

2024

臺灣氣候變遷分析系列報告

暖化趨勢下的臺灣極端高溫與衝擊



Extreme High Temperatures and Impacts in Taiwan under Global Warming
Taiwan Climate Change Analysis Series Report 2024



彙編 國家科學及技術委員會 臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台

共同發行

交通部中央氣象署 中央研究院環境變遷研究中心 國立臺灣師範大學地球科學系 國家災害防救科技中心
國立成功大學建築學系 國家衛生研究院國家環境醫學研究所 國立高雄科技大學永續漁業發展研究中心 農業部畜產試驗所

暖化趨勢下的臺灣極端高溫與衝擊

Extreme High Temperatures and Impacts in Taiwan under Global Warming
Taiwan Climate Change Analysis Series Report 2024

主編 / 許晃雄

編輯群 / 陳昭安、劉曉薇、李欣輯、紀佳法、陳永明

作者群 /

文史紀錄中的臺灣極端溫度事件回顧

陳家琦 中央氣象署
黃文亭 中央氣象署
謝章生 中央氣象署

從觀測資料看臺灣過去高溫趨勢

羅資婷 中央氣象署
李思瑩 中央氣象署
洪景山 中央氣象署
駱世豪 中央研究院環境變遷研究中心
張雅惠 中央研究院環境變遷研究中心
陳正達 國立臺灣師範大學地球科學系

臺灣未來高溫指標推估

童裕翔 國家災害防救科技中心
王俊寓 國家災害防救科技中心
李時雨 中央研究院環境變遷研究中心
曾品涵 中央研究院環境變遷研究中心
洪若雅 中央研究院環境變遷研究中心

高溫衝擊－都市熱島

王柳臻 國立成功大學建築學系
林子平 國立成功大學建築學系

高溫衝擊－暖化下的環境熱壓力

李時雨 中央研究院環境變遷研究中心
曾品涵 中央研究院環境變遷研究中心
洪若雅 中央研究院環境變遷研究中心

高溫衝擊－氣候變遷對心血管疾病的影響

吳威德 國家衛生研究院國家環境醫學研究所
陳保中 國家衛生研究院國家環境醫學研究所
林靜君 國立臺灣大學公共衛生學院
楊曜旭 長庚大學中醫學系

高溫衝擊－高溫危害對臺灣文蛤養殖漁產業潛在風險評估

侯清賢 國立高雄科技大學永續漁業發展研究中心
歐姿辰 國立高雄科技大學永續漁業發展研究中心
蔡至恒 國立高雄科技大學永續漁業發展研究中心
盧韻存 國家災害防救科技中心

高溫衝擊－氣候變遷高溫環境對乳牛經濟產能之影響

施意敏 農業部畜產試驗所北區分所
闕帝旺 國家災害防救科技中心
涂柏安 農業部畜產試驗所北區分所

美術設計 / 陳彥霓

書封設計理念 以色彩堆疊表現氣溫上升趨勢，將城市包圍在之中傳達高溫籠罩的意象；運用視覺型態表現極端數值概念，設計成爲尖銳三角形，搭配上熱浪元素簡化成波形圖像，形成熱氣上升氣溫流動的意象，結合顏色與圖像構成本次刊物主題。

引用參考

主編與作者群，依作者姓氏筆畫順序：

許晃雄、王俊寓、王柳臻、吳威德、李欣輯、李思瑩、李時雨、林子平、林靜君、侯清賢、涂柏安、施意敏、洪若雅、洪景山、紀佳法、張雅惠、陳正達、陳永明、陳保中、陳昭安、陳家琦、曾品涵、童裕翔、黃文亭、楊曜旭、劉曉薇、歐姿辰、蔡至恒、盧韻存、駱世豪、謝章生、闕帝旺與羅資婷

CONTENTS

目 錄

005

摘要

006

前言

009

PART.01 文史紀錄中的臺灣極端溫度事件回顧

1. 臺灣早期的高溫紀錄 009
2. 高山的增溫趨勢 011

013

PART.02 從觀測資料看臺灣過去高溫趨勢

1. 高溫指標長期趨勢 013
2. 事件觀點探討過去極端高溫事件 015
3. 高溫事件個案與大氣環流條件探討 025

027

PART.03 臺灣未來高溫指標推估

1. 使用資料 027
2. 暖化情境 029
3. 高溫指標 031
4. 全球暖化程度未來推估 032
5. 中期與長期高溫指標未來推估 038

041

PART.04 高溫衝擊

1. 都市熱島 041
2. 暖化下的環境熱壓力 045
3. 氣候變遷對心血管疾病的影響 048
4. 高溫危害對臺灣文蛤養殖漁產業潛在風險評估 056
5. 氣候變遷高溫環境對乳牛經濟產能之影響 059

064

結語

066

參考文獻

071

附錄

摘要

根據文史紀錄，日治時期臺灣氣候偏冷，偶發的異常高溫事件多由焚風造成。近代觀測資料則顯示臺灣有明顯的氣溫上升趨勢。1910 至 2020 年間，六個百年測站的夏季平均最高溫變化與高溫指標天數，以臺北站增加幅度最大，臺中、恆春、花蓮、臺東則於 1980 至 1990 年代後才呈現增加趨勢。以事件觀點偵測極端高溫發生的等級、頻率、面積與持續天數，顯示全臺平均皆有明顯上升趨勢，以及極端高溫事件盛行的季節，提前發生與延後結束的趨勢。極端高溫事件之背景大氣環流大多與強盛的西南風與較強的夏季太平洋副熱帶高壓有關。由臺灣過去觀測紀錄，已可見暖化趨勢對於極端高溫事件的明顯影響。氣候模式未來推估顯示，臺灣各區域的高溫指標將隨著暖化程度增強而增加。全球暖化程度 2°C 是重要關鍵，之後上升趨勢加速，若全球持續增溫至 3°C，極端高溫的強度與持續時間約大幅增加為全球暖化程度 2°C 的二倍。

暖化氣候下異常高溫更為頻繁，將造成下列衝擊：

(1) 都市全年熱不舒適區域占比增加，(2) 不僅日間室外工作時數需要減少，夜間工作者也需要考量高溫產生的勞動安全問題，(3) 達到中風高風險高溫門檻的天數增加，(4) 對養殖漁業生產區的危害程度升高且影響範圍擴大，以及 (5) 乳牛平均乳量與經濟產能降低。

由高溫指標的未來推估顯示全球暖化程度 2°C 是重要臨界門檻，為了避免暖化程度加劇帶來更為頻繁極端的高溫事件與衝擊，需要更加積極的採取有效措施減緩暖化趨勢以及高溫環境對人類健康與產業的衝擊。

前言

根據聯合國政府間氣候變遷專門委員會 (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) 第六次評估報告 (IPCC AR6)，全球陸地長期觀測顯示平均溫度、日最高溫極大值與日最低溫極小值一致呈現增溫趨勢。自 1950 年以來，全球大多數區域呈現日益頻繁且增強的極端高溫事件，而人為活動導致溫室氣體增加是這些極端溫度事件變化的主要驅動因素。極端高溫事件的頻率，很可能隨著全球暖化程度呈現非線性增加，罕見極端高溫事件將更頻繁發生。

聯合國 2023 年全球氣候狀態報告 (State of the Global Climate 2023) 與歐盟氣候監測機構哥白尼氣候變遷服務 (Copernicus Climate Change Service) 的全球氣候亮點報告 (Global Climate highlights 2023) 皆指出，2023 年已超越 2016 與 2020 年的高溫記錄，是自 1850 年以來溫度最高的一年，暖化程度已將近攝氏 1.5 度 (1.45 ± 0.12 度)。過去十年也是有紀錄以來最溫暖的十年。過去幾年加拿大、北美西部、地中海地區、中國、南歐、北非、韓國、日本等地，極端高溫與熱浪事件頻傳，不僅高溫危害人體健康甚至死亡，其異常乾燥的條件易伴隨複合性的災害，例如 2021 年加拿大野火與 2022 年中國乾旱。

臺灣地處於熱帶和亞熱帶之間，夏季氣候受到西南季風與太平洋副熱帶高壓環流的調節：當副熱帶高壓系統增強，高壓邊緣向西延伸壟罩臺灣上空，其穩定乾燥的下沉氣流，造成高溫且不利對流發展的大氣條件，同時阻礙西南季風的南方水氣輸送，導致臺灣上空的雲層發展與降雨機率減少。當這樣的大氣條件持續，往往為臺灣帶來連續多日的高溫酷熱天氣。所幸臺灣四面環海的海島氣候，極端高溫天氣型態容易受海風調節而減緩酷熱難耐的情況。然而，當全球暖化持續，世界各地極端高溫事件已由異常逐漸成為常態，臺灣未來可能也會面臨更頻繁發生的極端高溫與熱浪事件。

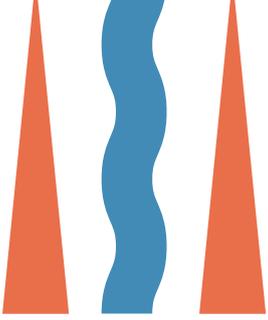
本報告為國家科學及技術委員會「臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平臺計畫」(Taiwan Climate Change Projection Information and Adaptation Knowledge Platform, 以下簡稱 TCCIP) 推動之臺灣關鍵氣候議題為主題的「臺灣氣候變遷分析系列報告」的第二個主題「高溫」：以收錄團隊與國內學研單位對高溫議題的研究成果為主，內容包含回顧百年來臺灣極端高溫變化趨勢與極端高溫事件特性，並分析不同排放情境下高溫指標的未來變遷趨勢以及臺灣可能的衝擊影響。

本報告以交通部中央氣象署(以下簡稱中央氣象署)臺灣南區氣象中心的日治時期文史紀錄為出發點，回顧臺灣的歷史極端高低溫事件；分析百年測站觀測紀錄，呈現高溫指標的長期趨勢；利用客觀偵測方法，分析高溫事件的時空分布，整合事件發生的頻率、強度與範圍，更為立體地呈現過去高溫事件的特徵與長期變化；未來推估方面，利用 TCCIP 氣候變遷統計降尺度資料，分析臺灣未來高溫指標的變化趨勢；延伸目前氣候分析對於高溫現象的了解，收錄從都市熱島角度探討的人體熱不舒適度、影響職業安全的環境熱壓力，以及高溫對心血管疾病、養殖漁業與臺灣乳牛產能的衝擊評估。結合氣候分析與應用領域的衝擊評估，本報告呈現臺灣極端高溫事件的過去、現在與未來的可能發展趨勢，以及高溫現象可能的衝擊，作為落實國內氣候變遷調適措施的參考。



PART.01

文史紀錄中的 臺灣極端溫度事件回顧



PART.
01

文史紀錄中的 臺灣極端溫度事件回顧

■ 1. 臺灣早期的高溫紀錄

臺灣早期文獻記載中，由高溫造成的氣象災害或紀錄，相較於颱風或低溫偏少甚多，當時多以文字「定性」方式來敘述現象，例如清領時期 1752 年（乾隆 17 年）《臺灣府志》記載「秋 7 月大風挾火而行，俗名火颶或麒麟風，被處草木皆焦文廟樞星門石柱六根盡斷。」此處的火颶或麒麟風即為現今所稱「焚風」。

臺灣首次使用測量儀器進行科學化「定量」的氣溫觀測，是在 1874 年（同治 13 年）牡丹社事件，當時日本西鄉軍團駐紮於恆春半島社寮（今屏東縣車城鄉西南之射寮地區）的戰地醫院，記錄了長達 7 個月的氣溫數據（表 1）。

月份		5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月
氣溫	華氏	89.4 °F	93.6 °F	93.9 °F	97.7 °F	95.7 °F	82.6 °F	77.7 °F
	攝氏	31.9°C	34.2°C	34.4°C	36.5°C	35.4°C	28.1°C	25.4°C

表 1 1874 年 5 至 11 月恆春半島社寮每日中午氣溫觀測紀錄。（來源：台灣總督府氣象台沿革史，1997 年）

因著香港氣象臺提供觀測儀器及技術指導，1885 年（光緒 11 年）起臺灣曾在基隆、安平、淡水、打狗（今高雄）等 4 處海關及漁翁島（今澎湖西嶼）與南岬（今鵝鑾鼻）等 2 處燈塔實施氣象觀測，後因甲午戰爭波及而中斷，大半觀測儀器與紀錄也因戰亂遺失，目前在《臺灣氣象報文 第三》得以窺見 1885 至 1895 年部分降雨資料，卻仍未查找到氣溫相關紀錄。

甲午戰爭後，1896 年 3 月底臺灣總督府公布臺灣總督府測候所官制，同年 7 月 12 日公布測候所位置及名稱，選定設立臺北、臺中、臺南、恆春、澎湖島等 5 處測候所，開啟臺灣有組織性的氣象觀測，當時的觀測項目包含氣溫、風向風速、雨量、相對濕度與雲量等。1901 年（明治 34 年）1 月臺東測候所成立，隔年發生在臺東的焚風，成為臺灣現存最早且完整的焚風紀錄。

焚風是出現在山脈背風坡的乾熱風，發生時的特徵為氣溫急劇升高且濕度快速下降。1902年臺東出現2次焚風紀錄，分別為1902年(明治35年)6月21日，臺東日最高溫為35.8°C，發生於上午2時，此時觀測到的相對濕度35%，對比西半部臺南與恆春的氣溫約30°C、相對濕度超過70%，為偏西南風的大環境場；以及8月31日，臺東日最高溫為35.7°C，當天上午2時觀測氣溫34.6°C、相對濕度33%，對比西半部臺南與恆春的氣溫低於27°C、相對濕度超過70%，屬於偏西北風的大環境場(圖1)。

臺東測候所自記溫度儀也紀錄著8月31日這場焚風發生前後的氣溫變化。圖2顯示8月30日下午2至4時氣溫約30°C，晚上10時氣溫降至26°C，爾後氣溫快速上升，31日上午1至5時左右的氣溫逼近36°C，與平常輻射冷卻所出現的清晨低溫明顯不同。

圖1 1902年(明治35年)6月21日及8月31日臺東焚風發生時，臺東、臺南及恆春測候所於上午2時觀測之氣壓(mmHg)、氣溫、相對濕度、風向、風力及日最高溫資料。(來源：臺灣氣象報文 第四，1907年)。

一 明治三十五年六月二十一日熱風			一 明治三十五年八月三十一日熱風		
觀測	二時	午前	觀測	二時	午前
恒	臺	臺	恒	臺	臺
春	南	東	春	南	東
氣壓	七四〇・一	七四〇・一	七五四・二	七五四・〇	七五一・九
氣溫	二六・二	二七・〇	三〇・五	三〇・二	三五・八
濕度%	九二	七四	七二	七四	三五
風向	北	北	南	西南	南
風力	北	北	西	西南	西
當日ノ最高氣溫	二九・六	三〇・五	三一・三	三一・七	三五・八

一 明治三十五年六月二十一日熱風 一 低氣壓支那大陸ヨリ來リ其中心本島ノ北部海上ニア
 リシトキ
 一 明治三十五年八月三十一日熱風 始メ呂宋北東部ニ現レシ低氣壓北方ニ進行シ其中心本島ノ北東方ニ來リシトキ

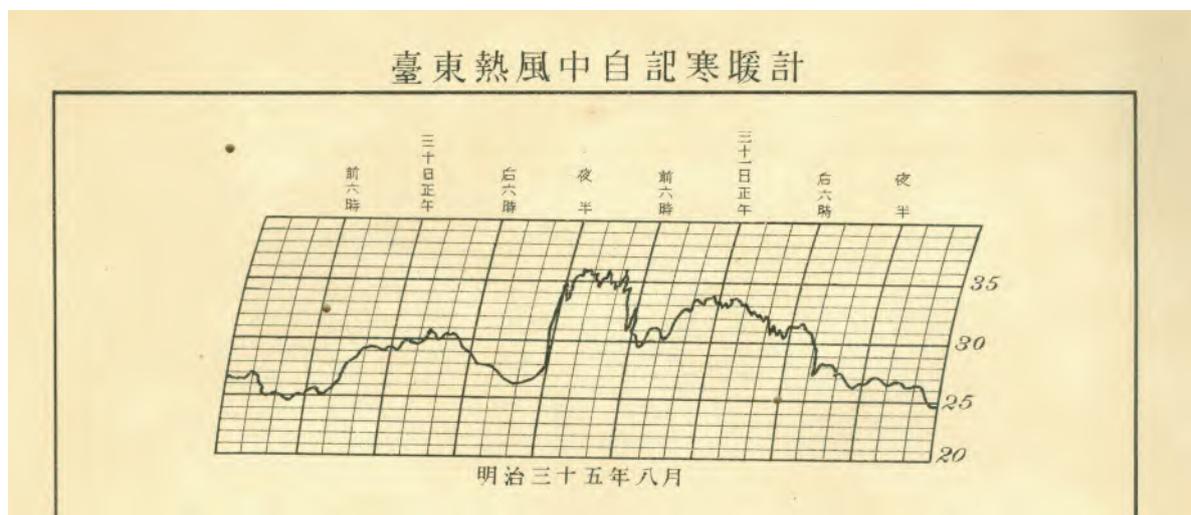


圖2 1902年(明治35年)8月30日至31日臺東焚風自記溫度儀之紀錄。(來源：臺灣氣象報文 第四，1907年)。

2. 高山的增溫趨勢

一般而言，氣溫隨海拔高度上升而下降，高山通常較平地容易發生低溫或下雪現象。1933 年設立的阿里山高山觀測所（今阿里山氣象站），是臺灣第 1 個海拔超過 2000 公尺的高山氣象站，當時設站後出現的第一次降雪也難得地被記錄下來，從老照片（圖 3）可看到氣象前輩身旁的雪堆場景。



圖 3

1933 年阿里山高山觀測所設站以來第一次降雪。（來源：中央氣象署阿里山氣象站，由該站第一任職員（近藤石象技手）之長子近藤尚武先生提供。）

從 1933 至 2023 年阿里山氣象站每年觀測到的年最低溫的逐年變化（圖 4），可以發現這 90 年來每 10 年增溫趨勢約 0.49°C ，相較於臺北、臺中、臺南、恆春、花蓮及臺東等氣象站之增溫趨勢分別約為 0.38°C 、 0.33°C 、 0.37°C 、 0.22°C 、 0.26°C 及 0.25°C 都來得高，超過增溫趨勢最小的恆春氣象站 2 倍，或許這也反應在近幾年阿里山出現下雪、霜或霧等天氣現象日益減少，也顯見長期增溫趨勢不只發生於都會區，也發生於海拔高於 2000 公尺的山區。▲

阿里山站 年最低溫 1933-2023 年

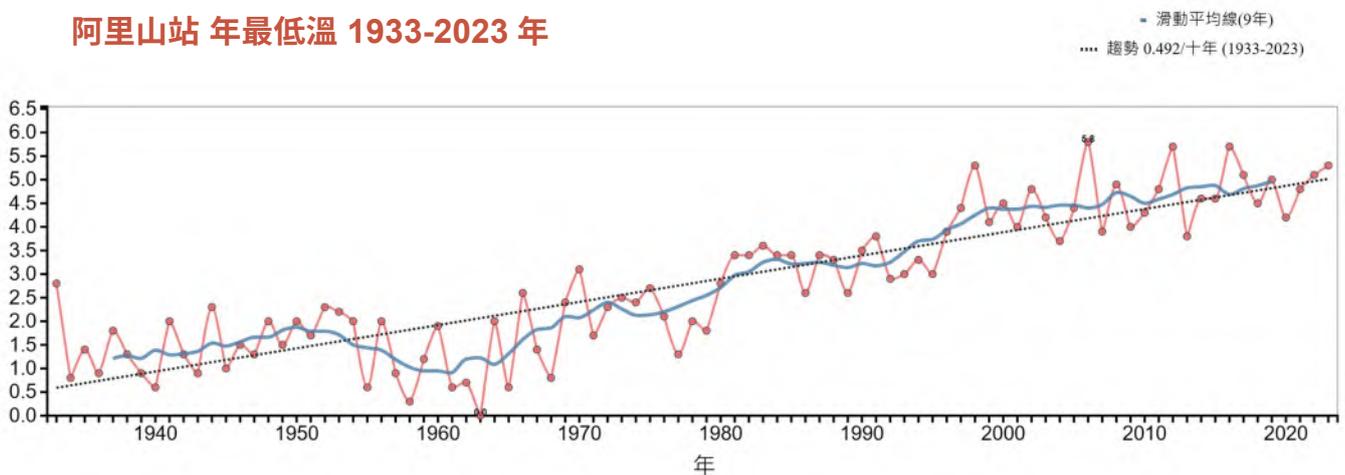


圖 4 1933 至 2023 年阿里山氣象站年最低溫的逐年變化。（來源：中央氣象署氣候監測與預報作業輔助系統）。



PART.02

從觀測資料
看臺灣過去高溫趨勢

PART. 02

從觀測資料看臺灣過去高溫趨勢

■ 1. 高溫指標長期趨勢

全球平均溫度變化指出，自 1850 年以來全球氣溫逐漸升高，1980 年後全球平均溫度急遽增加，世界各地熱浪頻傳。國家氣候變遷科學報告 2024 指出過去百年 (1900 年至 2022 年) 臺灣地區全年平均氣溫上升 1.5°C，夏季、冬季增溫趨勢皆與全年平均相同為 1.5°C / 百年。臺灣的氣溫長期變化與全球平均氣溫的變化特徵相似，2015 年後的年均溫從未低於攝氏 24.2 度，2015 年至 2020 年間屢屢打破過去的高溫紀錄，2020 年夏季更是中央氣象署有紀錄以來最熱的一季。

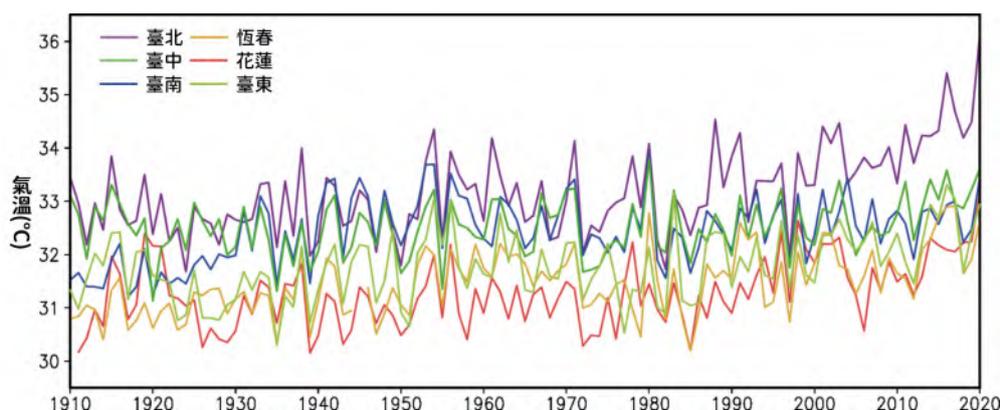


圖 5 1910 - 2020 年 6 個百年測站 (臺北、臺中、臺南、恆春、花蓮、臺東) 每年夏季 (6 月至 8 月) 平均最高溫度變化趨勢。(來源：中央氣象署繪製)

圖 5 為 1910 年至 2020 年期間，臺灣 6 個百年氣象站 (臺北、臺中、臺南、恆春、花蓮、臺東) 夏季平均日最高溫的變化趨勢。因地理位置與地形的關係，6 個測站觀測的最高溫度特徵變化落在不同的溫度區間，其中臺北站的日最高溫多為 6 個測站中最高，推測臺北為盆地地形，測站設置於盆地中央蓄熱嚴重，且為人口集中的大都市，受熱島效應影響使得臺北氣溫升高較為劇烈。

中央氣象署的高溫定義在 2018 年前為 35°C，2018 年改為 36°C 並開始發布高溫資訊。除了臺北站，其他 5 個測站發生 36°C 以上的高溫之頻率極低，不宜將 36°C 做為門檻一體適用於每一測站。為檢視各測站極端高溫的變化，本節以各測站夏季 (6 月至 8 月) 在 1910 至 2020 年間，日最高溫度之百分位分布達 90% 的溫度值 (PR90) 做為門檻值，分別為臺北 35.8°C、臺中 34.4°C、臺南 34.5°C、恆春 33.3°C、花蓮 33.3°C、臺東 33.7°C。

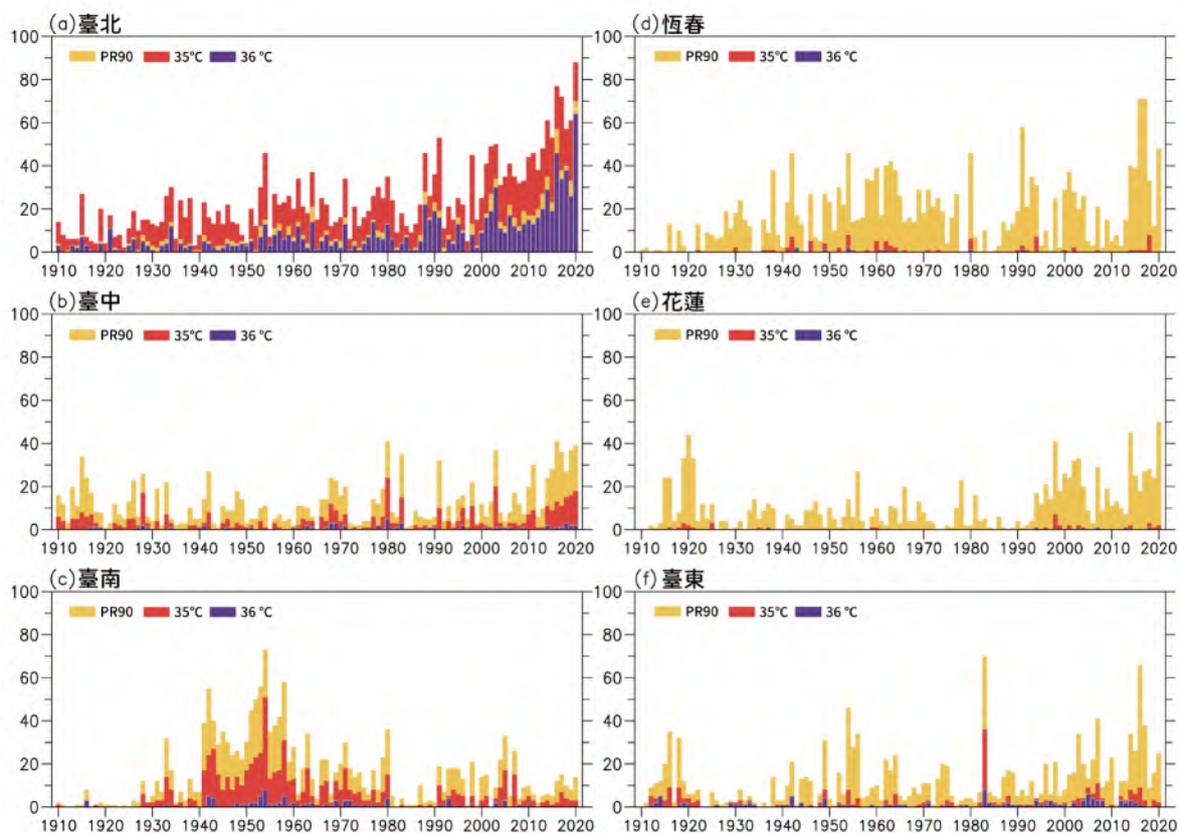


圖6 1910 – 2020年 (a) 臺北、(b) 臺中、(c) 臺南、(d) 恆春、(e) 花蓮以及 (f) 臺東 6 個測站每年極端高溫日數之時間序列與變化趨勢。橫軸代表年份，縱軸代表日數。圖中極端高溫辨識的門檻值 (PR90) 是按照各站夏季 (6~8 月) 溫度百分位分布的高溫 90% 定義。黃色代表日最高溫大於 PR90 的日數，紅色代表日最高溫大於 35°C 的日數，紫色代表日最高溫大於 36°C 的日數。(來源：中央氣象署繪製)

