

张金瑞, 贾树云, 刘美玲, 等. 醋糟覆盖对堆存牛粪 NH_3 和 CO_2 排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(9): 2193–2201.

ZHANG Jin-rui, JIA Shu-yun, LIU Mei-ling, et al. Impact of a vinegar residue covering on the NH_3 and CO_2 emissions from cattle manure[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(9): 2193–2201.

醋糟覆盖对堆存牛粪 NH_3 和 CO_2 排放的影响

张金瑞^{1,2}, 贾树云^{1,2}, 刘美玲^{1,2}, 张 祎^{1,2}, 高志岭^{1,2*}

(1. 河北农业大学资源与环境科学学院, 河北 保定 071000; 2. 河北省农田生态环境重点实验室, 河北 保定 071000)

摘要:为探究物料覆盖对堆放存储的牛粪氨气(NH_3)和二氧化碳(CO_2)排放的影响,本研究利用氨浓度在线检测(Innova1412i)和动态箱技术,测定了酸性有机物料醋糟覆盖(覆盖厚度为0.5、1.0 cm和2.0 cm)下牛粪堆存过程中 NH_3 和 CO_2 的排放通量。结果表明,与未覆盖醋糟的对照组相比,醋糟覆盖厚度超过1 cm时可显著降低牛粪 NH_3 和 CO_2 排放($P<0.05$);模拟降雨去除醋糟酸性成分(洗涤醋糟)对醋糟的氨减排效果影响较小,覆盖洗涤醋糟仍达到了81.34%的氨减排率($P<0.05$),而添加醋糟冲洗液对牛粪 NH_3 和 CO_2 排放没有显著影响;当覆盖时段从2周延长到3周时,醋糟覆盖的氨减排率从35.22%~84.97%降低至15.58%~60.25%;醋糟覆盖还可以有效降低牛粪的C/N和提高N/P。综上,有机物料醋糟是兼具覆盖、酸化等作用的一类控氨材料,对于堆放存储的牛粪具有控氨、保氮和提质效果,但其氨减排率受养殖场粪尿储存和覆盖技术的实施时段的影响较大。

关键词:牛粪;氨气;二氧化碳;醋糟覆盖;减排

中图分类号:X511 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2019)09-2193-09 doi:10.11654/jaes.2018-1442

Impact of a vinegar residue covering on the NH_3 and CO_2 emissions from cattle manure

ZHANG Jin-rui^{1,2}, JIA Shu-yun^{1,2}, LIU Mei-ling^{1,2}, ZHANG Yi^{1,2}, GAO Zhi-ling^{1,2*}

(1. College of Resource and Environmental Sciences, Hebei Agricultural University, Baoding 071000, China; 2. Key Laboratory for Farmland Eco-Environment of Hebei Province, Baoding 071000, China)

Abstract: An experiment was carried out to explore the effects of covering on ammonia (NH_3) and carbon dioxide (CO_2) emissions from stored cattle manure. NH_3 and CO_2 emissions from stored cattle manure covered by vinegar residues (cover thicknesses of 0.5, 1.0 cm, and 2.0 cm) were measured, using an online measurement system (Innova1412i) and a dynamic chamber technique. The results showed that the vinegar residue covering with thicknesses over 1 cm significantly reduced the NH_3 and CO_2 emissions from cattle manure, in comparison with the uncovered control ($P<0.05$). The removal of acid components from the vinegar residue with simulated rainfall (washed vinegar residue) had little effect on its ammonia reduction effect, as covering by washed vinegar residues still achieving an ammonia reduction rate of 81.34% ($P<0.05$), while mixing with the vinegar residues washing solution had little effect on the NH_3 and CO_2 emissions. When the covering period was extended from 2 weeks to 3 weeks, the ammonia reduction rates declined from 35.22%~84.97% to 15.58%~60.25%. In addition, the vinegar residue covering also effectively reduced the manure C/N and increased the N/P. In summary, the acidic organic material vinegar residue has been demonstrated to be a useful material for ammonia control, nitrogen retention, and quality upgrading for cattle manure in storage, although the ammonia reduction rate is affected by the implementation duration, and is also influenced by manure storage and covering techniques.

Keywords: cattle manure; ammonia; carbon dioxide; vinegar residue covering; emission reduction

收稿日期:2018-11-19 录用日期:2019-01-29

作者简介:张金瑞(1993—),男,河北邢台人,硕士研究生,从事环境化学与污染控制研究。E-mail:13244306496@163.com

*通信作者:高志岭 E-mail:zhilinggao@hotmail.com

基金项目:国家自然科学基金项目(41675151);国家重点研发计划项目(2016YFC0207906)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China (41675151); The National Key Research and Development Program of China (2016YFC0207906)

氨气(NH₃)是大气中重要的碱性气体,与二氧化硫、氮氧化物等是形成细颗粒物的重要前体物,其相互反应形成的二次粒子硫酸盐和硝酸盐是大气PM_{2.5}的重要组成部分^[1-2],在大气化学和气溶胶形成过程中起着重要的作用,同时对酸沉降、能见度、水体富营养化等都有直接或间接的影响^[3]。研究表明,我国人为源氨排放约有80%~90%来自养殖业、种植业等农业源^[4]。随着我国养殖业的集约化发展,养殖场废弃物的排放量日益增多,特别是畜禽粪尿引发的环境污染问题越发严重。2013年全国畜禽粪尿排放总量为25.36亿t,其中畜禽粪便总量为15.14亿t,畜禽尿液总量为10.22亿t^[5],而80%的粪便会舍外贮存或处理^[6]。由于缺乏科学有效的管理措施,在其堆放存储过程中因微生物的分解作用会有大量养分丢失,同时也造成了严重的环境污染。

