

崔利利, 王效琴, 梁东丽, 等. 不同堆高奶牛粪便长期堆积过程中温室气体和氨排放特点[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(2): 376–382.

CUI Li-li, WANG Xiao-qin, LIANG Dong-li, et al. Greenhouse gas and ammonia emissions from different piling heights in long-term stacks of dairy manure [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(2): 376–382.

## 不同堆高奶牛粪便长期堆积过程中 温室气体和氨排放特点

崔利利<sup>1</sup>, 王效琴<sup>1,2\*</sup>, 梁东丽<sup>1,2</sup>, 段雪琴<sup>1</sup>, 刘松<sup>1</sup>, 赵加磊<sup>1</sup>

(1.西北农林科技大学资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 2.农业部西北植物营养与农业环境重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:**为定量评价牛粪长期堆积对大气环境的影响,分别采用静态箱-气相色谱和通气法测定了不同堆体高度(堆高)奶牛粪便41周堆积过程中CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O和NH<sub>3</sub>3种气体的排放量,分析了堆高对3种气体累积排放量以及温室效应和PM<sub>2.5</sub>的影响。结果表明,堆高对温室气体和NH<sub>3</sub>累积排放量的影响差异显著。堆高25 cm的CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O累积排放量显著低于堆高50 cm,但堆高对NH<sub>3</sub>累积排放量的影响正好相反。奶牛粪便长期堆积过程中CH<sub>4</sub>对温室效应贡献最大,贡献率为61.41%~63.97%,其次是N<sub>2</sub>O,贡献率为32.71%~33.70%,NH<sub>3</sub>对温室效应的贡献很小,仅为2.33%~5.88%。堆高25 cm的堆体温室效应显著低于堆高50 cm。堆高25 cm的堆体对PM<sub>2.5</sub>的影响显著高于50 cm。

**关键词:**奶牛粪便;堆高;温室气体;氨排放

中图分类号:X713 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2018)02-0376-07 doi:10.11654/jaes.2017-0963

### Greenhouse gas and ammonia emissions from different piling heights in long-term stacks of dairy manure

CUI Li-li<sup>1</sup>, WANG Xiao-qin<sup>1,2\*</sup>, LIANG Dong-li<sup>1,2</sup>, DUAN Xue-qin<sup>1</sup>, LIU Song<sup>1</sup>, ZHAO Jia-lei<sup>1</sup>

(1.College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2.Key Laboratory of Plant Nutrition and the Agri-environment in Northwest China, Ministry of Agriculture, Yangling 712100, China)

**Abstract:** The present study aimed to analyze the effects of piling height on greenhouse gas and NH<sub>3</sub> emissions during 41 weeks stacking of dairy manure, and the effects on global warming potential(GWP) and particulate matter 2.5 (PM<sub>2.5</sub>) were also investigated. Emissions of CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O were measured by the static chamber-gas chromatography technique and NH<sub>3</sub> was measured by the venting method. The results showed that CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O cumulative emissions from manure in stack heights of 50 cm were significantly higher than that of 25 cm. However, the opposite trend was shown for NH<sub>3</sub> emission. Methane was the largest contributor to GWP, accounting for 61.41%~63.97% of the total value, N<sub>2</sub>O being the second largest contributor at 32.71%~33.70%, and NH<sub>3</sub> contributing the least, accounting for only 2.33%~5.88%. GWP increased as stacking height increased from 25 cm to 50 cm, while PM<sub>2.5</sub> forming potential decreased significantly. The present study suggested that the choice of manure management measures should be taken into consideration for multiple environmental problems.

**Keywords:** cattle manure; stacking height; greenhouse gas; ammonia emission

近年,随着生活水平的提高,人们对肉蛋奶的需求量越来越大,畜禽养殖业也随之快速发展,从而产生的畜禽粪便越来越多。1978—2011年,中国畜禽养

殖业产生的粪便量增加了1.35倍,到2011年已高达25.45亿t<sup>[1]</sup>。畜禽粪便是中国农业源温室气体排放的主要来源之一<sup>[2]</sup>,也是中国NH<sub>3</sub>排放的重要来源,占

收稿日期:2017-07-08 录用日期:2017-09-27

作者简介:崔利利(1990—),女,河南焦作人,硕士研究生,从事农业源温室气体和氨排放研究。E-mail:cuililixn@163.com

\*通信作者:王效琴 E-mail:xqwang@nwsuaf.edu.cn

基金项目:国家自然科学基金项目(41201588);“十二五”国家科技支撑计划课题(2012BAD14B11);中央高校基本科研业务费专项基金(Z109021538)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(41201588); The National Science & Technology Pillar Program during the 12th Five-year Plan Period(2012BAD14B11); Fundamental Research Funds for the Central Universities(Z109021538)

全国  $\text{NH}_3$  排放总量的 40.79%~69.2%<sup>[3-4]</sup>。 $\text{NH}_3$  不仅间接影响全球变暖,还与大气中  $\text{SO}_2$  和  $\text{NO}_x$  等气体进行化学反应生成气溶胶粒子 [ $\text{NH}_4\text{NO}_3$ 、 $\text{NH}_4\text{HSO}_4$ 、 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  等],这些气溶胶粒子是  $\text{PM}_{2.5}$  的重要组成部分<sup>[5]</sup>,是形成雾霾天气的主要物质<sup>[6]</sup>。

