

冬季猪舍粪便贮存过程中CH₄排放特征试验*

叶章颖¹ 李保明² 张国强³ 泮进明¹ 郑荣进¹ 朱松明¹

(1. 浙江大学生物系统工程与食品科学学院, 杭州 310058; 2. 中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083;
3. 奥胡斯大学农学院, 丹麦奥胡斯 8830)

【摘要】 利用丹麦猪舍和液态猪粪便进行了 CH₄ 气体排放测试, 比较了 3 种粪坑内粪便高度 (0.15、0.40、0.65 m)、4 种通风量 (211、650、1 852、3 088 m³/h)、粪坑内有无挡板情况下冬季猪舍粪便贮存过程中 CH₄ 排放通量。测试结果表明: 粪便高度、粪便温度和通风量可以用来解释大部分的 CH₄ 排放通量变化差异; 对于使用渗透性天花板进气和负压通风排气系统, 4 种通风量之间 CH₄ 排放通量差异不显著, 但由于通风量的增加同时会降低舍内与粪坑内空气温度和粪便温度, 因此要综合考虑通风量和温度对气体排放通量的影响; 液态猪粪便中 CH₄ 排放通量随着粪坑内粪便高度的降低而减少; 设置粪坑挡板对粪坑内 CH₄ 排放没有影响; 敏感性分析表明 CH₄ 排放通量相对于粪便温度、粪便高度和通风量的敏感性依次减小 (敏感度依次减小)。在较低的通风量和粪便高度变化区间, CH₄ 排放通量变化的敏感性要高于较高的通风量和粪便高度变化区间, 但对于粪便温度变化趋势正好相反。

关键词: 猪舍 甲烷排放 粪坑 排放通量

中图分类号: X502; S815.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2011)04-0184-06

Characteristics of CH₄ Emission from Liquid Manure Stored in Under-floor Pit of Pig House in Winter

Ye Zhangying¹ Li Baoming² Zhang Guoqiang³ Pan Jinming¹ Zheng Rongjin¹ Zhu Songming¹

(1. School of Biosystems Engineering and Food Science, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China

2. College of Water Conservancy & Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

3. Faculty of Agricultural Sciences, University of Aarhus, Tjele 8830, Denmark)

Abstract

CH₄ emissions from liquid pig manure stored in under-floor pits were investigated using an empty full-scale pig house in Denmark in winter season. The experiment designs were three manure depths of 0.15, 0.40 and 0.65 m, four ventilation rates of 211, 650, 1 852 and 3 088 m³/h, and with or without pit curtains. The three parameters that explained most of the variability of the CH₄ emissions were manure temperature, manure depth and ventilation rate. There were no significant differences in CH₄ emission rates among four ventilation rates with diffuse ceiling inlet and negative pressure exhaust. However, the lower manure temperature could reduce CH₄ emission or compensate the effects of higher ventilation rate. CH₄ emission rate reduced with decreasing manure depth in pit. No significant differences in CH₄ emission rates were found by using manure pit curtains. The emission rates were more sensitive to manure temperature than to manure depth and ventilation rate due to higher sensitivity percentages. At the lower ventilation rate and manure depth ranges, the emission rates were more sensitive to ventilation rate change compared to the higher ones. However, the contrary sensitivity responses for different manure temperature ranges were obtained.

Key words Pig house, CH₄ emission, Under-floor pit, Emission rate

收稿日期: 2010-11-24 修回日期: 2010-12-13

* 国家自然科学基金资助项目 (31001028), 丹麦食品、农业和渔业部项目 (3304-VMP-05-032-01), 浙江省自然科学基金资助项目 (Y5080143)

作者简介: 叶章颖, 助理研究员, 博士后, 主要从事设施养殖环境工程与农业空气质量研究, E-mail: yzyzju@zju.edu.cn

通讯作者: 朱松明, 教授, 博士生导师, 主要从事设施养殖环境工程研究, E-mail: zhushm@zju.edu.cn

引言

畜禽粪便是农业甲烷 (CH₄) 最主要的排放源^[1]。养猪生产中,漏缝地板结合深粪坑系统在欧美应用较为普遍,猪粪尿和污水通过漏缝地板漏到深粪坑中进行舍内贮存^[2]。在此类猪舍建筑中,粪坑内粪便是舍内温室气体释放的主要来源^[3]。Monteny^[4]估算来自粪便中的 CH₄ 排放量占到了 65%,其他 35% 来自动物本身,但由于 CH₄ 产生条件的不同,这个比例将会差异很大。目前有关畜禽粪便贮存过程中 CH₄ 排放研究多集中在舍外蓄粪池,影响蓄粪池粪便贮存过程中 CH₄ 排放的影响因子有粪便特性、温度、风速、覆盖、粪污停留时间、搅动频率和降雨等^[5]。但对于猪舍粪坑内粪便贮存过程中的 CH₄ 排放测试报道较少,国内仅有董红敏等^[6-7]对育肥猪舍和猪场污水贮存 CH₄ 排放作了初步研究,但猪舍建筑形式和本研究相差较大。另外,粪坑设置挡板对猪舍粪坑内 CH₄ 排放的影响未见报道。

