

田雪力, 翟中葳, 丁飞飞, 等. 奶牛场粪污制备卧床垫料过程中物料性质及污染物含量的周年变化规律[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(3): 552–558.

TIAN Xue-li, ZHAI Zhong-wei, DING Fei-fei, et al. Annual variation of material properties and pollutant content in the process of dairy manure making bedding in dairy farm[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(3): 552–558.

奶牛场粪污制备卧床垫料过程中物料性质及污染物含量的周年变化规律

田雪力^{1,2}, 翟中葳², 丁飞飞², 杨凤霞², 张克强^{1,2*}

(1.东北农业大学资源与环境学院, 哈尔滨 150030; 2.农业部环境保护科研监测所, 天津 300191)

摘要:为了考察奶牛场粪污制备卧床垫料过程中的牛粪性质及相关污染物含量的周年变化规律,选择天津市一家规模化奶牛养殖场作为研究对象,进行不同阶段、不同季节的连续采样,并对样品中的 TN、TP、pH、含水率、有机质、粪大肠菌群和 Cu、Zn 等重金属进行了系统检测分析。检测数据分析显示:泌乳牛牛粪中的 TN、TP、VS、Cu、Zn 的排放量存在显著性季节差异($P<0.05$),且 TN、TP、Cu、Zn、Cd 的排放量均以冬季最高;经过 BRU(Bedding Recovery Unit)好氧发酵处理后,再生牛粪固体中的含水率、重金属 Zn 和粪大肠菌群的含量出现不同程度的降低,而 TN、TP 和重金属 Cu 的含量则基本呈现升高趋势。

关键词:牛粪;好氧发酵;BRU;卧床垫料

中图分类号:X713 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2018)03-0552-07 doi:10.11654/jaes.2018-0158

Annual variation of material properties and pollutant content in the process of dairy manure making bedding in dairy farm

TIAN Xue-li^{1,2}, ZHAI Zhong-wei², DING Fei-fei², YANG Feng-xia², ZHANG Ke-qiang^{1,2*}

(1.College of Resources and Environment, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China; 2.Institute of Agro-environmental Protection, Ministry of Agriculture, Tianjin 300191, China)

Abstract: In order to investigate the annual variation of the properties of dairy manure and the contents of the related pollutants in the process of preparing recover bedding material with liquid manure, a typical large-scale dairy farm in Tianjin was selected as the research object in this study. Continuous sampling was conducted in different stages and different seasons. TN, TP, pH, water content, organic matter, fecal coliform, Cu, Zn and other heavy metals in the samples were detected and analyzed. The results showed that there was a significant seasonal difference ($P<0.05$) in TN, TP, VS, Cu and Zn emissions from dairy manure, and the emissions of TN, TP, Cu, Zn and Cd were the highest in winter. After BRU(Bedding Recovery Unit) aerobic fermentation, it was found that the moisture content, Zn-content and fecal coliform had various degrees of decrease, while TN, TP and Cu-content showed an increasing trend in the recycled manure solid.

Keywords: dairy manure; aerobic fermentation; BRU; bedding

收稿日期:2018-01-28 录用日期:2018-02-28

作者简介:田雪力(1993—),女,黑龙江黑河人,硕士研究生,从事农业废弃物资源化处理与利用研究。E-mail:xl.tian@foxmail.com

*通信作者:张克强 E-mail:kqzhang68@126.com

基金项目:中国农业科学院科技创新工程;现代农业(奶牛)产业技术体系建设专项资金-CARS-36;天津市现代奶牛产业技术体系创新团队建设专项(ITTCRS2017006);规模化奶牛场废弃物综合防治示范区建设项目

Project supported: Agricultural Science and Technology Innovation Program(ASTIP); China Agriculture Research System-CARS-36; Innovation Team of Tianjin Cattle Research System(ITTCRS2017006); Demonstration Construction of Comprehensive Prevention and Control over Large-scale Dairy Farm Waste

奶牛舍环境是保障奶牛健康、提高奶牛生产能力的关键因素。在奶牛舍结构中,牛床对奶牛健康有着至关重要的作用。奶牛每天有 50%~60%的时间趴在卧床上休息和反刍^[1],趴卧时流经乳腺的血流量可增加 20%~25%^[2],从而增加营养效率和产奶量。不良的卧床环境可使奶牛的趴卧时间明显减少,严重影响奶牛休息和产奶量,还会增加肢蹄病、乳房炎等疾病的发病率^[3-4]。因此,建造优良舒服的牛床,选择舒适的卧床垫料,对提高奶牛生产力和降低乳房炎等疾病发生率是十分必要的^[5]。

