

大安森林公園之友基金會
105 年度環境基礎調查計畫調查報告

探討都市公園綠地中微棲地結構與
土壤生物組成及功能運作之關係

計畫主持人：李美慧

計畫執行者：謝 嘉

國立臺灣大學地理環境資源學系



大安森林公園之友基金會

中華民國 106 年 06 月

摘要

隨都市擴張與氣候變遷帶來的衝擊加劇，人為活動改變了都市中生地化循環情況，而不利於都市的永續發展。透過都市規劃與經營管理，都市公園可作為多功能地景並提供多種生態系統服務，其中以植物與土壤為提供生態系統服務之基石。因此了解大安森林公園中地上—地下部交互作用關係對於土壤生物多樣性與其功能運作之情況，對於未來提升公園內土壤生物多樣性與其所衍生之生態系統服務十分重要。因此本計畫於 2015 年 12 月至 2017 年 1 月間，在大安森林公園之草坪以及草坪與喬木等兩種主要棲地類型中，調查植被組成、經營管理與遊憩活動強度，及地表節肢動物組成情況等地上部特性，以及採樣量測表層 10 cm 土壤之物化特性與微生物胞外酵素活性等地下部特性。進一步檢驗地上與地下部特性於棲地類型的差異性，以及地上與地下部特性間的關係性，以了解棲地類型對於土壤生物網組成與其生態作用過程運作的效應，及其中重要的影響因子。調查結果顯示在受到枯落物移除與割草管理下，木本植物所帶來之物理棲地與有機物質資源效應，對於地表節肢動物組成與土壤微生物胞外酵素活性並不具顯著影響，而轉以地表草本植物為主要的影響因子。地表草本植物可透過根部生長提升土壤孔隙度與土壤水壤含量，進而促進微生物胞外水解酵素活性與有機物質降解速率；地表草本植物高度增加可提升地表節肢動物出沒之個體數量與分類群數。基於本調查結果，如欲藉由地上—地下部交互作用關係，提升土壤生物多樣性、增加土壤有機物質含量以促進土壤蓄水能力與植物生長之正面效應，可考量降低枯落物移除與割草管理的頻度，且保留部分枯落物或割草殘遺於地表，以提升地表棲地與有機物質資源的多樣性。另一方面，可進一步透過不同管理頻度下，地表節肢動物組成與土壤微生物胞外酵素活性之變化的調查研究，以了解對於土壤食物網組成與其功能運作干擾較低地經營管理頻度。

目錄

一、計畫緣由.....	1
1. 計畫重要性.....	1
2. 研究計畫目的.....	1
二、文獻回顧.....	2
1. 地上部植被組成與地下部土壤食物網之關係.....	2
2. 都市中人為活動對於地上—地下部交互作用關係之影響.....	4
三、材料與方法.....	6
1. 大安森林公園環境背景介紹.....	6
2. 地上—地下部特性採樣調查與分析.....	8
2.1 環境因子分析.....	8
2.2 採樣區內地上部特性調查.....	9
2.3 採樣區內地下部特性調查.....	10
四、結果與討論.....	14
1. 地上部棲地組成特性.....	14
2. 地上部節肢動物組成特性.....	16
3. 地下部土壤物化特性與微生物胞外酵素活性.....	21
五、結論.....	26
引用文獻.....	27
附錄一 2016 年 1-2 月草坪採樣區內地表積水情形	31
附錄二 各採樣區內地上部與地下部特性平均值.....	32

一、計畫緣由

1. 計畫重要性

隨著都市擴張與氣候變遷所帶來的衝擊加劇，如何透過都市規劃設計或經營管理模式減緩都市化效應的影響，將會是都市邁向永續的重要課題 (UN-Habitat, 2012)。在都市規劃與經營管理中，多功能地景之都市公園提供了多種生態系統服務，其中由生物與土壤所提供的生態服務 (如養分循環、碳吸存、調節水文與氣溫) 為都市農業生產服務，以及休閒遊憩之文化服務的基石 (Lovell and Taylor 2013)。因此藉由規劃與經營管理公園綠地，提升或維護生物多樣性與其衍生之生態系統功能，將有助於提升雜揉人文與自然之都市生態系統的調適力 (Alberti 2010; Taylor and Hochuli 2014)。

公園綠地中的土壤與植被乃為生態服務主要的提供者在地上部與地下部生態交互理論中，不同植被枯落物組成特性 (如含氮比、化學結構複雜度) 會影響細菌與真菌利用情況，進而形成不同之土壤食物網組成的細菌或真菌能量渠道，而具有不同之碳氮物質的分解速率 (Wardle et al. 2004)。然而人為活動會藉使用行為及經營管理模式 (如除割草、枯落物移除、踩踏) 或是添加非自然生成物質 (如化學肥料、有機肥、食物殘渣)，改變公園綠地的有機物質輸入及組成特性、土壤結構與植被組成，進而改變棲地結構與土壤生物組成及其功能 (Byrne 2007; Vodyanitskii, 2015)。

過往對於都市化如何影響都市生物組成，多以地上部的生物組成，如節肢動物、鳥類、蝶類等為對象，與地景尺度下棲地破碎化程度或是棲地結構複雜度進一步連結，而缺乏探討土壤生物組成及其碳氮物質分解的功能性，與地表棲地結構特性之關係性 (如植被組成與其受人為活動干擾情況)(Byrne 2007; Pavao-Zuckerman and Byrne 2009)。透過於公園綠地進行現地生態調查與研究，將有助於了解人為活動影響棲地組成結構、土壤生物組成及其功能運作概況情況，進而將能進一步應用於創造多功能地景與都市生態系統復育，以提升都市生態系統的調適力 (Lovell and Johnston, 2008; Heneghan et al. 2008; Klaus 2013)

2. 研究計畫目的

為探討大安森林公園中，地上部植被及人為活動情況，與土壤生物組成及其功能運作之間的關係性，本研究計畫以大安森林公園中常見並提供不同枯落物之

資源型態的植被類群—草坪、草坪與喬木等，劃分大安森林公園之棲地結構。再進一步分析不同植被類群所構成之土壤生物組成與碳氮分解功能之間的關係性。因此本研究計畫目的如下：

1. 檢視兩個植被類群所構成之棲地類型中，地上部特性（植被類群、人為活動型態與頻率、地表節肢動物組成）與地下部特性（土壤物化特性、土壤微生物胞外酵素活性）是否具有顯著差異。
2. 進一步了解地上部與地下部特性間的關係性。

二、文獻回顧

1. 地上部植被組成與地下部土壤食物網之關係

大氣中的二氧化碳在生態系統中透過光合作用轉成有機碳形式，其再經過生物呼吸作用消耗釋出二氧化碳後，所存下之有機碳即為淨初級生產量 (net primary production)，其進一步存於植物體內，以及藉產生枯落物 (litter) 與泌出物 (exudates) 輸入至土壤中，之後以土壤有機物質型態儲存，以提供異營生物及食物網所需能量。而當異營生物利用淨初級生產量所增加的生物量，再扣除呼吸作用所消耗之能量即為淨次級生產量 (net secondary production)，因此淨初級生產量為生態系統中重要的能量提供者，並以土壤有機物質為主要儲存者。

土壤有機物質的形成與消耗受植被之枯落物與泌出物所輸出的有機物質組成特性，以及土壤食物網之分解作用所影響。土壤食物網組成與結構依功能群可分為微生物分解者、枯落物轉換者 (litter transformers) 或稱為食碎屑者、掠食性節肢動物 (predatory arthropods) 以及生態系統工程師 (ecosystem engineers) (圖 1)。微生物與真菌生物量的比例，會基於兩者對於有機物質組成特性的使用偏好所影響 (Wardle and Yeates 1993)，而進一步影響不同食性偏好 (如食細菌性、食真菌性) 之線蟲、原生動物與節肢動物 (如彈尾目、蟎類、蜘蛛)，形成土壤食物網。枯落物轉換者功能群則主要掌控枯落物的分解作用，其透過嚼食消化將微生物不易分解的枯落物轉為易分解使用的糞便，提升微生物分解代謝可用之資源，其以食碎屑者的彈尾目與蟎類為主要組成。生態系統工程師功能群則為透過移動

或築巢改變土壤物理結構，提升土壤孔隙度供生物棲息，或是透過消化吸收後排出的糞便以提供微生物易使用的資源。

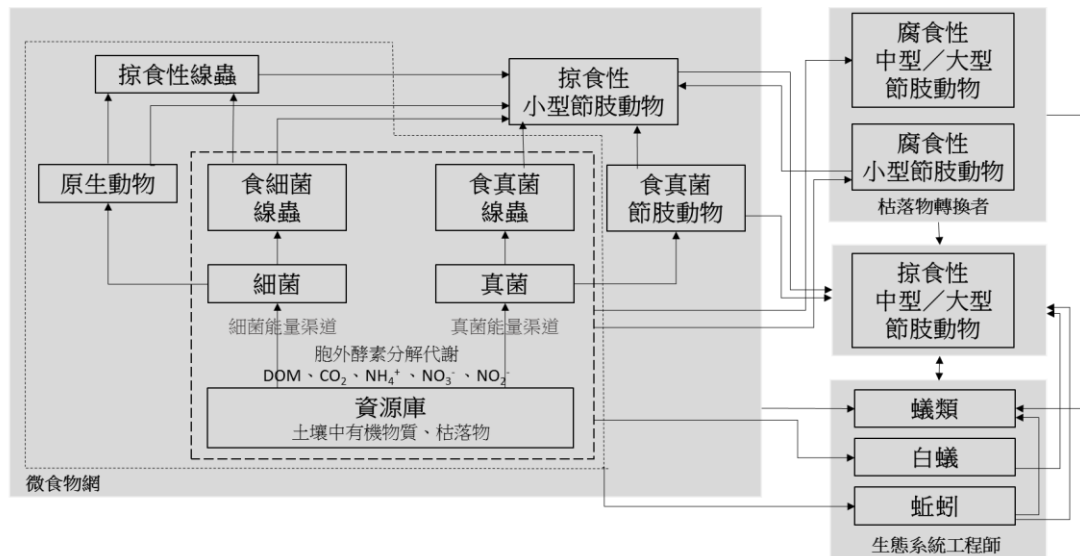


圖 1 土壤中食物網組成結構與其之間已知的交互作用關係

圖片資源：改繪自 Wardle, 2002

進而 Wardle et al. (2004) 提出不同有機物質組成特性之植被枯落物，會形成不同土壤食物網結構，尤以偏好使用含氮比高、含木質素與酚類物質低者的細菌，形成以線蟲、高密度蚯蚓與低密度小型節肢動物為主的食物網結構，進而具有較快速之分解與養分礦化作用速率、低土壤吸存效率的細菌能量渠道；與細菌偏好相反的真菌，形成以高密度小型與大型節肢動物為主，而具有較慢之分解與養分礦化作用速率與高土壤碳吸存效率的真菌能量渠道（圖 2）。因此地上部不同植被組成會影響土壤生物食物網組成情況，尤以土壤微生物、地表節肢動物為直接掌控土壤有機質與地表枯落物分解作用速率者，其多樣性會進一步影響土壤養分提供以及成土作用。



圖 2 地上部植被之枯落物組成特性形成兩大能量渠道及其食物網結構組成

圖片來源：改繪自 Wardle et al., 2004

2. 都市中人為活動對於地上一地下部交互作用關係之影響

都市規劃建置綠地的過程中，人為活動從不同的面向影響了都市綠地生態功能運作情況，如透過景觀植被規劃栽植、植被經營管理（除割草、枯落物移除），以及民眾遊憩使用情況所影響。不同植被類群會藉植物有機物質的組成特性改變土壤生物的組成，如細菌與真菌生物量比例會受具不同有機物質特性的植物組成所影響，進而影響公園綠地中土壤食網結構中線蟲與彈尾目的數量 (Vauramo and Setälä 2010)，或是透過改變微棲地條件，而對節肢動物多樣性組成產生影響 (McIntyre et al. 2001; Philpott et al. 2014)。都市中節肢動物群落組成，除會受公園綠地內部植被組成所影響外，也可能會受到都市綠地周圍地景組成所影響。Egerer et al. (2017) 指出地表遊獵型的掠食者蜘蛛於都市環境中可能的移動範圍為 500 m 至 1 km，若都市綠地周圍 1 km 內都市土地利用強度（道路或建物面積比例）愈高，則可能會對於地表遊獵型的掠食者蜘蛛移動與播遷具有負面影響，進而降低其於綠地中的多樣性。

