 RCP 2.6 (左) 與 RCP 8.5 (右) 情境模擬灌木、草地或農作物面積變化趨勢

面積下降趨勢。本研究由推估的分析結果顯示，土地利用的型態會受到氣候變遷影響而逐漸在空間分布產生變化與集中，特別影響農作的區域，在較嚴苛的氣候變遷情境下相對脆弱，為必須關注與提出相對應的調適策略。氣候變遷的驅動力正成為影響土地利用與生物多樣性變化的因素，並將對其空間結構產生衝擊

(Warren *et al.*, 2001; 35. Newbold, 2018)。

四、結論與建議

本研究應用多時期衛星影像資料配合長期氣候網

格資料分析海岸林環境變遷獲得良好成果，可具體瞭解海岸林生長區位之現況不足或欠佳之處，提供相關單位瞭解需加強造林及撫育之區位。以整體成果而言，不同縣市之海岸林植生生長趨勢各有不同，研判主因可能是受到慣行風與地形的影響，研究成果如下：

1. 利用空間統計技術依海岸林區位距離海岸線 50 m、100 m、250 m、500 m、1,000 m、2,000 m 與 2,500 m 分析雲嘉南海岸密生植生空間分布結果，在雲林縣平均僅占有土地的 3.1 %、嘉義縣為 3.5 %、臺南市為 2.6 %，顯示海岸林帶在 3 個縣市皆相當不足，對於減風、減鹽效果有限，需加強造林以厚實因應氣候變遷之調適能力。
2. 以 2000 年至 2019 年的 2.5 km × 2.5 km 逐日氣候網格資料配合植生指標計算值，以隨機森林 (random forest) 模型區分為人為與氣候因子與僅氣象因子 2 種模型，分別建立估計 NDVI、密生植生與灌木、草地或農作物之面積結果，在考量人為與氣候因子模型中，NDBI 為影響植生指標最重要的因子，而溫度與降雨是重要的特徵因子。
3. 以 IPCC 在 AR5 之 RCP 情境模擬分析自 2020 年至 2050 年間海岸林衰退及變遷結果，3 縣市總體的密生植生面積，在氣候變遷的狀態下市呈現增加的趨勢，灌木、草地或農作物面積則是呈現下降的趨勢。
4. 根據氣候變遷之模擬結果，在溫室氣體高度排放的情境下，由於氣候呈現高溫與降雨空間分布不均，推論可能導致海岸林植生受到影響，而促使變遷朝向產生空間分布不均的趨勢。

全球氣候暖化現象為當今必須面對的問題，我國各單位部門均積極投入人力物力進行氣候變遷影響評估，並且考量人、環境、生態系統之脆弱性，擬訂氣候變遷衝擊之減緩與調適策略，減低危害衝擊。以研究區域而言，由於氣候變遷導致氣溫增加與降雨空間分布型態改變，已對海岸林生態環境造成衝擊，沿海地區鹽霧及飛沙危害加劇，或是極端氣象事件引起大面積淹浸海水，而使海岸林活力衰退或死亡。因此，本研究建議因應衝擊之調適策略如下：

1. 在海岸林環境管理層面，應加強沿海地區林地管理，確實掌握海岸林的環境變化，定期評估脆弱度空間區位分布及風險，厚植海岸林保護帶，並串聯海岸林構築森林的綠帶網絡，建構近似天然林之複層林，積極復育劣化生態系（鹽漬地、地層下陷區、漁塭等），使劣化區位恢復原有之生態功能，增強海岸林帶之國土保安生態服務機能，避免不當

開發致使林地減損與破壞，緩衝氣候變遷的衝擊。

2. 在海岸林樹木種類選擇層面，瞭解可能受氣候變遷影響之海岸林樹種，加強育種技術並選育可因應氣候變遷（耐高溫、耐旱澇、耐鹽等）之品系，並規劃其合理利用，增加樹木對抗氣候變遷逆境之韌性，亦可強化農林業防災科技的研發，透過智慧農林業設施，減緩氣候條件劣化所帶來的衝擊。

五、謝誌

本研究感謝林業試驗所提供科技計畫（計畫編號：109AS-21.4.2-FI-G1）經費支持，並感謝科技部臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台 (TCCIP) 提供研究區長期氣候網格資料。

