

改良剂对旱地红壤活性有机碳及土壤酶活性的影响^①

袁颖红^{1,2}, 张文锋², 周际海², 芮绍云², 刘贵军², 李 丽², 黄欠如^{1*}, 成艳红¹, 孙 波³

(1 江西省红壤研究所, 江西进贤 331717; 2 南昌工程学院江西省退化生态系统修复与流域生态水文重点实验室,

南昌 330099; 3 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008)

摘 要: 针对江西旱地红壤肥力低下、生产力不高等突出问题, 基于长期野外旱地红壤定位试验, 研究了改良剂(生物质炭和过氧化钙)对旱地红壤活性有机碳及与碳代谢相关酶活性的影响。试验设置生物质炭施用量 0(C0)、758(C1)、1 515(C2) kg/hm² 和过氧化钙施用量 0(Ca0)、61(Ca1)、121(Ca2)kg/hm², 生物质炭和过氧化钙单施和配施共 9 个处理, 即 CK、C0Ca1、C0Ca2、C1Ca0、C1Ca1、C1Ca2、C2Ca0、C2Ca1、C2Ca2。结果表明, 生物质炭单施和配施均在一定程度上提高了旱地红壤有机碳及活性碳组分, 且效果优于单施过氧化钙。C2Ca0、C2Ca1 和 C2Ca2 处理土壤有机碳增加较显著。生物质炭和过氧化钙显著提高土壤活性有机碳组分, 与对照(CK)相比, 其中 C1Ca0 处理的微生物生物量碳平均增加了 45.22%, C1Ca2 处理的可溶性有机碳平均增加了 21.34%, C1Ca0 处理的颗粒有机碳平均增加了 20.72%, C2Ca2 处理的易氧化有机碳平均增加了 22.19%。生物质炭和过氧化钙对提高碳库管理指数均有较好的效果, 0~10 cm 和 10~20 cm 土层分别平均增加了 11.09%、14.07%。添加生物质炭对旱地红壤酶活性均有促进作用, 且对 0~10 cm 土层土壤酶的影响较 10~20 cm 土层明显; 配施 C2Ca2 明显提高旱地红壤淀粉酶、纤维素酶和 β -葡萄糖苷酶活性, C1Ca1 明显提高红壤蔗糖酶活性。因此, 生物质炭和过氧化钙能有效改善旱地红壤活性有机碳组分以及碳代谢相关酶活性, 且生物质炭与过氧化钙配合施用对土壤改良的效果更好。

关键词: 改良剂; 旱地红壤; 活性有机碳; 土壤酶

中图分类号: S151.; S154.1 **文献标识码:** A

红壤广泛分布于南方热带、亚热带地区, 是南方地区重要的土壤资源, 具有酸度高、质地黏重、通气透水性差、保肥性能弱等特点^[1]。但红壤地区光温资源丰富, 是我国重要的农产品生产基地, 具有巨大的农业生产潜力。由于受季风的影响, 红壤地区高温高湿, 土壤矿物风化淋溶强烈, 自然肥力低下, 生产力相对不高, 再加上人类近几十年来不合理的种植、耕作等活动, 造成水土流失, 使红壤肥力衰退程度更加严重^[2]。

应用生物质炭等改良剂进行土壤改良已成为全球关注的热点, 众多研究表明, 生物质炭施入土壤可以改善土壤理化性质和土壤养分状况, 促进作物生长和提高产量^[3-4]。土壤有机碳库是陆地碳库的重要组成部分, 在研究陆地碳循环中具有重要的作用。由于碳循环对全球生态系统循环有着重要的影响, 因此, 土

壤有机碳研究受到人们普遍关注, 已成为全球变化研究的三大热点之一^[5-6]。土壤活性有机碳是土壤有机碳中活性较高的那部分, 在一定的时空条件下受植物、微生物影响强烈, 具有一定溶解性, 且在土壤中移动较快、易氧化、易分解、易矿化^[7-8], 包括植物残茬、根系分泌物、真菌菌丝等游离度较高的有机物^[9]。另外, 土壤酶是一种具有生物催化能力和蛋白质性质的高分子活性物质^[10], 参与土壤中各种化学反应和生物化学过程, 与有机物质矿化分解、矿质营养元素循环、能量转移、环境质量等密切相关^[11]。有试验结果表明, 施入以生物质炭为主要成分的生态炭肥, 能显著提升土壤有机质含量, 明显增加土壤细菌数量, 有效活化土壤蔗糖酶、淀粉酶及纤维素酶的活性, 并存在正剂量效应, 有效修复土壤健康, 为植物的生长发育提供良好的土壤条件, 为降低病害发生及减少产量损失提

基金项目: 江西省教育厅科研技术研究项目(GJJ161100)、国家自然科学基金项目(41461050, 41661065, 31760167)、2014 年高校大学生创新创业教育计划专项和江西省 2015 年度研究生创新专项资金项目(YC2015-S416)资助。

* 通讯作者(qianruhuang@163.com)

作者简介: 袁颖红(1974—), 男, 江西宜春人, 博士, 副教授, 主要从事水土保持和土壤生态方面的研究。E-mail: yhyuan@nit.edu.cn

供了保障^[12-13]。但是国内外开展较多的是关于高剂量生物质炭对土壤改良效果研究。近几年来,有研究表明,过氧化钙在水分作用下缓慢分解放出氧气,一方面进行物理扩散作用,加强了土壤的透气性,防止土壤板结,有利于植物根系生长,促进植物新陈代谢,提高马铃薯、甜瓜等农产品的质量和产量;另一方面又进行化学氧化作用,控制细菌的生长,增强植物抵御病虫害的能力,生成的氢氧化钙还可中和酸性土壤^[14-15]。目前,有关生物质炭和过氧化钙等改良剂对旱地红壤活性有机碳组分以及土壤酶活性的影响研究报道较少,尤其是生物质炭和过氧化钙配施对土壤改良效果研究鲜见报道。本研究基于野外旱地红壤定位试验,初步探究低剂量生物质炭和过氧化钙对旱地红壤活性碳组分及土壤酶活性的影响,可为秸秆生物质炭长期还田和添加过氧化钙改良旱地红壤有机碳组分,提高农业生产力提供理论基础和参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验地设在江西省红壤研究所定位试验基地内,属典型的低丘红壤区红壤旱地,海拔高度为 25 ~ 30 m,坡度 5°。其地理位置为 116°20'24"E,28°15'30"N,属亚热带季风气候,气候温和、雨量充沛、日照充足、无霜期长。年平均降雨量 1 587 mm,无霜期 282 d,

