

論 永續水利事業

顏清連／國立臺灣大學土木工程學系名譽教授暨水工試驗所特約研究員

摘要

水的過度利用對生態環境造成不可忽視的衝擊已受到普遍的關注，如何減緩負面衝擊變成今後水利事業的一項重要課題。本文首先從永續概念切入，簡要說明自然資源的利用必須要能達成的目標；其次，就永續水資源的意涵加以闡明，並指出在循環型社會，水資源的利用必須兼顧水量、水質與水環境三者之間的和諧；繼而，探討永續水利事業的經營策略，特別指出水利設施功能維護與強化、跨流域水圈管理、親水文化重建等三項重點；最後，提出為落實經營策略，在技術、制度及法規等方面必須建立的配套措施。

永續概念

■ 基本理念

回顧廿世紀人類社會的最大變化，可以說是利用科技發展成為高經濟成長的大量生產、大量消費型社會。經過不斷的財富累積與福祉擴大的歷程，追求富裕而便利的個人生活變成這個社會多數人的目標。

由於經濟成長的支撐，於是就更進一步開發各種越來越大的設備與裝置，消耗大量的水、能源與物質，以求創造大量的生產與消費。生產與消費所消耗的水、能源與物質最後轉換成廢水、廢熱與廢棄物，顯然已經危及全人類及其他生物的生活環境。這也就表明了全球規模的大量消費型社會的極限即將來臨。當消費型社會受到地球環境的制約時，人類為保有持續的活力，必須從大量生產、大量消費的思維所構成的消費型社會體系轉變成循環再利用的循環型社會體系。

就理念上而言，循環型社會就是要符合 1987 年聯

合國發表的「我們的共同未來」報告中^[1]所定義的永續概念：永續發展為滿足當世代自身的需求，而不損及未來世代滿足其需求的能力。此一定義涵蓋二個關鍵思維，其一為「需求」係針對所有的人而言，不論族群與貧富；其二為藉由科技與社會的調節，可使環境具有滿足各世代需求的可能性。

聯合國環境與發展大會於 1992 年通過「21 世紀議程」^[2]，闡明了人類社會在環境保護與永續發展之間應作出的選擇與行動方案；該文件對於如何加強環境永續問題的國際合作具有積極的指導意義。由此可見，環境永續是一個全球性的課題，而水資源永續是其中的重要部分，需要水利事業從業者的特別關注。

■ 行動原則

從消費型社會轉變成循環型社會必須秉持二個基本的行動原則，其一為利用自然資源的過程要能達成循環利用的目標；其二為資源利用的效益要能做到族群間以及世代間之公平正義。

為達成上述之循環利用及公平正義，首先必須能確實掌握水、空氣、生物、礦物、能源等自然資源的狀況，並且將利用效益作合理的分配，使人類活動（包括經濟與文化等）與自然之間能夠和諧以利永續發展。在利用資源並尋求與自然和諧的過程中，人類社會必須有各種資本投入，從事硬體與軟體建設。前者包括維生線、水利、電力、交通等各類基礎設施；後者包括經營運用這些基礎設施所需之法規、制度、教育及行政等各類措施。雖然這些自然與社會因素之間的關係甚為複雜，但可以用一個化繁為簡的流程方式來表示其與達成循環利用及公平正義的關聯概念，如圖 1 所示。

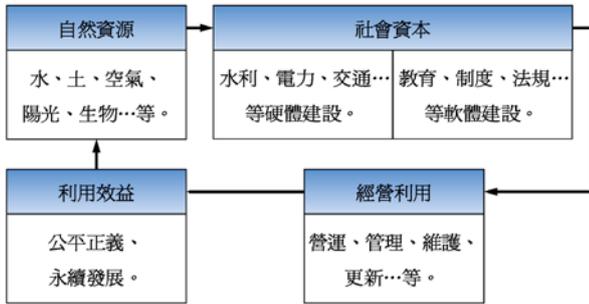


圖 1 資源循環利用之自然與社會因素關聯性

在廿世紀消費型社會的中心思維之下，由世界各國為利用自然資源所投入社會資本的成長趨勢可知，在本世紀循環型社會中，這種趨勢是難以持續的。換言之，未來對於自然資源利用的社會資本投入不可能在廿世紀的延長線上持續進行，而必須作大幅度的修正^[5]；修正不僅要在空間上而且亦要在時間上作考慮。在空間上應該從村落、城市、都會區、流域到全國，甚至全球的各種不同空間尺度去作思考；在時間尺度上則要從日、月、季、十年乃至世紀都必須涵蓋。從這兩個向度切入思考，可交織成各種可能情景並進行檢討後，再據以形成各種具體的行動調整方案。

