

顾 钊,陈小磊,江建峰,等.施用不同类型生物质炭对红黄壤团聚体碳氮分布的影响[J].江苏农业科学,2024,52(1):240-247.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2024.01.034

施用不同类型生物质炭对红黄壤团聚体碳氮分布的影响

顾 钊¹,陈小磊²,江建峰³,杨海峻³,李子川¹,张 睿¹,袁梦婷¹,柴彦君¹

(1.浙江科技学院环境与资源学院,浙江杭州 310023;2.浙江省地质院,浙江杭州 311203;

3.浙江省衢州市衢江区农业技术推广中心,浙江衢州 324022)

摘要:于 2018—2020 年开展定位试验,在同一温度(350 ℃)下热裂解的玉米秸秆炭、水稻秸秆炭、猪粪炭分别以 0、0.75%、2.25% 的添加量施入种植油菜—玉米的新垦红黄壤农田中,研究不同类型的生物质炭及其不同施用量对土壤团聚体粒径分布、碳氮分布规律的影响。结果表明,不同类型的生物质炭及其不同施用量对土壤团聚体粒径分布均未产生显著的影响。与对照(CK)相比,各施炭处理中猪粪炭 2.25% 施用量处理(PMB2)对各粒径团聚体中全氮含量的提升最为显著,在 >0.250、0.250~0.053、<0.053 mm 粒径团聚体中分别显著提高 106.49%、32.82%、78.57% ($P<0.05$)。施用生物质炭显著提升了红黄壤各粒径团聚体中有机碳含量,>0.250 mm 粒径团聚体中 2.25% 施用量的玉米秸秆炭(CSB2)、猪粪炭(PMB2)提升效果最好,分别提高 308.40%、328.46%。在 >0.250 mm 与 0.250~0.053 mm 粒径团聚体重组组分中,猪粪炭 2.25% 施用量处理(PMB2)对于全氮含量提升效果最显著,其他施炭处理相比对照(CK)均显著提升了全氮含量但是不显著。猪粪炭 2.25% 施用量处理(PMB2)对于 >0.250、0.250~0.053 mm 粒径团聚体重组组分有机碳含量提升最明显,<0.053 mm 粒径团聚体中玉米秸秆炭 2.25% 施用量处理(CSB2)提升最高,猪粪炭 2.25% 施用量处理(PMB2)次之。团聚体与重组碳氮比在 >0.250、<0.053 mm 2 个粒径团聚体中均是玉米秸秆炭 2.25% 施用量处理(CSB2)下最高,且 >0.250、0.250~0.053 mm 粒径中重组碳氮比显著高于原土。原土和重组中碳氮比与贡献率之间仅在 >0.250 mm 粒径团聚体中存在显著弱相关,在其他粒径团聚体中均不相关。说明新垦红黄壤农田中施用生物质炭 2 年后,土壤中碳氮等理化性质受到了生物质炭引发的激发效应,但是未影响土壤团聚体分布。

关键词:生物质炭;粒径;团聚体;碳氮比;重组;有机碳;全氮;红黄壤

中图分类号:S152.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2024)01-0240-08

土壤团聚体为土壤结构的最基本单元^[1]。不

同粒径的团粒组合影响着表土层的土壤结构,综合协调着土壤水分循环与养分分布^[2],团聚体稳定与否反映土壤是否具备优异的适于农业生产的土壤结构^[3]。土壤有机碳作为团粒结构的胶结物质之一^[4],与土壤中碎散腐殖质、菌丝等多种物质胶结而成的团粒结构在外力挤压的影响下形成了土壤的稳定状态。团聚体固相骨架所具有的高孔隙度特点不但为微生物提供更适宜的栖息环境^[5],也对

收稿日期:2023-02-14

基金项目:浙江省公益计划(编号:LG18D010004);浙江省自然资源厅科技项目(编号:2022-83)。

作者简介:顾 钊(1998—),男,山东滨州人,硕士研究生,研究方向为生物质资源利用。E-mail:guzhao112@163.com。

通信作者:柴彦君,博士,副研究员,研究方向为退化与污染农田的改良与修复。E-mail:chaiyanjun@zust.edu.cn。

[25]李 姣,刘国顺,高 琴,等.不同生物有机肥与烟草专用复合肥配施对烤烟根际土壤微生物及土壤酶活性的影响[J].河南农业大学学报,2013,47(2):132-137.

[26]韦泽秀,梁银丽,山田智,等.不同水肥条件下番茄土壤微生物群落多样性及其与产量品质的关系[J].植物生态学报,2009,33(3):580-586.

[27]许 江,戴慧敏,刘国栋,等.不同土地利用方式下土壤酶活性的变化研究[J].地质与资源,2020,29(6):579-584.

[28]徐 娜,党廷辉,刘文兆.黄土高塬沟壑区农田土壤养分与作物

产量变化的长期监测[J].植物营养与肥料学报,2016,22(5):1240-1248.

[29]白世红,马风云,李树生,等.黄河三角洲不同退化程度人工刺槐林土壤酶活性、养分和微生物相关性研究[J].中国生态农业学报,2012,20(11):1478-1483.

[30]Canellas L P,Oliveres F L,Okorokova - Façanha A L,et al. Humic acids isolated from earthworm compost enhance root elongation, lateral root emergence, and plasma membrane H^{+} -ATPase activity in maize roots[J]. Plant Physiology,2002,130(4):1951-1957.