平均气温 17.5 ,年平均日照时数 1 900 ~ 2 000 h。

1.2 试验材料

试验土壤为第四纪红色黏土发育而成,0 ~ 20 cm 土层土壤 pH 为 4.18、有机碳含量 8.64 g/kg、全氮为 1.64 g/kg、全磷为 1.01 g/kg、有效磷为 157.75 mg/kg、全钾含量为 7.73 g/kg,CEC 为 18.84 cmol/kg。生物质炭由小麦秸秆在 350 ~ 500 °C 下厌氧烧制而成,购于河南商丘三利新能源有限公司,制备率约为 35%,其理化性质如下:pH 为 10.35,有机碳含量为 467.20 g/kg,全氮含量为 5.90 g/kg,全磷含量为 14.43 g/kg,有效磷为 4.70 g/kg,全钾含量为 11.50 g/kg,CEC 为 217.00 cmol/kg。田间管理按常规管理进行,每年种植红薯(苏薯 8 号)。

1.3 试验设计

试验从 2013 年 4 月开始实施,采用完全方案设计,随机区组排列,每个处理设 3 个重复,共计 27 个小区,小区面积 3.5 m × 6 m = 21 m²。走道宽 0.5 m,保护行宽 1 m,小区间排水沟宽 0.5 m。每个小区施尿素 630 g(300 kg/hm²),钙镁磷肥(P₂O₅ 12.5%)787 g(375 kg/hm²),KCl(K₂O 60%)552 g(263 kg/hm²)。生物质炭过 20 目筛,每年添加一次生物质炭和过氧化钙,施用方法为表层施用,再翻耕。根据生物质炭和过氧化钙的不同施用剂量设 9 种处理,各小区处理及生物质炭和过氧化钙用量如表 1。

表 1 处理及改良剂施用量(kg/hm²)
Table 1 Experimental treatments and applied amounts of soil amendments

改良剂	处理								
	CK	C0Ca1	C0Ca2	C1Ca0	C1Ca1	C1Ca2	C2Ca0	C2Ca1	C2Ca2
生物质炭	0	0	0	758	758	758	1515	1515	1515
过氧化钙	0	61	121	0	61	121	0	61	121

1.4 样品的采集

于 2014 年 4 月底采集土壤样品,用土钻在每个试验小区进行多点混合采集土壤,取样深度为 0 ~ 10、10 ~ 20 cm,把土样密封后带回实验室 4 °C 冰箱保存。采集的部分土样充分混合,自然风干,过筛备用。

1.5 分析方法

土壤有机碳测定采用重铬酸钾容量法-外加热法^[16]。

土壤微生物生物量碳采用氯仿熏蒸-K₂SO₄ 提取法测定,微生物生物量碳的换算系数为 0.45^[16]。

土壤可溶性有机碳测定:纯净水提取鲜土可溶性有机碳,水土比 4 : 1,200 r/min 振荡 2 h 后,在 4 °C 条件下以 4 500 r/min 离心 20 min。将上清液过 0.45

μm 滤膜后得到土壤可溶性有机碳样品,可溶性有机碳含量采用 TOC 分析仪测定^[17]。

土壤颗粒有机碳测定:称取过 2 mm 筛的风干土 25 g,放入塑料瓶中,加入 30 ml 5 g/L 的六偏磷酸钠溶液,在往复式振荡器(90 r/min)上振荡 18 h,分散。分散溶液置于 53 μm 筛上,用清水冲洗直至沥滤液澄清。将筛上保留的 53 ~ 2 000 μm 土壤在 60 °C 下烘干至恒量,计算其占整个土壤样品的百分比。将烘干样品中的有机碳含量分别换算为单位质量土壤样品的对应组分有机碳含量,即为颗粒有机碳含量^[18]。

土壤易氧化有机碳测定:依据 Blair 等^[19]KMnO₄ 氧化性分级方法测定。称取过 500 μm 土壤筛的含碳 15 mg 的风干土壤,加入 25 ml 的 333 mmol/L

KMnO₄, 振荡 1 h, 振荡后在 4 000 r/min 离心 5 min, 吸取上清液稀释 250 倍, 稀释液在 565 nm 波长处进行比色, 同时配制标准系列浓度 KMnO₄ 溶液, 也在 565 nm 处比色, 依标准曲线得 KMnO₄ 浓度, 进而求得消耗 KMnO₄ 量。

土壤酶活性测定: 土壤蔗糖酶、淀粉酶、纤维素酶活性采用 3,5-二硝基水杨酸比色法测定, 蔗糖酶活性以 24 h 后 1 g 土壤葡萄糖的毫克数表示; 淀粉酶活性以 24 h 后 1 g 土壤中麦芽糖的毫克数表示; 纤维素酶活性, 以 72 h, 1 g 土壤生成葡萄糖毫克数表示; β -葡萄糖苷酶活性采用硝基酚比色法测定, 以 1 h, 1 g 土壤生成对硝基酚毫克数表示^[11]。

1.6 计算公式

稳态碳 = 总有机碳 - 活性碳; 碳库指数(CPI) = 农田土壤有机碳/参考农田土壤有机碳; 碳库活度(A) = 活性碳/稳态碳; 碳库活度指数(AI) = 农田碳库活度/参考土壤碳库活度; 碳库管理指数(CPMI) = 碳库指数 × 碳库活度指数 × 100; 活性碳有效率 = 活性碳/土壤有机碳 × 100%^[20]。公式中活性碳指易氧化有机碳。

1.7 数据处理

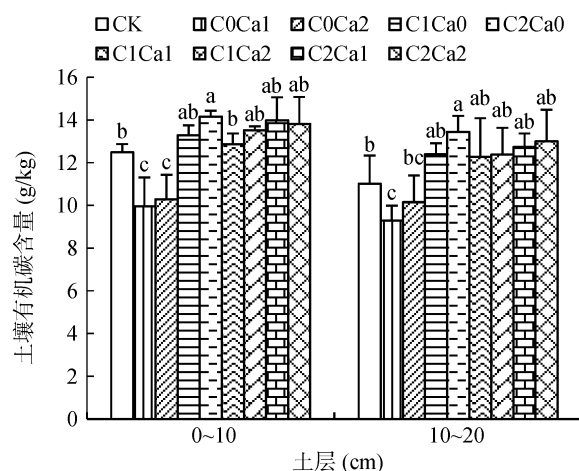
数据采用 Microsoft Excel 2007 软件进行处理和绘图, 图表中的数据采用平均值表示, 采用 SPSS 统计软件进行差异显著性分析。

