

102-133-6166
MOTC-IOT-101-TAA004

交通設施因應氣候變遷之脆弱度 評估作業探討



交通部運輸研究所

中華民國 102 年 8 月

ISSN 號碼
及條碼

GPN：

定價 160 元

102-133-6166
MOTC-IOT-101-TAA004

交通設施因應氣候變遷之脆弱 度評估作業探討

著者：黃新薰、朱珮芸
張益城、林忠欽

交通部運輸研究所

中華民國 102 年 8 月

國家圖書館出版品預行編目資料

交通設施因應氣候變遷之脆弱度評估作業探討 / 黃
新薰等著. -- 初版. -- 臺北市：交通部運研所，
民 102.08

面；公分
ISBN 978-986-03-7765-1(平裝)

1. 交通管理

557

102016227

交通設施因應氣候變遷之脆弱度評估作業探討

著者：黃新薰、朱珮芸、張益城、林忠欽

出版機關：交通部運輸研究所

地址：10548 臺北市敦化北路 240 號

網址：www.iot.gov.tw (中文版>圖書服務>本所出版品)

電話：(02)23496789

出版年月：中華民國 102 年 8 月

印刷者：承亞興企業有限公司

版(刷)次冊數：初版一刷 90 冊

本書同時登載於交通部運輸研究所網站

定價：160 元

展售處：

交通部運輸研究所運輸資訊組・電話：(02)23496880

國家書店松江門市：10485 臺北市中山區松江路 209 號・電話：(02)25180207

五南文化廣場：40042 臺中市中山路 6 號・電話：(04)22260330

GPN：1010201655 ISBN：978-986-03-7765-1

著作財產權人：中華民國（代表機關：交通部運輸研究所）

本著作保留所有權利，欲利用本著作全部或部分內容者，須徵求交通部運輸研究所
書面授權。

交通部運輸研究所自行研究計畫出版品摘要表

出版品名稱：交通設施因應氣候變遷之脆弱度評估作業探討			
國際標準書號（或叢刊號） ISBN 978-986-03-7765-1(平裝)	政府出版品統一編號 1010201655	運輸研究所出版品編號 102-133-6166	計畫編號 MOTC-IOT-101-TAA004
主辦單位：綜合技術組 主管：張瓊文 計畫主持人：黃新薰(前任主管) 研究人員：朱珮芸、張益城、林忠欽 聯絡電話：(02)23496874 傳真號碼：(02)27120223			研究期間 自 101 年 01 月 至 101 年 12 月
關鍵詞：交通設施、氣候變遷、脆弱度評估			
摘要： <p>交通設施為國家維生基礎設施之一環，不僅與人民日常生活息息相關，亦是一個國家能維持正常運作最基本的設施。有鑑於全球氣候變遷所引起之衝擊（例如暴雨集中、滯災、乾旱、海平面上升...）似有日漸加劇之趨勢，因此如何進行有效的氣候變遷調適作為，以降低交通設施的脆弱度，提昇其在氣候變遷下之調適能力，進而維持其應有之運作功能並減少對社會之衝擊，將是交通部門未來因應全球氣候變遷衝擊的重要課題。</p> <p>行政院已於101年6月25日核定經濟建設委員會所提「國家氣候變遷調適政策綱領」，在該政策綱領中已揭示各領域設施辦理氣候變遷脆弱度評估的重要性與必要性，本研究即依該政策綱領之指導，重新檢視國內交通設施氣候變遷調適策略與重要課題，並且參酌國內外有關氣候變遷脆弱度評估之研究文獻與經驗作法，研提交通設施氣候變遷脆弱度評估項目與作業流程，並從「實體」、「社會」及「經濟」等三大層面提出共16項脆弱度評估建議指標，期能透過本研究之成果，提升交通設施主管機關對氣候變遷調適之瞭解與重視，並且作為後續各機關進行交通設施氣候變遷脆弱度評估及建置氣候變遷調適資訊平台之參據。</p>			
出版日期	頁數	定價	本出版品取得方式
102 年 8 月	196	160	凡屬機密性出版品均不對外公開。普通性出版品，公營、公益機關團體及學校可函洽本所免費贈閱；私人及私營機關團體可按定價價購。
機密等級： <input type="checkbox"/> 密 <input type="checkbox"/> 機密 <input type="checkbox"/> 極機密 <input type="checkbox"/> 絕對機密 （解密條件： <input type="checkbox"/> 年 月 日解密， <input type="checkbox"/> 公布後解密， <input type="checkbox"/> 附件抽存後解密， <input type="checkbox"/> 工作完成或會議終了時解密， <input type="checkbox"/> 另行檢討後辦理解密） <input checked="" type="checkbox"/> 普通			
備註：本研究之結論與建議不代表交通部之意見。			

**PUBLICATION ABSTRACTS OF RESEARCH PROJECTS
INSTITUTE OF TRANSPORTATION
MINISTRY OF TRANSPORTATION AND COMMUNICATIONS**

TITLE: Vulnerability Assessment of Transport Infrastructures in Response to Climate Change			
ISBN(OR ISSN) ISBN 978-986-03-7765-1(pbk.)	GOVERNMENT PUBLICATIONS NUMBER 1010201655	IOT SERIAL NUMBER 102-133-6166	PROJECT NUMBER MOTC-IOT-101-TAA004
DIVISION: Interdisciplinary Research Division DIVISION DIRECTOR: Chiung-Wen Chang PRINCIPAL INVESTIGATOR: Hsin-Hsun Huang (Former Division Director) PROJECT STAFF: Pei-Yun Chu, Yi-Cheng Chang, Chung-Chin Lin PHONE: (02)2349-6874 FAX: (02)2712-0223			PROJECT PERIOD FROM 2012/01 TO 2012/12
KEY WORDS: transport infrastructures, climate change, vulnerability assessment			
ABSTRACT : <p>Transportation infrastructures are not only closely related to the daily life of the populace, but are also the most basic type of infrastructure needed for a nation to function properly; thus, transportation infrastructures are critical for maintaining a nation's infrastructure. However, as climate change (e.g., torrential rains, floods, droughts, and rising sea levels) intensifies, transportations sectors must consider proposing effective adaptation measures to minimize the vulnerability, enhance the adaptability, and maintain the expected functionality of transportation infrastructures to decrease relevant impacts on society.</p> <p>The Adaptation Strategy to Climate Change in Taiwan, which emphasized the importance and essentiality of vulnerability assessment for climate change in various fields, was proposed by the Executive Yuan on June 25, 2012. This study referenced this adaptation strategy and reviewed domestic and foreign research and case studies on vulnerability assessment for climate change, thereby proposing the operating procedures and indices for assessing the vulnerability of transport infrastructures in response to climate change. Subsequently, 16 vulnerability indices for vulnerability assessment were selected based on the aspects of practicality, society, and economy. We anticipate that this study can promote the understanding and value that authorities have for the importance of adaptation regarding climate change. Furthermore, the results of this study can be used as a basis for authorities to proceed in vulnerability assessment for climate change and to establish a platform for adaptation information concerning transportation infrastructures.</p>			
DATE OF PUBLICATION August 2013	NUMBER OF PAGES 196	PRICE 160	CLASSIFICATION <input type="checkbox"/> RESTRICTED <input type="checkbox"/> CONFIDENTIAL <input type="checkbox"/> SECRET <input type="checkbox"/> TOP SECRET <input checked="" type="checkbox"/> UNCLASSIFIED
The views expressed in this publication are not necessarily those of the Ministry of Transportation and Communications.			

目錄

第一章 緒論.....	1-1
1.1 研究緣起.....	1-1
1.2 研究目的.....	1-2
1.3 研究範圍.....	1-2
1.4 研究內容與流程.....	1-3
第二章 氣候變遷趨勢與影響分析	2-1
2.1 全球氣候變遷情形.....	2-1
2.2 臺灣氣候變遷情形.....	2-7
2.3 氣候變遷對臺灣近十年造成之衝擊	2-12
2.4 未來臺灣氣候變遷推估、衝擊與挑戰	2-19
2.4.1 未來臺灣氣候變遷推估.....	2-19
2.4.2 衝擊與挑戰.....	2-20
2.5 小結.....	2-23
第三章 交通設施氣候變遷調適策略探討	3-1
3.1 交通設施氣候變遷調適總目標	3-1
3.2 交通設施氣候變遷調適策略	3-2
第四章 國、內外氣候變遷調適與脆弱度評估文獻回顧與分析	4-1
4.1 脆弱度之定義.....	4-1
4.2 國外氣候變遷調適與脆弱度評估	4-5
4.3 國內氣候變遷調適與脆弱度評估	4-30
4.4 小結.....	4-39
第五章 交通設施氣候變遷脆弱度評估作業流程之研析	5-1
5.1 脆弱度評估作業流程.....	5-1

5.2 氣象資料蒐集與分析階段	5-3
5.3 設施脆弱度評估階段.....	5-9
5.4 評估結果產出階段.....	5-20
第六章 重要課題探討與推動策略研擬	6-1
6.1 重要課題探討.....	6-1
6.2 推動策略研擬.....	6-4
6.3 時程規劃與權責劃分.....	6-6
第七章 結論與建議	7-1
7.1 結論.....	7-1
7.2 建議.....	7-6
參考文獻.....	R-1
附錄 1 計畫摘要	附 1-1
附錄 2 簡報.....	附 2-1

表目錄

表 3-1 我國「維生基礎設施」與「災害」領域之調適總目標.....	3-1
表 4-1 道路設施因應氣候變遷關鍵衝擊及調適作為.....	4-20
表 4-2 軌道設施因應氣候變遷關鍵衝擊及調適作為.....	4-22
表 4-3 水運設施因應氣候變遷關鍵衝擊及調適作為.....	4-24
表 4-4 車輛及運行設施因應氣候變遷關鍵衝擊及調適作為.....	4-25
表 4-5 氣候變遷對道路設施的衝擊.....	4-27
表 4-6 氣候變遷對軌道設施的衝擊.....	4-27
表 4-7 氣候變遷對港埠設施的衝擊.....	4-28
表 4-8 氣候變遷對空運設施的衝擊.....	4-28
表 5-1 臺灣過去及未來之氣候變遷推估成果.....	5-4
表 5-2 交通設施脆弱度評估指標建議表.....	5-16
表 5-3 潛在衝擊評估矩陣.....	5-19
表 5-4 脆弱度評估矩陣.....	5-19
表 5-5 交通設施脆弱度評估結果與調適策略關聯檢查表.....	5-23
表 6-1 交通設施脆弱度評估過程之各部會署／機關權責劃分.....	6-7

圖目錄

圖 1.1 研究流程圖.....	1-4
圖 2.1 南極冰芯中氘與溫室氣體關係示意圖.....	2-2
圖 2.2 全球溫室氣體濃度示意圖.....	2-3
圖 2.3 全球年平均的觀測氣溫(黑點)示意圖.....	2-3
圖 2.4 極端氣溫發生頻率趨勢圖.....	2-5
圖 2.5 1979-2007 年 9 月北極海冰覆蓋面積變化圖.....	2-5
圖 2.6 臺灣地區各地測站百年年平均溫度距平變化示意圖.....	2-8
圖 2.7 臺灣年際降雨分佈圖.....	2-9
圖 2.8 雨量站分佈圖.....	2-10
圖 2.9 降雨型態趨勢分析圖.....	2-11
圖 2.10 1990-2010 各颱風事件造成之最大總雨量示意圖.....	2-12
圖 2.11 2000-2010 臺灣地區主要水災災情示意圖.....	2-14
圖 2.12 坡地災害風險地圖.....	2-15
圖 2.13 臺灣主要水庫淤積概況.....	2-16
圖 2.14 臺灣地區海岸脆弱度分級.....	2-17
圖 2.15 氣候淹水災害風險圖.....	2-18
圖 4.1 脆弱度各面向之關係架構圖.....	4-4
圖 4.2 採用「由上而下」及「由下而上」方法評估脆弱度及 調適措施.....	4-6
圖 4.3 衝擊型架構的內涵.....	4-7
圖 4.4 聯合國開發計畫署調適政策架構.....	4-8
圖 4.5 國家調適行動方案流程.....	4-9
圖 4.6 美國氣候變遷與極端氣候脆弱度評估架構.....	4-11
圖 4.7 FHWA 脆弱度及風險評估矩陣.....	4-12
圖 4.8 城市運輸調適策略發展架構.....	4-15
圖 4.9 城市運輸需要調適作為之理由.....	4-17

圖 4.10 能源產業因應氣候變遷之脆弱度評估方法.....	4-36
圖 5.1 交通設施氣候變遷脆弱度評估完整作業流程.....	5-2
圖 5.2 氣候變遷情境下全球年平均溫度趨勢與調適目標年示意圖	5-5
圖 5.3 鐵公路設施脆弱度因子分析示意圖.....	5-10
圖 5.4 省道脆弱度地圖.....	5-20
圖 5.5 國道脆弱度地圖.....	5-21
圖 5.6 高鐵脆弱度地圖.....	5-21

第一章 緒論

1.1 研究緣起

「節能減碳」與「氣候變遷調適」已是當前世界各國面對全球暖化與氣候變遷最主要之因應策略。其中，所謂的「氣候變遷調適」係指人類組織為因應氣候變遷之威脅所啟動的一種本能行為與作為，亦是為了確保人類仍能在新的氣候條件下，持續不斷生存與發展的必要行為與作為。具體而言，「氣候變遷調適」乃是要透過各種具體且有效的策略與措施的規劃、執行及落實，將人類本身及其所賴以生存與發展的各種人造系統與自然系統的脆弱度（vulnerability）降到最低，以確保人類的持續生存與發展不會受到氣候變遷的衝擊而中斷。

交通設施為國家維生基礎設施之一環，不僅與人民日常生活息息相關，亦是一個國家能維持正常運作最基本的設施。一般而言，交通設施的範圍涵蓋公路、軌道、橋梁及隧道、港口及機場等工程、場站及相關附屬設備。有鑑於全球氣候變遷所引起之衝擊（例如暴雨集中、滄災、乾旱、海平面上升...）似有日漸加劇之趨勢，因此如何進行有效的氣候變遷調適作為，以降低交通設施的脆弱度，提昇其在氣候變遷下之調適能力，進而維持其應有之運作功能並減少對社會之衝擊，將是未來交通部門因應全球氣候變遷衝擊的重要課題。

面對全球氣候變遷所可能造成之衝擊，近年來包括行政院國家災害防救科技中心、國家科學委員會、環境保護署、農業委員會、經濟部水利署、交通部中央氣象局、中央研究院環境變遷中心，以及國內大學與研究機構等，雖然都持續針對國內未來氣候變遷趨勢與可能影響進行相關研究，而且行政院經濟建設委員會亦於 99 年邀請相關部會、專家學者、非政府組織（NGO）及產業界代表成立「規劃推動氣候變遷調適政策綱領與行動計畫」專案小組，著手規劃研提我國氣候變遷調適政策綱領與行動計畫，但是有關交通設施因應氣候變遷相關課題的研究卻仍普遍缺乏。探究其原因，除了交通部門對於氣候變遷調適尚未真正瞭解並予重

視外，缺乏交通設施氣候變遷脆弱度評估作業之指導亦是其中一項重要因素。

行政院已於 101 年 6 月 25 日核定經濟建設委員會所提「國家氣候變遷調適政策綱領」^[1]，在該政策綱領中已揭示各領域設施辦理氣候變遷脆弱度評估的重要性與必要性，本研究即依該政策綱領之指導，重新檢視國內交通設施氣候變遷調適策略與重要課題，並且參酌國內外有關氣候變遷脆弱度評估之研究文獻與經驗作法，進行交通設施氣候變遷脆弱度評估項目與作業流程之深入探討，期能透過本研究之成果，提升交通設施主管機關對氣候變遷調適之瞭解與重視，並作為後續各機關進行交通設施氣候變遷脆弱度評估及建置氣候變遷調適資訊平台之參據。

1.2 研究目的

本研究主要目的如下：

1. 確認我國未來面對之氣候變遷趨勢與可能影響，並且重新檢視交通設施氣候變遷調適策略與重要課題。
2. 研提交通設施氣候變遷脆弱度評估之建議項目與作業流程，以作為後續相關主管機關進行交通設施氣候變遷脆弱度評估及建置氣候變遷調適資訊平台之參據。
3. 透過本研究之成果，提升交通設施主管機關對氣候變遷調適之瞭解與重視。

1.3 研究範圍

本研究以由交通部轄管之交通設施（包括公路、鐵路、港口及機場等）為主要研究對象，並以前揭設施之氣候變遷脆弱度評估相關作業為主要研究範圍。

1.4 研究內容與流程

本研究之研究流程如圖 1-2 所示，主要研究項目分述如下：

1. 我國氣候變遷趨勢與影響分析

蒐集彙整包括行政院國家災害防救科技中心、國家科學委員會、環境保護署、農業委員會、經濟部水利署、交通部中央氣象局、中央研究院環境變遷中心，以及國內大學與研究機構歷年來有關我國氣候變遷之相關研究資料，以確認國內交通設施未來將面對之氣候變遷趨勢與可能的影響分析。

2. 交通設施氣候變遷調適策略探討

根據前項氣候變遷趨勢與影響分析之結果，重新檢視行政院經濟建設委員會所提「氣候變遷調適政策綱領」中有關「維生基礎設施」與「災害」領域之調適策略與交通設施之關聯性，並研提適合交通設施之氣候變遷調適策略。

3. 國內、外氣候變遷調適與脆弱度評估文獻回顧

為對氣候變遷調適與脆弱度評估有更進一步之瞭解，蒐集並彙整國內、外有關研究文獻與經驗作法，並且進行回顧與分析，以作為研提交通設施氣候變遷脆弱度評估作業流程與評估項目之參考基礎。

4. 交通設施氣候變遷脆弱度評估作業流程之研析

參酌前項國內、外氣候變遷調適與脆弱度評估之文獻彙析結果，進一步研析適合交通設施氣候變遷脆弱度評估之作業流程，並針對作業流程中之交通建設氣候變遷脆弱度因子分析、評估項目（指標）建立、評估方法選定及成果展現等主要工作進行探討。

5. 重要課題探討與推動策略研擬

依據前述研究成果，就交通設施進行氣候變遷調適與脆弱度評估之重要課題進行探討，並研提未來推動作法、相關配套措施及推動時程。

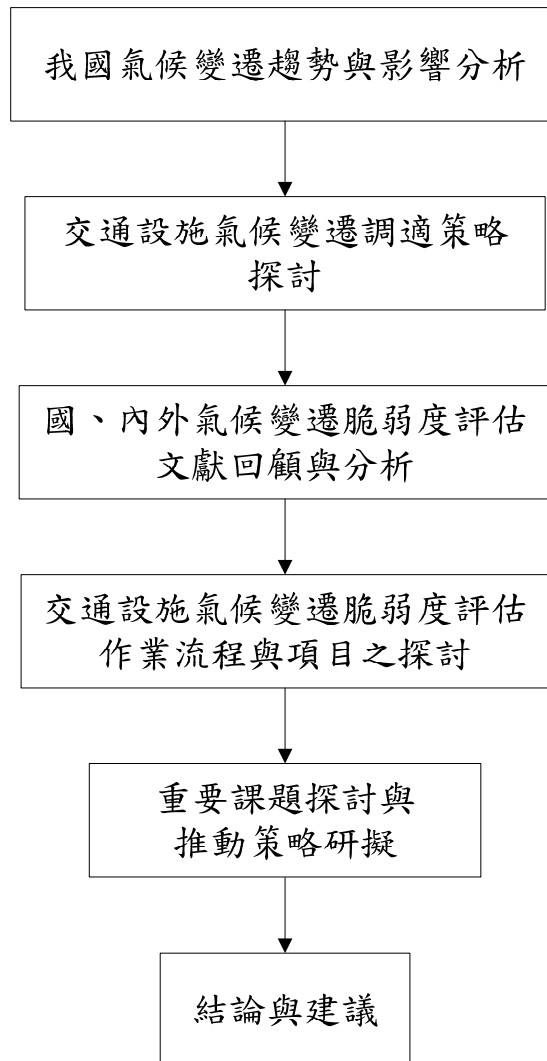


圖 1.1 研究流程圖

第二章 氣候變遷趨勢與影響分析

行政院國家科會委員會於 100 年 11 月公布「臺灣氣候變遷科學報告 2011」^[2]，該科學報告係由國家災害防究科技中心主導並整合交通中央氣象局、中央研究院環境變遷研究中心、行政院農業委員會、經濟部水利署，以及國內相關學研界之研究成果而成，除回顧過去全球與臺灣地區氣候變遷的研究成果，亦介紹「臺灣氣候變遷推估與資訊平台計畫（Taiwan Climate Change Projection and Information Platform Project, TCCIP）中最新分析的結果。其中，TCCIP 計畫透過 6 個具百年以上長期紀錄之氣象測站（臺北、臺中、臺南、恒春、臺東、花蓮）、4 個有 60 年風速資料之外島測站（澎湖、東吉島、蘭嶼、彭佳嶼），以及美國聯合颱風警報中心（Joint Typhoon Warning Center, JTWC）之颱風最佳路徑等資料，以系統化的方式顯示臺灣區域氣候變遷的特徵，其分析結果為目前國內氣候變遷研究相關領域學術研究與政府部門推動氣候變遷相關政策時之最主要氣候科學參據。

由於交通設施絕大多數暴露在外，易受氣候變化之影響，為瞭解交通設施可能面臨之氣候變遷的衝擊，茲摘述國內外相關文獻及「臺灣氣候變遷科學報告 2011」對氣候變遷之觀測趨勢與重要分析結果如后。

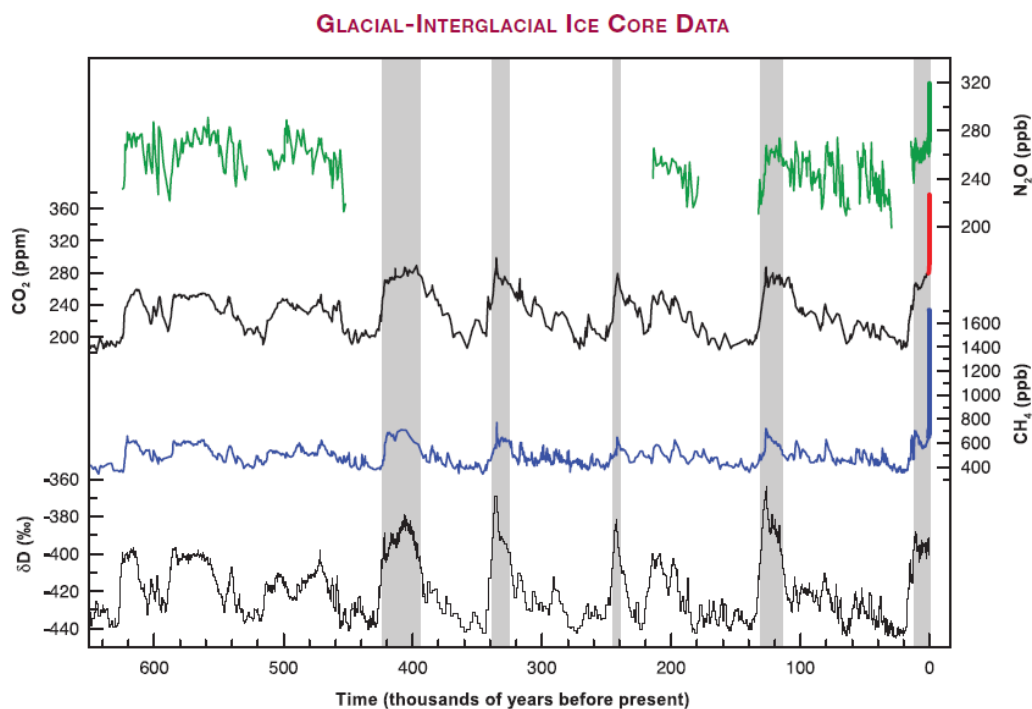
2.1 全球氣候變遷情形

全球暖化（Global Warming）的現象已被公認是氣候變遷最明顯也是最有力的證據，而「溫室氣體」增加則是造成全球暖化的最主要成因。

所謂的「溫室氣體」是指二氧化碳（CO₂）、氧化亞氮（N₂O）、甲烷（CH₄）、氟氯碳化合物（CFCs）等氣體的統稱，因為這些氣體會顯著吸收地球散發或反射出來的長波輻射，進而加強地球溫室效應，造成更多的輻射能量被保留在地球系統中，導致溫度上升，而由

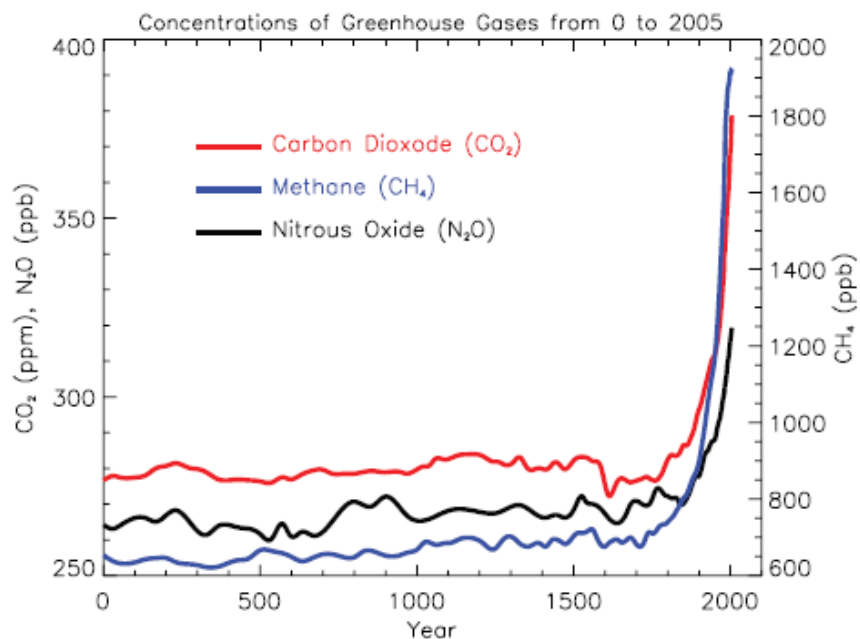
於大氣層中溫室氣體的濃度是為平均的濃度，屬於全球尺度的問題，所以又稱之為「全球暖化」。

從歷史資料分析可見地球溫度與溫室氣體存在一定關聯性。圖 2.1 顯示過去 65 萬年前以來，南極冰芯中氘的變化 (δD ，約相當於局部的氣溫) 與二氧化碳、氧化亞氮以及甲烷等溫室氣體濃度間之關係。從圖中可看出，當溫度高時，各溫室氣體的濃度亦升高，當溫度低時，溫室氣體的濃度則降低，呈現一定程度的正相關性；圖 2.2 顯示自 1750 年以來，由於人類工業革命，造成溫室氣體如 CO_2 、 N_2O 及 CH_4 濃度急速上升；若進一步根據觀測的全球平均氣溫資料進行分析，並分成近 150 年、近 100 年、近 50 年與近 25 年探討全球平均氣溫上升的趨勢，則可從圖 2.3 中看出愈靠近現今，全球平均氣溫上升的趨勢愈明顯且愈劇烈。



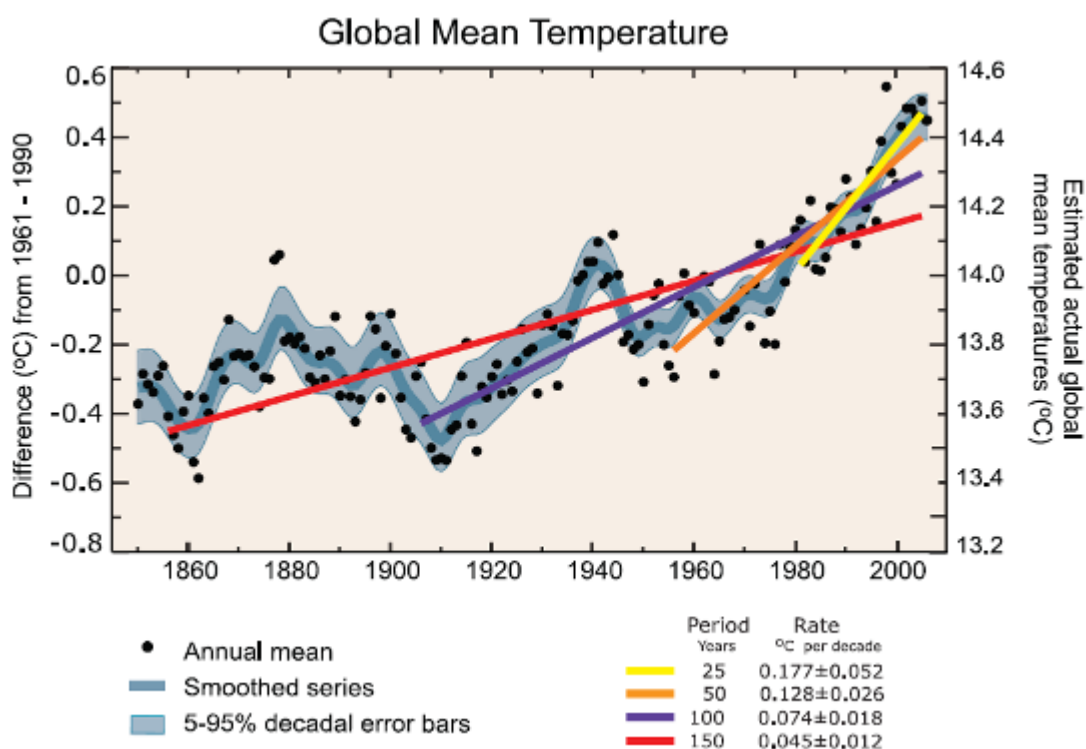
資源來源：[3]，南極冰芯中氘的變化 (δD ，約相當於局部的氣溫) 與大氣溫室氣體濃度 (CO_2 、 N_2O 、 CH_4) 於 65 萬年以來的關係示意圖，陰影處表現今與以前的間冰期暖期，左右兩縱軸分別表示氘的變化與溫室氣體的濃度，橫軸為時間。

圖 2.1 南極冰芯中氘與溫室氣體關係示意圖



資源來源：[3]，過去 2000 年來溫室氣體的濃度示意圖，其中自 1750 年後，溫室氣體濃度急劇上升，左右兩縱軸分別為溫室氣體的濃度，橫軸為時間。

圖 2.2 全球溫室氣體濃度示意圖



資料來源：[3]，左邊縱軸為各年溫度相對於 1961-1990 平均的差異，右邊縱軸為估計的實際溫度，橫軸為時間，其中，不同顏色線分別代表過去 25 年（1981-2005）、50 年（1956-2005）、100 年（1906-2005）以及 150 年（1856-2005）的溫度上升趨勢，離現今時間愈短，上升趨勢愈劇烈。

圖 2.3 全球年平均的觀測氣溫（黑點）示意圖

聯合國政府間氣候變遷專家小組（Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC）於 2007 年出版之第四次氣候變遷評估報告中指出過去百年全球氣候變遷的重要特性如下：

1. 全球暖化的趨勢不是線性趨勢

由過去 100 年（1906~2005 年）的線性趨勢估計，全球平均表面溫度上升 $0.74^{\circ}\text{C} \pm 0.18^{\circ}\text{C}$ ，惟過去 50 年的暖化速度卻是過去 100 年的兩倍，如圖 2.3 所示，顯示全球暖化趨勢不是線性的，而且變遷趨勢有逐漸加速的現象。

2. 陸地暖化速度大於海洋

暖化發生在陸地和海洋，也發生在海平面溫度和夜間海洋上的氣溫。1979 年以後，陸地表面氣溫上升大約是海洋的兩倍（超過 $0.27^{\circ}\text{C}/\text{十年}$ 比 $0.13^{\circ}\text{C}/\text{十年}$ ），最顯著的暖化發生於冬季（12-2 月）與春季（3-5 月）的北半球。

3. 極端溫度改變與氣候暖化一致

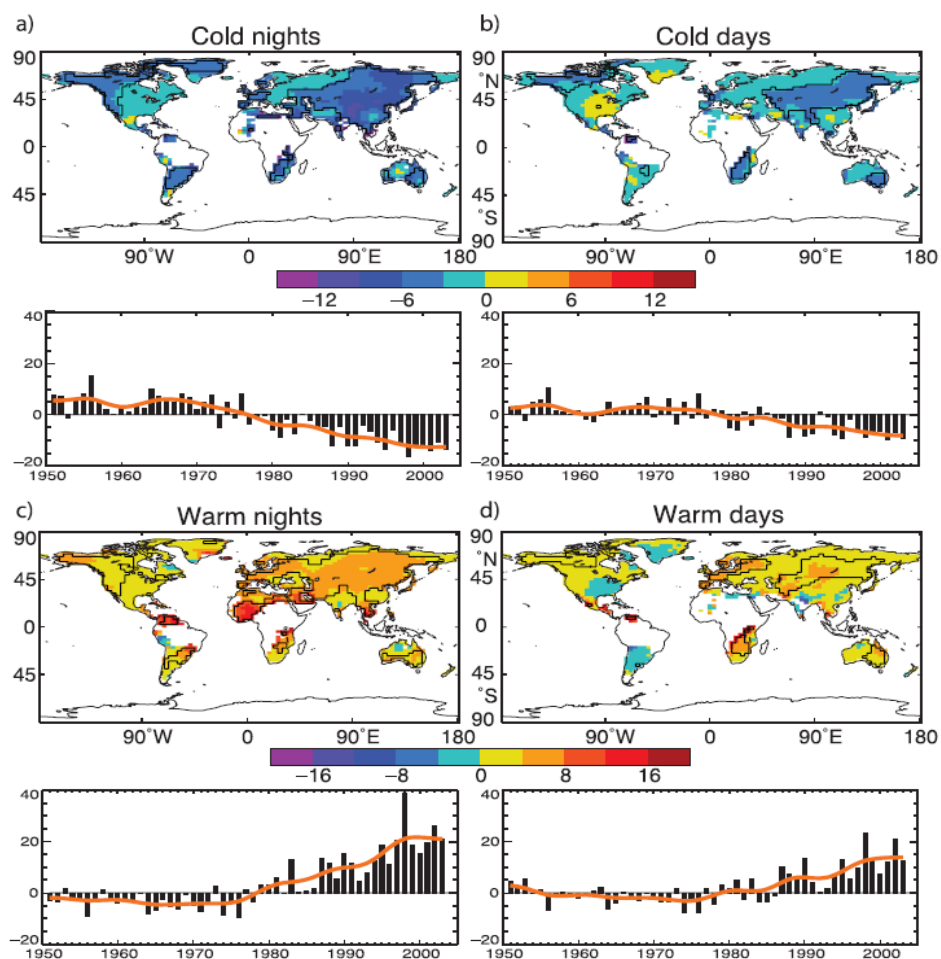
在 70~75% 有觀測資料的陸地，霜日在中緯度地區大規模減少、熱極端事件增加和冷極端事件減少，如圖 2.4 之空間分佈圖所示。最明顯的是在 1951 到 2003 年期間，冷夜變得罕見；極端暖夜則變得更加頻繁。日溫差在 1950 到 2004 年間以 $0.07/\text{十年}$ 速率變小，但在 1979 到 2004 年卻只有極少的改變，這是因為在後段時期的最高和最低溫度以相似的速率上升，如圖 2.4 之曲線圖所示。

4. 每個大洋所有緯度的海面溫度都有暖化現象

南北半球的大西洋暖化程度不同，太平洋的暖化則受赤道的聖嬰現象和太平洋年代際變化干擾，印度洋顯現比較穩定的暖化，這些特徵導致海洋表面不同的局地暖化速率。

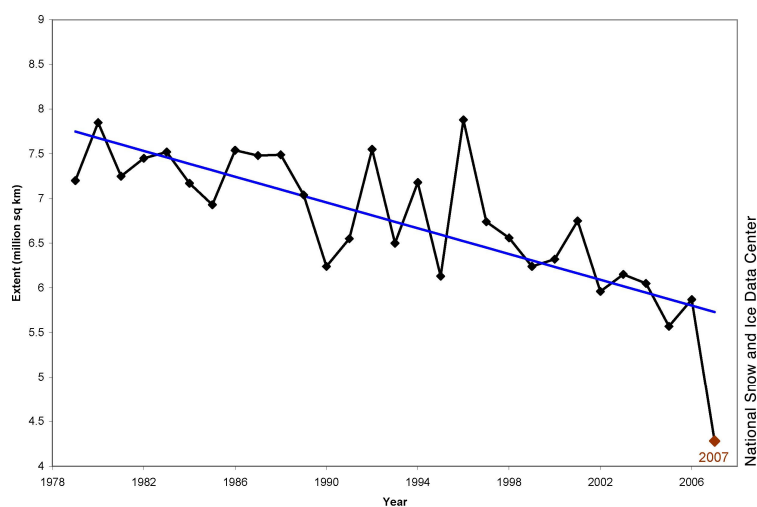
5. 北極平均溫度以全球平均溫度的兩倍速率增加

北極溫度有明顯年代際變化。在 1920 年代晚期到 1950 年代初期，曾發生過與現在類似但些微持久的溫暖時期，但是空間分佈不同。衛星觀測資料顯示，夏季北極海冰覆蓋面積自 1979 年以來至 2007 年以每十年 10%（約 72,000 平方公里）的速率減少，如圖 2.5 所示。



資料來源：[4]，紀錄長度：1951-2003，單位日/十年，以 1961-1990 為基準。(a) 冷夜與 (b) 冷日 (定義為十百分位 percentile); (c) 暖夜與 (d) 暖日 (定義為九十百分位 percentile)。曲線為全球年平均值的逐年變化，平滑均線為十年平均曲線。(Alexander et al., 2006)

圖 2.4 極端氣溫發生頻率趨勢圖



資料來源：[5]

圖 2.5 1979-2007 年 9 月北極海冰覆蓋面積變化圖。

6. 全球降水型態的改變

降水在北緯 30 度以北的陸地從 1900 到 2005 年普遍增加，但是熱帶地區從 1970 年代之後卻是呈現下降趨勢；北緯 10 度到 30 度地區，在 1900 到 1950 年代降水顯著地增加，但是在 1970 年以後減少；下降趨勢存在於北緯 10 度到南緯 10 度熱帶地區，1976 和 1977 年以後特別明顯。降水型態的改變，比溫度改變更具空間和季節性的變動，但顯著降水變化發生的地方，和氣流的變化是一致的。

7. 強烈降水事件增加

許多陸地地區（即使是某些總雨量減少的地區）豪雨事件（95 百分位）數的增加是可能的，這與氣候暖化與大氣中水氣量顯著增加是一致的。有些報告指出罕見降水事件（每 50 年發生 1 次）增加，但只有少數區域有充足資料可做出可靠的估計。

8. 乾旱變的越來越常見，特別是在熱帶和副熱帶地區

過去 30 年，較強且持續較久的乾旱在許多地區越來越頻繁。依據帕爾默乾旱指數（Palmer Drought Severity Index, PDSI）顯示，陸地降水減少，以及因為溫度上升造成蒸發量提高，是使越來越多地區出現乾旱的重要因素。乾旱發生的地區似乎主要是因為海面溫度變化，影響大氣環流和降水所造成，此一現象在熱帶尤其明顯。此外，在美國西部，積雪量減少和隨後的土壤濕度減少，也是影響因子；至於澳洲和歐洲的乾旱，則推斷應與全球暖化產生的高溫 and 熱浪有關。

9. 海平面高度節節上昇

海平面於過去數十年間逐漸上昇，而在進行海平面上昇推估過程中，熱膨脹是最重要的因素，約佔 70 到 75%。此外，冰河、冰帽和格陵蘭冰床也是影響海平面高度的重要因素。

2.2 臺灣氣候變遷情形

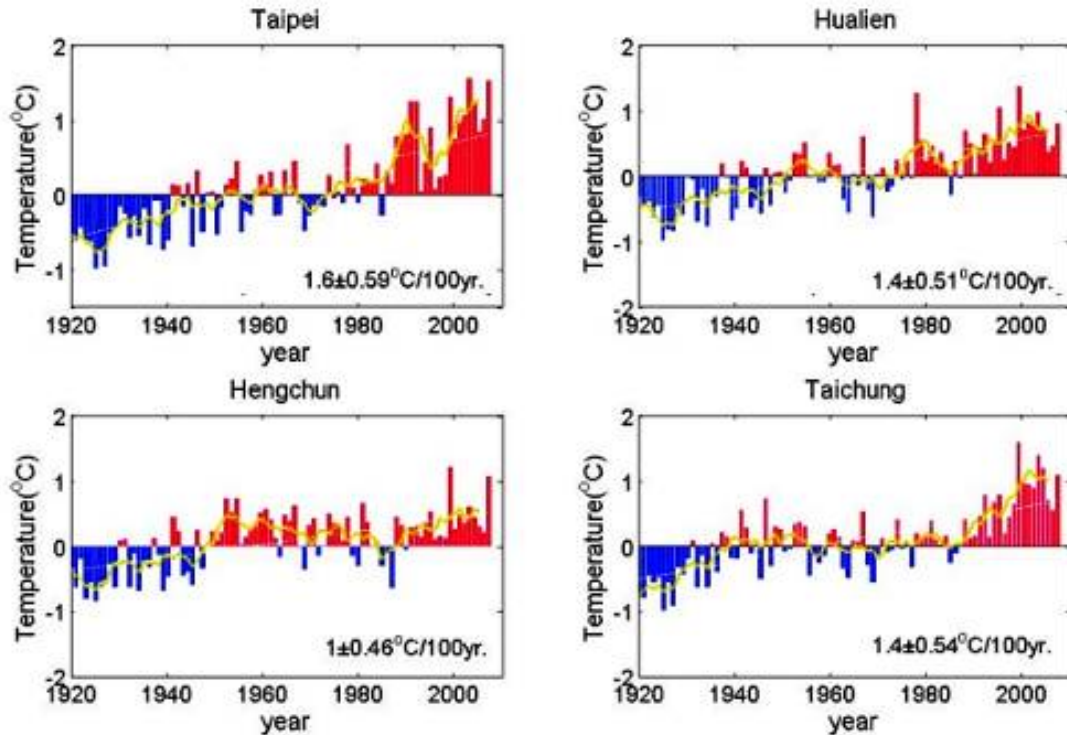
由全球氣候變遷的趨勢來看，氣候變遷對於環境造成影響的因子，可大致歸納為氣溫特性改變、降雨特性改變、海平面上升及極端事件（例如颱風）發生強度增加等 4 類，而從臺灣交通設施災害歷史的關聯性來看，這 4 類因子也是影響交通設施能否維持正常功能的最主要因素。依據「臺灣氣候變遷科學報告 2011」^[2]之研究結果，茲將有關臺灣過去在此 4 類氣候因子之變遷現象說明如后。

1. 溫度

依據 100 年、50 年和 30 年的年平均溫度變化趨勢，臺灣地區正以每年 $0.8\sim 1.6^{\circ}\text{C}$ 之暖化速度逐漸增溫，亦即有明顯暖化現象。其中，臺灣平地年平均溫度在 1911 年至 2009 年期間上升了 1.4°C ，增溫速率相當於每 10 年上升 0.14°C ，約為同期全球平均值（每 10 年上升 0.07°C ）的 2 倍；此外，臺灣近 30 年（1980~2009）氣溫的增加明顯加快，每 10 年的上升幅度為 0.29°C ，幾乎是臺灣百年趨勢值的兩倍，此趨勢與 IPCC 第四次氣候變遷評估報告的結論一致。

其他有關臺灣全區溫度變化之重要現象包括：

- (1) 在區域特性方面，臺灣東岸測站的增溫趨勢明顯高於西岸；
- (2) 在季節特性方面，百年變化以秋季溫度的暖化幅度最大，但近 30 年的變化以冬季的增溫幅度大於其他三季；
- (3) 高溫日數百年變化呈現增加的趨勢，且以臺北增加幅度最大，約為每 10 年增加 1.4 天，近 50 年與 30 年的極端高溫日數則分別增加為每 10 年 2 天與 4 天。
- (4) 極端低溫發生頻率顯著下降，1985 年之後，寒潮事件明顯偏少，這樣的情況在 1985 年以前不曾出現過。
- (5) 依據中央氣象局 98 年有關臺灣過去百年氣候特性變化的統計資料亦顯示，過去 50 年熱浪發生頻率及持續天數明顯增加，且北部溫度變化比其他地區高。其中，都會區平均最低氣溫增加 2.1°C ，最高氣溫增加 0.7°C ，夜晚升溫現象比白天高。



