



添加废弃活性焦对鸡粪堆肥产品性质的影响

陈艳^{1,2}, 赵仲鹤^{1,3}, 彭梓航¹, 冯政君^{2,4,✉}, 靳大鹏⁵, 邹炎⁵, 宋慧平^{1,4}

1. 山西大学资源与环境工程研究所黄河流域资源增效减碳教育部工程研究中心, 太原 030006; 2. 山西大学黄土高原研究所, 太原 030006; 3. 山西大地生态环境技术研究院有限公司, 太原 030032; 4. 山西省黄河实验室, 太原 030006; 5. 山西清环能创环境科技有限公司, 太原 030032

摘要 废弃活性焦为活性焦脱硫脱硝后的筛下物, 呈粉末状, 难以回收利用, 但其具有丰富的孔隙、较高的碳、氮含量, 有潜力作为掺料应用于堆肥。将废弃活性焦与鸡粪混合进行堆肥, 以秸秆、再生焦粉与新焦粉作为对比, 跟踪堆肥过程中产品性质变化, 比较最终堆肥产品性能及其对植物生长的影响从而探究废弃活性焦的添加对堆肥产品的影响以及废弃活性焦的最适配比。结果发现: 添加废弃活性焦的堆肥产品腐熟后其含水率、pH、种子发芽指数(GI)、总养分及重金属含量均符合 NY/T 525—2021 有机肥料标准。废弃活性焦堆肥产品的 pH、氮含量以及有机质含量均优于其他处理, 狗牙根的株高和鲜重也优于对照。综合各项指标, 废弃活性焦堆肥配比在 40% 时产品质量最佳。本研究表明利用废弃活性焦混配堆肥是可行的, 相关结果可为废弃活性焦的资源化利用提供一定理论和技术支撑。

关键词 堆肥; 废弃活性焦; 有机肥; 土壤改良

活性焦是煤炭经炭化、活化等过程制成的多孔碳材料^[1-4], 主要用于烟气脱硫脱硝^[5-7], 可以通过低温再生循环利用, 但在再生过程中会有一部分活性焦形成粉末状筛下物, 达不到再利用要求而成为废料, 即废弃活性焦^[8-9]。废弃活性焦具有丰富的孔隙和表面官能团^[10], 能有效吸附营养物质、改善土壤结构, 且含碳量高^[11], 同时含有氢、氧、氮、硫等元素^[1,12], 有潜力应用于土壤改良。

利用废弃活性焦进行土壤改良已有一定研究。秦文芳等^[13]发现在土壤里直接施用少量废弃活性焦可以有效提高土壤团聚体含量, 降低土壤 pH, 但过量施用会因其较高的硫和盐含量^[8]对植物生长产生影响; 利用酸化改性使废弃活性焦 S 含量降低 57.1%, 电导率降低约 15 倍, 应用于土壤中有效促进植物的光合作用和养分吸收^[8]。酸改性改善了废弃活性焦的性质, 但提高了利用成本。

堆肥是一种常见的利用废弃物制备土壤改良剂的方法^[14-15]。生物炭是近年来常见的堆肥添加材料。WANG 等^[16]以生物炭与猪粪和稻草进行堆肥, 发现二者均能提升氮含量并且优化细菌群落结构, 有效加快腐熟进程; 李宇航等^[17]和夏璇^[18]的研究均发现生物炭的加入可以有效固氮, 同时提升全磷、全钾的含量, 使堆肥产品养分含量增加。利用废弃活性焦作为辅料堆肥的研究尚未见报道, 但活性焦与生物炭性质类似, 均具有丰富孔隙和表面官能团, 生物炭作为调理剂可有效促进堆肥腐熟^[19-20], 如果将废弃活性焦作为掺料与其他物质进行堆肥利用达到土壤改良效果, 则更具经济性, 因而有必要探究废弃活性焦作为辅料制堆肥产品的可行性。

因此, 本研究将废弃活性焦与鸡粪按比例混合进行堆肥, 以秸秆、再生焦粉和新焦粉作为对比, 探究废弃活性焦制堆肥产品的可行性, 分析不同配比下堆肥产品性质以及对植物生长的影响, 确定废弃活性焦的最佳配比, 旨在充分探究废弃活性焦在土壤改良方向的应用潜力, 为废弃活性焦的资源化利用提供理论和技术支撑。

收稿日期: 2023-12-12 录用日期: 2024-04-24

基金项目: 国家重点研发计划-政府间国际科技创新合作项目(2023YFE0100700); 山西省黄河实验室科技攻关项目(YRL-202104); 山西交控生态研发计划项目(2023-YF3)

第一作者: 陈艳(1996—), 女, 硕士研究生, 研究方向为固废资源化利用, chen1391737@163.com ✉通信作者: 冯政君(1989—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为生态修复与土壤改良, fzj@sxu.edu.cn

1 材料与方法

1.1 实验原料

实验所用废弃活性焦、再生焦粉、新焦粉均产出于山西清环能创环境科技有限公司；玉米秸秆来源于长治屯留县；鸡粪从运城高村镇宏运养殖场获得；菌剂选购于广东立得生物科技有限公司生产的 EM 真菌原液。原料的主要特性如表 1。

表 1 原料理化性质
Table 1 Properties of materials

原料	总养分/%	N/%	P ₂ O ₅ /%	K ₂ O/%	pH	有机碳/%	C/N	As/(mg·kg ⁻¹)	Cd/(mg·kg ⁻¹)	Cr/(mg·kg ⁻¹)	Pb/(mg·kg ⁻¹)
废弃活性焦	2.81	2.3	0.41	0.1	7	24.04	10.45	2.26	ND	2.58	2.87
再生焦粉	1.23	0.35	0.79	0.09	7.98	13.78	39.36	13.3	ND	0.64	5.15
新焦粉	0.89	0.36	0.44	0.09	8.23	13.71	38.07	1.28	ND	0.07	0.52
鸡粪	8.36	1.94	3.68	2.74	9.04	17.35	8.95	8.24	ND	ND	2.89
秸秆	3.4	0.9	0.33	2.17	7.31	29.9	33.22	1.28	ND	0.07	0.52

