

## Forests and trees for social adaptation to climate variability and change

### 面對氣候變遷之調適策略- 森林和樹木

#### 摘要

氣候變遷顯著影響地球上的人類，目前最迫切需要的是最嚴謹的減排方式，以及有效的適應方案。人類也重新瞭解到社會適應氣候變遷中生態系商品和服務的重要性。強調「以生態系為基礎的調適策略」(Ecosystem-based adaptation, EBA)，其目標乃在維持並增強生態系與人類的恢復力，減少其脆弱性，並使其更能面對氣候變遷的不利影響。人類從生態系獲得生態系服務的益處是維生功能/配置性服務（如木材和柴火）、調節功能/規範性服務（水調節）和文化功能（娛樂）。以生態系為基礎的調適策略的例子，包括像恢復沿海居民免於遭受暴風和海浪侵襲，以及減少受森林覆蓋保護的流域，遭受洪水風險的紅樹林防護林帶。

許多國際和非政府保育及發展機構一直以來，都極力推廣使用能有效減少社會脆弱性、成本效益，並可保護生態多樣性、減少資產減損及減緩氣候變遷等多重重點的生態系。

為呼應這項需求，本文將列舉有關可降低氣候變遷的社會脆弱性的森林/樹木生態系服務研究文獻，並將其分為五種類型，每一種類型將會以解決氣候變遷或變遷、社會脆弱性，以及森林或樹木生態系服務這等三面向，來闡述相關的發現和科學證據，隨後再蒐整更多文獻，來探討其中所涉及的不確定性、爭議和取捨的因素。

本文檢視了與森林樹木有關的「以生態系為基礎的調適策略」並以它們幫助當地社區和社會適應氣候變遷的方式分為五種類型：(1)森林樹木提供商品給當地居民來因應氣候的威脅，(2)農業區內的樹木可以調節水分、土壤和微氣候以得到更有彈性的生產。(3)覆蓋集水區的森林能調節水分，並且保護土壤以降低氣候影響。(4)森林能保護沿海地區免於與氣候有關的威脅，(5)都市森林樹木調節溫度和水以成為韌性都市。文獻顯示包含樹木森林的「以生態系為基礎的調適策略」能降低社會面臨氣候危害的脆弱性，但是到目前仍有些作用無法確定或尚存有知識上的隔閡，特別是集水區和沿海地區的森林調節服務。

而本文也提到，雖然生態系服務和人類對氣候變遷及變化的脆弱性相關的文獻很少，但是仍有其他的研究可以補足我們對「以生態系為基礎的調適策略」的認知。舉例來說，在第三類集水區的例子，水文研究提供了有關集水區內森林服務功能的資訊，即便它們無法解決氣候變遷或改變的問題。同樣地，第一類的森林商品和生計多樣化、第二類樹木和農業，以及第四類紅樹林及海嘯的研究也有相同的情況。此外，雖然多數研究都是注重當前的氣候變遷而不是逐漸改變的氣候，但是那些研究對瞭解氣候變化的適應而言，也是相當有幫助的。

我們必須要清楚瞭解「以生態系為基礎的調適策略」當中具有森林樹木的效用、成本、優勢以及需要取捨的情況。因此，不僅要具備相關科學上的知識（如補足有關生態系統功能的知識），也要檢驗及評估各種干擾因素。藉由已在實施

中的領航計畫能做為學習的開始，並且將既有的資訊做為氣候變化調適的借鏡。順勢調整管理方式和從做中學都是「以生態系為基礎的調適策略」的基本要素，而有效監控和評估系統則是其中的關鍵。

結合當地、景觀、區域性不同層面的監控系統能提供充分的社會生態系回饋及動態資訊。而在監控過程中有利益關係者的參與，特別是生態系服務的受惠者，將有助於提升整體適應能力、促進學習，並且加速傳達與環境變化有關的早期預警。但主要挑戰是要能創造一個創新、靈活及反覆式大量學習的過程和有利條件。

### **第一類：森林和樹木能提供受氣候威脅之當地部落有關的商品服務**

森林和樹木能提供木材和非木材類的森林商品，形成一個重要安全網絡，而非木質林產品（NTFPs），例如木炭、薪柴、野果、蘑菇、樹根和飼料草料，成為發展中國家在面臨不斷增加的氣候變遷和氣候災害風險情況下的多元收入方式。

農村地區在乾旱期間收成不佳時，會利用森林產品作為解決方案之一。2005年到2006年期間，坦尚尼亞半乾旱地區的家庭，直接將森林產品作為他們的糧食攝取一部分，而販售野生水果、柴火、木材和木炭也佔總收入的42%。秘魯農村地區遭受洪水導致收成不佳的因應方式，是採集森林水果、棕櫚心和其他產品。森林產品也在洪都拉斯災後方案內發揮關鍵作用，農村家庭以販售木材和其他產品的方式，來彌補他們在Mitch風災時遭受的土地損失。

