

# 全株玉米青贮饲料在奶牛瘤胃中的干物质、淀粉及中性洗涤纤维降解特性研究与预测模型建立

刘娜<sup>1</sup> 毕研亮<sup>1</sup> 刁其玉<sup>1</sup> 郭江鹏<sup>2</sup> 齐志国<sup>2</sup> 司丙文<sup>1</sup> 程思源<sup>3</sup> 屠焰<sup>1\*</sup>

(1.中国农业科学院饲料研究所,奶牛营养学北京市重点实验室,农业部饲料生物技术重点实验室,北京 100081;2.北京市畜牧总站,北京 100107;3.甘肃农业大学动物科学技术学院,兰州 730070)

**摘要:** 本研究采用体外法测定全株玉米青贮饲料在奶牛瘤胃中的降解特性,并分析了其营养成分与有效降解率(ED)的相关性,旨在寻求干物质(DM)、淀粉(Starch)、中性洗涤纤维(NDF)有效降解率的快速评定方法。以奶牛场不同贮存时期的玉米青贮饲料为研究对象,采用体外人工瘤胃持续发酵法,测定DM、Starch、NDF有效降解率,并分析与其营养成分的相关性,建立营养成分与DM、Starch、NDF有效降解率的数学模型。结果表明:1)在青贮60、150和240 d时,全株玉米青贮饲料DM、Starch和NDF有效降解率在60 d时最高,分别为33.40%、78.91%和25.53%。2)全株玉米青贮饲料DM有效降解率与粗蛋白质(CP)含量呈极显著正相关关系( $P < 0.01$ ),与NDF、酸性洗涤纤维(ADF)含量呈极显著负相关关系( $P < 0.01$ );Starch有效降解率与Starch含量呈极显著正相关关系( $P < 0.01$ );NDF有效降解率与NDF、ADF含量呈极显著或显著负相关关系( $P < 0.01$ 或 $P < 0.05$ ),与CP含量呈显著正相关关系( $P < 0.05$ )。3)全株玉米青贮DM有效降解率与非纤维性碳水化合物(NFC)含量呈极显著正相关关系( $P < 0.01$ ),与碳水化合物(CHO)、可消化纤维(CB3)、不消化纤维(CC)含量呈极显著负相关关系( $P < 0.01$ );Starch有效降解率与CHO、NFC含量呈显著正相关关系( $P < 0.05$ ),与挥发性脂肪酸(CA1)、乳酸(CA2)、水溶性碳水化合物(CA4)、可溶性纤维(CB2)含量呈显著或极显著负相关关系( $P < 0.05$ 或 $P < 0.01$ );NDF有效降解率与CHO、CB3、CC含量呈极显著负相关关系( $P < 0.01$ ),与NFC含量呈极显著正相关关系( $P < 0.01$ )。4)以CP、NDF、ADF、Starch含量为预测因子建立的DM、Starch有效降解率的预测模型分别为: $ED_{(DM)} = 54.777 - 0.439NDF - 0.004ADF$  ( $R^2 = 0.973, n = 51, P < 0.0001$ ); $ED_{(Starch)} = 55.434 + 0.987Starch$  ( $R^2 = 0.843, n = 51, P < 0.0001$ ); $ED_{(NDF)} = 75.786 - 0.765CP - 1.036NDF + 0.310ADF$  ( $R^2 = 0.879, n = 51, P < 0.0001$ )。5)以CHO、NFC、CB3、CHO、NFC、CA2、CA4、CB2、CC含量为预测因子建立的DM、Starch有效降解率的预测模型分别为: $ED_{(DM)} = 66.158 - 0.488CHO + 0.330NFC - 0.079CC$  ( $R^2 = 0.980, n = 51, P < 0.0001$ ); $ED_{(Starch)} = 45.754 - 3.564CA4 - 0.827CB2 + 0.159CHO - 0.692CA2 + 0.960NFC$  ( $R^2 = 0.894, n = 51, P < 0.0001$ ); $ED_{(NDF)} = 41.972 - 0.457CHO + 0.753NFC - 0.697CC$  ( $R^2 = 0.810, n = 51, P < 0.0001$ )。由此可知,基于全株玉米青贮饲料营养成分与DM、Starch、NDF有效降解率的强相关性,可快速、有效地评价饲料降解性能,为奶牛场饲料营养价值评定提供参考。

**关键词:** 全株玉米青贮;体外法;淀粉;干物质;中性洗涤纤维;瘤胃降解特性

中图分类号:S823

文献标识码:A

文章编号:1006-267X(2019)12-5846-11

收稿日期:2019-06-03

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFD0501600);奶牛产业技术体系北京市创新团队(BAIC06-2019)

作者简介:刘娜(1991—),女,甘肃平凉人,硕士研究生,从事反刍动物营养与饲料科学研究。E-mail: liuna2017w@163.com

\*通信作者:屠焰,研究员,博士生导师,E-mail: tuyan@caas.cn

全株玉米青贮饲料不仅是反刍动物主要的粗饲料来源,也是其重要的能量来源。全株玉米青贮饲料中干物质(DM)、淀粉(Starch)和中性洗涤纤维(NDF)含量对奶牛饲料利用率至关重要。近年来,随着我国规模化奶牛养殖场的建立,对生产效率和经济效益的要求逐步提高,使青贮饲料营养越来越得到牧场的高度重视。采用预测模型快速准确预测全株玉米青贮饲料的瘤胃降解特性,既可减少采用瘻管动物评价饲料的工作量,又对科学配制奶牛饲料、提高养殖场的经济效益具有重要意义。文献中粗饲料瘤胃降解率的测定多采用尼龙袋法和体外产气法,例如,郭天龙等<sup>[1]</sup>采用体外产气法研究羔羊精饲料的瘤胃有机物(OM)降解率并建立预测模型。张婕等<sup>[2]</sup>、刘艳芳等<sup>[3]</sup>通过尼龙袋法研究青贮饲料在奶牛瘤胃中的降解特性。测定的饲料类型和品种较多,但对于单一饲料的样本量较少。尼龙袋法需要试验奶牛安装瘻管,成本高,手术风险较大,试验牛的体况对试验结果影响较大<sup>[4]</sup>。体外产气法不具有瘤胃食糜外流的功能,内容物不能够外移,导致终产物积累改变容器内环境。Gargallo 等<sup>[5]</sup>提出的三步体外法弥补了前两者的不足。王燕等<sup>[6]</sup>又提出了移动尼龙袋法验证了其与三步体外法具有较好的相关性,决定系数为 0.838。韩璐璐<sup>[7]</sup>采用 ANKOM Daisy II 自动培养箱研究不同蛋白质水平的饲料营养物质瘤胃降解率,寻求最佳蛋白质水平,从而提高动物的生产性能。本研究以全株玉米青贮饲料为研究对象,利用 ANKOM Daisy II 自动培养技术探究 DM、Starch 和 NDF 有效降解率在奶牛瘤胃中的动态降解规律,并与常规养分建立预测模型,以期在全株玉米青贮饲料营养价值的快速评定和合理利用提供理论依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 待测样品采集与制备

