



# 115 年度氣候變遷創意實作競賽

## 決賽作品說明書

隊伍編號+名稱	D03 查無此樹
作品中文名稱	氣候韌性人樹共好
作品英文名稱	Resilient Human-Tree Symbiosis

參賽學校：國立中興大學

指導老師：柳婉郁

團隊成員：李竹涪、王雅雯、高德耘



## 作品摘要

面對氣候變遷與極端天氣衝擊，都市林正由綠色資產轉為潛在風險。本研究創新建構都市林生態系統損害(EDS)空間評估模型，整合遙測、樹木清冊與GIS，量化根系衝突、病媒風險與維護負擔，並開發PWA決策系統。以大安森林公園為例，實現離線巡檢與風險導航，推動都市林由被動養護邁向精準防災與智慧治理。

## Abstract

Under intensifying climate change, urban forests are shifting from ecological assets to potential risks. This study develops an innovative spatial assessment model for ecosystem disservices (EDS), integrating remote sensing, tree inventory data, and GIS to quantify root conflicts, vector risks, and maintenance burdens. A Web-GIS PWA system enables offline inspection and real-time risk navigation. Using Daan Forest Park as a case study, the approach advances urban forest management from reactive maintenance to precision-based, proactive climate resilience governance.



# 目錄

一、問題界定.....	1
二、創意構想.....	2
(一)創意動機.....	2
(二)創意亮點.....	2
三、設計構想及運作說明.....	3
(一)研究區域.....	3
(二)研究方法.....	4
(三)系統實作與空間視覺化架構.....	5
四、作品結果說明.....	6
(一)EDS量化分析.....	6
(二)Web-GIS決策支援系統開發.....	8
五、作品應用與發展潛能.....	9
六、工作分配.....	10
七、附錄.....	11
八、參考文獻.....	15



# 一、問題界定

全球都市化進程加速，預計2050年都市人口將達68%(UNHabitat, 2024)，其中近九成新增於亞非地區(UN DESA, 2018)。此趨勢導致都市綠地 (Urban Green Space, UGS) 顯著流失，1990至2020年間人均綠地面積衰退54%(UNHabitat,2024)，在南亞與西亞等區域尤為嚴重(Husqvarna Group, 2024)。綠地減少與人口及工業活動疊加，惡化了空氣品質與都市熱島效應(Cherif et al., 2024)。空氣污染與綠地衰退形成惡性循環，污染物濃度升高損傷植被健康，進而削弱綠地的調節能力(Paoletti & Grulke, 2010; Feng et al., 2022; Li et al., 2022; Wang et al., 2024)。此外，都市熱島效應加劇使氣溫上升 1.0°C至6.0°C (Dimoudi et al., 2013)，預計 2040 年前將影響超過 20 億人(UNHabitat, 2024)。這些環境壓力導致嚴重的健康與經濟後果，如呼吸道疾病風險倍增與熱相關死亡率上升(Syuhada et al., 2023; Romanello et al., 2024; Alyami et al., 2025)。

因此，將都市林與基於自然的解方(Nature-based Solution, NbS)納入規劃，是減緩環境風險的重要策略(Raymond et al., 2017; Parker & Zingoni de Baro, 2019)。都市林提供關鍵的生態系統服務(Ecosystem Services, ES)，包括供給、調節、支持與文化服務(Cultural Ecosystem Services, CES) (Costanza et al., 2017; MEA, 2005)。調節服務能淨化空氣與緩解熱島(Gill et al., 2007; Lan & Wan, 2025)，CES 則提供不可逆的身心健康與文化效益(Daniel et al., 2012; Kajosaari & Pasanen,2021)。然而，都市林亦可能帶來生態系統服務損害(Ecosystem Disservices, EDS)，隨著氣候變遷的反饋機制，樹木的生物物理脆弱性增加，導致其角色發生質變，從資產轉為對基礎設施或公共安全構成潛在風險的負債 (Roman et al., 2021; Worthley et al., 2024)。如圖 1 所示，依據2024年康芮颱風災損統計，台北市遭遇8年來最嚴重災損，造成逾2,000棵路樹倒塌與3,370件災情回報(張彤和林秉州，2024)。



圖1 都市樹木災害(如颱風樹倒)新聞畫面

除了極端氣候風險，樹木與都市密集環境的日常實體互動亦構成多重層次的EDS。首先是公共安全風險，即使在平靜天氣下，老化的行道樹亦可能因結構腐朽而產生無預警斷裂(Roman et al., 2021)。其次是樹木與灰色基礎設施(Grey Infrastructure)的空間競爭，樹根造成的路面隆起可能影響無障礙通行，而對地下污水管網的隱蔽入侵則常衍生高昂維修成本(Roy et al., 2012; Lee, 2022)。此外，茂密的樹冠若遮蔽路燈，亦可能因照明不足間接影響居民的安全感知(Lyytimäki,2017; Veibiakkim et al., 2025)。為系統性整合這些影響，Anderson(2025)將其歸納為四大領域，如表1所示。

表1 都市綠地生態系統損害(EDS)分類

類別	損害類型	項目
健康安全	生物性健康風險	植被釋放花粉引發過敏；病媒傳播；野生動物互動風險
	結構與物理危害	老化樹木傾倒或斷枝；綠地管理不善引發的治安疑慮
經濟損失	基礎設施損壞	植被根系造成的鋪面破損
	直接維護成本	綠地的例行管理成本；果實掉落導致車輛損壞
	空間利用障礙	植被過度生長阻擋視線或通道
社會文化	社會公平問題	綠色縉紳化導致弱勢群體被社會排斥或遷移
	美學與感知失調	未維護植被引發負面評價；異味與噪音污染
生態環境	環境污染物與排放	樹木釋放揮發性有機化合物(VOCs)；PM濃度因植被阻擋而局部集中
	資源消耗與水質	維護植被所需的灌溉水資源消耗；水體優養化導致水質下降

面對日益複雜的EDS風險，傳統監測技術顯得左支右絀。隨著遙測技術快速演進，研究焦點已從大尺度的土地覆蓋(Land Cover)分類，轉向樹冠結構與環境變化的精細監測。然而，早期研究主要採用基於人工特徵的傳統機器學習方法(如 RF, SVM)，這類方法多依賴光譜 (NDVI) 或紋理特徵。在高度異質的都市環境中，面對建築陰影與複雜背景時，傳統方法常面臨特徵提取能力不足的瓶頸，難以區分光譜相似的草地、灌木與喬木，更無法精確描繪單株樹木的邊界以進行風險評估。

