

# 放牧家畜采食量估测方法研究进展

洛桑顿珠<sup>1,2</sup>, 巴桑旺堆<sup>1,2</sup>, 张强<sup>1,2</sup>, 郭娜<sup>3\*</sup>

(1. 西藏自治区农牧科学院, 省部共建青稞和牦牛种质资源与遗传改良国家重点实验室, 西藏 拉萨 850000; 2. 西藏自治区农牧科学院畜牧兽医研究所, 西藏 拉萨 850009; 3. 兰州大学生态学院, 草种创新与草地农业生态系统全国重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

**摘要:**放牧家畜采食量是评价草地生态系统转化效率和动物生产力的主要参数, 受草地植被生长情况、环境条件、放牧方式、家畜生理特征及其瘤胃内环境等因素影响。放牧家畜采食量的准确测定一直以来都是食性研究的难点和热点问题, 关系到动物营养状态的评估、补饲策略的制定以及食性理论的探索。传统采食量估测方法大多基于观察法或放牧前后牧草生物量差值法, 这些方法对动物的干扰较小, 但是受技术本身和适用范围的限制, 如未能估测单个动物的采食量, 很难适用于大范围的采食量估测。链烷烃技术和近红外技术的出现为准确测定采食量提供了前所未有的机遇, 不仅能克服传统测定方法的缺点, 还在准确率、适用范围(圈养动物和放牧动物)等方面优势较为明显, 但由于粪便回收率和数据库完整性等因素的影响, 目前应用于生物多样性较高草地的放牧动物采食量估测尚有难度。在简要总结不同方法的原理和影响因素基础上, 综述了差值法、内标法、链烷烃法和近红外法在放牧家畜采食量测定方面取得的最新进展及存在的问题, 并建议多种方法结合可以准确测定放牧家畜采食量, 以为制定合理的草地生态系统管理策略和实现草地可持续生态服务功能提供新思路 and 启发。

**关键词:**放牧家畜; 采食量; 测定方法; 影响因素

**中图分类号:**S812 **文献标志码:**A **文章编号:**1009-5500(2024)01-0208-09

**DOI:**10.13817/j.cnki.cyycp.2024.01.024



草地是地球陆地面积最大、分布最广的多功能生态系统, 放牧是其主要的利用方式。长期以来由于家畜数量迅猛增加, 草地过牧现象非常普遍, 加之气候变暖影响, 致使草地退化日渐严重, 已然成为制约草

地实现生产、生活和生态功能的世界性环境问题之一<sup>[1]</sup>。家畜作为调节草地生态系统结构和功能的关键因素, 可通过采食直接或间接地影响草地生态系统稳定性<sup>[2]</sup>。因此, 了解放牧家畜的采食策略, 寻求适宜的放牧管理模式, 对草地生态系统的可持续管理和有效的生态服务功能, 以及畜牧业的健康发展意义重大。

动物采食是植物、动物和生态系统功能三者之间关系的决定性因素, 主要通过采食行为影响植物群落<sup>[3]</sup>。采食量是限制放牧家畜生产性能的主要因素<sup>[4]</sup>, 是决定季节性放牧和饲养管理的最适标准。但由于缺乏可行的测定技术和较大的测定误差, 以及测定过程可能会干扰动物正常的采食行为, 因此很难准确测定<sup>[5]</sup>。有关营养摄入和利用的定量研究多集中在与放牧家畜具有相似日粮的圈养动物, 自由放牧家畜采食量的量化一直以来都是生态学和营养生态学领

**收稿日期:**2023-02-24; **修回日期:**2023-03-17

**基金项目:**省部共建青稞和牦牛种质资源与遗传改良国家重点实验室自主课题和开放课题项目(XZNKY-2021-C-014-Z05, XZNKY-CZ-2022-016-10); 国家自然科学基金青年项目(32102498); 甘肃省青年科技基金计划项目(22JR5RA521); 国家自然科学基金面上项目(32072757); 国家肉牛牦牛产业技术体系岗位专家项目(CARS-37)

**作者简介:**洛桑顿珠(1989-), 男, 西藏山南人, 研究实习员, 主要从事牦牛养殖研究。

E-mail: 382665675@qq.com

\*通信作者。E-mail: guon15@lzu.edu.cn

域面临的较大挑战。放牧家畜只有在草地上才能完全展现其采食日粮的潜力。已有文献报道了生存于物种单一草地放牧家畜采食量估测,但这与多数放牧家畜的生存条件相比不够典型。在物种单一草地上,动物采食量摄入是受限的;而大多自由放牧家畜在异质性环境中采食,放牧家畜的择食性与牧草特征互作共同决定家畜的采食量。由于草地植被组成差异和家畜择食行为的差异性,使得放牧家畜采食量的测定异常困难。因此,找到切实可行的采食量分析方法,对评估饲料营养价值和家畜营养状态至关重要,也是优化动物营养策略,理解动物与植物互作,以及草地生态系统可持续发展的基本保证;还可以通过选育家畜以减少温室气体排放,为实现“碳中和”“碳达峰”目标做出应有贡献。