許多農村地區同樣也使用森林和木材產品，作為一種多元收入的調適策略，而此種生計模式是坦尚尼亞因應氣候變遷的主要策略。

有些是以採集柴火、水果、香料、草料、傳統草藥，肉類、木柴、木炭和磚塊產品的方式。在坦尚尼亞一些研究區域內，有高達68%的家庭收入是來自森林資源。非洲剛果盆地的農村部落，為了生計和生存會善用森林資源，同時也解決有關雨季初期或雨季期間所產生的氣候變遷。透過非木材林產品和木材，玻利維亞山坡部落所實施的永續森林管理措施，已經改善的當地的生計條件，也增強其因應乾旱及突來降雨的策略。

西非的農民一直以來都持續管理樹林，以便取得各種產品來降低氣候變遷對他們的影響，如尼日、馬利共和國或布吉納法索的農民在乾季時會撿拾柴火供牲畜使用，或是收穫自己食用或販售各種水果和醫藥產品。印度拉賈斯坦邦的農民通常在乾旱年份以更高的價格賣出牧豆屬樹和紅棗、飼料，做為彌補因乾季損失的作物收入。孟加拉博多河沖積平原上，存在常年供應多元化產品的謀生方式，如以芒果為主的多層耕作制度（例如芒果果實、木材、樹皮樹葉、小麥、甘蔗、木瓜、香蕉、薑，以及各種蔬菜），都讓農民更能抵禦與氣候相關的衝擊。即便乳油木果油和大葉巴克豆，或許會降低小米的產量，但是這些對於西非的農民來說仍相當珍貴，這是因為這些樹木的產品，可以補償替代損失的作物產量，特別是在乾旱時期。同樣在半乾旱地區的肯尼亞，生長快速的原始棟屬樹木也能在乾旱情況，提供具有價值的木材和各式樣的產品。

在南非東開普省和林波波省的農村研究顯示，有 70% 的家庭依賴非木質林產品來因應氣候變遷的衝擊，且多數貧困的家庭會利用或販售非木質林產品。如在馬拉威南部，收入最低的家庭、或是由年齡較長或教育程度較低的人所領導的部落，因應乾季的方式幾乎都是倚賴森林資源。而在宏都拉斯，完全沒有農業資產的人們，在災害後都是重度仰賴森林資源。同樣在印尼，最受到影響、最貧窮且沒有開化的部落，在洪水後的因應方式也是依賴森林。

肯亞 Endau 山頂地區溫度增加和不規則的降雨都造成產量降低、農作物欠收和缺水，嚴重導致農民和牧民無法取用森林產品如木材、蜂蜜、藥材、野生動物的肉品和飼料。由多數作物產量調查和家庭訪問結果顯示，對貧困當地部落來說，森林樹木產品在氣候變遷情況下，是重要的短期因應策略和長期家庭生計來源。

以「森林安全網」作為因應調適策略或因應多元生計之類型研究有所不同，但卻無法明確定位。許多家庭利用森林產品做為他們的部分日常生計，卻也降低他們對氣候的敏感性，這是因為多元化產品不會這類影響，或是同時受氣候事件影響。這些家庭也改變森林產品的使用方式以因應特定事件。

在因應措施和調適措施之間的其中一個差異，就是所採取的預先性行動-如為確保未來的森林產品所做的管理或恢復行動。在這樣的脈絡下，治理就是主要瞭解為何在沒有太多投資管理的情況，有些生態系被做為安全網，以及其他被管理用來確保可持續並具彈性的生計方式。

當生態系退化或是管理不當、在不同的森林利用者之間出現分歧，或是當取用受到限制時，高度依賴森林產品做為因應氣候事件的策略，亦為是脆弱性的來源之一。因此當使用者取用的後果會造成資源劣化時，開放取用資源就非大家所期望的。如果隨著氣候變化造成氣候上的壓力增加，那麼在反覆極端氣候事件後進行密集資源開採，將會導致森林產品稀缺，並且造成森林產品無法持續利用。因此，治理制度就必須要能夠在現有壓力下，提供產品以及未來管理生態系之間之權衡。治理制度將可確認如何將利用森林產品的因應策略，轉化為可持續的適應策略，以便能保障人民生計。

幾個研究中，森林產品的角色並不僅只於當地所消耗的糧食安全，同時包含了商業活動。提高市場取用或許可以提供傳統生產更多元商機，並且也能具增加家庭收入和社會恢復力的作用，但是同時也會產生過度利用和資源耗竭的情況，特別在高價值和高需求商品上。價格波動也會增加額外的脆弱性，特別是對於某些社群或家庭。此外，由於具外部利益，一旦被認定具有價值的非木質林產品，可能被當地權貴從中奪取，或基礎建設促使貿易深入到偏遠部落，造成利潤分配不均的情況，因此以市場為導向的策略應更加謹慎處理。

