

张霞,刘蓓一,李健,等. 养猪发酵床熟化垫料组分及重金属含量评估[J]. 江苏农业科学,2019,47(11):302-305.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2019.11.068

养猪发酵床熟化垫料组分及重金属含量评估

张霞^{1,2}, 刘蓓一^{1,2,3}, 李健^{1,2}, 秦枫^{1,2}, 潘孝青^{1,2}, 邵乐^{1,2}, 杨杰^{1,2}, 顾洪如^{1,2}

(1. 江苏省农业科学院畜牧研究所, 江苏南京 210014; 2. 农业部种养结合重点实验室, 江苏南京 210014;

3. 扬州市伊绿鲜生态农业科技有限公司, 江苏扬州 225261)

摘要:为评价猪发酵床废弃垫料的资源化利用价值及潜力,测定4种使用了3~4年的猪发酵床废弃垫料的基本理化性质、盐分及重金属含量等指标。结果表明,垫料富含有机质及氮磷钾营养物质,有机质含量在37.11%~50.73%之间,全氮含量为13.62~18.99 mg/g,全磷(P_2O_5)含量为23.04~55.32 mg/g,全钾(K_2O)含量为40.37~51.74 mg/g,且部分垫料之间差异显著。总腐殖酸含量较高,在35.36~43.60 g/kg之间。废弃垫料pH值在6.72~7.58之间,电导率为1.06~2.60 mS/cm,可溶性总盐含量为1.28%~3.77%,电导率、可溶性总盐含量及 Na^+ 、 $NO_3^- - N$ 含量不同垫料间差异显著,电导率与无机氮含量、可溶性总盐含量呈极显著正相关,pH值与 $NO_3^- - N$ 含量、可溶性总盐含量呈极显著负相关。垫料Cr、Cd、Pb含量均低于有机肥料农业行业标准(NY 884—2012《生物有机肥》)的要求;菌糠垫料As元素含量高于有机肥农业行业标准(As含量 ≤ 15 mg/kg)。Cu、Zn含量超过了《农用污泥中污染物控制标准》(GB 4284—1984)控制范围。总之,使用了3~4年的废弃垫料有机质、氮、磷、钾、腐殖酸含量丰富,盐含量相对较高,超标的重金属以Cu、Zn、As为主。

关键词:养猪发酵床;垫料;资源化利用;养分;重金属

中图分类号: X713 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2019)11-0302-04

发酵床养猪技术是基于控制畜禽粪便排放与污染的一种养殖模式,主要是将锯末、稻壳等材料接种生物菌种堆积发酵

后用作垫料,在厚的垫料上养猪,使粪污分解产生的臭味物质转化为菌体固定下来,达到降低养殖舍内有害气体浓度、减少养殖污染排放的目的^[1-3]。发酵床养殖技术减少了现代养殖方式中水冲圈产生的大量污水对环境的污染,改善了饲养环境,在农业生态循环技术中起着重要的作用^[4]。

近年来生物发酵床养殖技术逐渐发展起来,并在全国大力推广。但是垫料在使用一定年限后便因为各种原因(如垫料理化性质、微生物发酵菌群以及病原微生物等)导致处理粪便的能力及饲养效果下降,须要进行更新。作为有机肥还田是废弃垫料资源化利用的主要途径,而废弃垫料作有机肥

收稿日期:2018-02-27

基金项目:江苏省农业科技自主创新资金[编号:CX(16)1003-12];

江苏省农业三新工程(编号: SXGC[2016]331);江苏省双创科技副总项目。

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:583765990@qq.com。

通信作者:顾洪如,研究员,主要从事牧草资源与育种以及生态畜牧业技术研究。E-mail:guhongrui@163.com。

[3]孙景生,康绍忠,蔡焕杰,等. 控制性交替灌溉技术的研究进展[J]. 农业工程学报,2001,17(4):1-5.

