

朱海生, 董红敏, 栾冬梅, 等. 贮存高度和锯末覆盖厚度对猪粪 NH_3 和温室气体排放量及其增温潜势的影响[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(4): 937-943.

ZHU Hai-sheng, DONG Hong-min, LUAN Dong-mei, et al. The effects of stack height and sawdust covering depth on ammonia and greenhouse gas emissions from swine manure and global warming potential[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(4): 937-943.

贮存高度和锯末覆盖厚度对猪粪 NH_3 和温室气体排放量及其增温潜势的影响

朱海生¹, 董红敏², 栾冬梅³, 蒲德伦¹, 袁 丰¹

(1. 西南大学动物科学学院, 重庆 402460; 2. 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081; 3. 东北农业大学动物科学技术学院, 哈尔滨 150030)

摘 要:为研究贮存高度和锯末覆盖厚度对猪粪 NH_3 和温室气体排放量及其增温潜势的影响, 以猪粪为贮存材料, 锯末为覆盖材料, 试验设 2 种猪粪贮存高度 (20 cm 和 40 cm) 和 3 种锯末覆盖厚度 (0、10 cm 和 20 cm), 共 6 个处理, 每个处理 3 个重复。通过动态箱技术对猪粪贮存过程中 NH_3 和温室气体排放进行不间断测试, 每小时测量一次进气口和排气口 NH_3 、 N_2O 、 CH_4 和 CO_2 的质量浓度, 进而计算增温潜势, 共测量 42 d。结果表明: 猪粪便的贮存高度对各种气体排放量均有显著影响, 与 20 cm 贮存高度的猪粪相比, 40 cm 贮存高度猪粪的 NH_3 、 N_2O 和 CO_2 排放量显著降低, 而 CH_4 排放量显著增加。锯末覆盖降低了猪粪贮存过程中 NH_3 和 CO_2 的排放量, 但是增加了 CH_4 的排放量; 锯末覆盖对不同贮存高度猪粪 N_2O 排放量影响不同, 锯末覆盖增加了 20 cm 贮存高度猪粪 N_2O 排放量, 却降低了 40 cm 贮存高度猪粪 N_2O 排放量。各处理组单位质量猪粪排放的总温室气体增温潜势为 $36.62\sim 62.83 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (CO_2 基础)。覆盖可以减少猪粪贮存过程中总温室气体增温潜势 11.59%~23.61%, 但差异不显著。与 20 cm 贮存高度的猪粪相比, 40 cm 贮存高度显著降低了猪粪总温室气体增温潜势达 36.26%~41.48%。研究表明, 增加猪粪贮存高度可以减少猪粪贮存过程中总温室气体的增温潜势。

关键词:猪粪; 贮存高度; 锯末覆盖厚度; NH_3 和温室气体排放

中图分类号: X713 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2019)04-0937-07 doi:10.11654/jaes.2018-0728

The effects of stack height and sawdust covering depth on ammonia and greenhouse gas emissions from swine manure and global warming potential

ZHU Hai-sheng¹, DONG Hong-min², LUAN Dong-mei³, PU De-lun¹, YUAN Feng¹

(1. College of Animal Science, Southwest University, Chongqing 402460, China; 2. Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; 3. College of Animal Science and Technology, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: To study the effects of stack height and sawdust covering depth on ammonia and greenhouse gas (GHG) emissions from swine manure, and the global warming potential, two stack heights (20 cm and 40 cm) of swine manure and three covering depths of sawdust (0, 10 cm, and 20 cm) were selected to form six treatments. Each treatment was carried out in triplicate. Continuous measurements of ammonia and GHG emissions were carried out using a dynamic system. The experiment lasted 42 days. The results showed that a higher manure stack (40 cm) significantly reduced NH_3 , N_2O , and CO_2 emissions, in terms of emissions per kilogram initial manure. However, CH_4 emissions showed a completely different trend from that of the NH_3 , N_2O , and CO_2 emissions. Sawdust covering reduced the cumulative NH_3 and

收稿日期: 2018-06-02 录用日期: 2018-11-20

作者简介: 朱海生 (1976—), 男, 黑龙江巴彦人, 博士, 副教授, 主要从事农业生物环境研究。E-mail: zhs19761228@163.com

基金项目: 西南大学校地合作项目 (41005617)

Project supported: Project for Cooperation of Southwest University-Local Government (41005617)

CO₂ emissions from swine manure during storage, in terms of emissions per kilogram initial manure, but simultaneously increased the cumulative CH₄ emissions. Sawdust covering had different effects on the N₂O emissions from swine manure at different stack heights. The covering increased the cumulative N₂O emission for the 20 cm stack height of swine manure, but reduced it for the 40 cm stack height. The cumulative GHG emissions from swine manure were 36.62~62.83 g·kg⁻¹ of initial manure weight (based on CO₂). Sawdust covering reduced the total GHG emission by 11.59%~23.61%, but there was no significant difference between covered and uncovered samples. Compared with that for the 20 cm stack height of swine manure, the total GHG emission reduction was 36.26%~41.48% for the 40 cm stack height. A higher stack produced the least GHG emissions from swine manure during storage.

