

台灣國有森林資源水源涵養經濟 效益之評估

謝敬華*、柳婉郁**

摘要

水資源為人類不可或缺之生存要素，森林生態系亦與人類生活息息相關，而水源涵養便是森林生態系主要功能之一，其效益屬於一種間接利用價值。隨著環境資源被開發與破壞，水資源缺乏的問題逐漸受到重視，評估森林水源涵養功能便成為探討森林水資源永續利用之重要手段。然而評估森林水源涵養功能並不容易，其評估方法易依據不同環境特性等因素而有所差異，如何準確評估近似於現實狀況亦是研究所需著重探討之部分。本研究針對台灣八個國有林區管理處轄下之森林，透過水文平衡收支法以及水庫單位容積造價之重置成本法，分區計算台灣國有林森林每年平均水源涵養總量為29,967,841,946.00 m³，平均每單位蓄水量價格為0.10元/m³，每年涵養水源之經濟效益則約為3,102,671,667.08元。自本研究模擬之結果顯示，台灣國有林水源涵養功能與位處之環境氣候相符，然而於計算過程中發現，即便皆位於本島，不同地區水庫單位蓄水貼現成本可能受地理環境等諸多因素影響，而有較大的差異。因此建議在估算水源涵養時，

* 國立中興大學農業暨自然資源學院森林學系研究生。

** 國立中興大學農業暨自然資源學院森林學系專任教授，本文聯繫作者。E-mail：
wyliau@nchu.edu.tw。本文承蒙行政院農業委員會研究計畫之補助(106農管-1.11-企-01)，謹致謝忱。文中若有任何疏失之處，均屬作者之責任。

除了考量資料獲取的尺度及限制外，亦應該顧慮到國內不同地區的水資源供應來源，分別計算後再加總以求更精確的結果。

關鍵詞：生態系統服務功能、經濟效益、水源涵養

JEL 分類代號：Q23、Q24、Q51、Q58

台灣國有森林資源水源涵養經濟效益之評估

謝敬華、柳婉郁

壹、前言

水資源為人類生存所需的基本自然資源，不僅可以做為生活品質的指標，其基礎建設亦具備促進經濟持續發展的功能，因水資源在產業發展與環境保護方面扮演相當重要的角色，為國家永續發展的關鍵要素（楊偉甫，2010）。近年來由於氣候變遷的影響，如近年春夏期間，印度、美國加州以及日本關東等地區出現嚴重乾旱以及雨季缺水的情形，使得世界各國更加重視水資源的維護與開發，Fant et al. (2016) 於亞洲的研究更指出，社會經濟 (socioeconomic) 改變 (例如：人口成長及工業發展等) 常被氣候變遷的影響所掩蓋，若無妥善地規劃利用水資源，未來水資源缺乏的嚴重程度可能會大幅增長。

生態系 (ecosystem) (海洋、陸地、森林、草地、濕地、河川、湖泊、農田、城市等) 與人類息息相關，健全且永續的生態系可對人類社會與環境帶來諸多效益，如提供食物、調節氣候、滯塵等，而無論是直接或間接獲得、有形或無形的效益皆稱為「生態系服務」(侯元照與吳水榮，2008；Costanza et al., 1997)，其概念於 20 世紀 60 年代後期始被重視與使用，初期 Westman (1977) 提出「自然服務值多少價值？」的主張，將生態系功能定義於「資產」概念的屬性；接著 Ehrlich and Mooney (1981) 提出「生態系服務」的說法，Daily (1997) 將生態系服務定義為以生態系和其中物種運行的過程為出發點，提供人類維持自身生命或滿足需求，進而反映生態系服務中「流量」的概念；Costanza et al. (1997) 則於「世界生態系統服務和自然資產價值」研究中，說明資本為任一時間任意形式的資產

儲存量 (capital stock)，人類利用自然資產時，其屬性會產生定量至流量的改變，進而成為生態系服務；2012 年，生態系服務 (Ecosystem Services) 期刊創立並發行第一期。

2005 年，千禧年生態系統評估 (Millennium Ecosystem Assessment, MA) 將生態系服務定義為「人類可從生態系中得到的益處」，並將生態系服務區分為供給、調節、支持、文化四大類別：其中支持服務為生產其他生態系服務的基礎，提供產出其他三項服務所需之條件；供給服務產出食物、原料、乾淨淡水甚至是基因資源等人類所需資源；調節服務調節氣候及水源等，減緩自然災害對人類的衝擊與威脅；文化服務則屬於精神層面，包括休閒娛樂、美學價值、教育價值等，使人類能從中得到心靈上的富足與充實，而這四大類別的服務皆為維持人類健康、提供安全生活的必要條件 (Millennium Ecosystem Assessment, 2005)。

2007 年，八大工業國暨新興工業五國 (G8+5) 於德國波茨坦召開高峰會，於會議中通過「生態系統暨生物多樣性經濟學倡議 (The Economics of Ecosystems and Biodiversity, TEEB)」，基於 MA 將生態系服務四大類別細分為 17 個項目，期望能藉此倡議促進各界對於生物多樣性的全球經濟效益、喪失生物多樣性導致的價值損失、未能採取適當防護措施產生的影響有更多的重視，並針對前述問題以及採取有效保護措施的成本效益等相關議題進行全面性的評估分析 (李俊鴻等，2011)。自 TEEB 生態系服務資料庫可觀察到，過去生態系服務相關的研究，以森林生態系服務較其它生態系多，包含非木材之林產品 (食物)、淨化水源、預防土壤沖蝕、休閒、原料材料及生物多樣性保護等，而台灣與中國多數森林生態系服務價值評估報告 (康文星等，2008；呂明倫等，2012) 顯示出，森林水源涵養功能在各項服務中具有較高的價值。

森林為可再生資源，具有淨化空氣、鞏固土砂、增加水分蓄存空間、調節水源供給並減輕災害、淨化水質等功能 (吳俊賢等，2004)。森林水源涵養係指，增加森林集水區之低流量或基流量與調節流量在時間上之分佈情形 (陸象豫，1996；吳俊賢等，2004)，而陳信雄與陳明杰 (1990) 及吳俊賢與陳溢宏 (2010) 認為，除蒸發散及地表逕流損失以外，長時間保持在土壤水帶及中間水帶，因重力關係向下滲透而未達地下水面時形成積

向的中間流，即為森林的水源涵養能力。森林涵養水源的價值為一種生態價值，亦是一種永續利用價值，主要包含增加有效水量價值、改善水質價值以及調節逕流價值 (吳俊賢等，2004)。

自 2002 年台灣加入世界貿易組織 (World Trade Organization, WTO) 後，國內對於木材生產之相關生產補貼措施受到限制，政府對於造林之支持措施便轉為以資源保育、生態環境保護等相關議題為主，而其中水源涵養功能即可納入成為生態補償之綠色給付之一部分，森林水源涵養功能對於環境之重要性可由美國 1964 年創建至今的水土保持基金 (Land and Water Conservation Fund, LWCF) 上體現，此基金除了較為主要之水資源供給、棲地與林地保育外，亦對保護地役權有所貢獻，2017 年美國政府便撥款 9 億美元給予 LWCF 基金作為計畫資金，可見其對於森林水土保持之重視程度。而 2014 年聯合國永續發展目標 (Sustainable Development Goals, SDGs) 公告之 17 項目標中，目標六為「確保所有人都能享有水及衛生之可利用性及永續管理」(United Nations, 2017)，可見森林水資源供給與蓄存功能對此目標之重要性。

台灣目前之水文現況顯示，台灣降雨在時間與空間上分配極不均勻，再加上地形山多陡峭，河川也較短而湍急，佔有台灣本島 60.91% 國土覆蓋率的森林 (行政院農業委員會林務局，2016a) 便成為水資源涵養與供給的關鍵，由 TEEB 生態系服務類別中可知，水源涵養亦是森林生態系統一項重要的服務，其同時具備環境與經濟上的價值。綜覽多數台灣與中國之森林生態系服務價值評估相關研究 (康文星等，2008；呂明倫等，2012)，其研究結果顯示森林水源涵養功能在各項生態系統服務中具有相對較高的價值。目前台灣較少有文獻針對台灣進行較大範圍之森林水源涵養效益之評估，多為區域性質且較為精準之研究，因此本研究期望利用佔據台灣本島一定比例之八個國有林區作為研究對象，所評估之水源涵養價值可供農委會林務局參考，進而使其依據此結果研析如何納入政府對於造林綠色給付等相關之補助政策中。

本研究主要目的在於評估台灣國有林之森林蓄存水量 (意即水源涵養) 效益價值，透過蒐集中央氣象局、經濟部水利署及農委會林務局所提供之基礎資料，利用相關文獻的

統整與回顧，試行估算並建立台灣八個國有林區森林水源涵養的評估參數與模式。因此本研究之研究目標地點為佔據台灣全島林地約 77.09% (行政院農業委員會林務局，2016a)，且由行政院農業委員會林務局八個林區管理處所管轄之八個國有林區，並參照森林生態系統服務水源涵養價值之相關文獻的研究方法，建立台灣森林生態系水源涵養服務之調節水量及水庫價格間的關係，形成一套適用於臺灣國有林的估算方式，使未來在計算森林水源涵養這項功能之價值時，能以較為快速簡便的方式，得到較接近真實情形的結果。

貳、我國森林生態系水源涵養現況與發展趨勢

一、台灣森林水源涵養現況

(一)台灣近 10 年平均降雨量

台灣森林水源涵養現況主要與降雨量、蒸發量、逕流量以及森林區域現況相關，依據行政院經濟部水利署 (2015a) 主計室利用交通部中央氣象局資料編製之台灣地區近 10 年 (2005-2014) 降雨量概況，以及交通部中央氣象局 (2016) 公告 2015 年每月氣象之年均降雨量資料，本研究統整台灣近 10 年 (2006-2015) 降雨量概況以及年均降雨量如表 1 所示，列表中包含 28 個平地或山區之氣象觀測站，由各年均降雨量概況可發現，各區域之降雨量隨年份而有遞減之趨勢，其中以 2014 年為相對其他年份較為乾旱的一年，而各個測站中則以大武與東吉島測站，為降雨量比例波動較大之測站。