注：ND表示未检出。

1.2 堆肥过程

堆肥初始阶段的物料合适 C/N 比一般要求为 25~35^[17-20]；活性焦含碳物质生物可利用性较低；实验所用废弃活性焦的 C/N 比为 10.45，鸡粪 C/N 比为 8.95，按照合理的 C/N 比区间与鸡粪混配无法完成，再生焦粉和新焦粉的 C/N 比为 39.36 和 38.07，按合理区间配置的焦粉配比在 90% 以上。其他煤基固废如风化煤、粉煤灰和煤矸石添加量在 0~60% 的区间内均有探究^[21-23]，但其 C/N 比较高（如煤矸石 C/N 比 57.44），应用于堆肥可以调节堆肥 C/N 比在 25~35 之间。结合废弃活性焦的性质，其配比过高无法完成堆肥。

为使堆肥顺利进行，本研究初步设定活性焦配比为 35%~55%，并添加了 EM 菌液以进一步促进发酵过程。利用搅拌机将鸡粪和 EM 菌液按表 2 的质量配比混合，分别添加 35% 的废弃活性焦、新焦粉、再生焦粉以及秸秆以分析其可行性，分别编号为 BH、XJ、ZS、JG，向堆体添加纯水将含水率控制到 60% 左右。4 组堆肥产品的初始 C/N 比分别为 9.53、11.64、11.59、13.79，初始含水率依次为 56.98%、53.27%、51.49%、57.04%。对废弃活性焦的最佳配比进行探究，按表 3 的质量配比混合，在 30%~55% 之间设置 6 个废弃活性焦的配比梯度，分别编号为 BH-30、BH-35、BH-40、BH-45、BH-50、BH-55，C/N 比在 9~10 之间，初始含水率在 55%~57% 之间。

表 2 不同材料堆肥产品配比
Table 2 Composting product ratios of different materials

材料	秸秆	废弃活性焦	再生焦粉	新焦粉
鸡粪	65%	65%	65%	65%
秸秆	35%	—	—	—
废弃活性焦	—	35%	—	—
再生焦粉	—	—	35%	—
新焦粉	—	—	—	35%
EM菌液	0.10%	0.10%	0.10%	0.10%

表 3 废弃活性焦不同配比的堆肥产品的原料配比
Table 3 Raw material ratios of composting products with different ratios of waste activated coke

编号	废弃活性焦	鸡粪	EM菌液
BH-30	30%	70%	0.10%
BH-35	35%	65%	0.10%
BH-40	40%	60%	0.10%
BH-45	45%	55%	0.10%
BH-50	50%	50%	0.10%
BH-55	55%	45%	0.10%

每个处理有 3 个平行，共 27 个堆体，每个堆体重 300 kg，堆肥时间为 26 d，堆体在第 0、6、11、16、26 d 进行翻堆并适当补水。所有处理堆体的温度和含水率均使用 16 路温湿测定器（16UC，JK3008，辉达隆电子科技有限公司，中国）进行记录，将探针插入堆体，探针位置距离堆体表面 5~10 cm 左右，先稳

定 10 min, 然后快速读取并记录堆体的温度和含水率, 每个堆体取 3 个点位进行随机测定并取均值; 在此基础上, 利用烘干法 (GB/T 8576—2010) [24] 对 16 路温湿测定器的含水率结果进行校正, 校正后的含水率作为最终的堆体含水率。在堆肥过程中, 通过随机混合堆体五个位置的样品以获取均匀样品, 将一部分样品储存在 -4°C 的冰箱中, 剩余部分干燥并研磨过 0.4 mm 筛。

1.3 性质测定

堆肥样本的性质测定均根据《有机肥料》(NY/T 525—2021) 标准[25], 酸碱度测定利用 pH 计 (FE38, 梅特勒-托利多公司, 美国) 记录; 有机质含量利用重铬酸钾容量法进行测定; 总养分 (氮、磷、钾) 测定分别利用凯氏定氮法、分光光度计法以及等离子体发射光谱法; 种子发芽指数 (GI) 测定利用 10 粒大小一致的胡萝卜种子于放置定性滤纸上的培养皿中, 加入 10 mL 试样浸取液培养 48 h 来确定; As、Cr、Cd、Pb 等重金属检测依据 NY/T 1978—2010 标准中离子体发射光谱法[26] 进行测定。

1.4 植物种植

花盆的规格为 $7\text{ cm}\times 5\text{ cm}\times 7.8\text{ cm}$, 每个花盆装 200 g 土, 分别加 2 g 的不同配比的废弃活性焦堆肥产品的样品与土壤混合进行盆栽实验, 对照为纯土壤 (CK)、加 0.2 g 化肥 (HF) 以及 2 g 秸秆堆肥产品样品 (JG), 种植狗牙根, 设置 3 个平行, 在 30 d 进行收获, 对狗牙根的鲜重、株高进行记录。

1.5 数据分析

使用 SPSS 27.0 对各组进行单因素方差分析 (One-Way ANOVA), 多重比较采用 LSD 法, 显著水平为 $P<0.05$ 。使用 Origin 2021 进行作图。