畜禽粪便无论是自然堆积的堆肥过程还是工业化的堆肥处理都会产生温室气体和  $\text{NH}_3$ ,2008 年中国畜禽粪便进行工业化堆肥处理的比例约为 8.73%,多数长期堆积在养殖场内外或堆沤后还田<sup>[7-8]</sup>。目前,畜禽粪便温室气体和  $\text{NH}_3$  排放的研究主要集中在短时间内的堆肥处理(好氧堆肥、厌氧发酵和短时间内的自然堆积)<sup>[9-12]</sup>,而针对长期堆积过程中温室气体和  $\text{NH}_3$  排放的研究却未见报道。另外,现有研究主要分析堆肥处理对温室效应以及碳氮损失的影响,尚未见堆肥处理措施对大气环境中  $\text{PM}_{2.5}$  影响的研究,而  $\text{PM}_{2.5}$  是中国正面临的严峻环境问题之一。因此,应同时考虑温室效应和  $\text{PM}_{2.5}$ ,以更全面地评价畜禽粪便处理过程对大气环境的影响。

2010 年《第一次全国污染源普查公告》显示,奶牛场粪便产生量占中国畜禽养殖业粪便排放量的 23.5%<sup>[13]</sup>,奶牛场内奶牛粪便的堆积高度一般在 20~60 cm 之间。不同的堆体高度可通过影响堆体内氧气浓度、含水率以及温度等因素影响温室气体和  $\text{NH}_3$  的排放。因此,本试验以奶牛粪便为研究对象,研究牛粪在长期堆积状况下不同堆高的温室气体和  $\text{NH}_3$  排放特点及其对全球变暖和  $\text{PM}_{2.5}$  的影响,以期为更准确地定量评价牛粪长期堆积对大气环境的影响提供数据支持,并为寻求有效减少环境问题的措施提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

试验在西北农林科技大学实验大棚内进行,大棚只封顶而四周不密封,以模拟牛粪自然堆积情况。试验牛粪采自西北农林科技大学畜牧站。

试验开始于 2016 年 1 月 6 日,共设 2 种处理,分别是堆高 25 cm 和堆高 50 cm,每种处理设置 3 个重复。收集同一牛群当天的新鲜粪便,置于不同高度的堆肥箱中,堆肥箱为直径 50 cm、高 25 cm 和 50 cm 的不锈钢圆柱体,无顶盖。堆高 25 cm 和 50 cm 的堆肥箱分别装 40 kg 和 80 kg 新鲜牛粪,试验共进行 41 周。

### 1.2 气体采集与分析

温室气体的测定采用静态箱-气相色谱法,采样

箱为不锈钢圆柱体,设计与王效琴等<sup>[11]</sup>的一致:直径与高均为 50 cm,采样箱顶部有一温度计插口,用于测定箱内的气温;箱体内侧有一风扇,采样时起混匀气体的作用;箱体内另一侧设采气口,用于采集气体;采样箱无底盖,采样时,将采样箱扣在堆肥箱上,用水密封,接通风扇电源,待箱内气体混匀后,先抽取箱内的初始气体,然后每隔 15 min 采 1 次气样,共采 3 次样,随后通过堆体内气体浓度的变化量计算温室气体的排放速率。采样时间为早上 9:00—10:00<sup>[14]</sup>,前一周每日采样,一周后每周采样 1 次,共采 48 次样,采集的样品当天用气相色谱仪测定。

$\text{NH}_3$  的测定采用通气法,装置设计与王朝辉等<sup>[15]</sup>的一致:分别将两块厚度为 2 cm、直径为 16 cm 的海绵均匀浸以 15 mL 的磷酸甘油溶液后,置于直径 15 cm、高 10 cm 的硬质塑料管中,下层的海绵距管底 4 cm,用于吸收牛粪排出的  $\text{NH}_3$ ;上层的海绵与管顶部相平以隔绝空气。将吸收  $\text{NH}_3$  的海绵完全浸泡在一定量的  $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  的  $\text{KCl}$  溶液中,振荡 1 h,浸出液用流动分析仪测定硝态氮和铵态氮 ( $\text{NO}_3^- - \text{N}$  和  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ ) 含量,从而计算  $\text{NH}_3$  的排放速率。采样时间为上午 10:00—11:00,前 11 d 每日采样,之后根据  $\text{NH}_3$  的变化趋势,做相应的调整(11~27 d 每隔 1 d 采样 1 次,27~159 d 每隔 2~3 d 采样 1 次,159 d 后每周采样 1 次),共采集了 74 次。在采集各种气体的同时,用温度计测定堆体中心位置的温度,前一周每日测定,一周后每隔 2~3 d 测定 1 次,共有 85 个数据。

### 1.3 固体样采集与分析

试验开始前充分混合牛粪,采集一定量的固体样,每份固体样分为 2 部分。一部分为鲜样,4 °C 保存,用于测定 pH(蒸馏水浸提-pH 计测定)、含水率(MC,105 °C 干燥 24 h)、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$  和  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ ( $\text{KCl}$  浸提-流动分析仪测定)等指标,这些指标以湿基表示。另一部分自然风干、粉碎后过 100 目筛,用于测定总氮(TN,  $\text{H}_2\text{SO}_4 - \text{H}_2\text{O}_2$  消煮-凯氏定氮法)和总有机碳(TOC,高温外热重铬酸钾氧化-容量法)的含量,以干基计。试验用牛粪的理化性质见表 1。

### 1.4 数据处理

试验数据采用 Excel 2013 和 SPSS 19.0 统计分析软件进行处理分析,显著性水平  $\alpha=0.05$ 。

温室气体的排放速率根据公式(1)计算<sup>[14]</sup>:

$$F = \frac{273\rho V}{(273+T)_m} \times \frac{dC}{dt} \quad (1)$$

式中: $F$  为温室气体排放速率,  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ ;  $\rho$  为各温

