

國際氣候變遷情境發展對鐵公路氣候變遷 風險評估影響研析

A study for the impacts of climate change risk assessment with considering the development of climate change scenarios on the railway and highway transport

綜合技術組蕭為元、徐偉誌、曾佩如、朱珮芸

研究期間：民國 109 年 1 月至 110 年 6 月

摘 要

為因應未來氣候變遷可能對鐵公路系統造成衝擊，交通部運輸研究所(以下簡稱本所)於 104 年完成鐵公路系統氣候變遷風險評估資訊之建置，探討未來氣候變遷下，不同降雨情境之鐵公路系統坡災風險及淹水風險，並提供鐵公路管理機關(構)參考應用。

為了解國際氣候變遷情境發展趨勢，本研究蒐集政府間氣候變化專門委員會(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)近年氣候變遷相關特別報告，並初步探討 IPCC 將於 2022 年公布之第六次評估報告(AR6)之氣候變遷情境與 AR4 及 AR5 之差異。此外，透過訪談國家災害防救科技中心，了解國家氣候變遷情境資料因應未來 AR6 發布後之發展趨勢。另訪談水利署了解其調適研究進展。

考量本所已於 109 年 11 月將鐵公路氣候變遷風險評估資訊移轉予鐵公路管理機關(構)應用，未來 AR6 發布後，建議鐵公路管理機關(構)應掌握相關氣候變遷情境資訊，辦理氣候變遷風險評估及落實執行調適作為，並納入既有政策及業務推動，以達到降低氣候變遷衝擊之最大功效。

關鍵詞：

氣候變遷、鐵公路系統、氣候變遷風險評估

國際氣候變遷情境發展對鐵公路氣候變遷 風險評估影響研析

一、前言

1.1 研究緣起

近幾年來，氣候變遷已成為世界各國關注的議題。為因應氣候變遷可能帶來的衝擊，行政院於 101 年核定國發會所提「國家氣候變遷調適政策綱領」中，明確揭示重要設施權管機關應建置風險評估機制及氣候變遷調適資訊平台。

鐵公路系統為國家維持正常運作與經濟發展之重要基礎建設，面對氣候變遷可能帶來的衝擊，應及早因應並提升調適能力與韌性，才能降低風險及生命財產損失。因此本所自 102 年起辦理運輸系統調適系列相關研究，探討未來氣候變遷下，不同降雨情境之鐵公路系統坡災及淹水風險，並於 104 年完成建置鐵公路氣候變遷風險評估資訊，105 年起提供鐵公路設施管理機關(構)做為實務應用之參考。

在氣候變遷情境降雨量重現期部分，本所引用經濟部水利署產製之降雨資料，其情境係為聯合國 IPCC《第 4 次評估報告》(IPCC Forth Assessment Report: Climate Change 2007, AR4)之 A1B 情境¹。

IPCC 於 2014 年《第 5 次評估報告》(IPCC Fifth Assessment Report: Climate Change 2014, AR5)發布新版的氣候變遷情境，經國家災害防救科技中心(National Science and Technology Center for Disaster Reduction, NCDR)及水利署分析後認為，AR5 情境的降雨條件與 AR4 無明顯差異，且水利署無產製 AR5 情境之降雨量重現期資料；因此，本所鐵公路氣候變遷風險評估仍持續沿用 AR4 之 A1B 情境。

1.2 研究目的

本所辦理鐵公路氣候變遷調適風險評估相關研究，應隨時掌握國際氣候變遷情境發展趨勢；IPCC《第 6 次評估報告》(IPCC Sixth Assessment Report, AR6)預計於 2022 年發表，在近幾年亦陸續發表氣候變遷情境相關報告，透過本研究蒐集及了解近年來國內外氣候變遷情境研究發展。

此外，考量本所鐵公路氣候變遷風險評估研究係引用水利署產製之氣

¹A1B 是 IPCC AR4 評估報告的未來情境假設之一，指再生能源與化石燃料並用，土地使用變遷速度適中(被認為未來最可能發生的情境)。

候變遷情境資料，未來 IPCC 於 AR6 發表後預計將提出新的氣候變遷情境，屆時水利署之氣候變遷情境資料亦可能重新推估及調整，進而致本所鐵公路氣候變遷風險評估亦可能需進行更新，或提供更新作業流程之建議予鐵公路管理機關(構)參考，爰有必要辦理本研究，預先了解及規劃後續相關更新作業流程。

因此，本研究以過去經驗及訪談，了解國家災害防救科技中心及水利署因應氣候變遷情境變更(AR4 至 AR5)時之作法及辦理流程，進一步探討在氣候變遷情境變更下，鐵公路氣候變遷風險評估資訊更新之作業程序。研究成果可做為本所後續更新規劃，以及鐵公路設施相關實務機關應用之參考。

1.3 研究項目與方法

本研究辦理之工作項目包括下列 3 項：

- 1.蒐集及彙整 IPCC 氣候變遷情境發展趨勢相關資料。
- 2.蒐集及探討國家災害防救科技中心及水利署過去產製氣候變遷情境資料，在 AR4 及 AR5 氣候變遷情境變更下之因應作法。此外，並了解未來因應 AR6 情境發布之作法。
- 3.提出因應氣候變遷情境變更，鐵公路氣候變遷風險評估資訊更新流程之規劃建議，並撰寫報告。

本研究辦理方式以文獻回顧為主，並透過實務單位訪談，蒐集意見並研析因應作法及建議，俾提升研究內容之完整性。

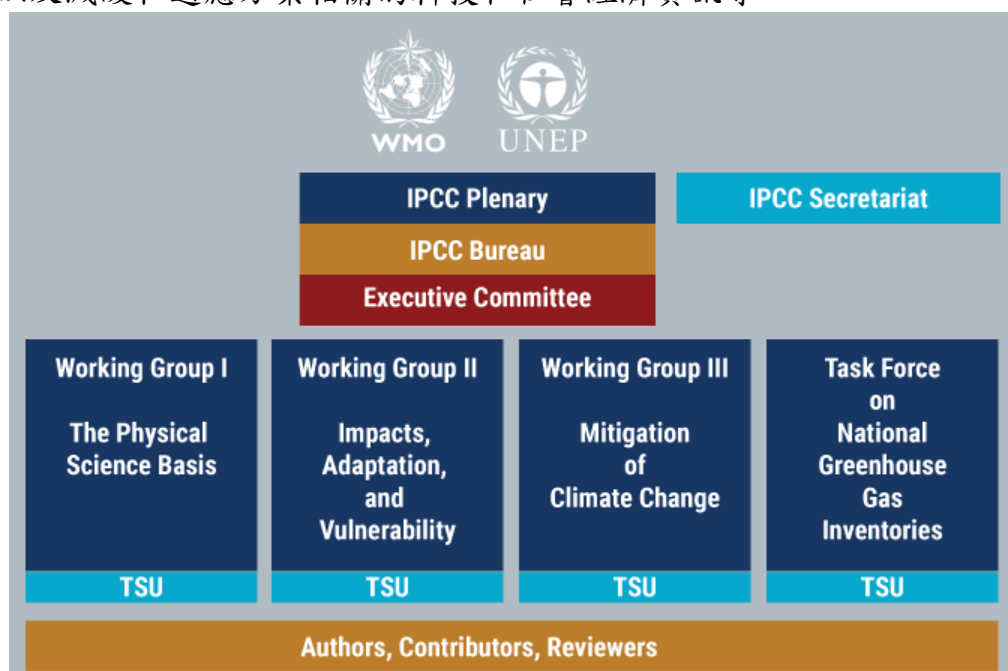
二、氣候變遷情境相關研究發展趨勢

2.1 政府間氣候變化專門委員會^[1]

政府間氣候變化專門委員會(IPCC)是分析與評估全球氣候變遷相關研究的國際組織，由聯合國環境規劃署(United Nations Environment Programme, UNEP)和世界氣象組織(World Meteorological Organization, WMO)於 1988 年建立附屬於聯合國之跨政府組織，旨在為決策者提供關於氣候變遷情形、其影響和未來潛在風險的定期科學評估成果，並提出調適和減緩策略。

IPCC 是一個政府間的科學機構，其作用在全面、客觀、公開和透明的

基礎上，透過仔細審閱已出版的科學技術和社會經濟文獻，定期對世界上氣候變遷的認知現狀進行評估，包括人為引起的氣候變遷現象、其潛在影響以及減緩和適應方案相關的科技和社會經濟資訊等。