近年来,我国秋冬季雾霾污染日趋严重,由此引发的人体健康问题日益严重^[7]。源解析表明铵盐对PM_{2.5}的贡献约为10%,重污染时期可达60%,NH₃排放对全国城市PM_{2.5}年均浓度贡献率高达29.8%^[8]。因此,控制农业源的氨排放是我国治理雾霾污染的重要课题^[9]。常用的养殖场氨减排技术主要包括源头控制技术(降低饲料蛋白投入)^[10-11]、增加饲料氮素的转化吸收(生物添加剂)^[12]和末端控氨技术(粪尿等废弃物酸化、覆盖等)^[13-16]。众多研究表明,塑料膜、秸秆、锯末等覆盖技术主要是通过阻隔和吸附达到降低氨排放的目的^[15-16]。此外,喷淋酸性溶液降低粪尿pH也是降低氨排放的重要措施之一^[13-14]。

当前,我国制醋工业每年产生的醋糟达到200万t左右^[17],之前通常将醋糟直接当作垃圾进行填埋处理,但这种处理方式会因酸液渗漏而造成环境污染。近几年来国内外主要是将醋糟用于饲料、食用菌培料、植物无土栽培基质、医药和生物质能源等方面,但利用效果均不理想^[18]。研究表明,醋糟的pH约为4.5,如能够将此类酸性有机物料作为养殖场粪尿控氨材料,既能起到秸秆类覆盖物料的阻隔吸附作用,同时还兼具酸性物质降低粪尿表层pH的作用。此外,由于秸秆等材料的覆盖,阻碍了粪尿与大气的交

换,从而在降低氨排放的同时,可能也会引起其他气体如二氧化碳(CO₂)、氧化亚氮(N₂O)、甲烷(CH₄)等温室气体排放速率的变化。因此,在探究醋糟等物料控氨效果时,充分考虑由此带来的其他气体排放变化,将对整体认识此类潜在控氨技术以及综合大气环境效应尤为重要。

因此,本研究利用自行设计的动态箱与自动监测系统,结合牛粪存储过程中碳氮比(C/N)、氮磷比(N/P)等指标的变化,探究了醋糟覆盖厚度及其致酸成分对牛粪存储过程中的NH₃和CO₂排放的影响,以明确其控氨效果,这将为我国养殖场粪尿的氨排放控制提供重要的技术支持。

1 材料与方法

1.1 试验材料

本研究采用动态箱技术室内模拟测定了醋糟覆盖对牛粪堆放存储阶段的NH₃和CO₂排放的影响,试验所用新鲜牛粪尿取自于河北农业大学三分厂标本园的农大奶牛养殖场,其基本理化性质见表1;覆盖用的醋糟是酿醋后所余的残渣(pH=4.5),主要原材料为高粱,购自山西省长治县玉平老陈醋酿造厂。

1.2 试验设计

1.2.1 研究内容一:醋糟覆盖厚度对牛粪气体排放的影响

试验将混匀的牛粪样品(6000 g)装填于动态箱中,厚度为8 cm,共设置无醋糟覆盖的对照处理(CK)以及醋糟覆盖厚度为0.5、1 cm和2 cm的试验处理(表2),所用醋糟量分别为170、340 g和680 g。每个处理设置4个重复。

1.2.2 研究内容二:洗涤醋糟及其冲洗液对牛粪气体排放的影响

本部分试验共设4个处理(表2):无醋糟覆盖的空白对照(CK)、醋糟冲洗液混合(CY)、洗涤醋糟覆盖(CC)和醋糟覆盖(CZ)。其中,CZ处理醋糟的铺设量与研究内容一相同。将680 g醋糟和水按1:1.5(g:mL)混合,振荡后进行固液分离,制备得到醋糟冲洗液和洗涤醋糟,将冲洗液和牛粪混匀(CY),洗涤醋糟

表1 试验牛粪的基本理化性质
Table 1 Basic physical and chemical properties of cattle manure

研究内容 Research content	含水率 Water content/%	pH	总有机质 TOC/g·kg ⁻¹	全氮 TN/g·kg ⁻¹	总磷 TP/g·kg ⁻¹
一 Research content1	71.66	9.19	450.81	3.56	5.94
二 Research content2	69.89	8.49	582.24	9.47	13.10

覆盖于牛粪上(CC)。每个处理设置4个重复。详细内容见表2。

1.3 气体排放测定与数据计算

本研究利用自动化控制技术,将氨浓度在线检测(Innova1412i)和传统动态箱技术相结合,构建了养殖场废弃物氨排放自动监测系统,并采用此系统测定了不同处理牛粪的NH₃和CO₂排放。该监测系统包括动态箱(16~24个箱体)、红外光声谱气体监测仪(Innova1412i)和中央控制系统(包括控制面板和控制单元)3部分构成(图1):(1)动态培养箱采用PVC材质的长方体箱体,尺寸为50 cm×14 cm×10 cm,采样盖的尺寸为50 cm×14 cm×2 cm,即上层通气空间为1.4 L。采样盖前后两端开孔,分别作为进气口和出气口。(2)NH₃和CO₂浓度检测采用红外光声谱气体监测仪(Innova1412i),测定精确度可达到十亿分率(10⁻⁹)。(3)中央控制系统的功能是定时实现Innova与相应培养箱体气路相连,并将相应的浓度和温度等信息储存。用BG表示背景浓度测定,OUTLET表示动态箱出气口浓度测定,一个完整测定周期包括:BG+OUTLET×4+BG+OUTLET×4+BG+OUTLET×4+BG+OUTLET×4+BG,共测定5个时段的背景值和16个动态箱出气口的气体浓度。每个背景值和动态箱出气口浓度连续检测时间均为10 min,Innova1412i测定频率设定为每分钟1次,完成一个测定周期共需要210 min。测定期间,将动态箱进气管延伸出室外以保证背景浓度的稳定,动态培养箱出气口管路经转子流量计与抽气风机相连,通过流量计将动态箱的空气流速调节至28 L·min⁻¹,即动态箱内空气交换率为每分钟20次。监

测期间,每日测定一次各处理的气体排放速率,根据测定期间气体浓度的变化特征将试验周期确定为21 d。气体排放速率计算公式如下:

$$F = \frac{(c - c_0) \times v \times M \times 273.15 \times P}{V_m \times s \times (273.15 + T) \times 1013.25}$$