本文通过对冬季丹麦典型猪舍粪坑内粪便贮存过程中 CH₄ 排放的测试,着重研究粪坑内粪便贮存过程中 CH₄ 的排放特征,并探索粪坑内设置挡板对 CH₄ 减排的可行性。

1 试验材料与方法

1.1 试验猪舍

试验在丹麦奥胡斯大学农业科学学院生物系统工程系试验农场的育肥猪舍中进行。试验猪舍建筑特点和尺寸如图 1 所示。试验猪舍为新建,共有 2 个圈栏。采用在丹麦应用广泛的渗透性天花板进气,并结合负压通风排气。猪舍地板采用开口比例为 16.5% 的漏缝地板(占圈栏面积的 2/3)和开口比例为 8.5% 的渗透型地板(占圈栏面积的 1/3)组合而成。漏缝地板下设粪坑,高为 0.9 m。试验用液态粪便来自猪场同一个蓄粪池且试验期间蓄粪池中无新的粪便加入,猪舍地板在试验期间保持清洁。猪舍配有一个饲喂走道和操作走道,所有测试仪器和采样管道安放在控制室内。

试验主要测试粪坑中的 CH₄ 排放情况,因此没有放入猪,但为了模拟猪产热,在圈栏渗透型地板处放置红色的加热电缆,每圈栏 3 kW,相当于 16 头质量为 60 kg 猪的产热量。由于加热电缆覆盖了部分渗透型地板,猪舍实际只有 3.2 m×4.8 m 的漏缝地板。

1.2 试验测试仪器及方法

试验设计采用 3 种粪坑内粪便高度:0.15、

0.40、0.65 m;4 种通风量:211、650、1 852、3 088 m³/h。为了研究粪坑内有无挡板对 CH₄ 排放的影响,两个尺寸为 4.8 m×0.9 m×0.005 m 聚氯乙烯板分别放置于圈栏的 1/3 和 2/3 处,将粪坑分隔成 3 个部分(图 1)。每个试验处理均连续采样 24 h,共测试 24 d,即每个高度下粪坑内猪粪堆放保持 8 d。

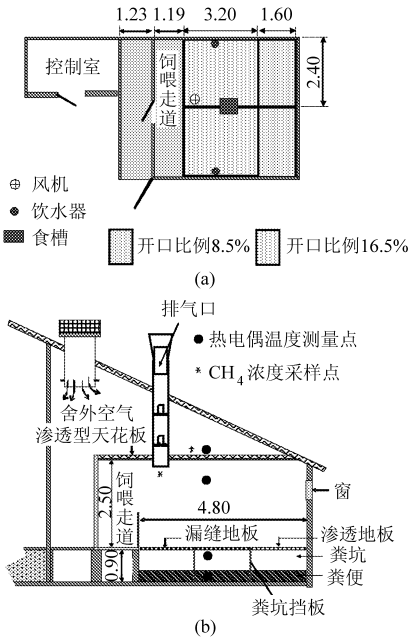


图 1 试验猪舍示意图
Fig. 1 Schematic diagram of the experimental pig house
(a) 平面图 (b) 剖面图

舍内通风量用 FanCom 传感器 (FanCom Model ATM40) 1 s 采集 1 次,并用自动数据采集仪 (CR1000, Campbell Scientific, Inc) 10 min 记录 1 次。风机通风量为

$$V_R = 34.634V \tag{1}$$

式中 V ——传感器输出的模拟信号,mV

CH₄ 浓度由 INNOVA1312 型多功能气体测定仪和 1309 型多路器 (Brüel and Kjær, Denmark) 进行测量。采样点分别为进气口上方 10 cm 和排风口下方 10 cm 处。舍内空气温度和相对湿度、粪坑内空气温度及粪便温度用 T 型热电偶进行测量(图 1)。所有温度数据用自动数据采集仪 (CR1000 型, Campbell Scientific, Inc) 1 s 采集 1 次,10 min 记录 1 次。舍外气象数据从丹麦奥胡斯大学农业生态环境系数据库获取。试验前和试验后分别采样分析粪便的 pH 值和总氨 (TAN),每个样品测量 2 次,取平均值。pH 值用 pH 计 (Sension 1, Hach-Lange GmbH, Germany) 测定,TAN 浓度采用分光光度计 (NOVA 60, Merck KGaA, Darmstadt, Germany) 进行测量。

