

猪发酵床不同垫料中 As、Hg 累积规律

刘天宇¹, 李建辉¹, 刘姝彤¹, 俞筱妍¹, 尹微琴¹, 王小治^{1,2*}, 封克^{1,2}, 顾洪如³

(1.扬州大学环境科学与工程学院, 江苏 扬州 225127; 2.江苏省有机固体废弃物资源化协同创新中心, 江苏 南京 210095; 3.江苏省农业科学院畜牧研究所, 江苏 南京 210014)

摘要:为研究在发酵床养猪过程中不同组成垫料的 As、Hg 累积规律,本文以木屑、稻壳和秸秆为原料,配制成 3 种垫料处理,分别为木屑(S)、木屑+稻壳(SR)和木屑+稻壳+秸秆段(SRS),在一年半的时间里,测定了 4 批育肥猪养殖结束时不同层次垫料中 As、Hg 含量,分析了长期使用后不同发酵床垫料中 As、Hg 累积情况,为发酵床废弃垫料的后续农用提供理论依据。结果表明,随着猪养殖批次的延长,3 种处理及其不同层次垫料 As、Hg 含量均存在不同程度增加。4 批猪养殖结束时,As 累积量最大的是 SRS 处理的发酵床,为 1 921.7 mg·栏⁻¹,Hg 累积量最大的也是 SRS 处理的发酵床,为 21.1 mg·栏⁻¹。S、SR、SRS 处理的 As、Hg 含量分别为 2.921、2.190、2.621 mg·kg⁻¹ 和 0.048、0.036、0.042 mg·kg⁻¹,均符合《农业行业标准有机肥料》(NY 525—2012)、《食用农产品产地环境质量评价标准》(HJ/T 332—2006)的标准限值。

关键词:发酵床养殖;垫料;砷;汞;累积规律

中图分类号:X71

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2016)04-0369-07

doi: 10.13254/j.jare.2016.0134

引用格式:

刘天宇, 李建辉, 刘姝彤, 等. 猪发酵床不同垫料中 As、Hg 累积规律[J]. 农业资源与环境学报, 2016, 33(4):369-375.

LIU Tian-yu, LI Jian-hui, LIU Shu-tong, et al. Accumulation of Arsenic and Mercury in Different Bio-bed Padding Materials[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2016, 33(4):369-375.

Accumulation of Arsenic and Mercury in Different Bio-bed Padding Materials

LIU Tian-yu¹, LI Jian-hui¹, LIU Shu-tong¹, YU Xiao-yan¹, YIN Wei-qin¹, WANG Xiao-zhi^{1,2*}, FENG Ke^{1,2}, GU Hong-ru³

(1.College of Environmental Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225127, China; 2.Jiangsu Collaborative Innovation Center for Solid Organic Waste Resource Utilization, Nanjing 210095, China; 3.Institute of Animal Science, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China)

Abstract: In order to study the accumulation and distribution of As, Hg in different bio-bed padding materials while implementing bio-bed raising method, three kinds of bio-bed padding materials were well designed, which consisted of sawdust(S), sawdust + rice husk(SR) and sawdust + rice husk + straw(SRS). For a year and a half, the contents of As, Hg at different depth were measured when four groups of fattening pig breeding had finished to analyze the accumulation and distribution of As, Hg in different bio-bed padding materials, which could provide a theoretical basis for follow-up application of bio-bed padding materials in agriculture. The results showed that, the accumulation of As and Hg, at different levels, occurred during four pig-raising cycles. When 4 groups of fattening pig breeding finished, the largest accumulation of As and Hg occurred in SRS bio-beds, respectively reached 1 921.7 mg per sty and 21.1 mg per sty. The As and Hg contents of S, SR, SRS were 2.921, 2.190, 2.621 mg·kg⁻¹ and 0.048, 0.036, 0.042 mg·kg⁻¹, respectively, which met the China's Organic Fertilizer Agriculture Standards(NY 525—2012), and Farmland Environmental Quality Evaluation Standards For Edible Agricultural Products(HJ/T 332—2006).

Keywords: bio-bed raising method; padding materials; As; Hg; accumulation

收稿日期:2016-05-18

基金项目:江苏省农业科技自主创新资金(CX(12)1001-6);江苏省社会发展项目(BE2015661);江苏省苏北科技发展计划(BN2013010)

