

運輸氣候風險評估應用國家氣候情境圖資之 課題研析

Study on the Challenges of Applying National Climate Scenario Geospatial Data to Transportation Climate Risk Assessment

運輸能源及環境組 蕭為元、楊家銘、鄔德傳、朱珮芸

研究期間：民國 113 年 1 月至 113 年 12 月

摘要

我國於 2023 年施行「氣候變遷因應法」新增調適專章，要求各級政府以科學為基礎推動氣候變遷風險評估與調適規劃。因此，交通部所屬機關（構）需就所轄運輸設施進行風險評估，據以研提相關調適策略，以提升運輸設施之韌性。

本研究蒐集研析「國家調適應用情境」及「國家氣候變遷科學報告 2024：現象、衝擊與調適」相關資料於運輸系統氣候變遷風險評估之應用，並透過訪談公路局、高速公路局、鐵道局及民航局，蒐集及探討運輸設施管理單位進行氣候變遷風險評估所需氣候情境推估資訊。另透過訪談國家災害防救科技中心及中央氣象署，探討國家氣候情境圖資可提供之協助及合作模式，包括透過洽詢、申請、簽署合作意向書（MOU）或透過「氣候變遷調適科研協作平台」提出需求，以取得相關圖資資料。綜合分析，運輸單位應依計畫規模、所在區位、氣候衝擊因子，合理選用「國家調適應用情境」之固定增溫情境與降尺度資料，並結合「國家氣候變遷科學報告」趨勢與工程專業判斷，以增進風險評估與調適決策之科學性與周延性。

關鍵詞：氣候變遷、國家調適應用情境、調適

運輸氣候風險評估應用國家氣候情境圖資之 課題研析

一、前言

1.1 研究緣起

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 2023 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，做為研擬、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」。

在行政院 2023 年 9 月核定之「國家氣候變遷調適行動計畫（112-115 年）」，以「固定暖化情境」設定為「國家調適應用情境」，另國家科學及技術委員會與環境部於 2024 年 5 月 8 日共同發布「國家氣候

變遷科學報告 2024：現象、衝擊與調適」，提供各級政府進行氣候變遷風險評估之參考應用。

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。本研究目的係蒐集研析國家新版之氣候變遷科學報告及國家調適應用情境，探討國家調適應用情境相關圖資應用於運輸系統氣候變遷風險評估之相關課題，並提出應用建議，提供運輸管理機關（構）後續應用國家氣候情境圖資進行氣候變遷風險評估之參據。

1.2 研究項目

本研究之工作項目如下：

1. 蒐集研析國家調適應用情境及國家新版之氣候變遷科學報告：透過文獻回顧方式，蒐集「國家調適應用情境」及「國家氣候變遷科學報告 2024：現象、衝擊與調適」相關資料，並研析相關內容如何應用於運輸系統氣候變遷風險評估。
2. 探討運輸管理機關（構）進行氣候變遷風險評估所需氣候情境推估資訊：透過國內外文獻回顧及機關訪談方式，蒐集及探討運輸管理機關（構）進行氣候變遷風險評估所需氣候情境推估資訊，如氣候情境圖資尺度、氣候衝擊因子項目等。
3. 探討我國氣候科研團隊（如國家災害防救科技中心）、氣象署與運輸管理機關（構）之溝通管道：透過訪談交流，瞭解國家災害防救科技中心（National Science and Technology Center for Disaster Reduction, NCDR）與氣象署就國家氣候情境圖資可提供之協助及合作模式，並探討運輸管理機關（構）與 NCDR 及氣象署之溝通管道，各機關（構）可適時提出國家氣候情境圖資應用需求及回饋相關意見，強化與 NCDR 及氣象署之交流。
4. 探討國家調適應用情境應用於運輸風險評估之相關課題，並提出應用建議：就運輸管理機關（構）氣候變遷風險評估所需氣候情境推估資料，探討國家調適應用情境於運輸風險評估相關課題，

如降尺度需求、固定增溫情境選擇等，並提出後續應用建議。

1.3 研究方法

本研究辦理方式以文獻回顧為主，並輔以單位訪談以提升研究內容之周延性。具體辦理方式如下：

1. 文獻蒐集與彙析

透過圖書與網路資源進行文獻回顧與資料調查蒐集研析國家新版之氣候變遷科學報告及國家調適應用情境，了解運輸管理機關（構）進行氣候變遷風險評估所需氣候情境推估資訊。

2. 訪談與諮詢

透過機關訪談與專家諮詢，了解各機關（構）對國家調適應用情境之需求，以及 NCDR、氣象署可提供之圖資及協助，研提國家調適應用情境圖資之應用課題及後續建議。

二、國家調適應用情境及國家氣候變遷科學報告

2.1 國家調適應用情境

政府間氣候變遷專門委員會（Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC）成立於 1988 年，為聯合國組織之一，負責研究與評估氣候變遷相關科學成果之國際組織，每 5 至 7 年發布一次評估報告，提供國際氣候變遷相關科學成果與進展，做為各國決策與學術研究之參考。其分別已於 1990 年、1995 年、2001 年、2007 年、2013 年發布第 1 次至第 5 次評估報告，並於 2021 至 2023 年間發布第 6 次評估報告（The 6th Assessment Report, AR6）。

AR6 報告採用的氣候情境結合「共享社會經濟路徑（Shared Socioeconomic Pathways, SSPs）與代表濃度路徑（Representative Concentration Pathway, RCP）」，簡稱為 SSP 排放情境（SSP-RCPs），其中 SSPs 代表社會經濟發展、RCPs 代表溫室氣體排放或濃度變化所造成的輻射強迫力結果，兩者交織下的多元情境提供不同暖化路徑選項，例如 SSP1-2.6（低排放量/巴黎協議）、SSP2-4.5（中排放量/最

有可能情況)、SSP3-7.0 (高排放量/延續目前狀況)、SSP5-8.5 (極高排放量/減碳失敗) 等。

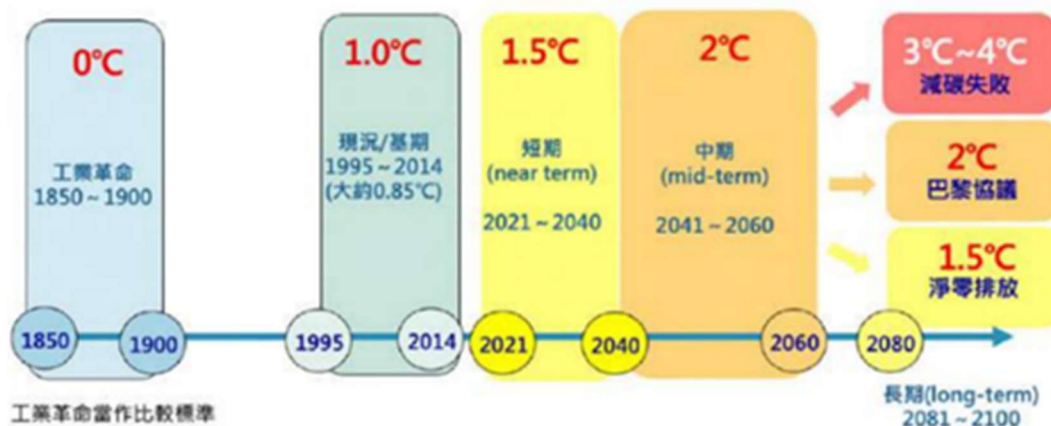
由於 AR6 採用之 SSP 排放情境的設定複雜，且不同氣候模式對於同一個排放情境所反應的溫度變化差異也很大，為提高氣候情境應用性與理解性，IPCC 將上述情境簡化成不同程度的未來增溫幅度，稱為「全球暖化程度 (Global Warming Level, GWL)」或「固定增溫情境」來呈現全球暖化推估結果。

