



仿生消化技术评定猪禽饲料营养价值体系的构建及应用

解竞静,王钰明,赵 峰*

(中国农业科学院北京畜牧兽医研究所 畜禽营养与饲养全国重点实验室,北京 100193)

摘 要: 饲料成本占养殖成本的60%~70%。低蛋白低豆粕多元化日粮配制技术是降低饲料成本、缓解玉米和豆粕等饲料粮供给压力的关键。精确的饲料营养价值数据是分析饲料原料的替代价值以及实现低蛋白低豆粕配制多元化日粮的基石。创制精准、快速的饲料营养价值评定技术,构建饲料原料动态营养价值数据库,是生产中获得精准饲料营养价值数据的关键手段。为此,本文从饲料原料营养价值数据库建设的基本原理、仿生消化评定饲料原料营养价值技术体系发展、仿生消化技术在饲料原料数据库建设和饲料原料间替代价值分析的应用三个方面,系统论述了仿生消化技术在饲料原料营养价值评定的重要价值和广阔前景。

关键词: 仿生消化;饲料原料;营养价值;多元化日粮

中图分类号: S816.15

文献标志码: A

文章编号: 0366-6964(2026)01-0068-12

Establishment and Application of Simulated Digestion Technique to Evaluate the Nutritional Values of Feedstuffs for Pig and Poultry

XIE Jingjing, WANG Yuming, ZHAO Feng*

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

Abstract: Feed accounts for 60% to 70% of costs in pig and poultry production. The technology of diversified diets with low protein and low soybean meal is critical to reduce feed costs and relieve the pressure on the supply of feed grains such as corn and soybean meal. Accurate nutritional values are the keystone to determine the substitutability of various feed ingredients and to formulate diversified diets with low protein and low soybean meal. To obtain accurate nutritional values for feedstuffs in practice, it is critical to establish dynamic nutritional value database for feed ingredients by developing precise and rapid evaluation technologies. Thereby, this article systemically discusses the importance and broad application of simulated digestion technique in nutritional evaluation for feedstuffs from three aspects: the principles of establishing nutritional values database for feed ingredients, the progress in simulated digestion technique for feedstuff evaluation, and the application of simulated digestion technique in feedstuff database establishment and substitutability determination.

Keywords: simulated digestion; feed ingredient; nutritional value; diversified diet

* **Corresponding author:** ZHAO Feng, E-mail: zhaofeng@caas.cn

收稿日期: 2025-01-20

基金项目: 现代农业产业技术体系北京市家禽创新团队(BAIC06-2025-G4); 中国农业科学院科技创新工程(ASTIP-IAS-08)

作者简介: 解竞静, 副研究员, 博士, 主要从事饲料养分效价评定与利用研究, Tel: 010-62874840, E-mail: jiejingjing@caas.cn

* 通信作者: 赵 峰, 主要从事单胃动物饲料养分生物学效价评定研究, E-mail: zhaofeng@caas.cn

2024年我国进口大豆10503万吨,进口来源主要为巴西、美国、阿根廷等产豆国。大豆对外高度依存,影响了我国饲料粮的供给安全。2023年农业农村部发布了《饲用豆粕减量替代三年行动方案》,明确提出,饲料中豆粕用量占比每年下降0.5个百分点以上,到2025年豆粕用量降至13%以下,预计减少豆粕用量680万吨。全国畜牧总站先后发布生猪、肉鸡、蛋鸡、肉鸭、奶牛饲用豆粕减量替代技术要点,全面推广多元化日粮配制技术,优化饲料资源利用。生产中饲料配方是根据饲料原料的价格及其营养价值,在满足约束条件下获得最优成本的原料比例组成^[1],饲料原料的选择取决于两个重要的因素:饲料原料的营养价值和价格。精准地评定饲料原料的营养价值,构建完整的饲料原料营养价值数据库,从营养价值和价格两个维度综合评价饲料原料的饲用价值,是推动多元化日粮配制技术在畜禽养殖行业落地的基础。为此,本文论述仿生消化评定饲料原料营养价值体系的构建以及在饲料原料替代中的应用,为行业提供参考。

1 饲料原料营养价值数据库构建的原则

1.1 常用饲料原料数据库营养价值数据的比较

饲料原料营养价值数据是畜禽饲料生产的基础数据。目前,国内饲料生产、畜禽养殖企业以及动物营养学界主要使用的饲料原料数据来源有《CVB饲料原料的化学成分与营养价值饲料表》(以下简称CVB)^[2]、美国NRC的《猪营养需要量》和《家禽营养需要量》(以下简称NRC)^[3-4]、《巴西家禽和猪饲料成分与营养需要量表》(以下简称巴西猪禽饲料表)^[5]以及中国农业大学发布的《猪营养需要》国家标准^[6]、中国农业科学院发布的《中国饲料成分及营养价值表》^[7]。不同的饲料原料数据库基本架构类似,都包括了饲料描述、常规成分、有效能值、氨基酸组成以及标准回肠消化率等营养指标,但各个数据库包括常规成分的指标不同。例如, CVB^[2]除了提供饲料原料的概略养分、氨基酸组成和矿物元素等数据,还增加了淀粉、糖以及非淀粉多糖等碳水化合物数据。通过比对不同数据库中营养指标,可以非常清晰地看出同名饲料原料在不同数据库中数据差异很大。例如, CVB^[2]、NRC^[3]、巴西猪禽饲料表^[5]、《猪营养需要》^[6]数据库中玉米、豆粕、棉籽粕、菜籽粕、葵花籽粕、花生粕、玉米干酒糟及可溶物(DGGS)的猪净能值的极差分别为0.52、

1.46、0.82、1.16、2.77、1.32、1.56 MJ·kg⁻¹;而 CVB^[2]、NRC^[4]、巴西猪禽饲料表^[5]、中国饲料数据库^[7]中玉米、豆粕、棉籽粕、菜籽粕、葵花籽粕、花生粕、玉米DGGS的鸡代谢能值的极差分别为1.16、1.68、1.46、1.71、2.19、2.29和1.18 MJ·kg⁻¹。同名饲料原料营养价值数据的巨大差异表明不同数据库来源的数据不能相互兼容,实际使用中会造成困扰(表1)。

1.2 饲料原料营养价值数据库的建设原则

造成同一饲料原料在不同饲料数据库中营养价值数据差异的主要原因有三个。其一,饲料原料营养价值数据的来源不同。以美国NRC^[3-4]为代表的数据库,主要数据来源是文献数据总结,而 CVB^[2]为代表的数据库,数据主要来源于数据库建设单位的长期数据积累。目前,饲料原料营养价值数据库中提供了饲料原料的营养价值均值,一些数据库也采用了不同策略构建了饲料原料营养价值预测模型。以有效能为例,《猪营养需要》^[6]国家标准中按照饲料原料分别给出了通过化学成分估测有效能的方程,而 CVB^[2]则构建了基于原料可消化养分估测有效能的方程。不同来源数据的质量、饲料原料营养价值模型的架构会影响饲料原料营养价值数据的代表性和准确性。其二,饲料原料营养价值数据测定方法、使用的仪器设备、操作步骤不同也会导致测定值的差异。以有效能为例,不同饲料数据库的营养价值数据都以动物的消化代谢试验实测数据为基础,然而,消化代谢试验中动物的品种、日龄、试验流程等都会影响测定结果^[8-10],导致了同一饲料原料有效能观测值的差异。Wang等^[9]发现,代谢试验正式期开始前禁食和不禁食造成了能量、粗脂肪、粗蛋白质消化率相差3.5%、18.56%、-8.1%(禁食 vs. 不禁食),表观代谢能则相差了1.59%。化学成分测定中,仪器型号、操作步骤等不同也会导致测定结果的较大偏差。杜中原等^[11]比较了两种主流氧弹热量计测定的日粮和粪样能值差异,发现两个设备的测定值最大可相差0.54 MJ·kg⁻¹。本团队前期联合中国农业大学、美国明尼苏达大学三个实验室,开展了15个玉米DGGS总能测定的比对试验,发现同一样品实验室间测定值最大相差达1.35 MJ·kg⁻¹(未发表数据)。这是由于不同实验室分别采用矿物油封或镜头纸包样品,来防止燃烧时样品的飞溅。通过实验室间比对试验,本团队还发现,中性洗涤纤维(NDF)和

