

奶牛采食调控理论与干物质采食量模型研究现状和分析

杨琴 熊本海* 韩英东 杨亮

(中国农业科学院北京畜牧兽医研究所, 动物营养学国家重点实验室, 北京 100193)

摘要: 对奶牛采食调控机理进行分析不仅有助于理解影响采食量的因素, 同时也能为构建与发展奶牛干物质采食量模型奠定基础。本文在探究奶牛采食调控理论的基础上, 总结了国际上近 20 年来构建的奶牛干物质采食量模型, 主要包括经验模型、机理模型及半机理模型, 深入分析了一些典型模型构建的背景、特点及它们之间的相互关系。目前, 干物质采食量预测仍是以经验模型为主, 而机理模型虽然参数比较复杂且不易获得, 但是作为机理调控的量化描述有重要的研究意义, 半机理模型综合了机理模型及经验模型的各自特点, 反映了模型发展的新趋势, 但具体预测效果还需要进一步验证。本文通过对干物质采食量模型进行总结与分析, 为开展适合我国奶牛干物质采食量模型研究提供了新思路。

关键词: 奶牛; 干物质采食量; 调控理论; 模型

中图分类号: S816

文献标识码: A

文章编号: 1006-267X(2014)01-0034-09

精确预测奶牛干物质采食量 (dry matter intake, DMI) 是设计奶牛饲粮配方的关键。DMI 模型通过探寻 DMI 与相关因素之间的定量关系, 实现 DMI 量化预测, 不仅能为精细化及动态的奶牛饲养管理提供依据, 更有助于进一步阐明奶牛采食调控机理, 实现对不同机理的整合^[1]。在不同生理阶段、饲粮组成和饲养环境下奶牛 DMI 存在明显差异, 其代谢调控机理十分复杂^[2], 利用传统采食调控理论无法解释其中复杂的调控模式^[3-4]。随着分子生物学、代谢组学和蛋白质组学的发展, 奶牛采食调控机理研究不断深入。因此, 依托当前对奶牛采食调控机理的研究现状, 对采食调控理论进行整合^[5], 这也是构建 DMI 预测模型的理论基础。

1 奶牛采食调控理论

传统理论认为奶牛采食主要受“饱腹感反馈

(distension-fill feedback)”^[6] 或者“代谢化学反馈 (chemostatic-metabolic feedback)”^[7] 调控, 并通过中枢神经系统来完成整个采食反馈过程^[8]。然而, 这些调控理论并不能完全解释奶牛实际采食变化^[9]。奶牛由于具有特殊的繁殖泌乳同期性, 其采食调控机理必然是错综复杂的。目前奶牛采食调控机理的研究呈现一种系统整合的发展趋势。

Mertens^[4] 将奶牛采食调控模式分为长期性调节和短期性调节; 短期性调节是指短期调节因素 (如饲粮中物理化学成分变化、环境温度等) 所引起的奶牛机体物理代谢、内分泌和中枢神经系统的采食快速反馈过程, 短期性调节因素主要影响奶牛每日或者每周采食量; 长期性调节是指奶牛在一定时期内为保证机体营养需要从而对采食量的适应性调节过程, 长期性调节因素影响奶牛整个繁殖周期平均采食量。在此基础上, Forbes^[3] 和

收稿日期: 2013-08-29

基金项目: 国家 973 计划课题 (2011CB100805); 国家 863 计划课题 (2012AA101905); 北京市奶牛产业技术体系创新团队; 中国饲料数据库数据更新与数据发布 (200903006-03-06)

作者简介: 杨琴 (1988—), 女, 广西桂林人, 硕士研究生, 从事反刍动物营养研究。E-mail: yq233@hotmail.com

* 通讯作者: 熊本海, 研究员, 博士生导师, E-mail: bxiong@iascaas.net.cn

Allen^[10]均认为“饱腹感反馈”与“代谢化学反馈”理论其实质是协同作用奶牛采食的短期性调节。Conrad 等^[11]试验发现当饲喂低纤维高消化饲料时,奶牛采食量与饲料营养组成(纤维含量等)呈正相关,即主要表现“饱腹感反馈”理论;当饲喂高纤维低消化饲料时,动物采食量与饲料能量平衡程度有关,即主要受控于“代谢化学反馈”理论。Cheeke^[12]提出“饱腹感反馈”调节与“代谢化学反馈”调节对奶牛采食调控存在一个能量浓度阈值,这个阈值与胃肠道容积有关。除了“饱腹感反馈”理论与“代谢化学反馈”理论构成奶牛短期性调节之外,Derno 等^[13]认为饲料中营养素在机体内的氧化过程也对奶牛采食量短期性调节有影响,其中采食后营养素的氧化过程可能会抑制采食量,而采食前脂肪净能氧化效率[pre-prandial net fat oxidation, FOX(net)]的提高与采食后碳水化合物氧化效率[postprandial net carbohydrate oxidation, COX(net)]的降低作为采食启动因子,共同调节采食过程。

