

河川復育計畫完工後之評估 —以高雄愛河及台中高山溪為例

Post-Project Appraisals in River Restoration — Case Studies of Love River in Kaohsiung and Kao-Shan Creek in Taichung

國立成功大學
水利及海洋工程學系
助理教授

王筱雯*
Hsiao-Wen Wang

國立成功大學
水利及海洋工程學系
博士候選人

蘇郁文
Yu-Wen Su

國立成功大學
水利及海洋工程學系
特聘教授

詹錢登
Chyan-Deng Jan

摘 要

台灣地區近年來河川復育課題雖然逐漸受到重視，但是缺乏河川復育的明確定義，也缺乏河川復育計畫完成後之成效評估及適應性管理。本研究首先對河川復育之定義進行彙整及歸納，然後訂出河川復育之明確定義，接著應用美國學者 Downs 及 Kondolf 在 2002 年所發展之河川復育評估方法(PPAs)，以高雄市愛河之心復育計畫及台中市高山溪壩體移除改善計畫為研究對象，進行河川復育計畫資料完善性與成效評估之案例研究。研究結果顯示愛河之心復育計畫欠缺計畫施作前之河道基本資料調查，也缺乏計畫成功與否之明確標準，導致生態池未有妥善設計，使得水質改善功能之目標達成有限，而監測計畫之欠缺，亦難以提供改善方式之研擬。高山溪位於雪霸國家公園內，它的壩體拆除改善工程計畫受到比較多的重視，計畫前有相對完整之調查資料。計畫施作前、中、後的河道環境及魚類的完整調查資料，將有利於河川復育計畫成效評估及未來改善方案之擬訂。惟後續變化情形仍應長期加以觀測，在適應性管理的概念下，以準確掌握拆壩對於河道及櫻花鉤吻鮭棲地所產生之衝擊。

關鍵詞：河川復育評估，愛河之心，高山溪。

ABSTRACT

Restoration of rivers and streams has attracted increased interest in recent years. In

*通訊作者，國立成功大學水利及海洋工程學系助理教授，70101 台南市大學路 1 號，whw82@mail.ncku.edu.tw

Taiwan, there are no consistent definitions and lacks adaptive management of river restoration. Therefore, this study clarified the definition of river restoration first and then used an evaluation tool, Post-Project Appraisals (PPAs), to evaluate two restoration projects. One is the urban river restoration project of Love River in Kaohsiung, and the other is the dam removal project in Taichung. The results showed that integrated documents could help us to evaluate restoration project well i.e. the check dams removal of Kao-Shan Creek. In the restoration of Love River at the Heart of Love River, the lake of pre-project baseline survey caused the bad design of ecological ponds setting and the objective of water quality improve was failed. There have no integrated documents, it's difficult to draw some improve suggestion, nor adaptive management.

Keywords: River Restoration Appraisals, the Heart of Love River, Kao-Shan Creek.

一、前言

河川有如大地的循環系統，當自然河川受到人為干擾後，在整體河槽安定和生態環境品質上都可能因此受到影響。

早期人們對河川之利用是以航運、灌溉、發電等為主，近年來人類對於河川環境已逐漸從以往人定勝天的觀念轉變為人定敬天的責任，河川復育的討論與應用便應運而生，包括特定物種之棲地營造、河川廊道連續性之改善、生物多樣性之提昇、兼顧安全及生態之治山防洪工程等。在台灣，河川復育工作主要始於眾所周知的生態工程(Ecological Engineering)，其廣泛實施階段受到相當的重視。行政院公共工程委員會(2006)闡述生態工程所強調的目標，除了促進產業及經濟發展外，更在創造優質永續的生活環境。因此，生態工程即在推動公共工程應融合生態系統與工程技術，兼顧環境的永續經營；而實際的作法是在治山防洪需求之前提下，結合生態工程施作，進行河川天然化之整治。除了考量原有的功能、安全之外，並對環境、生態、景觀、甚至文化等進行考量，以促使硬體工程建設與整體環境相融合，並維護生物多樣性。自 2000 年至今，包含水利及水土保持相關單位多融入生態工程之概念於施作工程中，並有如位於新北市雙溪區之后番子坑溪神農橋區段被列為生態工法教學園區之「后番子坑溪整治工程」，以複層木排樁施作

護岸工程、乾砌石工法施作固床工，並於河道創造多樣化的水域型態，營造魚類棲地等復育工程；以及位於台中市新社區和平里中和橋下游河段榮獲公共工程金質獎殊榮的「抽藤坑溪中和橋下游整治工程」，以當地天然材料為建材，進行預鑄格框護岸及漿砌塊石護岸與固床工之施作，創造多樣化的水域型態，營造魚類棲地，期許達到水患防治及生態復育之成效。

然而，生態工程的相關作為自 2004 年後，由於許多採用生態工程治理之地區產生工程損壞或是成果不如預期目標之情事，例如高雄市政府下水道工程處於 2005 年所辦理之「鹽水港溪生態工法改善水質工程」，經 2007 年檢視其水質改善之成效不佳，未達成復育目標(高雄市政府下水道工程處，2011)；另花蓮縣壽豐鄉樹湖溪於 2001 年欲設立戶外生態教室，卻以水泥結合砌石工法施作護岸，其密閉的護岸難以提供植生與動物棲息(金文森，2003)；另加上在欠缺生態效益檢驗機制之情況下，常造成生態工程之效益未能被客觀評估，導致生態工程逐漸不再被廣泛提倡，而河川復育相關領域仍有待努力。究其原因，乃在於河川復育之範疇與生態工程之實質意義並未被明確釐清，兩者間之關聯未被客觀了解，且相關計畫工程完成後之成效評估付之闕如。

近年來在生態復育意識高漲的趨勢下，雖有越來越多河川復育工作的投入，並且持續針對各

種不同的復育方法與技術做出討論，而在此同時雖有零星對於復育計畫施作後的評估研究，但總以局部討論或較短時程的研究為主，較少有針對復育計畫施作前、後相關監測資料的存在與進行探討分析和以全面且長時距性的方式來評估復育計畫結果，更別提從眾多失敗或成功的案例中學習經驗。王隆昌等(2004)探討生態工法驗收過程所遭遇之相關問題，進一步整合專家建議及執行單位之經驗，建議應加強生態工法規劃設計前的環境背景調查，且驗收作業應有生態專家參與、並需以工程之功能性作為驗收方式，而完工後之營運維護管理亦應明確訂定。汪靜明(2003、2004、2008)研究有關生態工法之評估模式，指出生態評估調查需涵括工程施作前、中、後各階段之調查與監測；且嘗試研擬生態工法之生態評估程序及其內涵，做為生態工法實施之配套機制；並進一步研提生態檢核評估及改善措施表，以期教育推廣之落實。