表1 不同饲料数据库中饲料原料有效能值的比较

Table 1 Comparison of effective energy values of feedstuffs from different feed databases

饲料原料 Feed ingredient	指标/% Index	生长猪净能/(MJ·kg ⁻¹) Net energy for growing pig				鸡代谢能/(MJ·kg ⁻¹) AME ¹ for poultry			
		荷兰 ⁵	美国 ⁶	巴西 ⁷	中国 ⁸	荷兰 ⁵	美国 ⁹	巴西 ⁷	中国 ¹⁰
		Netherlands	USA	Brazil	China	Netherlands	USA	Brazil	China
玉米 Corn	CP ² , 7.5~8.5	11.06	11.18	11.16	11.58	12.91	14.02	14.07	13.47
豆粕 Soybean meal	CP, 43.6~44.5	8.18	8.99	8.29	9.64	8.32	9.33	9.26	10.00
棉籽粕 Cottonseed meal	CP, 39.2~44.7	5.97	6.79	6.67	6.44	7.03	7.77	8.37	8.49
菜籽粕 Canola meal	CP, 36.2~38.6	6.75	7.91	7.15	7.57	6.66	8.37	7.29	7.41
葵花籽粕 Sunflower seed meal	CF ³ , 20.4~25.8; CP, 29.0~33.0	5.35	3.92	4.16	6.69	5.32	6.46	7.51	6.65
花生粕 Peanut meal	CF, 6.2~10.0; CP, 45.0~50.7	8.56	8.05	8.25	9.37	8.59	9.20	9.32	10.88
玉米干酒糟及可溶物 Corn DDGS	EE ⁴ , 6~12.5%	9.23	9.80	8.24	9.34	—	10.38	10.08	9.20

¹. AME, 表观代谢能; ². CP, 粗蛋白; ³. CF, 粗纤维; ⁴. EE, 粗脂肪; ⁵. 荷兰:《2023年 CVB 饲料原料的化学成分与营养价值饲料表》^[3]; ⁶. 美国:《猪营养需要(第11修订版)》^[4]; ⁷. 巴西:《巴西家禽和猪饲料成分与营养需要量表(第5版)》^[5]; ⁸. 中国:《猪营养需要量(GB/T 39235—2020)》^[6]; ⁹. 美国:《家禽营养需要(第9修订版)》^[4]; ¹⁰. 中国:《中国饲料成分及营养价值表(第35版)》^[7]

¹. AME, Apparent metabolized energy; ². CP, Crude protein; ³. CF, Crude fiber; ⁴. EE, Ether extract; ⁵. Netherlands: CVB feed table 2023-chemical composition and nutritional values of feedstuffs^[3]; ⁶. USA: Nutrient requirements of swine: Eleventh Revised Edition^[4]; ⁷. Brazil: Brazilian tables for poultry and swine: composition of feedstuffs and nutritional requirements (Fifth Edition)^[5]; ⁸. China: Nutrient requirements of swine (GB/T 39235—2020)^[6]; ⁹. USA: Nutrient requirements of poultry: Ninth Revised Edition^[6]; ¹⁰. China: Tables of feed composition and nutritive values in China (Thirty-fifth edition)^[7]

酸性洗涤纤维(ADF)测定存在更大的实验室间变异。从测定结果上看,每个参与对比试验的实验室所测定的 NDF 和 ADF,测定值批内和批次间重复性均满足测定方法的要求,但一些饲料原料样品的测定值在不同实验室间可相差 20%~40%(图1,未发表数据)。其三,化学成分测定值的差异直接导致从化学成分估测有效能值回归方程的差异。不同检测体系测定的化学成分无法通过同一个回归方程准确地估测饲料的有效能值,造成了估测结果的“脱靶效应”。Meloche 等^[12]通过其他实验室建立的代谢能预测模型估测了 15 个玉米 DDGS 的代谢能,与肉鸡代谢试验实测值整体相差 1.15 MJ·kg⁻¹。由此可见,化学成分检测体系的一致性预测模型能否准确估测有效能的前提。因此,在饲料数据库建设中,对所有样品进行化学成分测定及营养价值评定时,应遵循“书同文、车同轨,一把尺子量到底”的基本规则。在实际生产中,饲料和养殖企业饲料原料周转速度快,使用的饲料原料种类多、化学成分存在明显差异,静态的营养价值数据仅能提供参考,不能满足生产中对于饲料原料精准使用、控制日粮配方成本的需求。法国 EvaPig^[13]、澳大利亚^[14]等数据库提出了通过化学成分估测有效能、可消化

氨基酸含量的动态估测模型。然而,这些模型在实际使用中存在着“彼”、“此”的不同,在化学成分测定方法、营养指标测定体系、动物品种上都存在着系统误差,往往导致了动态模型的“水土不服”。近些年,部分龙头企业已基于自身的质检体系,在保证营养指标和化学成分的测定标准统一的前提下,针对企业自身主打的畜禽品种建立了仿生消化技术快速评定不同饲料原料有效能等营养指标,构建了企业内部的饲料原料动态营养价值数据库。

2 仿生消化评定猪禽饲料原料营养价值的技术体系

2.1 仿生消化评定饲料营养价值的发展趋势

生物学法评定饲料原料的营养价值存在费时、费力、耗资等问题,限制了企业在生产中采用该方法构建饲料原料数据库,难以快速获得饲料原料(特别是非常规饲料原料)准确的营养价值。因此,如何实现对饲料营养价值的快速评定一直是行业关注的焦点。早在上世纪 50 年代,国内外学者就开展了体外消化方法的研究,通过模拟饲料养分在动物体内消化吸收的过程,来评价饲料原料的营养价值。随着对动物消化生理研究的深入、消化酶提取

