

跨流域旱象治理模式：新店溪與科羅拉多河之韌性策略與 風險識別機制比較

姚祥瑞*

摘 要

我國新店溪與美國科羅拉多河流域於 2002 年均面臨嚴峻的旱象治理，兩大流域最嚴重旱象均發生於同一年，且二流域的翡翠與舒壯泉（Strontia Springs）水庫互結為姊妹水庫，流域規模雖不同，但自 2000 年起至今長達 20 餘年的旱象治理仍可供我國主管機關參考。本文從韌性策略、風險識別與預警等構面，作二流域的旱象治理模式比較。結果顯示：韌性策略上，新店溪以單一水庫調節與管網改善為主，科羅拉多河採多水庫群聯合管理、分級應變及跨州協議；風險識別面，新店溪面臨單一水庫依賴與降雨不確定性，科羅拉多河則為結構性缺水與協議到期衝突。建議包括：建立多層級水情預警與分級應變機制；推動多元水源利用與跨區調度；並強化氣候風險評估與跨域協調機制，以提升整體流域旱象治理韌性。

關鍵字：旱象治理、流域治理、科羅拉多河、新店溪、翡翠水庫

* 中國地方自治學會副祕書長、臺北市立大學兼任助理教授，E-mail: yauruey@gmail.com
本論文經兩位雙向匿名審查通過。收件：2026/3/27。同意刊登：2026/7/1。

壹、前言

本文旨在比較我國新店溪與美國科羅拉多河流域之旱象治理機制差異，並以「多中心與制度化治理架構」作為核心研究命題探討其水資源抗旱韌性。新店溪流域腹地雖小但人口密集，治理模式正由中央主導逐漸向跨域協作轉型；科羅拉多河則牽涉龐大跨州與跨國水權，具高度制度化卻陷入歷史分配之僵局。透過研究，檢視兩地在危機調度、法規演進與利害關係人參與之成效。剖析多中心治理如何藉由權責分散與網絡協調，提升極端氣候下的資源調適力；同時論證制度化架構在確保長程政策延續性、降低協商交易成本上的絕對必要性。新店溪流域供應大台北地區約 600 萬人用水，流域內重要蓄水設施主要為攔蓄北勢溪的翡翠水庫，與南勢溪聯合運轉供應下游用水。科羅拉多河（簡稱科河）流域用水人口達 4000 萬，流域內重要蓄水設施很多，主要有攔蓄米德湖的胡佛水庫（Hoover dam）。在乾旱治理的政策框架下，二流域對於維持區域供水安全與跨流域協調具有舉足輕重的作用。

一、研究動機與目的

新店溪與科河流域於 2002 年均面臨嚴峻的旱象治理，兩大流域最嚴重旱象均發生於同一年，且二流域的翡翠與舒壯泉（Strontia Springs）水庫同為姊妹水庫，「2002 年乾旱危機」對應了治理理論中的「危機調適與韌性管理」核心命題，此為本文研究動機，翡翠及舒壯泉二水庫雖屬於該流域內，但在本文並未特別篩選作比較，比較重點主要在新店溪與科羅拉多河流域整體的旱象治理。美國旱象治理經驗豐富，且自 2000 年起至今長達 20 餘年的旱象治理亦可供我國主管機關參考，此為本文研究目的。

二、兩河比較的價值性與適當性

將新店溪（Xindian River）與科羅拉多河（Colorado River）進行比較分析，表面上看似跨越了巨大的尺度與地理差異，但在環境韌性策略（Resilience Strategies）與風險識別機制（Risk Identification Mechanisms）的學術框架下，兩者的對比具有極高的研究價值與理論適當性。首先，兩河進行比較，可驗證韌性理論在不同空間維度下的適用性與邊界。

其次，政策互鑑上科羅拉多河的「長期乾旱預警機制」可為台灣乾旱頻率上升提供預警參考；最後，新店溪的「都市洪澇快速應變」則可為美西城市化過程中的局部水管理提供經驗。這種「跨尺度對比分析」能打破在地研究的侷限，將新店溪的個案研究提昇至全球河流治理的對話層級，進而提煉出具備普適性的風險識別模型。

三、非單一理論的跨尺度整合

本文研究旱象治理，面對當代氣候危機，單一理論已不足以解釋複雜現象，必須採取「綜合診斷模式」，亦即「跨尺度整合（Multi-scalar Integration）」，說明如下。

（一）複合系統治理：水資源治理本質上是一種跨領域的複合系統（Complex System）。

氣候變遷引發的旱象並非單一自然現象，而是「氣候（生態）」、「基礎設施（組織）」與「人類決策（國家治理）」相互回饋的結果。本文採用的架構是建立一個診斷模型，分別從「脆弱性來源（風險治理）」到「反應能力（適應性治理）」進行系統性掃描。

（二）多層次分析（Multi-level Analysis）：理論建構概念層次不同，是為了進行多層次分析，旱象治理本來就存在於不同維度：包括生態層次、組織層次及結構層次，透過不同層次指標，構築出一個「旱象治理的韌性全貌」。若忽略其中任何一個層次，研究結果都將失之偏頗。

（三）確立「問題導向」：以「氣候變遷下的極端不確定性」為核心，將理論串聯為具體的治理問題，當代流域治理的核心矛盾在於「靜態制度設計」與「動態極端風險」之間的落差，故而本文架構的邏輯鏈是以「風險識別（全球風險報告、風險鑑識）」定義外部環境的變異性。以「複合風險」解釋災難的級聯效應（Cascading Effect）。以「適應性治理」與「韌性理論」提供應對策略與診斷框架。

本文採取「分層診斷、系統聯動」的分析策略以避免單純的概念羅列，為應對氣候變遷帶來的複合風險，治理效能的分析必須超越單一維度。本研究將『生態韌性』視為系統的底層條件，「組織與國家韌性」視為調控機制，並將「風險識別」作為動態偵測器。此架構之核心邏輯在於：當極端旱象發生時，治理失敗往往非單一原因造成，而是不同層次韌性在交互作用中出現了『斷鏈』。因此，這種多理論並用的架構，是為了捕捉旱象治理中「人-地-組織」三方互動的完整病理圖譜。

四、研究方法及 分析架構

（一）研究方法

本研究以文獻蒐集為主，資料來源包括：國內、外著作期刊及政府機關出版品、研究報告暨相關規範等文件。有關災害風險治理概念，則採取個案、定性等途徑，採用比較研究法（Comparative Analysis），透過建構面向比較框架，以解析新店溪與科河流域在治理模式上的異同。本文依據國際水治理與公共政策領域常見的學理基礎，以韌性策略、風險識別與預警等面向，作為比較項目。

（二）分析架構

本文為確保在兩流域案例中，皆以同一標準衡量，將分析聚焦於以下機制，說明兩流域在不同情境下的表現差異：

1. 制度差異性如何影響韌性？

分析路徑：探討流域治理的「集中度」。

新店溪（高集中/單一管轄）：透過集權治理能快速反應，但易受單一主管機關資源限制，韌性來自於「調度效率」。

科羅拉多河（低集中/多州協商）：因涉及多州利益，韌性建立在「協議機制」（如《科羅拉多河契約》），雖然協商冗長，但風險分攤機制多元。

2. 規模是否影響治理模式？

分析路徑：探討「供水路徑」與「治理尺度」。

新店溪：治理模式傾向於「應急式管理」，重點在於防洪與短程供水調度。

科羅拉多河：規模導致的長距離輸水與跨域需求，強制其發展出「系統性規劃」，治理模式由應急轉向「長期配額與水量銀行」。

3. 法制化程度如何影響預警？

分析路徑：預警機制「觸發門檻」的法制化程度。

關鍵對比：法制化程度高（如科羅拉多河有嚴格的乾旱分級觸發條件），預警機制具有強制執行力，能抑制政治干預；反之，若預警屬於行政建議，則容易因政治考量而延誤旱象因應。分析架構比較表如下。

表 1

分析架構比較

分析維度	核心概念 (操作指標)	評估標準
制度差異	決策權限與協調機制	集中式 vs. 分散式；跨部門權責明確度
規模影響	水源供應鏈複雜度	區域供需平衡 vs. 多州跨域調度規模
法制化程度	預警法律授權與效力	災害應變法規強制力；數據透明度規範

資料來源：本研究整理。

貳、文獻探討與韌性理論建構

本章旨在奠定新店溪與科羅拉多河流域旱象治理之對比研究基礎。鑑於兩者流域規模與水文情境存在差異，相關文獻多屬單一個案探討，缺乏跨區域之整合分析。為彌補此缺口，本章將文獻回顧與理論建構整合，透過治理網絡與韌性水資源管理等視角，探討兩流域面對氣候變遷與缺水危機之政策演變、資源分配機制及技術調適策略，藉此提煉出具備解釋力的分析架構，以供後續進行深入之比較論證。

