

张 艺,赵 远,张玉虎,等. 生物炭及炭基缓释肥对土壤酶活性的影响[J]. 江苏农业科学,2019,47(14):321–326.
doi:10.15889/j.issn.1002–1302.2019.14.073

生物炭及炭基缓释肥对土壤酶活性的影响

张 艺¹, 赵 远¹, 张玉虎², 胡 茜¹, 荆玉琳², 符 菁¹, 王艺璇¹, 杨建红¹

(1. 常州大学环境与安全工程学院, 江苏常州 213164; 2. 首都师范大学, 北京 100037)

摘要:选取 3 种秸秆(玉米、小麦、水稻)生物炭及炭基缓释肥为试验材料对土壤相关酶活性的动态变化进行分析,设计未施加生物炭(CK)、500 ℃小麦生物炭(WBC)、500 ℃玉米生物炭(CBC)、300 ℃水稻生物炭(NBC₃)、500 ℃水稻生物炭(NBC₅)、700 ℃水稻生物炭(NBC₇)和炭基缓释肥(CN)7 个处理。结果表明,在同等养分条件下,施加生物炭和炭基缓释肥均能提高本研究中土壤酶活性。通过研究水稻生长时期各处理对酶活的影响发现,单一酶的最佳处理分别为 NBC₃、NBC₅、NBC₅、NBC₅、NBC₅、WBC;同时 NBC₅ 处理土壤总体酶活性参数 E_t 值最高,其次分别为 WBC、CBC、NBC₇、CN、NBC₃ 处理,较 CK 处理分别提高 19.81%、16.63%、13.59%、10.54%、9.09% 和 9.03%,土壤总体酶活性参数完善了单一酶活性反映的片面性。因此,NBC₅ 处理表现明显提高土壤酶活性的优势。

关键词:生物炭;炭基缓释肥;土壤酶活性

中图分类号:S154 **文献标志码:**A **文章编号:**1002–1302(2019)14–0321–06

近年来,农业逐渐成为我国的国民基础产业,我国每年粮食产量约 9 亿 t,其中秸秆总量高达 7 亿 t^[1],但秸秆利用率仅达到 33.3%。由于国家的快速发展,农村劳动力逐渐减少,导致大部分秸秆被废弃或直接烧掉,这不仅浪费资源,还对环境造成了严重的污染^[2]。

生物炭(BC)是由生物质在完全或部分缺氧的情况下经过热解炭化产生的一类高度芳香化难溶性固态物质^[3],多为粉状颗粒^[4]。由于生物炭具有发达的多孔结构和较大的比表面积^[5],施入土壤后能够改善土壤理化性质^[6],增加土壤微生物数量和酶活性^[7],因而能够促进土壤多种元素的循环。生物炭可以改善重金属污染土壤^[8],减少 CH₄、CO₂ 和 NO₂ 温室气体的排放^[9–11],同时增加土壤碳库储量,将碳封存在土壤中,有效地减少 CO₂ 的释放量。土壤微生物是土壤碳库中最为活跃的组分,对环境的变化最为敏感,而土壤酶活性可反映土壤微生物的活性^[12]。土壤酶是由微生物和动植物活体及其残骸分解释放到土壤中的一类参与循环反应的催化剂^[13],其活性可反映土壤中生物化学反应活跃程度和养分物质循环状况等^[14],是土壤质量的潜在敏感指标和评价土壤肥力的重要参数之一^[15]。目前的研究表明,生物炭的施用能提高与 N、P 等矿质元素利用相关的土壤酶活性^[16],而抑制参与土壤矿化等生态学过程的土壤酶活性^[17]。近年来,国内外学者对土壤酶进行相关研究,Oleszczuk 等的研究表明,向

灰化土中添加麦秆生物炭能够提高土壤脱氢酶、蛋白酶、碱性磷酸酶活性^[18];谷思玉等的研究表明,在大豆种植前施加玉米秸秆生物炭,提高了土壤中蔗糖酶、过氧化氢酶、脲酶的活性^[19]。目前,关于施肥和秸秆还田等对土壤酶活性影响的研究已有较多报道,但关于生物炭及炭基缓释肥对作物生长时期土壤酶活性影响的研究相对较少。因此,本研究采用大田试验探讨不同秸秆生物炭及炭基缓释肥对土壤酶活性的影响,以期为深入研究生物炭在土壤中的综合作用提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 供试土壤 研究区位于江苏省丹阳市珥陵镇德木桥村(119°35′27.47″E,31°51′53.64″N),海拔 6 m,属于亚热带季风气候,年平均降水量约 1 056 mm,年平均温度约 15 ℃。土壤类型为淹育水稻土,其基本理化性质为有机碳含量 8.99 g/kg,全氮含量 1.31 g/kg,全磷含量 0.42 g/kg,速效钾含量 84.41 mg/kg,有效磷含量 91.25 mg/kg,阳离子交换量(CEC)15.4 cmol/kg,容重 1.16 g/cm³,pH 值 5.85。