資料來源：[2]

圖 2.6 臺灣地區各地測站百年年平均溫度距平變化示意圖

2. 降雨特性的改變

若僅看年度總降雨量，過去 100 年以來，臺灣年平均雨量並沒有明顯的變化趨勢，但若以數十年為週期來看待，則可觀測到乾季與濕季的降雨變化。值得注意的是，臺灣降雨日數呈現減少的趨勢，以 100 年來看，趨勢為每 10 年減少 4 天；但若看最近 30 年，則增至每 10 年減少 6 天，顯示降雨日數減少趨勢益發明顯。其中，最近一次發生於 2002 年至 2004 年的乾旱事件則是 100 年以來降雨日數最少的 3 年。至於在季節特性方面，四個季節的降雨日數都呈現減少趨勢，其中又以夏季的減少幅度最大。

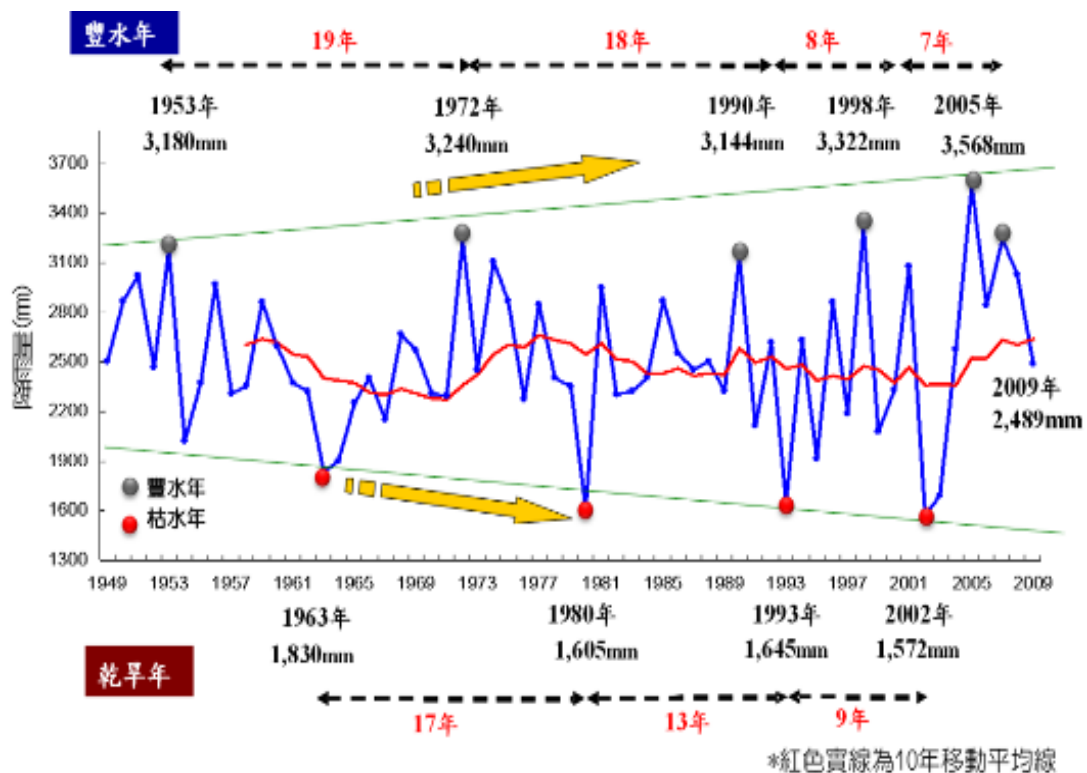
另一方面，統計資料卻同時顯示大豪雨日數(日雨量大於 200mm)在近 50 年和近 30 年則皆有明顯增多的趨勢，且近 10 年具極端強降雨之颱風數目倍增，而與灌溉和水資源保育有關的小雨日數則大幅度減少(近 100 年趨勢為每 10 年減少 2 天，而近 30 年增加為每 10 年減少 4 天，顯示小雨日數減少趨勢的極端化)。

圖 2.7 顯示臺灣雨量近 60 年之統計變化圖，臺灣地區的年際雨量

變化非常大，從降雨量最多的 3,568mm，至最少的 1,572mm，高低相差達約 2,000mm，顯現出臺灣降雨量的高度變異性。

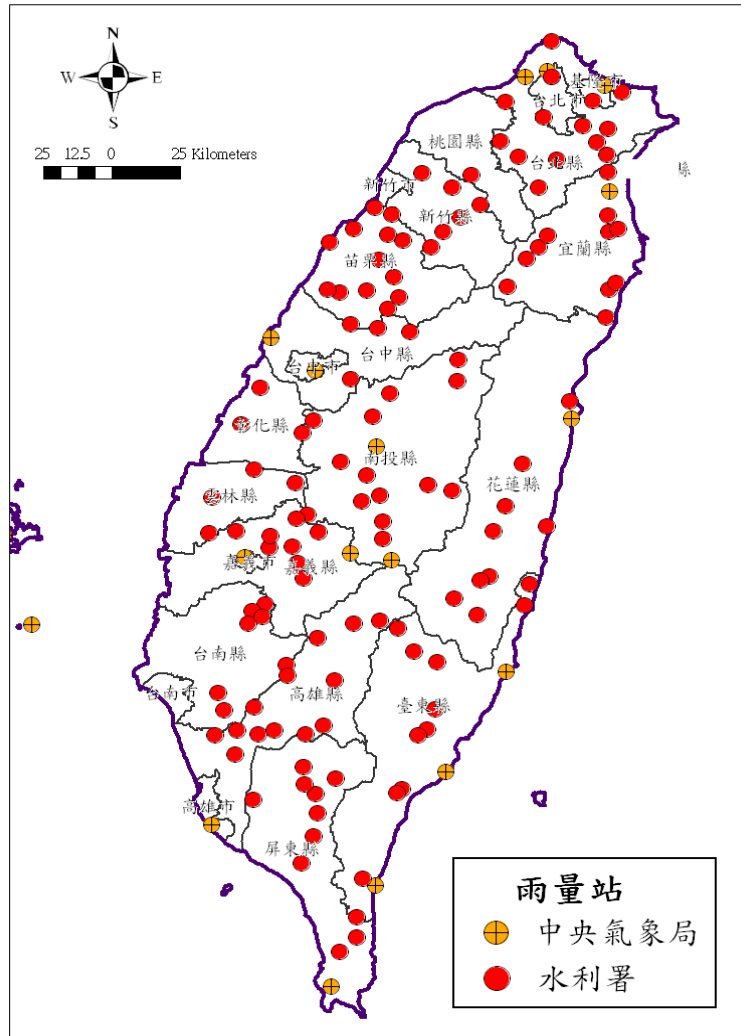
依據全臺 148 個雨量站（氣象局 19 站，水利署 129 站，如圖 2.8 所示）每年所觀測之時雨量資料，分析從 1980 至 2009 年間臺灣的降雨型態，統計大雨（大於或等於 50mm）之降雨次數，結果如圖 2.9（a）所示，不論是移動平均線或是十年平均線，發生大雨的次數皆呈現上升趨勢，意指臺灣的降雨有逐漸集中的現象。

除了分析時雨量外，依據全臺 148 個雨量站每年所觀測之日雨量資料，統計豪雨（大於或等於 200mm）之平均發生日數（即降雨日數／有效站數），結果如圖 2.9（b）所示，不論是移動平均線或是十年平均線，豪雨的平均發生日數皆呈現上升趨勢，再次說明臺灣的降雨型態於時間尺度上有逐漸集中的現象。



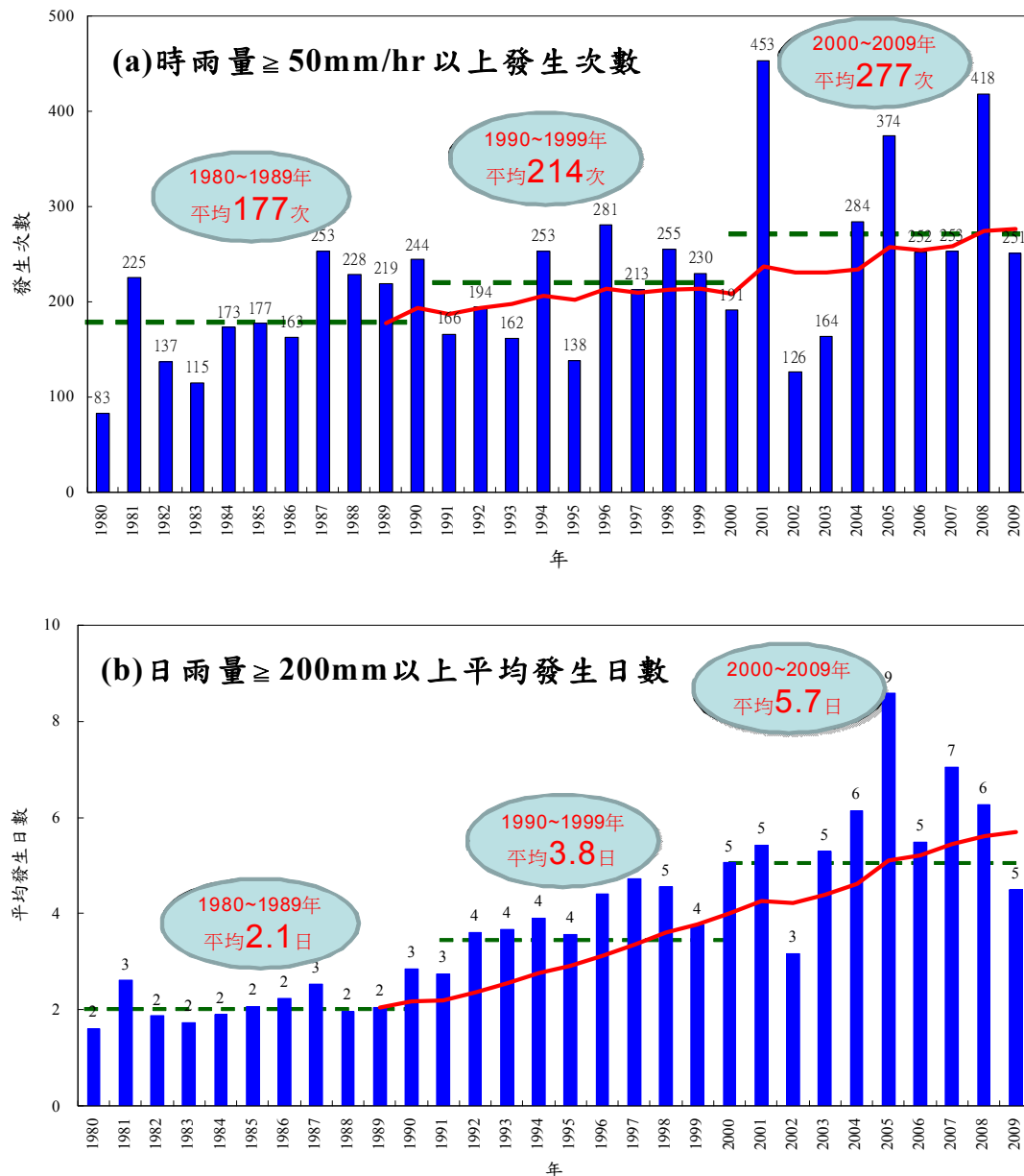
資料來源：[6]

圖 2.7 臺灣年際降雨分佈圖



資料來源：[6]

圖 2.8 雨量站分佈圖



資料來源：[6]，(a) 顯示時雨量 $\geq 50\text{mm}$ 次數分析；(b) 顯示日雨量 $\geq 200\text{mm}$ 平均發生日數。其中紅色實線為 10 年移動平均線，綠色虛線為 10 年平均線。

圖 2.9 降雨型態趨勢分析圖

3. 海平面上升

1993 年至 2003 年間臺灣附近平均海平面上升速率為每年 5.7mm，上升速率為過去 50 年的 2 倍，略高於衛星所測得的每年 5.3mm，但此數值大於同時期全球平均值上升速率（每年 3.1mm）。臺灣周遭海域海平面上升的可能原因，除全球暖化後的平均海平面上升外，部分原因屬於區域性的現象，包括近幾十年東太平洋海平面持續下降、西太平洋海平面持續上升、聖嬰現象等氣候現象的影響，以

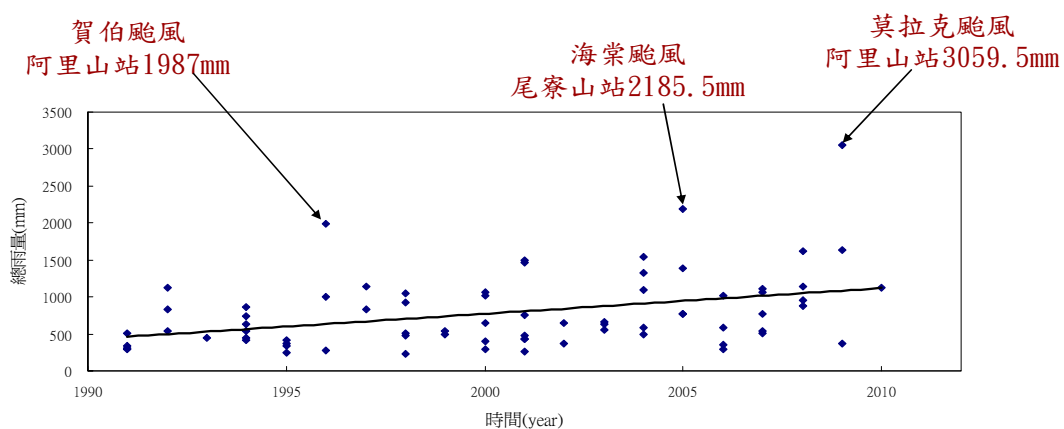
及鄰近海域（如南海）海平面的改變。

此外，根據兩岸三地分布在臺灣周圍海域的海洋潮位觀測站自 1961 年到 2003 年觀測資料，發現臺灣海域海平面每年平均上升速率達 2.51mm，為全球海平面平均上升速率 1.8mm 的 1.4 倍。過去 10 年，高雄沿海以每年 6.79mm 的速率上升，不但是全球平均上升速率的 2.2 倍，更凸顯臺灣西南地區地層下陷速率每年高達 7.89mm 此一嚴重問題。

4. 極端事件發生強度增加

根據 2009 年中央研究院環境變遷研究中心「溫室效應影響下的全球極端降雨變化」^[7]研究報告，近 45 年來全臺灣前 10%強降雨已增加約 100%，而前 20%小雨則相對減少約 50%，這意味著颱風帶來的強降雨在過去 45 年間已增加 1 倍。

依據國家災害防救科技中心臺灣受颱風侵襲次數統計資料^[8]，臺灣由 1897 至 2007 年間，侵臺颱風平均 1 年有 3.63 次，但 2000 年至 2007 年，年內僅 2002 年未超過 4 次，其中 2001 與 2010 年更高達 17 次，顯示臺灣地區颱風侵襲次數有顯著增加趨勢。在降雨量方面，依據經濟部水利署統計 1991 至 2010 年歷史侵臺颱風事件資料^[9]，總降雨量超過 1,000mm 之事件高達 22 場，平均每年至少發生 1 場，圖 2.10 則顯示各颱風事件與總降雨量之示意圖，說明極端事件（颱風）的發生機率不但升高，降雨量也顯著增加。



資源來源：[9]

圖 2.10 1990-2010 各颱風事件造成之最大總雨量示意圖

2.3 氣候變遷對臺灣近十年造成之衝擊

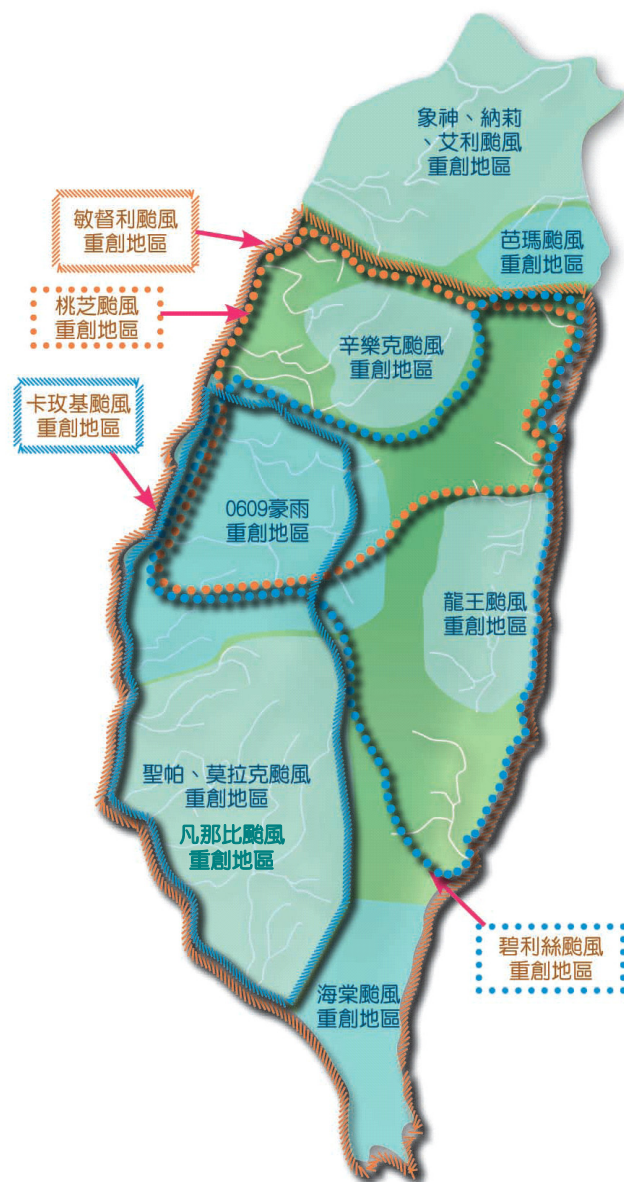
有鑑於前述 4 項氣候因子的改變會造成不同程度的衝擊與影響，甚至發生複合型災害的衝擊，茲定性說明從 2000 年至 2009 年 10 年間，氣候變遷對我國環境及設施可能造成之衝擊如后：

1. 降雨強度增加導致淹水、坡地土砂與複合型災害風險上升

暴雨強度增強與次數增加，其增強後之降雨強度若是降在河川中下游地區，將可能高於既有排水系統與防洪系統規劃抵禦之強度，進而引發淹水災害，如圖 2.11 所示臺灣近 10 年所發生之水災災情地區示意圖。

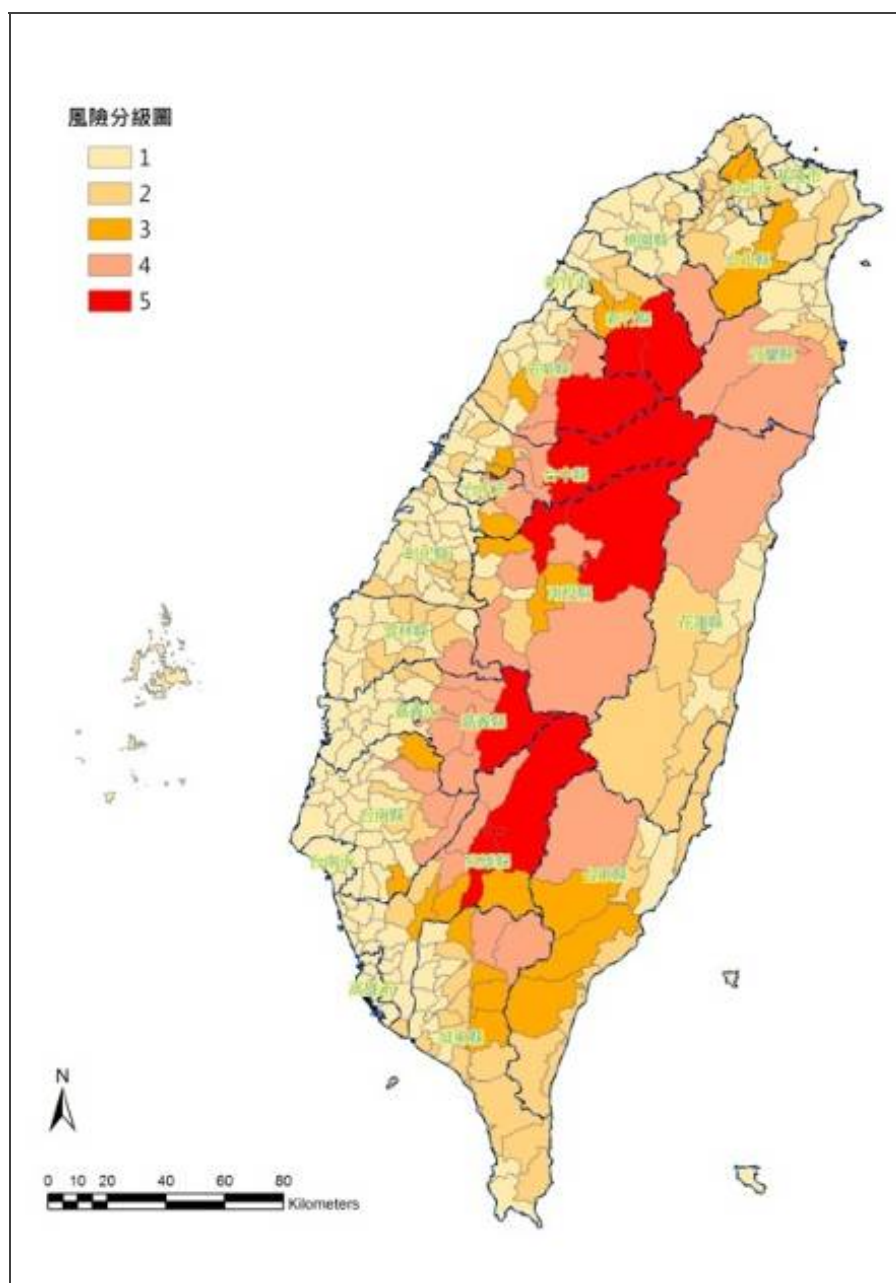
而暴雨若是降在河川上游集水區，將可能造成坡地土砂災害風險上升，國家災害防救科技中心根據歷史災害記錄及各鄉鎮土石流潛勢溪流警戒雨量值（莫拉克颱風之前警戒值）等因子，建立臺灣地區山坡地脆弱度分級圖（以鄉鎮為單元）進行之坡地災害脆弱區位分析與風險評估，其中坡地災害脆弱度包含歷史災害頻率與土石流警戒值，社會經濟脆弱度考量人口密度、高等教育人口、死亡率及所得等因素。綜合以上脆弱度指標之坡地災害風險地圖，如圖 2.12 所示，結果顯示臺灣現階段坡地災害風險相對高的地方為：新竹、苗栗、臺中、南投山區以及嘉義、高雄山區。

另外降雨強度增加亦可能造成複合型災害風險升高，由洪水、土砂與浮木等結合產生的複合型災害則會造成水庫淤砂量上升，有效蓄水容量降低，並影響水庫正常之運轉，如圖 2.13 顯示臺灣重要水庫的淤砂情形，其中臺灣南部地區的水庫淤砂情形嚴重，缺水風險較高。



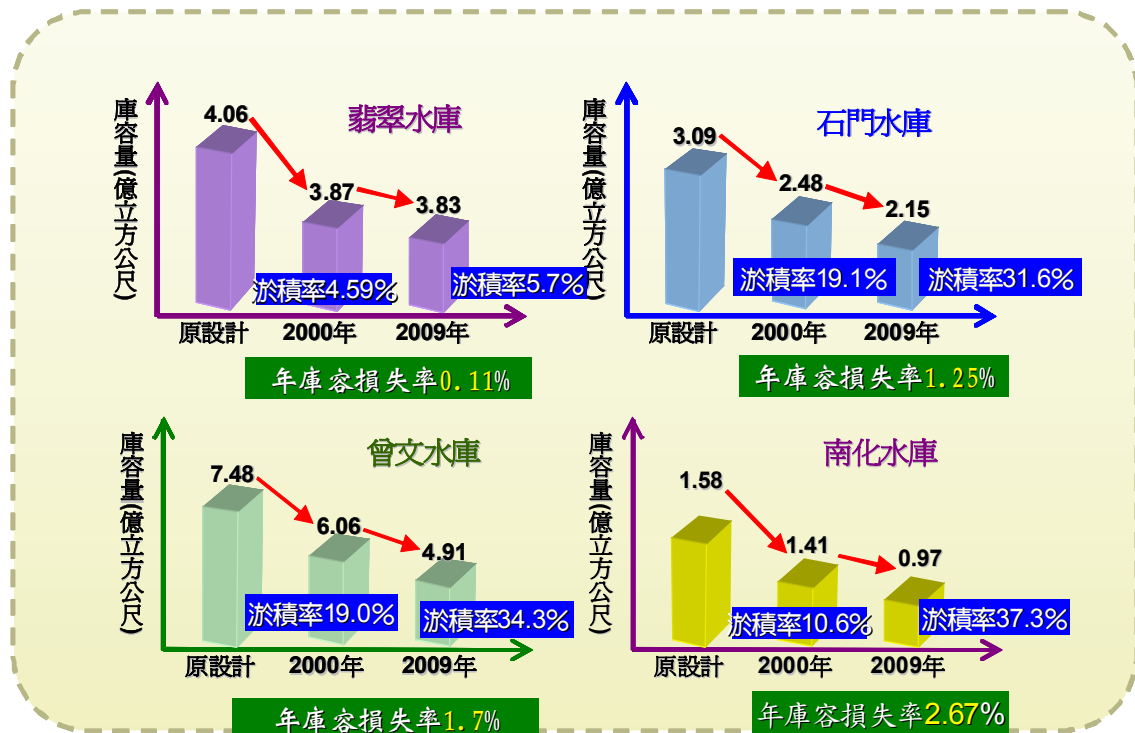
資源來源：[9]

圖 2.11 2000-2010 臺灣地區主要水災災情示意圖



資料來源：[8]，考量降雨分布、坡地災害警戒值、坡地歷史災害頻率，社會經濟脆弱度與人口暴露量等指標，深色代表風險相對較高。

圖 2.12 坡地災害風險地圖



資源來源：[9]

圖 2.13 臺灣主要水庫淤積概況

2. 海平面上升易導致沿海低窪地區排水困難

由於氣候變遷可能引致海平面常態性的上升，使得河川河口水位隨之抬升且感潮段增長，導致沿海低窪地區之排水系統因內外水頭差縮小，增加區域排水藉由重力排除之難度，並可能因內水不易排除而導致淹水災害發生，如圖 2.11 所示。

另外海平面上升也將造成國土因被淹沒而流失，根據氣候變遷國家通訊報告(2002)指出，當海平面上升 0.5 公尺時，臺灣將損失 105 平方公里的土地，有 1,237.6 平方公里的土地處於風險之中；如果海平面上升 1 公尺，將損失 272 平方公里的土地，1,246.2 平方公里的土地處於風險中。海平面的持續上升將衝擊沿海維生基礎設施等，而如果海平面上升，主要的淹沒區將為臺南縣、臺南市、嘉義縣及高雄縣等沿海鄉鎮，主要風險區則為臺南縣、雲林縣和嘉義縣等地。

國家災害防救科技中心根據聯合國環境規劃署 (UN/UNEP) (2005) 所提出的海岸脆弱度指標 (Coastal Vulnerability Index,

CVI)，考量海岸地區的人口密度 (PDI)、天然災害發生機率 (NDI)、森林覆蓋率 (FI)、地理暴露量 (Geographic Exposure) (GEI)、人類發展指標 (HDI)，共計算 118 個國家的海岸脆弱度 (CVI)，臺灣海岸脆弱度指數 (CVI) 為 0.517，分級屬於高等，全球排名第 16 名，是嚴重脆弱區域；若依據 UNEP 的方法分別計算臺灣本島沿海鄉鎮之脆弱度，並將之分級，如圖 2.14 所示，海岸脆弱地區主要分布在雲林、嘉義、臺南、高雄等縣市的海岸。

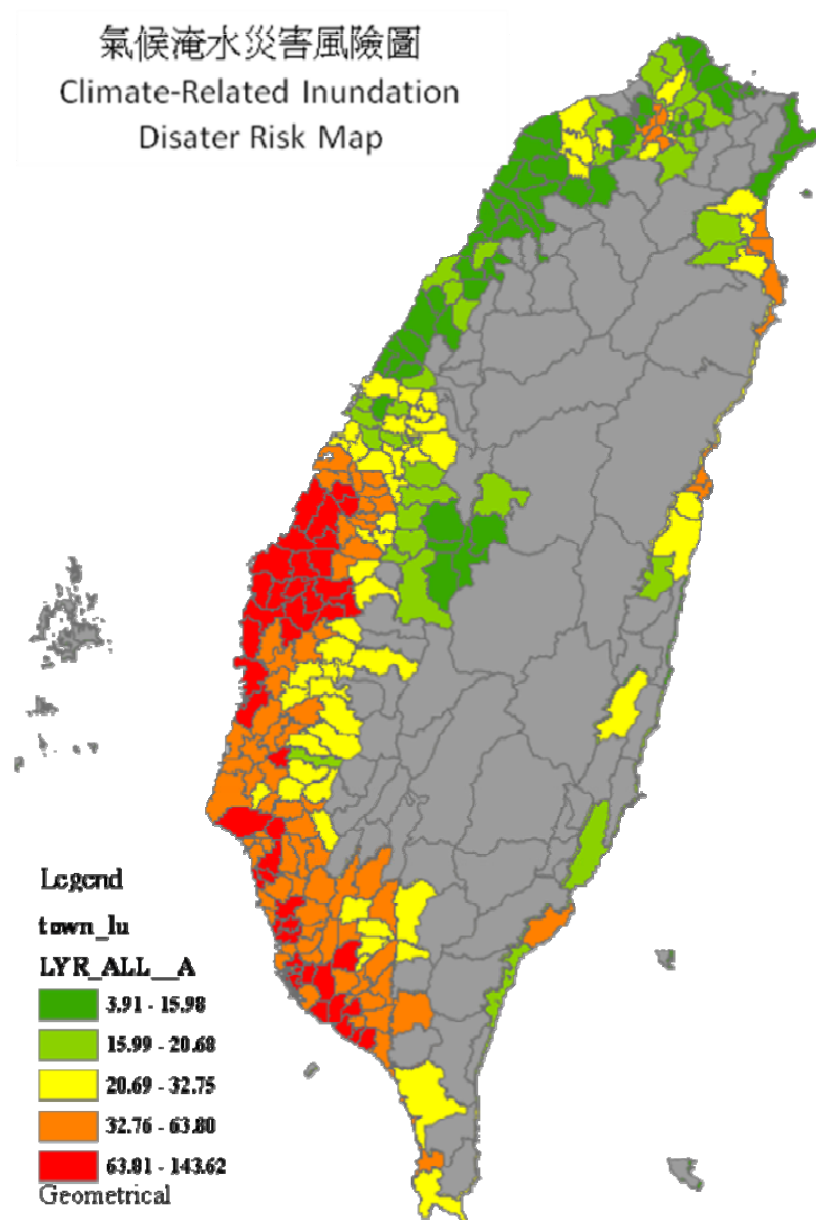


資料來源：[8]

圖 2.14 臺灣地區海岸脆弱度分級

3. 暴潮發生機率增加導致淹水機會與時間增加

由於氣候變遷可能因氣溫上升而加劇極端事件（例如颱風事件）之強度，增加暴潮之高度與發生機率，由於暴潮一般是由颱風事件所引起，故常伴隨著暴雨事件的發生，致使河川洪流宣洩不易以及洪水水位上升，其洪水水位可能高於既有排水系統與防洪系統規劃抵禦之洪水水位高度，進而引發淹水災害，如圖 2.15 所示。



資料來源：[8]，數值愈高代表風險愈大。

圖 2.15 氣候淹水災害風險圖

4. 極端事件發生機率上升導致設施設計防護基準下降

氣候變遷將導致未來極端事件發生機率上升且更新了相關的統計資料量，造成原本防護設施的安全防護基準下降，例如當初設計時參考過去 30 年資料，所訂定之安全防護基準為 100 年重現期距，可能因未來極端事件發生機率增加，更新相關統計資料後，降低為 30 年重現期距。

2.4 未來臺灣氣候變遷推估、衝擊與挑戰

2.4.1 未來臺灣氣候變遷推估

以科學家認為未來世界最可能的發展情境（A1B¹）為例，運用 IPCC 多個全球氣候模式所模擬出的未來氣候變遷結果，進行臺灣地區的空間降尺度分析，以提高解析度與精確度，主要發現如下：

1. 以近地表氣溫變化而論，多數氣候模式所推估 21 世紀末臺灣地區的氣溫上升幅度，相對於 20 世紀末，將介於 2.0°C 至 3.0°C 之間，略小於全球平均值的上升幅度。在區域與季節方面，北臺灣較南臺灣的增溫幅度略高，春季較其他季節略低。
2. 在雨量推估方面，全球乾濕季越趨明顯的趨勢在 21 世紀將持續維持，臺灣北、中、南、東四個主要分區的未來冬季平均雨量多半都是減少的，約有一半的模式推估減少幅度介於-3%至-22%之間，南臺灣春季未來的平均雨量變化與冬季非常類似。未來夏季平均雨量變化，除了北臺灣以外，超過 3/4 的模式推估降水增加，約有一半的模式認為未來夏季平均雨量變化介於+2%至+26%之間。這種原本多雨期間的雨量增加，而少雨季節雨量減少的未來推估情境，是臺灣未來水資源調配之一大挑戰。

¹ 情境 A1B、B1、A2：A 與 B 代表未來的經濟是（A）以市場導向發展為重；抑或（B）以環境保護優先。數字 1 與 2 則分別表示未來的社會將（1）更朝全球化發展或（2）開始著重區域特性。因此 A1 代表未來經濟以市場導向發展且更全球化，其中 A1 又細分為三種次情境，主要是使用能源的不同，A1B 代表同時運用再生能源與石化燃料，發展比較平衡。

3. 在颱風方面，依據歷史觀測資料顯示西北太平洋颱風以及影響臺灣的颱風個數與強度，受年代際變化（inter-decadal variability）影響較大，直接受暖化影響之線性變化趨勢則不明顯。然而，根據大多數氣候模式推估，在暖化的氣候情境下，全球颱風個數偏少的機率偏高，但颱風增強的機率與極端降雨的強度可能增加。

2.4.2 衝擊與挑戰

臺灣雖為美麗之島，然而由於本身的地理特性，氣候變遷脆弱度與災害風險遠高於其他地區，未來氣候變遷帶來的最大衝擊與挑戰就是原本常態性的災害，包括水災、土石流、旱災等，將會巨大化，很可能形成摧毀性的巨災，造成更嚴重的損害。若無法採取積極作為，在最短的時間內，克服巨災造成的破壞，將使得災期延長，巨災將轉變為複合性的災害，嚴重破壞原有的自然生態、人文社會結構，造成無可彌補的傷害。因此，我們必須嚴肅審視未來的衝擊與挑戰。

1. 總體衝擊與挑戰

氣候變遷的主要現象包括氣溫上升、降雨型態改變、極端天氣事件發生的強度與頻率升高以及海平面上升，可能造成的影響包括：乾旱、熱浪、暴雨、暴潮、土石流、颱風、生態變遷、土地使用與地表覆蓋改變、地層下陷、海水倒灌、空氣惡化、水質改變等。

(1) 氣溫上升與降雨型態改變

氣溫上升與降雨型態改變，對水資源供給面造成極大的衝擊和挑戰，因為氣候變遷會造成河川流量與地下水補注量改變，豐水期與枯水期的水量差異增加，使水庫供水能力下降，進而影響到水資源供應的穩定性。其亦會造成自然生態環境變遷、物種滅絕、生物多樣性下降、稀有性或局部分布的物種受到衝擊。再者，由於農業生產對於氣溫變化與水資源供給的穩定性非常敏感，故其亦會威脅糧食安全，加上臺灣依賴進口糧食的程度日益升高，糧食安全亦會因國外地區的農業受氣候變遷衝擊而受到連帶影

響。此外，氣溫上升會引發病媒散佈，升高傳染性疾病流行的可能；尤其在水資源供給不穩定的狀況下，可能使疫病發生的機率升高，加重公共衛生與醫療體系的負擔。降雨型態變化與氣溫升高也會引發產業經濟與能源供給的衝擊。例如降水量變化導致旱災或洪澇災害，造成產業的嚴重損失，或因氣溫上升導致空調系統裝置與操作成本及節約能源投資增加，以及極端天氣事件威脅位於地質災害敏感地區及洪泛區範圍內的電力、油氣供應設施之安全度，而影響能源供給的穩定性。

(2) 極端天氣事件發生的強度與頻率升高

氣候變遷造成極端天氣事件發生的機率與強度升高，一方面，使颱風、暴雨引發的洪患與山坡地的地質災害更為頻繁，另一方面，中小雨減少使得旱災機率提高。臺灣原本就易受颱風、暴雨襲擊，又因地形因素與地質脆弱，山區地質不穩定，經常發生山坡地地質災害如土石崩落、土石流、地滑等現象；在平原與沿海地勢低窪地區則易發生淹水問題。而過去不當的發展型態所導致土地資源超限使用，減少透水與蓄水面積等問題，使天然災害發生時，損害程度升高。另外，各種災害發生時，經常會破壞「維生基礎設施」，包含：輸油、輸電、輸氣（瓦斯）、供水、電廠、自來水、交通道路系統等，都可能會受到相當程度的衝擊，使災後復原的困難性升高，生命財產的損害程度也升高。

(3) 海平面上升

全球升溫，冰山溶解會引起海平面上升，導致海岸土地淹沒、海岸侵蝕及海岸線後退，造成國土流失。海平面上升使沿海地區受海水入侵或暴潮的威脅升高，沿海地區居民與產業發展往地勢高處遷徙。由於海平面上升引發的海水入侵及海岸災害，與沿海土地資源使用有密切關係，使得沿海與低窪地區之土地使用型態必須調整，尤其是重要港口、工業區、聚落等。此外，氣溫上升、海水入侵、災害威脅、水資源短缺等衝擊，都將成為臺灣

城鄉發展與運作的重要限制。因此，土地使用規劃與發展的模式亦必須加以調整才能因應發展的需要。

總體而言，臺灣未來應依據各調適領域的衝擊與挑戰，擬定因應調適策略，以降低常態性災害釀成巨災的可能性，最重要的做法，就是設法減少常態性災害的影響，並積極處理災害造成的損害，避免因災害時間延長，而釀成更具破壞性的複合性巨災。此外，亦應設法保全適度的能量，才能因應未知的挑戰。

2. 交通系統的衝擊

有關氣候變遷對臺灣地區交通系統之可能衝擊，茲以公路、鐵路、港口及機場等4個系統簡要分析如下：

(1) 公路

山區公路建設多沿河谷開鑿構築，在暴雨作用下，容易受到邊坡滑動崩塌的威脅；亦常因河谷沖蝕加劇而危及道路路基，造成公路系統中斷。若河川上游發生洪水、土石流等災害，則沖刷裸露基礎之橋梁，極容易因後續的地震而傾倒斷裂，下游橋梁的橋墩、橋面也易遭洪水、土石流沖毀或掩埋。

(2) 鐵路

鐵路系統因降雨與強風增強，平原低窪地區容易造成淹水，山區易受到邊坡滑動崩塌的威脅，而河谷沖蝕加劇也會危及鐵軌路基，造成鐵路系統中斷。

(3) 港口

隨著地球暖化造成海平面上升，與變異度極端化造成颱風波浪增大，將會影響港灣構造物的結構安全，並增加港灣淤積，進而影響港埠營運作業，導致海運運輸中斷。

(4) 機場

在極端降雨的侵襲下，若是區域排水無法負荷暴雨雨量，將造成機場跑道淹水，影響班機起降。另外，在暴雨侵襲下，也會破壞機場設施，如場站、跑道等。

2.5 小結

對照前述整理的研究結果，不難發現臺灣和全球與東亞地區的氣候在溫度變化方面特徵相當一致，不論是 100 年、50 年、30 年氣溫都是上升的，1980 年代以後更明顯的暖化趨勢。臺灣 30 年的變化以冬季的增溫幅度大於其他三季，和東亞冬季季風呈減弱趨勢的現象相當一致。東亞冬季季風偏弱也可能是導致臺灣在 1985 年之後寒潮明顯偏少的原因。東亞夏季季風的減弱或是西北太平洋副熱帶高壓脊自 1970 年代後期以來的增強，都可使臺灣的高溫日數增多。季風的變化除了對溫度有影響之外，也可能是造成臺灣強風（颱風除外）日數減少的原因。

在雨量變化方面，不論是臺灣或是東亞和全球得到的分析結果都比較紛雜，乃因降雨的影響因素甚多，並且觀測資料的時間長度和空間密度都還相當不足，但是臺灣降雨日數減少的現象非常明顯，值得注意。另一方面，大豪雨日數在近 50 年和近 30 年卻明顯增多，並有 50~60 年尺度的長週期年代際變化現象。由於無論檢視過去氣候變化或推估未來氣候變遷趨勢都需考慮年代際的影響，IPCC 已經將年代預報納為重要的研究方向，並將於第五次評估報告首次提出初步研究成果，臺灣地區極端降雨和全球氣候的關係必須朝此方向繼續進行研究。

「臺灣氣候變遷科學報告 2011」歸納臺灣過去百年的氣候變遷重要現象包括：

1. 降雨方面

- (1) 年均總降雨日數呈現明顯下降趨勢。
- (2) 年總雨量在北、東部呈現增加，南部呈現減少，且全島平均雨量近 30 年在夏季呈顯著上升趨勢。
- (3) 小雨日數有大幅減少趨勢。

(4)以日雨量達 50mm 做為大雨標準，臺北大雨日數出現顯著增加趨勢，顯示臺北降雨強度的百年變化有增強趨勢。

2. 溫度方面

(1)百年間上升 1.4°C （增溫速度為 $0.14^{\circ}\text{C}/10$ 年），近 30 年增溫速度明顯加快，增溫速度為 $0.29^{\circ}\text{C}/10$ 年，約為百年趨勢值的 2 倍。

(2)近 30 年西岸測站增溫趨勢明顯高於東岸。

(3)四季氣溫均呈增暖現象。其中，百年變化以秋季的暖化幅度最大，但近 30 年則以冬季的增溫幅度大於其他三季。

3. 極端事件方面

(1)極端高溫日數百年變化呈現增加趨勢。其中，臺北測站增加幅度最大，每 10 年增加 1.4 天。

(2)極端低溫日數 100 年、50 年、30 年之線性變化均呈下降趨勢。其中，1985 年之後寒潮事件呈現明顯偏少現象。

(3)北部氣象乾旱漸趨緩和，中、南部則有嚴重旱化趨勢。

(4)1966 年之後日降雨量的極端值有增加之趨勢。其中，伴隨颱風的極端降雨，3~24 小時延時的暴雨事件在 2000~2006 年之發生頻率明顯高於 1970~1999 年每 10 年期間之統計量。另極端降雨事件在西部沒有增加趨勢，但北部與東部則有增加趨勢。

(5)1990 年以後的颱風個數和 1961~1989 年相比有增多的現象，且在 2000 年出現明顯增加轉折。另受到熱帶太平洋海溫升高及太平洋高壓勢力向西延展之影響，2000 年之後侵臺颱風路徑有偏向西北象限之現象。

由於分析氣候變遷需要長時間觀測（常以百年計），其影響因素甚多，現階段觀測資料的時間長度與空間密度尚不足夠，再上部分氣候因子需考慮年代際之週期性變化影響，因此 IPCC 已將年代預報納為重要研究方向並將於第五次評估報告提出研究成果。

至於氣候變遷對臺灣地區交通系統之可能衝擊主要有：

(1)公路

在暴雨作用下，沿河谷開鑿構築之山區公路容易受到邊坡滑動崩塌的威脅，而河谷沖蝕加劇將危及道路路基，造成公路系統中斷。另一方面，河川上游因洪水、土石流等災害沖刷裸露基礎之橋梁，極容易因後續的地震而傾倒斷裂，下游橋梁的橋墩、橋面則易遭洪水、土石流沖毀或掩埋。