2 结果与分析

2.1 改良剂对旱地红壤有机碳及活性有机碳含量的影响及分布特征

2.1.1 改良剂对旱地红壤有机碳含量的影响及分布特征 由图 1 可知, 施用两种改良剂(生物质炭和过氧化钙)对旱地红壤有机碳(SOC)含量和分布有不同程度的影响。各处理中, 随着土层加深土壤有机碳含量降低, 即 0~10 cm > 10~20 cm, 且两土层之间均无显著性差异。单施过氧化钙土壤有机碳含量均低于对照(CK), 0~10、10~20 cm 土层平均分别减少了 18.93%、11.73%; 与 CK 相比, 单施生物质炭和配施处理土壤有机碳均有所增加, 并随着生物质炭施入量增加, 土壤有机碳含量增加, 0~10、10~20 cm 土层平均分别增加了 8.89%、15.35%。0~10 cm 土层, 施用改良剂后土壤有机碳含量范围约为 9.97~14.16 g/kg; 不同处理土壤有机碳含量由低到高顺序为: C0Ca1 < C0Ca2 < CK < C1Ca1 < C1Ca0 < C1Ca2 < C2Ca2 < C2Ca1 < C2Ca0; C0Ca1、C0Ca2 处理显著降低了土壤有机碳含量, C2Ca0 与 C1Ca1 处理之间,

C2Ca0、C1Ca1 与 C0Ca1、C0Ca2 处理之间土壤有机碳含量差异显著。在 10~20 cm 土层, 施用改良剂后土壤有机碳含量范围为 9.29~13.44 g/kg; 不同处理土壤有机碳含量由低到高顺序为: C0Ca1 < C0Ca2 < CK < C1Ca1 < C1Ca2 < C1Ca0 < C2Ca1 < C2Ca2 < C2Ca0; C0Ca1 处理土壤有机碳含量显著低于 CK, C2Ca0 与 C0Ca1、C0Ca2 处理之间土壤有机碳含量差异显著。



(图中小写字母不同表示同土层不同处理间差异达到 $P < 0.05$ 显著水平; 样品重复数(样本量) $n = 3$, 下同)

图 1 改良剂对旱地红壤有机碳的影响

Fig. 1 Effects of different amendments on organic carbons in upland red soil

2.1.2 改良剂对旱地红壤活性有机碳含量的影响及分布特征 施用两种改良剂(生物质炭和过氧化钙)对旱地红壤微生物生物量碳、可溶性有机碳、颗粒有机碳、易氧化有机碳含量和分布有不同程度的影响。从图 2 中可以看出, 各处理中, 随着土层加深土壤微生物生物量碳、可溶性有机碳、颗粒有机碳、易氧化有机碳含量降低, 即 0~10 cm > 10~20 cm, 且除可溶性有机碳外, 两土层之间均无显著差异。

由图 2 可知, 施入改良剂后, 0~10、10~20 cm 土层土壤微生物生物量碳含量范围分别为 77.70~105.44、62.52~96.74 mg/kg; 且与 CK 相比, 各处理 0~10、10~20 cm 土层土壤微生物生物量碳平均分别增加了 24.78%、39.85%。0~10 cm 土层, 不同处理土壤微生物生物量碳含量由小到大顺序为: CK < C0Ca1 < C0Ca2 < C1Ca2 < C2Ca1 < C2Ca0 < C1Ca1 < C2Ca2 < C1Ca0; C1Ca0、C2Ca0、C1Ca1、C1Ca2、C2Ca1、C2Ca2 土壤微生物生物量碳含量显著高于 CK 处理, C1Ca0 与 C1Ca2 处理之间差异显著。10~20 cm 土层, 不同处理土壤微生物生物量碳含量由小到大顺序为: CK < C0Ca1 < C0Ca2 < C1Ca2 < C2Ca1

< C1Ca1 < C2Ca0 < C2Ca2 < C1Ca0; 除 C0Ca1 外, 其他处理土壤微生物量碳含量显著高于 CK 处

理, C1Ca0、C2Ca2 与 C0Ca1、C0Ca2、C1Ca2 处理之间差异显著。

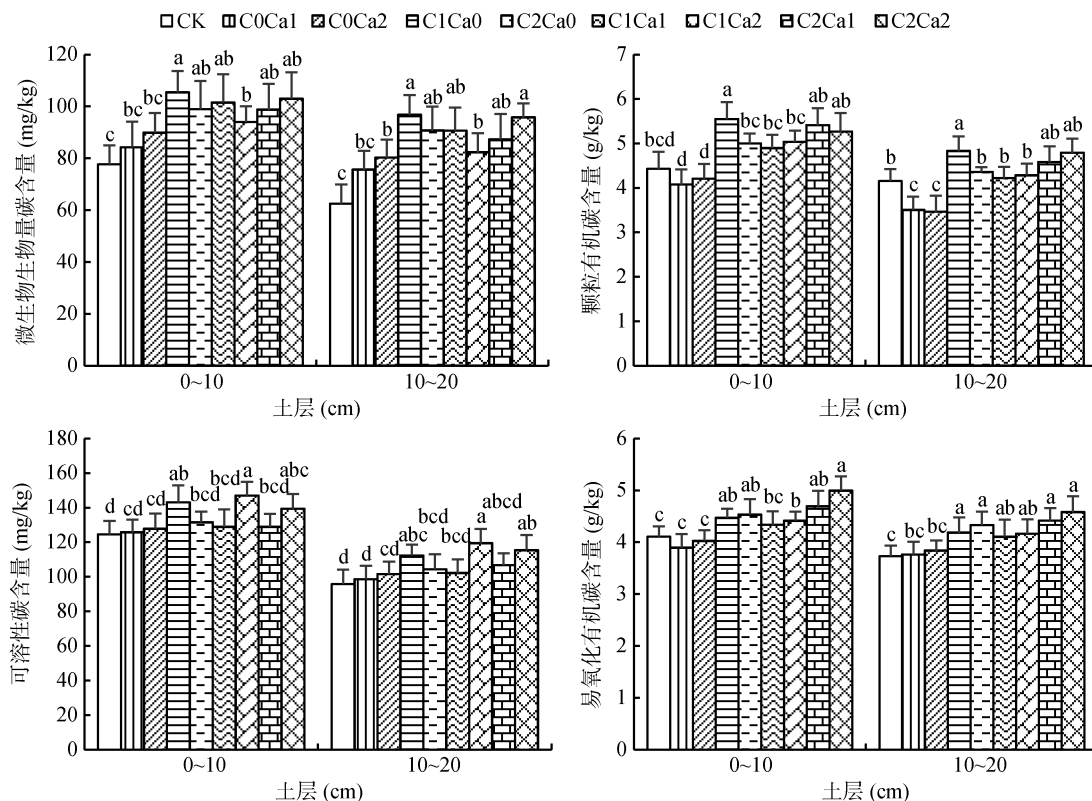


图 2 改良剂对旱地红壤有机碳组分的影响

Fig. 2 Effects of different amendments on organic carbon fractions in upland red soil

