

探討氣候變遷風險評估方法與工具之科研缺口- 以鐵道系統為例

Study of Research Gaps in Climate Change Risk Assessment Methods and Tools: A Case Study of Railway Systems

運輸能源與環境組 楊家銘 鄔德傳 朱珮芸

研究期間：民國114年1月至12月

摘要

為因應全球氣候變遷並確保國家永續發展，氣候變遷調適已成為近年國內外關注之議題，氣候變遷因應法於 112 年 2 月 15 日公布施行，本次修法新增調適專章，包含基礎能力建構、科研推估接軌及確定推動架構等三大重點，顯示我國對氣候變遷調適推動工作的重視。運輸與民眾日常生活息息相關，運輸系統中斷將影響國家能否維持正常運作的關鍵，因此在面臨氣候變遷衝擊的調適作為至關重要。

由於鐵道基礎設施易受到氣候變遷極端氣候事件影響，為強化鐵道系統之氣候變遷調適能力，亟需盤點鐵道系統之氣候壓力並瞭解相關調適風險評估方法及工具，以及其科研缺口，以提升鐵道系統在面對氣候變遷極端天氣與災害風險的韌性。

本研究針對鐵道系統研析相關風險評估方法及工具調適科研缺口，並將就可能遭遇之相關議題進行研析，提出未來需進一步研究之議題及因應建議，以協助鐵道管理機關(構)後續應用國家氣候變遷科學報告及氣候情境資料精進氣候變遷風險評估方法及工具之參據。透過本研究研析成果可知，鐵道系統權管機關需持續關注國際風險評估方法與工具發展趨勢，並將新技術(如 AI 或無人機等科技)納入氣候變遷風險評估工具中，以及加強跨領域合作關係及複合性風險評估，將有助於彌補相關科研缺口並加速落實實務應用。本計畫成果後續亦可於鐵道系統強化調適能力之探討，以及建構運輸管理機關

(構)之調適專業能力等兩案合辦計畫相關調適議題中繼續納入參考應用。

關鍵詞：

氣候變遷、風險評估方法、鐵道系統

一、緒論

1.1 研究緣起

為因應全球氣候變遷並確保國家永續發展，氣候變遷調適已成為近年國內外關注之議題，氣候變遷因應法於 112 年 2 月 15 日公布施行，本次修法新增調適專章，包含基礎能力建構、科研推估接軌及確定推動架構等三大重點，顯示我國對氣候變遷調適推動工作的重視。運輸與民眾日常生活息息相關，運輸系統中斷將影響國家能否維持正常運作的關鍵，因此在面臨氣候變遷衝擊的調適作為至關重要。依據氣候變遷因應法第 17 條第 1 項第 1 款，為因應氣候變遷，政府應推動調適能力建構之事項，如「以科學為基礎，檢視現有資料、推估未來可能之氣候變遷，並評估氣候變遷風險，藉以強化風險治理及氣候變遷調適能力」。因此交通部屬機關(構)應建構氣候變遷風險評估之專業能力，就所轄運輸設施進行風險評估，以強化運輸系統因應氣候變遷之調適能力。

另依據氣候變遷因應法第 18 條第 1 項，「中央主管機關與中央科技主管機關應進行氣候變遷科學及衝擊調適研究發展，並與氣象主管機關共同研析及掌握氣候變遷趨勢，綜整氣候情境設定、氣候變遷科學及衝擊資訊，定期公開氣候變遷科學報告」；以及氣候變遷因應法第 18 條第 2 項，「中央主管機關與中央科技主管機關應輔導各級政府使用前項氣候變遷科學報告，進行氣候變遷風險評估，作為研擬、推動調適方案及策略之依據。各級政府於必要時得依據前項氣候變遷科學報告，規劃早期預警機制及系統監測」。國科會於 113 年 5 月公開國家氣候變遷科學報告及氣候情境資料，提供各級政府進行氣候變遷風險評估之參考應用。其中，為強化國家整體氣候變遷風險評估之一致性，氣候情境資料原則採「固定暖化情境設定」，即「西元 2021-2040 年升溫 1.5°C、西元 2041-2060 年升溫 2°C」，以做為各部門進行風險評估與辨別調適缺口之共同參考基本情境，也有助於跨部門風險評估應用與整合。

由於鐵道基礎設施易受到氣候變遷極端氣候事件影響，為強化鐵道系統之氣候變遷調適能力，亟需盤點鐵道系統之氣候壓力並瞭解相關調適風險評估方法及工具，以及其科研缺口，以提升鐵道系統在面對氣候變遷極端天氣與災害風險的韌性。

為因應氣候變遷衝擊及氣候變遷因應法法定工作事項，各機關(構)應透過風險評估辨識氣候變遷與調適缺口，並據以進行調適規劃與行動。考量目前各單位對調適風險評估方法較不熟悉，爰本研究目的係研析鐵道系統有關風險評估方法及工具調適科研缺口，並將鐵道系統於風險評估方法及工具可能遭遇相關議題進行研析，提出未來需進一步研究之議題及因應建議，以協助鐵道管理機關(構)後續應用國家氣候變遷科學報告及氣候情境資料精進氣候變遷風險評估方法及工具之參據。

1.2 研究項目與方法

本研究之工作項目說明如下：

1. 蒐集並研析鐵道系統在氣候變遷衝擊下的風險評估方法與工具

蒐研鐵道系統各項氣候變遷風險因子的風險評估方法及工具，並研析國內外運輸系統及鐵道系統調適風險評估相關文獻，進行相關資料蒐集及研析氣候變遷衝擊、風險評估與工具之發展情形。

2. 探討鐵道系統有關風險評估方法及工具調適科研缺口

研析國家氣候變遷科學報告及國內外文獻回顧，蒐集及探討調適科研於風險評估方法及工具現況及缺口，彙整鐵道系統於風險評估方法及工具可能遭遇相關課題(如：鐵道系統於海岸地形上興建和營運時，可能遭遇海平面升高和暴潮現象侵蝕海岸線，惟針對鐵道系統基礎設施衝擊評估方法尚缺乏)，協助鐵道管理機關(構)利用風險評估相關資料、風險評估方法及工具進行氣候變遷風險評估。

3. 針對鐵道系統風險評估方法及工具提出未來需研究因應及建議

透過研析鐵道管理機關(構)進行氣候變遷風險評估、風險評估方法及工具等相關課題並提出應用建議，俾利鐵道系統因應氣候變遷進行風險評估應用及調適規劃實務需求。

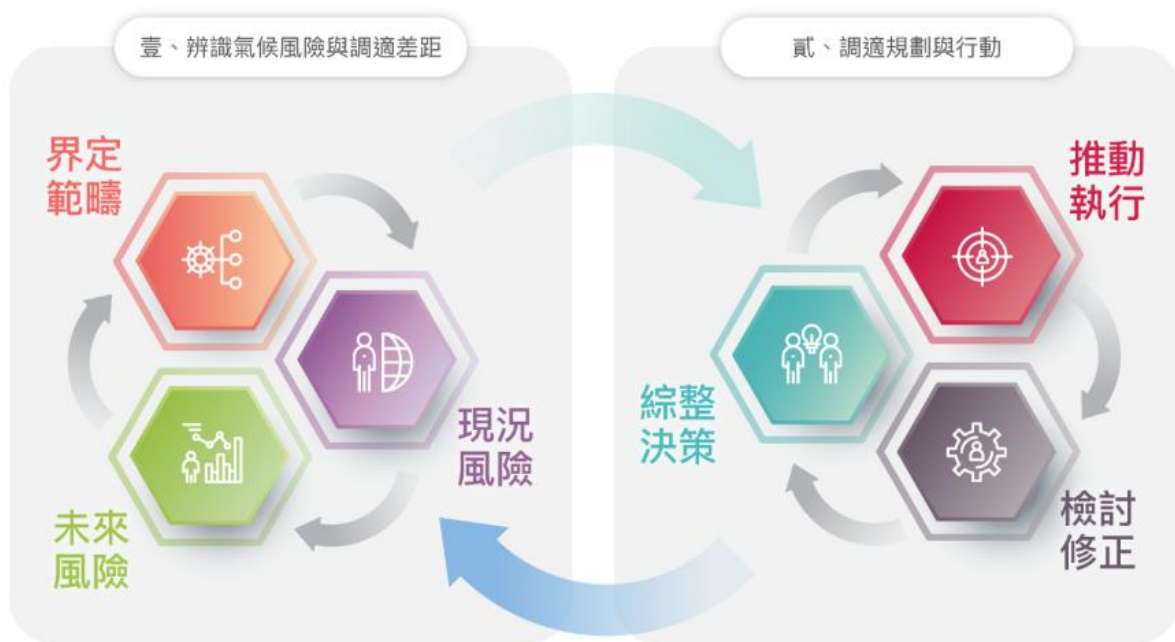
二、文獻回顧

鐵道系統做為國家關鍵基礎設施，其營運安全與穩定性直接影響經濟發展與民生需求。然而，在全球氣候變遷的衝擊下，極端天氣事件（如強降雨、高溫、強風、海平面上升等）日益頻繁，對鐵路基礎設施造成嚴峻挑戰，包括路基沖刷、軌道挫曲、邊坡災害、淹水等。因此，開發與應用氣候變遷風險評估工具對於提升鐵道系統的韌性至關重要。本節蒐整鐵道系統各項氣候變遷風險因子的風險評估方法及工具相關文獻分述如下：