2 结果与讨论

2.1 不同原料的堆肥产品在堆肥过程中的指标比较

图 1 是同配比不同原料的堆肥产品的温度随时间的变化情况。由图可知 BH、ZS、XJ、JG 的堆体温度在 26 d 内均呈现出上升-稳定-下降的规律, 最高发酵温度均超过了 50°C 。BH、ZS、XJ、JG 组在 3 d 内迅速升温并达到 50°C 以上, 说明堆体的养分和初始含水率满足微生物活动的需求[27-28], 因而升温阶段迅速。ZS 组在升温阶段变化最快, 在高温持续阶段堆体温度维持在 $53\sim 62^{\circ}\text{C}$; BH 组在第 0、3、5、8、15、20、25 d 的温度分别为 25.8 、 50.2 、 50.6 、 52.1 、 38.7 、 30.5 、 29.2°C , 测定最高温度为 52.1°C , 在高温阶段持续达 5 d, BH 组高温阶段温度低于 3 个对照, 高温阶段变化较小更有利于微生物的代谢活力[29]; 从 21 d 开始各堆体的平均温度逐渐接近室温, 4 组堆肥产品在第 25 d 的平均温度均降低, 与室温基本一致。温度是堆肥过程中最重要的测量指标, 影响着堆肥的腐熟程度[30], 4 组堆肥产品在堆肥过程中均经历了升温、持续高温、降温腐熟阶段, 在高温阶段持续超过 5 d[31]。

图 2 是不同原料堆肥产品在堆肥过程中 pH 值的变化情况。在堆肥的整个过程中, BH 组的 pH 值有明显下降的趋势, pH 值 8.02 降到 7.63, ZS 组的 pH 值有上升的趋势, 最终 pH 稳定在 9.07, XJ 组 pH 值变化趋势较大, 在堆肥前 10 d 之内下降明显, 最后保持在与初始值相近的水平

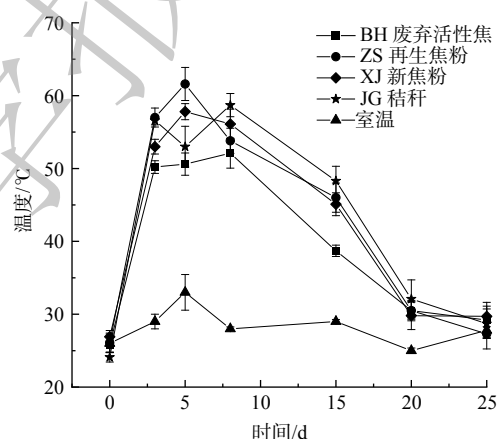


图 1 不同堆肥产品在堆肥过程中温度的变化

Fig. 1 Temperature changes of different composting products in the composting process

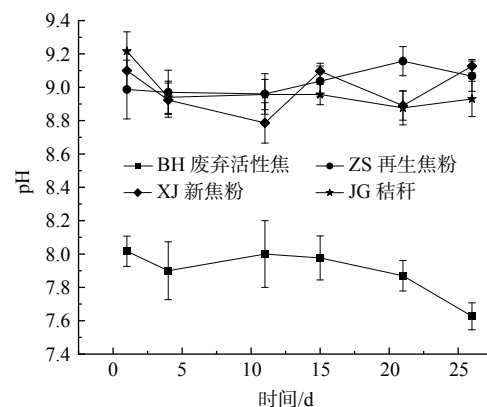


图 2 不同堆肥产品在堆肥过程中 pH 的变化

Fig. 2 pH changes of different composting products in the composting process

为 9.13, JG 组 pH 呈下降趋势, 最后稳定在 8.93, 可见不同材料的堆肥 pH 值的变化趋势不尽相同^[32], 与秸秆、再生焦粉和新焦粉相比, 废弃活性焦堆肥后的 pH 值远低于三者, 符合 NY/T 525—2021 的标准, 这是由于活性焦在烟气脱硫脱硝过程中吸持了一些硫酸、硝酸等酸性物质^[33], 对于降低 pH 值起到明显作用, 微碱性环境更有利于微生物的生长繁殖以及代谢活动^[34]。

图 3 是不同原料堆肥产品堆肥含水率的变化情况。堆体堆肥过程中水分含量呈下降趋势, 4 组产品的含水率在升温期和高温期损失最快, 在 14 d 以后含水率变化较缓慢, BH 组初始的含水率高于 JG 组、ZS 组和 XJ 组, 在第 7 d 含水率损失了 20.95%, 最终含水率稳定在 30.08%, 高于 ZS 组和 XJ 组, 废弃活性焦的初始含水率高对于微生物的分解代谢活动有利, 不同原料堆肥产品的含水率损失不同, XJ 组含水率损失最多, 在第 14 d 含水率已降到 24.69%, 可能会造成微生物分解活动微弱^[35]。不同原料堆肥产品含水率变化与李宇航等^[17]对堆肥含水率的变化规律基本一致, 含水率的变化与温度的变化相一致。

图 4 是不同堆肥产品的有机质含量变化。堆肥有机质含量在一定的时间范围内呈现下降的趋势是因为堆肥中微生物分解有机质导致的^[36]。图中将 BH、ZS、XJ、JG 的结果对比发现, JG 组起始的有机质含量最高, 显著高于其余处理组 ($P < 0.001$), 因原料有机质的差异, BH 组的初始有机质含量也显著高于 ZS 和 XJ 组 ($P < 0.001$); 在堆肥结束时 BH 组高于其他组, 有极显著性差异 ($P < 0.001$), 且 BH 组的腐熟有机质含量为 21.88%。

