

# 仿生法评定抗草甘膦玉米和转 *Bt* 基因玉米的酶水解物能值的研究

钟儒清 陈亮 高理想 黄庆华 刘蕾 张宏福\*

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

**摘要:** 本试验旨在分析抗草甘膦玉米和转 *Bt* 基因玉米原料及饲料与同源非转基因玉米原料及饲料体外总能消化率以及酶水解物能值,为转基因玉米的营养实质等同性仿生评定方法的研究提供参考。试验采用单因素完全随机设计,使用单胃动物仿生消化系统模拟饲料原料和饲料在鸡胃肠道的消化过程,分析同源非转基因玉米、抗草甘膦玉米和转 *Bt* 基因玉米以及对应的 3 种玉米-豆粕饲料在不同体外模拟消化阶段的干物质消化率、总能消化率和酶水解物能值的差异。结果表明:同源非转基因玉米、抗草甘膦玉米和转 *Bt* 基因玉米以及对应饲料在常规概率成分含量上是相似的。抗草甘膦玉米及饲料与同源非转基因玉米及饲料相比,在干物质和能量胃消化率、全消化道消化率及酶水解物能值上均没有显著差异 ( $P>0.05$ )。转 *Bt* 基因玉米全消化道总能消化率低于同源非转基因玉米 ( $P=0.03$ , 变异系数=0.50%), 对应玉米饲料的酶水解物能值则高于同源非转基因玉米饲料 ( $P=0.02$ , 变异系数=1.12%), 但均处于仿生消化系统测试的误差范围内(变异系数 $\leq 1.64\%$ )。由此可见,抗草甘膦玉米的酶水解物能值与同源对照玉米没有差异,而转 *Bt* 基因玉米存在统计学意义上的差异,但所有的测值均处于仿生消化系统的测试误差之内。仿生法发现的差异是否具有生物学意义有待体内试验验证。仿生法可为转基因饲料营养等同性研究提供一种新方法。

**关键词:** 转基因玉米;干物质消化率;总能消化率;酶水解物能值;仿生消化系统

中图分类号:S816.17

文献标识码:A

文章编号:1006-267X(2015)05-1468-09

2013年,全球转基因作物种植面积达到1.752亿  $\text{hm}^2$ ,延续了17年的持续增长<sup>[1]</sup>。约八成的转基因作物作为畜禽饲料原料<sup>[2]</sup>。转基因玉米的种植面积仅次于转基因大豆,位居第二,而且玉米是畜禽饲料的主要能量来源。大量文献研究表明转基因玉米对畜禽营养、免疫、繁殖、肠道微生态等多个方面没有产生不利的影响<sup>[2-6]</sup>。在转基因玉米饲用安全的前提下,转基因玉米的养分的营养价值评定对玉米的利用具有重要的意义。动物试验表明,转基因玉米与同源非转基因玉米营养成分和消化率没有显著差异,具有营养实质等同

性<sup>[4,7]</sup>。动物营养学国家重点实验室开发的单胃动物仿生消化系统(SDS-II)试图通过模拟饲料在猪禽体内的消化过程,实现对饲料养分生物学效价的估测。本课题组长期从事基于体外酶法的仿生方法研究和仿生消化系统的开发,由电脑程控模型控制模拟饲料在畜禽体内消化过程,最大限度地减少了由于人工操作产生的系统误差,测试的酶水解物能值(enzymatic hydrolysate gross energy, EHGE)与动物体内能值具有较高的相关性和重复性<sup>[8-10]</sup>。但利用体外法评价转基因饲料的酶水解物能值仍鲜见相关报道。本文利用仿生消化

收稿日期:2014-12-09

基金项目:国家转基因重大专项“转基因生物食用饲用安全性评价技术研究”(2014ZX08011-005);中国博士后科学基金资助项目(2014M561113);中国农业科学院科技创新工程(ASTIP-IAS07)