從水系統來看，就空間尺度而言，台灣本身範圍雖然不大，但因地形變化劇烈，以致在小範圍內的水文循環受地形之影響幅度甚大。同時，全球性的氣候變遷亦對台灣整體的水文循環有一定程度的影響。因此，在空間尺度上的思維必須擴大至全台、東亞甚至全球。就時間尺度而言，要準確預測未來十年甚至百年可能發生的情況雖然有極高的難度，但是仍可設定各種可能發生的情境，然後再依實際發生情況逐步修正各種情境以方便應用。

水資源之永續

自然界之大循環

在自然界，水系統與生物系統構成一個密切關聯的大循環系統。植物吸收地球環境中的水、二氧化碳、無機物及太陽能，進而合成碳水化合物，並將此過程中所產生的氧氣、水蒸汽及熱能排放至大氣中。動物則以植物為主要食物，並於其食物鏈中消化分解碳水化合物，且在各個階段呼吸植物所排出的氧氣；最後排放二氧化碳、無機物及熱能至環境中，二氧化碳及無機物再為植物所利用，而熱能則透過大氣中的水循環回到太空中。整個關聯的大循環概念如圖 2 所示。

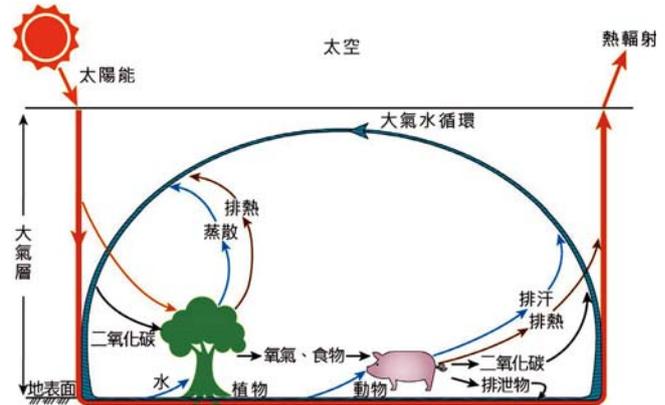


圖 2 水系統與生物系統大循環概念圖

由以上所述的大循環來看，包括人類在內的各種生物至今能夠在地球上生生不息，顯然是因為水系統在大循環中與生物系統維持一個平衡狀態所致。換言之，如果此一平衡狀態遭受到嚴重破壞，則生物系統的生生不息將難以為繼。

地球接收到的太陽能大半是用於系統大循環及伴隨而來的能源與其他物質的移動。水與其他物質在地表上是通過河系從上游地區移至下游湖泊、水庫及海岸地區。水與以水為媒介而移動的泥砂、營養鹽類以及生物從河系上游到下游連續遷移，並維持彼此間的互動關係；因而將林地、農地、水庫、湖泊及海岸地區連結成一體，成為健全的生態體系。因此，深切體認到這樣的河系連續性，並設法予以維持，對於營造地球環境之永續性至為重要。

人類活動對水系統之影響

由於消費型社會對於水的利用是以水量為主要考量進行水資源利用計畫之建設與營運，故多為成長效率化的價值觀所主導。然而在循環型社會，價值觀趨於多元化，因此水資源利用計畫必須朝著水量、水質與水環境三者兼顧的方向作調整，才能符合多元化的價值觀。水質的劣優一般是依水體中所含有的化學物、微生物及固體物等不純潔雜質之多寡而定。水質劣者不僅會導致可供利用水量的減少，而且還會造成水環境及生態系統的破壞。另外，水域及水岸的出現與否對於環境景觀之美感有密切關係，而且其存在可孕育出人們鄰近水邊生活的親水文化。這也就是說，以一個地區固有的水域為背景，該地區居民經過長時間與水的互動而形成共有的生活方式、生產方式及價值觀，並且在地區內部長久傳承。然而現今日常生活的用水已大都變成由自來水所供應，而且大量耗水與