此外有幾個案例，也顯示最貧窮的人民的因應和調適策略，通常都極度仰賴森林產品。Pattanayak 和 Sills 解釋這種現象，並非因為人民貧窮所致，而是他們根本沒有其他的替代方案（如離開田地工作、創造緩衝存量（buffer stocks），或栽種不同類型作物）。Levang 等人也證實在沒有其他方法的情況下，森林產品是作為安全網方式。因此，只強調保護森林資源的適應政策或計畫，可能會適得

其反，我們所需要的是發展能永續森林管理的多元策略，森林和其安全網將成為適應行動的一部分。

## **第二類：農業中的樹木能調節水、土壤和微氣候以達更具回復力的生產**

小規模種植的農民和農業往往會受到降雨和氣溫變異的威脅。在農業裡，樹木有助於在變化多端的氣候下維持穩定的產量，並且也能保護作物對抗極端氣候。

農林業（混合樹木和作物殘枝和/或牲畜），已逐漸被視為能在氣候變遷中有效降低生產風險。因為它們具有深部根系統，樹木能夠讓更大範圍深部土壤獲得水分和養分，這兩個元素都有益於作物在乾早期間生長。同時它們也能提高土壤孔隙率、減少徑流並增加土壤覆蓋，進而提高水滲透率和保水量，減少低降雨時期的濕度壓力。但另一方面，由於它們的高蒸散率特徵，因此也會導致在農林業地點大量的水份被迅速從土壤中抽取。

非洲的研究顯示，固氮樹讓農業更能抵抗乾旱，這是因為固氮樹改善土壤養分和水滲透，特別是在退化的土地上。在馬拉威和尚比亞，實施相思樹保護性耕作的地區有較高的玉米產量，這種樹在雨季初期作物被栽植時會脫落其枝葉，雨季結束後，再重新長出其葉子，因此不會與生長中的作物搶奪光線、養分或水份。在馬拉威實行相思樹和南洋櫻的農地，在乾季時期可以保有最低的產量，若沒有實行這種栽種法，則可能面臨沒有收成的情況。參與「由農民管理的自然復育法」（farmer-managed natural regeneration，簡稱 FMNR）的尼日共和國農民稱像相思樹這類的樹木能提高他們的高粱和小米產量，部分是因為這些樹木可以降低風速並增加土壤濕度。對參與由農民管理的自然復育法的區域，近年乾旱的不利影響已經比其他地區減少許多。

易乾旱區域如印度西部拉賈斯坦邦社區，一般也廣泛使用固氮樹，來確保在不穩定的降雨區穩定穀物的產量。在非洲東部和南部，固氮樹也同樣被用來恢復土壤的沃度及抓水力，以在乾燥期間增加玉米產量。這種農林業制度最顯著的益處，是改善傳統的土壤和水保育技術，例如利用這樣的技術（石頭堤壩和用有機物填充土壤凹坑），布基納法索農民可更容易在他們的田地進行再生和保護樹木。灌溉區域也會種植這些樹木，像是在塞內加爾流域因為缺水使得稻米無法持續種植，因此應用這種農林業（間作相思樹和小米）來因應。這些樹木保護了灌溉地點免於風和水的侵蝕，也可以減少土壤受到日曬和蒸散以進一步調節微氣候，而且這種農林業種植所需要的水份也比稻米還要少。

這些樹木也有益於商業作物如咖啡和可可的種植。咖啡樹容易受到微氣候的影響，例如阿拉比卡咖啡豆最適生長溫度在攝氏 18 至 21 度，因此這些樹木可以提供遮蔭調節溫度和濕度變化，也同樣讓咖啡樹不受強風吹襲。墨西哥恰帕斯的例子，則說明樹木提供的遮蔭確能降低溫度和濕度變化，並降低對水需求的壓力。印尼蘇拉威西島的研究顯示南洋櫻遮蔭的可可豆，由於能從樹木吸取水分和獲得遮蔭，因此明顯不受乾旱影響。

因此許多研究都發現這些樹木都能夠改善農地的土壤沃度、土壤濕度和微氣

候，而且作物產量也能較不受氣候變遷的影響。在雨季或乾季時，不同農耕制度的生物物理田野估測、產量估算的研究也發現，根據種植區域和作物種類不同，這些樹木所能提供的維護農作產量有效程度也都不一樣，因為又涉及到區域內的土壤屬性、降雨和其他特徵。

然而，這些樹木對農業的各種影響也應加以評估，例如這些樹木雖覆蓋保護土壤，但過於密集數量卻可能和作物爭奪日照光線。由於在樹木和作物之間存有多樣的相互作用，因此我們也很難將樹蔭覆蓋和作物產量間關係一言以蔽之。樹蔭覆蓋要能產生最大的正面效應，主要是需在特定環境條件下。其他有關作物產量和回復力間要取捨的是，這些樹木對作物來說能緩衝氣候的影響，但是在沒有氣候或其他干擾因素下卻會降低平均產量。因此，在氣候變遷的背景下，再加上不同氣候事件及人類對產量的需求，什麼是農林系統應具備的回復力仍是一個大家所關心的問題。

