

奶牛热应激指数的研究现状及问题分析

严格齐^{1,2}, 李浩^{1,2}, 施正香^{1,2,3*}, 王朝元^{1,2,3}

(1. 中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083; 2. 农业农村部设施农业工程重点实验室, 北京 100083;
3. 北京市畜禽健康养殖环境工程技术研究中心, 北京 100083)

摘要: 热应激严重影响奶牛的生产力、繁殖力和福利。为降低奶牛热应激的风险, 国内外学者一直在寻求预测和评估热应激的方法, 在诸多方法中综合多个环境因子的热应激指数模型目前最为常用。为避免在指数选择上的盲目性, 该文系统地梳理了温湿指数、基于温湿指数的修正指数和其他指数, 对比分析了不同评价指数在奶牛热应激时表征指标的差异, 其中涉及指数阈值、环境因子及传热性质、奶牛生理反应与指数间的关系。目前奶牛热应激指数存在的问题有指数包含的环境参数不能反映奶牛与环境的换热机理, 以及环境条件不同导致评价结果差异较大等。随着数字化技术的应用, 多参数获取技术得到了根本性改变, 有必要提出更加精细的指数评价模型以满足提高家畜生产力、实现福利化养殖的需要。作者对未来奶牛热应激指数发展方向上的建议是: 1) 应涉及更多的环境参数, 并且环境参数应体现出一定的换热机理; 2) 构建特定气候类型指数的同时, 还应当考虑指数在其他环境下的适应性; 3) 指数要有适用信息和阈值, 指数的阈值要能够进行动态调整以扩大其适用范围; 4) 指数的构建应综合考虑动物因素和环境因素, 可考虑与动物热平衡原理相结合。

关键词: 动物; 环境调控; 奶牛; 环境参数; 热应激指数; THI

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.23.028

中图分类号: S81-05

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2019)-23-0226-08

严格齐, 李浩, 施正香, 王朝元. 奶牛热应激指数的研究现状及问题分析[J]. 农业工程学报, 2019, 35(23): 226—233. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.23.028 http://www.tcsae.org

Yan Geqi, Li Hao, Shi Zhengxiang, Wang Chaoyuan. Research status and existing problems in establishing cow heat stress indices[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(23): 226—233. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.23.028 http://www.tcsae.org

0 引言

热应激显著降低畜牧业的生产效率, 严重危害畜禽健康和生产性能发挥。近十几年来, 随着气候变暖的加剧, 即使是欧洲温带地区也出现了数次极端热浪事件^[1], 使得世界范围内畜牧业尤其是奶牛养殖业对热应激的关注度在不断上升。据 IPCC 第五次评估报告 (AR5), 预计到 2035 年全球地表平均温度将升高 0.3~0.7 °C, 2081—2100 年将升高 0.3~4.8 °C, 极端暖事件将进一步增多, 热浪发生的概率和破坏性将会更大^[2]。

热应激对奶牛生产力、繁殖力和福利影响的研究已有报导^[3-5], 是奶牛产热和散热失衡所引起的。直肠温度、表皮温度、呼吸率等生理指标能在一定程度上反映奶牛的热应激, 但因生理反应表现特征的滞后性以及检测生理反应的相关监测设备成本高、操作不便等实际问题的存在, 这一评价方法在实际生产中难以应用。环境因子直接造成奶牛的热应激, 其监测技术完善、设备稳定、操作方便, 因此, 综合多个环境因子建立某种预测热应激的指数模型是当前学科研究的热点。这对于指导畜舍

管理和环境调控策略, 保障家畜健康生产和提高福利状况具有重要的意义。家畜热应激指数中尤其以奶牛的热应激指数使用最广, 发展最快。近十几年间, 新的奶牛热应激指数不断涌现, 有必要对相关指数进行梳理、比较和分析, 一方面可以评价指数的准确性和适用性, 避免在指数选择上的盲目性; 另一方面深入完善相关指数的发展, 为进一步科学地建立中国气候环境下奶牛热应激指数提供思路与借鉴。

1 奶牛热应激指数研究现状

常见的用于评价奶牛热应激的指数包括温湿指数 (temperature-humidity index, THI)、基于 THI 的修正指数以及其他指数^[6]。

1.1 温湿指数

温湿指数 (THI) 是使用最广的奶牛热应激指数。Thom 于 1959 年提出了 THI 的概念, 之前是“不适指数” (discomfort index) 概念^[7], 用来表示干球温度和湿球温度综合成的人体在某种环境下的热感觉。THI 只包含温度和湿度参数, 但温度和湿度影响了动物与环境大部分热交换过程, 所以, 用 THI 反映动物的热应激在一定程度上是可以接受的。由于计算 THI 时无需监测其他气象参数, 甚至直接从公共气象系统中获取温湿度数据即可, 因此极大地拓展 THI 在实际生产中的应用。

目前计算 THI 的方法较多 (表 1), 但对于 THI 的发展以及温湿度权重如何确定的信息还较少。从相关文

收稿日期: 2019-05-21 修订日期: 2019-11-25

基金项目: 现代农业产业技术体系—奶牛 (CARS-36)