表1 试验用牛粪的理化特性

Table 1 The physicochemical properties of dairy manure composting

处理	pH	MC/%	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N/mg·kg <sup>-1</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N/mg·kg <sup>-1</sup>	TN/g·kg <sup>-1</sup>	TOC/g·kg <sup>-1</sup>	C/N
堆高 25 cm	7.47±0.19a	80.89±2.34a	3.36±0.64a	690.85±52.36a	25.16±0.38a	456.70±17.03a	18.15±0.40a
堆高 50 cm	7.42±0.22a	80.82±0.97a	3.42±0.44a	707.95±31.72a	28.30±1.79a	457.38±18.92a	16.49±0.62a

注: 同列不同小写字母的处理间差异显著( $P<0.05$ )。下同。

Note: Different small letters in a row indicate significant differences among treatments ( $P<0.05$ ). The same below.

室气体标准状态下的密度( $\text{CH}_4$  为  $0.717 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  为  $1.978 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ );  $V$  为粪样顶部到采样箱顶部空间的体积,  $\text{m}^3$ ;  $dC/dt$  为温室气体浓度的变化率;  $T$  为采样过程中采样箱内的平均温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $m$  为牛粪的质量(干基),  $\text{kg}$ 。

$\text{NH}_3$  的排放速率根据公式(2)计算<sup>[15]</sup>:

$$F = \frac{(c_1 + c_2)AV}{amt} \times 10^{-3} \quad (2)$$

式中:  $F$  为  $\text{NH}_3$  的排放速率,  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ ;  $c_1$  和  $c_2$  分别为浸提液中  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  和  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  含量,  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ;  $V$  为浸提液的体积,  $\text{mL}$ ;  $A$  为堆体上表层面积,  $\text{m}^2$ ;  $a$  为吸收  $\text{NH}_3$  的海绵的有效面积,  $\text{m}^2$ ;  $m$  为牛粪的质量(干基),  $\text{kg}$ ;  $t$  为采样时间,  $\text{h}$ 。

牛粪整个堆积期的排放对温室效应的影响用温室效应潜值表示, 根据公式(3)计算<sup>[16-17]</sup>:

$$\text{GWP} = 28E_{\text{CH}_4} + 265 \times (E_{\text{N}_2\text{O}} + 0.01E_{\text{NH}_3\text{-N}} \times 44/28) \quad (3)$$

式中:  $\text{GWP}$  (Global warming potential) 为温室效应潜值,  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 以  $\text{CO}_2\text{-eq}$  计;  $E_{\text{CH}_4}$  为  $\text{CH}_4$  的累积排放量,  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ;  $E_{\text{N}_2\text{O}}$  为  $\text{N}_2\text{O}$  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,  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ; 28 和 265 分别为  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  在 100 年尺度上相对  $\text{CO}_2$  的增温潜势<sup>[16]</sup>, 0.01 为  $\text{NH}_3$  (以  $\text{NH}_3\text{-N}$  计) 通过大气沉降及化学反应转化成  $\text{N}_2\text{O}$  (以  $\text{N}_2\text{O-N}$  计) 的系数<sup>[17]</sup>; 44/28 为  $\text{N}_2\text{O-N}$  转化为  $\text{N}_2\text{O}$  的系数。

牛粪整个堆积期对  $\text{PM}_{2.5}$  的影响用  $\text{PM}_{2.5}$  影响潜值表示, 计算方法如公式(4)所示<sup>[18]</sup>:

$$\text{PMP} = E_{\text{NH}_3} \times 0.0667 \quad (4)$$

式中:  $\text{PMP}$  ( $\text{PM}_{2.5}$  forming potential) 为  $\text{PM}_{2.5}$  形成潜值,  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 以  $\text{PM}_{2.5}\text{-eq}$  计;  $E_{\text{NH}_3}$  为  $\text{NH}_3$  的累积排放量,  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ; 0.0667 为转化系数<sup>[18]</sup>。

## 2 结果与讨论

### 2.1 温度的变化

温度通过影响堆体内部微生物的活跃程度, 从而影响着各气体的释放。从图 1 可知, 堆积初期, 由于采集的牛粪是奶牛当天排放的新鲜粪便, 堆体内部还保留

一定的热量, 因此, 堆体温度高于气温, 但试验始于寒冬季节, 堆体初始的热量受外界低气温影响很快散失, 堆体温度降低, 直至堆积 24 d (2016 年 1 月 30 日) 时堆体温度和气温都达到最小值, 且两者差异不大。堆积 24 d 后堆体温度随着气温的升高而逐渐上升, 直到堆积 221 d (2016 年 8 月 14 日) 时达到最大值, 随后缓慢下降, 在这个过程中堆体温度和气温没有明显差异。在整个堆积过程中, 堆高 50 cm 的温度略高于堆高 25 cm, 但差异不显著。

