



影响猪饲料原料有效能值的关键化学成分

胡杰, 刘岭, 张帅, 李军涛, 李忠超, 黄承飞, 朴香淑, 王凤来, 赖长华, 王军军*

中国农业大学动物科学技术学院, 动物营养学国家重点实验室, 北京 100193

* 联系人, E-mail: jkywj@hotmail.com

收稿日期: 2019-11-15; 接受日期: 2020-02-22; 网络版发表日期: 2020-05-16

国家自然科学基金(批准号: 31630074)和国家生猪产业技术体系建设专项(批准号: CARS-35)资助

摘要 饲料的有效能可用于猪的维持、生长、繁殖和泌乳, 饲料原料品种、种植年份、气候环境、储存条件、加工工艺等多种因素均会造成饲料原料理化参数及有效能值的变异. 研究表明, 猪饲料原料中多种化学成分与饲料原料的有效能值显著相关, 通过建立基于不同饲料原料化学成分的预测方程可以较为准确地评定其有效能值, 从而达到精准配方的目的. 文章就猪常用饲料原料中理化参数和有效能值的变异情况、影响猪饲料原料有效能值的关键化学成分、基于猪饲料原料化学成分预测其有效能值的数学模型及其在饲料配方中的应用作一综述, 以期进一步深化对饲料原料与有效能值间构效关系的认知, 并推动猪饲料的精准配制.

关键词 猪, 饲料原料, 有效能, 预测, 化学成分, 精准配方

生猪产业一直是中国畜牧业的支柱产业^[1], “十二五”以来, 中国生猪存栏量、出栏量和猪肉产量均稳居世界第一^[2]. 在猪肉生产过程中, 饲料成本占据了总成本的70%以上^[3], 而饲料能量则是配制饲料配方时需考虑的重要因素, 饲料中可被动物机体利用的能量被称为有效能. 因此, 对不同饲料原料的有效能值进行评定是十分必要的. NRC^[4]提供的饲料原料有效能数据大多是预测值或基于已发表参考文献的平均值, 并不能真实反映饲料原料的变异情况. 饲料原料的有效能值很大程度上受其特定化学成分的影响^[5-8], 通过揭示影响猪饲料原料有效能值的关键化学成分、建立基于不同饲料原料化学成分的预测方程, 可以较为准确地评定其有效能值, 并在饲料配制过程中予以精确把握. 本文就猪常用饲料原料理化参数和有效能值的变

异情况、影响猪饲料原料有效能值的关键化学成分、基于猪饲料原料化学成分预测其有效能值的数学模型及其在饲料配方中的应用作一综述, 以期深化对饲料原料与有效能值间构效关系的认知, 并推动猪饲料的精准配制.

1 猪常用饲料原料理化参数及有效能值的变异

猪饲料原料理化参数包括容重、千粒重、颗粒大小、化学成分等指标, 有效能包括消化能(digestible energy, DE)、代谢能(metabolizable energy, ME)和净能(net energy, NE). 饲料原料品种、种植年份、气候环境、种植地区、降雨量、储存条件、加工工艺等多

引用格式: 胡杰, 刘岭, 张帅, 等. 影响猪饲料原料有效能值的关键化学成分. 中国科学: 生命科学, 2020, 50: 939-947

Hu J, Liu L, Zhang S, et al. Key chemical components affecting the available energy of feed ingredients in pigs (in Chinese). Sci Sin Vitae, 2020, 50: 939-947, doi: 10.1360/N052018-00262

种因素均会造成饲料原料理化参数以及有效能值的变异。王红亮^[9]测定了19个不同产地大麦的化学成分含量, 研究显示包括粗蛋白(crude protein, CP)等7种常规成分的变异系数超过10%。李全丰^[10]采集同一地区不同品种的玉米对其常规理化参数进行检测, 发现不同品种玉米的容重变异系数较大, 化学成分中中性洗涤纤维(neutral detergent fiber, NDF)变异系数达到5.95%, DE和ME均差异显著($P<0.05$), DE和ME的最大最小值之差分别达到0.52以及0.55 MJ kg⁻¹。Liu等人^[11]指出膨化玉米比常规玉米的DE显著提高5.54% ($P<0.05$)。研究报道大麦去皮后可以显著提高($P<0.01$)大麦的DE和ME, 这可能是由于大麦皮中含有较多纤维成分, 而纤维成分具有抗营养特性^[12]。Kraler等人^[13]发现发酵小麦麸中的淀粉(starch, St)、粗纤维(crude fiber, CF)以及粗脂肪(ether extract, EE)含量与小麦麸原料相比有较大变化。此外, 饲料原料颗粒大小是造成有效能值变异的一个重要因素。Liu等人^[14]指出DDGS (distillers dried grains with solubles)的颗粒尺寸由818 μm 降低至595 μm 时, 其DE显著提升194 kcal kg⁻¹ ($P<0.05$)。Rojas和Stein^[15]也发现玉米的DE和ME随颗粒尺寸减小(865~339 μm)而线性增加($P<0.05$)。NRC^[4]重新修订了众多饲料原料的化学成分含量和有效能值, 说明不同时期的饲料原料的理化参数和能值会发生变化。而且, 动物品种、体重阶段等对有效能值也有影响, 谢飞^[16]研究表明谷物的有效能值在猪的不同体重阶段存在差异, 配制日粮时应充分考虑猪的体重阶段对有效能值的影响。

