

NCDR 112-T11

畜牧領域應用氣候變遷推估資料之探討
Discussion on the application of climate change
data in the livestock



國家災害防救科技中心

National Science and Technology Center
for Disaster Reduction

國家災害防救科技中心

中華民國 113 年 01 月

NCDR 112-T11

畜牧領域應用氣候變遷推估資料之探討
Discussion on the application of climate change
data in the livestock

關帝旺、施意敏、李欣輯、涂柏安、陳家頡



國家災害防救科技中心
中華民國 113 年 01 月

中文摘要

臺灣因地理位置特殊，包含熱帶氣候及亞熱帶氣候，且四季長年多雨，尤以夏季多有颱風豪雨，並且臺灣夏季溫度平均高達 30°C 以上，甚至受氣候變遷影響下，近年來曾出現超過 40°C 高溫紀錄，且臺灣已不僅於夏季(5 月至 7 月)高溫，甚至秋季(8 月至 10 月)溫度亦逐漸上升趨勢，畜牧產業受到高溫、高濕的影響下，動物容易形成熱緊迫(Heat Stress)，在未來逐漸暖化情形下，畜牧產業持續受到高溫衝擊及傷害。

本報告與農業部畜產試驗所合作研究，本報告使用氣象測站觀測資料、臺灣歷史氣候重建資料(TReAD)、統計降尺度、動力降尺度等資料進行數據測試檢定，並探討臺灣乳牛及乳產量於未來高溫環境下，所受到的熱傷害及乳產量下降之情形。經氣候資料測試檢定後，本報告採用動力降尺度作為數據參數之依據，並建立全臺溫溼度指數(temperature-humidity index, THI)，並利用相關乳損失量模型計算及繪製成果。全球暖化程度情境下，臺灣平原地區的溫溼度指數將會超過門檻值(THI 72)，導致大量乳牛受到熱緊迫危害，且依乳損失量模型預估，全球暖化程度 4°C 情境下，乳產量平均減少約 20%~30%。

關鍵字：氣候變遷、THI、乳產量、TCCIP

ABSTRACT

Taiwan has a special geographical location, with tropical and subtropical climates, and it rains all year round, especially in summer, where there are frequent typhoons and heavy rains. The average summer temperature in Taiwan is over 30°C, and even affected by climate change, it has exceeded 40°C in recent years. High temperature records have been recorded, and Taiwan has not only experienced high temperatures in summer (May to July), but also gradually increased temperatures in autumn (August to October). Under the influence of high temperature and high humidity in the livestock industry, animals are prone to heat stress (Heat Stress), under the gradual warming in the future, the livestock industry will continue to be impacted and harmed by high temperatures.

This study focuses on the thermal damage and decrease in milk production of dairy cows and milk production in future high-temperature environments. This study uses observational data, Taiwan's historical climate reconstruction data (TReAD), statistical downscaling, and dynamic downscaling data for testing and validation. It explores the potential heat stress and decrease in milk production of Taiwanese dairy cows under future high-temperature conditions. After testing and validating the climate data, the report adopts dynamic downscaling as the basis for data parameters, establishing a Temperature-Humidity Index (THI) for Taiwan and utilizing a related milk loss model to calculate and present the results.

Under the scenario of global warming, the Temperature-Humidity Index (THI) in the plains of Taiwan is projected to exceed the threshold value of 72, leading to a significant number of dairy cows experiencing heat stress. According to the milk loss model, in a scenario where global warming reaches 4°C, the average milk production is estimated to decrease by approximately 20% to 30%.

Keywords: Climate Change, THI, Milk production, TCCIP



目錄

第一章 前言.....	1
第二章 氣象資料及文獻回顧.....	4
2.1 氣象站觀測資料.....	6
2.2 臺灣歷史氣候重建資料.....	10
2.3 統計降尺度資料.....	14
2.4 動力降尺度資料.....	18
2.5 高溫及熱緊迫關係.....	19
2.6 溫溼度指數.....	21
第三章 研究方法及步驟.....	23
3.1 氣候變遷下畜牧領域研究流程.....	23
3.2 氣候變遷畜牧領域危害指標選定及計算方式.....	24
3.3 氣候變遷下乳牛之乳產量損失衝擊評估.....	25
3.4 動力降尺度資料應用.....	26
第四章 全球暖化程度下之乳牛乳產量危害及衝擊.....	32
4.1 全球暖化程度下之 THI 變化.....	32
4.2 全球暖化程度下之乳量損失變化.....	38
第五章 結論與建議.....	43
5.1 結論.....	43

5.2 建議44



圖目錄

圖 1 氣候變遷影響下乳產量危害、衝擊之研究流程圖	5
圖 2 全台灣氣象測站分布數量	7
圖 3 使用氣象測站之參數-以屏東縣竹田站(C0R650)為例.....	7
圖 4 溫度及相對溼度迴歸分析，以柳營站_C0X320 為例.....	9
圖 5 溫度及相對溼度迴歸分析，以佳里站_C0X080 為例.....	9
圖 6 2020 年屏東縣乳牛乳量損失預測圖(氣象測站)	10
圖 7 TReAD_日資料平均溫度_CSV 檔案內容.....	11
圖 8 2020 年全臺乳牛乳量損失預測圖(TReAD).....	12
圖 9 2020 年七月屏東縣乳牛乳量損失預測圖(氣象測站)	13
圖 10 2020 年七月屏東縣乳牛乳量損失預測圖(TReAD).....	14
圖 11 以一天 24 小時探討 THI Load 為畜禽所受到熱承載量	22
圖 12 畜產試驗所平均每月牛奶產量紀錄	24
圖 13 依 HiRAM 資料選取所需參數資料(1995 年 9 月)	27
圖 14 依據公式計算 THI 及乳損量(1995 年 9 月).....	28
圖 15 HiRAM 之 2010 年每月乳損量	28
圖 16 HiRAM 之 2050 年每月乳損量	29
圖 17 HiRAM 基期之 THI 變化圖.....	33
圖 18 HiRAM 2 度 C 暖化情境下之 THI 變化圖	34

圖 19 HiRAM 4 度 C 暖化情境下之 THI 變化圖	35
圖 20 各升溫情境下之 THI 變化圖-以彰化縣為例	37
圖 21 HiRAM 基期之全臺乳量損失圖	39
圖 22 HiRAM 2 度 C 暖化之全臺乳量損失圖	40
圖 23 HiRAM 4 度 C 暖化之全臺乳量損失圖	41



表目錄

表 1 排放路徑 RCP 2.6 之模式及暖化情境對應年份.....	15
表 2 排放路徑 RCP 8.5 之模式及暖化情境對應年份.....	15
表 3 統計降尺度最高溫之相對溼度推估-以萬丹為例(RCP 8.5).....	17
表 4 統計降尺度最低溫之相對溼度推估-以萬丹為例(RCP 8.5).....	17
表 5 統計降尺度 2050 年 THI 推估-以萬丹為例(氣象測站).....	18
表 6 HiRAM 增溫情境年份.....	19
表 7 高溫熱緊迫對畜禽及畜產品之影響.....	20
表 8 THI 公式文獻蒐集.....	22
表 9 四個代表性區域縣市之 THI 變化率.....	37
表 10 2°C 及 4°C 暖化情境下各代表區乳量損失量變化率.....	42

第一章 前言

聯合國 IPCC 氣候變遷報告指出，1850-1900 年以來所排放的溫室氣體，已經造成全球升溫約 1°C ，未來全球很可能在 2040 年前升溫達 1.5°C 甚至超過 1.5°C 。國家科學委員會(以下簡稱國科會)「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，簡稱 TCCIP)」亦指出未來臺灣夏季日數會越來越長，冬季日數將縮短，甚至 21 世紀末將沒有冬季存在。另外，聯合國糧食與農業組織(Food and Agricultural Organisation,FAO)的報告(2013 年)，全球畜牧業每年約排放 7.1 兆噸的二氧化碳，大約是人為排放溫室氣體的 14.5%，亦是全球溫室氣體主要的排放源之一。

過去數十年全球人類生活水準的顯著提升，造成飲食消費習慣改變，造成肉類製品需求以爆炸量需求增加，致使畜牧業為符合全球經濟需求，不斷開墾土地及大量飼養，不僅造成綠地的破壞，甚至種植飼料使用大量肥料，產生更多一氧化二氮(N_2O)，以及禽畜的大量排泄物，產生甲烷(CH_4)，造成環境嚴重汙染及溫度升溫更甚。然畜牧業的產量皆受到高溫、高濕的環境影響，過高的溫度會造成雞不生蛋、乳牛乳產量下降、豬食慾不振長不大等產量問題，反而再次進入惡性循環。故本報告彙整國內外畜牧衝擊減災調適操作規劃及相關研究成

果，藉此了解各單位及學者之氣候變遷下畜牧產業衝擊評估概況。

本研究初次與國內畜產試驗所合作，由於國內針對氣候變遷下之畜牧產業研究較為匱乏，過去討論議題較為基因改造、病蟲害防治等議題來維持畜牧產量，惟近年來已受到氣候變遷影響下，基因改造及病蟲害防治等作為，無法快速調適氣候變遷所造成之產量缺口，故本研究初步以氣候變遷影響之議題，討論畜牧產業之危害、衝擊及調適作為之探討。

本研究於第二章說明畜牧領域之研究方法與步驟，其相關內容將敘述畜牧領域所採用之危害指標計算及乳產損失量公式。本研究於研究前期資料分析利用氣象署之氣象測站，以確認相關危害指標之趨勢及正確性，而後為因應全球暖化程度(Global Warming Levels, GWLs)，採用國科會 TCCIP 提供臺灣歷史氣候重建資料(TReAD)及動力降尺度資料(HIRAM)，並選取溫度及相對溼度之參數，進行危害及衝擊指標資料分析，其相關內容將於第三章資料說明進行詳述，另包含本研究採用氣候推估資料未來暖化程度分析等，第四章為動力降尺度資料應用於畜牧資源之成果探討，以熱緊迫危害指數對臺灣乳牛產業生產效率的影響，並探討乳牛管理之各項調適相關策略對經濟產能之影響，研擬調適作為以降低氣候變遷對乳牛產業的衝擊。第五章為結果與討論，希冀初步研究成果可做為畜牧領域調適之應用，並提供決

策者於決策上之參考依據，以利增加畜牧產業之經濟效益及福祉。



第二章 氣象資料之應用說明

本研究將以氣候變遷下之乳產量作為研究項目，依據文獻採用熱緊迫相關危害指標計算式，選取溫度及相對溼度進行演算，初步以氣象測站觀測資料進行參數顯著性檢視，並利用 TReAD 與乳產量兩者關係一致性檢定；本研究為配合全球暖化程度情境資料分析，採用國科會 TCCIP 之統計降尺度、動力降尺度兩筆資料，其中，統計降尺度具有 99 個全球氣候模式(Global Climate Model, GCM)，原始資料原自相對低解析度的氣候模式，但資料長度為連續時間且資料產製速度較快，動力降尺度採用的 2 個高解析度全球模式，資料時間為區塊性(非連續)，其資料時間尺度可達時資料；經資料特性說明統計降尺度之氣象參數只有溫度、降雨量，利用前述氣象測站觀測資料所建置之溫度-相對溼度迴歸式，可推求相對溼度，推算 RCP 2.6 及 RCP 8.5 情境下之 THI 變化趨勢，而動力降尺度具有時資料特性且包含多種不同氣象變數(颱風雨量、風速、輻射、相對溼度、溫度...)，可用每小時溫度、相對溼度資料計算出 THI，整體相關研究流程步驟如圖 1 所示。



圖 1 氣象資料及氣候變遷推估資料應用流程圖

2.1 氣象站觀測資料

本研究之前期研究採氣象測站資料進行危害及衝擊指標計算，蒐整全國氣象站(圖 2)之測站日資料，並且挑選測站資料中之日最高溫度、日最低溫度，日平均溫度、日平均相對溼度等參數，詳如圖 3 所示。由於中央氣象署部分自動測站資料監測資料會有遺漏或不合理值，本研究依據「中央氣象署產品說明文件-溫度網格化資料生產履歷」說明進行數據資料補遺修正：

1. 異常值剔除：測站因周遭環境現況或當下機械異常，常有觀測值紀錄發生偏差，其合理值範圍(-20°C至 50°C)，若高於或低於正常值域，將予以剔除。
2. 資料補遺：針對前後兩小時內具有觀測紀錄值之測站，以遺漏(缺)值前後兩小時之溫度值與其對應之氣候值的差值平均值加上缺值時間點的氣候值進行補遺；若長時間缺乏觀測值不採用網格化補遺，僅予以剔除。

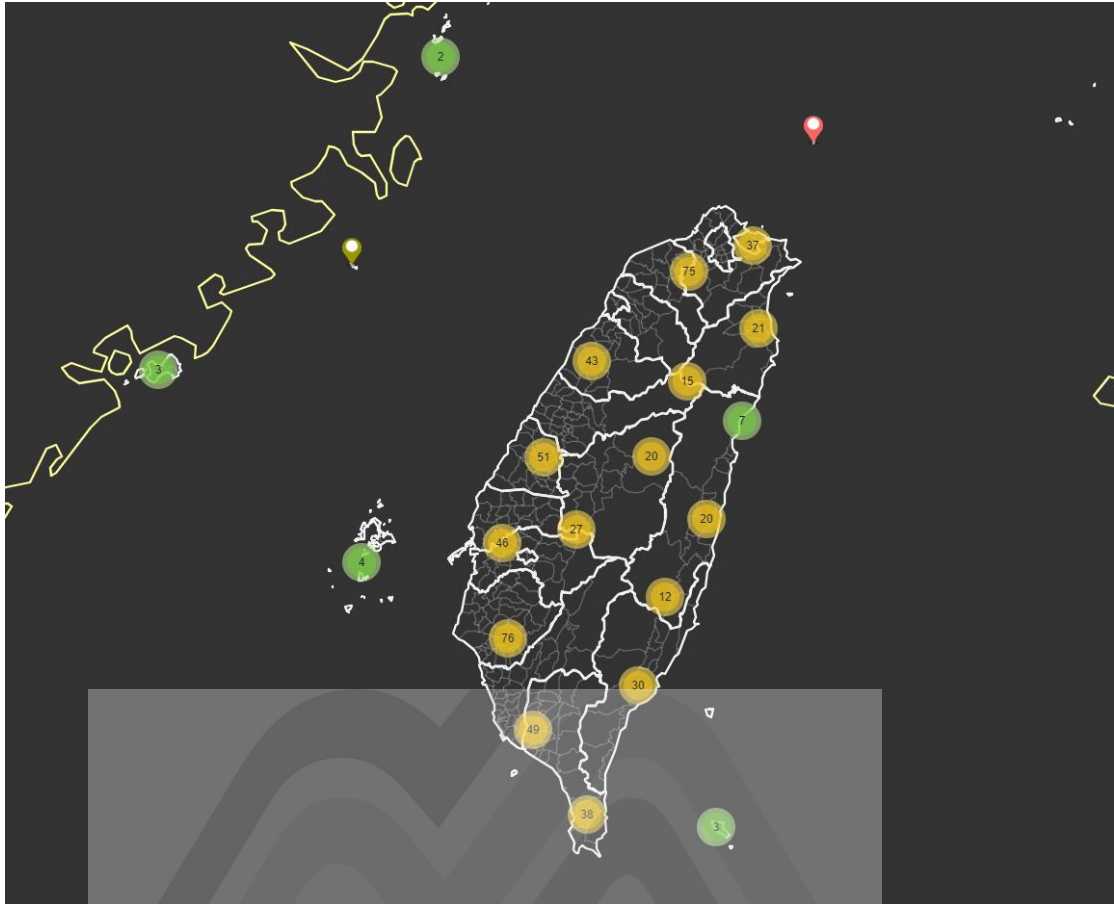


圖 2 全台灣氣象測站分布數量

	A	B	C	J	K	M	P	Q
1	COR650-2018-08.csv	月	觀測時間(氣溫(°C)	最高氣溫(°C)	最低氣溫(°C)	相對溼度(最小相對溼度(%))		
2	COR650-2018-08.csv	08.csv	1
3	COR650-2018-08.csv	08.csv	2 /		31.7	25.8 /		67
4	COR650-2018-08.csv	08.csv	3	28.9	33.3	26	84	56
5	COR650-2018-08.csv	08.csv	4	27.3	34.4	22.4	86	53
6	COR650-2018-08.csv	08.csv	5	27.2	34.6	23.4	86	52
7	COR650-2018-08.csv	08.csv	6	27.9	34.8	24.1	80	46
8	COR650-2018-08.csv	08.csv	7	28.4	33.7	25.7	84	54
9	COR650-2018-08.csv	08.csv	8	28.3	34.5	25.7	83	53
10	COR650-2018-08.csv	08.csv	9	28.6	33.8	25.1	80	52
11	COR650-2018-08.csv	08.csv	10	28.1	33.2	25.3	87	57
12	COR650-2018-08.csv	08.csv	11	27.8	33.9	24.9	88	56
13	COR650-2018-08.csv	08.csv	12	29.2	34.7	24.6	77	48
14	COR650-2018-08.csv	08.csv	13	26.4	29.6	24.7	96	81
15	COR650-2018-08.csv	08.csv	14	26.8	32.4	24.7	91	64
16	COR650-2018-08.csv	08.csv	15	26.2	28.6	25.4	96	81
17	COR650-2018-08.csv	08.csv	16	27.8	29.3	26.2	87	82
18	COR650-2018-08.csv	08.csv	17	28.3	31.5	24.8	86	64
19	COR650-2018-08.csv	08.csv	18	27	31.6	25.2	92	66
20	COR650-2018-08.csv	08.csv	19	27.2	30.2	25.2	90	72
21	COR650-2018-08.csv	08.csv	20	27.8	31.5	24.9	89	67
22	COR650-2018-08.csv	08.csv	21	28.2	31.8	25.6	84	65