(2) 鐵路

因降雨增強，平原低窪地區容易造成淹水，山區易受到邊坡滑動崩塌的威脅，而河谷沖蝕加劇也會危及鐵軌路基，造成鐵路系統中斷。

(3) 港口

隨著海平面上升與變異度極端化造成颱風波浪增大，將會影響港灣構造物的結構安全，並增加港灣淤積，進而影響港埠營運作業，導致海運運輸中斷。

(4) 機場

在極端降雨的侵襲下，若區域排水無法負荷暴雨雨量，將造成機場跑道淹水，影響班機起降，而場站、跑道等機場設施亦可能因此遭受破壞。

第三章 交通設施氣候變遷調適策略探討

3.1 交通設施氣候變遷調適總目標

交通系統為國家重要維生基礎設施，亦是國家防救災體系之一環，因此交通設施進行氣候變遷調適時，最主要涉及的領域應包含「維生基礎設施」與「災害」等兩個領域，而依據行政院 101 年 6 月 25 日核定之「國家氣候變遷調適政策綱領」，「維生基礎設施」與「災害」兩領域之調適總目標整理如表 3-1 所示。

表 3-1 我國「維生基礎設施」與「災害」領域之調適總目標

調適領域	維生基礎設施領域	災害領域
總目標	提升維生基礎設施在氣候變遷下之調適能力，以維持其應有之運作功能並減少對社會經濟之衝擊。	經由災害風險評估與綜合調適政策推動，降低氣候變遷所導致之災害風險，強化整體防災避災之調適能力。

資料來源：[1]。

交通設施的主要功能在提供人與貨物的各項運輸服務，本研究遵循上表兩領域之調適總目標的精神與意涵，將交通設施氣候變遷調適總目標訂為：「經由災害風險評估與綜合調適政策推動，降低交通設施在氣候變遷下之之災害風險並強化整體調適能力，以維持其應有之運作功能並減少對社會經濟之衝擊。」

為進一步瞭解交通設施面對氣候變遷應有之調適策略，本研究整併並轉化「維生基礎設施」與「災害」等兩個領域之氣候變遷調適策略如后。

3.2 交通設施氣候變遷調適策略

氣候變遷影響下之交通設施的調適策略及方法，並非僅用增加硬體措施強度來抵抗為唯一的方法，而是擬定一套精心策劃、軟硬兼施之全方位、可執行及可適時調整的具體方案。其中，為能有效分配國家資源來提高交通設施抵抗氣候變遷的能力，並且分期程及分範圍地逐步針對各項交通設施進行調適，除了持續關注臺灣未來氣候變遷最新推估的結果之外，亦應針對國內社會經濟的最新發展進行完整的資料蒐集與分析，以確保有關的調適策略可符合氣候變遷調適的需要。

綜合來說，交通設施在氣候變遷下之調適策略的主要核心思維就是「提升設施對災害作用之預測能力及加強其抵抗衝擊之能力」。至於各調適策略與分項目標說明如后：

策略一：落實與檢討修訂既有法令與相關規範，檢視與評估現有重大交通設施之脆弱度與防護能力，並強化災害防護計畫。

目 標：提升及強化交通設施之基本抗災能力

因應氣候變遷後的外力改變，既有交通設施之設計與抗災規範標準亦可能有所不足，實有必要加以檢視後作成必要之修訂。而在檢視過程中，至少應以歷史上曾發生之最嚴重的事件可能再發生的假設條件，來檢核其抗災能力。

對於現有未達使用年限之結構物而言，則須以診斷與補強的手段來強化其抗災能力，然而考量其使用年限較短，補強後之抗災標準可容許低於新建結構物之要求。

面對氣候變遷之外力難以利用工程手段加以避免時，則需思考以減災的手段因應，例如將受災風險較高的居民或設施遷移至其他地點，或是劃設滯洪池等，有時便為必要之選項。但此種遷移的作法因為往往牽涉諸多土地問題，同時也極有可能所進行的工程設計考量難以沿循往例，甚至在短期

內不一定可以彰顯其成效者，因此必須藉由立法程序建立其法源。

此外，考量既有法令與相關規範之落實與修訂常會涉及跨機關、跨部會單位之協調整合，因此宜有常設組織定期針對相關法令與規範作全面檢視。

策略二：推動氣候變遷災害風險調查與評估、高災害風險地區與潛在危險地區之劃設，並且建立設施安全性風險評估機制及生命損失衝擊分析模式。

目 標：確保設施損害及人員傷亡可降至最低

交通設施主管部門應建立對於交通設施之可靠度及風險分析之能力，並且研訂相關評估指標以作為決策之量化依據，同時滾動式檢討所建立各項指標之代表性。相關具體作法如：

- (1) 推動氣候變遷之災害衝擊跨領域整合應用研究。
- (2) 氣候變遷之複合型災害脆弱度與極端災害規模之推估。
- (3) 調查與劃設國土潛在危險地區，評估氣候變遷衝擊之高災害風險區與脆弱地點。

進行風險評估時應將災後導致環境脆弱度增加一併納入考量，並確定致災原因及是否為重覆致災區，如屬重覆致災區，應審慎檢討治理策略、工法、材料及構造物配置後再行辦理，以降低災區再次受損風險。

策略三：加速國土監測資源與災害預警資訊系統之整合及平台建立，並且擬定及落實交通設施分等級之開發與復建原則。

目 標：落實國土開發及復育最佳化使用原則

交通設施分等級開發與復建之意義，係指各項交通建設應尊重及順應自然，以資源保護與災害防治為前提，配合國

土保育及復育，不一味強調新闢道路，而是因地制宜地加強路面排水設施改善、維持邊坡穩定及路面修補整建，以維持路基之完整與暢通，確保用路人安全。因此，除了加強辦理國土監測與強化現有監測資源整合外，亦需加速推動災害預警科技整合，強化災害模擬與預警，以作為減災、防災、預警、土地管理之決策依據。

對因天然災害受損而需復建的交通設施工程而言，復建工程之等級大致可分為三級：針對重要之交通設施，應將受損之設施達到原功能完全恢復者，歸之為甲類；對於重要性等級次之的對象，則不要求百分之百恢復原功能，可以部分原功能修復為目的，歸之為乙類；至於為維持少數村落及居民必須維生基本物資運送之目的，可以簡易修復方式進行，則歸之為丙類。

策略四：落實交通設施維修養護，提升基本抗災及耐災之能力。

目 標：兼顧交通設施抗災能力及使用生命週期

面對極端氣候變遷之極大外力作用，超越既有交通設施的設計標準，因而必須進行適當之診斷評估與維修補強，以提升其抵抗衝擊的能力。各級政府與交通設施主管機關必須依法彙措編列、申請爭取費用來進行調適。因此必須藉由立法程序建立其法源及合理之分配機制，以可有足夠之經費預算辦理，並進行執行績效之追蹤考核，始有可能順利推動，進而獲致良好的成效。

策略五：推動流域綜合治理，加強各管理機關間協調機制，以及與產業、學術界資源之整合，以降低氣候風險。

目 標：整合跨領域資源以提升系統整體調適效率

為因應交通設施管理所涉及不同權責單位，及各級政府

間之界面整合問題，應建立明確之交通設施安全管理機制（包括各級政府分工、中央裁量機制、交通主管機關與河川主管機關協商合作裁量機制等），並與視需要依河系為原則所成立之管理單位及集水區治理單位協調，務使交通與水土、林務及河川管理單位協調合作，落實山、河、路、橋共治。此外，若能將民間之產、學能量予以納入亦能發揮相當可觀的效果。相關具體作法如：

- (1)研究流域綜合治理災害脆弱度評估方法與流程、流域防護能力檢討與評估，以及高致災風險區位及其調適能力的評估。
- (2)以流域為單元，整合水、土、林等資源之保育使用及復育，落實還地於海、還地於河之理念，優先推動流域綜合治理示範區計畫。
- (3)掌握山崩、土石流、流域土砂、海岸侵蝕間之互動關係，推動流域土砂管理與回收處理。
- (4)推動流域治理事務協調與制度建立，短期建立協調機制，整合流域整體治理工作，長期透過組織再造，建立單一專責單位負責流域整體治理工作。

策略六：提升交通設施營運維護管理人力素質及技術，並且推動氣候變遷衝擊與危險地區資訊公開、宣導、預警、防災、避災之教育與演習。

目 標：構建並提升完整之調適人力與技術能量

全面因應氣候變遷需要工程人員與民眾的共同參與。在工程人員方面，應以新思維來面對此一挑戰，瞭解所將面臨之課題內容，並學習適當有效之防治因應對策，其中也包括訂定緊急應變措施。對於經檢討若現有工程方法暫無法克服，則採軟性防災措施因應，例如辦理疏散避難規劃及演

練、建立避難場所等，以使在災害中之損傷可降至最低限度。

在民眾方面，則是需要同時擴大進行教育宣導，以使其理解與感受氣候變遷所可能帶來之影響程度將會較以往更為強烈，故非舊有之因應措施所能應付，一方面使其做好更週全的防災應變準備，另一方面也令其配合政府部門之相關政策推行。此外，為可有效診斷交通設施在極端氣候作用下之損傷劣化情形，應建立檢測評估人員的訓練及資格授證的體制。相關具體作法如：

- (1)擬訂極端災害衝擊與災害風險分散之因應對策，規劃與確定防救災政策與體系，並強化地方與社區因應極端天氣事件之防災調適能力。
- (2)加強氣候變遷防災教育、災害資訊流通、民眾參與及風險溝通。
- (3)研究透過保險機制強化災害預防及救助。
- (4)檢討訂定土石流、堰塞湖之警戒值、範圍及發布警戒時間，並擴大、強化土石流防災專業與水情通報系統，以降低災風險。
- (5)強化災防軟硬體之專業人力與資源，建立災害撤離標準化流程，研究建立分級撤離機制；增進各級災害應變中心機制之專業能力，達到自主性防救災及強制撤離效益提升之目標。

策略七：建置交通設施營運管理資料庫並強化監測作業。

目 標：建立全方位且可即時流通之資訊平台及支援系統

調適對策應採軟體防災與硬體災害防治並重方式，各交通設施必須先對各項可能災害問題進行詳實之調查，建立完整之資料庫內容，同時建立跨領域間之資訊交流平台，以期能將各種災害之可能危害程度與範圍做出合理的推估。

各交通設施皆應建立維護管理系統，並加強其資料庫之內容可作為災害防治及救災應變之用，同時需具有持續更新之機制。由於氣候變遷後的自然條件已超出舊有歷史紀錄，顯示交通設施將面臨前所未有的挑戰，為瞭解交通設施在未知的氣候條件下之抗災行為表現，或探討新技術之適用情形，以檢視修訂規範之標準設定，應以監測的作業方式收集完整資料，並開發整體網絡型之監測系統，以達到防災預警管理的效果，確保人民生命財產安全。

策略八：研發交通設施之氣候變遷調適新技術。

目 標：提升交通設施調適之彈性、能力及機會

無論在「強化」與「減災」此二概念，就工程角度而言，皆難以僅由既有之工法、理念、規範架構即能達成，因此為因應前述之規範修訂與舊有結構物損傷、診斷、補強作業需要，實有賴調適新技術之研發，以於氣候變遷後所形成之新環境中，建設更為耐洪、耐澇、耐旱、耐強風之交通設施。

為強化我國交通設施氣候變遷調適之新技術能力，政府應投資人力與經費於國外新技術之交流與移轉，並整合國內各研發單位相關技術。

第四章 國、內外氣候變遷調適與脆弱度評估文獻回顧與分析

本章將分別針對國內外有關氣候變遷脆弱度、氣候調適架構及因應氣候變遷之調適策略等進行文獻回顧。相關內容說明如后。

4.1 脆弱度之定義

因應氣候變遷之「調適 (adaptation)」係指為了因應實際或預期的氣候衝擊或影響，而在自然或人類系統所做的調整，以減輕危害或發展有利的機會。調適的目的在於降低人類與自然系統處於氣候變遷影響與效應下的「脆弱度 (vulnerability)」，使得人類與自然系統在極端天氣事件與暖化效應下的負面衝擊最小，且配合氣候變化的獲益能夠最大。

然而，世界各國對於氣候變遷下之「脆弱度」的定義不盡相同，目前最普遍受到認同的概念大致是依據 IPCC 2001 年「第三次氣候變遷評估報告 (AR3)」^[3]及 2007 年「第四次氣候變遷評估報告 (AR4)」^[4]專有名詞之定義，分別為：

「系統無法完全調適氣候變遷之變化，因而受到此變化帶來之負面效應傷害。」(AR3)

「脆弱度為某個系統受氣候變遷（包括氣候的變異性及極端情況）負面影響及無法因應的程度。脆弱度與該系統暴露所在之氣候變化的特性、強度及頻率，以及系統本身之敏感度及調適能力有關。」(AR4)

根據 IPCC 之定義，「脆弱度」係指在某種程度之外力影響下，系統發生預期不利影響的整體估量結果，而這樣的定義也代表在全球氣

候變遷研究素有名聲之人士的共識想法。在這個想法中，脆弱度共包括外部面向與內部面向兩個部分，前述系統曝露於氣候變化的情形即屬於外部面向的部分，而系統面對這些外力的敏感度及調適能力即屬於內部面向的部分。值得一提的是，IPCC 對於脆弱度的定義可能被廣義地視為是針對人為引起之氣候變遷的整體脆弱度。

此外，IPCC 於第四次評估報告（AR4）之第二工作小組報告執行摘要（Executive Summary）提到：「氣候變遷下的脆弱度是用來描述系統受到有害的衝擊影響並且無法處理有害衝擊的程度等級；至於風險的概念，則是結合了衝擊發生的機率值、氣候變遷所造成的不確定性、暴露程度以及調適能力」；另於第二工作小組報告第 19 章第 1 小節中則提到：「脆弱度一詞係指脆弱的系統本身，例如低窪島嶼或海濱城市；或指對這些系統的衝擊，如海濱城市以及農業用地受到洪水災害而被迫遷徙；或係指導致這些衝擊的機制，例如海平面的上升是因為南極西部冰帽的消融。」

至於「選擇關鍵脆弱度的條件（Criteria for selecting “key” vulnerabilities）」，在第二工作小組報告第 19 章第 2 小節中，共提出下列 7 項：

1. 衝擊的強度

強烈的衝擊通常會被認定是為關鍵的脆弱度，而衝擊的強度則由該衝擊的規模（如面積或是受影響的人數）、強度（例如致災的等級）來判斷。

2. 衝擊的時間

當某一項有害的衝擊是預期於近期內發生，則該衝擊相較於遠期發生的衝擊來說，是較關鍵的脆弱度。

3. 持續性與可逆性

當某一項有害的衝擊是持續且不可逆時，通常會被認定是為關鍵的脆弱度。

4. 可能性與信賴性

當某一衝擊是為高度可能發生的，則該衝擊較傾向被定義為關鍵

的脆弱度。例如風險被定義為「結果（衝擊）」乘以（×）「發生可能（機率）」，愈高的發生衝擊機率會造成愈高的風險，而該衝擊則為關鍵的脆弱度。

5. 潛在的調適能力

進行氣候變遷所造成的潛在傷害評估時，必需考慮個人、群體、社會和自然的適應或改善有害衝擊的能力，其有效調適的可行性愈低，則該項有害的衝擊愈容易被描述為關鍵的脆弱度。

6. 分佈

當衝擊與脆弱度具有高度空間上的變異性時，通常也被認定是為關鍵的脆弱度。

7. 脆弱系統的重要性

一個脆弱系統的重要性或是該系統的價值，是主觀認定為關鍵脆弱度的顯著條件，例如有多種瀕臨絕種生物的棲地是具有較關鍵的脆弱度，或者是一個上游的積雪區若供應融雪於下游眾多人口使用，則該積雪區也具有較關鍵的脆弱度。

綜整 IPCC 提出相關脆弱度說明描述，脆弱度（Vulnerability）可以視為「衝擊（Impact）」、「發生機率（Probability）」、「調適能力（Adaptive Capacity）」、「敏感度（Sensitivity）」、「暴露度（Exposure）」之綜合函數，即：

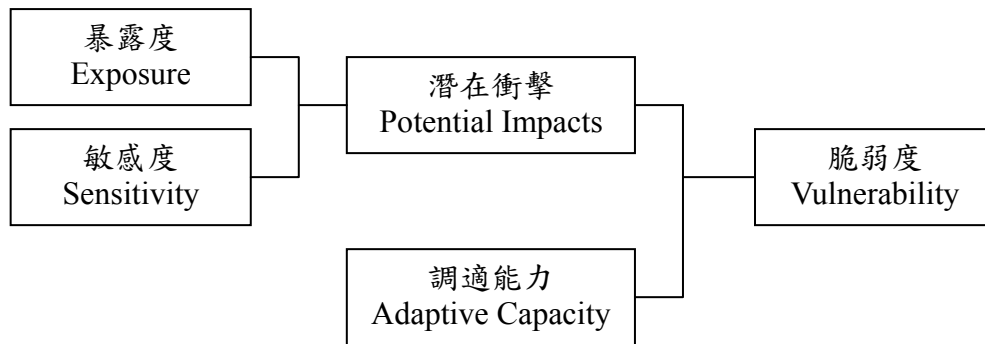
$$\text{Vulnerability} = f(\text{Impact, Probability, Adaptive Capacity, Sensitivity, Exposure})$$

或者是暴露度、敏感度及調適能力的綜合函數，如：

$$\text{Vulnerability} = f(\text{Exposure, Sensitivity, Adaptive Capacity})$$

圖 4.1 即為脆弱度各面向之關係架構圖，各架構組成亦代表評估氣候變遷脆弱度所需包括之主要工作，包括：評估各領域之氣候變遷暴露程度、評估特定領域對氣候變遷的敏感性、分析該領域之氣候變

遷潛在衝擊，以及該領域容納或因應氣候變遷衝擊的能力等。



資料來源：[10]

圖 4.1 脆弱度各面向之關係架構圖

交通部於 101 年 9 月彙整函送經建會之「國家氣候變遷調適行動方案（2012-2017）（草案）-維生基礎設施領域」^[11]中已參酌相關部會署之意見納入上述類似的概念，並且進一步說明暴露度、敏感度及調適能力如下：

1. 暴露度（exposure）

指設施或系統受氣候變遷直接影響的範圍。若為整體設施或系統受影響，則為高暴露度；部分受影響則為中暴露度；不直接受影響則為低暴露度。

2. 敏感度（sensitivity）

設施或系統損壞導致重要單位如國際機場、科學園區、政治及軍事等重要指揮中心、緊急應變中心等運作受影響。若導致設施或系統無法運作則為高敏感度、維持最低限度之運作則為中敏感度、可持續運作則為低敏感度。敏感度在某些情況下亦代表該設施/系統之重要性。

3. 調適能力（adaptive capacity）

設施或系統抵禦、承受及容納衝擊及復原的能力。設施或系統得以及時復原則為高適應力、需一段時間始可復原則為中適應力、無法快速復原則為低適應力。

4.2 國外氣候變遷調適與脆弱度評估

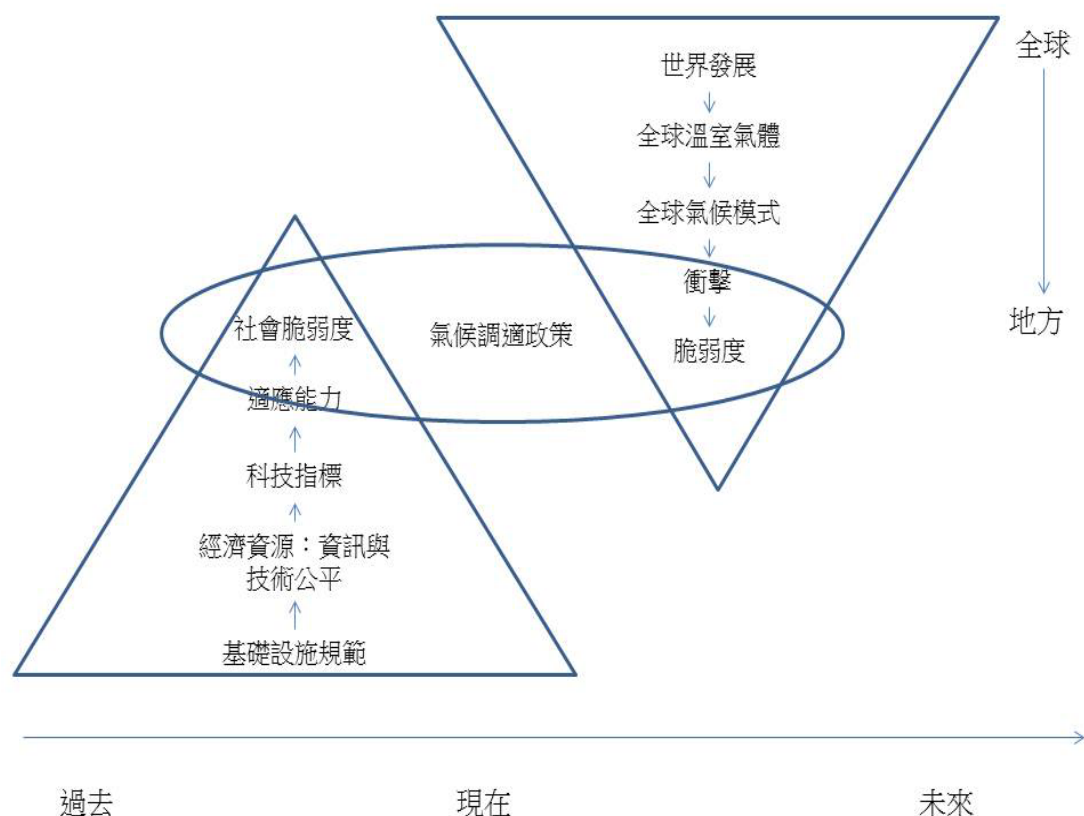
1. 聯合國氣候變化綱要公約（UNFCCC）之氣候變遷脆弱度與調適架構^[12]

此一架構指出進行脆弱性與調適評估，都必須選擇一個特定的或是相近的架構來評估，但是必需小心謹慎，以便瞭解所選擇的架構將會有什麼樣的產出，以及與其他評估方法間的差異。因為脆弱度與調適措施架構提供了一個檢視氣候變遷潛在衝擊與調適的結構，在評估脆弱度與調適措施前，不需特地去選定一個評估架構，而每一個架構代表著一個選擇的方法。

基本上，選擇一個評估脆弱度與調適措施的架構必需要符合下列幾點：

- (1) 會面臨的問題；
- (2) 誰會面臨這些問題；
- (3) 需要什麼樣的解答；
- (4) 資源限制因素；
- (5) 時間限制因素。

UNFCCC 指出評估脆弱度與調適措施的架構有兩種：分別是衝擊型與調適型。衝擊型有時會參考「第一代」或是「由上而下」架構模式，主要是有助於了解氣候變遷長期的潛在衝擊；而調適型的，則是參考「第二代」或是「由下而上」架構模式，是用來探討調適措施與利益相關者之關係。圖 4.2 顯示了這兩種型式架構的不同。



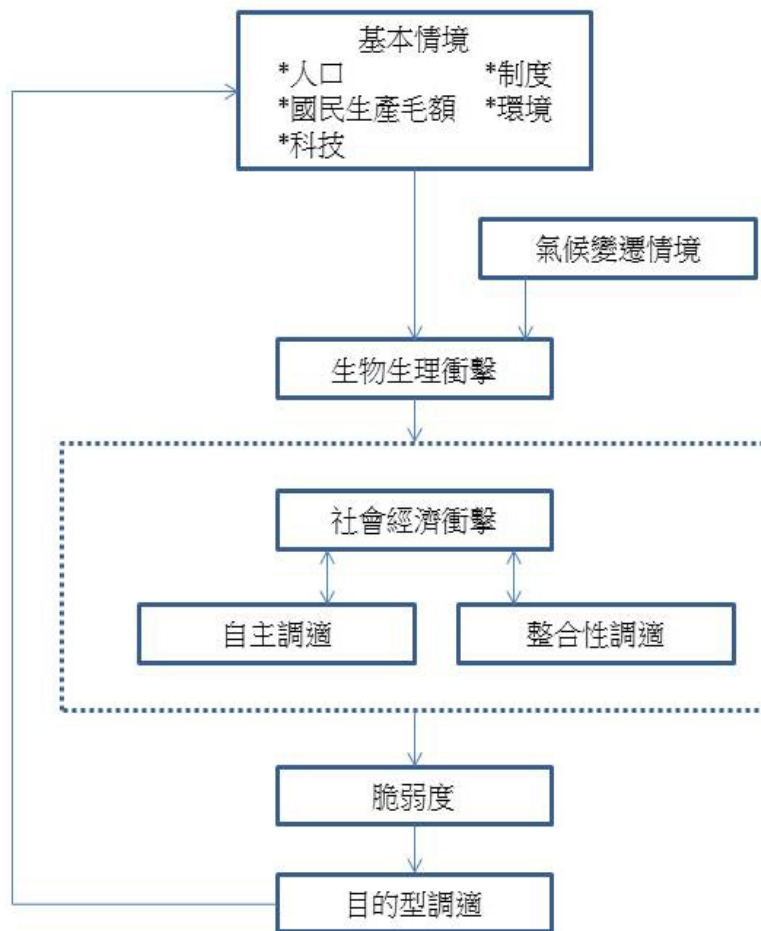
資料來源：[12]

圖 4.2 採用「由上而下」及「由下而上」方法評估脆弱度及調適措施

(1) 衝擊型架構

主要著重在評估氣候變遷所帶來的長期風險，衝擊型架構是著眼未來幾十年（通常指西元 2100 年以前），常被引用的氣候變遷情境。

圖 4.3 顯示衝擊型架構中主要的內涵：首先是社會與經濟與環境的基本情境，就如同研究團隊已設定的氣候變遷情境必須一致，同時假設其他相關的變數也一致。舉例來說，人口較多國民生產毛額就較高，但不表示會有較高的個人所得，因此生物物理衝擊評估是必要的。由於衝擊是跨部門的議題，自主調適必須經過檢視及整合，因此依照這個架構，便可檢視相關調適措施。



資料來源： [12]

圖 4.3 衝擊型架構的內涵

以下舉出 1 個屬於衝擊型架構的例子，IPCC 的預測氣候變遷衝擊的程序：

- A. 定義問題；
- B. 選擇模式；
- C. 測試模式；
- D. 情境設定；
- E. 評估生物物理與社會經濟衝擊；
- F. 評估自主性調整；
- G. 評估調適策略。

(2) 調適型架構

調適型架構是最近這幾年才發展出來的，重點著重在相關利害關係人說明與提出調適措施。這個架構也提出一些目前備受矚目的焦點，像是氣候變遷所造成的脆弱度。

以下舉出 2 個調適型架構的例子：

① 聯合國開發計畫署調適政策架構（Adaptation Policy Framework, APF）^[13]

為輔助各國積極投入推動氣候變遷調適策略的制定與落實，聯合國開發計畫署（United Nations Development Programme, UNDP）提出一套調適政策架構，作為指引國家設計與執行各項降低脆弱度方案之依據。

UNDP APF 強調在相關利害關係人的說明，以及當前氣候所帶來的脆弱度，圖 4.4 說明架構的內涵。此一架構也包含有關調適計畫、利害關係人、脆弱度評估、現在與未來的氣候風險評估、社會經濟條件改變的評估、氣候變遷調適力的評估、調適策略制定，以及調適程序的技術文件。

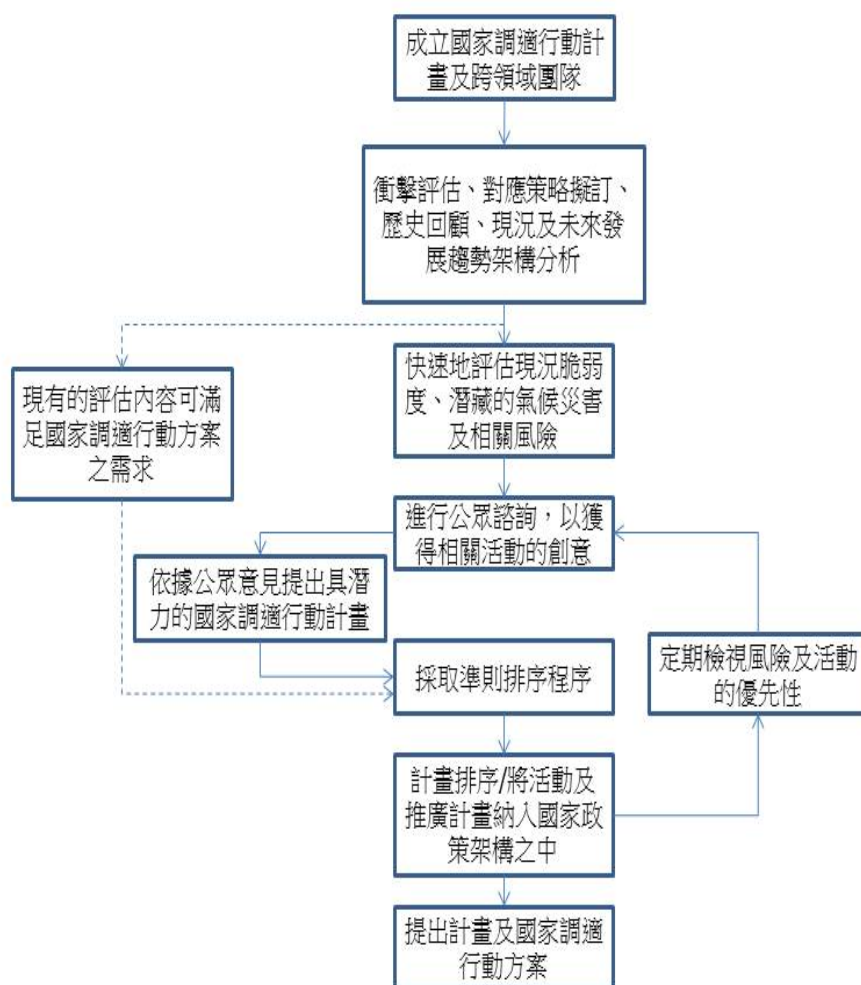


資料來源：^[13]

圖 4.4 聯合國開發計畫署調適政策架構

② NAPA 指引^[14]

2001 年 COP7 會議上啟動了「國家調適行動方案(National Adaptation Programmes of Action, NAPA)」流程，在由低度開發國家專家團隊(LEG)所完成的國家調適行動方案指導方針中，詳述了國家調適行動方案目標與架構。然而，國家調適行動方案的發展是一個相當快速的過程，因此不可能採用定量分析，但可以充份利用現有的研究成果。圖 4.5 即為 NAPA 的流程圖。



資料來源：^[14]

圖 4.5 國家調適行動方案流程

整體而言，上述兩種型式架構都著重在地方層級的脆弱度上，使得氣候變遷架構的脆弱度與回應分析(VARA)，對於地方層級因應氣候變遷的脆弱度與因應策略資訊的蒐集有很大的幫助。它加強了定

性分析方法，並進行更細部的分析（雖然它不需要這麼做），也包含了許多提示與連結，以便分析人員進行定量分析，而當資料來源不是那麼充份時，它也可進行分析。實務上，其主要重點將放在目前的現況上，意即短期計畫重於長期計畫，而使用這些方法的挑戰在於如何去調和短期和長期氣候變遷計畫。

UNFCCC 的這份文件指出以往氣候情境型式（衝擊型）及脆弱度型式的二分法架構已不再那麼適用，於是開始了解整合氣候預報，以及調適決策，比單純只用脆弱度基線來得重要。至於發展一個可以整合目前脆弱度與長期風險的架構將是未來的挑戰，理想的狀況是構建一個可以用來描述目前的脆弱度，亦能用來說明長期氣候變遷風險因子的架構。

2. 美國氣候變遷與極端氣候脆弱度評估架構

美國聯邦公路總署（Federal Highway Administration, FHWA）為要找出因應氣候變遷之重要考慮因素、問題及資源，以用於公路設計與實施氣候變遷脆弱度評估，於 2010 年起結合包括交通部、都會規劃局、以及其他有關運輸系統規劃、設計、營運、維修單位之經驗，透過先導計畫之測試與回饋，於 2012 年發表適用於美國的「氣候變遷與極端氣候脆弱度評估架構」^[15]，詳如圖 4.6 所示。

該架構由 3 個主要元素（階段）組成，包括：

(1) 範疇界定

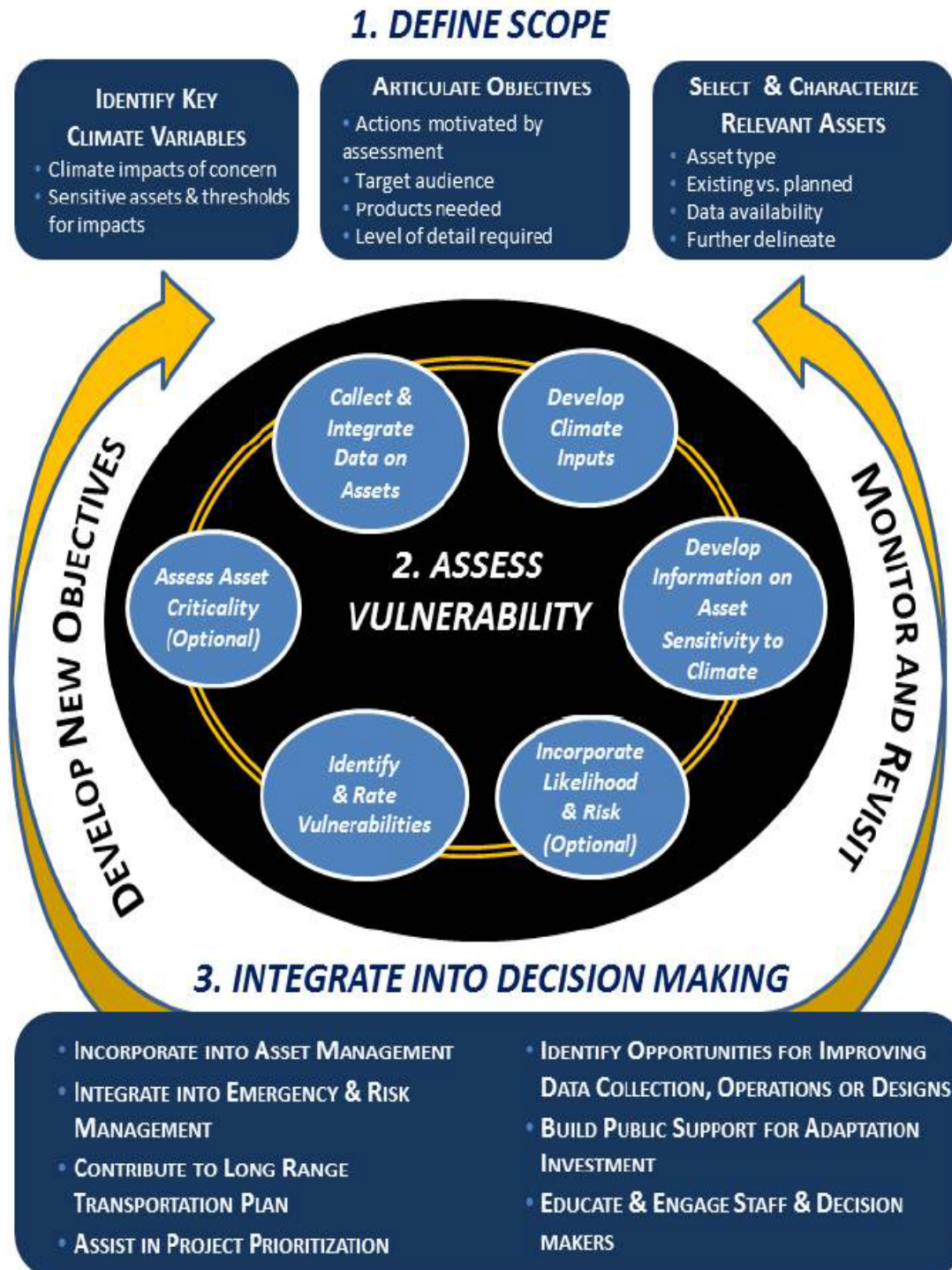
包括確認氣候關鍵變數、評估目標，以及挑選與掌握資產之相關資訊。

(2) 脆弱度評估

分析資產在氣候變遷衝擊下的風險評估，並以評估矩陣之方式，分析衝擊之可能性與嚴重性（各分成 5 級，如圖 4.7 所示），再進一步區分為高度風險（H）、中度風險（M）及低度風險（L）等 3 類的風險等級。

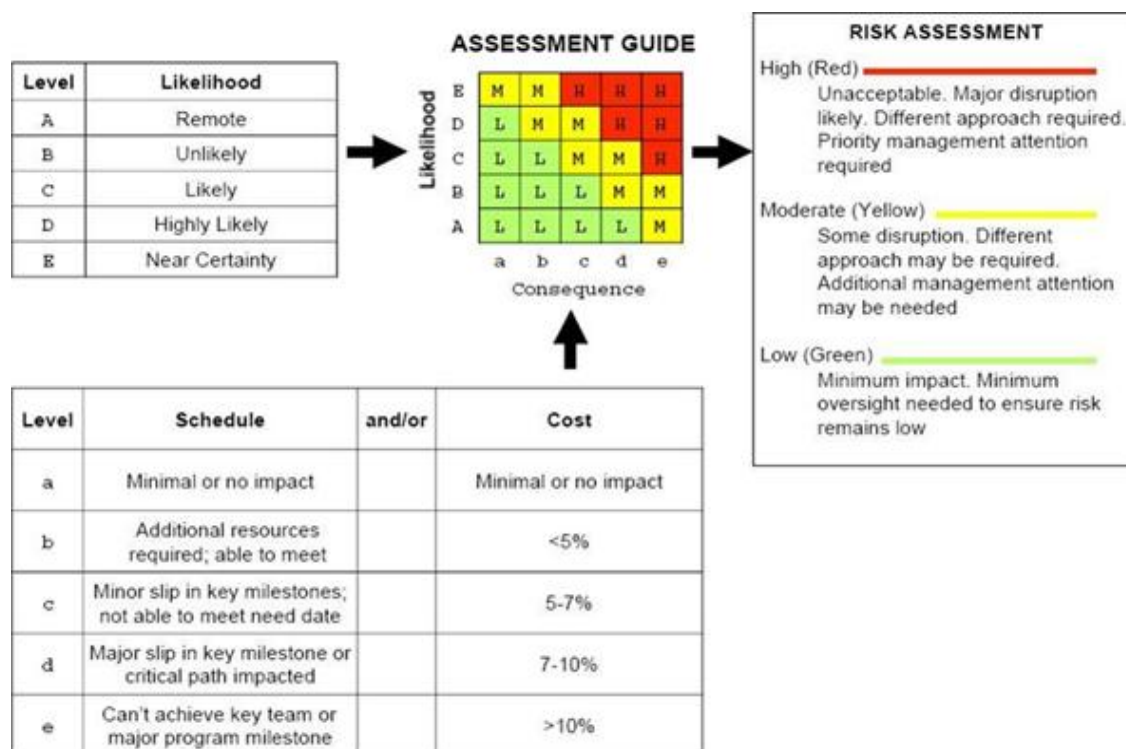
(3) 整合脆弱度至決策過程

將前項脆弱度分析之結果整合至決策過程中，進而尋求可以落實調適策略之執行計畫的有效方法，甚至是推動永續長期的回饋機制。



資料來源：[15]。

圖 4.6 美國氣候變遷與極端氣候脆弱度評估架構



資料來源：[16]。

圖 4.7 FHWA 脆弱度及風險評估矩陣

3. 英國 2012 氣候變遷風險評估-運輸部門^[17]

英國為因應氣候變遷，於 2008 年制定“氣候變遷法”（Climate Change Bill），並在 2012 年 1 月 25 日發表「英國氣候變遷風險評估報告（UKCCRA）」，分析了 11 個主要領域，列出 700 多項潛在的衝擊，而運輸部門相關之風險評估內容亦函括其中。

在英國受到低溫、強風、暴雨、大雪，以及冰封等天氣因子所帶來的災害遠比因高溫所帶來的災害來得頻繁。所以風險評估的工作必須在風險不斷增高的情境下，找出在整個運輸路網中那個環節是比較脆弱的。

(1) 議題範疇與風險評估項目

該評估報告中將運輸部門所面對的氣候風險界定為以下三大議題範疇：

- ① 極端暴風雨對運輸設施所帶來直接與相關的損害（尤其是暴雨及強風）。

- ② 極端暴風雨對運輸工具（如汽車、火車、航空器及船舶）所帶來直接損害（尤其是暴雨及強風）。可以採取預防性的關閉服務設施（包括公路、軌道及航線），以避免因暴風雨或停電所帶來的大範圍災害。
- ③ 逐漸改變的氣候對運輸系統帶來的間接損害，尤其是氣溫上升對客、貨及業者所帶來的損害。

氣候變遷也代表著潛在衝擊程度、影響時間及頻率的改變，以及對運輸營運衝擊的改變，其中與交通運輸有關之關鍵風險評估項目包括：

- ① Tier1: 洪患/交通延滯。
- ② Tier2: 山崩對道路路網的衝擊。
- ③ Tier4: 道路修復成本。
- ④ Tier5: 軌道變形之風險。
- ⑤ Tier6: 公路及軌道橋梁被沖毀。

以上這些風險評估項目的選擇係透過個別風險評分之方法而產生，選擇的程序包括評估各項風險發生時，對經濟、環境及社會所造成衝擊度。同時也進一步考量風險的急迫程度。

(2) 敏感度分析

不同運具對於天氣變化有其各自的敏感度，氣候變遷對各種運具的影響程度，只是較多或較少而已。而這些敏感度更是影響營運的關鍵因子，同時也是運輸部門風險管理很重要的一部分。

(3) 運輸部門與 CCRA 中所列其他部門之風險關聯

運輸部門與其他部門間有很高的依存度存在。例如商業部門就高度依賴運輸部門，一旦運輸路網受到阻斷，即造成重大影響。在評估報告的分析中，除了運輸部門外，還包括了其他 10 個部門，而每個部門或多或少都與運輸部門有關聯性。例如：

- ① 公路及鐵路遭受洪水的災害風險增加（洪水及海岸侵蝕部門）。
- ② 水源供給與需求，這攸關未來內河航運管理（水資源部門）。
- ③ 北極航線的開啟及其對全球船運的衝擊（海運部門）。

- ④ 外來物種的入侵對港口及船舶的影響（海運部門）。
- ⑤ 建築物、機場及場站過熱問題（建築及環境部門）。
- ⑥ 建築物下陷問題（建築及環境部門）。
- ⑦ 森林火災風險的轉變，可能影響公路及鐵路運輸（森林部門）。
- ⑧ 商業供應鏈因運輸系統崩壞所造成的損失（商業部門）。

除上述項目之外，其他未納入分析的跨部門衝擊還包括：

- ① 其他運輸基礎設施所遭受的洪災。
- ② 農業及食物供給，尤其是易腐食物的運送，因運輸系統崩壞所受到的影響。
- ③ 因氣溫上升，人們使用運輸系統對健康所造成的影響。
- ④ 因運輸基礎設施、材料及運送遭受破壞所導致的保險、補償及理賠案件。
- ⑤ 因戶外活動盛行，如步行及自行車活動，使旅遊及運具潛在選擇行為改變，造成旅運需求增加的轉變。

4. 發展中城市建構氣候不侵的運輸系統架構與調適作為^[18]

此文件提及以往在規劃運輸系統時，都假設氣候條件是不會改變的，但這個假設已不再適用。如今，運輸規劃或營運階段皆需將現在及未來氣候變遷的因素納入考慮，這也意謂必須將一些新的工具納入運輸規劃之中，例如，地區性的氣候情境、脆弱度及風險評估，或是有關抵抗氣候侵害的指引等。尤其是運輸規劃模式中的假設均應再檢視及修正。例如，一些因氣候變遷導致易淹水地區，以往土地使用的假設條件將不再適用。

氣候變遷使得都市化過程及決策充滿許多不確定性，而健全的決策必需將所有與氣候變遷及社經等有關的情境納入考量。根據研究發現，在社會普遍有認知的情境下所做的決策，往往可以大幅減低脆弱度，例如避免在高風險區進行開發行為。

圖 4.8 為城市運輸系統發展調適策略的程序，以及如何整合至幾個重要的運輸規劃與決策程序之中。相關的程序說明如后：



資料來源： [18]。

圖 4.8 城市運輸調適策略發展架構

(1) 步驟 1：確認氣候變遷可能之衝擊

運輸規劃第一個步驟就是確認現有運輸系統的問題。運輸資料蒐集，就如社會及經濟發展的情境資料，均是為了確認運輸發展所需要。因此，運輸發展同時也需要將氣候變遷納入考量，並蒐集有關衝擊及脆弱度等資訊。