从图 2 可以看出,施入改良剂后,0~10、10~20 cm 土层,土壤可溶性有机碳含量范围分别为 124.53~146.92、95.76~119.41 mg/kg,且与 CK 相比,各处理土壤可溶性有机碳分别平均增加了 7.62%、12.33%,C1Ca0、C1Ca2、C2Ca2 处理增加显著。0~10 cm 土层,不同处理土壤可溶性有机碳含量由小到大顺序为:CK < C0Ca1 < C0Ca2 < C1Ca1 < C2Ca1 < C2Ca0 < C2Ca2 < C1Ca0 < C1Ca2;C1Ca0 与 C0Ca1、C0Ca2 处理之间,C1Ca2 与 C0Ca1、C0Ca2、C2Ca0、C1Ca1、C2Ca1 处理之间差异显著。10~20 cm 土层,不同处理土壤可溶性有机碳含量由小到大顺序为:CK < C0Ca1 < C0Ca2 < C1Ca1 < C2Ca0 < C2Ca1 < C1Ca0 < C2Ca2 < C1Ca2;C1Ca0 与 C0Ca1 处理之间,C1Ca2、C2Ca2 与 C0Ca1、C0Ca2 处理之间,C1Ca2 与 C2Ca0 处理之间差异显著。

图 2 表明,施入改良剂后,0~10、10~20 cm 土层土壤颗粒有机碳含量范围分别为 4.08~5.55、3.46~4.83 g/kg。与 CK 相比,单施过氧化钙处理,0~10、10~20 cm 土层土壤颗粒有机碳含量平均降低了 6.54%、16.11%;单施生物质炭和配施处理,0~10、10~20 cm 土层土壤颗粒有机碳平均分别增加了

17.17%、8.60%。0~10 cm 土层,不同处理土壤颗粒有机碳含量从小到大的顺序为:C0Ca1 < C0Ca2 < CK < C1Ca1 < C1Ca2 < C2Ca0 < C1Ca0;C1Ca0 与 C0Ca1、C0Ca2、C2Ca0、CK 处理之间,C2Ca0、C1Ca1、C1Ca2、C2Ca1、C2Ca2 与 C0Ca1、C0Ca2 处理之间差异显著。10~20 cm 土层,不同处理土壤颗粒有机碳含量从小到大的顺序为:C0Ca2 < C0Ca1 < CK < C1Ca1 < C1Ca2 < C2Ca0 < C2Ca1 < C2Ca2 < C1Ca0;C0Ca1、C0Ca2 与 C1Ca0、CK、C2Ca0、C1Ca1、C1Ca2、C2Ca1、C2Ca2 处理之间,C1Ca0 与 CK、C2Ca0、C1Ca1、C1Ca2 处理之间差异显著。

图 2 还表明,施入改良剂后,0~10、10~20 cm 土层土壤易氧化有机碳含量范围分别为 3.90~5.00、3.73~4.58 g/kg。与 CK 相比,各处理 0~10、10~20 cm 土层土壤可溶性有机碳含量平均分别增加了 11.33%、11.86%。0~10 cm 土层,不同处理土壤易氧化有机碳含量从小到大的顺序为:C0Ca1 < C0Ca2 < CK < C1Ca1 < C1Ca2 < C1Ca0 < C2Ca0 < C2Ca1 < C2Ca2;C0Ca1、C0Ca2、CK 与 C1Ca0、C2Ca0、C1Ca2、C2Ca1、C2Ca2 处理之间,C2Ca2 与 C1Ca1、C1Ca2

处理之间差异显著。10~20 cm 土层,不同处理土壤易氧化有机碳含量从小到大的顺序为:CK<C0Ca1<C0Ca2<C1Ca1<C1Ca2<C1Ca0<C2Ca0<C2Ca1<C2Ca2;C1Ca1、C1Ca2 与 CK 处理之间,C1Ca0、C2Ca0、C2Ca1、C2Ca2 与 CK、C0Ca1、C0Ca2 处理之间差异显著。

2.1.3 改良剂对旱地红壤碳库管理指数的影响 由表 2 可知,施用两种改良剂(生物质炭和过氧化钙)对旱地红壤稳态碳、碳库指数、碳库活度、碳库活度指数和碳库管理指数均有不同程度的影响。与 CK 相比,各处理 0~10、10~20 cm 土层土壤碳库管理指数平均分别

增加了 11.09%、14.07%。除 C2Ca2 处理外,其他处理两土层之间土壤碳库管理指数均无显著差异。0~10、10~20 cm 土层均以 C2Ca2 处理土壤碳库管理指数最高。0~10 cm 土层,施用改良剂后各处理土壤碳库管理指数从小到大顺序为 CK<C0Ca1<C1Ca1<C1Ca2<C0Ca2<C2Ca0<C1Ca0<C2Ca1<C2Ca2,除 C2Ca1 处理外,C2Ca2 与其他处理之间碳库管理指数差异显著。10~20 cm 土层,施用改良剂后各处理土壤碳库管理指数从小到大顺序为 CK<C1Ca1<C0Ca2<C1Ca2<C0Ca1<C1Ca0<C2Ca0<C2Ca1<C2Ca2,各处理之间土壤碳库管理指数无显著差异。

表 2 改良剂对旱地红壤碳库管理指数的影响
Table 2 Effects of different amendments on carbon management indexes in upland red soil

土层(cm)	处理	总碳(g/kg)	活性碳(g/kg)	稳态碳(g/kg)	碳库指数	碳库活度	碳库活度指数	碳库管理指数
0~10	CK	12.49 b	4.11 ce	8.38 a	1.00 a	0.490 1 b	1.00 b	100.00 b
	C0Ca1	9.97 c	3.90 e	6.07 b	0.80 b	0.641 7 a	1.31 a	104.47 b
	C0Ca2	10.29 c	4.03 de	6.26 b	0.82 b	0.642 8 a	1.31 a	108.03 b
	C1Ca0	13.28 ab	4.47 bc	8.81 a	1.06 a	0.507 6 b	1.04 b	110.09 b
	C2Ca0	14.16 a	4.53 b	9.62 a	1.13 a	0.470 8 b	0.96 b	108.88 b
	C1Ca1	12.86 ab	4.34 bcd	8.52 a	1.03 a	0.509 0 b	1.04 b	106.92 b
	C1Ca2	13.51 ab	4.41 bcd	9.10 a	1.08 a	0.485 2 b	0.99 b	107.11 b
	C2Ca1	13.98 a	4.69 ab	9.29 a	1.12 a	0.505 3 b	1.03 b	115.41 ab
	C2Ca2	13.82 ab	5.00 a	8.82 a	1.11 a	0.566 1 ab	1.16 ab	127.80 a
10~20	CK	11.01 bcd	3.73 d	7.28 abc	1.00 abc	0.512 1 bc	1.00 ab	100.00 a
	C0Ca1	9.29 d	3.76 cd	5.53 c	0.84 c	0.679 3 a	1.33 a	111.91 a
	C0Ca2	10.15 cd	3.84 cd	6.31 bc	0.92 bc	0.609 0 ab	1.19 ab	109.59 a
	C1Ca0	12.40 ab	4.18 abc	8.22 ab	1.13 abc	0.509 3 bc	0.99 b	111.98 a
	C2Ca0	13.44 a	4.33 ab	9.12 a	1.22 a	0.474 9 c	0.93 b	113.21 a
	C1Ca1	12.27 abc	4.11 bcd	8.17 ab	1.11 abc	0.502 6 bc	0.98 ab	109.38 a
	C1Ca2	12.38 ab	4.16 abcd	8.21 ab	1.12 abc	0.507 0 bc	0.99 ab	111.26 a
	C2Ca1	12.73 ab	4.42 ab	8.31 a	1.16 ab	0.531 1 bc	1.04 ab	119.85 a
	C2Ca2	13.00 ab	4.58 a	8.42 a	1.18 ab	0.544 1 abc	1.06 ab	125.37 a