圖 3 使用氣象測站之參數-以屏東縣竹田站(COR650)為例

依據畜產試驗所及前人研究過往使用氣象測站觀測資料之經驗，多採用日均溫度與日平均相對溼度之參數進行 THI 演算，利用兩參數可以快速求得當日 THI 情形，並節省時間篩選每天每小時資料，但氣象資料已經過均勻化處理，較難顯示當日乳牛是否受到熱緊迫或受熱影響時段區間，故本研究依據公式(1)所需要氣象測站每小時之溫度、相對溼度資料進行探討，兩者參數利用線性迴歸討論兩者是否有顯著性，並利用線性迴歸式探討是兩者相關性，以及未來是否可行利用溫度推求相對溼度之方法。本次研究以農場鄰近之氣象測站進行檢定，挑選農場密集度較高之區域進行資料測試，故本次選定臺南市柳營氣象自動測站(C0X320)及佳里氣象自動測站(C0X080)，經數據分析兩者之相關係數為 0.0404、0.037，P-值皆小於 0.05，仍達 1%顯著水準如圖 4、圖 5 所示。

由此可知，溫度及相對溼度參數具有顯著性，故本研究初步利用氣象測站資料建立乳損失量資料，並以 2020 年屏東縣為例進行運算，利用屏東縣內各氣象測站 12 個月之氣象資料計算乳損失量，詳如圖 6 所示。

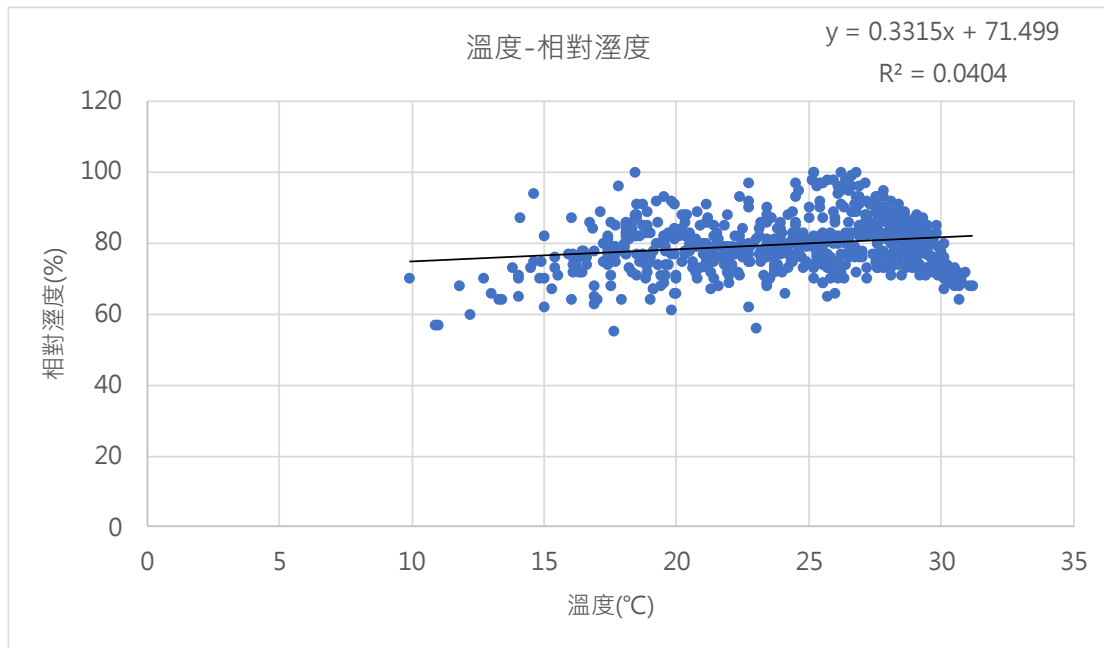


圖 4 溫度及相對溼度迴歸分析，以柳營站_COX320 為例

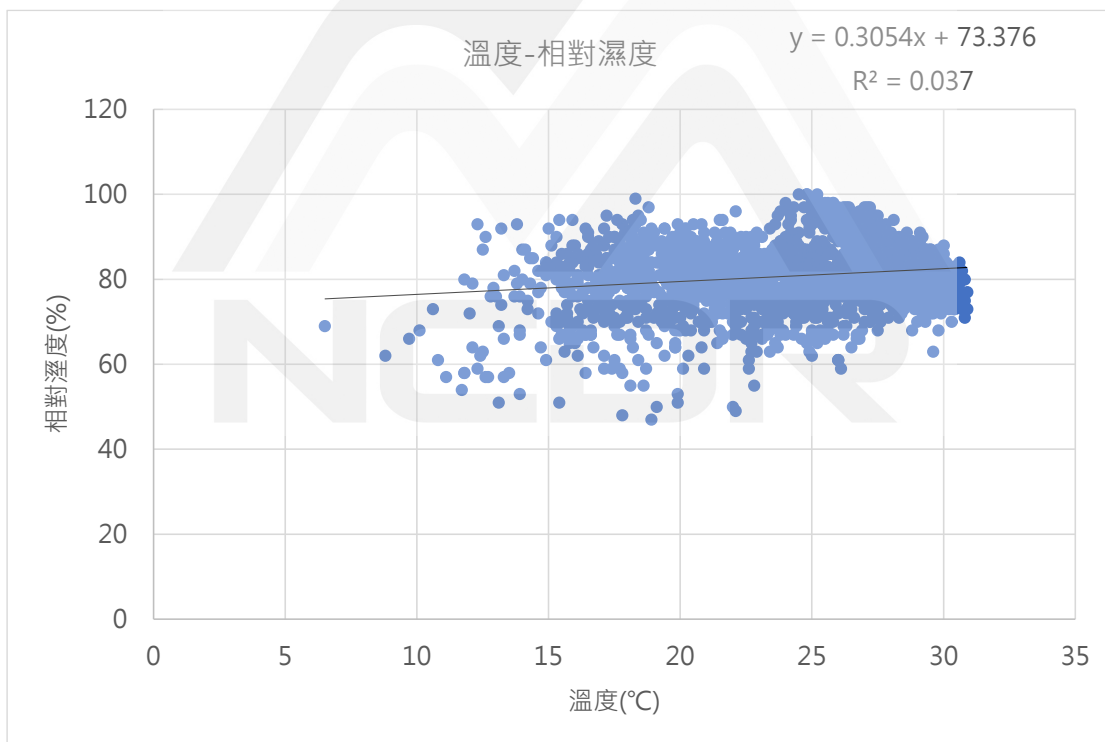


圖 5 溫度及相對溼度迴歸分析，以佳里站_COX080 為例

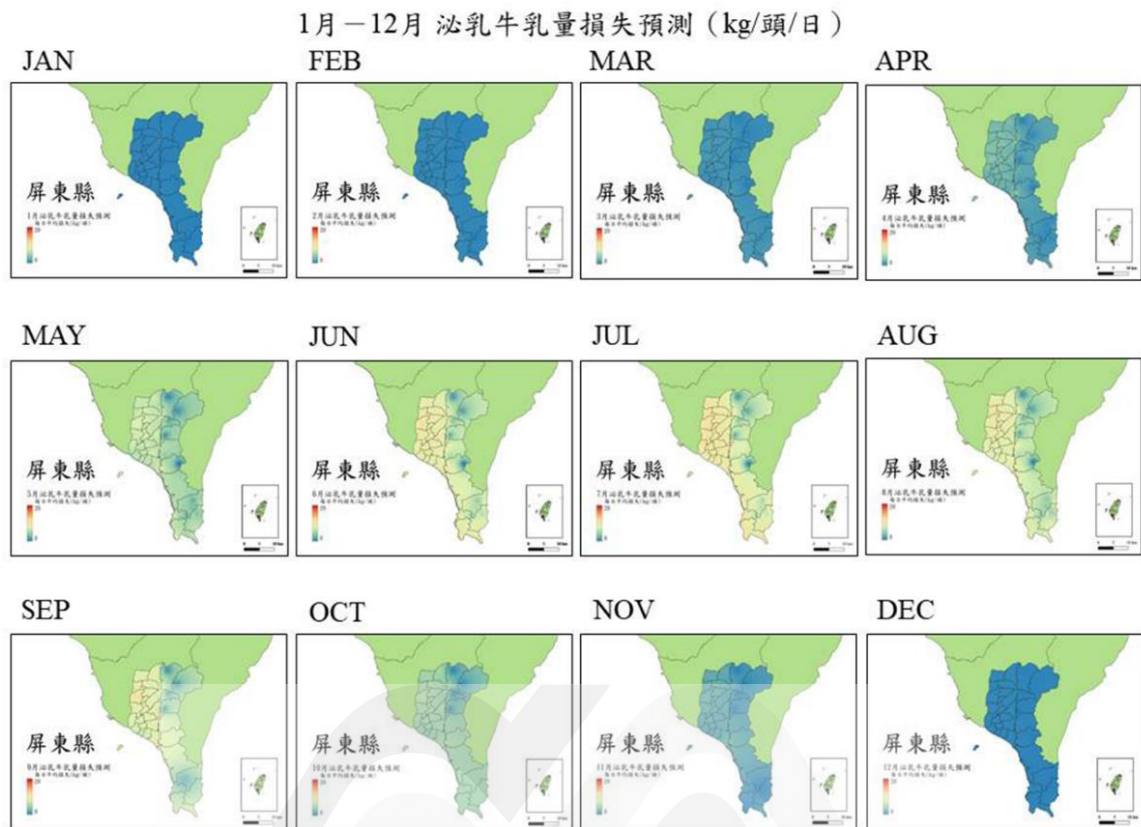


圖 6 2020 年屏東縣乳牛乳量損失推估結果 (氣象測站)

2.2 臺灣歷史氣候重建資料

由於前述採用氣象測站資料進行資料測試分析，確認參數之間相關性，惟臺灣畜牧場其分布較廣，且部分位於偏僻鄉鎮地區，故氣象測站設立位置與畜牧場常常相隔數十公里，倘若採用氣象資料據有不確定性，且部分畜牧場於山坡地或山地，採用平地氣象測站數據較不妥適。經研究團隊討論後，由國科會臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台計畫 (Taiwan Climate Change Projection Information and Adaptation Knowledge Platform, TCCIP) 提供臺灣歷史氣候重建資料，其資料特性係為提供一些沒有氣象觀測站的地方，或者觀測時沒有的

氣象資料變數，都能透過重分析資料獲得過去的天氣資料，重建缺失的歷史資料(TCCIP)。本資料提供 5 公里、2 公里資料，本研究採用 5 公里日資料，其資料格式內容如圖 7 所示，內容第一列為時間(YYYY/MM/DD)，時間由左至右往後遞增，另由左至右順序之最左邊兩欄為經度及緯度，其後為不同網格之參數變量資料。

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1	LON	LAT	19800101	19800102	19800103	19800104	19800105	19800106	19800107	19800108	19800109	19800110	19800111	19800112	19800113
2	120.55	23.2	17.35	17.97	17.98	16.62	14	14.98	14.38	14.83	15.93	13.98	15.71	17.74	15.8
3	120.6	23.2	17.55	18.16	18.15	17.34	14.47	15.25	15.41	15.19	16.45	14.1	15.87	17.95	16.56
4	120.5	23.25	16.2	17.02	16.94	14.95	12.67	13.79	12.86	13.81	14.06	13	14.71	16.5	14.42
5	120.55	23.25	18.17	18.85	18.82	17.55	14.85	15.86	15.51	15.83	16.76	14.79	16.47	18.44	16.92
6	120.6	23.25	15.75	16.41	16.38	15.61	13	13.32	13.56	13.66	14.55	12.35	14.08	16.17	15.13
7	120.65	23.25	16.15	16.72	16.74	16.06	13.17	13.67	14.12	14.13	14.96	12.56	14.45	16.69	15.56
8	120.15	23.3	18.6	18.99	19.34	17.64	15.64	17.11	15.36	16.69	16.31	16.58	18.05	18.37	16.34
9	120.2	23.3	18.19	18.44	18.73	17.32	14.96	16.49	15.03	16.12	15.79	15.4	17.32	17.9	16.06
10	120.25	23.3	17.85	18.15	18.3	17.11	13.85	15.7	14.43	15.36	14.93	13.73	16.63	17.51	15.67
11	120.5	23.3	15.96	16.75	16.64	14.72	12.48	13.63	12.8	13.58	13.72	13.19	14.55	16.27	13.96
12	120.55	23.3	16.8	17.36	17.4	16.2	13.71	14.32	14.47	14.39	14.98	13.53	15.19	17.16	15.54
13	120.6	23.3	18.45	19.05	19.02	17.88	15.42	15.91	15.98	15.81	16.67	15.11	16.78	18.61	17.14
14	120.65	23.3	17.01	17.65	17.63	16.85	14.13	14.52	14.93	14.72	15.7	13.57	15.26	17.4	16.36
15	120.7	23.3	13.76	14.25	14.16	13.66	10.77	11.13	11.93	11.94	12.5	10.2	11.83	14	12.94
16	120.75	23.3	11.93	12.27	12.16	11.41	8.7	8.97	10.21	10.89	10.5	8.08	9.47	11.3	10.33
17	120.1	23.35	18.74	19.16	19.55	17.7	15.94	17.26	15.51	16.86	16.5	16.98	18.34	18.47	16.45
18	120.15	23.35	18.64	19.03	19.37	17.55	15.46	16.99	15.16	16.52	16.07	16.53	17.99	18.33	16.18
19	120.2	23.35	18.11	18.28	18.64	17.17	14.76	16.34	14.83	15.96	15.53	14.82	16.84	17.73	15.86
20	120.25	23.35	17.93	18.21	18.39	17.05	13.91	15.81	14.48	15.32	14.94	13.7	16.73	17.72	15.65
21	120.3	23.35	18.48	18.91	18.78	17.21	14.39	16.05	14.69	15.63	15.2	14.68	17.15	18.17	15.69
22	120.5	23.35	17.05	17.91	17.58	15.58	12.4	14.24	13.04	14.52	13.34	14.06	15.55	16.43	13.59
23	120.55	23.35	15.06	15.73	15.68	14.08	11.73	12.14	11.92	12.74	12.36	11.93	13.34	15.11	12.94
24	120.6	23.35	15.07	15.8	15.88	14.83	12.1	13.12	13.32	13.19	13.48	11.96	13.61	15.79	14.31
25	120.65	23.35	15.32	15.99	15.96	15.17	12.31	12.97	13.34	13.15	14.07	11.9	13.63	15.84	14.6
26	120.7	23.35	13.59	14.19	14.11	13.55	10.71	11.15	11.94	12.28	12.64	10.19	11.89	14.11	12.94
27	120.75	23.35	11.08	11.38	11.22	10.52	7.94	8.35	9.8	11.2	9.45	7.37	8.72	10.38	9.46
28	120.8	23.35	12.35	12.69	12.61	11.59	9.18	9.29	10.4	11.79	10.09	8.3	9.37	11	9.91
29	120.85	23.35	9.5	9.61	9.64	8.31	6.12	6.17	6.9	8.49	6.6	5.11	5.98	7.27	6.34

