

臺灣乳牛熱緊迫脆弱度係數之在地化估算及乳量損失經濟風險評估⁽¹⁾

柯美如⁽²⁾⁽³⁾ 陳玗彤⁽²⁾ 陳怡璇⁽²⁾ 蕭振文⁽²⁾ 施意敏⁽⁴⁾ 涂柏安⁽²⁾⁽⁵⁾

收件日期：114 年 9 月 10 日；接受日期：115 年 2 月 23 日

摘 要

氣候變遷導致極端氣候事件日益頻繁，全球酪農產業面臨嚴重之熱緊迫風險，影響乳牛健康、泌乳表現及牧場經濟效益。臺灣地處亞熱帶，乳牛飼養環境常年高溫高濕，熱緊迫問題尤為嚴峻。本研究針對臺灣氣候條件，建構乳牛熱緊迫與乳量損失關係之本地化模型。研究期間蒐集 2014 年至 2024 年間，臺灣北、中、南及東部共 9 座乳牛牧場之場級日平均乳量資料，並同步取得各牧場所在地區之逐日歷史氣象資料，包括日最高溫濕度指數 (Maximum daily Temperature-Humidity Index, $THI_{max,d}$) 與牛隻每日暴露於超過熱緊迫閾值 ($THI \geq 70$) 之時間比例。結合逐時氣象歷史資料、乳牛日泌乳量與熱緊迫指標，本研究建立臺灣在地化之乳牛熱緊迫風險評估模式，並以最小平方方法 (ordinary least squares, OLS) 估算出乳牛熱緊迫之脆弱度係數 (vulnerability coefficient, $k = 0.0200$)。進一步以蒙地卡羅隨機模擬方法，以歷史氣象數據為基礎，模擬未來可能出現極端高溫情境，評估及量化乳牛乳量損失。模擬顯示，臺灣乳牛牧場在熱緊迫情境下，平均每頭每日乳量損失約 2.07 公斤，且在 95% 信賴區間之極端情境下，單日乳量損失可超過 6 公斤，換算經濟損失約為新臺幣 0.59 至 179.49 元 / 頭 / 日。顯示在現行氣候與乳價條件下，熱緊迫已對乳牛生產效益構成顯著經濟風險，所建立之模型與評估結果可作為未來調適政策與補助制度設計之科學依據。

關鍵詞：乳牛熱緊迫、蒙地卡羅模擬、脆弱度係數。

緒 言

全球暖化導致氣候變遷日益加劇，極端氣候如熱浪、極端降雨和長期乾旱，造成極端氣候事件發生頻率增加，對酪農業之生產能力及經濟效益構成重大挑戰 (Chang-Fung-Martel *et al.*, 2017)。根據環境部氣候變遷署 (2023) 資料顯示，過去 110 年間，臺灣年平均氣溫上升約 1.6°C，且近 50 年來呈現加速趨勢。Chen *et al.* (2021) 以代表性濃度路徑 (Representative concentration pathways, RCP) 8.5 情境進行氣候模擬預測，至 2060 年，臺灣年均超過 30°C 的高溫日數將大幅增加 2 到 5 倍。另根據農業部 (2023) 統計，臺灣酪農產業主要分布於中南部地區，該區於夏季期間常出現氣溫超過攝氏 35 度的現象，並長時間處於溫濕度指數偏高之條件下，顯示飼養於此地區之乳牛在氣候變遷下，將面臨更嚴峻之熱緊迫風險。

乳牛對環境溫度較為敏感 (Araki *et al.*, 1984)，在眾多氣候因子當中，高溫被認為是對乳牛最具威脅性的環境因子。當乳牛長期暴露在高溫環境且散熱能力不足，導致體溫過高，進而產生熱緊迫，會對其採食量、泌乳量、繁殖能力與整體健康造成負面影響 (Mahamed, 2024)。溫濕度指數 (Temperature-Humidity Index, THI) 為綜合環境溫度和濕度的指標 (NOAA, 1976)。尤其當高溫及高濕度的環境條件同時出現時，更容易造成牛隻熱緊迫，從而導致乳量下降和品質降低 (Hill and Wall, 2015)。研究顯示，乳牛對於濕熱環境極為敏感，當日濕球溫度超過 26°C 時，每增加 1 小時的暴露即可使當日乳量再下降約 0.5%，極端高溫事件更導致乳量即刻減少 10% 的產量，且其負面影響可延續逾 10 天，即便使用風扇與水霧等降溫設施亦僅能緩解部分負面效果。此結果更凸顯了酪農業在氣候暖化與極端

(1) 農業部畜產試驗所研究報告第 2849 號。
(2) 農業部畜產試驗所北區分所。
(3) 國家災害防救科技中心。
(4) 農業部畜產試驗所技術服務組。
(5) 通訊作者，E-mail: tpa@mail.tlri.gov.tw。

熱浪的頻率增加時，所面臨之產能與韌性挑戰 (Palandri *et al.*, 2025)。除此之外，乳量損失的幅度亦因氣候帶而異。在溫帶地區，例如英國過去 40 年平均每年僅約 1 日出現 THI 超過乳牛熱緊迫閾值的情況，但於 2003 與 2006 年熱浪事件發生期間，中南部地區則達到 5 日以上，部分牧場乳量顯著下降 (Dunn *et al.*, 2014)。Fodor *et al.* (2018) 推估於 2090 年英格蘭東南部年乳量損失可超過 170 公斤 / 頭，極端年份的情況下，其年乳量損失甚至接近 600 公斤 / 頭。相較之下，亞熱帶與熱帶地區乳牛面臨更嚴重的挑戰，研究指出在高溫高濕條件下，產乳量每日可下降 3 – 6 公斤，於熱浪期間甚至超過 8 公斤，且損失幅度通常比溫帶乳牛高出 1.5 – 2 倍 (Habimana *et al.*, 2023)，此結果顯示隨著全球暖化，乳牛的脆弱性將隨地理位置而有顯著差異，尤其亞熱帶與熱帶乳業需強化調適措施。此外，研究指出，熱緊迫下乳量的下降並非單純由採食量減少所致，即使在等量採食條件下，泌乳量仍顯著下降，表示代謝調控與內分泌重分配為熱緊迫影響泌乳量的關鍵 (Rhoads *et al.*, 2009; Wheelock *et al.*, 2010)。

