

## 籽粒含油量的选择轮次对 BHO 群体高油玉米的化学成分、活体外消化率和发酵参数的影响

常影<sup>1,2</sup> 陈绍江<sup>3</sup> 孟庆翔<sup>1,2</sup>

(1. 动物营养学国家重点实验室, 中国农业大学, 北京 100094; 2. 中国农业大学 动物科技学院/ 肉牛研究中心, 北京 100094; 3. 中国农业大学 农学与生物技术学院, 北京 100094)

**摘要** 在北农大高油(BHO)玉米群体的16个选择轮次中隔轮选取籽粒样品为试验材料,利用活体外人工瘤胃产气量方法,研究HOC籽粒含油量的选择进程对BHO群体籽粒的化学组成、活体外干物质和淀粉消化率以及瘤胃发酵参数的影响。BHO群体的籽粒含油量从第2轮的6.84%提高至第16轮的13.20%,分别与籽粒淀粉和蛋白质含量呈现显著的负相关( $r = -0.84, P < 0.001$ )和正相关( $r = 0.74, P < 0.001$ )。随着含油量选择进程的提  
高,HOC籽粒的活体外产气速度和淀粉消化率线性增加( $P < 0.001$ ),这可能源于BHO群体的淀粉结构随含油量选择进程发生了改变。理论最大产气量和活体外干物质消化率随含油量选择轮次的提高而线性降低( $P < 0.001$ )。活体外发酵6h的pH、总挥发酸(mmol/L)和丙酸比例(%)线性提高( $P < 0.001$ ),乙酸和丁酸的比例线性下降( $P < 0.001$ )。活体外发酵24h以后,不同选择轮次间的各项发酵参数均无显著差异。

**关键词** 高油玉米籽粒; 选择轮次; 活体外瘤胃消化率; 活体外瘤胃发酵参数

中图分类号 S 816.2; S 5-033

文章编号 1007-4333(2006)02-0054-07

文献标识码 A

## Influence of oil selection cycles of BHO population on chemical compositions, in vitro ruminal digestion characteristics and fermentation traits of HOC grain

Chang Ying<sup>1,2</sup>, Chen Shaojiang<sup>3</sup>, Meng Qingxiang<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Animal Nutrition, China Agricultural University, Beijing 100094, China;

2. College of Animal Science and Technology/ Beef Cattle Research Center, China Agricultural University, Beijing 100094, China; 3. College of Agronomy and Biotechnology, China Agricultural University, Beijing 100094, China)

**Abstract** An in vitro gas production experiment was conducted to investigate the effect of oil selection progress of Beiningda high oil (BHO) population on chemical composition, ruminal digestion characteristics and fermentation traits in vitro. The experimental HOC grains were alternately obtained from 16 oil-selecting cycles of BHO population. With genetic selection progress, the fat content of BHO population linearly increased from 6.84% in cycle 2 to 13.20% in cycle 16. The starch and protein content in HOC grain quadratically responded to the selection progress, and there were close correlations between the content of starch and fat ( $r = -0.83, P < 0.001$ ) in one hand and between the content of protein and fat ( $r = 0.75, P < 0.001$ ) in the other hand. Rate and extent of starch digestion significantly increased in a linear fashion with increased selecting cycles, indicating that genetic selection for oil in such BHO population probably altered the structure of endosperm layers or texture of starch granules. Accumulative gas amount during 48 h fermentation and DM digestibility at 24 h incubation time significantly declined with increased selecting cycles. This may be attributable to the reduced starch content with the increased fat content, rather than to any direct effect of increased fat. As fat content increased, the pH value, total VFA concentration and propionate molar percentage also significantly increased in a linear fashion and molar proportions of acetate and butyrate linearly declined at 6h incubation

收稿日期: 2005-09-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(30070562)

作者简介: 常影, 博士研究生; 孟庆翔, 教授, 博士生导师, 通讯作者, 主要从事反刍动物营养研究, E-mail: qxmeng@cau.edu.cn

time. However, these values did not differ at 24 h incubation time.