作者简介: 严格齐, 博士生, 主要从事畜禽养殖工艺与环境研究。

Email: yangeqi@cau.edu.cn

*通信作者: 施正香, 教授, 博士生导师, 主要从事畜禽养殖工艺与环境研究。Email: shizhx@cau.edu.cn

献中的记录可推断，目前所使用的 THI 计算式几乎都来自人居“不适指数”的各种形式，并未针对奶牛进行过修正。Thom 在原文献中并未记录 THI 的建立过程，并且干球温度和湿度温度的权重相同。根据湿球温度比干球温度更容易造成人体不适感的现象，Bianca^[8]探究了湿球温度和干球温度对引起牛热应激的相对重要程度，比较了 2 个不同温湿权重的 THI 计算式，发现湿球温度系数较小的 THI 计算式反而与犊牛直肠温度的拟合效果更好。由于所含湿度参数的不同，各 THI 计算式间的温湿度相对权重难以直接进行比较。Bohmanova 等^[9]通过某种换算关系得出 THI 计算式中干湿球权重比在 0.3~5.7，但对这一方法的论述还不够充分。各 THI 公式间的温湿度权重不同导致 THI 在不同环境下对热应激的预测能力不同。Berman 等^[10]使用了 1 组温湿度数据（气温 20~42℃，相对湿度 10%~70%）对各 THI 公式的研究表明温湿度权重确实存在差异，露点温度作为湿度参数的 THI 的湿度权重最小。Bohmanova 等^[9]使用美国亚利桑那州和佐治亚州的 2 组公共气象站数据进行了研究，发现湿度权重较大的 THI 公式更适用于气候潮湿地区，湿度权重较小的 THI 公式更适用于干旱地区。目前尚未有文献对 THI 公式的选择作更深的解释，但将相对湿度作为湿度变量的 THI 计算式最为常用^[11-13]。

表 1 THI 计算公式

Table 1 Formulas for calculating THI

来源 Resource	时间 Year	计算式 Calculation formula
Thom ^[7]	1959	$0.4 \times (T_a + T_{wb}) + 15$
Bianca ^[8]	1962	$0.15 \times T_a + 0.85 \times T_{wb}$
		$0.35 \times T_a + 0.65 \times T_{wb}$
Cargill 等 ^[14]	1966	$0.55 \times T_a + 0.2 \times T_{dp} + 17.5$
Maust 等 ^[15]	1972	$0.72 \times (T_a + T_{wb}) + 40.6$
Ingraham 等 ^[16]	1974	$T_a - (0.55 - 0.005 \times RH)(T_a - 58)$
Buffington 等 ^[17]	1981	$T_a + 0.36 \times T_{dp} + 41.5$
Mayer 等 ^[18]	1999	$T_a + 0.36 \times T_{dp} + 41.2$
Mader 等 ^[19]	2006	$0.8 \times T_a + (RH/100) \times (T_a - 14.4) + 46.4$

注：T_a 为干球温度，°F 或 °C；T_{wb} 为湿球温度，°F 或 °C；T_{dp} 为露点温度，°F 或 °C；RH 为相对湿度，%。下同。
Note: T_a is dry bulb temperature, °F or °C; T_{wb} is wet bulb temperature, °F or °C; T_{dp} is dew point temperature, °F or °C; RH is relative humidity, %. Same as below.

1.2 基于 THI 的修正指数

引起动物热应激的环境因素并不只有温度和湿度，其他环境因子如辐射和风速在动物与环境换热过程中也起着重要的作用。舍外散养模式下，家畜吸收的太阳辐射可能是其自身代谢产热量的数倍，辐射是引起热应激的主因^[20]。在舍饲条件下，加快舍内空气流速是减弱家畜热应激的主要方式。

针对 THI 未考虑辐射和风速的缺点，有研究提出了相关的修正指数（见表 2）。Buffington 等^[17]建议用黑球温度替换原 THI 公式中的干球温度，由此提出了黑球湿度指数（black globe-humidity index, BGHI）。黑球温度经常用来反映周围环境的辐射热，黑球温度受到风速与

气流速度的影响，因此，BGHI 在一定程度上能代表环境温度、湿度、风速和辐射的综合影响。

Mader 和 Davis 还提出一种基于喘息行为来评估动物的热应激程度的方法，他们称之为喘息得分（panting score）。喘息得分规定，0 分表示正常的呼吸行为，4 分表示张嘴伸舌、用力吸气、分泌过多唾液的急性呼吸行为^[21]。2006 年，Mader 等将喘息得分作为因变量，建立了风速和太阳辐射与 THI 的修正关系，提出了调整温湿指数^[19]（adjusted THI, THI_{adj}）

1.3 其他指数

不同于对已有 THI 概念的补充和修正，一些研究从建模方法、应用环境等不同方向提出了一些新的指数形态。Baeta 等^[22]在环控舱条件下综合考虑了干球温度、相对湿度和风速，提出了等效温度指数（equivalent temperature index, ETI）。但 ETI 未考虑辐射的影响，理论上只适用于无辐射的环境，不过 Da Silva 等^[23]认为 ETI 适用于评价热带地区舍外放养下奶牛的热应激。Yamamoto 等^[24]也通过环控舱提出过类似人居热舒适指标中的有效温度（effective temperature, ET），不过初期只考虑了温度和风速的影响，后来又通过移动犊牛舍遮阴板探讨了有太阳辐射下情况，提出了另一种包含干球温度和黑球温度的有效温度指数^[25]。

进入 21 世纪后，奶牛热应激指数的变化尤为迅速。呼吸率能够较好地反映牛的热应激程度，但不方便对群体进行呼吸率的观察，Eigenberg 等^[26]提出预测呼吸率指数（respiratory rate index, RRI）。但 RRI 应用范围比较有限，只适用于气温高于 25℃ 且没有荫棚的舍外条件。牛的热应激程度会随着白天热量的累积和夜间的消散而加重和减轻，但现有指数均未能考虑这一因素。因此，Gaughan 等^[27]提出了能够反映牛只体内热量周期性变化的热负荷指数（heat load index, HLI）。HLI 的评判标准为黑球温度，当黑球温度高于 25℃ 时，HLI 采用指数公式，低于 25℃ 使用线性公式。多数指数只考虑了炎热环境，未考虑过在低气温下的应用问题，Mader 等^[28]拓宽了指数的适用范围，提出综合气候指数（comprehensive climate index, CCI）。公式中将湿度、风速、太阳辐射都转化成相应的等效干球温度值，CCI 为各部分等效干球温度与实际干球温度之和。