(2) 步驟 2：訂定目標及指標

運輸系統目標的界定與調適目標的界定可以同時進行。例如，氣候變遷可能對既有道路系統、設施或公共運輸造成衝擊，但運輸系統也必須能因應氣候的變化，例如面對極端的溫度或是強降雨時，能維持正常營運。

目標確認後，營運準則或指標也同時必須確定，以用來評估運輸發展及調適措施。

(3) 步驟 3：運輸之脆弱度與風險評估

在提出運輸相關計畫草案時，必先將預期不同氣候情境對計畫所帶來之衝擊予以評估。在這個階段也必須考慮到計畫草案

（或是替代方案）推動時溫室氣體的排放情形。另外儘可能在現有的研究基礎上，將氣候風險評估與政策環評或環境影響評估整合。

(4) 步驟 4：確認調適項目

基於運輸計畫的風險評估結果，可以進一步擬訂對應的調適措施，剛開始可以將所有可能之調適措施均納入。同時儘可能邀請多位專家共同參與，儘可能找出無悔的調適措施。

(5) 步驟 5：調適措施排序

為使有限的資源發揮最大效用，必須將可行的調適措施予以排序，依據步驟 3 的脆弱度及風險評估結果，可以擬出針對新的運輸計畫的諸多調適措施及替代方案，並可以逐一進行評估。同時也可將每項措施的成效一併納入評估，例如，CO₂ 的排放量、污染量或是公眾目標的達成情形。

(6) 步驟 6：執行調適措施

調適措施的推動已是運輸計畫不可或缺的一部分，可要求在公開招標中納入調適措施，例如在採購公車時要求配有隔熱玻璃或配有空調系統的車輛，或是闢建新的道路時，依據新頒訂因應氣候變遷的設計標準。

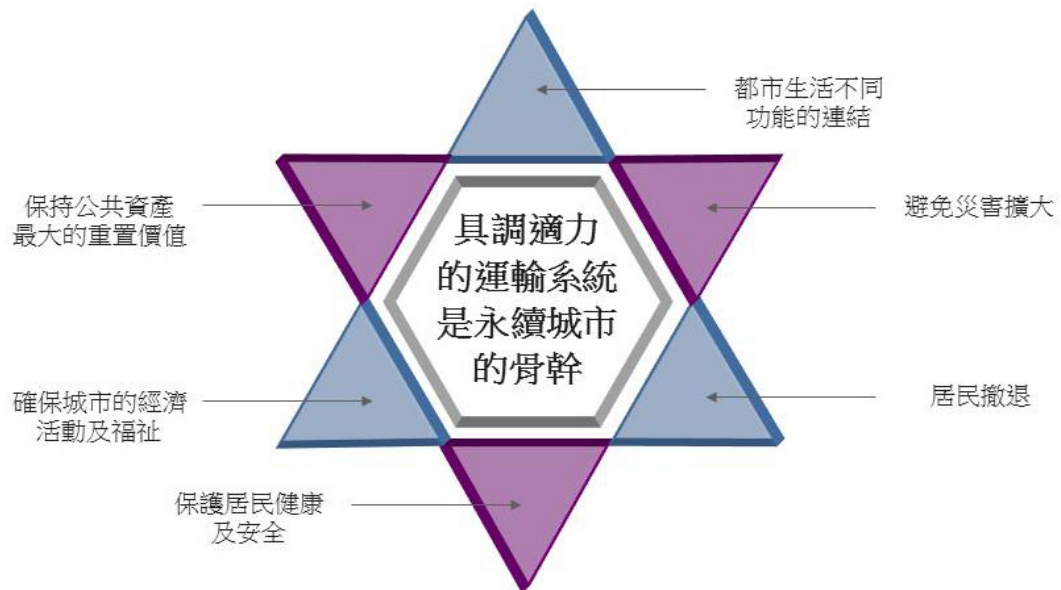
(7) 步驟 7：監測與評估

監測與評估不僅可以用於評估運輸計畫及調適措施成功與否，更可獲得風險評估的資訊（再此檢視步驟 3）或是依監測結果發現新的問題（再次檢視步驟 1）。因此，將調適措施納入計畫評估程序是反覆回饋的過程。

基本上，運輸和城市生活息息相關，包括休閒、教育、商業及產業等。於是一個具有調適力的運輸系統就變得很重要，以避免城市生活因而崩解。因此，基於以下 3 個原因，建構一個可以抵擋氣候變遷衝擊的城市運輸系統乃是有其必要性：

(1) 保護運輸設施及其價值；

- (2)確保移動性及城市的經濟活動與發展；
- (3)確保城市居民的健康及安全。



資料來源： [18]。

圖 4.9 城市運輸需要調適作為之理由

運輸部門的調適不能單獨處理，也不能減少技術性設施的投入。而運輸部門在因應氣候變遷的同時，除了必需滿足所有城市居民移動力的需求外（包括弱勢族群的需求），也必需試著降低溫室氣體的排放。同時與其他部門的整合亦不可少，尤其是與城市規劃部門的配合，以追求最大效益。運輸部門決策者與城市規劃者握有建構可抵擋氣候變遷的永續城市發展之控制權。

(1)城市與氣候變遷

① 預期的衝擊

每個城市所受到的衝擊各異，一般可歸納成以下幾項：

- A. 高溫及熱浪侵襲使得城市熱島效應更加惡化，並對居民健康及舒適感有負面影響，另外，高溫也會破壞基礎設施的材料，例如瀝清及軌道。同時，而高溫及熱浪也會增加空調系統的需求，也讓電力供給吃緊。

- B. 乾旱事件，預期在許多地區將會越來越頻繁，水資源變得越來越珍貴。水源的短缺也影響了電力的供應、居民的生活、產業活動、水運及農業活動等。
- C. 海平面上升使得海岸城市受到大風浪及海岸侵蝕的風險增加，使得沿海地區的城市存在被淹沒的風險。而海平面升高也阻礙了排水系統及河流的排洪能力，使得鹽水入侵，岸邊的濕地也將消失，進而失去對抗海潮及大風浪的天然緩衝區。
- D. 極端降雨事件（包括季節的轉換）預期將會在許多城市發生，同時將導致更多水災。更多強降雨增加城市排水系統的壓力，讓商業活動及運輸系統崩解，亦使建築物及基礎設施受到破壞。另外，極端降雨也可能引發更多的山崩。
- E. 健康的衝擊，同時受到熱浪及暴風雨的影響，而高溫也帶來了光化霧及臭氧問題，同時隨著暖化也改變了病媒的傳播。傳染病在人口稠密的都會地區傳播的特別快。

② 城市的脆弱度

必須正視每個居民本身的脆弱度並不一樣的事實，而這取決於兩個因素：其一是他們暴露於氣候災害的程度，另一因素是他們自身調適或避災的能力。一般而言，城市人口中屬於較脆弱的族群包括小孩、身障者或是老人，他們是比較無法耐熱，或是面對災害發生時逃生能力較差的人。當身處在一個環境較差的城市時，以上這些脆弱度就特別容易暴露出來。

(2) 城市運輸系統可能遭受到的衝擊與調適方法

城市的基礎設施彼此間有緊密的關係，一旦遭受破壞可能導致骨牌效應，所造成的衝擊往往比起氣候對單一設施所帶來的衝擊為大。基本上，氣候變遷對城市運輸系統可能造成的衝擊可分成 3 大類：

- ① 對運輸基礎設施的衝擊；
- ② 對車輛的衝擊；

③ 對運輸行為的衝擊。

基礎設施的興建及維護必須能抵抗高溫、暴風、強降雨、洪水及上升的海平面；而車輛部分，則是在越來越熱的天氣條件下，仍然可以提供乘車的舒適性。至於行為轉變部分，主要是界定在受極端天氣影響時的因應作為，如熱浪、洪水、強降雨、強風及暴風雨侵襲。

因為城市運輸系統影響了生活中許多層面，所以調適措施必須是跨部門的合作及做決策。氣候變遷的概念必須整合至一般的運輸系統設計、運輸發展，以及現行路網的維運制度裡，以因應未來所遭遇到的衝擊。而跨部門的合作也必需擴及撤離計畫及災害風險管理計畫。

該研究就運輸基礎設施、公共運輸及私人運輸因應氣候變遷之調適作為彙整如表 4-1 至表 4-4 所示：

表 4-1 道路設施因應氣候變遷關鍵衝擊及調適作為

氣候衝擊	道路設施受到的衝擊	可採取的調適作為
高溫及熱浪侵襲	<ul style="list-style-type: none"> *道路變形/減低道路行駛速度或道路崩壞/瀝清軟化/鋪面受損 *在既有鋪面材料限制下，因高溫導致路面出現車輪凹痕 	<ul style="list-style-type: none"> *於道路兩旁植栽，以減少道路暴露於高溫之下 *透過設置綠色或藍色設施，如公園及湖泊，同時配合於路旁植栽，產生遮蔭效果，以減少道路暴露於高溫之下 *適切的設計及施工，鋪面材料使用較抗壓的瀝清或混凝土 *加強維護，補平車輪凹痕
	<ul style="list-style-type: none"> *橋梁接縫及橋面受熱膨脹 *橋梁結構的劣化 	<ul style="list-style-type: none"> *重新訂定橋梁設計標準，以提高橋梁耐熱度 *增加維護頻率
乾旱	<ul style="list-style-type: none"> *乾燥土壤遇到大雨易導致山崩及土石堆積 *因土壤乾濕度變化劇烈導致路基劣化 *沙塵造成行車危害，例如降低煞車的摩擦力及標誌的可辨視度 	<ul style="list-style-type: none"> *製作道路受災的風險地圖 *避免於高風險區開發 *土質監測 *增加道路清掃及維護頻率
海平面上升及海岸侵蝕	<ul style="list-style-type: none"> *沿海城市道路及隧道遭淹沒的風險 *道路鋪面及路基遭鹽份入侵而劣化 	<ul style="list-style-type: none"> *製作脆度地圖，以確認高風險地區 *限制高風險區開發，如鄰海地區及海岸線邊 *整合運輸規劃與海岸區域管理 *提升防護設施，如防波堤、設置緩衝濕地 *撤退管理，包括中長期可能需要放棄之運輸設施 *採用抗腐蝕材質 *改善地下道及坡道之排水
極端降雨及洪患	<ul style="list-style-type: none"> *洪患可能影響所有運具，平地及沿海低窪地區，因排水系統不良，風險較高 *排水設施不完善的道路及地下道 *因沖刷、山崩及土壤含水量增加而破壞道路及破壞道路結構 	<ul style="list-style-type: none"> *改善排水設施可以有效減低強降雨對道路的衝擊，增加排水系統的排水量，可以減低洪水溢流，包括於較大的道路底下埋設涵管，加速雨水的渲洩 *定期編列排水預算 *提升排水能力 *製作易淹水地圖，以確認高脆弱度地區，當地未來是否應加強道路設施防護/改善/避建，另外則

表 4-1 道路設施因應氣候變遷關鍵衝擊及調適作為（續）

氣候衝擊	道路設施受到的衝擊	可採取的調適作為
		<p>是尋求替代道路（這對撤離計畫極其重要）</p> <p>*要求所有開發計畫進行淹水風險評估</p> <p>*高淹水風險區域限制開發</p> <p>*強化治水管理/海岸管理及防護設施</p> <p>*建立強降雨及洪水的預警系統及撤離計畫</p> <p>*在易淹水地區設立水位高度警示牌面，以提醒行人及駕駛注意安全</p>
	*河流及運河的水位上升，加重橋墩的沖刷	<p>*確認橋梁及相關設施足堪負荷預期的洪水量</p> <p>*降雨監測</p>
	*泥土道路、基礎較不穩固或是排水不良的道路有可能面臨被沖毀的風險	<p>*提高路基強度</p> <p>*建構能適應各種天候條件的道路</p> <p>*改善滯洪設施</p>
	*路基採用次級基礎材料的道路更容易遭受侵蝕，造成強度及承载力喪失	<p>*提升路基狀況監測品質，尤其在大雨或洪水過後</p> <p>*定期維護</p>
	*加重道路設施的損害度	*使用耐用材料，例如抗腐蝕材料
越來越強且頻繁的暴風雨	<p>*破壞設施結構、橋梁、天橋、道路照明、號誌及服務設施</p> <p>*海水倒灌風險，尤其強風伴隨著大潮</p>	<p>*評估現有設施標準是否能承受越來越強及頻繁的暴風雨</p> <p>*調整橋梁、天橋、建築物的設計標準以面對強風及暴雨</p>
	<p>*強風吹落的樹木、建物或車輛造成道路受阻</p> <p>*因道路崩壞隨之帶來的安全及社會經濟衝擊</p>	<p>*提升對於暴風雨預報能力，以提早作因應及減少生命財產損失（預警系統及災害風險管理）</p> <p>*緊急救援計畫及撤退路線應避開高風險區域</p>

表 4-2 軌道設施因應氣候變遷關鍵衝擊及調適作為

氣候衝擊	軌道設施受到的衝擊	可採取的調適作為
高溫及熱浪侵襲	*軌道因受熱膨脹變形及位移，導致列車必須減速行駛或影響運輸功能	*在美國，透過維護程序的改造，如軌道接面的強化 *透過新設計標準的制訂，以抵抗高溫（此部分涉及國家標準的修訂） *依不同區段訂定不同速限 *透過軌道檢測、檢修、偵測器及號誌等系統改善，以達成對行車中心、工作人員及車站之預警功能
	*地下軌道路網溫度上升	*在地下的軌道路網、車站及列車採用較好的空調系統 *地下設施的溫度監測 *高溫天氣的因應計畫 *符合預期需求的電力供應系統（足以面對逐漸增加的空調需求）
	*低溫地區因高溫對軌道及號誌系統等設備所帶來的衝擊較低	—
乾旱	*乾燥土壤遇到大雨易導致山崩及土石堆積	*製作軌道受災的風險地圖 *高風險區軌道監測及維護 *避免於高風險區開發*
海平面上升及海岸侵蝕	*沿海地區軌道及隧道段遭淹沒的風險	*製作脆度地圖，以確認高風險地區 *限制高風險區開發，如鄰海地區及海岸沿線 *整合運輸規劃與海岸區域管理 *提升防護設施，如防波堤、設置緩衝濕地 *撤退管理，包括中長期可能需要放棄之運輸設施
極端降雨及洪患	*洪患可能影響所有運具，平地及沿海低窪地區，因排水系統不良，風險較高 *增加軌道及隧道淹水的機會 *因沖刷、山崩及土壤含水量增加而破壞軌道路路基及結構	*改善或興建排水設施以因應強降雨的發生，以及提高排水系統的排洪量，以避免溢流的發生 *定期編列排水預算 *提升排水能力 *製作易淹水地圖，以確認高脆弱度地區，當地未來是否應加強道路設施防護/改善/避建，另外則是尋求替代路線（軌道系統要繞

表 4-2 軌道設施因應氣候變遷關鍵衝擊及調適作為（續）

氣候衝擊	軌道設施受到的衝擊	可採取的調適作為
		<p>過淹水區不像公路那麼容易，而且在營運上可能造成困擾）</p> <p>*要求所有開發計畫進行淹水風險評估</p> <p>*高淹水風險區域限制開發</p> <p>*強化治水管理/海岸管理及防護設施</p>
	*排水設施不完善的地 下軌道系統及隧道路段 易被淹沒	<p>*擬訂地下軌道系統旅客疏散計畫</p> <p>*提高抽水機抽水能力</p> <p>*製作脆度地圖，以確認高風險地區</p> <p>*高淹水風險區域限制開發</p>
	<p>*土木工程的安全性會 受到強降雨所造成土壤 毛細水壓影響，尤其在 高溫久旱之後</p> <p>*路基採用次級基礎材 料的道路更容易遭受侵 蝕，造成強度及承載力 喪失</p>	<p>*提高路基強度</p> <p>*建構能適應各種天候條件的道路</p> <p>*改善滯洪設施</p>
	*造成軌道電路中斷，訊 號無法偵測軌道區段間 有無列車	—
	*加重道路設施損害度	*使用耐用材料，例如抗腐蝕材料
越來越強且頻繁 的暴風雨	*破壞設施結構、橋梁、 天橋、高架的電纜線、 月台、道路照明及號誌	<p>*評估現有設施標準是否能承受越 來越強及頻繁的暴風雨</p> <p>*調整橋梁、天橋、建築物的設計 標準以面對強風及暴雨</p>
	*海水倒灌風險，尤其強 風伴隨著大潮	*提升對於暴風雨預報能力，以提 早作因應及減少生命財產損失 （預警系統及災害風險管理）
	<p>*強風吹落的樹木、建物 或車輛造成道路受阻</p> <p>*成堆落葉覆蓋軌道，影 響軌道附著力及行車安 全</p> <p>*增加號誌及電力系統 遭雷擊之事件</p> <p>*電子信號系統遭雷擊 而受損</p>	<p>*加強露天的軌道防風能力</p> <p>*線路高架化：電路阻斷保護裝置</p> <p>*提升號誌設置標準</p> <p>*擬訂緊急救援計畫</p>

表 4-3 水運設施因應氣候變遷關鍵衝擊及調適作為

氣候衝擊	水運設施受到的衝擊	可採取的調適作為
高溫及熱浪侵襲	*水生植物大量繁殖， 阻礙航道	*加強航道清理
乾旱	*降低航道水位，限縮 航道使用轉而使用道 路運輸	*評估航道的使用限制水位，並規 劃替代方案 *更改航路 *評估增加航道流量的可行性
海平面上升及海 岸侵蝕	*港口設施及近海航路 無法再使用	*提升防護設施，如防波堤、設置 緩衝濕地 *撤退管理，包括中長期可能需要 放棄之運輸設施；整合海岸區域 的管理
極端降雨及洪患	*降低航道與橋梁間的 淨高 *降低河流及航道的適 航性	*規劃替代運具 *未來橋梁設計應將高水位因子納 入
	*增加泥沙淤積	*增加清淤頻率
越來越強且頻繁 的暴風雨	*暴風雨影響航道利用	*加強監測及維護
	*漂流物阻塞河流及航 道	*緊急應變計畫

表 4-4 車輛及運行設施因應氣候變遷關鍵衝擊及調適作為

氣候衝擊	車輛及運行設施受到的衝擊	可採取的調適作為
高溫及熱浪侵襲	<ul style="list-style-type: none"> *導致公車及列車內溫度上升，增加乘客及駕駛不舒適感及中暑機會 *駕駛的不適及中暑會導致較高的肇事率 *可能讓公共運輸使用者轉向具有較佳空調設備的私人運具或是計程車 *使用具備昂貴及較耗能的空調系統 	<ul style="list-style-type: none"> *設計足夠且大面積的窗戶 *採用有色的玻璃以阻擋陽光 *車頂塗上白漆 *強化隔熱及冷卻系統 *採用不含氟化物的空調系統 *加強駕駛訓練 *高層巴士之電力供應設計標準應能符合其最大用電需求（尤其是對空調使用的需求）並能對抗強風 *地下鐵路系統應擬訂熱浪事件應變計畫 *重新擬訂公共運具採購規範
	<ul style="list-style-type: none"> *輪胎磨耗增加 *導致設備溫度過高，例如柴油引擎 	<ul style="list-style-type: none"> *重新擬訂設計標準，以抵抗高溫（此部分涉及國家標準的修訂）
極端降雨及洪患	<ul style="list-style-type: none"> *造成行車狀況不佳而影響安全及營運，例如降低速度而導致延誤 *洪患影響公共運輸營運而損及經濟 	<ul style="list-style-type: none"> *惡劣天候下的速度管制，例如降低列車的行駛速度 *加強公共運輸車輛的駕駛人因應極端天氣，如暴雨、冰雹及強風的駕駛訓練 *緊急避難路線規劃 *預警系統建置，以避開高風險區 *洪水險
越來越強且頻繁的暴風雨	<ul style="list-style-type: none"> *天候狀況不佳造成行車事故或無法行駛，例如出軌或撞車事件，而導致系統遭受破壞，以及影響安全及社會經濟 *車輛或列車翻覆 	<ul style="list-style-type: none"> *加強駕駛訓練 *限速 *提升暴風雨預報能力，以提早作因應及減少生命財產損失（預警系統及災害風險管理） *緊急救援計畫及撤退路線應避開高風險區域

整體而言，運輸行為及車輛所受到的衝擊分析如下：

(1) 非機動車輛運輸

惡劣的天氣，諸如大雨、強風及極端溫度等，都會降低居民採用步行及騎乘自行車完成旅次的意願，可能導致居民往機動車輛靠攏；也使得只能靠步行或騎乘自行車的居民行動力無以為繼。而短途旅次是較不會受到極端天氣的影響。

在寒冷地區，溫暖的天氣反而讓居民樂於步行及騎乘自行車，但在溫度較高的地區，高溫反而使得非機動運具的旅次卻步。

有些調適措施可以改善非機動化運輸的品質及安全性，例如，提供自行車道及人行道遮蔭設施，以提高使用的舒適度，讓居民樂於採用步行或騎乘自行車。

(2) 機動車輛運輸

當下大雨（雪）時，車速會降低，而發生交通延滯及癱瘓的情況，同時，意外事故也較容易發生。因此降雨（雪）會使得旅行時間增加，讓原本已十分擁塞的道路狀況更雪上加霜。另外，就車輛而言，高溫將增加車輛空調設備的需求，部分車輛也必須強化引擎或輪胎的抗熱能力。

5. 澳洲氣候變遷對運輸部門之衝擊^[19]

氣候變遷對於澳洲的運輸部門有 2 個意涵：

(1) 運輸設施面臨的風險

氣候變遷將對運輸設施帶來風險，這其中包括有高溫、太陽幅射、海平面上升、森林大火、大風浪、暴風雨（雷擊、強風及強降雨）等。而各種衝擊的程度將因各設施的區位、設計、使用年限及使用強度而異，但是主管單位、營運單位及使用者都必須充份瞭解並掌握相關資訊。

(2) 溫室氣體的排放

澳洲運輸部門的溫室氣體排放量約佔全國的 14%，而其中有 90% 是公路部門油料燃燒所排放，其餘的部分則是軌道系統及國

內航空與水運所排放。而運輸服務的提供者及使用者緊接著所要面對的挑戰即是如何減少運輸服務的溫室氣體排放。

而調適計畫主要係為減少運輸設施的脆弱度，同時確保各項設施可以擁有更強的抵抗氣候變遷衝擊的能力。表 4-5~表 4-6 彙整澳洲運輸部門各項基礎設施面對氣候變遷所帶來之衝擊。

表 4-5 氣候變遷對道路設施的衝擊

氣候變遷效應	對道路設施的直接衝擊	導致的結果
*逐漸上升的氣溫及太陽幅射 *逐漸增加的強降雨 *海平面上升 *洪水 *森林大火 *鹽化效應	*瀝清鋪面遭受破壞 *導致路面坑洞 *地勢較低的道路將被淹沒 *少雨及持續的乾旱將使得路基受損	*造成暫時或永久的道路阻礙 *導致依靠道路運輸的商業活動受影響 *增加道路維護成本 *重新規劃路線以避開氣候變遷的影響 *因道路設施損壞所衍生的責任風險 *高額保險成本

表 4-6 氣候變遷對軌道設施的衝擊

氣候變遷效應	對軌道設施的直接衝擊	導致的結果
*逐漸上升的氣溫 *洪水 *海平面上升 *越來越頻繁、強度越強的暴風雨	*軌道變形 *導致路面坑洞 *地勢較低的軌道及臨港的軌道將被淹沒 *號誌及電力系統受損 *少雨及持續的乾旱將使得路基受損	*導致依靠軌道運輸的商業活動受影響 *增加維護及重置成本 *因軌道設施損壞所衍生的責任風險 *高額保險成本

表 4-7 氣候變遷對港埠設施的衝擊

氣候變遷效應	對港埠設施的直接衝擊	導致的結果
*逐漸增加的劇烈天氣事件(包括降雨、強風、龍捲風及海上風暴) *海平面上升 *逐漸增加的大風浪 *海水酸化	*侵蝕作用 *基礎設施損壞及惡化 *基礎設施被淹沒	*港埠關閉的頻率及時間拉長 *運送延遲 *貨物損壞 *海上貿易及貨物船運成本增加 *增加維護及重置成本 *因港埠設施損壞所衍生的責任風險 *高額保險成本

表 4-8 氣候變遷對空運設施的衝擊

氣候變遷效應	對空運設施的直接衝擊	導致的結果
*逐漸增加的降雨及暴風雨事件 *逐漸增加的強風事件 *越來越頻繁、強度越強的暴風雨 *逐漸上升的氣溫及太陽幅射 *森林大火	*航站受損 *空橋及其他空運基礎設施的包覆材料及密封塗料劣化 *跑道及連絡道路被淹沒 *縮短機場瀝青碎石鋪面的壽命 *減少空運量 *降低能見度	*影響航空公司營運 *增加維護及重置成本 *需建置更長的跑道，以彌補減少的空運量 *需要地面冷卻系統 *因空運設施損壞所衍生的責任風險 *高額保險成本

綜整其他國外有關脆弱度指標與脆弱度評估相關文獻發現，由於缺乏標準化規範，使得絕大部分的研究均以脆弱度因子之組合來評估與描述脆弱度，例如：

1. 脆弱度指標應包括自然條件、環境議題及人類活動等部分^[20]。
2. 脆弱度應包括人口、經濟、社會和技術等因子^[21]。
3. 脆弱度評估應可量測空間危害與地區社會特色間之交互作用、生命或財產遭受環境危害時的潛在損失，以及耐受災害或潛在損失的能力^[22]。

4. 在區域性影響範圍下，脆弱度因子常包含人口密度及區域性範圍的交集狀態^[23]。
5. 脆弱度應包含社會經濟層面因子，例如年齡、性別、種族、收入等^[24]。
6. 脆弱度應考量易損性與回復力^[25]。
7. 脆弱度依影響大小，可將影響因子區分為^[26,27,28,29]：
 - (1)個人性：如貧窮度、就業情形、個人健康狀態、風險意識與防災意願，以及心理上的易損性等。
 - (2)區域性：如人口密度、區域性地區的交集狀態。
 - (3)全國性：人口成長率、基礎設施、土地管理層面、防-救-減災計畫等。
8. 在運輸系統脆弱度部分，常用因子包括：
 - (1)路網脆弱度：當事件發生時，運輸路網受到影響而降低路網服務度或不能運作的程度。其中，所謂的「服務度」即指在給定一段時間下，路段/路線/路網的使用程度^[30]。
 - (2)路網可靠度：指路網在艱苦的情況下還能運作的狀態，亦即路網持續運作的能力^[31]。
 - (3)地區人口的暴露度、總暴露度、地區重要性、人口密度、道路密度、平均旅行時間、路段長度、平均交通量^[32]。
 - (4)可及性、路網結構、旅運型態^[33]。

4.3 國內氣候變遷調適與脆弱度評估

1. 國家氣候變遷調適行動方案（2012-2017）（草案）-維生基礎設施領域^[11]

本行動方案（草案）指出由於氣候變遷及脆弱度的評估方法與工具，截至目前為止，還沒有一套可適用於各種組織、領域及系統的定量分析或評估方法與工具。因此，在調適行動啟動初期主要都是以定性的方式，就組織、領域或系統的特性發展一套評估方法以因應脆弱度與影響評估需求。

針對維生基礎設施之脆弱度評估，本草案提出依「暴露度」、「敏感度」與「適應力」等三種考量因素來訂定調適行動啟動初期之定性評估標準，其評估標準分述如下：

(1) 暴露度評估標準

- ① 高暴露度：設施系統整體均受氣候變遷直接影響。
- ② 中暴露度：設施系統部分受到氣候變遷直接影響。
- ③ 低暴露度：設施系統不受氣候變遷直接影響。

(2) 敏感度評估標準

- ① 高敏感度：設施損壞將導致劇烈災害、重要單位無法運作、重大經濟損失或民生衝擊。
- ② 中敏感度：設施損壞將導致人員傷亡、重要單位僅可維持最低限度運作、中度經濟損失或民生衝擊。
- ③ 低敏感度：設施損壞將導致財物損失、各單位可持續運作、低度經濟損失或民生衝擊。

(3) 適應力評估標準

- ① 高適應力：設施已具預警機制且可進行功能改善，能及時且有效地抵禦、承受及容納衝擊或快速復原。
- ② 中適應力：設施可建立預警機制且可進行功能改善，但需一段時間反應，或部分地抵禦、承受及容納衝擊，或需一段時間方可復原。

- ③ 低適應力：設施無法有效進行功能改善，無法及時且有效地抵禦、承受及容納衝擊或快速復原。

考量交通系統設施所在區域、重要性及定期安全檢查與營運維護機制之完善性，該草案針對交通系統之氣候變遷脆弱度評估結果為高暴露度、高敏感度及中適應力之評等。

2. 國家科學委員會氣候變遷調適相關專題研究計畫

(1) 氣候變遷調適科技整合研究計畫-環境災害系統評估技術發展^[34]

該研究以過去研究為基礎，發展臺灣環境災害系統之脆弱度評估與風險管理之決策工具，以建立環境災害系統受氣候變遷衝擊之脆弱度評估與恢復能力。首先真對氣候變遷導致極端氣候之坡地與洪水綜合型態環境災害現象，釐清關鍵議題之優先順序，並進行環境系統脆弱度與恢復度評估指標及工具之構建。進一步進行坡地與洪水災害系統問題之綜合分析，擬定降低脆弱度與提高恢復度之可能方案。最終探討跨空間與跨領域關連性，以構建評估標準流程，並研擬降低環境災害系統脆弱度及提高恢復度之短中長程調適策略。

(2) 國家關鍵基礎設施防護(NCIP)脆弱度評估及相依性分析之研究^[35]

該研究探討關鍵基礎建設之脆弱度評估方法及風險管理作法，期能建構本土化之脆弱度評估方法及風險管理機制之架構，並以決策實驗室分析法(DENATEL)結合方析網路程序法(ANP)將脆弱度與風險因子加以羅列，並建立地理資訊系統統計分析(GIS statistical analysis)脆弱度資料庫，以風險管理理論，轉化脆弱度因子至公共政策面與執行面防制之考量(例如警政體系、防救災體系及行政部門應有之作為)，特別是建立針對大都會區域之脆弱環帶，所可能造成重大傷亡與成本損失之系統化分析方法論。

(3) 水土資源利用管理及災害風險管理方法與系統之研究－氣候環境變遷對社經環境系統脆弱度與回復力的影響評估^[36]

該研究透過案例式評估與論述的方式，針對莫拉克風災受損較嚴重之旗山溪流，及其城鎮區域的環境社經脆弱度與空間回復力進行分析。同時佐以地理資訊系統操作，呈現高雄縣等受災城鎮區域因氣候異常化所引發的土地使用差異及地區的社經脆弱度與回復、調適等機制的形成；透過環境診斷與自傳（environmental autobiography）等質化與廣泛社區脆弱度與容受力評估法（community-wide vulnerability and capacity assessment, CVCA）等研究方法，分析歷年氣候變化及聚落發展變遷與社經災害潛勢圖資套疊，以評估觀光、設施與產業的脆弱度及其回復力。

(4) 天然災害弱勢族群評估指標與避難疏散援助機制之研—天然災害老人弱勢族群社經脆弱度指標建立與應用研究^[37]

該研究主要係為降低老人弱勢族群在面臨氣候變遷所帶來之災害的威脅，提升其抗災與耐災之能力，故針對這些族群在應對災害之減災、整備、應變與復原階段的脆弱度差異，據以建立一套區隔脆弱程度的評估指標，進行不同弱勢族群在災害威脅下的脆弱度分析應用，並強化政府相關部門對弱勢族群的防救災能力，減少弱勢族群致災機會及受災時之傷亡損失程度。

(5) 各層級國土空間規劃與管理之脆弱度與回復力之評估研究—以都市空間為對象(I)^[38]

該研究針對各層級國土空間規劃與管理之脆弱度與回復力進行評估研究，從「巨觀」(Macro)的流域、跨轄區到「中觀」(Meso)的縣市、鄉鎮一直到「微觀」(Micro)的社區，以不同尺度的空間觀點切入探討，以降低脆弱度之觀念來建立評估體系或進行防災規劃策略。

研究指出「脆弱度評估」是估計遭受風險成份對潛在災害危害脆弱度的過程。脆弱度評估一般被運用於設計防救災政策或使其合法、災害減輕計畫之成本效益分析，或設定減災措施之優先

順序。此外，脆弱度評估也運用在基礎建設的區位選擇上，例如避免設施位於斷層帶、土石流潛勢溪流等環境敏感地區上。

該研究針對特定災害事件下，特定區域內，暴露於災害影響範圍內之人口、建物、生態系統、設施、財產，應用統計方法、數量化分析、質化研究等方式，進行受害脆弱度分析與評估，進行的步驟主要包括：

- (1) 界定分析之標的與時間範圍；
- (2) 研擬受害脆弱度衡量的指標系統；
- (3) 進行受害脆弱度的基本調查；
- (4) 應用受害脆弱度分析工具並進行評估。

3. 經濟部水利署氣候變遷調適與脆弱度評估相關計畫

(1) 氣候變遷對水環境之衝擊與調適研究第 2 階段管理計畫^[39]

該研究針對氣候變遷下災害脆弱度及風險評估方法進行討論，並且認為「脆弱度評估」即為考量系統可能遭受之災害程度、暴露在災害下之敏感度與調適能力後，系統可能受到之綜合影響，而且評估過程中必須考量風險（包括災害發生機率與可能導致損失之期望值）。

研究成果重點如下：

- ① 社會脆弱度係指災害侵襲對象為人類社會系統時，該系統、次系統或系統組成物因暴露在災害、壓力或擾動下可能遭遇損害的程度，以及遭受影響後的調整、降低潛在傷害、掌握機會與系統轉變後的處理能力，而這些處理能力，與社會的經濟條件與基礎建設環境息息相關。
- ② 洪水、乾旱、土石流等災害事件往往考量給定發生機率下之災害規模，例如 200 年迴歸週期之洪水量（即此洪水量每年被超過之機率為 $1/200=0.005$ ），因應氣候變遷，這些發生機率應該有更客觀、更科學的檢討。

- ③ 敏感度則往往與暴露人口及社會經濟活動有關，暴露人口與經濟社會活動越多，則受災敏感度越高，些微災害程度改變即可能導致顯著損失變化。
- ④ 調適能力為政策與行動之回應，其可能包括結構性工程手段與非結構性之管理措施。
- ⑤ 脆弱度與災害不必然呈完全正相關，例如，雖然有較大規模之洪水災害，但暴露在災害下生命財產少，所以受害敏感度低，如再加上有避災與救災調適能力，其脆弱度不高。因此，如能在瞭解可能災害衝擊下，透過土地利用規劃，建立有彈性之調適能力，以作出及時的應變行動，減少生命財產暴露以降低敏感度，則可顯著降低脆弱度。
- ⑥ 目前世界各國致力於推動建構脆弱度地圖，即考量災害、人口、社會經濟與調適措施之空間分布，進而綜合評估並呈現脆弱度在空間上之分布。藉由脆弱度地圖可鑑別脆弱度高之區域，並將其訂為「熱點」（hot spot），以做為優先改善之地區。
- ⑦ 經濟部水利署透過脆弱度及風險地圖分析方法之相關研究，已陸續完成南部地區水資源、水災脆弱度及風險地圖製作，並且針對高脆弱地區與對象，提出氣候變遷調適策略。

(2) 員山子分洪隧道受氣候變遷影響之脆弱度分析^[40]

該研究依循 IPCC AR3 及 AR4 對於脆弱度之定義，並以脆弱度做為分析受氣候變遷威脅程度之指標。研究成果重點如下：

- ① 「脆弱度」之概念即為「表現環境系統所承受之壓力」，而此壓力與環境系統暴露之程度及持續時間相關。由於目前並沒有一套標準之方法可以衡量人與環境間之互動，因此脆弱度分析之目的在於提供一個在氣候變遷情境下，人與環境間互動關係之衡量指標。

- ② 脆弱度研究之重要性在於瞭解造成「脆弱」的原因及條件，而且脆弱度分析整合「風險」及「暴露量」兩個指標，可提供對於災害強度及減災規劃之參考。
- ③ 所稱脆弱度係指水利防洪設施在危害事件（hazard）中，失去作用之傾向程度（propensity），建議由 0~1 之數值或以百分比表示，以顯示所探討元素所可能受到損失之嚴重程度。由於不同型態之危害事件對目標物之毀壞風險不同，因此大部分減災工作即著重於脆弱度之降低，而為了有效降低脆弱度，決策者須要掌握已確認（identify）之主要害事件中，何種元素（element）具有被壞之最高風險。而決策者亦須嘗試將可清楚描述之脆弱度及損失量化，以幫助減災之規劃。
- ④ 提出脆弱度分析之七個步驟，包括「定義問題」、「選擇評估方法」、「不確定性分析」、「選擇氣候變遷情境」、「評估物理性衝擊與社會經濟衝擊」、「評估內部調適能力」及「擬定調適策略」。

(3) 強化南部水資源分區因應氣候變遷水資源管理調適能力研究^[41,42]

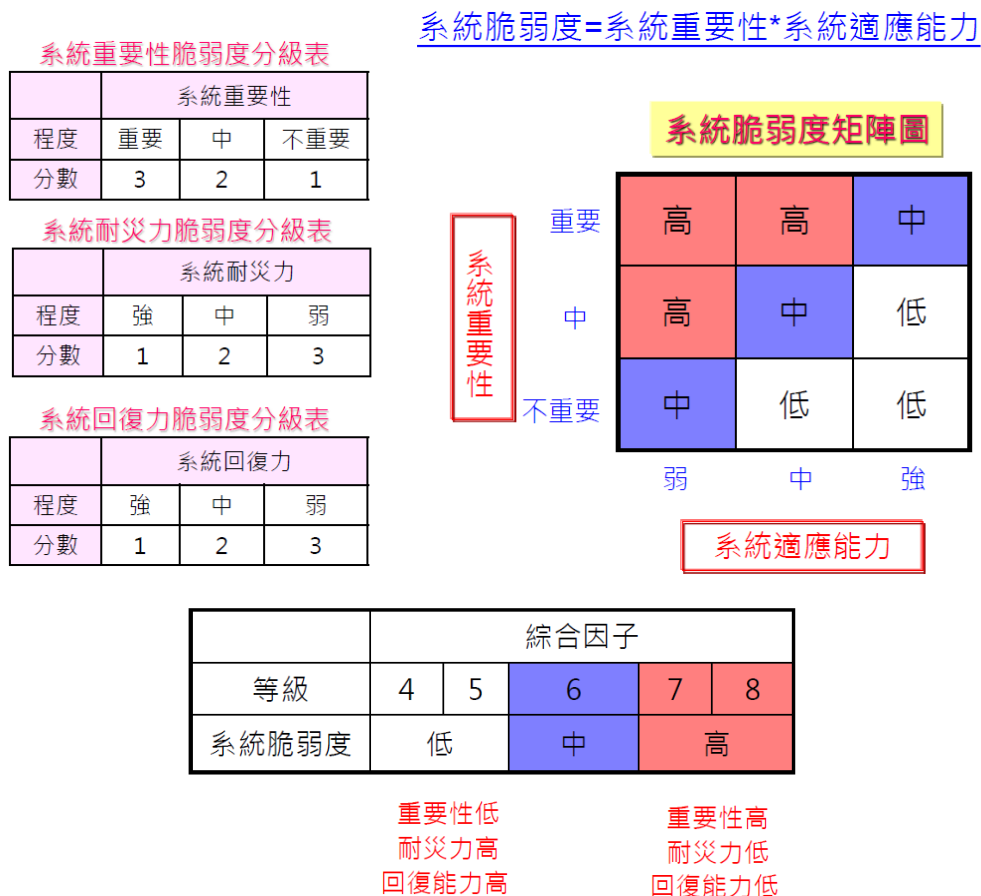
該研究係由經濟部水利署水利規劃試驗所於 2010 年執行，主要考量氣候變遷情況下，針對生活、工業及農業等三部分面對缺水時的脆弱對象與脆弱程度，分別以人口密度、工業產值及農業面積等指標，分析評估缺水風險；隔年（2011 年）並進一步以高屏溪流域為案例，選定人口與脆弱人口、救難設施、建築物型態及河川距離等因子，分析其因應氣候變遷防洪調適之能力。

4. 經濟部能源局氣候變遷調適與脆弱度評估相關計畫

經濟部能源局於 101 年委託財團法人台灣綜合研究院，針對我國能源產業因應氣候變遷之脆弱度及風險評估工具進行研究^[43]，其中該研究認為「脆弱度」應包含以下三個面向：

- (1) 暴露度 (exposure)：設施系統受氣候變遷直接影響的範圍。若為整體系統受影響，則為高暴露度；部分受影響則為中暴露度；不直接受影響則為低暴露度。
- (2) 敏感度 (sensitivity) 或重要性：設施損壞導致重要單位如國際機場、科學園區、政治及軍事等重要指揮中心、緊急應變中心等運作受影響。若導致無法運作則為高敏感度、維持最低限度運作則為中敏感度、可持續運作則為低敏感度。
- (3) 適應力 (adaptive capacity)：設施抵禦、承受及容納衝擊及復原的能力。設施得以及時復原則為高適應力、需一段時間始可復原則為中適應力、無法快速復原則為低適應力。

至於在評估方法方面，該研究係亦以脆弱度評估矩陣之方式來進行評估。其中，敏感度部分以系統重要性來表示，系統適應力則又細分為耐災力及回復力，並且提出綜合評估指標，詳如圖 4.10 所示。



資料來源： [43]。

圖 4.10 能源產業因應氣候變遷之脆弱度評估方法

5. 農委會氣候變遷調適與脆弱度評估相關計畫

農委會多年來已透過政府科技計畫辦理多項氣候變遷調適與脆弱度方面的相關研究，惟多著重於氣候變遷對農業期作業水期程之改變、臺灣周邊海域漁業、集水區水文頻率及保育策略之衝擊、對乾旱期距之衝擊等。

2011 年農委會委由范正成透過七種模式及三種情境，配合建立之崩塌及土石流發生潛勢評估模式^[44]，進行氣候變遷對高屏溪流域內坡地災害發生潛勢之影響評估。該研究成果顯示研究區域內於 2020~2039 年崩塌發生潛勢「極高」（發生頻率年小於 5 年）的面積與基期相比，增加 175 平方公里（約 70.8%）之多；而「極高」土石流發生潛勢的溪流數量則增加 9 條（約 90.0%）。另由區域內防災潛勢分布圖之結果觀之，未來屬高防災潛勢區域的範圍有顯著增加的趨勢。

2012 年另針對基隆河流域於極端降雨事件下山坡地社區災害之影響進行研究^[45]，以瞭解氣候變遷之極端降雨事件對廣域山坡地社區災害所可能之影響，該研究首先蒐集雨量資料，統計研究區域雨量於時中分布特性，之後利用定率法建立廣域淺層坡地崩塌模式，進而探討基隆河流域內之降雨與坡地社區崩塌之關係，並瞭解區域內颱風豪雨事件造成坡地社區環境災害特性。

6. 其他相關研究

馮正民等^[46]曾透過文獻評析方式針對影響運輸路網脆弱度之因素進行探討，進而從道路交通及社會兩構面，擬定 7 項脆弱度衡量模式之分析指標，並用來評估臺北都會區之路網脆弱度。最後透過 GIS 圖層繪製與套疊，發現替代路徑數量與連結性為影響運輸路網脆弱度最劇之指標，而納莉風災所造成之運輸路網失效則以服務水準影響最大。

Hsieh 等^[47]研究指出替代路徑、急救責任醫院可及性、就業機會及日常用品備援水準，會影響公路橋梁失效之脆弱度與風險；Hsieh 及 Feng^[48]則進一步利用解構法考慮都會區路網相關人口密度及區域

性交集狀態，進行運輸路網脆弱度之定義與脆弱度因子之界定，並且界定路網中關鍵設施路段，提供預防措施以維持路網之效能。該研究除界定路網脆弱度係指路網系統面對危害事件發生時，可能造成的損失或危害程度外，同時指出暴露量應納入脆弱度影響因子。

