

DOI: 10.12101/j.issn.1004-390X(n).201704042

秸秆生物炭与猪粪配施对山原红壤团聚体结构的影响*

李 鑫¹, 李永梅¹, 王自林¹, 范茂攀¹, 杨广容^{2**}

(1. 云南农业大学 资源与环境学院, 云南 昆明 650201;

2. 云南农业大学 龙润普洱茶学院, 云南 昆明 650201)

摘要:【目的】探讨不同生物炭添加对山原红壤团聚体结构的影响。【方法】以山原红壤(CK)为对照, 选用不同比例的秸秆生物炭(0、1%和1.5%), 添加到施用相同量猪粪的山原红壤中, 研究山原红壤团聚体结构的改变。【结果】与CK相比, 随着生物炭量的增加, >0.25 mm水稳性团聚体的含量($WSA_{0.25}$)和>0.25 mm机械稳定性团聚体的含量($MSA_{0.25}$)分别增加了26.15%、30.45%和31.48%, 10.11%、10.32%和10.59%; 土壤团聚体平均质量直径(MWD)则分别降低20.41%、4.08%和3.06%, 但炭粪处理的MWD值和CK差异不显著; 土壤团聚体破坏率(PAD)分别显著降低了18.03%、22.57%和22.55%; 水稳性团聚体分形维数(D)分别降低到2.70、2.69和2.68; 通过分形维数和>0.25 mm团聚体含量的回归分析以及土壤有机质和 $WSA_{0.25}$ 的相关分析, 分形维数和土壤有机质用于表达土壤团聚体含量和稳定性是合理的。【结论】生物炭和猪粪配施显著提高了土壤水稳性团聚体的含量和稳定性。

关键词: 秸秆生物炭; 土壤团聚体; 稳定性; 分形维数

中图分类号: S 156.6

文献标识码: A

文章编号: 1004-390X(2018)04-0737-07

Effect of Straw Biochar and Pig Manure Application on the Structure Aggregates in Mountain Red Soil

LI Xin¹, LI Yongmei¹, WANG Zilin¹, FAN Maopan¹, YANG Guangrong²

(1. College of Resources and Environment, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China;

2. College of Longrun Pu-erh Tea, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China)

Abstract: [Purpose] The effects of straw biochar amendment of different amounts on the structure of aggregates in mountain red soil were revealed in this study. [Method] The different proportions (0, 1% and 1.5%) straw biochar as an additive was selected and added to mountain red soil with pig manure application under organic planting as the original red soil control (CK). And the aggregate structure of treatments was tested. [Result] Compared with CK, the contents of water and mechanical stable aggregates greater than 0.25 mm ($WSA_{0.25}$ and $MSA_{0.25}$) with the increasing amount of straw biochar addition evidently increased by 26.15%, 30.45% and 31.48%, 10.11%, 10.32% and 10.59%, respectively in three treatments, while the mean weight diameters of aggregates (MWD) ob-

收稿日期: 2017-04-26

修回日期: 2017-09-07

网络出版时间: 2018-07-19

*基金项目: 国家自然科学基金项目(41461059, 31660225)。

作者简介: 李鑫(1989—), 女, 陕西西安人, 在读硕士研究生, 主要从事农田土壤磷素迁移与流失控制研究。

E-mail: 1149440901@qq.com

**通信作者 Corresponding author: 杨广容(1974—), 女, 云南大理人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事茶园土壤和古茶树种质资源与茶叶品质的研究。E-mail: 2452739538@qq.com

网络出版地址: [http://dx.doi.org/10.12101/j.issn.1004-390X\(n\).201704042](http://dx.doi.org/10.12101/j.issn.1004-390X(n).201704042)

viously decreased by 20.41%, 4.08% and 3.06%, respectively. There was no significant difference between CK and couples of biochar and pig manure application, but the percentages of aggregate destruction (PAD) significantly decreased by 18.03%, 22.57% and 22.55%, and the fractal dimensions of water-stable aggregates (D) in soils separately decreased to 2.70, 2.69 and 2.68. Investigations of regression relations between fractal dimensions and contents of aggregates greater than 0.25 mm and correlation relations between soil organic matter and $WSA_{0.25}$ clarified that the fractal dimension and soil organic matter were more reasonable choices for showing contents and stability of soil aggregates. [Conclusion] It is suggested that there is a significant improvement on contents and stability of soil aggregates under straw biochar with pig manure application.