2 影响猪饲料原料有效能值的关键化学成分

2.1 文献综述

已有大量研究利用饲料原料中的化学成分建立预测方程来预测其有效能值, 并且取得了良好的预测效果。饲料原料由于其组成结构不同, 影响其有效能值的化学成分也不尽相同。

能量饲料原料是饲料配方中的重要组成部分。EE, St, NDF、粗灰分(Ash)、总能(GE)与玉米DE的相关性较高($P<0.01$), 而St, EE, NDF, Ash则是影响玉米ME的关键化学成分。其中, NDF与Ash对玉米的有效能值均呈现负效应^[17]。王红亮^[9]指出影响大麦有效能值的第

一关键化学成分为酸性洗涤纤维(acid detergent fiber, ADF), Fairbairn等人^[18]也有同样结论, 以该因子为单一变量建立的预测方程就有较高的相关系数(coefficient of correlation, R^2), 当引入NDF和GE时可以改善DE模型的预测性能。高粱是重要的谷物饲料原料, 其所含的抗营养因子单宁(Tannin)是影响DE, ME的重要因素, 高粱中Tannin含量每升高1%, ME与DE均可降低超过200 kcal kg⁻¹, ADF则是预测高粱有效能值的第二关键化学成分^[19]。油脂中含有较多的多不饱和脂肪酸(polyunsaturated fatty acids, PUFA), Su等人^[20]报道以油脂中PUFA、油酸(oleic acid, C18:1)、硬脂酸(stearic acid, C18:0)为参数建立的DE与ME预测方程有较高的准确度。

蛋白质饲料原料在猪饲料配方中具有不可替代的作用, 它可以为猪的正常生长和生命活动提供各种氨基酸和能量, 对其有效能值的测定也是研究热点。贺喜等人^[21]报道预测大米蛋白DE和ME的最佳化学成分为NDF, EE虽然和DE无显著相关性($P>0.05$), 但由EE, CF也可以建立准确性较高的预测方程。玉米DDGS按其加工工艺是否提油可以分为提油型和全油型, 研究发现建立玉米DDGS分类模型要比全类模型效果更好, 影响二者DE的第一关键化学成分均为纤维类成分(CF和NDF); 分析玉米DDGS成分与ME的相关关系时, NDF仍然为最高相关因子; EE对于全油类至关重要, 但EE与提油类没有显著相关性($P>0.05$), EE在建立预测方程过程中也未有改善预测效果的作用^[22,23]。Li等人^[24]发现豆粕中DE与CF, ADF, NDF负相关($P<0.05$), 而DE是影响豆粕ME的关键因子, R^2 为0.85($P<0.01$), CP可提高豆粕ME预测模型的准确度。朱良等人^[25]研究报道棉籽粕CP与DE相关性最高, 相关系数达到0.82 ($P<0.01$), 而通径分析表明NDF对DE的贡献较高。因此, 棉籽粕中CP与NDF是影响DE的关键化学成分, 去酚棉籽粕中影响DE的关键化学成分为ADF^[26]。李明^[27]发现菜籽饼粕中由ADF或NDF为唯一参数建立的DE预测模型效果最好, 当引入其他变量时反而会增加模型的残差标准差(residual standard deviation, RSD)。花生粕DE与NDF, ADF, GE均有显著相关性($P<0.05$), 其中NDF的 R^2 最高, 为-0.82($P<0.01$), 当CP, GE引入NDF对DE的预测模型时可以取得最佳效果; ME与NDF的 R^2 达到-0.77($P<0.05$)^[28]。Liu等人^[29]指出CP与葵花粕的DE和ME显著正相关($P<0.05$)。