Chen 等^[49]研究提出衝擊區域脆弱度分析取代傳統全路網掃描方式，在研究大範圍的擁擠路網時，只針對受到衝擊區域內的路段作探討，以尋找重要路段，如此可提高尋找路網中重要路段的效率，但是仍不能忽略旅行者接受風險程度不一致及動態需求的影響。

姚乃嘉等^[50]研究探討在極端氣候下，橋梁面臨複合性災害時所因應之管理與維護策略，以延長橋梁的服務年限，提升橋梁基礎建設之完整性。該研究之重點在於探討如何快速且有效（避免下次災害發生又遭受損毀）進行重建工作，以迅速恢復交通並保障用路人安全及避免下次之災害，因此透過遙測影像技術，針對現有橋梁進行分析，找出橋梁附近潛在威脅以進行災害潛勢之判定，再輔以重要之橋梁致災因素，建立現存橋梁受複合性災害潛勢之指標，以評估各強梁之受災潛勢，並針對其生命週期各階段，研議調適與管理策略。

4.4 小結

1. 有關氣候變遷脆弱度定義

世界各國對於氣候變遷下之「脆弱度」的定義不盡相同，目前以 IPCC 的定義最普遍受到認同，綜整 IPCC 提出相關脆弱度說明描述，脆弱度（Vulnerability）可以視為「暴露度（Exposure）」、「敏感度（Sensitivity）」及「調適能力（Adaptive Capacity）」之綜合函數，即：

$$\text{Vulnerability} = f(\text{Exposure, Sensitivity, Adaptive Capacity})$$

2. 有關運輸系統氣候變遷調適架構

氣候變遷使得運輸系統的規劃與建置充滿許多不確定性，為能即時進行調適並減低其脆弱度，運輸規劃或營運階段皆需將現在及未來氣候變遷的因素納入考量。有關運輸系統氣候變遷調適的核心架構包括以下 7 個步驟：

- (1) 步驟 1：確認氣候變遷可能之衝擊
- (2) 步驟 2：訂定目標及指標
- (3) 步驟 3：運輸之脆弱度與風險評估
- (4) 步驟 4：確認調適項目
- (5) 步驟 5：調適措施排序
- (6) 步驟 6：執行調適措施
- (7) 步驟 7：監測與評估

因為運輸系統影響了生活中許多層面，所以調適措施必須是跨部門的合作及做決策。爰此，氣候變遷的概念必須整合至一般的運輸系統設計、運輸發展，以及現行路網的維運制度裡，以因應未來所遭遇到的衝擊，而跨部門的合作也必需擴及撤離計畫及災害風險管理計畫。

3. 有關交通設施脆弱度評估作業流程

為能找出因應氣候變遷之重要考慮因素、問題及資源，以用於公

路設計與實施氣候變遷脆弱度評估，美國聯邦公路總署（FHWA）於 2010 年起結合包括交通部、都會規劃局、以及其他有關運輸系統規劃、設計、營運、維修單位之經驗，透過先導計畫之測試與回饋，於 2012 年發表適用於美國的「氣候變遷與極端氣候脆弱度評估架構」，揭示脆弱度評估作業係由 3 個主要元素（階段）組成，包括：

(1) 範疇界定

包括確認氣候關鍵變數、評估目標，以及挑選與掌握資產之相關資訊。

(2) 脆弱度評估

分析資產在氣候變遷衝擊下的風險評估，並以評估矩陣之方式，分析衝擊之可能性與嚴重性（分成 5 級），再進一步區分為高度風險（H）、中度風險（M）及低度風險（L）等 3 類的風險等級。

(3) 整合脆弱度至決策過程

將前項脆弱度分析之結果整合至決策過程中，進而尋求可以落實調適策略之執行計畫的有效方法，甚至是推動永續長期的回饋機制。

4. 有關交通設施脆弱度評估指標

綜整國外有關脆弱度指標與脆弱度評估相關文獻發現，由於缺乏標準化規範，使得絕大部分的研究均以脆弱度因子之組合來評估與描述脆弱度，例如：

- (1) 脆弱度指標應包括自然條件、環境議題及人類活動等部分。
- (2) 脆弱度應包括人口、經濟、社會和技術等因子。
- (3) 脆弱度評估應可量測空間危害與地區社會特色間之交互作用、生命或財產遭受環境危害時的潛在損失，以及耐受災害或潛在損失的能力。
- (4) 在區域性影響範圍下，脆弱度因子常包含人口密度及區域性範圍的交集狀態。

- (5) 脆弱度應包含社會經濟層面因子，例如年齡、性別、種族、收入等。
- (6) 脆弱度應考量易損性與回復力。
- (7) 脆弱度依影響大小，可將影響因子區分為：
- ① 個人性：如貧窮度、就業情形、個人健康狀態、風險意識與防災意願，以及心理上的易損性等。
 - ② 區域性：如人口密度、區域性地區的交集狀態。
 - ③ 全國性：人口成長率、基礎設施、土地管理層面、防-救-減災計畫等。
- (8) 在運輸系統脆弱度部分，常用因子包括：
- ① 路網脆弱度：當事件發生時，運輸路網受到影響而降低路網服務度或不能運作的程度。其中，所謂的「服務度」即指在給定一段時間下，路段/路線/路網的使用程度。
 - ② 路網可靠度：指路網在艱苦的情況下還能運作的狀態，亦即路網持續運作的能力。
 - ③ 地區人口的暴露度、總暴露度、地區重要性、人口密度、道路密度、平均旅行時間、路段長度、平均交通量。
 - ④ 可及性、路網結構、旅運型態。
5. 在國內氣候變遷調適與脆弱度評估文獻方面，除交通部彙整之「國家氣候變遷調適行動方案（2012-2017）（草案）-維生基礎設施領域」外，包括國家科學委員會氣候變遷調適相關專題研究計畫、經濟部水利署、能源局及農委會之氣候變遷調適與脆弱度評估相關計畫等，所採用調適架構、脆弱度評估方法及評估指標，基本上與前述國外作法類似，足可供本研究參採。

第五章 交通設施氣候變遷脆弱度評估 作業流程之研析

5.1 脆弱度評估作業流程

參酌前一章有關國內外辦理氣候變遷脆弱度評估之流程作法，有關交通設施氣候變遷脆弱度評估之完整作業流程，從受評估之交通設施主體與範疇界定起，大致可分成三大階段共 12 個步驟：

1. 氣象資料蒐集與分析階段

- (1) 評估主體與範疇界定。
- (2) 測站氣象資料蒐集。
- (3) 氣象資料趨勢分析。
- (4) 氣候變遷情境設定。
- (5) 降尺度與氣象資料合成。

2. 脆弱度評估階段

- (1) 脆弱度因子分析。
- (2) 脆弱度評估指標建立。
- (3) 脆弱度評估方法選擇。
- (4) 設施脆弱度評估。

3. 評估產出階段

- (1) 脆弱度地圖繪製。
- (2) 脆弱度資料庫建置。
- (3) 回饋至調適策略及決策。

上述各步驟之進一步探討與說明如本章後面小節。

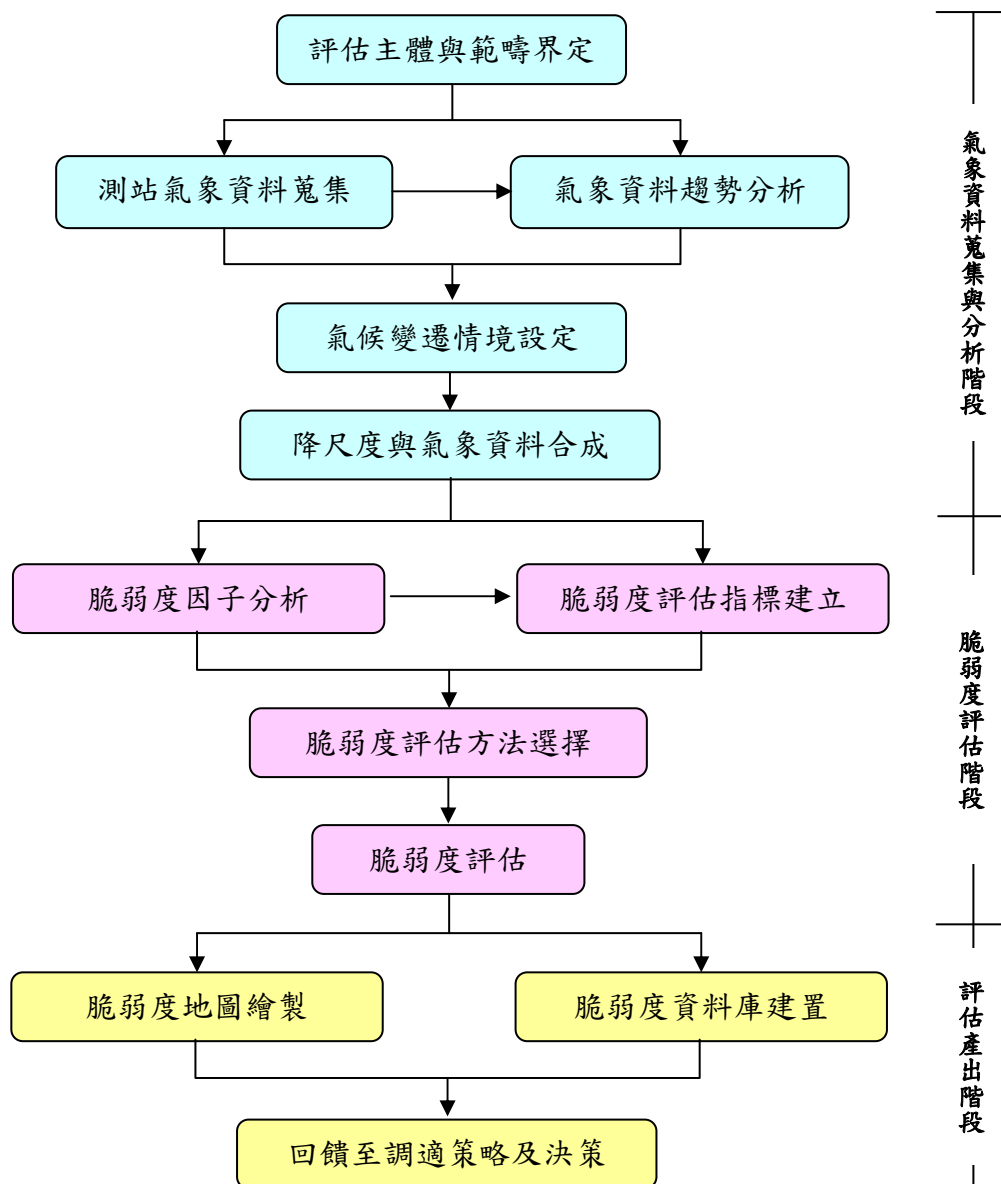


圖 5.1 交通設施氣候變遷脆弱度評估完整作業流程

5.2 氣象資料蒐集與分析階段

由於以現今氣象科學之技術，對於氣候變遷之預測仍存在不確定性，因此若能獲得愈完整的氣象資訊，就愈能降低這種不確定性，提高氣候變遷衝擊預測的準確性，進而增加脆弱度評估的可信程度，爰本研究認為氣象資料蒐集與分析為進行氣候變遷脆弱度評估的基礎。

依照圖 5.1 之作業流程，在氣象資料蒐集與分析階段共有 5 個重要步驟，茲探討說明如下：

1. 評估主體與範疇界定

交通設施之評估主體與範疇可以為全線、特定路段之單一系統設施，亦可以為特定區域內之相關交通設施，以及相關連絡道或支線，界定時應在依據脆弱度評估之目的進行綜合考量。此外，由於評估過程需要同時針對社會與經濟面向進行資料蒐集與影響分析，而此兩個面向受交通設施本身功能與區域發展特性影響大，因此不同交通設施所需資料可能有所差異，若能事先針對此兩個面向之相關資料蒐集與影響分析的範圍有所界定，則對於後續脆弱度評估作業之進行將有事半功倍之效。

實務作法上除可參考以往類似案例進行界定外，亦可透過召開範疇界定會議之方式，邀請相關主管機關及專家學者共同研商確認，以確保所需資料之可蒐集性及可用性。

2. 測站氣象資料蒐集

各氣象測站之資料主要是作為從大尺度觀點觀察歷史氣象變化及預測未來氣象趨勢之基礎，現階段建議可參照「臺灣氣候變遷推估與資訊平台計畫（TCCIP）之作法，以臺北、臺中、臺南、恒春、臺東、花蓮等 6 個具百年以上長期紀錄之氣象測站，以及澎湖、東吉島、蘭嶼、彭佳嶼等 4 個有 60 年風速資料之外島測站為主要蒐集對象。另外，針對有關颱風資訊部分，另可參考美國聯合颱風警報中心（JTWC）之相關資料。

3. 氣象資料趨勢分析

依據於前述步驟所蒐集之氣象資訊，透過氣象科學預測推估模式，即可針對歷史氣象變化及未來氣象趨勢進行預測分析。其中，考量影響交通設施能否維持正常功能的最主要氣候影響因子，原則上進行氣象趨勢預測分析時，應以「溫度」、「降雨」、「海平面上升」及「極端氣候事件」等為主要分析對象。

依據國科會「臺灣氣候變遷科學報告 2011」及經濟部水利署相關研究成果，臺灣地區在「溫度」、「降雨」、「海平面上升」及「極端氣候事件」等 4 項影響因子之未來趨勢推估詳如表 5-1 所示，其餘有關臺灣氣候變遷影響因子之趨勢分析結果，詳見本報告第二章。

表 5-1 臺灣過去及未來之氣候變遷推估成果

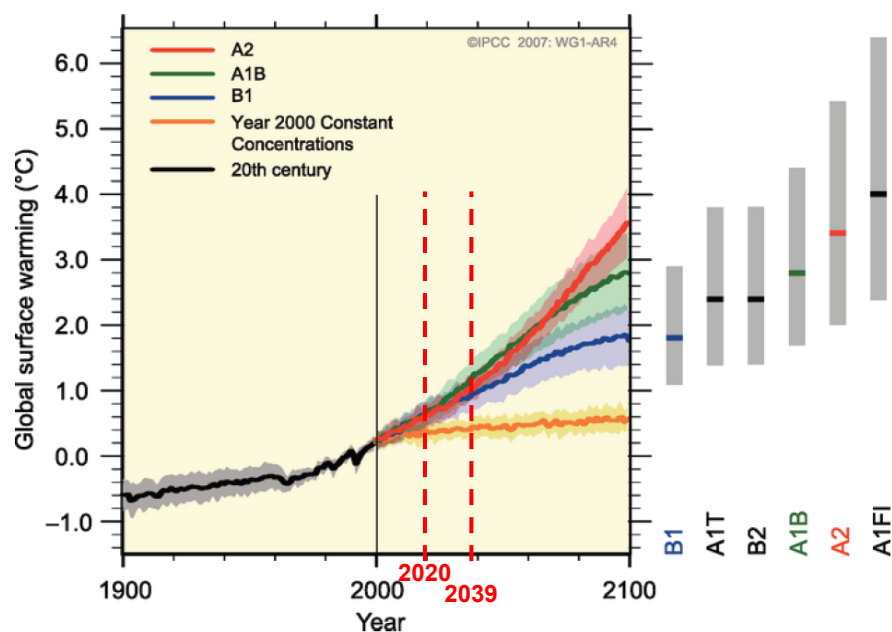
影響因子	過去趨勢分析	未來趨勢分析
溫度	<ol style="list-style-type: none"> 1. 臺灣年平均溫度在 1911 年至 2009 年期間上升 1.4，其增溫速度較全球平均值高。 2. 近 30 年氣溫增加明顯加快，幾乎是百年趨勢值的 2 倍。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 溫度平均上升幅度介於 2.0°C 至 3.0°C 間。 2. 北臺灣較南臺灣增溫幅度略高。 3. 春季較其他季節略低。
降雨	<ol style="list-style-type: none"> 1. 臺灣平均雨量近 100 年的線性變化趨勢並不明顯，惟降雨日數呈現減少趨勢。 2. 30、50 或 100 年平均降雨強度均有明顯增加趨勢。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 臺灣北、中、南、東四個主要分區的未來冬季平均雨量將減少 3%~22%。 2. 夏季雨量將增加 2%~26%。
海平面上升	<ol style="list-style-type: none"> 1. 1993 年至 2003 年間臺灣海域平均海平面上升速率每年 5.7mm，約為過去 50 年的 2 倍，亦大於同時期全球平均上升速率。 2. 東部海域的海平面上升增幅大於西部。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 臺灣西南海域未來海平面上升量約為 6.74~17.66cm。 2. 西北海域之海平面上升量則為 4.02~21.81cm。
極端氣候事件	<ol style="list-style-type: none"> 1. 因西北太平洋颱風平均路徑向北偏移，近 30 年間侵臺颱風年平均發生次數有逐漸增加之趨勢。 2. 統計結果顯示，近年發生之強降雨颱風比例顯著增加。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 未來暖化氣候下，熱帶氣旋生成數目普遍維持不變或減少。 2. 因颱風平均生成位置在未來暖化氣候下將向東南偏移，侵臺颱風數目並沒有系統性影響。 3. 由於未來熱帶地區增溫且水氣量增加，強烈颱風之比例則可能隨之增加。

資料來源：[2,51]

4. 氣候變遷情境設定

IPCC 雖然已經依據未來不同溫室氣體排放情境，推估全球年平均溫度，但是不同情境之推估結果仍有很大的差異，為能確實掌握臺灣地區未來氣候變遷趨勢，建議以國際普遍認為最有可能發生之 A1B 情境作為氣象趨勢分析之假設情境，以集中有限的調適資源並進行最有效之運用。

此外，雖然行政院經濟建設委員會草擬中之「國家氣候變遷調適行動計畫」，已將第一期國家調適行動計畫之時程規劃設定為民國 102 年至 106 年，並揭示各領域調適行動計畫應即刻展開，惟考量氣候變遷調適無法一蹴可幾，而且相關溫室氣體排放情境所造成的全球均溫在期間內之差異不顯著（如圖 5.2 所示），爰建議可將以民國 109 至 128 年（西元 2020 至 2039 年，共 20 年）規劃設定為第一階段調適目標年。然而，有鑑於氣候變遷具有高度不確定性，要精準預測未來溫室氣體的排放情形有其困難度，從圖 5.2 可見隨著時間的增加，有關未來各情境模擬結果之差異性將愈來愈顯著，因此建議應配合國家減緩與調適行動方案之最新推動成果，定期檢討，滾動修正。



資料來源：[52]

圖 5.2 氣候變遷情境下全球年平均溫度趨勢與調適目標年示意圖

5. 降尺度（Downscaling）與氣象資料合成

(1) 降尺度

所謂的「降尺度」即指以科學的方法提高氣候模式預測模擬結果的解析度。受限於計算資源的需求與現有模式架構，目前常用的全球氣候模式（Global Climate Models 或 General Circulation Models, GCMs）的水平空間解析度大約從 500 多公里至 100 多公里，其中大多數的模式網格大小為 300 公里。臺灣地區在此典型氣候模式的解析度下只能是一個網格點，甚至是被定義為海洋的網格點之一。由於無法獲得細部的氣候資訊，使得模式模擬結果與臺灣地區之細部觀測資料有所差距，特別是在地形對溫度與降雨影響的部分很容易被誤判。

有鑑於交通硬體設施多為點與線的型式，其服務範圍常因為路廊或區域發展特性而有不同，因此在進行氣候脆弱度評估時，必須在現有氣候模式架構下進行降尺度的作業，以求所推估之氣候變遷與衝擊較能符合設施所在區域或影響範圍之細部氣候現象。至於常用的方式有動力降尺度與統計降尺度兩種^[2]：

① 動力降尺度

此方式是以全球氣候模式的完整模擬結果作為邊界條件，運用區域氣候模式，提高局部地區在水平或垂直空間之解析度，選擇特定時段加以模擬的作法。區域氣候模式與全球氣候模式有相似的動力與物理參數化計算結構，但是因為具有較高的空間解析度（可達 50 公里或更高），所以能夠更精確地模擬海陸分布、地形高度等對局部地區氣候之影響。

由於此種方式需要運用全球氣候模式的資料加以驅動，並且需要大量的計算資源，因此往往無法完整涵蓋原先所有全球氣候模式對未來氣候變遷推估的可能性機率分布範圍，有時候同樣需要再以其他方法進一步提高模擬結果的解析度。

② 統計降尺度

此方式是以迴歸或統計方法，分析高解析度觀測資料與全球氣候模式低解析網格模擬資料結果間的關係，然後修正模式模擬推估的誤差，進而提高資料的解析度。此法由於不需要完整的全球氣候模式資料，只針對部分氣候變數之進行分析，所以可涵蓋資料庫中所有不同全球氣候模式的推估結果，有效保留原有推估的可能性機率分布範圍。其缺點是不見得所有的氣候變數都有長期的高解析度觀測資料可以進行上述分析。

(2) 氣象資料合成

氣象資料合成即指利用氣象資料合成模式（Weather Generation Model），將前述空間降尺度後之月統計氣候資料，進行時間降尺度，以合成為多組相同統計特性之日氣象或更小時間尺度之氣象資料。透過氣象資料合成，可進一步模擬預測未來日溫度與日降雨量資料，提供作為不同氣候情境下之氣候衝擊結果的比較，特別是針對極端氣候事件的模擬。

雖然月統計氣候資料較容易取得，但是許多氣候評估模式卻是需要以日氣象資料當做輸入值，因此必須以氣象資料合成模式進行轉換。常用的氣象資料合成模式如 Tung and Haith 所發展之日溫度及日降雨合成模式^[52]，簡單說明如下：

(1) 日溫度模擬模式

未來氣候條件下日溫度之模擬，由月平均溫度，透過一階馬可夫鏈做模擬，其方程式如下：

$$T_i = \mu_{Tm} + \rho(T_{i-1} - \mu_{Tm}) + v_i \sigma_T \sqrt{1 - \rho^2}$$

T_i ：第 i 天的溫度

μ_{Tm} ：對應該月平均溫度

ρ ：為該月份 T_i 與 T_{i-1} 之一階系列相關係數

v_i ：屬於 $N(0,1)$ (Normal sampling deviate)

σ_T ：為歷史資料對應該月份之標準偏差

假設每月的第一天溫度以該月的月平均溫度代替，便可經由歷史溫度資料模擬出未來新的日溫度資料。

(2) 日降雨量模擬模式

可分為降雨事件和降雨發生時之降雨量兩部分。其中，降雨事件之模擬以歷史資料為演算依據，其第 i 天降雨事件判別式如下：

若第 $i-1$ 天降雨量 > 0 且 $RN \leq P(W|W)$ ，則第 i 天會降雨；
否則，則第 i 天不會降雨

若第 $i-1$ 天降雨量 $= 0$ 且 $RN \leq P(W|D)$ ，則第 i 天會降雨；
否則，則第 i 天不會降雨

$P(W|W)$ ：各月中第 $i-1$ 日降雨時，第 i 日降雨的機率

$P(W|D)$ ：各月中第 $i-1$ 日不降雨時，第 i 日降雨的機率

RN ：每月第 1 天，模擬產生 $(0,1)$ 間之亂數

當 RN 小於或等於該月降雨機率 $P(W)$ 時，表示此日為降雨日；每月除第 1 日外，其餘日則利用前 1 日的降雨情形判定為降雨日或非降雨日。依照 $P(W|W)$ 或 $P(W|D)$ 的歷史資料平均值，若亂數 RN 小於或等於 $P(W|W)$ 或 $P(W|D)$ 時，判定該日為降雨日。

至於降雨量值之模擬，多根據洪念民所提由指數分佈 (Exponential distribution) 模擬出理想的氣候資料。其指數分佈方程式如下：

$$P = \mu_p(I) \times [-\ln(1 - RN)]$$

P ：日降雨量 (cm)

$\mu_p(I)$ ：對應第 I 月份雨天之平均降雨量 (cm)

RN ：介於 $(0, 1)$ 間的隨機亂數

5.3 設施脆弱度評估階段

1. 脆弱度因子分析

本報告於 2.2 節已提及氣溫、降雨、海平面上升及極端氣候事件不僅是氣候變遷影響環境的 4 個主要因子，亦是影響交通設施能否維持正常功能的最主要因素。然而，不同氣候影響因子可能引發的衝擊類型不相同，且同一影響因子在不同的空間區域引發的衝擊亦可能會有所差異。

由於氣候變遷可能導致交通設施功能喪失與破壞風險提升，要進行交通設施氣候變遷脆弱度因子分析，必須先瞭解各主要氣候影響因子對交通設施所造成的影響為何？以降雨強度增加對鐵公路設施的影響為例：降雨強度增強會導致平原低窪地區路段容易造成淹水、山區路段易受到邊坡滑動崩塌的威脅、河川上游發生洪水、土石流之頻率增加，使得下游之河川跨越橋的橋墩、橋面版遭受洪水、土石流沖毀或淹埋的機會亦隨之增加，且河谷沖蝕加劇，進而危及鐵公路的路基，增加鐵公路系統中斷的風險。

圖 5.3 為鐵公路設施面對溫度上升、海平面上升及極端降雨事件等氣候變遷影響因子之脆弱度因子分析示意圖，分析說明如后：

(1) 溫度上升

溫度上升對鐵公路建設之影響，主要為鐵公路建設如道路鋪面、鐵路鐵軌、高鐵鐵軌等受到形變而造成破壞；公路系統鋪面的破壞一般分為因大重車重量荷重所造成之疲勞破壞、因為溫差所造成之鋪面溫度裂縫破壞以及因溫度造成之車轍現象永久變形破壞。

鐵路系統之軌道，則主要因為溫度變化所造成之熱膨脹，造成設施擠壓、軌道扭曲變形之破壞。

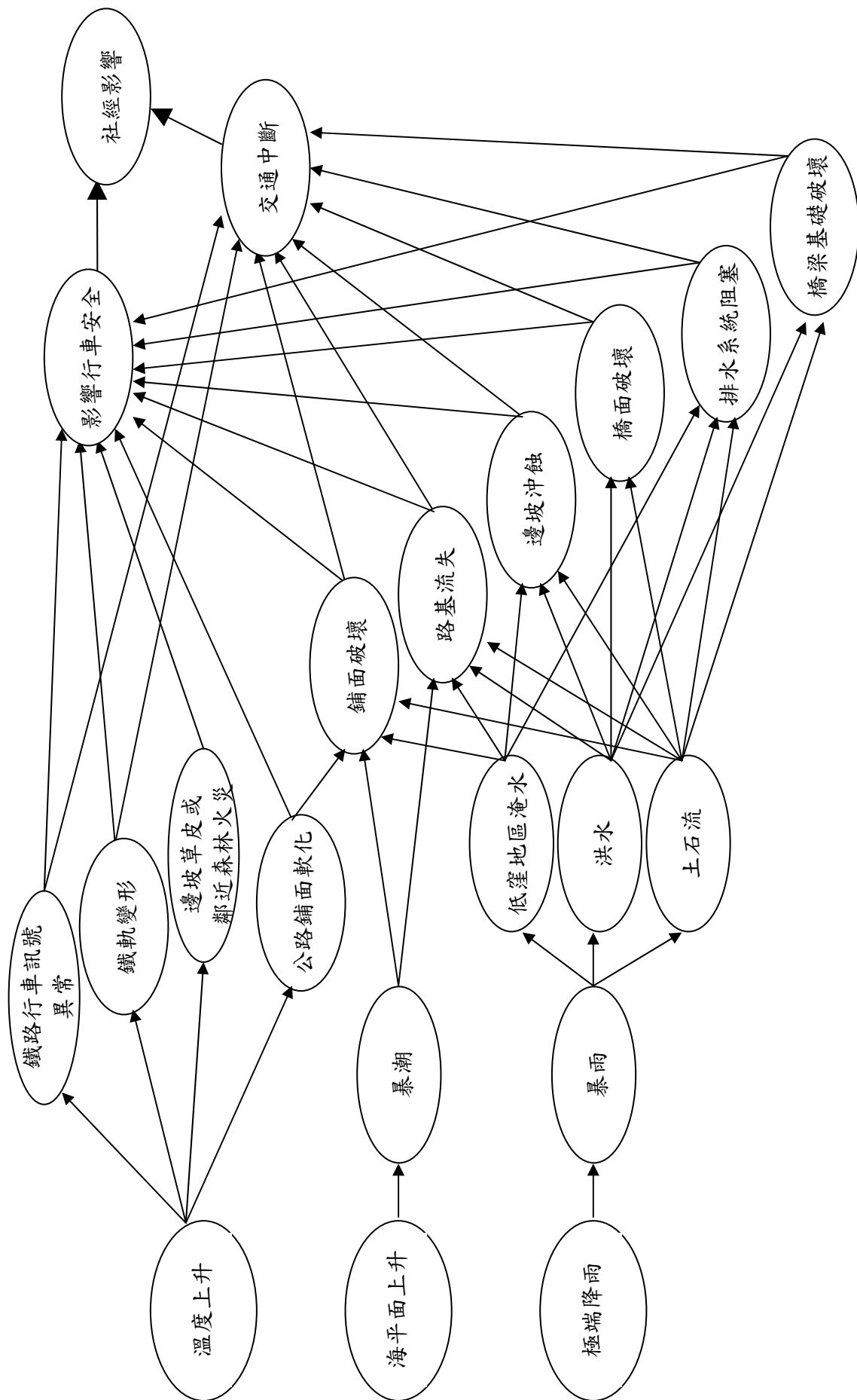


圖 5.3 鐵路設施脆弱度因子分析示意圖

- ① 一般市區道路為例，夏季氣溫 35℃，路面平均溫度可能高達 65℃，道路鋪面可能因為高溫或熱浪侵襲，鋪面之瀝青產生流變與車轍現象，使鋪面軟化破壞，進而造成交通阻礙，導致運輸功能暫時喪失。
- ② 山區公路系統則比較容易產生高低溫差之溫度裂縫而致使鋪面破壞，可能發生運輸中斷之現象。
- ③ 鐵路系統為鐵軌、橋台伸縮縫等易受高溫影響產生膨脹扭曲變形，輕則影響交通運輸中斷，重則導致列車出軌，造成人命財產之損失。

(2) 海平面上升

海平面上升對鐵公路建設之影響，主要為位處低窪地區以及沿海地區之公路鐵路設施將會受到影響，一為受暴潮越堤所造成鐵公路設施之損壞，二為因低窪區內水無法排除所造成之溢淹狀況，而導致交通中斷。

- ① 沿海公路鋪面受到暴潮越堤影響，若路面無法即時排水，又遭車輛重複碾壓可能造成鋪面破壞，進而使交通中斷。
- ② 沿海公路或鐵路受內水無法排除之原因造成道路與鐵路溢淹泡在水中之交通中斷。
- ③ 沿海公路或鐵路之排水系統溢淹後受到水流牽引而致使路基土壤流失，所產生之鐵公路設施破壞，導致交通中斷。

(3) 極端氣候事件

極端事件有乾旱事件、颱風豪雨事件等，為三個氣候變遷影響因子中影響較劇者。主要因為極端降雨可能造成之邊坡土壤流失、路基流失、高含砂水流衝擊設施或河岸侵蝕等現象，間接影響鐵公路如鋪面、邊坡排水、隧道、橋樑等各層面之建設元件。

- ① 極端降雨瞬間落下超量的雨水，道路鋪面、鐵公路側邊排水系統排除不及或土石災害造成之水路阻塞，容易產生路面積水，進而產生路基土壤流失，導致之部分功能喪失，或是交通中斷。

- ② 極端降雨瞬間落下超量的雨水，邊坡受水流沖蝕造成土砂災害或邊坡崩落，導致道路、隧道、橋樑等受到影響，特別是山區易產生邊坡崩塌、土石流等災害，將使交通中斷，喪失運輸功能。
- ③ 極端降雨事件所產生的高含砂水流直接衝擊橋樑系統，可能導致鐵公路設施直接撞擊損壞，而產生的交通中斷。特別是山區坡陡流急，水流可移動之土砂顆粒較大，容易產生橋墩、橋臺、或橋面板的損壞。
- ④ 極端降雨事件之大流量沖刷護岸，可能導致路基、橋台等設施受淘刷而損壞，間接迫使交通中斷，特別是山區坡陡流急，容易有這類事件產生。
- ⑤ 乾旱事件若與高溫結合，易使鐵公路建設之路基土壤劇烈收所，產生裂縫，若再受降雨與水流作用，更容易有路基流失的破壞，致使交通中斷。如隧道、鐵公路路基部分。

另一方面，依據 IPCC 定義，「脆弱度」(Vulnerability) 係指某個系統受氣候變遷（包括氣候的變異性及極端情況）負面影響及無法因應的程度。脆弱度會受到不同因子影響，脆弱度影響因子包括系統暴露在氣候變遷及其變化的特性、強度、頻率（即暴露度）、敏感度及調適能力。其中：

(1) 暴露度 (Exposure)：

係指設施或系統受氣候變遷直接影響的範圍，可表示為氣候條件之長期變化或氣候變率之變化，包括極端事件之程度和頻率。暴露度一般主要考量氣候本身自我改變（如海平面上升、降雨及溫度改變）及受氣候變遷影響之事物（如人口、資源、財產）。其中，受氣候變遷影響之事物亦可納於「敏感度」進行分析。

(2) 敏感度 (Sensitivity)：

係指系統受影響之程度，或反應於氣候刺激之程度。基本上，敏感度是氣候變遷之生物物理影響，但敏感度亦會受社會經濟變化而改變。例如，新作物品種亦可能受到氣候變遷影響。

(3) 調適能力 (Adaptive Capacity)：

係指系統適應氣候變遷之潛力或能力，如為了氣候變異或極端事件所導致之中度潛在破壞，採取機會優勢或處理其後果。換言之，調適能力即為系統適應氣候變遷衝擊之能力。

調適能力之建構，並非拋棄過去作為而完全重新建立，因為氣候變遷可能使原有天氣相關災害擴大（如洪水、乾旱），也可能導致新類型的災害（如複合型水土災害與公共衛生問題）。如為原問題擴大，則調適能力建構應以強化原有措施為主，惟必須注意氣候變遷所帶來之不確定性；如為新類型災害，則必須研究建構新的調適行動方案，此部份往往具有跨領域與跨空間之特性，必須特別注意系統間之整合。

2. 脆弱度評估指標建立

在瞭解交通設施氣候變遷影響因子之後，即可依據交通設施之特性建立適合之脆弱度評估指標。基本上，交通設施脆弱度評估指標建議可分為實體脆弱度、社會脆弱度及經濟脆弱度等三個類別之指標，如表 5-2 所示，至於實際操作上則可藉由模糊德爾菲法的專家問卷分析，建立指標體系。

(1) 實體脆弱度指標

係指交通設施受氣候變遷衝擊時，可能導致功能喪失或破壞之相關指標。例如：

① 設計標準

即交通設施之相關工程設計標準。依據氣象合成資訊之預測模擬結果或歷史災害之經驗，檢視設施設計洪水週期、結構或基礎型式愈符合相關設計標準並具有基本抗災能力者，代表調適能力愈高，即實體脆弱度愈低。

② 替代路徑

指可提供與原交通設施相同或部分運輸服務功能之其他路徑。若評估路段經過區域有可使用的替代路徑，且至少包含二條以上替代公路（或鐵路），則表示其受影響程度低（脆弱度低）；若評估路段經過區域未有可使用的替代路徑、道路封閉或中斷，將形成孤島，則代表此區域之脆弱度高。此外，若替代路徑距離交通設施之距離短，則代表調適能力較高，即實體脆弱度愈低。

- ③ 交通量：指交通設施功能喪失或遭受破壞後，受影響之每日交通量。受影響之每日交通量愈高，代表交通設施敏感度愈高，即實體脆弱度愈高。
- ④ 旅行時間：指交通設施功能喪失或遭受破壞後，整體旅次之旅行時間改變情形（通常指旅行時間增加）。旅行時間增加愈少，代表設施敏感度愈低，即實體脆弱度愈低。
- ⑤ 環境敏感區干擾：指交通設施與依「自然保護區設置管理辦法」所劃設之野生動物重要棲息環境、自然保留區、自然保護區、野生動物保護區及國家公園等自然保護區之空間關係，例如設施與環境敏感區之距離、設施位於敏感區之長度或面積。若距離愈近、長度愈長、面積愈大，則代表暴露度及敏感度愈高，即實體脆弱度愈高。
- ⑥ 歷史災害規模：指交通設施歷史發生災害之情形，例如一定規模之災害次數或災損金額。災害次數愈多、災損金額愈高，則代表敏感度愈高，即實體脆弱度愈高。

(2) 社會脆弱度指標

指交通設施受氣候變遷衝擊並導致功能喪失或遭受破壞之後，間接對社會產生影響之相關指標。例如：

- ① 人口密度：人口密度愈高，表示當交通設施功能喪失或遭受破壞後，此區位可能受影響之人口亦愈高，亦即可視為敏感度愈高，即社會脆弱度愈高。

- ② 高齡人口比例：高齡人口由於生心理狀況的限制，使其在災害自保及應變能力方面較弱，或需要較多人的照顧，因此高齡人口比例愈高，則代表敏感度愈高，即社會脆弱度愈高。
- ③ 身心障礙人口比例：同高齡人口比例之概念，身心障礙者由於生心理狀況的限制，使其在災害自保及應變能力方面較弱，或需要較多人的照顧，因此身心障礙者愈高，則代表敏感度愈高，即社會脆弱度愈高。
- ④ 低收入人口比例：交通設施功能喪失或遭受破壞後，將衍生轉換運具或繞路之情形，惟低收入人口在衍生額外成本考量下，相對較難以因應。低收入人口比例愈高，代表社會脆弱度愈高。
- ⑤ 依賴人口扶養率：即依賴人口（指未滿 15 歲之幼年人口及 65 歲以上之老年人口）與工作年齡人口之比例。其值愈高顯示工作年齡人口平均之扶養負擔愈重，一旦交通設施功能喪失或遭受破壞後，可能導致工作年齡人口之工作及收入受影響，即社會脆弱度愈高。
- ⑥ 距急救責任醫院距離：主要用來評量交通設施受危害時之應變與救護能力，可視為社會調適能力的一部分。交通設施距急救責任醫院之平均距離愈遠，代表應變與救護能力愈不足，即社會脆弱度愈高。

(3) 經濟脆弱度指標

指交通設施受氣候變遷衝擊並導致功能喪失或破壞之後，間接對經濟產生影響之相關指標。例如：

- ① 產業損失：受影響產業之產值或貿易減少金額，金額愈高，代表敏感度愈高，即經濟脆弱度愈高。
- ② 產業活動：若評估範圍內之產業活動多不需要倚賴評估路段運輸，則屬低敏感度，即經濟脆弱度愈低；若主要產業（如二級產業）活動多需要倚賴評估路段運輸，且替代道路運輸量偏低，則屬高敏感度，即經濟脆弱度愈高。

- ③ 產業運輸載運量：指交通設施功能喪失或破壞後，受影響之每日產業運輸載運量，類似前述交通量指標之概念，受影響之每日產業運輸載運量愈高，代表交通設施敏感度愈高，即經濟脆弱度愈高。
- ④ 家戶可支配所得：家戶可支配所得顯示其經濟能力，交通設施功能喪失或破壞後，經濟能力較佳者受衝擊相對較小，故平均家戶可支配所得愈高，代表所受衝擊相對較小，即經濟脆弱度愈低。

表 5-2 交通設施脆弱度評估指標建議表

指標類別	評估指標	評估準則	涉及脆弱度面向
實體脆弱度	設計標準	<ul style="list-style-type: none"> 交通設施之相關工程設計標準。 設施設計洪水週期、結構或基礎型式愈符合相關設計標準並具有基本抗災能力者，代表調適能力愈高，即實體脆弱度愈低。 	調適能力
	替代路徑	<ul style="list-style-type: none"> 可提供與原交通設施相同或部分運輸服務功能之其他路徑。 評估路段經過區域可使用的替代路徑愈多或距離交通設施之距離愈短，則代表調適能力愈高，即實體脆弱度愈低。 	調適能力
	交通量	<ul style="list-style-type: none"> 交通設施功能喪失或遭受破壞後，受影響之每日交通量。 受影響每日交通量愈高，代表交通設施敏感度愈高，即實體脆弱度愈高。 	敏感度
	旅行時間	<ul style="list-style-type: none"> 交通設施功能喪失或遭受破壞後，整體旅次之旅行時間改變情形（通常指旅行時間增加）。 旅行時間增加愈少，代表設施敏感度愈低，即實體脆弱度愈低。 	敏感度
	環境敏感區干擾	<ul style="list-style-type: none"> 交通設施與環境敏感區之距離、設施位於敏感區之長度或面積。 若距離愈近、長度愈長、面積愈大，則代表暴露度及敏感度愈高，即實體脆弱度愈高。 	暴露度、敏感度

表 5-2 交通設施脆弱度評估指標建議表(續 1)

指標類別	評估指標	評估準則	涉及脆弱度面向
	歷史災害規模	<ul style="list-style-type: none"> 交通設施歷史發生一定規模之災害次數或災損金額。 災害次數愈多、災損金額愈高，則代表暴露度及敏感度愈高，即實體脆弱度愈高。 	暴露度、敏感度
社會脆弱度	人口密度	<ul style="list-style-type: none"> 人口密度愈高，表示當交通設施功能喪失或遭受破壞後，此區位可能受影響之人口亦愈高，即可視為敏感度愈高，或社會脆弱度愈高。 	敏感度
	高齡人口比例	<ul style="list-style-type: none"> 高齡人口由於生心理狀況的限制，使其在災害自保及應變能力方面較弱，或需要較多人的照顧。 因此高齡人口比例愈高，則代表敏感度愈高，即社會脆弱度愈高。 	敏感度
	身心障礙人口比例	<ul style="list-style-type: none"> 同高齡人口比例之概念，身心障礙者由於生心理狀況的限制，使其在災害自保及應變能力方面較弱，或需要較多人的照顧。 因此身心障礙者愈高，則代表敏感度愈高，即社會脆弱度愈高。 	敏感度
	低收入人口比例	<ul style="list-style-type: none"> 交通設施功能喪失或遭受破壞後，將衍生轉換運具或繞路之情形，低收入人口考量衍生額外成本，相對較難以因應。 低收入人口比例愈高，代表社會脆弱度愈高。 	敏感度
	依賴人口扶養率	<ul style="list-style-type: none"> 依賴人口（指未滿15 歲之幼年人口及65 歲以上之老年人口）與工作年齡人口之比例。 其值愈高顯示工作年齡人口平均之扶養負擔愈重，一旦交通設施功能喪失或遭受破壞後，可能導致工作年齡人口之工作及收入受影響，即社會脆弱度愈高。 	敏感度
	距急救責任醫院距離	<ul style="list-style-type: none"> 主要用來評量交通設施受危害時之應變與救護能力，可視為社會調適能力的一部分。 交通設施距急救責任醫院之平均距離愈遠，代表應變與救護能力愈不足，即社會脆弱度愈高。 	敏感度、調適能力

表 5-2 交通設施脆弱度評估指標建議表(續 2)

指標類別	評估指標	評估準則	涉及脆弱度面向
經濟脆弱度	產業損失	<ul style="list-style-type: none"> 受影響產業之產值或貿易減少金額。 產業損失金額愈高，代表敏感度愈高，即經濟脆弱度愈高。 	敏感度
	產業活動	<ul style="list-style-type: none"> 評估範圍內之產業活動需要倚賴評估路段運輸的程度。 主要產業（如二級產業）活動愈需要倚賴評估路段運輸，且替代道路運輸量偏低，則敏感度愈高，即經濟脆弱度愈高。 	敏感度
	產業運輸載運量	<ul style="list-style-type: none"> 指交通設施功能喪失或破壞後，受影響之每日產業運輸載運量。 受影響之每日產業運輸載運量愈高，代表交通設施敏感度愈高，即經濟脆弱度愈高。 	敏感度
	家戶可支配所得	<ul style="list-style-type: none"> 家戶可支配所得顯示其經濟能力，交通設施功能喪失或破壞後，經濟能力較佳者受衝擊相對較小。 平均家戶可支配所得愈高，代表所受衝擊相對較小，即經濟脆弱度愈低。 	敏感度、調適能力