## 1 放牧家畜采食量的测定方法

采食量的测定方法主要包括基于植物法和基于动物法<sup>[6]</sup>(表1)。基于植物法是通过测定家畜放牧前后草地植物生物量的变化以确定采食量,即差减法,但由于植物的持续生长,这种方法在短时间内是有效的,并不适用于较长时间放牧家畜采食量测定;或将玻璃框置于草地上,以测定植被盖度变化,这种方法并不能准确测定采食量。所以,基于植物法可能有助于评估其他测量技术,但它们的使用范围有限。基于动物法主要包括牧食行为法<sup>[7]</sup>、消化率和排粪量关系法<sup>[8]</sup>、链烷烃法<sup>[9]</sup>和近红外法<sup>[10]</sup>,这些方法既能估测单个动物的排粪量、消化率和采食量,还可用于连续放牧草地生态系统。基于动物法可用于长期放牧试验和组内个体采食量的测定,所以明显优于基于植物法。

表1 采食量的分析方法、估测原理及其优缺点比较

Table 1 The comparison of intake analysis methods based on their principle, advantage, and disadvantage

分析方法	原理	优点	缺点	适用范围
差减法	放牧前后草地植物生物量差值	对动物干扰较小	不适用于较长时间放牧	适用于短期放牧动物
牧食行为法	直接观察放牧家畜的牧食行为	对动物无损伤,简单易操作,成本低	耗时,需较高的能见度	易于观察的动物,不适用于夜行性或警觉性高的动物
消化率和排粪量法	据排粪量和消化率之间的关系进行测定	可估测较长时间的采食量,对动物干扰较小	较难选择合适的指示剂,动物体内指示剂浓度的日变化	适用于圈养环境或易于操作的动物
链烷烃法	植物具有独特的烷烃分布模式	指示剂在动物体内比较稳定	不完全的回收率	适用于圈养动物或草地生物多样性比较单一的牧场
近红外法	有机物在近红外区域具有特定的波长	对动物干扰较小,方便、快捷、安全	需建立强大的植物光谱数据库	尤其适用于放牧动物

### 1.1 牧食行为法

通过直接观察放牧家畜的牧食行为,根据采食植物时间和单位时间内对该植物的采食次数来计算放牧家畜采食量<sup>[6]</sup>。计算方程如下:

$$\text{采食量(DM kg/d)} = \text{采食速率(采食口数/h)} \times \text{采食时间(h/d)} \times \text{单口采食量(DM kg/口)}$$

该方法简单易行且成本低廉。但近距离观察动物采食次数和单口采食量时,会影响动物正常的牧食行为;同时动物个体对不同植物和植物不同部位的采食策略不同,导致采食速率结果差异较大。因此,这种采食量的估测比较粗略<sup>[7]</sup>。

### 1.2 消化率和排粪量法

采食量可根据排粪量和消化率之间的关系来估算,即采食量( $I$ )为排粪量( $F$ )与日粮中不可消化部分( $1 - \text{消化率}$ )的比例。采食量估测的准确性主要取决于排粪量和消化率,通常消化率的测定误差较大。计算公式如下<sup>[6]</sup>:

$$I = F / (1 - \text{消化率})$$

1.2.1 排粪量测定 由于全收粪法在野外条件下很难进行,所以常给动物口服外源指示剂,通过测定粪便中外源指示剂浓度来估测排粪量,即给动物持续投喂指示剂10~14 d,至粪便中指示剂浓度保持稳定后,开始收集粪样5~7 d,然后根据指示剂估算其排粪量。

计算公式如下<sup>[6]</sup>:

$$\text{排粪量(DM kg/d)} = \frac{\text{外源指示剂用量(mg/d)}}{\text{粪便中外源指示剂浓度(mg/kg)}}$$

由于外源指示剂法可估测较长时间的采食量,而且对动物正常的牧食行为干扰较小,已被广泛用于估测放牧家畜采食量。许多化合物可用作粪便指示剂,如三氧化二铬、镱或金属氧化物(TiO<sub>2</sub>)等<sup>[11-13]</sup>(表2)。三氧化二铬作为外源指示剂估测放牧黄牛采食量时,粪便中较低三氧化二铬浓度,使得排粪量估测值偏高,最终导致采食量估测结果较高<sup>[14-15]</sup>。然而当用三氧化二铬测定阉割肉牛采食量时,虽然其粪便回收率可达103%,但在粪便中的浓度日变化较大(87%~103%)<sup>[16]</sup>,导致采食量估测产生误差。与时间点采样法相比,全收粪法所测粪便中三氧化二铬浓度较稳

定,所以推荐全收粪法采集粪便样品<sup>[5]</sup>。同时三氧化二铬可致癌,因此使用过程中需特别谨慎。镱属于稀有元素,其粪便回收率的变化范围为86%~144%,变化较大的粪便回收率会影响采食量估测的准确性,所以关于镱估测采食量准确性的说法不一。Stuth等<sup>[17]</sup>将粉末状镱醋酸盐制成胶囊给动物服用,试图减小镱较大的浓度日变化,并取得了积极效果。Delagarde等<sup>[18]</sup>采用稀释的氧化镱估测放牧奶山羊采食量,发现实测值和估测值之间的误差小于7%,且镱的粪便回收率达100%。但Prigge等<sup>[19]</sup>发现单独使用镱估测采食量的准确性较低。如上所述,外源指示剂法受不完全回收率和粪便中指示剂浓度的日变化影响,可通过谨慎选择指示剂的投喂剂量、采样时间和改变指示剂载体等方法减少可能产生的误差。