Key words HOC grain; selection cycles; in vitro rumen digestibility; in vitro rumen fermentation

高油玉米(HOC)品种的遗传选育工作主要关注谷物产量、植株抗病力和贮藏特性等农艺性状,很少研究选育进程对玉米籽粒饲喂价值的影响。玉米籽粒是反刍动物饲料中的重要能量来源,通常占日粮净能的60%~80%。HOC籽粒的油脂含量随着遗传选育逐渐增加,对反刍动物的饲养具有较高的能值优势。然而目前选用的HOC品种非常有限,籽粒油脂含量增加幅度较小,未能显著提高奶牛的产奶量和乳脂率<sup>[1~4]</sup>。HOC籽粒中不饱和脂肪酸含量随着遗传选择进程逐渐增加<sup>[5~6]</sup>,过量添加不饱和脂肪酸丰富的饲料会改变瘤胃发酵模式,对纤维的降解产生负面影响<sup>[7]</sup>,但以籽粒形式添加则可以降低对纤维降解和微生物发酵的抑制作用<sup>[8]</sup>。油脂的添加只有改变了瘤胃发酵环境、降低瘤胃pH才会导致乳脂率的下降<sup>[9]</sup>,因此HOC籽粒对瘤胃发酵模式的影响在很大程度上决定着高油玉米对反刍动物的饲喂价值。但是针对高油玉米油脂含量提高程度对营养物质消化率和瘤胃发酵模式影响的研究却较少。

我国的HOC育种技术体系和种质资源已跻身国际前列,独立培育的高品质高油玉米群体——北农大高油(BHO)——与国外HOC基础群体的遗传背景具有很大的差异,且具有良好的农艺性状。本研究以BHO籽粒含油量选育进程中不同轮次的玉米籽粒为研究对象,探讨HOC籽粒含油量的提高幅度对其化学组成、活体外消化率和瘤胃发酵参数的影响。

## 1 材料与方法

### 1.1 样品的来源与制备

从BHO群体16个籽粒含油量的选择轮次(C1—C16)中隔轮采集试验玉米籽粒共8组,即C2、C4、C6、C8、C10、C12、C14和C16。该样品由中国农业大学国家玉米改良中心提供。HOC籽粒风干、旋风磨粉碎(0.5 mm筛;Perten Laboratory Mill 3100)置于聚乙烯样品袋中密封保存。

### 1.2 活体产气量试验

本试验采用Menke等<sup>[10]</sup>的活体外产气法进行活体外瘤胃发酵培养。HOC发酵底物在体外培养6、12和24 h取发酵液样品,测定该时间点的发酵参

数、干物质和淀粉的活体外消化率;培养48 h的发酵管用于读取不同时间点的产气量。停止发酵后,立即测定发酵液pH。发酵液离心(10 000 ×g, 15 min)取上清液待测挥发酸(VFA)含量和氨态氮(NH<sub>3</sub>-N)。用蒸馏水悬浮离心沉淀并2次离心,烘干测定样品的活体外干物质和淀粉消化率。

### 1.3 检测指标及分析方法

HOC籽粒化学成分测定包括水分<sup>[11]</sup>、淀粉<sup>[12]</sup>、蛋白质<sup>[13]</sup>、NDF和灰分<sup>[11]</sup>含量,各指标均做3个平行测定。发酵液中VFA的测定以Eriwin等人<sup>[14]</sup>的方法为基础,在HP-INNOWax(30.0 m × 320 μm × 0.5 μm)分离,气相色谱柱箱程序升温(120 保持3 min,10 /min升至180 ,保持1 min);进样口和检测器温度分别为220和250 ;NH<sub>3</sub>-N测定采用比色法<sup>[15]</sup>。活体外发酵残渣中淀粉含量的测定方法与样本淀粉含量测定方法相同。

### 1.4 结果计算与统计分析

活体外产气量试验中,计算0.200 0 g高油玉米发酵底物干物质的净产气量(24 h),并根据动态发酵模型,利用SAS<sup>[16]</sup>统计软件中Non-Linear方法计算样本动态发酵参数。该模型为 $Y = B \times (1 - \exp(-c \times (t - lag)))$ 。式中:Y为t时间点0.200 0 g(DM)底物产气量,mL;B为0.200 0 g(DM)底物理论最大产气量,mL;c为样本的产气速度,h<sup>-1</sup>;lag为产气延滞期,h。利用SAS<sup>[16]</sup>统计软件的GLM程序对高油玉米化学成分、活体外消化率和瘤胃发酵参数进行单因子方差分析,并利用皮尔逊积差相关模型(Pearson CORR)和REG回归模型对数据进行相关性分析。

## 2 结果与讨论

### 2.1 高油玉米籽粒的化学组成分析

表1显示BHO群体的玉米籽粒化学组成在16轮品种选育过程中的变化。HOC籽粒含油量从第2轮的6.84%线性增加至第16轮的13.20%( $P < 0.001$ )。玉米胚的油脂含量占籽粒含油量的80%以上,HOC籽粒含油量的选育进程提高了籽粒胚的比例,使胚乳比例相对下降,导致籽粒中其他化学组分的含量随之改变。随着含油量选择进程的提高,本群体HOC籽粒的淀粉含量显著下降( $P <$

