

李冰青, 朱 宁, 叶小梅, 等. 奶牛粪颗粒粒径分布及养分含量特征[J]. 江苏农业学报, 2019, 35(6): 1354-1359.
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2019.06.012

奶牛粪颗粒粒径分布及养分含量特征

李冰青^{1,2}, 朱 宁^{1,3}, 叶小梅^{1,3}, 刘 威¹, 加 伟⁴, 张应鹏¹, 朱燕云^{1,3}, 靳红梅^{1,3}

(1. 江苏省农业科学院循环农业研究中心, 江苏 南京 210014; 2. 南京农业大学资源与环境科学学院, 江苏 南京 210095; 3. 农业农村部种养结合重点实验室, 江苏 南京 210014; 4. 南京卫岗乳业有限公司, 江苏 南京 210014)

摘要: 为探明奶牛粪颗粒粒径及其有机碳和养分分布特征, 以新鲜的泌乳奶牛粪为研究对象, 通过分级筛分方法得到了粒径分别为 ≤ 0.10 、 $0.11\sim 0.20$ 、 $0.21\sim 0.50$ 、 $0.51\sim 1.00$ 、 $1.01\sim 2.00$ 和 >2.00 mm的颗粒样品, 并对其质量、总有机碳(TOC)、总氮(TN)、总磷(TP)和总钾(TK)含量及其所占比例, 以及C/N分布进行分析。结果表明, 不同粒径颗粒所占比例依次为 ≤ 0.10 mm颗粒28.0%、 $0.11\sim 2.00$ mm颗粒25.3%、 $0.51\sim 1.00$ mm颗粒24.2%、 >2.00 mm颗粒11.5%、 $0.21\sim 0.50$ mm颗粒7.5%、 $0.11\sim 0.20$ mm颗粒3.5%。TOC主要存在于较大颗粒(粒径 >0.50 mm)中, 约占总量的70%; 而TN、TP和TK主要存在于较小颗粒(粒径 ≤ 0.1 mm)中, 占各自总量的44.4%、50.1%和67.3%。固液分离后固体的C/N较高。

关键词: 奶牛粪; 颗粒粒径; 养分含量

中图分类号: S823.9⁺1

文献标识码: A

文章编号: 1000-4440(2019)06-1354-06

Characteristics of particle size distribution and nutrient content in cow manure

LI Bing-qing^{1,2}, ZHU Ning^{1,3}, YE Xiao-mei^{1,3}, LIU Wei¹, JIA Wei⁴, ZHANG Ying-peng¹, ZHU Yan-yun^{1,3}, JIN Hong-mei^{1,3}

(1. Recycling Agriculture Research Center, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China; 2. College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 3. Key Laboratory of Crop and Livestock Integration, Ministry of Agriculture and Rural Areas, Nanjing 210014, China; 4. Nanjing Weigang Dairy Co., Ltd., Nanjing 210014, China)

Abstract: In the present study, fresh cow manure was used to investigate the distribution characteristics of particle size, organic carbon and nutrients in cow manure. Samples with particle sizes of ≤ 0.10 mm, $0.11\sim 0.20$ mm, $0.21\sim 0.50$ mm, $0.51\sim 1.00$ mm, $1.01\sim 2.00$ mm and >2.00 mm were obtained by classification screening method, and their weight, total organic carbon(TOC), total nitrogen(TN), total phosphorus(TP) and total potassium(TK) contents and their proportion, as well as C/N were determined. The results showed that the proportions of different particle sizes followed the order of (≤ 0.10 mm, 28.0%) $>$ ($1.00\sim 2.00$ mm, 25.3%) $>$ ($0.51\sim 1.00$ mm, 24.2%) $>$ (>2.00 mm, 11.5%) $>$ ($0.21\sim 0.50$ mm, 7.5%) $>$ ($0.10\sim 0.20$ mm, 3.5%). TOC was mainly present in larger particles (particle size of >0.50 mm),

accounting for about 70% of the total TOC of fresh cow manure. TN, TP and TK mainly existed in smaller particles (particle size of ≤ 0.1 mm), accounted for 44.4%, 50.1% and 67.3% of the total TN, TP and TK, respectively. The C/N of solid fraction after solid-liquid separation was higher.

