

雷 鸣, 程于真, 陈竹君, 等. 添加黄土或古土壤降低猪粪温室气体综合排放效应[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(7): 1624–1632.

LEI Ming, CHENG Yu-zhen, CHEN Zhu-jun, et al. Addition of loess or paleosol reduces greenhouse gas emissions from pig manure[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(7): 1624–1632.

## 添加黄土或古土壤降低猪粪温室气体综合排放效应

雷 鸣<sup>1,2</sup>, 程于真<sup>1,2</sup>, 陈竹君<sup>1,2</sup>, 周建斌<sup>1,2\*</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:**为了探究加土垫圈这一传统措施对控制畜禽粪便存贮过程中温室气体排放的作用, 采用室内培养方法研究了添加黄土与古土壤对猪粪温室气体排放的影响及可能的作用机理。结果表明: 与猪粪处理相比, 添加黄土或古土壤处理的CO<sub>2</sub>累积排放量降低了42.4%~64.3%, CH<sub>4</sub>累积排放量降低了99.8%以上, 但N<sub>2</sub>O累积排放量增加了1.8~18.0倍, 这与土壤对养分的保蓄作用及土壤添加后碳、氮底物的变化有关。总体而言, 添加黄土或古土壤处理的全球增温潜势为猪粪对照的38.1%~67.0%, 有效减少了猪粪的温室气体排放。与施用黄土相比, 添加古土壤具有更好的减排效果, 这与古土壤中具有吸附能力的物理性黏粒和游离态氧化铁含量较高有关, 说明添加物类型的选择对减少畜禽粪便存贮阶段的温室气体排放具有重要作用。

**关键词:**家畜粪肥; 温室气体; 黄土; 古土壤; 全球增温潜势

中图分类号: X511 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2019)07-1624-09 doi:10.11654/jaes.2018-1459

### Addition of loess or paleosol reduces greenhouse gas emissions from pig manure

LEI Ming<sup>1,2</sup>, CHENG Yu-zhen<sup>1,2</sup>, CHEN Zhu-jun<sup>1,2</sup>, ZHOU Jian-bin<sup>1,2\*</sup>

(1. College of Natural 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:** Manure storage is an important process that influences greenhouse gas emissions when considering manure management practices. In order to better understand the possible mechanisms of adding loess to livestock housing and its effects on greenhouse gas emissions, an incubation experiment was carried out to study the effects of adding loess and paleosol to pig manure. The results showed that the cumulative release of CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> decreased by 42.4%~64.3% and by more than 99.8%, respectively. Compared to the control (pig manure without the addition of loess or paleosol), the loess and paleosol treatments show a 1.8 to 18.0-fold reduction in the cumulative N<sub>2</sub>O emissions because of their soil retention abilities and dilution effects. The global warming potential of loess or paleosol treatments was approximately 38.1%~67.0%, compared to that of the control, indicating an effective reduction in greenhouse gas emissions. When compared to the loess treatment, the paleosol treatment had a greater effect on emission reduction owing to the higher content of physical clay and free iron oxide present in paleosol. We conclude that the selection of a suitable additive has an important impact on greenhouse gas emissions during manure storage.

**Keywords:** livestock manure; greenhouse gases; loess; paleosol; global warming potential

全球变暖是当今国际社会普遍关注的全球性问题, 养殖业产生的畜禽粪便是温室气体的重要来源。联合国粮农组织(FAO)在《牲畜的巨大阴影: 环境问

题与选择》报告中指出<sup>[1]</sup>, 全球人为温室气体排放总量中有9%的CO<sub>2</sub>、37%的CH<sub>4</sub>和65%的N<sub>2</sub>O是由畜牧业造成的, 其中畜禽粪便的温室气体排放量占全球

收稿日期: 2018-11-22 录用日期: 2019-02-26

作者简介: 雷 鸣(1994—), 男, 河南三门峡人, 硕士研究生, 从事土壤碳、氮养分转化方面的研究。E-mail: hnsmlm@foxmail.com

\*通信作者: 周建斌 E-mail: jbzhou@nwsuaf.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目(41671295)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China(41671295)

农业温室气体总排放量的10%,并呈持续上涨的趋势<sup>[2]</sup>。

粪肥的施用在我国具有悠久的历史,长期施用粪肥不仅提高了作物产量,还改善了土壤理化及生物性质<sup>[3-4]</sup>。畜禽粪便类有机肥与化肥配合施用,可以协调土壤有机、无机养分平衡,满足作物不同生育期的养分需求<sup>[5]</sup>。然而,近年来随着畜禽养殖规模的不断扩大以及养殖方式的迅速转变,畜禽粪便已成为我国环境的重要污染源之一<sup>[6]</sup>。

目前我国畜禽养殖业每年的废弃物排放量约38亿t<sup>[7]</sup>,近20%的畜禽粪便未及时处理,对生态环境造成了严重的污染与破坏<sup>[4]</sup>。因此,做好畜禽粪便的综合管理与合理利用工作,对减少养殖过程中因畜禽粪便引起的环境污染及温室气体排放问题具有重要意义<sup>[8]</sup>。

畜禽粪便的管理过程主要分为室内处理、室外储存和管理及还田利用3个阶段,对固液分离、厌氧发酵、酸化贮存等多种管理方式而言,温室气体的排放均来自室内与室外的储存及管理两个阶段<sup>[9]</sup>。由于我国对于畜禽粪便的就地就近科学储存技术设备的研究不足,同时缺乏高效输送设备的有效推广<sup>[10]</sup>,因此,从传统畜禽粪便管理措施中借鉴经验与启示尤为重要。我国劳动人民在长期的农业生产实践中积累了丰富的使用粪肥的经验。加土垫圈、施用土粪是我国北方地区特别是黄土高原地区一种传统的处理粪肥的方法,这种方法不仅利于保持畜禽圈舍的清洁,而且对粪肥中的碳氮养分也具有较好的保蓄作用<sup>[11]</sup>。但是,在二十世纪六七十年代,由于肥料不足,对土粪这一传统有机肥的研究主要以其肥力作用为主<sup>[12]</sup>,对加土垫圈这一措施的环境效应缺乏相关研究。在利用垫料的发酵床养殖模式在国内外得到推广的今天<sup>[13-14]</sup>,重新审视加土垫圈这一传统措施的肥力与环境效益,为解决当前畜禽粪便造成的环境问题提供借鉴。