作者简介:刘天宇(1991—),男,江苏徐州人,硕士研究生,研究方向为固体废弃物处理处置及资源化利用。E-mail: liu-tianyu@qq.com

*通信作者:王小治 E-mail: xzwang@yzu.edu.cn

发酵床养殖技术,是通过在猪舍内铺设有机质作为垫料,将猪饲养于垫料上的一种养殖模式。在养殖过程中,猪排泄的粪尿直接被垫料包容,从而被垫料中的微生物降解,使得猪的饲养和粪尿处理在同一时间和空间内完成,达到养殖过程节水、节料、除臭等效果^[1-2]。日本最早开展发酵床养殖技术的研究,在 1970 年建立了以木屑为垫料的发酵床^[3]。后来多次改良,许多学者^[4-6]通过用不同的原料作为垫料,如稻草、菌糠、药渣、酒糟、醋糟等,研究发现不同垫料对猪的饲养性能和环境影响有一定的差异。此外,发酵床养殖后期废弃垫料的处理处置被很多学者广泛关注,垫料中含有大量的氮磷钾等营养元素^[7],这为废弃垫料作为有机肥进行农用提供了可行性。然而在规模化养殖过程中,为促进畜禽生长、提高饲料利用率,常使用含有重金属的添加剂,进而导致猪粪中含有较高浓度的重金属^[8]。通过猪的采食和排泄过程,饲料中的重金属在垫料中累积。

现有的研究主要针对发酵床养殖中 As、Hg 的累积总量和变化趋势^[9-12],而对不同垫料组成、不同养殖周期、不同层次下垫料 As、Hg 含量变化研究较少。本文以猪发酵床垫料为研究对象,以木屑、稻壳和秸秆为原料,通过不同配比制作发酵床垫料,养殖育肥猪,对比不同养殖周期后以及不同层次垫料中 As、Hg 含量,旨在揭示垫料中 As、Hg 的累积规律,为发酵床垫料后续农用提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 试验设计

试验在江苏省农业科学研究所六合动物科学基地猪场进行。

发酵床猪舍长 30 m,宽 8 m,高 3.5 m,东西走向。舍内布设发酵床东西走向共 9 栏,栏间用栅栏隔开,每栏设水泥台面积 3 m²,垫料区面积 16 m²,深 60 cm,垫料区底层铺设塑料薄膜。每栏设有鸭嘴式饮水器和饲料槽。

发酵床育肥猪舍的垫料以木屑、稻壳、秸秆制成。

试验垫料设置木屑(S)、木屑+稻壳(SR)、木屑+稻壳+秸秆段(SRS),共 3 种垫料处理,每种垫料处理的各原料按照等质量比例铺设于发酵床的垫料区内,垫料层初始厚度 60 cm,不接种菌剂,每种垫料处理设 3 次重复。试验初始垫料基本性质见表 1。

试验共养殖育肥猪 4 批,每批育肥猪饲养 120 d 左右后出栏,每批出栏后按照该栏垫料组成的原始比例补充新垫料,铺设于现有垫料表层,使新旧垫料层的总厚度达到 60 cm。

1.2 样品采集与制备方法

采集的垫料样品为初始垫料以及每批育肥猪出栏后的垫料,样品采集时间分别为 2014 年 7 月 30 日(I)第 1 批育肥猪饲养 10 d、2014 年 11 月 14 日(II)第 1 批育肥猪出栏、2015 年 4 月 2 日(III)第 2 批育肥猪出栏、2015 年 10 月 15 日(IV)第 3 批育肥猪出栏、2016 年 1 月 15 日(V)第 4 批育肥猪出栏。在养殖栏内采集多点混合样,采集时按照发酵床垫料层次,分别采集 0~20、20~40 cm 及 40~60 cm 垫料样品于自封袋内,共采集垫料样品 5 批。在每批猪出栏后采样,因猪的采食、碾压以及垫料的自身降解等原因,导致垫料层厚度些许减少,则按上、中、下三层,等深度比例取样,分别作为 0~20、20~40 cm 及 40~60 cm 垫料样品。样品取回后,在阴凉处进行风干、磨细、过筛,备用。

1.3 测定方法

垫料中 As、Hg 含量采用硝酸-盐酸混合试剂,沸水浴加热消煮,原子荧光光谱法测定;垫料含水率采用 105 °C 烘干至恒重,采用差量法测定;垫料容重采用单位体积的烘干质量测定;垫料 pH 采用 $m(\text{垫料}):V(\text{水})=1:10$,S-3C 型 pH 计测定;垫料中总碳含量采用重铬酸钾容量法测定;垫料中总氮含量采用 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮,奈氏比色法测定。

1.4 数据处理方法

采用 Excel 2016 进行数据分析;SPSS 19.0 进行统计分析,方差分析采用单因素方差分析(One-way ANOVA)、Duncan 新复极差法检验不同试验间的显

表 1 初始垫料基本性质

Table 1 Basic characteristics of original bio-bed padding materials

处理	原料	质量比	采样批次 I						
			含水率/%	容重/kg·m ⁻³	pH 值	总碳/g·kg ⁻¹	总氮/g·kg ⁻¹	As/mg·kg ⁻¹	Hg/mg·kg ⁻¹
S	木屑	1	23.0	209.9	6.56	561.6	2.63	0.916	0.029
SR	木屑+稻壳	1:1	18.0	193.2	7.41	535.9	4.58	0.328	0.016
SRS	木屑+稻壳+秸秆	1:1:1	17.1	148.2	6.94	520.5	4.89	0.175	0.011