農林業的優點已經廣被討論，但是很少以緩衝氣候變遷來穩定產量的觀點切入。結合生態和社會經濟權衡的農林跨學科研究仍然很少，而且多數是從氣候變遷的觀點來看。但大多情況下，耕作制度的回復力都是受到樹木產品（本章所提的第一類）和其服務（本類型）兩者的影響，而且當在分析不同樹種或管理方案時，也應將兩類觀點納入考量。

儘管農林業制度有如此多的優點，但其發展仍受到一定程度的限制。許多熱帶國家政府目前已推廣能強化糧食安全和增加農民收入及保護森林的農業集約化，做為替代農業生態制度和輪墾制度的方式。但是集中型農作卻可能加劇對氣候變遷的脆弱性，並且可能導致濫伐森林。其他被建議的方法，如以保護生態服務和增加農民收入為目標的與樹木有關的集約農業，又涉及到「土地節約法」（land sparing）和「土地共用法」（land-sharing）的爭議。（前者是一個地景內的部分區域進行最大化的農業生產，而在別處則是進行自然生態系保護，亦即在集中型農作區與自然生態保護區之間尋求二者清楚界線；後者則是在同一地景內整合保護和生產，希望在同一塊土地上兼顧農作發展目標以及自然生態保護）。

「土地節約法」所強調的是景觀最佳化，而「土地共用法」則是協合人類及生態系統，哪一個是適當的作法，將是以社會和生物物理脈絡環境而定。總體而言，要確保在不斷改變氣候環境下的糧食安全，將需要從生產、分佈到分配系統到地方、區域和全球性機構等各方面施以調適策略。

強化能抵抗氣候變遷的農林業，需要的是簡單且低成本，並讓社區居民試驗並相互學習的創新方法，如同「由農民管理的自然復育法」的例子。因此採用的農林業作法，政府政策、激勵方案和機構制度的角色就很重要。舉例來說，蔭下栽種咖啡和可可的認證計畫和補貼，或是生態系服務的付費，都能促進農民採用農林業作法。但是一些市場和補助地方農林業，可能會因為過度扶持集中型農業、生物燃料和木材種植而產生一些缺點。補貼制度也能被創新運用，來推廣以樹木為主的耕作制度，如 Garrity 等人所建議的將肥料補助連結到有固氮樹木農田上的農林業投資。

其他影響農林業發展的因素，如採用家庭的特徵（如性別）、推廣服務的干擾、權利制度，以及土地和森林資源的壓力。以尼日「由農民管理的自然復育法」的例子來看，他們是由治理層面開始改變，進而改變相關的經濟及生態。在執行初期，樹木權利並未提供人們實質激勵來保護樹木，這是因為樹木的擁有者是市政府。而「由農民管理的自然復育法」計畫聯合當地森林主管部門共同確保人們能由保護樹木中獲利，並且允許人們最終能自己決定何時和如何利用這些樹木。將權利賦予農民，使他們成為改革的積極推動者和長期調適的行動單位。因此，農林業的相關行動應該首重在當地規劃制訂支持性制度（如規定、組織和激勵方案）。

### **第三類：覆蓋流域的森林能調節水量並保護土壤以降低氣候影響**

森林會影響降雨截流、蒸散量、水的滲透或是補充地下水。它們有助於調節乾季時基流和降雨時期的洪峰，而這兩種水流都是人們適應氣候變遷中極為重要的服務。森林同時也能穩固土壤並防止發生水土流失和崩塌，更能降低會危害基礎建設、居住場所和水用戶有關氣候的負面影響。

在印尼弗洛勒斯島，熱帶森林覆蓋的流域已被證明能增加基流（即沒有降雨時來自地下水的流量比例），並且可減少下游農業社區受乾旱的影響。而在不規則的降雨期間，鄰近有森林覆蓋的流域上，農戶會比其他區域的農戶有更多的利潤。

波利維亞的森林再生和人工造林計畫，已經證實能降低 Khuluyo 社區對不規則降雨和強烈暴風兩者的脆弱性。當地社區長期依賴灌溉農業，但頻繁的暴風造成土壤流失和崩塌，因此天然林的再生，也可以延長在乾旱期間的供水。天然再生林和種植森林也能穩固山坡，進而降低居住地區及農地土壤的侵蝕和崩塌脆弱性。

1988 年泰國發生土石崩塌事件是和突發的劇烈降雨和坡度有關，同時也由於伐林和矮林。過去，山區水源處一度完全被森林覆蓋，但農業的入侵和過度砍伐森林，又人們在許多地方都改種植橡膠（橡膠一直是多數社區的收入來源），但橡膠的根部很淺，無法有效抓住土壤。

2004 年在菲律賓的熱帶氣旋造成許多生命損失及經濟嚴重受創，都可歸因於砍伐森林。劇烈的降雨造成山體滑坡以及山區泥石流，同時也使得河流溢流、水庫潰堤和水患。山坡和流域缺少森林來留住土壤並減少洪水流量，導致影響加劇。發生在喀麥隆低窪地區的水災也是由於土地利用的改變。