内部有机碳形成物理保护以有效减少与外界的接触面积,降低土壤有机物质的矿化与分解,促进土壤有机碳固持。因此,土壤碳固存与养分保持等生态功能和土壤团聚体结构的调控密切相关^[6]。

人类的耕作活动将大团聚体破碎化,使内部有机碳被微生物等消耗分解^[7],而外施生物质炭等富碳物料能促进团聚体胶结,可显著降低耕作活动对于团粒稳定结构的影响^[8],新垦土地作用更加明显。施用生物质炭会造成植物根际的激发效应,同时土壤结构与团聚体粒径分布也会影响根际激发效应的方向和强度,多种潜在机制相互影响造成根际土壤碳氮比的动态变化。目前,生物质炭激发效应与土壤性质之间的关系尚无定论。谭文峰等认为,大粒径微团聚体对有机碳的物理保护作用强于小粒径微团聚体,而小粒径微团聚体对有机碳的化学保护作用更能占据主导地位^[9]。在撂荒恢复的土地中,大团聚体有机碳含量的增加是由大团聚体总量的增加主导的,其次依赖于大团聚体有机碳含量的增加^[10]。生物质炭在土壤中的长期固碳功能是最重要的功能^[11]。与制炭的原生物质材料相比,由于生物质炭中的碳元素有着高度芳香化的特征^[12],生物质炭在土壤中极为稳定,它的固碳时间可达数百年乃至数千年之久^[13]。生物质炭的添加会对土壤质地、土壤性质以及土壤微生物群落等产生巨大的影响,通过间接改变土壤理化性质作用于土壤中原有机碳的矿化^[14-15]。废垦土地施入生物质炭等有机物料可以促进土壤中各密度组分中有机碳、氮的形成和积累,但更有利于土壤中胡敏酸和胡敏素等有机化合物的积累,从而有效提升土壤有机质的腐殖化水平,进一步提高土壤有机质的稳定性。焦欢等发现,单施有机肥显著提高了复垦土壤轻组有机碳含量^[16]。Tong 等基于 17 年长期定位试验发现,矿物结合有机碳是红壤主要的固碳组分,游离颗粒有机碳对于施肥处理具有极其敏感响应^[17]。Lu 等研究发现,生物质炭在沙壤土中会引发负激发效应^[18]。

关于生物质炭施入土壤对土壤团聚体及其稳定性的研究仍存有较多争议。付琳琳等在对水稻土一次施用生物质炭的 3 年定位研究中发现,生物质炭施用会对土壤团聚体中有机碳造成正向的积累作用,有机碳含量得到显著提升^[19]。但也有研究表明,生物质炭的施用并不会对土壤中团粒胶结形成的大团聚体产生影响^[20]。

基于多种生物质炭施用试验对于土壤团聚体碳氮分布研究结果有着不同的结论。生物质炭常为碱性,且对有机碳的研究并未消除生物质炭本身作为惰性碳源的影响。本试验于 2018—2020 年通过田间微区长期定位试验,研究油菜—玉米下不同生物质炭在不同施用量下对新垦红黄壤农田土壤团聚体粒径分布、团聚体中原土与重组组分碳氮含量的影响。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

定位试验始于 2018 年 5 月。试验田位于浙江科技学院校内东南向的山谷中,属亚热带季风气候,年均温 17.3 ℃,年均降水量 1 437 mm,年平均日照时数 1 657.9 h。土壤为硅铁质砂岩风化壳发育形成的黄壤,种植制度为玉米(夏)—油菜(冬)。供试土壤初始理化性质为:有机碳含量 3.93 g/kg,全氮含量 1.04 g/kg,全钾含量 4.73 g/kg,全磷含量 5.02 g/kg,pH 值 7.17。

1.2 试验设计

本研究共设 8 个处理,3 次重复,共 24 个小区。试验小区区划采用随机区组试验设计,每个小区净长 6 m,宽 3.5 m,面积为 21 m²,相邻小区通过水泥墙隔开,上部露土约 10 cm。8 个处理分别为不施肥不施生物质炭(CK)、单施氮磷钾肥(NPK)、玉米秸秆炭 0.75% 与 2.25% 施用量还田(CSB1 与 CSB2)、水稻秸秆炭 0.75% 与 2.25% 施用量还田(RSB1 与 RSB2)、猪粪炭 0.75% 与 2.25% 施用量还田(PMB1 与 PMB2)。肥料施用量与常规施肥处理相同,玉米栽培季氮肥施用量为 225 kg/hm²,磷肥施用量为 120 kg/hm²,钾肥施用量为 180 kg/hm²;油菜栽培季氮肥施用量为 180 kg/hm²,磷肥施用量为 90 kg/hm²,钾肥施用量为 120 kg/hm²。生物质炭基本理化性质见表 1。

表 1 供试土壤所施生物质炭理化性质

生物质炭类型	总碳含量 (%)	总氮含量 (%)	总硫含量 (%)	总氢含量 (%)	pH 值
猪粪炭	29.03	2.63	0.56	2.94	8.27
玉米秸秆炭	52.35	1.15	0.22	2.37	5.13
水稻秸秆炭	54.11	0.83	0.19	2.68	5.30