著性差异,显著水平为 $P<0.05$;Origin 9.1 进行绘图。

2 结果与分析

2.1 不同原料垫料中 As 累积量

表 2 是不同原料垫料中 As 的累积量。由表 2 可知,随着养猪批次的延长,不同原料组成的垫料中的 As 含量均明显增加。在初始垫料(即采样批次 I)中, S 处理中的 As 含量显著高于其他两种处理。在经过 4

批猪养殖周期后,S、SR 和 SRS 3 种处理中的 As 含量分别为 2.921、2.190、2.621 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,分别增加了 2.005、1.862、2.446 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,S 处理 As 含量最高,但 3 种处理 As 含量差异不显著。

2.2 不同层次垫料中 As 累积量

图 1 是不同层次垫料中 As 的累积量。由图 1 所示,在同一处理中,随着养猪批次的延长,各层垫料中 As 含量均有所增加;同一批次不同层次垫料中 As 含

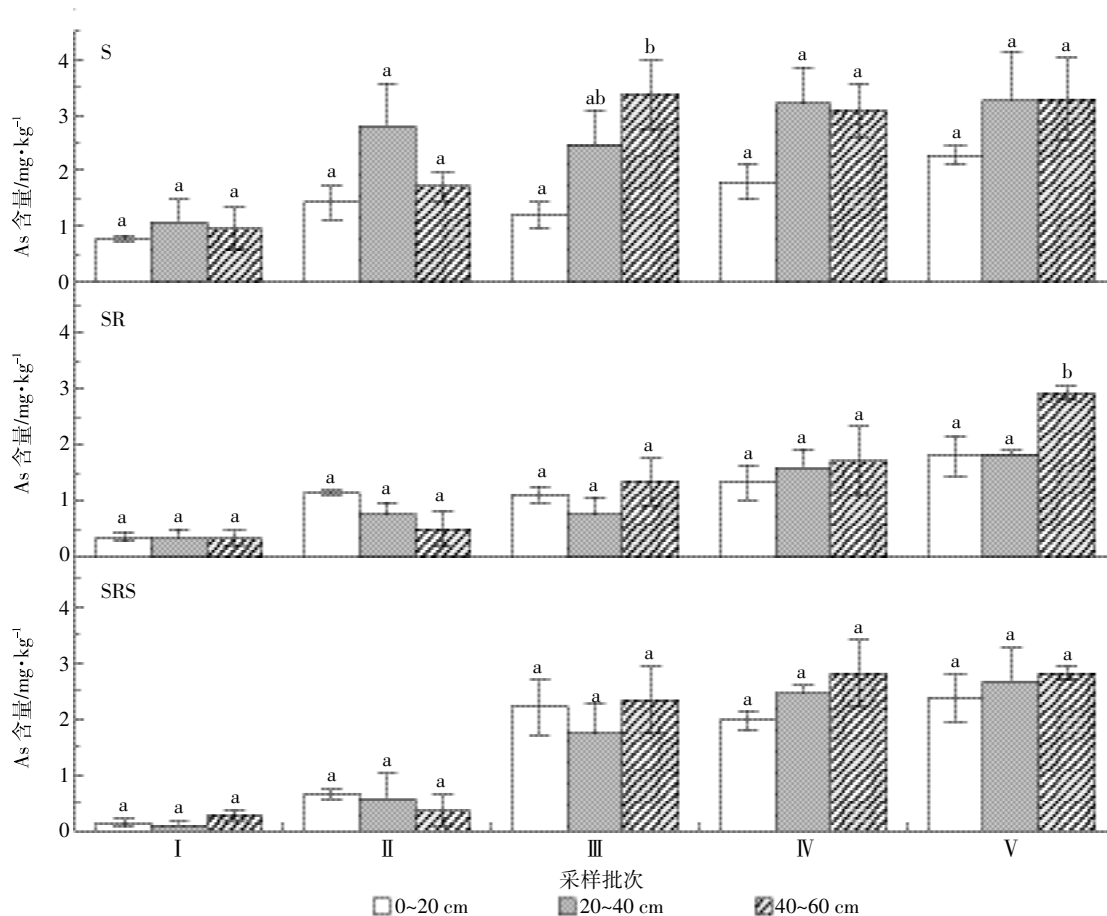
表 2 不同原料垫料中 As 累积量($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

Table 2 The contents of As in different bio-bed padding materials($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

处理	采样批次				
	I	II	III	IV	V
S	0.916±0.077a	1.957±0.414a	2.321±0.625a	2.701±0.448a	2.921±0.333a
SR	0.328±0.011b	0.798±0.190b	1.068±0.163a	1.531±0.117b	2.190±0.369a
SRS	0.175±0.059b	0.515±0.090b	2.078±0.177a	2.401±0.244ab	2.621±0.129a

注:同列的不同小写字母表示数据差异显著($P<0.05$)。下同。

Note: Data in the same column followed by lowercase letter are significantly different at 0.05 level. The same below.