另一方面，公園中植被經營管理方式也會藉改變棲地結構與干擾而對植物與土壤生物組成產生影響，如草坪割草管理頻率愈高，對於食碎屑者之彈尾目與掠食者蜘蛛的個體數量與體型具有負面效應 (Byrne and Bruns 2004; Egerer et al. 2017; Sattler et al. 2010)。因此，地表節肢動物中掠食者與分解者之組成與個體數量的變化，可能會藉由改變土壤食物網中由上位營養階層影響下位食碎屑者個體數量或土壤微生物生物量，影響公園綠地中有機物質的分解作用速率，進而影響土壤養分提供以及成土作用的情況。

都市公園綠地為結合了不同植被組成、地表覆蓋型態空間配置、使用行為與經營管理模式等交互作用的環境。但對於公園綠地中，地表覆蓋型態如何影響土壤有機物質含量，仍缺乏將地上部之植被組成、人為活動對於有機物質輸入情況的影響，以及地下部土壤中微生物與分解者群落分解功能性進行連結。因此本研究計畫建立一概念模型（圖 3），以進一步探討大安森林公園中，地上一地下交互作用與生物多樣性及生態功能的關係性，以了解土壤生物多樣性與其所能提供之生態功能。

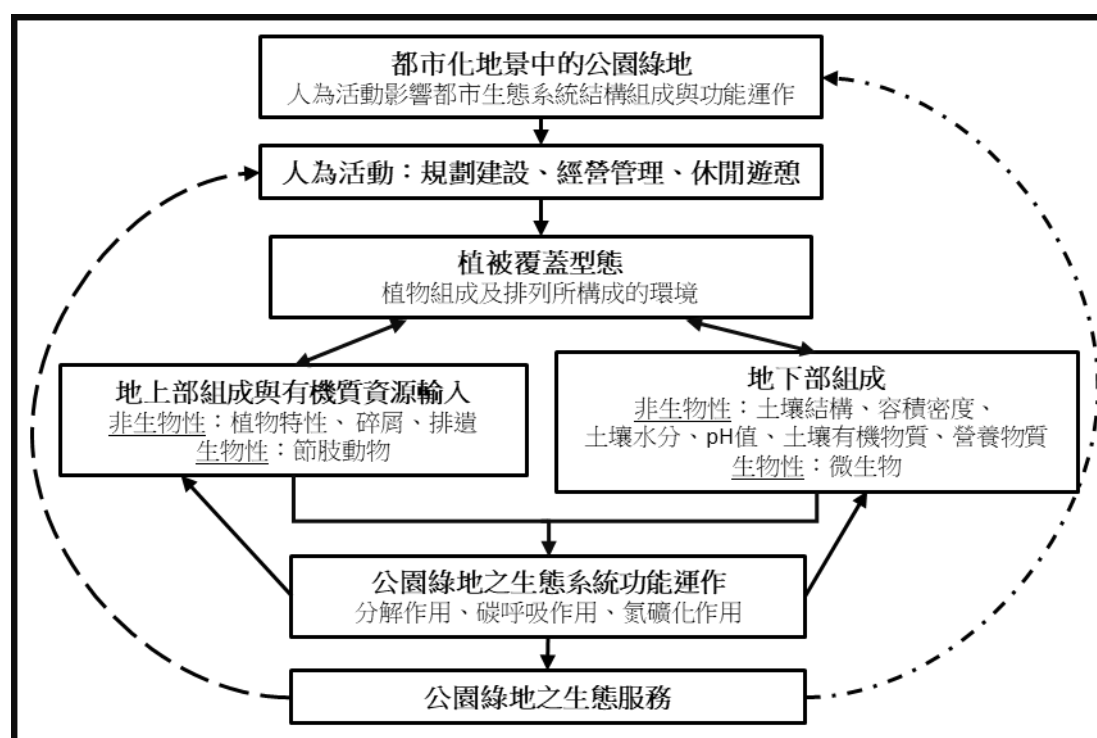


圖 3 公園綠地中地上部與地下部生物多樣性與功能運作之關係性的概念模型

圖片來源：改繪自 Byrne, 2007

三、材料與方法

本研究選擇台北市都市公園中常見的兩种植被棲地類型—草坪、草坪與喬木等，進行地上部特性與地下部特性的調查採樣分析，而研究採樣調查流程如圖 4 所示。

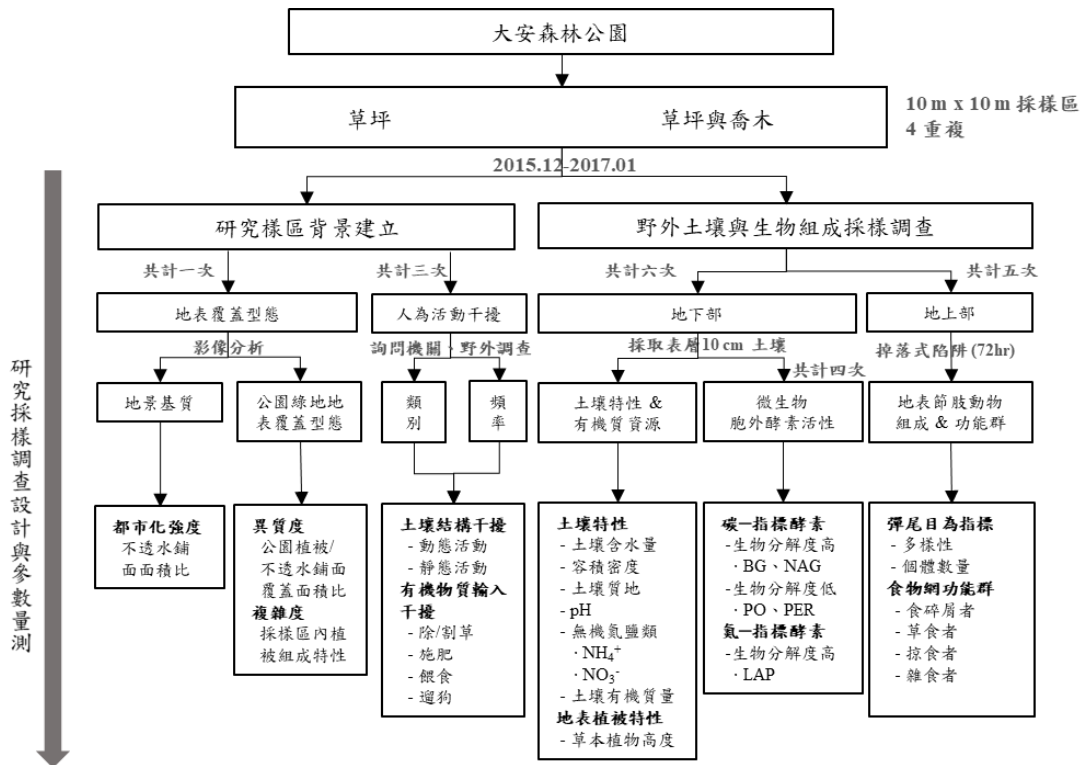


圖 4 研究計畫採樣調查與分析流程

1. 大安森林公園環境背景介紹

大安森林公園位於台北市中心 (圖 5)，於 1992 年始建立而在 1994 年對外開放。其功能屬性為都市森林、防災與休閒遊憩等功能 (臺北市工務局公園路燈工程管理處 2016a, 2016b)。其面積為 259,293 m^2 ，而氣候條件以距離最近之中央氣象局臺北測站 (25°02' 23" N, 121°30' 24" E) 的氣候資料為代表，其過去十年 (2006-2015 年) 年均溫為 23.4 $^{\circ}\text{C}$ ，而年總降雨量為 2,410 mm (圖 6)。

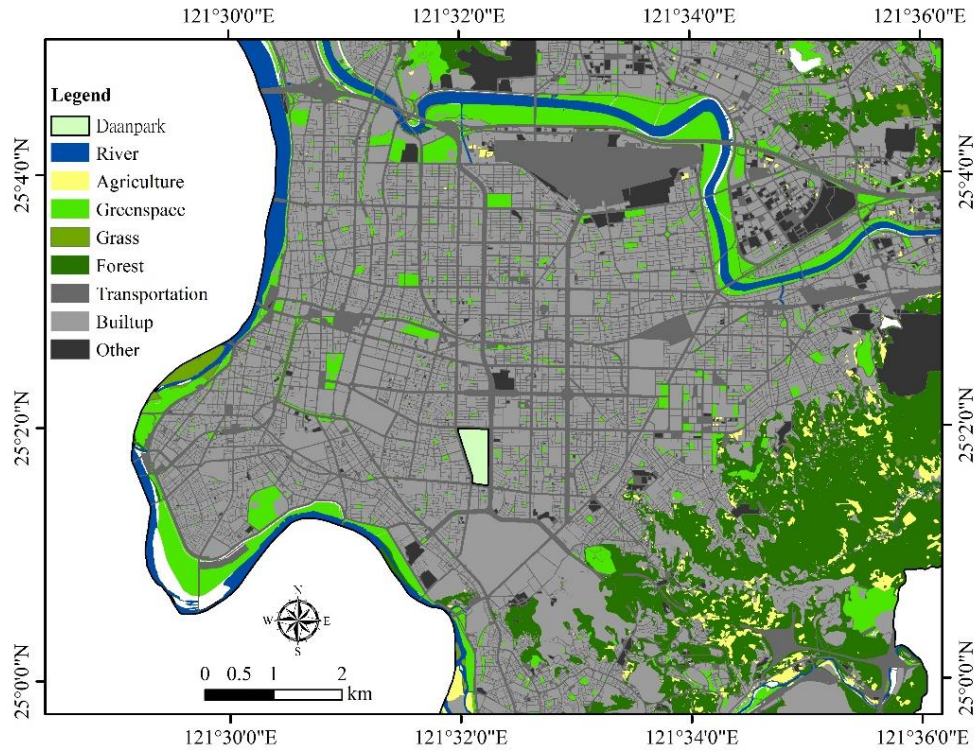


圖 5 大安森林公園位置與周圍土地利用型態

圖資來源：內政部國土測繪中心之 2006 年第二次土地利用調查結果

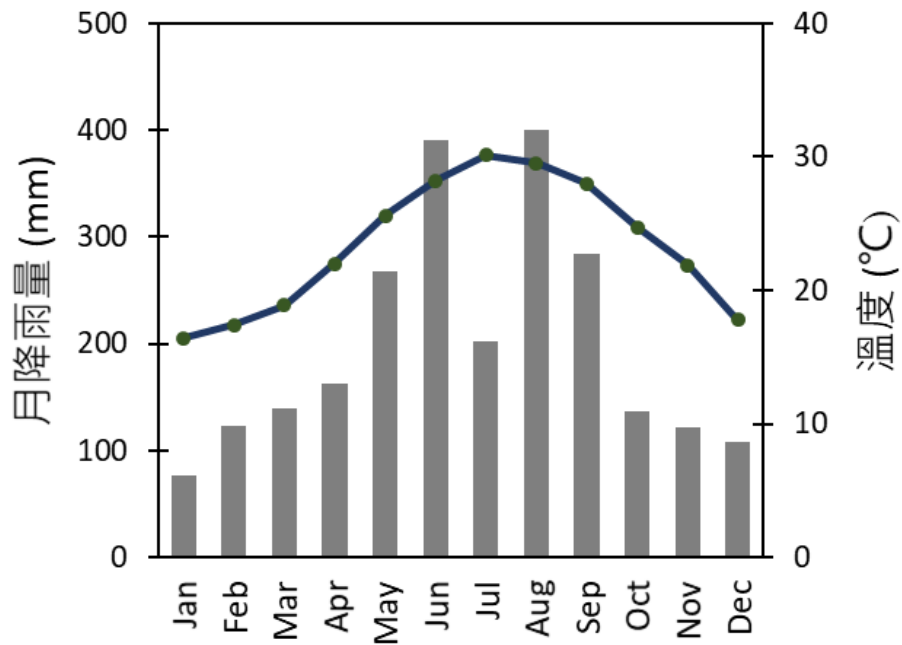


圖 6 臺北測站近十年 (2006-2015 年) 年均溫與年均降水量

資料來源：中央氣象局 <http://www.cwb.gov.tw/V7/climate/watch/watch.htm>

在研究公園中，以高度 4 m 作為區分喬灌木的標準 (Chong et al., 2014)，進行草坪以及喬木與草坪的分區 (圖 7)。再於草坪與喬木 (TG) 與草坪(G) 兩個棲地類型覆蓋的區域內各劃設 4 重複的 10 m x 10 m 的採樣區、，以進行地上部與地下部特性的調查。

