

不同通风速率对厌氧残余物沼渣堆肥的影响

邱珊^{1*}, 赵龙彬¹, 马放^{1,2}, 孙颖³ (1. 哈尔滨工业大学市政环境工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150090; 2. 哈尔滨工业大学城市水资源与水环境国家重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150090; 3. 中国环境管理干部学院, 河北 秦皇岛 066102)

摘要: 以牛粪发酵残余物沼渣为原料, 设置不同的通风速率进行堆肥, 堆体的通风速率分别是 0.2, 0.5, 0.8 L/(min·kg OM), 分析堆肥 20d 过程中物理、化学和腐熟变化的特征, 探讨不同通风速率对堆肥特性的影响。结果表明, 通风速率为 0.2, 0.5 L/(min·kg OM) 的堆体维持高温阶段的时间为 5d, 而通风速率为 0.8 L/(min·kg OM) 堆体维持高温阶段时间为 4d; 各堆体 OM 分解率分别是 28.2%, 32.9%, 30.5%; 通风速率对终产品 pH 值、电导率(EC)影响不大, pH 值均能满足堆肥最优 pH 值, EC 均未超过 4 mS/cm; 通风速率为 0.2 L/(min·kg OM) 的堆体终产品的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量超过 400 mg/kg, 各堆体终产品 $\text{NO}_3^+\text{-N}$ 的含量分别是 2545, 3146, 2735 mg/kg; 各堆体终产品 C/N 分别是 16.5, 14.1, 15.6; 各堆体终产品 GI 值分别是 92.2%, 96.6%, 82.7%。通风速率为 0.5 L/(min·kg OM) 堆体 E465/E665 (E4/E6) 最小, 其腐殖化程度最高。综合分析, 0.5 L/(min·kg OM) 是沼渣堆肥最为合适的通风速率。

关键词: 沼渣; 堆肥; 通风速率; 腐熟

中图分类号: X705 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2016)08-2402-07

The influence of aeration rate on intermittent forced-aeration composting of biogas residue. QIU Shan^{1*}, ZHAO Long-bin¹, MA Fang^{1,2}, SUN Ying³ (1. School of Municipal and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China; 2. State Key Laboratory of Urban water Resource and Environment, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China; 3. Environmental management college of China, Qinhuangdao 066102, China). *China Environmental Science*, 2016, 36(8): 2402~2408

Abstract: An experiment was conducted to study the effect of aeration rates of 0.2, 0.5, 0.8 L/(min·kg OM) on intermittent forced-aeration composting of biogas residue. Characteristics of physics, chemistry and maturity were determined during the composting. The results were manifested that the higher aeration rate of 0.8 L/(min·kg OM) did not maintain a longer thermophilic phase. The decomposition rate of OM were 28.2%, 32.9% and 30.5%, respectively. The aeration rate had little influence on the final pH and EC, all composts had reached acceptable optimum values and EC had not exceeded 4 mS/cm. The final ammonia nitrogen content in pile of aeration rates of 0.2 L/(min·kg OM) did not meet the limit value of 400 mg/kg, and the nitrate nitrogen was 2545, 3146 and 2735 mg/kg, respectively. The final C/N was 16.5, 14.1 and 15.6, and the final germination index (GI) was 92.2%, 96.6% and 82.7%, respectively. The pile of middle aeration rates of 0.5 L/(min·kg OM) had the highest humification because E465/E665 (E4/E6) of it reduced the largest range. Overall, aeration rates of 0.5 L/(min·kg OM) can be chosen for composting.

Key words: biogas residue; composting; aeration rate; maturity

利用厌氧发酵技术可以将牛粪等废弃物转变为能源物质, 达到降低污染、保护环境的目的, 同时具有环境、社会、经济效益。但厌氧发酵技术会产生大量沼渣、沼液, 如果其得不到合适的处理处置, 可能会引起高浓度的有机物、病原微生物等污染物质进入环境, 造成资源浪费的同时又引起二次污染, 所以探究沼渣与沼液的资源化利用具有重要的应用价值^[1]。

目前, 沼渣与沼液较为成熟的使用模式主要有叶面肥施用、浇灌使用、沼液沼渣分离后将沼渣制成有机肥使用^[2-4], 其中沼渣堆肥化受到学者的广泛关注^[5-6]。堆肥化是有效实现沼渣资源