表2 动物排粪量估测的常见外源指示剂

Table 2 Common fecal markers used for the estimation of fecal output in animals

指示剂	类型	回收率	食糜性状	分析方法	参考文献
三氧化二铬 (Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	难溶性氧化物	较高	稠密	AA或XRF	Maccon, <i>et al.</i> 2003 <sup>[14]</sup>
二氧化钛 (TiO <sub>2</sub> )	难溶性氧化物	较高	稠密	AA或XRF	Pere, <i>et al.</i> 2019 <sup>[20]</sup> ; Putra, <i>et al.</i> 2021 <sup>[21]</sup> ; 焦婷等, 2019 <sup>[12]</sup>
硫酸钡(BaSO <sub>4</sub> )	难溶性盐	较高	稠密	XRF	Dick, 1967 <sup>[22]</sup>
镱(Yb)	可溶性稀土	中等或高	固相	AA或XRF	Delagarde, <i>et al.</i> 2010 <sup>[11]</sup> ; Perez-Ramirez, <i>et al.</i> 2012 <sup>[13]</sup>
钌-邻菲啉	可溶性复合物	高	固相	AA或XRF	Faichney and Griffiths, 2007 <sup>[23]</sup>
铬标记纤维	附着至纤维上	较高	固相	AA或XRF	Dawson, <i>et al.</i> 2000 <sup>[24]</sup>
聚乙二醇	可溶性聚合物	高	液相 <sup>e</sup>	浑浊度	Ahvenjarvi, <i>et al.</i> 2018 <sup>[25]</sup> ; Casaus and Albanell, 2014 <sup>[26]</sup>
人工烷烃	难溶性蜡质	中等或高	固相	GC	Jurado, <i>et al.</i> 2019 <sup>[27]</sup> ; Andriarimalala, <i>et al.</i> 2020 <sup>[28]</sup>
塑料颗粒	难溶性聚合物	较高	无	计数法	Schwabl, <i>et al.</i> 2019 <sup>[29]</sup>

注:AA:原子吸收光谱;XRF:X射线荧光光谱;CRD:缓释装置;GC:气象色谱。

1.2.2 消化率估测 消化率估测误差常导致采食量的估测误差,尤其是消化率较高时,所以消化率的准确估测显得尤为重要,但在野外条件下很难获得动物的消化率,即使动物食物组成变化范围有限(如物种单一草地)<sup>[6]</sup>。最早是将氮等成分作为消化率估测指标,因为粪便浓度与植物消化率直接相关。随后发展了体外法,即通过体内和体外消化率交叉验证估测体内消化率。该方法适用于在性别、生长阶段、生殖状态、采食水平、物种等方面具有显著差异的动物,而不

适用于消化过程中具有牧草与补饲料间互作的补饲动物。例如,当给放牧家畜补饲谷物等淀粉含量较高的精料时,可能导致粗饲料消化率降低。消化率受供试动物年龄和体况影响,而且体外分析样品需要通过瘘管动物采集,操作比较麻烦。同时这种方法的主要弊端是假设组内所有试验动物具有相同的消化率,这显然不现实;更进一步地发展了内源性指示剂法,即将日粮不可消化组分作为内源性指示剂(表3),通过日粮和粪便中内源性指示剂的相对浓度估算消化率。

计算方程如下<sup>[6]</sup>:

$$\text{消化率} = 1 - \frac{\text{日粮中内源性指示剂浓度}}{\text{粪便中内源指示剂浓度}}$$

由于大多数内源性指示剂不是离散化合物,因此得到的粪便回收率差异较大<sup>[5]</sup>。内源性指示剂经过动物肠道时成分发生变化,动物吸收或分析方法均会导致内源指示剂的粪便回收率差异,具体原因尚不清楚。尽管还未确定这些化合物是否为理想内源性指示剂,但它们能安全通过肠道,具有作为指示剂的潜力。例如,植物蜡质烷烃作为内源性指示剂,估测食草动物消

化率已被广泛使用。粪便烷烃回收率随碳链长度增加而增加,尽管C<sub>35</sub>粪便回收率可达95%,但其在牧草中的含量较低,会产生较大的分析误差。C<sub>29</sub>、C<sub>31</sub>和C<sub>33</sub>粪便回收率经校正后,具有较低的分析误差(<3%),是消化率测定的最佳内源性指示剂<sup>[9]</sup>。内源性指示剂法不仅能估测单个动物消化率,还可测定补饲动物消化率,反映消化过程中粗饲料与精料之间的互作。但是内源性指示剂法受样品是否具有代表性影响。与体外消化率法相比,内源性指示剂法主要取决于体外消化率和内部指示剂的样本相对变异率。

表3 估测食草动物消化率的粪便内源性指示剂<sup>[6]</sup>

Table 3 Internal feces markers for estimating digestibility in herbivores

内标	类型	分析	回收率
木质素	纤维组分	萃取	可变的
酸性洗涤木质素	纤维组分	萃取	可变的
未消化中性洗涤纤维(NDF)	纤维组分	萃取	可变的
未消化酸性洗涤纤维(ADF)	纤维组分	萃取	可变的
潜在的难消化纤维	纤维组分	萃取	可变的
酸不溶灰分	硅质	萃取	高
二氧化硅	硅质	多种方法	高
色素原	植物色素	比色	可变的
长链烷烃	植物蜡质混合物	气相色谱	高
长链脂肪酸	植物蜡质混合物	气相色谱	中等/高