大部分奶牛热应激指数针对的是温带气候环境，部分学者将研究重点转向高温、高湿、强太阳辐射的热带地区。Da Silva 等^[29]提出了适用于热带地区的奶牛热应激指数（index of thermal stress for cows, ITSC）。2018 年，Lees 等^[30]基于泌乳牛呼吸行为提出了用于热带和亚热带地区的奶牛热负荷指数（dairy heat load index, DHLI）。Berman 等^[10]基于湿空气的显热提出过一种显热基温湿指数（sensible heat-based THI, THIs）。

以往的热应激指数几乎都是采用统计建模得出经验公式，而近年有学者在指数建模方式上有所发展。Wang 等^[31]针对高产奶牛提出等效温度指数（equivalent temperature index for cattle, ETIC）。ETIC 是风速为 0、

相对湿度 100%和无辐射的假想环境下的气温。相较于 CCI, ETIC 同样将风速、湿度和太阳辐射的影响转化成等效干球温度。但 CCI 是统计模型,而 ETIC 在建模过程中一定程度上考虑了环境参数的换热机理,因此,ETIC 应为半经验半理论模型。由于 ETIC 的建模和验证过程均来自于同一个数据库,并且该数据库是由一组环控舱数据和另一组现场数据汇集而成,那么,ETIC 的准确性和有效性还有待检验。

表 2 除 THI 外其他热应激指数
Table 2 Other thermal stress indices except THI

	指数 Index	出版年 Year	提出人 Authors	计算公式 Calculation formula
BGHI ^[17]	黑球湿度指数 Black globe-humidity index	1981	Buffington	$BGHI = T_{bg} + 0.36 \times T_{dp} + 41.5$
ETI ^[22]	等效温度指数 Equivalent temperature index	1987	Baeta	$ETI = 27.88 - 0.456T_a + 0.010\,754T_a^2 - 0.490\,5RH + 0.000\,88RH^2 + 1.150\,7u - 0.126\,477u^2 + 0.019\,876 \times T_a \times RH - 0.046\,313 \times T_a \times u$
ET ^[24,25]	有效温度 Equivalent temperature index	1989 1994	Yamamoto	$ET1 = T_a - 10u^{0.5}$ $ET2 = 0.24T_a + 0.76T_{bg}$
RRI ^[26]	呼吸率指数 Respiratory rate index	2005	Eigenberg	$RRI = 0.28T_a + 2.4T_{dp} - 1.5u + 0.038SR - 52.8$ $RRI = 5.1T_a + 0.58RH - 1.7u + 0.039SR - 105.7$
THI _{adj} ^[19]	调整温湿指数 Adjusted THI	2006	Mader	$THI_{adj} = THI + 4.51 - 1.992u + 0.006\,8SR$
HLI ^[27]	热负荷指数 Heat load index	2008	Gaughan	$HLI(T_{bg} < 25) = 10.66 + 0.28RH + 1.9T_{bg} - u$ $HLI(T_{bg} > 25) = 8.62 + 0.38RH + 1.55T_{bg} - 0.5u + e^{2.4-u}$
CCI ^[28]	综合气候指数 Comprehensive climate index	2010	Mader	$CCI = T_a + Eq.[1] + Eq.[2] + Eq.[3]$ $Eq.[1] = [\exp(0.001\,82RH + 1.8 \times 10^{-5} \times T_a \times RH)] \times (0.000\,054T_a^2 + 0.001\,92T_a - 0.024\,6) \times (RH - 30)$ $Eq.[2] = \frac{-6.56}{\exp\left\{\frac{1}{(2.26u + 0.23)^{0.45 \times (2.9 + 1.14 \times 10^{-6} u^{2.5}) - \log_{0.1}(2.6u + 0.33)^{-2}}}\right\}}$ $- 0.005\,66u^2 + 3.33$ $Eq.[3] = 0.007\,6SR - 0.000\,02 \times SR \times T_a + 0.000\,05 \times T_a^2 \times SR^{0.5} + 0.1T_a - 2$
ITSC ^[29]	奶牛热应激指数 Index of thermal stress for cows	2014	Silva	$TISC = 77.174\,7 + 4.832\,7T_a - 34.818\,9u + 1.111u^2 + 118.698\,1P_v - 14.795\,6P_v - 0.105\,9ERHL$ $ERHL = 0.5S_p + \sigma T_{rm}^4$ $T_{rm} = [e_{bg}^{-1} \times h_{bg} \times (T_{bg} - T_a) + \sigma(T_{bg} + 273.15)^4]^{0.25}$
THIs ^[10]	显热基温湿指数 Sensible heat-based THI	2016	Berman	$THIs = 3.43 + 1.058T_a - 0.293RH + 0.016\,4 \times T_a \times RH + 35.7$
DHLI ^[30]	奶牛热负荷指数 Dairy heat load index	2018	Lees	$DHLI = \frac{\left(\frac{1.681\,813}{1 + e^{-(8.507\,49 + 0.206\,159T_{bg} + 4.088\,39RH)}}\right) - 0.000\,2}{1.681\,2 - 0.000\,2} \times 100$
ETIC ^[31]	牛等效温度指数 Equivalent temperature index for cattle	2018	Wang	$ETIC = T_a - 0.003\,8T_a(100 - RH) - 0.117\,3u^{0.707} \times (39.2 - T_a) + 1.86 \times 10^{-4} \times T_a \times SR$

注: T_{bg} 、 T_{rm} 分别为黑球温度和平均辐射温度, $^{\circ}\text{C}$; u 为风速, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; SR 为太阳辐射强度, $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$; $ERHL$ 为有效辐射热负荷, $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 。
Note: T_{bg} and T_{rm} are black global temperature and mean radiant temperature respectively, $^{\circ}\text{C}$. u is wind speed, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; SR is intensity of solar radiation, $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$; $ERHL$ is effective radiation heat load, $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$.

