

猪发酵床不同原料垫料重金属元素累积特性研究

张霞, 杨杰, 李健, 潘孝青, 秦枫, 顾洪如*

(江苏省农业科学院畜牧研究所, 南京 210014)

摘要: 2011年7月至10月,在江苏省农业科学院六合动物科学基地猪发酵床养殖场,选择两种不同垫料,一栋使用已饲养2批猪的木屑与稻壳并按比例添加部分木屑与稻壳为垫料,一栋以发酵猪粪、果树枝、菌糠及中药渣为主并配以少部分木屑为垫料,监测在育肥猪一个生长周期不同垫料内重金属Cu、Zn、As、Cr等的积累变化情况。结果表明,在一个养殖周期内,不同垫料内重金属元素As、Zn、Cr、Cu含量随时间增加而显著增加,Cu、Zn、Cr等元素在不同垫料内的积累差异显著;经过约一个养殖周期,发酵猪粪、果树枝、菌糠、中药渣垫料内As、Zn、Cu元素含量由浅层(0~20 cm)到深层(20~40、40~60 cm)呈降低趋势。以发酵猪粪为主的垫料内重金属元素含量均显著高于果树枝、菌糠、中药渣成分为主的垫料,其他材料为主的垫料对垫料内重金属元素积累影响则不明显。

关键词: 猪发酵床;垫料;重金属;积累

中图分类号:X713 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2013)01-0166-06 doi:10.11654/jaes.2013.01.024

Accumulated Characteristics of Heavy Metals in Different Pig Bio-bed Materials

ZHANG Xia, YANG Jie, LI Jian, PAN Xiao-qing, QIN Feng, GU Hong-ru*

(Institute of Animal Science, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China)

Abstract: The bio-bed pig raising system, by making deep littering with sawdust, rice hull and other cropping by-products, and also environment friendly microorganisms, helps to compost pig excreta within the bedding. The purpose of the study is to investigate accumulated characteristics of heavy metals including Cu, Zn, As and Cr in different litter in one growth period of fattening pigs. The experiment was conducted in pig bio-bed farms of Luhe animal science base, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences from July 2011 to October 2011. The spent litter was collected from four different pens in which the sawdust and rice husk mixture were used as litter and 2 batches of pigs had been feeding. Another spent litter was collected from the other four different pens which fermented pig manure, branches of fruit trees, waste of mushroom cultivation and residue of traditional Chinese medicine were used as litter, in which pigs had not been fed. The results showed that the content of heavy metals of As, Zn, Cr and Cu in litter increased significantly ($P < 0.05$) the use time of litter prolonged. The accumulation content of Cu, Zn and Cr in the different litter differed significantly ($P < 0.05$). The accumulation content of As, Zn and Cu of fermented pig manure, branches of fruit trees, waste of mushroom cultivation in turn reduced from the upper shallow layer (0~20 cm) to the lower deep layer (20~40 cm and/or 40~60 cm). The accumulation content of heavy metals in fermented pig manure litter was higher significantly than that in branches of fruit trees, waste of mushroom cultivation and residue of traditional Chinese medicine litters, while branches of fruit trees, waste of mushroom cultivation, residue of traditional Chinese medicine, sawdust and rice husk had not significantly effect on the accumulation of heavy metals in litter.

Keywords: pig bio-bed; bio-bed material; heavy metal; accumulation

收稿日期:2012-07-18

基金项目:江苏省农业科技自主创新基金项目(CX(12)1001)

作者简介:张霞(1976—),河南新乡人,博士,副研究员,主要从事畜禽粪便综合利用研究。E-mail:yangymn@yahoo.com.cn

*通信作者:顾洪如 E-mail:guhongru@yahoo.com.cn

随着社会经济的快速发展,规模化养殖已成为畜禽生产的主要方式。2006年,我国规模化养殖场(小区、专业户)的畜禽粪便产生量达2.43亿t,尿液产生量达1.63亿t,成为农业主要的污染源之一^[1]。畜禽养殖场各种微量元素添加剂的大量使用造成动物粪便中Cu、Zn、As等元素含量普遍偏高^[2-4],成为环境中Cu、Zn、As等污染的重要来源之一^[5-7]。发酵床养殖是一种基于控制畜禽粪便排放与污染的养殖方式^[8-9],可减少粪污对环境的污染,且改善饲养环境。目前,发酵床养殖还存在一些急待解决的问题,如由于饲料中超量添加的Cu、Zn元素以及有机肿等,垫料中累积的重金属可能会对土壤环境构成污染,通过不同的途径进入食物中危害人类健康,存在一定的环境风险^[10-12]。