統計 1910 年至 2020 年，臺北、臺中、臺南、恆春、花蓮、臺東 6 個測站每年日最高溫達到門檻值的日數，即為極端高溫日數變化 (圖 6)，其中黃色代表日最高溫大於 PR90 的日數，紅色代表日最高溫大於 35°C 的日數，紫色代表日最高溫大於 36°C 的日數。6 個百年測站極端高溫日數皆呈現增加的趨勢，臺南站增加幅度最小，臺北站增加幅度最大，除了臺南站，其他百年測站均於 1980 至 1990 年代後有高溫日數明顯增加的現象。臺南站與恆春站在 1940 到 1960 年代間，皆呈現明顯的高溫現象，尤其在臺南站是百年中高溫日數最多的時期。此一現象，發生於西南部，可能與特殊的氣候年代際變化有關，目前尚未有文獻探討此一現象。

分析各測站的變化趨勢，臺北站百年來的高溫日數增加最為顯著，呈現逐年上升的趨勢，3 種高溫日數有一致的變化，1990 年後急遽上升，2000 年之後屢破新高，特別是在 2003 年、2016 年至 2018 年與 2020 年，36°C 以上的高溫日數皆超過 30 天。臺中站高溫日數相較其他測站雖然較少，亦可明顯看見日數逐年增加。臺南站的高溫日數變化雖有增加但趨勢不明顯，且高溫日數最多的時期出現在 1940 年至 1960 年，而不是 2000 年以後。恆春站的極端高溫日數變動幅度較大，日數相較其他測站為多，且與臺南站相似，在 1940 年至 1960 年間有較多的高溫 (甚至超過 36°C) 日數，高溫日數最大值則出現在 2010 年後。東部的花蓮站與臺東站自 1990 年後超過 PR90 的高溫日數即有明顯增加，其中臺東站在夏季易受焚風影響，因此有超過 36°C 的高溫出現。

2. 事件觀點探討過去極端高溫事件

2.1 極端高溫事件定義

在以往的熱浪或極端高溫事件研究中，通常以日最高溫度（Tmax）作為主要指標，來探討極端高溫的變化。然而，過去的研究（Salinger, 1995; Easterling et al., 1997; Dai et al., 1999; Zhou et al., 2008, 2009）指出，在全球暖化的背景下，北半球大部分地區的日最低溫度（Tmin）升幅遠大於日最高溫度（Tmax），這導致日較差（Diurnal Temperature Range, DTR）呈現下降的趨勢。這種現象可能導致霜凍日數減少、暖夜天數增多，甚至增長極端高溫的發生時間（IPCC, 2007; Zhou et al., 2009）。在臺灣，DTR 的下降趨勢也相當明顯（賴和姜，2004; 黃和翁，2011）。最近的研究（黃和翁，2011; 楊等，2023）發現，臺灣日均溫（Tavg）、Tmax 和 Tmin 呈現出不同的長期趨勢變化。其中，Tavg 和 Tmin 在全臺灣皆呈現明顯的上升趨勢，尤其以 Tmin 的升幅最為顯著。相對而言，Tmax 的趨勢則較不明顯，部分山區甚至呈現溫度下降的趨勢（與全球暖化下，模式模擬普遍增溫的結果不一致）。另外，夏季 Tmin 通常是代表夜晚或清晨的升溫情況，若這些時段都有嚴重的升溫趨勢，則高溫的情況將更為嚴重，因此，本節將以 Tmin 作為主要指標，分析臺灣極端高溫事件的長期變化。

傳統的熱浪或極端高溫事件定義中，因計算指標的方法無法保留事件的時空演變訊息，而限制了對高溫事件在時空層面的深入分析。為了更精確地偵測和追蹤極端高溫事件，本節採用中央研究院環境變遷研究中心（以下簡稱中研院環變中心）駱世豪博士於 Lo et al. (2021) 提出的客觀極端高溫事件偵測方法（詳情請見附錄 1），分別計算出極端高溫事件的四種特性（請參閱文字框 1：極端高溫事件指標特性）：極端高溫事件等級（Heatwave magnitude scale, HWMS）、極端高溫事件的平均強度（Heatwave mean magnitude, HWMM）、極端高溫事件的平均面積（Heatwave mean area, HWMA）和極端高溫事件持續時間（Heatwave duration, HWD），其中 HWMS 為 HWMM、HWMA 和 HWD 的乘積，所以可以使用 HWMS 值的大小量化熱浪事件。本節將此偵測方式應用於 TCCIP 網格化觀測資料（以下簡稱 TCCIP 網格化資料，翁與楊，2012；翁與楊，2020；林與楊，2023）之溫度變數，資料每日一筆，空間解析度 $0.05^{\circ} \times 0.05^{\circ}$ 。

文字框一 極端高溫事件指標特性

本節以 T_{min} 做為指標，參照客觀極端高溫事件定義估算每日極端高溫事件強度指數 (Russo et al. 2015)，當連續 3 天溫度指標大於事件溫度門檻值，定義為極端高溫事件進行偵測，估算每日的事件強度。並根據 Lo et al. (2021) 將有相似時間、空間特性的高溫訊號分類，並定義為同一事件的群組。根據這樣的方式，可進一步將偵測所得之資訊歸納為：

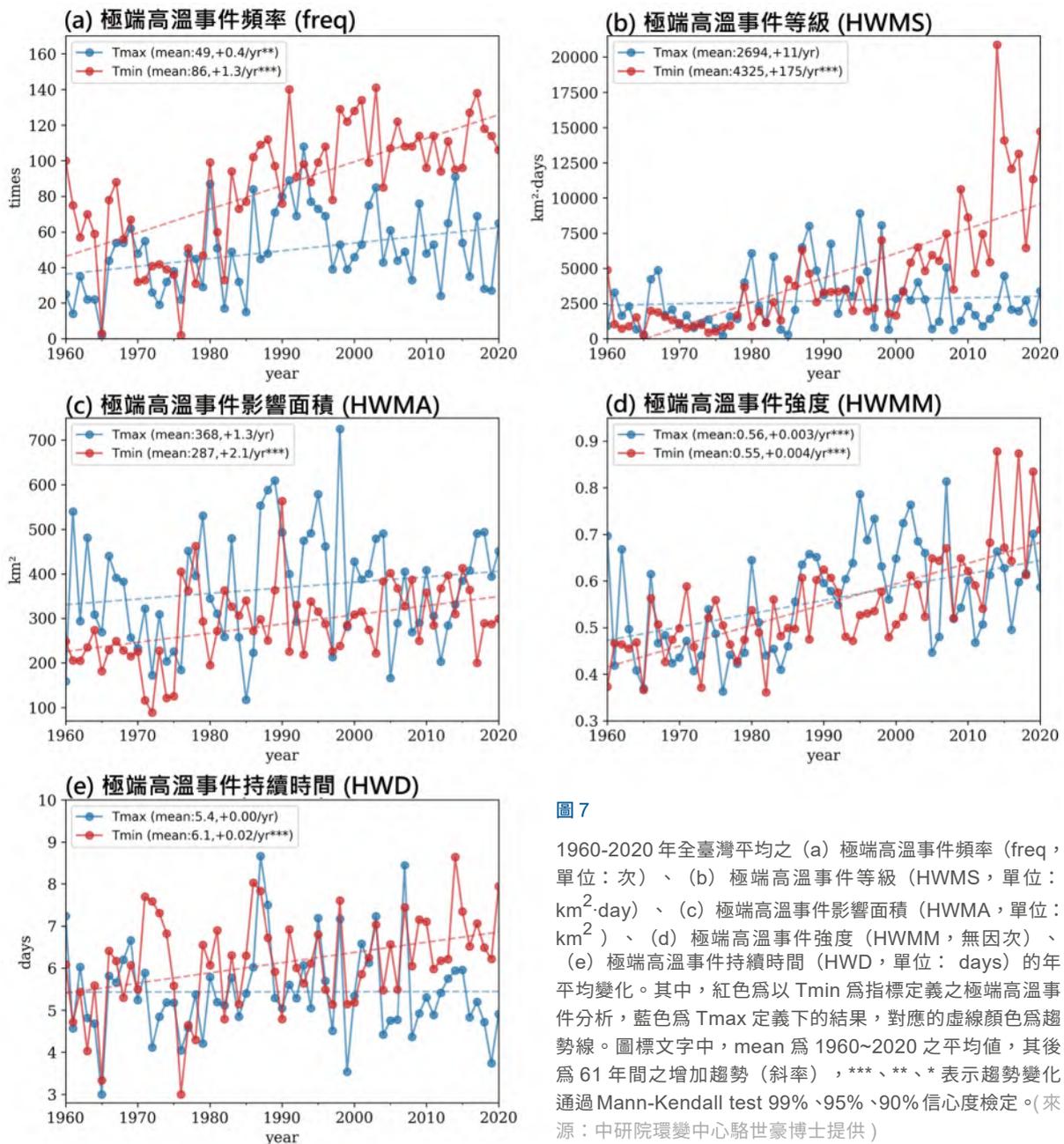
1. 極端高溫事件的平均面積 (Heatwave mean area, HWMA)：指的是受事件涵蓋的經緯度範圍估算之面積；
2. 極端高溫事件持續時間 (Heatwave duration, HWD)：計算事件的起始和結束日期所得之天數；
3. 極端高溫事件的平均強度 (Heatwave mean magnitude, HWMM)：極端高溫事件期間，受涵蓋範圍內的平均每日極端高溫強度，其中每日極端高溫強度代表每日最高溫相較於溫度門檻值之變異程度；以及
4. 極端高溫事件等級 (Heatwave magnitude scale, HWMS)：主要用於判斷事件的嚴重等級，除了考量溫度強度，也考量受事件涵蓋的面積，為極端高溫事件中每日溫度強度和面積的乘積總和；詳細計算方式請參見附錄 1。

2.2 極端高溫事件特性的年際變化

首先，為檢視本節採用的偵測方式下，以 T_{max} 和 T_{min} 作為指標，是否也會有不同的趨勢特徵。在此分別使用 TCCIP 網格化日最高溫、日最低溫資料偵測與分析，結果顯示 (圖 7) 近 60 年來， T_{max} 定義下的極端高溫事件發生頻率 (通過 95% 信心度)、HWMM (通過 99% 信心度) 雖有上升趨勢，但在 HWMS、HWMA、HWD 的表現上，皆不具有統計上的顯著性 (無法通過檢定)。相對地， T_{min} 的變化趨勢較為穩定，在全球暖化的背景下，臺灣極端高溫事件次數和其特性皆有明顯增加趨勢。這樣的結果與前述 T_{min} 與 T_{max} 長期趨勢變化相同，即 T_{min} 的變化特徵較能反應溫室效應對全球暖化的影響，因此以下的討論皆以 T_{min} 做分析。

圖 7a 為每年極端高溫事件發生頻率，1960-2020 年間平均每年事件發生頻率為 86 次，並且有明顯增加的趨勢 (通過 99% 信心度)，其增長速度約為每年增加 1.3 次。另外，從極端高溫事件等級 (圖 7b) 上看，1960-2020 年間平均每年的事件等級約為 $4325 \text{ day} \cdot \text{km}^2$ ，其增長速度約為每年增加 $175 \text{ day} \cdot \text{km}^2$ ，若觀察其增長趨勢可發現，極端高溫事件等級約在 2000 年後才有較為顯著的增長。比對 2000 年前後的極端高溫事件頻率和等級來看，2000 年前極端

高溫事件的頻率增加速率較 2000 年後大，而其等級則有相反的趨勢，也就是說，2000 年後極端高溫事件頻率雖然增加的頻率不大，但每年極端高溫事件等級都是急遽的增加，其代表意義為，嚴重極端高溫事件的發生機率變大。若將極端高溫事件等級拆解來看，圖 7c、圖 7d、圖 7e 分別為平均每年極端高溫事件影響面積、平均每年極端高溫事件強度、平均每年極端高溫事件持續時間。1960-2020 年間平均每年極端高溫事件影響面積為 287 km²（通過 99% 信心度）；平均每年極端高溫事件強度為 0.55，每年以 0.004 的趨勢增加（通過 99% 信心度）；平均每年極端高溫事件持續時間為 6.1 天，每年以 0.02 天的趨勢增加（通過 99% 信心度）。通過各項的趨勢分析可以知道，不論是發生頻率、事件等級，或是發生面積、強度、持續天數，全臺平均皆有明顯上升趨勢，也就是說，臺灣現階段面臨大範圍、長延時且高強度的極端高溫挑戰。



2.3 門檻值的空間變化

值得注意的是，從圖 7a（紅線）中可以發現，全臺平均極端高溫事件發生頻率在 1980 年後有明顯上升趨勢，而在事件等級（圖 7b，紅線）中也可以看到相似的特徵，甚至在 2000 年有更明顯的上升趨勢。然而，根據每日極端高溫事件強度的定義，其強度變化取決於溫度相對於基期（一般而言為 30 年）溫度的 25 和 75 百分位數的比較（附錄 1 式 2）。在此進一步將 1960-2020 年分為三個時間區間進行分析（分別為 1961-1980 年、1981-2000 年、2001-2020 年），以探討在這三個不同時間區間內，25 和 75 的溫度百分位數分布是否存在顯著差異。

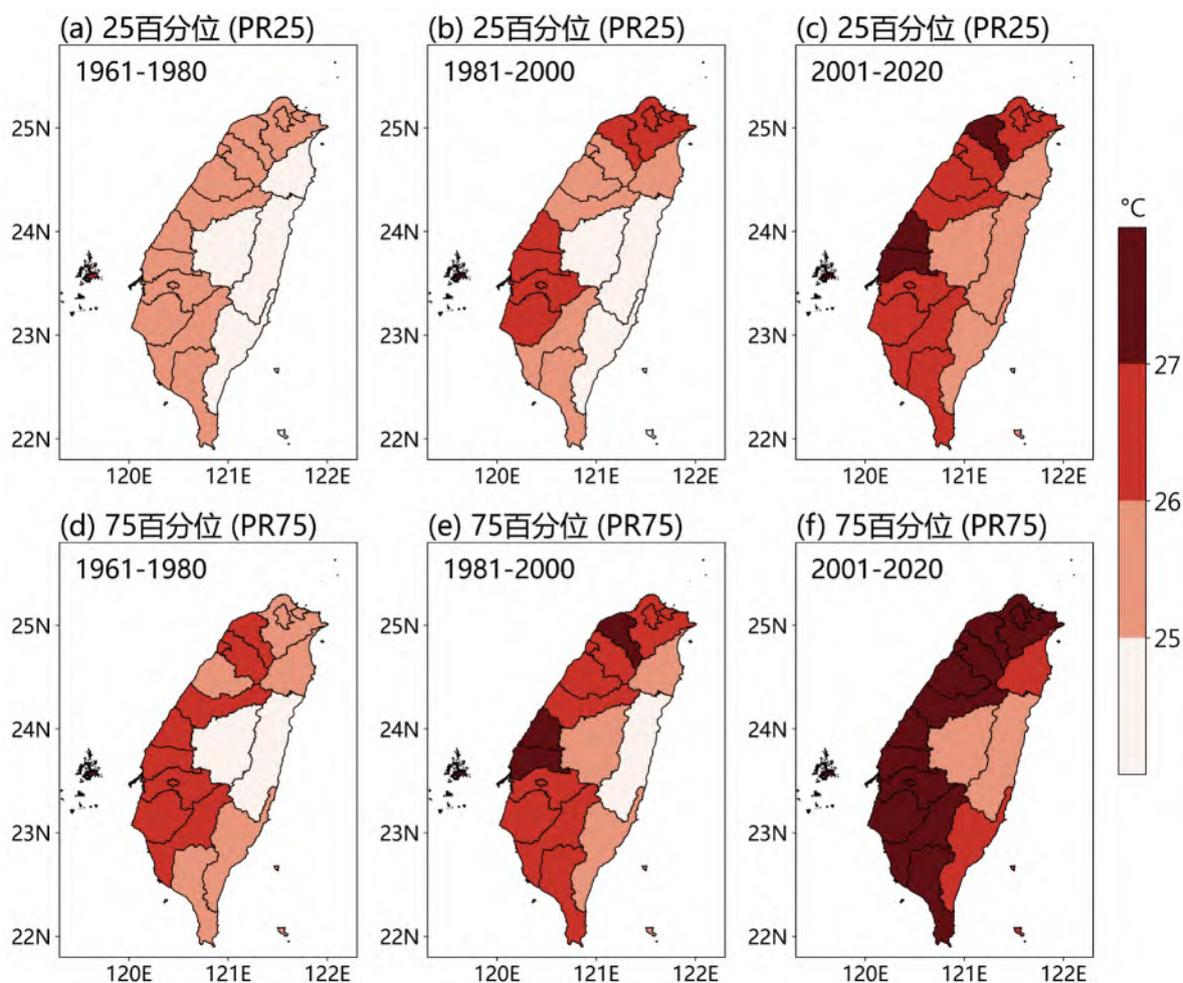


圖 8 全縣市在不同時間區間下 (a、d：1961-1980 年；b、e：1981-2000 年；c、f：2001-2020 年)，Tmin 的 (a) - (c) 25 百分位 (PR25)；(d) - (f) 75 百分位 (PR75) 值分布 (單位：°C)。(來源：中研院環變中心駱世豪博士提供)

從圖 8 可見，不論是 25 百分位 (PR25，圖 8a 至 c) 還是 75 百分位 (PR75，圖 8d 至 f)，每個縣市的平均溫度隨時間上升。這表示若以不同時間作為基準期進行分析，各區域的門檻值皆隨時間不斷上升。從 PR25 的分析來看，在 1961-1980 年間 (圖 8a)，臺灣西半部的 PR25 大約在 25 度，東半部則低於 25 度。但到了 1981-2000 年 (圖 8b)，北部和中部的 PR25 增加；2001-2020 年 (圖 8c)，西半部的 PR25 溫度普遍超過 26 度，而東半部也提升至 25 度以上，顯示在過去幾十年中，臺灣的升溫現象在中部和北部尤為顯著，並且已擴展至全臺。PR75 分析結果亦顯示了相似的特徵：在 1961-1980 年間 (圖 8d)，桃園、新竹、臺中至高雄一帶 PR75

較高（約 26 度），其餘地區則低於 26 度；到了 1981-2000 年（圖 8e），桃園、彰化、雲林超過 27 度，西半部溫度普遍在 26 度以上；到了 2001-2020 年（圖 8f），西半部各地區的 PR75 更是上升至 27 度以上。總體而言，不論是 PR25 還是 PR75 的溫度值，均觀察到臺灣各縣市的溫度持續上升，門檻值不斷提高，這些變化與全球暖化趨勢相符。

2.4 極端高溫事件特性的區域長期變化

綜合前述全臺各區域溫度門檻值隨時間增加的結果（圖 8），以及圖 7 中全臺平均極端高溫事件頻率和強度的上升趨勢，因此可以推測，極端高溫事件發生頻率在各區域應該有相似的變化特徵，且 HWMM 皆會有明顯的增加趨勢。藉此，針對極端高溫事件發生頻率及各項特性做區域分析，討論暖化趨勢下是否全臺皆有相同的變化特徵。

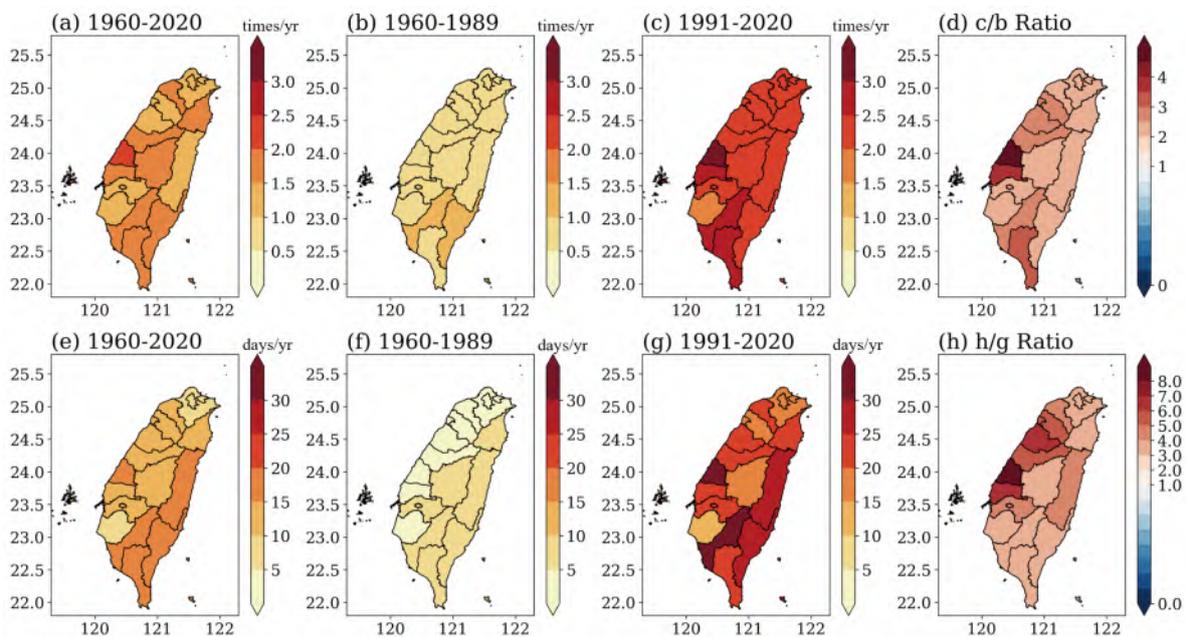


圖 9 (a) - (d) 極端高溫事件發生頻率 (a) 1960-2020 年平均 (單位：time/yr)、(b) 1960-1989 年平均 (單位：time/yr)、(c) 1991-2020 年平均 (單位：time/yr)、(d) 1991-2020 年和 1960-1989 年平均之比值 (即 c/b)；(e) - (h) 與 (a) - (d) 相似，但為事件發生天數 (e-f 單位：day/yr)。(來源：中研院環變中心駱世豪博士提供)

針對極端高溫事件發生頻率，我們分析各縣市區域平均值在不同時期的發生個數和天數（圖 9）。從圖 9a 可以看出，在 1960-2020 年間，臺灣各縣市的平均個案數均超過每年 1 次，這表示平均來說，每個縣市每年至少經歷 1 次極端高溫事件。將時間細分為 1960-1989 年和 1991-2020 年兩個階段來進行比較，發現在前 30 年（圖 9b），各地的極端高溫事件個案數普遍低於每年 1 個，而在後 30 年（圖 9c），該數字顯著增加至每年 1.5 個以上，特別是在彰化、雲林和高雄地區，更是超過每年 2.5 個。藉由比較前後時期個案數的增長率（圖 9d），可以觀察到全臺灣在後期的極端高溫事件個案增加數普遍超過 1.5 倍，其中以中部和南部的增加最為顯著，彰化和雲林的增長率甚至超過了 3 倍。再看到事件發生天數的分析結果，圖 9e 長期平均（1960-2020 年）顯示出各地極端高溫事件天數介於 5-20 天之間。在前 30 年（圖 9f），各縣市的極端

高溫事件平均天數大多不超過 10 天，然而後 30 年（圖 9g）的數據則有明顯的增加趨勢，與先前 30 年相比，增幅普遍達到 3 倍以上。中部地區的增幅尤為突出（超過 4 倍），而彰化和雲林的極端高溫事件天數增加幅度更是超過 7 倍。綜上所述，圖 9 顯示出臺灣在近半世紀以來，極端高溫事件的頻率和天數均呈現出顯著的上升趨勢，尤其是中部地區最為明顯。

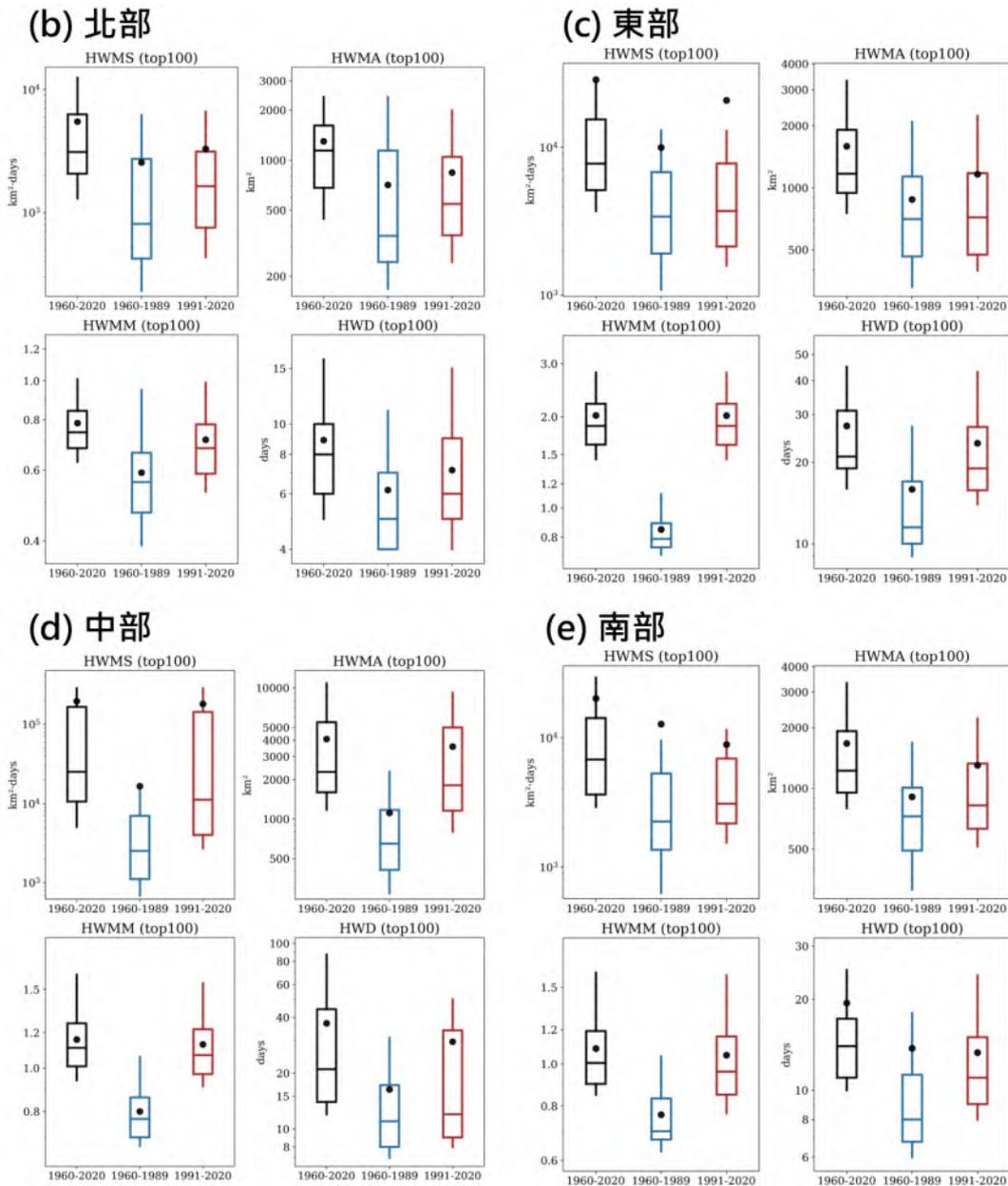
另外，考慮到各區域的極端高溫事件個數差異，為了客觀地討論各區域的極端高溫事件特性是否出現明顯變化，在此參考中央氣象署的區域劃分，將臺灣本島分為四大區域（圖 10a），包括北部、中部、南部和東部地區，以各事件所有時間的平均極端高溫事件發生的核心位置為基準歸納其發生位置，並從各區域的個案中，探討不同極端高溫事件特性（HWMS、HWMA、HWMM 和 HWD）在 1960-2020 年的前後期（分別為 1960-1989 年和 1991-2020 年）之前 100 名（top100）個案的特性變化。此處需特別注意，事件歸類於某地區並不代表只發生或只涵蓋於該地區，僅表示事件大部分時間的核心位置位於此地區。舉例來說，若該事件被歸類於中部地區，其範圍可能延伸至北部、南部或東部地區，某些時間點的核心位置也可能為於其他地區，只是所有時間的核心位置，平均後位於中部地區。

