

渠清博, 杨 鹏, 翟中葳, 等. 规模化奶牛场泌乳牛粪便氮磷含量预测模型研究[J]. 农业资源与环境学报, 2017, 34(3): 234-241.

QU Qing-bo, YANG Peng, ZHAI Zhong-wei, et al. Prediction of Fecal Nitrogen and Fecal Phosphorus Content for Lactating Dairy Cows in Large-scale Dairy Farms[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2017, 34(3): 234-241.

## 规模化奶牛场泌乳牛粪便氮磷含量预测模型研究

渠清博, 杨 鹏, 翟中葳, 李爱秀, 张克强\*

(农业部环境保护科研监测所, 天津 300191)

**摘要:** 为了探讨基于泌乳牛日粮营养成分及其基本生产状况预测粪便氮磷含量的可行性, 建立粪便总氮(fecal nitrogen, FN)、粪便总磷(fecal phosphorus, FP)含量的预测模型。本试验以中国荷斯坦奶牛为研究对象, 选取天津市具有代表性的7家规模化奶牛场为采样点, 利用问卷调查收集了20组泌乳期奶牛日粮营养成分及基本生产状况等基础数据, 并采集了60份粪便样品, 测定其氮磷含量。选取其中14组泌乳期奶牛日粮营养成分及基本生产状况等基础数据和48份泌乳牛粪便的氮磷含量, 利用SAS统计分析软件, 对其进行相关性分析和回归分析, 建立预测模型。结果表明: 日粮有机质摄入量(organic matter intake, OMI)和粗脂肪摄入量(crude fat intake, CFI)与泌乳牛粪便总氮含量有显著的正相关性, 相关系数分别为0.836和0.705。泌乳牛体重(body weight, BW)与粪便总磷含量呈负相关性, 相关系数为-0.525。利用多元线性回归分析建立的预测模型的决定系数 $R^2$ 显著高于一元线性回归方程。其中基于泌乳牛产奶量(milk yield, MY), 产奶天数(days in milk, DIM), 日粮有机质摄入量 OMI 和氮摄入量(nitrogen intake, NI)建立的粪便总氮含量的预测模型的决定系数 $R^2$ 可达0.96( $P<0.001$ ), 预测方程为:  $y=0.43+0.29\times MY+0.02\times DIM+0.92\times OMI-13.01\times NI$ 。粪便总磷含量的预测模型的决定系数 $R^2$ 相对低于总氮含量的预测模型, 最高为0.62( $P<0.10$ ), 预测方程为:  $y=22.97-0.026\times BW-4.02\times NI+14.63\times PI$  (phosphorus intake, PI)。最后利用6组泌乳牛日粮营养成分及其基本生产状况的基础数据和对应的18份粪便样品的氮磷含量对最优预测模型进行了外部验证。结果表明, 粪便总氮含量和总磷含量的预测值与测定值间的相对误差分别为1.62%和3.81%, 预测标准差分别为0.70 mg·g<sup>-1</sup>和0.68 mg·g<sup>-1</sup>, 模型取得较理想的预测结果。

**关键词:** 泌乳牛; 粪氮; 粪磷; 日粮营养成分; 预测模型

中图分类号: X713

文献标志码: A

文章编号: 2095-6819(2017)03-0234-08

doi: 10.13254/j.jare.2017.0038

### Prediction of Fecal Nitrogen and Fecal Phosphorus Content for Lactating Dairy Cows in Large-scale Dairy Farms

QU Qing-bo, YANG Peng, ZHAI Zhong-wei, LI Ai-xiu, ZHANG Ke-qiang\*

(Agro-environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture, Tianjin 300191, China)

**Abstract:** To facilitate efficient and sustainable manure management and reduce potential pollution, it's necessary for precise prediction of fecal nutrient content. The aim of this study is to build prediction models of fecal nitrogen and phosphorus content by the factors of dietary nutrient composition, days in milk, milk yield and body weight of Chinese Holstein lactating dairy cows. 20 kinds of dietary nutrient composition and 60 feces samples were collected from lactating dairy cows from 7 large-scale dairy farms in Tianjin City; The fecal nitrogen and phosphorus content were analyzed. The whole data set was divided into training data set and testing data set. The training data set, including 14 kinds of dietary nutrient composition and 48 feces samples, was used to develop prediction models. The relationship between fecal nitrogen or phosphorus content and dietary nutrient composition was illustrated by means of correlation and regression analysis using SAS software. The results showed that fecal nitrogen (FN) content was highly positively correlated with organic matter intake (OMI) and crude fat intake (CFI), and correlation coefficients were 0.836 and 0.705, respectively. Negative correlation coefficient was found between fecal phosphorus (FP) content and body weight (BW), and the correlation coefficient was -0.525. Among different approaches to

收稿日期: 2017-02-15

基金项目: 天津市科技支撑计划(重点)项目(12ZCZDNC09600); 中国农业科学院科技创新工程项目; 农业科研杰出人才及其创新团队项目

作者简介: 渠清博(1992-), 女, 山西怀仁人, 硕士研究生, 主要从事畜禽养殖业污染防治研究。E-mail: qingboqu2014@163.com

\*通信作者: 张克强 E-mail: kqzhang68@126.com

develop prediction models, the results indicated that determination coefficients of multiple linear regression equations were higher than those of simple linear regression equations. Specially, fecal nitrogen content was excellently predicted by milk yield (MY), days in milk (DIM), organic matter intake (OMI) and nitrogen intake (NI), and the model was as follows:  $y=0.43+0.29 \times MY+0.02 \times DIM+0.92 \times OMI-13.01 \times NI$  ( $R^2=0.96$ ). Accordingly, the highest determination coefficient of prediction equation of FP content was 0.62, when body weight (BW), phosphorus intake (PI) and nitrogen intake (NI) were combined as predictors. The prediction equation was as follows:  $y=22.97-0.026 \times BW-4.02 \times NI+14.63 \times PI$ . Using the testing data set, including 6 kinds of dietary nutrient composition and 18 feces samples for the external validation, the relative error between predicted value and measured value of fecal nitrogen and fecal phosphorus content were 1.62% and 3.81%, respectively; the standard error of prediction were  $0.70 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$  and  $0.68 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ , respectively. The results indicated the equations had good accuracy for predicting fecal nitrogen and fecal phosphorus content.