近年来生物发酵床养殖技术得到较大面积的推广。发酵床养殖技术相关研究多集中于畜舍环境、动物生长性能等方面^[13],迄今直接对猪发酵床垫料内重金属元素含量及毒性研究报道较少,对养殖过程中垫料内重金属动态变化特征也缺乏了解。国内仅见王福山等研究认为猪发酵床垫料中Cu、Zn含量普遍偏高,垫料重金属含量有较明显的累积趋势^[14]。张霞等研究发现使用2年及7年发酵床垫料As、Zn、Pb、Cd、Ni、Cr、Cu等重金属元素含量均在城镇垃圾农用控制标准限量范围内,垫料中As、Zn、Cu、Cd元素含量最高值与标准限量最高值差距相对较近^[15]。国内外已报道的发酵床相关研究采用的垫料基本上是以木屑或以木屑与稻壳为主要材料,那么木屑与稻壳比例不同对垫料内重金属元素含量是否有影响,以及不同材料替代木屑作垫料是否对垫料内重金属元素含量积累有影响,这些尚需作进一步的研究。本研究利用不同材料作垫料进行猪发酵床饲养试验,研究在一个饲养周期不同垫料内重金属积累情况,以便为垫料的安全利用提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验处理及样品采集

样品采集地点为江苏省农业科学院六合动物科学基地猪发酵床养殖场。实验采用两栋发酵床,每栋4栏,每栏发酵面积50m²,深60cm,非发酵面积水泥睡台10m²。一栋发酵床所用垫料为木屑与稻壳,已使用1年饲养2批猪,试验取样时间为第三批猪饲养期间,每批每栏饲养猪15~20只,在原来垫料的基础上按稻壳/木屑比例添加木屑与稻壳,四栏垫料稻壳/木屑之比分别为0/100、20/80、60/40、80/20。另一栋发酵

床所用垫料第一次使用,垫料分别为发酵猪粪、果树枝、菌糠、中药渣,每栏再添加少量的木屑。垫料准备好后接种菌种、调节水分拌匀,用塑料薄膜覆盖发酵。使用的发酵菌种为江苏省农业科学院自行分离、配制的菌剂,主要含乳酸菌、芽孢杆菌等。发酵床的日常维护主要包括垫料的浅层翻扒,将粪便集中的区域人工分散,1个月后将垫料出现明显下降时按稻壳/木屑比例0/100、20/80、60/40、80/20添加木屑与稻壳,新补充的垫料木屑内As、Zn、Cr、Cu含量分别为0.04、24.79、13.30、3.45mg·kg⁻¹,新的稻壳内As、Zn、Cr、Cu含量分别为0.13、24.24、72.91、3.92mg·kg⁻¹。另一栋没有补充新垫料。

发酵床育肥猪进栏时间2011年7月22日,每栏进猪15只。分别于猪进栏后1个月(2011年8月25日)、2个月(2011年9月29日)、3个月(2011年10月21日)取样。使用土钻取样,采集时于每一栏发酵床内取3点,垫料每20cm为1层,每层3个取样点的样品混合后装于自封袋内。取回的垫料及土壤样品进行无机氮提取,同时测定含水量,之后垫料放于65℃烘箱烘至恒温,粉碎后贮存备用。

1.2 测定方法

垫料Zn、Cr、Cu、As含量测定:用硝酸:高氯酸=4:1在130~170℃条件下消煮,采用ICP(Inductively Coupled Plasma)电感耦合等离子体测定样品中全量Zn、Cr、Cu含量,As含量采用原子荧光分光光度计测定。数据分析采用SAS8.1和Excel软件。

