



利用物理性棲地品質驗證 生態檢核 之效益 — 以頓阿巴娜野溪流域 為例

田志仁 / 觀察家生態顧問有限公司 研究員、技術經理

「生態檢核機制」自 2007 年研發推廣，至今已累積 12 年以上之案例經驗。本文應用底棲棲地多樣性、水域環境多樣性、堤岸植被完整度、縱橫向連結性等物理性棲地指標，評估治理形式涵括傳統混凝土工法和考量生態設計的頓阿巴娜野溪流域。初步結果呈現在 6 年觀察期間，該溪在經歷自然災害與人為整治等擾動後，治理工程納入生態考量，其棲地品質與生態功能之恢復速度是為慣行混凝土工程的 2 倍以上，顯示良好操作的「生態檢核機制」有其正面效益。建議未來建立長期資料庫以因應海量的棲地評估數據，研議維持評估資料的質量與水準。

生態檢核是什麼？它有效嗎？

「生態檢核機制」自 2007 年在上游集水區發展運用，歷經 12 年以上之研發、試行、發展與推動^[1,2]，到今日中央管工程與前瞻計畫相關新建工程之全面實施，已成為臺灣在既有環境影響評估制度之外，唯一可將生態納入工程設計之可行制度^[3]。「生態檢核機制」在運用之初，導入工程流程之時機是在計畫核定前後，即將生態需求納入工程案眾多設計考量之一^[1,2]。「生態檢核機制」是臺灣歷經十年之民意、環團、生態、工程與機關等領域，多方協調溝通後，由下而上逐步推動的進步。生態檢核機制的主軸有二，一是生態專業人員參與，另一是民眾參與和資訊公開^[1,2]，其目的皆在於納入多元意見和專業領域，避免在單一視角下產生盲點，造成無法回復的損失。

然而，我們總是在生態大腸花論壇、城鄉河溪論壇等網路社群，甚至是在新聞媒體看到一件件被揭露，無必要性或是過度開挖的野溪治理工程後，辦理機關和工程單位總會出面澄清，說明該工程有辦理「生態檢核」，

所以不會有生態上之問題。當然這些說法往往引起網路鄉民們情緒上的對立和酸言。另外，公部門和其生態團隊，常舉出獲得金質獎或優良農村建設等，集聚資源打造的頂尖個案，呈現在生態上積極之作為，希望獲得民眾掌聲。然而這些獲獎明星身上的光彩，卻和公路上瞥見的野溪經的整治或改造模樣相比天差地別。這些由極端案例所構成的自身經驗，讓人對生態檢核產生質疑和不信任感，然而，我們所看到的案例是普遍的真實嗎？

河溪治理工程在良好的生態檢核的執行過程中，生態專業人員會根據預定工區的生態議題和棲地敏感度，給予相對應的生態友善措施建議^[1,2]，例如預定治理溪段位在森林等高度敏感區域旁邊時，就會建議該溪段在非攻擊岸處，迴避而不佈設護岸，或是以減輕手段設計砌石護岸以增加其孔隙度和柔韌性，最後甚至撒播植生原生草木加速復原以做補償植被損失，促進施工裸露面恢復。同時也會設置動物逃生通道或是緩坡，以供森林中可能潛在的動物上下護岸。然而，許多的作法其實是根據生態學學理、人類對各種動植

物有限的知識、零星的實驗和有限的調查資訊，去整合、推理和假設所獲得的。

筆者最常遵循的程序，是依照棲地－群聚－物種－個體等層次之優先順序，逐層界定議題，在每一個層次，依序擬定迴避、縮小、減輕、補償之策略，並思考對應的實作對策和措施。簡而言之的操作心法，是優先保留棲地，在棲地難以保留時，則設法保留棲地自我恢復潛力。

生態檢核機制整合多方專業領域，釐清災害成因，採取合理的工程治理手段等過程，是否對於生態系統之保護和恢復有所幫助？該怎麼知道在生態檢核中，一連串的努力、溝通、設計、投資和安全風險承擔，最後的確帶來正面的生態效益？在過去 12 年生態檢核發展歷程中，這個部分的研究極少，也缺乏整體之統計數據支持其有效性。在生態界和工程界仍停留在正面與負面個案論述的層級。

因此，筆者為驗證河溪治理工程中生態檢核機制實施在生態層面的效益，彙整頓阿巴娜野溪流流域長達 6 年之觀察和研究，應用簡易快速的物理性棲地評估指標，建立起一套兼具正負控制組，納入時間和空間維度的研究模型，用於比較在不同時期不同工程設計下，物理性棲地的恢復速度^[4,5]。這套研究模型希望未來也可以套用在其他流域或地區，作為在生態檢核中監測物理性棲地恢復之工具。

茶山頓阿巴娜野溪流流域具多元治理型態和豐富生態環境

頓阿巴娜野溪是有常流水之野溪，其位於嘉義縣阿里山鄉茶山村，隸屬於曾文水庫集水區之茶山子集水區，溪流長度為 4612 公尺，集水面積 314 公頃。頓阿巴娜野溪少受人為干擾，水質潔淨，是茶山地區的主要水源。該野溪鄰近人口約 4 百人之茶山村（珈雅瑪部落），以鄒族最多，亦混居布農族與漢人。部落經濟以農業與生態觀光與地方深度旅遊為主，近年以部落公園化為方向，結合頓阿巴娜野溪流流域的生態資源，發展出獨特原民文化和生態主題的民宿村（圖 1）。

頓阿巴娜野溪曾在 2009 年莫拉克颱風期間，最大三日累積降雨量達 2,704 毫米，在超過 200 年重現期距下，引發土石流災害，造成溪床淤積、河床抬升、流心擺盪不穩，導致兩岸嚴重沖刷及橋梁中斷，危及部落生財產安全。

莫拉克風災後，行政院農業委員會水土保持局南投分局與阿里山鄉公所，為保全部落、茶山國小與嘉 129 線道路等重要民生目標，在 2010 年至 2013 年間，在頓阿巴娜野溪投入 7 件整治工程，包括清疏工程、第一至第五期整治工程與上游崩場地處理工程等，以穩定河道，防洪導流，維持水源與保護下游聚落安全。並依各階段需求採用多樣化工法設計（圖 2）。



圖 1 茶山村珈雅瑪部落，生態旅遊和體驗是其重要經濟來源



圖 2 頓阿巴娜野溪各期整治工程位置、明細與現場概況

第一期至第三期整治工程（2011 年），為災後的即時搶災救險工程，避免災害擴大，採用傳統混凝土防砂壩與固床工之設計形式治理（圖 3），未考慮生態面向，也沒有執行生態檢核，本文中稱為負控制組。

前三期整治工程之後，為了兼顧在地生態資源之保育與永續利用，後續治理工程設計在防災之外，同時導入生態概念。因此第四期整治工程（2011 年）開始諮詢生態專家，使用砌石護岸作有限度治理，保留大部分自然溪段、岩盤隘口與瀑布，並鋪設稻草蓆保持土壤濕度，部分區域灑播草籽，加速濱溪植被生長。後續在原防砂壩上開口降低落差改善，現已成為當地民宿漂浮戲水生生態體驗之重要景點。