Key words: cow manure; particle size; nutrient content

收稿日期: 2019-04-30

基金项目: 江苏省现代农业重点及面上项目(BE2017363); 江苏省农业科技自主创新基金项目[CX(17)1005]; 江苏现代农业产业技术体系建设专项基金项目[JATS[2018]270]

作者简介: 李冰青(1995-), 女, 江西吉安人, 硕士研究生, 主要研究方向为养殖废弃物资源化。(E-mail) 1203935229@qq.com

通讯作者: 靳红梅, (Tel) 025-84390238; (E-mail) hmjin@jaas.ac.cn

奶牛养殖业是中国畜牧业的重要组成部分。截至2017年,中国奶牛养殖量近 1.1×10^5 头,粪便排放量占畜禽粪便总量的44%^[1-2]。目前,奶牛养殖规模化率(存栏100头以上)超过50%,由此带来的污染物集中排放对奶牛场粪便管理和利用提出了巨大的挑战,已成为制约奶牛产业健康发展的重要因素。

奶牛粪资源化是解决其环境污染、提升其循环利用价值的重要途径^[3]。奶牛粪富含有机质、氮(N)、磷(P)、钾(K)等大量营养元素以及丰富的微量元素和木质素^[4-6]。目前对其资源化利用方式主要有:①采用好氧堆肥制作有机肥;②采用厌氧消化生产沼气;③作为牛床垫料再利用。然而,在奶牛养殖过程中,其粪、尿与跑冒滴漏的饮水和冲洗水等常常混合在一起,造成粪污产生量大且含水率高,直接进行处理会增加运输成本和处理系统的负荷^[7]。

固液分离技术作为重要的养殖粪污前处理技术,可有效降低粪便含水率,因此得到国内外的广泛关注和使用^[8]。中国奶牛粪污处理工艺最为普遍的是:首先进行固液分离,分离后的固体进行堆肥发酵制成有机肥或垫料,液体则经一定时间厌氧消化或直接存放后施用于农田^[9]。对于堆肥或者垫料化处理而言,理想的固液分离效果是固体粪便含水率达到55%~65%^[10]。常用的固液分离设备主要有螺旋挤压式固液分离机、带式压滤固液分离机、离心分离机以及筛分式洗涤脱水机等^[11]。各类固液分离设备的分离效率差异很大,除装备特性外,粪便自身特性是重要的影响因素^[7]。螺旋挤压机与其他固液分离设备相比具有能耗低、运行费用低、操作简单和寿命长等优点^[12-13],在奶牛场得到广泛应用。常志州等^[14]采用XY型螺旋式固液分离机对猪粪和泌乳奶牛粪分离后发现,奶牛粪便固形物回收率为45.5%,远高于猪粪的27.8%。与新鲜的粪便不同,贮存后的粪便由于微生物的降解作用,导致其固体颗粒和理化性质改变,这使二者在固液分离效率和产物含水量上存在明显的差异^[7]。

通常情况下,固形物回收率与养分回收率呈正相关,这意味着不适当的固液分离会造成养分大量残留在液相中。有研究结果表明,畜禽粪便中80%以上N、P和K呈水溶性或存在于小颗粒中,养分回收率不足20%^[15]。因此,为了提高固形物和养分回收率,有研究者向奶牛粪水中添加阳离子聚丙烯酰胺等聚合物^[16-17],通过絮凝作用将细颗粒聚集为大

颗粒,从而提高固液分离效率。可见,选择合适的固液分离技术是提高养分回收率和利用率的关键,而探明奶牛粪颗粒粒径和养分分布特征是优化固液分离技术的重要前提。此外,奶牛粪的粒径分布情况也可反映奶牛机体的消化性能以及饲料的消化利用率,薛丰等^[18]认为如果奶牛粪中残留大量长度大于1.0 cm纤维,说明奶牛瘤胃中流通速率过快。