2 结果与分析

2.1 稻壳与木屑不同比例垫料内重金属积累

由图1可知,进猪后同一时间内,稻壳与木屑不同比例垫料内As元素积累量有一定差异,但差异不显著。不同栏之间Zn元素含量差异显著($P<0.05$),猪进栏3个月后稻壳/木屑比为0/100的垫料内Zn含量最低为393mg·kg⁻¹,稻壳/木屑比为60/40的垫料内Zn含量最高值达493mg·kg⁻¹。进猪3个月之后,不同栏之间Cr元素含量差异显著($P<0.05$),稻壳/木屑比为60/40的垫料内Cr含量最低为112mg·kg⁻¹,稻壳/木屑比为80/20的垫料内Cr含量最高值达145mg·kg⁻¹。进猪后同一时间内,不同垫料内积累的Cu元素含量差异显著($P<0.05$),进猪3个月后,稻壳/木屑比为80/20的垫料内Cu含量最低为111mg·kg⁻¹,稻壳/木屑比为60/40的垫料内Cu含量最高值达137mg·kg⁻¹。总体表现为稻壳/木屑比为60/40的垫料内

As、Cu、Zn 元素含量显著高于其他 3 个配比的垫料。

表 1 为在不同时间段内稻壳与木屑不同比例 4 种垫料内重金属元素含量的平均值。由表 1、图 1 可知,在一个养殖周期内,随着猪的生长及排粪便量的增加,重金属元素 As、Zn、Cr、Cu 含量随时间增加而显著增加($P<0.05$),进猪 3 个月后垫料内 As、Zn、Cr、Cu 含量显著高于进猪 2 个月及 1 个月后的垫料。

2.2 不同垫料(发酵猪粪、果树枝、菌糠、中药渣)内重金属积累

由图 2 可知,不同垫料(发酵猪粪、果树枝、菌糠、中药渣)发酵床进猪后,发酵猪粪为主的垫料内 As 元

素在不同的时间段内含量均较高,其中 1 个月、2 个月时显著高于($P<0.05$)其他 3 种垫料,随着猪粪便量的增多,进猪 3 个月后不同原料垫料内 As 含量差异不显著。进猪后 1、2 个月时,发酵猪粪为主的垫料内 Zn 含量显著高于果树枝、菌糠、中药渣垫料,中药渣垫料内 Zn 含量也较高;进猪 3 个月后不同原料垫料之间 Zn 元素含量差异显著($P<0.05$),中药渣垫料内 Zn 含量最高为 $371.41\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。Cr 元素含量总的呈增加趋势,进猪 3 个月后,不同原料垫料间 Cr 含量差异显著 ($P<0.05$),菌糠垫料内 Cr 含量最低为 $109\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,中药渣垫料内 Cr 含量最高达 $141\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。进猪