**Keywords:** lactating dairy cows; fecal nitrogen; fecal phosphorus; dietary nutrient composition; prediction models

基于不同泌乳期奶牛日粮营养成分及其基本生产状况开展粪便氮磷含量预测模型的研究,对于从源头上控制规模化奶牛场粪便污染物的产生,实现其合理资源化和无害化利用具有重要的意义。数学模型法作为一种定量预测方法,在畜禽粪便氮磷含量预测方面的应用越来越普遍<sup>[1-5]</sup>。Dragun<sup>[6]</sup>,Moral等<sup>[7]</sup>,Suresh等<sup>[8]</sup>,韩鲁佳等<sup>[9]</sup>分别基于粪便比重、电导率及pH值等理化指标建立了预测畜禽粪便氮磷含量的数学模型。该类预测模型具有较高的预测精度,在实际应用中需配套相应的理化指标的检测装置以实现快速预测,同时对操作人员也有一定的专业要求。Reeves等<sup>[10]</sup>,Saeys等<sup>[11]</sup>,樊霞等<sup>[12]</sup>考察了利用近红外光谱分析建立快速预测畜禽粪便氮磷含量的数学模型的可行性,结果表明,基于近红外光谱分析建立的粪便氮磷含量的预测模型具有较高的精度,但近红外光谱仪器昂贵,一次性投入大,并且所建立的定标模型需要反复定标、验证和不断升级优化<sup>[13]</sup>。

有研究表明,基于畜禽日粮营养成分<sup>[14]</sup>可快速预测粪便氮磷含量。该方法适合于可获得日粮营养成分的规模化养殖场对其畜禽粪便氮磷含量进行估算,为粪便的资源化和无害化利用提供基础数据,也可为规模化养殖场从日粮角度上寻求减排措施提供一定的参考。国外许多研究人员如Tomlinson等<sup>[15]</sup>,Nennich等<sup>[16]</sup>,Jiao等<sup>[17]</sup>基于此方法建立了快速预测泌乳牛粪便氮磷含量的数学模型。这些预测模型在模型复杂度、建立模型的方法、选择的变量和适用范围等方面各不相同。而且我国奶牛养殖品种、饲料组成及养殖模式与国外存在较大差别,直接利用国外的预测模型存在较大误差。国内从日粮营养成分的角度对规模化奶牛场泌乳牛粪便氮磷含量预测模型的研究较少。陈海媛等<sup>[18]</sup>以日粮采食量及摄入氮、磷含量为自变量建立了中国荷斯坦奶牛粪便氮磷含量的预测模型,但其未对奶牛的养殖阶段进行细分,而泌乳牛作

为奶牛牛群结构的重要组成部分,其粪便产生量最大,氮、磷含量最高<sup>[19]</sup>,是奶牛场造成环境污染的主要因素。

本文以中国荷斯坦泌乳期奶牛为研究对象,探讨养殖过程中泌乳牛日粮营养成分及其基本生产状况对粪便氮磷含量的影响,分析各因素之间的相关性,建立适合我国荷斯坦奶牛养殖模式的粪便氮磷含量的预测模型,为合理预测规模化奶牛场泌乳牛粪便氮磷含量提供简便有效的方法和依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 采样点基本概况

在天津地区选取奶牛养殖品种为中国荷斯坦奶牛、年存栏量 $\geq 500$ 头的具有代表性的7家规模化奶牛场为采样点。各采样点粗饲料主要以苜蓿、燕麦、羊草、全株玉米为主,精饲料以精补料、棉籽、豆皮、甜菜粕、麸皮为主,采用全混合日粮(total mixed rations, TMR)饲喂技术进行饲喂,奶牛在舍内自由采食。舍内粪便主要采用机械干清或干清+水冲的清粪方式进行收集。

### 1.2 基础数据收集

通过调查问卷的形式,收集养殖场的基本信息,包括奶牛存栏量、饲料组成、饲喂方式以及泌乳期奶牛日粮营养成分及基本生产状况等基础数据。其中日粮营养成分主要包括日粮摄入量(dietary intake),干物质摄入量(dry matter intake,DMI),粗蛋白摄入量(crude protein intake,CPI),粗脂肪摄入量(crude fat intake,CFI),有机质摄入量(organic matter intake,O-MI),氮摄入量(nitrogen intake,NI)以及磷摄入量(phosphorus intake,PI);基本生产状况主要包括产奶量(milk yield,MY),产奶天数(days in milk,DIM)及体重(body weight,BW)。在调研过程中,要求各养殖场饲喂员认真填写调研当天养殖场的基本信息,其中

日粮营养成分部分应根据日粮检测报告如实填写,以确保数据的准确无误。本试验共收集了 7 个采样点共 20 组不同日粮配方的泌乳期奶牛的日粮营养成分及其基本生产状况等基础数据,作为模型的自变量集。

### 1.3 样品采集与制备

参照 GB/T 25169—2010 的相关规定,以采样点各泌乳期奶牛牛舍为单位,同一日粮配方的泌乳期奶牛采集 3 份粪便样品,每份样品随机选取不少于 5 头泌乳牛的新鲜粪便于采样盆中,充分混匀后,采用四分法取约 1 kg 左右的样品于采样盒中并进行编号,并按每 100 g 样品添加 10 mL 4.5 mol·L<sup>-1</sup> 的 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 进行现场固定。将采集的样品带回实验室置于室外阴凉处摊开风干至干燥状态,用粉碎机粉碎,并过 40 目筛网,保证制备样品的粒径小于等于 1 mm。将粉碎后的样品装入塑料密封袋后贴上标签,置于室内常温下(25 ℃)干燥避光保存待分析测定。本试验共采集了 60 份泌乳期荷斯坦奶牛的粪便样品,并对其总氮(fecal nitrogen, FN)、总磷(fecal phosphorus, FP)含量进行了测定,作为模型的因变量集。