本试验采集全株玉米青贮样品共 3 组,每组 17 个样品,分别来自北京市延庆区、昌平区、密云区、大兴区、房山区、顺义区和丰台区等地 17 个奶牛养殖场。奶牛场 2017 年 10 月青贮制作,分别在贮存 60、150、240 d 选取具有代表性、无发霉和无杂草全株玉米青贮样品 4~5 kg,采集的全株玉米青贮样品符合《饲料卫生标准》GB 13078—2001 要求。

将采集回实验室的全株玉米青贮新鲜样品称重,65 ℃烘箱烘干 48 h,回潮 24 h,制成风干样品,以粉碎机(Retsch SM-100)粉碎样品,过 40 目饲料分析筛后将样品混合均匀,装入自封袋保存备用。准确称量 6 g 样品装入已恒重的 R510 滤袋(50 μm 孔径,50 mm×100 mm 规格)中进行 DM 瘤胃降解率测定,称取 1 g 样品装入已恒重的 F57 滤袋进行 Starch 瘤胃降解率测定。

### 1.2 试验方法

#### 1.2.1 饲料常规营养成分测定

DM、粗蛋白质(CP)、粗脂肪(EE)、粗灰分(Ash)的含量按照 AOAC(1995)<sup>[8]</sup>方法进行测定;NDF、酸性洗涤纤维(ADF)的含量按照 Van Soest<sup>[9]</sup>的方法测定;Starch 的含量通过 Megazyme 淀粉试剂盒进行测定。每个样本做 3 个重复。

#### 1.2.2 DM、NDF 瘤胃降解率测定

缓冲液的配制:瘤胃缓冲液分为缓冲液 A 液和缓冲液 B 液。以 1 L 为单位,其中 A 液包括:磷酸二氢钾( $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ) 10.0 g、硫酸镁( $\text{MgSO}_4$ ) 0.5 g、氯化钠(NaCl) 0.5 g、氯化钙( $\text{CaCl}_2$ ) 0.1 g、尿素(试剂级) 0.5 g;B 液包括:碳酸钠( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) 15.0 g、硫化钠( $\text{Na}_2\text{S}$ ) 1.0 g。

瘤胃液采集:选用 3 头健康、体重和胎次相近的安装永久性瘻管的荷斯坦泌乳奶牛[(550±20) kg]为瘤胃液供体牛,泌乳天数为(307±7) d,日产奶量为(33±2) kg。试验饲料组成及营养水平见表 1。于晨饲前 1 h 采集瘤胃液,用 4 层纱布过滤到已经预热的 39 ℃保温瓶,迅速带回实验室。

瘤胃培养液制备:每个发酵瓶中 A 液为 1 330 mL,B 液为 266 mL,采集的新鲜瘤胃液 400 mL。

样品培养:利用 ANKOM Daisy II 型体外模拟培养箱测定饲料的体外真值降解率,使用单因素水平试验设计。培养时间点分别为 8、12、24、48、72 h,每个时间点 2 个平行。将 5 个发酵瓶分别编为 1、2、3、4、5 号,1 号放入 8 h 的滤袋,2 号放入 12 h 的滤袋,3 号放入 24 h 的滤袋,4 号放入 48 h 的滤袋,5 号放入 72 h 的滤袋。发酵瓶提前放入 39 ℃瘤胃体外模拟培养箱中预热,用量筒向每个发酵罐中量取已制备好的体外瘤胃培养液,通入  $\text{CO}_2$  气体 30 s 后迅速拧紧瓶盖,转入 ANKOM Daisy II 型体外模拟培养箱培养,同时设置空白对照。

表1 试验饲料组成及营养水平(干物质基础)

Table 1 Composition and nutrient levels of the experimental diet (DM basis)

%

原料 Ingredients	含量 Content	营养物质 Nutrient levels <sup>3)</sup>	含量 Content
玉米 Corn	17.80	泌乳净能 NE <sub>L</sub> /(MJ/kg)	7.32
豆粕 Soybean meal	7.30	粗蛋白质 CP	16.50
大豆皮 Soybean hull	18.00	粗脂肪 EE	4.80
干酒糟及其可溶物 DDGS	20.00	中性洗涤纤维 NDF	28.60
喷浆玉米皮 Shotcrete corn hull	8.70	物理有效纤维 peNDF	19.70
全棉籽 Whole cottonseed	11.70	木质素 ADL	3.00
糖蜜 Molasses	8.00	淀粉 Starch	24.20
益康 XP <sup>1)</sup>	1.00	非纤维性碳水化合物 NFC	43.20
预混料 Premix <sup>2)</sup>	6.50	钙 Ca	0.83
小苏打 NaHCO <sub>3</sub>	1.00	磷 P	0.44
合计 Total	100.00		

<sup>1)</sup> 达农威生物发酵工程技术(深圳)有限公司产品,主要成分为酵母培养物。Diamond V Biological Fermentation Engineering Technology (Shenzhen) Corporation product; the main component was yeast culture.

