

中药药渣厌氧堆肥理化性质和酶活性的演变

刘莹, 王明欢, 王姗姗, 张英*

(广州中医药大学中药学院, 广东 广州 510006)

摘要: **目的** 探究中药药渣厌氧堆肥理化性质和酶活性的演变。**方法** 以中药药渣、羊粪和秸秆生物炭的混合物为原料,测定厌氧堆肥过程中 pH、电导率 (EC)、总有机碳 (TOC) 等理化指标和蔗糖酶、脲酶、酸性磷酸酶、过氧化氢酶活性。**结果** 经厌氧堆肥, TOC 降解了 47.015 mg/g, 最终有机质含量>30%; 堆肥产品最终总养分为 41.382 mg/g, 总有机酸质量浓度为 13.887 mg/g, 蔗糖酶活性为 542.4 mg/(g·d), 脲酶活性为 0.213 mg/(g·12 h), 酸性磷酸酶活性为 0.199 mg/(g·h), 过氧化氢酶活性为 239.889 mg/(g·20 min)。pH 与碳氮比 (C/N)、挥发性脂肪酸 (VFAs)、蔗糖酶活性、酸性磷酸酶活性、过氧化氢酶活性显著相关。**结论** 中药药渣经厌氧堆肥, 最终产品的有机质含量符合《中华人民共和国农业行业标准 (NY/T 2596-2014)》中的要求; pH 受过程中多个理化指标的影响, 表现在有机质的降解、酶活性等方面; 在整个堆肥过程中 pH 的调控对于提高药渣厌氧堆肥效果至关重要。

关键词: 中药药渣; 厌氧堆肥; 理化性质; 酶活性

中图分类号: X705

文献标志码: B

文章编号: 1001-1528(2022)03-1022-06

doi: 10.3969/j.issn.1001-1528.2022.03.063

近几年我国中医药行业迅速发展,在中药材加工炮制、中成药的生产等过程中不免产生大量废弃的中药药渣,每年中药药渣产量可达 1 000 万吨^[1]。目前,中药药渣的处理方式有焚烧、填埋、堆放等,不仅造成环境污染,而且由于药渣中富含纤维素、半纤维素、木质素、蛋白质,大量植物生长所必需的微量元素及生物活性物质^[2],以上处置方式还造成了资源的浪费。

厌氧堆肥,也称厌氧消化,能够降解有机物实现有机固体废弃物的减量化,消化后的残渣是高质量的有机肥料和土壤改良剂^[3-4]。目前更多运用于污水污泥以及生活垃圾等的减量化和清洁能源甲烷的生产^[5-6],在中药药渣的处理方面应用很少。本实验以中药药渣为原料,通过研究厌氧堆肥过程中理化性质和酶活性的演变,探讨环境因子对最终堆肥质量的影响,为中药药渣回收利用和厌氧堆肥处理有机固体废物提供参考。

1 材料

1.1 堆肥材料 供试中药药渣取自广州市某中成药厂,羊粪取自某饲养场,秸秆生物炭购自河南立泽环保科技有限公司。堆肥材料性质见表 1。

表 1 堆肥材料的基本性质

堆肥材料	含水率/%	总有机碳/ (mg·g ⁻¹)	总氮/ (mg·g ⁻¹)	碳氮比
中药药渣	60.21	512.24	17.61	29.09
羊粪	37.83	359.59	18.19	19.77
秸秆生物炭	0.13	196.30	2.37	82.83

1.2 仪器 FA2104 型电子分析天平 (上海明桥仪器设备有限公司); DDB-12 L 型笔式电导率仪 (杭州齐威仪器有限公司); YX-280 型手提式压力蒸汽灭菌器 (合肥华泰医疗设备有限公司); BPC-70F 型生化培养箱、THZ-103B 型恒温培养摇床 (上海一恒学仪器有限公司); WFZ UV-2100 型紫外可见分光光度计 [尤尼柯 (上海) 仪器有限公司]; AA7000 型原子吸收分光光度计 (日本岛津公司); 1260 型高效液相色谱仪 (美国安捷伦公司); TGL-16A 型离心机 (湖南平凡科技有限公司); DFD-700 型水浴锅 (北京中兴伟业仪器有限公司); SX2-2.5-10 型马弗炉 (绍兴苏珀仪器有限公司); HH-S1 型油浴锅 (常州澳华仪器有限公司)。