從圖 10a 可以發現，Tmin 於後 30 年在北、中、南、東部分別約增溫 0.8°C、1.0°C、1.1°C、0.9°C，以中南部增加最多。比較各區域的極端高溫事件特性（圖 10b-e、附錄 2 表 1）在 1960-2020 年和前後 30 年極端事件（前 100 名）的特性分布，顯示 HWMS 平均在各區域皆增加；以中位數來看，北部、中部、南部、東部在後 30 年與前 30 年相比分別約增加 2.1、4.4、1.4、0.8 倍，其中以中部增加最為顯著（通過 99% 信心檢定）。再將 HWMS 分成 HWMA、HWMM、HWD 來看，在北部、中部變化最大的事件特性為 HWMA，約分別增加 1.6、2.8 倍，南部變化較大的事件特性為 HWMM 和 HWD，而東部則以 HWMM 增加最多。換句話說，以極端高溫事件變化而言，在南、東部面臨到的主要是更強的極端高溫挑戰，而北、中部則是面臨到極端高溫涵蓋範圍擴張的問題。這些分析有助於我們更全面地了解不同區域的極端高溫事件特性在過去幾十年中發生的變化，以及這些變化是否具有統計學意義。進一步的研究可能有助於我們更好地理解極端高溫對各地區的影響，並制定相應的應對措施。



圖 10

(a) 為本節使用之區域劃分方式，以及北部、中部、南部、東部的增溫幅度（為 1960-1989 年和 1991-2020 年的增溫幅度）。(b) - (e) 分別為北部、東部、中部、南部不同極端高溫事件特性 (HWMS、HWMA、HWMM、HWD)，在不同時段的前 100 名的盒鬚圖。黑色、藍色、紅色分別代表 1960-2020 年、1960-1989 年、1991-2020 年間的時段，盒狀圖界線分別代表 25 百分位、50 百分位、75 百分位，黑色圓點為平均值。(來源：中研院環變中心駱世豪博士提供)



2.5 極端高溫事件特性的區域特性差異

前述針對極端高溫事件特性討論中，選取前 100 名之事件分析，討論各區域在前後期的事件特性是否有變化。在此使用泡泡圖分析所有極端高溫事件的特性分布，泡泡圖的橫軸為持續天數，縱軸為平均影響面積，顏色表示平均強度，泡泡大小表示事件等級，不同的事件特性代表形成機制的不同。舉例來說，綜觀環境場所造成的極端高溫事件通常為大面積、長延續時間和較強的平均強度，所以通常事件等級較大；相反來說，都市熱島效應所造成的極端高溫事件則為小面積、短延續時間和較弱的平均強度，所以通常事件等級較小。

圖 11 為 1960-2020 年 (a) 全臺灣、(b) 北部、(c) 東部、(d) 中部、(e) 南部所有極端高溫事件個案的特性分布。從全臺所有事件分布 (圖 11a) 來看，極端高溫事件發生面積 (HWMA) 大多落在 6000km^2 內、持續天數 (HWD) 落在 50 天內，而極端高溫事件強度 (HWMM) 則分散 0.4-1.1 左右的範圍。比較不同區域 (圖 11b-e) 的差異可以發現，各區域中以北部 (圖 11b) 極端高溫事件等級較小、強度較小、發生面積較小、持續天數較短，通常為地區性的效應所造成之極端高溫事件，如熱島效應；而中部 (圖 11d) 事件等級較大、強度較強、發生面積較大、持續天數較長，通常與綜觀環境場的系統有關，在當中還可以發現，1960-2020 年之間 HWMS 最大的 5 個熱浪個案核心位置皆發生在中部。

除了上述提到的極端高溫事件特性變化之外，本節研究也觀察到極端高溫事件的開始時間提前，而結束時間則延遲，這顯示夏季擴張的趨勢也反映在極端高溫事件上。然而，這種特性在平地 (海拔小於 500 米) 和山區 (海拔大於 500 米) 有著不同的變化特徵。需要指出的是，由於山區測站較少，可能存在較大的誤差，因此本節僅討論平地的分析結果。

(a) 全台 (n=5274)

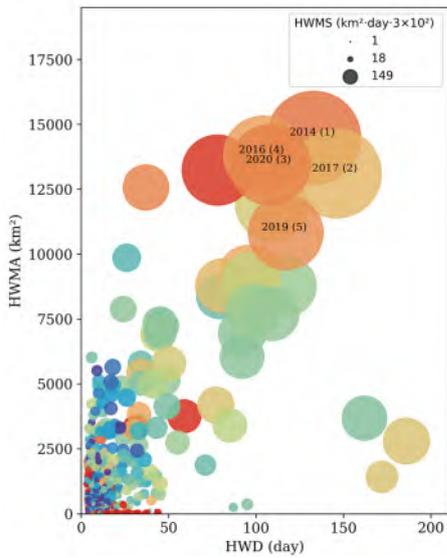
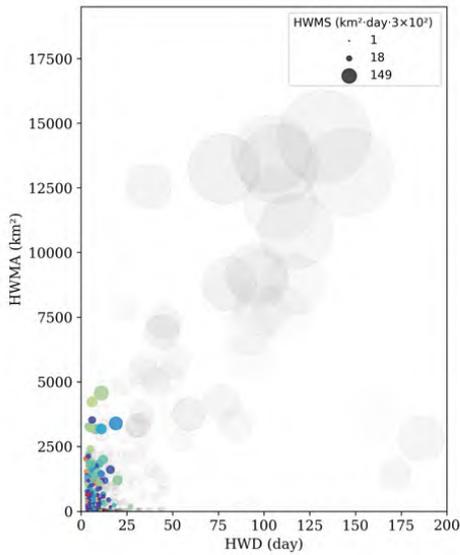


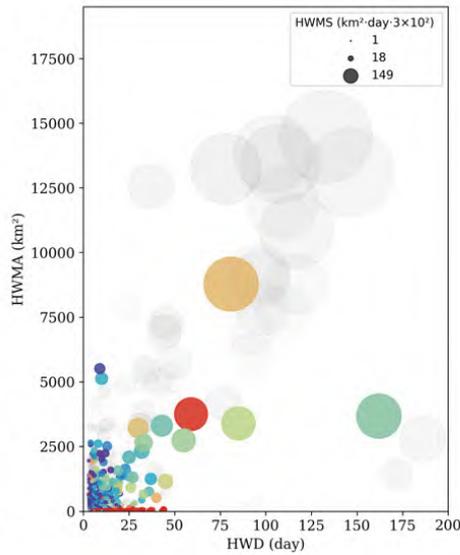
圖 11

1960-2020 年 (a) 全臺灣、(b) 北部、(c) 東部、(d) 中部、(e) 南部所有極端高溫事件個案的特性分布。其中，圓點大小代表 HWMS (單位： $\text{km}^2 \cdot \text{day}$) 之大小，顏色表示 HWMM 大小，Y 軸為對應之 HWMA (單位： km^2)，而 X 軸則為 HWD (單位： day)。為方便比較區域特性，(b) - (e) 同時以之灰階標記全臺灣之個案分布。(a) 中，圓點內標記數值為 HWMS 最大的五個個案的發生年份及其排名。(來源：中研院環變中心駱世豪博士提供)

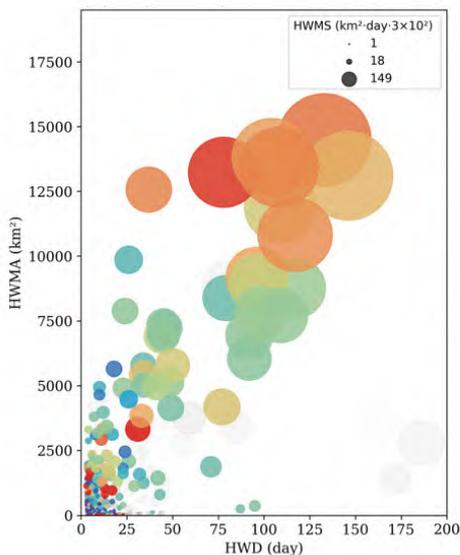
(b) 北部 (n=440)



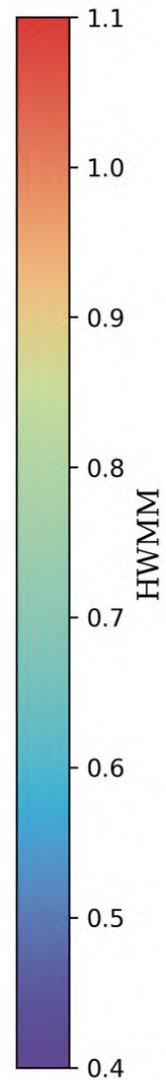
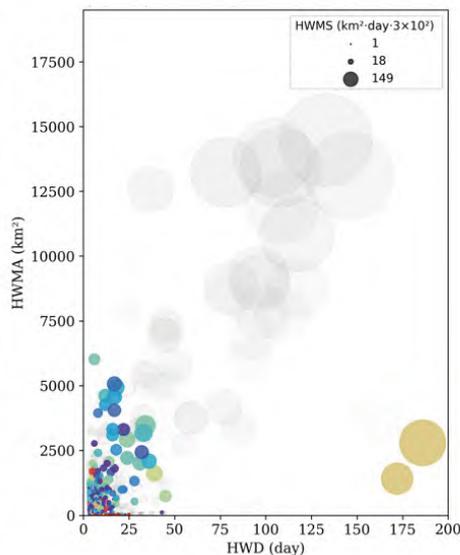
(c) 東部 (n=2298)



(d) 中部 (n=993)



(e) 南部 (n=1078)



在圖 12 中，我們將分析時間分為前期（1960-1989 年，藍色）及後期（1991-2020 年，紅色），計算全臺灣及各區域平地（海拔低於 500 米）每日個案發生次數累計分布。在圖 12(a) 中，可以看到全臺極端高溫事件發生次數在 1991-2020 年間有顯著增加。此外，前期主要發生在五月中旬到十月初之間，而後期則從四月底開始到十一月初，顯示在近三十年間，極端高溫事件發生的時間明顯擴張，類似的特徵也可以在各個區域看到（圖 12b、c、e、f）。進一步以甘特圖（圖 12d）比較前後期及各區域事件發生時間的變化，圖中顯示雖然各區域極端高溫事件發生的開始、結束時間以及增加幅度不同，但皆表現出明顯時間擴張的特徵，其中又以中部及東部增加 81 天最為明顯。在極端高溫事件發生時間擴張，以及夏季越來越長的趨勢下，對人體傷害、環境變遷帶來更多嚴峻的考驗。

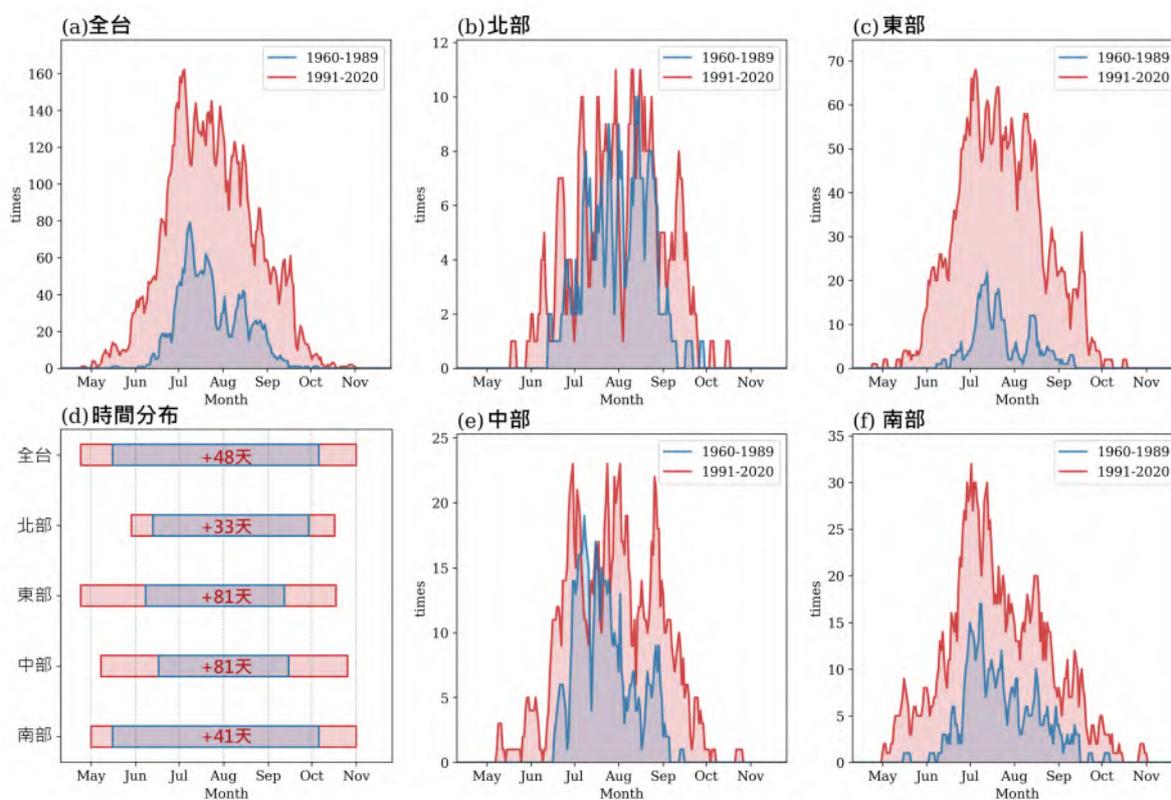


圖 12 1960-1989 年（藍色）及 1991-2020 年（紅色）(a) 全臺灣、(b) 北部、(c) 東部、(e) 中部、(f) 南部平地（海拔低於 500 米）每日個案發生次數累計分布（單位：次）。(d) 為各區域極端高溫事件最早發生時間及最晚結束時間之甘特圖分布，藍色長條圖為前期（1991-2020 年），紅色為後期（1960-1989 年），標記之天數為後期與前期發生時間長度之差。（來源：中研院環變中心駱世豪博士提供）

總的來說，本節探討了臺灣極端高溫事件的變化趨勢以及其區域特性。極端高溫事件的定義以日最低溫度（Tmin）為主要指標，並利用客觀事件偵測方法來分析時空演變訊息。結果顯示，與全球暖化趨勢一致，臺灣面臨著極端高溫事件的增加與增強趨勢，這些事件不僅在數量上增加、發生時間擴張，還在強度和影響範圍上變得更為嚴重，其中又以中部地區變化最為明顯。

3. 高溫事件個案與大氣環流條件探討

針對臺灣夏季產生極端高溫的原因，Wu 等人 (2020) 使用群集分析將 1982-2016 年間的臺灣夏季極端高溫事件分為三類，並通過客觀統計方法分析了極端高溫事件發生時的時空特徵，以系統性地辨識利於極端高溫發生的天氣類型。根據研究，臺灣夏季極端高溫發生時的大氣條件可歸納為三種低層環流型態：南風或西南風 (47.6%)、太平洋副熱帶高壓 (35.9%) 和熱帶氣旋 (16.5%)。

• 南風或西南風型態

當發生南風或西南風型態，對流層有強烈的沉降、相對濕度較低，並且靠近地表有強逆溫層。當太平洋副熱帶高壓增強並向西延伸時，臺灣附近區域被高壓覆蓋，導致雲量偏少，地表接收更多向下的短波輻射。垂直結構顯示，高壓內的沉降氣流使得整個對流層大部分地區變得乾燥且雲量減少，近地面大氣溫度隨高度增加，形成穩定狀況。除此之外，當帶有水氣的西南風穿過臺灣南部後受地形舉升，水氣減少，越過中央山脈後下沉增溫，在臺灣東南沿海 (如大武) 造成極端高溫。

• 太平洋副熱帶高壓型態

此一型態發生時，是太平洋副熱帶高壓比氣候平均值更向西延伸並增強。由於太平洋副熱帶高壓的增強削弱了東亞 - 西太平洋熱帶地區的夏季西南風，臺灣附近低層大氣風速減弱，削弱來自海上的調節作用，再加上受高壓壟罩的中國東南部到臺灣一帶的大氣異常沉降增溫，且因為雲量偏少而有更多的太陽輻射加熱地表。這一系列過程導致臺灣極端高溫事件的發生。

• 熱帶氣旋型態

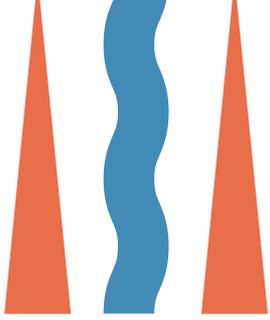
熱帶氣旋型態引起的極端高溫不只受水平風的下坡沉降影響，颱風的外圍環流也加強了整體沉降，進而增強了下沉增溫。以 2014 年的娜克莉 (Nakri) 颱風與 2002 年雷馬遜 (Ramasun) 颱風為例，娜克莉颱風的外圍雨帶為臺灣中部和西南部帶來降雨，然而，在臺灣北部有強烈沉降增溫，且更多向下的太陽輻射加熱地表。雷馬遜颱風的風從臺灣西側爬升越過中央山脈最南端後，在臺灣東南部下坡，空氣變暖變乾，且伴隨增強的向下太陽輻射，暖化近地面空氣。

此三種低層環流型態與過去臺灣夏季發生極端高溫的環流概念一致，南風或西南風型態以 6 月最為常見，7 月以南風或西南風型態以及太平洋副熱帶高壓型態為主導，8 月主導的是太平洋副熱帶高壓以及熱帶氣旋。綜上所述，太平洋副熱帶高壓的增強仍多是臺灣發生極端高溫最主要的原因，這也跟朱吟晨 (2007) 以及李與許 (2017) 的研究結果一致。▲



PART.03

臺灣未來高溫指標推估



PART. 03

臺灣未來高溫指標推估

■ 1. 使用資料

本章使用 TCCIP 產製的統計降尺度資料 (TCCIP 技術報告, 2021; TCCIP 資料說明, 2023) 之日最高溫度, 此組資料應用最新的第六期耦合模式比對計畫 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 6, CMIP6) 所提供的全球多模式氣候模擬資料。CMIP6 統計降尺度過程中, 需要使用 0.05° 空間解析度的 TCCIP 網格化觀測日溫度資料 (Tung et al, 2022; Weng and Yang, 2018) 做為歷史氣候參考資料, 才可進行空間內差與偏差修正兩項重要統計降尺度步驟。為兼顧溫度推估數值資料的一致性, 模式的日最高、最低、平均溫度同時進行統計降尺度, 產製模式歷史基期 (historical) 1960-2014, 以及四組社會經濟 - 排放情境 (SSP-RCPs, 參閱文字框 2: SSP 排放情境) 未來推估的結果, 包含 SSP1-2.6、SSP2-4.5、SSP3-7.0 與 SSP5-8.5, 資料長度為 2015-2100 年。詳細的資料產製過程與模式清單可參考「AR6 統計降尺度日資料 - 資料說明文件」 (https://tccip.ncdr.nat.gov.tw/upload/data_document/20220708151649.pdf)。

文字框二 SSP 排放情境

最新公布的 IPCC AR6 報告中使用的 CMIP6 模式，其模擬全球暖化的情境設定，不同於 AR5 僅考慮溫室氣體排放濃度的代表濃度途徑 (Representative Concentration Pathway, RCP) 做為排放情境設定，還考慮了共享社會經濟路徑 (Shared Socioeconomic Pathway, SSP) (Riahi et al., 2017)，納入社會經濟情境，目的在於使氣候模式模擬當中的暖化情境設定能更加趨近真實世界且合理，這也提升了情境設定的複雜程度。SSP 依據人口變化、城市化、資源可用性、技術發展等不同設定組成不同程度的社會與經濟發展假設，進行區分。由 SSP1 至 SSP5 代表由重視永續發展至高度仰賴化石燃料的高發展、高排放方向的 5 種不同程度社經發展。CMIP6 模式使用之暖化情境結合共享社會經濟路徑與代表濃度途徑，透過搭配不同程度之社經發展與不同程度之溫室氣體排放濃度相對應的輻射強迫力，以 SSP-RCP 搭配不同程度的數字組合表示。其中，以 SSP1-2.6、SSP2-4.5、SSP3-7.0 及 SSP5-8.5 做為 4 個主要使用的暖化模擬情境：

1.

SSP1-2.6：為低輻射強迫力路徑，呈現低脆弱性、低減緩壓力特性，以實現巴黎協定的限制目標；

2.

SSP2-4.5：為中間路徑，屬於中等社會脆弱性與中等輻射強迫力的組合，較緩和的土地利用與氣膠路徑設定，屬於較接近現況，基於現有氣候政策的未來趨勢；

3.

SSP3-7.0：假設目前排放量持續增加，無減緩目標的發展情境，屬於於中高輻射強迫力路徑；

4.

SSP5-8.5：為高輻射強迫力路徑，非常高濃度溫室氣體排放，設定為未來可能發展的最極端情境。

更詳細的 SSP-RCP 定義與說明，請參考國家氣候變遷科學報告 2024 關於 SSP 排放情境文字框以及 TCCIP 計畫的 AR6 情境說明 (https://tccip.ncdr.nat.gov.tw/ds_02_06_ar6.aspx)

2. 暖化情境

未來全球暖化情境下臺灣的推估資訊，需要使用地球系統模式 (Earth System Model, ESM)，將各種未來可能發生的 SSP 排放情境加入 ESM 進行未來氣候模擬，而輸出的氣候資料再由使用者依照需求挑選情境、時段進行評估。IPCC AR6 爲了因應氣候變遷調適應用需求，以符合不同程度的暖化情況進行調適政策與作爲擬定，增加了新的全球暖化程度 (Global Warming Levels, GWL，參閱文字框 3: 全球暖化程度) 情境設定。GWL 以人類尚未大量使用石化燃料的工業革命前 1850-1900 (pre-industrial level) 時段設爲全球氣候暖化的起點，當全球溫度上升至不同程度時，將各模式的模擬資料截取出來，評估導致氣候環境改變所造成的影響當作警鐘或提醒。詳細的情境設定與說明，可參考國家氣候變遷科學報告 2024、TCCIP 資料說明 (2023)、童等人 (2019)。

依照上述相關文件以多個全球模式的評估結果，GWL 1.5° C (110 個模式) 發生在 2007-2076 年，其中位數爲 2028 年；GWL 2° C (99 個模式) 發生時間 2022-2085 年，中位數爲 2042 年；GWL 3° C (66 個模式) 發生時間爲 2040-2090 年，中位數 2065 年；GWL 4° C (31 個模式) 發生時間爲 2054-2087 年，中位數 2076 年。然而臺灣並無工業革命 (1900 年) 前的觀測資料，因此以 IPCC AR6 所設定的基期 (1995-2014) 爲參考期，進行後續不同 GWL 情境下的臺灣各區域高溫推估。

此外，本章也收錄世紀中 (2038-2065) 與世紀末 (2071-2100) 的高溫指標分析結果，提供不同角度呈現臺灣未來高溫指標推估變化。

文字框三 全球暖化程度 Global Warming Level

由於 2015 年之巴黎協定將全球暖化升溫幅度以限制於 2°C 或 1.5°C 為目標，開啟了後續以全球平均溫度變化為評估基準的氣候科學研究；同時，IPCC 於 2018 年提出之全球升溫 1.5°C 特別報告 (Special Report on Global Warming to 1.5°C, SR15)；IPCC AR6 大量採用全球平均溫度變化之概念，以全球暖化程度 (Global Warming Levels, GWL) 做為衝擊評估與氣候變遷相關資訊的比較基準；以及 GWL 提供了可更為簡易明瞭地呈現當全球平均增溫至不同程度，對氣候環境造成的影響的評估方式，因此 GWL 成為探討氣候變遷議題廣泛使用之評估設定，提供相關量化推估資訊。

所謂全球暖化程度，指的是相較於工業革命前 (1850-1900) 的平均溫度，於未來推估計算之全球年平均溫度上升的幅度。以 GWL 1.5°C 為例，GWL 1.5°C 表示相較於工業革命前，當全球平均溫度上升達 1.5°C 的情況。綜合 CMIP6 氣候模式於不同 SSP 情境之推估升溫結果，不同 GWL 發生機率與時期可大致歸納如下：

1. GWL 1.5°C 可視為近未來有很高機率發生的情況，過半數的 SSP 情境推估結果顯示在 2021-2040 年間，全球平均升溫可達到 1.5°C；
2. GWL 2°C 可代表溫室氣體排放程度為中度之情況，未來很有可能發生，有超過一半的模式推估在 2041-2060 年期間，全球平均升溫可達到 2°C；而
3. GWL 3°C 與 GWL 4°C 則相當於最劣情況，代表溫室氣體排放減量失敗，最可能發生於 2081-2100 年。

更詳細的全球暖化程度定義與說明，請參考國家氣候變遷科學報告 2024 關於全球暖化程度 (GWL) 文字框以及 TCCIP 資料說明 (2023)。

3. 高溫指標

對於現今全球氣候變化，世界氣象組織 (World Meteorological Organization, WMO) 已有套固定的作法以極端氣候指標進行評估。應用此一方法除了評估過去歷史長期變化趨勢外，也可以用於未來氣候變遷 (Li et al, 2023 ; Sillmann et al, 2013)。全球暖化程度推估結果將依照 IPCC AR6 的情境設定，以 1995-2014 共 20 年的模式歷史模擬資料為參考期，在每一格點計算相關指標的高溫門檻值後，再應用於未來推估資料。高溫指標分別為暖晝天數 (TX90p)、日高溫最大值 (TXx)、極端高溫持續指數 (HWDI)，其中 TXx 用來呈現極端高溫嚴重程度，HWDI 則是高溫持續天數，考量臺灣複雜地形高度，這些指標都以每一格點的統計值做計算，比如 TX90p 是使用以地區性相對高溫為門檻值計算的高溫持續天數。表 2 說明各項高溫指標的詳細定義。詳細說明可參考臺灣氣候變遷關鍵指標圖集：AR6 統計降尺度版。

指標	定義
日高溫最大值 TXx(°C) Annual maximum value of daily maximum temperature	一年之中，日最高溫的最大值。
極端高溫持續指數 HWDI(天) Heat wave duration index	一年之中，連續 3 天以上日最高溫高於基期第 95 百分位數之事件總天數。
暖晝天數 TX90p(天) Annual count of days when daily maximum temperature is greater than the 90 th percentile	一年之中，日最高溫高於基期當天第 90 百分位數的總天數。

表 2 高溫指標與定義說明

4. 全球暖化程度未來推估

在全球暖化的背景情境下，應用 TCCIP 的 0.05° 高空間解析度推估資料，可落實在地化未來高溫風險的辨識。參考中央氣象署的分區方法 (圖 10a)，將臺灣本島設定為北部、中部、南部與東部四大分區 (由於外島地理位置分散，相關氣候資訊並無包含在四大分區)。一般而言，高溫狀況常以日最高溫度進行評估，本節將各個模式日最高溫度推估資料進行 3 項指標的計算，以分區的方式得到 20 年為期不同暖化程度的氣候平均值進行後續分析。未來推估的變化趨勢，則將多模式的未來推估結果與歷史基期 (1995-2014) 計算得出相對變化量，以盒鬚圖呈現多模式推估結果的不確定性。

4.1 日高溫最大值 (TXx)