基於上述研究，現行乳牛熱緊迫衝擊評估指標以溫度與濕度估算的 THI 為主，在高濕高輻射的亞熱帶環境亦有學者主張採用納入風速與輻射的綜合氣候指數 (如 CCI) 或熱負荷指數 (Heat load index, HLI) 作為補充 (Gaughan *et al.*, 2008; Mader *et al.*, 2010)。熱緊迫對乳牛生產系統帶來顯著經濟衝擊，St-Pierre *et al.* (2003) 估算，美國每年因熱緊迫導致之畜牧業經濟損失約為新臺幣 51.9 – 61 億元，其中以乳品產業受影響最大。對於臺灣而言，若能建立量化預測高溫事件下乳量減產與經濟損失的模型，將有助於強化政府在農業補助設計、氣候風險保險及畜牧場調適策略制訂上的科學決策基礎。

儘管國際間已有多項針對乳牛熱緊迫之氣候指標與產量損失模型的研究，並廣泛應用於熱緊迫風險評估與畜產管理建議中，然而這些模型大多建立於溫帶地區的氣候與飼養條件，其經驗參數未必適用於臺灣潮濕且長期高溫的亞熱帶環境。在熱緊迫閾值設定方面，隨著乳牛泌乳量提升，乳牛對熱的敏感性增加。Ekine-Dzivenu *et al.* (2020) 以撒哈拉以南非洲之小型乳牛牧場為研究對象，發現高產荷蘭牛於部分熱帶與亞熱帶環境中，其產乳量受熱緊迫之反應具有提前的現象，建議將 THI 閾值下修至約 68；該研究亦指出，不同地區因氣候乾濕特性、飼養方式與管理條件不同，乳牛對熱緊迫之敏感程度與適用之 THI 閾值存在明顯差異。臺灣針對乳牛熱緊迫所致乳量損失進行量化分析，並調整評估公式之相關研究仍相對有限；特別是結合實際乳牛泌乳資料與氣象觀測資料，所進行經驗模型之在地化修正的文獻更為稀少。因此，本研究擬以臺灣地區乳牛牧場之生產與氣象實測資料為基礎，修正國際既有熱緊迫評估模型中之脆弱度參數，建立更貼近本地氣候與乳牛生理特性的在地化評估工具，期能提供乳牛產業更具科學依據之熱緊迫風險管理與氣候調適決策參考。

材料與方法

I. 研究資料來源與數據收集方式

為建構適合臺灣乳牛牧場熱緊迫經濟影響評估的在地化模型，首先於 2014 至 2024 年期間，從臺灣北部 1 場、中部 2 場、南部 5 場及東部 1 場共計 9 場具代表性乳牛牧場收集每日泌乳牛群場級之日平均乳量 (kg/cow/day)，同時自中央氣象署所屬測站取得各牧場鄰近區域的逐時氣象歷史資料，包括每日逐時溫度 (T, °C) 及相對濕度 (RH, %)。經資料前處理與品質檢核後，納入分析之有效觀測資料項目包括：每日場級平均泌乳量 (kg/cow/day)、逐時環境溫度 (°C / h) 與相對濕度 (%/h)，並依逐時氣象資料計算日最高溫濕度指數 (THI_{max, d})、熱負荷幅度 (ΔTHI) 及熱緊迫暴露比例 (D)。最終共取得 3,753 頭泌乳牛之日級有效觀測資料 (指平均泌乳量)，作為後續分析之基礎資料集。

II. 溫濕度指數計算與閾值設定

乳牛之熱緊迫衝擊指標以溫濕度指數表示。本研究採用 NOAA (1976) 所提出之公式計算每日 THI，如下所示：

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

其中 T 為日逐時溫度 (°C)，RH 為該時段相對濕度 (%)。

每日取該日最高逐時 THI 值，定義為日最高溫濕度指數 (THI_{max, d})。根據臺灣亞熱帶氣候條件與相關研究經驗，Tu *et al.* (2025) 以臺灣實際飼養環境為背景，分析不同 THI 水準下泌乳牛之產乳表現與生理反應，結果顯示當 THI 超過約 70 後，乳量下降、呼吸速率與直腸溫度等熱緊迫指標均出現明顯變化，顯示 THI = 70 可合理作為乳牛開始受到顯著熱緊迫影響之臨界點。考量本研究使用之資料亦來自臺灣商業乳牛牧場，故設定 THI = 70 為熱緊迫評估之閾值，作為泌乳牛群開始顯著受到熱緊迫影響而導致泌乳量損失之分界點，以確保評估結果具在地適用性。

III. 資料前處理與乳量損失估算

為建立適合臺灣情境的熱緊迫損失模型，研究進一步將日級資料轉換為下述變數：

(i) 熱負荷幅度 (ΔTHI_d)：

日最高 THI 超過 THI 閾值之差異，定義為：

$$\Delta\text{THI}_d = \text{THI}_{\max, d} - \text{THI}_{\text{thr}}$$

其計算方式係依據 St-Pierre *et al.* (2003) 所提出之乳牛熱緊迫評估模型。

(ii) 暴露比例 (D_d)：

計算當日 THI 超過閾值 ($\text{THI} > 70$) 的時數佔全天 24 小時的比例，以表示當日乳牛群遭受熱緊迫影響的時間比例。

(iii) 乳量損失 (L_d)：

本研究乃旨在探討熱緊迫對產乳量之影響，因此每一牧場均使用最不受熱緊迫影響之冬期 (每年 12 月至翌年 3 月) 的日平均乳量做為基礎乳量值，計算該場熱緊迫期間日平均乳量相對於基礎乳量值的差值，做為熱緊迫乳量損失 ($\text{kg}/\text{cow}/\text{day}$)。

IV. 模型建立與脆弱度係數估算

採用 St-Pierre *et al.* (2003) 所提出的二次熱緊迫模型之理論架構，並以最小平方方法 (Ordinary least squares, OLS) 估計臺灣乳牛熱緊迫之脆弱度係數 (k)。模型公式為：

$$L_d = k \times X_d + \varepsilon_d, \text{ 其中 } X_d = (\Delta\text{THI}_d)^2 \times D_d$$

以 OLS 無截距迴歸方式，估計係數 k 表示臺灣乳牛每增加一單位熱負荷指數 (X_d)，所造成的平均乳量損失 (L_d ; $\text{kg}/\text{cow}/\text{day}$)。模型之適配度及解釋力以調整後決定係數 R^2_{adj} (Adjusted R^2) 評估，預測誤差則以均方根誤差 (Root-mean-square error, RMSE) 呈現。

