

刘媛媛, 徐 智, 陈卓君, 等. 外源添加磷石膏对堆肥碳组分及腐殖质品质的影响[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(11): 2483–2490.

LIU Yuan-yuan, XU Zhi, CHEN Zhuo-jun, et al. Effects of phosphogypsum addition on carbon fractions and humus quality during composting [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(11): 2483–2490.

外源添加磷石膏对堆肥碳组分及腐殖质品质的影响

刘媛媛, 徐 智, 陈卓君, 汤 利*

(云南农业大学资源与环境学院, 昆明 650201)

摘 要:为探究磷石膏的高效资源化利用方式,本文以鸡粪和玉米秸秆为原料,按照有机物料质量(以干物质计),添加磷石膏0%(对照)、磷石膏10%(PG10%)和磷石膏20%(PG20%)3个处理,研究外源添加磷石膏对堆肥碳组分及腐殖质品质的影响。结果表明:至堆肥结束时,CK、PG10%和PG20%处理均可腐熟,均可达到堆肥无害化标准。PG10%处理可延长堆肥高温持续时间(2 d)。与对照相比,PG10%和PG20%处理均显著降低了堆肥总有机碳、水溶性有机碳、腐殖质碳含量、胡敏酸碳含量和富里酸碳含量。PG10%处理的堆肥总有机碳、水溶性有机碳、腐殖质碳含量、胡敏酸碳含量和富里酸碳含量均显著高于PG20%处理,增幅分别为4.50%、51.79%、14.52%、16.99%和8.22%。与对照相比,PG10%处理的堆肥腐殖化指数、腐殖化率、胡敏酸百分含量和胡富比分别增加了3.44%、1.08%、2.36%和8.70%。因此,适量磷石膏添加(10%)可促进堆肥腐殖化进程,提高腐殖质品质。

关键词:磷石膏;堆肥;碳组分;腐殖化进程;腐殖质品质

中图分类号:X781 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2018)11-2483-08 doi:10.11654/jaes.2018-0377

Effects of phosphogypsum addition on carbon fractions and humus quality during composting

LIU Yuan-yuan, XU Zhi, CHEN Zhuo-jun, TANG Li*

(College of Resources and Environmental Science, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China)

Abstract: This aim of this research was to study the efficient utilization of phosphogypsum and to investigate the effects of phosphogypsum addition on carbon fractions and humus quality during chicken manure and corn stalk composting. The chicken manure was mixed with corn stalk and further amended with phosphogypsum at 0% (CK), 10% (PG10%), and 20% (PG20%) in dry weight of organic materials before being composted for 24 days. Results showed that the CK, PG10%, and PG20% treatments resulted in mature compost, which meets the compost sanitation requirements. PG10% extended the high-temperature processing times by 2 days. Compared to CK, both the treatments of PG10% and PG20% significantly reduced the total organic carbon (TOC), water-soluble organic carbon (WSOC), humus carbon (HS-C), humic acid carbon (HA-C), and fulvic acid carbon (FA-C) contents. PG10% increased TOC, WSOC, HS-C, HA-C, and FA-C significantly by 4.50%, 51.79%, 14.52%, 16.99%, and 8.22%, respectively, when compared to those with PG20%. Compared to CK, PG10% increased the humification index (HI), humification ratio (HR), percentage of humic acid (PHA), and degree of polymerization (DP) by 3.44%, 1.08%, 2.36% and 8.70%, respectively. In conclusion, phosphogypsum (10%) could enhance the humification process and improve the humus quality.

Keywords: phosphogypsum; composting; carbon fractions; humification; humus quality

收稿日期:2018-03-21 录用日期:2018-05-17

作者简介:刘媛媛(1992—),女,吉林临江人,硕士研究生,从事固体废弃物资源化利用研究。E-mail:907002069@qq.com

*通信作者:汤 利 E-mail:ltang@ynau.edu.cn

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFD0800202)

Project supported: The National Key R&D Program of China (2017YFD0800202)

磷石膏是生产磷酸过程中产生的工业废渣,主要成分为二水硫酸钙($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)。每生产1 t磷酸可副产4.50~5.00 t磷石膏^[1]。根据2012年的统计数据,我国磷石膏排放量已达到6000万 t/a,但利用率仅为年产量的20%^[2]。磷石膏的长时间堆放,不仅会占用大量土地,而且极易造成周围环境的污染^[3]。因此,继续加强磷石膏的利用,开发新的利用方式是十分必要的。

目前,磷石膏的应用还主要集中在工业方面,如制造水泥缓凝剂^[4]、煅烧建筑石膏^[5]、制作新型墙体材料^[6]等。在农业方面,磷石膏可作土壤改良剂^[7-8]。研究表明,在滨海盐渍土上撒施磷石膏可显著降低土壤 Na^+ ,增加小麦成熟期穗数,提高小麦产量^[9]。在盐碱土上施加磷石膏也可提高土壤有效磷含量^[10]。但是,因为磷石膏的酸性较强,所以磷石膏直接施用于土壤中可能会造成土壤pH下降,土壤交换性铝含量增加^[11]等问题。