作者简介:钟儒清(1990—),男,山东枣庄人,硕士研究生,从事饲料营养价值评定研究。E-mail: ruqing\_zhong@163.com

\*通信作者:张宏福,研究员,博士生导师, E-mail: zhanghf6565@vip.sina.com

系统体外评价抗草甘膦玉米和转 *Bt* 基因玉米以及饲料的干物质消化率 (dry matter digestibility, DMD)、总能消化率 (gross energy digestibility, GED) 和酶水解物能值, 为仿生消化方法评价转基因饲料营养等同性提供参考。

## 1 材料与方 法

本试验于 2014 年 3 月到 2014 年 7 月在中国农业科学院北京畜牧兽医研究所动物营养学国家重点实验室进行。

### 1.1 饲料材料

本试验选用同源非转基因玉米 (郑单 958 玉米)、抗草甘膦玉米 (转 *maroACC* 基因玉米) 和转 *Bt* 基因玉米 (转 *mCry1Ac* 基因玉米) 以及对应的非转基因玉米-非转基因豆粕饲料、抗草甘膦玉米-非转基因豆粕饲料、转 *Bt* 基因玉米-非转基因豆粕饲料, 3 种饲料是参照 NRC (1994) 蛋鸡营养需要量标准配制的。2 种转基因玉米以及同源非转基因玉米均来自于中国农业大学国家玉米改良中心。饲料原料采用四分法取样后, 用试验用饲料粉碎机粉碎过 60 目, 充分混合均匀后-20 °C 储备备用。饲料原料化学成分见表 1, 试验饲料组成及营养水平见表 2。

### 1.2 试验设计

本试验采用单因素完全随机设计。3 个玉米

原料和 3 个饲料共 6 种试验样品, 每种样品设 5 个重复, 每个重复 1 根消化管。

### 1.3 转基因玉米及饲料的干物质消化率、总能消化率和酶水解物能的测定

用实验室 SDS-II 仿生消化仪, 分别测定样品在鸡胃段和全消化道的干物质消化率、总能消化率和酶水解物能值。

#### 1.3.1 胃模拟消化期的操作过程

精确称取 2.000 0 g 饲料材料 (精确到 0.000 2 g) 到 10 mL 的试管中。然后配制活性为 1 550 U/mL 的鸡胃蛋白酶液, 使用该蛋白酶液 20 mL 连同饲料样品无损转移到套有透析袋的仿生消化管中。此过程中同步测定饲料样品的干物质含量。

将仿生消化管固定在已经预热的 SDS-II 仿生消化仪系统机器上, 连通事先配制的胃段缓冲液, 41 °C 条件下消化 4 h。消化过程结束后, 将消化残渣无损转移到已知绝干重量的培养皿中, 放在 65 °C 烘箱中烘干至无水痕后, 再在 105 °C 条件下烘干至恒重, 计算干物质消化率。

将培养皿中的消化残渣全部刮下, 转移到绝干的玻璃砂芯坩埚中, 无水乙醇脱脂后烘干至恒重, 并测定脱脂未消化残渣的能量值, 推算饲料样品的酶水解物能值。

表 1 玉米原料的常规营养成分含量分析 (干物质基础)

Table 1 Analyzed nutrient composition of corn ingredients (dry matter basis)

项目 Items	玉米 Corn		
	非转基因玉米 Non-transgenic corn	转 <i>Bt</i> 基因玉米 Transgenic <i>Bt</i> corn	抗草甘膦玉米 Glyphosate-resistant corn
干物质 Dry matter/%	86.69	88.48	89.37
总能 Gross energy/(MJ/kg)	18.50	18.49	18.49
粗蛋白质 Crude protein/%	7.79	8.49	8.77
粗脂肪 Extract ether/%	3.58	3.44	3.63
粗灰分 Ash/%	1.31	1.40	1.27
中性洗涤纤维 Neutral detergent fiber/%	11.29	11.62	11.86
酸性洗涤纤维 Acid detergent fiber/%	2.07	1.98	1.88