1.3 数据处理

考虑实际试验数据的完整性,分析时选取了每

个处理下从 14:00 到次日 9:00 之间的数据。 CH_4 排放通量的计算公式为

$$E=1\times10^{-3}\frac{V_R(C_{\text{out}}-C_{\text{in}})}{A}$$

(2)

式中 E —— CH_4 排放通量, $\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$
 C_{out} ——排气口 CH_4 体积质量, mg/m^3
 C_{in} ——进气口 CH_4 体积质量, mg/m^3
 A ——粪坑表面积, m^2

多重回归分析用来探索试验中不同自变量组合对因变量(CH_4 排放通量)的作用大小,以修正后的拟合度来排序,自变量参数包括通风量 V_R 、粪便高度 H_{manure} 、粪坑挡板 C_{pit} 、粪便温度 T_{manure} 、粪坑内空气温度 T_{pit} 、舍内空气温度 T_{room} 和相对湿度 R_{room} 以及舍外空气温度 T_{outside} ,其中粪坑挡板被认为是虚拟变量(粪坑有挡板记为 1,粪坑无挡板记为 0)。单因素方差分析用来比较不同处理下 CH_4 排放通量之间的差异,SPSS 统计软件(SPSS 16.0, SPSS Inc., Chicago, IL, USA)用来进行上述分析。利用 DataFit 软件(version 8.2.79, Oakdale Engineering, USA)进行 CH_4 排放通量相对于舍内通风量、粪便温度和粪便高度的非线性回归分析,对得出的回归模型参照文献[8]进行参数敏感性分析

$$S_r=\frac{\Delta E/\overline{E}}{\Delta P/\overline{P}}$$

(3)

式中 S_r ——相对敏感度, %
 ΔE —— CH_4 排放通量的变化值, $\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$
 $\overline{E}$ —— CH_4 平均排放通量, $\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$
 ΔP ——模型参数的变化值
 $\overline{P}$ ——模型参数的平均值

2 结果分析与讨论

试验用的液态粪便仅作为甲烷排放源,重点研

究影响 CH_4 排放的环境因子而非准确估算 CH_4 排放量,粪便样品测试结果显示粪便的 TAN(总氮)体积质量为 $(0.85\pm0.03)\text{ g/L}$, pH 值为 7.43 ± 0.19 , 整个试验期间变化不大。因此认为试验期间粪便特性基本稳定。

2.1 CH_4 排放通量及影响因素

表 1 为 CH_4 排放通量多重回归模型在考虑不同的影响因子组合下的决定系数情况($p<0.001$)。考虑的变量数目越多,决定系数就越高。但是当变量数增大到一定程度时,决定系数增大的趋势变缓甚至不再增加,这可能是增加的变量对 CH_4 排放通量的影响确实很小或者与模型中已考虑的某个变量具有很高的相关性^[9]。例如只考虑通风量、粪便温度和粪便高度时,决定系数为 0.86。增加舍外空气温度和粪坑内空气温度时,决定系数达到最大为 0.88。由于试验猪舍采用渗透型天花板进气和模拟猪产热,通风量和舍外空气温度决定着舍内空气温度和粪坑内空气温度的变化。由于它们都和通风量有很高的相关性,因此,相对粪便温度而言,舍内外空气温度和粪坑内空气温度对 CH_4 排放通量的影响要小的多。因此,由表 1 可知本试验中粪便高度、粪便温度和通风量可以用来解释大部分 CH_4 排放通量的变化。

不同粪便高度和通风量处理下的 CH_4 排放通量和温度平均值及标准偏差如表 2 所示。

2.2 通风量和粪便温度对 CH_4 排放通量的影响

图 2 为不同粪便高度和有无粪坑挡板下 CH_4 排放通量日变化情况。由图可看出:当通风量较小时, CH_4 排放通量在每个时刻变化较小,随着通风量的增加波动增大。如表 2 所示,各处理下粪便温度在前 3 种通风量下变化较小。因为在稳态条件下, 粪便温度与粪坑底部和四周土壤温度以及舍内空气

表 1 CH_4 排放通量多重回归分析

Tab.1 Best subset regressions (with higher adjusted R^2) for the CH_4 emissions, depending on the number of the independent variables included in the model