第五期整治工程（2011 年）進一步納入部落意見，以近自然的生態工法建構（圖 4），利用現地塊石

全段砌石並保留現地巨石，維持塊石底質和水流複雜性，營造多樣性棲地與自然景觀，保留生物通道與設置緩衝帶。在歷年枯水期，相較於第一期至第四期整治工程的溪水伏流或斷流，仍有地下水滲出形成地表逕流水，維持水域生態運作。

第六期整治工程（上游崩場地處理工程，2013 年），水土保持局開始導入生態檢核機制 [6]，在工程設計初期即邀集生態團隊參與，提出 7 項生態友善策略，包括迴避周邊森林與大樹、縮減固床工數量，與設計高通透性梳子壩、利用現有便道、導水維持地面逕流與加強沉砂池等方式，限縮混凝土使用與開挖面，減輕工程之生態衝擊，加速環境恢復速度（圖 5）。

第四期、第五期、第六期整治工程在本文稱為生態作為組，至今已融入溪流地景中，難在空照圖中發現。



圖 3 第一期至第三期整治工程是負控制組，以傳統工法施作



圖 4 第五期整治工程以近自然的生態工法建構



圖 5 第六期整治工程設計梳子壩，水陸域棲地恢復快速

頓阿巴娜野溪歷經多年災害治理，展現出臺灣難得的多元治理形式，同時呈現了野溪治理工程在不同階段的思維與工法，依其特性將其分成傳統工法區（第一、二、三期）、生態作為區（第四、五、六期）與自然溪段。水土保持局指定頓阿巴娜野溪為水庫集水區保育治理工程之示範區，獲得 105 年國家永續發展獎（圖 6）與 101-102 年優良農建工程獎。

茶山部落周邊食宿便利，儼然成為活生生之水土保持工程和生態教育、研究的重地。筆者藉其地利與方便，結合當地生態民宿，多次協助政府機關、大學和民間環境團體，在頓阿巴娜野溪辦理教育訓練和生態調查訓練，宣導生態保育之餘，同時活絡地方經濟，促進部落保育環境之熱情（圖 7）。



圖 6 國家永續發展獎在頓阿巴娜野溪現場評選

如何描述和量化一條野溪的棲地和生態功能？

生態檢核應用物理性棲地評估指標，描述和量化河溪的物理性棲地品質和相關生態功能，在歷年執行過程中，作者調整現行「河溪棲地評估指標」，就台灣地理環境條件和針對河溪治理工程的評估目的，作在地化與本土化之調整，以更完整呈現臺灣溪流生態的真實面貌。

「河溪棲地評估指標」是一快速評估河溪物理性棲地之方法，參考美國環境保護署針對溪流物理性棲地品質所制訂的「快速生物評估準則」(Rapid Bioassessment Protocols For Use in Streams and Wadeable Rivers) 第二版第五章^[7]所列之棲地評估方法，原用



圖 7 臺南大學生態暨環境資源學系水生物學戶外訓練課程

於支援在溪流中執行以魚類、底棲無脊椎動物（水棲昆蟲）和附著藻類為指標生物之「快速生物評估」法時，描述物理性棲地之方法。這個方法廣泛應用於美國的州級水資源單位。

在臺灣，則應用「河溪棲地評估指標」於評估河溪治理工程之生態影響上。水利署於 2016 年公告「水庫集水區工程生態檢核執行參考手冊」即納入^[3]，該手冊是臺灣目前最完整之生態檢核規範，工程會的工程生態檢核機制^[8,9]也引用之。「水庫集水區工程生態檢核執行參考手冊」^[3]利用「河溪棲地評估指標」高坡度部分作為快速棲地評估方法，成為制式工作項目之一。其用於評估野溪治理施工前、中、後之物理性棲地品質，可明確指出工程的影響，是屬於短期效應或是後續需要追蹤改善的重點，同時也提供工程設計和教育訓練之指導原則。

「河溪棲地評估指標」在臺灣之應用，常遭遇的一個問題，是該指標系統源於美國環境保護署^[7]，根據北美大陸之溪流「快速生物評估」需求所發展。其 10 項次指標項目、評分尺規與原則，是否適用於臺灣高山島嶼治理工程導向的需求？因此筆者在 2016 ~ 2017 年即協助水土保持局釐清評估需求愈範疇，建置適合臺灣河溪治理工程的生態評估指標^[4,5]。參考「河溪棲地評估指標」之精神和評量尺規，依臺灣河溪環境在地特性、治理工程特性和常見生態議題，歸併具相依關係之次指標，同時新設計「縱向棲地連結性」、「橫向棲地連結性」、「溪床裸露寬度變化」等新設指標，建立「野溪治理工程生態回復追蹤評估指標」，以強化評估河溪治理工程生態影響的應用潛力。

「野溪治理工程生態回復追蹤評估指標」使用 10 項次指標評估與描述河溪物理環境的四大面向，包括底棲棲地多樣性、水域環境多樣性、堤岸植被完整度、縱橫向連結性與河相變化等。應用次指標量化評估河溪物理性棲地的品質時，可視現場調查時目視可及約 100 公尺溪段內之環境狀況，依各項次指標所提供的評分尺規與原則，分別給予 0 ~ 20 分的評分，10 項加總積分最高 200 分。

「野溪治理工程生態回復追蹤評估指標」具科學性程序整合之評估方法，其優點是以環境利益為基礎，量化河溪的棲地品質，快速回報大量調查點的調查結果給決策者，由結果看出河溪環境需要提升改善的項目，以轉換為管理方針與公共政策。在實務上我

們也彙整各項次指標之精神與其對應的河溪物理環境重要面向，除了回饋保育對策及提供治理工程設計方案上，生態議題鎖定和對應友善措施建議之具體參考項目，也是相關河溪生態治理工程教育訓練，和民眾宣導之課程設計重點。

底棲棲地多樣性

底棲棲地多樣性可由「底棲生物的棲地基質」和「河床底質包埋度」2 項次指標描述，當多樣性底棲棲地比例越高，則無機性自然基質如卵石、礫石、塊石、大石和巨石等，和有機性自然基質如落葉、枝條、樹幹等越多，代表溪床有越充足多元的微環境和孔隙度，提供水生昆蟲、鰕虎、爬岩鰕與蝦蟹等底棲水生生物棲息、覓食、繁殖、躲藏、避難，可以供養越豐富多樣的水生生物越豐富。

底棲棲地常因河溪治理工程施工過程中，為了取用現地自然資材、維持通洪順暢或完工後驗收之美觀等原因，往往移除、打除溪床大石巨石與塊石，或是整平河道使之渠道化，最極端者是混凝土化後形成為三面光樣貌。或是在自然災害或施工過程中大量土砂進入水體，增加水體濁度，導致自然棲地基質與其中孔隙，因沉積物或土砂沉積覆蓋包埋而消失。以上自然或人為過程，均可能導致理想棲地基質的種類、面積與數量縮減，易造成棲地單一化、基質和底棲棲地多樣性降低，溪流緩衝抵抗人為與自然擾動能力降低等後果，溪床基質之生態服務功能因此衰減或消失。