#### 1.3.2 全消化道模拟消化期的操作过程

配制含淀粉酶 (活性为 401.46 U/mL)、胰蛋白酶 (活性为 49.28 U/mL)、糜蛋白酶 (活性为 11.31 U/mL) 的模拟鸡小肠液。在胃段消化结束

时, 连通事先配制的小肠前段缓冲液和小肠后段缓冲液, 并通过 SDS-II 的加酶管在每个消化管中补加 2 mL 模拟小肠液, 41 °C 条件下小肠前段消化 7.5 h 和小肠后段消化 7.5 h。其余步骤同胃段消

化过程。参数等试验操作细节均按照《单胃动物仿生消化  
透析袋的前处理、缓冲液的配制和仪器运行 系统操作手册》<sup>[11]</sup> 严格进行。

表 2 试验饲料组成及营养水平(干物质基础)

Table 2 Composition and nutrient levels of experimental diets (dry matter basis)

%

项目 Items	饲料 Diets		
	非转基因玉米饲料 Non-transgenic corn diet	转 <i>Bt</i> 基因玉米 Transgenic <i>Bt</i> corn diet	抗草甘膦玉米 Glyphosate-resistant corn diet
原料 Ingredients			
非转基因玉米 Non-transgenic corn	61.70		
转 <i>Bt</i> 基因玉米 Transgenic <i>Bt</i> corn		61.70	
抗草甘膦玉米 Glyphosate-resistant corn			61.70
非转基因豆粕 Non-transgenic soybean meal	26.20	26.20	26.20
非转基因大豆油 Non-transgenic soybean oil	1.00	1.00	1.00
石粉 Limestone	8.10	8.10	8.10
磷酸氢钙 CaHPO <sub>4</sub>	1.50	1.50	1.50
<i>DL</i> -蛋氨酸 <i>DL</i> -methionine	0.30	0.30	0.30
食盐 NaCl	0.10	0.10	0.10
氯化胆碱 Choline chloride	0.10	0.10	0.10
预混料 Premix	1.00	1.00	1.00
合计 Total	100.00	100.00	100.00
营养水平 Nutrient levels			
干物质 Dry matter	91.42	91.84	91.46
总能 Gross energy/(MJ/kg)	16.51	16.57	16.46
粗蛋白质 Crude protein	18.16	18.33	18.21
粗脂肪 Extract ether	3.48	3.48	3.66
粗灰分 Ash	14.61	14.32	14.99

预混料为每千克饲料提供 The premix provided the following per kg of diets: VA 12 500 IU, VD<sub>3</sub> 4 125 IU, VE 15 IU, VK<sub>3</sub> 2 mg, VB<sub>1</sub> 1 mg, VB<sub>2</sub> 8.5 mg, VB<sub>5</sub> 50 mg, 烟酸 nicotinic acid 32.5 mg, VB<sub>6</sub> 8 mg, 生物素 biotin 2.0 mg, 叶酸 folic acid 5.0 mg, VB<sub>12</sub> 5 mg, Mn (as manganese sulfate) 80 mg, I (as potassium iodide) 1 mg, Fe (as ferrous sulfate) 60 mg, Cu (as copper sulfate) 8.0 mg, Zn (as zinc sulfate) 80 mg, Se (as sodium selenite) 0.3 mg。

#### 1.4 数据处理与统计分析

根据单因素完全随机设计,用 SAS 9.2 对 2 种转基因玉米及饲料分别与其同源对照组分别进行成组法 *t* 检验,用 MEANS 模块对基本统计量进行分析。其中  $P < 0.05$  为差异显著,  $0.05 < P < 0.10$  趋势分析。结果以“平均值±标准差”表示。其中数据计算公式如下:

$$DMD(\%) = [(M_1 - M_2) / M_1] \times 100;$$

$$GED(\%) = [(GE_1 - GE_2) / GE_1] \times 100;$$

$$EHGE = (GE_1 - GE_2) / (M_1 \times 1000)。$$

式中: *DMD* 为饲料体外干物质消化率(%); *GED* 为饲料体外总能消化率(%); *EHGE* 为饲料

体外酶水解物能值(MJ/kg);  $M_1$  为上样饲料干物质重量(g);  $M_2$  为未消化残渣干物质重量(g);  $GE_1$  为上样饲料总能(J);  $GE_2$  为未消化残渣总能(J)。

