

# 饲料物理有效中性洗涤纤维和瘤胃可降解淀粉的平衡关系及其对奶牛瘤胃液 pH 和生产性能的影响

马燕芬 王丽芳 高 民

(内蒙古农牧业科学院动物营养与饲料研究所, 呼和浩特 010031)

**摘要:** 奶牛饲料物理有效中性洗涤纤维对于维持奶牛最佳瘤胃功能、减少代谢失调发生、预防生产性能下降等具有重要作用。奶牛瘤胃可降解淀粉含量与谷物类型、谷物加工处理方法、奶牛瘤胃网胃中食糜流通速率有很大关系。本文主要就奶牛饲料物理有效中性洗涤纤维和瘤胃可降解淀粉的平衡关系及其对奶牛瘤胃液 pH 和生产性能的影响做一综述, 以为生产实践提供理论依据。

**关键词:** 物理有效中性洗涤纤维; 瘤胃可降解淀粉; 瘤胃液 pH; 生产性能

**中图分类号:** S823

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1006-267X(2012)01-0020-09

保证饲料物理有效中性洗涤纤维 (physical effectiveness neutral detergent fiber, peNDF) 的足量供给对于维持高产奶牛最佳瘤胃功能、降低代谢失调危害以及避免因纤维消化不足而引起的采食量、产奶量和乳营养成分下降等均具有重要作用。但是如果饲喂过量则会降低奶牛采食量, 同时使瘤胃微生物蛋白的合成量降低, 进而降低奶牛的饲料转化率<sup>[1]</sup>。对奶牛饲料 peNDF 水平的评定到目前为止还是非常困难的, 主要是由于 peNDF 水平取决于饲料纤维含量、粗饲料粒度以及淀粉发酵能力等重要因素<sup>[2-3]</sup>。已有一些研究针对单一饲料因素 (如粗饲料粒度或粗饲料来源<sup>[4]</sup>、纤维水平<sup>[2]</sup>、谷物来源及其在瘤胃中有效降解率<sup>[5]</sup>) 对奶牛瘤胃内环境和产奶性能的影响, 但是有关以上因素的相互作用影响奶牛瘤胃内环境和产奶性能的研究到目前为止还相当少。为降低饲料对奶牛瘤胃失调的危害, 寻找在不降低奶牛生产性能的前提下的最佳 peNDF 水平已势在必行。本文主要就饲料 peNDF 和瘤胃可降解淀粉 (ruminal degradable starch, RDS) 的平衡关系及其对奶牛瘤胃液

pH 和生产性能的影响做一综述, 以为生产实践提供理论指导依据。

## 1 谷物饲料 RDS、粗饲料 peNDF 及饲料中二者的平衡关系

### 1.1 谷物饲料 RDS

淀粉是高产奶牛最为重要的能量来源, 也是合成瘤胃微生物蛋白的主要葡萄糖来源。Zebeli 等<sup>[3]</sup>研究表明高产奶牛饲料谷物中 RDS 含量为 5.5% ~ 29.0% (干物质基础), RDS 摄入量为 1.2 ~ 6.6 kg/d。不同研究所得的 RDS 含量间的变化主要与谷物类型及所采用的加工处理方法有关。表 1 中总结了不同来源谷物采用多种加工处理方法得到饲料的淀粉有效降解率<sup>[6-7]</sup>。与玉米中淀粉相比, 大麦、小麦胚乳中淀粉的慢速降解蛋白质较少, 当对玉米谷物进行蒸汽压片 (steam-flaked) 处理时, 淀粉降解指数升高, 而当对其进行蒸汽压轧 (steam-rolled) 处理时淀粉降解指数则下降。因此, 不同加工处理方法主要通过改变淀粉

收稿日期: 2011-07-27

基金项目: 现代农业产业技术体系建设专项; 内蒙古自然科学基金 (2010BS0409); 内蒙古自治区重大科技专项

作者简介: 马燕芬 (1979—), 女, 内蒙古呼和浩特人, 博士, 副研究员, 主要从事反刍动物营养与调控理论研究。E-mail: ma2999@163.com

颗粒糊化程度来改变淀粉降解程度。这对于玉米或高粱这类谷物饲料是非常重要的, 主要因其淀粉更加具有抗性, 而且淀粉的加工过程会提高糊化程度和降解程度。大麦或小麦谷物磨碎过细对奶牛瘤胃内环境、采食量和产奶量存在有潜在的危害, 但是通过采用蒸汽压轧或干粗压轧 (coarse dry rolled) 处理后则可降低这种危害。Sadri 等<sup>[8]</sup>研究表明大麦的加工处理方法对奶牛瘤胃状况和生产性能的影响与奶牛饲料中淀粉的含量有关。Silveira 等<sup>[9]</sup>研究表明在一定程度上, 饲料淀粉对瘤胃发酵和产奶量的影响归因于淀粉有效降解率。

瘤胃中淀粉降解率的变化还与反刍动物瘤胃

中食糜流通率有关, 当瘤胃、网胃中食糜滞留时间延长时, 淀粉降解率尤其是不溶性淀粉降解率就会升高<sup>[7]</sup>。通过机械加工方法研磨 (grinded) 降低谷物粒度大小可提高淀粉在瘤胃中的降解率, 这主要是由于增大了瘤胃中微生物接触淀粉的面积。包被方法也已证明对淀粉降解率有影响, 磨碎 (grounded) 高湿玉米的淀粉有效降解率要高于磨碎的干玉米谷物。最近研究也已阐明淀粉降解率的其他变化来源, 如 Yang 等<sup>[10]</sup>报道大麦在加工处理前后体积、质量上的变化可影响奶牛瘤胃淀粉降解率和生产性能, 而 McGregor 等<sup>[11]</sup>并不完全支持该试验的结论, 但支持加工处理前的谷物质量是需要重点考虑的因素之一。