收稿日期: 2015-12-16

基金项目: “十二五”国家重大科技专项(2012ZX07201002-003); 国家科技技术支撑专题项目(2012BAD14B06)

* 责任作者, 副教授, qiushan_hit@163.com

化、无害化、减量化的手段,它可以在高温发酵阶段使有机物稳定,杀死病原微生物,堆肥化的最终产物堆肥还可以起到增加土壤肥力,丰富土壤微生物组成,调节土壤结构的作用.与其他固体废弃物堆肥不同,沼渣有机质含量高、C/N 低、含水率较高,沼渣堆肥是厌氧残余物的资源化利用,可进一步实现资源的循环利用,降低对环境的危害.为了获得良好的沼渣堆肥产品,需在堆肥过程中对温度、含水率、通风速率、pH 值及 C/N 等因素进行适当的控制,其中通风速率与堆肥过程中微生物活性、有机质的分解率和温度的变化有关,是影响堆肥过程与堆肥产品质量的重要参数之一^[9].通风速率过低会使堆肥体系中出现厌氧环境影响堆肥的进行,通风速率过高会导致过多的热量损失,影响堆肥过程中高温阶段维持时间^[10],所以选用合适通风速率是进行高效好氧堆肥的前提,在堆肥的过程中有必要控制通风速率.研究发现,0.5L/(min·kg OM)的通风速率有利于鸡粪与锯末堆肥腐熟与稳定^[11],通风速率为 0.34L/(min·kg OM)便于猪粪与秸秆混合堆肥腐熟与臭味的去除^[12],0.48L/(min·kg OM)的通风速率可使猪粪与玉米秸秆混合堆肥达到最大腐熟程度^[13],Chen 等^[14]在进行盘尼西林菌丝体残渣进行堆肥时发现,通风速率 0.5L/(min·kg OM)有利于堆肥的腐熟及盘尼西林的降解.目前关于沼渣堆肥间歇通风最适通风速率的研究尚鲜见报道,本文通过研究不同通风速率对沼渣堆肥过程中物理化学性状和堆肥产腐熟程度的影响,旨在为沼渣堆肥化利用提供基础依据.

1 材料与方法

1.1 试验材料

新鲜沼渣采自黑龙江省牡丹江市海林农场沼气站,原料的基本性状如表 1.海林农场沼气池容积 1920m³,共 8 个池体组成,内置搅拌系统间歇式启动.配料浓度 TS 为经验值 8%,沼气池中温 35℃以单相半连续混合工艺运行,有机负荷及停留时间分别为 2.0kg VS/(m³·d)和 45d,沼渣产量约为 20 吨/d.有机肥发酵菌剂是由芽孢杆菌群、乳酸菌群、曲霉菌群、5406 菌等菌群及相关酶

组成,有效活菌数 2×10¹¹cfu/g,分解有机物能力强,能够使堆体快速升温.

表 1 堆肥原料基本性状

Table 1 The properties of composting materials

原料	全碳 (g/kg)	全氮 (g/kg)	碳氮比 (C/N)	含水率 (%)
沼渣	397.6	18.4	21.4	74

1.2 试验装置

堆肥装置是由泡沫箱体改装而成,长、宽、高分别是 50cm,30cm,30cm,有效容积 50L,壁厚 4cm,外加 5cm 的泡沫保温层,图 1 为试验装置.

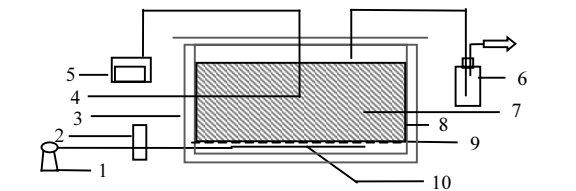


图 1 自制通风堆肥装置

Fig.1 Pattern of the automatic aerobic compost device

1.气泵;2.气体流量计;3.保温板;4.温度检测器;5.温度读数器;6.洗气瓶 7.堆料 8.箱体 9.筛板 10.缓冲层及曝气条

1.3 试验设计

根据预试验结果,堆体在通风速率为 0.15~0.9L/(min·kg OM)升温速率快,且最高温度高于 50℃,所以试验设置 3 个处理,采用间歇强制通风,通风速率分别为 0.2(BR-1),0.5(BR-2)与 0.8(BR-3)L/(min·kg OM),通风 15min,停止 45min.各处理沼渣 10kg,菌剂 20g,混合均匀后在堆肥装置中进行高温好氧堆肥.每 4d 翻堆一次,堆肥周期共 20d.在堆肥的过程中注意观察堆料颜色、状态及气味的变化.