肠段的干物质消化率、总能消化率为全消化道测值与胃段测值之差。

## 2 结果

### 2.1 仿生法评定 3 种玉米原料的干物质消化率、总能消化率和酶水解物能值

在体外模拟同源非转基因玉米、抗草甘膦玉米和转 *Bt* 基因玉米的胃和全消化道消化中(表

3), 转 *Bt* 基因玉米 (5.18%)、抗草甘膦玉米 (6.01%) 与同源非转基因玉米 (5.54%) 相比在胃干物质消化率上均没有显著性差异 ( $P>0.05$ )。在全消化道干物质消化中, 转 *Bt* 基因玉米干物质消化率 (78.10%) 与非转基因玉米 (78.88%) 相比没有显著性差异 ( $P>0.05$ ), 抗草甘膦玉米干物质消化率 (77.92%) 与非转基因玉米相比则有减小的趋势 ( $P=0.06$ ), 但两者极差为 2.58%, 变异系数为 0.86%。3 种玉米肠干物质消化率变化范围为 71.91%~73.34%。

2 种转基因玉米的胃总能消化率与非转基因玉米相比均没有呈现出显著性差异 (变化范围 11.35%~11.78%,  $P>0.05$ )。与同源非转基因玉米全消化道总能消化率 (84.54%) 相比, 抗草甘膦玉米的 (84.32%) 没有表现出显著差异 ( $P>0.05$ ), 转 *Bt* 基因玉米 (83.78%) 则显著低于非转基因玉米 ( $P=0.03$ ), 两者极差为 1.68%, 变异系数为 0.50%。3 种玉米肠的能量消化率变化范围则为 72.00%~73.15%。2 种转基因玉米的酶水解物能值与非转基因玉米相比也没有显著差异 (变化范围 15.55~15.66 MJ/kg,  $P>0.05$ )。

## 2.2 仿生法评定 3 种玉米饲料的干物质消化率、总能消化率和酶水解物能值

在体外模拟同源非转基因玉米饲料、抗草甘膦玉米饲料和转 *Bt* 基因玉米饲料的鸡胃和全消化道消化中 (表 4), 转 *Bt* 基因玉米饲料 (23.19%)、抗草甘膦玉米饲料 (23.83%) 与同源非转基因玉米饲料 (23.29%) 相比在胃干物质消化率上均没有显著性差异 ( $P>0.05$ )。2 种转基因玉米饲料的全消化道干物质消化率与同源非转基因玉米饲料相比也没有显著差异 (变化范围 68.30%~68.88%,  $P>0.05$ )。肠的干物质消化率变化范围为 45.05%~45.18%。

转 *Bt* 基因玉米饲料 (19.57%)、抗草甘膦玉米饲料 (20.66%) 与同源非转基因玉米饲料 (19.58%) 相比在胃总能消化率上均没有显著性差异 ( $P>0.05$ )。2 种转基因玉米饲料的全消化道总能消化率与同源非转基因玉米饲料相比也没有显著差异 (变化范围 70.48%~71.63%,  $P>0.05$ )。肠

的能量消化率变化范围为 50.29%~52.06%。抗草甘膦玉米饲料的酶水解物能值 (10.61 MJ/kg) 与同源非转基因玉米饲料 (10.57 MJ/kg) 没有显著差异 ( $P>0.05$ ), 转 *Bt* 基因玉米饲料的酶水解物能值 (10.83 MJ/kg) 则显著高于对照玉米饲料 ( $P=0.02$ ), 但两者极差为 0.35 MJ/kg, 变异系数为 1.12%。