[4]杜社妮,白岗栓,梁银丽. 灌溉方式对黄瓜生长、产量及水分利用效率的影响[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版),2010,36(4):433-439.

[5]曹琦,王树忠,高丽红,等. 交替隔沟灌溉对温室黄瓜生长及水分利用效率的影响[J]. 农业工程学报,2010,26(1):47-53.

[6]王志平,周继华,黄兴法,等. 交替沟灌在露地春甘蓝上的应用[J]. 干旱地区农业研究,2010,28(4):40-45.

[7]王志伟,张玉鑫,王晓巍,等. 隔沟交替灌溉在高原夏菜莴笋上的应用研究[J]. 中国农村水利水电,2011(8):77-79.

[8]王雪梅,曹红霞,韩红亮. 水氮耦合对温室番茄产量和水分利用效率的影响[J]. 节水灌溉,2014(12):20-22.

[9]谢安坤,李志宏,张云贵,等. 不同施氮水平对番茄产量、品质及土壤剖面硝态氮的影响[J]. 中国土壤与肥料,2011(1):26-29,68.

[10]聂斌,李文刚,江丽华,等. 不同灌溉方式对设施番茄土壤剖面硝态氮分布及灌溉水分效率的影响[J]. 水土保持研究,

2012,19(3):102-107.

[11]王春辉,祝鹏飞,束良佐,等. 分根区交替灌溉和氮形态影响土壤硝态氮的迁移利用[J]. 农业工程学报,2014,30(11):92-101.

[12]王鹏勃,李建明,丁娟娟,等. 水肥耦合对温室袋培番茄品质、产量及水分利用效率的影响[J]. 中国农业科学,2015,48(2):314-323.

[13]李建明,潘铜华,王玲慧,等. 水肥耦合对番茄光合、产量及水分利用效率的影响[J]. 农业工程学报,2014,30(10):82-90.

[14]李红峥,曹红霞,吴宣毅,等. 沟灌方式与灌水量对温室番茄生长指标的影响[J]. 节水灌溉,2016(9):90-93.

[15]刘小刚,张彦,张富仓,等. 交替灌溉下不同水氮供给对番茄产量和品质的影响[J]. 水土保持学报,2013,27(4):283-287.

[16]周继堂,成自勇,王峰,等. 覆膜沟灌条件下不同水氮处理对番茄产量与品质的影响[J]. 干旱地区农业研究,2013,31(4):43-49.

[17]郑国保,孔德杰,张源沛,等. 不同灌水量对日光温室番茄产量、品质和水肥利用效率的影响[J]. 北方园艺,2011(11):47-49.

利用的可行性研究相对较少,且主要集中在以稻壳与木屑为原料的垫料^[5-10]。

笔者所在研究团队自 2010 年开始进行猪发酵床生态养殖研究,2010—2011 年使用的垫料经过 3~4 年的连续养殖后,已不再适合继续进行养殖。本研究对这些已连续使用 3~4 年的由不同原料构成的废弃垫料进行研究,探讨废弃垫料基本理化特性、重金属元素含量等指标的变化,从而对废弃垫料作有机肥的适宜性及安全性进行评价,以期合理的资源化利用提供依据。

1 材料与方法

1.1 样品采集

样品采集自江苏省农业科学院六合动物科学基地猪发酵床养殖场。本试验采用使用 3~4 年的废弃垫料(60% 稻壳 + 40% 木屑垫料,简称稻壳垫料;60% 酒糟 + 40% 木屑垫料,简称酒糟垫料;60% 菌糠 + 40% 木屑垫料,简称菌糠垫料;60% 棉花秸秆 + 20% 稻壳 + 20% 木屑垫料,简称棉花秸秆垫料),共 4 栏。取样时每一栏发酵床内取 5 点,垫料约 50 cm 厚,分上下 2 层,每层 5 点的样品混合后作为该样的混合样品装于自封袋内。取回的垫料样品,放于 60 ℃ 烘箱烘至恒质量,用小型高速粉碎机粉碎后贮存备用。