2 不同评价指数在表征热应激时的差异

2.1 指数阈值

依据家畜气候安全指数 (livestock weather safety index, LWSI) 的记录, 引起泌乳牛产奶量下降的 THI 阈值为 72^[32], 也有一些文献佐证了这一结论^[33-35]。对 THI 阈值的评判依据大多是基于生产性能, 一方面是因为奶牛的采食量和产奶量对气候变化最为敏感; 另一方面是因为生产性能最受关注。

然而目前对奶牛热应激评判依据和 THI 阈值还存在争议。在欧洲地区进行的相关研究中, 有报导称 THI 高于 60 则奶蛋白量将会下降^[13], 高于 62 则产奶量、奶脂量会下降, 高于 66 则牛奶中的体细胞数增加^[12]。也有学

者认为影响产奶量、奶蛋白率、奶蛋白量、奶脂量的 THI 阈值分别为 73~76、65~71、72~73 和 71~72^[11]。美国很早就开展了奶牛生产水平与热应激的相关研究, 各研究间的结果也有明显差异。有学者在环控舱下的试验表明造成产奶量和采食量下降的 THI 阈值为 77^[36]。在美国不同地区甚至同一个州进行的不同研究之间也存在不同的结论^[9,35,37]。而其他地区进行过的相关研究中, 例如墨西哥^[38]、突尼斯^[39]、中国^[40]、泰国^[41], 得出过的结论分别有 70、69、70、80。

表 3 列出了指数在不同热应激等级下的阈值。除了 BGHI、ET、THI_{adj}、THIs 和 DHLI 没有给出分级信息外, 其余指数将热应激分为 4~6 个等级, 其中 THI、RRI、HLI 和 ETIC 的分级数为 4 个, ETI 和 ITSC 为 5 个。CCI

的分级最为细致，达到 6 个，可能是其试验条件覆盖了高温环境和低温环境。HLI 的热应激分级阈值可以根据动物因素和管理因素进行调整，其中动物因素有基因型、

被毛颜色、健康程度和环境适应性，管理因素有荫棚、饲养天数、粪便处理和饮水温度。HLI 的基础阈值为 86，基准动物是无遮阴下的安格斯肉牛。

表 3 不同热应激等级下的指数阈值
Table 3 Threshold of indices under different heat stress levels

指数 Index	分级数 Levels	分类依据 Classification basis	不同热应激等级下的阈值 Threshold under different heat stress levels
THI	4	产奶量 Milk production	无热应激≤72；轻度热应激(72,79]；中度热应激(79,89)；重度热应激≥89
ETI	5	-	无热应激[18,27]；警告(27,32]；极度警告(32,38]；危险(38,44)；极度危险≥44
RRI	4	THI	正常≤90；警告(90,110)；危险(110,130)；紧急≥130
HLI	4	喘息得分 Panting score	热中性≤70；温暖(70,77]；热(77,86)；极热≥86
CCI	6	THI	无应激≤25；轻微应激(25,30]；中等应激(30,35]；重度应激(35,40]；危险(40,45)；极度危险≥45
ITSC	5	呼吸率 Respiratory rate	舒适≤150；轻度不适(150,200]；不适(200,250]；热应激(250,350)；热应激加强≥350
ETIC	4	THI	轻度[23,26)；中度[26,31)；重度[31,37)；紧急≥37

2.2 指数中涉及的环境因子及传热性质

动物通过导热、对流、辐射以及蒸发的方式向环境释放多余的热量以维持动物体内热平衡^[42]，其中涉及的环境参数有气温、湿度、风速、太阳辐射强度、平均辐射温度等。气温决定了动物体表面与环境的对流换热温差因而影响了对流换热量。风速影响了对流换热系数，风速越大，对流换热量越大。动物蒸发散热的途径有表皮蒸发和呼吸道蒸发。湿度是表示空气水蒸气含量的参数，湿度越高，可通过蒸发带走的热量越少。风速也会影响动物体表面的水蒸气扩散系数，气流速度越大则会提高蒸发散热量。除了 THI、BGHI、ET1、ET2 和 DHLI 只包含 2 个环境参数外，其余指数均包含不少于 3 个环境参数，尤其是 ITSC 涉及的环境参数多达 6 个。

Da Silva 等^[29]的计算结果表明，CCI 与奶牛通过辐射得热无显著相关性，HLI 与奶牛呼吸蒸发散热无显著相关性。除了 CCI 与呼吸蒸发的相关性 ($r=0.408$) 最高外，ITSC 与对流散热、表皮蒸发和辐射得热的相关性均为最高。Bjerg 等^[43]报导 ETI、RRI、THI_{adj}、CCI、ITSC 和 HLI 都未能预测出动物体表温度与气温温差减小导致的风速降温效果减弱的现象。Wang 等^[44]提出“等效气温变化法”评价了一些热应激指数的传热特性。该评价方法可以理解为某一参数的变化使得气温为了维持原来的指数值而变化的量。气温和湿度升高分别使得对流换热温差和水汽压差减小，会导致散热减少，从而带来升温效果。Wang 等^[44]的结论认为绝大多数指数能反映这一现象。而风速升高所带来的降温效果在 CCI 中不能得到反映，只有 ET1 和 CCI 反映出风速升高所带来的降温效果会随着风速升高而减弱。除了 ITSC 以外，其他含有太阳辐射变量的指数均能反映辐射增大所引起的升温效果。

2.3 奶牛生理反应与各指数的关系

热应激指数只能作为一种客观地评价方法，必须与奶牛在热应激下的生理反应结合，才能构成较为完整的评价体系。Li 等^[45]使用 2 组数据分析了 THI、THI_{adj}、BGHI、ETI、HLI、RRI 与牛的表皮温度、呼吸率以及出汗率之间的相关性。第 1 组数据来自商业化牛场的奶牛

和肉牛。结果显示，上述指数都与表皮温度显著相关，ETI 与呼吸率相关性最高，HLI 与牛的出汗率相关性最高。第 2 组数据来自环控舱，试验对象为 12 头泌乳荷斯坦奶牛，结果显示除了 THI 与表皮温度不相关以外，其余指数均与表皮温度和呼吸率显著相关。此外，THI_{adj}、ETI 和 HLI 与出汗率不相关。