## 3 讨论

### 3.1 转基因玉米的营养成分含量分析

转基因玉米饲用安全性评价的第一步即是玉米的营养成分含量分析, 也是配制饲料和开展动物试验的基础。本试验表明抗草甘膦玉米、转 *Bt* 基因玉米以及饲料与同源非转基因玉米原料和饲料在常规概率成分含量上具有相似性。这与文献报道的转基因玉米与非转基因玉米常规概率成分含量相似一致<sup>[4,12-14]</sup>。Walsh 等<sup>[15]</sup>分析表明转 *Bt* 基因玉米和同源非转基因玉米除了在酸性洗涤纤维和抗性淀粉含量在数值上增加外, 其他概率成分和氨基酸组成上具有相似性。Mcnaughton 等<sup>[16]</sup>也发现抗草甘膦玉米与其同源非转基因玉米具有相似的营养成分。转基因玉米在与同源非转基因玉米的常规概率成分含量上具有相似性, 同时部分养分数值上也存在微小差异, 这种微小的差异是否会影响转基因玉米以及饲料的养分效价, 本研究使用体外干物质消化率、总能消化率和酶水解物能值作进一步的测试与分析。

### 3.2 转基因玉米养分效价评定

从玉米原料及饲料的仿生消化率测试看, 与同源非转基因玉米饲料相比, 抗草甘膦玉米饲料在各消化段的干物质消化率、能量消化率和酶水解物能值均没有显著性差异。与同源非转基因玉米相比, 抗草甘膦玉米原料的能量消化率和酶水解物能值均没有差异, 而全消化道干物质消化率在测值上有降低的趋势; 而转 *Bt* 基因玉米及饲料与对照玉米及饲料间的变异系数均处在 SDS-II 的精度范围之内 (变异系数  $\leq 1.64%$ ), 统计意义上的下降的趋势可能来源于仿生消化系统本身的测试误差。

表 3 玉米原料干物质消化率、总能消化率和酶水解物能值  
Table 3 Dry matter and gross energy digestibility and EHGE of corn ingredients

项目 Items	玉米原料 Corn ingredients				数据统计 Statistic analysis					
	非转基因玉米 Non-transgenic corn		转基因玉米 Transgenic Bt corn		非转基因玉米 vs. 转基因玉米 Non-transgenic corn vs. glyphosate-resistant corn		非转基因玉米 vs. 抗草甘膦玉米 Non-transgenic corn vs. glyphosate-resistant corn			
	非转基因玉米 Non-transgenic corn	转基因玉米 Transgenic Bt corn	抗草甘膦玉米 Glyphosate-resistant corn	转基因玉米 Transgenic Bt corn	P 值 P-value	变异系数 Coefficient of variation	极差 Range	P 值 P-value	变异系数 Coefficient of variation	极差 Range
干物质消化率 DMD/%										
胃 Stomach	5.54±0.21	5.18±0.35	6.01±1.19	6.01±1.19	0.12	5.60	1.09	0.43	15.73	2.78
全消化道 Total digestive tract	78.88±0.70	78.10±0.64	77.92±0.66	77.92±0.66	0.10	0.85	1.83	0.06	0.86	2.58
肠 Intestine	73.34	72.92	71.91	71.91						
总能消化率 GED/%										
胃 Stomach	11.39±0.66	11.78±0.76	11.35±0.29	11.35±0.29	0.42	6.12	2.26	0.90	4.65	1.83
全消化道 Total digestive tract	84.54±0.48	83.78±0.33	84.32±0.52	84.32±0.52	0.03	0.50	1.68	0.53	0.59	1.68
肠 Intestine	73.15	72.00	72.97	72.97						
酶水解物能值 EHGE/(MJ/kg)	15.60±0.09	15.55±0.06	15.66±0.10	15.66±0.10	0.13	0.51	0.13	0.75	0.59	0.25