编号	R^2	变量							
8	0.88 ($S=1.43$)	H_{manure}	T_{manure}	V_R	T_{outside}	T_{pit}	C_{pit}	R_{room}	T_{room}
7	0.88 ($S=1.39$)	H_{manure}	T_{manure}	V_R	T_{outside}	T_{pit}	C_{pit}	R_{room}	
6	0.88 ($S=1.34$)	H_{manure}	T_{manure}	V_R	T_{outside}	T_{pit}	C_{pit}		
5	0.88 ($S=1.32$)	H_{manure}	T_{manure}	V_R	T_{outside}	T_{pit}			
4	0.87 ($S=1.29$)	H_{manure}	T_{manure}	V_R	T_{outside}				
3	0.86 ($S=1.34$)	H_{manure}	T_{manure}	V_R					
2	0.76 ($S=1.63$)	H_{manure}	T_{manure}						
1	0.58 ($S=2.18$)	H_{manure}							

表 2 不同处理下的 CH₄ 排放通量和温度变化
Tab.2 CH₄ emissions and temperatures with different treatments

	粪便高度 /m	舍内通风量 /m ³ ·h ⁻¹	粪便温度 /℃	粪坑内空气温度 /℃	舍内空气温度 /℃	舍外空气温度 /℃	CH ₄ 排放通量 /g·(m ² ·h) ⁻¹
无粪坑挡板	0.15	211	13.3±0.4	19.7±0.4	31.2±0.2	5.4±0.4	0.15±0.01
		650	14.6±0.1	18.6±0.2	22.0±0.5	5.4±1.2	0.20±0.02
		1 852	14.1±0.3	15.1±0.5	16.7±0.4	7.2±0.6	0.22±0.05
		3 088	9.0±0.4	6.4±0.8	7.1±1.0	0.2±1.4	0.17±0.04
	0.40	211	12.6±0.4	22.3±0.3	34.4±0.1	8.2±0.6	0.33±0.03
		650	14.5±0.1	19.8±0.1	23.4±0.2	4.4±1.1	0.47±0.09
		1 852	12.1±0.3	13.1±0.5	14.7±0.4	5.1±0.8	0.35±0.06
		3 088	8.8±0.1	5.5±0.8	6.5±1.1	-0.6±1.9	0.28±0.14
	0.65	211	11.7±0.2	19.7±0.4	31.1±0.2	1.7±1.0	0.36±0.06
		650	11.0±0.1	12.6±1.1	15.9±0.9	-0.1±0.5	0.35±0.04
		1 852	11.3±0.1	6.5±0.7	7.5±0.9	-2.8±1.4	0.42±0.09
		3 088	13.0±0.1	10.7±1.7	11.1±1.5	4.1±0.9	0.52±0.17
有粪坑挡板	0.15	211	14.5±0.2	20.7±0.2	31.5±0.3	4.0±0.2	0.15±0.01
		650	14.9±0.1	19.2±0.8	23.0±0.9	4.2±0.3	0.20±0.01
		1 852	12.9±0.4	11.8±1.2	12.3±1.9	1.2±2.6	0.19±0.05
		3 088	10.5±0.3	8.7±0.9	9.2±1.4	2.5±1.5	0.19±0.05
	0.40	211	11.7±0.2	19.5±1.1	32.8±1.2	9.7±0.5	0.28±0.02
		650	14.6±0.1	18.9±0.2	23.3±0.1	4.5±0.4	0.41±0.04
		1 852	12.4±0.3	13.5±0.5	14.9±0.4	5.6±1.2	0.33±0.06
		3 088	8.8±0.1	8.8±0.5	11.3±0.7	5.5±0.7	0.32±0.05
	0.65	211	11.2±0.1	15.9±1.3	28.0±1.7	2.8±0.7	0.31±0.05
		650	11.0±0.1	12.7±0.1	16.0±0.1	-1.6±0.5	0.32±0.05
		1 852	12.1±0.2	9.2±0.2	10.5±0.4	1.3±1.0	0.53±0.11
		3 088	12.6±0.2	8.6±0.2	9.2±0.2	3.0±0.3	0.75±0.15

温度有关。试验中,人工调控不同大小的通风量但模拟产热量维持不变,随着舍外空气温度变化而导致舍内空气温度、粪坑内空气温度和粪便温度产生变化。但由于粪坑内液态粪便具有很大的热容量,因此其温度变化与舍内空气温度和粪坑内空气温度相比要缓得多,但当通风量很大(如 3 088 m³/h)且舍外气温很低时粪便温度也较低。