纤维饲料原料在生产中已越来越受到重视. 白酒糟是酿酒过程中的副产品, 理化参数变异较大, CF是影响其DE的第一关键化学成分^[30]. 施传信^[31]在建立全脂米糠有效能值预测模型时发现酸水解脂肪(acid hydrolyze ether extract, AEE)是最佳单一预测因子, 而当方程中引入CP, St, NDF, ADF等成分时可以改善模型的预测性能, DE与ME均受到全脂米糠中CP的影响($P<0.05$). 玉米副产品中的第一关键化学成分为半纤维素(hemicellulose, HC)^[32]. 小麦制粉副产品中St和CF变异较大, Huang等人^[33]建立了小麦制粉副产品的有效能值预测模型, NDF在建模过程中可以作为唯一的预测因子且具有良好的预测效果. 当单独研究小麦制粉副产品麦麸对猪的有效能时, 研究发现麦麸中与DE相关性最高的成分依次为St, NDF, CF和ADF^[34], 由St所建立的单因子或多因子DE预测方程具有较高的 R^2 和偏低的RSD值; EE与CP虽然和DE无显著相关性($P>0.05$), 但将其引入预测方程时能够增加方程预测的准确性.

2.2 规律性探究

(1) 影响不同猪饲料原料有效能值的关键化学成分. 通过对文献查阅, 影响不同猪饲料原料DE与ME的关键化学成分见表1.

麦麸和玉米St含量丰富, St对其有效能值影响较大. 油脂是供能物质, 玉米和全脂米糠中油脂较多, 因此EE和AEE分别作为第一关键化学成分影响玉米DE和全脂米糠有效能值. 当用油脂作为饲料原料时, 脂肪酸是与能值相关的主要因素, 且最佳预测因子为PUFA. 高粱中的单宁是一种抗营养成分, 会降低动物对营养物质的吸收率和利用率, 对高粱的有效能值影响较大, 将其作为饲料使用时应充分考虑其抗营养特性. 对于大多数饲料来说, 影响其DE与ME的第一关键化学成分还是纤维类成分(NDF, ADF和CF), 以NDF居多, 这与孙献忠和熊本海^[35]的报道一致, 但在植物性蛋白质饲料原料中, 影响葵花粕和棉籽粕有效能值的第一关键化学成分是CP. 影响饲料原料有效能值的其他关键化学成分也以纤维类成分居多.

(2) CP, EE, Ash和St对有效能值的贡献. 除纤维类物质外, CP, EE, Ash和St在多数饲料原料中会对其有效能值产生影响. 在玉米、麦麸、高粱、豆粕、棉籽粕和花生粕中, CP虽然与DE无显著相关性($P>0.05$),

但其作为模型预测自变量纳入方程时均可提高预测效果; 而小麦制粉副产品、全脂米糠和葵花粕中的CP与DE和ME相关性均显著($P<0.05$), 这说明CP对能量有一定的贡献, 对DE的影响更多一些, May和Bell^[36]也有此报道. 玉米、麦麸和大米蛋白的最优DE预测方程中均有EE, 玉米、大麦和全脂米糠中Ash与DE和ME显著相关($P<0.05$), Ash是玉米DDGS中第二或第三关键化学成分^[22], 表明EE与Ash对饲料原料有效能值的贡献不容忽视. 玉米、麦麸、高粱和全脂米糠中St与DE和ME显著正相关($P<0.05$).

(3) 关键化学成分的组合效应. 正常来讲, 与饲料原料有效能值相关性显著($P<0.05$)的化学成分均为影响其有效能值的关键化学成分, 但几乎所有饲料原料的最优预测模型均不是全部关键化学成分的组合, 甚至会引入其他无相关性的因子, 可能是由于因子间的互作导致了预测模型不同组合效果的差异. 在已有的文献报道中, 除玉米ME以及玉米副产品的有效能值预测模型外(表2), 其他饲料原料的最优DE和ME预测模型均包含第一关键化学成分(其含量并不一定最高^[21,24,25,28]), 证明了饲料原料中的第一关键化学成分对其有效能值占主导影响. 大部分最优预测模型因子数在1~3个之间, 且三因子预测方程居多, 这可以方便计算和使用; 而实际上, 如果按照逐步回归的方法筛选预测方程, 因子越多其方程拟合效果越好.

(4) 关键化学成分的负效应. 研究过程中还发现了另一个现象, EE, CP等从营养学角度看是供能物质, 预测模型中的系数应为正值; CF, NDF, ADF, Ash等较难被猪肠道消化吸收, 预测模型中的系数应为负值. 但在Anderson等人^[32]预测模型中却出现了相反的情况, 无法用营养学理论解释. 可能原因是方程中由于较大截距的存在, 使这些成分更多起到校正模型的作用; 也有可能与加工工艺导致相关化学成分间的关联变化有关^[22]; 此外, 这也与利用Stepwise Regression程序建立预测方程有关, 当两个相关性高的预测因子同时出现在方程中时, 该程序会自动将相关性更高的因子引入方程, 而再引入相关性较低的因子时, 后者便会出现不符合生物学意义的现象^[37].