Keywords: straw biochar; soil aggregate; stability; fractal dimension

红壤是中国热带与亚热带地区的主要土壤类型, 因经历过强烈的风化淋溶作用, 具有明显的脱硅富铝化特征, 而有机质含量较低, 不利于土壤的团聚作用^[1]。研究表明: 由于近年来农田不合理使用已造成了土壤侵蚀、养分贫乏化、土壤酸化和污染、土壤石质化等土壤退化^[2], 使得红壤中黏粒活性增强, 无机胶结物减少和有机物质难于积累, 影响了土壤稳定性团聚体形成与其数量的累积, 且养分有效性越来越低, 尤其是山原红壤缺磷较为突出^[3]。

土壤团聚体是土壤结构的基本单元, 在维持土壤功能中具有重要作用^[4]。具有良好团聚体结构的土壤, 不仅有高度的保水保肥能力, 而且还将提高土壤养分的生物有效性。因为土壤团聚体结构的大小分布和稳定性影响着土壤的孔隙性、持水性、通透性和抗蚀性^[5]。有研究表明: 除了常规描述土壤团聚体稳定性的方法——团聚体破坏率和土壤团聚体平均质量直径^[6-7]外, 土壤是具有自相似性结构的多孔介质, 具有一定的分形特征, 利用土壤颗粒的重量分布可直接计算土壤团聚体分布的分形维数, 量化地描述团聚体特征与土壤结构的关系, 即团粒结构粒径分布的分形维数越小, 则土壤越具有良好的结构和稳定性^[8]。在一定范围内, 土壤团聚体分形维数越低, 土壤肥力和质地状态越佳^[9]。

生物炭 (Biochar) 是利用生物残体在缺氧的情况下, 经高温慢热解 (通常 <700 °C) 产生的一类难溶的、稳定的、高度芳香化的、富含碳素的固态物^[10]。虽然生物炭的化学性质受原材料、热解条件和生产方式的影响很大, 但它仍含有大量植物养分的灰分, 尤其是 K、Ca 和 Mg 等盐基离子^[11-12]。

因此, 由于生物炭有着广泛的原材料来源、稳定的物理化学性质、丰富的养分存储等优点, 可提高土壤肥力和促进作物生长, 近年来作为一种土壤改良剂受到广泛的关注和研究, 其中, 多数为秸秆生物炭的资源化利用^[13]。并且, 生物炭对土壤化学性质的改良前景是可持续性的^[14]。和许多容易降解的传统土壤有机材料相比, 生物炭的稳定性决定了它可以长期地作为土壤改良材料, 而具有重要应用价值; 此外, 生物炭的多孔性、较大的比表面积以及丰富的有机碳量, 使其在土壤结构性质改善方面具有很好的应用前景^[15-18]。

为探讨秸秆生物炭和猪粪使用对山原红壤团聚体稳定性及其分形特征的影响, 本研究选取经生物炭改良 1 年的山原红壤为对照, 对施用猪粪下的不同比例秸秆生物炭 (0、1% 和 1.5%) 处理, 进行生菜栽培模拟试验, 测定和分析 >0.25 mm 团聚体分布、粒径分布分形维数及其他稳定性指标, 对其团聚体组成特性和分形特征进行比较研究。旨在探索秸秆生物炭添加对结构特性的影响, 定量描述秸秆生物炭对山原红壤质量结构的影响作用, 为秸秆生物炭在土壤改良研究和应用推广提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2016 年 4—10 月在云南农业大学实验农场 (N 25°08'03", E 102°44'46", 海拔 1 921.0 m) 的模拟径流槽内进行, 属于北亚热带低纬高原山地季风气候, 年平均气温 14.9 °C, 极端最高气温 31.5 °C, 极端最低气温 -7.8 °C, 年平均降雨量约 1 000.5 mm, 月最大降雨量 208.3 mm, 日最大