Keywords: swine manure; stack heights; sawdust covering depths; ammonia and greenhouse gas emissions

农业生产活动会导致大气中温室气体(CH₄、N₂O、CO₂)含量的增加^[1]。除此之外,NH₃也是农业生产过程中排放的重要气体,NH₃不仅造成间接的温室效应,而且会导致土壤的酸化和水体的富营养化^[2]。我国每年会产生大约12亿t的固体粪便,大约80%的固体粪便会在舍外贮存或处理,而且贮存高度大多不超过0.5 m^[3]。粪便贮存过程中排放的NH₃和温室气体已成为农业温室气体的重要组成部分^[4-5]。如何有效控制粪便贮存过程中气体排放至关重要。

粪便贮存过程中的气体排放受粪便性质、环境温度、贮存高度以及覆盖等多种因素的影响^[6-13]。不同的研究由于试验材料、环境温度和试验周期的不同而结果有所差异。针对粪便贮存过程中气体排放的影响研究大多集中在液体粪便贮存上,而对固体粪便的研究较少。从目前的研究来看,前人的研究或针对不同堆肥高度下温室气体排放进行了研究^[3,7-9],或针对覆盖对气体排放影响进行了研究^[10-11],而缺乏两者相结合对粪便堆肥过程中气体排放影响的研究。因此本研究在前期研究的基础上,采用动态箱技术,探讨贮存高度和覆盖厚度对猪粪贮存过程中NH₃和温室气体排放及其增温潜势的影响,为NH₃和温室气体减排措施的制定提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验在西南大学荣昌校区实习牧场进行,试验用猪粪来自实习牧场生长育肥猪舍。试验从2015年11月27日开始,至2016年1月7日结束,试验期为42 d。

试验设置2种猪粪贮存高度(H),分别为20 cm和40 cm,3种覆盖厚度(C),分别为0、10 cm和20 cm,共6个处理,即:(1)贮存高度20 cm,无覆盖(H20C0);(2)贮存高度20 cm,覆盖厚度10 cm(H20C10);(3)贮存高度20 cm,覆盖厚度为20 cm(H20C20);(4)贮存高度40 cm,无覆盖(H40C0);(5)

贮存高度40 cm,覆盖厚度为10 cm(H40C10);(6)贮存高度40 cm,覆盖厚度为20 cm(H40C20)。试验前,将收集的新鲜猪粪充分混合后,按照试验设计装入箱内,对于覆盖处理组,分别按照试验设计在猪粪上覆盖10 cm和20 cm厚的锯末。堆积高度20 cm的猪粪质量为11.99 kg;堆积高度40 cm的猪粪质量为24.07 kg。每个处理设3个重复。

1.2 动态箱设置及气体测量

温室气体排放的监测方法参考Dong等^[3]使用的动态箱监测技术。动态箱是由PVC管制成的圆筒,高为90 cm,内径为30.7 cm。桶内安装1个12 V的风扇。进气口设在桶的上部中央位置处,出气口设在桶的侧面,出气口高度略高于堆体高度。由于堆积高度和覆盖厚度的不同,粪便上方的气体体积从22.20 L到51.79 L不等,本试验通风量设置为20次·h⁻¹的气体交换率,这是参考Li等^[6]的研究结果,在该研究中发现,每小时气体交换率为10次·h⁻¹和20次·h⁻¹对气体排放没有显著差异。使用INNOVA 1409-24多点采样仪(LumaSense Technologies A/S, Ballerup, Denmark)将新鲜空气和出气口气体分别输送至INNOVA 1412i多种气体分析仪(LumaSense Technologies A/S, Ballerup, Denmark)进行测量,该仪器对NH₃、N₂O、CH₄和CO₂的检测下限分别为0.14、0.05、0.13 mg·kg⁻¹和9.15 mg·kg⁻¹,测试前,使用标准气体对仪器进行标定(NH₃: 28.64 mg·kg⁻¹; N₂O: 9.19 mg·kg⁻¹; CH₄: 29.95 mg·kg⁻¹; CO₂: 6 405.72 mg·kg⁻¹)。每小时完成18个桶的测试循环1次,每天测试24次,测试周期为42 d。猪粪每种气体(NH₃、N₂O、CH₄和CO₂)的排放速率由公式(1)计算得出。

$$F = \sum [(C_{no} - C_{ni})V]/W \quad (1)$$

式中: F 为单位质量猪粪的某种气体排放速率,mg·kg⁻¹·d⁻¹; C_{no} 为第 n ($n=1 \rightarrow 24$)小时出气口的某种气体质量浓度,mg·m⁻³; C_{ni} 为第 n ($n=1 \rightarrow 24$)小时进气口某种气体质量浓度,mg·m⁻³; V 为通风量,用通风管道的