<sup>2)</sup> 每千克预混料提供 One kilogram of premix provided the following: VA 240 000 IU, VD<sub>3</sub> 115 000 IU, VE 760 IU, Cu 800 mg, Zn 2 400 mg, Mn 4 500 mg, I 145 mg, Co 45 mg, Se 10 mg。

<sup>3)</sup> 泌乳净能为计算值,由 CPM-Dairy 3.8.0.1V 计算得出,其他为实测值。NE<sub>L</sub> was calculated by CPM-Dairy 3.8.0.1V, while other nutrient levels were measured values.

尼龙袋取出和处理:滤袋放入培养箱后计时,分别在 8、12、24、48、72 h 取出滤袋,清水冲洗至水澄清为止,严禁用手捏或揉搓滤袋(0 h 可一起冲洗)。将冲洗后的滤袋(包括其中的残余物)置于 65 ℃鼓风干燥箱烘干 48 h,回潮 24 h 后称重。将 2 个平行的滤袋残渣倒入同一个自封袋中,测定分析其中的 DM、NDF 含量,并计算 DM、NDF 瘤胃降解率。

### 1.2.3 Starch 瘤胃降解率测定

测定步骤和方法同 1.2.2,所不同的是培养时间点分别为 2、4、8、12、24 h。将冲洗后的滤袋(包括其中的残余物)置于 65 ℃鼓风干燥箱烘干 48 h,回潮 24 h 后称重。将 2 个平行的滤袋残渣倒入同一个自封袋中,测定分析其中的 Starch 含量,并计算 Starch 瘤胃降解率。

## 1.3 计算公式

### 1.3.1 装袋饲料样品量的校正

装袋饲料样品逃逸率的计算:

$$\text{装袋样品逃逸率}(\%) = \frac{[\text{空白试验装袋样品干物质量}(\text{g}) - \text{空白试验袋中残余物重}(\text{g})]}{[\text{空白试验装袋样品干物质重}(\text{g})]} \times 100。$$

校正装袋饲料样品量的计算:

$$\text{校正装袋饲料样品量}(\text{g}) = \text{实际装袋饲料}$$

$$\text{样品量}(\text{g}) \times [1 - \text{饲料样品逃逸率}(\%) ]。$$

### 1.3.2 DM、NDF 瘤胃降解率计算

采用以下公式计算不同时间点 DM、NDF 瘤胃降解率:

$$A = 100 \times (B - C) / B。$$

式中:A 为待测饲料某一时间点该营养成分的降解率(%);B 为待测饲料降解前该营养成分的含量(g);C 为待测饲料降解后滤袋残渣中该营养成分的含量(g)。

参照 Ørekov 等<sup>[10]</sup>提出的瘤胃动态降解率数学模型计算 DM、NDF 有效降解率,计算公式如下:

$$dP = a + b(1 - e^{-ct});$$

$$ED = a + bc / (k + c)。$$

式中:dP 为待测饲料的某营养成分在瘤胃某一时间点的降解率(%);a 为快速降解部分含量(%);b 为慢速降解部分含量(%);c 为慢速降解部分的降解速率(%/h);t 为瘤胃内培养时间(h);ED 为有效降解率(%);k 为瘤胃外流速率,本试验中 k 值取 0.046%/h<sup>[11]</sup>。

### 1.3.3 Starch 瘤胃降解率计算

采用以下公式计算不同时间点 Starch 降解率:

$$A = 100 \times (B - C) / B。$$

式中: $A$  为待测饲料某一时间点 Starch 的降解率(%); $B$  为待测饲料降解前 Starch 的含量(g); $C$  为待测饲料降解后滤袋残渣中 Starch 的含量(g)。

参照 Ørekov 等<sup>[10]</sup> 提出的瘤胃动态降解率数学模型计算 Starch 有效降解率,计算公式如下:

$$P = S + D(1 - e^{-Kdt});$$

$$ED = S + (D \times Kd) / (Kd + Kp)。$$

式中: $P$  为待测饲料的 Starch 在瘤胃某一时点的降解率(%); $S$  为快速降解部分含量(%); $D$  为慢速降解部分含量(%); $Kd$  为慢速降解部分的降解速率(%/h); $t$  为瘤胃内培养时间(h); $ED$  为有效降解率(%); $Kp$  为瘤胃外流速率,本试验中  $Kp$  值取  $0.031\%/h$ <sup>[3]</sup>。

#### 1.4 数据统计分析

数据先通过 Excel 2016 进行初步整理,使用

SAS 9.1 软件中单因素方差分析(one-way ANOVA)程序进行显著性检验。 $P < 0.05$  为差异显著。最后使用 SPSS 21.0 软件对变量进行线性回归分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 全株玉米青贮饲料常规营养成分的特点

由表 2 可知,不同贮存时期全株玉米青贮的 Starch 含量存在显著差异( $P < 0.05$ ),贮存 60 d 时青贮的 Starch 含量由 24.14% 显著降低到贮藏 240 d 时的 20.47%;而 DM、NDF、ADF 含量数值上均有所上升,但各贮存时期间差异均不显著( $P > 0.05$ );CP、Ash、EE 含量各贮存时期亦差异不显著( $P > 0.05$ )。

表 2 不同贮存时期全株玉米青贮饲料常规营养成分(干物质基础)

Table 2 Nutrient composition of whole-plant corn silage in different storage periods (DM basis) %

项目 Items	贮存时期 Storage period/d		
	60	150	240
干物质 DM (鲜样基础 fresh matter basis)	31.41±0.72	32.83±0.92	33.92±0.50
淀粉 Starch	24.14±1.04 <sup>a</sup>	21.40±0.78 <sup>ab</sup>	20.47±1.28 <sup>b</sup>
粗蛋白质 CP	8.52±1.34	8.38±0.23	8.53±1.98
中性洗涤纤维 NDF	49.11±1.01	50.02±1.20	51.08±1.05
酸性洗涤纤维 ADF	22.36±0.78	23.17±0.97	24.05±1.32
粗灰分 Ash	4.59±1.32	4.38±0.15	4.50±1.27
粗脂肪 EE	3.78±0.09	3.66±0.08	3.73±1.41

同行数据肩标不同小写字母者差异显著( $P < 0.05$ )。下表同。

In the same row, values with different small letter superscripts differ ( $P < 0.05$ ). The same as below.

