

青藏高原高寒牧区家畜粪便堆肥化处理技术研究

范悦, 丁路明, 李国英, 孙瑞, 李小刚*

(兰州大学生命科学学院草地农业生态系统国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

摘要:堆肥化处理是有效利用青藏高原高寒牧区牲畜粪便、减轻环境影响的可行途径。本文针对高寒牧区低温和劳动力资源缺乏的问题,研究了一种静态通气方式和保温措施对堆腐效果的影响。静态通气通过埋植于堆体中的通气管实现,而保温通过堆体外的双层塑料膜的温室效应实现。实验结果表明,埋入通气管与翻堆相比可以显著提高堆体内部和堆体外层的温度,有效加快腐熟速度,减少堆腐过程中养分的损失,降低劳动力投入,可以作为高寒牧区替代翻堆的更好通气手段。双层保温膜与单层膜相比能够有效辅助通气管维持堆体高温。堆肥原料中添加磷肥虽然可提高堆腐温度,但同时也增加了堆腐过程中有机质和氮素的损失,需要根据当地实际情况选用。

关键词:青藏高原高寒牧区;堆肥化;静态通气管;双层保温膜

中图分类号:S141.4

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2014)04-0335-08

doi: 10.13254/j.jare.2014.0107

A New Technique for Composting Livestock Manure on the Cold Qinghai-Tibet Plateau, China

FAN Yue, DING Lu-ming, LI Guo-ying, SUN Rui, LI Xiao-gang*

(School of Life Science, State Key laboratory of Grassland Agro-ecosystem, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Livestock manure composting on the cold Qinghai-Tibet Plateau is a feasible way to utilize manure while alleviating negative environmental effects. In order to overcome unfavorable factors of cold temperature and shortage of manpower for composting operation, we developed a new technique for composting livestock manure on the Qinghai-Tibet plateau: static ventilation-double-layer film insulation and studied the effect of it. The static ventilation had been achieved by ventilation pipes implanted in compost stacks while double-layer film mulching had prevented heat loss from composting process. Composting trials showed that compared with pile turning over, the static ventilation pipes significantly shortened the time for temperature rise and reduced the temperature difference between interior and outer layers of compost stacks, and thus speeded up the composting process meanwhile reducing losses of nutrients during composting. The double-layer film mulching further helped maintain the temperature of compost stacks. By this new technique, the operation of overturning compost stacks was not a necessity for composting livestock manure. Adding phosphorus fertilizers to manure for composting also helped to increase temperature but this had a possibility to increase losses of nitrogen and organic matters from composts.

Keywords: the cold Qinghai-Tibet plateau; livestock manure composting; static ventilation pipe; double-layer insulation film

青藏高原高寒牧区具有丰富的有机肥料资源,目前还没有一种高效的利用方式。未经处理的牛羊粪便不仅肥效低,而且会污染草场,进而随着降水进入水体产生严重的面源污染^[1-2]。由于特殊的自然地理条件与社会发展现状,高寒牧区家畜粪便堆肥化处理存在

一定的技术难题:青藏高原海拔高、温度低、昼夜温差大,堆肥腐熟困难;地形复杂、牧户分散限制了原料收集;少数民族地区劳动力资源短缺,不适宜采取大规模人力作业的方式^[3-7]。因此,研究适合于小牧户使用的快速堆腐、节约劳动力成本的堆肥模式对高寒牧区家畜粪便进行有效利用具有积极意义。

通气是好氧堆肥的关键影响因素^[8-11]。传统通气方式如人为翻堆需要消耗一定量的劳动力成本而且腐熟程度偏低^[9];强制通气和机械翻堆对设备要求较高不适宜分散居住的牧民^[10]。于是我们针对性地设计了PVC管静态通气这种方式,旨在不需要机械和能源

收稿日期:2014-04-28

基金项目:公益性行业(农业)科研专项(201203007)

作者简介:范悦(1989—),男,河北石家庄人,硕士研究生,主要研究高寒牧区有机肥料堆肥化处理。

E-mail: yfan11@lzu.edu.cn

*通信作者:李小刚 E-mail: lixiaogang@lzu.edu.cn

的情况下,通过埋插一定数量的通气管来实现堆体的有效通气、供氧。高效的保温装置可以提高堆体温度、提高腐熟程度^[12]。堆肥最为常见的保温方式就是覆盖保温材料。露天堆肥传统的保温材料有单层塑料膜、草帘、已经腐熟的堆肥料等^[13]。但是单层塑料膜保温效果差,而草帘体积大,搬运使用与保存困难,而且容易腐烂霉变。用已经腐熟的堆肥料需要消耗大量已有的堆肥产品,消耗人力成本高。于是我们设计了双层保温膜作为一种提升保温效果的新型装置。文献表明添加磷有利于提高堆腐效果,降低氮素损失^[14-17]。本实验中加入过磷酸钙作为堆肥添加剂,旨在不添加外源微生物的条件下通过添加磷肥促进堆腐。

1 材料与方法

1.1 实验地点与材料

堆肥场地选在甘南州夏河县桑科乡羊吉畜牧业专业合作社。该地海拔 3 001 m,年降水量 539.7 mm,年均温 1.59 ℃,7 月平均气温 12.1 ℃,属于典型高寒牧区。实验时间为 2013 年 6 月—10 月,实验前先将场地扫除杂物,平整夯实,铺双层 1.2 mm 防雨布进行隔水处理,防止堆肥浸出液下渗。整个场地用尼龙绳和木桩进行隔离,防止人畜干扰。