2 方法

2.1 堆肥样品制备 将新鲜中药药渣切成长度约为 1 cm 的小块,新鲜羊粪过 10 目筛。以 1.32:1 (干重) 的比例将药渣和羊粪混合,调节碳氮比 (C/N) 比至 25,加入质量占药渣和羊粪总干重 5% 的生物炭,总体 C/N 比不超过 30,用纯水调整含水量至 65%,混合均匀,堆肥材料初始总质量约为 20 kg。

将堆肥材料置于密封的加厚透明塑料袋中,从中引出一根导气管,导气管末端通入装有水的烧杯,整个发酵用塑料袋置于 90 cm×60 cm×40 cm 封闭泡沫箱,控制环境温度 (19±1)℃,于堆肥第 0、3、7、14、21、28、35、42 天取样,每次取样 350 g,于 -20℃ 保存 (必要时于保存于 -80℃)。每次取样前将堆体混匀,取样后放入 4 个厌氧

收稿日期: 2021-03-19

基金项目: 广州中医药大学“薪火计划”项目 (2019)

作者简介: 刘莹 (1998—), 女, 硕士生, 研究方向为中药资源循环利用。Tel: 13617499325, E-mail: LiuYing199867@163.com

*通信作者: 张英 (1976—), 女, 教授, 研究方向为中药资源循环利用。Tel: 13527768825, E-mail: tjxyzy@gzucm.edu.cn

袋,以排除进入装置的氧气。

2.2 分析方法

2.2.1 测定指标 pH、电导率(EC)、总有机碳(TOC)总有机质(TOM)、总养分、总氮(TN)、水溶性氮(WSN)、铵态氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)、硝态氮($\text{NO}_3^-\text{-N}$)、总磷(TP)、有效磷(OP)、总钾(TK)、有效钾(AK)、挥发性脂肪酸(VFAs)、脲酶酶活、蔗糖酶酶活、磷酸酶酶活、过氧化氢酶酶活。

2.2.2 测定方法 新鲜堆肥样品用于测定pH、EC、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和VFAs。将新鲜样品-水(1:10)提取、过滤,分别用PH计和电导率仪测定滤液pH和EC; $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 采用氯化钾提取-靛酚蓝比色法测定^[7]; $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 采用紫外分光光度法测定(GB/T 32737-2016);将新鲜样品-0.005 mol/L H_2SO_4 (1:4)提取,5 000 r/min离心10 min,上清液0.22 μm 微孔滤膜过滤,采用高效液相色谱法测定VFAs(甲酸、乙酸、丙酸、丁酸)含量,色谱条件为Bio-Rad Aminex HPX-87H色谱柱(300 mm $\times$ 7.8 mm);流动相0.005 mol/L H_2SO_4 ;体积流量0.5 mL/min;柱温60 $^\circ\text{C}$;进样量10 μL ;检测器VWD^[8]。

将新鲜堆肥样品在105 $^\circ\text{C}$ 的条件下烘干8 h以上,用于测定TOC、TOM、总养分、TN、WSN、TP、OP、TK和AK。TOC采用重铬酸钾容量法测定^[7],其中TOM含量用TOC含量乘以Van Benmmelen因数(1.724)表示;采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法(HJ 636-2012)测定TN和WSN;TP采用土壤全磷测定法(GB 9837-88)测定;OP采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗分光光度法(HJ 704-2014)测定;TK采用土壤全钾测定法(GB 9836-88);AK采用土壤速效钾测定法(DB13/T 844-2007)测定;总养分以TN、TP(P_2O_5)、TK(K_2O)的含量之和计算,以数量百分数计(NY/T 2596-2014)。

风干堆肥样品用于测定酶活性。蔗糖酶活性采用3,5-二硝基水杨酸比色法^[9]测定,以1 d后1 g风干堆肥样品水解生成葡萄糖的毫克数表示($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$);脲酶活性采用苯酚-次氯酸钠比色法^[10]测定,以12 h后1 g风干堆肥样品中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的毫克数表示($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot12\text{ h}^{-1}$);磷酸酶活性的测定参考《Methods of Soil Enzymology》^[11]中的方法,以1 h后生成对硝基苯酚的毫克数表示($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$);过氧化氢酶活性的测定参考文献[12],以20 min内1 g风干堆肥样品消耗的 H_2O_2 的毫克数表示($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot20\text{ min}^{-1}$)。