堆肥是废弃物无害化和资源化利用的重要途径之一。有研究表明,在橡胶籽油枯和锯末堆肥体系中,磷石膏添加量可达10%^[12];在餐厨垃圾堆肥和猪粪、玉米秸秆堆肥中加入磷石膏均可以显著降低 CH_4 、 N_2O 、 NH_3 等温室气体排放^[13-14]。堆肥腐殖质组成、含量及其品质是表征堆肥质量和堆肥腐熟度的重要指标^[15]。研究表明,在猪粪和锯末堆肥中添加生物炭可促进腐植酸合成,提高堆肥腐殖化进程^[16]。在畜禽垃圾堆肥中接种沙门氏菌(*Salmonella*)可增加堆肥腐殖化指数、腐殖化率和胡富比,提高堆肥腐殖化进程^[17]。添加沸石和石灰可增强生物固体和小麦秸秆堆肥的腐殖化程度^[18]。目前,关于磷石膏对堆肥腐殖化进程及腐殖质品质影响的报道较少。因此,本研究探究了磷石膏添加对鸡粪、玉米秸秆堆肥腐殖化进程以及腐殖质组成、含量和品质的影响,以期对磷石膏的高效资源化利用提供参考。

1 材料与方法

1.1 堆肥材料

供试鸡粪取自云南农业大学养鸡场,风干、粉碎后备用。供试玉米秸秆取自云南农业大学寻甸大河桥农场,风干后粉碎为1~3 cm左右的秸秆段。供试磷石膏取自云南中正化学工业有限公司,风干、粉碎、过2 mm筛后备用。磷石膏中Cd、Pb、Cr和As的含量分别为0.58、40.49、46.15 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和16.57 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。堆肥原料的理化性质见表1。

1.2 试验设计

试验设置不添加磷石膏(对照)、添加10%磷石

膏(PG10%)和添加20%磷石膏(PG20%)3个处理,每个处理3次重复。对照处理是将鸡粪与玉米秸秆按照干质量比1:2.5混合,控制C/N为28.5,各物料混合均匀,调节含水率为55%。PG10%处理和PG20%处理则在对照的基础上添加磷石膏,添加量分别为总有机物料干质量的10%和20%,总有机物料干质量与对照处理相同,且其余操作和对照处理完全一致(3个处理的有机物料干质量、C/N和含水率均保持一致)。

试验采用泡沫箱式堆肥(54 cm×27 cm×34 cm),每个泡沫箱并联组成一套曝气系统,每个箱子通气速率为6.5 $\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$,通气频率设定为每1 h通气10 min。试验发酵时间为24 d。堆肥前6 d每3 d翻堆一次,第6~24 d每6 d翻堆一次。

表1 堆肥原料理化性状

Table 1 Physical and chemical properties of compost feedstock					
物料	pH	总氮/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	总有机碳/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	总磷/%	含水率/%
鸡粪	8.62	34.35	273.44	3.25	8.66
玉米秸秆	6.91	5.41	436.41	0.22	6.30
磷石膏	4.01	—	—	3.68	13.21

注:“—”表示该原料的该指标未检测出。
Note: “—” indicates the index of the material was not detected.

1.3 分析方法

分别在堆肥第0、3、6、12、18、24 d采用五点法在堆体内部均匀取样,每处理每次采集6个混合样,其中3个混合样风干、粉碎后备用,3个混合样为鲜样保存于4℃冰箱中。

堆肥期间每日下午3点,用水银温度计分别测定堆肥上、中、下部的温度,取平均值为堆体的实际温度,同时测定环境温度。pH、总氮、总磷和有机质的测定均按照NY 525—2012中的相关步骤进行。总有机碳(Total organic carbon, TOC)采用重铬酸钾外加热法测定^[19]。水溶性有机碳(Water-soluble organic carbon, WSOC)测定方法为:新鲜堆肥样品与去离子水按1:10(m/V)比例混合振荡1 h,提取液在5000 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 下离心30 min,上清液经过滤后,用TOC仪进行测定。腐殖质碳含量(Humus carbon content, HS-C)、富里酸碳含量(Fulvic acid carbon content, FA-C)和胡敏酸碳含量(Humic acid carbon content, HA-C)按文献[20]进行测定。种子发芽指数(Germination index, GI)的测定方法为:取5 g新鲜堆肥样品于锥形瓶中,加入去离子水50 mL,用橡皮塞塞紧后在振荡机上

200 r·min⁻¹振荡2 h,过滤。吸取5 mL滤液加到铺有两张9 cm定性滤纸的培养皿中,在滤纸上均匀摆放20粒饱满的小白菜种子,置于30℃培养箱中培养48 h后,测定根长,并计算种子发芽指数。同时用蒸馏水作为对照。种子发芽指数的计算公式如下:

种子发芽指数(GI)=

$$\frac{\text{浸提液中的种子发芽率} \times \text{种子根长}}{\text{蒸馏水中的种子发芽率} \times \text{种子根长}} \times 100\%$$

1.4 数据计算及处理

腐殖化指数(Humification index, HI)=HA-C/TOC×100%

腐殖化率(Humification ratio, HR)=HS-C/TOC×100%

胡富比(Degree of polymerization, DP)=HA-C/FA-C

胡敏酸百分比(Percentage of humic acid, PHA)=
HA-C/HS-C×100%^[21]