一般情况下,沙子、沙土、橡胶等无机垫料不适合微生物菌群的生长,利于降低奶牛疾病发生率^[6],但其易对后续粪污处理设备造成磨损;稻草、木屑等有机垫料虽然有利于后续粪污处理,但垫料中的微生物菌群繁殖较快,容易对奶牛肢蹄及乳房的健康产生影响^[7];同时这些垫料的储存与运输成本较高,且使用后还需额外的废弃处理成本。针对上述传统垫料所存在的问题,FAN 公司研发出了 BRU(Bedding Recovery Unit)牛床垫料再生系统来解决这些问题,这种生产模式已在加拿大、新西兰、美国等国家的牧场得到普遍使用^[5,8]。采用 BRU 系统将固液分离后的牛粪经好氧发酵处理制作垫料,不但能减少奶牛场垫料购置成本,而且还解决了规模化奶牛场大量粪污处置的问题^[9]。现在 BRU 牛床垫料再生系统在我国也增加了投入使用,并且得到了用户的喜爱和认可。然而,目前国内缺少对 BRU 牛床垫料再生系统实际运行过程中重金属及粪大肠菌群等污染物去除的系统性研究。

本研究以天津市某规模奶牛养殖场中的 BRU 牛床垫料再生系统为研究对象,系统监测并分析了春、夏、秋、冬四季中泌乳牛牛粪、固液分离后固体和 BRU 系统好氧发酵后固体样品中的全氮、全磷、pH、含水率、有机质、铜、锌、镉和粪大肠菌群数量的变化规律,分析了 BRU 对粪污中主要污染物的去除效果,并通过粪大肠菌群含量指标对 BRU 的处理效果进行了安全性评估,以期为 BRU 牛床垫料再生系统污染阻控技术的研发及标准的建立提供数据支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地点和时间

选择天津市一家典型规模化奶牛养殖场作为研究对象,该奶牛养殖场采用散栏式饲养,TMR 全混合日粮每日饲喂 3 次,防疫与奶牛场其他泌乳牛同步进行。选择其中健康状况良好的中国荷斯坦泌乳牛高产

泌乳牛舍中一栏牛(190 只)作为试验对象。试验牛每日饲喂 3 次,挤奶 3 次,自由饮水,使用链条式刮粪板清粪。

试验时间为 2017 年 1 月至 12 月,分春、夏、秋、冬 4 个季节进行,每个季节连续采样 5 d,至少保证 3 d 有效数据。

1.2 样品采集与处理

BRU 牛床垫料再生系统主要工艺流程:首先将奶牛场粪污经机械或人工收集到集污池后,利用固液分离设备对粪污进行分离,然后将分离后的固体物料^[10]输入滚筒式好氧发酵设备——BRU 进行好氧发酵,最后生产出的再生固体牛粪(Recycled Manure Solid,RMS)^[11-13]可作为奶牛卧床垫料直接使用。

根据上述 BRU 处理过程进行样品采集,每天采集样品 1 次,分别采集约 1000 g 的鲜泌乳牛粪、固液分离后固体和好氧发酵后固体样品。将其分为 3 份,其中一份约 200 g,按粪样 100 g 加 4.5 mol·L⁻¹ H₂SO₄ 20 mL 进行固氮,移至自封袋中,于-20℃冻存,用于总氮的测定。另两份等分置于自封袋中,一份用于其他指标的测定,另一份置于-20℃冻存备用。

1.3 分析指标与测定方法

样品分析测定指标主要包括全氮(TN)、全磷(TP)、有机质、含水率、挥发性固体(VS)、粪大肠菌群、pH、铜(Cu)、锌(Zn)、镉(Cd)。具体测定方法详见表 1。

1.4 统计分析

数据分析采用 Excel 2010 和 SPSS 20.0 软件进行,方差分析采用单因素方差分析。

2 结果与讨论

2.1 季节对于泌乳牛粪中 N、P、Cu、Zn 等含量的影响

为了了解泌乳牛粪中 N、P 等营养元素和 Cu、Zn 等重金属的季节性变化规律,本研究对泌乳牛粪中的 TN、TP、Cu、Zn 和有机质等进行了春、夏、秋、冬 4 个季节的监测,其数据见表 2。