有關河川復育之成效評估，過去國內外之相關研究往往透過單一指標或複合式指標進行河川環境物理、化學、或生態等半量化評分來加以評估 (Hu *et al.*, 2007)。在棲地環境評估上，目前有如透過現場調查後以水域生物相指標之評估 (Purcell *et al.*, 2002)，包括美國環保署(U.S. EPA, 1989)所提出之溪流快速生物評估法(Rapid Bioassessment Protocols, RBP)、以魚類作為評估對象之生物整合指標 IBI (Index of Biotic Integrity, Karr, 1986, 1991；王漢泉，2002)、以水棲昆蟲作為評估對象之科級生物指標 FBI (Family-based Index, Hilsenholf, 1988)、以藻類作為評估對象之藻屬指數值 GI (Genus Index, Wu, 1999) 等來檢視水質優劣狀態或附著藻類之季節性變動與水質之相關性(張睿昇，2004)。另亦有考量生態性與物理性系統各方面品質的綜合性指標，如河川棲地管理模式(5-S model)、溪流狀況指數(ISC)、加州河川生態評估準則(California Stream Bioassessment Procedure, CSBP) (CDFG, 1999)、生息環境評估法(Habitat Index Method, HIM) (森下郁子等，2000)、物理性棲地模擬系統(Physical Habitat Simulation System, PHABSIM) (Milhous

et al., 1990)、深潭品質指標(Pool Quality Index, PQI) (Azzellino *et al.*, 2001)、定性棲地評估指標(Qualitative Habitat Evaluation Index, QHEI) (Rankin, 1989)、河川環境快速評估系統(SERAS) (巨廷工程顧問公司，2005)等。Hu *et al.* (2007)以 IBI、FBI、GI 與 ISC 綜合判斷南勢溪之環境狀況；李明儒(2004)以現地調查結合 FBI 及 IBI 研究河川環境生態評估指標；莊明德等(2004)以生物群聚探討河川棲地的變化；朱達仁(2004)以定性棲地評估指標(QHEI)及生物整合指標(IBI)探討工程對棲地生態的影響；陳樹群等(2008)參考溪流快速生物評估法(RBP)中棲息地評估指標，並增加人為之影響性與植生之族群種類及豐富度，研擬河川棲地物理性環境評估指標，並將該方法應用於石門水庫集水區之四條支流河段。至於在水質評估上，目前國內外較常採用的指數主要有一般河川水質指數(Horton、NSF、Harkins、SDD、Dunnette、House、WQI8、WQI5)、河川污染程度指標(Prati、Ross、傳統 RPI、簡易指標 BOD₅/DO、NCURPI)及生物指標三類。

上述的評估方式雖然有利於量化評估，且在國內外皆已有為數不少的應用，但卻較缺乏一致性的評估流程與基礎，往往每個河川復育案例之評估，僅限於該案例之評估結果，且若以不同的指標進行同一個項目的評估會難以在時間及空間之應用上進行明確的比較，同時評估結果不具備對河川環境演變進行追蹤之特性。

國外河川復育評估方法則已有不同之發展，Donnell 與 Galat 在 2007 年跳脫傳統的指標評估方法，針對美國密西西比河上游約兩百個河川復育案例以監測計畫存在與否、復育計畫適切性與監測資料等項目進行評估，並利用電訪問卷的方式輔助分析。Kondolf 於 2002 年針對美國及英國河川復育案例，以評估模式 Post-Project Appraisals (PPAs)進行評估，探討計畫成功標準、背景資料、設計理念、監測資料等存在狀況。Kondolf 等於 2007 年在美國加州透過 National River Restoration Science Synthesis 的研究紀錄，建立了四千多個河川復育工程的基本資料，並從中隨機選擇了 44 個復育工程案例，以 PPAs 進行

深入的研究及訪談，供後續類似復育工程之參考。Tompkins 與 Kondolf 於 2007 年利用 PPAs 針對七個複合型渠道的河川復育工程進行評估與比較，並就其成功標準判定其達成效益。由上述研究可知，河川復育計畫的評估已漸由傳統以不同面向之單一指標或複合式指標之應用，進一步提升為就計畫整體的監測資料存在與否，以及後續適應性管理進行探討，以供後續類似計畫之參考學習，此可作為國內相關研究之借鏡。

綜上所述，本研究首先對河川復育之定義進行彙整並進一步提供明確且適用於現今環境之定義，希望透過明確之定義以確立河川復育之內涵，進而透過 Post-project Appraisals (PPAs) 之評估方法應用於台灣地區河川復育計畫成效評估，進行案例研究，以供未來河川復育計畫評估之參考及適應性管理之應用。

二、河川復育定義

河川復育之理念與實踐源自歐洲，前人研究對河川復育之定義包括 Gore 於 1985 年提出河川復育乃是恢復生態系至近似未受人類干擾前之狀況；Jordan *et al.* (1987) 認為將人類對生態系統之動力及多樣性所造成的損害進行修補之過程稱之為河川復育；Cairns (1991) 將河川復育定義為河川的結構和功能完整恢復至受干擾前的狀態；NRC (1992) 則提出重建河川環境受干擾前之水域功能及物理、化學、生物等相關特性與恢復生態系統使其接近受干擾前的情況。

根據過去的研究，一般而言，河川復育較嚴格的定義乃指「修復因人類活動所導致環境之損害，重建河川生態環境系統，在結構上與功能上回復至未受人類開發活動干擾前之自然狀態」。然而，由於人類開發活動干擾前的原始河川環境狀態目前並無歷史資料可遵循得知，修復河川系統至原始的自然情況在事實上難以達成；因此，在實際操作上一般只能回復河川溯及大幅度開發干擾前某一稍微理想的自然生態環境。不過，由於所謂的稍微理想，在定義上較為主觀，因此，河川復育之定義與目標具有階段性與漸進性。

現今河川復育較廣泛、合理且為時代背景所接受的定義為「回復或改善河川生態環境系統中某一種或一種以上之功能」，例如：河川廊道縱橫向連續性改善、自然輸砂功能回復、水質改善、指標物種棲地復育、棲地多樣性提升、景觀營造等皆屬之。