表 1 台灣地區近 10 年 (2006-2015) 降雨量概況

氣象測站別	年別										年平均
	2006年	2007年	2008年	2009年	2010年	2011年	2012年	2013年	2014年	2015年	
阿里山*	5,330.8	5,042.8	5,886.7	5,222.0	3,654.6	3,655.6	5,166.3	4,966.1	3,172.4	3,413.3	4,664.6
鞍部*	5,367.7	5,889.1	5,355.3	3,860.5	4,915.1	4,879.0	4,911.5	5,205.5	3,887.7	3,500.1	4,829.8
板橋	2,285.3	3,018.7	2,720.4	1,616.5	2,291.0	1,909.0	3,083.3	2,488.0	2,369.2	2,132.2	2,455.7
成功	1,936.8	2,302.5	1,718.3	1,814.1	2,042.4	2,720.6	2,473.3	1,972.0	1,653.6	1,506.8	2,001.7
嘉義	2,317.8	2,063.9	2,510.6	1,826.5	1,532.5	1,021.7	2,201.3	2,580.5	1,342.1	1,790.3	2,015.7
大武**	2,473.8	2,755.4	2,081.5	2,684.8	2,529.9	2,687.2	3,031.1	2,563.3	1,263.8	1,915.4	2,501.5
東吉島	1,244.5	1,065.8	1,096.9	1,197.3	770.2	933.0	895.0	970.8	658.0	1,468.8	1,098.3
恆春**	1,690.1	2,139.8	2,004.5	1,854.3	2,421.2	2,597.0	2,938.4	2,098.1	1,489.0	1,480.1	2,095.6
新竹	2,127.5	1,963.9	2,166.6	1,119.5	1,605.1	1,222.6	2,741.2	2,043.5	1,150.3	1,417.8	1,812.9
花蓮	1,901.0	2,525.5	2,312.0	2,535.6	1,769.3	2,199.5	2,303.0	1,970.9	1,226.6	1,784.6	2,118.6
高雄	2,045.5	2,194.0	2,591.3	1,756.3	2,160.7	1,796.7	2,196.7	1,688.2	1,942.0	1,344.0	2,048.8
基隆	3,723.5	4,063.7	3,673.6	3,654.6	3,303.6	3,727.0	3,908.8	3,768.2	2,574.0	3,151.6	3,617.2
金門	1,544.5	994.1	1,025.2	884.3	972.6	780.3	893.0	1,400.8	905.8	1,109.6	1,092.0
蘭嶼	2,917.5	2,829.0	3,017.6	2,320.0	2,950.4	3,605.7	3,254.0	3,318.3	2,960.3	2,693.7	2,956.5
馬祖	1,468.5	1,088.7	1,059.0	1,170.6	1,206.2	792.8	1,914.4	1,033.4	908.2	1,026.8	1,170.6
澎湖	1,506.8	979.4	1,512.6	969.8	688.2	609.4	921.9	947.0	819.5	1,752.7	1,117.9
彭佳嶼	2,283.9	2,075.0	2,153.2	1,426.8	2,093.9	1,553.5	1,960.3	2,020.4	1,266.0	1,148.6	1,876.1
蘇澳**	4,548.3	5,466.3	3,990.9	4,682.3	4,738.2	4,443.8	4,732.9	4,265.1	2,723.4	4,069.1	4,339.6
日月潭*	3,228.8	2,822.4	3,851.3	1,797.8	1,932.1	1,725.3	3,090.9	2,933.8	2,191.2	1,878.0	2,586.9
臺中	2,171.9	2,432.9	2,477.8	1,978.7	2,054.4	1,204.9	2,202.5	2,133.0	1,466.1	1,526.3	2,020.3
臺南	1,867.2	2,207.3	1,950.0	1,366.6	1,779.2	1,218.8	2,425.7	1,688.5	1,268.1	1,481.0	1,854.6
臺北	2,288.4	3,015.9	2,969.2	1,669.2	2,278.3	1,758.6	2,910.3	2,541.4	2,147.3	2,519.2	2,466.0

表 1 台灣地區近 10 年 (2006-2015) 降雨量概況 (續)

氣象測站別	年別										年平均
	2006年	2007年	2008年	2009年	2010年	2011年	2012年	2013年	2014年	2015年	
臺東	1,772.3	1,732.3	1,642.4	1,380.9	1,973.8	2,510.6	2,118.2	1,867.8	1,194.2	1,222.8	1,726.6
淡水**	2,590.5	2,672.6	2,575.5	1,321.6	2,070.3	1,713.8	2,993.5	2,343.5	1,893.3	1,571.0	2,229.4
梧棲	1,372.6	2,203.7	1,613.5	997.3	1,182.4	605.0	1,660.8	1,921.4	1,154.2	1,148.0	1,422.1
宜蘭**	2,730.4	3,115.1	2,846.0	2,930.2	2,542.4	2,781.9	2,916.1	2,552.8	2,095.0	2,579.4	2,765.4
玉山*	4,519.2	3,847.0	4,063.8	3,588.9	2,423.8	2,548.3	3,583.8	3,535.1	2,149.4	2,317.4	3,388.5
竹子湖*	4,439.2	5,287.7	4,814.0	3,403.2	4,070.5	4,111.2	3,904.6	4,078.0	3,206.7	3,327.0	4,145.8

資料來源：行政院經濟部水利署 (2015b)、交通部中央氣象局 (2016)。單位：毫米。

註：*表示位於國有林區內之氣象測站，**表示為鄰近國有林區之氣象測站。

(二)台灣年均蒸發散量與逕流量

台灣年均蒸發量與逕流量資料來源，一為行政院經濟部水利署所提供之基礎資料，如表 2 之 2008-2013 年年均降雨量、逕流量與逕流率，以及行政院經濟部水利署 (2015b) 水利統計之 2013 年水資源概況 (2015/05/13 更新)，經由此數據可自全島年降雨、年蒸發以及年逕流量計算台灣年均蒸發散量約占年降雨量的 22.86%，年均逕流量則約占年降雨量的 72.02%，然而除了 2013 年之資料以外，政府所提供之各集水區資料大多僅含月均蒸發量，相對應之月均逕流量資料則常有缺漏之狀況產生。第二種資料來源為過去文獻所量測或評估之台灣年均蒸發量與逕流量，如陳朝圳等 (2006) 與吳治達等 (2008) 之研究 (表 3)，皆有探討不同土地利用型對於台灣區域蒸發散量的影響，其研究結果顯示森林區域之蒸發散量普遍較其他土地利用型 (如建地、水體、耕作農地、無耕作農地等) 高；又如鄒丞 (2015) 「結合土壤類型及其蒸發量推估區域性地下水補注之研究」，其研究結果顯示桃園台地地區之紅土及砂質壤土，此二種土壤類型蒸發量之範圍差異如表 4 所示，然而文獻資料較為細緻，較少有評估全台灣森林區域逕流量之相關研究與資料，因此在後續參數的選用上仍有一定之阻礙。

表 2 台灣 2008-2013 年之年年均降雨量、逕流量與逕流率

	年均雨量 (mm)	年降雨量 (億 m ³)	年逕流量 (億 m ³)	逕流率 (%)
2008	3,025.00	1,086.43	784.82	72.24
2009	2,489.00	893.92	612.86	68.56
2010	2,368.00	850.47	624.87	73.47
2011	2,300.00	826.05	586.02	70.94
2012	3,139.00	1,127.37	846.98	75.13
2013	2,738.00	985.68	709.88	72.02

資料來源：行政院經濟部水利署 (2015a)。

表 3 台灣不同土地利用型之單日蒸發散量比較

土地利用型	時間	平均蒸發散量 (mm/day)	引用文獻
森林	2001 年春	6.04	陳朝圳等 (2006)
	2001 年夏	3.63	
	2001 年秋	4.47	
	2001 年冬	3.05	
	1995 年	5.71	
耕作農地	2001 年春	1.42	陳朝圳等 (2006)
	2001 年夏	0.36	
	2001 年秋	1.35	
	2001 年冬	1.33	
	1995 年	2.16	
水體	2001 年春	3.34	陳朝圳等 (2006)
	2001 年夏	2.13	
	2001 年秋	2.79	
	2001 年冬	2.80	
	1995 年	1.85	
無耕作農地	1995 年	1.85	吳治達等 (2008)
建地	1995 年	1.35	吳治達等 (2008)
都市	2001 年春	1.94	陳朝圳等 (2006)
	2001 年夏	1.12	
	2001 年秋	1.88	
	2001 年冬	1.35	

資料來源：陳朝圳等 (2006)、吳治達等 (2008)。

表 4 桃園台地 2004-2010 年不同土壤類型的年入滲量、土壤蒸發量、地表逕流量及地下水補注量占年降水量之百分比

土壤類型	年入滲量 (%)	土壤蒸發量 (%)	地表逕流量 (%)	地下水補注量 (%)
紅土	29.14-38.07	18.25-27.72	61.93-70.86	8.47-10.84
砂質壤土	61.01-67.96	44.93-54.31	31.91-38.99	13.58-17.83

資料來源：鄒丞 (2015)。

(三) 台灣森林資源之區域現況

台灣行政院農業委員會林務局的八大林管處轄下國有林區約佔據台灣全島林地的 77.09%，各管理處所管轄之森林類型皆包含天然林與人工林，其中以天然林佔據較高之面積比例。台灣國有林區之海拔高度與面積範圍等相關資料皆可由第四次森林資源調查中蒐集（行政院農業委員會林務局，2016a），然而各國有林區佔各行政區域或各個分區（北、中、南及東部）之比例，此類相關資料仍較難以蒐集完備，因此本研究依據國立台灣大學生物多樣性研究中心（2006）所繪製之台灣國有林區區域劃分圖（圖 1a），將該國有林區圖網格化，並套疊台灣行政區域分布圖以進行色塊比例之評估（圖 1b），其中未填滿之網格皆以半格計數，再將此比例與台灣國有林森林區域面積相乘，估算各國有林區於各區域所占之比例及面積（表 5），由列表中可觀察到北部分區以新竹國有林區為主，中部以東勢及南投國有林區為主，南部以嘉義及屏東國有林區為主，東部則以羅東、台東及花蓮國有林區為主，其中花蓮國有林區較其他國有林區有最大的森林面積。

(四) 台灣鄰近國有林區之水庫概況

台灣森林水源涵養現況除了與降雨量、蒸發量、逕流量等參數相關外，在價值評估方面亦須考量鄰近國有林區之水庫現況。本研究依據行政院經濟部水利署（2016a）所提供之水庫安全評估及更新維護改善執行成果資料，選取 2011-2015 年平均年度維護更新費用，並藉由 2011 年全國已知水庫集水區位及水庫管理機關（構）表（行政院經濟部水利署，2016b）篩選各區資料較完備齊全且區位相符之水庫，其中包含現今已被經濟部水利署公告之台灣現今實際運轉且有營運統計資料之 17 座重要水庫。本研究所蒐集之水庫概況如表 6 所示，列表中包含水庫之有效蓄水量、水庫造價費用以及 5 年平均維護費用，其中東部地區宜蘭、花蓮、台東等地因地形氣候因素，少有較大型水庫，多為攔河堰、堤壩等設施，因此本研究亦以集水區位劃分水庫之範圍。

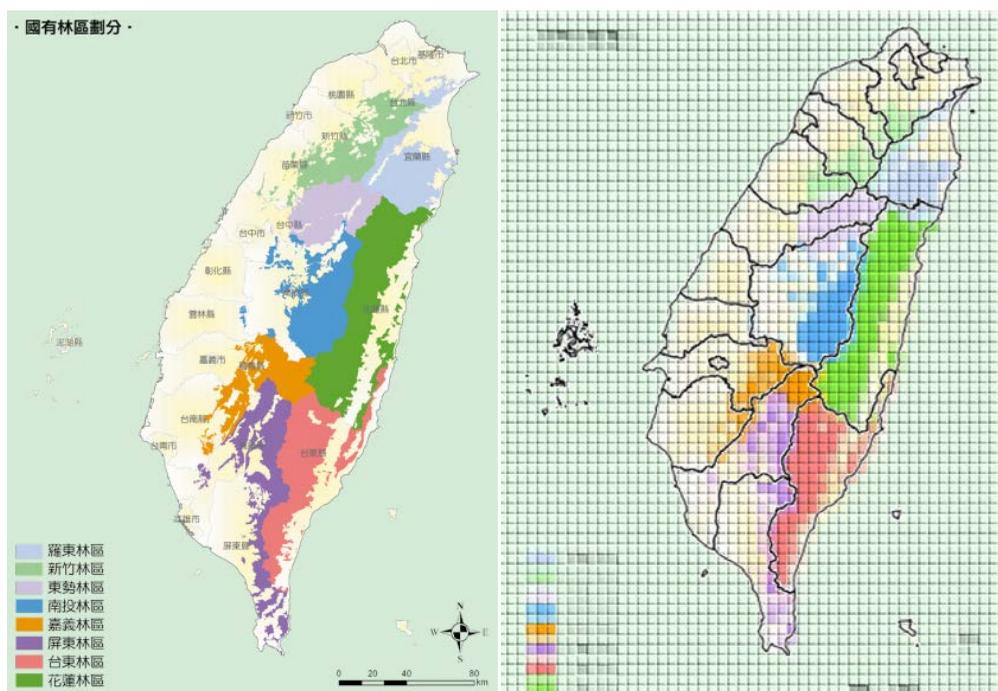


圖 1 台灣國有林區劃分 (a) 示意圖；(b) 示意圖網格化

(資料來源：國立台灣大學生物多樣性研究中心，2006)