不同小写字母表示同一处理同一采样批次不同层次之间差异显著($P<0.05$)。下同

Data with different lowercase letters in the same depth are significantly different at 0.05 level. The same below

图 1 不同层次垫料中 As 累积量

Figure 1 The contents of As in different depth of bio-bed padding materials

量有所差异,大多是 40~60 cm 层含量大于 0~20 cm 层和 20~40 cm 层,但大都差异不显著,仅在第Ⅲ采样批次,S 处理的 40~60 cm 垫料 As 含量显著高于 0~20 cm 垫料;在第Ⅴ采样批次,SR 处理的 40~60 cm 垫料中 As 含量显著高于 0~20 cm 和 20~40 cm 垫料。

2.3 不同原料垫料中 Hg 累积量

表 3 是不同原料垫料中 Hg 的累积量。由表 3 可知,随着养猪批次的延长,不同原料处理的垫料中的 Hg 累积明显。在初始垫料采样批次 I 中,S 处理中的

Hg 含量显著高于其他两种处理。在经过 4 批猪养殖周期后,S、SR 和 SRS 3 种处理中的 Hg 含量分别为 0.048、0.036、0.042 mg·kg⁻¹,分别增加了 0.020、0.020、0.030 mg·kg⁻¹,S 处理 As 含量最高。

2.4 不同层次垫料中 Hg 累积量

图 2 是不同层次垫料中 Hg 的累积量。由图 2 所示,在同一处理中,随着养猪批次的延长,各层垫料中的 Hg 含量均有所增加。在同一采样批次下,不同层次的垫料中 Hg 含量虽然有些许差异,但是差异均不

表 3 不同原料垫料中 Hg 累积量(mg·kg⁻¹)
Table 3 The contents of Hg in different bio-bed padding materials(mg·kg⁻¹)

处理	采样批次				
	I	II	III	IV	V
S	0.029±0.002a	0.036±0.003a	0.043±0.003a	0.047±0.007a	0.048±0.005a
SR	0.016±0.001b	0.021±0.001b	0.023±0.002b	0.025±0.002b	0.036±0.002b
SRS	0.011±0.001b	0.030±0.002a	0.031±0.005ab	0.034±0.003ab	0.042±0.002ab