0.001),蛋白质含量显著提高( $P < 0.001$ )。表2的相关和回归分析表明,籽粒含油量和淀粉含量之间呈现显著的负相关( $r = -0.79, P < 0.001$ ),油脂含量每提高1%淀粉含量下降1.35个百分点,该结果与美国TopCross生产模式下Optimum HOC的研究结果<sup>[17]</sup>相一致。目前,HOC籽粒蛋白质含量与籽粒含油量相关性的认识不尽相同。Watson等<sup>[18]</sup>指出籽粒含油量提高1%,蛋白质含量随之提高0.36~0.38个百分点,但Dudley<sup>[19]</sup>却未发现二者之间存在确定关系。本群体HOC籽粒的蛋白质含量与籽粒含油量显著正相关( $r = 0.72, P < 0.001$ ),且曲线回归模型能提高预测蛋白质随油脂含量变化

的准确度( $R^2 = 0.88, P < 0.001$ ,表2)。这说明籽粒蛋白质含量在BHO群体含油量选育初期快速增加,但提高到10.7%左右以后其增加幅度随含油量选择进程的提高而逐渐降低,甚至下降。因此,HOC样品的选择进程不同可能是导致上述研究结果存在较大分歧的重要原因。此外,遗传背景混杂和种植环境差异都有可能改变籽粒的蛋白质含量,影响研究结果的一致性。本试验所用样品来自同一群体,遗传背景相近,籽粒蛋白质和油脂含量的相关程度更为明显。HOC含油量的提高没有影响籽粒NDF含量,但干物质和灰分含量随油脂的变化呈现曲线上升的规律。

表1 不同含油量选择轮次高油玉米籽粒化学组成

Table 1 Chemical composition of HOC grains from different selection cycles

选择轮次	干物质	油脂	淀粉	蛋白质	中性洗涤纤维	灰分
C2	90.91 d	6.84 f	69.32 a	8.47 g	13.11	1.43 e
C4	91.50 c	8.55 e	68.59 ab	9.24 f	11.84	1.34 f
C6	92.24 b	9.11 d e	69.52 a	9.76 e	10.02	1.46 d
C8	92.75 a	9.55 d	68.15 ab	10.49 c	10.52	1.55 b
C10	92.75 a	10.38 c	65.49 bc	10.73 a	10.62	1.64 ab
C12	92.71 a	11.27 b	66.28 bc	10.36 b	10.22	1.61 c
C14	92.72 a	11.68 b	64.27 c	10.45 b	11.89	1.61 b
C16	92.47 a	13.20 a	59.99 d	9.96 d	13.92	1.65 a
SEM	0.07	0.21	0.83	0.03	1.19	0.01
P	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.051	<0.01
L	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.149	<0.01
Q	<0.001	0.923	0.012	<0.001	0.066	<0.01

注: 同列平均数旁有不同字母者差异显著( $P < 0.05$ )。随HOC油脂选择进程提高,各种指标呈线性(L)或二次曲线(Q)规律变化。下同。

表2 高油玉米籽粒含油量和淀粉及蛋白质含量的相关性分析和回归预测方程

Table 2 Correlation and regression analyses between oil improvement and major chemical constituents of HOC grain

营养成分	$r$	回归方程	$R^2$	$P$		SEM
				$b$	$c$	
淀粉	-0.79***	80.13 - 1.35 × EE	0.62	***	***	4.33
		54.29 + 9.37 × EE - 0.26 × EE <sup>2</sup>	0.72	***	*	3.27
蛋白质	0.72***	7.21 + 0.27 × EE	0.52	***	***	0.26
		-3.19 + 2.41 × EE - 0.16 × EE <sup>2</sup>	0.88	**	***	0.06

注:  $r$ 和 $R^2$ 分别表示HOC籽粒含油量与籽粒其他营养成分的相关系数和回归方程的决定系数; $b$ 和 $c$ 分别表示回归方程的截距和斜率。\*  $P < 0.05$ ; \*\*  $P < 0.01$ ; \*\*\*  $P < 0.001$ 。

## 2.2 动态产气参数和活体外消化率

表3显示随着籽粒含油量选择轮次的提高,HOC活体外发酵6h的累积产气量线性增加( $P < 0.001$ ),但12h以后呈现下降趋势,48h以后线性降低7.6 mL( $P < 0.001$ )。产气量数据经非线性回