表 5 台灣八大國有林森林分區面積

林管處	區域	分區比例 (%)	天然林 (ha)	人工林 (ha)	森林面積 (km ²)	分區面積 (km ²)
羅東	北部	11.1	136,013	30,720	1,667.33	185.07
	東部	88.9				1,482.26
新竹	北部	100.0	113,217	32,864	1,460.81	1,460.81
東勢	北部	9.7	97,538	27,178	1,247.16	120.97
	中部	90.0				1,122.44
	東部	0.3				3.74
南投	中部	100.0	145,558	29,248	1,748.06	1,748.06
嘉義	中部	39.2	61,320	51,269	1,125.89	441.35
	南部	60.8				684.54
屏東	中部	0.1	122,816	45,157	1,679.73	1.68
	南部	97.9				1,644.46
	東部	2.0				33.59
台東	南部	2.0	183,826	23,480	2,073.06	41.46
	東部	98.0				2,031.60
花蓮	東部	100.0	272,026	24,474	2,965.00	2,965.00
合計			1,132,314	264,390	1,396,704.00	

資料來源：行政院農業委員會林務局 (2016b)。

表 6 台灣各水庫壩堰之蓄水量、造價以及年均 (2011-2015) 維護費用

水庫 (行政區域)	蓄水量 (m ³)	造價 (元)	年維護費用 (元)
新山水庫 (基隆)	10,090,000	250,000,000	11,760,600
翡翠水庫 (新北)	406,000,000	11,450,000,000	7,815,800
石門水庫 (桃園)	391,200,000	3,183,000,000	242,645,000
永和山水庫* (苗栗)	29,580,000	1,260,000,000	2,015,000
寶山水庫*** (新竹)	5,500,000	680,000,000	2,987,000
寶山第二水庫 (新竹)	31,900,000	10,500,000,000	6,720,400
明德水庫 (苗栗)	16,500,000	211,350,000	12,197,200
鯉魚潭水庫 (苗栗)	122,770,000	8,600,000,000	24,628,874
德基水庫 (台中)	266,210,000	5,120,000,000	13,618,800
石岡壩 (台中)	3,380,000	480,000,000	32,769,876
日月潭水庫** (南投)	171,621,000	64,000,000	4,000,000
霧社水庫 (南投)	146,000,000	376,077,000	6,143,200
武界壩 (南投)	14,000,000	64,000,000	8,530,600
仁義潭水庫* (嘉義)	27,120,000	1,659,000,000	27,569,000
曾文水庫 (嘉義)	708,000,000	6,038,000,000	5,726,800
白河水庫 (台南)	25,000,000	205,000,000	9,424,400
烏山頭水庫 (台南)	154,158,000	54,130,000	306,377,200
南化水庫 (台南)	149,460,000	12,800,000,000	42,469,800
阿公店水庫 (高雄)	45,000,000	262,200,000	2,547,000
牡丹水庫 (屏東)	30,000,000	7,400,000,000	7,676,800
酬勤水庫*** (綠島)	75,000	40,000,000	1,242,000

資料來源：行政院經濟部水利署 (2016a)。

註：*表示此水庫維護費用缺失一年資料；**表示缺失兩年；***表示缺失三年。

二、台灣森林水源涵養發展趨勢

台灣森林水源涵養之發展趨勢，首先為近年政府積極推行農業之「三生價值」相關政策，此農業之定義為較廣泛之農林漁牧業，而三生價值亦即兼顧生產、生活與生態之價值，由於貿易自由化之國際趨勢，近年來農委會相關政策多朝向生活與生態面向著手，如已於 2016-2017 年試辦之對地綠色給付，即為生態面向之相關產業支持措施。而關於台灣水資源政策面向，經濟部水利署於 2015 年提出之「地下水保育管理暨地層下陷防治計畫」中，可瞭解政府在對於地下水不足之現況下，除了水源地仍應繼續進行環境保育外，水利署與農委會亦鼓勵在地下水管制區域內推廣枯水期之水稻田轉作進行造林，因相對於水稻等糧食作物而言，林木屬於低耗水作物，可有效緩和地層下陷之情況（行政院經濟部水利署，2015c）。

參、研究方法與理論模型

本研究主要在於評估台灣農委會林務局轄下之八個國有林區森林水源涵養量的價值，因此在評估與建立模式之理論模型分為兩部分：一為估算台灣國有林區森林的水源涵養量；二為藉由生態系服務價值評估方法，將森林水源涵養量估算具體價值。第三部分為本研究之實證模型，本研究於水源涵養估算水量部分使用水文平衡收支法，而水源涵養價值評估則採用水庫單位容積造價來評估森林水源涵養之效益，評估方法之選用緣由為下：

森林水源涵養量之評估方法眾多，綜觀過去評估森林水源涵養量之相關文獻，以水文平衡收支法 (water balance method)、土壤蓄水量法、基流資料估計法 (base-flow record estimation)、退水曲線位移法 (recession-curve replacement method) 等評估方法較為廣泛

被運用於水資源涵養量之計算，其中水文平衡收支法是將森林生態系統視為一封閉系統，直接考慮森林土壤中水資源的進出；土壤蓄水量法是將土壤本身的粗、細孔隙及其蓄水能力、土壤孔隙率視為土壤蓄水量的潛能，透過土壤孔隙最大蓄水量，進而瞭解土地對降雨、逕流等外來補注的單次最大承載能力；基流資料估計法為透過分析河川流量歷線，將直接逕流量 (runoff) 與基流量 (base-flow) 分離，並以時間為單位，以基流量推估森林本身涵養的水量；而退水曲線位移法與基流資料估計法之原理相似，其差別在於退水曲線位移法將洪峰期間的基流量扣除不納入計算，因此計算結果應小於基流資料估計法。

上述評估方法中，水文平衡收支法被孫立達與朱金兆 (1995) 學者認為是研究水源涵養量之基礎，且此法之操作較為容易，其評估所需花費之時間也相對較少 (中國國家林業局，2008)；土壤蓄水量法雖於其計算過程中無須考慮降雨、逕流、蒸發散等其他水文所需計算之參數，僅單純分析水在土壤中能達到的貯存狀況，然而此法只能求得某單位時間內土壤貯水量，缺乏每年中水在土壤孔隙中的進出次數之相關研究報告 (李國忠，1995)，在時間限制之下較難以此法計算森林水源涵養量；基流資料估計法所需之資料主要為河川的日流量，無須納入降雨量、蒸發量等變數，然此法並未考量集水區與河川的地文條件，僅以河川流量歷線進行基流量推估較容易產生誤差，須增加研究之時間與空間尺度以取得較理想之結果；退水曲線位移法之情形與基流資料估計法相近，且對於退水片段之選取時間長短較為敏感，過長或過短皆會有偏離現實之結果產生。

森林水源涵養價值之評估方法亦有許多，依據吳俊賢等 (2004) 以及周天穎等 (2000) 對於森林涵養水源效益之經驗模式之分類，本研究重新將評估方法規整為以下五類：(1) 重置成本-水庫單位容積造價，此法將森林視為一大型的天然水庫，以人工建造物取代生態系原有的功能，屬於市場價值法中的重置成本，部分文獻將此法稱為影子工程法或替代工程法，此價格可能還包含營運費、維護費等，且需考慮水庫建造預設使用年限、設備折舊、貼現率 (discount rate) 以及幣值改變之情況 (周佐辰，2011; Xue and Tisdell, 2001; Zhang et al., 2010; Biao et al., 2010; Ninan and Inoue, 2013a, 2013b; Ninan and Kontoleon,

2016)；(2) 市場價格-自來水水價，此法是以居民用水平均價格乘上森林調節的水量換算，屬於市場價值法 (market valuation) 中的市場價格 (market prices)，自來水價格資料取得較為容易，然而自來水價格同時包含水質淨化處理及供應成本考量，致使價格受到不同因素影響，較難真正反應森林水源涵養的價值；(3) 市場價格-生產函數法 (production function approach)，此法將水視為生產要素之一，並假設生產者首要追求成本極小或利潤極大，進而推導出包含其他生產要素的需求函數與截距項、係數，最後再藉由其他已知的生產要素價格來估算未知的水的影子價格 (吳俊賢等，2004)，然而水源涵養的益處並不單純包含生產力增加，亦有供民生用水、防洪等效果，此法較適合用於評估森林水源涵養對於農業及工業的影響方面；(4) 機會成本，此法以每年林木生長量之平均市場價格扣除生產費用計算 (李國忠，1995)，且又分為「面積生長量法」與「蓄積生長量法」兩種估算方式，利用不同林型面積乘單位面積生長量以及不同林型蓄積量乘生長率，分別再乘以平均立木價格，即為森林水源涵養的機會成本，然而同前述方法，森林水源涵養並不單純只有物質的產出，亦有其它功用，故此方法較適合用於估算森林水源涵養量對林木生產效益的評價；(5) 使用者調查法，以假設條件評估法 (contingent valuation method, CVM) 應用面談或問卷向受訪者詢問其願意支付價值 (willingness to pay, WTP) 或願意接受補償金額 (willingness to accept, WTA)，以獲取其價值，此法所獲取之價值差異較大。

綜覽上述數種森林水源涵養量與價值評估方法，本研究基於資料獲取以及估算方法的簡便與完整性，並期望可降低新研究所需耗費的時間與成本，選擇較為廣泛被運用於森林水源涵養效益評估相關研究之方法，亦即水文平衡收支法與重置成本法之水庫單位蓄水造價，對於台灣八個國有林區評估其森林水源涵養效益價值。

一、水文平衡收支法之理論模型

水文平衡收支法 (water balance method, water budget method) 是將森林生態系統視為一封閉系統，直接考慮土壤中水源的輸入與輸出，被廣泛運用於許多水資源涵養量的