由表 2 可以看出,相比于其他考察指标,泌乳牛牛粪样品中的 TN、TP、VS、Cu 和 Zn 的排放量均存在显著性季节差异($P<0.05$)。具体来讲,牛粪中的 TN 排放量以冬季最高、秋季最低,冬季的 TN 排放量比春夏秋三季分别高出了 8.23%、10.04%和 11.91%($P<0.05$)。同样地,牛粪中 TP 的排放量也表现与 TN 相似的季节性排放规律:以冬季最高、秋季最低,冬季的 TP 排放量比春夏秋三季分别高出了 36.54%、10.08%

表 1 样品测定指标与方法

Table 1 Indicators and methods of sample determination

测定指标	测定方法	方法标准号
全氮(TN)	有机肥料(全氮含量测定)	NY 525—2012
全磷(TP)	有机肥料(全磷含量测定)	NY 525—2012
有机质	有机肥料(有机质含量测定)	NY 525—2012
含水率	复混肥料中游离水含量测定	GB 8576
挥发性固体(VS)	煤的工业分析方法	GB 212—1991
粪大肠菌群	生活饮用水标准检验方法微生物指标	GB/T 5750.12—2006
pH	土壤 pH 的测定	NYT 1377—2007
铜(Cu)、锌(Zn)	土壤质量铜、锌的测定 火焰原子吸收分光光度法	GB/T 17138
镉(Cd)	土壤质量镉的测定 石墨炉原子吸收分光光度法	GB/T 17141—1997

表 2 不同季节泌乳牛牛粪性质和污染物含量的影响分析

Table 2 Influence and analysis of dairy manure nature and pollutant content in different seasons

测定指标	春季	夏季	秋季	冬季	平均值
TN/%	2.43±0.07b	2.39±0.03b	2.35±0.05b	2.63±0.06a	2.45
TP/%	1.04±0.08c	1.29±0.06b	1.03±0.05c	1.42±0.09a	1.20
有机质/%	56.68±0.69	57.82±1.08	58.66±1.16	57.80±1.13	57.74
含水率/%	83.33±1.53	84.33±0.58	84.67±0.58	84.00±1.00	84.08
VS/%	83.04±0.94b	86.46±1.03a	86.79±1.05a	82.89±1.48b	84.81
Cu/mg·kg ⁻¹	29.95±3.14b	30.70±6.45b	36.31±3.12ab	42.80±0.78a	34.94
Zn/mg·kg ⁻¹	120.50±20.20b	153.89±10.35a	175.68±13.90a	165.88±8.98a	153.99
Cd/mg·kg ⁻¹	0.03±0.01	0.03±0.01	0.04±0.01	0.04±0.02	0.04
pH	6.94±0.28	6.78±0.20	6.60±0.01	6.77±0.16	6.77

注:平均值($n=9$)后的不同小写字母表示污染物的季节性差异达 5%显著水平。

Note: Different lowercase letters($n=9$) indicate significant differences at 5% level between different seasons.

和 37.86% ($P<0.05$)。然而牛粪中的有机质含量和含水率则均以秋季最高、春季最低,但其季节性差异并不显著 ($P>0.05$)。与其相似的是,不同季节中牛粪的 pH 值差异也不显著 ($P>0.05$),年平均 pH 值为 6.77。关于牛粪中重金属的含量,我们发现 Zn 的排放量最高 (120.50~175.68 mg·kg⁻¹),金属 Cu 次之 (29.95~42.80 mg·kg⁻¹),而 Cd 的排放量最低 (0.03~0.04 mg·kg⁻¹)。对于重金属不同季节的差异性,检测数据显示: Cu 表现出冬季排放量最高、Zn 表现出秋季排放量最高,但两者均以春季排放量最低;相比于重金属 Cu 和 Zn,牛粪中 Cd 的排泄量则不存在显著性季节差异 ($P>0.05$)。

由上述结果分析可知,TN、TP 的排放量均以冬季最高,秋季最低;每个季节重金属排放量均为 Zn>Cu>Cd。泌乳牛牛粪中的 TN、TP、VS、Cu、Zn 的排放量均存在显著性季节差异 ($P<0.05$),即泌乳牛在一年的不同季节中污染物排放量均不同。因此可以根据不同季

节奶牛粪便中不同污染物 (Cu、Zn 等) 的量,适当调整日粮比例,以减少粪便中营养成分流失的比例,达到减少污染物排放的目的。据张振伟等^[14]和史鹏飞^[15]报道,泌乳牛中 N、P、Cu、Zn 排泄量随季节变化不同,这与本研所得结果相似。后者 N 排放量在 1.87%~2.42% 之间,P 排放量在 1.91%~2.54% 之间,含水率在 78.09%~79.09% 之间,有机质排放量在 53.53%~56.73% 之间,Cu 排放量在 34.27~52.97 mg·kg⁻¹ 之间,Zn 排放量在 266.53~383.10 mg·kg⁻¹ 之间^[15]。该结果中,P、Cu、Zn 的含量略高于本研究所测得结果,含水率略低于本研究所测得结果,造成这种现象的原因可能与饲料种类、饲喂方式以及当地气候有关。