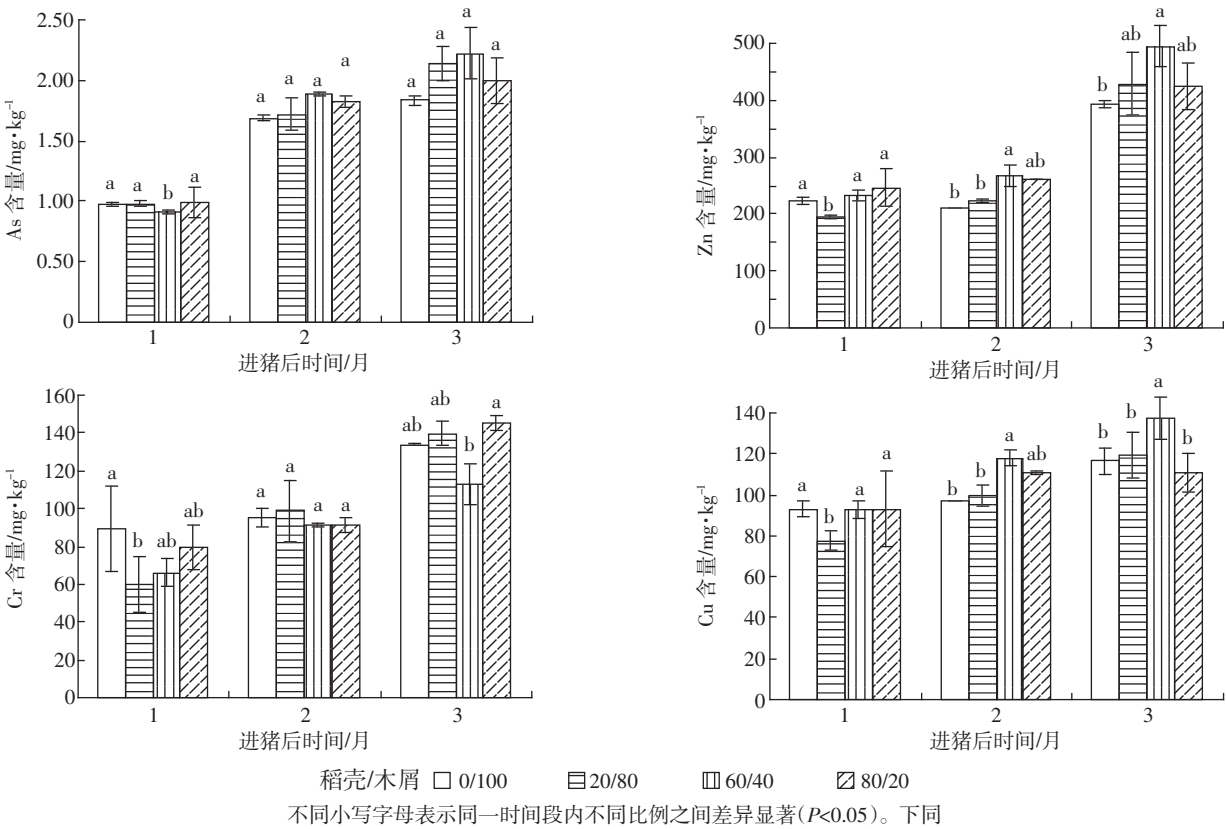


图 1 稻壳与木屑不同比例垫料内重金属积累
Figure 1 Accumulation of heavy metals in the sawdust and rice husk litter in different proportions

表 1 木屑与稻壳混合垫料内重金属积累特性($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)
Table 1 Accumulation of heavy metals in the sawdust and rice husk litter($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

元素 Element	垫料使用时间 Use time		
	1 个月 One month	2 个月 Two month	3 个月 Three month
As	0.97±0.04c	1.78±0.10b	2.05±0.17a
Zn	224.21±22.41b	240.51±27.32b	435.10±42.27a
Cr	75.39±16.02b	94.17±3.53b	132.87±14.17a
Cu	89.17±7.81c	106.41±9.79b	121.09±11.33a

注:同行不同小写字母表示达到 0.05 显著水平。下同。
Note: Data in the same line followed by different small letters are significantly difference at 0.05 level. The same below.

后以发酵猪粪为主的垫料内 Cu 元素含量均显著高于($P<0.05$)果树枝、菌糠、中药渣垫料,进猪 3 个月后,果树枝垫料内 Cu 含量最低为 $85 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,发酵猪粪垫料内 Cu 含量最高值达 $137 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

表 2 为在不同时间段内发酵猪粪、果树枝、菌糠、中药渣 4 种垫料内重金属元素含量的平均值。由表 2、图 2 可知,经过一个饲养周期,不同垫料内重金属元素 As、Zn、Cr、Cu 积累量随时间增加同样显著增加($P<0.05$)。进猪 3 个月后垫料内 As、Zn、Cu 含量显著高于($P<0.05$)进猪 2 个月及 1 个月后的垫料。

以上分析可知,进猪 1、2 个月时间段内,发酵猪

粪垫料内 As、Zn、Cr、Cu 含量均显著高于其他种垫料,尤其是 Cu 含量在整个猪饲养期间均显著高于其他 3 种垫料,这说明发酵猪粪内各种重金属尤其是 Cu 元素含量对整个垫料内重金属含量影响较大,而果树枝、菌糠、中药渣对其影响相对较小。

2.3 不同深度垫料内重金属积累特性

由表 3 可知,进猪 3 个月后,即经过约一个养殖周期,以发酵猪粪、果树枝、菌糠及中药渣为主的垫料内 As、Zn、Cu 元素含量均由浅层(0~20 cm)至中层(20~40 cm)至深层(40~60 cm)依次降低,而 Cr 元素含量规律变化不明显。