以河川廊道縱橫向連續性改善為例，由於河川廊道包括河道、河岸、灘地、堤防以及部分高地所形塑成之空間，可提供之生態系統功能包含了生物棲地之提供、生存空間之屏障、導流、過濾、食物來源及匯集等功能(王永珍，2004)，因此水工結構物的興建，可能阻斷河川廊道之縱橫向連續性，使得棲地破碎化，對生態系統造成影響，藉由結構物的改善或拆除，可復育廊道之連續性(王筱雯，2011)。在指標物種方面，由於指標物種具有一定之生存條件需求，可間接反應生存環境概況，因此常被用於做為生態環境優劣之評估指標，例如位於台中市和平區雪霸國家公園七家灣溪支流高山溪之壩體改善工程即是復育指標物種台灣櫻花鉤吻鮭(*Oncorhynchus formosanus*)所進行之河川廊道連續性改善復育工程之一例。而對於高度發展之都市及人口聚落，河川復育計畫除了洪氾防治，隨著人民生活水準提升及教育美學之素養，人們亦著重河川景觀之改善，因此位於高雄市愛河中游的愛河之心復育工程，便是透過專業美感設計，施作景觀改善之河川復育工程，該計畫乃是改善河道航運功能，並促進水陸交通連結，使都會區水岸景觀美化改善之河川復育工程。

由於河川環境系統受人為活動影響程度不一，野溪與都市型河川在復育的背景、目標與限制上皆有所不同(表 1)。位於台中市和平區雪霸國家公園境內之高山溪壩體改善工程，即屬於野溪型之河川復育計畫；位於彰化縣芬園鄉之抄封埤生態工程，採用塊石工法、土坡工法及拋石工法，並設有步道及觀景平台，另種植原生護岸植物水柳及苦苓樹，並於邊坡鋪排卵石及埋設魚槽，增加生物棲息空間(永續公共工程入口網，2011)，則偏屬於鄉村型河川復育工程；而高雄市為了景觀與滯洪空間營造之愛河之心乃是典型

表 1 河川復育計畫類型及其特性表

特性 \ 類型	野溪型	都市型
流量(Q)	較未受干擾	受人為干擾
輸砂量(Qs)	較未受干擾	受人為干擾
都市化	低	高
生態潛勢	高	低
案例	高山溪壩體移除改善工程、后番子坑溪整治工程	愛河之心復育工程、筏子溪劉厝堤防景觀復育試辦工程

的都市型河川復育工程。至於河川復育的手段，依上述野溪與都市之環境干擾程度和背景限制之不同，可分為透過自然形成或人工為之，在台灣之生態工程(例如新北市深坑區的阿柔坑溪棲地改善工程，改善既有橫向結構物以及利用天然資材營造生態棲地之方式；台中市新社區抽藤坑溪中河橋下游整治工程，使用當地天然材料建造固床工、預鑄格框護岸及漿砌塊石護岸，並營造深潭淺灘)僅是河川復育的手段之一。

由於河川復育在現今時代背景所賦予的意義乃是復育河川某一種或一種以上的功能，因此進行河川復育之規劃時，應深入了解河川的原有地形及形態、河川環境劣化的演變過程和原因、以及現今人為活動的限制因素等，並明確訂定復育目標，同時，需要了解河川環境乃是持續變動的系統，因此在復育完成之後，需要採取適應性管理，持續地監測，以了解河川環境系統對於復育手段所產生的變化，並在必要時採取因應措施。

三、研究方法

本研究參考 Downs and Kondolf (2002)所提出的河川復育計畫評估方法(Post-project Appraisals, PPAs)及王筱雯(2009)對於 PPAs 之相關研究，將該方法應用於台灣河川復育案例之評估研究，並從中進行分析、歸納與系統整合，透過案例研究以瞭解台灣河川復育計畫資料整備及監測計畫之應用情形，而評估結果亦可針對河川復育計畫提供經驗學習和適應性管理之建議。

3.1 PPAs 評估方法

PPAs 乃是一套以系統化資料蒐集為基礎之評估法。本研究將之彙整為以 6 個項目對既有已完工之河川復育案例分為復育工程施作前(pre-project)與完工後(post-project)兩個部分來進行評估的方法。各組成項目詳細內容說明如下，其架構請參見圖 1。

3.1.1 計畫目標及成功標準(Objectives and Success Criteria)

河川復育計畫於規劃設計前應就計畫預期成果確立計畫目標與訂定成功標準，成功標準包含可量化評估(例如水質改善程度可使用水質指標量化評估)與不可量化評估(例如環境景觀改善程度)之項目。

3.1.2 基本資料蒐集與調查(Baseline Survey)

基本資料蒐集與調查除了應包含復育計畫影響範圍內之環境背景資料外，亦需對照計畫目標進行評估和彙整相關基本資料，同時亦應描述計畫範圍之特殊問題與現象；理想狀況下，基本資料調查應包含計畫施作前的河道地形調查及為期一段時間的監測調查，以作為復育計畫內容規劃設計之參考。

3.1.3 設計理念及書圖(Design Rationale and Drawings)

復育工程施作前應有完整的設計書圖並包含詳盡的設計理念說明，如此可使評估分析作業趨於客觀，避免復育計畫成效評估時對計畫施作內容之主觀推測；理想狀況下，設計理念應可包含計畫地區社區民眾意見參與和相關經費籌措資料。

3.1.4 完工初期河道調查(As-built Survey)

計畫完工初期之河道調查乃是針對復育工程施作內容進行調查與記錄，可作為計畫完工一段時間後復育工程因環境營力所造成改變之對照，同時可作為工程設計之檢討以及未來改善計畫之參照。

3.1.5 完工後的監測計畫(Monitoring Program)

復育計畫完工後應有監測計畫；監測調查主要用來做為復育計畫成效之評估，可記錄復育計畫施作工程內容及周遭環境之改變情形，同時有



圖 1 PPA 評估項目資料架構圖

助於未來改善計畫之參考；監測計畫應包含生態系統對復育計畫之反應、渠道周邊地形調查和水文相關參數量測(例如：輸砂、流況…)等。

3.1.6 輔助分析程序(Secondary Analytical Procedure)

復育計畫依上述各要項進行有系統的資料蒐集之目的，乃在於了解可做為成效評估之資料存在與否，若相關資料存在性或取得性低、無法提供計畫成效評估之依據，則可藉由上述資料蒐集過程中所推衍之計畫目標進行適當參數之輔助分析程序，以獲得環境現況調查資料進行計畫成效評估，並可提供未來復育計畫成效再次評估之參考。