降雨量 153.3 mm, 降雨主要集中在 5—9 月。供试土壤为山原红壤: pH 7.32, 有机质 33.71 g/kg, 速效磷 46.57 mg/kg, 速效钾 99.56 mg/kg, 全氮 0.85 g/kg, 全磷 0.66 g/kg, 全钾 6.19 g/kg。

1.2 试验材料

按生物质炭制作要求自制秸秆生物炭, 并过 1 mm 筛备用; 供试农家肥是腐熟半年后的猪粪, 磨细备用。2 种供试材料的基本性质如表 1。试验作物选用昆明绿生优质抗病四季生菜。

表 1 供试材料的基本化学性质

Tab. 1 Basic chemical properties of tested materials

材料 materials	pH	w/(g·kg ⁻¹)			
		有机质 organic matter	全氮 total nitrogen	全磷 total phosphorus	全钾 total potassium
猪粪 pig manure	8.27	139.23	3.79	23.70	19.85
秸秆生物炭 straw biochar	9.16	—	8.30	19.90	19.20

1.3 试验设计

试验前, 取 3 份山原红壤, 剔除其中的碎石块和枯枝落叶等, 风干处理。保持原状用于土壤团聚体干筛和湿筛的测定 (即 CK)。

按生物炭与山原红壤质量的添加比例为 0、1% (1.25 kg/m²) 和 1.5% (1.88 kg/m²), 设 3 种不同的试验处理, 即 B-0、B-1% 和 B-1.5%。土壤翻松与生物炭混匀后, 将半腐熟的猪粪按 4.5 kg/m² 的量一次性均匀施入, 然后将生物炭按不同比例施入模拟槽的表层土壤 (0~10 cm) 并混合拌匀, 每个处理设 3 次重复。试验装置用 2 mm 的铁皮制成, 模型设计如图 1 所示, 面积为 100 cm×50 cm。

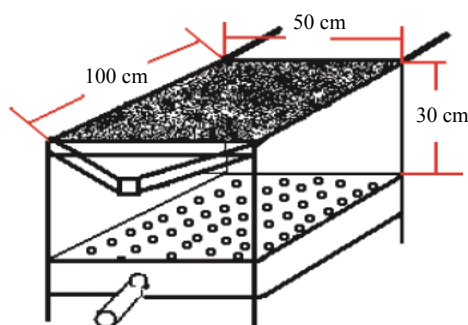


图 1 试验装置模型

Fig. 1 Model of test equipment

每个径流槽种 24 株生菜, 试验期内共种植 3 茬, 常规管理, 除猪粪底肥外, 没有施用其他肥料和农药。最后 1 茬生菜收获后, 分别取各处理表层土壤样品 3 份, 用于种植处理后土壤团聚体干筛及湿筛的测定。

1.4 测定方法

1.4.1 土壤团聚体组成测定

土壤团聚体分机械稳定性和水稳性 2 种结构单位, 通常将 >0.25 mm 的结构单位称为大团聚体分为机械稳定性和水稳性团聚体, 分别采用干筛法和湿筛法测定^[19]。

干筛分析是将风干的土样混匀, 取其中 500 g, 用孔径分别为 5、2、1、0.5、0.25 mm 筛子进行筛分 (筛子附有底和盖), 共 6 级团聚体。筛完后, 将各级筛子上的团聚体及粒径 <0.25 mm 的土粒分别称量 (精确至 0.01 g), 计算干筛的各级团聚体占土样总量的百分含量。然后按其百分比, 配成 2 份质量为 50 g (精确至 0.01 g) 的土样, 置于团聚体分析仪 (TTF-100 型) 上进行湿筛分析^[20], 振荡 30 min, 频率 40 次/min, 湿筛法共分 5 级 (即土壤粒径 >5 mm、≤5~2 mm、≤2~1 mm、≤1~0.5 mm 和 ≤0.5~0.25 mm), 于 85 °C 在烘箱中烘干至恒量, 然后置于室内空气中自然吸湿 2 h, 称量。土壤团聚体组成指标有 >0.25 mm 的机械稳定性团聚体含量 (MSA_{0.25}) 和 >0.25 mm 的水稳性团聚体含量 (WSA_{0.25}), 土壤团聚体稳定性指标有团聚体破坏率 (PAD)、土壤平均质量直径 (MWD) 和团聚体分形维数 (*D*), 分别采用下列公式对 PAD、MWD 和 *D* 进行计算:

团聚体破坏率 (PAD)^[6]=

$$\frac{W_{>0.25\text{mm 风干团聚体}} - W_{>0.25\text{mm 水稳团聚体}}}{W_{>0.25\text{mm 风干团聚体}}} \times 100\%$$

式中, $W_{>0.25\text{ mm 风干团聚体}}$ 是 >0.25 mm 风干团聚体各级粒径的总质量, $W_{>0.25\text{ mm 水稳团聚体}}$ 是 >0.25 mm 水稳性团聚体各级粒径的总质量。

土壤平均质量直径 (MWD)^[6]=($\sum_{i=1}^n \bar{d}_i w_i$)/*W*

式中, $\bar{d}_i$ 为各处理土壤团聚体组分平均颗粒直径, 在数值上等于两级筛孔的平均值; w_i 为各处理土壤团聚体组分的干重; *W* 为不同粒径土壤团聚体的总重。

利用杨培岭等^[8, 21]推导出的公式计算分形维数 (*D*), 由此得出土壤颗粒的重量分布与平均粒径间的分型关系式:

$$\frac{W(\delta > \bar{d}_i)}{W_0} = 1 - \left(\frac{\bar{d}_i}{\bar{d}_{\max}} \right)^{3-D} \quad (1)$$

或

$$\left(\frac{\bar{d}_i}{\bar{d}_{\max}} \right)^{3-D} = \frac{W(\delta < \bar{d}_i)}{W_0} \quad (2)$$

式中, $\bar{d}_i$ 表示两筛分粒级 d_i 与 d_{i+1} 间粒径的平均值, mm; $\bar{d}_{\max}$ 为最大粒级土粒的平均值, mm; $W(\delta > \bar{d}_i)$ 为大于 $\bar{d}_i$ 的累积土粒重量, g; W_0 表示土壤各粒级重量的总和, g; D 为分形维数。

以 $\lg(W_i/W_0)$, $\lg(\bar{d}_i/\bar{d}_{\max})$ 为纵、横坐标, 不难看出 $3-D$ 是 $\lg(\bar{d}_i/\bar{d}_{\max})$ 和 $\lg(W_i/W_0)$ 试验直线的斜率; 因此, 要测定 D 即可用回归分析方法。

1.4.2 土壤和供试材料的基本理化性质

基本理化性质测定参照《土壤农化分析》^[22]。其中, 用凯氏法测定全氮, 用氢氧化钠熔融—钼锑抗比色法测定全磷, 火焰光度计法测定全钾, 有机碳采用重铬酸钾氧化—外加加热法测定, 速效磷采用 0.5 mol/L 碳酸氢钠浸提—钼锑抗比色法测定, 速效钾采用火焰光度计法测定, pH 采用

pH S-3c 酸度计 (其中土壤与水比为 1:2.5, 供试材料猪粪和生物炭与水比则均为 1:5) 测定。

1.5 数据处理

采用 Excel 2003 和 SPSS Statistics 17.0 版软件对试验数据进行方差显著性分析, 相关性分析及线性回归分析和制图等工作。

2 结果与分析

2.1 秸秆生物炭对土壤团聚体含量的影响

由表 2 可知: 与 CK 相比, 不同生物炭处理的 $MSA_{0.25}$ 和 $WSA_{0.25}$ 都显著增加, 且随着生物炭添加量的增加而增加, 均表现为 $CK < B-0 < B-1\% < B-1.5\%$, 但是处理间 $MSA_{0.25}$ 和 $WSA_{0.25}$ 未达到显著差异。说明生物炭和猪粪配施有助于 >0.25 mm 土壤团聚体的形成, 并且生物炭添加量在 0~1.5% 范围内, 土壤水稳性团聚体形成作用随生物炭添加量增加而增强, 比单施猪粪对水稳性团聚体形成的作用明显, 但是生物炭与猪粪配施和单施猪粪对机械稳定性团聚体形成的作用差异不显著。