1.2 测定方法

1.2.1 基本理化性质的测定 (1)有机质含量采用重铬酸钾法测定。(2)垫料腐殖酸含量采用焦磷酸钠-氢氧化钠溶液提取法和重铬酸钾法测定。(3)pH 值及电导率:用水浸提鲜样,固液比为 1 g : 10 mL,用 Mettler Toledo FiveEasy Plus 型 pH 计测定 pH 值,用 EC215 Conductivity Meter 电导率仪测定电导率。(4)全氮(TN)含量采用凯氏定氮法测定。(5)全磷

(TP)含量采用钼黄比色法测定。(6)铵态氮、亚硝态氮和硝态氮含量:用 2 mol/L 的 KCl 溶液浸提,固液比为 1 g : 10 mL,用流动分析仪测定。(7)可溶性总盐含量:用重量法测定水溶性盐分总量。

1.2.2 重金属的测定 重金属元素 Cr、Cu、Zn、As、Cd、Pb 以及 K 元素采用硝酸:高氯酸=4:1 在 130~200 ℃ 条件下消煮,采用 ICP-MS 电感耦合等离子体质谱仪感应耦合等离子体质谱仪测定。

1.3 数据分析

数据采用 Excel 软件整理,方差分析采用 SAS 8.1 软件进行分析,多重比较采用 LSD 法,采用 Excel 软件进行作图。

2 结果与分析

2.1 不同废弃垫料有机质含量、腐殖酸含量及氮、磷、钾含量

由表 1 可知,在 4 种垫料中,稻壳垫料灰分含量最低,对应的有机质含量最高,菌糠垫料灰分含量最高,有机质含量最低。上层垫料灰分均低于下层垫料,有机质高于下层。总腐殖酸含量在 34.10~43.60 g/kg 之间,酒糟垫料总腐殖酸含量显著低于稻壳垫料、菌糠垫料,稻壳垫料含量最高,酒糟垫料最低;酒糟、菌糠与棉花秸秆上层垫料的总腐殖酸含量均高于下层垫料。全氮含量为 13.62~18.99 mg/g,稻壳垫料显著高于其他 3 种垫料,菌糠垫料显著低于其他 3 种垫料,而酒糟垫料与棉花秸秆垫料二者含量差异不显著。 P_2O_5 含量为 23.04~55.32 mg/g,上层垫料高于下层,稻壳与酒糟垫料含量显著高于菌糠与棉花秸秆垫料,棉花秸秆磷含量显著低于其他 3 种垫料。 K_2O 含量为 40.37~51.74 mg/g,酒糟垫料钾含量最高且上下层垫料钾含量差异不大,其他 3 种垫料均为下层垫料钾含量较高。

表 1 不同废弃垫料有机质含量及氮、磷、钾含量

垫料	分层	有机质含量 (%)	总腐殖酸含量 (g/kg)	全氮含量 (mg/g)	P_2O_5 含量 (mg/g)	K_2O 含量 (mg/g)
60% 稻壳 + 40% 木屑	上层	50.73 ± 8.05	39.17 ± 0.47	16.83 ± 0.25	53.78 ± 0.66	41.18 ± 0.64
	下层	43.93 ± 1.65	43.60 ± 1.90	18.99 ± 0.44	46.01 ± 0.07	45.72 ± 0.11
	平均值	47.33 ± 6.62a	41.38 ± 2.48a	17.91 ± 1.23a	49.90 ± 0.58a	43.45 ± 0.43b
60% 酒糟 + 40% 木屑	上层	44.56 ± 0.31	39.04 ± 2.90	16.09 ± 0.47	55.32 ± 0.17	51.74 ± 0.34
	下层	38.89 ± 0.61	34.10 ± 1.59	15.76 ± 0.39	47.87 ± 0.07	49.56 ± 0.80
	平均值	41.72 ± 3.14b	36.57 ± 3.12b	15.92 ± 0.43b	51.59 ± 0.41a	50.65 ± 0.69a
60% 菌糠 + 40% 木屑	上层	40.79 ± 0.92	40.08 ± 1.43	14.22 ± 0.05	43.52 ± 0.18	44.92 ± 0.29
	下层	37.11 ± 1.26	38.12 ± 1.45	13.62 ± 0.10	42.33 ± 0.13	45.22 ± 0.54
	平均值	38.95 ± 2.14b	39.10 ± 1.53a	13.92 ± 0.34c	42.93 ± 0.15b	45.07ab ± 0.39ab
60% 棉花秸秆 + 20% 稻壳 + 20% 木屑	上层	42.30 ± 5.53	41.18 ± 0.77	15.92 ± 0.28	28.27 ± 0.51	40.37 ± 0.39
	下层	38.12 ± 5.61	35.36 ± 0.75	15.57 ± 0.47	23.04 ± 0.37	42.37 ± 1.26
	平均值	40.21 ± 5.48b	38.27 ± 2.98ab	15.75 ± 0.40b	25.65 ± 0.56c	41.37b ± 0.92b