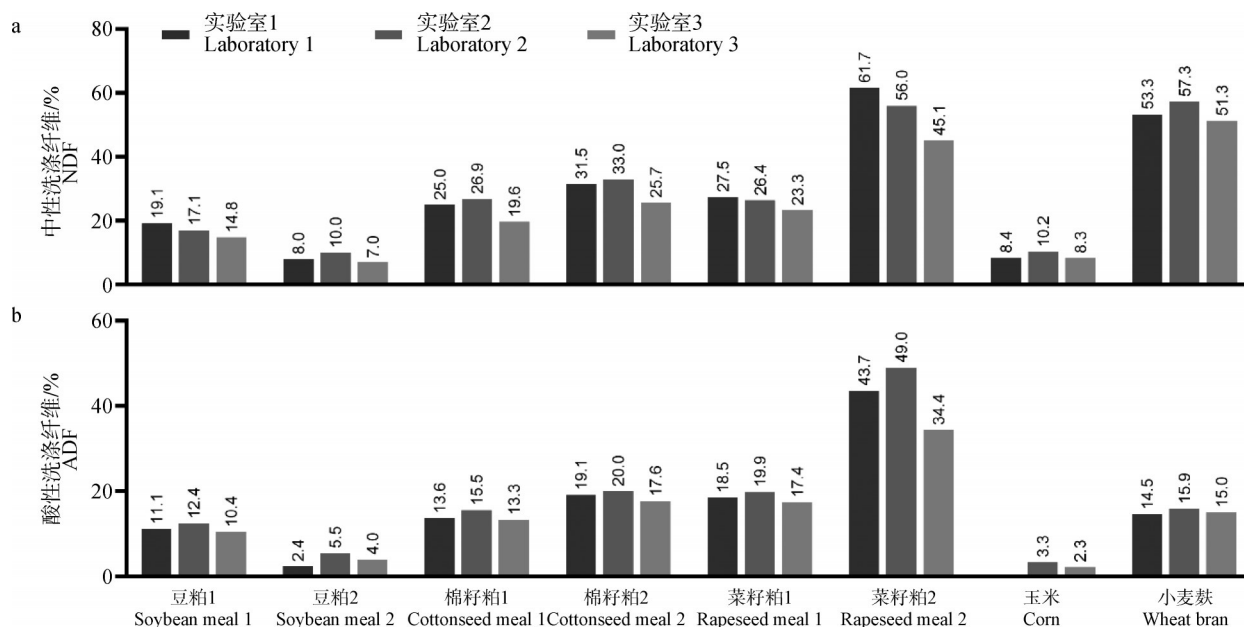


图1 实验室间测定饲料原料NDF(a)和ADF(b)的比较(干物质基础)(未发表数据)

Fig. 1 Interlaboratory variations in NDF (a) and ADF (b) of feed ingredients (dry matter basis) (Unpublished data)

与纯化技术的进步,体外仿生消化过程从最初的单一消化酶水解发展到多种消化酶分段式水解^[15-17]。目前,国外用于饲料营养价值评定的仿生消化法多参考 Boisen 和 Fernandez^[16]提出的三角瓶法。该方法以三角瓶或离心管作为模拟消化器;消化液分别使用胃蛋白酶、胰液素、纤维素酶模拟胃液、小肠液、大肠液;整个消化过程由水浴或空气浴提供酶促反应温度,采用摇床、搅拌或涡旋混合模拟胃肠道蠕动,保证底物和消化酶的充分接触;而进行各阶段消化时需要通过手工进行pH调节、消化液加入、消化产物的过滤分离等。该方法是从人类食品营养特性体外评估方法改进而来,应用在畜禽饲料营养价值的评定上还存在诸多弊端。首先,模拟消化液的组成及酶学特性与动物体内消化液存在差异,且消化液pH、消化时间等参数与体内消化不匹配。其次,消化过程中水解产物的积累会抑制酶促反应。此外,水解与未水解产物的分离难以准确定量,全程手工操作也造成了累计误差大和定量不准确的问题。近年来,根据人消化器官的生理环境条件及针对的评价指标,营养学家开发了很多仿生消化模型来研究食品的营养特性^[18-22]。然而,这些方法的消化条件不符合猪禽的体内消化环境,因此,通过它们测定的可消化养分含量与猪禽体内养分消化率以及生长反应的关联性不明确。而且这些方法模拟消化过程非常复杂,步骤多,累积误差大,

无法满足产业对饲料营养价值的精度要求。以肉鸡饲料为例,代谢能约为 $12.55 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$,代谢能测定值0.3%的误差精度($4.184 \text{ KJ} \cdot \text{kg}^{-1}$)将造成约每吨0.6元的饲料成本差异。因此,需要根据畜禽饲料营养价值评定的技术需求,改进体外仿生消化过程模拟猪禽体内消化过程的有效性,以提高对饲料营养价值评定的精准度。长期以来,动物营养学领域基于猪禽体内消化过程建立仿生消化方法,专用于饲料营养价值评定的研究不多。Kim等^[23]、Chen等^[24]、Son等^[25]、Salazar-Villanea等^[26]、Bryan等^[27-29]虽然在通过仿生消化估测猪禽饲料的能量及氨基酸的利用率上开展了相关工作,但在原理上仍主要基于 Boisen 和 Fernandez^[16]的体外模拟消化体系,难以达到标准化、仪器化、精准化快速评定饲料营养价值的目标。但是,以酶解法为基础的体外仿生消化法仍然是营养学家普遍认可的实现快速、高通量评定饲料营养价值的重要手段^[13,19,30-32]。

2.2 仿生消化评定猪禽饲料原料营养价值技术体系的构建

针对上述问题,中国农业科学院北京畜牧兽医研究所从猪禽体内消化生理学参数的获取、模拟消化液的制备、全自动模拟消化工具的研制等方面开展了持续研究,开发了全自动单胃动物仿生消化技术体系。首先,研制了新型的猪用肠道套管,发明了禽用肠道套管及配套的肠道外科手术^[33-35],为获

得猪禽肠道动态食糜及体内消化环境参数提供了关键手段。在此基础上,系统研究了不同日粮结构及营养水平对猪禽消化液组成的影响规律,并获得了生长猪、鸡(白羽肉鸡和黄羽肉鸡)和鸭(北京鸭)消化道各段消化液的组成、pH和离子浓度以及食糜的排空时间等消化生理学参数^[34-39]。基于体内消化参数建立了猪、鸡、鸭饲料仿生消化的质控参数^[40-42]。其次,针对商品化的高活性消化酶多是微生物源性或猪、牛源性,与模拟的猪禽品种体内消化酶不同源,酶学特性差异大等问题,建立了从动物肠液中分离纯化消化酶获得高水溶性、高活性消化酶产品的专利技术^[43-46]。基于纯化内源消化酶粉剂制备了模拟消化液的标准试剂盒产品,极大程

度地提高了模拟消化液与体内消化液在酶学特性上的相似性,仿生消化进一步与体内消化程度接近^[43,46-48]。最后,根据猪禽的体内消化参数及模拟消化液的制备方法,通过动物营养学与自动化控制技术的交叉融合,发明了全自动模拟猪禽体内消化过程的单胃动物仿生消化系统,包括仿生消化反应系统(消化场所)、消化液自动注入系统(自动切换消化阶段)、缓冲液自动循环系统(对消化环境中pH、离子浓度等进行自动切换)、水解产物清洗系统(模拟吸收)和电脑控制系统5大模块。通过仿生消化参数、仿生消化液试剂盒和全自动单胃动物仿生消化系统的“三位一体”,实现了猪禽仿生消化评定饲料营养价值的标准化、仪器化和工业化(图2)。