2.1 國內外氣候變遷調適架構

2.1.1 國家氣候變遷調適架構

為因應全球氣候變遷對臺灣的衝擊，國家科學及技術委員會成立臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台(Taiwan Climate Change Projection Information and Adaptation Knowledge Platform, TCCIP¹)，提供高解析度的氣候預測數據和相關資訊，協助公部門、學研單位、企業及社群機構評估氣候變遷帶來之衝擊。TCCIP 將調適架構分為「辨識氣候風險與調適缺口」及「調適規劃與行動」兩階段及 6 構面，如圖 2.1.1.1 所示。



資料來源：TCCIP

圖 2.1.1.1 TCCIP 調適架構示意圖

操作過程除依序實施外，亦可根據實際情況和可能遇到的障礙進行調整，該調適架構兩階段 6 構面重點摘整如下：

1. 界定範疇：包含確立保全對象、辨識影響保全對象之氣候危害類型及其暴露之時空範圍，並邀集有關機關、學者及民間團體界定評估範疇，以掌握各利害關係者關注議題，取得共識，並有助於在實施調適策略時獲得更大的支持和合作。
2. 現況風險：包含檢視可掌握資源及現況氣候風險評估，其中，現況氣候風險評估係透過歷史氣候觀測相關資訊，針對現況衝擊與脆弱度進行量化或質化評估。
3. 未來風險：未來風險關注長時間氣候變遷因子所造成之風險，透過科學推估資料，設定未來氣候變遷情境，以評估未來氣候變遷下，未來危害度與脆弱度對保全對象之衝擊與風險。
4. 綜整決策：進行辨識、評估及選擇調適選項，以因應現況及未來氣候變遷風險。
5. 推動執行：執行調適選項時，藉由建立成效評估指標，或透過

訪談、焦點團體、專家諮詢等方式，幫助組織檢視調適選項之執行成效。

6. 修正檢討：藉由檢討調適執行成效，評估調適策略及方案之適切性，以做為未來調適方案及改善方向參考。

2.1.2 氣候變遷風險評估作業準則²

環境部於 114 年 7 月 16 日公告氣候變遷風險評估作業準則，做為各級政府依據氣候變遷因應法推動調適政策統一標準，該準則明定各級政府規劃、執行調適方案時，應依該準則規定使用氣候變遷科學報告並以系統性方式進行氣候變遷風險評估，該準則重點包括：

1. 明訂評估原則與方法：氣候變遷風險評估須涵蓋範疇界定、現況與未來風險分析，並納入危害度、暴露度及脆弱度等要素。
2. 強化調適決策機制：各級政府應據風險評估結果，擬定調適選項，並評估其可行性與成效。
3. 促進跨部門協作與公眾參與：鼓勵公私部門與民間共同參與氣候風險評估與調適決策，推動氣候調適政策主流化與社會包容性。
4. 建立滾動式檢討與修正制度：根據最新科學報告與國內外發展趨勢，適時檢討並修正調適方案，提升調適措施之有效性與可複製性。

該準則評估步驟包括：界定範疇、檢視資源及氣候衝擊現況、評估未來氣候變遷風險、調適選項規劃及綜整決策、推動或執行調適選項、檢討或修正調適選項等，相關重點摘述如下：

1. 界定範疇：
 - (1) 確認易受氣候變遷影響對象、對應之業務範疇及權責機關。
 - (2) 評估前款易受氣候變遷影響對象之氣候危害類型、可能受影響之時間、空間尺度及範圍。
 - (3) 邀集有關機關、學者、專家、民間團體，共同界定評估範疇。

2. 檢視資源及氣候衝擊現況：
 - (1) 盤點權責機關及易受氣候變遷影響對象之可掌握資源：包括權責機關之知識、技術、人力、財務等能力建構情形，以及可投入有關氣候變遷風險評估及調適計畫等調適管理機制之資源。
 - (2) 評估項目包括危害度、暴露度及脆弱度；評估結果應含易受氣候變遷影響對象之影響程度或其空間分布情形。
 - (3) 規劃權責機關及易受氣候變遷影響對象屬性之質化、量化或綜合之衝擊評估方法。
3. 評估未來氣候變遷風險：
 - (1) 使用當期氣候變遷科學報告，並參採最新國內外科學研究機構及政府單位對於氣候變遷科學資訊與知識相關報告及建議，以調適應用情境評估氣候變遷易受氣候變遷影響對象及所對應業務範疇之未來衝擊或風險。
 - (2) 進行未來氣候變遷風險評估，辨識調適差距或指認高風險地區。
 - (3) 邀集有關機關、學者、專家、民間團體，共同檢視調適差距或指認高風險地區之合理性。
4. 調適選項規劃及綜整決策：
 - (1) 以降低調適差距為目標，擬訂調適選項及推動期程。
 - (2) 評估調適選項之有效性、可行性及可能之負面影響。
 - (3) 評估優先執行之調適選項。
5. 推動或執行調適選項：
 - (1) 調適選項推動期程之符合程度。
 - (2) 建立量化評估指標，做為評估調適選項或計畫之執行成效依據。
 - (3) 倘無法建立量化評估指標，得透過訪談相關團體、諮詢專家等方式，協助檢視調適執行成效。

6. 檢討或修正調適選項：

- (1) 降低調適差距之執行情形。
- (2) 針對易受氣候變遷衝擊之跨領域調適策略、政策或計畫實施內容，評估潛在之正、負面影響。
- (3) 彙整執行調適選項與行動過程之調適障礙，並提出未來解決方案。
- (4) 使用當期氣候變遷科學報告，並參採最新國內外科學研究機構及政府單位對於氣候變遷科學資訊與知識相關報告及建議，滾動進行氣候變遷風險評估之作業，做為調適選項修正之依據。

2.1.3 國際標準化組織(International Organization for Standardization, ISO) ISO 14090、14091 標準調適架構^{3、4}

ISO 14090 提供結構化流程，協助組織因應氣候變遷衝擊並辨識氣候風險與機會、擬定及實施調適策略與行動計畫；ISO 14091 提供關於氣候變遷風險評估之指引，協助組織針對脆弱度、衝擊，以及風險的辨識與分析進行評估，茲將重點摘述如下：

1. ISO 14090

ISO 14090 提出之調適架構包含：先期規劃、評估氣候變遷衝擊與機會、調適規劃、推動執行、監測與評估、報告與交流共 6 構面。其中，先期規劃亦即界定範疇，包含評估組織是否有執行後續步驟之能力，以及確立與利害關係者間的互動關係。

2. ISO 14091

為將風險評估方法予以系統化並可以複製，另隨著新知識、技術與經驗的出現，可以於組織內部以及外部單位進行評估與學習，ISO 組織於 2021 年公布「ISO 14091 氣候變遷調適-脆弱度、衝擊與風險評估指引」，主要針對氣候風險概念、氣候變遷風險評估前置作業，以及執行氣候變遷風險評估之方式進行說明，摘整如下：

- (1) 脆弱度評估：提供有關如何評估系統、資源、生態系統、經濟和社會的脆弱度的指引，進行脆弱度評估有助於確定哪些部分係屬易受氣候變遷不利影響。
- (2) 風險評估：為確定潛在氣候變遷風險，並說明組織規劃調適策略外，亦應包含風險識別、風險評估、風險描述和風險估算等過程。
- (3) 應對氣候變化：ISO 14091 提供如何選擇和實施調適措施之優先順序，除降低氣候變遷風險之外，亦有助於組織辨識及瞭解氣候變遷影響，進而支援決策。

2.2 氣候變遷風險評估方法與工具案例

為瞭解鐵道系統目前所開發及應用氣候變遷風險評估方法與工具，本節彙整美國國家環境保護局(U.S. Environmental Protection Agency, USEPA)「自我脆弱度評估工具(Vulnerability Self-Assessment Tool, VSAT)」^{6~8}、美國麻薩諸塞灣交通局(Massachusetts Bay Transportation Authority, MBTA)「脆弱度評估評分工具(Vulnerability Assessment Scoring Tool, VAST)」^{9~13}以及英國 2 號高速鐵路(High Speed 2, HS2)^{14~16}為應對氣候變遷各種氣候壓力因子(如極端高低溫、暴雨、強風等)，在其規劃、設計與建設階段開發並應用多項氣候調適與韌性提升工具相關文獻。相關案例所使用風險評估方法與工具情形，說明如下：

2.2.1 氣候變遷風險對鐵道設施系統性回顧及分析(Climatic change risks on railway infrastructure: A systematic review and analysis)⁵

氣候變遷已成為影響全球運輸系統的重要因素之一，鐵道運輸因其高運量及低碳排特性，被視為永續交通的重要支柱之一。然而鐵道基礎設施(如軌道、橋梁、隧道及電力系統)多暴露於自然環境中，使其對氣候衝擊高度敏感。本篇文獻篩選出 71 篇學術論文，旨在識別氣候危害、釐清其與衝擊之間因果關係，並探討相關研究差距，摘要說明如下：