注:平均值数据后同列不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著,表中各指标的质量分数均以烘干基计。表 2 同。

2.2 不同废弃垫料无机氮含量、pH 值、电导率及含盐量

由表 2 可知,4 种垫料 pH 值均为中性偏碱,稻壳垫料下层 pH 值最低。电导率为 1.06~2.60 mS/cm,稻壳垫料最高且显著高于其他 3 种垫料,棉花秸秆垫料最低,上层垫料电导率高于下层;可溶性总盐含量在 1.28%~3.77% 之间,稻壳垫料含量显著高于菌糠与棉花秸秆垫料。 Na^+ 离子含量在 1.05~2.90 mg/g 之间,棉花秸秆垫料含量显著低于稻壳与酒糟垫料。硝态氮含量平均值在 0.13~2.70 mg/g 之间,稻

壳垫料最高且下层略高于上层,棉花秸秆垫料最低,酒糟、菌糠与棉花秸秆垫料上层均略高于下层;铵态氮含量平均值在 0.13~0.30 mg/g 之间,不同垫料之间差异不显著,稻壳垫料最高,酒糟垫料最低。相关分析(分析结果未列成表格)表明,垫料电导率与 $NO_3^- - N$ 含量($r^2 = 0.89, df = 23$)、 $NH_4^+ - N$ 含量($r^2 = 0.91, df = 23$)可溶性总盐($r^2 = 0.96, df = 23$)呈极显著正相关,pH 值与 $NO_3^- - N$ 含量($r^2 = -0.69, df = 23$)、可溶性总盐($r^2 = -0.62, df = 23$)呈极显著负相关。