表 1 谷物来源及加工方法对瘤胃淀粉降解率的影响

Table 1 Effects of sources and processing methods of grains on rumen starch degradability

项目 Items	加工方法 Processing method	淀粉 Starch/ (% DM)	快速降解部分 a/%	潜在可降解 淀粉的降解率 c/(%/h)	淀粉有效 降解率 ERD/%
玉米 Corn	未经处理 Untreated	70.3	23.6	5.9	59.7
	磨碎 Grounded		33.8	5.5	67.9
	破碎 Cracked		20.0	5.7	58.4
	蒸汽压轧 Steam-rolled		4.1	2.7	33.8
	蒸汽压片 Steam-flaked		12.7	21.6	80.3
	包被 Pelleted		38.7	5.9	68.5
	甲醛处理 Formol treated		29.6	3.8	56.9
大麦籽粒 Barley grain	高湿 High moisture	57.8			86.8
	未经处理 Untreated		51.5	35.0	91.3
	磨碎 Grounded		46.0	38.7	85.9
	破碎 Cracked		1.0	6.0	50.3
	蒸汽热轧 Steam-rolled		29.5	10.9	70.6
小麦籽粒 Wheat grain	甲醛处理 Formol treated	67.6	39.7	26.4	84.4
	未经处理 Untreated		60.4	32.9	93.9
豌豆 Garden pea	未经处理 Untreated	44.6	49.4	19.2	87.8
	豆粕 Soybean meal	32.0	31.3	12.0	76.9
副产品 By-products	玉米蛋白粉 Corn gluten meal	17.1	56.2	11.9	84.9
	小麦加工副产品 Wheat by-products	67.6	78.2	23.8	93.7
	酒糟 Brewers grains	5.4	77.0	17.4	89.5

$ERD = a + bc / (c + k_p)$ 。式中,  $ERD$  为淀粉有效降解率 (%),  $a$  为淀粉快速降解部分 (%),  $b$  为淀粉中、慢速降解部分 (%),  $c$  为潜在可降解淀粉的降解率 (%/h),  $k_p$  为外流速率常数 (4%/h)。

$ERD = a + bc / (c + k_p)$ 。In the formula,  $ERD$  is efficient degradation percentage of starch (%),  $a$  is fraction of starch disappearing immediately (%),  $b$  is middle and slowly disappearing starch fraction (%),  $c$  is fractional degradation rate of potentially degradable starch (%/h), and  $k_p$  is fractional passage rate (4%/h)。

## 1.2 粗饲料 peNDF

粗饲料是全混合日粮 (TMR) 中 peNDF 的一个主要来源。Eastridge<sup>[12]</sup> 研究表明通过增加奶牛饲料中可降解纤维可提高粗饲料质量, 进而改善奶牛生产性能 (如采食量、能量采食量和产奶量), 但不影响瘤胃功能。Zebeli 等<sup>[3]</sup> 表明增加粗饲料中可降解有机物质含量可提高粗饲料采食量, 进而增加奶牛咀嚼和反刍时间, 同时提高乳脂含量。因此, 奶牛饲料中添加优质粗饲料有助于维持能量摄入量, 同时减少饲料中精饲料比例, 降低高产奶牛瘤胃失调的潜在危害, 促进奶牛消化和提高产奶性能。世界上许多地区把玉米青贮和牧草青贮作为奶牛的主要粗饲料, 他们的单独或混合的饲喂模式取决于地区、牧草的变化以及饲喂的目的不同, 其中玉米青贮因具有高淀粉、高能量、优质青贮特性和相对较高的瘤胃可降解纤维以及饲喂后奶牛产奶量高等特性, 是奶牛理想的粗饲料来源。牧草青贮生产费用相对低廉, 营养价值也很高, 也是 TMR 中一种重要的粗饲料来源。牧草青贮含有非常低的淀粉含量, 但其粗蛋白质含量和细胞壁组成含量高。TMR 中其他的粗饲料来源还有干草、苜蓿干草、高粱干草、燕麦青贮、大麦青贮和苜蓿青贮等, 苜蓿青贮因其易降解的 NDF (35% ~ 40%)、粗蛋白质 (20% ~ 22%) 和快速降解部分等的含量高, 被认为是一种极好的粗饲料来源。

## 1.3 粗饲料粒度和 peNDF 的测定

由于粗饲料显著影响奶牛瘤胃功能和生产性能, 因此在饲喂粗饲料时就需考虑粗饲料的营养品质。其中粗饲料粒度也影响其营养品质, 一般切割较短 (1 ~ 2 cm) 的粗饲料对奶牛瘤胃消化可产生负面影响, 为咀嚼活力和瘤胃收缩提供了较少的刺激, 这在很大程度上将会降低瘤胃液 pH, 降低纤维消化能力、采食量和饲料转化率<sup>[4]</sup>。中等粒度 (3 ~ 5 cm) 的粗饲料可促进瘤胃消化, 其主要原因是瘤胃内纤维分解菌的有效接触表面积的增加<sup>[13]</sup>, 有助于提高饲料采食量、增加高产奶牛的营养供应<sup>[1]</sup>。因此, 适度的粗饲料粒度可提高 TMR 的均匀性<sup>[14]</sup>, 降低瘤胃失调所产生的一系列危害<sup>[15]</sup>。综上所述, 适宜的粗饲料粒度对奶牛尤其是以 TMR 饲喂的奶牛的营养是非常重要的。