排放污水，再加上防洪設施的隔絕，使人們的親水文化逐漸消失。顯然重新建構親水文化是水資源利用的另一項重要課題。

如前所述，生物系統（含人類）在大循環中，利用水以維持其生命而能生生不息，其前提是兩者之間達到一個平衡狀態。然而消費型社會造成水系統的過度負荷，引起各式各樣的問題。這些不良後果都將對生物系統造成致命性的影響。

■ 循環型社會之水系統

顯然在消費型社會，水資源利用的思維是以「水量」為主導的，其特性是將原來水系統在大循環中的地面逕流作了大幅度的空間平均化與時間平均化，如圖3所示。以一個流域為單元的水系統來看，若需求用水量越大，則逕流被平均化的程度越高，亦即水系統大循環受到的干擾（或破壞）越嚴重。這當然也會改變蒸發散水汽、熱能及物質的移動。因此在循環型社會，水資源利用的思維轉變成水量、水質與水環境兼顧的意義，就是要將水系統大循環的干擾減至最低程度，而且必須具有可操作性。在水系統大循環中，地面水是有它可操作性的部分，包括用水計畫的規劃、設計、營運與管理。

絕大部分的地面水都必須經過林地及農地，以台灣的情況而言，林地面積約佔 60%，而林地加農地合計超過 80%。林地處於上游部位，在降雨到達地面之後，一部分滲入土壤中再慢慢釋放出來，另一部分則經由漫地流很快地進入河系。一般而言，從林地流出的水含有維持生物系統所需要的若干物質，而且具有較高位能，因此林地在水系統大循環中，不論水量、

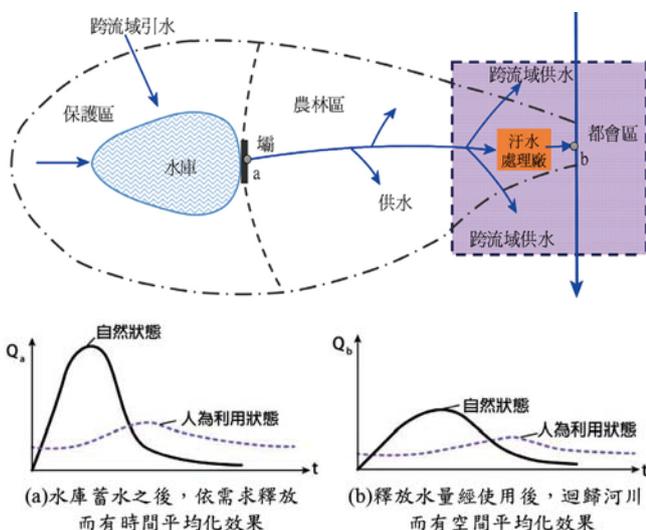


圖3 水量利用之空間及時間平均化示意圖

物質、能量的傳輸都扮演著重要的角色。

農地的灌溉操作，除維持較佳的水稻生產環境之外，亦能控制微生物活動而可使土壤成為還原狀態；其次水田在反覆灌溉、蓄水、排水的操作過程中，有補注地下水、抑制鹽害的功效；另外，由於水的熱容量甚大，故適當地配置水田、池塘、渠道等設施可以緩和都會區的熱島效應，具有維持、改善環境的功能。

總而言之，循環型社會對於水的利用必須以永續的理念為出發點，設法使水量、水質與水環境三者之間和諧相容，以尋求水系統與生物系統的平衡。

永續水利事業之經營策略

水利法第三條所定義之水利事業為：「謂用人為方法控馭，或利用地面水或地下水，以防洪、灌溉、排水、洗鹼、保土、蓄水、放淤、給水、築港、便利水運及發展水力。」此一定義之內涵有兩個重點，其一水利事業係公用事業，以公眾利益為主要考量，這一點至今仍然維持不變；其二為水利事業的主要課題為水流與水量的控制，以促進水的利用及水害的減輕，這一點在現今的永續理念驅動之下勢必要作調整，以使公眾利益達到最佳狀態，而這裡所謂的最佳狀態的意涵為符合公平正義、循環利用的最大利益。在這樣前提之下，水利事業的經營策略應包括下列三個面向：

■ 水利設施功能之維護與強化

歷年來政府以龐大的經費從事水利、防洪相關的公共建設，完成為數眾多的各種設施，包括大堤、隧道、渠道、堤防、電廠、水廠、自來水管網...等等。這些設施多年來都發揮了一定的功能，對經濟發展及社會民生作出了巨大的貢獻。然而由於設施受到種種不利因素的影響，以致減損了其應有功能，而有待維護或改善。同時，為因應循環型社會的新需求，而必須將原有的功能予以強化或擴大。