单因素方差分析结果表明,4 种通风量下 CH₄ 排放通量无显著性差异 ($p > 0.05$)。Haeussermann^[10]等人也发现通风策略的变化对整个试验期间 CH₄ 的排放没有影响。舍内通风量的改变主要会影响粪坑内粪便表面的气流压力变化,而 CH₄ 的产生主要来自粪便内部微生物厌氧发酵,与 NH₃ 极易溶于水不同,CH₄ 的溶解度很小,因此不受压力梯度的影响。试验猪舍的通风模式在粪坑中的换气量较少,粪坑中的换气主要是粪便温度和空气温度差造成的温差对流,因此猪舍换气量对 CH₄ 排放影响较小。

如上所述,较大的舍内通风量和较低的舍外气温会降低粪便的温度,从而影响 CH₄ 的排放。研究表明较高的粪便温度在一定程度上可以加速粪便内

部物理、化学和微生物变化过程,从而增加 CH₄ 的排放^[11]。Massé 等^[12]分别测试了蓄粪池中猪粪和奶牛粪便 CH₄ 的排放。结果表明当贮存温度从 10℃增加到 15℃,猪粪和奶牛粪便中 CH₄ 排放量均增加,但当粪便温度低于 10℃时,蓄粪池中 CH₄ 排放极少。较低的粪便温度抵消了通风量的部分作用,因此,要综合考虑粪便温度和通风量对 CH₄ 排放通量的影响。

2.3 粪便高度对 CH₄ 排放通量的影响

无粪坑挡板时,4 种通风量下 CH₄ 平均排放通量在粪便高度为 0.15 m 时比 0.40 m 和 0.65 m 分别减少了 50.0% ($p < 0.01$) 和 56.1% ($p < 0.01$), 0.40 m 时比 0.65 m 时 CH₄ 平均排放通量减少了 12.2% ($p > 0.05$)。有粪坑挡板时,4 种通风量下 CH₄ 平均排放通量在粪便高度为 0.15 m 时比 0.40 m 和 0.65 m 时分别减少了 47.1% ($p < 0.05$) 和 62.5% ($p < 0.01$), 0.40 m 时比 0.65 m CH₄ 平均排放通量减少了 29.2% ($p > 0.05$)。