表 2 不同废弃垫料 pH 值、电导率、可溶性盐含量及无机氮含量

垫料	分层	pH 值	电导率 (mS/cm)	可溶性总盐含量 (%)	Na ⁺ 含量 (mg/g)	NO ₃ ⁺ - N 含量 (mg/g)	NH ₄ ⁺ - N 含量 (mg/g)
60% 稻壳 + 40% 木屑	上层	7.34 ± 0.07	2.60 ± 0.03	3.18 ± 0.14	2.52 ± 0.15	2.53 ± 0.10	0.53 ± 0.14
	下层	6.72 ± 0.02	2.27 ± 0.02	3.77 ± 0.16	2.26 ± 0.02	2.70 ± 0.01	0.08 ± 0.01
	平均值	7.03 ± 0.31b	2.44 ± 0.17a	3.47 ± 0.35a	2.39 ± 0.17a	2.61 ± 0.11a	0.30 ± 0.24a
60% 酒糟 + 40% 木屑	上层	7.27 ± 0.10	2.19 ± 0.06	3.38 ± 0.11	2.90 ± 0.03	1.72 ± 0.04	0.11 ± 0.02
	下层	7.58 ± 0.03	1.49 ± 0.02	1.76 ± 0.07	1.58 ± 0.03	0.56 ± 0.02	0.15 ± 0.02
	平均值	7.43 ± 0.17a	1.84 ± 0.35b	2.57 ± 0.89ab	2.37 ± 0.72a	1.14 ± 0.58b	0.13 ± 0.03a
60% 菌糠 + 40% 木屑	上层	7.39 ± 0.03	1.49 ± 0.02	1.64 ± 0.07	1.78 ± 0.22	0.46 ± 0.02	0.23 ± 0.01
	下层	7.32 ± 0.04	1.36 ± 0.03	1.89 ± 0.08	2.00 ± 0.08	0.40 ± 0.09	0.18 ± 0.03
	平均值	7.36 ± 0.04a	1.43 ± 0.07bc	1.77 ± 0.15b	1.87 ± 0.20ab	0.43 ± 0.06c	0.21 ± 0.03a
60% 棉花秸秆 + 20% 稻壳 + 20% 木屑	上层	7.31 ± 0.04	1.17 ± 0.03	1.28 ± 0.03	1.28 ± 0.12	0.24 ± 0.02	0.19 ± 0.02
	下层	7.33 ± 0.07	1.06 ± 0.03	1.29 ± 0.10	1.05 ± 0.11	0.13 ± 0.03	0.18 ± 0.06
	平均值	7.32 ± 0.05a	1.12 ± 0.06c	1.28 ± 0.05b	1.22 ± 0.15b	0.19 ± 0.06c	0.19 ± 0.04a

2.3 不同废弃垫料重金属元素含量

由表 3 可知,不同垫料金属元素 Cr、Cd、Pb 含量均远低于有机肥料农业行业标准的要求。菌糠垫料 As 含量略高于有机肥农业行业标准的要求。有机肥行业标准对 Cu、Zn 含量没有要求,但它们的含量超过了《农用污泥中污染物控制标

准》(GB 4284—1984)的要求。同一元素,部分垫料之间含量差异显著,稻壳垫料金属元素含量最低,且 Cr、Cu、Zn 含量显著低于其他 3 种垫料。上层垫料的 As、Cd、Pb 元素含量均低于下层垫料;上层垫料 Zn 元素含量均高于下层垫料,Cu 元素在上下层垫料间在差异较小且规律不一致。

表 3 不同废弃垫料重金属元素含量

元素及农业行业标准	分层	重金属元素含量(mg/kg)			
		60% 稻壳 + 40% 木屑	60% 酒糟 + 40% 木屑	60% 菌糠 + 40% 木屑	60% 棉花秸秆 + 20% 稻壳 + 20% 木屑
Cr≤150 mg/kg	上层	45.19 ± 13.85	54.43 ± 5.82	81.29 ± 7.97	94.24 ± 4.12
	下层	43.71 ± 7.82	61.27 ± 9.42	77.41 ± 4.26	76.11 ± 8.17
	平均值	44.45 ± 1.05c	57.85 ± 4.84b	79.35 ± 2.74a	85.18 ± 12.82a
Cu	上层	189.43 ± 14.03	261.23 ± 24.38	287.41 ± 13.91	270.48 ± 11.86
	下层	204.01 ± 30.23	249.96 ± 13.31	305.33 ± 17.36	268.62 ± 19.76
	平均值	196.72 ± 10.31b	255.59 ± 7.97a	296.37 ± 12.67a	269.55 ± 1.31a
Zn	上层	842.85 ± 74.13	1 147.61 ± 95.31	1 037.07 ± 48.47	1 120.10 ± 72.17
	下层	760.62 ± 88.90	977.16 ± 66.81	940.35 ± 31.57	1 027.23 ± 73.66
	平均值	801.73 ± 58.90b	1 062.38 ± 120.53a	988.71 ± 68.39a	1 073.67 ± 65.66a
As≤15 mg/kg	上层	9.32 ± 3.07	12.04 ± 1.99	15.79 ± 0.59	14.13 ± 0.45
	下层	11.76 ± 3.67	13.74 ± 0.90	16.70 ± 1.04	15.36 ± 0.97
	平均值	10.54 ± 1.72b	12.89 ± 1.20ab	16.25 ± 0.64a	14.74 ± 0.87a
Cd≤3 mg/kg	上层	0.59 ± 0.05	0.88 ± 0.06	1.13 ± 0.22	1.35 ± 0.06
	下层	0.73 ± 0.12	1.01 ± 0.12	1.30 ± 0.25	1.43 ± 0.09
	平均值	0.66 ± 0.10b	0.94 ± 0.09ab	1.22 ± 0.11a	1.39 ± 0.05a
Pb≤50 mg/kg	上层	22.67 ± 5.43	24.82 ± 3.76	27.28 ± 1.69	38.81 ± 3.38
	下层	26.43 ± 5.27	26.84 ± 1.34	49.24 ± 16.31	41.29 ± 6.17
	平均值	24.55 ± 2.66b	25.83 ± 1.43b	38.26 ± 15.53a	40.05 ± 1.75a