表 4 玉米饲料干物质消化率、总能消化率和酶水解物能值

Table 4 Dry matter and gross energy digestibility and EHGE of corn diets

%

项目 Items	饲料 Diets		数据统计 Statistic analysis								
	非转基因玉米 Non-transgenic corn	转基因玉米 Transgenic <i>Bt</i> corn	抗草甘膦玉米 Glyphosate- resistant corn	非转基因玉米 vs. 转基因玉米 Non-transgenic corn vs. transgenic <i>Bt</i> corn		非转基因玉米 vs. 抗草甘膦玉米 Non-transgenic corn vs. glyphosate-resistant corn					
				<i>P</i> 值 <i>P</i> -value	变异系数 Coefficient of variation	<i>P</i> 值 <i>P</i> -value	变异系数 Coefficient of variation	极差 Range	极差 Range		
干物质消化率 DMD/%											
胃 Stomach	23.29±0.46	23.19±0.20	23.83±0.66	0.67	1.52	0.19	2.35	1.10	1.88		
全消化道 Total digestive tract	68.47±0.74	68.30±0.25	68.88±0.86	0.66	0.85	0.47	0.97	0.35	1.99		
肠 Intestine	45.18	45.11	45.05								
总能消化率 GED/%											
胃 Stomach	19.58±0.59	19.57±0.64	20.66±1.16	0.98	3.13	0.10	4.58	1.56	3.20		
全消化道 Total digestive tract	70.48±1.09	71.63±0.81	70.95±0.89	0.20	1.14	0.53	1.41	2.58	3.17		
肠 Intestine	50.90	52.06	50.29								
酶水解物能值 EHGE/(MJ/kg)	10.57±0.16	10.83±0.05	10.61±0.13	0.02	1.12	0.75	1.40	0.35	0.29		

猪的消化试验表明与对照非转基因玉米饲料相比,抗草甘膦玉米饲料的养分(有机物、粗蛋白质、无氮浸出物)消化率、消化能以及代谢能均没有差异<sup>[17]</sup>。Aulrich 等<sup>[18]</sup>进行的转 *Bt* 基因玉米养分效价评定研究中,饲喂转基因玉米饲料的肉鸡、蛋鸡及猪等的主要养分消化率和代谢能均没有显著性差异。Reuter 等<sup>[19]</sup>的研究表明转 *Bt* 基因玉米与常规玉米在化学成分上、常规营养物质消化率以及总能消化率上均没有出现显著性差异。本试验结果显示与同源非转基因玉米饲料相比转 *Bt* 基因玉米干物质消化率没有差异,但全消化道总能消化率低于同源对照玉米,而对应的转 *Bt* 基因玉米饲料的酶水解物能值却高于对照玉米饲料。可能的原因是单胃动物仿生化消化系统的体外干物质和能量消化率及酶水解物能值的变异系数为 1.64%<sup>[20]</sup>,而本试验测定的转 *Bt* 基因玉米及饲料与对照玉米及饲料间的差异均处在 SDS-II 的精度范围之内(变异系数 $\leq 1.64\%$ );同时,转 *Bt* 基因玉米具有较低的总能消化率,而转 *Bt* 基因玉米饲料却具有较高的酶水解物能值,这种看似不一致的测试结果也进一步说明了统计意义上的差异可能来源于仿生化消化系统本身的测试误差。目前,大量动物试验表明转 *Bt* 基因玉米和抗草甘膦玉米在养分效价上与同源非转基因玉米具有营养等同性,但动物个体差异很大,有时可能会掩盖或者削弱养分效价的差异。高精度的仿生化法可初步评估转基因饲料的养分效价,成为转基因饲料评价的新手段。

#### 4 结 论

与非转基因玉米相比,抗草甘膦玉米的酶水解物能值没有差异,而转 *Bt* 基因玉米酶水解物能值存在统计学意义上的差异,但所有的测值均处于仿生化消化系统的测试误差之内。试验发现的差异是否具有生物学意义有待体内试验验证。仿生化消化法可为转基因饲料营养等同性研究提供一种新方法。

