

庄海峰, 卢云鹏, 傅建舟, 等. 施用猪粪炭对水稻田土壤肥力与酶活性的影响及安全性分析[J]. 江苏农业科学, 2024, 52(5): 243–249.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2024.05.036

施用猪粪炭对水稻田土壤肥力与酶活性的影响 及安全性分析

庄海峰¹, 卢云鹏¹, 傅建舟², 谢博伊², 赵宇飞¹, 张雅荃¹

(1. 浙江科技学院浙江省废弃生物质循环利用与生态处理技术重点实验室, 浙江杭州 310023; 2. 舟山市农业科学研究院, 浙江舟山 316004)

摘要:采用大田试验, 研究不同施用量(0、1%、2%、3%)的猪粪炭对水稻田土壤肥力提升及酶学性质的影响, 分析猪粪炭优化调控水稻产量及钝化土壤重金属的应用性。结果表明, 施用猪粪炭提高土壤氮、磷、钾及有机质的含量并降低土壤容重。施炭处理促进提高水稻产量, 其中 1% 施炭处理的水稻产量较对照提高 8.19%, 有效分蘖数提高 17.57%。随着施炭量增加, 分蘖期土壤的蔗糖酶活性呈递增趋势, 成熟期蔗糖酶活性以及 2 个生育期脲酶活性呈先升后降趋势; 成熟期 1% 施炭处理的蔗糖酶、脲酶活性较对照分别提高 51.24%、31.60%。施用猪粪炭显著降低土壤有效态重金属 As、Cd 的含量; 1% 施炭处理在分蘖期、成熟期有效态 As 含量较对照分别降低 10.28%、7.69%, 有效态 Cd 分别降低 14.14%、11.82%。综上, 猪粪炭施用能够促进土壤肥力提升, 提高作物产量并降低土壤重金属风险, 其中 1% 施炭处理效果最佳。

关键词:猪粪炭; 土壤肥力; 水稻生长; 酶活性; 重金属

中图分类号:S511.06 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2024)05-0243-07

近年来, 随着经济的快速发展和居民消费水平的提高, 畜禽养殖业的生产规模不断扩大, 我国畜禽养殖业已由原来的分散型、小规模向集约化、大规模化方向发展, 这导致动物粪便的大量产生^[1]。据统计, 我国每年畜禽粪污产生量高达 38 亿 t, 给周边环境安全带来潜在的危害, 加剧农业面

源污染问题^[2]。研究表明, 畜禽粪便中含有植物生长需要的多种营养物质, 能够促进作物生产, 是化肥的有机替代品^[3]。然而, 在施用粪肥之后, 农田土壤和作物中可能出现重金属含量增加或超标等现象, 这对农业安全生产构成严重威胁^[4]。如何对畜禽粪便进行有效管理和利用, 已成为一个迫切需要解决的问题。

随着全球环境污染和能源危机的不断加剧, 畜禽粪便生物炭作为一种可再生、环保的废弃物资源, 如何对其进行循环利用, 已成为备受关注的课题。闫翠侠等通过土壤培养试验发现, 鸡粪生物炭有着较强的钝化效果, 可以显著降低 TCLP 提取态的 Pb、Cd 含量^[5]。孙雪等通过盆栽试验发现, 猪粪

收稿日期: 2023-05-08

基金项目: 国家自然科学基金(编号: 51708505); 浙江省重点研发计划(编号: 2020C01017); 舟山市科技计划(编号: 2021C31019)。

作者简介: 庄海峰(1984—), 男, 黑龙江牡丹江人, 博士, 副教授, 主要从事环境污染防治与废物资源化研究。E-mail: zhuanghaifeng1984@163.com。

通信作者: 傅建舟, 硕士, 高级工程师, 主要从事农业农村生态与能源技术推广应用工作。E-mail: fujz306@139.com。

[27] 钟晓兰, 周生路, 黄明丽, 等. 土壤重金属的形态分布特征及其影响因素[J]. 生态环境学报, 2009, 18(4): 1266–1273.

[28] 吴迪, 邓琴, 秦樊鑫, 等. 黔产红托竹荪基地土壤中重金属含量及其生态危害风险评价[J]. 土壤通报, 2013, 44(3): 719–722.

[29] 王妮, 尹显慧, 彭丽娟, 等. 辣椒炭疽病原鉴定及其杀菌剂毒力测定[J]. 植物保护, 2019, 45(4): 216–223.

[30] 曾令达, 黄颖, 曾海泉, 等. 不同提取方法对植物粗提物抑制荔枝霜疫霉效果的影响[J]. 广东农业科学, 2016, 43(8): 103–107.