式中: F 为牛粪气体排放速率,mg·m⁻²·h⁻¹; c_0 、 c 分别为动态箱进、出气口气体浓度,μL·L⁻¹; v 为箱体内空气流速,m³·h⁻¹; M 为气体摩尔质量,g·mol⁻¹; V_m 为气体标准摩尔体积,22.4 L·mol⁻¹; s 为箱体底面积,0.07 m²; P 为气体压强,Pa; T 为气体温度,℃。

1.4 其他测定指标及方法

试验前后各取样一次进行牛粪含水率、pH、总氮(TAN)、全氮(TN)、全磷(TP)、总有机质(TOC)含量的测定分析。含水率采用真空烘箱法测定,pH采用玻璃电极法(奥豪斯STARTER 3100/F),TAN采用凯氏定氮法,TN采用H₂SO₄-H₂O₂消煮,凯氏定氮法(NY 525—2012),TP采用H₂SO₄-H₂O₂消煮,紫外分光光度法(NY 525—2012),TOC采用重铬酸钾容量法(NY 525—2012),试验期间牛粪温度采用HOBO系统实时监测。气体测定结束后取牛粪进行发芽率实验,以检测试验中各处理对牛粪毒性的影响。发芽率指数(GI)计算公式如下:

$$GI = \frac{\text{试验处理的种子发芽率} \times \text{试验处理的种子根长}}{\text{对照(蒸馏水)的种子发芽率} \times \text{对照的种子根长}} \times 100\%$$

1.5 数据统计分析

采用Excel对试验数据进行统计分析,SPSS 19.0进行差异显著性分析。

2 结果与分析

2.1 醋糟覆盖对牛粪NH₃排放的影响

如图2所示,不同覆盖处理的氨排放特征存在明显的差异:无醋糟覆盖(CK)牛粪的NH₃排放速率第1 d最高,达到93.67 mg·m⁻²·h⁻¹,第2 d急剧下降至56.51 mg·m⁻²·h⁻¹,之后排放速率降幅逐渐减小,约8 d后排放速率降低至34.72 mg·m⁻²·h⁻¹,其中1~8 d时期内牛粪氨排放速率呈指数规律递减($R^2=0.8092$)。与CK相比,不同厚度的醋糟覆盖均不同程度地降低了氨排放速率,其中0.5、1 cm和2 cm醋糟覆盖分别降低了1~3、1~6 d和1~14 d等时段的氨排放,之后各组牛粪氨排放速率趋于一致。由表3可知,覆盖0.5 cm醋糟对牛粪氨排放影响较小,然而当覆盖厚度超过1 cm时,均显著降低了其氨排放($P<0.05$),1~21 d中降

表2 研究内容一和研究内容二各处理详细情况

Table 2 Details of each treatment of research content 1 and research content 2

试验处理 Experiment treatment	物料组成 Material constituent	
	牛粪 Cattle manure	处理措施 Treatment measure
研究内容一 Research content1		
CK(空白对照)	6000 g	
0.5 cm 醋糟覆盖	6000 g	覆盖0.5 cm 醋糟
1.0 cm 醋糟覆盖	6000 g	覆盖1.0 cm 醋糟
2.0 cm 醋糟覆盖	6000 g	覆盖2.0 cm 醋糟
研究内容二 Research content2		
CK(空白对照)	4950 g	加水 1050 mL, 混匀
CY(醋糟冲洗液)	4950 g	加醋糟冲洗液 1050 mL, 混匀
CC(洗涤醋糟)	4950 g	加水 1050 mL, 混匀, 覆盖洗涤醋糟 2 cm
CZ(醋糟)	4950 g	加水 1050 mL, 混匀, 覆盖醋糟 2 cm