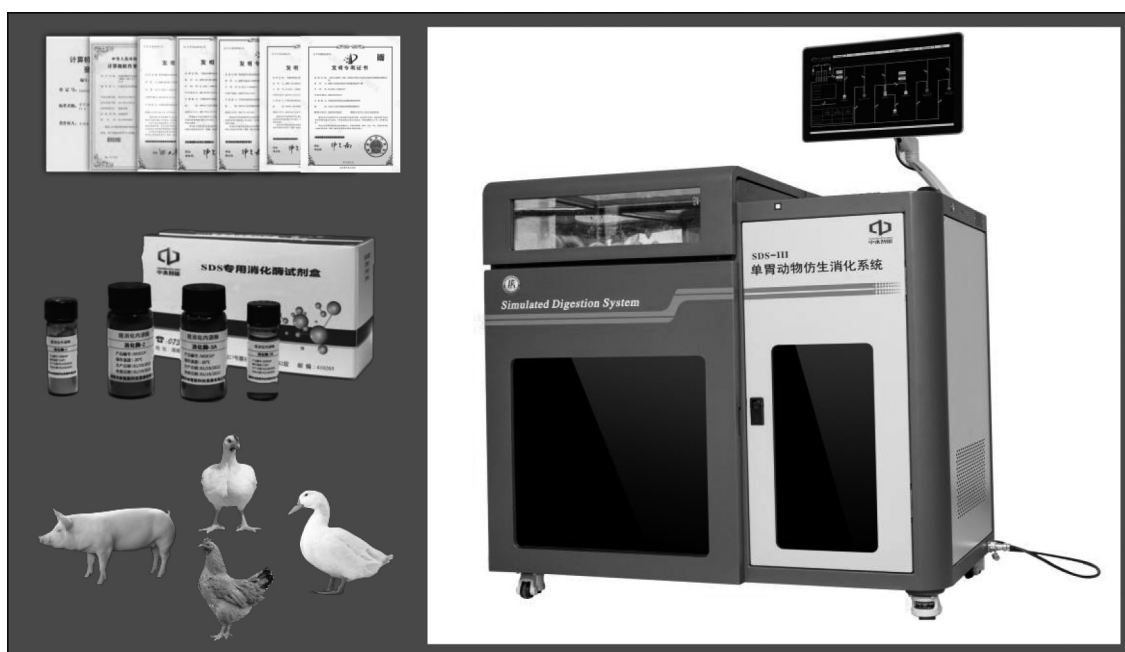


图2 单胃动物仿生消化技术体系

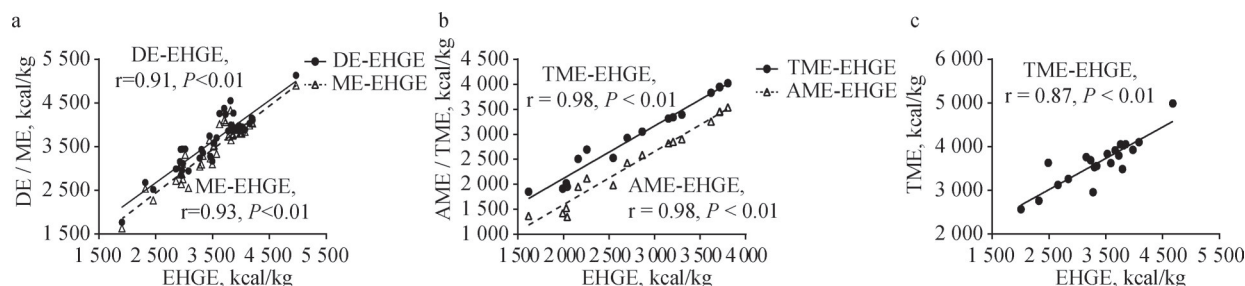
Fig. 2 Simulated digestion system for monogastric animals

基于单胃动物仿生消化技术体系,本研究团队已开发了针对饲料能量、蛋白质(氨基酸)、磷及还原糖等养分效价的体外快速评定方法^[49-50],并系统验证了该体系的准确性、重演性、可加性。与动物体内试验结果相比,通过仿生消化系统评定的43个猪常用饲料原料的酶水解物能值与体内法消化能的相关系数为0.91、与代谢能的相关系数为0.93(未发表数据,图3a);评定的16个肉鸡常用饲料原料的酶水解物能值与表观代谢能和真代谢能的相关系数均为0.98(Zhao等^[42];图3b);评定的21个肉鸭常用饲料原料的酶水解物能值与真代谢能的相

关系数为0.87(Wang等^[56];图3c)。国内其他研究团队也证实了单胃动物仿生消化系统测定的酶水解物能值与猪禽体内法测值高度相关^[51-56],这进一步表明,采用仿生消化技术可以准确估测饲料的有效能值。在此基础上,通过对单胃动物仿生消化系统的仪器间及不同实验室间测定结果的重演性和可加性的研究,表明同一台仿生消化仪在测定饲料原料干物质消化率与酶水解物能值的批内变异系数(coefficient of variation, CV)、批间CV和总CV均小于1.40%;仪器间CV和总CV均小于1.64%^[57];4个不同实验室测定6个饲料原料和8个

日粮的酶水解物能值,实验室间和再现性 CV 均小于 1.01% (仅小麦麸的上述 CV 分别 1.18% 和 1.97%),并且具有良好的可加性^[58-59]。目前,猪、鸡、鸭饲料有效能的评定技术已实现了从仿生消化

试剂盒→单胃动物仿生消化系统→数据计算软件等系列知识产权保护的商业化推广,并针对企业的主要饲养品种,进行了专门化的仿生消化技术定制服务。



a. 43 种生长猪常用原料酶水解物能值与消化能、代谢能的相关性(未发表数据):DE. 消化能;ME. 代谢能;EHGE. 酶水解物能值。b. 16 个鸡常用原料酶水解物能值与表观代谢能、真代谢能的相关性^[42]:AME. 表观代谢能;TME. 真代谢能;EHGE. 酶水解物能值。c. 21 个肉鸭常用原料酶水解物能值与真代谢能的相关性^[56]:TME. 真代谢能;EHGE. 酶水解物能值

a. Correlation between EHGE and DE or ME of 43 common feed ingredients for swine (unpublished data): DE. Digestive energy; ME. Metabolizable energy; EHGE. Enzyme hydrolyzed gross energy. b. Correlation between EHGE and AME or TME of 43 common feed ingredients for chickens^[42]: AME. Apparent metabolizable energy; TME. True metabolizable energy; EHGE. Enzyme hydrolyzed gross energy. c. Correlation between EHGE and TME of 43 common feed ingredients for ducks^[56]: TME. True metabolizable energy; EHGE. Enzyme hydrolyzed gross energy

图3 仿生消化法测值与体内法测值的相关性

Fig. 3 Correlation between values determined with simulated digestion and *in vivo* method

3 仿生消化技术在饲料原料数据库建设中的应用

3.1 仿生消化技术在饲料原料数据库建设中的作用

饲料原料数据库的准确性显著地影响日粮配方的结构和成本。Tahir 和 Pesti^[60]使用不同的可消化氨基酸含量数据库(Ajinomoto Heartland vs. Evonik Degussa)计算家禽日粮的配方,两个配方成本相差 3~6 美元/吨(约 20~45 元/吨)。在商品饲料生产中,饲料原料营养成分变异大是影响饲料配方效果的主要挑战之一^[1]。目前,生产企业通常采用近红外快速估测饲料原料的化学成分,再通过化学成分与有效能值或可消化氨基酸含量的回归模型获得饲料原料的营养价值^[1,13,61]。然而,我国每年大量使用非常规饲料原料,如酱油渣、醋渣、白酒渣、小麦胚芽、花椒籽等。营养学家很难从现有资料中得到以化学成分估测这些原料营养价值的数学模型。而仿生消化法则可以发挥其快速、工业化测定的优势,