1.1.2 供试生物炭和炭基缓释肥 采用 3 种生物炭进行试验,其中小麦、玉米秸秆生物炭(制备温度为 300 ℃)均购自南京勤丰秸秆科技有限公司;水稻秸秆生物炭在实验室利用马弗炉制备,通过预试验再委托企业加工。炭基缓释肥由制备的水稻秸秆生物炭通过工厂配施一定肥料制备而成。

1.1.3 供试作物 所用水稻品种为江苏省农业科学院粮食作物研究所培育的南粳 5055。

1.2 试验设计

试验于 2017 年 5—11 月在江苏省南部丹阳市大田中进行,由于生物炭原料和热解温度是影响土壤酶活性的重要因素,因此设 7 个处理,即未施用生物炭(CK)、施用小麦秸秆生物炭(WBC)、施用玉米秸秆生物炭(CBC)、施用 300 ℃水稻秸秆生物炭(NBC₃)、施用 700 ℃水稻秸秆生物炭(NBC₇)、施

收稿日期:2018–03–31

基金项目:国家科技支撑计划(编号:2015BAC02B02–01);江苏省常州市科技支撑计划(社会发展)(编号:CE20175060);江苏省重点研发专项资金(社会发展)(编号:BE2015670)。

作者简介:张 艺(1994—),男,重庆人,硕士研究生,主要从事土壤污染修复技术研究。E-mail:964734250@qq.com。

通信作者:赵 远,博士,研究员,主要从事土壤污染修复技术和环境生态毒理研究。E-mail:zhaoyuan@cczu.edu.cn。

用 500 ℃ 水稻秸秆生物炭 (NBC₅) 和施用炭基缓释肥 (CN), 各生物炭的基本理化性质见表 1。每块田面积大致相当, 水稻所需氮、磷、钾等营养元素分别由尿素、普通过磷酸钙和氯化钾提供。按照基肥 - 分蘖肥 - 穗肥施肥, 基肥 N、P₂O₅、K₂O 用量分别为 72、75、72 kg/hm², 分蘖肥 N 用量为 56 kg/hm², 穗肥 N、K₂O 用量分别为 50、30 kg/hm²。生物炭

施用量为 3% (10 t/hm²), 炭基缓释肥用量为 450 kg/hm², 不作其他肥施入。种植前将生物炭均匀撒入田中, 翻耕土壤, 30 d 后即可种植水稻。作物生长期统一管理, 在 1 d (返青期)、8 d (分蘖前期)、22 d (分蘖中期)、33 d (分蘖后期)、44 d (拔节期)、90 d (抽穗期)、136 d (收获期) 时采集土样, 测定土壤酶活性。

表 1 生物炭及炭基缓释肥的基本理化性质

生物炭种类	碳含量 (%)	氢含量 (%)	氮含量 (%)	氧含量 (%)	pH 值	灰分含量 (%)	挥发性成分含量 (%)	比表面积 (m ² /g)
WBC	63.45	2.36	0.94	33.41	11.6	29.87	22.53	219.12
CBC	66.13	2.84	1.08	37.66	11.4	31.75	23.42	226.07
NBC ₃	55.70	3.26	1.40	39.62	9.5	25.83	37.60	5.81
NBC ₇	68.73	1.33	0.35	29.59	12.8	33.72	12.84	184.80
NBC ₅	64.29	2.12	0.86	32.73	12.3	30.26	21.48	216.40
CN	59.42	3.01	0.91	38.25	11.2	27.16	15.29	152.49

1.3 土样采集及测定方法

每块大田采用 5 点法采集表层 0 ~ 20 cm 土壤样品, 剔除石砾和残渣后将土样充分混合, 装袋并按次序编号贴上标签, 风干过筛 (2 mm) 后备用。

酶活性的测定: 碱性磷酸酶催化水解对硝基苯磷酸二钠 (p-NPP), 产生具有稳定性质的黄色对硝基苯酚 (PNP), 通过比色法测定 PNP 的量^[20], 以 1 g 土 1 h 后产生的 PNP 量表示磷酸酶活性; 脲酶活性采用苯酚钠 - 次氯酸钠比色法测定, 以 1 g 土 24 h 后产生的 NH₃ - N 量表示^[21]; 蔗糖酶、纤维素酶活性采用 3,5 - 二硝基水杨酸比色法测定, 分别以 1 g 土

24、72 h 后产生的葡萄糖量表示; 荧光素二乙酸酯 (FDA) 水解酶采用荧光素比色法测定^[22-23], 以 1 g 土 1 h 后产生的荧光素量表示。

1.4 土壤总体酶活性

在对土壤酶研究的基础上, 和文祥等认为单一酶活性反映的信息并不全面, 无法涵盖整体酶的信息, 于是提出一个土壤总体酶活性参数 E_t ^[24], 本研究在此基础进行改进。计算过程为: 采用每个时期土样酶活性的平均值为参比, 分别计算各土样酶活性的相对值, 然后累加即为该时期各土样的总体酶活性指标, 其公式为

$$E_t = \frac{\sum_{i=1}^n X_i / \bar{X} + \sum_{j=1}^n X_j / \bar{X} + \sum_{k=1}^n X_k / \bar{X} + \sum_{l=1}^n X_l / \bar{X} + \sum_{m=1}^n X_m / \bar{X} + \sum_{o=1}^n X_o / \bar{X} + \sum_{p=1}^n X_p / \bar{X}}{7}$$