低幅度分别为15.58%和60.25%,随醋糟覆盖厚度增加,NH₃排放速率明显降低,减排率逐渐增大。

鉴于不同厚度的醋糟覆盖影响氨排放的时段长

短不同,本研究分别计算了1~14 d和1~21 d两个时段的氨排放。由表3可知,两种计算方式下,各覆盖处理的氨累积排放的差异随着覆盖时间增加逐渐减

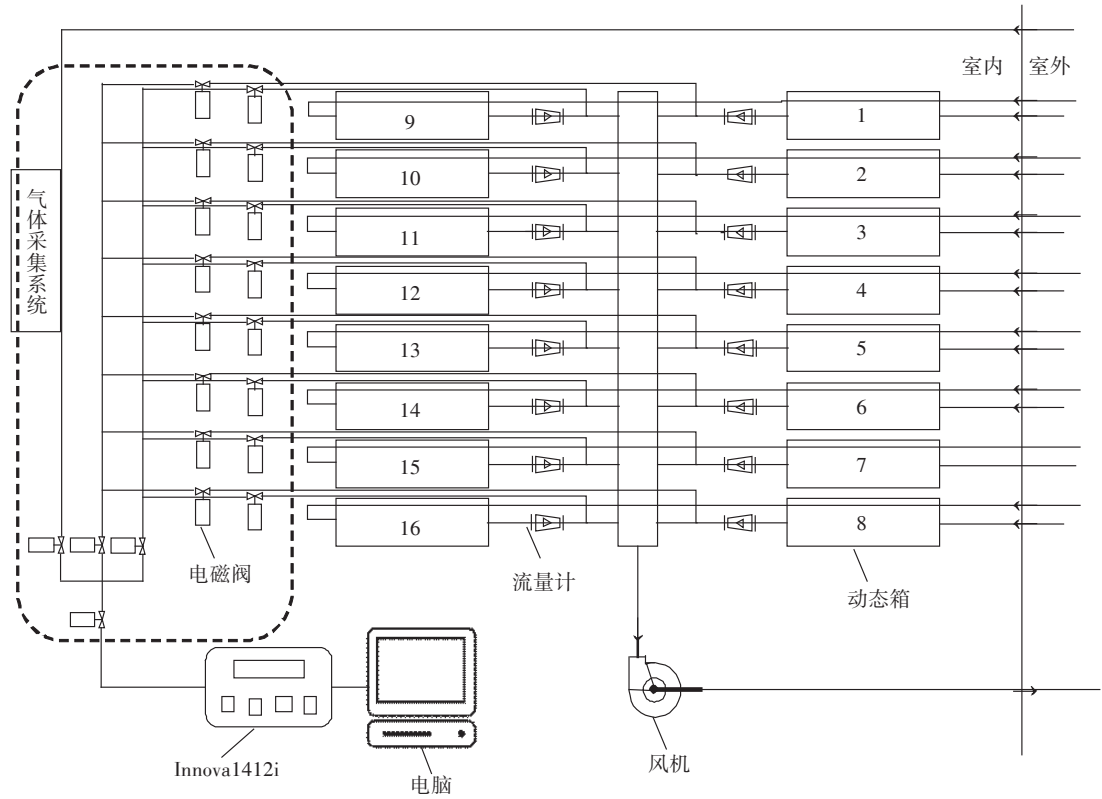


图1 牛粪氨挥发测定系统示意图

Figure 1 Schematic diagram of the cattle manure ammonia volatilization measurement system

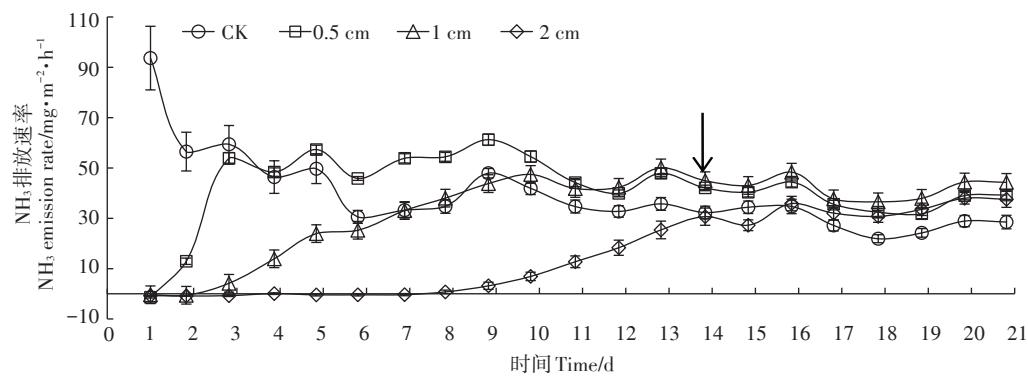


图2 不同厚度醋糟覆盖下牛粪NH₃排放速率变化

Figure 2 Changes of NH₃ emission rate of cattle manure under different thicknesses of vinegar residue

表3 研究内容一各处理牛粪NH₃和CO₂累积排放量

Table 3 Cumulative emissions of NH₃ and CO₂ from cattle manure in each treatment of study content 1

气体 Gas	CK	0.5 cm	1 cm	2 cm
NH ₃ (14 d)/mg	1 057.5±195.7a	1 033.3±63.8a	685.1±102.9b	158.9±58.7c
NH ₃ (21 d)/mg	1 393.2±244.3a	1 474.9±103.5a	1 176.1±163.6a	553.8±117.7b
CO ₂ /g	91.7±2.0a	83.4±7.7ab	77.4±4.7b	72.9±6.2b

注:同行不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同。
Note: Different small letters in the same row mean significant difference at 0.05 level among different treatments. The same below.

小。例如,与对照相比,1 cm和2 cm醋糟覆盖1~14 d的氨排放分别降低了35.22%和84.97%,明显高于1~21 d时段的降低幅度15.58%和60.25%。由此可见,醋糟覆盖可以有效降低牛粪氨排放,同时也揭示了在准确评估覆盖类控氨措施的具体减排效率时,还应着重考虑养殖场粪尿储存和覆盖技术的实施时段对氨减排率的影响。

如图3所示,研究内容二中CK、CY处理组皆在第1 d就达到氨排放高峰,峰值分别为149.05 mg·m⁻²·h⁻¹和151.55 mg·m⁻²·h⁻¹,随后伴随着波动下降,且两组氨排放变化大致相同。而CC、CZ处理组氨排放速率一直处于较低水平,前10 d均未超过10 mg·m⁻²·h⁻¹。由表4可知,CK、CY两组氨累积排放量并无显著差异($P>0.05$)。CC、CZ组则显著降低了存储前期的牛粪NH₃排放,其减排率在第14 d时分别达到94.22%、96.83%,第21 d时又分别降至81.34%、89.07%,即覆盖技术的氨减排率随存储时间延长而逐渐降低,这与研究内容一结果一致。因此,降水等短期冲淋过程对醋糟的氨减排能力影响很小。

2.2 醋糟覆盖对牛粪CO₂排放的影响

醋糟覆盖对牛粪CO₂排放的影响如图4所示,测定期间不同处理CO₂排放速率的变化趋势基本一致,各处理牛粪CO₂排放速率和牛粪温度之间的相关性均达到极显著水平($P<0.01$)。此外,与CK相比,0.5、

1、2 cm 3个覆盖组CO₂累积排放量比对照组分别减少9.75%、16.14%和21.10%,且1、2 cm覆盖组的CO₂累积排放量较对照组显著降低($P<0.05$),醋糟覆盖厚度越厚,CO₂累积排放量越小。因此覆盖醋糟可有效降低牛粪CO₂的排放。

研究内容二也发现各处理牛粪CO₂排放速率与牛粪温度动态变化基本一致(图5),其中CK和CY处理牛粪的CO₂排放速率和牛粪温度之间均呈现出显著正相关性($P<0.05$),与研究内容一结论相似。此外,与对照相比,CY、CC、CZ处理的CO₂累积排放分别下降3.56%、26.17%、30.70%,其中CC和CZ处理的降低幅度达显著水平($P<0.05$),但CC和CZ处理间无显著差异。

