

焦常锋, 常会庆, 朱晓辉, 等. 脱水污泥堆肥过程中养分、有机质与重金属的变化特征[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(19): 255–260.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2019.19.058

脱水污泥堆肥过程中养分、有机质与重金属的变化特征

焦常锋, 常会庆, 朱晓辉, 吴 杰, 王启震

(河南科技大学农学院, 河南洛阳 471000)

摘要:对城市脱水污泥在堆肥过程中的氮、磷等主要养分、不同有机物以及铜(Cu)、锌(Zn)、铅(Pb)、镉(Cd)4种重金属的变化特性开展研究, 分析不同有机物与有效态重金属之间的相关关系。结果表明:堆肥结束时, 总氮、铵态氮含量分别降低了 18.57%、13.93%, 硝态氮含量增加了 7.69%, 速效磷含量增加了 100.35%。堆肥期间不同有机物含量的变化趋势不同, 堆肥结束时污泥有机质、溶解性有机物含量分别下降了 50.92%、12.11%, 而腐殖酸、富里酸、胡敏酸的含量分别增加了 59.77%、30.85%、218.66%, 胡敏酸、富里酸的比值从 0.10 上升到 0.24。在堆肥结束时 4 种重金属总量都高于堆肥开始时的含量。有效态重金属含量在堆肥结束时最低, 此时分别占重金属总量的 28.13%、23.76%、11.08%、25.33%。污泥堆肥过程中不同有效态重金属和不同参数之间的相关性存在明显差异。

关键词:脱水污泥; 养分; 有机物; 重金属; 堆肥

中图分类号: S141.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2019)19-0255-06

随着我国污水处理规模的迅速发展, 污泥产量也逐年剧增。截至 2015 年年底, 我国年产剩余污泥(含水 80%)高达 3 500 万 t, 预计到 2020 年污泥产量将增加 1 倍^[1-2]。脱水污泥堆肥处理是实现污泥减量化、稳定化、无害化和资源化的重要手段之一。堆肥过程是一个腐殖化的过程, 同时伴随着氮、磷等养分的释放与固定, 堆肥过程的多种因素会影响到重金属的有效性。因此, 研究脱水污泥堆肥过程中养分、有机物、重金属的变化, 对其后期的资源化利用及其农用评价具有重要的指导意义。

已有研究表明, 在污泥堆肥过程中不同类型的有机物与

重金属间会发生相互作用, 从而改变重金属的有效性^[3-5], 主要影响到重金属的分布, 如有机物质矿化对重金属的释放产生影响, 或由于 pH 值的改变影响重金属浓度, 重金属和新生成的腐殖质形成复合体或其他因素影响其有效性等^[6-8]。重金属的生物有效性也受有机物形态, 如溶解态富里酸(FA)和不易溶解的胡敏酸(HA)含量变化的影响。难溶解的有机物阻碍植物对重金属的吸收, 由于它们和有机物结合紧密, 使其生物有效性降低。溶解态的有机物通过形成溶解性的金属有机物复合体而增强其生物有效性^[9]。因此关注堆肥过程中有机物变化对重金属有效性的影响尤显重要。

收稿日期: 2018-06-28

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(编号: 41571319); 国家重点研发计划(编号: 2017YFD0801300); 河南省科技攻关项目(编号: 172102310181)。

作者简介: 焦常锋(1995—), 女, 河南南召人, 硕士研究生, 主要从事废弃物农用环境效应研究。E-mail: 2263492939@qq.com。

通信作者: 常会庆, 男, 山西太谷人, 博士, 副教授, 主要从事废弃物资源化研究。E-mail: hqchang@126.com

1 材料与方法

1.1 供试材料

采集某市区污水厂脱水污泥, 部分样品保存于 4℃冰箱, 部分自然风干, 研磨过 20、100 目筛后进行理化特征分析。

1.2 堆肥和采样

本试验是在自制的反应器(图 1)中进行的。将堆肥污泥基质水分调节至 60%, 曝气量为 60 mL/min, 在堆肥第 20 天

[32] Liu Y, Gao M S, Wu W, et al. The effects of conservation tillage practices on the soil water-holding capacity of a non-irrigated apple orchard in the Loess Plateau, China [J]. Soil and Tillage Research, 2013, 130: 7–12.

[33] 李仙岳, 彭遵原, 史海滨, 等. 不同类型地膜覆盖对土壤水热与葵花生长的影响[J]. 农业机械学报, 2015, 46(2): 97–103.

[34] Ruppel S, Merbach E. Effect of black plastic mulch in gonnitrogenbalnde in cultivation of pickles [J]. Garten bauwissenc haft, 1996, 61(5): 230–237.

[35] 时连辉, 韩国华, 张志国, 等. 秸秆腐解物覆盖对园林土壤理化性质的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(1): 113–117.