生態檢核發已發展出較具生態效益之方法，避免對底棲棲地多樣性負面影響之作法，依序如下：(1) 優先保留自然溪段及其穩定多樣化的石質底質結構（迴避）；(2) 避免移除、整平、混凝土封埋溪床（迴避）；(3) 從源頭控制土砂來源，降低施工過程中開挖擾動地表之範圍（縮小），避免土砂堆置溪床，或將之推入道路下邊坡野溪（減輕）；(4) 強化土砂與濁度管理，如設置土砂控制設施或措施如沉沙池、施工遠離流水區等，防止土砂進入下游溪床（減輕）；(5) 完工後以拋鋪塊石或其他方式復原或營造基質多樣性等（減輕）。

水域環境多樣性

水域環境多樣性可由「流速水深組合」、「河道水流狀態」和「湍瀾出現頻率」3 項次指標描述，包括了不同流速和水深的排列組合如淺瀾 ($v > 30 \text{ cm/sec}$, $d < 30$

cm，急流淺水，激起水花）、淺流（ $v > 30 \text{ cm/sec}$, $d < 30 \text{ cm}$ ，緩流淺水無水花）、深流（ $v > 30 \text{ cm/sec}$, $d > 30 \text{ cm}$ ，急流深水）、深潭（ $v < 30 \text{ cm/sec}$, $d > 30 \text{ cm}$ ，緩流深水）、岸邊緩流（ $v < 30 \text{ cm/sec}$, $d < 10 \text{ cm}$ ）等 [10]，也考慮水量或基流量之多寡，和溪段中湍瀨的出現頻率。當以上各項因子交錯的複雜度越高，野溪就越可能容納各種物種如魚、蝦、蟹、水棲昆蟲等，和不同大小的成魚和仔魚。仔魚與蝌蚪利用岸邊緩流區覓食並躲藏掠食者，溪流中上層魚類偏好緩流深水與急流深水的空間，底棲魚類如爬岩鰍則偏好急流淺水等湍流棲地，偏好清潔性或好高溶氧的水生昆蟲也聚集於這區。

河溪中水量或水位高低的程度，直接影響水域生態系存續，當水量水深足夠時，水生動植物將有足夠生存的空間，可降低其生存壓力，增加其多樣性和豐多度，即生態基流量之概念。溪流水深應當維持在水生生態系需求之最下限，避免伏流斷流等導致溪河生態系崩潰消失的極端狀況發生。當旱季水深不足時，深潭或水窪可提供水生生物避難所，生態價值相對重要。

在河溪治理工程之設計上，往往以固床工和防砂壩，拓寬河道調整溪床坡降，當坡降變緩，淺瀨與深潭即可能因為土砂淤積而減少或消失，最極端之狀況是溪床渠底混凝土化。在施工過程中，常為了取用現地塊石等自然資材、通洪順暢或完工後驗收之美觀等，移除可激起水花的溪床塊石，打碎可以形成深潭的大石巨石，或是整平河道使之渠道化，形成淺流或漫流之環境。以上影響可能造成水流平淺、瀨潭消失、流速水深組合貧乏等單調化現象，最後導致水域環境多樣性喪失。

河溪常因眾多原因而斷流，包括壩體的上游鬆軟土石堆積後，地表逕流走地面下而伏流，或是上游有截流、分流及引水等人為取水工程，或是枯水期自然乾涸，或是淺薄漫流因蒸散或入滲等。當評估溪段乾涸斷流，表示溪流生態系已然崩潰消失。

水域環境多樣性之維持與復原方法，依序如下 (1) 優先保留全段或部分天然溪段或少見的水域棲地類型（迴避、縮小）；(2) 保留溪床 2 ~ 3 公尺以上大石或塊石不移除打除（迴避）；(3) 設計圖面維持河道自然起伏線不整平，或是設計 V 型斷面、低水流路、深槽導溝等集中水流避免漫流溪床（迴避）；(4) 以近自然工法設計和復原營造，參考施工前溪流之特徵，利用塊石拋鋪、砌石、弧形固床工、多階、深潭等自然工法設計，設計合理瀨潭頻率等方法加以改善等（減輕）。

河岸植被完整度

河岸植被完整度可由「堤岸的植生保護」和「河岸植生帶寬度」2 項次指標描述。涵括了堤岸濱溪植被帶的組成層次、型態和佔治理工程之長度比例和寬度。濱溪植被帶的重要性，在近年的研究中逐漸揭露，濱溪植被帶是溪流生態系及陸域生態系間之緩衝過渡帶，具重要的生態功能和高生物多樣性，包括了連結水陸域生態系統、制洪蓄洪涵養水源、穩定堤岸保持水土、減少土壤侵蝕、調節養分循環、提供遮蔽穩定水溫水質、提供溪流生態系食物與能量來源、緩衝人為干擾與污染等。濱溪植生帶的生態敏感度，以多層次最優，喬木優於灌叢，草本次之；在林相上是天然林優於人工林，竹林、果園次之，草生地較差，道路建物與混凝土鋪面最差。

濱溪植被帶同時也提供動植物的棲地、避難所和縱橫向移動通道。許多動物如翠鳥、兩棲爬行類、小型哺乳類、蜻蛉、螢火蟲等豐富之生物，仰賴濱溪植被帶之庇護。食蟹獾是濱溪帶水陸連結功能的重要指標動物，其在陸域棲息，在水域環境覓食，頻繁進出濱溪植被帶與溪流間，是常見於臺灣野溪的哺乳動物。溪流型蛙類與龜鱉類在溪河環境棲息，在濱溪陸地繁殖，缺一則將阻斷溪流型蛙類生活史，導致其難以存續。

濱溪植被帶在工程領域，往往被視為沒有經濟效益的草生荒地或雜木林，而在河溪治理過程，因設置施工便道與土砂機具堆置場、疏浚土砂回填於護岸上、施工超出預定施工範圍以外、工程慣行的驗收前整理和地方民眾藉工程之勢進入開發利用等等原因而被移除。治理工程清除邊坡植生、溪畔林地與大樹後，導致多層次自然濱溪林地面積與棲地核心區域縮減或消失，濱溪緩植生帶提供的緩衝功能和連結水陸域棲地功能，也常因施工便道或農地等人為設施沿溪縱布而阻斷。濱溪植被帶在完工後的混凝土量體上植被難以生長回復。

治理工程對濱溪植被帶之負面衝擊，可藉由良好的治理工程設計與施規畫下而有效降低，依序如下：(1) 工程設計時優先採迴避原則，保留層次完整涵括喬木、灌叢和草本植被的良好濱溪帶；(2) 限制濱溪帶之開挖面積或限縮護岸回填區，保留其中大樹母樹，保留後續恢復所需之多樣化微棲地和植物種源（迴避、縮小）；(3) 施工便道與堆置場所設置優先使用既有便

道、空地和生態敏感度低之區塊等（迴避、縮小）；(4) 如果因工程或安全之必要性，而不得不移除濱溪植被帶，則可採補償之原則，規畫有效之植生復育計畫，灑播原生適生之草種、灌木和喬木，甚至實行二次植生，以確保完工後裸露面有機會在數年後恢復原生複雜多層次之理想濱溪林樣貌；(5) 設計多孔隙材質護岸，或在溪床留存灘地或回淤區提供濱溪植被生長，均有利植物生長，恢復植生帶寬度（減輕）；(6) 避免因驗收或長官視察作過度的坡岸整理（迴避）。

