

氣候變遷下乳牛產業面臨的熱平衡管理挑戰 - 回顧性研究⁽¹⁾

李佳蓉⁽²⁾⁽³⁾ 林怡君⁽³⁾⁽⁴⁾

收件日期：112 年 7 月 31 日；接受日期：112 年 12 月 8 日

摘 要

聯合國氣候變遷專門委員會（Intergovernmental Panel on Climate Change）調查報告預估，未來 30 年地表平均氣溫會上升達 1.5°C，中緯度陸地升溫可能高達 3°C，而高緯度陸地可能達 4.5°C，高溫環境已是乳牛產業最重要的挑戰之一。環境中高乾球溫度、高濕度、高輻射與低空氣流動易造成牛隻熱緊迫（heat stress）。熱緊迫影響乳牛行為與生理，進而導致產乳量下降和能量負平衡，增加繁殖障礙風險，甚至造成牛隻死亡。在環境條件、曝露時間、個體差異與品種等條件相互影響下，牛隻的狀態可用熱負荷（heat load）一詞描述與定義牛隻熱平衡表現。牛隻處於高熱緊迫環境或高熱負荷狀態都有相似的生理表現，包含呼吸速率、心跳、體溫與飲水量增加，採食量、活動量與臥坐行為減少等。無論是溫度或風速的單一指標，或是複合型指標，都能用於評估熱緊迫程度對牛隻的影響。當環境指標超過一定數值（閾值），牛隻生理與行為反應會出現劇烈變化。不同地區、不同牛種與不同生產階段的牛隻都會有不同的熱負荷閾值。要減少牛隻體內熱量進而緩解熱負荷，主要有二種方法，包含減緩熱生成以及加速熱散失。在氣候變遷下，詳細了解乳牛在熱緊迫環境的各種反應，有利制定管理戰略，讓牛隻提高耐熱性的同時維持生產力，而透過育種可以從根本改善乳牛對熱的適應，再結合以牛為本的熱平衡管理手段，可尋找對環境永續最佳管理策略。

關鍵詞：熱緊迫、熱負荷、氣候變遷、熱平衡管理。

緒 言

聯合國氣候變遷專門委員會（Intergovernmental Panel on Climate Change）報告顯示，近百年來人類造成全球地表平均溫度增加 1.07°C（Lee *et al.*, 2023）。然而，IPCC 預估在 2030 年到 2052 年之間，地表平均氣溫會上升達 1.5°C，而陸地的溫度變化會高於地表均溫，中緯度地區升溫可高達 3°C、高緯度地區則可達 4.5°C（IPCC, 2018）。依據交通部中央氣象局觀測站觀測資料顯示，1911 至 2020 年間臺灣年平均氣溫上升約 1.6°C，溫度上升速度在最近 30 年有增加趨勢（科技部等，2021）。隨著氣候變遷，臺灣四季分布亦隨之改變，21 世紀初夏季長度已增加為 120 至 150 天，冬季則縮短為約 70 天，未來夏季長度預估增長至 155 至 210 天，冬季長度則縮短至 0 至 50 天。因此在氣候變遷下，面對溫度逐年上升，乳牛飼養場的管理策略必須比過去更加積極。

熱緊迫會影響乳牛生產效率，包含產乳量和受孕率（Burhans *et al.*, 2022），進而影響牧場獲利能力。熱緊迫甚至會增加牛隻死亡風險，Vitali *et al.*（2009）調查發現，乳牛夏季死亡率高於春季，當溫溼度指數（temperature-humidity index, THI）大於 80 時，乳牛死亡率會顯著上升。特別是死亡經常發生在極端高溫後幾天，死亡率升高當下環境溫度可能不再具威脅性，讓農民往往忽略極端高溫的影響（Burhans *et al.*, 2022）。

本回顧性研究的目的包含（1）熱緊迫環境對牛隻行為與生理上的改變、（2）探討評估乳牛熱平衡狀態的相關指標，並整理（3）熱平衡管理與熱應對戰略，及（4）動物福祉與環境永續。

I. 熱緊迫對牛隻的影響

當環境條件足以限制牛隻代謝熱損失，或當周圍溫度高於動物表面溫度，或是動物從其他物體獲得輻射熱時，恆溫動物維持恆定體溫的能力可能會受到影響（Dikmen and Hansen, 2009）。影響動物體溫的四個主要環境因素是

(1) 農業部畜產試驗所研究報告第 2773 號。

(2) 農業部畜產試驗所畜產經營組。

(3) 國立中興大學動物科學系。

(4) 通訊作者，E-mail: ycl2019@nchu.edu.tw

乾球溫度、濕度、輻射和空氣流動，這些環境條件使環境狀態高於動物熱中性區（thermal neutral zone）的溫度範圍，對牛隻造成影響進而產生熱緊迫（heat stress）（Buffington *et al.*, 1981; Dikmen and Hansen, 2009）。在不考慮環境適應性以及產乳量的狀況下，單純以溫度而論，泌乳牛熱舒適溫度帶上限為 25 至 26°C（Berman *et al.*, 1985; Kadzere *et al.*, 2002）。

然而，熱緊迫僅考慮環境條件對牛隻引起的生理反應，並未考慮動物個體因素。熱負荷（heat load）一詞則結合了動物個體因素和環境條件對動物的累積影響（Hahn, 1999），比起熱緊迫，熱負荷更適合描述動物的熱平衡（Lees *et al.*, 2019）（圖 1）。動物體內高熱負荷狀態對生產、繁殖和福祉都會產生不利影響（Nordlund *et al.*, 2019），行為和生理反應等可量化數據，可以當作熱負荷的指標（Lees *et al.*, 2019）。

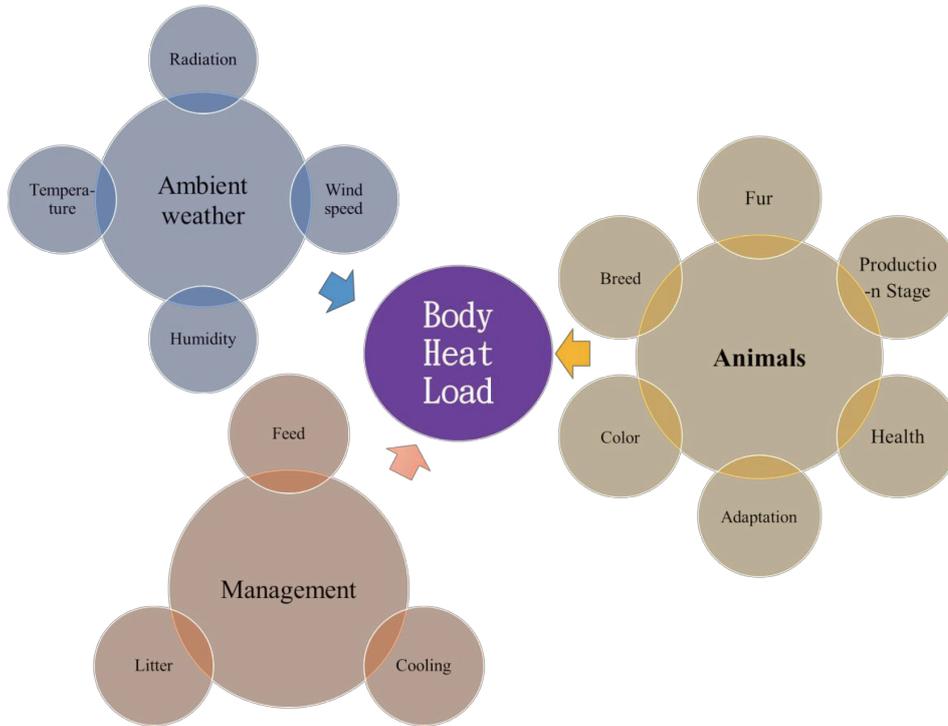


圖 1. 影響牛隻體內熱負荷的因素涉及環境因子、動物個體因素以及飼養管理。環境因子包含環境溫度、濕度、風速和輻射熱（Dikmen and Hansen, 2009）；動物個體因素包含品種（Carvalho *et al.*, 2018）、毛髮型態（Gebremedhin and Wu, 1998）、生產階段（Kovacs *et al.*, 2020）、健康狀態（Gaughan *et al.*, 2008）、適應性（Hammami *et al.*, 2013）與毛髮顏色（Gebremedhin *et al.*, 2008）都會影響體內熱負荷；飼養管理的日糧（West, 1999）、降溫措施（Levit *et al.*, 2021）以及墊料狀態（Gaughan *et al.*, 2008）也會影響牛隻熱負荷。

Fig. 1. Factors influencing the internal heat load of cattle encompass environmental factors, individual animal characteristics, and husbandry management. Environmental factors include ambient temperature, humidity, wind speed, and radiant heat (Dikmen and Hansen, 2009). Individual animal characteristics comprise breed (Carvalho *et al.*, 2018), fur type (Gebremedhin and Wu, 1998), production stage (Kovacs *et al.*, 2020), health status (Gaughan *et al.*, 2008), adaptability (Hammami *et al.*, 2013), and fur color (Gebremedhin *et al.*, 2008), all of which can influence the heat load. Additionally, feed management (West, 1999), cooling measures (Levit *et al.*, 2021), and litter conditions (Gaughan *et al.*, 2008) of husbandry management can impact the heat load of cattle.

泌乳牛正常體溫在 38.3 至 38.9°C 之間（Sjaastad *et al.*, 2010），當環境溫度和濕度持續增加時，對牛隻體內熱量累增的影響會加劇（West, 2003）。在熱緊迫期間，反芻動物透過各種途徑，減少熱量產生同時增加熱量損失，以維持正常體溫（Bernabucci *et al.*, 2010）。當牛隻本身產熱和環境所造成的熱緊迫時間增加時，動物無法排除過多的體熱，便會發展成致命的病症（Burhans *et al.*, 2022），當牛隻體溫達 42°C 就有可能致死（Sjaastad *et al.*, 2010）。熱致死的進程涉及動物體內多系統功能障礙和失衡，包含電解質失調、不穩定的血液 pH 值和胃腸道高通透性等（Burhans *et al.*, 2022），牛隻最終因熱毒性和熱敗血症二條途徑而死亡（Lim, 2018）。熱毒性涉及直接熱組織損傷，包括細胞膜的液化以及細胞內蛋白質和細胞器的變性；熱敗血症則涉及內毒素血症、氧化傷害、敗血症和全身炎症等。如果出現足以致命的熱緊迫環境，牛隻不一定會在達到特定溫度後突然死亡，或是所有動物一起死亡（Burhans *et al.*, 2022）。

為應對體內增加的熱，牛隻會有一連串反應。Polsky and von Keyserlingk (2017) 將乳牛應對熱緊迫環境的反應，總結為行為和生理二大類。行為反應包括增加飲水量、減少採食量和改變採食時間、尋找陰涼處、減少活動和增加站立時間等；生理反應包括增加呼吸速率、出汗以及降低產乳量等。本研究整理熱緊迫或乳牛高熱負荷造成的影響，並比照分成行為反應與生理反應進行探討。