[36] Matitschka G. Mineral N dynamic, N uptake and growth of lettuce

affected by mulch [J]. Acta Horticulture, 1996, 428: 85–94.

[37] Wang Y J, Xie Z K, Sukhdev S S, et al. Effects of rainfall harvesting and mulching technologies on water use efficiency and crop yield in the semi-arid Loess Plateau, China [J]. Agricultural Water Management, 2009, 96(3): 374–382.

[38] 魏新光, 聂真义, 刘守阳, 等. 黄土丘陵区枣林土壤水分动态及其对蒸腾的影响[J]. 农业机械学报, 2015, 46(6): 130–140.

[39] 李陆生, 赵西宁, 高晓东, 等. 黄土丘陵区不同树龄旱作枣园细根空间分布特征[J]. 农业工程学报, 2015, 31(20): 140–146.

[40] 杨 磊, 卫 伟, 莫保儒, 等. 半干旱黄土丘陵区不同人工植被恢复土壤水分的相对亏缺[J]. 生态学报, 2011, 31(11): 3060–3068.

停止曝气,堆肥周期为 30 d。堆肥阶段于每天 9:00、16:00、22:00 记录 3 次反应器内的温度,取平均值作为每日的堆体温度。试验于 2016 年 5—6 月在河南科技大学进行,采样时间为第 1、5、8、18、30 天,于堆体的上、中、下 3 个位置各取样 100 g 后混合,部分样品保存于 4 ℃ 冰箱,部分自然风干,研磨过 20、100 目筛后进行测定。

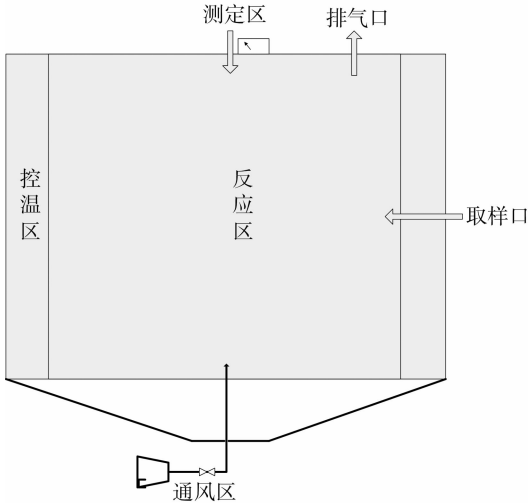


图1 试验装置示意

1.3 测定项目与方法

污泥理化性质:pH 值按土、水比 1 g : 2.5 mL 稀释后用 pH 计测定;总氮含量采用浓硫酸 - H₂O₂ 消煮,凯氏定氮法测定;铵态氮含量用纳氏试剂比色法测定;硝态氮含量采用紫外分光光度法测定;速效磷含量采用 NaHCO₄ 浸提 - 钼锑抗比色法测定。

有机质和可溶性有机碳含量用重铬酸钾容量法测定。不同形态腐殖酸含量提取方法:2 g 堆肥样品加入 20 mL 提取液

[0.1 mol/L NaOH + 0.1 mol/L Na₂P₂O₇ (体积比为 1 : 1)],室温下振荡 2 h,4 000 r/min 离心 10 min,提取上清液,去掉滤渣,滤渣按照上述操作重复提取 3 次。滤液为总腐殖酸 (HS),取 1/3 HS 测定样品,剩下的 2/3 用 6 mol/L 盐酸酸化至 pH 值为 1.0 ~ 2.0,充分搅拌,室温下静置过夜,4 000 r/min 条件下离心 10 min,上层液体为富里酸,沉淀物为胡敏酸,提取 FA 定容,沉淀用 0.1 mol/L KOH 溶解,定容,然后采用总有机碳 (TOC) 仪测定。

重金属的提取测定:污泥有效态重金属采用二乙基三胺五乙酸 (DTPA) 浸提法提取。取 25 g 过 20 目的污泥样品,用 DTPA 提取剂提取后利用等离子发射光谱 (美国, optima5300DV 型,美国 PE 公司) 法测定样品中的铜 (Cu)、锌 (Zn)、铅 (Pb)、镉 (Cd) 含量。称取 0.200 0 g 预处理后的样品于微波消解罐中,采用 HNO₃ - HF - HClO₄ 消煮后定容,采用上述等离子发射光谱法测定污泥中全量重金属。

1.4 数据分析

采用 Excel 2016 软件对数据进行处理和分析。用 SPSS 22.0 软件进行各参数之间的相关性分析。

2 结果与分析

2.1 脱水污泥的理化性质和重金属特征

由表 1 和表 2 可知,脱水污泥的 pH 值为 7.07,污泥中 4 种重金属含量的大小顺序为铜 (Cu) > 锌 (Zn) > 铅 (Pb) > 镉 (Cd),其中 Cu 总量超出 CJ/T 309—2009《城镇污水处理厂污泥处置 农用地泥质》的 B 级标准。Zn 和 Pb 总量低于 GB 4284—1984《农用污泥中污染物控制标准》(pH 值 ≥ 6.5) 和 CJ/T 309—2009《城镇污水处理厂污泥处置 农用地泥质》A 级标准,同时也低于 2014 中国城市污泥重金属均值^[10]。Cd 总量高于 CJ/T 309—2009《城镇污水处理厂污泥处置 农用地泥质》A 级但低于 B 级标准。

