

生物炭对亚热带红壤水稳性团聚体及其碳、氮分布的影响

张红雪^{1, 2}, 赵 壮^{1, 2}, 王晓朋^{1, 2}, 朱巧莲^{1, 2}, 邹双全³, 毛艳玲^{1, 2, 3*}

(1. 福建农林大学资源与环境学院, 福建 福州 350002;

2. 土壤生态系统健康与调控福建省高校重点实验室, 福建 福州 350002;

3. 自然生物资源保育利用福建省高校工程研究中心, 福建 福州 350002)

摘 要: 为探究生物炭对亚热带红壤水稳性团聚体结构及其碳、氮分布的影响, 针对亚热带红壤选用海鲜菇废菌棒为原料制备生物炭, 通过短期盆栽试验, 研究生物炭施用下土壤水稳性团聚体及其碳、氮分布特征。研究结果表明: (1) 土壤水稳性团聚体均以 <0.25 mm 粒径为主, 其中生物炭配施化肥处理含量最高, 为 65.88%, 生物炭能够显著增加土壤粒径 >0.25 mm 水稳性团聚体比例, 增幅达到 40.52%; 配施化肥、猪粪则会降低其含量, 降幅分别为 43.33%、25.33%; (2) 生物炭配施化肥、猪粪可以显著提高土壤平均重量直径与几何平均直径; (3) 施用生物炭可以显著提高土壤有机碳、全氮含量及碳氮比, 平均增幅分别为 154.76%、74.05%、30.16%。综上所述, 生物炭施用有利于提高亚热带红壤水稳性大团聚体含量及稳定性, 且对于土壤碳氮含量的提升效果更为显著。

关键词: 生物炭; 亚热带红壤; 水稳性团聚体; 有机碳; 全氮

团聚体是土壤结构的基本单元, 是土壤质量的物质基础, 其粒级分布和稳定性及其各粒级养分含量对土壤质量、结构以及土壤肥力等方面具有重要影响, 是综合反映土壤肥力的重要参考依据^[1-4]。生物炭是由碳含量丰富的生物质在相对较低温度 (250~700℃) 的无氧或限氧条件下, 通过热裂解的方式得到的一种富有孔隙结构、含碳量高的碳质材料^[2], 因其自身含有丰富的有机大分子和大孔隙等结构, 在土壤结构改良等方面具有重要作用^[3-4]。吴鹏豹等^[5]研究了生物炭对海南花岗岩砖红壤土壤团聚体结构的影响, 发现生物炭增加了土壤中大粒级团聚体的含量, >1 mm 粒级的团聚体的含量增加最为显著。Lu 等^[6]以 0、4、8 和 16 g/kg 施用量开展盆栽试验, 11 个月后发现施加生物炭可以显著提高土壤大团聚体含量, 但对不同类型土壤作用效果有所不同。李江舟等^[7]通过田间定

位试验研究生物炭对云南烟区红壤团聚体组成及有机碳分布的影响, 结果发现生物炭可以长期影响土壤团聚体和有机碳, 能够显著提升土壤大团聚体含量、团聚体稳定性、土壤和各粒级团聚体有机碳含量。米会珍等^[8]研究发现生物炭显著增加了不同粒级团聚体中有机碳和全氮的含量, 且增加幅度随施用量的增加而增大。

我国亚热带红壤区由于长期不合理的利用, 曾一度成为除黄土高原外的另一水土流失严重区^[9], 土壤结构遭受到严重破坏, 团聚体含量锐减, 土壤质量下降, 严重限制了该地区农林业的发展, 因此, 加强土壤结构改良, 提高团聚体含量势在必行。谢锦升等^[10]研究了植被恢复对侵蚀退化红壤团聚体稳定性的影响, 结果发现植被能够显著增加土壤大团聚体含量, >0.25 mm 水稳性团聚体含量是裸地的 1.5~2.8 倍, 且能够增加大团聚体中有机碳比例。然而, 关于不同施肥措施对亚热带红壤团聚体含量、团聚结构及其碳、氮分布的影响还少见报道。为此, 本研究选用福建省古田县产生的海鲜菇废菌棒为原料制备生物炭, 配施化肥、猪粪研究其对土壤团聚体含量、团聚结构及其碳、氮分布的影响, 以期阐明生物炭施用下土壤团聚体含量、团聚结构及其碳、氮分布特征, 为生物炭应用于改善土壤质量提供科学依据。