废弃活性焦的堆肥产品在腐熟之后的有机质含量远高于再生焦粉和新焦粉, 再生焦粉和新焦粉的堆肥产品的初始有机质含量接近, 这是由于活性焦的原料为煤, 废弃活性焦吸附了烟气中一些挥发性有机污染物^[4], 因而初始有机物含量高于新焦粉和再生焦粉, 腐熟之后有机质含量也高于再生焦粉和新焦粉组。但废弃活性焦堆肥产品的有机质含量仍达不到 NY/T 525—2021 的标准, 小于 30%, 是因为在堆肥产品好氧发酵过程中有机物被好氧微生物利用, 微生物的生长繁殖将物料中大量的有机质消耗并转化成气体以二氧化碳的形式释放到空气中^[37], 所以有机质不断损失, 试验所用废弃活性焦有机质含量约为 41.45%, 腐熟以后由于损耗多, 有机质并不能保留到 30% 以上。此外, 废弃活性焦的堆肥产品在高温持续阶段温度变化小, 稳定在 50~53 °C 之间, 有利于好氧微生物的持续活动, 加快了有机质的分解。

表 4 所含不同原料组堆肥后的总养分 ($N+P_2O_5+K_2O$) 以及重金属含量的变化情况, 发现 4 个原料组堆肥腐熟后的总养分含量均高于 4%, BH-35 与 JG-35 的总养分含量接近均达到 5.4%, ZS-35 组总养分为 4.9%, XJ-35 组总养分最低为 4.11%; 4 个组的 N 有显著性差异 ($P < 0.05$), BH-35 组的氮含量极显著高于 3 个对照 ($P < 0.001$), JG-35 组的 K_2O 含量最高, XJ-35 组所含养分最低, 这是由于废弃活性焦的总氮含量为 2.3%, 而再生焦粉和新焦粉的总氮含量为 0.35% 和 0.36%, 秸秆的总氮含量为 0.9%, 废弃活性焦自身在氮含量上的优势促使废弃活性焦堆肥产品的总养分与秸秆堆肥产品的总养分接近, 而再生焦粉和新焦粉堆肥产品的总养分主要依靠鸡粪的配比; 4 个不同原料组的重金属含量接近, As 的含量最高, 废弃活性焦

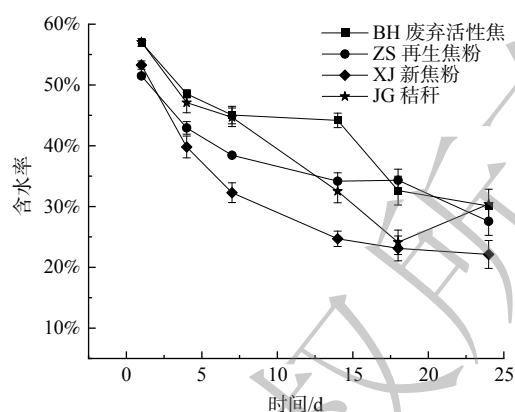
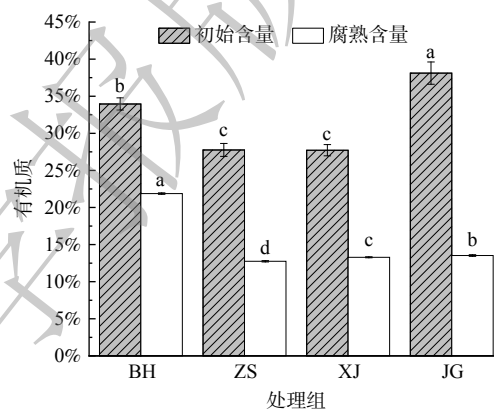


图 3 不同堆肥产品在堆肥过程中含水率的变化

Fig. 3 Changes of water content of different composting products in the composting process



注: 不同小写字母表示不同处理组间有机质含量存在显著性差异 ($P < 0.05$)。

图 4 不同堆肥产品有机质含量的变化

Fig. 4 Changes of organic matter content of different composting products

表 4 不同堆肥产品的总养分及重金属含量变化
Table 4 Changes of total nutrient and heavy metal contents of different composting products

检测指标	总养分/%	N/%	P ₂ O ₅ /%	K ₂ O/%	As/(mg kg ⁻¹)	Cr/(mg kg ⁻¹)	Cd/(mg kg ⁻¹)	Pb/(mg kg ⁻¹)
BH-30	5.59±0.17a	1.57±0.04ab	2.06±0.00ab	1.96±0.25b	1.57±0.06bcd	0.08±0.01d	ND	0.08±0.02e
BH-35	5.41±0.14a	1.44±0.05cd	2.11±0.06a	1.86±0.07bc	1.54±0.09cd	0.08d	ND	0.15±0.03cd
BH-40	5.34±0.20a	1.50±0.05bc	2.01±0.02bc	1.83±0.17bc	1.45±0.04de	0.06e	ND	0.13d
BH-45	4.66±0.09b	1.29±0.03e	1.55±0.02e	1.82±0.15bc	1.67±0.10abc	0.13b	ND	0.17±0.01c
BH-50	4.91±0.13b	1.68±0.05a	1.68±0.01d	1.55±0.12c	1.61±0.15abcd	0.11±0.02c	ND	0.12±0.01d
BH-55	3.73±0.14d	1.33±0.08de	1.26±0.02f	1.14±0.26d	1.62±0.16abcd	0.16±0.01a	ND	0.24±0.03a
ZS-35	4.9±0.14b	0.83±0.09g	1.68±0.04e	2.39±0.14a	1.53±0.14ce	0.07de	ND	0.16±0.04cd
XJ-35	4.11±0.15c	0.60±0.11h	1.56±0.09e	1.95±0.19b	1.77±0.20ab	0.07±0.01de	ND	0.18±0.02bc
JG-35	5.43±0.05a	1.06±0.11f	1.96±0.02c	2.41±0.18a	1.81±0.08a	0.07±0.01de	ND	0.22±0.02ab
NY525—2021	总养分 (N+P ₂ O ₅ +K ₂ O) 百分比≥4%				≤15	≤150	≤3	≤50

