

张丽萍, 盛 婧, 刘红江, 等. 发酵床养猪过程中垫料 P 素和 K 素物质流分析[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(9): 1750-1755.

ZHANG Li-ping, SHENG Jing, LIU Hong-jiang, et al. Material flows of phosphorus and potassium in deep litter of swine biobeds[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(9): 1750-1755.

发酵床养猪过程中垫料 P 素和 K 素物质流分析

张丽萍^{1,2}, 盛 婧^{1,2}, 刘红江^{1,2}, 陈留根^{1,2}, 郑建初^{1,2*}

(1.江苏省农业科学院农业资源与环境研究所, 南京 210014; 2.江苏省农业科学院循环农业研究中心, 南京 210014)

摘 要:选取 3 种垫料(40%稻壳+60%菌糠、40%稻壳+60%锯木屑、40%稻壳+60%酒糟)为研究对象,分别在育肥猪进栏前和出栏后对垫料和表层土壤进行采样分析,采用物质流分析的方法分析了一个养猪周期内 3 种垫料 TP 和 TK 的损失途径。结果表明:P 素在发酵床养殖过程中主要的损失途径为猪采食与淋溶损失,总损失量分别为(FJ:40%稻壳+60%菌糠组合)15.69 kg、(FD:40%稻壳+60%锯木屑组合)16.61 kg、(FW:40%稻壳+60%酒糟组合)14.37 kg;而 3 种发酵床分别有(FJ)80.74 kg、(FD)52.48 kg、(FW)84.65 kg 的总 P 库存在垫料中,75%~85%的 P 素会滞留在垫料中,损失率均超过 14%。K 素的主要损失途径也为猪采食与淋溶损失,总损失量分别为(FJ)45.95 kg、(FD)33.95 kg、(FW)63.95 kg;总库存的 K 素分别为(FJ)158 kg、(FD)107 kg、(FW)136 kg,68%~78%的 K 素会留存在垫料中,损失率均超过 22%。养殖过后发酵床下部表层土壤会出现 P 素和 K 素累积现象,为了防止元素通过淋溶作用渗漏损失,建议发酵床垫料厚度要超过 50 cm。

关键词:磷;钾;发酵床垫料;养分转化;物质流分析

中图分类号:X71 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2016)09-1750-06 doi:10.11654/jaes.2016-0093

Material flows of phosphorus and potassium in deep litter of swine biobeds

ZHANG Li-ping^{1,2}, SHENG Jing^{1,2}, LIU Hong-jiang^{1,2}, CHEN Liu-gen^{1,2}, ZHENG Jian-chu^{1,2*}

(1.Institute of Agricultural Resources and Environment, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China; 2.Circular Agriculture Research Center, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China)

Abstract: In this study, material flows of phosphorus (P) and potassium (K) in deep litter of swine bio-beds were examined using three kinds of deep litter, i.e., 40% rice husk+60% mushroom bran (FJ), 40% rice husk+60% sawdust (FD), and 40% rice husk+60% vinasse (FW). Phosphorus and K transformations in deep litters and top soils during a feeding period were determined. Results indicated that phosphorus lost mainly via leaching and pig feeding, in which the losses were 15.69, 16.61 and 14.37 kg, respectively, for FJ, FD, and FW. Residual P were 80.74, 52.48, and 84.65 kg in deep litter of FJ, FD and FW, respectively, which accounted for 75%~85% of total P. The rest 14% of P was lost via foraging and leaching. The K losses were 45.95, 33.95, and 63.95 kg, in FJ, FD, and FW, respectively. The residual amount of K was 158, 107 and 136 kg, respectively in FJ, FD and FW, indicating that more than 68%~78% of K was retained in the litter. The loss rate was over 22% due to foraging and leaching. Accumulation of P and K in top soils was found at the bottom of biobed. In order to prevent nutrient losses through leaching, the litter depth of biobed should be more than 50 cm.