黄土高原广泛分布的古土壤由于所受风化和淋溶作用不同,与黄土在元素组成和理化性质上存在一

定差异<sup>[15]</sup>,因此添加黄土与古土壤对畜禽粪便温室气体的排放可能具有不同影响。为了评估加土垫圈这种传统措施的温室气体释放特性与主要机理,本试验采用室内培养的方法,比较研究添加黄土与古土壤对猪粪温室气体排放的影响,为畜禽粪便的优化管理提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料

供试土壤采自陕西省杨凌示范区崔西沟东侧的黄土-古土壤剖面,采集的土壤风干除杂后过2 mm筛于4℃环境下保存备用。所采黄土、古土壤样品的部分理化性质如表1所示。

供试的新鲜猪粪采自西北农林科技大学畜牧教学试验基地,取存放时间不超过24 h的鲜样,其基本理化性质为:有机碳348 g·kg<sup>-1</sup>,全氮30.9 g·kg<sup>-1</sup>,碳氮比11.3,含水率71.7%,pH 8.73。

### 1.2 试验设计

试验采用室内好气培养的方法,将所采集的新鲜猪粪与风干后的黄土和古土壤分别按照1:2、1:4和1:6比例均匀混合,25℃下于250 mL锥形瓶内培养,同时设置单一猪粪、黄土与古土壤作为对照,共9个处理(表2),每个处理重复3次。猪粪处理保持其原始含水量,其余各处理均调节含水量在30%左右,各培养瓶用带有透气孔的封口膜封口,以在保障好气环境的同时防止水分散失。在培养开始的第1、2、3、4、5、7、9、11、14、17、20、23、26、29、32、35、38、42、46、50 d采集气体样品,每次采样结束后用称重法补充相应水分。

为了在测定理化性质的同时不对气体样品的采集产生影响,另取相同比例猪粪与土壤混合后置于

表2 气体测定试验设计

Table 2 Experiment scheme of GHGs determination

处理 Treatments	粪肥 Manure CK <sub>1</sub>	黄土 Loess				古土壤 Paleosol			
		1:2	1:4	1:6	CK <sub>2</sub>	1:2	1:4	1:6	CK <sub>3</sub>
猪粪/g	15	15	15	15	0	15	15	15	0
土壤/g	0	30	60	90	30	30	60	90	30

表1 供试黄土和古土壤理化性质

Table 1 The physicochemical properties of loess and paleosol

供试样品 Sample types	有机质 Organic matter/ g·kg <sup>-1</sup>	全氮 Total N/ g·kg <sup>-1</sup>	速效磷 Olsen-P/ mg·kg <sup>-1</sup>	速效钾 Available K/ mg·kg <sup>-1</sup>	硝态氮 NO <sub>3</sub> -N/ mg·kg <sup>-1</sup>	铵态氮 NH <sub>4</sub> -N/ mg·kg <sup>-1</sup>	碳酸钙 CaCO <sub>3</sub> / g·kg <sup>-1</sup>	物理性黏粒 Physical clay (≤0.01 mm)/%	游离态氧 化铁 Fe <sub>o</sub> / g·kg <sup>-1</sup>	比表面积 S <sub>BET</sub> /m <sup>2</sup> ·g <sup>-1</sup>	pH
黄土	3.24	0.51	9.11	152	21.5	2.94	128	27.7	7.19	26.1	8.47
古土壤	3.48	0.53	6.78	207	4.36	1.28	2.88	46.2	9.76	37.0	8.37

1 L培养瓶中进行培养(表3),培养过程中水分及温度调控与上述采气过程保持一致。在培养开始的第1、5、9、14、20、29、38、50 d采集各处理样品10 g,用于pH及矿质态氮的测定。

表3 样品理化性质试验设计

Table 3 Experiment scheme of basic physicochemical properties

处理 Treatments	粪肥 Manure		黄土 Loess				古土壤 Paleosol			
	CK <sub>1</sub>		1:2	1:4	1:6	CK <sub>2</sub>	1:2	1:4	1:6	CK <sub>3</sub>
猪粪/g	200		60	60	60	0	60	60	60	0
土壤/g	0		120	240	360	200	120	240	360	200

### 1.3 采样方法与室内分析

采集气体样品前,将装有样品的锥形瓶置于通气环境中30 min,使瓶内气体浓度与室内大气浓度基本平衡。采样时在瓶塞的玻璃管外端套上带有三通阀的软管,并用同样带有三通阀的注射器抽取30 mL瓶内气体,抽气前反复推拉注射器以混匀瓶内气体。第一次取样完成后利用注射器抽取30 mL室内空气注入瓶内以补充之前瓶中的气体损失<sup>[16]</sup>,之后密闭培养1 h,按上述同样方法进行第二次抽样。采样结束后将瓶塞打开,通气后封口放入培养箱中继续进行培养。采集的气体样品存于提前抽成真空的采气袋中保存待测。

气体样品在气相色谱仪(Agilent 7890B)上测定,CH<sub>4</sub>与CO<sub>2</sub>检测器为火焰离子化检测器(FID),检测器温度250 ℃,载气为N<sub>2</sub>,流速30 mL·min<sup>-1</sup>;电子捕获检测器(ECD)测定N<sub>2</sub>O,检测器温度300 ℃,载气为N<sub>2</sub>,流速2 mL·min<sup>-1</sup>;柱温55 ℃。

温室气体排放速率按以下公式计算:

$$F = \rho \times (\Delta c / \Delta t) \times (V / W) \times [273 / (273 + T)]$$