依據 IPCC 推估，相較工業革命時期，全球增溫 1.5°C 約在 2030 年左右，增溫 2°C 約在 2045 年左右，而增溫 4°C 約在 2070 年左右。因此，至少到本 (21) 世紀中前，全球地表溫度將會持續升高。除非在未來幾十年內大幅減少 CO₂ 及其他溫室氣體排放量，否則全球升溫將在 21 世紀超過 1.5°C 和 2°C。

根據「國家氣候變遷調適行動計畫(112-115 年)」，綜整 IPCC AR6 各情境推估與科學模擬依據，並考量調適工作推動經驗檢討與操作之可行性，優先採「固定暖化情境」做為「國家調適應用情境」，「固定暖化情境」將推估期間與排放情境綜合考量，兼顧施政期程規劃與目標設定，可做為各部門進行風險評估與辨別調適缺口之共同參考情境 [1]。

國家調適應用情境原則，相關情境說明如圖 1 所示：

1. 0°C：工業革命時期 (1850-1900 年)，為全球暖化的起始點，做為固定暖化情境的參考基準。
2. 1°C：現階段氣候基期 (1995-2014 年)，可做為現有風險評估及其未來缺口的參考基準。
3. 1.5°C：近期 (短期 2021-2040 年) 的增溫情境。
4. 2°C：中期 (中期 2041-2060 年) 的增溫情境。
5. 3°C~4°C：考量 21 世紀末減碳失敗的增溫情境，將增溫 3°C~4°C (長期 2081-2100 年) 之極端情境。



資料來源：[2]

圖 1 固定暖化情境之參考基準、基期與增溫情境與時程

本期國家氣候變遷調適行動計畫（112-115 年）之「國家調適應用情境」，原則優先採「西元 2021-2040 年全球暖化程度升溫 1.5°C（短期）、西元 2041-2060 年全球暖化程度升溫 2°C（中期）」，以兼顧施政期程規劃與目標設定，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，可強化國家整體風險評估之一致性，也助於跨部門風險評估應用與整合^[2]。

2.2 臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台^[3]

「臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台計畫」（TCCIP）自 2009 年由國科會啟動（原名「臺灣氣候變遷推估與資訊平台建置」），由國家災害防救科技中心（NCDR）擔任計畫辦公室，結合國內學研單位與政府科研人員，致力於產製符合臺灣氣候變遷研究需求的氣候資料，並提供加值與應用服務，成為國內氣候變遷科學資訊的重要基礎。

2022 年，國科會啟動第四期 TCCIP（2022 年 6 月至 2026 年 5 月），延續推動氣候科學模擬與調適知識服務，並配合「韌性臺灣永續發展策略」，提供學術研究、政府施政及產業應用所需的整合性氣候變遷資訊服務。計畫持續穩定供應科學數據與加值資訊，並透過與

利害關係人溝通，發展風險評估與調適工具，助力政策目標達成。

在科研成果上，TCCIP 分別於 2011 年與 2017 年發表「臺灣氣候變遷科學報告」，針對全球、東亞/西北太平洋及臺灣地區的氣候變遷現況與未來推估，並分析其對臺灣的衝擊，成為政府研擬調適政策的科學依據。2024 年，TCCIP 計畫研究團隊協助完成「國家氣候變遷科學報告 2024：現象、衝擊與調適」，國科會及環境部依氣候法共同發布本科學報告，為各級政府的調適能力建構與方案規劃提供關鍵科學資訊。

2023 年 2 月實施的「氣候變遷因應法」進一步強調調適科學資訊的重要性，第 18 條規定中央主管機關與國科會應定期公開氣候變遷科學報告，並輔導地方政府運用於風險評估及調適策略研擬。為落實法定職責，國科會於同年完成「氣候變遷調適科研生態圈」(圖 2) 規劃，明確定位自身在前瞻氣候科研中的關鍵角色，並透過 TCCIP 平台串聯跨部會科研溝通與施政應用。



● 本圖修改自20240918氣候變遷調適科研協作平台第一次平台會議簡報中「國家氣候變遷調適科研生態圈架構」

資料來源：[3]

圖 2 國家氣候變遷調適科研生態圈架構

「臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台計畫」(TCCIP) 在國科會的支持下，以提供臺灣氣候變遷科學與技術研究服務為宗旨。在 TCCIP 平台網站之資料服務氣候圖集中，提供「臺灣氣候變遷關鍵指標圖集：AR6 統計降尺度版」(圖 3) 圖資，其參考 IPCC AR6，使用最新的 AR6 暖化情境與氣候推估資料，並新增以全球暖化程度(GWL，即固定增溫情境)做為評估氣候變遷的另一種呈現方式，使讀者更好理解當全球落實不同程度的氣候目標時，將導致臺灣氣候變遷的嚴重程度有所差異。



資料來源：[3]

圖 3 臺灣氣候變遷關鍵指標圖集：AR6 統計降尺度版

該圖集的資料組包括網格觀測日資料(0.05°)及 AR6 統計降尺度日資料(2023 年 1 月發布)，氣候變遷關鍵指標包括溫度指標及降雨指標，各指標包含的項目如表 1 所示。

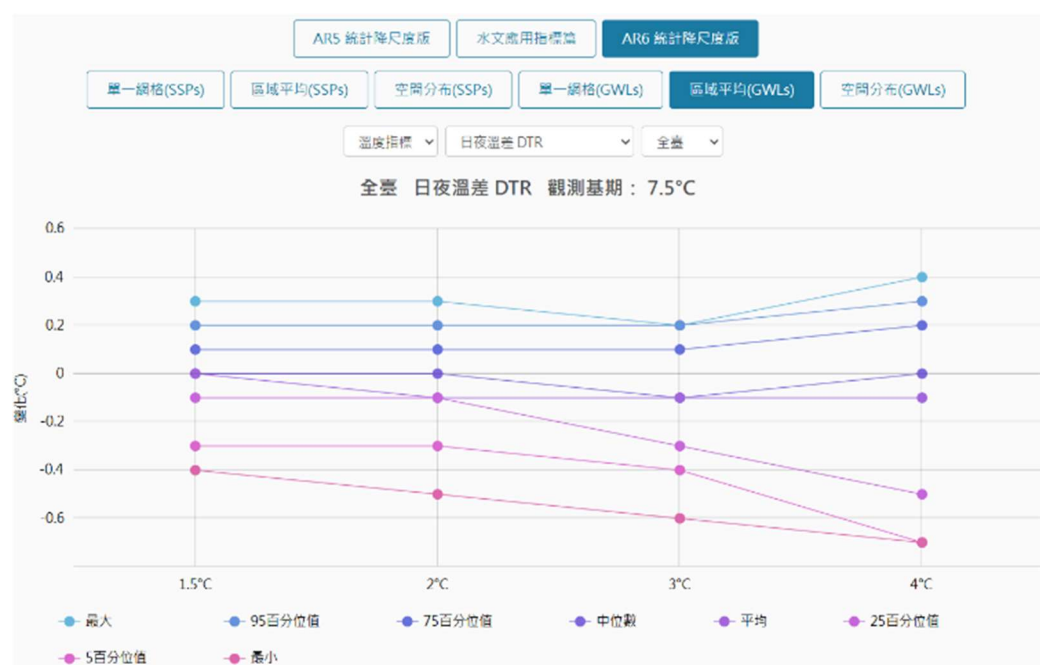
該圖集之全球暖化程度之增溫情境包括 1.5°C、2°C、3°C、4°C，

其呈現方式包括單一網格、區域平均及空間分布，單一網格係呈現各網格變化，區域平均則可分為各縣市或各區（北區、中區、南區、東區）之網格平均值，空間分布則呈現全臺網格數值分布，如圖 4 所示。