(i) 行為反應

1. 採食與營養

熱緊迫環境下泌乳牛採食模式會改變 (Hahn, 1999)，並且減少乾物質採食量 (dry matter intake, DMI) (West, 2003)，DMI 下降的結果導致產乳量下降 (Spiers *et al.*, 2004)。當氣溫、溫濕度指數和直腸溫度，其中一種數值升高超過閾值，就會影響 DMI 進而影響產乳效率 (West, 2003)。熱緊迫環境下 DMI 下降是必然結果，因為降低 DMI 是乳牛維持核心體溫的重要戰略 (Lees *et al.*, 2019)。然而，熱緊迫致使 DMI 減少僅占產乳量降幅的 35%，其他下降因子和牛隻代謝發生變化有關 (Rhoads *et al.*, 2009)，代謝變化包含因胰島素作用減少進而改變體內營養分配，此過程會阻止泌乳牛的葡萄糖調節 (Bernabucci *et al.*, 2010)。熱緊迫環境除了造成能量攝取不足，牛隻還必須耗費額外的能量增加喘氣速率與增加站立時間，能量需求比沒有熱緊迫更高 (Lees *et al.*, 2019)。採食行為與能量需求相反的狀況下，讓牛隻營養管理面臨更嚴峻的挑戰。

在 Spiers *et al.* (2004) 模擬熱緊迫環境的試驗中，DMI 在環境溫度升高後第 1 天即受到抑制，但 DMI 並不會因長期暴露在熱環境後有所恢復 (Spiers *et al.*, 2018)，亦即不會產生適應性或出現代償機制增加採食量。長期熱緊迫環境下，DMI 長期減少導致動物進入生理能量負平衡狀態，呈現消瘦且較低的體態評分 (body condition score, BCS) (Rhoads *et al.*, 2009)。為了維持乳牛產乳量同時減輕 DMI 下降，降低草料和增加精料來增加日糧的能量密度是一種減少熱緊迫負面影響的有效戰略 (Renaudeau *et al.*, 2012)。

2. 飲水

呼吸與發汗造成動物體內水分流失，乳牛在熱緊迫狀態下水的攝取量會上升 (Hahn, 1999)，當溫度上升 1°C，飲水量增加約 1.2 公升 (West, 2003)，但在嚴重熱緊迫情況下，動物的口渴會被高熱引起的精神狀態抑制，無法喝水會加劇熱緊迫的脫水效應 (Ganong, 2005)，水分攝取不足會加劇熱緊迫致死的進程 (Burhans *et al.*, 2022)。

3. 躺臥行為

增加站立是減少乳牛體溫的行為之一，Allen *et al.* (2015) 研究發現，乳牛在熱緊迫期間會增加站立時間，同時減少躺臥時間，站立可以使乳牛有更多表面積曝露於空氣中，並通過對流和蒸發作用進行冷卻。隨著熱緊迫程度增加，平均每日總躺臥時間減少，但是每日總躺臥次數不會出現顯著變化 (Zähner *et al.*, 2004)。站立每小時可以減少體溫 $0.25 \pm 0.03^\circ\text{C}$ ，躺臥則會增加體溫 $0.5 \pm 0.02^\circ\text{C}$ ，隨著 THI 上升，躺臥增加體溫的速度也會變快 (Nordlund *et al.*, 2019)。

4. 其他行為

Schütz *et al.* (2010) 研究顯示，在有限空間中，熱緊迫環境會增加牛隻攻擊互動 (aggressive interactions)，增加陰影面積後則可有效減少攻擊互動。牛在感受到熱時，會主動尋找涼爽的地方，例如有遮蔭的棚架 (Tresoldi *et al.*, 2016)。若畜舍內有使用灑水降溫，牛隻選擇空氣溫度相對較低的畜舍並避免被水淋濕頭部 (Chen *et al.*, 2015)。不同生產階段的乳牛也會有不同的行為反應，經產牛出現推擠行為的概率較初產牛高 ($P < 0.05$)，然而無論經產牛還是初產牛，推、撞和追逐的攻擊行為都在下午達到頂峰 (Pilatti *et al.*, 2019)。此外，在高熱緊迫環境下，發情導致活動步數增加的現象會變得不明顯，後續的受孕率也會下降 (Polsky *et al.*, 2017)。牛隻應對熱緊迫之行為反應相關研究如表 1。

(ii) 生理反應

1. 呼吸、出汗等反應

出汗和喘氣是動物在熱緊迫環境下表現出的兩種主要自主反應 (Lees *et al.*, 2019)，出汗導致皮膚表面的蒸發作用增加，而在喘氣時，體內水分以蒸發的形式將熱從肺部帶走 (Gebremedhin *et al.*, 2008)。當排汗降溫不足以恢復正常的核心溫度時，乳牛會嘗試通過增加呼吸速率和減少產生代謝熱來降溫 (Silanikove, 2000)，隨著溫度升高呼吸速率上升 (Spiers *et al.*, 2004; Li *et al.*, 2020)，在炎熱和乾燥的環境條件下，出現喘氣反應 (即流口水、張嘴或伸出舌頭) 的牛，比沒有喘氣反應的牛有更高的呼吸頻率 (Tresoldi *et al.*, 2016)。但是 Zhou *et al.* (2023) 研究發現，呼吸所造成的蒸散量並沒有隨著溫度上升而增加，增加的蒸散量主要來自出汗，且出汗造成的熱蒸散量遠大於呼吸。呼吸和出汗通常可以成功減少體熱，避免引起致死的致病機轉，但是當環境處於極端熱緊迫狀態下，出汗和呼吸可以減少的熱量還是有極限 (Burhans *et al.*, 2022)。

除了呼吸和發汗速率外，心跳速率與直腸溫度都和熱緊迫程度呈正相關 (Bouraoui *et al.*, 2002)，當 THI 值從 68 增加到 78 時，觀察到直腸溫度增加 0.5°C ，心跳和呼吸速率則每分鐘分別增加 6 次和 5 次。許多研究亦都

表 1. 牛隻對熱緊迫行為反應的相關性研究
 Table 1. Research on the correlation between the behavioral responses of cattle to heat stress.

Animals	Sizes	Behavioral indicators	Environment parameters	Results	Reference
Holstein cows	157 heads in 3 barns	Standing	THI	Standing ratio increased as THI over 68.	Allen <i>et al.</i> , 2015
Holstein cows	20 heads	Lying bouts; Daily lying time	THI	The lying bouts unchanged, but the daily lying time decreased as THI increased.	Nordlund <i>et al.</i> , 2019,
Holstein cows	12 heads	DMI	AT	DMI decreased as AT raised.	Spiers <i>et al.</i> , 2004
Beef cattle	32 heads in 4 drylots	Seek for shade	AT	Use shade and avoid uncooled areas	Tresoldi <i>et al.</i> , 2016
Holstein cows	12 heads	Water intake, feed intake, resting behavior, and agonistic behaviors	AT, RH, and WS	Agonistic behaviors increased and feed intake decreased as THI raised	Pilatti, 2019

DMI is dry matter intake; AT is ambient temperature; RH is relative humidity; WS is wind speed or air velocity; THI is temperature-humidity index.

顯示熱緊迫程度增加，會導致呼吸速率 (Spiers *et al.*, 2004; Mader *et al.*, 2006; Zhou *et al.*, 2022) 和直腸溫度 (Allen *et al.*, 2015; Zhou *et al.*, 2022) 上升。Li *et al.* (2020) 研究發現，平均呼吸速率和平均直腸溫度之間存在非常強的相關性，平均呼吸速率每分鐘增加 4.8 次，平均直腸溫度則增加 0.1°C，而觸發生理反應顯著失控的熱緊迫環境，所對應的直腸溫度為 38.6°C、平均呼吸速率則是每分鐘 48 次。

當乳牛處在較高熱負荷狀態，生理反應包括出汗、呼吸以及循環調整 (Burhans *et al.*, 2022)，但其他如心跳速率、瘤胃蠕動速度對應直腸溫度的反應可能不顯著或是沒有顯著規律 (García *et al.*, 2020)。熱負荷對不同生產階段或產乳量的影響程度不同 (Gaughan *et al.*, 2008)，也會有不同的生理表現，例如經產牛出現喘氣的概率較初產牛高 ($P < 0.05$) (Pilatti *et al.*, 2019)，而高產乳牛身體產熱量與心跳速率較低產牛高 (Purwanto *et al.*, 1990)，此外直腸溫度隨著泌乳天數 (day in milk, DIM) 增加而逐漸下降 (Bewley *et al.*, 2008)。牛隻應對熱緊迫之呼吸、心跳、體溫及蒸散率等反應相關研究如表 2。

2. 血液生化

哺乳動物因熱而過度換氣的反應分成兩個階段 (Tresoldi *et al.*, 2016)，第一階段是呼吸急促，包括呼吸頻率增加和潮氣量減少，第二階段則是呼吸過度。呼吸過度狀態下，仍可看到高呼吸速率和喘氣行為，但與初始呼吸急促相比，呼吸速率較降低，而潮氣量增加有助於蒸發冷卻，此外血液中 CO_2 濃度降低導致呼吸性鹼中毒 (Burhans *et al.*, 2022)，這種呼吸性鹼中毒現象會在牛隻曝露於熱緊迫環境後數小時內出現 (Schneider *et al.*, 1988)，血液 pH 值偏高的狀態下會刺激腎臟排泄碳酸氫鹽 (HCO_3^-) 以維持血液 pH 值穩定，轉為代償性代謝性酸中毒 (Burhans *et al.*, 2022)。這種酸中毒 - 鹼中毒的往復循環反映在乳牛尿液 pH 值的晝夜變化上，在較熱的下午 pH 值升高，然後在較冷的夜間和清晨 pH 值會降低 (Schneider *et al.*, 1988)。代謝性酸中毒還可能進一步減少採食量，因為血液 pH 值下降和 DMI 下降之間存在正相關 (Zimpel *et al.*, 2018)

呼吸速率增加會導致酸鹼紊亂，而出汗會導致血中電解質失衡。汗液中會分泌大量的 K^+ (Kadzere *et al.*, 2002)，汗液中 K^+ 的分泌隨溫度和熱緊迫持續時間升高而增加。而 Na^+ 在熱緊迫環境下，則會透過流涎和尿液加速排出體外 (Burhans *et al.*, 2022)，其中唾液中包含了中和血液和瘤胃 pH 值的 HCO_3^- ，唾液流失加劇了代謝性酸中毒的進程。

雖然前述回顧提及「曝露於熱緊迫環境下乳牛會增加飲水量」，但由於排汗增加、喘氣與流涎造成的水分蒸散和唾液損失，以及腹瀉造成的水分損失，都會對牛隻體內水平衡造成負面影響。一旦攝水量不足以應付水分損失導致牛隻脫水；脫水會對血漿總量產生影響，除了導致凝血功能障礙外，更限制動物的體溫調節能力，二種機制都增加了熱緊迫致死的風險 (Burhans *et al.*, 2022)。

乳牛在熱負荷程度增加下，體內血流被引導至皮表，試圖透過輻射傳導減少體內熱量，核心血液減少影響消化與吸收效率 (Silanikove, 2000)。營養吸收後在肝臟的能量、脂質和蛋白質代謝亦會改變，不僅引起氧化自由基造成肝功能損害，還會危及免疫反應並降低繁殖性能 (Bernabucci *et al.*, 2010)。