1.4 采样与测定

分别于第 0,2,4,6,8,10,12,14,16,18,20d 在堆肥表层以下 10cm 处采样,按 5 点采样法原则,每点各取样品 20g 左右,充分混合,样品分为 2 份,一份为鲜样储存于 4℃冰箱备用,另一份风干粉碎备用.

温度由数显温度计直接测量.新鲜样品:蒸馏

水=1:10 混合震荡 30min,静置 15min 后,8000r/min 条件下离心 5min(重复两次),然后过滤,滤液储存于 4℃冰箱备用;pH 值,EC 用梅特勒 S470-K/pH/电导率多功能测量仪直接测定,重复 3 次; $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 参考纳氏试剂分光光度法^[15]测定; $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 参考酚二磺酸分光光度法^[16]测定;E4/E6 表示提取液在波长 465nm 与 665nm 处吸光度的比值,用 TU-1810 紫外可见分光光度计直接测定吸光度.全碳采用重铬酸钾容量法—外加热法测定^[17].全氮采用浓硫酸- H_2O_2 消煮,凯氏定氮法测定^[18].有机质采用灼烧法测定^[19];GI 值参考文献[20]测定.

2 结果与分析

2.1 堆肥特性

2.1.1 温度变化 图 2 为堆肥过程中温度的变化.

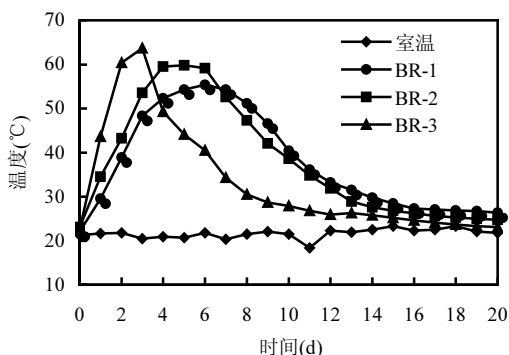


图2 堆肥过程温度变化

Fig.2 Changes of temperature during composting

BR-1 在第 6d 达到最高温度 55℃,BR-2 在第 5d 达到最高温度 60℃,BR-3 在第 3d 达到最高温度 65℃,BR-1, BR-2, BR-3 三个堆体维持高温阶段(大于 50℃)的时间分别为 5,5,4d.由于 BR-3 通风量大,致使其中的可降解物质迅速降解,堆体温度相对于 BR-1, BR-2 更快达到了最高温度;粪便无害化卫生标准 GB2989-2012 规定堆体温度保持在 50~60℃的时间应该在 5~10d, BR-3 不能满足堆肥的卫生学指标的需要,这可能是由于 BR-3 通风量过大引起热量散失所导

致^[11].在腐熟阶段,BR-1 堆体的温度较高,这是由于在高温阶段通风速率过低不能满足微生物生命活动的需要, BR-1 中易降解有机物降解不彻底所致^[13].BR-2 堆体的通风速率既能满足微生物生命活动的需要,又不会因为通风量过大而带走过多的热量,是合适的通风速率.

2.1.2 含水率变化 各堆体含水率不断降低(图 3),堆肥结束时 BR-1, BR-2, BR-3 的含水率分别是 49.4%,46.5%与 38.8%;在高温阶段,由于堆体温度较高,水分蒸发快,含水率下降迅速,在升温阶段,降温阶段与腐熟阶段,由于温度较低含水率下降较慢;BR-3 堆体通风速率大,含水率下降快.