注：表中小写字母不同表示同土层不同处理之间差异显著($P<0.05$)；样品重复数(样本量) $n=3$ 。表中活性碳是指易氧化有机碳。

2.2 改良剂对旱地红壤碳代谢相关酶活性的影响
从图 3 可以看出,施用两种改良剂对旱地红壤蔗糖酶、淀粉酶、纤维素酶、 β -葡萄糖苷酶活性有不同程度的影响。各处理中,随着土层加深,土壤 4 种酶活性均降低,即 0~10 cm>10~20 cm。施入改良剂后,0~10、10~20 cm 土层土壤蔗糖酶活性范围分别为 115.43~179.45、105.61~140.90 mg/(kg·h)；单施过氧化钙处理土壤蔗糖酶活性有不同程度降低,单施生物质炭和配施处理有不同程度增强。单施生物质炭处理,随着生物质炭施入量的增加,蔗糖酶活性增强。与 CK 相比,单施过氧化钙处理 0~10、10~20 cm 土层土壤蔗糖酶活性平均分别降低了 7.94%、11.53%；

单施生物质炭和配施处理 0~10、10~20 cm 土层土壤蔗糖酶活性平均分别增加了 18.26%、6.93%。0~10 cm 土层,各处理土壤蔗糖酶活性从小到大顺序: C0Ca1<C0Ca2<CK<C1Ca2<C1Ca0<C2Ca1<C2Ca0<C2Ca2<C1Ca1;C2Ca0、C1Ca1、C2Ca1、C2Ca2 与 CK 处理之间,C1Ca1 与 C1Ca0、C1Ca2 处理之间差异显著;除 CK 处理外,C0Ca1、C0Ca2 与其他处理之间差异显著。10~20 cm 土层,各处理土壤蔗糖酶活性从小到大顺序: C0Ca1<C0Ca2<CK<C2Ca1<C1Ca1<C1Ca0<C1Ca2<C2Ca0<C2Ca2;C2Ca0、C2Ca2 与 C0Ca2 之间差异显著;除 C0Ca2 处理外,C0Ca1 与其他处理之间差异显著。

由图 3 可知, 施入改良剂后, 0~10、10~20 cm 土层土壤淀粉酶活性范围分别为 56.87~67.71、46.54~58.38 mg/(kg·h); 单施过氧化钙处理土壤淀粉酶活性有不同程度降低, 单施生物质炭和配施处理土壤淀粉酶活性有不同程度的增强。与 CK 相比, 单施过氧化钙处理 0~10、10~20 cm 土层土壤淀粉酶活性平均分别降低了 5.13%、5.74%; 单施生物质炭和配施处理 0~10、10~20 cm 土层土壤淀粉酶活性平均分别增加了 5.41%、7.30%。0~10 cm 土层, 各处理土壤

淀粉酶活性从小到大顺序: C0Ca1< C1Ca1< C0Ca2< CK< C1Ca2< C2Ca0< C2Ca1< C1Ca0< C2Ca2; C1Ca0、C2Ca1、C2Ca2 与 C0Ca1、C0Ca2、C1Ca1、CK 处理之间差异显著。10~20 cm 土层, 各处理土壤淀粉酶活性从小到大顺序: C0Ca1< C1Ca1< C0Ca2< CK< C2Ca0< C1Ca2< C2Ca1< C2Ca2< C1Ca0; C1Ca0、C2Ca2 与 CK、C0Ca1、C0Ca2、C1Ca1 处理之间, C1Ca1、C0Ca1 与 C2Ca0、C1Ca2、C2Ca1 处理之间差异显著。

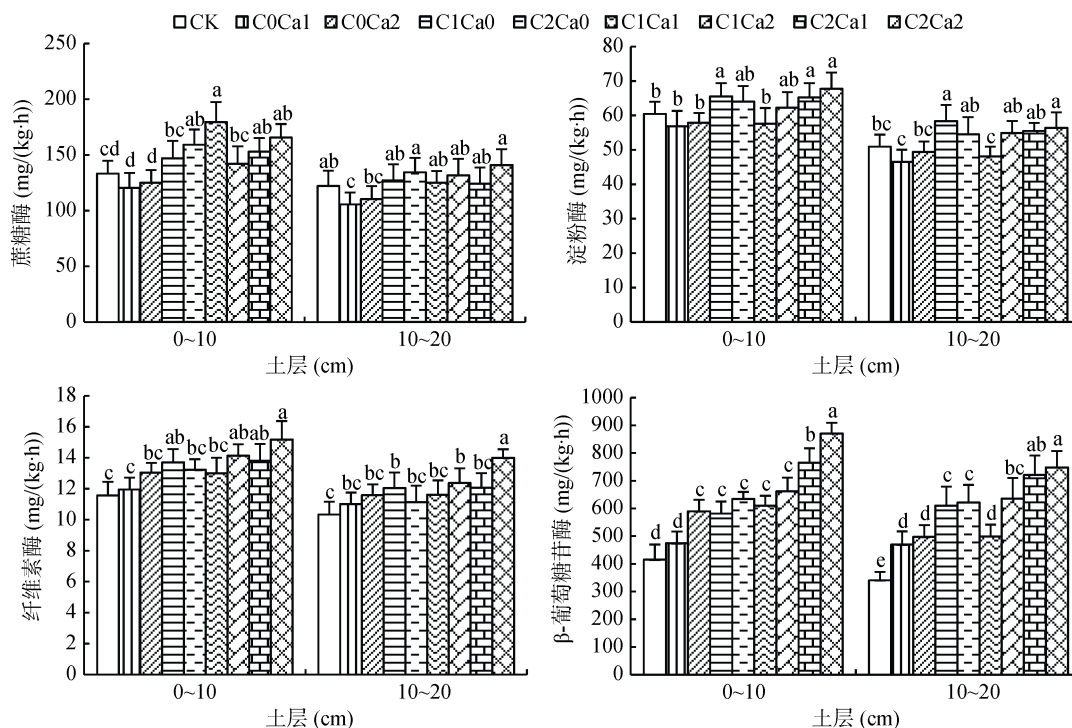


图 3 改良剂对旱地红壤碳代谢相关酶活性的影响

Fig. 3 Effects of different amendments on enzymes activities associated with carbon cycling in upland red soil