采用SPSS 11.5统计软件和Origin 9.0软件进行数据处理及分析。

2 结果与分析

2.1 温度变化

图1为堆肥过程中温度的变化,横坐标为堆肥时间,加下划线的时间也代表翻堆时间。由图1可知,对照处理(不添加磷石膏)、PG10%(外源添加磷石膏10%)和PG20%(外源添加磷石膏20%)处理的最高温度分别为71、71℃和67℃,高温阶段持续时间分别为5、7 d和5 d。3个处理均可达到无害化卫生标准。

2.2 C/N变化

堆肥过程中,所有处理的C/N均呈下降趋势(图2)。堆肥结束时,对照、PG10%和PG20%处理的堆肥C/N值分别为18.36、15.36和16.02,T值[(C/N)终点/

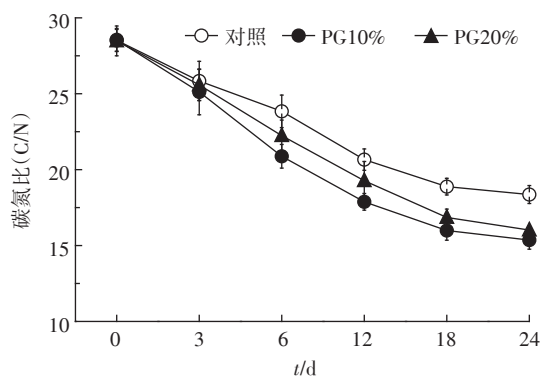


图2 鸡粪、玉米秸秆联合堆肥过程碳氮比变化

Figure 2 Change of C/N during chicken manure and corn stalk composting

(C/N)起点]分别为0.64、0.54和0.56。与对照相比,PG10%和PG20%处理均显著降低了堆肥C/N,降幅分别为16.34%和12.75%。PG10%和PG20%处理之间无显著差异。

2.3 含水率变化

由图3可知,在堆肥进程中,各处理的含水率均呈现逐渐下降的趋势。堆肥结束时,对照、PG10%和PG20%处理的含水率分别从堆肥开始时的54.72%、54.04%和56.20%降低到31.22%、35.50%和36.04%。堆肥结束时,PG10%和PG20%处理的含水率显著高于对照处理,增幅分别为13.71%和15.44%。PG10%和PG20%处理之间并无显著差异。

2.4 种子发芽指数(GI)变化

在堆肥进程中,GI整体呈上升趋势(图4)。堆肥结束时,对照、PG10%和PG20%处理的GI值分别为99.5%、116.00%和110.80%。与对照相比,PG10%和PG20%处理显著提高了堆肥GI值,增幅分别为16.58%和11.36%。

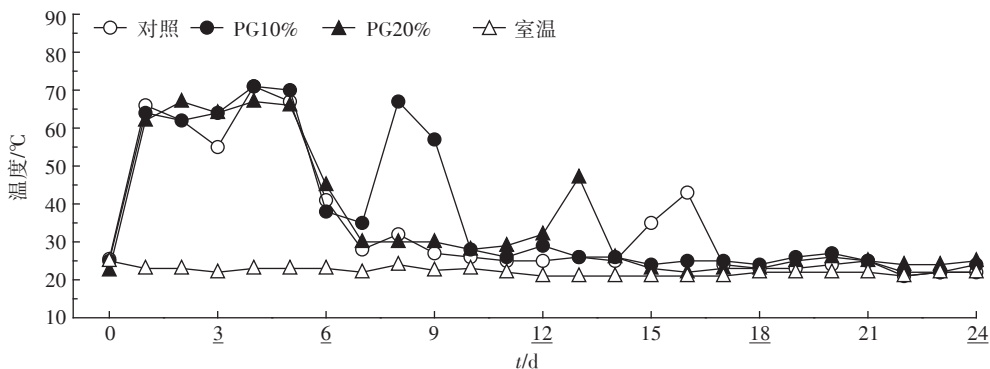


图1 鸡粪、玉米秸秆联合堆肥过程中温度变化

Figure 1 Change of temperature during chicken manure and corn stalk composting

2.5 总有机碳(TOC)含量变化

堆肥过程中TOC含量呈不断下降趋势,且在堆肥前期下降幅度较大,后期趋于稳定(图5)。与对照相比,PG10%和PG20%处理均显著降低了堆肥TOC含量,降幅分别为6.64%、10.66%。堆肥结束时,PG10%处理的TOC含量显著高于PG20%处理,增幅为4.50%。

2.6 水溶性有机碳(WSOC)含量变化

在堆肥过程中,WSOC含量整体呈现先升高后降低的趋势(图6)。堆肥结束时,对照处理、PG10%和PG20%处理的WSOC含量分别为15.21、8.06 g·kg⁻¹和5.31 g·kg⁻¹。与PG20%处理相比,PG10%处理显著提高了堆体WSOC含量,增幅为51.79%。

2.7 腐殖质碳组分含量变化

2.7.1 腐殖质碳(HS-C)含量变化

由图7a可知,HS-C含量整体呈先上升再下降后上升的趋势。堆肥结束时,对照、PG10%和PG20%处

理的HS-C含量分别从堆肥开始时的152.86、148.24、140.16 g·kg⁻¹升高到194.80、183.82、160.51 g·kg⁻¹,分别升高了27.44%、24.00%和14.52%。与对照相比,PG10%和PG20%处理均显著降低了堆肥HS-C含量,降幅分别为5.64%和17.60%。与PG20%处理相比,PG10%处理显著提高了堆肥HS-C含量,增幅为14.52%。