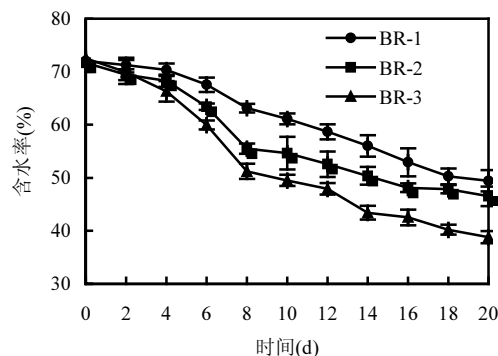


图3 堆肥过程含水率的变化

Fig.3 Changes of moisture content during composting

2.1.3 有机质变化 BR-1, BR-2, BR-3 堆体中 OM 的含量都有不同程度的降低(图 4), OM 分解率分别是 28.2%,32.9%,30.5%,其中 BR-2 堆体中 OM 的分解率最高;在 10d 前,堆体 BR-3 中 OM 分解率高于 BR-2,而 10d 后 BR-3 中 OM 分解率低于 BR-2,这是因为在堆肥初期,各堆体中易分解有机物多,曝气量成为有机物分解的限制性因素,堆体 BR-3 中曝气速率大,有机物分解速率高于 BR-2,随着堆体中有机物的消耗,堆体温度降低,温度成为有机物分解的限制性因素, BR-3 曝气速率过大会带走大量的热量,使堆体温度相对较低,影响堆体中有机物的分解,使 BR-3 中有机质的分解速率低于 BR-2.在堆肥后期,各试验组 OM 的含量相对稳定,表明沼渣堆肥进入了稳定阶段;在堆肥过程中,过低或过高的通风量都会对

OM 的分解带来不利的影响, BR-2 的通风量既能为微生物提供足够的氧气, 又能避免由于通风量过大而导致含水率下降过快从而使微生物活性受到抑制, 是合适的通风速率。

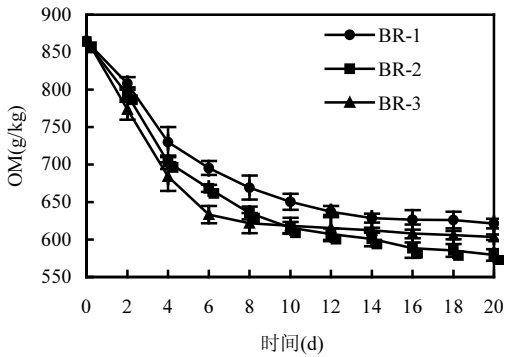


图 4 堆肥过程 OM 的变化
Fig.4 Changes of OM during composting

2.1.4 pH 值与 EC 的变化 各组堆肥过程中 pH 值先升高后降低(图 5a), 堆肥结束时 BR-1, BR-2, BR-3 的 pH 值分别是 7.76, 7.86, 7.61。在堆肥初始时期, 由于含氮有机物氨化作用导致各试验组 pH 值升高, 最高值都超过 8.0; 随着堆肥继续进行, 由于氨不断挥发, 微生物硝化作用而消耗氨、释放 H^+ , 有机物分解过程中产生有机酸与无机酸等因素, 致使各堆体的 pH 值逐渐降低^[21]。各堆体的 pH 值均能满足堆肥的最优 pH 值^[22-23], 有利于堆肥后续利用。

EC 变化与 pH 值变化相似(图 5b), 各组堆肥过程中 EC 先升高后降低, 在第 6, 6 与 4d 出现最大值, 分别是 4.6, 4.9 与 3.0 mS/cm; 堆肥初期 EC 的升高是由有机物质的分解引起磷酸盐、铵离子等矿物盐类释放而引起的; 随着堆肥的进行, 由于氨的挥发和矿物盐类的沉淀, 致使堆肥后期 EC 不断降低^[24]。通风速率对堆肥产品 EC 影响不大, 各组产品均符合 Garcia^[25]给出堆肥电导率的标准 (小于 4 mS/cm)。

2.1.5 NH_4^+-N 与 NO_3^--N 变化 各堆体中 NH_4^+-N 的含量都是先增加后减小(图 6a), BR-1, BR-2, BR-3 中 NH_4^+-N 含量分别从 2873, 2878, 2893 mg/kg 升高到最大值 4430, 4698, 4211 mg/kg,

在堆肥结束时, BR-1, BR-2, BR-3 中 NH_4^+-N 的浓度分别是 651, 388, 214 mg/kg。堆肥初始阶段, 堆体中含氮有机物水解转化为氨, 使各试验组的 NH_4^+-N 的含量升高; 之后随着微生物的同化、硝化和氨的蒸发^[26], 使堆体中 NH_4^+-N 的含量不断降低, 有学者认为腐熟的堆肥产品中 NH_4^+-N 的浓度不应超过 400 mg/kg^[27], BR-2 与 BR-3 可以满足腐熟要求, 而 BR-1 不能满足要求, 主要有以下两个方面原因, 第一是由于 NH_4^+-N 的浓度受堆肥过程中通风速率的影响, BR-1 中通风速率较低, 限制了 NH_3 的吹脱, 第二是在堆肥后期 BR-1 中堆体温度较高, 硝化过程受到一定程度的抑制, 导致 BR-1 中 NH_4^+-N 的含量较高。