式中: $F$ 为CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O排放通量; $\rho$ 为标准状况下气体密度,CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O的气体密度分别为1.977、0.717 kg·m<sup>-3</sup>和1.977 kg·m<sup>-3</sup>; $\Delta c$ 为时间变化 $\Delta t$ 内培养瓶中气体的浓度变化量; $V$ 为培养瓶中气体的有效空间体积; $W$ 为培养瓶中样品烘干质量; $T$ 为培养时的温度。

各处理CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O的累计排放量通过相邻两次气体平均排放速率与排放时间的乘积累加计算得出,相邻两次测定间总的排放量为:

$$M = \sum [(F_1 + F_2) / 2] \times 24 \times t \times m$$

式中: $M$ 为CO<sub>2</sub>累积排放量; $F$ 为CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O的排放通量; $t$ 为两次气体测定的间隔时间; $m$ 为各培养瓶中样品的烘干质量。

由于CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O的增温效应不同,在大气中停留时间也不同,因此需计算其全球增温潜势(Global warming potential, GWP)以评估不同体系温室气体的综合效应。据IPCC预估,在100年的时间范围内,若以CO<sub>2</sub>的GWP值为1,则CH<sub>4</sub>的GWP值为28, N<sub>2</sub>O的GWP值为265<sup>[17]</sup>。参考蔡祖聪<sup>[18]</sup>和Hou等<sup>[19]</sup>所用方法,计算各处理GWP<sub>100</sub>:

$$GWP_{100} = M(\text{CO}_2) + M(\text{CH}_4) \times 28 + M(\text{N}_2\text{O}) \times 265$$

式中: $M$ 为各温室气体的累计排放量。

在进行相关性分析时,由于把黄土和古土壤作为添加物,因此单独计算各处理中猪粪的温室气体综合效应能更好地反映添加物的作用。添加黄土与古土壤处理中的猪粪温室气体综合效应按下列公式进行计算:

$$GWP_{\text{猪粪}} = (GWP_1 - GWP_2 \times wt_1\%) / wt_2\%$$

式中: $GWP_1$ 为各处理中猪粪与土壤的总增温潜势; $GWP_2$ 为黄土或古土壤对照(CK<sub>2</sub>、CK<sub>3</sub>)的增温潜势; $wt_1\%$ 为黄土或古土壤在各处理中所占的质量百分数; $wt_2\%$ 为各处理中粪肥所占的质量百分数。

### 1.4 数据处理

利用Microsoft Excel 2016进行基础数据整理与表格制作;SigmaPlot 12.0进行图形绘制;SPSS 20.0进行统计分析。采用最小显著性差异法(LSD法)进行多重比较;Pearson相关分析用以确定GWP与各理化因素间的关系。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同处理pH的变化

如图1所示,猪粪处理pH整体呈上升趋势,培养期间共上升0.61个单位。添加黄土或古土壤的处理pH先缓慢上升,随后逐渐下降,培养期间各处理pH始终显著低于猪粪处理( $P < 0.05$ )。培养结束时,添加黄土或古土壤各处理的pH随着土壤添加比例的增加而降低,且添加黄土处理的pH均高于古土壤处理,这可能与黄土中较高的碳酸盐起到的缓冲作用有关。

### 2.2 不同处理矿质态氮的变化

猪粪处理铵态氮含量在培养前23 d呈上升趋势,随后逐渐下降,培养结束时较培养前降低了20.6% (图2a)。由于土壤的稀释效应,添加黄土或古土壤各处理的初始铵态氮含量显著降低( $P < 0.05$ )。培养结束时,古土壤1:2处理铵态氮含量较培养前下降了84.4%,其余添加黄土或古土壤处理的铵态氮含量均降低98%以上。



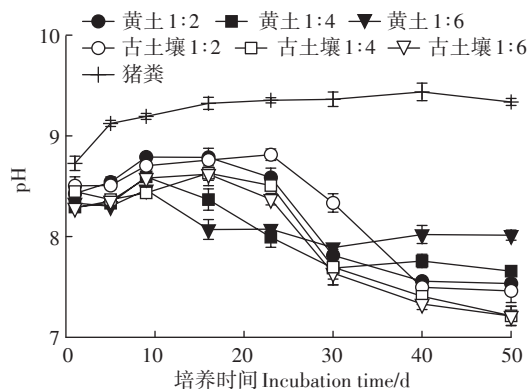


图1 试验过程中各处理pH值的变化

Figure 1 Changes of pH in each treatment during incubation

猪粪处理硝态氮含量在培养前30 d基本保持平稳,随后迅速增加(图2b)。添加黄土或古土壤处理的硝态氮含量显著增加,各处理培养结束时的硝态氮含量均随土壤添加比例的提高而降低。添加黄土和古土壤后硝态氮含量变化趋势基本一致,但添加黄土处理的硝态氮变化更迅速,且不同添加量处理间的差异更大。

### 2.3 不同处理温室气体排放速率的动态变化

添加黄土或古土壤均显著降低了猪粪的 $\text{CO}_2$ 排放速率,且古土壤处理的排放速率较低(图3a)。古土壤1:2、1:4与1:6处理的 $\text{CO}_2$ 峰值依次为87.9、38.2、18.7  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ ,较同比例黄土处理分别降低21.6%、23.8%和27.6%。猪粪 $\text{CH}_4$ 排放速率于第2 d时达到峰值1163  $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ ,之后呈缓慢下降趋势(图3b)。添加黄土或古土壤各处理的 $\text{CH}_4$ 释放速率较低,在培养的前42 d均与猪粪对照处理存在显著差异( $P<0.05$ )。

在培养的前35 d,猪粪 $\text{N}_2\text{O}$ 净排放速率为负值,最低为 $-3.16 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ (图3c),表明该阶段几乎没有 $\text{N}_2\text{O}$ 的生成且存在 $\text{N}_2\text{O}$ 被转化的现象,这与猪粪硝态氮的变化基本相符。添加黄土或古土壤改变了猪粪的 $\text{N}_2\text{O}$ 释放特性,培养第4 d时出现 $\text{N}_2\text{O}$ 排放峰。古土壤3个处理的 $\text{N}_2\text{O}$ 峰值较小,较同比例黄土处理依次降低77.2%、68.1%、51.5%。随着培养进行,黄土与古土壤1:2处理排放速率持续上升,先后于第26 d和第42 d出现第二个更高的峰值,分别为54.4  $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ 和84.9  $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ ;其余各处理在第1个峰值结束后排放速率基本保持稳定,未出现新的 $\text{N}_2\text{O}$ 排放峰。