1.3 样品采集与分析

采样时间为 2020 年 9 月上旬。在玉米收获后

随机采集 10 株玉米根系,取玉米根际土壤,混合均匀后为 1 个土壤样品,带回实验室。将土样内植物残体、砾石等剔除减少试验误差,轻轻沿土壤自然裂缝掰开,避免破坏土壤结构,风干。随后挑去细根与石块,用四分法后采集 250 g 土壤,用于筛分土壤团聚体,通过振筛器所放置的套筛将土样分离为不同粒径(>0.250、0.250~0.053、0.053 mm)的团聚体,再按照团聚体各组分占比将干筛土样配样后放入装有去离子水的水桶套筛中筛分出水稳性团聚体^[21]。

有机质组分的分离参考傅积平等的方法^[22],通过使用 1.8 g/cm³ NaI 溶液将水稳性团聚体分散并通过密度差异分离出重组部分,然后将重组土样研磨,过 100 目筛,测定有机碳和全氮含量。在此基础上计算碳氮比(C/N)和团聚体有机碳(全氮)贡献率。

C/N = 土壤中有机碳含量/土壤中全氮含量;
团聚体有机碳(全氮)贡献率 = 该粒径团聚体中有机碳(全氮)含量 × 该团聚体含量/原土有机碳(全氮)含量 × 100%。

1.4 数据计算与处理

采用 Microsoft Excel 2016 进行数据处理,利用 DPS 数据处理系统 7.05 进行试验数据的统计分析,采用 Duncan's 法在 α = 0.05 水平进行差异显著性检验,使用 GraphPad Prism 绘制图形。

2 结果与分析

2.1 生物质炭施用对红黄壤土壤团聚体组成的影响

各处理下红黄壤团聚体粒径分布结果见表 2。土壤团聚体粒径分布主要以 >0.25 mm 粒径团聚体为主,占比达 49.59% ~ 57.39%;其次为 0.250 ~

0.053 mm 粒径团聚体,占比为 24.50% ~ 28.21%; <0.053 mm 粒径团聚体占比最小,仅占 15.67% ~ 23.07%。各粒径团聚体占比在不同处理之间均未有显著性差异(P < 0.05)。

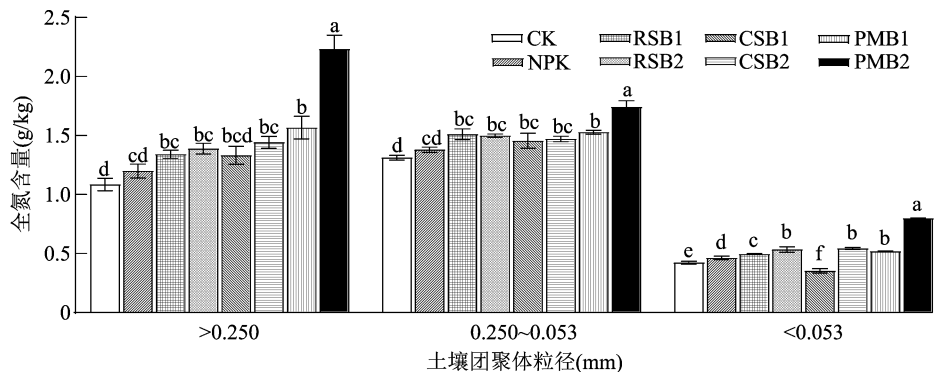
表 2 不同生物质炭施用后红黄壤土壤团聚体的粒径分布组成

处理	土壤团聚体占比(%)		
	>0.250 mm	0.250~0.053 mm	<0.053 mm
CK	52.63 ± 5.81a	25.94 ± 2.54a	21.42 ± 7.69a
NPK	52.74 ± 10.32a	27.16 ± 3.27a	20.10 ± 7.44a
RSB1	56.16 ± 5.99a	24.66 ± 7.73a	19.18 ± 5.72a
RSB2	49.59 ± 7.19a	28.21 ± 5.21a	22.20 ± 6.26a
CSB1	54.76 ± 6.55a	25.34 ± 1.95a	19.89 ± 8.42a
CSB2	52.43 ± 9.00a	24.50 ± 2.28a	23.07 ± 9.01a
PMB1	57.39 ± 2.65a	26.94 ± 2.29a	15.67 ± 2.32a
PMB2	55.37 ± 10.09a	28.03 ± 4.96a	16.60 ± 5.91a

注:同列数据后不同字母表示同一粒径下不同处理间差异显著(P < 0.05)。

2.2 生物质炭施用对团聚体全氮与有机碳含量的影响

由图 1 可知,在红黄壤 >0.250 mm 与 0.250 ~ 0.053 mm 粒径团聚体中,所有处理全氮含量相比于对照(CK)均有提高。生物质炭施用处理下,>0.250 mm 粒径团聚体全氮含量为 1.33 ~ 2.23 g/kg,猪粪炭 2.25% 施用量处理(PMB2)较对照差异最明显;0.250 ~ 0.053 mm 粒径团聚体全氮含量为 1.45 ~ 1.74 g/kg,猪粪炭 2.25% 施用量处理(PMB2)最高;<0.053 mm 粒径团聚体中全氮含量为 0.40 ~ 0.75 g/kg,猪粪炭处理相比植物秸秆炭处理对此粒径全氮含量提升效果更好,相比对照(CK),猪粪炭 2.25% 施用量处理(PMB2)在 >0.250、0.250 ~ 0.053、<0.053 mm 粒径团聚体中分别显著提高 106.49%、32.82%、78.57%(P < 0.05)。