### 1.3 链烷烃法

植物表皮蜡质是一种覆盖在高等植物表皮细胞外,由烷烃、醇类、酮类、酯类和超长链脂肪酸等亲脂性化合物组成的复杂有机混合物<sup>[30]</sup>。植物表皮蜡质组分具有显著的种间差异,且不同植物部位的蜡质含量也有差异。例如,叶片和花中含量较高,而根部含量较低<sup>[31]</sup>。因植物蜡质是一种离散化合物,具有惰性且易于分析,以及分布规律的种间差异等特点,可作为理想的粪便指示剂估测食草动物采食量<sup>[9]</sup>。常见的植物蜡质混合物见表4。植物蜡质混合物作为粪便标记物已被广泛报道,尤以烷烃作为标记物估测动物采食量的研究较多<sup>[28,32]</sup>。链烷烃法是基于植物烷烃(奇数链)作为内标,投喂偶数烷烃用作外标,奇数烷烃和偶数烷烃形成烷烃对进而估测采食量。一般情况下,给动物服用已知剂量的人工合成偶数烷烃,并与牧草天然奇数烷烃形成烷烃对<sup>[32]</sup>。天然烷烃主要是由碳链长度为C<sub>25</sub>—C<sub>35</sub>的长链烷烃组成,且奇数烷烃浓度高于偶数烷烃<sup>[32-33]</sup>,这为采用链烷烃技术进行动物采

食量估测奠定了坚实的基础。采食量测定公式如下<sup>[5]</sup>:

$$\text{采食量} =$$

$$\frac{\text{人工合成烷烃浓度}j}{(\text{粪便烷烃浓度}j/\text{粪便烷烃浓度}i) \times \text{植物烷烃浓度}i - \text{植物烷烃浓度}j}$$

式中:i代表奇数烷烃,j代表偶数烷烃。

使用烷烃对的优势在于相差一个碳原子的烷烃具有相似的粪便回收率<sup>[28]</sup>。当日粮烷烃C<sub>33</sub>浓度较低时,C<sub>29</sub>或C<sub>31</sub>也可估测干物质采食量,虽有可能降低采食量估测结果的准确性,但尚在可接受误差范围内<sup>[34]</sup>。由于粪便回收率不受饲喂量、饲喂频率、补饲情况和泌乳阶段等因素影响,所以在舍饲和放牧条件下均可使用烷烃对估测采食量。常见烷烃对包括C<sub>29</sub>/C<sub>32</sub>、C<sub>33</sub>/C<sub>32</sub>和C<sub>31</sub>/C<sub>32</sub>。Andriarimalala等<sup>[28]</sup>采用Meta分析评估了链烷烃法估测黄牛和绵羊采食量的准确性,发现使用粪便回收率校正烷烃对浓度后,链烷烃法可准确估测舍饲条件下黄牛和绵羊的采食量。然而,对不同烷烃对估测采食量准确性的说法不一<sup>[28]</sup>。

链烷烃法估测饲喂多年生黑麦草的奶牛采食量,发现  $C_{33}/C_{32}$  的估测结果较  $C_{31}/C_{32}$  更精确<sup>[32]</sup>。Lin 等<sup>[35]</sup>用混合日粮(赖草、披碱草和羊草)饲喂绵羊并用链烷烃估测其采食量,结果表明  $C_{33}/C_{32}$  估测的采食量与实测值差异较大,而  $C_{29}/C_{32}$  和  $C_{31}/C_{32}$  能准确测定绵羊采食量,这可能是不同碳链长度烷烃的回收率差异所致。烷烃对粪便回收率的百分比差异可导致黄牛和绵羊采食量估测出现 1.52% 和 1.45% 误差<sup>[28]</sup>。因此,动物品种和投喂烷烃浓度均会影响采食量估测,其中  $C_{33}/C_{32}$  有利于黄牛采食量的估测,  $C_{31}/C_{32}$  则适用于绵羊采食量估测<sup>[28]</sup>。

烷烃法的主要限制条件之一是植物中大多数短链烷烃和偶数烷烃浓度太低,当烷烃浓度小于 50 mg 时导致作为标记物的烷烃浓度不足,就会影响估测结果的准确性<sup>[36]</sup>。但在夏季和秋季收割牧草后饲喂奶

牛,采用烷烃对  $C_{33}/C_{32}$  可准确估测奶牛采食量<sup>[32]</sup>。无论是自由采食还是限制采食,当给牦牛饲喂由燕麦、青稞、禾草、莎草和杂类草组成的混合日粮时,链烷烃方法可以很好地估测牦牛干物质采食量,虽然尚存在一定的估测误差(前者 7%, 后者 2%),但均在可接受范围内,并推荐  $C_{33}/C_{32}$  烷烃对作为冷暖季采食量估测的首选<sup>[33]</sup>。这些研究也证实了日粮烷烃浓度的季节变化不会影响其估测结果的准确性。然而,不得不承认采用链烷烃非常精确地估测采食量尚有难度<sup>[37]</sup>,因为烷烃对估测采食量的前提是假设相邻奇数烷烃和偶数烷烃的粪便回收率相似;但通常情况下,投喂烷烃与其相邻天然烷烃的粪便回收率有一定差异,从而导致采食量估测产生偏差。Wright 等<sup>[32]</sup>总结了链烷烃方法估测食草动物采食量文献,发现采食量的实测值与估测值相差 0.23 kg DM/day,平均误差为 6.1%。

表 4 用于采食量估测的植物表皮蜡质混合物分类及其特性

Table 4 Main plant cuticular wax compounds and their properties in relation to intake.