截面积乘以风速求得, $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$; W 为初始粪便质量, kg 。

通过累加每天的排放速率求得整个试验期内单位质量猪粪每种气体的累积排放量, 单位为 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 或 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

根据 CH_4 和 N_2O 在 100 年尺度上的增温潜势分别为 CO_2 的 28 倍和 265 倍^[12], 得出每千克猪粪 CH_4 和 N_2O 累积排放量的 CO_2 当量。此外, 考虑到沉降的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 会有 1% 转化为 $\text{N}_2\text{O-N}$ ^[13], 因此, 先将 $\text{NH}_3\text{-N}$ 转化为 $\text{N}_2\text{O-N}$, 再计算出每千克猪粪总温室气体增温潜势, 见公式(2)。

$$E_{\text{CO}_2\text{eq}} = E_{\text{CO}_2} + 28E_{\text{CH}_4} + 265(E_{\text{N}_2\text{O}} + 0.01E_{\text{NH}_3\text{-N}} \times 44/28) \quad (2)$$

式中: $E_{\text{CO}_2\text{eq}}$ 为增温潜势, $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 以 CO_2 计; E_{CO_2} 为 CO_2 的累积排放量, $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$; E_{CH_4} 为 CH_4 的累积排放量, $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$; $E_{\text{N}_2\text{O}}$ 为 N_2O 的累积排放量, $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$; $E_{\text{NH}_3\text{-N}}$ 为 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的累积排放量, $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

1.3 粪便的性质分析

试验开始前将猪粪充分混合, 采集大约 500 g 猪粪样品, 分析其水分和干物质(Dry matter, DM, 105 °C 烘干)^[14]、总氮(Total nitrogen, TN, H_2SO_4 -混合加速剂

蒸馏法)及有机碳(Total organic carbon, TOC, 高温外热重铬酸钾氧化容量法)含量^[15]。得到粪便的含水率为 74.81%, 干物质含量为 $251.88 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 总有机碳为 $798.44 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、总氮为 $28.41 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

1.4 数据分析

数据采用 Excel 2007 进行处理, 试验结果为平均值 $\pm$ 标准差。采用 SPSS 17 对数据进行差异显著性分析。

2 结果与讨论

2.1 环境温湿度

试验过程中的环境温度为 7.50~15.20 °C, 平均值为 11.56 °C (标准偏差为 1.65 °C); 相对湿度为 56.50%~93.90%, 平均值为 85.77% (标准偏差为 5.10%)。见图 1。

2.2 NH₃的排放

NH_3 的排放模式如图 2 所示。不覆盖的 2 个处理组排放量呈现出先升高后降低的趋势, 而 4 个覆盖处理组一直维持在较低的排放水平。在相同的覆盖厚

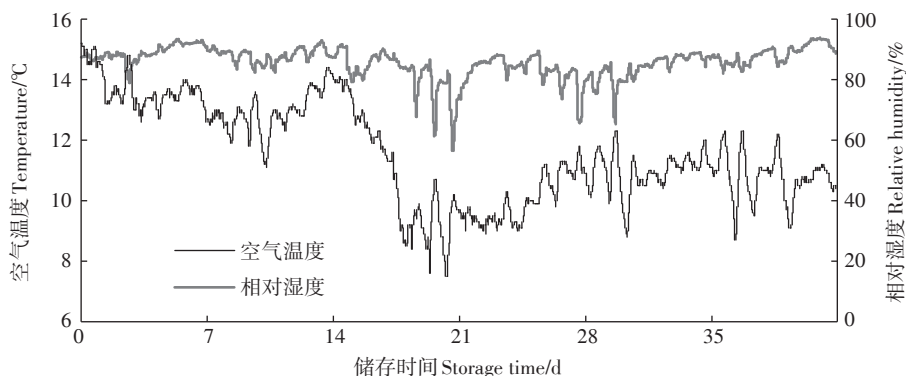


图1 猪粪储存期间环境温湿度变化

Figure 1 Evolution of air temperature and relative humidity during storage of swine manure