一、文獻探討

新店溪屬於淡水河系，如前所述目前文獻尚未發現與科河流域做系統性、跨流域之比較研究，即使新店溪或淡水河之單獨研究文獻亦不多見，至於研究科河流域更屬罕見，文獻整理如下表。

表 2
文獻探討

類別	作者／單位	年度	研究名稱	研究重點
流域通案	行政院研考會	2002	我國流域管理之研析	分析我國流域管理問題，並比較美、日、法、瑞河川管理，未涉雨量、供水等議題
	劉泉源	2002	台灣地區河川流域管理組織架構重整及其運作模式之探討	探討管理組織架構與運作方式，並進行個案分析
"	李忠勳等	2020	以 Budyko 架構探討氣候變遷與人為活動造成臺灣北部逕流量之變化	用統計分析台灣北部流域逕流量變化與轉折
"	陳坤	2011	流域管理中的法律衝突問題探討	分析水事法律間衝突並提出修法建議
"	羅致高等	2018	國外流域管理典型案例研究	探討德國萊茵河、法國河流域與美國特拉華河案例
淡水河 / 新店溪	謝龍生等	2004	氣候變遷對大漢溪及新店溪流域防洪系統潛在衝擊影響之研究	模擬各氣候情境對防洪系統的衝擊
"	李長晏	2009	從協力治理模式探討淡水河流域的管理	探討五種治理模式對流域協作治理影響
"	陳恒鈞等	2009	循證政策制定之運用：以南勢溪流域管理策略為例	探討永續發展政策中，如何獲得利益關係人支持
"	許文堯等	2014	從淡水河流域整體治理談國土空間跨域治理之實踐	以邏輯框架法規劃治理對策，促進利害關係人參與
"	林易俊	2016	嚴重乾旱時期限水策略預測模式研究 — 以新店溪水源為例	建立限水策略模擬與調度模型
科羅拉多河	姚祥瑞	2024	美國流域旱象治理－以科羅拉多河流域乾旱期（2000–2021）為例	以 IWRM 視角分析治理策略、制度挑戰與氣候風險

資料來源：本研究整理。

文獻清單涵蓋 2002 年到 2024 年間，關於「流域管理」從制度建立、跨域治理到氣候變遷因應的演變過程。以下將這些文獻依據理論脈絡進行歸納，分析其異同，並指出目前研究中可能存在的缺口。

（一）文獻理論脈絡分析

這批文獻的演進可分為三個主要的理論階段：

1. 制度框架與組織重整（2000 - 2005 年）

早期的研究核心在於「制度建立」與「國際比較」。

理論重點：探討如何建立有效的行政組織架構。行政院研究發展考核委員會(2002)與劉泉源(2002)側重於組織的垂直與水平整合，試圖解決台灣河川管理權責破碎化的問題。

管理模式：屬於由上而下的行政體系建構。

2. 跨域治理與利益關係人參與 (2005 - 2016 年)

隨著環境問題轉向複雜化，研究重點轉向「協力治理」(Collaborative Governance)。

理論重點：強調跨行政區的空間治理與社會協作。李長晏(2009)提出五種治理模式；陳恒鈞(2009)與許文堯(2014)則分別透過「循證政策」與「邏輯框架法」，探討如何讓利益關係人參與決策。法律衝突，陳坤(2011)補足了制度轉型中的法律漏洞，分析修法的必要性。

3. 氣候變遷與整合性水資源管理 (IWRM) (2014 - 2024 年)

近年研究轉向「韌性管理」，因應極端氣候帶來的風險。

理論重點：結合數據模擬與系統分析。謝龍生(2004)早期即觸及防洪衝擊，後期的李忠勳(2020)利用 Budyko 架構進行科學量化，林易俊(2016)與姚祥瑞(2024)則聚焦於「乾旱管理」。其中由姚祥瑞(2024)正式帶入 IWRM (整合性水資源管理) 視角，處理長期乾旱下的制度挑戰。

(二) 文獻間的比較分析

經由橫向對比可以發現，各文獻間在管理範式、技術工具與風險定義上存在顯著差異：

1. 管理範式之變遷：早期文獻(如研考會, 2002)將流域管理界定為「靜態的行政組織優化」；而近期研究(如姚祥瑞, 2024)則將其視為「動態的系統適應過程」，強調制度在面對不確定性時的彈性。

2. 方法論之演進：從初期的定性描述與國外案例引介(羅致高, 2018)，演變至中期的社會科學實證分析(陳恒鈞, 2009)，最後發展為高度量化的水文統計模型(李忠勳, 2020)與預測模型(林易俊, 2016)，反映出流域管理研究對於科學實證精準度的要求日益提升。

3. 治理對象的擴張：早期文獻多排除了降雨、供水等自然變數，純粹探討體制；反觀當代文獻，氣候變遷已成為不可或缺的背景參數，治理對象從單純的「行政人」轉變為「社會—生態複合系統」。

（三）研究缺口 (Research Gaps)

儘管上述文獻已發展出完整的脈絡，但仍存在以下研究缺口：

- 1.數位轉型與智慧治理的整合：雖然有林易俊（2016）的預測模型，但缺乏將「大數據、AI 監控、感測網路」整合進流域治理決策過程的系統性研究（即數位孿生技術在流域管理的應用）。
- 2.法律框架：陳坤（2011）雖探討了法律衝突，但面對氣候變遷下的「動態水源分配」（如非常規水源使用、水權交易機制），目前的法律架構仍顯僵化，缺乏因應極端情境的彈性法律框架研究。
- 3.管理範式：至於本土化 IWRM 的實踐成效評估，姚祥瑞（2024）以科羅拉多河為例探討 IWRM，但台灣流域面積小、坡陡流急，如何將國外大型流域的 IWRM 理論轉化為台灣小尺度、高密度人口區的具體實踐工具，仍有待更多本土個案的實證研究。

另外，從「水治理」到「生態系統服務」的擴展面，現有文獻多聚焦於「供水、防洪、行政管理」，較少提及「生物多樣性、河川生態補償」與流域管理制度深度融合，這在國際減碳趨勢（藍碳、生態基流量）下是明顯的缺失。

二、韌性理論建構

本研究運用「系統性與轉型韌性理論」，針對新店溪與科羅拉多河兩大流域，探討氣候變遷下的旱象治理。藉由「韌性策略並存的風險識別」框架，比較都市供水與跨州水權調配，生態修復及需求管理等多重策略的溢出效應。本文在釐清不同尺度下「韌性」的定義與落實方式，並識別流域治理從「防禦型」邁向「適應型」的關鍵路徑與轉型挑戰，構建跨流域的旱象治理分析模式。

（一）系統性與轉型韌性理論

以下分別從生態韌性、整合系統性風險及其策略轉型等面向說明其理論概念。

- 1.生態韌性與適應性治理：人類社會與自然環境被視為「不可分割的整體」（Integrated Social-Ecological Systems, SES）主要在 1990 年代末期，Berkes 和 Folke 將韌性的定義開始納入「社會適應能力」，不再只是自然界的恢復力，這正是現代防災「韌性社區」論點的理論雛形。(Berkes et al., 1998)其後 Folke 的社會-生態系統韌性理論（Social-Ecological Resilience）與 Pahl-Wostl 的適應性治理框架（Adaptive Governance Framework），則分析流域在水庫群調度、節水工具與基礎設施的韌性表現。前者主張人與自然是一體系統，韌性不僅是抵抗擾動，更在於適應與轉型的能力，而適應性治理與多中心合作是提升系統長期韌性的關鍵。(Folke, 2006)後者主張治理應是一個持續學習、跨尺度、包容且具彈性的過程，以因應複雜性與不確定性，最終強化社會-生態系統的韌性。(Pahl-Wostl, 2007)

2.整合系統性風險及韌性策略轉型：防災韌性理論隨著自然災害的難以掌控，區分了「防禦型韌性」與「管理型韌性」的論點(Linkov & Trump, 2021, pp. 7-9)被譽為權威，該核心論點主張在複雜系統中，韌性應透過系統工程（System Engineering）來達成，而非單純的災後恢復。Pascua 等多位在組織行為、策略管理與韌性研究領域具備深厚背景的學者共同整合了過去三年的實證研究，提出韌性策略應包含「認知韌性」（心理準備）與「結構韌性」。(Pascua et al., 2024) 聯合國經濟合作暨發展組織（Organisation for Economic Co-operation and Development, OECD）則強調國家層級的「治理韌性」架構，強調國家層級必須建立跨部門的風險應對機制，應對地緣政治與經濟波動。(OECD, 2022)於此概念下，聯合國減少災害風險辦公室（United Nations Office for Disaster Risk Reduction, UNDRR）在 2024 年至 2025 年間發布了兩份關鍵文件：《2024 全球評估特別報告》（GAR Special Report 2024）與《2025 全球評估報告》（GAR 2025）。這兩份報告標誌著全球防災策略從「應對單一災害」轉向「破解系統性風險惡性循環」的重大轉折。在《GAR 2025: Resilience Pays》中，UNDRR 強調韌性策略必須與「氣候調適（CCA）」深度整合，推動不僅是補強，而是改變土地利用與能源結構的根本轉型（Transformative Adaptation）。(UNDRR, 2025)