奶牛采食长期性调节的完善,主要是源于传统调控理论无法合理解释奶牛围产前期采食量快速下降的问题。传统调控理论认为围产前期奶牛采食量下降的原因是因为腹部胎儿与脂肪对胃肠道的挤压所造成的,但是 Friggens 等^[9]发现产犊后采食量的上升幅度并没有由于腹部挤压的释放呈现一个很快的速率。Ingvarsen 等^[14]认为围产前期奶牛采食量降低是由奶牛生理状态所决定,受机体内大量激素变化的影响,胎儿对胃肠道的物理挤压影响不大。Allen 等^[15]利用肝脏氧化理论(hepatic oxidation theory)解释奶牛快速动员体脂与高淀粉饲料的摄入使得机体快速产生并吸收丙氨酸刺激乙酰辅酶 A 氧化,从而引起采食量下降。这一现象也与机体营养分配的协调控制理论(homeorhetic regulation theory)相符合^[16],即营养素优先供给机体急需器官组织。采食长期性调节影响整个奶牛繁殖周期的采食量变化,与奶牛妊娠阶段、繁殖潜能有很大的相关性,准确掌握长期性调节变化是合理预测奶牛不同时期采食量的基础。

传统采食调控理论主要是从饲料因素或者奶牛机体营养需要等单方面进行阐述,缺乏一个完整的系统理论体系。特别是对于具有繁殖周期性变化的产奶牛而言,不论是饲料、环境等外在因

素,还是泌乳阶段、体重、体况等机体内在因素,这些因素最终相互协同牵制,共同调控奶牛采食过程。如今,采食调控理论进入了系统整合阶段,由于机理的复杂性,目前所考虑的采食调控系统理论尚有许多不足之处。因此,随着各学科对采食调控研究的不断深入,系统性采食调控理论会更加完善,同时也为科学研究方向提供了新思路。

2 奶牛 DMI 模型

奶牛 DMI 模型不仅可用于指导实际生产,同时对采食调控理论的完善有重要意义。除了各国所提出奶牛饲养标准中的 DMI 模型之外,随着采食调控理论研究的不断深入与实际生产需求的变化,DMI 模型的研究呈现多元化的发展态势。本文总结了近 20 年来各国研究者所提出的具有一定影响的奶牛 DMI 模型,包括经验模型、机理模型与半机理模型。

2.1 经验模型

奶牛 DMI 经验模型是通过拟合与采食量有简单因果关系的因素(产奶量、体重和饲料特性等)所构建的关系方程式。该类模型参数不具有生物学意义,变量在实践中容易获得,具有较好的生产实践预测效果^[17]。

奶牛 DMI 经验模型的构建有 2 个步骤:第 1 步,寻求最优化模型变量,其中模型变量主要从影响奶牛 DMI 的动物因素、饲料因素和环境因素中寻找;第 2 步,寻找最合适模型骨架。当最优化变量找到之后,就需要有最适合的模型骨架(线性或者非线性模型等)来拟合参数。许多研究^[5,18-19]已对模型变量进行过总结,但是忽视了从模型骨架上对 DMI 经验模型分类。因此,本文依据 Ingvarsen^[19]总结的模型分类思想,将 DMI 经验模型按照所利用的不同模型骨架特点分为多元线性回归模型、多元复合模型和非线性模型(表 1)。

2.1.1 多元线性回归模型

以往奶牛 DMI 多元线性回归模型所选用的变量相对比较简单。目前,多元线性回归模型的变量种类越来越多元化^[20-21]。Rayburn 等^[20]构建的多元线性回归模型考虑了不同泌乳阶段(泌乳早期与泌乳中后期)和饲料因素对奶牛 DMI 的影响。西班牙学者 Fuentes-Pila 等^[31]考虑了影响 DMI 相关变量之间的交互,通过 Meta 分析找出了与 DMI 有较高相关度的变量^[32],建立了多元线性

回归模型。该模型整合了动物因素与饲料因素,并考虑各因素之间的交互,与其他 DMI 模型比较验证,结果表明该模型具有较高的预测精准性^[18]。北爱尔兰学者 McEvoy 等^[23]针对当地以放牧为主的饲养模式,分别构建了牧草干物质采食量 (grass DMI, GDMI) 模型和总干物质采食量 (total DMI,

TDMI) 模型。以色列学者 Halachmi 等^[22]针对机械化奶牛养殖需求,考虑到以往采用一群奶牛平均每周 DMI 作为模型变量^[24,33]的不足,利用每头奶牛每日 DMI 与体重的比值作为变量,构建适用于个体奶牛的预测经验模型。