2.2 季节对于好氧发酵制回床垫料 (BRU) 系统处理效果的影响

因牛粪中含有大量有机物、营养元素^[16]的同时也含有病原微生物、寄生虫虫卵等^[17]。且当垫料中含水率较高时,奶牛趴卧不舒适,而含水率过低时,垫料中

的细小颗粒物易堵塞奶牛乳头管,造成异物型乳房炎,且奶牛趴卧时会扬起粉尘,对奶牛呼吸系统有潜在的危害。所以含水率适中、病原菌含量低更适合奶牛趴卧并能降低奶牛患乳房炎的概率,故使用牛粪制回卧床垫料的生产过程中最重要的环节是水分控制环节和杀菌消毒环节。在BRU系统中,这两个环节均由固液分离^[18]和好氧发酵两部分构成。经过固液分离,物料中含水率从94.67%降至71.83%,再经过好氧发酵,含水率进一步降至58.58%。同时利用固液分离技术对畜禽粪便进行处理,也能够有效提高有机成分的利用率^[19],更利于后续好氧发酵反应的进行。

图1为BRU处理前后牛粪中TN、TP、有机质和含水率的含量变化。由图1可知经BRU处理后固体牛粪TN和TP的含量除秋季降低外,春、夏、冬季均略有上涨。其中,TN从1.08%降低到1.02%,去除率为5.56%;TP从0.91%降至0.84%。类似地,经BRU处理后有机质的去除率为夏季>春季>秋季>冬季,仅夏季和春季有机质含量降低,4个季节的有机质去除率分别为2.95%、1.66%、-0.33%、-0.93%。然而经BRU处理后的含水率均有不同程度的降低,秋季去除率最高,含水率从73.67%降低到55.00%,降低了25.34%;冬季去除率最低,从73.00%到63.00%,去除率为

13.70%。秋季去除率比冬季高84.96%。春、夏季去除率分别为13.81%和20.76%。

图2为BRU处理前后牛粪中重金属的含量变化。检测数据显示,经BRU处理后四季中Zn的含量均有所下降,且以秋季去除效果最好,牛粪中Zn的含量从85.84 mg·kg⁻¹降至65.58 mg·kg⁻¹,去除率为23.60%;其次为冬季,其去除率为20.00%,春季中Zn的去除率与冬季相差不大,为19.74%;而夏季Zn的去除率最低,仅为3.59%。然而值得注意的是,经过BRU系统,Cu的含量在四季中则出现了不同程度的升高,其主要表现为冬季>夏季>春季>秋季,增幅分别为76.79%、47.03%、28.61%、13.26%。与Cu、Zn不同,Cd的含量一直很低且季节性差异较大,去除率最高的是秋季从0.07 mg·kg⁻¹降至0 mg·kg⁻¹,约达100%,而在夏季经BRU处理后,Cd的含量从0.04 mg·kg⁻¹升高到0.05 mg·kg⁻¹,升高了25%。春季Cd含量从0.07 mg·kg⁻¹降至0.04 mg·kg⁻¹,降低了42.86%,冬季Cd含量从0.03 mg·kg⁻¹降至0.02 mg·kg⁻¹,降低了33.33%。