归方程拟合得到HOC产气动态发酵参数( $R^2 = 0.98, RSD = 3.65$ )。模型估测的理论最大产气量与累积48h产气量相接近,且线性下降( $P < 0.001$ )。随着油脂选择轮次的提高,HOC籽粒的产气速度线性增加( $P < 0.001$ ),产气延滞期没有显著

变化。随着 HOC 籽粒含油量选择轮次的提高,活体外发酵 6 h 的干物质消化率曲线降低 ( $P=0.04$ ), 12 h 后快速线性下降 ( $P<0.001$ ) (表 4)。活体外淀

粉消化率在各发酵时间点随油脂选择轮次的增加显著提高 ( $P<0.001$ )。

表 3 不同含油量选择轮次高油玉米籽粒的活体外发酵 48 h 累积产气量和产气动态参数

Table 3 Amount and kinetics of *in vitro* gas production of HOC grains from different selection cycles

选择轮次	累积产气量/mL				产气动态参数		
	6 h	12 h	24 h	48 h	B/mL	C/h <sup>-1</sup>	Lag/h
C2	36.65 c	60.60 a	74.48 a	81.20 a	82.14 a	0.110 d	1.01
C4	37.17 c	60.30 a	73.38 a	79.57 ab	80.12 ab	0.114 c	0.93
C6	37.60 c	60.37 a	72.69 a	79.00 ab	79.43 ab	0.116 c	0.95
C8	36.93 bc	60.60 a	73.29 a	79.77 b	80.33 b	0.121 b	0.96
C10	40.17 ab	60.77 a	72.29 a	78.33 ab	78.45 b	0.121 b	0.85
C12	38.77 c	59.70 a	71.28 a	77.40 ab	77.39 ab	0.114 c	0.88
C14	40.77 a	61.73 a	73.56 a	80.07 ab	79.75 ab	0.123 b	0.88
C16	40.13 ab	57.27 b	67.44 b	73.60 c	72.75 c	0.130 a	0.84
SEM	0.47	0.54	0.67	0.67	0.65	0.001	0.04
P	<0.001	0.032	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.165
L	<0.001	0.072	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.026
Q	0.670	0.028	0.116	0.228	0.131	0.155	0.512

表 4 不同选择轮次高油玉米籽粒在不同发酵时间点的活体外瘤胃干物质和淀粉消化率

Table 4 *In vitro* ruminal DM and starch digestibility of HOC grains from different selecting cycles at different fermentation time %

选择轮次	活体外瘤胃干物质消化率			活体外瘤胃淀粉消化率		
	6 h	12 h	24 h	6 h	12 h	24 h
C2	38.18 b	56.88 ab	63.58 a	72.38 f	93.03 f	98.53 g
C4	38.68 b	58.03 a	62.24 a	73.13 e	94.65 e	99.09 d
C6	44.73 a	52.82 bc	56.66 b	73.73 d	94.54 e	98.85 f
C8	34.78 c	57.10 ab	62.45 a	73.30 de	94.84 d	99.14 b
C10	39.48 b	54.28 ab	55.39 b	76.47 c	95.66 b	99.28 a
C12	39.01 b	49.05 c	60.85 a	80.56 a	95.25 c	99.22 c
C14	37.75 b	48.52 c	54.81 b	77.60 b	95.25 c	99.24 ab
C16	35.67 c	52.52 bc	54.35 b	80.74 a	95.97 a	98.99 ab
SEM	0.66	1.15	1.00	0.16	0.06	0.01
P	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
L	0.014	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
Q	0.004	0.519	0.949	<0.001	<0.001	<0.001

表 5 的相关分析显示, HOC 籽粒的淀粉含量与发酵 6 h 累积产气量显著负相关 ( $r = -0.728$ ,  $P < 0.001$ ), 与发酵 48 h 累积产气量显著正相关 ( $r = 0.680$ ,  $P < 0.001$ )。这表明 HOC 籽粒淀粉的发酵速度和含量分别是决定不同发酵时间点的产气量的主要因素。活体外发酵 6 h 时, HOC 各轮次的淀粉消化率约为 70% ~ 80%, 仍有部分淀粉尚未消化。因此, 决定此时累积产气量的是各选择轮次的淀粉消化速度, 与籽粒淀粉总量没有必然联系。淀粉是

HOC 籽粒中主要可发酵碳水化合物, 活体外发酵 6h 的累积产气量显著提高可以表明, HOC 籽粒的淀粉消化速度随油脂选育进程的显著提高; 活体外发酵 24 h 以后, 无论籽粒淀粉发酵的速度快慢均已被全部利用。随着含油量选择轮次的提高, 籽粒淀粉含量下降最终导致了活体外 48 h 累积产气量的降低。籽粒淀粉含量正比于理论最大产气量 ( $r = 0.755$ ,  $P < 0.001$ ), 反比于产气速度 ( $r = 0.766$ ,  $P < 0.001$ ), 这与上述推论相一致。