表 1 奶牛 DMI 经验模型

Table 1 Empirical models of DMI in dairy cows

| 经验模型 Empirical models | 参考文献 Reference |
|--|--------------------------------|
| 多元线性回归模型 Multiple linear regression models | |
| $DMI = 0.0117BW + 0.281FCM + 0.0749DIM, DIM < 70$ $DMI = 0.023BW + 0.286FCM + 0.0201DIM - 0.0979RNDF, DIM > 70$ 式中: BW 为体重; FCM 为 4% 校正乳产量; DIM 为泌乳天数; $RNDF$ 为日粮中中性洗涤纤维含量 | Rayburn 等 ^[20] |
| $DMI = 548.0294 - 111.7076 \ln BW + 1.4024BW^{0.75} - 4.4128 \ln MY + 3.7496FY + 11.7684PY + 3.8327 \ln MOL + 0.0043RADF^2 + 0.7589RNDF - 0.0101RNDF^2 - 0.1367RCP$ 式中: BW 为体重; $BW^{0.75}$ 为代谢体重; MY 为乳产量; FY 为乳脂肪产量; PY 为乳蛋白产量; MOL 为泌乳月份; $RADF$ 为日粮中酸性洗涤纤维含量; $RNDF$ 为日粮中中性洗涤纤维含量; RCP 为日粮中粗蛋白质含量 | Fuentes-Pila 等 ^[21] |
| $DMI(\%)_{0,i} = b_{0,i} + b_{1,i} \frac{MY_0}{BW_0} + b_{2,i} \frac{MY_{-1}}{BW_{-1}} + b_{3,i} \frac{MY_{-2}}{BW_{-2}} + b_{4,i} BW_0 + b_{0,i} \frac{MY_{-2}}{BW_0} + b_{0,i} Fat + e$ 式中: BW 为体重; MY 为乳产量; Fat 为乳脂肪含量; b 为回归系数; e 为残差; i 为产犊后 3 ~ n d | Halachmi 等 ^[22] |
| $TDMI = -3.40 - 2.01parity + 0.05DIM + 0.15MY + 0.02BW - 1.15BCS + 0.31DHA + 0.64cDM$ $GDMI = -3.40 - 2.01parity + 0.05DIM + 0.15MY + 0.02BW - 1.15BCS + 0.31DHA - 0.36cDM$ 式中: $TDMI$ 为总干物质采食量; $GDMI$ 为饲草干物质采食量; $parity$ 为胎次; DIM 为泌乳天数; MY 为乳产量; BCS 为体况评分; DHA 为每日补充牧草重量; cDM 为每日补充精料重量 | McEvoy 等 ^[23] |
| 多元复合模型 Multiple complex models | |
| $DIM(\text{kg/d}) = [4.6 + 0.011 \times BW_{atcalving}(\text{kg}) + 12.4 \times MPRYD(\text{kg/d})] \times LAG$ (适于初产奶牛) $DIM(\text{kg/d}) = [8.4 + 0.006 \times BW_{atcalving}(\text{kg}) + 12.2 \times MPRYD(\text{kg/d})] \times LAG$ (适于经产奶牛) 式中: $BW_{atcalving}$ 为产犊后奶牛体重; $MPRYD$ 为乳蛋白产量; LAG 为采食高峰与泌乳高峰时间差值换算项 | Roseler 等 ^[24] |
| $DMI = (-0.293 + 0.372FCM + 0.0963BW^{0.75}) \times (1 - e^{-0.192 \times (WOL + 3.67)})$ 式中: FCM 为 4% 校正乳产量; $BW^{0.75}$ 为代谢体重; WOL 为泌乳周数 | NRC(2001) ^[25] |
| $DMI = (0.0185 \times BW + 0.305 \times FCM) \times DMLAF \times Mud \times LAG$ $DMI = (0.0185 \times BW + 0.305 \times FCM) \times LAG$ (不考虑环境因素) 式中: BW 为体重; FCM 为 4% 校正乳产量; $DMLAF$ 为夜晚冷应激对 DMI 的调整系数; Mud 为圈舍围墙泥巴厚度; LAG 为采食高峰与泌乳高峰时间差值换算项 | Fox 等 ^[26] |
| $DMI(\text{kg/d}) = 2.9(+/-0.56) + 0.258(+/-0.011) \times sECM(\text{kg/d}) + 0.0148(+/-0.0009) \times BW(\text{kg}) - 0.0175(+/-0.001) \times DIM - 5.85(+/-0.41) \times e^{-0.03DIM} + 0.09(+/-0.002) \times TDMI_{index}$ 式中: $sECM$ 为标准能量校正乳产量; BW 为体重; DIM 为泌乳天数; $TDMI_{index}$ 为总干物质采食量指数 | Huhtanen 等 ^[27] |
| 非线性模型 Nonlinear models | |
| $DMI = FIC / (\sum_p f_p \times SV_p)$ 式中: FIC 为动物采食能力; f_p 为第 p 个原料在饲料中所占的比例; SV_p 为第 p 个原料的充盈度值 | Zom 等 ^[28] |

续表 1

| 经验模型 Empirical models | 参考文献 Reference |
|--|---------------------------|
| $DMI(t) = 1.713 - 0.688e^{0.344t}$ (适用于初产奶牛) $DMI(t) = 1.979 - 0.756e^{0.134t}$ (适用于经产奶牛) 式中: e 为自然常数; t 为泌乳天数 | Hayirli 等 ^[29] |
| $DMI = 26.4 - 13.9e^{-0.06t}$ (适用于泌乳早期阶段奶牛) 式中: e 为自然常数; t 为泌乳天数 | Shah 等 ^[30] |

2.1.2 多元复合模型

多元复合模型在多元线性回归模型的基础上,加入非线性子模型,既能满足拟合曲线大幅度波动变化的需要,又具有较为简洁的公式。其中,比较典型的多元复合模型当属美国学者所提出的一系列奶牛 DMI 预测模型。