式中: X_i 、 X_j 、 X_k 、 X_l 、 X_m 、 X_o 、 X_p 分别表示水稻各时期土壤酶活性; \bar{X} 为同种酶活性平均值 [碱性磷酸酶和 FDA 水解酶活性单位为 $\mu\text{g}/(\text{g} \cdot \text{h})$; 脲酶活性单位为 $\mu\text{g}/(\text{g} \cdot 24 \text{ h})$; 蔗糖酶活性单位为 $\text{mg}/(\text{g} \cdot 24 \text{ h})$; 纤维素酶活性单位为 $\mu\text{g}/(\text{g} \cdot 72 \text{ h})$]。 E_t 的物理意义为: 定量指示供试土样中土壤总体酶活性的大小^[25]。

1.5 数据处理

采用 Excel 2010 和 SPSS 19.0 软件对数据进行整理作图和单因素方差分析, Duncan's 法检验差异显著性, 显著性水平设为 0.05。

2 结果与分析

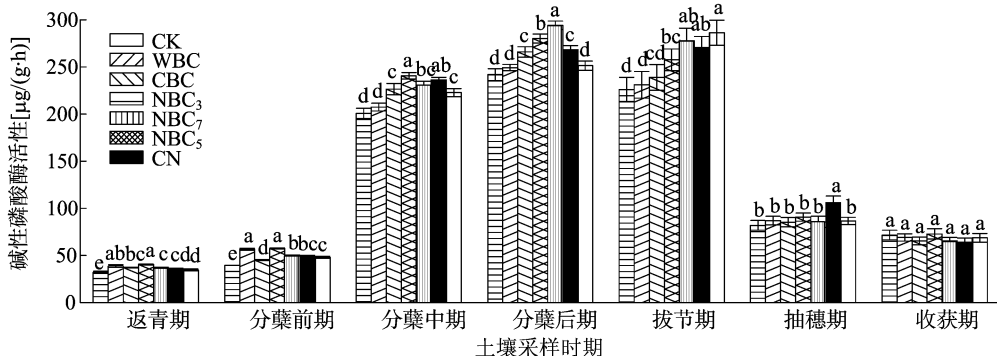
2.1 生物炭及炭基缓释肥对碱性磷酸酶活性的影响

从图 1 可以看出, 在水稻整个生长时期, 土壤碱性磷酸酶活性表现为先升高后降低的变化趋势, 并在分蘖后期达到峰值, 但各处理提高效果不同。在返青期和分蘖前期, 经过 BC、CN 处理的土壤碱性磷酸酶活性显著高于 CK 处理 ($P < 0.05$), 分别提高了 7.75% ~ 25.86% 和 13.63% ~ 45.08%, 其中 NBC₃ 处理酶活性最高; 通过比较 BC 处理和 CN 处理发现, 仅在分蘖前期 CBC 处理显著低于 CN 处理。分蘖中期、分蘖后期、拔节期相较于 CK 处理分别提高了 3.31% ~ 19.86%、3.09% ~ 21.64%、2.20% ~ 26.64%; 其中在拔节期 CN 处理碱性磷酸酶活性显著高于 WBC、CBC、NBC₃ 处理。

在抽穗期仅 NBC₅ 处理碱性磷酸酶活性显著高于 CK 处理, 其他 6 个处理之间差异均不显著, 在收获期各处理间碱性磷酸酶活性无显著差异, 这可能是由于磷素水平的季节波动。从返青期至收获期各时期碱性磷酸酶活性最高的处理分别是 NBC₃、NBC₃、NBC₃、NBC₇、CN、NBC₅、NBC₃ 处理, 较 CK 处理分别提高了 25.86%、45.08%、19.86%、21.64%、26.64%、29.37%、1.75%, 表明生物炭和炭基缓释肥的施用可以提高水稻土壤碱性磷酸酶活性, 其中 NBC₃ 处理效果较好, 而且生物炭效果总体优于炭基缓释肥。

2.2 生物炭及炭基缓释肥对脲酶活性的影响

从图 2 可以看出, 在水稻生长时期土壤脲酶活性变化趋势与碱性磷酸酶大体一致, 但是其在拔节期达到峰值。从返青期至分蘖前期, 土壤脲酶活性缓慢增长, BC 处理脲酶活性普遍显著高于 CK 和 CN 处理 ($P < 0.05$), 分别在 NBC₃ 和 NBC₅ 处理下达到最高值, CN 较 CK 处理从无显著性到显著提高。从分蘖中期到收获期, BC、CN 处理脲酶活性高于 CK 处理, 其中在分蘖中期 WBC、NBC₇、NBC₅ 处理脲酶活性显著高于 CK 处理, 分别提高了 21.88%、17.89%、57.66%, 仅 NBC₅ 处理显著高于 CN 处理; 分蘖后期和收获期各 BC 处理的脲酶活性均显著高于 CK 处理, 分别提高 5.03% ~ 50.35% 和 27.31% ~ 47.78%, 在分蘖后期 CN 处理脲酶活性低于 BC 处理; 在拔节期 NBC₅ 处理较 CK、CN 处理脲酶活性分别显著提高了 10.17%、8.11%, 而在抽穗期、收获期 CN 处理的脲酶