图柱上不同小写字母代表同一粒径不同处理之间在 0.05 水平上差异显著。下图同
图 1 各粒径不同处理土壤团聚体中全氮含量

从各处理团聚体有机碳含量统计结果(图2)可知,在 >0.250 mm 粒径团聚体中,猪粪炭 2.25% 施用量处理(PMB2)与玉米秸秆炭 2.25% 施用量处理(CSB2)中有机碳含量较高,在 >0.250 mm 粒径团聚体中,2.25% 施用量的玉米秸秆炭处理(CSB2)有机碳含量比对照提高 308.40%,2.25% 施用量的猪粪炭处理(PMB2)比对照提高 328.46%,且所有施炭处理与对照(CK)相比有机碳含量均有显著提升。而在 $0.250 \sim 0.053$ mm 粒径团聚体中,水稻秸秆炭 2.25% 施用量处理(RSB2)对有机碳含量的提升效果最佳,且所有施炭处理与对照(CK)相比有机

碳含量均有显著的提升效果,植物秸秆炭处理随着施用量的增加也显著提高了此粒径团聚体有机碳含量,而猪粪炭施用量对有机碳含量的提升效果相反。在 <0.053 mm 粒径团聚体中,施用 0.75% 生物质炭(CSB1、RSB1、PMB1)对于有机碳含量有显著的提升效果,但是这 3 个处理之间差异不显著;玉米秸秆炭 2.25% 施用量处理(CSB2)对此团聚体有机碳含量提升最显著,猪粪炭 2.25% 施用量处理(PMB2)次之。所有处理的有机碳含量都与对照(CK)相比具有显著性提升。

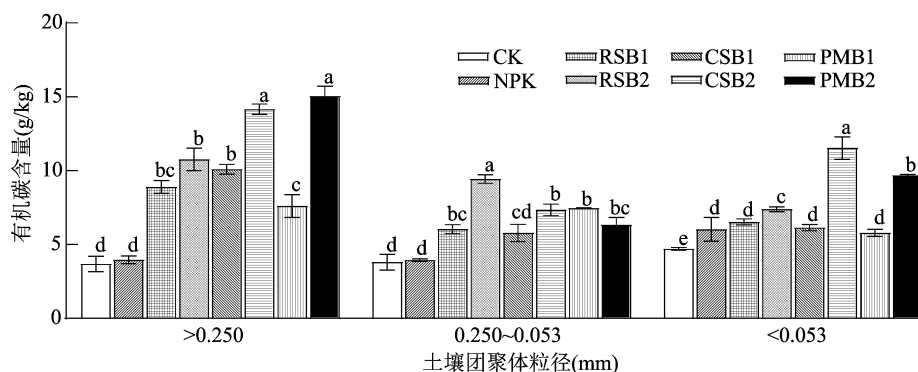


图2 各粒径不同处理土壤团聚体中有机碳含量

2.3 生物质炭施用对团聚体重组全氮与有机碳含量的影响

各粒径团聚体重组组分中全氮含量(图3)显示,在 >0.250 mm 粒径团聚体重组中,除对照(CK)以外,其他处理之间全氮含量没有显著性差异,且玉米秸秆炭 0.75% 施用量处理(CSB1)以外的所有处理中全氮含量均相比对照(CK)有显著提高;在 $0.250 \sim 0.053$ mm 粒径团聚体重组组分中,各处理的

全氮含量与对照相比均有提升,且除水稻秸秆炭 2.25% 施用量处理(RSB2)以外均有显著性提升效果; <0.053 mm 粒径团聚体重组中的全氮含量在 3 种粒径团聚体中最高,除玉米秸秆炭 0.75% 施用量处理(CSB1)以外的所有处理中全氮含量均与对照(CK)有显著差异性($P < 0.05$)。在所有粒径团聚体重组中,猪粪炭 2.25% 施用量处理(PMB2)的全氮含量最高。

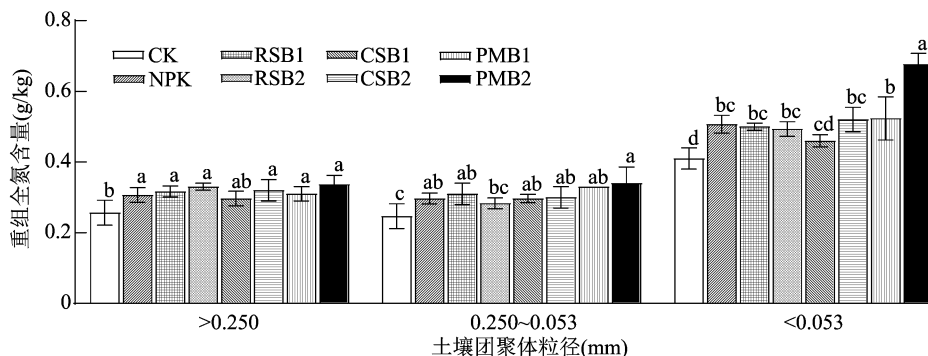


图3 各粒径不同处理土壤团聚体重组中全氮含量

从团聚体重组有机碳含量(图4)可以看出,生物质炭的施用对于各粒径团聚体重组中有机碳含量的影响高于其对全氮含量的影响。除 >0.250 mm 团聚体中猪粪炭 0.75% 施用量处理(PMB1)相比于对照