注：不同小写字母表示不同处理组间总养分及重金属含量存在显著性差异 ($P<0.05$)；ND表示未检出。

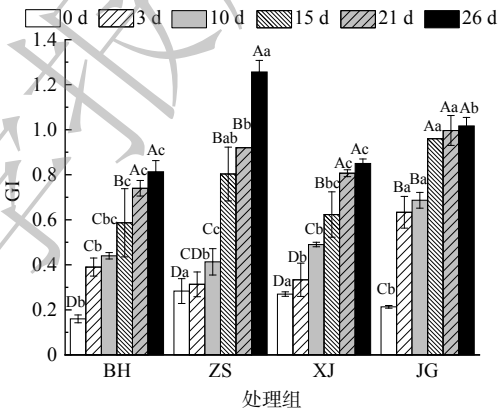
Pb 和 As 含量低于 JG 组，Cr 含量接近，但都符合 NY/T 525—2021 的要求。

图 5 是不同堆肥产品对堆肥过程 GI 变化的影响，由图可知，4 组原料的堆肥产品的 GI 值随着堆肥时间变化呈上升趋势，四个处理组 GI 值均在 26 d 达到最大，且除 ZS 组外其余组在 21 d 和 26 d 的 GI 变化没有显著性差异，可见堆肥产品在 26 d 的腐熟是较为完全的，BH 组在第 26 d 的 GI 值为 0.79，符合有机肥料标准。本试验中的 4 组堆肥产品在堆肥结束时发芽指数都在 0.7 以上，说明废弃活性焦、再生焦粉、新焦粉添加到堆肥产品中堆肥品质是合格的^[38]，但是 BH 组最低，这可能是由于废弃活性焦含有较多的盐，在堆肥腐熟过程中逐渐溶出，升高了浸出液的盐度^[39,40]，影响种子萌发。

通过分析废弃活性焦混配鸡粪的堆肥产品在堆肥过程中温度变化符合腐熟过程，其 pH、总养分、GI 等均符合有机肥料标准，废弃活性焦的添加有助于降低 pH，可能是由于活性焦对堆肥过程中产生的挥发 NH₃ 进行了吸附，因为废弃活性焦 BET 表面积可达 97.54 m²·g⁻¹^[13]，这一结果与石建新等^[19]对生物炭堆肥降低了堆体的 pH 的结果一致，废弃活性焦虽表现出良好吸附性，但其浸出液的所含盐分抑制了种子的萌发，这一结果与生物炭表现出的效果并不相同，可见二者虽有相似的性质，应用于堆肥的效果却不同，夏璇^[18]在对生物炭堆肥的研究中发现其添加增加了全钾和全磷的含量，而废弃活性焦的添加增加了鸡粪堆肥产品的全钾含量，减少了全磷含量，可能是因为废弃活性焦自身磷贡献少且对磷素活化无促进作用。综上，废弃活性焦作为辅料堆肥是具备可行性的，但是由于添加废弃活性焦的鸡粪堆肥产品的初始 C/N 比低于 15，可能造成氮素的损失^[27]，在后续的研究中应该考虑添加 C/N 比更高的辅料调节产品的 C/N 比至合理的区间。

2.2 不同配比的废弃活性焦堆肥产品的性质对比

图 6 为不同配比的废弃活性焦堆肥产品有机质含量，废弃活性焦配比在 30%~55% 之间的堆肥产品腐熟后的有机质含量在 10.23%~22.92% 之间，当废弃活性焦的添加量在 35%、40%、45% 时腐熟有机质含量分别为 21.88%、22.92%、22.9%；随着废弃活性焦含量增加有机质的初始含量基本呈增加趋势，BH-50 组有



注：不同小写字母和大写字母表示不同处理组相同时间内以及不同时间相同处理组内 GI 值存在显著性差异 ($P<0.05$)。

图 5 不同堆肥产品对堆肥过程 GI 变化的影响
Fig. 5 Effects of different composting products on GI changes in the composting process

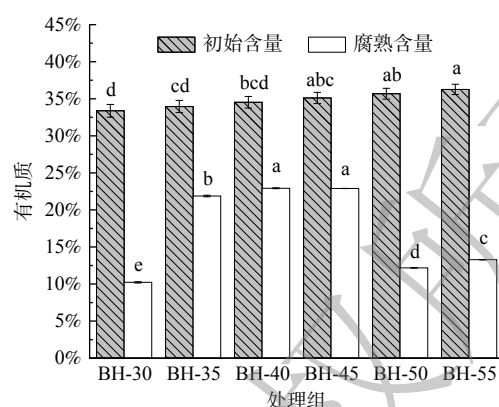
机质含量前后变化最大,堆肥产品腐熟完成后有机质含量减少了 23.5%,其次为 BH-30 组和 BH-55 组减少较多,分别为 23.15%、22.97%;BH-35 和 BH-40 的腐熟含量有极显著性差异 ($P<0.001$),BH-40 与 BH-45 腐熟有机质含量无差异,废弃活性焦添加比例在 40%~45% 之间更加接近 NY/T 525—2021 标准的要求。