快速获得这些“无据可查”的非常规饲料原料营养价值,从而高效地应用于建立更加全面的饲料原料的动态营养价值数据库,以实现精准营养供给。目前,国内已有 90 余家单位采用仿生消化技术评定饲料原料的营养价值或构建饲料原料数据库^[53,56,62-63]。其中部分龙头企业已采用该技术构建了相对完整的饲料原料动态营养价值数据库应用于饲料配方,并证实方法精准、可靠^[58]。水禽产业技术体系制定的鸭饲养标准^[64]已将仿生消化法测定的酶水解物能值作为能量需要量指标列入,供行业参考。2022 年,仿生消化法精准评定饲料原料的营养价值列入农业农村部豆粕减量替代技术应用典型案例。中国农业科学院北京畜牧兽医研究所通过仿生消化法已经积累了大量的猪、鸡、鸭饲料原料有效能值数据,通过《中国饲料数据库》发布供行业参考应用(部分成套数据列于表 2)。同时,也通过逐步回归,建立了基于化学成分估测饲料原料有效能值的动态模型。这为非常规饲料原料替代玉米、豆粕的饲用价值分析提供了精准的营养价值数据。

表 2 通过仿生消化法估测的猪、鸡、鸭饲料原料有效能

Table 2 Effective energy of feed ingredients predicted by simulated digestion method for pig, rooster and duck																	%
饲料名称 Feed Name	干物质 Dry matter	粗蛋白质 Crude protein	粗脂肪 EE	粗纤维 Crude fiber	粗灰分 Ash	中性洗涤 纤维 Neutral detergent fiber		酸性洗涤 纤维 Acid detergent fiber	总能/ (MJ·kg ⁻¹) Gross energy	猪净能/ (MJ·kg ⁻¹) Net energy of pig		鸡代谢能/ (MJ·kg ⁻¹) AME ¹ of rooster		鸭真代谢能/ (MJ·kg ⁻¹) TME ² of duck			
										平均值		平均值		平均值			
										n	Mean	n	Mean	n	Mean		
玉米 Corn	86	7.6	3.5	1.8	1.2	7.6	1.8	16.10	37	10.99	57	12.82	27	13.64			
高粱 Sorghum	86	8.7	3.3	1.9	1.3	7.3	2.4	16.27	8	10.34	3	11.76	4	13.76			
小麦 Wheat	87	13.6	1.5	2.8	1.6	11.4	2.7	16.06	49	10.44	52	12.60	38	13.68			
面粉 Wheat flour	87	15.8	2.2	1.2	1.4	4.9	0.9	16.37	3	11.55	2	13.62	1	14.37			
小麦次粉 Wheat shorts	87	17.7		5.2	2.9	18.3	4.8	16.59	8	9.02	4	11.18	1	11.72			
小麦麸 Wheat bran	87	16.0	3.9	8.6	5.8	40.2	11.7	16.81	9	6.16	6	8.46	7	10.03			
米糠 Rice bran	89	13.0	13.4	12.3	7.5	12.1	4.4	18.80	5	10.49	2	14.36	3	13.18			
豆粕 Soybean meal	89	43.8	1.7	5.4	6.0	11.6	7.6	17.53	54	8.57	47	12.03	5	13.24			
豆粕 Soybean meal	89	46.6	1.0	3.3	5.8	10.8	6.5	17.57	34	8.56	28	12.42	4	13.02			
棉籽粕 Cottonseed meal	90	41.6	1.0	13.0	6.1	34.3	14.8	17.23	5	6.83	5	10.10	5	10.73			
棉籽粕 Cottonseed meal	90	50.4	1.6	9.1	6.8	26.2	10.4	17.71	5	6.94	3	10.85	2	11.39			
菜籽粕 Rapeseed meal	88	36.0	2.9	10.8	6.0	27.0	15.8	17.18	9	6.76	9	8.97	13	10.83			
花生粕 Peanut meal	88	45.9	1.6	6.2	5.8	24.7	8.3	16.56	6	8.18	3	12.40	4	14.10			
葵花籽粕 Sunflower seed meal	88	34.1	1.1	15.9	6.2	30.8	20.1	17.01	6	5.54	2	10.24	1	10.36			
玉米干酒糟及可溶物 Corn distiller dried grains with solubles	90	26.7	10.1	6.0	4.6	25.6	7.5	19.47	5	8.63	57	11.70	33	12.63			
豌豆 Pea	89	21.3	1.7	—	2.5	—	5.9	16.35	3	9.88	3	12.07	3	13.46			