(CK)重组有机碳含量提升效果较小外,其他处理均对重组有机碳含量有着显著影响($P < 0.05$),其中玉米秸秆炭 2.25% 施用量处理(CSB2)、猪粪炭 2.25% 施用(PMB2)对于各粒径团聚体重组有机碳

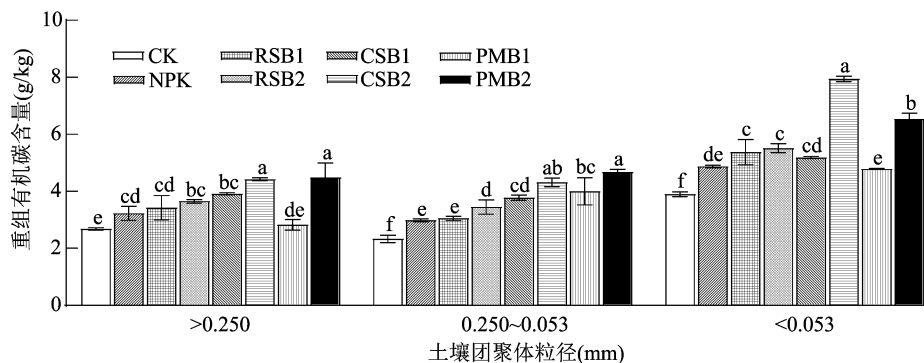


图4 各粒径不同处理土壤团聚体重组中有机碳含量

含量的提升在所有处理中效果较好。

2.4 生物质炭施用对各粒径团聚体碳氮比的影响

从不同粒径团聚体及重组碳氮比(图 5)可以看出, >0.250 mm 与 0.250 ~ 0.053 mm 等 2 个粒径团聚体中的碳氮比显著低于 <0.053 mm 粒径团聚体, >0.250、0.250 ~ 0.05 mm 粒径团聚体中碳氮比分别为 3.4 ~ 10.45、2.86 ~ 6.30。而各粒径之间重组碳氮比总体未有显著差异,且 >0.250 mm 与 0.250 ~ 0.053 mm 2 个粒径团聚体中原土碳氮比显著小于重组部分碳氮比。在原土碳氮比中,除 0.250 ~ 0.053 mm 粒径团聚体中碳氮比随猪粪炭施用量增加减小以外,其他处理土壤碳氮比均随着施用量增

加而增高。>0.250 mm 粒径团聚体重组组分施炭处理碳氮比除猪粪炭处理随着施用量增加而显著提高,秸秆炭处理碳氮比未随着施用量变化而显著变化;0.250 ~ 0.053 mm 粒径团聚体重组组分中,施炭处理碳氮比变化趋势与 >0.250 mm 粒径团聚体中重组组分相反,仅猪粪炭施用处理未随施用量变化而显著变化; <0.053 mm 重组部分施炭处理碳氮比仅玉米秸秆炭处理施用量增加而显著提高,其他 2 种生物质炭处理施用量变化未对重组碳氮比产生显著影响。团聚体与重组部分 <0.053 mm 粒径中猪粪炭处理土壤的碳氮比均相对对照(CK)未有显著变化。