### 1.4 测定方法

参照《有机肥料(NY 525—2012)》的相关规定,对风干粪便样品进行消解测定。粪便总氮含量采用蒸馏滴定法利用凯氏定氮仪测得(型号:KDY-9810);总磷含量采用分光光度法利用紫外分光光度计测得(型号:HACH DR5000);含水量采用传统烘干法<sup>[20]</sup>利用电热恒温鼓风干燥箱测得(型号:DGG-9240B);每个样

品做 3 个平行,取其平均值作为最终的测定结果。

### 1.5 统计分析

采用 SAS 统计分析软件(SAS 9.1.3)对数据进行处理分析:通过相关性分析 Proc corr 考察泌乳牛日粮营养成分及其基本生产状况等基础数据与粪便总氮、总磷含量的相关性,其指标形式为 Pearson 相关系数,并通过 *t* 检验来确定 Pearson 相关系数的显著性。通过线性回归分析 Proc reg 建立基于泌乳牛日粮营养成分及其基本生产状况等基础数据预测粪便总氮、总磷含量的数学模型,通过回归方程的决定系数 *R*<sup>2</sup> 与均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)考察方程的精确度,并通过 *F* 检验考察回归方程的显著性。最后对预测模型进行了外部验证,通过预测值与测定值间的相对误差,线性回归方程的决定系数及预测标准差(Standard Error of Prediction, SEP)对预测模型的验证结果进行评估<sup>[21]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 基础数据分析

对泌乳牛日粮营养成分摄入量、体重、产奶量、产奶天数及粪便总氮、粪便总磷含量的统计结果见表 1。由于不同奶牛场饲养管理方式各不相同,泌乳牛的日常组成多样化,其营养成分的摄入量存在一定差异。由表 1 可知,日粮粗蛋白摄入量 CPi、粗脂肪摄入量 CFi 及氮、磷摄入量的变异系数分别为 19.54%、27.97%、19.57% 和 16.95%,均大于 15%,表明该样本具有一定的代表性。各采样点不同泌乳期奶牛的体

表 1 试验基础数据及粪便总氮、粪便总磷含量统计结果

Table 1 Statistical results of basic data, fecal nitrogen and fecal phosphorus content

变量 Variable	最小值 Minimum	最大值 Maximum	平均值 Mean	极差 Range	标准差 SD	变异系数 CV/%
日粮摄入量 Dietary intake/kg·d <sup>-1</sup> ·头 <sup>-1</sup>	39.6	53.51	47.44	13.91	3.64	7.68
干物质摄入量 DMI/kg·d <sup>-1</sup> ·头 <sup>-1</sup>	19.66	27.05	24.05	7.39	2.35	9.77
粗蛋白摄入量 CPi/kg·d <sup>-1</sup> ·头 <sup>-1</sup>	2.84	5.38	3.89	2.54	0.76	19.54
粗脂肪摄入量 CFi/kg·d <sup>-1</sup> ·头 <sup>-1</sup>	0.27	1.63	1.10	1.36	0.31	27.97
有机质摄入量 OMI/kg·d <sup>-1</sup> ·头 <sup>-1</sup>	18	25.16	22.11	7.16	2.19	9.90
氮摄入量 NI/kg·d <sup>-1</sup> ·头 <sup>-1</sup>	0.45	0.86	0.62	0.41	0.12	19.57
磷摄入量 PI/kg·d <sup>-1</sup> ·头 <sup>-1</sup>	0.07	0.13	0.1	0.06	0.02	16.95
产奶天数 DIM/d	68	372	215	304	94.85	44.03
体重 BW/kg·头 <sup>-1</sup>	550	750	660	200	47.57	7.20
产奶量 MY/kg·d <sup>-1</sup> ·头 <sup>-1</sup>	18.6	50	32.85	31.4	9.71	29.55
粪便总氮 FN/mg·g <sup>-1</sup>	21.35	31.94	26.82	10.59	2.36	8.79
粪便总磷 FP/mg·g <sup>-1</sup>	2.76	6.78	4.53	4.02	0.93	20.48

注:粪便总氮、总磷含量均以干重计。

Note: Fecal nitrogen and fecal phosphorus content are calculated on dry basis.

重 BW、产奶量 MY 和产奶天数 DIM 之间也存在显著差异,其中泌乳牛的最小产奶天数 DIM 仅为 68 d,最大可达 372 d;随着产奶天数 DIM 的增加,泌乳牛的体重 BW 也逐渐增加,最高可达 750 kg·头<sup>-1</sup>;而产奶量 MY 则随着泌乳牛产奶天数的增加呈下降趋势。

分析泌乳牛粪便总氮、总磷含量可知,采集的泌乳牛粪便的总氮、总磷含量的平均值分别为 26.82±2.36、4.53±0.93 mg·g<sup>-1</sup>。由于各采样点泌乳牛日粮营养成分的摄入量各不相同,其粪便总氮、总磷的含量也存在较大差异。总磷含量的最大值约是最小值的 2 倍多,变异系数大于 20%。而总氮含量最大值与最小值间的极差也达 10.59 mg·g<sup>-1</sup>。表明日粮营养成分对泌乳牛粪便氮磷含量影响显著。