圖 7 TReAD_日資料平均溫度_CSV 檔案內容

由於多數氣象自動測站資料記錄不足 10 年，甚至花東地區僅有 1-3 年資料，且自動測站數據缺少人工校正，並常發生長時間缺漏氣象資料，數據較不齊全，故較難預測乳損失量。

臺灣部分農場的位置與氣象測站的相距甚遠，甚至氣象測站位於山區或臨海區，其天氣與平原區的農場皆有差異，故本計畫採用國科會 TCCIP 提供臺灣歷史氣候重建資料，其資料以測站資料及鄰近測

站資料進行內插求得參數，並進行網格化產製全臺網格數據。

依據前人研究指出相對溼度對於未來暖化程度上較難準確預測，因此相對溼度恆定的假設避免不確定性來源，但仍考慮到溫暖空氣含水能力的增加，且相對溼度影響溫溼度指數較小(Guillaume Mauger et al.,2014)。由於畜產試驗所乳產量資料以”月”為單位進行統計，然 TReAD 提供日高、低溫度及日平均相對溼度， THI_{max} 、 THI_{min} 都採相同的日平均相對溼度計算，將每個月之每日 THI 進行算術平均求得 THI 最大值，並以乳損量公式計算(乳損公式詳第三章)，成果詳如圖 8 所示。

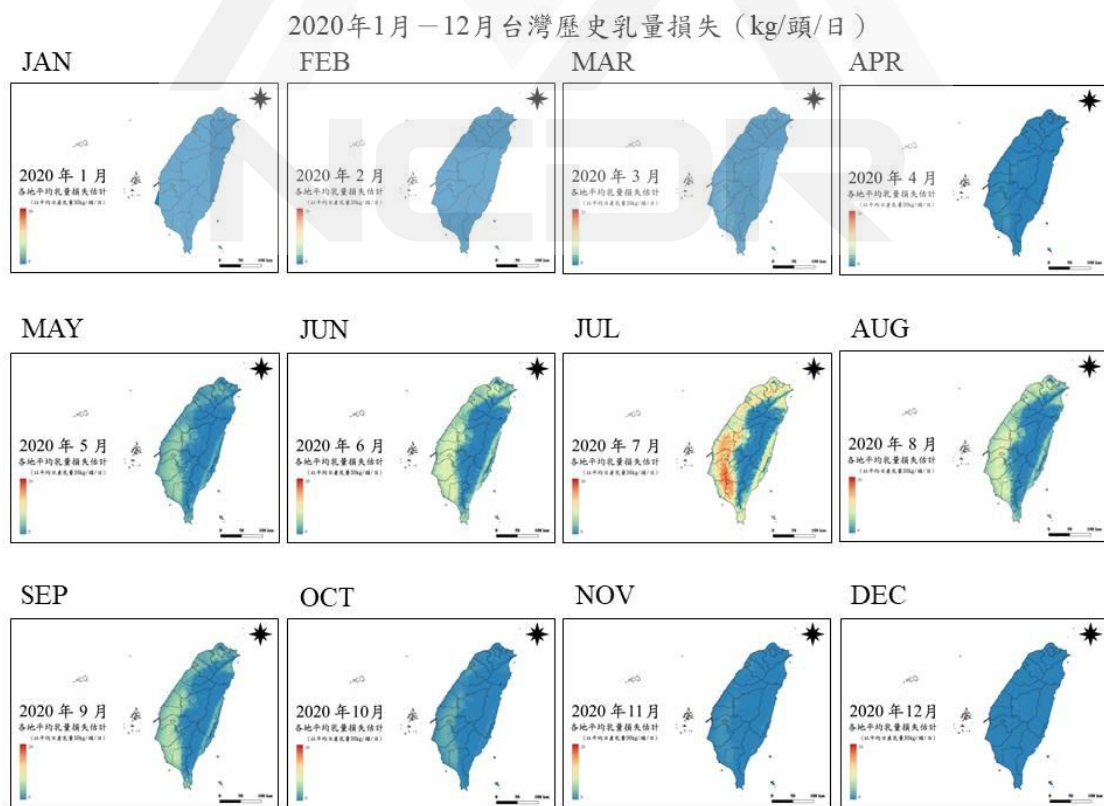


圖 8 2020 年全臺乳牛乳量損失推估結果(TReAD)

由圖 9、圖 10 兩筆乳損失量預測圖可發現屏東縣右側山區及屏東縣左側平原區，其乳損失趨勢是一致的，但明顯不同差異係為損失量的變化，由於圖 9 是採各氣象測站間內插所得，故相較於屏東縣邊緣地區較無氣象測站，容易使得數值失真，如屏東縣東北方區域，該地區為高山區域亦無氣象測站，其溫度相較於低海拔地區偏低，其山區發生乳損情況較不合理。因此就應用的結果來說，在氣象測站不足的地區，利用臺灣歷史氣候重建資料來推估乳損量的作法，在一定程度上可減少監測數據不足的問題。

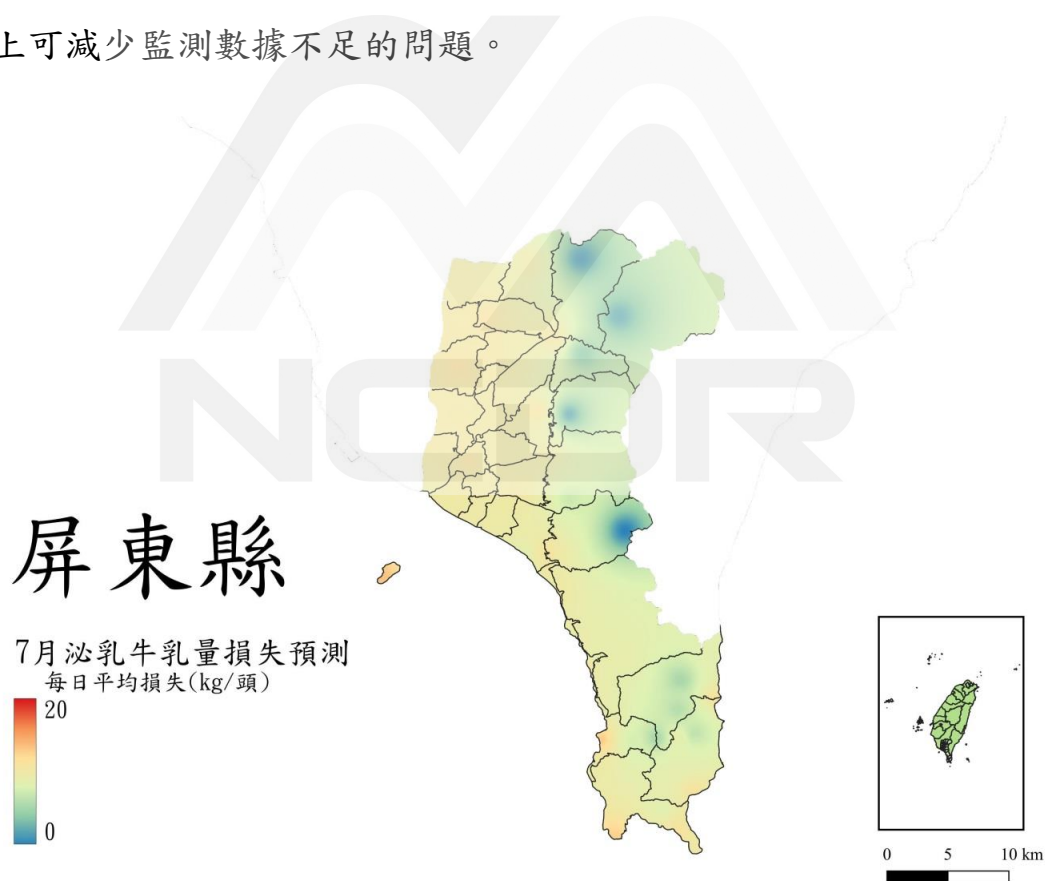


圖 9 2020 年七月屏東縣乳牛乳量損失推估結果(氣象測站)

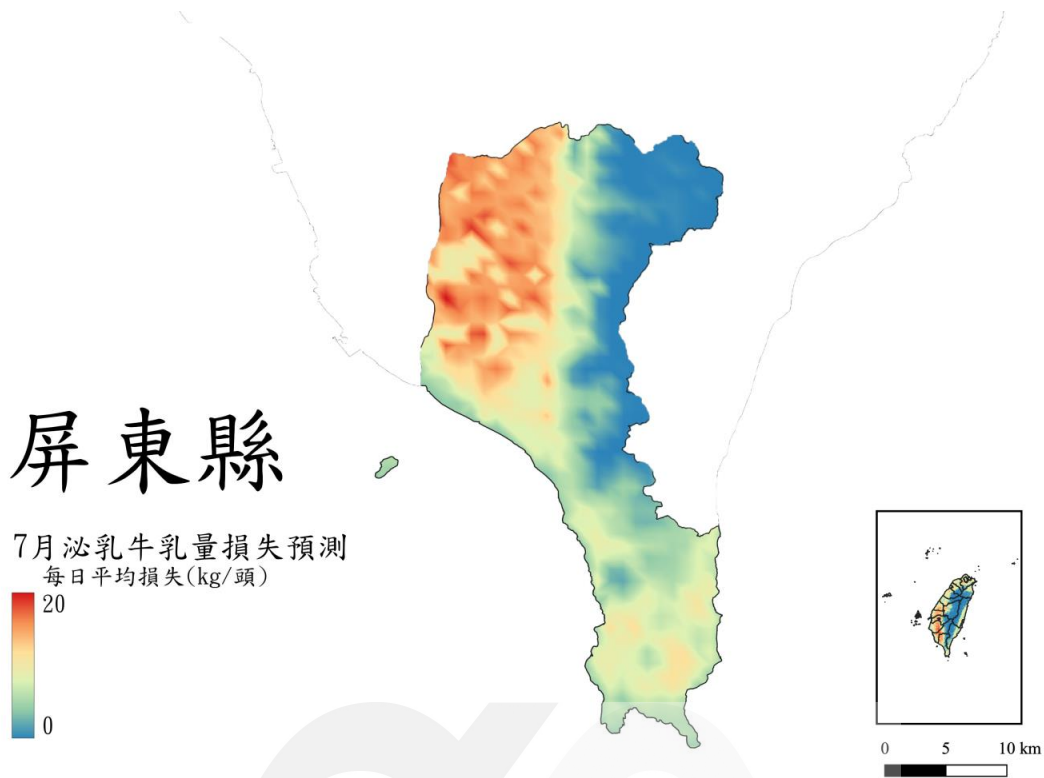


圖 10 2020 年七月屏東縣乳牛乳量損失推估結果(TReAD)

2.3 統計降尺度資料

本研究為符合全球暖化程度情境，其情境採用聯合國政府間氣候變遷專門委員會(Intergovernmental Panel on Climate Change，以下簡稱 IPCC)之第五次評估報告(The 5th Assessment Report，以下簡稱 AR5)所提出代表性濃度途徑(Representative Concentration Pathways,RCP)之情境。本研究採用 RCP 2.6 及 RCP 8.5 兩種排放路徑，以 RCP 2.6 而言，是相對較低的溫室氣體排放情境，以較嚴苛的排放條件，壓制全球暖化程度；另以 RCP8.5 探討未來溫室氣體排放失控情形下，氣候變遷對臺灣畜牧領域相關產業恐面臨更嚴重之衝擊程度及範圍。兩種

排放路徑之模式及數量詳表 1、表 2 所示。

表 1 排放路徑 RCP 2.6 之模式及暖化情境對應年份

排放路徑	GCM/ESM	1.5°C	2°C
RCP 2.6	bcc-csm1-1-m	2031	-
	BNU-ESM	2025	-
	CanESM2	2021	2043
	CCSM4	2041	-
	CESM1-CAM5	2027	2057
	CNRM-CM5	2044	-
	CSIRO-Mk3-6-0	2031	2082
	GFDL-CM3	2016	2038
	HadGEM2-AO	2046	-
	HadGEM2-ES	2019	2040
	IPSL-CM5A-LR	2029	-
	IPSL-CM5A-MR	2030	-
	MIROC5	2041	-
	MIROC-ESM	2026	2048
	MIROC-ESM-CHEM	2020	2037
	MPI-ESM-LR	2040	-
MRI-CGCM3	2071	-	
NorESM1-M	2072	-	

資料來源：AR5 統計降尺度資料說明文件,TCCIP(2023)

表 2 排放路徑 RCP 8.5 之模式及暖化情境對應年份

排放路徑	GCM/ESM	1.5°C	2°C	4°C
RCP 8.5	ACCESS1-0	2026	2038	2079
	ACCESS1-3	2024	2037	2077
	bcc-csm1-1	2032	2046	-
	bcc-csm1-1-m	2025	2043	-
	BNU-ESM	2022	2034	2073
	CanESM2	2018	2031	2071
	CCSM4	2026	2041	2086
	CESM1-BGC	2027	2042	-
	CESM1-CAM5	2024	2037	2076
	CMCC-CESM	2031	2042	2082
	CMCC-CM	2029	2041	2078
	CNRM-CM5	2031	2045	-
	CSIRO-Mk3-6-0	2031	2042	2081
	EC-EARTH	2029	2044	-
	FGOALS-g2	2030	2046	-
	GFDL-CM3	2017	2030	2068
	GFDL-ESM2G	2039	2056	-
	GFDL-ESM2M	2037	2053	-
	HadGEM2-AO	2032	2044	2079

排放路徑	GCM/ESM	1.5°C	2°C	4°C
	HadGEM2-CC	2021	2032	2068
	HadGEM2-ES	2019	2031	2069
	inmcm4	2042	2057	-
	IPSL-CM5A-LR	2024	2036	2073
	IPSL-CM5A-MR	2023	2036	2071
	IPSL-CM5B-LR	2031	2045	-
	MIROC5	2030	2046	-
	MIROC-ESM	2023	2033	2072
	MIROC-ESM-CHEM	2020	2032	2068
	MPI-ESM-LR	2027	2044	-
	MPI-ESM-MR	2030	2045	-
	MRI-CGCM3	2035	2048	-
	MRI-ESM1	2035	2048	-
	NorESM1-M	2032	2047	-

資料來源：AR5 統計降尺度資料說明文件,TCCIP(2023)