（二）韌性策略並存的風險識別概念

風險識別於流域管理中，主要在於自然或人為條件引發的旱、澇偵測與預判，是韌性策略的先驗條件，以「治理」（Governance）為核心的架構下，在建構一個從「防禦」轉向「適應」的動態管理體系。韌性策略與風險識別這兩項並非先後順序關係，而是同時並進，治理作為核心，提供制度保障、資源分配與決策權限，確保風險訊息能轉化為韌性行動。

1.強調災害鑑識（Disaster Forensics）與系統分析(UNDRR, 2024)：聯合國減災風險辦公室提出包括

（1）災害鑑識：聯合國減少災害風險辦公室於 2024 年提出報告，提出核心論點認為災害並非天然（Natural），而是人為決策與環境脆弱性的交織。須透過「抽絲剝繭」的非歷史災害，識別出導致損失的社會、環境與治理結構中的根本脆弱因子。

（2）系統分析：在 UNDRR 的《GAR Special Report 2024》報告中，強調「級聯效應」（Cascading Effects），從經濟產值的損失（Economic loss）回溯到基礎設施的失效，再回溯到最初的風險識別缺失。例如，識別洪水如何導致供電中斷，進而癱瘓醫療與水資源系統，被視為理解系統性風險的核心機制。利用 AI 與大數據識別未來可能出現「新風險」的區域，而非僅依賴歷史紀錄。

2. 複合風險識別

全球公認最具權威性的「風險識別與預警」年度文獻即為世界經濟論壇（World Economic Forum, WEF）發布的《全球風險報告》（The Global Risks Report），其於 2023 年的年度報告中，定義了「複數危機」（Polycrisis），並利用「風險關聯圖（Risk Interconnection Map）」識別出氣候、技術與社會風險之間的級聯效應。（WEF,2023）若往前追溯，學術界更早即出現「複合風險」論點，其對「複合風險」的識別，解釋了多個極端事件同時發生時，包括生活成本危機、氣候危機緩解不力以及有限資源面臨的日益增長的壓力，都可能成為引發風險識別模型的失效原因與改進路徑。（Zscheischler et al.,2021）

3. 預警機制倡議

水資源預警與構建社會生態韌性的緊密性，在於更精準的乾旱預警是構建社會生態韌性（Social-Ecological Resilience）的關鍵，能為農業調度與水資源管理提供更有價值的「前瞻洞察」（Anticipation）。（Reichstein et al.,2023）實務上全球倡議災害預警行動，仍在於聯合國創立的「全球全民預警機制」（Early Warnings for All, EW4All），其核心目標非常明確，在 2027 年底前，確保地球上每個人都能受到多重災害預警系統（MHEWS）的保護及達成目標的四個支柱，（UNDRR & WMO,2022）包括災害風險知識（Disaster Risk Knowledge）、觀測與預測（Observation and Forecasting）、警報傳播與通訊（Dissemination and Communication）及準備與反應能力（Preparedness and Response Capabilities）等。EW4All 倡議反映了 2022-2025 年間韌性策略所因應的多重災害導向（Multi-Hazard Approach），即系統必須能同時處理洪水、乾旱、熱浪等多種併發風險，即級聯效應（Cascading Impacts）的識別。

綜前所述，韌性理論因其能涵蓋系統之結構完整性與過程演化，故作為本研究核心檢驗之標的。適應性治理與風險治理應定位為提升上述「韌性」的必要條件與子變項。透過此一架構，不僅能釐清兩河流域因地緣背景不同而產生的治理差異，更能將「旱象治理成效」轉化為可觀測、可比較、可驗證的科學論述。

參、新店溪流域旱象治理探討

新店溪流域面積達 909.54 平方公里，年均流量為 21 億立方公尺。全球面臨氣候異常導致旱象頻仍時，風險治理即成該流域因應旱象重要一環。以下即依序探討分析。

一、新店溪流域治理的韌性策略

面對極端氣候（如旱象、水災）挑戰，新店溪流域須有快速恢復正常運作的治理措施與系統規劃。其韌性策略做法如下：

（一）南、北勢溪平日運轉原則

新店溪供水調配運用原則依中央及臺北市修訂的翡翠水庫運用要點與南勢溪聯合運用，亦即「先南勢溪後翡翠水庫」的運轉原則，故南勢溪供水比例遠大於翡翠水庫。以 2008 年至 2024 年的供水為例，南勢溪為 73%，翡翠水庫僅 27%（臺北翡翠水庫管理局，2025）。

（二）南、北勢溪旱象運轉操作凸顯翡翠水庫功能

台灣水資源環境於 2002 年至 2024 年間多次出現「乾旱警示」與「供水危機」，以北勢溪翡翠水庫 2008-2024 為例，翡翠水庫佔新店溪年均供水比為 24.26%，高於此比例計有 2008、2009、2010、2020、2021、2023 及 2024 等七年，供水最高比例為 2024 年高達 36.6%（臺北翡翠水庫管理局，2025）前述七年翡翠水庫流量同因旱象減少，然須補南勢溪不足支援仍不間斷。因前述共同運轉原則，在正常天候下自無問題，但於氣溫異常環境下，翡翠水庫要維持下游用水量就存在風險，這是未來將面臨的困境。

（三）修訂運轉規範強化旱象操作

自 2002 年北部旱象後，「翡翠水庫運用要點」分別於 2004、2011 及 2014 年修改三次，修訂重點涵蓋「蓄水運轉」及「防洪運轉」二部分。首先，增加供水量成為主要考量，將調節放水的進流量與水位等標準均提高，修訂後的操作運轉儼然成為預防枯旱的操作模式。其次，將發電條件均刪除，增加得視天候狀況增加放水量的彈性操作。經由前述運用要點的修正，賦與翡翠水庫更加彈性的操作空間，成為因應旱象韌性策略的一環。

（四）新店溪旱象加量支援的「板新地區供水改善計畫」

為改善新店溪輸送原水能力，至 2019 年止分二期完成「板新地區供水改善計畫」，每日最高可輸送 101 萬公噸原水。供水範圍涵蓋新北部分地區，影響人口 130 萬人。此供水改善解決輸送量不足問題，也解決石門水庫供水壓力。然板新供水改善計畫僅為增加輸送能力，未增加水庫原水量，遇旱象支援並未停止，在旱象次數隨氣候異常增加下，形成新店溪水系的供水壓力。

（五）解決大臺北管線漏水的管網改善

北台灣 2002 年發生重大旱象，影響範圍包括雙北市及桃園市（時為桃園縣），影響期間長達四個餘月，翡翠水庫最低蓄水容量僅餘 7.7%，（臺北翡翠水庫管理局，2002）此現況亦凸顯北水處漏水率偏高問題，為解決前述問題，北水處分別提出四年供水管網改善中程及二十年計畫，至 2023 年底止，漏水率由 26.99% 降低至 10.71%。每日配水量節省近 57 萬公噸，相當可供 120 萬人用水。（臺北

自來水事業處，2024）管網改善計畫的完成，不僅提升了供水效率，也強化整體供水韌性，降低對石門水庫的調度壓力。

二、新店溪流域風險識別與預警

新店溪流域主要風險仍來自天然流量減少及忽旱忽勞的極端氣候環境，以下分從南、北勢溪旱象風險識別、預警應變機制及侷限等二部分說明。

（一）南、北勢溪旱象風險識別

我國旱象預警應變作法，主要依據為 2024 年 1 月 9 日修訂之「經濟部水利署災害緊急應變小組作業要點」，依要點規範旱災認定主要考慮「河川流量」與「水庫水位」，其中新店溪流域是由北勢溪的翡翠水庫與南勢溪聯合運用，更屬因應枯旱操作的重中之重。就前述探究，南、北勢溪的運用仍存有預期的風險。

1.南勢溪運用量及氣候受限部分：水利署日前推動南勢溪引水至石門水庫計畫雖受阻但並未終止，¹此計畫與翡翠水庫共用南勢溪，故直接影響翡翠水庫，計畫完成後，是否如期發揮功能及不影響大臺北地區用水，關鍵仍在南勢溪面臨的可運用量、流量及極度天候等條件。