## 2.2 泌乳牛及其日粮基础数据与粪便总氮含量的关系

### 2.2.1 相关性分析

随机选取 14 组泌乳牛日粮营养成分及其基本生产状况等基础数据,分析其与对应粪便总氮含量的关系,见表 2。从表 2 可以看出,除与产奶天数 (DIM) 相关性较弱外,粪便总氮含量与其他各因子均具有一定的相关性。其中,粪便总氮含量与产奶量 MY、干物质摄入量 DMI 以及磷摄入量 PI 具有显著的正相关性 ( $P < 0.05$ ), Pearson 相关系数分别为 0.579、0.549 和 0.64。粪便总氮含量与日粮粗脂肪摄入量 CFi 及有机质摄入量 OMI 的 Pearson 相关系数大于 0.7,具有强相关性。粪便总氮含量与泌乳牛体重 BW、日粮摄入量 Dietary intake、粗蛋白摄入量 CPi 等

其他指标虽具有一定的相关性,但 Pearson 相关系数较小,且不显著 ( $P > 0.1$ )。

### 2.2.2 回归分析

#### 2.2.2.1 一元线性回归

基于相关性分析,对粪便总氮含量与泌乳牛基本生产状况及其日粮基础数据的一元线性回归方程进行了拟合,结果见表 3。比较分析各一元线性回归方程的决定系数可知,有机质摄入量 OMI 与粪便总氮含量的一元线性回归拟合度较高,决定系数  $R^2$  值为 0.70 ( $P < 0.01$ ),均方根误差 RMSE 为 1.270 mg·g<sup>-1</sup>,预测值与真值间的偏差较小(方程 1)。表明基于有机质摄入量 OMI 可较精确地预测粪便总氮含量。基于粗脂肪摄入量 CFi、磷摄入量 PI、泌乳牛产奶量 MY 及干物质摄入量 DMI 分别建立的预测粪便总氮含量的一元线性回归方程虽然通过了  $F$  检验,但方程的决定系数  $R^2$  值相对较低(方程 2~方程 5),因此有待进一步提高方程的拟合度和预测精度。而泌乳牛体重 BW、日粮摄入量 Dietary intake 及产奶天数 DIM 等与粪便总氮含量的一元线性回归方程的决定系数较低,拟合度较差,未通过  $F$  检验,且均方根误差 RMSE 相对较高,基于其预测粪便总氮含量的误差较大。

#### 2.2.2.2 多元线性回归

在一元线性回归分析的基础上,进行了多元线性回归分析,并采用逐步回归的方法对模型进行优化和对比,见表 4。结果表明,除了基于泌乳牛产奶量 MY、产奶天数 DIM 和日粮粗蛋白摄入量 CPi、粗脂肪摄入

表 2 泌乳牛及其日粮基础数据与粪便总氮含量相关性分析

Table 2 Relationships between basic data of lactating dairy cows, diet and fecal nitrogen content

项目 item	BW	MY	DIM	Dietary intake	DMI	CPi	CFi	OMI	NI	PI
Pearson 相关系数	-0.44	0.579**	-0.26	0.361	0.549**	0.404	0.705**	0.836***	0.401	0.64**
显著检验值	0.119	0.03	0.37	0.205	0.042	0.218	0.016	0.001	0.221	0.034

注:\* 表示在 0.1 水平下显著;\*\* 表示在 0.05 水平下显著;\*\*\* 表示在 0.01 水平下显著;下同。

Note:\* means significant correlation at 0.1 level;\*\* means significant correlation at 0.05 level;\*\*\* means significant correlation at 0.01 level;The same below.

表 3 预测粪便总氮含量的一元线性回归方程

Table 3 Simple linear regression equations for predicting fecal nitrogen content

方程编号 Equation no.	自变量 Independent variable	预测方程 Prediction equation	决定系数 $R^2$ Determination coefficient	$F$ 检验 $F$ -test ( $P$ )	均方根 RMSE/mg·g <sup>-1</sup>
1	OMI	$y=8.431+0.781 \times \text{OMI}$	$R^2=0.70$	<0.01	1.270
2	CFi	$y=21.179+4.093 \times \text{CFi}$	$R^2=0.50$	<0.05	1.644
3	PI	$y=17.56+78.88 \times \text{PI}$	$R^2=0.41$	<0.05	1.781
4	MY	$y=21.686+0.133 \times \text{MY}$	$R^2=0.34$	<0.05	1.880
5	DMI	$y=13.761+0.508 \times \text{DMI}$	$R^2=0.30$	<0.05	1.927

量 CFi 建立的二元线性回归方程较一元线性回归方程的决定系数略有提高外(方程 12 和方程 13),其余多元线性回归方程的决定系数均得到显著提高。其中以产奶量 MY、产奶天数 DIM、日粮有机质摄入量 OMI 及氮摄入量 NI 为自变量,粪便总氮含量为因变量的多元线性回归方程的决定系数  $R^2$  高达 0.96 ( $P < 0.001$ ),均方根误差 RMSE 仅为  $0.577 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$  (方程 6)。表明基于产奶量 MY、产奶天数 DIM、日粮有机质摄入量 OMI 及氮含量 NI 可精确预测泌乳牛粪便总氮含量。此外,基于日粮粗蛋白摄入量 CPi、粗脂肪摄入量 CFi、有机质、氮、磷摄入量 (OMI、NI、PI) 建立的预测方程或基于有机质、氮、磷摄入量 (OMI、NI、PI) 或有机质摄入量 OMI 和氮摄入量 NI 也可较精确地预测粪便总氮含量,其预测方程的决定系数  $R^2$  均在 0.80 以上,方程拟合度较高,且均方根误差 RMSE 也相对较低(方程 8~方程 10)。

### 2.3 泌乳牛及其日粮基础数据与粪便总磷含量的关系

#### 2.3.1 相关性分析

随机选取 14 组泌乳牛基本生产状况及其日粮营养成分等基础数据,分析其与对应粪便总磷含量的相关关系,见表 5。从表 5 可以看出,泌乳牛粪便总磷含量与体重 BW 呈显著负相关( $P < 0.10$ ),Pearson 相关系数为-0.525。泌乳牛粪便总磷含量与其他指标虽具有一定的相关性,但 Pearson 相关系数均较小,且不显著( $P > 0.10$ )。