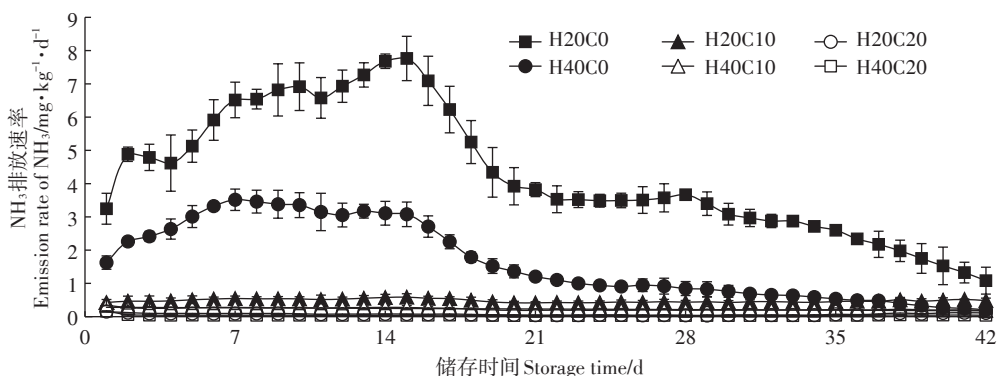


图2 猪粪储存期间NH₃排放速率变化

Figure 2 Evolution of emission rate of NH_3 during storage of swine manure

度下,与20 cm贮存高度相比,40 cm贮存高度单位质量猪粪的 NH_3 累积排放量分别下降了110.55(不覆盖)、10.56(10 cm锯末覆盖)、 $1.45 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (20 cm锯末覆盖),下降比例分别为61.52% ($P < 0.05$)、52.40% ($P > 0.05$)、45.43% ($P > 0.05$)。与不覆盖处理相比,覆盖明显降低了 NH_3 的累积排放量。整个42 d的试验期,对于猪粪贮存高度为20 cm的处理组来说,10 cm和20 cm锯末覆盖分别降低单位质量猪粪 NH_3 累积排放量达88.78%和98.23% ($P < 0.05$);对于猪粪贮存高度为40 cm的处理组来说,与不覆盖相比,10 cm和20 cm锯末覆盖分别降低单位质量猪粪 NH_3 累积排放量达86.12%和97.49% ($P < 0.05$)。覆盖厚度越大, NH_3 累积排放量越低。

粪便贮存过程中 NH_3 的排放受环境温度、粪便性质、粪便管理措施等多种因素的影响^[6,11,18-19]。在本试验中,40 cm贮存高度单位质量猪粪 NH_3 的累积排放量低于20 cm贮存高度,单位质量粪便 NH_3 的累积排放量会随着粪便贮存高度的增加而下降,这与Li等^[6]使用鸡粪进行的试验结论一致。这可能是由于粪便堆积高度增加,抑制了下部粪便 NH_3 的排放。覆盖进一步降低了单位质量猪粪 NH_3 的累积排放量,这与之前的一些研究结果相似^[20-23],如Clanton等^[20]使用稻草覆盖猪粪的研究结果表明 NH_3 的排放量下降了37%~86%。本试验中,覆盖降低了单位质量猪粪的 NH_3 累积排放量达86.12%~98.23%,与其他一些研究结果略有差异,这可能与使用的覆盖材料或者覆盖厚度不同有关。覆盖之所以能降低 NH_3 的排放可能是由于覆盖抑制了表面粪便 NH_3 向大气排放,随着堆体高度和覆盖厚度的增加,抑制作用增强;另外可能是由于覆盖材料对 NH_3 具有一定的吸附作用^[20],因而降低了

NH_3 的排放。

2.3 N_2O 的排放

猪粪贮存初期, N_2O 排放速率处于较低的水平,大约1星期后开始缓慢升高,到试验的第5个星期左右达到排放高峰,此后开始下降(图3)。在相同的覆盖厚度下,与20 cm贮存高度相比较,40 cm贮存高度单位质量猪粪 N_2O 累积排放量分别下降了6.94(不覆盖)、19.16(10 cm锯末覆盖)、 $21.11 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (20 cm锯末覆盖),下降比例分别为20.96%、45.89%、50.80% ($P < 0.05$)。覆盖处理对于不同贮存高度的单位质量猪粪 N_2O 累积排放量影响不同。覆盖处理增加了20 cm贮存高度的单位质量猪粪 N_2O 累积排放量,与不覆盖相比,10 cm和20 cm锯末覆盖分别增加单位质量猪粪 N_2O 累积排放量达26.19%和25.59% ($P < 0.05$);然而,覆盖处理却降低了40 cm贮存高度单位质量猪粪的 N_2O 累积排放量,与不覆盖处理相比,20 cm锯末覆盖显著降低单位质量猪粪 N_2O 累积排放量达21.82% ($P < 0.05$),10 cm锯末覆盖减少单位质量猪粪 N_2O 累积排放量达13.61%,但差异不显著 ($P > 0.05$)。