混合物分类		碳链长度	主要特征	存在部位
碳氢化合物	链烷烃	$C_{21}-C_{37}$	奇数碳烷烃为优势烷烃	常见
	支链烷烃	$C_{28}-C_{32}$	异支链和反异支链烷烃	稀少
	链烯烃	$C_{27}-C_{33}$	$C_{7-8}$ 或 $C_{9-10}$ 具有双键的奇数单烯烃	花序
长链醇		$C_{24}-C_{30}$	$C_{1-2}$ 双键偶数单烯烃	某些木本植物叶片
	初级醇	$C_{20}-C_{34}$	饱和、无支链,偶数醇	常见,浓度较高
	次级醇		奇数链,主要为 10-壬烷醇( $C_{29}$ )	针叶树叶片浓度较高
	长链脂肪酸	$C_{16}-C_{34}$	饱和、无支链,偶数醇	常见
	酯类	$C_{35}-C_{64}$	长链脂肪酸和长链脂肪醇的酯类	常见
	长链脂肪醛	$C_{16}-C_{34}$	饱和、无支链,偶数脂肪醛	某些植物具有较高浓度
	长链酮		奇数链,主要为 10-二十九烷醇	存在于某些植物

相比其他测定方法,链烷烃方法具有低侵入性,结果可靠,以及考虑植物-动物间互作的优势,已被广泛用于反刍动物、非反刍动物和食虫动物的采食量测定<sup>[5, 27-28, 32, 38]</sup>。链烷烃方法的准确性受粪便烷烃不完全回收率和指示剂浓度日变化影响,前者受动物品种、植物种类、日粮组成等因素影响,后者可通过每天给供试动物投喂人工合成烷烃减少误差。此外,考虑到较多样本会增加试验成本,以及供试动物每天的粪样取平均值得到的采食量不一定合理,所以可将整个试验期的所有样本合并为一个样本来估测采食量,从而降低试验误差<sup>[13]</sup>。人工合成烷烃包括胶囊、弹丸、悬浮体和缓释胶囊等<sup>[40-41]</sup>。给山羊口服以碎纸或纸

因为载体制作的合成烷烃,其在肠道中的平均滞留时间较粉末状纤维长。但这些合成烷烃需每天投喂给供试动物,工作量大且人为误差高,还会干扰放牧家畜正常的牧食行为。近年来发展了一种瘤胃缓释装置(controlled-release devices, CRD),即给动物投喂缓释烷烃  $C_{32}$  或  $C_{36}$ ,其在 20 d 内缓慢释放(40 mg/d),并且不受日粮水平影响,从而减少对动物干扰和烷烃浓度的日变化<sup>[39]</sup>。因此,可优先选择缓释烷烃装置作为外源指示剂估测放牧家畜采食量。

使用链烷烃法估测采食量的研究大都集中在舍饲条件下,但是随着现代化牧场管理方式的转变,欧盟近期也提出 2027 年全面禁止笼养动物,因此对于自

由放牧动物采食量的估测仍然面临较大挑战,尤其是放牧在生物多样性较高草地上的动物。考虑到不同烷烃回收率差异及其季节性变化,在将其应用于自由放牧动物采食量估测之前,有必要通过室内控制试验先确定该动物的烷烃粪便回收率,以便于对放牧试验粪便烷烃浓度进行校正,从而准确估测放牧动物采食量。

#### 1.4 近红外法

近红外方法是基于饲料和粪便样品在近红外区域具有特定的波长吸收特性,从而建立相应方程以估测动物采食量。因其方便、快捷、安全和成本低等优点,近红外方法在动物营养研究中具有广阔的应用前景,如分析饲料中水分、粗蛋白、酸性洗涤纤维、中性洗涤纤维等常规养分和氨基酸、维生素等微量元素含量<sup>[42]</sup>,估测放牧家畜采食量(放牧奶牛、黄牛、奶山羊、绵羊、分娩羊等)<sup>[10,15,43]</sup>,以及评价日粮营养水平等。采用近红外方法估测采食量时,只需用近红外光谱分析仪扫描干燥研磨粪样的光谱波长,而无需影响动物正常牧食行为,也避免了繁琐的室内实验分析,因此更适用于估测放牧动物的采食量。用粪样近红外光谱数据建立的方程估测绵羊采食量,发现其干物质采食量为894 g/d,标准误差为18%,接近AFRC规定的误差范围10%<sup>[43]</sup>。Lahart等<sup>[10]</sup>研究表明,中红外反射光谱(MIRS)和近红外反射光谱(NIRS)结合建立的基准方程( $R^2=0.6$ , RMSE=1.68 kg)较单独MIRS( $R^2=0.3$ , RMSE=2.23 kg)或NIRS( $R^2=0.3$ , RMSE=2.23 kg)的基准方程能更准确预测放牧奶牛采食量。也有研究发现近红外方法并不能准确地估测肉牛干物质采食量<sup>[44]</sup>。近红外方法估测采食量的准确性受多种因素影响,如数据库完整性、待测样本数量、标样选择、标样待测成分含量和分布情况<sup>[45]</sup>。其中完整的近红外光谱数据库和准确的校准方程是决定采食量准确估测的关键因素。随着近红外光谱数据库的进一步完善,以及校准方程的改进,近红外方法预测放牧家畜采食量的准确性将逐步提升。