Roseler 等^[24]分别对初产奶牛和经产奶牛提出了不同的 DMI 模型,模型中引入采食高峰与泌乳高峰时间差值换算项(LAG)公式: $LAG = 1 - e^{-[(0.564 - 0.124 \times PKMK) \times (WOL + P)]}$ [式中: WOL 为泌乳周数(下式同); $PKMK$ 为产后泌乳高峰的月份(1、2、3), $PKMK$ 为 1 或 2 时, P 为 2.36, 而 $PKMK$ 为 3 时, P 为 3.67]。但是该模型只考虑了动物因素,没有考虑饲料因素对 DMI 的影响。NRC (2001)^[25]选用代谢体重($BW^{0.75}$)与 4% 校正乳产量(FCM)作为变量构建奶牛 DMI 模型,同时加入了泌乳早期 DMI 下降校正项($1 - e^{-0.192 \times (WOL + 3.67)}$)用于描述泌乳早期 DMI 的类指数变化趋势。这个校正项可以看成是对 LAG 公式的简化;Fox 等^[26]借用了 LAG 公式,利用体重与 FCM 构建奶牛 DMI 模型,同时在模型中考虑了环境因素。NRC 利用 1988—1998 年奶牛 DMI 相关资料构建十分简化的模型,其数据量大,来源广,模型普适性强,但该模型对于单头奶牛 DMI 预测精度不高^[30];Fox 等^[26]提出的模型是在 1992—1993 年发表模型的基础上,经过 10 多年的修改与完善,包括动物因素、饲料因素与环境因素对奶牛 DMI 的影响而提出的,但目前还没有研究验证该模型的实际预测效果。

以上模型基于美国集约化养殖场所建立,能较准确预测相同条件下群体奶牛平均 DMI。但模型所参考的 DMI 数据中奶牛主要饲喂高消化饲料,该饲料对消化道填充作用不明显,因此研究者没有考虑饲料因素对 DMI 的影响,同时一部分参

考奶牛使用了生长激素。因此,该类模型是否适用于我国乃至其他饲料资源不是很理想、饲料消化率不高、禁止使用生长激素的国家或地区,还需要进一步的试验验证。

此外,瑞典科学家 Huhtanen 等^[27]为了区别不同饲料之间的 DMI 差异性,分别引入了青贮干物质采食量(silage DMI, SDMI)^[34-35]与精饲料干物质采食量(concentrate DMI, CDMI)变量^[36],同时将饲料对 DMI 的影响与奶牛机体本身对 DMI 的影响进行了分析,更适用于精细化奶牛养殖,并具有更高的预测精度^[37]。

2.1.3 非线性模型

非线性模型是近年来构建 DMI 经验模型的新尝试,其能够利用较为简单的变量来拟合多变的模型趋势,其中比较典型的是法国 INRA 的瘤胃充盈单位体系(fill-unit system)^[38]。Zom 等^[28]利用该体系考虑饲料因素与动物因素对 DMI 的影响,借用 Bines^[39]对于变量选择的观点,将 DMI 模型看成是与泌乳天数相关的时间变量函数,并选用胎次、泌乳天数和妊娠天数来拟合动物采食能力(FIC)中的参数。Zom 等^[28]提出的模型参数相对复杂,但与奶牛 DMI 经验模型相比,其实际预测效果较好^[40]。

此外, Hayirli 等^[29]和 Shah 等^[30]都关注了奶牛围产期 DMI 的变化。研究发现,利用指数模型对围产期 DMI 的拟合程度更高^[20,41]。Hayirli 等^[42]考虑了奶牛围产期动物因素与饲料因素对 DMI 的影响,借用 Berkey^[43]提出的差分方程 $DMI(t) = a + pe^{kt}$ (式中: a 为随时间减小的渐进截距; p 为从渐进截距到奶牛分娩的采食量变化; k 为影响曲线形状的速率常数; e 为自然常数; t 为泌乳天数)进行模型构建。Hayirli 等^[42]提出的模型的回归系数受到体况分数(BCS)与饲料中有机物营养浓度的影响。Shah 等^[30]认为以往的 DMI 预测模

型通常考虑的是每周或者每个月的平均 DMI, 忽视每日 DMI 的变化情况, 因此利用指数方程 $DMI(t) = a - be^{-ct}$ (式中: a 为渐进最大 DMI; b 为 DMI 的潜在增量; c 为随泌乳天数小速率递增的 DMI; e 为自然常数; t 为泌乳天数) 建立模型。该指数模型的精确性与功能性都优于 NRC 模型。

奶牛 DMI 经验模型变量容易获得, 预测精度高, 实际生产中广泛应用。但由于其脱离了采食调控机理, 在预测出现偏差时, 只能盲目替换变量以希望达到更高的精度, 这个过程随机性较大, 费时费力。而动物因素、饲料因素和环境因素都是调控机理的表观变量, 是否可以依据奶牛采食调控机理选择最适合的表观变量, 使模型的构建更具有方向性? 这可能成为今后奶牛 DMI 经验模型深度构建的方向。

2.2 机理模型

奶牛 DMI 机理模型是在器官层面, 利用数学公式对采食调控机理的量化描述。构建 DMI 机理不仅有利于深入了解采食调控机理, 同时也能利用模型来验证对不明确调控过程的假设, 更进一步从机理角度为精确预测 DMI 提供了框架^[44-45]。起初, 奶牛并没有作为一个独立的动物来研究其采食机理模型, 而是作为反刍动物中的模型动物来共同探究反刍动物采食调控机理。