收稿日期: 2019-10-23; 录用日期: 2019-12-18

基金项目: 中央财政林业科技推广示范项目 (闽 [2018]JTG15 号); 福建省科技厅重大专项专题项目 (2017NZ0001); 校科技创新专项基金项目 (CXZX2017226、CXZX2017116)。

作者简介: 张红雪 (1997-), 女, 山东济宁人, 硕士研究生, 从事土壤碳氮循环研究。E-mail: ameliaisnow@163.com。

通讯作者: 毛艳玲, E-mail: fafum@126.com。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试土壤于2018年10月采自福建省三明市清流县灵地镇杨源村(北纬25° 50' 42" , 东经116° 47' 50"), 该地区为低山丘陵地貌, 平均海拔350 m, 年平均气温18.2℃, 最高气温38.8℃, 最低气温-8.9℃, 年平均降水量1 853.5 mm, 降雨集中在5~6月, 年平均日照时数1 583.4 h。土壤为花岗岩类风化的残坡积物发育的亚热带红壤, 可蚀性高。地带性植被为马尾松林, 2008年皆伐后营造为罗汉松(*Podocarpus macrophyllus*)、竹柏(*Podocarpus nagi*)等人工林。供试土壤采自罗汉松林下表层(0~20 cm)土壤, 土壤经自然风干后, 除去石块、石砾、动植物残体等杂物, 粉碎过2 mm筛备用, 其基本理化性质见表1。试验所用生物炭为海鲜菇废菌棒在500℃条件下采用炭化机无氧炭化2 h后, 冷却研磨过0.15 mm筛而成, 其基本理化性质: pH 10.82, 全碳491.08 g/kg, 全氮20.50 g/kg, 全磷7.80 g/kg、全钾12.11 g/kg、灰分27.52%。化肥为N:P₂O₅:K₂O=15:15:15。猪粪经堆肥发酵, 全碳含量为377.31 g/kg, 全氮含量为23.01 g/kg。

表1 供试土壤基本理化性质

pH	有机质 (g/kg)	全氮 (g/kg)	全磷 (g/kg)	全钾 (g/kg)	碱解氮 (mg/kg)	有效磷 (mg/kg)	速效钾 (mg/kg)
5.43	4.39	0.58	0.26	8.13	24.58	6.41	81.54

1.2 试验设计

试验为盆栽试验, 于2019年1月19日至7月19日在福建农林大学校内进行。盆钵直径25 cm、高35 cm, 每盆装土7 kg, 种植2棵两年生竹柏。试验设6个处理, 分别是: ①CK(对照); ②F(化肥); ③FM(化肥+猪粪); ④B(生物炭); ⑤BF(生物炭+化肥); ⑥BFM(生物炭+化肥+猪粪), 每个处理3个重复。生物炭施用量为20 g/kg(折合大田施用量20 t/hm²); 化肥施用量为0.25 g/kg(参照常規施肥, 折合大田施用量500 kg/hm²); 猪粪施用量为15 g/kg(折合大田施用量15 t/hm²)。