本研究歸納出國內都市林治理目前面臨的三大挑戰：

### 1. 高密度發展下的灰綠衝突與棲受限：

都市化導致綠地流失與熱島效應惡化，雖然綠地能提供生態效益，但在狹窄的都市棲地中，樹木與建物、道路的空間競爭日益激烈。隨著氣候變遷加劇，樹木衍生的倒伏風險與基礎設施破壞，使其角色正從環境資產轉變為安全負債。

### 2. 極端氣候加劇資產變負債的公共安全風險：

台灣地狹人稠且颱風頻繁，都市林面臨嚴峻考驗。然而，目前的管理模式仍過度依賴人力目視巡檢，缺乏科學化的量化數據。這導致管理者難以在保留生態效益與預防公共安全風險之間取得精準平衡，常陷入防災與生態的兩難。

### 3. 空間演算法與量化解方：

傳統的被動巡檢與人力調查難以即時處理龐大且複雜的都市林數據。本研究整合高解析度遙測影像與官方樹木清冊，導入Python 空間資料科學技術突破傳統限制。透過將各項EDS指標封裝為演算法函數，對全區樹木進行自動化批次陣列運算，建立一套具備空間屬性的量化風險評估系統，為都市林的防汛與公衛治理提供客觀且可驗證的科學依據。

## 二、創意構想

### (一) 創意動機

提升都市韌性已成為全球在氣候變遷治理下的核心命題。都市林作為關鍵的綠色基盤，長期以來提供著降溫、碳匯與遊憩等不可或缺的綠色福祉。然而，隨著極端高溫、短延時強降雨與強烈颱風的發生頻率及強度持續攀升，都市植栽與既有灰色基盤之間的空間衝突逐漸浮現。當缺乏精確且具可操作性的科學數據支撐時，樹木往往容易從具備氣候調適效益的自然資產，轉變為對基礎設施與市民安全造成威脅的 EDS。檢視當前公部門的都市林營運模式，多半停留在災後搶修或被動接收市民客訴。實務上，管理單位因難以即時且客觀地辨識高風險樹體，針對EDS的防範往往缺乏具備空間屬性與量化基準的風險預警機制。在這種將全區視為均質、缺乏差異化管理的粗放策略下，管理方常被迫採取基於風險迴避的全面性修剪或斷頭式砍伐。此舉不僅無謂消耗龐大的市政資源，更嚴重削弱了都市林原有的降溫、截流等生態系統服務，使原本應作為防護屏障的綠地，在極端天氣侵襲時反轉為都市防災網絡中的脆弱節點。因此，如何突破現有管理瓶頸，建構客觀的風險評估模型以實踐精準派工，已成為強化都市氣候韌性的當務之急。

### (二) 創意亮點

為突破此管理困境，本研究從風險管理的視角出發，探討都市林中綠色福祉與綠色負擔的雙向權衡關係，並建構一套可量化、具備空間特徵的EDS決策支援系統。研究整合植物生態學、公共衛生學與地理資訊科學的跨領域方法，將過往難以捉摸的環境負面衝擊轉化為具體的管理指標。



在風險評估模型的建構上，為消除不同樹種間因絕對生長尺度所造成的評估誤差，研究導入相對胸徑進行數據標準化，確保各項指標的客觀性。模型進一步針對都市林管理的三大痛點，推演出具備高度鑑別度的空間風險演算法。根系衝突風險指數結合植株量體與根系型態參數，精準量化樹木對硬鋪面及地下管線的破壞潛力，藉此標定出空間中顯著的邊緣效應熱區，有助於預防強風豪雨下的路樹倒伏與基盤毀損。除了硬體設施的威脅，氣候暖化亦使得蟲媒傳染病的防範成為都市公衛的嚴峻挑戰。本研究所建構的病媒風險等級，系統性地盤點樹冠枝幹形成的隱蔽源潛力與大型落葉造成的容器源積水潛力，進而鎖定公園內呈現區塊化群聚的病媒孳生熱點，為登革熱等傳染病的預防提供空間指引。同時，都市髒亂感指數則綜合評估特定樹種的果實髒亂度與集中落葉型態，將基層維護的勞務負擔予以具象化。這項數據不僅反映了日常的環境品質，更能賦予管理單位跨期預測的能力，使其得以在防汛期或極端天氣預報發布前，動態調度清掃人力，優先疏通高風險區的排水溝渠，強化都市整體的防洪防汛韌性。

在將學術模型轉化為實務應用的過程中，面對高達五千餘筆樹木的龐大空間資料，本研究於 Web-GIS 平台捨棄了傳統固定尺寸的點位標記，改採非線性縮放的氣泡分級圖疊合連續色階。此視覺化策略不僅保留了個體植株的量體差異，更消除了群植大樹掩蓋周邊小樹的視覺干擾，使決策者能直觀判別風險分佈的幾何特徵。考量到第一線巡檢人員在公園內部常面臨網路收訊死角的實務限制，本系統採用漸進式網頁應用程式結合 Service Worker 技術進行系統封裝。基層維護人員只需透過行動裝置的全球定位系統，即可進行跨平台、無縫的離線空間檢索與紅黃綠警示燈號判讀。此一空間決策支援系統有效降低了數位工具的應用門檻，將理論層面的風險評估落實為第一線的智慧化管理實務，促使都市綠地的管理從被動救災邁向主動的防護調適，以循證決策實質深化都市面對氣候變遷的整體發展韌性。

本研究旨在探討都市林管理中常被忽視的EDS，並嘗試建構一套可量化、具空間屬性且能輔助實務決策的風險評估模型。本章節將依序說明研究架構、樣區選擇與資料集建置過程，EDS 風險量化評估模型之參數設定準則，最後闡述 Web-GIS 空間視覺化系統之實作與技術架構。