3.2 案例探究

本研究為突顯都市型河川及野溪型河川因環境差異而有所不同之計畫目標及評估參數，選取二件具有不同環境特性之案例進行復育計畫評估，分別為都市型河川「愛河之心復育工程」

及野溪型河川「高山溪壩體改善工程」。由於每一個復育案例皆有其獨特的環境背景與特性，本研究之案例分析乃針對如何以 PPA 評估法了解成效評估所需資料之完善與否並據以提出建議，進而根據各案例之不同目標所對應之不同參數進行評估，旨在於增進對河川復育之了解。

3.2.1 都市型河川案例：愛河之心復育工程

愛河發源自高雄縣仁武鄉，經高雄市區後注入高雄港第一港口，流域面積為 57.2 km²，河流全長約 16 km，其地理位置及水系分布請參見圖 2。

愛河上游河段，河岸兩旁有親水造景設施，被規劃為社區河堤公園；中游河段設有愛河之心；下游河段主要為碼頭及河岸景觀。愛河中下游河段為海水感潮河段，鹹水魚類常洄游至此，形成愛河豐富的魚類生態。愛河多年整治復育之重點在於改善愛河水質及營造愛河周邊環境景觀。愛河水質改善工程主要透過污水下水道截污配合水中閘門之控管，自愛河下游往上游階段性

改善水質，同時在愛河上游段天祥二路之河堤公園興建礫間處理法水質淨化工程，以加強上游河川水質之改善；而河岸景觀營造工程包括造景設施的營造。本研究選取愛河中游之愛河之心作為主要研究地區，透過愛河中心樞紐愛河之心的延伸，可兼顧愛河整體復育計畫之評估。

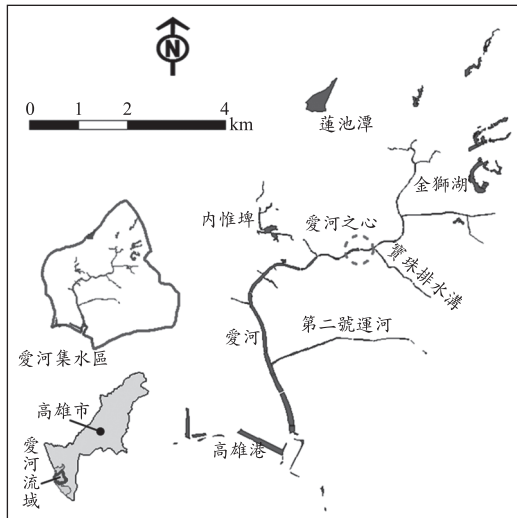


圖 2 愛河水系分布位置圖

愛河之心關建工程乃是高雄市政府愛河湖航計畫之子計畫，其工程內容包含博愛路兩側之東湖(生態池)、西湖(迴船湖)和橫跨博愛路之景觀陸橋。本研究參照 PPAs 之評估流程進行愛河之心復育計畫相關資料蒐集，並著手輔助分析作業於 2010 年 1 月及 3 月拜訪高雄市政府下水道工程處，進行愛河之心興建工程及愛河之心清淤作業相關訪談；2010 年 8 月進行愛河之心民衆問卷調查作業，以了解民衆對於愛河之心水質、環境營造及愛之船航運功能之評價，共調查問卷 100 份，以做為愛河之心計畫目標成效評估之參考。

3.2.2 野溪型河川案例：高山溪壩體移除改善工程

雪霸國家公園轄區內的七家灣溪為大甲溪上游主要支流，七家灣溪源頭由北方的桃山北溪與桃山西溪匯流而成，並在下游段匯集高山溪，於萬壽橋下游端匯入大甲溪，河系總長約 13 公里(參見圖 3)。七家灣溪流域是目前國寶魚台灣櫻花鉤吻鮭唯一的棲息河域。該地區自 1980 年代起，由於防砂壩的建造與人為開發等因素，造成櫻花鉤吻鮭棲地大幅銳減，為提供鮭魚洄游空間及改善棲地破碎化，雪霸國家公園管理處於