事實上，台灣水利事業所要面對的諸多問題，包括水之供需預測、用水調度與節約、水源開發與利用、水環境保育、水經濟與法制...等等，早先已有相當詳盡的研析報告^[3]。本文因限於篇幅，僅就當前最值得關注的數項簡要說明如下：

■ 全面推行水利建造物之診斷與補強

水利建造物隨著時間逐漸老化或遭逢天災受損，以致無法充分發揮其應有功能，因此必須全面性地定期對建造物結構體作健康檢查及診斷，並在必要時予以補強。另外，由於氣候變遷因素，可能水文條件起了變

化致使建造物的安全受到威脅，故亦須定期對其安全加以檢討，如有需要亦應予以加強。這些檢查、診斷、補強、檢討、加強的工作必須有完善的技術作後盾，但有些技術仍待積極研發。

加強水庫清淤技術之落實應用

由於地理與地質環境的關係，台灣的水庫泥砂淤積相當嚴重，對於水利事業的經營非常不利，因而是一個必須嚴肅面對的重大課題。水庫清淤的工作難以推動的主要原因有二，其一為環保主管機關認為清出之泥砂為廢棄物，不可傾倒於河川內，而事實上，清出之泥砂本應迴歸下游河川，以保護河床免於過度沖刷，並可減輕海岸線退縮；其二為清淤成本仍然偏高，清淤技術水準有待提升。目前石門已開始水力排砂（改稱為水庫通砂應較符合環保概念）的嘗試，曾文水庫亦正進行規劃研究 [6]，均值得肯定。未來除應加快步調推動技術水準之提升外，更應加強推行落實應用。

促進水利事業經營之企業化

目前主要供水機構為農田水利會及自來水公司，但兩者經營績效均欠佳。長期以來水價偏低，未能真正反映成本與經濟成長的通貨膨脹，導致水利事業機構的財務困難，因而衍生用水浪費等諸多問題，亦成為供水機構無效率的遁詞。水價若能反映真實成本，則不僅可發揮以價制量的效果，更可作為水利事業經營績效評量時之參考市場價格，使經濟效益分析合理化，進而可促進其經營邁向企業化。企業化之水利事業可區分成原水供應、水處理及配水等三個部分；農田水利會可轉型為原水供應者，與其他供水者同時提供水源，可在市場競爭機制下提升其經營績效。

跨流域水圈管理

對水利事業的經營而言，若要符合永續理念，則流域中的空間及水流管理至為重要。在過去，水利事業所涉及之水源與供水雖然偶爾有跨流域的情形，但傳統上其經營的基本思維多以單一流域為對象。然而在經濟成長及社會發展的需求壓力之下，跨流域的引水與供水幾乎已成為不可避免的事實，而且其範圍越來越廣大。因此，跨流域的部分必須納入作整體的管理，才能使永續水利事業的經營順暢有效。本文將這種本流域加上跨流域部分空間及水流的總和稱為跨流域水圈（或簡稱為水圈），如圖 4 所示。換言之，跨流域水圈的空間及水流必須作整體考量納入管理。

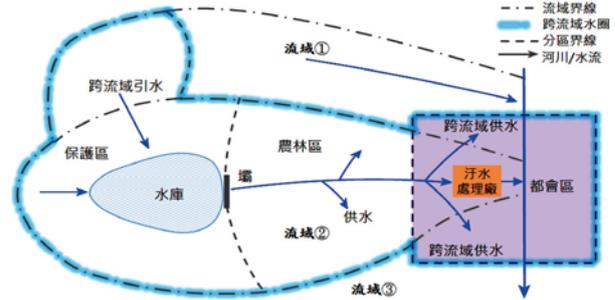


圖 4 跨流域水圈概念示意圖

水圈的空間管理基本上可說是國土利用的管理，可依土地利用方式分成都會產業區、農林生產區及生態保護區^[5]（或簡稱為都會區、農林區及保護區）。在這三大分區中，由於土地利用密度不同，人類活動對於自然水系統的干擾程度有別，可依序以高、中、低來表示其定性上之差異。就土地利用的管理而言，對於干擾程度高者，要設法使其降低；而對干擾程度低者，要盡量防止其升高。就水流管理而言，要使每個大分區的水量使用、環境品質維護及相關物質輸送所消耗能源為最小。以下就這三個大分區的管理策略分別作簡要說明：