1. 危害與衝擊分類：

本篇文獻回顧發現全球已辨識出 24 種氣候危害(如強降雨、高

溫、洪水及強風等)與 29 種相關衝擊(如軌道挫曲、路堤變形、服務中斷、限速行駛、維修延遲等)，且存在顯著的連鎖效應(cascading effects)，例如洪水導致軌道損壞進而引發營運中斷。

2. 危害與衝擊關聯度：

經彙整相關文獻後，可發現影響最廣泛的危害前 3 名依序為暴風、強降雨及強降雪，分別可造成 23 種、21 種以及 19 種負面衝擊。


3. 研究差距：

本篇研究指出當前氣候變遷風險於鐵道設施相關研究存在四種研究差距，說明如下：

- (1) 地理分布過度集中：目前大多數研究在氣候變遷與鐵道系統風險研究於地理上分布呈現明顯的集中化現象，大部分研究貢獻來自於歐洲(特別是英國)、北美洲以及中國。這些地區的基礎設施較為完善，且有較多的預算投入科學研究，惟亞洲大部分地區、非洲以及南美洲等開發中區域的國家級研究嚴重匱乏，研究地理分布不平衡導致許多獨特的氣候風險無法被量化。
- (2) 氣候風險研究類型失衡：回顧文獻中辨識出 24 種氣候危害，惟研究重點分配不均，導致某些高風險領域長期被低估，例如在瑞典等高緯度國家，冰雪堆積占氣候相關故障比例約 82%，惟探討此類風險相關文獻卻相對稀少，亦缺乏針對冰雪風險相關預測模型與早期預警系統。
- (3) 氣候情境與動態模擬應用不足：大多數研究僅為敘述性連結，即分析歷史數據並提及未來氣候變遷可能增加災害頻率及強度，惟缺乏具體量化數值預測，參考價值相對受限。
- (4) 新興技術應用差距：人工智慧等新興技術在預測天氣災害導致營運延誤及軌道溫度推估等方面展現高度潛力，但目前大部分研究仍使用傳統統計模型，對於高度複雜與非線性氣候風險的預測能力較弱。

2.2.2 美國國家環境保護局(USEPA)-「自我脆弱度評估工具」^{6~8}

美國國家環境保護局為聯邦政府獨立機構，權責範圍包括水資源、空氣污染、有毒物管理與氣候調適等，負責維護自然環境與保護人類健康不受環境危害及污染影響。為協助供水及污水處理機構了解氣候危害與衝擊，於2015年編撰供水設施調適指引⁶，協助機構評估脆弱度與風險，提供調適策略與調適選項。美國國家環境保護局在氣候脆弱度辨識、調適策略選擇與效益分析，開發自我脆弱度評估工具(VSAT)供給水及廢水處理設施管理機構使用，VSAT為網頁界面之脆弱度評估工具，主要係協助相關公用事業辨識關鍵營運作業影響最大之風險，並尋找最具成本效益的調適選項以降低其風險，整體操作均透過網頁方式點選選項或輸入數值，其流程與操作步驟，摘要說明如下：



Quantitative Risk Assessment
Flood – Baseline risk data entered for training scenario

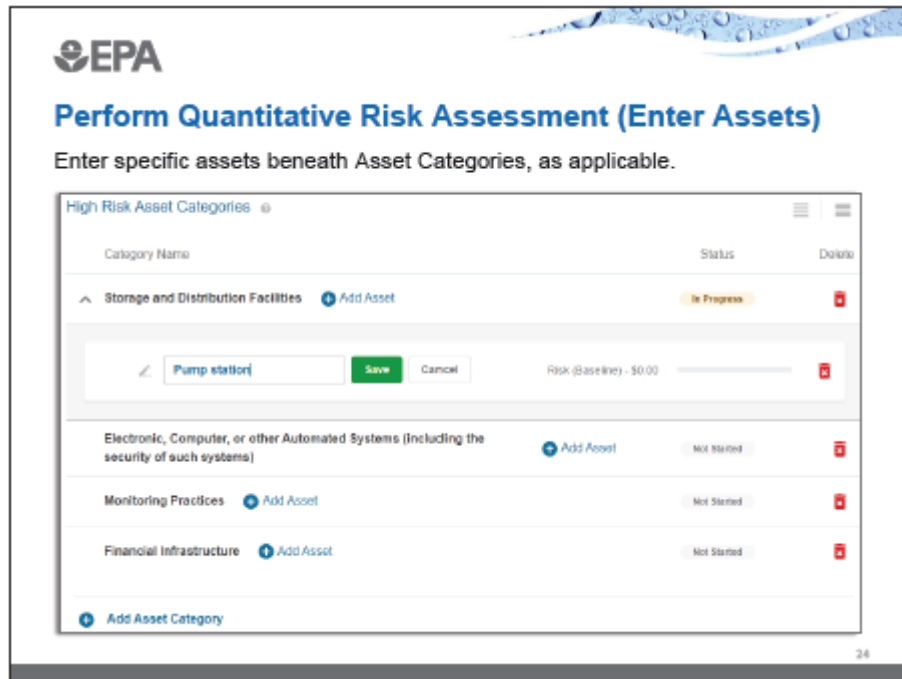
Asset-Threat Pair		Baseline consequences, threat likelihood, and vulnerability			
Asset	Threat	Public Health Consequences	Economic Consequences	Threat Likelihood	Vulnerability Likelihood
Online Water Quality Monitoring Sensors	Flood – F1 – Flood – 100 Year	Fatalities: 0 Injuries: 0	Utility Financial: \$76,000 Regional Economic: \$80,944,600	Annual Baseline Estimate: 0.01	Baseline Estimate: 72%

23

資料來源：VSAT⁷

圖 2.2.2.1 VSAT 量化風險評估內容

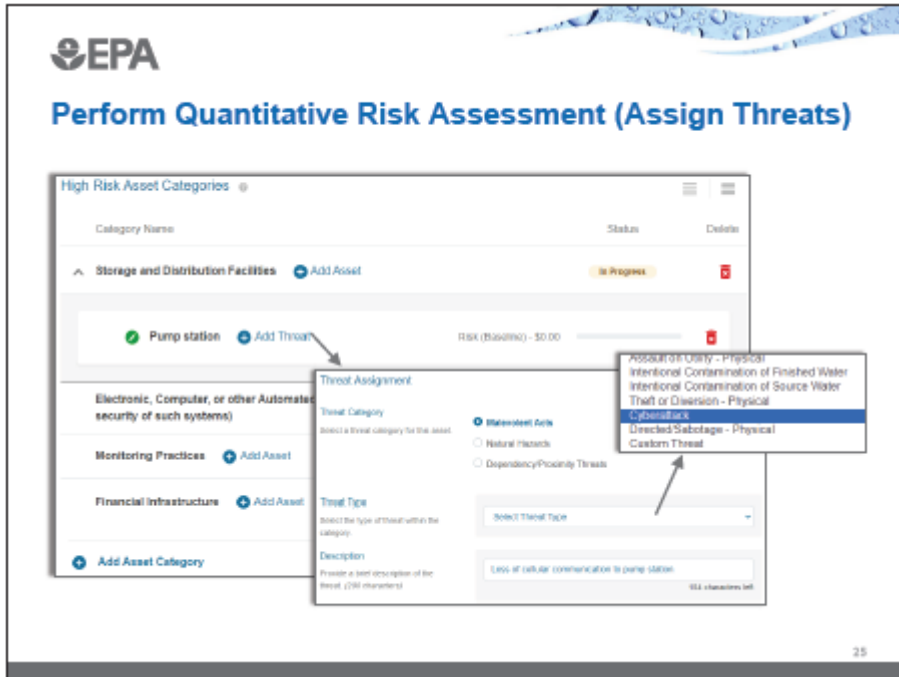
圖 2.2.2.1 以供水品質監測感應器 (Online Water Quality Monitoring Sensors) 為例做為受衝擊資產，並以洪水危害(100 年洪水重現期)進行量化風險評估，評估基準主要分為公共衛生後果、經濟後果、危害可能性及脆弱度可能性等 4 種面向進行評估。



資料來源：VSAT⁷

圖 2.2.2.2 VSAT 量化風險評估內容(輸入資產)


針對每項資產類別，將處於風險中的特定資產進行定義，資產類別包含資產本身(例如：儲水與給水設施)、單一設備或是整個系統(例如：給水系統)，表單中可新增資產(Add Asset)為每項資產類別下新增多個資產，亦可利用定量風險評估(Quantitative Risk Assessment)下的新增資產類別(Add Asset Category)來新增額外的資產類別。



資料來源：VSAT⁷

圖 2.2.2.3 VSAT 量化風險評估內容(指定危害)

針對每項資產選定特定危害風險，其危害風險可分為惡意行為、自然災害，以及具依賴性或鄰近性危害等不同類別。圖 2.2.2.3 中，以加壓站為例進行不同危害風險辨識，在惡意行為類別中選定網路攻擊做為其可能受到危害(因網路攻擊導致加壓站通訊中斷風險)。



Threat Categories and Threat Types

Threat Category	Threat Type
Malevolent Acts	Assault on Utility - Physical Intentional Contamination of Finished Water Intentional Contamination of Source Water Theft or Diversion - Physical Cyberattack Directed/Sabotage - Physical Custom Threat
Natural Hazards	Earthquake (PGA 0 – PGA>1.1) Flood (100-year or 500-year) Hurricane (Category 1 – 5) Ice Storm (IO to IS) Tornado (Fujita 0 – Fujita 5) Wildfire (FRG1 – FRG5) Custom Threat
Dependency Threats	D(C) – Key Customers D(E) – Key Employees D(S) – Key Suppliers D(T) – Transportation D(U) – Utilities Custom Threat
Proximity Threats	D(P) – Proximity Custom Threat

26

資料來源：VSAT⁷

圖 2.2.2.4 VSAT 量化風險評估內容(危害類別與種類)

圖 2.2.2.4 顯示了危害類別與危害種類，自然危害類別包含地震、洪水、颶風，以及野火等，亦可新增特定自然危害納入評估。

EPA

Quantitative Risk Assessment (Evaluate Consequences)

Evaluate the public health and economic consequences of the threat occurring

- Fatalities
- Injuries
- Utility financial
- Regional economic

Public health consequence is calculated by multiplying fatalities and injuries by VSL and VSI values.