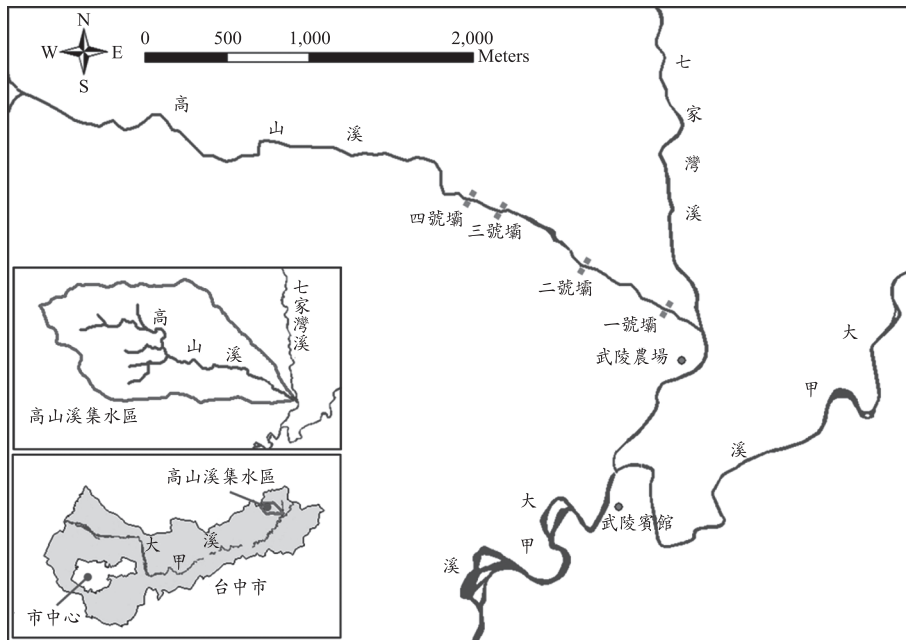


圖 3 高山溪水系分布位置圖

表 2 案例研究 PPAs 評估結果彙整表

檢視項目	案例	評估結果	說明	案例	評估結果	說明
計畫目標及成功標準	愛河之心河川復育計畫	不明確	計畫目標為航運功能、景觀營造、水質改善及滯洪功能，並無明確之成功標準設定。	高山溪防砂壩壩體拆除計畫	明確	計畫目標乃是將高山溪河道上的四座防砂壩進行拆除或改善，以復育生態棲地。
基本資料蒐集與調查		不完整	基本資料調查僅包含河道斷面測量及少量的魚類資料，並未調查水質。		明確	基本資料蒐集與調查包含了水質調查、魚類分布狀況及數量調查、水域生態棲地調查等資料均有紀錄。
設計理念		明確	設計理念主要考量愛之船迴船空間，景觀營造，生態池水質改善功能及滯洪空間。		明確	壩體拆除及改善作業設計理念乃是透過物理模型試驗分析加以擬定。
設計書圖		明確	設計書圖明確記錄。		不明確	相關資料並未有壩體拆除之相關設計書圖，僅有工程師做前後河道縱橫斷面測量及照片紀錄。
完工初期調查		欠缺	工程施作與設計書圖相符，但是並無對照計畫目標之相關調查。		明確	防砂壩改善拆除初期，相關河道縱橫斷面測量、水質調查、魚類分布狀況及數量調查作業均有相關紀錄
完工後的監測計畫		欠缺	並無監測計畫，偶有相關研究計畫可針對主管機關要求進行相關調查，但現階段並無完整監測資料或監測計畫。		明確	防砂壩改善後，相關河道縱橫斷面測量、水質調查、魚類分布狀況及數量調查作業均有相關紀錄
輔助分析程序		需要	本研究針對景觀營造及航運與滯洪功能，透過訪談及問卷調查進行補充調查，以評估計畫目標。		不需要	計畫包含計畫執行前及執行後之相關調查和紀錄資料完備，透過記錄資料，可對該復育計畫進行評估，因此在現有之監測調查及管理體制下，無須新增輔助分析程序。

1996 年起開始對高山溪防砂壩之壩體改善及拆除作業進行可行性評估，並於 1999 年至 2001 年間，自最上游之四號壩陸續往下游之一號壩進行四座壩體改善與拆除工程。

由於當時國內並無堰壩改善之相關研究，鑒於壩體改善計畫目的為特定魚類棲地復育，因此壩體改善作業透過模型試驗，進行不同拆除方式於河道環境與泥砂輸送之模擬，將模擬分析結果綜合生態專家建議之作業時機，呈報相關主管機關核可，最後進行壩體改善工程及計畫完工後之監測調查（經濟部水利署水利規劃試驗所，2010）。

本研究參照 PPAs 之評估流程進行不同階段的資料蒐集，透過主管機關歷年紀錄資料及委託辦理之規劃報告以進行高山溪壩體改善工程河川復育成效評估。

四、結果與討論

4.1 愛河之心河川復育計畫

4.1.1 PPAs 評估結果

本研究於愛河之心評估結果(表 2)可知愛河之心復育計畫之目標著重於迴船湖之建置、景觀營造、水質改善和滯洪功能之提升，但相關規劃報告並未設定明確之成功標準；而基本資料調查僅包含河道斷面測量及少量的魚類資料；設計原理與書圖則有相關資料明確記錄；復育計畫完工初期並無河道型態相關調查，但主管機關(高雄市政府工務局下水道工程處)表示工程施作與設計理念和書圖相符。根據主管機關進一步表示，愛河之環境監測，除了下游區段(龍心橋下游)有高雄市政府環境保護局設置之水質監測站，中上游地區並無定期監測計畫，雖偶有計畫型之規劃案可進行相關環境調查，但現階段並無完整監測計畫和資料。

4.1.2 復育成效評估結果

根據上述之 PPAs 評估流程所蒐集之資料並不足以評估復育成效，因此本研究進一步進行輔助分析，針對愛河之水質改善、景觀營造、滯洪

表 3 愛河之心河川復育計畫目標成果評估問卷調查結果表

單位：件

問題	結果		
愛河之心景觀是否良好？	是：73	否：7	一般：20
您是否曾經搭乘「愛之船」(愛河之心航線)？	是：24	否：76	
愛之船(愛河之心航線)現階段航班僅假日行駛，您覺得此前提下之航運便利嗎？	便利：20	不便利：23	一般：57
鄰近地區於愛河之心開建前是否有淹水情形？ — 愛河之心開建後，淹水情事是否減少？	有：20 是：13/20	無：66 否：0	不清楚：14 不清楚：7/20
是否知道愛河之心興建前環境樣貌？ — 愛河之心之建設是否符合您的期待？	知道：64 符合：50/64	不知道：36 不符合：14/64	
您覺得愛河之心之建設是成功的嗎？	是：72	否：10	一般：18

調查日期：2010 年 8 月。

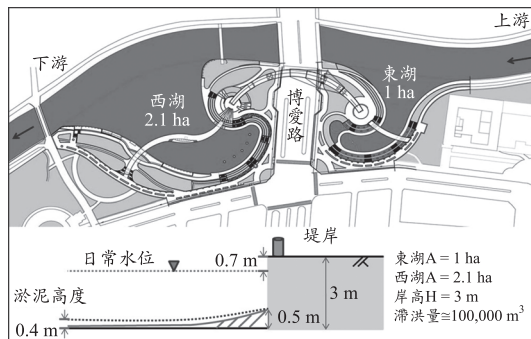


圖 4 愛河之心平面配置及滯洪量分析示意圖

效益及航運功能等項目與主管機關進行訪談和民衆問卷調查以作為補充資訊。評估結果得知愛河之心所屬河段為感潮河段，淡鹹水交界以及颱風豪雨時期來自上游的洪水衝擊，水生植栽不易存活，以致愛河之心東湖生態池工程效益不彰；而滯洪功能方面，因愛河之心為開放式設計，其空庫容積約 100,000 m³，加上愛河之心為感潮河段，平時河道具有一定水位，所以實際滯洪效果有限(圖 4)。在景觀營造層面，問卷調查結果約有 80%的民衆認同愛河之心的景觀良好，此調查結果與林佩瑩等(2008)之研究結果「民衆甚為肯定愛河綠廊在觀光遊憩和社會文化的功能」相符；但民衆對於愛河之心愛之船航運功能之評價較低，多數認為愛之船航運功能並不便利，觀光客使用居多；問卷調查分析結果請參見表 3。

4.2 高山溪防砂壩壩體拆除計畫

4.2.1 PPAs 評估結果

高山溪壩體改善工程案例評估結果(表 2)得知高山溪復育計畫乃是透過四座防砂壩壩體拆除及改善工作，以改善高山溪因河川廊道連續性阻斷所造成破碎化之生態棲地；基本資料蒐集部分，依本研究蒐集文獻彙整結果得知，與高山溪復育計畫相關之基本資料調查包含了計畫施作前的水質調查(廖林彥，2001)、櫻花鉤吻鮭族群數量年度變化(曾晴賢，1998~2003)、與水域生態棲地調查(葉昭憲，2000、2001)等資料，但未有河道地形等相關資料。高山溪防砂壩壩體拆除及改善作業之理念乃是透過物理模型試驗分析加以擬定，而工程書圖僅有壩體改善前後的斷面測量資料及照片紀錄(圖 5)，並無設計工程書圖；當壩體改善作業完成，主管機關仍定期進行監測與調查作業(葉昭憲，1998~2001)，因此具有計畫完工初期的河道型態調查以及完工後之監測調查計畫。