表 1 臺灣氣候變遷關鍵指標圖集使用的氣候變遷關鍵指標

溫度指標	降雨指標
日夜溫差 DTR	雨日 RR1
暖晝天數 TX90p	雨日總降雨量 PRCPTOT
暖夜天數 TN90p	雨日降雨強度 SDII
冷晝天數 TX10p	10 毫米雨日 R10mm
冷夜天數 TN10p	20 毫米雨日 R20mm
日高溫最大值 TXx	大雨日 R80mm
日低溫最大值 TNx	豪雨日 R200mm
日高溫最小值 TXn	年最大一日降雨量 Rx1day
日低溫最小值 TNn	年最大連續五日累積降雨量 Rx5day
極端高溫持續指數 HWDI	年最長連續不降雨日 CDD
極端低溫持續指數 CWDI	年最長連續降雨日 CWD

資料來源：[3]



資料來源：[3]

圖 4 臺灣氣候變遷關鍵指標圖集-頁面展示

此外，TCCIP 也提供 IPCC AR6 不同固定增溫情境（包括 1.5°C、2°C、3°C、4°C）之統計降尺度資料，其中 2023 年提供 AR6 統計降尺度 5 公里日資料及 AR6 統計降尺度 5 公里月資料，2025 年 7 月起提供 AR6 統計降尺度 1 公里之日資料，其網格尺度更加細緻，但相對網格檔案也增加很多，以縣市為例，5 公里網格檔案大小共約 115GB，但若為 1 公里網格，檔案大小達 2.4TB，約多 21 倍。氣象變數包括日最高溫、日最低溫、日均溫及降雨等 4 類，如可呈現高溫 36°C 發生區域、未來年總雨量變化趨勢、年最大日降雨量。相關資料可在 TCCIP 網站之資料服務/氣候變遷資料商店申請及下載。

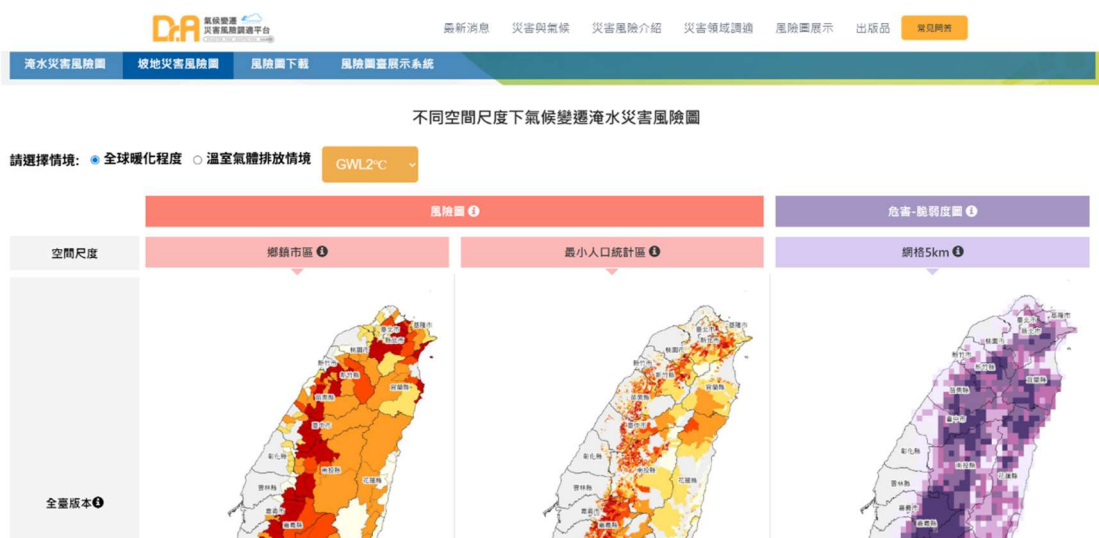
2.3 氣候變遷災害風險調適平台^[4]

國家災害防救科技中心建置「氣候變遷災害風險調適平台（Disaster Risk Adaptation，簡稱 Dr.A 網站）」，除了提供氣候變遷、調適等資訊與知識服務外，另在風險圖展示區提供淹水災害風險圖（如圖 5）及坡地災害風險圖（如圖 6），在情境選擇部分，可選擇 AR6 不同全球暖化程度之增溫情境 1.5°C、2°C、4°C 等 3 種情境。在風險圖之空間尺度，可選擇鄉鎮市區尺度及最小人口統計尺度。不同尺度內，皆會展現現況及未來增溫情境之危害度、脆弱度、危害-脆弱度、暴露度及淹水/坡災災害風險圖資。另在風險圖下載區，亦可下載 NCDR 風險圖之 jpg 檔。



資料來源：[4]

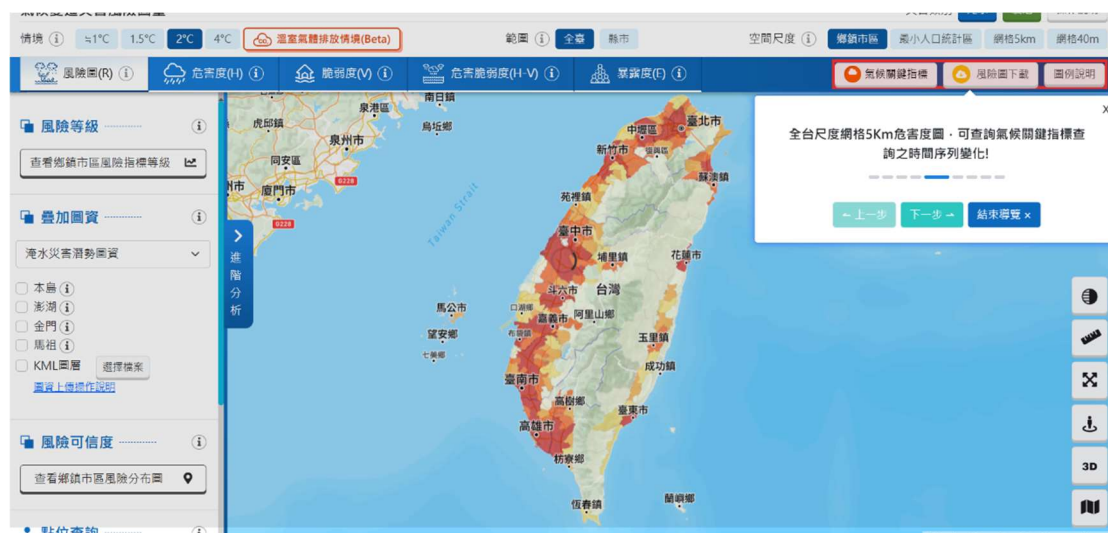
圖 5 Dr.A 氣候變遷災害風險調適平台-淹水災害風險圖



資料來源：[4]