柱上不同小写字母表示同一时期不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。下图同

图1 生物炭及炭基缓释肥对土壤碱性磷酸酶活性的影响

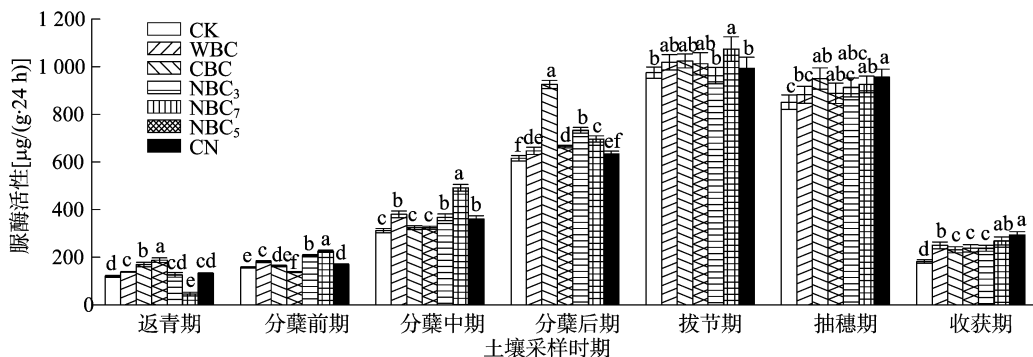


图2 生物炭及炭基缓释肥对土壤脲酶活性的影响

活性高于 BC、CK 处理,这可能是由于炭基缓释肥具有良好的保肥能力,使得土壤在水稻生长末期仍具有高脲酶活性。从返青期至收获期各时期脲酶活性最高的处理分别是 NBC₃、NBC₅、NBC₅、CBC、NBC₅、CN、CN 处理,较 CK 处理分别提高了 56.99%、43.48%、57.65%、50.35%、10.17%、12.38%、61.43%,说明生物炭和炭基缓释肥可对土壤脲酶活性起促进作用。

2.3 生物炭及炭基缓释肥对蔗糖酶活性的影响

从图 3 可以看出,从返青期到收获期所有处理蔗糖酶活性均表现为先升高后降低的趋势,并在分蘖后期达到峰值。在返青期 WBC、NBC₇、NBC₅ 处理脲酶活性较 CK 处理提高了 9.35%、3.32%、15.22%,而 CN 处理低于 CK、BC 处理。从分蘖前期到分蘖后期,BC、CN 处理的蔗糖酶活性有高于 CK 处理的趋势,土壤有机碳 (SOC) 和可溶性有机碳 (DOC) 含量增加带来较高水平的土壤蔗糖酶活性,其中在分蘖前期

CBC、NBC₇、NBC₅、CN 处理较 CK 处理分别显著提高了 13.27%、14.81%、24.00%、15.84%,NBC₅ 处理较 CN 处理显著提高 7.04%;在分蘖中期和分蘖后期 WBC、CBC、NBC₅ 处理较 CK 处理分别显著提高了 25.59%、14.18%、11.90% 和 25.51%、35.97%、19.62%;CN 处理蔗糖酶活性在分蘖中期低于 WBC、CBC、NBC₅ 处理,但在分蘖后期仅低于 CBC 处理。从拔节期到收获期,BC 处理蔗糖酶活性普遍高于 CN、CK 处理,除拔节期 NBC₅ 处理较 CK 处理显著提高 34.49% 外,其他处理间差异均达不到显著水平。从返青期至收获期各时期蔗糖酶活性最高的处理分别是 NBC₅、NBC₅、WBC、CBC、NBC₅、CBC、NBC₅ 处理,较 CK 处理分别提高了 15.22%、24.00%、25.59%、35.97%、34.49%、11.75%、14.92%,说明施加生物炭可以有效提高土壤蔗糖酶活性,其中 NBC₅ 处理在多个采样时期表现良好效果。