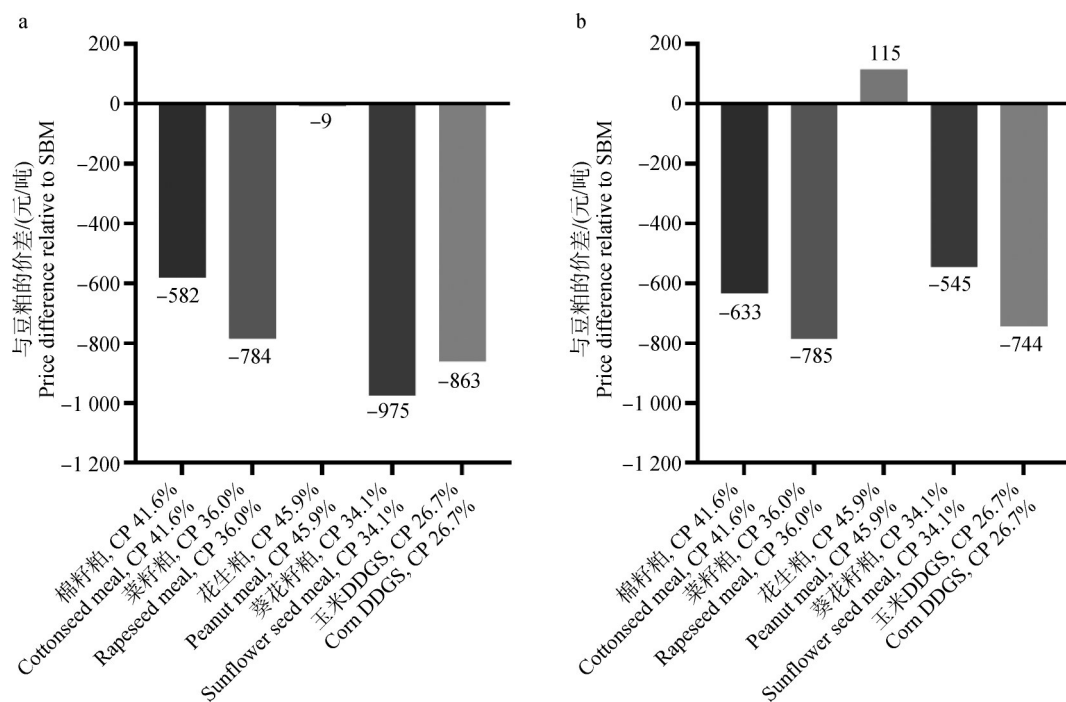
¹. AME. 表观代谢能; ². TME. 真代谢能

¹. AME. Apparent metabolizable energy. ². TME. True metabolizable energy

3.2 仿生消化技术在饲料原料饲用价值评估上的应用

在饲料生产中,饲料原料的价格、营养价值及设定的营养需要量共同决定了最低配方成本^[1, 60]。饲料原料的饲用价值实质上是原料间营养价值和价格的综合比较,而不仅是营养价值的差异。因此,饲料原料间相互替代的潜力依赖于饲料原料营养价值数据库的完整性以及当前的原料市场价格。美国 Brill、比利时 Bestmix 等配方软件都是通过参数(经济)分析模块实现对饲料原料饲用价值的分析。这些配方系统中,通常以玉米和豆粕等重要能量饲料和蛋白质饲料原料为参照,来估算饲料原料的饲用价值。由于能量和蛋白质成本约占日粮配方成本的 90% 以上,以玉米和豆粕作的价格、以及玉米和豆粕提供的有效能值和可消化蛋白质的含量,可以计算出 1 kJ 有效能和 1 个百分点可消化蛋白(或氨基酸)的价格。其他饲料原料根据有效能、可消化粗蛋白(或氨基酸)的含量及价格,以玉米和豆粕的有效能和可消化粗蛋白含量为参

照,相应地计算出该饲料原料的配方价格。当配方价格高于采购价格时,表明该原料有替代玉米或豆粕的价格优势。因此,快速、准确获得不同原料的有效能和可消化蛋白是合理估算饲料原料饲用价值的前提和关键。仿生消化技术除了在饲料原料营养价值的快速和准确评定上有明显的优势,该方法还能更灵敏地分辨不同原料间营养价值的差异^[65]。通过仿生消化技术,笔者对棉籽粕、菜籽粕、花生粕、葵花籽粕、玉米 DDGS 这 5 个具有替代豆粕潜力的蛋白质饲料原料进行了配方价格和饲用价值分析。从图 4a 可知,在生长猪日粮中,当棉籽粕、菜籽粕、花生粕、葵花籽粕和玉米 DDGS 的价格分别低于豆粕 582、784、9、975 和 863 元/吨时,才具有替代豆粕的价格优势;在肉鸡日粮中(图 4b),当花生粕的价格在不高于豆粕 115 元/吨时,具有替代豆粕的优势;当棉籽粕、菜籽粕、葵花籽粕和玉米 DDGS 的价格分别低于豆粕 633、785、545 和 744 元/吨时,才具有替代豆粕的价格优势。总体上,随着豆粕价格的回落,肉鸡



a. 猪饲料; b. 鸡饲料; 豆粕(43% 粗蛋白含量, 3 030 元/吨)的价格参考博亚和讯 2025 年 1 月山东地区监测的数据(<http://www.boyar.cn>)

a. Feed for swine; b. Feed for poultry; Soybean (43% CP, 3 030 RMB/T) price was referred to the data in Shandong province collected by Boyar on January, 2025 (<http://www.boyar.cn>)

图 4 猪鸡饲料配方中具有替代豆粕价格优势的蛋白质饲料与豆粕价格的最小价差

Fig. 4 The minimal price difference between protein feed ingredients and soybean meal when having price advantage to replace soybean meal in swine and poultry diets

利用非常规蛋白质饲料原料替代豆粕的优势高于生长猪。

4 结论与展望

饲料原料营养价值的精准评定是影响日粮配方成本、饲料原料间替代的关键。在实际生产中,只有基于“书同文、车同轨,一把尺子量到底”的基本原则进行所有饲料原料的营养价值评定,且在此基础上构建动态营养价值数据库,才能确保饲料配方效果稳定,并最大程度地优化原料采购和降低配方成本。仿生化技术能够实现“同一度量”下饲料原料营养价值的标准化、仪器化和工业化测定,在保证饲料原料营养价值评定效率的同时,减少数据变异,提高标准化水平,实现精准的多元化日粮配制技术。随着仿生化技术的进一步发展,它通过定量淀粉与蛋白质消化速度来实现碳氮适配提高畜禽饲料转化效率、高通量筛选饲用酶制剂产品、评估功能性物质定点释放工艺等领域,都有广阔的应用前景。

参考文献(References):

- [1] ALHOTAN R A. Commercial poultry feed formulation: current status, challenges, and future expectations [J]. *World Poultry Sci J*, 2021, 77(2): 279-299.
- [2] CVB. CVB feed table 2023-chemical composition and nutritional values of feedstuffs [Z]. 2023.
- [3] National Research Council. Nutrient requirements of swine: Eleventh Revised Edition [M]. Washington, DC: The National Academy Press, 2012.
- [4] National Research Council. Nutrient requirements of poultry: Ninth Revised Edition [M]. Washington, DC: National Academy Press, 1994.
- [5] ROSTAGNO H S, ALBINO L F T, CALDERANO A A, et al. Brazilian tables for poultry and swine: composition of feedstuffs and nutritional requirements [M]. Suprema: Visconde do Rio Branco, MG, 2024.
- [6] GB/T 39235—2020, 猪营养需要量[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
GB/T 39235—2020, Nutrient requirements of swine [S]. Beijing: Standards Press of China, 2020. (in Chinese)
- [7] 中国饲料成分及营养价值表(第35版)[J]. 中国饲料, 2024(21): 182-197.
Table of feed composition and nutritive values in China (Thirty-fifth edition) [J]. *China Feed*, 2024 (21): 182-197. (in Chinese)
- [8] OUWELTJES W, VERSCHUREN L M G, PIJLMAN J, et al. The repeatability of individual nutrient digestibility in pigs [J]. *Livest Sci*, 2018, 207: 63-67.
- [9] WANG Y, WU Y, MAHMOOD T, et al. Age-dependent response to fasting during assessment of metabolizable energy and total tract digestibility in chicken [J]. *Poul Sci*, 2022, 101(7): 101932.
- [10] RAVINDRAN V, ADEOLA O, RODEHUTSCORD M, et al. Determination of ileal digestibility of amino acids in raw materials for broiler chickens-Results of collaborative studies and assay recommendations [J]. *Anim Feed Sci Tech*, 2017, 225: 62-72.
- [11] 杜中原, 苏艳芬, 陈凯旋, 等. 2种氧弹热量计测定样品总能的差异及其对能量消化率的影响[J]. 动物营养学报, 2021, 33(2): 1128-1136.
DU Z Y, SU Y F, CHEN K X, et al. Difference in two types of oxygen bomb calorimeter to determine gross energy and its effects on energy digestibility. [J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2021, 33 (2): 1128-1136. (in Chinese)
- [12] MELOCHE K J, KERR B J, BILLOR N, et al. Validation of prediction equations for apparent metabolizable energy of corn distillers dried grains with solubles in broiler chicks [J]. *Poul Sci*, 2014, 93(6): 1428-1439.
- [13] INRA, AFZ, NØØVISTAGO M. EvaPig-Equations and coefficients [Z]. 2020.
- [14] BRYDEN W, LI X, RAVINDRAN G, et al. Ileal digestible amino acid values in feedstuffs for poultry [M]. BARTON: Rural Industries Research and Development Corporation, 2009.
- [15] FURUYA S, SAKAMOTO K, TAKAHASHI S. A new in vitro method for the estimation of digestibility using the intestinal fluid of the pig [J]. *Br J Nutr*, 1979, 41(3): 511-520.
- [16] BOISEN S, FERNANDEZ J A. Prediction of the total tract digestibility of energy in feedstuffs and pig diets by *in vitro* analyses [J]. *Anim Feed Sci Tech*, 1997, 68(3-4): 277-286.
- [17] SHEFFNER A L, ECKFELDT G A, SPECTOR H. The pepsin-digest-residue (PDR) amino acid index of net protein utilization [J]. *J Nutr*, 1956, 60 (1): 105-120.
- [18] DUPONT D, ALRIC M, BLANQUET-DIOT S, et al. Can dynamic *in vitro* digestion systems mimic