縱向棲地連結性

「縱向棲地連結性」次指標，用於描述河溪縱向廊道暢通與阻隔程度，量化溪流水生生物包括魚與蝦蟹類，在評估溪段中縱向溯游所會遇到的最大阻隔，以量測垂直落差呈現。自然野溪落差低，因為塊石交疊形成連續灘潭和各種流速水深組合，足以提供水生生物為了生存、生育、避難、迴游所需之順暢縱向移動通道，尤其是迴游生物如鱸鰻、日本禿頭鯊、湯鯉、枝芽鰕虎、毛蟹與陸蟹等，需依賴良好的縱向連結以完成其生活史。因此除非遇到瀑布等特例，縱向阻隔在自然野溪並不常見。縱向順暢的溪流溪床，也可以提供陸生生物覓食、移動與逃生之縱向路徑。從更大的環境與生態學尺度來看，在臺灣切割破碎之環境條件與極端降雨與洪水的氣候條件下，溪流良好的縱向連結性，可以維繫上下游水生生物族群之連結，流域中不同族群之個體可以交流、擴散、遞補，以分散物種存續所面臨之環境、氣候或人為干擾等風險，在基因層級亦可避免長期族群隔離所造成之遺傳品質劣化。

臺灣河溪經過連年治理，上下游主支流布滿防砂壩、固床工等人造橫向構造物，其落差往往數公尺以上，形成溪流水生生物縱向移動過程中，一道到難以躍過的牆。高聳的防砂壩與固床工往往直接截斷溪流，限制水生動物縱向移動。枯水期時缺乏雨水補注，農用截水，加上橫向構造物設置其上游因鬆軟土砂淤積，溪水往往伏流入地而形成斷流現象，也是造成水生生物之縱向阻隔的原因。因此應予以正視和納入評估。

河溪中橫向構造物對水生生物族群與棲地之縱向阻隔，對於溪流魚類有以下影響：(1) 阻斷迴游性生物之生活史：當迴游性生物在不同生長階段，往來河海之間繁殖與棲息之需求被阻斷，則族群難以存續，尤其是在

目前迴游生物仍是豐富的東部、東北部與東南部河溪，縱向通道之維持至為重要；(2) 造成河溪棲地破碎化：限制溪流內各棲地水生生物族群間之交流與補充，也限制水生生物可以利用的溪段、空間資源與分布範圍，在學理上容易造成各族群基因層面之劣化、單調化和極端化；(3) 降低水生生物之活動空間與避難選擇：水生生物在颱風洪水或極端降雨來襲前，為避免被洪水沖走，常朝上游或是支流移動避難，當避難路徑被阻斷，則可能影響族群在災害中的存續。

「縱向棲地連結性」之評估標準建立，是彙整相關研究數據，歸納臺灣常見原生魚類之跳躍高度以 50 公分為限。當橫向構造物落差低於 50 公分，則評估為無或低縱向阻隔；當落差高於 50 公分以上，則可能對水生生物游溯產生縱向阻隔，視流量多寡而定；當落差高於 100 公分以上時，則原生魚類難以通過。

根據聯合報願景系列「尋找溪望救水路」專題，「回家是一條撞牆之路，魚群擱淺的悲慘命運」報導，其引述了人禾基金會於 2018 年 3 月北部地區豐水期時，在貢寮野溪針對固床工縱向阻隔的觀察調查、居民訪談與影像紀錄。這次調查記錄了魚類前仆後繼試圖跳躍過約 1 公尺落差之固床工至上游產卵的過程，結果跳躍上溯的魚類全數撞上固床工壁面，無一成功躍過。筆者從拍攝影像中估計，在水量豐沛，魚類可以衝刺之潭區深度充足之下，12 公分左右之溪哥、苦花、馬口魚等常見溪流魚類，跳躍高度可達 70-80 公分，仍難以達到一般固床工之落差。

較友善的防砂壩與固床工設計，可提供水生生物游溯與動物縱向通行。維持基本「縱向棲地連結性」的生態友善措施，依序如下：(1) 優先從整體流域考量橫向物設置必要性，避免設置新壩（迴避），進而拆除或改善既有舊壩；(2) 其次是精算工程與安全需求，盡可能減少壩體數目與壩體高度（縮小）；(3) 然後再使用較友善的防砂壩與固床工設計如開口或高通透壩體設計、或連續式低壩取代高壩、降低落差等減輕縱向阻隔之設計，可提供水生生物游溯與動物縱向通行；(4) 最後才考慮斜坡、魚道、疊石等輔助設施（減輕）。

橫向棲地連結性

「橫向棲地連結性」1 項次指標，用於描述溪流水陸域間之連結功能和阻隔程度。主要是針對縱向構造

物如護岸，或施工便道建置、濱溪植被或溪畔林移除等，以上行為對於周邊動物，尤其是依賴水陸域連結之食蟹、龜鱉、蛙類與陸蟹等，可能阻隔切斷其進出溪流與陸域棲地之橫向通道。「橫向棲地連結性」指標以量測評估溪段的坡岸／護岸坡度和佔溪段之比例而呈現。在自然野溪中，自然的溪流坡岸形成多樣的坡度，可供動物上下通行的緩坡與路徑選擇多，兩岸濱溪植物帶茂密完整，可提供動物順暢橫向移動通道與隱蔽環境。因此除非遇到岩壁等特例，橫向阻隔在自然野溪問題不大。

然而在河溪治理後，各型護岸坡度往往近乎垂直，落差可達數公尺，延綿溪岸，形成動物難以跨越的長城。傳統型式的護岸，切割阻隔水陸域棲地與通道，不但阻斷動物回家的路，同時也阻隔了人的親水機會，增加急難救援之難度。

以護岸為主的人造縱向構造物，對濱溪動物有以下影響：(1) 切斷動物進出水陸域之路徑：尤其是須從森林進入溪流覓食的「橫向連結性」指標生物食蟹獾，受護岸設置影響最大，其他如白鼻心、鼬獾、臺灣野豬、麝香貓、山羌，甚至是梅花鹿等，也是筆者在溪畔設置紅外線自動相機時，常拍攝紀錄之哺乳動物，這些動物皆有進出水陸域間，以滿足棲息、覓食、飲水、避難等需求，而現行傳統高陡之護岸設計，往往限制這些動物利用溪流之需求；(2) 阻斷濱溪動物之生活史：棲息於溪流的蛙類和龜鱉類，仰賴濱溪陸地作為繁殖場，棲息於森林底層的陸蟹，則需以溪流為通道降海繁殖，當這些生物之生活史被護岸阻斷後，影響其族群存續；(3) 人造設施形成陷阱區：小型動物如小型哺乳類、蛙類、兩棲爬蟲類或龜鱉類等，常受困於護岸和固床工之間，或周邊相關的人造設施如靜水池、消能池、U型溝等，這些人造設施如果沒有設計逃生通道，將形成陷阱區，造成動物受困死亡，或是大水時無路逃生。