[31] 孟祥春, 黄泽鹏, 凡超, 等. 茶树油粕中茶皂素的提取及其对果蔬采后致病菌的抑制作用[J]. 保鲜与加工, 2019, 19(3): 90–96.

[32] 李波. 镉胁迫下两个姬松茸品种生长及镉富集特性研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2016.

[33] 李春冬, 徐伟良, 郭梁. 食用菌对重金属吸附作用的研究进展[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(5): 23–27.

[34] Tuzen M, Sesli E, Soyak M. Trace element levels of mushroom species from East Black Sea region of Turkey[J]. Food Control, 2007, 18(7): 806–810.

炭可以显著提高土壤肥力和作物产量,说明畜禽粪便在经过热裂解炭化后用作肥料,是一种有效的废弃物处理和资源化利用的途径^[6]。猪粪炭的使用可以显著提高土壤 FDA 水解酶、脲酶、脱氢酶的活性,改善茶园土壤的酸碱环境和微生物活性,促进土壤的生物化学反应和养分元素循环,从而提高土壤的养分利用率和质量^[7]。合理使用生物质炭,不仅可以改善土壤微生物的栖息环境,还可以直接影响微生物代谢,同时增强土壤酶活性,从而实现土壤的修复和改良^[8]。

综上所述,将畜禽粪便热解后得到的生物炭应用于土壤中,有助于改善土壤质量,降低环境风险,是有效利用废弃资源的良好方式。目前,以畜禽粪便为原料的生物炭应用研究,多集中于生物炭理化结构对污染物的吸附以及盆栽试验对土壤的改良

效果。本研究通过大田试验,探究低温(350 ℃)制备猪粪炭的不同施加量(0.1%、2%、3%)对水稻生长不同阶段(分蘖期、成熟期)土壤的养分和酶活性的影响,同时评估作物增产效果及重金属污染风险,旨在为猪粪炭的资源化利用和农业可持续发展提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

试验地点位于浙江省舟山市定海区马岙街道三星社区(30°7'51"N,122°5'22"E)。该地区年平均气温 17.1 ℃,年均降水量 1 472.5 mm,日照时数 1 823.8 h,大风天 10.8 d,雾天 19.2 d,无霜期 336.5 d。研究土壤为壤土,其基本理化性质详见表 1。

表 1 试验土壤的基本理化性质

全氮含量 (g/kg)	全磷含量 (g/kg)	速效钾含量 (mg/kg)	有机质含量 (g/kg)	pH 值	容重 (g/cm ³)	总砷含量 (mg/kg)	总镉含量 (mg/kg)
1.22	0.92	101.21	23.12	6.01	1.27	6.75	0.39

1.2 试验材料及设计

试验共设计 4 个不同施炭量处理,分别为 0、1%、2%、3%,每个处理重复 3 次,共 12 个小区,每个小区面积 20 m²。试验采用的猪粪炭是在 350 ℃低温下制备而成的,其基本理化性质详见表 2,猪粪

炭的扫描电镜图像见图 1。2021 年 6 月 23 日,将猪粪炭与道尔水稻专用肥(300 kg/hm²)混合后作为基肥,与土壤表层混合均匀施入;随后在 7 月 2 日、25 日分别进行同等量的追肥。水稻品种为秀水 14。

表 2 猪粪炭的基本理化指标

比表面积 (m ² /g)	孔体积 (cm ³ /g)	C 含量 (%)	N 含量 (%)	P 含量 (%)	K 含量 (%)	pH 值	As 含量 (mg/kg)	Cd 含量 (mg/kg)
7.63	0.0133	37.13	2.4	2.29	3.99	8.08	2.82	0.45