泌乳牛约占规模化奶牛场牛群结构的60%^[19],粪便产生量占比最大。因此,本研究以泌乳奶牛粪为研究对象,通过分级筛分方法确定颗粒分布特征,系统分析各粒径颗粒物中总有机碳(TOC)、总氮(TN)、总磷(TP)和总钾(TK)含量的变化,旨在为奶牛粪固液分离技术选择和后续处理条件优化提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

奶牛粪取自江苏省泗洪县上塘镇一家规模奶牛养殖场的泌乳牛舍,取样时间为2018年6月。该养殖场奶牛存栏量常年保持在2 500~2 600头,生产管理规范,配备完善的粪污收集、贮存和处理设施。粪便收集采用机械刮板清粪工艺,收集到的粪便(含尿液)贮存在舍外暂存池,随后进入粪便收集池进行固液分离,固体用作堆肥原料或牛床垫料,液体进行厌氧发酵,发酵产生的沼液经三级稳定塘处理后还田利用。初始奶牛粪基本理化性状:pH值8.3,含水率82.2%,TOC含量352.6 g/kg,TN含量12.1 g/kg,TP含量3.0 g/kg,TK含量10.3 g/kg,C/N比值29.4。

1.2 试验方法

准确称取奶牛粪样品1.00 kg,依次通过孔径大小为2.0、1.0、0.5、0.2和0.1 mm的网筛进行多级分离,得到的6种不同颗粒粒径的样品,即粒径为>2.00、1.01~2.00、0.510~1.00、0.21~0.50、0.11~0.20和≤0.10 mm的样品。将分级得到的样品放置在烘箱(DHG-9076A,上海精宏实验设备有限公司产品)中,于50℃条件下烘干,烘干后的样品研磨过100目筛,用干燥器密封后保存待测。

样品中TOC、TN、TP和TK含量测定参照文献[20]的方法进行。其中,TOC含量采用重铬酸钾容量法测定,用定量的重铬酸钾-硫酸溶液在加热条件下氧化有机碳,再用硫酸亚铁标准溶液标定。样品用浓硫酸-过氧化氢溶液经石墨消解仪(SH220,海

能仪器股份有限公司产品) 消煮, 消解液用于测定其中的 TN、TP 和 TK 含量。TN 含量采用自动凯氏定氮仪(K9840, 海能仪器股份有限公司产品) 蒸馏, 再用 0.02 mol/L 硫酸溶液滴定; TP 含量采用钼酸铵分光光度法测定, 消解液在一定酸度下加入定量的钼钒酸铵试剂, 使用紫外-可见分光光度计(UV759S, 上海精密科学仪器有限公司产品) 测定; TK 含量采用火焰光度法测定, 消解液经稀释后使用火焰光度计(FP6410, 上海欣益仪器仪表有限公司产品) 测定。试验中所用药品均为分析纯。

1.3 数据分析

有机碳和养分含量均以干质量计。各指标在不同粒径间的差异采用单因素方差分析(one-way ANOVA), 多重比较采用 LSD 法($\alpha = 0.05$)。数据分析软件为 SPSS 13.0 v, 作图软件为 Origin 9.0 v。

2 结果与讨论

2.1 奶牛粪的粒径分布特征

泌乳奶牛粪粒径分布如图 1 所示。可以看出, 新鲜奶牛粪中粒径 ≤ 0.10 mm 的颗粒含量占总样品量的 28.0%, 所占比例最高, 这与吴军伟等^[14]的研究结果一致。粒径在 0.11~0.20 mm 的奶牛粪颗粒含量最少, 仅占总样品量的 3.5%。其余颗粒(即粒径为 0.21~0.50、0.51~1.00、1.01~2.00 和 >2.00 mm) 含量所占比例分别为 7.4%、24.2%、25.3% 和 11.6%。这说明细颗粒是固液分离的重点。