表 1 污泥的各指标特征

指标	数值	指标	数值
含水率 (%)	82.80 ± 1.23	胡敏酸含量 (%)	1.34 ± 0.10
pH 值	7.07 ± 0.23	水溶性有机碳含量 (%)	3.30 ± 0.12
全氮含量 (g/kg)	6.03 ± 0.45	总腐殖酸含量 (%)	15.34 ± 2.13
全碳含量 (g/kg)	406.30 ± 4.36	富里酸含量 (%)	13.36 ± 2.87
铵态氮含量 (g/kg)	2.01 ± 0.13	有效 Cu 含量 (mg/kg)	438.15 ± 43.78
硝态氮含量 (g/kg)	0.13 ± 0.06	有效 Zn 含量 (mg/kg)	313.97 ± 37.98
速效磷含量 (g/kg)	14.26 ± 1.02	有效 Pb 含量 (mg/kg)	7.46 ± 0.93
有机质含量 (%)	57.60 ± 15.27	有效 Cd 含量 (mg/kg)	4.19 ± 0.98

表 2 污泥中重金属含量与目前污泥标准的比较

重金属	Cu	Zn	Pb	Cd
污泥	1 569.67	702.23	25.87	10.12
GB 4284—1984《农用污泥中污染物控制标准》(pH 值 ≥ 6.5)	500	1 000	1 000	20
CJ/T 309—2009《城镇污水处理厂污泥处置 农用地泥质》A 级	500	1 500	300	5
CJ/T 309—2009《城镇污水处理厂污泥处置 农用地泥质》B 级	1 500	3 000	1 000	15
2014 中国城市污泥重金属均值 ^[10]	283.5	925.7	78.0	3.8

2.2 污泥堆肥温度和 pH 值的变化

污泥堆体温度在 55 ℃ 条件下保持 3 d 以上 (或 50 ℃ 以上保持 5 ~ 7 d),可以杀灭堆料中的病原菌,满足堆肥卫生学

指标和堆肥腐熟的要求^[11]。由图 2 可知,本研究中污泥堆体温度超过 50 ℃ 共 10 d,在堆肥后 5 d 其最高温度为 64 ℃,此后温度开始降低,在降温阶段和腐熟阶段温度变化较小,而且

接近环境温度,该结果与 Fialho 等的研究结果^[12]一致。在整个堆肥过程中 pH 值始终维持在 7.0~8.0 之间,堆肥后 8 d 的 pH 值最高,为 7.89。堆肥过程中 pH 值的变化趋势与堆体温度的变化趋势较为相似,都呈现前期快速升高,而后下降的趋势,这与金芬等的研究结果^[13]一致。堆肥初期 pH 值迅速

增大,主要是由于微生物分解含氮化合物产生的大量氨气使得 pH 值升高,而在堆肥后期由于氮的氨化挥发作用减弱与硝化作用增强造成 pH 值下降,同时有机物在分解过程中产生的有机酸也是造成 pH 值下降的重要原因^[14]。

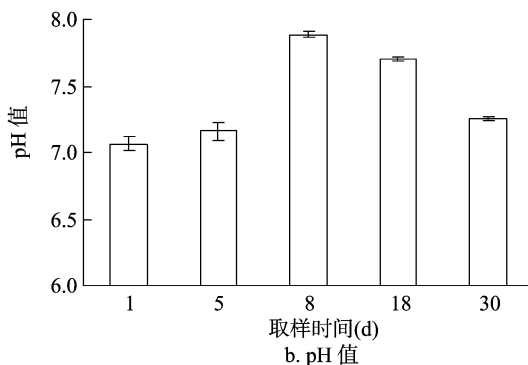
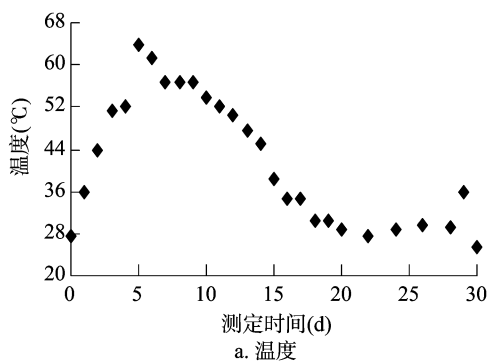