## 2 放牧家畜采食量的影响因素

放牧家畜采食量是动态且复杂的,是生物与非生物因素以及动物与植物相互作用的过程,受资源(水资源、矿质元素、植物质量和数量等)、环境、动物个体

和人类活动等因素影响<sup>[9,12]</sup>。放牧家畜采食范围与水源之间的距离影响其采食压力。可利用牧草数量和质量是影响放牧家畜采食量和生产性能的主要因素。需求理论提出,一定限制条件下(牧草质量、胃肠道容量等因素),动物通过采食满足自身能量需求,以最大限度地发挥其生产潜能<sup>[46]</sup>。青藏高原植物的数量和质量随季节而快速变化,牧草于五月中旬开始进入生长期至九月中旬结束,生长高峰期处于七月至九月,地上植物生物量形成了“过山车式”的动态变化和草地植物资源可利用性的时空差异<sup>[47-48]</sup>,而放牧家畜可根据其自身营养需求,采取相应的采食策略来应对食物资源可利用性的季节变化。放牧牦牛在冬季减少选择性采食,以采食更多牧草维持正常的机体代谢<sup>[33]</sup>。放牧绵羊在8月的日采食量显著增加(80.61 g/W<sup>0.75</sup>kg·d),而在1月的日采食量显著降低(37.84 g/W<sup>0.75</sup>kg·d),这可能是由于冬季牧草中较高的纤维含量,促进了家畜消化道内源性蛋白排出,使机体内蛋白质代谢发生紊乱,最终降低采食量<sup>[49]</sup>。此外,放牧家畜的选择性采食和草地特征(草层结构、地上生物量)也是影响其采食量的关键因素<sup>[9]</sup>。当草地植物群落处于最佳状态时,牧草营养含量成为影响放牧家畜采食量的主要因素。放牧家畜的选择性采食与植物所含蛋白质呈正相关,与木质素和纤维含量呈负相关。总体来看,放牧家畜根据不同季节植物的质量和数量调整其采食策略,从而获得最佳生存对策。

放牧家畜的品种、生理阶段、代谢体重等方面的差异,使其采食量也不尽相同。研究表明,放牧家畜个体间采食量差异较大,如体尺较大动物的采食量较多,对植物的选择性较差;反之,体尺较小动物具有较强的选择性采食,采食营养含量较高的牧草<sup>[50]</sup>。不同品系放牧藏羊干物质采食量与其代谢体重正相关,随代谢体重增加而增加<sup>[12]</sup>。

## 3 展望

从直接观测法、牧食行为法、消化率和排粪量关系法、链烷烃法到近红外法,放牧家畜采食量估测研究发展的每一步都离不开科学的发展和技术的创新。尽管不同方法都有其技术限制,如不完全回收率、指示剂浓度日变化、光谱数据库完整性等。但随着这些技术的发展和不断完善,多种方法的结合更有利于放