关正军等^[21]曾考察新型螺旋挤压式固液分离机的分离筛笼间隙分别为 1.0、1.5 和 2.0 mm 时的固液分离效果, 发现分离筛笼条间隙为 1.0 mm 时的固液分离效果最佳。王明等^[22]等以螺旋挤压式固液分离机为研究对象, 比较孔径为 0.3 mm、0.5 mm 和 0.7 mm 的 3 种筛网对奶牛粪的固液分离效率, 结果表明 0.3 mm 孔径筛网的固液分离效率最高, 60.9% 的固体物质被分离出来, 而筛网孔径为 0.5 mm 和 0.7 mm 的分离效率分别是 50.1% 和 41.5%。本团队在奶牛养殖场采用筛网孔径为 0.5 mm 的螺旋挤压式固液分离机对泌乳牛粪污进行固液分离后发现, 固体回收率为 57.0%, 略低于理论值(61.1%), 但高于王明等^[22]等的研究结果。同时发现, 经螺旋挤压后获得的粒径 >0.5 mm 的牛粪颗粒含水率可降低到 55% 左右^[15]。细颗粒牛粪作垫料时容易粘附在奶牛乳房上, 引发乳房炎, 同时在奶牛行动时易产生扬尘, 破坏

牛舍环境^[23-24]。因此, 综合考虑固体回收率和奶牛健康问题, 建议在奶牛粪垫料化利用时选择孔径 >0.5 mm 的网筛进行固液分离。

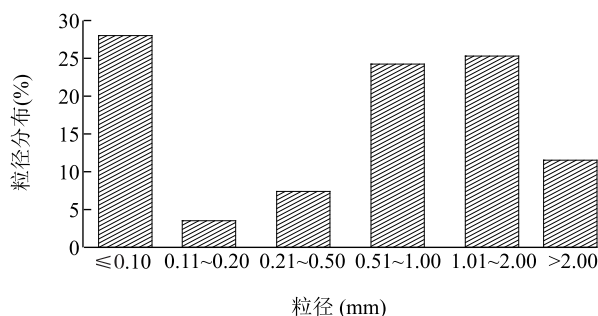


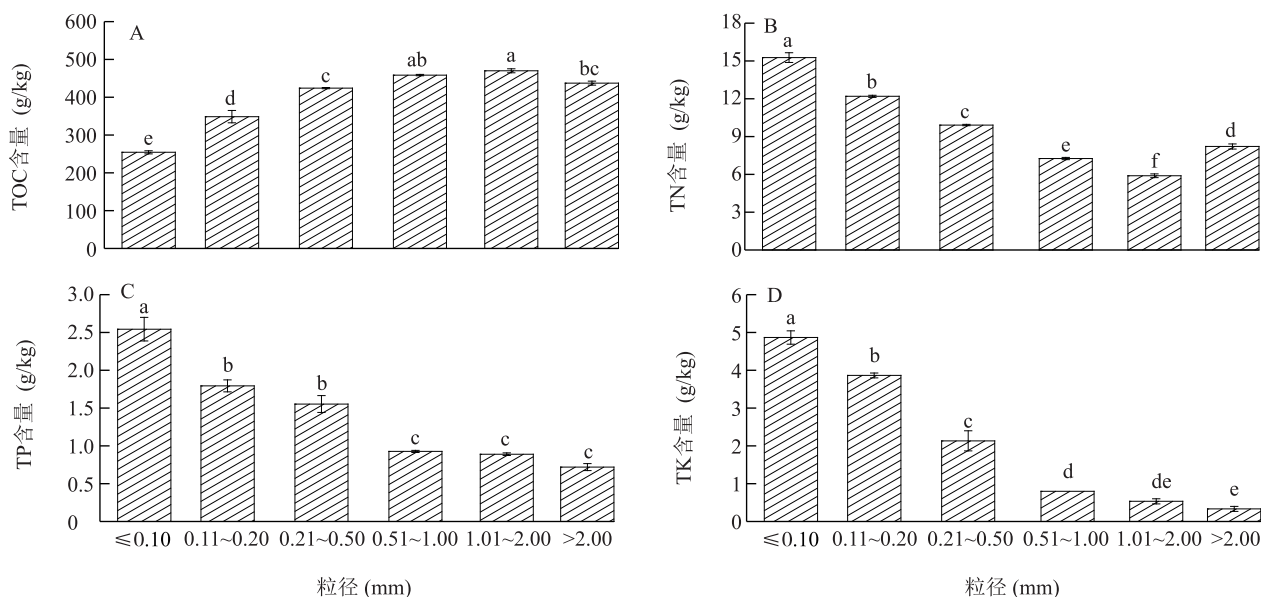
图 1 奶牛粪粒径分布情况

Fig.1 Particle size distribution of cow manure

2.2 不同粒径颗粒奶牛粪中有机碳及养分含量

不同粒径颗粒奶牛粪中 TOC 的含量特征如图 2A 所示。可以看出, 粒径 1.01~2.00 mm 颗粒中 TOC 含量最高, 为 458.57 g/kg, 而粒径 ≤ 0.10 mm 颗粒中 TOC 含量最低, 为 254.37 g/kg。在 <2.00 mm 范围内, TOC 含量随着粒径的减小而显著 ($P < 0.05$) 降低。可见, 奶牛粪有机质主要集中在较大颗粒上, 这主要与有机质在颗粒上的吸附性能有关。然而, >2.00 mm 颗粒的 TOC 含量却显著 ($P < 0.05$) 低于 1.01~2.00 mm 颗粒。这可能是由于大颗粒中矿物颗粒含量较少, 不利于有机质吸附并与之形成复合体^[25]。