V. 模型適配性評估

為驗證模型之穩定性與有效性，透過以下四個視覺化診斷圖 (Diagnostic plots) 進行模型診斷與適配性驗證：

- (i) 觀測點與迴歸線圖：熱負荷指標 $X = (\text{THI}_{\max, d} - \text{THI}_{\text{thr}})^2 \times D$ 。將模型預測線與實際觀測點共同繪製，觀察觀測點是否沿迴歸線均勻分布，藉此初步確認模型設定之線性假設是否成立，並目視觀察潛在的異常值或資料趨勢。
- (ii) 殘差 (Residuals) 與擬合值 (Fitted values) 圖：評估模型殘差之線性假設與同質性 (Homoscedasticity)，特別檢視殘差是否存在異質變異數 (Heteroscedasticity) 現象或有明顯的非線性趨勢或特定結構存在。
- (iii) 常態 Q-Q 圖 (Normal Q-Q plot)：以殘差之樣本分位數 (Sample quantiles) 對應理論常態分位數 (Theoretical normal quantiles)，用以檢定殘差分布是否符合常態性 (Normality)。
- (iv) 乳量損失對 $\text{THI}_{\max, d}$ 圖 (Milk-loss vs. $\text{THI}_{\max, d}$ plot)：此圖顯示以每日最高溫濕度指數與每日實際觀測之乳量損失 (Milk loss) 之關係，並計算局部迴歸平滑曲線 (Locally estimated scatterplot smoothing, LOESS)，以視覺化呈現乳牛群乳量損失與實際環境熱強度之非線性關係，並提供決策者更具體的環境指標參考依據，評估極端熱負荷日對乳量的影響程度與非線性效應。

VI. 蒙地卡羅乳量損失風險模擬分析

為評估未來氣候不確定性與熱負荷波動所造成的乳量損失風險，採用蒙地卡羅隨機模擬法，進行 1,000 次隨機抽樣模擬，熱負荷幅度隨機抽樣根據農業氣象歷史資料所估算之熱負荷幅度均值與標準差，以截斷常態分布 (Truncated normal distribution) 隨機抽取每日熱負荷幅度 (ΔTHI^*)： $\Delta\text{THI}^* \sim \max\{0, N(\mu_{\Delta\text{THI}}, \sigma_{\Delta\text{THI}}^2)\}$ 。暴露比例隨機抽樣根據歷史暴露比例 (D_d) 之經驗分布 (Empirical distribution) 隨機抽樣暴露比例 (D^*)，以反映實務上暴露時間的隨機波動。模擬結果進一步彙整為乳量損失之機率分布，計算平均乳量損失、標準差及 95% 信賴區間 (Confidence interval, CI)，提供管理者與決策者氣候風險的量化依據。

結 果

為建立臺灣地區乳牛熱緊迫經濟風險評估之在地化模型，本研究整合實際乳牛泌乳資料與氣象觀測資料，量化熱負荷對乳量之衝擊程度，並進一步推估乳牛熱緊迫脆弱度係數 (k 值)，作為衡量敏感性的重要指標。本研究選定溫濕度指數作為評估乳牛熱緊迫程度的衡量指標，並以 $\text{THI} = 70$ 作為閾值基準，進一步分析乳牛在不同熱負荷幅度

(ΔTHI_d) 與暴露比例 (D_d) 條件下之乳量變化。

I. 資料基本統計描述

蒐集 2012 – 2024 年間臺灣北、中、南、東部 9 座乳牛牧場，總計有 3,753 頭牛之有效逐日觀測資料。在本研究設定之 THI 閾值 70 以上之有效觀測資料進行分析。熱負荷幅度 (ΔTHI_d) 平均值為 8.94，標準差為 3.80；暴露比例 (D_d) 平均值為 0.73 (約每日 17.5 小時)，標準差為 0.28；每日乳量損失 (L_d) 平均為 2.54 kg/cow/day，標準差為 2.66，最大值超過 10 kg/cow/day (表 1)，顯示熱緊迫對乳量之顯著負面影響。

表 1. 熱緊迫條件下之乳牛熱負荷指標、暴露比例與每日乳量損失之基本統計描述

Table 1. Descriptive statistics of heat load, exposure, and daily milk loss under heat stress conditions

	mean	standard deviation	mini-mum	median	maximum
ΔTHI_d	10.41	4.98	0.06	11.33	19.54
D_d	0.77	0.32	0.04	1	1
Exposure hours/day	18.52	7.71	1.01	24	24
L_d	3.4	2.39	0	3.18	11.03

This table summarizes the descriptive statistics of valid daily observations recorded under heat stress conditions, defined as days with a temperature–humidity index (THI) ≥ 70 .

ΔTHI_d represents the magnitude by which the daily maximum THI exceeds the threshold.

D_d denotes the proportion of the day during which cows were exposed to heat stress conditions.

Exposure hours/day were calculated as $D_d \times 24$.

L_d indicates the daily milk loss per cow (kg/cow/day). Values are presented as the mean, standard deviation, minimum, median, and maximum.

II. 臺灣乳牛熱緊迫脆弱度本土係數之估算結果

如圖 1 所示，乳牛每日乳量損失與熱負荷呈現線性增加趨勢，點群分布清晰且趨勢明確，回歸線良好貼合資料點。估算臺灣乳牛熱緊迫脆弱度本土係數 k 為 0.0200。模型解釋力 (Adjusted R^2) 為 61.2%，顯示本研究所定義之熱負荷指標能有效解釋臺灣乳牛群熱緊迫下約六成的乳量損失變異；模型之 RMSE 為 2.59 kg/cow/day (圖 1)。

III. 統計模型適配性評估

以視覺化診斷圖進行統計模型假設驗證，共進行 4 項圖表分析，結果描述如下：

(i) 觀測點與迴歸線圖

熱負荷指標 (X) 與每日乳量損失之散點圖如圖 1 所示，多數觀測點集中於較低至中等熱負荷範圍，但存在一定程度的變異與分散情形；在較高熱負荷範圍，乳量損失明顯隨值增加而提高，點群趨勢清晰呈現線性分布，迴歸線可良好地貼合資料點趨勢，顯示本模型線性假設成立。