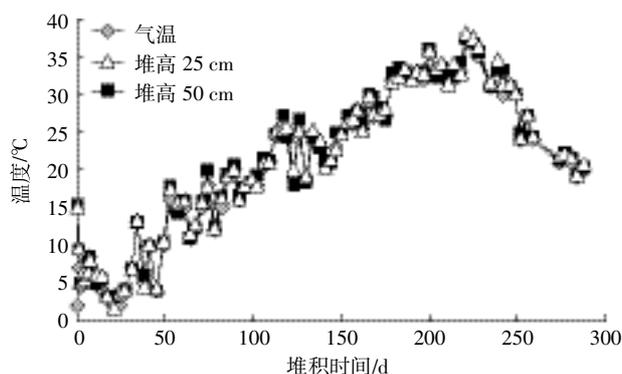


图1 堆积过程中温度的变化

Figure 1 Changes of temperature during piling

### 2.2 $\text{CH}_4$ 排放特点

如图 2 所示, 各处理  $\text{CH}_4$  排放速率的变化趋势基本相同,  $\text{CH}_4$  排放主要集中于堆积中后期。堆积初期, 受外界低气温的影响, 新鲜粪便初始的热量很快散失, 微生物活性降低,  $\text{CH}_4$  排放速率随着迅速下降, 在堆积第 14 d (2016 年 1 月 20 日) 下降为零, 并在较长时间没有排放。堆积 92 d (2016 年 4 月 7 日) 后, 随着外界温度的上升,  $\text{CH}_4$  排放速率开始缓慢上升, 并在第 166 d (2016 年 6 月 20 日) 达到第一个峰值, 此后在此峰值上下呈波动状变化。然后随着可利用有效碳源的减少<sup>[19]</sup>,  $\text{CH}_4$  排放速率从第 200 d (2016 年 7 月 24 日) 左右开始逐渐下降, 并在第 235 d (2016 年 8 月 28 日) 下降为零。王效琴等<sup>[11]</sup>和朱海生等<sup>[20]</sup>的研究也发现了类似的结果, 即堆积前期基本无排放而中后期排放量大。但也有研究表明  $\text{CH}_4$  的排放主要集中在堆肥前

期,中后期排放速率很小<sup>[21-22]</sup>,主要因为这些研究在牛粪中添加了锯末或草垫等碳源,大量碳源的存在使得前期有机质降解速率快,堆体温度快速上升,有利于微生物繁殖,形成了适宜CH<sub>4</sub>产生的条件,堆积中后期随着有效碳源少,CH<sub>4</sub>排放量也降低,而本试验的堆体只有牛粪,堆积前期又处于寒冬季节,堆体温度低,不适宜产甲烷菌的大量繁殖,CH<sub>4</sub>排放量少,到堆积中后期,堆体温度随外界温度升高而缓慢上升,逐渐形成了适宜产甲烷菌繁殖的条件,CH<sub>4</sub>排放量才增加。

从图2可知,在堆积前148 d堆高25 cm的CH<sub>4</sub>排放速率比堆高50 cm的大,但差异不显著,148 d后堆高50 cm的CH<sub>4</sub>排放速率高于25 cm的,且差异显著,由此导致CH<sub>4</sub>累积排放量在172 d也发生转折。这一变化趋势与段池清<sup>[23]</sup>的研究结果相似。其原因可能是在堆积初期,堆高越低,越有利于CH<sub>4</sub>从堆体内部释放出来,但随着堆积时间的延续,高堆体内部适宜厌氧发酵的厌氧区域比低堆体的大,有利于CH<sub>4</sub>的产生。到试验结束时,堆高50 cm的CH<sub>4</sub>累积排放量比堆高25 cm增加了28.31%,这说明减小堆高有助于减少CH<sub>4</sub>的排放。很多研究学者<sup>[16-17,23-25]</sup>也发现了相同的结论。