(5) 有效能之间的相关关系. 对文献总结之后发现, 在玉米、大米蛋白、全脂米糠、玉米DDGS、花生粕以及葵花粕中, GE与DE间具有显著正相关性($P<0.05$), 且在葵花粕DE预测方程中引入GE可以提高

表 1 影响不同猪饲料原料DE与ME的关键化学成分^{a)}

Table 1 The key chemical components affecting DE and ME value of feed ingredients in pigs^{a)}

饲料原料	消化能	代谢能
玉米	*EE, St, NDF, Ash	*St, EE, Ash, NDF
玉米副产品	*HC	*HC
麦麸	*St, NDF, CF, ADF	—
大麦	*ADF, Ash	*ADF, Ash
小麦制粉副产品	*NDF	*NDF
高粱	*Tannin, ADF, St	*Tannin, ADF, St
油脂	*PUFA	*PUFA
大米蛋白	*NDF, ADF, CF	*NDF, ADF, CF
玉米干酒糟及可溶物	*NDF, ADF, CF, EE	*NDF, ADF, CF, EE
豆粕	*CF, ADF, NDF	—
棉籽粕	*CP, NDF, ADF	—
脱酚棉籽蛋白	*ADF, NDF, CF	—
菜籽饼粕	*ADF/NDF	—
花生粕	*NDF, ADF	*NDF
葵花粕	*CP, ADF	*CP, ADF
白酒糟	*CF, ADF	—
全脂米糠	*AEE, Ash, CP	*AEE, Ash, CP, St

a) *, 表示影响饲料原料消化能或代谢能的第一关键化学成分, DE表示消化能, ME表示代谢能, EE表示粗脂肪, St表示淀粉, NDF表示中性洗涤纤维, ADF表示酸性洗涤纤维, Ash表示粗灰分, HC表示半纤维素, CF表示粗纤维, Tannin表示单宁, PUFA表示多不饱和脂肪酸, CP表示粗蛋白, AEE表示酸水解脂肪, —表示尚未有文献报道, 下表同

表 2 生长猪能量饲料原料有效能预测方程^{a)}

Table 2 Equations for predicting available energy in energy ingredients for growing pigs^{a)}

饲料原料	消化能	代谢能	净能	资料来源
玉米	*DE=1062.68+49.72×EE+0.54×GE+9.11×St ($R^2=0.62$)	*ME=671.54+0.89×DE-5.57×NDF-191.39×Ash ($R^2=0.87$)	—	Li等人 ^[17]
大麦	DE=2.9-0.296×ADF+0.018×NDF+0.708×GE ($R^2=0.92$) DE=3526-92.8×ADF ($R^2=0.85$)	ME=6.442-0.299×ADF+0.022×NDF+ 0.498×GE ($R^2=0.92$)	—	王红亮 ^[9] Fairbairn等人 ^[18]
高粱	*DE=6974-236×Tannin-43.27×ADF+24.96 ×CP-0.71×GE ($R^2=0.96$)	*ME=3973-262×Tannin-27.24×ADF ($R^2=0.94$)	—	Pan等人 ^[19]
油脂	DE=34.15+0.07×PUFA+0.21×C18:0-0.04×C18:1 ($R^2=0.84$)	ME=33.37+0.07×PUFA+0.20×C18:0-0.04×C18:1 ($R^2=0.85$)	—	Su等人 ^[20]

a) 原料为干基状态, 预测方程前有*号表示有效能单位为kcal kg⁻¹, 无*号表示有效能单位为MJ kg⁻¹, GE表示总能, C18:0表示硬脂酸, C18:1表示油酸, R^2 表示相关系数, 下表同

模型预测精确度; 在玉米、大麦、全脂米糠、玉米DDGS、豆粕、葵花粕和小麦制粉副产品中, DE与ME显著正相关($P<0.05$), 豆粕的最佳ME和NE预测方

程中就含有DE(表3). 而且, DE可以改善玉米副产品ME预测模型的性能. 在高粱、大米蛋白和玉米DDGS中GE与ME呈显著正相关($P<0.05$).

3 基于猪饲料原料化学成分预测其有效能值的数学模型

本文搜集整理了已发表的相关文献中基于猪饲料原料化学成分预测其有效能值的最佳预测方程, 按照饲料原料特性分类归纳, 详见表2~4.