(ii) 殘差 (Residuals) 與擬合值 (Fitted values) 圖

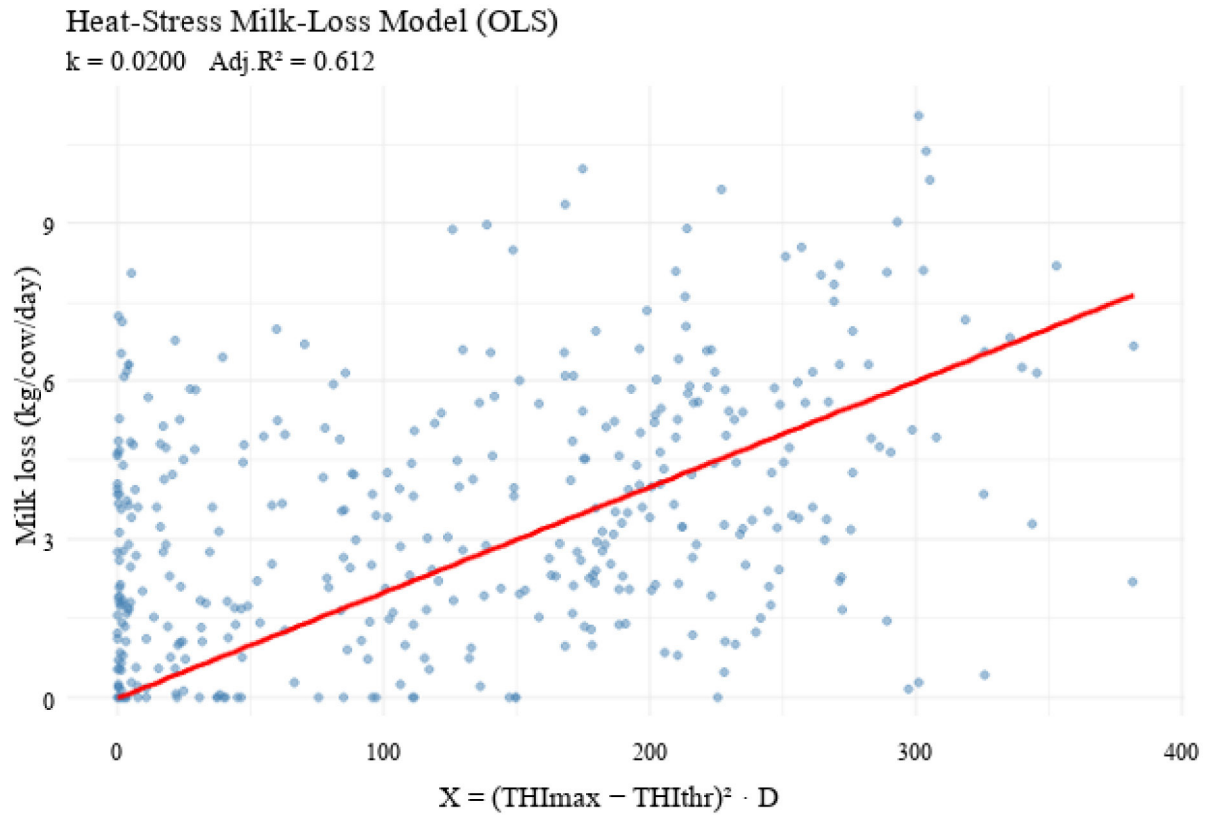
模型殘差診斷結果顯示 (圖 2A)，殘差與擬合值散點圖中，隨著預測值 (乳量損失) 增加，殘差變異幅度逐漸縮小，且部分殘差集中於特定擬合值範圍，顯示模型可能存在異質變異數，未完全符合變異同質性假設。惟由常態 Q-Q 圖可見，多數點位大致落於對角線附近，表示殘差整體近似常態分布。整體而言，本模型殘差常態性尚可接受，但變異同質性仍有待進一步檢視。

(iii) 常態 Q-Q 圖 (Normal Q-Q plot)

殘差之常態 Q-Q 圖顯示 (圖 2B)，大部分資料點位於理論常態分位數直線附近，僅在兩端存在些微偏離常態分布假設，顯示殘差近似常態。此現象程度輕微且大樣本下並不顯著影響模型係數之估計精度。

(iv) 乳量損失對 $\text{THI}_{\max, d}$ 散點圖與 LOESS 平滑曲線

當 $\text{THI}_{\max, d}$ 位於 70 – 78 區間時，乳量損失緩慢增加；當 $\text{THI}_{\max, d}$ 超過約 80 後，乳量損失急劇升高，明顯呈現非線性且快速增加趨勢。此結果亦證實研究 THI 閾值設定 ($\text{THI} = 70$) 及熱負荷對乳量之非線性影響明確存在 (圖 3)，顯示高 THI 環境對乳牛泌乳表現造成顯著負面衝擊。



$$\Delta THI_d = THI_{max,d} - THI_{thr}$$

I
 圖 1. 熱緊迫指標 $X = (THI_{max,d} - THI_{thr})^2 \times D$ 與乳量損失 (kg/cow/day) 之散點圖。觀測點為 2014 – 2024 年間臺灣 9 座乳牛場每日觀測值，直線為以最小平方方法 (OLS) 建立之線性回歸線。

Fig. 1. Scatter plot showing the linear relationship between heat-load index $X = (THI_{max,d} - THI_{thr})^2 \times D$ and daily milk loss (kg/cow/day). Each point represents a daily observation collected from 8 representative dairy farms in Taiwan between 2014 and 2024. The line indicates the ordinary least squares (OLS) regression line fitted to the data. The scatter plot illustrates a clear linear trend between increasing heat load and milk loss, with higher heat load values corresponding to more milk loss. The linear assumption is well supported (coefficient $k = 0.0200$, Adjusted $R^2 = 0.612$), validating the model's applicability for heat-stress impact assessment.