由表 1 可知不同配比废弃活性焦的 6 组堆肥产品的总养分含量在 5.31%~6.7% 之间,由表 4 可知 6 组处理的堆肥产品腐熟后总养分含量在 3.73%~5.59% 之间,除 BH-55 外其余组均符合有机肥料标准,堆肥产品不同配比影响总养分的变化^[35,41],总养分含量随废弃活性焦的配比增加而减少,其中 BH-30 的总养分含量最高为 5.59%,配比在 30%~40% 的堆肥产品总养分在 5.30% 以上,且 BH-30、BH-35、BH-40 的总养分之间没有显著差异,但与其他处理有极显著性差异 ($P<0.001$)。6 组堆肥产品的总氮含量与配比变化不呈比例,BH-50 的 N 最高为 1.68%,其次为 BH-30 与 BH-40 的 N 含量接近在 1.5% 以上,BH-45 与 BH-55 的 N 含量接近在 1.3% 左右。总磷含量从废弃活性焦配比为 45% 的堆肥产品开始显现差异,废弃活性焦配比为 30%、35%、40% 时堆肥产品 P_2O_5 含量在 2% 以上废弃活性焦配比为 45%、50%、55% 时 P_2O_5 含量均在 1.70% 以下。由于鸡粪的总钾含量是饱和焦粉的 27.4 倍,堆肥产品的总钾含量变化主要受鸡粪的影响,因而不同配比废弃活性焦堆肥产品随鸡粪配比的增加而增加。鸡粪的总磷含量是废弃活性焦的 8.98 倍,堆肥产品的总磷含量也主要受鸡粪配比的影响,堆肥产品的总磷含量随着鸡粪的配比增加而增加反而减少,表 4 不同配比堆肥产品的总磷和总钾变化也符合这一规律。

6 组堆肥产品的重金属含量见表 4,各处理的重金属均符合 NY/T 525—2021 标准的要求。随着废弃活性焦比例的增加,Cr 含量基本呈现增加趋势,除 BH-30 与 BH-35 含量接近,其他各组均有显著性差异 ($P<0.05$),BH-55 的 Cr 含量最高;Pb 含量基本呈现增加趋势,废弃活性焦配比在 30%~50% 之间的堆肥产品 Pb 含量接近,BH-55 的 Pb 含量最高;As 含量变化接近。

2.3 狗牙根盆栽试验

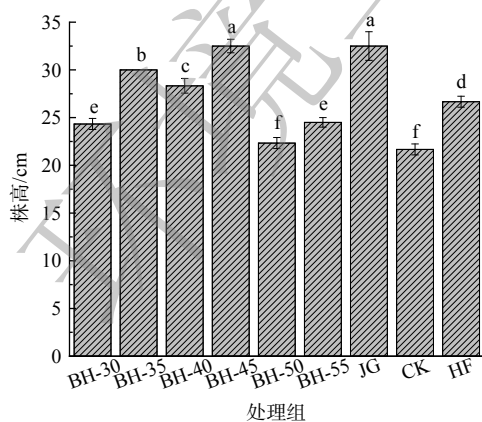
用狗牙根作为受试植物评估不同配比废弃活性焦堆肥产品对植物生长的影响。由图 7(a) 可知,不同配比



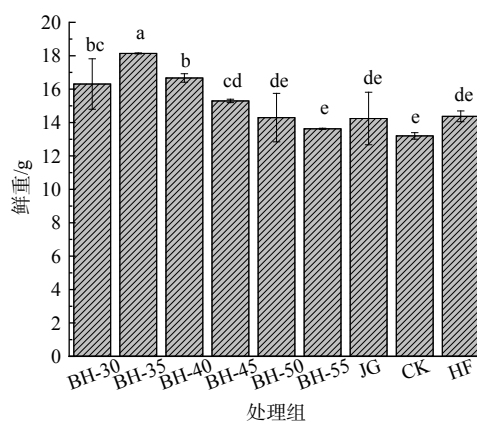
注:不同小写字母表示不同处理组的有机质含量有显著性差异 ($P<0.05$)。

图 6 不同配比的废弃活性焦堆肥产品有机质含量

Fig. 6 Content of organic matter in composting products with different ratios of waste activated coke



(a) 不同废弃活性焦配比下株高的变化



(b) 不同废弃活性焦配比下鲜重的变化

注:不同小写字母表示不同处理组在狗牙根株高和鲜重上有显著性差异 ($P<0.05$)。

图 7 废弃活性焦不同配比堆肥产品对狗牙根生长指标的影响

Fig. 7 Effects of composting products with different ratios of waste activated coke on the growth indexes of bermudagrass

废弃活性焦堆肥产品组的株高均高于 CK 组, 其中 BH-45 组的株高最高为 32.5 cm 左右, BH-50 组株高最低为 22.3 cm 左右, 与加化肥的处理 HF 组相比, BH-35、BH-40、BH-45 组的株高均显现优势, 增长了 6.22%~21.86%; 与 JG 组相比, 只有 BH-45 组株高与其接近, 其余组株高均极显著低于 JG 组 ($P < 0.001$)。由图 7 (b) 可知废弃活性焦组的鲜重均高于 CK, BH-35 组的鲜重最大为 18.14 g, 其次为 BH-40 组, 除了 BH-50 与 BH-55 组以外其余处理组的鲜重均高于 HF 组, 增加了 6.40%~26.19%; 与 JG 组相比, 废弃活性焦配比在 30%~40% 的组鲜重均显著高于 JG 组鲜重 ($P < 0.05$), BH-45 和 BH-50 鲜重接近于 JG, BH-55 组鲜重低于 JG。由此可知, 不同配比的废弃活性焦堆肥产品没有对植物生长产生负面影响, 部分配比可以促进植物的生长效果优于化肥, 初步说明添加适量废弃活性焦堆肥产品是可行的。狗牙根的株高和鲜重与不同配比废弃活性焦堆肥产品的总养分含量有一定相关性但不显著, BH-35 和 BH-40 的总养分均在 5.3% 以上, 2 个组的鲜重均达到最大, 株高虽低于 JG 组却高于其他对照, 虽然 BH-30 的总养分在 5.59%, 狗牙根的株高却无优势, 但鲜重高于对照处理, BH-45 的总养分含量在 4.66%, 植物的株高优势却最明显, 可见总养分含量与植物生长指标之间关联不显著, 结合有机质含量变化确定当废弃活性焦配比在 40% 时产品性质及应用效果较为理想。