然而在实际生产中, 对粗饲料或 TMR 的粒度进行测定是非常困难的。Tafaj 等<sup>[4]</sup> 研究表明在调

查粗饲料粒度对高产奶牛瘤胃消化所产生的影响时, 奶牛饲料纤维尤其是粗饲料纤维所占 RDS 的比例、谷物粒度、加工处理方法以及饲料采食量等都应考虑在内。

宾夕法尼亚州立大学研究人员发明了一种评定粗饲料、TMR 的碎片粒度的方法称为宾夕法尼亚州立大学的颗粒分级筛 (penn state particle separator, PSPS) 法<sup>[16-17]</sup>。PSPS 法可根据滞留在每个筛层和底盘上的饲料比例对饲料进行评价<sup>[17]</sup>。此外, PSPS 法也能运用于评价 TMR 的分级损耗、混合程度和均匀度, 也便于筛选出某些 TMR 中非营养的粗饲料组分<sup>[18]</sup>。

PSPS 法可用于计算饲料中 peNDF 含量。PSPS 法原理是将 3 层筛子 (孔径分别为 19、1.18 mm) 和底盘按孔径由大到小依次垂直排列, 取约 300 g 鲜样置于最上层筛, 筛子水平振荡 40 次 (每个方向 5 次), 振荡频率为 1 次/s 或水平振荡距离大于 17 cm。振荡过程中不允许出现垂直振动<sup>[18]</sup>。peNDF 是指纤维的物理性质 (主要是碎片大小), 可以更精确预测瘤胃内的代谢状况, 对促进瘤胃液固液相分层、刺激瘤胃蠕动以及刺激唾液分泌来中和瘤胃发酵产生的酸性物质有重要作用<sup>[19]</sup>, 同时 peNDF 还可对化学 NDF 和饲料粒度碎片的信息进行整合<sup>[2-3]</sup>。饲料 peNDF 即为此饲料产品的 NDF 含量和物理有效因子 (physical effectiveness factor, pef) 的乘积, pef 的范围在 0 (NDF 不能刺激咀嚼活动) 和 1 (NDF 最大刺激咀嚼活动) 之间, 其值大于等于某一孔径的各层筛上干物质含量之和 [例如:  $pef_{1.18} = (DM_{19\text{mm}} + DM_{8\text{mm}} + DM_{1.18\text{mm}})/100$ ]。

计算 peNDF 主要有 2 个方法。方法一: 滞留在 PSPS 的 19 和 8 mm 筛上干物质比例总和<sup>[16]</sup>、或计算滞留在 19、8 和 1.18 mm 筛上的干物质比例总和<sup>[17]</sup> 乘以 NDF 含量分别得到 > 8 mm 层物理有效中性洗涤纤维 (peNDF<sub>>8</sub>)、> 1.18 mm 层物理有效中性洗涤纤维 (peNDF<sub>>1.18</sub>); 方法二: 计算滞留在 8 (peNDF<sub>>8-NDF</sub>) 和 1.18 mm (peNDF<sub>>1.18-NDF</sub>) 筛上 NDF 碎片。后一个方法在表达 TMR 中 peNDF 含量时更加准确, 因为充分考虑了不同粒度中 NDF 含量之间存在的差异。但是, 鉴于以上 2 种方法都考虑到了饲料 peNDF 含量<sup>[20]</sup>, 且 peNDF<sub>>8</sub> 和 peNDF<sub>>1.18</sub> 的计算更加实用、费用更加低廉, 该方法在奶牛场中应用更为广泛。

运用计算  $\text{peNDF}_{>1.18}$  方法,估测到奶牛在自由采食 TMR 时,其中约有 19% 的饲料干物质 ( $4.1 \text{ kg/d peNDF}_{>1.18}$  或  $6 \text{ g/kg BW peNDF}_{>1.18}$ ) 用于来维持瘤胃液 pH 在  $6.0^{[3]}$ 。而 Mertens<sup>[2]</sup> 也运用计算  $\text{peNDF}_{>1.18}$  方法,测出约有 22% 的饲料干物质 ( $4.4 \text{ kg/d peNDF}_{>1.18}$ ) 是用来维持瘤胃液 pH 在  $6.0$ 。Zebeli 等<sup>[3]</sup> 研究瘤胃液 pH 与饲料  $\text{peNDF}_{>1.18}$  关系时得出二者之间呈拟合 (quasi) 线性关系,运用数学渐进 (asymptotic) 函数得出瘤胃液 pH 与饲料  $\text{peNDF}_{>1.18}$  之间呈渐进关系,得出当饲料  $\text{peNDF}_{>1.18}$  大约为 30% 时,瘤胃液 pH 可达  $6.2$ 。

维持瘤胃正常功能所需求的 peNDF 的最佳含量主要取决于饲料发酵特性,peNDF 概念的缺陷之一是不能充分考虑各种饲料在瘤胃内发酵的差异,尤其是淀粉降解动力学。这将会导致瘤胃液 pH 对饲料 peNDF 反映出不一致性,同时 peNDF 对瘤胃发酵和生产性能的影响也很难进行定量。因此,peNDF 和奶牛饲料中 RDS 含量的平衡关系也需要做出评价。

#### 1.4 饲料 peNDF 和 RDS 的平衡关系

饲料 peNDF 与 RDS 的平衡可改变奶牛瘤胃发酵特性和生产性能。如 Silveira 等<sup>[9]</sup> 研究表明 peNDF 可改变瘤胃液 pH 和生产性能,但当以可消化淀粉为来源时,以上影响是不明显的,表明可降解碳水化合物可提高奶牛对 peNDF 的需求。此外,Yang 等<sup>[20]</sup> 研究表明饲喂粒度较大的粗饲料可改变淀粉消化部位,如淀粉可从瘤胃进入到小肠进行消化,这样可降低奶牛瘤胃酸中毒的发生率。Zebeli 等<sup>[19]</sup> 研究表明饲料中 peNDF 含量与瘤网胃外流体降解的碎片流通率之间呈正相关 ( $r=0.5$ ,  $P<0.001$ ),表明当增加饲料 peNDF 含量时,可加快瘤网胃降解瘤胃淀粉的流通率。但是,关于饲料 peNDF 含量和小肠中最佳淀粉降解的转变程度之间的关系还需做进一步研究,以确定奶牛淀粉和饲料的最佳有效利用率。