一年之中日高溫最大值 (TXx) 多發生於夏季，由 TCCIP 網格化觀測資料分析現今氣候 (1995-2014) 空間分布圖 (圖 14 上圖)，呈現高溫強度依地形高度遞減，平地的年最大值都超過 34°C 以上。北部地區 (平均 33.1°C) 都市發展加上較多盆地地形，高溫熱島效應相對於其它區域嚴重，因此溫度較高。另一個重要特徵，由於沿海區域每天有海陸風調節，因此溫度較低；相對的，靠近山腳或河谷區域 (如臺東縱谷)，在夏季大範圍副熱帶高壓系統下沉氣流的壟罩下，容易出現高溫事件。

圖 14(下圖) 顯示全球暖化程度越高，臺灣各區域 TXx 上升幅度越大。在相同暖化程度下，四大分區 TXx 增加程度情況相近，在最嚴重 GWL 4°C 情境下，與基期相比強度會增加達 2.7°C (中位數)，其中以北部地區推估趨勢一致性最高 (第 25-75 百分位數值差異最小)。

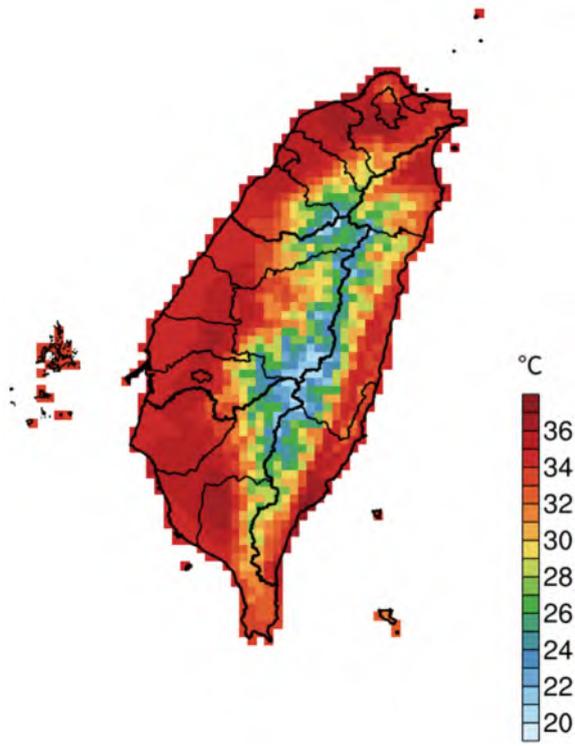
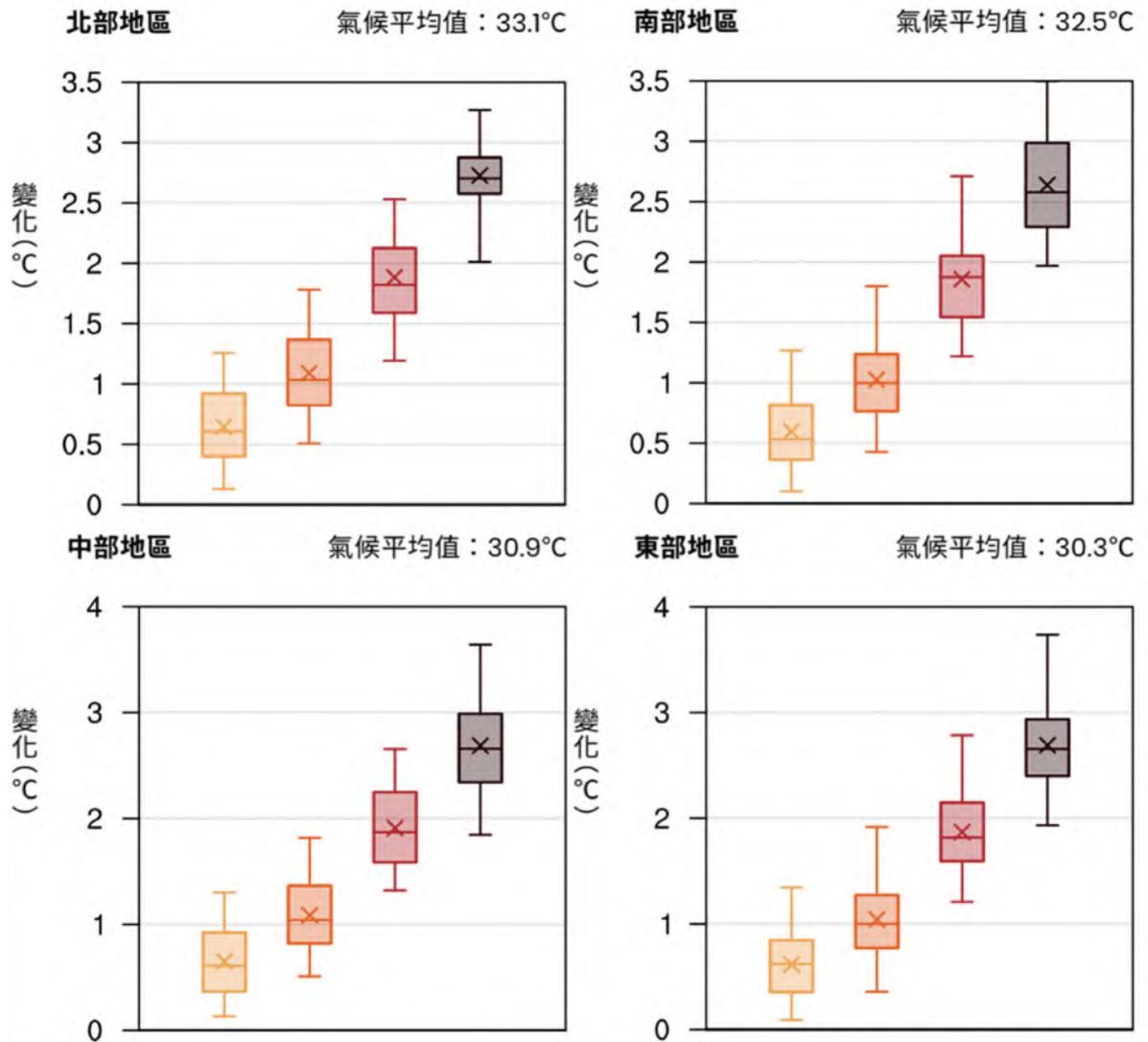


圖 14

日高溫最大值 (TXx) 基期 (1995-2014) (上圖) 空間分布 (單位: °C)。下圖每區域的四個盒鬚圖分別代表各區域在 GWL 1.5、2、3、4°C (由左至右) 情境下多模式推估的數值變化分布 (相對於基期), 右上角數值為該區域基期氣候平均值。每個盒鬚圖由上至下分別代表第 95、75、50 (中位數)、25 與 5 百分位; × 標示系集平均值。(來源: 臺灣氣候變遷關鍵指標圖集: AR6 統計降尺度版)



4.2 極端高溫持續指數 (HWDI)

極端高溫持續指數 (HWDI) 是以基期日最高溫資料為背景值，設定第 95 百分位為門檻值，且需要至少連續 3 天超過才可定義為極端高溫。由 TCCIP 網格化觀測資料 (1995-2014) 分析 HWDI 歷史氣候的空間分布，呈現北自東北角、南至臺東大武附近，整個臺灣東半部都好發極端高溫事件，平均每年極端高溫天數為 12-14 天 (圖 15 上圖)。由於臺灣夏季低層盛行暖濕的西南風，配合中央山脈地理位置與高度，東半部位在西南風背風面因氣流沉降，容易出現連續多日的高溫事件。

以現今氣候的高溫門檻值套用到不同 GWL 暖化程度顯示，隨著升溫程度愈嚴重，HWDI 增加愈明顯，當 GWL 超過 3°C，更出現大幅度上升的情況 (圖 15 下圖)。整體而言，南部地區是全臺增加天數最顯著，在最劣情境 GWL 4°C 下，平均天數增加至 103.5 天 / 年 (中位數)，即每年有超過 3 個月時間呈現極端高溫的情況。

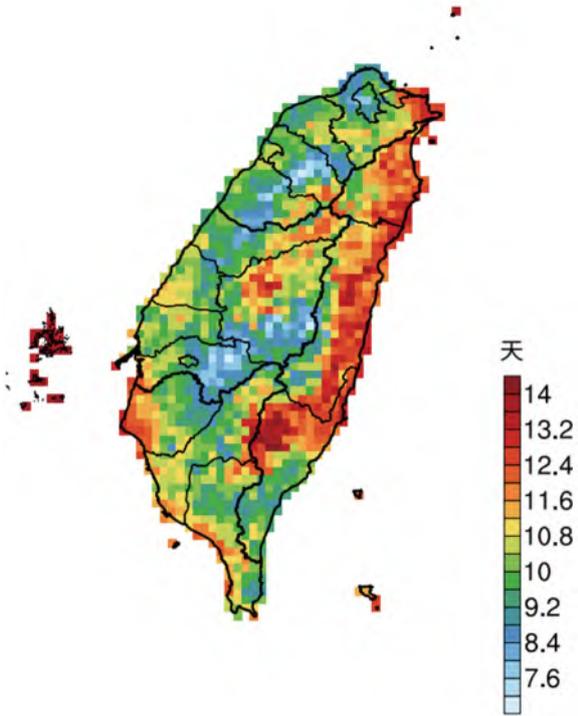
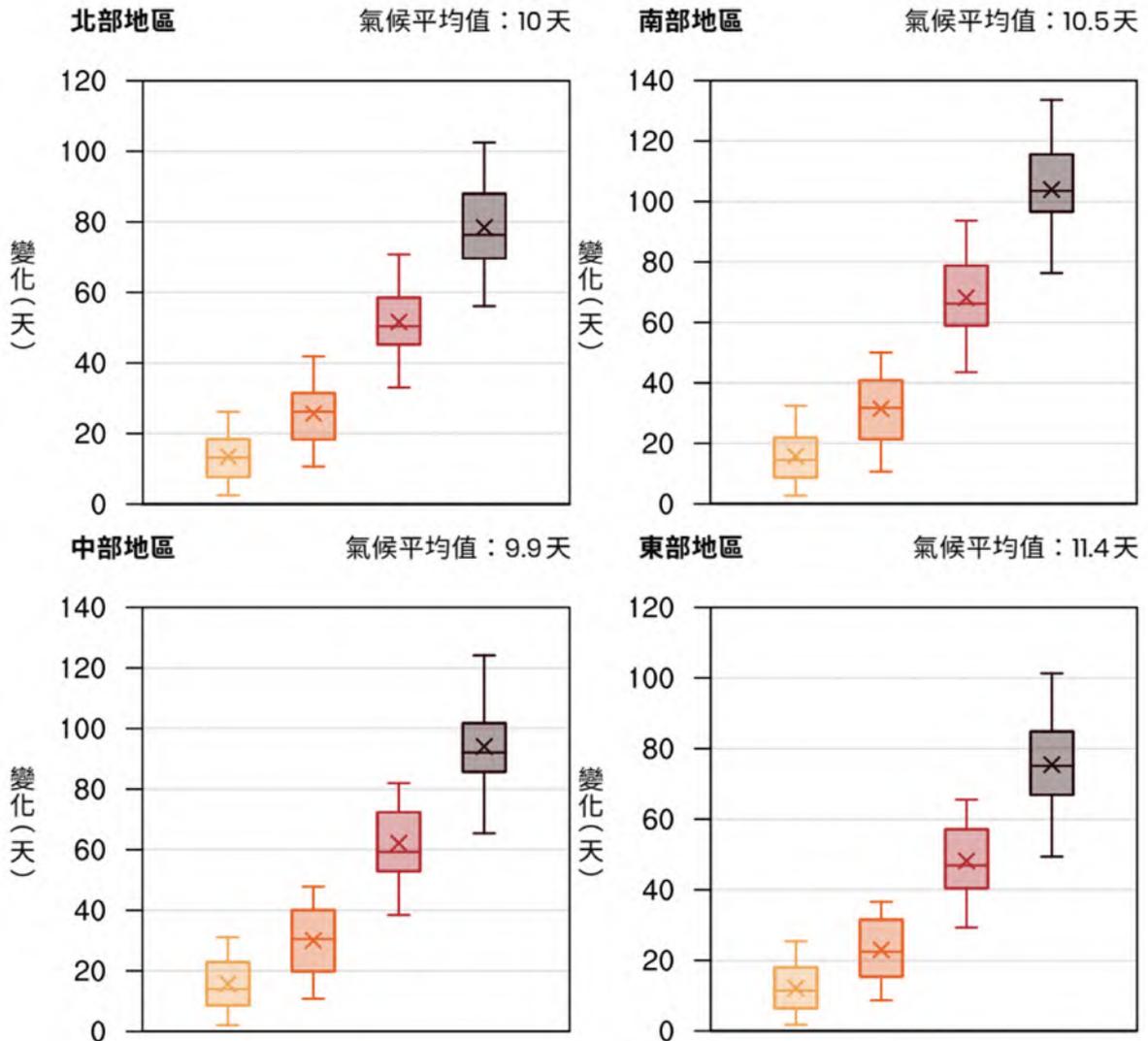


圖 15

類似圖 14 但為極端高溫持續指數(HWDI)(單位:天) (來源:臺灣氣候變遷關鍵指標圖集:AR6 統計降尺度版)



4.3 暖晝天數 (TX90p)

暖晝天數 (TX90p) 指標使用 1995-2014 期間之日最高溫度資料，以 5 日滑動的方式，取氣候上第 90 百分位高溫值，因此一年 365 天每天都可得到一個暖晝門檻值，可用來說明在不分季節情況下的相對高溫事件。圖 16 網格化觀測資料 (圖 16 左側) 由於指標定義的計算結果，雖然全臺各區域暖晝天數在空間上無顯著差異 (數值範圍是 39-41 天/年)，但目的是以此為基礎推估未來變化趨勢。

暖化情境下，臺灣暖晝天數呈現整體上升的情況 (圖 16 右側)，且隨著 GWL 升溫愈嚴重，暖晝天數增加愈明顯；當增溫程度超過 GWL 3°C，TX90p 出現跳躍式上升變化，如南部地區 GWL 2°C 為 57.9 天/年、GWL 3°C 則是 118.8 天/年，GWL 4°C 更達到 165.9 天/年 (中位數)。相同增溫情境下，南部地區是全臺增加天數最明顯的區域，在 GWL 4°C 下，平均暖晝天數甚至高達 205 天/年。

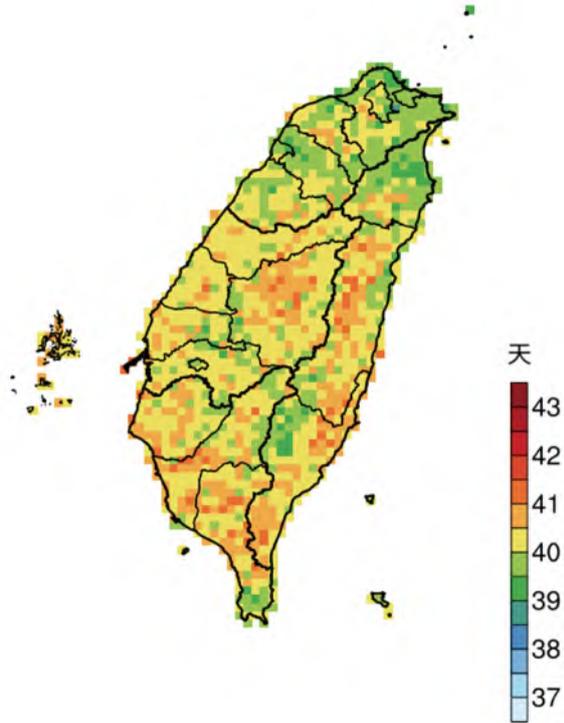
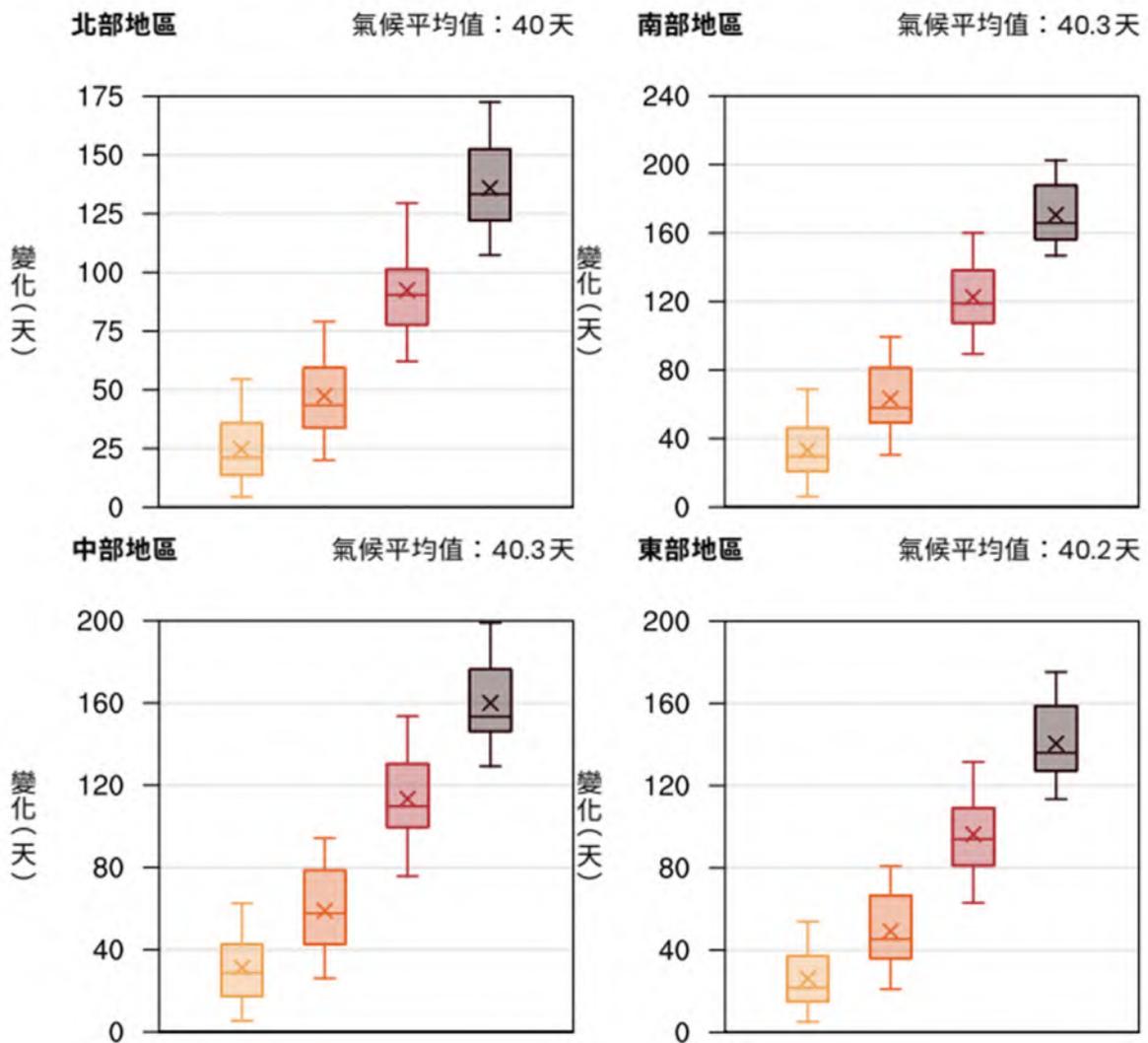


圖 16

類似圖 14 但為暖晝天數 (TX90p) (單位：天) (來源：臺灣氣候變遷關鍵指標圖集：AR6 統計降尺度版)



5. 中期與長期高溫指標未來推估

第二章百年測站的高溫指標觀測趨勢顯示在 1980 至 1990 年代後，多數測站的極端高溫日數呈現增加的現象；此外，前一節暖晝天數 TX90p 可用來評估不分季節的相對高溫事件。本節收錄中研院環變中心李時雨博士團隊分析統計降尺度資料結果，將綜合中央氣象署高溫資訊之日最高溫大於 36 度天數以及暖晝天數，來評估相對於 1990-2014 期間的未來臺灣中期 (2038-2065) 與長期 (2071-2100) 的高溫指標變化。為了濾除短天期的溫度變化，呈現高溫指標在月份尺度的改變，反映季節內的相對高溫變遷，本節使用 15 日滑動的方式，取得日最高溫的暖晝天數 TX90p。相較於前一節的 5 日滑動方式，15 日滑動的估算可濾除短天期的雜訊變化，其所得的暖晝門檻值會較低較平緩，較能呈現季節平均特徵。附錄圖 1 呈現暖晝天數在 1990-2014 的月平均空間分布：高屏地區在冬季約可達到 26°C，到 3 月已經到達需要開啟空調的 28°C，到 4 月臺北盆地與中部地區也超過 28°C 並持續到 10 月。從 5 月開始到 10 月整個西半部都市門檻值都在 30°C 以上，此結果也表明了夏季以外的月份也可能有相對高溫事件的發生。

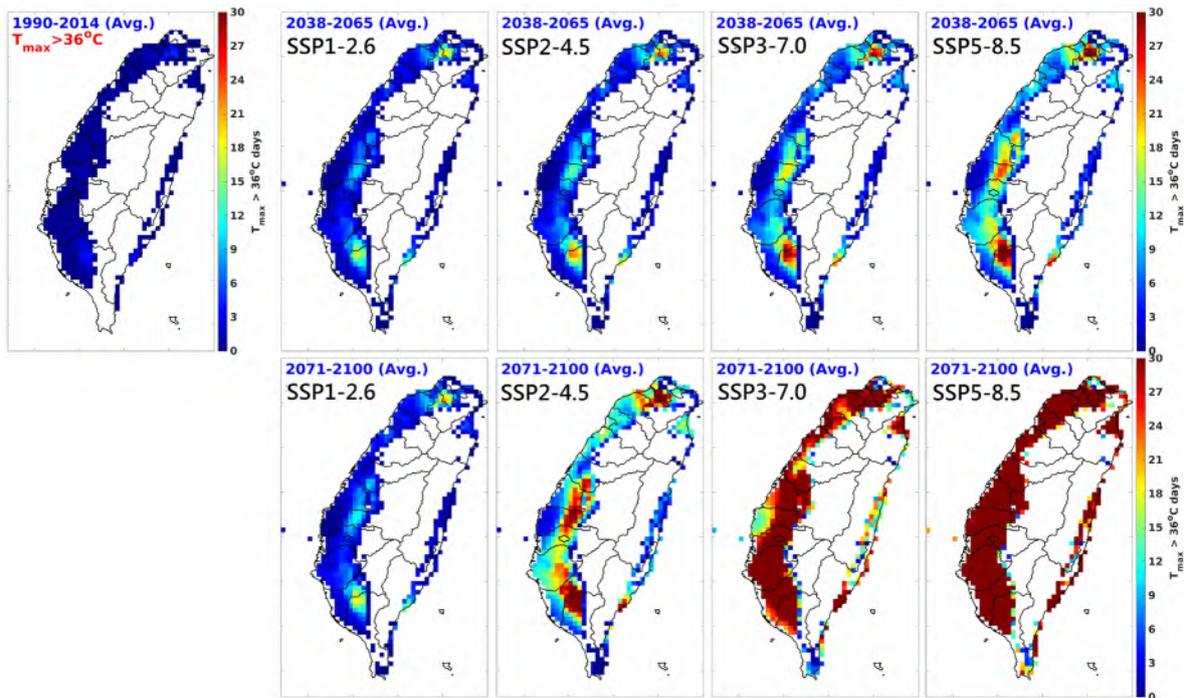


圖 17 以中央氣象署高溫資訊定義，各情境於世紀中與世紀末日最高溫大於 36 度之最大連續日數。本圖僅呈現高度低於 300 公尺以下的平地區域。(來源：中研院環變中心李時雨副研究員提供)

比對四種暖化情境的未來推估結果 (圖 17)，臺灣最高溫大於 36°C 日數於世紀中並沒有大幅度的不同，而世紀末 SSP1-2.6 情境之結果與現今日數相當接近。然而，隨著暖化情境加劇，於世紀末的變化幅度也跟著增加。在 SSP5-8.5 情境中，整個西部沿岸的都市區與臺北盆地日數已經在 100 天以上，已經超過傳統夏季 (6 到 8 月) 的 92 天總日數，表示極端高溫事件的發生擴展至整個夏季。

從季節尺度的角度探討暖晝天數變化，在 30 年連續資料 (圖 18) 的最長連續日數中可以看到，現今大多數地區的暖晝天數多落在 20 天以內。然而，在未來的世紀中即使是暖化受到控制

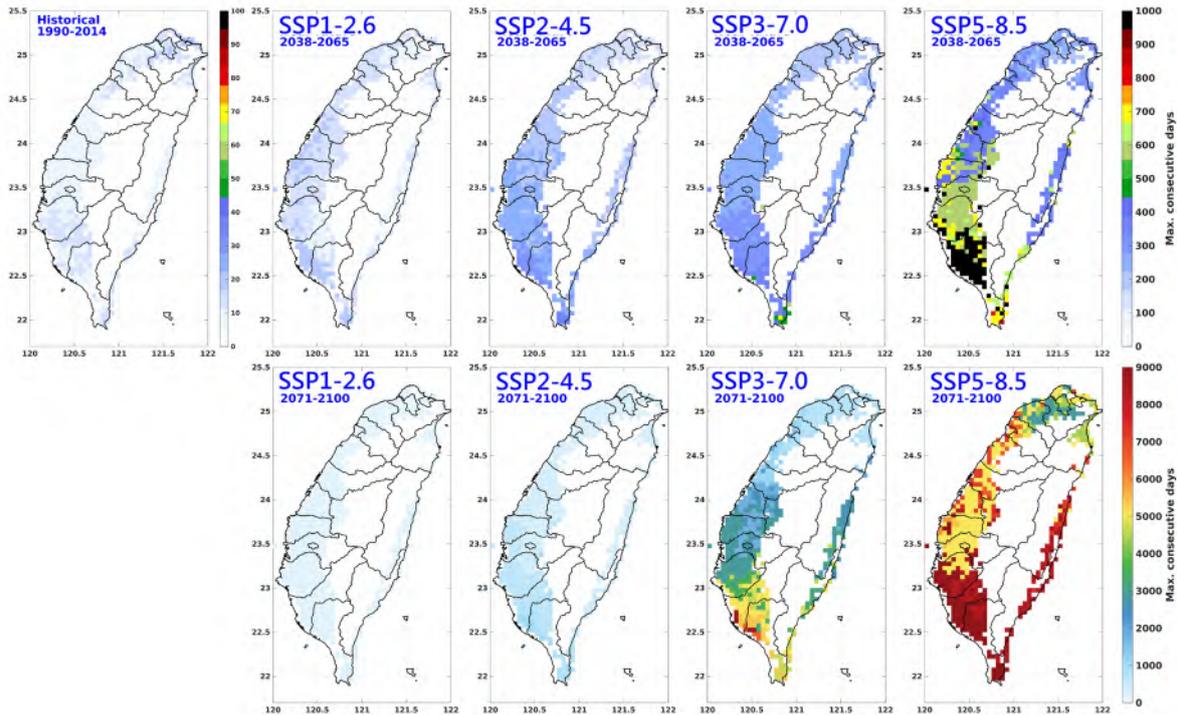


圖 18 各情境於世紀中與世紀末日之暖晝天數指標的最長連續日數。本圖僅呈現高度低於 300 公尺以下的平地區域。(來源：中研院環變中心李時雨副研究員提供)

的 SSP1-2.6，日最高溫高於攝氏 36 度的最長連續日數已達 100 天以上。到了最極端的暖化情境下，整個都市地區的暖晝天數連續日數都在 300 天以上，南部甚至來到 1000 天，也就是長達 2 年以上的時間，處在高於目前暖晝門檻的狀態。這樣的連續日數告訴我們，若溫室氣體排放無法控制，以現今氣候狀況定義極端高溫，2038 年後有可能會有以年為單位的長期極端高溫發生。同樣的情形到世紀末，最高持續日數都是 1000 天以上，代表臺灣地區遭受極端高溫影響會非常嚴重且持續時間非常長。