HOC 籽粒的脂肪含量正比于 6 h 累积产气量 ( $r = 0.618, P < 0.01$ ) 和产气速度 ( $r = 0.715, P < 0.001$ ), 反比于 48 h 累积产气量 ( $r = -0.584, P < 0.01$ ) 和理论最大产气量 ( $r = -0.657, P < 0.001$ ) (表 5)。由于油脂在瘤胃中并不能直接被微生物利用产生气体, 且 HOC 蛋白质含量对产气动态参数和活体外发酵初期淀粉消化率的贡献不大, 因此

表 5 高油玉米籽粒主要营养组分含量与活体外产气动态参数及消化率的相关系数

Table 5 Correlation coefficients between fermentation and digestion characteristics and major chemical constituents of HOC grains

项目	淀粉	脂肪	蛋白质
累积产气量			
6 h	-0.728***	0.618**	0.557*
48 h	0.680***	-0.584**	-0.212
产气动态参数			
B	0.755***	-0.657***	-0.269
C	-0.766***	0.715***	0.437*
L	0.524**	-0.459*	-0.413*
活体外淀粉消化率			
6 h	-0.697***	0.609**	0.430*
12 h	-0.729***	0.820***	0.765***
24 h	-0.258	0.540**	0.855***

注: \*  $P < 0.05$ ; \*\*  $P < 0.01$ ; \*\*\*  $P < 0.001$ 。

HOC 籽粒油脂含量与 6 h 累积产气量和产气速度间的正相关表明油脂选择轮次的提高促进了籽粒淀粉的消化速度。尽管瘤胃的淀粉消化率受到淀粉类型、籽粒加工方法和瘤胃微生物环境等因素的影响, 但本研究采用的活体外产气量法使样品具有相同的颗粒度和活体外发酵环境, 因此活体外瘤胃淀粉消化率的提高也表明 HOC 籽粒淀粉结构随 BHO 群体含油量的选择进程发生了改变。

### 2.3 活体外发酵参数

表 6 和 7 分别显示了 HOC 籽粒含油量选择轮次对活体外 6 和 12 h 发酵参数的影响, 24 h 后各发酵参数均无显著差异 (数据略)。随着选择轮次的增加, 发酵 6 h 的 pH 线性提高 ( $P < 0.001$ ), 这与添加植物油提高瘤胃液 pH 的报道相一致<sup>[20-24]</sup>。一些学者指出, 油脂抑制瘤胃发酵使总挥发酸 (TVFA) 生成量下降是导致上述现象的主要原因<sup>[22, 24]</sup>。本研究随着选择轮次的提高, 发酵 6 h 的 TVFA 含量也线性增加 ( $P < 0.001$ ), 发酵 12 h 以后无显著差异

( $P > 0.05$ )。这表明 TVFA 产量不但没有因油脂的提高而降低, 而且淀粉消化率的提高弥补了可发酵碳水化合物的不足。因此, 本试验发酵初期 pH 的提高并不是油脂的抑制作用所致。另一种观点认为, 植物油中不饱和脂肪酸的微生物氢化作用使瘤胃代谢产生的氢离子大量消耗, 从而稳定或提高了瘤胃液 pH<sup>[23]</sup>。由于 HOC 的含油量选育过程提高了籽粒不饱和脂肪酸含量, 尤其是油酸的含量<sup>[5-6, 25]</sup>, 而且 HOC 日粮比直接添加玉米油日粮的油酸氢化程度显著增加 ( $P < 0.05$ )<sup>[25]</sup>, 因此第 2 种观点更适宜解释本试验 pH 和 TVFA 含量同时上升的现象。

