

南投種瓜坑溪還溪於野之自然解方

洪煒甯^[1] 邱渝方^[1] 陳弘恩^[1] 梁閔智^[1] 廖雯慧^[2] 李霽修^[2]
邱彥瑜^[3] 張緯東^[4] 許秋容^[5] Peter Chesson^[6] 陳樹群^{[1]*}

摘 要 種瓜坑溪以自然解方為基礎拆除堤防及固床工的復育策略，強調還溪於野的自然演替及生態功能。研究方法以五層分類法分析南投縣種瓜坑流域特性，並介紹了監測系統的設置，用以評估農村水保署南投分署種瓜坑溪整治工程對環境的影響。本研究透過數值模擬，驗證了這些整治措施在洪水期間的有效性，尤其是在增強生態系統韌性及提高生物多樣性方面的成效。本研究案例強調自然解方的全球標準在種瓜坑溪的具體實踐，並指出自然解方不僅有助於環境恢復，也能夠促進當地居民對生態保護的理解與參與，實現人與自然的和諧共生。本研究為推動自然解方在台灣乃至全球的應用提供了實證支持，並展示了在應對氣候變遷挑戰中的潛在效益。

關鍵詞：自然解方、還溪於野、氣候變遷、生態系統、韌性滯洪

Nature-based Solutions for River Rewilding in Zhongguakeng Creek, Nantou

Wei-Ning Hung^[1] Yu-Fang Chiu^[1] Hung-En Chen^[1] Min-Chih Liang^[1] Wei-Hui Liao^[2]
Chi-Hsiu Lee^[2] Yen-Yu Chiu^[3] Wei-Tung Chung^[4] Chiou-Rong Sheue^[5]
Peter Chesson^[6] Su-Chin Chen^{[1]*}

ABSTRACT Embankments and groundsills were removed as part of a restoration strategy based on Nature-based Solutions (NbS) for river rewilding to restore natural stream conditions and ecological functioning of Zhongguakeng Creek. The research employed the 5-Level River Morphology Classification to analyze the watershed characteristics and established a monitoring system to assess the restoration efforts. Numerical simulations confirmed the effectiveness of these measures, particularly during flood events, where they enhanced ecosystem resilience and promoted biodiversity. The Zhongguakeng case study aligns with global standards for NbS, highlighting the efficacy of NbS in environmental restoration and its ability to engage local communities in ecological protection. This case also provides practical support for promoting NbS in Taiwan and globally, demonstrating its potential benefits in addressing the challenges of climate change.

Keywords: Nature-based Solutions (NbS), River Rewilding, Climate Change, Ecosystem, Flood Retention Resilience

一、前 言

近年來，受氣候變遷影響，極端和不規則的降雨增加了集

水區和溪流發生洪水和土石流的風險 (Dietrich and Krautblatter, 2017; Schlögel et al., 2020)。台灣的降雨具有集中性和季節性的特徵，短延時強降雨增加土壤侵蝕和坡地崩塌的機率，而侵蝕作用降低了植被覆蓋，進一步減少了土壤的穩定性，加劇

[1] 國立中興大學水土保持學系

Department of Soil and Water Conservation, National Chung-Hsing University, Taichung, Taiwan, R.O.C.

[2] 農業部農村發展及水土保持署南投分署

Nantou Branch, Agency of Rural Development and Soil and Water Conservation (ARDSWC), Ministry of Agriculture(MOA)

[3] 彰化師範大學地理系

Department of of Geography, National Changhua University of Education, Changhua, Taiwan, R.O.C.

[4] 亞際工程技術顧問有限公司

Asia-Tech Engineering and Technical Consultants Co., Ltd

[5] 國立中興大學生命科學系

Department of Life Sciences, National Chung-Hsing University, Taichung, Taiwan, R.O.C.

[6] 國立中興大學生命科學系/美國亞利桑那大學生態與演化生物學系

Department of Life Sciences, National Chung-Hsing University, Taichung, Taiwan, R.O.C.

Department of Ecology and Evolutionary Biology, University of Arizona, USA

* Corresponding Author. E-mail: schen@nchu.edu.tw

了坡地自然環境和生態系統的變化。這些變化不僅改變了物種分布和土壤結構，還破壞了溪流棲地。此外，水資源的變化影響了地下水位和土壤濕度，對環境穩定性構成了更大的威脅。這些因素共同作用，使集水區和溪流的环境安全面臨嚴峻挑戰，亟需採取各種管理策略來應對。自然解方 (Nature-based Solutions, NbS) 目前是全球應對氣候變遷的主要策略之一。這一概念最早源於世界銀行在 2008 年發佈的《生物多樣性、氣候變化和適應：世界銀行投資中基於自然的解決方案》，而世界保育聯盟 (IUCN) 在 2009 年《聯合國氣候變遷綱要公約》第十五屆締約方大會的立場文件中開始積極推廣自然解方 (NbS) 的概念。

IUCN 在 2012 年正式將自然解方 (NbS) 納入其 2013-2016 年計畫的三大工作領域之一。此外，歐盟委員會也將 NbS 納入 H2020 計畫，並投入一系列研究專案來加強 NbS 的實證基礎 (Maes and Jacobs, 2015)。在 2016 年，IUCN 認為 NbS 涵蓋了過去幾十年各國為恢復生態系統服務而採取的各種措施 (Cohen-Shacham et al., 2016)，例如生態工程 (Ecological Engineering, 簡稱 EE)、基於生態系的防災減災 (Ecosystem-based Disaster Risk Reduction, 簡稱 Eco-DRR)、綠色基礎設施 (Green Infrastructure, 簡稱 GI)、水資源綜合管理等。這些方法早於 NbS 的提出，它們在恢復生態系統服務和相關措施方面具有許多共同點，不僅可以整合到 NbS 概念中，還有助於未來發展 NbS 行動框架。綠色基礎設施和生態工程等領域在過去一直致力於結合工程技術和生態學知識，旨在保護、恢復、改造或創建新生態系統。這些生態系服務有時可以通過傳統的「灰色基礎設施」或「灰綠混合基礎設施」來實現 (Mitsch, 2012; Anderson and Renaud, 2021)。生態工程將自然動力學融入基礎設施設計中，這也是 NbS 的核心特徵之一。這些基礎設施帶來多種好處，如增強生物多樣性、改善水質，以及減少洪水和乾旱的影響 (Beechie et al., 2013)。此外，這些基礎設施還可以提供遊憩機會，並通過生態旅遊促進當地經濟發展 (Palmer and Palmer, 2014)。相比傳統的工程方法，這些 NbS 基礎設施通常維護成本更低 (Wamsley et al., 2020)，並且有助於提升河流管理的長期可持續性。

歐盟執行委員會在 2019 年提出了自然解方 (NbS) 的定義，並 2020 年進行了修訂。最終，在 2022 年的第五屆聯合國環境大會上，193 個聯合國成員國一致通過了對 NbS 的定義：「採取行動來保護、保育、修復、可持續利用和管理自然或已改變的陸地、淡水、沿海和海洋生態系統，以有效應對社會、經濟和環境挑戰，同時增進人類福祉、生態系統服務與韌性，以及生物多樣性。」NbS 強調人與自然之間的相互聯繫，提供了解決潛在社會挑戰(如水安全和糧食安全)的機會，同時有助於適應和減緩氣候變遷。如今，自然解方 (NbS) 已從一個具體的概念發展成為應對氣候變遷的標準化指標工具 (IUCN, 2020)，使實踐者能夠將 NbS 的設計和實施進行標準化，並透過現有的生態系統方法和工具來執行，特別是那些具有可操作性和參與性的工具和方法。NbS 因其理念容易理解，很快被許多領域採納 (Cohen-Shacham et al., 2016)。然而，為了充分發揮 NbS 的影響力，仍需克服一些挑戰，包括在實踐和操作中缺乏科學嚴謹性，以及概念和框架之間的不一致性 (Cohen-

Sacham et al., 2019)。這些框架通常涉及多個領域，例如永續城市和基於生態系統的適應方法 (Raymond et al., 2017; Ruangpan et al., 2020)。在過去的幾年中，許多研究提出了評估 NbS 項目、定義替代行動方案以及解決其缺乏績效計算的方法 (Narayan et al., 2016; Wendling et al., 2018; Shah et al., 2020)。這些研究一致認為，如果 NbS 被有效地實施，它可以廣泛地為利害關係人提供社會、生態和環境方面的益處。

過去的研究建議使用經濟、社會和環境領域的指標來評估 NbS 的績效 (Kabisch et al., 2016)，但大多數框架過於側重於社會層面，往往忽略了自然環境科學的領域 (Shah et al., 2020)。此外，如何將全球政策轉化為國家和地方層面的政策和法律框架，以促進 NbS 的進一步主流化和規模化，仍然是一個挑戰 (Acharya et al., 2020)。這種問題在亞洲國家尤為突出，由於經濟發展、人口增長和價值觀的多樣性，許多發展中國家同時面臨著環境退化的問題 (Wesenbeeck et al., 2019)。

隨著都市化進程加快了氣候變遷影響，臺灣的淺山自然環境正逐漸退化。為了保護森林生態系統並減少對傳統灰色基礎設施的依賴，農村水保署南投分署在種瓜坑溪地區採用了混合灰綠方式及以自然為基礎的適應策略，進行系統性規劃，旨在提升生態系統服務。種瓜坑溪位於淺山區域，擁有豐富的生態多樣性和環境敏感特性，二十餘年前的固床工及護岸溪流整治工程，雖然達到了保護右岸檳榔園農地土地流失的問題以及防洪效果，但時至今日相關工程已年久失修，且右岸土地皆為荒蕪，已無農作經濟需求 (南投分局轄區 111 年度生態檢核執行及民眾參與推動計畫, 2022)。混凝土構造物的阻擋，使當地的生物與溪流形成隔閡，因此決定藉由拆除右側護岸，並營造右岸作為滯洪區及建立濱溪帶生態。本研究根據 IUCN(2020) 提出的自然解方 (NbS) 框架，透過科學方法進行施工前後的各種環境分析，結合河川現場調查、環境監測及水力數值模擬分析，評估工程方案是否符合 NbS 八大準則，並量化分析與傳統工程方式的差異，期能在種瓜坑溪具體實踐自然解方的全球標準。