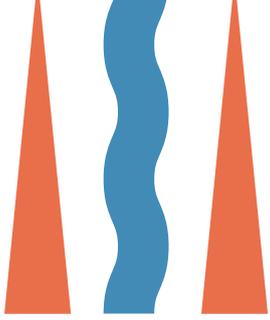
由高解析度之日最高溫資料分析結果可見，TXx 提供極端高溫強度資訊，其發生在夏季副熱帶高壓穩定的大氣環境場背景下，地理環境為內陸山腳下、盆地或縱谷…等氣流不易擴散的地形區域，其溫度變化不易受海陸風調節，相對較容易發生嚴重高溫事件。在全球暖化情境下，北部是全臺高溫強度增加最嚴重的區域。持續極端高溫指標 (HWDI)，在夏季盛行西南風的情況下，位在中央山脈背風面的臺灣東半部最嚴重；以全年資料計算暖晝天數 (TX90p)，其將影響動 / 植物生態週期變化，特別是當冬季天數增加時，將使得生物開花季節紛亂 (陳等人, 2021)、助長害蟲和疾病肆虐 (Lee et al, 2019)。就三項高溫指標總體而言，若在現今氣候已經是指標偏高的嚴重區域，在 GWL 情境下將發生更加嚴重的增溫情況。

全球暖化程度越高，未來的高溫強度、持續時間與日數也越高。比較世紀中期與世紀末的 36°C 高溫指標以及季節尺度的暖晝天數推估分析，亦得到相似結論。隨著世紀末暖化情境加劇，高溫現象的持續天數將大幅增加。超過半數模式推估顯示，約略在 21 世紀中的近未來 (2041-2060) 期間，暖化程度會達到 GWL 2°C，是至關重要的轉折時間。全球若持續增溫至 GWL 3°C，高溫事件的強度與持續時間將呈現大幅度增加，因應氣候變遷的調適作為與政策擬定困難度預期將大幅增加。▲



PART.04

高溫衝擊



PART. 04

高溫衝擊

■ 1. 都市熱島

1.1 都市熱島現象的成因與影響

都市熱島，係指都市市區的氣溫高於郊區的一種現象。最早由英國學者 Luke Howard 於 1818 年時，發現倫敦市中心夜間的氣溫，比郊外地區高出約 2.1°C。都市熱島的成因可分為「地形劣勢」與「人為開發」兩大方向，其中又以「人為開發」與都市化發展具有密切的關聯性，都市內的產熱與蓄熱量大於散熱量，無法達成熱平衡，而造成都市比郊區高溫的狀態。

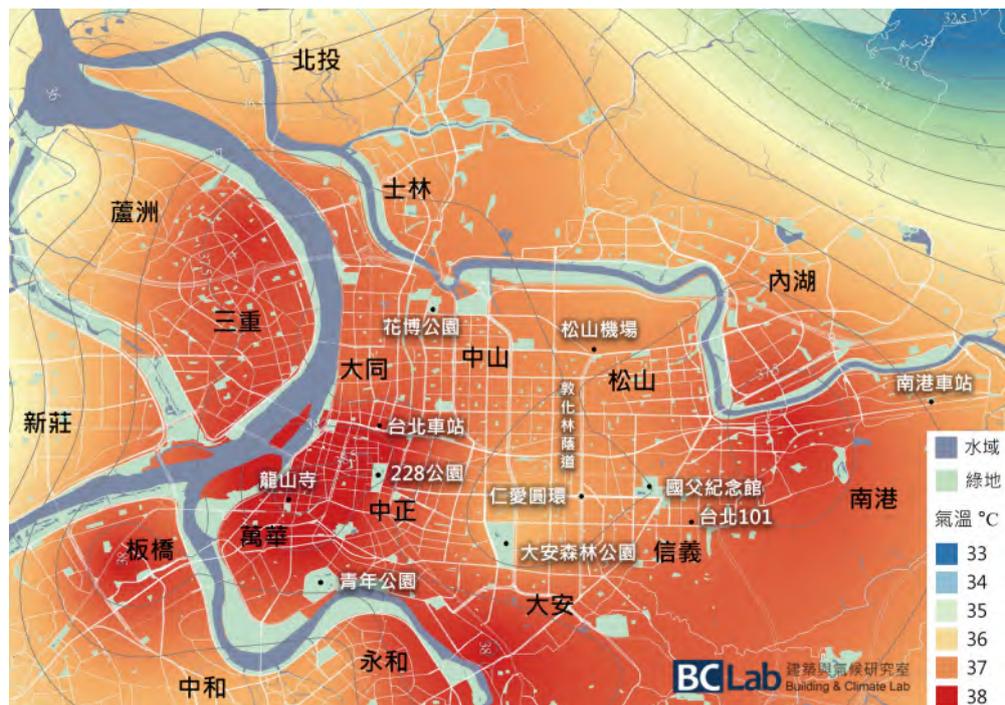


圖 19 臺北市熱島分布圖。統計時間為 2023 年 7 月 8 日 13 時 (來源：建築與氣候研究室)

臺北盆地是臺灣都市熱島現象最明顯的區域。以臺北市 2023 年 7 月 8 日下午一點的溫度分布 (圖 19) 為例：萬華、中正等高度開發的市區，相較南港、北投一帶的郊區，溫度高出約 2 至 3°C 左右，此溫差被稱作「都市熱島強度」，即在同一時間下，都市最高溫及郊區最低溫的溫度差異。這個值愈大，代表都市高溫化的問題愈嚴重。

都市有四項造成高溫的重要特徵，分別是：綠地、水域及透水面積減少，使蒸發散熱不足；建築、構造物密集及間距小，使通風散熱不良；建築、鋪面及人工材料增多，使材料蓄熱提高；空調、機具及交通使用頻繁，使人工發熱增加。

都市熱島所造成的氣溫上升，會降低人們在戶外的熱舒適性，影響人們對環境的滿意度及空間利用率。若依賴空調來降低室內溫度，則將排放大量廢熱至戶外，造成熱島效應加劇，用電量的大幅提升也將造成二氧化碳排放量增加，以致陷入全球暖化的惡性循環之中。除此之外，都市熱島現象也會造成空氣品質、降雨量與分布的改變，對環境影響極大。

1.2 氣候變遷下都市氣溫推估與熱舒適性預測

為了解未來氣候變遷下，都市可能面臨的高溫風險、量化熱島效應嚴重程度，以及進一步評估相關調適政策之執行規模等，國立成功大學建築學系林子平教授所主持的「建築與氣候研究室 (Building and Climate Lab, 以下簡稱 BCLab)」於 TCCIP 計畫下，針對都市熱島領域，考慮以高溫對都市最直接的衝擊項目—熱舒適 (Thermal comfort) 為主軸，選用「生理等效溫度 (Physiological Equivalent Temperature, PET)」作為人體在戶外環境下對複合氣象變數的綜合熱感受量化指標 (參見文字框 4: 生理等效溫度)，訂列以下兩階段之熱不舒適門檻值：

- (1) 熱不舒適：生理等效溫度 (PET) 大於 34°C 者。
- (2) 熱極不舒適：生理等效溫度 (PET) 大於 46°C 者。

使用計畫產製之 HiRAM (High Resolution Atmospheric Model, HiRAM; Anderson and Coauthors, 2004; Zhao et al. 2009) 未來氣候推估資料作為各項氣象變數的基礎，進行都市面對氣候變遷時可能產生的溫度、熱不舒適率以及能源需求變化等的相關研究與分析。

HiRAM 係美國普林斯頓大學地物流體動力實驗室的高解析度全球大氣模式，TCCIP 計畫以該模式進行 RCP8.5 暖化情境下的全球氣候推估模擬，再透過美國大氣研究中心 (National Center for Atmospheric Research, NCAR) 的區域大氣模式 (Weather Research and Forecasting, WRF; Skamarock 2008) 進行動力降尺度模擬 (以下簡稱 HiRAM-WRF AR5 動力降尺度) 將資料降至臺灣區域 5 公里解析度。模擬時期為基期 1995–2014 年及 RCP8.5 情境下 GWL 2°C 的 2034–2053 年與 GWL 4°C 的 2073–2092 年。驅動全球模式模擬所需的海溫：基期使用觀測海溫，未來推估模擬則使用 CMIP5 實驗中 28 組模式的平均海溫暖化趨勢加上基期的觀測海溫的推估值。

而在數據統計方面，將降尺度資料中各項氣象變數的各時期區段年份經月平均後，得各時期中每個月份分別之逐時平均溫度、相對濕度、風速、輻射資料。透過 RayMan model 進行 PET 模擬後，統計全臺於五公里解析度下之 PET 分布情形，再擇臺北盆地中最高溫之萬華與相對郊區之南港作為低溫區，進行全年熱不舒適率之統計與分析。熱不舒適率係指於全年 8,760 小時之中，達到熱不舒適門檻值之小時數百分比。臺北萬華與南港於現況與未來升溫情境下之熱不舒適率變化趨勢，如圖 20 所示。

全球暖化程度 全年熱不舒適率佔比

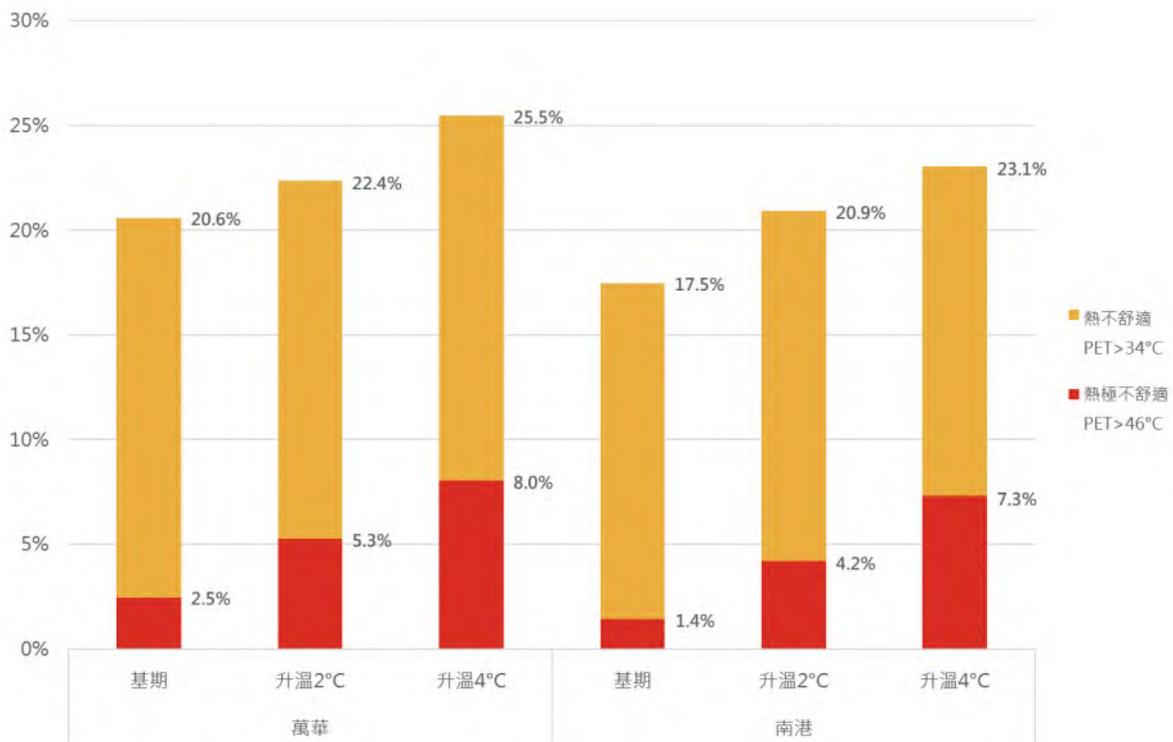


圖 20 臺北萬華與南港於現況、GWL2°C 與 GWL4°C 下之熱不舒適率變化圖 (Lin and Wang, 2023)

由上圖可知，臺北盆地最高溫、建築物密度最高之萬華地區於現況（即基期）下，全年已有 20.6% 的時間處於熱不舒適、2.5% 的時間處於熱極不舒適，相較南港的 17.5% 與 1.4% 高出許多。萬華地區於 GWL2°C（約世紀中）與 GWL4°C（約世紀末）時，熱不舒適則會分別再上升至 22.4% 與 25.5%，意即代表在世紀末時，萬華地區全年將有四分之一的時間皆處於熱不舒適的壓力下。即便是相對郊區之南港地區，至世紀末時熱不舒適率也將有 5.6% 的成長，比萬華地區的 4.9% 增幅更為劇烈。詳看紅色的熱極不舒適率則有更明顯之倍數成長，可見氣候變遷對都市熱島與民衆於戶外之熱舒適度息息相關，其熱壓力之變化不容小覷。

1.3 未來增溫情境導入都市規劃政策

根據上述分析，臺北市面臨著來自都市熱島和氣候變遷的雙重挑戰，未來將面臨更加嚴峻的高溫問題。爲了提前應對這一挑戰，臺北市政府都市發展局於 112 年 12 月 19 日市政會議，提出臺北低碳家園的三大策略，包括「體感降溫減碳」、「建築能效降碳」和「密集綠化固碳」，並提出了「戶外空間體感溫度下降 2° C」的具體目標。

林子平教授與 BCLab，透過與 TCCIP 計畫和臺北市政府的合作，將萬華區於本世紀中（約增溫 2° C）及世紀末（約增溫 4° C）的未來升溫情境納入市府「體感降溫 2° C」的目標中，以科學量化的方式，定義「調適缺口」，意即城市現況與降溫目標之間的差距。

而在「降溫減碳」方面，則有三個主要策略：積極增加開發基地的綠化面積和綠覆率，以實現水綠降溫；建築物退縮和增大棟距以促進通風散熱；透過連續性的樹木和遮陽設施來遮蔽陽光，達到遮蔭涼適效果。

目前，臺北市政府都市發展局根據上述的調適缺口，以「體感降溫 2°C」爲目標，推算臺北市面對未來升溫應具備的密集綠覆面積與遮蔭比例，並兼顧原有的都市紋理與環境特色，將自然及人工遮蔭整合評估導入建築設計，公私有開發者一起齊頭併進。目前已研議修改既有綠化規則，將原先僅以總綠化面積的「綠覆率」的規定，額外考量個別喬木對遮蔭涼適效果的加權，同時鼓勵設置系統性的遮簷設施，整合出「綠容率」的創新方案，且依不同基地規模及屬性進行基準值的規範，研議進行專案都市計畫擬訂並完成法治化程序。

這個計畫結合了產業、政府、學術和研究的能量，是臺灣首個將國家氣候變遷情境納入都市發展的啟動計畫。預計將推動全國各縣市逐步將未來的氣候變化模式納入都市開發、建築設計和景觀工程中，不僅可以創造出更適宜居住的環境，更可提升城市應對氣候變化的能力。

文字框四

生理等效溫度 Physiological Equivalent Temperature, PET

生理等效溫度 (physiologically equivalent temperature, PET)，適用於觀察都市環境氣候的指標，考量人體的熱舒適受到包含溫度、濕度、風、輻射、衣著量、運動型態等多項因素的影響。PET 最早由 Höppe (1999) 提出，係指將人體於環境中，所受到複雜的熱環境作用，換算為在無風無日照情境下人體感受到的溫度 (Lin, 2009)，其單位與溫度相同，使用 $^{\circ}\text{C}$ 。與其他熱舒適指標相比，PET 綜合評估的因素更加全面，除常見的氣項參數外，年齡身高、衣著量、活動量、戶外環境的天空可視率等，皆可加以定義。

PET 開始被廣泛用於評估都市戶外熱環境，始於 Matzarakis(2007) 建立的 RayMan model。此模式考量人體熱舒適的多項因素以模擬評估 PET，將人體在戶外熱環境下，對複合氣象變數的綜合熱感受量化為數值。林子平與 Matzarakis 後續於 2008 年共同發表生理等效溫度熱舒適分級標準 (Lin, T. P., & Matzarakis, A., 2008)，此標準在 2013 年受 IPCC 第五次評估報告 (IPCC WGII AR5) 引用，更加定義了臺灣與歐洲地區人體的舒適區間。

PET 的計算因考量參數過多，仍需要以 RayMan model 模擬評估。以 2023 年最高溫為例，發生於 7 月 8 日 12:35，位於中央氣象署臺北測站 (121.5149°E , 25.0377°N)，空氣溫度 36.9°C 、濕度 43%、全天空日射量 3.61 MJ/m^2 ，設定 1.75 米高、75 公斤、衣著量 0.9 clo、活動量 80W 之 35 歲亞洲成年男子，其當下之 PET 為 54.6°C 。

2. 暖化下的環境熱壓力

為了解未來氣候變遷所導致的極端高溫，對臺灣整體社會經濟的影響程度，本節收錄中研院環變中心李時雨副研究員團隊利用模式模擬推估，探討高溫帶來的熱壓力對職業安全衝擊之研究成果。

2.1 資料來源

本主題使用 Tsai et al. (2022) 以 WRF 高解析度 (2 公里) 區域模式進行三組動力降尺度模擬實驗，其中控制組 (CTRL run) 以歐洲中期天氣預報中心 (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF) ERA5 重分析資料作為初始場與邊界條件，模擬 2011 年至 2015 年的臺灣地區氣象場，代表當前的氣候狀態。暖化推估則採用擬暖化模擬 (Pseudo Global Warming simulation, PGW)，將全球增溫 2°C (PGW_2C) 和 4°C (PGW_4C) 情況下所增加的氣溫、海溫與水氣量加入 2011 年至 2015 年的 ERA5 重分析資

料，進行 5 年模擬。亦即，2011 年至 2015 年的臺灣氣候如果於 PGW_2C 和 PGW_4C 再現，會有何變遷。這種研究方式已經廣為氣候變遷研究採用，談討未來暖化對現今氣候與環境的可能影響 (Chen et al. 2020; Brogli et al. 2023)。在此分析 2011 至 2015 的氣象場和兩種暖化情境資料，以綜合溫度熱指數 (Wet Bulb Globe Temperature, WBGT) 評估臺灣各城市的熱效應狀況。WBGT 為一暑熱評估指數 (參見文字框 5：綜合溫度熱指數 WBGT；<https://www.weather.gov/tsa/wbgt>)，除大氣溫度外，另需加入相對濕度與輻射量作為環境因子，整合評估人體的熱感受與熱壓力，其主要用途為高溫作業活動之管理。

2.2 臺灣綜合溫度熱指數

利用 Tsai et al. (2022) 動力降尺度模擬結果所得之 WBGT 評估顯示，熱指數日夜變化 (圖 21 上圖)，以臺北地區 8 月為例，清晨最低，中午最高。PGW_4C 之綜合溫度熱指數整體隨之上升，在夜間的增溫相對較大約為 4 度，其中增溫幅度最小的時間為上午八點，但到了白天最高溫時，增溫約 3 度。值得注意的是，增溫實驗 (PGW_2C、PGW_4C) 在傍晚五點到七點的熱指數依舊高於 28 度，亦即暖化後高溫的情況會延續到夜間，使得夜間工作者因為高溫關係，也需考量高溫產生的勞動安全問題。

圖 21(下) 以臺北為例，進一步依據溫度熱指數推估之室外勞力者須休息的逐時之月累積時數。按月份累計來看，5 月跟 9 月在 PGW_2C 所需的休息時間增加一倍。比對控制組、PGW_2C 與 PGW_4C 可見，在夏季黃燈的增加幅度差距並不大，但紅燈明顯增加，甚至出現黑燈累計達 350 小時，若以天換算一個月將有 14 天的累計休息時間。夜間工作者也明顯受到高溫指數的影響而需要更多休息的時間，顯示未來升溫對經濟活動與勞動安全將造成影響。

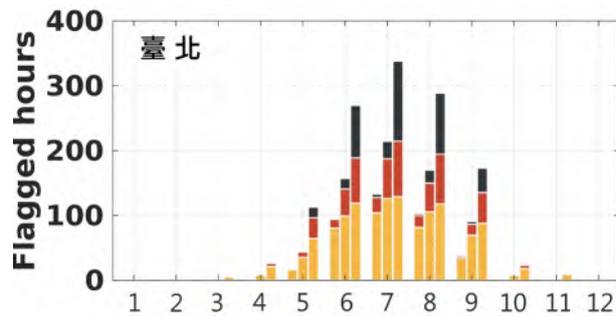
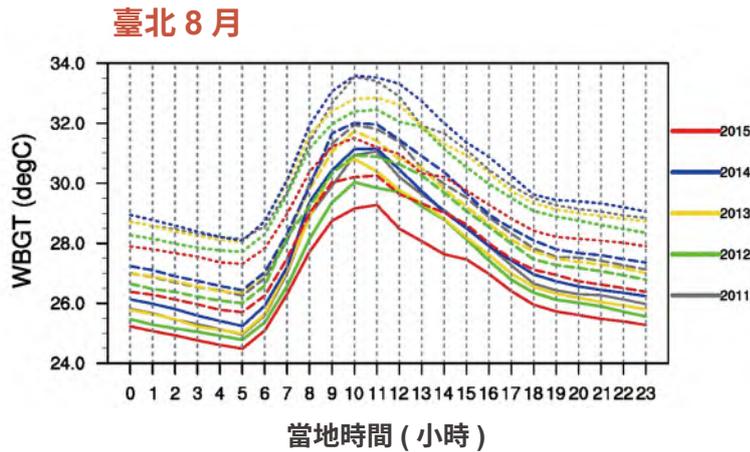


圖 21 上圖為臺北測站八月 2011 到 2015 年 WBGT 的日夜變化，實線為控制組 (CTRL run)，虛線為增溫 2 度 (PGW_2C) 的實驗，點線為增溫 4 度 (PGW_4C)。

下圖為高溫勞作休息時間累積圖，橫軸為月份，每個月有三條柱狀，最左邊為控制組，中間為增溫 2 度，最右邊為 4 度。黃色代表因黃色燈號所需的累積休息時數，紅色為紅色燈號，黑色為黑色燈號。其中，黃燈代表熱指數介於 29.4 度到 31.1 度間，此時休息與作業時間比為 1:3；紅燈代表熱指數 31.1 到 32.2 度，作業休息時間比 1:1；黑燈代表熱指數大於 32.2 度，休息工作時間比為 3:1。(來源：中研院環變中心李時雨副研究員提供)

文字框五

綜合溫度熱指數 WBGT Wet Bulb Globe Temperature

WBGT，綜合溫度熱指數，是一種考慮了環境溫度、濕度與輻射量的體感熱指數，其計算方式由乾球溫度、濕球溫度、黑球溫度，依室內外環境不同計算公式略為不同下得出。

WBGT 的計算方式

$$\text{WBGT} = 0.7 \text{ 濕球溫度} + 0.2 \text{ 黑球溫度} + 0.1 \text{ 乾球溫度}$$

此一溫度指數用於指示人體在輻射暴露下，人體預期的體感熱壓力狀況。最早用於確保軍隊於戶外操演時的人體安全，之後被用以評估溫度、相對濕度、風速和太陽輻射量對人體的影響，並被廣泛應用在勞動安全上之高溫環境作業管理。

WBGT 指數常用領域

在可能有高溫風險的環境活動的人都適用。例如：戶外工作者、運動員、以及從事其他具一定強度戶外活動的人士。軍事機構、美國職業安全與健康管理局 (OSHA) 和馬拉松組織一直在使用這個指數。相關的職業安全、衛福規定，也使用這個指數。

3. 氣候變遷對心血管疾病的影響

氣候變遷是 21 世紀全球面臨的最嚴重問題之一，不僅對環境造成影響，更直接威脅著人類健康。其中，心血管疾病是受氣候變遷影響最為明顯的健康問題之一。根據 2012 年全球疾病負擔報告 (Global Burden of Disease, GBD)，中風在 1990 年至 2010 年間是全球第二大死因 (Lozano et al. 2012)，而氣象條件被證實是促使中風發生的重要因子 (Alpérovitch et al. 2009; Pan et al. 1995; Shinkawa et al. 1990; Turin et al. 2008; Woodhouse et al. 1993)。臺灣正逐漸邁入老年人口超過 20% 的超高齡社會，2039 年將突破 30%，至 2070 年將高達 43.6%，老年人群體對氣候變化更為敏感。衛福部 2021 年十大死因統計資料的統計數據顯示，心臟疾病和高血壓性疾病的死亡率持續攀升，並首次指出了氣候因子對心血管疾病的影響。過去的研究表明，溫度變化與死亡率呈現出非線性關係，即低溫和高溫都會增加心血管疾病的發病率和死亡率 (Anderson and Bell 2009; Curriero et al. 2002; Rodrigues et al. 2019; Zanobetti and Schwartz 2008)。鑑於全球持續變暖、人口老化以及具有多種心臟血管疾病風險因素的患者更加脆弱，預計這些趨勢在未來幾年會惡化。

許多研究針對溫度變化與氣候因子對心血管疾病的影響進行了探索，並使用不同的方法和數據來分析這一問題。一項國內研究利用 2008 年至 2010 年的死亡登記檔資料，發現當溫度介於 12.91°C 和 26.36°C 之間，平均日溫度與心臟血管疾病死亡率呈現反比關係，這表明在一定的溫度範圍內，心血管疾病的風險較低 (Yang et al. 2018)；日本的一項世代研究顯示，氣候條件會影響女性中風、缺血性中風和出血性中風的風險 (Matsumoto et al. 2010)；德國的一項病例對照研究則發現，缺血性中風的發病風險可能會隨著溫度的大幅上升或下降而增加 (Kyobutungi et al. 2005)；伊朗拉什特地區 (Rasht) 的研究發現低溫對心臟血管死亡率有顯著影響，並且發現了一種反向 J 型溫度 - 死亡率關係：在溫度偏低時會有一個較高的死亡率，然後隨著溫度的升高，死亡率會逐漸下降，直到達到一個最低值，之後再隨著溫度繼續升高而增加。此外高溫對心臟血管死亡率的直接影響，在當天影響最強 (Moghadamnia et al. 2018)。另外，在波多黎各聖胡安的一項研究中，採用了泊瓦松迴歸模型分析了 2009 年至 2013 年的數據，發現中風和心臟血管疾病是夏季氣溫升高最相關的主要死亡原因 (Méndez-Lázaro et al. 2018)。而美國密西根州進行的一項研究觀察 2000 年至 2009 年因極端高溫而相關的住院情況，發現極端高溫與心臟血管住院之間沒有直接關聯，但當溫度達到極端高溫的第 99 個百分位閾值時，則與心肌梗死住院有關 (Ogbomo et al. 2017)。

總整來說，不同地區的研究中可以看出，溫度的變化對心血管健康有著重要的影響，並且這種影響可能隨著地理位置和氣候條件的不同而異。然而，大多研究仍以死亡為研究結果，容易受到醫療水平影響導致數據偏差。為了有效提供早期疾病發生與公共衛生預防所需資訊，因此著實該採用發生率 (指暴露到新個案發病) 真實反映氣候因子與疾病風險關係。

3.1 研究方法

爲了更全面地了解氣候變遷對心血管疾病的影響，本節收錄國家衛生研究院（以下簡稱國衛院）吳威德助研究員團隊於 TCCIP 計畫的研究成果。該研究結合全臺 2001 年至 2020 年的腦血管疾病數據與氣象觀測資料，建立溫度與心血管疾病發生率的關聯性迴歸模型。