2.7.2 胡敏酸碳(HA-C)含量变化

由图7b可知,在堆肥过程中,HA-C含量整体呈先上升再下降后上升的趋势,与HS-C含量的趋势一致。与对照相比,堆肥结束时PG10%和PG20%处理的HA-C含量分别降低了3.42%、17.45%。堆肥结束时,PG10%处理的HA-C含量显著高于PG20%处理,增幅为16.99%。

2.7.3 富里酸碳(FA-C)含量变化

堆肥过程中,FA-C含量整体呈下降趋势(图7c)。与对照相比,堆肥结束时PG10%和PG20%处理的

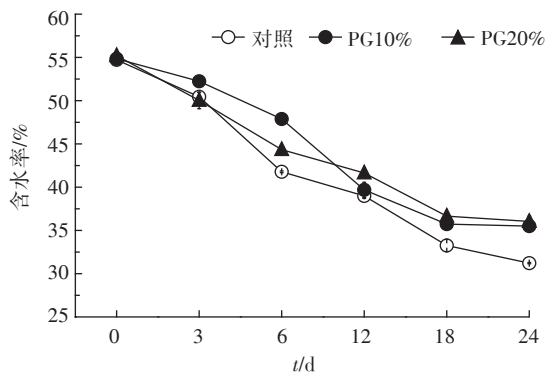


图3 鸡粪、玉米秸秆联合堆肥过程含水率变化

Figure 3 Change of moisture content during chicken manure and corn stalk composting

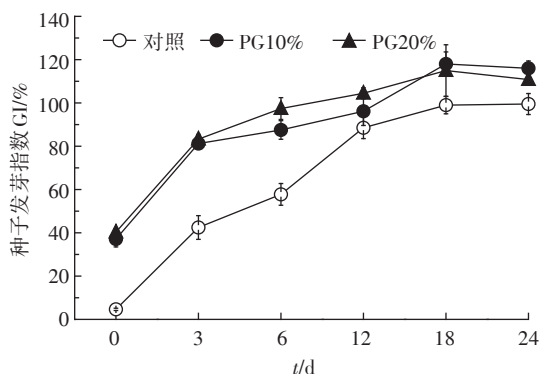


图4 鸡粪、玉米秸秆联合堆肥过程中种子发芽指数变化

Figure 4 Change of germination index during chicken manure and corn stalk composting

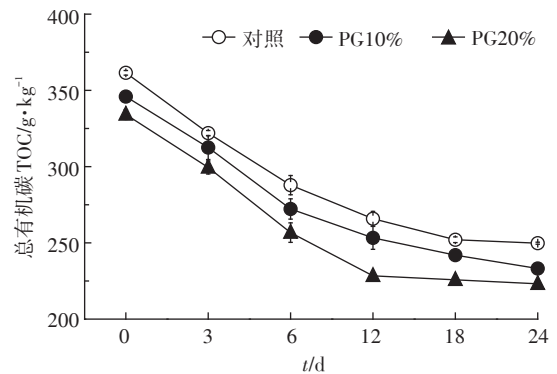


图5 鸡粪、玉米秸秆联合堆肥过程中有机碳含量变化

Figure 5 Change of organic carbon during chicken manure and corn stalk composting

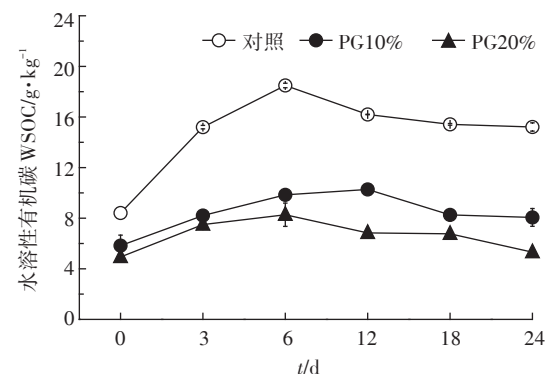


图6 鸡粪、玉米秸秆联合堆肥过程中水溶性有机碳含量变化

Figure 6 Change of water-soluble organic carbon during chicken manure and corn stalk composting