Da Silva 等^[23]在早期的研究中将 THI、BGHI、ETI、RRI 和 HLI 分别与奶牛的直肠温度和呼吸率进行了相关分析。其结果表明，THI、BGHI 与直肠温度无显著相关性，ETI 与呼吸率和直肠温度的相关性分别为 0.293 和 0.520，HLI 分别为 0.286 和 0.542。在热带环境下，使用 ETI 和 HLI 比 THI、BGHI 能够更好预测奶牛热应激。此外，由于 ETI 所涉及的环境参数（温度、湿度和风速）更少，ETI 可能是更好的热应激指数。Da Silva 等将后期建立的 ITSC 与 CCI、HLI、BGHI 对比，其结果显示指数均与直肠温度和呼吸率显著相关，并且 CCI 在 2 个生理指标中均表现出最高的相关性，其次是 ITSC^[29]。

3 存在问题分析

3.1 选择的环境参数无法反映奶牛与环境的换热机理

THI 提出至今已有 60 a，但迄今仍是使用最广的热应激指数，有学者甚至认为 THI 是家畜生产和运输环节的热环境分类的实际标准^[6]。虽然 THI 中只含有温度和湿度 2 个环境参数，但原文献对干球温度和湿球温度的权重没有给出解释，而研究结果已表明各种 THI 指数在干球温度和湿度的权重上存在差异，并且都低估了湿度对奶牛热应激的影响。值得一提的是，目前已有的 THI 公式都来自人居环境的指数，该指数是基于人的热感觉和热舒适提出的，将 THI 用于畜舍环境其实忽视了人与家畜在生活环境、生理特性和散热能力方面的巨大差异。

理论上，奶牛热应激指数所涉及的环境参数越多，则能够解释动物体与环境的热交换过程也越多，那么指数对热应激的预测效果也应该越好。THI 的缺点是只包括温度和湿度，未考虑风速和太阳辐射的影响使其不太能适用于有风的舍内和强日照的舍外环境。而后来发展的

指数同样也存在环境参数考虑不全的问题。BGHI、ET、DHLI 等指数采用黑球温度来表示风速、辐射和干球温度对奶牛与环境换热过程中的综合影响,但黑球温度是特定尺寸和特定材料的球体在一定空间点上对流换热和辐射换热的结果。由于不同奶牛个体在体型、被毛及其生理性质上的差异,黑球温度不应该被视为奶牛与环境热交换的通用模型。

奶牛热应激指数中所确定的参数应该能体现其涉及的换热机理。目前的指数大多是只能通过统计方式将环境参数与奶牛生理反应或行为反应之间建立相关关系,但不能体现环境参数在动物与环境换热过程中的物理作用,仍然是经验模型。环境参数通常不止涉及一个热交换过程,环境参数之间具有耦合性。一些热应激指数中环境参数与指数值是线性关系,没有考虑环境参数间的交互作用。

3.2 研究结果因研究条件不同存在较大差异

奶牛热应激指数的背景差异首先表现在地域上。在综述指数中,大多数指数的提出是来自于美国和澳大利亚,例如 THI、BGHI、ETI、RRI、THI_{adj}、CCI、ETIC 产生于丹麦(数据来自美国),HLI 和 DHLI 产生于澳大利亚,ET 产生于日本,THIs 产生于以色列,ITSC 产生于巴西。地区的差异导致气候环境的差异,而指数的提出者在建模时通常只考虑了所在地区的气候条件。除了 THIs 和 ITSC 分别产生于地中海气候和热带气候以外,绝大部分指数产生于温带气候,这使得一些指数在非温带气候气候下使用会产生很大偏差。

除了气候上的差异,指数间的背景差异还存在于试验环境方面。ETI、BGHI、ETI、ETIC 等的试验是在环控舱内进行的,其他指数的试验则是在商业化牛场或者试验牛场中开展的。环控舱内气候条件存在一定的特殊性,试验动物的行为反应和生理反应在环控舱环境下与开放环境下具有明显的环境条件差异。环控舱模拟的气候条件例如气流组织、辐射方向等也往往与真实环境迥异。环境因素与动物因素的双重偏差使得通过环控舱试验得到的指数难以准确评价开放环境下奶牛的热应激水平。

动物热应激受自身生理因素的影响,已有的指数与对应激的预测也是建立在指数值与动物生理、行为反应的对应关系上。各指数在测试动物上的差异存在于试验动物数量(十几到数千头)、品种(纯种、杂种奶牛,纯种、杂种肉牛)、产奶水平(高产、中产、低产、干奶)等方面的不同。

热应激指数在构建时的背景差异是导致其适用性较差的主要原因。但要求指数在不同环境下都具有普适性也是不现实的。因此,指数的提出者应当对指数的适用环境以及其他的必要条件进行说明,以便于指数的选择和运用,从而提高指数对奶牛热应激评估和预测的效果。然而,例如 BGHI、CCI、ITSC、ETIC 等的大部分热应激指数没有给出适用条件,读者仅能从文献中记录其试验条件而推测出部分信息,这造成了指数选用上的难度。BGHI、THIs 等指数甚至没有给出引起热应激的指数阈