为有效降低奶牛瘤胃酸中毒的发生、提高淀粉和饲料的利用率,在奶牛饲料中提高过瘤胃淀粉量将会是一种有效的途径。但是,这在改变淀粉从瘤胃到小肠的降解率和提高葡萄糖代谢效率方面不是很有效,因为反刍动物小肠中降解淀粉的活性已被限制<sup>[5]</sup>。Matthe 等<sup>[21]</sup> 采用模型研究表明在饲料中添加低于  $1.3 \text{ kg/d}$  过瘤胃淀粉可避免

淀粉降解率的降低。此外,淀粉在小肠中降解可提高泌乳奶牛葡萄糖供应,但如果这发生在瘤胃微生物蛋白合成的时期,将会提高后肠发酵程度及随后粪中微生物蛋白的损失。因此,增加葡萄糖供应最好的方法就是将最佳量的 RDS 结合限定量的过瘤胃淀粉,保证有足够量的丙酸在肝脏中转化为葡萄糖,并对纤维降解率和瘤胃功能不产生负面影响<sup>[6]</sup>。

近年采用的模型法得出 TMR 中约 15% 谷物源 RDS 可被作为评价瘤胃功能正常和消化率最佳的标准。但是,RDS 含量是否还需进行校正取决于饲料中 peNDF 含量。TMR 中谷物适宜 peNDF 与 RDS 的比可作为于正确配制奶牛饲料的参考。如表 1 中所示,提高 TMR 谷物中  $\text{peNDF}_{>1.18}$  与 RDS 的比可显著提高奶牛瘤胃内 pH,但是此关系并不呈线性关系。此模型还表明 TMR 谷物中  $\text{peNDF}_{>1.18}$  与 RDS 比的临界点为  $1.45 \pm 0.22$  时可使瘤胃液 pH 维持在  $6.2$ ,这与 Zebeli 等<sup>[19]</sup> 报道的均属于正常 pH 范围内。

就平衡饲料中 peNDF 和可降解碳水化合物而言,TMR 中谷物  $\text{peNDF}_{>1.18}$  与 RDS 比的阈值可作为最佳值,可为配制奶牛健康饲料提供参考,应极力避免此比例低于  $1.45$ 。就实际生产中而言,达到最佳比例是非常困难的,只有以富含 RDS 的谷物(如大麦或小麦)饲料为基础饲料时才可以达到。

## 2 饲料 peNDF 和 RDS 的平衡对奶牛瘤胃液 pH 和生产性能的影响

### 2.1 饲料 peNDF 和 RDS 的平衡对瘤胃液 pH 的影响

饲料成分在瘤胃内的发酵和降解效率是保证现代奶牛群体饲料利用率和生产性能的关键因素<sup>[12]</sup>。瘤胃液 pH 是瘤胃功能稳衡的重要因素,因为 pH 对瘤胃微生物区系、瘤胃发酵产物以及瘤胃生理功能等具有重要作用<sup>[22]</sup>。瘤胃液 pH 在 24 h 内发生波动主要受采食碳水化合物的量影响<sup>[15,22]</sup>。

高产奶牛采食饲料精饲料比例(干物质基础) $>45\%$  时,瘤胃液 pH 从早晨采食前的  $6.6$  变化到发酵期的  $5.3$  或  $5.0$ ,平均 pH 在  $6.0$  或  $6.2^{[15]}$ 。整个采食周期内的某一时间段 pH 低于平均水平以下,pH 低于安全值的这一段时间可造

成瘤胃功能失调,并引发亚急性瘤胃酸中毒(SARA),SARA会降低奶牛纤维消化力、干物质采食量(DMI)、产奶量、饲料利用率,且易增加蹄叶炎和肝脂质代谢障碍的发生率,以及与此相关的全身性炎症反应。SARA会损害奶牛健康,由于纤维消化力和饲料利用率低下而使饲料费用增加,造成经济损失<sup>[1]</sup>。Zebeli等<sup>[19]</sup>研究得出了奶牛瘤胃液pH平均阈值、提高纤维降解和预防SARA出现的pH的持续时间。为确保瘤胃正常功能并预防SARA,高产奶牛日平均瘤胃液pH应低于6.16,低于5.8的持续时间不应超过5.24 h/d。

表2总结了高产奶牛泌乳前、中期饲料物理和化学特性对瘤胃发酵功能的影响。奶牛日平均瘤胃液pH与乳脂含量之间呈正相关关系,而瘤胃

液pH维持在高于6.2(日常平均值)时可阻止高产奶牛乳脂含量的下降。当饲料以苜蓿干草和磨碎玉米为基础饲料时,奶牛日平均瘤胃液pH低于6.1;但当饲料以玉米青贮(其淀粉含量要高于苜蓿干草)为基础饲料时,peNDF<sub>>1.18</sub>含量提高到30%~32%,瘤胃液pH高于6.16。当以玉米青贮为粗饲料、玉米为谷物来源时,得出与以上结论相似的结果。相反,当奶牛饲料中添加大麦谷物时,瘤胃液pH则降低<sup>[9,24-25]</sup>。但是以上情况,当瘤胃液pH低于6.15时,通过增加饲料中peNDF含量就会得以缓解。因此,以上结果证实了瘤胃液pH或奶牛SARA的发生主要取决于peNDF含量和谷物来源以及饲料的发酵特性。