本研究於 2022 年 5 月開始進行推估未來暖化情境下乳量損失情形，藉以分析氣候變遷對酪農業造成的衝擊程度，由於氣象測站與 TReAD 不含未來情境推估資料因而無法使用。因採用國科會 TCCIP 提供未來氣候推估資料的統計降尺度進行分析。

IPCC AR5 使用的全球氣候模式(Global Climate Model, GCM)以網格點的方式劃分(網格大小約 200 公里至 300 公里)全球區域時，臺灣由於面積較小，以大網格劃分僅能佔 2 格至 3 格，臺灣地形錯縱複雜，有高山、平原、台地、盆地等，難以用 2~3 個網格代表全臺氣候，故使用統計降尺度方法以統計學方式將較低解析度氣候模式資料轉化為高解析度資料(國科會，2021)

由於統計降尺度沒有相對溼度推估資料，故利用 3.4.1 一節氣象測站建立之溫度-相對溼度回歸公式進行相對溼度計算，並以 RCP

2.6、RCP 8.5 之 2022 年與 2050 年前後十年進行模式趨勢變化量計算，計算出最大、小 THI 值之變化量呈現，詳如表 3、表 4 所示，利用推估資料求得 2022 及 2050 前後十年進行模式平均的差異值之後(即改變量)，再加疊依據過去氣象站所估算的之 THI (現況真值)，推求出未來 2050 年 THI，詳如表 5 所示。

本研究利用與畜產試驗所合作之乳牛業者所在地及對應統計降尺度網格，進行相對溼度及 THI 推估計算，並以乳牛業者鄰近之氣象測站作為現況數據。唯經檢視 2050 年推估成果(表 5)後，發現由於氣象測站回歸公式，其相對溼度變化皆不明顯，且採月平均資料後，數據呈現均勻化後，導致 THI 的變動幅度不大，主要原因在於統計降尺度沒有相對溼度推估資料，因此較無法反應此變數之改變量，經討論應更換另一組資料進行推估。

表 3 統計降尺度最高溫之相對溼度推估-以萬丹為例(RCP 8.5)

年份	項目	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
2017-2027	最高溫	25.7	26.5	28.7	31.2	32.9	33.6	34.0	33.5	33.1	31.9	29.7	26.9
2017-2027	最高溫相對溼度	76.3	76.4	76.7	77.0	77.3	77.4	77.4	77.3	77.3	77.1	76.8	76.5
2017-2027	THI	75.6	76.9	80.3	84.3	87.1	88.1	88.8	88.0	87.4	85.4	82.0	77.5
2045-2055	最高溫	26.5	27.5	29.7	32.1	34.0	34.5	34.9	34.4	34.1	32.9	30.6	27.8
2045-2055	最高溫相對溼度	76.4	76.5	76.8	77.2	77.4	77.5	77.5	77.5	77.4	77.3	77.0	76.6
2045-2055	THI	76.9	78.4	81.9	85.8	88.8	89.6	90.2	89.4	89.1	87.0	83.3	78.9
	Δ THI	1.32	1.58	1.66	1.55	1.76	1.57	1.45	1.51	1.69	1.68	1.46	1.51

表 4 統計降尺度最低溫之相對溼度推估-以萬丹為例(RCP 8.5)

年份	項目	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
2017-2027	最低溫	14.4	15.4	18.1	21.2	23.7	25.0	25.3	25.0	24.3	22.7	19.8	16.1
2017-2027	最低溫相對溼度	74.8	75.0	75.3	75.7	76.0	76.2	76.3	76.2	76.1	75.9	75.5	75.0
2017-2027	THI	57.9	59.6	63.7	68.6	72.4	74.5	75.0	74.5	73.4	70.9	66.3	60.5
2045-2055	最低溫	15.2	16.4	19.0	22.1	24.7	25.9	26.2	25.9	25.3	23.7	20.6	17.0
2045-2055	最低溫相對溼度	74.9	75.1	75.4	75.8	76.2	76.3	76.4	76.3	76.3	76.0	75.6	75.2
2045-2055	THI	59.2	61.1	65.0	70.0	74.1	76.0	76.4	76.0	75.0	72.4	67.5	61.9
	△THI	1.33	1.54	1.37	1.43	1.64	1.53	1.37	1.50	1.61	1.49	1.20	1.40

表 5 統計降尺度 2050 年 THI 推估-以萬丹為例(氣象測站)

年份	項目	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
2022 年	現況高溫	25.3	26.1	28.1	30.4	32.5	33.6	33.9	32.9	33.4	31.7	29.6	26.3
	現況高溫相對溼度	76.3	76.4	76.6	76.9	77.2	77.4	77.4	77.3	77.3	77.1	76.8	76.4
	現況 THI	75.0	76.3	79.3	83.0	86.5	88.2	88.7	87.0	87.9	85.1	81.8	76.6
2050 年	推估 THI	76.3	77.8	80.9	84.5	88.1	89.7	90.1	88.5	89.5	86.7	83.2	78.0
2022 年	現況最低溫	16.0	16.7	19.3	22.2	24.9	26.0	26.0	25.5	25.5	24.0	21.6	17.7
	現況最低溫相對溼度	75.0	75.1	75.5	75.8	76.2	76.3	76.4	76.3	76.3	76.1	75.8	75.2
	現況 THI	60.4	61.6	65.6	70.1	74.4	76.1	76.2	75.3	75.2	72.9	69.2	63.0
2050 年	推估 THI	61.7	63.1	67.0	71.5	76.1	77.6	77.5	76.8	76.8	74.4	70.4	64.4

2.4 動力降尺度資料-HiRAM

相較於統計降尺料只能提供日資料的變化，國科會 TCCIP 一組動力降尺度資料，可提供到小時的資料，其中亦包括各氣象變數，唯動力降尺度計算模擬需要消耗大量電腦計算資源，故目前僅能針對特定的時間區間進行模擬。動力降尺度資料主要利用高解度的 MRI-HiRAM 模式解析出每小時氣候資料，並以 IPCC AR5(Fifth Assessment Report)之 RCP 8.5 情境進行模擬，以數值模擬的方式將高解析度大氣環流模式 MRI 以及 HiRAM 推估資料的空間解析度提高至 5 公里，

目前動力降尺度模擬的時期為基期 1979 年至 2005 年，以及 RCP8.5 情境 21 世紀中 2039 年至 2065 年、世紀末 2075 年至 2099 年。(國科會，2021)

此外，AR5 HiRAM 資料使用四種不同的海溫情境進行模擬，提供四種系集予使用者參考利用(C0、C1、C2、C3)，並降低氣候之不確定性，為了對照目前以全球暖化程度之增溫情境(2°C、4°C)，這組動力降尺度針對 HiRAM RCP8.5 情境下世紀中及世紀末之年份，以時間區間達到增溫情境之年份進行選取，利用世紀中、世紀末推估的 20 年平均相較於基期增溫，評估相較於基期超過 2°C、4°C 之對應年份(表 6)。相較於統計降尺度資料，動力降尺資料較能反應畜牧領域對未來氣候評估的需求。因此本研究第一年度初步採用 C0 系集之時序資料，作為後續畜牧領域危害指標之計算依據。

表 6 HiRAM 增溫情境年份

資料類別	2°C	4°C
基期	1995-2014	
C0	2034-2053	2073-2092
C1	2032-2051	2072-2091
C2	2033-2052	2074-2093
C3	2036-2055	2076-2095

資料來源：TCCIP 團隊製作

2.5 高溫及熱緊迫關係

熱緊迫(Heat Stress)是一種畜禽常常罹患的疾病，往往是畜禽處於

熱產生過度的情形，體熱無法靠畜禽自身排除，甚至產熱速度超過排除速度，體溫超過或持續一定時間內，畜禽可能就會產生熱緊迫。畜禽產熱情形可分為內、外部因素，內部因素可能是劇烈運動或受外部刺激產生不安情緒；外部因素係指周圍環境氣溫升高，外部熱源傳入畜禽體內，兩者皆會造成體內產生過度的熱情形。當環境逐漸處於高溫高濕狀況，高溫會造成畜禽逐漸失去自我排熱功能，而高濕情況則會造成畜禽無法依靠流汗蒸發等方式散熱，當畜禽健康不良且排汗散熱皆不良，更容易患得熱緊迫；故臺灣夏季時常處於高溫、高濕環境，畜牧業者更應注意熱緊迫的問題，熱緊迫將引發各種疾病發生，嚴重甚至死亡。本研究蒐整國內、外相關熱緊迫研究文獻，以高溫造成熱緊迫現象，以及熱緊迫影響畜禽健康情形及畜產品產量等面向說明，詳表 7 所示。

表 7 高溫熱緊迫對畜禽及畜產品之影響

類別	熱緊迫影響	參考文獻
畜禽	在更高的溫度下，溫度每升高 1 度，動物的進食量就會減少 3-5%，從而降低牠們的生產力和生育能力。熱緊迫抑制免疫和內分泌系統，增強動物對疾病的易感性。	Das et al., 2016
乳牛	到本世紀末，美國、英國和西非部分地區因熱緊迫導致的牛奶產量損失估計為 1-17%	Hristov et al., 2018; Fodor et al., 2018; Wreford and Topp, 2020; Rahimi et al., 2020
畜禽	預計熱帶和亞熱帶許多地區由於熱緊迫導致乳製品和牛肉生產產生更大的損失：到本世紀末 SSP5-8.5 之下，乳製品損失可能達到每年 220 億美元和牛肉每年損失 380 億美元，這	IPCC, 2017

	些商品的全球產值大約佔 7% 和 20%，以 2005 年美元計算。	
畜禽	反芻動物、豬和家禽由於代謝率和生長、產量以及瘤胃發酵、出汗障礙和皮膚隔熱等物種特性都容易受到熱緊迫。此外，熱緊迫會導致氧化壓力、脂質和蛋白質氧化，並因細菌生長和傳染而縮短保存期限和食品安全。	Paula A. Gonzalez-Rivas et al., 2020
乳牛	本文獻研究結果顯示，牛隻受到熱緊迫情形下，容易產生呼吸頻率上升、流口水增加、容易口渴、跌倒率增加、攻擊行為增加、進食量下降、發情機率降低及乳量減少甚至無乳。	畜產試驗所
豬	豬隻容易呼吸頻率增加，脈搏跳動減少，採食量也降低，母豬容易因熱緊迫造成流產及不孕，而公豬則會造成精蟲品質不佳等情形。	畜產試驗所
雞	雞受到熱緊迫影響容易喘氣、拍動翅膀增加、蛋殼質量變差，甚至嚴重情形會造成雞隻產蛋量下降以及死亡。	畜產試驗所

資料來源：本研究彙整

2.6 溫溼度指數

溫溼度指數(temperature-humidity index, THI)對於畜牧領域是標準性指標，THI 指數常常被作為評估畜禽熱緊迫狀況，本研究蒐集 THI 指數相關研究文獻，彙整各學者及單位所提之公式，詳如表 8 所示。經本研究彙整成果指出，多數 THI 參考文獻採 1971 年國家研究會(National Research Council, NRC)所提出之 THI 公式為主，該文獻說明畜禽一天受熱緊迫程度和熱累積承載量，並增加兩個變數 $THI_{threshold}$ 、 THI_{Load} ，其中 $THI_{threshold}$ 為 THI 門檻值，每個國家針對畜禽都有不同門檻值設定，如溫帶國家對於溫度升高較為敏感，故採 THI 約為 68-72 為門檻值，臺灣普遍以 THI 72、THI74 作為門檻值，部分場域會依地區、環境氣候、農場設施等不同因素調整門檻值； THI_{Load} 為

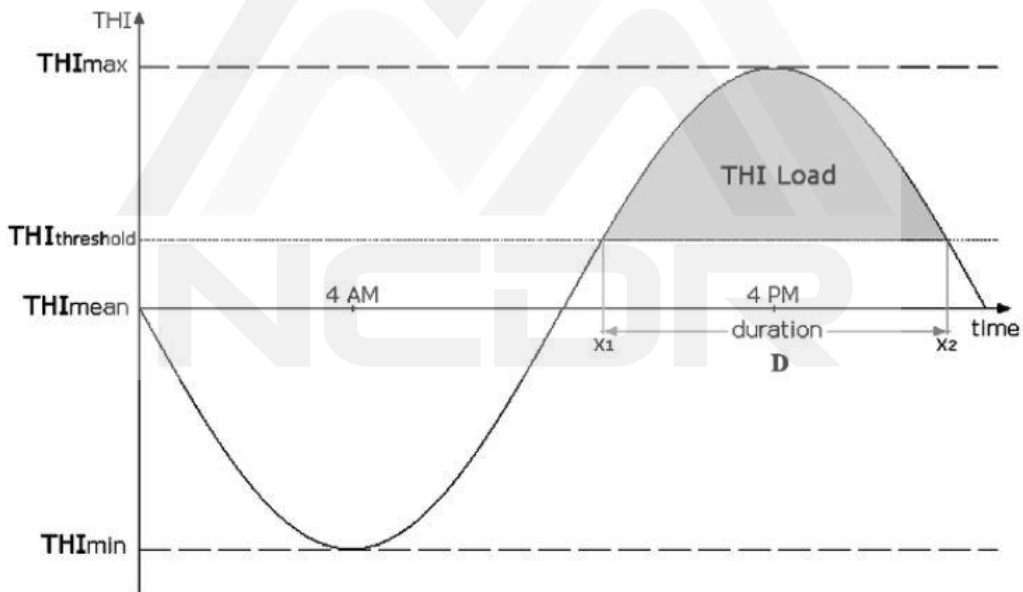
熱緊迫承載量，係以面積法表示畜禽於某段時間內所累積熱量，並以

THI Load 推求不同畜產品損失量，詳如圖 11 所示。

表 8 THI 公式文獻蒐集

項次	公式	參考文獻
1	$THI = (0.15 \times T_{db} + 0.65 \times T_{wb}) \times 1.8 + 32$	Bianca, 1962
2	$THI = (0.55 \times T_{db} + 0.22 \times T_{dp}) \times 1.8 + 32 + 17.5$	NRC,1971
3	$THI = (1.8 \times T_{db} + 32) - (0.55 - 0.005 \times RH) \times (1.8 \times T_{db} + 32)$	NRC,1971
4	$THI = (T_{db} + 0.36 \times T_{dp}) \times 41.2$	Yousef, 1985

註： T_{db} ：乾球溫度(°C)； T_{wb} ：濕球溫度(°C)； T_{dp} ：露點溫度(°C)；RH：相對溼度(%)



資料來源：N.R. St-Pierre et al.,2003

圖 11 以一天 24 小時探討 THI Load 為畜禽所受到熱承載量

第三章 研究步驟及方法

3.1 氣候變遷下畜牧領域研究流程

畜牧業係指從事家畜及家禽之飼育、放牧，以生產肉、乳、皮、毛、蛋等之行業均屬之。本研究經與畜產試驗所探討後，目前豬、牛、雞為本國目前畜牧業大宗，近年來高溫環境持續下，目前畜牧所圈養動物皆已有受到熱緊迫影響，其中，牛、雞比豬更容易受到熱影響，故往年常有新聞報導指出牛奶、雞蛋產量不足之問題，而由於雞蛋產能不足，有包含多種因素，如熱緊迫(高溫)、冷緊迫(低溫)、禽流感(疾病)等情況皆會影響雞蛋產能，故本次研究較難以採單一氣候因素探討雞隻氣候變遷下的產量影響。然牛奶產量受高溫影響因素較高，且畜產試驗所與多家酪農業者合作，固定紀錄每年每個月每頭牛之牛奶生產量資料，依照每月產量統計紀錄可以發現，牛奶於台灣夏、秋兩季(6月至11月)明顯產量下降，其最高產量與最低產量差異約每頭牛平均每月損失1公斤至2公斤牛奶，詳如圖12所示。