較友善的護岸設計與施工管理，可保留動物橫向通行路徑。生態友善措施依序是：(1) 優先從整體流域考量護岸設置必要性，避免設置新護岸（迴避），甚至拆除或改善既有舊護岸；(2) 其次是精算工程與安全需求，盡可能保留自然坡岸，減少護岸長度，避免連續性混凝土垂直護岸（縮小）；(3) 限縮護岸上方之回填區

與裸露面，可促進植被恢復與掩蔽處（縮小）；(4) 然後再考慮使用較友善和多樣化的護岸設計，如砌石等多孔隙工法、緩坡、低矮化設計、善用支流匯口作為橫向通道等（減輕），在海拔 800 公尺以下，另需考慮攀爬能力較差的龜鱉類需求；(5) 在材質選擇上，自然邊坡優於乾砌和其他多孔隙設計，其次是漿砌，混凝土最差（減輕）；(6) 最後手段才是設置動物坡道或是通道等輔助設施（減輕）。

河相改變程度

利用「溪床寬度變化」這項次指標評估野溪治理前後，溪床寬度的改變比例，描述河溪治理工程對河相之改變程度。溪床寬度除了直接影響溪流河相、水域棲地多樣性與功能外，同時反映在溪床的兩岸植生罩蓋度與營養累積程度上。溪寬較窄，植生罩蓋度佳之溪流，水溫偏低也相對穩定，降低溪床因曝曬而高溫之機率，有助於良好水域生態維持。溪寬較窄，植物有機碎屑容易進入溪流食物鏈中成為食物與能量來源。溪床寬度亦反映了動物從兩岸森林移動往來至流水區之距離，其間距離越小，動物利用溪流移動的困難度與風險越低，友善度與可利用性越高。

河溪治理為了確保有足夠通洪空間疏排洪水，往往根據通洪計算結果，拓寬河道溪床至不會溢淹致災的寬度，完工後溪床往往寬廣裸露，大幅改變溪流的棲地與河道樣貌，影響溪流生態存續與恢復。在經驗上，河溪上游與支流之坑溝與溪溝（寬約 5~6 公尺），拓寬後溪床寬度的增加的比例越高，往往可達原溪床寬度之 3 倍，在溪幅稍寬之野溪（寬約 8~10 公尺），拓寬幅度平均約為原溪床寬度之 1.5 倍。如果有滯洪空間等之特殊考量，則拓寬幅度更大。溪床拓寬幅度越大，對於水域棲地環境、濱溪植被、高灘地植被、溪中小島等之移除面積越大，溪流之生態功能在施工後往往改變、消失而不易恢復。

為鼓勵與提醒工程設計人員避免過度設計，回歸最低限度之合理近自然溪寬，建議減少「溪床寬度變化」的生態友善措施，依序如下：(1) 優先從整體流域考量溪床拓寬之必要性，避免於棲地與生態功能良好之溪段施工（迴避）；(2) 其次是精算工程與防災安全需求，盡可能降低溪床拓寬幅度（縮小）。

應用「野溪治理工程生態回復追蹤評估指標」於頓阿巴娜野溪流域

筆者應用「野溪治理工程生態回復追蹤評估指標」10項次指標，評估頓阿巴娜野溪流域中各期治理工程的物理性棲地品質，以瞭解治理工程對野溪棲地之影響程度與恢復速度。

蒐集彙整頓阿巴那野溪流域 2011 至 2016 年間歷次現勘與調查所累積之資料 [4-6,11-13]，重新檢視評估數據，量化評估不同工程設計之物理性棲地品質。嘗試從時間與空間尺度，建立頓阿巴娜野溪的物理性棲地基線和恢復模型，作為各機關後續建立溪流基礎生態資料時之可行範例。

如何比較不同時期不同設計工程下生態之恢復速度？

頓阿巴娜野溪各期整治工程，施作之年份和終始時間不一，難以直接比較，必須經過標準化處理方能互相比較。因此筆者嘗試將開工到竣工這段時間，壓縮成一個時間點，稱為施工階段。從經驗上論，在施工階段除非具有極優良之工程設計與施工管理，在臺灣正常施工過程中，因整地、布設施工便道、土砂機具堆置場、工程施作、伏流斷流與驗收前整理等，與各種難以控制之行為如超越河裡施工範圍或不當開挖等影響下，施工階段期間各項物理性指標評分往往低落，因此筆者在呈現暫時將這施工階段壓縮，視其為一個時間點和經工程擾動後棲地恢復的起始點。

在施工階段以前，預定施工溪段因尚未受到人為干擾，因此可視為自然溪段正控制組；在施工階段以後，則可觀察不同治理工程設計下溪段之指標值恢復速度。因此可以藉上述方法，建立頓阿巴娜野溪物理性棲地品質之自然波動幅度，和在各種工程設計思維下，產生的不同恢復曲線和模型。這些資料，除了可以用以呈現生態檢核的效益，也用以預測在這條野溪中其他工程的恢復潛勢。

圖 8 是將頓阿巴娜野溪各期整治工程之 10 項指標評估值，利用散點圖比較各工程的數值，在時間維度中之升降與恢復狀況，以描繪各區域或溪流在自然狀態與受干擾後之恢復基線，以提供人為改善與未來周邊治理工程參考。其中 Y 軸是施工前後之時間序列，以月分作為基本單位，各工程竣工後觀察 3~6 年；X 軸則是各工程在每一個評估時間點的 10 項指標評估值的加總積分，最高 200 分。正控制組為 2 組自然溪段，以亮色實心點表示，各施工溪段施工前之指標值也可視為正控制組之一，其分布幅度表示涵括野溪受各種自然因素影響，包括枯豐水期與季節在內的自然波動範圍；負控制組是未考慮生態之傳統工法區（第一、二、三期），以深色空心點表示。生態作為組則是涵括生態考量區（第四期）、生態工法區（第四期）和生態檢核區（第六期）之溪段，以深色實心點表示。筆者同時將歷次生態調查／勘察中所紀錄之水陸域物種標示在圖中，用以初步瞭解物理性棲地品質與生物棲息／活動間之關聯性。