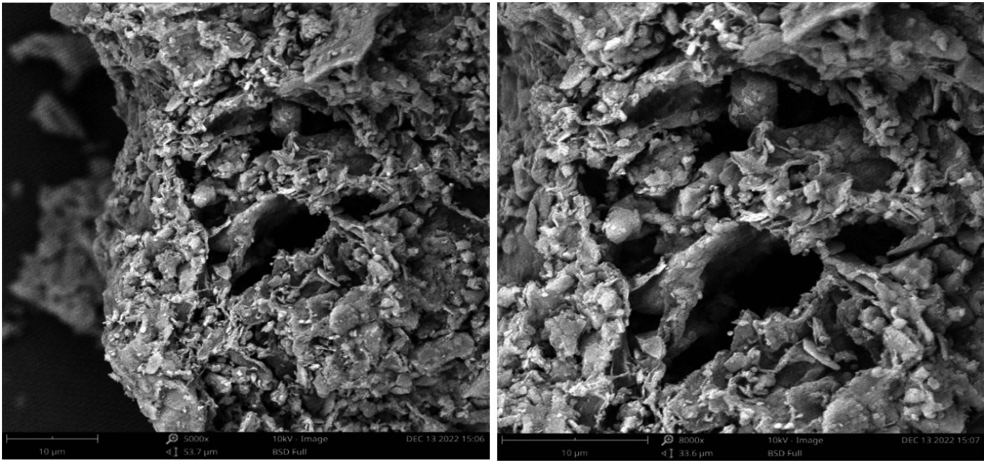


图1 350 ℃猪粪炭 SEM 分析

1.3 样品采集与分析方法

于 2021 年 7 月 20 日水稻分蘖期和 11 月 20 日成熟期,分别采集耕作层 0 ~ 20 cm 土壤,用“S”形采样法,每个小区采集 5 个样本混合均匀运回实验室,部分自然风干后,测定土壤各种指标数值。土壤理化性质参照《土壤农化分析》进行测定:pH 值采用电位法测定,土壤全氮含量采用凯式定氮法测定,全磷含量采用 NaOH 熔融 - 钼锑比色法测定,速效钾含量采用 NH₄OAc 浸提 - 火焰光度法测定,有机质含量采用硫酸 - 重铬酸钾外加热法测定^[9]。各小区土壤样品中的脲酶、蔗糖酶活性,分别采用靛酚比色法、3,5 - 二硝基水杨酸比色法测定^[10]。土壤有效态 Cd、As 含量,采用 DTPA 浸提、ICP - MS 方法测定^[9]。于 11 月 24 日收割不同小区的水稻,分别统计产量。每个小区取 3 穴水稻,穗节至穗顶(不连芒)的平均长度记作穗长;3 穴充实度在 1/3 以上的谷粒数及落粒数之和除以 3 穴总穗数,记作每穗粒数;每穗实粒数/每穗总粒数,记作结实率;在考种后完全晒干的实粒中,随机取 2 份 1 000 粒分别称质量(g),其差值不大于其平均值的 3%,取 2 个重复的平均值,记作千粒重^[11]。采用 Microsoft Excel 2016、Origin 2021、SPSS 26.0 软件,对试验数

据进行方差分析、均值的多重比较、相关性分析,显著性水平设为 $\alpha = 0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 施炭量对不同时期土壤理化性质的影响

由表 3 可知,施用猪粪炭能够显著改良土壤的理化性质,随着施炭量的增加,土壤容重逐渐降低,pH 值、饱和含水量呈上升趋势。在水稻成熟期,3% 施炭量处理的土壤容重较 CK 下降 3.9%,pH 值、饱和含水量分别增长 17.34%、42.73%。

猪粪炭作为一种优质的土壤改良材料,具有明显的 pH 值升高作用。其在高温裂解后含有大量钾、钙、镁等元素,这些元素多以氧化物、碳酸盐的形式存在于炭中。在与水接触时,这些元素会释放出来并呈现明显的碱性^[12]。由于其缓慢释放的特性,随着时间的推移,生物炭还能进一步提高土壤的 pH 值,是改良酸性土壤的优质材料。生物炭能够改善土壤的孔隙结构,降低土壤容重,增加土壤的孔隙度、饱和含水量,这是因为生物炭本身具有疏松多孔、比表面积大的特点^[13]。此外,生物炭还可以吸附并保持水分,进而提高土壤的渗透性和饱和含水量^[14]。

表 3 不同猪粪炭处理对土壤理化性质的影响

采样时期	施炭量	容重 (g/cm ³)	pH 值	饱和含水量 (%)
分蘖期	0(CK)	1.28 ± 0.03a	5.98 ± 0.12d	44.09 ± 0.89d
	1%	1.26 ± 0.01ab	6.47 ± 0.11c	54.24 ± 1.05c
	2%	1.25 ± 0.01b	6.71 ± 0.09b	59.55 ± 1.07b
	3%	1.24 ± 0.01b	6.88 ± 0.05a	61.73 ± 1.23a
成熟期	CK	1.28 ± 0.02a	5.94 ± 0.08d	42.43 ± 1.26c
	1%	1.26 ± 0.01b	6.55 ± 0.09c	55.41 ± 1.26b
	2%	1.25 ± 0.01b	6.75 ± 0.09b	57.47 ± 1.77ab
	3%	1.23 ± 0.02c	6.97 ± 0.06a	60.56 ± 1.51a