圖 6 Dr.A 氣候變遷災害風險調適平台-坡地災害風險圖

另 Dr.A 氣候變遷災害風險調適平台亦提供風險圖台展示系統（如圖 7），讓使用者可直接選擇空間尺度，呈現風險圖、危害度、脆弱度、暴露度等圖資。此外，亦可疊加歷史災害圖資、交通運輸圖資、其他基礎圖資，或線上自行疊加 KML 圖層。讓使用者可更彈性使用參考圖資。



資料來源：[4]

圖 7 Dr.A 氣候變遷災害風險調適平台-風險圖台展示系統

惟相關圖資應用卻有警語，國家災害防救科技中心表示，此圖資僅適用於氣候變遷情境下之災害風險高低相對辨識，無法保證對任何特定用途的適用性，亦不得用於開發限制、法律或監管等目的，國家災害防救科技中心無法對該圖資分析得出的任何結論而負責。

2.4 國家氣候變遷科學報告

「國家氣候變遷科學報告 2024：現象、衝擊與調適」^[5]（以下簡稱科學報告）是 2023 年「氣候變遷因應法」公布施行後，國科會及環境部依法於 2024 年共同發布的科學報告。

國科會長期推動氣候變遷科學研究並提供相關科研成果，讓外界掌握最新科學資訊，過去國科會科研團隊已完成「臺灣氣候變遷科學報告 2011」與「臺灣氣候變遷科學報告 2017」。

本份報告延續國科會科學團隊過往完成的兩份氣候變遷科學報

告架構，以氣候變遷科學、衝擊與調適為主軸，共分五章：前三章為氣候變遷科學趨勢以及未來推估，後兩章則為衝擊與調適。第一章說明全球與東亞的氣候變遷；第二、三章分別討論臺灣氣候變遷趨勢與未來推估；第四章彙編氣候變遷對水領域、坡地、海岸、糧食生產與安全、生態、人類健康、城鄉規劃等議題之衝擊資訊；第五章則說明氣候變遷風險與調適架構之科學論述與知識方法學，做為部會與地方調適建構與規劃之參考^[5]。

在第三章，未來的臺灣氣候變遷推估，主要是應用 IPCCAR6 氣候情境模擬資料，以基期（1995 年至 2014 年）氣候值為基準，進行短期（2021 年至 2040 年）、中期（2041 年至 2060 年）與長期（2081 年至 2100 年）3 個 20 年時段氣候變化的評估。臺灣未來降雨量變化推估方面，以全球暖化程度（GWL）為基準，全臺降雨變化幅度隨暖化程度增加而增加（由 GWL 從 1.5°C 至 4°C 所對應的上升幅度為 1.6% 至 14%）。西南部在 GWL 4°C 狀態下呈現高模式一致性，降雨增加可超過 30%。降雨季節分布變化推估結果顯示，乾季（11 月至 4 月）越來越乾，濕季（5 月至 10 月）越來越濕，其不均勻將隨全球暖化而變得更加嚴重。以 GWL 推估結果為例，GWL 3°C 及 GWL 4°C 時，乾季降雨減少 10% 至 15%，主要在臺灣東北部及東半部地區，且模式一致性較高。濕季降雨增加幅度，在 GWL 3°C 小幅增加 5% 至 15%。但在 GWL 4°C 時，中南部沿海、臺東及澎湖區域可增加超過 30%，這些未來乾濕季雨量的變化將使臺灣的水資源調度更加困難。

極端高溫部分，以日高溫超過 36°C 天數（TX36），呈現未來持續性高溫事件的變化趨勢。4 種 GWL 溫度增加介於 0.7°C 至 3°C，增加幅度較高的區域為西部（GWL 4°C 時）。極端降雨的型態變化部分，在未來暖化情境下，夏季增溫結構特徵將導致大氣垂直穩定度增加，不利於午後對流發生，使得午後對流的降雨頻率變少，但水汽蒸發散量增加，降雨強度將增強。在梅雨季，臺灣西半部迎風面極端降雨事件天數及強度皆為增加，而在東部地區則是減少。此外，21 世紀中後期，梅雨季降雨量最大的發生時間，從 6 月中旬往後延至 6 月下旬，

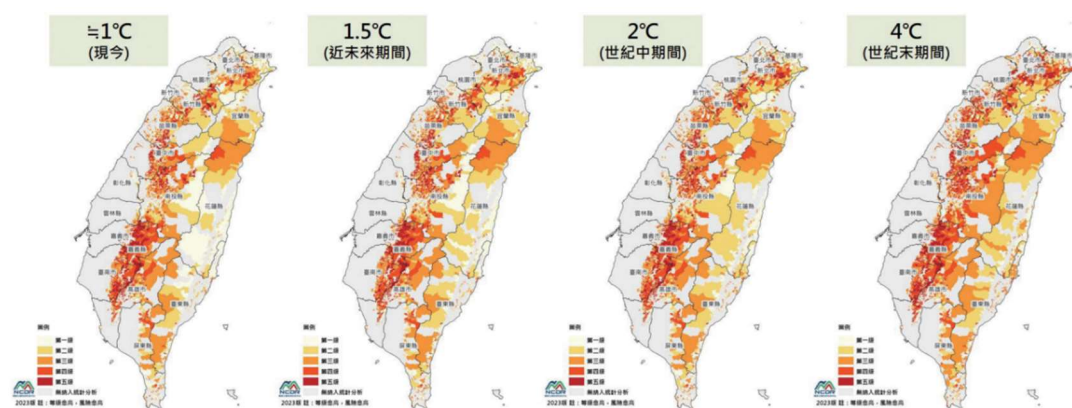
且降雨強度亦將增強，此因南海地區西南風增強的時間往後延遲，所以傳輸至下游的臺灣產生劇烈降雨時間也往後遞延。

未來推估年最大一日降雨量(Rx1day)降雨強度將增加，在 GWL 1.5 至 GWL 4°C 增暖下，增加幅度分別為 8%、10%、14.1% 和 28.6%。

水文頻率分析也顯示降雨量隨著暖化嚴重程度增加，尤其在 GWL 4°C 情境下，10 年重現期距降雨量 (return value 10, rv10)，已接近現今氣候 (基期) 50 年重現期距降雨量 (return value 50, rv50)。

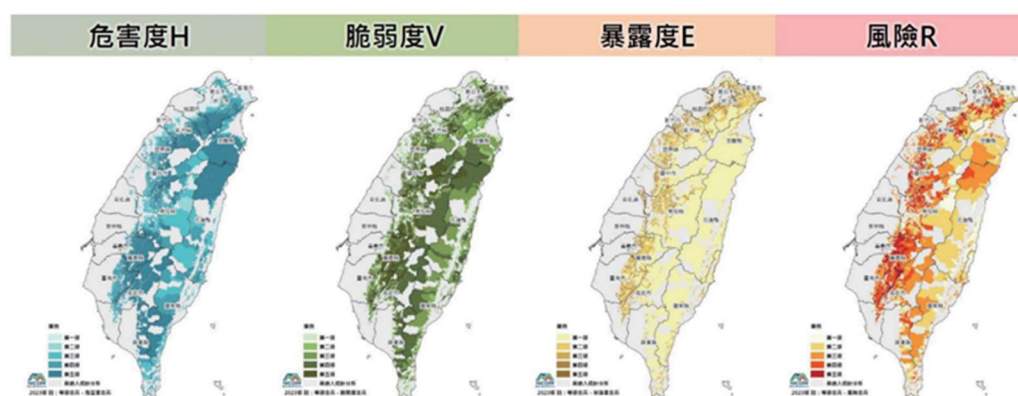
在第四章探討議題的衝擊資訊中，與運輸較相關的部分，提供氣候變遷淹水衝擊評估、氣候變遷對坡地的影響及衝擊、海平面上升溢淹衝擊、颱風暴潮與巨浪衝擊，以及相關調適方法及科研缺口。其風險圖資內容也結合 TCCIP 平台及 Dr.A 氣候變遷災害風險調適平台產製之圖資，並進行相關風險評估說明，可提供各單位參考應用。