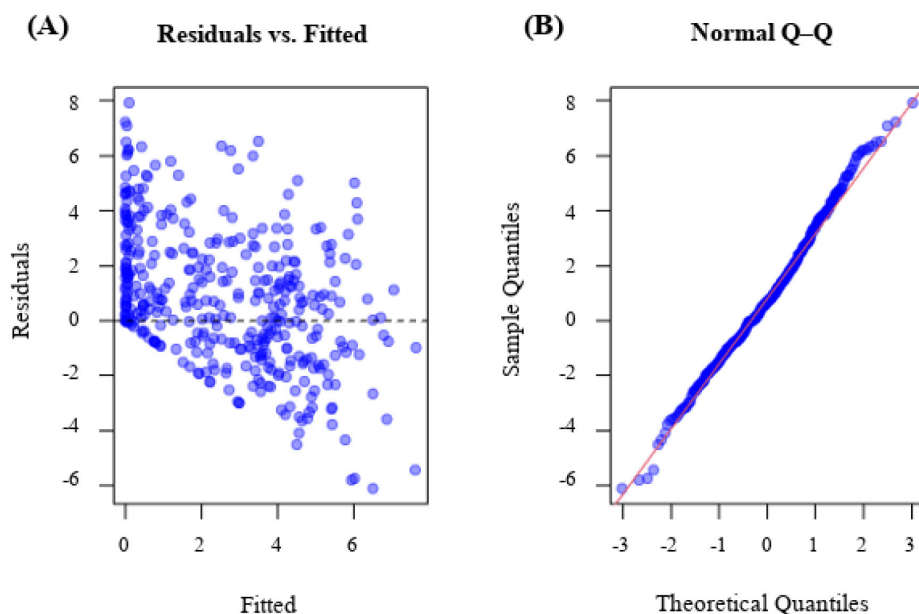


圖 2. (A) 線性迴歸模型之殘差診斷圖。為殘差與擬合值的關係圖，用以檢視殘差是否呈現隨機分布，以確認變異數同質性 (Homoscedasticity) 及線性假設是否成立檢定。(B) 常態 Q-Q 圖，用以比較模型殘差分布與理論常態分布是否一致。若資料點大致沿著對角線分布，表示殘差近似常態分布，因此可支持模型殘差符合常態性假設。

Fig. 2. Diagnostic plots for evaluating assumptions of the linear regression model. The (A) panel shows the residuals versus fitted values, which is used to assess whether residuals are randomly distributed and whether homoscedasticity and linearity assumptions hold. In this plot, residuals show mild heteroscedasticity, suggesting potential variance inequality at certain fitted values. The (B) panel displays the Normal Q-Q plot, which compares the distribution of residuals with the theoretical normal distribution. Points closely aligned along the diagonal line indicate that the residuals follow a normal distribution, thus supporting the normality assumption.

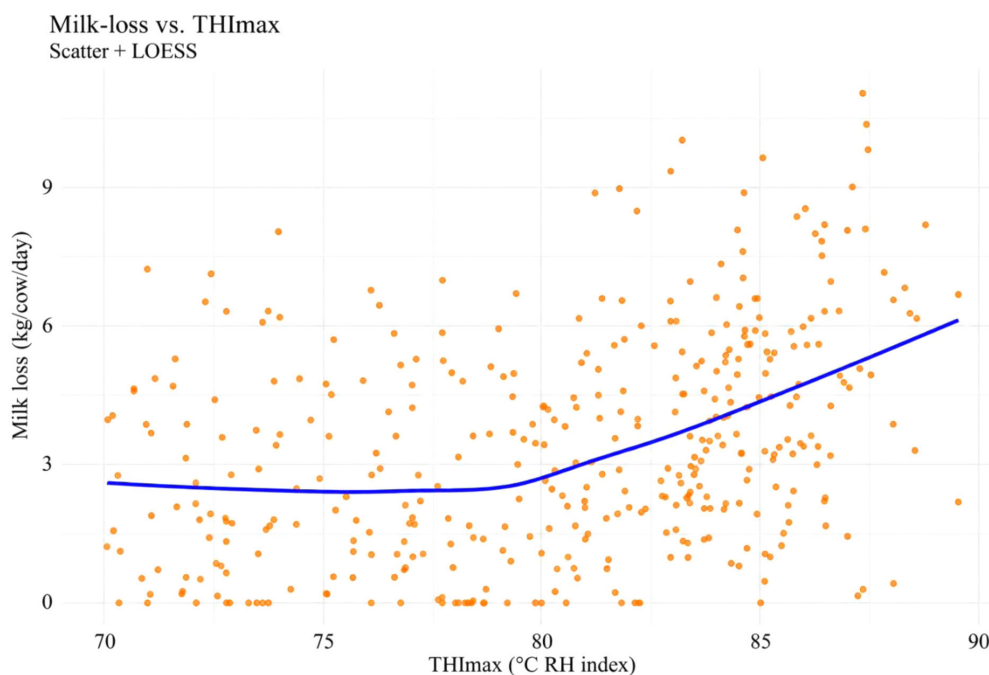


圖 3. 乳量損失與日最高溫濕指數 ($THI_{max, d}$) 之關係圖。圖中各點代表每日實際觀測之乳量損失值 (kg/cow/day)，實線為局部加權迴歸平滑線 (Locally estimated scatterplot smoothing, LOESS)。

Fig. 3. Relationship between daily milk loss (kg/cow/day) and maximum daily Temperature-Humidity Index $THI_{max, d}$. Orange dots represent observed daily milk losses, while the blue line shows the LOESS smoothed trend. The plot illustrates a nonlinear relationship: milk loss remains relatively stable when is below 75, but increases significantly once exceeds 80.

IV. 蒙地卡羅乳量損失風險模擬分析結果

為評估乳量損失於實際氣候變動下的日級變動與經濟風險，以蒙地卡羅隨機模擬法進行乳量損失風險評估，總計進行 1,000 次隨機模擬試算，結果顯示每日平均乳量損失為 2.07 kg/cow/day，乳量損失之標準差為 1.71，乳量損失之 95% 信賴區間範圍介於 0.02 至 6.13 kg/cow/day 之間。

模擬結果表示，於現行臺灣牧場經營情境及季節性熱緊迫環境下，乳牛受熱緊迫影響所造成的每日平均乳量損失約為 2 kg/cow/day，並且在 5% 極端情境下，損失可能達到 6 kg/cow/day 以上，顯示出熱緊迫所帶來的乳牛乳量損失之顯著經濟風險 ($P < 0.05$)。