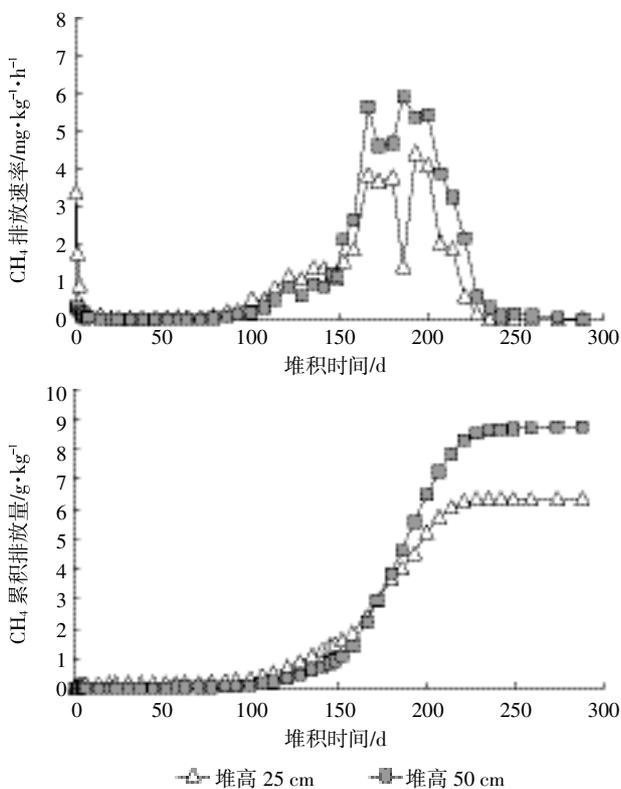


图2 CH<sub>4</sub>的排放速率和累积排放量

Figure 2 Emission rate and cumulative emission of CH<sub>4</sub>

### 2.3 N<sub>2</sub>O 排放特点

在整个堆积过程中不同堆高N<sub>2</sub>O排放速率的变化趋势基本相同(图3),与CH<sub>4</sub>排放相似,N<sub>2</sub>O排放也主要集中于堆积中后期,这与之前的很多研究结论一致<sup>[9,11]</sup>。堆积前92 d(2016年1月6日—4月7日),堆体温度低、含水率高,硝化作用较弱,可供发生反硝化反应的NO<sub>3</sub>-N积累缓慢,该阶段N<sub>2</sub>O排放速率几乎为零。随着外界温度的不断升高,堆体中NO<sub>3</sub>-N含量不断增加,适宜的温度加上堆体存在缺氧和厌氧的区间,堆积前期累积产生的NO<sub>3</sub>-N和亚硝态氮(NO<sub>2</sub>-N)在反硝化细菌的作用下,不断生成N<sub>2</sub>O,使得N<sub>2</sub>O排放速率迅速上升,至堆积110 d(2016年4月25日)左右达到第一个峰值,随后缓慢下降到零。堆高50 cm的堆体在堆积后期又出现了两个较为明显的峰值(第207 d和第235 d),之后才逐渐下降至零,该现象说明较高堆体可能存在自上而下的硝化和反硝化的分层反应过程,主要原因可能是较高堆体的中间区域在堆积后期随着上层含水量的减少逐渐成为适宜发生硝化反应的氧气充足区域,而其下部含水量较高,仍然存在较大的适宜发生反硝化反应的缺氧和厌氧区域。

从不同堆高N<sub>2</sub>O排放速率图3可以看出,堆高

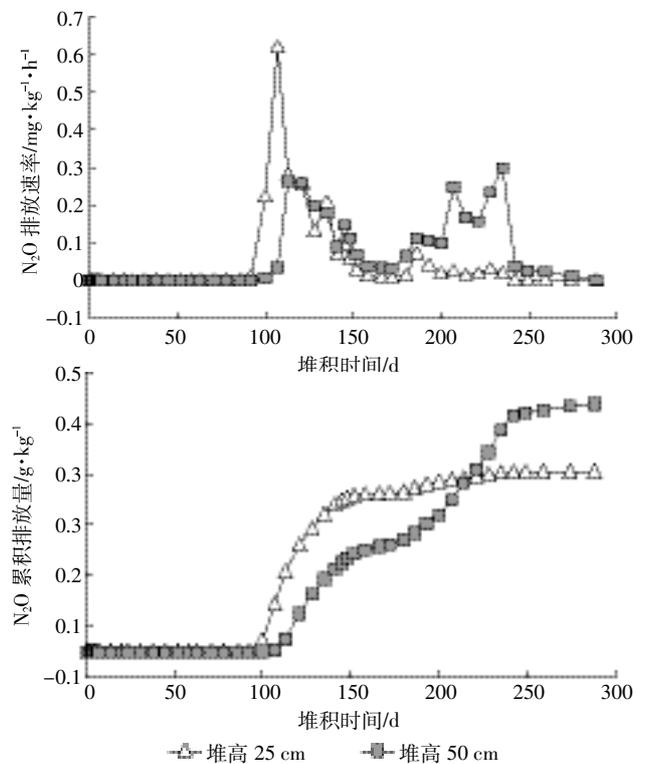


图3 N<sub>2</sub>O的排放速率和累积排放量

Figure 3 Emission rate and cumulative emission of N<sub>2</sub>O

25 cm 的  $N_2O$  排放速率(第 107 d, 2016 年 4 月 22 日)先于堆高 50 cm(第 113 d, 2016 年 4 月 28 日)达到第一个峰值,然而在堆高 50 cm 达到第一个峰值后,由于较高堆体的分层反应过程,堆高 50 cm 的  $N_2O$  排放速率在第 121 d(2016 年 5 月 6 日)后显著高于堆高 25 cm,且又接连出现了两个峰值,使得堆高 50 cm 的  $N_2O$  累积排放量在堆积 221 d(2016 年 8 月 14 日)后高于堆高 25 cm,该特点与 Fukumoto 等<sup>[26]</sup>的研究类似。试验结束时,堆高 50 cm 的  $N_2O$  累积排放量比堆高 25 cm 增加了 28.57%,这表明降低堆高有利于减少  $N_2O$  的排放。

#### 2.4 $NH_3$ 排放特点

如图 4 所示,各处理  $NH_3$  排放速率的变化趋势基本相同,且  $NH_3$  排放贯穿于整个堆积过程。堆积前 27 d,正处于寒冬季节,温度较低( $-4\sim 4^\circ C$ ), $NH_3$  排放速率较小。堆积 27 d(2016 年 2 月 2 日)后,随着温度的不断升高,堆体含水率下降,微生物分解产生的