計算上。國內外已有多篇關於森林與集水區進出水量間關係的研究報告 (陸象豫, 1996 ; 肖寒等, 2000; Xue and Tisdell, 2001; Mashayekhi et al., 2010; Ninan and Inoue, 2013a; Ninan and Kontoleon, 2016), 而綜觀各研究報告可知「改變植物覆蓋面積或組成會影響集水區之出流量」, 而經由以下水文平衡收支法之關係式, 可瞭解林地變更後集水區出水量之改變情形 (陸象豫, 1996), 亦可進而瞭解森林對於此區域水源涵養量之影響。水文平衡收支法被視為研究水源涵養機理的基礎 (孫立達與朱金兆, 1995), 過去有研究顯示森林可將 86% 之降雨過濾並蓄存為地下水, 餘下之 14% 將作為地表逕流流失 (Xue and Tisdell, 2001), 而其中森林降水量與蒸發散量等其他消耗之差異, 即為森林每年之蓄水量, 亦即森林水源涵養量, 再將森林水源涵養量 (蓄水量) 乘上區域之森林面積, 即可得到森林總水源涵養量 (肖寒等, 2000)。其公式計算大致如下所示:

$$Q_w = Q_v \times A \div 1000 \quad (1)$$

式 (1) 中 Q_w 為每年平均森林總水源涵養量 (m^3), 或稱森林總蓄水量, Q_v 為森林區域每單位面積土壤之蓄水量 (mm), A 為森林總面積 (km^2), 其中關於森林單位面積蓄水量之計算與其所涵蓋之參數, 各研究評估方式亦有些許之差異。

$$Q_v = Q_p - Q_{ET} \quad (2)$$

如肖寒等 (2000) 與 Xue and Tisdell (2001) 將水文平衡收支法之森林單位面積蓄水量整理為式 (2), 其中 Q_p 為年均降水量 (precipitation) (mm), Q_{ET} 為年均蒸發散量 (evapotranspiration) (mm), 此公式僅考慮降水量與蒸發散量兩者之間的關係。

$$Q_{IE} = Q_p - Q_{ET} \pm \Delta S \quad (3)$$

然而影響森林水源涵養量之因子眾多，其中又以逕流量（亦稱逕流係數，runoff coefficient, RC)¹ 此一參數較常被相關研究納入水源涵養之評估（陸象豫，1996；中國國家林業局，2008；Ninan and Inoue, 2013a; Ninan and Kontoleon, 2016），式（4）即是探討年均降水量、年均蒸發散量、年均逕流量 Q_{IE} (mm) 以及 ΔS 地下水滲透量 (groundwater seepage) (mm) 之間的關聯性，此公式認為年均逕流量隨年均蒸發散量之改變而變化，並受到不同的土地利用型影響，而地下水滲透量就一水文週期而言應被視為零（陸象豫，1996）。

$$Q_V = Q_P - Q_{IE} - Q_{ET} \quad (4)$$

除了降雨量與蒸發散量之外，亦考量逕流量對森林單位面積蓄水量之影響的水文平衡收支公式呈現如式（4）所示，中國國家林業局（2008）認為使用水文平衡收支法，應因地制宜的以經驗取得適合當地的逕流係數，其中逕流係數即為該區域之總逕流量佔總降雨量之比例。

$$Q_V = Q_P \times (1 - Q_{ET} / Q_{IE}) \quad (5)$$

而考量降雨量、蒸發散量以及逕流量對森林單位面積蓄水量影響之經驗關係式並不僅只式（3），式（4）為 Ninan and Inoue (2013a) 與 Ninan and Kontoleon (2016) 評估森林水源涵養量之經驗公式，此式將年均降雨量視為該年進入此區域之總水量，蒸發散量佔

¹ 逕流係數為地表逕流量與降雨量之比值，視地形、地勢、土壤、地質、集水區面積、土地利用狀況、降雨量、降雨強度等因素而有所差異，此值大致分三種：(1) 洪峰逕流係數，洪峰流量對集流時間內之平均降雨量的比值；(2) 一場暴雨逕流係數，一場暴雨期間總逕流量與總降雨量的比值；(3) 長時間逕流係數，指長期（如年、季節、月等）間總逕流量與總降雨量的比值，此亦為本研究所使用之逕流係數值種類（行政院農業委員會水土保持局，2006）。

逕流量之比例則為水量流失之比例，因此將餘下之比例與降雨量相乘即可得知該年分森林所蓄存之總水量，亦即該年分森林之水源涵養量。

$$Q_v = \theta \times Q_r \quad (6)$$

除上述公式外，亦有研究將研究資料彙整，計算出經驗公式，將蒸發散量與逕流量以係數取代，如公式 (6) 中的 θ 便取決於不同的林型或土地條件，由此可看出水文平衡收支法計量項目較為精細且多樣化 (周佐辰，2011)。

二、重置成本法之理論模型

重置成本法常用來估算水源涵養之價值，其式子如下 (7) 式。 V_{WC} 為森林每年涵養水源之平均效益價值 (元)， Q_w 為經由前述方法估算出的年均森林總水源涵養量(m^3)， C_{RU} 為水庫單位容積造價 (元/ m^3)，在計算生態系水源涵養服務時，目前大多研究以水庫單位儲水容積造價計算 (周佐辰，2011；Xue and Tisdell, 2001; Zhang et al., 2010; Biao et al., 2010; Ninan and Inoue, 2013a, 2013b; Ninan and Kontoleon, 2016)，以人工建造物取代生態系原有的功能，將森林視為一座大型且天然之綠色水庫，其蓄存水資源之功能被類比為水庫之存在，此法屬於市場價值法中的重置成本，部分文獻中稱為影子工程法或替代工程法，此價格可能還包含營運費、維護費等。一般水庫在建造時，預設使用年限為 50 年，然而依據美國墾務局之資料顯示，多數水庫之使用年限其實可延長至 80-100 年左右 (如著名之胡佛水壩)，而隨著水庫的使用時間增加、設備折舊，必需多乘上貼現率 (discount rate)，或將幣值改變的情況考慮進去。

$$V_{WC} = Q_w \times C_R \quad (7)$$

Ninan and Inoue (2013a) 使用水庫儲水成本估算日本森林保護區的水源涵養效益，水庫的儲存成本 137.15 日元/ m^3 /年，約新台幣 39.32 元；Ninan and Kontoleon (2016) 則用此

法評估印度國家公園的水源涵養價值，顯示其 Kabini 水壩每 m^3 蓄水之貼現成本為 0.58 盧比/ m^3 /年，約新台幣 0.27 元；中國國家林業局 (2008) 所公告的《森林生態系統服務功能評估規範》亦使用此方法，故許多文獻依循此方法，採用的水庫造價在 0.86-6.11 人民幣/ m^3 之間，約 4.25-30.20 元新台幣；而台灣翡翠水庫的單位容積造價約 86.8 元/ m^3 (周佐辰, 2011)，比日本與中國高出許多；北京市森林生態系統之水源涵養價值，單指土壤蓄水量部分，由 Zhang et al. (2010) 以水庫單位容積造價估算為 21.5 億人民幣，約 103.2 億元新台幣。

三、實證模型

本研究主要參照 Ninan and Kontoleon (2016) 之生態服務價值評估研究方法進行台灣森林水源涵養效益價值的估算，其研究所使用之水文平衡收支法及重置成本法—水庫單位容積造價，具備操作相對簡單、資料獲取相對容易、所需時間以及花費較少等優點。森林水源涵養量的水文平衡收支法計算上，本研究除了將 Ninan and Kontoleon (2016) 之研究方法做為參考依據，也嘗試仿照肖寒等 (2000) 與 Xue and Tisdell (2001) 以及中國國家林業局 (2008) 所提供之規範與方法進行估算，詳細過程之公式補充如下：

$$Q_{ET} = Q_P \times R_{ET} \quad (8)$$

$$Q_{IE} = Q_P \times R_{IE} \quad (9)$$

研究區域內每年平均降雨量 Q_P (mm) 分別乘以該區域平均蒸發散率 R_{ET} 與逕流率 R_{IE} ，可得到區域內每年平均蒸發散量 Q_{ET} (mm) 以及年均逕流量 Q_{IE} (mm)。

$$Q_V = Q_P \times (1 - Q_{ET} / Q_{IE}) \quad (10)$$

$$Q_V = Q_P - Q_{ET} \quad (11)$$

$$Q_V = Q_P - Q_{IE} - Q_{ET} \quad (12)$$

$$Q_W = Q_V \times A \div 100 \quad (13)$$

Q_V 為森林區域每單位土壤之蓄水量 (mm)，利用年均降水量、蒸發量及逕流量計算出單位蓄水量之公式 (8) - (10) 依順序分別標註為方法 I (Ninan and Kontoleon, 2016)、方法 II (肖寒等, 2000; Xue and Tisdell, 2001) 與方法 III (中國國家林業局, 2008)，單位蓄水量與森林區域總面積 A (km^2) 相乘，經單位換算後便可得到該區林地留存之總蓄水量 Q_W (m^3)，於水文平衡法中此為森林水源涵養量。

$$Q_{TM} = C_M \times A_{IP} \quad (14)$$

$$C_D = \left[\frac{C_C}{(1-D)^{-L_R}} + C_{TM} \right] \times D \times (1 - (1+D)^{-L_R}) \quad (15)$$

$$C_{RU} = C_D \div Q_R \quad (16)$$

$$V_{WC} = Q_W \times C_{RU} \quad (17)$$

接續為水庫單位容積造價之細項，此部分本研究主要參照 Ninan and Kontoleon (2016) 之研究方法，計算台灣森林水源涵養之效益價值， C_M 為水庫每年每公頃的維護費用 (元/ha)， A_{IP} 為水庫之灌溉潛力 (irrigation potential) (ha)，意謂水庫滿水位時所蓄存的水可灌溉多少公頃的農田， C_{TM} 為水庫年度總維護成本 (元)， C_C 為水庫建造支出 (元)， L_R 為假設水庫設施可使用之壽命或年限， D 為貼現率，經計算後得出 C_D 水庫現今價格的貼現成本 (元)，而將此貼現成本除以 Q_R 水庫蓄水量 (m^3)，可得到水庫每單位水量蓄水之貼現成本 C_{RU} (元/ m^3)。將前述所得之森林涵養水源量與水庫單位蓄水量貼現成本相乘，即可估算出此區域森林涵養水源效益價值 V_{WC} (元)。

肆、實證結果分析

一、變數設定與分析

(一) 年均降雨量 (Q_p)

Q_p 為某地區平均每年之降雨量，為較接近現今趨勢，並避免過於受到相對較乾旱的 2014 年降雨量影響，本研究依據行政院經濟部水利署 (2015a) 主計室利用交通部中央氣象局資料編製之台灣地區近 10 年 (2005-2014) 降雨量概況，以及交通部中央氣象局 (2016) 之 2015 年每月氣象資料整理之年均降雨量資料，自 28 個氣象觀測站中選取位於或鄰近台灣八個國有林區之測站，取得近 10 年台灣地區平均降雨量 (表 7)，接續參照中央氣象局氣象預報分區方式進行北、中、南以及東部之行政區域劃分，並估算各區之年均降雨量 (表 8)，由於本研究評估對象主要為國有林區，因此各測站之分區並未包含外島部分。

(二) 蒸發散率 (R_{ET}) 與逕流率 (R_{IE})

本研究原先屬意於利用各區或縣市之水文資料與文獻，進而區別各區之蒸發量 (與逕流量) 佔降雨量之比例，但礙於文獻與資料不足以涵蓋全國各區之範圍，如：行政院經濟部水利署所提供之各集水區資料大多僅含月均蒸發量，較難與其提供之全台各年平均逕流率資料 (表 9) 進行整合；陳朝圳等 (2006) 與吳治達等 (2008) 之研究，皆有探討森林對於台灣區域蒸發散量的影響 (表 10)，然而對於台灣森林區域逕流量之研究較少，較難套用此數據進行評估；而鄒丞 (2015) 結合土壤類型及其蒸發量推估區域性地下水補注之研究僅顯示桃園台地地區，且其研究是將紅土及砂質壤土進行區分，並非代表整體與森林地區 (表 11)。因此本研究是以行政院經濟部水利署 (2015b) 水利統計之 2013 年