不同粒径颗粒奶牛粪中 TN、TP 和 TK 的含量特征如图 2B~图 2D 所示。三者均在粒径 ≤ 0.10 mm 的颗粒中含量最高, 分别为 15.27 g/kg、2.54 g/kg 和 4.86 g/kg, 显著 ($P < 0.05$) 高于其他颗粒。而 TN 含量在 1.01~2.00 mm 颗粒中最低, 为 5.89 g/kg; TP 和 TK 含量在粒径 >2.00 mm 的颗粒中最低, 分别为 0.72 g/kg 和 0.33 g/kg。这与常志州等^[14]使用 XY 型螺旋式畜禽粪便固液分离机对原始牛粪进行固液分离后得到的结果相似。虽然使用细网筛对牛粪进行固液分离后其养分回收效果最好, 但同时会增加处理的成本, 对水分去除效果也产生一定影响^[26]。总体上看, 这 3 种养分在奶牛粪不同粒径中的分布特点基本一致, 即随颗粒粒径的降低而显著 ($P < 0.05$) 增加, 但与 TOC 分布趋势相反。这主要是由于三者的存在形式与 TOC 差异较大, 因此在颗粒上的吸附和存在形式也有差异。



图中数据为平均值±标准差($n=6$),不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。

图2 不同粒径奶牛粪中有机碳和养分含量

Fig.2 Contents of total organic carbon and nutrients in cow manure with different particle sizes

2.3 不同颗粒奶牛粪中有机碳及养分的分布特征

根据不同颗粒中 TOC、TN、TP 和 TK 的含量与各颗粒组分的质量,计算得到各粒径颗粒中有机碳和养分质量所占的比例(图 3)。不同粒径颗粒中 TOC 质量差异显著($P<0.05$),大小趋势为:粒径 1.01~2.00 mm 颗粒>粒径 0.51~1.00 mm 颗粒>粒径 ≤0.10 mm 颗粒>粒径 >2.00 mm 颗粒>粒径 0.11~0.20 mm 颗粒。粒径 1.01~2.00 mm 和 0.51~1.00 mm 颗粒 TOC 所占比例分别为 30.1%和 28.1%。以现有的固液分离条件(筛网孔径>0.5 mm)对奶牛粪分离后,TOC 的回收率理论上可超过 70%。