有机肥原料为藏羊羊粪,收集自桑科乡牧户圈舍中,其含水量 14.8%,有机质含量 63.7%,全氮 1.46%。覆盖塑料膜选用 0.08 mm 优质聚乙烯棚膜,通气管原料选用直径 5 cm 的优质 PVC 管。

1.2 实验方法

本实验采取 $L_9(3^4)$ 正交试验设计^[18],共设置不同通气处理、不同保温处理、不同添加剂处理 3 个因素,每个因素 3 个水平共 9 组实验分别为 T1~T9,如表 1 所示。

表 1 实验处理水平设置
Table 1 Experimental treatment

处理	通气水平	保温水平	添加剂水平
T1	不翻堆不插管	单层膜	不添加
T2	不翻堆不插管	25 cm 双层膜	0.2 kg·t ⁻¹ 过磷酸钙粉末
T3	不翻堆不插管	35 cm 双层膜	0.2 kg·t ⁻¹ 过磷酸钙颗粒
T4	埋插通气管	单层膜	0.2 kg·t ⁻¹ 过磷酸钙粉末
T5	埋插通气管	25 cm 双层膜	0.2 kg·t ⁻¹ 过磷酸钙颗粒
T6	埋插通气管	35 cm 双层膜	不添加
T7	每隔 12 d 翻堆	单层膜	0.2 kg·t ⁻¹ 过磷酸钙颗粒
T8	每隔 12 d 翻堆	25 cm 双层膜	不添加
T9	每隔 12 d 翻堆	35 cm 双层膜	0.2 kg·t ⁻¹ 过磷酸钙粉末

1.2.1 通气处理

设置不翻堆不插管、埋插通气管和每隔 12 d 翻堆这 3 种处理水平。通气管采用直径 5 cm 优质 PVC 管,在管身上开孔实现通气。本实验开孔直径 1 cm,开孔数 300 个·根⁻¹,每堆插入 12 根,分 3 层排布,自上至下每层分别为 3 根、4 根、5 根。层与层之间距离 45 cm,每层管与管间距 35 cm。通气管方向与常年盛行风风向平行,长度 4.5 m 保证覆盖双层膜的堆体通气管长度足以穿过双层膜与空气联通,如图 1~图 2 所示。

1.2.2 保温处理

设置覆盖单层聚乙烯膜、覆盖间距 25 cm 的双层膜、覆盖间距 35 cm 的大间距双层膜 3 种保温水平处理。铺设双层膜首先以单层膜覆盖堆体,然后堆体四

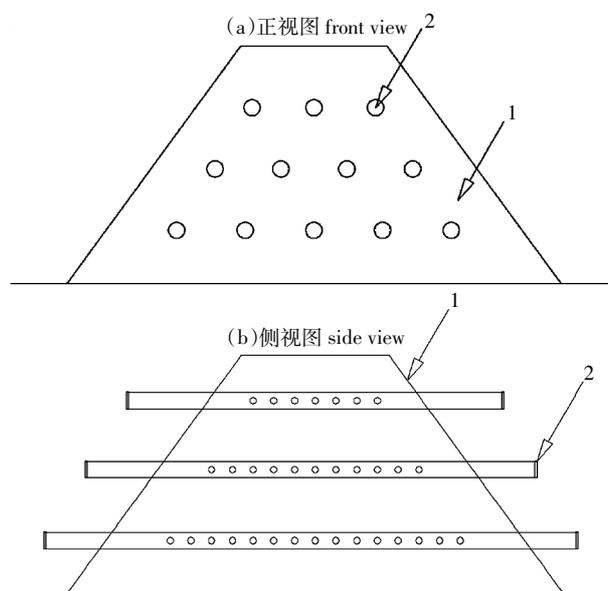
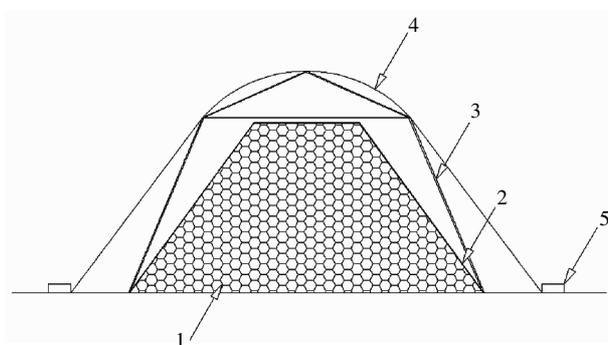


图 1 通气管埋插示意图(1.堆体,2.通气管)

Figure 1 Ventilation tube in the pipe (1.pile, 2.snorkel)