（1）可運用量及流量受限：依 2008-2019「新店溪水系供水統計」，南勢溪供水量年均約 6.7 億噸。依南勢溪歷史流量資料顯示，² 南勢溪年均流量約 12 億噸，扣除下游用水量，尚餘約 5.3 億噸，然 5.3 億並非全部運用，尚須排除河川維持機能的正常流量及日蒸發量等。限於引水管容量，無法全引進南勢溪的水量至石門水庫，南勢溪流量仍會部分自然流失，故南勢溪可運用量均會降低，若要發揮南勢溪引水的最大功能，尚需其他條件配合。至於引水計畫的取水條件，南勢溪流量須達每秒 40 cms，才會取水引至石門水庫。翡管局亦明確表明必須不能影響大臺北地區民眾用水權益之立場。³

（2）歷史低流量已連續出現：依歷年（1988-2024）的水源利用資料觀之，南勢溪達 19 年流量低於年均值，其中北部最嚴重亢旱年（2002）時流量僅約 6.6 億噸，約為平均流量的一半強，不足水量均由翡翠水庫補足。隔年（2003）南勢溪再次出現歷史最低流量約 5.98 億噸，流量不到往常一半，低流量連續出現已成警訊，未來任何規劃南勢溪用水，尤其引水至外域的計劃恐須承擔氣候變遷的極大風險。

2.北勢溪雨水利用率低：南、北勢溪的雨水利用率均低，北勢溪尤為明顯。

¹ 南勢溪引水至石門水庫計畫為水利署「強化西部廊道供水管網韌性先導計畫」之子計畫，由於推動過程引起烏來部落及環保團體疑慮，水利署對外表示會持續和地方溝通，取得部落同意後才會實施。2022.8.26 中央社。

² 翡翠水庫歷年水源利用統計表（76-113）及翡翠水庫運轉資料（109-112）。

³ 翡管局主管 A 君 2022.8 月 29 日電話及同年 9 月 5 日 line 本人陸續表示。

(1) 雨量豐沛利用率卻低：根據翡管局歷年水源利用率統計，自 1988 起至 2024 年止，共計 37 年的營運時間，水源利用率超過 90% 有 22 次（年），約佔營運 37 年的 59%，90% 以下 15 次，約佔營運 37 年的 41%。亦即水源利用率有 41% 的營運年份低於 90% 以下。年降雨歷史資料顯示，1998、2000 及 2001 等三年，為歷年年降雨量的前三高，⁴但利用率卻極低，分別為 65%、86% 及 70%。（臺北翡翠水庫管理局，2002，頁 39）究其原因，在於翡翠庫容量受限無法攔下當次所有雨水，此種現象則以颱風時期最為明顯。

(2) 單次颱風雨量充沛難攔蓄：翡翠水庫史上降雨前五高颱風剛好集中於年降雨量最多的前述三個年份，總進水量均超過 2 億噸，攔蓄利用率卻僅介於 16.9% 至 36.4% 間。（同上翡管局）故即使年颱風數量多，甚或年降雨量高，庫容無法完全攔蓄，仍有機率發生枯旱，故「雨多不等於水足」給了翡翠水庫蓄水警訊，此亦提醒新店溪流域若依賴單一水庫，下游供水安全仍將存在風險。

（二）預警應變機制及侷限

新店溪流域旱象因應的預警機制主要以水庫蓄水率為標準，但因主客觀因素有侷限問題，說明如下。

1. 預警應變機制

(1) 旱象分級應變：依旱災災害防救規範，翡翠水庫蓄水率若低於 50%，則屬於一級（黃燈），開始產業節水、灌溉調度、地方限水預備等。若二級（橙燈），代表水庫進水異常偏低，必須採取限水、水車供水啟動、抗旱井設置等措施。若進入三級（紅燈），代表極端乾旱、生活供水嚴重受限，必須採取進一步強制限水、災防會報啟動、補助機制等措施。（經濟部，2024）

(2) 預警規範推動：經濟部為因應乾旱，「自來水停止及限制供水執行要點」，歷經三次修正，將停止及限制供水標準與措施分為四階段，讓北水處等自來水事業機構將停止及限制供水標準與措施納入營業章程內。水源端部分，翡翠水庫建立枯旱預警水位線，並於 2020 年 8 月建立枯旱預警應變機制，當低於該機制所建立之枯旱預警水位，即研判未來有枯旱可能，並提早啟動枯旱應變作為延緩水庫水位下降，並待水庫水位回升至枯旱預警水位以上。（翡管局，2020，頁 11）

2. 預警侷限

前述預警機制對翡翠水庫運轉自有助益，然僅預防卻無法根本解決，前述枯旱預警應變機制建立後的隔年 2021 年 2-5 月旱象再起，⁵ 蓄水量百分比跌破六成，仍無法解決原水不足問題。供水亦不減反增，且新店溪流域尚有忽澇忽旱的氣候現象，增添供水變數。例如：2021 年降雨量偏少（北水處，2021，頁 48）。

⁴ 截至 2024 年止翡翠水庫集水區降雨統計。

⁵ 依據 2021 年翡翠水庫日平均水位歷線。

2022 年降雨即暴增為 4,960 毫米，為歷史雨量第四高。隔年的 2023 年又呈現旱象，雨量僅為歷史平均的 76%，⁶ 亦為翡翠水庫運轉來的第五低，忽勞忽旱的氣候現象無法預測，成為新店溪流域預警侷限。

肆、科羅拉多河流域旱象治理檢驗

科羅拉多河（簡稱科河）流域涵蓋美國西南部七個州，面積廣達 637,137 平方公里，分為上、下流域。流域年均流量為 202 億立方公尺，年均降水量僅約 500 毫米。該州自 2000 起至 2024 年止陸續有旱象發生，2002 年且發生史上最嚴重的旱象，範圍擴及該州全區，長期流域旱象治理使聯邦與地方累積了旱象治理經驗。以下即從二分析構面探討。

一、科羅拉多河流域治理的韌性策略

科河流域面積規模大但常須面對不確定氣候的挑戰，為了承受治理系統的衝擊、調適變化、並在長期中持續發揮功能，該流域推動及執行的韌性策略如下：

（一）科羅拉多河流域運轉原則

科河依據早期制定的《科羅拉多河契約》確立了上流域支援下流域的操作方式，亦即規定上流域的用水量須同時計算向下流域輸送的一定水量。⁷其中美國最大水壩胡佛壩，為下流域的用水主要來源，不僅承擔下游主要的蓄水功能，每年還能夠為加州、亞利桑那州及內華達州居民供應約 42 億度電。

（二）科羅拉多河流域旱象運轉操作

科河於 2000 年至 2022 年間是一百餘年來最乾旱的 23 年，也是過去 1200 年來最乾旱的時期之一。(Stern et al., 2025)面對流域旱象經驗，美國旱象劃分及啟動標準如下。

- 1.旱象依強度劃分：科羅拉多州 2023 年提出的增強型災害緩解計畫（Colorado Enhanced-State Hazard Mitigation Plan –2023），將乾旱強度分為五個等級，包括：輕微旱象、中度旱象、嚴重旱象、極端旱象（Extreme）及極度旱象（Exceptional）等。（Colorado Division of Homeland Security & Emergency Management,2023, pp. 119-120）
- 2.旱象啟動標準：根據前述旱象等級，以流域內水庫及系統容量現況做為啟動與終止各階段旱象措施的標準，由於流域旱象應急管理和營運關乎各方權益，須依

⁶ 99-113 翡翠水庫歷年月雨量統計表。

⁷ 根據科羅拉多河契約第三條 (a) 款每年分配到三個下流域州每年 92.5 億噸，包括：分配加利福尼亞州 54.3 億噸，亞利桑那州 34.5 億噸，內華達州 3.7 億噸。取自：National Archives ,Boulder Canyon Project Act (1928) , <https://www.archives.gov/milestone-documents/boulder-canyon-project-act>.