### 三、設計構想及運作說明

#### (一)研究區域

本研究採量化研究導向，結合植物生態學、公共衛生學與地理資訊科學 (GIS) 進行跨領域探討。選定臺北市大安森林公園作為示範樣區，該公園占地近二十六公頃，為臺北市都會區內最具規模且承載極高市民活動密度的核心公園，其內部密集的硬鋪面步道、活動廣場與遊戲區形塑了高度重疊的人樹交界區，使得根系破壞、落果濕滑或病媒蚊叮咬等潛在風險極易轉化為實際的公共安全威脅與市民客訴，高度契合本研究建構風險預警系統之初衷。該園區自 1994 年開園至今已逾三十年，植栽皆已自幼苗邁入成熟期，諸如樹冠與根系擴張導致之鋪面隆起、或枝幹老化腐朽產生之樹洞積水等EDS徵候日益顯著，為本研究提供真實的觀察場域。此外，園區內囊括了128種喬木與棕櫚科植物，涵蓋具顯著浮根特性之榕屬植物、季節性大量落葉之黑板樹，以及易形成微型水窪的大王椰子等，呈現出極高的物種異質性，此一特性不僅提供了龐大的參數變異量，更能有效檢驗本研究之EDS 量化公式於不同樹種間的鑑別度與實證價值。



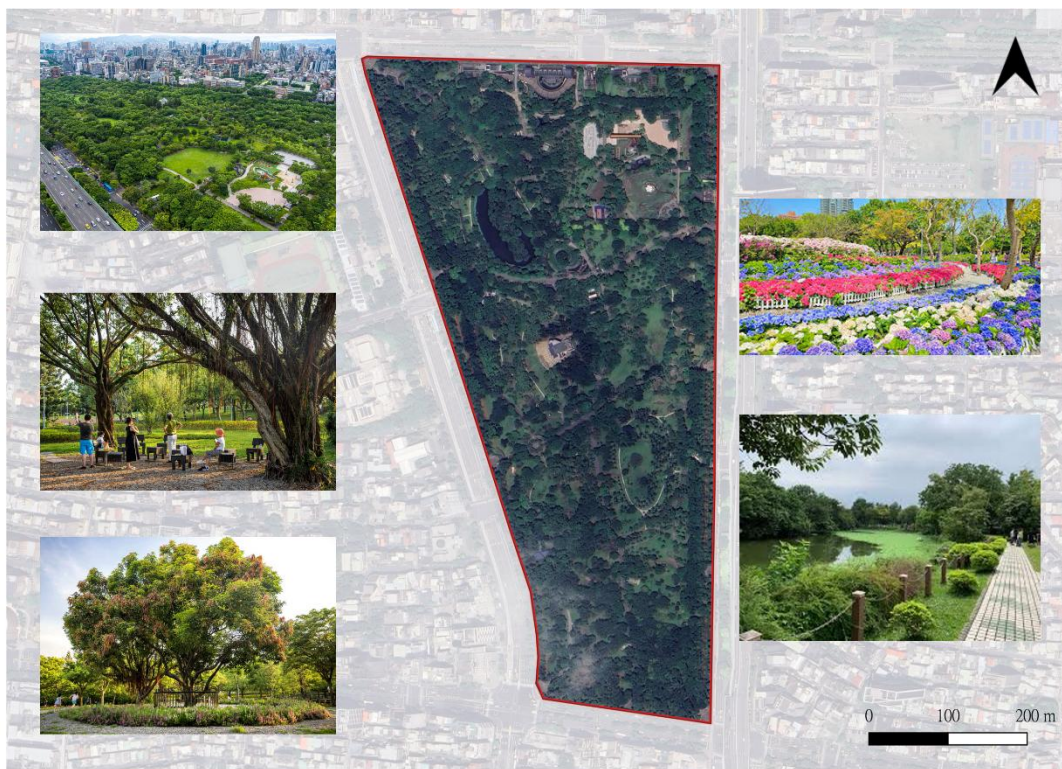


圖2大安森林公園

## (二)研究方法

首先，針對資料蒐集與前處理階段之基礎建構，本研究廣泛整合了遙測影像與公部門官方圖資，以確保量化評估具備高度的精確性與客觀性。在空間環境資訊的判釋上，本研究導入由林業及自然保育署提供之高解析度航空照片。同時，在植栽屬性資料的建置方面，研究團隊全面匯入並整合了臺北市政府所提供之官方樹木清冊。內容完整涵蓋了精確的地理定位座標、樹種、樹高以及胸高直徑。

接著將抽象的EDS轉化為具體的管理指標。依據圖文資料與植物學特性，本研究針對硬體破壞、病媒孳生與維護成本三大面向，設定相應之參數並建構經驗公式。考量到不同樹種之絕對生長尺度存在先天差異，為消除此空間尺度差異所造成的評估偏差，本研究將所有樹木之絕對胸高直徑轉化為相對胸徑( $DBH_{norm}$ )。該數值由單株胸徑除以該樹種最大胸徑所得，使所有樹木之量體特徵標準化至0與1之區間內。

樹木根系生長引發之鋪面隆起或地下管線破壞，為都市公園硬體設施維護之重大挑戰。為量化此破壞潛力，本研究建構根系衝突風險指數( $R_{conflict}$ )，以樹木量體與根系型態作為雙因子評估基準，其數學模型表示為：

$$R_{conflict} = 0.5 \times DBH_{norm} + 0.5 \times R_{butt}$$

式中， $R_{butt}$ 代表根系特性參數，本研究依據物種特徵進行賦值。對於如榕屬或黑板樹等具備顯著板根或浮根特性之樹種，因其破壞地表硬體之機率顯著，參數設定為 1.0；反之，深根系主導之樹種則設定為0.0。在此等權重之設定下，突顯了具備強烈浮根特性之植株，縱使相對胸徑較小，仍具備破壞風險。

在公共衛生與蟲媒傳染病(如登革熱)防治層面，樹木之微棲地常成為病媒蚊之潛在孳生源。本研究據此提出病媒風險等級( $R_{mos}$ )，透過量化隱蔽源與容器源之形成機率進行綜合評估，公式如下：

$$R_{mos} = 0.4 \times T_{hole} + 0.4 \times L_{cup} + 0.2 \times L_{type}$$



其中，隱蔽源潛力( $T_{hole}$ )佔總權重之 0.4，主要評估樹冠與枝幹結構；若樹種具備複雜氣生根系、纏勒現象(如雀榕)，或因木材易腐朽而生成天然樹洞者，因其易提供病媒蚊棲息空間，該參數設定為 1.0。同佔 0.4 權重之容器源積水潛力( $L_{cup}$ )，則聚焦於落葉形態；葉片寬度大於10公分者(如棕櫚科或大型闊葉樹)落地後易形成微型水窪，參數設為 1.0；葉寬介於5至10公分者設為 0.5，小葉型樹種則為 0.0。另外 0.2 之權重則歸因於排水阻塞風險( $L_{type}$ )，考量季節性集中落葉樹種(設為1.0)於降雨季極易造成排水系統淤積，進而引發大面積積水死角，常綠樹種則不計此項風險。