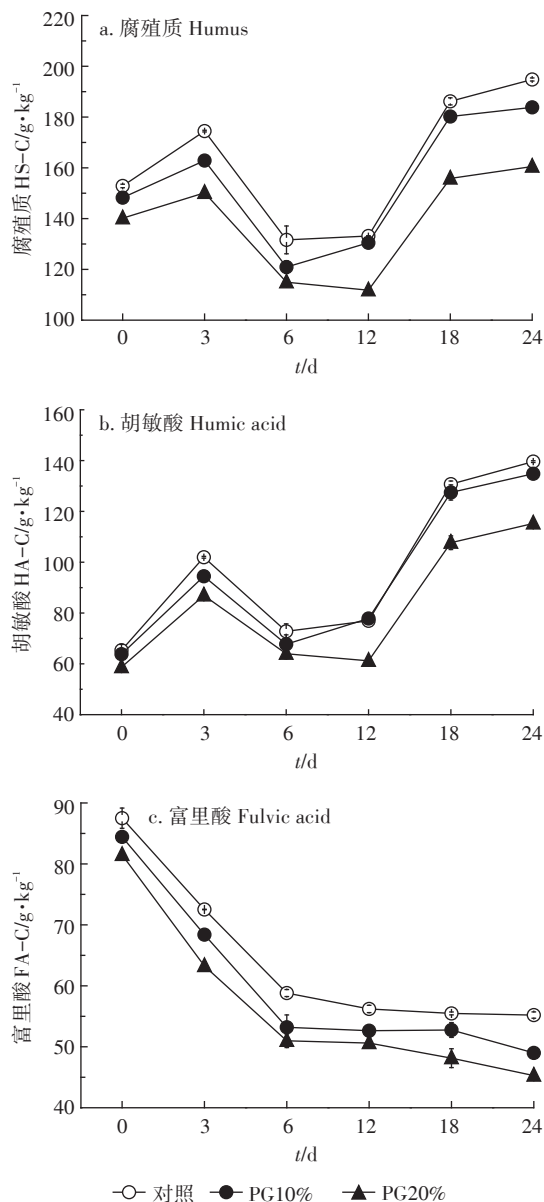


图7 鸡粪、玉米秸秆联合堆肥过程中腐殖质(a)、胡敏酸(b)、富里酸(c)变化

Figure 7 Change of humus content(a), humic acid content(b) and fulvic acid content(c) during chicken manure and corn stalk composting

FA-C含量分别降低了11.23%、17.97%。堆肥结束时,PG10%处理的FA-C含量显著高于PG20%处理,增幅为8.22%。

2.8 外源添加磷石膏对腐殖化进程的影响

2.8.1 腐殖化指数(HI)变化

随着堆肥的进行,HI呈上升趋势(图8)。堆肥结束时,对照、PG10%处理和PG20%处理的HI分别为56.45%、58.39%和52.16%。与对照相比,PG10%处理显著升高了堆肥HI值,增幅为3.44%。与PG20%

处理相比,PG10%处理的HI则显著增加了11.94%。PG20%处理的HI显著低于对照处理,降幅为7.60%。

2.8.2 腐殖化率(HR)变化

在堆肥进程中,HR呈上升趋势(图9)。堆肥结束时,对照、PG10%处理和PG20%处理的HR分别为77.99%、78.83%和71.93%。与对照相比,堆肥结束时PG10%处理的HR显著增加了1.08%,PG20%处理的HR则显著低于对照处理,降幅为7.77%。

2.9 外源添加磷石膏对腐殖质品质的影响

2.9.1 胡富比(DP)变化

堆肥结束时,对照、PG10%和PG20%处理的DP分别为2.53、2.75、2.55(图10)。与对照相比,PG10%处理显著增加了堆肥DP值,增幅为8.70%。对照与PG20%处理之间并无显著差异。

2.9.2 胡敏酸(PHA)百分比变化

堆肥结束时,对照、PG10%处理和PG20%处理的胡敏酸(PHA)百分比分别为71.66%、73.35%和

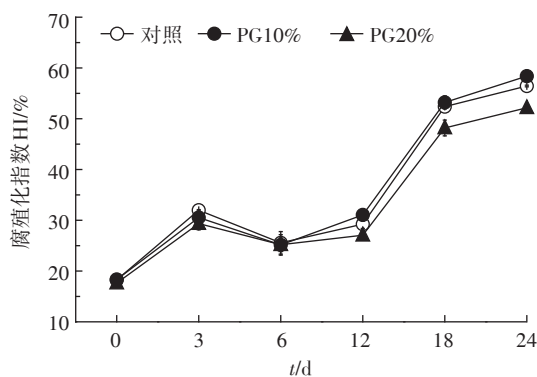


图8 鸡粪、玉米秸秆联合堆肥过程中腐殖化指数变化

Figure 8 Change of degree of humification index during chicken manure and corn stalk composting

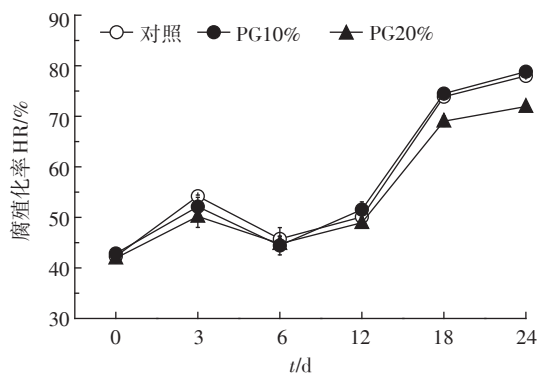


图9 鸡粪、玉米秸秆联合堆肥过程中腐殖化率变化

Figure 9 Change of degree of humification ratio during chicken manure and corn stalk composting