牧动物采食量估测,有助于实现草畜资源合理化和最大化利用,并为放牧动物营养研究、草畜平衡和草地畜牧业的可持续发展等提供技术支撑和理论基础。

#### 参考文献:

- [1] 王德利,王岭,辛晓平,等. 退化草地的系统性恢复:概念、机制与途径[J]. 中国农业科学, 2020, 53(13): 2532—2540.
- [2] Wang L, Delgado—Baquerizo M, Wang D L, *et al.* Diversifying livestock promotes multidiversity and multifunctionality in managed grasslands [J]. Proceedings of the National Academy of Science of the United States of America, 2019, 116: 6187—6192.
- [3] 王德利,王岭. 草食动物与草地植物多样性的互作关系研究进展[J]. 草地学报, 2011, 19(4): 699—704.
- [4] 龙瑞军,董世魁,王元素,等. 反刍动物采食量的概念与研究方法[J]. 草业学报, 2003, 12(5): 8—17.
- [5] Smith W B, Galyean M L, Kallenbach R L, *et al.* Understanding intake on pastures: how, why, and a way forward [J]. Journal of Animal Science, 2021, 99(6): 1—17.
- [6] Mayes R W, Dove H. Measurement of dietary nutrient intake in free—ranging mammalian herbivores [J]. Nutrition Research Reviews, 2000, 13(1): 107—138.
- [7] 任继周,金巨和. 牦牛群放牧习性的观察研究[J]. 中国畜牧兽医杂志, 1956, 2: 58—62.
- [8] Morgan P J K, Pienaar J P, Clark R A. Animal-based methods of determining herbage intake and quality under grazing conditions [J]. Proceedings of the Annual Congresses of the Grassland Society of Southern Africa, 1976, 11(1): 73—78.
- [9] Dove H, Mayes R W. Protocol for the analysis of n—alkanes and other plant—wax compounds and for their use as markers for quantifying the nutrient supply of large mammalian herbivores [J]. Nature Protocols, 2006, 1(4): 1680—1697.
- [10] Lahart B, McParland S, Kennedy E, *et al.* Predicting the dry matter intake of grazing dairy cows using infrared reflectance spectroscopy analysis. Journal of Dairy Science, 2019, 102: 8907—8918.
- [11] Delagarde R, Perez—Ramirez E, Peyraud J L. Ytterbium oxide has the same accuracy as chromic oxide for estimating variations of faecal dry matter output in dairy cows fed a total mixed ration at two feeding levels [J]. Animal Feed Science and Technology, 2010, 161(3): 121—131.
- [12] 焦婷,吴铁成,吴建平,等. 不同类型藏羊消化率与采食量的比较研究[J]. 草业学报, 2019, 28(5): 100—108.
- [13] Perez—Ramirez E, Peyraud J L, Delagarde R. N—alkanes v. ytterbium/faecal index as two methods for estimating herbage intake of dairy cows fed on diets differing in the herbage: maize silage ratio and feeding level [J]. Animal, 2012, 6(2): 232—244.
- [14] Maccon B, Sollenberg L E, Moore J E, *et al.* Comparison of three techniques for estimating the forage intake of lactating dairy cows on pasture [J]. Journal of Animal Science, 2003, 81: 1331—1344.
- [15] Decruyenaere V, Froidmont E, Bartiaux—Thill N, *et al.* Faecal near—infrared reflectance spectroscopy (NIRS) compared with other techniques for estimating the in vivo digestibility and dry matter intake of lactating grazing dairy cows [J]. Animal Feed Science and Technology, 2012, 173: 220—234.
- [16] Cross D L, Boiling J A, Bradley N W. Chromic oxide and crude protein excretion in steers as influenced by water restriction [J]. Progress report—Kentucky, Agricultural Experiment Station, 1971, 196: 50.
- [17] Stuth J W, Robert K L. Grazing steer fecal output dynamics on south Texas shrubland [J]. Journal of Range Management, 1999, 52(3): 275—282.
- [18] Delagrd R, Belarbre N, Charpentier A. Accuracy of the ytterbium—faecal index method for estimating intake of pasture—fed dairy goats [C]//27 General meeting of the European Grassland Federation, 2018, hai—01827935.
- [19] Prigge E C, Varga G A, Vicini J L, *et al.* Comparison of ytterbium chloride and chromium sesquioxide as fecal indicators [J]. Journal of Animal Science, 1981, 53(6): 1629—1633.
- [20] Pere M T P, Batista R, Twardowski T S, *et al.* Titanium dioxide (TiO<sub>2</sub>) as a marker to estimate fecal output in sheep [J]. Ciencia Rural, 2019, 49(12): e20190190.
- [21] Putra C, Bello D, Tucker K, *et al.* Dietary intake and fecal excretion of Titanium Dioxide in U. S. adults from Lowell, Massachusetts [J]. Current developments in nutrition, 2021, 5(2): 1082.
- [22] Dick M. Use of barium sulphate as a continuous marker for faeces [J]. Journal of clinical pathology, 1967, 3: 216—218.
- [23] Faichney G J, Griffiths D A. Behaviour of solute and particle markers in the stomach of sheep given a concentrate diet [J]. British Journal of Nutrition, 2007, 40(1):

- 71—82.
- [24] Dawson T J, Whitehead P J, McLean A, *et al.* Digestive function in Australian magpie geese (*Anseranassemipalmata*) [J]. *Australian Journal of Zoology*, 2000, 48: 265—279.
- [25] Ahvenjarvi A, Nyholm L, Nousiainen J, *et al.* Polyethylene glycol as an indigestible marker to estimate fecal output in dairy cows[J]. *Journal of Dairy Science*, 2018, 101: 4245—4258.
- [26] Casasus I, Albanell E. Prediction of faecal output and hay intake by cattle from NIRS estimates of faecal concentrations of orally-dosed polyethylene glycol [J]. *Animal Feed Science and Technology*, 2014, 192:48—61.
- [27] Jurado V N, Tanner A E, Blevins S, *et al.* Choices between red clover and fescue in the diet can be reliably estimated in heifers post-weaning using n-alkanes [J]. *Animal*, 2019, 13(9):1907—1916.
- [28] Andriarimalala J H, Dubeux J B, DiLorenzo N, *et al.* Use of n-alkanes to estimate feed intake in ruminants: a meta-analysis [J]. *Journal of Animal Science*, 2020, 98(10):1—10.
- [29] Schwabl P, Koppel S, Konigshofer P, *et al.* Detection of various microplastics in human stool: A prospective case series [J]. *Annals of Internal Medicine*, 2019, 171(7): 453—457.
- [30] 郭娜. 高寒草甸植物叶表皮蜡质的适应性研究[D]. 重庆:西南大学硕士学位论文, 2015.
- [31] Roumet C, Picon-Cochard C, Dawson L A, *et al.* Quantifying species composition in root mixtures using two methods: near-infrared reflectance spectroscopy and plant wax markers [J]. *New Phytologist*, 2006, 170(3): 631—638.
- [32] Wright M M, Auldist M J, Kennedy E, *et al.* Evaluation of the n-alkane technique for estimating the individual intake of dairy cows consuming diets containing herbage and a partial mixed ration [J]. *Animal Feed Science and Technology*, 2020, 265:114524.
- [33] 郭娜. 放牧牦牛食性选择季节变化及其与肠道微生物的互作研究[D]. 兰州:兰州大学, 2020.
- [34] Andriarimalala H J, Dubeux Jr J C, Jaramillo D M, *et al.* Using n-alkanes to estimate herbage intake and diet composition of cattle fed with natural forages in Madagascar [J]. *Animal Feed Science and Technology*, 2021, 273: 114795.
- [35] Lin L J, Zhu X Y, Jiang C, *et al.* The potential use of n-alkanes, long-chain alcohols and long-chain fatty acids as diet composition markers: indoor validation with sheep and herbage species from the rangeland of Inner Mongolia of China [J]. *Animal*, 2012, 6(3): 449—458.
- [36] Brosh A, Henkin Z, Rothman S J, *et al.* Effects of faecal n-alkane recovery in estimates of diet composition [J]. *Journal of Agriculture Science*, 2003, 140(1):93—100.
- [37] Thanner S, Schori F, Bruckmaier R M, *et al.* Grazing behaviour, physical activity and metabolic profile of two Holstein strains in an organic grazing system [J]. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition*, 2014, 98(6): 1143—1153.
- [38] Wegi T, Hassen A, Bezabih M, *et al.* Estimation of feed intake and digestibility in Zebu type Arsi steers fed natural pasture using the n-alkane technique [J]. *Animal Feed Science and Technology*, 2021, 271:114765.
- [39] Dove H, Mayes R W, Lamb C S, *et al.* Factors influencing the release rate of alkanes from an intra-ruminal, controlled-release device, and the resultant accuracy of intake estimation in sheep [J]. *Australian Journal of Agricultural Research*, 2002, 53(6):681—696.
- [40] Giraldez F J, Lamb C S, Lopez S, *et al.* Effects of carrier matrix and dosing frequency on digestive kinetics of even-chain alkanes and implications on herbage intake and rate of passage studies [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2004, 84(12):1562—1570.
- [41] Elwert C, Dove H. Estimation of roughage intake in sheep using a known daily intake of a labelled supplement [J]. *Animal Science*, 2005, 81(1):47—56.
- [42] Ikoyi A Y, Younge B A. Influence of forage particle size and residual moisture on near infrared reflectance spectroscopy (NIRS) calibration accuracy for macro-mineral determination [J]. *Animal Feed Science and Technology*, 2020, 270:114674.
- [43] Fanchone A, Boval M, Lecomte P, *et al.* Faecal indices based on near infrared spectroscopy to assess intake, in vivo digestibility and chemical composition of herbage ingested by sheep (crude protein, fibres and lignin content) [J]. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 2007, 15: 107—113.
- [44] Johnson J R, Carstens G E, Prince S D, *et al.* Application of fecal near-infrared reflectance spectroscopy profiling for the prediction of diet nutritional characteristics and voluntary intake in beef cattle [J]. *Journal of Animal Science*, 2017, 95:447—454.