粪便 N_2O 产生于不完全的硝化和反硝化过程,严格的好氧条件和厌氧条件下不容易产生 N_2O ^[25]。以前的研究报道了关于覆盖对粪便 N_2O 排放量的影响,陆日东等^[26]通过奶牛粪便堆积试验发现,覆盖降低了牛粪 N_2O 排放量。早期的研究发现,锯末覆盖增加了牛粪 N_2O 的累积排放量^[10-11]。在本研究中,覆盖增加了20 cm贮存高度单位质量猪粪 N_2O 的累积排放量,但降低了40 cm贮存高度单位质量猪粪 N_2O 的累积排放量。由于 O_2 通过自然扩散可以进入堆体内部达25 cm,虽然锯末有一定的阻隔作用,但堆体较低(20 cm),不能抑制堆体的氧化。因此较低的堆体氧化较

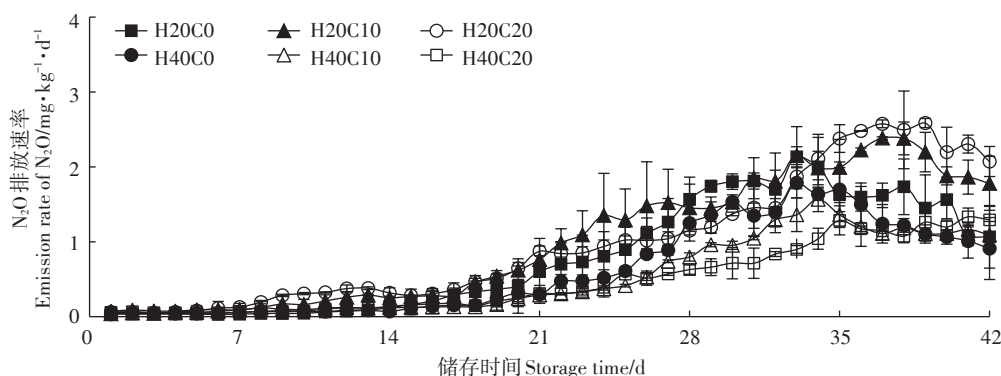


图3 猪粪储存期间 N_2O 排放速率变化

Figure 3 Evolution of emission rate of N_2O during the storage of swine manure

充分,可以形成更多的硝酸盐;而对于较高的堆体(40 cm),由于空气不能进入堆体下部,导致氧化不充分,形成的硝酸盐较少,而锯末的阻隔作用进一步降低了O₂供应,从而减少了硝酸盐形成,因此,降低了N₂O的产生。与20 cm贮存高度相比,40 cm贮存高度单位质量猪粪N₂O的累积排放量降低了20.96%~50.80%,这与Dong等^[3]的研究结论相一致,他们的研究表明,40 cm高的猪粪较20 cm高猪粪N₂O累积排放量下降了28%。不同研究结果的差异可能与粪便性质、堆体高度以及覆盖材料和厚度有关。应该对堆体内部的O₂含量以及微生物活动进行研究,以便更好地说明问题。

2.4 CH₄的排放

CH₄的排放表现为贮存前期排放速率较高,后期排放速率较低(图4),这与Dong等^[3]的研究变化趋势相一致。在相同的覆盖厚度下,CH₄累积排放量随堆积高度的增加而显著增大。与20 cm贮存高度相比较,40 cm贮存高度单位质量猪粪CH₄累积排放量分别增加了132.87(不覆盖)、118.72(10 cm 锯末覆盖)、133.57 mg·kg⁻¹(20 cm 锯末覆盖),增加比例分别为208.45%、77.15%、70.12%(*P*<0.05)。对于20 cm贮存高度猪粪来说,10 cm和20 cm 锯末覆盖分别增加单位质量猪粪CH₄累积排放量达141.44%和198.86%(*P*<0.05);对于40 cm贮存高度猪粪来说,10 cm和20 cm 锯末覆盖分别增加单位质量猪粪CH₄累积排放量达38.66%和64.83%(*P*<0.05);单位质量猪粪CH₄累积排放量随覆盖厚度增加而增大。

CH₄是微生物厌氧发酵的主要产物。本试验中,与20 cm堆高猪粪相比,40 cm堆高的猪粪CH₄排放量显著增加,而且,覆盖进一步增加了CH₄的排放量,随着覆盖厚度的增加,CH₄排放量也增大。以前的研究