本研究以動力降尺度 HiRAM 模式運算，取得時溫度及時相對溼度，並依據公式計算出溫溼度指數(THI)，且依資料空間解析度 5 公里之網格繪製臺灣熱緊迫危害圖，利用溫溼度指數推求未來牛奶損失量，本研究流程圖如圖 13 所示。

平均乳量

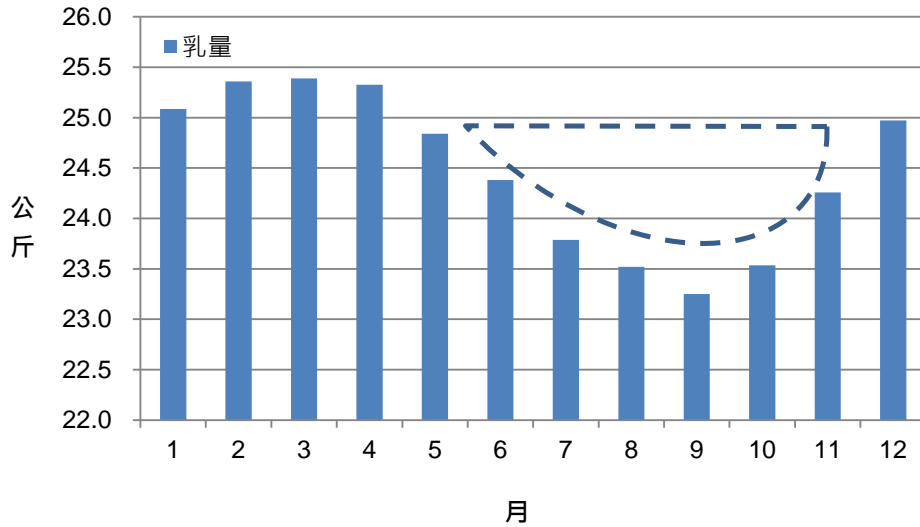


圖 12 畜產試驗所平均每月牛奶產量紀錄

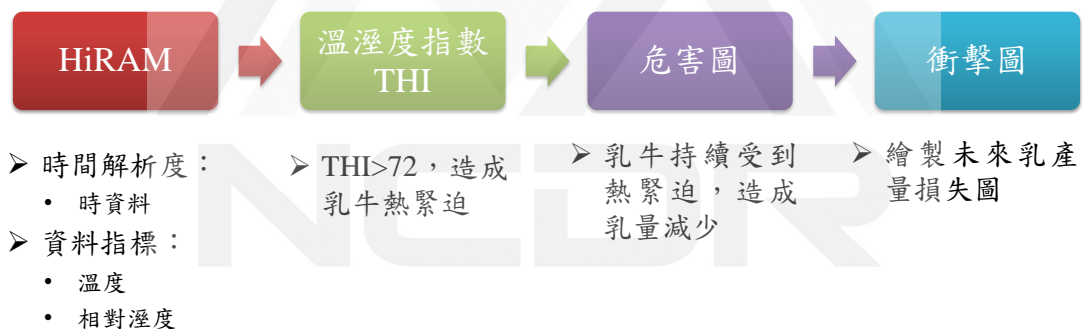


圖 13 氣候變遷影響下乳產量危害、衝擊之研究流程圖

3.2 氣候變遷畜牧領域危害指標選定及計算方式

依前述文獻蒐集成果，目前國內研究溫溼度指數較為匱乏，多數文獻針對人體的熱舒適度研究，故畜牧領域較難以採用，且國內農業部畜產試驗所多篇文獻亦採用 1971 年 NRC 之 THI 公式進行計算，

故本研究將以此公式作為畜牧領域危害指標計算，並以日最高溫及日最高相對溼度計算 THI_{max} ，日最低溫及日最低相對溼度計算 THI_{min} ，採前述兩者之平均值 THI_{mean} ，文獻蒐集顯示臺灣採用 THI 門檻值有 72 或 74，根據良好的農場設施具有溫、濕度監測設備，可自行灑水、自動通風、中央空調等降溫措施，故採用較高 THI 74 之門檻值，惟臺灣畜牧業者農場設備參差不齊，亦有部分於戶外養殖，故採用較低門檻值 THI 72 作為表示容易受到熱緊迫危害，其相關 THI 公式為：

$$THI = (1.8 \times T + 32) - (0.55 - 0.0055 \times RH) \times (1.8T - 26) \quad (1)$$

式中， T ：氣溫(°C)；

 RH ：相對溼度(%)；

3.3 氣候變遷下乳牛之乳產量損失衝擊評估

依據 N.R. St-Pierre et al(2003)提出以熱緊迫建立乳牛模型，其模型包含乾物質採食量減少、乳產量損失、懷孕率、死亡率等指標經驗公式，因此本研究探討氣候變遷影響下，乳牛受到熱緊迫所造成乳產量損失情況，乳產量損失公式如下：

$$MILK_{Loss} = 0.0695 \times (THI_{max} - THI_{threshold})^2 \times D \quad (2)$$

式中， THI_{max} : 當日最高 THI ；
 $THI_{threshold}$: THI 門檻值採用 72 ；
D : 一天受熱緊迫時間(hr)

3.4 動力降尺度資料應用

由於氣象觀測資料、臺灣歷史氣候重建資料僅有歷史資料，並無未來氣候推估資料，故不適用於本研究；此外，統計降尺度資料因參數僅有溫度、降雨量，且時間解析度資料僅到日資料，並且需透過經驗迴歸公式推求相對溼度，但相對溼度不僅受溫度影響，亦受風速、風向、降雨量等因素影響，故運算方法過於繁複耗時，而目前相對溼度推求僅依靠溫度資料較不適宜，故本研究採用動力降尺度 HiRAM 氣候推估資料。

依據原始資料讀取每一網格座標經度(LON)、緯度(LAT)，並以溫濕度指數公式選取每日最高溫度(T_{max})、最低溫度(T_{min})、平均溫(T_x)、最高相對溼度(RH_{max})、最低相對溼度(RH_{min})及平均相對溼度(RH)等 6 個參數，彙整成 EXCEL 檔詳如圖 14 所示，並可計算 THI_{max} 、 THI_{min} 及 THI_{mean} ，並依據每日 THI_{max} 、門檻值(THI 72)及乳牛每日受熱時數(D)求得每日乳損失量(LOSS)，計算成果詳如圖 15 所示。本研究初步單以 2010 年、2050 年單一年進行資料計算及繪製，其成果亦符合目前每月乳量損失趨勢，以 2010 年及 2050 年綜觀趨勢顯示，臺灣 5 月

至 8 月以彰化縣以南地區承受熱緊迫最為明顯，由於臺灣山區溫度偏低，其熱緊迫情形較緩，成果詳如圖 16、圖 17 所示。

初步以彰化縣福興鄉內經度 120.4、緯度 24.05 之網格進行探討，該 5 公里×5 公里網格內計有 32 家牧場，為牧場密集較高之地區，並以 2010 年、2050 年兩年進行比較，2050 年月平均 THI 幅度較 2010 年上升約 2%，詳如圖 18 所示；此外，分析 2050 年臺灣中南部縣市之每日 THI，成果顯示一年 365 天內中南部縣市熱緊迫日數已超過 200 天，如圖 19 所示。

	A	B	D			E	F	G	H	I	J	K	L
3	LON	LAT	年	月	日	Tx	Tmax	Tmin	RH	RHmax	RHmin		
4	119.2	21.5	1995	9	1	28.73395	29.423	25.3259	51.20174	71.9485	42.9184		
5	119.2	21.5	1995	9	2	28.33715	29.0264	27.3053	55.0129	60.8268	45.381		
6	119.2	21.5	1995	9	3	28.62404	29.0585	28.3128	63.40297	78.6205	52.2419		
7	119.2	21.5	1995	9	4	28.23238	28.8216	25.9972	71.64323	86.339	60.8194		
8	119.2	21.5	1995	9	5	26.43986	27.647	25.1156	85.63349	92.755	77.1417		
9	119.2	21.5	1995	9	6	26.77295	27.7461	24.644	81.01166	90.5827	69.3343		
10	119.2	21.5	1995	9	7	27.4075	28.4383	25.4824	78.78833	86.7459	68.6692		
11	119.2	21.5	1995	9	8	28.72059	29.6119	27.056	67.11298	89.7726	48.6508		
12	119.2	21.5	1995	9	9	28.9369	29.3121	28.4745	69.12193	77.2485	48.767		
13	119.2	21.5	1995	9	10	28.65279	29.2257	28.1245	71.14023	78.4195	63.101		
14	119.2	21.5	1995	9	11	28.83488	29.1048	28.165	68.73014	78.8723	60.4467		
15	119.2	21.5	1995	9	12	28.79092	29.2276	28.0216	63.19009	77.9558	48.8296		
16	119.2	21.5	1995	9	13	29.05323	29.4221	28.3132	55.45487	63.5637	44.1732		
17	119.2	21.5	1995	9	14	28.284	28.6031	27.775	72.54586	80.6129	64.9902		
18	119.2	21.5	1995	9	15	28.97885	29.2543	28.0968	61.47801	81.3311	50.2749		
19	119.2	21.5	1995	9	16	28.5531	29.2677	25.8202	58.71036	83.392	48.6504		
20	119.2	21.5	1995	9	17	26.7784	27.487	25.6479	86.44786	92.212	76.6476		
21	119.2	21.5	1995	9	18	27.73095	28.7554	25.959	72.78091	89.0751	50.9506		
22	119.2	21.5	1995	9	19	27.69762	28.0955	26.9999	77.92774	85.3568	70.9998		
23	119.2	21.5	1995	9	20	27.65825	28.1353	27.1096	81.82359	86.8559	75.3458		
24	119.2	21.5	1995	9	21	27.82437	28.4884	26.9962	81.26156	89.6927	71.6912		

圖 14 依 HiRAM 資料選取所需參數資料(1995 年 9 月)

	A	B	D	E	F	H	I	K	L	M	N	O	Q	U	V
3	LON	LAT	年	月	日	Tmax	Tmin	RHmax	RHmin	THImax	THImin	THImean	D	THIload	LOSS
4	119.2	21.5	1995	9	1	29.42	25.33	71.95	42.92	80.80	71.44	76.12	11.4	100.28	2.55
5	119.2	21.5	1995	9	2	29.03	27.31	60.83	45.38	78.59	74.20	76.39	24.0	105.45	3.02
6	119.2	21.5	1995	9	3	29.06	28.31	78.62	52.24	81.21	76.41	78.81	24.0	163.42	5.90
7	119.2	21.5	1995	9	4	28.82	26.00	86.34	60.82	81.93	74.31	78.12	24.0	146.98	6.86
8	119.2	21.5	1995	9	5	27.65	25.12	92.76	77.14	80.82	74.79	77.81	24.0	139.33	5.40
9	119.2	21.5	1995	9	6	27.75	24.64	90.58	69.33	80.70	73.26	76.98	24.0	119.59	5.26
10	119.2	21.5	1995	9	7	28.44	25.48	86.75	68.67	81.35	74.44	77.90	24.0	141.57	6.08
11	119.2	21.5	1995	9	8	29.61	27.06	89.77	48.65	83.77	74.29	79.03	24.0	168.66	9.62
12	119.2	21.5	1995	9	9	29.31	28.47	77.25	48.77	81.41	76.14	78.78	24.0	162.61	6.16
13	119.2	21.5	1995	9	10	29.23	28.12	78.42	63.10	81.45	77.63	79.54	24.0	180.90	6.20
14	119.2	21.5	1995	9	11	29.10	28.17	78.87	60.45	81.32	77.32	79.32	24.0	175.76	6.04
15	119.2	21.5	1995	9	12	29.23	28.02	77.96	48.83	81.38	75.56	78.47	24.0	155.33	6.12
16	119.2	21.5	1995	9	13	29.42	28.31	63.56	44.17	79.56	75.30	77.43	24.0	130.27	3.97
17	119.2	21.5	1995	9	14	28.60	27.78	80.61	64.99	80.77	77.37	79.07	24.0	169.71	5.34
18	119.2	21.5	1995	9	15	29.25	28.10	81.33	50.27	81.92	75.85	78.89	24.0	165.29	6.84
19	119.2	21.5	1995	9	16	29.27	25.82	83.39	48.65	82.24	72.69	77.47	24.0	131.26	7.29
20	119.2	21.5	1995	9	17	27.49	25.65	92.21	76.65	80.47	75.58	78.02	24.0	144.57	4.99
21	119.2	21.5	1995	9	18	28.76	25.96	89.08	50.95	82.21	73.13	77.67	24.0	136.16	7.25
22	119.2	21.5	1995	9	19	28.10	27.00	85.36	71.00	80.59	77.00	78.79	24.0	163.06	5.13
23	119.2	21.5	1995	9	20	28.14	27.11	86.86	75.35	80.86	77.71	79.28	24.0	174.82	5.46
24	119.2	21.5	1995	9	21	28.49	27.00	89.69	71.69	81.85	77.08	79.46	24.0	179.06	6.74
25	119.2	21.5	1995	9	22	28.49	27.16	83.71	71.05	81.02	77.25	79.14	24.0	171.25	5.66
26	119.2	21.5	1995	9	23	28.31	26.93	84.45	63.50	80.83	75.97	78.40	24.0	153.51	5.41

圖 15 依據公式計算 THI 及乳損量(1995 年 9 月)