实际猪舍中,粪便高度的不同意味着猪粪累积的时间不同,而在猪舍中时间愈长,猪粪厌氧发酵的机会就越大,产生 CH₄ 的量就会增加;而发酵充分

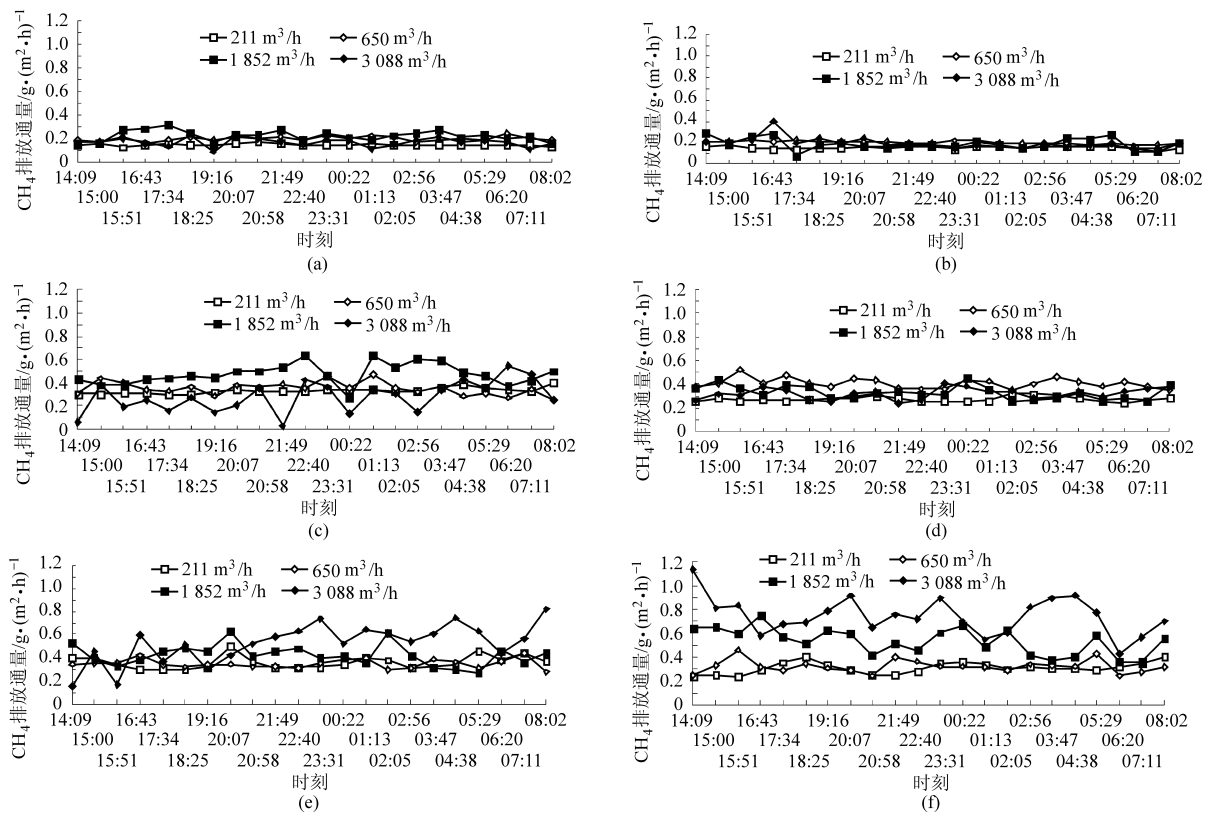


图2 CH₄ 排放通量日变化

Fig. 2 Diurnal variation of CH₄ emission

(a) 粪坑无挡板, 粪便高度 0.15 m (b) 粪坑有挡板, 粪便高度 0.15 m (c) 粪坑无挡板, 粪便高度 0.40 m
(d) 粪坑有挡板, 粪便高度 0.40 m (e) 粪坑无挡板, 粪便高度 0.65 m (f) 粪坑有挡板, 粪便高度 0.65 m

又反过来会影响猪粪的温度,进而影响CH₄的产生与排放特性。研究表明减少CH₄排放最有效的方法是通过清粪而抑制细菌接种体的形成^[4,10-11,13]。当粪便被清除后,蓄粪池或粪坑内的粪便高度将会降低。Massé等^[11]模拟了蓄粪池内奶牛粪便在0.30、0.60、0.90和1.20 m时的CH₄排放通量,发现CH₄排放通量随着蓄粪池内粪便高度的降低而减少,当粪便高度从0.60 m降低到0.30 m时,CH₄平均排放通量减少了26%。这与本试验液态猪粪的结果很类似。Haeussermann^[10]等研究发现如果只是将粪坑内粪便清空但并没有冲洗干净粪坑,CH₄排放量要比完全清洗干净的粪坑大的多。这是因为粪坑内残留的粪便使得细菌接种体更易形成,从而容易产生和排放更多的CH₄^[3]。

2.4 粪坑挡板对CH₄排放通量的影响

单因素方差分析结果表明,粪坑内有无挡板CH₄排放通量无显著性差异($p>0.05$)。粪坑挡板影响着粪坑内气流行为和空气交换率^[14]。不设置粪坑挡板时,舍内气流通过漏缝地板进入粪坑后可以无阻挡地通过整个粪坑挥发表面。当粪坑被挡板分割成几部分后,进入粪坑的气流也被分割成相应的小部分,从而限制了气流与粪便挥发表面的接触

面积,最终降低粪坑空气交换率。尽管Morsing^[15]等发现粪坑挡板设置成和进入粪坑的气流方向垂直时与平行时相比,舍内NH₃可降低23%,但如上所述,CH₄的产生主要来自粪便内部微生物厌氧发酵,与NH₃极易溶于水不同,CH₄的溶解度很小,因此不受压力梯度的影响。

2.5 CH₄排放通量统计模型

根据表1,基于通风量、粪便温度和粪便高度3个主要变量,可以建立CH₄排放通量非线性回归数学模型:

无粪坑挡板

$$E = 0.013V_R^{0.09}T_{\text{manure}}^{1.29}H_{\text{manure}}^{0.60} \quad (4)$$

($R^2 = 0.90, p < 0.01$)

有粪坑挡板

$$E = 0.004V_R^{0.24}T_{\text{manure}}^{1.42}H_{\text{manure}}^{0.74} \quad (5)$$

($R^2 = 0.90, p < 0.01$)

敏感性分析用来比较改变统计模型中参数而引起的CH₄排放通量的变化情况^[16],如表3所示。由于式(4)和(5)较类似,因此只取式(4)作敏感性分析。敏感性分析中所用的通风量、粪便温度和粪便高度平均值分别为1450 m³/h、12.2℃和0.4 m。由表3可知,CH₄排放通量相对于粪便温度、粪便高

度和通风量的敏感性依次减小(敏感度依次减小)。在较低的通风量变化区间(如 197 ~ 685 m³/h,敏感度为 29.5%),CH₄ 排放通量变化的敏感性要高于较高的通风量变化区间。CH₄ 排放通量变化的敏感性相对粪便高度有相同变化趋势。但对于粪便温度趋势正好相反,CH₄ 排放通量变化的敏感性在较高的粪便温度区间要高于较低的粪便温度。