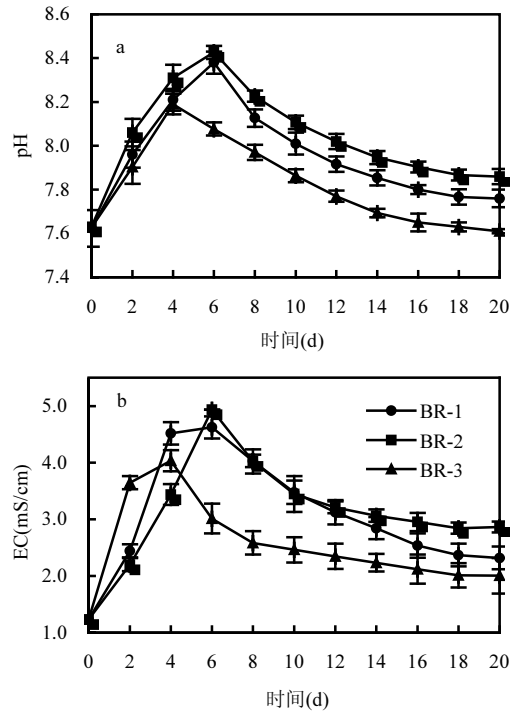


图 5 堆肥过程中 pH 和 EC 的变化
Fig.5 Changes of pH and EC during composting

堆肥过程中 NO_3^--N 的含量不断增高(图 6b), 堆肥结束时 BR-1, BR-2, BR-3 中 NO_3^--N 的含量分别是 2545, 3146, 2735 mg/kg。在堆肥初始阶段, 由于堆体温度过高(温度大于 $40^\circ C$)会抑制硝化细菌的生长繁殖与活性, 所以各试验组 NO_3^--N 的含量的增加不明显。当堆体中的温度降低到一

定值时, $\text{NO}_3^- \text{N}$ 的含量会出现急剧的增长,高温阶段之后(温度小于 40°C),硝化细菌的活性增强,由于硝化细菌生命活动, $\text{NO}_3^- \text{N}$ 的含量会出现明显上升的现象; $\text{NO}_3^- \text{N}$ 含量的增加与 $\text{NH}_4^+ \text{N}$ 含量的降低相符合,这是微生物硝化作用的结果,硝化作用可以使堆肥获得更高浓度可以利用的氮^[27].BR-2 中 $\text{NO}_3^- \text{N}$ 含量较高,从此角度考虑,0.5L/(min·kg OM)是堆体合适的通风速率.

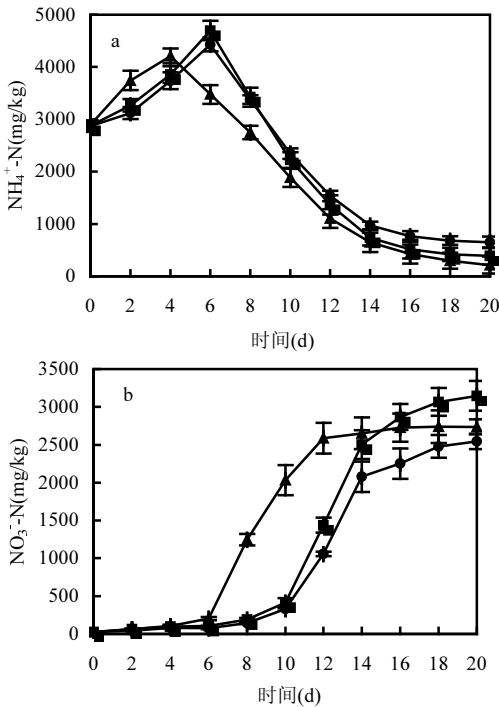


图 6 堆肥过程中 $\text{NH}_4^+ \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- \text{N}$ 的变化
Fig.6 Changes of $\text{NH}_4^+ \text{N}$ and $\text{NO}_3^- \text{N}$ during composting
● BR-1 ■ BR-2 ▲ BR-3