早期反刍动物采食机理模型依据“饱腹感反馈”理论与“代谢化学反馈”理论分为消化动力学模型和代谢模型。消化动力学模型假设 DMI 是由食糜在胃肠道内排空的速率所决定, 基于房室系统建模 (compartmental modeling)^[46] 规则, 将消化道内不同器官假设为不同的房室, 不同房室之间通过食糜的流通速率所连通。Mertens^[47] 和 Allen 等^[48] 对消化动力学模型进行了详细的概述。之后, 研究者依据饲料在消化道内的降解特性, 将器官房室进一步细分为不同营养代谢池, 以便研究不同饲料对 DMI 所产生的差异性变化^[1,49-51]。代谢模型假设食糜的消化吸收产物与机体的代谢状态共同作用反馈调控 DMI, 基于米氏动力学 (Michaelis-Menten kinetics)^[52] 规则, 认为食糜在消化道内的代谢是一系列酶促反应过程, 主要由最大反应速率 (V_{max})、米氏常数 (K_m) 和底物浓度所确定。Gill 等^[53] 将消化道看成一个代谢反应池, 将代谢能和代谢蛋白质作为构建代谢模型所考虑的两大因素。Illius 等^[54] 将代谢过程分为内

脏代谢池和内脏外代谢池 2 个部分, 内脏外代谢池区分为运输营养物质的血液池和细胞外液池, 同时用食糜代谢的醋酸盐替代 Gill 等^[53] 提出的 ATP 降解物作为表征代谢能的拟合变量。

2.2.1 机理模型整合

随着机理研究的深度整合, DMI 机理模型也进入了整合阶段。Forbes^[3] 首先尝试整合消化动力学模型和代谢模型, 假设动物采食是为了满足自身的能量需要, 利用阈值来表示物理反馈调节对 DMI 的限制。由于阈值所设定反馈的范围不能表征采食过程中动态连续的调控变化, Fisher^[1] 利用数学式分别表示由物理或者化学反馈引起的持续性正负调控^[55], 并首次将其进行了量化描述与整合。Hackmann 等^[49] 在 Fisher^[1] 的基础上选择更为容易测定的模型变量可溶性碳水化合物 (soluble carbohydrate)、可消化酸性洗涤纤维 (digestible acid detergent fiber) 等作为模型变量, 模型更加贴近实际运用。机理模型变量的选择上更倾向于多元化。Poppi 等^[56] 利用采食速率、植物细胞壁在瘤胃内周转速率和粪便排泄量作为物理调控变量, 基因限制蛋白质沉积率、散热率和 ATP 降解率作为代谢调控变量, 来构建整合采食调控机理。Sauvant 等^[57] 在前期整合的物理代谢模型基础上, 创新性引入“采食行为调控”子模型, 其中囊括了动物的能量需要状态和饲料的适口性等特点。Forbes^[58-59] 也创新性尝试了在模型中整合调控采食的神经中枢系统信号。

2.2.2 奶牛采食机理模型发展

在反刍动物采食机理研究的基础上, 各国研究者已经开始针对奶牛的 DMI 机理模型进行研究。目前的奶牛采食调控机理认为: 奶牛 DMI 变化主要受长期性调控与短期性调控共同作用, 以往研究反刍动物采食变化的“饱腹感反馈”理论与“代谢化学反馈”理论只能说明短期性调控变化, 忽略长期性调控所构建的机理模型不适用于奶牛, 特别是无法准确模拟围产后期奶牛 DMI 快速上升的变化趋势^[14]。在此基础上, Tedeschi 等^[60] 研究奶牛采食与体储变化的关系, 基于长反馈与短反馈机理构建了奶牛在繁殖生产周期内 DMI 变化的动态机理模型。该模型考虑了长期性调节中妊娠组织对消化道物理压迫的影响, 以及短期性调节中“饱腹感反馈”与“代谢化学反馈”的影响, 首次在器官层面整合了奶牛采食机理模型, 虽然

没有将采食过程中生理激素变化作为长反馈因素进行量化建模,但是这个奶牛机理模型思路也为今后的进一步建模研究提供了基础。

由于机理参数的复杂性与模型的动态性以及影响因素的广泛性,构建或提出的 DMI 机理模型不可能如同经验模型一样只需一个数学方程就能描述,而是需要一组前后相互关联的数学模型、状态变量及参数,并通过一定的具有矢量关系的机理流程图才能表达。因此,机理模型的研究往往需要通过计算机编程技术,通过一个模块实现模型化的计算过程。

2.3 半机理模型

在经验模型与机理模型的基础上,目前出现了一种新型的模型形式,即半机理模型。该模型在机理调控的基础上,利用表观变量进行模型拟合。Ellis 等^[61]在 DMI 预测模型中加入一个反馈调控变量公式 $Feedback = (K_1 \times WOL + K_2) \times [(ER - iER)/iER]$ (式中: $Feedback$ 为反馈调控; WOL 为泌乳周数; ER 为奶牛当前净能储备; iER 为奶牛原始净能储备; K_1 和 K_2 表示反馈估计参数)。该公式利用净能储备 (ER) 随泌乳周数变化的关系,考虑机体维持能量储存状态来估计反馈调节 DMI 的程度,从而降低预测 DMI 与实际 DMI 的差异。

半机理模型在利用生产实践中容易获得的变量参数,考虑机体 DMI 的调控规律,一定程度上打开了机体的黑箱,但该模型的预测效果与使用范围还需要进一步研究探索。

3 小结与展望

虽然机理模型能够从奶牛采食生理角度描绘采食变化状况,但其中许多变量在实际生产中不易获得,实际使用效果不理想。半机理模型作为一种预测模型的趋势,加入机理的优势,同时弥补了经验模型的不足,克服了机理模型归于复杂性及经验模型过于简单的特点,无疑是一种能够行“中庸”之举的模型。较于机理模型和半机理模型,经验模型具有发展时间长,自变量数据获得难度小,预测相对准确的优点,因此目前对于 DMI 预测还是以经验模型为主。