3 结论

1) 与秸秆相比, 同配比废弃活性焦的添加使鸡粪堆肥产品的 pH 降低了 14.55%, N 含量增加了 35.85%, 腐熟有机质增加了 61.76%; 与再生焦粉和新焦粉相比, 同配比废弃活性焦的添加显著增加了产品的总养分 ($P < 0.05$), 分别增加了 10.41% 和 31.63%, 有机质分别增加了 71.63% 和 64.64%。

2) 添加废弃活性焦的鸡粪堆肥产品含水率达到 20.21%, pH 为 7.63, 种子发芽指数在 81.33%, As、Cr、Pb 等重金属的含量属极低, 总养分含量为 5.41%, 均符合有机肥料的标准, 有机质含量达到 21.88%, 废弃活性焦作为掺料与鸡粪制堆肥产品具备可行性。综合废弃活性焦不同配比堆肥产品的养分及有机质指标以及对植物生长指标的影响确定废弃活性焦配比为 40% 时产品性质和效果更理想。

参考文献

- [1] DING S, LI Y, ZHU T, et al. Regeneration performance and carbon consumption of semi-coke and activated coke for SO_2 and NO removal[J]. *Journal of Environment Sciences (China)*, 2015, 34(8): 37-43.
- [2] TIAN Y H, HU S D, JING X D, et al. Desulfurization performances of activated coke prepared from fine blue-coke[J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2020, 231(12): 1383-1387.
- [3] LI P, AILIJIAN N, CAO X X, et al. Pretreatment of coal gasification wastewater by adsorption using activated carbons and activated coke[J]. *Colloids and Surfaces A-Physicochemical and Engineering Aspects*, 2015, 482: 177-183.
- [4] ZHANG J, LI C T, DU X Y, et al. Recycle of waste activated coke as an efficient sorbent for Hg^0 removal from coal-fired flue gas[J]. *Fuel*, 2022, 324: 124645.
- [5] BUCZEK B. Analysis of spent active coke properties by spouted bed technique[J]. *Chemical and Process Engineering*, 2013, 34(3): 415-421.
- [6] LI J, ZHOU B X, CHANG J C, et al. Study on thermal regeneration of saturated activated coke coupled with SO_2 carbothermal reduction to produce elemental sulfur[J]. *Energy*, 2023, 278: 127909.
- [7] SUN F, GAO J, ZHU Y, et al. Mechanism of SO_2 adsorption and desorption on commercial activated coke[J]. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 2011, 28(11): 2218-2225.
- [8] 秦文芳. 活性焦基改良剂对盐碱地的改良效应[D]. 太原: 山西大学, 2021.
- [9] HU Z J, ZHOU H, ZHANG W L, et al. The influence of the porous structure of activated coke for the treatment of gases from coal combustion on its mechanical strength[J]. *Processes*, 2020, 8(8): 900.
- [10] JOSE LUIS F, MANUE FERNANDO R P, MARIA M A, et al. Modification of the surface chemistry of activated carbons[J]. *Carbon*, 1999, 37(9): 1379-1389.
- [11] JASTRZAB K. Changes of activated coke properties in cyclic adsorption treatment of flue gases[J]. *Fuel Processing Technology*, 2012, 104: 371-377.
- [12] ZHANG J H, HE Z J, GUO Q, et al. Effects of microwave modification on the desulfurization and denitrification of activated coke[J]. *Bioresources*, 2021, 16(1): 729-746.
- [13] 秦文芳, 宋慧平, 范远, 等. 活性焦对晋北盐碱地土壤性质和两种植物生长的影响[J]. *应用生态学报*, 2021, 32(5): 1799-1806.
- [14] OVIEDO-OCANA E R, TORRES-LOZADA P, MARMOLEJO-REBELLON L F, et al. Stability and maturity of biowaste composts derived by small municipalities: correlation among physical, chemical and biological indices[J]. *Waste Management*, 2015, 44: 63-71.
- [15] TESSFAW Z A, BEYENE A, NEBIYU A, et al. Co-composting of khat-derived biochar with municipal solid waste: a sustainable practice of waste management[J]. *Sustainability*, 2020, 12(24): 10668.
- [16] WANG M M, WU Y C, ZHAO J Y, et al. Comparison of composting factors, heavy metal immobilization, and microbial activity after biochar or lime application in straw-manure composting[J]. *Bioresour Technol*, 2022, 363: 127872.