随着油脂选择轮次的提高, 6 和 12 h 发酵液的氨态氮 ( $\text{NH}_3\text{-N}$ ) 质量浓度均呈现上升趋势 ( $P > 0.05$ ), 且 12 h 呈现显著的曲线变化规律 ( $P = 0.010$ )。活体外发酵液中  $\text{NH}_3\text{-N}$  的质量浓度受到缓冲培养液组成、底物蛋白质降解和微生物利用等多因素共同影响<sup>[26]</sup>。随着 HOC 含油量选择轮次的提高, 籽粒中可发酵碳水化合物含量下降导致微生物生长对氮素的需求量下降, 发酵液中  $\text{NH}_3\text{-N}$  质量浓度增加。其次, 发酵液中  $\text{NH}_3\text{-N}$  质量浓度曲线增加与 HOC 籽粒蛋白质含量的曲线增加规律相一致, 这表明籽粒蛋白质在瘤胃中降解水平没有显著改变。值得关注的是, 各发酵液中的  $\text{NH}_3\text{-N}$  质量浓度均低于微生物最大生长效率所需的最低值 ( $5.0 \text{ mg}/100 \text{ mL}$ )<sup>[26]</sup>, 而且随着发酵时间的延长呈现下降趋势。因此尽管 HOC 籽粒蛋白质含量有所提高, 仍需补充氮素以实现最大的微生物生长效率。

活体外发酵 6 h 的 TVFA 含量和丙酸比例线性增加 ( $P < 0.001$ ), 乙酸和丁酸的比例以及乙丙酸比值线性下降 ( $P < 0.001$ ), 这又与淀粉发酵速度提高的推论相一致。活体外发酵 12 h 的丙酸比例线性增加 ( $P < 0.001$ ), 丁酸比例曲线下降 ( $P < 0.01$ )。活体外发酵 24 h 以后, 不同选择轮次间的各项发酵参数均无显著差异, 这与高油 115 活体外发酵 24 h 的发酵参数结果相一致<sup>[27]</sup>; 但体内试验却发现饲喂 HOC 日粮奶牛的瘤胃中乙丙酸比值显著高于采食普通玉米日粮的奶牛 ( $P < 0.05$ )<sup>[2, 28]</sup>。高油玉米品种和体内外试验方法的差异, 均可能使试验结果出现分歧。由于种皮和籽粒结构的保护, 以籽粒形式提供的油脂对瘤胃微生物和纤维降解的负面影响远远小于直接添加的植物油<sup>[8, 25]</sup>, 而且体内试验证明 HOC 日粮没有抑制瘤胃微生物对纤维的降解<sup>[2, 26, 30]</sup>。由

表 6 不同含油量选择轮次高油玉米籽粒的活体外 6 h 发酵参数

Table 6 Results of *in vitro* rumen fermentation traits at 6 hours incubation from different selecting cycles

选择轮次	pH	氨态氮/ (mg/100 mL)	总挥发酸/ (mmol/L)	挥发酸摩尔比/(mol/100 mol)					乙丙比	
				乙酸	丙酸	异丁酸	丁酸	异戊酸		戊酸
C2	6.84 c	4.30	64.08 b	63.26 a	25.76 c	0.98	8.03 a	1.48	0.50	2.46 a
C4	6.88 bc	5.11	62.55 b	63.37 a	25.85 c	0.97	7.80 b	1.49	0.54	2.46 a
C6	6.89 b	4.81	65.20 b	63.14 ab	26.20 c	0.89	7.77 bc	1.49	0.54	2.41 a
C8	6.87 b	4.88	67.89 ab	62.65 bc	26.88 b	0.97	7.59 cd	1.41	0.52	2.33 b
C10	6.85 b	5.13	71.03 a	62.52 bc	27.00 b	0.93	7.55 d	1.48	0.52	2.32 b
C12	6.98 a	3.81	72.98 a	62.54 bc	26.91 b	0.97	7.60 cd	1.44	0.56	2.33 b
C14	6.91 b	5.31	70.60 a	62.51 bc	27.20 ab	0.95	7.43 d	1.41	0.51	2.30 b
C16	6.90 b	4.74	72.67 a	62.32 c	27.62 a	0.91	7.24 e	1.42	0.52	2.26 b
SEM	0.02	0.23	1.27	0.14	0.15	0.04	0.04	0.02	0.01	0.02
P	<0.001	0.060	0.001	0.003	<0.001	0.704	<0.001	0.101	0.051	<0.001
L	<0.001	0.647	<0.001	<0.001	<0.001	0.511	<0.001	0.015	0.463	<0.001
Q	0.361	0.454	0.290	0.269	0.311	0.926	0.599	0.894	0.033	0.228

表 7 不同含油量选择轮次高油玉米籽粒的活体外 12 h 发酵参数

Table 7 Results of *in vitro* rumen fermentation traits at 12 hours incubation from different selecting cycles