### 2.2 不同贮存时期全株玉米青贮 DM 瘤胃降解率参数及有效降解率

由表 3 可知,不同贮存时期全株玉米青贮 DM 瘤胃降解参数和有效降解率差异均不显著( $P > 0.05$ )。

### 2.3 不同贮存时期全株玉米青贮 Starch 瘤胃降解率参数及有效降解率

由表 4 可知,不同贮存时期全株玉米青贮 Starch 瘤胃降解参数和有效降解率存在一定差异。Starch 快速降解部分由贮存 60 d 时的 58.29% 显著降低到 240 d 时的 53.72% ( $P < 0.05$ ), Starch 有效降解率由贮藏 60 d 的 78.91% 逐渐降低到 240 d 时的

75.65%,但差异不显著( $P > 0.05$ )。慢速降解部分和降解速率在 3 个贮存时期间皆差异不显著( $P > 0.05$ )。

### 2.4 不同贮存时期全株玉米青贮 NDF 瘤胃降解率参数及有效降解率

由表 5 可知,不同贮存时期全株玉米青贮 NDF 瘤胃降解参数和有效降解率也存在一定差异。NDF 快速降解部分随着全株玉米青贮时间的延长逐渐降低,但差异不显著( $P > 0.05$ );慢速降解部分在贮存 60 和 150 d 时基本没有变化,到 240 d 时降低,但差异均不显著( $P > 0.05$ );NDF 有效降解率从青贮 60 到 240 d 有降低的趋势,差异不显著( $P > 0.05$ )。

表 3 不同贮存时期全株玉米青贮 DM 瘤胃降解参数及有效降解率  
Table 3 Rumen degradation parameters and effective degradability of DM in whole-plant corn silage in different storage periods

项目 Items	贮存时期 Storage period/d		
	60	150	240
a/%	17.76±0.35	17.46±0.58	17.47±0.33
b/%	34.35±0.90	33.76±1.47	33.53±0.91
c/(%/h)	0.038±0.001	0.038±0.001	0.039±0.001
a+b/%	52.11±0.83	51.21±1.11	51.00±0.78
ED/%	33.40±0.46	32.95±0.55	32.59±0.44

a: 快速降解部分; b: 慢速降解部分; c: 慢速降解部分的降解速率; a+b: 可降解部分; ED: 有效降解率。表 5 同。

a: rapid degradation fraction; b: slow degradation fraction; c: degradation rate of slow degradation fraction; a+b: degradable fraction; ED: effective degradability. The same as Table 5.

表 4 不同贮存时期全株玉米青贮 Starch 瘤胃降解参数及有效降解率  
Table 4 Rumen degradation parameters and effective degradability of starch in whole-plant corn silage in different storage periods

项目 Items	贮存时期 Storage period/d		
	60	150	240
S/%	58.29±1.25 <sup>a</sup>	55.31±1.33 <sup>ab</sup>	53.72±1.65 <sup>b</sup>
D/%	33.01±0.46	32.71±0.51	33.88±0.56
Kd/(%/h)	0.081±0.005	0.093±0.006	0.090±0.005
S+D/%	91.31±1.50	88.02±0.89	87.61±1.99
ED/%	78.91±0.89	76.91±0.95	75.65±1.53

S: 快速降解部分; D: 慢速降解部分; Kd: 慢速降解部分的降解速率; S+D: 可降解部分; ED: 有效降解率。

S: rapid degradation fraction; D: slow degradation fraction; Kd: degradation rate of slow degradation fraction; S+D: degradable fraction; ED: effective degradability.

表 5 不同贮存时期全株玉米青贮 NDF 瘤胃降解参数及有效降解率  
Table 5 Rumen degradation parameters and effective degradability of NDF in whole-plant corn silage in different storage periods

项目 Items	贮存时期 Storage period/d		
	60	150	240
a/%	5.84±0.55	5.00±0.52	4.41±0.35
b/%	86.24±0.35	86.54±0.47	82.21±0.55
c/(%/h)	0.014±0.005	0.014±0.004	0.015±0.006
a+b/%	92.00±1.05	91.50±1.55	86.63±0.95
ED/%	25.53±0.95	24.31±0.87	23.89±0.55

## 2.5 全株玉米青贮 DM、Starch、NDF 有效降解率与其常规养分的相关性

由表 6 可知,全株玉米青贮 DM 有效降解率与 CP 含量呈极显著正相关( $P<0.01$ ),与 Ash 含量呈极显著负相关( $P<0.01$ ),与 NDF 含量呈极显著负相关( $P<0.01$ ),与 ADF 含量呈极显著负相关

( $P<0.01$ ),与 Starch 和 EE 含量无显著相关关系( $P>0.05$ )。Starch 有效降解率与 Starch 含量呈极显著正相关( $P<0.01$ ),与 CP、Ash、NDF、ADF、EE 含量无显著相关关系( $P>0.05$ )。NDF 有效降解率与 NDF 含量呈极显著负相关关系( $P<0.01$ ),与 ADF 含量呈显著负相关关系( $P<0.05$ ),与 Ash 含

量呈有极显著正相关关系 ( $P<0.01$ ), 与 CP 含量 没有显著相关性 ( $P>0.05$ )。  
呈显著正相关关系 ( $P<0.05$ ), 与 Starch、EE 含量

表 6 全株玉米青贮 DM、Starch 和 NDF 有效降解率与其常规养分的相关性  
Table 6 Correlations between effective degradability of DM, starch and NDF and conventional nutrients in whole-plant corn silage

项目 Items	相关系数 Correlation coefficient (r)					
	淀粉 Starch	粗蛋白质 CP	粗灰分 Ash	中性洗涤纤维 NDF	中性洗涤纤维 ADF	粗脂肪 EE
干物质有效降解率 DM effective degradability	0.141	0.608 **	-0.890 **	-0.986 **	-0.769 **	0.193
淀粉有效降解率 Starch effective degradability	0.918 **	0.040	0.026	-0.174	-0.100	0.168
中性洗涤纤维有效降解率 NDF effective degradability	0.258	0.421 *	0.699 **	-0.891 **	-0.519 *	0.071

\* 表示显著相关 ( $P<0.05$ ), \*\* 表示极显著相关 ( $P<0.01$ )。表 8 同。

\* indicated significant correlation ( $P<0.05$ ), and \*\* indicated extremely significant correlation ( $P<0.01$ ). The same as Table 8.