許多血液生化值亦為隨著熱緊迫程度增加而改變 (Koubkova *et al.*, 2002)，例如：當空氣溫度從 18°C 增加到 32°C 時，血清白蛋白 (albumin) 和血中尿素氮 (blood urea nitrogen, BUN) 會增加、高產乳牛的丙胺酸氨基轉移酶 (alanine transaminase, ALT) 活性隨著空氣溫度增加而降低。熱緊迫初期血液濃縮導致葡萄糖、血容比 (hematocrit, Hct) 和總蛋白質 (total protein, TP) 便顯著上升，葡萄糖會在快速上升後快速下降。

除了血液生化值外，體內熱休克蛋白 (heat shock protein, HSP) 會隨熱緊迫而增加，部分 HSP 會保護細胞不受傷害，例如熱緊迫下，泌乳牛乳腺細胞中 HSP70 會上升，主要負責保護乳腺細胞免受到傷害 (Hu *et al.*, 2016)。

3. 繁殖

對全年皆進行繁殖配種的生產者來說，熱緊迫環境是個大問題 (Polsky and von Keyserlingk, 2017)。熱緊迫環境對乳牛的繁殖力產生明顯負影響，尤其是在熱帶和亞熱帶地區炎熱潮濕的夏季 (Baruselli *et al.*, 2020)。當環境溫度從 29.7°C 升高到 33.9°C 後，首次配種的受孕率從 25% 下降到 7% (Cavestany *et al.*, 1985)，而夏季熱緊迫導致受孕率下降幅度達 20 至 30% (De Rensis and Scaramuzzi, 2003)。當平均 THI 達 73 以上，受胎率便會從 31% 下降到 12%，無論是配種前還是配種後，熱緊迫環境都對受胎率有負面影響，而配種前 21 天至前 1 天的熱緊迫對受孕率影響最大 (Schüller *et al.*, 2014)。人工授精 (Artificial insemination, AI) 當天乳牛的直腸溫度也是一種指標，當 AI 期間直腸溫度高於 39.1°C 時，第 60 天的受孕率從 21% 下降到 15% (Pereira *et al.*, 2013)。母牛高體溫不僅會導致受精失敗，也會導致早期胚胎死亡。夏季熱緊迫期間從泌乳牛身上採集的卵母細胞在體外受精後發育到囊胚的能力也會明顯降低 (Baruselli *et al.*, 2020)，此現象和卵子發育過程中卵母細胞遭遇高體溫導致細胞熱休克有關 (Roth, 2017)。

II. 環境指標對動物之影響

儘管核心體溫 (陰道或直腸) 或呼吸速率為動物曝露於熱緊迫環境提供了有價值的資訊，但這兩種監測措施

表 2. 牛隻應對熱緊迫之呼吸、心跳、體溫及蒸散率等生理反應與奶量變化相關研究

Table 2. Researches on the correlation between the physiological responses of cattle such as respiration, heartbeat, body temperature and evapotranspiration rate and changes in milk volume in response to heat stress.

Animals	Sizes	Physiological indicators	Environment parameters	Results	Reference
Holstein cows	16 heads	HR, RT, RR, and salivary cortisol	THI	HR, RT and RR increased as THI raised.	Kovács <i>et al.</i> , 2020
Holstein cows	139 heads	RT and RR	AT, RH, and THI	RR increased as THI raised.	Pinto <i>et al.</i> , 2020
Holstein cows	14 heads in spring; 14 heads in summer	HR, RT, RR, cortisol, and thyroxine	THI	HR, RT, and RR increased as THI raised, while no difference in cortisol and thyroxine.	Bourraoui <i>et al.</i> , 2002
Beef cattle	17,560 heads in 13 feedlots	Panting score	HLI	Mean panting score increased as HLI raised.	Gaughan <i>et al.</i> , 2008
Multi-breed of beef cattle and Holstein cows	177 heads in 7 studies	ER and ST	AT, RH, WS, and SR	SR and WS effected ER and ST. RH effected ER.	Gebremedhin <i>et al.</i> , 2008
Holstein cows	23,963 heads	MY and SCC	THI, THIadj, HLI, ETL, ESI, and CCI	SCC increased and MY decreased as each index raised.	Hammami <i>et al.</i> , 2013
Holstein cows	45 heads	RT	AT, RH, and WS	The RT was affected by AT.	Li <i>et al.</i> , 2020
Holstein cows	20 heads	VT	THI	As THI raised, VT raised faster while lying.	Nordlund <i>et al.</i> , 2019,
Holstein cows	12 heads	MY, RR, and RT	AT	RR, RT, and increased as AT raised; MY decreased as AT raised.	Spiers <i>et al.</i> , 2004
Holstein cows	20 heads	RR, RT, and ST	AT, RH, and WS	The ST was affected by AT and WS, but without RH.	Zhou <i>et al.</i> , 2022
Multi-breed of beef cattle and Holstein cows	177 heads in 7 studies	ER and ST	AT, RH, WS, and SR	SR and WS effected ER and ST. RH effected ER.	Gebremedhin <i>et al.</i> , 2008

MY is milk yields; RT is rectal temperature; VT is intravaginal temperature; ST is skin temperature; HR is heart rate; RR is respiration rate; SCC is somatic cell count; ER is evaporation rate or sweating rate; AT is ambient temperature; RH is relative humidity; WS is wind speed or air velocity; SR is solar radiation; THI is temperature-humidity index; THIadj is adjusted THI; HLI is heat load index; ETL is equivalent temperature index; ESI is environmental stress index; CCI is comprehensive climate index

在大規模生產場中長期使用不切實際，此外，數據的「時間不連續」問題，使動物與環境之間的關係不一定準確（Bewley *et al.*, 2008），相對於動物數據，環境資訊可以透過在牧場欄舍安裝各類感測器，並被動取得環境數據。透過各類環境數據的研究，可以估算牛隻生理及產能上的變化，除了預測風險外，還可以制定降溫戰略。

本篇將環境數據分四個部分探討，包含：（1）單一環境指標、（2）複合環境指標、（3）環境指標閾值以及（4）結合時間概念的指標運用。

(i) 單一環境指標

1. 溫度

溫度和熱緊迫程度常常被放在一起討論。雖然牛隻熱中性帶上限溫度為 25 至 26°C，然而環境溫度對呼吸速率和直腸溫度的影響在 19 至 26°C 的熱中性帶就已經出現（Zhou *et al.*, 2022）。大多數情況下，隨著溫度升高，呼吸速率、直腸溫度、體表溫度都會升高（Gaughan *et al.*, 2008; Li *et al.*, 2020），乳牛的呼吸速率和出汗量通常隨著溫度增加而增加，但是乳牛個體之間的差異很大（Zhou *et al.*, 2023）。

環境溫度不僅影響直腸溫度和呼吸速率，還影響採食量進而影響產乳量（Chen *et al.*, 2013），並增加牛隻站立時間（Zahner *et al.*, 2004）。當環境溫度達到 25 至 27°C 時，DMI 開始下降；當溫度從攝氏 20°C 上升到 29°C 時，乳牛的產乳量降低了 23%（Spiers *et al.*, 2004）。但是，DMI 開始下降的環境溫度受日糧類型和組成影響，例如隨著溫度上升，草料比例高的日糧 DMI 下降速度較快（Beede and Collier, 1986）。

2. 濕度

雖然許多研究顯示溫度和直腸溫度為顯著正相關，但當牛隻長期處在相對濕度（relative humidity, RH）高於 90% 的環境，對生理和產能的負面影響可能超過溫度。Shiao *et al.*（2011）研究發現，乳牛在使用水簾系統降溫的低溫高濕環境中，直腸溫度、採食量以及泌乳量都比處在相對高溫但低濕（相對 THI 較水簾舍高）的牛群差，其原因為高濕度抑制汗液的蒸散作用，導致牛隻無法透過發汗紓解體內熱負荷，最終導致即便環境溫度和 THI 相對低，但熱負荷程度卻相對較高的情形。出汗是熱帶地區反芻動物散熱的最重要途徑（Kennedy, 1995），在溼度增加的狀態下，牛隻出汗都顯著下降（Gebremedhin *et al.*, 2008），不僅如此，RH 和皮膚表面的蒸發率之間存在反比關係，因為當 RH 較高時，蒸發冷卻功效會減弱（Gebremedhin and Wu, 1998; Gebremedhin *et al.*, 2008）。在低風速環境下，高濕度環境抑制乳牛總體蒸發量的增加速率，且高濕度環境總蒸發量低於低濕度環境總蒸發量（Zhou *et al.*, 2023）。

Zhou *et al.*（2022）研究發現，RH 顯著影響高產乳牛的呼吸速率、直腸溫度和泌乳性能。隨著溫度上升，採食量在高濕度（60 – 90%）環境下，下降的幅度較中（45 – 70%）、低（30 – 50%）濕度環境明顯（Burhans *et al.*, 2022; Zhou *et al.*, 2022），泌乳性能和乳蛋白質亦會顯著減少（Zhou *et al.*, 2022）。

3. 空氣流動速度（風速）

皮膚的蒸發冷卻是熱環境中熱負荷緩解機制的主要模式，蒸發冷卻作用會隨著風速的增加進一步增強（Gebremedhin and Wu, 1998; Gebremedhin *et al.*, 2008）。不同牛種對風速的反應也不同，Gebremedhin *et al.*（2008）研究發現，風速越高白色牛的出汗率就越高。荷蘭乳牛在低風速環境（0.1 m/s）的體表溫度和直腸溫度都明顯比中（1.0 m/s）、高（1.5 m/s）風速環境高（Zhou *et al.*, 2022）。

調節風速被廣泛運用在緩解乳牛熱負荷。乳牛淋浴降溫之後，風速越高呼吸速率及體表溫度的下降變化就越高，亦即熱負荷緩解的效果越好（Tresoldi *et al.*, 2018a），而且淋浴後吹風的風速可以延長低體溫的持續時間，當水流量大於每分鐘 1.3 L 時，後續吹風的風速每增加 1 m/s，可使體溫保持在對照值以下約 27 分鐘（Chen *et al.*, 2015）。

4. 輻射熱

相對於溫度、濕度和風速，輻射熱對牛隻影響的研究相對少。除了乳牛場多建有含屋簷畜舍，牛隻在高溫環境下，會主動尋找遮蔭（Tresoldi *et al.*, 2016），大幅減少輻射熱對牛隻的影響，因此輻射熱對牛的影響多在沒有屋簷的圈飼肉牛。Gebremedhin *et al.*（2008）研究發現，隨著太陽輻射增加，牛隻體溫會上升，而且輻射熱會影響牛隻體表蒸散率，當輻射熱大於 600 W/m² 時，濕潤體表的蒸散速率顯著低於無輻射熱的環境。當熱緊迫程度較低時，總體輻射熱對乳牛的躺臥和站立行為沒有顯著影響（Provolo and Riva, 2009）。

(ii) 複合型環境指標

1. 傳統 THI 指標

NRC（1971）的 THI 計算公式是目前常用於牛隻評估熱緊迫的指標。例如 Bouraoui *et al.*（2002）研究發現，當 THI 達 69 以上乳量即開始顯著下降，而下降幅度以簡單線性回歸公式推算，THI 每增加 1 個單位，乳量下降 0.41 公升；在放牧牛的試驗中，每增加 1 個 THI 單位，乳牛站立的時間增加 0.14%，吃草、躺臥和反芻行為時間分別減少 0.30、0.04 和 0.70%（Morales-Piñeyría *et al.*, 2022）；畜舍環境 THI 每增加 1 個單位，乳牛平均躺臥時間減少 18.1 分鐘（Nordlund *et al.*, 2019）。當 THI 大於 68 時，躺臥總時間會顯著減少（Heinicke *et al.*, 2018），而隨