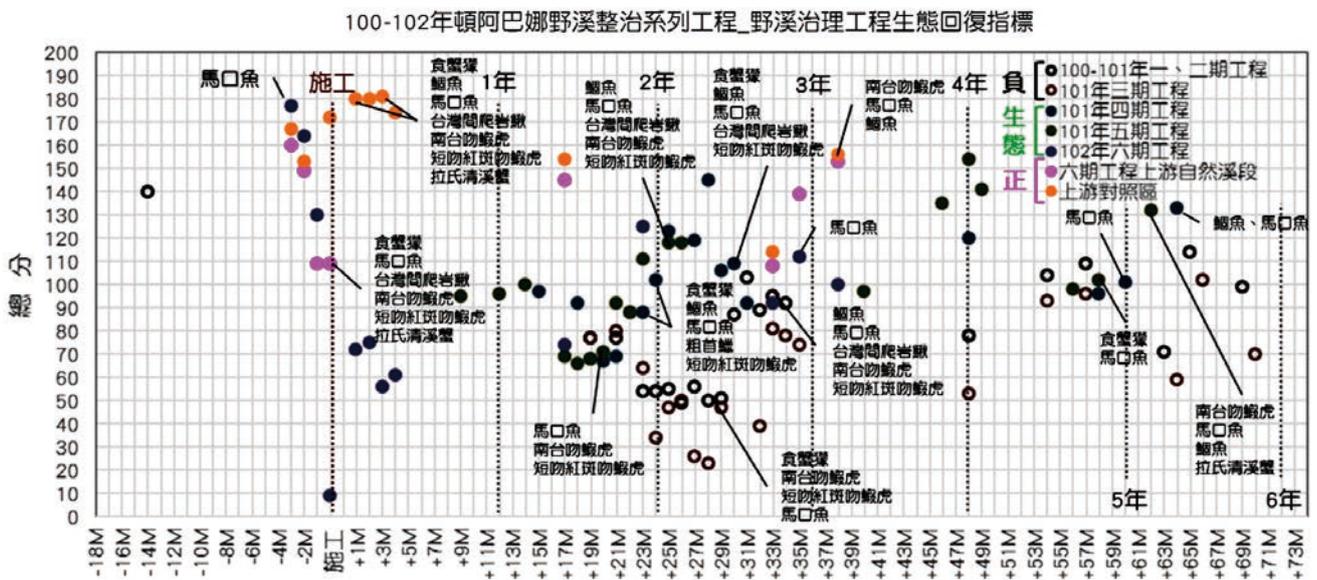


圖 8 頓阿巴娜野溪流域 10 項物理性棲地指標 6 年評估成果彙整

導入生態思維的工程案例恢復速度優於傳統混凝土工法

綜觀頓阿巴娜野溪各工區不同評估時間點，10 項物理性棲地指標之總分分布範圍（圖 8），顯示各工區在施工前介於 130 ~ 180 分間，和作為正控制組的自然溪段介於 110 ~ 185 分間差異小，可以綜整推估頓阿巴娜野溪物理性棲地總分的自然波動範圍介於 110 ~ 180 分間。當生態作為組或負控制組的總分恢復達正控制組自然波動範圍的低限 110 分以上時，即可視為恢復至自然溪段水準。

各工程在災後和施工階段，總分降至最低點約 10 分，可視為物理性棲地品質開始恢復之起點。生態作為組之工程，約需時 1 年 11 個月以恢復至正控制組的低限 110 分，負控制組傳統工法區至少需時 4 年 9 個月以上恢復時間。在完工後 1 ~ 3 年間，生態作為組各評估時間點的總分分布，高於負控制組傳統工法區。從以上數據可以證實，執行生態檢核／生態考量／生態工法，導入生態專業思維與設計的治理工程案例，其物理性棲地恢復之速度，高於傳統工法案例。也證實可從不同工程設計與施作方法，預測不同恢復趨勢。

結合物理性棲地指標數據和生物調查數據可歸納出警戒／改善之閾值

生態學是描述生物和環境間交互作用的一門學科，撰文至此，是時候提問本文的介紹的物理性棲地指標所描述的棲地品質，是否可以反映和生物分布或與其行為間之關聯性？

筆者嘗試將歷年觀察和調查野溪過程中紀錄之水生生物和食蟹獾資料^[4-6, 11-13]，匯入阿巴娜野溪各工區各時期指標評估資料中（圖 8），希望能歸納出物理因子和生物因子間的關係。頓阿巴娜野溪常見魚類有鯛魚、臺灣馬口魚、粗首鱖、臺灣間爬岩鰍、南台吻鰕虎、短吻紅斑吻鰕虎等，另有拉氏清溪蟹與粗糙沼蝦。結果從圖 8 中可以發現，無論水生生物或是食蟹獾，在頓阿巴娜野溪之分布有一個約 50 分左右的下限值，此時仍有食蟹獾、南台吻鰕虎、紅斑吻鰕虎和臺灣馬口魚等出現，低於這個下限值，則難發現生物蹤跡。

筆者歸納物理性棲地指標和生物記錄等資訊後，建議以生態作為組魚類分布總分之下限 70 分為警戒值，總分低於 70 分時即需觀察警戒，因物理性棲地之品質下降劣化，可能對評估溪段水生生物造成壓力和

負面影響；總分低於 50 分整體生物記錄之下限值時，顯示該溪段整體環境條件已不適合水生生物之生存，和支持食蟹獾之覓食活動，如果不是自然因素所導致，則應採取改善行動，降低人為影響，避免棲地品質與生態功能繼續惡化。以上所建議的警戒／改善的閾值，應隨著中長期勘查、記錄和調查的數據累積，而作更精確的調整。

分類個別指標恢復模式估計恢復速度

分析個別指標的恢復狀況，主要可以分成「漸隨時間恢復」、「難隨時間恢復」、「枯豐水期與降雨影響大於工程影響」三種模式。

「漸隨時間恢復」的指標有溪床自然基質多樣性、河床底質包埋度、堤岸的植生保護、河岸植生帶寬度等 4 項，屬於底棲棲地多樣性與堤岸植被完整度。無論是負控制組傳統工法區或是生態作為組工程，皆有隨時間而正向恢復的趨勢。筆者彙整與估計不同組別在數值上恢復至正控制組最低限所需要之時間，顯示生態作為組工程之恢復速度，遠高於負控制組之現象（表 1）。

以溪床自然基質多樣性為例（圖 9），第四期工程保留自然溪床底質、第五期工程完工後拋鋪塊石營造石質底質（減輕）、第六期工程縮小工程擾動面、保留自然溪床等措施，皆能保留溪床自然基質多樣性的恢復潛勢，小於 10 個月即可恢復到正控制組下限，高於負控制組傳統工法區整平溪床渠道化後，需超過 2 年 6 個月後方能恢復。

以河岸植生帶寬度之恢復為例（圖 10），第四期工程與第六期工程限制開挖面（縮小）、保留大面積森林成為種源（迴避）之作法，有利於促進坡岸濱溪植被帶之恢復，恢復時間需時 2 年。第五期工程因水患災害和施工中未限制開挖面等因素，完工後裸露面大，所以恢復稍慢。負控制組傳統工法區因兩岸為植物難以生長的混凝土護岸，且有農地與道路等干擾，幾乎沒有恢復潛勢，估計恢復時間遠多於 5 年 10 個月以上。

表 1 依各指標散點圖估計生態作為組與負控制組之恢復時間

指標	生態作為組 第四、五、六期 工程	負控制組 第一、二、三期 工程
溪床自然基質多樣性	< 10 月	> 2 年 6 月
河床底質包埋度	< 9 月	< 1 年 7 月
堤岸的植生保護	> 2 年 6 月	>> 5 年 10 月
河岸植生帶寬度	> 2 年	>> 5 年 10 月