4.2.2 復育成效評估結果

由於高山溪壩體改善案例雖未有明確之設計理念與河道地形相關背景資料，但與計畫目標相關之魚類棲地復育資料眾多。由計畫完工後魚類族群數量年度變化資料及曾晴賢 1998~2003 年之研究成果，各齡族群比例都逐漸攀升，尤其是幼魚族群的增加最為顯著且快速，可得知高山溪原本破碎化的棲地已獲得改善，縱向生態廊道得以再度串聯，計畫目標可謂達成。



(a)高山溪一號壩拆除前



(b)高山溪一號壩拆除後



(c)高山溪二號壩拆除前



(d)高山溪二號壩拆除後



(e)高山溪三號壩拆除前



(f)高山溪三號壩拆除後



(g)高山溪四號壩拆除前



(h)高山溪四號壩拆除後

圖 5 高山溪四座防砂壩壩體拆除前後鄰近河道環境之比較(照片來源：廖林彥，2001)

表 4 各案例計畫目標及評估參數資料表

計畫名稱	計畫目標	評估方法	評估參數
愛河之心 復育工程	航運	問卷調查(本研究補充調查與分析)	民眾觀感
	滯洪功能	訪談及水理計算(本研究補充調查與分析)	滯洪容積 主管機關意見
	水質改善	訪談、現地勘查及水質資料蒐集 (本研究於 2010 年 1 月訪談高雄市政府下水道工程處)	主管機關意見 (生態池水質改善設施功能、水質 RPI 指數)
	景觀營造	問卷調查(本研究補充調查與分析)	民眾觀感
高山溪壩體 移除改善工程	棲地改善	相關資料與照片蒐集與分析 (曾晴賢, 1998~2003; 葉昭憲, 1998~2002; 廖林彥, 2001)	櫻花鉤吻鮭族群數量年度 變化、棲地連續性

4.3 綜合評估

進行河川復育時，應深入了解河川環境劣化的演變過程和原因以及現今人爲活動的限制因素等，並明確訂定復育目標，同時，需要了解河川環境乃是持續變動的系統，因此在復育完成之後，需要採取適應性管理，持續地監測，以了解河川環境系統對於復育手段所產生的變化，並在必要時採取因應措施。

台灣早期的復育計畫往往只對計畫目的及緣由進行簡要說明，並無詳盡的成功標準敘述和定義，因此本研究在進行案例探討時於 PPAs 進行評估之時，同時嘗試回溯定義其計畫目標及成功標準，以利復育計畫成效評估及適應性管理之參考。

一般而言，當河川復育完工後，並非意味著全部的工作都已經結束，監測評估與維護管理仍是相當重要的工作。在台灣河川治理計畫往往只包含事前的調查、規劃、設計及施工，完工後的監測計畫和成效評估則付之闕如，遑論有效的適應性管理。惟有透過良好的監測以及適當的評估，才能對充滿著不確定性的生態系發展過程有更加深入的認識與了解，亦才能彌補工程或管理人員事前無法獲得完整的基本資料而造成計畫不詳實的困境，或因諸多無法控制的環境因素而造成計畫失敗的窘境。而長期的監測亦將進一步提供更多有用的資料可作為 PPAs 之支持。此外，若完工後並無監測計畫或監測計畫並非於計畫完工初期立即實施，或是簡易的、短期的採樣調查結果太過粗糙而不足以顯現關於計畫目標

關鍵參數的重要改變，可透過檢視歷史監測調查資料加以輔助評估作業。

本文案例研究中，愛河之心復育工程經資料蒐集與訪談推衍得知之復育目標為航運功能、水質改善、滯洪功能及景觀營造，藉由 PPAs 之評估可知其相關監測資料闕如，本研究乃進一步以訪談及問卷調查加以評估；而高山溪防砂壩壩體拆除計畫之目標為改善高山溪破碎化之生態棲地，其評估方式乃透過相關資料蒐集(包含棲地調查、魚類數量調查等)，針對計畫目標加以評估。兩案例之計畫目標及評估方法如表 4，其中，計畫目標乃依各主管機關高雄市政府工務局下水道工程處及雪霸國家公園管理處表示。

綜觀案例研究成果發現，愛河之心復育計畫座落於高雄市市中心，河川復育重點著重於防洪及景觀營造，景觀營造部分獲得廣大群眾之肯定，而滯洪功能因愛河之心為開放式之滯洪空間，滯洪功能僅約 100,000 m³；水質改善功能則因設計考量不足而效益不彰；愛之船溯航功能雖然達成，但航線航班之規劃及鄰近交通串聯仍有改善空間。高山溪復育計畫施行結果，雖改善河川廊道縱向連貫性，且復育指標魚種-櫻花鉤吻鮭之族群數量亦有增加之趨勢，但根據雪霸國家公園管理處(2008)委託計畫調查成果發現，高山溪二號壩因 2007 年科羅莎與韋帕兩個颱風事件的影響，使得壩基損毀，再加上原本二號壩上舊有泥砂淤積與木質殘材堆形成一結構完整之殘材壩(圖 6)，造成與下游河道約 4 公尺的高低差，同時亦造成河川廊及棲地之破碎等負面影響，致使

高山溪復育計畫未盡全功；雖然殘材壩可視為天然形成之堰壩，但此處形成殘材壩之部分成因乃是舊有壩體殘骸影響所致，而非其河川環境下形成之天然殘材壩。

綜合上述，河川復育計畫為回復或改善河川生態環境系統中某一種或一種以上之功能所進行之工程方法，應考量河川背景環境之適宜性與相關限制。野溪型河川具有較為穩定之流況且生態潛勢較高，可從事生態環境復育為主之河川復育計畫，而都市型河川因都市化程度較高，且河川流況豐枯期差異較大，適合發展防洪及景觀營造類之河川復育計畫。