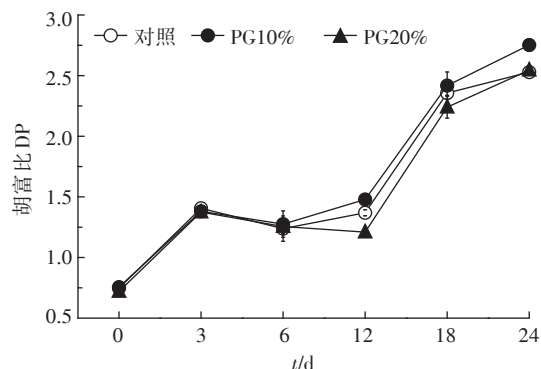


图10 鸡粪、玉米秸秆联合堆肥过程中胡富比变化

Figure 10 Change of degree of polymerization during chicken manure and corn stalk composting

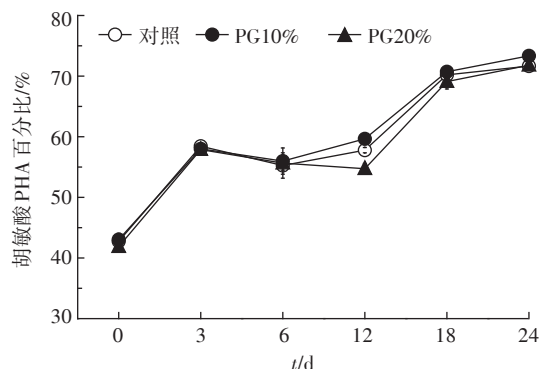


图11 鸡粪、玉米秸秆联合堆肥过程中胡敏酸百分比变化

Figure 11 Change of degree of percent of humic acid during chicken manure and corn stalk composting

71.79% (图11)。与对照相比, PG10%处理显著增加了堆肥 PHA 值, 增幅为 2.36%。对照与 PG20% 处理之间并无显著差异。

3 讨论

本研究表明, 不添加磷石膏、磷石膏添加 10% 和磷石膏添加 20% 处理的高温持续时间分别为 5、7 d 和 5 d。堆肥结束时, 不添加磷石膏、磷石膏添加 10% 和磷石膏添加 20% 处理的种子发芽指数均大于 80%, C/N 均小于 20.00。因此, 堆肥结束时, 各处理均已腐熟, 均已达到无害化卫生标准, 植物毒性均已消失。

有机质为微生物的活动提供营养物质, 是微生物赖以生存和繁殖的重要因素^[22]。水溶性有机碳是微生物可以直接利用的碳源, 是能够被微生物直接用来合成自身生命体的重要组成成分^[23]。本研究表明, 添加磷石膏可显著降低堆体中总有机碳和水溶性有机碳含量。这可能与添加磷石膏后降低了堆体的 pH 值和产生的“稀释效应”有关。同时, 磷石膏中的 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 会与堆体中的 CO_3^{2-} 产生 CaCO_3 , 对堆肥中的碳有一定的固定作用^[13], 也是导致堆体总有机碳和水溶性有机碳含量下降的原因之一。

堆肥过程的实质是有机物质稳定化和腐殖化的过程, 是在微生物作用下有机质转化为腐殖质的过程^[24-25]。胡敏酸是腐殖质中稳定性较高的物质, 含有多种功能基团, 是腐殖质的重要组成成分^[26-27]。腐殖质含量是影响堆肥腐熟度及其农作效果的重要指标^[21]。本研究表明, 各处理堆体中腐殖质碳含量、胡敏酸碳含量均呈先上升后下降再上升的趋势, 富里酸碳含量呈下降趋势。这是因为堆肥至高温期结束前

形成的腐殖质类物质并不稳定, 易被微生物分解^[28]。在第 12 d 后, 堆肥进入腐殖化阶段, 微生物开始利用难降解的木质素、纤维素等物质作为碳源, 这类物质在降解的同时, 逐渐生成了结构复杂的腐殖质类物质^[20]。而富里酸分子量较小、结构较简单, 易被微生物降解, 因此在堆肥过程中富里酸碳含量呈下降趋势^[20]。在鸡粪和玉米秸秆堆肥中添加磷石膏后, 堆肥中腐殖质碳含量、胡敏酸碳含量和富里酸碳含量与不添加磷石膏相比均出现不同程度的降低。这可能是因为添加磷石膏后产生的“稀释效应”, 也可能与添加磷石膏后堆体中有机碳和水溶性有机碳含量的降低有关, 减少了合成腐殖质的“源头物质”。

堆肥腐殖化指数和腐殖化率是表征腐殖化程度的重要指标^[29]。本研究表明, 磷石膏添加 10% 可提高堆肥腐殖化指数和腐殖化率, 表明在鸡粪、玉米秸秆堆肥中添加 10% 磷石膏可提升堆肥腐殖化程度, 促进富里酸向胡敏酸转化。胡富比和胡敏酸百分比则是表征腐殖质品质的重要指标^[20, 30]。磷石膏添加 10% 可提高堆肥胡富比和胡敏酸百分比, 这表明在鸡粪、玉米秸秆堆肥中添加 10% 磷石膏有利于腐殖质中胡敏酸百分含量的增加, 促进胡敏酸的合成, 提高腐殖质品质。这可能与添加 10% 磷石膏可延长堆肥高温期有关。但磷石膏添加 20% 降低了堆肥腐殖化指数、腐殖化率、胡富比和胡敏酸百分比, 表明在鸡粪、玉米秸秆堆肥中添加 20% 磷石膏可降低堆肥腐殖化程度, 并降低了腐殖质品质。这可能与磷石膏添加 20% 的“稀释效应”更为明显和堆肥碳组分降幅较大有关。