图2 污泥堆肥过程中温度和 pH 值的变化

2.3 污泥堆肥过程中主要养分的变化特征

堆肥产品中养分含量及组成直接影响堆肥产品的农用效果。由图 3 可知,污泥在堆肥过程中铵态氮含量呈现先升后降趋势,随着堆体温度升高,铵态氮含量也呈现升高趋势,并且在堆肥后 8 d 达到最高,为 3.21 g/kg。污泥中硝态氮的含量明显低于铵态氮含量,并且在堆肥后 18 d 达到最高值,为 0.69 g/kg,可见硝态氮含量最高的时间点要滞后于铵态氮,

在堆肥结束时硝态氮含量呈现明显降低。堆肥中总氮含量呈下降趋势,该变化趋势与陈镇新等的研究结果^[15]并不一致,在堆肥结束时总氮的含量为 4.90 g/kg。速效磷含量的变化趋势与总氮含量正好相反,呈上升趋势,堆肥结束时速效磷含量最高,达到 28.56 g/kg。可见,在堆肥过程中,污泥中的不同养分变化趋势不同,高温期有利于铵态氮产生,降温期有利于硝态氮和速效磷的保持。

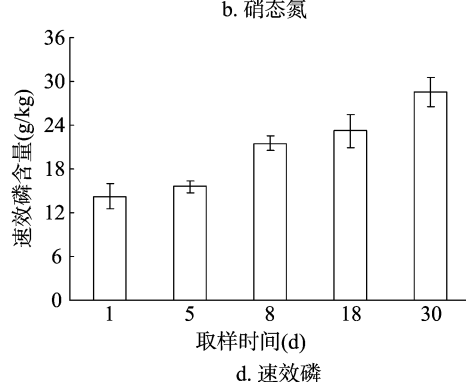
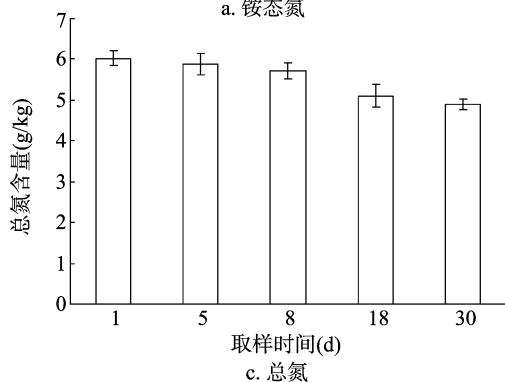
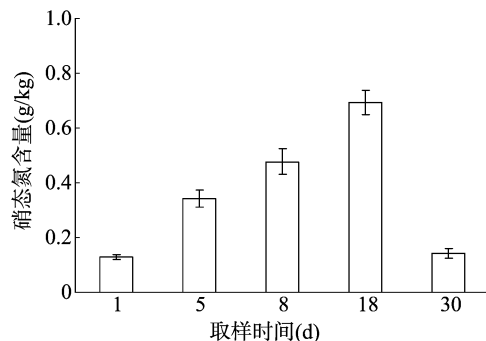
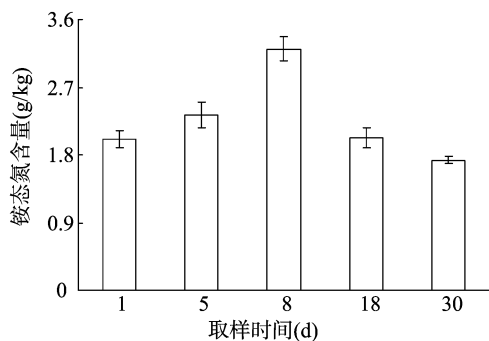


图3 污泥堆肥过程中主要养分含量的变化

2.4 污泥堆肥过程中各有机物的变化特征

堆肥过程实质上是有机物稳定化和腐殖化的过程,污泥堆肥产品中腐殖酸的含量及组成是评价堆肥质量的关键^[16],胡敏酸(HA)和富里酸(FA)是腐殖质的重要组成成分,对腐

殖质的质量起决定性的作用^[17]。由图 4 可知,堆肥过程中,随着堆肥时间的增加污泥的有机质含量呈现降低的趋势,堆肥结束时有机质含量为 282.74 g/kg,与堆肥 1d 相比降幅达 50.92%。总腐殖酸、富里酸、胡敏酸的含量均随着堆肥时间

的增加而增加,变化趋势保持一致;到堆肥结束时,总腐殖酸、富里酸和胡敏酸的含量分别为 24.51%、17.48%、4.27%,与堆肥前相比增幅分别为 59.78%、30.85%、218.66%。HA/FA 的变化范围在 0.10~0.25 之间,并且在堆肥后 18 d

取样时该比值最大,为 0.25。溶解性有机物(DOM)含量在堆肥过程呈现先增加后下降的趋势,堆肥后 5 d 的含量最大,为 3.87 g/kg,堆肥后 5 d 后呈降低的趋势。