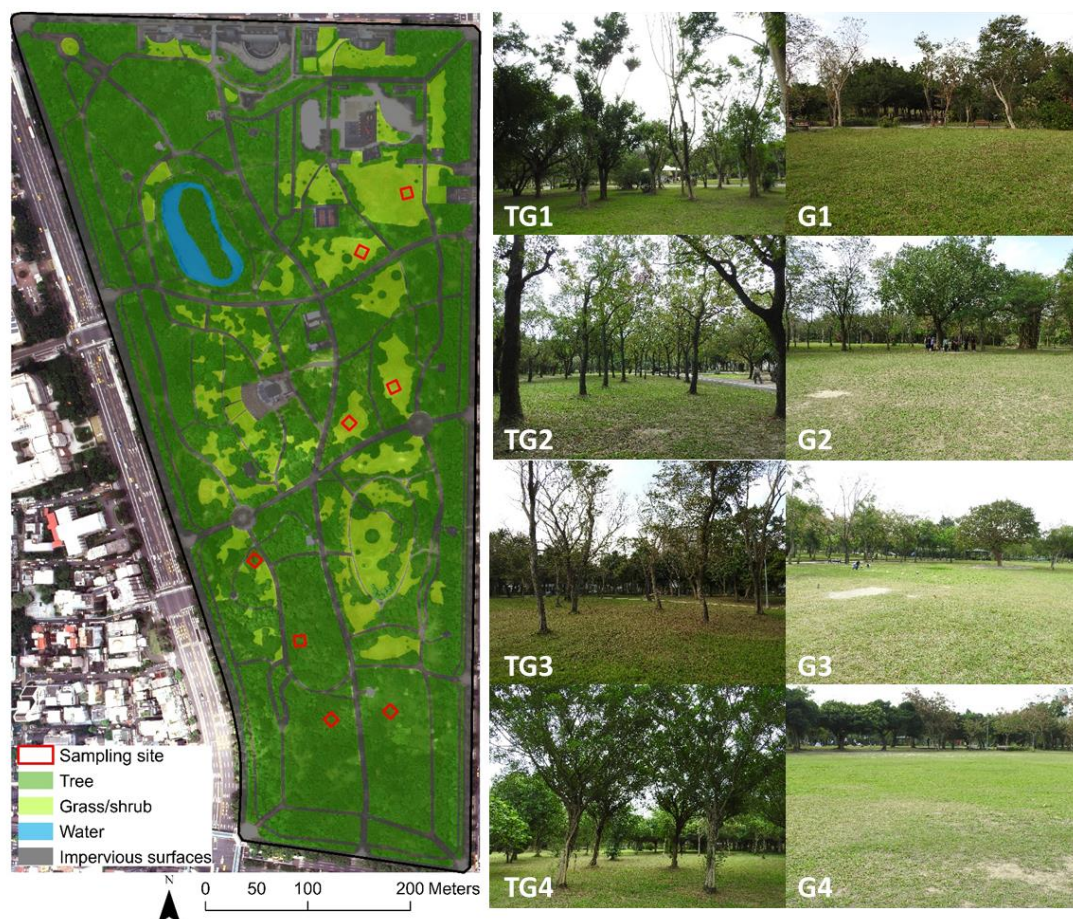


圖 7 大安森林公園之地表覆蓋型態與兩棲地類型採樣區

圖資來源：購自林務局農林航空測量所 (影像日期：2016.07)

2. 地上—地下部特性採樣調查與分析

2.1 環境因子分析

2.1.1 地景基質土地利用型態分析

使用 ArcGIS 10.1 軟體以大安森林公園邊界向外劃設 1 km 範圍，以作為了解可能影響地表節肢動物組成的地景效應範圍 (Egerer et al. 2017)。利用 96 年度國土利用調查成果之台北市地區的向量圖層 (內政部國土測繪中心，2006)，將周圍土地利用分類為森林、草地、都市綠地、農地、不透水鋪面，以及其他等六種。

進一步計算各土地利用型態所佔 1 km 範圍面積比例，以了解都市土地利用強度。

2.1.2 公園地表覆蓋型態分析

大安森林公園地表覆蓋型態分析採用高解析度之航照圖，並利用 ArcGIS 10.1 軟體數化公園內高於 4 m 的木本植物 (Chong et al. 2014)、進行割草管理的草本植物與低於 4 m 的灌木、不透水鋪面 (水泥道路與建物)，以及水體等四種覆蓋型態，進一步計算各地表覆蓋型態所佔公園面積比例。

2.2 採樣區內地上部特性調查

2.2.1 植物特性調查

於 2015 年 12 月、2016 年 7 月，以及 2017 年 1 月各進行一次木本植物與草本植物的特性調查。每次調查喬木組成特性以普查方式進行，調查喬木顆數、種類數量、胸高直徑與樹高；地表植被覆蓋度以方框網格法隨機抽樣，調查 100 m² 採樣區內 5 個 50 cm x 50 cm 方框內之地表植被覆蓋度。

2.2.2 經營管理與遊憩活動調查

經營管理類型與頻度藉由詢問主管機關進行了解。遊憩活動之類型與強度的調查於 2016 年的 3 月、7 月與 11 月各進行一次，每次調查於平日與假日各一天，一天內分為三個時段：08:00-10:00、13:00-15:00、17:00-19:00 來進行調查。在每個調查時段內，於各 100 m² 採樣區範圍外定點觀察採樣區內動態、靜態、遛狗與餵食等活動者數 10 分鐘。各採樣區內單日三個時段之各遊憩類型的活動人數進行平均，作為單日每 10 分鐘活動者數量。進一步將平日與假日單日活動者數量以發生天數進行加權平均： $(5 \text{ 天} \times \text{平日每 10 分鐘活動者數量} + 2 \text{ 天} \times \text{假日每 10 分鐘活動者數量}) / 7 \text{ 天}$ ，而後將其轉為每小時活動者數量，以作為各樣區之遊憩活動強度。

2.2.3 節肢動物採樣

地表節肢動物的採樣於 2016 年 2 月、4 月、8 月、11 月與 12 月進行，共計 5 次。掉落式陷阱 (McIntyre et al. 2001) 為最適合用於地表節肢動物採樣的方法，參考 Larson et al. (2012) 為了解使用殺蟲劑之草坪經營管理模式，對於節肢動物組成影響之掉落式陷阱設計，於各採樣區內以直徑 3 cm 深度 11.5 cm 的 50 ml 塑

膠離心管作為收集容器設置 5 個掉落式陷阱。掉落式陷阱的設置以採樣區中心向四邊平均分布於採樣區內可設置的區域，各陷阱相距 3 m 且距邊緣 2 m，且放置時陷阱口與地表齊平。調查進行時，於離心管內裝入 20 ml 75%酒精作為保存液並放置 72 小時。72 小時過後倒出內部保存液與樣本，將各樣區五個掉落式陷阱所捕獲之樣本匯集為一個樣本後以 75%酒精保存。而後地表節肢動物利用顯微鏡觀察外觀以分類至目或科級，以及食性功能群 (Mueller et al. 2016; Scheu 2002; Vauramo and Setälä 2010)。

2.3 採樣區內地下部特性調查

2.3.1 土壤採樣

土壤採樣於 2016 年 2 月至 12 月每兩個月進行一次，共計 6 次。表層 10 cm 的土壤為有機物質碳氮礦化作用，與人為活動干擾交互作用最強的土層 (Cusack et al. 2010; Cusack 2013)，進而每次採樣使用直徑 3.8 cm 的不鏽鋼管進行表層 10 cm 土壤的採集。每次採樣於各採樣區內利用簡單隨機採樣法 (simple random sampling) (行政院環境保護署，2015)，隨機採集 4 個土壤樣本。採集之土壤樣本參考 Saiya-Cork et al. (2002) 與 Yao et al. (2009) 對於土壤樣本保存的步驟，將土壤樣本密封後保存於 4 °C 環境至進一步分析。4 個土壤樣本分為 2 份次樣本，1 個樣本不經前處理以進行土壤水分含量、土壤容積密度，以及有機質含量的量測；另 3 個土壤樣本均勻混合為複合樣本，再於室溫隔夜風乾後利用篩網篩至 < 2 mm，以進一步用於分析土壤 pH 值、微生物胞外酵素活性、土壤無機氮營養物質濃度分析。惟微生物胞外酵素活性測量於採樣後 2 天內完成，其餘土壤物化特性量測於採樣後 7 天內完成。

2.3.2 土壤容積密度、水分含量、有機質含量與酸鹼值

土壤總體密度與土壤含水量使用土罐法 (core method; Blake, 1965) 與烘乾稱重法進行的量測。將已知體積的土壤取出置於已知重量的蒸發皿中以 105 °C 烘箱烘乾 72 小時，再取出進行稱重。兩者重量差即為土壤水分，而乾土重除以原土壤體積則為土壤容積比重。土壤有機物質含量的量測採用乾灰化法 (loss on ignition; Salehi et al., 2011)，將烘乾後土壤研磨篩至 < 2 mm，取 5 g 土壤置於鋁盤

中放入高溫烤箱中，以 360 °C 灰化 2 小時。而後取出放涼後量測重量，重量差即為土壤總有機質含量。

2.3.3 土壤酸鹼值

土壤 pH 值依據環保署「土壤酸鹼值 (pH 值) 測定方法 - 電極法」進行 pH 值的量測，以 1:1 (wt/wt) 的比例將 10 g 混合風乾過篩之土壤樣本加入 10 mL Milli-Q 純水，攪拌 5 分鐘後，靜置 1 小時待固體沉澱後，直接以 Eutech-pH 510 pH 儀直接量測 pH 值。

2.3.4 土壤硝酸氮與氨氮

土壤中硝酸鹽氮與氨氮萃取依據 Keeney and Nelson (1982) 與 Bremner and Keeney (1965) 使用氯化鉀 (KCl) 萃取土壤中硝酸鹽氮與氨氮之方法，以 1:10 (wt/wt) 之比例，將混合風乾過篩之土壤樣本加入 1 M KCl 後，置於搖晃機上以中速搖晃 30 分鐘萃取無機氮鹽類。再以 900 x g 進行離心 10 分鐘後，取離心後之上清液保存。土壤水樣中硝酸鹽氮與氨氮之濃度測定皆於萃取後七天內分析完成，於分析前萃取樣本皆保存於 4°C 避光環境。

土壤水樣之硝酸氮量測採用 American Publish Health Association (1999) 量測水樣中硝酸鹽氮的分光光度計法，其藉由硝酸氮於 220 nm 波段吸光而於 275 nm 波段不吸光的特性，以 220 nm 波段吸光減去兩倍 275 nm 吸光值之淨吸光值計算水樣中硝酸氮濃度。220 nm 與 275 nm 的波段吸光值使用 Hitachi UV/Vis U2900 spectrophotometer 之雙光槽紫外光/可見光光譜儀並搭配 1 cm 光徑之石英樣品槽以進行量測。並以 1 M KCl 序列稀釋硝酸氮離子標準溶液為 0 mg L⁻¹、1.25 mg L⁻¹、2.5 mg L⁻¹、5 mg L⁻¹、10 mg L⁻¹ 等五點濃度 ($R^2 > 0.999$)，計算檢量線以測定硝酸氮濃度。

土壤水樣氨氮量測根據美國 HACH 公司 DR3900 分光光度計之 Nitrogen, Ammonia - Nessler Method (Hach company, 2012) 的氨氮量測方法 (偵測範圍為 0.02 to 2.5 mg L⁻¹)。其原理為利用碘汞酸鉀 (K₂HgI₄) 會與氨氮螯合形成黃棕色之化學物質的特性，以利用該物質於 400 nm 至 425 nm 波段吸收值以測定氨氮濃度。進而土壤水樣中的氨氮濃度之策定為依序加入一定比例的 Mineral

Stabilizer、Polyvinyl Alcohol Dispersing Agent，及 Nessler Reagent 等所需試劑¹，靜置 1 分鐘後使用 Hitachi UV/Vis U2900 spectrophotometer 之雙光槽紫外光/可見光光譜儀量測 425 nm 之吸光值。並以 1 M KCl 序列稀釋氯化銨 (NH₄Cl) 離子標準溶液為 0 mg L⁻¹、0.625 mg L⁻¹、1.25 mg L⁻¹、2.5 mg L⁻¹ 等四點濃度 (R² > 0.99)，計算檢量線以測定土壤水樣中氮氮濃度。