#### 参考文献:

- [ 1 ] JAMES C. 2013 年全球生物技术/转基因作物商业化发展态势[J]. 中国生物工程杂志, 2014, 34(1): 1-8.
- [ 2 ] FLACHOWSKY G, SCHAFFT H, MEYER U. Animal feeding studies for nutritional and safety assessments of feeds from genetically modified plants: a review [J]. Journal für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit, 2012, 7(3): 179-194.
- [ 3 ] RIZZI A, RADDADI N, SORLINI C, et al. The stability and degradation of dietary DNA in the gastrointestinal tract of mammals: implications for horizontal gene transfer and the biosafety of GMOs [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2012, 52(2): 142-161.
- [ 4 ] 陈亮, 黄庆华, 孟丽辉, 等. 转基因作物的饲用安全性评价研究进展 [J]. 中国农业科学, 2015, 48(6): 1205-1218.
- [ 5 ] YONEMOCHI C, IKEDA T, HARADA C, et al. Influence of transgenic corn (CBH 351, named Starlink) on health condition of dairy cows and transfer of Cry9C protein and cry9C gene to milk, blood, liver and muscle [J]. Animal Science Journal, 2003, 74(2): 81-88.
- [ 6 ] VAN EENENNAAM A L, YOUNG A E. Prevalence and impacts of genetically engineered feedstuffs on livestock populations [J]. Journal of Animal Science, 2014, 92(10): 4255-4278.
- [ 7 ] AUMAITRE A, AULRICH K, CHESSON A, et al. New feeds from genetically modified plants: substantial equivalence, nutritional equivalence, digestibility, and safety for animals and the food chain [J]. Livestock Production Science, 2002, 74(3): 223-238.
- [ 8 ] ZHAO F, REN L Q, MI B M, et al. Developing a computer-controlled simulated digestion system to predict the concentration of metabolizable energy of feedstuffs for rooster [J]. Journal of Animal Science, 2014, 92(4): 1537-1547.
- [ 9 ] ZHAO F, ZHANG L, MI B M, et al. Using a computer-controlled simulated digestion system to predict the energetic value of corn for ducks [J]. Poultry Science, 2014, 93(6): 1410-1420.
- [ 10 ] CHEN L, GAO L X, HUANG Q H, et al. Prediction of digestible energy of feed ingredients for growing pigs using a computer-controlled simulated digestion system [J]. Journal of Animal Science, 2014, 92(9): 3887-3894.
- [ 11 ] 赵峰, 张宏福, 张子仪. 单胃动物仿生化消化系统操作