為具象化樹木對都市基層維護人力所造成之勞務負擔，以及衍生之視覺觀感影響，本研究建構都市髒亂感指數( $M_{burden}$ )，為：

$$M_{burden} = 0.5 \times F_{mess} + 0.3 \times DBH_{norm} + 0.2 \times L_{type}$$

該模型中，果實髒亂度( $F_{mess}$ )具備最高之 0.5 權重；考量多汁漿果或具染色性之果實落地後不易清掃，且易發酵產生異味或造成鋪面濕滑，對公共安全與環境衛生衝擊甚鉅，故將其參數最大化設定為 1.0；乾果類影響較輕微設為 0.5，無果實困擾者則為 0.0。其次，考量植株量體與枯枝落葉絕對量呈現正相關，故賦予相對胸徑0.3 之加乘權重。最後 0.2 之權重著眼於清掃預測性( $L_{type}$ )；季節性集中落葉型樹種(設為1.0)雖於特定時節產生較大之環境視覺衝擊，然因其具備時序上之可預測性，管理單位得藉由動態調配清掃人力予以應對，故相對於果實污染，其風險權重予以適度收斂。

本研究盤點大安森林公園內共 139種喬灌木，依據各物種之植物學形態特徵(如板根生成潛力、樹皮紋理與樹洞發生率、葉面積與葉片質地、果實含水量等)，並參酌台灣樹木誌，賦予係數。此係數矩陣為構建本研究空間演算法之基礎。

### (三) 系統實作與空間視覺化架構

為將龐大且抽象的計算結果轉化為管理單位的決策輔助工具，本研究採用開源軟體建構 Web-GIS 系統。

利用Python之pandas與geopandas套件，將上述三項公式封裝為演算法函數，對5,005株樹木進行批次陣列運算。接著萃取綜合風險值，並透過folium套件將結果渲染至互動式地圖上。在視覺化策略上，考量到樹木量體的懸殊差異，本研究捨棄傳統的固定大小點位圖，改採氣泡分級圖(Bubble Map)。氣泡的半徑以非線性縮放(即胸高直徑的平方根)呈現，避免大樹標記掩蓋周遭小樹的視覺干擾。

為確保研究成果能落地應用於第一線公園巡檢業務，本系統最終封裝為「漸進式網頁應用程式(Progressive Web App, PWA)」。相較於傳統網頁或原生APP，PWA具備Service Worker技術，可將圖資與風險資料庫快取至行動裝置端。這使得維護人員即使在公園內部網路死角或伺服器斷線的情況下，仍能透過GPS定位跨裝置進行離線空間檢索、風險熱區導航與紅黃綠警示燈號(高、中、低風險)之判讀，大幅提升都市林經營管理的智慧化程度。



## 四、作品結果說明

本研究針對大安森林公園共計5,005株樹木進行全面性的量測與演算，將成果分為EDS量化分析與Web-GIS決策支援系統開發兩大核心進行說明。前者萃取了都市林的空間潛在風險，後者則將此風險數據轉化為第一線管理單位的實務操作工具。

### (一) EDS量化分析

本研究整合大安森林公園共計5,005株樹木之量測資料，建構都市林EDS空間風險決策支援系統，並產出具備幾何映射特徵之Web-GIS空間圖資。透過非線性縮放之氣泡分級圖與連續色階疊合，系統化了各項EDS指標之地理分佈。在氣候變遷加劇之背景下，此空間圖資將基層綠化管理需求與提升都市韌性之宏觀目標結合，為都市綠地之循證決策(Evidence-based decision making)提供客觀之實證依據。

根系衝突風險之邊緣效應與硬體韌性針對根系衝突風險指數之演算結果，全區平均值達0.39，其中榕屬植物(如垂榕、大葉雀榕等)呈現顯著之高風險特徵。觀測地圖(圖3)，紅色警戒植株集中於公園外圍邊界與主要硬鋪面步道兩側，產生明顯之邊緣效應(Edge effect)。在極端氣候事件(如強烈颱風)頻發之條件下，此類因早期景觀規劃遺緒(密植大型強勢樹種於狹窄樹穴)所致之硬體破壞熱區，不僅加劇日常鋪面維護成本，更易成為都市防災設施如地下管線、避難疏散動線之脆弱節點。透過本系統進行空間盤點與預防性處置如設置阻根板或根系導引，有助於降低樹倒或鋪面損毀之致災風險，實質提升都市基礎設施之防護韌性。

病媒風險等級之區塊化群聚與公衛防禦於病媒風險等級方面，模型評估全區平均值為0.36，統計結果指出具備複雜氣生根、天然樹洞及大型杯狀落葉之植株(如大王椰子、厚葉榕等)為主要高風險來源。其空間分佈並非均勻散佈，而是呈現高度之區塊化群聚特徵，特別集中於公園東南角等特定景觀區段。考量全球暖化與降雨型態改變，此類因人為群植而形成之微棲地空間疊合，極易成為蟲媒傳染病(如登革熱)之孳生溫床。本系統所標定之高風險盲點，可協助公部門將被動之環境客訴處理，轉型為主動之公共衛生防禦機制，針對群聚熱區實施預防性病媒防治作業，強化都市面對氣候變遷下公衛威脅之調適能力。

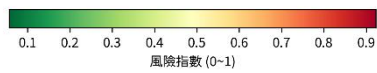
都市髒亂感指數與動態防汛調度都市髒亂感指數之極端值分佈與前述指標截然不同，高風險植株多屬漿果類(如芒果、蓮霧)與大型落葉樹種(如大葉桃花心木)。除果實腐爛發酵影響環境衛生外，空間圖資(圖3)顯示，特定樹種之集中落葉若遇短延時強降雨，極易造成周邊排水溝渠淤積，進而引發局部積淹水。藉由風險數據之空間化揭露，賦予管理單位跨期預測能力，使其得於汛期或極端天氣預報發布前，動態調配清掃人力與資源，優先清除紅色警戒區之落葉與殘果，從而強化都市整體之排洪與防汛韌性。