1.堆体 pile, 2.内层膜 inner film, 3.支撑物 support, 4.外层膜 outer film, 5.固定物 fixtures

图 2 堆体双层覆膜示意图

Figure 2 Double-layer film

周用竹竿和木棍架设支架,在支架上再覆盖第二层棚膜。调节支架与堆体间的距离即可控制两层膜之间的距离,外层膜拉紧后与地面用砖块压实以维持各个位置的间距一致。

1.2.3 添加剂处理

设置不添加磷、添加颗粒过磷酸钙、添加粉末过磷酸钙 3 个水平。该含量是依据培养堆肥功能菌的适宜磷含量选择的,该磷含量是培养基中的磷含量的 15% 左右。目的是添加一部分外源磷以促进堆腐效果而不是完全依靠添加的磷来提供整个堆腐过程所需^[18-20],颗粒和粉末过磷酸钙的添加量均为每吨风干羊粪 200 g。添加颗粒过磷酸钙的处理即直接添加肥料过磷酸钙,添加粉末过磷酸钙即为肥料过磷酸钙粉碎研磨过 100 目筛后添加。

1.2.4 堆体设置和水分

采用露天条垛式堆腐,根据当地原料现状、人工劳动力水平结合上一阶段实验筛选出的最佳堆体尺寸,最终选定堆体大小为 2.3 m×2.3 m×1.5 m(长×宽×高),堆体之间间隔 3 m。加水后充分搅拌,然后用 WTHOT1-SM 型水分传感器测定含水量。此过程反复 1~2 次,最终使各堆体的原料初始含水量调节至 62.5% 左右。

1.3 测定与分析方法

1.3.1 温度

温度测定采用福建望云山信息科技有限公司生产的 WYSTH000T20 型 20 路温度传感器。该传感器量程 -40~150 ℃,分辨率 0.1 ℃。温度测量采取传感器自动记录的方式,根据不同的阶段采用不同的时间间隔,升温阶段采取每 20 min 记录 1 次,到达高温阶段后 1 h 记录 1 次。每个堆体埋放 2 个传感器探头,分别测量堆体中心温度和距表层 15 cm 处的温度。另外两路温度探头置于堆肥场地中央距地面 0.35 m 处测定环境温度。

1.3.2 堆腐效果参数测定

堆肥堆腐过程以微生物活动强度显著下降为结束依据,标志为堆芯温度与环境温度之差低于 10 ℃ 且持续 7 d 以上。一方面温度能够直观反映微生物活性^[20-21],另一方面温度也是高寒牧区野外试验条件下最直观的监测方法。建堆和堆腐结束时分别取样测定堆腐前后有机质、灰分和全氮含量。用土钻沿堆体对角线分表层 0~20 cm 和堆芯 60~80 cm 处分别取样。有机质含量和灰分含量测定采用干烧法(CJ/T 96—1999);全氮采用 H₂SO₄-HClO₄ 消煮、开氏定氮仪蒸馏

法(NY/T 297—1995)。

由于实验地点夏河县桑科乡政府所在地没有大型称量设备,堆腐前后堆体物质的质量难以获得,所以我们分别用下式(1)和(2)计算堆腐过程中的物料质量损失率和氮素损失率:

$$\Delta M\% = (1 - \frac{Ad_1}{Ad_2}) \times 100\% \quad (1)$$

$$\Delta N\% = (1 - \frac{Ad_1}{Ad_2} \times \frac{c_2}{c_1}) \times 100\% \quad (2)$$

(1)和(2)式中的 $\Delta M\%$ 和 $\Delta N\%$ 分别为堆腐过程中的质量损失率和氮素损失率; Ad_1 和 Ad_2 分别为堆肥原料和堆肥的灰分百分含量; c_1 和 c_2 分别为原料和堆肥的氮百分含量。上述(1)和(2)式的推导过程如下:

设原料质量为 m_1 ,堆腐后形成的堆肥的质量为 m_2 。堆腐过程中质量的损失率 $\Delta M\%$ 应该为:

$$\Delta M\% = (\frac{m_1 - m_2}{m_1}) \times 100\% \quad (3)$$

因为堆体中的灰分质量守恒^[21],所以存在如下关系:

$$m_1 \times Ad_1 = m_2 \times Ad_2, \text{ 即 } m_2 = m_1 \cdot \frac{Ad_1}{Ad_2} \quad (4)$$

将上述(4)式带入(3)式,即可得到堆腐过程中的质量损失率计算公式(1)。

同理,对于氮素损失率:

$$\Delta N\% = (\frac{m_1 \times c_1 - m_2 \times c_2}{m_1 \times c_1}) \times 100\% \quad (5)$$

将上述(4)式带入(5)式,即可得到堆腐过程中的氮素损失率计算公式(2)。

1.3.3 统计分析方法

实验数据依照文献[22]提供的正交试验分析方法进行极差与方差分析以评价各个因素的影响大小,进而筛选最优堆腐条件。

2 结果与分析

建堆含水量在 61.4%~65.3% 之间,用表 2 和表 3 中 10 组指标与建堆含水量进行方差分析和相关性分析,发现均没有体现出显著相关,首先排除建堆含水量对实验结果的影响。

2.1 不同处理对堆腐过程温度的影响

首先利用堆体日均温绘制了堆体温度随时间变化图(图 3),发现不同通气处理的堆体堆腐过程存在明显不同。埋插通风管的堆体升温快、最高温度高于其他堆体,而且堆腐时间短。各组不同处理高温阶段