### 2.4 添加黄土或古土壤对猪粪温室气体累积排放量的影响

猪粪 $\text{CO}_2$ 累积排放量最高为 $1213\pm 91.2 \text{ mg}$ ,添加不同比例黄土或古土壤均可显著降低猪粪的 $\text{CO}_2$ 累积排放量,其中添加古土壤的3个处理减排效果更好,可降低54.2%~64.3%的 $\text{CO}_2$ 累积排放量(图4a)。随着黄土或古土壤添加比例的提高, $\text{CO}_2$ 累积排放量逐渐降低。由图4b可以看出,添加黄土或古土壤极显著地降低了猪粪的 $\text{CH}_4$ 排放量( $P<0.01$ ),降幅均在99.8%以上,但添加黄土与古土壤处理间的 $\text{CH}_4$ 累积排放量差异不显著。

图4c表明,除1:4比例施用古土壤处理外,添加不同比例的黄土或古土壤均显著增加了猪粪的 $\text{N}_2\text{O}$ 累积排放量( $P<0.05$ ),且1:2比例施用黄土或古土壤处理的 $\text{N}_2\text{O}$ 累积排放量均高于相同土壤类型下的其他处理。方差分析结果表明,土壤添加比例对 $\text{N}_2\text{O}$ 累积排放量影响显著,且土壤类型和添加量对 $\text{N}_2\text{O}$ 累积

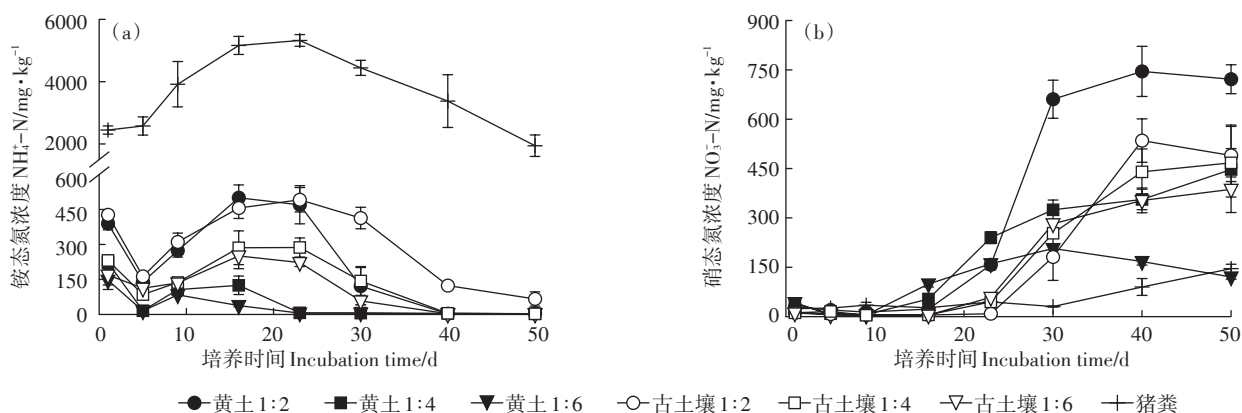


图2 试验过程中各处理矿质态氮的变化

Figure 2 Changes of mineral nitrogen in each treatment during incubation

排放量具有显著的交互作用。

### 2.5 添加黄土或古土壤对全球增温潜势的影响

表4结果表明,添加黄土或古土壤显著降低了猪粪处理的增温潜势。各处理中CO<sub>2</sub>均是主要的温室气体排放种类,对增温潜势的贡献占71.7%以上。添加黄土或古土壤处理的N<sub>2</sub>O所占贡献仅次于CO<sub>2</sub>,占增温潜势的5.1%~28.2%。猪粪处理中N<sub>2</sub>O所占贡献最低,CH<sub>4</sub>贡献相对较高。