为了考察BRU对微生物的去除效果,评估BRU设备的安全性,选取粪大肠菌群这一指示性指标对BRU处理前后样品进行了检测,其检测结果如图3

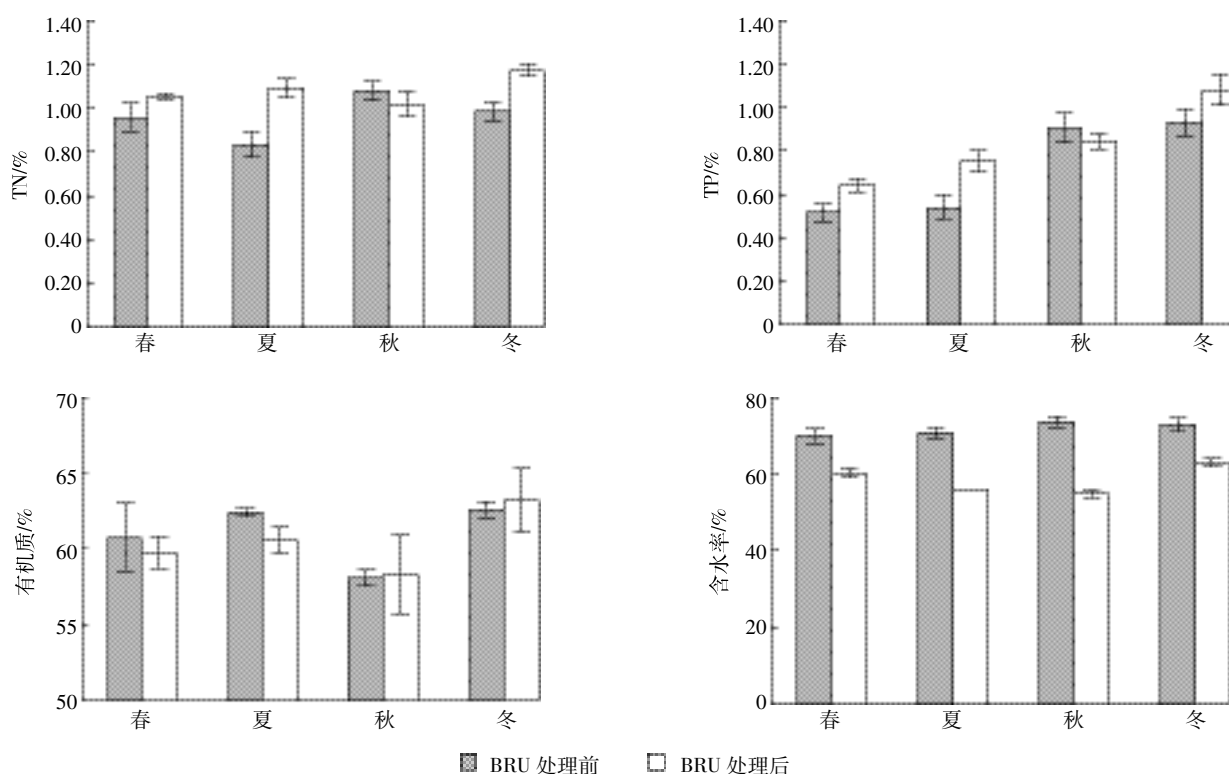


图1 BRU处理前后TN、TP、有机质和含水率的变化

Figure 1 Changes of total nitrogen, total phosphorus, organic matter and moisture content before and after BRU treatment