表 2 秸秆生物炭处理的土壤团聚体组成
Tab. 2 Composition of soil aggregates under straw biochar addition

处理 treatment		团聚体大小/mm aggregate size						%
		>5	≤5~2	≤2~1	≤1~0.5	≤0.5~0.25	>0.25	
湿筛 wet sieving	CK	2.08	11.64	13.62	14.70	6.79	48.83 b	
	B-0	0.60	7.20	9.80	23.50	20.50	61.60 a	
	B-1%	2.70	9.40	9.30	23.00	19.30	63.70 a	
	B-1.5%	1.90	10.50	10.30	22.50	19.00	64.20 a	
干筛 dry sieving	CK	15.62	25.65	23.20	12.75	11.09	88.30 b	
	B-0	41.53	24.49	17.89	8.08	5.25	97.23 a	
	B-1%	31.36	27.22	21.67	10.40	6.76	97.41 a	
	B-1.5%	37.34	26.16	20.15	8.95	5.06	97.65 a	

注: 两种筛法最后一列中不同的字母分别代表方差分析达显著水平 ($P < 0.05$)。

Note: Different letters in the last column from these two sieving in the table show significant difference at 0.05 level separately.

2.2 秸秆生物炭对团聚体结构稳定性的影响

由图 2 可知: 与 CK 相比, 随着生物炭添加量的增加团聚体破换率 (PAD) 反而下降, 其中 B-0、B-1% 和 B-1.5% 处理分别降低了 18.03%、22.57% 和 22.55%, 但处理之间的差异不显著, 说明单施猪粪和生物炭与猪粪配施均对土壤团聚体稳定性有显著增强的作用。但是, 单施猪粪处理的平均质量直径 (MWD) 显著降低, 说明在一定范围内生物炭的添加有助于土壤团粒结构的形

成; 而施用猪粪下添加生物炭处理 B-1% 和 B-1.5% 的 MWD 反而较 B-0 增加, 说明生物炭有利于土壤团聚体的稳定性提高。

2.3 生物炭对土壤团聚体分形特征的影响

由表 3 可知: 4 种不同处理土壤团聚体的粒径分形维数的范围在 1.96~2.76, 且各处理粒径平均直径比与对应团聚体质量比的相关性均在 0.95 以上, 表现为 >0.25 mm 粒径的团粒含量越高, 对应土壤结构粒径分布的分形维数越低。土

壤团聚体分形维数从 CK、B-0、B-1% 到 B-1.5%, 分别在干筛和湿筛条件下表现出依次降低的现象, 说明在施用猪粪下, 生物炭的施用量增加更有利于团粒结构的形成。

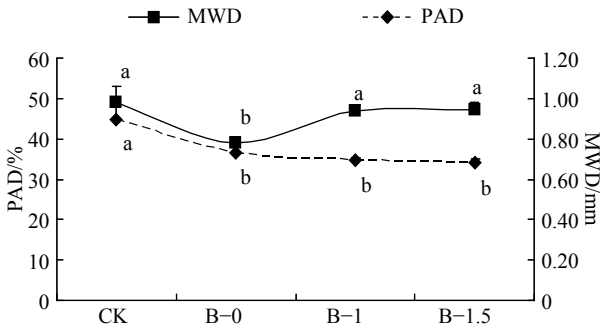


图 2 生物炭不同处理对团聚体破坏率 (PAD) 和平均质量直径 (MWD) 的影响

Fig. 2 Effect of straw biochar addition in different amount on the percentage of aggregate destruction (PAD) and the mean weight diameter (MWD)

表 3 秸秆生物炭添加土壤团聚体分形特征		
Tab. 3 Fractal characteristics of soil aggregates under straw biochar addition		
处理 treatment	相关系数 (r) correlation coefficient	分形维数 (D) fractal dimension
CK	0.995**	2.76
	0.995**	2.31
B-0	0.950	2.70
	0.994**	2.04
B-1%	0.954*	2.69
	0.990**	2.01
B-1.5%	0.960*	2.68
	0.992**	1.96

注: **表示相关性极显著 ($P<0.01$), *表示相关性显著 ($P<0.05$), $n=4$; 下同。
Note: ** represents an extremely significant correlation at 0.01 level, * represents a significant correlation at 0.05 level, $n=4$; the same as below.