古土壤1:4和1:6处理的增温潜势显著低于相同比例的黄土处理( $P<0.05$ )。同一土壤类型下1:6处

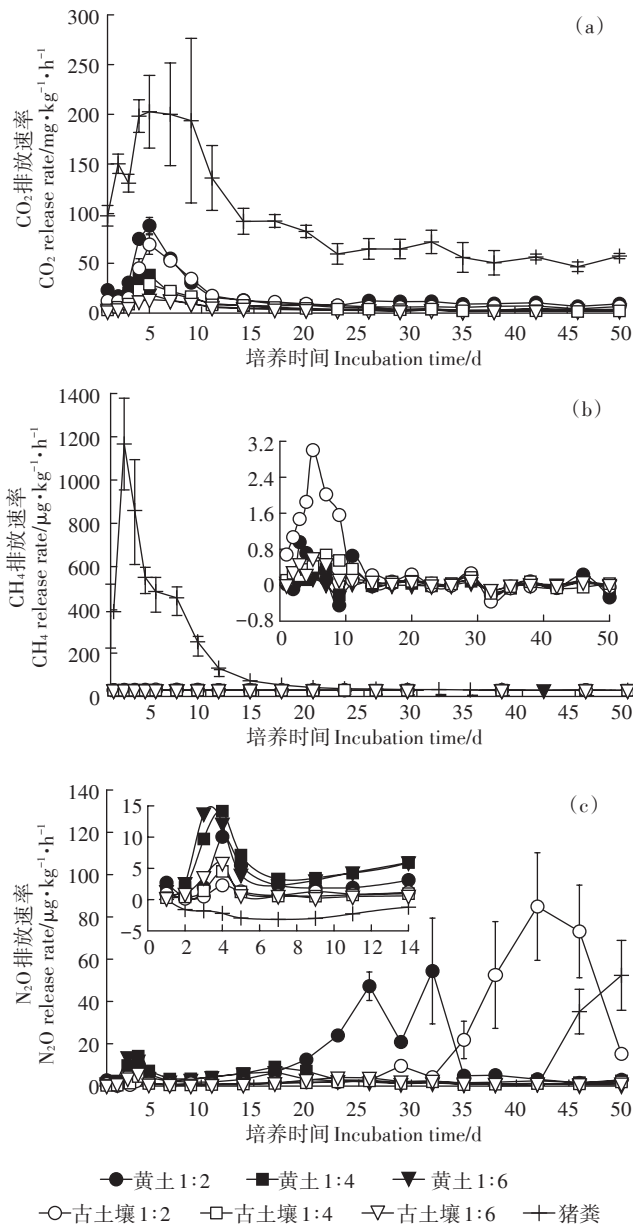


图3 试验过程中各处理CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O排放速率的动态变化  
Figure 3 Dynamic changes of CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O in different treatments during incubation

理增温潜势较1:4处理无显著差异。将黄土与古土壤添加量及土壤类型作为两个因素进行方差分析(表5),结果表明黄土与古土壤的性质差异及添加比例均对猪粪温室气体的排放具有极显著的影响,但两者对增温潜势的交互作用未达显著水平。

### 2.6 添加黄土或古土壤后各因素与猪粪温室气体排放的相关性

将添加黄土与古土壤后样品的总碳、全氮、pH等指标分别与各处理中猪粪的3种温室气体排放量进行

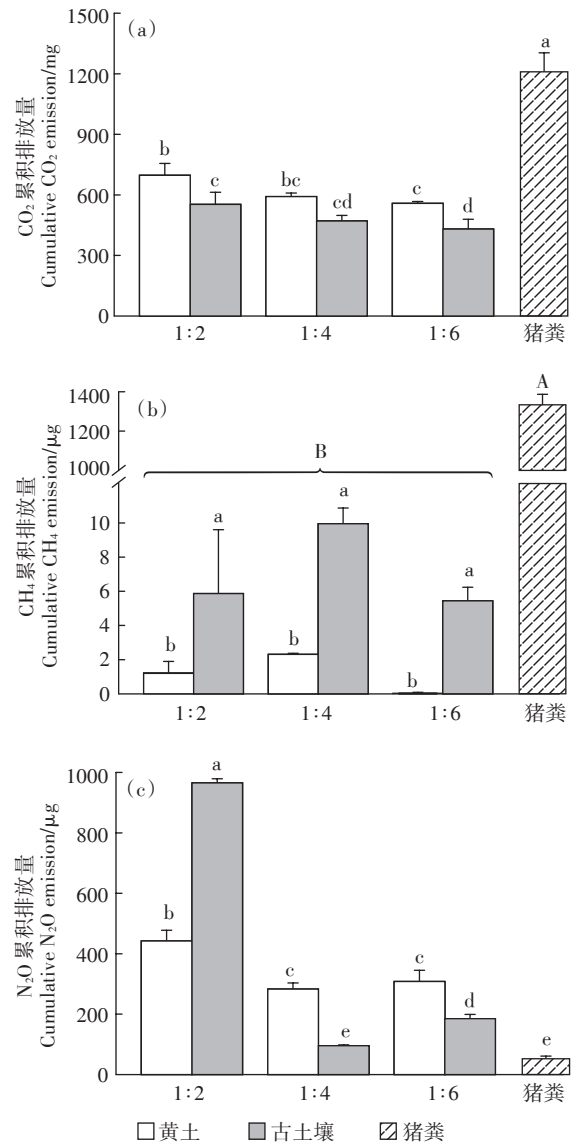


图4 试验过程中各处理CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O的累积排放量  
Figure 4 Cumulative emission of CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O in different treatments during incubation

相关性分析发现(表6),添加黄土与古土壤后猪粪的CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O排放量均与样品总碳和全氮的含量呈显著或极显著正相关。碳氮比与猪粪N<sub>2</sub>O排放量呈极显著正相关关系( $P<0.01$ ),与CO<sub>2</sub>和CH<sub>4</sub>排放无明显相关性。铵态氮与3种温室气体释放量均呈正相关关系,其中与CO<sub>2</sub>和N<sub>2</sub>O的相关性达极显著水平。pH和硝态氮与3种温室气体间的相关性均不显著。

表4 各处理温室气体所占贡献及全球增温潜势

Table 4 The contribution of GHGs and their global warming potential in different treatments

处理 Treatments	CO <sub>2</sub> 对GWP的 贡献 Contribution of CO <sub>2</sub> to GWP/%	CH <sub>4</sub> 对GWP的 贡献 Contribution of CH <sub>4</sub> to GWP/%	N <sub>2</sub> O对GWP的 贡献 Contribution of N <sub>2</sub> O to GWP/%	GWP
黄土1:2	82.28	0.011	17.71	850.3b
黄土1:4	88.73	0.014	11.25	669.7bc
黄土1:6	87.23	0.004	12.77	642.3c
古土壤1:2	71.73	0.046	28.22	774.1b
古土壤1:4	94.79	0.046	5.16	499.1d
古土壤1:6	89.70	0.060	10.24	482.7d
猪粪	95.63	3.245	1.13	1 268.1a

注:不同小写字母表示处理之间在0.05水平上差异显著。

Note: Lower-case letters indicate significant difference at  $P<0.05$  between different treatments.

表5 黄土、古土壤添加量和土壤类型对猪粪温室气体影响的方差分析( $F$ 值)

Table 5 Variance analysis of loess/paleosol additions and types on greenhouse gases in pig manure

因素 Factors	温室气体 Greenhouse gases			GWP
	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O	
添加量	17.06**	0.27ns	25.02**	24.35**
土壤类型	48.26**	6.92*	0.08ns	17.54**
交互作用	0.14ns	0.26ns	4.683*	0.85ns

注:\*,\*\*分别表示显著水平达5%和1%;ns,无显著性差异( $P>0.05$ ),下同。

Note: \* significant at  $P<0.05$ ; \*\* significant at  $P<0.01$ ; ns, no significant difference( $P>0.05$ ). The same below.