例如在坡災風險部分，陳韻如等人^[6]採用指標疊加統計法，評估臺灣在不同暖化情境下之坡地災害風險分布與變化趨勢。研究以 CMIP6 統計降尺度日雨量資料計算 1 日降雨量超過 350 mm 的機率做為危害度指標；脆弱度則引用經濟部地質調查及礦業管理中心之岩屑崩滑、岩體滑落、落石與順向坡資料，以及農業部林業及自然保育署之崩塌地圖；暴露度則採內政部統計之最小人口統計區人口密度 (每區人口少於 400 人)。三項指標分級後相乘再分級，即可得到各情境下的坡地災害風險 (圖 8)。結果顯示，在全球暖化 2°C 情境下，中南部山區持續維持高風險，北部與東部山區風險升高；在 4°C 情境下，部分山區風險顯著加劇 (圖 9)。該方法能快速辨識高風險區位，為氣候變遷調適與土地利用規劃提供參考。



資料來源：[5]

圖 8 風險圖組成



資料來源：[5]

圖 9 全球暖化程度不同情境下最小人口統計區之坡地災害風險

2.5 小結

本研究回顧顯示，臺灣氣候變遷調適的科學與資訊基礎已形成國際情境—國家情境—在地化推估—風險圖資—科學報告的完整鏈結。

在國際層面，IPCC AR6 透過全球暖化程度之固定增溫情境(1.5°C、2°C、4°C)，簡化複雜的溫室氣體排放與氣候模式結果，另我國「國家氣候變遷調適行動計畫(112-115年)」已將其納為「國家調適應用情境」。

在國內層面，TCCIP 平台持續產製高解析度(5公里與1公里)統計降尺度資料，涵蓋溫度、降雨等極端事件指標，支援跨尺度應用。

Dr.A 氣候變遷災害風險調適平台則將氣候推估與災害風險資訊

視覺化，提供淹水與坡地災害之危害度、脆弱度與暴露度分布，協助高風險區辨識，但僅做為研究之參考。

「科學報告」進一步彙整臺灣未來降雨、高溫及極端事件的變化推估，並針對各領域衝擊與調適提出科學方法。其中坡地災害評估案例顯示，在高暖化情境下，中南部山區風險持續偏高，北部與東部風險亦升高，突顯針對脆弱地區優先調適規劃的重要性。

三、運輸氣候變遷風險評估所需氣候圖資

為了解運輸管理機關（構）進行氣候變遷風險評估所需氣候情境推估資訊，本研究透過文獻回顧及機關訪談方式，蒐集及探討運輸管理機關（構）進行氣候變遷風險評估所需氣候情境推估資訊，另也透過訪談國家氣候科研團隊（如國家災害防救科技中心）及氣象署，了解其在國家氣候情境產製過程中的角色，以及在氣候情境資料可提供之協助及合作模式。

3.1 氣候變遷風險評估所需氣候圖資

3.1.1 文獻回顧與機關訪談

透過文獻回顧，初步發現，在全球鐵路和公路基礎設施在未來破紀錄極端氣候事件的風險暴露^[7]文章中，分析全球道路與鐵路資產在高溫、極端降雨（日最大降雨、強降雨天數、乾旱＋暴雨交互事件）等氣候尺度下的暴露變化。並觀察 21 世紀中晚期之暴露趨勢，指出高排放路徑下風險顯著增加，若控制溫室氣體排放可減少約 29-52% 暴露量。另在氣候變遷背景下降水變遷對中國鐵路營運安全的影響^[8]文章中，係使用高強度降雨（如每小時超過 30 mm）做為判斷指標，分析不同氣候情境下，中國不同鐵路局的運行風險變化。

為了解國內運輸管理機關對氣候變遷風險評估所需氣候情境推估資訊的認知，以及未來對氣候圖資之需求，本研究透過電話或電子郵件方式，初步訪談公路局、高速公路局、鐵道局及民航局等 4 個運輸管理單位，根據訪結果，綜整其對氣候變遷的認識與氣候變遷資料

需求，說明如下：

4 個單位皆表達對氣候變遷可能造成運輸系統衝擊的關注，並對應用氣候情境圖資於工程規劃、設計與營運管理上表現出逐步提升的意願與需求。整體而言，雖然部分單位尚處於初步認識階段，但已有試辦或探索應用情形。

4 個單位皆表示已初步掌握氣候變遷對運輸基礎設施的潛在影響，特別是強降雨、淹水與坡災等災害風險。例如高速公路局於「國 2 甲由台 15 線延伸至台 61 線新建工程」中，已參考「科學報告」數據資料，並參考統計降尺度針對雨量及溫度推估與以動力降尺度模擬之「強降雨」、「高溫」、「海平面上升」及「強風」等因素，納入施工考量，並進行橋梁高度調整。公路局則持續在防救災與改善工程中考量氣候條件。鐵道局在「高鐵延伸宜蘭計畫」已進行氣候變遷風險評估，關注氣候變遷強降雨導致淹水風險及坡災風險之數據資料，另表示未來各建設計畫也會要求規劃設計廠商進行風險評估，並視個案實際需求，評估所需氣候變遷圖資。民航局於 2024 年派員參與本所辦理相關調適課程，以獲取氣候變遷風險評估及調適相關知能。

多數單位知道 TCCIP（臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台）及 Dr.A（氣候變遷災害風險調適平台）網站的存在，但實際使用與理解深度仍有限。高公局、鐵道局與民航局皆指出僅幕僚單位具備初步認識，實務單位與外部承攬廠商對於網站圖資應用與風險評估尚在摸索階段。另公路局表示，已在工程規劃設計階段參考相關圖資，但仍希望未來能有更具氣候變遷趨勢的分析資料。

此外，4 個單位皆強調「降雨」為最主要的氣象因子，另也常應用溫度、風速等資訊。衝擊面以「淹水」、「坡災」為主。民航局特別指出需要溫度、風速、最大時雨量、日降雨量等數據；高公局則強調主要面臨的風險為強降雨造成的坡災風險及淹水風險；公路局表示，因氣候變遷影響，強降雨等極端氣候發生頻率增加，如仍依過去氣象歷史資料，則難以推估未來氣候變化趨勢，故建議相關單位考量氣候變遷因素，提供未來降雨、淹水潛勢、洪水位高程等預估資料或預判

方法(如提供加權計算方法或趨勢圖)。對於氣象資料的尺度與精度，普遍認為應依照使用者需求與工程位置進行調整，並希望由專業顧問公司或中央單位提供具未來趨勢的情境圖資與標準化建議。

對於未來圖資需求與風險評估建議部分，各單位普遍希望未來能取得更具未來推估能力的降雨趨勢資料與淹水潛勢圖，也希望能反映氣候變遷情境下的最大降雨與其影響區域。此外，民航局也指出希望能有「地區淹水趨勢圖」，可做為 24 小時極端降雨風險的參考。