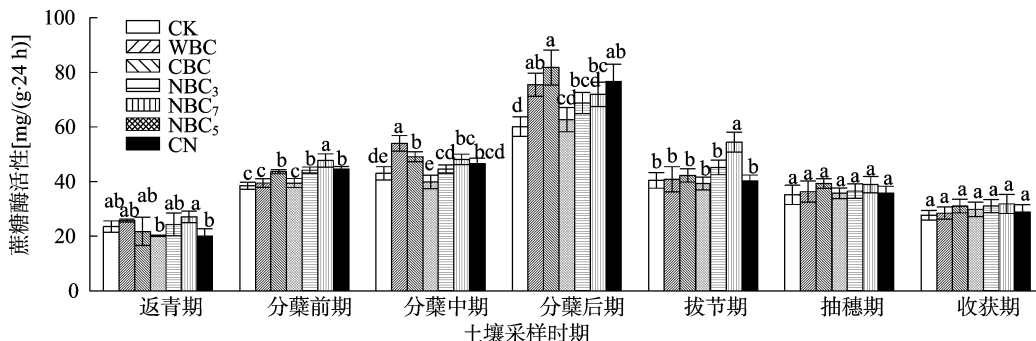


图3 生物炭及炭基缓释肥对土壤蔗糖酶活性的影响

2.4 生物炭及炭基缓释肥对 FDA 水解酶活性的影响

从图 4 可以看出,各处理土壤 FDA 水解酶活性整体呈现缓慢增长的趋势,在分蘖后期达到峰值,之后逐渐降低。在返青期和分蘖中期 BC 处理的 FDA 水解酶活性显著高于 CK、CN 处理,分别较 CK 处理提高了 26.42% ~ 31.70% 和 21.15% ~ 65.71%。可能是由于施入生物炭后水稻在返青期微生物变化快,而 FDA 水解酶通常反映土壤总微生物的活性,随着水稻进入分蘖期,土壤微生物快速生长,对土壤酶活性影响显著。在分蘖前期仅 NBC₅ 处理 FDA 水解酶活性较 CK 处理显著提高了 27.91%,在抽穗期 WBC、CBC 处理 FDA 水解酶活性较 CK 处理显著提高了 18.98%、32.86%,而其他

处理与 CK 处理无显著差异;虽然从返青期到收获期 CN 处理 FDA 水解酶活性均与 CK 处理无显著差异,但是分别提高了 7.17%、8.28%、6.41%、2.14%、0%、3.40%、9.00%。BC 处理的 FDA 水解酶活性仅在收获期低于 CN 处理,在返青期和分蘖中期 BC 处理较 CN 处理分别显著提高了 17.96% ~ 22.89% 和 13.86% ~ 55.72%。从返青期到收获期各时期 FDA 水解酶活性最高的处理分别是 NBC₇、NBC₅、NBC₃、NBC₅、WBC、CBC、CN 处理,较 CK 处理分别提高了 31.70%、27.91%、65.71%、19.02%、11.58%、32.86%、9.00%,说明各个时期施用生物炭和炭基缓释肥对土壤 FDA 水解酶活性有促进效果。

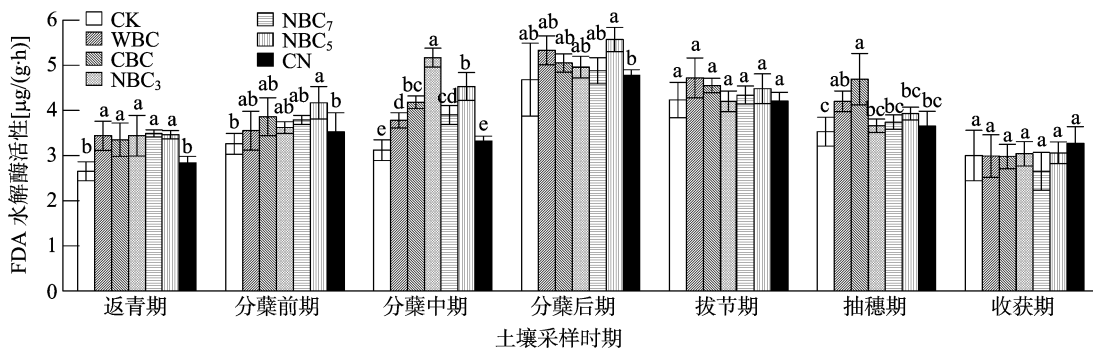


图4 生物炭及炭基缓释肥对土壤 FDA 水解酶活性的影响

2.5 生物炭及炭基缓释肥对纤维素酶活性的影响

从图 5 可以看出,添加生物炭和炭基缓释肥后土壤纤维素酶活性变化复杂,大致变化趋势为先降低后升高再降低。在返青期时,BC、CN 处理的纤维素酶活性相较于 CK 处理提高了 0% ~ 27.01%,其中 CBC、NBC₇、NBC₅ 处理显著提高了 19.64%、22.08%、27.01%。从分蘖前期到分蘖后期,各处理(除分蘖前期 CBC 处理)的纤维素酶活性变化趋势与返青期保持一致,相较于 CK 处理,分别提高了 3.72% ~ 52.17%、10.45% ~ 62.55% 和 8.04% ~ 22.09%,其中 NBC₅ 处理均最高。随着水稻生长至拔节期,土壤纤维素酶活性达到最高

值,表现为 WBC 处理 > CBC 处理 > NBC₅ 处理 > NBC₇ 处理 > NBC₃ 处理 > CN 处理 > CK 处理。在抽穗期和收获期 NBC₃、NBC₇ 处理纤维素酶活性均低于 CK 处理,仅 WBC 处理分别显著提高了 53.19% 和 26.65%。在拔节期除 NBC₃ 处理外,均显著低于 BC 处理。从返青期至收获期各时期纤维素酶活性最高的处理分别是 NBC₅、NBC₅、NBC₅、NBC₅、WBC、WBC 和 WBC 处理,较 CK 处理分别提高了 27.01%、52.17%、62.55%、22.09%、103.75%、53.19% 和 26.65%,说明施加生物炭土壤纤维素酶活性整体优于 CK、CN 处理。