Settings

Consequence Determination

Value of Statistical Life (VSL)
\$11,200,000.00

Value of a Statistical Injury
\$42,000.00

* Default VSL value of \$11.2 million/CEA default is provided based on converting a central estimate of VSL of \$14 million (2008 dollar) using the GDP deflator index per BNA's Database for Pricing/Economic Analysis, Appendix B: Statistical Risk Valuation Estimates.

Reset to Defaults Cancel Save

Baseline Risk Assessment

Consequences
Evaluate the public health and economic consequences

Fatalities: 0 Injuries: 0

Utility Financial Consequences: \$100,000 Regional Economic Consequences: \$400,000

VRSAT Calculator

The VRSAT calculator is a simplified version of the Water Health and Economic Analysis Tool (WHEAT), developed by EPA to assist with estimating fatalities, injuries, and utility financial and regional economic consequences. The full tool, including documentation, is available here.

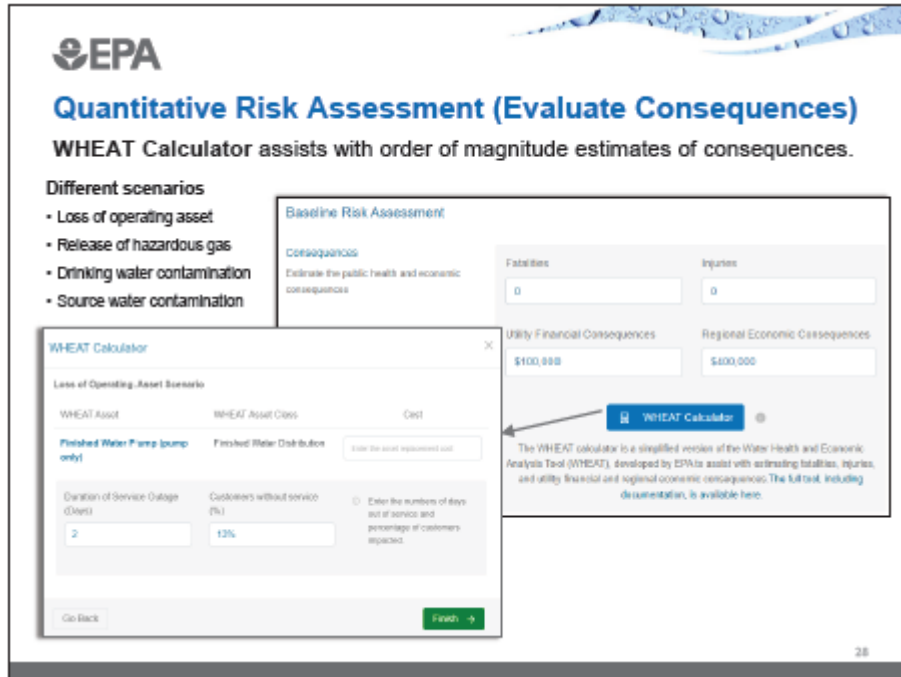
Help Introduction
Fatalities and significant injuries that are directly attributed to the utility asset, such as from contaminated water or a release of a hazardous gas.
VRSAT converts fatalities and significant injuries to monetary risk values. [Download Data.](#)
Utility financial and regional economic losses due to service interruptions and emergency response and recovery activities.

27

資料來源：VSAT⁷

圖 2.2.2.5 VSAT 量化風險評估內容(評估結果)

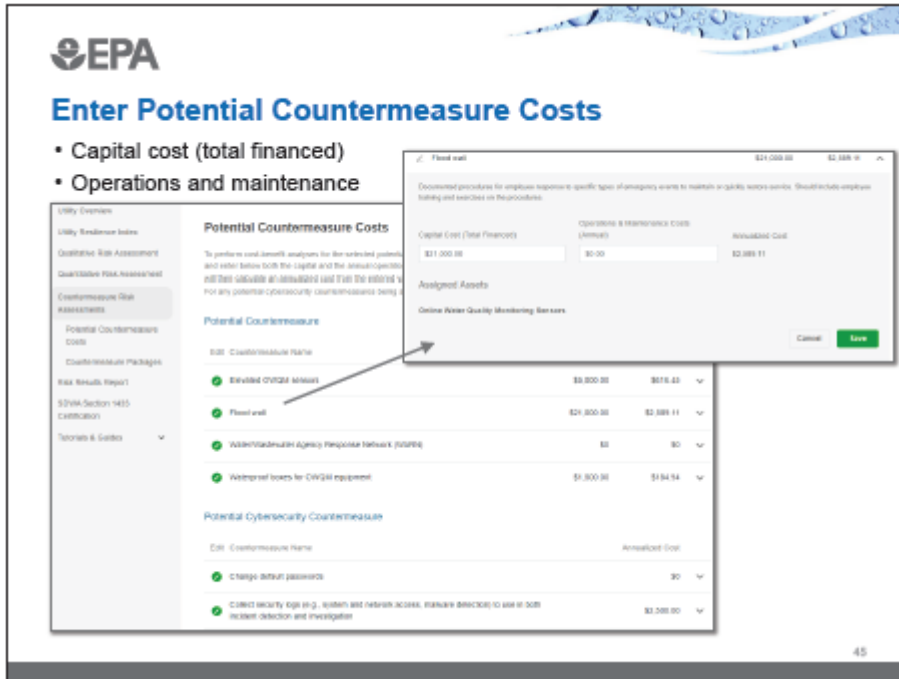
將各特定資產與危害(Asset/Threat)組合進行基準風險評估。在圖 2.2.2.5 情境案例中，假設關鍵抽水站遠端操作中斷將不會造成人員傷亡，且評估恢復抽水站運作需時 2 天，並估計約 10 萬美元的營收損失產生，以及 40 萬美元的區域經濟影響。本工具提供統計生命價值(Value of Statistical Life, VSL)和統計傷害價值(Value of Statistical Injury, VSI)的預設選項，利用死亡與重傷人數乘以對應的 VSL 和 VSI 值，進行貨幣化風險價值評估。



資料來源：VSAT⁷

圖 2.2.2.6 VSAT 量化風險評估內容(情境套用)

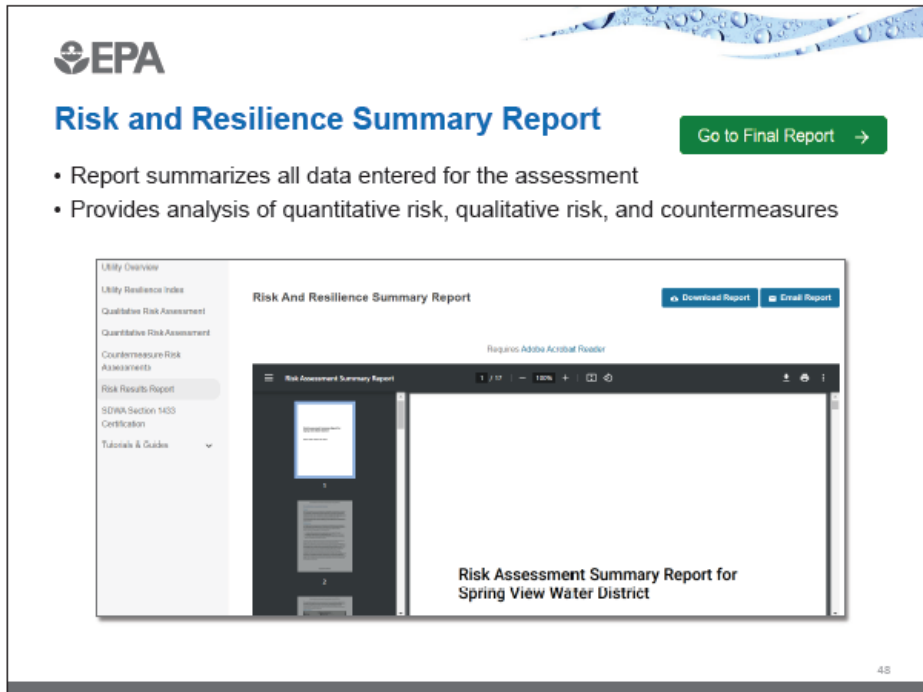
根據所選資產與危害組合，本工具計算中會提供不同的情境套用。例如在營運資產損失情境中，系統會提示使用者選擇資產類型、服務中斷持續時間，以及受影響客戶的百分比。