2.3.5 土壤微生物胞外酵素活性

量測主要降解有機質進行碳氮礦化作用之指標酵素的活性 (Sinsabaugh et al. 2008)，以代表土壤中微生物進行物質代謝與元素循環的功能運作 (表 1)。胞外酵素活性的測定調整自 DeForest (2009)、German et al., 2011 與 Sinsabaugh et al., 2008，以可見光與螢光分析方法搭配 96-well 微孔盤進行土壤胞外氧化與水解酵素活性的測定。土壤胞外酵素活性皆於採樣後 48 小時內分析完畢。土壤胞外酵素的萃取，以 5 g 混合風乾過篩之土壤樣本加入 10 mL 50 mM、pH 5.0 Acetate buffer 的 50 mL 離心管中，以振盪器高速振盪 2 分鐘。而後取 200 μ L 土壤混合液作為土壤酵素樣本，再依表 2 所列之基質進行避光恆溫培養與可見光吸收值或螢光強度測定。為使土壤微生物運作情況近於野外真實情況，使用近十年月均溫資料 (圖 6) 作為培養溫度。

表 1 土壤中微生物胞外氧化與水解酵素與物質循環代謝過程

酵素	編碼	元素	作用過程與產物
氧化酵素			
peroxidase (PER)	EC 1.11.1	碳	降解環狀有機物質，尤其是木質素 (lignin)與酚類 (phenolic)
phenol oxidase (PO)	EC 1.10.3	碳	降解環狀有機物質，尤其是木質素 (lignin)與酚類 (phenolic)
水解酵素			
β -glucosidase (BG)	EC 3.2.1.21	碳	有機質的分解，將纖維素降解為低聚物物值，如葡萄糖
β -N-acetylglucosaminidase (NAG)	EC 3.2.1.30	碳、氮	降解來自真菌細胞壁與節肢動物外骨骼的低聚物幾丁質
leucine aminopeptidase (LAP)	EC 3.4.11.1	氮	移除蛋白質肽鍊中的胺基酸

¹ 使用 HACH 公司所販售之 Nitrogen-Ammonia Reagent Set, Nessler, Cat. No. 2458200

表 2 土壤微生物胞外酵素測定之基質與量測波段

酵素	基質	基準品	量測波段	反應時間
PER	25 mM L-3,4-dihydroxyphenylalanine 0.3% H ₂ O ₂	-	可見光 450 nm	5 min
PO	25 mM L-3,4-dihydroxyphenylalanine	-	可見光 450 nm	5 min
BG	200 μM 4- methylumbelliferyl β-D glucopyranoside	10 μM 4-methylumbelliferone	螢光 ex:365 nm、em:450 nm	1 h
NAG	200 μM 4-methylumbelliferyl N-acetyl-β-D glucosaminide	10 μM 4-methylumbelliferone	螢光 ex:365 nm、em:450 nm	0.5 h
LAP	5 mM leucine p-nitroanilide	1 mM p-nitroaniline	可見光 405 nm	8 h

四、結果與討論

1. 地上部棲地組成特性

大安森林公園於公園周圍地景組成、公園覆蓋型態與採樣區內地上部棲地特性之結果表示於表 3。公園周圍 1 km 內的土地利用型態主要為不透水層鋪面，而公園內部以木本植物為主要的地表覆蓋型態。採樣區內部植被的組成特性中，木本植物的特性於草坪與喬木的採樣區間變異不大，而草本植物覆蓋情況在草坪與喬木略低於草坪。另一方面，採樣區內整體遊憩活動強度假日高於平日（圖 8），其中僅動態遊憩活動強度在兩個棲地類型之間具有顯著差異，草坪顯著高於草坪與喬木。透過地上部棲地組成特性的結果顯示，地表植被覆蓋度可能受到木本植物或遊憩強度所影響。

進一步比較木本植物特性與遊憩強度對於地表草本植物覆蓋度的影響（圖 9），地表草本植物覆蓋度與木本植物之胸高直徑具有負向趨勢，與遊憩活動強度無明顯趨勢。此結果顯示較大的樹可能藉由較大的樹蔭面積，進而降低地表植物生長所需之陽光資源，使地表植物覆蓋度於草坪與喬木中較低。綜觀以上結果，採樣調查區內部地上部棲地組成特性，主要以植被組成與經營管理類型為主要差異。遊憩踩踏對於地表植物生長的潛在負面效應於本調查中並不顯著。

表 3 兩種棲地類型於不同空間尺度下之地上部特性

	TG	G
公園外部周圍 1 km 內地景組成		
不透水層鋪面 (%)	91.12	
農地 (%)	0.00	
綠地 (%)	6.06	
草地 (%)	0.01	
森林 (%)	0.01	
其他 (%)	2.80	
公園內部覆蓋型態		
草坪/灌木 (%)	12.04	
樹木 (%)	61.32	
不透水層鋪面 (%)	25.51	
水體 (%)	1.13	

表 3 續

	TG	G
採樣區內部		
植被組成		
樹—棵數	3.0±0.0	-
樹—種數	1.3±0.5	-
樹—胸高直徑 (cm)	27.5±5.9	-
樹—樹高 (m)	10.6±2.4	-
草—覆蓋度 (%)	89.6±7.2	97.0±1.7
遊憩活動強度 (每小時活動者數)		
動態	1.1±0.2*	12.7±7.1*
靜態	0.0±1.0	1.6±2.0
遛狗	0.6±0.3	0.3±0.1
餵食	0.0±0.0	0.0±0.0
經營管理類型與頻率		
枯落葉移除	2-3 天	無
割草殘遺移除	割草後 2-3 天	
割草	夏季每 20 天、冬天季每 30 天	
施肥	無	無
灌溉	夏季乾旱	

N=4; Mann-Whitney test 顯著性: * $p < 0.05$

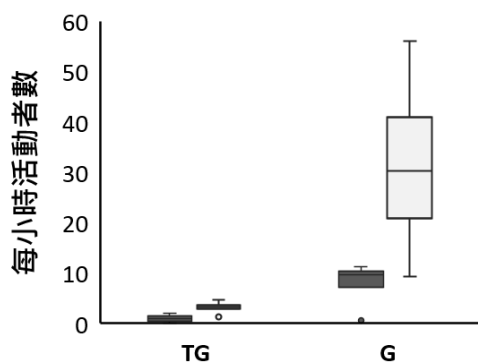


圖 8 兩種棲地類型內平假日遊憩強度

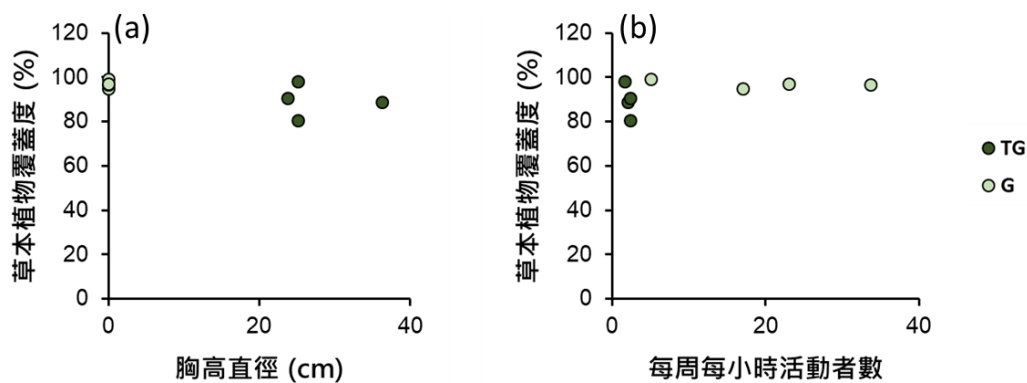


圖 9 草本植物覆蓋度與 (a) 木本植物特性或 (b) 遊憩強度之關係

2. 地上部節肢動物組成特性

本調查透過掉落式陷阱共捕捉到分屬於 23 個目或科級分類群之 20,480 隻個體 (表 4)。地表節肢動物的組成以中型之跳蟲 (Collembola)與蟎類 (Oribatida 與 Mesostigmata)，以及大型的螞蟥 (Formicidae) 及蜘蛛 (Araneae) 為主要，共佔總個體 93.5%。其中又以跳蟲 (Collembola) 為主要的優勢分類群，共佔總個體 69.4%。

表 4 所調查到之節肢動物所屬分類群、數量與特性

分類群	數量	佔總體百分比(%)	食性功能群	體型*
Entognatha				
Collembola				
Arthropleona	6,885	33.62	食碎屑者	中型
Symphypleona	7,331	35.8	食碎屑者	中型
Arachnida				
Acari				
Trombidiformes				
Oribatida	908	4.43	食碎屑者	中型
Mesostigmata	1,832	8.95	掠食者	中型
Araneae	556	2.71	掠食者	中型
Insecta				
Coleoptera				
Staphylinidae	175	0.85	掠食者	大型
Dung beetles (Scarabaeidae)	48	0.23	食糞者	大型
Others	372	1.82	草食者	大型
Blattaria	1	<0.01	食碎屑者	大型
Hemiptera	114	0.56	食碎屑者	大型
Orthoptera				
Gryllidae	36	0.18	草食者	大型
Gryllotalpidae	6	0.03	雜食者	大型
Acridoidea	6	0.03	草食者	大型
Thysanoptera	10	0.05	草食者	大型
Lepidoptera larva	9	0.04	草食者	大型
Diptera	284	1.39	食碎屑者	大型
Larva	55	0.27	食碎屑者	大型
Hymenoptera				
Formicidae	1,640	8.01	雜食者	大型
Others	74	0.36	授粉者、寄生者	大型
Dermaptera	90	0.44	雜食者	大型
Psocoptera	5	0.02	草食者	大型

表 4 續

分類群	數量	佔總體百分比(%)	食性功能群	體型*
Malacostraca				
Isopoda	34	0.17	食碎屑者	大型
Chilopoda	6	0.03	掠食者	超大型
Diplopoda	3	0.01	食碎屑者	超大型
總共	20,480	100		
分類群數	23			

*中型：體長界於 $100\ \mu\text{m} < < 2\ \text{mm}$ ；大型： $2\ \text{mm} < < 2\ \text{cm}$ ；超大型 $> 2\ \text{cm}$

進一步篩選去除飛行性之節肢動物，如雙翅目成蟲與蟻科以外之膜翅目蜂類等，以分屬於不同食性功能群的 20,122 隻個體，分析兩種棲地類型中節肢動物組成特性於不同月分的變化情況。結果顯示節肢動物個體數量、分類群數與功能群組成在棲地之間並無顯著差異，而於調查月分間具有顯著差異（表 5）。節肢動物個體數量、分類群數於月分間的變化與月均溫變化的趨勢相似（圖 10、圖 11），顯示氣溫為影響外溫動物之地表節肢動物出沒的個體數量與多樣性的重要環境因子。

表 5 節肢動物特性之二因子變異數分析結果

因子	d.f.	F-values		
		個體數量	分類群數	功能群組成
棲地	1	0.01	4.18	1.62
月分	4	10.67***	39.54***	6.41***
棲地 x 月分	4	4.16**	3.79*	2.48**

N=4；星狀符號代表二因子重複變異數分析顯著性：* $p < 0.05$ ；** $p < 0.01$ ，*** $p < 0.001$

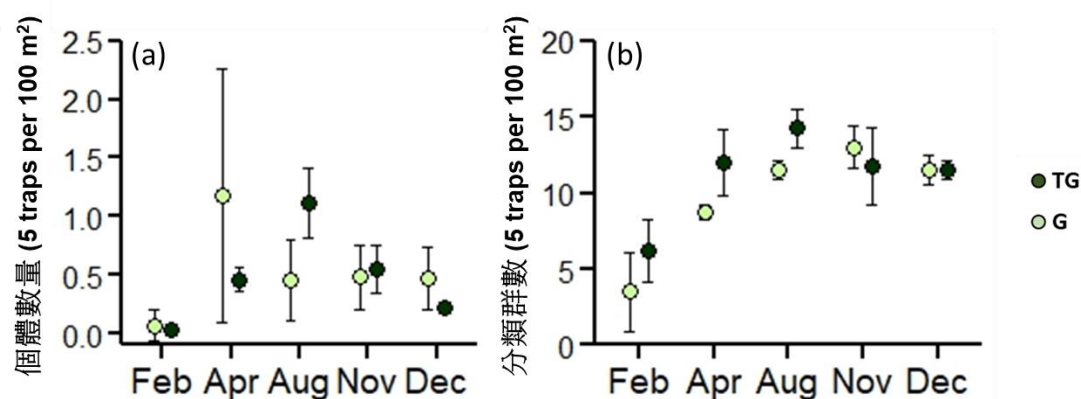


圖 10 兩種棲地類型中節肢動物 (a) 個體數量與 (b) 分類群數於 2016 年內不同月分的變化情況 (平均值 $\pm$ 標準差)