七州與部落等協議的《科羅拉多河流域乾旱應急計劃》始能克盡其功，根據墾務局（U.S. Bureau of Reclamation, USBR）公告，旱象啟動與否主要以「下流域」的艾維水庫（Lake Havasu）⁸或系統低於一定容量為考量。（U.S. Bureau of Reclamation, 2025a）艾維水庫總蓄水量約 7.6 億噸，分輕、中及嚴重旱象等三個階段。三階段啟動要求均由科河市政供水區認定及通知。（Colorado river Municipal water Distric, 2024, pp. 3-4）

3. 歷年節水協議及保持水庫一定水位：墾務局將上流域的格倫峽谷（Glen Canyon Dam）及下流域的胡佛（Hoover Dam），作為流域儲水狀況的指標。自 21 世紀初乾旱以來，二水庫的庫容水位一直在下降。為減少旱象影響，墾務局歷經 2001、2003、2007、2012、2017、2019 及 2023 等多年，與美國各州的法律協議及墨西哥的兩項國際協議，有效減少流域的用水量。（Brianet al.,2024）由於對流域長期供水的普遍擔憂，墾務局自 2023 年 5 月和流域各州宣布了一項共識提案，其中下游三個州將在 2026 年前共節約 37 億立方公尺的水量。上流域則依據 2019 年制定的《科羅拉多河乾旱應急計畫》，將格倫峽谷水庫水位保持在 1074 英尺以上，⁹亦即「最低發電水位」（1063 英尺）以上 11 英尺。（Stern et al.,2025）

（三）跨流域調度的大湯姆森引水計畫

該引水計畫主要引水為馬齒（Horsetooth Reservoir）、卡特湖（Carter Lake）和博爾德（Boulder Reservoir）等三座為 C-BT 計畫原水儲存最終端的水庫，每年向科羅拉多州東北部輸送約 3.8 億立方公尺的水，灌溉農田超過 2,916 平方公里。在科羅拉多州的跨流域調水已成為生活的一部分，主因為超過 80% 的人口居住於僅 20% 的降水地區。（U.S. Bureau of Reclamation, 2025b）旱象期間則樽節分配，無法全額供應，以 2022 年的旱象應變為例，即採取樽節用水措施，不再全額供應，而是將該年水分配量設定為 70%。大湯姆遜雖能引水解決東部地區旱象，但科河卻水源不足，如此不定的原水環境，未來勢必面臨供水區與支援區用水順序的挑戰。

二、風險識別與預警

科河流域面臨的困境亦為其未來須面對的風險，氣候異常及人為因素已使該流域旱象治理面臨困境及預警，陳述如下。

（一）氣候異常風險

包括融雪減少及自然流量低於歷史紀錄等問題，如以下說明。

⁸ Lake Havasu 位於加州與亞利桑那州交界處，即由前述帕克壩（Parker Dam）攔截，屬於科羅拉多河下流域位置。

⁹ 1 英尺 = 0.3048 公尺。1074 英尺 = 327.35 公尺。1063 英尺 = 324 公尺。11 英尺 = 3.35 公尺。

- 1.融雪減少影響蓄水：流域的河水主要來源就是依賴佔上流域總徑流 71%的融雪，(Lukas, 2020, pp. 51–52)墾務局一份提交國會的報告顯示，自 1950 年起至 2100 年止，溫度平均值上升約攝氏 4.72 度。在氣溫升高情況下，流域積雪量逐漸減少，原本降雪多轉變成直接降雨。導致 4 月至 7 月融雪徑流明顯減少。值得警惕的是，融雪所帶來的徑流效益，較降雨挹注的效率高出兩倍以上。(U.S. Bureau of Reclamation, 2011)即使科河流域擁有大容量水庫，也因極端氣候變化影響偏離正常蓄水，嚴重耗損水庫應有的蓄水空間。(Lukas,2020, p. 59)
- 2.自然流量低於歷史紀錄：科河契約於 1922 年完成時之河流年均流量歷史記錄為 202 億立方公尺，1906 年到 2020 年的數據觀察平均每年 181 億，自 2000 起至 2020（即在持續乾旱期間）自然流量平均已遠低於 153 億。(U.S. Bureau of Reclamation, 2022)根據美國河流協會報告，科河被列為水資源瀕危河流，該份報告預測到 2050 年，氣溫變高將使河流的流量減少 10% 至 30%，主要威脅因素即為氣候變化。(American Rivers,2022, p. 4)依據一份早期對該流域的氣溫影響預測研究，蓄水能力是該流域易受氣候異常影響的面向，年流量將減少 10%至 20%，預計年蓄水量將減少 30%至 60%。(McMurray,2012)以目前走勢觀之，預測與現況走向極為吻合。

（二）結構性缺水現象與成因

- 1.結構性缺水現象：胡佛水庫為流域最大水庫，蓄水來自小支流，亦有上游格倫峽谷大壩的釋水，位於下游的胡佛水庫進出水量的統計，即成為該流域水源利用指標。胡佛水庫在旱象前三年（1997-1999）水源進、出水量穩定豐沛，然除 2006 及 2008 進、出水量稍平衡外，2000 年至 2023 餘年份均屬出水大於進水的負水量現象，形成水庫蓄水的「結構性缺口（structural deficit）」問題¹⁰。(U.S. Bureau of Reclamation, 2025a)成為旱象治理面臨的另層困境。
- 2.供水目標過多：根據 1944 年的一項條約，科河除流經七州外，尚涵蓋境外的墨西哥，分配用水項目過多，致自然流量入不敷出，為流域用水供需不平衡原因。大湯姆遜引水工程給科羅拉多州東部帶來可觀用水，然早期僅用於農業灌溉，日後增加市政、工業、水力發電及魚類和野生動物，以及娛樂場所等用水，雖能補足東部貧乏的水資源，但同時亦增加科河供水負擔，近期又遇世界最乾旱的二十二年（2000 - 2021），為樽節用水，將 2022 年水分配量設定為 70%。(Amundson, 2022)這項引水大工程即使可發揮調水功能，亦將面臨源頭科河流域面臨旱象須採取應變之窘境。

¹⁰ 「結構性缺口（structural deficit）」是指米德湖每年出水量（包括下游用水、蒸發與系統損失）超過進水量的現象。這一概念首次由美國內政部墾務局（Bureau of Reclamation）於 2007 年提出，並在隨後的報告中持續強調。

（三）風險預警

依前述風險識別探討，科河流域面臨以下風險預警：

1. 應急計畫部分

（1）供水目標應納入協商：《科羅拉多河流域乾旱應急計畫》由七州及相關團體協議產生而非主管機構直接訂定，有效期至 2025 年 12 月 31 日止，該計畫目的在減少持續乾旱風險，同時協助格倫峽谷和胡佛等壩的下游流域之運作。（U.S. Bureau of Reclamation, 2019）然而由於結構性缺水導致乾旱現象加劇，重新協議時，墾務局應將供水目標納入協商範圍。

（2）配水協商面臨挑戰：由於期限將至，為取得持續供水勢須多方再作協議，參與協商者即為年度營運計畫的參與者，包括流域七州的州長、印第安部落、科河上游委員會、聯邦機構墾務局等，為各自用水取得優勢條件，極有可能掀起搶水之爭。

2. 氣候風險持續：針對科河流域下游旱象，美國墾務局於 2021 年 8 月 16 日，首次宣布出現缺水，氣候變化將加速因應缺水挑戰，必須在保護方面取得進展，並加倍供水的投資，包括再生水和雨水。（U.S. Bureau of Reclamation, 2021）一些科學家亦預估，隨著氣溫繼續上升，到 2050 年，科河可能會損失大約四分之一的流量，而且溫度每升高 1 攝氏度，平均流量可能會下降約 9 %。（Milly & Dunne, 2020）科河流域在旱象加劇下仍會因極端氣候事件致降雨分布更極端，該地區的降水量有可能增加，但這種潛在的增加將不會抵消氣溫升高導致的預期乾旱，（Stern et al., 2025）根據科羅拉多州三十年的降水資料顯示，乾旱年份越來越乾旱，雨水年份越來越雨水，旱澇事件越來越難以預測。（University of Colorado Boulder, 2020）此種「乾的更乾，濕的更濕」，暴雨更集中、短時強度更大的水文環境，反而增加洪水風險。

伍、新店溪流域與科羅拉多河流域旱象治理模式比較

本文二流域旱象治理比較差異，依據前述各面向探討，流域呈現的規模大小、法制化程度皆影響旱象治理制度，二流域的差異比較及形成原因分析如下。

一、韌性策略比較差異及形成原因

（一）比較差異

新店溪與科河流域治理的不同，從韌性策略上的差異比較，主要反映在運轉原則、旱象操作、規範修訂、制度設計、跨區調度、基礎建設及旱象分級等多重面向上：

運轉原則：新店溪採「南勢溪天然流量優先、翡翠水庫補足」的方式，平常約三分之二水源來自天然河川，三分之一來自水庫。科河則依《1922 年契約》明

定上、下游分配，上游須保證輸水，下游依靠胡佛壩、格倫峽谷大壩等大型水庫穩定供應，兼顧發電與跨州用水。

旱象操作：新店溪依賴翡翠水庫調節，早年供應比例最高達 36.4%，彌補南勢溪流量不足；科河因長期枯水，自 2000 年後多次啟動分級措施，依水庫蓄水量與旱象等級實施減供。這顯示新店溪偏向「單一水庫調節」，而科河強調「大型多水庫群聯合管理」（Coordinated Operation of Large Reservoir System）。