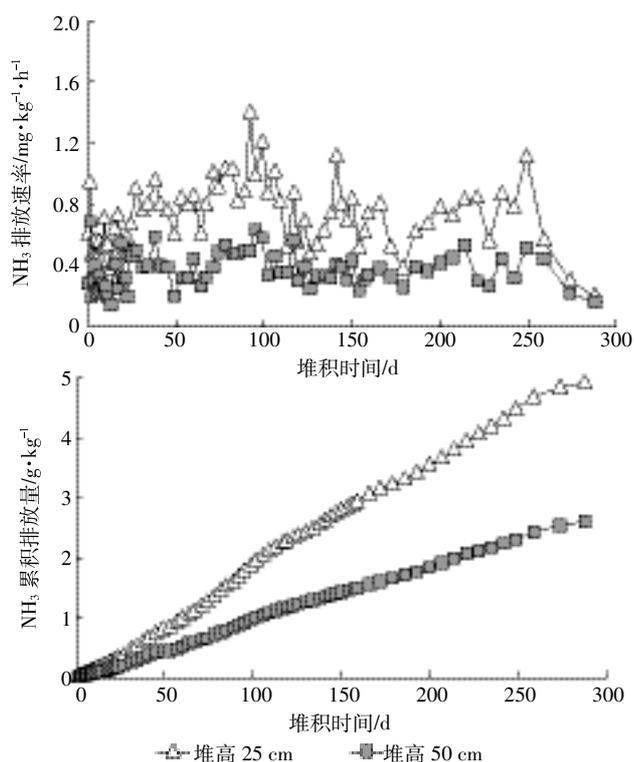


图 4  $NH_3$  的排放速率和累积排放量

Figure 4 Emission rate and cumulative emission of  $NH_3$

$NH_4^+$ 进一步转化成  $NH_3$  释放出来,且排放速率越来越大。在堆积第 93 d(2016 年 4 月 8 日)左右达到最大值,随后呈波动式缓慢降低。许多研究表明  $NH_3$  排放主要集中在堆肥前期<sup>[27-29]</sup>,而本试验却存在于整个堆积过程中,其原因可能为:堆积初期,受外界温度影响,堆体的温度较低,微生物的氨化作用较弱,且在整个堆积过程中,由于堆体较低,堆体温度基本与外界气温一致,没有显著的升温过程,在堆积后期,堆体形成明显分层,下层含水率过高,氧气供应不足,这些因素都导致堆体的有机氮降解速率缓慢,从而造成  $NH_3$  排放特点表现为长期的缓慢释放<sup>[29]</sup>,但其整个堆积过程的  $NH_3-N$  总损失为 7.55%~16.06%,低于进行人工通风的  $NH_3-N$  损失(27.9%~29.5%)<sup>[29]</sup>。

在整个试验过程中堆高 25 cm 的  $NH_3$  排放速率始终高于堆高 50 cm,且堆积中后期两者的差距更加明显,其原因可能是堆高 25 cm 的堆体比表面积较大,有利于  $NH_3$  从堆体内部释放;之后随着外界温度的上升,堆高 25 cm 的堆体含水率迅速降低,而堆高 50 cm 的堆体下部的水分很难蒸发,从而使得堆高 25 cm 堆体的孔隙度大于堆高 50 cm,进而导致堆高 25 cm 的  $NH_3$  排放速率比堆高 50 cm 的大。至堆积结束时,堆高 25 cm 的  $NH_3$  累积排放量比堆高 50 cm 增加了 88.85%。这表明,当底面积一定时,增加堆高有助于减少  $NH_3$  的排放。Li 等<sup>[25]</sup>的研究也得出了同样的结论。

#### 2.5 各气体排放及堆高对温室效应和 $PM_{2.5}$ 的影响

各气体的累积排放量(以  $CO_2$ -eq 计)、不同堆高的总温室效应和  $PM_{2.5}$  影响潜值计算结果见表 2。从表 2 可以看出, $CH_4$  对 GWP 的贡献最大,贡献率为 61.41%~63.97%,其次是  $N_2O$ ,贡献率为 32.71%~33.70%, $NH_3$  的贡献很小,仅为 2.33%~5.88%。由于堆高越高,相对厌氧区域越大, $CH_4$  和  $N_2O$  排放量就越高,且两者是粪便堆积过程影响温室效应的主要来源,因此堆高 25 cm 的温室效应显著低于堆高 50 cm。但对  $PM_{2.5}$  的影响,堆高 25 cm 的 PMP 显著高于堆高 50 cm,其原因主要是堆高越低, $NH_3$  排放量越高,PMP 越大。这表明,虽然堆体高度从 50 cm 降低到 25 cm 有助于减少温室效应,却会加剧对  $PM_{2.5}$  的影响。

表 2 41 周累积温室气体排放量( $CO_2$ -eq)和  $PM_{2.5}$  排放量

Table 2 Total greenhouse gas emission calculated in  $CO_2$ -eq and  $PM_{2.5}$  emission in 41 weeks

处理	$CH_4/g \cdot kg^{-1}$	$N_2O/g \cdot kg^{-1}$	$NH_3/g \cdot kg^{-1}$	GWP/ $g \cdot kg^{-1}$	PMP/ $g \cdot kg^{-1}$
堆高 25 cm	175.77±18.88a	93.64±13.58a	16.84±1.24a	286.25±6.55b	0.33±0.02a
堆高 50 cm	245.18±46.59a	129.18±14.93a	8.92±1.18b	383.28±33.25a	0.17±0.02b

## 2.6 各气体排放因子及堆高的影响

从表3可以看出,牛粪41周堆积情况下,CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O和NH<sub>3</sub>的排放因子分别为1.00%~1.49%、0.90%~1.10%和7.55%~16.06%。CH<sub>4</sub>的排放因子与Hao等<sup>[30]</sup>的牛粪堆肥研究相近,但高于江滔等<sup>[29]</sup>以及秦莉等<sup>[31]</sup>堆体为猪粪加秸秆的研究,其原因可能是一方面本试验和Hao等<sup>[30]</sup>的堆积时间都长于江滔等<sup>[29]</sup>以及秦莉等<sup>[31]</sup>的研究,另一方面可能由于本试验没有添加任何材料,堆体含水率较高、孔隙度较小,有利于产甲烷菌的生长和繁殖。N<sub>2</sub>O与NH<sub>3</sub>的排放因子均在前人研究范围内,本试验的N<sub>2</sub>O排放因子与IPCC对非强制通风的堆肥模式提供的缺省值相近<sup>[16]</sup>,NH<sub>3</sub>的排放因子低值与朱新梦等<sup>[32]</sup>农民堆肥模式的结果相近,但低于其他研究中进行人工通风所造成的排放因子<sup>[29]</sup>。对不同堆高而言,堆高25 cm堆体的CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O排放因子均低于堆高50 cm,但NH<sub>3</sub>的排放因子却显著高于堆高50 cm。