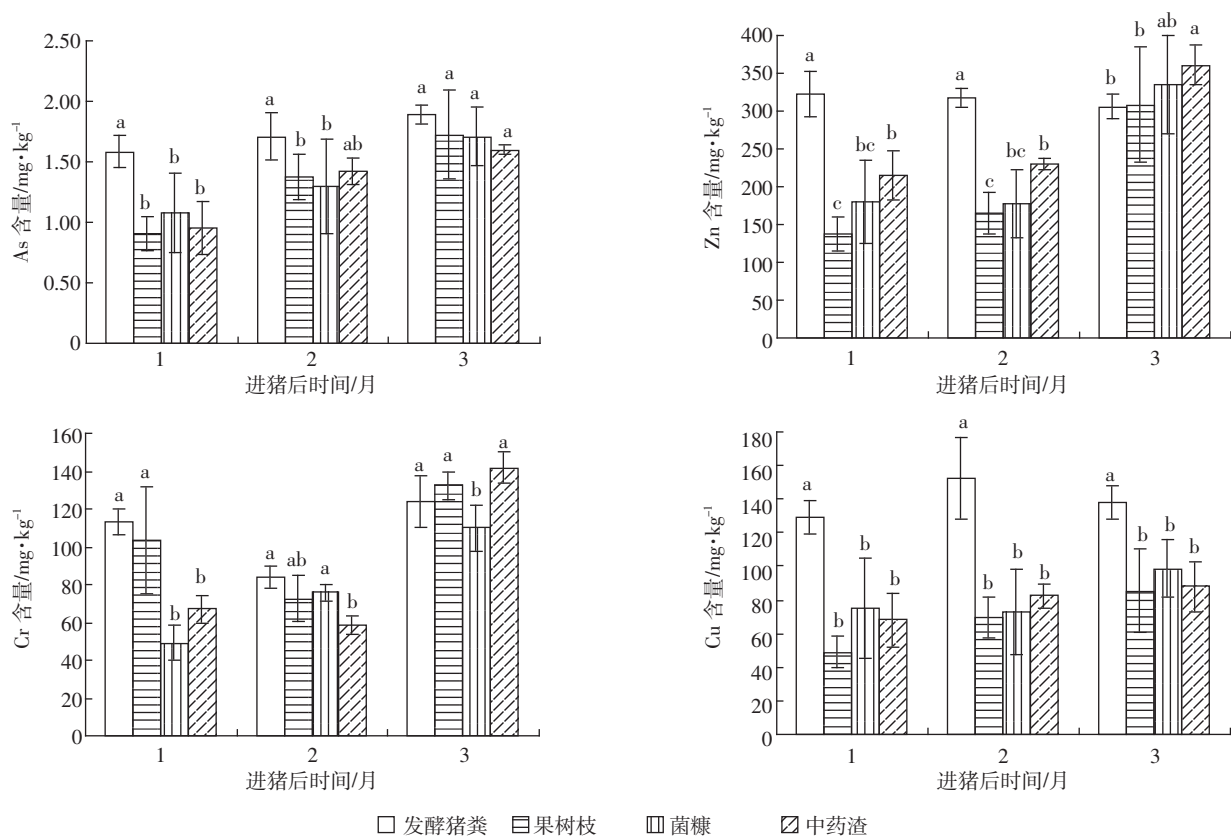


图 2 不同原料垫料(发酵猪粪、果树枝、菌糠、中药渣)内重金属积累

Figure 2 Accumulation of heavy metals in the different materials litter(fermented pig manure, branch scrap of fruit trees, material waste of mushroom cultivation, residue of traditional Chinese medicine)

表 2 不同垫料(发酵猪粪、果树枝、菌糠、中药渣)内重金属积累特性($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)

Table 2 Accumulation of heavy metals in the different litter(fermented pig manure, branch scrap of fruit trees, material waste of mushroom cultivation, residue of traditional Chinese medicine)($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)