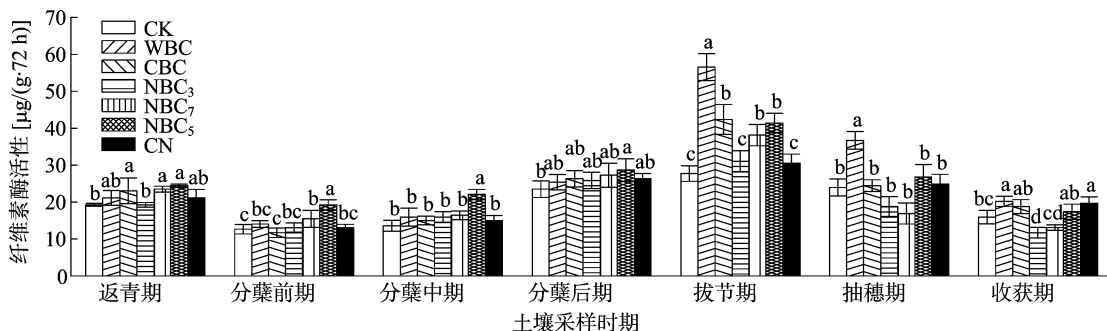


图5 生物炭及炭基缓释肥对土壤纤维素酶活性的影响

2.6 土壤总体酶活性指标

本研究引进一个新的土壤总体酶活性评价参数 E_t 对 5 种酶活性的整体水平进行分析,进一步验证各处理对土壤酶活性的影响。

由表 2 可知,NBC₅ 处理的土壤总体酶活性参数最大,其次由大到小依次为 WBC、CBC、NBC₇、CN、NBC₃ 处理,分别较 CK 处理提高了 19.81%、16.63%、13.59%、10.54%、

9.09%、9.03%,这与前述结果类似,NBC₅ 处理在水稻生长期对多个酶活性表现出良好的效果,因此土壤总体酶活性参数更加全面地说明了各处理对土壤酶活性的影响。

3 讨论

土壤酶作为土壤组分中最活跃的有机成分之一,参与土壤中各种化学反应和生物化学过程,不仅可以表征土壤物质

表 2 土壤总体酶活性参数

处理	总体酶活性参数
CK	4.497
WBC	5.245
CBC	5.108
NBC ₃	4.903
NBC ₇	4.971
NBC ₅	5.388
CN	4.906

能量代谢旺盛程度,还可以作为评价土壤肥力高低的一个重要生物指标。

3.1 生物炭和炭基缓释肥对土壤酶活性的影响

碱性磷酸酶是一种水解酶,能加快有机磷降解为无机磷的速度,提高土壤磷素有效性和有效磷的含量,其活性高低直接影响土壤中有有机磷的分解转化和生物有效性,同时也是评价土壤磷素生物转化方向与强度的指标^[26]。张继旭等在植烟土壤中添加生物炭,结果发现,生物炭对磷酸酶活性有一定程度的促进作用^[27]。本研究对水稻生长期的土壤碱性磷酸酶活性进行比较发现,仅在收获期时,BC、CN 处理表现为对土壤碱性磷酸酶活性的抑制,其他时期表现为促进作用,说明施用生物炭和炭基缓释肥能提高土壤碱性磷酸酶活性,这与黄剑的研究结论^[28]一致。此外在水稻生长中期(分蘖中期至拔节期)碱性磷酸酶活性增幅明显,这可能是因为水稻生长旺盛对生物炭具有刺激作用,且该时期土壤对磷的需求加剧。

脲酶催化尿素水解生成氨、CO₂ 和 H₂O,其活性可以用来表征土壤中有有机氮的转化情况。它主要通过对土壤有机质中肽键的水解来提高有机氮的转化^[29]。刘淑英将秸秆施入西北干旱土壤中,结果发现,该土壤的脲酶活性显著增加^[30]。本研究结果表明,BC、CN 处理能显著提高土壤脲酶活性,这与周震峰等的研究结果^[13]一致。但在返青期 NBC₅ 处理和分蘖前期 NBC₃ 处理脲酶活性低于 CK 处理,这可能是因为该种生物炭对酶底物的吸附作用阻止了酶活性位点与底物结合,从而抑制了酶活性。

蔗糖酶别称转化酶,通过水解蔗糖为微生物提供能量,参与土壤有机质的矿化与分解,对增加土壤中易溶性营养物质起着重要的作用。李娜等通过田间微区试验发现,生物炭与秸秆还田可提高蔗糖酶和蛋白酶活性^[31]。本研究结果表明,BC、CN 处理蔗糖酶活性普遍较 CK 处理提高,但是在返青期部分施加生物炭处理蔗糖酶活性低于 CK 处理,特别是 NBC₃ 处理在分蘖中期和拔节期出现同样结果,这与赵军的研究结果^[32]相似,但其研究发现,CK 处理在拔节期和收获期蔗糖酶活性高于施加生物炭和炭基缓释肥处理,与本研究结果不一致,这可能与作物种类、土壤环境、施肥管理有关。