2.2 腐熟评价

2.2.1 C/N 变化 堆肥过程中 C/N 不断降低(图 7),BR-1,BR-2,BR-3 中 C/N 分别从 21.3,21.6,21.4 降低至 16.5,14.1,15.6.在堆肥过程中,易分解的糖类、脂肪、氨基酸与难分解的纤维素、半纤维素、木质素等含碳有机物的矿化导致全碳含量的损失,从而导致 C/N 含量降低.在高温阶段,由于含碳有机质分解快,导致 C/N 下降快,而 BR-3 堆体通风量大,有机质分解快,C/N 下降快;在降温阶

段,因 BR-3 堆体通风量过大从而带走过多的热量,使堆体 BR-3 中温度下降较快,从而影响堆体中有机物的分解速率,C/N 下降速率迅速减慢,BR-1 堆体通风量不足,影响微生物生命活动对氧气的需求,C/N 下降较慢;堆肥前期,堆体 BR-3 中 C/N 低于 BR-2,而堆肥后期 BR-3 中 C/N 高于 BR-2,这是由于堆肥前期 BR-3 堆体有机质分解快,C/N 下降快,而堆肥后期,BR-3 堆体有机质分解速率小于堆体 BR-2,导致 C/N 下降速率小于堆体 BR-2;在腐熟阶段,C/N 相对稳定,可用此来表征堆肥是否达到了腐熟阶段.

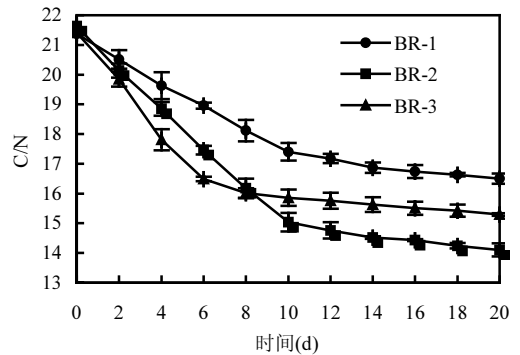


图 7 堆肥过程中 C/N 的变化
Fig.7 Changes of C/N during composting

许多研究表明,当堆肥结束时 C/N 小于 20 即可认为达到了腐熟,但是堆肥结束时固相 C/N 受堆肥原料的特性、堆肥过程中操作参数等因素的影响,所以单用堆肥结束时固相 C/N 值并不能作为堆肥腐熟的绝对指标.T 值((堆肥结束 C/N)/(堆肥开始 C/N))是评价堆肥的指标,Morel 等^[28]认为堆肥过程中 T 值小于 0.6,堆肥达到了腐熟;张相锋等^[29]认为堆肥过程中 T 值在 0.53~0.72 时,堆肥达到了腐熟.试验组 BR-1,BR-2,BR-3 的 T 值分别是 0.77,0.65,0.73,其中 BR-2 达到了腐熟要求,可能是由于堆肥过程中适当的通风速率强化了堆体中微生物对 OM 分解所导致.

2.2.2 E4/E6 变化 E4/E6 是堆肥水浸提液在 465nm 与 665nm 处吸光度的比值.各堆体随着堆肥的进行,E4/E6 不断减小(图 8),在堆肥后期,E4/E6 趋于平稳,在堆肥结束时各处理的 E4/E6

分别是 4.14, 3.88, 4.30。E4/E6 可以用来反映堆肥中腐殖质的聚合芳香化程度和分子量的大小^[30-31], 其值与腐殖质浓度无关, 与分子量有关, E4/E6 越小表明腐殖质分子量越大, 腐殖化和聚合程度越高。堆肥结束时 BR-2 的 E4/E6 最小, 表明堆体通风量为 0.5L/(min·kg OM) 时, 可以强化微生物对挥发性有机酸与氨等小分子量物质的分解, 使堆肥快速向大分子量腐殖质转变, 堆肥腐殖化程度最高。

