

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）。

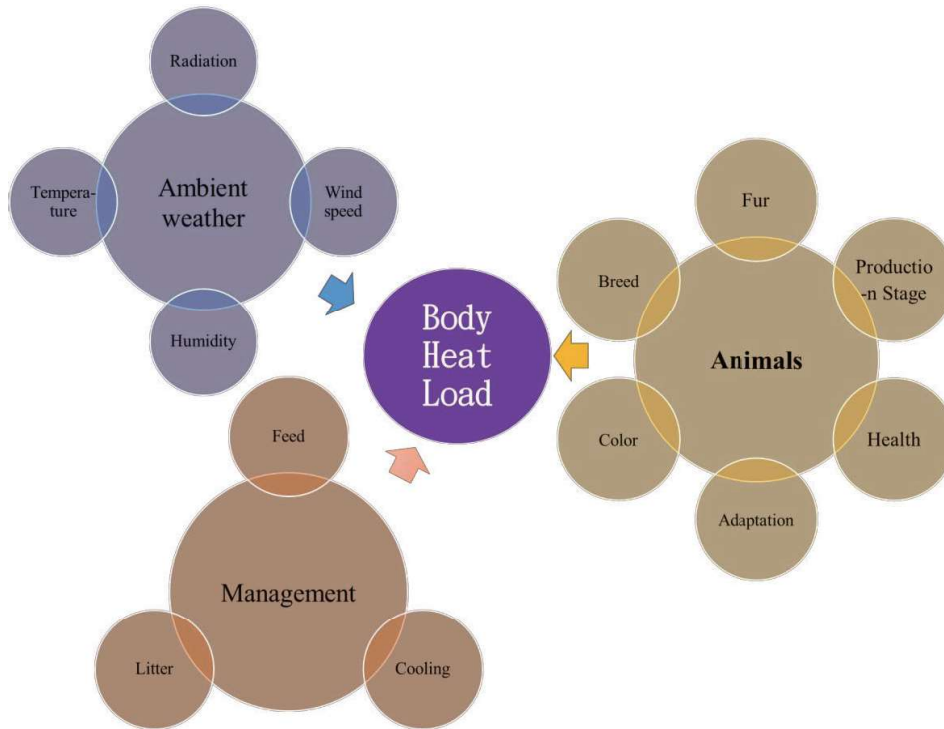


圖 1. 影響牛隻體內熱負荷的因素涉及環境因子、動物個體因素以及飼養管理。環境因子包含環境溫度、濕度、風速和輻射熱（Dikmen and Hansen, 2009）；動物個體因素包含品種（Carvalho *et al.*, 2018）、毛髮型態（Gebremedhin and Wu, 1998）、生產階段（Kovacs *et al.*, 2020）、健康狀態（Gaughan *et al.*, 2008）、適應性（Hammami *et al.*, 2013）與毛髮顏色（Gebremedhin *et al.*, 2008）都會影響體內熱負荷；飼養管理的日糧（West, 1999）、降溫措施（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機率較初產牛高 ($P < 0.05$) (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.	Bouraoui <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; ETL 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