根据全株玉米青贮 DM、Starch、NDF 有效降解率与其常规养分的 CP、Starch、DM、NDF、ADF 含量进行线性回归分析, 得到预测模型如表 7 所示。

表 7 全株玉米青贮 DM、Starch 和 NDF 有效降解率的预测模型

Table 7 Prediction equation of effective degradability of DM, starch and NDF in whole-plant corn silage

自变量 Independent variables	预测模型 Prediction equation	决定系数 $R^2$	P 值 P-value
NDF、ADF	$ED_{(DM)} = 54.777 - 0.439NDF - 0.004ADF$	0.973	<0.000 1
Starch	$ED_{(Starch)} = 55.434 + 0.987Starch$	0.843	<0.000 1
CP、NDF、ADF	$ED_{(NDF)} = 75.786 - 0.765CP - 1.036NDF + 0.310ADF$	0.879	<0.000 1

NDF: 中性洗涤纤维 neutral detergent fiber; ADF: 酸性洗涤纤维 acid detergent fiber; Starch: 淀粉; CP: 粗蛋白质 crude protein; ED: 有效降解率 effective degradability。

## 2.6 全株玉米青贮 DM、Starch、NDF 有效降解率与康奈尔净碳水化合物-蛋白质体系 (CNCPS) 组分的相关性

由表 8 可知, 全株玉米青贮 DM 有效降解率与 NFC 含量呈极显著正相关 ( $P<0.01$ ), 与可消化纤维 (CB3) 含量呈极显著负相关 ( $P<0.01$ ), 与碳水化合物 (CHO)、不消化纤维 (CC) 含量呈极显著负相关 ( $P<0.01$ ), 与乳酸 (CA2)、水溶性碳水化合物 (CA4)、可溶性纤维 (CB2)、难溶性真蛋白质 (PB1) 含量呈显著或极显著正相关关系 ( $P<0.05$  或  $P<0.01$ )。全株玉米青贮 Starch 有效降解率与 CHO、非纤维性碳水化合物 (NFC) 含量呈显著正相关关系 ( $P<0.05$ ), 与挥发性脂肪酸 (CA1)、CA2 含量呈显著负相关关系 ( $P<0.05$ ), 与 CA4、CB2 含量呈极显著负相关关系 ( $P<$

0.01), 与 CB3、CC、难溶性真蛋白质 (PA1)、PB1、纤维结合蛋白质 (PB2)、非降解蛋白质 (PC) 含量没有显著相关关系 ( $P>0.05$ )。NDF 有效降解率与 CHO、CC、CB3 含量呈极显著负相关关系 ( $P<0.01$ ), 与 NFC 含量呈极显著正相关关系 ( $P<0.01$ ), 与 CB2 含量呈显著正相关关系 ( $P<0.05$ ), 与 CA1、CA2、CA4 含量没有显著相关性 ( $P>0.05$ )。

根据全株玉米青贮 DM、Starch、NDF 有效降解率与 CNCPS 组分含量进行线性回归分析, 得到预测模型如表 9 所示。

## 3 讨论

### 3.1 全株玉米青贮饲料 DM 瘤胃降解特性

DM 瘤胃降解率主要影响反刍动物的 DM 采食量, 且粗饲料降解的难易程度又受其原料纤维

素及木质化程度的影响<sup>[12]</sup>。本试验中不同贮存时期全株玉米青贮 DM 瘤胃降解率和降解速率不同,且 DM 有效降解率均在 30.00% 以上,其中贮存 60 d 时的 DM 有效降解率最高,均值为 33.40%,高于贮藏 150 和 240 d 时的全株玉米青贮,与张婕等<sup>[2]</sup>的研究结果一致,但低于靳玲品<sup>[13]</sup>、何亭漪<sup>[14]</sup>的结果,这可能与玉米籽粒的品种、全株玉米收获时期、试验动物的个体差异有关。全株玉米在灌浆时,淀粉及其他营养物质转移到易被降解的籽粒中,到成熟后期,随着 Starch 含量的上升,纤维类物质含量相对下降,有利于提高全株玉米青贮的瘤胃降解<sup>[15]</sup>。本研究中不同贮

存时期全株玉米青贮 DM 有效降解率分别为 33.40%、32.95%、32.59%,随着青贮时间的延长,可消化利用的 CHO 易被分解为乳酸,不易分解的纤维类物质含量相对增加,可降解的 DM 含量逐渐减少,使饲料营养价值降低,导致 DM 有效降解率逐渐降低。闫贵龙等<sup>[16]</sup>通过研究不同季节对青贮窖中全株玉米青贮品质和营养价值的影响,结果表明无论是发酵品质和营养成分还是 DM 消化率,均在冬季显著高于春季和夏季。闫俊等<sup>[17]</sup>研究不同贮存时期全株玉米青贮营养品质,结果表明贮存时间越长越影响其营养物质的含量,这与本研究结果一致。

表 8 全株玉米青贮 DM、Starch 和 NDF 有效降解率与 CNCPS 组分的关系

Table 8 Correlation between effective degradability of DM, starch, NDF and CNCPS components in whole-plant corn silage