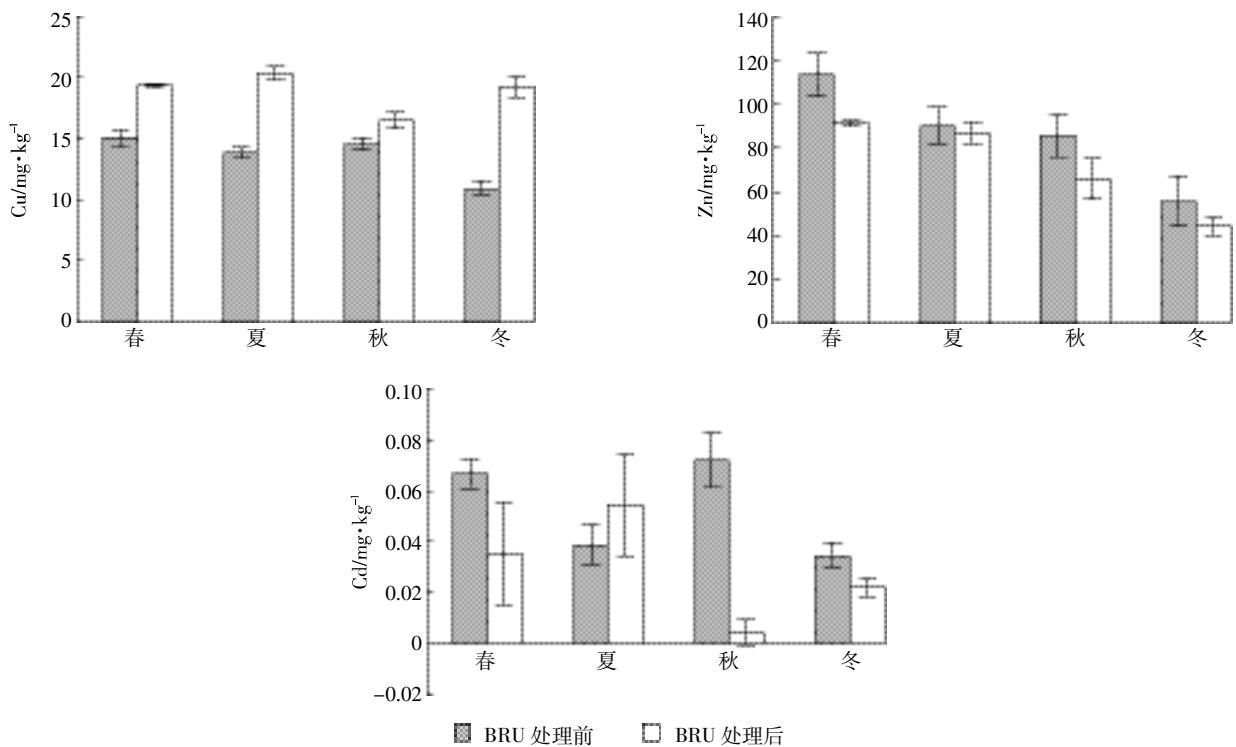


图 2 BRU 处理前后 Cu、Zn、Cd 的变化

Figure 2 Changes of copper, zinc and cadmium before and after BRU treatment

所示。由图 3 可知,本研究中气温最低的和最高的季节与 BRU 处理前样品中粪大肠菌群值最低和最高的季节并不对应,说明气温不是影响粪大肠菌群值的唯一因素,此前有研究也有同样的结论^[20-22]。造成这一结果的原因除温度外,还可能与物料放置时间、固液分离机运行状态等有关。但进行后续好氧发酵后,固体牛粪的粪大肠菌群值都降低到 $1 \text{ MPN} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下,说明 BRU 系统处理效果良好且即使进料性质有差异,去除病原菌效果仍比较稳定。奶牛场牛粪应用 BRU 系统制作垫料与牛粪直接晾晒相比安全性有所提升。

综上,在北方规模化奶牛场粪污处理工程“牛粪-

固液分离-好氧发酵制回床垫料”中,经过固液分离后,很多污染物含量都有所下降,再经过好氧发酵,一些指标反而上升,这与物料中含水率大幅降低有关。TP 和 TN 均为秋季的去除率最高;BRU 设备虽然能去除有机质、TN、含水率和 Zn,但是经好氧发酵后 Cu 含量上升,这是由于大分子有机物质的分解和损失,导致的“浓缩作用”所致^[23]。说明 BRU 设备 BRU 处理后的物料病原菌含量和微生物可利用的营养成分和含水率均降低,松软舒适,适合做牛床垫料。与固液分离后直接晾晒制卧床垫料的方式相比,提高奶牛舒适度的同时降低了奶牛患乳房炎的风险。而牛粪中 Cu 和 Zn 的含量一直较高,这是因为奶牛体内许多生理功能都离不开 Cu^[24],而 Zn 可以促进奶牛生长,所以奶牛饲料中会添加适量的 Cu 和 Zn 等。

2.3 使用 BRU 制牛粪卧床垫料的成本核算

以天津市某奶牛场为例,对使用 BRU 制牛粪卧床垫料的成本进行核算。该养殖场奶牛饲养量为 3000 头,总卧床面积约 4000 m^2 。使用 BRU 设备前该场每年购买沙土作卧床垫料,费用约为 18 万元,约需 15 人清粪,每人每年工资约为 5 万元,故使用沙土作为垫料每年需要投入总成本约为 93 万元;用秸秆作垫料购买费用约需 $20 \text{ 万元} \cdot \text{a}^{-1}$,人工约需 20 人,加上