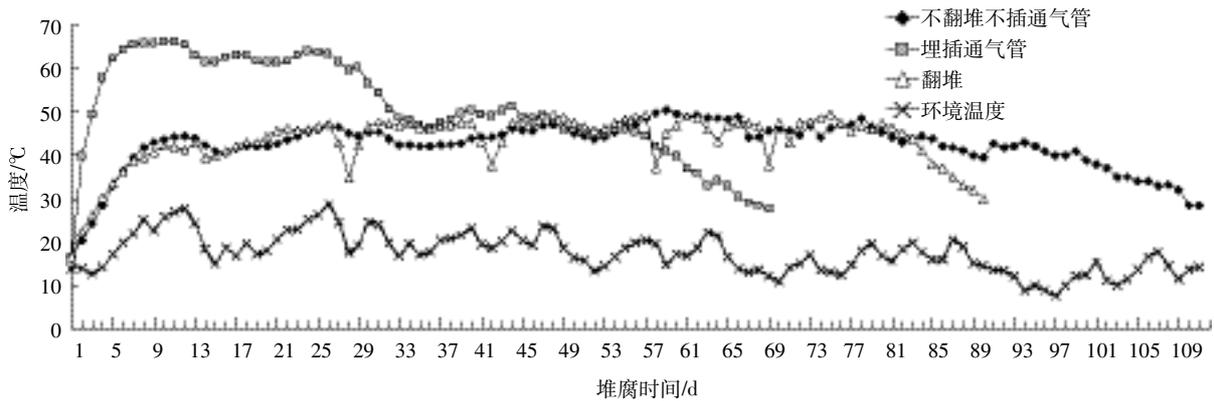


图 3 不同通气方式处理下堆腐过程温度图

Figure 3 Temperature variation of different treatment

表 2 不同处理下堆体的温度状况

Table 2 Temperature of different treatment

处理	建堆含水量/%	堆腐后含水量/%	总堆腐时间/d	堆芯 45 °C 以上 维持时间/d	表层 45 °C 以上 维持时间/d	堆芯 65 °C 以上 维持时间/d	表层 65 °C 以上 维持时间/d	堆芯最高温度/°C
T1	61.8	51.1	110	78	37	0	0	53.6
T2	63.1	59.2	97	69	26	0	0	50.4
T3	62.2	55.5	103	72	30	0	0	49.0
T4	64.0	49.8	50	43	23	10	6	68.6
T5	65.3	44.6	64	55	27	19	6	69.9
T6	63.9	42.5	65	56	30	20	6	62.7
T7	61.4	48.6	83	53	26	1	0	64.6
T8	64.9	60.0	72	44	30	0	2	50.6
T9	62.8	54.9	74	36	35	0	2	54.3

表 3 温度正交数据分析表

Table 3 Temperature data quadratured analysis

项目	$R_{\text{通气}}$	$R_{\text{覆盖}}$	$R_{\text{添加}}$	最大影响因子	显著性水平($\alpha=0.10$)
堆芯 45 °C 以上时间/h	644.3	307.3	266.7	通气	显著
表层 45 °C 以上时间/h	108.3	99.7	123.7	添加剂	—
堆芯 65 °C 以上时间/h	375.3	72.3	79.7	通气	显著
表层 65 °C 以上时间/h	121.3	10.0	29.0	通气	显著
堆芯最高温度/°C	16.1	16.1	3.4	通气	—
表层最高温度/°C	6.8	1.8	5.1	通气	显著
堆芯升温速度/°C·h ⁻¹	0.3	0.1	0.1	通气	显著
整体缩短堆腐时间/d	43.7	3.3	9.7	通气	显著
堆芯 45 °C 以上积温/°C·h	1 577.6	576.5	668.2	通气	显著
堆芯 45 °C 以上均温/°C	10.2	1.3	2.5	通气	显著

持续时间从 36 d 至 78 d 不等,均大于 14 d,结合表 2 的堆体均温数据等可见在无害化处理方面,符合国家禽畜粪便处理标准(NY/T 1168—2006)。

进而分别对堆芯 45 °C 以上时间等 10 项温度指标进行正交极差和方差分析,极差 R 和显著性水平如表 3。除表层 45 °C 以上温度维持时间主要受添加剂

影响以外,其他所有温度指标均主要受通气影响,而且除堆芯最高温度外均表现出显著性差异。而且这种差异主要表现在埋插通气管与其他 2 种处理之间,翻堆和不翻堆不埋插通气管之间没有显著性差异。埋插通气管对堆腐过程的影响均为有利影响,即正交水平平均值 f 均呈现向有利于堆腐过程的方向移动:45 °C

以上时间缩短,65℃以上时间延长;堆芯和表层最高温均有提高,整体堆腐时间缩短,积温增加。进而可以初步认定,通气是影响堆腐过程的一个最重要参数,埋插通气管也是优化整个堆腐过程的最重要手段。

添加剂和保温措施虽然不构成显著影响,但是仍存在一定的作用。覆盖处理的影响主要表现在堆芯45℃以上时间、堆芯最高温度、堆体升温速度3个方面,覆盖双层膜与覆盖单层膜相比有利于缩短堆体升温时间、维持45℃以上的高温时间;覆盖大间距双层膜与覆盖小间距双层膜之间没有明显差异。证明双层膜之间厚度25cm足以达到较高的保温能力。磷肥添加缩短了堆腐时间,延长了堆芯、表层65℃以上天数以及提高堆芯45℃以上积温、均温。表明添加磷肥的作用是可以缩短整体堆腐时间、促进堆体平均温度的升高,对整个堆腐过程而言其作用是积极的。