資料來源：VSAT⁷

圖 2.2.2.7 VSAT 量化風險評估內容(潛在防護成本)

圖 2.2.2.7 接續審視各項潛在防護對策成本，為對所選潛在對策進行成本效益分析，需根據實際情況，輸入相關對策的資本支出成本(Capital Cost)以及營運與維護成本(Operation & Maintenance)。在圖 2.2.2.7 案例中，預估防洪牆資本支出為 21,000 美元，年度營運與維護成本則為 0 美元。



資料來源：VSAT⁷

圖 2.2.2.8 VSAT 量化風險評估內容(摘要報告)

最後 VSAT 風險評估工具即產出風險及韌性摘要報告，該報告彙整定性風險評估、定量風險評估以及防護對策評估所輸入的數值。在評估摘要中，包含各項資產與危害組合的貨幣化風險摘要，亦同時列出基準估計值與改善後的估計值。

由上述摘要操作步驟中，可知 VSAT 是一套專為提供給水與污水處理系統進行氣候變遷風險管理與韌性評估的決策支援軟體，其核心邏輯在於將複雜災害情境轉化為貨幣化指標，協助單位在預算有限的情況下，挑選出最具經濟效益的防護對策。

2.2.3 美國麻薩諸塞灣交通局 (Massachusetts Bay Transportation Authority, MBTA) 「脆弱度評估評分工具 (Vulnerability Assessment Scoring Tool, VAST)」^{9~13}

MBTA 為麻薩諸塞州交通部 (Massachusetts Department of Transportation, MassDOT) 的分支機關，負責營運與提供波士頓都會區之公共運輸服務，包含通勤鐵路、巴士、渡輪及捷運系統。MBTA 針對氣候變遷推動之調適評估方法及工具應用，分別說明如下：

1. 氣候變遷調適措施

為因應氣候變遷極端天氣事件(如暴雨、暴潮和海平面上升)等可能會延誤或中斷服務，威脅客戶和員工的健康與安全，並增加維修、維護和營運成本，因此 MBTA 針對氣候變遷極端氣候所進行調適評估流程如下：

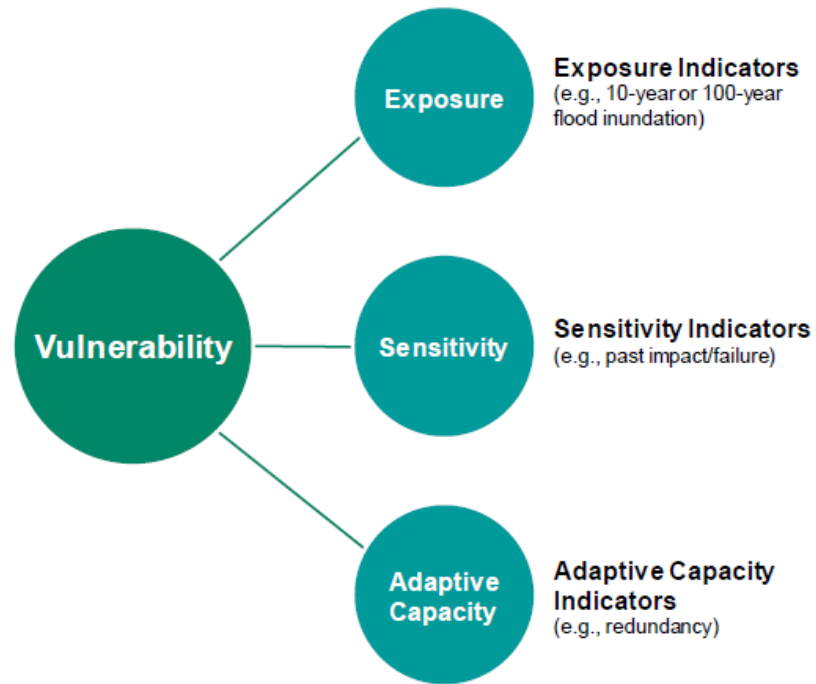
- (1) 脆弱度評估：脆弱性評估目的係為瞭解系統中哪些部分最容易受到氣候變遷的影響，這些評估結果將為 MBTA 公共交通資產管理計畫、資本投資計畫(Capital Investment Plan, CIP)以及全系統現代化改造專案提供基礎評估依據。評估範圍包含有整體系統、捷運、公車與通勤鐵路等 4 個系統，分別於 2022 年起陸續提出評估報告，並同時推動韌性工程。
- (2) 評估和設計標準：為確保可於各項計畫之最初設計階段即將氣候變遷影響納入考量，MBTA 提出標準如下：
 - 將脆弱性評估分數納入資本需求評估中：在每 3~4 年進行之資本需求評估中將脆弱度評分納入考量，有助於評估固定資產狀況和使用年限，以及更換或維修成本，並於更換或維修時可優先考量具風險韌性之項目，以降低系統脆弱度。
 - 資本投資計畫中納入韌性評分：在評估五年資本投資計畫所提項目時，有助於機構聚焦於其風險韌性。
 - 更新及制定新設計標準：針對防洪、極端降雨管理與其

他可能衝擊基礎設施之因素，與相關專業工程師共同制定新設計標準。

- 工程設計與建造中強制納入相關氣候風險考量：要求新建工程計畫於設計與建造時，需採用納入氣候風險之永續性評等標準或機制，如美國綠建築協會(United States Green Building Council, USGBC)所制定之能源與環境設計先導(Leadership in Energy and Environmental Design, LEED)標準，以及美國永續基礎設施研究所(Institute of Sustainable Infrastructure)與哈佛大學共同開發之 Envision 標準。

2. 脆弱度評估評分工具

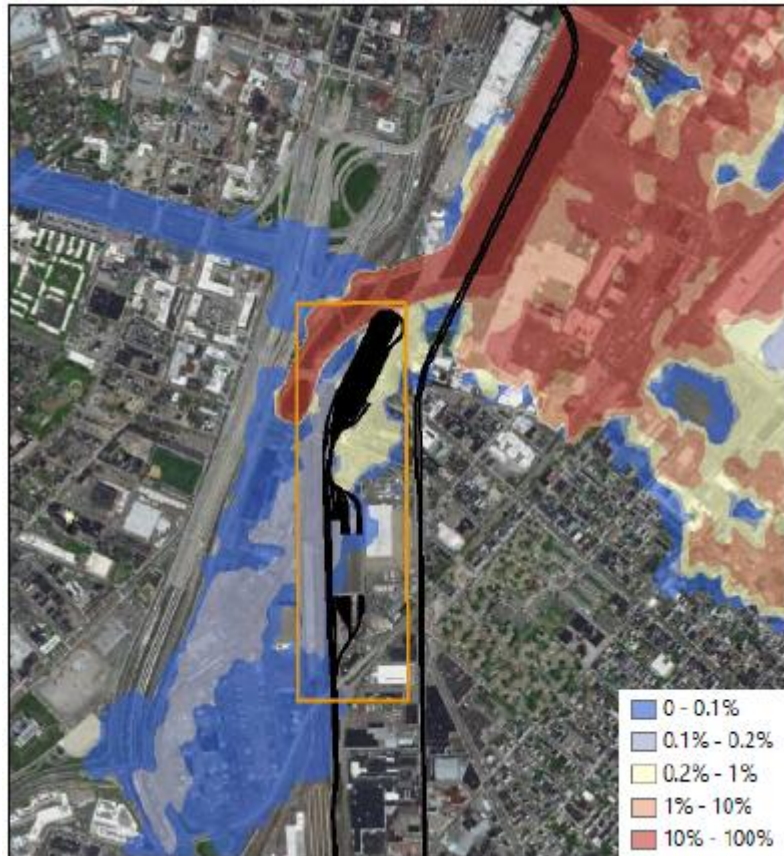
MBTA 參考美國聯邦公路管理局(Federal Highway Administration, FHWA)所開發之脆弱度評估評分工具(Vulnerability Assessment Scoring Tool, VAST)工具，並依據 MBTA 本身擁有之資產類別與需求，開發類似 Excel 介面的評分工具，此工具將脆弱度細分為暴露度、敏感度及調適能力(詳圖 2.2.3.1)，以協助 MBTA 了解哪些資產(例如車站、軌道、通訊及號誌系統)在面臨極端氣候時風險最高，使其更符合都市公共運輸系統的基礎設施管理需求。圖 2.2.3.1 中以鐵道系統受到洪水衝擊為例，在暴露度類別中，以 10 年或 100 年洪水重現期發生機率做為指標，並以過去曾受到衝擊以及因衝擊導致服務中斷做為敏感度指標，在調適能力中，以是否有備援系統做為衡量指標。



資料來源：MBTA Red Line Climate Change Vulnerability Assessment⁹

圖 2.2.3.1 MBTA 氣候變遷脆弱度評估工具脆弱度分類示意圖

此工具亦可搭配地理資訊系統，以地圖方式呈現 MBTA 鐵道資產所面臨氣候風險程度，例如 MBTA 捷運紅線卡伯特列車保養廠(Cabot Yard)面對洪水溢流機率如圖 2.2.3.2 所示。