首先，從「全民健保處方及治療明細檔_門急診」中篩選第一次急診中風個案作爲研究對象，並參考美國疾病控制和預防中心 (CDC)、國家慢性病預防和健康促進中心 (NCCDPHP) 以及心臟病和中風預防部 (DHDSP) 提供的國際疾病標準分類碼 (ICD, International Classification of Diseases) (ICD-9: 430-434, 436-438 ; ICD10: I60-I69) 進行疾病的確定。其次，研究設計採用病例交叉研究法 (Case-crossover study) 搭配時間分層法 (time-stratified strategy)。每個發病個案都被視爲自身的對照組，將疾病發病日的溫度與對照日的溫度進行比較。在此以事件日之前的 21 或 28 天作爲研究控制日，以確保對照日與事件日的比較具有相對一致的氣候環境。再者，爲了獲得準確的氣象變數資料，本節採用 TCCIP 提供的 2001 年至 2020 年的 0.01 度網格化觀測日資料，包括日均溫、日最高溫、日最低溫。最後，採用條件邏輯迴歸 (Conditional Logistic Regression) 模式來建立氣候變項與中風相關性模型，以 Odds ratio (OR) 與 95% confidence interval (CI) 估算相關性程度，並定義高風險溫度：OR>2.0，作爲臺灣對於中風急診發生之極端溫度健康調適建議。統計分析使用 SAS (Version 9.4. SAS Institute, Cary, NC) 統計軟體進行，並使用 TCCIP 提供之統計降尺度日資料 (日均溫、日最高溫、日最低溫)，以 GWL 2°C 進行未來氣候變化空間分布推估。分析時期爲基期 1960–2014 年 (系集數爲 28 組) 及 GWL 2°C 的 2015–2100 年系集數共 86 組的推估值。

3.2 分析結果

透過地理資訊系統 (GIS) 空間分布繪圖，根據鄉鎮區層級繪製溫度變化的熱點區域地圖 (包括最高溫和最低溫)，可發現在過去數十年中，低溫情況略有減少，高熱情形則略有增加 (深紅色在 6 月開始)，且高熱情況的持續時間更長。不過，各鄉鎮間低溫與高溫的分布差異不大 (圖 22 與圖 23)。在春季與夏季，中風個案發作時的溫度 (平均溫度、最高溫度、最低溫度) 的平均值和中位數高於對照組。而在秋季和冬季，中風個案發作時的溫度的平均值和中位數則低於對照組 (表 3)。

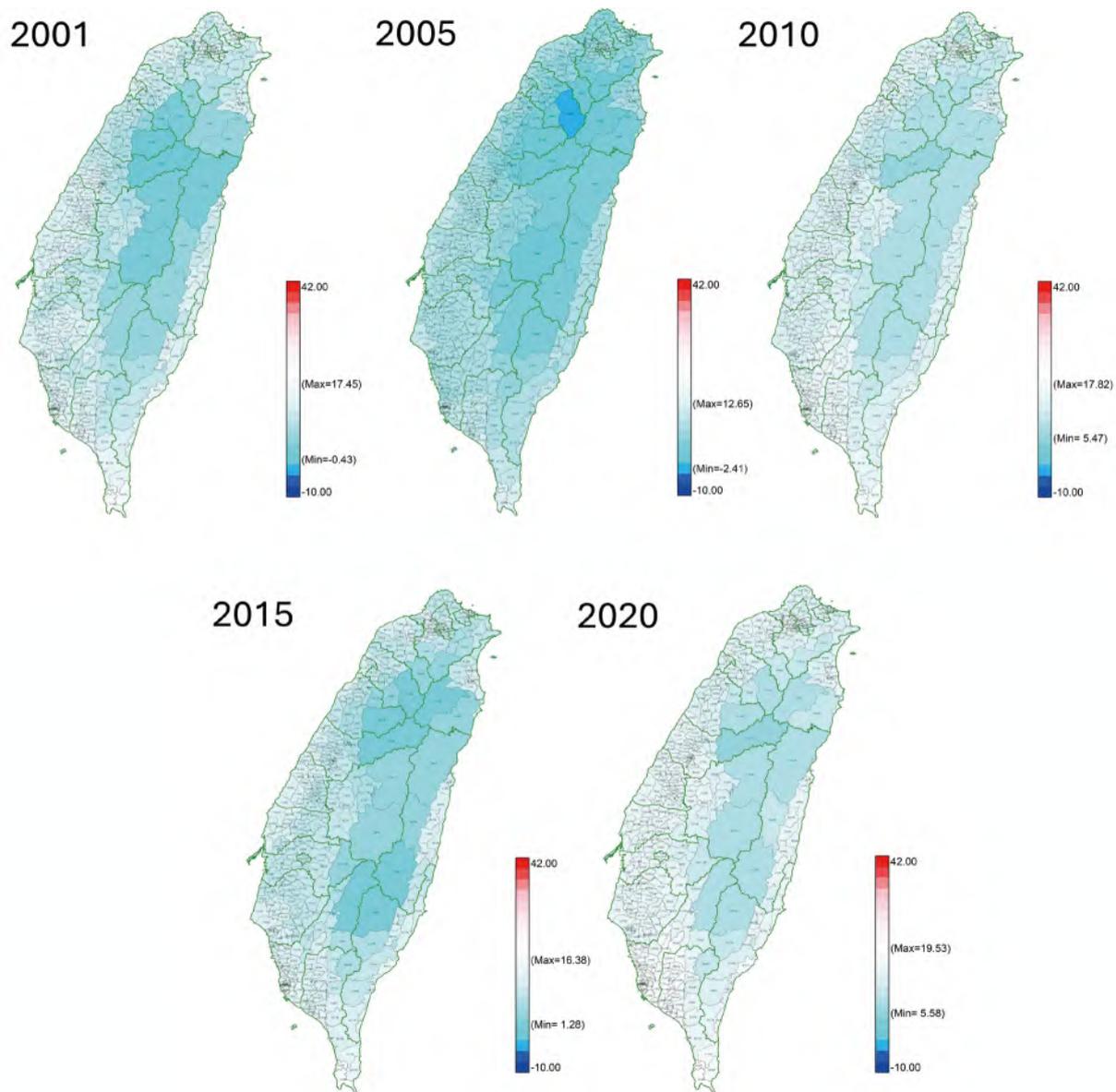


圖 22 2001、2005、2010、2015、2020 年 01 月 01 日之日最低溫區域圖範例（來源：國家科學及技術委員會（2024），臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平臺計畫期末報告。）

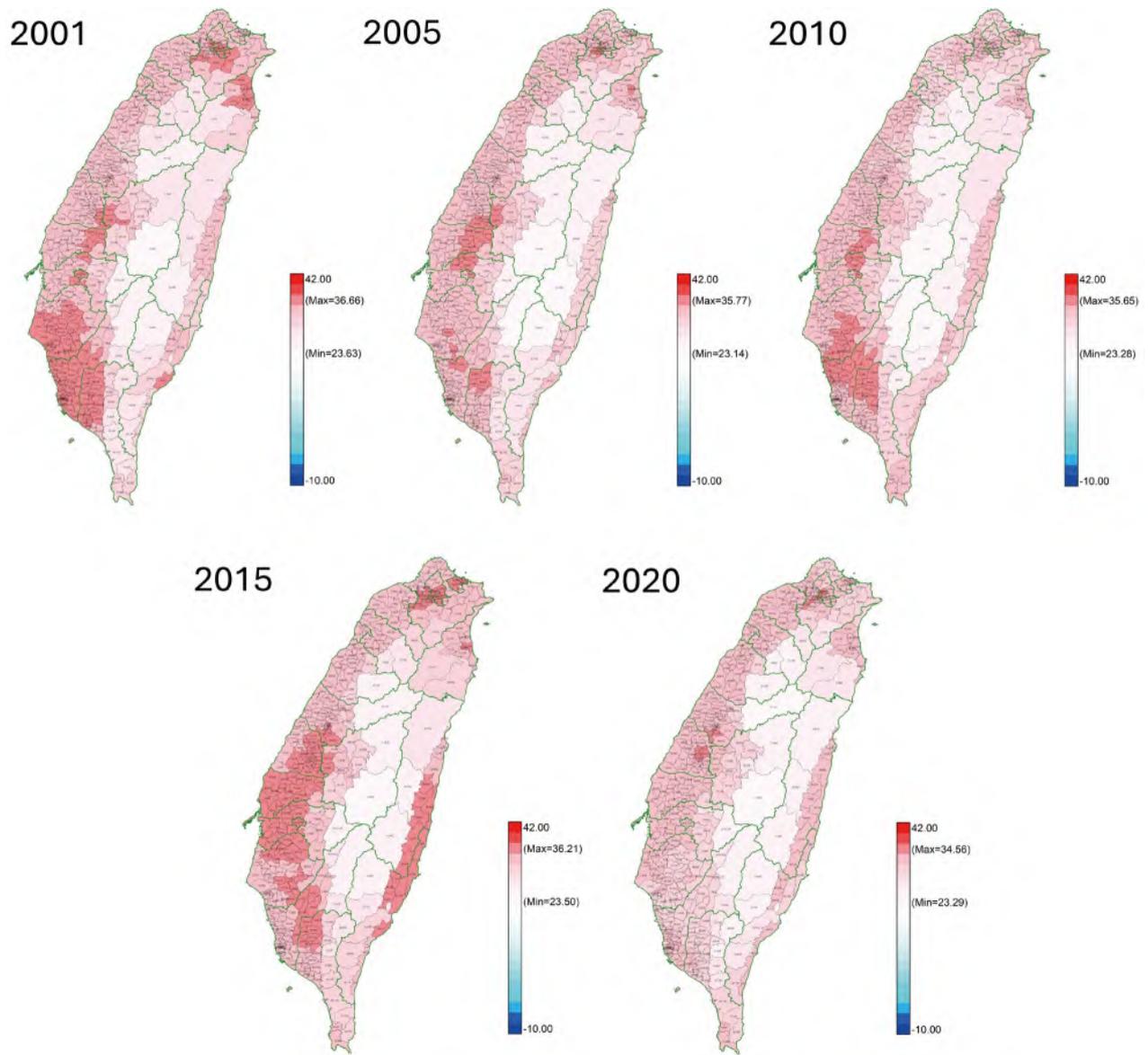


圖 23 2001、2005、2010、2015、2020 年 07 月 01 日之日最高溫區域圖範例 (來源：國家科學及技術委員會 (2024)，臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平臺計畫期末報告。)

全臺中風個案發作時的溫度與對照日的溫度分布情況 (2001-2020)

Stroke									
	N	Mean	SD	Min	Q1	Q2	Q3	Max	IQR
Meteorological parameters									
Ambient temperature (degrees of Celsius) 每日均溫									
Overall	1105191	23.0	5.2	0.8	19.1	23.8	27.5	33.2	8.4
Seasons									
Spring (Mar. - May)	278625	22.5	4.1	5.6	19.7	23.0	25.7	31.6	5.9
Summer (Jun. - Aug.)	270045	28.3	1.7	15.5	27.4	28.6	29.5	33.2	2.1
Autumn (Sep. - Nov.)	268371	24.5	3.2	9.9	22.4	24.8	27.0	32.0	4.7
Winter (Dec. - Feb.)	288150	17.2	3.3	0.8	15.1	17.4	19.5	26.7	4.5
Ambient temperature (degrees of Celsius) 每日日高溫									
Overall	1105191	26.9	5.6	3.1	23.1	27.8	31.6	39.0	8.5
Seasons									
Spring (Mar. - May)	278625	26.4	4.7	6.9	23.6	27.2	30.0	39.0	6.4
Summer (Jun. - Aug.)	270045	32.2	2.1	17.1	31.3	32.6	33.6	38.7	2.3
Autumn (Sep. - Nov.)	268371	28.2	3.8	12.4	25.8	28.8	31.1	37.8	5.3
Winter (Dec. - Feb.)	288150	21.1	4.4	3.1	18.1	21.5	24.4	34.2	6.3
Ambient temperature (degrees of Celsius) 每日日低溫									
Overall	1105191	20.0	5.1	-3.1	16.0	20.8	24.5	30.8	8.5
Seasons									
Spring (Mar. - May)	278625	19.3	4.0	1.2	16.5	19.7	22.4	28.9	6.0
Summer (Jun. - Aug.)	270045	25.3	1.6	13.3	24.4	25.4	26.4	30.8	2.0
Autumn (Sep. - Nov.)	268371	21.7	3.2	6.0	19.6	22.0	24.2	29.6	4.6
Winter (Dec. - Feb.)	288150	14.2	3.1	-3.1	12.2	14.4	16.4	23.6	4.2

表3 全臺中風個案發作時的溫度與對照日的溫度分布情況 (2001-2020) (來源：國家科學及技術委員會 (2024)，臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平臺計畫期末報告。)

全台中風個案發作時的溫度與對照日的溫度分布情況 (2001-2020)

Controls									
	N	Mean	SD	Min	Q1	Q2	Q3	Max	IQR
Meteorological parameters									
Ambient temperature (degrees of Celsius) 每日均溫									
Overall	2210382	23.0	5.2	1.4	19.1	23.8	27.5	33.2	8.4
Seasons									
Spring (Mar. - May)	557250	20.2	4.2	3.3	17.3	20.4	23.4	31.0	6.1
Summer (Jun. - Aug.)	540090	27.6	2.2	15.1	26.4	28.1	29.2	33.2	2.9
Autumn (Sep. - Nov.)	536742	26.3	2.6	13.4	24.6	26.8	28.4	33.1	3.8
Winter (Dec. - Feb.)	576300	18.3	3.6	1.4	15.8	18.3	20.8	28.5	5.0
Ambient temperature (degrees of Celsius) 每日日高溫									
Overall	2210382	26.8	5.6	3.1	23.0	27.8	31.6	39.0	8.5
Seasons									
Spring (Mar. - May)	557250	24.2	5.0	5.6	20.8	24.9	28.0	39.0	7.2
Summer (Jun. - Aug.)	540090	31.5	2.7	16.4	30.2	32.1	33.3	38.7	3.1
Autumn (Sep. - Nov.)	536742	30.1	3.2	14.7	28.2	30.8	32.4	38.5	4.2
Winter (Dec. - Feb.)	576300	22.0	4.4	3.1	19.0	22.3	25.3	33.8	6.3
Ambient temperature (degrees of Celsius) 每日日低溫									
Overall	2210382	20.0	5.1	-1.2	16.0	20.8	24.5	30.8	8.5
Seasons									
Spring (Mar. - May)	557250	17.0	3.9	-0.2	14.3	17.0	19.9	27.9	5.6
Summer (Jun. - Aug.)	540090	24.6	2.1	11.6	23.5	24.9	26.1	30.8	2.6
Autumn (Sep. - Nov.)	536742	23.5	2.6	9.0	21.9	24.0	25.4	30.6	3.5
Winter (Dec. - Feb.)	576300	15.4	3.6	-1.2	12.9	15.5	18.0	26.4	5.1

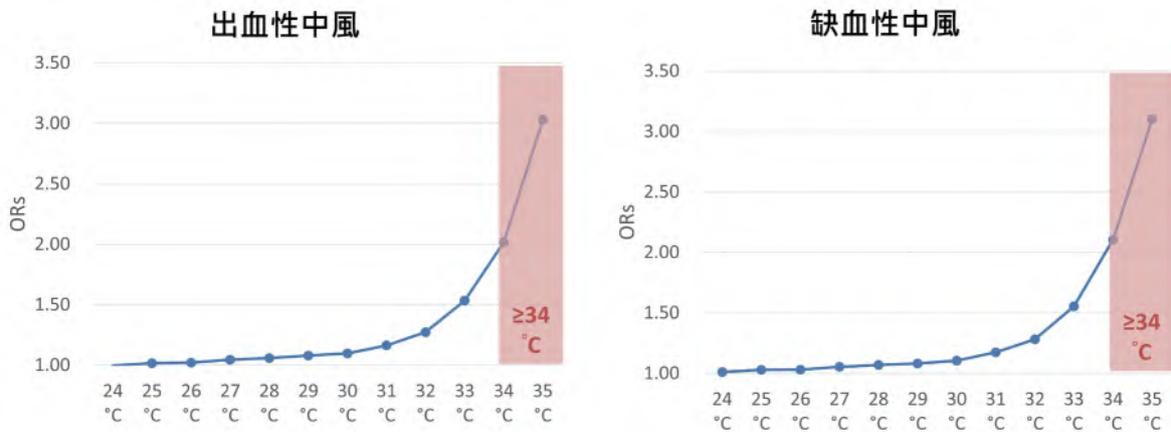


圖 24 2001-2020 每日日最高溫與出血性和缺血性中風急診風險。(來源：國家科學及技術委員會 (2024)，臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平臺計畫期末報告。)

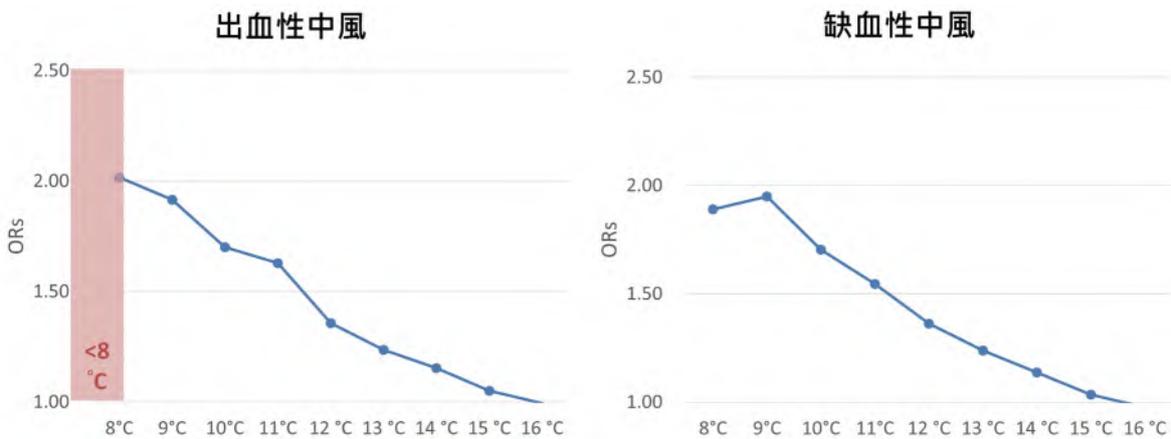


圖 25 2001-2020 每日日最低溫與出血性和缺血性中風急診風險。(來源：國家科學及技術委員會 (2024)，臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平臺計畫期末報告。)

結果顯示溫度與中風風險之間呈現出 U 形反應曲線，即溫度高於或低於最適溫度時風險均會增加。進一步觀察，對於日最高溫溫度，全臺不論是出血性或缺血性中風急診的閾值溫度均為 34°C。而每日的日最低溫溫度閾值僅在出血性中風急診中發現為 8°C (圖 24 與圖 25)。

CMIP6 全球暖化程度 (GWL) 升溫 2°C
日最高溫 > 34 度 (天數/每年)

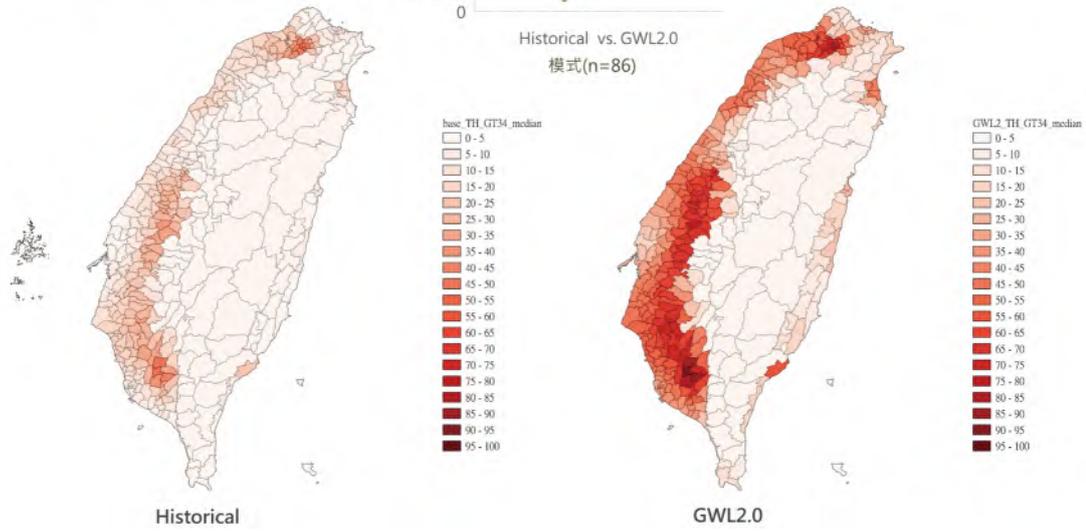


圖 26 AR6 日資料 (左) 基期與 (右) 全球暖化程度 2°C 之日最高溫 > 34 度天數全臺分布圖。(來源：國家科學及技術委員會 (2024)，臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平臺計畫期末報告。)

CMIP6 全球暖化程度 (GWL) 升溫 2°C
日最低溫 < 8 度 (天數/每年)

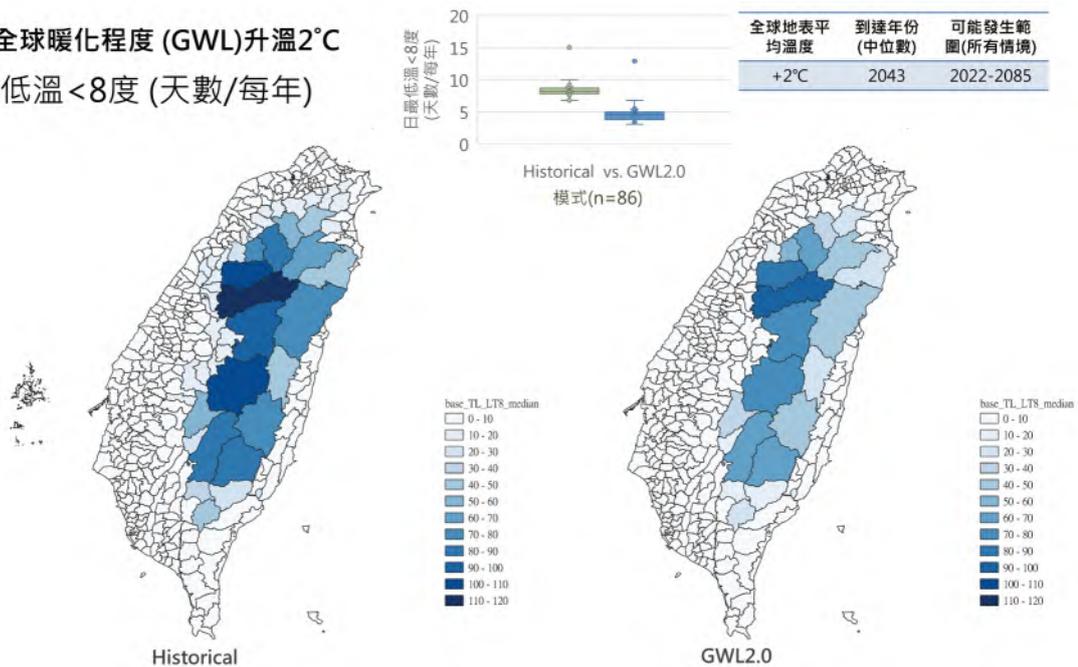


圖 27 AR6 日資料基期與全球暖化程度 2°C 之日最低溫 < 8 度天數全臺分布圖。(來源：國家科學及技術委員會 (2024)，臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平臺計畫期末報告。)

由日最高溫溫度閾值溫度為 34°C，以及日最低溫溫度閾值溫度為 8°C，進行全球暖化程度 2°C 情境推估。如果全球暖化程度上升至 2°C，推估到未來中風高風險的高溫天數將會增加，而低溫天數則會減少。具體而言，在全球暖化程度 2°C 的情境下，日最高溫超過 34 度的天數預計將增加至 36.4 天 / 每年，到達年份的中位數為 2043 年。這表示未來達到中風高風險的高溫天數將是目前的約 3 倍。相反地，日最低溫低於 8 度的天數預計將減少至 4.6 天 / 每年，顯示未來達到中風高風險的低溫天數將會減少 (圖 26 與圖 27)。

根據上述結果，可以觀察到溫度與中風風險之間存在著一個 U 形反應曲線，與過去心血管疾病死亡率曲線類似 (Alahmad et al. 2023)，表示在溫度過高或過低的情況下，中風風險都會增加，而在一個中間範圍內的最適溫度區間，中風風險較低。過去研究指出在高溫環境下，因出汗和皮膚血流量增加，會導致脫水、血液黏稠度增加、血液濃縮和膽固醇濃度升高，增加中風風險 (Liu et al. 2015)。而在低溫環境則會導致周邊血管收縮、血壓升高、血液黏稠度增加，造成心臟的負荷，此外血液中膽固醇及纖維蛋白原數值也會上升，造成血液濃縮與發炎反應，引起血栓的現象 (Kysely et al. 2009)。換句話說，無論是溫度過高還是過低，都可能會增加中風的風險。在對全球暖化程度上升至 2°C 的情境進行推估時，我們發現了一些值得關注的趨勢。未來中風高風險的高溫天數預計將會增加，這些推估提醒我們，隨著氣候暖化，需要更加關注高溫對中風風險的影響，並針對相應的應對措施進行規劃和實施。總整來說，本節的結果強調了氣溫變化對中風風險的重要影響，並提供了關於未來氣候變化可能對中風風險產生的影響的有價值資訊。這些發現有助於加強我們對中風預防和管理的認識，並促進相關的公共衛生政策和個人預防措施的制定。

4. 高溫危害對臺灣文蛤養殖漁產業潛在風險評估

4.1 臺灣文蛤養殖生產現況概述

臺灣養殖漁業扮演供給國人水產品糧食安全重要關鍵角色，但其主要養殖物種及環境存在差異，故其經營者所面臨的氣候災害類型與衝擊亦不同。養殖漁產業於生產作業過程中，面臨的氣候危害因子包括：平均氣溫上升、海平面上升、降雨型態改變、乾旱、極端強降雨事件、連續性高溫、極端低溫、颱風等。

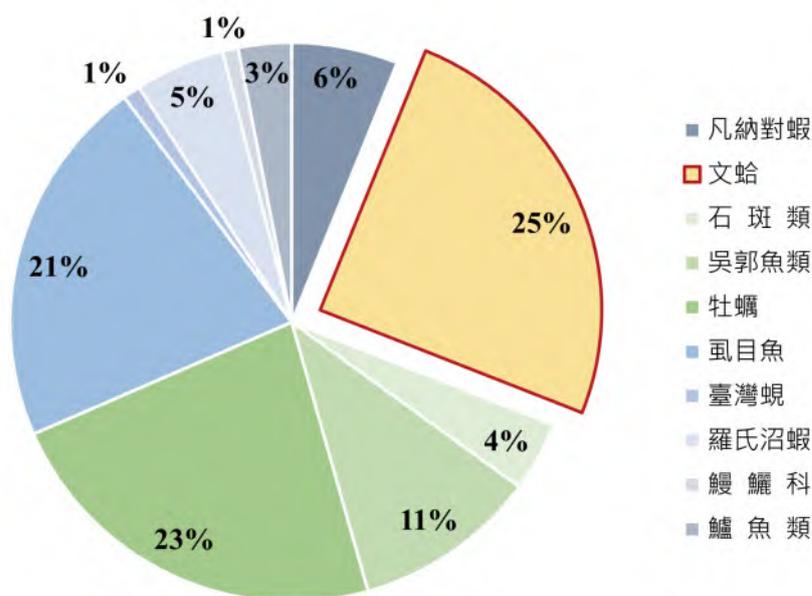


圖 28 2022 年全臺養殖漁業面積，資料來源：民國 111 年 (2022) 漁業統計年報。

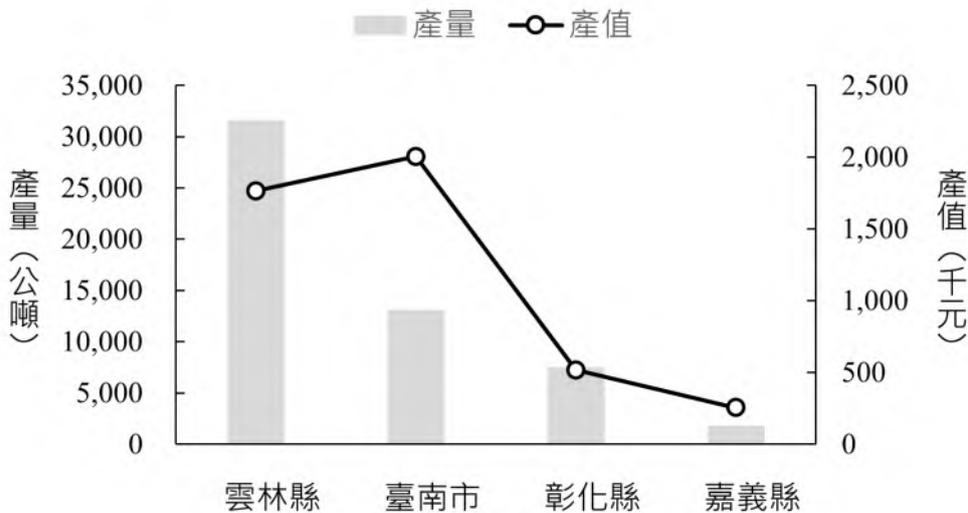


圖 29 2022 年文蛤養殖縣市產量產值，資料來源：民國 111 年 (2022) 漁業統計年報。

近年來，因受極端高溫屢創新高，以及連續天數高溫事件的影響，高溫危害對臺灣養殖漁業的影響逐漸受到產業關注，其中又以文蛤養殖漁產業的生產穩定性最受到關注。文蛤 (*Meretrix lusoria*) 為臺灣重要養殖經濟物種中養殖面積占比最大的物種。2022 年時，全臺養殖漁業生產面積占 25% (圖 28) (民國 111 年 (2022) 漁業統計年報)，主要生產作業區域以雲林縣、臺南市、彰化縣、嘉義縣為主 (圖 29)。