2.2 不同处理对堆肥有机质和氮素含量的影响

堆肥产品品质方面(表4),堆肥有机质含量变化在46.1%~55.9%之间,全氮含量1.18%~1.47%不等,达到国家有机肥料行业标准(NY 525—2012)。堆肥有机质损失率变化在29.8%~48.6%之间,全氮损失率在17.3%~42.3%之间。 f 为该因素在某一水平下的实验结果的均值。由表5可以看出,有机质含量主要受添加剂影响,添加磷的处理有机质含量低于未添加磷

表4 不同处理下堆肥有机质和氮素损失率

Table 4 Organic matter and nitrogen loss rates under different treatment

处理	质量损失率/%	堆腐后有机质/%	有机质损失率/%	堆腐后全氮/%	全氮损失率/%
T1	18.8	55.2	29.8	1.49	17.3
T2	27.7	49.7	43.7	1.40	30.8
T3	27.7	49.7	43.7	1.41	30.3
T4	26.5	50.5	41.8	1.33	33.2
T5	19.8	54.6	31.4	1.33	27.1
T6	22.4	53.1	35.5	1.30	31.1
T7	30.8	47.4	48.6	1.22	42.3
T8	20.4	54.3	32.3	1.33	27.6
T9	26.8	50.3	42.3	1.21	39.5

表5 养分指标正交数据分析表

Table 5 Nutrient data quadratured analysis

项目	$R_{\text{通气}}$	$R_{\text{覆盖}}$	$R_{\text{添加}}$	最大影响因子	显著性水平($\alpha=0.10$)
有机质含量/%	2.1	1.9	4.0	添加剂	—
全氮含量/%	1.8	0.5	0.6	通气	显著

的($f_{\text{空}}=54.19, f_{\text{颗粒}}=50.17, f_{\text{粉末}}=50.55$),所以磷会加剧有机质损失。相反,插入通气管($f_{\text{空}}=50.55, f_{\text{插管}}=52.73, f_{\text{翻堆}}=50.63$)和覆盖小间距双层膜($f_{\text{单}}=51.04, f_{\text{双}}=52.88, f_{\text{大双}}=51.00$)有利于降低有机质损失。

全氮与有机质呈现相似的规律,通气对全氮含量表现出显著影响(表5),但差异主要表现在不翻堆不插管的处理与翻堆处理之间,插入通气管的处理居于两者之间($f_{\text{空}}=14.32, f_{\text{插管}}=13.213, f_{\text{翻堆}}=12.52$)。这是由于不翻堆不插管的处理物质分解不彻底,全氮含量偏高;翻堆的处理,多次重复升温阶段物质损失严重,所以有机质与氮素普遍偏低。磷的添加对全氮含量有一定不利影响,但不显著($f_{\text{空}}=13.73, f_{\text{颗粒}}=13.12, f_{\text{粉末}}=13.21$)。差距主要表现在添加磷与不添加之间,2种不同添加形式之间差距很小。覆盖的影响居第三位,总体影响很小($\Delta f < 0.5$)。

2.3 不同堆肥处理的整体评价

最终堆腐效果好坏的评价标准以堆腐时间短、养分含量高、堆体均温高为优。综合上述分析可以看出,通气方式对整个堆腐过程和最终的肥效具有支配性影响。埋插通气管的处理在提高堆腐温度、缩短堆腐周期方面优于翻堆处理,而且有机质含量和全氮含量亦明显高于翻堆处理,这表明插管处理(T4、T5、T6)整体优于翻堆处理(T7、T8、T9)。覆盖虽然在个别指标中表现出显著的有利影响,但不能决定最关键的堆体温度,所以只能作为提高堆腐程度的一种有效辅助手段。磷的添加会加速堆腐过程,但是这种提升效果不及埋插通气管,而且存在养分损失加剧的不利影响。所以根据正交试验最优水平的选择最后选出的最优组合为:埋插通气管、覆盖小间距双层膜、添加颗粒过磷酸钙。

3 讨论

3.1 通气管显著提高堆腐温度的原因

埋插通气管能够显著提高堆腐效果的原因可能是由于高寒牧区的空气特点和风干羊粪原料的结构特性。高寒牧区一般地处高原地带,氧气含量低(本实验所在地海拔3001m,大气的氧气含量为17.05%,是海拔200m处平原地区的80.3%,氧气含量相比降低19.7%)。但由于本实验选用的羊粪在圈舍中已经风干,颗粒非常明显,所以建堆后的堆体内孔隙率非常大,这就导致不翻堆不插管的堆体在一段时间内不会完全缺氧。非埋插通气管的处理之所以无法达到高

温,是因为氧浓度而不是氧气总量的限制。虽然多孔的羊粪提供了很高的氧气总量,但不能解决氧气浓度随消耗而下降的致命缺陷。通气管的优势就在于能够持续的提供氧气。非埋插通气管处理的堆体间隙中的氧气在堆腐过程中浓度不断降低导致升温阶段完成后不足以继续供给 65℃以上高温好氧菌的生长所需^[12],所以翻堆处理亦不能产生高温。同样是由于堆体孔隙度大的原因,插入的通气管不仅仅在管身开孔处发生气体交换,而是相当于整个管身附近 10~15 cm 的羊粪孔隙都在发生气体交换,这就使得大部分堆料都获得了充分的氧气供给。