### 2.3.2 回归分析

#### 2.3.2.1 一元线性回归

在相关分析的基础上,对粪便总磷含量与泌乳牛及其日粮基础数据的一元线性回归方程进行了分析。结果表明,基于泌乳牛体重 BW 建立的预测粪便总磷含量的预测方程为: $y=11.42-0.01 \times \text{BW}$ ,  $R^2$  值为 0.28 ( $P < 0.10$ ),均方根误差 RMSE 为  $0.910 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。方程的决定系数较低,预测误差较大。总磷与其他基础数据的一元线性回归方程的决定系数均较低,方程拟合度差,且不显著,有待对其进行进一步的研究。

#### 2.3.2.2 多元线性回归

在一元线性回归分析的基础上,进行了粪便总磷含量的多元线性回归分析,并采用逐步回归的方法对模型进行优化和对比,见表 6。结果表明,相比于一元线性回归方程,多元线性回归方程的决定系数得到显著提高。其中,基于泌乳牛体重 BW、氮摄入量 NI 及磷摄入量 PI 建立的多元线性回归方程的决定系数  $R^2$  为 0.62 ( $P < 0.10$ ),均方根误差 RMSE 为  $0.832 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ,预测值与真值的偏差相对较小(方程 14)。而以泌乳牛体重 BW、日粮粗蛋白摄入量 CPi、粗脂肪摄入量 CFi 为自变量,粪便总磷含量为因变量的多元线性回归方程的决定系数  $R^2$  为 0.58 ( $P < 0.10$ ),均方根误差 RMSE 为  $0.873 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ (方程 15),与前者相近。表明基于泌乳牛体重 BW、氮摄入量 NI、磷摄入量 PI 或日粮粗蛋白摄入量 CPi、粗脂肪摄入量 CFi,可粗略预测泌

表 4 预测粪便总氮含量的多元线性回归方程

Table 4 Multiple linear regression equations for predicting fecal nitrogen content

方程编号 Equation no.	自变量 Independent variable	预测方程 Prediction equation	决定系数 $R^2$ Determination coefficient	F 检验 F-test(P)	均方根 RMSE/ $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$
6	MY、DIM、OMI、NI	$y=0.43+0.29 \times \text{MY}+0.02 \times \text{DIM}+0.92 \times \text{OMI}-13.01 \times \text{NI}$	$R^2=0.96$	$<0.001$	0.577
7	MY、DIM、CFi	$y=5.90+0.27 \times \text{MY}+0.03 \times \text{DIM}+4.82 \times \text{CFi}$	$R^2=0.91$	$<0.001$	0.806
8	CPi、CFi、OMI、NI、PI	$y=1.33-34.51 \times \text{CPi}-1.60 \times \text{CFi}+1.53 \times \text{OMI}+204.0 \times \text{NI}+2.46 \times \text{PI}$	$R^2=0.85$	$<0.05$	1.192
9	OMI、NI、PI	$y=5.07+1.30 \times \text{OMI}-8.30 \times \text{NI}-26.02 \times \text{PI}$	$R^2=0.81$	$<0.01$	0.812
10	OMI、NI	$y=6.15+1.09 \times \text{OMI}-6.96 \times \text{NI}$	$R^2=0.80$	$<0.01$	1.110
11	DMI、BW、MY、DIM	$y=7.232+0.680 \times \text{DMI}-0.014 \times \text{BW}+0.180 \times \text{MY}+0.025 \times \text{DIM}$	$R^2=0.72$	$<0.05$	1.404
12	CPi、CFi	$y=18.82+0.67 \times \text{CPi}+3.77 \times \text{CFi}$	$R^2=0.57$	$<0.05$	1.615
13	MY、DIM	$y=11.039+0.318 \times \text{MY}+0.022 \times \text{DIM}$	$R^2=0.56$	$<0.05$	1.600

表 5 泌乳牛及其日粮基础数据与粪便总磷含量相关性分析

Table 5 Relationships between basic data of lactating dairy cows, diet and fecal phosphorus content

项目 item	BW	MY	DIM	Dietary intake	DMI	CPi	CFi	OMI	NI	PI
Pearson 相关系数	-0.525*	0.055	-0.133	0.216	0.136	-0.196	0.296	0.126	-0.205	0.248
显著检验值	0.054	0.851	0.65	0.459	0.642	0.563	0.376	0.712	0.545	0.463

表6 预测粪便总磷含量的多元线性回归方程

Table 6 Multiple linear regression equations for predicting fecal phosphorus content

方程编号 Equation no.	自变量 Independent variable	预测方程 Prediction equation	决定系数 $R^2$ Determination coefficient	F 检验 F-test(P)	均方根 RMSE/mg·g <sup>-1</sup>
14	BW、NI、PI	$y=22.97-0.026 \times BW-4.02 \times NI+14.63 \times PI$	$R^2=0.62$	<0.10	0.832
15	BW、CPI、CFi	$y=23.91-0.57 \times CPI+0.32 \times CFi-0.03 \times BW$	$R^2=0.58$	<0.10	0.873
16	MY、BW、DMI	$y=8.18+0.31 \times DMI-0.01 \times BW-0.08 \times MY$	$R^2=0.40$	0.146 4	0.905
17	MY、BW、DIM	$y=15.20-0.01 \times BW-0.06 \times MY-0.01 \times DIM$	$R^2=0.35$	0.217 3	0.946

乳牛粪便总磷含量。基于泌乳牛产奶量 MY、体重 BW、干物质摄入量 DMI 或产奶天数 DIM 建立的预测方程(方程 16 和方程 17)的决定系数  $R^2$  分别为 0.40 和 0.35,均小于 0.5,方程拟合度较差,且不显著,均方根误差 RMSE 也相对较大,表明基于其预测粪便总磷含量的误差较大。