项目 Items	相关系数 Correlation coefficient ( <i>r</i> )		
	干物质有效降解率 DM effective degradability	淀粉有效降解率 Starch effective degradability	中性洗涤纤维有效降解率 NDF effective degradability
碳水化合物 CHO	-0.767 **	0.369 *	-0.572 **
非纤维性碳水化合物 NFC	0.873 **	0.335 *	0.866 **
挥发性脂肪酸 CA1	-0.024	-0.322 *	-0.096
乳酸 CA2	0.322 *	-0.385 *	0.276
水溶性碳水化合物 CA4	0.373 *	-0.578 **	0.256
可溶性纤维 CB2	0.472 **	-0.613 **	0.360 *
可消化纤维 CB3	-0.971 **	-0.140	-0.882 **
不消化纤维 CC	-0.601 **	0.212	-0.609 **
氨 PA1	0.133	0.096	0.082
可溶性真蛋白质 PA2	0.159	0.089	0.277
难溶性真蛋白质 PB1	0.401 **	-0.061	0.240
纤维结合蛋白质 PB2	-0.151	-0.083	-0.158
非降解蛋白质 PC	-0.133	-0.143	-0.195

表 9 全株玉米青贮 DM、Starch 和 NDF 有效降解率的预测模型

Table 9 Prediction equation of effective degradability of DM, starch and NDF in whole-plant corn silage

自变量 Independent variables	预测模型 Prediction equation	决定系数 <i>R</i> <sup>2</sup>	<i>P</i> 值 <i>P</i> -value
CHO、NFC、CC	$ED_{(DM)} = 66.158 - 0.488CHO + 0.330NFC - 0.079CC$	0.980	<0.000 1
CHO、NFC、CA2、CA4、CB2	$ED_{(Starch)} = 45.754 - 3.564CA4 - 0.827CB2 + 0.159CHO - 0.692CA2 + 0.960NFC$	0.894	<0.000 1
CHO、NFC、CC	$ED_{(NDF)} = 41.972 - 0.457CHO + 0.753NFC - 0.697CC$	0.810	<0.000 1

CHO:碳水化合物 carbohydrate;NFC:非纤维性碳水化合物 non-fibrous carbohydrate;CC:不消化纤维 indigestible fibre;CA2:乳酸 lactic acid;CA4:水溶性碳水化合物 water soluble carbohydrate;CB2:可溶性纤维 soluble fiber;ED:有效降解率 effective degradability。

### 3.2 全株玉米青贮饲料 Starch 瘤胃降解特性

全株玉米青贮饲料 Starch 含量决定着其能量的高低,由于全株玉米在青贮窖中的贮存时间不同,其 Starch 含量不同。本试验中全株玉米青贮 Starch 含量随贮藏时间的延长,Starch 含量显著降低,主要是因为可利用的糖类物质被厌氧或兼性厌氧的水解性或发酵性细菌逐渐分解为挥发性脂肪酸等物质<sup>[18]</sup>。同时,本研究中 Starch 有效降解率也逐渐降低。影响青贮饲料 Starch 降解率的因素较多,主要有单一性饲料品种、加工技术、试验动物及试验方法,目前对全株玉米青贮 Starch 瘤胃降解率的研究大多为尼龙袋半体内法,且研究结果差异较大,对其体外法的研究报道鲜少。本研究中全株玉米在青贮窖贮藏时间越短,其 Starch 有效降解率越高,这可能因为青贮玉米贮存时间短,DM 和 Starch 含量较高。通过 Starch 有效降解率与 Starch 含量相关性的研究可知,全株玉米青贮饲料的 Starch 有效降解率与其 Starch 含量呈很强的正相关性。Krieg 等<sup>[19]</sup>通过尼龙袋法和体外法研究不同黑麦、黑小麦和大麦基因型的谷物瘤胃 Starch 降解特性,其 Starch 含量与 Starch 快速降解部分含量及慢速降解部分的降解速率呈极显著正相关关系。Seifried 等<sup>[20]</sup>利用尼龙袋法和体外产气法对不同基因型小麦籽粒营养物质降解率以及有效降解速率进行研究,发现其有效降解速率与 Starch 含量呈正相关关系,与本研究结果相似。Nocek 等<sup>[21]</sup>采用体外法测得全株玉米青贮的 Starch 有效降解率为 69.60%,但通过体内法所得全株玉米青贮的 Starch 有效降解率为 82.00%,本研究结果介于其体外法和体内法之间。

### 3.3 全株玉米青贮饲料 NDF 瘤胃降解特性

饲料中纤维物质具有刺激反刍动物瘤胃的作用,使其反刍和分泌唾液,也可以脂肪的形式贮存为反刍动物提供能量<sup>[22]</sup>。粗饲料 NDF 含量不同导致其有效降解率不同,全株玉米青贮中 NDF 含量随着在青贮窖贮存时间的不同而不同。本试验结果中 NDF 含量变化趋势与闫贵龙等<sup>[16]</sup>、闫峻等<sup>[17]</sup>研究结果一致,与颜欣超等<sup>[23]</sup>对全株青贮玉米分别贮存 30、60、90 d 营养价值评定结果相反。就纤维本身而言,其作为植物细胞的细胞壁,难溶于水且不易被微生物利用,在青贮过程中,部分可

溶营养物质形成气体挥发或者随水分渗透流失,因此其含量会相对增高,同时 NDF 在奶牛瘤胃的有效降解率降低。

### 3.4 全株玉米青贮营养成分与瘤胃降解特性的相关性分析

全株玉米青贮作为反刍动物常用的粗饲料来源,其营养组成直接影响动物的消化性能。综合常规养分与 DM、Starch 和 NDF 有效降解率的相关性分析,并建立多元回归模型,发现引入常规养分含量建立的有效降解率预测模型决定系数和 CNCPS 体系中 CHO 组分得到的模型决定系数均较高,蛋白质组分与有效降解率的相关性低,这与靳玲品<sup>[13]</sup>对反刍动物常用粗饲料营养价值评价的研究结果相似。茹彩霞等<sup>[24]</sup>、陈晓琳<sup>[25]</sup>研究发现,DM 有效降解率与 CP 含量呈显著正相关,与 NDF 和 ADF 含量呈显著负相关。本研究结果与前人试验结果基本相似。但 CNCPS 组分含量与 DM、Starch 和 NDF 有效降解率相关性分析的研究鲜少,且饲料品种不同,其结果差异较大。