V. 乳量損失導致經濟損失

根據農業部現行生乳參考收購價格採冬、暖、夏三段式計價，以乳脂率及無脂固形物 (solids not fat, SNF) 為計價基準，根據 2024 年臺灣乳價，各期均價為冬期 (12 至 3 月) 21.79 元 / 公斤、暖期 (4、5、10 及 11 月) 27.28 元 / 公斤及夏期 (6 至 9 月) 29.28 元 / 公斤。本研究之乳量經濟損失係以模型估計之每日乳量損失 (公斤 / 頭 / 日)，乘以熱緊迫最嚴重之夏期的生乳參考收購價格 (元 / 公斤) 計算而得，以反映熱緊迫對乳量下降實際經濟影響。模擬結果顯示，在夏期高溫條件下，乳牛因熱緊迫造成之乳量經濟損失平均為 60.61 元 / 頭 / 日 (2.07 公斤 29.28 元)。在 95% 信賴區間的範圍下，一日損失最高可達 179.49 元 / 頭 / 日以上 (6.13 公斤 29.28 元)，即便在熱緊迫影響極小的模擬條件下，乳量損失所導致的每日經濟損失仍為約 0.59 元 / 頭 / 日 (0.02 公斤 29.28 元)。

討 論

本研究以 $THI = 70$ 為閾值，估算出我國乳牛熱緊迫脆弱度係數 $k = 0.0200$ ，顯示在亞熱帶潮濕氣候條件下，乳牛對熱緊迫具有中等敏感性。與國際研究比較可發現，熱帶及亞熱帶地區的結果與本研究相近，並於 $THI > 80$ 後乳量損失呈現加速的非線性反應。研究以濕球溫度評估熱暴露的持續效應，結果顯示極端高溫造成的乳量下降可持續超過 10 天 (Palandri *et al.*, 2025)。若我國未來改採含風速與太陽輻射的綜合指標 (如 CCI/HLI) 估算熱負荷，因 CCI/HLI 將輻射熱與風速納入指標內一起評估，能直接反映太陽輻射所造成之額外熱吸收，以及風速不足時對牛隻對流與蒸發散熱效率之限制，可更完整呈現牛隻實際承受之熱負荷，因此在高濕高輻射的環境下，乳損與經濟損失可能出現較本研究增加的結果 (Gaughan *et al.*, 2008; Mader *et al.*, 2010)。另一方面，研究顯示採食量下降僅佔熱緊迫乳量損失原因的一部分，其餘來自代謝與內分泌的重分配與乳腺合成的抑制作用 (Rhoads *et al.*, 2009; Wheelock *et al.*, 2010)，這可合理化本研究在高 THI 區段觀察到的乳損陡升。除泌乳量降低外，熱緊迫亦常伴隨乳品質下降與體細胞數升高的情況，且繁殖能力顯著降低 (Schüller *et al.*, 2014; Becker *et al.*, 2020; Chen *et al.*, 2024)，表示以乳量預估熱緊迫所導致之經濟損失僅為保守估計。

Mbuthia *et al.* (2021) 於肯亞的分析顯示 THI 閾值為 69，每 1 個 THI 單位的乳量損失介於 0.25 至 0.47 kg/day，與本研究換算後的約 0.32 kg/day 接近，反映熱帶與亞熱帶地區乳牛具有相似的熱緊迫反應模式 (Mbuthia *et al.*, 2021)。Amamou *et al.* (2022) 在突尼西亞地中海氣候下的研究則顯示，經產乳牛每 THI 單位損失約 0.135 kg/day，且 THI 閾值介於 65 – 67，其結果與其他文獻相比較低，可能反映當地氣候較為涼爽與乳牛品種適應性。在溫帶地區，Bernabucci *et al.* (2014) 以乳量開始明顯下降之後的中高 THI 值區間 (約 $THI \geq 73$) 估算義大利乳牛泌乳量損失率，發現每增加 1 個 THI 單位將有 0.90 至 1.27 kg/day 的泌乳量損失，顯著高於熱帶地區，顯示溫帶乳牛對高溫耐受性較低。Bohmanova *et al.* (2007) 則於美國喬治亞州觀察到 THI 超過 72 時，每增加 1 個 THI 單位會導致初產乳牛泌乳量損失約 0.39 kg/day，其損失量介於熱帶與歐洲溫帶的評估結果之間。Arias *et al.* (2024) 同樣採用 St-Pierre *et al.* (2003) 的乳量損失模型，在智利八個產乳區以 THI 閾值 65 進行評估，估計夏季每頭牛經濟損失為新臺幣 2,745 – 5,526 元，全年國家損失為新臺幣 870 – 3,250 萬元。該研究顯示，若使用包含太陽輻射與風速修正的 THI 指標，乳量損失估計將比原本僅以溫濕度評估的結果高 2.0 – 6.4 倍，顯示氣候要素的多維影響不可忽視。臺灣為海島型氣候，未來相關研究評估可納入風速與輻射資料，以捕捉實際熱負荷。本研究採用 $THI = 70$ 作為閾值，此設定與熱帶的肯亞 ($THI = 69$) 接近 (Mbuthia *et al.*, 2021)，高於突尼西亞 ($THI = 65 - 67$) 與智利 ($THI = 65$) (Amamou *et al.*, 2022; Arias *et al.*, 2024)，低於傳統溫帶地區所採用的 THI 閾值 72 (St-Pierre *et al.*, 2003)。本研究採用 LOESS 分析顯示 THI 超過 80 後乳量損失急遽上升，此觀察與國際上對嚴重熱緊迫閾值的認知一致。

根據農業部 (2024) 農業統計指標資料顯示，產乳牛在養頭數為 59,259 頭，結合研究估算所得之脆弱度係數 ($k = 0.0200$) 進行推估，結果顯示在夏季高溫情境下，平均每頭產乳牛每日之乳量損失約為 2.07 公斤，若以國內夏

季收購乳價每公斤 29.28 元計算，並以夏季期間約 122 天進行年化推估，則全臺產乳牛因熱緊迫所導致之年總乳量損失約為新臺幣 4.4 億元。以美國為例，St-Pierre *et al.* (2003) 估算一年中 THI 超過熱緊迫閾值的日數計算年度乳量損失，最後乘以當年度乳價換算為經濟損失，估計年度損失為新臺幣 27.27 億元。智利的損失經年化換算後為新臺幣 17.4 – 65.1 億元，考量到智利的乳牛養殖數量約為我國的 1.5 倍 (Arias *et al.*, 2024)，我國的年度損失金額，在相對規模上是合理的，甚至可能偏向保守估計；而突尼西亞因乳價與氣候條件與臺灣不同，因此損失較低 (Amamou *et al.*, 2022)。結果顯示，現行氣候與乳價條件下，熱緊迫所導致之乳量損失已展現具統計顯著性之經濟風險，顯示其為影響乳牛生產效益之重要氣候因子。