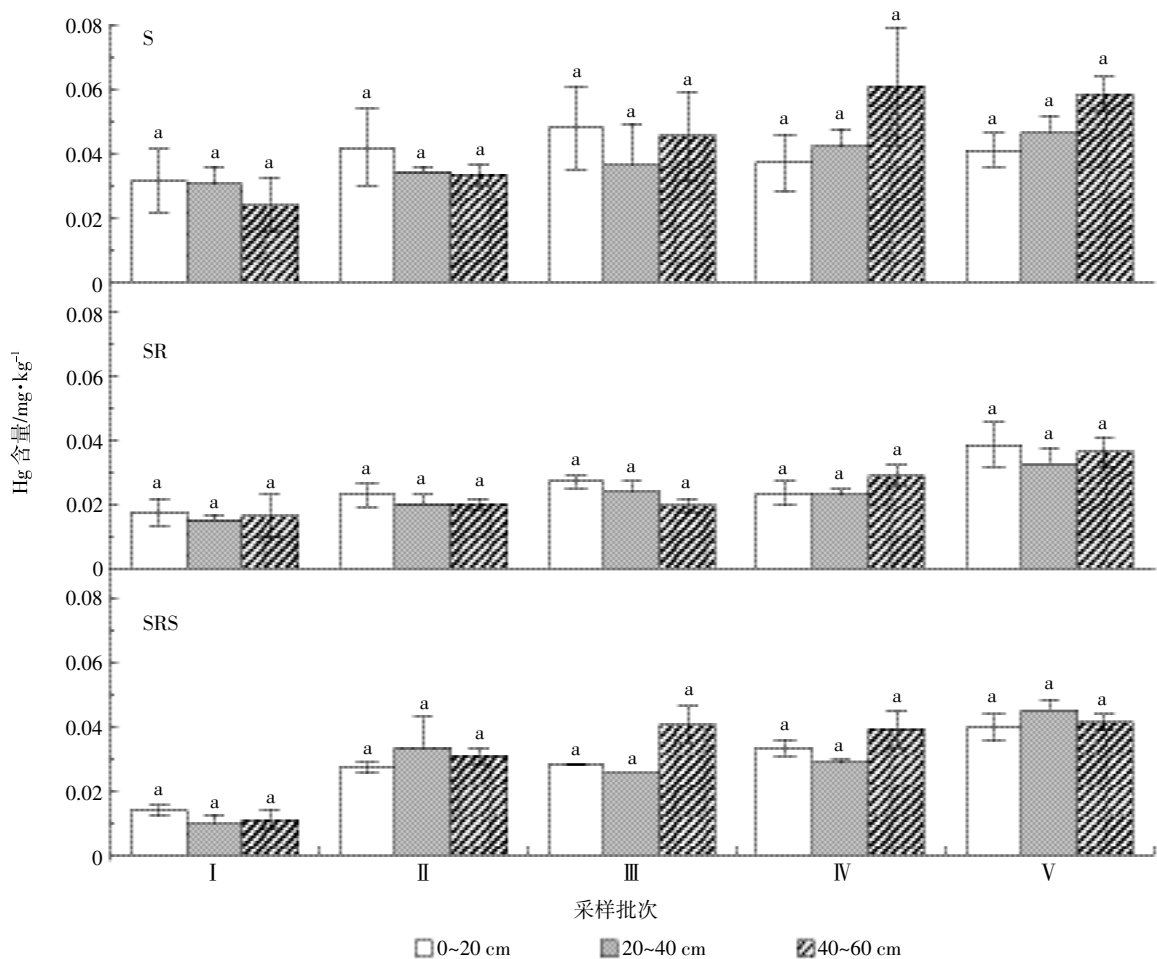


图 2 不同层次垫料中 Hg 累积量

Figure 2 The contents of Hg in different depth of bio-bed padding materials

显著。

2.5 不同垫料中 As、Hg 累积量对比

在经过 4 批养猪周期结束后垫料的基本性质见表 4。不同处理垫料的含水率、容重、总碳和总氮较初始垫料(表 1)均有增加。在经过 4 批养猪周期结束后,S 处理的 pH 值显著高于 SRS 处理,3 种处理之间含水率和 As 含量的差异不显著,S 处理的 Hg 含量显著高于 SR 处理。

通过结合初始垫料(表 1)和经过 4 批养猪周期结束后垫料(表 4)的基本性质,经计算可知,在经过 4 批养猪周期后,不同垫料的发酵床中 As、Hg 累积量略有差异(表 5)。S 和 SR 处理的发酵床的总干物质质量显著高于 SRS 处理。SRS 垫料的发酵床的 As 累积量最多,为 $1\,921.7\text{ mg}\cdot\text{栏}^{-1}$,略高于其他 2 种处理,但不同处理之间的差异不显著。SRS 垫料的发酵床的 Hg 累积量最多,为 $21.1\text{ mg}\cdot\text{栏}^{-1}$,显著高于其他 2 种处理。在累积特性上,不同垫料的发酵床对 As、Hg 的累积能力相同,均为 $\text{SRS} > \text{SR} > \text{S}$ 。

3 讨论

在经过 4 批猪养殖周期后,S、SR 和 SRS 3 种处理中的 As 含量均有不同程度的增长。根据张媛媛等^[13]研究,垫料中 As 富集量在饲养 3 个月后达到 $2.86\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;根据马建民等^[14]研究,使用 3 年的发酵床垫料中 As 含量最高为 $8.34\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。与以上研究比较,本研究中垫料使用时长约一年半,垫料中的 As 含量或富集量相对低于以上学者的研究。这可能是由于在规模化养殖过程中某些苯砷酸化合物(如对氨基胍

酸)常常作为饲料添加剂^[15],而在本实验的饲料中 As 含量为 $3.67\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,可能比其他学者使用的饲料中 As 含量低,因而随着猪的采食和排泄,进入垫料中的 As 也相对较少。另外,由于垫料原料大都就地取材,不同学者在不同地区进行研究,因而垫料原料中的 As 含量也会对研究结果有一定影响。

在不同层次垫料中,0~20 cm 层和 20~40 cm 层 As 的含量并未随着深度的增加,呈现明显的增加或减少的线性关系,这与马晗等^[16]对垫料中不同层次重金属的研究结果符合。但是大多数 40~60 cm 层 As 含量大于 0~20 cm 层和 20~40 cm 层,且 40~60 cm 底层垫料 As 累积明显,这与马建民等^[14,17]的研究结果类似。出现这种现象可能有以下几种原因。一是在饲养的过程中,由于猪的翻拱,会使得表层和中层的垫料之间进行了一定程度的混匀,所以在 0~20 cm 及 20~40 cm 垫料 As 含量的变化规律不明显,而底层 40~60 cm 垫料不易被猪翻拱,所以底层垫料中 As 累积明显;二是由于在发酵床养殖过程中,猪的采食、翻拱、碾压以及垫料的自身降解,会导致垫料的减少,因此在每个养殖批次结束后,需要补充新的垫料,新的垫料铺设在表层,会对表层垫料中的含量有一定的稀释作用;三是根据李月芬等研究^[18],水溶态 As 与 pH 值之间存在明显的正相关关系。在本实验中,随着养殖批次的延长,垫料 pH 值略有升高(表 1 和表 4),随着 pH 值的升高,垫料对 As 的吸附能力降低,因此水溶态 As 的含量增高,进而表层垫料中的水溶态 As 渗漏到底层,导致底层垫料中 As 含量略高。