3.1.2 小結

整體而言，公路局、高速公路局、鐵道局及民航局等 4 個單位皆關注氣候變遷對運輸基礎設施的衝擊，尤其是強降雨導致之淹水風險及坡災風險，並對應用氣候情境圖資於工程規劃、設計與營運管理上表現出逐步提升的意願與需求。且多數已知 TCCIP 與 Dr.A 平台的存在，但實際應用深度仍有限。

在目前已有進行風險評估案例之單位(如高速公路局、鐵道局)，均表示在該建設案評估中，已參考「科學報告」數據資料及氣候變遷情境圖資，相關情境、尺度資料取得及應用皆已符合計畫需求，無新增其他需求。其中，高速公路局於「國 2 甲由台 15 線延伸至台 61 線新建工程」之風險評估中，主要以縣市尺度，分析未來氣候變遷情境下，強降雨及海平面上升相較現況之增量情形，據以研擬調適策略及工程調整(如調整橋梁設計高度)。鐵道局於「高鐵延伸宜蘭計畫」之風險評估，關注氣候變遷強降雨導致淹水風險及坡災風險之數據資料，亦以未來增量情形(如淹水情形)研擬調適策略，並表示未來各建設計畫也會要求規劃設計廠商進行風險評估，並視個案實際需求，評估所需氣候變遷圖資。

公路局表示，氣候變遷導致強降雨等極端氣候發生頻率增加，建議可提供未來降雨、淹水潛勢、洪水位高程等預估資料或預判方法。民航局則表示，過去常使用之氣象因子包括溫度、風速、最大時雨量、日降雨量等數據，另在未來圖資需求上，提出地區淹水趨勢圖(24 小

時 (350) mm 之雨量)，顯示最大日降雨量與淹水深度變化之需求。

3.2 國家災害防救科技中心與氣象署之角色及可提供之協助

本研究透過訪談，了解國家災害防救科技中心及氣象署在國家氣候變遷情境圖資之角色，以及各單位在應用氣候情境資料可提供之協助及合作方式。

3.2.1 國家災害防救科技中心

本研究訪談國家災害防救科技中心(NCDR)，主要目的在於了解 NCDR 在國家調適應用情境之角色，對「科學報告」的應用觀點、氣候情境資料的產製與限制、氣候風險評估應用的建議，以及目前氣候圖資的法定地位與跨部會應用情形，以做為後續運輸管理機關（構）執行氣候風險評估與調適規劃作業之參考。訪談結果說明如下：

過去臺灣缺乏本地化氣候變遷模擬資料，早期研究多仰賴國外模式，如與日本合作取得區域模擬結果。隨著 TCCIP 計畫推進，逐步建置包含 IPCC AR5 與 AR6 的氣候推估資料，統計降尺度至 5 公里×5 公里及 1 公里×1 公里。目前統計降尺度資料適用於多數部門長期趨勢研判，但針對如坡地災害、淹水等需小時以下解析度的應用，仍需依賴動力降尺度資料，而此類資料產製成本高、計算量大，尚未全面完成。

「科學報告」係整合全國科研成果，具科學價值與趨勢觀察功能，但非治理用圖資或操作型工具，應以參考趨勢為基礎進行質性分析，再配合部門自身的工程標準與業務經驗進行專業判斷。可依據報告中氣候趨勢、現況風險與未來風險變化，進行第一階段風險辨識與缺口分析，掌握下列 3 種情境類型：

1. 現況與未來皆為高風險區：應強化調適作為，優先列入工程評估與應變規劃。
2. 現況風險低但未來顯著升高：屬新增高風險區，需提前規劃防範措施。
3. 未來風險下降區域：可視為潛在機會區，利於未來設施設置或開

發應用。

目前 Dr.A 網站雖提供淹水與坡地災害潛勢及風險圖資，但由於國家災害防救科技中心（NCDR）並非法定圖資主管機關，相關資料僅供科研參考，無法定效力。若直接將現行 Dr.A 圖資應用於國土開發限制、工程設計或政策規劃，恐引發法令適用與責任歸屬爭議。例如，水利署公告之淹水潛勢圖具法律效力，惟其內容尚未涵蓋氣候變遷情境。因此，建議各單位應與業管機關合作，共同建構具法定依據與明確責任界定之應用圖資。

TCCIP 計畫團隊在國家版氣候變遷圖資目前仍在建置階段，未來規劃將引用各部會正式公告之圖資。然而，現階段尚無主管機關正式公告氣候變遷風險圖資。未來若能由圖資主管機關共同認定資料來源、使用規範與責任界線，並透過「氣候變遷調適科研協作平台」回饋需求，即可建立具權威性與可追溯性的「國家氣候情境圖資」體系，做為各部門推動政策規劃、法規制訂及工程設計的重要依據。

3.2.2 中央氣象署

本研究透過訪談了解中央氣象署在國家氣候變遷情境圖資之角色，以及各單位在應用氣候資料可提供之協助及合作方式，訪談結果說明如下：

中央氣象署在臺灣氣候變遷調適體系中，扮演著關鍵的科學支援角色。長期參與「臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台（TCCIP）」計畫，負責提供全國歷史氣象觀測資料，並進行氣候現象分析，協助描繪臺灣氣候變遷的科學圖像。此外，氣象署亦與相關部會合作研擬國家調適應用情境，為各部門進行氣候風險評估與調適規劃提供科學依據。

在工作分工上，氣象署與國家災害防救科技中心（NCDR）已建立明確的協作機制。氣象署專注於分析歷史氣候資料，建立氣候變遷的風險基線，確保過去觀測資訊的完整性與一致性；而 NCDR 則聚焦於模擬未來氣候情境及極端事件的潛勢評估，包括淹水、坡地災害

與海平面上升等情境模擬。兩者的功能互補，形成從過去到未來、從基礎資料到應用分析的完整氣候風險支援系統，為國家氣候變遷調適決策提供全方位的科學支援。

氣象署目前推動的氣候服務，採需求導向與合作導向的方式進行規劃。其運作流程包括：主動與使用單位對話以瞭解資料需求，盤點現有資源與識別資料缺口，透過簽署合作備忘錄（MOU）確認合作基礎，並在此基礎上共同擬定工作計畫與技術合作內容。以運輸系統為例，氣象署已與公路總局、臺鐵等單位合作，提供即時氣象預警資訊，例如透過 QPEplus 系統發送劇烈天氣警報，輔助單位進行封路或交通調度等決策；同時亦建置海象環境資訊平台，提供航行安全所需之浪高與海況預測，協助運輸系統提升災害韌性。

在實務推動上，氣象署亦面臨數項挑戰。其中最主要者為部會間對氣候資訊理解程度不一，部分單位對氣候資料的時空解析度、使用限制等尚不熟悉，導致需求定義不明確，使得氣象署難以針對性提供服務。另一項挑戰為合作單位參與意願不一，即便建置服務平台與資訊產品，若使用單位未能積極提出回饋與具體應用情境，將限制氣候服務的成效與深化。針對上述問題，氣象署建議未來透過跨部門對話平台、合作備忘錄與工作會議等形式，強化溝通與協作機制，以推動「共同設計、共同推動」之氣候服務模式。

未來，氣象署與運輸機關的合作，應朝向制度化與長期化發展。建議運輸部門應主動盤點氣候風險議題，與氣象署協商優先議題，並共同擬定具體目標與可行計畫。此外，氣象署也建議導入科研平台做為合作支架，例如運用 TCCIP 計畫之科學資源與人員網絡，整合氣象署專業能量與運輸部門實務需求，建構跨域且可持續的合作模式，以應對長期且高度不確定性的氣候變遷挑戰。