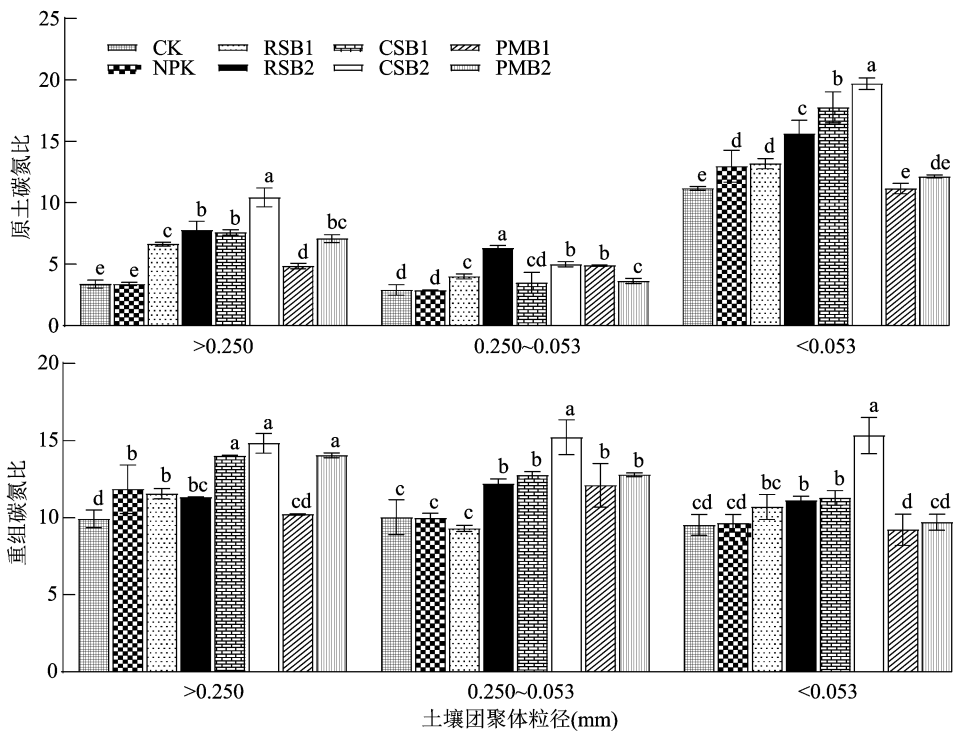


图5 不同处理土壤团聚体与重组中的碳氮比

各粒径团聚体和重组土壤中碳氮比与贡献率的相关性分析结果见表 3,生物质炭施用对于土壤

各粒径团聚体理化性质有不同程度的改变,在 >0.250 mm 粒径中,团聚体与重组土壤碳氮比与

贡献率之间为显著弱相关;而在 0.250 ~ 0.053 mm 与 <0.053 mm 粒径中,团聚体与重组土壤碳氮比与贡献率皆为不相关关系。

表 3 各粒径团聚体与重组土壤中碳氮比与贡献率的相关性

粒径 (mm)	碳氮比与贡献率的相关系数	
	团聚体	重组
>0.250	0.440 *	0.479 *
0.250 ~ 0.053	0.257	0.321
<0.053	0.070	0.103

注: * 表示通过双尾检验($n=24$)在 0.05 水平上显著相关。

3 讨论

3.1 生物质炭施用对红黄壤土壤团聚体粒径分布的影响

土壤大团聚体的胶结是由微生物活动、植物根系、气候等多种因素相互作用而综合影响的过程,高占比的大团聚体意味着土壤团粒胶结具有非常强的稳定性,对于土壤中植物根系、雨水侵蚀有着较强的抵抗能力^[23]。本研究结果显示,在红黄壤施用 2 年生物质炭的情况下,所有生物质炭处理均未能使土壤中 >0.250 mm 粒径水稳性团聚体的含量得到显著变化,这与王富华等的研究结果^[24]相似。虽然破碎化的生物质炭本身作为多孔结构团聚着土壤中粒径较小的黏粒部分^[25],且其表面所具有的如羟基、羧基等多种官能团所带有的电荷,可通过静电引力与矿物质颗粒相结合^[26],形成稳定的土壤团粒结构,但是生物质炭是裂解产生的高度羧酸酯化固态物质,其芳香化结构是其保持稳定性的基础,微生物与自然环境难以分解这种惰性碳源使其更好地与土壤团粒胶结融合^[27]。稳定性的土壤团聚体结构是胶结后的团粒经过外力的挤压选择而成的,生物质炭在施入土壤后对其理化性质的影响是一个长期的动态过程,无法在短期内通过影响植物根系与菌丝间接介导微团聚体向大团聚体胶结;且新开垦的红壤具有立地条件差、耕作层瘠薄的特点,耕作层中大量存在的石块导致胶结的大团聚体无法保持水稳性而破碎,无法形成稳定的大团聚体结构。Peng 等在向红壤施用稻草生物质炭的研究中并未发现生物质炭处理对于土壤中大团聚体的团聚作用产生影响^[28],本试验结果与之相似。但李江舟等的研究结果显示,土壤团聚结构对生物质炭用量反应明显,大团聚体占比得到有效提升^[29]。这说明具有不同性质的土壤在不同施用水平的生物

炭处理下呈现着多种团聚体结构组成^[30],同时不同生物质的组织结构与内含物差异显著,这使得不同原料在不同热解温度下所产生的生物质炭也有着巨大的结构区别^[31],因而对团聚体粒径分布影响效果不同。

3.2 生物质炭施用对红黄壤土壤团聚体与重组碳氮影响

生物质炭作为有机物料的热裂解产物,其本质仍是富碳的有机物质,施入农田土壤后,通过间接改变土壤结构促进土壤中腐殖酸等活跃有机组分的形成^[32-33],而且其多孔结构营造了微生物适宜的生存环境,通过对微生物活性的提升促进土壤“协同共代谢作用”机制,提升了有机碳含量。土壤团聚体外部胶结的多种物质形成对于内部有机碳的有效物理保护并储存在其中。安艳等的研究结果显示,土壤中所有粒径团聚体中有机碳含量均因生物质炭施用处理得到了有效提升,有机碳含量增加幅度与生物质炭的施用量显著正相关^[34]。本研究也发现,不同类型生物质炭处理随着其施用量的增加显著提高各粒径土壤团聚体中的有机碳含量。由于生物质炭作为以富碳为主要特点的土壤改良剂,本身也是为土壤碳库实现碳封存的重要参与者。在本研究中,>0.250 mm 和 <0.053 mm 粒径团聚体中有机碳含量最高,0.250 ~ 0.053 mm 粒径团聚体中有机碳含量最低,这与 Huang 等的研究结果^[35]一致。这表明大团聚体所存在的菌丝将部分稳定的生物质炭颗粒胶结其中,此粒径团聚体所提升的有机碳含量多为生物质炭本身的惰性碳源;同时大团聚体中含有较多的腐殖质等物质也影响了有机碳含量^[3]。

重组有机质由于其稳定性强,无法像活性有机碳对于外界环境具有敏感的反应^[16]。在本试验中,施用生物质炭也显著提升了重组部分的有机碳含量,但是相比于团聚体总有机碳的提升幅度具有显著的差异。可能是生物质炭优异的比表面积提供了微生物的生存空间,微生物活性的提升进而影响了土壤中不同有机组分的活化。