二、種瓜坑溪集水區

河川行為受到河相特性的影響，在進行防洪規劃和溪流復育時，必須先了解河川的型態。基於此，本研究參考陳樹群等人(2012)的研究，使用以空間分層和營力特性為基礎的台灣河川型態五層分類法，以明確定義河川行為的尺度。該分類法將河川型態按空間尺度從大到小分為三層，分別為第一層流域特性、第二層水系特性和第三層主流特性。種瓜坑溪集水區位於南投縣國姓鄉，屬烏溪流域之子集水區。該集水區面積僅約 1677 公頃，流域規模較小。由於區域內大部分為森林覆蓋，因此在這三層的流域、水系及主流近百年來變化不大，可視為基礎資料。

該集水區特性主要受四陵砂岩及階地堆積層兩種地質條件所控制 (圖 1a)，在下游工程點位處的河道土砂主要來自階地堆積層，而階地堆積層因接近工程點位，可運移河床質偏向細粒，泥砂遞移率 (sediment delivery ratio) 較高。至於大面積的四陵砂岩則具備抗冲刷特性，因此河道保持陡峻特徵。種瓜

坑溪為常流水流域，屬於丘陵地形，流域內並無明顯崩塌情形(圖 1b)。

由於種瓜坑溪為四級河川(圖 2a)，主流長度約 7,370 公尺、集水區之地面平均坡度約 6.9%。流域圓度為 0.418，流域形狀偏圓，上游水系在橫向空間發展，形成樹枝狀水系且流域上游在四陵砂岩區呈現兩大支流型態，流域的切割程度顯著，河道較為陡峻。在圖 2b 中，當距離溪口工程點位約 4000 m 時，大部分的支流匯集進入主流，漸漸形成狹長型的流域，下游受到兩側護岸的束縮限制，影響下游的低級序河川發展。由於上游偏圓且雙支流的流域水系，具有同時匯集流量的特性，因此下游的洪水風險較高。

種瓜坑溪流域的主要地形為丘陵，流域上游的四陵砂岩具有較高的硬度和耐風化性，坡面較為穩定，故河道可下切深度較大，故低級序的河段具更大坡度。種瓜坑溪的各河段的平均高程、坡度分布情況如圖 2c，一級河川的平均坡度為 16.8%、二級為 8.9%、三級為 6.2%、四級為 2.9%，根據野溪定義「河段平均坡度大於 4%，且集水面積小於 2000 公頃之溪流」(朱芳儀等人, 2018)，一至三級河川為 V 型窄深河谷、易發生土砂災害的野溪特性。而整治河段位於四級河川下游，平均坡度為 2.1%，屬於 U 型寬廣的河川。本區為典型由 V 谷轉為 U

谷之溪流，屬於易發生洪水災害的區域。

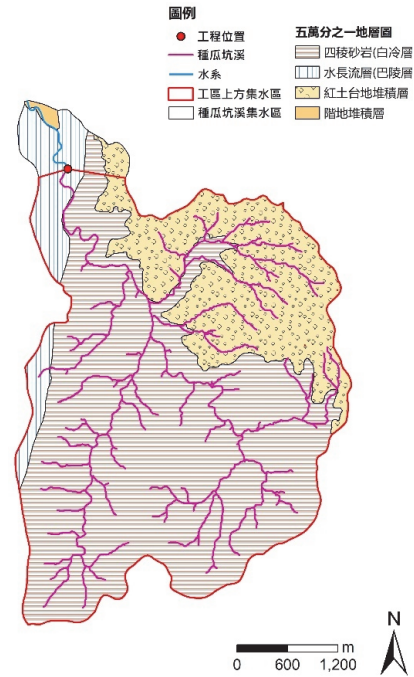


圖 1 種瓜坑溪集水區地質圖

Fig.1 Geology of Zhongguakeng watershed

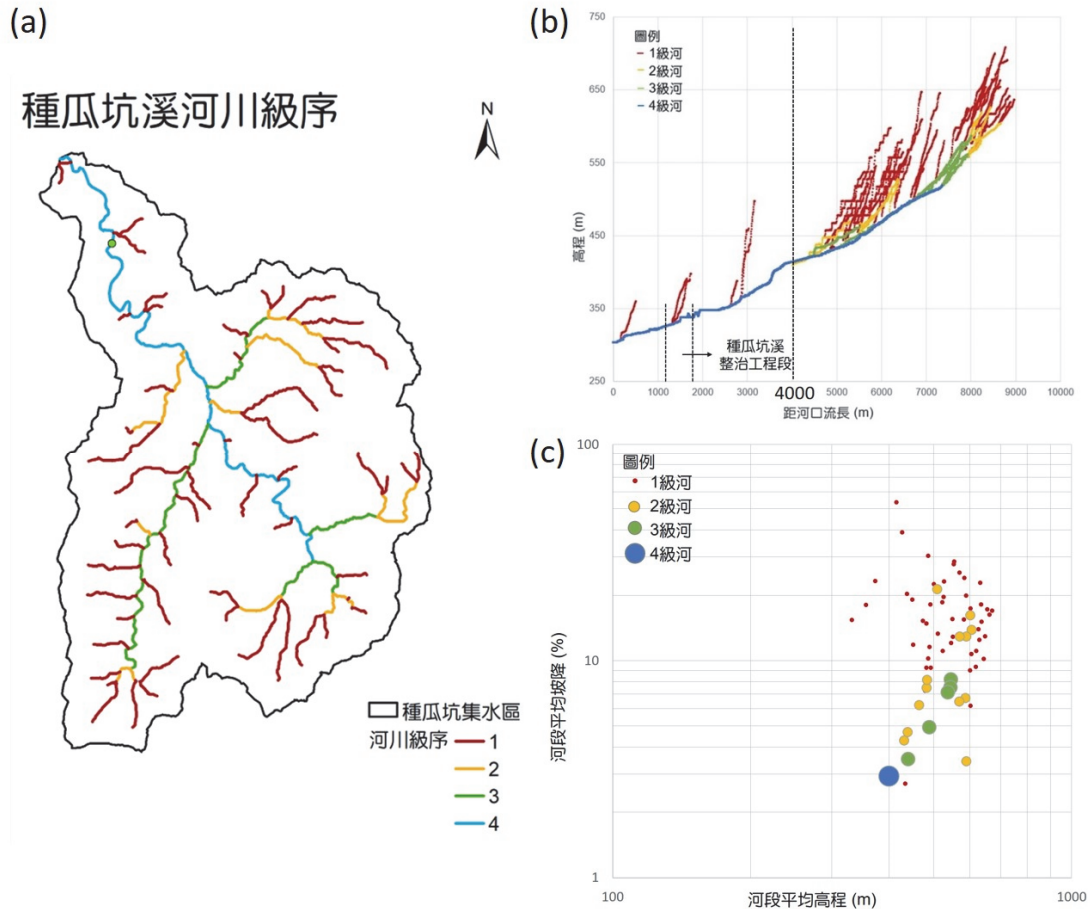


圖 2 種瓜坑河流域 (a) 河川級序分布, (b) 各級河川縱剖面圖, (c) 各級河段高程坡度特性比較圖

Fig.2 Zhongguakeng watershed : (a) distribution of stream orders, (b) longitudinal profiles, (c) relationship between elevation and slope

三、溪流整治與評估

台灣河川型態五層分類法的第四層為河道特性，指河川在特定研究區段內具有一致的河床質或水流特性，這些區段通常是工程施作的範圍，並且可透過數值模擬進行洪水歷線的演算。第五層則為棲地特性，通常集中在特定点，主要用於分析水域及濱水帶之物理性棲地環境特徵，例如水流的潭瀾結構、河床質粒徑組成、濱溪植物分佈等。這兩層特性極易受氣候變遷或是人為開發的影響，因此在進行洪水防治與溪流生態營造，必須深入了解這兩層的河相特徵。

1. 溪流整治歷程

在歷經 921 大地震造成土砂鬆動及 2001 年桃芝颱風強降雨後，種瓜坑溪河階地頻繁遭受河道沖刷和土壤流失的影響。當時為保護居民私有土地免於流失，於 2001 年進行了野溪整治工程，包含興建橫向構造物、固床工和護岸等設施。除部分左岸為天然岩盤外，上游兩岸及下游右岸均建有超過 4 公尺高的堤防或護岸，並在河床上設置了多座連續混凝土固床工。過去野溪整治往往忽視溪流自我修復及其生態功能，以人為觀點興建縱、橫向構造物，造成生態棲地不連通與河床地形阻隔等問題。固床工使得泥沙在上游淤積，細化的泥沙顆粒促進了植物在河道中的生長，進一步限縮了溪流的流路。此外，種瓜坑溪還面臨外來種入侵的問題，如象草、小花蔓澤蘭和水蘊草等。儘管二十多年前的溪流整治工程有效達到了防洪的效果，但隨

著時間推移，相關設施已經年久失修，鋼筋外露，固床工上游淤積問題也導致溪水斷流現象。除了固床工上淤下淘造成的高程落差加劇外，更衍生了護岸基腳淘刷及堤防內水無法排出等困境，生態縱橫向的不連續現象也日益加劇（圖 3）。

評估種瓜坑溪所面臨各種問題，經農村水保署南投分署與國財署、林業署、地方地主等協調土地所有權，並與學術研究單位、生態團體及地方居民等共同探討解決方案。最終採「還地於河」方案（圖 4），局部恢復溪流自然樣貌之工程，以敬畏大自然的力量為宗旨來解決洪水問題，將河岸右側護岸移除，改為拋石緩坡，以減緩河岸淘刷；河道內部份固床工移除，以恢復自然坡度，部份固床工打開缺口營造潭瀾交錯的棲地環境且引導自然水流。其中一處固床工位於彎道處，打開三個缺口，缺口深度由深到淺分別為中央、右岸及左岸，中央缺口最深與下游之河床齊高，目的為引導水流於河道中央，避免淘刷左岸擋土牆。打除固床工恢復原本略陡之河床坡度，會增加河床質的淘刷，因此在河道內以隨機方式拋大塊石以增加河床糙度來減緩流速，同時營造自然棲地及流況多變特性。但還地於河主要是以水流觀點來增加河川水域範圍及兩側的滯洪空間，並以此營造自然棲地。本研究更將復育方向進一步推行至「還溪於野」，主要是讓大自然自行調節，允許自然過程塑造溪流，修復受損的生態系統，恢復退化的景觀。方法上係以最小擾動達到韌性防洪整治的效益，同時能恢復藍綠帶連結性、增加縱橫向生物通道，營造自然棲地及韌性滯洪空間等目標。通過還溪於野，動植物的自然節奏創造出更野性、更具多樣性的棲息地。