结果也证实了这一点,Li等^[6]使用鸡粪、Dong等^[3]使用猪粪、Wang等^[9]使用牛粪的试验都表明,较高的堆体会排放出更多的CH₄。因为,较高的堆体更容易保持堆体内部的水分和厌氧环境,因此会促进CH₄的生成和排放。由于覆盖可以抑制堆体与空气的接触,强化了厌氧条件,CH₄产生量因而增加。朱海生等^[10]使用牛粪的堆积试验表明,较高的堆体和覆盖都可以增加CH₄的排放量;Berg等^[27]通过覆盖液体猪粪的试验也证实了覆盖增加了CH₄的排放量,此外,Amon等^[28]在使用稻草覆盖奶牛场的污水试验中发现,稻草覆盖增加了21.70%的CH₄排放量。因此,随着堆体高度和覆盖厚度的增加,厌氧程度进一步加大,CH₄累积排放量也逐渐增加。

2.5 CO₂的排放

CO₂的排放趋势与CH₄相似,初期排放速率较高,此后逐渐下降(图5)。在相同的覆盖厚度下,与20 cm贮存高度的猪粪相比,40 cm贮存高度猪粪CO₂累积排放量分别下降了27.27(不覆盖)、24.27(10 cm 锯末覆盖)、20.94 g·kg⁻¹(20 cm 锯末覆盖),下降比例分别为45.53%、51.22%、48.64%,差异显著(*P*<0.05)。覆盖处理降低了单位质量猪粪CO₂的累积排放量。对于20 cm贮存高度的猪粪来说,与不覆盖相比,10 cm和20 cm 锯末覆盖分别降低单位质量猪粪CO₂累积排放量达12.51 g·kg⁻¹和16.83 g·kg⁻¹,降低比例分别为20.89%和28.10%,但10 cm 锯末覆盖与不覆盖之间差异不显著(*P*>0.05),20 cm 锯末覆盖与不覆盖之间差异显著(*P*<0.05);对于40 cm贮存高度的猪粪来说,10 cm和20 cm 锯末覆盖分别降低单位质量猪粪CO₂累积排放量达9.51 g·kg⁻¹和10.51 g·kg⁻¹,降低比例分别为29.15%和32.20%,但差异均不显著(*P*>0.05)。

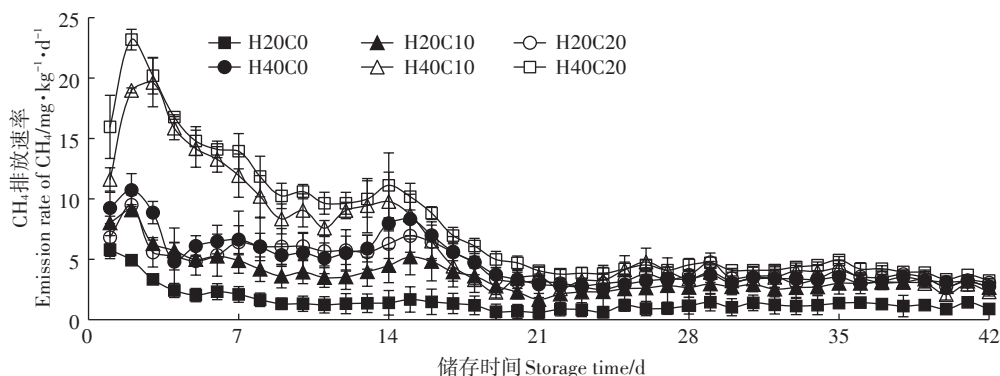
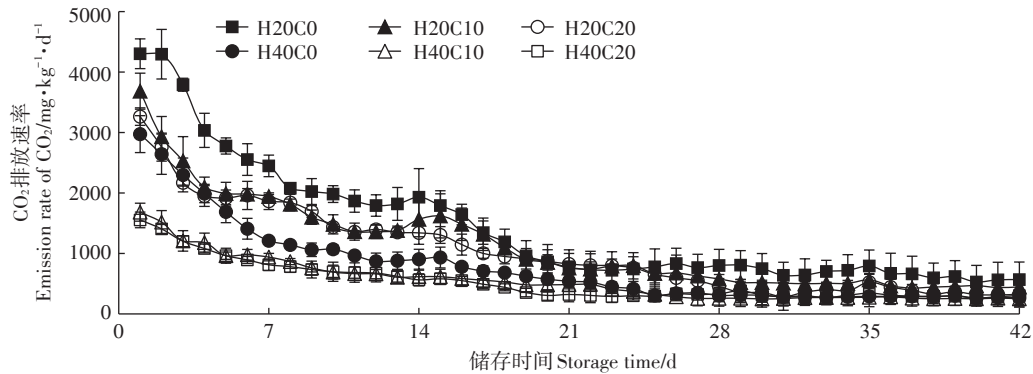


图4 猪粪储存期间CH₄排放速率变化

Figure 4 Evolution of emission rate of CH₄ during the storage of swine manure

图5 猪粪储存期间CO₂排放速率变化Figure 5 Evolution of emission rate of CO₂ during the storage of swine manure