資料來源：MBTA Red Line Climate Change Vulnerability Assessment⁸

圖 2.2.3.2 MBTA 卡伯特列車保養廠面對洪水溢流機率示意圖

脆弱度評估評分工具將風險評分結果，進一步匯入 MBTA 資產管理系統，於未來資本規劃中強化氣候變遷風險考量，以供未來氣候調適工作優先排序規劃之參據。

2.2.4 英國 2 號高速鐵路(High Speed 2, HS2)相關風險評估工具^{14~16}

英國 2 號高速鐵路為英國近期興建之鐵道建設計畫，連接倫敦、伯明罕、曼徹斯特等英格蘭境內的主要城市，設計最高營運時速達 330 公里。HS2 依據英國 2008 年氣候變遷法(Climate Change Act 2008) 及 2024 年發表之第 4 版調適報告能力書(Adaptation Reporting Power Fourth, ARP4)¹⁷，提交有關氣候變遷風險評估以及相對應調適措施報告，該計畫彙整多項考量氣候變遷影響之調適設計與工程案例，說明如下：

1. 氣候變遷調適與韌性報告及相關工具

HS2 開發氣候變遷設計影響評估工具(Climate Change Design Impact Assessment, CCDIA)，確保在設計的各個階段都能考量並管理氣候變遷風險，該工具考量 HS2 設計標準對未來氣候變遷的適用性，並識別何處需要額外的容忍設計值以確保氣候韌性，並將這些資訊提供予承包商，做為其設計的參考。CCDIA 根據各項資產的預計設計壽命，對每種資產類型進行獨立考量，設計人員可以在其氣候變遷調適與韌性報告(Climate Change Adaptation and Resilience Reports, CCARR)中，針對特定場址評估風險，其中包含關於災害暴露程度，以及特定系統或資產對當地氣候條件敏感性詳細資訊，CCARR 係證明其設計於合理之可行範圍內，已達氣候韌性與調適能力最大化，並盡可能降低因氣候變遷對跨系統界面造成衝擊。此報告於設計與建造過程中持續有效，且要求廠商應隨設計進度或變更設計而進行更新，目前 HS2 針對土建工程、車站工程與軌道系統承包商所提交 CCARR 報告完成審查，並於 2022 年成立 HS2 承包商氣候韌性協作小組，旨在訓練與指引承包廠商針對計畫範圍內之風險，導入氣候韌性設計與相關調適措施。

另 HS2 亦發展氣候變遷韌性與相互依賴性評估工具(Climate Change Resilience and Interdependencies Assessment, CCRIA)，因現代化、高效且網路化的基礎設施，必然會使不同的基礎設施部門之間產生相互依賴性。HS2 利用 CCRIA 辨識受氣候變遷影響的 HS2 系統關鍵相互依賴性，這些相互依賴資產

包括：鐵道網路、道路基礎設施、電力基礎設施，以及電信網路，CCRIA 並可用於在資產群組層級對氣候變遷影響相關的脆弱性進行分類、評估與優先排序。

綜上所述可知，CCDIA 主要用於設計階段，將 CCARR 中提到的高風險因子，落實到具體的工程設計與技術規範中，CCDIA 則提供評估的基準情境(例如：設計必須能抵抗世紀末前百年一遇洪水規模)。CCDIA 亦彙整各個階段的執行結果，形成系統性的韌性總結報告；CCRIA 則著重鐵道系統與外部系統的關聯性，CCRIA 與 CCARR 共同構成了完整的氣候風險評估。

2. 氣象預測工具

為避免極端與季節性天氣事件衝擊工程進度，影響成本、進度、品質、安全，以及降低施工期間之風險，HS2 主要土建工程承包廠商 Align JV 與氣象科技公司 MetSwift 合作，於施工區域導入 6 個 Davis 氣象儀器觀測站，用於蒐集施工現場各關鍵位置的即時氣象資料，以現場氣象站數據以及歷史氣候資料作為基礎資料庫，MetSwift 與 Align 採用類神經網路基礎之機器學習技術，開發具備人工智慧之短期預報系統(Short-Term Forecast system, STF)預測平台。此平台利用人工智慧近期的技術發展，使軟體開發者能利用神經網路的機器學習技術，透過學習歷史氣象資料，並結合當前的大氣氣象資料，產出未來 10 天的預報資料。

STF 預測平台可依據現場人員針對特定作業設定之天氣條件限制，產生施工場址特性之預測結果以及未來一週氣象預報，協助提升規劃施工排程之精確度，強化工程安全性並減少延誤時間，其操作介面如圖 2.2.4.1。



資料來源：A Weather Resilient Approach to Construction - Lessons from Align Joint Venture on HS2¹⁶

圖 2.2.4.1 STF 預測平台操作預測風速示意圖

HS2 為評估 STF 平台之預測準確性，將 STF 預測模型、美國國家氣象局(United States National Weather Service)所提供的傳統數值預報模型(Global Forecast System, GFS)以及天氣應用程式 XC Weather (XCW)3 種模型所預測之結果與前述 6 個氣象儀器觀測站之實際數據進行比較，結果證明 STF 為準確度最高之預測模型，STF 預測優勢摘要說明如下：

- (1) 風速預測準確率：MetSwift 在預測操作方面(如陣風速度)準確率高達 86%至 93%，而傳統模型僅約為 7%。
- (2) 減少不必要停工：此工具能區分觀測上雖然安全惟預報不佳情況，顯著降低因氣象誤報導致的昂貴停工成本，約僅 3%的停工時間預估錯誤，遠低於其他模型的 30%。
- (3) 先進安全預警：曾於一場襲擊英國風暴中，比英國氣象局(Met Office)的紅色警報提早 36 小時發出預警，為現場機具撤收與加固爭取更多關鍵時間。

應用 STF 預測工具不僅改善施工效率，更符合 HS2 建立氣

候適應型鐵道系統的長期策略，透過 MetSwift 的資料數據，管理團隊能以科學方式進行策略性規劃，確保在極端天氣日益頻繁的未來，鐵道基礎設施能同時兼顧安全、成本與環保等目標。

2.3 小結

本章初步回顧國外氣候變遷風險評估方法及工具調適研究，以及實務案例相關內容，茲將重點彙整如下：

1. 國內外調適架構流程相似，主要由「前期規劃與問題界定」、「現況風險評估與分析」、「未來風險評估與分析」、「調適策略發展與評估」、「實施與調適路徑管理」及「監測、評估與溝通」等 6 構面組成。
 - (1) 前期規劃與問題界定：確認保全對象及調適目標，同時辨識利害關係人，並依據其關注議題調整調適範疇。
 - (2) 現況風險評估與分析：藉由歷史或現況氣象資料進行風險評估，其評估結果做為風險比較基準。
 - (3) 未來風險評估與分析：藉由科學推估未來氣候資料，模擬未來氣候變遷情境下之風險，以研析未來氣候變遷與現況間之差距。
 - (4) 調適策略發展與評估：研擬適合組織自身的調適選項，並制定調適策略及行動計畫。
 - (5) 實施與調適路徑管理：根據調適策略及行動計畫執行調適行動，並定期評估調適的執行成效。
 - (6) 監測、評估與溝通：檢討調適執行結果與目標符合程度，做為調適策略及行動計畫的滾動檢討及精進修正依據。
2. 國外機構提供相關調適評估工具或方法，協助組織進行調適風險評估，各評估工具簡要特色彙整如表 2-1，並簡要說明如下：

- (1) 美國國家環境保護局提供有脆弱度評估工具 VSAT、調適選項資料庫及檢核表，藉由標準化流程提供給水或廢水處理設施能主動辨識關鍵資產的脆弱性，並評估強化安全與韌性的改善方案，並幫助管理者找出對任務關鍵型運作威脅最大的風險，並尋求最具成本效益的調適措施。
 - (2) 美國麻薩諸塞灣交通局針對軌道交通資產所開發氣候脆弱度評估工具 VAST，藉由資產清查、暴露評估、敏感度與韌性分析，以及風險評分等步驟，系統性進行鐵道資產(如軌道、車站或變電站)脆弱度評估。此工具將脆弱度分為暴露度、敏感度及調適能力，與 IPCC AR 6 脆弱度包含敏感度與調適能力稍有不同。
 - (3) 英國 HS2 要求工程承包廠商皆須提交相關風險評估韌性報告，以證明其設計將納入氣候變遷調適能力，並在計畫初期針對氣候危害的科學研究與評估中，將氣候變遷納入評估並依據評估成果調整相關工程設計標準；另於施工期間導入科技設備及開發氣象預測工具，以適當之彈性施工規劃提升安全性並降低期程延誤之目標。
3. 綜合上述，可發現國外調適案例皆依據氣候變遷情境與風險評估之結果，將極端氣候衝擊納入設計、建造與營運中；另國內外調適風險評估方法相仿，雖對脆弱度評估定義有些微差異，但核心目標皆為辨識高風險資產，做為後續研擬調適選項依據。