4.2 臺灣高溫對文蛤養殖生產影響及現行調適作為

根據國立高雄科技大學永續漁業發展研究中心侯清賢教授團隊參與 TCCIP 計畫的分析現場調查結果顯示，文蛤養殖區雖存在的連續性高溫事件，但衝擊主要是來自高溫誘發水質惡化、藻類滋生現象以及乾旱造成養殖水源供給不足的問題，因而間接影響物種生長或導致死亡減產等損失，其中彰化縣為文蛤現行主要生產區最北端區域，亦為近年來暖化變異程度較為劇烈的區域之一。

近年發生的極端高溫現象事件已對彰化文蛤生產造成暴斃大量死亡，以及高額漁業損失等衝擊 (農業部漁業署，2023)。面對連續性高溫事件造成的衝擊，彰化地區的養殖業者亦已開始自主推行海水補注方式降低池水溫度、調整水質與水色、建置水質監測系統、投餵益生菌等作為調適高溫災害對生產造成的衝擊。然而，隨著極端高溫變異程度加劇，養殖業者現行的部分調適作為已無法有效調適極端高溫對文蛤生產產生的衝擊。因此，業者已開始研發相應的調適作為 (例如：生產作為改變等)，希望藉此降低極端高溫可能造成的影響。

4.3 彰化文蛤生產作業區未來氣候風險模擬評估

4.3.1 資料概述

為瞭解彰化文蛤生產區未來可能面臨的高溫危害風險，參與 TCCIP 計畫的侯清賢教授帶領之養殖漁業領域團隊使用統計降尺度資料於 GWL 1.5°C 與 GWL 2.0°C 之推估，以 1976 至 2005 年為基期，立基於利害關係人調查及訪談的成果，設定以連續 7 天 32°C 為關鍵指標（表 4），進行未來氣候變遷於養殖漁業的危害評估。

表 4. 本節選用未來氣候風險分析指標類型

指標	資料選取	資料來源
危害	連續性高溫事件：IPCC AR6 GWL1.5°C及 GWL 2°C 指定指標連續危害事件數。(T32D7)	TCCIP 統計降尺度
暴露	彰化縣政府管轄鄉鎮空間尺度範圍內，現行文蛤養殖主要生產作業區。	本節研究繪製

4.3.2 氣候風險模擬結果

根據 GWL 1.5°C 及 GWL 2°C 情境的危害度分析，彰化縣現行的文蛤養殖漁業生產作業區，未來發生連續性高溫事件的機率均為增加趨勢，但因各鄉鎮承受的危害程度不同，造成縣市內各生產作業區的暴露風險不同（圖 30）。

彰化縣五大文蛤養殖漁業生產區中，未來高溫危害的變化率依大到小排序分別為：最南端的大城鄉、芳苑鄉、福興鄉、鹿港鎮、最後者為最北端的伸港鄉。在 GWL 1.5°C 情境下，彰化縣南端的大城鄉與芳苑的高溫危害變化率約增加 15-20%，較北端的福興鄉、鹿港鎮與伸港鄉的高溫變化率約增加 5-10%。在 GWL 2.0°C 的情境下，高溫事件發生機率相較 GWL 1.5°C 情境高，南端的大城鄉高溫危害變化率約增加 25-30%、芳苑鄉則約增加 20-25%，其北端的福興鄉的變化率約增加 10-15%、鹿港鎮與伸港鄉的變化率分別增加 5-10%（圖 30）。

在未來升溫情境下，極端高溫發生的機率會將持續增加，不利於文蛤養殖產業的發展。未來地方調適策略擬定時，建議依據科學的循證研究基礎，提早規劃合宜的在地調適策略，例如：公私部合作的產業研究、調適手段的創新、新型態漁業保單的開發等，在擬定相應的調適策略時，亦可發掘產業轉型可能的潛力，將可預見的風險轉變成可期待的發展的機會。

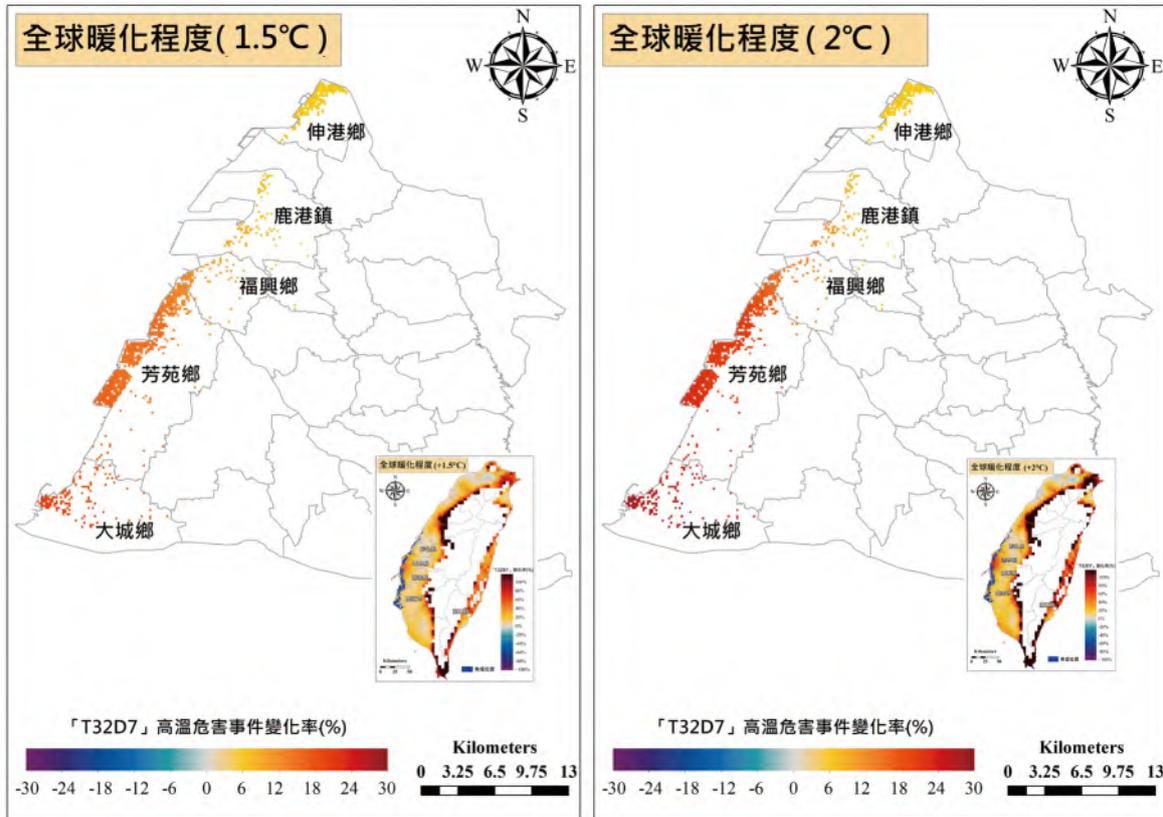


圖 30 AR6 全球暖化程度下，彰化文蛤養殖生產區高溫危害（T32D7）發生次數的變化率。變化率則以未來高溫發生次數除以基期高溫次數後，以百分比呈現。（來源：國家科學及技術委員會（2024），臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平臺計畫期末報告。）

5. 氣候變遷高溫環境對乳牛經濟產能之影響

氣候變遷下，高溫似乎已成常態，國內畜禽飼養在高溫環境下，面臨產量減少、罹患疾病等風險。以乳品酪農業為例，酪農收入仰賴生產牛奶的乳牛多為源自溫帶地區的荷蘭牛，牛奶產量高但不耐高溫，在炎熱的氣候條件下，會出現呼吸加快、流口水、躺臥時間縮短和採食量減少等熱緊迫徵狀，一般乳牛需要長時間的躺臥休息，站立是為了增加表皮與空氣接觸的散熱面積，長時間站立引發蹄病會影響乳牛行動力、不願行走，增加額外人力照護及治療成本。採食量更是直接影響乳牛的泌乳量，良好的養分攝取才能生產較多的牛奶，但在熱緊迫的狀態下，乳牛為了抵抗高溫，即便同樣的採食量仍然會產生乳量下降的狀況，業者必須瞭解氣候變化與高溫危害的程度，從而找到有效維持牛奶產量的應對方法，並減少乳牛受到上述熱緊迫所產生的風險。

面臨未來高溫的氣候條件，畜牧業的高溫危害及衝擊評估方式是本節闡述的重點，包括應用溫濕度指數 (temperature-humidity index, 以下簡稱 THI) 做為畜禽面臨熱緊迫時的危害指標。本節收錄農業部畜產試驗所施意敏副研究員帶領的畜禽領域團隊參與 TCCIP 計畫之研究成果，採用 HiRAM-WRF AR5 動力降尺度之全球模式降尺度資料，其資料含有溫度、濕度之時序資料，可用於分析暖化氣候情境下之溫濕度指數變化及預估未來乳牛乳量的損失量，以科學化的數據模擬未來乳牛產業的情境，提供國家政策研擬之參考。

5.1 高溫環境對乳牛經濟產能之評估方法

為探討當全球暖化程度 GWL 2°C 與 GWL 4°C 情況下，乳牛經濟產能受高溫環境之影響，畜禽領域團隊以 TCCIP 計畫產製之 HiRAM-WRF AR5 動力降尺度資料劃分出基期 (1995 年至 2014 年)、GWL 2°C (2034 年至 2053 年)、GWL 4°C (2073 年至 2092 年)，以每一情境 20 年資料之氣候變遷推估資料進行評估。評估畜禽面臨熱緊迫的程度，通常採用整合溫度與濕度的溫濕度指數 (THI) 表示 (參見文字框 3：畜禽常用熱緊迫指標 - 溫濕度指數 THI)，並進一步利用乳量損失公式 (St-Pierre et al. 2003)，於無調適作為的條件下，預估乳量損失。

文字框六 畜禽常用熱緊迫指標 - 溫濕度指數

Temperature-Humidity Index

依據 St-Pierre et al. (2003) 研究，美國重要畜禽 (奶牛、小牛、肉牛、母豬、豬、肉雞、蛋雞和火雞) 的經濟損失，結合溫濕度指數、每日熱緊迫持續時間和熱負荷指數等參數進行經濟損失評估，明確指出高溫、高濕環境不利於畜禽的生產。乳牛遭受熱緊迫的指標主要依據 (NRC 1971) THI 公式：

$$THI = (1.8 T + 32) - (0.55 - 0.0055RH) \times (1.8T - 26)$$

其中 T 為氣溫以 °C 為單位，RH 為相對濕度以 % 單位表示。

Mellado et al. (2018) 將豬隻熱緊迫 THI 分級為 <74、74-78、78-82 和 >82。THI 82 為最嚴重的熱緊迫門檻值。研究比較 THI 82 與 THI 74 結果顯示，高 THI 易造成母豬的受胎率及仔豬的育成率降低。以豬隻而言，當 THI 超過 72 達到熱緊迫門檻值，豬隻的採食量下降，造成日增重下降。THI 介於 72-78 為溫和熱緊迫，78 至 89 為中度熱緊迫，89 以上屬嚴重熱緊迫。

蛋雞的門檻值較低，THI 70 即達到門檻，雞隻的肉垂和雞冠會膨脹，並伸展翅膀幫助散熱，生產的蛋不僅產量減少且蛋殼較薄，嚴重的熱緊迫反應亦可能中暑死亡。雞隻飼養後期，當環境溫度超過 28°C -30°C 時，加上濕度增高，便會引起明顯的熱緊迫反應，造成雞隻採食量降低與熱中暑死亡。

乳牛遭受熱緊迫時，最先表現在呼吸速率上升及躺臥時間減少，造成乳量下降。當畜舍內 THI 開始升高至 74，乳牛呼吸速率則急速增加，開始表現熱緊迫的生理特徵。以臺灣畜舍 THI 變化而言，每年處於熱緊迫狀態的熱季約佔 6.73 個月 (5-10 月) (THI \geq 72)。

不同畜禽 THI 門檻值、熱緊迫表徵與影響

種類	豬	蛋雞	乳牛
THI 門檻值	72	70	72
熱緊迫表徵	體溫上升 呼吸加快 飲水量增加 採食量下降	伸展翅膀散熱 肉垂和雞冠膨脹 呼吸加快 活動力下降 採食量下降	躺臥時間下降 呼吸加快 流口水 採食量下降
熱緊迫影響	日增重下降 飼料效率下降 繁殖性能下降 免疫力下降	生產力下降 飼料效率下降 蛋品質下降 死亡率上升	乳量下降 乳品質下降 繁殖性能下降 患蹄病率上升

進一步依據 St-Pierre et al.,(2003) 乳量損失公式，於無調適作為的條件下，預估乳量損失的公式可表示如：

$$MILK_{Loss} = \alpha \times (THI_{max} - THI_{threshold})^2 \times D$$

其中， THI_{max} ，即每日 THI 最大值； $\alpha=0.0695$ ； $THI_{threshold}=72$ ；D，為 THI 超過門檻值時數比例 (0<D<1)。

5.2 評估結果

全球暖化程度下臺灣地區溫濕度指數 (THI) 的變化趨勢如圖 31。以基期年 (1995-2014) 而言， $72 < \text{THI} < 75$ 主要分布在屏東縣與高雄市的交界處，其餘區域則低於 $\text{THI} < 72$ ，亦即僅南部酪農區的乳牛可能遭受熱緊迫 (圖 31 左)。於 $\text{GWL } 2^\circ\text{C}$ 的升溫程度下 (如圖 31 中)， $72 < \text{THI} < 75$ 的區域由南部擴散至臺中市，包括乳牛主要產區彰化縣。於 $\text{GWL } 4^\circ\text{C}$ 的升溫程度下 (如圖 31 右)， $72 < \text{THI} < 75$ 的區域則擴散至基隆及東部地區， $\text{THI} > 75$ 的區域以屏東、高雄、臺南、嘉義及雲林為主要警戒區。

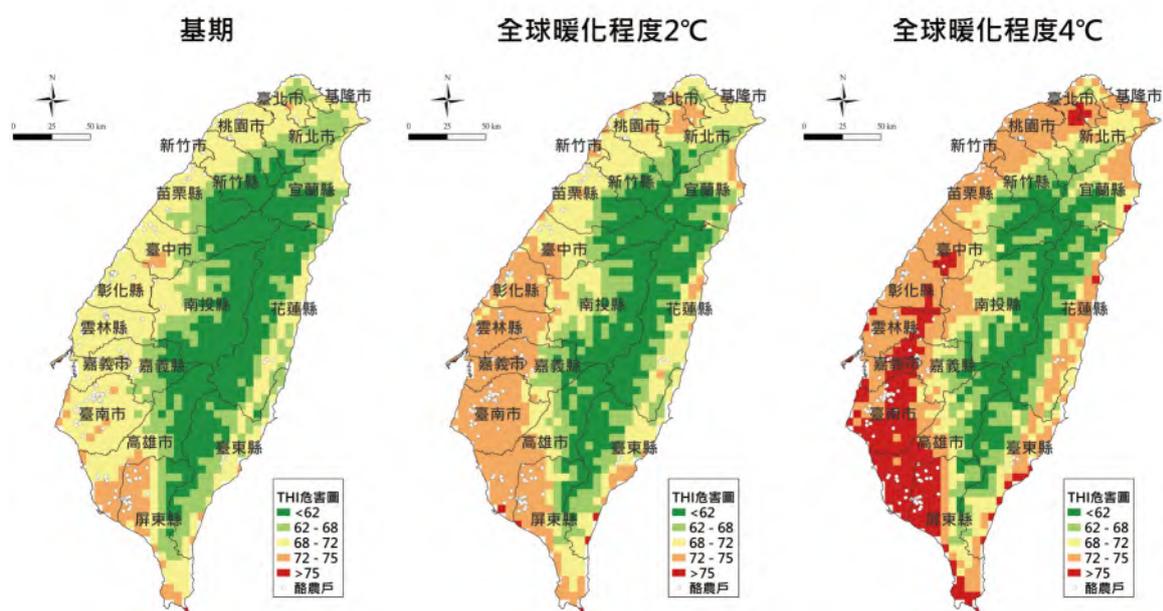


圖 31 不同暖化程度下臺灣地區溫濕度指數 (THI) 的變化趨勢 (來源：國家科學及技術委員會 (2024)，臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平臺計畫期末報告)

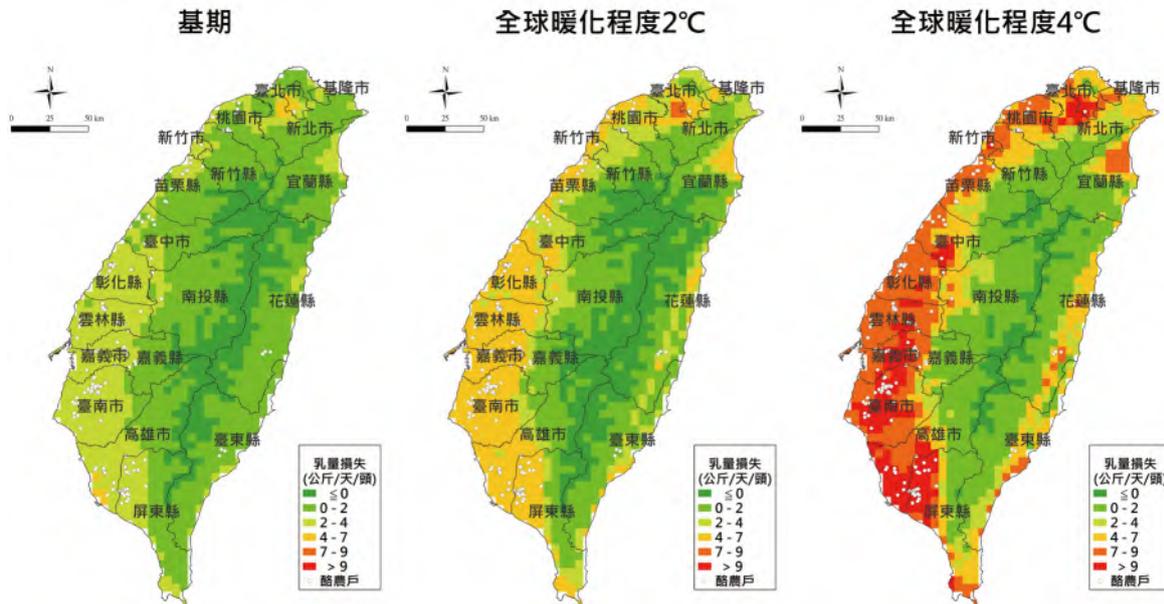


圖 32 不同暖化程度下臺灣地區乳牛產乳量損失的變化趨勢 (來源：國家科學及技術委員會 (2024)，臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平臺計畫期末報告)

當 GWL 2°C 的升溫程度下，彰化、雲林、嘉義及臺南的乳牛乳量損失約 4-6 kg/day/cow；當 GWL4°C 的升溫程度下，嘉義、臺南、高雄及屏東的乳牛乳量損失約 6-8 kg/day/cow，不同暖化程度下臺灣地區乳牛產乳量損失的變化趨勢如圖 32。其初步推估結果顯示，乳量損失變化與 THI 的變化趨勢一致，如臺南、高雄、屏東都屬高 THI 危害區域，而乳損失量亦同高損失區，惟每一地區受熱承載時間不一樣，故而會影響乳量損失多寡。

以臺灣乳牛平均乳量 25 kg/day/cow 而言，在 GWL2°C 升溫程度下，乳牛乳量損失約 4-6 kg/day/cow，乳量損失比例可達平均乳量的 1/4，對乳牛產業的經營是相當嚴峻的壓力。畜牧業者為減緩高溫帶來的衝擊，進行相當多的調適作為，包括導入畜舍的降溫設備如風扇、灑水器，引進智能設備如自動餵飼機提供少量多餐的餵飼模式等方式，以增加乳牛的採食量。

應用 THI 表達畜禽遭受熱緊迫的程度，已廣泛應用於畜牧產業，目前國內、外文獻已有建立不同 THI 計算方式，亦有利用 THI 推估畜禽經濟性能的衝擊等模型。畜牧業不僅乳牛受到氣候變遷之高溫影響，不同畜禽物種亦會受到熱緊迫影響，如豬的增重率、雞的產蛋率、繁殖效率及採食率等情形，除產量下降外，極端高溫甚至會造成死亡。未來持續升溫將使產業、畜禽物種、民生需求等面向受到嚴重影響，除了依據科學量化分析，提供危害及衝擊評估外，亦可結合重點生產區的業者，共同研擬可行的在地調適案，透過公私協作及業者知識教育等調適作為，減緩畜牧業受到氣候變遷的衝擊，以利畜禽產業永續發展。

結語

臺灣六個百年測站長期溫度觀測評估的高溫指標顯示，除了臺南站變化較不明顯，各測站在1980-1990年代之後均呈現極端高溫天數增加的趨勢，其中以臺北站天數增加最為顯著，確認了愈加頻繁發生的異常高溫狀況。

TCCIP 網格化觀測資料分析顯示，在1960至2020年期間，各縣市平均溫度持續上升，平均溫度的百分位分布也因此呈現門檻值不斷提高的趨勢。另一方面，日最低溫呈現穩定顯著的暖化趨勢，且增溫速率高於日最高溫，更具體地反映全球暖化的影響。

國際上，熱浪定義會因地區或目的而有不同定義。本報告在熱浪趨勢的分析研究，參採中研院研究團隊針對臺灣的極端高溫事件（以受暖化影響較明顯的每日最低溫為關鍵變數）之研究成果，透過事件變化等級、強度、發生面積、持續時間的分析，立體地描繪極端高溫事件變化的特徵。分析結果顯示，近半世紀以來，極端高溫事件發生頻率和天數均呈現顯著的上升趨勢，後期30年較前期30年的增加幅度於各縣市普遍增幅超過一倍，其中以中部地區增幅最明顯，可達3-4倍。同時，極端高溫事件發生季節擴張，提前發生但延後結束，全臺平均將擴張48天。區域特性上，臺灣南部與東部面臨的是極端高溫強度增強，北部與中部地區則是面臨極端高溫涵蓋範圍的擴大。臺灣較強的極端高溫事件通常發生於副熱帶高壓脊西伸壟罩臺灣或是綜觀天氣系統帶來的強盛西南風的環境。

綜合不同全球暖化程度的高溫指標推估顯示，臺灣各區域的高溫指標都呈現隨著暖化程度增強而增加的趨勢，模式推估呈現高度一致性。其中，全球暖化 2°C 是一個重要的轉折點；若全球溫度持續上升至 3°C ，高溫事件的強度與持續時間其增加幅度將更大幅增加，為全球暖化 2°C 的近2倍。

延伸目前氣候分析對於高溫現象的了解，對臺灣不同面向也會有所衝擊影響。本報告整理以 TCCIP 計畫以及中研院團隊為主的衝擊研究領域，包含都市熱島、健康、養殖漁業與乳牛產能為例，呈現目前在科學上的初步評估，尚未涵蓋國內所有高溫衝擊研究之成果。

從都市熱島（以臺北盆地為例）角度進行熱舒適度的評估顯示，隨著全球暖化程度增強至 4°C，萬華地區全年有四分之一的時間將處於熱不舒適的狀態；即使是相對郊區的南港，熱不舒適的時間占比率也將增加至 23.1%，增加幅度較萬華地區還高，顯示暖化趨勢下，更為嚴峻的極端高溫對於都市熱島與民衆於戶外之熱舒適度的嚴重影響。

在極端高溫對健康的影響顯示，當全球暖化程度達 2°C，臺灣中風高風險的高溫天數將增加約為目前的 3 倍。從戶外工作者角度而言，未來推估的高溫事件不僅造成白天適合工作時數減少，也使得夜間工作者需要考量高溫導致的勞動安全問題。

農漁生產的影響面向來看，本報告整理了目前文蛤養殖生產與畜牧領域乳牛產量的衝擊評估結果，研究結果顯示暖化氣候下的高溫事件會帶來生產面的經濟損失，現行調適作為可能仍不足以有效因應高溫危害發生機率逐年提高所帶來的衝擊。

由過去長期觀測與模式未來推估顯示在全球暖化趨勢下，臺灣面臨的高溫事件將增加，並有增強趨勢，這樣的分析結果與全球趨勢一致。極端高溫事件加劇的趨勢將給不同領域帶來衝擊，這些評估顯示暖化趨勢下的高溫環境為人們的日常生活帶來更顯而易見的不良影響，意謂著未來公共衛生政策、個人健康預防措施、職業安全、都市發展與規劃、經濟活動與農漁生產等，需要考慮暖化氣候與更為頻繁嚴峻的高溫事件，以便擬定更有效益的調適策略方案，減緩氣候變遷的衝擊。

參考文獻

- 中央氣象署，1897-2020 年臺灣氣候統計圖集，2023。中央氣象署。2023 年 9 月出版。
- TCCIP 資料說明，2023：AR6 統計降尺度日資料 - 資料說明文件。臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台。
https://tccip.ncdr.nat.gov.tw/upload/data_document/20220708151649.pdf
- TCCIP 技術報告 (2021)。統計與動力降尺度方法。臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台。
- https://tccip.ncdr.nat.gov.tw/km_publish_data_document_one.aspx?dd_id=20210609212941
- 台灣氣象會，1997，台灣總督府氣象台沿革史，日本：和歌山，頁 12。
- 林子平與王柳臻，2024：臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平臺，熱島領域第二年度期末報告書，國家科學委員會。
- 朱吟晨，2007：21 世紀的熱浪。國立臺灣大學大氣科學系碩士論文。
- 李庭慧與許晃雄，2017：台灣熱浪特性分析與變遷推估，大氣科學，45(4)，281-304。
<https://doi.org/10.3966/025400022017124504001>
- 林士堯與楊承道，2023：網格化觀測資料說明文件 (3.2 版)。
- 科技部、中央研究院環境變遷研究中心、交通部中央氣象局、臺灣師範大學地球科學系、國家災害防救科技中心，2021：IPCC 氣候變遷第六次評估報告之科學重點摘錄與臺灣氣候變遷評析更新報告。
- 翁叔平與楊承道，2012：臺灣地區月降雨及溫度 1 公里網格資料庫之建立 (1960-2009) 及其在近未來 (2015-2039) 的氣候推估應用，大氣科學，第 40 期，349-370。
- 翁叔平與楊承道，2018：臺灣地區日降雨網格化資料庫 (1960-2015) 之建置與驗證。臺灣水利，66(4)，33-52。
- 翁叔平與楊承道，2020：臺灣日降雨網格化觀測資料之建置與驗證，臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台電子報，第 37 期。
- 國科會「臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台計畫」編撰，2023：臺灣氣候變遷關鍵指標圖集：AR6 統計降尺度版，國家災害防救科技中心。ISBN 978-986-5436-44-5。
- 國家科學及技術委員會，2019：臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平臺計畫期末報告，國家科學及技術委員會。
- 國家科學及技術委員會，2024：臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平臺計畫期末報告，國家科學及技術委員會。
- 許晃雄、王嘉琪、陳正達、李明旭、詹士樑 (2024)。國家氣候變遷科學報告 2024：現象、衝擊與調適 [許晃雄、李明旭 主編]。國家科學及技術委員會與環境部聯合出版。
- 陳永明、徐永衡、黃亞雯、劉玫婷、黃亞婷、李欣輯，2021：氣候推估及災害類型對果樹產業影響，2021 中部果樹產業因應氣候變遷之調適與策略發展研討會論文集，112-120。

- 童裕翔、陳正達、劉俊志、陳永明，2019：統計降尺度（日）資料評估與應用。國家災害防救科技中心，NCDR 107-T19。

- 黃燕儀與翁叔平，2011：臺灣地區日較差的百年變化（1901-2008），大氣科學，39(1)，69-82。

- 楊承道、張容慈、翁叔平，2023：臺灣地區日溫度網格化資料庫之建置和長期變化趨勢分析，地理研究，78，75-110。

- 農業部漁業署，2022：112 年中華民國臺閩地區漁業統計年報。 https://www.fa.gov.tw/list.php?theme=FS_AR&subtheme=

- 臺灣總督府臺北測候所，1904，臺灣氣象報文第三，臺北：臺灣日日新報社，頁 14~28。

- 臺灣總督府臺北測候所，1907，臺灣氣象報文第四，臺北：臺灣日日新報社，頁 61、64A。

- 賴栗葦與姜善鑫，2004：臺灣地區月平均氣溫日較差趨勢分析，地理學報，36，101-116。

- 環境部，2023：國家氣候變遷調適行動計畫（112-115 年）（核定本）。

- Alperovitch, A., Lacombe, J. M., Hanon, O., Dartigues, J. F., Ritchie, K., Ducimetière, P., & Tzourio, C. (2009). Relationship between blood pressure and outdoor temperature in a large sample of elderly individuals: the Three-City study. *Archives of internal medicine*, 169(1), 75-80.