注:同行不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著,各指标的质量分数均以烘干基计。

3 讨论

3.1 废弃垫料有机质及氮、磷、钾等主要营养成分

有机质及氮、磷、钾等是有机肥的主要营养成分,有机肥农业标准 NY 848—2012《生物有机肥》规定:有机肥有机质含量≥40%,氮磷钾总含量≥5%。本研究表明,废弃垫料有机质含量在 37.11% ~ 50.73% 之间,全氮含量为 13.62 ~ 18.99 mg/g,全磷(P₂O₅)含量为 23.04 ~ 55.32 mg/g,全钾(K₂O)含量为 40.37 ~ 51.74 mg/g,且部分垫料之间差异显

著。菌糠垫料有机质含量略低于 40%,其他 3 种垫料有机质含量均符合有机肥农业标准(NY 848—2012《生物有机肥》)的要求。整体上,氮磷钾总量均大于 5%,符合农业有机肥标准(NY 525—2012《有机肥料》)的要求,此结果与国内对废弃垫料营养成分的研究结果^[5,10-12]相符。垫料使用年限为 3 ~ 4 年,垫料全氮含量并不高(13 ~ 18 mg/g),这可能是由于在发酵床养殖期间垫料氮素损失引起的。

3.2 废弃垫料无机氮含量、pH 值、电导率及盐分含量
土壤次生盐渍化成为影响农业可持续发展的重要障碍因

子之一^[13-14]。尽管施用有机肥在一定程度上可以减轻土壤次生盐渍化,但现在畜禽有机肥也含有较高的盐分,施用畜禽粪肥对露天种植的土壤次生盐渍化没有显著影响,而对温室土壤影响较大^[13-16]。饲料中大量使用的添加剂应是畜禽粪便中盐分的重要来源之一,食盐、磷酸盐、膨润土、稀土沸石等矿物质饲料、非蛋白质氮(如尿素)等添加剂最终均有可能通过动物的消化排泄系统进入畜禽粪便^[17-18]。粪尿中的无机盐在垫料中累积,长期使用垫料存在盐渍化的风险^[4]。本研究表明,垫料 pH 值多为中性偏碱(6.72~7.58)标准要求,与国内对废弃垫料 pH 值检测结果^[5,12,19-21]相符。电导率为 1.06~2.60 mS/cm,与胡海燕等的研究结果(8.14~16.06 mS/cm)^[5]相比较低。可溶性总盐含量在 1.28%~3.77% 之间,此研究结果与朱洪等的研究中使用 2~4 年的垫料可溶性盐含量(1.5%~3.5% 和 2.22%~4.57%)^[4-5]均相一致。从 pH 值、电导率以及可溶液性盐含量可知,经过长期使用的垫料盐渍化较高,作有机肥使用时应考虑其盐分,防止长期大量使用引起土壤次生盐渍化。