資料來源：[1]

圖 1 IPCC 組織架構

IPCC 開放給聯合國和 WMO 的所有會員國加入其組織，目前(2021 年)有 195 個會員國。通過 IPCC 批准的報告，各國政府承認其科學內容的權威性。目前 IPCC 有 3 個工作組和 1 個專題組。工作組和專題組由技術支援小組(Technical Support Unit, TSU)予以協助(見圖 1)。第一工作組的主題是氣候變遷的自然科學基礎，檢視氣候變遷以及人類造成氣候變遷的證據；第二工作組是研究氣候變遷的衝擊、適應性和脆弱性；第三工作組是研究減緩氣候變遷的方法。除了工作組和專題組之外，為審議某個特定主題或問題，還可進一步建立有限或更長時限的專題組和指導組。

2.2 IPCC 評估報告歷程及重要訊息

IPCC 自成立以來至 2021 年前發表了 5 次正式的評估報告，對持續推動國際氣候進程發揮了重要作用。IPCC 在認為有必要提供獨立的科學資訊和諮詢意見的情況下，委員會也撰寫關於某些特定主題的「特別報告」和「技術報告」，並透過制定《國家溫室氣體清單》(National Greenhouse Gas Inventories)的方法學，以供「聯合國氣候變化綱要公約」(United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC)締約方準備各自國家

訊息通報時使用。

《第 1 次評估報告》(The first Assessment Report, FAR)^[2]於 1990 年發表，報告確認了對有關氣候變遷問題的科學基礎，提醒世界各國可能有氣候暖化現象。它促使聯合國大會做出制定 UNFCCC 的決定。該公約於 1994 年 3 月生效。

《第 2 次評估報告》(The Second Assessment Report, SAR)^[3]於 1995 年提交 UNFCCC 第 2 次締約國大會，報告重申全球暖化很能已經發生，並為公約的京都議定書會議談判做出了貢獻。

《第 3 次評估報告》(The Third Assessment Report, TAR)^[4]於 2001 年提出，包括 3 個工作組的相關「科學基礎」、「影響、適應性和脆弱性」和「減緩」的報告，以及側重於各種與政策有關的科學與技術問題的綜合報告，報告強調全球暖化證據非常明顯，但是否與人類活動有關仍有爭議。

《第 4 次評估報告》(AR4)^[5]於 2007 年提出，並指出全球氣溫上升由人類活動導致的可能性超過 90%，論證人類活動可能與全球暖化有因果關係。因為人類行為所造成的氣候變遷對自然系統造成了衝擊，導致資源短缺，威脅全球逾十億人口。氣候變遷已不只是單純的環境問題，而更廣泛地影響著政治、經濟、社會與國家安全，各國除了要致力於減少溫室氣體排放，同時也需要對氣候變遷的適應措施有更多了解，以及早找出因應對策。

《第 5 次評估報告》(AR5)^[6]於 2014 年提出，增強了對雲與懸浮微粒、空氣汙染、模擬尺度等關鍵科學問題，代表國際科學的演進及技術提升，報告也預估 21 世紀初期、中期和末期的氣候變化狀況，並表示人類活動對氣候影響是明確的，並可能已經對氣候系統造成不可逆之影響。

《第 6 次評估報告》(AR6)預計將於 2022 年發表，因應 2020 年後應對氣候變化新機制開始運行，也是國際社會展望 2030 年的關鍵時期，預期報告結論將對國際氣候變遷制度發展產生影響。

2.3 IPCC AR6 發表前 3 本特別評估報告

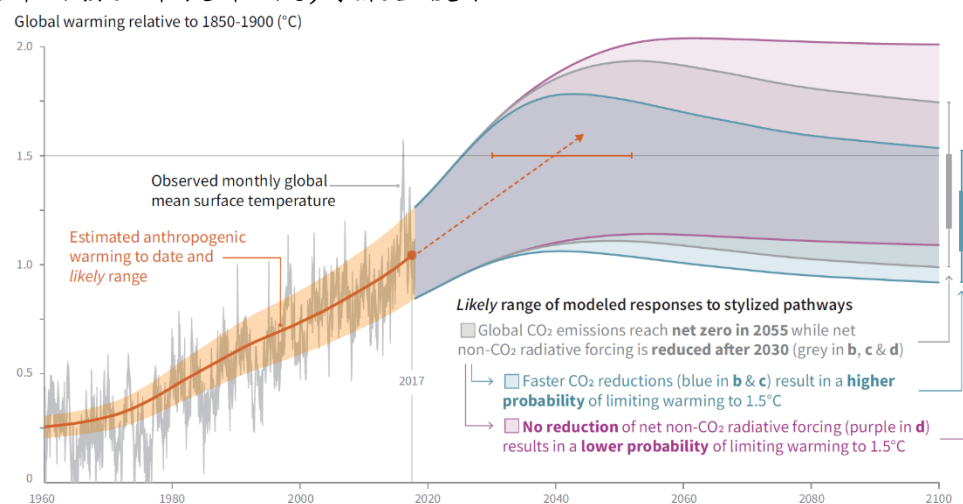
IPCC 在 AR6 發表前，於 2018 年與 2019 年陸續公開 3 本特別報告，並揭露重要訊息，摘要說明如下：

(1) 全球暖化 1.5°C 特別報告^[7]

該報告闡述相對於工業革命前水準，地球暖化 1.5°C 後所產生的影響，以及全球溫室氣體排放途徑之影響。2015 年巴黎協定約束各會員國本世紀前的升溫幅度不超過 2°C、並朝 1.5°C 目標努力。該報告進一步呼應限制升溫 2°C 是不夠的，1.5°C 才是關鍵。升溫 1.5°C 的衝擊沒有 2°C 來得強烈，

但足夠為環境帶來許多無法挽回的災難。

依目前溫室氣體排放增速，可能在 2030-2052 年就突破 1.5°C 門檻(見圖 2)，並引發如生態系統破壞、島國和低窪區遭淹沒(海平面上升 10 公分以上)、脆弱生物滅絕(珊瑚礁減少 70~90%)、氣候型態出現難以預測的變化(強降雨發生率提升 2%)等嚴重後果。

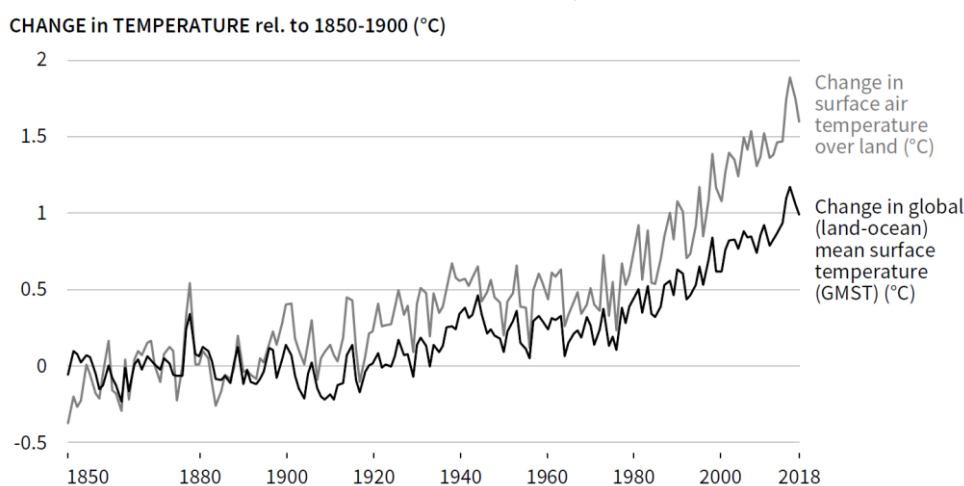


資料來源：[7]

圖 2 人類導致的暖化趨勢致可能在 2030-2052 年就突破 1.5°C

(2) 氣候變遷與土地特別報告^[8]

該報告從土地利用與氣候變化觀測(見圖 3)，通盤檢視並評估土地生態系統的相互關聯性和重疊的各個問題，包括氣候變遷、沙漠化、土地劣化、永續土地管理、糧食安全和陸域生態系統中的溫室氣體。