綜合EDS與差異化管理策略進一步分析指標間之交互關係，發現根系衝突與病媒風險呈現高度正相關( $r=0.85$ )，顯示樹體老化與不當修剪常同時伴隨根系擴張與樹洞積水問題。綜合疊加各項指標所萃取之綜合EDS，其第95百分位數臨界值為0.525，名列前茅之個體多為生長勢極盛之大型榕樹。整體空間分佈(圖3)顯示了園區內部核心綠區低風險、邊陲地帶高負擔之落差。

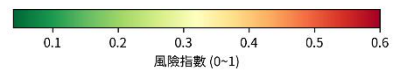
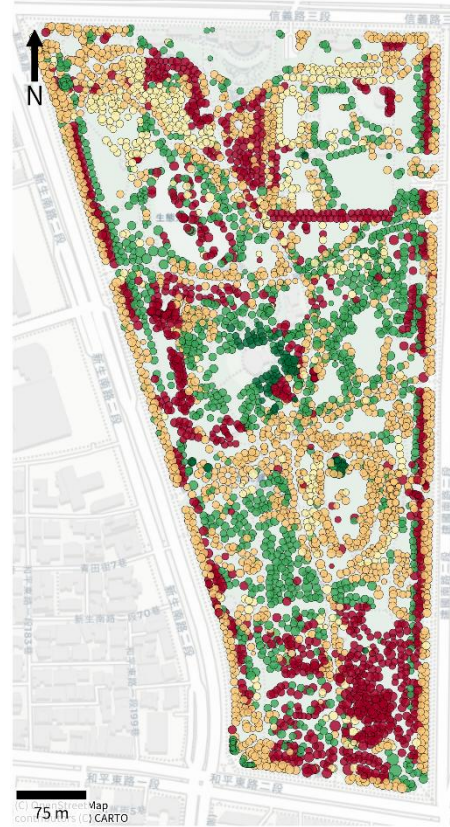
分析結果表明，面對氣候變遷之高度不確定性，都市林營運需改變過往全區均質化之粗放作業模式。透過本Web-GIS系統標定之高風險警戒區，管理單位得實施空間差異化之精準派工。將有限之市政養護資源優先投入高風險熱點之預防與管養，方能於維持都市林碳匯與生態服務效益之際，最小化其衍生之系統性負擔，進而落實智慧韌性都市之永續治理目標。



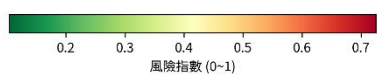
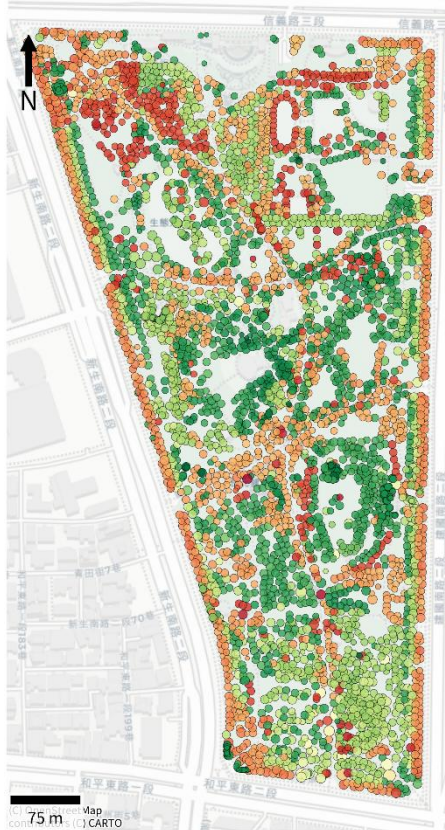
大安森林公園 - 根系衝突風險 ( $R_{conflict}$ )



大安森林公園 - 病媒風險等級 ( $R_{mos}$ )



大安森林公園 - 都市髒亂指數 ( $M_{burden}$ )



大安森林公園 - 綜合生態負擔 (Total EDS Risk)

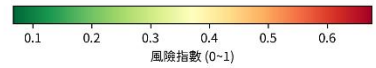


圖3大安森林公園各項EDS風險指數與綜合評估空間分佈圖



## (二) Web-GIS 決策支援系統開發

為將龐雜的分析數據轉化為具備實務操作價值的工具，本研究自主開發出一套具備高互動性的漸進式網頁應用程式(PWA)(圖4)。本系統在技術實作上突破了傳統圖資疊蔽的視覺限制，創新性地導入非線性縮放演算法，利用樹木胸高直徑之平方根動態設定氣泡半徑大小，並結合連續色階渲染技術，將抽象的風險數據轉化為直觀且具備量體感的地理分佈圖。系統核心功能包含多維度風險圖層的動態切換，使用者可於操作介面中即時切換綜合EDS、根系衝突風險、病媒風險等級與都市髒亂感指數等圖層，實現多準則的空間決策評估。

在單株精準管理層面，系統具備強大的互動檢索功能，當管理人員於地圖上點選特定植株氣泡時，系統會立即彈出包含樹種、胸徑、以及各項風險因子量化數值的彈出式視窗(Popup)，將管理尺度從宏觀的分區規劃精細化至微觀的單株管控，落實智慧化巡檢。此外，考量都市林內部常面臨網路訊號死角之實務限制，本系統整合了Service Worker技術與GPS定位功能，支援跨裝置的離線空間檢索與熱區導航。基層維護人員得依賴行動裝置，在斷網環境下精準導航至標定的高風險盲點，執行預防性投藥、設置阻根板或進行精準修剪。

針對氣候變遷引發的極端天氣威脅，本系統增加管理單位動態調度與預測的能力。在汛期或颱風警報發布前，決策者可透過系統篩選功能，預先識別易造成排水淤積的落葉警戒區與結構脆弱之樹倒熱點，進而實施空間差異化之精準派工。此開發成果成功將傳統被動救災的管理模式轉型為主動防禦的科學治理，以有限的市政資源最大化都市綠地之防護韌性，達成智慧韌性都市之永續治理目標。