1.3 土壤样品采集及分析

竹柏收获后, 每盆四分法取约1 kg原状土样, 分成两份, 其中一份风干后用于土壤理化性质测

定, 另一份自然风干, 当土壤含水量到土壤塑限(含水量22%~25%)时沿土壤自然裂隙掰成直径1 cm左右的小块继续烘干供团聚体分析测试使用; 采用干筛法^[11]测定土壤非水稳性团聚体组成。首先将风干后的样品过2、1、0.5、0.25 mm筛, 分成>2、2~1、1~0.5、0.5~0.25、<0.25 mm 5个级别的团聚体样品, 称重即计算出各粒级团聚体样品所占风干总土样质量的比例; 采用湿筛法^[12]测定土壤水稳性团聚体组成。根据干筛各粒级团聚体比例配成50 g土壤混合样, 然后将样品置于土壤团粒分析仪(日本, DIK-2012)的套筛上(孔径分别为2、1、0.5、0.25 mm), 置于水桶中, 水面高于样品2 cm, 上下振荡30 min, 振荡频率30次/min, 振幅3 cm, 然后将各级筛子上的土样冲洗到铝盒中, 50℃烘干计算土样质量; 将烘干的团聚体土样磨细, 过0.149 mm筛, 采用碳氮元素分析仪(德国)测定土壤有机碳、全氮含量。

1.4 数据处理与分析

试验结果采用Excel 2013和SPSS 20.0软件进行整理分析。利用各粒级团聚体质量数据, 计算团聚体平均质量直径、几何平均直径和团聚体破坏率, 公式如下:

平均重量直径(MWD):

$$MWD = \frac{\sum_{i=1}^n (\bar{R}_i W_i)}{\sum_{i=1}^n W_i} \tag{1}$$

式中: W_i 为某粒径水稳性团聚体的质量百分比, %; $\bar{R}_i$ 为某粒径团聚体平均直径。

几何平均直径(GMD):

$$GMD = \exp \left[\frac{\sum_{i=1}^n (\ln \bar{R}_i W_i)}{\sum_{i=1}^n W_i} \right] \tag{2}$$

各粒级团聚体有机碳(全氮)对土壤有机碳(全氮)的贡献率由公式(3)计算:

$$\text{贡献率} = \frac{\text{该级团聚体中的有机碳(全氮)含量} \times \text{该级团聚体含量}}{\text{土壤有机碳(全氮)含量}} \times 100\% \tag{3}$$

土壤粒级>0.25 mm水稳定性团聚体比例:

$$WA_{0.25} = 1 - W_{0.25} \tag{4}$$

分形维数(D)参考杨培岭等^[13]推导的公式计算:

$$\frac{M_{(r<\overline{R_i})}}{M_T} = \left(\frac{\overline{R_i}}{R_{\max}}\right)^{3-D} \tag{5}$$

两边取对数则进一步推导

$$D = 3 - \lg\left(\frac{M_{(r<\overline{R_i})}}{M_T}\right) / \lg\left(\frac{\overline{R_i}}{R_{\max}}\right) \tag{6}$$

式中： M_T 为各个粒级团聚体的总质量，g； $R_{\max}$ 是团聚体的最大粒径，mm； $M(r<\overline{R_i})$ 是粒径小于 $\overline{R_i}$ 的团聚体的质量，g。以 $\lg\left(\frac{\overline{R_i}}{R_{\max}}\right)$ 为横坐标， $\frac{M_{(r<\overline{R_i})}}{M_T}$ 为纵坐标，利用最小二乘法直线拟合，计算其斜率得到质量分形维数 D。

2 结果与分析

2.1 生物炭对亚热带红壤水稳性团聚体分布的影响
生物炭对亚热带红壤水稳性团聚体分布的影响如表 2 所示。土壤水稳性团聚体均以 <0.25 mm

粒径为主，其中 BF 处理土壤中粒径 <0.25 mm 水稳性团聚体含量达到 65.88%。粒径 >2 mm 团聚体中，F、BF 及 BFM 处理其水稳性团聚体含量均显著高于对照组，可见，生物炭配施化肥（及猪粪）能显著提高粒径 >2 mm 的水稳性团聚体含量；粒径 2 ~ 1 mm 团聚体中，FM 和 B 处理的水稳性团聚体含量显著高于对照组，B 处理含量最高，达到 28.32%，其他处理与对照组无差异；粒径 1 ~ 0.5 mm 团聚体中，除 BF 处理显著高于对照组外，其他处理均显著低于对照组；粒径 0.5 ~ 0.25 mm 团聚体中，BF、BFM 处理显著降低其水稳性团聚体含量；与 CK 相比，单施生物炭能够显著降低土壤中粒径 <0.25 mm 水稳性团聚体含量，增加了 $WA_{0.25}$ 值，增幅达到 40.52%；而生物炭配施化肥却显著提高土壤粒径 <0.25 mm 水稳性团聚体含量，降低了 $WA_{0.25}$ 的值，降幅为 25.33%；BFM 对其影响则不显著。