表 3 CH₄ 排放通量统计模型敏感性分析

Tab.3 Relative sensitivity values for CH₄ emission with respect to ventilation rate, manure temperature and manure depth

通风量范围/m ³ ·h ⁻¹	通风量敏感度/%	粪便温度范围/℃	粪便温度敏感度/%	粪便高度范围/m	粪便高度敏感度/%
197 ~ 685	29.5	8.7 ~ 9.7	118.9	0.150 ~ 0.235	80.8
685 ~ 1 173	13.8	9.7 ~ 10.7	122.5	0.235 ~ 0.320	69.6
1 173 ~ 1 661	9.3	10.7 ~ 11.7	125.8	0.320 ~ 0.405	62.5
1 661 ~ 2 149	7.1	11.7 ~ 12.7	128.9	0.405 ~ 0.490	57.4
2 149 ~ 2 637	5.7	12.7 ~ 13.7	131.9	0.490 ~ 0.575	53.5
2 637 ~ 3 125	4.8	13.7 ~ 14.7	134.8	0.575 ~ 0.660	50.5

3 结论

(1)粪便高度、粪便温度和通风量可以用来解释大部分的 CH₄ 排放通量变化差异。

(2)对于使用渗透性天花板进气和负压通风排气系统,4 种通风量之间 CH₄ 排放通量差异不显著,但并不适用于其他通风模式的猪舍。舍内通风量的改变同时会影响舍内和粪坑内空气温度以及粪便温度,因此要综合考虑通风量和温度对气体排放通量

的影响。

(3)液态猪粪便中 CH₄ 排放通量随着粪坑内粪便高度的降低而减少。设置粪坑挡板对粪坑内 CH₄ 排放没有影响。

(4)敏感性分析表明就 CH₄ 排放通量而言粪便温度的敏感性(敏感度大)要高于粪便高度和通风量。在较低的通风量和粪便高度变化区间,CH₄ 排放通量变化的敏感性要高于较高的通风量和粪便高度变化区间。而对于粪便温度变化趋势正好相反。

参 考 文 献

1 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 Hongmin, Li Yu'e, Tao Xiuping, et al. China greenhouse gas emissions from agricultural activities and its mitigation strategy[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(10): 269 ~ 273. (in Chinese)

2 Sommer S G, Zhang G, Bannink A, et al. Algorithms determining ammonia emission from buildings housing cattle and pigs and from manure stores[J]. Advances in Agronomy, 2006, 89: 261 ~ 335.

3 Sommer S G, Petersen S O, Sørensen P, et al. Methane and carbon dioxide emissions and nitrogen turnover during liquid manure storage[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2007, 78(1): 27 ~ 36.

4 Monteny G J, Groenestein C M, Hilhorst M A. Interactions and coupling between emissions of methane and nitrous oxide from animal husbandry [J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2001, 60(1 ~ 3): 123 ~ 132.

5 高新星, 赵立欣. 养殖场粪池甲烷排放研究进展及对 CDM 项目贡献分析[J]. 可再生能源, 2006, 24(6): 73 ~ 77. Gao Xinxing, Zhao Lixin. Research status of methane emission from animal manure lagoon of livestock farm and analysis on its contribution to CDM project [J]. Renewable Energy, 2006, 24(6): 73 ~ 77. (in Chinese)

6 董红敏, 朱志平, 陶秀萍, 等. 育肥猪舍甲烷排放浓度和排放通量的测试与分析 [J]. 农业工程学报, 2006, 22(1): 123 ~ 128.

Dong Hongmin, Zhu Zhiping, Tao Xiuping, et al. Measurement and analysis of methane concentration and flux emitted from finishing pig house [J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(1): 123 ~ 128. (in Chinese)

7 李娜, 董红敏, 朱志平, 等. 夏季猪场污水贮存过程中 CO₂、CH₄ 排放试验[J]. 农业工程学报, 2008, 24(9): 234 ~ 238.

Li Na, Dong Hongmin, Zhu Zhiping, et al. Carbon dioxide and methane emissions from slurry storage of swine farm in summer [J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(9): 234 ~ 238. (in Chinese)

8 Zerihun D, Feyen J, Reddy J M. Sensitivity analysis of furrow-irrigation performance parameters[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 1996, 122(1): 49 ~ 57.