表 7 台灣國有林區 2006-2015 年平均降雨量概況

氣象測站別	年別										年平均
	2006 年	2007 年	2008 年	2009 年	2010 年	2011 年	2012 年	2013 年	2014 年	2015 年	
阿里山*	5,330.8	5,042.8	5,886.7	5,222.0	3,654.6	3,655.6	5,166.3	4,966.1	3,172.4	3,413.3	4,664.6
鞍部*	5,367.7	5,889.1	5,355.3	3,860.5	4,915.1	4,879.0	4,911.5	5,205.5	3,887.7	3,500.1	4,829.8
大武**	2,473.8	2,755.4	2,081.5	2,684.8	2,529.9	2,687.2	3,031.1	2,563.3	1,263.8	1,915.4	2,501.5
恆春**	1,690.1	2,139.8	2,004.5	1,854.3	2,421.2	2,597.0	2,938.4	2,098.1	1,489.0	1,480.1	2,095.6
蘇澳**	4,548.3	5,466.3	3,990.9	4,682.3	4,738.2	4,443.8	4,732.9	4,265.1	2,723.4	4,069.1	4,339.6
日月潭*	3,228.8	2,822.4	3,851.3	1,797.8	1,932.1	1,725.3	3,090.9	2,933.8	2,191.2	1,878.0	2,586.9
淡水**	2,590.5	2,672.6	2,575.5	1,321.6	2,070.3	1,713.8	2,993.5	2,343.5	1,893.3	1,571.0	2,229.4
宜蘭**	2,730.4	3,115.1	2,846.0	2,930.2	2,542.4	2,781.9	2,916.1	2,552.8	2,095.0	2,579.4	2,765.4
玉山*	4,519.2	3,847.0	4,063.8	3,588.9	2,423.8	2,548.3	3,583.8	3,535.1	2,149.4	2,317.4	3,388.5
竹子湖*	4,439.2	5,287.7	4,814.0	3,403.2	4,070.5	4,111.2	3,904.6	4,078.0	3,206.7	3,327.0	4,145.8

資料來源：行政院經濟部水利署 (2015b)、交通部中央氣象局 (2016)。單位：毫米。

註：*表示位於國有林區內之氣象測站，**表示為鄰近國有林區之氣象測站。

表 8 台灣分區之行政區域與近 10 年國有林區平均降雨量

分區	行政區域涵蓋範圍	年平均降雨量 (mm)
北部	基隆、台北、桃園、新竹、苗栗	3,735.00
中部	台中、彰化、南投、雲林、嘉義	3,546.69
南部	台南、高雄、屏東	1,975.11
東部	宜蘭、花蓮、台東	3,202.18

資料來源：行政院經濟部水利署 (2015b)、交通部中央氣象局 (2016)。

水資源概況 (2015/05/27 更新) 為基準，自全島年降雨、年蒸發以及年逕流量計算出，台灣年蒸發散率 (R_{ET}) 約占年降雨量的 22.86%，年逕流率 (R_{IE}) 則約占年降雨量的 72.02%，換算數值後與經濟部水利署、陳朝圳等 (2006) 以及鄒丞 (2015) 之資料範圍相近，僅蒸發散佔降雨量之比例則略低於吳治達等 (2008) 之研究結果。

表 9 台灣 2008-2013 年之年均降雨量、逕流量與逕流率

	年均雨量 (mm)	年降雨量 (億 m ³)	年逕流量 (億 m ³)	逕流率 (%)
2008	3,025.00	1,086.43	784.82	72.24
2009	2,489.00	893.92	612.86	68.56
2010	2,368.00	850.47	624.87	73.47
2011	2,300.00	826.05	586.02	70.94
2012	3,139.00	1,127.37	846.98	75.13
2013		985.68	709.88	72.02

資料來源：行政院經濟部水利署 (2015a)。

表 10 台灣森林之單日蒸發散量比較

土地利用型	時間	平均蒸發散量 (mm/day)	引用文獻
森林	2001 年春	6.04	陳朝圳等 (2006)
	2001 年夏	3.63	
	2001 年秋	4.47	
	2001 年冬	3.05	吳治達等 (2008)
	1995 年	5.71	

資料來源：陳朝圳等 (2006)；吳治達等 (2008)。

表 11 桃園台地 2004-2010 年不同土壤類型的年入滲量、土壤蒸發量、地表逕流量及地下水補注量占年降水量之百分比

土壤類型	年入滲量 (%)	土壤蒸發量 (%)	地表逕流量 (%)	地下水補注量 (%)
紅土	29.14-38.07	18.25-27.72	61.93-70.86	8.47-10.84
砂質壤土	61.01-67.96	44.93-54.31	31.91-38.99	13.58-17.83

資料來源：鄒丞 (2015)。

(三)研究範圍及區域面積 (A)

本研究之研究區域為佔據台灣全島林地約 77.09%，行政院農業委員會林務局的八大林管處轄下國有林區，即使各林區之海拔面積範圍甚至林型皆有資料可依循，各林區所佔之行政區域面積及比例資料仍有所缺漏，因此本研究將國有林圖資網格化，並依各區比例與台灣國有林森林區域面積資料（行政院農業委員會林務局，2016b），估算各國有林區於各行政區域所占之比例及面積（表 12）。

表 12 台灣八大國有林森林分區面積

林管處	區域	分區比例 (%)	森林面積 (km ²)	分區面積 (km ²)
羅東	北部	11.1	1,667.33	185.07
	東部	88.9		1,482.26
新竹	北部	100.0	1,460.81	1,460.81
東勢	北部	9.7	1,247.16	120.97
	中部	90.0		1,122.44
	東部	0.3		3.74
南投	中部	100.0	1,748.06	1,748.06
嘉義	中部	39.2	1,125.89	441.35
	南部	60.8		684.54
屏東	中部	0.1	1,679.73	1.68
	南部	97.9		1,644.46
	東部	2.0		33.59
台東	南部	2.0	2,073.06	41.46
	東部	98.0		2,031.60
花蓮	東部	100.0	2,965.00	2,965.00
合計			1,396,704.00	

資料來源：行政院農業委員會林務局 (2016b)。

(四)水庫年度總維護成本 (C_{TM})

由於各研究之地點及資料獲取方面具有一定的差異性，本研究在於 C_{TM} 的計算上無須如 Ninan and Kontoleon (2016) 研究中如公式 (14) 那般繁雜，得益於行政院經濟部水利署 (2016a) 所提供之水庫安全評估及更新維護改善執行成果資料，如表 13 所示，本研究取 2011-2015 年共計 5 年資料進行年度維護更新費用平均，並藉由 2011 年全國已知水庫集水區位及水庫管理機關 (構) 表 (行政院經濟部水利署，2016b) 篩選各區資料較完備齊全且區位相符之水庫，估算水庫單位容積造價。接續利用各區中維護資料較為完整，且被經濟部水利署公告之台灣現今實際運轉且有營運統計資料之 17 座重要水庫，於表 16-18 實證模擬結果中，依據北、中、南、東分區以及 2011 年全國已知水庫集水區位及水庫管理機關 (構) 表 (行政院經濟部水利署，2016b)，篩選集水區位與各區相符之水庫，進行後續之水源涵養效益計算。

表 13 台灣各水庫壩堰之蓄水量、造價以及年均 (2011-2015) 維護費用

水庫 (行政區域)	蓄水量 (m ³)	造價 (元)	年維護費用 (元)
翡翠水庫 (新北)	406,000,000	11,450,000,000	7,815,800
石門水庫 (桃園)	391,200,000	3,183,000,000	242,645,000
德基水庫 (台中)	266,210,000	5,120,000,000	13,618,800
霧社水庫 (南投)	146,000,000	376,077,000	6,143,200
曾文水庫 (嘉義)	708,000,000	6,038,000,000	5,726,800
南化水庫 (台南)	149,460,000	12,800,000,000	42,469,800

資料來源：行政院經濟部水利署 (2016a)。

二、實證模擬結果與分析

(一)水文平衡收支法在台灣各區平均留存降水量之分析

本研究依水文平衡收支法，利用 2013 年台灣全島之年均雨量、年蒸發散量以及年逕流量，計算出年度蒸發散與逕流率，依三種方法估算得到台灣的森林水源涵養量占總降雨量之比例，並將相關文獻計算結果整理於表 14，其中多數文獻之森林水源涵養功能皆維持於 55-65%，中國甘肅省石羊河流域則是因其研究區域之氣候環境特徵而有較低比例之森林水源涵養功能（趙軍與陳姍，2011）。本研究依不同方法所計算之台灣全島森林水源涵養功能分別為 68.27%（方法 I）、77.14%（方法 II）及 5.12%（方法 III），三種方法中以方法 I 之比例與相關文獻比較後，較貼近台灣整體環境之森林水源涵養功能，方法 II 僅考慮年均雨量及年均蒸發散量之關係，或許有高估森林涵養水源功能之可能性，而方法 III 其比例則有過分低估的傾向，因台灣為一位處於亞熱帶季風型氣候區且四周環海之島嶼，每年平均降雨量皆大於 2000 mm，森林覆蓋率達 60.71%，即便受到地勢陡峭河流短而湍急等地形因素影響，亦不至於使台灣森林水源涵養功能較中國甘肅省差。

表 14 森林生態系涵養水源功能以水文平衡收支法估算之相關文獻

相關文獻 (年分)	研究地點	*森林涵養水源量佔降雨量之比例 (%)
李俊梅等 (2007)	中國-雲南	55.00
趙軍與陳姍 (2011)	中國-甘肅省石羊河流域	25.00
Ninan and Inoue (2013a)	日本	65.00
Krishnaswamy et al. (2013)	印度-西高止山脈北卡納達縣	61.25
本研究 (2017)	台灣-八個國有林區	方法 I：68.27 方法 II：77.14 方法 III：5.12

註：*分母為年平均降雨量。

取得各方法所計算出的森林水源涵養量佔年均降水量之比例，其剩餘之年均降水量百分比即為蒸發量（與逕流量）佔降雨量之比，本研究將近十年（2006-2015）之年平均降雨量進行分區平均，再分別扣除年均降水量乘以三種方法的蒸發量（與逕流量）佔降雨量之比例，取得台灣四個區域平均每年留存之降雨量（表 15），受年均雨量影響，台灣北部留存年均雨量最高，中部次之，而南部最低，方法 I 之分區留存年均雨量約介於 1300-2600 mm 之間，方法 II 各區留存年均雨量則約落於 1500-2900 mm 之範圍內，方法 III 所計算出之每年留存平均雨量約 100-200 mm，各區留存年均雨量皆遠低於方法 I 及方法 II。

本研究以表 15 中台灣北、中、南與東部各方法計算之年均留存雨量，依公式 (13) 與台灣國有林分區面積相乘，取得其總留存年均雨量，並根據國有林之集水區範圍選擇適當之水庫，參照表 13 以及公式 (15)-(17) 計算國有林區森林水源涵養之效益價值，其中水庫設施之使用年限參考 Ninan and Kontoleon (2016) 研究以 80 年為其假設壽命，而貼現率則為證卷櫃檯買賣中心(2016)提供之政府公債 5 年期利率 0.51% (更新日期：2016/09/30)，藉此分別計算出台灣翡翠水庫單位蓄水貼現成本約為 0.15 (元/m³)、石門水庫單位蓄水貼現成本約為 0.09 (元/m³)、德基水庫單位蓄水貼現成本約為 0.12 (元/m³)、霧

表 15 利用水文平衡收支法之三種方式計算台灣分區年平均留存降水量

	北部	中部	南部	東部
年均雨量 (mm)	3,735.00	3,546.69	1,975.11	3,202.18
方法 I-蒸發量 (與逕流量) 佔降雨量之比例	31.73%	31.73%	31.73%	31.73%
留存年均雨量 (mm)	2,549.89	2,421.33	1,348.41	2,186.13
方法 II-蒸發量 (與逕流量) 佔降雨量之比例	22.86%	22.86%	22.86%	22.86%
留存年均雨量 (mm)	2,881.18	2,735.92	1,523.60	2,470.16
方法 III-蒸發量 (與逕流量) 佔降雨量之比例	94.87%	94.87%	94.87%	94.87%
留存年均雨量 (mm)	191.23	181.59	101.13	163.95