值,这使得热应激的产生与否以及程度如何无从判断。

4 未来研究热点展望

热应激显著降低奶牛的生产水平和繁殖力。全球气候变暖以及奶牛耐热性的降低加剧了奶牛的热应激。随着高效生产的要求以及对动物福利理念的不断认识,如何减小奶牛热应激,创造福利型畜舍环境成为学术热点。但怎样的环境会使得奶牛产生热应激?对于这一问题尚未有明确和统一的答案。热应激一方面是取决于动物自身,一方面取决于环境条件包括气温、湿度、风速和太阳辐射等因素的综合影响。在过去的半个多世纪里,相继有学者提出了多种奶牛热应激指数评价方法,希望通过综合多个环境参数,建立综合评价指数以有效评估和预测奶牛产生热应激的环境条件。THI 的广泛应用证明了热应激指数评价方法的可行性。尽管 THI 只包含温度和湿度,但在缺乏其他环境数据的情况下也能够利用公共气象服务系统的温湿度的实测参数来计算 THI,实现对热应激的监测和预警。THI 公式多种多样,而各个 THI 公式中的干球温度和湿度的相对权重不一样,且目前尚未有文献对 THI 公式的选用做出解释。更大的问题是,THI 公式都是基于人的热舒适和热感觉提出的,而人与牛在生活环境、生理特性和散热能力方面差异极大。因此,学界内的一些学者也意识到 THI 未考虑风速和辐射等显著影响热应激程度的环境参数,提出了基于 THI 的修正指数和一些针对其他气候环境的热应激指数。这些指数依然存在着环境参数不全、环境参数考虑不全的问题,这些问题制约着奶牛热应激指数在实际生产中的应用。

在过去的几十年,奶牛热应激指数还是朝着将环境参数与奶牛生理、行为参数建立对应关系的经验模型的方式发展。甚至有学者认为由于 THI 在家畜生产中的使用非常成功,建议未来指数的发展仍需要往 THI 中加入新的环境参数并不断优化。不得不承认,THI 在过去环境参数和动物生理、行为参数不易获取的一段时间里发挥过重要的作用。但目前牛舍建筑结构形式以及环境调控设备为满足减缓热应激的发生进行了诸多改进^[46],在遮阳降温、强制通风降温、蒸发降温以及针对牛脖颈部局部送风等多种降温方式的联动下,THI 以及其他的简单指数很难再满足未来奶牛养殖业生产的需要。随着环境和动物的监测设备和方法不断取得长足进步的条件下,有必要建立更加精准的评价指数,以满足提高家畜生产力、实现福利化养殖的需要。那么,未来该如何发展奶牛或者家畜热应激指数?或许,人居环境热舒适指数的发展过程可以提供一些值得借鉴的思路。随着动物热平衡理论的发展和完善,未来可以发展类似标准有效温度(standard effective temperature, SET)^[47]、通用气候指数(universal thermal climate index, UTCI)^[48]等基于热平衡模型的奶牛热应激指数。由于热应激是由动物因素和环境因素共同决定的,综合动物因素与环境因素并且基于热平衡建立的“理论指数”模型应当要比单依靠环境参数拟合的“简单指数”模型能更加真实地描述奶牛的综合感觉。因

此, 对于未来奶牛热应激指数的研究方向, 笔者提出如下建议:

1) 奶牛热应激指数应涉及较多的环境参数, 并且环境参数应体现出一定的换热机理。

2) 除了构建特定环境条件下的指数模型, 还应适当考虑指数在其他环境下的适应性。

3) 奶牛热应激指数的提出者应尽可能详细地给出指数的适用信息和阈值, 指数的阈值要能够满足动态调整, 以扩大其适用范围。

4) 应考虑结合动物生理参数和环境参数, 并基于动物热平衡理论建立新的奶牛热应激指数形式。

5 结 论

综合多个环境因子的指数模型是当前预测和评价奶牛热应激的主要方法。其中, 温湿指数作为判断奶牛热应激的标准被广泛应用。在温湿指数的基础上, 后续研究从建模方法、应用环境等方面不同方向提出了一些参数上的优化, 以覆盖更多的环境因子, 提高热应激指数的预测和评价性能。这些指数在阈值信息、指数中涉及的环境因子及传热性质、奶牛生理反应与指数间的关系等有明显的差异。目前奶牛热应激指数存在的问题主要在于指数包含的环境参数不能反映奶牛与环境的换热机理, 以及环境条件不同而导致的评价结果差异。为避免上述问题, 可以考虑从产生热应激的物理机制入手发展家畜热应激指数, 并借鉴一些基于人体热平衡的人居热舒适指数的研究思路, 通过建立更加精细的指数评价模型以满足提高家畜生产力、实现福利化养殖的需要。

[参 考 文 献]