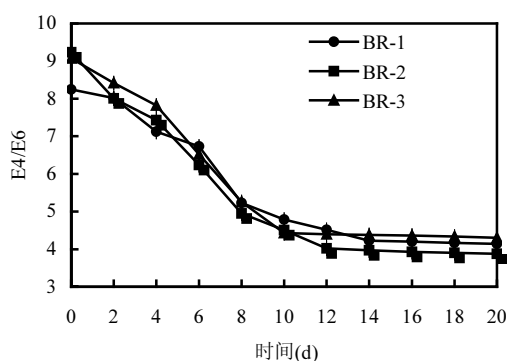


图 8 堆肥过程中 E4/E6 的变化

Fig.8 Changes of E4/E6 during composting

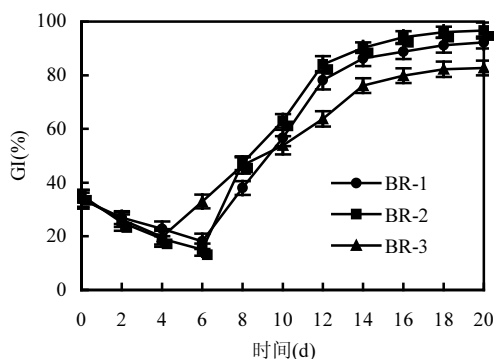


图 9 堆肥过程中 GI 的变化

Fig.9 Changes of GI during composting

2.2.3 GI 值变化 BR-1, BR-2, BR-3 堆体的 GI 值先降低后增加(图 9), 各堆体在第 6, 6, 4d 出现最低值, 最低值分别是 18.2%, 15.0%, 19%, 之后 GI 值不断增加, 堆肥结束时各堆体的 GI 值分别是 92.2%, 96.6%, 82.7%。在堆肥初始阶段有机物分解生成短链挥发性有机酸与氨, 堆肥中对植物有毒

害性物质增多^[32], 导致 BR-1, BR-2, BR-3 堆体的 GI 值都有不同程度的降低; 随着堆肥的进行, 由于短链挥发性有机酸的分解与氨的挥发, 各组 GI 上升, 由于各组通风速率不同, 使各堆体中微生物活性不同, 进而影响微生物对 NH₃ 与有机酸等低分子量物质的分解, 影响堆肥产品 GI 值。堆肥 BR-2 的 GI 值最高, 表明 0.5L/(min·kg OM) 是堆体合适的通风速率。

3 结论

3.1 通风量过大, 堆体不利于长时间维持高温阶段, 影响堆肥无害化程度, 使堆体含水率下降过快从而会影响堆肥后期微生物的生命活动; 通风量过低, 高温阶段对易分解有机物分解不彻底, 降温阶段与腐熟阶段堆体温度偏高, 影响微生物硝化作用, 使堆肥中低分子量物质偏高, 影响堆肥腐熟。

3.2 采用通风 15min, 停止 45min 的通风方式对沼渣进行堆肥, 堆体通风量为 0.5L/(min·kg OM) 时, 沼渣堆肥无害化程度最高、腐殖化程度最高。

参考文献:

- [1] 姜文腾, 林 聪. 大中型沼气工程厌氧残留物综合利用探究 [J]. 猪业科学, 2008, (4): 84-87.
- [2] Govasmark E, Ståb J, Holen B., et al. Chemical and microbiological hazards associated with recycling of anaerobic digested residue intended for agricultural use [J]. Waste Management, 2011, 31(12): 2577-2583.
- [3] 陈玉成, 杨志敏, 陈庆华, 等. 大中型沼气工程厌氧发酵液的后处置技术 [J]. 中国沼气, 2010, 28(1): 14-20.
- [4] 党 锋, 毕于运, 刘研萍, 等. 欧洲大中型沼气工程现状分析及对我国的启示 [J]. 中国沼气, 2014, 32(1): 79-83+89.
- [5] Do T, Scherer H. Compost and biogas residues as basic materials for potting substrates [J]. Plant Soil Environ, 2012, 58: 459-464.
- [6] Svensson K, Odlare M, Pell M. The fertilizing effect of compost and biogas residues from source separated household waste [J]. The Journal of Agricultural Science, 2004, 142(4): 461-467.
- [7] 黄懿梅, 安韶山, 白红英, 等. 鸡粪与不同秸秆高温堆肥中氮素的变化特征 [J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2004, 32(11): 53-58.
- [8] Do T C V, Scherer H W. Compost and biogas residues as basic materials for potting substrates [J]. Plant Soil and Environment, 2012, 58(10): 459-464.
- [9] Kuter G, Hoitink H, Rossman L. Effects of aeration and temperature on composting of municipal sludge in a full-scale