表2 不同饲料因素对高产奶牛瘤胃发酵、采食量和乳脂产量的影响

Table 2 Effects of different dietary factors on rumen fermentation, feed intake and milk fat production in high-producing dairy cow

饲料因素 Dietary factors				作用 Effects					参考文献 Reference
粗饲料来源 Forage sources	谷物来源 Grain sources	精饲料 Concentrate/%	>1.18 mm 层物理有效中性洗涤纤维 peNDF <sub>&gt;1.18</sub> /%	干物质采食量 DMI/(kg/d)	瘤胃液 pH Ruminal pH	瘤胃液乙酸/丙酸 Ruminal acetate/propionate	乳脂肪 Milk fat/%	3.5%校正乳 FCM/(kg/d)	
苜蓿干草 Alfalfa hay	玉米籽粒+6%干酒糟+5%小麦粉	50	25.7	23.4	6.04	2.99	3.38	34.8	Kononoff等 <sup>[23]</sup>
	Corn+6% DDG+5% wheat middlings	50	26.4	20.7	6.09	3.26	3.31	32.9	
玉米青贮 Maize silage	玉米籽粒+7%干酒糟+7%小麦粉	40	31.7	28.0	6.30	2.50	3.70	43.7	Kononoff等 <sup>[13]</sup>
	Corn+7% DGG+7% wheat middlings	40	31.9	26.8	6.40	2.70	3.90	47.1	
玉米青贮 Maize silage	玉米籽粒+7%干酒糟+7%小麦粉	40	32.0	26.8	6.30	2.60	4.00	47.4	Kononoff等 <sup>[26]</sup>
	Corn+7% DGG+7% wheat middlings	40	32.1	25.7	6.40	2.50	3.70	43.4	
玉米青贮+青干草 Maize silage+grass hay	玉米籽粒+7%干酒糟+7%小麦粉	40	31.3	25.7	6.24	2.77	3.61	49.0	Zebeli等 <sup>[27]</sup>
	Corn+7% DGG+7% wheat middlings	55	32.4	27.6	6.17	2.83	3.49	48.4	
玉米青贮+青干草 Maize silage+grass hay	大麦籽粒+小麦籽粒+玉米籽粒	50	29.6	20.6	6.28	2.02	3.69	33.7	Zebeli等 <sup>[27]</sup>
	Barley grain+wheat grain+corn	50	30.9	21.0	6.20	2.10	3.36	31.4	
玉米青贮 Maize silage	玉米籽粒+2%玉米蛋白粉	55	28.3	23.7	6.08	2.60	3.65	33.5	Yang等 <sup>[1]</sup>
	Corn+2% corn gluten meal	55	26.6	23.8	6.06	2.66	3.66	33.9	
玉米青贮 Maize silage	玉米籽粒+2%玉米蛋白粉	55	26.5	24.8	5.99	2.62	3.65	32.9	

续表 2

饲料因素 Dietary factors		作用 Effects							参考文献 Reference
粗饲料来源 Forage sources	谷物来源 Grain sources	精饲料 Concentrate/%	>1.18 mm 层物理有效中性洗涤纤维 peNDF <sub>&gt;1.18</sub> /%	干物质采食量 DMI/(kg/d)	瘤胃液 pH Ruminant pH	瘤胃液乙酸/丙酸 Ruminal acetate/propionate	乳脂肪 Milk fat/%	校正乳 3.5% FCM/(kg/d)	
苜蓿青贮 Alfalfa silage	蒸汽压榨大	60	28.6	23.8	5.86	1.83	3.45	33.0	Yang 等 <sup>[24-25]</sup>
	麦 +3% 玉米蛋白粉	60	28.8	23.9	6.17	1.81	3.44	32.6	
	Steam-rolled barley +3%	40	32.2	21.6	6.46	3.19	3.84	33.8	
	corn gluten meal	40	34.0	21.9	6.55	3.07	3.80	34.0	
大麦青贮 + 苜蓿干草 Barley silage + alfalfa hay	大麦籽粒(29% 淀粉)	60	31.6	20.1	6.15	2.70	3.59	31.3	Silveira 等 <sup>[9]</sup>
	Barley grain (29% starch)	60	31.6	20.1	6.15	2.70	3.59	31.3	
	大麦籽粒(32% 淀粉)	60	29.3	20.1	6.05	2.29	3.22	28.2	
	Barley grain (32% starch)	60	29.3	20.1	6.05	2.29	3.22	28.2	
	大麦籽粒 + 甜菜渣 (22% 淀粉)	60	33.4	19.9	6.19	2.92	3.51	31.2	
	Barley grain + beet pulp (22% starch)	60	33.4	19.9	6.19	2.92	3.51	31.2	
	大麦籽粒 + 甜菜渣 (24% 淀粉)	60	31.0	20.2	6.15	2.67	3.35	30.4	
	Barley grain + beet pulp (24% starch)	60	31.0	20.2	6.15	2.67	3.35	30.4	

淀粉含量以不同降解率淀粉含量的总和计。

Starch content was the total content of starch differing in its degradability.