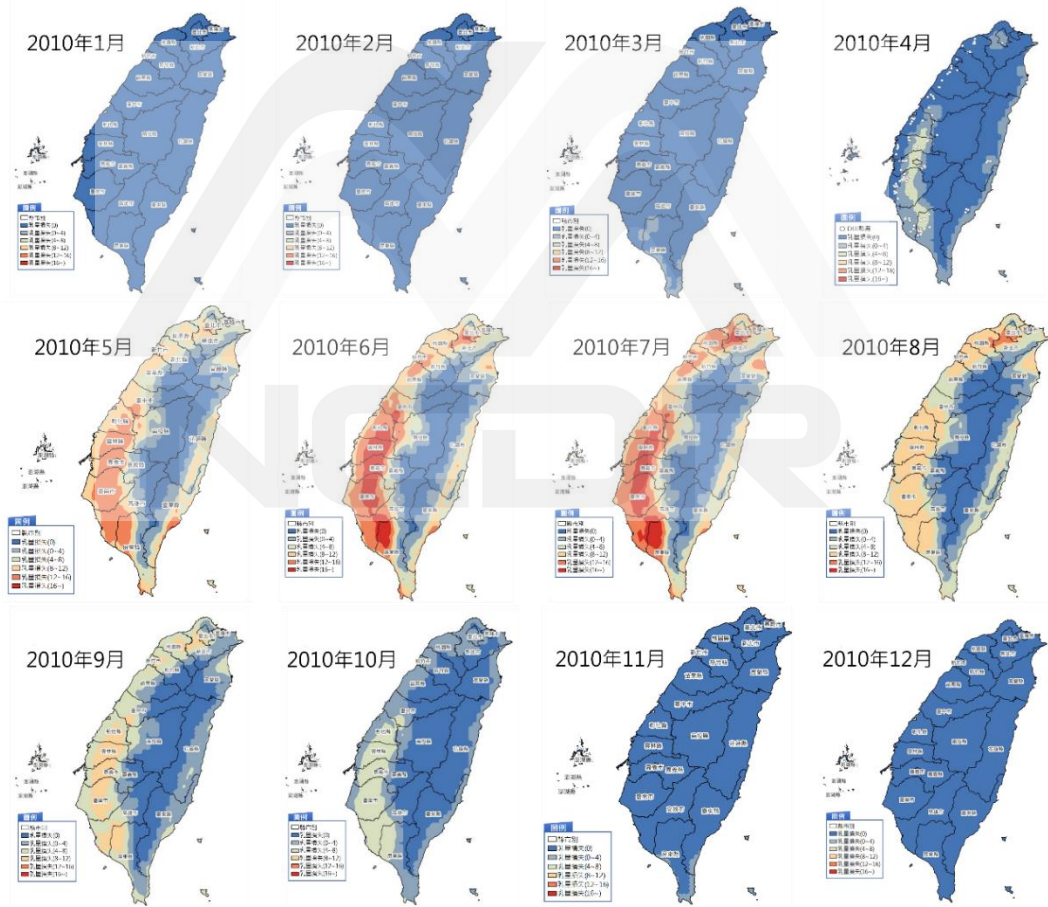


圖 16 HiRAM 之 2010 年每月乳損量

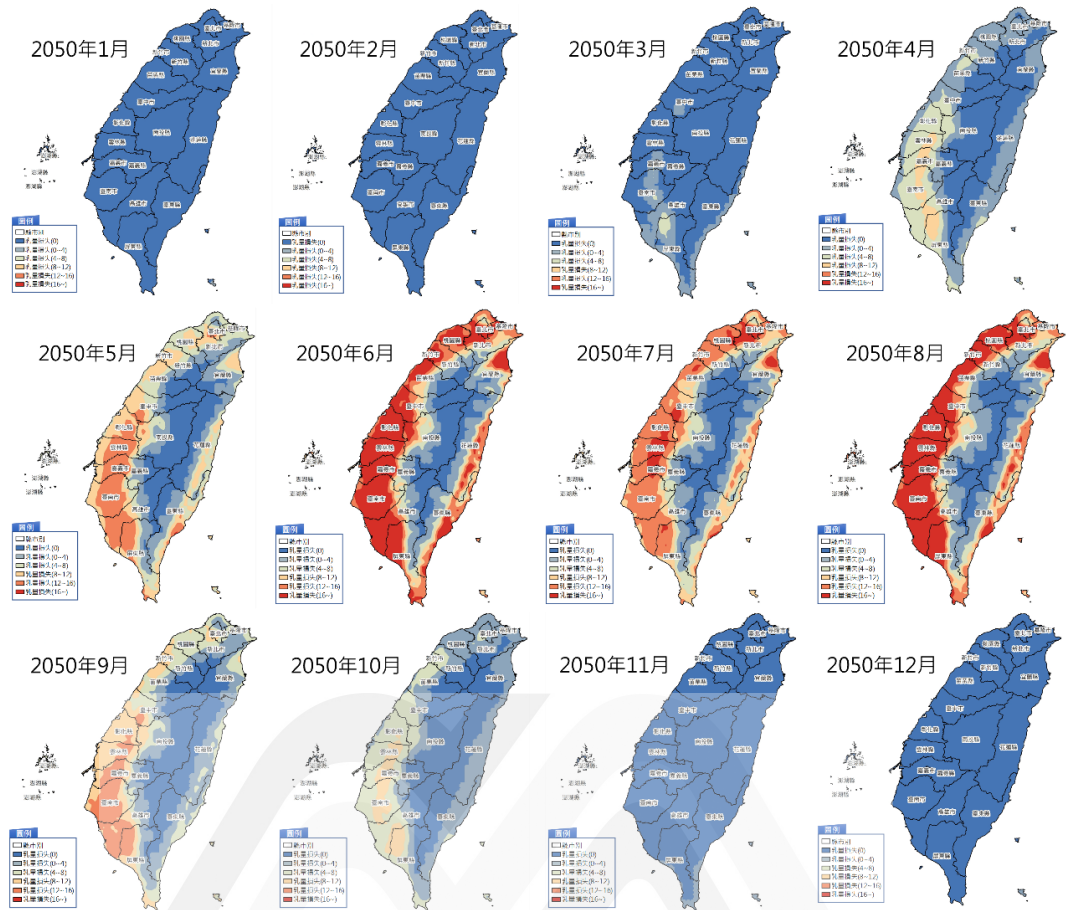


圖 17 HiRAM 之 2050 年每月乳損量

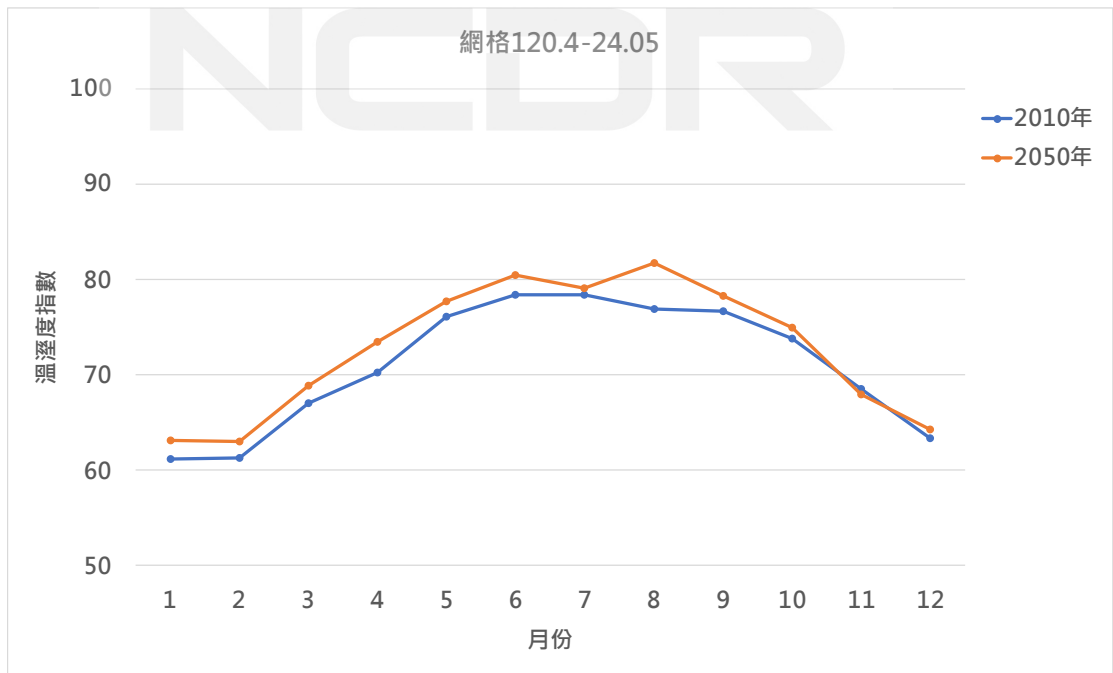


圖 18 2010 年及 2050 年溫溼度指數變化比較圖



圖 19 2050 年溫溼度指數變化圖-以彰化、雲林、台南、屏東為例

由前述數值計算及資料說明可知，動力降尺度係透過物理模式進行模擬，可得到高解析度時間及空間資料，且使用者除可選取溫度、降雨量之參數，亦可使用風向、風速、相對濕度、輻射等其他參數，並且時間解析度可達到小時資料，其動力降尺度推估資料可滿足本研究方向，但依據國科會 TCCIP 說明其資料仍有限制使用條件，如前述僅分析說明 2010 年、2050 年之單一年份較不合理，因氣候推估資料與實際觀測資料不同，統計降尺度、動力降尺度之模式皆是以長期氣候模擬的資料，無法直接用於解釋每日天氣概況，亦無法作為天氣預報使用，僅能說明某段氣候期間(如 10 年、20 年、30 年)的資料統

計特性，並與模式的基期進行趨勢比較。故後續第四章將以全球暖化程度之升溫情境(2°C、4°C)長期氣候推估資料，進行溫溼度指數及乳量損失計算研究，其每一情境氣候推估資料長度達 20 年，並以 20 年平均趨勢與基期進行比較說明。



第四章 全球暖化程度下之乳牛乳產量危害及衝擊

4.1 全球暖化程度下之 THI 變化

本節主要探討氣候變遷情境下升溫 2°C、4°C 之 THI 變化情形，本研究以 IPCC AR5 之 RCP 8.5 情境下，依 HiRAM 動力降尺度資料劃分出基期(1995-2014 年)、2°C(2034-2053 年)、4°C(2073-2092 年)，如前述章節表 6 所示。

因氣候變遷推估資料具有不確定性，且每一年推估之氣象資料亦非為氣象預報資料，僅能表述預估某一暖化情境下，可能該地區會達到某程度情況(如溫度、相對溼度、雨量等)，故資料之不確定性特性之問題，本研究將每一情境以 20 年資料進行平均值，以其降低資料不確定性，針對 THI 之升溫情境下計算成果，進行繪製全臺 THI 圖檔，詳如圖 20~圖 22 所示。由圖 20、圖 21、圖 22 三張圖可知，臺灣 DHI 酪農戶(與畜產試驗所合作之業者)密集於彰化以南之縣市，然臺灣於升溫 2°C、4°C 情境下之 THI 變化趨勢，從平原逐漸往山區擴展，從高屏地區往雙北地區升高，臺灣未來乳牛將容易受到一定熱危害之傷害。