4 猪饲料原料有效能值预测模型在饲料配方中的应用

猪饲料原料有效能值测定所需周期较长、代价昂

贵且工作量大, 而且, 季节、产地、加工工艺等因素又会通过影响饲料原料的化学组成从而影响其有效能值; 动物方面, 随着猪体重的增加, 猪的能量消化率也随之提高. 猪饲料原料有效能值预测模型可以快速、简便和较为准确地评定不同饲料原料中的有效能值. 所以, 目前的研究趋势是建立以常规化学养分指标为预测因子的有效能预测方程, 以预测未知原料中针对某一阶段猪的消化能值、代谢能值乃至净能值. 但应注意的是, 现有模型大多数适用于生长猪, 针对仔猪、育肥猪和母猪的饲料原料有效能值预测模型还有

表 3 生长猪植物蛋白质类饲料原料有效能预测方程^{a)}

Table 3 Equations for predicting available energy in protein ingredients for growing pigs^{a)}

饲料原料	消化能	代谢能	净能	资料来源
大米蛋白	DE=22.17-0.51×NDF ($R^2=0.50$, RSD=0.93) DE=18.58-0.49×CF+0.31×EE ($R^2=0.70$, RSD=0.77)	ME=21.42-0.74×NDF ($R^2=0.52$, RSD=1.30)	—	贺喜等人 ^[21]
玉米干酒糟及可溶物	*DE=1874-21.35×NDF+0.65×GE-99.84×CF ($R^2=0.86$) *DE=1601-54.48×TDF+0.69×GE+731.5×BD ($R^2=0.91$)	*ME=1463-32.43×NDF+0.79×GE-54.52×Ash-68.82×CF ($R^2=0.86$) *ME=4558+52.26×EE-50.08×TDF ($R^2=0.85$)	*NE=-740.4-43.82×CF+161.98×Ash+0.765×DE ($R^2=1.00$, RSD=1.25)	李平 ^[22] Kerr等人 ^[23]
玉米全油类干酒糟及可溶物	*DE=-643-94.52×CF+1.14×GE-22.89×NDF ($R^2=0.83$)	*ME=7898-42.08×NDF-36.17×Ash+101.19×EE-103.83×CP ($R^2=0.90$)		
玉米提油类干酒糟及可溶物	*DE=4338-36.75×NDF+32.99×CP-67.10×CF ($R^2=0.95$)	*ME=4066-46.30×NDF+45.80×CP-106.19×Ash ($R^2=0.94$)		
豆粕	DE=38.44-0.43×CF-0.9×GE+0.11×ADF ($R^2=0.67$)	ME=2.74+0.97×DE-0.06×CP ($R^2=0.79$)	NE=0.75×DE+0.043×ADF-2.18 ($R^2=0.89$)	Li等人 ^[24]
棉籽粕	DE=-14.38+0.557×GE+0.32095×CP-0.01268×NDF ($R^2=0.72$)	—	—	朱良等人 ^[25]
脱酚棉籽蛋白	DE=15.40-0.27×ADF ($R^2=0.91$, RSD=0.27) DE=14.88-0.29×ADF+0.25×EE ($R^2=0.94$, RSD=0.22)	—	—	Shen等人 ^[26]
菜籽饼粕	DE=16.20-0.10×NDF ($R^2=0.63$, RSD=0.49) DE=16.32-0.15×ADF ($R^2=0.63$, RSD=0.49)	—	NE=1.14×DE+0.46×CP-25.24 ($R^2=0.96$)	李明 ^[27] 李忠超 ^[37]
花生粕	DE=0.18+0.73GE+0.08×CP-0.14×NDF ($R^2=0.97$, RSD=0.10)	ME=17.78-0.17×NDF ($R^2=0.59$, RSD=0.51) ME=1.14+0.87×DE ($R^2=0.93$, RSD=0.20)	—	Li等人 ^[28]
葵花粕	DE=-4.90+0.14×CP-0.08×CF+0.71×GE ($R^2=0.89$, RSD=0.27)	ME=-4.90-0.05×NDF+0.66×GE+0.16×CP ($R^2=0.96$, RSD=0.14)	—	Liu等人 ^[29]

a) TDF表示总洗涤纤维, BD表示体积密度, RSD表示残差标准差, 下表同

表 4 生长猪纤维饲料原料有效能预测方程^{a)}

Table 4 Equations for predicting available energy in fiber ingredients for growing pigs^{a)}