微生物是堆肥过程中物质分解的真正执行者, 对堆肥化和腐殖化进程均有显著影响。因为磷石膏的

酸性较强且含有Ca、P、S等营养物质,所以在堆肥中加入磷石膏则会改变堆体的pH值、养分含量和含水率等,这些都有可能直接或间接地影响堆肥过程中微生物的种群变化。已有研究表明,在堆肥过程中,腐殖化参数与微生物性质(微生物数量、氧气消耗速率、ATP含量等)之间存在显著相关性^[31]。因此,在堆肥体系中添加磷石膏所引发的一系列变化可能增加某些功能微生物的活性,从而促进堆肥腐殖化进程,促进胡敏酸的合成,提高腐殖质品质。但关于磷石膏和微生物在堆肥过程中的相互作用机理尚未明确,需要进一步研究。

4 结论

(1)外源添加磷石膏可降低鸡粪与玉米秸秆联合堆肥体系中总有机碳、水溶性有机碳、腐殖质碳含量、富里酸碳含量和胡敏酸碳含量,以外源添加磷石膏10%的降幅最低。

(2)外源添加磷石膏10%可延长鸡粪与玉米秸秆联合堆肥体系中高温持续时间,提高堆肥腐殖化指数和腐殖化率,促进堆肥腐殖化进程,也可提高堆肥胡富比和胡敏酸百分比,提高堆肥腐殖质品质。

参考文献:

- [1] Novikova A P, Perova N M, Chupakhin O N. Assessment of phosphogypsum impact on the salt-marshes of the Tinto River (SW Spain): Role of natural attenuation processes[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2011, 62(12):2787-2796.
- [2] 谷林静, 白来汉, 张乃明, 等. 菌根技术对磷石膏农用的强化效应[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(17):152-159.
GU Lin-jing, BAI Lai-han, ZHANG Nai-ming, et al. Strengthening effect of mycorrhizal technology on application of phosphogypsum in agriculture[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*(*Transactions of CSAE*), 2013, 29(17):152-159.
- [3] 李燕. 磷石膏在建筑材料中的应用[J]. *建材与装饰*, 2017(24):181-182.
LI Yan. Application of phosphogypsum in building materials[J]. *Architecture and Decoration*, 2017(24):181-182.
- [4] 罗派峰, 夏伟, 周圣稳, 等. 基于沥青废料复合改性的新型磷石膏水泥缓凝剂研究[J]. *新型建筑材料*, 2017, 44(1):40-42.
LUO Pai-feng, XIA Wei, ZHOU Sheng-wen, et al. Research on the novel phosphogypsum cement retarder based on the asphalt waste composite modifier[J]. *New Building Materials*, 2017, 44(1):40-42.
- [5] 李箫, 王莹, 万惠文, 等. 磷石膏制建筑石膏的试验研究[J]. *武汉理工大学学报*, 2015, 37(12):40-46.
LI Xiao, WANG Ying, WAN Hui-wen, et al. Experimental study on the gypsum preparation by the phosphogypsum[J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2015, 37(12):40-46.
- [6] 郑书瑞. 磷石膏 α 半水石膏制备轻质墙体材料的研究[D]. 昆明:昆明理工大学, 2016.
ZHENG Shu-rui. Study on preparation of light wall materials by phosphogypsum α hemihydrate gypsum[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2016.
- [7] Smaoui-jardak M, Kriaa W, Maalej M, et al. Effect of the phosphogypsum amendment of saline and agricultural soils on growth, productivity and antioxidant enzyme activities of tomato (*Solanum lycopersicum* L.) [J]. *Ecotoxicology*, 2017(3):1-16.
- [8] Elloumi N, Zouari M, Chaari L, et al. Effect of phosphogypsum on growth, physiology, and the antioxidative defense system in sunflower seedlings[J]. *Environmental Science & Pollution Research*, 2015, 22(19):14829-14840.
- [9] 张济世, 于波涛, 张金凤, 等. 不同改良剂对滨海盐渍土土壤理化性质和小麦生长的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(3):704-711.
ZHANG Ji-shi, YU Bo-tao, ZHANG Jin-feng, et al. Effects of different amendments on soil physical and chemical properties and wheat growth in a coastal saline soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2017, 23(3):704-711.
- [10] Alenazy A A, Albarakah F, Aloud S, et al. Effect of phosphogypsum application and bacteria co-inoculation on biochemical properties and nutrient availability to maize plants in a saline soil[J]. *Archives of Agronomy & Soil Science*, 2018, 64(10):1394-1406.
- [11] 尹元萍, 舒艺周, 董文汉, 等. 连续3年施用磷石膏对红壤理化性质的影响[J]. *西南农业学报*, 2016, 29(9):2187-2192.
YIN Yuan-ping, SHU Yi-zhou, DONG Wen-han, et al. Effect of phosphorus gypsum application for three consecutive years on physical and chemical characteristics of red soil[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2016, 29(9):2187-2192.
- [12] 范茂攀, 汤利, 徐智, 等. 橡胶籽油枯-锯末-磷石膏联合堆肥过程研究[J]. *云南农业大学学报*, 2013, 28(5):750-754.
FAN Mao-pan, TANG Li, XU Zhi, et al. Study on Co-composting process of rubber seed oil cake, sawdust and phosphogypsum[J]. *Journal of Yunnan Agricultural University*, 2013, 28(5):750-754.
- [13] Yang F, Li G, Shi H, et al. Effects of phosphogypsum and superphosphate on compost maturity and gaseous emissions during kitchen waste composting[J]. *Waste Management*, 2015, 36:70-76.
- [14] Luo Y, Li G, Luo W, et al. Effect of phosphogypsum and dicyandiamide as additives on NH_3 , N_2O and CH_4 emissions during composting [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2013, 25(7):1338-1345.
- [15] Bremanis G, Klavins M, Purmalis O, et al. Peat humic substances and earthworm biohumus extracts for agricultural applications[J]. *Proceedings of the Latvian Academy of Sciences*, 2013, 67(3):236-241.
- [16] Cheng W, Tu Q, Da D, et al. Spectroscopic evidence for biochar amendment promoting humic acid synthesis and intensifying humification during composting[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2014, 280:409-416.
- [17] Mushtaq M, Kasur H, Khan R A, et al. Effect of salmonella on decomposition of poultry litter[J]. *Journal of Scientific Research*, 2018, 10(1):51.