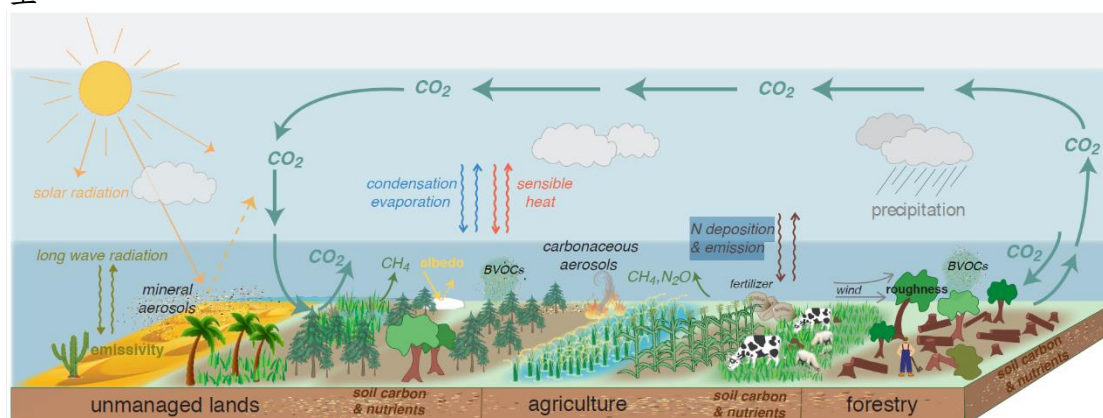


資料來源：[8]

圖 3 自工業革命(1850-1900 年)以後，觀測到平均地表氣溫的上升幅度超過全球平均地面氣溫(含陸地和海洋)溫度

報告說明農業、林業和其他土地用途約占全球溫室氣體排放量的四分之一。若不能減少溫室氣體排放，會成為減排阻礙，要阻止氣候危機，土地利用方式和糧食體系必須劇烈變革。

這份報告提供世界各國最新的科學和政策相關資訊，像是土地的使用管理和大氣環境氣候間的交互作用(見圖 4)，顯示我們使用土地的方式正在推進氣候危機並危害土地系統，加劇對人類和自然的風險。若要達到巴黎協定的 1.5°C 目標，除減少化石燃料使用與碳排放，土地管理應儘快轉型。



資料來源：[8]

圖 4 土地的使用管理影響氣候的交互作用示意圖

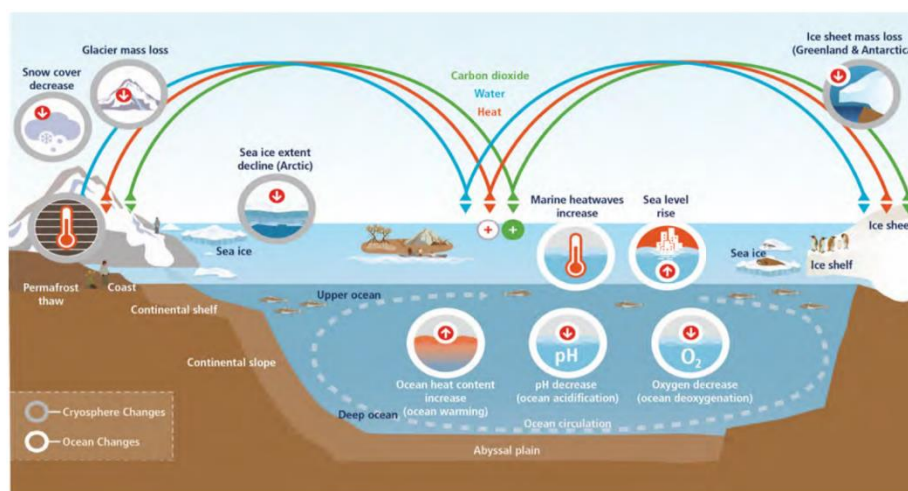
(3) 氣候變遷下的海洋和冰凍圈特別報告^[9]

該報告對氣候變遷對高山地區、極區、海平面上升以及海洋的影響(見圖 5)，做細緻的資料整理及趨勢分析。

報告強調因應氣候變遷所帶來的危機，關鍵在於減碳及持續溝通協調的調適行動。若能控制碳排放，透過低碳途徑模擬結果可知，本世紀及往後海洋與永凍圈變化的風險可有所降低。

調適方面，建議與地方和原住民族群建立穩定的多方聯繫，了解各地特色和變化；加強跨規模、跨轄區、跨部門、跨政策領域和規劃範圍的合作與協調。

提倡氣候素養亦可提高公眾對地方性風險意識和應對潛力。從各層級上的氣候教育有助於整體社會學習和對氣候變遷的應對能力，進而降低風險並強化韌性，也有助於相關氣候政策的實行。



資料來源：[9]

圖 5 海洋和冰凍圈透過熱，水和碳的運動與地球系統的關聯性

2.4 IPCC AR4 到 AR6 的氣候變遷情境發展情形

人類行為、決策和社經發展是影響氣候變遷的關鍵因素，IPCC 歷次評估報告的核心內容之一即是進行不同情境下的氣候預測，以衡量不同的社會經濟發展模式與氣候變遷的關係，並成為政府決策的重要科學依據。以下就 2000 年後發布的 AR4 到預計 2022 發布 AR6 的氣候變遷情境發展進行摘要說明。

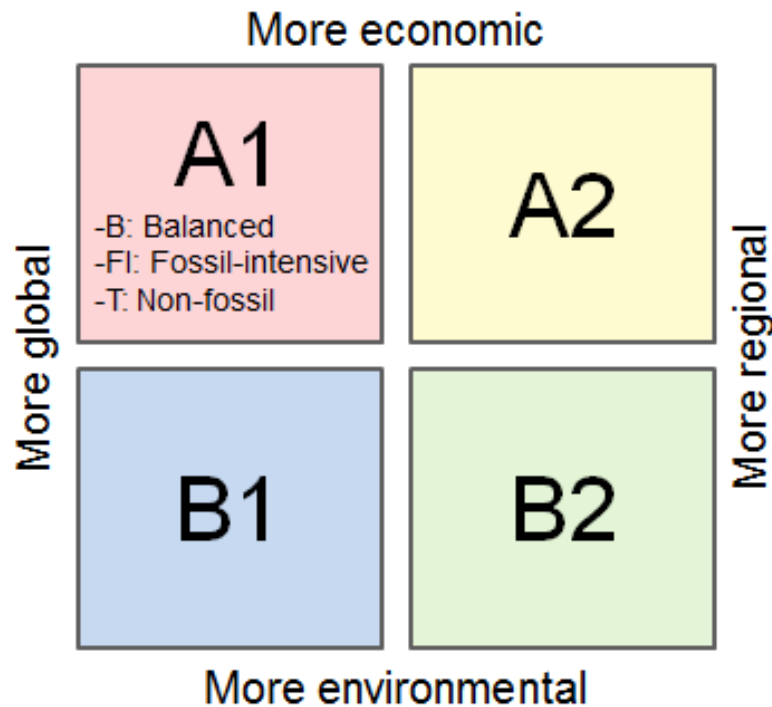
(1) IPCC AR4 的氣候變遷情境發展概述^[5]

IPCC 於 2000 年發表「未來溫室氣體排放情境特別報告」(Special Report on Emissions Scenarios, SRES)^[10]，考量經濟、人口、工業、環境等因素，同時考慮未來可能致力經濟發展，或是朝永續利用的目標等不同可能情形，並考慮全球性或是區域性不同發展帶來的影響，提出可能溫室氣體排放的趨勢及 4 個主要情境，說明如下：

- A1 情境：代表快速的經濟成長，全球人口在 21 世紀中時期達到尖峰，之後便開始下降。而 A1 情境再細分為 3 個情境，分別描述能源系統不同的技術變化方向，以技術面來區分，分別為化石燃料密集型(A1FI)、非化石燃料能源(A1T)及各種能源之間的平衡(A1B)(所謂「平衡」，即不過分依賴於某種特定能源)。
- A2 情境：描述多變異性組成的世界，各國自力更生與維持地方發展，而全球人口在不斷增加的情況下，經濟主要為區域性成長，而每人經濟成長率及技術改進較其他情境零碎分散且緩慢。
- B1 情境：如同 A1 情境，全球人口在 21 世紀中時期達到尖峰，之後開

始下降，但經濟發展朝向具服務與資訊之社會發展結構，能源使用減少，並引用乾淨且較有效率之技術，為一注重經濟、社會與環境的永續性，卻不考慮額外其它起始氣候條件之情境。