3. 脆弱度評估方法選擇

參酌國內外研究文獻與實施經驗，目前在脆弱度評估方法方面主要透過「脆弱度評估矩陣」，分別針對敏感度、暴露度及調適能力之彼此關係進行綜合性評估分析。其中，評估時可先就敏感度與暴露度進行潛在衝擊評估分析，再就其評估結果加上調適能力進行綜合脆弱度評估，詳如表 5-3 及表 5-4 所示。然後，應用多準則評估方法中的層級分析法與網絡分析法，藉由專家系統依據前述各評估指標之標準及合理性，加以找出交通設施脆弱度指標的階層關係與權重，並訂出分級標準（可分成 3 級或更多級）。

表 5-3 潛在衝擊評估矩陣

潛在衝擊評估矩陣		敏感度		
		低	中	高
暴露度	低	低	低	中
	中	低	中	高
	高	中	高	高

表 5-4 脆弱度評估矩陣

脆弱度評估矩陣		潛在衝擊		
		低	中	高
調適能力	低	中	高	高
	中	低	中	高
	高	低	低	中

4. 脆弱度評估

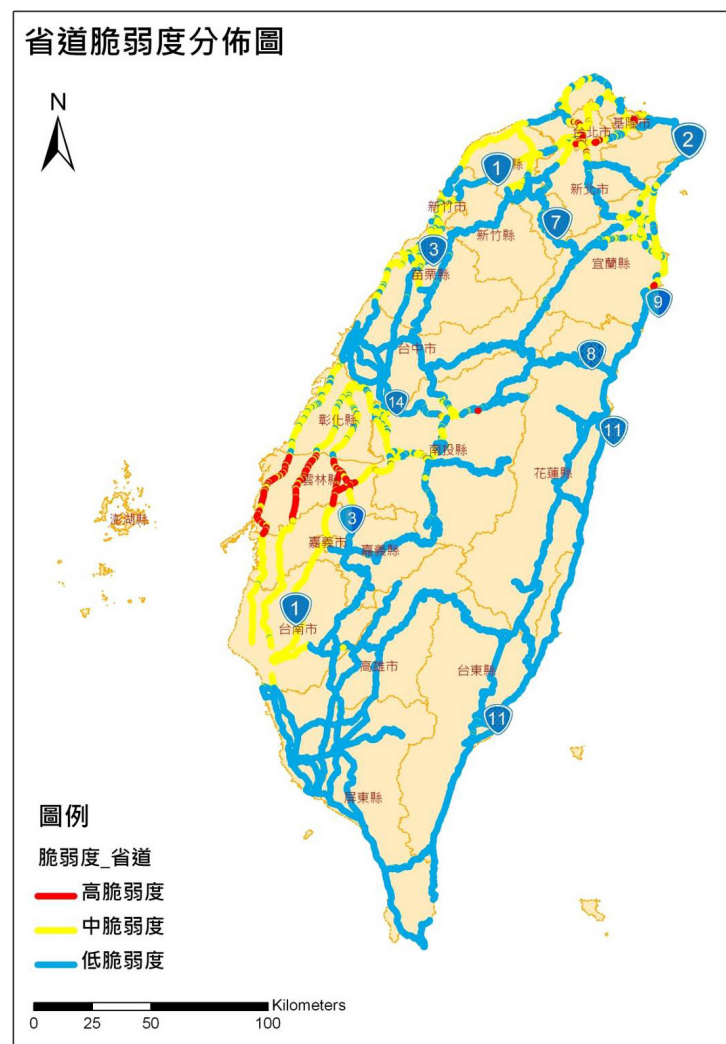
透過前述評估矩陣，針對交通設施脆弱度進行評估。評估時，面對氣候變遷衝擊具有高程度的敏感性而只有低程度的調適能力者，給予高脆弱度評定；領域面對氣候變遷衝擊具有低度敏感性而且有高度調適能力者，則給予低脆弱度評定，其餘依此類推。

對於交通設施而言，暴露度可以判斷出系統各點或各線段係受某一種或多種之災害或威脅，再由該設施之敏感度與調適能力評估在災害威脅下所產生之整體脆弱度。由前述表 5-3 表 5-4 脆弱度評估矩陣可知，設施敏感度及暴露度愈低，調適能力愈高，則設施綜合脆弱度就愈低（如綠色區塊），反之則設施脆弱度就愈高（如紅色區塊）。

5.4 評估結果產出階段

1. 脆弱度地圖繪製

即依據前述脆弱度評估結果，透過 GIS 技術之應用，繪製成脆弱度地圖，輸出範例如圖 5.4 至圖 5.6 所示。



資料來源：[53]

圖 5.4 省道脆弱度地圖



資料來源：[53]

圖 5.5 國道脆弱度地圖



資料來源：[53]

圖 5.6 高鐵脆弱度地圖

有鑑於 GIS 技術的應用在國內已成熟發展多年，且已應用至土地使用及防災等領域，例如：

- (1)內政部營建署：利用此項技術，針對區域土地使用、區域計畫、環境敏感區、限制發展區等建置完整之「區域計畫地理資訊系統」；
- (2)國家災害防救科技中心：於 2012 年完成之「災害潛勢地圖網站」亦是利用此項技術，整合經濟部水利署、中央地質調查所、行政院農業委員會水土保持局、交通部公路總局、氣象局、內政部社會司、營建署等機關所提供之資料，載明可能發生土石流、坡地或淹水災害之地區或標示災害可能衝擊影響之範圍；
- (3)其他如農業委員會建置之土石流防災資訊網、內政部資訊中心發展之國土資訊系統倉儲及網路服務平台（TGOS）及地理資訊雲端運算服務平台（MAKOCI）、公路總局建置之公路基本資料庫、臺灣地區橋梁管理系統等亦都是利用此項技術發展。

為能與上述相關資訊系統及資料平台進行整合與相互支援，有關交通設施脆弱度評估的結果亦宜運用 GIS 技術來展現。

2. 脆弱度資料庫建置

依據前述步驟中選定之脆弱度評估指標項目，交通設施氣候變遷脆弱度評估過程需要實體面、社會面及經濟面等各面向的許多資料，且評估結果（即交通設施脆弱度）亦可作為後續進行交通設施氣候變遷風險評估之基本資料，因此有必要在交通設施脆弱度評估作業中一併建置資料庫，以利監測及後續分析及管理之相關應用。

3. 回饋至調適策略及決策

為達成「降低交通設施在氣候變遷下之災害風險並強化整體調適能力，以維持其應有運作功能並減少對社會經濟衝擊」之調適總目標，交通設施氣候變遷脆弱度評估的結果必須回饋至氣候變遷調適策略的規劃與執行，並且強化主管機關因應氣候變遷之決策能力及縮短決策時間。

作法上建議可透過調適策略關聯檢查表的方式來進行檢視，如表

5-5 所示。亦即依據脆弱度評估之結果，找出交通設施脆弱點所在，然後對各項調適策略目標，逐一檢討是否有可以改善此弱點之各種可行作法？若有，則應一併將有關的調適工作與權責機關列出，以利後續相關調適行動計畫之規劃與執行。由於我國氣候變遷調適尚在起步階段，推動初期經由此檢查表之檢視，應會發現大多數的調適策略關聯檢查項目均需勾選「是」，並研提建議因應的調適工作與權責機關。

表 5-5 交通設施脆弱度評估結果與調適策略關聯檢查表

調適策略關聯檢查項目	否	是	調適工作／權責機關說明
1. 是否需要落實、檢討與修訂既有法令與相關規範？	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
2. 是否需要建立設施安全性風險評估機制及生命損失衝擊分析模式？	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
3. 是否需要建立國土監測資源與災害預警資訊系統之整合平台？	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
4. 是否需要落實交通設施維修養護？	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
5. 是否需要流域綜合治理協調機制及產學界資源整合之協助？	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
6. 是否需要提升完整之調適人力與技術能量，並進行教育與宣導？	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
7. 是否需要建置交通設施營運管理資料庫並強化監測作業？	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
8. 是否需要研發交通設施之氣候變遷調適新技術？	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	

第六章 重要課題探討與推動策略研擬

氣候變遷脆弱度評估在我國仍屬起步階段，尤其是在交通部門更是近年才逐漸引入此一概念，因此，雖然在前述章節中已針對完整之脆弱度評估作業流程進行研析，但是未來有關交通設施氣候變遷脆弱度評估之推動，仍存在一些值得探討與注意的重要課題。

6.1 重要課題探討

課題一：氣候變遷預測推估結果仍存在不確定性。

探討：

1. 氣象資料合成為氣候變遷脆弱度評估與後續相關調適作為之基礎，惟依據目前相關氣象資料合成模式之發展，仍無法降低氣候變遷預測推估結果之不確定性，而且氣候變遷情境設計不易。
2. 由於交通設施脆弱度評估過程必須使用降尺度後之氣象資訊，導致其不確定性將更為增加。
3. 如何發展適合且有效之氣象資料合成模式與降尺度方法，以提高相關預測推估結果之公信力並充分支援各領域進行氣候變遷脆弱度評估之需要，將是未來各領域進行氣候變遷調適之首要課題。

課題二：交通設施脆弱度因子分析與應用需要個別進行實證。

探討：

1. 不同交通設施之特性有所差異，即便是同一種交通設施（如公路）亦有可能具有不同功能等級與興建目的。
2. 交通設施氣候變遷脆弱度因子非常多，並會因災害、時間及地點而有不同，加上個別因子之資料完整度不盡相同，進行蒐集時所需投入資源亦不相同。

3. 在脆弱度因子分析之實際應用上，有必要詳細規劃並個別進行實證，以利交通設施脆弱度評估指標之研訂。

課題三：交通設施敏感度指標之評估能力是否足夠。

探討：

1. 表 5-2 交通設施脆弱度評估指標建議表中多項指標均涉及敏感度面向，可知降低交通設施之敏感度為降低整體脆弱度之重點所在。
2. 敏感度指標某個層面係代表交通設施之重要性，因此多與社會經濟之整體發展有關，惟三者間之關聯性既密切又複雜。
3. 如何強化相關敏感度指標之評估能力，讓氣候變遷衝擊災害的評估更有具體的參考功能，提供地區防災、空間規劃與土地使用檢討等，將是未來值得探討的重要課題。

課題四：跨部會、跨領域支援與合作的必要性。

探討：

1. 從氣象資料趨勢分析、氣候情境設定、降尺度 (downscaling) 與氣象資料合成、脆弱度因子分析至脆弱度評估指標建立等步驟觀之，交通設施氣候變遷脆弱度評估涉及跨部會、跨領域之資料蒐集。
2. 脆弱度評估結果可提供跨部會、跨領域做進一步應用（如風險評估與管理）的參據，例如檢討修正各領域之氣候變遷調適策略，或擬訂可提升調適能力之行動計畫。
3. 如何持續及加強跨部會、跨領域的支援與合作，將是未來成功推動交通設施氣候變遷脆弱度評估之重要課題。

課題五：「脆弱度評估矩陣」的操作方法與評等準則是否明確且客觀。

探討：

1. 目前國內外仍多以「脆弱度評估矩陣」進行氣候變遷脆弱度評估的主要方法，惟此種方式中有關評分等級與評分準則之

研訂，仍有不夠客觀之疑慮。

2. 如何從各脆弱度評估指標之量化或質化之評估結果，反映至脆弱度評估矩陣之各分級評等，則是值得進一步研究探討的課題。

課題六：交通設施氣候變遷脆弱度評估範疇界定是否周延。

探討：

1. 交通設施本身多為點或線之型式，但服務範圍與影響範圍卻可能擴及平面或空間上的有形或無形的範疇。
2. 交通設施氣候變遷脆弱度評估範疇可能需要考量評估的目的，並依照歷史災害之種類、規模、發生時間，以及不同交通設施之特性與需要，做不同範疇的界定。
3. 如何透過科學方法，充分界定氣候變遷脆弱度評估的範疇並研訂周延之脆弱度評估指標，將成為未來推動交通設施氣候變遷脆弱度評估作業之重要課題。

課題七：交通設施是否需要全面實施氣候變遷脆弱度評估。

探討：

1. 脆弱度評估為進行調適之基礎，而交通設施又屬於國家維生基礎設施之一環，為能預先找出重要交通設施之脆弱點並加以改善，實施脆弱度評估有其必要性。
2. 交通設施涵蓋公路、鐵路、港口與機場等相關軟硬體設施，且所在區位遍及全省各地，全面實施氣候變遷脆弱度評估將需要龐大經費與時間。
3. 如何在政府有限經費情況下，考量整體氣候變遷衝擊最小原則，決定那些重大交通設施優先實施氣候變遷脆弱度評估，將是一項重要課題。

6.2 推動策略研擬

策略一：積極推動重大鐵公路建設氣候變遷脆弱度評估與調適行動。

說明：

1. 重大鐵公路不僅與人民日常生活息息相關，亦是一個國家能維持正常運作與社會經濟發展的最基本設施，面對日益嚴重之氣候變遷衝擊，應列為優先進行調適之對象。
2. 透過重大鐵公路建設氣候變遷脆弱度評估案例的實施，一方面可瞭解重大鐵公路建設面對氣候變遷之脆弱點，以利於調適行動計畫的擬定、決策與管理；另一方面亦可藉機將脆弱度評估的概念逐步導入各級交通設施主管機關，強化其他新建設施之規劃設計成果及既有設施之維修養護能力。

策略二：建置跨部會、跨領域之脆弱度與調適資訊平台。

說明：

1. 無論那一個領域，其面對氣候變遷之調適行動，都需要跨部會、跨領域的相關互支援與整合，交通設施亦不例外。以臺灣地區來說，交通設施實施脆弱度評估時，至少需要氣象局、國科會、國家災害防救科技中心、水利署、營建署、農委會協助提供相關資料。
2. 目前相關部會署陸續建置個別設施之脆弱度與調適資訊平台，為充分利用這些資訊平台的資訊，並避免重複投入資源進行監測與調查，達成相互支援之目的，建置跨部會、跨領域之脆弱度與調適資訊平台有其必要。

策略三：編列相關預算，定期辦理脆弱度評估作業。

說明：

1. 交通設施脆弱度評估必須因應氣候變遷，持續從實體面、社會面及經濟面中分別進行評估，以掌握設施最新的脆弱點，並利於研擬調適改善計畫。

2. 主管機關可於新建交通設施工程費或既有設施維護費項下，編列相關預算，定期辦理脆弱度評估作業。此外，對於脆弱度高之設施或位於易致災地區之設施，其辦理脆弱度評估之頻率與預算應提高。

策略四：發展適合交通設施之氣候變遷脆弱度評估與驗證方法，並精緻化脆弱度指標系統及資料庫。

說明：

1. 為提升脆弱度評估方法之客觀性與代表性，後續仍應依交通設施之特性，發展適合交通設施之氣候變遷脆弱度評估與驗證的方法。
2. 本研究雖已參酌國內外研究文獻，提出交通設施氣候變遷脆弱度評估建議指標，惟災害發生對交通設施所造成之衝擊，往往因地理區位及地形條件而有所差異，後續應該依照各交通設施之特性與功能，廣泛地蒐集及調查相關基礎資料以建立本土化之脆弱度評估資料庫，並且進行精緻化的檢討與修訂。

策略五：結合氣候變遷脆弱度評估作業，修訂傳統運輸規劃程序與工程設計規範。

說明：

1. 傳統運輸規劃程序僅針運輸問題提出可行方案並進行評估及決策，然氣候變遷衝擊已是現今人類所面臨之重大課題，應將脆弱度評估作業納入傳統運輸規劃程序，以提供決策者更完整之決策資訊。
2. 脆弱度評估作業能預先避開敏感之區位，以降低交通設施面對氣候變遷之風險，並節省日後維養之費用支出。

6.3 時程規劃與權責劃分

1. 時程規劃

依據交通部於 101 年 9 月彙整函送經建會之「國家氣候變遷調適行動方案（2012-2017）（草案）-維生基礎設施領域」^[11]之時程規劃，交通設施實施氣候變遷脆弱度評估的工作應即刻展開，並於 106 年前對相關設施完成首次基本的脆弱度評估，且爾後配合調適行動方案之修正，每 5 年應通盤檢討一次，惟每年可視極端氣候事件與重要課題之需要，進行個別檢討。

此外，考量重大災害對交通設施造成之影響，參酌交通部公路總局 100 年公布之「為因應災害復原重建、搶通知緊急工程申請面實施環境影響評估之辦理原則」之精神，交通設施發生嚴重災損時，應於災害發生後 6 個月內針進行局部或全部之脆弱度評估，以及時掌握交通設施之脆弱度與脆弱點是否有所變化，俾利於後續調適及改善行動計畫之擬定。

2. 權責劃分

前述提及交通設施氣候變遷脆弱度評估辦理過程，除交通設施主管機關外，尚需要跨部會、跨領域的相互支援與整合，例如氣象局、國科會、國家災害防救科技中心、水利署、營建署、農委會等，茲以表 6-1 說明各部會署／機關之權責。

其中，在氣象資料蒐集與分析階段，主要係以氣象局、國科會、國家災害防救科技中心、水利署、農委會等各部會署所提供之氣象資料的蒐集與分析為主；在脆弱度評估階段，係由交通設施主管機關主辦各項工作，並視需要請氣象局、國科會、國家災害防救科技中心、水利署、農委會、營建署及地方政府協助提供意見；至於在評估結果產出階段，則亦由交通設施主管機關負責繪製脆弱度地圖與建置脆弱度資料庫，期間可能需要與國家災害防救科技中心及營建署相關地理資訊系統及資料庫進行連結。

表 6-1 交通設施脆弱度評估過程之各部會署／機關權責劃分

階段	步驟	權責機關
氣象資料蒐集與分析	評估主體與範疇界定	交通設施主管機關
	測站氣象資料蒐集	氣象局、國科會、國家災害防救科技中心、水利署、農委會
	氣象資料趨勢分析	
	氣候變遷情境設定	
	降尺度與氣象資料合成	
脆弱度評估	脆弱度因子分析	交通設施主管機關、氣象局、國科會、國家災害防救科技中心、水利署、農委會、營建署、地方政府
	脆弱度評估指標建立	
	脆弱度評估方法選擇	交通設施主管機關
	脆弱度評估	
評估產出	脆弱度地圖繪製	交通設施主管機關、國家災害防救科技中心、營建署
	脆弱度資料庫建置	
	回饋至調適策略及決策	交通部、交通設施主管機關

第七章 結論與建議

7.1 結論

主要研究成果與結論包括：

1. 歸納「臺灣氣候變遷科學報告 2011」對臺灣過去百年的氣候變遷重要現象包括：

(1) 降雨方面

- ① 年均總降雨日數呈現明顯下降趨勢。
- ② 年總雨量在北、東部呈現增加，南部呈現減少，且全島平均雨量近 30 年在夏季呈顯著上升趨勢。
- ③ 小雨日數有大幅減少趨勢。
- ④ 以日雨量達 50mm 做為大雨標準，臺北大雨日數出現顯著增加趨勢，顯示臺北降雨強度的百年變化有增強趨勢。

(2) 溫度方面

- ① 百年間上升 1.4°C （增溫速度為 $0.14^{\circ}\text{C}/10$ 年），近 30 年增溫速度明顯加快，增溫速度為 $0.29^{\circ}\text{C}/10$ 年，約為百年趨勢值的 2 倍。
- ② 近 30 年西岸測站增溫趨勢明顯高於東岸。
- ③ 四季氣溫均呈增暖現象。其中，百年變化以秋季的暖化幅度最大，但近 30 年則以冬季的增溫幅度大於其他三季。

(3) 極端事件方面

- ① 極端高溫日數百年變化呈現增加趨勢。其中，臺北測站增加幅度最大，每 10 年增加 1.4 天。
- ② 極端低溫日數 100 年、50 年、30 年之線性變化均呈下降趨勢。其中，1985 年之後寒潮事件呈現明顯偏少現象。
- ③ 北部氣象乾旱漸趨緩和，中、南部則有嚴重旱化趨勢。

- ④ 1966 年之後日降雨量的極端值有增加之趨勢。其中，伴隨颱風的極端降雨，3~24 小時延時的暴雨事件在 2000~2006 年之發生頻率明顯高於 1970~1999 年每 10 年期間之統計量。另極端降雨事件在西部沒有增加趨勢，但北部與東部則有增加趨勢。
- ⑤ 1990 年以後的颱風個數和 1961~1989 年相比有增多的現象，且在 2000 年出現明顯增加轉折。另受到熱帶太平洋海溫升高及太平洋高壓勢力向西延展之影響，2000 年之後侵臺颱風路徑有偏向西北象限之現象。

- (4) 由於分析氣候變遷需要長時間觀測（常以百年計），其影響因素甚多，現階段觀測資料的時間長度與空間密度尚不足夠，再上部分氣候因子需考慮年代際之週期性變化影響，導致氣候變遷預測推估仍存在不確定性。
2. 本研究遵循「維生基礎設施」與「災害」兩領域之調適總目標的精神與意涵，將交通設施氣候變遷調適總目標訂為：「經由災害風險評估與綜合調適政策推動，降低交通設施在氣候變遷下之災害風險並強化整體調適能力，以維持其應有之運作功能並減少對社會經濟之衝擊」。
3. 綜合來說，交通設施在氣候變遷下之調適政策的主要核心思維就是「提升設施對災害作用之預測能力及加強其抵抗衝擊之能力」。本研究整併並轉化「維生基礎設施」與「災害」等兩個領域之氣候變遷調適策略及目標成交通設施氣候變遷調適策略共 8 項，詳見 3.2 節。
4. 綜整國內外相關文獻之定義與描述，脆弱度（Vulnerability）可以視為是「暴露度」、「敏感度」及「調適能力」的綜合函數，亦即評估氣候變遷脆弱度所需主要工作包括：評估各領域之氣候變遷暴露程度、評估特定領域對氣候變遷的敏感性、分析該領域之氣候變遷潛在衝擊，以及該領域容納或因應氣候變遷衝擊的能力等。
5. 綜整其他國外有關脆弱度指標與脆弱度評估相關文獻發現，由於缺乏標準化規範，使得絕大部分的研究均以脆弱度因子之組合來

評估與描述脆弱度。

6. 本研究參酌國內外辦理氣候變遷脆弱度評估之流程作法，研提交通設施氣候變遷脆弱度評估之完整作業流程如圖 5.1 所示，從受評估之交通設施主體與範疇界定起，大致可分成三大階段共 12 個步驟。
7. 氣溫、降雨、海平面上升及極端氣候事件不僅是氣候變遷影響環境的 4 個主要因子，亦是影響交通設施能否維持正常功能的最主要因素。然而，不同氣候影響因子可能引發的衝擊類型不相同，且同一影響因子在不同的空間區域引發的衝擊亦可能會有所差異。
8. 本研究從實體脆弱度、社會脆弱度及經濟脆弱度等三個類別，研提交通設施氣候變遷脆弱度評估指標如表 5-2 所示，並逐一分析個別指標所涉及之脆弱度面向。其中，多項指標均涉及敏感度面向，可知降低交通設施之敏感度為降低整體脆弱度之重點所在。
9. 在脆弱度評估方法方面目前仍以「脆弱度評估矩陣」（如表 5-3 所示）為主，分別針對敏感度、暴露度及調適能力之彼此關係進行綜合性評估分析。評估時並可應用多準則評估方法中的層級分析法與網絡分析法，藉由專家系統依據前述各評估指標之標準及合理性，加以找出交通設施脆弱度指標的階層關係與權重，並訂出分級標準（可分成 3 級或更多級）。
10. 有鑑於 GIS 技術的應用在國內已成熟發展多年，且已應用至土地使用及防災等領域，為能與相關資訊系統及資料平台進行整合與相互支援，交通設施脆弱度評估的結果亦宜運用 GIS 技術來展現。
11. 交通設施氣候變遷脆弱度評估過程需要實體面、社會面及經濟面等各面向的許多資料，且評估結果（即交通設施脆弱度）亦可作為後續進行交通設施氣候變遷風險評估之基本資料，因此有必要在交通設施脆弱度評估作業中一併建置資料庫，以利監測及後續分析及管理之相關應用。
12. 交通設施氣候變遷脆弱度評估的結果必須回饋至氣候變遷調適策

略的規劃與執行，以強化主管機關因應氣候變遷之決策能力及縮短決策時間，達成交通設施調適總目標。作法上可透過調適策略關聯檢查表的方式來進行檢視，如表 5-4 所示。

13. 針對未來推動交通設施氣候變遷脆弱度評估時，應進一步探討之重要課題如下：

- (1) 氣候變遷預測推估結果仍存在不確定性。
- (2) 交通設施脆弱度因子分析與應用需要個別進行實證。
- (3) 交通設施敏感度指標之評估能力是否足夠。
- (4) 跨部會、跨領域支援與合作的必要性。
- (5) 「脆弱度評估矩陣」的操作方法與評等準則是否明確且客觀。
- (6) 交通設施氣候變遷脆弱度評估範疇界定是否周延。
- (7) 交通設施是否需要全面實施氣候變遷脆弱度評估。

14. 有關交通設施氣候變遷調適與脆弱度評估之推動策略如下：

- (1) 積極推動重大鐵公路建設氣候變遷脆弱度評估與調適行動。
- (2) 建置跨部會、跨領域之脆弱度與調適資訊平台。
- (3) 於新建交通設施工程費或既有設施維護費項下編列相關預算，定期辦理脆弱度評估作業。
- (4) 發展適合交通設施之氣候變遷脆弱度評估方法，並精緻化脆弱度指標系統及資料庫。
- (5) 結合氣候變遷脆弱度評估作業，修訂傳統運輸規劃程序與工程設計規範。

15. 依據「國家氣候變遷調適行動方案（2012-2017）（草案）-維生基礎設施領域」之時程規劃，交通設施實施氣候變遷脆弱度評估的工作應即刻展開，並於 106 年前對相關設施完成首次基本的脆弱度評估，且爾後配合調適行動方案之修正，每 5 年應重新檢討實施一次。

16. 當交通設施發生嚴重災損時，應於災害發生後 6 個月內針進行局部或全部之脆弱度評估，以及時掌握交通設施之脆弱度與脆弱點是否有所變化，俾利於後續調適及改善行動計畫之擬定。

17.交通設施氣候變遷脆弱度評估過程需要跨部會、跨領域的相關互支援與整合。在氣象資料蒐集與分析階段，主要係以氣象局、國科會、國家災害防救科技中心、水利署、農委會等各部會署所提供之氣象資料的蒐集與分析為主；在脆弱度評估階段，係由交通設施主管機關主辦各項工作，並視需要請氣象局、國科會、國家災害防救科技中心、水利署、農委會、營建署及地方政府協助提供意見；至於在評估結果產出階段，則亦由交通設施主管機關負責繪製脆弱度地圖與建置脆弱度資料庫，期間可能需要與國家災害防救科技中心及營建署相關地理資訊系統及資料庫進行連結。

7.2 建議

本研究相關建議如下：

1. 為能及時並精確掌握全球及臺灣氣候變遷之最新科學發展趨勢，以及降低氣候變遷預測推估之不確定性，建議交通設施主管機關除借重跨部會、跨領域的協助外，亦可主動培養或引入具備氣象科學專業之人才，以於交通設施之規劃、設計、施工及維運階段，適時提供意見，甚至是發展適合交通設施之降尺度與氣象資料合成模式。
2. 由於重大鐵公路不僅與人民日常生活息息相關，亦是一個國家能維持正常運作與社會經濟發展的最基本設施，建議應積極推動重大鐵公路建設氣候變遷脆弱度評估與調適行動，一方面瞭解重大鐵公路建設面對氣候變遷之脆弱點，以有利於調適行動計畫的擬定、決策與管理；另一方面亦可藉機將脆弱度評估的概念逐步導入各級交通設施主管機關，強化其他新建設施之規劃設計成果及既有設施之維修養護能力。
3. 鑑於目前相關部會署已陸續建置個別設施之脆弱度與調適資訊平台，為充分利用這些資訊平台的資訊，並避免重複投入資源進行監測與調查，達成相互支援且資源共享之目的，建議應加強推動建置跨部會、跨領域之脆弱度與調適資訊平台。
4. 建議主管機關可於新建交通設施工程費或既有設施維護費項下，編列相關預算，定期辦理脆弱度評估作業，以掌握設施最新的脆弱點，並利於研擬調適改善計畫；此外，對於脆弱度高之設施或位於易致災地區之設施，其辦理脆弱度評估之頻率與預算應提高。
5. 交通部門應持續發展適合交通設施氣候變遷脆弱度評估的方法與工具，同時建立專屬之氣候變遷脆弱度評估指標系統與脆弱度資料庫，然後透過實際案例進行個別驗證，以提升並確保脆弱度評估結果之公信力。

參考文獻

1. 行政院經濟建設委員會，「國家氣候變遷調適政策綱領」，行政院 101 年 6 月 25 日院臺環字第 1010036440 號函核定。
2. 行政院國家科學委員會，「臺灣氣候變遷科學報告 2011」，民國 100 年 11 月。
3. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)，” Fourth Assessment Report: Climate Change 2001 (AR3)” ，2001。
4. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)，” Fourth Assessment Report: Climate Change 2007 (AR4)” ，2007。
5. National Snow and Ice Data Center, Arctic Sea Ice Shatters All Previous Record Lows, 1 October 2007。
6. 淡江大學水資源管理及政策研究中心，<http://www.water.tku.edu.tw/>。
7. 劉紹臣、符淙斌、許乾忠、陳正平、吳福婷，「溫室效應影響下的全球極端降雨變化」，中央研究院環境變遷研究中心，2009。
8. 國家災害防救科技中心，<http://www.ncdr.nat.gov.tw/>。
9. 經濟部水利署，<http://www.wra.gov.tw/>。
10. 行政院經濟建設委員會，「地方氣候變遷調適計畫規劃作業指引」，2012 年。
11. 交通部等，「國家氣候變遷調適行動方案（2012-2017）（草案）- 維生基礎設施領域」，101 年 9 月。
12. United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC), Adaptation Framework, <http://unfccc.int/adaptation/items/4159.php>.
13. United Nations Development Programme (UNDP), Adaptation Policy Framework, <http://www.undp.org/climatechange/adapt/apf.html>.
14. United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC), National Adaptation Programmes of Action , http://unfccc.int/national_reports/napa/items/2719.php.

15. Federal Highway Administration, Climate Change & Extreme Weather Vulnerability Assessment Framework, FHWA-HEP-13-005.
16. Federal Highway Administration, Assessing Vulnerability and Risk of Climate Change Effects on Transportation Infrastructure: Pilot of the Conceptual.
17. UK 2012 Climate Change Risk Assessment for the Transport Sector, January, 2012.
18. "Adapting Urban Transport to Climate Change", Urda Eichhorst (Wuppertal Institute for Climate, Environment and Energy), November, 2009.
19. "Climate Change and the Transport Sector: Are we travelling in the right direction? ", Maddocks in collaboration with HASSELL and Hyder, November, 2010.
20. Wang, X. D., Zhong, X.H., Liu, S. Z., Liu, J. G., Wang, Z. Y., Li, M. H., "Reginal assessment of environmental vulnerability in the Tibetan plateau: development and application of a new method," Journal of Arid Environments, 70(10), PP.1929-1939, 2008.
21. Dow, K. and Downing, T. E., "Vulnerability research: what things stand," Human Dimensions Quarterly, 1(1), PP.3-5, 1995.
22. Cutter, S. L., "Vulnerability to environmental hazards," Progress in Human Geography, 20(4), PP.529-539, 1996.
23. Cutter, S. L., Boruff, B. J. and Shirley, W. L., "Social vulnerability to environmental hazards," Social Science Quarterly, 84(2), PP.242-261, 2003.
24. Tobin G. A. and Montz B. E., "National Hazards: Explanation and Integration," The Guilford Press, New York, 1997.
25. Schneiderbauer, S. and Ehrlich, D., "Risk, Hazard and People's Vulnerability to Natural Hazards. A Review of Definitions, Concepts and Data, Joint Research Center, European Commission, 2004.

26. Bollin C. and Hidajat, R., "Community-Based disaster risk index: Pilot implementation in Indonesia," in J. Brikmann (Ed.) *Measuring Vulnerability to Natural Hazard-Towards Disaster Resilient Societies*, pp.271-289, United National University, New York, 2006.
27. Granger, K. and Hayne, P., "Natural Hazard and the Risk they Pose to South-East Queensland," *Geoscience Australia*, Canberra, 2001.
28. Messner F. and Meyer, V., "Flood damage, vulnerability and risk perception-Challenges for flood damage research," in J. Schanze, E. Zeman and J. Marsalek (Eds.) *Flood Risk Management: Hazards, Vulnerability and mitigation Measures*, pp.149-167, Springer Netherlands, Dordrecht, 2005.
29. Mulilis, J. P. and Duval, T. S., "Negative threat appeals and earthquake preparedness: A Person-relative-to-event (PrE) model for coping with threat," *Journal of Applied Social Psychology*, 25(15), pp.1319-1339, 1995.
30. Berdica, K., "An introduction to road vulnerability: what has been done, is done and should be done," *Transport Policy*, 9(2), pp.117-127, 2002.
31. Husdal J., "Reliability and vulnerability versus cost and benefits," *Proceedings of the Second International Symposium on Transportation Network Reliability*, pp.182-188, 2004.
32. Jenelius, E., Petersen, T. and Mattsson, L-G., "Importance and exposure in road network vulnerability analysis," *Transportation Research Part A*, 40(7), pp.537-560, 2006.
33. Taylor, M. A. and Susilawati, "Remoteness and accessibility in the vulnerability analysis of regional road network," *Transportation Part A*, 46(5), pp.761-771, 2012
34. 李光敦、何興亞、周憲德、鄧慰先，氣候變遷調適科技整合研究計畫-環境災害系統評估技術發展，行政院國家科學委員會專題研

- 究計畫，2012 年。
- 35.黃俊能，國家關鍵基礎設施防護（NCIP）脆弱度評估及相依性分析之研究，行政院國家科學委員會專題研究計畫，2012 年。
 - 36.洪啟東，水土資源利用管理及災害風險管理方法與系統之研究－氣候環境變遷對社經環境系統脆弱度與回復力的影響評估，行政院國家科學委員會專題研究計畫，2012 年。
 - 37.林文苑、莊睦雄，天然災害弱勢族群評估指標與避難疏散援助機制之研－天然災害老人弱勢族群社經脆弱度指標建立與應用研究，行政院國家科學委員會專題研究計畫，2009 年。
 - 38.白仁德、林建元、賴炳樹，各層級國土空間規劃與管理之脆弱度與回復力之評估研究－以都市空間為對象(I)，行政院國家科學委員會專題研究計畫，2009 年。
 - 39.經濟部水利署，氣候變遷對水環境之衝擊與調適研究第 2 階段管理計畫，100 年 2 月。
 - 40.賴進松、潘宗毅、童慶斌、張國強、譚義績、林彥廷，員山子分洪隧道受氣候變遷影響之脆弱度分析，農業工程學報，第 55 卷第 2 期，98 年 6 月。
 - 41.經濟部水利署規劃試驗所，強化南部水資源分區因應氣候變遷水資源管理調適能力研究，2010 年。
 - 42.經濟部水利署規劃試驗所，強化高屏溪流域因應氣候變遷防洪調適能力研究計畫(總報告)，2011 年。
 - 43.財團法人台灣綜合研究院，能源產業因應氣候變遷之脆弱度及風險評估工具，能源產業因應氣候變遷調適策略研討會，101 年 11 月。
 - 44.范正成，氣候變遷對高屏溪流域災發生潛勢之影響評估，行政院農業委員會水土保持局，2011 年。
 - 45.顧承宇、陳建忠、張怡文、許世孟、陳耐錦、溫惠鈺，氣候變遷下極端降雨引致廣域坡地災害評估技術之研究，中華水土保持學報，43(1)，pp.75-84，2012 年。

- 46.馮正民、謝承憲、柯旻嬋，建構都會區路網脆弱度評量模式，中華民國運輸學會 100 年學術論文國際研討會論文集，pp.1703-1718，2011 年。
- 47.Hsieh, C. H., Su, J. L. And Feng, C. M., “Disaster risk analysis of highway bridges from vulnerability perspective,” Journal of the Eastern Asia Society for Transportation studies, 9, pp.1-15, 2011.
- 48.Hsieh, C. H. and Feng, C. M., “Resilience determination of metropolitan road network based on vulnerability and interdependency analysis,” Proceeding of the 17th International Conference of Hong Kong Society for Transportation studies, pp.665-672, 2012.
- 49.Chen, B.Y., Lam, W.H.K., Sumalee, A., Li, Q. and Li, Z-C., “Vulnerability analysis for large-scale and congested road networks with demand uncertainty,” Transportation Research Part A: Policy and Practice, 46(3), pp.501-516, 2012.
- 50.姚乃嘉、蔡龍治、許文科、黃榮堯、蘇木春、陳介豪，極端氣候下複合性災害防治之研究—極端氣候後下因應複合性災害橋梁工程調適策略之研究(I)，2011 年。
- 51.經濟部水利署，強化臺灣西北及東北地區因應氣候變遷海岸災害調適能力研究計畫(1/2)，101 年 12 月。
- 52.Tung, C. P. and D. A. Haith, 1995, Global Warming Effects on New York Streamflows, Journal of Water Resources Planning and Management, 121(2): 216-225.
- 53.環興科技股份有限公司，重大鐵公路建設氣候變遷調適策略與脆弱度評估指標之研究工作計畫書，交通部運輸研究所，102 年 3 月。

附錄 1

計畫摘要

計畫摘要

一、研究緣起與目的

「氣候變遷調適」乃是要透過各種具體且有效的策略與措施的規劃、執行及落實，將人類本身及其所賴以生存與發展的各種人造系統與自然系統的脆弱度（vulnerability）降到最低，以確保人類的持續生存與發展不會受到氣候變遷的衝擊而中斷。

交通設施為國家維生基礎設施之一環，不僅與人民日常生活息息相關，亦是一個國家能維持正常運作最基本的設施。一般而言，交通設施的範圍涵蓋公路、軌道、橋梁及隧道、港口及機場等工程、場站及相關附屬設備。有鑑於全球氣候變遷所引起之衝擊似有日漸加劇之趨勢，因此如何進行有效的氣候變遷調適作為，以降低交通設施的脆弱度，提昇其在氣候變遷下之調適能力，進而維持其應有之運作功能並減少對社會之衝擊，將是未來交通部門因應全球氣候變遷衝擊的重要課題。

行政院 101 年 6 月 25 日核定之「國家氣候變遷調適政策綱領」已揭示各領域設施辦理氣候變遷脆弱度評估的重要性與必要性，本研究依該政策綱領之指導，重新檢視國內交通設施氣候變遷調適策略與重要課題，並且參酌國內外有關氣候變遷脆弱度評估之研究文獻與經驗作法，進行交通設施氣候變遷脆弱度評估項目與作業流程之深入探討，期能透過本研究之成果，提升交通設施主管機關對氣候變遷調適之瞭解與重視，並作為後續各機關進行交通設施氣候變遷脆弱度評估及建置氣候變遷調適資訊平台之參據。

本研究主要目的如下：

1. 確認我國未來面對之氣候變遷趨勢與可能影響，並且重新檢視交通設施氣候變遷調適策略與重要課題。
2. 研提交通設施氣候變遷脆弱度評估之建議項目與作業流程，以作為後續相關主管機關進行交通設施氣候變遷脆弱度評估及建置氣候變遷調適資訊平台之參據。
3. 透過本研究之成果，提升交通設施主管機關對氣候變遷調適之瞭解與重視。

二、研究範圍與內容

本研究以由交通部轄管之交通設施（包括公路、鐵路、港口及機場等）為主要研究對象，並以前揭設施之氣候變遷脆弱度評估相關作業為主要研究範圍。主要研究內容分述如下：

1. 我國氣候變遷趨勢與影響分析

蒐集彙整包括行政院國家災害防救科技中心、國家科學委員會、環境保護署、農業委員會、經濟部水利署、交通部中央氣象局、中央研究院環境變遷中心，以及國內大學與研究機構歷年來有關我國氣候變遷之相關研究資料，以確認國內交通設施未來將面對之氣候變遷趨勢與可能的影響分析。

2. 交通設施氣候變遷調適策略探討

根據前項氣候變遷趨勢與影響分析之結果，重新檢視行政院經濟建設委員會所提「氣候變遷調適政策綱領」中有關「維生基礎設施」與「災害」領域之調適策略與交通設施之關聯性，並研提適合交通設施之氣候變遷調適策略。

3. 國內、外氣候變遷調適與脆弱度評估文獻回顧

為對氣候變遷調適與脆弱度評估有更進一步之瞭解，蒐集並彙整國內、外有關研究文獻與經驗作法，並且進行回顧與分析，以作為研提交通設施氣候變遷脆弱度評估作業流程與評估項目之參考基礎。

4. 交通設施氣候變遷脆弱度評估作業流程之研析

參酌前項國內、外氣候變遷調適與脆弱度評估之文獻彙析結果，進一步研析適合交通設施氣候變遷脆弱度評估之作業流程，並針對作業流程中之交通建設氣候變遷脆弱度因子分析、評估項目（指標）建立、評估方法選定及成果展現等主要工作進行探討。

5. 重要課題探討與推動策略研擬

依據前述研究成果，就交通設施進行氣候變遷調適與脆弱度評估之重要課題進行探討，並研提未來推動作法、相關配套措施及推動時程。

三、氣候變遷趨勢與影響分析

1. 未來臺灣氣候推估

(1) 溫度

21 世紀末臺灣地區的氣溫上升幅度，相對於 20 世紀末，

將介於 2.0°C 至 3.0°C 之間，略小於全球平均值的上升幅度。在區域與季節方面，北臺灣較南臺灣的增溫幅度略高，春季較其他季節略低。

(2) 雨量

未來冬季平均雨量多半都是減少的，減少幅度介於-3%至-22%之間，南臺灣春季未來的平均雨量變化與冬季非常類似；未來夏季平均雨量變化，除了北臺灣以外，推估降水將增加，平均雨量變化介於+2%至+26%之間。

(3) 颱風

西北太平洋颱風以及影響台灣的颱風個數與強度，受年代際變化影響較大，直接受暖化影響之線性變化趨勢則不明顯。然而，根據大多數氣候模式推估，颱風個數偏少的機率偏高，但颱風增強的機率與極端降雨的強度可能增加。

2. 交通系統的衝擊

(1) 公路

在暴雨作用下，容易受到邊坡滑動崩塌的威脅，亦常因河谷沖蝕加劇而危及道路路基，造成公路系統中斷。若河川上游發生洪水、土石流等災害，則沖刷裸露基礎之橋梁，極容易因後續的地震而傾倒斷裂，下游橋梁的橋墩、橋面也易遭洪水、土石流沖毀或掩埋。

(2) 鐵路

鐵路系統因降雨與強風增強，平原低窪地區容易造成淹水，山區易受到邊坡滑動崩塌的威脅，而河谷沖蝕加劇也會危及鐵軌路基，造成鐵路系統中斷。

(3) 港口

隨著地球暖化造成水位上升，與變異度極端化造成颱風波浪增大，將會影響港灣構造物的結構安全，並增加港灣淤積，進而影響港埠營運作業，導致海運運輸中斷。

(4) 機場

在極端降雨的侵襲下，若是區域排水無法負荷暴雨雨量，將造成機場跑道淹水，影響班機起降。另外，在暴雨侵襲下，也會破壞機場設施，如場站、跑道等。

四、交通設施氣候變遷調適總目標與策略

本研究遵循「維生基礎設施」及「災害」兩領域之調適總目標的

精神與意涵，將交通設施氣候變遷調適總目標訂為：「經由災害風險評估與綜合調適政策推動，降低交通設施在氣候變遷下之之災害風險並強化整體調適能力，以維持其應有之運作功能並減少對社會經濟之衝擊。」

交通設施氣候變遷調適的核心思維為「提升設施對災害作用之預測能力及加強其抵抗衝擊之能力」，計有 8 項策略：

1. 落實與檢討修訂既有法令與相關規範，檢視與評估現有重大交通設施之脆弱度與防護能力，並強化災害防護計畫。
2. 推動氣候變遷災害風險調查與評估、高災害風險地區與潛在危險地區之劃設，並且建立設施安全性風險評估機制及生命損失衝擊分析模式。
3. 加速國土監測資源與災害預警資訊系統之整合及平台建立，並且擬定及落實交通設施之分等級開發與復建原則。
4. 落實交通設施維修養護，提升基本抗災及耐災之能力。
5. 推動流域綜合治理，加強各管理機關間協調機制，以及與產業、學術界資源之整合，以降低氣候風險。
6. 提升交通設施營運維護管理人力素質及技術，並且推動氣候變遷衝擊與危險地區資訊公開、宣導、預警、防災、避災之教育與演習。
7. 建置交通設施營運管理資料庫並強化監測作業。
8. 研發交通設施之氣候變遷調適新技術。