- the physiological reality?[J]. *Crit Rev Food Sci Nutr*, 2019, 59(10):1546-1562.
- [19] BRODKORB A, EGGER L, ALMINGER M, et al. INFOGEST static *in vitro* simulation of gastrointestinal food digestion[J]. *Nat Protoc*, 2019, 14(4):991-1014.
- [20] SOUSA R, PORTMANN R, DUBOIS S, et al. Protein digestion of different protein sources using the INFOGEST static digestion model[J]. *Food Res Int*, 2020, 130:108996.
- [21] MULET-CABERO A I, EGGER L, PORTMANN R, et al. A standardised semi-dynamic *in vitro* digestion method suitable for food-an international consensus [J]. *Food Funct*, 2020, 11(2):1702-1720.
- [22] MARTINEAU-COTE D, ACHOURI A, PITRE M, et al. Improved *in vitro* gastrointestinal digestion protocol mimicking brush border digestion for the determination of the Digestible Indispensable Amino Acid Score (DIAAS) of different food matrices [J]. *Food Res Int*, 2024, 178:113932.
- [23] KIM J, JO Y Y, KIM B G. Energy concentrations and nutrient digestibility of high-fiber ingredients for pigs based on *in vitro* and *in vivo* assays [J]. *Anim Feed Sci Tech*, 2022, 294:115507.
- [24] CHEN H, WIERENGA P A, HENDRIKS W H, et al. *In vitro* protein digestion kinetics of protein sources for pigs[J]. *Animal*, 2019, 13(6):1154-1164.
- [25] SON J, PARK N, KIM B G. Energy utilization of corn, oilseed meals, and fibrous ingredients can be predicted by multi-sample simultaneous *in vitro* assay for growing pigs[J]. *Anim Feed Sci Tech*, 2024, 309:115903.
- [26] SALAZAR-VILLANEA S, HULSHOF T G, VAN DER POEL A F B, et al. Predicting the standardized ileal protein digestibility of processed soybean meal and rapeseed meal in growing pigs using two *in vitro* methods[J]. *J Anim Sci*, 2016, 94(suppl_3):202-206.
- [27] BRYAN D, ABBOTT D A, CLASSEN H L. Development of an *in vitro* protein digestibility assay mimicking the chicken digestive tract[J]. *Anim Nutr*, 2018, 4(4):401-409.
- [28] BRYAN D D S L, ABBOTT D A, CLASSEN H L. Digestion kinetics of protein sources determined using an *in vitro* chicken model[J]. *Anim Feed Sci Tech*, 2019, 248:106-113.
- [29] BRYAN D D S L, CLASSEN H L. *In vitro* methods of assessing protein quality for poultry [J]. *Animals*, 2020, 10(4):551.
- [30] ZAEFARIAN F, COWIESON A J, PONTOPPIDAN K, et al. Trends in feed evaluation for poultry with emphasis on *in vitro* techniques [J]. *Anim Nutr*, 2021, 7(2):268-281.
- [31] MINEKUS M, ALMINGER M, ALVITO P, et al. A standardised static *in vitro* digestion method suitable for food-an international consensus [J]. *Food Funct*, 2014, 5(6):1113-1124.
- [32] KIM H Y, MOON J-O, KIM S W. Development and application of a multi-step porcine *in vitro* system to evaluate feedstuffs and feed additives for their efficacy in nutrient digestion, digesta characteristics, and intestinal immune responses[J]. *Anim Nutr*, 2024, 17:265-282.
- [33] ZHAO F, XIE M L, LI H, et al. Developing a silicon T-shaped cannula to sample intestinal digesta in ducks [J]. *Anim Feed Sci Tech*, 2016, 219:175-180.
- [34] REN L Q, ZHAO F, TAN H Z, et al. Effects of dietary protein source on the digestive enzyme activities and electrolyte composition in the small intestinal fluid of chickens[J]. *Poul Sci*, 2012, 91(7):1641-1646.
- [35] ZHAO F, HOU S S, ZHANG H F, et al. Effects of dietary metabolizable energy and crude protein content on the activities of digestive enzymes in jejunal fluid of Peking ducks [J]. *Poul Sci*, 2007, 86(8):1690-1695.
- [36] YU Y, ZHAO F, CHEN J, et al. Research Note: Effect of dietary cottonseed meal and soybean oil concentration on digesta passage time and amino acids digestibility in roosters[J]. *Poult Sci*, 2021, 100(11):101446.
- [37] 叶晓梦, 宋明强, 孙晓晓, 等. 饲料粗蛋白质水平对肉鸡消化酶活性及能量、蛋白质代谢的影响[J]. 动物营养学报, 2022, 34(8):4988-4999.
- YE X M, SONG M Q, SUN X X, et al. Effects of dietary crude protein level on digestive enzyme activities, metabolism of energy and protein of broilers [J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2022, 34(8):4988-4999. (in Chinese)
- [38] 党方昆, 赵 峰, 高理想, 等. 饲料蛋白质水平及纤维来源对生长猪盲肠液特性的影响[J]. 动物营养学报, 2018, 30(7):2510-2518.
- DANG F K, ZHAO F, GAO L X, et al. Effects of dietary protein levels and fiber sources on characteristics of cecal fluid of growing pigs [J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2018, 30(7):2510-2518. (in Chinese)
- [39] 高庆涛, 赵 峰, 张 虎, 等. 饲料粗纤维水平与采食