2.3 统计学分析 采用Origin 2018软件进行数据绘图,采用SPSS 25.0软件进行统计学分析。 $P<0.05$ 表示差异具有统计学意义。

3 结果

3.1 理化指标的变化

3.1.1 pH值、VFAs和EC pH值是堆肥过程中的重要影响因素,pH值的变化直接影响堆肥过程及产物。过高的pH会使氨气挥发,有机氮损失,pH值过低,会抑制微生物的活动,散发酸性气味^[13-14],故通过在堆肥初始物料中

添加5%的秸秆生物炭,使得初始pH值达到6.31。pH值变化见图1,堆肥整体pH值呈下降趋势,中间稳定在4.5,后期达4.6并呈略微上升趋势。

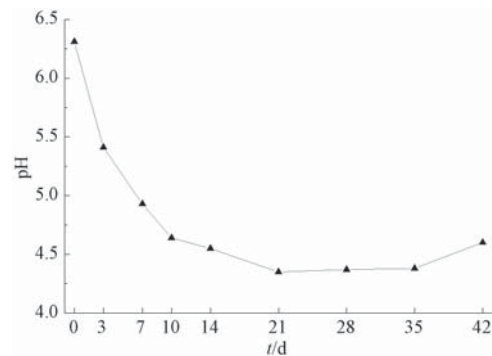


图1 pH值变化情况

挥发性脂肪酸(VFAs)是厌氧堆肥过程中的中间产物。其中乙酸作为主要的有机酸之一,其浓度堆肥初期呈上升趋势,中期平稳,后期略呈下降趋势,有机酸的变化与pH值相对应,见图2。厌氧环境中,厌氧微生物分解药渣中水溶性多糖,产生大量有机酸,导致pH降低,另一方面,相比于高温或中温厌氧堆肥,常温厌氧堆肥中微生物活跃程度明显较低^[5]。由于本实验在冬季进行,要保持高温或中温环境,能耗较高,所以厌氧堆肥对季节有一定的要求。

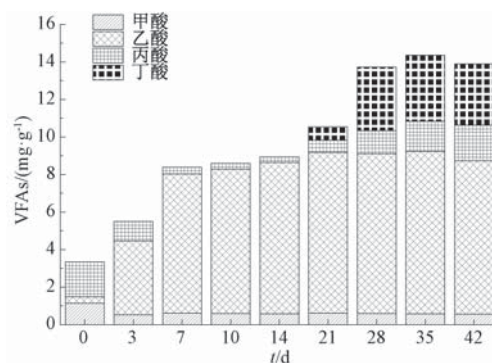


图2 VFAs浓度变化情况

EC表示堆肥过程中可溶性盐的变化,在一定浓度范围内,与堆肥产品的盐浓度呈正相关^[15]。EC在堆肥过程中总体呈上升趋势,后期稳定在2 800 $\mu\text{S}/\text{cm}$,见图3。EC逐渐升高可能是微生物降解有机物产生盐类物质的结果,当 $\text{EC}<4\,000\,\mu\text{S}/\text{cm}$ 时,表示堆肥产品无毒^[16],整个厌氧堆肥过程中EC值都保持在4 000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 以下。

3.1.2 E_4/E_6 堆肥是有机质逐渐腐殖化的过程,腐殖酸类物质在465 nm和665 nm下存在特异吸收,两者吸光度的比值可用来表示腐殖化程度。在堆肥过程中有机物不断降解,不稳定的小分子物质向大分子物质转化,小分子腐殖酸不断转化成大分子腐殖酸, E_4/E_6 通常与腐殖酸的分子量和芳香环缩合度成反比^[17]。在好氧堆肥过程中,通常随着堆肥物料的腐熟程度升高而降低^[18],厌氧堆肥 E_4/E_6