表 2-1 各風險評估工具彙整表

評估工具	主要定位	使用對象	產出成果
美國國家環境保護局脆弱度評估工具 VSAT	既有設施風險管理決策工具	給水與廢水設施管理者	具體及貨幣化改進方案與成本評估分析
美國麻薩諸塞灣交通局脆弱度評估評分工具 VAST	針對既有特定資產在災害情境中損壞或功能中斷的機率	大眾運輸設施管理者	資本投資計畫(CIP)優先順序、防洪工程規格及備援電力需求等
英國 HS2 氣候變遷設計影響評估工具	全生命週期氣候韌性資產管理	HS2 計畫相關工程師、管理者、施工廠商及環境監管機關	包含各標案設施風險等級、防洪設施規格、以及資產維護頻率建議之氣候變遷調適報告

資料來源：[6~16]與本研究整理

三、鐵道系統風險評估方法及工具調適科研缺口 探討

由國外文獻回顧發現，國外氣候變遷風險評估方法及工具調適研究及實務案例報告所採用資料及工具範圍較廣闊，本章彙整所發現之資料、工具及方法等應用，以提供未來投入風險評估方法及工具科研能力之精進建議。

經彙整前章文獻回顧有關鐵路系統因應氣候變遷風險評估可知，高溫、強降雨，以及強風對於鐵道設施設備、易淹水潛勢區、土石流潛勢區、邊坡之影響，存在相當之風險。本研究綜整相關文獻針對鐵道系統相關氣候變遷調適資料進行探討分析，以下將針對風險評估相關資料及風險評估方法與工具進行說明。

3.1 風險評估相關資料

由於鐵道系統由規劃設計、施工興建及營運各階段所需資料量龐大，茲就規劃設計、興建及營運各階段風險評估資料進行說明：

1. 規劃設計階段：此階段主要為確定路廊選擇及站點選址，需引用長期氣候情境數據(如 IPCC^{18、19} SSP5-8.5 或國家科學報告之長年期尺度資料，分析未來 50 至 100 年的降雨增加率、海平面上升幅度)、災害潛勢圖資(包含洪水位與淹水模擬：包含 200 年重現期洪水位淹水範圍與深度圖、地質敏感區分佈，特別是極端降雨下可能產生的坡地災害，以及針對沿海鐵道路廊及基礎設施，需評估未來暴潮水位、永久受淹區及海岸地形變遷趨勢模擬資訊)、極端溫度紀錄(包含過去數 10 年最高與最低溫紀錄，以決定鋼軌預應力及電力系統等散熱設計)。
2. 施工興建階段：本階段所處氣候風險多屬於短期影響，包含局部短期天氣預報(以規劃材料運輸及大跨度吊裝如 HS2 文獻中提及的起重機作業)、施工地點氣候數據以監測局部風速強度(確認吊車是否需停工)與降雨量，以決定開挖邊坡是否需加固。
3. 營運階段：此階段風險評估著重於未來調適決策門檻，以精確評估成本與避免造成營運損失，包含動態氣候風險門檻(如路段及橋梁即時風

速與風向，倘風速達 25m/s 需減速或 30m/s 需停駛等門檻值)、結構監測數據(基礎設施結構物與氣候資訊感測器結合，以觀察橋梁等結構物在極端高溫或強風下的動態衝擊)、建立歷史故障資料庫(將過去的極端氣候事件與設施故障案例，如號誌失效、電力線斷裂等進行關聯分析，建立預測性維修模型)，以及乘客與貨物運務資料，例如在極端氣候發生時，評估分析乘客疏散動線、轉乘容量及跨系統輸運，並進行事件後復原規劃。

3.2 風險評估方法與工具

經彙整前章相關文獻可發現，全球先進國家交通與環境機構已進行開發特定評估工具進行風險評估，惟各工具於評估過程中仍存在顯著的調適科研缺口，本研究摘要說明如下：

1. 美國國家環境保護局之自我脆弱度評估工具(VSAT)，主要設計用於給水與廢水處理系統，倘於鐵道基礎設施應用中可能缺口如下：
 - (1) 跨系統關聯性模擬不足：VSAT 專注於單一資產(如水廠或單一基礎設施)受損風險，缺乏對線性系統如軌道及場站等複合型基礎設施風險衝擊模擬。
 - (2) 更新頻率較低：該工具對於變化快速極端氣候(如強降雨所導致土石流)缺乏評估與即時更新。
 - (3) 需依賴專家判定：脆弱度評分高度依賴專家經驗或使用者自評，缺乏客觀定量數據長期自動回饋。
2. 美國麻薩諸塞灣交通局之脆弱度評估評分工具(VAST)係評估資產改善優先順序工具，其缺口可能為：
 - (1) 工程參數轉化缺口：評估工具產出為風險分數，而非工程規格，工程師仍需進一步判斷防洪牆需要加高 30 或 50 公分。
 - (2) 長期性風險壓力：該工具對於長期高溫導致的鋼軌疲勞及其對維護成本的長期負面影響，仍需進一步研究及量化。
 - (3) 經濟效益量化困難：無法精確計算調適成本與營運損失之間關係，可能於預算編列時缺乏財務平衡可行性。
3. HS2 建立設計影響評估(CCDIA)、調適與韌性報告(CCARR)、相互依

賴性評估(CCRIA)以及氣象工具(MetSwift)，惟各工具間仍有相關缺口，說明如下：

- (1) 缺乏跨領域動態推估模型：以電力供給與需求為例，當極端熱浪發生時，HS2 列車因空調與牽引系統滿載，對外部電力需求飆升，惟外部電網同時因環境高溫導致變壓器散熱不良與輸電效率下降，形成電力供給下降且需求暴增供需失衡，目前尚缺乏相關跨領域整合評估模型。
- (2) 數據覆蓋程度：氣象工具準確度需依賴現場氣象站，惟於氣象站設置不足區域，預測準確度可能下降。
- (3) 複合性風險：單一危害分析雖可探討一定時空尺度下單一危害風險及其影響過程，但現有工具難以整合評估多樣氣候壓力下所造成的複合性風險。

3.3 科研缺口議題研析

綜理有關鐵道系統在面對氣候變遷衝擊進行風險評估與工具發展、應用風險評估方法及工具等相關文獻後，本研究摘整相關科研缺口議題，說明如下：

1. 複合性與連鎖性風險評估缺口：目前研究仍著重於單一危害分析(如僅考慮淹水或極端溫度)，缺乏對複合性風險(如強降雨同時伴隨強風與電力失效)及多樣風險壓力進行評估。
2. 基礎設施材料耐受極限缺口：現有設計標準係參考歷史氣候資料或以模型推估未來氣候情境，惟氣候變遷推估不確定性對長期暴露在極端溫度及強風等氣候壓力下之基礎設施材料(如軌道、電車線等)，其劣化速率與疲勞極限尚待研究。
3. 基礎氣候風險評估資料不足缺口：既有氣候推估模型於區域或地方解析度仍不夠精細，微觀氣候風險亦難以準確掌握，為更精確推估未來氣候變遷情境分析，需持續進行高解析度動力降尺度模型相關研究。

四、結論與建議

4.1 結論

本研究針對鐵道系統氣候變遷風險評估方法與工具之科研缺口蒐集國內外相關資料進行探討，並以各國已採行風險評估方法與工具案例之內容，及其可應用性、效益及限制進行研析，俾供相關鐵道系統管理機關做為參考應用，協助其強化鐵道系統之韌性。綜整結論如下：

1. 回顧風險評估方法與工具相關文獻可知其發展及現況應用情形，擇要如下：

(1) 針對美國國家環境保護局所開發的脆弱度自我評估工具(VSAT)，其在基礎設施調適應用中，可從其設計原理及實務限制進行說明：

- 設計原理：該工具提供了一套標準化、結構化的風險評估框架，提供設施管理者針對供水與廢水處理，後續亦可將此延伸至鐵道系統基礎設施，並以資產導向模式將災害損失(包括修復成本、服務中斷損失等)進行貨幣化，提供管理者具體的調適預算資訊。
- 實務限制：VSAT 專注於單一資產(如水廠或單一基礎設施)受損風險，缺乏對線性系統如軌道及場站等複合型基礎設施風險衝擊模擬。

(2) 美國麻薩諸塞灣交通局 MBTA 所開發的脆弱度評估評分工具(VAST)，其在軌道交通資產管理與氣候調適應用中，建立一套可重複、可比較且以資產為主的評分架構，就其設計原理及實務限制進行摘要說明：

- 設計原理：VAST 採用暴露度、敏感度及調適能力等 3 種指標，使管理機關能在眾多鐵道資產中，例如軌道、車站、變電站、號誌等設施，辨識哪些基礎設施在面對氣候變遷極端氣候如海平面上升或強降雨時脆弱度評分最高。另透過 VAST 產出的風險分數，可篩選出關鍵節點，例如低窪地區的變電站，並將其列入未來資本投資計畫中改善。
- 實務限制：VAST 對單一資產有深度掌握，但對於系統連鎖反應

的模擬較為欠缺。例如，軌道本身可能不會因小規模淹水受損，倘若下游的抽水站電力中斷，軌道仍會因積水而暫停營運。

(3) HS2 所建構的氣候調適架構，包含 CCDIA、CCARR、CCRIA 以及 MetSwift 等評估工具，其展現目前最完備基礎設施氣候變遷調適工具，將風險評估由災後補救調整為全生命週期預防，就其設計原理及實務限制進行摘要說明：