參考文獻

1. Alonso-Rego, C.; Arellano-Pérez, S.; Guerra-Hernández, J.; Molina-Valero, J.A.; Martínez-Calvo, A.; Pérez-Cruzado, C.; Castedo-Dorado, F.; González-Ferreiro, E.; Álvarez-González, J.G.; Ruiz-González, A.D. (2021) "Estimating Stand and Fire-Related Surface and Canopy Fuel Variables in Pine Stands Using Low-Density Airborne and Single-Scan Terrestrial Laser Scanning Data," *Remote Sensing*, 2021, 13(24), 5170. <https://doi.org/10.3390/rs13245170>.
2. Ayrey, E.; Hayes, D.J.; Kilbride, J.B.; Fraver, S.; Kershaw, J.A., Jr.; Cook, B.D.; Weiskittel, A.R. (2021) "Synthesizing Disparate LiDAR and Satellite Datasets through Deep Learning to Generate Wall-to-Wall Regional Inventories for the Complex, Mixed-Species Forests of the Eastern United States," *Remote Sensing*, 2021, 13, 5113. <https://doi.org/10.3390/rs13245113>.
3. Borrelli, P., Robinson, D. A., Panagos, P., Ballabio, C. (2020) "Land use and climate change impacts on global soil erosion by water (2015-2070)." *Proceedings of the National Academy of Sciences* 117.36 (2020): 21994-22001.
4. Breiman, L. (2001) "Random forests," *Machine learning*, 45, 5-32. <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>.
5. Chen, C., Liaw, A., & Breiman, L. (2004) *Using random forest to learn imbalanced data*, University of California, Berkeley. Retrieved from <https://statistics.berkeley.edu/sites/default/files/tech-reports/666.pdf>

6. Chen, D.; Wang, Y.; Shen, Z.; Liao, J.; Chen, J.; Sun, S. (2021) "Long Time-Series Mapping and Change Detection of Coastal Zone Land Use Based on Google Earth Engine and Multi-Source Data Fusion," *Remote Sensing*, 2022, 14, 1. <https://doi.org/10.3390/rs14010001>
7. Gao, B.-C. (1996) "NDWI - A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space," *Remote Sensing of Environment*, 58, 257-266.
8. Gareth James, Daniela Witten, Trevor Hastie, Robert Tibshirani. (2013) *An Introduction to Statistical Learning : with Applications in R*, New York, Springer.
9. Giuliani, G., Chatenoux, B., De Bono, A., Rodila, D., Richard, J. P., Allenbach, K., Dao, H., & Peduzzi, P. (2017) "Building an Earth Observations Data Cube: lessons learned from the Swiss Data Cube (SDC) on generating Analysis Ready Data (ARD), Big Earth Data", 1:1-2, 100-117, DOI: 10.1080/20964471.2017.1398903
10. Hsu, H.H., C. Chou, Y.C. Wu, M.M. Lu, C.T. Chen and Y.M. Chen. (2011) *Climate Change in Taiwan: Scientific Report 2011 (Summary)*. National Science Council, Taipei, Taiwan, ROC, 67pp.
11. L.M. Montandon, and E.E. Small (2008) "The impact of soil reflectance on the quantification of the green vegetation fraction from NDVI," *Remote Sensing of Environment*, 112, 1835-1845.
12. Liaw, A. and Wiener, M. (2002) "Classification and Regression by Random Forest," *R News*, 2(3), 18-22.
13. Lin, H.-Y., C.-F. Li, T.-Y. Chen, *et al.* (2020) "Climate-based approach for modeling the distribution of montane forest vegetation in Taiwan," *Applied Vegetation Science*, 34, 239-253.
14. McFeeters, S. K. (1996) "The use of normalized difference water index (NDWI) in the delineation of open water features," *International Journal of Remote Sensing*, 17, 1425-1432.
15. McFeeters, S. K. (2013) "Using the Normalized Difference Water Index (NDWI) within a Geographic Information System to Detect Swimming Pools for Mosquito Abatement: A Practical Approach,". *Remote Sensing*, 5, 3544-3561. <https://doi.org/10.3390/rs5073544>.
16. McFeeters, S.K. (1996) "The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features". *Int. J. Remote Sens.* 17, 1425-1432
17. Morresi, D.; Vitali, A.; Urbinati, C.; Garbarino, M. (2019) "Forest Spectral Recovery and Regeneration Dynamics in Stand-Replacing Wildfires of Central Apennines Derived from Landsat Time Series," *Remote Sensing*, 2019, 11, 308. <https://doi.org/10.3390/rs11030308>.
18. Newbold T. (2018) "Future effects of climate and land-use change on terrestrial vertebrate community diversity under different scenarios." *Proc. R. Soc. B* 285: 20180792. <http://dx.doi.org/10.1098/rspb.2018.0792>.
19. Rehfeldt, G.E., Crookston, N.L., Sáenz-Romero, C., & Campbell, E.M. (2012) "North American vegetation model for land-use planning in a changing climate: a solution to large classification problems," *Ecological Applications*, 22, 119-141. <https://doi.org/10.1890/11-0495.1>.
20. Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A., and Deering D.W. (1974) "Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS," In: Fraden S.C., Marcanti E.P. & Becker M.A. (eds.), Third ERTS-1 Symposium, 10-14 Dec. 1973, NASA SP-351, Washington D.C. NASA. pp.309-317.
21. Uddin, S., Al Ghadban, A.N., Al Dousari, A., Al Murad, M. and Al Shamroukh, D. (2010) "A Remote Sensing Classification for Land-Cover Changes and Micro-Climate in Kuwait," *International Journal of Sustainable Development and Planning*, 5, 367-377. <https://doi.org/10.2495/SDP-V5-N4-367-377>
22. USGS. *Landsat Surface Reflectance-Derived Spectral Indices- Normalized Difference Moisture Index*. <https://www.usgs.gov/landsat-missions/normalized-difference-moisture-index>.
23. Wang, J.; Zhou, Q.; Shang, J.; Liu, C.; Zhuang, T.; Ding, J.; Xian, Y.; Zhao, L.; Wang, W.; Zhou, G.; Tan, C.; Huo, Z. (2021) "UAV- and Machine Learning-Based Retrieval of Wheat SPAD Values at the Overwintering Stage for Variety Screening," *Remote Sensing*, 2021, 13, 5166. <https://doi.org/10.3390/rs13245166>.
24. Wang, T., Wang, G., Innes, J., Nitschke, C., & Kang, H. (2016) "Climatic niche models and their consensus projections for future climates for four major forest tree species in the Asia-Pacific region," *Forest Ecology and Management*, 360, 357-366. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.08.004>.
25. Warren, M. S., Hill, J. K., Thomas, J. A., Asher, J., Fox, R., Huntley, B., Roy, D. B. M., Telfer, G., Jeffcoate, S., Harding, P., Jeffcoate, G., Willis, S. G., Greatorex-Davies, J. N., Moss, D., & Thomas, C. D. (2001) "Rapid