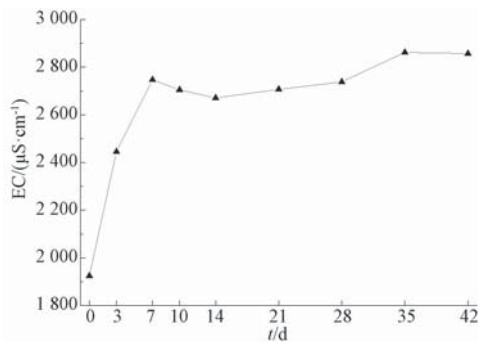


图 3 EC 变化情况

的变化却很少有人报道。本实验 E_4/E_6 的变化见图 4, 呈先下降后上升的趋势, 这与秦莉等^[19] 研究结果相似, 其堆肥水提液的 E_4/E_6 值随堆肥的进行总体呈上升趋势。

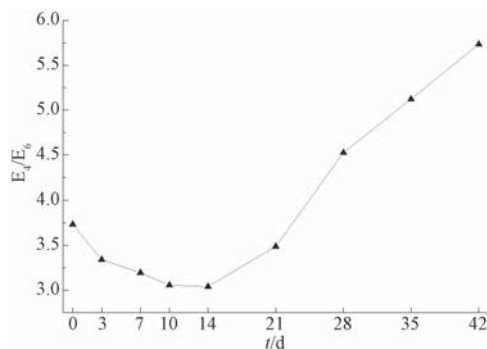


图 4 E_4/E_6 变化情况

3.1.3 TOC 堆肥物料中碳素物质是供微生物活动的碳源和能源^[20], 中药药渣厌氧堆肥中 TOC 的变化, 前期下降幅度较大, 后期趋于稳定, 这可能是由于在堆肥过程中微生物先利用易降解的物质如可溶性糖等进行新陈代谢, 产生低分子有机酸等, 然后开始分解一些难降解的物质, 降解速率变缓并趋于平稳, 见图 5。

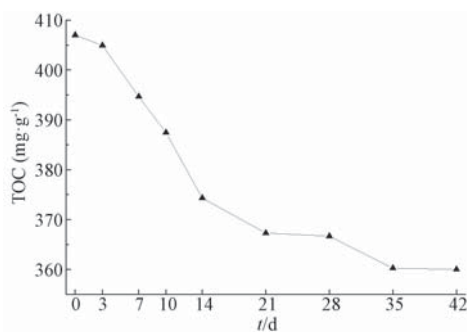


图 5 TOC 变化情况

3.1.4 C/N 碳和氮是微生物生长繁殖最重要的两种营养物质, 堆肥微生物在利用可降解的碳源的同时, 还会利用部分氮素来构建自身细胞体, 氮还是构成细胞中蛋白质、核酸、氨基酸、酶、辅酶的重要成分。C/N 比是评估堆肥腐熟度最常用参数之一^[21]。堆肥初期, C/N 急剧下降, 后趋于平稳, 结束时降至 18.93, 低于堆肥成熟度的指标 20, 见图 6。

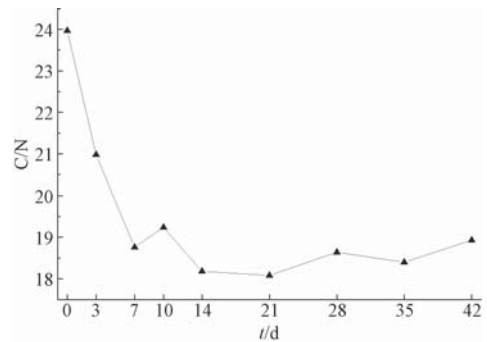


图 6 C/N 变化情况

3.1.5 TN、WSN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 充足的 N 元素有助于提高土壤的肥力, 维系土壤微生物和植物生长发育, 因此, 堆肥产品中 TN 的含量是反映肥效的重要指标^[22]。TN 含量于堆肥第 1 周先上升, 随后略下降, 由堆肥最初的 16.983 mg/g 升高到 19.018 mg/g, 见图 7。

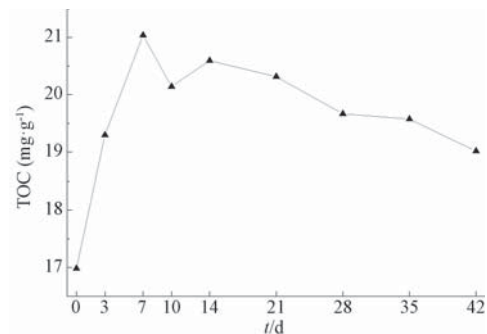


图 7 TN 变化情况

水溶性氮 (WSN) 是可供植物直接吸收利用的速效氮^[23], 本实验中 WSN 含量于前 2 周呈下降趋势, 随后上升, 堆肥开始和结束时含量基本保持在 3.5 mg/g, 见图 8。