氮是植物发育所必需的营养元素,可吸收的氮元素维持着植物生长活动过程中多种重要化合物的组成,因此土壤碳氮之间具备一定程度的耦合关联。本试验结果显示,施用不同类型生物质炭处理与对照相比,新垦红黄壤根际土中各粒径团聚体全氮含量均得到了大幅度的提升,且猪粪炭对于全氮

含量提升最显著,说明生物质炭施用会有效固持土壤中的氮素,同时一定程度上影响其转化。Doydora 等研究认为,pH 值较小的生物质炭施用后能降低土壤中 50% 以上的氮素损失^[36],这与本试验酸性生物质炭施用研究结果相似。同时,由于猪粪炭制备原料中相较于其他生物质炭原料具有较高的氮含量,此处理为外加氮源,因此具有最显著的全氮含量。此外,本研究中施炭处理重组有机碳中全氮含量相比对照也有显著提升,这说明生物质炭施用后,除本身对于氮素的吸附,还可能通过影响土壤环境进而增强微生物活性来间接动态影响土壤中的氮含量。生物质炭的多孔结构为微生物提供了栖息环境与营养物质等碳源,提高了微生物合成氨基酸等代谢过程对氮的需求,进一步提升了固氮能力^[37]。

3.3 生物质炭施用对红黄壤土壤团聚体碳氮比与影响

土壤碳氮比与微生物对有机物的分解有着显著的关联,较高的碳氮比意味着土壤中对于碳源物质的分解不彻底,土壤碳库可以得到有效的积累^[38]。本研究中秸秆类生物炭施用处理能显著提高新垦红黄壤农田土壤碳氮比,且随着施用量的增加会进一步增强碳氮比的提升效果;猪粪炭施用对于黏粒中碳氮比未产生影响。这与前人的研究结果^[39]类似。这表明生物质炭可以对土壤中碳源物质形成有效的积累作用,为新垦土壤中营养元素与土壤结构的提升产生积极的影响。本研究发现,团聚体中碳氮比的变化并没有随着团聚体粒径的增大而有升高的趋势。虽然土壤团聚体作为微生物生存的重要载体,土壤碳氮比的变化可能会通过影响微生物的活动而影响大团聚体的胶结程度,但不同粒径团聚体之间微生物也存在着一定的差异,使得土壤中碳氮固持和矿化有着差异,从而影响土壤的碳氮比。

4 结论

施用生物质炭未对新垦红黄壤团聚体粒径分布产生显著影响,土壤团聚体稳定性无明显变化,>0.250 mm 粒径团聚体占比最高,约 50%。

土壤有机碳含量与全氮含量在各粒径团聚体中随生物质炭的施用量增加而增加,施用猪粪炭对于各粒径团聚体中全氮含量增加效果最为显著,土壤有机碳主要分布在 >0.250 mm 粒径中,有机碳含量随着团聚体粒径的减小呈现“高一低—高”的

趋势。

土壤团聚体重组组分中有机碳和全氮含量均是 <0.053 mm 粒径团聚体中最高,且各粒径团聚体中生物质炭施用均显著增加其含量。

本次新垦土壤生物质炭施用研究中 <0.053 mm 粒径团聚体碳氮比最高,各粒径团聚体重组组分碳氮比相近,无显著差异,且原土与重组中仅 >0.250 mm 粒径团聚体中碳氮比与贡献率之间存在显著弱相关,其他粒径均不相关。

参考文献:

- [1] Hans J V, Maria B, Alexandra K, et al. A holistic perspective on soil architecture is needed as a key to soil functions [J]. *European Journal of Soil Science*, 2021, 73 (1): 13152.
- [2] 刘中良, 宇万太, 周桦, 等. 不同有机氮肥输入量对土壤团聚体有机碳组分的影响 [J]. *土壤学报*, 2011, 48 (6): 1149 - 1157.
- [3] Six J, Elliott E T, Paustian K. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: a mechanism for C sequestration under no - tillage agriculture [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32 (14): 2099 - 2103.
- [4] 刘鸿宇. 泡桐人工林土壤团聚体稳定性及其影响因素研究 [D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2020: 1 - 5.
- [5] Pulleman M M, Marinissen J C Y. Physical protection of mineralizable C in aggregates from long - term pasture and arable soil [J]. *Geoderma*, 2004, 120 (3/4): 273 - 282.
- [6] 徐香菇, 汪景宽. 土壤团聚体与有机碳稳定机制的研究进展 [J]. *土壤通报*, 2017, 48 (6): 1523 - 1529.
- [7] 刘恩科, 赵秉梅, 梅旭荣, 等. 不同施肥处理对土壤水稳定性团聚体及有机碳分布的影响 [J]. *生态学报*, 2010, 30 (4): 1035 - 1041.
- [8] 王秀娟, 解占军, 董环, 等. 秸秆还田对玉米产量和土壤团聚体组成及有机碳分布的影响 [J]. *玉米科学*, 2018, 26 (1): 108 - 115.
- [9] 谭文峰, 朱志锋, 刘凡, 等. 江汉平原不同土地利用方式下土壤团聚体中有机碳的分布与积累特点 [J]. *自然资源学报*, 2006, 21 (6): 973 - 980.
- [10] 王兴, 钟泽坤, 张欣怡, 等. 长期撂荒恢复土壤团聚体组成与有机碳分布关系 [J]. *环境科学*, 2020, 41 (5): 2416 - 2424.
- [11] Lehmann J. A handful of carbon [J]. *Nature*, 2007, 447 (7141): 143 - 144.
- [12] McBeath A V, Smernik R J. Variation in the degree of aromatic condensation of chars [J]. *Organic Geochemistry*, 2009, 40 (12): 1161 - 1168.
- [13] Fang Y Y, Singh B, Singh B P. Effect of temperature on biochar priming effects and its stability in soils [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, 80: 136 - 145.
- [14] Wang J, Xiong Z, Kuzyakov Y. Biochar stability in soil: meta - analysis of decomposition and priming effects [J]. *GCB Bioenergy*, 2016, 8 (3): 512 - 523.