注:同列数据后不同小写字母表示各处理间差异显著($P < 0.05$),表 4 同。

2.2 施炭量对不同时期土壤肥力的影响

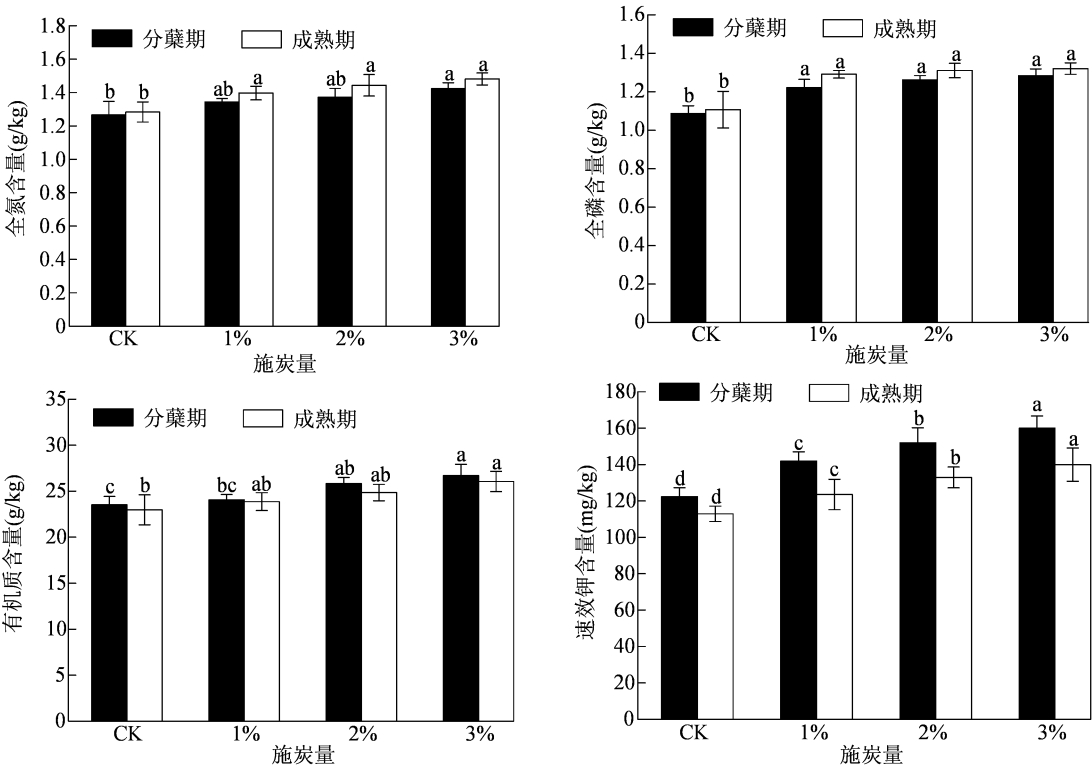
由图 2 可知,不同施炭量处理可以提高水稻分蘖期、成熟期土壤的全氮、全磷、速效钾、有机质含量。在 3% 施炭量处理中,分蘖期土壤的全氮、全磷、速效钾、有机质含量分别比对照提高 12.40%、18.14%、30.67%、11.98%;成熟期土壤的全氮、全磷、速效钾、有机质含量分别比对照提高 15.35%、18.91%、23.97%、11.85%。随着施炭量的增加,土壤的全氮、全磷、有机质含量有所提高,但多差异不显

著,而土壤中速效钾的含量则显著增加($P < 0.05$)。

施用猪粪炭可以显著提高土壤养分,并且随着时间的推移,提高幅度逐渐增加,因此它是一种良好的缓释肥料载体。生物质炭拥有丰富的孔隙结构和官能团、较高的比表面积以及芳香结构,这些性质赋予其强大的吸附能力,可以减少氮、磷、钾等营养元素的流失^[15]。此外,生物质炭本身就含有少量的氮、磷、钾元素,这些元素可能会被释放出来,从而促进土壤中营养物质含量的提高^[16]。值得注

意的是,施加生物炭可提高土壤养分,但施炭量过高导致土壤 pH 值过高,土壤中的有机质、速效钾含量过高,氮、磷含量过低,反而不利于作物的生长,

因此寻求土壤养分处于综合性最好的状态是必要且可行的^[17]。



柱上不同小写字母表示各处理间差异显著($P<0.05$)。图3、图5同
图2 猪粪炭施用后对土壤养分含量的变化

2.3 施炭量对水稻产量的影响

由表4可知,与CK相比,施用生物质炭可以提高水稻的产量、每穗实粒数、平均穗长、有效分蘖数;1%施炭量处理的增加效果最显著,比CK增产8.19%,每穗实粒数增加14.65%,平均穗长增加13.06%,有效分蘖数增加17.57%。然而,随着施炭量的增加,产量、结实率有显著下降趋势;与1%施炭量处理相比,3%施炭量处理产量下降6.83%,结实率下降10.49%,而千粒重在各处理之间没有显著差异。