奶牛 DMI 经验模型的发展有 2 个主要方向: 1) 选择 DMI 相关度高的影响因素来构建模型。这可以考虑以采食调控理论为基础,在考虑奶牛

DMI 长期性调节的基础上,再依据不同饲料对短期性调节的影响程度,选择出更高相关度的表观变量,从而达到更高预测精确度。例如,在消化率低的饲料条件下,主要考虑饲料因素对 DMI 的影响,将饲料的中性洗涤纤维 (NDF) 等作为模型拟合的变量之一;在奶牛围产期,主要考虑机体本身的激素水平与妊娠状态对 DMI 的影响,选取与之相关的表观因素(泌乳周期或泌乳天数等)作为构建 DMI 模型的变量。2) 考虑当地饲喂水平和饲料资源特性,构建更贴近实际生产的奶牛 DMI 模型。随着奶牛精细化养殖的普及,利用群体均值预测模型在实际生产中必定会导致较大偏差,因此,特定牧场或特定饲料个体奶牛 DMI 预测将成为一种新趋势^[62]。目前这类 DMI 预测变量比较复杂多变^[22-23,27],如何简化与调整是今后研究的重点。

本文在探究采食调控理论的基础上,总结分析了近 20 年来奶牛主要 DMI 模型发展现状。目前我国主要沿用 NRC 提出的 DMI 模型,该模型是否适用于我国不同地域、不同养殖模式下奶牛生产 DMI 的预测,还没有验证结果。但是,由于我国粗饲料,尤其是优质粗饲料严重短缺,利用模型准确预测 DMI 来制订适合不同生产水平下奶牛的全混合日粮 (TMR) 配方,不仅能满足奶牛各阶段的营养需要,更能为牧场节约饲料成本,还能从总量上缓解对饲料资源的需求压力。因此,深入研究采食调控机理,搜集并总结 DMI 数据,构建符合我国牧场实际的奶牛 DMI 模型,是推动我国奶牛饲养精细化发展的关键技术之一。

参考文献:

- [1] FISHER D S. Modeling ruminant feed intake with protein, hemostatic, and distention feedbacks [J]. Journal of Animal Science, 1996, 74 (12) : 3076 - 3081.
- [2] ALLEN M S, BRADFORD B J, HARVATINE K J. The cow as a model to study food intake regulation [J]. Annual Review of Nutrition, 2005, 25 (1) : 523 - 547.
- [3] FORBES J M. A model of the short-term control of feeding in the ruminant: effects of changing animal or feed characteristics [J]. Appetite, 1980, 1 (1) : 21 - 41.
- [4] MERTENS D R. Predicting intake and digestibility using mathematical models of ruminal function [J].

- Journal of Animal Science, 1987, 64 (5) : 1548 - 1558.
- [5] 丁耿芝, 孟庆翔. 反刍动物干物质采食量预测模型研究进展[J]. 动物营养学报, 2013, 25 (2) : 248 - 255.
- [6] ALLEN M S. Physical constraints on voluntary intake of forages by ruminants[J]. Journal of Animal Science, 1996, 74 (12) : 3063 - 3075.
- [7] ILLIUS A W, JESSOP N S. Metabolic constraints on voluntary intake in ruminants[J]. Journal of Animal Science, 1996, 74 (12) : 3052 - 3062.
- [8] FISHER D S. A review of a few key factors regulating voluntary feed intake in ruminants[J]. Crop Science, 2002, 42 (5) : 1651 - 1655.
- [9] FRIGGENS N C, INGVARTSEN K L, EMMANS G C. Prediction of body lipid change in pregnancy and lactation[J]. Journal of Dairy Science, 2004, 87 (4) : 988 - 1000.
- [10] ALLEN M S. Effects of diet on short-term regulation of feed intake by lactating dairy cattle[J]. Journal of Dairy Science, 2000, 83 (7) : 1598 - 1624.
- [11] CONRAD H R, PRATT A D, HIBBS J W. Regulation of feed intake in dairy cows. I. Change in importance of physical and physiological factors with increasing digestibility[J]. Journal of Dairy Science, 1964, 47 (1) : 54 - 62.
- [12] CHEEKE P R. Applied animal nutrition-feeds and feeding[M]. 2nd ed. New Jersey: Prentice Hall, Inc., 1999.
- [13] DERNO M, NÜRNBERG G, SCHON P, et al. Short-term feed intake is regulated by macronutrient oxidation in lactating Holstein cows[J]. Journal of Dairy Science, 2013, 96 (2) : 971 - 980.
- [14] INGVARTSEN K L, ANDERSEN J B. Integration of metabolism and intake regulation: a review focusing on periparturient animals[J]. Journal of Dairy Science, 2000, 83 (7) : 1573 - 1597.
- [15] ALLEN M S, BRADFORD B J, OBA M. Board invited review: the hepatic oxidation theory of the control of feed intake and its application to ruminants[J]. Journal of Animal Science, 2009, 87 (10) : 3317 - 3334.
- [16] BAUMAN D E, BRUCE C W. Partitioning of nutrients during pregnancy and lactation: a review of mechanisms involving homeostasis and homeorhesis[J]. Journal of Dairy Science, 1980, 63 (9) : 1514 - 1529.
- [17] BEEVER D E, ROOK A J, FRANCE J, et al. A review of empirical and mechanistic models of lactational performance by the dairy cow[J]. Livestock Production Science, 1991, 29 (2) : 115 - 130.
- [18] MERTENS D R. Methods in modelling feeding behaviour and intake in herbivores[J]. Annales de Zootechnie, 1996, 45 (Suppl.) : 141 - 273.
- [19] INGVARTSEN K L. Models of voluntary food intake in cattle[J]. Livestock Production Science, 1994, 39 (1) : 19 - 38.
- [20] RAYBURN E B, FOX D G. Variation in neutral detergent fiber intake of Holstein cows[J]. Journal of Dairy Science, 1993, 76 (2) : 544 - 554.
- [21] FUENTES-PILA J, IBAÑEZ M, DE MIGUEL J M, et al. Predicting average feed intake of lactating Holstein cows fed totally mixed rations[J]. Journal of Dairy Science, 2003, 86 (1) : 309 - 323.
- [22] HALACHMI I, EDAN Y, MOALLEM U, et al. Predicting feed intake of the individual dairy cow[J]. Journal of Dairy Science, 2004, 87 (7) : 2254 - 2267.
- [23] MCEVOY M, DELABY L, KENNEDY E, et al. Early lactation dairy cows: development of equations to predict intake and milk performance at grazing[J]. Livestock Science, 2009, 122 (2/3) : 214 - 221.
- [24] ROSELER D K, FOX D G, CHASE L E, et al. Development and evaluation of equations for prediction of feed intake for lactating Holstein dairy cows[J]. Journal of Dairy Science, 1997, 80 (5) : 878 - 893.
- [25] NRC. Nutrient requirements of dairy cattle[S]. 7th ed. Washington, D. C. : National Academy Press, 2001.
- [26] FOX D G, TYLUTKI T P, TEDESCHI L O, et al. The net carbohydrate and protein system for evaluating herd nutrition and nutrient excretion[J]. Animal Feed Science and Technology, 2004, 112 : 29 - 78.
- [27] HUHTANEN P, RINNE M, MANTYSAARI P, et al. Integration of the effects of animal and dietary factors on total dry matter intake of dairy cows fed silage-based diets[J]. Journal of Animal Science, 2011, 5 (5) : 691 - 702.
- [28] ZOM R L G, ANDRÉ G, VAN VUUREN A M. Development of a model for the prediction of feed intake by dairy cows: I. Prediction of feed intake[J]. Livestock Science, 2012, 143 (1) : 43 - 57.
- [29] HAYIRLI A, GRUMMER R R, NORDHEIM E V, et al. Models for predicting dry matter intake of Holsteins during the prefresh transition period[J]. Journal of Dairy Science, 2003, 86 (5) : 1771 - 1779.