圖4基於氣泡分級圖之EDS空間資訊查詢系統實作畫面

## 五、作品應用範圍及發展潛能

本研究所開發之都市林 EDS 空間風險決策支援系統具備高度之跨場域擴充能力，其應用範疇可自單一都會公園，進階延伸至全行政區之行道樹與綠地系統管理。在公部門之實務運用上，本系統得直接對接公園路燈工程管理處、環境保護局與水利單位之跨局處業務。透過空間圖資之風險標定，工程單位得於防汛期前針對根系衝突與落葉阻塞熱區進行預防性修剪與疏通；公共衛生單位則可精準鎖定高病媒潛力之植株進行環境消毒。此循證決策模式不僅大幅降低巡護人力成本，更使都市綠地設施之維護由過往災後被動搶修，轉型為災前主動防禦，實質強化都市面對極端氣候之災防韌性。

除公部門之公共治理外，本系統亦具備導入私部門ESG永續管理之應用價值。伴隨企業對廠區綠化與開發案生態效益之日益重視，本系統可協助景觀規劃單位在植栽設計初期，即先行評估潛在之EDS。藉由量化特定樹種未來可能衍生之維護碳足跡(如頻繁動用機具修剪、落葉清運等勞務所排放之溫室氣體)與環境干擾，輔助決策者篩選出兼具景觀美學、低維護負擔且適地適木之植栽配置，進而落實企業永續報告書中對永續之承諾。

針對系統未來之技術發展潛能，本研究規劃朝向動態時空預測與邊緣運算技術整合兩大維度進行深化。於動態時空預測方面，系統底層架構已具備擴充應用程式介面(API)之彈性，未來可進一步介接交通部中央氣象署之即時溫濕度與降雨觀測數據。透過納入氣候時間序列變數，系統將能針對連續強降雨或颱風警報發布期間，動態調升特定樹種之病媒孳生與排水阻塞風險權重，提供具備時效性之防災預警。於硬體整合方面，漸進式網頁應用程式 (PWA) 前端可導入輕量化之影像辨識模組，當第一線巡護人員使用行動裝置拍攝樹木現況時，系統即可輔助判釋天然樹洞積水或根系隆起之幾何特徵，進而自動校正該單株植株之風險參數，形塑具備資料迴饋與更新能力之智慧化管理架構。

從宏觀之都市林生態經濟學視角，本系統具備與既有生態系統服務(Ecosystem Services, ES)評估模型相互疊合之高度發展潛力。當前學界與實務界多聚焦於計算樹木之碳吸存量、微氣候調節與懸浮微粒滯留等正向效益；未來若能將本系統量化之 EDS 負面風險指數作為環境成本抵扣項，將可建構出都市林淨生態效益之綜合決算平臺。此一學理突破不僅能更客觀地呈現樹木對都市環境之真實貢獻，亦能為後續公部門研擬都市林碳匯計價、生態補償機制與綠色金融政策時，提供具備公信力與空間實證基礎之科學量化工具。

為了確保研究成果能具備永續經營，本研究進一步規劃了完整的營運架構。本研究開發之都市林生態系統損害(EDS)空間風險決策支援系統，其營運邏輯旨在透過數位轉型手段，將傳統都市綠地管理由被動救災重構為價值驅動的主動治理，在價值主張上，系統以自動化空間巡檢技術替代高成本的人力目視調查，將質性的管理經驗轉化為量化的數據決策，以達成「低成本、低民怨、高生態」之智慧管理目標。為實踐此目標，系統建置仰賴高解析度無人機航拍圖資、經標註的訓練資料集、GPU 運算伺服器及 Python 演算法模型等關鍵資源，並透過都市林風險特徵提取、單木立體風險清冊建立及EDS風險熱點地圖產製等關鍵活動，確保技術開發與實務需求對接。在合作網絡方面，本研究鏈結學術單位如國立中興大學森林學系、圖資供應商及氣象數據提供單位作為關鍵夥伴，並以公部門養護單位、公衛與環境部門、私部門企業及研究機構為目標客層，透過政府公開招標、產學合作示範計畫與學術發表等多元通路建立顧客關係，提供科學數據決策支援與長期監測服務。財務架構則考量了影像採集與模型訓練算力等成本結構，並規劃以EDS風險地圖建置費、系統訂閱授權費、精準治理諮詢費及整廠輸出至海外市場作為永續之收入來源，建立一套具備技術深度與市場可行性之營運框架。