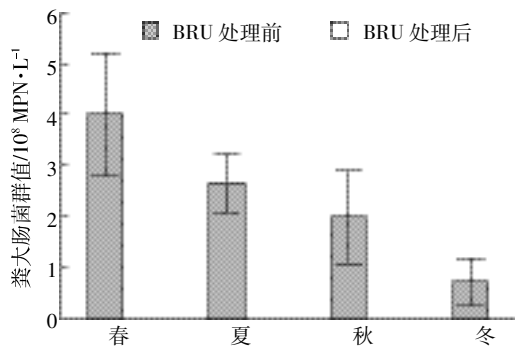


图 3 BRU 处理前后 MPN 值的变化

Figure 3 Changes of fecal coliform before and after BRU treatment

运输、储存、粉碎、铺设以及后续处理等费用,投入逐年上涨。该奶牛场使用 BRU 制卧床垫料的工艺,该工艺前期设备总投资为 270 万元,需雇佣 5 人运行系统、铺设垫料,设备年运行电费、维护费约 8 万元,每年总运行费用约 33 万元。该工艺如计算上粪污处理系统损耗的减少和施入农田的收益,该场年盈利超过 120 万元·a⁻¹。由以上常见垫料的成本核算可以得出,以 10 年为运行周期,利用牛粪好氧发酵作为卧床垫料的运行成本最低,橡胶垫次之,沙土再次,成本最高的是秸秆。奶牛场在使用 BRU 制备的卧床垫料之后,每头泌乳牛的日平均产量较之前可提高 2.47 kg,以每千克牛奶的市场价格 4.3 元,泌乳牛存栏 967 头计,该场每年牛奶产量增加经济效益可达 374.87 万元^[25]。

综上,奶牛场长期使用 BRU 制备的卧床垫料,不仅可以节省奶牛卧床垫料的费用,还可以提高奶牛产奶量,进一步增加经济效益。

3 结论

(1)不同季节泌乳牛牛粪中的 TN、TP、VS、Cu、Zn 的排放量均存在显著差异($P<0.05$),其中 TN、TP、Cu、Zn、Cd 的排放量均为冬季最高。

(2)BRU 系统经固液分离处理后 TN、TP、含水率、Cu、Zn、粪大肠菌群的含量降低,再经过好氧发酵处理后,含水率、重金属 Zn 和粪大肠菌群含量降低,因物料含水率降低,重金属 Cu 的含量基本呈现升高趋势。

(3)以 10 年为运行周期,与橡胶垫、沙土、秸秆相比,利用 BRU 制备的卧床垫料的运行成本最低;使用 BRU 制备的卧床垫料后,奶牛日均产奶量可提高 2.47 kg·头⁻¹。

参考文献:

- [1] Jensen M B, Pedersen L J, Munksgaard L. The effect of reward duration on demand functions for rest in dairy heifers and lying requirements as measured by demand functions[J]. *APPI Anim Behav Sci*, 2005, 90(3/4): 207-217.
- [2] Rulquin H, Caudal J P. Effects of lying or standing on mammary blood flow and heart rate of dairy cows[J]. *Ann Zooteh (Paris)*, 1992, 41: 101.
- [3] Norring M, Manninen E, Passillé A M D, et al. Effects of sand and straw bedding on the lying behavior, cleanliness, and hoof and hock injuries of dairy cows[J]. *J Dairy Sci*, 2008, 91(2): 570-576.
- [4] Rushen J, Haley D, de Passillé A M. Effect of softer flooring in tie stalls on resting behavior and leg injuries of lactating cows[J]. *Journal of Dairy Science*, 2007, 90(8): 3647-3651.
- [5] 侯世忠. 牛粪的卧床垫料利用技术[J]. 山东畜牧兽医, 2012, 33(9): 26-28.
HOU Shi-zhong. The bed pad material utilization technology of dairy manure[J]. *Shandong Journal of Animal Science and Veterinary Medicine*, 2012, 33(9): 26-28.
- [6] 朱洪刚, 金华明. 牛床铺沙好处多[J]. 乳业科学与技术, 2004(1): 43.
ZHU Hong-gang, JIN Hua-ming. There are many benefits of using sand to make mattresses[J]. *Journal of Dairy Science and Technology*, 2004(1): 43.
- [7] 彭英霞, 李俊卫, 王浚峰, 等. 奶牛场固体牛粪用作卧床垫料的工艺分析[J]. 中国奶牛, 2015(2): 47-51.
PENG Ying-xia, LI Jun-wei, WANG Jun-feng, et al. Analysis of dried solid manure used as bedding for dairy farm[J]. *China Dairy Cattle*, 2015(2): 47-51.
- [8] 巩少倩. 新西兰采用新型奶牛卧床生态垫料[J]. 北方牧业, 2013(22): 13.
GONG Shao-qian. New Zealand uses new cow bedding ecological pad[J]. *Northern Animal Husbandry*, 2013(22): 13.
- [9] 陈鹏举, 向忠菊. 畜禽粪便资源化处理技术在农业环境污染防治中的应用[J]. 家畜生态学报, 2010, 31(2): 106-108.
CHEN Peng-ju, XIANG Zhong-ju. The comprehensive utilization technology of livestock and poultry feces resource in the prevention of the agricultural environment pollution[J]. *Acta Ecologiae Animalis Domastici*, 2010, 31(2): 106-108.
- [10] 王盼柳, 施正香, 曾雅琼, 等. 牛床再生垫料生产技术模式和产业需求分析[J]. 中国畜牧杂志, 2017, 53(3): 147-153.
WANG Pan-liu, SHI Zheng-xiang, ZENG Ya-qiong, et al. Analysis of production technology models and industry demand of recycled manure solids as bedding[J]. *Chinese Journal of Animal Science*, 2017, 53(3): 147-153.
- [11] Husfeldt A W, Endres M I, Salfer J A, et al. Management and characteristics of recycled manure solids used for bedding in Midwest freestall dairy herds[J]. *Journal of Dairy Science*, 2012, 95(4): 2195-2203.
- [12] Green M J, Leach K A, Breen J E, et al. Recycled manure solids as bedding for dairy cattle: A scoping study[J]. *Cattle Practice*, 2014(22): 207-214.
- [13] Husfeldt A W, Endres M I. Association between stall surface and some animal welfare measurements in freestall dairy herds using recycled manure solids for bedding[J]. *Journal of Dairy Science*, 2012, 95(10): 5626-5634.
- [14] 张振伟, 庞伟英, 周玉香, 等. 季节对泌乳牛排粪量及粪中 N、P、Cu、Zn 量的影响[J]. 草食家畜, 2014(2): 31-33.
ZHANG Zhen-wei, PANG Wei-ying, ZHOU Yu-xiang, et al. Study on the effect of season on produce faecal output and N, P, Cu and Zn pollutant excretion in lactating cow faecal[J]. *Grass-feeding Livestock*, 2014(2): 31-33.
- [15] 史鹏飞. 规模化奶牛场产污系数和排污系数测定研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2009.
SHI Peng-fei. Study on determination of pollutants producing coefficient and pollutants discharge coefficient of discharge coefficient of large scale dairy farm[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University,