- [1] Fischer E M, Seneviratne S I, Lüthi D, et al. Contribution of land-atmosphere coupling to recent European summer heat waves[J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(6): 125—141.
- [2] 秦大河, Thomas Stocker. IPCC 第五次评估报告第一工作组报告的亮点结论[J]. *气候变化研究进展*, 2014, 10(1): 1—6.
Dahe Qin, Stocker Thomas. Highlights of the IPCC working group I fifth assessment report[J]. *Advances in Climate Change Research*, 2014, 10(1): 1—6. (in Chinese with English abstract)
- [3] Polsky L, Marina A G. Invited review: Effects of heat stress on dairy cattle welfare[J]. *Journal of Dairy Science*, 2017, 100(11): S1330047310.
- [4] West J W. Effects of heat-stress on production in dairy cattle[J]. *Journal of Dairy Science*, 2003, 86(6): 2131—2144.
- [5] Jordan E R. Effects of heat stress on reproduction[J]. *Journal of Dairy Science*, 2003, 86(3): E104—E114.
- [6] Hahn Le Roy, Gaughan John B, Mader Terry L, et al. Thermal indices and their applications for livestock environments[J]. *Livestock Energetics & Thermal Environmental Management*, 2009, 21(2): 113—130.
- [7] Thom E C. The discomfort index[J]. *Weatherwise*, 1959, 12(2): 57—61.
- [8] Bianca W. Relative importance of dry- and wet-bulb temperatures in causing heat stress in cattle[J]. *Nature*, 1962, 195: 251—252.
- [9] Bohmanova J, Misztal I, Cole J B. Temperature-Humidity Indices as Indicators of Milk Production Losses due to Heat Stress[J]. *Journal of Dairy Science*, 2007, 90(4): 1947—1956.
- [10] Berman A, Horovitz Talia, Kaim M, et al. A comparison of THI indices leads to a sensible heat-based heat stress index for shaded cattle that aligns temperature and humidity stress[J]. *International Journal of Biometeorology*, 2016, 60(10): 1453—1462.
- [11] Bernabucci U, Biffani S, Buggiotti L, et al. The effects of heat stress in Italian Holstein dairy cattle[J]. *Journal of Dairy Science*, 2014, 97(1): 471—486.
- [12] Hammami H, Bormann J, M'Hamdi N, et al. Evaluation of heat stress effects on production traits and somatic cell score of Holsteins in a temperate environment[J]. *Journal of Dairy Science*, 2013, 96(3): 1844—1855.
- [13] Brügemann K, Gernand E, von Borstel U U, et al. Genetic analyses of protein yield in dairy cows applying random regression models with time-dependent and temperature \times humidity-dependent covariates[J]. *Journal of Dairy Science*, 2011, 94(8): 4129—4139.
- [14] Cargill F, Stewart B. Effect of humidity on total heat and total vapor dissipation of holstein cows[J]. *Transactions of the ASAE*, 1966, 9: 702—706.
- [15] Maust L E, Mcdowell R E, Hooven N W. Effect of summer weather on performance of holstein cows in three stages of lactation[J]. *Journal of Dairy Science*, 1972, 55(8): 1133—1139.
- [16] Ingraham R H, Stanley R W, Wagner W C. Relationship of temperature and humidity to conception rate of Holstein cows in Hawaii[J]. *Journal of Dairy Science*, 1974, 57(4): 476—481.
- [17] Buffington D E, Collazo-Arocho A, Canton G H, et al. Black globe-humidity index (BGHI) as comfort equation for dairy cows[J]. *Transactions of the ASAE*, 1981, 24(3): 711—714.
- [18] Mayer D G, Davison T M, McGowan M R, et al. Extent and economic effect of heat loads on dairy cattle production in Australia[J]. *Aust Vet J*, 1999, 77(12): 804—808.
- [19] Mader T L, Davis M S, Brown-Brandl T. Environmental factors influencing heat stress in feedlot cattle[J]. *J Anim Sci*, 2006, 84(3): 712—719.
- [20] Maia A S C, Dasilva R G, Loureiro C M Battiston. Sensible and latent heat loss from the body surface of Holstein cows in a tropical environment[J]. *International Journal of Biometeorology*, 2005, 50(1): 17—22.

- [21] Mader T L, Davis M S. Wind speed and solar radiation corrections for the temperature-humidity index[C]. 15th Conference on Biometeorology and Aerobiology, Kansas City, MO, 2002.
- [22] Baeta F C, Meador N F, Shanklin M D, et al. Equivalent temperature index at temperatures above the thermoneutral for lactating dairy cows[C]. ASAE Summer Meeting, Baltimore, Maryland, 1987.
- [23] Da Silva R G, Morais D A E F, Guilhermino M M. Evaluation of thermal stress indexes for dairy cows in tropical regions[J]. *Rev Bras Zootec*, 2007, 36(4): 1192—1198.
- [24] Yamamoto Aya, Yamamoto Sadaki, Yamagishi Noriaki, et al. Effects of environmental temperature and air movement on thermoregulatory responses of lactating cows: An assessment of air movement in terms of effective temperature[J]. *Japanese Journal of Zootechnical Science*, 1989, 60(8): 728—733.
- [25] Yamamoto S, Young B, Purwanto B. Effect of solar radiation on the heat load of dairy heifers[J]. *Australian Journal of Agricultural Research*, 1994, 45(8): 1741.
- [26] Eigenberg R A, Brown-Brandl T M, Nienaber J A, et al. Dynamic response indicators of heat stress in shaded and non-shaded feedlot cattle, Part 2: Predictive relationships[J]. *Biosystems Engineering*, 2005, 91(1): 111—118.
- [27] Gaughan J B, Mader T L, Holt S M, et al. A new heat load index for feedlot cattle[J]. *Journal of Animal Science*, 2008, 86(1): 226—234.
- [28] Mader T L, Johnson L J, Gaughan J B. A comprehensive index for assessing environmental stress in animals[J]. *Journal of Animal Science*, 2010, 88(6): 2153—2165.
- [29] Da Silva Roberto Gomes, Maia Alex Sandro C, de Macedo Costa Leonardo Lelis. Index of thermal stress for cows (ITSC) under high solar radiation in tropical environments[J]. *International Journal of Biometeorology*, 2015, 59(5): 551—559.
- [30] Lees J C, Lees A M, Gaughan J B. Developing a heat load index for lactating dairy cows[J]. *Animal Production Science*, 2018, 58(8): 1387.
- [31] Wang X, Gao H, Gebremedhin K G, et al. A Predictive model of equivalent temperature index for dairy cattle (ETIC)[J]. *J Therm Biol*, 2018, 76: 165—170.
- [32] Preez J H Du, Hattingh P J, Giesecke W H, et al. Heat stress in dairy cattle and other livestock under Southern African conditions. III. Monthly temperature-humidity index mean values and their significance in the performance of dairy cattle[J]. *Onderstepoort Journal of Veterinary Research*, 1990, 57(4): 243.
- [33] Igono M O, Bjotvedt G, Sanford-Crane H T. Environmental profile and critical temperature effects on milk production of Holstein cows in desert climate[J]. *International Journal of Biometeorology*, 1992, 36(2): 77—87.
- [34] Ravagnolo O, Misztal I, Hoogenboom G. Genetic component of heat stress in dairy cattle, development of heat index function[J]. *Journal of Dairy Science*, 2000, 83(9): 2120—2125.
- [35] Ravagnolo O, Misztal I. Studies on genetics of heat tolerance in dairy cattle with reduced weather information via cluster analysis[J]. *Journal of Dairy Science*, 2002, 85(6): 1586—1589.
- [36] Johnson H D, Ragsdale A C, Berry I L, et al. Environmental physiology and shelter engineering with special reference to domestic animals. LXVI, Temperature-humidity effects including influence of acclimation in feed and water consumption of Holstein cattle[J]. *Research Bulletin Missouri Agricultural Experiment Station*, 1963.
- [37] Dikmen S, Hansen P J. Is the temperature-humidity index the best indicator of heat stress in lactating dairy cows in a subtropical environment?[J]. *Journal of Dairy Science*, 2009, 92(1): 109—116.
- [38] Ingraham R H, Stanley R W, Wagner W C. Seasonal effects of tropical climate on shaded and nonshaded cows as measured by rectal temperature, adrenal cortex hormones, thyroid hormone, and milk production[J]. *American Journal of Veterinary Research*, 1979, 40(12): 1792—1797.
- [39] Bouraoui R, Lahmar M, Majdoub A. The relationship of temperature-humidity index with milk production of dairy cows in a Mediterranean climate[J]. *Animal Research*, 2002, 51(6): 479—491.
- [40] 薛白, 王之盛, 李胜利, 等. 温湿度指数与奶牛生产性能的关系[J]. *中国畜牧兽医*, 2010, 37(3): 153—157.
- Xue Bai, Wang Zhisheng, Li Shengli, et al. Temperature-humidity index on performance of cows[J]. *China Animal Husbandry & Veterinary Medicine*, 2010, 37(3): 153—157. (in Chinese with English abstract)
- [41] Boonkum W, Misztal I, Duangjinda M, et al. Genetic effects of heat stress on milk yield of Thai Holstein crossbreds[J]. *Journal of Dairy Science*, 2011, 94(1): 487—492.
- [42] Mcarthur A J. Thermal interaction between animal and microclimate: A comprehensive model[J]. *Journal of Theoretical Biology*, 1987, 126(2): 203—238.
- [43] Bjerg Bjarne, Wang Xiaoshuai, Zhang Guoqiang. The effect of air velocity on heat stress at increased air temperature[C]. *Cigr-ageng*, 2016.
- [44] Wang Xiaoshuai, Bjerg Bjarne Schmidt, Choi Christopher Y, et al. A review and quantitative assessment of cattle-related thermal indices[J]. *Journal of Thermal Biology*, 2018, 77: S2011796654.
- [45] Li Shuhai, Gebremedhin Kifle G, Lee Chin N, et al. Evaluation of Thermal Stress Indices for Cattle[C]. *ASABE Annual Meeting*, St. Joseph, Mich, 2009.
- [46] 施正香, 王朝元, 许云丽, 等. 奶牛夏季热环境控制技术研究与应用进展[J]. *中国畜牧杂志*, 2011, 47(10): 41—46.