在本实验研究中,在 3 种垫料处理下,经过 4 批

表 4 经过 4 批养猪周期后垫料的基本性质

Table 4 Basic characteristics of bio-bed padding materials after four breeding cycles

处理	采样批次 V						
	含水率/%	容重/ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	pH 值	总碳/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	总氮/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	As/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	Hg/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$
S	65.2±1.7a	548.7±18.6a	9.40±0.21a	350.8±11.6a	20.04±1.18a	2.921±0.333a	0.048±0.005a
SR	54.5±1.2a	429.8±12.8b	8.76±0.19b	258.7±31.0b	15.94±1.68b	2.190±0.369a	0.036±0.002b
SRS	53.5±9.1a	383.5±27.9b	9.13±0.05ab	257.0±6.1b	16.25±0.57b	2.621±0.129a	0.042±0.002ab

表 5 不同垫料中 As、Hg 的累积总量对比

Table 5 The contrast of the accumulation of As, Hg in different depth of bio-bed padding materials

处理	样品 I			样品 V			As 累积量/ $\text{mg}\cdot\text{栏}^{-1}$	Hg 累积量/ $\text{mg}\cdot\text{栏}^{-1}$
	总干物质质量/ $\text{kg}\cdot\text{栏}^{-1}$	As 总量/ $\text{mg}\cdot\text{栏}^{-1}$	Hg 总量/ $\text{mg}\cdot\text{栏}^{-1}$	总干物质质量/ $\text{kg}\cdot\text{栏}^{-1}$	As 总量/ $\text{mg}\cdot\text{栏}^{-1}$	Hg 总量/ $\text{mg}\cdot\text{栏}^{-1}$		
S	1 580.0±4.3a	1 501.0±13.5a	45.8±4.5a	1 069.1±52.4a	3 139.3±691.6a	52.4±4.0a	1 638.3±569.1a	6.5±1.8a
SR	1 558.4±1.7a	517.1±16.7b	24.8±2.9b	1 080.7±59.8a	2 366.6±264.6a	38.9±3.3b	1 849.6±287.9a	14.2±2.6b
SRS	1 219.2±11.0b	210.0±19.7c	13.1±1.8c	769.3±33.2b	2 131.8±204.9a	34.2±0.7b	1 921.7±248.8a	21.1±2.1c

养殖周期后,S、SR和SRS3种处理中的Hg含量均有所增加。根据黄静等^[12]研究,使用3年发酵床垫料中Hg含量为 $0.0321\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;根据应三成等^[19]研究,使用3年的发酵床垫料中Hg含量为 $0.067\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。在以上长期使用的发酵床垫料研究中,Hg含量也略有增加,这与本研究情况相近,但Hg的累积情况有所不同。这可能一是由于本实验的饲料中含有少量的Hg($0.053\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),随着猪的采食和排泄进入垫料;二是由于垫料原料的来源不同,导致初始垫料中Hg含量有所不同;三是少量的Hg可能是大气中的气态Hg沉降或固定于垫料中。大气环境中含有单质Hg、二价Hg及其化合物、有机Hg等多种形态Hg^[20-21]。根据李波等^[22]研究,胡敏酸、腐植酸、富里酸、猪粪等七种物质对田间土壤的Hg活性具有抑制作用,且腐植酸、胡敏酸等能够提高土壤对Hg的固定能力,使土壤再次捕获已挥发在大气环境中的气态Hg。而在发酵床养殖过程中,猪粪会不断进入垫料中,且垫料会腐解产生腐植酸等,所以表层垫料会捕获极少量气态Hg,引起垫料中Hg含量增加。但是根据应三成等^[19]研究,使用3年的发酵床垫料中Hg含量在整个发酵床使用过程中随时间无显著规律,这与本实验结果不同,原因可能是由于垫料原料的来源不同,或与饲料、周边大气环境、土壤中重金属等有关。