資料來源：行政院經濟部水利署 (2015a, 2015b)、Ninan and Kontoleon (2016) (方法 I)、肖寒等 (2000) (方法 II)、中國國家林業局 (2008) (方法 III)。

社水庫單位蓄水貼現成本約為 0.03 (元/m³)、曾文水庫單位蓄水貼現成本約為 0.05 (元/m³) 以及南化水庫單位蓄水貼現成本約為 0.56 (元/m³)，上述本研究所估算之水庫單位蓄水貼現成本範圍為 0.03-0.56 元/m³，顯示即便皆位處台灣本島，不同地區水庫單位蓄水貼現成本亦可能因地理環境等因素有較大的差異。

(二) 台灣國有林區森林涵養水源之經濟效益評估

表 16-表 18 為本研究分別依據水文平衡收支法之方法 I、II、III 及水庫單位容積造價估算的模擬結果，其中以花蓮國有林區每年留存之年均雨量最多，嘉義國有林區最少，而各水庫單位蓄水貼現成本以南化水庫價格最高，霧社水庫價格最低，此二水庫之蓄水量相近，造價及年維護費用則差距甚大，推測與經濟、地理環境及工程建設狀況等因素相關，在國有林區涵養水源效益部分，以屏東國有林區效益最高，嘉義國有林區最低，其效益高低之排序較貼近水庫單位蓄水貼現成本。將台灣各國有林區涵養水源效益價值加總後，可得知方法 I 之森林涵養水源之效益價值為 3,102,671,667.08 元，即台灣森林每年每公頃之水源涵養價值 22.21 元；方法 II 之森林涵養水源之效益價值為 3,506,255,132.15 元，即台灣森林每年每公頃之水源涵養價值 25.10 元；方法 III 之森林涵養水源之效益價值為 232,951,090.58 元，即台灣森林每年每公頃之水源涵養價值 1.67 元；若再將上述總水源涵養價值除以台灣森林總留存年均雨量，可估算出台灣國有林區森林水源涵養每單位蓄水量之效益價值約為 0.10 元/m³。

表 16 台灣國有林區森林涵養水源之經濟效益-方法 I 實證模擬結果

國有林區	面積 (km ²)	總留存年均雨量 (m ³)	水庫	單位蓄水貼現 成本(元/m ³)	涵養水源效益 (元)
羅東					
北部	185.07	471,882,607.88	翡翠水庫	0.15	72,110,527.37
東部	1,482.26	3,240,166,823.34			495,144,628.11
新竹					
北部	1,460.81	3,724,630,204.81	石門水庫	0.09	335,731,749.48
東勢					
北部	120.97	308,448,977.76	德基水庫	0.12	36,966,640.24
中部	1,122.44	2,717,608,328.08			325,696,814.13
東部	3.74	8,178,760.17			980,198.69
南投					
中部	1,748.06	4,232,320,199.48	霧社水庫	0.03	129,212,867.70
嘉義					
中部	441.35	1,068,573,035.16	曾文水庫	0.05	50,375,653.88
南部	684.54	922,975,339.87			43,511,753.28
屏東					
中部	1.68	4,066,882.84	南化水庫	0.56	2,264,545.36
南部	1,644.46	2,217,240,113.97			1,234,616,537.70
東部	33.59	73,436,762.07			40,891,485.03
台東					
南部	41.46	55,902,653.68	霧社水庫	0.03	1,706,709.76
東部	2,031.60	4,441,012,474.85			135,584,249.38
花蓮					
東部	2,965.00	6,481,398,782.04	霧社水庫	0.03	197,877,306.98
總計	1,396,704.00	29,967,841,946.00			3,102,671,667.08

表 17 台灣國有林區森林涵養水源之經濟效益-方法 II 實證模擬結果

國有林區	面積 (km ²)	總留存年均雨量 (m ³)	水庫	單位蓄水貼現 成本(元/m ³)	涵養水源效益 (元)
羅東					
北部	185.07	533,263,262.49	翡翠水庫	0.15	81,490,384.35
東部	1,482.26	3,661,635,123.65			559,551,115.86
新竹					
北部	1,460.81	4,209,115,617.85	石門水庫	0.09	379,402,429.89
東勢					
北部	120.97	348,570,821.32	德基水庫	0.12	41,775,117.05
中部	1,122.44	3,071,104,251.42			368,062,189.17
東部	3.74	9,242,621.49			1,107,699.13
南投					
中部	1,748.06	4,782,843,952.78	霧社水庫	0.03	146,020,375.06
嘉義					
中部	441.35	1,207,568,860.21	曾文水庫	0.05	56,928,323.04
南部	684.54	1,043,032,382.90			49,171,592.94
屏東					
中部	1.68	4,595,887.14	南化水庫	0.56	2,559,108.61
南部	1,644.46	2,505,650,085.80			1,395,210,655.86
東部	33.59	82,989,130.50			46,210,490.38
台東					
南部	41.46	63,174,253.48	霧社水庫	0.03	1,928,711.93
東部	2,031.60	5,018,682,107.77			153,220,521.29
花蓮					
東部	2,965.00	7,324,473,931.35	霧社水庫	0.03	223,616,417.59
總計	1,396,704.00	33,865,942,290.15			3,506,255,132.15

表 18 台灣國有林區森林涵養水源之經濟效益-方法 III 實證模擬結果

國有林區	面積 (km ²)	總留存年均雨量 (m ³)	水庫	單位蓄水貼現成本 (元/m ³)	涵養水源效益 (元)
羅東					
北部	185.07	35,429,326.70	翡翠水庫	0.15	5,414,116.54
東部	1,482.26	243,274,337.78			37,175,857.93
新竹					
北部	1,460.81	279,648,239.10	石門水庫	0.09	25,207,010.47
東勢					
北部	120.97	23,158,597.97	德基水庫	0.12	2,775,485.16
中部	1,122.44	204,040,224.59			24,453,579.43
東部	3.74	614,067.91			73,594.11
南投					
中部	1,748.06	317,766,013.27	霧社水庫	0.03	9,701,406.30
嘉義					
中部	441.35	80,229,325.12	曾文水庫	0.05	3,782,244.71
南部	684.54	69,297,732.75			3,266,897.52
屏東					
中部	1.68	305,344.84	南化水庫	0.56	170,023.89
南部	1,644.46	166,472,175.61			92,696,005.17
東部	33.59	5,513,691.31			3,070,165.67
台東					
南部	41.46	4,197,216.32	霧社水庫	0.03	128,141.15
東部	2,031.60	333,434,797.59			10,179,774.77
花蓮					
東部	2,965.00	486,628,646.78	霧社水庫	0.03	14,856,787.77
總計	1,396,704.00	2,250,009,737.64			232,951,090.58

根據上述評估結果，本研究整理森林生態系水源涵養服務價值估算的其他相關文獻，僅列上森林年均單位蓄水價格與本研究結果做比較（表 19），其中若單看台灣之文獻，顯示較前述各水庫之價格差異更大，範圍由 0.64 至 86.8 元/m³，以李國忠（1995）之研究結果為最低價格，可能與此研究所使用之機會成本—蓄積生長量法具有關聯性，至於計算出最高價格之研究（周佐辰，2011），則是使用重置成本—水庫單位容積造價方法，推論與其研究區域以及方法計算之細項有所關連，本研究估算結果為 0.10 元/m³，與李國忠（1995）以及 Ninan and Kontoleon（2016）之研究價格相近，前者研究亦是以台灣作為研究地點，而後者研究則為本研究主要參照之方法。表 19 中若與其他國家一同觀察，森林涵養水源每單位蓄水體積之價格範圍增廣至 0.01 至 86.8 元/m³，以 Ninan and Kontoleon（2016）於印度卡納塔克邦 Nagarhole 國家公園之研究為最低價格，推測不同國家總體經濟狀況及評估之尺度差異皆可能為影響價格之其中一項重要因素。

表 19 森林生態系水源涵養服務價值評估之相關文獻

相關文獻 (按年分)	地 點	計算方法	單位體積價格 (元/m ³)
陳信雄與李錦育 (1986)	臺灣	市場價格	6.60
任憶安等 (1988)	臺灣	自來水價格 重置成本	50.30
李國忠 (1995)	臺灣	水庫單位容積造價 森林水源涵養之機會成本	0.97
		面積生長量法 森林水源涵養之機會成本	0.64
鄭欽龍 (1994)	臺灣	蓄積生長量法 市場價格	21.56
吳俊賢等 (2004)	臺灣 (南投、台中、苗栗、彰化)	生產函數法 市場價格	15.36
馬健偉等 (2007)	中國 (小隴山)	生產函數法 市場價格 自來水價格	4.90*

表 19 森林生態系水源涵養服務價值評估之相關文獻 (續)

相關文獻 (按年分)	地 點	計算方法	單位體積價格 (元/m ³)
王兵與魯紹偉 (2009)	中國	重置成本	31.53*
王祖華等 (2010)	中國 (淳安縣)	水庫單位容積造價	31.53*
		重置成本	
周佐辰 (2011)	臺灣 (台北)	重置成本	86.80
		水庫單位容積造價	
趙軍與陳姍 (2011)	中國 (石羊河流域)	重置成本	4.44*
		水庫單位容積造價	
陳彩虹與肖默 (2011)	中國 (長株潭城市)	市場價格	7.23*
		自來水價格	
李惠萍等 (2012)	中國 (小隴山)	重置成本	31.53*
		水庫單位容積造價	
Ninan and Inoue (2013a)	日本	重置成本	41.06*
		水庫單位容積造價	
Häyhä et al. (2015)	義大利	市場價格	50.47*
		自來水價格	
Ninan and Kontoleon (2016)	印度	重置成本	0.01*
		水庫單位容積造價	
本研究 (2017)	台灣	重置成本	0.10
		水庫單位容積造價	

註：*表示皆以 2015 年平均匯率換算成新台幣。

伍、結論與建議

水資源為人類生存必需之基本要素之一，並與產業經濟發展與生態環境保護有相當重要的關聯性，近年來受到氣候變遷及社會經濟改變的影響使得水資源缺乏的現象日益嚴重 (Fant et al., 2016)，顯示水資源應受到更加妥善的規劃與利用，其中生態系服務價值評估即為水資源維護管理前期相當重要的環節，森林為可再生資源，且其植被覆蓋具有攔截降水之功用，水源涵養便是森林生態系服務中一項重要功能，因此本研究套用 Ninan

and Kontoleon (2016) 於印度之研究方法，透過分區的方式進行台灣國有林區森林水源涵養效益之評估。

森林水源涵養效益評估大致可分為兩個部分，一為森林水源涵養量的估算，本研究嘗試使用同為水文平衡收支法，但依各研究經驗與環境而於細項有所差異之計算方式 I-III (肖寒等，2000；中國國家林業局，2008；Ninan and Kontoleon, 2016)，進行森林蓄水量的推估；第二部分則是利用重置成本法，以水庫單位容積造價與森林水源涵養量計算出台灣國有林區森林涵養水源之效益價值。