本试验中,较高的堆体(40 cm)单位质量猪粪产生较少的CO₂,这与之前的研究结论相似,在Dong等^[3]的研究中发现,40 cm高的猪粪堆体比20 cm高的堆体累积CO₂排放量下降了16%。对于固体粪便来说,CO₂的产生主要来源于微生物好氧分解有机物质^[29],较低的堆体更容易与外界进行气体交换,因此CO₂的产生量较高,而较高的堆体下层不能充分接触O₂,所以单位质量牛粪的CO₂产生量较低。覆盖阻止了空气与粪便表面的接触,减少了CO₂的排放量。因此,随着堆体高度和覆盖厚度的增加,CO₂累积排放量降低。

2.6 增温潜势

不同处理下每千克猪粪总温室气体增温潜势如表1所示。覆盖虽然降低2种贮存高度猪粪总温室气体增温潜势达11.59%~23.61%,但差异均不显著($P>0.05$)。贮存高度对增温潜势产生了显著影响,与20 cm贮存高度的猪粪相比,40 cm贮存高度猪粪总温室气体增温潜势分别下降了22.80~26.06 g·kg⁻¹(CO₂基础),降低比例达36.26%~41.48%($P<0.05$)。

3 结论

(1)CO₂是猪粪贮存过程中排放的最主要温室气

体,NH₃的温室效应较小。

(2)各处理组的单位质量猪粪总温室气体增温潜势为36.62~71.06 g·kg⁻¹(CO₂基础)。猪粪贮存高度越高,排放的总温室气体增温潜势越小。覆盖可以减少猪粪贮存过程中总温室气体增温潜势。

(3)为了减少猪粪贮存过程中温室气体的排放,建议采用覆盖处理并增加贮存高度。

参考文献:

- [1] Mathot M, Decruyenaere V, Lambert R. Deep litter removal frequency rate influences on greenhouse gas emissions from barns for beef heifers and from manure stores[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2016, 233(1):94-105.
- [2] Sommer S G, Pedersen S O, Sogaard H T. Greenhouse gas emissions from stored livestock slurry[J]. *J Environ Qual*, 2000, 29(3):744-751.
- [3] 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 and Technology*, 2011, 166/167:557-561.
- [4] Mosier A, Kroeze C, Nevison C, et al. Closing the global N₂O budget: Nitrous oxide emissions through the agricultural nitrogen cycle-OECD/IPCC/IEA phase II development of IPCC guidelines for national greenhouse gas inventory methodology[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1998, 52(2/3):225-248.

表1 猪粪贮存期间温室气体增温潜势(g·kg⁻¹,CO₂基础)Table 1 Global warming potential during swine manure storage(g·kg⁻¹,Based on CO₂)

处理 Treatments	NH ₃	N ₂ O	CH ₄	CO ₂	Total
H20C0	0.62±0.02a	8.77±0.75b	1.78±0.67c	59.89±7.00a	71.06±8.44a
H20C10	0.07±0.01c	11.07±0.79a	4.31±0.89b	47.38±3.13ab	62.83±1.46a
H20C20	0.01±0.01d	11.01±0.57a	5.33±0.86b	43.06±3.40bc	59.42±1.98a
H40C0	0.24±0.03b	6.93±0.70c	5.51±0.50b	32.62±3.02cd	45.30±3.20b
H40C10	0.03±0.0cd	5.99±0.30cd	7.63±1.03a	23.11±4.96d	36.77±4.23b
H40C20	0.01±0d	5.42±0.05d	9.07±0.51a	22.12±3.79d	36.62±3.22b

注:同列不同字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。

Note: The different letters in a column indicate significant differences among different treatments at $P<0.05$.