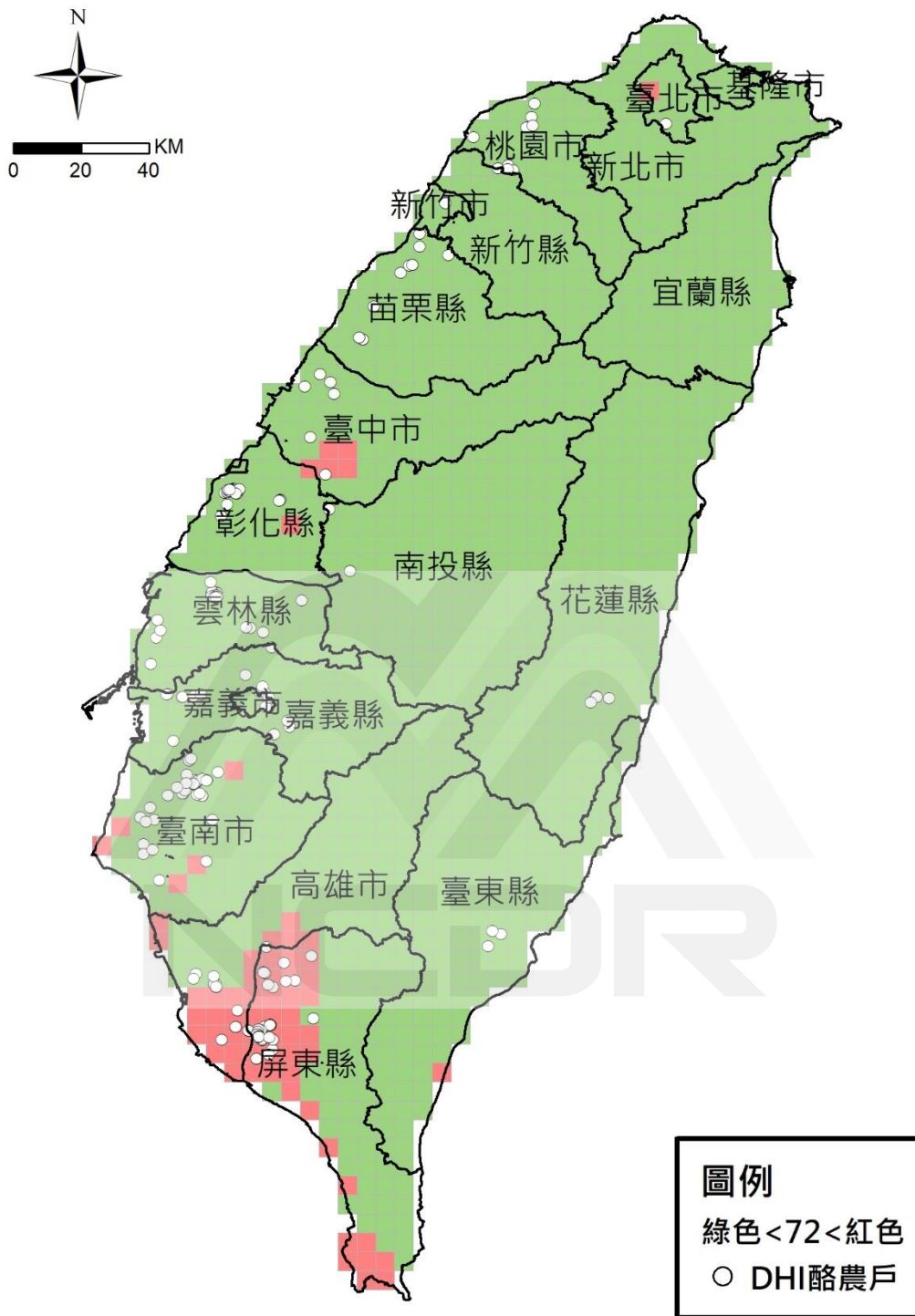


圖 20 HiRAM 基期之 THI 變化圖

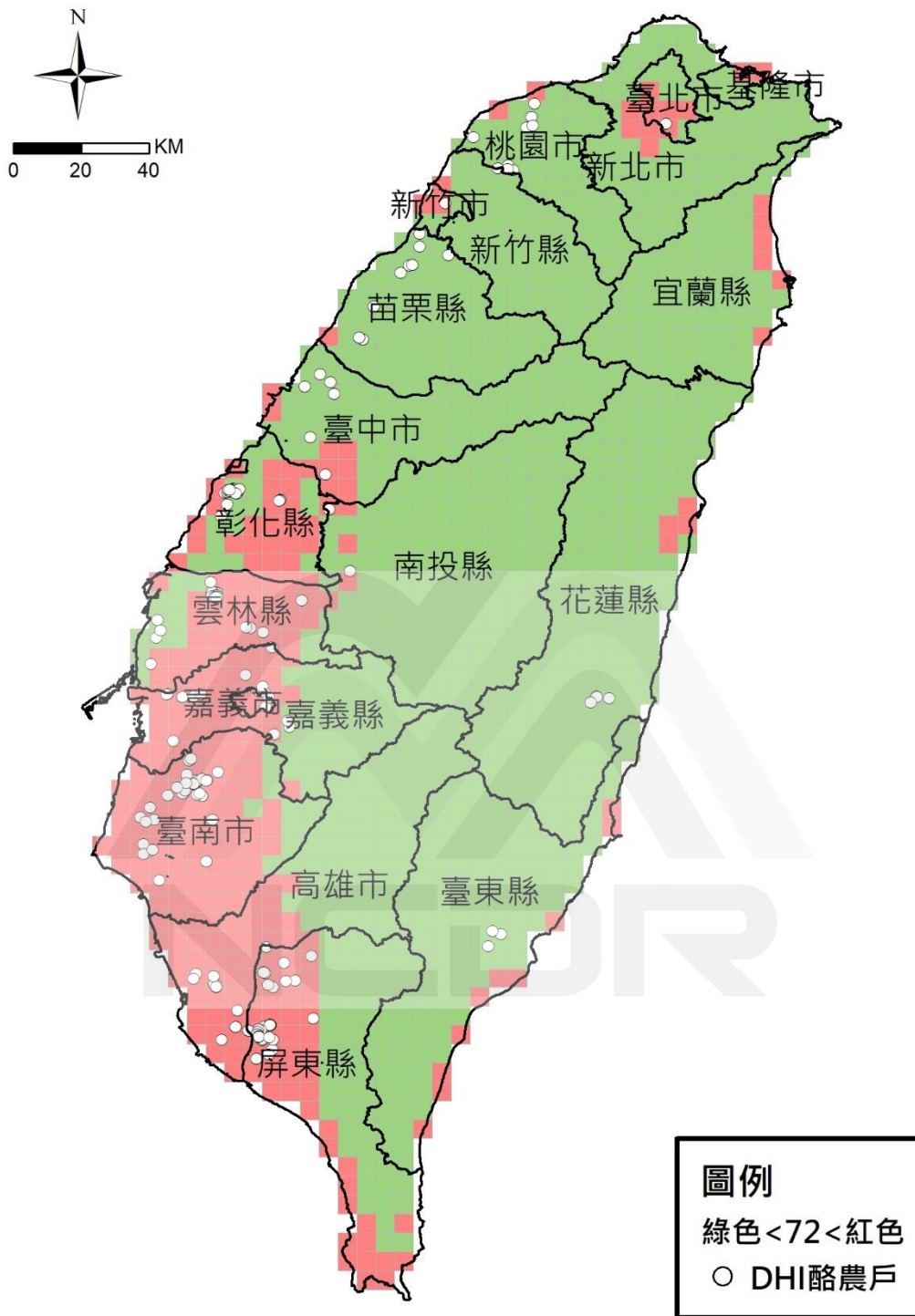


圖 21 HiRAM 2 度 C 暖化情境下之 THI 變化圖

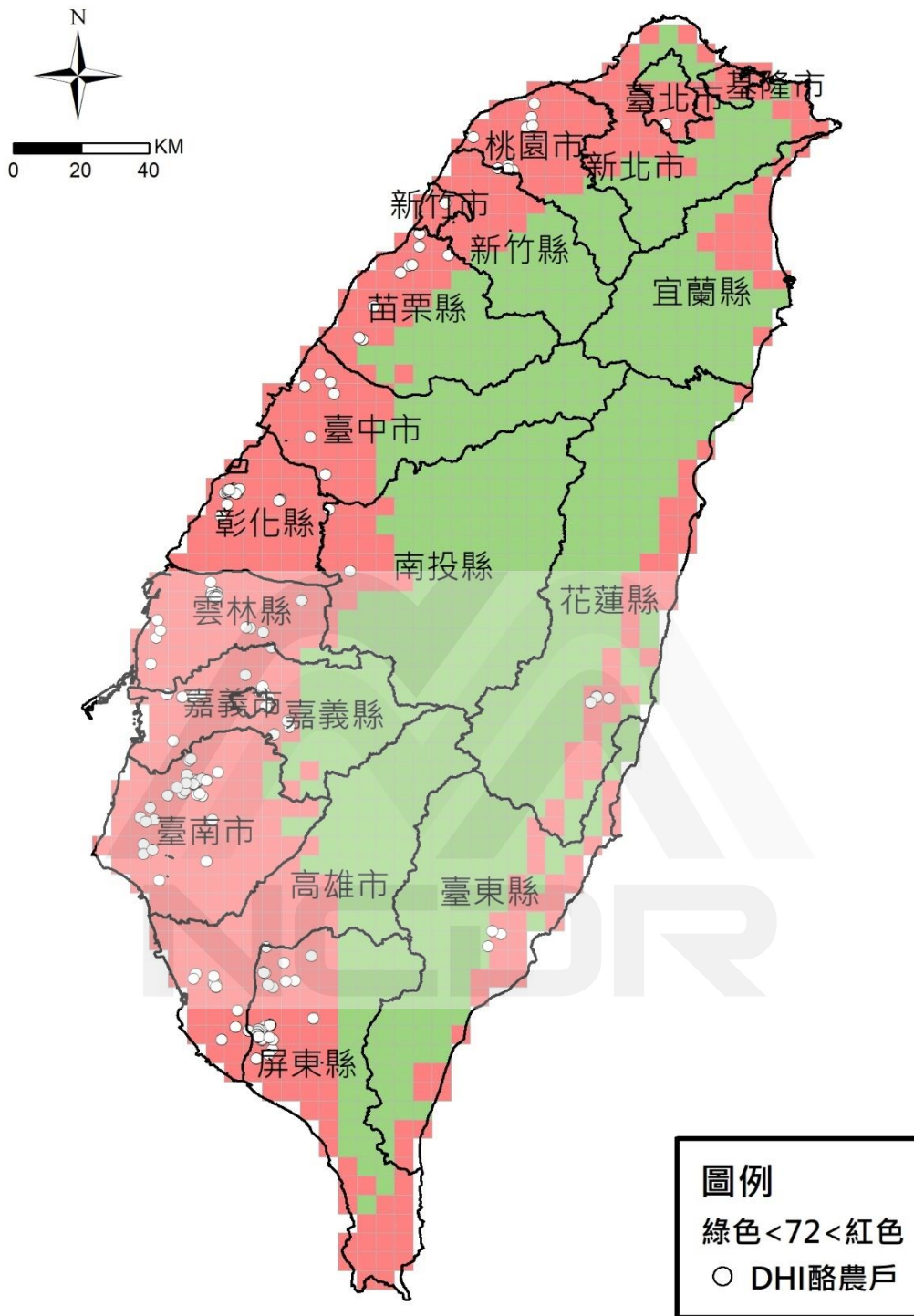


圖 22 HiRAM 4 度 C 暖化情境下之 THI 變化圖

本研究將臺灣分為北中南東等四分區探討 THI 變化(如圖 23), 並將各四區內養殖乳牛頭數最多之縣市作為代表性區域, 北區為桃園

市、中區為彰化縣、南區為屏東縣、東區為花蓮縣，將各代表縣市內之 THI 數值網格加總平均，計算出每一縣市基期、2°C、4°C 之 THI，探討不同情境下，2°C、4°C 相對於基期之變化率。

依表 9 成果顯示桃園市 2°C 暖化情境下，THI 值相對於基期上升 2.61%，升溫 4°C 情境下，與基期相比 THI 值上升約 5.59%；彰化縣 2°C 暖化情境下，THI 值平均上升 2.35%，則於 4°C 暖化情境下平均上升 5.26%；屏東縣於 2°C 及 4°C 暖化情境下，與基期 THI 值進行比較，分別 THI 值增幅 2.32%、5.18%；花蓮縣於 2°C 及 4°C 暖化情境分別增幅為 2.68%、5.79%。

本研究針對四個代表區 THI 值變化率，可以發現花蓮縣 THI 值變化率最大，其次是桃園市、彰化縣，而屏東縣 THI 值變化率最小，初步探討其原因，花蓮縣相對其他三個區域，其地形海拔高度較高，故 1994 年至 2015 年溫度尚未明顯升高變化時，受地形影響溫度偏低，故基期 THI 值亦偏低，然而當溫度開始升溫至 2°C 或 4°C 時，溫度上升明顯影響 THI 值較大，相對的臺灣緯度較高區域亦受到一樣情形影響，溫度升高皆會有較明顯 THI 增幅，故與基期相比之下，花蓮縣 THI 值變化率就明顯偏高；然而，相反的屏東縣地理位置上屬於熱帶氣候，常年平均溫度就比其他三區較高，乳牛受熱緊迫時數也比其他三區長，故常年 THI 值屬於偏高情形，甚至夏季大多天數都是超

過門檻值 THI 72，於 2°C、4°C 暖化情境下，THI 值的變化率相對比其他三區較低。

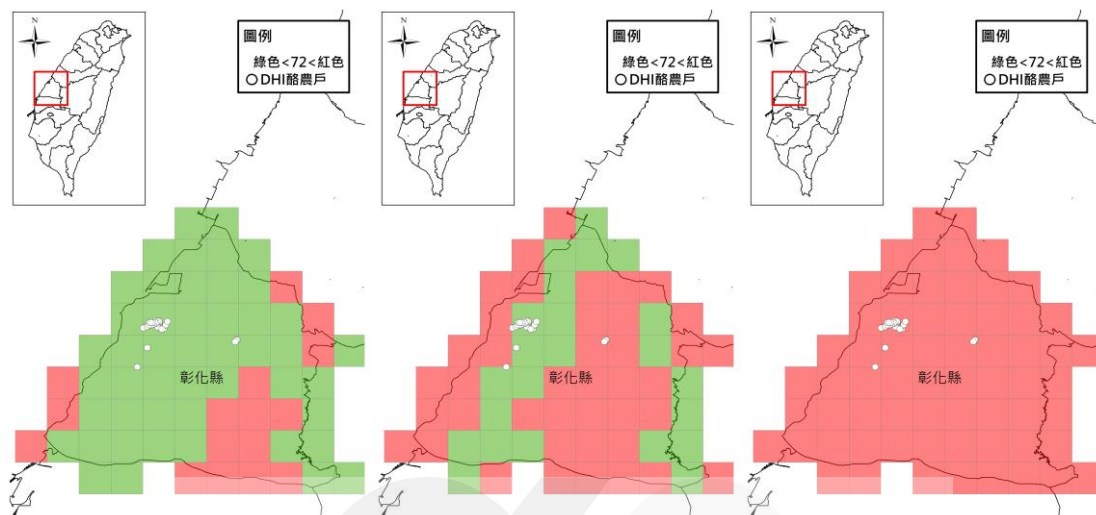


圖 23 各升溫情境下之 THI 變化圖-以彰化縣為例

表 9 四個代表性區域縣市之 THI 變化率

代表性區域		THI 變化率	
		2°C(2034-2053)	4°C(2073-2092)
北	桃園市	+2.61%	+5.59%
中	彰化縣	+2.35%	+5.26%
南	屏東縣	+2.32%	+5.18%
東	花蓮縣	+2.68%	+5.79%

4.2 全球暖化程度下之乳量損失變化

依據前述章節 THI 於各不同暖化情境之變化情形，將會造成熱緊迫危害，導致乳產量損失。然本國國內針對乳牛產量研究較為匱乏，故本研究根據 N.R. St-Pierre et al(2003)提出乳產量損失公式(公式(2))，計算我國國內未來全球暖化程度下之損失量，全臺乳損量如圖 24~圖 26 所示。

本研究利用 2011 年至 2021 年農業部農業統計年報之各縣市乳總產量進行加總平均，得出四個代表性區之縣市的 10 年平均產乳量，桃園市平均產乳量 15.59 公斤/頭/天，彰化縣平均產乳量 18.18 公斤/頭/天，屏東縣平均產乳量 17.31 公斤/頭/天，花蓮縣平均產乳量 17.26 公斤/頭/天，並與計算出 2°C、4°C 之乳損失量相減，可得出乳量損失變化率，其公式如下：

$$\text{乳量損失變化率} = \frac{(\text{平均產乳量} - \text{不同暖化程度乳損失量})}{(\text{平均產乳量} - \text{基期乳損失量})} \quad (3)$$

桃園市在全球升溫 2°C 及 4°C 情境下，產乳量損失百分比最高，分別為 16.18% 與 44.93%；屏東縣乳損失量變化率最低，分別為 12.79%、34.24%。依據各情境之 THI 值計算每日產乳量損失，並與基期產乳量比較損失差異，其成果如表 10 所示。