## 4 结 论

① 本研究条件下,全株玉米青贮 60、150 和 240 d 时,DM、Starch 和 NDF 有效降解率随着时间的延长而降低。

② 全株玉米青贮 DM 有效降解率与 CP、NFC 含量呈极显著正相关关系,与 NDF、ADF、CHO 和 CB3 含量呈极显著负相关关系;Starch 有效降解率与 Starch、CHO 和 NFC 含量呈显著或极显著正相关关系,与 CB2 含量呈极显著负相关关系;NDF 有效降解率与 NDF、ADF、CHO 和 CB3 含量呈显著或极显著负相关关系,与 CP 和 NFC 含量呈显著或极显著正相关关系。

③ 以 CP、NDF、ADF、Starch 含量为预测因子建立的 DM、Starch 和 NDF 有效降解率的预测模型分别为:

$$ED_{(DM)} = 54.777 - 0.439NDF - 0.004ADF \\ (R^2 = 0.973, n = 51, P < 0.000 1);$$

$$ED_{(Starch)} = 55.434 + 0.987Starch \\ (R^2 = 0.843, n = 51, P < 0.000 1);$$

$$ED_{(NDF)} = 75.786 - 0.765CP - 1.036NDF + 0.310ADF \\ (R^2 = 0.879, n = 51, P < 0.000 1)。$$

④ 以 CHO、NFC、CB3、CHO、NFC、CA2、CA4、CB2、CC 含量为预测因子建立的 DM、Starch 和 NDF 有效降解率的预测模型分别为:

$$ED_{(DM)} = 66.158 - 0.488CHO + 0.330NFC - 0.079CC$$

$$(R^2 = 0.980, n = 51, P < 0.0001);$$

$$ED_{(Starch)} = 45.754 - 3.564CA4 - 0.827CB2 +$$

$$0.159CHO - 0.692CA2 + 0.960NFC$$

$$(R^2 = 0.894, n = 51, P < 0.0001);$$

$$ED_{(NDF)} = 41.972 - 0.457CHO +$$

$$0.753NFC - 0.697CC$$

$$(R^2 = 0.810, n = 51, P < 0.0001)。$$

### 参考文献:

- [1] 郭天龙,金海,薛树媛,等.羔羊精饲料在瘤胃中有机物降解率预测模型的建立[J].安徽农业科学,2015,43(36):75-77.
- [2] 张婕,童津津,杨德莲,等.北京市周边地区奶牛场玉米青贮饲料瘤胃降解特性对比分析[J].动物营养学报,2018,30(2):726-733.
- [3] 刘艳芳,马健,李胜利,等.5种青贮饲料在奶牛瘤胃中的淀粉降解特性[J].中国畜牧兽医,2018,45(4):925-932.
- [4] 富丽霞,马涛,刁其玉,等.肉用绵羊常用精饲料的瘤胃降解特性与瘤胃非降解蛋白质体外小肠消化率的相关分析[J].动物营养学报,2018,30(7):2641-2651.
- [5] GARGALLO S, CALSAMIGLIA S, FERRET A. Technical note: a modified three-step *in vitro* procedure to determine intestinal digestion of proteins[J]. Journal of Animal Science, 2006, 84(8):2163-2167.
- [6] 王燕,辛杭书,杨方,等.不同方法测定瘤胃非降解蛋白质小肠消化率及相关性分析[J].动物营养学报,2012,24(7):1264-1273.
- [7] 韩璐璐.体外模拟环境下日粮粗蛋白水平对绵羊瘤胃发酵和养分降解的影响[D].硕士学位论文.沈阳:沈阳农业大学,2016.
- [8] AOAC. Official methods of analysis of AOAC international[S]. 16th ed. Arlington, USA: AOAC International, 1995.
- [9] VAN SOEST P J. Development of a comprehensive system of feed analyses and its application to forages[J]. Journal of Animal Science, 1967, 26(1):119-128.
- [10] ØRSKOV E R, MCDONALD I. The estimation of protein degradability in the rumen from incubation measurements weighted according to rate of passage[J]. The Journal of Agricultural Science, 1979, 92(2):499-503.
- [11] KRIZSAN S J, AHVENJÄRVI S, VOLDEN H, et al. Estimation of rumen outflow in dairy cows fed grass silage-based diets by use of reticular sampling as an alternative to sampling from the omasal canal[J]. Journal of Dairy Science, 2010, 93(3):1138-1147.
- [12] 陈晓琳,刘志科,孙娟,等.不同牧草在肉羊瘤胃中的降解特性研究[J].草业学报,2014,23(2):268-276.
- [13] 靳玲品.反刍动物常用粗饲料营养价值评定方法的比较研究[D].硕士学位论文.北京:中国农业科学院,2013.
- [14] 何亭漪.不同粗饲料在绵羊瘤胃和体外降解规律的研究及代谢能数学预测模型的建立[D].硕士学位论文.呼和浩特:内蒙古农业大学,2013.
- [15] 胡志勇,张甜,王金新,等.不同成熟阶段及品种对全株小麦营养成分和瘤胃降解特性的影响[J].动物营养学报,2018,30(4):1333-1343.
- [16] 闫贵龙,曹春梅,刁其玉,等.不同季节对青贮窖中全株玉米青贮品质和营养价值的影响[J].畜牧兽医学报,2010,41(5):557-563.
- [17] 闫峻,高玉鹏,王文杰,等.全株玉米青贮饲料在贮存期营养品质的变化规律[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2009,37(8):75-80.
- [18] 李洋,李春雷,赵洪波,等.不同产地全株玉米青贮的瘤胃降解特性与小肠消化率的研究[J].动物营养学报,2015,27(5):1641-1649.
- [19] KRIEG J, KOENZEN E, SEIFRIED N, et al. Prediction of CP and starch concentrations in ruminal *in situ* studies and ruminal degradation of cereal grains using NIRS[J]. Animal, 2018, 12(3):472-480.
- [20] SEIFRIED N, STEINGASS H, HOFFMANN N, et al. *In situ* starch and crude protein degradation in the rumen and *in vitro* gas production kinetics of wheat genotypes[J]. Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition, 2017, 101(4):779-790.
- [21] NOCEK J E, TAMMINGA S. Site of digestion of starch in the gastrointestinal tract of dairy cows and its effect on milk yield and composition[J]. Journal of Dairy Science, 1991, 74(10):3598-3629.
- [22] ZHANG R Y, ZHU W Y, ZHU W, et al. Effect of dietary forage sources on rumen microbiota, rumen fer-

mentation and biogenic amines in dairy cows[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2014, 94 (9):1886-1895.