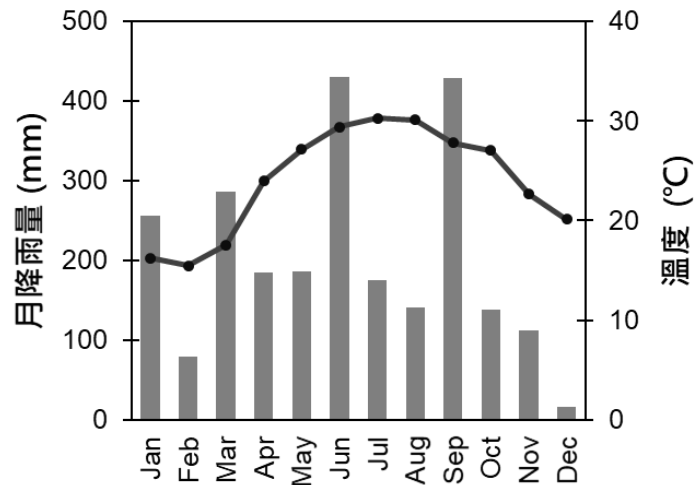


圖 11 臺北測站 2016 年月均溫與月降雨量

資料來源：中央氣象局 <http://www.cwb.gov.tw/V7/climate/watch/watch.htm>

在兩棲地類型中功能群整體組成無顯著差異的情況下，透過節肢動物功能群的非計量多元尺度圖，進一步觀察各調查月分中功能群於棲地類型間的變化（圖 12）。各月分的地表節肢動物功能群組成主要以二月分較有明顯的分群，基於現地採樣觀察在一月底至二月初草坪棲地類型中地表有積水現象（附錄一），進而影響二月之地表節肢動物出沒的情況。其他四個月分的非計量多元尺度圖顯示，草坪與喬木棲地類型中，大型食碎屑者與食糞者的個體數量略高於草坪棲地類型。

本計畫所調查到之大型食碎屑者為鼠婦（佔總個體 0.17%）與雙翅目幼蟲（佔總個體 0.27%），前者出沒數量主要受到枯落物層所影響（Riedel et al. 2009; Pfiffner and Luka 2000），而土壤濕度與枯落葉層對後者的出沒數量具有正面效應（Frouz 1999; 楊平世等，2015）。另一方面，所調查到之食糞者為糞金龜，依據其食性與出沒偏好，其較偏好哺乳類糞便與有樹蔭之陰涼環境（黃明樹、留淑娟，2005），而都市公園中哺乳類糞便可能來源為松鼠與狗隻，（王嘉靖，2007；楊平世等，2015）。公園中松鼠主要於木本植物間攝食與活動，而本計畫所觀察到狗隻活動強度於兩個棲地類型間並不具顯著差異，進而松鼠糞便與樹蔭環境可能為主要影響糞金龜出沒於草坪與喬木的因子。

進一步檢視割草管理對於地表節肢動物功能群個體出沒數量的影響，本計畫所調查之地表草本植物高度與地表節肢動物分類群數（圖 13a）、中型食碎屑者（圖 13b）與掠食者個體數量（圖 13c-d）皆具有顯著正相關。其中以掠食者個體數量對於地表草本植物高度變化反應更為顯著。

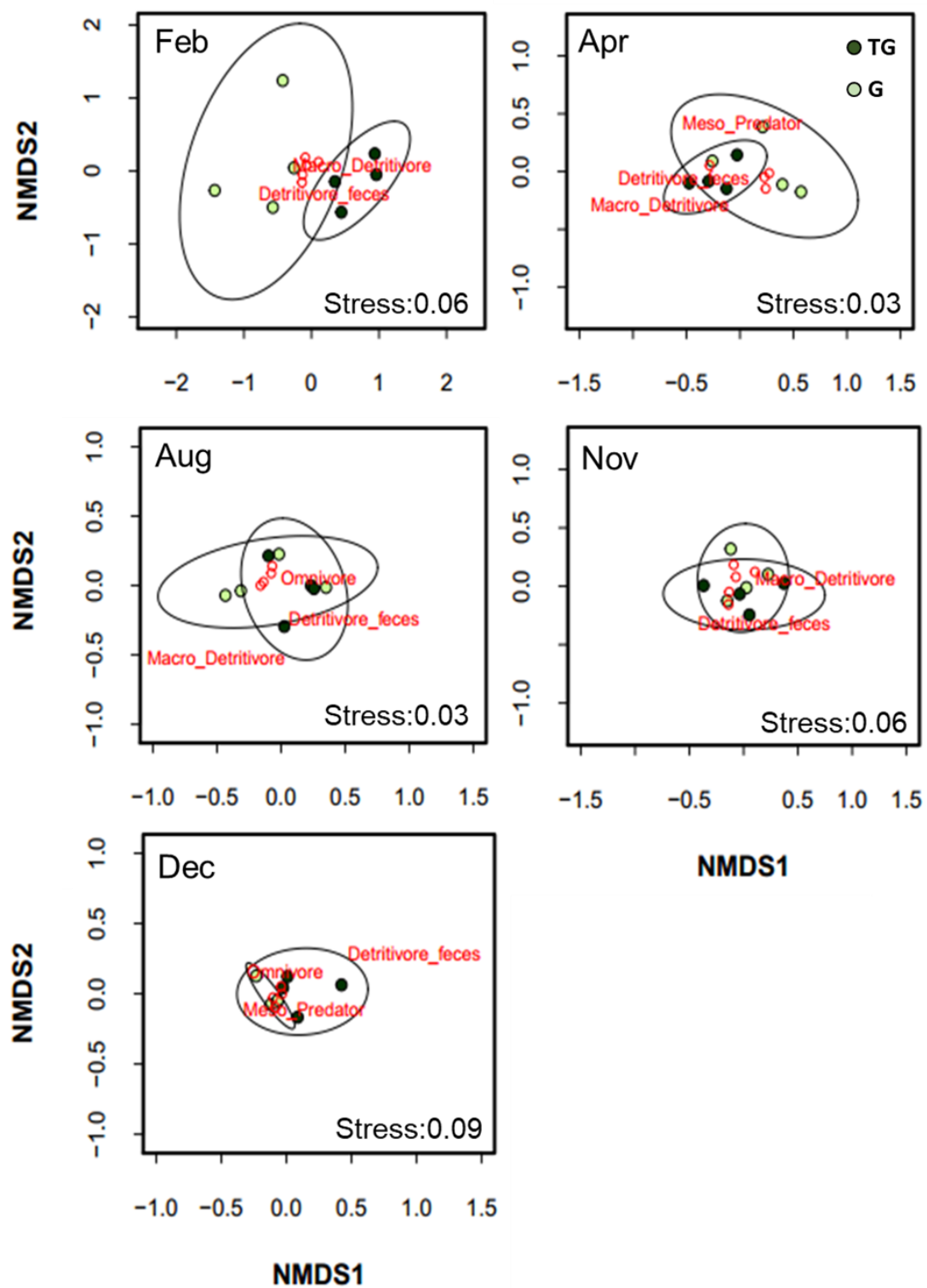


圖 12 兩種棲地類型中節肢動物功能群組成於 2016 年內不同月分的非計量多元尺度圖 (n=12; 橢圓形代表分群中心點之 95%信賴區間; 紅色字代表功能群於排序後二維空間的位置)

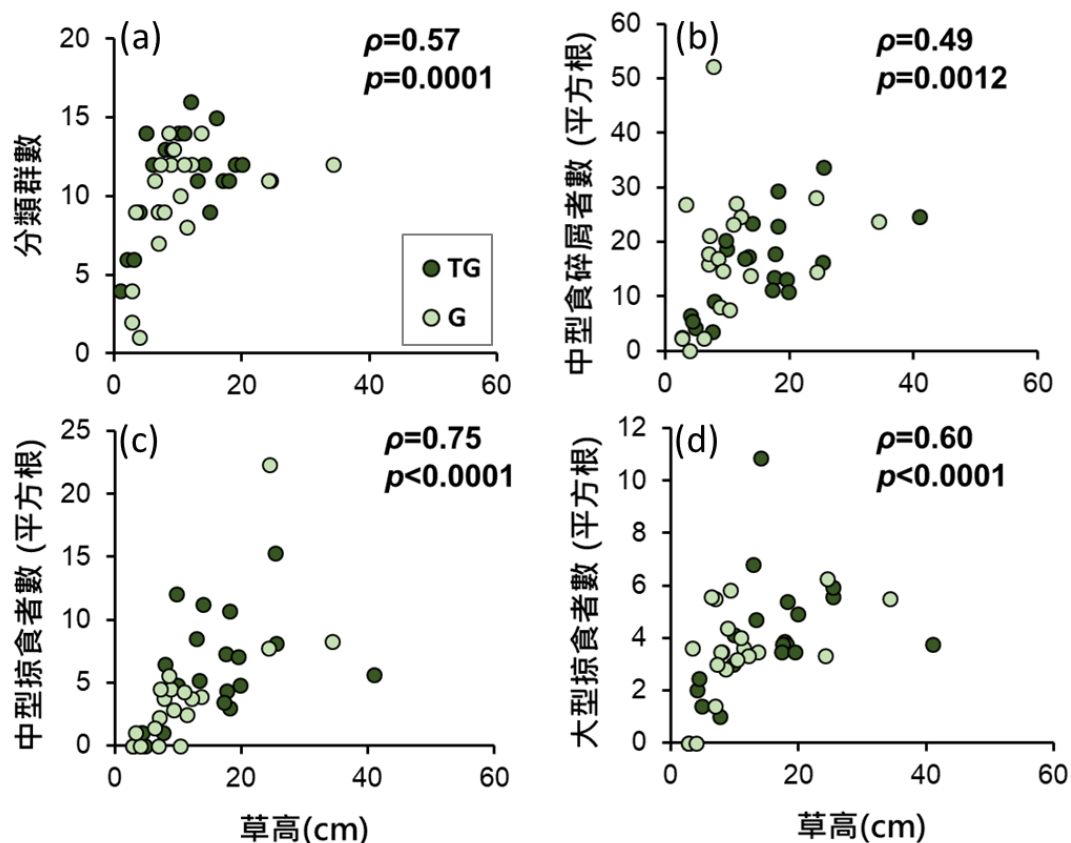


圖 13 地表草本植物高與 (a) 節肢動物分類群數、(b) 中型食碎屑者數量、(c) 中型掠食者數量，以及 (d) 大型掠食者數量之關係 ($n=8 \times 5$; ρ 代表 Spearman's correlation coefficient)

綜觀上述結果，公園綠地經營管理降低木本植物與草本植物所衍生之棲地效應的差異性，使兩個棲地類型間具有相似的地表節肢動物組成特性，但現下枯落物移除強度尚未完全降低對於特定功能群的影響，使大型食碎屑者於兩個棲地類型間具有些微個體數量分布差異。另一方面，割草管理除影響不同體型的節肢動物個體出沒數量，也影響超大型地表節肢動物 (>2 cm) 的出沒數量，尤其是分解者與掠食者，例如馬陸 (Riedel et al. 2009) 與蜘蛛。此結果也回應了前人研究割草管理強度對於地表節肢動物分類群多樣性與體型多樣性的負面效應 (Egerer et al. 2017; Sattler et al. 2010)。兩個棲地類型間相似的地表節肢動物組成特性，更顯示了地表節肢動物所提供之動物性有機物質資源輸入至土壤的情況，以及在土壤食物網中由上位營養階層影響下位土壤微生物量與活性的效應，於兩個棲地類型間並無顯著差異。

3. 地下部土壤物化特性與微生物胞外酵素活性

兩種棲地類型中土壤物化特性僅有土壤 pH 值與無機氮營養物質濃度在棲地類型間具顯著差異 (表 6)，而地表草本植物高度、土壤 pH 值、土壤水分含量，以及無機氮營養物質濃度於不同月分具顯著差異。地表草本植物高度於月分間的變化趨勢 (圖 14a) 代表割草事件的發生 (割草後草高約為 5 公分)，以及兩種棲地類型中地表棲地結構的變化。由地表草本植物高度個結果顯示，割草管理頻度確實於兩種棲地類型中無顯著差異，且每次採樣調查皆具有割草事件。