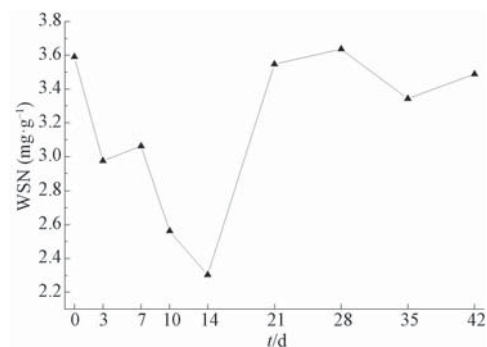


图 8 WSN 变化情况

铵态氮 ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) 是植物可以直接吸收的水溶性速效态氮。在厌氧堆肥中, 厌氧菌将一部分氮转化成可溶性的供植物易吸收的铵氮, 厌氧菌的生长条件越佳, 则转化成的铵氮量越高, 因此 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量的高低可以反映堆肥化程度的好坏^[24]。厌氧堆肥中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量随时间变化见图 9, 含量于堆肥第 1 周上升, 随后一直保持在 0.55 mg/g。当 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量不再升高时反映厌氧堆肥的结束^[25]。硝态氮 ($\text{NO}_3^-\text{-N}$) 也是作物可直接吸收的水溶性速效氮, $\text{NO}_3^-\text{-N}$

含量于堆肥第 1 周下降 (图 9), 随后一直保持在 0.1 mg/g, 变化趋势与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 相反, 产生此现象的原因可能与反硝化有关, 硝酸盐在缺氧条件下, 可被反硝化细菌作用还原成亚硝酸盐, 再转化为氮气^[24]。

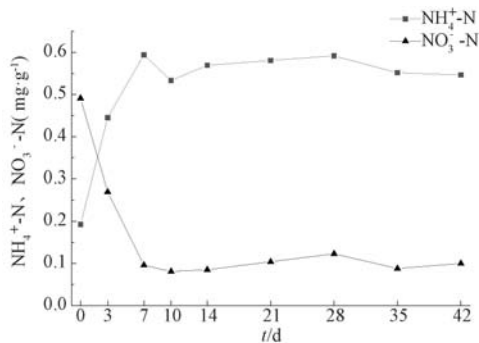


图 9 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 变化情况

3.1.6 TP、OP、TK 和 AK 总磷 (TP) 和有效磷 (OP) 含量在厌氧堆肥保持相似变化趋势, 小范围上下波动, 见图 10。结束时两者含量为 2.859、1.173 mg/g, 略高于初始含量 2.827、1.135 mg/g。