- [45] 金有顺,侯扶江. 放牧家畜采食量的测定[J]. 动物营养学报,2020,32(7):3012—3030.
- [46] Kyriazakis I. What are ruminant herbivores trying to achieve through their feeding behaviour and food intake [J]. Matching herbivore nutrition to ecosystems biodiversity,2008,pp153—173.
- [47] Long R J, Apori S O, Castro F B, *et al.* Feed value of native forages of the Tibetan Plateau of China [J]. Animal Feed Science and Technology, 1999, 80(2): 101—113.
- [48] Guo N, Wu Q F, Shi F Y, *et al.* Seasonal dynamics of diet—gut microbiota interaction in adaptation of yaks to life at high altitude [J]. npj Biofilms and Microbiomes, 2021, 7:38.
- [49] 刘金祥,胡自治,任继周,等. 高山草原绵羊放牧生态及消化代谢IV采食量和消化代谢季节动态[J]. 草业学报,2001,10(3):65—71.
- [50] 李静. 大型食草动物采食空间异质性的初步研究[D]. 长春:东北师范大学,2014.

## Study progress on the estimation of intake in grazing livestock

Dunzhu Luosang<sup>1,2</sup>, Basang Wangdui<sup>1,2</sup>, ZHANG Qiang<sup>1,2</sup>, GUO Na<sup>3\*</sup>

(1. State Key Laboratory of Hulless Barley and Yak Germplasm Resources and Genetic Improvement, Tibet Academy of Agriculture and Animal Husbandry Sciences, Lhasa 850000, China; 2. Institute of Animal Science and Veterinary, Tibet Academy of Agricultural and Animal Husbandry Sciences, Lhasa 850009, China; 3. State Key Laboratory of Herbage Improvement and Grassland Agro-ecosystems, College of Ecology, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** The intake of grazing livestock is the vital parameter to evaluate the conversion efficiency and productivity of grassland ecosystem, and is affected by plant growth, environmental condition, grazing management, physiological characteristics of livestock and its rumen environment. Accurate determination of intake is always difficult for researchers, which is related to the assessment of animal nutrition status, formulation of supplementary feeding strategy and the exploration of diet theory. Traditional quantification method for intake is based on direct observation or the biomass difference between pre- and post-grazing of grazing animals. These methods have well-known limitations. It could not estimate the intake of individual animal and is not suited for widely intake estimation. n-Alkane and near infrared spectrum (NIRS) methods outperforms these traditional methods in many respects (e. g., accuracy or application condition). However, to date few studies have attempted to analysis intake of grazing animals by n-Alkane and near infrared spectrum (NIRS) methods because of incomplete feces recovery and inaccurate database. The review illustrates and compares the principle of various methods, including different value, internal marker, n-alkane, near infrared spectroscopy and their recent process. It is also suggested that the combination of several methods could be used for the estimation of intake in grazing livestock. The review could provide new information and novel methods to formulate reasonable management strategies of grassland ecosystem and realize the sustainable grassland ecosystem function.

**Key words:** grazing livestock; intake; measure method; impact factor

(责任编辑 靳奇峰)