- 手册[M]. 2版. 北京: 中国农业科学院, 2011.
- [12] AESCHBACHER K, MESSIKOMMER R, MEILE L, et al. *Bt176* corn in poultry nutrition: physiological characteristics and fate of recombinant plant DNA in chickens[J]. *Poultry Science*, 2005, 84(3): 385-394.
- [13] 刘莎莎, 隋晓峰, 谭建庄, 等. 转基因作物的饲用安全性评价[J]. *中国畜牧杂志*, 2010, 46(14): 34-37.
- [14] ZDUNCZYK Z, FREJNAGEL S, FORNAL J, et al. Biological response of rat fed diets with high tuber content of conventionally bred and transgenic potato resistant to necrotic strain of potato virus (PVYN) Part I. Chemical composition of tubers and nutritional value of diets[J]. *Food Control*, 2005, 16(8): 761-766.
- [15] WALSH M C, BUZOIANU S G, GARDINER G E, et al. Effects of short-term feeding of *Bt* MON810 maize on growth performance, organ morphology and function in pigs[J]. *British Journal of Nutrition*, 2012, 107(3): 364-371.
- [16] MCNAUGHTON J, ROBERTS M, RICE D, et al. Nutritional equivalency evaluation of transgenic maize grain from event DP-Ø9814Ø-6 and transgenic soybeans containing event DP-356Ø43-5; Laying hen performance and egg quality measures[J]. *Poultry Science*, 2011, 90(2): 377-389.
- [17] BÖHME H, AULRICH K, DAENICKE R, et al. Genetically modified feeds in animal nutrition. 2nd communication: glufosinate tolerant sugar beets (roots and silage) and maize grains for ruminants and pigs[J]. *Archiv für Tierernährung*, 2001, 54(3): 197-207.
- [18] AULRICH K, BÖHME H, DAENICKE R, et al. Genetically modified feeds in animal nutrition. 1st communication: *Bacillus thuringiensis* (*Bt*) corn in poultry, pig and ruminant nutrition [J]. *Archiv für Tierernährung*, 2001, 54(3): 183-195.
- [19] REUTER T, AULRICH K, BERK A, et al. Investigations on genetically modified maize (*Bt*-maize) in pig nutrition: chemical composition and nutritional evaluation[J]. *Archiv für Tierernährung*, 2002, 56(1): 23-31.
- [20] 赵峰, 米宝民, 任立琴, 等. 基于单胃动物仿生消化系统的鸡仿生消化法测定饲料酶水解物能值变异程度的研究[J]. *动物营养学报*, 2014, 26(6): 1535-1544.

## Evaluation of Enzymatic Hydrolysate Gross Energy of Glyphosate-Tolerant Corn and Transgenic *Bt* Corn Using Simulative Digestion System

ZHONG Ruqing CHEN Liang GAO Lixiang HUANG Qinghua LIU Lei ZHANG Hongfu\*

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

**Abstract:** The objective of the present study was to evaluate the energy value of the glyphosate-tolerant corn and transgenic *Bt* corn or the glyphosate-tolerant corn diet and transgenic *Bt* corn diet comparing to the isogenic non-transgenic corn or diet using an *in vitro* digestion method with computer-controlled simulated digestion system (SDS). It would provide a reference to develop *in vitro* method for evaluating the nutritional substantial equivalence of genetically modified crops using the SDS. A single factorial completely randomized design with 3 corn ingredients (isogenic non-transgenic corn, glyphosate-tolerant corn, and transgenic *Bt* corn) and corresponding 3 corn diets (isogenic non-transgenic corn diet, glyphosate-tolerant corn diet, and transgenic *Bt* corn diet) was adapted. The digestion in the stomach and total tract were simulated respectively. The *in vitro* dry matter digestibility (DMD), *in vitro* gross energy digestibility (GED), and enzymatic hydrolysate gross energy (EHGE) were determined of corn ingredients and diets. The results showed that the nutrient concentration was similar between the corn ingredients and diets. As a whole, the gastric and total tract DMD, the gastric and total tract GED and the EHG were not affected by the corn ingredient treatments ( $P>0.05$ ). However, the GED of transgenic *Bt* corn were lower than the GED of isogenic non-transgenic corn ( $P=0.03$ , coefficient of variation=0.50%), when the EHGE of transgenic *Bt* corn diet were greater than the EHGE of isogenic non-transgenic corn diet ( $P=0.02$ , coefficient of variation=1.12%). But, above two coefficient of variations were all less than the coefficient of variation of feed ingredients using the SDS (coefficient of variation $\leq$ 1.64%). These results suggest that *in vitro* gastric and total tract digestibility of dry matter and gross energy for glyphosate-tolerant corn is similar to that for isogenic non-transgenic corn, with transgenic *Bt* corn has some statistical differences. These differences are all within the test error of the SDS, via next animal testing test and verify. The SDS may supply a new method for evaluating the nutritional substantial equivalence of genetically modified crops. [Chinese Journal of Animal Nutrition, 2015, 27(5):1468-1476]

**Key words:** transgenic maize; *in vitro* gross energy digestibility; *in vitro* dry matter digestibility; enzymatic hydrolysate gross energy; simulative digestion system