图 3 表明, 施入改良剂后, 0~10、10~20 cm 土层土壤纤维素酶活性范围分别为 11.57~15.18、10.33~14.00 mg/(kg·h)。单施过氧化钙处理, 随着过氧化钙施用量增加, 土壤纤维素酶活性增强; 单施生物质炭处理, 随着生物质炭施入量的增加, 纤维素酶活性降低。与 CK 相比, 各处理 0~10、10~20 cm 土层土壤纤维素酶活性平均分别增加了 16.71%、15.95%。0~10 cm 土层, 各处理土壤纤维素酶活性从小到大顺序: CK< C0Ca1< C1Ca1< C0Ca2< C2Ca0< C1Ca0< C2Ca1< C1Ca2< C2Ca2; C1Ca0、C1Ca2、C2Ca1、C2Ca2 与 CK、C0Ca1 处理之间, C2Ca2 与 C0Ca2、C2Ca0、C1Ca1 处理之间差异显著。10~20 cm 土层, 各处理土壤纤维素酶活性从小到大顺序: CK< C0Ca1< C2Ca0< C0Ca2< C1Ca1< C1Ca0< C2Ca1< C1Ca2< C2Ca2; C2Ca2 与其他处理之间,

C1Ca0、C1Ca2 与 CK 处理之间差异显著。

从图 3 可知, 施入改良剂后, 0~10、10~20 cm 土层土壤 β-葡萄糖苷酶活性范围分别为 415.30~870.18、340.68~747.44 mg/(kg·h)。单施过氧化钙处理, 随着过氧化钙施用量增加, 土壤 β-葡萄糖苷酶活性增强; 单施生物质炭处理, 随着生物质炭施入量的增加, β-葡萄糖苷酶活性增强。与 CK 相比, 各处理 0~10、10~20 cm 土层土壤 β-葡萄糖苷酶活性均显著增强, 平均分别增强了 56.15%、76.11%。0~10 cm 土层, 各处理土壤 β-葡萄糖苷酶活性从小到大顺序: CK< C0Ca1< C1Ca0< C0Ca2< C1Ca1< C2Ca0< C1Ca2< C2Ca1< C2Ca2, C2Ca2 与 C2Ca1 处理之间, C2Ca2、C2Ca1 与其他处理之间, C0Ca1 与其他处理之间差异显著。10~20 cm 土层, 各处理土壤 β-葡萄糖苷酶活性从小到大顺序: CK< C0Ca1< C0Ca2<

C1Ca1< C1Ca0< C2Ca0< C1Ca2< C2Ca1< C2Ca2 , C0Ca1、C0Ca2、C1Ca1 与其他处理之间 ,C1Ca0、C2Ca0 与 C2Ca1、C2Ca2 处理之间 ,C2Ca2 与 C1Ca2 处理之间差异显著。

2.3 改良剂对旱地红壤有机碳组分与土壤酶活性之间相关性分析

通过分析施用过氧化钙和生物质炭处理下旱地红壤有机碳及碳组分与碳代谢相关酶活性之间的相关性(表 3) ,0~10 cm 土层,总有机碳、颗粒有机碳、易氧化有机碳含量与 β -葡糖苷酶、蔗糖酶、淀粉酶、

纤维素酶活性呈显著或极显著正相关 ,可溶性有机碳含量与淀粉酶活性呈极显著正相关 ,微生物生物量碳含量与 β -葡糖苷酶、蔗糖酶、淀粉酶活性呈显著或极显著正相关。10~20 cm 土层,可溶性有机碳、易氧化有机碳含量与 β -葡糖苷酶、蔗糖酶、淀粉酶、纤维素酶活性呈显著或极显著正相关,总有机碳、颗粒有机碳含量与 β -葡糖苷酶、蔗糖酶、淀粉酶活性呈显著或极显著正相关,微生物生物量碳含量与 β -葡糖苷酶、淀粉酶、纤维素酶活性呈显著或极显著正相关。

表 3 土壤有机碳组分与土壤酶活性相关性
Table 3 Correlation coefficients between soil enzyme activities and soil organic carbon fractions

土层(cm)	有机碳组分	β -葡糖苷酶	蔗糖酶	淀粉酶	纤维素酶
0~10	总有机碳	0.464*	0.645**	0.591**	0.381*
	微生物生物量碳	0.475*	0.503**	0.465*	0.279
	可溶性有机碳	0.285	0.35	0.491**	0.31
	颗粒有机碳	0.522**	0.554**	0.644**	0.476*
	易氧化有机碳	0.686**	0.531**	0.643**	0.454*
10~20	总有机碳	0.497**	0.418*	0.525**	0.259
	微生物生物量碳	0.617**	0.365	0.538**	0.417*
	可溶性有机碳	0.626**	0.446*	0.389*	0.549**
	颗粒有机碳	0.563**	0.557**	0.615**	0.308
	易氧化有机碳	0.625**	0.442*	0.494**	0.569**

注：* 表示相关性达到 $P<0.05$ 显著水平，** 相关性达到 $P<0.01$ 显著水平。

3 讨论

3.1 改良剂对旱地红壤有机碳及活性有机碳组分的影响

土壤有机碳可以增强土壤保水、保肥能力,提高土壤结构稳定性和抗蚀性,对维持土壤质量和产量具有关键的作用^[21]。本研究结果表明,施用生物质炭后对提高表层旱地红壤(0~10 cm)有机碳含量有明显的效果,对 10~20 cm 土层的促进作用减弱;随着生物质炭用量的增加,旱地红壤有机碳含量也增加;其中 C2Ca0、C2Ca1、C2Ca2 在 0~10、10~20 cm 土层土壤有机碳增加效果较明显,平均增加约为 11.97%、18.55%,以单施 C2Ca0 处理土壤有机碳含量最高。原因可能是: 生物质炭本身含碳量较高,化学稳定性较高,难降解,有利于土壤有机碳的积累^[22];

过氧化钙与生物质炭二者相互影响,过氧化钙与土壤水分发生反应,缓慢释放氧气,改善土壤环境,增加了土壤有机质的分解,使得配施(C2Ca1、C2Ca2)处理土壤有机碳含量低于单施 C2Ca0 处理。