在相同的割草管理與枯落物移除頻度下，草坪棲地類型中土壤容積密度略低於草坪與喬木 (圖 14b)，土壤水分含量與土壤有機物質含量略高於草坪與喬木 (圖 14c-f)，而土壤酸鹼值與無機氮營養物質顯著高於草坪與喬木 (圖 14d-e)。所調查到之土壤容積密度平均值約為 1.3 g cm^{-3} ，小於抑制植物根部生長的閾值 1.8 g cm^{-3} (Stirzaker, Passioura, and Wilms 1996; Zisa, Halverson, and Stout 1979)，代表在目前的採樣區內遊憩活動強度對於土壤物理特性的影響並未達到抑制地表植物生長的情況。土壤物化特性的調查結果顯示兩個棲地類型中，植被類型特性藉由地下部根部對於土壤物理特性 (土壤容積密度、土壤水分含量) 與有機物質輸入情況可能具有影響，進而可能影響將有機物質催化降解為無機氮營養物質之土壤微生物胞外酵素的活性。另一方面，土壤 pH 主要受到土壤本身來源所影響，因此兩個棲地類型中土壤 pH 的差異可能為種植草坪時具有不同的土壤來源。此外，草坪與喬木棲地類型之土壤為弱酸性，而草坪為弱鹼性，此差異可能會影響對於酸鹼環境較敏感之土壤微生物胞外酵素的活性。

表 6 土壤物化特性之二因子變異數分析結果

因子	d.f.	F- values		
		草高	土壤容積密度	土壤水分
棲地	1	0.82	1.44	4.20
月分	5	5.39**	2.46	27.12***
棲地 x 月分	5	0.39	1.54	2.68*
		pH	無機氮營養物質	土壤有機物質
棲地	1	6.09*	9.71*	0.40
月分	5	2.99*	7.23***	2.05
棲地 x 月分	5	2.03	1.39	0.80

N=4; 星狀符號代表二因子重複量測變異數分析之顯著性: * $p < 0.05$; ** $p < 0.01$;

*** $p < 0.001$

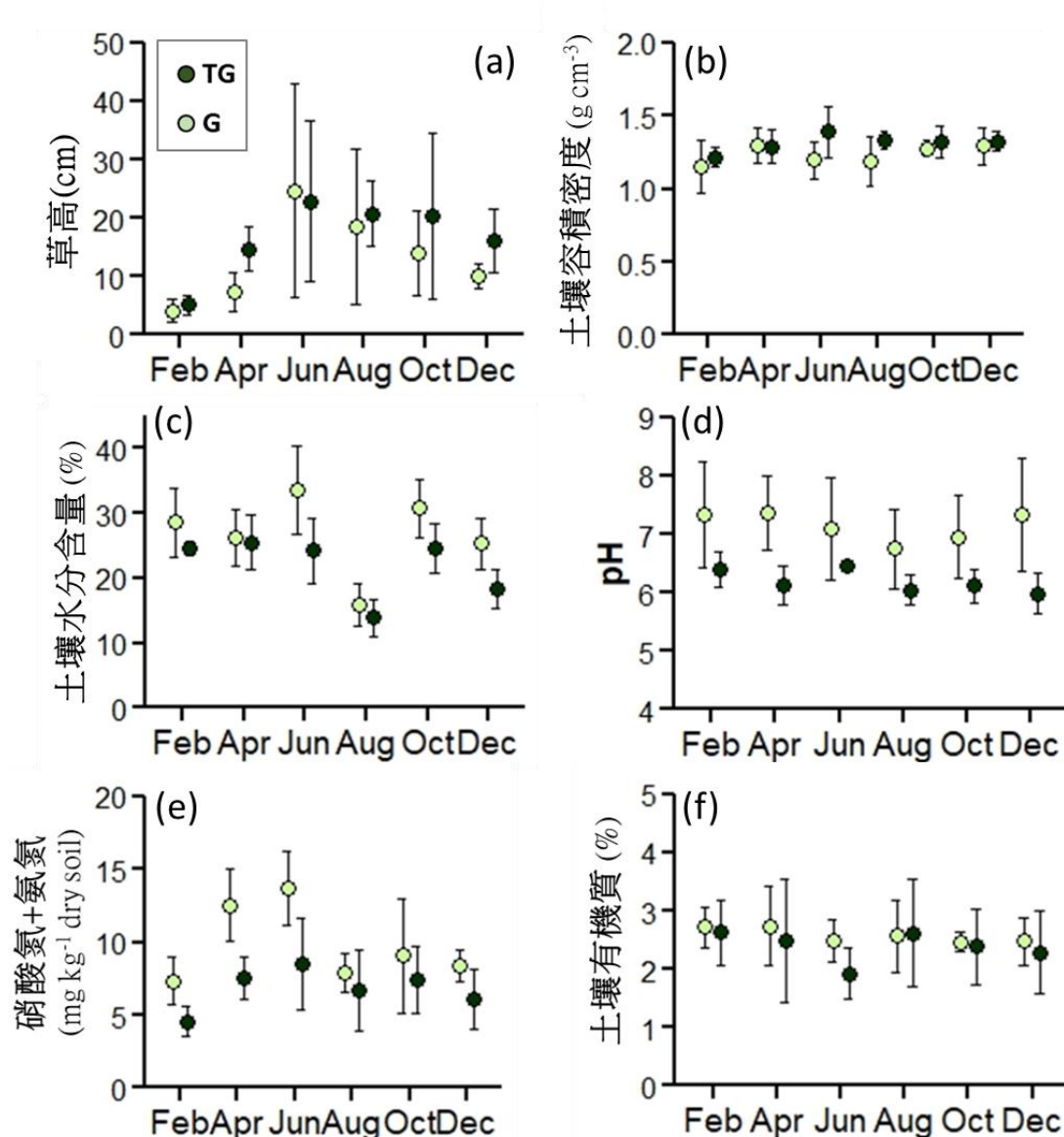


圖 14 兩種棲地類型中 (a) 地表草本植物高度、(b) 土壤容積密度、(c) 土壤水分含量、(d) 土壤酸鹼值、(e) 無機氮營養物質濃度，以及 (f) 土壤有機質含量於 2016 年內不同月分的變化情況 (平均值 $\pm$ 標準差)

然而，兩群土壤微生物胞外酵素活性於兩個棲地類型間的差異中，兩種氧化酵素活性皆不顯著 (表 7、圖 15a-b)，而三種水解酵素活性於草坪中較高 (圖 15c-e)，但僅降解幾丁質的 NAG 水解酵素活性具有顯著差異 (表 7)。氧化酵素活性的結果顯示兩個棲地類型之土壤酸鹼環境差異，對於土壤微生物胞外氧化酵素活性並無顯著的影響，而三種水解酵素活性的些微差異，則顯示兩個棲地類型間植被對於土壤物理特性與有機物質輸入的可能影響。另一方面，土壤微生物胞外酵素活性於月分間的變化趨勢中，僅催化降解蛋白質的 LAP 水解酵素活性於月分

間不具顯著差異 (表 7)。此外，BG 與 NAG 兩種水解酵素活性於月分間變化趨勢與土壤水分含量的變化趨勢相似，顯示土壤微生物胞外酵素活性於月分間的變化除受到月均溫影響外，土壤物理特性也可能為重要因子。

在地上部植被特性與地下部土壤物化特性與土壤微生物胞外酵素活性間的關係性中，土壤容積密度與地表草本植物覆蓋度間具有負向趨勢 (圖 16a)、土壤水分含量與土壤容積密度具顯著負相關 (圖 16b)，而土壤微生物胞外水解酵素與土壤水分含量 (圖 16c)，以及無機氮營養物質與土壤微生物胞外水解酵素活性 (圖 16d) 等兩者具顯著正相關。透過相關性分析的結果，觀察到地表草本可能藉由淺根生長的特性，增加土壤中的孔隙度而使土壤容積密度下降，也增加土壤水分含量 (Angers and Caron 1998)。當土壤水分含量上升，利於土壤中微生物分泌胞外酵素，以及使其與所催化降解之基質接觸的機會增加，進而使有機物質降解為較小的有機物質或無機態營養物質的生態作用過程速率上升 (Davidson et al. 2000)。綜觀以上結果，在地表枯落物移除管理與相似節肢動物組成的情況下，地上部有機物質輸入至土壤的情況，於兩個棲地類型間並不具有顯著差異，進而有有機物質資源輸入則轉為以草本植物地下部根部有機物質輸入，為表層土壤有機物質的重要來源。另一方面，兩個棲地類型之生態作用過程主要受土壤水分含量所影響。

表 7 土壤微生物胞外酵素活性之二因子變異數分析結果

因子	d.f.	F- values		
		PO	PER	
棲地	1	0.17	0.03	
月分	3	10.02***	56.47***	
棲地 x 月分	3	2.03	0.49	
		BG	NAG	LAP
棲地	1	3.86	6.49*	0.95
月分	3	36.62***	27.80***	1.37
棲地 x 月分	3	0.30	0.372	0.28

N=4; 星狀符號代表二因子重複量測變異數分析之顯著性: *p<0.05; ***p <0.001

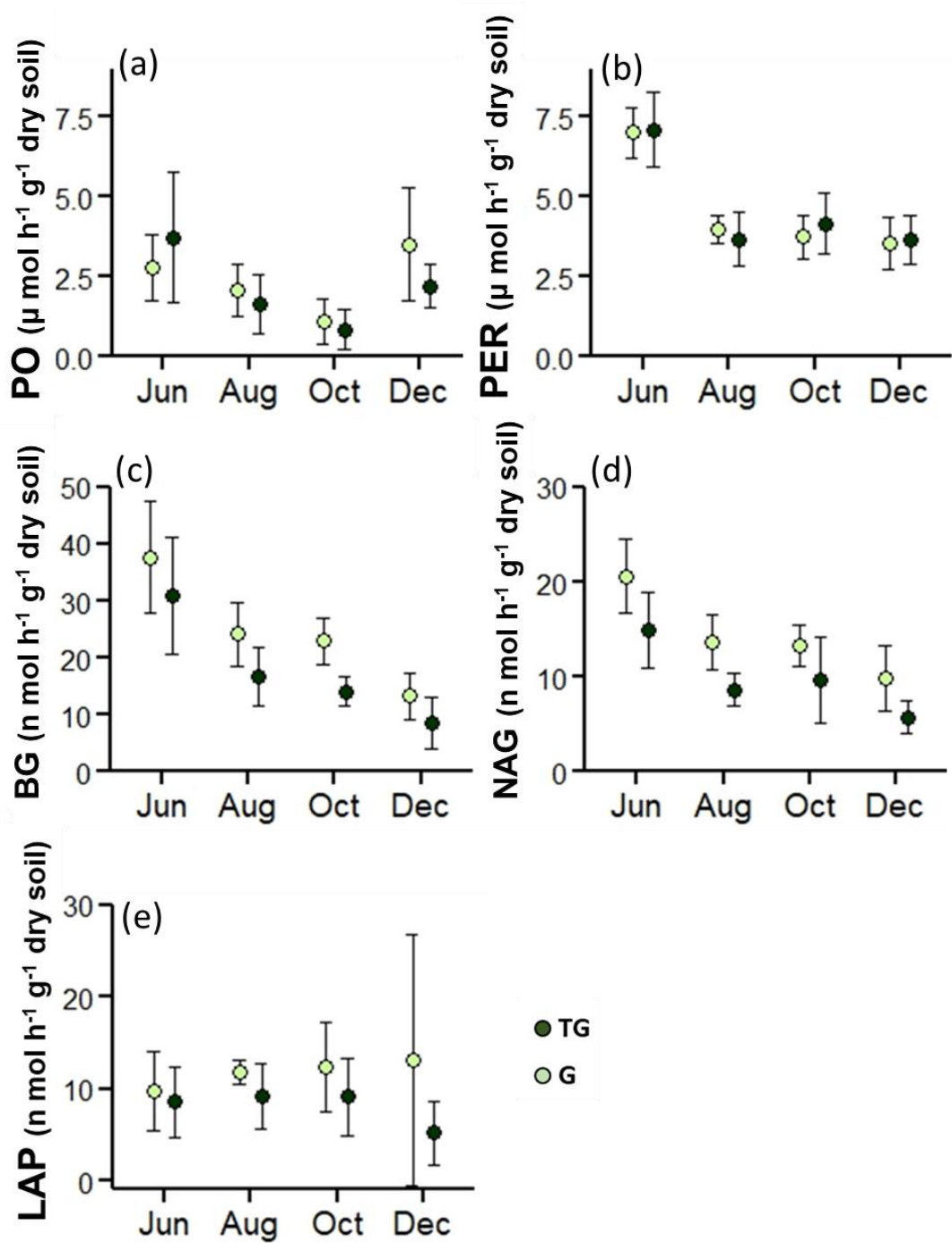


圖 15 兩種棲地類型中土壤微生物胞外氧化酵素 (a) PO 與 (b) PER，以及水解酵素 (c) BG、(d) NAG 與 (e) LAP 於 2016 年內不同月分的變化情況 (平均值 $\pm$ 標準差)