不同粒径颗粒中 TN、TP 和 TK 3 种养分的分布特征基本一致(图 3),即三者主要分布在粒径 ≤0.10 mm 的颗粒中,所占比例分别为 44.4%、50.1%和 67.3%,显著($P<0.05$)高于其他颗粒。理论上,现有固液分离条件对三者的回收率分别不足 42%、37%和 21%。与吴军伟等^[27]的研究结果相一致,即 80%以上 TN 和 TP 集中在粒径<0.149 mm 的颗粒中。可见,常见的螺旋挤压固液分离机对奶牛粪中 TN、TP 和 TK 的回收率非常有限。因此,若要提高养分回收率,降低后续处理的压力,需要对固液分离后的粪水进一步处理,如增加絮凝剂。Liu 等^[28]研究发现经固液分离后的奶

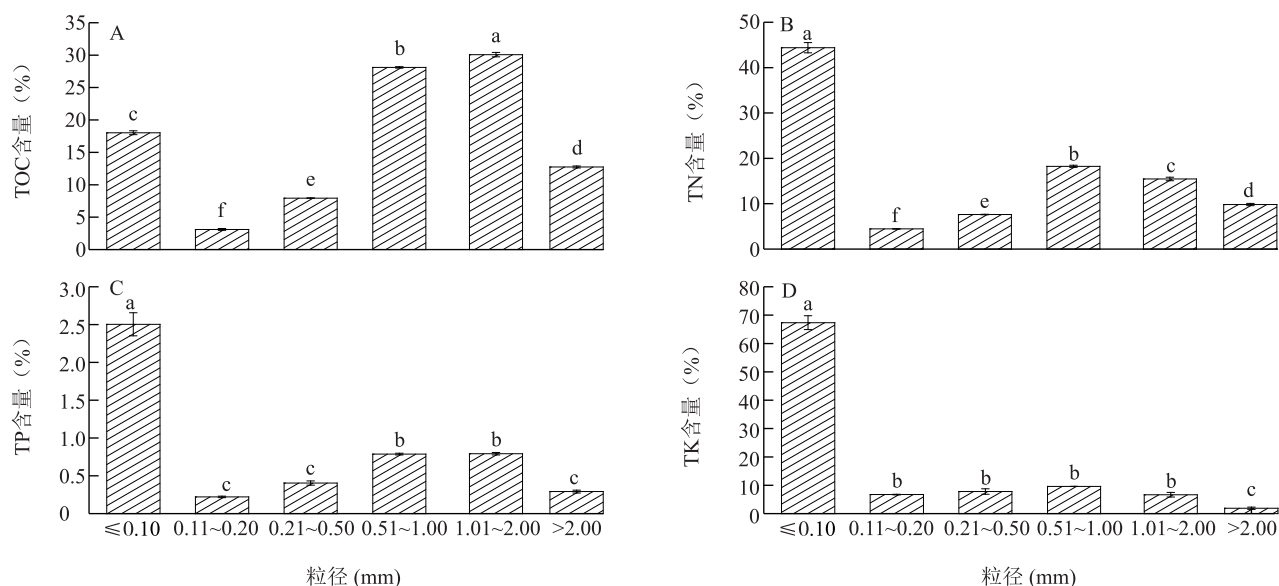
牛粪在加入阳离子聚丙烯酰胺(CPAM)后 1 h 内,分离效率可达 28%,而未加絮凝剂的对照组在 1 h 的沉降试验中没有观察到明显分离。

2.4 奶牛粪颗粒 C/N 特征

固液分离后的固体物质通常用于好氧堆肥,物料 C/N 是影响堆肥微生物腐熟的重要因素。大量研究表明,好氧堆肥最佳碳氮比为 25 左右^[29-30]。张鹤等^[31]研究发现,奶牛粪高效好氧堆肥的最佳 C/N 为 30,C/N 过高易导致微生物供氮不足,生长受到抑制,有机物降解缓慢;而 C/N 过低则碳素不足,相对过量的氮素不能用于微生物细胞合成,易导致氮元素以氨气的形式散失而降低肥效。本研究中小颗粒的 C/N 较低,粒径 ≤0.10 mm 的颗粒 C/N 最小,为 16.7;而 1.01~2.00 mm 颗粒的 C/N 最高,达 79.9(图 4)。根据牛粪堆肥最佳 C/N 要求,粒径为 0.11~0.20 mm 颗粒的 C/N(即 28.1)最适宜。而现有固液分离条件下获得的固体 C/N 过高,不利于其好氧堆肥进程,需对堆体进行 C/N 调节,保证堆肥进程的顺利进行。因此,建议在奶牛粪好氧堆肥处理时选择孔径<0.5 mm 的网筛进行固液分离。