- 2009.
- [16] Schlegel A J, Assefa Y, Bond H D, et al. Changes in soil nutrients after 10 years of cattle manure and swine effluent application[J]. *Soil & Tillage Research*, 2017, 172: 48–58.
- [17] 李 玉. 牛粪堆肥中添加石灰氮对粪肠球菌的杀灭效果及堆肥发酵影响的研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2011.
- LI Yu. The Effect of adding lime nitrogen to cattle manure compost on the killing effect of enterococcus faecalis and composing[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2011.
- [18] 彭英霞, 王浚峰, 高继伟. 畜牧场固液分离及水冲系统简介及设计要点[J]. 中国沼气, 2012, 30(5): 38–42.
- PENG Ying-xia, WANG Jun-feng, GAO Ji-wei. Introduction to solid-liquid separation and water flushing system on animal farm and the design points[J]. *China Biogas*, 2012, 30(5): 38–42.
- [19] Kaparaju P L N, Rintala J A. Effects of solid-liquid separation on re-covering residual methane and digested dairy cow manure[J]. *Bioresour. Technology*, 2008, 99(1): 120–127.
- [20] Dugan R S, Leytem A B, Bjorneberg D L. Concentrations of airborne endotoxin and microorganisms at a 10, 000-cow open-freestall dairy [J]. *Journal of Animal Science*, 2011, 89(10): 3300–3309.
- [21] Popescu S, Borda C, Diugan E A. Microbiological air quality in tie-stall dairy barns and some factors that influence it[J]. *African Journal of Agricultural Research*, 2011, 6(32): 6726–6734.
- [22] 李宏双, 杨 岚, 单春花, 等. 发酵牛粪作为奶牛卧床垫料的微生物消长规律研究[J]. 河北农业大学学报, 2017, 40(2): 88–92.
- LI Hong-shuang, YANG Lan, SHAN Chun-hua, et al. The microbial growth and decline fermented cow dung bedding for dairy cow[J]. *Journal of Agricultural University of Hebei*, 2017, 40(2): 88–92.
- [23] Li R, Wang J J, Zhang Z, et al. Nutrient transformations during composting of swine manure with bentonite[J]. *Bioresour. Technology*, 2012, 121: 362–368.
- [24] 张苏琼. 反刍动物营养中铜的研究进展[J]. 饲料研究, 2005(2): 24–27.
- ZHANG Su-qiong. The research progress of the copper in ruminant nutrition[J]. *Feed Research*, 2005(2): 24–27.
- [25] 天津神驰农牧发展有限公司. 粪水回用和牛粪生产垫料工艺[J]. 中国畜牧业, 2017(9): 46–47.
- Tianjin Shen Chi Agriculture and Animal Husbandry Development Co. Ltd. recycled manure and cow dung to product bedding[J]. *China Animal Industry*, 2017(9): 46–47.