在本实验中S处理的采样批次V的垫料As浓度最高为 $2.921\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,Hg含量最高值为 $0.048\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,与《农业行业标准有机肥料》(NY 525—2012)、《食用农产品产地环境质量评价标准》(HJ/T 332—2006)比较,As、Hg含量均远低于标准限值,没有超标风险。综合考虑发酵床垫料的原料不同,以及猪的采食、碾压,垫料的自身降解和新垫料后期补充等影响因素,在经过4批养猪周期后,As累积总量最大的是SRS处理的发酵床,为 $1921.7\text{ mg}\cdot\text{栏}^{-1}$,略高于其他2种处理,但不同处理之间的差异不显著。Hg累积总量最大的也是SRS处理的发酵床,为 $21.1\text{ mg}\cdot\text{栏}^{-1}$,显著高于其他2种处理。在初始垫料样品即采样批次I中,As、Hg主要来自于木屑、稻壳和秸秆这3种原料,由于这3种原料的密度和性质有所差异,所以在S、SR和SRS3种垫料处理的发酵床的总干物质质量和As、Hg总量有所差异。而在每批养殖过程中,不同垫料原料处理的的发酵床的总干物质质量和As、Hg含量,随着猪粪尿排泄和补充新垫料等原因而有所累积。在实际生产中,不同垫料的自身降解有很大差异,且由于不同原料密度的不同,猪的碾压也会造成发酵床垫

料层厚度不同程度的降低,因此后期补充垫料的添加量也有很大差异。综合以上原因,SRS处理的发酵床的As、Hg累积总量略高于其他2种处理。

4 结论

(1)随着养猪批次的延长,不同原料处理的垫料中的As、Hg均累积显著,在经过4批猪养殖周期后,木屑、木屑+稻壳和木屑+稻壳+秸秆段3种处理下的垫料中的As、Hg含量均远低于《农业行业标准有机肥料》(NY 525—2012)、《食用农产品产地环境质量评价标准》(HJ/T 332—2006)的限值。

(2)在3种垫料处理下,不同层次垫料中的As、Hg含量均有所累积,大多数40~60 cm层As含量大于0~20 cm层和20~40 cm层;不同层次垫料中Hg含量虽然有些许差异,但是差异均不显著。

(3)经过4批养殖周期后,综合考虑猪的采食、碾压以及垫料的自身降解和新垫料后期补充等影响因素,木屑+稻壳+秸秆段处理的发酵床的As、Hg累积总量略高于其他2种处理。

参考文献:

- [1] Schembri N, Hart K, Petersen R, et al. Assessment of the management practices facilitating the establishment and spread of exotic diseases of pigs in the Sydney region[J]. *Australian Veterinary Journal*, 2006, 84(10): 341.
- [2] 王远孝, 王恬. 发酵床养猪技术的应用研究进展[J]. *动物医学进展*, 2010, 31(S1): 199-202.
WANG Yuan-xiao, WANG Tian. Progress on and application of biology bed in pigs raising[J]. *Progress in Veterinary Medicine*, 2010, 31(S1): 199-202. (in Chinese)
- [3] Gaddj. Housing of pigs in livestock environment IV. Fourth international symposium[C]. Michigan: American Society of Agricultural Engineers, 1993: 1040-1048.
- [4] 张霞, 杨杰, 李健, 等. 猪发酵床不同原料垫料重金属元素累积特性研究[J]. *农业环境科学学报*, 2013, 32(1): 166-171.
ZHANG Xia, YANG Jie, LI Jian, et al. Accumulated characteristics of heavy metals in different pig bio-bed materials [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(1): 166-171. (in Chinese)
- [5] 秦枫, 潘孝青, 顾洪如, 等. 发酵床不同垫料对猪生长组织器官及血液相关指标的影响[J]. *江苏农业学报*, 2014, 30(1): 136-140.
QIN Feng, PAN Xiao-qing, GU Hong-ru, et al. Effects of padding materials on growth, organs and haematological indexes of swines in bio-bed system[J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2014, 30(1): 136-140. (in Chinese)
- [6] 宦海琳, 闫俊书, 周维仁, 等. 不同垫料组成对猪用发酵床细菌群落的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2014, 33(9): 1843-1848.
HUAN Hai-lin, YAN Jun-shu, ZHOU Wei-ren, et al. Effects of differ-