3 结论

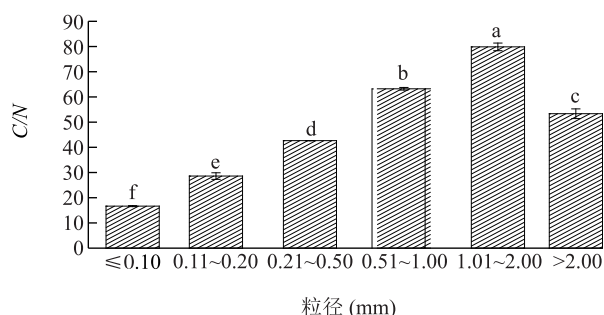
泌乳奶牛粪中不同粒径颗粒所占比例依次



图中数据为平均值±标准误($n=6$),不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。

图3 不同粒径奶牛粪颗粒中有机碳和主要养分所占比例

Fig.3 Percentage of total organic carbon and nutrients in cow manure with different particle sizes



图中数据为平均值±标准误($n=6$),不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。

图4 不同粒径奶牛粪的 C/N

Fig.4 The C/N of cow manure with different particle sizes

为:≤0.10 mm 颗粒 28.0%、1.01~2.00 mm 颗粒 25.3%、0.51~1.00 mm 颗粒 24.2%、>2.00 mm 颗粒 11.5%、0.21~0.50 mm 颗粒 7.5%、0.11~0.20 mm 颗粒 3.5%。有机碳主要存在于较大颗粒(粒径>0.51 mm)中,约占总量的 70%;而 N、P 和 K 主要存在于较小颗粒(粒径≤0.10 mm)中,占各自总量的 44.4%、50.1%和 67.3%。

现有固液分离设备对奶牛粪固体和主要养分的回收率较低,且固液分离后固体的 C/N 过高,不利于好氧堆肥利用。牛粪好氧堆肥合适的初始 C/N 为 25~30,粒径<0.5 mm 的牛粪固体颗粒 C/N 为 16~42,更适宜好氧堆肥。但堆肥物料颗粒太细可

能会引起堆体透气性差等问题,因此,在提高奶牛粪固液分离效率和固体堆肥处理效果方面有待进一步研究。

参考文献:

- [1] 庄犁,周慧平,张龙江.我国畜禽养殖业产排污系数研究进展[J].生态与农村环境学报,2015,31(5):633-639.
- [2] 耿维,胡林,崔建宇,等.中国区域畜禽粪便能源潜力及总量控制研究[J].农业工程学报,2013,29(1):171-179.
- [3] 陈利洪,舒帮荣,李鑫.华东地区农业废弃物资源量估算及其综合利用评价[J].江苏农业科学,2018,46(13):251-255.
- [4] 黄小莲.畜禽粪便资源化利用技术分析[J].广西畜牧兽医,2018,34(5):278-280.
- [5] 袁立,王占哲,刘春龙.国内外牛粪生物资源利用的现状与趋势[J].中国奶牛,2011(5):3-9.
- [6] 赵青玲,杨继涛,李遂亮,等.畜禽粪便资源化利用技术的现状及展望[J].河南农业大学学报,2003(2):181-184.
- [7] MØLLERH B, SOMMERS G, AHRING B K. Separation efficiency and particle size distribution in relation to manure type and storage conditions[J]. Bioresource Technology, 2002, 85(2):189-196.
- [8] GEBREZGABHER S A, MEUWISSEN M P M, KRUSEMAN G, et al. Factors influencing adoption of manure separation technology in the Netherlands[J]. Journal of Environmental Management, 2015, 150: 1-8.
- [9] 国辉,袁红莉,耿兵,等.牛粪便资源化利用的研究进展[J].环境科学与技术,2013,36(5):68-75.
- [10] 李凤莲.规模牛场牛粪的资源化利用新技术[J].北方牧业,2016(4):21.