Keywords: phosphorus; potassium; biobed litter; nutrient transformation; material flow

发酵床养猪是新型环保养殖技术,不仅能够减少有害气体的排放,还能够保留垫料中绝大多数养分

(如 P、K 等)。虽然国内目前对发酵床养猪研究较多,但主要集中在发酵床垫料对猪舍环境改善、生猪生产性能提高以及猪肉品质等方面,关于垫料中各种成分含量的测定结果报道很少^[1]。应三成等^[2]对不同使用时间和类型的生猪发酵床垫料中的 22 个有机和无机成分进行了测定分析,发现 P 素和 K 素随发酵床使用时间的延长逐渐增多,同时对垫料中各种成分含量与

收稿日期:2016-01-20

基金项目:集约化农区种养结合生产技术与工程示范(201203050-2)

作者简介:张丽萍(1983—),女,汉族,博士,助研。目前从事的研究方向为农业资源与利用。E-mail:lp.zhang@hotmail.com

* 通信作者:郑建初 E-mail:zhengjianchu@hotmail.com

使用时间的关系以及不同类型发酵床垫料的成分差异有了初步的认识。郭彤等^[3]也对不同使用时间和深度的发酵床垫料进行研究发现,随着使用时间的延长,钾、总磷含量均显著增加;在使用1年和2年的垫料中从上层到下层总磷、总钾的浓度逐渐降低,而使用3年的垫料中间层总钾的浓度是最高的。陆扬等^[4]对连续饲养两批猪的发酵床垫料进行取样分析发现,总P含量显著提高,铵态氮、亚硝态氮和硝态氮浓度也显著升高。

发酵床垫料含有丰富的P素和K素,在清理后经过处理可以作为有机肥施用在农田、蔬菜地和果园土壤中。文献报道大多关注发酵床垫料对猪舍环境的改善、育肥猪生长、猪肉风味品质等方面的研究^[5-7],也有文献报道垫料还田后对植物和农作物的生长的影响^[8-10]。然而,在养猪前后发酵床垫料的理化性状变化,其中的P素和K素养分发生了怎样的转化,以及养分的流动过程和对周围环境的影响,目前国内研究较少。本研究旨在通过应用物质流分析的方法,探明养猪前后发酵床垫料内P素和K素等营养元素的物质流向和转化特点,并对该区域内的物质容纳量做出区域生态评价,以期为循环农业中种养结合下合理利用废弃物、可持续发展提供科学依据和新的视角。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究中涉及的发酵床养猪舍位于江苏省南京市六合区竹镇镇的江苏省农科院六合基地内,属亚热带湿润气候区域,降水量较多。通过前期试验,发酵床猪舍已经使用1年并养殖过两批次育肥猪,是一个稳定的生态系统。试验区因地制宜以节约经济成本和适宜生猪生长发育为前提,研究确定了3种较好垫料组合:稻壳+菌糠、稻壳+锯木屑、稻壳+酒糟。选取3个不同垫料配比的猪栏:FJ(40%稻壳+60%菌糠)、FD(40%稻壳+60%锯木屑)、FW(40%稻壳+60%酒糟)。

表1 不同试验物料基本理化性状

Table 1 Physical and chemical characteristics of experimental materials

物料	比重/ g·mL ⁻¹	容重/ g·cm ⁻³	孔隙度/%	最大持水量/%	pH值	EC值/ mS·cm
锯木屑	1.22	0.28	77.05	56.57	7.06	0.26
稻壳	1.44	0.12	91.67	40.37	6.92	1.53
酒糟	1.44	0.18	87.5	45.59	5.2	3.07
菌糠	1.31	0.29	77.86	37.66	6.38	3.2

每个猪栏面积为37 m²,存栏育肥仔猪15头,仔猪初始体重分别为FJ 28.75±1.21 kg、FD 28.09±2.01 kg、FW 27.91±1.49 kg,每天消耗饲料量为25 kg·栏⁻¹。床体厚度为50 cm。

本试验运行2年,共计饲养2批次,分别在每年的5月到9月进行饲养,每次育肥猪出栏后均清理垫料,并在下次上猪前铺设新的垫料,共计2次重复。将每一批次育肥猪入栏前设定为P0期,猪出栏后设定为P1期,养殖过程中始终保持自然通风状态。

1.2 样品采集与分析

1.2.1 垫料采集

鉴于猪的生活习性,每个栏区划分4个采样区:饮水区、重排便区、轻排便区、活动区(采用多点测量并通过不规则多边形计算确定各个区域的面积);按照垫料层厚度,每个小区域分层取样(0~20 cm、20~50 cm),垫料下部表层土壤取样厚度为0~10 cm,所有样品制成混合样,每个栏区4个重复,分别在第0 d与第150 d取样。混合样风干后过100目筛用于测定总磷(TP)和总钾(TK)。