- [15]梁 尧,韩晓增,丁雪丽,等. 不同有机肥输入量对黑土密度分组中碳、氮分配的影响[J]. 水土保持学报,2012,26(1):174 – 178.
- [16]焦 欢,李廷亮,高继伟,等. 培肥措施对复垦土壤轻重组有机碳氮的影响[J]. 水土保持学报,2018,32(5):208 – 213,221.
- [17]Tong X G,Xu M G,Wang X J,et al. Long – term fertilization effects on organic carbon fractions in a red soil of China[J]. Catena, 2014,113:251 – 259.
- [18]Lu W W,Ding W X,Zhang J H,et al. Biochar suppressed the decomposition of organic carbon in a cultivated sandy loam soil: a negative priming effect[J]. Soil Biology and Biochemistry,2014, 76:12 – 21.
- [19]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特效影响[J]. 土壤通报,2013,44(6):1379 – 1384.
- [20]叶丽丽,王翠红,周 虎,等. 添加生物质黑炭对红壤结构稳定性的影响[J]. 土壤,2012,44(1):62 – 66.
- [21]柴彦君. 灌漠土团聚体稳定性及其固碳机制研究[D]. 北京: 中国农业科学院,2014:14 – 17.
- [22]傅积平,张敬森,熊 毅. 太湖地区水稻土复合胶体的特性[J]. 土壤学报,1983,20(2):112 – 128,215.
- [23]Eynard A,Schumacher T E,Lindstrom M J,et al. Aggregate sizes and stability in cultivated South Dakota prairie ustolls and usterts [J]. Soil Science Society of America Journal,2004,68(4):1360 – 1365.
- [24]王富华,黄 容,高 明,等. 生物质炭与秸秆配施对紫色土团聚体中有机碳含量的影响[J]. 土壤学报,2019,56(4):929 – 939.
- [25]姬 强. 不同耕作措施和外源碳输入对土壤结构和有机碳库的影响[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2016:40 – 42.
- [26]谢嘉伟,魏 龙,肖石红,等. 连州风电场对周边土壤物理性质的影响[J]. 林业与环境科学,2021,37(4):40 – 45.
- [27]柯跃进,胡学玉,易 卿,等. 水稻秸秆生物炭对耕地土壤有机碳及其 CO₂ 释放的影响[J]. 环境科学,2014,35(1):93 – 99.
- [28]Peng X,Zhu Q H,Xie Z B,et al. The impact of manure, straw and biochar amendments on aggregation and erosion in a hillslope Ultisol [J]. Catena,2016,138:30 – 37.
- [29]李江舟,代 快,张立猛,等. 施用生物炭对云南烟区红壤团聚体组成及有机碳分布的影响[J]. 环境科学学报,2016,36(6): 2114 – 2120.
- [30]Busscher W J,Novak J M,Evans D E,et al. Influence of pecan biochar on physical properties of a Norfolk loamy sand[J]. Soil Science,2010,175(1):10 – 14.
- [31]Peng X,Ye L L,Wang C H,et al. Temperature – and duration – dependent rice straw – derived biochar: characteristics and its effects on soil properties of an Ultisol in Southern China[J]. Soil and Tillage Research,2011,112(2):159 – 166.
- [32]花 莉,金素素,洛晶晶. 生物质炭输入对土壤微域特征及土壤腐殖质的作用效应研究[J]. 生态环境学报,2012,21(11): 1795 – 1799.
- [33]曹茜斐,谢军祥,常尧枫,等. 生物质炭对氮转化过程及其功能微生物影响研究进展[J]. 江苏农业学报,2022,38(2):558 – 566.
- [34]安 艳,姬 强,赵世翔,等. 生物质炭对果园土壤团聚体分布及保水性的影响[J]. 环境科学,2016,37(1):293 – 300.
- [35]Huang R,Lan M L,Liu J,et al. Soil aggregate and organic carbon distribution at dry land soil and paddy soil: the role of different straws returning[J]. Environmental Science and Pollution Research,2017,24(36):27942 – 27952.
- [36]Doydora S A,Cabrera M L,Das K C,et al. Release of nitrogen and phosphorus from poultry litter amended with acidified biochar[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2011,8(5):1491 – 1502.
- [37]Biederman L A,Harpole W S. Biochar and its effects on plant productivity and nutrient cycling: a meta – analysis [J]. GCB Bioenergy,2013,5(2):202 – 214.
- [38]Schipper L A,Sparling G P. Accumulation of soil organic C and change in C : N ratio after establishment of pastures on reverted scrubland in New Zealand[J]. Biogeochemistry,2011,104(1): 49 – 58.
- [39]Wang H H,Ren T B,Müller K,et al. Soil type regulates carbon and nitrogen stoichiometry and mineralization following biochar or nitrogen addition[J]. Science of the Total Environment,2021,753: 141645.