不翻堆不插通气管的堆体在 33 d 左右出现温度下降,之后再次升温并长时间持续的过程可能是一个兼性厌氧过程^[9],这就是虽然 45℃以上时间长但始终微生物没能进行充分的有机物氧化无法使堆体达到 65℃高温进而堆腐效果不及埋插通气管处理的主要原因。堆肥静态通气方式近年来主要的研究方向是研究反应器或者工厂化处理中的通气量问题^[11,23-24],这种利用空气自然对流静态被动通气方式在文献中研究的较少,由于静态被动通气量低,而且通气量测量、控制较难,这种方式不适用于大规模的养殖场但适用于甘南牧区的野外使用条件。本实验虽然发现埋插通气管具有明显优势,但是插入通气管的数量、埋放间距的最优化还需要进一步研究。

3.2 双层膜对堆体温度的影响

就双层膜保温能力的优势而言,双层膜是成功的。但外层温度主要是受太阳辐射影响而波动的。当堆芯本身温度很高时,良好的外部保温措施能够整体提高堆体的平均温度,缩短堆腐时间提高堆腐程度。但是当堆芯本身温度较低的时候,双层保温膜虽然能够有效提高堆体表层的温度,但由于堆肥根本的热量来源是堆体内部微生物活动,单纯保温无法提高堆芯的温度。这就说明了为什么双层膜对各项温度指标的影响大都居于次要地位,不能起到决定性作用。不同间距的 2 个双层膜处理水平之间没有表现出显著差异,这表明 25 cm 以上的间距足以达到所需的保温效果,再增大膜间距没有意义;是否能够进一步缩小膜间距需要进一步的研究。近年来保温或者调温装置的研究更多地集中在工厂化处理与反应器设计上,露天条垛堆肥覆盖方面的研究主要针对降低氮素损失、减少气体排放等方面^[25-29]。通过与一些冬季或北方寒冷地区堆肥保温研究的文献相比,发现双层膜在使用效果与便利程度上都具有一定优势^[12-13]。

3.3 磷肥作为添加剂的效果分析

设计添加磷肥的目的旨在通过少量磷肥达到调节、加速升温阶段堆肥微生物代谢,进而促进堆腐。而不是利用磷肥去降低氮素损失,所以添加量选择是按照培养堆肥初期的功能微生物的适宜磷含量选定的。文献中磷肥的添加量从堆肥总干物料量的 1%~15% 不等,大部分属于作为固定剂大量添加,所以普遍的效果是磷肥的加入降低了氮素损失,并提高了腐熟速度^[30-32]。也有文献报道了磷的加入导致有机质损失加剧的实例^[33]。就本实验而言,磷肥添加表现出加快堆体升温速度和提高堆腐温度的作用,与实验设计的预期是一致的,达到了当初设计时的目的。但是磷添加减少有机质和氮素损失的效果没有达到显著水平。可能的原因有以下两点:首先,磷对微生物代谢过程的影响是复杂的,大量磷加入与微量磷加入的影响是不同的;其次,微生物群落演替是复杂的,不一定促进了升温过程就会对堆腐结果中氮素含量产生定向影响。而且,升温速度增加、表层温度提高与堆体养分消耗加剧逻辑上相符。所以,磷在本实验中的作用和不足之处是明确的,但磷的作用机理与如何减轻有机质和氮素的损失需要进一步深入研究。

4 结论

通过实验发现,埋插通气管、覆盖双层膜对高寒牧区牲畜粪便堆肥化处理具有显著作用。埋插通气管可以有效加速堆腐速度提高腐熟效果、节约劳动力,可以完全取代翻堆作为高寒牧区家畜粪便堆肥化处理的通气手段。双层保温膜与通气管配合使用可以达到更好地促进堆腐、替代翻堆的作用。微量磷肥的添加表现出促进堆腐的优点和加剧有机质和氮素损失的不足,需要进一步深入研究。本实验的最优工艺参数为埋插通气管、采用小间距双层膜、添加颗粒过磷酸钙。

参考文献:

- [1] 于伯华,吕昌河. 青藏高原高寒区生态脆弱性评价[J]. 地理研究, 2011, 30(12): 2289-2295.
YU Bo-hua, LÜ Chang-he. Assessment of ecological vulnerability on the Tibetan Plateau[J]. *Geographical Research*, 2011, 30(12): 2289-2295. (in Chinese)
- [2] 李 博,何奕忻,王志远,等. 青藏高原东部高寒草甸牦牛粪便的分解过程和科学管理[J]. 草业科学, 2012, 29(8): 1302-1306.
LI Bo, HE Yi-xin, WANG Zhi-yuan, et al. Decomposition process and scientific management of yak dung on alpine meadow in the eastern

- Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Pratacultural Science*, 2012, 29(8): 1302-1306.(in Chinese)
- [3] 柯英,陈晓群.牛羊粪高温堆肥腐熟过程研究[J].宁夏农林科技, 2012, 53(6): 63-65.
KE Ying, CHEN Xiao-qun. A study of high temperature composting process of cattle and sheep dung[J]. *Ningxia Journal of Agri and Fores Sci & Tech*, 2012, 53(6): 63-65.(in Chinese)
- [4] 白帆,王晓昌.粪便好氧堆肥过程中温度对有机物的降解和氮的保持特性影响[J].中国土壤与肥料, 2011(3): 68-71.
BAI Fan, WANG Xiao-chang. Effect on biodegradation and nitrogen holding property from temperature during aerobic composting for sanitary disposal of human feces[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2011(3): 68-71.(in Chinese)
- [5] 卢秉林,王文丽,李娟,等.小麦秸秆添加量对羊粪高温堆肥腐熟进程的影响[J].中国农业大学学报, 2010, 15(2): 30-34.
LU Bing-lin, WANG Wen-li, LI Juan, et al. Effect of wheat straw on the maturity processing of sheep manure under high temperature condition [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2010, 15(2): 30-34.(in Chinese)
- [6] 刘兴元,王伟.藏北高寒草地生态系统现状及发展态势[J].草业科学, 2012, 29(9): 1352-1358.
LIU Xing-yuan, WANG Wei. Current situation and development trend of the alpine rangeland ecosystem in northern Tibet, China[J]. *Pratacultural Science*, 2012, 29(9): 1352-1358.(in Chinese)
- [7] 王录仓,李巍,王生荣,等.高寒民族地区城乡一体化面临的问题与实现路径——以甘南藏族自治州为例[J].草业科学, 2013, 30(4): 654-660.
WANG Lu-cang, LI Wei, WANG Sheng-rong, et al. Issues and approaches of the urban-rural integration in alpine minority areas—A case study of Gannan Tibet Autonomous Prefecture[J]. *Pratacultural Science*, 2013, 30(4): 654-660.(in Chinese)
- [8] 沈玉君,李国学,任丽梅,等.通风对堆肥供氧的影响及堆高优化研究[J].环境科学与技术, 2011, 34(11): 171-175.
SHEN Yu-jun, LI Guo-xue, REN Li-mei, et al. Impact of aeration on oxygen variation during composting and optimization on pile height[J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, 34(11): 171-175.(in Chinese)
- [9] 孙英杰,张延鹏,王洪涛,等.不同通风方式对粪渣与树叶共堆肥的影响[J].安徽农业科学, 2010, 38(30): 16899-16902.
SUN Ying-jie, ZHANG Yan-peng, WANG Hong-tao, et al. Effects of different aeration pattern on co-composting of night soil and leaf[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2010, 38(30): 16899-16902.(in Chinese)
- [10] 杨延梅.通风量对厨余堆肥氮素转化及氮素损失的影响[J].环境科学与技术, 2010, 33(12): 1-4.
YANG Yan-mei. Influence of ventilation on nitrogen transformation and loss during composting of kitchen waste[J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, 33(12): 1-4.(in Chinese)
- [11] 沈玉君,李国学,任丽梅,等.不同通风速率对堆肥腐熟度和含氮气体排放的影响[J].农业环境科学学报, 2010, 29(9): 1814-1819.
SHEN Yu-jun, LI Guo-xue, REN Li-mei, et al. The impact of com-
- posting with different aeration rates on maturity variation and emission of gas concluding N[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(9): 1814-1819.(in Chinese)
- [12] 化党领,刘方,李国学,等.翻堆与覆盖工艺对猪粪秸秆堆肥性质的影响[J].农业工程学报, 2011, 27(12): 210-216.
HUA Dang-ling, LIU Fang, LI Guo-xue, et al. Effect of turning and covering techniques on pig manure-straw composting property[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27(12): 210-216.(in Chinese)
- [13] 隋文志,胡广民,赵晓锋,等.北方寒区牛粪无害化处理关键技术研究[J].农业环境科学学报, 2010, 29(3): 578-585.
SUI Wen-zhi, HU Guang-min, ZHAO Xiao-feng, et al. Key technology of cow dung composting innocuous in northern cold regions[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(3): 578-585.(in Chinese)
- [14] LI Yu, SU Ben-sheng, et al. Use of potassium dihydrogen phosphate and sawdust as adsorbents of ammoniacal nitrogen in aerobic composting process[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, 141(3): 736-744.
- [15] 黄向东,韩志英,石德智,等.畜禽粪便堆肥过程中氮素的损失与控制[J].应用生态学报, 2010, 21(1): 247-254.
HUANG Xiang-dong, HAN Zhi-ying, SHI De-zhi, et al. Nitrogen loss and its control during livestock manure composting[J]. *Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(1): 247-254.(in Chinese)
- [16] 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_3 , N_2O and CH_4 emissions during pig manure composting[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(22): 235-242.(in Chinese)
- [17] 沈玉君,林小凤,李国学,等.外源铁磷对堆肥腐熟的影响及“腐殖酸-Fe-P”复合体的形成初探[J].生态环境学报, 2010, 19(5): 1232-1237.
SHEN Yu-jun, LIN Xiao-feng, LI Guo-xue, et al. Effect of FeCl_3 and $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ on composting maturity and study on synthesis of ternary compound substance[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, 19(5): 1232-1237.(in Chinese)
- [18] 马怀良,郭文学,柴军红.常温高效纤维素分解菌的筛选[J].东北农业大学学报, 2010(1): 52-55.
MA Huai-liang, GUO Wen-xue, CHAI Jun-hong. Screening high-performance cellulose-degrading microbes at normal temperature[J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2010(1): 52-55.(in Chinese)
- [19] 王志超,陆文静,王洪涛.好氧堆肥中高温纤维素分解菌的筛选及性状研究[J].北京大学学报:自然科学版, 2006(2): 259-264.
WANG Zhi-chao, LU Wen-jing, WANG Hong-tao. Research on the isolation and characters of several strains of thermophilic cellulolytic bacteria[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2006(2): 259-264.(in Chinese)
- [20] 宫玉胜,李玉成,吴旺宝,等.嗜热纤维素分解菌的筛选及混合发酵研究[J].江苏农业科学, 2010(3): 394-396.
GONG Yu-sheng, LI Yu-cheng, WU Wang-bao, et al. Research on the screening and mixed fermentation of thermophilic cellulolytic bacteria [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2010(3): 394-396.(in Chinese)