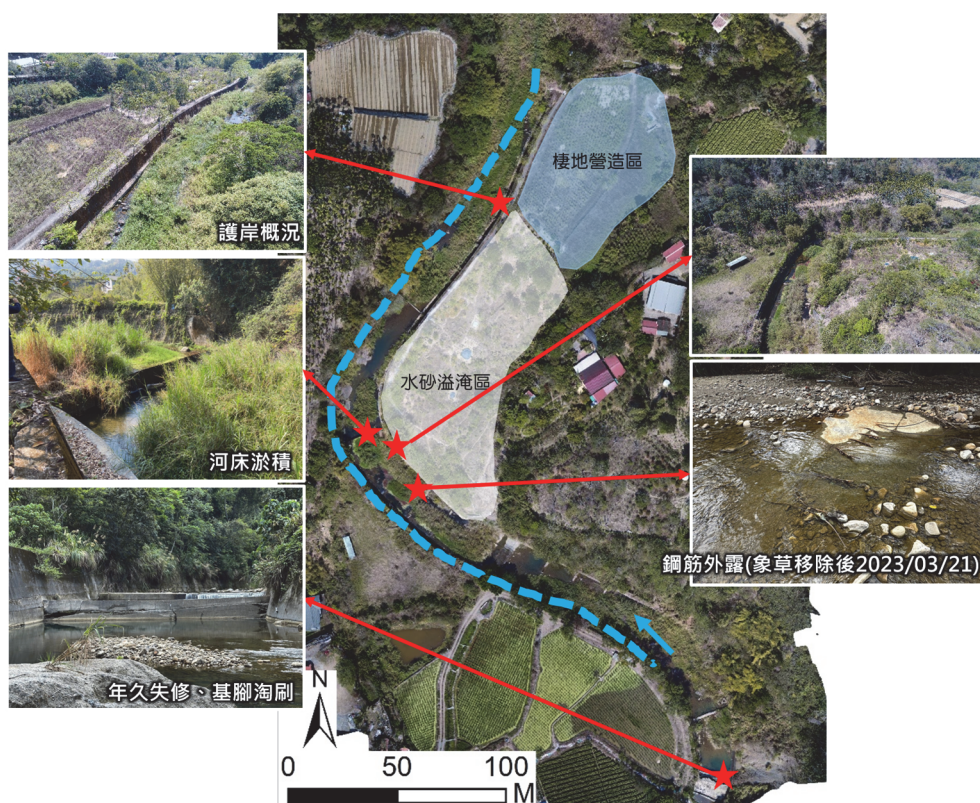


圖 3 南投國姓種瓜坑溪施工前概況 (2023/03/10)

Fig.3 Overview of Zhongguangkeng Creek before construction (2023/03/10)

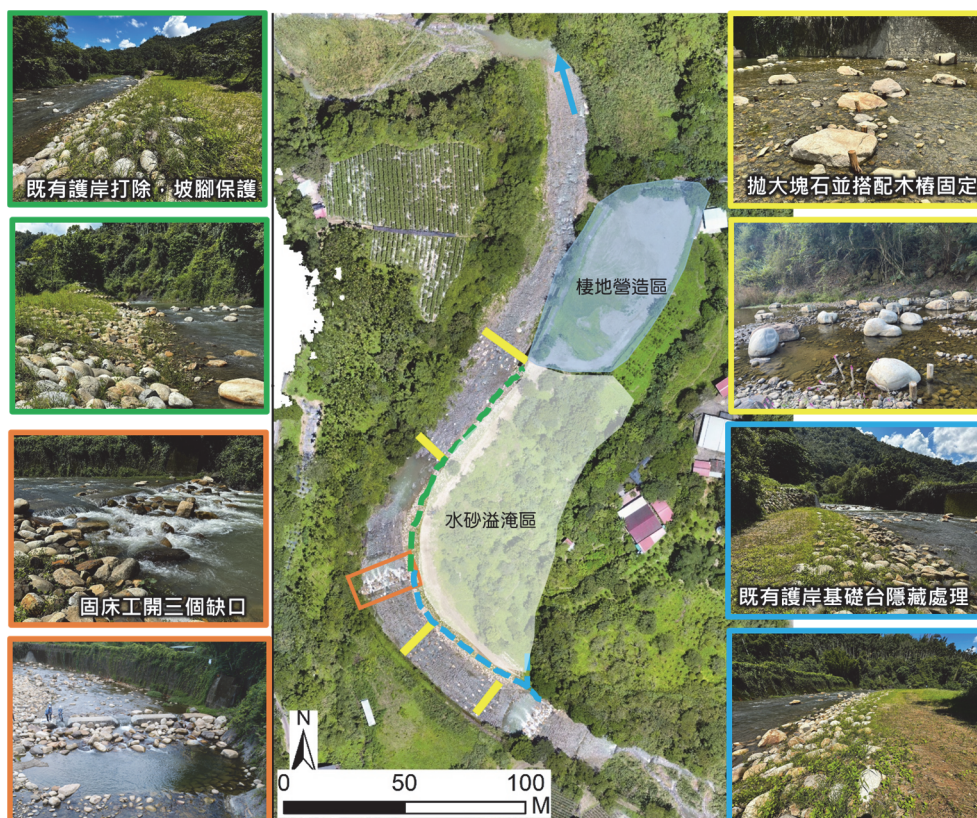


圖 4 種瓜坑溪野溪還溪於野工程內容 (圖片邊框顏色與空拍圖之標記處相對應)

Fig.4 Image borders are color-coded corresponding to markings on the aerial view (image borders are color-coded corresponding to markings on the aerial view)

2. 監測系統

本研究為探討環境與水文變化對於種瓜坑溪之影響,因此建置環境與水文監測儀器,主要監測空氣溫濕度、水溫、水深以及降雨量。感測器模組建置主要是以 Arduino 開發板結合終端感測器,數據收集透過 LoRa 無線傳輸,將數據回傳到電腦端。感測器模組配置,空氣溫濕度與水溫感測器 (圖 5(a))、雨量監測儀器 (圖 5(b))、水深監測儀器 (圖 5(c))、攝影機水深監測 (圖 5(d))。數據紀錄方式,空氣溫濕度與水溫感測器是每半小時監測一次;雨量監測儀器是每當雨量累計達到 0.2 mm 時進行計算;水深監測儀器是每 10 分鐘監測一次;攝影機水深監測為即時監測。

3. 整治工程前後差異

種瓜坑溪右側護岸拆除,即可增加滯洪空間並營造自然生態環境,當洪水來臨時將部份洪水暫留於滯洪空間,對下游反而有減緩水流之功效。不僅保全下游保護對象之安全,亦增加滯洪空間野生動植物之棲息環境及碳匯,並有益於生態系進行自我修復功能,以恢復藍綠帶連結性、提升環境親水功能,營造人與自然共生共存之環境。

本研究在種瓜坑溪進行多次現地調查,分別為施工前 (2023/03/10)、施工中 (2023/08/22)、完工後 (2024/03/22) 及完工後經歷 2024 年 6 月 23 日、6 月 28 日、7 月 1 日、7 月 2 日之豪雨事件後之地形 (2024/07/05),利用無人載具 (UAV) 測量,建立研究試區之數值地表模型 (DSM),各期影像的空間

解析度最佳可達 1 cm,並且至少能達到 10 cm 的解析度範圍。種瓜坑溪一期復育工程中護岸共拆除長約 161 m、高約 3 m,其中上游護岸基礎保留長 61 m、深度約 1.5 m。

將種瓜坑溪工程區由上游至下游,以 A、B、C 三處橫剖面進行地形變化說明 (圖 6)。施工前 (2023/03/10),由於河道中有多處固床工,使河床淤積坡度減緩;在施工中 (2023/08/22),河道及右岸植生皆因施工過程而部分移除,使地形有明顯變化情況,A、B 剖面之右岸受工程影響部分喬木移除,而 C 剖面受工程擾動較少,卻因喬木補植及氣候因素,使植生復育良好情形;完工後進入乾季 (2024/03/22),植生恢復緩慢,因此 A、B、C 剖面的高程變化不大。在 2024 豪雨事件後 (2024/07/05),發現 A、B 剖面受上游泥砂及漂流木於右岸滯洪區堆積之影響,高程有些微變化,C 剖面因水流已於前段滯洪區減緩流速並消能,補植喬木並未受到河水冲刷影響而倒伏。

於圖 7 正攝影像可看出,一期工程拆除護岸、拆除固床工及河道清淤後,河道及右岸高程大幅下降,增加了水流的流動性。台灣的乾濕季分明,在乾季時 (2024/03/22),整體流量及流速下降,此時的土砂運移力較低,泥沙於河道堆積,形成多個小型沙洲;而雨季時 (2023/08/22、2024/07/05),水流量增大,將沉積物帶往下游。一期工程完工後,在常時水流時,水位仍控制在拋石緩坡內。觀測經歷 2024 年豪雨事件後 (2024/07/05) 之地形,水流進入右岸的水砂溢淹區,達到逕流分攤、減緩流速及消能等功效,導致右岸的草本植生倒伏,而上游的細顆粒

泥砂及漂流木覆蓋。圖 6 的正攝影像 (2024/07/05)，經歷 4 場豪雨後，沉積物主要堆積於水流進入轉彎處之前段右岸，在 A、B 剖面中可以看到右岸高程的些微變化且右岸拋石受水流衝擊影響，有部分運移情形；然而 C 剖面受水流影響較小，右岸