4.4 適應性管理

王筱雯(2010)提出適應性管理(Adaptive Management)是面對具有不確定性與自我發展特



圖 6 高山溪二號壩拆除後漂流木堆疊形成殘材壩

性之系統時，藉由檢測之方式，不斷追蹤監測以調整操作方式，從學中做、從做中學(Learning by doing; Doing by learning)，動態性地視實際狀況調整管理措施。河川復育工作的施行，由於河川生態環境之反應與演變具有複雜、不確定與自我發展的特性，在知識無法完全掌握的情形之下，所採取的河川復育措施僅能當作是階段性的過程，需具備調整彈性。

適應性管理即是符合此一特性之管理模式，在此模式下，河川復育計畫得以隨時學習以及修正、再執行，其特點即是透過 PPA 所建立的監測評估機制得以適時修正復育的方向與做法。透過監測與評估，得以對因生態系統的不確定性而造成不良的設計或無效的執行進行檢視，且檢討生態環境反應的結果是否符合預期狀況，以決定其復育措施是否合適。一般的適應性管理步驟是由規劃、行動、監測和評估等四各步驟所連結而成的(FEMAT, 1993)，如圖 7。在適應性管理的概念下，每一個河川復育計畫的檢討，都是增進新的經驗與知識的契機。唯有透過此種回饋機制，未如預期的狀況得以不再消極的僅被視為失敗案例，還能積極面的提供寶貴的學習經驗，作為後續計畫的參考。

以本研究所評估之高山溪復育為例，所形成之殘材壩與其高差所造成河川廊及棲地之破碎等負面影響非原先計畫所預期，後續變化情形仍應長期加以觀測，在適應性管理的概念下，以準確掌握拆壩對於河道及櫻花鉤吻鮭棲地所產生之衝擊。

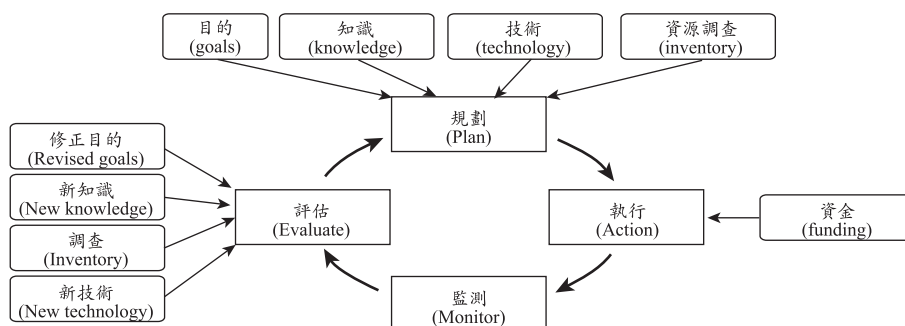


圖 7 適應性管理流程(修改自 FEMAT, 1993)

五、結論與建議

本研究對較廣泛、合理且為時代背景所接受的河川復育提出明確之定義，即河川復育為「回復或改善河川生態環境系統中某一種或一種以上之功能」，進而應用一套適用於台灣地區河川復育計畫成效評估之方法以確立河川復育計畫之內涵，並針對野溪及都市型河川進行河川環境復育案例之研討，以供未來河川復育計畫成效評估之參考及適應性管理之應用。

本研究以 PPAs 評估法對於復育案例進行分析，經由系統化的資料蒐集過程，可檢視復育計畫的優缺點，並可進一步提供相關課題研習，作為復育計畫適應性管理之參考。研究結果發現台灣地區河川復育計畫工作施作前的基礎調查與規劃較為缺乏，且復育目標訂定不夠明確；而在復育工作完成後，具有長期監測調查的計畫，如七家灣溪支流高山溪防砂壩改善工程，可提供後續類似復育計畫學習的良好依據。河川復育計畫施作前後之相關資料記錄若缺乏系統性之彙整，將不易留存或缺漏，而不完整的資料不易發展周全的適應性管理，河川復育計畫若缺乏適應性管理將可能產生復育計畫失敗時卻不知如何改善，同時造成人力及金錢上的損失，而河川復育之效益難以彰顯。復育工作於規劃與決策持續進行的同時，亦迫切需要來自過去的經驗整合，以提昇台灣河川復育工程之成熟性。

參考文獻

1. 王永珍(2004)，「應用河川廊道水理與蜿蜒之特性進行評估水生棲地復育適宜性之研究」，國立中興大學水土保持學系博士論文。
2. 王隆昌、林正平、徐培剛、陳岡亮(2004)，「國內生態工法驗收遭遇問題之探討」，營建創新科技研討會，pp. 93~104。
3. 王筱雯(2009)，「河川環境改善復育與評估之研究」，行政院國家科學委員會專題研究計畫(NSC 97-2218-E-006-283)。
4. 王筱雯(2010)，「河川復育工作成效之檢討評估與適應性管理」，行政院國家科學委員會

專題研究計畫(NSC 98-2221-E-006-237)。

5. 王筱雯(2011)，「河川復育之適應性管理」，行政院國家科學委員會專題研究計畫(NSC 99-2221-E-006-190)。
6. 王漢泉(2002)，「台灣河川水質魚類指標之研究」，環境檢驗所環境調查研究年報 9：207-236。
7. 巨廷工程顧問公司(2005)，「河川生態工法參考手冊」，行政院公共工程委員會。
8. 朱達仁(2004)，「台北縣雙溪鄉后番子坑溪應用生態工法整治影響及生態監測評估之研究」，第十四屆水利工程研討會，國立交通大學土木工程學系，D-97~D-98。
9. 李明儒(2004)，「頭汴坑溪環境生態評估指標之研究」，國立中興大學水土保持學系博士論文。
10. 汪靜明(2003)，「生態工法之生態評估模式探討」，近自然生態工法國際學術研討會論文集 pp. 92-108。
11. 汪靜明、邱健介(2004)，「河川棲地復育原理及美國實務案例」，行政院公共工程委員會生態工法案例編選集 pp. 500-532。
12. 汪靜明(2008)，「為落實生態工法與生物多樣性保育的生態檢核評估機制催生」，生態工法及生物多樣性研討會論文集，A1-1~A1-13。
13. 林佩瑩、廖學誠(2008)，「民眾對高雄愛河綠廊的認知、互動關係及管理建議之探討」，中華水土保持學報，39(3): 269-287。
14. 金文森(2003)，「淺論生態工法」，營造天下 94: 14-17。
15. 張睿昇、朱達仁、施君翰、陳有祺(2004)，「石門水庫上游集水區附著藻類之季節性變動與水質相關性研究」，第十四屆水利工程研討會論文集，B19-B26。
16. 莊明德、林志銘、余嘉娟(2004)，「水利工程對生物群聚影響之研究-以赤蘭溪為例」，臺灣水利 52(2): 82-91。
17. 陳樹群、安軒霈(2008)，「河川整治對棲地物理性環境影響之評估體系」，土木水利 35(4): 67-76。