Vibration Control, 2006, 26(2): 4~6. (in Chinese)

- 3 陈奎孚,张森文. 半功率法估计阻尼的一种改进[J]. 振动工程学报,2002,15(2): 151~155.
Chen Kuifu, Zhang Senwen. Improvement on the damping estimation by half power point method[J]. Journal of Vibration Engineering, 2002, 15(2): 151~155. (in Chinese)
- 4 赵晓丹,刘涛. 基于内积模极值的小阻尼计算新方法[J]. 机械科学与技术,2009,28(10): 1 308~1 310.
Zhao Xiaodan, Liu Tao. A method for small damping estimation by searching the maximum of inner product module[J]. Mechanical Science and Technology, 2009, 28(10): 1 308~1 310. (in Chinese)
- 5 黄应来,董大伟,闫兵. 密集模态分离及其参数识别方法研究[J]. 机械强度,2009,31(1): 8~13.
Huang Yinglai, Dong Dawei, Yan Bing. Study on closely spaced modes decomposition and modal parameter identification[J]. Journal of Mechanical Strength, 2009, 31(1): 8~13. (in Chinese)
- 6 Yin H P, Duhamel D, Argoul P. Natural frequencies and damping estimation using wavelet transform of a frequency response function[J]. Journal of Sound and Vibration, 2004, 271(5): 999~1 014.
- 7 Tan Jiubin, Liu Yan, Wang Lei, et al. Identification of modal parameters of a system with high damping and closely spaced modes by combining continuous wavelet transform with pattern search[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2008, 22(5): 1 055~1 060.
- 8 黄天立,楼梦麟. 小波变换在密集模态结构参数识别中的应用[J]. 振动与冲击,2006,25(5): 140~143.
Huang Tianli, Lou Menglin. Application of wavelet transform in the modal parameters identification of structures with closely spaced modes[J]. Journal of Vibration and Shock, 2006, 25(5): 140~143. (in Chinese)
- 9 刘俊斐,李华军. HHT 方法在模态密集结构模态参数识别中的应用研究[J]. 中国海洋大学学报,2007,37(增刊 2): 181~188.
Liu Junfei, Li Huajun. Modal parameter identification for structures with closely spaced modes of vibration using the HHT method[J]. Periodical of Ocean University of China,2007,37(Supp. 2): 181~188. (in Chinese)
- 10 王宏禹. 信号处理相关理论与统一法[M]. 北京:国防工业出版社,2005: 217~221.
- 11 王慧,刘正士,陈恩伟,等. 悬臂梁结构模态参数 Hibert-Huang 变换识别方法[J]. 农业机械学报,2008,39(9): 187~191.
Wang Hui, Liu Zhengshi, Chen Enwei, et al. Application of HHT for modal parameters identification to cantilever beam structure[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(9): 187~191. (in Chinese)
- 12 何正嘉,訾艳阳,张西宁. 现代信号处理及工程应用[M]. 西安:西安交通大学出版社,2007: 11.

(上接第 189 页)

- 9 Blanes-Vidal V, Hansen M N, Pedersen S, et al. Emissions of ammonia, methane and nitrous oxide from pig houses and slurry: effects of rooting material, animal activity and ventilation flow[J]. Agriculture, Ecosystem & Environment, 2008, 124(3~4): 237~244.
- 10 Haeussermann A, Hartung E, Gallmann E, et al. Influence of season, ventilation strategy, and slurry removal on methane emissions from pig houses[J]. Agriculture, Ecosystem & Environment, 2006, 112(2~3): 115~121.
- 11 Massé D I, Masse L, Claveau S, et al. Methane emissions from manure storages [J]. Transactions of the ASABE, 2008, 51(5): 1 775~1 781.
- 12 Massé D I, Croteau F, Patni N K, et al. Methane emissions from dairy cow and swine manure slurries stored at 10°C and 15°C [J]. Canadian Biosystems Engineering, 2003, 45: 6.1~6.6.
- 13 Osada T, Rom H B, Dahl P. Continuous measurement of nitrous oxide and methane emission in pig units by infrared photoacoustic detection[J]. Transactions of the ASAE, 1998, 41(4): 1 109~1 114.
- 14 Ye Z Y, Saha K C, Li B M, et al. Effect of environmental deflector and curtain on air exchange rate in slurry pit in a model pig house[J]. Biosystems Engineering, 2009, 104(4): 522~533.
- 15 Morsing S, Strøm J S, Zhang G, et al. Scale model experiments to determine the effects of internal airflow and floor design on gaseous emissions from animal houses[J]. Biosystems Engineering, 2008, 99(1): 99~104.
- 16 Liang Z S, Westerman P W, Arogo J. Modeling ammonia emission from swine anaerobic lagoons[J]. Transactions of the ASAE, 2002, 45(3): 787~798.