由表 4 可知: 相较 CK, 随着生物炭添加量的逐步增加, 各处理分形维数和相应 $WSA_{0.25}$ (X_1) 存在极显著 ($P<0.01$) 负相关, 说明生物炭处理的 $WSA_{0.25}$ 越高, 粒径分布分形维数越低, 土壤结构和稳定性越好, 比单施猪粪的稳定程度好。与 $WSA_{0.25}$ 趋势类似, $MSA_{0.25}(X_2)$ 与土壤团粒结构的粒径分布的分形维数之间为显著正相关 ($P<0.05$), 并且按 CK、B-0、B-1% 和 B-1.5% 顺次升高, 说明不仅单施猪粪对土壤团聚结构的形成有促进作用, 炭粪配施更有助于土壤团聚结构的形成, 而且随着生物炭添加量的增加, 促进效果越佳。

表 4 分形维数与土壤 >0.25 mm 团聚体含量的回归关系

Tab. 4 Regression relationship between soil aggregates greater than 0.25 mm particle size content and fractal dimension

自变量 X independent variable X	回归模型 regression	相关系数 (r) correlation coefficient
$WSA_{0.25}(X_1)$	$D=3.004-0.01X_1$	-0.998**
$MSA_{0.25}(X_2)$	$D=5.304-0.068X_2$	-0.986*

注: $WSA_{0.25}$: >0.25 mm 水稳性团聚体含量; $MSA_{0.25}$: >0.25 mm 机械稳定性团聚体含量。
Note: $WSA_{0.25}$: the content of water stable aggregates greater than 0.25 mm; $MSA_{0.25}$: the content of mechanical stable aggregates greater than >0.25 mm.

2.4 不同处理土壤团聚体组成与有机质的关系

由图 3 可知: 与 CK 相比, 施用猪粪及其添加生物炭处理的有机质含量会有所升高, 其中 B-1% 和 B-1.5% 处理分别增加了 10.84% 和 15.62%。各处理山原红壤 $WSA_{0.25}$ 随着生物炭添加量的增加而升高, 但是 B-0、B-1% 和 B-1.5% 处理间 $WSA_{0.25}$ 差异随生物炭添加量增加变化不显著, 而单施猪粪的 $WSA_{0.25}$ 显著增加。同时, 各处理 $WSA_{0.25}$ 与有机质含量的变化的相关性为 0.65, 说明在一定程度上, 随着生物炭施用量的增加, 土壤有机质含量增加, $WSA_{0.25}$ 也增加。

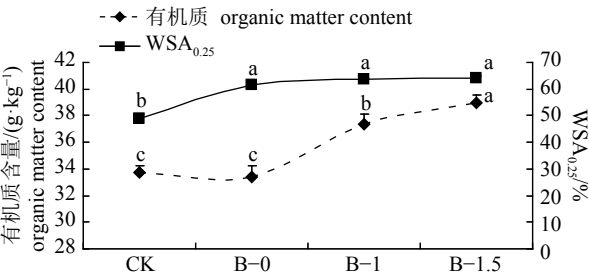


图 3 >0.25 mm 水稳性团聚体含量 ($WSA_{0.25}$) 和有机质含量的关系

Fig. 3 The relationships between the content of soil water-stable aggregates (>0.25 mm particle size, $WSA_{0.25}$) and the content of organic matter

3 讨论

3.1 秸秆生物炭添加增加施猪粪土壤团聚体含量, 提高团粒结构稳定性

本研究表明: 土壤团聚体组成在 $MSA_{0.25}$ 和 $WSA_{0.25}$ 的百分含量总体上表现为 $B-1.5\%>B-1\%>B-0$, 土壤团聚体破坏率 (PAD) 则表现为 $B-1\%<B-1.5\%<B-0<CK$ 。这就说明, 随着生物炭的添加, 土壤团聚体结构和稳定性得到显著地改善,