FDA 水解酶可以被土壤中多种酶催化水解,发生酶促反应,生成相对稳定的荧光素,其可反映微生物活性和土壤质量^[22]。FDA 水解酶活性与微生物活性之间的相关性比其他酶活性更显著,因此应用其活性来评价土壤微生物的总体活性^[33-35]。本研究中,除收获期外,BC、CN 处理均能增加土壤 FDA 水解酶活性,这与李腊梅等的研究结果^[36]相似,化肥施用和秸秆还田显著提高 FDA 水解酶活性,但是各种施肥处理间活性差异不明显,与本试验结果矛盾,这可能是由于该土壤

连续 10 年秸秆还田,对土壤的刺激逐渐降低。

纤维素酶属于水解酶,是重要的土壤质量评价指标,其活性会直接影响作物或植物的产量。辛淬鑫等以山西省试验田土壤为材料,添加不同种类、不同量的生物炭进行试验,结果发现,生物炭能有效提高纤维素酶活性且延长其酶活性周期^[37]。本研究中,添加 BC 和 CN 后土壤纤维素酶活性变化复杂,从返青期到分蘖前期,土壤纤维素酶活性总体降低,这可能是因为纤维素酶起腐化作物的作用,对于作物来说,生长发育的初期纤维素酶活性越低越好,所以酶活性逐渐降低,但随着有机酸的积累和纤维素分解菌对环境的逐渐适应,纤维素酶活性越来越高。本试验在最后 2 次采样时,仅 NBC₃、NBC₇ 处理土壤纤维素酶活性低于 CK 处理,这可能是由于该种生物炭在裂解温度上对农田土壤影响显著,也有可能与该时期内土壤微生物量和养分含量减少有关。

3.2 土壤总体酶活参数

根据土壤酶种类的不同,构建一个土壤总体酶活性指标参数,即无量纲常数 E_t 。计算得到的土壤总体酶活性可更好地比较不同处理间酶活性的大小,更准确地表征供试土壤肥力水平的高低。从本研究结果可知,单一酶活性可以提供部分相关信息,例如 NBC₃ 处理对土壤碱性磷酸酶活性在水稻生长期表现出良好的促进效果,但是土壤总体酶活性参数较小;而 NBC₅ 处理对多种土壤酶活性起促进作用,验证了 NBC₅ 处理土壤总体酶活性最大的结果。虽然采用单一酶活性作为评价相关处理优劣的指标是片面的,但可以从单一酶活性获得相关规律,通过土壤总体酶活性进行验证。

4 结论

综上所述,生物炭的施用对土壤酶活性的影响显著,其影响程度的大小与生物炭的种类、裂解温度有关。生物炭和炭基缓释肥可以显著增加土壤碱性磷酸酶、脲酶活性,也可增加蔗糖酶、FDA 水解酶、纤维素酶活性。但是在部分采样时期部分处理蔗糖酶、纤维素酶活性低于 CK 处理,这可能是因为土壤酶活性由土壤微生物的底物利用方式和效率决定,受到土壤环境(温度、水分、养分等)、微生物种群和土壤理化性质等因素的制约。通过土壤总体酶活参数发现,各处理的 E_t 值均高于 CK 处理,其中 NBC₅ 处理土壤总体酶活性最大。施用生物炭和炭基缓释肥对土壤酶活性产生复杂多变的效应,究其原因主要可能是:一方面生物炭具有极强的吸附性能,可以吸附酶促反应的反应底物,进而促进酶促反应的进行,提高土壤酶活性;另一方面生物炭还可以吸附保护酶促反应的结合位点,从而抑制酶促反应的进行,降低酶活性^[38]。

参考文献:

- [1] 王宝山,周景宇. 对农作物秸秆综合利用发展方向的探索[J]. 农业机械,2009(18):75-76.
- [2] 董贤文. 秸秆氮化处理技术[J]. 四川农业科技,2009(8):34-35.
- [3] Antal M J, Grønli M. The art, science, and technology of charcoal production[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research,2003, 42(8):1619-1640.
- [4] 赵军,耿增超,张雯,等. 生物炭及炭基硝酸铵肥料对土壤酶