台灣八個國有林管處管轄之森林，佔據全台總森林 77.09% 面積，其森林總水源涵養量依不同計量方式大致分別為 29,967,841,946.00 m³ (方法 I)、33,865,942,290.15 m³ (方法 II) 及 2,250,009,737.64 m³ (方法 III)，經由與其他文獻結果比對後，以方法 I 之結果較符合台灣之整體環境，而森林水源涵養效益價值，由水庫單位容積造價可計算出台灣平均每單位蓄水量價格為 0.10 元/m³，於台灣相關文獻結果中屬偏低之價格，若分別將此價格與方法 I、II、III 之森林涵養水量相乘，可得知台灣八個國有林區森林涵養水源之總效益分別為 3,102,671,667.08 (方法 I)、3,506,255,132.15 (方法 II) 以及 232,951,090.58 (方法 III) 元。而再進一步將森林涵養水源之總效益價值除以台灣國有林區森林面積即可得到台灣森林每年每公頃具有 1.67-25.10 元的水源涵養價值。若是政府相關部門未來欲針對私有林進行涵養水源效益相關之環境給付補助措施，或制訂生態損害補償機制，此一價格範圍可供政府作直接給付金額上限參考依據，且進而可使政府研析如何將相關效益市場化或納入政府獎勵補助政策中。

生態系統服務功能為一複雜且多面向的體系，其功能之分類涵蓋領域甚廣，不同的尺度差異也會影響其功能之評估方法，而為了更加精準且有效的對生態系統服務功能進行評估，研究學者不斷重複驗證並改進原有之方法，或提出新的評估方法，而除了方法應即時更新外，針對不同評估區域做為評估對象時，應審慎考量該區域之環境等多項因素，因地制宜的採取合適之方法以降低泛用化基礎資料所造成與實際狀況的差異，即便無法非常準確的評估出實際價值，亦可對此生態系統服務功能的基本價值有個大概的認知。

森林水源涵養效益價值評估之資料選用上，受到政府部門資料流通限制以及實際測站等部分資料缺失，且本研究係以 Ninan and Kontoleon (2016) 之研究為主要參考依據，多數相關文獻之研究區域為中國大陸地區，皆與台灣整體環境有所差異，進而可能導致誤差的出現，因此蒐集台灣之相關文獻資料為評估台灣森林生態系統服務之水源涵養功能相當重要的一環。

自本研究實證模擬結果與其他文獻比對中，可瞭解到台灣國有森林水源涵養功能略高於其他國家，顯示台灣確實是一個降水量豐沛之海島國家，然而森林水源涵養的效益價值上，台灣不同文獻與方法所估算之價格差異甚大，顯然對於如何更加貼近實際價值，仍要基於評估方法、基礎資料之獲取以及氣候地理環境等各方面因素，多加進行審慎的考量與評估，本研究得出之效益價值與其他相關文獻相比偏低，較低之價格有助於政府考量相關政策時，在環境價格給付方面相對容易被民眾所接受。

(收件日期為民國 106 年 5 月 18 日，接受日期為民國 106 年 11 月 30 日)

參考文獻

一、中文部分

- 中國國家林業局，2008，「森林生態系統服務功能評估規範」，中華人民共和國林業行業標準，北京：國家林業局。(National Forestry and Grass Administration, 2008, "Forest Ecosystem Service Function Assessment Specification", *Forestry Industry Standard of the People's Republic of China*, Beijing: National Forestry and Grass Administration.)
- 王兵與魯紹偉，2009，「中國經濟林生態系統服務價值評估」，應用生態學報，20：417-425。

(Wang, B. and S. W. Lu, 2009, "Evaluation of Economic Forest Ecosystem Services in China", *Chinese Journal of Applied Ecology*, 20: 417-425.)

王祖華、蔡良良、關慶偉與蔡霞，2010，「淳安縣森林生態系統服務價值評估」，*浙江林學院學報*，27：757-761。(Wang, Z. H., L. L. Cai, Q. W. Guan, and X. Cai, 2010, "Evaluation of Forest Ecosystem Services in Chunan County", *Journal of Zhejiang Forestry Collage*, 27: 757-761.)

交通部中央氣象局，2016，「每月氣象資料」，氣候統計，取自<http://www.cwb.gov.tw/V7/climate/monthlyData/mD.htm>，檢索日期：2016/10/11。(Central Weather Bureau, Ministry of Transportation and Communications, 2016, "Monthly Weather Data", Climate Statistics, Retrieved October 11, 2016, from <http://www.cwb.gov.tw/V7/climate/monthlyData/mD.htm>.)

任憶安、王鴻濬與賴柳英，1988，「台灣森林對水源涵養之經濟效益評估」，*中華林學季刊*，21：17-25。(Ren, Y. A., H. J. Wang, and L. Y. Lai, 1988, "Evaluating the Economic Value of Water Conservation by Taiwan Forests", *Quarterly Journal of Chinese Forestry*, 21: 17-25.)

行政院經濟部水利署，2015a，「台灣地區近 10 年 (94-103) 降雨量概況」，水利統計簡訊，水文類別，273 期，取自<https://www.wra.gov.tw/media/16076/f-temp-attachment-513016254771.pdf>，檢索日期：2016/10/11。(Water Resources Agency, Ministry of Economic Affairs, 2015a, "Overview of Rainfall in the Last 10 Years (94-103) in Taiwan", *Water Resources Statistics Bulletin, Hydrology Category*, Issue 273, Retrieved October 11, 2016, from <https://www.wra.gov.tw/media/16076/f-temp-attachment-513016254771.pdf>.)

行政院經濟部水利署，2015b，「102 年水資源概況」，水利統計，統計資料指標，取自<http://shihmen.wra.gov.tw/ct.asp?xItem=22922&ctNode=5402&comefrom=lp>，檢索日期：2016/10/11。(Water Resources Agency, Ministry of Economic Affairs, 2015b, "Water Resources Overview Year 102", *Water Resources Statistics, Statistical Data Indicators*, Retrieved October 11, 2016, from <http://shihmen.wra.gov.tw/ct.asp?xItem=22922&ctNode=5402&comefrom=lp>.)

- 行政院經濟部水利署，2015c，地下水保育管理暨地層下陷防治第2期計畫(104~109年)核定本，台北：行政院經濟部水利署。(Water Resources Agency, Ministry of Economic Affairs, 2015c, *Groundwater Conservation Management and Ground Subsidence Prevention Plan (Stage 2,104-109)*, Taipei: Water Resources Agency, Ministry of Economic Affairs.)
- 行政院經濟部水利署，2016a，「水庫安全評估及更新維護改善執行成果」，水利統計，公務統計報表，標號1152-02-03，取自<https://www.wra.gov.tw/6950/7169/7316/7324/24023/>，檢索日期：2016/10/11。(Water Resources Agency, Ministry of Economic Affairs, 2016a, “Reservoir Safety Assessment and Renewal Maintenance Improvement Implementation Results”, Water Resources Statistics, Public Service Statistical Reports, Tag No. 1152-02-03, Retrieved October 11, 2016, from [https://www.wra.gov.tw/6950/7169/7316/7324/24023.](https://www.wra.gov.tw/6950/7169/7316/7324/24023/))
- 行政院經濟部水利署，2016b，「全國已知水庫集水區位及水庫管理機關(構)表(100年1月版)」，取自<https://www.wranb.gov.tw/public/Attachment/5810155961.pdf>，檢索日期：2016/10/11。(Water Resources Agency, Ministry of Economic Affairs, 2016b, “Table of Known Reservoir Catchment Areas and Reservoir Management Authorities (Organizations) (January 2011 Version)”, Retrieved October 11, 2016, from [https://www.wranb.gov.tw/public/Attachment/5810155961.pdf.](https://www.wranb.gov.tw/public/Attachment/5810155961.pdf))
- 行政院農業委員會水土保持局，2006，水土保持手冊，台北：行政院農業委員會水土保持局、中華水土保持學會。(Soil and Water Conservation Bureau, Council of Agriculture, Executive Yuan, 2006, *Soil and Water Conservation Handbook*, Taipei: Soil and Water Conservation Bureau, Council of Agriculture, Executive Yuan, Chinese for Soil and Water Conservation Society.)
- 行政院農業委員會林務局，2016a，「第四次森林資源調查成果」，取自<http://www.forest.gov.tw/0000052>，檢索日期：2016/10/03。(Forestry Bureau, Council of Agriculture, Executive Yuan 2016a, “Fourth Forest Resources Survey Results”, Retrieved October 3, 2016, from [http://www.forest.gov.tw/0000052.](http://www.forest.gov.tw/0000052))

- 行政院農業委員會林務局，2016b，林業統計年報，台北：行政院農業委員會。(Forestry Bureau, Council of Agriculture, Executive Yuan, 2016b, *Annual Report on Forestry Statistics*, Taipei: Council of Agriculture, Executive Yuan.)
- 吳俊賢與陳溢宏，2010，「綠色造林對水源涵養之效益評估」，林業研究專訊，17：56-59。(Wu, C. S. and Y. H. Chen, 2010, "Evaluation of the Benefits of Green Afforestation on Water Conservation", *Forestry Research Newsletter*, 17: 56-59.)
- 吳俊賢、陳溢宏、鄭美如、黃正良與李國忠，2004，「森林涵養水源貨幣價值之研究」，臺灣林業科學，19：187-197。(Wu, C. S., Y. H. Chen, M. R. Cheng, J. L. Huang, and K. C. Lee, 2004, "Evaluating the Economic Benefit of Water Resource Nourishment by Forests", *Taiwan Journal of Forestry Science*, 19: 187-197.)
- 吳治達、鄭祈全與羅漢強，2008，「土地利用型與空間尺度對蒸發散量影響之研究」，中華林學季刊，41：211-219。(Wu, C. T., C. C. Cheng, and H. C. Lo, 2008, "Effects of Land-Use Types and Spatial Scales on Evapotranspiration", *Quarterly Journal of Chinese Forestry*, 41: 211-219.)
- 呂明倫、黃靜宜與鍾玉龍，2012，「恆春半島生態系服務價值之評估」，中華林學季刊，45：491-502。(Lu, M. L., J. Y. Huang, and Y. L. Luang, 2012, "Assessing the Ecosystem Service Values in the Hengchun Peninsula", *Quarterly Journal of Chinese Forestry*, 45: 491-502.)
- 李俊梅、朱福進、段昌群、費宇與王宏鑛，2007，「雲南典型自然保護區生態系統服務效益計量—以西雙版納勐臘自然保護區為例」，生態經濟，2007：367-371。(Li, J. M., F. J. Zhu, C. Q. Duan, Y. Fei, and H. B. Wang, 2007, "Assessment of Ecosystem Services Benefit for Mengla Nature Reserve in Xishuangbanna", *Ecological Economy*, 2007: 367-371.)
- 李俊鴻、陳郁蕙與陳雅惠，2011，森林生態系服務功能及其價值探討，台北：行政院農業委員會林務局。(Lee, C. H., Y. H. Chen, and Y. H. Chen, 2011, *Exploring the Service Function of Forest Ecosystem and Its Value*, Taipei: Forestry Bureau, Council of Agriculture, Executive Yuan.)