的高程變化主要為喬木的生長情形。未來受洪水的持續沖刷雖仍有可能沖移拋石使護岸基礎裸露，但護岸基礎仍能起到減緩水流的作用，從而穩定河岸位置。

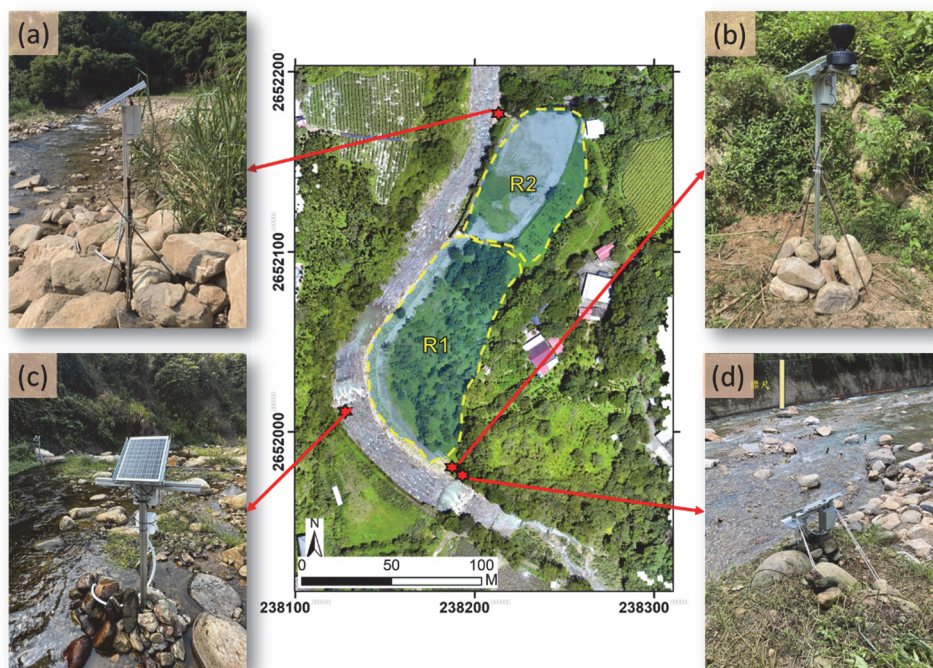


圖 5 感測器模組配置位置 (a) 環境溫濕度與水溫監測儀器、(b) 雨量監測儀器、(c) 水位監測儀器、(d) 攝影機水深監測。

Fig.5 Locations of sensors and monitoring modules (a) air temperature, humidity, and water temperature instruments, (b) rainfall gauge, (c) water level gauge, (d) CCD for water depth

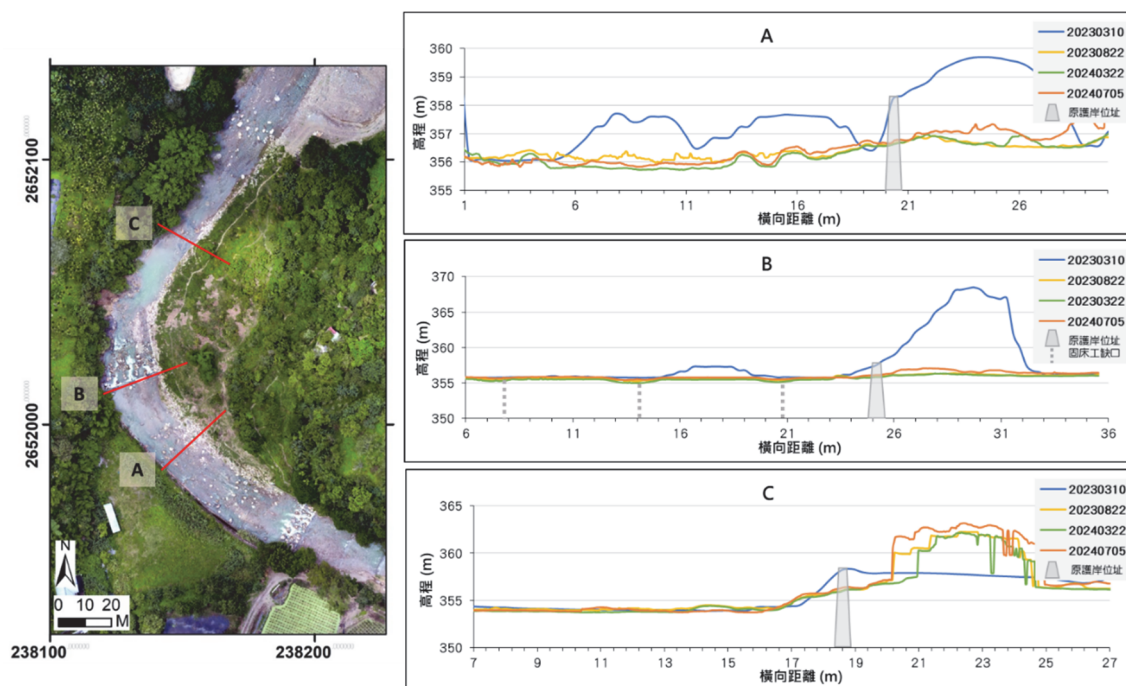


圖 6 種瓜坑溪橫剖面圖

Fig.6 Cross-sectional profiles of Zhongguakeng Creek

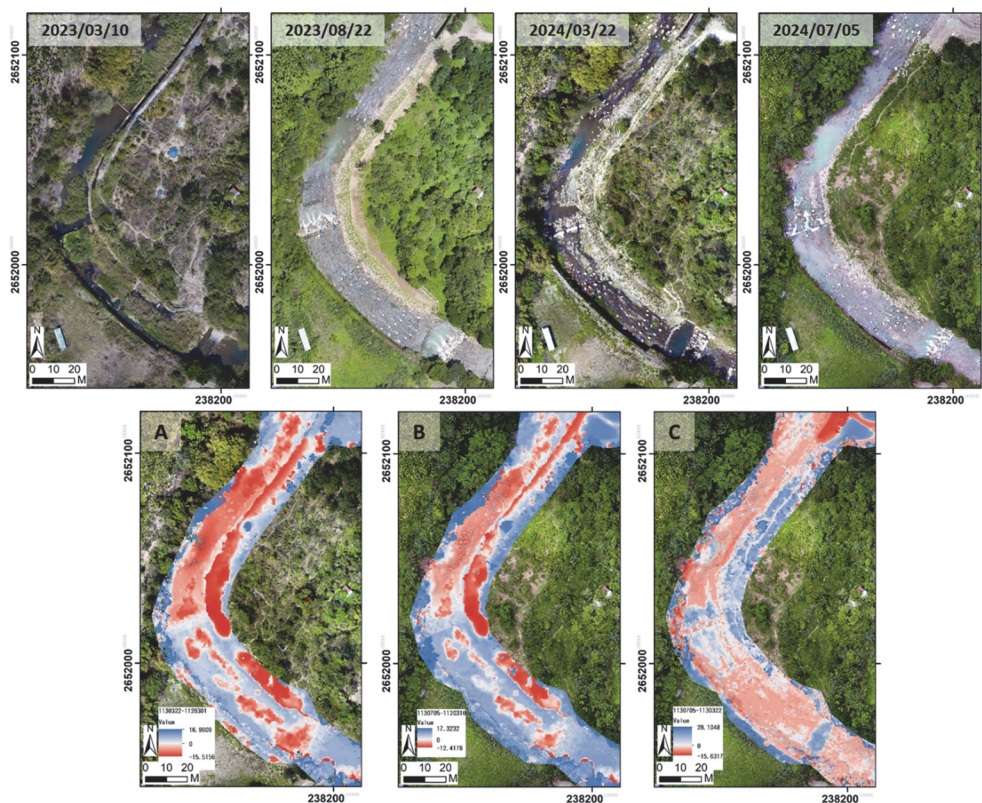


圖 7 種瓜坑溪各時期正射影像及地形差異分析
Fig.7 Orthomosaics and terrain elevation analysis for different periods in Zhongguakeng Creek

4. 數值模擬與驗證

原河道以堅固且高聳的堤防護岸結構物，來抵抗自然彎道，並將洪水限縮於河道空間，此為傳統的溪流整治工程方法。若將河道變寬，所需結構物強度就可以降低，並在河道及兩岸隨機拋設塊石，即可達到適量消能的作用。但所需拆除之護岸長度及需預留之滯洪空間範圍，則需經數值水理計算。

工程河段位於主流下游段，圖 2 顯示為水系匯集河段，且坡度變緩，因此具有較高的洪水風險。歷經 921 地震 (1999) 後種瓜坑溪於極端降雨造成之高強度流量之影響下，於兩側設計出具 50 年重現期之承洪能力之高聳堤防護岸。在重現期流量估算中，選用九份二山與外大坪雨量站 (位置如圖 8 所示)，並統計 2002 至 2023 年間的資料，利用反距加權法推算種瓜坑溪整治段近 20 年的日最大降雨量值 (mm/day)。兩個雨量站共計 40 筆數據，擬合常態分布曲線。其中約 97% 的數據落在兩個標準差內，能有效反映颱風豪雨情況。接著計算其平均值

(μ) 與標準差 (σ)，並透過超越機率 (P)，來估算不同重現期對應的日最大降雨量 (林維明，2007)。



圖 8 雨量站位置圖
Fig.8 Locations of rainfall gauges

表 1 降雨常態分佈法計算表格

Table 1 Rainfall normal distribution calculation

(1) 重現期 (T)	(2) 超越機率 (P)	(3) 頻率面積 (A)	(4) 標準常態分布面積 (Z)	(5) 日降雨量 (X)
2	50%	0%	±0	239.2
5	20%	60%	±0.842	361.2
10	10%	80%	±1.282	424.9
20	5%	90%	±1.645	477.5

欄：列出重現期年 (T)。
欄：每T年發生一次之超越機率 $P = \frac{1}{T} \times 100\%$ 。範例：每2年發生一次， $P = \frac{1}{2} \times 100\% = 50\%$ 。
欄：(2) 欄之超越機率下，常態分布曲線下之頻率面積， $A = 100\% - 2P$ 。
欄：由標準常態分布面積表，查得相當於 $\frac{A}{100}$ 時 (常態分佈對稱性) 之發生機率 (Z)。
欄：根據 (4) 欄，求出不同重現期下的日降雨量值 (X)， $X = \mu + Z\sigma$ 。

根據台灣豪大雨及颱風的特性，將不同重現期雨量分佈在 12 小時，帶入三角歷線法中（謝平城和林昭儀，2010），以 Mockus 等人（1957）所提出集流時間公式，計算不同重現期之流量歷線如圖 9 所示。並根據整治區架設的縮時影像及雨量站資料進行比對，推估其稽延時間為 1 小時。

一期工程完工後經歷 2024 年 6 月 23 日、6 月 28 日、7 月 1 日、7 月 2 日之豪雨事件，除了九份二山及外大坪雨量站資料外，加入距離更近的國 6 號 W023K 雨量站資料，進行三處的反距加權計算更精確的逐時雨量。以 10 年重現期分別對施工前地形（圖 10a）、施工中地形（圖 10b）、全護岸拆除之完工後地形（圖 10c）進行數值模擬。