研究表明,生物炭可以平均提高水稻产量5.6%,而且施用量与产量并不成正比^[18],本研究结

果与之基本一致。增加生物炭施用量未必能提高产量可能是因为:(1)C/N<9 会比高 C/N 比更明显地增加产量,而3%施炭量处理具有较高的 C/N 比,微生物在含碳量高的土壤中会消耗更多的氮、磷元素,促使稻田中氮、磷元素被微生物固定,造成植物所吸收的营养物质减少^[18]; (2)高施用量虽然可以有效提高土壤养分,但氮素生理利用率、农学利用率、氮素偏生产力均显著下降,这可能与高炭处理下“源库不协调”影响氮素养分向粒子的转运有关,导致过多的养分留存在茎鞘、叶片等营养器官中,造成植物对养分的过度吸收^[19-20]。

表4 不同施炭量处理对水稻产量、质量的影响

施炭量	产量 (kg/hm ²)	结实率 (%)	千粒重 (g)	每穗实粒数 (粒/穗)	平均穗长 (cm)	有效分蘖数 (个)
CK	7 505 ± 205b	91.83 ± 0.71a	26.93 ± 0.75a	110.40 ± 14.89a	13.47 ± 1.22b	13.89 ± 0.51b
1%	8 120 ± 145a	92.53 ± 0.79a	26.67 ± 0.32a	126.57 ± 17.31a	15.23 ± 1.36a	16.33 ± 0.58a
2%	7 890 ± 440ab	86.84 ± 3.09b	26.22 ± 0.38a	125.76 ± 13.13a	14.13 ± 0.65ab	15.89 ± 0.77a
3%	7 565 ± 105ab	82.82 ± 1.71c	26.00 ± 0.13a	123.19 ± 18.33a	14.83 ± 1.26ab	14.36 ± 0.97b

2.4 施炭量对不同时土壤酶活性的影响

如图 3 所示,猪粪炭能够提高水稻分蘖期土壤的脲酶活性,并随着施用量的增加,提升效果先增后减。1% 施炭量处理较 CK 组增长 15.92%,而 3% 施炭量处理增长 13.69%,不同施用量之间没有显著差异。随着施用量的增加,成熟期的提升效果同样先增后减,在 1% 处理下达到最大值,比 CK 增长 31.60%,各处理之间的差异显著。随着作用时间的延长,3% 施炭量处理下,成熟期土壤脲酶活性下降,但其他处理呈增长趋势,其中 1% 施炭量处理增幅最为明显,达到 13.11%。

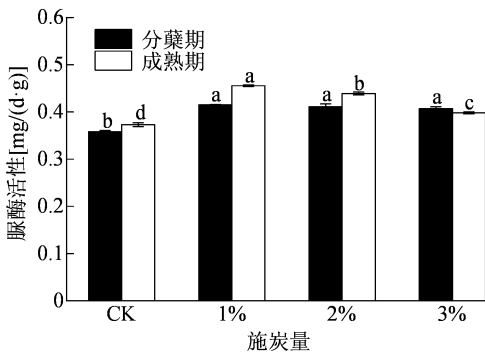
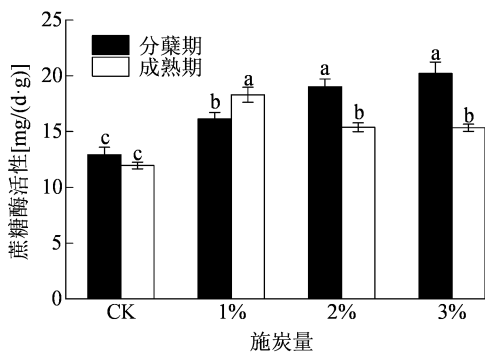