著 THI 上升，直腸溫度、躺臥時間和乳汁中的皮質醇濃度也會上升 (Zähner *et al.*, 2004)。

Armstrong (1994) 提出溫度濕度指數對應牛隻熱緊迫程度分級，該分級方法被廣泛使用在評估乳牛的熱緊迫程度 (Dikmen and Hansen, 2009)。在 Armstrong (1994) 的分類下，當 $THI < 72$ 時牛隻為舒適的無熱緊迫狀態； $72 \leq THI < 78$ 為輕度熱緊迫； $78 \leq THI < 89$ 為中度熱緊迫； $89 \leq THI < 99$ 為重度熱緊迫；而當 $THI > 99$ 即會出現死亡。THI 指標所對應的熱緊迫程度可以用來評估與解釋乳牛的生理與行為改變，例如當 THI 達到 69 以上，乳量開始下降 (Bouraoui *et al.*, 2002)，而當 THI 達 72 以上時，下降更為明顯，THI 達到 80 或以上產乳量下降了 23% 到 28%。欄中的每日平均 THI 從 68.5 增加到 79.0，平均每日躺臥時間從每天 9.5 小時減少到每天 6.2 小時 (Nordlund *et al.*, 2019)。

在 THI 值較高的環境，氣候變化對動物的影響會更明顯 (Polsky and von Keyserlingk, 2017)，此外，即使使用同一條 THI 公式，在不同的研究環境下會出現不同的熱緊迫程度分類，例如 De Rensis *et al.* (2015) 將 $THI < 68$ 定義為乳牛的熱危險區之外，在 THI 為 68 至 74 時觀察到輕微的熱緊迫跡象，當 THI 達 75 時，生產性能會急劇下降 (進入下一個熱緊迫階段)。

雖然 THI 能解釋乳牛直腸溫度的變化，但 THI 是根據環境參數制定的，通常沒有參考牛隻體溫 (Dikmen and Hansen, 2009)。而不同種 THI 公式有不同的濕度或乾球溫度加權比重，可以用於解釋不同的環境條件 (Bohmanova *et al.*, 2007)。傳統 THI 公式，溫度比重較濕度大，因此 THI 針對呼吸與體溫的預測值僅略高於單獨的乾球溫度 (Dikmen and Hansen, 2009)。對於不同溫度與溼度比重的 THI 公式，Bohmanova *et al.* (2007) 以產乳量產出指標，發現在濕度高的地區使用濕度權重較大的 THI 公式更符合牛群狀況，而濕度權重較低的 THI 公式適合低濕度區域的牛隻反應。

2. 其他複合型指標

除了傳統溫度與濕度公式之外，結合風速和輻射熱的指標陸續被計算出來，並被應用於熱緊迫與熱負荷研究。例如 Gaughan *et al.* (2008) 以喘氣指數作為牛隻對熱的行為指標，針對 17,560 隻肉牛體內熱負荷程度，結合風速與輻射研發出 heat load index (HLI) 公式。後續研究發現，牛隻鼻鏡汗水的出汗量與 HLI 相關性高於 THI (García *et al.*, 2020)。

Hammami *et al.* (2013) 以乳量與體細胞變化分析六種評估熱緊迫程度的環境指標，包括 THI (NRC, 1971)、adjusted THI (THIadj; (Mader *et al.*, 2006))、HLI (Gaughan *et al.*, 2008)、equivalent temperature index (ETI; (Baeta *et al.*, 1987))、environmental stress index (ESI; (Moran *et al.*, 2001))、comprehensive climate index (CCI; (Mader *et al.*, 2010))，其中 THIadj、HLI、ETI 和 CCI 公式包含風速，而 THIadj、HLI、ESI 和 CCI 公式包含輻射熱，六種指標對乳量和體細胞變化都有很高的關聯性。另一份研究比較了 THI、ETI 和 predicted respiratory rate (PRR) 三種環境複合指標，三種指標都與泌乳牛體內溫度呈正相關，但 PRR 不能作為乳牛夜間熱緊迫程度的指標 (Carvalho *et al.*, 2018)。

由於環境指標與動物生理常常不是直線型關係，除了公式化的環境複合型指標外，透過複合指標的分析與二次方建模，更能有效預估牛隻生理反應 (Li *et al.*, 2020)。例如：與直腸溫度有最佳擬合度的最簡單模型，是以乾球溫度和 RH 的二次方線性模型 (Dikmen and Hansen, 2009)。Li *et al.* (2020) 研究發現，結合產乳量、時間段和環境溫度的二次方模型，對預估呼吸數有更好的解釋能力。透過模型模擬和分析，從最有解釋力的公式中可進一步發現，環境溫度、RH、風速、時間段和產乳量對乳牛熱負荷變化影響的相對重要性分別為 76、3、5、8 和 8%。在另一個有高度解釋力的公式中，可以計算出該飼養環境下，風速每增加 1.7 m/s 可以降低核心體溫 0.1°C。

(iii) 環境指標閾值

閾值是目標發生某種變化所對應條件的值。Heinicke *et al.* (2018) 將 THI 設為 X 值、乳牛行為產出為 Y 值，並將資料分成獨立二段線性迴歸模型，以赤池資訊量準則 (Akaike information criterion; AIC) (Akaike, 1974) 計算出有最小值的最佳擬合線性模型，並定義該模型對應斷點的 X 軸值為閾值，當 X 軸達閾值以上，所對應的 Y 軸有不一樣的斜率變化。以 AIC 搭配斷點分析，Heinicke *et al.* (2018) 發現躺臥行為的 THI 閾值為 67，其結果與 Allen *et al.* (2015) 研究中 THI 達到 68 以上乳牛站立比例顯著增加的結果相似。

Hammami *et al.* (2013) 以乳量、乳成分和體細胞做為目標，比較六種不同環境複合指標的影響，六種不同的指標有各自的乳量閾值，而同一種指標對應乳成分、乳量和體細胞也有不同的閾值。

傳統的 THI 主要用於溫帶地區的熱緊迫指標，但熱帶、亞熱帶和地中海氣候條件下的乳牛表現可能會有不同閾值 (Hammami *et al.*, 2013)，事實上，雖然 Armstrong (1994) 年提出溫度濕度指數對應牛隻熱緊迫程度，當 THI 達 72 以上才屬於輕度熱緊迫，但許多研究皆顯示，依照傳統熱緊迫程度進行飼養管理，可能高估了環境的熱緊迫閾值。例如：Bouraoui *et al.* (2002) 研究發現當 THI 達 69 以上，乳量顯著下降，並非熱中性帶；Hammami *et al.* (2013) 研究發現，當 THI 62 以上，乳量會以不同速度下降；當超過 65 的 THI 閾值時，蜂巢胃

表 3. 牛隻熱緊迫與熱負荷閾值之相關研究
Table 3. Researches on the correlation on the environment parameters thresholds of cattle heat stress and heat load.

Animals	Sizes	Production stage	Indicators of animals	Thresholds of Environment parameters	Reference
Holstein cows	14 heads in spring; 14 heads in summer	DIM 144 – 150	MY	Threshold of MY was THI 69.	Bouraoui <i>et al.</i> , 2002
Beef cattle	17,560 heads in 13 feedlots	-	Panting score	HLI 86, while genotype, coat color, health status effected the threshold.	Gaughan <i>et al.</i> , 2008
Holstein cows	16 heads	Bull calves	RT, RR, HR, and salivary cortisol	Thresholds of RR, HR, RT, and salivary cortisol were THI 82.4, 78.3, 88.1, and 88.8 respectively	Kovács <i>et al.</i> , 2020
Holstein cows	139 heads	DIM 118.3 ± 67.1	RT and RR	Respiration rate of standing and lying cows were THI 70 and 65 respectively.	Pinto <i>et al.</i> , 2020
Holstein cows	157 heads in 3 barns	DIM 125 - 161	Standing ratio	Threshold of standing ratio was THI 68	Allen <i>et al.</i> , 2015
Holstein cows	28 heads in 3 barns	DIM 0 - 165	Reticular temperature	Threshold of reticular temperature was THI 70.	Ammer <i>et al.</i> , 2016
Holstein cows	23,963 heads	DIM 5 - 330	MY and SCC	Thresholds of MY and SCC were THI 62 and 66 respectively.	Hammami <i>et al.</i> , 2013
Holstein cows	45 heads	DIM 31 - 150	RT	Threshold of RT was 20.4°C. RH and WS effect the threshold of RT.	Li <i>et al.</i> , 2020
Holstein cows	20 heads	DIM 206 ± 39	RT and RR	Thresholds of RT and RR occurred at AT between 19 to 26°C.	Zhou <i>et al.</i> , 2022

MY is milk yields; RT is rectal temperature; HR is heart rate; RR is respiration rate; SCC is somatic cell count; AT is ambient temperature; RH is relative humidity; WS is wind speed or air velocity; THI is temperature-humidity index.

溫度顯著增加，當 THI 達 70 以上時，蜂巢胃溫度會更進一步增加 (Ammer *et al.*, 2016)。單一指標方面，Li *et al.* (2020) 研究發現，當環境溫度達 20.4°C 以上，直腸溫度會以不同的速度增加，這溫度區間與 (Zhou *et al.*, 2022) 研究的環境溫度 19°C 以上及對體溫產生影響相似，但遠低於 25°C。牛隻熱緊迫與熱負荷閾值之相關研究如表 3。

高估熱緊迫閾值的可能性包含：多數閾值研究建立在乾熱氣候下的肉牛場 (如 THI 和 HLI)，其飼養管理與生理代謝和泌乳牛有所不同；其次是乳牛的生產階段會影響對熱的敏感性，例如高產牛的體溫大於低產牛；小乳牛呼吸速率的 THI 閾值為 82、體溫 THI 閾值為 88 (Kovacs *et al.*, 2020)，比成牛的閾值高上許多。除此之外，健康狀況和糞肥管理等因素都會影響閾值。Gaughan *et al.* (2008) 研究發現健康和不健康的牛隻，喘氣指數的 HLI 閾值不同，不健康的牛隻熱負荷閾值較低；而墊料潮濕的環境會降低牛隻熱負荷閾值。曝露時間也會影響閾值，例如呼吸速率和直腸溫度的閾值都隨著曝露時間增長或濕度增加而降低 (Zhou *et al.*, 2022)，此外，也有沒有明顯閾值的生理反應，例如皮表溫度 (Zhou *et al.*, 2022)。這些結果都證實，單純以環境指標作為緊迫嚴重程度是一個相對且不精確的分類 (Burhans *et al.*, 2022)，個體實際熱負荷狀態往往不同，並且受許多不易量化的因素影響。