規範修訂：新店溪的《翡翠水庫運用要點》歷經三次修訂，主要針對旱象與驟雨調整，刪除發電優先；科河則透過 2003 水量量化協議（QSA）、2007 臨時營運指引（Interim Guidelines）、2019 乾旱應急計畫（DCP）等多次跨州協議，建立長期動態法制，確保水庫水位與公平分配。

跨區調度：新店溪透過「板新供水改善計畫」提升每日輸送能力至 101 萬公噸，支援 130 萬人，但蓄水及天然水容量未增加；科河的大湯姆森引水計畫則每年跨流域輸送 3.8 億立方公尺，早年則依比例減供。

基礎建設：新店溪供水藉管網汰換大幅降低漏水率（由 26.99% 降至 10.71%），相當於增加每日 57 萬公噸水源；科河則持續依靠水庫與跨域協議，但基礎設施老化仍是隱憂。

旱象分級：兩者在旱象分級制度上差異明顯。新店溪缺乏精細分級，主要依水庫運用要點與地方規範調整；科河則有美國氣象局的五級旱象定義，並由科河市政供水區設定三階段啟動標準，形成制度化應變。

（二）形成原因

新店溪（大漢溪與新店溪構成淡水河系）與美國科羅拉多河（Colorado River）的流域治理差異，本質上是「海島型濕潤氣候」與「大陸型乾旱/半乾旱氣候」兩種極端環境下的治理邏輯碰撞。形成這些差異的原因，可以從地理環境及規模大小、法律架構與制度、以及風險調控的核心目標來深入分析：

1. 地理特徵、規模大小與水文循環的尺度差異：這是造成治理原則不同的根本原因，包括新店溪地形陡峭，降雨高度集中在颱風季與梅雨季。治理核心在於「快進快出」，重點是防洪與即時攔截。由於河川常流量小，治理重點傾向於維持日常供水的穩定性。科羅拉多河（跨域長流，雪水依賴）規模極大流域橫跨美國七個州，水源主要來自落基山脈的融雪。治理核心在於「長期儲存與遠距離輸送」。其流域跨度大、蒸發量高，因此運轉原則更強調以年為單位的跨年度調度。

2. 法律架構與水權制度的起源：制度設計的差異源於歷史對「稀缺性」的定義不同，新店溪（國家所有制）：台灣遵循《水利法》，水資源被視為國家所有。在旱象操作與跨區調度（如：板新地區供水改善計畫）上，政府具備較強的行政主導權，能透過跨部會協調進行強制減壓或休耕補償。科羅拉多河（優先佔用原

則，Prior Appropriation）：遵循「先來後到」的西部水權法規。這種制度極度剛性，導致在規範修訂與旱象分級時，涉及極其複雜的法律訴訟與跨州契約（The Law of the River），修訂難度極高，且往往伴隨商業利益的博弈。

3.風險管理的「韌性」定義不同：新店溪的韌性（防洪與備援）：因應短時間強降雨與突發旱情，重點在於「靈活調度」。例如：雙北地區的翡翠水庫與板新給水廠的雙向連通管，強調基礎建設的互補性。科羅拉多河的韌性（長期耐旱）面對的是持續數十年的「特大乾旱」（Megadrought）。其韌性體現在「預算化管理」。透過大型水庫（如 Lake Mead, Lake Powell）的蓄水位作為旱象分級的唯一標準，一旦水位低於特定海拔，便觸發強制性的分級減供。

二、風險識別與預警比較差異

（一）比較差異

新店河流域的主要風險來自「極端氣候下的忽旱忽澇」。南勢溪天然流量在枯旱時急遽下降，翡翠水庫便需承擔補給角色。但翡翠水庫的雨水利用率偏低，在颱風時的攔蓄率僅 16–36%，限制了其在暴雨後補足水源的能力。台北人口高度集中，加上板新地區的跨區輸水需求，使翡翠水庫逐漸被推向主要供水來源的角色，導致抗旱壓力持續增加。雖然翡翠水庫運用要點歷經多次修訂，並設置枯旱預警水位線（可提前 3 個月預判），同時透過管網汰換降低漏水損耗，但整體仍屬「事後補強」型的治理。由於台灣降雨的時空分布越來越極端，預測難度上升，顯示其韌性提升有限。

科河流域的風險則更具結構性，氣候變遷導致升溫與高山降雪減少，使河川徑流逐步衰退，平均年流量降低，且未來可能再減少 10–30%。河川水量大幅減少與需求持續增加，使胡佛水庫與格倫峽谷水庫出現「結構性缺口」，即長期出水大於進水。治理上，美國採取跨州與跨國制度化協商機制，例如 2019 年的《乾旱應急計畫》、年度營運計畫（AOP）會議，並強調再生水與雨水投資。但隨著協議即將於 2026 年重新談判，水權分配衝突可能再次浮現。

（二）形成差別原因

新店溪（翡翠水庫系統）與科羅拉多河流域（胡佛與格倫峽谷水庫系統）在風險識別與預警機制上存在顯著差異。儘管兩者都面臨氣候變遷的威脅，但其核心挑戰、預警邏輯與治理結構截然不同。

1.水源性質與環境限制的差異：新店溪（降雨驅動型），風險來自「極端降雨的不穩定性」。台灣地形陡峭，翡翠水庫雖然集水區降雨豐沛，但颱風時攔蓄率僅 16–36%，導致大量雨水直接排入大海。預警重點在於「短時間內的旱澇轉換」，即如何在高頻率的降雨中精準保留水源。科羅拉多河（融雪驅動型）：風險來自

「系統性的徑流衰退」。該流域高度依賴高山積雪，升溫導致雪水補給減少，流量預計減少 10–30%。其預警重點在於「長期的趨勢遞減」，屬於緩慢但不可逆的環境轉變。

2. 風險結構的本質差異：新店溪後端需求導向的「運用型風險」，其成因並非水源絕對不足，而是因為台北人口集中與「板新地區」的跨區供水需求，使原本作為備援的翡翠水庫轉為主要供水來源。特徵在於風險來自於需求增長快於設施優化，導致韌性提升有限。科羅拉多河則屬進出失衡的「結構性缺口」，其成因出現了長期「入不敷出」的現象（ $\text{Outflow} > \text{Inflow}$ ）。特徵在於物理上的水源短缺，而非單純的調度問題，導致水庫水位可能跌至「死水位」的結構性危機。

3. 預警機制與治理邏輯的差異：新店溪技術監控與事後補強，機制依賴「枯旱預警水位線」進行技術性預判（提前 3 個月），並輔以管網汰換（降漏）。其邏輯屬於「反應式治理」。雖然能預測，但核心仍是在既有框架下進行修補，難以應對時空分布極端化帶來的預測失效。科羅拉多河屬制度化協商與結構轉型，其機制透過《乾旱應急計畫》（DCP）與年度營運計畫（AOP）會議，將預警轉化為法律約束與配額削減。而其邏輯屬於「制度化協商」。除了技術監控，更側重於多州、多國間的水權重新分配，並透過大規模投資再生水與雨水來試圖填補結構性漏洞。

三、二溪比較面向綜整

在流域尺度下的旱象治理研究中，韌性理論（Resilience Theory）不僅是描述系統狀態的描述性概念，更是最具檢驗潛力的分析框架。儘管適應性治理（Adaptive Governance）與風險治理（Risk Governance）皆為重要機制，但韌性理論因其具備「動態過程的量化潛力」與「系統邊界的明確定義」，最適合成為實證分析的檢驗對象。新店溪與科羅拉多河流域之差異，主要體現於地理水文特性、法律水權制度、韌性目標設定、風險識別核心及治理預警邏輯等多元維度。透過結構化比較分析，釐清不同時空環境下，區域性水資源管理與流域尺度調適策略之本質性歧異。綜合以上分析，各項關鍵指標之綜整與對照，詳如下表所示。

表 3

新店溪與科羅拉多河流域旱象治理模式比較表

比較維度	新店溪流域	科羅拉多河流域
地理與水文特徵	海島型濕潤氣候、地形陡峭；降雨高度集中，屬「快進快出」型。	大陸型乾旱/半乾旱氣候；依賴雪水，規模巨大，屬「長期儲存與遠距離輸送」型。
法律與水權制度	國家所有制；行政主導權強，具靈活調度空間。	「先來後到」（Prior Appropriation）；制度剛性強，跨州契約複雜，修訂困難。

比較維度	新店河流域	科羅拉多河流域
韌性定義與核心目標	靈活調度：因應短時間旱澇，強調基礎建設互補與供水備援。	長期耐旱：因應數十年特大乾旱，強調水位預算化管理與分級減供。
風險識別核心	運用型風險：需求增長快於設施優化，風險源於短時間旱澇轉換。	結構性缺口：入不敷出，風險源於物理性水源短缺及長期徑流衰退。
預警與治理邏輯	反應式治理：技術監控水位線，強調事後管網補強與調度。	制度化協商：以法律約束配額削減，側重多方利益重新分配與結構轉型。