#### 2.4 模型验证

为了进一步验证泌乳牛粪便氮磷含量的最优预测模型(方程 6 和方程 14),选取 6 组泌乳牛日粮营养成分及基本生产状况的基础数据和对应的 18 份粪便样品的氮磷含量对其进行外部验证,验证评价指标结果如表 7 所示。由表 7 可知,粪便总氮含量测定值的平均值为 28.05 mg·g<sup>-1</sup>,预测方程 6 的预测值的平均值为 27.60 mg·g<sup>-1</sup>,预测值与测定值间的平均相对误差为 1.62%,其线性回归方程的决定系数  $r^2$  为 0.90,预测标准差为 0.70 mg·g<sup>-1</sup>,表明预测模型验证的精确度较高,可用于精确预测规模化奶牛场泌乳牛粪便总氮含量。粪便总磷含量测定值的平均值为 4.28 mg·g<sup>-1</sup>,预测方程 14 的预测值的平均值为 4.11 mg·g<sup>-1</sup>,预测值与测定值间的平均相对误差为 3.81%,其线性回归方程的决定系数  $r^2$  为 0.58,预测标准差为 0.68 mg·g<sup>-1</sup>,表明方程具有一定的预测精度,可用于粗略预测粪便总磷含量。

### 3 讨论

日粮营养成分的摄入量与粪便氮磷含量密切相关<sup>[22-23]</sup>。基于日粮营养成分摄入量建立的粪便氮磷含量的预测模型对于规模化养殖场从日粮源头寻求氮

磷的减排措施,合理预测粪便氮磷含量,实现其合理的资源化利用具有重要的意义<sup>[24]</sup>。本研究基于我国荷斯坦奶牛的养殖模式,综合考虑日粮营养成分与泌乳牛基本生产状况对粪便氮磷含量的影响,建立了中国荷斯坦泌乳期奶牛粪便氮磷含量的预测模型。模型解决了因泌乳牛体重、产奶量、产奶天数及日粮营养成分摄入量等不同而带来的误差问题,模型预测精度较高,适用范围较广。研究发现单独基于有机质摄入量 OMI 与粗脂肪摄入量 CFi 可预测泌乳牛粪便总氮含量(方程 1 和方程 2),该研究结果进一步丰富了泌乳牛粪便总氮含量的单变量预测模型<sup>[25-26]</sup>。其中方程 1 的  $R^2$  值和均方根误差 RMSE 分别为 0.70 和 1.270 mg·g<sup>-1</sup>,模型预测精度较高,可较精确地预测粪便总氮含量。方程 2 的  $R^2$  值和均方根误差 RMSE 分别为 0.50 和 1.644 mg·g<sup>-1</sup>,该模型预测精度有待提高,可用于粗略预测粪便总氮含量。通过增加泌乳牛体重、产奶量、产奶天数等预测因子,预测模型的精确度显著提高。本试验以泌乳牛体重、产奶量、产奶天数及日粮有机质、氮、磷摄入量等为自变量,建立的预测粪便总氮含量的多元线性回归方程的决定系数显著高于一元线性回归方程,该研究结果与 Yan 等<sup>[27]</sup>,Reed 等<sup>[28]</sup>,Marini 等<sup>[29]</sup>,Huhtanen 等<sup>[30]</sup>的结果一致。其中方程 6~方程 10 的决定系数  $R^2 \geq 0.8$ ,均方根误差 RMSE 在 0.5~1.2 mg·g<sup>-1</sup> 之间,模型预测精度较高,可较精确地预测粪便总氮含量,为粪便的资源化利用,特别是粪肥还田提供基础数据<sup>[31-32]</sup>。方程 11、方程 12 和方程 13 的决定系数  $R^2: 0.5 \leq R^2 < 0.8$ ,均方根误差 RMSE 分别为 1.404、1.615 mg·g<sup>-1</sup> 和 1.600 mg·g<sup>-1</sup>,该模型可粗略地

表7 预测模型验证结果

Table 7 External validation of the prediction model

方程编号 Equation no.	测定值平均值/mg·g <sup>-1</sup> Mean measured value	预测值平均值/mg·g <sup>-1</sup> Mean predicted value	相对误差/% Relative error	$r^2$	预测标准差/mg·g <sup>-1</sup> SEP
6	28.05	27.60	1.62	0.90	0.70
14	4.28	4.11	3.81	0.58	0.68

注: $r^2$ 为预测值与测定值线性回归方程的决定系数。

Note: $r^2$  is determination coefficient for linear regression between predicted and measured value.

预测泌乳牛粪便总氮含量,为养殖场粪污处理工程的设计、实施及运行提供科学依据<sup>[33]</sup>。

相比粪便总氮含量的预测模型,粪便总磷含量预测模型的精度相对较低。在一元线性回归方程中,仅泌乳牛体重 BW 与粪便总磷含量具有一定的负相关性,基于其建立的预测方程的决定系数  $R^2$  为 0.28,均方根误差 RMSE 为  $0.910 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ,预测误差相对较大。而建立的多元回归方程的决定系数相对一元回归方程虽有所提高,但仍相对较低。其中方程 14 和方程 15 的决定系数  $R^2: 0.5 \leq R^2 < 0.8$ ,均方根误差 RMSE:  $0.8 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \leq \text{RMSE} < 1.0 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ,可粗略地预测泌乳牛粪便总磷的含量;方程 16 和方程 17 的决定系数  $R^2 < 0.5$ ,无法精确预测粪便总磷含量,其预测精度有待进一步提高。与 Nennich 等<sup>[16]</sup>、美国农业工程师协会 ASAE<sup>[34]</sup>及 Alvarez-Fuentes 等<sup>[35]</sup>研究结果相比,本研究建立的粪便总磷的预测模型精度相对较低。一方面可能是因为拟合的样本量的个数有限,模型稳定性较差<sup>[24]</sup>,另一方面也可能与统计分析的方法有关。本研究主要进行了一元和多元线性回归分析,有待进一步对数据样本进行非线性回归分析<sup>[36]</sup>。