- [30] SHAH M A, MURPHY M R. Development and evaluation of models to predict the feed intake of dairy cows in early lactation[J]. *Journal of Dairy Science*, 2006, 89(1):294-306.
- [31] FUENTES-PILA J, DELORENZO M A, BEEDE D K, et al. Evaluation of equations based on animal factors to predict intake of lactating holstein cows[J]. *Journal of Dairy Science*, 1996, 79(9):1562-1571.
- [32] FUENTES-PILA J. Predicting the voluntary food intake of lactating Holstein cows fed total mixed rations [D]. Ph. D. Thesis. Madrid: Polytechnic University, 1997:12-19.
- [33] ROSELER D K, FOX D G, PELL A N, et al. Evaluation of alternative equations for prediction of intake for Holstein dairy cows[J]. *Journal of Dairy Science*, 1997, 80(5):864-877.
- [34] HUHTANEN P, KHALILI H, NOUSIAINEN J I, et al. Prediction of the relative intake potential of grass silage by dairy cows[J]. *Livestock Production Science*, 2002, 73(2):111-130.
- [35] HUHTANEN P, RINNE M, NOUSIAINEN J. Evaluation of the factors affecting silage intake of dairy cows; a revision of the relative silage dry-matter intake index[J]. *Journal of Animal Science*, 2007, 1(5):758-770.
- [36] HUHTANEN P, RINNE M, NOUSIAINEN J. Evaluation of concentrate factors affecting silage intake of dairy cows; a development of the relative total diet intake index[J]. *Journal of Animal Science*, 2008, 2(6):942-953.
- [37] HUTTMANN H, STAMER E, JUNGE W, et al. Analysis of feed intake and energy balance of high-yielding first lactating Holstein cows with fixed and random regression models[J]. *Journal of Animal Science*, 2009, 3(2):181-188.
- [38] JARRIGE R. Ruminant nutrition; recommended allowances and feed tables[M]. London: John Libbey Eurotext, 1989.
- [39] BINES J A. Feeding systems and food intake by housed dairy cows[J]. *Proceedings of the Nutrition Society*, 1985, 44(2):355-362.
- [40] ZOM R L G, ANDRÉ G, VAN VUUREN A M. Development of a model for the prediction of feed intake by dairy cows 2. Evaluation of prediction accuracy[J]. *Livestock Science*, 2012, 143(1):58-69.
- [41] KEADY T W J, MAYNE C S, KILPATRICK D J. An evaluation of five models commonly used to predict food intake of lactating dairy cattle[J]. *Livestock Production Science*, 2004, 89(2):129-138.
- [42] HAYIRLI A, GRUMMER R R, NORDHEIM E V, et al. Animal and dietary factors affecting feed intake during the prefresh transition period in holsteins[J]. *Journal of Dairy Science*, 2002, 85(12):3430-3443.
- [43] BERKEY D. Applied calculus[M]. 3th ed. Orlando: Sounders College Publishing, 1994.
- [44] ILLIUS A W, JESSOP N S, GILL M. Mathematical models of food intake and metabolism in ruminants [M]//CRONJE P B. Ruminant physiology: digestion, metabolism, growth and reproduction. Wallingford: CABI Publishing, 2000:21-39.
- [45] 易渺, 杨琴, 熊本海. 反刍动物营养代谢调控的数学模型化[J]. *动物营养学报*, 2013, 25(5):943-950.
- [46] JACQUEZ J A. Compartmental analysis in biology and medicine[M]. 2nd ed. Ann Arbor: University of Michigan Press, 1985.
- [47] MERTENS D R. Regulation of forage intake[M]//FAHEY G C, Jr, COLLINS M. Forage quality, evaluation, and utilization. Madison, WI: American Society of Agronomy, 1994:450-493.
- [48] ALLEN M S, MERTENS D R. Evaluating constraints on fiber digestion by rumen microbes[J]. *The Journal of Nutrition*, 1988, 118(2):261-270.
- [49] HACKMANN T J, SPAIN J N. A mechanistic model for predicting intake of forage diets by ruminants[J]. *Journal of Animal Science*, 2010, 88(3):1108-1124.
- [50] CHILIBROSTE P, AGUILAR C, GARCÍA F. Nutritional evaluation of diets. Simulation model of digestion and passage of nutrients through the rumen-reticulum[J]. *Animal Feed Science and Technology*, 1997, 68(3/4):259-275.
- [51] POPPI D P. Predictions of food intake in ruminants from analyses of food composition[J]. *Australian Journal of Agricultural Research*, 1996, 47(4):489-504.
- [52] PENRY D L, JUMARS P A. Modeling animal guts as chemical reactors[J]. *American Naturalist*, 1987, 129(1):69-96.
- [53] GILL M, THORNLEY J, HBLACK J L, et al. Simulation of the metabolism of absorbed energy-yielding nutrients in young sheep[J]. *British Journal of Nutrition*, 1984, 52(3):621-649.
- [54] ILLIUS A W, JESSOP N S. Modeling metabolic costs