社會適應氣候變遷具調節服務的集水區數據很少，即使森林和水之間相互作用的研究資料豐富能提供「以生態系為基礎的調適策略」的決定。但在這些討論中，只有一個探討是與氣候災害有關的森林的水文角色，並且是利用水流、降水、地形、植被和土壤的水文模型數據。「以生態系為基礎的調適策略」研究或建議的方案，不應以傳統上相信天然和種植的森林會能提高總水流量的概念為主，但事實上，這與許多小型配（併）對集水區（paired watershed）所顯示的結果相違

背。但傳統的概念已深植在大眾的心中，現在已經有些研究學者利用科學數據來分析傳統上的概念並加以比較。

森林對於暴雨、洪水的影響目前也是廣泛討論的議題。即便森林似可增加滲透量和蒸散量，而且也能降低暴雨流量，但是森林能降低水災的實證，仍受到大家質疑。根據 Bruhnzeel 的研究指出，森林無法調節劇烈的降雨，因為在當時土壤已經相當濕潤了。因此配對集水區的研究可能會有些偏差，因為沒有將洪水發生頻率納入考量。目前，已經證明森林覆蓋率能降低洪水發生頻率。有些集水區管理計畫是以林和樹木管理為主，因此森林的水文研究以及與洪水的關聯性，還需要重複檢測以增加相關研究數據。舉例來說，中美洲在 Mitch 颶風後，建議以植樹的方式，來保護極端氣候期間的集水區，至今還沒有證據顯示相關的成效。然而，即使森林對預防大規模水災的作用尚有爭議，但是它們得以預防平均和最頻繁的水災的功能是不可忽視的。

森林對基流的影響不能一概而論，因為它是兩種相互競爭過程產生：和非林地利用相較之下，林地一般都具有較高的蒸散量（因此基流較低）和較高滲透量（因此較能補足土壤水分且基流較高）。假使相較於其他利用方式，森林能提高土壤中的水滲透量比它們引起增加的蒸散量還多，那麼森林就可以保護基流。這同時也說明在比較林地和非林地的利用時，考量土壤性質和管理方式是很重要的。

規模大小對於確認森林對水流的影響是很重要的因素。例如，森林降低小型集水區暴雨流量或是總年水流量的影響，會比對大型集水區還要明顯。以區域規模而言，除了滲透、徑流和蒸散之外（後者被視為在本地或集水區的觀念被採納，而人類使用所導致的水的損失），其他過程也必須要考量在內。在區域和全球規模來說，森林可以回收降雨並且產生大氣水氣流量，但這些功能無法被量化。雖然森林的蒸散功能會降低集水區的總水流量，但是它仍可以將水再次抽回到大氣中，進而增加該地區的降雨量。森林也可以增加大氣濕度並吸引海洋潮濕的空氣到內陸地區，但是地區規模內這種水文過程中，森林所發揮的作用仍是廣受討論。

至於土壤流失和土石流，研究文獻已經證實相較於其他土地利用，森林地區表面所受的侵蝕較低，這是因為森林可以提供土地較多保護並促使徑流較低。而且和非林地區比較之下，一般觀察到有森林覆蓋的區域發生土石流的機率也很低，這也是因為森林能增進其根部的土壤黏性。然而，有關森林對土石流的預防作用仍尚未確定。1988年在泰國發生的土石流，研究得到的結論是土石流發生率和植被覆蓋並沒有關聯性，是因為降雨強度超過了根部穩定土壤的能力。因此，森林雖能降低高降雨強度對土壤侵蝕的影響，但或許仍無法降低災害風險。

「以生態系為基礎的調適策略」在集水區的推廣成效相關數據很少且尚未明確，而且外部因素也增加了一些困難。大多數集水區管理問題（無論與氣候有關與否）所面臨到的外部因素，是利益相關者管理土地的方式，以及水上游影響其他下游地區的利益相關者的決策。因此，集水區的「以生態系為基礎的調適策略」

應該要發展一套水使用者及管理者之間的協調機制，以及分配集水區管理成本的補償機制。舉例來說，與森林提供保護上游有關的機會成本應該要獲得環境服務的補償。

#### **第四類：森林能讓沿海地區免於與氣候有關的威脅**

沿海樹林如紅樹林能保護沿海地區免於熱帶暴風、海平面上升、洪水和侵蝕，這是因為它們能吸收並且分散海浪的能量並且穩固沿海區域的土地。

1999年印度在 Orissa 颶風後的結果更證實紅樹林具有保護地區免於遭受颶風的作用。由於紅樹林的保護，這場颶風造成村莊人們的生命、財產和作物的損失很少。孟加拉的沿海島嶼 Nijhum Dwip 上的居民相信，紅樹林的恢復除了能讓他們獲得原料並且保護土壤之外，也可以讓他們抵禦自然災害。在菲律賓班乃島上的人們也願意保護紅樹林生態，因為多數人都相信紅樹林能保護他們免於暴風災害。