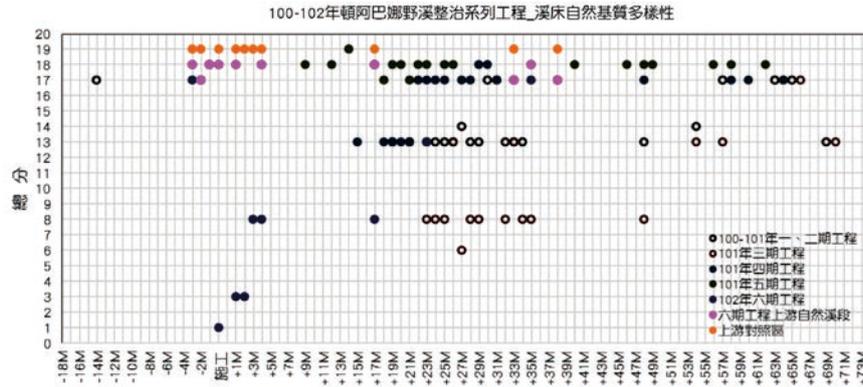


圖 9 以溪床自然基質多樣性為例，指標評估值隨時間逐漸恢復

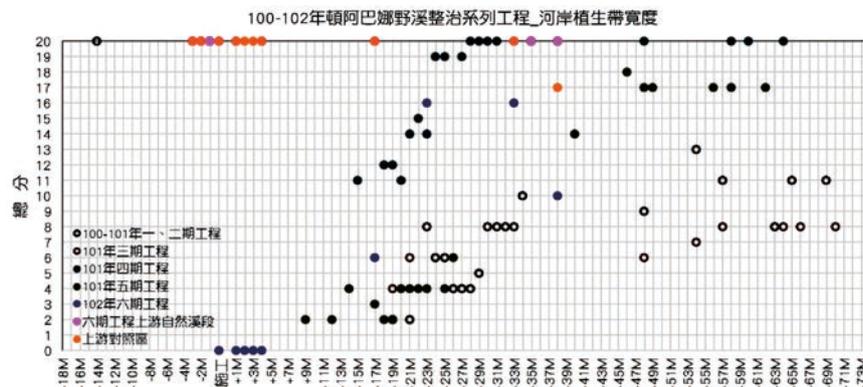


圖 10 以河岸植生帶寬度為例，指標評估值隨時間逐漸恢復

「難隨時間恢復」的指標有縱向棲地連結性、橫向棲地連結性、溪床寬度變化 3 項，無論是負控制組傳統工法區或是生態作為組工程，評估數值在完工後即穩定持平，難隨時間而有正向恢復的趨勢。換言之，這 3 項指標的評分，決定於工程設計形式選擇之當下，例如防砂壩、固床工與溪床間之落差，護岸的坡度和材質，或是河道拓寬幅度等。完工後短、中期內自然力難以介入改變硬性工程結構，失去自然恢復潛勢，除非經由後續的人力介入改善。因此在工程初期將這 3 項指標所代表之生態功能和棲地需求納入設計考量，至為重要。

以橫向棲地連結性為例（圖 11），負控制組第一、二、三期工程，全段護岸皆為 1：0.3 接近垂直之混凝土構造，不利各種動物攀爬進出，其評分是零分趴底，至近完工後第 6 年，仍然無恢復跡象。生態作為組第四期與六期工程，保留自然坡岸，或護岸使用砌石之多孔隙材質，因此動物的橫向連結與通道狀況良好。生態作為組五期工程雖使用 1：0.3 漿砌石護岸，在坡度上仍不適合各種動物上下，因此在 2014 年完工後數年未觀察到中型哺乳類動物在此出沒^[11]，直到

2017 年砌石護岸長出草木與灌叢，恢復易攀爬和足夠掩蔽後，方發現食蟹獾活動之排遺，2017～2018 年經由紅外線自動相機監測^[12,13]，拍攝食蟹獾與麝香貓等中型哺乳類，利用護岸與固床工壩翼垂直角處，踩著樹根和砌石攀爬上下護岸之影像（圖 12、圖 13）。即使如此，五期護岸仍不適合小型動物如蛙類或小型哺乳類通行，可能受困溪床，因此評分介於第四、六期工程與負控制組之間。

「枯豐水期與降雨影響大於工程影響」的指標，包括流速水深組合、湍瀨出現頻率、河道水流狀態等 3 項，皆是與水域環境多樣性相關的指標（圖 14、圖 15）。從正控制組散佈廣泛偏向兩極的分布範圍，可以歸納出當在豐水期時，水域環境多樣性偏高，枯水期時則偏向單調的現象，顯示降雨量對於這 3 項指標之影響，可能不亞於工程形式之影響。儘管有降雨量因子干擾，數據分散而無規律，仍可以觀察到，生態作為組比負控制組有更多機率得到更高的評分。這是一件好事，顯示具有生態設計的治理工程，水域環境多樣性和變異性可能更為高。目前的數據證實難以以上的假設，需作更多的觀察，使用更細緻的分析方法試圖釐清這種可能性。