[23] 颜欣超,宣晶晶,王立克,等.青贮时间对全株玉米常规营养成分及瘤胃降解率的影响[J].安徽科技学院学报,2018,32(2):20-25.

[24] 茹彩霞,咎林森,马陕红.模拟瘤胃条件下5种粗饲料干物质、中性洗涤纤维降解率的研究[J].中国畜牧杂志,2006,42(11):42-44.

[25] 陈晓琳.肉羊常用粗饲料营养价值和瘤胃降解特性研究[D].硕士学位论文.青岛:青岛农业大学,2014.

## Degradation Characteristics and Prediction Model of Dry Matter, Starch and Neutral Detergent Fiber of Whole-Plant Corn Silage in Cow Rumen

LIU Na<sup>1</sup> BI Yanliang<sup>1</sup> DIAO Qiyu<sup>1</sup> GUO Jiangpeng<sup>2</sup> QI Zhiguo<sup>2</sup> SI Bingwen<sup>1</sup>  
CHENG Siyuan<sup>3</sup> TU Yan<sup>1\*</sup>

(1. Key Laboratory of Feed Biotechnology of the Ministry of Agriculture, Feed Research Institute of Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; 2. Beijing Municipal Animal Husbandry Station, Beijing 100107, China; 3. College of Animal Science and Technology, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China)

**Abstract:** This study determined the rumen degradation characteristics of whole-plant corn silage by *in vitro* method, and analyzed the correlation between the nutrient composition and its effective degradability, and aimed to find a rapid assessment method for the effective degradability of dry matter (DM), starch and neutral detergent fiber (NDF). Taking corn silage in different storage periods of dairy farms as the research object. The *in vitro* artificial rumen continuous fermentation method was used to determine the effective degradability of DM, starch, and NDF and the correlation between the nutrient composition of whole-plant corn silage and its effective degradability was analyzed. The mathematical model of nutrient composition and effective degradability of DM, starch and NDF was established. The results showed as follows: 1) at silage 60, 150 and 240 h, the ruminal degradability of DM, starch and NDF was the highest when stored for 60 d, which were 33.40%, 78.91% and 25.53%, respectively. 2) The effective degradability of whole-plant corn silage DM was extremely significant positive correlated with crude protein (CP) content ( $P<0.01$ ), and extremely significant negative correlated with NDF and acid detergent fiber (ADF) content ( $P<0.01$ ). The effective degradability of starch was extremely significant positive correlated with starch content ( $P<0.01$ ). The effective degradability of NDF was significant negative correlated or extremely significant negative correlated with NDF and ADF content ( $P<0.05$  or  $P<0.01$ ), and significant positive correlated with CP content ( $P<0.05$ ). 3) The effective degradability of whole-plant corn silage DM was extremely significant positive correlated with NFC content ( $P<0.01$ ), and extremely significant negative correlated with carbohydrate (CHO), digestible fibre (CB3) and indigestible fibre (CC) contents ( $P<0.01$ ). The effective degradability of starch was significant positive correlated with CHO and NFC contents ( $P<0.05$ ), and significant negative correlated or extremely significant negative correlated with volatile fatty acids (CA1), lactic acid (CA2), water-soluble carbohydrates (CA4), soluble fiber (CB2) contents ( $P<0.05$  or  $P<0.01$ ). The effective degradability of NDF was extremely significant negative correlated with CHO, CB3 and CC contents ( $P<0.01$ ), and extremely signifi-

\* Corresponding author, professor, E-mail: tuyan@caas.cn

cant positive correlated with NFC content ( $P < 0.01$ ). 4) Prediction equations for effective degradability of DM and starch using CP, NDF, ADF and starch were  $ED_{(DM)} = 54.777 - 0.439NDF - 0.004ADF$  ( $R^2 = 0.973$ ,  $n = 51$ ,  $P < 0.0001$ );  $ED_{(Starch)} = 55.434 + 0.987Starch$  ( $R^2 = 0.843$ ,  $n = 51$ ,  $P < 0.0001$ );  $ED_{(NDF)} = 75.786 - 0.765CP - 1.036NDF + 0.310ADF$  ( $R^2 = 0.879$ ,  $n = 51$ ,  $P < 0.0001$ ). 5) Prediction equations for effective degradability of DM and starch using CHO, NFC, CB3, CHO, NFC, CA2, CA4, CB2 and CC were  $ED_{(DM)} = 66.158 - 0.488CHO + 0.330NFC - 0.079CC$  ( $R^2 = 0.980$ ,  $n = 51$ ,  $P < 0.0001$ );  $ED_{(Starch)} = 45.754 - 3.564CA4 - 0.827CB2 + 0.159CHO - 0.692CA2 + 0.960NFC$  ( $R^2 = 0.894$ ,  $n = 51$ ,  $P < 0.0001$ );  $ED_{(NDF)} = 41.972 - 0.457CHO + 0.753NFC - 0.697CC$  ( $R^2 = 0.810$ ,  $n = 51$ ,  $P < 0.0001$ ). In summary, based on the strong correlation between the nutrient content of whole-plant corn silage and the effective degradability of DM, starch and NDF, the degradation performance of feed can be evaluated quickly and effectively, which provides a reference for the nutritional value assessment of feed in dairy farm. [ *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2019, 31(12):5846-5856 ]

**Key words:** whole-plant corn silage; *in vitro* method; starch; DM; NDF; rumen degradation characteristics