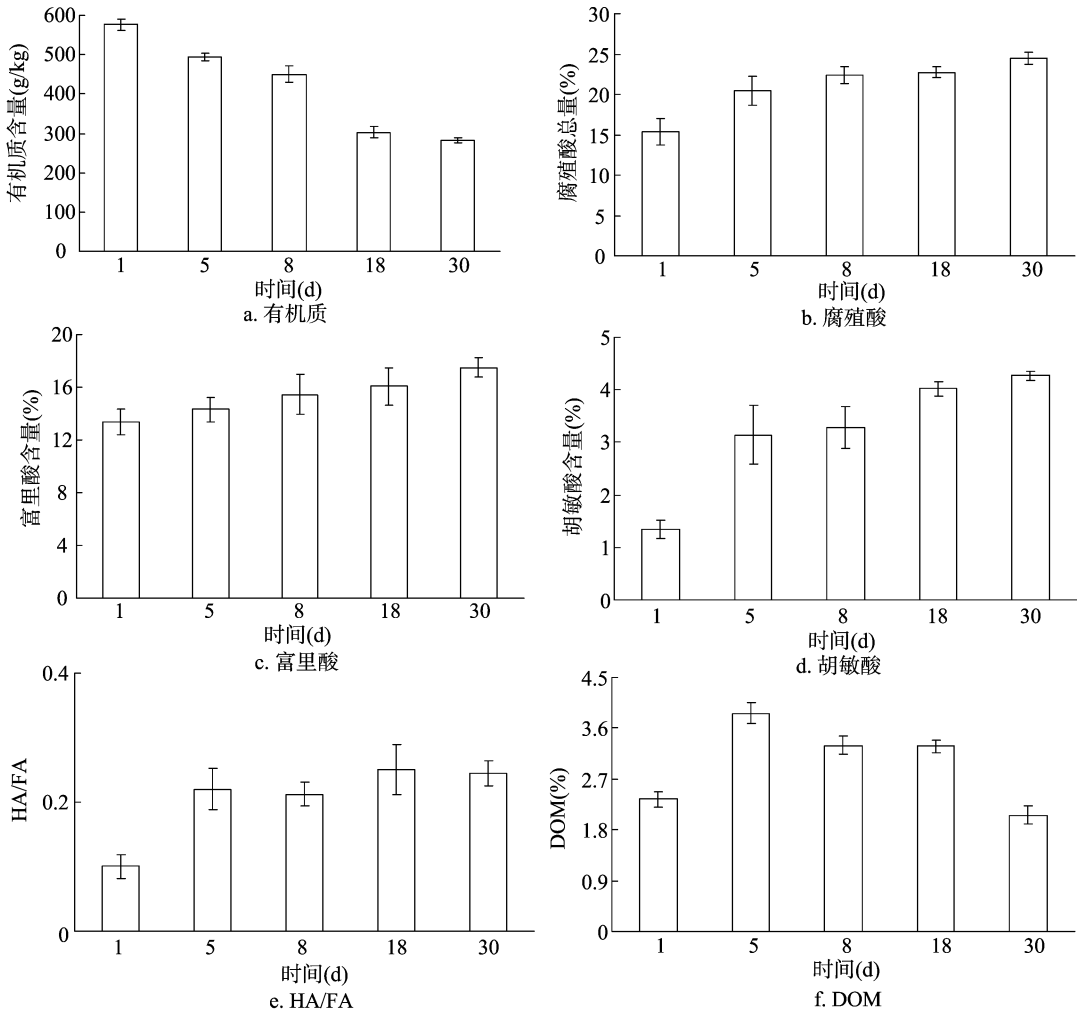


图4 污泥堆肥过程中不同有机物含量的变化

2.5 污泥堆肥对污泥中 4 种重金属总量和有效态含量的影响

堆肥过程中重金属含量的变化主要是由于有机质分解和 CO₂ 释放导致重金属含量升高,或者淋溶作用造成污泥中重金属含量减少。由图 5 可知,在本试验中,4 种重金属随着堆肥时间的增加其总量呈现增加的趋势,在堆肥结束时 Cu、Zn、Pb、Cd 4 种重金属的含量顺序为 Cu>Zn>Pb>Cd,且含量分别为 1 211.5、951.45、35.84、13.62 mg/kg。与重金属总量相反,有效态重金属含量随着堆肥的进程呈降低的趋势,有效态 Cu、Zn、Pb、Cd 的含量分别为 340.85~438.15、225.79~313.97、3.84~7.46、3.45~4.20 mg/kg,占 4 种重金属总量的比例分别为 28.13%~48.99%、23.75%~44.71%、11.08%~28.84%、25.33%~41.52%。

2.6 各参数与有效态重金属的相关性

重金属的形态变化与堆肥中有机质的变化和腐殖质的形成具有一定的相关性^[18]。由表 3 可知,本试验中,有效态 Cu 与有机质之间存在极显著的正相关性,而与腐殖酸、胡敏酸有