3.3 可採行之交流及合作模式

本研究透過訪談，並整合本所 2023 年、2024 年辦理運輸調適課程之經驗，初步歸納運輸管理機關（構）對圖資需求可溝通之管道，

以及與氣象署、NCDR 可採行之交流及合作模式，說明如下：

1. 本所於 2024 年辦理運輸調適相關課程，邀請 NCDR 講授「氣候變遷情境資訊介紹與應用」、「氣候變遷風險評估準則及執行政序」、「運輸氣候變遷風險評估—範疇界定操作工作坊」等課程，邀請中央氣象署講授「氣候服務的內涵與資料解讀」、「氣候服務在調適應用案例」等課程，授課對象為中央運輸管理機關（構）、地方政府、各捷運公司、高鐵公司及運輸建設相關顧問公司人員，透過課程講授，讓各單位了解國家產製之未來氣候變遷相關圖資、風險評估方法，另也可了解氣象署之氣候服務內容，課後也有安排學員與講師交流時間，讓學員可進一步諮詢講師相關問題。因此，未來亦可透過相關課程講授及工作坊模式，建立各運輸單位與 NCDR、中央氣象署之溝通橋梁。
2. 透過簽署合作意向書（MOU）建立正式合作框架，明確各方權責與合作目標。由相關單位定期召開工作會議，交流技術能力與作業流程，並依使用需求提出具體規格與資料格式要求。各方可依專業分工共同研擬與驗證圖資內容，確保其科學性、法定依據及應用可行性，最終完成具法律效力且可支援決策的氣候變遷風險圖資。
3. 另國科會和環境部共同研議推動氣候調適科研生態圈，並成立「氣候變遷調適科研協作平台」，就「科研缺口」與調適治理中之各相關主責部會進行交流。國科會於 2024 年 9 月 18 日召開「氣候變遷調適科研協作平台第 1 次（起始）會議」，依據會議簡報資料，科研協作平台主要任務如下：
 - (1) 掌握氣候治理平台與調適工作科研需求（含中央部會與地方）。
 - (2) 盤點部會之調適科研成果與缺口（包含資料、工具、方法、圖資與知識）。
 - (3) 整合氣候變遷風險評估跨部門資料庫。
 - (4) 提供最新氣候變遷科研資訊給調適部會、地方政府參考。

(5) 科學報告相關工作（更新與下一期）。

(6) 研擬與推動跨部會調適科研方案。

因此，就主要任務第 1 點，未來各運輸單位若對於圖資有相關需求，如氣候變遷情境之淹水潛勢圖或坡災潛勢圖，可透過此協作平台提出需求建議，讓水利署及經濟部地質調查及礦業管理中心未來產製淹水潛勢圖資及坡災潛勢圖資時，能將氣候變遷情境及全球暖化程度之增溫情境納入考量。

四、國家調適應用情境之相關課題及應用建議

本研究針對運輸管理機關（構）於氣候變遷風險評估過程中所需之氣候情境推估資料，探討國家調適應用情境在運輸風險評估中的相關課題，包含降尺度需求及固定增溫情境選擇等，並提出後續應用建議，相關課題及建議分述如后。

課題一、降尺度資料之需求

在交通建設計畫中，因應規模大小與地點特性，對氣候變遷降尺度資料的需求並不一致。若進行跨縣市路網規劃，5 公里解析度的統計降尺度資料即可支撐決策；但若針對單一路段或局部工程設計，則需更高解析度的 1 公里統計降尺度資料，甚至是動力降尺度資料，以確保精細度與可靠性。然而，各降尺度資料均有其優缺點，且在測站分布稀少的山區，數據不確定性更高，增加了應用風險。此外，目前統計降尺度僅涵蓋日溫度與日降雨量，若需分析風速、極端降雨等氣候變數，則需依賴動力降尺度模式，並透過 NCDR 進階申請，才可取得相關資料。

在應用上，目前「臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台」（TCCIP）已產製 AR6 統計降尺度 5 公里與 1 公里日資料，兩者各具優缺點，如表 3 所述。

表 3 AR6 統計降尺度 5 公里及 1 公里資料比較

5 公里資料	1 公里資料
較粗的空間解析度 適合全臺、跨縣市的大尺度研究	精細的空間細節 適合都市、鄉鎮或流域等小尺度研究
缺乏極端值 資料較均質化	較能捕抓極端值 ➤ 凸顯高溫、強降雨熱點 ➤ 極端事件分析仍建議使用動力降尺度的資料
小資料量 全臺資料約 85GB	大資料量 25 倍資料量，全臺資料約 2.2TB
低計算需求	高計算需求

資料來源：[3]

建議各運輸主管機關在建設計畫的可行性研究與設計階段，依據空間尺度（如跨縣市路網 vs. 小範圍工程）及研究需求（如僅需溫度/降雨或需更完整的氣候因子），選擇合適的統計或動力降尺度資料。短期內可優先使用 TCCIP 已產製的 AR6 統計降尺度 5 公里與 1 公里日資料。中長期則建議加強與 NCDR 之合作，持續推動動力降尺度模擬成果的擴充與更新，並針對極端氣候事件加強模擬能力，以支持運輸部門在風險評估與適應規劃上的需求。

課題二、固定增溫情境選擇

在固定增溫情境選擇部分，全球暖化程度之增溫情境 1.5°C，指相較工業革命前溫度增加 1.5°C，預計發生於 2021 至 2040 年間，屬近期增溫情境；增溫 2°C 則為 2041 至 2060 年間的中期情境；而增溫 3°C 及 4°C 為 2081 至 2100 年間，代表長期及減碳失敗的情境。

在應用建議上，運輸管理機關（構）應依據建設經費、設施耐受度與生命週期，合理選擇適用的增溫情境，以因應未來氣候衝擊。

課題三、國家氣候變遷科學報告之應用

在「科學報告」之應用上，「科學報告」整合全國科研成果，具科

學價值及趨勢觀察功能，但非治理用之圖資或操作型工具。其資料可做為趨勢參考，並配合部門工程標準及業務經驗，進行質性分析及專業判斷。

在應用建議上，運輸管理機關（構）可善用「科學報告」中的氣候趨勢資料進行風險辨識與篩選，結合歷史監測及工程判斷，提升調適決策效能。

課題四、統計降尺度資料取得方式

在運輸氣候變遷風險評估中，如何取得可靠且具高解析度的氣候推估資料，是一項重要課題。目前國內主要透過「臺灣氣候變遷推估與調適知識平台（TCCIP）」取得基於 IPCC AR6 之統計降尺度資料，並依網格劃分提供更精準的氣候數值。然而，相關資料的申請、格式與應用方式，對於運輸管理機關與研究人員而言，仍存在技術操作及熟悉度上的挑戰，需要進一步了解。

應用建議上，建議可使用 TCCIP 所提供的 AR6 統計降尺度資料，相關圖資可透過 TCCIP 資料商店或雲端平台申請下載，申請流程包括填寫申請單、確認申請書（含個資同意及服務範圍）、準備個人金鑰，並取得下載工具連結。資料以 CSV 格式提供，可使用 excel、R、python、GIS 等軟體或程式語言進行計算，例如可於 GIS 軟體中進行圖資套疊分析，以提升情境推估資料於空間化應用的可行性與便利性。