- Shi Zhengxiang, Wang Chaoyuan, Xu Yunli, et al. Chinese Journal of Animal Science, 2011, 47(10): 41—46. (in Chinese with English abstract)
- [47] Gonzalez R R, Nishi Y, Gagge A P. Experimental evaluation of standard effective temperature: A new biometeorological index of man's thermal discomfort[J]. International Journal of Biometeorology, 1974, 18(1): 1—15.
- [48] Jendritzky Gerd, de Dear Richard, Havenith George. UTCI—Why another thermal index?[J]. International Journal of Biometeorology, 2012, 56(3): 421—428.

Research status and existing problems in establishing cow heat stress indices

Yan Geqi^{1,2}, Li Hao^{1,2}, Shi Zhengxiang^{1,2,3*}, Wang Chaoyuan^{1,2,3}

(1. College of Water Resources and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China; 2. Key Laboratory of Agricultural Engineering in Structure and Environment, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100083, China; 3. Beijing Engineering Research Center on Animal Healthy Environment, Beijing 100083, China)

Abstract: Heat stress seriously affects the productivity, fertility and welfare of dairy cows. It is to be expected that, in the course of the next few decades, climate conditions for raising cattle will deteriorate. In order to reduce the risks of heat stress in dairy cows, researchers have been trying to seek a reliable method to predict or evaluate heat stress, and it has been become to a hot topic in this research field to obtain an index model by combining multiple environmental factors. To avoid blindness in selecting these environmental factors, this paper systematically analyzed the temperature-humidity index, and its modified indices based on THI combined with other factors, and compared the differences among these indices in characterizing the heat stress of dairy cows. These differences relate to the thresholds of indices, environmental factors involved and heat exchanging properties, and the relationships between physiological responses of dairy cows and indices. In this paper, the problems of heat stress index of dairy cows are also discussed. The most widely used temperature-humidity index is based on thermal sensation and thermal comfort of human, but had not been actually related to cow's living environments. Most indices linking environmental parameters to the physiological or behavioral responses of cows were established through the statistical correlation analysis process, but it did not reflect the real physical significance of the effects of environmental parameters on the process of heat exchange between animals and its environmental factors. In addition, the indices could only be well applied to the situation where they were established properly with the sufficient information for their use. We believed that THI had played an important role in the past when environmental parameters, physiology indicators and behavior responses were hard to be obtained, but the problem of THI had been existing in its application, so other direct parameters such as heat tolerance of high-yielding cows, the change of building structure and the linkage of various cooling modes should be considered when a new THI is being designed. Otherwise, the current THI will be not to meet the future production requirements of the dairy farming industry. With the application of digital technology, multi-parameter acquisition technology has been fundamentally changed, so it is necessary to develop a more reliable index of evaluating heat stress for cows to meet the needs of increasing livestock productivity and achieving welfare. Our suggestions to achieve this goal are as follows: 1) The index should be developed to incorporate more environmental parameters reflecting heat transfer mechanism. 2) The index can be applied not only in some specific climatic conditions, but also in other climatic conditions. 3) The index is to have applicable conditions and thresholds, and the thresholds of the index should be able to be dynamically adjusted to extend the scope of its application. 4) The index should be linked to animal physiological parameters and environmental factors, and consideration could be given to constructing a new index by meeting the theory of animal thermal balance.

Keywords: animals; environmental control; dairy cow; environmental parameters; heat stress index; THI