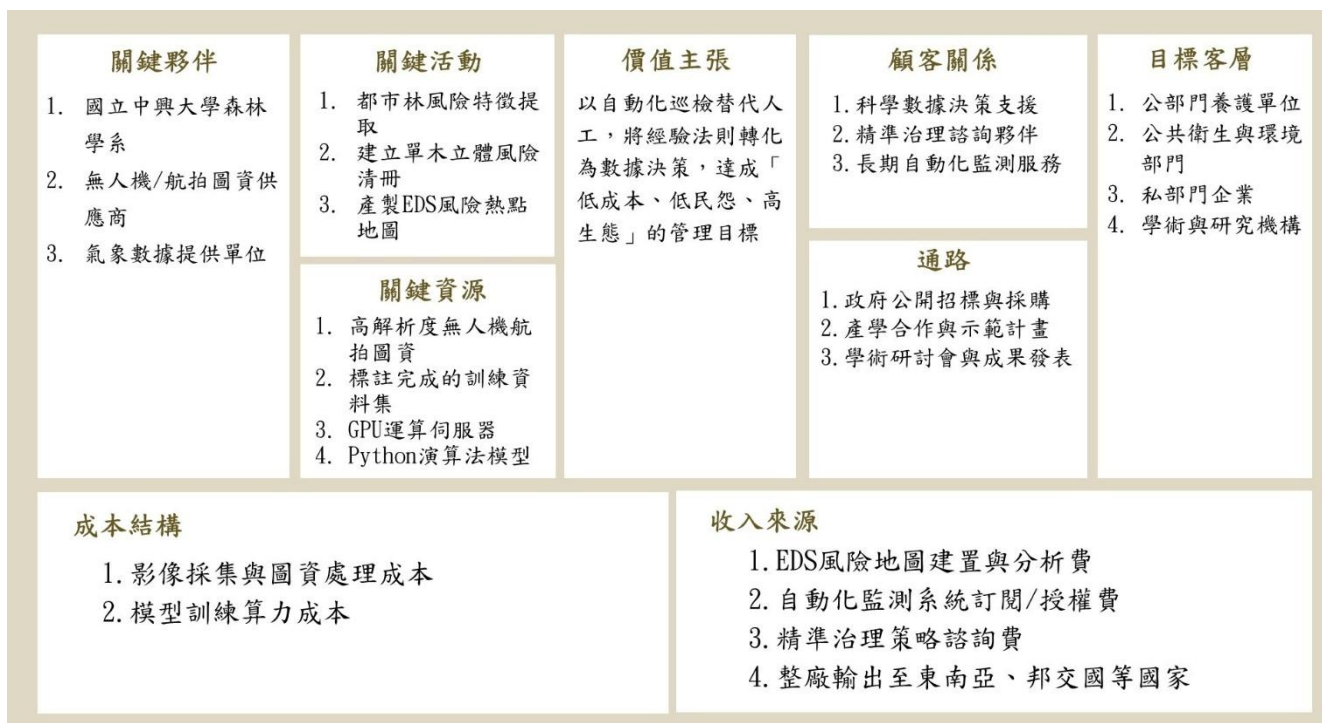


圖5商業模式圖

## 六、工作分配

團隊成員	負責工作
李竹涪	企劃書撰寫、作品說明書撰寫、實地調查、系統模型製作
王雅雯	企劃書撰寫與美編、作品說明書撰寫與美編、實體調查、競賽影片製作
高德耘	企劃書美編、實地調查、競賽影片製作、競賽海報製作



## 七、附錄

附錄一：大安森林公園139種喬灌木之完整係數表

樹種名稱	根系特性 (R_butt)	隱蔽源潛力 (T_hole)	積水潛力 (L_cup)	落葉樹種 (L_type)	果實髒亂度 (F_mess)
九丁榕	1	1	0.5	0	1
亞里垂榕	1	1	0.5	0	1
印度橡膠樹	1	1	1	0	1
厚葉榕	1	1	0.5	0	1
垂榕	1	1	0.5	0	1
大果藤榕	1	1	0.5	0	1
大葉雀榕	1	1	1	1	1
孟加拉榕	1	1	1	0	1
尖尾長葉榕	1	1	0.5	0	1
島榕	1	1	0.5	0	1
榕樹	1	1	0.5	0	1
水同木	1	1	1	0	1
澀葉榕	1	1	0.5	0	1
琴葉榕	1	1	1	0	1
稜果榕	1	1	1	0	1
象耳榕	1	1	1	0	1
雀榕	1	1	0.5	1	1
菩提樹	1	1	0.5	1	1
亞力山大椰子	0	0	1	0	0.5
壯幹棕櫚	0	0	1	0	0.5
大王椰子	0	0	1	0	0.5
旅人蕉	0	0	1	0	0
棍棒椰子	0	0	1	0	0.5
番仔林投	0	1	1	0	0.5
蒲葵	0	0	1	0	0.5
酒瓶椰子	0	0	1	0	0.5
黃椰子	0	0	1	0	0.5
麵包樹	0	0	1	0	1
第倫桃	0	0	1	1	1
洋玉蘭	0	0	1	0	0.5
大葉桉	0	0	1	0	0.5
人心果	0	0	0.5	0	1
李	0	0	0.5	1	1
枇杷	0	0	0.5	0	1
柚子	0	0	0.5	0	1

樹種名稱	根系特性 (R_butt)	隱蔽源潛力 (T_hole)	積水潛力 (L_cup)	落葉樹種 (L_type)	果實髒亂度 (F_mess)
柿子	0	0	0.5	1	1
桃	0	0	0.5	1	1
桑樹	0	0	0.5	1	1
小葉桑	0	0	0.5	1	1
梅	0	0	0	1	1
番石榴	0	0	0.5	0	1
茄苳	0	1	0.5	0	1
芒果	0	0	0.5	0	1
蓮霧	0	0	0.5	0	1
象牙柿	0	0	0.5	0	1
龍眼	0	0	0.5	0	1
苦橙	0	0	0.5	0	1
楊梅	0	0	0.5	0	1
構樹	0	0	0.5	1	1
血桐	0	0	1	0	1
側柏	0	0	0	0	0
小葉南洋杉	0	0	0	0	0
肯氏南洋杉	0	0	0	0	0
竹柏	0	0	0	0	0
羅漢松	0	0	0	0	0.5
黑松	0	0	0	0	0
龍柏	0	0	0	0	0
木麻黃	0	0	0	0	0.5
澳洲茶樹	0	1	0	0	0
桂花	0	0	0	0	0
落羽杉	0	0	0	1	0
池杉	0	0	0	1	0
九芎	0	0	0.5	1	0.5
大花紫薇	0	0	0.5	1	0.5
大葉合歡	0	0	0	1	0.5
大葉桃花心木	0	0	0.5	1	0.5
小葉欖仁	0	0	0	1	0.5
山櫻花	0	0	0.5	1	0
櫻花	0	0	0.5	1	0
大漁櫻	0	0	0.5	1	0
山黃麻	0	0	0.5	1	0
木棉	0	0	0.5	1	0.5
木芙蓉	0	0	0.5	1	0