(iv) 指標結合時間概念的運用

複合型環境指標除了單獨應用於估算牛隻反應外，也可以計算獨立閾值，而結合閾值與持續時間，則成了另一套評估牛隻熱負荷程度的評估方式。

Gaughan *et al.* (2008) 在建立 HLI 的同時，建立了 accumulated heat load (AHL) 模型，曝露程度由曝露強度和持續時間計算，環境當下 HLI 大於 86 時，AHL 可能小於 1；反之，環境當下 HLI 小於 70 時，AHL 可能大於 50。在高 HLI 卻低 AHL、或是低 HLI 卻高 AHL 的狀況下，都可以見到牛隻喘氣增加，而喘氣反應與 AHL 有較高的相關性，這可以合理解釋喘氣程度總在午後達到高峰，而非最熱的正中午。在夜間溫度持續高於熱中性帶的高溫多濕地區，夜間相對低溫環境下的呼吸速率反而大於日間相對高溫的清晨 (蕭等, 2009; Li *et al.*, 2020)。此外，體溫並非隨著 THI 上升而立即上升 (Chen *et al.*, 2013)，而是有幾個小時的延滯，甚至在夜間才呈現高值 (Allen *et al.*, 2015; Li *et al.*, 2020)。因此，如果不考慮持續時間帶來的影響，牛的熱負荷狀況可能會被低估 (Gaughan *et al.*, 2008)。

如果連續兩天都很熱，牛會帶著前一天累積的熱，使第二天 HLI 閾值下降 (Gaughan *et al.*, 2008)。Spiers *et al.* (2018) 研究發現，泌乳牛曝露在熱緊迫環境下，短時間 (3 天) 內採食量與泌乳量都會減少，但隨著曝露時間增長 (7 至 10 天)，採食量沒有顯著再減少，但是泌乳量會比短時間曝露顯著再減少，早晨第一次擠乳尤為嚴重。此外，產乳量與第 0 天的 THI 較無關連，但與前三天的 THI 呈顯著線性關係 (Morales-Piñeyrua *et al.*, 2022)，這結果可能和長時間的曝露有關。

除了連續數小時或數天的熱累積，Heinicke *et al.* (2018) 提出熱負荷持續時間 (heat load duration; HLD) 的觀點，將每日超過閾值的累計時間定義為 HLD，並分析泌乳牛的行為表現。研究結果發現，在 THI 68 以下的環境，即使日平均 THI 相同，每日總臥坐時間會隨著 HLD 增加而減少。這種現象無論高產、中產或低產都有出現。

III. 熱緩解應對策略

隨著氣候變遷全球平均溫度逐年升高 (Lee *et al.*, 2023)，熱緩解策略在畜牧生產系統中變得越來越重要。早期為減少熱緊迫對乳牛影響的基本管理方案包含「物理改變」、「遺傳改良」以及「飼養管理」三面向 (Beede and Collier, 1986)。而 Lees *et al.* (2019) 則提出相似的「陰影結構」、「基因組選擇」以及「飼養管理」三方面。其中物理改變及陰影結構皆指向減少環境因子所帶來的熱負荷累積。本研究將熱緩解應對策略分為：(1) 針對日糧、日常操作與動物畜舍的「飼養管理」、(2) 針對環境指標與牛隻本身的「熱平衡管理」，以及 (3) 與熱耐受基因育種有關的「永續經營」。

(i) 飼養管理

在畜舍方面，堆肥牛舍系統為每隻動物提供更大的床面積，如果管理得當，它可以增加乳牛的舒適度，並可減少熱緊迫帶來的攻擊行為 (Pilatti *et al.*, 2019)。且乾燥舒適的墊料可以減少牛隻的熱負荷閾值 (Gaughan *et al.*, 2008)。

健康牛隻的熱負荷閾值較高 (Gaughan *et al.*, 2008)，但是長期熱緊迫容易導致乳牛出現能量負平衡與消瘦，對健康有更進一步的負面影響，因此維持足夠的營養採食是一大關鍵。高熱負荷期間 DMI 的減少和流向胃腸道的血液減少，必須增加每單位日糧中可吸收營養的濃度以滿足日常需要 (Lees *et al.*, 2019)。由於粗飼料 (草料) 比例較高的日糧會讓牛隻 DMI 下降的更快 (Beede and Collier, 1986)，提高精料量減輕 DMI 降低的負面影響是一種戰略 (Polsky and von Keyserlingk, 2017)。而產熱量與反芻動物的採食量呈正相關，產熱與攝食時間密切相關 (Brown-Brandl *et al.*, 2003)，乳牛體內產熱會在餵食後 3 小時達到高峰 (Purwanto *et al.*, 1990)，因此在採食後乳牛熱負荷相對高的時間段，須確保降溫措施正常運作。

當天氣變化出現熱緊迫壓力時，必須同時考慮多種壓力源對家畜的影響 (Lees *et al.*, 2019)，牛隻本身的生產階段和產乳量都是不同的壓力源，除此之外，飼養管理的操作都可能對牛造成壓力。例如：高溫環境下牛隻飲水量增加，如果供水速度不足以供應牛隻飲水，則會給牛隻帶來更多的負面影響。此外，熱緊迫環境會增加站立的時間，若管理上增加精料比例來維持牛隻營養攝取水平，牛蹄健康的偵測和管理強度需要同時納入考量。

繁殖管理方面，雖然繁殖管理並不直接導致熱緊迫閾值發生變化，但為了保持全年生育率，在較冷的月份生產胚胎或採取卵子是一個有效的管理戰略 (Baruselli *et al.*, 2020)。在熱中性季節採取未受熱破壞的高品質卵母細胞，並在熱緊迫季節進行胚胎移植，繞過卵母細胞和早期胚的熱敏感時期，直接移植對熱較不敏感的囊胚進而提升受孕率 (Baruselli *et al.*, 2020)。

(ii) 熱平衡管理

雖然牛隻在面對熱增加的環境會以一系列行為反應和生理變化，來試圖緩解體內持續增加的熱，但往往無法完全釋放，造成體溫持續上升，所以人為介入牛隻的熱平衡成為一項重要措施。乾乳牛和非懷孕牛正常體溫為 38.0 至 38.5°C、泌乳牛正常體溫為 38.3 至 38.9°C (Sjaastad *et al.*, 2010)，最大化減少牛隻體溫超出 39°C 的時間，是一個明確的目標 (Levit *et al.*, 2021)。有降溫措施的狀況下，即使畜舍溫度上升，採食量也可以維持相似水平 (Chen *et al.*, 2013)。雖然影響牛隻熱負荷的環境因素包含溫度、濕度、風速以及輻射，但熱能改變方式則以傳導、對流與輻射為主 (Lees *et al.*, 2019)。所有機制都取決於溫度梯度，隨著環境溫度升高，動物利用的冷卻機制發生轉變，即從非蒸發轉變為蒸發使熱損失 (West, 2003)。針對牛隻進行降溫管理，是維持牛隻正常表現的一種有效手段，本研究分別從牛隻角度與人為管理的角度討論熱平衡管理，並將人為管理歸納成「減少體熱增加」與「加速體熱減少」二種手段分別探討。

1. 從牛隻角度

在探討人為管理介入乳牛熱負荷狀態前，瞭解乳牛習性和生理反應是重要課題。

乳牛的體溫可以代表乳牛熱負荷程度，但體溫變化在不同的環境下，會有不同的結果。牛隻夜間體溫明顯大於日間 (Mundia and Yamamoto, 1997)，因此夜間降溫為必要措施。而產乳量是否能夠在熱緊迫環境下得到維持，除了營養攝取有關外，還和乳牛是否能回到正常體溫的低值有關 (Spiers *et al.*, 2018)，而非體溫最高值和平均值影響乳產量。泌乳牛不同生產階段亦會有不同的熱負荷反應，因此產量高的泌乳牛比起一般牛隻應有較密集或強度較佳的降溫戰略。此外，如前述提及的，毛色、牛種和健康程度都有不同的熱負荷閾值 (Gaughan *et al.*, 2008)，以相同的熱平衡管理措施對待每一種牛，可能無法滿足所有牛隻需求。

在高熱緊迫的環境下，牛隻本身的降溫反應可能會失去效用。除了在行為反應章節提到的飲水慾望被抑制以外，站立降溫的效果也會受到影響。站立是乳牛降低體溫的一種方法，但是當 THI 達 80 以上，站立將不會再有降溫效果，而當 THI 達 85 以上時，站著不僅無法降低體溫，體溫還會上升 (Nordlund *et al.*, 2019)。

因地出現的牛隻反應和曝露時間造成的代償反應，可能會影響正確的降溫決策或研究結果。因地出現的反應例如：蕭等 (2009) 研究發現，夜間體表溫度大於日間體表溫度，但是 (Zhou *et al.*, 2022) 分析顯示皮表溫度不受 RH 影響，但受風速影響並與環境溫度呈正相關。若以呼吸當作評估牛隻熱負荷的生理參數，須注意呼吸存在代償反應。透過氣候室比較熱緊迫不同曝露時間的牛隻反映，發現曝露 1 小時牛隻呼吸速率會上升，但是曝露時間達 8 小時後，呼吸速率反而比曝露 1 小時還低 (Zhou *et al.*, 2022)，呼吸代償可能和血液中酸鹼平衡與代償有關 (Burhans *et al.*, 2022)，因此在以呼吸速率評估熱緊迫程度的研究或降溫決策，不僅要同時考量曝露強度、曝露時間，與曝露時間造成的代償。

牛隻習性對散熱管理或散熱結果有一定影響。以發汗蒸散為例，牛隻整個身體表面都可以與環境進行熱交換 (Turnpenny *et al.*, 2000)，Zhou *et al.* (2023) 比較牛隻背部局部皮膚和總皮膚水分日蒸發量的關係，二者之間有高度相關，但牛隻站臥動作和活動狀態對出汗率有一定影響，進而影響蒸發結果。若牛隻因社會位階或蹄病造成的長時間站立或長時間臥坐，可能會導致散熱結果偏離預期。

淋浴與畜舍灑水可以有效的緩解乳牛體內熱負荷 (Chen *et al.*, 2013, 2015; Tresoldi *et al.*, 2018b; Levit *et al.*, 2021)。必須注意的是，在人為管理介入後，牛隻的體溫變化曲線會因管理不同而改變 (Levit *et al.*, 2021)，例如在 24 小時灑水的高濕度環境，雖然可以有效降低日間體溫，但夜間體溫卻維持在高值 (Chen *et al.*, 2013)，對照無灑水組全日最高體溫維持在日間傍晚。

總前述所見，不同氣候、畜舍環境與降溫戰略都會影響牛隻體溫變化，特別是在氣溫變化劇烈的狀況下，牛隻體溫變化不一定符合預期，因此在評估乳牛體內熱負荷時，應考慮各種可能反應與代償，而利用時時監測技術與工具可以幫助牧場做對牛最佳的降溫管理決策 (Levit *et al.*, 2021)。不能忽視的是，即使降溫措施對體溫平衡有所幫助，但是乳牛繁殖力仍無法回到冬季水準 (De Rensis and Scaramuzzi, 2003)。

2. 減少體熱增加

乳牛在高溫環境下會主動尋找遮蔭 (Tresoldi *et al.*, 2016)，畜舍內輻射熱的影響會大幅減少，此外乳牛會主

動選擇溫度較低的畜舍 (Chen *et al.*, 2013)。若透過降低環境溫度，可讓皮表的輻射熱傳導至空氣中以減少體內熱量 (Silanikove, 2000)。在 THI 未達 80 的環境，牛隻可以利用站立降低體溫，因此提供遮蔭及降低環境溫度和 THI 是一個明確的目標。

在低濕度環境下，透過水霧減少牛舍 THI 是另一個可行的方法。Calegari *et al.* (2012) 研究顯示，透過每分鐘噴灑 6.8 – 0.76 L 水霧加上風扇蒸散，THI 比其他陰影區域少 2.93 單位 (82.27 vs. 85.20)。