- 設計原理：HS2 相關評估工具確保每一項工程設施零件從規劃設計階段即引入未來 50 至 100 年的氣候情境，並使鐵道系統管理機關必須與外部利害者，例如電力公司，建立共享風險協議，亦利用 MetSwift 展示氣象預測調適工具不只保障安全，更可提升營運效率，精準預測極端風速或降雨，讓鐵道系統管理機關能提前進行資源調度，實現循證治理的決策模式。
- 實務限制：氣候預測模型對於未來數十年至百年的長期預測仍存在極大不確定性，相關氣候資訊與推估不確定性尚待進一步研究；另氣象預測工具準確度亦需依賴現場氣象站，倘氣象站設置不足或資訊量缺乏，預測準確度可能下降。

2. 針對鐵道系統在面對氣候變遷衝擊進行風險評估與工具發展、應用風險評估方法及工具，並研析國內外運輸系統及鐵道系統調適風險評估相等文獻發現，國外氣候變遷風險評估研究及實務案例所採用評估工具較為多元，說明如下：

- (1) 當前各國所使用氣候風險評估工具已由災害地圖演進至資產風險影響評估，惟整體仍處於從定性向定量轉型的過渡期。
- (2) 單一風險評估工具無法解決所有氣候風險，需依鐵道系統各階段進行評估，各階段評估資料亦需流通共享。
- (3) 現有風險評估工具將各氣候風險視為獨立事件，較難評估複合性風險同時發生機率及負面衝擊，後續有關複合性風險資料及方法尚待研討。

4.2 建議

考量氣候變遷對於全球衝擊影響已為不可逆趨勢，而國內運輸系統在多山、面海，或是位處缺乏良善排水系統的低窪區域，每逢極端高溫、強降雨，加上颱風季節各種氣候壓力可能同時發生情境下，應用氣候變遷風險評估方法與工具提升各系統管理機關調適能力以及系統韌性實有其需要。建議後續可配合國際調適趨勢積極推廣風險評估方法與工具開發及應用，亦可參考英國 HS2 作法以全生命週期為概念，於鐵道系統規劃設計、施工興建及營運各階段輔以風險評估方法及工具開發及應用，並研擬相關指引及配套措施，以利加速落實應用。綜理本計畫研究過程中之觀察及發現，提出鐵道系統調適工作降低風險評估方法與工具之科研缺口建議，分項說明如下：

1. 持續追蹤國際趨勢及發展

為助於風險評估方法與工具發展及應用，並降低相關科研缺口，建議持續蒐整實務操作問題及需求，以供回饋至風險評估方法與工具技術開發，俾利相關機關(構)執行調適作業。風險評估方法與工具科研缺口包括圖資與量能不足、跨系統關聯性模擬不足、缺乏客觀定量數據長期自動回饋與成效不確定性等挑戰。面對當前的限制因素，建議對策包括知識差距的補足、加強跨系統合作關係、能力建構，以及專案成效監測評估。建議鐵道系統設施權管機關可邀請土木、電力、水利、氣象及氣候變遷等跨領域之學者專家，並結合民間顧問公司實務經驗，透過工作坊及座談會形式，追蹤國際風險評估方法與工具發展及應用趨勢並整合相關資訊俾提供鐵道系統設施權管機關參考應用，以彌補缺乏相關知識之調適缺口。

2. 將新技術納入風險評估方法與工具

將新技術(如 AI 或無人機等)納入氣候變遷風險評估工具，例如 HS2 應用 MetSwift 調適工具進行氣象預測，或利用無人機或車載監視器拍攝軌道、電車線、橋墩照片，透過 AI 影像辨識技術進行自動化損害識別，亦可透過模擬不同年份投入調適預算，以評估何時應加高防洪牆或升級散熱系統，以達成生命週期成本最小化的目標，透過導入 AI 評估工具，可自動依據過往天氣事件與設備故障間的隱性關聯，協助建立更全面的風險資料庫。

3. 加強跨領域合作關係

鐵道系統需與跨領域系統建立夥伴關係，透過跨領域專家共同制

定願景有助於成功實施之可能性，例如鐵道系統運作穩定高度依賴外部電網，當風險評估工具預測有極端高溫情況時，不應只評估鋼軌溫度，需同步分析鐵道系統所需電力可能因場站或車廂空調需求提升而導致電力不足情形，可及早因應預先規劃備用電力或班次縮減等措施，以填補隱性依存性缺口。倘營運路段因極端氣候導致中斷，風險評估工具亦可提供建議將乘客受困納入風險評估，而非僅評估物理資產損壞。跨領域合作關係可將外部性風險內部化，未來的風險評估工具將不只是單一封閉資料庫，而是開放式資料交換中心，透過電力、水利、結構監測與財務精算整合，鐵道系統管理機關可於複合型風險發生時，提升跨越單領域的氣候風險應變韌性。

4. 複合性風險評估

過去研究主要著重評估單一自然或氣候所造成的危害度，例如強降雨、強風、淹水、崩塌、暴潮等事件。單一危害分析雖可探討特定時空尺度下單一危害風險及其影響過程，但難以整合評估多樣風險壓力下所造成的複合性風險。建議後續可逐步將複合及連鎖風險議題納入調適相關策略、體系與管理等面向，並進行檢討及提出因應解方，另建議未來需考慮連續性危害的效應，並鑑識整體空間上受到複合危害影響最嚴重的地區，予以先期規劃因應的調適策略或行動。

參考文獻

1. TCCIP 臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台，檢自：
<https://tccip.ncdr.nat.gov.tw/index.aspx>
2. 環境部，氣候變遷風險評估作業準則，民國 114 年
3. International Organization for Standardization (ISO), ISO 14090:2019 Adaptation to Climate Change- Principles, Requirements And Guidelines, 2019.
4. International Organization for Standardization (ISO), ISO 14091:2021 Adaptation to Climate Change- Guidelines on Vulnerability, Impacts and Risk Assessment, 2021.
5. Haghghi, E., Kasraei, A., Strandberg, A., Sas, G., & Garmabaki, A. H. S. Climate change risks on railway infrastructure: A systematic review and analysis. Sustainable Cities and Society, 2025.
6. U.S. Environmental Protection Agency (USEPA), Adatation Strategies Guide for Water Utilities, 2015.
7. U.S. Environmental Protection Agency (USEPA), VSAT Web Data Entry Guide., 2018.
8. U.S. Environmental Protection Agency (USEPA), Vulnerability Self-Assessment Tool Web, Retrieved from:
<https://www.epa.gov/waterresilience/vulnerability-self-assessment-tool-conduct-drinking-water-or-wastewater-utility>.
9. Massachusetts Bay Transportation Authority (MBTA), MBTA Red Line Climate Change Vulnerability Assessment, 2022.
10. Massachusetts Bay Transportation Authority (MBTA), MBTA Green Line Climate Change Vulnerability Assessment, 2022.
11. Massachusetts Bay Transportation Authority (MBTA), MBTA Red Line Climate Change Vulnerability Assessment Storympas, Retrieved from:
<https://storymaps.arcgis.com/stories/0e8ee0c8457240a99ef7657b73ac08d7>
12. Massachusetts Bay Transportation Authority (MBTA), Quincy Bus Maintenance

- Facility Construction Update | Spring 2024, Retrieved from: <https://www.mbta.com/projects/bus-facility-modernization/update/quincy-bus-maintenance-facility-construction-update>
13. Massachusetts Bay Transportation Authority (MBTA), Fenway Portal Flood Protection Project, Retrieved from: <https://www.mbta.com/projects/fenway-portal-flood-protection-project>
 14. High Speed Two (HS2), Chiltern Tunnel cross passage durability design response to challenges, Retrieved from: <https://learninglegacy.hs2.org.uk/document/chiltern-tunnel-cross-passage-durability-design-response-to-challenges/>
 15. High Speed Two (HS2), Resilient river landscapes River Cole realignment: mitigating climate change through landscape design, Retrieved from: <https://learninglegacy.hs2.org.uk/document/resilient-river-landscapes-river-cole-realignment-mitigating-climate-change-through-landscape-design/>
 16. High Speed Two (HS2), A Weather Resilient Approach to Construction - Lessons from Align Joint Venture on HS2, Retrieved from: <https://learninglegacy.hs2.org.uk/document/a-weather-resilient-approach-to-construction-lessons-from-align-joint-venture-on-hs2/>
 17. Department for Environment, Food & Rural Affairs (Defra), Understanding Climate Adaptation and the Third National Adaptation Programme (NAP3), 2024.
 18. Intergovernmental Panel on Climate Change, AR6 Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability, 2022.
 19. Intergovernmental Panel on Climate Change, Synthesis report of the IPCC sixth assessment report, 2023
 20. 環境部，氣候變遷因應法，民國 112 年
 21. 行政院，國家因應氣候變遷行動綱領，民國 112 年
 22. 國家科學及技術委員會與環境部聯合出版，國家氣候變遷科學報告 2024：

現象、衝擊與調適，民國 113 年