- [11] 国家畜禽养殖废弃物资源化利用科技创新联盟. 清洁回用模式技术方式之固液分离[J]. 中国畜牧业, 2018(4): 39-42.
- [12] 江滔, 温志国, 马旭光, 等. 畜禽粪便固液分离技术特点及效率评估[J]. 农业工程学报, 2016, 32(S2): 218-225.
- [13] 杨柏松, 关正军. 畜禽粪便固液分离研究[J]. 农机化研究, 2010, 32(2): 223-225.
- [14] 常志州, 黄红英, 吴军伟, 等. 猪和奶牛粪便的粒径及养分分布对固液分离效率的影响[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(2): 392-395.
- [15] 吴军伟, 常志州, 周立祥, 等. XY型固液分离机的畜禽粪便脱水效果分析[J]. 江苏农业科学, 2009(2): 286-288.
- [16] RICO C, JOSÉ LR, HIPÓLITO G, et al. Solid-Liquid separation of dairy manure: Distribution of components and methane production[J]. Biomass & Bioenergy, 2012, 39: 370-377.
- [17] HJORTH M, CHRISTENSEN M L, CHRISTENSEN P V. Flocculation, coagulation, and precipitation of manure affecting three separation techniques[J]. Bioresour Technol, 2008, 99(18): 8598-8604.
- [18] 薛丰, 代俊芳, 刘辉, 等. 粪便分离检测在奶牛养殖中的应用[J]. 中国奶牛, 2015(16): 65-67.
- [19] 惠雪, 孙书锋, 吴中红, 等. 规模化奶牛场牛群结构的算法[J]. 黑龙江畜牧兽医, 2008(8): 30-32.
- [20] 中华人民共和国农业部. 行业标准: NY525—2012[S]. 北京: 中国农业出版社, 2012.
- [21] 关正军, 王新志, 张旭, 等. 规模化养牛粪污固液分离试验研究[J]. 农业机械学报, 2016, 47(11): 192-197.
- [22] 王明, 赵胜雪, 李旭荣, 等. 螺旋挤压机筛网孔径对牛粪固液分离效果的影响[J]. 太阳能学报, 2018, 39(4): 1032-1037.
- [23] LEACH K A, ARCHER S C, BREEN J E, et al. Recycling manure as cow bedding: Potential benefits and risks for UK dairy farms[J]. Veterinary Journal, 2015, 206(2): 123-130.
- [24] 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.
- [25] 刘智杰, 董雪, 刘凡, 等. 九宫山地带性土壤颗粒中黏粒矿物的特征[J]. 矿物学报, 2018, 38(2): 166-175.
- [26] GUAN Z J, LI W Z, ZHENG G X, et al. Effect of solid-liquid separation on utilization of dairy manure[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(4): 259-263.
- [27] 吴军伟. 畜禽粪便固液分离技术研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2009.
- [28] LIU Z, CARROLL Z S, LONG S C, et al. Centrifuge separation effect on bacterial indicator reduction in dairy manure[J]. Journal of Environmental Management, 2017, 191: 268-274.
- [29] 刘超, 王若, 操一凡, 等. 不同碳氮比下牛粪高温堆肥腐熟进程研究[J]. 土壤通报, 2017, 48(3): 662-668.
- [30] 卢健, 贺方云, 张纪利, 等. 碳氮比对有机肥发酵过程中理化性质的影响[J]. 湖北农业科学, 2014, 53(14): 3251-3256.
- [31] 张鹤, 李孟婵, 杨慧珍, 等. 不同碳氮比对牛粪好氧堆肥腐熟过程的影响[J]. 甘肃农业大学学报, 2019, 54(1): 60-67.

(责任编辑: 张震林)