表6 黄土、古土壤添加后各因素与猪粪温室气体排放的相关性

Table 6 Relationships between GHGs and factors with loess/paleosol additions

温室气体 GHGs	总碳 Total C	全氮 Total N	碳氮比 C/N	pH	铵态氮 Ammonium N	硝态氮 Nitrate N
CO <sub>2</sub> ( $n=18$ )	0.708**	0.754**	0.100ns	0.440ns	0.772**	0.246ns
CH <sub>4</sub> ( $n=12$ )	0.707*	0.628*	0.505ns	0.499ns	0.507ns	-0.019ns
N <sub>2</sub> O( $n=16$ )	0.855**	0.649**	0.668**	0.467ns	0.728**	-0.134ns

### 3 讨论

#### 3.1 猪粪贮存阶段的温室气体释放特性

有研究发现,CH<sub>4</sub>是猪粪存贮阶段的主要温室气体类型,而在还田利用阶段N<sub>2</sub>O则成为主要的温室气体来源<sup>[20-21]</sup>。本研究中CO<sub>2</sub>与CH<sub>4</sub>的累积排放量在前14 d分别占总排放量的48%~61%和77.4%以上,N<sub>2</sub>O排放主要集中在后期,这与前人研究结果基本一致。可见实际生产中根据管理方式与管理时期的差异对温室气体进行针对性的管理有助于更好地解决畜禽粪便的温室气体问题。

本研究中各处理CO<sub>2</sub>贡献占增温潜势的70%以上,是主要的温室气体(表4)。虽然目前常把畜禽粪便产生的CO<sub>2</sub>作为可被植物光合利用抵消的部分不纳入统计<sup>[22]</sup>,但由于含碳化合物的合成途径存在内部的相互联系,不同畜禽粪便管理模式也会造成温室气体排放的显著差异<sup>[23-24]</sup>,因此为了避免不恰当地评估畜禽管理中的温室气体排放,在相关研究中宜将CO<sub>2</sub>纳入畜禽粪便温室气体范畴<sup>[25-26]</sup>。

#### 3.2 添加黄土或古土壤对猪粪温室气体排放的影响

本研究发现,添加不同比例的黄土或古土壤降低了猪粪42.4%~64.3%的CO<sub>2</sub>排放与99.8%以上的CH<sub>4</sub>排放(图4a和图4b),有效控制了猪粪的温室气体排放,这与加入黄土或古土壤后其对粪肥中有机碳起到的保护作用有关。有研究发现,土壤对有机质的固定作用主要是由于土壤的物理、化学与生物化学保护作用对外源有机质的分解与转化产生了影响<sup>[27-29]</sup>。本研究发现,相同比例下施用黄土与古土壤的温室气体排放量也存在差异,这可能是黄土与古土壤的物理性黏粒和游离态氧化铁含量的差异造成的。Mikutta等<sup>[30]</sup>研究表明,土壤中的黏土矿物和铁、铝氧化物可以与有机质结合成有机-无机复合体,进而对有机物质产生物理保护作用。其他学者研究也表明,黄土与古土壤中的游离态氧化铁与黏粒对有机碳的固定具有重要作用<sup>[31]</sup>。本试验供试古土壤粒径的比表面积更大,具有相对较强的吸附能力,更有利于减少猪粪



温室气体的排放。

畜禽粪便的有机物分解可以分为有机物的好氧分解、尿素在酶作用下的水解和厌氧分解3种类型<sup>[26]</sup>,因此本试验中除土壤自身对外源有机碳的保护作用外,土壤施用量的不同对pH、含水率、可利用碳氮底物等因素的改变可能也会对相关酶和微生物产生影响,进而可能影响温室气体的排放。本试验中添加黄土与古土壤的处理中3种温室气体排放量与pH的相关性均不显著,CO<sub>2</sub>与CH<sub>4</sub>和碳氮比间相关性也未达显著水平,仅与碳、氮总量水平显著相关,可见黄土或古土壤添加后对粪肥碳、氮的稀释作用也是造成各处理间温室气体排放差异的原因,其他理化因素的影响相对有限。

由于CH<sub>4</sub>产生一般需要极端的还原条件,而在O<sub>2</sub>充足的环境中更易发生CH<sub>4</sub>被甲烷氧化菌氧化的过程<sup>[32-33]</sup>,因此本试验中除土壤自身对外源有机碳的保护作用外,施用黄土或古土壤降低了猪粪可利用有机碳含量并改善了通气条件,也会抑制CH<sub>4</sub>的排放<sup>[34-35]</sup>。朱新梦等<sup>[36]</sup>研究也发现在覆盖堆肥期间进行额外的通风和翻堆管理可以降低53.4%的CH<sub>4</sub>累积排放量,其原理也是改善了通风条件、提高了堆肥中O<sub>2</sub>含量进而抑制CH<sub>4</sub>的排放。

本研究中猪粪处理的N<sub>2</sub>O排放水平较低,添加黄土或古土壤增加了N<sub>2</sub>O的排放(图3c,图4c),这主要是由于猪粪水分含量较高、通气状况不佳,限制了硝化作用进行,同时较低的确态氮底物含量也影响了反硝化作用<sup>[37]</sup>。虽然黄土或古土壤添加的稀释效应降低了各处理的初始铵态氮含量,但添加黄土或古土壤处理的确态氮含量在培养前期便快速上升,而猪粪处理确态氮含量则一直处于较低水平(图2),这表明黄土与古土壤的添加促进了硝化作用的进行,与稀释效应相比,添加黄土或古土壤对环境因素的改变是影响氮素转化的主要因素。本试验中添加黄土与古土壤处理确态氮变化速率与变化量存在差异(图2b),可能是土壤质地的不同对有机碳的分解速率及产生N<sub>2</sub>O的微生物基质供应产生了影响。一般情况下,颗粒粗、透水性好的土壤有利于硝化作用,反之则有利于反硝化作用<sup>[38]</sup>。由于古土壤黏粒含量较高(表1),前期硝化作用相对较弱(图2b),N<sub>2</sub>O生成量相对较低。