## 2.2 饲料 peNDF 和 RDS 的平衡对奶牛生产性能的影响

采食量的短期变化反映了谷物粒度大小和采食频率的变化,而粗饲料粒度<sup>[14]</sup>、精饲料水平及粗饲料来源<sup>[28]</sup>是影响谷物粒度大小和采食频率变化的主要因素。高采食量是高产奶牛保证产奶量和维持繁殖性能的必要条件。由表 2 可见,高产奶牛的 DMI 范围在 20 ~ 28 kg/d 之间。Allen<sup>[29]</sup> 研究表明饲料特殊的物理和化学特性可影响奶牛的 DMI,包括饲料纤维含量、淀粉和纤维降解酶、饲料粒度、粒度碎片、青贮发酵物、脂肪浓度和特性以及瘤胃降解蛋白质,纤维质量尤其是纤维降解特性可刺激 NDF 在瘤胃中快速周转,进而促使奶牛采食更多的饲料。此外,NDF 可运用于确定 DMI 的最高值和最低值,当瘤胃中饲料 NDF 含量高时则会限制 DMI,而当饲料中 NDF 含量低时,通过能量采食量反馈作用就会促进 DMI 增加。

饲料粒度或 peNDF 对高产奶牛 DMI 的影响已有广泛研究。因其物理填充效应(physical fill)产生的正效应,饲料中低 peNDF 含量可增加奶牛 DMI,但同时也提高了饲料发酵强度,有可能损坏瘤胃功能、降低 DMI。Allen<sup>[29]</sup> 研究表明在低精饲料条件下,粗饲料对瘤胃产生的物理填充效应可限制奶牛的 DMI。由表 2 可见,当奶牛饲料中 peNDF<sub>>1.18</sub> 含量高时,奶牛以玉米青贮和玉米谷物为基础饲料时 DMI 也相对较高;相反,当奶牛以粗饲料如苜蓿干草、青干草,谷物如大麦或小麦为基础饲料时 DMI 则下降。泌乳后期通过饲喂奶牛以玉米谷物和经过干蒸馏谷物、粗饲料为苜蓿干草和玉米青贮(50:50)的混合物的 TMR 为基础饲料时,发现 DMI 增加了 3 kg/d,尽管此时 peNDF<sub>>1.18</sub> 含量仅提高了 2%<sup>[30]</sup>。Tafaj 等<sup>[4]</sup> 研究表明饲料粒度对 DMI 的影响可能取决于粗饲料来源、精粗比及精饲料类型,尤其精饲料在瘤胃中的降解率,

反映出他们对瘤胃功能和消化的影响。Silveira 等<sup>[31]</sup>用小麦或大麦谷物替代 TMR 饲料中玉米谷物,可降低泌乳早期和泌乳末期 DMI 2 kg/d。但是当奶牛在不同的瘤胃降解阶段采食大麦谷物时并没有发现对 DMI 产生不同的影响<sup>[8-9,11]</sup>。当用具有较高瘤胃降解特性和相对较低的 peNDF 特性的高湿玉米替代干玉米谷物时可降低 DMI 2 kg/d,同时也表明了谷物来源和保护技术也是影响奶牛 DMI 的重要因素<sup>[32]</sup>。

尽管饲料中 peNDF 含量在维持最佳瘤胃微生物和促进瘤胃发酵效率方面是非常重要的,但饲料中太多的 peNDF 反而对产奶量和饲料转化率产生负面影响<sup>[1]</sup>。由表 2 可见,TMR 中 peNDF<sub>>1.18</sub> 含量高时并不会对产奶量和饲料转化率产生负面影响,例如:泌乳早期的研究结果表明饲喂 30% ~ 32% 的 peNDF<sub>>1.18</sub> 并不会对产奶量有副作用,尤其当以玉米青贮作为唯一粗饲料来源、低水平玉米谷物副产物作为精饲料混合物时。Silveira 等<sup>[9]</sup>和 Yang 等<sup>[24-25]</sup>研究以快速降解大麦淀粉为基础,增加饲料中 peNDF<sub>>1.18</sub> 含量,结果表明由于 DMI 下降而使产奶量下降,但是乳脂含量和产量上升,这主要是由于奶牛具有较好的瘤胃内环境和较高的乙酸/丙酸;增加饲料中 peNDF<sub>>1.18</sub> 含量,可提高 3.5% 校正乳脂、能量效率和饲料利用率。Zebeli 等<sup>[27]</sup>和张赛等<sup>[33]</sup>报道,增加饲料中 peNDF<sub>>1.18</sub> 含量能提高产奶量和 4% 校正乳产量。Allen<sup>[29]</sup>认为在精饲料比例较高(>50%)的饲料中,瘤胃微生物代谢对 DMI 的限制作用较饲料加工产生的物理效应更为重要。虽然 DMI 降低会影响产奶量,但张赛等<sup>[33]</sup>研究发现高水平 peNDF<sub>>1.18</sub> (36.96%) 条件下产奶量和乳脂等乳成分含量较高。采食中等水平 peNDF<sub>>1.18</sub> (35.68%) 饲料奶牛乳脂、乳蛋白质和乳糖含量下降并导致乳总固形物含量随之发生相应变化,这可能由于苜蓿干草具有改善瘤胃微生物代谢和大颗粒苜蓿干草促进了咀嚼活动和唾液分泌,从而引起瘤胃液 pH 发生改变,使瘤胃发酵发生变化。因此,考察饲料 peNDF 对产奶量尤其是对乳脂含量和乳能量效率的影响主要应研究对瘤胃功能和代谢的影响,提高瘤胃内代谢有助于提高乳脂合成。

乳脂含量和瘤胃发酵产物和功能有直接关系,乳脂含量常常作为衡量奶牛瘤胃健康和纤维充足的指标。根据 DeBrabander 等<sup>[34]</sup>的研究发现