2.3 牛粪pH和TAN动态变化

如图6所示,醋糟覆盖可显著降低牛粪pH。其中不同醋糟覆盖处理表层牛粪(1~3 cm)的pH在第7 d时均有显著下降($P<0.05$),且下降幅度随覆盖醋糟厚度增加而增加,之后pH逐渐回升,而下层牛粪(4~8 cm)pH也呈现出下降趋势($P<0.05$),但降幅随着时间逐渐降低。由图7可知,不同醋糟覆盖处理1~3 cm和4~8 cm牛粪中的TAN含量均随着存储时间的延长而逐渐降低,同时,不同处理间牛粪TAN含量也存在明显差异,尤其是在1~3 cm层,醋糟覆盖处理的TAN均显著高于对照处理($P<0.05$),表明醋糟覆盖技术具

表4 研究内容二各处理牛粪NH₃和CO₂累积排放量

Table 4 Cumulative emissions of NH₃ and CO₂ from cattle manure in each treatment of study content 2

气体 Gas	CK	CY	CC	CZ
NH ₃ (14 d)/mg	1 174.5±137.1a	1 187.7±103.4a	67.8±73.9b	37.3±22.2b
NH ₃ (21 d)/mg	1 474.0±149.2a	1 506.0±143.9a	275.0±110.2b	161.1±103.4b
CO ₂ /g	149.2±5.6a	143.9±8.1a	110.2±8.7b	103.4±3.2b

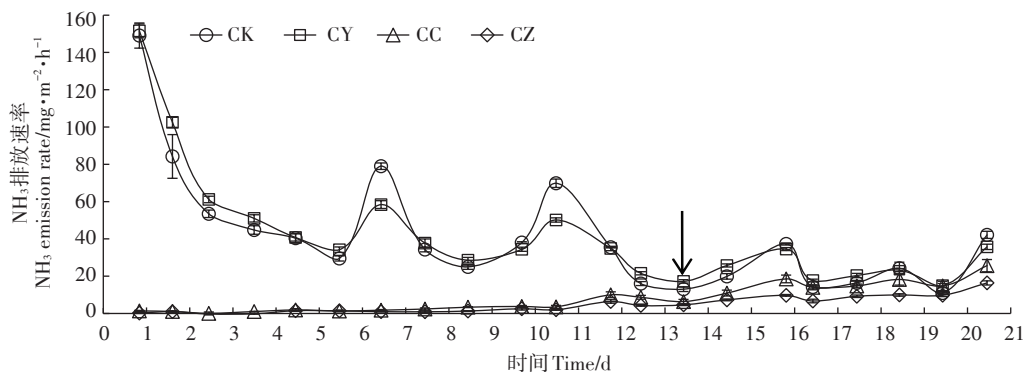


图3 研究内容二各处理牛粪NH₃排放速率变化

Figure 3 Changes of NH₃ emission rate from cattle manure under each treatment of study content 2

有实现牛粪氮素保持的功能。

2.4 醋糟覆盖对牛粪 C/N 和 N/P 的影响

本研究发现,对照与各覆盖处理的牛粪 TN 和 TP 含量均较试验前有不同程度升高(表 5),其中 1 cm 和 2 cm 覆盖处理的 TN 含量显著高于基础样和对照($P<0.05$),各处理的 TP 均较试验前有显著增加,但不同处理间无显著差异;相较而言,不同处理的牛粪 TOC

含量均有所下降,但只有 2 cm 覆盖处理的 TOC 含量有显著降低($P<0.05$)。整体看来,与对照相比,覆盖处理的牛粪 C/N 随醋糟覆盖厚度增加而逐渐降低,当覆盖厚度超过 1 cm 时降幅达显著水平($P<0.05$),而各处理牛粪 N/P 有随着醋糟覆盖厚度增加而增加的趋势,但差异不显著($P>0.05$)。综上,覆盖醋糟存在降低牛粪 C/N、提高有机肥品质的潜力。

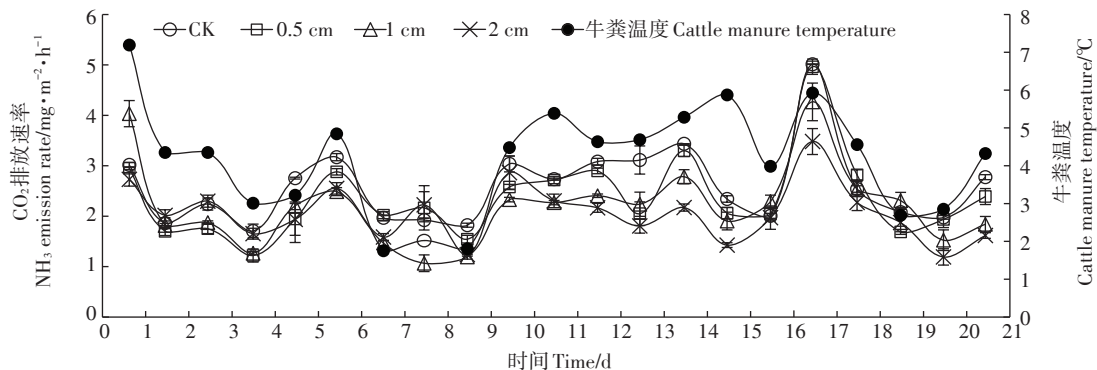


图4 不同厚度醋糟覆盖下牛粪 CO₂ 排放速率变化

Figure 4 Changes of CO₂ emission rate of cattle manure under different thicknesses of vinegar residue