表3 41周各温室气体和NH<sub>3</sub>的排放因子

Table 3 Greenhouse gas and ammonia emission factors in 41 weeks

处理	(CH <sub>4</sub> -C/TOC)/%	(N <sub>2</sub> O-N/TN)/%	(NH <sub>3</sub> -N/TN)/%
堆高 25 cm	1.00±0.11a	0.90±0.15a	16.06±0.95a
堆高 50 cm	1.49±0.26a	1.10±0.10a	7.55±0.54b

## 3 结论

(1)堆高对温室气体和NH<sub>3</sub>累积排放量的影响差异显著。堆高25 cm的NH<sub>3</sub>累积排放量显著高于堆高50 cm,但堆高25 cm的CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O累积排放量却低于堆高50 cm。

(2)各气体对温室效应贡献率不同。CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O和NH<sub>3</sub>对温室效应贡献率依次为61.41%~63.97%、32.71%~33.70%和2.33%~5.88%。

(3)堆高50 cm和25 cm的堆体对温室效应和PM<sub>2.5</sub>的影响呈相反趋势。堆高25 cm的温室效应显著低于堆高50 cm,但对PM<sub>2.5</sub>的影响却显著高于堆高50 cm的堆体。

由于本试验中牛粪是放在堆肥箱中进行,与实际堆体的四面通风情况存在一定差异,因此进一步在实际堆体上测试温室气体和NH<sub>3</sub>排放的变化特点仍然是必要的。

### 参考文献:

[1] 朱建春,张增强,樊志民,等.中国畜禽粪便的能源潜力与氮磷耕地负荷及总量控制[J].农业环境科学学报,2014,33(3):435-445.

- ZHU Jian-chun, ZHANG Zeng-qiang, FAN Zhi-min, et al. Biogas potential, cropland load and total amount control of animal manure in China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(3):435-445.
- [2] 董红敏,李玉娥,陶秀萍,等.中国农业源温室气体排放与减排技术对策[J].农业工程学报,2008,24(10):269-273.  
DONG Hong-min, LI Yu-e, TAO Xiu-ping, et al. China greenhouse gas emissions from agricultural activities and its mitigation strategy[J]. *Transactions of the CSAE*, 2008, 24(10):269-273.
- [3] 李新艳,李恒鹏.中国大气NH<sub>3</sub>和NO<sub>x</sub>排放的时空分布特征[J].中国环境科学,2012,32(1):37-42.  
LI Xin-yan, LI Heng-peng. Emission and distribution of NH<sub>3</sub> and NO<sub>x</sub> in China[J]. *China Environmental Science*, 2012, 32(1):37-42.
- [4] 董文焯,邢佳,王书肖.1994—2006年中国人为源大气氨排放时空分布[J].环境科学,2010,31(7):1457-1463.  
DONG Wen-xuan, XING Jia, WANG Shu-xiao. Temporal and spatial distribution of anthropogenic ammonia emissions in China: 1994—2006 [J]. *Environmental Science*, 2010, 31(7):1457-1463.
- [5] Wu S Y, Hu J L, Zhang Y, et al. Modeling atmospheric transport and fate of ammonia in North Carolina—Part II: Effect of ammonia emissions on fine particulate matter formation[J]. *Atmospheric Environment*, 2008, 42(14):3437-3451.
- [6] 马子珍,李振,蒋靖坤,等.燃煤电厂产生和排放的PM<sub>2.5</sub>中水溶性离子特征[J].环境科学,2015,36(7):2361-2366.  
MA Zi-zhen, LI Zhen, JIANG Jing-kun, et al. Characteristics of water-soluble inorganic ions in PM<sub>2.5</sub> emitted from coal fired power plants[J]. *Environmental Science*, 2015, 36(7):2361-2366.
- [7] 杨帆,李荣,崔勇,等.我国有机肥料资源利用现状与发展建议[J].中国土壤与肥料,2010(4):77-82.  
YANG Fan, LI Rong, CUI Yong, et al. Utilization and develop strategy of organic fertilizer resources in China[J]. *Soil and Fertilizer Sciences*, 2010(4):77-82.
- [8] 仇焕广,莫海霞,白军飞,等.中国农村畜禽粪便处理方式及其影响因素[J].中国农村经济,2012(3):78-87.  
QIU Huan-guang, MO Hai-xia, BAI Jun-fei, et al. Chinese rural poultry manure treatment and its influencing factors[J]. *Chinese Rural Economy*, 2012(3):78-87.
- [9] 赵晨阳,李洪枚,魏源送,等.翻堆频率对猪粪条垛堆肥过程温室气体和氨气排放的影响[J].环境科学,2014,35(2):533-540.  
ZHAO Chen-yang, LI Hong-mei, WEI Yuan-song, et al. Effects of turning frequency on emission of greenhouse gas and ammonia during swine manure windrow composting[J]. *Environmental Science*, 2014, 35(2):533-540.
- [10] 赵玲,王聪,田萌萌,等.秸秆与畜禽粪便混合厌氧发酵产沼气特性研究[J].中国沼气,2015,33(5):32-37.  
ZHAO Ling, WANG Cong, TIAN Meng-meng, et al. Characteristics of anaerobic fermentation of mixed livestock manure and straw[J]. *China Biogas*, 2015, 33(5):32-37.
- [11] 王效琴,李文圣,王旭东,等.不同泌乳期奶牛粪便碳氮变化与温室气体排放特点研究[J].农业机械学报,2016,47(3):179-185.  
WANG Xiao-qin, LI Wen-sheng, WANG Xu-dong, et al. Greenhouse gases emissions and varies of carbon and nitrogen of manure from dif-