- [5] Steed J, Hashimoto A G. Methane emissions from typical manure management—systems[J]. *Bioresource Technology*, 1994, 50(2):123–130.
- [6] Li H, Xin H W. Lab-scale assessment of gaseous emissions from laying-hen manure storage as affected by physical and environmental factors[J]. *Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 2010, 53(2):593–604.
- [7] 游玉波, 董红敏, 朱志平, 等. 堆积肉牛粪便甲烷排放影响因子试验[J]. 农业工程学报, 2008, 24(12):168–172.
YOU Yu-bo, DONG Hong-min, ZHU Zhi-ping, et al. Experiments on influencing factors of methane emissions from beef cattle manure stack [J]. *Transactions of the CSAE*, 2008, 24(12):168–172.
- [8] 陆日东, 李玉娥, 石 锋, 等. 不同堆放方式对牛粪温室气体排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(3):1235–1241.
LU Ri-dong, LI Yu-e, SHI Feng, et al. Effect of compost on the greenhouse gases emission from dairy manure[J]. *Journal Agro-Environment Science*, 2008, 27(3):1235–1241.
- [9] Wang J J, Duan C Q, Ji Y Q, et al. Methane emissions during storage of different treatments from cattle manure in Tianjin[J]. *Journal of Environmental Science*, 2010, 22(10):1564–1569.
- [10] 朱海生, 董红敏, 左福元, 等. 覆盖及堆积高度对肉牛粪便温室气体排放的影响[J]. 农业工程学报, 2014, 30(24):225–231.
ZHU Hai-sheng, DONG Hong-min, ZUO Fu-yuan, et al. Effect of covering on greenhouse gas emissions from beef cattle solid manure stored at different stack heights[J]. *Transactions of the CSAE*, 2014, 30(24):225–231.
- [11] 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 gas emissions from cattle manure during storage[J]. *Transactions of the CSAE*, 2015, 31(6):223–229.
- [12] IPCC. Climate change[M]//Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. UK:Cambridge University Press, 2013:714.
- [13] Hayashi K, Nishimur S, Yagi K. Ammonia volatilization from a paddy field following applications of urea; Rice plants are both an absorber and an emitter for atmospheric ammonia[J]. *Science of the Total Environment*, 2008, 390(2/3):485–494.
- [14] 中华人民共和国农业部. 有机肥水分的测定 NY 525—2012[S]. 北京: 中国标准出版社, 1995.
Ministry of Agriculture of PRC. Test methods of moisture content of organic fertilizer NY/T 1302—1995[S]. Beijing: China Standards Press, 1995.
- [15] 中华人民共和国农业部. 有机肥料 NY/T 302—1995[S]. 北京: 中国标准出版社, 1995.
Ministry of Agriculture of PRC. Organic fertilizer NY 525—2012[S]. Beijing: China Standards Press, 2012.
- [16] Viguria M, Sanz-Cobena A, María L D, et al. Ammonia and greenhouse gases emission from impermeable covered storage and land application of cattle slurry to bare soil[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2015, 199:261–271.
- [17] Browne J D, Gilkinson S R, Frost J P. The effects of storage time and temperature on biogas production from dairy cow slurry[J]. *Biosystems Engineering*, 2015, 129(1):48–56.
- [18] Pratt E V, Rose S P, Keeling A A. Effect of ambient temperature on losses of volatile nitrogen compounds from stored laying hen manure [J]. *Bioresource Technology*, 2002, 84(2):203–205.
- [19] Carr L E, Wheaton F W, Douglass L W. Empirical models to determine ammonia concentrations from broiler chicken litter[J]. *Transactions of the ASAE*, 1990, 33(4):1337–1340.
- [20] Clanton C J, Schmidt D R, Nicolai R E, et al. Geotextile fabric—straw manure storage covers for odor, hydrogen sulfide and ammonia control [J]. *Applied Engineering for Agriculture*, 2001, 17(6):849–858.
- [21] Chadwick D R. Emissions of ammonia, nitrous oxide and methane from cattle manure heaps: Effect of compaction and covering[J]. *Atmospheric Environment*, 2005, 39(4):787–799.
- [22] Sommer S G, Christensen B T, Nielsen N E, et al. Ammonia volatilization during storage of cattle and pig slurry: Effect of surface cover[J]. *J Agric Sci*, 1993, 121(1):63–71.
- [23] Protejoie S, Martinez J, Guiziou F, et al. Effect of covering pig slurry stores on the ammonia emission processes[J]. *Bioresource Technology*, 2003, 87(3):199–207.
- [24] Phillips V R, Cowell D A, Sneath R W, et al. An assessment of ways to abate ammonia emissions from UK livestock buildings and waste stores. Part 1: Ranking exercise[J]. *Bioresource Technology*, 1999, 70(2):143–155.
- [25] Wrage N, Velthof G L, van Beusichem M L, et al. Role of nitrifier denitrification in the production of nitrous oxide[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2001, 33(12/13):1723–1732.
- [26] 陆日东, 李玉娥, 万运帆, 等. 堆放奶牛粪便温室气体排放及影响因素研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(8):198–204.
LU Ri-dong, LI Yu-e, WAN Yun-fan, et al. Emission of greenhouse gases from stored dairy manure and influence factors[J]. *Transactions of the CSAE*, 2007, 23(8):198–204.
- [27] Berg W, Brunsch R, Pazsiczki I. Greenhouse gas emissions from covered slurry compared with uncovered during storage[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2006, 112(2/3):129–134.
- [28] Amon B, Kryvoruchko V, Amon T, et al. Methane, nitrous oxide and ammonia emissions during storage and after application of dairy cattle slurry and influence of slurry treatment[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2006, 112(2/3):153–162.
- [29] Philippe F X, Nicks B. Review on greenhouse gas emissions from pig houses: Production of carbon dioxide, methane and nitrous oxide by animals and manure[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2015, 119(1):10–25.