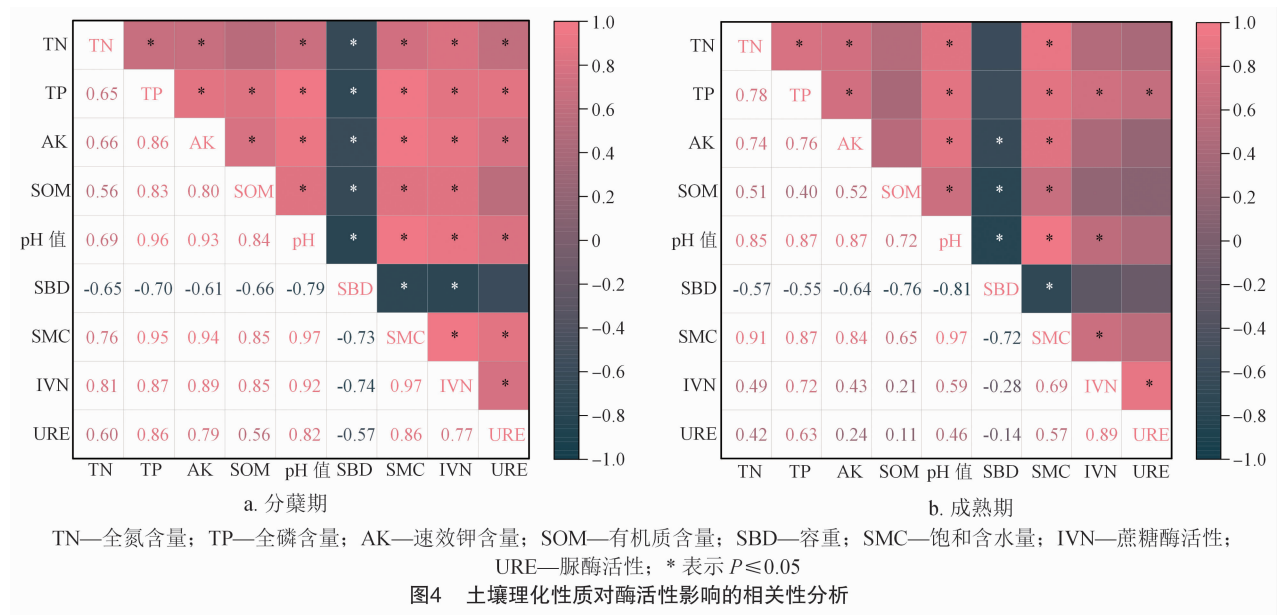
图3 猪粪炭施用后酶活性的变化

猪粪炭能够提高水稻分蘖期土壤蔗糖酶的含量,随着施用量的增加,提升效果增大,最大值出现在 3% 施炭量处理中,比 CK 增长 56.59%。随着施用量的增加,成熟期的提升效果呈先增后减,在 1% 施炭量处理下达到最大值,比 CK 增长 51.24%,且与 2%、3% 施炭量处理之间差异显著。不同处理下土壤蔗糖酶活性在分蘖期和成熟期均有所不同,随着作用时间的延长,在成熟期 2%、3% 施炭量处理的土壤蔗糖酶活性与分蘖期相比下降较大,分别为 19.09%、31.94%,但 1% 施炭量处理增长了 18.22%。



利用相关系数热图,研究不同施炭量对土壤理化性质的影响以及其对土壤酶活性的影响(图 4),土壤酶活性与土壤养分之间存在较强的相关性。土壤容重与土壤酶活性呈负相关,而其他土壤性质变量则与土壤酶活性呈正相关。总氮、总磷、有机

质含量与脲酶活性具有较高的相关性,而总磷含量、pH 值、饱和含水量与土壤蔗糖酶活性具有较高相关性。可见,施用猪粪炭导致多个土壤理化因素发生变化,从而影响土壤酶的活性。



生物炭的表面和孔隙为微生物提供栖息地,同时增加土壤基质中空气、水、养分的运动,有助于提高微生物的丰度和活动,从而显著提高土壤蔗糖酶和脲酶的活性^[21]。在成熟期,3%施炭量处理的脲酶活性显著低于其他2个施炭量处理,这可能是因为,生物炭随水分沿土壤剖面向下迁移的过程中,细粒子如粉粒、黏粒等填充了部分大孔隙,形成“闭合区域”,从而限制了生物炭的作用^[13]。此外,生物炭对酶底物有强烈的吸附作用,这会减少酶与底物的接触机会,从而抑制土壤脲酶的活性。同时,一些研究者发现,生物炭颗粒表面存在的环境持久性自由基(EPFRs)会对酶活性位点造成氧化损伤,导致其结构发生变化,从而降低或抑制脲酶的活性^[22]。随着生物炭施用量的增加,分蘖期土壤蔗糖酶的活性显著提高,这可能是因为施加生物炭后,增加了外源碳并提高了土壤微生物活性,从而促进了腐解作用,并补充了土壤养分,提高了土壤蔗糖酶的活性^[23]。随着时间的推移,2%、3%施炭量处理导致土壤蔗糖酶活性降低,这可能是因为过量的生物炭吸附了大量蔗糖酶分子,并对蔗糖酶的酶促

反应结合点形成了保护作用,从而阻止蔗糖酶酶促反应的进行^[13]。此外,生物炭中的金属离子 Cu、Zn、Cd、Ni 与蔗糖酶上游离的巯基(—SH)结合,酶的分子构象发生变化,最终导致酶的失活^[23]。因此,增加猪粪炭的施用量,反而降低了土壤蔗糖酶的活性。