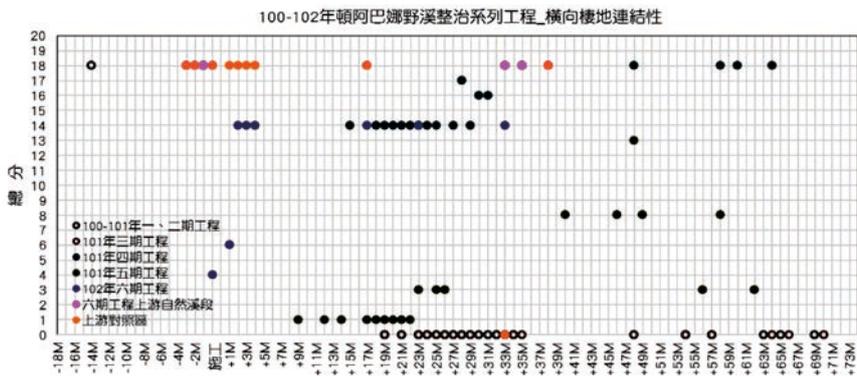


圖 11 橫向棲地連結性難隨時間恢復，設計時應納入生態考量



圖 12 利用紅外線自動相機紀錄中型哺乳類食蟹獺白天上下長滿樹木灌叢的砌石護岸



圖 13 利用紅外線自動相機紀錄中型哺乳類麝香貓夜晚上下長滿樹木灌叢的砌石護岸

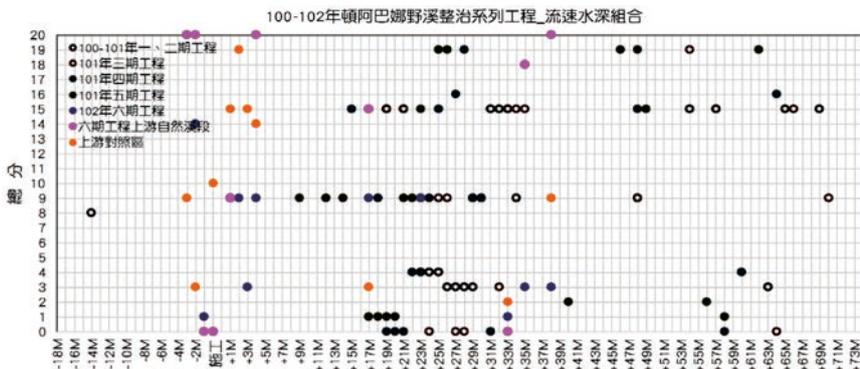


圖 14 以流流水深組合為例，受枯豐水期影響大，生態作為組之變異較負控制組高

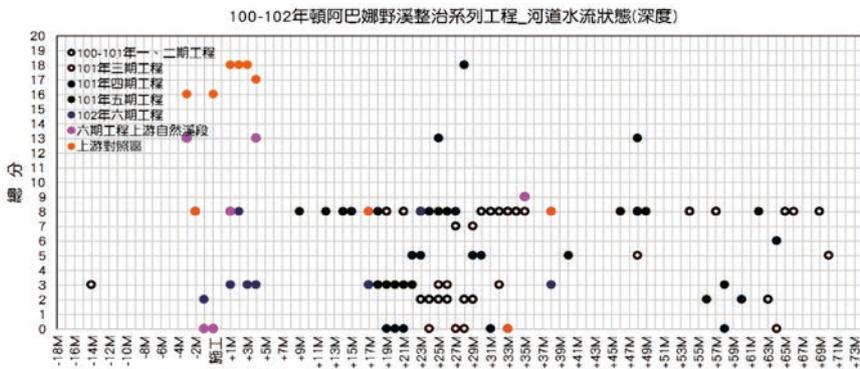


圖 15 以河道水流狀態為例，受枯豐水期影響大，生態作為組之變異較負控制組高

結語

本文以頓阿巴娜野溪為觀察對象，證實採取生態作為或導入生態檢核的治理工程，其物理性棲地包括

底棲棲地多樣性、堤岸植被完整度之恢復速度較傳統混凝土治理工法快，縱向和橫向連結性較佳，水域環境多樣性變異較大。過程中建立頓阿巴娜野溪流域之自然基

線，和經過天災和人為治理工程干擾後的恢復曲線，並搭配既有生態調查資料建立警戒和改善之閾值。

筆者建議，未來應就個別流域或區域，應建立適地之基線、恢復曲線與警戒／改善值，方能作時間與空間上的評估資訊比較。

從個別指標值的分析中，亦歸納出保留自然溪床、縮小工程擾動面和營造塊石底質等措施，有利於底棲棲地多樣性之恢復；限制開挖面、保留大面積森林成為種源之作法，有利於促進坡岸濱溪植被帶之恢復。

本文也指出，縱向橫向棲地連結性和溪床寬度變化，難以自然恢復，需從工程早期設計階段即納入設計考量方能確保生態效益。

最後回到最初的問題，生態檢核它有效嗎？筆者在本文所觀察的結果顯示，生態檢核機制在河溪治理災害治理的安全需求、自然環境條件與機關治理規範的層層限制下，利用迴避保留自然河溪棲地之彈性有限，然而在良好確實的規劃執行縮小、減輕和補償之策略與措施下，棲地仍有機會保有自我恢復之潛勢。後續，仍然需要更細緻之觀察標的與實驗設計，和更多之研究資源投入，取得更多實例和證據，回饋機制之檢討調整。

未來展望

以上自頓阿巴娜野溪流域所建立之研究與分析系統，適用於臺灣河溪治理工程的生態檢核作業，可提供各機關後續建立生態檢核基礎生態資料庫時之可行範例。本文所述之物理性棲地指標，僅適用中高海拔高坡降河溪，低海拔下游河段和區域排水，未來仍需根據臺灣低坡降的河溪環境特性作指標項目作調整。

物理性棲地指標是瞭解生態現況的工具之一，應參考其他面向的生態資料與專家建議，避免過度窄化與簡單化而低估野溪的生態獨特性，也需持續思考物理性棲地指標與生物因子間之連結關係。在使用本文所述的物理性棲地指標和研究與分析系統的同時，我們也應認知，野溪被破壞後的棲地恢復，不代表獨特的生態相與物種會回來。

生態檢核機制在中央管工程全面實行^{[8][9]}後，可以預見其實行範圍將會隨時間而越趨擴大，未來也將會累積海量的物理性棲地指標數據。因此建立一長期資料庫，常態性和系統性的收集台灣各地河溪背景資料，避免這些資訊隨時間流逝，具有彙整記錄當代環境變遷的重大意義，也可供做未來劣化環境重建的依據。除了資

料庫建立外，如何維持生態調查、評估、檢核等從業人員之專業素質和水準，以確保物理性棲地評估資料的品質，將是未來生態和工程領域必須面臨之課題。

參考文獻

1. 黃于坡主編，水庫集水區工程生態檢核成果彙編，經濟部水利署，台中市（2015）。
2. 黃于坡主編，水土保持工程導入生態保育—生態檢核之運用，行政院農業委員會水土保持局，南投（2016）。
3. 經濟部水利署，水庫集水區工程生態檢核執行參考手冊，經濟部水利署台北辦公區，台北，第2-4頁（2016）。
4. 觀察家生態顧問有限公司，105年度工程生態保育措施推廣，水土保持局委託專業服務案成果報告，南投（2016）。
5. 觀察家生態顧問有限公司，106年度工程生態課題分析及復育評估，水土保持局委託專業服務案成果報告，南投（2017）。
6. 觀察家生態顧問有限公司，水庫集水區落實生態檢核機制及保育治理需求評估，水土保持局委託專業服務案成果報告，南投（2013）。
7. Barbour, M.T., Gerritsen, J., Snyder, B.D., and Stribling, J.B. *Rapid bioassessment protocols for use in wadeable streams and rivers*, EPA 841-B-99-002, Office of Water, US Environmental Protection Agency, Washington, DC, pp. 5-1-5-31 (1999).
8. 行政院公共工程委員會，公共工程生態檢核機制，行政院公共工程委員會工程技字第10600124400號函（2017）。
9. 行政院公共工程委員會，公共工程生態檢核注意事項，行政院公共工程委員會工程技字第1080200380號函修正（2019）。
10. 汪靜明，大甲溪水資源環境教育，經濟部水資源局台北辦公區，台北市（2000）。
11. 觀察家生態顧問有限公司，103年度工程環境友善措施評估與建議，水土保持局委託專業服務案成果報告，南投（2014）。
12. 觀察家生態顧問有限公司，生毛樹溪等集水區（含幼葉林大規模崩塌地區）環境友善評估，水土保持局南投分局委託專業服務案成果報告，南投（2017）。
13. 觀察家生態顧問有限公司，南投分局轄區水庫集水區環境友善及生態檢核措施管理計畫，水土保持局南投分局委託專業服務案成果報告，南投（2018）。

作者介紹

作者田志仁現職觀察家生態顧問有限公司的研究員兼技術經理，嫻熟相關之案例實作、制度和評估方法研發與生態效益研究。自2013年起參與生態檢核制度發展歷程中各重要階段，包括2013～2015年間曾文、南化、烏山頭水庫治理及穩定南部地區供水計畫中，水利署、水土保持局、林務局與公路總局等單位之生態檢核；2015～2019年協助水土保持局建立生態檢核相關制度與執行專業委託案；2018年起執行前瞻基礎建設計畫高雄市和屏東縣水與安全之生態檢核。作者專業涵括環境工程、溪流生態與環境微生物，業務與研究方向著重於河溪治理工程和相關流域開發等人類干擾行為，對於河溪生態系統產生的影響，並尋求改善之道。