- B2 情境：主要描述地方性經濟、社會與環境永續性的結果，雖全球人口持續增加，卻比 A2 情境慢，經濟發展中等，而科技的改變比 B1、A1 較緩且更多差異性，而情境主要也以社會平等與環境保護為目標，其發展為區域性發展。



資料來源：[10]

圖 6 SRES 的氣候變遷情境

綜上所述，SRES 情境可由圖 6 來簡單說明^[10]，4 個情境主要差異在於經濟發展、環境保護、區域性發展或全球性發展等不同程度來區分。然而，除了上述各項情境因子的數據更新，還有諸多不確定因素需要納入考量：像是新的因子(空氣污染、大氣組成等)的加入、整合評估模式(Integrated Assessment Models, IAM)的更新、全球氣候模型的推演資料需求等，SRES 仍不足以提供各種不同需求的情境^{[11],[12]}。

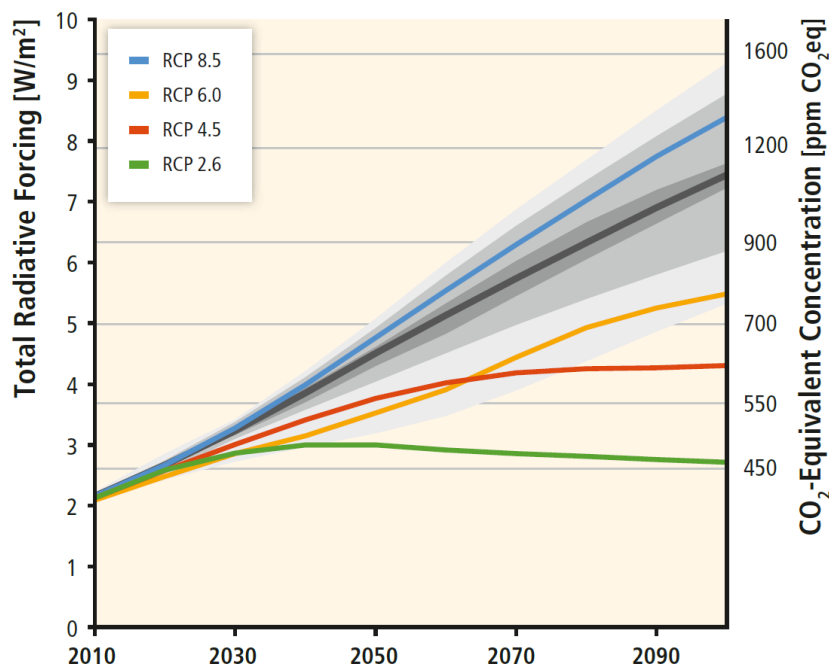
(2) IPCC AR5 的氣候變遷情境發展概述^[6]

AR5 改以「代表濃度路徑」(Representative Concentration Pathways, RCPs)取代舊有的情境。RCPs 提出的 4 種新情境路徑(RCP8.5, RCP6.0, RCP4.5, RCP2.6)模擬未來社會發展假設下的氣候變遷情境發展。其中路徑

指的是濃度的變化歷程，以輻射強迫力(Radiative Forcing)在 1750 年與 2100 年之間的差異量當作指標性的數值來區分之。例如，RCP2.6 的情境意味著每平方公尺的輻射強迫力在 2100 年增加 2.6 瓦。在這 4 種情境中，RCP2.6 是暖化減緩的情境(輻射強迫力在 2100 年呈減少趨勢)；RCP4.5 與 RCP6.0 是穩定變化的情境(輻射強迫力的變化在 2100 年呈較為穩定狀態)；RCP8.5 則是溫室氣體高度排放的情境(輻射強迫力在 2100 年呈持續增加趨勢)^{[11],[13]} (見圖 7)。

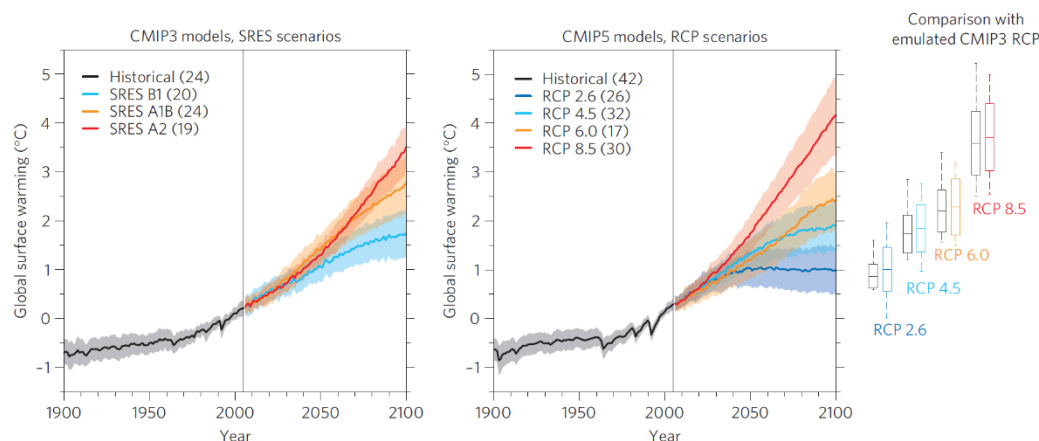
此外，SRES 情境(採用 24 組歷史氣象資料)與 RCPs 情境(採用 42 組歷史氣象資料)演算 1986-2099 年的全球溫度變化及不確定性區間如圖 8^[14]，分析受到歷史氣象資料量及分析模組數的影響。其中越近代的氣候變遷情境模擬因採用越多的分析模組(如 RCP 8.5 情境模擬採用 30 個分析模組，對比 SRES A2 情境模擬採用 19 個分析模組)，相較前期情境模擬，具有較高的可靠性。

雖然 RCPs 情境已經涵蓋相當廣的輻射強迫力範圍，但仍有其不足之處，特別是與氣溶膠相關的部分。此外，RCPs 的情境模擬沒有考量人口、經濟與科技發展等因子，也無法同時評估土地使用與氣候政策對於情境模擬、排放量的影響，因而難以評估減緩作為的成本和效益^{[15]-[17]}。



資料來源：^[13]

圖 7 RCPs 不同情境的輻射強迫力發展情形



資料來源：[14]

圖 8 SRES 與 RCPs 模式之全球溫度變化情形

(3) IPCC AR6 的氣候變遷情境發展概述^{[19],[20]}

IPCC 自 2011 年起著手建構「共享社會經濟路徑」(Shared Socio-economic Pathways, SSPs)，可與各種整合評估模式(IAM)結合使用以進行氣候政策評估^[18]，其中包含了具體的人口、經濟和技術等社會發展指標的變化，可以更加合理地評估減緩行動的成本和效益。

SSPs 推導不同氣候政策下全球社會經濟變化的溫室氣體排放情境，主要有 5 個情境路徑(見圖 9^[19])：

● SSP1—永續發展路徑(Sustainability)

世界逐漸朝向永續發展路徑前進，更加包容與尊重環境自主發展。全球管理的困難度逐漸改善，教育和衛生資源的投入，加速人口轉變的腳步，經濟成長著重全人類福祉，取代傳統區域性思維。

● SSP2—中間路徑(Middle of the Road)

社會、經濟和技術趨勢走向未明顯偏離歷史格局。發展和收入增長不平均。即使有全球和國家機構的努力，但永續發展目標的進展緩慢。雖然資源和能源消耗強度下降，整體環境仍每況愈下。

● SSP3—區域競爭路徑(Regional Rivalry)

復興的民族主義提高國家對競爭力和安全的需求，讓其更加關注國家或區域問題。政策傾向國家和地區安全問題。各國只專注實現各自區域能源和糧食安全，而犧牲區域外的發展。經濟發展緩慢不平等現象持續，甚至惡化。

● SSP4—不平等發展路徑(Inequality)

對人力資本高度不平等投資，再加上經濟機會和政治權力日益擴大差距，導致國家之間和內部的不平等現象和分層日益嚴重。隨著時間流

逝，知識、經濟密集的社會與低收入、教育程度低、勞力密集的社會差距越來越大。

● SSP5—以化石燃料發展路徑(Fossil-fueled Development)