3.3 废弃垫料重金属元素含量

大量促进动物生长发育的饲料添加剂、预混剂的广泛使用,使畜禽粪便的盐分含量较高,另外由于畜禽对微量重金属元素吸收利用率较低,重金属元素大部分通过粪便排到体外。而垫料中重金属含量将直接影响到垫料作为有机肥使用时对环境的污染以及能否资源化利用。研究表明,使用 3~4 年的不同废弃垫料 Cr、Cd、Pb 含量均低于有机肥料农业行业标准(NY 884—2012)的要求;菌糠垫料 As 元素含量高于有机肥料农业行业标准(As 含量 ≤ 15 mg/kg),稻壳、酒糟及棉花秸秆垫料 As 含量均低于有机肥料农业行业标准规定。这些结果与笔者所在研究团队以前的研究结果^[8,22]一致。有机肥行业标准对 Cu、Zn 含量没有硬性要求,但超过了农污污泥中污染物的控制标准(GB 4284—1984,酸性土壤 Cu 含量 ≤ 250 mg/kg、Zn 含量 ≤ 500 mg/kg,碱性土壤 Cu 含量 ≤ 500 mg/kg、Zn 含量 $\leq 1\,000$ mg/kg),这一结果高于笔者所在研究团队前期的研究结果^[8]。本试验所用垫料均有 3 年或 4 年使用时间,相对来说垫料使用时间较长,另一方面由于猪饲养期间饲料内 Cu、Zn 添加量较高,从而引起垫料内 Cu、Zn 含量超标^[23]。郭彤等研究认为,只要饲料中重金属含量控制在国家规定的范围内,且发酵床管理好,定期深翻垫料或更换新的垫料和发酵菌种(尤其是粪尿区),重金属就不会超标,不会污染环境^[22]。

参考文献:

- [1] Nfy T, Llp V. Effects of the inoculum 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.
- [2] 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.
- [3] 孔凡真. 日本发酵床养猪技术简介[J]. 肉品卫生, 2005(2): 40-42.
- [4] 朱洪. 基于畜禽废弃物管理的发酵床技术研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2007.
- [5] 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.
- [6] 盛清凯, 武英, 赵红波, 等. 发酵床养殖垫料组分的变化规律[J]. 西南农业学报, 2010, 23(5): 1703-1705.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 侯建华, 孟莉蓉, 李晖, 等. 基于肥料化利用的猪发酵床垫料主要化学性状分析[J]. 扬州大学学报(农业与生命科学版), 2017(3): 104-110.
- [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.
- [12] 孙盼, 王全红, 直俊强, 等. 生猪发酵床废弃垫料主要组分检测分析[J]. 北京农业, 2014(6): 14-15.
- [13] 王辉, 董元华, 张绪美, 等. 江苏省集约化养殖畜禽粪便盐分含量及分布特征分析[J]. 农业工程学报, 2007, 3(11): 229-233.
- [14] 王辉, 董元华, 张绪美, 等. 集约化养殖畜禽粪便农用对土壤次生盐渍化的影响评估[J]. 环境科学, 2008, 29(1): 183-188.
- [15] 余海英, 李廷轩, 周健民. 设施土壤盐分的累积、迁移及离子组成变化特征[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(4): 642-650.
- [16] 董元华, 王辉国, 张劲强, 等. 现代畜禽粪肥的特点及对土壤质量的潜在影响[C]//江苏耕地质量建设文集. 南京: 中国土壤学会, 2008.
- [17] 感昕. 常用的矿物质饲料和微量元素饲料[J]. 猪业观察, 2004(21): 30-30.
- [18] 丁述理, 彭苏萍, 刘钦甫, 等. 膨润土用作饲料添加剂可行性分析[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2003, 22(1): 24-26.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 马晗. 发酵床垫料降解特性及氮素变化研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2015.
- [22] 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.
- [23] 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.