- of allelochemical ingestion by foraging herbivores [J]. *Journal of Chemical Ecology*, 1995, 21 (6): 693 – 719.
- [55] FISHER D S, BURNS J C, POND K R. Modeling ad libitum dry matter intake by ruminants as regulated by distension and chemostatic feedbacks [J]. *Journal of Theoretical Biology*, 1987, 126 (4): 407 – 418.
- [56] POPPI D P, GILL M, FRANCE J. Integration of theories of intake regulation in growing ruminants [J]. *Journal of Theoretical Biology*, 1994, 167 (2): 129 – 145.
- [57] SAUVANT D, BAUMONT R, FAVERDIN P. Development of a mechanistic model of intake and chewing activities of sheep [J]. *Journal of Animal Science*, 1996, 74 (11): 2785 – 2802.
- [58] FORBES J M. Integration of regulatory signals controlling forage intake in ruminants [J]. *Journal of Animal Science*, 1996, 74 (12): 3029 – 3035.
- [59] FORBES J M. Minimal total discomfort as a concept for the control of food intake and selection [J]. *Appetite*, 1999, 33 (3): 371.
- [60] TEDESCHI L O, FOX D G, KONONOFF P J. A dynamic model to predict fat and protein fluxes and dry matter intake associated with body reserve changes in cattle [J]. *Journal of Dairy Science*, 2013, 96 (4): 2448 – 2463.
- [61] ELLIS J L, QIAO F, CANT J P. Prediction of dry matter intake throughout lactation in a dynamic model of dairy cow performance [J]. *Journal of Dairy Science*, 2006, 89 (5): 1558 – 1570.
- [62] VAZQUEZ O P, SMITH T R. Factors affecting pasture intake and total dry matter intake in grazing dairy cows [J]. *Journal of Dairy Science*, 2000, 83 (10): 2301 – 2309.

Research Situation and Analysis on Feed Intake Theory and Dry Matter Intake Models for Dairy Cows

YANG Qin XIONG Benhai* HAN Yingdong YANG Liang

(State Key Laboratory of Animal Nutrition, Institute of Animal Science, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China)

Abstract: Analyzing the feed intake mechanism for dairy cows not only helps to understand the factors which impacting feed intake, but also lays a foundation for building and developing dry matter intake (DMI) models for dairy cows. Based on the investigation of feed intake theory for dairy cows, this paper summarized DMI models for dairy cows which were built by international in the past 20 years, mainly including empirical, mechanistic and semi-mechanistic models. Meanwhile, the paper also deeply analyzed the building background, characteristics and interrelation of typical models. At present, the empirical models are mainly used to predict DMI. Even though the parameters are complex and difficult to obtain, the mechanistic models as the quantitative description of mechanism regulation have an important significance. Semi-mechanistic models integrate the characteristics of mechanistic and empirical models, and reflect a new trend of models' development. But the concrete prediction effects of semi-mechanistic models still need further verification. Based on the analysis and summary of DMI models, this paper provides a new idea for carrying out the research in DMI models for dairy cows in China. [*Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2014, 26 (1): 34-42]

Key words: dairy cow; dry matter intake; regulation mechanism; model