并且炭粪处理比单施猪粪能显著提高团粒结构稳定性。本研究结果与李江舟等^[23]的研究结果一致。影响土壤团聚体含量和稳定性的内在因素是形成土壤团聚体的胶结物质,生物炭的施用提高了土壤有机质含量和土壤的微生物量,增强了土壤生物活性,因此,会产生更多对土壤起团聚作用的分泌物^[24-25]。

3.2 秸秆生物炭添加对土壤有机质与分形维数和>0.25 mm 水稳性团聚体含量的影响

本研究中,各处理土壤水稳性团粒粒径分布分形维数由小到大依次为: B-1.5%<B-1%<B-0<CK,其粒径分布分形维数与 MSA_{0.25} 和 WSA_{0.25} 的回归系数高达 0.97 和 0.99,说明分形维数和土壤团粒的组成具有较强的相关性,表现为机械性团粒组成和水稳性团粒组成含量越高,粒径团聚程度越高,粒径分布的分形维数越低,本研究结果与侯晓娜等^[26]的研究结果相似,即生物炭与肥料配施可以显著提高水稳性团粒结构的含量,降低土壤团聚体的分形维数,表明分形维数用来表述土壤团聚体结构水平和稳定性是合理的。

本研究还表明:随着生物炭添加量的增加,土壤有机质含量与土壤>0.25 mm 水稳性团聚体呈现为正相关性($R=0.65$)。说明生物炭的添加可以促进有机种植后土壤有机质(有机碳)含量的增加,其作用结果既改善了土壤肥力状况,还降低团聚体的分散率,提高了土壤团聚体的稳定性^[1]。大量研究表明:有机碳是土壤团聚体形成和稳定的主要胶结物质,土壤团聚体里的有机碳浓度随粒径增大而增大^[27];而大团聚体有机碳含量高,不仅是因为有机质通过微团聚体胶结成大团聚体,更重要的是大团聚体中处于分解状态的菌丝可以提升其中有机碳的浓度^[28]。

综上所述,秸秆生物炭的添加能有效地改善有机种植后山原红壤的肥力,提高山原红壤的水稳性团粒结构的含量和稳定性,降低土壤团聚体破坏率和分形维数。

[参考文献]