元素 Element	进猪后时间 Use time		
	1 个月 One month	2 个月 Two month	3 个月 Three month
As	$1.13 \pm 0.31 \text{c}$	$1.45 \pm 0.18 \text{b}$	$1.73 \pm 0.12 \text{a}$
Zn	$214.08 \pm 79.39 \text{b}$	$223.04 \pm 69.19 \text{b}$	$329.20 \pm 35.85 \text{a}$
Cr	$120.82 \pm 62.62 \text{a}$	$72.56 \pm 10.61 \text{b}$	$117.66 \pm 24.78 \text{a}$
Cu	$80.45 \pm 34.51 \text{b}$	$94.25 \pm 39.01 \text{ab}$	$102.53 \pm 24.29 \text{a}$

表 3 进猪 3 个月后不同深度垫料内重金属积累特性

Table 3 Accumulation of heavy metals at different depths litter after three months pigs raised in the bio-bed

材料 Material	深度 Depth/cm	As/mg·kg ⁻¹	Zn/mg·kg ⁻¹	Cr/mg·kg ⁻¹	Cu/mg·kg ⁻¹
发酵猪粪 Fermented pig manure	0~20	1.95±0.02a	304.76±4.17a	86.88±0.17a	145.90±0.87a
	20~40	1.91±0.13a	307.13±8.12a	77.01±2.12a	141.14±3.15a
	40~60	1.80±0.03a	277.51±4.27a	88.68±10.18a	126.75±3.73b
果树枝 Branch scrap of fruit trees	0~20	2.08±0.01a	380.50±0.94a	128.11±1.44b	110.86±0.83a
	20~40	1.75±0.04b	315.58±6.93b	128.57±1.13b	85.69±0.22b
	40~60	1.35±0.05c	229.53±7.44c	140.72±1.80a	60.14±0.57c
菌糠 Material waste of mushroom cultivation	0~20	1.96±0.05a	390.01±5.77a	117.98±1.24a	115.54±3.45a
	20~40	1.69±0.06a	349.53±1.99b	96.18±0.36b	98.74±1.27ab
	40~60	1.47±0.37a	263.46±1.48c	86.16±0.70c	82.01±23.07b
中药渣 Residue of traditional Chinese medicine	0~20	1.59±0.28a	383.32±4.15a	132.72±1.71b	103.92±4.78a
	20~40	1.64±0.12a	374.91±2.62a	148.12±1.24a	86.39±8.91b
	40~60	1.57±0.36a	356.00±38.89a	144.89±4.17a	73.34±1.99b

注: 同列不同小写字母表示同一材料不同深度间差异显著($P<0.05$)。

Note: Data in the same line followed by different small letters are significantly at 0.05 level between the different depths of the same material.

3 讨论

猪发酵床垫料内重金属含量主要受饲料中超量添加的 Cu、Zn 等元素的含量以及饲料中含有的其他重金属元素含量的影响。王福山等^[14]研究认为,随着垫料使用时间的延长,垫料重金属 Cu、Zn 含量有较明显的累积趋势。张霞等^[15]研究表明,使用 7 年垫料氮、磷、As、Zn、Pb、Cd、Cu 含量均高于使用两年垫料。在香港的发酵床养猪实验于 1995 年发表的结果表明,短期使用的垫料内 Cu、Zn 元素分别为 142、175 mg·kg⁻¹,使用较长时间的垫料内 Cu、Zn 元素分别为 238、542 mg·kg⁻¹^[16];而他们 1996 及 1998 年发表的结果则为 Cu、Zn 元素均分别高于 200、400 mg·kg⁻¹^[17-18];至 2000 年实验中垫料中铜的总含量为 800~1600 mg·kg⁻¹^[19],Cu、Zn 元素含量呈现明显的随使用时间延长而累积。本研究结果与前人的相符。在一个养殖周期内,锯木屑与稻壳不同比例的垫料以及不同原料(发酵猪粪、果树枝、菌糠、中药渣)的垫料内,重金属元素 As、Zn、Cr、Cu 含量随时间增加而显著增加($P<0.05$),进猪 3 个月后垫料内 As、Zn、Cr、Cu 含量显著高于进猪 2 个月及 1 个月后的垫料。从表 1 与表 2 结果可以看出,饲养 3 批猪的垫料内重金属含量均高于饲养 1 批猪的垫料,表明随着垫料使用时间的延长,垫料内重金属元素存在累积,而且在猪一个生长周期内,随着时间的延长,越到后期重金属积累越快,这主要是由于随着猪的生长,体重增加,粪便排泄量也相应的增加引起的。