2.5 施炭量对不同时期土壤重金属有效态的影响

如图5所示,猪粪炭可以降低水稻分蘖期和成熟期土壤中的有效态砷含量,而且随着施炭量的增加,下降幅度先增后减。其中,在1%施炭量处理下,分蘖期、成熟期土壤有效态砷含量分别下降10.28%、7.69%,下降幅度最为显著;此外,随着作用时间的延长,成熟期各处理土壤有效态砷含量相比分蘖期也呈下降趋势。猪粪炭可以降低水稻分蘖期、成熟期土壤中的有效态镉含量;其降低效果在1%处理时达到最大,分别下降14.14%、11.82%。此外,随着作用时间的延长,在各种处理中,成熟期土壤有效态镉含量相比分蘖期呈上升趋势。

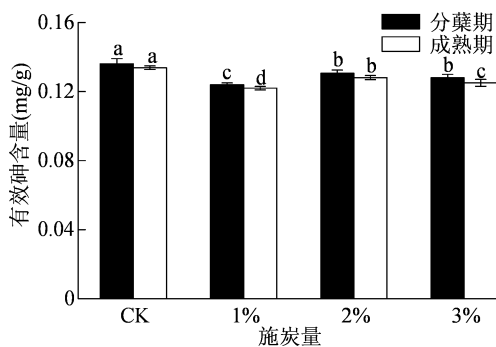
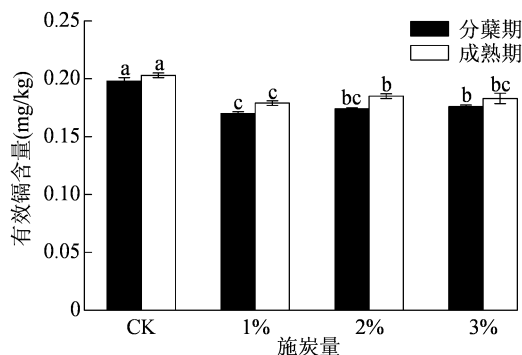


图5 猪粪炭施用量对不同时期土壤有效态重金属含量的影响



施用猪粪炭明显降低了水稻土壤中有有效态 As、Cd 的含量,这是因为生物质炭可以通过金属离子在其活性位点的静电吸附、生物质炭孔隙内表面的物理吸附以及与生物质炭所含元素形成共沉淀、与生物质炭表面官能团的络合等机制,来固定土壤中的重金属^[24]。但是,过量的生物炭添加会降低其有效态重金属吸附能力,其原因是生物炭添加量过高会导致在生物炭制备过程中大量无机盐离子和其他多余有机物质的残留,这些杂质会影响生物炭孔结构和表面的化学成分,进而影响其吸附能力,这与张艺腾等的研究结果^[25-26]一致。此外,添加量过高会导致生物炭粒子之间相互聚集,形成较大颗粒,从而影响生物炭的孔隙度和比表面积,降低其吸附

能力。当生物炭添加过多时,可能会发生饱和吸附,即生物炭的表面积被重金属离子完全覆盖,导致生物炭的吸附容量达到饱和状态。有效态 Cd 在土壤中的含量随着作用时间的延长而出现上升趋势可能是由于水稻生长根系分泌有机酸促进根际土壤有效 Cd 含量的增加。有效态 As 在土壤含量随着作用时间延长而降低,可能是由于生物质炭的吸附作用,以及在成熟期稻田水基本排干,氧化还原电位大幅升高,抑制 As 的解析。

3 结论

猪粪炭能够显著改善土壤理化性质并提高土壤养分含量。施加不同量的猪粪炭,对水稻产量各

指标的影响不同,其中 1% 施炭量处理的效果最好,相较于 CK 组,水稻增产 8.19%、每穗实粒数增长 14.65%、平均穗长增长 13.06%、有效分蘖数增长 17.57%;而随着施用量的增加,结实率呈下降趋势,其中 3% 施炭量处理对结实率的影响最大,较 CK 组下降 9.81%。

猪粪炭能够显著提高土壤酶活性并降低土壤重金属的有效性,其中 1% 施炭量处理的效果最佳。1 年生长周期后,与 CK 相比,脲酶活性增长 31.60%,蔗糖酶活性增长 51.24%;As、Cd 等重金属的有效态含量分别降低 7.69%、11.82%。

采用低施炭量的方式可以减少对土地和环境的污染,同时节约成本和资源。综上所述,本研究结果表明,施用 1% 的 350 ℃ 猪粪炭,可以有效提升土壤肥力、增加酶活性和作物产量,同时大幅消减重金属有效性,具有良好的实际应用。

参考文献:

- [1] 孙 雪. 鸡粪和猪粪生物质炭对土壤肥效及小白菜产量与品质的影响[D]. 南京:南京农业大学,2016:11-12.
- [2] 吴浩玮,孙小淇,梁博文,等. 我国畜禽粪便污染现状及处理与资源化利用分析[J]. 农业环境科学学报,2020,39(6):1168-1176.
- [3] Du L S, Zhu Z K, Qi Y T, et al. Effects of different stoichiometric ratios on mineralisation of root exudates and its priming effect in paddy soil[J]. Science of the Total Environment, 2020, 743: 140808.
- [4] Li F Y, Wu X, Ji W C, et al. Effects of pyrolysis temperature on properties of swine manure biochar and its environmental risks of heavy metals[J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2020, 152:104945.
- [5] 闫翠侠,贾宏涛,孙 涛,等. 鸡粪生物炭表征及其对水和土壤镉铅的修复效果[J]. 农业工程学报,2019,35(13):225-233.
- [6] 孙 雪,刘琪琪,郭 虎,等. 猪粪生物炭对土壤肥效及小白菜生长的影响[J]. 农业环境科学学报,2016,35(9):1756-1763.
- [7] 何莉莉,黄佳佳,刘玉学,等. 猪粪炭对茶园土壤硝化过程及微生物酶活性的影响[J]. 农业环境科学学报,2020,39(12):2824-2832.
- [8] Zhu X M, Chen B L, Zhu L Z, et al. Effects and mechanisms of biochar-microbe interactions in soil improvement and pollution remediation: a review[J]. Environmental Pollution, 2017, 227:98-115.
- [9] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京:中国农业出版社,2000:25-241.
- [10] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京:农业出版社,1986:

274-339.

- [11] 石建尧,杨长登. 浙江省常规晚粳(糯)稻品种的主要农艺性状和发展趋势分析[J]. 浙江农业学报,2012,24(2):197-201.
- [12] Yip K, Tian F J, Hayashi J I, et al. Effect of alkali and alkaline earth metallic species on biochar reactivity and syngas compositions during steam gasification[J]. Energy & Fuels, 2010, 24(1):173-181.
- [13] 郭碧林,陈效民,景 峰,等. 施用生物炭对红壤性水稻土重金金属钝化与土壤肥力的影响[J]. 水土保持学报,2019,33(3):298-304.
- [14] Novak J, Lima I, Gaskin J, et al. Characterization of designer biochar produced at different temperatures and their effects on a loamy sand[J]. Annals of Environmental Science, 2009, 3:195-206.
- [15] Dong D, Wang C, van Zwieten L, et al. An effective biochar-based slow-release fertilizer for reducing nitrogen loss in paddy fields[J]. Journal of Soils and Sediments, 2020, 20(8):3027-3040.
- [16] Kätterer T, Roobroeck D, Andrén O, et al. Biochar addition persistently increased soil fertility and yields in maize-soybean rotations over 10 years in sub-humid regions of Kenya[J]. Field Crops Research, 2019, 235:18-26.
- [17] 魏永霞,石国新,冯 超,等. 黑土区施加生物炭对土壤综合肥力与大豆生长的影响[J]. 农业机械学报,2020,51(5):285-294.
- [18] Liu X Y, Zhang A F, Ji C Y, et al. Biochar's effect on crop productivity and the dependence on experimental conditions—A meta-analysis of literature data[J]. Plant and Soil, 2013, 373(1):583-594.
- [19] 王 艳,易 军,高继平,等. 不同叶龄蘖、穗氮肥组对梗稻产量及氮素利用的影响[J]. 作物学报,2020,46(1):102-116.
- [20] 何大卫,赵艳泽,高继平,等. 生物炭和氮肥配施对梗稻产量形成、氮肥当季效应及其后效的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2021, 27(12):2114-2124.
- [21] Gul S, Whalen J K, Thomas B W, et al. Physico-chemical properties and microbial responses in biochar-amended soils: mechanisms and future directions[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2015, 206:46-59.
- [22] 李博文. 污泥生物炭中溶解性有机质的溶出及其对土壤酸性磷酸酶活性的影响[D]. 昆明:昆明理工大学,2021:1-2.
- [23] 袁 访,李开钰,杨 慧,等. 生物炭施用对黄壤土壤养分及酶活性的影响[J]. 环境科学,2022,43(9):4655-4661.
- [24] 李 璐. 热裂解炭化温度对小麦秸秆生物质炭理化性质及其可溶性组分生物活性的影响[D]. 南京:南京农业大学,2018:60-61.
- [25] 张艺腾. 在不同条件下添加优良鸡粪生物炭对土壤化学特性的影响研究[D]. 长春:吉林农业大学,2018:37-38.
- [26] 彭红宇,刘红恩,王秋红,等. 低温生物炭和化肥配施对冬小麦生长和土壤铅镉生物有效性的影响[J]. 江苏农业科学,2023, 51(4):212-219.