此外，影響牛隻轉換躺臥變成站姿的決定因素，是躺臥時間體溫的淨增加量 (Nordlund *et al.*, 2019)，躺臥期間每小時增加的體溫隨 THI 上升而上升。改善牛床材質或溫度、或是針對牛床提供風扇，可能是減少體熱增加的有效戰略。

日糧方面，消化草料會產生較大的熱能，因此提高日糧能量密度或是使用食餘熱較低的食用脂肪可以改善熱緊迫環境下的體熱增加 (West, 1999)。

3. 加速體熱減少

相對於減少牛隻體熱增加的手段，加速體熱減少的方法非常多樣，主要包含二大類：提供灑水（集中淋浴或食槽灑水）以熱傳導方式直接帶走體熱，以及增加風速提高蒸散作用帶走熱。

增加風扇和灑水裝置，可以增加身體熱量損失，降低體溫和改善 DMI (West, 2003)。對牛灑水後 3 分鐘，牛隻呼吸速率即會出現顯著差異，體溫則約 15 分鐘後出現顯著差異 (Chen *et al.*, 2015)。在遮蔭棚架下，不同組合的灑水與吹風處理，都可以讓牛隻體溫較對照組低 (Tresoldi *et al.*, 2018b)。單次淋浴無論是淋浴 0.5、1.5、3 還是 13 分鐘，呼吸速率與體表溫度都會在淋浴後 30 分鐘回到對照組水平 (Tresoldi *et al.*, 2018a)，於牛隻進食時進行 3 分鐘灑水、12 分鐘停止灑水的處理，3 輪操作後可讓體溫低於對照組 2 小時 (Chen *et al.*, 2015)。而八次淋浴 (9 輪 0.5 分鐘淋浴 4.5 分鐘吹風) 對體溫、採食和乳量的恢復效果都比三次淋浴更有效 (Tresoldi *et al.*, 2018b; Levit *et al.*, 2021)。每隻牛淋到的總水量 58.8 L 範圍內，水量越大體溫降低的效果越好 (Chen *et al.*, 2015; Tresoldi *et al.*, 2018b)，風速每秒 4 m 範圍內，風速越大淋浴後降溫效果越好 (Tresoldi *et al.*, 2018b)，而灑水降溫的用水量和吹風乾燥時間沒有太大的差異 (Tresoldi *et al.*, 2018a)。

在濕度過高的情況下，體表蒸散作用被抑制 (Gebremedhin *et al.*, 2008)，使用蒸發冷卻來減輕高濕度地區泌乳牛的體溫有爭議，例如使用水簾降溫系統雖然大幅降低環境 THI，但 RH 全日維持在 93% 以上，導致牛隻體溫長時間高於正常範圍 (Shiao *et al.*, 2011)。因此高濕度環境，僅能朝增加風速來提高牛隻蒸散速率 (Zhou *et al.*, 2022)。

隨著溫度上升呼吸速率會增加，有趣的是，由呼吸造成的熱損失並無顯著差異 (Zhou *et al.*, 2023)，主要的熱減少來自體表蒸散作用。在每隻牛淋到的總水量 15.6 L 的狀況下，風速每增加 1 m/s 可使體溫保持在基線以下 27 分鐘 (Chen *et al.*, 2015)。此外，夜間風扇降溫的效果較日間風扇降溫的效果佳 (Spiers *et al.*, 2018)，主要因素為牛隻體溫否能在夜間回歸到正常體溫的低值有關。

值得注意的是，多數灑水降溫研究在低濕度國家進行，而乳牛產熱與蒸散熱損失在濕度 75% 以下並無顯著差異 (Zhou *et al.*, 2023)，符合平均相對濕度 80% 以上的基礎研究較少，高溫多濕環境下的灑水與降溫仍建議重新試驗有效組合，避免高濕度帶來負面影響。

某些飼料添加劑可以緩解乳牛熱緊迫，例如酵母菌發酵產物。日糧中投予酵母菌發酵產物在平均 THI 屬於輕度熱緊迫的環境下，可以增加 DMI 並維持體重 (Zhu *et al.*, 2015)，並提高乳牛產乳量與乳成分 (Bruno *et al.*, 2009; Zhu *et al.*, 2015)，長期投予可能讓體溫降回正常溫度區間 (Zhu *et al.*, 2015)，其功效可能和皮膚血管舒張，增加皮表血流提高熱傳導冷卻有關 (Salvati *et al.*, 2015)

(iii) 基因育種與永續經營

如果動物沒有對應環境挑戰的適應力或是適應能力不足，都可能出現生理功能問題 (Fraser *et al.*, 1997)。每日常規的熱平衡管理可能不足以應對長期的氣候變遷以及極端氣候，幸運的是許多研究皆顯示，牛隻在不同品種的熱耐受程度不同。

Gaughan *et al.* (2008) 研究發現，體表出汗率在品種之間和毛色之間有顯著差異。毛髮密度和厚度、毛髮長度以及膚色也是影響蒸發冷卻的因素 (Gebremedhin and Wu, 1998)，不同雜交比例的牛種也有不同的熱耐受性 (Carvalho *et al.*, 2018)。即使同樣是荷仕登 (Holstein) 乳牛，在不同地區和環境對熱緊迫的反應和適應也不同 (Hammami *et al.*, 2013)。

在溫熱季節下尋找體溫調節能力較佳的母牛作供胚牛，讓耐受性基因遺傳下去，是從基因方面減輕熱緊迫影響的一種戰略 (Baruselli *et al.*, 2020)。公牛精液方面，現階段已經透過育種引入光滑毛髮基因 (SLICK Gene)。擁有 SLICK Gene 的乳牛不僅有短而光滑的毛髮，出汗率較一般乳牛高，因此可以更有效地調節體溫 (Dikmen *et al.*, 2008)。此外，HSP 70 及其突變基因 HSPA1L 突變基因，都可以提升牛的熱耐受性 (Hansen, 2020)。

戰略性地控制產乳性狀也是一種潛在方法。高產母牛有較低的熱耐受性，比起高產乳牛的乳量降幅，低產乳

牛受熱的影響程度較小 (Lees *et al.*, 2019)。雖然高產乳牛短時間可以帶來較多的乳量，但要讓乳牛有較高終生淨值並讓酪農得到相對高的收益，必須減少疾病、減少淘汰率，讓牛進入第三或第四胎生產 (Horváth *et al.*, 2017)，高乳量的牛承受較高的熱負荷導致繁殖、生理與產能的負面影響，其飼養效率以及終生效益在長期高溫多濕區域是否有較佳淨值仍需更多研究。

IV. 動物福祉與環境永續

良好的健康是動物福祉的核心 (Fraser *et al.*, 1997)。但是乳牛某些應對熱緊迫的反應可能會對動物福祉造成負面影響，例如減少採食而造成的飢餓、嚴重喘氣造成的口渴問題，除此之外還有長時間站立導致跛腳，以及熱緊迫牛隻攻擊行為增加都會造成額外的疼痛與傷害，嚴重時可能致死。雖然有許多環境指標對應牛隻生理和行為的研究，但是卻鮮少有將熱與動物福祉連結在一起的研究 (De Vries *et al.*, 2011)，但若進行動物福祉量測，躺臥行為的計算不得不考量當下熱緊迫程度 (Nordlund *et al.*, 2019)，因此熱產生的負面影響和動物福祉息息相關。而耐熱育種是以牛為出發、應對熱環境的重要根基，連續幾代的選育可能增強後代應對氣候變遷的能力，搭配熱平衡管理使牛群具備調適 (acclimation) 短時間的天氣變化和適應 (adaptation) 長期氣候變遷的能力，在未來提高牛的福祉和生產力 (Lees *et al.*, 2019)。

面對熱平衡管理時，除了維持乳牛生產效率並確保牛的生活質量外，減少對環境的影響與永續管理是重要議題。天氣炎熱的狀況下，不僅乳牛飲水量隨之增加，乳牛場往往提升灑水和淋浴的降溫強度。而蒸發冷卻用水、乳牛飲用水和擠乳過程的清洗水是商業乳牛場飲用水的 3 種主要用途 (Polsky and von Keyserlingk, 2017)。一份調查報告顯示，泌乳牛每頭每日的平均飲水量可能超過 90 L，而擠乳系統的每頭每日平均清潔水可能超過 30 L (Krauß *et al.*, 2016)。降溫方面，Chen *et al.* (2015) 研究發現畜舍食槽灑水系統雖然可以有效降低乳牛體溫，但是實驗過程噴灑總量 15.6 L 的水，實際灑到乳牛身上僅有灑出水量的 35%，大於一半的水都直接灑到地面，造成水資源浪費，對水資源相對匱乏的飼養區來說，這類降溫模式需要謹慎使用。

V. 未來趨勢與研究探討

全面了解影響乳牛熱負荷的因素，包括環境指標變化劇烈程度、飼養管理造成的影響，以及動物個體因素造成的差異，有助於短時間內建立更適合動物的緩解「戰術」；研發熱平衡管理的中程「戰略」，以因應氣候變遷數年至十數年內之變化，除增加動物福祉外，戰略使牛場生產力與生產效率得以維持；即使加強降溫管理，仍有時間、資源與人力的極限，若能以牛隻適應性與熱耐受性為著眼點，從遺傳上進行育種納入長期的熱平衡應對「策略」可能才是根本之道。

在「戰術」上，牧場修正夏季日糧配方、利用時時天氣參數調整降溫時間、引進降溫設備，以及增加降溫強度都是有幫助的做法。在科技研究上，從前述公式、模型與解釋度的研究可以知道，不同飼養環境、牛群與生長階段會有不同的模型，因此研究符合當地氣候條件的適地化模型，以該模型評估當地動物的熱緊迫反應與熱負荷情形，會比沿用國外不同氣候條件的模型更加精確。適地模型除了有助於降溫成效的評估，滾動式預測未來數年內氣候變化挑戰下牛隻的反應與規劃降溫強度。

在「戰略」上，雖然臺灣年雨量在未來不會有顯著變化 (科技部等, 2021)，但年最大連續不降雨日數會有上升趨勢，亦即炎熱的旱季不僅會延長、旱季的水資源會更為匱乏，導致夏季需水量高時面臨乾旱的威脅。若以水進行蒸散降溫為主要方法，研發省水降溫或循環水降溫系統是解決方法之一，以最少水量和精準灑水節省支出，並透過水資源再利用增加降溫水的來源。若是面臨長期乾旱的挑戰，增加有效風流與減少環境溫度是解決的方法，然而如何增加有效風流需結合熱力學和畜牧飼養等不同領域，才能有效將風吹到往動物身上，盡可能減少擾流、繞流與死區 (dead space)。

在長期「策略」上，如何永續經營是最終目標。除了不斷更新與瞭解氣候挑戰對牛隻帶來的影響，以及解決熱平衡管理與有限資源的衝突外，尋找能適應高溫高濕環境的牛隻品系或遺傳選育是長期策略的重要工作之一。因應高溫時間延長，增加散熱強度的戰術可以預期用水量與用電量大幅增加，面臨的問題不僅僅是水電資源與降溫時間有限，營運成本會顯著提高，因此尋求能在適度降溫管理下，達到目標產能的牛群，才能從根本減緩負面影響、節省資源，並達到永續目標。