18. 曾晴賢(1998),「櫻花鉤吻鮭族群監測與生態調查(一)」,內政部營建署雪霸國家公園管理處。
19. 曾晴賢(1999),「櫻花鉤吻鮭族群監測與生態調查(二)」,內政部營建署雪霸國家公園管理處。
20. 曾晴賢(2000),「櫻花鉤吻鮭族群監測與生態調查(三)」,內政部營建署雪霸國家公園管理處。
21. 曾晴賢(2001),「櫻花鉤吻鮭族群監測與生態調查(四)」,內政部營建署雪霸國家公園管理處。
22. 曾晴賢(2002),「櫻花鉤吻鮭族群監測與生態調查(五)」,內政部營建署雪霸國家公園管理處。
23. 曾晴賢(2003),「櫻花鉤吻鮭族群監測與生態調查(六)」,內政部營建署雪霸國家公園管理處。
24. 森下郁子、森下雅子、森下依理子(2000),「川のHの條件陸水生態學からの提言」,山海堂(東京),150p。
25. 經濟部水利署水利規劃試驗所(2010),「橫向水工結構物移除、改善與河川復育效益評估(3/3)」。
26. 葉昭憲(1998),七家灣溪河床棲地改善之試驗研究,內政部營建署雪霸國家公園管理處。
27. 葉昭憲(1999),七家灣溪河床棲地改善之試驗研究(二),內政部營建署雪霸國家公園管理處。
28. 葉昭憲(2000),七家灣溪河床棲地改善之試驗研究(三),內政部營建署雪霸國家公園管理處。
29. 葉昭憲(2000),七家灣溪河床棲地改善之試驗研究(四),內政部營建署雪霸國家公園管理處。
30. 葉昭憲(2001),七家灣溪河床棲地改善之試驗研究(五),內政部營建署雪霸國家公園管理處。
31. 葉昭憲(2002),高山溪防砂壩改善工程之實施與現況,國家公園學報 12(2): 191-203。
32. 廖林彥(2001),「高山溪防砂壩改善前後棲地變化之調查研究」,內政部營建署雪霸國家公園管理處。
33. Azzellino, A. and Vismara, R. (2001), "Pool Quality Index: New Method to Define Minimum Flow Requirements of High-Gradient, Low-Order Streams," *Journal of Environmental Engineering*, 127(11): 1003~1013.
34. Cairns, J. (1991), "The status of the theoretical and applied science of restoration ecology," *The Environmental Professional*, 13: 186~194.
35. CDFG (1999), "California Stream Bioassessment Procedure. Protocol brief for biological and physical/habitat assessment in wadeable streams," California Department of Fish and Game (CDFG), Water Pollution Laboratory, Aquatic Bioassessment Laboratory.
36. Downs, P. W. and Kondolf, G. M. (2002), "Post-project appraisals in adaptive management of river channel restoration," *Environmental Management*, 29(4): 477~496.
37. Forest Ecosystem Management Assessment Team. (1993), "Forest ecosystem management: an ecological, economic and social assessment" Washington, DC: U.S. Forest Service and collaborating agencies.
38. Gore, J. A., (Ed.) (1985), "The Restoration of Rivers and Streams: Theories and Experience," Butterworth Publishers, Stoneham. 280 p.
39. Hilsenholf, W. L. (1988), "Rapid field assessment with organic pollution with a family-level biotic index," *Journal of the North American Benthological Society*, 7(1): 65~68.
40. Hu, T. J. and Wang, H. W. (2007), "Assessment of environmental conditions of Bei-Gang River in Taiwan," *The 6th International Symposium on Ecohydraulics*, Christchurch, New Zealand.
41. Jordan, W. R., Gilpin, M. E., and Aber, J. D. (1987), "Restoration ecology: restoration as a technique for basic research," in *Restoration*

- Ecology: A Synthetic Approach to Ecological Research Eds W R Jordan III, M E Gilpin, J D Aber (Cambridge University Press, Cambridge) pp. 3-21.
42. Karr, J. R., Fausch, K. D., Angermeier, P. L., Yant, P. R., and Schlosser, I. J. (1986), "Assessment of Biological Integrity in Running Waters: A Method and its Rationale," Illinois Natural History Survey Special Publication 5, Champaign, Illinois.
 43. Karr, J. R. (1991), "Biological integrity: a long-neglected aspect of water resource management," Ecological Application. 1: 66~84.
 44. Kondolf, G. M., Anderson, S., Lave, R., Pagano, L., Merenlender, A., and Bernhardt, E. S. (2007), "Two Decades of River Restoration in California: What Can We Learn?" Restoration Ecology, 15(3): 516~523.
 45. Milhous, R. T., Updike, M., and Schneider, D. (1990), "User's Guide to the Physical Habitat Simulation (PHABSIM)-Version II," Biological Report, U.S. Fish and Wildlife Service.
 46. National Research Council (1992), "Restoration of aquatic ecosystems: science, technology, and public policy," National Academy Press, Washington DC.
 47. O'Donnell, T. K. and Galat, D. L. (2007), "River Enhancement in the Upper Mississippi River Basin: Approaches Based on River Uses, Alterations, and Management Agencies," Restoration Ecology, 15(3): 538~549.
 48. Purcell, A. H., Friedrich, C., and Resh, V. H. (2002), "An assessment of a small urban stream restoration project in Northern California," Restoration Ecology, 10(4): 685~694.
 49. Rankin, E. T. (1989), "The Qualitative Habitat Evaluation Index (QHEI), Rationale, Methods, and Application," Ohio EPA, Division of Water Quality Planning and Assessment, Ecological Assessment Section, Columbus, Ohio.
 50. Tompkins, M. R. and Kondolf, G. M. (2007), "Systematic Post-project Appraisals to Maximize Lessons Learned from River Restoration Projects: Case Study of Compound Channel Restoration Projects in Northern California," Restoration Ecology, 15(3): 524~537.
 51. U.S. EPA. (1989), "Rapid Bioassessment Protocols for Use in Streams and Rivers: Benthic Macroinvertebrates and Fish," U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC.
 52. Wu, J. T. (1999), "A Generic Index of diatom assemblages as bioindicator of pollution in the Keelung river of Taiwan," Hydrobiologia, 397: 79~87.

收稿日期：民國 100 年 10 月 11 日

修正日期：民國 100 年 11 月 25 日

接受日期：民國 100 年 12 月 26 日