选择轮次	pH	氨态氮/ (mg/100 mL)	总挥发酸/ (mmol/L)	挥发酸摩尔比/(mol/100 mol)					乙丙比	
				乙酸	丙酸	异丁酸	丁酸	异戊酸		戊酸
C2	6.89	3.14	96.84	61.37	26.96 c	1.02	8.59 a	1.51	0.56	2.28 a
C4	6.89	2.94	90.96	61.37	27.39 bc	0.94	8.19 b	1.56	0.58	2.25 ab
C6	6.89	3.90	89.91	61.00	27.97 ab	0.90	7.98 bc	1.60	0.58	2.18 b
C8	6.87	4.07	88.19	61.85	27.63 ab	0.71	7.75 cd	1.51	0.58	2.24 b
C10	6.87	4.20	91.57	61.86	28.16 ab	0.42	7.48 de	1.53	0.57	2.20 b
C12	6.89	4.63	89.10	61.23	28.00 ab	0.96	7.68 cd	1.52	0.61	2.19 ab
C14	6.89	4.06	91.94	62.08	27.96 ab	0.69	7.19 e	1.52	0.57	2.22 ab
C16	6.89	3.27	89.30	61.93	28.20 a	0.39	7.40 ed	1.54	0.57	2.20 ab
SEM	0.01	0.40	1.43	0.15	0.15	0.14	0.08	0.03	0.01	0.02
P	0.060	0.091	0.251	0.007	0.004	0.063	0.001	0.501	0.200	0.188
L	0.092	0.108	0.150	0.159	<0.001	0.005	<0.001	0.528	0.949	0.027
Q	0.004	0.010	0.180	0.225	0.013	0.886	0.005	0.736	0.062	0.015

于丙酸产量相对增加通常意味着饲料能量损失随甲烷产量的降低而下降<sup>[29]</sup>,因此随着 HOC 籽粒含油量的提高,发酵液丙酸比例增加不但在一定程度上解释了产气量下降的现象,而且意味着饲喂 HOC 有助于提高饲料利用率。由于支链挥发性脂肪酸通常与蛋白质的降解密切相关<sup>[6,30]</sup>;本试验未观察到支链挥发性脂肪酸变化的现象验证了 BHO 群体的油脂选择轮次没有改变籽粒蛋白质瘤胃降解率的推测,这与体内研究<sup>[2,6,20]</sup>结果一致。

### 3 结 论

经过 16 个含油量选择轮次, BHO 群体的籽粒

含油量达到 13.2%;籽粒淀粉和蛋白质含量随油脂的选择进程发生显著改变,与籽粒含油量显著相关。含油量选择进程的提髙使籽粒中可发酵碳水化合物含量下降,导致 HOC 籽粒的活体外瘤胃干物质消化率降低。HOC 籽粒淀粉的瘤胃消化速度和消化率显著提髙,在一定程度上弥补了淀粉含量下降的不足。这可能是 BHO 群体的籽粒淀粉结构在含油量选育过程中发生改变所致,由于目前尚未见到相关报道,因此有必要采用其他试验方法进一步验证。本群体 HOC 籽粒含油量大幅度提髙没有对瘤胃微生物发酵产生明显抑制作用,发酵液丙酸比例增加有助于提髙反刍动物的饲料转化效率。