表 2 生物炭对亚热带红壤水稳性团聚体分布的影响 (%)

处理	各级团聚体百分比含量					
	>2 mm	2 ~ 1 mm	1 ~ 0.5 mm	0.5 ~ 0.25 mm	<0.25 mm	$WA_{0.25}$
CK	11.30 ± 1.57c	6.08 ± 0.54c	9.44 ± 0.36b	15.78 ± 1.33a	57.40 ± 5.52bc	42.60 ± 4.04b
F	18.74 ± 2.07a	4.82 ± 0.24c	7.18 ± 0.53c	14.26 ± 1.03ab	55.00 ± 4.01c	45.00 ± 2.04b
FM	7.82 ± 0.56d	10.98 ± 0.91b	7.40 ± 0.52c	13.36 ± 1.54ab	60.44 ± 3.35b	39.56 ± 3.61c
B	6.84 ± 0.36d	28.32 ± 2.04a	7.96 ± 1.03c	16.74 ± 2.05a	40.14 ± 6.03d	59.86 ± 6.03a
BF	15.46 ± 1.57b	6.40 ± 0.35c	11.02 ± 1.04a	1.24 ± 0.66c	65.88 ± 5.64a	34.12 ± 2.63c
BFM	18.54 ± 2.31a	6.44 ± 0.24c	8.02 ± 0.93c	11.70 ± 1.05b	55.30 ± 2.55c	44.70 ± 5.05b

注：小写字母为不同处理间各项指标差异显著（ $P<0.05$ ）；下同。

2.2 生物炭对亚热带红壤团聚体稳定性的影响
由表 3 可知，与对照组相比，除 F、B 处理外其他处理的水稳性团聚体平均重量直径均有不同程度的增加，其中 FM、BF 及 BFM 处理达到显著水平，增幅分别为 41.52%、23.02%、42.49%；与

对照组相比，FM、B 及 BFM 处理的水稳性团聚体几何平均直径均显著增加，增幅分别为 20.99%、42.62%、23.37%；各处理土壤团聚体分形维数比较相近，范围为 2.75 ~ 2.88，其中 B 处理的分形维数较小，与对照组相比减少了 3.73%。

表 3 生物炭对亚热带红壤水稳性团聚体稳定性的影响

指标	CK	F	FM	B	BF	BFM
MWD (mm)	0.97 ± 0.05c	0.82 ± 0.08d	1.37 ± 0.09a	1.01 ± 0.05c	1.19 ± 0.06b	1.38 ± 0.12a
GMD (mm)	0.32 ± 0.02c	0.29 ± 0.02c	0.39 ± 0.03b	0.46 ± 0.04a	0.33 ± 0.04c	0.39 ± 0.03b
D	2.86 ± 0.09a	2.85 ± 0.12a	2.87 ± 0.13a	2.75 ± 0.08a	2.88 ± 0.21a	2.85 ± 0.16a

2.3 生物炭对亚热带红壤各粒径团聚体有机碳、全氮含量分布的影响

2.3.1 生物炭对亚热带红壤各粒径团聚体有机碳含量的影响

生物炭对亚热带红壤总有机碳及土壤水稳性团聚体各粒级有机碳含量表现出不同的差异,与对照相比,各处理均显著提高全土的有机碳含量,平均含量提高 74.01% (表 4),其中 BFM 处理有机碳含量最高,为 9.93 g/kg;施用生物炭能增加土壤有机碳含量,但是外源碳与各粒级团聚体结合能力有所差异,结果表明,施用生物炭后各粒级土壤有机碳含量与 CK 相比均有不同程度的提高,其中 CK、FM 和 BF 处理中,>2 mm 粒级比同处理下其他粒级的水稳性团聚体土壤有机碳含量高,F 和 B 处理