饲料原料	消化能	代谢能	净能	资料来源
白酒糟	DE=16.128-0.370×CF-0.093×ADF +0.131×NDF (R ² =0.937, RSD=0.69)	—	—	李云萍 ^[30]
全脂米糠	DE=7.78-0.09×CP+0.25×AEE+ 0.05×St-0.08×NDF+0.29×ADF-0.13×Ash-1.8×Ca +2.43×TP (R ² =0.92)	ME=6.22+0.22×CP+0.28×AEE +0.02×St-0.14×NDF+0.30×ADF (R ² =0.61)	—	施传信 ^[31]
玉米副产品	*DE=-7471+1.94×GE-50.91× EE+15.20×St+18.04×OM digestibility (R ² =0.90)	*ME=0.90×GE-29.95×TDF (R ² =0.72)	—	Anderson 等人 ^[32]
小麦制粉副产品	DE=19.2-0.016×NDF (R ² =0.94, RSD=0.58)	ME=16.9-0.0136×NDF (R ² =0.94, RSD=0.50)	—	Huang等人 ^[33]
麦麸	DE=0.32×St-1.66×EE+8.70 (R ² =0.93, RSD=0.25) DE=-0.91×CF-0.71×CP+33.80 (R ² =0.76, RSD=0.35)	—	—	张志虎 ^[34]

a) Ca表示钙, TP表示总磷, OM digestibility表示有机物消化率

较大缺口;此外,模型预测结果的准确性取决于化学成分测定的准确性,实现特定原料有效能值的快速预测还需建立合适的化学成分测定体系。

5 总结

有效能值是猪饲料原料的重要指标,众多因素会导致猪饲料原料中有效能值的变异,而饲料原料中的某些化学成分与其有效能值密切相关。建立基于饲料原料化学成分的有效能值预测方程,可以实现对有效能值的动态评定,弥补直接引用相关数据的缺陷。不

同饲料原料中影响其有效能值的化学成分较多,但第一关键化学成分占据主导地位,其在大多数预测方程中是必不可少的因素;揭示关键化学成分影响有效能值的规律,可深化对原料构效关系的认知,从而为生产中合理、灵活地使用预测方程,实现猪饲料的精准配制奠定理论基础。应注意的是:现有模型大多适用于生长猪,仔猪、育肥猪和母猪的能量预测模型还有较大空缺;同时,对猪饲料原料NE的测定较少,对影响NE的关键因子研究尚有待进一步展开。以上两方面应是未来猪饲料原料有效能值评定的重点和主要方向。

参考文献

1 Zhang G A. Current situation and future development trend of China swine industry (in Chinese). Vet Orient, 2017, 11: 9-11 [张广安. 中国猪业现状以及未来发展趋势. 兽医导刊, 2017, 11: 9-11]

2 The development momentum of China swine industry is encouraging (in Chinese). Swine Ind Outlook, 2016, 3: 37 [中国猪业发展势头可喜. 猪业观察, 2016, 3: 37]

3 De Lange C F M, Birkett H. Characterization of useful energy content in swine and poultry feed ingredients. Can J Anim Sci, 2005, 85: 269-280

4 NRC. Nutrient requirements of swine. 11th ed. Washington DC: National Academy Press, 2012. 4-5

5 Sol C, Castillejos L, López-Vergé S, et al. Prediction of the digestibility and energy contents of non-conventional by-products for pigs from their chemical composition and *in vitro* digestibility. Anim Feed Sci Tech, 2017, 234: 237-243

6 Kim M J, Hosseindoust A R, Choi Y H, et al. An evaluation of metabolizable energy content of main feed ingredients for growing pigs when adding dietary lysophospholipids. Livest Sci, 2018, 210: 99-103

7 Huang Q. Study on available energy and amino acid digestibility of wheat milling by-products for growing pigs (in Chinese). Dissertation for