与土壤总有机碳相比,土壤活性有机碳更能作为

农业管理措施改变引起的土壤环境和碳库早期变化的敏感性指标^[23]。本研究结果表明,在施用生物质炭和过氧化钙情况下,土壤微生物生物量碳、可溶性有机碳、颗粒有机碳、易氧化有机碳含量在各土层的变化趋势相同,即随着土层深度的加深逐渐减小;生物质炭单施和配施对旱地红壤活性有机碳组分含量均有不同程度的提高,且生物质炭单施和配施效果优于单施过氧化钙。付琳琳等^[24]研究结果表明,施加高施用量生物质炭(10、20、40 t/hm²)可以提高土壤有机碳、颗粒态有机碳、易氧化态有机碳和微生物生物量碳含量,本研究结果与之类似。Durenkamp 等^[25]研究发现黏质土中微生物生物量碳随生物质炭添加量的增加而增加。马莉等^[26]研究也发现,施用生物质炭且不同剂量对土壤可溶性碳影响效果也有差异,低、中施用量(5 g/kg 和 10 g/kg)土壤可溶性有机碳含量显著高于高施用量(20 g/kg)。陈红霞等^[27]基于华北平原农田 3 年定位实验也表明施用生物质炭(2.25 t/hm²、4.50 t/hm²)可以显著增加 0~7 cm 和 7.5~15 cm 土层的颗粒态有机碳含量。生物质炭可以提高土壤对养分的保持能力,为微生物生长和繁殖提供一定的氮

源,促进微生物的生长,提高微生物生物量;另外生物质炭表面具有大量负电荷及高电荷密度,能吸附一些对微生物有毒害作用的物质以及对土壤可溶性有机碳的吸附,从而促进微生物的生长繁殖,提高微生物生物量,减少可溶性有机碳的淋洗^[26]。红壤偏酸性,黏性较高,透气性差,不利于活性有机碳组分的形成与积累,生物质炭和过氧化钙均呈碱性,可以对红壤 pH 起到调节作用,有助于固相有机碳溶解,增加土壤可溶性有机碳含量^[28];且生物质炭的疏松结构以及过氧化钙与土壤水分缓慢反应释放氧气均可调节土壤的透气性,有利于微生物的生长代谢,促进活性有机碳组分的形成。还有,土壤碳库管理指数可以表征土壤管理措施引起土壤有机质变化,能够反映不同利用方式对土壤质量影响的程度^[29]。本研究所有处理对提高碳库管理指数均有较好的效果,0~10 cm 和 10~20 cm 土层分别平均增加 11.09% 和 14.07%。

3.2 改良剂对旱地红壤碳代谢相关酶活性的影响

土壤酶是一种具有生物催化能力和蛋白质性质的高分子活性物质^[10],能催化土壤中复杂的有机物质,使其转化为简单的无机化合物,供植物重新吸收利用^[11]。相关野外调查结果表明,土壤 pH 与土壤酶活性之间的关系较为密切,人工改变土壤 pH 对土壤酶活性存在一定程度的影响^[30]。土壤有机质是土壤中酶促底物的主要供源,是土壤固相中最复杂的系统,也是土壤肥力的主要物质基础^[31]。本试验研究表明,在红壤旱地施用生物质炭和过氧化钙作用下,旱地红壤参与碳循环的 4 种酶,蔗糖酶、淀粉酶、纤维素酶、 β -葡糖苷酶活性随土层加深而降低,即对 0~10 cm 土层土壤酶的影响较 10~20 cm 土层明显;单施过氧化钙对土壤蔗糖酶、淀粉酶活性有抑制作用,低于对照 CK,对纤维素酶、 β -葡糖苷酶活性有促进作用;单施生物质炭和配施对 4 种酶均有促进作用,随着生物质炭用量的增加蔗糖酶、 β -葡糖苷酶活性也呈增加趋势。王涵等^[30]研究表明,在偏酸性土壤,且其 pH 低于大部分土壤酶及其相关微生物适宜 pH,加 $[\text{OH}^-]$ 主要对土壤酶活性起刺激作用,而添加 $[\text{H}^+]$ 主要呈现抑制作用。刘欢欢等^[12]研究表明,麦田施入生态炭肥(以生物质炭为主要成分)后能显著提升土壤有机质含量,明显增加土壤细菌数量,有效活化土壤蔗糖酶、淀粉酶及纤维素酶的活性,并存在正剂量效应,有效修复土壤健康,为小麦的生长发育提供良好的土壤条件,为降低病害发生及减少产量损失提供保障。主要原因可归结为:可能是添加了生

物质炭和过氧化钙调节了红壤 pH,提供了有机碳等养分,改善了红壤条件,促进微生物的活性;可能是生物质炭对反应底物的吸附有助于酶促反应的进行而提高土壤酶活性。

4 结论

生物质炭单施及与过氧化钙配施在一定程度上均提高了旱地红壤有机碳及活性碳组分,且效果优于单施过氧化钙;C2Ca0、C2Ca1 和 C2Ca2 处理能明显增加土壤有机碳;C1Ca0 处理能明显提高红壤微生物生物量碳和颗粒有机碳含量,C1Ca2 处理的可溶性有机碳平均增加了 21.34%,C2Ca2 处理的易氧化有机碳平均增加了 22.19%;生物质炭和过氧化钙对提高碳库管理指数均有明显效果。添加生物质炭对旱地红壤酶活性均有促进作用,且对 0~10 cm 土层的影响较 10~20 cm 土层明显;配施(C2Ca2)处理对旱地红壤淀粉酶、纤维素酶和 β -葡糖苷酶活性影响效果最好。目前,生物质炭和过氧化钙对旱地红壤活性有机碳组分以及与碳代谢相关酶活性的影响研究还处在初步阶段,有待今后的长期定位试验进一步研究。

参考文献:

- [1] 时仁勇,李九玉,徐仁扣,等. 生物质灰对红壤酸度的改良效果[J]. 土壤学报, 2015, 52(5): 1088-1095
- [2] 和利钊,张杨珠,刘杰,等. 不同施肥和调理剂对侵蚀红壤肥力和抗侵蚀性的修复效应[J]. 水土保持学报, 2012, 26(4): 54-58
- [3] Lai W Y, Lai C M, Ke G R, et al. The effects of woodchip biochar application on crop yield, carbon sequestration and greenhouse gas emissions from soils planted with rice or leaf beet[J]. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, 2013, 44(6): 1039-1044
- [4] 匡崇婷,江春玉,李忠佩,等. 添加生物质炭对红壤水稻土有机碳矿化和微生物生物量的影响[J]. 土壤, 2012, 44(4): 570-575
- [5] 李嵘,常瑞英. 土壤有机碳对外源氮添加的响应及其机制[J]. 植物生态学报, 2015, 39(10): 1012-1020
- [6] 张忠启,于东升,潘剑君,等. 红壤典型区不同类型土壤有机碳组分构成及空间分异研究[J]. 土壤, 2015, 47(2): 318-323
- [7] 黄尚书,成艳红,钟义军,等. 水土保持措施对红壤缓坡地土壤活性有机碳及酶活性的影响[J]. 土壤学报, 2016, 53(2): 468-476
- [8] 荣井荣,钟文昭,刘燕,等. 干旱区长期施肥对土壤活性碳组分及团聚体的影响[J]. 生态学杂志, 2013, 32(10): 2559-2566
- [9] Whitbread A M, Lefroy R D B, Blair G J. A survey of the impact of cropping on soil physical and chemical properties in north-western New South Wales[J]. Soil Research, 1998, 36(4): 669-681