显著的负相关性,并且与富里酸存在极显著的负相关性;有效态 Zn 与有机质之间存在显著的正相关性,与腐殖酸、富里酸和胡敏酸有极显著的负相关性,与 HA/FA 存在显著的负相关性。有效态 Pb 与腐殖酸、胡敏酸、HA/FA 有极显著的负相关性。有效态 Cd 只与富里酸有极显著的负相关性。pH 值与各有效态重金属之间存在负相关性,但没有达到显著水平。

3 讨论

污泥在堆肥过程中其养分含量会发生较大的变化,了解其主要养分的变化特征,可以为堆肥过程中养分的保持和控制提供依据^[19]。例如,堆肥中氮含量是确定其农用价值的最重要的参数之一^[20];然而,在堆肥过程中,氮素通常有一定的损失,这主要是由于有机氮的矿化和持续性氮的挥发以及硝态氮的反硝化作用^[21]。研究表明,城市污泥堆肥化处理过程中氮的损失量约为 20%~70%^[22],本研究中总氮损失为 18.57%。堆肥过程中氮的损失,直接导致堆肥品质的下降,影响其农用价值。堆肥结束时总氮含量为 0.49%,而 GB

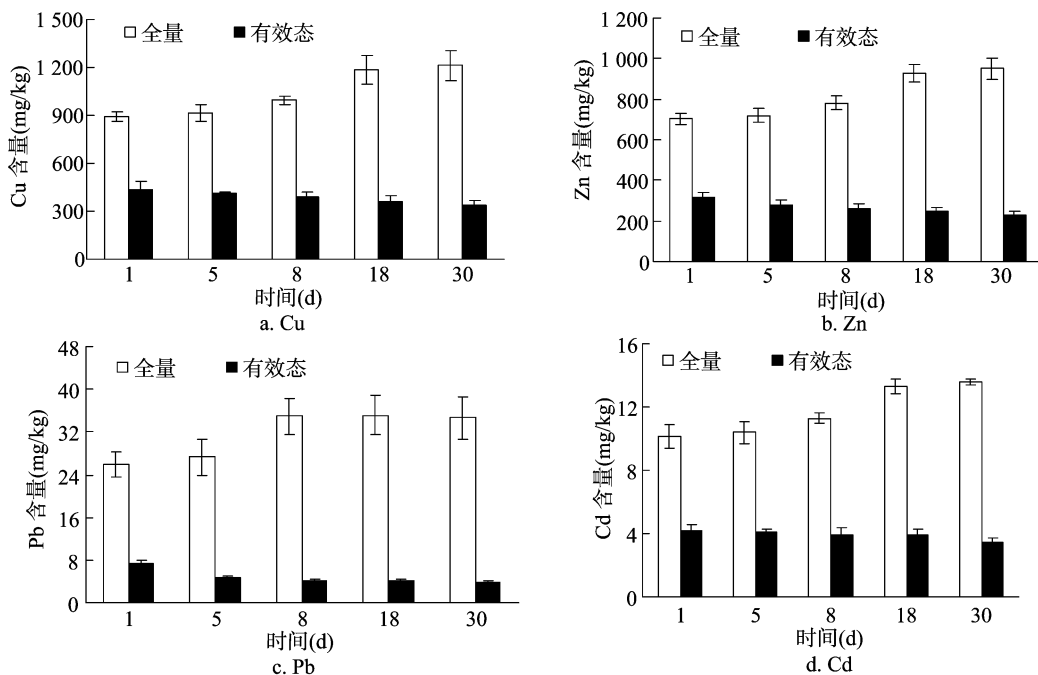


图5 污泥堆肥过程中 4 种重金属含量的变化

表 3 有效态重金属与各参数之间的相关关系

参数	相关系数						
	有机质含量	腐殖酸含量	富里酸含量	胡敏酸含量	HA/FA	DOM 含量	pH 值
有效态铜	0.99 **	-0.93 *	-0.99 **	-0.94 *	-0.85	0.21	-0.35
有效态锌	0.95 *	-0.98 **	-0.97 **	-0.98 **	-0.91 *	0.07	-0.40
有效态铅	0.80	-0.97 **	-0.82	-0.96 **	-0.98 **	-0.31	-0.54
有效态镉	0.86	-0.83	-0.96 **	-0.80	-0.66	0.47	-0.07

注:表中各值为相关系数 r , ** 代表极显著相关, * 代表显著相关。

8172—1987《城镇垃圾农用控制标准》中堆肥总氮的含量 ($\geq 0.5\%$) 接近。本研究结果显示,高温期有利于铵态氮产生,降温期有利于硝态氮和速效磷的保持,因此可以通过对堆肥高温和降温时间的控制来减少总氮的损失。