### 3.3 加土垫圈、堆制土粪的综合效应

本研究表明,向畜禽粪便中添加黄土与古土壤有效降低了粪肥中CO<sub>2</sub>与CH<sub>4</sub>的排放,虽然N<sub>2</sub>O排放量

增加,但随着黄土与古土壤施用量的提高,各处理增温潜势逐渐降低,可见加土垫圈这种措施有效降低了猪粪的温室气体排放。传统生产中垫圈过程的土壤添加量一般占总量的50%~90%,过高的土壤添加量意味着土粪养分有效性的降低以及劳动力的大量投入,这不仅增加了经济成本与管理难度,而且对减少畜禽粪便温室气体排放无明显效果,易造成“黄土搬家”<sup>[11]</sup>。但加土垫圈、堆制土粪作为一种传统的废弃物资源化利用方式,在其特定历史时期对农业生产及生态保护的贡献不可否认,在畜禽粪便贮存阶段通过垫料及施用添加物的途径减少温室气体排放的方式也值得借鉴。在当前畜禽粪便管理过程中,借鉴土壤垫圈过程的传统经验,进一步选择便捷易得且保蓄能力更强、减排效果更好的添加物以降低因畜禽粪便处置不当造成的环境风险,值得深入研究。

## 4 结论

(1)与猪粪对照相比,添加不同比例的黄土或古土壤培养期间N<sub>2</sub>O排放量增加了1.8~18.0倍,但CH<sub>4</sub>与CO<sub>2</sub>排放量分别降低了42.4%和99.8%以上。综合来看,添加一定比例的黄土或古土壤可以降低猪粪存贮过程中33.0%~61.9%的增温潜势,是一种有效减少畜禽粪便废弃物温室气体综合排放效应的利用方式。

(2)土壤类型及添加量均是影响畜禽粪便温室气体综合排放效应的重要因素。土壤用量对猪粪CO<sub>2</sub>与N<sub>2</sub>O的排放影响显著,土壤类型差异则对CO<sub>2</sub>与CH<sub>4</sub>的排放产生显著影响,且两者对N<sub>2</sub>O的排放具有显著的交互作用。

### 参考文献:

- [1] FAO. Livestock's long shadow: Environmental issues and options[R]. Rome: FAO, 2006.
- [2] Owen J J, Silver W L. Greenhouse gas emissions from dairy manure management: A review of field-based studies[J]. *Global Change Biology*, 2015, 21(2): 550-565.
- [3] 李江涛, 钟晓兰, 赵其国. 畜禽粪便施用对稻麦轮作土壤质量的影响[J]. *生态学报*, 2011, 31(10): 2837-2845.  
LI Jiang-tao, ZHONG Xiao-lan, ZHAO Qi-guo. Enhancement of soil quality in a rice-wheat rotation after long-term application of poultry litter and livestock manure[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(10): 2837-2845.
- [4] Chadwick D, Jia W, Tong Y, et al. Improving manure nutrient management towards sustainable agricultural intensification in China[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2015, 209: 34-46.
- [5] 周建斌. 作物营养从有机肥到化肥的变化与反思[J]. *植物营养与肥*