- Alahmad, B., Khraishah, H., Royé, D., Vicedo-Cabrera, A. M., Guo, Y., Papatheodorou, S. I., ... & Koutrakis, P. (2023). Associations between extreme temperatures and cardiovascular cause-specific mortality: results from 27 countries. *Circulation*, 147(1), 35-46.

- Anderson, J. L., and Coauthors. (2004). The new GFDL global atmosphere and land model AM2-LM2: Evaluation with prescribed SST simulations. *J. Climate*, 17, 4641-4673, <https://doi.org/10.1175/JCLI-3223.1>.

- Anderson, B. G., & Bell, M. L. (2009). Weather-related mortality: how heat, cold, and heat waves affect mortality in the United States. *Epidemiology*, 20(2), 205-213.

- Brogli, R., Heim, C., Mensch, J., Sørland, S. L., & Schär, C. (2023). The pseudo-global-warming (PGW) approach: methodology, software package PGW4ERA5 v1. 1, validation, and sensitivity analyses. *Geoscientific Model Development*, 16(3), 907-926.

- Chen, J., Wang, Z., Tam, C. Y., Lau, N. C., Lau, D. S. D., & Mok, H. Y. (2020). Impacts of climate change on tropical cyclones and induced storm surges in the Pearl River Delta region using pseudo-global-warming method. *Scientific reports*, 10(1), 1965.

- Central Weather Bureau (2018). "Heat information product description." Central weather bureau.

- https://www.cwa.gov.tw/V8/assets/pdf/HeatInformation_ProductDescription_En.pdf (in Chinese)

- Curriero, F. C., Heiner, K. S., Samet, J. M., Zeger, S. L., Strug, L., & Patz, J. A. (2002). Temperature and mortality in 11 cities of the eastern United States. *American journal of epidemiology*, 155(1), 80-87.

- Dai, A., Trenberth, K. E., & Karl, T. R. (1999). Effects of clouds, soil moisture, precipitation, and water vapor on diurnal temperature range. *Journal of Climate*, 12(8), 2451-2473.

- Easterling, D. R., Horton, B., Jones, P. D., Peterson, T. C., Karl, T. R., Parker, D. E., ... & Folland, C. K. (1997). Maximum and minimum temperature trends for the globe. *Science*, 277(5324), 364-367.

- Li, C., Zwiers, F., Zhang, X., Li, G., Sun, Y., & Wehner, M. (2021). Changes in annual extremes of daily temperature and precipitation in CMIP6 models. *Journal of Climate*, 34(9), 3441-3460.

- IPCC, 2021: Technical Summary. In *Climate Change. (2021). The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 33 – 144. doi:10.1017/9781009157896.002.

- Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC. (2007). Observed changes in climate and their effects. *Climate change 2007: Synthesis report*, Valencia, Spain, 30pp. including appendixes.

- Joshi, M. K., Rai, A., Kulkarni, A., & Kucharski, F. (2020). Assessing changes in characteristics of hot extremes over India in a warming environment and their driving mechanisms. *Scientific Reports*, 10(1), 2631.

- Kyobutungi, C., Grau, A., Stieglbauer, G., & Becher, H. (2005). Absolute temperature, temperature changes and stroke risk: a case-crossover study. *European Journal of Epidemiology*, 20, 693-698.

- Kysely, J., Pokorna, L., Kyncl, J., & Kriz, B. (2009). Excess cardiovascular mortality associated with cold spells in the Czech Republic. *BMC public health*, 9, 1-11.

- Lee, JS., Farlow, A. The threat of climate change to non-dengue-endemic countries: increasing risk of dengue transmission potential using climate and non-climate datasets. *BMC Public Health* 19, 934 (2019). <https://doi.org/10.1186/s12889-019-7282-3>

- Lin, T. P., & Matzarakis, A. (2008). Tourism climate and thermal comfort in Sun Moon Lake, Taiwan. *International Journal of Biometeorology*, 52, 281-290.

- Lin, T.P., Wang, L.C. (2023). Health risks and prevention for outdoor workers at extreme climate (high temperature). 2023 International Conference on Occupational Hygiene and Occupational Medicine (OHEOMC 2023), Taipei, Taiwan.

- Liu, C., Yavar, Z., & Sun, Q. (2015). Cardiovascular response to thermoregulatory challenges. *American Journal of Physiology-Heart and Circulatory Physiology*, 309(11), H1793-H1812.

- Lo, S. H., Chen, C. T., Russo, S., Huang, W. R., & Shih, M. F. (2021). Tracking heatwave extremes from an event perspective. *Weather and Climate Extremes*, 34, 100371.

- Lozano, R., Naghavi, M., Foreman, K., Lim, S., Shibuya, K., Aboyans, V., ... & Remuzzi, G. (2012). Global and regional mortality from 235 causes of death for 20 age groups in 1990 and 2010: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2010. *The Lancet*, 380(9859), 2095-2128.

- Matsumoto, M., Ishikawa, S., & Kajii, E. (2010). Cumulative effects of weather on stroke incidence: a multi-community cohort study in Japan. *Journal of Epidemiology*, 20(2), 136-142.

- Matzarakis, A., Rutz, F., & Mayer, H. (2007). Modelling radiation fluxes in simple and complex environments—application of the RayMan model. *International journal of biometeorology*, 51, 323-334.

- Mellado, M., Gaytán, L., Macías-Cruz, U., Avendaño, L., Meza-Herrera, C., Lozano, E. A., ... & Mellado, J. (2018). Effect of climate and insemination technique on reproductive performance of gilts and sows in a subtropical zone of Mexico. *Austral journal of veterinary sciences*, 50(1), 27-34.

- Méndez-Lázaro, P. A., Pérez-Cardona, C. M., Rodríguez, E., Martínez, O., Taboas, M., Bocanegra, A., & Méndez-Tejeda, R. (2018). Climate change, heat, and mortality in the tropical urban area of San Juan, Puerto Rico. *International journal of biometeorology*, 62, 699-707.

- Moghadamnia, M. T., Ardalán, A., Mesdaghinia, A., Naddafi, K., & Yekaninejad, M. S. (2018). The effects of apparent temperature on cardiovascular mortality using a distributed lag nonlinear model analysis: 2005 to 2014. *Asia Pacific Journal of Public Health*, 30(4), 361-368.

- NRC (1971). *A guide to environmental research on animals*. National Academies: Washington, DC, USA.

- Ogbomo, A. S., Gronlund, C. J., O'Neill, M. S., Konen, T., Cameron, L., & Wahl, R. (2017). Vulnerability to extreme-heat-associated hospitalization in three counties in Michigan, USA, 2000–2009. *International journal of biometeorology*, 61, 833-843.

- O'Neill, B. C., Tebaldi, C., Van Vuuren, D. P., Eyring, V., Friedlingstein, P., Hurtt, G., ... & Sanderson, B. M. (2016). The scenario model intercomparison project (ScenarioMIP) for CMIP6. *Geoscientific Model Development*, 9(9), 3461-3482.

- Pan, W. H., Li, L. A., & Tsai, M. J. (1995). Temperature extremes and mortality from coronary heart disease and cerebral infarction in elderly Chinese. *The Lancet*, 345(8946), 353-355.

- Riahi, K., Van Vuuren, D. P., Kriegler, E., Edmonds, J., O'Neill, B. C., Fujimori, S., ... & Tavoni, M. (2017). The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. *Global environmental change*, 42, 153-168.

- Rodrigues, M., Santana, P., & Rocha, A. (2019). Effects of extreme temperatures on cerebrovascular mortality in Lisbon: a distributed lag non-linear model. *International journal of biometeorology*, 63, 549-559.

- Russo, S., Sillmann, J., & Fischer, E. M. (2015). Top ten European heatwaves since 1950 and their occurrence in the coming decades. *Environmental Research Letters*, 10(12), 124003.

- Salinger, M. J. (1995). Southwest Pacific temperatures: trends in maximum and minimum temperatures. *Atmospheric research*, 37(1-3), 87-99.

- Shinkawa, A., Ueda, K., Hasuo, Y., Kiyohara, Y., & Fujishima, M. (1990). Seasonal variation in stroke incidence in Hisayama, Japan. *Stroke*, 21(9), 1262-1267.

- Sillmann, J., Kharin, V. V., Zwiers, F. W., Zhang, X., & Bronaugh, D. (2013). Climate extremes indices in the CMIP5 multimodel ensemble: Part 2. Future climate projections. *Journal of geophysical research: atmospheres*, 118(6), 2473-2493.

- Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Barker, D. M., Duda, M. G., ... & Powers, J. G. (2008). A description of the advanced research WRF version 3. NCAR technical note, 475, 113.

- St-Pierre, N. R., Cobanov, B., & Schnitkey, G. (2003). Economic losses from heat stress by US livestock industries. *Journal of dairy science*, 86, E52-E77.

- Tsai, I. C., Hsieh, P. R., Cheng, C. T., Tung, Y. S., Lin, L. Y., & Hsu, H. H. (2023). Impacts of 2 and 4° C global warmings on extreme temperatures in Taiwan. *International Journal of Climatology*, 43(2), 702-719.

- Tung, Y. S., Wang, C. Y., Weng, S. P., & Yang, C. D. (2022). Extreme index trends of daily gridded rainfall dataset (1960–2017) in Taiwan. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 33(1), 8.

- Turin, T. C., Kita, Y., Murakami, Y., Rumana, N., Sugihara, H., Morita, Y., ... & Ueshima, H. (2008). Higher stroke incidence in the spring season regardless of conventional risk factors: Takashima Stroke Registry, Japan, 1988–2001. *Stroke*, 39(3), 745-752.

- Weng, S. P., & Yang, C. D. (2018). The construction and verification of daily gridded rainfall dataset (1960–2015) in Taiwan. *Taiwan Water Conserv*, 66, 33-52.

- Woodhouse, P. R., Khaw, K. T., & Plummer, M. (1993). Seasonal variation of serum lipids in an elderly population. *Age and ageing*, 22(4), 273-278.

- Wu, Y. C., Chu, J. L., & Yu, Y. C. (2020). Climatology and the Interannual Variability of the High - Temperature Extremes in Taiwan. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 125(3), e2019JD030992.

- Yang, L. T., Chang, Y. M., Hsieh, T. H., Hou, W. H., & Li, C. Y. (2018). Associations of ambient temperature with mortality rates of cardiovascular and respiratory diseases in Taiwan: a subtropical country. *Acta Cardiologica Sinica*, 34(2), 166.

- Zanobetti, A., & Schwartz, J. (2008). Temperature and mortality in nine US cities. *Epidemiology*, 19(4), 563-570.

- Zhao, M., Held, I. M., Lin, S. J., & Vecchi, G. A. (2009). Simulations of global hurricane climatology, interannual variability, and response to global warming using a 50-km resolution GCM. *Journal of Climate*, 22(24), 6653-6678.

- Zhou, L., Dai, A., Dai, Y., Vose, R. S., Zou, C. Z., Tian, Y., & Chen, H. (2009). Spatial dependence of diurnal temperature range trends on precipitation from 1950 to 2004. *Climate Dynamics*, 32, 429-440.

- Zhou, L., Dickinson, R. E., Dirmeyer, P., Dai, A., & Min, S. K. (2009). Spatiotemporal patterns of changes in maximum and minimum temperatures in multi - model simulations. *Geophysical Research Letters*, 36(2).

致謝

感謝中央氣象署阿里山氣象站朱瑞鼎主任提供早期降雪紀錄照片。

附錄 1.

客觀極端高溫事件定義方法是運用 Russo et al. (2015) 提出的每日極端高溫事件強度指數 (HWMId, Heat Wave Magnitude Index Daily) 來偵測網格點上的極端事件，將極端高溫事件定義為連續 3 天溫度指標 (T, 如 Tmax、Tmin; 本研究主要採用 Tmin 做為指標) 大於事件溫度門檻值的一段時期。而該門檻值則根據基期 (在此採用 1960-1989 年) 的 31 天窗區中的每日溫度指標的第 90 個百分位數 (即 PR90) 定義，如下：

$$1. \quad A_d = \bigcup_{y=1960}^{1989} \bigcup_{i=d-15}^{d+15} T_{(y,i)}$$

其中，U 表示數據的聯集， $T_{(y,i)}$ 是年份 y 中第 i 天的最高氣溫。

每日極端高溫強度 (Daily Heatwave Magnitude, Md) 定義如下：

$$2. \quad M_d(T_d) = \begin{cases} \frac{T_d - PR25}{PR75 - PR25} & , \text{ if } T_d > PR25; \\ 0 & , \text{ if } T_d \leq PR25 \end{cases}$$

其中， T_d 為事件中第 d 天的最高氣溫，PR25 和 PR75 是選自 30 年基期 (1960~1989 年) 中每年溫度的第 25 個和第 75 個百分位數值。由式 2 中可得知，Md 表示年度 T 時間序列的變異量，如果 T_d 低於 25 個百分位數 (PR25)，Md 則為零。換句話說，如果在事件期間有溫度相對較低的天氣，這些天的每日強度 Md 為零，不會對 HWMId 產生影響。

以 HWMId 方法偵測出極端高溫訊號之後，再利用深度優先搜索演算法 (Depth-First-Search, DFS)，將有相似時間、空間特性的高溫訊號分類，並定義為該事件的群組。這項方法能夠突破傳統研究僅局限於特定時空範疇的限制，深化對極端高溫事件複雜性的理解，為相關研究提供更全面的結果與分析，詳細方法與討論見 Lo et al. (2021)。

除了討論極端高溫事件發生頻率外，亦會依據 Lo et al. (2021) 的方法針對每一極端高溫事件進下列特性分析：極端高溫事件等級 (Heatwave magnitude scale, HWMS)、極端高溫事件的平均強度 (Heatwave mean magnitude, HWMM)、極端高溫事件的平均面積 (Heatwave mean area, HWMA) 和極端高溫事件持續時間 (Heatwave duration, HWD)。各項特性說明如下：

HWMS 主要用於判斷事件的嚴重等級，除了考量溫度強度，也考量受事件涵蓋的面積，為極端高溫事件中每日溫度強度 (Md) 和面積的乘積總和，可表達成以下公式，

$$3. \quad HWMS = \sum_{t=d_1}^{d_n} \sum_{x=x_e}^{x_w} \sum_{y=y_s}^{y_n} M_d(x, y, t) \delta(x, y, t) \Delta x \Delta y \cos(\varphi(x, y))$$

其中， d_1 和 d_n 分別代表極端高溫事件的起始和結束日期； x_e 和 x_w (y_s 和 y_n) 則分別為整體事件發生範圍最東邊和最西邊的經度 (最南邊和最北邊的緯度)，每個像素的面積是根據緯度餘弦加權計算的經緯度格網單元大小。由事件等級 (HWMS) 的公式 (式 3)，我們進一步計算平均強度 (HWMM)、平均面積 (HWMA) 和持續時間 (HWD)，討論不同極端高溫事件特性的變化，公式如下：

$$4. \quad HWMM = \frac{\sum_{t=d_1}^{d_n} \sum_{x=x_e}^{x_w} \sum_{y=y_s}^{y_n} M_d(x, y, t) \delta(x, y, t) \Delta x \Delta y \cos(\varphi(x, y))}{\sum_{t=d_1}^{d_n} \sum_{x=x_e}^{x_w} \sum_{y=y_s}^{y_n} \delta(x, y, t) \Delta x \Delta y \cos(\varphi(x, y))}$$

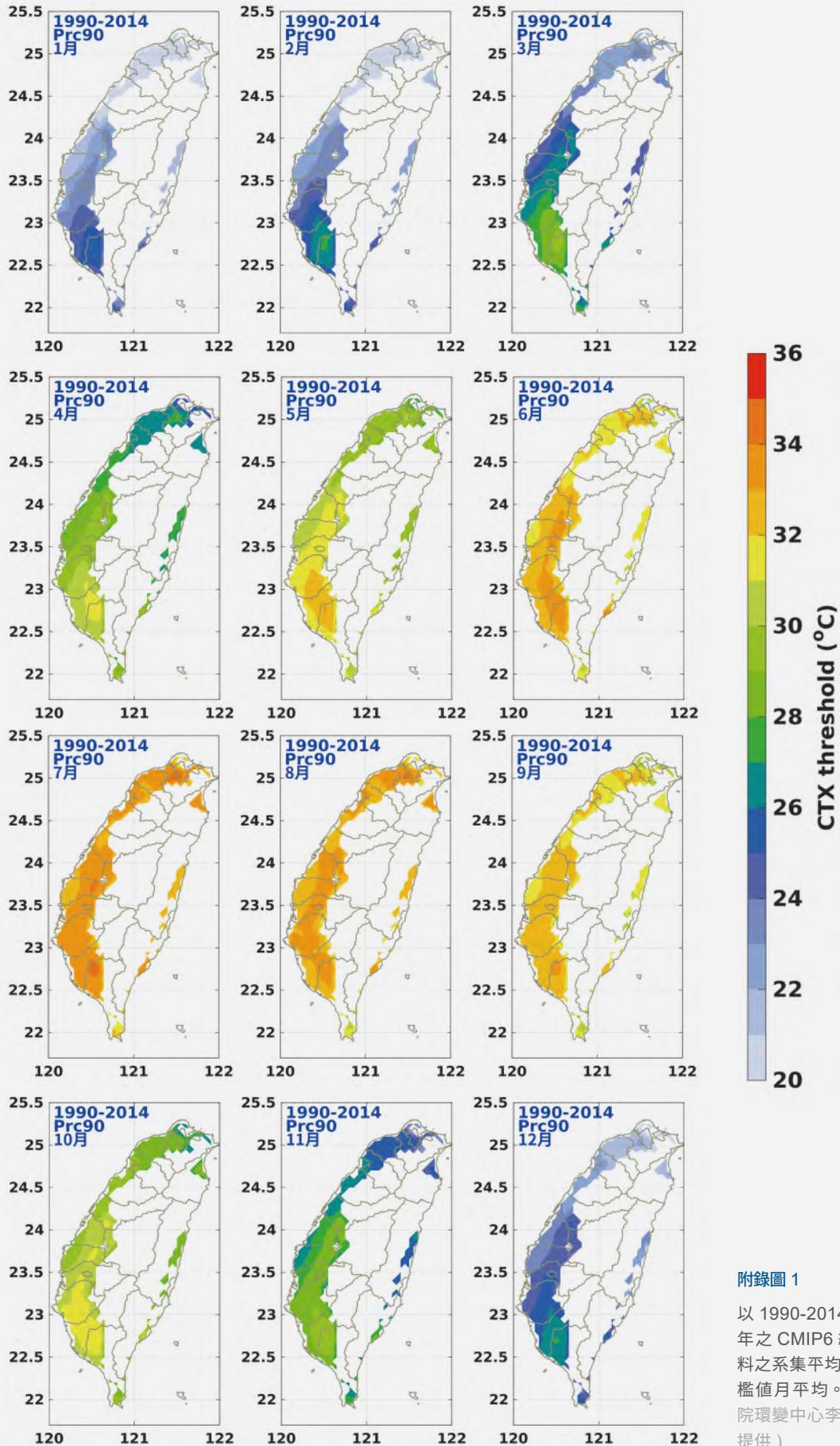
$$5. \quad HWA = \frac{\sum_{t=d_1}^{d_n} \sum_{x=x_e}^{x_w} \sum_{y=y_s}^{y_n} M_d(x, y, t) \delta(x, y, t) \Delta x \Delta y \cos(\varphi(x, y))}{(d_n - d_1 + 1)}$$

$$6. \quad HWD = d_n - d_1 + 1$$

附錄 2.

		HWMS			HWMA			HWMM			HWD		
		25%	50%	75%	25%	50%	75%	25%	50%	75%	25%	50%	75%
N 北部 (b)	Past-30	423	812	2737	244	351	1145	0.47	0.56	0.66	4.0	5.0	7.0
	Last-30	756	1640	3135	354	546	1048	0.59	0.68	0.78	5.0	6.0	9.0
	Ratio	1.8	2.0	1.1	1.5	1.6	0.9	1.3	1.2	1.2	1.3	1.2	1.3
	t-test							***			**		
	M-W test	***			***			***			***		
	K-S test	***			***			***			***		
C 中部 (c)	Past-30	1111	2524	7009	411	651	1177	0.7	0.77	0.86	8.0	11.0	17.3
	Last-30	4014	11206	144382	1164	1810	4999	0.97	1.07	1.22	9.0	12.0	34.0
	Ratio	3.6	4.4	20.6	2.8	2.8	4.2	1.4	1.4	1.4	1.1	1.1	2.0
	t-test	***			***			***			***		
	M-W test	***			***			***			**		
	K-S test	***			***			***			*		
S 南部 (d)	Past-30	1366	2258	5299	492	726	1009	0.67	0.7	0.83	6.8	8.0	11.3
	Last-30	2185	3095	6921	631	824	1329	0.85	0.96	1.16	9.0	11.0	15.0
	Ratio	1.6	1.4	1.3	1.3	1.1	1.3	1.3	1.4	1.4	1.3	1.4	1.3
	t-test				***			***					
	M-W test	***			***			***			***		
	K-S test	***			***			***			***		
E 東部 (e)	Past-30	1911	3412	6809	464	705	1135	0.74	0.79	0.89	10.0	11.5	17.0
	Last-30	2135	2713	7796	474	718	1179	1.62	1.87	2.21	16.0	19.0	27.0
	Ratio	1.1	0.8	1.1	1.0	1.0	1.0	2.2	2.4	2.5	1.6	1.7	1.6
	t-test				**			***			***		
	M-W test							***			***		
	K-S test	*						***			***		

表 1 圖 10b-e 中，各區域極端高溫事件特性第 25、50、75 百分位數在前 (Past 30，1960-1989 年，盒鬚圖為藍色)、後 30 年 (Last 30，1991-2020 年，盒鬚圖為藍色) 之數值及前後其之比值 (Ratio=Last 30/Past 30)。各組資料下方為前、後 30 年差異性比較之 Student t test (t-test)、Mann-Whitney U test (M-W test)、Kolmogorov-Smirnov test (K-S test) 統計檢定結果，***、**、* 分別表示通過 99%、95%、90% 信心度檢定。(來源：中研院環變中心駱世豪博士於本報告產製)



附錄圖 1

以 1990-2014 年作為基準年之 CMIP6 統計降尺度資料之系集平均求得的暖晝門檻值月平均。(來源：中研院環變中心李時雨副研究員提供)

2024 臺灣氣候變遷分析系列報告

暖化趨勢下的臺灣極端高溫與衝擊

發行人 / 陳宏宇

作者 / 許晃雄、王俊寓、王柳臻、吳威德、李欣輯、李思瑩、
李時雨、林子平、林靜君、侯清賢、涂柏安、施意敏、
洪若雅、洪景山、紀佳法、張雅惠、陳正達、陳永明、
陳保中、陳昭安、陳家琦、曾品涵、童裕翔、黃文亭、
楊曜旭、劉曉薇、歐姿辰、蔡至恒、盧韻存、駱世豪、
謝章生、闕帝旺與羅資婷

美術設計 / 陳彥霓

出版機關 / 國家災害防救科技中心

地址 / 新北市新店區北新路三段 200 號 9 樓

電話 / 02-81958600

發行日期 / 2024 年 6 月

共同發行 / (依章節撰寫順序)
交通部中央氣象署
中央研究院環境變遷研究中心
國立臺灣師範大學地球科學系
國家災害防救科技中心
國立成功大學建築學系
國家衛生研究院國家環境醫學研究所
國立高雄科技大學永續漁業發展研究中心
農業部畜產試驗所

國家圖書館出版品預行編目 (CIP) 資料

暖化趨勢下的臺灣極端高溫與衝擊 = Extreme high temperatures and impacts in Taiwan under global warming / 許晃雄, 王俊寓, 王柳臻, 吳威德, 李欣輯, 李思瑩, 李時雨, 林子平, 林靜君, 侯清賢, 涂柏安, 施意敏, 洪若雅, 洪景山, 紀佳法, 張雅惠, 陳正達, 陳永明, 陳保中, 陳昭安, 陳家琦, 曾品涵, 童裕翔, 黃文亭, 楊曜旭, 劉曉薇, 歐姿辰, 蔡至恒, 盧韻存, 駱世豪, 謝章生, 闕帝旺, 羅資婷作. -- 新北市: 國家災害防救科技中心, 2024.06

面; 公分. -- (臺灣氣候變遷分析系列報告. 2024)

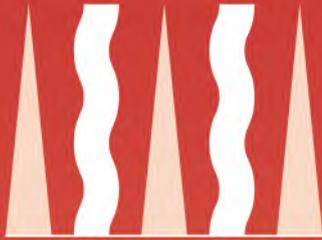
ISBN 978-986-5436-53-7(平裝)

1.CST: 氣候變遷 2.CST: 地球暖化 3.CST: 氣象紀錄

328.8018

113008707

2024 臺灣氣候變遷分析系列報告



暖化趨勢下的臺灣極端高溫與衝擊

Extreme High Temperatures and Impacts in Taiwan under Global Warming
Taiwan Climate Change Analysis Series Report 2024

彙編

共同發行