都會產業區

主要的土地利用為住宅、文教、工業及商業等相關活動密集、人口密度甚高的區塊，所消耗的水、能源及物質等之量體均甚大，對於水系統大循環的干擾程度極高。因此，從空間管理的角度來看，這個大分區不僅一方面應盡量限制其擴張，甚至另一方面還要設法使其逐步縮小，進行都市改造；在都市改造時納入治水因素，並考慮氣候變遷引起海平面上升之不利情勢，將低窪地區居民遷移至安全地帶。從水流管理的角度來看，都會區人口眾多，且多數居住或使用高樓，其用水量及污水量大且集中，供水及污水處理消耗大量能源。因此，如何降低能源消耗量而將污水處理回收再利用，就成為水流管理的一個重要課題。還有，如何降低自來水管網的漏水率也是一項值得重視的挑戰。

另外，關於都會區熱島效應的減輕對策也應多加重視。植物茂盛的綠色地帶、以及開放式水面空間對於緩和都會區的熱島效有很大的助益。因此，都會區內的綠地公園與周邊農林地面積的確保甚至擴大、被暗渠化或管道化渠道水面的恢復、開放式貯水空間的增加…等措施亦應積極投入。這些不僅可以緩和熱島效應降低空調用電量，而且亦可有效地提升生態環境品質。

農林生產區

為能建構人類與其他生物共存共榮的循環型社

會，包括都會、農林及保護區在內的整個跨流域水圈的水循環必須是健全的。因此，在農林區從事農業、林業及畜牧業的生產過程中，環境保護與環境品質提升的考量至為重要。例如農地具有蓄洪與補注地下水、林地具有保水與防止沖蝕、水田具有調節生態系統…等多種公益性功能。事實上，這些公益性功能的維護被認為是農林生產活動的副產品，顯得較為消極。若這些生產活動之評價持續偏低，以致其相關公益性功能難以維護，則應採取積極的作法；考慮將公益性功能內部化為農林生產價值的一部分，而非僅為副產品。如此才有助於在空間管理上維持農林區的穩定，以確保這些公益性功能的存在。

在農林區的水流管理上，不論是從水量、水環境生態、物質或能源的變化及移動的觀點來看，首先應將水及物質輸送系統健全化。這個系統必須具有的特色包括：(1) 改善水質所消耗能源為最少，(2) 創造優質的水環境，(3) 確保生物棲息場所及遷徙路徑，以及(4) 確保泥砂及營養鹽類運移暢通無阻。其次，應建構氮、磷再利用系統，將畜牧業排出富含氮、磷成分之污水處理並回歸農地，既可作為肥料又可避免水系統遭受污染。另外，為配合建構潔淨能源系統，利用小型水力發電及其他廢棄熱能，也是值得關注的項目。

生態保護區

在人類活動極少而未造成明顯干擾的地區，生物系統與水系統所構成的大循環系統早已達到自然的平衡狀態。對於這一部分水圈的空間及水流管理應以維持此一平衡狀態為最高原則。換言之，在生態保護區的土地利用與水資源利用均應予以嚴格限制，以避免破壞經長期自然演進而成的平衡狀態。

親水文化重建

長年以來由於水利設施興建與水利事業經營的結果，水的穩定供應及水害的逐步減輕已有顯著的進展，再加上人口朝向都會區集中，絕大多數的人們和水的接觸逐漸僅限於日常生活中不可或缺的自來水以及偶爾遇到的洪水事件。因此，對於水所帶來的恩惠與威脅幾乎變得沒有什麼感覺，也可說是喪失了大部分的親水文化。在這種情況下，不僅難以期待人們對水利事業的支持，更不用說對水資源的珍惜或對水環境的保護。這個困境必須予以突破，重新建立親水文化；其內涵包括認識水的價值、體會有水邊的生活、養成與水互動的意識…等。

親水文化的重建工作應從教育著手，可以分成學校

教育及社會教育等二個部分；前者是以未來世代的中小學生為對象的紮根工作，強調基本知識的學習；後者是針對社會大眾的推廣工作，強調實際生活的體驗。至於教材內容可包括永續理念、循環型社會概念、水與生物的大循環系統、水利設施、水圈管理、親水文化…等重點。社會教育部分因涉及社會大眾價值觀的重新形塑，故宜考慮事先培養地區性領導人，由其帶動日常生活體驗，自然而然養成新的價值觀。