本研究運用數值模式 RiverFlow 2D，為鑲嵌於 QGIS 的介面，以水理動床軟體可以模擬較為複雜的建模場景，解析各種流場，包括河流、河口、洪氾平原，甚至是壩堤破壞的河道等，兼具速度、高解析度、穩定性和準確性（李蘊容，2022）。本研究模擬範圍為種瓜坑溪整治河段，建立 1 m 的三角網格，以 Q_{10} 及 7 月 1 日豪雨作為模擬情境，曼寧 n 值設定如下圖 10 所示（融合安全及溪流環境功能之橫向構造物優化案例評估，2021），分析河道水位及右岸溢淹情形，並與河道縮時紀錄比較其準確性。

施工前圖 11a 中，護岸可約束洪水於河道內，惟流速快、

水位深。水流被侷限在護岸與岩石坡面之間，因此整體水位較高，河道平均水位為 2.5~3 m。河道轉彎段水流因離心力向外側聚集，產生彎道超高效應，加上轉彎段為深潭區，水深介於 4.5~5 m。在極端氣候的影響下，未來可能形成更多的短延時強降雨，屆時水位可能會超越護岸的防洪高度，對右岸後方的保全對象造成威脅。而施工中的模擬情況如圖 11b，右岸之護岸已拆除，水流進入右岸滯洪區逕流分攤，水深介於 0 至 1 m 之間。河道的平均水深降低為 1.5~2 m，深潭區水深降為 3~3.5 m。下游未拆除護岸段設有土方暫置區，水流從後方匯流回到河道，在下游轉彎處因彎道超高效應，水深介於 4.5~5 m 之間。圖 11c 模擬，2024/07/01 豪雨事件的流量約為 1.25 年重現期，河道的最高水位介於 1~1.5 m，水流從拆除護岸的起始點流入右岸，溢淹水深為 0~0.5 m，且水流僅累積於上游的水砂溢淹區（參見圖 4）。而下游的轉彎處水流的能量較大，因此水位較高，達到 2.5~3 m，部分水流進入右岸下游的棲地營造區（參見圖 4）。在圖 12 的縮時攝影器記錄中，19:00 時接近洪峰時間，在圖像紀錄中水位正好覆蓋緩坡拋石，尚未導致右岸的草本植物倒伏，根據 2024/03/22 的高程資料，得知河床與右岸的高差約為 1 m，因此推斷最高水位約為 1.5 m，與模擬結果相近。

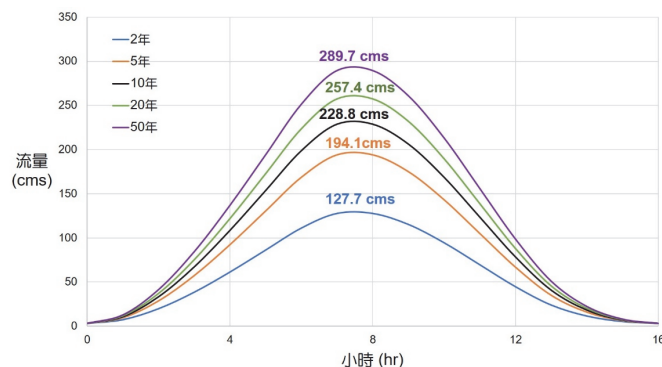


圖 9 重現期流量比較

Fig.9 Comparison of discharge for different return periods.

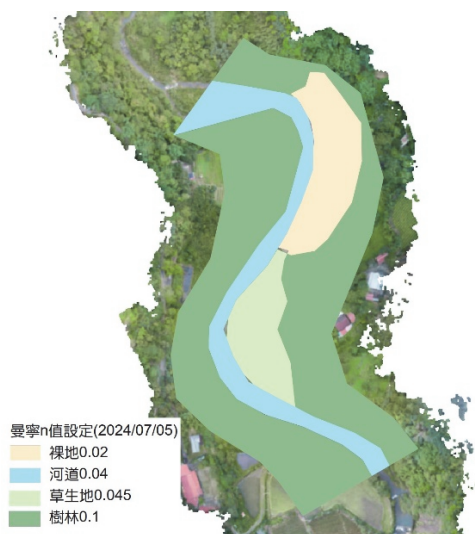


圖 10 曼寧 n 值設定

Fig.10 Manning's n coefficient setting

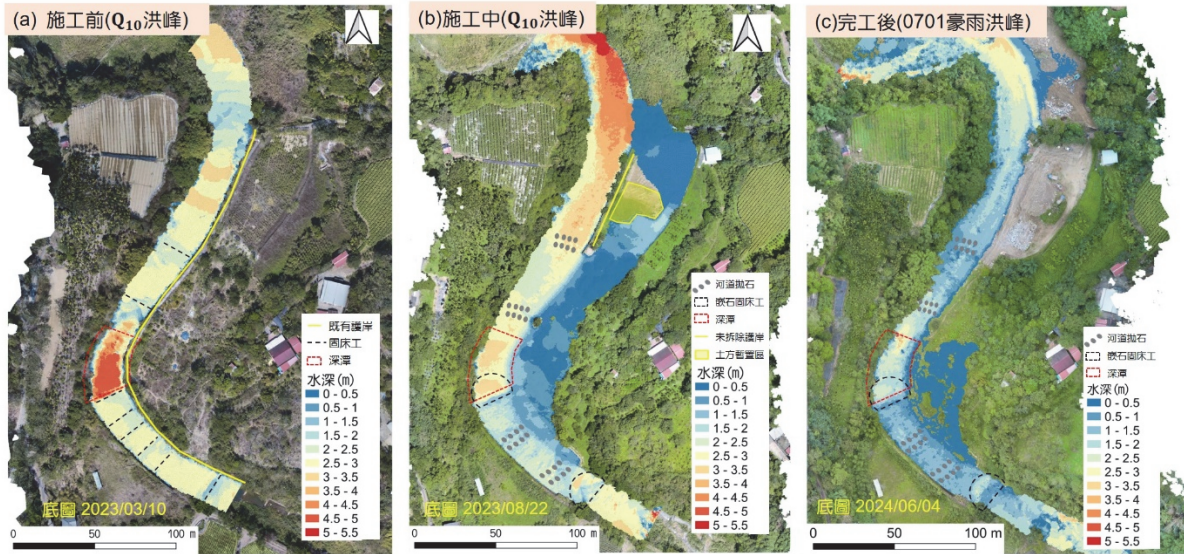


圖 11 洪峰水深分布圖 (a) 以施工前地形模擬 Q_{10} 流量, (b) 以施工中地形模擬 Q_{10} 流量, (c) 以完工後地形模擬 2024/07/01 豪雨流量

Fig.11 Simulated flood peak: (a) Q_{10} flow pre-construction, (b) Q_{10} flow during construction, (c) heavy rain flow on 2024/07/01 after construction



圖 12 0701 豪雨不同時段縮時紀錄

Fig.12 Time-lapse photos at different times on 0701 when heavy rain fell

5. 棲地物理環境評估

觀察不同時期的地貌變化 (圖 13), 探討整治前後的差異。拆除固床工可小幅度的提升坡度, 拆除護岸卻大幅度的降低水力半徑, 河道上的拋石也有有效的增加曼寧糙度值, 整體的流速下降, 於洪水來臨時減緩對於凹岸的攻擊, 並分散水流降低洪峰流量。

比較棲地環境, 原本的護岸切斷了水陸的連結, 河道上的

多座固床工使流速減緩導致泥砂淤積, 形成沙洲更加阻擋水流流動, 流況及底床質趨近單一。在拆除護岸後, 建立水陸連接的濱溪帶, 固床工造成的迴水效應減少, 河床上的粒徑也更具差異性。

以工區右岸護岸拆除前後情形及上游無人工構造物的溪流作為參考樣站, 位置如圖 14a, 並採用同時期的河道情況, 施工區域 113/07/05(一期工程上游、一期工程段) 及參考樣區 113/07/19, 共三處進行比較, 參考圖 14b、14c、14d。

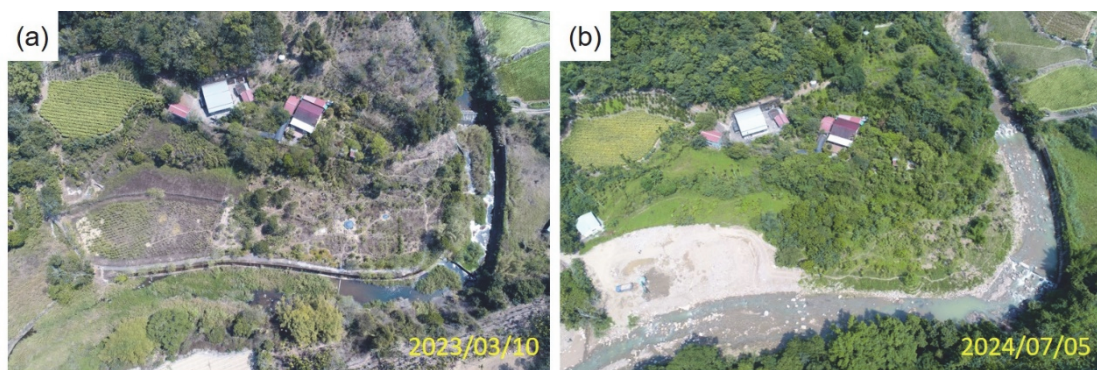


圖 13 棲地環境圖, (a)施工前, (b)完工後九個月的復育情形

Fig.13 Habitat conditions (a) before construction, (b) 9 months after completion of construction