木屑与稻壳不同比例的垫料以及果树枝、菌糠、中药渣作垫料时,研究表明 As 元素在不同垫料内的

积累差异不显著,且 As 含量较低,与前人对猪粪内 As 元素含量结果差异较大^[2-4,6-7],这可能与试验所采用的饲料内有机肿添加量有关系。

在猪进栏 3 个月时,对于已饲养 2 批猪、按比例添加部分木屑与稻壳的垫料,进猪 3 个月内不同时间段稻壳/木屑比为 60/40 的垫料内 Cu、Zn 元素含量显著高于其他 3 个配比的垫料,但目前为止的数据还不能说明稻壳/木屑比为 60/40 的垫料对重金属积累量有一定的影响。首先根据新添加垫料稻壳与木屑内 Cu、Zn 元素的含量差异不大,不能得出稻壳/木屑比为 60/40 的垫料内 Cu、Zn 元素较高。其次,因为 Cu、Zn 为饲料内添加量最大的金属元素,尤其是在育肥期后期,Cu、Zn 元素添加量较大,而猪对 Cu、Zn 两元素的吸收利用效率有限,超过猪身体吸收量以外的 Cu、Zn 元素将大量的随粪便排出体外。根据对本栋猪进栏与出栏时的体重比较,猪进栏时平均体重最轻,而出栏时本栋四栏猪的平均体重之间差异不显著,由此可知,本栏内猪的体重增加最多,相应的育肥期间猪排泄的粪便也较多,这可能是引起稻壳/木屑比为 60/40 的垫料内 Cu、Zn 元素含量较高的原因。

不同垫料(发酵猪粪、果树枝、菌糠、中药渣)内 Cu、Zn、Cr 等元素含量差异显著($P<0.05$),尤其是以发酵猪粪为主的垫料前两个月内不同重金属元素含量均显著高于其他三种原料的垫料,这也说明发酵猪粪内本身重金属含量较高,对垫料内重金属元素积累量影响较大;而在后期由于发酵猪粪为主的垫料发酵情况不好添加了部分木屑,起了一定的稀释作用,从而使其重金属 As、Cu 元素含量相对较低。本研究结果并不能说明果树枝、菌糠、中药渣三种原料对垫料