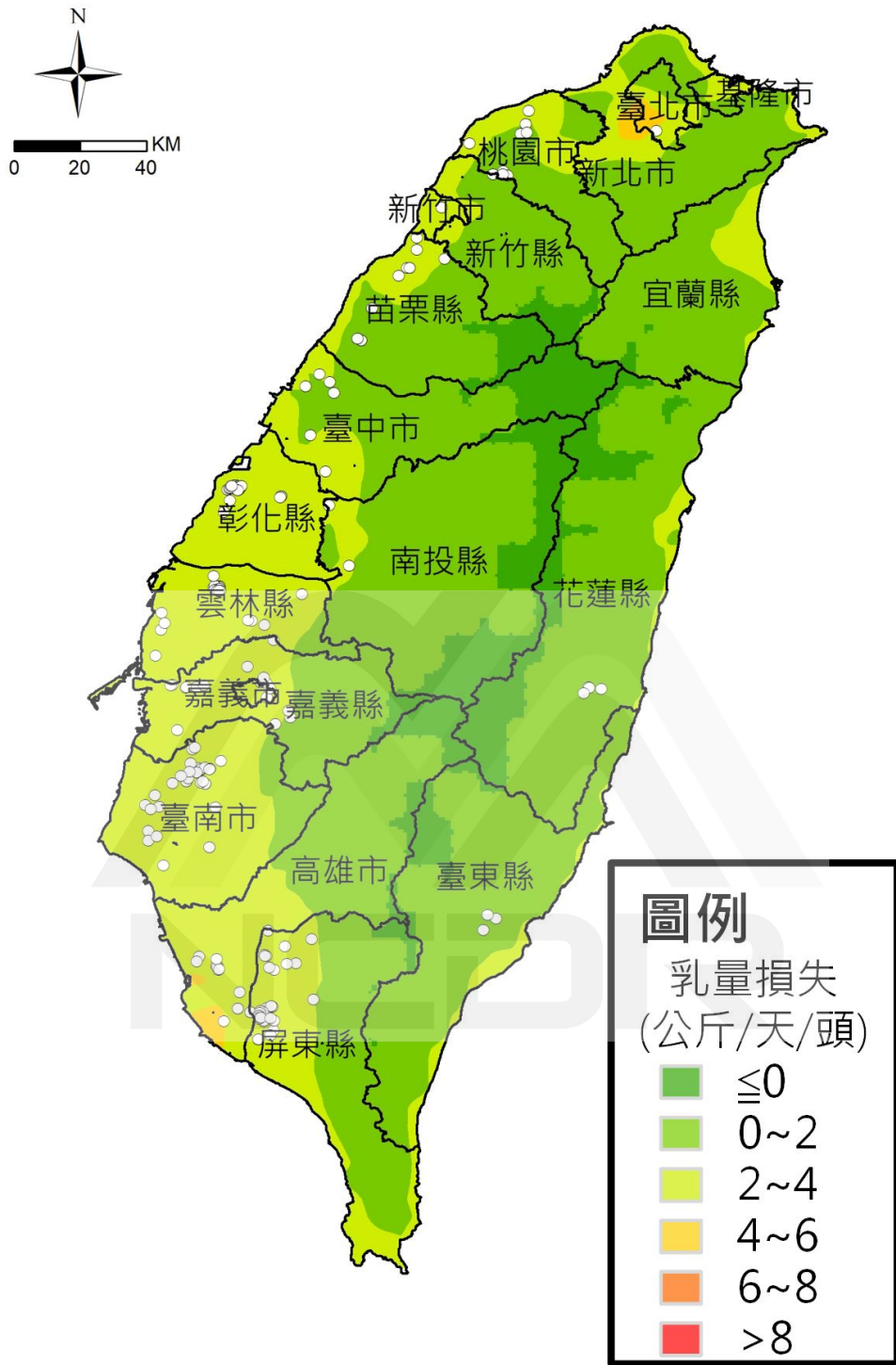


圖 24 HiRAM 基期之全臺乳量損失圖

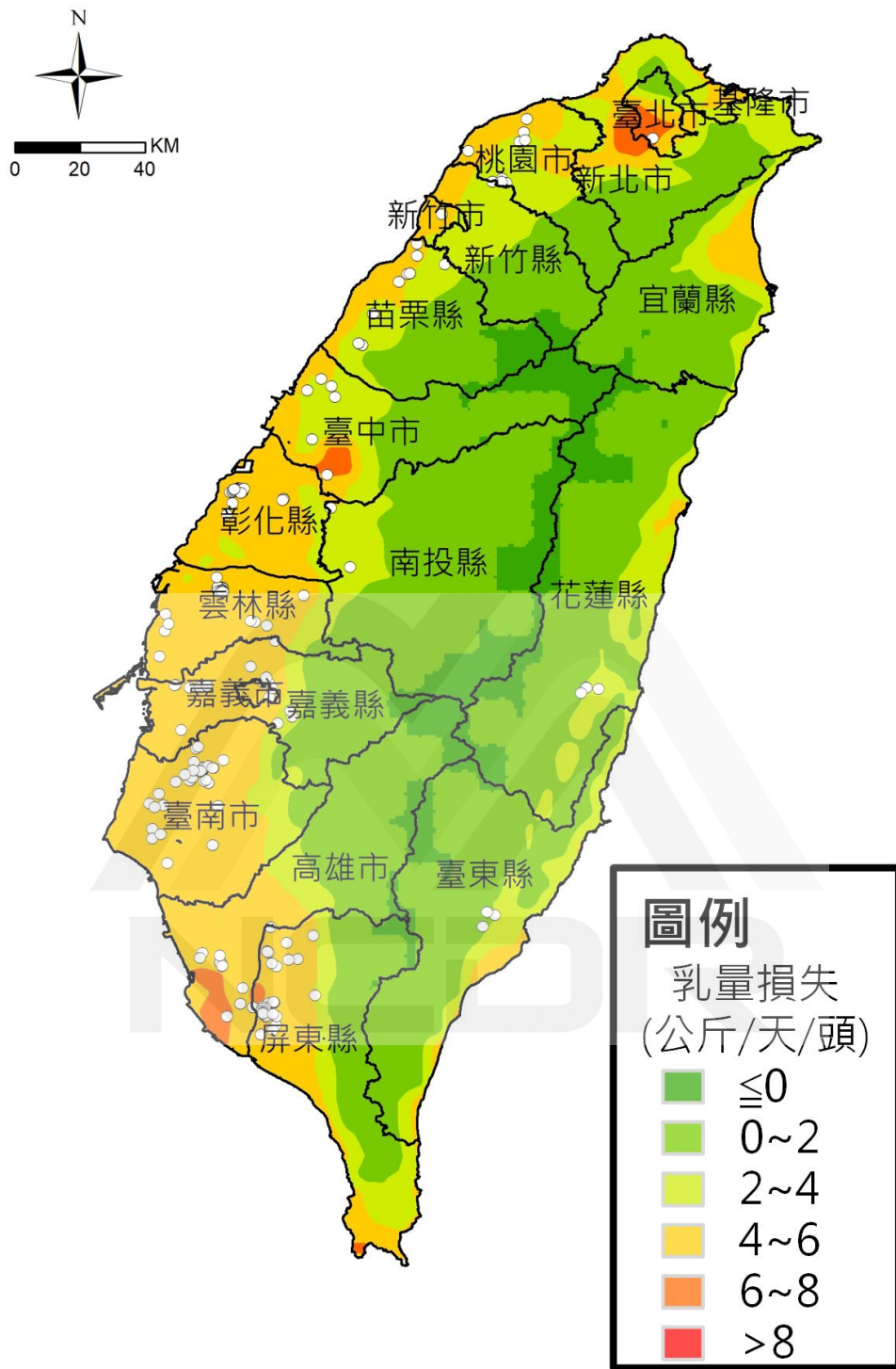


圖 25 HiRAM 2°C暖化之全臺乳量損失圖

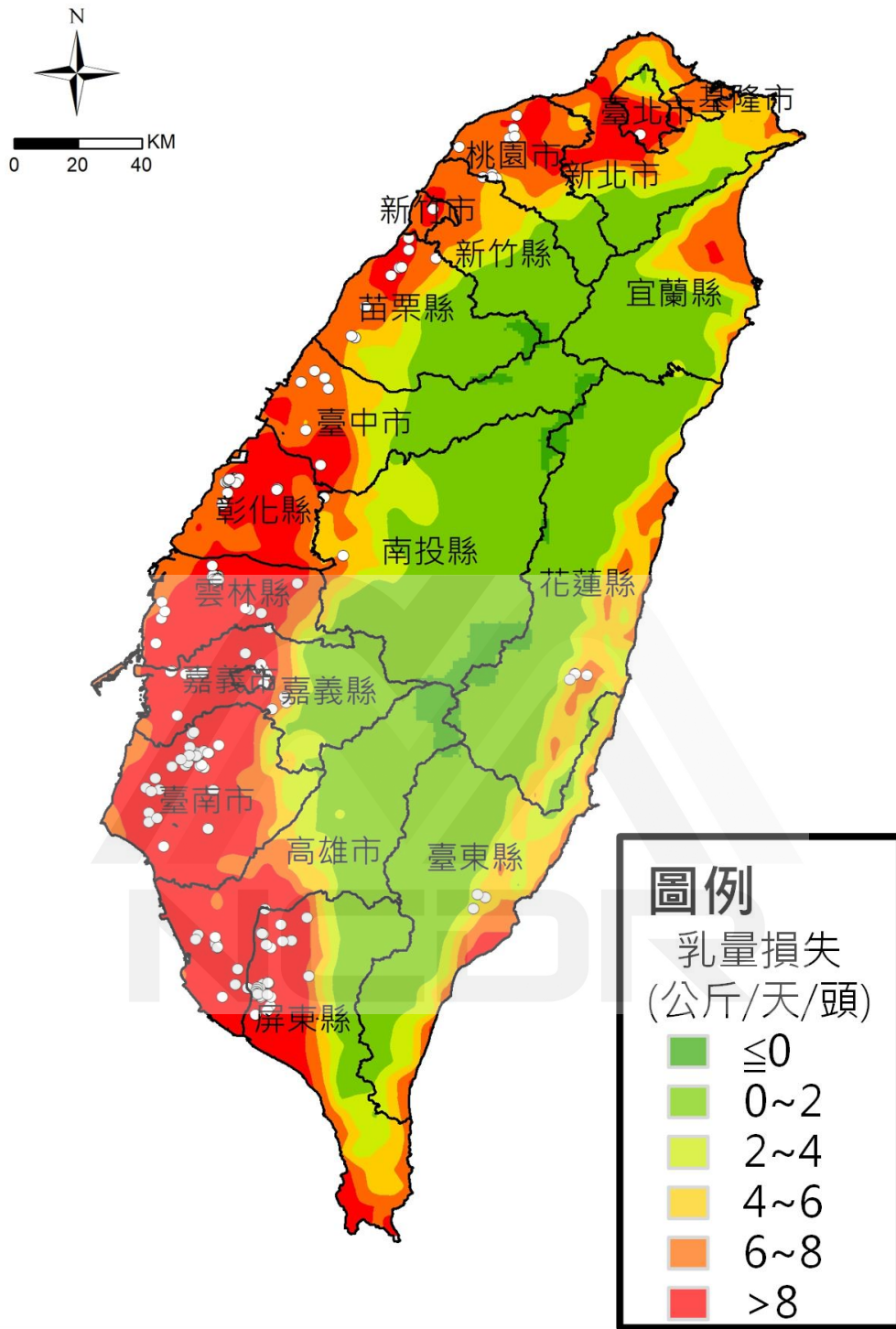


圖 26 HiRAM 4°C暖化之全臺乳量損失圖

表 10 2°C 及 4°C 暖化情境下各代表區乳量損失量變化率

代表性區域		乳量損失量變化率	
		2°C(2034-2053)	4°C(2073-2092)
北	桃園市	16.18%	44.93%
中	彰化縣	15.46%	38.87%
南	屏東縣	12.79%	34.24%
東	花蓮縣	13.17%	38.43%



第五章 結論與建議

5.1 結論

利用氣候變遷推估資料探討乳牛乳產量之國內、外研究文獻較為匱乏，多數文獻以歷史氣候探討現況乳產量變化，故本研究與農業部畜產試驗所共同合作研究，首次採用氣候變遷推估資料針對全球暖化下之乳業產業危害衝擊影響，初步以氣象署氣象測站觀測資料，以及國科會 TCCIP 提供 TReAD、統計降尺度、動力降尺度等氣象資料進行數據測試及探討，並提供給畜牧領域相關研究者參考使用。茲將本研究重點結果進行以下說明：

1. 氣象測站觀測資料選用：本次研究探討溫溼度指數及乳牛乳產量，其因採用公式參數單純僅使用溫度、相對溼度，可確認兩者參數具有顯著性，目前氣象測站預報可提供每小時溫度、相對溼度，可提供畜牧業者參考。
2. 臺灣歷史氣候重建資料選用：經與氣象測站比對成果，可以確認 TReAD 呈現乳損量趨勢一致，甚至可補足沒有氣象測站地區之氣象資料。
3. 統計降尺度資料：因統計降尺度僅有溫度、降雨量之日資料參數，且須利用氣象測站溫溼度回歸分析公式求取相對溼度，且溫度及

相對溼度為負相關，但由於臺灣為海島地形氣候，臺灣平均相對溼度大約為 70%左右，導致每日 THI 較無明顯變化。

4. 動力降尺度：動力降尺度符合目前採用溫溼度指數公式之應用，然動力降尺度只有兩組模式，其資料不確定性較統計降尺度高，故仍需多種領域測試方能確認資料可使用性。
5. 溫溼度指數(THI)危害指標：本研究之全球暖化 2°C、4°C 情境下，已明顯表示出臺灣畜牧業未來環境勢必受到熱緊迫傷害，且以全球暖化 4°C 情境下，臺灣平原地區皆超過門檻值 THI 72，臺灣乳牛畜牧場亦在平原區，如何調適熱緊迫傷害是目前畜牧產業重大課題。
6. 乳損失量衝擊指標：本研究結果顯示出未來臺灣乳量於全球暖化 2°C 情境下，乳產量平均下降 13%~15%，而來到 4°C 情境下，乳產量下降是 2°C 時的 2 倍~3 倍，乳產量平均下降約 20%~30%。

5.2 建議

1. 熱緊迫的影響主要來溫度、相對溼度，但兩個因子亦會受到風速、雨量、風向、輻射量等影響，國外學者亦有探討納入多項因子，可

更加明確表示熱緊迫的發生，建議後續研究可嘗試入其他因子探討，以提供畜牧業者參考依據。

2. 本研究目前採用國外乳量損失經驗公式計算，惟國內畜產試驗所有大量 10 多年乳產量紀錄資料，建議後續研究應可利用動力降尺度、TReAD 等資料與實際乳量資料，建立國內本土乳損失經驗公式較佳。
3. 未來畜牧業者都將遭到熱緊迫危害，國內政策多以淨零排碳政策為導向，但畜牧領域減熱調適策略較少探討，目前畜牧業者多以灑水、通風傳統手段進行調節熱緊迫，但未來若持續升溫，傳統手段應無法維持產能，造成調適缺口，建議國內應持續發展新技術，結合數位科技及相關排碳策略，以利調適全球暖化後造成產業及產能之缺口。

致謝

感謝國科會(計畫編號：NSTC 112-2119-M-865-004) 補助，爰本研究得以完成。此外承蒙「臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台」計畫 (Taiwan Climate Change Projection Information and Adaptation Knowledge Platform，簡稱 TCCIP)計畫參與人員諸多建議與指導，特此感謝。



參考文獻

- BIANCA, W. (1962) Relative Importance of Dry- and Wet-Bulb Temperatures in Causing Heat Stress in Cattle. *Nature* 195, 251–252.
<https://doi.org/10.1038/195251a0>
- Das, R., Sailo, L., Verma, N., Bharti, P., Saikia, J., Imtiwati, & Kumar, R. (2016). Impact of heat stress on health and performance of dairy animals: A review. *Veterinary World*, 9(3), 260-268. <https://doi.org/10.14202/vetworld.2016.260-268>
- Fodor N, Foskolos A, Topp CFE, Moorby JM, Pásztor L, Foyer CH. (2018). Spatially explicit estimation of heat stress-related impacts of climate change on the milk production of dairy cows in the United Kingdom. *PLoS One*, 13(5):e0197076. doi: 10.1371/journal.pone.0197076.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (2020). *The State of Food Insecurity in the World 2020*. Food and Agriculture Organization, Rome.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (2019). *The State of Food and Agriculture 2019*. Moving forward on food loss and waste reduction. Rome.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (2018). *The State of Food Insecurity in the World 2018*. Food and Agriculture Organization, Rome.
- Hristov, A. N., Degaetano, A. T., Rotz, C. A., Hoberg, Eric P., Skinner, R. H., Felix, T., Li, H., Patterson, P. H., Roth, G., Hall, M., Ott, T. L., Baumgard, L. H., Staniar, W., Hulet, R. M., Geraci, C. J., Brito, A. F., and Hollinger, D. Y. (2018). Climate change effects on livestock in the Northeast US and strategies for adaptation. *Clim. Change*, 146(1-2), 33-45, doi:10.1007/s10584-017-2023-z
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2022). *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, (pp. 3056). doi.org/10.1017/9781009325844
- National Research Council. Committee on Physiological Effects of Environmental Factors on Animals. (1971). *A guide to environmental research on animals*. National Academies of Sciences.

N.R. St-Pierre, B. Cobanov, and G. Schnitkey (2003). Economic losses from heat stress by US livestock industries. *Journal of Dairy Science*, 86, E52–77.

Paula A. Gonzalez-Rivas, Surinder S. Chauhan, Minh Ha, Narelle Fegan, Frank R. Dunshea, Robyn D. Warner (2020). Effects of heat stress on animal physiology, metabolism, and meat quality: A review. *Meat Science*, 146, doi.org/10.1016/j.meatsci.2019.108025

Rahimi, J., Mutua, J.Y., Notenbaert, A.M.O., Dieng, D. and Butterbach-Bahl, K. (2020). Will dairy cattle production in West Africa be challenged by heat stress in the future? *Climatic Change* 161:665–685.

Wreford, A. and C. F. E. Topp (2020). Impacts of climate change on livestock and possible adaptations: A case study of the United Kingdom. *Agric. Syst.*, 178, 102737, doi:10.1016/j.agsy.2019.102737.

Yousef, M. K. (1985). *Stress physiology in livestock. Volume I. Basic principles*. CRC press.

行政院農業委員會(2022)。農業委員會農業統計年報(110年)。行政院農業委員會。(瀏覽日期：2023/9/25)

<https://agrstat.coa.gov.tw/sdweb/public/book/Book.aspx>

行政院農業委員會畜牧試驗所。紓解家畜禽夏季熱緊迫。行政院農業委員會畜牧試驗所。(瀏覽日期：2023/9/25)

https://www.tlri.gov.tw/view.php?theme=web_structure&id=139

國家科學委員會(2021) 臺灣氣候變遷推估與資訊平台-統計與動力降尺度方法。國家科學委員會。(瀏覽日期：2023/9/25)

https://tccip.ncdr.nat.gov.tw/km_publish_data_document_one.aspx?dd_id=20210609212941

國家科學委員會(2022) 臺灣氣候變遷推估與資訊平台-資料介紹-歷史氣候重建資料。國家科學委員會。(瀏覽日期：2023/9/25)

https://tccip.ncdr.nat.gov.tw/ds_intro_one.aspx?ds_id=20221208212122

國家科學委員會(2022) 臺灣氣候變遷推估與資訊平台-資料介紹-動力降尺度。國家科學委員會。(瀏覽日期：2023/9/25)

https://tccip.ncdr.nat.gov.tw/ds_intro_one.aspx?ds_id=20221208212325

林修立、朱吟成、童裕翔(2019)。TCCIP 2019 年統計降尺度日資料即將上線。臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台(TCCIP)，電子報，028。

陳志毅、葉家舟、李國華、張菊犁、蕭宗法、謝昭賢、江欣蓉、姜延年(2009)，不同季節牛舍溫濕度指數與乳牛生產性狀之關係。畜產研究，42(1)：01-12。

葉亦馨、陳怡璇、陳一明、趙俊炫、陳志毅、楊明桂、李國華、蕭振文、涂柏安(2022)評估荷蘭泌乳牛於臺灣涼季及熱季之耐熱性能及其溫濕度指數閾值，中國畜牧學會會誌。51(1)，95-107。



畜牧領域應用氣候變遷推估資料之探討

發行人：陳宏宇

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：02-8195-8600

報告完成日期：中華民國 112 年 12 月

出版年月：中華民國 113 年 01 月

版 次：第一版

非賣品



地址： 23143 新北市新店區北新路三段 200 號 9 樓

電話： ++886-2-8195-8600

傳真： ++886-2-8912-7766

網址： <https://www.ncdr.nat.gov.tw>