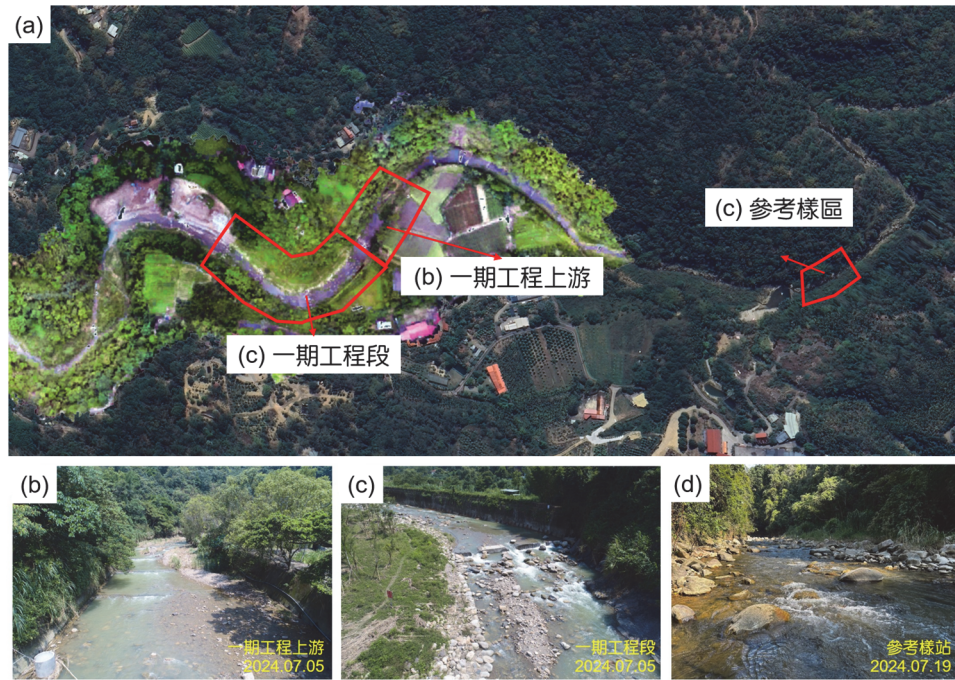


圖 14 (a) 棲地調查位置圖，棲地環境圖：(b) 一期工程上游，(c) 一期工程段，(d) 參考樣站

Fig.14 (a) locations of habitat survey; habitat condition, (b) upstream of phase I project, (c) phase I project site, (d) reference site

使用 (陳樹群等人, 2010) 的棲地物理環境評估法，將棲地分為水域及濱水區，評分內容分為泥砂、水流、地形、植生與人為五大類，並針對其 17 個子項進行評分及加總，並以雷達圖呈現，評分結果如圖 15。

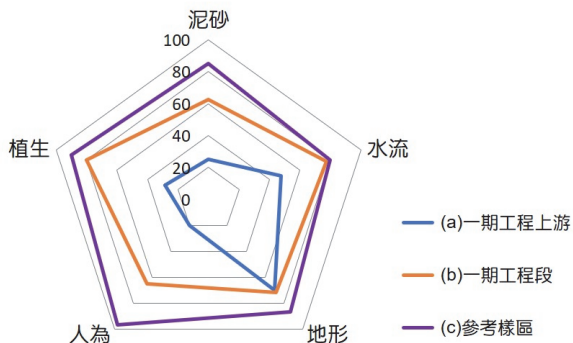


圖 15 (a) 一期工程上游 (b) 一期工程段 (c) 參考樣區之棲地評分

Fig.15 Habitat evaluation for (a) upstream of phase I project, (b) phase I project site, (c) reference site.

(1) 一期工程段上游

一期工程上游仍有兩側護岸及多座固床工，人為工程的介入對於棲地環境造成影響。固床工使流速減緩，流況趨近單一，細粒徑土砂主要堆積於固床工上方，底質孔隙淤塞，降低其多樣性，故降低了整體「泥砂」、「水流」的評分。兩側接近 5 m 高的護岸，阻隔了水陸間的連結，因此濱水區的整體評分較低。「植生」並未將護岸後方的植生情形納入評分，樣區具有豐枯季明顯

的特徵，河道上沙洲植生演替周期較短，故發展出多樣性較低之植生環境。

(2) 一期工程段

拆除護岸及部分固床工大大提升「人為」的正向評分，增加了河川與濱溪植生的連結。河道上的拋石及嵌石階梯式固床工，營造淺灘及深潭，水流多樣性較高；固床工的拆除使流速增加，帶走了部分底床孔隙中的細砂，提升了「泥砂」、「水流」的評分。由於樣區河道較寬，且兩岸的穩定性高，護岸等縱向構造物對棲地之影響比例相對減少，對於「地形」的評分並無太大變化。

(3) 參考樣區

參考樣區內沒有受人為擾動，但其下游的固床工，使樣區底質孔隙稍有阻塞情形，河道上堆積情形少。相較於前兩個樣區，存在大粒徑的塊石，石頭間可互相卡樁營造出多變的水流。種瓜坑流域屬於常流水河川，水流維持穩定。另外，濱溪帶河岸穩定，植生覆蓋良好，有外來種生長跡象，降低植生物種豐富度。

工程整治對棲地的影響明顯，透過拆除大量混凝土結構，減少了灰色設施的使用。灰色設施有助於穩定保全地區，但過度使用往往會限制河道的自由發展，長期下來有基礎淘刷、設施損壞、連續性截斷等問題。為此，工程結合了灰綠的整治工法，採用了石材和木樁等自然資材，隨著地形的變化調整。施工前的流相單一，降低生物多樣性發展，取而代之的是適應性強的外來種魚類，而外來種的出現也更加競爭原生魚種的生存地位。工程透過塊石堆疊排列，營造深潭、深流及淺灘等不同水域環境；另外河道清淤並減少固床工對河道縱向連續性的阻隔，加上附近居民參予外來種魚類的清除，讓水域生態系統得

以重新建立。

水砂溢淹區的植生演替周期較短，以草本植物為主；而下游棲地營造區，樹木補植及草本植物恢復良好，有助於提升當地的生物多樣性。於種瓜坑溪右岸舉辦樹木補植活動，集結了國立中興大學、台灣河溪網協會、荒野保護學會台中分會、台灣原生植物保育協會、南投縣南港社區發展協會及南投縣國姓鄉糯米橋休閒農業區促進協會等相關單位。樹木補植為種瓜坑溪營造更好的棲地環境，不僅增加了民眾參與，同時也成為推廣自然解方的山坡地環境的韌性整治案例。補植物種以在地原生種及先驅物種為主，這些植物的優先生長可預防外來種的入侵，補植物種的生長也改善了當地的微氣候條件，營造更自然的棲地環境，有助於陸域生物的生存及躲藏。

為達成農業部門 2040 淨零排放目標，農村水保署提出了「韌性坡地補助方案」，對於緩衝綠帶撫育、棲地友善措施及水砂溢淹區，鼓勵土地擁有者於工程周邊設置緩衝帶及棲地營造，並提供相應的補助方案。而種瓜坑溪的「還溪於野」，也成功地落實了這三項目標，促進了生態系統的復育。本工程以提升種瓜坑溪整體的生態系統為核心，並考量工程手法與棲地調整，集合各類專家及民眾的全面參與，為良好的自然解方 (NbS) 整治範例。

表 2 IUCN 之自然解方全球標準

Table 2 IUCN global standard for NbS

項目	準則	指標
1 NbS應能有效應對社會的挑戰		1.1優先考慮最迫切的*社會挑戰並做出回應 1.2清楚理解並記錄所應對的社會挑戰 1.3設立基準並定期評估NbS提升的人類福祉
2 應根據不同尺度 (scale) 設計NbS		2.1識別經濟、社會和生態系之間的相互作用 2.2與其他解決方法互補，及聯合不同部門協同作用 2.3應納入場地以外區域的風險識別和風險管理
3 NbS應能帶來生物多樣性淨成長及生態系完整性		3.1對生態系的現狀、退化及喪失的主要驅動力，進行評估並做出回應 3.2設立基準並量化，階段性評估生物多樣性保育成效 3.3監測並階段性評估可能對自然造成的不利影響 3.4辨識加強生態系整體性與連結性的機會並整合到NbS策略中
4 NbS應具有經濟可行性		4.1確認和記錄NbS項目的成本及效益 4.2提供成本效益的研究支持NbS的決策，包含相關法規及補貼的可能影響 4.3NbS方法與備選方案比照其有效性，考慮相關成本、效益 4.4考慮多種資金來源並保證資金使用合規
5 NbS應基於包容、透明和培力的治理過程		5.1應與所有關係權益方商定回饋與申訴機制 5.2確保NbS的參與過程是基於相互尊重和平等， 5.3應識別並保證所有利害關係人的參與 5.4記錄決策過程並回應相關訴求 5.5建立跨管轄區域的聯合決策機制
6 NbS應在主要目標與其他多種惠益之間公平合理地權衡得失		6.1明確各方案的權衡及其潛在成本和效益，並告知相關的保障和改進措施 6.2尊重相關方在土地及自然資源的權利與責任 6.3定期檢查保障措施，不破壞整體NbS的穩定性
7 NbS應以證據為基礎進行調適性管理		7.1制訂並定期監測評估NbS策略 7.2制訂適用於*NbS全生命週期的監測與評估方案 7.3建立迭代學習框架，確保調適性管理
8 NbS應有可持續性，並在適當的管轄背景下主流化		8.1分享和交流NbS的實施和規劃經驗 8.2以NbS促進政策和法規的完善，推動應用與主流化 8.3促進實現全球及國家層面的目標
*IUCN 目前定義了七項社會挑戰，包含氣候變化減緩和適應、防災減災、經濟與社會發展、人類健康、糧食安全、水安全、生態環境退化與生物多樣性喪失。 *NbS 全生命週期，包括啟動、規劃、執行和結束。		

評估方案符合 NbS 標準的程度，對 28 項指標進行評分，分為低於 25%、25~50%、50~75%和高於 75%的四個等級，分別對應「不匹配」、「部分匹配」、「充分匹配」與「高度匹

四、自然解方 (NbS) 實踐

1. IUCN 八大準則

隨著氣候變遷引發的極端氣候和溫度上升，坡地崩塌、土壤侵蝕和生態系統變遷的風險增加，NbS 逐漸成為全球應對這些挑戰的主流方法。世界自然保護聯盟 (IUCN) 致力於保護、管理及恢復環境，以及為人們帶來永續的效益，也就是現在「自然解方 (NbS)」的概念。為了實現《巴黎協定》中，將 2030 年全球氣溫上升控制在工業化前水平 2°C 以內的目標，IUCN 訂立了 NbS 全球標準 (IUCN, 2020)，如表 2 所示，包含 8 大準則和 28 項指標，將自然解方從概念轉為指標工具，可提供以下功能：(1) 評估方案在大多程度上符合 NbS 標準，並以匹配程度進行衡量，可針對需加強的領域採取行動，(2) 根據特定準則或指標設計解決方案，同時建立適應性管理機制，以確保方案在規劃、執行和後續管理可遵循 NbS 標準。

此標準不僅限於自然保護領域，使用程度廣泛，也可作為一種長期紀錄和觀測的工具，透過追蹤、評估及經驗學習，有助於更好的設計和實施自然解方，以及應對社會挑戰與促進永續發展。