在熱帶與溫帶不同地區，熱緊迫對乳牛生產及經濟影響差異顯著。國際經驗顯示，熱緊迫風險將隨氣候變遷增加。VanderZaag *et al.* (2023) 指出，即使在加拿大等涼爽地區，熱緊迫天數亦呈上升趨勢。Key *et al.* (2014) 預測至 2030 年美國乳業產量損失將增加 0.60 – 1.35%。印度北方平原地區在 RCP4.5 情境下，若未採取調適行動，2021 – 2040 年間年均乳量損失可達 34 – 63 萬公噸，造成每年約新臺幣 47 – 82 億元損失；即便單位產量提升，若無同步強化調適策略，損失仍可達新臺幣 84.4 億元 (Choudhary and Sirohi, 2022)。英國英格蘭西南地區因乳牛密度高，在未採取緩解措施情況下，本世紀末年收入損失預估為新臺幣 5.6 億元，極端情況可達新臺幣 14.1 億元 (Fodor *et al.*, 2018)。南非半乾旱地區在日最高溫超過 25°C 時乳量顯著下降，夏季高溫情境下每日每頭損失約 0.35 公升，換算年經濟損失約新臺幣 10 億元 (Ogundeji *et al.*, 2021)。本研究為提升模型在地適用性，沿用 St-Pierre *et al.* (2003) 模型理論結構，並以國內牧場的實測資料重新估算 k 值。與智利研究相比，本研究更聚焦於脆弱度係數的精確估算與蒙地卡羅模擬的不確定性量化，而智利則著重不同熱指標比較 (Arias *et al.*, 2024)。蒙地卡羅模擬可提供乳量損失的機率分布與極端值，對政策與保險設計尤為重要。

結 論

本研究使用臺灣乳牛牧場實際場級日資料，透過 St-Pierre *et al.* (2003) 所提出的二次熱緊迫乳量損失模型框架，估算出臺灣乳牛熱緊迫之在地化脆弱度係數 ($k = 0.0200$)。本模型能有效解釋乳量損失之 61% 變異，且經診斷分析確認模型線性與常態性假設符合，但於低度熱緊迫下存在異質變異數現象。進一步透過蒙地卡羅模擬分析顯示，氣候熱緊迫對乳量損失有顯著影響，特別在 $THI_{max, d}$ 超過約 80 之極端氣候條件下，乳牛乳量損失呈加速增加趨勢，帶來每日高達 6 kg/cow/day 以上之顯著經濟損失風險。整體而言，本研究成功建立一套結合實測資料與模擬推估之乳牛熱緊迫經濟損失評估架構，不僅具實證基礎，結果亦展現與國際研究相符之可比性，所建模型與結果可作為政府推動調適政策、氣候補貼與風險預警系統建置之科學依據。未來建議擴大涵蓋不同飼養型態與管理策略，進一步評估乳牛產業在不同氣候情境下之經濟脆弱度，以提升臺灣酪農業整體之氣候韌性與永續發展能力。

參考文獻

- 環境部氣候變遷署。2023。國家氣候變遷調適行動計畫。行政院環境部。<https://www.climatechange.tw/>。
- 農業部。2023。112 年農業統計年報。行政院農業部。<https://www.moa.gov.tw/>。
- 農業部。2025。畜禽統計調查結果 (114 年 1 季)。行政院農業部。<https://www.moa.gov.tw/>。
- Amamou, H., M. Mahouachi, L. M. Dale, Y. Beckers, and H. Hammami. 2022. Vulnerability assessments in dairy cattle farms based on individual sensitivity to heat stress. *Int. J. Biometeorol.* 66: 1403-1414.
- Araki, C. T., R. M. Nakamura, L. W. G. Kam, and N. Clarke. 1984. Effect of lactation on diurnal temperature patterns of dairy cattle in hot environments. *J. Dairy Sci.* 67: 1350-1356.
- Arias, R. A., J. P. Keim, R. Pinto, and E. Bombal. 2024. Estimation of the economic impact of heat stress on the Chilean dairy regions by using two comfort thermal indices. *Int. J. Biometeorol.* 68: 1823-1836.
- Becker, C. A., R. J. Collier, and A. E. Stone. 2020. Invited review: Physiological and behavioral effects of heat stress in dairy cows. *J. Dairy Sci.* 103: 6751-6770.
- Bernabucci, U., S. Biffani, L. Buggiotti, A. Vitali, N. Lacetera, and A. Nardone. 2014. The effects of heat stress in Italian Holstein dairy cattle. *J. Dairy Sci.* 97: 471-486.
- Bohmanova, J., I. Misztal, and J. B. Cole. 2007. Temperature-humidity indices as indicators of milk production losses due to heat stress. *J. Dairy Sci.* 90: 1947-1956.