沿海森林能有效控制侵蝕，在西印度群島中的馬提尼克島上多數海灘都有侵蝕風險，現有沿海管理作法的分析和當前測繪和預計的脆弱性，都建議以保護及復育紅樹林，做為百分之十五的馬提尼克海岸帶的優先調適策略。過去五十年來，桑吉巴爾島海岸帶的侵蝕和沙灘入侵現象，都顯示與原始植被減少有關。因此海岸森林能藉由穩固海灘的沙粒，並吸收海浪強度來避免過度的侵蝕，同時也可促使海灘的發展。而沿岸社區和利益相關者也都同意以種植樹木、灌木和攀緣植物做為解決侵蝕的優先作法。

在越南，經濟評估顯示在靠海的海堤邊種植紅樹林，能降低防護堤的維護成本，因為紅樹林能消散破壞性的海浪強度，並且能穩固海底及其坡度，也能圍住沈積物。恢復紅樹林保護堤防每年每公頃能獲得的利潤為 70 至 130 美元，核算折現率後，相關產品的利益每年每公頃為 700 至 1700 美元，而恢復紅樹林的成本每年每公頃僅需要 170 至 310 美元。因此，復育紅樹林來保護海堤的優點，不只是能降低維護海堤的費用，而且也能避免損害。

儘管有這些證據的支持，但仍很難確定紅樹林究竟能提供多少的保護，且如何解釋這樣的保護作用。有些科學家批評在一些極端氣候事件紅樹林的保護作用的說法仍是零星的、描述性的或是理論上的，但並未進一步探討其他的因素，如地形、近岸水深度、和海岸的距離及人類因素（如緊急應變措施）。因此，必須特別謹慎在沒有完全理解每一個特殊地區沿海動態和紅樹林保護作用的前提下，是否適合開始進行海岸區域適應的工作。

到目前，尚不清楚究竟需要多少紅樹林才能降低某個特定地區的脆弱性，以及何種生態系統特徵得以確定它的保護作用。保護沿岸所需要紅樹林的程度是依據地貌和極端事件的風險而定，而且紅樹林廣度對於其到底能發揮多少保護尤其重要。舉例來說，每個特定地區所需的最小的紅樹林廣度是按照紅樹林結構而定，紅樹林的根部系統和樹幹直徑則關係到衰減正常海浪波強，紅樹林的垂直分佈則在暴風期間發揮關鍵作用。紅樹林種類多樣化更可以提升其保護作用，這是因為



樹幹和根部的不同可以產生不同程度的粗糙度。

紅樹林的品種和組成對其抵禦干擾或從干擾回復(如極端天氣、海平面上升),以及改變水文情況也是很重要的。紅樹林的回復力則是其保護作用主要關鍵,在暴露於海平面上升和氣候變化的情況下,生態系會惡化甚至無法提供生態服務。而多數情況下,防護既有的沿海森林屏障會比補植新的更是可持續的作法,而已經改變的環境條件將會使紅樹林再生或恢復更加困難。

沿海樹林能在地區遭受暴風時提供一些保護,但是這應該被視為是較廣義調適和降低災害風險策略的一部分,特別是這些樹林無法保證能完全防止極端事件。但是沿海樹林確是能穩固海平面上升和漲潮的侵蝕情況。

### **第五類：擁有調節溫度和水的都市森林—彈性的城市(Resilient city)：**

都市的森林和樹木能提供遮蔭、蒸發冷卻和攔截雨水、儲水及滲透的服務。這些樹木是都市中調適氣候變遷和變化的關鍵角色。

由於都市的表面覆蓋已改變,如建築物代替了原有的綠色植被,因此導致都市地區發生地表徑流速度和流量增加,並且出現熱島效應(UHI)。英國曼徹斯特的綠覆率增加情況顯示,降雨時的徑流有減少的趨勢。

熱島效應是因為城市地區的地表被混凝土、磚頭、柏油和石頭覆蓋,吸收太陽輻射熱能增加並且蓄熱所致。文獻顯示美國新紐澤西州的都市樹林能降低熱島效應對健康的影響(熱度壓力和空氣污染),進一步降低空調使用而節約能源。大型成熟的樹林因具有更大的樹冠和樹蔭,故特別能發揮效用,具估測有成熟樹冠地方會比沒有樹木的較涼爽約攝氏2.7-3.3度。

英國曼徹斯特地區,綠色覆蓋對地表溫度的影響更加顯著。都市林地的最高地表溫度為攝氏18.4度,而沒有樹林覆蓋的市中心最高溫度為攝氏31.2度。而在市中心增加10%的綠色植物覆蓋,最多可降低地表溫度攝氏2.2度。此外,根據排放的情況,預測2080年地表溫度在林地區域最多將提高攝氏1.5-3.2度,市中心則會增加攝氏2-4.3度。

在塔瓦、津得爾和尼日,研究顯示森林和樹木利用調節微氣候和暴風雨水,能將都市地區遭受不利氣候影響降到最低。其他研究顯示,在奈及利亞和埃努古的商業和工業地區所觀測到的溫度比有森林的地區還要高。