世界越來越相信競爭市場，創新和社會參與加速技術進步和人力資本的發展，並邁向永續發展的路徑。全球市場趨向整合，在衛生、教育方面也進行大量投資，來增強人力和社會資本。同時，為推動經濟和社會發展，世界鼓勵開採豐富的化石燃料資源，並採用能源密集型的生活方式。這些因素導致全球經濟快速增長。



資料來源：^[19]，本計畫重新繪製

圖 9 共享社會經濟路徑(SSPs)及每種路徑減緩與調適的挑戰性

AR6 的 SSPs 考量多元的共享社會經濟發展情境，因此相對於 AR5 的 RCPs 情境，具有更豐富的代表濃度路徑。在 AR5 的 RCPs 有 2.6、4.5、6.0 及 8.5 等 4 個主要情境，AR6 則具有更廣泛的社會發展類型，相較於 AR5 情境，AR6 依多元社會發展出更多額外的情境，如 RCPs 1.9、3.4 與 7.0 的輻射強迫力發展，可以呈現不同的國家、區域發展造成氣候變遷之影響^[20]。

三、鐵公路氣候變遷風險評估資訊

對於氣候劇變所造成之衝擊，國內鐵公路管理機關(構)莫不致力於應變作為；惟對於氣候變遷長期調適課題，仍須掌握運輸設施調適能力條件，包括設施受到氣候變遷衝擊對社會經濟之潛在影響程度(脆弱度)，以及設施所在區位之氣候危害情境(危害度)等因子，俾利進一步綜合評估其風險程度，方有利於研擬適當調適作為。

本所自 102 年起辦理運輸系統氣候變遷調適系列相關研究，探討未來氣候變遷下，不同降雨情境之鐵公路系統坡災及淹水風險，並於 104 年完成建置鐵公路氣候變遷風險評估資訊，提供予鐵公路管理機關(構)做為其研提因應氣候變遷調適改善計畫之參考^{[21],[22]}，109 年已將鐵公路氣候變遷風險評估資訊移轉予鐵公路管理機關(構)做後續應用。

3.1 鐵公路氣候變遷風險評估方法

本所過去研訂鐵公路系統因應氣候變遷之風險評估方法，主要參考國內相關政府單位(如經濟部水利署)及 2004 年聯合國國際減災組織(United Nations International Strategy for Disaster Reduction, UNISDR)提出進行氣候變遷風險評估使用之方法如下：

$$\text{風險(Risk)} = \text{危害度(Hazard)} \times \text{脆弱度(Vulnerability)} \quad (1)$$

及 IPCC AR5 對氣候變遷風險的評估方式如下

$$\text{風險} = F(\text{危害度}, \text{脆弱度}) \quad (2)$$

其中， $F(\cdot)$ 表示方程式函數(function)，「風險」係指氣候變遷衝擊對交通設施未來可能損害或損失的程度，「危害度」係指氣候變遷對交通系統(如鐵公路系統)產生衝擊後造成系統之失能機率或程度，「脆弱度」係指交通系統受氣候變遷衝擊後負面影響的傾向與本質，包括敏感性、容易受災特性及目前應付與適應的能力^[21]。

在鐵公路系統的「危害度」分析部分，目前考量坡災及淹水 2 種危害衝擊，主要探討未來氣候變遷情境下的坡災、淹水造成道路阻斷潛勢，對交通設施所在地區(地點)易受衝擊影響之機率值或程度，其中交通設施所在地區(地點)隱含 IPCC AR5 之「暴露度」概念(即對於運輸建設有可能遭受不利影響的位置與設置)。

在鐵公路系統的「脆弱度」分析部分，考量社會經濟影響程度(含產值、運輸系統之日交通量或乘客量)及運輸設施現有調適能力(含設施安全性、監測系統、替代道路數)等兩大類指標。

最後，將「危害度」及「脆弱度」利用風險矩陣進行風險等級劃分，劃分為高、中高、中、中低、低風險等 5 個等級。，風險矩陣與風險評估流程如圖 10 所示^[22]，其中坡災、淹水風險計算如下

$$\text{淹水/坡災風險} = F(\text{淹水/坡災危害度}, \text{脆弱度}) \quad (3)$$

$$\text{淹水/坡災危害度} = F(\text{淹水/坡災潛勢}, \text{淹水/坡災設施型式}) \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \text{淹水/坡災脆弱度} = & \text{Round}(\text{潛在影響程度} \times W6 \\ & + (6 - \text{淹水/坡災設施調適能力}) \times W7) \end{aligned} \quad (5)$$

$$\text{潛在影響程度} = \text{Round}(\text{產值} \times W1 + \text{交通量} \times W2) \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \text{淹水/坡災設施調適能力} = & \text{Round}(\text{淹水/坡災設施安全性} \times W3 \\ & + \text{淹水/坡災預警應變作為} \times W4 \\ & + \text{替代道路數} \times W5) \end{aligned} \quad (7)$$

其中

Round(.)為四捨五入函數。

W1：產值在潛在影響程度權重，預設 0.5。

W2：交通量在潛在影響程度權重，預設 0.5。

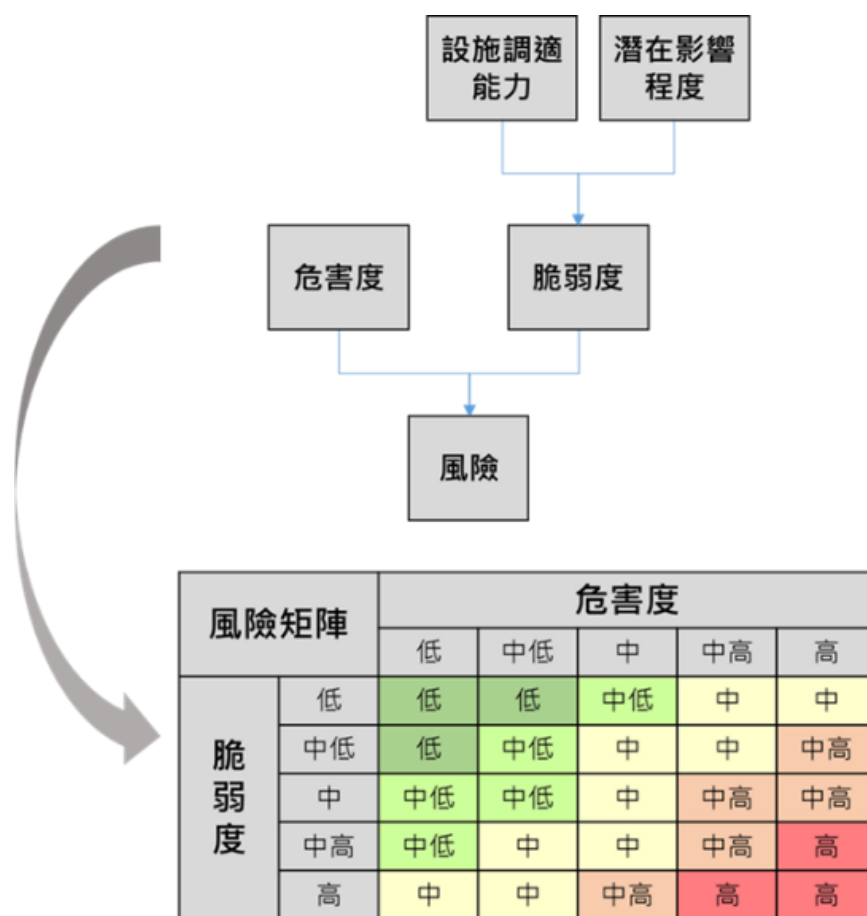
W3：設施安全性在設施調適能力權重，預設 0.33。

W4：預警應變作為在設施調適能力權重，預設 0.33。

W5：替代道路數在設施調適能力權重，預設 0.33。

W6：潛在影響程度在脆弱度權重，預設 0.5。

W7：設施調適能力在脆弱度權重，預設 0.5。



資料來源：[22]

圖 10 鐵公路系統氣候變遷風險矩陣

在鐵公路氣候變遷風險評估方法建立時，未來氣候變遷情境係引用 IPCC AR4 之 A1B 情境，A1B 情境為再生能源與化石燃料並用，土地使用變遷速度適中，是當時國際及國內認為未來最有可能發生的情境。