- Chang-Fung-Martel, J., M. T. Harrison, R. P. Rawnsley, A. P. Smith, and H. Meinke. 2017. The impact of extreme climate events on pasture-based dairy systems: A review. *Crop. Pasture Sci.* 68: 1158-1176.
- Chen, C. C., Y. R. Wang., Y. C. Wang, S. L. Lin, C. T. Chen, M. M. Lu, and Y. L. L. Guo. 2021. Projection of future temperature extremes, related mortality, and adaptation due to climate and population changes in Taiwan. *Sci. Total Environ.* 760: 143373.
- Chen, L., V. M. Thorup, A. B. Kudahl, and S. Østergaard. 2024. Effects of heat stress on feed intake, milk yield, milk composition, and feed efficiency in dairy cows: A meta-analysis. *J. Dairy Sci.* 107: 3207-3218.
- Choudhary, B. B. and S. Sirohi. 2022. Understanding vulnerability of agricultural production system to climatic stressors in North Indian Plains: a meso-analysis. *Environ. Dev. Sustain.* 24: 13522-13541.
- Dunn, R. J. H., N. E. Mead, K. M. Willett, and D. E. Parker. 2014. Analysis of heat stress in UK dairy cattle and impact on milk yields. *Environ. Res. Lett.* 9: 064006.
- Fodor, N., A. Foskolos, C. F. E. Topp, J. M. Moorby, L. Pásztor, and C. H. Foyer. 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: e0197076.
- Gaughan, J. B., T. L. Mader, S. M. Holt, and A. Lisle. 2008. A new heat load index for feedlot cattle. *J. Anim. Sci.* 86: 226-234.
- Habimana, V., A. S. Nguluma, Z. C. Nziku, C. C. Ekine-Dzivenu, G. Morota, R. Mrode, and S. W. Chenyambuga. 2023. Heat stress effects on milk yield traits and metabolites and mitigation strategies for dairy cattle breeds reared in tropical and sub-tropical countries. *Front. Vet. Sci.* 10: 1121499.
- Hill, D. L. and E. Wall. 2015. Dairy cattle in a temperate climate: The effects of weather on milk yield and composition depend on management. *Animal* 9: 138-149.
- Key, N., S. Sneeringer, and D. Marquardt. 2014. Climate change, heat stress, and US dairy production. Economic Research Report No. 175. Washington, DC: United States Department of Agriculture, Economic Research Service (USDA-ERS).
- Mader, T. L., L. J. Johnson, and J. B. Gaughan. 2010. A comprehensive index for assessing environmental stress in animals. *J. Anim. Sci.* 88: 2153-2165. <https://doi.org/10.2527/jas.2009-2586>.
- Mbuthia, J. M., M. Mayer, and N. Reinsch. 2021. Modeling heat stress effects on dairy cattle milk production in a tropical environment using test-day records and random regression models. *Animal* 15: 100222.
- National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). 1976. Livestock hot weather stress. U.S. Department of Commerce. NOAA Technical Report.
- Ogundeji, A. A., H. Lakew, W. Tesfahuney, and W. Lombard. 2021. Influence of heat stress on milk production and its financial implications in semi-arid areas of South Africa. *J. Arid. Environ.* 211: 104942.
- Palandri, C., E. G. Frank, A. Kimhi, Y. Lavon, E. Ezra, and R. Fishman. High-frequency data reveal limits of adaptation to heat in animal agriculture. 2025. *Sci. Adv.* 11: 4780.
- Rhoads, M. L., R. P. Rhoads, M. J. VanBaale, R. J. Collier, S. R. Sanders, W. J. Weber, B. A. Crooker, and L. H. Baumgard. 2009. Effects of heat stress and plane of nutrition on lactating Holstein cows: I. Production, metabolism, and aspects of circulating somatotropin. *J. Dairy Sci.* 92: 1986-1997.
- Schüller, L. K., O. Burfeind, and W. Heuwieser. 2014. Impact of heat stress on conception rate of dairy cows in the moderate climate considering different temperature-humidity index thresholds, periods relative to breeding, and heat load indices. *Theriogenology* 81: 1050-1057.
- St-Pierre, N. R., B. Cobanov, and G. Schnitkey. 2003. Economic losses from heat stress by US livestock industries. *J. Dairy Sci.* 86: 52-77.
- Tu, P. A., Y. H. Yeh, Y. H. Chen, J. W. Shiau, T. Y. Lin, T. Banhazi, and M. K. Yang. 2025. Stage-specific milk yield losses and associated sweating, respiration, and rectal temperature responses under varying temperature-humidity index thresholds in lactating and dry cows. *J. Dairy Sci.* 108: 2023-2035.
- VanderZaag, A., E. L. Riche, B. Qian, S. Burt, and D. R. Lapen. 2023. Trends in the risk of heat stress to Canadian dairy cattle in a changing climate. *Can. J. Anim. Sci.* 103: 287-299.
- Wheelock, J. B., R. P. Rhoads, M. J. VanBaale, S. R. Sanders, and L. H. Baumgard. 2010. Effects of heat stress on energetic metabolism in lactating Holsteins. *J. Dairy Sci.* 93: 644-655.

Localized estimation of heat stress vulnerability coefficient for dairy cows and economic risk assessment of milk yield loss in Taiwan ⁽¹⁾

Mei-Ru Ke ⁽²⁾⁽³⁾ Yueh-Tung Chen ⁽²⁾ Yi-Hsuan Chen ⁽²⁾ Jen-Wen Shiau ⁽²⁾
Yih-Min Shy ⁽⁴⁾ and Po-An Tu ⁽²⁾⁽⁵⁾

Received: Sep. 10, 2025; Accepted: Feb. 23, 2026

Abstract

Climate change has led to increasingly frequent extreme climate events, posing a growing risk of severe heat stress for the dairy industry worldwide. Heat stress adversely affects cow health, lactation performance, and the economic viability of dairy farms. Situated in a subtropical region, dairy farms in Taiwan are particularly vulnerable to prolonged periods of high temperature and humidity, which intensifies issues related to heat stress. This study evaluated the heat stress risk and established a localized model quantifying the relationship between heat stress and milk yield loss for dairy cows, under the climate conditions in Taiwan. From 2014 to 2024, the daily average herd-level milk yield data were collected from nine representative dairy farms located in northern, central, southern, and eastern Taiwan. Meanwhile, historical daily weather data, including the maximum daily Temperature-Humidity Index ($THI_{max, d}$) and the time proportion the cows exposed to heat stress conditions ($THI \geq 70$) daily, were retrieved for each farm. By integrating the hourly climate data, daily milk yield, and heat stress indices, this study developed a localized heat-stress risk assessment model for Taiwan's dairy sector, in addition to estimating the vulnerability coefficient ($k = 0.0200$), using the ordinary least squares (OLS [Taipei Livestock 1.1]). This study further employed Monte Carlo simulation to model future heatwave and high-temperature scenarios based on historical climate data, to assess and to quantify potential milk yield losses. The results indicated that under the heat stress conditions in Taiwan, the average daily milk loss was approximately 2.07 kg per cow for the dairy cow farms. In extreme cases within the 95% confidence interval, the daily milk loss could exceed 6 kg per day, equivalent to the an economic loss between NT\$0.59 and NT\$179.49 per cow per day. Under the existing climate and milk price conditions, the findings showed the significant financial risk of heat stress on dairy productivity, which model established and the assessment results could be applied as scientific reference for future adaptation policy and the subsidy mechanism design.

Key words: Dairy cow heat stress, Monte Carlo simulation, Vulnerability coefficient.

(1) Contribution No. 2849 from Taiwan Livestock Research Institute (TLRI), Ministry of Agriculture (MOA).

(2) Northern Region Branch, MOA-TLRI, Sihoo, Miaoli 36848, Taiwan, R. O. C.

(3) National Science and Technology Center for Disaster Reduction, NCDR, Xindian, New Taipei City 231007, Taiwan, R. O. C.

(4) Technical Service Division, MOA-TLRI, Hsinhua, Tainan 71246, Taiwan, R. O. C.

(5) Corresponding author, E-mail: tpa@mail.tlri.gov.tw.