配套措施

以上所述係就理念、價值及相關策略加以闡明，然而策略推行仍需有完備的配套措施，各種方案才足以實踐落實。依台灣的實況來看，配套措施大致可依技術、制度及法規^[4]等三個面向來思考，分別說明如下：

技術面

在永續理念與循環型社會價值觀的導引下，原來以供水防洪為目標的水利事業將逐漸擴大其範圍與尺度，因而在傳統上應用的技術顯然有許多不夠完備，需要提升加強，甚至有開發新技術的需求，例如：

- 水利設施之安全檢查、診斷及補強技術，包括大堤、隧道、堤防、閘門、淨水廠、污水處理廠、水力電廠、輸水系統及配水系統等。
- 泥砂產出、傳輸及沖淤等之監測與模擬，包括短期現象與長期演變等。
- 水庫通砂技術水準之提升，包括在台灣落實應用的實踐。
- 水系統大循環模式之建立，包括水汽、地面水、地下水、以及相關聯之物質及熱能傳輸。
- 水利事業經營績效率量化評估模式之建立，包括水量、水質與水環境之經濟、社會與環境效益。

制度面

為維持自然界水系統與生物系統的平衡狀態，並維護社會的公平正義，永續水利事業的經營所涉及的業務跨越政府體系的不同部門與不同層級，並且與許多民間機構有關。各個相關單位基於其分工職責，提出不同看法或意見雖是正當而且健康的，但顯然這些看法或意見的溝通與整合的機制有待建立。例如：

- 跨流域水圈及分區劃設機制之建立，包括都會區、農林區及保護區。
- 水圈中各分區管理機制之建立，包括空間管理及水流管理。
- 各部門之水圈基本資料產出與運用機制之建立，包括

水文、地文、人文、生態、污染... 等各類基本資料。

- 跨政府部門與民間機構溝通機制之建立。

■ 法規面

永續水利事業經營是一個長期而且辛苦的工作，有許多上述所要建立的技術與制度都是新的嘗試，必須經過一段時間的磨合、驗證、試用、改善之後才能確定其可行性。確定可行之後的每一項技術或機制就應予以法制化，成為相關機關、機構或個人遵循的依據。這裡所謂法制化主要是指行政機關訂定的規範、規則、辦法... 等。例如：

- 各類技術規範
- 水圈及分區劃設辦法
- 各類管理辦法

結語

1. 由於永續理念的帶動，原為消費型的社會正逐漸轉變成循環型的社會。在此情況下，自然資源的利用被嚴格要求必須達成循環利用與公平正義；水資源的利用亦不例外。
2. 在自然界水系統與生物系統所構成的大循環系統中，二者是互相依存且維持平衡狀態的；水資源的

過度利用將嚴重破壞此一平衡狀態，而致生物系統難以永續，因此維持水資源的永續至為重要。

3. 永續水利事業經營的主要策略有二，其一為水利設施效能維護與強化，包括營運、管理、維修、更新等，其二為跨域水圈管理，包括空間管理及水流管理等。
4. 經營策略之推行落實需要技術、制度及法規等方面的配套措施，例如建造物之診斷與補強技術、模擬與評估模式、水圈劃設及跨部協調機制、技術規範、管理辦法... 等的建立。

參考文獻

1. Brundtland Comission, 1987, Our Common Future: Report of the World Commission on Environment and Development, United Nations.
2. 聯合國環境與發展大會，1992，21 世紀議程，中國環境科學出版社譯。
3. 顏清連等，2002，台灣水資源問題之研析(二)，國立台灣大學水工試驗所，研究報告第 149 號。
4. 徐義人，2006，日本水資源之經營管理，中興工程科技研究發展基金會，SFRDESTE-06-HY-01-02。
5. 日本河川環境管理財團，2011，變革與水的 21 世紀，中興工程科技研究發展基金會譯，SFRDESTE-11-HY-01-1。
6. 顏清連，2014，莫拉克颱風災後國土保育治理思維－水利／水害觀點，土木水雙月刊，第 41 卷第 4 期。

曾文水庫防淤隧道工程

永續經營舉步艱
曾文水庫防淤隧道工程
共創水庫新未來