关于堆肥过程中腐殖酸含量、组成变化的研究,不同研究者得到的结论不同,原因可能在于所用原料、堆肥条件等差异会影响堆肥腐殖酸产生。张雪英等研究表明,污泥经堆肥处理后,腐殖酸含量较堆肥初期增加了 2 倍多^[23]。李恕艳等利用鸡粪接种菌剂堆肥的研究结果表明,经过堆肥处理总腐殖酸含量提高了 38.7%^[24]。胡敏酸与富里酸的比值在堆肥结束时增大的结论与张盛华等利用城市污泥堆肥的研究结果^[25] 较为一致。本研究中腐殖酸总量、胡敏酸、富里酸在堆肥过程中都有增加趋势,其原因可能是污泥堆肥过程中新形成腐殖质的速度大于其降解速度,而且形成的低分子量的富里酸通过分子聚合作用,产生了大分子的胡敏酸。而堆肥初始时富里酸较胡敏酸易降解,并且小分子量的富里酸结合成大分子胡敏酸,使 HA/FA 在堆肥结束后呈现升高的趋势。

供试污泥堆肥前期和结束时重金属 Cu 和 Cd 的含量均高于 GB 4284—1984《农用污泥中污染物控制标准》(pH 值 ≥ 6.5),Zn 和 Pb 的含量却远低于 GB 4284—1984《农用污泥中污染物控制标准》和 CJ/T309—2009《城镇污水处理厂污泥处置 农用泥质》A 级标准和郭广慧等的研究结果^[10] 中城市污

泥重金属均值,但目前认为重金属总量不能准确地反映其对环境的潜在影响,重金属的有效性很大程度上影响其生物有效性^[26]。腐殖酸含有大量的羧基、酚羟基和醇羟基等官能团,可以吸附和固定重金属离子^[27]。已有研究结果表明,随着堆肥的进行,易溶态的重金属含量将降低,相对稳定的重金属含量会增加^[28]。研究表明,FA 和重金属离子的作用主要是络合反应,而 HA 主要通过化学吸附与重金属离子发生作用^[25],因此 HA 与重金属的结合稳定性远远大于 FA 与重金属的结合稳定性。本试验结果表明,堆肥过程中有效态重金属呈现先增加后降低的趋势,并且在堆肥结束时有效态重金属的含量低于污泥堆肥前的含量。说明堆肥过程中大分子腐殖酸的形成,增加了 HA 和 HA/FA,有利于有效态重金属的降低。pH 值虽然是影响重金属生物有效性和毒性的重要因素^[29-30],但污泥中其他性质如阳离子交换量(CEC)、有机碳含量(OC)、黏粒含量(clay content)等也均对重金属的生物有效性产生重要的影响^[31-32],本研究中 4 种有效态重金属与 pH 值之间并没有显示出显著的相关性。

4 结论

(1) 在堆肥过程中,脱水污泥总氮含量呈现降低趋势,速效磷在堆肥期间呈增加趋势,铵态氮和硝态氮含量分别在堆肥后 8 d 和 18 d 最高。因此针对氮素的损失可重点针对高温

阶段温度和降温时间长短进行控制。

(2)随着污泥堆肥过程的进行,有机质含量呈现降低的趋势,总腐殖酸、富里酸和胡敏酸含量都呈现增加趋势,HA/FA 在堆肥期间基本保持上升趋势,在堆肥后 5 d DOM 的含量最高,此后呈降低的趋势。

(3)随着污泥堆肥过程的进行,脱水污泥 4 种重金属总量都呈增加趋势,尤其在降温期间增幅较大,有效态重金属含量则呈降低趋势。因此,污泥堆肥后对重金属的风险评价依然十分必要。脱水污泥在堆肥过程中有机质、腐殖酸、富里酸和胡敏酸与不同有效性重金属的相关性不同。HA/FA、pH 与有效态重金属之间并没有显示出显著的相关性,因此可以通过在堆肥期间调控上述指标来控制重金属的有效态含量。

参考文献:

- [1] 余亚伟,杨雨洽,张成,等. 施用污泥堆肥品对土壤和植物总汞及甲基汞的影响[J]. 环境科学,2016,38(1):405-411.
- [2] 韩鹏,刘和,丁春华. 蒸汽爆破对城市污泥预处理和厌氧发酵产酸的影响[J]. 中国环境科学,2017,37(1):238-244.
- [3] 吴冠男,谢震宇,张文妍. 我国城市污泥农用的潜力浅析[J]. 广东化工,2014,41(16):141-142.
- [4] 刘新安,王社平,郑琴. 城市污泥堆肥过程及重金属形态分析研究[J]. 中国农业报,2012,28(8):217-222.
- [5] 孙文彬,李必琼,赵秀兰. 不同秸秆与城市污泥好氧堆肥过程中重金属质量分数及形态变化[J]. 西南大学学报(自然科学版),2012,34(3):90-94.
- [6] 李云峰,周通,商照聪,等. 连续污泥农用对土壤微团聚体及有机质组分中重金属分布的影响[J]. 土壤,2015,47(5):953-959.
- [7] Zorpas A A, Arapoglou D, Panagiotis K. Waste paper and clinoptilolite as a bulking material with dewatered anaerobically stabilized primary sewage sludge (DASPS) for compost production[J]. Waste Management,2003,23(1):27-35.
- [8] Hsu J H, Lo S L. Effect of composting on characterization and leaching of copper, manganese, and zinc from swine manure[J]. Environmental Pollution,2001,114(1):119-127.
- [9] 卜贵军,于静,邸慧慧,等. 鸡粪堆肥有机物演化对重金属生物有效性影响研究[J]. 环境科学,2014,35(11):4352-4358.
- [10] 郭广慧,陈同斌,杨军,等. 中国城市污泥重金属区域分布特征及变化趋势[J]. 环境科学学报,2014,34(10):2455-2461.
- [11] 吴珍珍,舒增年,黄健. 以菇渣和猪粪为调理剂的城市污泥堆肥效果研究[J]. 浙江农业学报,2015,27(12):2171-2176.
- [12] Fialho L L, Lopes - Da - Silva W T, Milori D M, et al. Characterization of organic matter from composting of different residues by physicochemical and spectroscopic methods[J]. Bioresource Technology,2010,101(6):1927-1934.
- [13] 金芬,孙先锋,高自文,等. 不同调理剂对城市污泥好氧堆肥的影响[J]. 西安工程大学学报,2015,29(1):62-67.
- [14] 蔡函臻,宁西翠,王权,等. 碱性固体对污泥的调质堆肥影响及产品对土壤的改良潜力[J]. 环境科学,2016,37(12):4848-4856.
- [15] 陈镇新,檀笑,解启来,等. 不同辅料配比对城市污泥堆肥效果及重金属形态转化的影响[J]. 江苏农业科学,2017,45(1):227-234.
- [16] 张盛华,郑凯琪,薛红波,等. 城市污泥堆肥过程中腐殖酸及重金属形态的变化[J]. 江苏农业学报,2014,30(6):1350-1354.
- [17] 张艳涛,窦森,董珊珊,等. 秸秆深还及配施化肥对土壤腐殖质组成和胡敏酸结构的影响[J]. 土壤学报,2016,53(3):694-702.
- [18] Liu L, Guo X P, Wang S Q, et al. Effects of wood vinegar on properties and mechanism of heavy metal competitive adsorption on secondary fermentation based composts[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety,2018,150:270-279.
- [19] 刘善江,陈桂梅,夏雪,等. 污泥堆肥过程中的理化性质及微生物学特性[J]. 水土保持学报,2011,25(5):89-93.
- [20] Vazquez M A, Soto M. The efficiency of home composting programmes and compost quality[J]. Waste Management,2017,64:39-50.
- [21] 马强,孙英杰,王华伟. 添加腐熟污泥对生活垃圾堆肥氮素转化与损失的影响[J]. 环境工程学报,2017,11(7):4325-4330.
- [22] Tiquia S M, Richard T L, Honeyman M S. Carbon, nutrient, and mass loss during composting[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems,2002,62(1):15-24.
- [23] 张雪英,周顺桂,周立祥. 堆肥处理对污泥腐殖物质形态及其重金属分配的影响[J]. 生态学杂志,2004,23(1):30-33.
- [24] 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.
- [25] 张盛华,郑凯琪,薛红波,等. 城市污泥堆肥过程中腐殖酸及重金属形态的变化[J]. 江苏农业学报,2014,30(6):1350-1354.
- [26] 杨洁,瞿攀,王金生,等. 土壤中重金属的生物有效性分析方法及其影响因素综述[J]. 环境污染与防治,2017,39(2):217-223.
- [27] 李慧敏,雷静,王友东. 腐殖质在土壤重金属污染修复中的作用与展望[J]. 农业研究与应用,2017,5:25-29.
- [28] 郑国砥,陈同斌,高定. 好氧高温堆肥处理对猪粪中重金属形态的影响[J]. 中国环境科学 2005,25(1):7-10.
- [29] Warne M S J, Heemsbergen D, McLaughlin M, et al. Models for the field-based toxicity of copper and zinc salts to wheat in 11 Australian soils and comparison to laboratory-based models[J]. Environmental Pollution,2008,156(3):707-714.
- [30] Li B, Ma Y B, McLaughlin M J, et al. Influences of soil properties and leaching on copper toxicity to barley root elongation[J]. Environmental Toxicology and Chemistry,2010,29(4):835-842.
- [31] 林蕾,刘继芳,陈世宝. 土壤中外源锌对不同植物毒性的敏感性分布[J]. 生态毒理学报,2012,7(6):657-663.
- [32] 陈世宝,林蕾,魏威,等. 基于不同测试终点的土壤锌毒性阈值及预测模型[J]. 中国环境科学,2013,32(3):548-555.