配」四種等級作為衡量標準，並以 1~4 的分數代表之 (1 為不匹配，4 為高度匹配)，將準則內的各項指標分數平均後，可獲得準則的匹配分數。本研究比較傳統工法以及種瓜坑溪使

用自然解方之整治工法，評分內容如表 3 所示，圖 15 以雷達圖呈現 IUCN 之 8 大準則統計分數。

表 3 IUCN 自然解方全球標準之 28 項指標分數

Table 3 The scores of the 28 indicators in the IUCN global standard for NbS

指標	傳統	NbS	指標	傳統	NbS
1.1	1	3	5.1	2	4
1.2	1	3	5.2	2	4
1.3	1	2	5.3	1	3
2.1	2	3	5.4	1	3
2.2	3	4	5.5	1	3
2.3	3	2	6.1	1	3
3.1	1	4	6.2	2	3
3.2	2	4	6.3	1	2
3.3	2	3	7.1	1	3
3.4	1	4	7.2	1	2
4.1	2	4	7.3	2	4
4.2	1	2	8.1	1	4
4.3	1	4	8.2	1	2
4.4	1	3	8.3	1	3

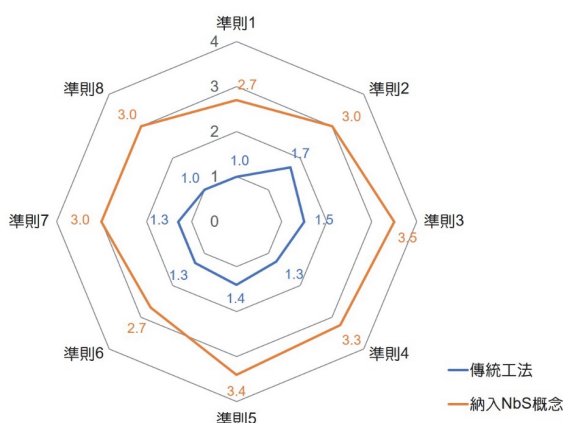


圖 15 IUCN 準則評估雷達圖

Fig.15 IUCN criteria assessment chart

分數評估中，納入 NbS 概念之 8 項準則平均為「充分匹配」(50~75%) 的等級，其中準則 3、4、5 的分數有較顯著的提升。

準則 1 以 IUCN 七大社會挑戰為重點，傳統工法主要關注防減災的社會挑戰，現在則更多的考量種瓜坑溪工程區附近生態環境復育的需求與人類社經條件的挑戰，雖未達到氣候變遷影響的減緩，但已提出氣候變遷對應的調適策略。種瓜坑溪的工程明顯改善當地環境及提升人類福祉，然而目前對人類福祉相關的評估較為抽象，未來須訂定更加具體且可衡量的目標，並定期評估 NbS 方法帶來的改變。

準則 2 強調根據不同尺度進行設計，台灣多為小尺度工程，這些小規模的 NbS 實施可以為更大範圍的應用提供基礎，並在設計階段融入生態視角。然而，工程以外區域的風險識別及管理尚需加強。

準則 3，人們對於保育的意識提升，更加注重生物多樣性，工程納入更多生態系統監測，如水生昆蟲、植生恢復及水溫調

查，並將這些結果數值化，以便直觀地觀察變化，並整合 NbS 帶來的效益，但後續管理仍需更深入的考量。

準則 4，在經濟方面，傳統工法注重經費最小化及有效的整治方法等直接效益，並無考量永續性，工程易因年久失修而損壞，NbS 除了直接效益之外，還納入間接效益的考量，如生態和景觀提升，並思考 NbS 方案的潛在影響及長期性，設計時的備選方案也更加多元。2023 年，農村水保署提出了「韌性坡地補助方案」，除了民眾對環境意識的提升，更加鼓勵民眾提供土地等資源，共同實現更大的整治效益。

準則 5 強調包容、透明及培力。傳統工程設計多為政府、工程團隊及地主間的協調，而現今工程內容更為透明，鼓勵廣泛的參與與對話，包括政府、工程團隊、生態學家、水利專家、當地居民和 NGO 團體，這使得決策過程更全面，減少了效益不平等的情況發生。

在準則 6 中的權衡，傳統工法更多地著眼於災害本身的評估，由於準則 5 的全面參與，得以了解相關者的利益和成本考量，作為整體方案的決策的考量因素。然而，定期的檢查及保障措施，則根據地區的話題討論度決定。

準則 7 強調調適性管理，傳統工法較依賴於固定模式，而 NbS 則需要建立一套持續監測和評估的系統，需透過案例學習和經驗積累下進行調整。台灣目前的 NbS 發展仍處於初期階段，通過持續的學習—應用—學習循環，提升 NbS 在實際應用中的效果。

準則 8，NbS 的永續性與主流化，除了向上（政府層面）和向外（國際層面）的擴展，透過更多的交流、經驗分享會，將知識轉移大眾，一步步地使 NbS 主流化，期望未來相關法規的制定，從而確保其長期效益和持續性。

經評估結果的雷達圖（圖 15）顯示，準則 3 及準則 5 所獲得的評價最高。準則 3 表示本治理工程更加是以建立完整生態系統為前提，而非防洪治理，亦可關注生態檢核。準則 5 也由施工單位為主的單一治理機構，大幅轉變為尊重地主權益，與學界、環保團體及技術顧問公司，共同商討治理對策，建立透明交流及包容異議的尊重文化。

2. 成效

種瓜坑溪野溪復育一期工程共拆除長度 161 m、高度 3 m 之護岸。觀察種瓜坑溪野溪復育工程於一期完工前後河道開闊及連續性之差異（圖 16），其植生恢復良好，地景與構造物之差異已逐漸融合，河道及韌性滯洪區達到自然調整之特性。

透過調整集水區內既有結構物，擴展韌性承洪及生態空間，以恢復溪流自然流動和連通性，提高水域及濱溪帶的生物多樣性，逐漸恢復自然生態系。期間雖看似犧牲了居民的部分農業生產區，但與水域相連結及未來滯洪區綠林成蔭的環境效益，再加上積極的碳匯成效，也為人類福祉提供了支持。這些都是符合自然解方（NbS）的核心概念。

種瓜坑溪復育工程以敬畏大自然的力量來解決洪水問題，營造生態廊道、韌性滯洪空間達到逕流分攤之效果，以提高山區溪流生態系統的韌性，實現生態系統復育和永續發展。經由六月及七月的幾次大洪水，原拋設於河道內及河岸兩側的塊石

均有位移的現象，均視為河道演變的自然調整作用。滯洪區內阻滯了許多上游漂流而下的雜草枯枝，同時也有部分樹木倒伏，也採取放任自然演替的做法。只要不危及居民的安全，不

論在水域、濱溪帶及滯洪區都以尊重自然的方式，順應其演替。因此將整治理念又向前推至「溪流復野」的觀念。由「還石於水」及「還地於河」，再推廣至「還溪於野」。



圖 16 種瓜坑溪還溪於野工程一期施工前中後環境復育概況

Fig.16 Restoration overview before, during, and phase I completion of the Zhongguakeng Creek rewilding project

五、結 論

本研究探討了台灣南投縣國姓鄉種瓜坑溪在面臨氣候變遷導致的洪水和土砂災害威脅下，以自然解方 (Nature-based Solutions, NbS) 為基礎的整治策略。隨著氣候變遷頻發的短延時高強度降雨事件，常施予更加強化的鋼筋混凝土的工程來降低災害風險，但卻也對完整生態系統產生迫害，甚至難以復育。如何面對新世代的挑戰，本研究以「還溪於野」為核心理念，透過拆除部分人工護岸、創建濱溪帶、擴展滯洪空間等方式，並且讓大自然自行調節，恢復溪流的自然生態功能。允許自然過程塑造溪流，修復受損的生態系統，恢復退化的景觀，並提升生態系統的韌性和生物多樣性。

整治前，種瓜坑溪的河道受到過度工程干預，護岸和固床工等構造物雖暫時解決了洪水和土壤流失的問題，但卻阻隔了溪流的自然流動，導致生態棲地破壞、河床淤積、流速減緩以及生物多樣性降低。這些問題進一步惡化了河道環境，無法長期維持生態系統的健康和可持續性。

整治後，通過拆除護岸、堤防和固床工，種瓜坑溪重新建立了水陸連接的濱溪帶，增加了河道的寬度和滯洪空間，顯著改善了洪水期間的水流集中和流速過快的缺失。這不僅減少了下游的洪水風險，還為當地的生物提供了更多的棲息空間。恢復河道自然坡度和滯洪空間水流變化，減緩溪流泥砂淤積，將細泥淤積於滯洪空間，提供植物生長肥力。底床改以加大粒徑增加糙度來減緩因移除固床工所提高的流速，同時因底床粒徑

多樣化，除可提供曝氣以改善水質外，更有利於多樣性較高的水生昆蟲及魚類的生長。

這些措施在增強生態系統韌性方面的成效尤為顯著。監測系統的數據顯示，整治後的種瓜坑溪在應對洪水事件時，水流被有效地分攤至右岸滯洪區，達到了顯著的滯洪效果，且恢復了河道的自然流動性。植生的恢復和多樣化的水流形態也促進了生物多樣性的提高，生態系統自我修復能力增強。

此外，本研究強調了自然解方不僅在生態層面上帶來益處，也促進了當地居民對環境保護的理解和參與。整治過程中，通過與當地居民、學術研究單位及生態團體的合作，提升了社區對於自然保護和氣候變遷的認識，實現了人類福祉與自然生態和諧共榮共存的願景。種瓜坑溪的溪流復野工程成功展示了自然解方在恢復生態系統健康、減少災害風險及促進人類福祉方面的潛力，為未來台灣及全球自然解方的應用提供了寶貴的實例。

參考文獻

- [1] 農業部農村發展及水土保持署南投分署 (2024), 「種瓜坑溪調整構造物營造溪流韌性環境之評估」。(Nantou Branch, Agency of Rural Development and Soil and Water Conservation (2024). "Fluvial Environment Assessment of Zhong Gua Stream." (in Chinese))
- [2] 行政院農業委員會水土保持局 (2023), 「自然解方之適用性工法與淨零排碳之研究」。(Soil and Water Conservation