- Doctoral Degree. Beijing: China Agricultural University, 2015. 40–64 [黄强. 小麦制粉副产品猪有效能值和氨基酸消化率的研究. 博士学位论文. 北京: 中国农业大学, 2015. 40–64]
- 8 Pan X H, Yang L, Pang Z H, et al. Construction of prediction models of feedstuffs effective energy values for swine (in Chinese). *Chin J Anim Nutr*, 2015, 27: 1450–1460 [潘晓花, 杨亮, 庞之洪, 等. 猪饲料有效能值预测模型的构建. *动物营养学报*, 2015, 27: 1450–1460]
 - 9 Wang H L. Prediction equations and improving methods of available energy in barley fed to pigs (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Beijing: China Agricultural University, 2017. 17–31 [王红亮. 大麦猪有效能预测方程及改善方法的研究. 博士学位论文. 北京: 中国农业大学, 2017. 17–31]
 - 10 Li Q F. Establish prediction modeling on available nutrients with Chinese corn for pigs (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Beijing: China Agricultural University, 2014. 18–50 [李全丰. 中国玉米猪有效营养成分预测方程的构建. 博士学位论文. 北京: 中国农业大学, 2014. 18–50]
 - 11 Liu H, Wan H, Xu S, et al. Influence of extrusion of corn and broken rice on energy content and growth performance of weaning pigs. *Anim Sci J*, 2016, 87: 1386–1395
 - 12 Wang H L, Shi M, Xu X, et al. Partial dehulling increases the energy content and nutrient digestibility of barley in growing pigs. *Asian-Austral J Anim Sci*, 2016, 30: 562–568
 - 13 Kraler M, Schedle K, Domig K J, et al. Effects of fermented and extruded wheat bran on total tract apparent digestibility of nutrients, minerals and energy in growing pigs. *Anim Feed Sci Tech*, 2014, 197: 121–129
 - 14 Liu P, Souza L W O, Baidoo S K, et al. Impact of distillers dried grains with solubles particle size on nutrient digestibility, DE and ME content, and flowability in diets for growing pigs. *J Anim Sci*, 2012, 90: 4925–4932
 - 15 Rojas O J, Stein H H. Effects of reducing the particle size of corn grain on the concentration of digestible and metabolizable energy and on the digestibility of energy and nutrients in corn grain fed to growing pigs. *Livest Sci*, 2015, 181: 187–193
 - 16 Xie F. Comparative digestibility of energy in common feed ingredients to barrows at different body weights (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Beijing: China Agricultural University, 2017. 33–39 [谢飞. 不同体重阶段猪常用饲料原料有效能比较研究. 博士学位论文. 北京: 中国农业大学, 2017. 33–39]
 - 17 Li Q, Zang J, Liu D, et al. Predicting corn digestible and metabolizable energy content from its chemical composition in growing pigs. *J Anim Sci Biotechnol*, 2014, 5: 11
 - 18 Fairbairn S L, Patience J F, Classen H L, et al. The energy content of barley fed to growing pigs: characterizing the nature of its variability and developing prediction equations for its estimation. *J Anim Sci*, 1999, 77: 1502–1512
 - 19 Pan L, Li P, Ma X K, et al. Tannin is a key factor in the determination and prediction of energy content in sorghum grains fed to growing pigs. *J Anim Sci*, 2016, 94: 2879–2889
 - 20 Su Y B, Bi X H, Ma X K, et al. Determination and prediction of the digestible and metabolizable energy content of lipid sources fed to growing pigs. *Anim Feed Sci Tech*, 2015, 209: 119–127
 - 21 He X, Chen D T, Hu G B, et al. Evaluation and prediction model of digestible energy and metabolic energy of rice protein for growing pigs (in Chinese). *Chin J Anim Nutr*, 2015, 27: 1740–1749 [贺喜, 陈达图, 胡官波, 等. 生长猪大米蛋白消化能、代谢能的评定及预测模型研究. *动物营养学报*, 2015, 27: 1740–1749]
 - 22 Li P. Determination and prediction of energy and amino acid digestibility in different processing corn distillers dried grains with solubles of china fed to growing pigs (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Beijing: China Agricultural University, 2014. 13–38 [李平. 国产不同生产工艺玉米DDGS生长猪能量与氨基酸消化率研究. 博士学位论文. 北京: 中国农业大学, 2014. 13–38]
 - 23 Kerr B J, Dozier III W A, Shurson G C. Effects of reduced-oil corn distillers dried grains with solubles composition on digestible and metabolizable energy value and prediction in growing pigs. *J Anim Sci*, 2013, 91: 3231–3243
 - 24 Li Z, Wang X, Guo P, et al. Prediction of digestible and metabolisable energy in soybean meals produced from soybeans of different origins fed to growing pigs. *Arch Anim Nutr*, 2015, 69: 473–486
 - 25 Zhu L, He X, Li M, et al. Evaluation and prediction models of digestible energy of cottonseed meal fed for growing pigs (in Chinese). *Chin J Anim Nutr*, 2013, 25: 819–826 [朱良, 贺喜, 李敏, 等. 生长猪棉籽粕消化能的评定及估测模型研. *动物营养学报*, 2013, 25: 819–826]
 - 26 Shen J, Chen D, Guanbo H U, et al. Evaluation and prediction model of digestible energy of degossypolized cottonseed protein for growing pigs. *Chin J Anim Nutr*, 2014, 26: 2262–2269
 - 27 Li M. Study on prediction of digestible energy and digestibility of nutrients in rapeseed meal for swine (in Chinese). Dissertation for Master's