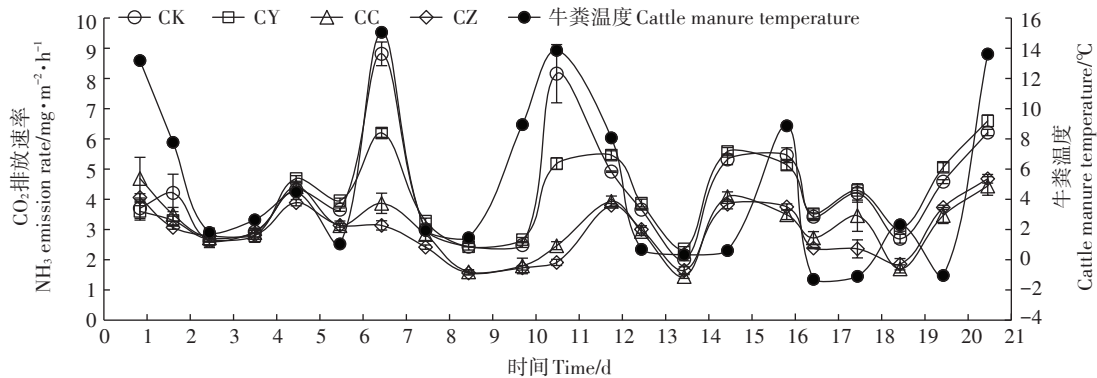


图5 研究内容二各处理牛粪 CO₂ 排放速率变化

Figure 5 Changes of CO₂ emission rate from cattle manure under each treatment of study content 2

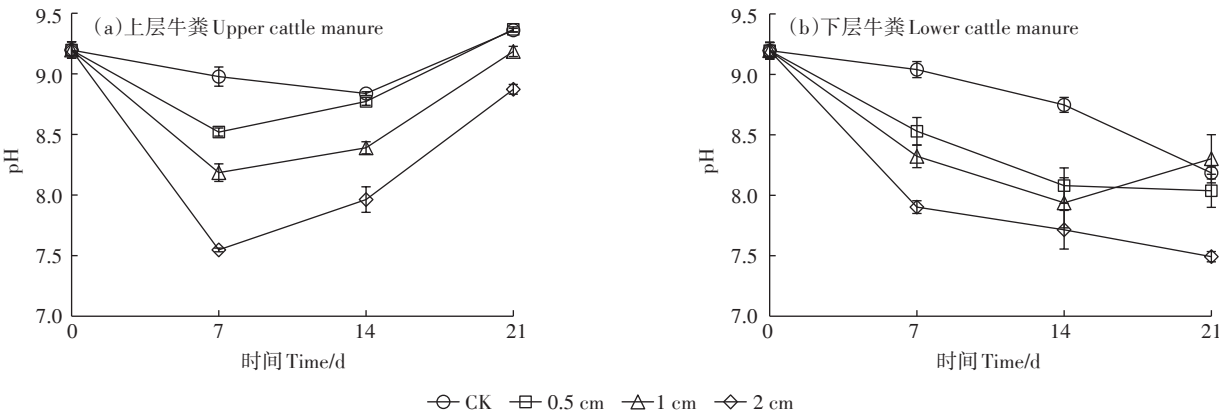


图6 不同厚度醋糟覆盖下牛粪 pH 变化

Figure 6 Changes of pH of cattle manure under different thicknesses of vinegar residue

3 讨论

覆盖技术是降低养殖场粪便NH₃排放的重要措施,经检验发现覆盖木屑、锯末、稻草、生物炭、聚乙烯膜等物料均可不同程度地降低氨排放(减排率为11%~96%)^[15-16,19-21]。本研究验证了覆盖醋糟在厚度超过1 cm时可显著降低牛粪氨气排放($P<0.05$),2~3周内的氨排放减排率最高可达96.83%,因此醋糟也是一类可有效降低养殖场粪便氨挥发的物料。该物料降低氨挥发的机理除了物理阻隔作用之外,还可使牛粪表层pH下降,最高可达1.0~1.5,由此推断醋糟的致酸能力是降低粪尿氨挥发的另一个重要原因^[22]。牛粪CO₂的排放受温度影响较大^[23],其排放速率与牛粪温度之间呈现出显著正相关性($P<0.05$)。

该牛场为了增强奶牛食欲,增加产奶量^[24],向饲料中添加了苏打,这可能是导致研究内容一中牛粪初始pH较高的原因之一。本研究还表明,由于覆盖醋糟后牛粪pH下降(图6),更接近于粪便发酵最适宜的pH(6.5~7.5)^[25-26],促进了牛粪发酵的过程^[21,27-28],但醋糟覆盖形成的厌氧环境不利于微生物产生CO₂,同

时却可以促进CH₄的产生^[15],推测这可能是导致醋糟覆盖处理的牛粪CO₂排放减少且TOC含量也下降的重要原因之一(表5);同时,醋糟覆盖的牛粪的TN含量均较高,这可能是由于牛粪pH下降而减少了氨挥发等氮素损失所致,最终导致覆盖处理的C/N较低。此外,本研究发现醋糟覆盖还增加了牛粪的N/P,鉴于牛粪中P的低损失性^[27],更从侧面反映了醋糟覆盖处理组的N含量较高,这也证实了醋糟覆盖对牛粪氮素保持、提高氮素资源利用的积极作用。本研究的发芽率试验结果表明,各处理试验后牛粪发芽率指数均显著高于试验前基础牛粪($P<0.05$),但醋糟覆盖处理的发芽率指数与对照相比无显著差异($P>0.05$),表明覆盖牛粪堆存过程中毒性会降低,且醋糟也不会增加牛粪毒性。

本研究中牛粪和醋糟混合物的理论pH最低为7.44,呈弱碱性,因此施入土壤后应不会导致土壤酸化。此外,降雨等短期冲淋对醋糟的氨减排能力影响也很小,这是由于醋糟的致酸成分主要是乙酸、乳酸等有机弱酸^[29],冲洗后醋糟的pH仅从4.9上升到了5.2,因此醋糟控氨作用的缓冲性能较强。综上,醋糟是一