- [17] 李宇航, 邢泽炳, 马玮键, 等. 生物炭对鸡粪好氧堆肥过程的影响[J]. *农业工程*, 2021, 11(8): 53-58.
- [18] 夏璇. 生物炭对鸡粪好氧堆肥中养分含量及腐殖化的影响研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2019.
- [19] 石建新. 添加生物炭猪粪堆肥腐殖化及应用研究[D]. 塔里木: 塔里木大学, 2023.
- [20] 张浩然. 添加不同生物质炭对牛粪堆肥碳氮养分保蓄的影响[D]. 西宁: 青海师范大学, 2022.
- [21] LUO C, LI S H, REN P Y, et al. Enhancing the carbon content of coal gangue for composting through sludge amendment: A feasibility study[J]. *Environmental Pollution*, 2024, 348: 123439.
- [22] 孙志华, 张金水, 同延安, 等. 添加风化石对蘑菇渣牛粪堆肥的影响[J]. *西北农业学报*, 2012, 21(2): 162-166.
- [23] 黄宏林, 何广聪, 覃侠龙, 等. 粉煤灰对牛粪好氧堆肥进程的影响[J]. *养殖与饲料*, 2021, 20(1): 10-14.
- [24] 中国国家标准化管理委员会. 复混肥料中游离水含量的测定: GB/T 8576-2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
- [25] 中华人民共和国农业农村部. 有机肥料: NY 525-2021[S]. 北京: 中国农业出版社, 2021.
- [26] 中华人民共和国农业农村部. 肥料 汞、砷、镉、铅、铬含量的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
- [27] 徐伟栋, 张佳楠, 王俊梅, 等. 鸡粪堆肥周期中养分指标和腐熟程度变化研究[J]. *安徽农业科学*, 2021, 49(8): 153-156.
- [28] 周亚文, 张宇航, 沈玉君, 等. 初始含水率对人粪污好氧堆肥腐熟及微生物群落结构变化的影响[J]. *环境工程学报*, 2022, 16(12): 4108-4120.
- [29] 杨海君, 许云海, 肖为, 等. 温度和物料配比对城市园林绿化废物与鸡粪水浴法好氧堆肥的影响[J]. *水土保持通报*, 2019, 39(6): 35-43.
- [30] RICH N, BHARTI A, KUMAR S. Effect of bulking agents and cow dung as inoculant on vegetable waste compost quality[J]. *Bioresource Technology*, 2018, 252: 83-90.
- [31] WANG W, ZHANG L, SUN X Y. Improvement of two-stage composting of green waste by addition of eggshell waste and rice husks[J]. *Bioresource Technology*, 2021, 320(Pt B): 124388.
- [32] AYILARA M S, OLANREWAIJU O S, BABALOLA O, et al. Waste management through composting: challenges and potentials[J]. *Sustainability*, 2020, 12(11): 4456.
- [33] 肖庆超, 刘莉萍, 白云, 等. 焦炉烟气脱硫脱硝超低排放改造工艺探析[J]. *环境工程*, 2023, 41(S1): 621-624.
- [34] 冯红梅, 秦永胜, 李筱帆, 等. 添加菌剂和鸡粪对园林废弃物堆肥效果的影响[J]. *北方园艺*, 2015, 15: 156-160.
- [35] 刘祥, 李辉, 丁旻, 等. 翻抛频率与混合比对鸡粪槽式好氧堆肥的影响[J]. *农业工程*, 2023, 13(7): 35-41.
- [36] 敖静, 李杨, 刘晓辉, 等. 鸡粪堆肥发酵过程微生物数量与温度及酶变化的相关性研究[J]. *微生物学杂志*, 2020, 40(5): 67-72.
- [37] FANG C, YUAN X R, LIAO K K, et al. Micro-aerobic conditions based on membrane-covered improves the quality of compost products: Insights into fungal community evolution and dissolved organic matter characteristics[J]. *Bioresource Technology*, 2022, 362: 127849.
- [38] YANG Y, WANG G Y, LI G X, et al. Selection of sensitive seeds for evaluation of compost maturity with the seed germination index[J]. *Waste Management*, 2021, 136: 238-243.
- [39] LIU G K, WANG L W, LI Y K, et al. Biomass and coal modification to prepare activated coke for desulfurization and denitrification[J]. *Energies*, 2022, 15(8): 2904.
- [40] 钱虎林, 曹先中, 邓成豪, 等. 活性焦脱硫脱硝技术及其改性方法研究进展[J]. *煤化工*, 2021, 49(5): 82-85.
- [41] 薛刚, 厉桂香, 李希臣, 等. 不同配比堆肥替代化肥对土壤性状及小麦产量的影响[J]. *农业科技与信息*, 2023, 2: 57-60.

(责任编辑: 金曙光)

Effect of adding waste activated coke on the properties of chicken manure compost products

CHEN Yan^{1,2}, ZHAO Zhonghe^{1,3}, PENG Zihang¹, FENG Zhengjun^{2,4,*}, JIN Dapeng⁵, ZOU Yan⁵, SONG Huiping^{1,4}

1. Institute of Resources and Environmental Engineering, Engineering Research Center of Ministry of Education for Resource Efficiency Enhancing and Carbon Emission Reduction in Yellow River Basin, Shanxi University, Taiyuan 030006, China; 2. Loess Plateau Research Institute, Shanxi University, Taiyuan 030006, China; 3. Shanxi Dadi Eco-Environment Technology Institute Co., Ltd., Taiyuan 030032, China; 4. Shanxi Laboratory for Yellow River, Taiyuan 030006, China; 5. Shanxi Qinghuan Nengchuan Environmental Protection Technology Co., Ltd., Taiyuan 030032, China

*Corresponding author, E-mail: fzj@sxu.edu.cn

Abstract Waste activated coke is a byproduct derived from the fragmental fraction of activated coke following desulfurization and denitrification. Though typically considered non-recyclable, this powdery substance seems to be a promising material for composting as an additive due to its porous structure and substantial carbon and nitrogen content. For this purpose, waste activated coke was mixed with chicken manure for composting. Straw, recycled coke powder, and fresh activated coke powder were also applied respectively for comparative analysis to investigate the effects of waste activated coke to compost and determine the optimal ratio of waste activated coke. The results showed that the water content, pH, seed germination index (GI), total nutrients and heavy metal content of the composted products with waste activated coke met the NY/T 525—2021 standards for organic fertilizer. The composting products with waste activated coke exhibited superior pH, nitrogen content and organic matter content; furthermore, incorporated with waste activated coke composted products were better, comparing to the other treatments. Finally, the results suggested that the optimal mixing ratio for waste activated coke compost was 40%. The results indicated that waste activated coke could be used as an additive for composting and the results provided both theoretical and technical insights into the resourceful utilization of waste activated coke.

Keywords compost; waste activated coke; organic fertilizer; soil amelioration