資料來源：本研究整理。

陸、結 論

以上分析反映了二河流域因流域規模大小、法制化程度及制度差異等對韌性策略及風險識別與預警的影響，本文經前述各章節探討比較後，得出研究發現及建議如下：

一、研究發現

（一）韌性策略差異：單一節點依賴 vs. 系統性協作網絡

新店河流域（偏向硬體工程與單一調節）：

目前的韌性策略高度集中於「單一水庫（如翡翠水庫）蓄水調節」與「下游自來水管網防漏改善」。此模式在常態氣候下運作穩定，但面對極端氣候（如連續無颱風或空梅）時，因缺乏廣泛的空間調度與多元備援機制，系統容錯率低，整體的抗旱與防備能力面臨顯著侷限。

科羅拉多河（偏向綜合治理與系統韌性）：

展現出高度的複合型韌性，其策略涵蓋「多水庫群（如米德湖與鮑威爾湖）聯合營運管理」、「科學化的水情分級應變制度」，以及「跨州與跨國（美墨）的長期水權分配協議」。透過硬體設施聯動與軟體制度的結合，形成具備高度彈性與緩衝能力的治理框架。

（二）風險識別與預警：短期極端衝擊 vs. 長期結構性枯水

新店溪的風險特徵：

風險高度集中於「過度依賴單一水庫的供水安全」以及「降雨極端化帶來的高度不確定性（如暴雨與乾旱交替發生）」。現有的預警機制多依賴單一水庫的水位或蓄水率作為決策指標，缺乏對整體流域氣候變遷趨勢的長期動態壓力測試。

科羅拉多河的風險特徵：

主要面臨「氣候變遷導致的長期結構性缺水（大旱/Megadrought）」以及「歷史水權超發與舊有分配協議到期所衍生的地緣政治與利益衝突」。其風險識別不僅包含水文數據的監測，更延伸至法律、經濟與跨區域合作破裂的社會性風險。

二、具體建議與治理對策

（一）導入動態與多維度的分級應變機制（制度面）

建立多層級水情預警：借鏡科河的旱象分級與減量協議（如 DCP），新店溪應建立更細緻的「多層級水情預警與分級減供指標」。

擴充決策綜合指標：決策基準應從「單一水庫絕對水位」擴充為包含「流域土壤含水量、中長期降雨預測、氣候震盪指標（如聖嬰現象）」的綜合預警模型。

法制化減供措施：明訂不同旱象等級下的強制性需水管理措施（如民生、工業、農業的階梯式限水比例），並提前與大眾及產業溝通，確保應變程序的法制化與透明化，降低臨時限水帶來的社會衝擊。

（二）建構多元水源與智慧調度策略（工程與技術面）

推動流域水資源組合(Water Portfolio)：降低對單一水庫與傳統降雨的絕對依賴。除持續進行管網漏水改善外，應大幅投資並提升「非傳統水源」的比例，包含雨水貯留系統、地下水補注與戰備水井整備。

擴大再生水與水資源回收：積極推動民生污水與工業廢水回收再利用，將再生水優先供應給工業區或市政澆灌，藉此替換並保留珍貴的自來水供民生使用。

強化跨區域聯通調度：完善北部水資源系統（如淡水河系與大漢溪、新店溪）的跨流域聯通管網，實現豐枯水期的區域互相支援；並導入智慧水網(Smart Water Grid)技術，利用物聯網精準預測用水需求並進行動態水壓管理。

（三）推動長期氣候風險治理與跨域協調（治理面）

建立跨域協調與整合平台：打破單一行政區或單一管理單位的本位主義，針對新店溪及北部流域成立類似科河的「跨域水資源協調平台」，納入上下游縣市政府、中央水利主管機關、自來水事業及民間利害關係人。

實施動態修訂與調適路徑：針對未來 20 至 50 年的極端氣候風險、人口結構變遷與產業發展需求進行定期的壓力測試。建立「動態修訂機制」，定期（如每五年）檢討並調整水資源操作規程與分配優先序，以適應不斷變化的環境。

強化風險溝通與社會韌性：將水資源稀缺性納入主流政策動態與全民意識。

參考文獻

- 行政院研究發展考核委員會（2002）。我國流域管理之研析。行政院研究發展考核委員會。[Research, Development and Evaluation Commission, Executive Yuan. (2002). *An analysis of river basin management in Taiwan*. Research, Development and Evaluation Commission, Executive Yuan.]
- 李長晏（2009）。從協力治理模式探討淡水河流域的管理。中國地方自治，62（10），3-19。[Li, C.-Y. (2009). Exploring the management of the Tamsui River Basin from a collaborative governance perspective. *China Local Self-Government*, 62(10), 3-19.]
- 李忠勳、葉信富（2020）。以 Budyko 架構探討氣候變遷與人為活動造成臺灣北部逕流量之變化。農業工程學報，66（2），26-42。[Li, C.-H., & Yeh, X.-F. (2020). Using Budyko framework to investigate the impacts of climate change and human activities on runoff changes in northern Taiwan. *Journal of Taiwan Agricultural Engineering*, 66(2), 26-42.]
- 林易俊（2016）。嚴重乾旱時期限水策略預測模式之研究-以新店溪水源為例〔未出版之碩士論文〕。國立成功大學。[Lin, Y.-C. (2016). *Research on prediction models for water rationing strategies during severe droughts: A case study of the Xindian River water source* [Unpublished master's thesis]. National Cheng Kung University.]
- 姚祥瑞（2024）。美國流域旱象治理－以科羅拉多河流域乾旱期（2000–2021）為例。科際整合月刊，9（6），24-53。[Yao, H.-J. (2024). Drought governance in U.S. river basins: A case study of the Colorado River Basin drought period (2000–2021). *Interdisciplinary Research Monthly*, 9(6), 24-53.]
- 許文堯、游進裕、李鴻源、黃佼聘（2014）。從淡水河流域整體治理談國土空間跨域治理之實踐。公共治理季刊，2（4），79-90。[Hsu, W.-Y., Yu, C.-Y., Lee, H.-Y., & Huang, H.-P. (2014). The practice of spatial cross-boundary governance from the perspective of integrated management in the Tamsui River Basin. *Public Governance Quarterly*, 2(4), 79-90.]
- 陳坤（2011）。流域管理中的法律衝突問題探討。科技與法律，（31），75-80。[Chen, K. (2011). Discussion on legal conflict issues in river basin management. *Technology and Law*, (31), 75-80.]
- 陳恒鈞、黃渾峰（2009）。循證政策制定之運用：以南勢溪流域管理策略為例。公共行政學報，（31），101-148。[Chen, H.-C., & Huang, H.-F. (2009). The application of evidence-based policy making: A case study of the Nanshih River Basin management strategy. *Taiwanese Journal of Public Administration*, (31), 101-148.]
- 經濟部（2024）。旱災災害防救業務計畫。經濟部。[Ministry of Economic Affairs. (2024). *Drought disaster prevention and protection operation plan*. Ministry of

Economic Affairs.]

臺北自來水事業處（2021）。韌性城市永續供水。臺北自來水事業處。

https://www.water.gov.taipei/News_Photo.aspx?n=2021CACEC1D6D6FE&sms=272065261D2506D2 [Taipei Water Department. (2021). *Resilient city, sustainable water supply*. Taipei Water Department.

https://www.water.gov.taipei/News_Photo.aspx?n=2021CACEC1D6D6FE&sms=272065261D2506D2

臺北自來水事業處（2024）。韌性城市永續供水。臺北自來水事業處。

https://www.water.gov.taipei/Content_List.aspx?n=19065A4BCA536F13 [Taipei Water Department. (2024). *Resilient city, sustainable water supply*. Taipei Water Department.

https://www.water.gov.taipei/Content_List.aspx?n=19065A4BCA536F13

臺北翡翠水庫管理局（2002）。翡翠水庫九十一年抗旱四月紀實報告。臺北翡翠水庫管理局。[Taipei Feitsui Reservoir Administration. (2002). *April record of the 2002 drought relief operations at Feitsui Reservoir*. Taipei Feitsui Reservoir Administration.]