- 料学报, 2017, 23(6):1686-1693.
- ZHOU Jian-bin. Reconsideration of the changes of plant nutrition from organic fertilizers to chemical fertilizers[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2017, 23(6):1686-1693.
- [6] 陈芬, 李伟, 刘奋武, 等. 3种畜禽粪便产气特性差异分析[J]. 环境工程学报, 2015, 9(9):4540-4546.
- CHEN Fen, LI Wei, LIU Fen-wu, et al. Gas-producing variance analysis of different animal manures[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2015, 9(9):4540-4546.
- [7] 印遇龙. 大力发展生态养殖撬动大农业循环发展[J]. 中国畜牧兽医文摘, 2017, 33(3):8.
- YIN Yu-long. Vigorously develop ecological breeding and promote circular agricultural development[J]. *Chinese Abstracts of Animal Husbandry and Veterinary Medicine*, 2017, 33(3):8.
- [8] Petersen S O, Blanchard M, Chadwick D, et al. Manure management for greenhouse gas mitigation[J]. *Animal*, 2013, 7(Suppl2):266-282.
- [9] Wang Y, Dong H, Zhu Z, et al. Mitigating greenhouse gas and ammonia emissions from swine manure management: A system analysis[J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, 51(8):4503-4511.
- [10] 隋斌, 孟海波, 沈玉君, 等. 丹麦畜禽粪肥利用对中国种养结合循环农业发展的启示[J]. 农业工程学报, 2018, 34(12):1-7.
- SUI Bin, MENG Hai-bo, SHEN Yu-jun, et al. Utilization of livestock manure in Denmark and its inspiration for planting-breeding combined circular agricultural development in China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(12):1-7.
- [11] 师倩云, 李雪松, 孟延, 等. 加入不同比例黄土对粪肥碳、氮养分保蓄的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(5):999-1005.
- SHI Qian-yun, LI Xue-song, MENG Yan, et al. Effects of loess additions on carbon and nitrogen retention in manures[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(5):999-1005.
- [12] 刘更另, 陈福兴, 张启昭. 加土垫圈沤制厩肥的研究[J]. 土壤通报, 1966(2):11-14.
- LIU Geng-ling, CHEN Fu-xing, ZHANG Qi-zhao. The study of loess addition to swine lots for the retting of barnyard manure[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 1966(2):11-14.
- [13] Chen Q, Liu B, Wang J, et al. Diversity and dynamics of the bacterial community involved in pig manure biodegradation in a microbial fermentation bed system[J]. *Annals of Microbiology*, 2017, 67:491-500.
- [14] 胡海燕, 于勇, 张玉静, 等. 发酵床养猪废弃垫料的资源化利用评价[J]. 植物营养与肥科学报, 2013, 19(1):252-258.
- HU Hai-yan, YU Yong, ZHANG Yu-jing, et al. Evaluation on resource utilization of litters in pig-on-litter farming system[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2013, 19(1):252-258.
- [15] 刘东生. 黄土与环境[M]. 北京:科学出版社, 1985.
- LIU Dong-sheng. Loess and environment[M]. Beijing: Science Press, 1985.
- [16] Plaza-Bonilla D, Cantero-Martínez C, Álvaro-Fuentes J. Soil management effects on greenhouse gases production at the macroaggregate scale[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2014, 68(1):471-481.
- [17] IPCC. Climate change 2007: The physical science basis. Contribution of working group I to the fourth assessment report of the IPCC[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [18] 蔡祖聪. 水分类型对土壤排放的温室气体组成和综合温室效应的影响[J]. 土壤学报, 1999, 36(4):484-491.
- CAI Zu-cong. Effects of water regime on CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O emissions and overall potential for greenhouse effect caused by emitted gases[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1999, 36(4):484-491.
- [19] Hou H, Chen H, Cai H, et al. CO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub>O emissions from Lou soils of greenhouse tomato fields under aerated irrigation[J]. *Atmospheric Environment*, 2016, 132:69-76.
- [20] Dong H, Zhu Z, Zhou Z, et al. Greenhouse gas emissions from swine manure stored at different stack heights[J]. *Animal Feed Science & Technology*, 2011, 166/167(7):557-561.
- [21] Rodhe L K K, Abubaker J, Ascue J, et al. Greenhouse gas emissions from pig slurry during storage and after field application in northern European conditions[J]. *Biosystems Engineering*, 2012, 113(4):379-394.
- [22] Dennehy C, Lawlor P, Jiang Y, et al. Greenhouse gas emissions from different pig manure management techniques: A critical analysis[J]. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 2017, 11(3):3-18.
- [23] 陈瑞蕊, 王一明, 胡君利, 等. 畜禽粪便管理系统中甲烷的产排特征及减排对策[J]. 土壤学报, 2012, 49(4):815-823.
- CHEN Rui-rui, WANG Yi-ming, HU Jun-li, et al. Methane emission and mitigation strategies in animal manure management system[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2012, 49(4):815-823.
- [24] Mazzetto A M, Barneze A S, Feigl B J, et al. Temperature and moisture affect methane and nitrous oxide emission from bovine manure patches in tropical conditions[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2014, 76:242-248.
- [25] Ahn H K, Mulbry W, White J, et al. Pile mixing increases greenhouse gas emissions during composting of dairy manure[J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102(3):2904-2909.
- [26] 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 & Environment*, 2015, 199:10-25.
- [27] Rovira P, Vallejo V R. Physical protection and biochemical quality of organic matter in mediterranean calcareous forest soils: A density fractionation approach[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2003, 35(2):245-261.
- [28] 刘满强, 胡锋, 陈小云. 土壤有机碳稳定机制研究进展[J]. 生态学报, 2007, 27(6):2642-2650.
- LIU Man-qiang, HU Feng, CHEN Xiao-yun. A review on mechanisms of soil organic carbon stabilization[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(6):2642-2650.
- [29] Cui J, Li Z, Liu Z, et al. Physical and chemical stabilization of soil organic carbon along a 500-year cultivated soil chronosequence originating from estuarine wetlands: Temporal patterns and land use effects[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2014, 196(14):10-20.
- [30] Mikutta R, Schaumann G E, Gildemeister D, et al. Biogeochemistry of mineral-organic associations across a long-term mineralogical soil



- gradient(0.3–4100 kyr), Hawaiian Island[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2009, 73(7):2034–2060.
- [31] 师焕芝, 李福春, 孙旭辉, 等. 洛川黄土/古土壤中有机碳的分布特征及其与粘土矿物的相关性[J]. *中国地质*, 2011, 38(5):1355–1362.
- SHI Huan-zhi, LI Fu-chun, SUN Xu-hui, et al. Distribution of organic carbon in the Luochuan loess/paleosol and its relationship with clay minerals[J]. *Geology in China*, 2011, 38(5):1355–1362.
- [32] 续勇波, 蔡祖聪, 雷宝坤. 亚热带土壤反硝化过程中 $\text{NO}_3^-$ -N对 $\text{CH}_4$ 排放的影响[J]. *环境科学*, 2008, 29(12):3513–3519.
- XU Yong-bo, CAI Zu-cong, LEI Bao-kun. Effects of  $\text{NO}_3^-$ -N on  $\text{CH}_4$  emission during denitrification in subtropical soils[J]. *Environmental Science*, 2008, 29(12):3513–3519.
- [33] Rodhe L K K, Ascue J, Willén A, et al. Greenhouse gas emissions from storage and field application of anaerobically digested and non-digested cattle slurry[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2015, 199:358–368.
- [34] Yamulki S. Effect of straw addition on nitrous oxide and methane emissions from stored farmyard manures[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2006, 112(2):140–145.
- [35] Wang J, Duan C, Ji Y, et al. Methane emissions during storage of different treatments from cattle manure in Tianjin[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2010, 22(10):1564–1569.
- [36] 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 Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(10):258–264.
- [37] 曾泽彬, 朱波, 朱雪梅, 等. 施肥对夏玉米季紫色土 $\text{N}_2\text{O}$ 排放及反硝化作用的影响[J]. *土壤学报*, 2013, 50(1):130–137.
- ZENG Ze-bin, ZHU Bo, ZHU Xue-mei, et al. Effects of fertilization on  $\text{N}_2\text{O}$  emission and denitrification in purple soil during summer maize season in the Sichuan basin[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50(1):130–137.
- [38] 刘秋丽, 马娟娟, 孙西欢, 等. 土壤的硝化-反硝化作用因素研究进展[J]. *农业工程*, 2011, 1(4):79–83.
- LIU Qiu-li, MA Juan-juan, SUN Xi-huan, et al. Research advancement on soil nitrification-denitrification and its influencing factors[J]. *Agricultural Engineering*, 2011, 1(4):79–83.