針對於氣候變遷情境降雨量，IPCC 提供數個大氣環流模式（General Circulation Model，簡稱 GCM）供各國氣候變遷情境模擬使用，其中也包含氣候變遷情境的降雨模擬。然而因尺度過大，網格解析度約 250 km×250 km，故由科技部及 NCDR 執行 TCCIP 計畫，以統計降尺度(Statistical Downscaling)，將網格解析度降為 5 km×5 km，提供國內各機關進行氣候變遷情境模擬分析及應用。

在情境上，一般全球 GCMs 多以時間分段模擬未來之氣候，包括：近程 2020-2039 年、中程 2050-2069 年以及長程 2080-2099 年等 3 個時期的氣候推估。因使用科技部與 NCDR 執行 TCCIP 之統計降尺度研究成果，故基期(1980-1999 年)與目標年(2020 年-2039 年)設定與其一致。

搭配不同頻率分析重現年期，本計畫採以下 6 種不同降雨情境進行分析，分別為：

- (1) 基期(1980-1999 年)50 年 24 小時重現年降雨量
- (2) 基期(1980-1999 年)100 年 24 小時重現年降雨量
- (3) 基期(1980-1999 年)200 年 24 小時重現年降雨量
- (4) 未來年(2020-2039 年)A1B 情境之 50 年 24 小時重現年降雨量
- (5) 未來年(2020-2039 年) A1B 情境之 100 年 24 小時重現年降雨量
- (6) 未來年(2020-2039 年) A1B 情境之 200 年 24 小時重現年降雨量

綜上所述，因在鐵公路氣變遷風險評估中，僅危害度含有氣候變遷情境因子(脆弱度無氣候變遷情境因子)，因此，以下針對危害度進行氣候變遷情境引用說明。

3.2 坡災危害度分析

建立強降雨事件之山崩潛感評估模式(考量的因子包含地形因子、地質因子(地層、斷層等)、人文因子(道路開發、山地利用等)及水文因子(雨量)等四大類)，以評估全臺現況及未來氣候變遷下，因強降雨引致之邊坡崩塌機率。

氣候變遷情境模擬係以崩塌機率模式為主體，輸入 6 種不同降雨情境反映交通系統沿線坡災危害度變化，套疊全臺省道公路設施，以每 500 公尺路段做為危害度分析單元，計算每一路段崩塌機率平均值，此平均崩塌機率即為坡災危害度。

有關降雨情境資料係參考水規所(2013)「淡水河流域因應氣候變遷防洪及土砂研究計畫(2/2)」計畫中經統計降尺度的雨量站，進行不同情境(現況及 IPCC A1B)各重現期 24 小時累積雨量空間分布內插。

3.3 淹水危害度分析

104 年建立風險評估時，淹水潛勢資料採用經濟部水利署於 96-99 年所製作之第二代淹水潛勢圖資。

為探討現況與未來氣候變遷情境的不同降雨條件淹水潛勢，以現況而言，直接取用水利署降雨延時 24 小時之 3 種重現期降雨(50、100、200 年)潛勢圖資；未來淹水潛勢部分，由於水利署尚無氣候變遷下全臺淹水潛勢圖資，因此藉由水利署「氣候變遷水文環境風險評估研究(2/2)」研究中 A1B 情境下之全臺現況與未來各測站氣候變遷雨量情境下降雨頻率(2、5、10、

20、25、50、100、200 年)分析結果，將測站劃分為北中南東四區，並利用徐昇法計算北中南東重現年 50、100、200 年之降雨總量，如圖 12 所示。

由圖 11 可知，基期重現年 100 年之降雨總量(731mm)接近於未來重現年 50 年降雨總量(751mm)、基期重現年 200 年之降雨總量(856mm)接近於未來重現年 100 年降雨總量(838mm)...等，以此類推。故在未來重現年 50 年淹水潛勢部分，係採用現況重現年 100 年的淹水潛勢圖；未來重現年 100 年淹水潛勢部分，係採用現況重現年 200 年的淹水潛勢圖；未來重現年 200 年淹水潛勢部分，係採用現況重現年 500 年的淹水潛勢圖。

107 年水利署公布第 3 代淹水潛勢圖後，淹水危害度圖資亦配合更新，並重新進行鐵公路氣候變遷風險評估。

北部地區	基期 重現50年	基期 重現100年	基期 重現200年	南部地區	基期 重現50年	基期 重現100年	基期 重現200年
降雨量(mm)	647	731	826	降雨量(mm)	702	778	854
北部地區	未來 重現50年	未來 重現100年	未來 重現200年	南部地區	未來 重現50年	未來 重現100年	未來 重現200年
降雨量(mm)	751	838	935	降雨量(mm)	742	814	885
中部地區	基期 重現50年	基期 重現100年	基期 重現200年	東部地區	基期 重現50年	基期 重現100年	基期 重現200年
降雨量(mm)	582	651	721	降雨量(mm)	579.7	628	674
中部地區	未來 重現50年	未來 重現100年	未來 重現200年	東部地區	未來 重現50年	未來 重現100年	未來 重現200年
降雨量(mm)	670	743	816	降雨量(mm)	632	683	733

資料來源：[21]

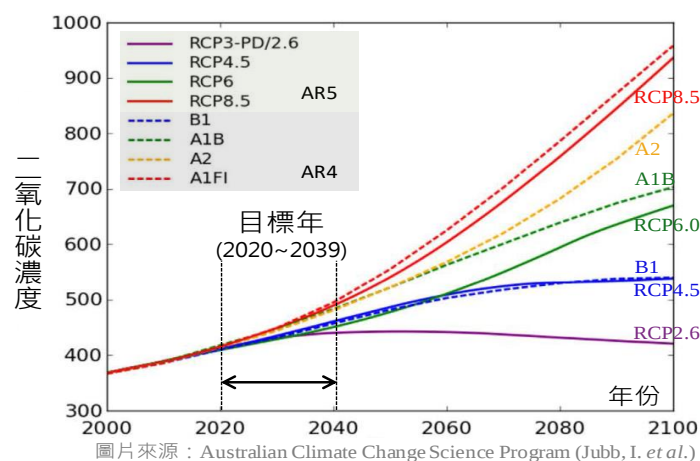
圖 11 氣候變遷影響下各區降雨總量變化

3.4 IPCC AR4 及 AR5 之氣候變遷情境比較

105~106 年經濟部水利署委託國立成功大學執行之「氣候變遷降雨情境差異對洪旱衝擊評估研究」，計畫中評估 AR5 與 AR4 情境的差異性。依據分析結果，在 AR5 的 4 個情境(RCP2.6、4.5、6.0 及 8.5)假設下，未來年期間的溫度上升量，相較於現階段水利署所採用的 A1B，並沒有明顯增加。其中，RCP2.6、4.5 及 6.0 的溫度上升量都比 A1B 低，而 RCP8.5 則與 A1B 非常相近；圖 12 比較 AR5 與 AR4 情境下未來全球溫度上升推估結果。

雨量分析結果，在枯水期，RCP8.5 情境下的月雨量與 A1B 情境相近；在豐水期，RCP8.5 情境下的月雨量略高於 A1B 情境。綜合現階段的研究成果，在未來年期間，AR5 情境下的降雨條件並未明顯較 AR4 更為惡劣。

綜上考量及評估，鐵公路氣候變遷風險評估計畫未來年(2020~2039 年)之情境背景仍採用 AR4 之 A1B 溫室氣體排放情境，搭配不同頻率分析氣候變遷之重現年期。



資料來源：[22]

圖 12 AR5 與 AR4 情境下未來全球溫度上升推估結果比較

3.5 鐵公路氣候變遷風險評估資訊移轉作業

本所自 102 年起辦理「鐵公路氣候變遷調適」系列研究，透過脆弱度及危害度的等級分析，綜合評估鐵公路系統在氣候變遷下，坡災及淹水風險程度，並於 104 年建置鐵公路氣候變遷風險評估資訊，提供予鐵公路管理機關(構)參考。後續每年持續滾動檢討及更新，如 105 年強化風險評估方法及指標，並更新風險評估資訊；106 年至 108 年進行指標數值更新。此外，每年亦辦理教育訓練，向鐵公路管理機關(構)說明鐵公路氣候變遷風險評估資訊之操作方法及應用方式。

為達到應用之最大效益，於 108 年至 109 年規劃辦理鐵公路氣候變遷風險評估資訊移轉作業。

因各機關對於風險評估內容、尺度與應用需求均有所不同，因此本所設計 3 種移轉方案供各單位選擇，並視各單位需求選取最適移轉方式取得風險圖資與評估方式。各方案說明如下：