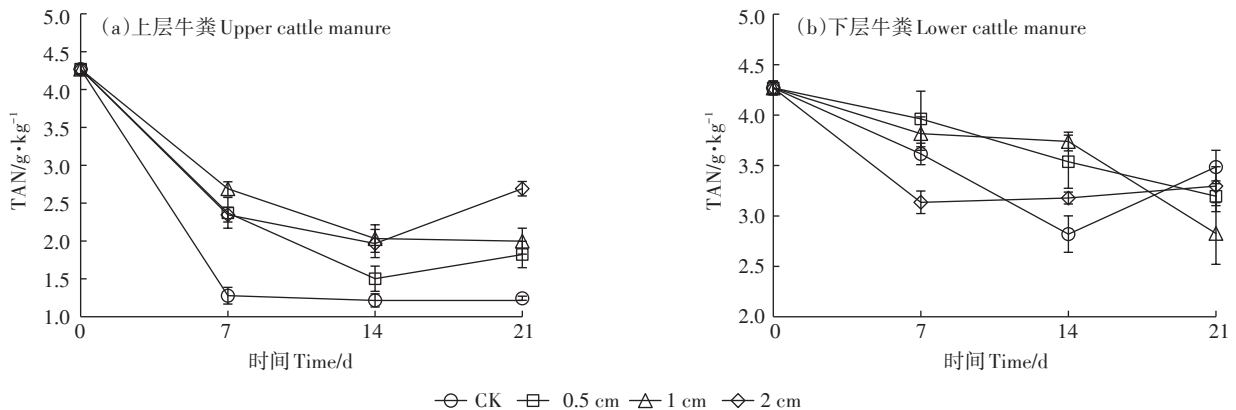


图7 不同厚度醋糟覆盖下牛粪TAN变化

Figure 7 Changes of TAN of cattle manure under different thicknesses of vinegar residue

表5 研究内容一各处理牛粪的指标变化

Table 5 Changes in indicators for each treatment of cattle manure in study content

项目 Items	基础样 Basic sample	CK	0.5 cm	1 cm	2 cm
TN/g·kg ⁻¹	3.56±0.18b	3.87±0.46b	4.23±0.16ab	4.75±0.17a	4.88±0.30a
TOC/g·kg ⁻¹	261.49±0.62a	256.29±14.84a	233.61±35.80ab	223.42±20.71ab	206.94±10.27b
TP/g·kg ⁻¹	5.94±0.41b	7.22±0.70ab	7.10±0.56ab	7.67±0.82a	7.57±0.89a
C/N	73.61±3.70a	66.97±4.57ab	55.21±8.26bc	52.54±0.68c	43.76±2.89c
N/P	0.61±0.08a	0.54±0.14a	0.58±0.06a	0.59±0.01a	0.64±0.10a
GI/%	93.14±6.54b	112.09±6.15a	105.78±11.6a	117.35±5.43a	119.45±22.7a

种有效的养殖场控氨物料,值得进一步研究关注。

4 结论

(1)覆盖醋糟有效地降低了堆存阶段牛粪 NH_3 和 CO_2 的排放,覆盖厚度超过1 cm时减排效果显著。覆盖醋糟对 NH_3 的减排率随着覆盖时间增加而逐渐降低,从2周时的35.22%~84.97%降低至3周时的15.58%~60.25%。

(2)酸性有机物料醋糟是兼具覆盖、酸化作用等特点的控氨材料,可有效降低牛粪C/N、提高N/P,对于堆放存储的牛粪具有控氨、保氮和提质效果,有利于接下来进行堆肥的后续利用。

(3)部分去除酸性成分对醋糟的氨减排效果影响较小,降雨等冲洗对实际应用中醋糟的氨减排能力影响很小。

(4)构建的养殖业废弃物氨排放自动监测系统提高了氨减排技术效果的初期验证效率,可为大范围筛选各种潜在有效管理措施及其田间效果验证提供技术支持。

参考文献:

- [1] Sun J, Liu L, Xu L, et al. Key role of nitrate in phase transitions of urban particles: Implications of important reactive surfaces for secondary aerosol formation[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2018, 123(16): 1234–1243.
- [2] 彭应登. 北京近期雾霾污染的成因及控制对策分析[J]. 工程研究—跨学科视野中的工程, 2013, 5(3): 233–239.
PENG Ying-deng. Analysis of the causes of recent Beijing haze pollution and its countermeasures[J]. *Journal of Engineering Studies*, 2013, 5(3): 233–239.
- [3] Zhang Y, Dore A J, Ma L, et al. Agricultural ammonia emissions inventory and spatial distribution in the North China Plain[J]. *Environmental Pollution*, 2010, 158(2): 490–501.
- [4] Huang X, Song Y, Li M, et al. A high-resolution ammonia emission inventory in China[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, doi: 10. 1029/2011GB004161, 2012.
- [5] 左旭. 我国农业废弃物新型能源化开发利用研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2015.
ZUO Xu. A research on the development and utilization of the agricultural residues as new sources energy in China[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2015.
- [6] Dong H M, Zhu Z P, Zhou Z K, et al. Greenhouse gas emissions from swine manure stored at different stack heights[J]. *Animal Feed Science & Technology*, 2011, 166/167(7): 557–561.
- [7] Dominici F, Greenstone M, Sunstein C R. Particulate matter matters[J]. *Science*, 2014, 344(6181): 257–259.
- [8] 薛文博, 许艳玲, 唐晓龙, 等. 中国氨排放对 $\text{PM}_{2.5}$ 污染的影响[J]. 中国环境科学, 2016, 36(12): 3531–3539.
- [9] XUE Wen-bo, XU Yan-ling, TANG Xiao-long, et al. Impacts of ammonia emission on $\text{PM}_{2.5}$ pollution in China[J]. *China Environmental Science*, 2016, 36(12): 3531–3539.
- [9] 赵天良, 柳笛, 李恬, 等. 农业活动大气污染物排放及其大气环境效应研究进展[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(28): 144–152.
ZHAO Tian-liang, LIU Di, LI Tian, et al. Progress of study on atmospheric pollutant emissions from agricultural activity and their effect on atmospheric environment[J]. *Science Technology and Engineering*, 2016, 16(28): 144–152.
- [10] Silaban R, Sumiati S, Adrizal A, et al. Nitrogen and ammonia mitigation on laying hen farms: Effects of low-protein diet and manure filtering[J]. *International Journal of Poultry Science*, 2017, 16(4): 125–131.
- [11] Hansen C F, Sørensen G, Lyngbye M. Reduced diet crude protein level, benzoic acid and inulin reduced ammonia, but failed to influence odour emission from finishing pigs[J]. *Livestock Science*, 2007, 109(1): 228–231.
- [12] 刘国华, 杨桂芹, 田河, 等. 以可消化氨基酸为基础配制日粮对蛋鸡粪便理化特性的影响[J]. 饲料博览, 2006(11): 5–8.
LIU Guo-hua, YANG Gui-qin, TIAN He, et al. Effects of well-balanced diet of digestible amino acids on physical and chemical characteristics of layer feces[J]. *Feed Review*, 2006(11): 5–8.
- [13] 李路路, 董红敏, 朱志平, 等. 酸化处理对猪场原水和沼液存储过程中气体排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(4): 774–784.
LI Lu-lu, DONG Hong-min, ZHU Zhi-ping, et al. Effects of acidification on gas emissions from raw pig slurry and biogas liquid during storage[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(5): 774–784.
- [14] Sommer S G, Clough T J, Balaine N, et al. Transformation of organic matter and the emissions of methane and ammonia during storage of liquid manure as affected by acidification[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2017, 46(3): 514–521.
- [15] 朱海生, 左福元, 董红敏, 等. 覆盖材料和厚度对堆存牛粪氨气和温室气体排放的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(6): 223–229.
ZHU Hai-sheng, ZUO Fu-yuan, DONG Hong-min, et al. Effects of covering materials and sawdust covering depths on ammonia and greenhouse gases emissions from cattle manure during storage[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(6): 223–229.
- [16] Holly M A, Larson R A. Thermochemical conversion of biomass storage covers to reduce ammonia emissions from dairy manure[J]. *Water Air & Soil Pollution*, 2017, 228(11): 434.
- [17] 宋增廷, 董晓芳, 佟建明, 等. 醋糟的营养价值及其在饲料生产中的应用[J]. 中国畜牧杂志, 2011, 47(9): 73–76.
SONG Zeng-ting, DONG Xiao-fang, TONG Jian-ming, et al. Research advances in nutritional value and application of waste vinegar residue in feedstuff[J]. *Chinese Journal of Animal Science*, 2011, 47(9): 73–76.
- [18] 陈晓寅, 王振斌, 马海乐, 等. 醋糟的利用现状及前景[J]. 中国酿