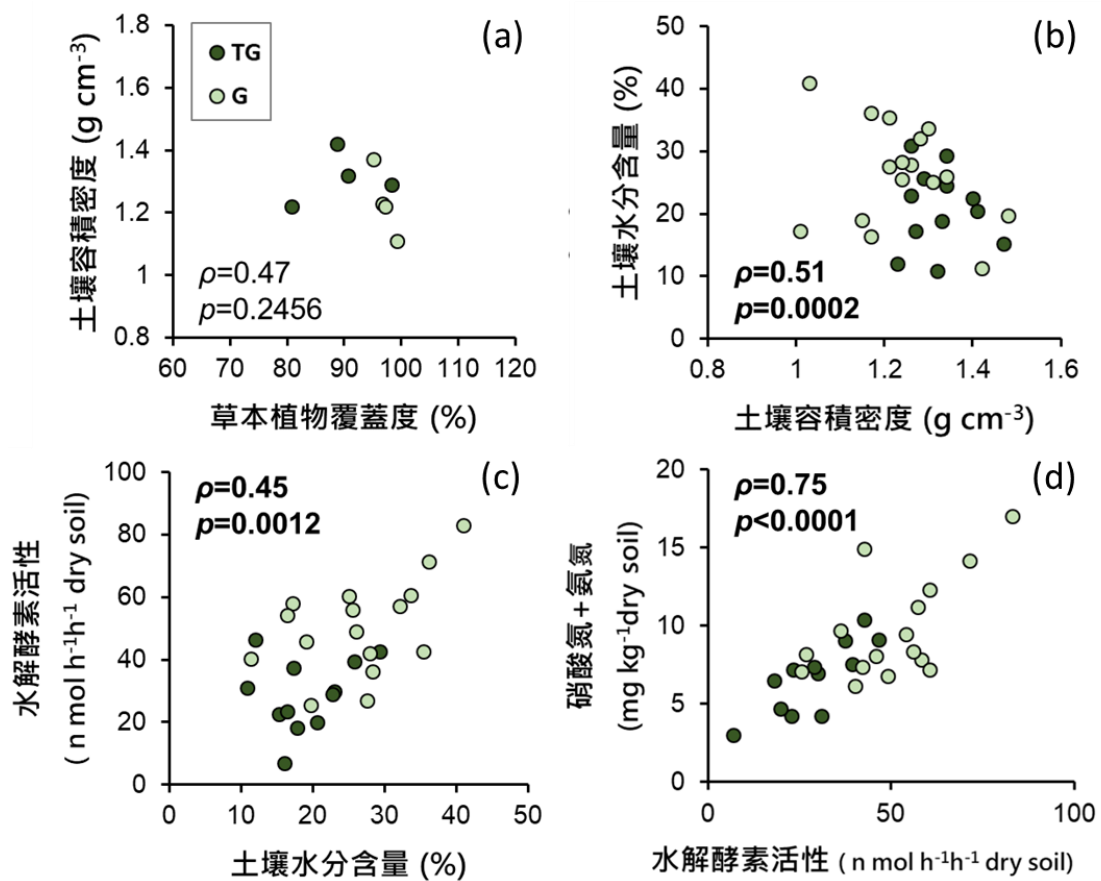


圖 16 (a) 土壤容積密度與地表草本植物覆蓋度、(b) 土壤水分含量與土壤容積密度、(c) 水解酵素活性與土壤水分含量，以及 (d) 無機氮營養物質與水解酵素活性等關係 (N=8 x 5; ρ 代表 Spearman 相關係數)

五、結論

本調查計畫整合性地調查了大安森林公園兩種棲地類型中，植被類型、人為活動強度（經營管理及遊憩活動）以及地表節肢動物組成等地上部特性，與土壤物化特性及土壤胞外酵素活性等地下部特性間的關係。調查結果顯示人為活動對於兩種棲地類型之地上一地下交互作用關係的影響，主要以枯落物與割草管理較為主，而遊憩活動強度並不顯著。枯落物與割草管理藉由降低地表棲地結構與有機物質輸入的差異性，進而兩個棲地類型中地表節肢動物組成與有機物質含量不具顯著差異。然而調查結果進一步顯示大安森林公園的枯落物移除強度，對於偏好出沒於枯落物層之大型食碎屑者，如鼠婦與雙翅目幼蟲等，尚未達完全抑制的情況。另一方面，地表草本植物的高度與節肢動物個體出沒數量具有正面效應。進而若能降低枯落物移除與割草管理的頻度，且保留枯落物或割草殘遺於地表，則可能具有促進地表節肢動物多樣性，以及提升土壤有機物質含量以促進土壤蓄水能力與植物生長的正面效應。

然而，基於公園使用者的遊憩品質與健康考量，地表草本植物高度以及大型食碎屑者中雙翅目蚊蠅幼蟲為需要管理的對象，降低割草頻率可能對使用者造成不便，而保留枯落物層則可能會增加蚊蠅幼蟲個體數量。考量兩者間可能的權衡情況，如能進一步了解遊憩活動與蚊蠅幼蟲是否具有空間分布上的差異，嘗試進行公園內分區的管理，即以遊憩活動強度與蚊蠅幼蟲分布較低的區域，降低枯落物移除與割草管理的頻度，並保留枯落物與割草遺骸形成枯落物層，以提升地表棲地與有機物質輸入的多樣性。另一方面，由於本計畫所調查到之經營管理強度於兩個棲地類型間一致，若能進一步透過進行不同管理頻度對於地表節肢動物組成的影響效應研究，則可以了解對於節肢動物組成情況干擾較少的管理頻度。

引用文獻

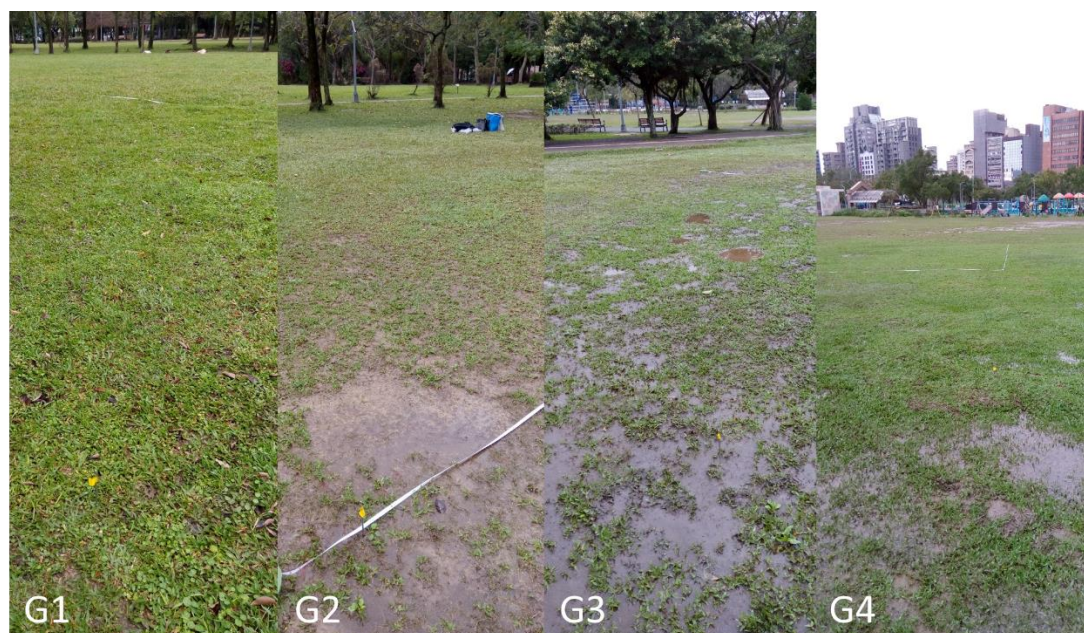
- 王嘉靖，2007。遊憩對生態的影響-以象山市民森林公園冀金龜為例。臺北市立教育大學，環境教育研究所碩士論文。
- 行政院環境保護署，2009。土壤酸鹼值（pH 值）測定方法－電極法（NIEA S410.62C）。
- 行政院環境保護署，2015。土壤採樣方法－（NIEA S102.63B）。
- 吳加雄、楊平世，2015。大安森林公園蚊蟲非化學防治之生態學基礎及實務工作。造園季刊，85: 48-52。
- 黃明樹、留淑娟，2005。都市中二種常見的冀金龜。自然保育季刊，51: 38-40。
- 楊平世等，2015。大安森林公園昆蟲資源調查與經營管理建議。造園季刊，85: 40-47。
- 臺北市工務局公園路燈工程管理處，2016a。臺北市都市計畫及其他公園、綠地、兒童遊樂場、廣場保留地—附件下載。
<http://pkl.gov.taipei/fp.asp?fpage=cp&xItem=1000849&CtNode=46922&mp=106011> (擷取日期：2017.04.03)。
- 臺北市工務局公園路燈工程管理處，2016b。臺北公園走透透。
<http://parks.taipei/web/> (擷取日期：2017.04.03)。
- American Public Health Association, 1999. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater: 4500-NO₃-B Ultraviolet Spectrophotometric Screening Method. Washington, D.C.: American Public Health Association.
- Alberti, Marina. 2010. "Maintaining Ecological Integrity and Sustaining Ecosystem Function in Urban Areas." *Current Opinion in Environmental Sustainability* 2 (3): 178–84. doi:10.1016/j.cosust.2010.07.002.
- American Public Health Association, 1999. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater: 4500-NO₃-B Ultraviolet Spectrophotometric Screening Method. Washington, D.C.: American Public Health Association.
- Angers, Denis A., and Jean Caron. 1998. "Plant-Induced Changes in Soil Structure: Processes and Feedbacks." In *Plant-Induced Soil Changes: Processes and Feedbacks*, edited by Nico Van Breemen, 55–72. Developments in Biogeochemistry 4. Springer Netherlands. doi:10.1007/978-94-017-2691-7_3.
- Blake, G.R., 1986. Bulk Density. In *Methods of Soil Analysis, Part 1. Physical and Mineralogical Methods* (Agronomy no. 9, 2nd edition), A. Klute (ed.), 363-375. Madison, Wisconsin: American Society of Agronomy.
- Byrne, Loren B. 2007. "Habitat Structure: A Fundamental Concept and Framework for Urban Soil Ecology." *Urban Ecosystems* 10 (3): 255–74. doi:10.1007/s11252-007-0027-6.
- Byrne, Loren B., and Mary A. Bruns. 2004. "The Effects of Lawn Management on Soil Microarthropods." *Journal of Agricultural and Urban Entomology* 21: 150–56.
- Chong, Kwek Yan, Siyang Teo, Buddhima Kurukulasuriya, Yi Fei Chung, Subaraj