五、脆弱度之定義

「脆弱度」即某個系統受氣候變遷（包括氣候的變異性及極端情況）負面影響及無法因應的程度。脆弱度與該系統暴露所在之氣候變化的特性、強度及頻率，以及系統本身之敏感度及調適能力有關。

1. 暴露度（exposure）

指設施或系統受氣候變遷直接影響的範圍。若為整體設施或系統受影響，則為高暴露度；部分受影響則為中暴露度；不直接受影響則為低暴露度。

2. 敏感度（sensitivity）

設施或系統損壞導致重要單位如國際機場、科學園區、政治及軍事等重要指揮中心、緊急應變中心等運作受影響。若導致設

施或系統無法運作則為高敏感度、維持最低限度之運作則為中敏感度、可持續運作則為低敏感度。敏感度在某些情況下亦代表該設施/系統之重要性。

3. 調適能力 (adaptive capacity)

設施或系統抵禦、承受及容納衝擊及復原的能力。設施或系統得以及時復原則為高適應力、需一段時間始可復原則為中適應力、無法快速復原則為低適應力。

六、交通設施氣候變遷脆弱度評估作業流程

有關交通設施氣候變遷脆弱度評估之完整作業流程，從受評估之交通設施主體與範疇界定起，大致可分成三大階段共 12 個步驟，如圖 1 所示。

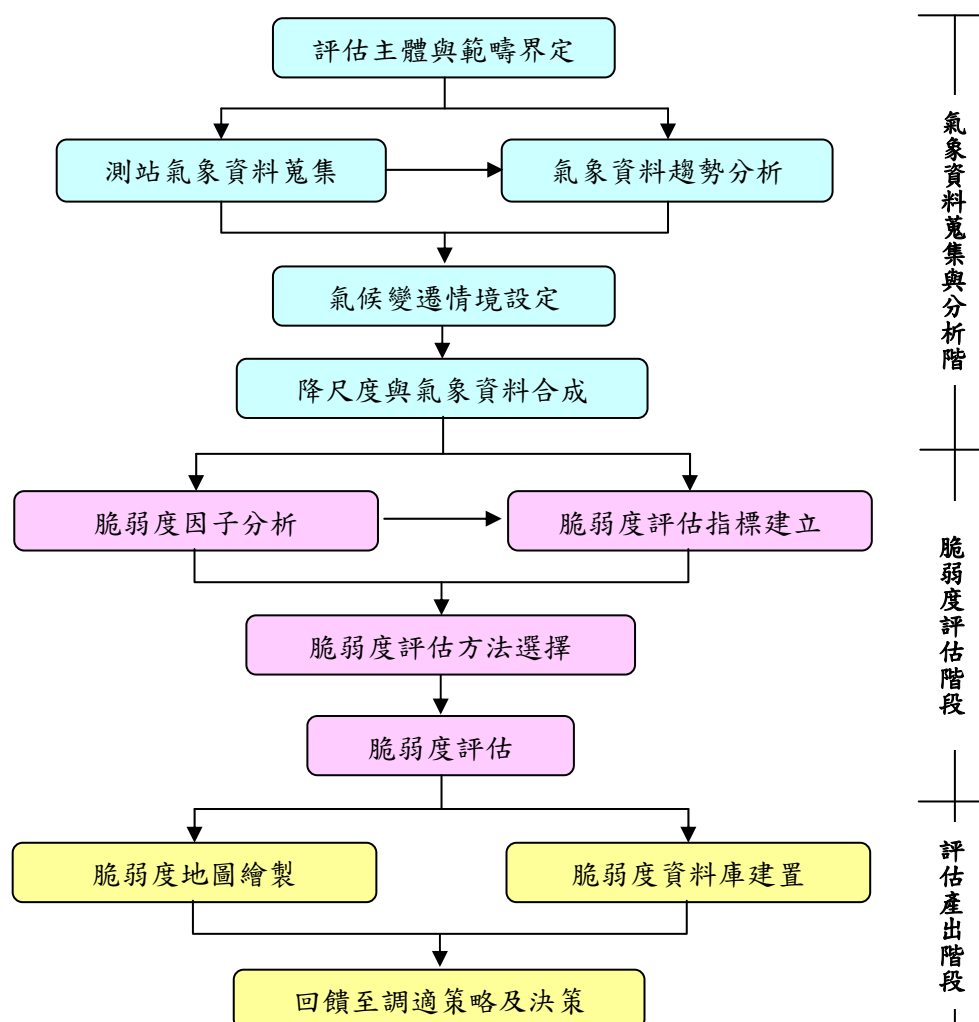


圖 1 交通設施氣候變遷脆弱度評估完整作業流程

七、交通設施脆弱度評估指標

交通設施脆弱度評估指標建議可分為實體脆弱度、社會脆弱度及經濟脆弱度等三個類別之指標，如表 1 所示。

表 1 交通設施脆弱度評估指標建議表

指標類別	評估指標	評估準則	涉及脆弱度面向
實體脆弱度	設計標準	<ul style="list-style-type: none"> 交通設施之相關工程設計標準。 設施設計洪水週期、結構或基礎型式愈符合相關設計標準並具有基本抗災能力者，代表調適能力愈高，即實體脆弱度愈低。 	調適能力
	替代路徑	<ul style="list-style-type: none"> 可提供與原交通設施相同或部分運輸服務功能之其他路徑。 評估路段經過區域可使用的替代路徑愈多或距離交通設施之距離愈短，則代表調適能力愈高，即實體脆弱度愈低。 	調適能力
	交通量	<ul style="list-style-type: none"> 交通設施功能喪失或遭受破壞後，受影響之每日交通量。 受影響每日交通量愈高，代表交通設施敏感度愈高，即實體脆弱度愈高。 	敏感度
	旅行時間	<ul style="list-style-type: none"> 交通設施功能喪失或遭受破壞後，整體旅次之旅行時間改變情形（通常指旅行時間增加）。 旅行時間增加愈少，代表設施敏感度愈低，即實體脆弱度愈低。 	敏感度
	環境敏感區干擾	<ul style="list-style-type: none"> 交通設施與環境敏感區之距離、設施位於敏感區之長度或面積。 若距離愈近、長度愈長、面積愈大，則代表暴露度及敏感度愈高，即實體脆弱度愈高。 	暴露度、敏感度
	歷史災害規模	<ul style="list-style-type: none"> 交通設施歷史發生一定規模之災害次數或災損金額。 災害次數愈多、災損金額愈高，則代表暴露度及敏感度愈高，即實體脆弱度愈高。 	暴露度、敏感度

表 1 交通設施脆弱度評估指標建議表(續 1)

指標類別	評估指標	評估準則	涉及脆弱度面向
社會脆弱度	人口密度	<ul style="list-style-type: none"> 人口密度愈高，表示當交通設施功能喪失或遭受破壞後，此區位可能受影響之人口亦愈高，即可視為敏感度愈高，或社會脆弱度愈高。 	敏感度
	高齡人口比例	<ul style="list-style-type: none"> 高齡人口由於生心理狀況的限制，使其在災害自保及應變能力方面較弱，或需要較多人的照顧。 因此高齡人口比例愈高，則代表敏感度愈高，即社會脆弱度愈高。 	敏感度
	身心障礙人口比例	<ul style="list-style-type: none"> 同高齡人口比例之概念，身心障礙者由於生心理狀況的限制，使其在災害自保及應變能力方面較弱，或需要較多人的照顧。 因此身心障礙者愈高，則代表敏感度愈高，即社會脆弱度愈高。 	敏感度
	低收入人口比例	<ul style="list-style-type: none"> 交通設施功能喪失或遭受破壞後，將衍生轉換運具或繞路之情形，低收入人口考量衍生額外成本，相對較難以因應。 低收入人口比例愈高，代表社會脆弱度愈高。 	敏感度
	依賴人口扶養率	<ul style="list-style-type: none"> 依賴人口（指未滿15 歲之幼年人口及65 歲以上之老年人口）與工作年齡人口之比例。 其值愈高顯示工作年齡人口平均之扶養負擔愈重，一旦交通設施功能喪失或遭受破壞後，可能導致工作年齡人口之工作及收入受影響，即社會脆弱度愈高。 	敏感度
	距急救責任醫院距離	<ul style="list-style-type: none"> 主要用來評量交通設施受危害時之應變與救護能力，可視為社會調適能力的一部分。 交通設施距急救責任醫院之平均距離愈遠，代表應變與救護能力愈不足，即社會脆弱度愈高。 	敏感度、調適能力

表 1 交通設施脆弱度評估指標建議表(續 2)

指標類別	評估指標	評估準則	涉及脆弱度面向
經濟脆弱度	產業損失	<ul style="list-style-type: none"> 受影響產業之產值或貿易減少金額 產業損失金額愈高，代表敏感度愈高，即經濟脆弱度愈高。 	敏感度
	產業活動	<ul style="list-style-type: none"> 評估範圍內之產業活動需要倚賴評估路段運輸的程度。 主要產業（如二級產業）活動愈需要倚賴評估路段運輸，且替代道路運輸量偏低，則敏感度愈高，即經濟脆弱度愈高。 	敏感度
	產業運輸載運量	<ul style="list-style-type: none"> 指交通設施功能喪失或破壞後，受影響之每日產業運輸載運量。 受影響之每日產業運輸載運量愈高，代表交通設施敏感度愈高，即經濟脆弱度愈高。 	敏感度
	家戶可支配所得	<ul style="list-style-type: none"> 家戶可支配所得顯示其經濟能力，交通設施功能喪失或破壞後，經濟能力較佳者受衝擊相對較小。 平均家戶可支配所得愈高，代表所受衝擊相對較小，即經濟脆弱度愈低。 	敏感度、調適能力

八、交通設施脆弱度評估方法

參酌國內外研究文獻與實施經驗，目前在脆弱度評估方法方面主要透過「脆弱度評估矩陣」，分別針對敏感度、暴露度及調適能力之彼此關係進行綜合性評估分析。其中，評估時可先就敏感度與暴露度進行潛在衝擊評估分析，再就其評估結果加上調適能力進行綜合脆弱度評估，詳如表 2 及表 3 所示。

表 2 潛在衝擊評估矩陣

潛在衝擊評估矩陣		敏感度		
		低	中	高
暴露度	低	低	低	中
	中	低	中	高
	高	中	高	高

表 3 脆弱度評估矩陣

脆弱度評估矩陣		潛在衝擊		
		低	中	高
調適能力	低	中	高	高
	中	低	中	高
	高	低	低	中

九、重要課題

1. 氣候變遷預測推估結果仍存在不確定性。
2. 交通設施脆弱度因子分析與應用需要個別進行實證。
3. 交通設施敏感度指標之評估能力是否足夠。
4. 跨部會、跨領域支援與合作的必要性。
5. 「脆弱度評估矩陣」的操作方法與評等準則是否明確且客觀。
6. 交通設施氣候變遷脆弱度評估範疇界定是否周延。
7. 交通設施是否需要全面實施氣候變遷脆弱度評估。

十、推動策略

1. 積極推動重大鐵公路建設氣候變遷脆弱度評估與調適行動。
2. 建置跨部會、跨領域之脆弱度與調適資訊平台。
3. 編列相關預算，定期辦理脆弱度評估作業。
4. 發展適合交通設施之氣候變遷脆弱度評估與驗證方法，並精緻化脆弱度指標系統及資料庫。
5. 結合氣候變遷脆弱度評估作業，修訂傳統運輸規劃程序與工程設計規範。

十一、時程規劃

1. 依據「國家氣候變遷調適行動方案（2012-2017）（草案）-維生基礎設施領域」之時程規劃，交通設施應即刻展開氣候變遷脆弱度評估工作，並於 106 年前完成首次基本的脆弱度評估。
2. 爾後配合調適行動方案之修正，每 5 年應通盤檢討一次，惟每年可視極端氣候事件與重要課題之需要，進行個別檢討。
3. 考量重大災害對交通設施造成之影響，參酌交通部公路總局 100 年公布之「為因應災害復原重建、搶通知緊急工程申請面實施環境影響評估之辦理原則」之精神，交通設施發生嚴重災損時，應於災害發生後 6 個月內針進行局部或全部之脆弱度評估，以及時掌握交通設施之脆弱度與脆弱點是否有所變化，俾利於後續調適及改善行動計畫之擬定。

十二、權責劃分

階段	步驟	權責機關
氣象資料蒐集與分析	評估主體與範疇界定	交通設施主管機關
	測站氣象資料蒐集	氣象局、國科會、國家災害防救科技中心、水利署、農委會
	氣象資料趨勢分析	
	氣候變遷情境設定	
	降尺度與氣象資料合成	
脆弱度評估	脆弱度因子分析	交通設施主管機關、氣象局、國科會、國家災害防救科技中心、水利署、農委會、營建署、地方政府
	脆弱度評估指標建立	
	脆弱度評估方法選擇	交通設施主管機關
	脆弱度評估	
評估產出	脆弱度地圖繪製	交通設施主管機關、國家災害防救科技中心、營建署
	脆弱度資料庫建置	
	回饋至調適策略及決策	交通部、交通設施主管機關

十三、結論與建議

1. 結論

- (1) 氣候變遷需要長時間觀測（常以百年計），其影響因素甚多，現階段觀測資料的時間長度與空間密度尚不足夠，再上部分氣候因子需考慮年代際之週期性變化影響，導致氣候變遷預測推估仍存在不確定性。
- (2) 本研究將交通設施氣候變遷調適總目標訂為：「經由災害風險評估與綜合調適政策推動，降低交通設施在氣候變遷下之災害風險並強化整體調適能力，以維持其應有之運作功能並減少對社會經濟之衝擊」，其核心思維就是「提升設施對災害作用之預測能力及加強其抵抗衝擊之能力」。
- (3) 本研究整併並轉化「維生基礎設施」與「災害」等兩個領域之氣候變遷調適策略及目標成交通設施氣候變遷調適策略共 8 項。
- (4) 綜整國內外相關文獻之定義與描述，脆弱度（Vulnerability）可以視為是「暴露度」、「敏感度」及「調適能力」的綜合函數。
- (5) 本研究研提交通設施氣候變遷脆弱度評估之完整作業流程如圖

1 所示，從受評估之交通設施主體與範疇界定起，大致可分成三大階段共 12 個步驟。

- (6) 本研究從實體脆弱度、社會脆弱度及經濟脆弱度等三個類別，研提交通設施氣候變遷脆弱度評估指標，並逐一分析個別指標所涉及之脆弱度面向。
- (7) 在脆弱度評估方法方面目前仍以「脆弱度評估矩陣」為主，分別針對敏感度、暴露度及調適能力之彼此關係進行綜合性評估分析。評估時並可應用層級分析法與網絡分析法，藉由專家系統依據前述各評估指標之標準及合理性，加以找出交通設施脆弱度指標的階層關係與權重，並訂出分級標準（可分成 3 級或更多級）。
- (8) 交通設施氣候變遷脆弱度評估的結果必須回饋至氣候變遷調適策略的規劃與執行，以強化主管機關因應氣候變遷之決策能力及縮短決策時間，達成交通設施調適總目標，作法上可透過調適策略關聯檢查表的方式來進行檢視。
- (9) 針對未來推動交通設施氣候變遷脆弱度評估時，應進一步探討之重要課題如下：
 - ① 氣候變遷預測推估結果仍存在不確定性。
 - ② 交通設施脆弱度因子分析與應用需要個別進行實證。
 - ③ 交通設施敏感度指標之評估能力是否足夠。
 - ④ 跨部會、跨領域支援與合作的必要性。
 - ⑤ 「脆弱度評估矩陣」的操作方法與評等準則是否明確且客觀。
 - ⑥ 交通設施氣候變遷脆弱度評估範疇界定是否周延。
 - ⑦ 交通設施是否需要全面實施氣候變遷脆弱度評估。
- (10) 有關交通設施氣候變遷調適與脆弱度評估之推動策略如下：
 - ① 積極推動重大鐵公路建設氣候變遷脆弱度評估與調適行動。
 - ② 建置跨部會、跨領域之脆弱度與調適資訊平台。
 - ③ 編列相關預算，定期辦理脆弱度評估作業。
 - ④ 發展適合交通設施之氣候變遷脆弱度評估方法，並精緻化脆弱度指標系統及資料庫。
 - ⑤ 結合氣候變遷脆弱度評估作業，修訂傳統運輸規劃程序與工程設計規範。
- (11) 在時程規劃方面，交通設施實施氣候變遷脆弱度評估的工作應即刻展開，並於 106 年前對相關設施完成首次基本的脆弱度評

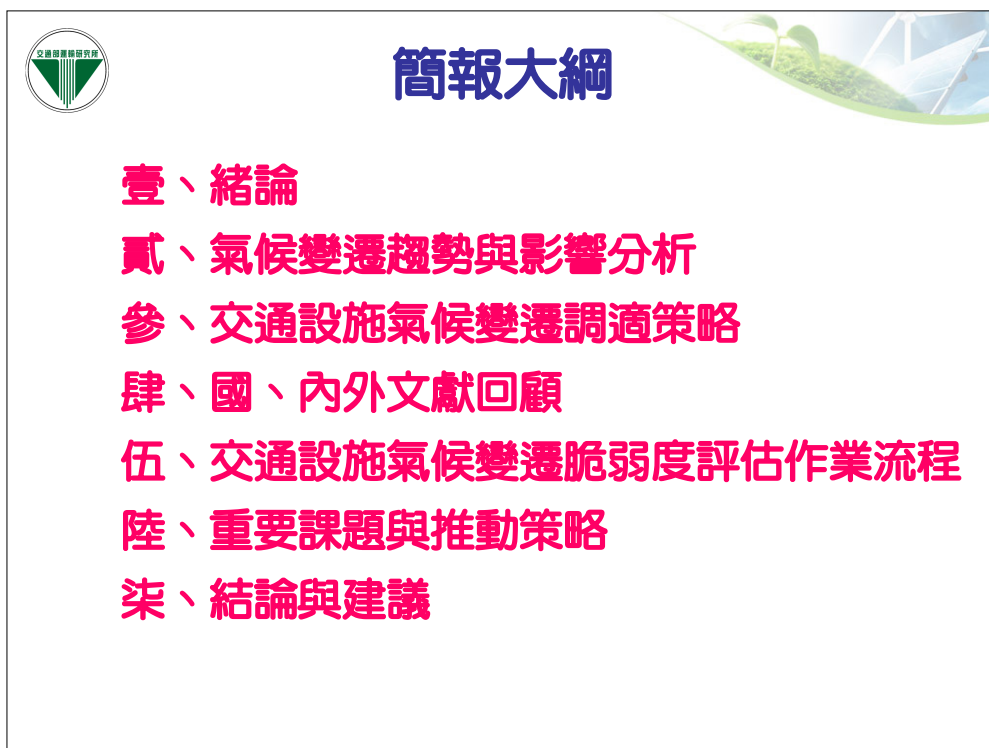
估，且爾後配合調適行動方案之修正，每 5 年應重新檢討實施一次；另交通設施應於嚴重災害發生後 6 個月內，針進行局部或全部之脆弱度評估，以及時掌握交通設施之脆弱度與脆弱點是否有所變化，俾利於後續調適及改善行動計畫之擬定。

2. 建議

1. 為能及時並精確掌握全球及臺灣氣候變遷之最新科學發展趨勢，以及降低氣候變遷預測推估之不確定性，建議交通設施主管機關除借重跨部會、跨領域的協助外，亦可主動培養或引入具備氣象科學專業之人才，以於交通設施之規劃、設計、施工及維運階段，適時提供意見，甚至是發展適合交通設施之降尺度與氣象資料合成模式。
2. 由於重大鐵公路不僅與人民日常生活息息相關，亦是一個國家能維持正常運作與社會經濟發展最基本的設施，建議應積極推動重大鐵公路建設氣候變遷脆弱度評估與調適行動，一方面瞭解重大鐵公路建設面對氣候變遷之脆弱點，以有利於調適行動計畫的擬定、決策與管理；另一方面亦可藉機將脆弱度評估的概念逐步導入各級交通設施主管機關，強化其他新建設施之規劃設計成果及既有設施之維修養護能力。
3. 鑑於目前相關部會署已陸續建置個別設施之脆弱度與調適資訊平台，為充分利用這些資訊平台的資訊，並避免重複投入資源進行監測與調查，達成相互支援且資源共享之目的，建議應加強推動建置跨部會、跨領域之脆弱度與調適資訊平台。
4. 建議主管機關可於新建交通設施工程費或既有設施維護費項下，編列相關預算，定期辦理脆弱度評估作業，以掌握設施最新的脆弱點，並利於研擬調適改善計畫；此外，對於脆弱度高之設施或位於易致災地區之設施，其辦理脆弱度評估之頻率與預算應提高。
5. 交通部門應持續發展適合交通設施氣候變遷脆弱度評估的方法與工具，同時建立專屬之氣候變遷脆弱度評估指標系統與脆弱度資料庫，然後透過實際案例進行個別驗證，以提升並確保脆弱度評估結果之公信力。

附錄 2

簡報





壹、緒論 (1/3)

► 研究緣起

- 「氣候變遷調適」乃是要透過各種具體且有效的策略與措施的規劃、執行及落實，將人類本身及其所賴以生存與發展的各種人造系統與自然系統的脆弱度（vulnerability）降到最低，以確保人類的永續生存與發展不會受到氣候變遷的衝擊而中斷。
- 行政院已於101年6月25日核定經濟建設委員會所提「國家氣候變遷調適政策綱領」，在該政策綱領中已揭示各領域設施辦理氣候變遷脆弱度評估的重要性與必要性。
- 交通設施為國家維生基礎設施之一環，不僅與人民日常生活息息相關，亦是一個國家能維持正常運作的最基本設施。
- 如何進行有效的氣候變遷調適作為，以降低交通設施的脆弱度，提昇其在氣候變遷下之調適能力，進而維持其應有之運作功能並減少對社會之衝擊，將是未來交通部門因應全球氣候變遷衝擊的重要課題。



壹、緒論 (2/3)

► 研究目的

- 確認我國未來面對之氣候變遷趨勢與可能影響，並且重新檢視交通設施氣候變遷調適策略與重要課題。
- 研提交通設施氣候變遷脆弱度評估之建議項目與作業流程，以作為後續相關主管機關進行交通設施氣候變遷脆弱度評估及建置氣候變遷調適資訊平台之參據。
- 透過本研究之成果，提升交通設施主管機關對氣候變遷調適之瞭解與重視。

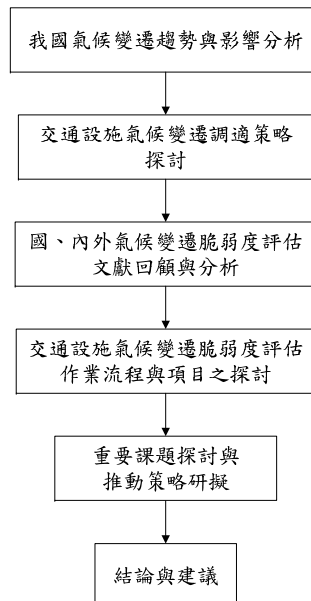
► 研究範圍

- 以由交通部轄管之交通設施（包括公路、鐵路、港口及機場等）為主要研究對象，並以前揭設施之氣候變遷脆弱度評估相關作業為主要研究範圍。



壹、緒論 (3/3)

▶ 研究流程



貳、氣候變遷趨勢與影響分析 (1/8)

▶ 全球氣候變遷

● 全球暖化的趨勢不是線性趨勢

- ✓ 過去 100 年（1906~2005 年）全球平均表面溫度上升 $0.74^{\circ}\text{C} \pm 0.18^{\circ}\text{C}$ ，惟過去 50 年的暖化速度卻是過去 100 年的兩倍，顯示全球暖化趨勢有逐漸加速的現象。

● 陸地暖化速度大於海洋

- ✓ 1979 年以後，陸地表面氣溫上升大約是海洋的兩倍（超過 $0.27^{\circ}\text{C}/\text{十年}$ 比 $0.13^{\circ}\text{C}/\text{十年}$ ），最顯著的暖化發生於冬季（12-2 月）與春季（3-5 月）的北半球。

● 極端溫度改變與氣候暖化一致

- ✓ 在 70~75% 有觀測資料的陸地，霜日在中緯度地區大規模減少、熱極端事件增加和冷極端事件減少。



貳、氣候變遷趨勢與影響分析 (2/8)

▶ 全球氣候變遷

- 每個大洋所有緯度的海面溫度都有暖化現象
 - ✓ 南北半球的大西洋暖化程度不同，太平洋的暖化則受赤道的聖嬰現象和太平洋年代際變化干擾，印度洋顯現比較穩定的暖化，這些特徵導致海洋表面不同的局地暖化速率。
- 北極平均溫度以全球平均溫度的兩倍速率增加
 - ✓ 北極溫度有明顯年代際變化，且衛星觀測資料顯示，夏季北極海冰覆蓋面積自1979年以來至2007年以每十年10%（約72,000平方公里）的速率減少。
- 全球降水型態的改變
 - ✓ 北緯30度以北的陸地，1900至2005年普遍增加，但熱帶地區1970年代後呈現下降趨勢；北緯10度到30度地區，1900至1950年代降水顯著增加，但1970年後呈現減少；北緯10度到南緯10度熱帶地區呈現下降趨勢，且1977年以後特別明顯。降水型態改變，比溫度改變更具空間和季節性的變動，但顯著降水變化發生的地方，和氣流的變化是一致的。



貳、氣候變遷趨勢與影響分析 (3/8)

▶ 全球氣候變遷情形

- 強烈降水事件增加
 - ✓ 許多陸地地區（即使是某些總雨量減少的地區）豪雨事件（95百分位）數的增加是可能的，這與氣候暖化與大氣中水氣量顯著增加是一致的。
- 乾旱變的越來越常見，特別是在熱帶和副熱帶地區
 - ✓ 過去30年，較強且持續較久的乾旱在許多地區越來越頻繁。依據帕爾默乾旱指數（Palmer Drought Severity Index, PDSI）顯示，陸地降水減少，以及因為溫度上升造成蒸發量提高，是使越來越多地區出現乾旱的重要因素。
- 海平面高度節節上昇
 - ✓ 海平面於過去數十年間逐漸上昇，而在進行海平面上昇推估過程中，熱膨脹是最重要的因素，約佔70到75%。此外，冰河、冰帽和格陵蘭冰床也是影響海平面高度的重要因素。



貳、氣候變遷趨勢與影響分析 (4/8)

▶ 臺灣氣候變遷情形

● 降雨

- ✓ 年均總降雨日數呈現明顯下降趨勢。
- ✓ 年總雨量在北、東部呈現增加，南部呈現減少，且全島平均雨量近30年在夏季呈顯著上升趨勢。
- ✓ 小雨日數有大幅減少趨勢。
- ✓ 以日雨量達50mm做為大雨標準，臺北大雨日數出現顯著增加趨勢，顯示臺北降雨強度的百年變化有增強趨勢。

● 溫度

- ✓ 百年間上升1.4℃（增溫速度為0.14℃/10yrs），近30年增溫速度明顯加快，增溫速度為0.29℃/10yrs，約為百年趨勢值的2倍。
- ✓ 近30年西岸測站增溫趨勢明顯高於東岸。
- ✓ 四季氣溫均呈增暖現象。其中，百年變化以秋季的暖化幅度最大，但近30年則以冬季的增溫幅度大於其他三季。



貳、氣候變遷趨勢與影響分析 (5/8)

▶ 臺灣氣候變遷情形

● 極端事件

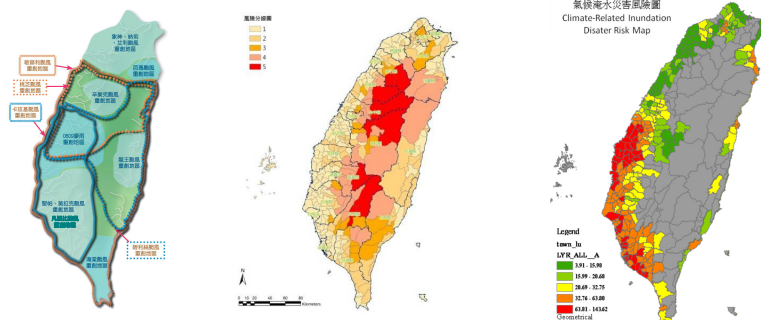
- ✓ 極端高溫日數百年變化呈現增加趨勢。其中，臺北測站增加幅度最大，每10年增加1.4天。
- ✓ 極端低溫日數100年、50年、30年之線性變化均呈下降趨勢。其中，1985年之後寒潮事件呈現明顯偏少現象。
- ✓ 北部氣象乾旱漸趨緩和，中、南部則有嚴重旱化趨勢。
- ✓ 1966年之後日降雨量的極端值有增加之趨勢。其中，伴隨颱風的極端降雨，3~24小時延時的暴雨事件在2000~2006年之發生頻率明顯高於1970~1999年每10年期間之統計量。另極端降雨事件在西部沒有增加趨勢，但北部與東部則有增加趨勢。
- ✓ 1990年以後的颱風個數和1961~1989年相比有增多的現象，且在2000年出現明顯增加轉折。另受到熱帶太平洋海溫升高及太平洋高壓勢力向西延展之影響，2000年之後侵臺颱風路徑有偏向西北象限之現象。



貳、氣候變遷趨勢與影響分析 (6/8)

► 氣候變遷對臺灣近十年造成之影響

- 降雨強度增加導致淹水、坡地土砂與複合型災害風險上升
- 海平面上升易導致沿海低窪地區排水困難
- 暴潮發生機率增加導致淹水機會與時間增加
- 極端事件發生機率上升導致設施設計防護基準下降



貳、氣候變遷趨勢與影響分析 (7/8)

► 未來臺灣氣候推估

● 溫度

- ✓ 21世紀末臺灣地區的氣溫上升幅度，相對於20世紀末，將介於2.0°C至3.0°C之間，略小於全球平均值的上升幅度。在區域與季節方面，北臺灣較南臺灣的增溫幅度略高，春季較其他季節略低。

● 雨量

- ✓ 未來冬季平均雨量多半都是減少的，減少幅度介於-3%至-22%之間，南臺灣春季未來的平均雨量變化與冬季非常類似；未來夏季平均雨量變化，除了北臺灣以外，推估降水將增加，平均雨量變化介於+2%至+26%之間。

● 颱風

- ✓ 西北太平洋颱風以及影響台灣的颱風個數與強度，受年代際變化影響較大，直接受暖化影響之線性變化趨勢則不明顯。然而，根據大多數氣候模式推估，颱風個數偏少的機率偏高，但颱風增強的機率與極端降雨的強度可能增加。



貳、氣候變遷趨勢與影響分析 (8/8)

► 交通系統的衝擊

● 公路

- ✓ 在暴雨作用下，容易受到邊坡滑動崩塌的威脅，亦常因河谷沖蝕加劇而危及道路路基，造成公路系統中斷。若河川上游發生洪水、土石流等災害，則沖刷裸露基礎之橋樑，極容易因後續的地震而傾倒斷裂，下游橋樑的橋墩、橋面也易遭洪水、土石流沖毀或掩埋。

● 鐵路

- ✓ 鐵路系統因降雨與強風增強，平原低窪地區容易造成淹水，山區易受到邊坡滑動崩塌的威脅，而河谷沖蝕加劇也會危及鐵軌路基，造成鐵路系統中斷。

● 港口

- ✓ 隨著地球暖化造成水位上升，與變異度極端化造成颱風波浪增大，將會影響港灣構造物的結構安全，並增加港灣淤積，進而影響港埠營運作業，導致海運運輸中斷。

● 機場

- ✓ 在極端降雨的侵襲下，若是區域排水無法負荷暴雨雨量，將造成機場跑道淹水，影響班機起降。另外，在暴雨侵襲下，也會破壞機場設施，如場站、跑道等。



參、交通設施氣候變遷調適策略 (1/3)

► 交通設施氣候變遷調適總目標

- 本研究遵循「維生基礎設施」及「災害」兩領域之調適總目標的精神與意涵，將交通設施氣候變遷調適總目標訂為：「經由災害風險評估與綜合調適政策推動，降低交通設施在氣候變遷下之災害風險並強化整體調適能力，以維持其應有之運作功能並減少對社會經濟之衝擊。」

調適領域	維生基礎設施領域	災害領域
總目標	提升維生基礎設施在氣候變遷下之調適能力，以維持其應有之運作功能並減少對社會經濟之衝擊。	經由災害風險評估與綜合調適政策推動，降低氣候變遷所導致之災害風險，強化整體防災避災之調適能力。



參、交通設施氣候變遷調適策略 (2/3)

▶ 交通設施氣候變遷調適策略

- 核心思維：「提升設施對災害作用之預測能力及加強其抵抗衝擊之能力」。
 - ✓ 策略一：落實與檢討修訂既有法令與相關規範，檢視與評估現有重大交通設施之脆弱度與防護能力，並強化災害防護計畫。
 - ✓ 策略二：推動氣候變遷災害風險調查與評估、高災害風險地區與潛在危險地區之劃設，並且建立設施安全性風險評估機制及生命損失衝擊分析模式。
 - ✓ 策略三：加速國土監測資源與災害預警資訊系統之整合及平台建立，並且擬定及落實交通設施分等級之開發與復建原則。
 - ✓ 策略四：落實交通設施維修養護，提升基本抗災及耐災之能力。



參、交通設施氣候變遷調適策略 (2/3)

▶ 交通設施氣候變遷調適策略

- ✓ 策略五：推動流域綜合治理，加強各管理機關間協調機制，以及與產業、學術界資源之整合，以降低氣候風險。
- ✓ 策略六：提升交通設施營運維護管理人力素質及技術，並且推動氣候變遷衝擊與危險地區資訊公開、宣導、預警、防災、避災之教育與演習。
- ✓ 策略七：建置交通設施營運管理資料庫並強化監測作業。
- ✓ 策略八：研發交通設施之氣候變遷調適新技術。



肆、國、內外文獻回顧 (1/19)

► 脆弱度之定義

- 統無法完全調適氣候變遷之變化，因而受到此變化帶來之負面效應傷害。（IPCC 第三次氣候變遷評估報告）
- 脆弱度為某個系統受氣候變遷（包括氣候的變異性及極端情況）負面影響及無法因應的程度。脆弱度與該系統暴露所在之氣候變化的特性、強度及頻率，以及系統本身之敏感度及調適能力有關。（IPCC 第四次氣候變遷評估報告）
- 可以視為「衝擊」、「發生機率」、「調適能力」、「敏感度」及「曝露度」之綜合函數：

$$\text{Vulnerability} = f(\text{Impact, Probability, Adaptive Capacity, Sensitivity, Exposure})$$

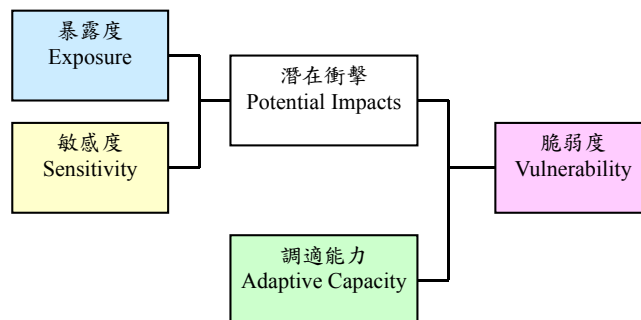
或

$$\text{Vulnerability} = f(\text{Exposure, Sensitivity, Adaptive Capacity})$$



肆、國、內外文獻回顧 (2/19)

► 脆弱度之定義



脆弱度各面向之關係架構圖



肆、國、內外文獻回顧 (3/19)

▶ 脆弱度之定義

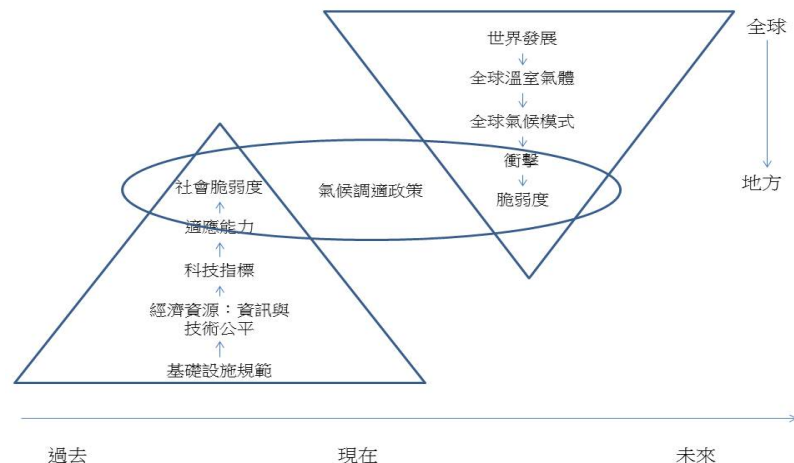
- 暴露度 (exposure)
 - ✓ 指設施或系統受氣候變遷直接影響的範圍。若為整體設施或系統受影響，則為高暴露度；部分受影響則為中暴露度；不直接受影響則為低暴露度。
- 敏感度 (sensitivity)
 - ✓ 設施或系統損壞導致重要單位如國際機場、科學園區、政治及軍事等重要指揮中心、緊急應變中心等運作受影響。若導致設施或系統無法運作則為高敏感度、維持最低限度之運作則為中敏感度、可持續運作則為低敏感度。敏感度在某些情況下亦代表該設施/系統之重要性。
- 調適能力 (adaptive capacity)
 - ✓ 設施或系統抵禦、承受及容納衝擊及復原的能力。設施或系統得以及時復原則為高適應力、需一段時間始可復原則為中適應力、無法快速復原則為低適應力。



肆、國、內外文獻回顧 (4/19)

▶ 氣候變遷調適與脆弱度評估架構

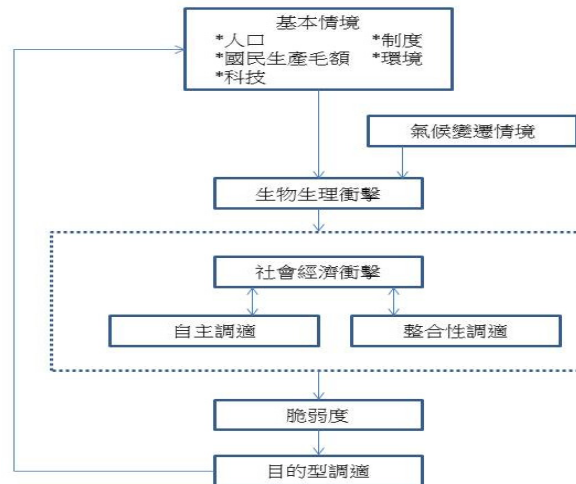
- 聯合國氣候變化綱要公約 (UNFCCC) 調適方法





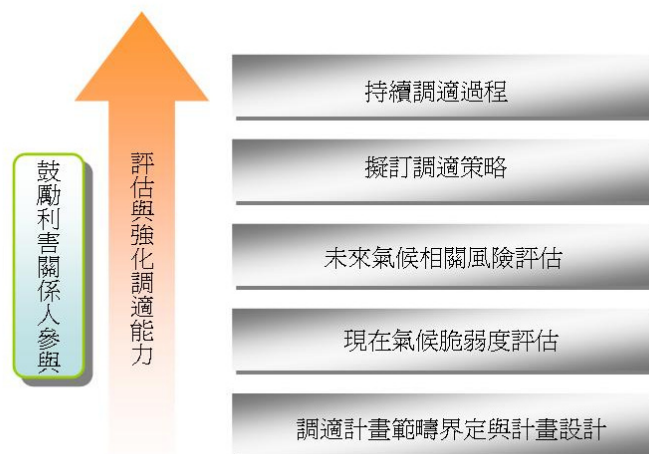
肆、國、內外文獻回顧 (5/19)

- UNFCCC衝擊型架構的內涵



肆、國、內外文獻回顧 (6/19)

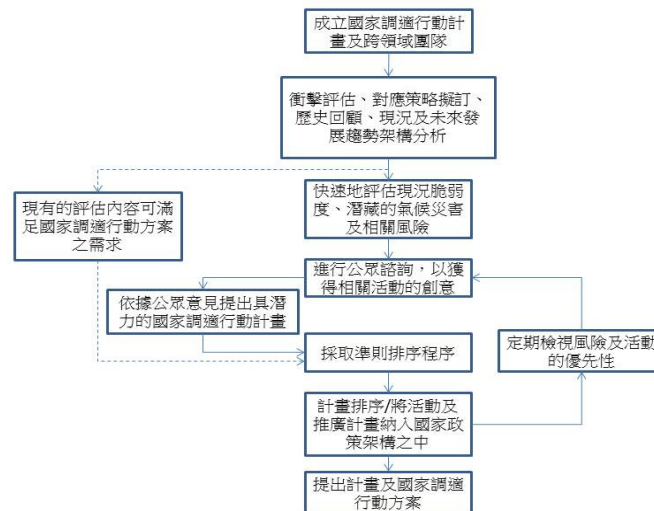
- 聯合國開發計畫署調適政策架構





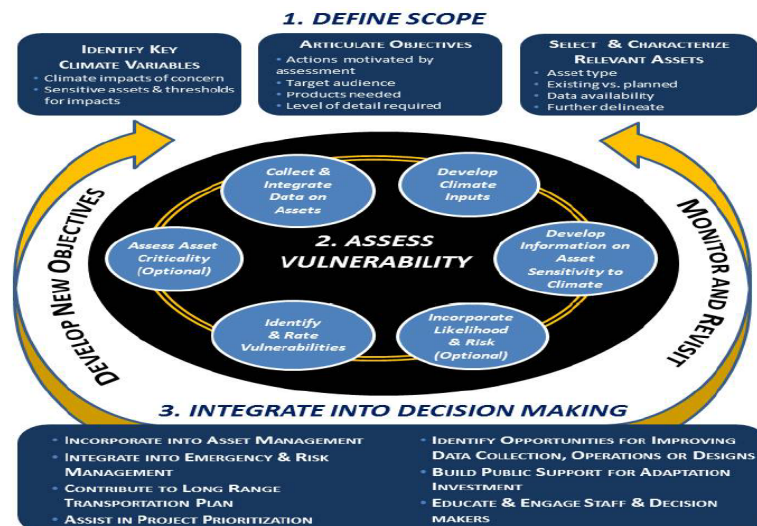
肆、國、內外文獻回顧 (7/19)

● 國家調適行動方案 (NAPA) 流程



肆、國、內外文獻回顧 (8/19)

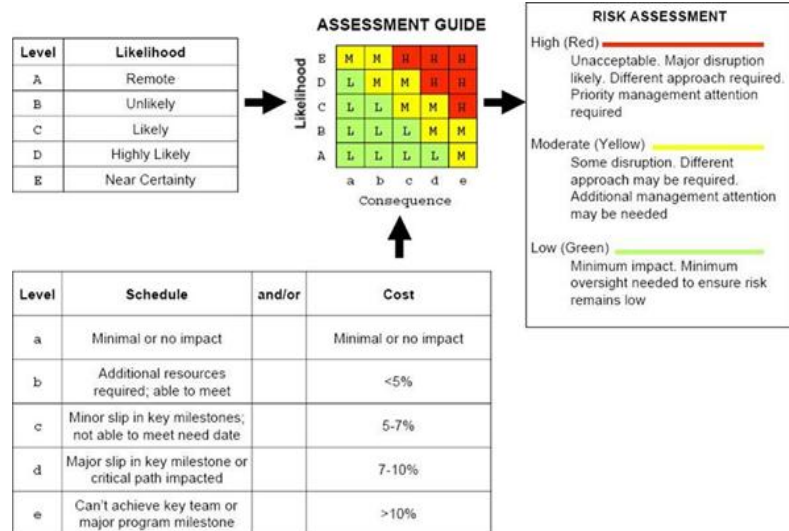
● 美國聯邦公路總署 (FHWA) 氣候變遷脆弱度評估架構





肆、國、內外文獻回顧 (9/19)

● FHWA脆弱度及風險評估矩陣



肆、國、內外文獻回顧 (10/19)