- [10] 刘善江, 夏雪, 陈桂梅, 等. 土壤酶的研究进展[J]. 中国农学通报, 2011, 27(21): 1-7
- [11] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986
- [12] 刘欢欢, 董宁禹, 柴升, 等. 生态炭肥防控小麦根腐病效果及对土壤健康修复机理分析[J]. 植物保护学报, 2015, 42(4): 504-509
- [13] 董宁禹, 焦永吉, 杨建新, 等. 不同前作对烤烟土壤健康状况的影响[J]. 河南农业科学, 2013, 42(10): 46-50
- [14] 张新民, 林忠禄, 庄燕. 过氧化钙的应用及其发展前景[J]. 无机盐工业, 1996(4): 21-23
- [15] 葛飞, 李权, 刘海宁, 等. 过氧化钙的制备与应用研究进展[J]. 无机盐工业, 2010, 42(2): 1-4
- [16] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000
- [17] Zhou L X, Wong J W. Effect of dissolved organic matter from sludge and sludge compost on soil copper sorption[J]. Journal of Environmental Quality, 2001, 30(3): 878-883
- [18] 石亚攀, 乔璐, 陈立新, 等. 红松针阔混交林林隙土壤颗粒有机碳和矿物结合有机碳的时空异质性[J]. 林业科学, 2014, 50(6): 18-27
- [19] Blair G J, Rdb L, Lise L. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems[J]. Australian Journal of Agricultural Research, 1995, 46(7): 393-406
- [20] 李硕, 李有兵, 王淑娟, 等. 关中平原作物秸秆不同还田方式对土壤有机碳和碳库管理指数的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(4): 1215-1222
- [21] 陈朝, 吕昌河, 范兰, 等. 土地利用变化对土壤有机碳的影响研究进展[J]. 生态学报, 2011, 31(18): 5358-5371
- [22] 周桂玉, 窦森, 刘世杰. 生物质炭结构性性质及其对土壤有效养分和腐殖质组成的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(10): 2075-2080
- [23] 徐万里, 唐光木, 盛建东, 等. 垦殖对新疆绿洲农田土壤有机碳组分及团聚体稳定性的影响[J]. 生态学报, 2010, 30(7): 1773-1779
- [24] 付琳琳, 蔺海红, 李恋卿, 等. 生物质炭对稻田土壤有机碳组分的持效影响[J]. 土壤通报, 2013(6): 1379-1384
- [25] Durenkamp M, Luo Y, Brookes P C. Impact of black carbon addition to soil on the determination of soil microbial biomass by fumigation extraction[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2010, 42(11): 2026-2029
- [26] 马莉, 吕宁, 冶军, 等. 生物炭对灰漠土有机碳及其组分的影响[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(8): 976-981
- [27] 陈红霞, 杜章留, 郭伟, 等. 施用生物炭对华北平原农田土壤容重、阳离子交换量和颗粒有机质含量的影响[J]. 应用生态学报, 2011, 22(11): 2930-2934
- [28] 李丛蕾. 改良剂对旱地红壤团聚体稳定性及有机碳组分的影响[D]. 南昌: 南昌工程学院, 2015
- [29] 刘珊珊, 张兴华, 宫渊波, 等. 放牧干扰对岷江上游山地森林/干旱河谷交错带土壤有机碳及其碳库管理指数的影响[J]. 土壤, 2014, 46(5): 799-805
- [30] 王涵, 王果, 黄颖颖, 等. pH 变化对酸性土壤酶活性的影响[J]. 生态环境学报, 2008, 17(6): 2401-2406
- [31] 吕国红, 周广胜, 赵先丽, 等. 土壤碳氮与土壤酶相关性研究进展[J]. 辽宁气象, 2005, 21(2): 6-8

Effects of Amendments on Labile Organic Carbon and Soil Enzymes Activities in Upland Red Soil

YUAN Yinghong^{1,2}, ZHANG Wenfeng², ZHOU Jihai², RUI Shaoyun², LIU Guijun², LI Li²,
HUANG Qianru^{1*}, CHENG Yanhong¹, SUN Bo³

(1 Jiangxi Institute of Red Soil, Jinxian, Jiangxi 331717, China; 2 Jiangxi Key Laboratory for Restoration of Degraded Ecosystems & Watershed Ecohydrology, Nanchang Institute of Technology, Nanchang 330099, China; 3 State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: A long-term field experiment was conducted to study the effects of different soil amendments (biochar and calcium peroxide) on soil labile organic carbon fractions and soil enzymes activities associated with carbon cycling in upland red soil in Jiangxi Province in order to resolve the problems of low fertility and productivity. 9 treatments were included in the experiment, i.e. CK, C0Ca1, C0Ca2, C1Ca0, C2Ca0, C1Ca1, C1Ca2, C2Ca1 and C2Ca2. The results showed that single application of biochar and combined application of biochar and calcium peroxide were beneficial to increase organic carbon content and labile organic carbon fractions, and the effects were better than single application of calcium peroxide. Soil organic carbon contents increased significantly under C2Ca0, C2Ca1 and C2Ca2 treatments. Biochar and calcium peroxide significantly increased soil labile organic carbon fractions. The content of microbial biomass carbon averagely increased by 45.22% in C1Ca0 treatment, the content of dissolved organic carbon averagely increased by 21.34% in C1Ca2 treatment, the content of particulate organic carbon averagely increased by 20.72% in C1Ca0 treatment, the content of labile organic carbon averagely increased by 22.19% in C2Ca2 treatment. Biochar and calcium peroxide increased averagely carbon management index by 11.09% and 14.07% in 0–10 cm and 10–20 cm soils, respectively. The enzyme activities were promoted with the addition of the biochar, and the effects of 0–10 cm soil layer was more obvious than 10–20 cm soil. The combined application (C2Ca2) significantly improved the activities of amylase, cellulase and β -glucosidase, while the C1Ca1 treatment significantly improved invertase activity. Therefore, biochar and calcium peroxide can effectively improve labile organic carbon fractions and enzymes activities associated with carbon cycling in upland red soil, and their combined application is more helpful in soil improvement.

Key words: Soil amendment; Upland red soil; Labile organic carbon; Soil enzymes