- Bureau, Ministry of Agriculture (2023). “*The Applicable Construction Method of Nature-based Solutions and Net Zero Emissions.*” (in Chinese))
- [3] 宋健生 (2023), 促進自然碳匯！農村水保署溪流復野 種瓜坑溪植樹登場, 經濟日報, 取自: <https://money.udn.com/money/story/5930/7603864>。(Song, J.S. (2023, November 28). Enhancing natural carbon sinks: The ARDSWC stream restoration and tree planting in Zhongguakeng Creek. Economic Daily. <https://money.udn.com/money/story/5930/7603864>)
- [4] 李蘊容 (2022), 「應用 RiverFlow2D 數值模式探討堰塞壩潰決水流對下游地形之影響」, 國立中興大學水土保持學系碩士學位論文。(Li, Y.J. (2022). *The Influence of Dam Breaching Flow on Downstream Topography Using River-Flow2D Numerical Model*, Master Thesis, National Chung Hsing University, Taiwan, ROC. (in Chinese))
- [5] 行政院農業委員會水土保持局南投分局 (2022), 「南投分局轄區 111 年度生態檢核執行及民眾參與推動計畫」。(Nantou Branch, Soil and Water Conservation Bureau, Ministry of Agriculture (2022). “*Ecological Inspection Implementation and Public Participation Promotion Plan.*” (in Chinese))
- [6] 行政院農業委員會水土保持局 (2021), 「融合安全及溪流環境功能之橫向構造物優化案例評估」。(Soil and Water Conservation Bureau, Ministry of Agriculture (2021). “*Assess Stream Lateral Structures with Multiple Environmental Functions-A Case Study.*” (in Chinese))
- [7] 朱芳儀、吳俊毅、安軒霏、林仕修、陳樹群 (2018), 「臺灣主要流域之河川型態及其野溪界點判定評估」, 中華水土保持學報, 49(3), 178-186。(Chu, F.Y., Wu, C.Y., An, S.P., Lin, S.H., and Chen, S.C. (2018). “Assessing River Morphology and Torrent Division Point of Main Basins in Taiwan.” *Journal of Chinese Soil and Water Conservation*, 49(3), 178-186. (in Chinese))
- [8] 陳樹群、安軒霏 (2012), 「河川型態五層分類法架構與應用」, 中華水土保持學報, 43(1), 21-40。(Chen, S.C., An, S.P. (2012). “The Framework and Application of River Morphology Five Level Classification.” *Journal of Chinese Soil and Water Conservation*, 43(1), 21-40. (in Chinese))
- [9] 陳樹群、安軒霏、方琦萱 (2010), 「河川物理棲地評估法在烏溪及濁水溪之應用」, 中華水土保持學報, 42(4), 479-497。(Chen, S.C., An, S.P., and Fang, C.H. (2010). “Application of Physical River Habitat Assessment Method in Wu River and Chou-Shui River.” *Journal of Chinese Soil and Water Conservation*, 42(4), 479-497. (in Chinese))
- [10] 謝平城、林昭儀 (2010), 「烏溪流域三角形單位歷線 m 值之研究」, 中華水土保持學報, 42(1), 99-122。(Hsieh, P.C., and Lin, C.Y. (2010). “Study on the m Value of the Triangular Unit Hydrograph for Wu River Catchment.” *Journal of Chinese Soil and Water Conservation*, 42(1), 99-122. (in Chinese))
- [11] 林維明 (2007), 「暴雨量頻率分析之實務研討」, 水利會訊第十期, 學術天地。(Lin, W.M. (2007). “Practical Discussion on Frequency Analysis of Rainfall Amount,” *Taiwan Association of Hydraulic Engineer*, 10, Academic Section.
- [12] 陳樹群、彭思顯 (2002), 「台灣河川型態五層分類法研究」, 中華水土保持學報, 33(3), 175-190。(Chen, S.C., and Peng, S.H. (2002). “Stream Classification System with Five Levels in Taiwan.” *Journal of Chinese Soil and Water Conservation*, 33(3), 175-190. (in Chinese))
- [13] 陳樹群 (1999), 「高強度降雨之坡地集流時間公式」, 中華水土保持學報, 30(2), 103-115。(Chen, S.C. (1999). “The Time of Concentration under High Rainfall Intensity in Hillslope Area.” *Journal of Chinese Soil and Water Conservation*, 30(2), 103-115. (in Chinese))
- [14] Acharya, P., Gupta, A.K., Dhyani, S., and Karki, M. (2020). “New pathways for NbS to realise and achieve SDGs and post 2015 targets: transformative approaches in resilience building.” *Nature-based solutions for resilient ecosystems and societies*, 435-455.
- [15] Anderson, C.C., and Renaud, F.G. (2021). “A Review of Public Acceptance of Nature-Based Solutions: The 'why', 'when', and 'how' of success for Disaster Risk Reduction Measures.” *Ambio*. doi:10.1007/s13280-021-01502-4.
- [16] Beechie, T., Pess, G.R., Roni, P., Giannico, G., and Morganti, T. “Developing and implementing integrated strategies for managing river ecosystems in the face of climate change: The Elwha River Restoration Project as a case study.” *Fisheries* 2013, 38(10), 451-461.
- [17] Chiu, Y.Y., Wu, Y.H., Fu, K.L., Lai, T.C., Chen, H.E., and Chen, S.C. (2023). “Nature-based Solutions for Disaster Reduction and Improving Ecosystem Services in Hutobi Watershed, Taiwan,” *Water*, 15, 2527. DOI:10.3390/w15142527
- [18] Cohen-Sacham, E., Andrade, A., Dalton, J., Dudley, N., Jones, M., and Kumar, C., Maginnis, S., Maynard S., Nelson C.R., Renaud F.G., Welling R., and Walters G. (2019). “Core Principles for Successfully Implementing and Upscaling Nature-Based Solutions.” *Environmental Science and Policy*, 98, 20-29.
- [19] Cohen-Shacham, E., Walters, G., Janzen, C., and Maginnis, S. (2016). “*Nature-Based Solutions to Address Global Societal Challenges.*” Gland, Switzerland: IUCN.
- [20] Dietrich, A., and Krautblatter, M. (2017). “Evidence for enhanced debris-flow activity in the Northern Calcareous Alps since the 1980s (Plansee, Austria).” *Geomorphology*, 287, 144-158.
- [21] Endo, I. (2017). “Regional: *Protecting and Investing in Natural Capital in Asia and the Pacific.*” Asian Development Bank : 2019.
- [22] Fryirs, K.A., Brierley, G.J., Preston, N.J., and Kasai, M. (2007). “Buffers, barriers and blankets: The (dis) connectivity of catchment-scale sediment cascades.” *Catena*, 70(1), 49-67.

- [23] Gorelick, J., and Walmsley, N. (2020). "The greening of municipal infrastructure investments: Technical assistance, instruments, and city champions". *Green Finance*, 2(2), 114-134.
- [24] International Union for the Conservation of Nature. (2020). *IUCN Global Standard for Nature-Based Solutions*.
- [25] Kabisch, N., Frantzeskaki, N., Pauleit, S., Naumann, S., Davis, M., and Artmann, M. (2016). "Nature-Based Solutions to Climate Change Mitigation and Adaptation in Urban Areas: Perspectives on Indicators, Knowledge Gaps, Barriers, and Opportunities for Action." *Ecology and Society*, 21(2). doi:10.5751/ES-08373-210239.
- [26] MacKinnon, K., Sobrevila, C., and Hickey, V. (2008). "Biodiversity, climate change, and adaptation: nature-based solutions from the World Bank portfolio (46726, 1-112)." The World Bank.
- [27] Maes, J., and Jacobs, S. (2015). "Nature-Based Solutions for Europe's Sustainable Development." *Conservation Letters*.
- [28] Mitsch, W.J. (2012). "What Is Ecological Engineering?" *Ecological Engineering*, 45, 5-12. doi:10.1016/j.ecoleng.2012.04.013.
- [29] Mockus, V. (1957). "Use of storm and watershed characteristics in synthetic hydrograph analysis and application." US Department of Agriculture, Soil Conservation Service.
- [30] Narayan, S., Beck, M.W., Reguero, B.G., Losada, I.J., van Wesenbeeck, B., and Pontee, N. (2016). "The Effectiveness, Costs and Coastal Protection Benefits of Natural and Nature-Based Defenses." *PLoS ONE*, 11(5), e0154735. doi:10.1371/journal.pone.0154735.
- [31] Palmer, M., and Palmer, S. "Wetlands for water management: experiences from the Upper Thukela River Basin." *Water Policy*, 2014, 16(5), 865-881.
- [32] Raymond, C.M., Frantzeskaki, N., Kabisch, N., Berry, P., Breil, M., and Nita, M.R. (2017). "A Framework for Assessing and Implementing the Co-benefits of Nature-Based Solutions in Urban Areas." *Environmental Science and Policy*, 77, 15-24. doi:10.1016/j.envsci.2017.07.008.
- [33] Ruangpan, L., Vojinovic, Z., Di Sabatino, S., Leo, L.S., Capobianco, V., and Oen, A.M.P. (2020). "Nature-Based Solutions for Hydro-Meteorological Risk Reduction: A State-Of-The-Art Review of the Research Area." *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 20, 243-270. doi:10.5194/nhess-20-243-2020.
- [34] Schlögel, R., Kofler, C., Gariano, S. L., Van Campenhout, J., and Plummer, S. (2020). "Author Correction: Changes in climate patterns and their association to natural hazard distribution in South Tyrol (Eastern Italian Alps)." *Scientific Reports*, 10(1), 10477.
- [35] Shah, M.A.R., Renaud, F.G., Anderson, C.C., Wild, A., Domeneghetti, A., and Polderman, A. (2020). "A Review of Hydro-Meteorological Hazard, Vulnerability, and Risk Assessment Frameworks and Indicators in the Context of Nature-Based Solutions." *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 50, 101728. doi:10.1016/j.ijdrr.2020.101728.
- [36] Wendling, L. A., Huovila, A., zu Castell-Rüdenhausen, M., Hukkalinainen, M., and Airaksinen, M. (2018). "Benchmarking Nature-Based Solution and Smart City Assessment Schemes Against the Sustainable Development Goal Indicator Framework." *Frontiers in Environmental Science*, 6, 69. doi:10.3389/fenvs.2018.00069.
- [37] Wesenbeeck, B.V., IJzendoorn, C.V., and Sanchez, A.N. (2019). "Regional: Protecting and Investing in Natural Capital in Asia and the Pacific". Asian Development Bank: Mandaluyong, Philippines.

2024 年 09 月 03 日 收稿

2024 年 09 月 25 日 修正

2024 年 10 月 09 日 接受