1.2.2 样品分析

风干样品经过消煮后,其中TP用流动分析仪(SKALAR San++)测定,TK用火焰分光光度计(PHILES FI-6480)测定。

1.3 分析评价方法

1.3.1 物质流模型建立

应用物质流分析的方法分析发酵床养猪前后P素和K素的转化与损失,能够较全面地反映2种元素在各个阶段的含量变化,模型见图1。物质流总量遵循质量守恒定律,其公式为:物质的输入量(inputs)=物质的输出量(outputs)+库存净增量(NAS)^[11-13]。

鉴于猪舍主要是生物质资源在流动,数据收集和整理分析时重点考虑以下几个方面:(1)系统边界以一个养殖周期计,即5个月;(2)选取的3个猪栏养殖规模较小,存栏量为15头·栏⁻¹,共计45头;(3)结合猪舍的特点,以整个养殖阶段为研究对象;(4)其他隐藏流暂不予考虑。

元素P、K的MFA(物质流分析)公式如下所示:

P(或K)初始总库存+猪粪尿含P(或K)量=P(或K)输入=输出+总净库存P(或K) (1)

P(或K)输出=猪采食-P(或K)+淋溶-P(或K) (2)

为了利于猪群翻拱地面,发酵床养猪在饲养过程中的饲料喂食量为普通养猪的80%~90%^[14],因此猪群需要从垫料中拱食以摄入其余所需的10%~20%食

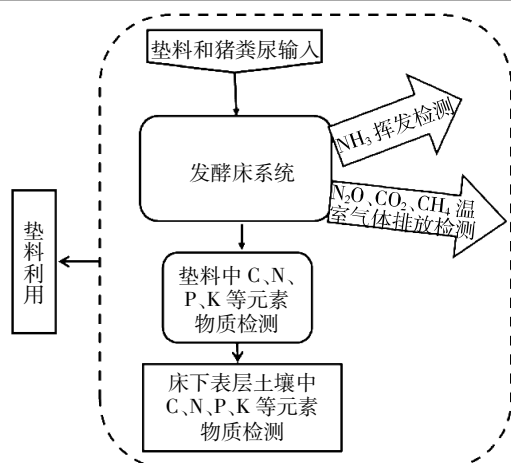


图1 发酵床养殖过程中各营养元素循环示意图

Figure 1 Chart of nutrient cycling in bio-bed during breeding period

物。在本试验中饲料投喂量为普通养猪的90%,因此猪群采食的10%的垫料作为发酵床系统的P和K元素输出。

1.3.2 数据统计分析

应用SPSS17.0和Excel2007软件进行数据处理,文中所列数据均为两次试验重复的平均值。

2 结果与分析

2.1 发酵床养猪P素物质流分析

2.1.1 P素输入分析

根据3种发酵床垫料测定分析数据,得出养殖阶段P素输入总量(表2)。每个发酵床投入的垫料量不同,每个发酵床输入的P素总量也不同。除去垫料本身所含P量,发酵床在养殖阶段的P素外源输入主要为猪粪尿排放。因此养殖阶段发酵床总P输入量=初始垫料含P量+猪粪尿含P量。在整个养殖阶段,3种发酵床垫料FJ、FD、FW输入的总P量分别为96.44、69.09、99.14 kg。

表2 不同垫料组合发酵床养殖过程中P素输入量

Table 2 Total inputs of P in three bio-beds during breeding period

项目	FJ	FD	FW
总床重/ $\times 10^3$ kg ⁻¹	8.29	6.32	8.02
含P量/g·kg ⁻¹	11.48	10.25	12.24
床体总P量/kg	85.65	58.30	88.35
育肥猪数量/头	15	15	15
总计粪尿含P量/kg	10.79	10.79	10.79
总P输入量/kg	96.44	69.09	99.14

注:育肥猪粪尿排量参照文献[15]计算。

2.1.2 P素转化与损失

在发酵床养猪过程中,P素转化或者损失的途径主要有2种:一部分经由猪的采食转化为猪身组成成分,一部分通过淋溶作用渗漏到发酵床下部表层土壤中。图2表明,养殖过后猪群采食垫料损失的P素总量分别为FJ8.57 kg、FD5.83 kg、FW8.84 kg,占P素总损失量的35%~62%;经淋溶作用渗漏到垫料下部表层土壤中的P素总量分别为FJ6.17 kg、FD10.13 kg、FW4.55 kg,在P素总损失中所占比例分别为FJ39.32%、FD60.99%、FW31.66%,可见FD中P的淋溶损失最大。