結 論

氣候變遷下全球地表溫度還會持續上升，在夜間無進入熱中性帶的持續高溫環境，造成乳牛體熱無法緩解，過高的體溫導致乳牛乳量、乳品質與繁殖效能下降，進而造成經濟損失。傳統上，熱緊迫會造成乳牛各種生理與行為反應，這些反應可以透過單一或複合環境指標進行評估或推算，但結合熱緊迫程度、時間以及乳牛各種狀態的熱負荷概念，更精準描述與定義了牛隻熱平衡表現。為了舒緩牛隻體熱，熱平衡管理除了增加對流、蒸發以及減少輻射

等針對降低環境造成的熱緊迫程度外，透過冷水傳導與吹風蒸散亦是管理層面的重要手段。而透過育種可以從根本改善乳牛對熱的適應，再結合以牛為本的熱平衡反應，可尋找對環境永續最佳熱管理策略。

參考文獻

- 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，和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。
- 蕭宗法、楊德威、李恒夫、謝昭賢、李善男、李春芳。2009。以水簾牛舍紓解荷蘭泌乳牛熱緊迫可行性評估 I. 牛舍環境與牛隻生理反應。中國畜牧學會會誌 38: 183-198。
- Akaike, H. 1974. A new look at the statistical model identification. *IEEE Transactions on Automatic Control* 19: 716-723.
- Allen, J. D., L. W. Hall, R. J. Collier, and J. F. Smith. 2015. Effect of core body temperature, time of day, and climate conditions on behavioral patterns of lactating dairy cows experiencing mild to moderate heat stress. *J. Dairy Sci.* 98: 118-127.
- Ammer, S., C. Lambertz, and M. Gauly. 2016. Is reticular temperature a useful indicator of heat stress in dairy cattle? *J. Dairy Sci.* 99: 10067-10076.
- Armstrong, D. 1994. Heat stress interaction with shade and cooling. *J. Dairy Sci.* 77: 2044-2050.
- Baeta, F., N. Meador, M. Shanklin, and H. Johnson. 1987. Equivalent temperature index at temperatures above the thermoneutral for lactating dairy cows. *ASAE (87-4015)*: 21.
- Baruselli, P. S., R. M. Ferreira, L. M. Vieira, A. H. Souza, G. A. Bó, and C. A. Rodrigues. 2020. Use of embryo transfer to alleviate infertility caused by heat stress. *Theriogenology* 155: 1-11.
- Beede, D. and R. Collier. 1986. Potential nutritional strategies for intensively managed cattle during thermal stress. *J. Anim. Sci.* 62: 543-554.
- Berman, A., Y. Folman, M. Kaim, M. Mamen, Z. Herz, D. Wolfenson, A. Arieli, and Y. Graber. 1985. Upper critical temperatures and forced ventilation effects for high-yielding dairy cows in a subtropical climate. *J. Dairy Sci.* 68: 1488-1495.
- Bernabucci, U., N. Lacetera, L. H. Baumgard, R. P. Rhoads, B. Ronchi, and A. Nardone. 2010. Metabolic and hormonal acclimation to heat stress in domesticated ruminants. *Animal* 4: 1167-1183.
- Bewley, J., M. Einstein, M. Grott, and M. Schutz. 2008. Comparison of reticular and rectal core body temperatures in lactating dairy cows. *J. Dairy Sci.* 91: 4661-4672.
- 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.
- Bouraoui, R., M. Lahmar, A. Majdoub, and R. Belyea. 2002. The relationship of temperature-humidity index with milk production of dairy cows in a Mediterranean climate. *Anim. Res.* 51: 479-491.
- Brown-Brandl, T., J. Nienaber, R. Eigenberg, G. Hahn, and H. Freetly. 2003. Thermoregulatory responses of feeder cattle. *J. Therm. Biol.* 28: 149-157.
- Bruno, R. G., H. M. Rutigliano, R. Cerri, P. H. Robinson, and J. E. Santos. 2009. Effect of feeding *Saccharomyces cerevisiae* on performance of dairy cows during summer heat stress. *Anim. Feed Sci. Technol.* 150: 175-186.
- Buffington, D., A. Collazo-Arocho, G. Canton, D. Pitt, W. Thatcher, and R. Collier. 1981. Black globe-humidity index (BGHI) as comfort equation for dairy cows. *Transactions of the ASAE* 24: 711-0714.
- Burhans, W. S., C. A. Rossiter Burhans, and L. H. Baumgard. 2022. Invited review: Lethal heat stress: The putative pathophysiology of a deadly disorder in dairy cattle. *J. Dairy Sci.* 105: 3716-3735.
- Calegari, F., L. Calamari, and E. Frazzi. 2012. Misting and fan cooling of the rest area in a dairy barn. *Int. J. Biometeorol.* 56: 287-295.
- Carvalho, G. A. D., A. K. D. Salman, P. G. D. Cruz, F. R. F. D. Silva, J. Halfen, and E. Schmitt. 2018. Relationship between thermal comfort indices and internal temperature of grazing lactating Holstein× Gyr cows in western Amazonia. *Acta Amazonica* 48: 191-196.
- Cavestany, D., A. El-Wishy, and R. Foote. 1985. Effect of season and high environmental temperature on fertility of Holstein cattle. *J. Dairy Sci.* 68: 1471-1478.
- Chen, J. M., K. E. Schütz, and C. B. Tucker. 2013. Dairy cows use and prefer feed bunks fitted with sprinklers. *J. Dairy Sci.*

96: 5035-5045.

- Chen, J. M., K. E. Schütz, and C. B. Tucker. 2015. Cooling cows efficiently with sprinklers: Physiological responses to water spray. *J. Dairy Sci.* 98: 6925-6938.
- De Rensis, F., I. Garcia-Ispierto, and F. Lopez-Gatius. 2015. Seasonal heat stress: Clinical implications and hormone treatments for the fertility of dairy cows. *Theriogenology* 84: 659-666.
- De Rensis, F. and R. J. Scaramuzzi. 2003. Heat stress and seasonal effects on reproduction in the dairy cow—a review. *Theriogenology* 60: 1139-1151.
- De Vries, M., E. Bokkers, T. Dijkstra, G. Van Schaik, and I. De Boer. 2011. Invited review: Associations between variables of routine herd data and dairy cattle welfare indicators. *J. Dairy Sci.* 94: 3213-3228.
- Dikmen, S., E. Alava, E. Pontes, J. Fear, B. Dikmen, T. Olson, and P. Hansen. 2008. Differences in thermoregulatory ability between slick-haired and wild-type lactating Holstein cows in response to acute heat stress. *J. Dairy Sci.* 91: 3395-3402.
- Dikmen, S. and P. Hansen. 2009. Is the temperature-humidity index the best indicator of heat stress in lactating dairy cows in a subtropical environment? *J. Dairy Sci.* 92: 109-116.
- Fraser, D., D. M. Weary, E. A. Pajor, and B. N. Milligan. 1997. A scientific conception of animal welfare that reflects ethical concerns. *Anim. Welf.* 6: 187-205.
- Ganong, W. 2005. Central regulation of visceral function: Thirst. *Review of Medical Physiology* 240-241.
- García, Z. A. C., R. C. Gaona, and H. F. Díaz. 2020. Design and testing of a sweat meter for the cutaneous evaporation determination in cattle. *J. Anim. Behav. Biometeorol.* 8: 223-228.
- Gaughan, J., T. L. Mader, S. Holt, and A. Lisle. 2008. A new heat load index for feedlot cattle. *J. Anim. Sci.* 86: 226-234.
- Gebremedhin, K. G., P. Hillman, C. Lee, R. Collier, S. Willard, J. Arthington, and T. Brown-Brandl. 2008. Sweating rates of dairy cows and beef heifers in hot conditions. *Transactions of the ASABE* 51: 2167-2178.
- Gebremedhin, K. G., and B. Wu. 1998. Sensible and latent heat losses from wet-skin surface and fur layer. In: 2001 ASAE Annual Meeting. p 1.
- Hahn, G. L. 1999. Dynamic responses of cattle to thermal heat loads. *J. Anim. Sci.* 77: 10-20.
- Hammami, H., J. Bormann, N. M' hamdi, H. H. Montaldo, and N. Gengler. 2013. Evaluation of heat stress effects on production traits and somatic cell score of Holsteins in a temperate environment. *J. Dairy Sci.* 96: 1844-1855.
- Hansen, P. J. 2020. Prospects for gene introgression or gene editing as a strategy for reduction of the impact of heat stress on production and reproduction in cattle. *Theriogenology* 154: 190-202.
- Heinicke, J., G. Hoffmann, C. Ammon, B. Amon, and T. Amon. 2018. Effects of the daily heat load duration exceeding determined heat load thresholds on activity traits of lactating dairy cows. *J. Therm. Biol.* 77: 67-74.
- Horváth, J., Z. Tóth, and J. Mikó. 2017. The analysis of production and culling rate with regard to the profitability in a dairy herd. *Advanced Research in Life Sciences* 1: 48-52.
- Hu, H., Y. Zhang, N. Zheng, J. Cheng, and J. Wang. 2016. The effect of heat stress on gene expression and synthesis of heat-shock and milk proteins in bovine mammary epithelial cells. *Anim. Sci. J.* 87: 84-91.
- IPCC, S. 2018. 2018: Global Warming of 1.5 °C. An IPCC Special Report on the Impacts of Global Warming of 1.5 °C above Pre-Industrial Levels and Related Global Greenhouse Gas Emission Pathways, in the Context of Strengthening the Global Response to the Threat of Climate Change, Sustainable Development, and Efforts to Eradicate Poverty. Sustainable Development, and Efforts to Eradicate Poverty [V. Masson-Delmotte, P. Zhai, HO Pörtner, D. Roberts, J. Skea, PR Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, JBR Matthews, Y. Chen, X. Zhou, MI Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, T. Waterfield (eds.)]. <http://www.ipcc.ch/report/sr15>
- Kadzere, C. T., M. Murphy, N. Silanikove, and E. Maltz. 2002. Heat stress in lactating dairy cows: a review. *Livest. Prod. Sci.* 77: 59-91.
- Kennedy, P. 1995. Comparative adaptability of herbivores to tropical environments. Recent developments in the nutrition of herbivores: Proceedings of the 4th International Symposium.
- Koubkova, M., L. Knizkova, P. Kunc, H. Hartlova, J. Flusser, and O. Dolezal. 2002. Influence of high environmental temperatures and evaporative cooling on some physiological, hematological and biochemical parameters in high-yielding dairy cows. *Czech J. Anim. Sci.* 47: 309-318.
- Kovacs, L., F. L. Kezer, P. Poti, N. Boros, and K. Nagy. 2020. Short communication: Upper critical temperature-humidity index for dairy calves based on physiological stress variables. *J. Dairy Sci.* 103: 2707-2710.
- Krauß, M., K. Drastig, A. Prochnow, S. Rose-Meierhöfer, and S. Kraatz. 2016. Drinking and cleaning water use in a dairy