都市的生態服務研究普遍也多是都是在已發展國家內進行,但已發展國家的都市適應氣候變遷、森林和樹木的作用的相關研究,很少以航空拍照和遠程遙感、土地利用及氣候數據模型、液壓和能量交換模型的方法進行。然而發展中國家該主題的研究才剛起步,因此相關證據也是很有限。許多發展中國家的城市快速成長,並積極尋求能適應氣候變化的都市土地利用計畫,以及評估相關的生態系優點。但這邊必須要將下列幾項因素納入適應氣候工作的考量,如該地區缺乏有關的灰色基礎建設(如排水溝)、綠色基礎建設(如濕地)受到大規模破壞,以及涉及到貧困、當地不善的治理,以及高風險地區的大群人民聚集如貧民區等。

普遍來說,樹木比草地更能冷卻溫度和減少徑流,這是因為樹木較不易受乾

旱影響。但是它們並不能做為唯一解決水災的作法，而是還要結合其他的措施如綠屋頂。對各大城市最建議的「以生態系為基礎的調適策略」是開發城市樹林和公園來降低熱島效應或水災，如建議奈及利亞和埃努古增加百分之五十的樹林覆蓋來降低熱島效應。但是建議城市的調適應該同時要考量到其他的範疇，包括市區外、集水區（第三類）和沿海地區（第四類）的森林管理。此外，來自周圍鄉村地區的生態系服務將會明顯影響都市的生態，這也表示必須要以更廣泛的城鄉地景系統考量。而生態網絡能提升都市的「以生態系為基礎的調適策略」整體效益。舉例來說，在北京所建議的綠色制度有三種層級，區域性（自然、半自然森林地區和緩衝帶）、都市（公園及綠色走廊），以及鄰近區域（綠色植物的延伸，道路及垂直綠化）。

在都市引進「以生態系為基礎的調適策略」的作法，也引起有關森林樹木管理權衡的關注。這是因為，進行都市綠化可能會透過其他方式取用天然資源，如乾早期間取用其他水用戶的水源來維護樹木。德班氣候保護計畫的經驗指出，要達成都市「以生態系為基礎的調適策略」需要超越所謂的一致性，也就是將發展街道樹木和公園一體適用的觀念，而是要進一步對生態系生態和韌性有更深的認識，並且具備有生物基礎建設的能力以改善多數弱勢族群的福祉。德班早期的經驗說明了「以生態系為基礎的調適策略」或許隱藏著許多長期利益，但這些都必須在能滿足先決條件的情況下才能達成，例如有適當結構和資源條件的發展計畫，能夠直接且立即促進當地社群的利益。所有地方政府應認同「以生態系為基礎的調適策略」，因為城市和周邊城市都會受到中上游決策和管理方式所影響。然而實際上，現階段往往都是以單一管理目標的基礎上作出決策。

## 結論

持續的證據顯示，森林樹木能降低社會面對氣候變遷和變化的脆弱性。本文中所提出的第一類中，森林提供鄉村社區重要的安全網、多樣的謀生方式，並且是居民不可或缺的收入來源之一，而且也產生相關森林和樹木產品做為一種適應方式。然而以森林為主的策略其可持續性目前仍被大家所存疑，因為做為因應短期衝擊的商品，而沒有管理森林和樹木的長期目標。其他的問題包括森林產品通常是最貧困的人所使用，這是因為他們已經沒有其他的替代方法，這也表示以商品的適應策略有可能會是一種造成貧困陷阱。

至於文中第二類，則是很明確的證據顯示樹木有能力讓退化的土地再生，並保護農業生產不受氣候危害，同時改善水利用效率。但在有關生產和回復力之間的取捨仍存有很大的認知隔閡，以及為了回復所需要的農業生態複雜程度尚不明確。第三類的討論中，我們看到森林所提供的集水區服務對社會適應相當重要，但是要測量及評估它們的效益仍然是有困難的，特別是因為其中所涉及的複雜過程和各種空間範圍。目前能證實森林覆蓋地貌可降低氣候變遷的研究仍很有限，雖然還有很多爭議尚待解決，但是森林水文服務對人類福祉的重要性應該不能輕忽。第四類有關在極端暴風氣候時紅樹林的保護作用也尚有爭議存在。然而，紅

樹林能緩衝沿海住戶遭受颱風、沿海水患、侵蝕和海平面上升仍相當有效。但至於要確定生態系特徵能對各種危害所提供的保護程度也還未能確定。第五類都市森林已有明確的證據說明能調節都市地區的微氣候，但卻有機會成本和韌性之間的問題，就如同德班「以生態系為基礎的調適策略」的經驗。