- 活性的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2015,43(9):123-130.
- [5] Schulz H, Dunst G, Glaser B. Positive effects of composted biochar on plant growth and soil fertility [J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2013, 33(4):817-827.
- [6] Huang M, Yang L, Qin H D, et al. Fertilizer nitrogen uptake by rice increased by biochar application [J]. *Biology & Fertility of Soils*, 2014, 50(6):997-1000.
- [7] 丁艳丽, 刘杰, 王莹莹. 生物炭对农田土壤微生物生态的影响研究进展[J]. *应用生态学报*, 2013, 24(11):3311-3317.
- [8] 曲晶晶. 生物质炭稻田施用下的土壤固碳减排效应及其对水稻生产力的影响[D]. 南京:南京农业大学, 2012:7-8.
- [9] 花莉, 张成, 马宏瑞, 等. 秸秆生物质炭土地利用的环境效益研究[J]. *生态环境学报*, 2010, 19(10):2489-2492.
- [10] 黄耀. 地气系统碳氮交换:从实验到模型[M]. 北京:气象出版社, 2003.
- [11] 郭艳亮, 王丹丹, 郑纪勇, 等. 生物炭添加对半干旱地区土壤温室气体排放的影响[J]. *环境科学*, 2015, 36(9):3393-3400.
- [12] 马晓霞, 王莲莲, 黎青慧, 等. 长期施肥对玉米生育期土壤微生物量碳氮及酶活性的影响[J]. *生态学报*, 2012, 32(17):5502-5511.
- [13] 周震峰, 王建超, 饶潇潇. 添加生物炭对土壤酶活性的影响[J]. *江西农业学报*, 2015, 27(6):110-112.
- [14] Stone M, Weiss M S, Goodale C L, et al. Temperature sensitivity of soil enzyme kinetics under N-fertilization in two temperate forests [J]. *Global Change Biology*, 2012, 18(3):1173-1184.
- [15] 刘世平, 聂新涛, 张洪程, 等. 稻麦两熟条件下不同土壤耕作方式与秸秆还田效用分析[J]. *农业工程学报*, 2006, 22(7):48-51.
- [16] Bailey V L, Fansler S J, Smith J L, et al. Reconciling apparent variability in effects of biochar amendment on soil enzyme activities by assay optimization [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, 43(2):296-301.
- [17] 姚钦. 生物炭施用对东北黑土土壤理化性质和微生物多样性的影响[D]. 长春:中国科学院东北地理与农业生态研究所, 2017:9-10.
- [18] Oleszczuk P, Joško I, Futa B, et al. Effect of pesticides on microorganisms, enzymatic activity and plant in biochar-amended soil [J]. *Geoderma*, 2014, 214-215(2):10-18.
- [19] 谷思玉, 李欣洁, 魏丹, 等. 生物炭对大豆根际土壤养分含量及微生物数量的影响[J]. *大豆科学*, 2014, 33(3):393-397.
- [20] Dick R P, Burns R G. A brief history of soil enzymology research [M]// *Oxygen and the evolution of life*. Springer Berlin Heidelberg, 2011.
- [21] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京:农业出版社, 1986.
- [22] 刘海芳, 马军辉, 金辽, 等. 水稻土 FDA 水解酶活性的测定方法及应用[J]. *土壤学报*, 2009, 46(2):365-367.
- [23] Battin T J. Assessment of fluorescein diacetate hydrolysis as a measure of total esterase activity in natural stream sediment biofilms [J]. *Science of the Total Environment*, 1997, 198(1):51-60.
- [24] 和文祥, 谭向平, 王旭东, 等. 土壤总体酶活性指标的初步研究[J]. *土壤学报*, 2010, 47(6):1232-1236.
- [25] 尚杰, 耿增超, 陈心想, 等. 生物炭对土壤酶活性和糜子产量的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2015, 33(2):146-151, 158.
- [26] 李莹飞, 耿玉清, 周红娟, 等. 基于不同方法测定土壤酸性磷酸酶活性的比较[J]. *中国生态农业学报*, 2016, 24(1):98-104.
- [27] 张继旭, 张继光, 张忠锋, 等. 秸秆生物炭对烤烟生长发育、土壤有机碳及酶活性的影响[J]. *中国烟草科学*, 2016, 37(5):16-21.
- [28] 黄剑. 生物炭对土壤微生物量及土壤酶的影响研究[D]. 北京:中国农业科学院, 2012:37-38.
- [29] 和文祥, 陈会明, 朱铭莪. 汞镉对游离和固定化脲酶活性的影响[J]. *土壤学报*, 2003, 40(6):945-951.
- [30] 刘淑英. 不同施肥对西北半干旱区土壤脲酶和土壤氮素的影响及其相关性[J]. *水土保持学报*, 2010, 24(1):219-223.
- [31] 李娜, 范树茂, 陈梦凡, 等. 生物炭与秸秆还田对水稻土碳氮转化及相关酶活性的影响[J]. *沈阳农业大学学报*, 2017, 48(4):431-438.
- [32] 赵军. 生物质炭基氮肥对土壤微生物量碳氮, 土壤酶及作物产量的影响研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2016:33-34.
- [33] 蒋炳伸, 李鸿雁, 杨喜田. 应用荧光素二乙酸脂水解酶活性研究不同绿地土壤微生物活性[J]. *河南农业科学*, 2011, 40(8):130-133.
- [34] Dick R P. Soil enzyme activities as indicators of soil quality [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1994, 58:107-124.
- [35] 马星竹. 长期施肥土壤的 FDA 水解酶活性[J]. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 2010, 36(4):451-455.
- [36] 李腊梅, 陆琴, 严蔚东, 等. 太湖地区稻麦二熟制下长期秸秆还田对土壤酶活性的影响[J]. *土壤*, 2006, 38(4):422-428.
- [37] 辛泽鑫, 刘俊, 史晓荣, 等. 施炭对土壤酶活性的影响及其作用机制[J]. *农业科学与技术(英文版)*, 2016, 17(9):2085-2089.
- [38] Czimczik C I, Masiello C A. Controls on black carbon storage in soils [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2007, 21(3):113.