- Degree. Yaan: Sichuan Agricultural University, 2011. 14–24 [李明. 菜籽饼粕饲料猪消化能及养分消化率预测模型的研究. 硕士学位论文. 雅安: 四川农业大学, 2011. 14–24]
- 28 Li Q, Piao X, Liu J, et al. Determination and prediction of the energy content and amino acid digestibility of peanut meals fed to growing pigs. *Arch Anim Nutr*, 2014, 68: 196–210
- 29 Liu J, Xu X, Zhao P F, et al. Evaluation of energy digestibility and prediction of digestible and metabolisable energy in sunflower seed meal fed to growing pigs. *Italian J Anim Sci*, 2015, 14: 3533
- 30 Li Y P. Prediction models of digestible energy and digestibility of nutrients of distiller grains for growing pigs. Dissertation for Master's Degree. Yaan: Sichuan Agricultural University, 2012. 18–26 [李云萍. 生长猪白酒糟消化能及养分消化率预测模型的研究. 硕士学位论文. 雅安: 四川农业大学, 2012. 18–26]
- 31 Shi C X. Study on available energy and nutrients digestibility of full-fat rice bran for growing pigs (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Beijing: China Agricultural University, 2015. 17–29 [施传信. 全脂米糠猪有效能值与养分消化率研究. 博士学位论文. 北京: 中国农业大学, 2015. 17–29]
- 32 Anderson P V, Kerr B J, Weber T E, et al. Determination and prediction of digestible and metabolizable energy from chemical analysis of corn coproducts fed to finishing pigs. *J Anim Sci*, 2012, 90: 1242–1254
- 33 Huang Q, Shi C X, Su Y B, et al. Prediction of the digestible and metabolizable energy content of wheat milling by-products for growing pigs from chemical composition. *Anim Feed Sci Tech*, 2014, 196: 107–116
- 34 Zhang Z H, Tang S W, Wang S Y, et al. Prediction equations for digestible energy and digestibility coefficient of energy of wheat bran for pigs(in Chinese). *Chin J Anim Nutr*, 2012, 24: 1903–1911 [张志虎, 唐受文, 王思宇, 等. 麦麸猪消化能与能量消化率预测方程的建立. 动物营养学报, 2012, 24: 1903–1911]
- 35 Sun X Z, Xiong B H. Study progresses on using feed chemical compositions to predict feed energy values for swine (in Chinese). *China Anim Husbandry Vet Med*, 2006, 11: 19–23 [孙献忠, 熊本海. 用饲料化学成分预测猪饲料能值的研究进展. 中国畜牧兽医, 2006, 11: 19–23]
- 36 May R W, Bell J M. Digestible and metabolizable energy values of some feeds for the growing pig. *Can J Anim Sci*, 1971, 51: 271–278
- 37 Li Z C. Net energy prediction of plant protein ingredients to growing pigs(in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Beijing: China Agricultural University, 2017. 32–79 [李忠超. 生长猪植物蛋白原料净能推测方程的构建. 博士学位论文. 北京: 中国农业大学, 2017. 32–79]

Key chemical components affecting the available energy of feed ingredients in pigs

HU Jie, LIU Ling, ZHANG Shuai, LI JunTao, LI ZhongChao, HUANG ChengFei, PIAO XiangShu, WANG FengLai, LAI ChangHua & WANG JunJun

State Key Laboratory of Animal Nutrition, College of Animal Science and Technology, China Agricultural University, Beijing 100193, China

The available energy of feed can be used for the maintenance, growth, reproduction and lactation of pigs. A number of factors including varieties, growing years, climate, storage condition, processing technology can lead to the variation in physical and chemical parameters and available energy value of feed ingredients. Studies have shown that the correlation between chemical components and available energy in feed ingredients of pigs is significant. Establishing prediction equations for different feed ingredients based on their chemical compositions is a great way to evaluate the available energy of feed ingredients and achieve the goal of accurate diet formulation. In this paper, the variation of physical and chemical parameters and available energy value in main feed ingredients of pigs, key chemical components affecting the available energy of feed ingredients in pigs, mathematical models predicting available energy based on chemical components and application of the models in feed formulation are reviewed. It is expected to deepen the cognition of structure-function relationship between feed ingredients and available energy as well as promote the accurate diet formulation for pigs.

pig, feed ingredients, available energy, prediction, chemical components, accurate diet formulation

doi: [10.1360/N052018-00262](https://doi.org/10.1360/N052018-00262)