## 参 考 文 献

- [1] LaCount D W, Drackley J K, Cicela T M, et al. High oil corn as silage or grain for dairy cows during an entire lactation [J]. *J Dairy Sci*, 1995, 78:1745-1754
- [2] Elliott J P, Drackley J K, Schauff D J, et al. Diets containing high oil corn and tallow for dairy cows during early lactation [J]. *J Dairy Sci*, 1993, 76:775-789
- [3] Weiss W P, Wyatt D J. Effect of oil content and kernel processing of corn silage on digestibility and milk production by dairy cows [J]. *J Dairy Sci*, 2000, 83:351-358
- [4] Whitlock L A, Schingoethe D J, Hippen A R, et al. Milk production and composition from cows fed high oil corn or conventional corn at two forage concentration [J]. *J Dairy Sci*, 2003, 86:2428-2437
- [5] Chouinard P Y, Corneau L, Butler W R, et al. Effect of dietary lipid source on conjugated linoleic acid concentrations in milk fat [J]. *J Dairy Sci*, 2001, 84:680-690
- [6] Andrae J G, Duckett S K, Hunt C W, et al. Effects of feeding high-oil corn to beef steer on carcass characteristics and meat quality [J]. *J Anim Sci*, 2001, 79:582-588
- [7] Jenkins T C. Regulation of lipid metabolism in the rumen [J]. *J Nutr*, 1994, 124:1372-1376
- [8] Hussein H S, Merchen N R, Fahey J R, et al. Composition of ruminal bacteria harvested from steers as influenced by dietary forage level and fat supplementation [J]. *J Anim. Sci*, 1995, 73, 2469-2473
- [9] Griinari J M, Dwyer D A, McGuire, et al. Effect of dietary sunflower oil and pasture forage maturity on conjugated linoleic acid content in milk fat from lactating dairy cows [J]. *J Dairy Sci*, 1998, 81:(Suppl 1):300
- [10] Menke K H, Raab L, Salewski A, et al. The estimation of the digestibility and metabolizable energy content of ruminant feedingstuffs from the gas production when they are incubated with rumen liquor *in vitro* [J]. *J Agric Sci*, 1979, 93: 217-222
- [11] 杨胜主编. 饲料分析及饲料质量检测技术 [M]. 北京:中国农业大学出版社,1993
- [12] Xiong Y, Bartle S J, Preston R L. Density of steam flaked sorghum grain, roughage level, and feeding regimen for feedlot steers [J]. *J Anim Sci*, 1991, 69:1707-1718
- [13] Sweeney R A. Generic combustion method for determination of crude protein in feeds: Collaborative study [M]. AOAC, 1989, 72:77-774
- [14] Erwin E S, Marco G J, and E. Emery. Volatile fatty acid analysis of blood and rumen fluid by gas chromatography [J]. *J Dairy Sci*, 1961, 44:1768-1771
- [15] Broderick G A, Kang J H. Automated simultaneous determination of ammonia and amino acids in ruminal fluids and *in vitro* media [J]. *J Dairy Sci*, 1980, 63: 64-75
- [16] SAS Institute Inc. SAS/STAT User's Guide: Statistics [M]. Version 8 editions. SAS Institute Inc, Cary, North Carolina, 1996
- [17] Strachan S D, Kaplan S L. Responses of high-oil and hybrid corn to rootworm beetles during pollination [J]. *Agronomy Journal*, 2001, 93:1043-1048
- [18] Watson S A, Freeman J E. American Seed Trade Association. Proceedings of 30th Corn and Sorghum Research Conference. Breeding corn for increased oil content [C]. Washington, 1975:251-275
- [19] Dudley J W, Lambert R J. Ninety generations of selection for oil and protein in maize [J]. *Maydica*, 1992, 37:81-87
- [20] Drackley J K, LaCount D W, Emmert L S, et al. Intake, production, and nutrient digestibilities by dairy cows fed TopCross high-oil corn as grain or silage [J]. *J Dairy Sci*, 1996, 79 (Suppl. 1):211 (Abstr)
- [21] VanNebel C J, Demeyer D I. Rumen microbial ecosystem [M]. New York:Blackie Academic and Professional, 1988, 387-443
- [22] Hwang I H, Kim H D, Shim S S. Effect of unsaturated fatty acids on cellulose degradation and fermentation characteristics by mixed ruminal microbes [J]. *J Anim Sci*, 2001, 14:501-506
- [23] Jalc D, Čeresnakova Z. Effect of plant oils and malate on rumen fermentation *in vitro* [J]. *Czech J Anim Sci*, 2002(3):106-111
- [24] 魏宏阳,王加启. 添加游离不饱和脂肪酸或植物油对瘤胃微生物体外发酵及微晶纤维素降解的影响 [J]. *畜牧兽医学报*, 2004, 35 (5):491-497
- [25] Duckett S K, Andrae J G, Owens F N. Effect of high oil corn or added corn oil on ruminal biohydrogenation of fatty acids and conjugated linoleic acid formation in beef steers fed finishing diets [J]. *J Anim Sci*, 2002, 80: 3353-3360
- [26] Meng Q, Kerley M S, Ludden P A, et al. Fermentation substrate and dilution rate interact to affect microbial growth and efficiency. [J]. *J Anim Sci*, 1999, 77: 206-214
- [27] 张鹏,王忠阁,刘大森,等. 利用体外法研究玉米油及高油玉米对绵羊瘤胃发酵的影响 [J]. *黑龙江畜牧兽医*, 2005, 6:55-56
- [28] Atwell D G, Jaster E H, Moore K J, et al. Evaluation of high oil corn and corn silage for lactating cows [J]. *J Dairy Sci*, 1988, 71:2689-2698
- [29] Machmuller A, Ossowski D A, Wanner M, et al. Potential of various fatty feeds to reduce methane release from rumen fermentation *in vitro* [J]. *Anim Feed Sci Technol*, 1998, 71: 117-130
- [30] Belknap C, Trenkle A. Effect of feeding high-oil corn and control corn with added fat on ruminal and total tract digestion of finishing steers [J]. *J Anim Sci*, 1999, 77(Suppl. 1):258 (Abstr)