- ent bedding litters on bacterial community in pig biobed [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(9): 1843-1848. (in Chinese)
- [7] 胡海燕, 于勇, 张玉静, 等. 发酵床养猪废弃垫料的资源化利用评价[J]. *植物营养与肥料学报*, 2013, 19(1): 252-258.
HU Hai-yan, YU Yong, ZHANG Yu-jing, et al. Evaluation on resource utilization of litters in pig-on-litter farming system[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2013, 19(1): 252-258. (in Chinese)
- [8] Barker A V, Bryson G M. Bioremediation of heavy metals and organic toxicants by composting[J]. *The Scientific World Journal*, 2002(2): 407-420.
- [9] 张丽萍, 盛婧, 孙国锋, 等. 基于物质流分析的发酵床重金属 As 的累积特征[J]. *江苏农业学报*, 2014, 30(2): 95-100.
ZHANG Li-ping, SHENG Jing, SUN Guo-feng, et al. Characteristics of heavy metal arsenic accumulation in bio-bed based on material flow analysis[J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2014, 30(2): 95-100. (in Chinese)
- [10] 马建民, 郭彤, 郭秀山, 等. 猪发酵床垫料中重金属元素残留分析[J]. *黑龙江畜牧兽医*, 2014, 1(1): 201-202.
MA Jian-min, GUO Tong, GUO Xiu-shan, et al. Analysis of the residues of heavy metallic elements in the bedding of pig fermentation bed [J]. *Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine*, 2014, 1(1): 201-202. (in Chinese)
- [11] 纪玉琨, 何洪, 杨博琼. 养猪场发酵床垫料营养物质及毒性研究[J]. *甘肃农业大学学报*, 2014, 49(6): 25-28, 34.
JI Yu-kun, HE Hong, YANG Bo-qiong. Nutrients and toxicology research on bedding of fermentation bed in pig farm[J]. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2014, 49(6): 25-28, 34. (in Chinese)
- [12] 黄静, 康建平, 苏波, 等. 生物床养猪垫料用作有机肥的安全性研究[J]. *食品与发酵科技*, 2011, 47(1): 39-41.
HUANG Jing, KANG Jian-ping, SU Bo, et al. Safety research on bedding of pig-on-litter used for organic fertilizer[J]. *Food and Fermentation Technology*, 2011, 47(1): 39-41. (in Chinese)
- [13] 张媛媛, 胡启蒙, 刘春燕, 等. 发酵床养猪垫料重金属含量变化[J]. *上海交通大学学报(农业科学版)*, 2013, 31(4): 23-29.
ZHANG Yuan-Yuan, HU Qi-meng, LIU Chun-yan, et al. Change of heavy metal content in the pad made from abandoned litters of feeding pigs[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University(Agricultural Science)*, 2013, 31(4): 23-29. (in Chinese)
- [14] 马建民, 郭彤, 郭秀山. 生态养猪场发酵床垫料中砷残留测定[J]. *家畜生态学报*, 2013, 34(5): 80-81.
MA Jian-min, GUO Tong, GUO Xiu-shan. Determination of arsenic residues in padding of pig-on-litter system[J]. *Journal of Domestic Animal Ecology*, 2013, 34(5): 80-81. (in Chinese)
- [15] 李圣发, 王宏斌. 土壤砷污染及其修复技术的研究进展[J]. *水土保持研究*, 2011, 18(4): 248-253.
LI Sheng-fa, WANG Hong-bin. Advances in the study of arsenic-contaminated soil and its remediation technology [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2011, 18(4): 248-253. (in Chinese)
- [16] 马晗, 郭海宁, 郑凯琪, 等. 不同养猪模式对土壤 As 累积的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2014, 33(10): 2042-2046.
MA Han, GUO Hai-ning, ZHENG Kai-qi, et al. Influence of different pig-raising patterns on soil As accumulation[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(10): 2042-2046. (in Chinese)
- [17] 马建民, 郭彤, 郭秀山, 等. 猪发酵床垫料中重金属元素残留分析[J]. *黑龙江畜牧兽医*, 2014, 1(1): 195-196.
MA Jian-min, GUO Tong, GUO Xiu-shan, et al. Analysis of the residues of heavy metallic elements in the bedding of pig fermentation bed[J]. *Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine*, 2014, 1(1): 195-196. (in Chinese)
- [18] 李月芬, 王冬艳, 汤洁, 等. 吉林西部土壤砷的形态分布及其与土壤性质的关系研究[J]. *农业环境科学学报*, 2012, 31(3): 516-522.
LI Yue-fen, WANG Dong-yan, TANG Jie, et al. Speciation of soil arsenic and its correlation with soil properties in western Jilin Province [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(3): 516-522. (in Chinese)
- [19] 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份比较研究[J]. *西南农业学报*, 2010, 23(4): 1279-1281.
YING San-cheng, LV 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 Sciences*, 2010, 23(4): 1279-1281. (in Chinese)
- [20] Mason R P, Fitzgerald W F, Morel F M M. The biogeochemical cycling of elemental mercury: Anthropogenic influences[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1994, 58(15): 3191-3198.
- [21] Slemr F, Schuster G, Seiler W. Distribution, speciation, and budget of atmospheric mercury[J]. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 1985, 3(4): 407-434.
- [22] 李波. 土壤: 植物系统中汞生物活性的调控及其机理研究[D]. 重庆: 西南农业大学, 2001.
LI Bo. Study on controlling the availability of mercury in soil-plant ecosystem and its mechanisms[D]. Chongqing: Southwest Agricultural University, 2001. (in Chinese)