- vessel system [J]. Journal (Water Pollution Control Federation), 1985:309-315.
- [10] Hu Z, Liu Y, Chen G, et al. Characterization of organic matter degradation during composting of manure-straw mixtures spiked with tetracyclines [J]. Bioresource Technology, 2011,102(15): 7329-7334.
- [11] Gao M, Li B, Yu A, et al. The effect of aeration rate on forced-aeration composting of chicken manure and sawdust [J]. Bioresource Technology, 2010,101(6):1899-1903.
- [12] 吕黄珍,韩鲁佳,杨增玲.猪粪麦秸反应器好氧堆肥工艺参数优化 [J]. 农业机械学报, 2008,39(3):101-105+100.
- [13] Guo R., Li G, Jiang T, et al. Effect of aeration rate, C/N ratio and moisture content on the stability and maturity of compost [J]. Bioresource Technology, 2012,112:171-178.
- [14] Chen Z, Zhang S, Wen Q, et al. Effect of aeration rate on composting of penicillin mycelial dreg [J]. Journal of Environmental Sciences, 2015,37:172-178.
- [15] HJ/535-2009 水质氨氮的测定纳氏试剂分光光度法 [S].
- [16] GB/T 7480-1987 水质硝酸盐氮的测定酚二磺酸分光光度法 [S].
- [17] 南京农业大学.土壤农化分析 [M]. 北京:中国农业出版, 1999.
- [18] NY525-2002 有机肥料 [S].
- [19] 田 华.有机肥原料中有机质含量测定方法的研究 [J]. 中小企业管理与科技(下旬刊), 2011,(10):313.
- [20] 徐 智,张陇利,张发宝,等.接种内外源微生物菌剂对堆肥效果的影响 [J]. 中国环境科学, 2009,29(8):856-860.
- [21] Wong J, Li S, Wong M. Coal fly ash as a composting material for sewage sludge: effects on microbial activities [J]. Environmental technology, 1995,16(6):527-537.
- [22] Wong J, Mak K., Chan N, et al. Co-composting of soybean residues and leaves in Hong Kong [J]. Bioresource Technology, 2001,76(2):99-106.
- [23] Lin C. A negative-pressure aeration system for composting food wastes [J]. Bioresource Technology, 2008,99(16):7651-7656.
- [24] Fang M., Wong J, Ma K., et al. Co-composting of sewage sludge and coal fly ash: nutrient transformations [J]. Bioresource Technology, 1999,67(1):19-24.
- [25] Garcia C, Hernandez T, Costa F, et al. Evaluation of the maturity of municipal waste compost using simple chemical parameters [J]. Communications in Soil Science & Plant Analysis, 1992, 23(13/14):1501-1512.
- [26] Mahimairaja S, Bolan N, Hedley M, et al. Losses and transformation of nitrogen during composting of poultry manure with different amendments: an incubation experiment [J]. Bioresource Technology, 1994,47(3):265-273.
- [27] Cáceres R, Flotats X, Marfà O. Changes in the chemical and physicochemical properties of the solid fraction of cattle slurry during composting using different aeration strategies [J]. Waste Management, 2006,26(10):1081-1091.
- [28] Morel J, Colin F, Germon J, et al. Methods for the evaluation of the maturity of municipal refuse compost [J]. Composting of agricultural and other wastes/edited by JKR Gasser, 1985:
- [29] 张相锋,王洪涛,聂永丰,等.猪粪和锯末联合堆肥的中试研究 [J]. 农村生态环境, 2002,18(4):19-22.
- [30] Korshin G V., Li C. -W, Benjamin M. M. Monitoring the properties of natural organic matter through UV spectroscopy: a consistent theory [J]. Water Research, 1997,31(7):1787-1795.
- [31] Liu W, Zhang Z, Yang X., et al. Effects of UV irradiation and UV/chlorine co-exposure on natural organic matter in water [J]. Science of the Total Environment, 2012,414:576-584.
- [32] Wong M. Phytotoxicity of refuse compost during the process of maturation [J]. Environmental Pollution Series A, Ecological and Biological, 1985,37(2):159-174.

致谢: 本试验所用堆肥原料是由黑龙江省牡丹江市海林农场沼气站工作人员协助完成,在此表示感谢。

作者简介: 邱 珊(1982-),女,黑龙江哈尔滨人,副教授,博士,主要从事固体废弃物资源化与电芬顿研究.发表论文 10 余篇