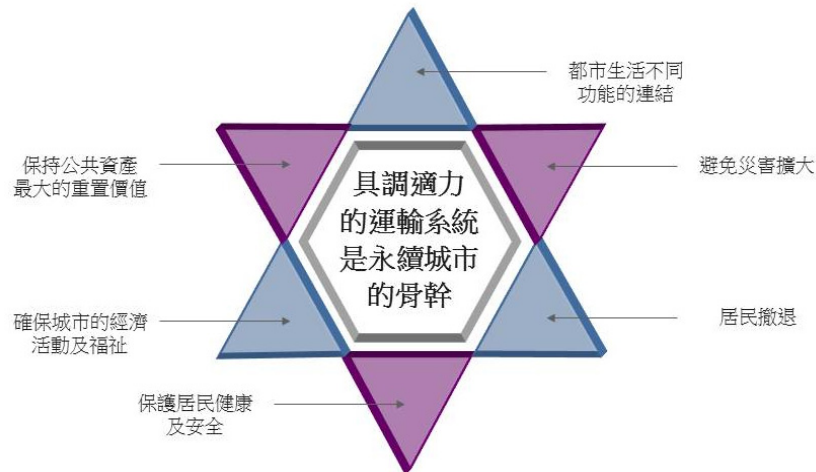
● 城市運輸調適策略發展架構





肆、國、內外文獻回顧 (11/19)

● 城市運輸需要調適作為之理由



肆、國、內外文獻回顧 (12/19)

▶ 城市的脆弱度

● 必須正視每個居民本身的脆弱度並不一樣的事實

- ✓ 取決於居民暴露於氣候災害的程度及其自身調適或避災的能力
- ✓ 一般而言，城市人口中屬於較脆弱的族群包括小孩、身障者或是老人，他們是比較無法耐熱，或是面對災害發生時逃生能力較差的人。

▶ 氣候變遷對城市運輸系統可能造成的衝擊

● 對運輸基礎設施的衝擊

- ✓ 基礎設施的興建及維護必須能抵抗高溫、暴風、強降雨、洪水及上升的海平面。

● 對車輛的衝擊

- ✓ 車輛部分，則是在越來越熱的天氣條件下，仍然可以提供乘車的舒適性。

● 對運輸行為的衝擊

- ✓ 行為轉變部分，主要是界定在受極端天氣影響時的因應作為，如熱浪、洪水、強降雨、強風及暴風雨侵襲。



肆、國、內外文獻回顧 (13/19)

► 運輸行為及車輛所受到的衝擊

● 非機動車輛運輸

- ✓ 惡劣的天氣，諸如大雨、強風及極端溫度等，都會降低居民採用步行及騎乘自行車完成旅次的意願，可能導致居民往機動車輛靠攏；也使得只能靠步行或騎乘自行車的居民行動力無以為繼。而短途旅次是較不會受到極端天氣的影響。
- ✓ 在寒冷地區，溫暖的天氣反而讓居民樂於步行及騎乘自行車，但在溫度較高的地區，高溫反而使得非機動運具的旅次卻步。
- ✓ 有些調適措施可以改善非機動化運輸的品質及安全性，例如，提供自行車道及人行道遮蔭設施，以提高使用的舒適度，讓居民樂於採用步行或騎乘自行車。

● 機動車輛運輸

- ✓ 當下大雨（雪）時，車速會降低，而發生交通延滯及癱瘓的情況，同時，意外事故也較容易發生。因此降雨（雪）會使得旅行時間增加，讓原本已十分擁塞的道路狀況更雪上加霜。另外，就車輛而言，高溫將增加車輛空調設備的需求，部分車輛也必須強化引擎或輪胎的抗熱能力。



肆、國、內外文獻回顧 (14/19)

► 澳洲運輸部門基礎設施之氣候變遷衝擊

● 氣候變遷對道路設施的衝擊

氣候變遷效應	對道路設施的直接衝擊	導致的結果
*逐漸上升的氣溫及太陽幅射 *逐漸增加的強降雨 *海平面上升 *洪水 *森林大火 *鹽化效應	*瀝青鋪面遭受破壞 *導致路面坑洞 *地勢較低的道路將被淹沒 *少雨及持續的乾旱將使得路基受損	*造成暫時或永久的道路阻礙 *導致依靠道路運輸的商業活動受影響 *增加道路維護成本 *重新規劃路線以避開氣候變遷的影響 *因道路設施損壞所衍生的責任風險 *高額保險成本



肆、國、內外文獻回顧 (15/19)

▶ 澳洲運輸部門基礎設施之氣候變遷衝擊

● 氣候變遷對軌道設施的衝擊

氣候變遷效應	對軌道設施的直接衝擊	導致的結果
*逐漸上升的氣溫 *洪水 *海平面上升 *越來越頻繁、強度越強的暴風雨	*軌道變形 *導致路面坑洞 *地勢較低的軌道及臨港的軌道將被淹沒 *號誌及電力系統受損 *少雨及持續的乾旱將使得路基受損	*導致依靠軌道運輸的商業活動受影響 *增加維護及重置成本 *因軌道設施損壞所衍生的責任風險 *高額保險成本



肆、國、內外文獻回顧 (16/19)

▶ 澳洲運輸部門基礎設施之氣候變遷衝擊

● 氣候變遷對港埠設施的衝擊

氣候變遷效應	對港埠設施的直接衝擊	導致的結果
*逐漸增加的劇烈天氣事件(包括降雨、強風、龍捲風及海上風暴) *海平面上升 *逐漸增加的大風浪 *海水酸化	*侵蝕作用 *基礎設施損壞及惡化 *基礎設施被淹沒	*港埠關閉的頻率及時間拉長 *運送延遲 *貨物損壞 *海上貿易及貨物船運成本增加 *增加維護及重置成本 *因港埠設施損壞所衍生的責任風險 *高額保險成本



肆、國、內外文獻回顧 (17/19)

► 澳洲運輸部門基礎設施之氣候變遷衝擊

● 氣候變遷對空運設施的衝擊

氣候變遷效應	對空運設施的直接衝擊	導致的結果
*逐漸增加的降雨及暴風雨事件 *逐漸增加的強風事件 *越來越頻繁、強度越強的暴風雨 *逐漸上升的氣溫及太陽輻射 *森林大火	*航站受損 *空橋及其他空運基礎設施的包覆材料及密封塗料劣化 *跑道及連絡道路被淹沒 *縮短機場瀝青碎石鋪面的壽命 *減少空運量 *降低能見度	*影響航空公司營運 *增加維護及重置成本 *需建置更長的跑道，以彌補減少的空運量 *需要地面冷卻系統 *因空運設施損壞所衍生的責任風險 *高額保險成本



肆、國、內外文獻回顧 (18/19)

► 交通設施脆弱度評估指標

● 由於缺乏標準化規範，使得絕大部分的研究均以脆弱度因子之組合來評估與描述脆弱度。

- ✓ 脆弱度指標應包括自然條件、環境議題及人類活動等部分。
- ✓ 脆弱度應包括人口、經濟、社會和技術等因子。
- ✓ 脆弱度評估應可量測空間危害與地區社會特色間之交互作用、生命或財產遭受環境危害時的潛在損失，以及耐災害或潛在損失的能力。
- ✓ 在區域性影響範圍下，脆弱度因子常包含人口密度及區域性範圍的交集狀態。
- ✓ 脆弱度應包含社會經濟層面因子，例如年齡、性別、種族、收入等。
- ✓ 脆弱度應考量易損性與回復力。



肆、國、內外文獻回顧 (19/19)

✓ 脆弱度依影響大小，可將影響因子區分為：

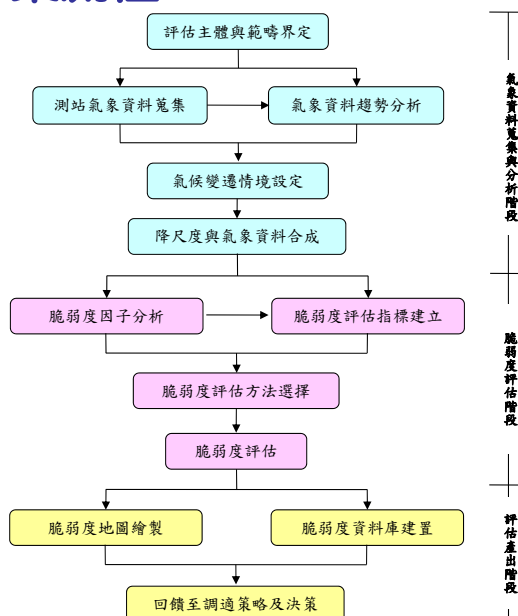
- ① 個人性：如貧窮度、就業情形、個人健康狀態、風險意識與防災意願，以及心理上的易損性等。
- ② 區域性：如人口密度、區域性地區的交集狀態。
- ③ 全國性：人口成長率、基礎設施、土地管理層面、防-救-減災計畫等。

✓ 在運輸系統脆弱度部分，常用因子包括：

- ① 路網脆弱度：當事件發生時，運輸路網受到影響而降低路網服務度或不能運作的程度。其中，所謂的「服務度」即指在給定一段時間下，路段/路線/路網的使用程度。
- ② 路網可靠度：指路網在艱苦的情況下還能運作的狀態，亦即路網持續運作的能力。
- ③ 地區人口的暴露度、總暴露度、地區重要性、人口密度、道路密度、平均旅行時間、路段長度、平均交通量。
- ④ 可及性、路網結構、旅運型態。



伍、交通設施氣候變遷脆弱度評估作業流程 (1/16)





伍、交通設施氣候變遷脆弱度評估作業流程 (2/16)

► 氣象資料蒐集與分析階段

● 評估主體與範疇界定

- ✓ 交通設施之評估主體與範疇可以為全線、特定路段之單一系統設施，亦可以為特定區域內之相關交通設施，以及相關連絡道或支線，界定時應在依據脆弱度評估之目的進行綜合考量。
- ✓ 評估過程需要同時針對社會與經濟面向進行資料蒐集與影響分析，而此兩個面向受交通設施本身功能與區域發展特性影響大，因此不同交通設施所需資料可能有所差異，若能事先針對此兩個面向之相關資料蒐集與影響分析的範圍有所界定，則對於後續脆弱度評估作業之進行將有事半功倍之效。
- ✓ 實務上除可參考以往類似案例進行界定外，亦可透過召開範疇界定會議之方式，邀請相關主管機關及專家學者共同研商確認，以確保所需資料之可蒐集性及可用性。



伍、交通設施氣候變遷脆弱度評估作業流程 (3/16)

► 氣象資料蒐集與分析階段

● 測站氣象資料蒐集

- ✓ 各氣象測站之資料主要是作為從大尺度觀點觀察歷史氣象變化及預測未來氣象趨勢之基礎。
- ✓ 現階段建議可參照「臺灣氣候變遷推估與資訊平台計畫（TCCIP）之作法，以臺北、臺中、臺南、恆春、臺東、花蓮等6個具百年以上長期紀錄之氣象測站，以及澎湖、東吉島、蘭嶼、彭佳嶼等4個有60年風速資料之外島測站為主要蒐集對象。另外，針對有關颱風資訊部分，另可參考美國聯合颱風警報中心（JTWC）之相關資料。



伍、交通設施氣候變遷脆弱度評估作業流程 (4/16)

● 氣象資料蒐集與分析階段

● 氣象資料趨勢分析

- ✓ 依據於前述步驟所蒐集之氣象資訊，透過氣象科學預測推估模式，即可針對歷史氣象變化及未來氣象趨勢進行預測分析。
- ✓ 考量影響交通設施能否維持正常功能的最主要氣候影響因子，原則上進行氣象趨勢預測分析時，應以「溫度」、「降雨」、「海平面上升」及「極端氣候事件」等為主要分析對象。



伍、交通設施氣候變遷脆弱度評估作業流程 (5/16)

● 臺灣過去及未來之氣候變遷推估成果

影響因子	過去趨勢分析	未來趨勢分析
溫度	臺灣年平均溫度在1911年至2009年期間上升1.4，其增溫速度較全球平均值高。近30年氣溫增加明顯加快，幾乎是百年趨勢值的2倍。	溫度平均上升幅度介於2.0℃至3.0℃間。北臺灣較南臺灣增溫幅度略高。春季較其他季節略低。
降雨	臺灣平均雨量近100年的線性變化趨勢並不明顯，惟降雨日數呈現減少趨勢。30、50或100年平均降雨強度均有明顯增加趨勢。	臺灣北、中、南、東四個主要分區的未來冬季平均雨量將減少3%~22%。夏季雨量將增加2%~26%。
海平面上升	1993年至2003年間臺灣海域平均海平面上升速率每年5.7mm，約為過去50年的2倍，亦大於同時期全球平均上升速率。東部海域的海平面上升增幅大於西部。	臺灣西南海域未來海平面上升量約為6.74~17.66cm。西北海域之海平面上升量則為4.02~21.81cm。
極端氣候事件	因西北太平洋颱風平均路徑向北偏移，近30年間侵臺颱風年平均發生次數有逐漸增加之趨勢。統計結果顯示，近年發生之強降雨颱風比例顯著增加。	未來暖化氣候下，熱帶氣旋生成數目普遍維持不變或減少。因颱風平均生成位置在未來暖化氣候下將向東南偏移，侵臺颱風數目並沒有系統性影響。由於未來熱帶地區增溫且水氣量增加，強烈颱風之比例則可能隨之增加。

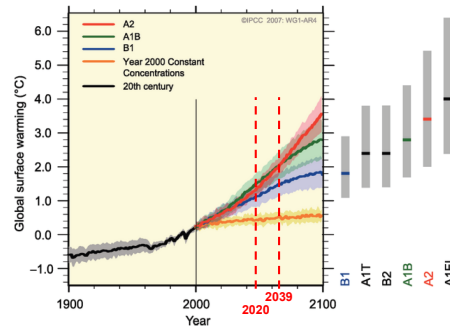


伍、交通設施氣候變遷脆弱度評估作業流程 (6/16)

► 氣象資料蒐集與分析階段

● 氣候變遷情境設定

- ✓ 以國際普遍認為最有可能發生之A1B情境作為氣象趨勢分析之假設情境。
- ✓ 「國家氣候變遷調適行動計畫」，已將第一期國家調適行動計畫之時程規劃設定為民國102年至106年。
- ✓ 考量各排放情境所造成的全球均溫在期間內之差異不顯著，建議可以民國109至128年（西元2020至2039年，共20年）規劃設定為第一階段調適目標年。



伍、交通設施氣候變遷脆弱度評估作業流程 (7/16)

► 氣象資料蒐集與分析階段

● 降尺度 (Downscaling) 與氣象資料合成

- ✓ 「降尺度」即指以科學的方法提高氣候模式預測模擬結果的解析度。
- ✓ 有鑑於交通硬體設施多為點與線的型式，其服務範圍常因為路廊或區域發展特性而有不同，因此在進行氣候脆弱度評估時，必須在現有氣候模式架構下進行降尺度的作業，以求所推估之氣候變遷與衝擊較能符合設施所在區域或影響範圍之細部氣候現象。
- ✓ 常用的方式有動力降尺度與統計降尺度兩種。
- ✓ 氣象資料合成即指利用氣象資料合成模式 (Weather Generation Model)，將前述空間降尺度後之月統計氣候資料，進行時間降尺度，以合成為多組相同統計特性之日氣象或更小時間尺度之氣象資料。
- ✓ 透過氣象資料合成，可進一步模擬預測未來日溫度與日降雨量資料，提供作為不同氣候情境下之氣候衝擊結果的比較，特別是針對極端氣候事件的模擬。



伍、交通設施氣候變遷脆弱度評估作業流程 (8/16)

▶ 設施脆弱度評估階段

● 溫度上升

- ✓ 溫度上升對鐵公路建設之影響，主要為鐵公路建設如道路鋪面、鐵路鐵軌、高鐵鐵軌等受到形變而造成破壞。
- ✓ 公路系統鋪面的破壞一般分為因大重車重量荷重所造成之疲勞破壞、因為溫差所造成之鋪面溫度裂縫破壞以及因溫度造成之車轍現象永久變形破壞。
- ✓ 鐵路系統之軌道，則主要因為溫度變化所造成之熱膨脹，造成設施擠壓、軌道扭曲變形之破壞。

● 降雨強度增加

- ✓ 降雨強度增強會導致平原低窪地區路段容易造成淹水、山區路段易受到邊坡滑動崩場的威脅、河川上游發生洪水、土石流之頻率增加，使得下游之河川跨越橋的橋墩、橋面版遭受洪水、土石流沖毀或淹埋的機會亦隨之增加，且河谷沖蝕加劇，進而危及鐵公路的路基，增加鐵公路系統中斷的風險。



伍、交通設施氣候變遷脆弱度評估作業流程 (9/16)

▶ 設施脆弱度評估階段

● 海平面上升

- ✓ 海平面上升對鐵公路建設之影響，主要為位處低窪地區以及沿海地區之公路鐵路設施將會受到影響，一為受暴潮越堤所造成鐵公路設施之損壞，二為因低窪區內水無法排除所造成之溢淹狀況，而導致交通中斷。

● 極端氣候事件

- ✓ 極端事件有乾旱事件、颱風豪雨事件等，為三個氣候變遷影響因子中影響較劇者。
- ✓ 主要因為極端降雨可能造成之邊坡土壤流失、路基流失、高含砂水流衝擊設施或河岸侵蝕等現象，間接影響鐵公路如鋪面、邊坡排水、隧道、橋樑等各層面之建設元件。



伍、交通設施氣候變遷脆弱度評估 作業流程 (10/16)

指標類別	評估指標	評估準則	涉及脆弱度面向
實體脆弱度	設計標準	<ul style="list-style-type: none"> 交通設施之相關工程設計標準。 設施設計洪水週期、結構或基礎型式愈符合相關設計標準並具有基本抗災能力者，代表調適能力愈高，即實體脆弱度愈低。 	調適能力
	替代路徑	<ul style="list-style-type: none"> 可提供與原交通設施相同或部分運輸服務功能之其他路徑。 評估路段經過區域可使用的替代路徑愈多或距離交通設施之距離愈短，則代表調適能力愈高，即實體脆弱度愈低。 	調適能力
	交通量	<ul style="list-style-type: none"> 交通設施功能喪失或遭受破壞後，受影響之每日交通量。 受影響每日交通量愈高，代表交通設施敏感度愈高，即實體脆弱度愈高。 	敏感度
	旅行時間	<ul style="list-style-type: none"> 交通設施功能喪失或遭受破壞後，整體旅次之旅行時間改變情形（通常指旅行時間增加）。 旅行時間增加愈少，代表設施敏感度愈低，即實體脆弱度愈低。 	敏感度
	環境敏感區干擾	<ul style="list-style-type: none"> 交通設施與環境敏感區之距離、設施位於敏感區之長度或面積。 若距離愈近、長度愈長、面積愈大，則代表暴露度及敏感度愈高，即實體脆弱度愈高。 	暴露度、敏感度
	歷史災害規模	<ul style="list-style-type: none"> 交通設施歷史發生一定規模之災害次數或災損金額。災害次數愈多、災損金額愈高，則代表暴露度及敏感度愈高，即實體脆弱度愈高。 	暴露度、敏感度



伍、交通設施氣候變遷脆弱度評估 作業流程 (11/16)

指標類別	評估指標	評估準則	涉及脆弱度面向
社會脆弱度	人口密度	<ul style="list-style-type: none"> 人口密度愈高，表示當交通設施功能喪失或遭受破壞後此區位可能受影響之人口亦愈高，即可視為敏感度愈高或社會脆弱度愈高。 	敏感度
	高齡人口比例	<ul style="list-style-type: none"> 高齡人口由於生心理狀況的限制，使其在災害自保及應變能力方面較弱，或需要較多人的照顧。 因此高齡人口比例愈高，則代表敏感度愈高，即社會脆弱度愈高。 	敏感度
	身心障礙人口比例	<ul style="list-style-type: none"> 同高齡人口比例之概念，身心障礙者由於生心理狀況的限制，使其在災害自保及應變能力方面較弱，或需要較多人的照顧。 因此身心障礙者愈高，則代表敏感度愈高，即社會脆弱度愈高。 	敏感度
	低收入人口比例	<ul style="list-style-type: none"> 交通設施功能喪失或遭受破壞後，將衍生轉換運具或繞路之情形，低收入人口考量衍生額外成本，相對較難以因應。 低收入人口比例愈高，代表社會脆弱度愈高。 	敏感度
	依賴人口扶養率	<ul style="list-style-type: none"> 依賴人口（指未滿15歲之幼年人口及65歲以上之老年人口）與工作年齡人口之比例。 其值愈高顯示工作年齡人口平均之扶養負擔愈重，一旦交通設施功能喪失或遭受破壞後，可能導致工作年齡人口之工作及收入受影響，即社會脆弱度愈高。 	敏感度
	距急救責任醫院距離	<ul style="list-style-type: none"> 主要用來評量交通設施受危害時之應變與救護能力，可視為社會調適能力的一部分。 交通設施距急救責任醫院之平均距離愈遠，代表應變與救護能力愈不足，即社會脆弱度愈高。 	敏感度、調適能力



伍、交通設施氣候變遷脆弱度評估作業流程 (12/16)

指標類別	評估指標	評估準則	涉及脆弱度面向
經濟脆弱度	產業損失	<ul style="list-style-type: none"> 受影響產業之產值或貿易減少金額 產業損失金額愈高，代表敏感度愈高，即經濟脆弱度愈高。 	敏感度
	產業活動	<ul style="list-style-type: none"> 主要產業（如二級產業）活動愈需要倚賴評估路段運輸，且替代道路運輸量偏低，則敏感度愈高，即經濟脆弱度愈高。 	敏感度
	產業運輸載運量	<ul style="list-style-type: none"> 指交通設施功能喪失或破壞後，受影響之每日產業運輸載運量。 受影響之每日產業運輸載運量愈高，代表交通設施敏感度愈高，即經濟脆弱度愈高。 	敏感度
	家戶可支配所得	<ul style="list-style-type: none"> 家戶可支配所得顯示其經濟能力，交通設施功能喪失或破壞後，經濟能力較佳者受衝擊相對較小。 平均家戶可支配所得愈高，代表所受衝擊相對較小，即經濟脆弱度愈低。 	敏感度、調適能力



伍、交通設施氣候變遷脆弱度評估作業流程 (13/16)

設施脆弱度評估階段

脆弱度評估方法選擇

- 目前在脆弱度評估方法方面主要透過「脆弱度評估矩陣」，分別針對敏感度、暴露度及調適能力之彼此關係進行綜合性評估分析。
- 評估時可先就敏感度與暴露度進行潛在衝擊評估分析，再就其評估結果加上調適能力進行綜合脆弱度評估。
- 應用層級分析法與網絡分析法，藉由專家系統依據前述各評估指標之標準及合理性，加以找出交通設施脆弱度指標的階層關係與權重。

潛在衝擊評估矩陣		敏感度		
		低	中	高
暴露度	低	低	低	中
	中	低	中	高
	高	中	高	高

脆弱度評估矩陣		潛在衝擊		
		低	中	高
調適能力	低	中	高	高
	中	低	中	高
	高	低	低	中



伍、交通設施氣候變遷脆弱度評估 作業流程 (14/16)

設施脆弱度評估階段

脆弱度評估

- ✓ 評估時，面對氣候變遷衝擊具有高程度的敏感性而只有低程度的調適能力者，給予高脆弱度評定；領域面對氣候變遷衝擊具有低度敏感性而且有高度調適能力者，則給予低脆弱度評定，其餘依此類推。
- ✓ 對於交通設施而言，暴露度可以判斷出系統各點或各線段係受某一種或多種之災害或威脅，再由該設施之敏感度與調適能力評估在災害威脅下所產生之整體脆弱度。
- ✓ 設施敏感度及暴露度愈低，調適能力愈高，則設施綜合脆弱度就愈低（如綠色區塊），反之則設施脆弱度就愈高（如紅色區塊）。

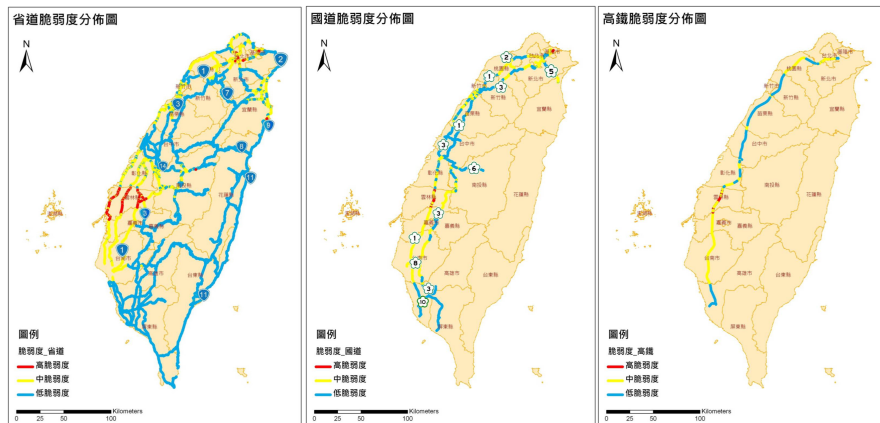


伍、交通設施氣候變遷脆弱度評估 作業流程 (15/16)

評估結果產出階段

脆弱度地圖繪製

- ✓ 依據前述脆弱度評估結果，透過GIS技術之應用，繪製成脆弱度地圖。





伍、交通設施氣候變遷脆弱度評估作業流程 (16/16)

▶ 設施脆弱度評估階段

● 脆弱度資料庫建置

- ✓ 交通設施氣候變遷脆弱度評估過程需要實體面、社會面及經濟面等各面向的許多資料，且評估結果（即交通設施脆弱度）亦可作為後續進行交通設施氣候變遷風險評估之基本資料。

● 回饋至調適策略及決策

- ✓ 為達成調適總目標，交通設施氣候變遷脆弱度評估的結果必須回饋至氣候變遷調適策略的規劃與執行，並且強化主管機關因應氣候變遷之決策能力及縮短決策時間。
- ✓ 作法上可透過調適策略關聯檢查表的方式來進行檢視。亦即依據脆弱度評估之結果，找出交通設施脆弱點所在，然後對各項調適策略目標，逐一檢討是否有可以改善此弱點之各種可行作法？若有，則應一併將有關的調適工作與權責機關列出，以利後續相關調適行動計畫之規劃與執行。



陸、重要課題與推動策略 (1/14)

▶ 重要課題

● 氣候變遷預測推估結果仍存在不確定性

- ✓ 氣象資料合成為氣候變遷脆弱度評估與後續相關調適作為之基礎，惟依據目前相關氣象資料合成模式之發展，仍無法降低氣候變遷預測推估結果之不確定性，而且氣候變遷情境設計不易。
- ✓ 由於交通設施脆弱度評估過程必須使用降尺度後之氣象資訊，導致其不確定性將更為增加。
- ✓ 如何發展適合且有效之氣象資料合成模式與降尺度方法，以提高相關預測推估結果之公信力並充分支援各領域進行氣候變遷脆弱度評估之需要，將是未來各領域進行氣候變遷調適之首要課題。



陸、重要課題與推動策略 (2/14)

▶ 重要課題

- 交通設施脆弱度因子分析與應用需要個別進行實證
 - ✓ 不同交通設施之特性有所差異，即便是同一種交通設施（如公路）亦有可能具有不同功能等級與興建目的。
 - ✓ 交通設施氣候變遷脆弱度因子非常多，並會因災害、時間及地點而有不同，加上個別因子之資料完整度不盡相同，進行蒐集時所需投入資源亦不相同。
 - ✓ 在脆弱度因子分析之實際應用上，有必要詳細規劃並個別進行實證，以利交通設施脆弱度評估指標之研訂。



陸、重要課題與推動策略 (3/14)

▶ 重要課題

- 交通設施敏感度指標之評估能力是否足夠
 - ✓ 表5-2交通設施脆弱度評估指標建議表中多項指標均涉及敏感度面向，可知降低交通設施之敏感度為降低整體脆弱度之重點所在。
 - ✓ 敏感度指標某個層面係代表交通設施之重要性，因此多與社會經濟之整體發展有關，惟三者間之關聯性既密切又複雜。
 - ✓ 如何強化相關敏感度指標之評估能力，讓氣候變遷衝擊災害的評估更有具體的參考功能，提供地區防災、空間規劃與土地使用檢討等，將是未來值得探討的重要課題。



陸、重要課題與推動策略 (4/14)

▶ 重要課題

● 跨部會、跨領域支援與合作的必要性

- ✓ 從氣象資料趨勢分析、氣候情境設定、降尺度（downscaling）與氣象資料合成、脆弱度因子分析至脆弱度評估指標建立等步驟觀之，交通設施氣候變遷脆弱度評估涉及跨部會、跨領域之資料蒐集。
- ✓ 脆弱度評估結果可提供跨部會、跨領域做進一步應用（如風險評估與管理）的參據，例如檢討修正各領域之氣候變遷調適策略，或擬訂可提升調適能力之行動計畫。
- ✓ 如何持續及加強跨部會、跨領域的支援與合作，將是未來成功推動交通設施氣候變遷脆弱度評估之重要課題。



陸、重要課題與推動策略 (5/14)

▶ 重要課題

● 「脆弱度評估矩陣」的操作方法與評等準則是否明確且客觀

- ✓ 目前國內外仍多以「脆弱度評估矩陣」進行氣候變遷脆弱度評估的主要方法，惟此種方式中有關評分等級與評分準則之研訂，仍有不夠客觀之疑慮。
- ✓ 如何從各脆弱度評估指標之量化或質化之評估結果，反映至脆弱度評估矩陣之各分級評等，則是值得進一步研究探討的課題。



陸、重要課題與推動策略 (6/14)

▶ 重要課題

- 交通設施氣候變遷脆弱度評估範疇界定是否周延
 - ✓ 交通設施本身多為點或線之型式，但服務範圍與影響範圍卻可能擴及平面或空間上的有形或無形的範疇。
 - ✓ 交通設施氣候變遷脆弱度評估範疇可能需要考量評估的目的，並依照歷史災害之種類、規模、發生時間，以及不同交通設施之特性與需要，做不同範疇的界定。
 - ✓ 如何透過科學方法，充分界定氣候變遷脆弱度評估的範疇並研訂周延之脆弱度評估指標，將成為未來推動交通設施氣候變遷脆弱度評估作業之重要課題。



陸、重要課題與推動策略 (7/14)

▶ 重要課題

- 交通設施是否需要全面實施氣候變遷脆弱度評估
 - ✓ 脆弱度評估為進行調適之基礎，而交通設施又屬於國家維生基礎設施之一環，為能預先找出重要交通設施之脆弱點並加以改善，實施脆弱度評估有其必要性。
 - ✓ 交通設施涵蓋公路、鐵路、港口與機場等相關軟硬體設施，且所在區位遍及全省各地，全面實施氣候變遷脆弱度評估將需要龐大經費與時間。
 - ✓ 如何在政府有限經費情況下，考量整體氣候變遷衝擊最小原則，決定那些重大交通設施優先實施氣候變遷脆弱度評估，將是一項重要課題。



陸、重要課題與推動策略 (8/14)

▶ 推動策略

- 積極推動重大鐵公路建設氣候變遷脆弱度評估與調適行動
 - ✓ 重大鐵公路不僅與人民日常生活息息相關，亦是一個國家能維持正常運作與社會經濟發展的最基本設施，面對日益嚴重之氣候變遷衝擊，應列為優先進行調適之對象。
 - ✓ 透過重大鐵公路建設氣候變遷脆弱度評估案例的實施，一方面可瞭解重大鐵公路建設面對氣候變遷之脆弱點，以利於調適行動計畫的擬定、決策與管理；另一方面亦可藉機將脆弱度評估的概念逐步導入各級交通設施主管機關，強化其他新建設施之規劃設計成果及既有設施之維修養護能力。



陸、重要課題與推動策略 (9/14)

▶ 推動策略

- 建置跨部會、跨領域之脆弱度與調適資訊平台
 - ✓ 無論那一個領域，其面對氣候變遷之調適行動，都需要跨部會、跨領域的相關互支援與整合，交通設施亦不例外。以臺灣地區來說，交通設施實施脆弱度評估時，至少需要氣象局、國科會、國家災害防救科技中心、水利署、營建署、農委會協助提供相關資料。
 - ✓ 目前相關部會署陸續建置個別設施之脆弱度與調適資訊平台，為充分利用這些資訊平台的資訊，並避免重複投入資源進行監測與調查，達成相互支援之目的，建置跨部會、跨領域之脆弱度與調適資訊平台有其必要。



陸、重要課題與推動策略 (10/14)

▶ 推動策略

- 於新建交通設施工程費或既有設施維護費項下，編列相關預算，定期辦理脆弱度評估作業
 - ✓ 交通設施脆弱度評估必須因應氣候變遷，持續從實體面、社會面及經濟面中分別進行評估，以掌握設施最新的脆弱點，並利於研擬調適改善計畫。
 - ✓ 主管機關可於新建交通設施工程費或既有設施維護費項下，編列相關預算，定期辦理脆弱度評估作業。此外，對於脆弱度高之設施或位於易致災地區之設施，其辦理脆弱度評估之頻率與預算應提高。



陸、重要課題與推動策略 (11/14)

▶ 推動策略

- 發展適合交通設施之氣候變遷脆弱度評估與驗證方法，並精緻化脆弱度指標系統及資料庫
 - ✓ 為提升脆弱度評估方法之客觀性與代表性，後續仍應依交通設施之特性，發展適合交通設施之氣候變遷脆弱度評估與驗證的方法。
 - ✓ 本研究雖已參酌國內外研究文獻，提出交通設施氣候變遷脆弱度評估建議指標，惟災害發生對交通設施所造成之衝擊，往往因地理區位及地形條件而有所差異，後續應該依照各交通設施之特性與功能，廣泛地蒐集及調查相關基礎資料以建立本土化之脆弱度評估資料庫，並且進行精緻化的檢討與修訂。



陸、重要課題與推動策略 (12/14)

▶ 推動策略

- 結合氣候變遷脆弱度評估作業，修訂傳統運輸規劃程序與工程設計規範
 - ✓ 傳統運輸規劃程序僅針運輸問題提出可行方案並進行評估及決策，然氣候變遷衝擊已是現今人類所面臨之重大課題，應將脆弱度評估作業納入傳統運輸規劃程序，以提供決策者更完整之決策資訊。
 - ✓ 脆弱度評估作業能預先避開敏感之區位，以降低交通設施面對氣候變遷之風險，並節省日後維養之費用支出。



陸、重要課題與推動策略 (13/14)

▶ 時程規劃

- 依據「國家氣候變遷調適行動方案（2012-2017）（草案）-維生基礎設施領域」之時程規劃，交通設施應即刻展開氣候變遷脆弱度評估工作，並於106年前完成首次基本的脆弱度評估。
- 爾後配合調適行動方案之修正，每5年應通盤檢討一次，惟每年可視極端氣候事件與重要課題之需要，進行個別檢討。
- 考量重大災害對交通設施造成之影響，參酌交通部公路總局100年公布之「為因應災害復原重建、搶通知緊急工程申請面實施環境影響評估之辦理原則」之精神，交通設施發生嚴重災損時，應於災害發生後6個月內針進行局部或全部之脆弱度評估，以及時掌握交通設施之脆弱度與脆弱點是否有所變化，俾利於後續調適及改善行動計畫之擬定。



陸、重要課題與推動策略 (14/14)

► 權責劃分

階段	步驟	權責機關
氣象資料蒐集與分析	評估主體與範疇界定	交通設施主管機關
	測站氣象資料蒐集	氣象局、國科會、國家災害防救科技中心、水利署、農委會
	氣象資料趨勢分析	
	氣候變遷情境設定	
	降尺度與氣象資料合成	
脆弱度評估	脆弱度因子分析	交通設施主管機關、氣象局、國科會、國家災害防救科技中心、水利署、農委會、營建署、地方政府
	脆弱度評估指標建立	
	脆弱度評估方法選擇	交通設施主管機關
	脆弱度評估	
評估產出	脆弱度地圖繪製	交通設施主管機關、國家災害防救科技中心、營建署
	脆弱度資料庫建置	
	回饋至調適策略及決策	交通部、交通設施主管機關



柒、結論與建議 (1/8)

► 結論

- 本研究歸納「臺灣氣候變遷科學報告2011」對臺灣過去百年的氣候變遷重要現象，包括降雨、溫度及極端事件，而由於分析氣候變遷需要長時間觀測（常以百年計），其影響因素甚多，現階段觀測資料的時間長度與空間密度尚不足夠，再上部分氣候因子需考慮年代際之週期性變化影響，導致氣候變遷預測推估仍存在不確定性。
- 本研究將交通設施氣候變遷調適總目標訂為：「經由災害風險評估與綜合調適政策推動，降低交通設施在氣候變遷下之災害風險並強化整體調適能力，以維持其應有之運作功能並減少對社會經濟之衝擊」，其核心思維就是「提升設施對災害作用之預測能力及加強其抵抗衝擊之能力」。
- 本研究整併並轉化「維生基礎設施」與「災害」等兩個領域之氣候變遷調適策略及目標成交通設施氣候變遷調適策略共8項。



柒、結論與建議 (2/8)

▶ 結論

- 綜整國內外相關文獻之定義與描述，脆弱度（Vulnerability）可以視為是「暴露度」、「敏感度」及「調適能力」的綜合函數，亦即評估氣候變遷脆弱度所需主要工作包括：評估各領域之氣候變遷暴露程度、評估特定領域對氣候變遷的敏感性、分析該領域之氣候變遷潛在衝擊，以及該領域容納或因應氣候變遷衝擊的能力等。
- 綜整其他國外有關脆弱度指標與脆弱度評估相關文獻發現，由於缺乏標準化規範，使得絕大部分的研究均以脆弱度因子之組合來評估與描述脆弱度。
- 本研究參酌國內外辦理氣候變遷脆弱度評估之流程作法，研提交通設施氣候變遷脆弱度評估之完整作業流程如圖 5.1 所示，從受評估之交通設施主體與範疇界定起，大致可分成三大階段共 12 個步驟。



柒、結論與建議 (3/8)

▶ 結論

- 氣溫、降雨、海平面上升及極端氣候事件不僅是氣候變遷影響環境的 4 個主要因子，亦是影響交通設施能否維持正常功能的最主要因素。然而，不同氣候影響因子可能引發的衝擊類型不相同，且同一影響因子在不同的空間區域引發的衝擊亦可能會有所差異。
- 本研究從實體脆弱度、社會脆弱度及經濟脆弱度等三個類別，研提交通設施氣候變遷脆弱度評估指標，並逐一分析個別指標所涉及之脆弱度面向。其中，多項指標均涉及敏感度面向，可知降低交通設施之敏感度為降低整體脆弱度之重點所在。
- 在脆弱度評估方法方面目前仍以「脆弱度評估矩陣」為主，分別針對敏感度、暴露度及調適能力之彼此關係進行綜合性評估分析。評估時並可應用層級分析法與網絡分析法，藉由專家系統依據前述各評估指標之標準及合理性，加以找出交通設施脆弱度指標的階層關係與權重，並訂出分級標準（可分成 3 級或更多級）。



柒、結論與建議 (4/8)

▶ 結論

- 有鑑於GIS技術的應用在國內已成熟發展多年，且已應用至土地使用及防災等領域，為能與相關資訊系統及資料平台進行整合與相互支援，交通設施脆弱度評估的結果亦宜運用GIS技術來展現。
- 交通設施氣候變遷脆弱度評估過程需要實體面、社會面及經濟面等各面向的許多資料，且評估結果（即交通設施脆弱度）亦可作為後續進行交通設施氣候變遷風險評估之基本資料，因此有必要在交通設施脆弱度評估作業中一併建置資料庫，以利監測及後續分析及管理之相關應用。
- 交通設施氣候變遷脆弱度評估的結果必須回饋至氣候變遷調適策略的規劃與執行，以強化主管機關因應氣候變遷之決策能力及縮短決策時間，達成交通設施調適總目標，作法上可透過調適策略關聯檢查表的方式來進行檢視。



柒、結論與建議 (5/8)

▶ 結論

- 針對未來推動交通設施氣候變遷脆弱度評估時，應進一步探討之重要課題如下：
 - ✓ 氣候變遷預測推估結果仍存在不確定性。
 - ✓ 交通設施脆弱度因子分析與應用需要個別進行實證。
 - ✓ 交通設施敏感度指標之評估能力是否足夠。
 - ✓ 跨部會、跨領域支援與合作的必要性。
 - ✓ 「脆弱度評估矩陣」的操作方法與評等準則是否明確且客觀。
 - ✓ 交通設施氣候變遷脆弱度評估範圍界定是否周延。
 - ✓ 交通設施是否需要全面實施氣候變遷脆弱度評估。
- 有關交通設施氣候變遷調適與脆弱度評估之推動策略如下：
 - ✓ 積極推動重大鐵公路建設氣候變遷脆弱度評估與調適行動。
 - ✓ 建置跨部會、跨領域之脆弱度與調適資訊平台。
 - ✓ 於新建交通設施工程費或既有設施維護費項下編列相關預算，定期辦理脆弱度評估作業。
 - ✓ 發展適合交通設施之氣候變遷脆弱度評估方法，並精緻化脆弱度指標系統及資料庫。
 - ✓ 結合氣候變遷脆弱度評估作業，修訂傳統運輸規劃程序與工程設計規範。



柒、結論與建議 (6/8)

▶ 結論

- 依據「國家氣候變遷調適行動方案（2012-2017）（草案）- 維生基礎設施領域」之時程規劃，交通設施實施氣候變遷脆弱度評估的工作應即刻展開，並於106年前對相關設施完成首次基本的脆弱度評估，且爾後配合調適行動方案之修正，每5年應重新檢討實施一次。
- 交通設施應於嚴重災害發生後6個月內，針進行局部或全部之脆弱度評估，以及時掌握交通設施之脆弱度與脆弱點是否有所變化，俾利於後續調適及改善行動計畫之擬定。
- 交通設施氣候變遷脆弱度評估過程需要跨部會、跨領域的相關互支援與整合。
 - ✓ 在氣象資料蒐集與分析階段，主要係以氣象局、國科會、國家災害防救科技中心、水利署、農委會等各部會署所提供之氣象資料的蒐集與分析為主；
 - ✓ 在脆弱度評估階段，係由交通設施主管機關主辦各項工作，並視需要請氣象局、國科會、國家災害防救科技中心、水利署、農委會、營建署及地方政府協助提供意見；
 - ✓ 至於在評估結果產出階段，則亦由交通設施主管機關負責繪製脆弱度地圖與建置脆弱度資料庫，期間可能需要與國家災害防救科技中心及營建署相關地理資訊系統及資料庫進行連結。



柒、結論與建議 (7/8)

▶ 建議

- 為能及時並精確掌握全球及臺灣氣候變遷之最新科學發展趨勢，以及降低氣候變遷預測推估之不確定性，建議交通設施主管機關除借重跨部會、跨領域的協助外，亦可主動培養或引入具備氣象科學專業之人才，以於交通設施之規劃、設計、施工及維運階段，適時提供意見，甚至是發展適合交通設施之降尺度與氣象資料合成模式。
- 由於重大鐵公路不僅與人民日常生活息息相關，亦是一個國家能維持正常運作與社會經濟發展的最基本設施，建議應積極推動重大鐵公路建設氣候變遷脆弱度評估與調適行動，一方面瞭解重大鐵公路建設面對氣候變遷之脆弱點，以有利於調適行動計畫的擬定、決策與管理；另一方面亦可藉機將脆弱度評估的概念逐步導入各級交通設施主管機關，強化其他新建設施之規劃設計成果及既有設施之維修養護能力。



柒、結論與建議 (8/8)

▶ 建議

- 鑑於目前相關部會署已陸續建置個別設施之脆弱度與調適資訊平台，為充分利用這些資訊平台的資訊，並避免重複投入資源進行監測與調查，達成相互支援且資源共享之目的，建議應加強推動建置跨部會、跨領域之脆弱度與調適資訊平台。
- 建議主管機關可於新建交通設施工程費或既有設施維護費項下，編列相關預算，定期辦理脆弱度評估作業，以掌握設施最新的脆弱點，並利於研擬調適改善計畫；此外，對於脆弱度高之設施或位於易致災地區之設施，其辦理脆弱度評估之頻率與預算應提高。
- 交通部門應持續發展適合交通設施氣候變遷脆弱度評估的方法與工具，同時建立專屬之氣候變遷脆弱度評估指標系統與脆弱度資料庫，然後透過實際案例進行個別驗證，以提升並確保脆弱度評估結果之公信力。



簡報結束
敬請指教