- [1] ELLIOTT E T. Aggregate structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1986, 50: 627. DOI: 10.2136/sssaj1986.03615995005000030017x.
- [2] 中国科学院红壤生态实验站. 红壤生态系统研究: 第一集[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1992.
- [3] 刘京, 常庆瑞, 李岗, 等. 连续不同施肥对土壤团聚体影响的研究[J]. 水土保持通报, 2000, 20(4): 24. DOI: 10.3969/j.issn.1000-288X.2000.04.006.
- [4] BRONICK C J, LAL R. Soil structure and management: a review[J]. Geoderma, 2005, 24(1): 3. DOI: 10.1016/j.geoderma.2004.03.005.
- [5] 李琰. 不同土地利用方式下紫色土团聚体分形特征和肥力研究[D]. 重庆: 西南大学, 2008: 5.
- [6] 姜灿烂, 何园球, 刘晓利, 等. 长期施用有机肥对旱地红壤团聚体结构与稳定性的影响[J]. 土壤学报, 2010, 47(4): 715.
- [7] SUN F F, LU S G. Biochars improve aggregate stability, water retention, and pore-space properties of clayey soil[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2014, 177(1): 26. DOI: 10.1002/jpln.201200639.
- [8] 杨培岭, 罗远培, 石元春. 用粒径的重量分布表征的土壤分形特征[J]. 科学通报, 1993, 38(20): 1896. DOI: 10.3321/j.issn:0023-074X.1993.20.010.
- [9] 丁杨, 张建军, 茹豪, 等. 晋西黄土区不同林地土壤团聚体分形维数特征与土壤养分相关关系[J]. 北京林业大学学报, 2014, 36(4): 42. DOI: 10.13332/j.cnki.jbfu.2014.04.011.
- [10] 李力, 陆宇超, 刘娅, 等. 玉米秸秆生物炭对 Cd (II) 的吸附机理研究[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(11): 2277.
- [11] DEENIK J L, CLELLAN T M, UEHARA G. Charcoal volatile matter content influences plant growth and soil nitrogen transformations[J]. Soil Fertility and Plant Nutrition, 2010, 74(4): 1259. DOI: 10.2136/sssaj2009.0115.
- [12] RAJKOVICH S, ENDERS A, HANLEY K, et al. Corn growth and nitrogen nutrition after additions of biochars with varying properties to a temperate soil[J]. Biology and Fertility of Soils, 2012, 48(3): 271. DOI: 10.1007/s00374-011-0624-7.
- [13] 陈温福, 张伟明, 孟军. 农用生物炭研究进展与前景[J]. 中国农业科学, 2013, 46(16): 3324. DOI: 10.3864/j.issn.0578-1752.2013.16.003.
- [14] LEHMANN J, RILLIG M C, THIES J, et al. Biochar effects on soil biota: a review[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2011, 43(9): 1812. DOI: 10.1016/j.soilbio.2011.04.022.
- [15] CHEN K Y, VAN ZWIETEN L, MESZAROS I, et al. Agronomic values of greenwaste biochar as a soil amendment[J]. Australian Journal of Soil Research, 2007, 45(8): 629. DOI: 10.1071/SR07109.
- [16] GASKIN J W, STEINER C, HARRIS K, et al. Effect of low temperature pyrolysis conditions on biochar for agricultural use[J]. Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2008, 51(6): 2061. DOI: 10.13031/2013.25409.
- [17] 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. DOI: 10.1097/SS.0b013e3181cb7f46.
- [18] 尚杰, 耿增超, 赵军, 等. 生物炭对壤土水热特性及团聚体稳定性的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(7): 1969. DOI: 10.13287/j.1001-9332.20150527.001.

- [19] F-HZ-DZ-TR-0009. 土壤—大团聚体组成的测定—筛分法[S].
- [20] HILLEL D. Fundamentals of soil physics[M]. New York: Academic Press, Inc., 1980: 93.
- [21] 王德, 傅伯杰, 陈利顶, 等. 不同土地利用类型下土壤粒径分形分析: 以黄土丘陵沟壑区为例[J]. 生态学报, 2007, 27(7): 3081. DOI: [10.3321/j.issn:1000-0933.2007.07.050](https://doi.org/10.3321/j.issn:1000-0933.2007.07.050).
- [22] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 39.
- [23] 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. DOI: [10.13671/j.hjkxxb.2015.0792](https://doi.org/10.13671/j.hjkxxb.2015.0792).
- [24] 张磊, 柳璇, 韩俊杰, 等. 生物炭对土壤团聚体及结合态碳库影响研究进展[J]. 山东农业科学, 2016, 48(9): 157. DOI: [10.14083/j.issn.1001-4942.2016.09.035](https://doi.org/10.14083/j.issn.1001-4942.2016.09.035).
- [25] LIANG B, LEHMANN J, SOHI S P, et al. Black carbon affects the cycling of non-black carbon in soil[J]. Organic Geochemistry, 2010, 41(2): 206. DOI: [10.1016/j.orggeochem.2009.09.007](https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2009.09.007).
- [26] 侯晓娜, 李慧, 朱刘兵, 等. 生物炭与秸秆添加对砂姜黑土团聚体组成和有机碳分布的影响[J]. 中国农业科学, 2015, 48(4): 705. DOI: [10.3864/j.issn.0578-1752.2015.04.08](https://doi.org/10.3864/j.issn.0578-1752.2015.04.08).
- [27] 刘晓利, 何园球, 李成亮, 等. 不同利用方式旱地红壤水稳性团聚体及其碳、氮、磷分布特征[J]. 土壤学报, 2009, 46(20): 255.
- [28] 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. DOI: [10.1016/S0038-0717\(00\)00179-6](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(00)00179-6).

责任编辑: 何馨成