- 造, 2010, 29(10):1-4.
- CHEN Xiao-yin, WANG Zhen-bin, MA Hai-le, et al. Situation and prospect of the utilization of vinegar residue[J]. *China Brewing*, 2010, 29(10):1-4.
- [19] Hansen M N, Henriksen K, Sommer S G. Observations of production and emission of greenhouse gases and ammonia during storage of solids separated from pig slurry: Effects of covering[J]. *Atmospheric Environment*, 2006, 40(22):4172-4181.
- [20] 马双双, 孙晓曦, 韩鲁佳, 等. 功能膜覆盖好氧堆肥过程氨气减排性能研究[J]. 农业机械学报, 2017, 48(11):344-349.
- MA Shuang-shuang, SUN Xiao-xi, HAN Lu-jia, et al. Reduction of ammonia emission during membrane-covered aerobic composting[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(11):344-349.
- [21] 江滔, Schuchardt F, 李国学. 冬季堆肥中翻堆和覆盖对温室气体和氨气排放的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(10):212-217.
- JIANG Tao, Schuchardt F, LI Guo-xue. Effect of turning and covering on greenhouse gas and ammonia emissions during the winter composting[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27(10):212-217.
- [22] 张楠. 不同添加剂对牛粪存储的保氮和气体减排效果研究[D]. 保定:河北农业大学, 2017.
- ZHANG Nan. Effect of different additives on nitrogen preservation and gas emission reduction of dairy manure during storage[D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2017.
- [23] 王悦. 猪场沼液贮存过程碳氮气体排放及机理研究[D]. 北京:中国农业科学院, 2016.
- WANG Yue. Emission and mechanism study of carbonaceous and nitrogenous gases from the storage of pig manure based biogas digester effluent[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2016.
- [24] 马玉胜, 宋志福. 炎夏奶牛日粮中添喂苏打的试验效果[J]. 饲料研究, 1992(6):22-23.
- MA Yu-sheng, SONG Zhi-fu. The effect of adding soda to the diet of cows in hot summer[J]. *Feed Research*, 1992(6):22-23.
- [25] 姜新有, 王晓东, 周江明, 等. 初始pH值对畜禽粪便和菌渣混合高温堆肥的影响[J]. 浙江农业学报, 2016, 28(9):1595-1602.
- JIANG Xin-you, WANG Xiao-dong, ZHOU Jiang-ming, et al. Effects of initial pH values on maturity and nitrogen loss during co-composting of pig manure and edible fungus residue[J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2016, 28(9):1595-1602.
- [26] Nakasaki K, Yaguchi H, Sasaki Y, et al. Effects of pH control on composting of garbage[J]. *Waste Management & Research*, 1993, 11(2):117-125.
- [27] 施宠, 张小娥, 沙依甫加玛丽, 等. 牛粪堆肥不同处理全N、P、K及有机质含量的动态变化[J]. 中国牛业科学, 2010, 36(4):26-29.
- SHI Chong, ZHANG Xiao-e, Shayifujiamali, et al. Dynamic changes of total N, P, K and organic matter by different treatments on cattle manure composting[J]. *China Cattle Science*, 2010, 36(4):26-29.
- [28] 高凌飞, 王义祥, 叶菁, 等. 堆肥过程中碳、氮转化与温室气体排放研究进展[J]. 福建农业学报, 2014(8):803-814.
- GAO Ling-fei, WANG Yi-xiang, YE Qing, et al. Progress on carbon- and nitrogen-transformation and greenhouse gas emission in composting[J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2014(8):803-814.
- [29] 崔耀明, 董晓芳, 佟建明, 等. 山西老陈醋醋糟中有机酸含量分析[J]. 饲料工业, 2015, 36(9):22-25.
- CUI Yao-ming, DONG Xiao-fang, TONG Jian-ming, et al. Analysis on the content of organic acids in vinegar residue[J]. *Feed Industry*, 2015, 36(9):22-25.