- [21] 吴翔, 甘炳成, 刘本洪, 等. 一个降解纤维素的复合菌剂对秸秆堆肥催腐熟效果[J]. 四川农业大学学报, 2010, 28(2): 205-210.
WU Xiang, GAN Bing-cheng, LIU Ben-hong, et al. The effect of a complex cellulose-decomposing strains manufacture on crop straw compost [J]. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 2010, 28(2): 205-210. (in Chinese)
- [22] 任露泉. 试验优化设计与分析(第二版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003: 100-109.
REN Lu-quan. Experimental design and analysis optimization (2nd edition)[M]. Beijing: Higher Education Press, 2003: 100-109. (in Chinese)
- [23] 常勤学, 魏源送, 夏世斌. 堆肥通风技术及进展[J]. 环境科学与技术, 2007, 30(10): 98-103.
CHANG Qin-xue, WEI Yuan-song, XIA Shi-bin. Progress on technology of aeration in composting[J]. *Environmental Science and Technology*, 2007, 30(10): 98-103. (in Chinese)
- [24] 孙晓杰, 王洪涛, 陆文静. 通风量对粪渣与树叶共堆肥的影响[J]. 农业工程学报, 2009, 25(9): 249-253.
SUN Xiao-jie, WANG Hong-tao, LU Wen-jing. Effect of ventilation rate on co-composting of night soil and leaf[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2009, 25(9): 249-253. (in Chinese)
- [25] 王岩, 王文亮. 家畜粪尿的堆肥化处理技术研究 II. 堆肥材料的发酵特性和氨气挥发[J]. 河南农业大学学报, 2002, 36(3): 284-287.
WANG Yan, WANG Wen-liang. Study on composting treatment of livestock wastes II. decomposition of composting materials and emission of ammonium[J]. *Journal of Henan Agricultural University*, 2002, 36(3): 284-287. (in Chinese)
- [26] 魏宗强, 李吉进, 邹国元, 等. 不同覆盖措施对鸡粪堆肥氨挥发的影响[J]. 水土保持学报, 2009, 23(6): 108-111.
WEI Zong-qiang, LI Ji-jin, ZOU Guo-yuan, et al. Influence of different cover materials on NH_3 volatilization from chicken manure composting[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2009, 23(6): 108-111. (in Chinese)
- [27] 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 Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27(10): 212-217. (in Chinese)
- [28] 刘宁, 赵义武, 史春梅. 覆盖、翻堆对堆肥过程中 N_2O 、 NH_3 排放规律的研究[J]. 环境卫生工程, 2013(1): 53-57.
LIU Ning, ZHAO Yi-wu, SHI Chun-mei. Effects of covering and turning on emission regularity of N_2O and NH_3 during composting process [J]. *Environmental Sanitation Engineering*, 2013(1): 53-57. (in Chinese)
- [29] 贺琪, 李国学, 张亚宁, 等. 高温堆肥过程中的氮素损失及其变化规律[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(1): 169-173.
HE Qi, LI Guo-xue, ZHANG Ya-ning, et al. N loss and its characteristics during high temperature composting[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(1): 169-173. (in Chinese)
- [30] 翁俊基. 过磷酸钙在猪粪堆肥过程中的保氮效果研究[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(8): 4528-4529.
WENG Jun-ji. Nitrogen conservation of calcium superphosphate in swine manure compost[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2012, 40(8): 4528-4529. (in Chinese)
- [31] 任丽梅, 贺琪, 李国学, 等. 氢氧化镁和磷酸固定剂控制堆肥氮素损失的研究[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(4): 814-819.
REN Li-mei, HE Qi, LI Guo-xue, et al. Effect of $\text{Mg}(\text{OH})_2$ and H_3PO_4 amendments on nitrogen conservation during composting[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(4): 814-819. (in Chinese)
- [32] LIU J, XIE Z, LIU G, et al. A holistic evaluation of CO_2 equivalent greenhouse gas emissions from compost reactors with aeration and calcium superphosphate addition[J]. *Journal of Resources and Ecology*, 2010, 1(2): 177-185.
- [33] 郑丹, 阎静, 陶光灿, 等. 添加无机肥料对高温堆肥化及磷素有效性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2006(6): 1631-1635.
ZHENG Dan, YAN Jing, TAO Guang-can, et al. Effects of inorganic fertilizer amendments on dairy waste composting and phosphorus availability[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006(6): 1631-1635. (in Chinese)