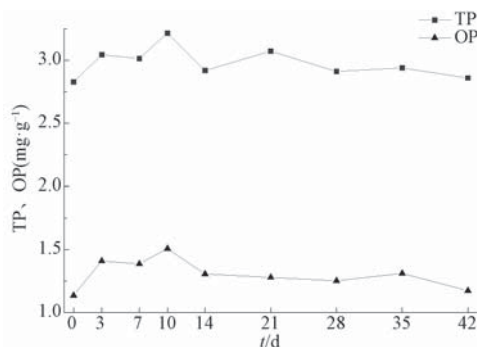


图 10 TP、OP 变化情况

总钾 (TK) 和有效钾 (AK) 含量在此实验过程中呈小范围波动, 堆肥前后含量基本不变, 见图 11。

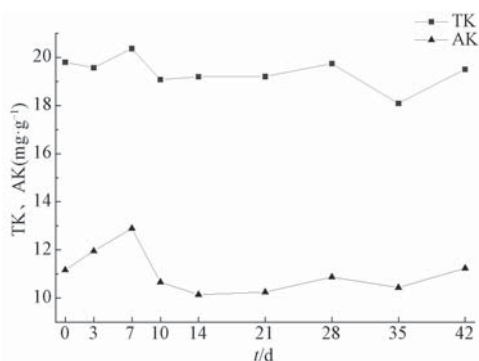


图 11 TK、AK 变化情况

3.2 酶活性变化 堆肥过程中, 有机质被微生物水解转换成大量低分子有机酸, 并在腐熟过程中形成稳定的腐殖酸

类物质^[26], 故参与反应的酶主要分为水解酶和氧化还原酶, 本实验主要考察蔗糖酶、脲酶、磷酸酶和过氧化氢酶的活性变化, 其中前三者属于水解酶, 直接影响堆肥矿质化过程的进程和强度, 堆肥有机物中某些特定的底物需要用与该种底物相应的水解酶来催化降解^[27], 过氧化氢酶属氧化还原酶, 对合成新的稳定的化合物起到催化作用, 其变化在一定程度上反映堆肥腐殖化的进程和强度^[28]。

厌氧堆肥过程中蔗糖酶活性逐渐上升, 稳定在较高水平, 脲酶和磷酸酶活性随堆肥时间逐渐下降, 最后趋于稳定, 反映了药渣堆肥中纤维素、多糖等有机质的降解转化逐渐变缓。由于堆肥原料中药渣中含有有机质含量高, 堆肥前期有机物矿化, 导致低分子有机酸积累, 影响腐熟过程中腐殖酸的生成^[29], 过氧化氢酶作为腐熟过程中的合成新的稳定化合物的催化酶, 其活性于前 4 周随低分子有机酸的积累逐渐下降, 第 5~6 周随堆体 pH 值的小幅度升高而略上升, 见图 12。

3.3 理化、生化指标相关性分析 厌氧堆肥腐熟度受多方面因素的影响, 单个指标的演变只能片面反应厌氧堆肥的过程, 因此, 对所测定的理化指标与生物特性进行简单相关性分析, 以探讨环境因子对堆肥过程的影响。

相关性分析见表 2, pH 与 C/N 比呈极显著正相关 ($R=0.883$), 与 VFAs 呈极显著负相关 ($R=-0.800$), 与 TOC 呈显著正相关 ($R=0.767$), 与蔗糖酶活性呈显著负相关 ($R=-0.767$), 与酸性磷酸酶活性呈显著正相关 ($R=0.783$), 与过氧化氢酶呈极显著正相关 ($R=0.967$)。在该研究条件下, pH 与 VFAs、有机质的降解和酶活性存在显著相关性。随着堆肥的进行, 即使 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 呈逐渐上升趋势, 但水解过程中出现低分子有机酸的积累现象, VFAs 浓度相对较高, pH 降低, 区别于其他研究中报道的 pH 与 C/N 比呈负相关^[30]。

4 结论

中药药渣经长达 42 d 的常温固态厌氧堆肥, 总有机碳降解了 47.015 mg/g, 最终有机质含量>30%, 符合《中华人民共和国农业行业标准 (NY/T 2596-2014)》中有机质含量标准 (30%); 堆肥最终总养分为 41.382 mg/g, 其比重为 4.138% (以干基计), 略低于《中华人民共和国农业行业标准 (NY/T 2596-2014)》中规定的沼渣总养分含量 (5%)。在堆肥初期, N 素含量逐渐升高, 后又下降, 如何降低 N 素损失以提高总养分是今后的研究重点。

中药药渣固态厌氧堆肥过程中, pH 受多个理化指标的影响, 表现在有机质的降解、酶活性等方面; 蔗糖酶对于药渣中有机质的降解起到重要作用, 堆肥过程中存在有机酸积累现象, 导致过氧化氢酶活性受到抑制, 进而影响腐殖化进程。因此, 在整个堆肥过程中 pH 的调控对于提高药渣厌氧堆肥效果至关重要, 本实验通过于堆肥初始材料中添加秸秆生物炭调整初始 pH, 但添加生物炭的种类和比例对改善中药药渣厌氧堆肥效果有待进一步研究。