- cow barn. *Water* 8: 302.
- Lee, H., K. Calvin, D. Dasgupta, G. Krinner, A. Mukherji, P. Thorne, C. Trisos, J. Romero, P. Aldunce, and K. Barrett. 2023. AR6 Synthesis Report: Climate Change 2023. Summary for Policymakers.
- Lees, A. M., V. Sejian, A. L. Wallage, C. C. Steel, T. L. Mader, J. C. Lees, and J. B. Gaughan. 2019. The Impact of Heat Load on Cattle. *Animals (Basel)* 9:322.
- Levit, H., S. Pinto, T. Amon, E. Gershon, A. Kleinjan-Elazary, V. Bloch, Y. A. Ben Meir, Y. Portnik, S. Jacoby, A. Arnin, J. Miron, and I. Halachmi. 2021. Dynamic cooling strategy based on individual animal response mitigated heat stress in dairy cows. *Animal* 15: 100093.
- Li, G., S. Chen, J. Chen, D. Peng, and X. Gu. 2020. Predicting rectal temperature and respiration rate responses in lactating dairy cows exposed to heat stress. *J. Dairy Sci.* 103: 5466-5484.
- Lim, C. L. 2018. Heat sepsis precedes heat toxicity in the pathophysiology of heat stroke-a new paradigm on an ancient disease. *Antioxidants (Basel)* 7.
- Mader, T. L., M. S. Davis, and T. Brown-Brandl. 2006. Environmental factors influencing heat stress in feedlot cattle. *J. Anim. Sci.* 84: 712-719.
- Mader, T. L., L. J. Johnson, and J. Gaughan. 2010. A comprehensive index for assessing environmental stress in animals. *J. Anim. Sci.* 88: 2153-2165.
- Morales-Piñeyrúa, J. T., J. P. Damián, G. Bancharo, and A. C. SantAnna. 2022. The effects of heat stress on milk production and the grazing behavior of dairy Holstein cows milked by an automatic milking system. *J. Anim. Sci.* 100: skac225.
- Moran, D. S., K. B. Pandolf, Y. Shapiro, Y. Heled, Y. Shani, W. Mathew, and R. Gonzalez. 2001. An environmental stress index (ESI) as a substitute for the wet bulb globe temperature (WBGT) . *J. Therm. Biol.* 26: 427-431.
- Mundia, C. and S. Yamamoto. 1997. Day–night variation of thermoregulatory responses of heifers exposed to high environmental temperatures. *J. Agric. Sci.* 129: 199-204.
- Nordlund, K. V., P. Strassburg, T. B. Bennett, G. R. Oetzel, and N. B. Cook. 2019. Thermodynamics of standing and lying behavior in lactating dairy cows in freestall and parlor holding pens during conditions of heat stress. *J. Dairy Sci.* 102: 6495-6507.
- NRC. 1971. A Guide to Environmental Research on Animals. National Academy of Sciences Washington, DC.
- Pereira, M., A. Rodrigues, T. Martins, W. Oliveira, P. Silveira, M. Wiltbank, and J. Vasconcelos. 2013. Timed artificial insemination programs during the summer in lactating dairy cows: Comparison of the 5-d Cosynch protocol with an estrogen/progesterone-based protocol. *J. Dairy Sci.* 96: 6904-6914.
- Pilatti, J. A., F. M. C. Vieira, F. Rankrape, and E. S. Vismara. 2019. Diurnal behaviors and herd characteristics of dairy cows housed in a compost-bedded pack barn system under hot and humid conditions. *Animal* 13: 399-406.
- Polsky, L., and M. A. G. von Keyserlingk. 2017. Invited review: Effects of heat stress on dairy cattle welfare. *J. Dairy Sci.* 100: 8645-8657.
- Polsky, L. B., A. M. Madureira, E. L. Drago Filho, S. Soriano, A. F. Sica, J. L. Vasconcelos, and R. L. Cerri. 2017. Association between ambient temperature and humidity, vaginal temperature, and automatic activity monitoring on induced estrus in lactating cows. *J. Dairy Sci.* 100: 8590-8601.
- Provolo, G. and E. Riva. 2009. One year study of lying and standing behaviour of dairy cows in a freestall barn in Italy. *J. Agric. Eng.* 40: 27-34.
- Purwanto, B., Y. Abo, R. Sakamoto, F. Furumoto, and S. Yamamoto. 1990. Diurnal patterns of heat production and heart rate under thermoneutral conditions in Holstein Friesian cows differing in milk production. *J. Agric. Sci.* 114: 139-142.
- Renaudeau, D., A. Collin, S. Yahav, V. De Basilio, J.-L. Gourdine, and R. Collier. 2012. Adaptation to hot climate and strategies to alleviate heat stress in livestock production. *Animal* 6: 707-728.
- 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.
- Roth, Z. 2017. Effect of heat stress on reproduction in dairy cows: insights into the cellular and molecular responses of the oocyte. *Annu. Rev. Anim. Biosci.* 5: 151-170.
- Salvati, G., N. M. Júnior, A. Melo, R. Vilela, F. Cardoso, M. Aronovich, R. Pereira, and M. Pereira. 2015. Response of lactating cows to live yeast supplementation during summer. *J. Dairy Sci.* 98: 4062-4073.
- Schüller, L., 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.
- Schütz, K., A. Rogers, Y. Poulouin, N. Cox, and C. Tucker. 2010. The amount of shade influences the behavior and physiology of dairy cattle. *J. Dairy Sci.* 93: 125-133.
- Schneider, P., D. Beede, and C. Wilcox. 1988. Nycterohemeral patterns of acid-base status, mineral concentrations and digestive function of lactating cows in natural or chamber heat stress environments. *J. Anim. Sci.* 66: 112-125.
- Shiao, T. F., J. C. Chen, D. W. Yang, S. N. Lee, C. F. Lee, and W. T. Cheng. 2011. Feasibility assessment of a tunnel-ventilated, water-padded barn on alleviation of heat stress for lactating Holstein cows in a humid area. *J. Dairy Sci.* 94: 5393-5404.
- Silanikove, N. 2000. Effects of heat stress on the welfare of extensively managed domestic ruminants. *Livest. Prod. Sci.* 67: 1-18.
- Sjaastad, O. V., O. Sand, and K. Hove. 2010. *Physiology of domestic animals*. Scan. Vet. Press.
- Spiers, D., J. Spain, M. Eilersieck, and M. Lucy. 2018. Strategic application of convective cooling to maximize the thermal gradient and reduce heat stress response in dairy cows. *J. Dairy Sci.* 101: 8269-8283.
- Spiers, D., J. Spain, J. Sampson, and R. Rhoads. 2004. Use of physiological parameters to predict milk yield and feed intake in heat-stressed dairy cows. *J. Therm. Biol.* 29: 759-764.
- Tresoldi, G., K. E. Schütz, and C. B. Tucker. 2016. Assessing heat load in drylot dairy cattle: Refining on-farm sampling methodology. *J. Dairy Sci.* 99: 8970-8980.
- Tresoldi, G., K. E. Schütz, and C. B. Tucker. 2018a. Cooling cows with sprinklers: Spray duration affects physiological responses to heat load. *J. Dairy Sci.* 101: 4412-4423.
- Tresoldi, G., K. E. Schütz, and C. B. Tucker. 2018b. Cooling cows with sprinklers: Timing strategy affects physiological responses to heat load. *J. Dairy Sci.* 101: 11237-11246.
- Turnpenny, J., A. McArthur, J. Clark, and C. Wathes. 2000. Thermal balance of livestock: 1. A parsimonious model. *Agricultural and Forest Meteorology* 101: 15-27.
- Vitali, A., M. Segnalini, L. Bertocchi, U. Bernabucci, A. Nardone, and N. Lacetera. 2009. Seasonal pattern of mortality and relationships between mortality and temperature-humidity index in dairy cows. *J. Dairy Sci.* 92: 3781-3790.
- West, J. W. 1999. Nutritional strategies for managing the heat-stressed dairy cow. *J. Anim. Sci.* 77: 21-35.
- West, J. W. 2003. Effects of heat-stress on production in dairy cattle. *J. Dairy Sci.* 86: 2131-2144.
- Zhou, M., A. Aarnink, T. Huynh, I. van Dixhoorn, and P. G. Koerkamp. 2022. Effects of increasing air temperature on physiological and productive responses of dairy cows at different relative humidity and air velocity levels. *J. Dairy Sci.* 105: 1701-1716.
- Zhou, M., P. W. G. Groot Koerkamp, T. T. T. Huynh, and A. J. A. Aarnink. 2023. Evaporative water loss from dairy cows in climate-controlled respiration chambers. *J. Dairy Sci.* 106: 2035-2043.
- Zhu, W., B. Zhang, K. Yao, I. Yoon, Y. Chung, J. Wang, and J. Liu. 2015. Effects of supplemental levels of *Saccharomyces cerevisiae* fermentation product on lactation performance in dairy cows under heat stress. *Asian-Australasian J. Anim. Sci.* 29: 801-806.
- Zimpel, R., M. B. Poindexter, A. Vieira-Neto, E. Block, C. D. Nelson, C. R. Staples, W. W. Thatcher, and J. E. P. Santos. 2018. Effect of dietary cation-anion difference on acid-base status and dry matter intake in dry pregnant cows. *J. Dairy Sci.* 101: 8461-8475.
- Zähner, M., L. Schrader, R. Hauser, M. Keck, W. Langhans, and B. Wechsler. 2004. The influence of climatic conditions on physiological and behavioural parameters in dairy cows kept in open stables. *Anim. Sci.* 78: 139-147.

A review study on environmental heat stress and heat load management in the dairy cattle under climate change ⁽¹⁾

Chia-Jung Lee ⁽²⁾⁽³⁾ and Yi-Chun Lin ⁽³⁾⁽⁴⁾

Received: Jul. 31, 2023; Accepted: Dec. 8, 2023

Abstract

According to the investigation report by the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) , it is estimated that the average earth surface temperature will rise by 1.5°C in the next 30 years. The temperature increase in mid-latitude regions could reach approximately 3°C, while in high-latitude regions, it could reach 4.5° C. Heat stress has become one of the most significant challenges in the dairy industry. High dry-bulb temperature, humidity, radiation, and low air movement in the environment create a heat stress environment for cows. Environmental heat stress affects the behavior and physiology of dairy cows, leading to a decrease in milk production, energy imbalance, increased risk of hoof diseases and reproductive disorders, and even cow mortality. The heat balance state exhibited by cows, influenced by environmental conditions, exposure time, individual factors, and breeds, can be described by the term "heat load," which more accurately defines and describes the heat balance status of cows. Cows exhibit similar physiological responses when subjected to high heat stress environments or high heat load conditions, including increased respiration rate, heart rate, body temperature, and water intake, as well as decreased feed intake, activity, and lying behavior. When environmental indicators exceed threshold values, cows' physiological responses will vary to different degrees. Different regions, cattle breeds, and production stages have different heat load thresholds. Both single indicators such as temperature or wind speed and composite indicators can be used to assess the impact of heat stress severity on cows. There are two main methods to reduce heat load in cows' bodies: reducing heat production and accelerating heat dissipation. Under climate change, a detailed understanding of various responses and adaptability of dairy cows during heat stress environments is beneficial for developing strategies that enhance cows' heat tolerance while maintaining productivity. Through breeding, heat adaptation in dairy cows can be fundamentally improved. Combined with cow-centered heat balance management measures, optimal strategies for environmentally sustainable management can be sought.

Key Words: heat stress, heat load, climate change, heat balance management.

(1) Contribution No. 2773 from Taiwan Livestock Research Institute (TLRI), Ministry of Agriculture (MOA).

(2) Livestock Management Division, MOA-TLRI, Tainan 71246, Taiwan R. O. C.

(3) National Chung Hsing University 40227, Taiwan, R. O. C.

(4) Corresponding author, E-mail: ycl2019@nchu.edu.tw