乳脂含量在 1 周内下降约 0.6% 可作为衡量奶牛饲料中纤维不足的标准。通过对表 2 中 7 个研究所得的数据进行简单回归分析表明,高产奶牛饲料中要求有足够的 peNDF<sub>>1.18</sub> 用以维持乳脂含量。Mertens<sup>[2]</sup>研究表明泌乳早期到泌乳中期的荷斯坦奶牛需要 20% (干物质基础) 的 peNDF<sub>>1.18</sub> 来维持 3.4% 的乳脂含量。但是最近研究结果表明即使 peNDF<sub>>1.18</sub> 含量为 23%<sup>[35]</sup> 或 26%<sup>[23]</sup> 时,乳脂含量仍低于 3.4%,尤其当以玉米谷物或高湿玉米为基础饲料时,谷物的发酵会增加 peNDF 的需求来维持乳脂含量。Silveira 等<sup>[9]</sup>研究表明当以较高含量的大麦淀粉为基础饲料时,29% peNDF<sub>>1.18</sub> 对于维持 3.4% 乳脂含量是不足的,这与低日平均瘤胃液 pH、乙酸/丙酸、丁酸比例有关。另外,当提高饲料中 peNDF<sub>>1.18</sub> 含量到 30% ~ 32% 时,所有研究均得出乳脂含量均超过 3.4% 的结论,而且不用考虑饲料中的谷物来源。这表明饲料 peNDF<sub>>1.18</sub> 和谷物降解淀粉由于对咀嚼活性和瘤胃代谢的影响而影响奶牛乳脂含量。Mertens<sup>[2]</sup>研究表明当奶牛采食 peNDF 不足会降低咀嚼活性、减少唾液分泌、降低瘤胃液 pH、改变瘤胃发酵模式、降低瘤胃乙酸/丙酸等,这都将会最终改变动物代谢并降低乳脂含量。Zebeli 等<sup>[3]</sup>通过回归分析发现奶牛乳脂含量与咀嚼活性呈正相关( $R^2 = 0.5$ )。根据这一分析,奶牛必须消耗足够的 peNDF 来获得 687 min/d 的咀嚼时间或 30 min/kg 的干物质摄入,从而保证生产出 3.4% 的乳脂。

### 3 小结

综上所述,饲料中 peNDF 和 RDS 的平衡关系可影响奶牛瘤胃发酵和生产性能,当 peNDF<sub>>1.18</sub> 含量为 30% ~ 32%、peNDF<sub>>1.18</sub> 与 RDS 比在  $1.45 \pm 0.22$  时,可使奶牛日平均瘤胃液 pH 达 6.2、降低 SARA 产生、预防乳脂含量下降,同时对 DMI 和产奶量不会产生负面影响。但是配方泌乳奶牛饲料时,除要综合考虑奶牛饲料中 peNDF 和 RDS 的平衡关系外,还要考虑奶牛饲料之间的组合效应、饲料营养水平和比例以及饲料在奶牛体内的降解情况等。

### 参考文献:

- [1] YANG W Z, BEACHEMIN K A. Physically effective fiber: method of determination and effects on

- chewing, ruminal acidosis, and digestion by dairy cows[J]. *Journal of Dairy Science*, 2006, 89: 2618–2633.
- [ 2 ] MERTENS D R. Creating a system for meeting the fiber requirements of dairy cows[J]. *Journal of Dairy Science*, 1997, 80:1463–1481.
- [ 3 ] ZEBELI Q, TAJAFI M, STEINGASS H, et al. Effects of physically effective fiber on digestive processes and milk fat content in early lactating dairy cow fed total mixed rations[J]. *Journal of Dairy Science*, 2006, 89:651–668.
- [ 4 ] TAJAFI M, ZEBELI Q, BAES C, et al. A meta-analysis examining effects of particle size of total mixed rations on intake, rumen digestion and milk production in high-yielding dairy cows in early lactation[J]. *Animal Feed Science Technology*, 2007, 138:137–161.
- [ 5 ] MATTHE A, LEBZIEN P, FLACHOWSKY G. On the relevance of bypass starch for glucose supply of high-producing dairy cows [J]. *Ubers Tierernahr*, 2000, 28:1–64.
- [ 6 ] FIRKINS J L, EASTRIDGE M L, ST-PIERRE N R, et al. Effect of grain processing on starch utilization by lactating dairy cattle[J]. *Journal of Animal Science*, 2001, 79:218–238.
- [ 7 ] OFFNER A, BACH A, SAUVANT D. Quantitative review of in situ starch degradation in the rumen[J]. *Animal Feed Science Technology*, 2003, 106:81–93.
- [ 8 ] SADRI H, GHORBANI G R, ALIKHANI M, et al. Ground, dry-rolled and steam-processed barley grain for midlactation Holstein cows[J]. *Animal Feed Science Technology*, 2007, 138:195–204.
- [ 9 ] SILVEIRA C, OBA M, BEAUCHEMIN K A, et al. Effect of grains differing in expected ruminal fermentability on the productivity of lactating dairy cows[J]. *Journal of Dairy Science*, 2007, 90:2852–2859.
- [10] YANG W Z, BEAUCHEMIN K A, RODE L M. Effect of barley grain processing on extent of digestion and milk production of lactating cows[J]. *Journal of Dairy Science*, 2000, 83:554–568.
- [11] MCGREGOR G, OBA M, DEGHAN-BANADAKY M, et al. Extent of processing of barley grain did not affect productivity of lactating dairy cows [J]. *Animal Feed Science Technology*, 2007, 138: 272–284.
- [12] EASTRIDGE M L. Major advances in applied dairy cattle nutrition[J]. *Journal of Dairy Science*, 2006, 89:1311–1323.
- [13] KONONOFF P J, HEINRICHS A J, BUCKMASTER D A. Modification of the Peen State forage and total mixed ration particle separator and the effect of moisture content on its measurements[J]. *Journal of Dairy Science*, 2003, 86:1858–1863.
- [14] ZEBELI Q, AMETAJ B N, JUNCK B, et al. Maize silage particle length modulates feeding patterns and milk composition in loose-housed lactating Holstein cows[J]. *Livestock Science*, 2009, 134:33–40.
- [15] KRAUSE K M, OETZEL G R. Understanding and preventing ruminal acute acidosis in dairy herds[J]. *Animal Feed Science Technology*, 2006, 126:215–236.
- [16] LAMMERS B P, BUCKMASTER D R, HEINRICH A J. A simple method for the analysis of particle sizes of forage and total mixed rations[J]. *Journal of Dairy Science*, 1996, 79:922–928.
- [17] KONONOFF P J, HEINRICHS A J, LEHMAN H A. The effect of corn silage particle size on eating behaviour, chewing activities and rumen fermentation in lactating dairy cows[J]. *Journal of Dairy Science*, 2003, 86:3343–3353.
- [18] HEINRICH A J, BUCKMASTER D R, LAMMERS B P. Processing, mixing, and particle size reduction of forages for dairy cattle[J]. *Journal of Animal Science*, 1999, 77:180–186.
- [19] ZEBELI Q, DIJKSTRA J, TAJAFI M, et al. Modeling the adequacy of dietary fiber in dairy cows based on the responses of ruminal pH and milk fat production to composition of diets[J]. *Journal of Dairy Science*, 2008, 91:2046–2066.
- [20] YANG W Z, BEAUCHEMIN K A. Increasing effective fiber content of dairy cow diets may lower efficiency of feed use [J]. *Journal of Dairy Science*, 2006, 89:2694–2704.
- [21] MATTHE A, LEBZIEN P, HRIC I, et al. Effect of starch application into proximal duodenum of ruminants on starch digestibility in the small and total intestine[J]. *Archives of Animal Nutrition*, 2001, 55: 351–369.
- [22] NARAGAJA T G, TIGEMEYER E C. Ruminal acidosis in beef cattle: the current microbiological and nutritional outlook [J]. *Journal of Dairy Science*, 2007, 90:17–38.
- [23] KONONOFF P J, HEINRICHS A J. The effect of