本文的研究雖未侷限在某些地理區域，但是多數都是有關發展中的國家，除了第五類的研究（都市地區）。這可能是因為一般認為發展中國家最脆弱的，儘管這些國家也具備處理有關氣候風險的經驗。另一個原因可能是我們僅選擇森林和樹木來進行分析。舉例來說，一些有關加拿大、美國及英國的沿海生態系統管理和脆弱性降低，但是主要都是因為鹽沼或泥灘，而不是森林。因此在熱帶地區的紅樹林就被視為是熱帶國家的觀察重點之一。第三個原因是相當富裕的國家其經濟和科技可能使他們能利用工程技術替代生態系統服務。舉例來說，水調節服務退化情況已經可由改善的水資源、污水處理或灌溉及防洪基礎建設而獲得補償。同樣地，失去對農業優勢的生態系服務已經能藉由增加使用化肥和農藥來補償。在這樣的情況下，在已發展國家內有關生態系服務的適應氣候工作通常就會比在發展中國家的來得少。

文獻也顯示能降低氣候脆弱性的生態系服務成效一般會受到某些地理特徵影響，如地形、地貌、土壤、生態系統多樣性和結構，以及氣候。也因此在某處有效的以生態系為基礎的調適策略不一定能同等適用於另一個地區，因此必須謹慎選擇每一個「以生態系為基礎的調適策略」計畫的樹種，以該地特徵並符合其特定氣候條件下所需的優先生態系服務類型為主。生態系的恢復或保護程度和位置，以及其結構組成對於他們能將風險減至最小將有很大的影響，如在集水區內森林的位置（如第三類）或紅樹林的結構（第四類）。

而我們所看到的研究也強調「以生態系為基礎的調適策略」，是基於各種社會經濟和治理因素，因此在規劃適應方案時都要將該兩項因素納入考慮。社區民眾的參與以及資產擁有者，都是每一個以生態系為基礎的調適策略得以成功實現的關鍵要素。適應行動不應只著重在方案的生態成效，而且也要注重能在適當有利條件下能夠獲得的經濟利益。此外，也應一併結合相關的教育、能力建設和延伸的服務，來取代只強調集中資源生態管理和適應的短期因應策略，特別是第一類中所提到的「商品」和「農業」。短期因應策略和調適的永續生態系統管理之間的差異，就是要確保資產和取用權的明確定義。調適氣候變化工作需要短期和長期的行動、機構制度和政策來強化永續森林管理和調節功能。本文也認同社會經濟和治理因素也會影響森林生態系統管理及達成「以生態系為基礎的調適策略」的有效性。

許多研究評估都提到生態系對人類調適或福祉的多重優點。舉例來說，紅樹林的保護研究中同時將以漁業、蜂蜜採集、木材和木炭生產為主的居民經濟利益納入考量。在整體沿海管理上，生態系不僅是被視為是生物防護罩，更是提供了許多有價值的生態系服務。更普遍來說，農村環境情境常看到第一類（商品）和第二（農業）、第三（集水區）或第四類型（海岸）互有關聯。而上游森林或某

些依賴沿海生態的都市環境，第五類（都市）常與第三（集水區）和第四（海岸）有關。

生態系服務之間的取舍也是考量的重點之一。舉例來說，再生林計畫的目標是透過種植單一特定品種或外來品種來降低土石崩塌或沿海災害風險，這或許能提供當地居民少數的商品。相反的，某些抗氣候樹木品種被做為是能快速生財的多樣謀生方式（尤加利樹），但卻可能會影響人類使用水的情況。一般是會用於沿海地區的外來樹種如木麻黃則可能損害當地物種，因此也讓大家注意到有關生物多樣性和其他生態系服務。此外，每個利益關係者對相同的生態系服務會有不同利益上的認知。在不同的空間範圍一般也會發生要取舍的現象，例如保育集水區森林能降低下游民眾的脆弱性，但上游社區會因此受到取用土地和森林的限制，而導致他們的脆弱性增加。

適應決策時需要注意的部分還包括成本效益、共享利益和可行性。森林樹木通常都能提供上述的各種利益。就生態多樣性來說，則具有共享利益的優點、減緩氣候變化或是其他生態系服務（如在都市內具有休閒娛樂的利益）。「以生態系為基礎的調適策略」也會比以基礎建設為主的調適作法更具有彈性，儘管仍有一些不確定性，但在決定「以生態系為基礎的調適策略」時一定要考慮到多個層面。

最後，人類不應只追求「以生態系為基礎的調適策略」，而是要將其做為整體調適的一部分，如利用森林商品是一種很重要的生計多樣化方式，但並非只是單獨的一個策略。以防禦沿海的例子來看，紅樹林無法完全防止任一個極端事件，因此適應氣候變化或降低災害風險的計畫，應該也要包括設置警報系統或防災準備。但在一些例子，「以生態系為基礎的調適策略」可能會面臨到一些限制，例如要降低土地崩塌風險的作法是在非常陡峭的斜坡上造林，但實際上這種作法幾乎不行，因此可能會考慮其他作法甚是遷移住所。而「以生態系為基礎的調適策略」，也能夠補強人造建築，如利用紅樹林（綠色基礎建設）來強化海岸的堤壩（灰色基礎建設）。