- ferent lactating period cows[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(3):179-185.
- [12] Shen Y J, Ren L M, Li G X, et al. Influence of aeration on CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O and NH<sub>3</sub> emissions during aerobic composting of a chicken manure and high C/N waste mixture[J]. *Waste Management*, 2011, 31(1):33-38.
- [13] 中华人民共和国环境保护部, 中华人民共和国国家统计局, 中华人民共和国农业部. 全国第一次污染源普查公报[EB/OL]. (2010-02-06). [http://www.stats.gov.cn/tjgb/qgttjgb/qgqgttjgb/t20100211\\_402621161.htm](http://www.stats.gov.cn/tjgb/qgttjgb/qgqgttjgb/t20100211_402621161.htm).  
Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China, People's Republic of Chinese Bureau of statistics, Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. The first national survey of pollution sources bulletin[EB/OL]. (2010-02-06). [http://www.stats.gov.cn/tjgb/qgttjgb/qgqgttjgb/t20100211\\_402621161.htm](http://www.stats.gov.cn/tjgb/qgttjgb/qgqgttjgb/t20100211_402621161.htm).
- [14] Hao X Y, Chang C, Larney F J, et al. Greenhouse gas emissions during cattle feedlot manure composting[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2001, 30(2):376-386.
- [15] 王朝辉, 刘学军, 巨晓棠. 田间土壤氨挥发的原位测定: 通气法[J]. 植物营养与肥料学报, 2002, 8(2):205-209.  
WANG Zhao-hui, LIU Xue-jun, JU Xiao-tang. Field *in situ* determination of ammonia volatilization from soil: Venting method[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2002, 8(2):205-209.
- [16] IPCC. Climate change 2013: The physical science basis[EB/OL]. [2013-07-08]. [http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WG1AR5\\_ALL\\_FINAL.pdf](http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WG1AR5_ALL_FINAL.pdf).
- [17] IPCC. IPCC Guidelines for national greenhouse gas inventories[EB/OL]. [2013-07-08]. <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol4.html>.
- [18] Sala S, Wolf M A, Pant R. Characterisation factors of the ILCD recommended life cycle impact assessment methods. Database and supporting information. EUR25167EN[R/OL]. [2012-07-08]. <http://eplca.jrc.ec.europa.eu/uploads/2014/01/LCIA-characterization-factors-of-the-ILCD.pdf>.
- [19] 罗一鸣, 李国学, 王坤, 等. 过磷酸钙添加剂对猪粪堆肥温室气体和氨气减排的作用[J]. 农业工程学报, 2012, 28(22):235-242.  
LUO Yi-ming, LI Guo-xue, WANG Kun, et al. Effects of additive superphosphate on NH<sub>3</sub>, N<sub>2</sub>O and CH<sub>4</sub> emissions during pig manure composting[J]. *Transactions of the CSAE*, 2012, 28(22):235-242.
- [20] 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.
- [21] 刘飞, 周岭. 棉秆木醋液对牛粪堆肥过程中 CH<sub>4</sub> 和 CO<sub>2</sub> 排放的影响[J]. 江苏农业科学, 2015(9):364-369.  
LIU Fei, ZHOU Ling. Effect of cotton wood vinegar on CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub> emission during cow dung composting[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2015(9):364-369.
- [22] Ahn H K, Mulbry W, White J W, et al. Pile mixing increases greenhouse gas emissions during composting of dairy manure[J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102(3):2904-2909.
- [23] 段池清, 王嘉璐, 姬亚芹. 基于静态箱法的堆放奶牛粪便甲烷排放速率研究[J]. 南开大学学报(自然科学版), 2010, 43(1):87-92.  
DUAN Chi-qing, WANG Jia-jun, JI Ya-qin. Study on methane emissions rate from untreated storage dairy cow manure by static chamber technique[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Nankaiensis*, 2010, 43(1):87-92.
- [24] 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.
- [25] 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 ASABE*, 2010, 53(2):593-604.
- [26] Fukumoto Y, Osada T, Hanajima D, et al. Patterns and quantities of NH<sub>3</sub>, N<sub>2</sub>O and CH<sub>4</sub> emissions during swine manure composting without forced aeration-effect of compost pile scale[J]. *Bioresource Technology*, 2003, 89(2):109-114.
- [27] 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.
- [28] 罗一鸣, 魏宗强, 孙钦平, 等. 沸石作为添加剂对鸡粪高温堆肥氨挥发的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(2):243-247.  
LUO Yi-ming, WEI Zong-qiang, SUN Qin-ping, et al. Effects of zeolite addition on ammonia volatilization in chicken manure composting[J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(2):243-247.
- [29] 江滔, 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, LI Guo-xue. Effect of turning and covering on greenhouse gas and ammonia emissions during the winter composting[J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(10):212-217.
- [30] Hao X, Chang C, Larney F J, et al. Greenhouse gas emissions during cattle feedlot manure composting[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2001, 30(2):376-386.
- [31] 秦莉, 沈玉君, 李国学, 等. 不同 CN 比堆肥碳素物质变化规律研究[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(7):1388-1393.  
QIN Li, SHEN Yu-jun, LI Guo-xue, et al. C Matter change of composting with different C/N[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(7):1388-1393.
- [32] 朱新梦, 董雯怡, 王洪媛, 等. 牛粪堆肥方式对温室气体和氨气排放的影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33(10):258-264.  
ZHU Xin-meng, DONG Wen-yi, WANG Hong-yuan, et al. Effects of cattle manure composting methods on greenhouse gas and ammonia emissions[J]. *Transactions of the CSAE*, 2017, 33(10):258-264.