#### 4 结论

(1)通过相关性分析发现,粪便总氮含量与日粮有机质摄入量 OMI 和粗脂肪摄入量 CFi 具有显著的正相关性,相关系数分别为 0.836、0.705。粪便总磷含量与泌乳牛体重 BW 呈负相关性,相关系数为-0.525。该结论有助于养殖场从日粮营养成分的角度上寻求氮磷的减排措施。

(2)通过线性回归分析发现,粪便总氮含量的预测模型中,基于产奶量 MY、产奶天数 DIM、日粮有机质摄入量 OMI 及氮摄入量 NI 建立的预测模型的决定系数  $R^2$  最高,为 0.96,模型如下:  $y=0.43+0.29 \times \text{MY}+0.02 \times \text{DIM}+0.92 \times \text{OMI}-13.01 \times \text{NI}$ 。粪便总磷含量的预测模型中,基于泌乳牛体重 BW、氮摄入量 NI 及磷摄入量 PI 建立的预测模型的决定系数  $R^2$  最高,为 0.62,模型如下:  $y=22.97-0.026 \times \text{BW}-4.02 \times \text{NI}+14.63 \times \text{PI}$ 。

(3)通过预测模型的外部验证结果表明,粪便总氮的最优预测模型 ( $y=0.43+0.29 \times \text{MY}+0.02 \times \text{DIM}+0.92 \times \text{OMI}-13.01 \times \text{NI}$ )稳健性较好,可较准确地预测泌乳牛粪便总氮含量。粪便总磷的最优预测模型 ( $y=22.97-0.026 \times \text{BW}-4.02 \times \text{NI}+14.63 \times \text{PI}$ )的稳定性较好,但预测精度仍有待提高,可粗略估算泌乳牛粪便总磷含量。

#### 参考文献:

- [1] Huang G, Wang X, Han L. Rapid estimation of nutrients in chicken manure during plant-field composting using physicochemical properties[J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102(2): 1455-1461.
- [2] Tamburini E, Castaldelli G, Ferrari G, et al. Onsite and online FT-NIR spectroscopy for the estimation of fecal nitrogen and moisture content in poultry manure[J]. *Environmental Technology*, 2015, 36(18): 1-20.
- [3] Jorgensen H, Prapasongsa T, Poulsen H D. Models to quantify excretion of dry matter, nitrogen, phosphorus and carbon in growing pigs fed regional diets[J]. *Journal of Animal Science and Biotechnology*, 2013, 4(1): 1-9.
- [4] 杨增玲, 韩鲁佳, 刘依, 等. 基于摄入养分含量预测猪新鲜粪便肥料成分含量的试验研究[J]. *农业工程学报*, 2004, 20(1): 278-283. YANG Zeng-ling, HAN Lu-jia, LIU Yi, et al. Experimental study on estimating fertilizer value of raw swine slurries based on nutrients intake [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2004, 20(1): 278-283. (in Chinese)
- [5] 渠清博, 杨鹏, 翟中威, 等. 规模化畜禽养殖粪便主要污染物产生量预测方法研究进展[J]. *农业资源与环境学报*, 2016, 33(5): 397-406. QU Qing-bo, YANG Peng, ZHAI Zhong-wei, et al. Prediction methods of major pollutants production in manure from large-scale livestock and poultry farms: A review [J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2016, 33(5): 397-406. (in Chinese)
- [6] Dragn W. Quantitative and qualitative characteristics of manure from closed cycle pig farms[C]. Szczecin, Poland: Proceedings of the Rural Design Official Association, 1978.
- [7] Moral R, Perez-Murcia M D, Perez-Espinosa A, et al. Estimation of nutrient values of pig slurries in Southeast Spain using easily determined properties[J]. *Waste Management*, 2005, 25(7): 719-725.
- [8] Suresh A, Choi H L, Oh D I, et al. Prediction of the nutrients value and biochemical characteristics of swine slurry by measurement of EC-electrical conductivity[J]. *Bioresource Technology*, 2009, 100(20): 4683-4689.
- [9] 韩鲁佳, 胡峥峥, 阎巧娟, 等. 肉鸡粪便理化指标与其肥料成分含量的相关关系研究[J]. *农业工程学报*, 2002, 18(6): 123-126. HAN Lu-jia, HU Zheng-zheng, YAN Qiao-juan, et al. Correlations between chemical-physical properties and nutrient contents in broiler manure[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2002, 18(6): 123-126. (in Chinese)
- [10] Reeves J B. Near-infrared diffuse reflectance spectroscopy for the analysis of poultry manures[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2001, 49(5): 2193-2197.
- [11] Saeys W, Mouazen A M, Ramon H. Potential for onsite and online analysis of pig manure using visible and near infrared reflectance spectroscopy[J]. *Biosystems Engineering*, 2005, 91(4): 393-402.
- [12] 樊霞, 韩鲁佳, 皇才进, 等. 基于近红外光谱技术的牛粪成分含量测定方法[J]. *农业机械学报*, 2006, 37(3): 76-79. FAN Xia, HAN Lu-jia, HUANG Cai-jin, et al. Determination of nutrient contents in beef manure with near infrared reflectance spectroscopy