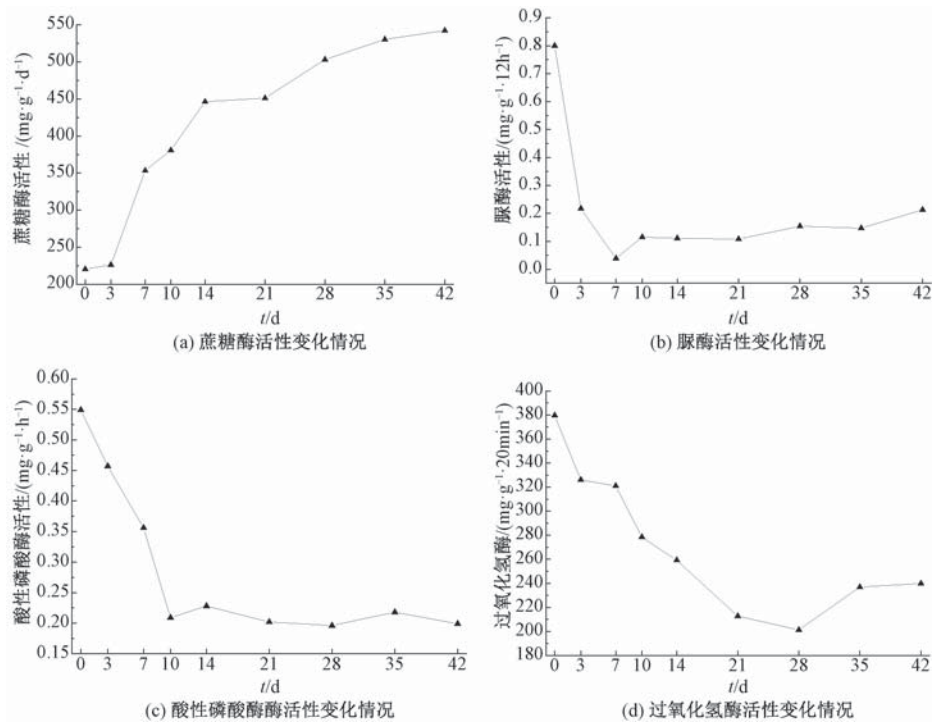


图 12 酶活性变化情况

表 2 堆肥生物特性与理化因子之间的简单相关性分析

	pH	EC	C/N	E ₄ /E ₆	TOC	TN	TP	TK	VFAs
脲酶活性	0.450	-0.350	0.700 *	0.500	0.150	-0.950 **	-0.550	0.017	-0.183
蔗糖酶活性	-0.767 *	0.800 **	-0.583	0.630	-0.982 **	0.391	-0.147	-0.461	0.964 **
酸性磷酸酶活性	0.783 *	-0.583	0.483	-0.400	0.833 **	-0.117	-0.033	0.533	-0.783 *
过氧化氢酶活性	0.967 **	-0.617	0.767 *	-0.429	0.922 **	-0.475	-0.076	0.440	-0.886 **
pH	1	-0.517	0.883 **	-0.233	0.767 *	-0.367	-0.150	0.467	-0.800 **
EC		1	-0.450	0.533	-0.800 **	0.167	-0.017	-0.233	0.817 **
C/N			1	0.050	0.583	-0.633	-0.200	0.305	-0.633
E ₄ /E ₆				1	-0.643	-0.332	-0.559	-0.305	0.712 *
TOC					1	-0.322	0.167	0.531	-0.943 **
TN						1	0.551	-0.041	0.359
TP							1	-0.136	-0.120
TK								1	-0.440
VFAs									1

注: * $P < 0.05$, ** $P < 0.01$ 。

参考文献:

[1] Guo F Q, Dong Y P, Zhang T H, *et al.* Experimental study on herb residue gasification in an air-blown circulating fluidized bed gasifier [J]. *Ind Eng Chem Res*, 2014, 53 (34): 13264-13273.

[2] 谭显东, 王向东, 黄健盛, 等. 中药渣资源化技术研究进展[J]. *中成药*, 2010, 32(5): 847-849.

[3] Nicholson F, Bhogal A, Cardenas L, *et al.* Nitrogen losses to the environment following food-based digestate and compost

applications to agricultural land [J]. *Environ Pollut*, 2017, 228: 504-516.

[4] 张无敌, 周长平, 刘士清. 厌氧消化残留物对改良土壤的作用[J]. *生态农业研究*, 1996, 4(3): 37-39.

[5] Shi J, Wang Z J, Stiverson J A, *et al.* Reactor performance and microbial community dynamics during solid-state anaerobic digestion of corn stover at mesophilic and thermophilic conditions[J]. *Bioresour Technol*, 2013, 136: 574-581.