- 方案 1「圖資移轉」：以光碟提供風險評評估資訊，鐵公路設施管理機關(構)可套疊於既有圖資平台或以 GIS 單機系統進行查詢。
- 方案 2「圖資及評估技術移轉」：除提供原始圖資外，另針對風險評估方法做技術移轉。
- 方案 3「全調適資訊平台移轉」：將圖資與網站平台進行移轉，同時進行風險地圖圖資優化、資料更新與指標調整。

本所已於 109 年 11 月將鐵公路氣候變遷風險評估資訊移轉予鐵公路管理機關(構)，除高鐵公司採方案 2 外，公路總局、高速公路局、臺鐵局、鐵道局均採方案 1。其中臺鐵局表示將規劃納入現有邊坡管理系統中；公路總局表示有更即時的風險資訊系統，另高速公路局表示有更精細的救災風險資訊系統，爰鐵公路風險評估資訊將做為參考用；鐵道局表示將做為後續新路線規劃之參考。各單位相關說明詳表 1 所示。

表 1 風險資訊移轉機關(構)選取方案及回復說明

機關/構	選擇方案	各機關(構)回復說明
高公局	方案 1	有更精細的救災風險資訊系統， <u>光碟的風險資訊做參考用</u>
公路總局	方案 1	有更即時的風險資訊系統， <u>光碟的風險資訊做參考用</u>
臺鐵局	方案 1	已提供給 <u>邊坡系統維運廠商參考納入邊坡管理系統</u>
鐵道局	方案 1	無營運鐵道營運，光碟已存檔並 <u>做為後續新路線規劃參考</u>
高鐵公司	方案 2	<u>針對風險計算方式說明</u> ，以利技術移轉。

資料來源：[23]

四、鐵公路氣候變遷風險評估因應未來情境發展研析

為研析 IPCC AR6 發布後，其氣候變遷情境可能對鐵公路氣候變遷風險評估之影響，本研究採取訪談 TCCIP 計畫核心執行團隊之一的國家災害防救科技中心，以及本所過去研究數據資料引用之水利署，以掌握目前國內氣候變遷情境發展最新動態，並了解相關單位對未來氣候變遷情境改變之作法；依訪談結果，及各鐵公路管理機關(構)選取之移轉方案，提出後續辦理鐵公路氣候變遷風險評估之因應作法建議。

4.1 國內氣候變遷情境發展最新動態

國家災害防救科技中心辦理氣候變遷情境推估與衝擊影響研究，並執行科技部主辦之 TCCIP 計畫，協助研析氣候變遷趨勢及產製臺灣本土氣候變遷資料。因此本研究透過訪談國家災害防救科技中心陳組長永明，以了解因應 AR6 發布，國內最新氣候變遷情境發展趨勢。

1.訪談方式：110 年 2 月 24 日邀請國家災害防救科技中心陳組長永明，以專家座談方式辦理訪談。

2.AR6 發布後之國內氣候變遷情境因應作法

(1)AR6 第一本報告預訂於 110 年 10 月公布（通常在科學報告公布前，各國氣候變遷研究團家已可先取得、上傳 GCM 模擬的氣象資料，並進行相關分析），國內 TCCIP 計畫預計 111 年上半年可完成 AR6 各未來氣候變遷情境之統計降尺度模擬。

(2)AR6 公布後，後續各單位需以何種氣候變遷情境進行風險評估，環保署將會邀集相關部會討論確認。

(3)鐵公路氣候變遷風險評估之氣候變遷 24 小時重現期降雨量，係源自於水利署產製之資料，主要係因當時該署僅能索取到 TCCIP 統計降尺度資料，僅有月降雨量變化，故水利署以計畫產製時雨量之降雨情境資料。而目前 TCCIP 已進行 AR5 重現期降雨的分析(日降雨量)，後續 AR6 也會比照進行，惟後續各單位要如何應用，可再與國家災害防救科技中心討論。

(4)後續有關氣候變遷情境降尺度資料需求或應用上有疑問，可直接洽國家災害防救科技中心討論。

3.對鐵公路氣候變遷風險評估研究之建議：過去鐵公路氣候變遷風險評估研究於 AR4 至 AR5 階段，已進行一次未來情境之氣象資料比對及沿用；AR6 發布後，若仍有氣候變遷風險評估應用需求，建議應以 AR6 情境重新進行風險評估，因 AR4 及 AR6 之兩次報告相隔時間已久遠(約 14 年)，不適宜繼續沿用。

此外，鐵公路氣候變遷風險評估研究係引用之水利署相關調適研究產製之氣候變遷情境資料，爰本研究透過洽詢水利署，了解過去資料產製方式及後續因應 AR6 發布之作法。

1.訪談方式：110 年 1 月 28 日以電話及電子郵件洽詢水利署。

2.過去資料產製：

(1)過去 TCCIP 提供之統計降尺度 GCMs，僅有月降雨量變化資料，因此水利署於 99-102 年辦理調適系列研究之水文情境計畫中，進一步依

該署研究所需，產製時降雨量情境資料，其中也包含基期及未來 IPCC AR4 A1B 情境之不同重現年降雨量資料。

- (2)水利署耗時多年，於 102 年完成產製 IPCC AR4 相關評估資料及各類水資源因應氣候變遷相關之風險地圖後，旋即 IPCC AR5 於 103 年推出；經評估實無必要每推出一個新階段的情境就非得重新曠日廢時費錢費工去重做一次風險分析，因此水利署才會於 105~106 年辦理「氣候變遷降雨情境差異對洪旱衝擊評估研究」，利用比對 AR4 與 AR5 相近情境對應的方式，來處理接下來相關計畫的氣候變遷情境模擬。
- 3.AR6 發布後，並無規劃辦理相關調適研究：該署目前及未來之研究計畫規劃，已由過去氣候變遷情境模擬及相關調適研究，轉為水資源及韌性相關研究；目前對於未來 AR6 發布後，並無規劃相關氣候變遷情境模擬及調適相關研究，亦無編列相關預算。

4.2 鐵公路氣候變遷風險評估因應作法之建議

行政院於 101 年核定國發會所提「國家氣候變遷調適政策綱領」中，明確揭示重要設施權管機關應建置風險評估機制及氣候變遷調適資訊平台。

依 3.5 節鐵公路氣候變遷風險評估資訊移轉結果顯示，公路總局、臺鐵局及高速公路局均已有建置符合自身使用需求的客製化管理系統。

鐵公路氣候變遷風險評估資訊主要是建立氣候變遷風險評估方法，並以大尺度評估鐵公路氣候變遷之坡災風險及淹水風險，透過風險評估資訊移轉，提供鐵公路管理機關(構)參考，鐵公路管理機關(構)仍需視設施屬性進行細部評估確認，針對未來可能的風險成因，研提相關調適作為，以強化設施的調適能力。

因此，AR6 發布後，鐵公路管理機關(構)應掌握其趨勢，並在既有的管理系統納入氣候變遷風險評估。建議後續鐵公路管理機關(構)辦理方式如下：

1. 鐵公路管理機關(構)應掌握 AR6 相關氣候資訊，參與國內科技部/NCDR 或環保署舉辦之 AR6 情境相關會議，並了解國內後續可能採用的氣候變遷情境，未來情境之引用應與國內情境一致化。
2. 鐵公路管理機關(構)可依所需的氣候情境資訊或尺度，適時向環保署或 NCDR 溝通，提供所需 GCMs 降尺度氣候變遷情境資料。
3. 鐵公路管理機關(構)應與執行 TCCIP 計畫之科技部及 NCDR 保持聯繫

溝通，就氣候變遷情境更新後之 GCMs 降尺度資料，了解如何直接或間接應用於鐵公路氣候變遷風險評估中。

4. 鐵公路管理機關(構)應定期辦理或參與其他機關舉辦之氣候變遷調適教育訓練，強化機關內部調適能力建構。

五、結論與建議

5.1 結論

1. 氣候變遷情境發展趨勢

IPCC 自 1990 發布第 1 次評估報告(FAR)迄今，以科學論證全球暖化與氣候變遷現象，也指出全球氣溫上升與人類活動有因果關係，並透過氣候變遷情境模擬未來不同人類活動型態造成的自然系統衝擊。