- 李國忠，1995，「水源涵養林任務成本與水利用效率之研究」，中華林學季刊，28：81-117。
(Li, G. Z., 1995, "A Study on the Cost of Water-conserving Forests and Water Use Efficiency", *Quarterly Journal of Chinese Forestry*, 28: 81-117.)
- 李惠萍、劉小林、張宋智、藺岩雄、楊海裕與袁一超，2012，「小隴山生態站森林生態系統服務功能及其價值評估」，西北林學院學報，27：15-20。(Li, H. P., X. L. Liu, S. Z. Zhang, Y. X. Lin, H. Y. Yang, and Y. C. Yuan, 2012, "Assessment on Value of Forest Ecosystem Services in Xiaolongshan Ecological Research Station", *Journal of Northwest Forestry University*, 27: 15-20.)
- 肖寒、歐陽志雲、趙景柱與王效科，2000，「森林生態系統服務功能及其生態經濟價值評估初探—以海南島尖峰嶺熱帶森林為例」，應用生態學報，11：481-484。(Xiao, H., Z. Y. Ou-Yang, J. Z. Zhao, and X. K. Wang, 2000, "A Preliminary Atudy on the Aervice Function of Forest Ecosystem and Its Ecological and Economic Value Assessment: A Case of Tropical Forest in Jian Feng Ling, Hainan Island", *Chinese Journal of Applied Ecology*, 11: 481-484.)
- 周天穎、楊龍士與陳美心，2000，「應用遙測與水文模式於水庫集水區水源涵養之推估」，航測及遙測學刊，5：57-74。(Chou, T. Y., L. S. Yang, and M. H. Chen, 2000, "The Application of Remote Sensing and Hydrological Model on Water Conservation Capacity Estimation for Reservoir Watershed", *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 5: 57-74.)
- 周佐辰，2011，「台北市生態系統水源涵養服務功能之研究」，臺灣大學森林環境暨資源學研究所碩士論文。(Chou, T. C., 2011, *A Study in Ecosystem Nourishment of Water in Taipei*, Master's Thesis, Institute of Forestry and Resource Converstion, National Taiwan University.)
- 侯元照與吳水榮，2008，「生態系統價值評估理論方法的最新進展及對我國流行概念的辨正」，世界林業研究，21：7-16。(Hou, Y. Z. and S. R. Wu, 2008, "Recent Progress on Theory & Method of Ecosystem Valuation and Rectification on the Related Concepts Popular in China", *World Forestry Research*, 21: 7-16.)

- 孫立達與朱金兆，1995，水土保持林體系綜合效益研究與評價，北京：中國科學技術出版社。(Sun, L. D. and C. C. Chao, 1995, *Research and Evaluation of Comprehensive Benefits of Soil and Water Conservation Forest Systems*, Beijing: Shanghai Science & Technology Press.)
- 馬健偉、張宋智、郭小龍、張會軍、陳立同與趙長明，2007，「小隴山森林生態系統服務功能價值評估」，生態與農村環境學報，23：27-30。(Ma, J. W., S. Z. Zhang, X. L. Guo, H. J. Zhang, L. T. Chen, and C. M. Zhao, 2007, "Evaluation on Service Function of the Forest Ecosystem of Xiaolong Mountain", *Journal of Ecology and Rural Environment*, 23: 27-30.)
- 國立臺灣大學生物多樣性研究中心，2006，台灣的自然資源與生態資料庫 III 農林漁牧，台北：行政院農業委員會。(National Taiwan University, Biodiversity Research Center, 2006, *Taiwan's Natural Resources and Ecological Database III, Agriculture, Forestry, Fisheries and Livestock*, Taipei: Council of Agriculture, Executive Yuan.)
- 康文星、郭清和、何介南、申初聯、鄧湘雯與趙仲輝，2008，「廣州城市森林涵養水源、固土保肥的功能及價值分析」，林業科學，44：19-25。(Kang, W. X., Q. H. Guo, J. N. He, C. L. Shen, X. W. Deng, and Z. H. Zhao, 2008, "Function and Value Analysis of Water Conservation, Soil Reinforcement and Fertility Maintenance of Urban Forest in Guangzhou", *Scientia Silvae Sinicae*, 44: 19-25.)
- 陳信雄與李錦育，1986，「森林集水區水土保育功能綜合模式之研究」，中華林學季刊，19：59-74。(Chen, H. H. and J. Y. Li, 1986, "An Integrated Model of Soil and Water Conservation Functions in Forest Catchment Areas", *Quarterly Journal of Chinese Forestry*, 19: 59-74.)
- 陳信雄與陳明杰，1990，「集水區森林現況與水資源涵養功能之調查研究」，國立臺灣大學森林研究報告。(Chen, H. H. and M. C. Chen, 1990, "A Study on the Current Status of Forests Catchment Area and the Function of Water Conservation", National Taiwan University Forest Research Report.)
- 陳彩虹與肖默，2011，「長株潭城市群城市森林生態系統服務功能的價值評估」，中南

- 林業科技大學學報，31：50-54。(Hong, C. H. and M. Xiao, 2011, "Evaluation of Forest Ecosystem Service Function Value of Urban Forest in Changsha-Zhuzhou-Xiangtan City Group", *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 31: 50-54.)
- 陳朝圳、吳守從與江彥鋒，2006，「應用 MODIS 衛星影像推估台灣地區之蒸發散量」，*台灣林業科學*，21：249-261。(Chen, C. T., S. T. Wu, and Y. F. Chaing, 2006, "Using MODIS Satellite Images to Estimate Evapotranspiration in Taiwan", *Taiwan Journal of Forest Science*, 21: 249-261.)
- 陸象豫，1996，「森林在水土資源保育上之功能」，*台灣林業科學*，11：333-347。(Lu, S. Y., 1996, "The Role of Forests in Soil and Water Conservation", *Taiwan Journal of Forest Science*, 11: 333-347.)
- 楊偉甫，2010，*台灣水資源利用現況與未來發展問題*，台北：經濟部水利署。(Yang, W. F., 2010, *Current Status and Future Development Problem with Utilization of Water Resources in Taiwan*, Taipei: Water Resources Agency, Ministry of Economic Affairs.)
- 鄒丞，2015，「結合土壤類型及其蒸發量推估區域性地下水補注之研究」，*中原大學土木工程學系碩士論文*。(Cheng, Z., 2015, *A Study on Regional Groundwater Recharge based on Soil Types and Evaporation*, Master's Thesis, Department of Civil Engineering, Chung Yuan University.)
- 趙軍與陳姍，2011，「基於 GIS 的石羊河流域森林生態效益估算與空間分布特徵研究」，*乾旱區地理*，34：12-19。(Zhao, J. and S. Chen, 2011, "Valuation of Forest Ecological Benefit and Distributing Pattern in Shiyang River Basin Based on GIS", *Arid Land Geography*, 34: 12-19.)
- 鄭欽龍，1994，*製造業用水函數及用水模式預測之研究(一)*，經濟部水資會委託研究，台北：中華經濟研究院。(Zheng, C. L., 1994, *Study on Water Use Functions and Water Use Pattern Prediction in Manufacturing Industry (1)*, Research Commissioned by Water Resources Agency, Taipei: Chung-Hua Institution for Economic Research.)
- 證卷櫃檯買賣中心，2016，「台灣公債 5 年期殖利率」，取自 <http://www.tpex.org.tw/web/>，檢索日期：2016/09/30。(Taipei Exchange, 2016, "Taiwan Bond 5-Year Yield", Retrieved

September 30, 2016, from <http://www.tpex.org.tw/web/>.)

二、英文部分

- Biao, Z., L. Wenhua, X. Gaodi, and X. Yu, 2010, "Water Conservation of Forest Ecosystem in Beijing and Its Value", *Ecological Economics*, 69: 1416-1426.
- Costanza, R., R. d'Arge, R. de Groot, S. Farber, M. Grasso, B. Hannon, K. Limburg, S. Naeem, R. V. O'Neill, J. Paruelo, R. G. Raskin, P. Sutton, and M. van den Belt, 1997, "The Value of the World's Ecosystem Services and Natural Capital", *Nature*, 387: 253-260.
- Daily, G. C., 1997, *Nature's Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems*, Washington D.C.: Island Press.
- Ehrlich, P. R. and H. A. Mooney, 1981, *Extinction: The Causes and Consequences of the Disappearance of Species*, New York: Random House Press.
- Fant, C., C. A. Schlosser, X. Gao, K. Strzepek, and J. Reilly, 2016, "Projections of Water Stress Based on an Ensemble of Socioeconomic Growth and Climate Change Scenarios: A Case Study in Asia", *PLoS One*, 11: 1-33.
- Häyhä, T., P. P. Franzese, A. Paletto, and B. D. Fath, 2015, "Assessing, Valuing, and Mapping Ecosystem Services in Alpine Forests", *Ecosystem Services*, 14: 12-23.
- Krishnaswamy, J., M. Bonell, B. Venkatesh, B. K. Purandara, K. N. Rakesh, S. Lele, M. C. Kiran, V. Reddy, S. Badiger, 2013, "The Groundwater Recharge Response and Hydrologic Services of Tropical Humid Forest Ecosystems to Use and Reformation: Support for the Infiltration-evapotranspiration Trade-off Hypothesis", *Journal of Hydrology*, 498: 191-209.
- Mashayekhi, Z., M. Panahi, M. Karami, S. Khalighi, and A. Malekian, 2010, "Economic Valuation of Water Storage Function of Forest Ecosystems (Case Study: Zagros Forests, Iran)", *Journal of Forest Research*, 21: 293-300.
- Millennium Ecosystem Assessment, 2005, *Ecosystems and Human Well-being: Synthesis*, Washington, D.C.: Millennium Ecosystem Assessment Press.
- Ninan, K. N. and M. Inoue, 2013a, "Valuing Forest Ecosystem Services - Case Study of a

- Forest Reserve in Japan”, *Ecosystem Services*, 5: 78-87.
- Ninan, K. N. and M. Inoue, 2013b, “Valuing Forest Ecosystem Services: What We Know and What We Don’t”, *Ecological Economics*, 93: 137-149.
- Ninan, K. N. and A. Kontoleon, 2016, “Valuing Forest Ecosystem Services and Disservices – Case Study of a Protected Area in India”, *Ecosystem Services*, 20: 1-14.
- United Nations, 2017, *The Sustainable Development Goals Report 2017*, New York: United Nations.
- Westman, W. E., 1977, “How Much are Nature's Services Worth?”, *Science*, 197: 960-964.
- Xue, D. and C. Tisdell, 2001, “Valuing Ecological Functions of Biodiversity in Changbaishan Mountain Biosphere Reserve in Northeast China”, *Biodiversity and Conservation*, 10: 467-481.
- Zhang, B., W. Li, G. Xie, and Y. Xiao, 2010, “Water Conservation of Forest Ecosystem in Beijing and Its Value”, *Ecological Economics*, 69: 1416-1426

Evaluating the Economic Value of Water Conservation by Taiwan National Forests

Ching-Hua Hsieh* and Wan-Yu Liu**

Abstract

Water is the subsistence of human beings and it can be conserved by forests. The water conservation value is a kind of indirect use value. With the continued consumption of natural resources, the problem of water scarcity has been becoming important. Estimating the value of water conservation becomes critical to investigate the sustainable use of water resources by forest. However, estimating the value of water is difficult. The estimates are easily affected by many factors, such as climate, topography, and data sources. Therefore, it is challenging to estimate the value of water accurately in a practical way. In this study, a water balance model with replacement cost is adopted to estimate the value of water conservation in eight national forest districts in Taiwan. The estimated water conserved in the national forest districts is approximately 29,967,841,946.00 m³ annually and the average cost for reservoirs is NT\$ 0.10/m³. The economic value of the water stored in Taiwan's national forest districts is estimated to be NT\$ 3,102,671,667.08 per year. The result of this study indicates that the capability of conserving water by forests conforms to rainfalls generally. In addition, the discounted cost of each reservoir in Taiwan has large variations in the assessment process. This

* Master, Department of Forestry, National Chung Hsing University.

** Professor, Department of Forestry, National Chung Hsing University. Corresponding Author.

E-mail: wyliau@nchu.edu.tw. This paper is funded by the Council of Agriculture (106 農管-1.11-企-01).

DOI: 10.3966/054696002018120104005

study also suggests that we should consider water sources, in addition to the data scale, to improve the estimation accuracy.

Keywords: Ecosystem Service, Economic Benefit, Water Conservation

JEL Classification: Q23, Q24, Q51, Q58