[6] Yan Z Y, Song Z L, Li D, *et al.* The effects of initial substrate concentration, C/N ratio, and temperature on solid-

- state anaerobic digestion from composting rice straw [J]. *Bioresour Technol*, 2015, 177: 266-273.
- [7] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 30-33.
- [8] 姜 艳, 范桂芳, 杜 然, 等. 高效液相色谱法测定菌群降解纤维素产物中的糖、有机酸和醇[J]. 色谱, 2015, 33(8): 805-808.
- [9] 关松荫, 张德生, 张志明. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986: 275-276.
- [10] 王玉功, 刘婧晶, 刘貽熙, 等. 苯酚-次氯酸钠比色法测定土壤脲酶活性影响因素的研究[J]. 土壤通报, 2019, 50(5): 1166-1170.
- [11] Dick R P. Methods of soil enzymology [M]. Madison: American Society of Agronomy, 2011: 163-168.
- [12] 杨兰芳, 曾 巧, 李海波, 等. 紫外分光光度法测定土壤过氧化氢酶活性[J]. 土壤通报, 2011, 42(1): 207-210.
- [13] Khan N, Clark I, Sánchez-Monedero M A, et al. Maturity indices in co-composting of chicken manure and sawdust with biochar[J]. *Bioresour Technol*. 2014, 168: 245-251.
- [14] Sundberg C, Yu D, Franke-Whittle I, et al. Effects of pH and microbial composition on odour in food waste composting [J]. *Waste Manage*, 2013, 33(1): 204-211.
- [15] 吴飞龙, 叶美锋, 吴晓梅, 等. 添加菌糠对猪粪渣堆肥过程及氨排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(3): 598-604.
- [16] Wang X, Selvam A, Wong J W C. Influence of lime on struvite formation and nitrogen conservation during food waste composting[J]. *Bioresour technol*, 2016, 217: 227-232.
- [17] 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(S2): 268-274.
- [18] Fernandez-Bayo J D, Yazdani R, Simmons C W, et al. Comparison of thermophilic anaerobic and aerobic treatment processes for stabilization of green and food wastes and production of soil amendments[J]. *Waste manage*, 2018, 77: 555-564.
- [19] 秦 莉, 李玉春, 李国学, 等. 城市生活垃圾堆肥过程中腐熟度指标及控制参数[J]. 农业工程学报, 2006, 22(12): 189-194.
- [20] 常瑞雪, 甘晶晶, 陈 清, 等. 碳源调理剂对黄瓜秧堆肥进程和碳氮养分损失的影响[J]. 农业工程学报, 2016, 32(S2): 254-259.
- [21] Zhang J P, Ying Y, Yao X H. Effects of turning frequency on the nutrients of *Camellia oleifera* shell co-compost with goat dung and evaluation of co-compost maturity [J]. *PLoS One*, 2019, 14(9): e0222841.
- [22] Sánchez Ó J, Ospina D A, Montoya S. compost supplementation with nutrients and microorganisms in composting process[J]. *Waste Manage*, 2017, 69: 136-153.
- [23] 辛 奇, 梁楚涛, 张骄阳, 等. 氮添加对白羊草土壤水溶性碳氮及其光谱特征的影响[J]. 水土保持研究, 2017, 24(5): 93-98; 104.
- [24] 鞠 猛. 污水处理厂污泥的厌氧堆肥探讨[J]. 当代化工, 2008, 37(4): 430-434.
- [25] 施跃锦. 城市污水处理厂污泥的脱水、厌氧消化及厌氧堆肥[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2002.
- [26] 丁 杰, 郝 艳, 侯佳奇, 等. 接种抗酸化复合菌对餐厨废弃物堆肥酸化缓解及腐殖化的影响[J]. 环境科学研究, 2016, 29(12): 1887-1894.
- [27] 郭梅莹. 凹凸棒添加堆肥过程中的酶活性研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2015.
- [28] 张卫娟, 谷 洁, 高 华, 等. 重金属锌对猪粪堆肥过程中氧化还原类酶活性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(2): 383-388.
- [29] Yu H, Huang G H. Effects of sodium acetate as a pH control amendment on the composting of food waste [J]. *Bioresour technol*, 2009, 100: 2005-2011.
- [30] 孙凯宁, 于君宝, 宁 凯, 等. 棉花秸秆堆腐特性及腐熟度评价[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(2): 393-399.