从表3可看出,养猪结束后3种发酵床的总P净库存分别为(FJ)80.74 kg、(FD)52.48 kg、(FW)84.65 kg,下降幅度分别为16.27%、24.04%、14.49%;养殖过后3种发酵床垫料的总损失分别为(FJ)15.69 kg、(FD)16.61 kg、(FW)14.37 kg。

2.2 发酵床养猪K素物质流分析

2.2.1 K素输入分析

根据3种发酵床垫料测定分析数据,得出养殖阶段K素输入总量(表4)。与P素输入相同,每个发酵床投入的垫料量不同,每个发酵床输入的K素总量也不同。除去垫料本身所含K量,发酵床在养殖阶段的K素外源输入主要为猪粪尿排放。因此养殖阶段

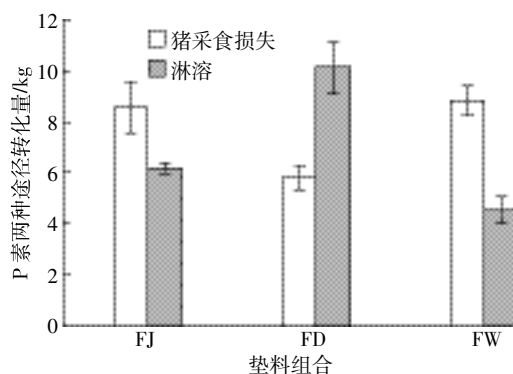


图2 两种途径的P素转化量

Figure 2 Two paths of P transformation during feeding period

表3 养猪结束后垫料的P素净库存和总损失量

Table 3 Total inventory and total loss of P in bio-bed litter at end of feeding

项目	床体P含量/ g·kg ⁻¹	库存 P量/kg	总损失 P量/kg	总P 留存率/%	总P 损失率/%
FJ	9.14	80.74	15.69	83.73	16.40
FD	6.85	52.48	16.61	75.96	24.66
FW	9.71	84.65	14.37	85.51	14.59

发酵床总 K 输入量=垫料含 K 量+猪粪尿含 K 量。在整个养殖阶段,3 种发酵床垫料 FJ、FD、FW 输入的总 K 量分别为 204、141、200 kg。

2.2.2 K 素转化与损失

与 P 元素相同,在发酵床养猪过程中,K 素转化或者损失的途径主要有 2 种:一部分经由猪的采食转化为猪身组成成分,一部分通过淋溶作用渗漏到发酵床下部表层土壤中。图 3 表明,养殖过后猪群采食垫料损失的 K 素总量分别为 FJ18.60 kg、FD12.30 kg、FW18.20 kg,占 K 素总损失量的 28%~40%;经淋溶作用渗漏到垫料下部表层土壤中的 K 素总量分别为 FJ25.19 kg、FD20.32 kg、FW43.38 kg,在 K 素总损失中所占比例分别为 FJ54.82%、FD59.85%、FW67.83%,FJ 对 K 素的吸纳效果最好。

从表 5 可看出,养猪结束后 3 种发酵床的总 K 净库存分别为(FJ)158 kg、(FD)107 kg、(FW)136 kg,下降幅度分别为22.53%、24.09%、31.98%,FW 损失的 K 素最多;养殖过后 3 种发酵床垫料的总损失分别为 (FJ)45.86 kg、(FD)33.93 kg、(FW)63.56 kg。

2.3 P 素和 K 素在土壤中的累积

猪粪便对土壤和水体的污染除了 N 元素外主要为 P 污染。一方面,猪饲料中含有部分不溶性蛋白及

抗营养因子,同时还含有以植酸磷形式存在于猪饲料中的 P 素,这些含氮和含磷物质未经消化就随粪便排出体外,滞留在粪便中;钾(K)虽然是动物机体中仅少于钙(Ca)和磷(P)的第三大矿物元素,但仍会有大量的 K 素随粪尿排出体外^[16]。P、K 随粪便排出体外后会累积在垫料中,上面的研究结果表明这 2 种元素会因淋溶作用渗漏到床体下部表层土壤中。经过对床体下部表层土壤采样分析,发现饲养过两批次猪之后,垫料下部表层土壤(0~10 cm)会出现 P 素和 K 素的累积(表 6),并且 3 种土壤 P 素和 K 素的含量均具有显著性差异。经过 2 个养殖周期后,FD 下部表层土壤总 P 含量最高,为 27.73 kg,FW 下部土壤总 K 含量最高,为 135.46 kg。表层土壤中,FJ 的 TP 含量和 FD 的 TK 含量均最低。