- [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2006, 37(3):76-79. (in Chinese)
- [13] 兴 丽, 韩鲁佳, 樊 霞. 快速预测畜禽粪便肥料成分含量方法研究进展[J]. 环境科学与技术, 2006, 29(10): 103-105.  
XING Li, HAN Lu-jia, FAN Xia. Progress on quick estimation of fertilizer value of animal manure[J]. *Environmental Science & Technology*, 2006, 29(10): 103-105. (in Chinese)
- [14] 娜仁花, 董红敏. 日粮类型对奶牛粪尿特性及氮排放的影响[J]. 畜牧与兽医, 2012, 44(5):26-30.  
NA Ren-hua, DONG Hong-min. Effects of dietary categories on feces/urine features and nitrogen emission in dairy cows[J]. *Animal Husbandry & Veterinary Medicine*, 2012, 44(5):26-30. (in Chinese)
- [15] Tomlinson A P, Powers W J, Van-Horn H H, et al. Dietary protein effects on nitrogen excretion and manure characteristics of lactating cows [J]. *Transactions of the ASAE*, 1996, 39(4): 1441-1448.
- [16] Nennich T D, Harrison J H, Van-Wieringen L M, et al. Prediction of manure and nutrient excretion from dairy cattle[J]. *Journal of Dairy Science*, 2005, 88(10):3721-3733.
- [17] Jiao H P, Yan T, Mc-Dowell D A. Prediction of manure nitrogen and organic matter excretion for young Holstein cattle fed on grass silage-based diets[J]. *Journal of Animal Science*, 2014, 92(7):3042-3052.
- [18] 陈海媛, 张宝贵, 郭建斌, 等. 规模化养殖的中国荷斯坦奶牛生产污系数模型的确定[J]. 中国环境科学, 2012, 32(10):1895-1899.  
CHEN Hai-yuan, ZHANG Bao-gui, GUO Jian-bin, et al. Modelling pollutant generation coefficients in Holstein dairy production[J]. *China Environmental Science*, 2012, 32(10):1895-1899. (in Chinese)
- [19] 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 环境保护部南京环境科学研究所. 第一次全国污染源普查畜禽养殖业产排污系数手册[EB/OL]. <http://doc.mbalib.com/view/e4c6ba36add-1542acd-faa10bf7db6c5a.html> (2009-02).  
Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, CAAS, Nanjing Institute of Environmental Sciences, MEP. A manual of the first national census of pollutant generation and discharge coefficient of livestock and poultry breeding industry[EB/OL]. <http://doc.mbalib.com/view/e4c6ba36add-1542acd-faa10bf7db6c5a.html> (2009-02). (in Chinese)
- [20] 鲍士旦. 土壤农化分析(第二版)[M]. 北京: 中国农业出版社, 2010.  
BAO Shi-dan. Soil and agricultural chemistry analysis (Second edition.)[M]. Beijing: Chinese Agriculture Press, 2010. (in Chinese)
- [21] 皇才进, 刘 贤, 杨增玲, 等. 秸秆热值近红外光谱模型的外部验证结果间的统计比较分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2009, 29(5):1264-1267.  
HUANG Cai-jin, LIU Xian, YANG Zeng-ling, et al. Statistical comparison of independent validation results for near infrared spectroscopy models predicting calorific value of straw[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2009, 29(5):1264-1267. (in Chinese)
- [22] 娜仁花, 王 月, 刘思强, 等. 日粮类型对奶牛产污的影响 [J]. 中国饲料, 2014(3):22-25.  
NA Ren-hua, WANG Yue, LIU Si-qiang, et al. Effects of diets on pollutants produced by dairy cows[J]. *China Feed*, 2014(3):22-25. (in Chinese)
- [23] Reid M, O'donovan M, Elliott C T, et al. The effect of dietary crude protein and phosphorus on grass-fed dairy cow production, nutrient status, and milk heat stability[J]. *Journal of Dairy Science*, 2014, 99(1):771-782.
- [24] Johnson A C B, Reed K F, Kebreab E. Short communication: Evaluation of nitrogen excretion equations from cattle[J]. *Journal of Dairy Science*, 2016, 99(9):7669-7678.
- [25] Higgs R J, Chase L E, Van Amburgh M E. Development and evaluation of equations in the Cornell net carbohydrate and protein system to predict nitrogen excretion in lactating dairy cows[J]. *Journal of Dairy Science*, 2012, 95(4):2004-2014.
- [26] Kebreab E, Strathe A B, Dijkstra J, et al. Energy and protein interactions and their effect on nitrogen excretion in dairy cows[C]//Energy and Protein Metabolism and Nutrition. EAAP International Symposium on Energy and Protein Metabolism and Nutrition, 2010, 127:417-426.
- [27] Yan T, Frost J P, Agnew R E, et al. Relationships among manure nitrogen output and dietary and animal factors in lactating dairy cows[J]. *Journal of Dairy Science*, 2006, 89(10):3981-3991.
- [28] Reed K F, Moraes L E, Casper D P, et al. Predicting nitrogen excretion from cattle[J]. *Journal of Dairy Science*, 2015, 98(5):3025-3035.
- [29] Marini J C, Fox D G, Murphy M R. Nitrogen transactions along the gastrointestinal tract of cattle: A meta-analytical approach[J]. *Journal of Animal Science*, 2007, 86(3):660-679.
- [30] Huhtanen P, Nousiainen J I, Rinne M, et al. Utilization and partition of dietary nitrogen in dairy cows fed grass silage-based diets[J]. *Journal of Dairy Science*, 2008, 91(9):3589-3599.
- [31] Reeves III J B. The present status of "quick tests" for on-farm analysis with emphasis on manures and soil: What is available and what is lacking?[J]. *Livestock Science*, 2007, 112(3):224-231.
- [32] Martinez-Suller L, Azzellino A, Provolo G. Analysis of livestock slurries from farms across Northern Italy relationship between indicators and nutrient content[J]. *Biosystems Engineering*, 2008, 99(4):540-552.
- [33] Hollmann M, Knowlton K F, Hanigan M D. Evaluation of solids, nitrogen and phosphorus excretion models[J]. *American Dairy Science Association*, 2008, 91(3):1245-1257.
- [34] American Society of Agricultural Engineers. Manure production and characteristics[S]. America: American Society of Agricultural Engineers, 2005.
- [35] Alvarez-Flentes G, Appuhamy J A D R N, Kebreab E. Prediction of phosphorus output in manure and milk by lactating dairy cows[J]. *Journal of Dairy Science*, 2016, 99(1):771-782.
- [36] Chen L J, Cui L Y, Xing L, et al. Prediction of the nutrient content in dairy manure using artificial neural network modeling[J]. *Journal of Dairy Science*, 2008, 91(12):4822-4829.