- responses of British butterflies to opposing forces of climate and habitat change.” *Nature*, 414, 65-69. doi:10.1038/35102054.
26. Weng, S.P. and C.T. Yang. (2012) “The construction of monthly rainfall and temperature dataset with 1km gridded resolution over Taiwan area (1960-2009) and its application to climate projection in the near future (2015-2039),” *Atmospheric Sciences*, 40(4), 349-369.
27. Xu, Hanqiu. (2006) “Modification of Normalised Difference Water Index (NDWI) to Enhance Open Water Features in Remotely Sensed Imagery,” *International Journal of Remote Sensing*, 27(14), 3025-3033.
28. Ye, J.; Hu, Y.; Zhen, L.; Wang, H.; Zhang, Y. (2021) “Analysis on Land-Use Change and Its Driving Mechanism in Xilingol, China, during 2000–2020 Using the Google Earth Engine,” *Remote Sensing*, 2021, 13, 5134. <https://doi.org/10.3390/rs13245134>.
29. Zha, Y., GAO, Y. and NI, S. (2003) “Use of normalized difference builtup index in automatically mapping urban areas from TM imagery,” *International Journal of Remote Sensing*, 24:3, 583-594.
30. 李祈德、林信輝，「雲林沿海地區保安林現況調查評估」，臺灣林業，第 41 卷第 6 期，pp. 30-40，2015。
31. 林務局，2020 年統計年報。林務局出版，2020。
32. 林睿思、陳宜敏、王經文、廖天賜、楊凱倫、陳忠義、許立勳、陳財輝，「台中港區木麻黃天然更新之研究」，林業研究季刊，第 31 卷第 2 期，pp. 47-60，2009。
33. 陳財輝、呂錦明、沈慈安，「苗栗海岸地區不同齡級木麻黃防風林生長調查」，林業試驗所研究報告季刊，第 5 卷第 1 期，pp. 17-24，1990。
34. 鄧書麟、沈勇強，「臺灣海岸林經營面臨之困境與對策探討」，臺灣林業，第 32 卷第 4 期，pp. 3-8，2006。
35. 鄧書麟、黃正良、張怡萱、徐俊騰，「四湖海岸低濕地木麻黃天然更新可行性之研究」，中華林學季刊，第 48 卷第 3 期，pp. 205-220，2015。

收稿日期：民國 111 年 01 月 28 日

修改日期：民國 111 年 05 月 09 日

接受日期：民國 111 年 06 月 22 日