- [18] Awasthi M K, Wang Q, Chen H, et al. Beneficial effect of mixture of additives amendment on enzymatic activities, organic matter degradation and humification during biosolids co-composting[J]. *Bioresource Technology*, 2018, 247:138-146.
- [19] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
BAO Shi-dan. Agricultural and Chemistry analysis of soil[M]. 3th Edition. Beijing: China agricultural Press, 2000.
- [20] 李恕艳, 李吉进, 张邦喜, 等. 菌剂对鸡粪堆肥腐殖质含量品质的影响[J]. 农业工程学报, 2016, 32(增刊2):268-274.
LI Shu-yan, LI Ji-jin, ZHANG Bang-xi, et al. Influence of inoculants on content and quality of humus during chicken manure composting[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(Suppl 2):268-274.
- [21] Zhao X L, Bi-Qiong L I, Jiu-Pai N I, et al. Effect of four crop straws on transformation of organic matter during sewage sludge composting[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2016, 15(1):232-240.
- [22] 张园, 耿春女, 何承文, 等. 堆肥过程中有机质和微生物群落的动态变化[J]. 生态环境学报, 2011, 20(11):1745-1752.
ZHANG Yuan, GENG Chun-nü, HE Cheng-wen, et al. Dynamics of organic matters and microbial population during aerobic composting process[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2011, 20(11):1745-1752.
- [23] Zhao X, He X, Xi B, et al. The evolution of water extractable organic matter and its association with microbial community dynamics during municipal solid waste composting[J]. *Waste Management*, 2016, 56:79-87.
- [24] 姚武, 顾燕青, 巫阳, 等. 畜禽堆肥过程中腐殖质形成特征研究进展[J]. 杭州师范大学学报(自然科学版), 2014(5):517-522.
YAO Wu, GU Yan-qing, WU Yang, et al. On the formation characteristics of humic substances in livestock manure compost[J]. *Journal of Hangzhou Normal University (Natural Science Edition)*, 2014(5):517-522.
- [25] Uyguner-Demirel C S, Bekbolet M. Significance of analytical parameters for the understanding of natural organic matter in relation to photocatalytic oxidation[J]. *Chemosphere*, 2011, 84(8):1009-1031.
- [26] Shan Y N, Chen J H, Wang L, et al. Influences of adding easily degradable organic waste on the minimization and humification of organic matter during straw composting[J]. *Journal of Environmental Science & Health Part B Pesticides Food Contaminants & Agricultural Wastes*, 2013, 48(5):384-392.
- [27] 孙向平, 李国学, 肖爱平, 等. 添加不同比例玉米秸秆对猪粪高温堆肥过程中胡敏酸的结构组成及红外光谱特性影响分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(9):2413-2418.
SUN Xiang-ping, LI Guo-xue, XIAO Ai-ping, et al. Analysis on the impact of composting with different proportions of corn stalks and pig manure on humic acid fractions and IR spectral feature[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2014, 34(9):2413-2418.
- [28] 任静. 接种菌剂对牛粪堆肥过程中微生物、酶活性及腐殖质的影响[D]. 甘肃农业大学, 2013.
REN Jing. Inoculum additions during cow manure composting: Impacts on microbial populations and enzyme activity and humus[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2013.
- [29] Song C H, Li M X, Wei Z M, et al. Effect of inoculation with multiple composite microorganisms on characteristics of humic fractions and bacterial community structure during biogas residue and livestock manure co-composting[J]. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 2016, 91(1):155-164.
- [30] Roca-Pérez L, Martínez C, Marcilla P, et al. Composting rice straw with sewage sludge and compost effects on the soil-plant system[J]. *Chemosphere*, 2009, 75(6):781-787.
- [31] Tiquia S M. Microbiological parameters as indicators of compost maturity[J]. *Journal of Applied Microbiology*, 2005, 99(4):816-828.