IPCC 在 2022 年 AR6 發表前，於 2018 與 2019 年陸續公布的 3 本特別報告分別強調：限制升溫 1.5°C 的重要性、土地利用與永續管理的重要性，以及氣候變遷對高山地區、極區、海平面上升及海洋的影響。

IPCC 於 AR6 將以 2011 年起著手建構的「共享社會經濟路徑」(SSPs)，與各種整合評估模式(IAM)結合使用以進行氣候政策評估，其中包含了具體的人口、經濟和技術等社會發展指標的變化，可以更加合理地評估減緩行動的成本和效益。

相較於 AR5 的 RCPs 情境，AR6 的 SSPs 考量多元的共享社會經濟發展情境，因此具有更豐富的代表濃度路徑。然而，因為 AR6 的情境模擬資料更完整及模式數的增加，模擬結果具有較高的可靠度。

綜合上述可知近幾年隨著科技技術的進步，全球尺度的氣候變遷情境模擬不僅納入溫室氣體環境考量，也與經濟、人口、工業、環境等因素結合，其分析結果有助相關氣候政策的實行。有鑑於鐵公路風險評估資訊係基於全球氣候變遷的模擬情境，且 IPCC 的 AR6 於 2022 年公布在即，持續關注其公布成果與 AR4、AR5 的差異性，有利於風險資訊之更新。

2. 國內相關機關(構)因應未來氣候變遷發展趨勢之作法及建議

本研究訪談執行 TCCIP 計畫之國家災害防救科技中心(NCDR)及本所過去研究引用氣候變遷情境資料之水利署，了解相關單位對未來氣候變遷情境發展趨勢之因應作法。

水利署表示，對於未來 AR6 發布後，尚未規劃相關氣候變遷情境模擬及調適相關研究，亦尚未編列相關預算。

國家災害防救科技中心表示，國內預計 111 年上半年可完成 AR6 各

未來氣候變遷情境之統計降尺度模擬。AR6 公布後，若仍有鐵公路系統氣候變遷風險評估資訊之應用需求，建議應以 AR6 情境重新進行風險評估，因 AR4 及 AR6 之 2 次報告相隔時間已久遠(約 14 年)，不適宜繼續沿用。另表示，後續有關氣候變遷情境降尺度資料需求或應用上有疑問，可直接洽 NCDR 討論。

3.未來情境發展對鐵公路氣候變遷風險評估之影響及因應

鐵公路氣候變遷風險評估資訊已於 109 年移轉至各鐵公路管理機關(構)，鐵公路管理機關(構)應將氣候變遷風險評估及調適理念落實執行，納入既有政策及業務推動，才能達到降低氣候變遷衝擊之最大功效。未來 AR6 公布後，建議鐵公路管理機關(構)應掌握 AR6 氣候變遷情境發展趨勢，並依各機關(構)業務需求，將氣候變遷風險評估納入既有的設施管理系統，以因應未來氣候變遷之影響，進而研議調適行動計畫以提升調適能力。

5.2 建議

1. 建議鐵公路管理機關(構)應建立氣候變遷及調適觀念，針對未來氣候變遷可能造成的鐵公路系統之衝擊應即早因應，並進行氣候變遷風險評估及風險管理；針對高風險路段或場站，因地制宜研提調適策略及作為，以利未來可能的衝擊降至最低。
2. 本所移轉之鐵公路風險評估資訊，係以大尺度進行鐵公路系統路段或場站之評估，後續鐵公路管理機關(構)參考應用時，可先以大尺度篩選出高風險區域，再自行針對這些區域進行小尺度分析。此外，風險評估資訊中的指標或氣候變遷因子也可依業管系統特性，因地制宜地進行調整，以較符合實際業務需求。
3. 建議鐵公路管理機關(構)未來研提「國家氣候變遷調適行動方案(112-116 年)」之調適行動計畫時，計畫內應包含氣候變遷風險評估之工作項目，使所提的調適行動計畫能與氣候變遷調適相符。
4. 建議鐵公路管理機關(構)於 AR6 發布後，應主動參與國內相關機關(如科技部、NCDR 或環保署)舉辦之氣候變遷相關會議，以掌握 AR6 相關氣候資訊，並了解國內後續可能採用的氣候變遷情境。
5. 鐵公路管理機關(構)若有客製化需求時，可另委託專業服務團隊，並與氣候團隊合作介接氣候變遷情境資料，以進行風險資訊的更新。

參考資料

- [1] IPCC -Intergovernmental Panel on Climate Change Official Website,<https://www.ipcc.ch/>, 2021.
- [2] IPCC,“FAR Climate Change: Impacts Assessment of Climate Change”, 1990.
- [3] IPCC,“SAR Climate Change 1995: Impacts, Adaptations and Mitigation of Climate Change: Scientific-Technical Analyses”, 1995.
- [4] IPCC,“ TAR Climate Change 2001: Synthesis Report”, 2001.
- [5] IPCC, “AR4 Climate Change 2007: Synthesis Report”, 2007.
- [6] IPCC, “AR5 Synthesis Report: Climate Change 2014”, 2014.
- [7] IPCC,“Global Warming of 1.5°C”, 2018.
- [8] IPCC, “Climate Change and Land”, 2019.
- [9] IPCC, “The Ocean and Cryosphere in a Changing Climate”, 2019.
- [10] IPCC, “Special report on emissions scenarios: a special report of working group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]”, Cambridge: Cambridge University Press, 2000.
- [11] van Vuuren D.P., Stehfest E., den Elzen M.G. J., Kram T., van Vliet J. and van Ruijven B., “RCP2.6: exploring the possibility to keep global mean temperature increase below 2°C”, Climatic Change, Vol. 109, 2011, pp. 95–116.
- [12] O’Neill B.C., Kriegler E., Riahi K., Ebi K.L., Hallegatte S., Carter T.R., Mathur R. and van Vuuren, D.P., “A new scenario framework for climate change research: the concept of Shared Socioeconomic Pathways”, Climate Change, Vol. 122, 2014, pp. 387–400.
- [13] IPCC, “AR5 Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change”, 2014.
- [14] Knutti R. and Sedlacek J., “Robustness and Uncertainties in the New CMIP5 Climate Model Projections”, Nature Climate Change, Vol. 3, 2012, pp. 369-373.
- [15] Riahi K., Rao S., Krey V., Cho C., Chirkov V., Fischer G., Kindermann G., Nakicenovic N. and Rafaj P., “RCP 8.5-A Scenario of Comparatively High Greenhouse Gas Emissions” Climatic Change, Vol. 109, 2011, pp. 33-57.

- [16] Masui T., Matsumoto K., Hijioka Y., Kinoshita T., Nozawa T., Ishiwatari S., Kato E., Shukla P.R., Yamagata Y. and Kainuma M., “An emission pathway to stabilize at 6 W/m² of radiative forcing” *Climatic Change*, Vol. 109, 2011, pp. 59–76.
- [17] Thomson A. M., Calvin K. V., Smith S. J., Kyle G. Page, Volke A., Patel P., Delgado-Arias S., Bond-Lamberty B., Wise M. A., Clarke L. E. and Edmonds J. A., “RCP4.5: a pathway for stabilization of radiative forcing by 2100”, *Global Environmental Change*, Vol. 109, 2011, pp. 77-94.
- [18] Kriegler E., O’Neill B.C., Hallegatte S., Kram T., Lempert R.J., Moss R.H. and Wilbanks T., “The need for and use of socio-economic scenarios for climate change analysis: a new approach based on shared socio-economic pathways”, *Global Environmental Change*, Vol. 22, 2012, pp. 807–822.
- [19] O’Neill B.C., Kriegler E., Ebi K.L., et al., “The roads ahead: narratives for shared socioeconomic pathways describing world futures in the 21st century”, *Global Environmental Change*, Vol. 42, 2017, pp. 169-180.
- [20] Riahi K., van Vuuren D.P., Kriegler E., Edmonds J., O’Neill B.C., Tavoni M., “The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview”, *Global Environmental Change*, Vol. 42, 2017, pp. 153–168.
- [21] 重大鐵公路系統氣候變遷風險評估機制與調適資訊平台之研究 (2/2)，交通部運輸研究所，105 年 10 月。
- [22] 氣候變遷運輸設施風險評估暨風險資訊進階服務計畫，交通部運輸研究所，107 年 5 月。
- [23] 運輸系統因應氣候變遷調適之研究，交通部運輸研究所，預計 110 年 7 月出版。