内重金属元素含量有较显著的影响。

4 结论

本试验表明,在育肥猪的一个饲养周期内,不同垫料内重金属元素 As、Zn、Cr、Cu 含量随垫料使用时间延长而显著增加,发酵猪粪、果树枝、菌糠、中药渣垫料内 As、Zn、Cu 元素含量有由浅层(0~20 cm)到深层(20~40、40~60 cm)降低的趋势。以发酵猪粪为主的垫料内重金属元素含量均显著高于果树枝、菌糠、中药渣为主的垫料。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国环境保护部, 中华人民共和国国家统计局, 中华人民共和国农业部. 全国第一次污染源普查公报[R]. 2010.
Department of Environment Protection of the People's Republic of China, National Bureau of Statistics of the People's Republic of China, the People's Republic of China Ministry of Agriculture. The commune of the first national census of pollution sources[R]. 2010.
- [2] Cang Long, Wang Yu-jun, Zhou Dong-mei, et al. Heavy metals pollution in poultry and livestock feeds and manures under intensive faming in Jiangsu Province, China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2003, 16(3): 371-374.
- [3] 姚丽贤, 李国良, 党志. 集约化养殖禽畜粪中主要化学物质调查[J]. 应用生态学报, 2006, 17(10): 1989-1992.
YAO Li-xian, LI Guo-liang, DANG Zhi. Major chemical components of poultry and livestock manures under intensive breeding[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(10): 1989-1992.
- [4] 黄磊, 郭金花, 李彦明. 不同饲养阶段猪粪中微量元素含量水平调查研究[J]. 北京农业, 2011(1): 131-134.
HUANG Lei, GUO Jin-hua, LI Yan-ming. Survey research on the content level of trace elements of manures from different feeding stages of pig manure[J]. *Beijing Agriculture*, 2011(1): 131-134.
- [5] Oremland R S, Stolz J F. The ecology of arsenic[J]. *Science*, 2003, 300(5621): 939-944.
- [6] 修金生, 吴顺意, 周伦江, 等. 福建省规模化猪场饲料和猪粪中重金属砷含量测定初报[J]. 中国农学通报, 2011, 27(17): 13-16.
XIU Jin-sheng, WU Shun-yi, ZHOU Lun-jiang, et al. Investigation on the concentrations of arsenic from feed and feces in Fujian Province[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2011, 27(17): 13-16.
- [7] 张树清, 张夫道, 刘秀梅, 等. 规模化养殖畜禽粪主要有害成分测定分析研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(6): 822-829.
ZHANG Shu-qing, ZHANG Fu-dao, LIU Xiu-mei, et al. Determination and analysis on main harmful composition in excrement of scale live-stock and poultry feedlots[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2005, 11(6): 822-829.
- [8] 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.
- [9] 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. Applied research progress of the biological fermentation bed in the pig production [J]. *China Animal Health*, 2010(9): 50-51.
- [10] 颜培实. 发酵床养猪的科学误区[J]. 今日畜牧兽医, 2009(11): 15-17.
YAN Pei-shi. Science and errors of pig-on-litter system[J]. *Today Animal Husbandry and Veterinary Medicine*, 2009(11): 15-17.
- [11] 蓝江林, 刘波, 唐建阳, 等. 基于微生物发酵床养猪模式的生态安全探讨[J]. 中国农学通报, 2010, 26(19): 324-326.
LIAN Jiang-lin, LIU Bo, TANG Jiang-yang, et al. Discussion on ecological security of microbial fermentation bed in pig farming[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2010, 26(19): 324-326.
- [12] 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.
- [13] 段洪斌, 姬永莲, 赵冬青, 等. 生物发酵床与暖棚式圈舍对育肥猪育肥效果的对比试验[J]. 草原与草坪, 2009(5): 35-37.
DUAN Qi-bin, JI Yong-lian, ZHAO Dong-qing, et al. Effects of biological ferment bed and warm pen on the pig fattening[J]. *Grassland and Terf*, 2009(5): 35-37.
- [14] 王福山, 周斌, 汪开英, 等. 发酵床养猪垫料中重金属累积初探[C]//畜牧业环境、生态、安全生产与管理: 2010年家畜环境与生态学术研讨会论文集, 2010: 432-434.
WANG Fu-shan, ZHOU Bin, WANG Kai-ying, et al. The preliminary study on heavy metals accumulation in deep-litter systems[C]//Animal environment, ecology, safety in production and management: 2010 animal environment and ecology conference proceedings. 2010: 324-326.
- [15] 张霞, 顾洪如, 杨杰, 等. 猪发酵床垫料中氮、磷、重金属元素含量[J]. 江苏农业学报, 2011, 27(6): 1414-1415.
ZHANG Xia, GU Hong-ru, YANG Jie, et al. Contents of total nitrogen, total phosphorus and heavy metal elements in padding of pig-on-litter system[J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Science*, 2011, 27(6): 1414-1415.
- [16] Tam N F Y, Wong Y S. Spent pig litter as fertilizer for growing vegetables[J]. *Bioresource Technology*, 1995, 53: 151-155.
- [17] Tiquia S M, Tam N F Y, Hodgkiss I J. Effects of composting on phytotoxicity of spent pig-manure sawdust litter[J]. *Environmental Pollution*, 1996, 93(3): 249-256.
- [18] Tiquia S M, Tam N F Y. Elimination of phytotoxicity during co-composting of spent pig-manure sawdust litter and pig sludge [J]. *Biore-source Technology*, 1998, 65: 43-49.
- [19] Tiquia S M. Evaluating phytotoxicity of pig manure from the pig-on-litter system [M] // Warman P R, Taylor B R. International Composting Symposium (ICS 1999) Nova Scotia, Canada. CBA Press, 2000: 648-669.