樹種名稱	根系特性 (R_butt)	隱蔽源潛力 (T_hole)	積水潛力 (L_cup)	落葉樹種 (L_type)	果實髒亂度 (F_mess)
朴樹	0	0	0.5	1	0.5
石朴	0	0	0.5	1	0.5
楓香	0	0	0.5	1	0.5
榔榆	0	0	0	1	0
檫	0	0	0.5	1	0
欖仁樹	0	0	1	1	0.5
水柳	0	0	0	1	0
流蘇	0	0	0	1	0
烏桕	0	0	0.5	1	0.5
無患子	0	0	0.5	1	0.5
盾柱木	0	0	0	1	0.5
紫薇	0	0	0	1	0.5
羊蹄甲	0	0	0.5	1	0.5
豔紫荊	0	0	0.5	1	0.5
臺灣欒樹	0	0	0	1	0.5
苦楝	0	0	0	1	0.5
藍花楹	0	0	0	1	0.5
鐵刀木	0	0	0	1	0.5
阿勃勒	0	0	0	1	0.5
青楓	0	0	0.5	1	0
黃連木	0	0	0	1	0.5
鳳凰木	0	0	0	1	0.5
毛風鈴木	0	0	0.5	1	0.5
風鈴木	0	0	0.5	1	0.5
黃金風鈴木	0	0	0.5	1	0.5
洋紅風鈴木	0	0	0.5	1	0.5
黑板樹	1	0	0.5	0	0.5
白千層	0	1	0	0	0.5
光蠟樹	0	0	0.5	0	0.5
加羅林魚木	0	0	0.5	0	0.5
魚木	0	0	0.5	0	0.5
印度紫檀	0	0	0.5	1	0.5
菲律賓紫檀	0	0	0.5	1	0.5
厚皮香	0	0	0.5	0	0
山芙蓉	0	0	0.5	0	0
山黃梔	0	0	0.5	0	0.5
日日櫻	0	0	0.5	0	0
杜英	0	0	0.5	0	0.5

樹種名稱	根系特性 (R_butt)	隱蔽源潛力 (T_hole)	積水潛力 (L_cup)	落葉樹種 (L_type)	果實髒亂度 (F_mess)
森氏紅淡比	0	0	0.5	0	0
楨梧	0	0	0.5	0	0.5
樟樹	0	0	0.5	0	0.5
水黃皮	0	0	0.5	0	0.5
烏心石	0	0	0.5	0	0
蘭嶼烏心石	0	0	0.5	0	0
牛樟	0	0	0.5	0	0.5
珊瑚刺桐	0	0	0.5	1	0.5
白玉蘭	0	0	0.5	0	0
福木	0	0	0.5	0	0.5
穗花棋盤腳	0	0	0.5	0	0.5
紅楠	0	0	0.5	0	0
香楠	0	0	0.5	0	0
臭娘子	0	0	0.5	0	0.5
臺東漆	0	0	0.5	0	1
臺灣海桐	0	0	0.5	0	0.5
臺灣赤楠	0	0	0	0	0.5
菲律賓饅頭果	0	0	0.5	0	0
披針葉饅頭果	0	0	0.5	0	0
錫蘭饅頭果	0	0	0.5	0	0
金露花	0	0	0	0	0.5
銀樺	0	0	0	0	0
鐵冬青	0	0	0.5	0	0.5
青剛櫟	0	0	0.5	0	0.5
風箱樹	0	0	0.5	0	0
黃禱花	0	0	0	0	0.5



## 八、參考文獻

- 張彤、林秉州 (2024年11月1日)。北市8年來最嚴重災損！市民灌爆蔣萬安臉書：騎車上班像障礙賽。台視新聞網。  
<https://news.ttv.com.tw/news/113110100155001>
- 劉業經、呂福原、歐辰雄 (1994)。台灣樹木誌 (修訂增補版)。國立中興大學農學院出版委員會。
- Anderson, C. C., Metzemacher, A., & Adem Esmail, B. (2025). Boxes of rain: A systematic review on the classes and frameworks of ecosystem disservices. *Ambio*. Advance online publication.
- Derks, M., van der Velden, B., & Roiz, D. (2016). *Aedes albopictus* (Diptera: Culicidae) breeding in urban green spaces: The role of leaf litter and woody debris. *Journal of Medical Entomology*, 53(3), 605-611.
- Gómez-Baggethun, E., & Barton, D. N. (2013). Classifying and valuing ecosystem services for urban planning. *Ecological Economics*, 86, 235-245.
- Lan, T., & Wan, L. (2025). How green infrastructure change shapes regulating ecosystem services in urban landscapes? Trade-offs between urban cooling and stormwater retention in Taipei. *Urban Ecosystems*, 28, 1-15.
- Lee, L. S. (2022). Quantitative tools for the prediction of pavement damages associated with urban trees. *Arboriculture & Urban Forestry*, 48(4), 217-232.
- Löhmus, M., & Balbus, J. M. (2015). Making city infrastructure healthy and safe. *Oecologia*, 179(2), 629-635.
- Lyytimäki, J., & Sipilä, M. (2009). Hopping on one leg – The challenge of ecosystem disservices for urban green management. *Urban Forestry & Urban Greening*, 8(4), 309-315.
- Mullaney, J., Lucke, T., & Trueman, S. J. (2015). A review of benefits and challenges in growing street trees in paved urban environments. *Landscape and Urban Planning*, 134, 157-166.
- Nitoslawski, S. A., Galle, N. J., Van Den Bosch, C. K., & Steenberg, J. W. (2019). The digital forest: Mapping a decade of urban forestry. *Urban Forestry & Urban Greening*, 41, 230-238.
- Randrup, T. B., McPherson, E. G., & Costello, L. R. (2001). A review of tree root conflicts with sidewalks, curbs, and roads. *Urban Ecosystems*, 5(3), 209-225.
- Roman, L. A., Conway, T. M., Eisenman, T. S., Koeser, A. K., Ordóñez Barona, C., Locke, D. H., Jenerette, G. D., Östberg, J., & Vogt, J. (2021). Beyond ‘trees are good’: Disservices, management costs, and tradeoffs in urban forestry. *Ambio*, 50, 615-630.
- Sharma, G., Morgenroth, J., Richards, D. R., & Ye, N. (2025). Advancing urban forest and ecosystem service assessment through the integration of remote sensing and i-Tree Eco: A systematic review. *Urban Forestry & Urban Greening*, 128659.
- Valikhani, R., Shkaruba, A., & Sepp, K. (2025). A systematic review of urban ecosystem disservices and its evaluation: Key findings and implications. *Environmental and Sustainability Indicators*, 26, 100612.
- Ventura, J., Pawlak, C., Honsberger, M., Gonsalves, C., Rice, J., Love, N. L., ... & Ritter, M. (2024). Individual tree detection in large-scale urban environments using high-resolution multispectral imagery. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 130, 103848.
- Worthley, T., Bunce, A., Morzillo, A. T., Witharana, C., Zhu, Z., Cabral, J., ... & Fahey, R. T. (2024). Stormwise: Innovative forest management to promote storm resistance in roadside forests. *Journal of Forestry*, 122(4), 398-409.