臺北翡翠水庫管理局（2020）。臺北翡翠水庫管理局 109 年刊。臺北翡翠水庫管理局。 <https://www->

[ws.gov.taipei/001/Upload/384/refile/19340/3237430/b9aafb88-cd59-46aa-8dbe-eeecd8d13c02.pdf](https://www-) [Taipei Feitsui Reservoir Administration. (2020). *2020 annual report of the Taipei Feitsui Reservoir Administration*. Taipei Feitsui Reservoir Administration. <https://www->

[ws.gov.taipei/001/Upload/384/refile/19340/3237430/b9aafb88-cd59-46aa-8dbe-eeecd8d13c02.pdf](https://www-)]

臺北翡翠水庫管理局（2025）。翡翠水庫操作管理。翡翠水庫環境學習中心。
<https://www.klsh.kl.edu.tw/wp-content/uploads/sites/36/2024/11/e7640944-e888-4b3e-940e-e9f5a390028b.pdf> [Taipei Feitsui Reservoir Administration. (2025). *Operation and management of Feitsui Reservoir*. Feitsui Reservoir Environmental Education Center. [https://www.klsh.kl.edu.tw/wp-](https://www.klsh.kl.edu.tw/wp-content/uploads/sites/36/2024/11/e7640944-e888-4b3e-940e-e9f5a390028b.pdf)

劉泉源（2002）。台灣地區河川流域管理組織架構重整及其運作模式之探討〔未出版之碩士論文〕。國立東華大學。[Liu, C.-Y. (2002). *A study on the restructuring of river basin management organizational frameworks and their operational models in Taiwan* [Unpublished master's thesis]. National Dong Hwa University.]

謝龍生、柳文成、童慶斌（2004）。氣候變遷對大漢溪及新店河流域防洪系統潛在衝擊影響之研究。農業工程學報，50（3），32-47。[Hsieh, L.-S., Liu, W.-C., & Tung, C.-B. (2004). A study on the potential impacts of climate change on the

- flood control systems of the Dahan River and Xindian River basins. *Journal of Agricultural Engineering*, 50(3), 32-47.]
- 羅致高、劉勇、蒲瑩暉、岳宜陽、萬幸、鐵燕 (2018)。國外流域管理典型案例研究。財經錢線文化有限公司。[Luo, Z.-G., Liu, Y., Pu, Y.-H., Yue, Y.-Y., Wan, X., & Tie, Y. (2018). *Case studies on typical foreign river basin management*. Financial Frontline Culture Co., Ltd.]
- American Rivers. (2022). *America's most endangered rivers*.
https://www.americanrivers.org/wp-content/uploads/2022/04/MER2022_Report_Final_04062022.pdf
- Amundson, K. (2022). Northern Water sets allocation at 70% for the season. *Reporter-Herald*. <https://www.reporterherald.com/2022/04/14/northern-water-sets-allocation-at-70-for-the-season/>
- Berkes, F., Folke, C., & Colding, J. (1998). *Linking social and ecological systems: Management practices and social mechanisms for building resilience*. Cambridge University Press.
- Brian, D. R., Lamsal, G., & Schmidt, J. C. (2024). New water accounting reveals why the Colorado River no longer reaches the sea. *Communications Earth & Environment*, 134. <https://www.nature.com/articles/s43247-024-01291-0>
- Colorado Division of Homeland Security & Emergency Management. (2023). *Colorado enhanced state hazard mitigation plan 2023-2028*.
<https://mars.colorado.gov/mitigation/enhanced-state-hazard-mitigation-plan-e-shmp>
- Colorado River Municipal Water District. (2024, May). *Drought contingency plan*.
<https://www.crmwd.org/>
- Folke, C. (2006). Resilience: The emergence of a perspective for social–ecological systems analyses. *Global Environmental Change*.
- Linkov, I., & Trump, B. D. (2021). *The science and practice of resilience*. Springer International Publications.
- Lukas, J. (2020, April). *Colorado River Basin climate and hydrology: State of the science*. Western Water Assessment.
https://wwa.colorado.edu/sites/default/files/2021-06/ColoRiver_StateOfScience_WWA_2020_Chapter_2.pdf
- McMurray, C. (2012). The Colorado River Basin and climate: Perfect storm for the twenty-first century? *Climate Change and the Basin*.
<https://www.coloradocollege.edu/dotAsset/74e91de4-a1ff-4062-b628-030e997b4e0b.pdf>
- Milly, P. C. D., & Dunne, K. A. (2020). Colorado River flow dwindles as warming-driven loss of reflective snow energizes evaporation. *Science*, 367(6483), 1252-

1255.

- OECD. (2022). *Building resilience to strategic risks*. OECD Publishing.
- Pahl-Wostl, C. (2007). Transitions towards adaptive management of water facing climate and global change. *Water Resources Management*.
- Pascua, M., De Massis, A., Kotlar, I., & Signori, P. (2024). Organizational resilience: A systematic review and future research directions. *Journal of Business Research*.
- Reichstein, M., Camps-Valls, G., Stevens, B., Jung, M., Denzler, J., Carvalhais, N., & Prabhat. (2023). Deep learning for anticipating extreme events. *Nature*.
- Stern, C. V., Hite, K., & Sheikh, P. A. (2025, March). *Management of the Colorado River: Water allocations, drought, and the federal role*.
https://www.congress.gov/crs_external_products/R/PDF/R45546/R45546.41.pdf
- UNDRR. (2024). *GAR special report 2024: Forensic insights for future resilience: Learning from past disasters*. <https://www.undrr.org/gar/gar2024-special-report>
- UNDRR. (2025). *2025 GAR global assessment report on disaster risk reduction*.
<https://www.undrr.org/gar/gar2025>
- UNDRR, & WMO. (2022). *Early warnings for all: Executive action plan 2023-2027*.
<https://www.preventionweb.net/publication/early-warnings-all-executive-action-plan-2023-2027>
- University of Colorado Boulder. (2020). *2020 trends | Climate, data shows Boulder's dry years are getting drier, while its wet years are getting wetter*.
<https://cslc.colorado.edu/2020-trends/data-shows-boulders-dry-years-are-getting-drier>
- U.S. Bureau of Reclamation. (2011). *SECURE Water Act Section 9503(c) - Reclamation climate change and water 2011, future changes in climate and hydrology*. <https://www.usbr.gov/climate/secure/docs/coloradobasinfactsheet.pdf>
- U.S. Bureau of Reclamation. (2019). *Colorado River Basin drought contingency plan, Lower Colorado River operations*.
<https://www.usbr.gov/lc/region/programs/dcp.html>
- U.S. Bureau of Reclamation. (2021). *Reclamation announces 2022 operating conditions for Lake Powell and Lake Mead*.
<https://www.usbr.gov/newsroom/news-release/3950?filterBy=year&year=2021>
- U.S. Bureau of Reclamation. (2022, April). *Colorado River Basin natural flow and salt data-current natural flow data 1906-2022*.
<https://www.usbr.gov/lc/region/g4000/NaturalFlow/provisional.html>
- U.S. Bureau of Reclamation. (2025a). *Lower Colorado River operations*.
<https://www.usbr.gov/lc/region/g4000/hourly/mead-elv.html>
- U.S. Bureau of Reclamation. (2025b). *Colorado-Big Thompson project, projects &*

facilities. <https://www.usbr.gov/projects/index.php?id=432>

World Economic Forum. (2023, January 13). *We're on the brink of a 'polycrisis' – how worried should we be?* <https://www.weforum.org/stories/2023/01/polycrisis-global-risks-report-cost-of-living/>

Zscheischler, J., Martius, O., Westra, S., Bevacqua, E., Raymond, C., Horton, R. M., van den Hurk, B., AghaKouchak, A., Jézéquel, A., & Mahecha, M. D. (2021). A typology of compound weather and climate events. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2(3), 237–253. <https://doi.org/10.1038/s43017-021-00146-3>

Cross-Basin Drought Management Models: A Comparison of Resilience Strategies and Risk Identification Mechanisms between the Xindian River and the Colorado River

Hsiang – Jui Yao*

Abstract

In 2002, both Taiwan's Xindian River Basin and the U.S. Colorado River Basin faced their most severe droughts. Interestingly, their key reservoirs—Feitsui and Strontia Springs—share a sister reservoir relationship. Drawing on the U.S. experience of managing long-term drought since 2000, this study compares the governance models of these basins, focusing on resilience strategies, risk identification, and early warning systems. Results indicate that while the Xindian Basin relies on single-reservoir regulation and network improvements, the Colorado Basin employs multi-reservoir joint management, tiered responses, and interstate compacts. In terms of risk, the Xindian Basin faces single-source dependency and rainfall uncertainty, whereas the Colorado Basin confronts structural water deficits and conflicts over expiring agreements. Recommendations include establishing multi-level early warning systems, diversifying water sources with cross-regional allocation, and strengthening climate risk assessment to enhance overall basin resilience.

Keywords: Drought Governance, Basin Governance, Colorado River, Xindian River, Feitsui Reservoir

* Deputy Secretary-General of the Association of Chinese Local Government; Adjunct Assistant Professor, University of Taipei, E-mail: yauruey@gmail.com

The paper was published under two double-blind reviews. Received: March 27, 2026. Accepted: July 1, 2026.