对发酵床床体下部表层土壤在养猪前后的 TP 和 TK 增量与超背景值比率进行统计分析,发现所选3 种发酵床垫料下部表层土壤的 TP 和 TK 不论是增量还是超背景值比率,每两者之间都具有显著性差异。在 TP 的增量和超背景值比率方面,FJ 两项都最低,分别为 15.68 kg 和 4.26;FD 的 TP 增量和超背景值比率最大,分别为 26.33 kg 和 19.99;FW 的两项均居中。而在 TK 的增量和超背景值比率方面,FD 两项都最低,分别为 40.46 kg 和 1.62,FW 两项都最高,分别为 86.98 kg 和 2.79,FJ 两项均居中(表 7)。

表 4 不同垫料组合发酵床养殖过程中 K 素输入量

Table 4 Total K inputs in three biobed during breeding period

项目	FJ	FD	FW
总床重/ $\times 10^3$ kg	8.29	6.32	8.02
含 K 量/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	24.93	21.54	25.16
床体总 K 量/kg	186	123	182
育肥猪数量/头	15	15	15
总计粪尿含 K 量/kg	17.95	17.95	17.95
总 K 输入量/kg	204	141	200

注:育肥猪粪尿排量参照有关文献[15]计算。

表 5 养猪结束后垫料的 K 素净库存和总损失量

Table 5 Total inventory and total loss of K in bio-bed litter at end of feeding

项目	床体 K 含量/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	库存 K 量/kg	总损失 K 量/kg	总 K 留存率/%	总 K 损失率/%
FJ	17.95	158	45.95	77.47	22.49
FD	13.79	107	33.95	75.91	24.07
FW	16.58	136	63.95	68.02	31.79

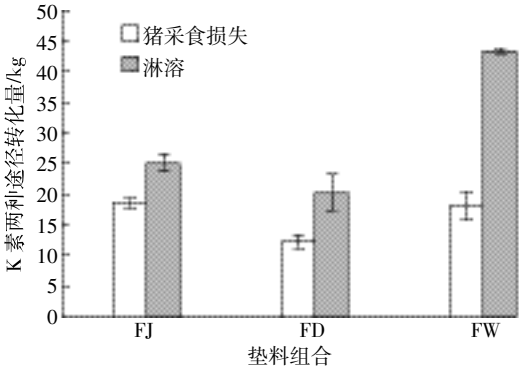


图 3 两种途径的 K 素转化量

Table 3 Two paths of K transformation during feeding period

表 6 发酵床垫料养猪前后床体下部表层土壤 TP 与 TK 含量

Table 6 Total P and K content in surface soil under bio-bed litter before and after pig-rearing

垫料组合	TP/kg		TK/kg	
	背景值	末值	背景值	末值
FJ	4.81c	20.49a	75.55c	125.63b
FD	1.39a	27.73c	65.14b	105.60a
FW	2.42b	23.71b	48.48a	135.46c

注:背景值为发酵床未上猪前表层土壤实测值;末值为养殖两批次育肥猪后表层土壤实测值。表中小写字母表示 $P<0.05$ 时的显著性水平。

表7 养殖两批次育肥猪后3种垫料下部表层土壤

TP与TK增量

Table 7 Total P and K increments in surface soil under bio-bed litters after two seasons of pig-rearing

垫料组合	TP		TK	
	增量/kg	超背景值比率	增量/kg	超背景值比率
FJ	15.68a	4.26a	50.13b	1.66b
FD	26.33c	19.99c	40.46a	1.62a
FW	21.29b	9.81b	86.98c	2.79c

注:表中小写字母表示 $P<0.05$ 时的显著性水平。

3 讨论

目前在我国关于养猪前后发酵床垫料养分转化与损失的研究报道比较少,而应用物质流分析的方法研究发酵床垫料养分转化与流动的报道更是少之又少。

通过研究发现,发酵床垫料中的P素的损失途径主要有两种,分别是猪采食损失与淋溶损失,留存在垫料中的TP分别是总P输入的FJ 83.73%、FD 75.96%、FW 85.51%,总损失分别是总P输入的FJ 16.40%、FD 24.66%、FW 14.59%,养殖1批次猪后发酵床垫料的P素损失率不超过25%;3种垫料中TP含量均超过 $6\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,符合有机肥国家含量标准^[17]。