課題五、統計降尺度資料種類

TCCIP 目前產製的 AR6 統計降尺度日資料，不論解析度為 5 公里或 1 公里，涵蓋平均溫、最高溫、最低溫及降雨量（mm/day（總雨量/總天數））。此資料雖已可滿足大部分基礎需求，但在專業領域應用上，仍存在不足。例如，民航局於訪談中指出，其進行風險評估時需使用溫度、風速、最大時雨量與日降雨量等變數。然目前 AR6 統計降尺度僅涵蓋溫度及日降雨量，未能直接提供最大時雨量，而風速部分則須依循 AR5 動力降尺度模式輸出，並透過向 NCDR 提出進階需求申請方可取得。由於溫度與降雨以外的氣候變數推估不確定性較高，使用上必須與資料產製單位充分討論，以確認不確定性範圍及資料可

行性。另可參考「臺灣氣候變遷關鍵指標圖集：AR6 統計降尺度版」，雖提供包括溫度與降雨的 11 項氣候指標，但目前僅有 5 公里x5 公里解析度，對部分應用情境仍具限制。

應用建議上，建議運輸單位在進行風險評估時，除可優先使用 TCCIPAR6 統計降尺度之溫度與降雨資料外，亦應針對其他所需氣候情境資料，如風速及極端降雨（如最大時雨量）等專業需求，與 TCCIP 資料產製團隊建立諮詢及合作管道，尋求跨部門協作，透過進階申請或客製化產製方式，逐步擴充可取得的氣候變數種類，以支持更廣泛的運輸單位應用。

課題六、交通領域缺乏專屬危害指標

目前 TCCIP 計畫中 AR6 版本之危害指標由 Team 2 研究團隊產製，涵蓋海岸衝擊、水資源、林業、養殖漁業、農業及健康等六大類別，但尚未針對交通領域進行專門研究，故暫無交通專屬之危害指標。但仍可透過挑選氣候變遷關鍵指標或借用其他領域的危害指標應用於交通系統風險評估，惟是否能符合各單位需求及適切性仍有待評估。另依據本研究訪談結果顯示，公路局與高速公路局認為強降雨引發之坡地災害與淹水風險是交通系統的主要氣候風險來源。然而，淹水與坡地災害潛勢圖分別由經濟部水利署、地質調查及礦業管理中心產製，惟目前尚未產製氣候變遷情境下的潛勢圖資。

應用建議上，建議短期內交通領域可先參考既有的危害指標資源，檢視農業、養殖漁業等領域所設定之溫度門檻值是否可合理轉用於交通系統。中長期而言，應透過「氣候變遷調適科研協作平台」提出需求，請經濟部水利署、地質調查及礦業管理中心產製氣候變遷情境下之相關淹水潛勢圖及坡地災害潛勢圖，促進跨部會協調與資料整合，推動交通領域專屬危害指標的研發，以提升交通系統氣候風險評估之精確性與可用性。

四、結論與建議

4.1 結論

1. 為因應氣候變遷法法定工作事項，各運輸管理機關（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。本研究蒐集研析國家氣候變遷科學報告及國家調適應用情境，另透過單位訪談，探討國家調適應用情境應用於運輸系統氣候變遷風險評估之相關課題，並提出應用建議，以提供運輸管理機關（構）後續應用國家氣候情境圖資進行氣候變遷風險評估之參據。
2. 為了解運輸管理機關（構）進行氣候變遷風險評估所需氣候情境推估資訊，本研究透過機關（構）訪談及彙析各單位意見，結果顯示，運輸單位普遍高度關注氣候變遷之強降雨對運輸基礎設施（如道路、橋梁、航空場等）所帶來的淹水及坡地災害風險影響。雖然多數單位目前仍處於氣候變遷影響的初步認知階段，但已開始嘗試將氣候情境推估資料應用於工程規劃、設計及營運管理，並期望未來能獲取具備更高預測能力的氣候情境趨勢資料及災害潛勢圖資，以提升風險評估與調適成效。
3. 為了解中央氣象署及國家災害防救科技中心（NCDR）在國家氣候情境圖資可提供之協助及合作模式，本研究透過訪談，了解中央氣象署主要提供歷史氣象資料與氣象預報相關的氣候服務，做為現況及短期氣象狀況的科學依據；而 NCDR 在臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台計畫（TCCIP）中，則聚焦於產製中長期的未來氣候情境資料，為氣候變遷調適策略的規劃與實施提供關鍵支援。各單位可依氣候資料需求，洽詢資料取得方式及合作方式。
4. 在課題探討及應用建議部分，運輸管理機關（構）於氣候變遷風險評估中，需根據不同建設計畫的規模、所在區位及氣候衝擊因子，選擇適宜的氣候情境推估圖資，並合理採用固定增溫情境以反映不同時間階段的氣候變化風險；同時建議結合「國家氣候變遷科學報告」的趨勢分析與部門實務判斷，提升風險辨識與調適

決策的科學性與周延性。

4.2 建議

1. 對於目前 TCCIP 尚無之氣候情境資料，建議運輸部門可主動提出需求與建議，以利其後續資料服務規劃。但若需求屬於針對特定目的之高度客製化資料，就無法直接透過 TCCIP 計畫提供，建議另尋其他專案或跨機關合作管道以滿足特定應用需求。例如建議國科會與環境部持續推動國際氣候情境、國家調適策略與在地化高解析度氣候推估資料的整合，建立跨領域協作機制，提升氣候變遷調適決策的科學基礎與實務連結，確保各層級資料可相互銜接並滿足不同使用者需求。
2. 建議未來訪談對象擴大至交通部相關部屬機關（構）所屬工務段及執行交通計畫的相關顧問公司，因其在實務操作及氣候變遷風險評估應用上具備豐富經驗。透過深入了解這些單位的實際需求與挑戰，可促進氣候情境資料更貼近現場應用，提升資料的精確性與適用性，進而強化運輸系統調適策略的制定與執行成效。
3. 建議加強運輸管理機關氣候變遷風險與調適知能的培訓與交流，推動氣候情境資料在工程規劃、設計及營運管理中的實務應用，並鼓勵運輸單位主動反映對未來氣候趨勢資料及災害潛勢圖資的需求，促進風險評估與調適措施精準化。
4. 建議可透過跨部會協作平台（如「氣候變遷調適科研協作平台」）提出圖資需求，如淹水及坡地災害潛勢圖資，促進氣候變遷調適相關資訊的有效運用與共享。

參考資料

- [1] 交通部運輸研究所，公路系統因應氣候變遷強化調適能力案例研析（附冊）-公路系統規劃階段氣候變遷調適指引，2024 年 10 月。
- [2] 環境部，國家氣候變遷調適行動計畫（112-115 年）（核訂本），2023 年 9 月。
- [3] 國科會，臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台（TCCIP），<https://tccip.ncdr.nat.gov.tw/>。
- [4] 行政法人國家災害防救科技中心，氣候變遷災害風險調適平台（Dr.A），<https://dra.ncdr.nat.gov.tw/>。
- [5] 國科會、環境部，國家氣候變遷科學報告 2024：現象、衝擊與調適，2024 年。
- [6] 陳韻如、林宣汝、劉俊志、童裕翔、陳永明，坡地災害氣候變遷風險圖研發與應用，國家災害防救科技中心技術報告，NCDR112-T10，2024 年。
- [7] Qianzhi Wang, et al. Exposure of Global Rail and Road Infrastructures in Future Record-Breaking Climate Extremes, Earth's Future, Volume 12, Issue 1, January 2024.
- [8] Ying Jiang, et al. The impact of precipitation changes on the safety of railway operations in China under the background of climate change, Frontiers in Earth Science, Volume 12, May 2024.