- 时间对生长猪肠道食糜通过速度的影响[J]. 动物营养学报, 2018, 30(12): 5230-5237.
- GAO Q T, ZHAO F, ZHANG H, et al. Effects of dietary crude fiber level and feeding time on passage rate of digesta in intestinal tract of growing pigs[J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2018, 30(12): 5230-5237. (in Chinese)
- [40] WANG Y, YIN L, ZHANG H, et al. Accuracy of predicting metabolizable energy from *in vitro* digestible energy determined with a computer-controlled simulated digestion system in feed ingredients for ducks [J]. *Anim Nutr*, 2022, 8: 52-60.
- [41] DU Z, WANG Y, SONG M, et al. An automatically progressed computer-controlled simulated digestion system to predict digestible and metabolizable energy of unconventional plant protein meals for growing pigs [J]. *Anim Nutr*, 2022, 10: 178-187.
- [42] 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]. *J Anim Sci*, 2014, 92(4): 1537-1547.
- [43] ZHANG L, ZHAO F, ZHANG H, et al. Validation of *in vitro* digestion using simulated small intestinal fluid with specific digestive activity to predict the metabolizable energy of feed ingredients for duck[J]. *Poult Sci*, 2019, 98(3): 1280-1287.
- [44] 王钰明, 王 亚, 党方昆, 等. 不同生长阶段和饲粮类型下猪空肠液在纯化过程中消化酶活性回收率的差异[J]. 动物营养学报, 2019, 31(7): 3067-3073.
- WANG Y M, WANG Y, DANG F K, et al. Difference in recoveries of digestive enzyme activities during purification process for jejunal fluid of pigs in different growth phases and diet types [J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2019, 31(7): 3067-3073. (in Chinese)
- [45] SONG M, REN C, LIU Y, et al. Comparison of the characteristics of small intestinal fluid from white-feathered and yellow-feathered broilers[J]. *Poult Sci*, 2024, 103(12): 104417.
- [46] 党方坤. 生长猪肠内消化酶的纯化与肠液体外模拟的研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2018.
- DANG F K. Study on purification of digestive enzymes from intestinal tract and *in vitro* simulation of intestinal fluid for growing pigs [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2018. (in Chinese)
- [47] 杜中原, 王钰明, 曾述礼, 等. 仿生消化模拟杂粕在生长猪结肠消化程度的研究[J]. 动物营养学报, 2022, 34(7): 4716-4725.
- DU Z Y, WANG Y M, ZENG S L, et al. Study on digestion extent of miscellaneous meal in colon of growing pigs by simulated digestion [J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2022, 34(7): 4716-4725. (in Chinese)
- [48] 徐葛宣, 于 耀, 王钰明, 等. 鸡体内小肠液和模拟小肠液对饲料蛋白质消化的比较研究[J]. 动物营养学报, 2022, 34(2): 1325-1333.
- XU A X, YU Y, WANG Y M, et al. Comparative study on endogenous and simulated small intestinal fluid to digest protein in feed for chicken [J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2022, 34(2): 1325-1333. (in Chinese)
- [49] 赵 峰, 王钰明, 张 虎, 等. 单胃动物仿生消化系统操作手册(第五版) [M]. 北京: 中国农业科学院, 2024.
- ZHAO F, WANG Y M, ZHANG H, et al. Manual instruction of monogastric animal bionic digestion system (5th ed) [M]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2024. (in Chinese)
- [50] YU Y, WANG Y, GE K, et al. Comparison of two *in vitro* methods progressed in a computer-controlled simulated digestion system to determine amino acid digestibility of feed ingredients for yellow-feathered roosters[J]. *Poult Sci*, 2024: 104738.
- [51] PAN L, PIAO X S, WU Y, et al. Digestible energy of sorghum grain for pigs could be predicted using a computer-controlled simulated digestion system [J]. *Anim Feed Sci Tech*, 2018, 240: 31-39.
- [52] PAN L, MA H, PIAO X S, et al. A computer-controlled simulated digestion system is a promising *in vitro* digestibility technique to predict digestible energy of corn grain for growing pigs [J]. *Anim Feed Sci Tech*, 2018, 235: 43-49.
- [53] WEI J, XIE M, TANG J, et al. The feasibility of enzyme hydrolysate gross energy for formulating duck feeds[J]. *Poult Sci*, 2020, 99(8): 3941-3947.
- [54] 魏 杰, 谢 明, 唐 静, 等. 玉米 DDGS 常规营养成分和代谢能与鸭酶水解物总能相关性研究[J]. 畜牧兽医学报, 2019, 50(10): 2032-2040.
- WEI J, XIE M, TANG J, et al. The correlation between general nutritive components metabolizable energy and enzyme hydrolysate gross energy of corn DDGS for ducks[J]. *Acta Veterinaria et Zootechnica Sinica*, 2019, 50(10): 2032-2040. (in Chinese)

- [55] 魏 杰,谢 明,张 琪,等. 豆粕的鸭酶水解物总能与代谢能相关性研究[J]. 动物营养学报,2019,31(4):1623-1629.
- WEI J, XIE M, ZHANG Q, et al. Correlation between enzyme hydrolysate gross energy and metabolizable energy of soybean meal for ducks[J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2019, 31(4): 1623-1629. (in Chinese)
- [56] WANG H, WANG X, ZHAN Y, et al. Predicting the metabolizable energy and metabolizability of gross energy of conventional feedstuffs for Muscovy duck using in vitro digestion method[J]. *J Anim Sci*, 2023, 101:skad018.
- [57] 李 辉,赵 峰,计 峰,等. 仿生消化系统测定鸭饲料原料代谢能的重复性与精密度检验[J]. 动物营养学报,2010,22(6):1709-1716.
- LI H, ZHAO F, JI F, et al. A test on repeatability and precision for determining metabolizable energy of duck feedstuffs using bionic digestion system [J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2010, 22(6): 1709-1716. (in Chinese)
- [58] 赵江涛,高理想,张 虎,等. 4个实验室间测定猪饲料酶水解物能值的差异及可加性研究[J]. 动物营养学报,2022,34(5):3307-3316.
- ZHAO J T, GAO L X, ZHANG H, et al. Difference and additivity of determing enzymatic hydrolysate gross energy of feeds in 4 laboratories for pigs [J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2022, 34(5): 3307-3316. (in Chinese)
- [59] 任 聪,张 虎,王钰明,等. 仿生消化法估测生长猪饲料有效能的准确性及可加性研究[J]. 畜牧兽医学报,2024,55(9):3988-4000.
- REN C, ZHANG H, WANG Y M, et al. Study on the accuracy and additivity of effective energy in feed for growing pigs by simulated digestion method [J]. *Acta Veterinaria et Zootechnica Sinica*, 2024, 55(9): 3988-4000. (in Chinese)
- [60] TAHIR M, PESTI G M. Comparison of ingredient usage and formula costs in poultry feeds using different amino acid digestibility databases [J]. *J Appl Poult Res*, 2012, 21(3):693-705.
- [61] SADIGHI SHEIKHHASAN B, MORAVEJ H, GHAZIANI F, et al. Relationship between chemical composition and standardized ileal digestible amino acid contents of corn grain in broiler chickens[J]. *Poult Sci*, 2020, 99(9):4496-4504.
- [62] ZOU Y, LIU S, PENG Y, et al. Net energy prediction equations used in Chinese yellow chickens for energy evaluation[J]. *Braz J Poult Sci*, 2021, 23(3):eRBCA-2020-1293.
- [63] 彭运智,谭会泽,刘松柏,等. 基于仿生消化系统估测肉鸭饲料原料代谢能的研究[J]. 动物营养学报, 2020, 32(2):881-889.
- PENG Y Z, TAN H Z, LIU S B, et al. A study of feed ingredient metabolizable energy of meat ducks predicted with simulated digestion system [J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2020, 32(2): 881-889. (in Chinese)
- [64] 鸭饲养标准:[S]. 北京:中国畜牧业协会,2020.
- Nutrient requirements of meat-type duck:[S]. Beijing: China Animal Agricultural Association, 2020. (in Chinese)
- [65] YU Y, ZHAO F, CHEN J, et al. Sensitivity of *in vitro* digestible energy determined with computer-controlled simulated digestion system and its accuracy to predict dietary metabolizable energy for roosters [J]. *Poult Sci*, 2020, 100(1):206-214.

(编辑 范子娟)