而K素在发酵床养猪过程中的转化途径同样是猪采食与淋溶两种,总K库存分别是总K输入的FJ 77.47%、FD 75.91%、FW 68.02%,总K损失分别是总K输入的FJ 22.49%、FD 24.07%、FW 31.79%,3种发酵床的TK损失率不超过32%,TK含量均超过 $13\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,同样符合有机肥国家含量标准。

已有的关于发酵床垫料养猪的研究表明,随着垫料使用时间的延长,垫料中的P素和K素含量会逐渐升高从而出现累积现象^[2-3,18]。本研究同样测定了发酵床下部表层土壤中的TP和TK。通过物质流公式得知,淋溶-P(或K)=[P(或K)初始总库存+猪粪尿含P(或K)量]-总净库存P(或K)量-猪采食-P(或K)量。据公式计算得出0~10 cm表层土壤中P素总量(即推导值)分别是FJ 7.13 kg、FD 10.78 kg、FW 5.53 kg,实测值是推导值的82%~94%。同样,K素总量的计算推导值分别是FJ 27.40 kg、FD 21.70 kg、FW 45.80 kg,实测值均占推导值的93%以上,说明10 cm以下的土壤中仍会有P素和K素的渗漏。由此说明养殖过两批次育肥猪后,由于淋溶作用,这部分表层土壤中的TP和TK量具有明显的累积现象。土壤的TP、TK增量和超背景值比率同样表明了发酵床养殖过程中P素和

K素的淋溶渗漏和在表层土壤中的累积。从土壤TP和TK含量、增量和超背景值比率来看,FJ(即稻壳+菌糠组合的垫料)对TP的吸纳效果最好;FD(即稻壳+锯木屑的垫料)对TK的吸纳效果最好。此外,为了防止元素通过淋溶作用渗漏损失,建议发酵床垫料厚度要超过50 cm。

4 结论

物质流分析结果表明,P素和K素在发酵床养猪过程中主要通过猪采食和淋溶的途径损失。一个养殖周期结束后,垫料中的P素和K素含量较高,能够作为有机肥施用于农田。

养殖过程中,发酵床垫料会出现P素和K素累积;同时,由于发酵床垫料厚度过低造成2种元素淋溶,导致表层土壤出现P素和K素累积,持续使用会对当地土壤环境造成一定影响,因此发酵床厚度应该超过50 cm。

参考文献:

- [1] 梁皓仪. “发酵床”养猪热下的冷思考[J]. 养猪, 2009(4): 4-5.
LIANG Hao-yi. Calm thinking on the pig rearing of "fermentation bed" system[J]. *Swine Production*, 2009(4): 4-5.
- [2] 应三成, 吕学斌, 何志平, 等. 不同使用时间和类型生猪发酵床垫料成分比较研究[J]. 西南农业学报, 2010, 23(4): 1279-1281.
YING San-cheng, LÜ Xue-bin, HE Zhi-ping, et al. Comparative research of swine litter compounds between different utilization time and different types[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Science*, 2010, 23(4): 1279-1281.
- [3] 郭 彤, 马建民, 赵曾元, 等. 不同使用时间和深度的发酵床垫料成分及重金属沉积规律的研究[J]. 中国畜牧杂志, 2013, 49(10): 51-55.
GUO Tong, MA Jian-min, ZHAO Zeng-yuan, et al. Study on the composition of fermentation bed mattress materials and the deposition of heavy metals with different time and depth[J]. *Chinese Journal of Animal Science*, 2013, 49(10): 51-55.
- [4] 陆 扬, 吴淑杭, 周德平, 等. 发酵床养猪垫料的养分转化与植物毒性研究[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(7): 1409-1412.
LU Yang, WU Shu-hang, ZHOU De-ping, et al. Nutrition Transformation and phytotoxicity of pig litters under Pig-on-Litter (POL) system[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(7): 1409-1412.
- [5] Tam N F Y, Vrijmoed L L P. Effects of the inoculums size of commercial bacterial product and the age of sawdust bedding on pig waste decomposition in a pig-on-litter system[J]. *Waste Management*, 1993, 11(2): 107-115.
- [6] 毕小艳, 张 彬. 发酵床生态养殖模式在养猪生产中的应用研究进展[J]. 中国动物保健, 2010(9): 50-51.
BI Xiao-yan, ZHANG Bin. Application and research progress of ecological culture model of fermentation bed in pig production[J]. *China Ani-*