- Rajathurai, and Hugh Tiang Wah Tan. 2014. "Not All Green Is as Good: Different Effects of the Natural and Cultivated Components of Urban Vegetation on Bird and Butterfly Diversity." *Biological Conservation* 171 (March): 299–309. doi:10.1016/j.biocon.2014.01.037.
- Cusack, Daniela F. 2013. "Soil Nitrogen Levels Are Linked to Decomposition Enzyme Activities along an Urban-Remote Tropical Forest Gradient." *Soil Biology and Biochemistry* 57 (February): 192–203. doi:10.1016/j.soilbio.2012.07.012.
- Cusack, Daniela F., Whendee L. Silver, Margaret S. Torn, and William H. McDowell. 2010. "Effects of Nitrogen Additions on Above- and Belowground Carbon Dynamics in Two Tropical Forests." *Biogeochemistry* 104 (1–3): 203–25. doi:10.1007/s10533-010-9496-4.
- Davidson, Eric A., Louis V. Verchot, J. Henrique Cattânio, Ilse L. Ackerman, and J. E. M. Carvalho. 2000. "Effects of Soil Water Content on Soil Respiration in Forests and Cattle Pastures of Eastern Amazonia." *Biogeochemistry* 48 (1): 53–69. doi:10.1023/A:1006204113917.
- DeForest, Jared L. 2009. "The Influence of Time, Storage Temperature, and Substrate Age on Potential Soil Enzyme Activity in Acidic Forest Soils Using MUB-Linked Substrates and l-DOPA." *Soil Biology and Biochemistry* 41 (6): 1180–86. doi:10.1016/j.soilbio.2009.02.029.
- Egerer, Monika H., Courtney Arel, Michelle D. Otoshi, Robyn D. Quistberg, Peter Bichier, and Stacy M. Philpott. 2017. "Urban Arthropods Respond Variably to Changes in Landscape Context and Spatial Scale." *Journal of Urban Ecology* 3 (1). doi:10.1093/jue/jux001.
- Frouz, Jan. 1999. "Use of Soil Dwelling Diptera (Insecta, Diptera) as Bioindicators: A Review of Ecological Requirements and Response to Disturbance - ScienceDirect." *Agriculture, Ecosystems & Environment* 74 (1–3): 167–86.
- German, Donovan P., Michael N. Weintraub, A. Stuart Grandy, Christian L. Lauber, Zachary L. Rinkes, and Steven D. Allison. 2011. "Optimization of Hydrolytic and Oxidative Enzyme Methods for Ecosystem Studies." *Soil Biology and Biochemistry* 43 (7): 1387–1397. doi:10.1016/j.soilbio.2011.03.017.
- Hach company, 2012. Hach method 8038: Ammonia - Nessler Method. Colorado, USA: Hach company. (This method adapted from American Public Health Association (1999) Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater: 4500-NH₄-B&C).
- Heneghan, Liam, Susan P. Miller, Sara Baer, Mac A. Callahan, James Montgomery, Mitchell Pavao-Zuckerman, Charles C. Rhoades, and Sarah Richardson. 2008. "Integrating Soil Ecological Knowledge into Restoration Management." *Restoration Ecology* 16 (4): 608–17. doi:10.1111/j.1526-100X.2008.00477.x.
- Keeney, D.R., Nelson, D.W., 1982. Nitrogen inorganic forms. In *Methods of Soil Analysis*, (Agronomy, No. 9, part 2), A. L. Page, R. H. Miller, and D. R. Keeney et al. (eds.), 643-698. Madison, Wisconsin: American Society of Agronomy.
- Klaus, Valentin H. 2013. "Urban Grassland Restoration: A Neglected Opportunity for Biodiversity Conservation." *Restoration Ecology* 21 (6): 665–69. doi:10.1111/rec.12051.

- Larson, Jonathan L, Carl T Redmond, and Daniel A Potter. 2012. "Comparative Impact of an Anthranilic Diamide and Other Insecticidal Chemistries on Beneficial Invertebrates and Ecosystem Services in Turfgrass." *Pest Management Science* 68 (5): 740–48. doi:10.1002/ps.2321.
- Lovell, Sarah Taylor, and Douglas M Johnston. 2008. "Creating Multifunctional Landscapes: How Can the Field of Ecology Inform the Design of the Landscape?" *Frontiers in Ecology and the Environment* 7 (4): 212–20. doi:10.1890/070178.
- Lovell, Sarah Taylor, and John R. Taylor. 2013. "Supplying Urban Ecosystem Services through Multifunctional Green Infrastructure in the United States." *Landscape Ecology* 28 (8): 1447–63. doi:10.1007/s10980-013-9912-y.
- McIntyre, N. E., J. Rango, W. F. Fagan, and S. H. Faeth. 2001. "Ground Arthropod Community Structure in a Heterogeneous Urban Environment." *Landscape and Urban Planning* 52 (4): 257–74. doi:10.1016/S0169-2046(00)00122-5.
- Mueller, Kevin E., Nico Eisenhauer, Peter B. Reich, Sarah E. Hobbie, Oliver A. Chadwick, Jon Chorover, Tomasz Dobies, et al. 2016. "Light, Earthworms, and Soil Resources as Predictors of Diversity of 10 Soil Invertebrate Groups across Monocultures of 14 Tree Species." *Soil Biology and Biochemistry* 92 (January): 184–98. doi:10.1016/j.soilbio.2015.10.010.
- Pavao-Zuckerman, Mitchell A., and Loren B. Byrne. 2009. "Scratching the Surface and Digging Deeper: Exploring Ecological Theories in Urban Soils." *Urban Ecosystems* 12 (1): 9–20. doi:10.1007/s11252-008-0078-3.
- Pfiffner, Lukas, and Henryk Luka. 2000. "Overwintering of Arthropods in Soils of Arable Fields and Adjacent Semi-Natural Habitats." *Agriculture, Ecosystems & Environment* 78 (3): 215–22. doi:10.1016/S0167-8809(99)00130-9.
- Philpott, Stacy M., Julie Cotton, Peter Bichier, Russell L. Friedrich, Leigh C. Moorhead, Shinsuke Uno, and Monica Valdez. 2014. "Local and Landscape Drivers of Arthropod Abundance, Richness, and Trophic Composition in Urban Habitats." *Urban Ecosystems* 17 (2): 513–32. doi:10.1007/s11252-013-0333-0.
- Riedel, Pavel, Marek Navrátil, Ivan H. Tuf, and Jana Tufová. 2009. "Terrestrial Isopods (Isopoda: Oniscidea) and Millipedes (Diplopoda) of the City of Olomouc (Czech Republic)." In: *Tajovský K, Schlaghamerský J, Pižl V (Eds) Contributions to Soil Zoology in Central Europe.*, 125–32.
- Saiya-Cork, K. R., R. L Sinsabaugh, and D. R Zak. 2002. "The Effects of Long Term Nitrogen Deposition on Extracellular Enzyme Activity in an Acer Saccharum Forest Soil." *Soil Biology and Biochemistry* 34 (9): 1309–15. doi:10.1016/S0038-0717(02)00074-3.
- Salehi, M. H., O. Hashemi Beni, H. Beigi Harchegani, I. Esfandiarpour Borujeni, and H. R. Motaghian. 2011. "Refining Soil Organic Matter Determination by Loss-on-Ignition." *Pedosphere* 21 (4): 473–82. doi:10.1016/S1002-0160(11)60149-5.
- Sattler, T., P. Duelli, M. K. Obrist, R. Arlettaz, and M. Moretti. 2010. "Response of Arthropod Species Richness and Functional Groups to Urban Habitat Structure and Management." *Landscape Ecology* 25 (6): 941–54. doi:10.1007/s10980-010-9473-2.

- Scheu, Stefan. 2002. "The Soil Food Web: Structure and Perspectives." *European Journal of Soil Biology* 38 (1): 11–20. doi:10.1016/S1164-5563(01)01117-7.
- Sinsabaugh, Robert L., Christian L. Lauber, Michael N. Weintraub, Bony Ahmed, Steven D. Allison, Chelsea Crenshaw, Alexandra R. Contosta, et al. 2008. "Stoichiometry of Soil Enzyme Activity at Global Scale." *Ecology Letters* 11 (11): 1252–1264. doi:10.1111/j.1461-0248.2008.01245.x.
- Stirzaker, R. J., J. B. Passioura, and Y. Wilms. 1996. "Soil Structure and Plant Growth: Impact of Bulk Density and Biopores." *Plant and Soil* 185 (1): 151–62. doi:10.1007/BF02257571.
- Taylor, Lucy, and Dieter F. Hochuli. 2014. "Creating Better Cities: How Biodiversity and Ecosystem Functioning Enhance Urban Residents' Wellbeing." *Urban Ecosystems*, November, 1–16. doi:10.1007/s11252-014-0427-3.
- Vauramo, Saara, and Heikki Setälä. 2010. "Urban Belowground Food-Web Responses to Plant Community Manipulation – Impacts on Nutrient Dynamics." *Landscape and Urban Planning* 97 (1): 1–10. doi:10.1016/j.landurbplan.2010.04.004.
- Vodyanitskii, Yu N. 2015. "Organic Matter of Urban Soils: A Review." *Eurasian Soil Science* 48 (8): 802–11. doi:10.1134/S1064229315080116.
- Wardle, D. A., and G. W. Yeates. 1993. "The Dual Importance of Competition and Predation as Regulatory Forces in Terrestrial Ecosystems: Evidence from Decomposer Food-Webs." *Oecologia* 93 (2): 303–6. doi:10.1007/BF00317685.
- Wardle, David A., Richard D. Bardgett, John N. Klironomos, Heikki Setälä, Wim H. van der Putten, and Diana H. Wall. 2004. "Ecological Linkages Between Aboveground and Belowground Biota." *Science* 304 (5677): 1629–33. doi:10.1126/science.1094875.
- Yao, Huaiying, Daniel Bowman, Thomas Rufty, and Wei Shi. 2009. "Interactions between N Fertilization, Grass Clipping Addition and PH in Turf Ecosystems: Implications for Soil Enzyme Activities and Organic Matter Decomposition." *Soil Biology and Biochemistry* 41 (7): 1425–32. doi:10.1016/j.soilbio.2009.03.020.
- Zisa, Robert P., Howard G. Halverson, and Benjamin B. ; Stout. 1979. *Establishment and Early Growth of Conifers on Compact Soils in Urban Areas*. U.S. Department of Agriculture, Forest Service. <https://www.treeseearch.fs.fed.us/pubs/14985>.

附錄一 2016 年 1-2 月草坪採樣區內地表積水情形



攝於 2016 年 1 月

附錄二 各採樣區內地上部與地下部特性平均值

附錄表 1 各採樣區地上部棲地特性平均值

採樣區	木本植物				草本植物		遊憩活動強度			
	棵數	種數	胸高直徑 (cm)	樹高 (m)	覆蓋度 (%)	草高 (cm)	動態	靜態 (每小時活動者數)	遛狗	餵食
G1	0	0	0.0	0.0	99.2	21.97	3.0	0.0	0.2	0
G2	0	0	0.0	0.0	95.07	10.36	13.3	0.0	0.4	0
G3	0	0	0.0	0.0	96.73	8.24	19.8	4.1	0.2	0
G4	0	0	0.0	0.0	97.13	11.96	14.7	2.3	0.5	0
TG1	3	2	36.3	13.1	88.73	23.15	1.2	0.0	0.2	0
TG2	3	1	23.7	12.0	90.6	11.21	1.2	0.0	0.7	0
TG3	3	1	25.1	8.5	98.27	15.64	0.9	0.0	1.0	0
TG4	3	1	25.1	8.6	80.73	16.67	1.0	0.0	0.4	0

附錄表 2 各採樣區地表節肢動物食性功能群隻數平均值

採樣區	中型食碎屑者 隻	大型食碎屑者 隻	中型掠食者 隻	大型掠食者 隻	糞食者 隻	草食者 隻	雜食者 隻	個體數量 隻	分類群數
G1	505.8	1	29.4	16.8	0.6	16.8	9.4	579.8	10
G2	305.6	0.2	14.4	9.8	0.6	19.8	39	389.4	10.2
G3	696.8	0.2	8.4	18.6	0	14.6	30.4	769	9.2
G4	238.8	1.2	103.6	14.8	0.2	15.2	9.8	383.6	8.6
TG1	272.2	3.8	60.6	15	1.6	13.6	51.4	418.2	10
TG2	339.2	3.2	66.2	15.2	4.2	12.4	47.2	487.6	10.6
TG3	365	4.2	37.6	15.6	0.4	8.6	7	438.4	9.8
TG4	301.4	4.2	46.2	41.6	2	8.2	151.8	555.4	12.4

附錄表 3 各採樣區土壤物化特性與土壤微生物胞外酵素活性平均值

採樣區	物理特性		化學特性				微生物胞外水解酵素活性			微生物胞外氧化酵素活性	
	水分含量 (%)	容積密度 (g cm ⁻³)	pH	有機物質含量 (%)	硝酸氮 (mg kg ⁻¹ dry soil)	氨氮	BG (n mol h ⁻¹ g ⁻¹ dry soil)	NAG	LAP	PO (μ mol h ⁻¹ g ⁻¹ dry soil)	PER
G1	31.53	1.11	6.59	2.86	2.99	8.42	30.67	16.46	7.96	1.2	4.2
G2	22.51	1.37	7.53	2.17	4.13	4.47	20.51	12.28	8.52	3.47	4.84
G3	24.6	1.23	7.96	2.66	5.81	3.51	20.6	15.96	18.36	2.67	4.56
G4	28.23	1.22	6.46	2.61	4.81	5.09	26.43	12.6	12.16	2.17	4.71
TG1	19.88	1.42	6.4	1.6	1.02	3.95	11.23	6.1	3.55	1.52	3.47
TG2	20.14	1.32	6.39	2.32	2.52	3.54	15.74	9.21	6.8	3.21	5.5
TG3	21.67	1.29	5.98	2.46	3.3	4.91	21.83	10.71	10.71	2.27	4.93
TG4	25.59	1.22	5.97	3.17	0.57	7.32	21.58	12.92	10.92	1.48	4.71