- corn silage particle size and cottonseed hulls on cows in early lactation [J]. *Journal of Dairy Science*, 2003, 86:2438–2451.
- [24] YANG W Z, BEAUCHEMIN K A. Altering physically effective fiber intake through forage proportion and particle length; chewing and ruminal pH [J]. *Journal of Dairy Science*, 2007, 90:2826–2838.
- [25] YANG W Z, BEAUCHEMIN K A. Altering physically effective fiber intake through forage proportion and particle length; digestion and milk production [J]. *Journal of Dairy Science*, 2007, 90:3410–3421.
- [26] KONONOFF P J, HEINRICHS A J. The effect of reducing alfalfa hay silage particle size on cows in early lactation [J]. *Journal of Dairy Science*, 2003, 86:1445–1457.
- [27] ZEBELI Q, TAJAJ M, JUNCK B, et al. Evaluation of the responses of ruminal fermentation and activities of nonstarch polysaccharide-degrading enzymes to particle length of corn silage in dairy cows [J]. *Journal of Dairy Science*, 2008, 91:2388–2398.
- [28] MAZZENGA A, GIANESELLA M, BRSCIC M, et al. Feeding behaviour, diet digestibility rumen fluid and metabolic parameters of beef cattle fed total mixed ration with a stepped substitution of wheat straw with maize silage [J]. *Livestock Science*, 2009, 122:16–23.
- [29] ALLEN M S. Effect of short-term regulation of feed intake by lactating dairy cattle [J]. *Journal of Dairy Science*, 2000, 83:1598–1624.
- [30] KLERNESCHMIT D H, SCHINGORTHE D J, HIPPEL A R, et al. Dried distillers grains plus solubles with corn silage or alfalfa hay as the primary forage source in dairy cows [J]. *Journal of Dairy Science*, 2007, 90:5587–5599.
- [31] SILVEIRA C, OBA M, YANG W Z, et al. Selection of barley grains affects ruminal fermentation, starch digestibility, and productivity of lactating dairy cows [J]. *Journal of Dairy Science*, 2007, 90:2860–2869.
- [32] BRADFORD B J, ALLEN M S. Depression in feed intake by a highly fermentation diet is related to plasma insulin concentration and insulin response to glucose infusion [J]. *Journal of Dairy Science*, 2007, 90:3838–3845.
- [33] 张骞, 赵国琦, 邬彩霞. peNDF 水平对泌乳中后期奶牛产奶性能的影响 [J]. *饲料工业*, 2010(9):33–35.
- [34] DEBRABANDER D L, DEBOEVER J L, VANACKER J M, et al. Evaluation of physical structure in dairy cattle nutrition [C]//Recent Advances in Animal Nutrition. Nottingham: Nottingham University Press, 1999: 111–145.
- [35] MERTENS D R. Role of effective fiber in reducing milk fat depression in lactating cows fed rumensim [J]. *Journal of Animal Science*, 2007, 85:562.

## Balance between Dietary Physically Effective Neutral Detergent Fiber and Rumen Degradable Starch: Effects on Rumen Fluid pH and Performance of Dairy Cows

MA Yanfen WANG Lifang GAO Min

(Animal Nutrition Institute, Inner Mongolia Academy of Animal Science, Huhhot 010031, China)

**Abstract:** Dietary physically effective neutral detergent fiber (peNDF) is critical in maintaining rumen function, decreasing the risk of metabolic disorders and preventing the decrease of performance of dairy cows. Rumen degradable starch (RDS) content is related to the type and processing method of grain, as well as the passage rate of digesta from the reticulo-rumen. In order to provide a theoretical guidance for production, balance between dietary peNDF and RDS and its effects on rumen fluid pH and performance of dairy cows are reviewed in this paper. [*Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2012, 24(1):20-28]

**Key words:** physically effective neutral detergent fiber; rumen degradable starch; rumen pH; performance