- mal Health, 2010(9):50-51.
- [7] 郭 彤, 郭秀山, 马建民, 等. 发酵床饲养模式对断奶仔猪生长性能、腹泻、肠道菌群及畜舍环境的影响[J]. 中国畜牧杂志, 2012, 48(20):56-60.
- GUO Tong, GUO Xiu-shan, MA Jian-min. The effect of fermentation bed feeding mode on weaning piglet growth performance, diarrhea, intestinal flora and piggery environment[J]. *Chinese Journal of Animal Science*, 2012, 48(20):56-60.
- [8] 黄义彬, 李 卿, 张 莉, 等. 发酵床垫料无害化处理技术研究[J]. 贵州畜牧兽医, 2011, 35(5):3-7.
- HUANG Yi-bin, LI Qing, ZHANG Li, et al. Research on the harmless treatment technology of fermentation bed padding material[J]. *Guizhou Journal of Animal Husbandry & Veterinary Medicine*, 2011, 35(5):3-7.
- [9] 刘向明. 猪场生物发酵床垫料卫生研究[D]. 武汉:华中农业大学, 2012.
- LIU Xiang-ming. Research on hygiene of piggery bio-fermentation litter[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2012.
- [10] 陈 宏, 陈玉成, 杨学春. 硫化钠对土壤汞、镉、铅的植物可利用性的调控[J]. 生态环境, 2003, 12(3):285-288.
- CHEN Hong, CHEN Yu-cheng, YANG Xue-chun. Regulation of phyto-availability of Hg, Cd, Pb in soil by sodium sulfide[J]. *Ecology and Environment*, 2003, 12(3):285-288.
- [11] 王 军, 周 燕, 刘金华, 等. 物质流分析方法的理论及其应用研究[J]. 中国人口资源与环境, 2006, 16(4):60-64.
- WANG Jun, ZHOU Yan, LIU Jin-hua, et al. Study on theory and application of material flow analysis[J]. *China Population Resources and Environment*, 2006, 16(4):60-64.
- [12] 沈 镭, 刘晓洁. 资源流研究的理论与方法探析[J]. 资源科学, 2006, 28(3):9-16.
- SHEN Lei, LIU Xiao-jie. Discussion on theories and methods of resources flow[J]. *Resources Science*, 2006, 28(3):9-16.
- [13] Tachibana J, Hirota K, Goto N, et al. A method for regional-scale material flow and decoupling analysis: A demonstration case study of Aichi prefecture, Japan[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2008, 52(12):1382-1390.
- [14] 李建喜. 发酵床在养猪生产中的应用[J]. 广东畜牧兽医科技, 2010, 35(3):22-24.
- LI Jian-xi. Application of fermentation bed in pig production[J]. *Guangdong Journal of Animal and Veterinary Science*, 2010, 35(3):22-24.
- [15] 郭德杰, 吴华山, 马 艳, 等. 不同猪群粪、尿产生量的监测[J]. 江苏农业学报, 2011, 27(3):516-522.
- GUO De-jie, WU Hua-shan, MA Yan, et al. Monitoring of the amount of pig manure and urine in different swineries[J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2011, 27(3):516-522.
- [16] Danny M Hooge, 李 震. 钾在动物体内的代谢功能(下)[J]. 国外畜牧科技, 1996, 23(1):13-14.
- Danny M Hooge, LI Zhen. Potassium metabolism in animals (lower parts)[J]. *Foreign Animal Husbandry Science and Technology*, 1996, 23(1):13-14.
- [17] 中华人民共和国农业部. NY 525—2012 农业行业标准—有机肥料[S]. 北京:中国农业出版社, 2012.
- Ministry of Agriculture of the PRC. NY 525—2012 Agriculture industry standard of the PRC—Organic fertilizer [S]. Beijing: China Agriculture Press, 2012.
- [18] 刘向明, 刘 婕, 张妮娅, 等. 猪场生物发酵床垫料卫生研究[J]. 环境工程学报, 2013, 7(8):3237-3243.
- LIU Xiang-ming, LIU Jie, ZHANG Ni-ya, et al. Research on hygiene of piggery bio-fermentation litter[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2013, 7(8):3237-3243.