中,1 ~ 0.5 mm 粒级比同处理下其他粒级的水稳性团聚体土壤有机碳含量高,BFM 则是 0.5 ~ 0.25 mm 粒级最高。整体水平来看,1 ~ 0.5 mm 粒级的水稳性团聚体土壤有机碳含量与对照组相比增幅最大,增幅为 61.22% ~ 287.79%,其次为 >2 mm 粒级的水稳性团聚体,增幅为 25.00% ~ 110.76%。

从各粒级水稳性团聚体土壤有机碳的相对贡献率(表 5)中可以发现,CK、FM 及 BF 处理有机碳分布以 <0.25 mm 粒级为主,相对贡献率分别为 50.09%、43.06%、57.66%;F 处理有机碳分布以 >2 mm 和 <0.25 mm 粒级为主,相对贡献率为 60.29%;B 处理有机碳除 >2 mm 粒级分布较少外,其余粒级均匀分布(19.52% ~ 25.15%);而 BFM 处理有机碳分布以 <0.5 mm 粒级为主,相对贡献率为 56.81%。

表 4 生物炭对亚热带红壤有机碳含量与各粒级水稳性团聚体有机碳分布的影响 (g/kg)

处理	总有机碳	各级水稳性团聚体有机碳含量				
		>2 mm	2 ~ 1 mm	1 ~ 0.5 mm	0.5 ~ 0.25 mm	<0.25 mm
CK	4.32 ± 0.51c	6.04 ± 0.10c	3.10 ± 0.08d	5.57 ± 0.75e	4.81 ± 0.64d	3.77 ± 0.31c
F	5.74 ± 0.69b	7.55 ± 0.14c	6.68 ± 1.06b	17.17 ± 2.15b	5.05 ± 0.91d	3.72 ± 0.52c
FM	6.12 ± 0.85b	12.26 ± 2.01a	8.47 ± 1.03a	11.31 ± 2.44c	5.71 ± 1.03d	4.36 ± 0.29b
B	8.81 ± 1.02a	12.11 ± 1.13a	6.79 ± 0.95b	21.60 ± 3.57a	12.66 ± 1.61b	5.52 ± 1.02ab
BF	6.93 ± 0.64b	9.29 ± 1.64b	6.24 ± 0.67b	8.95 ± 1.66d	8.69 ± 1.62c	6.07 ± 0.59a
BFM	9.93 ± 1.07a	12.73 ± 1.64a	5.73 ± 0.65c	19.48 ± 2.60ab	22.36 ± 3.68a	5.47 ± 0.62ab

表 5 土壤各粒级水稳性团聚体有机碳的相对贡献率 (%)

处理	水稳性团聚体有机碳的相对贡献率				
	>2 mm	2 ~ 1 mm	1 ~ 0.5 mm	0.5 ~ 0.25 mm	<0.25 mm
CK	15.80 ± 2.01c	4.36 ± 0.51cd	12.17 ± 1.23c	17.57 ± 1.25b	50.09 ± 4.69a
F	24.65 ± 2.32a	5.61 ± 0.36c	21.48 ± 2.03a	12.55 ± 1.69c	35.64 ± 3.51bc
FM	15.67 ± 1.21c	15.20 ± 1.48b	13.68 ± 1.08bc	12.46 ± 0.91c	43.06 ± 5.67b
B	9.40 ± 1.02d	21.83 ± 1.65a	19.52 ± 2.32a	24.06 ± 2.17a	25.15 ± 3.68d
BF	20.72 ± 3.02b	5.76 ± 0.64c	14.23 ± 1.38b	1.55 ± 0.28d	57.66 ± 5.61a
BFM	23.77 ± 2.54a	3.72 ± 0.26d	15.73 ± 2.04b	26.35 ± 1.94a	30.46 ± 2.68c

2.3.2 生物炭对亚热带红壤各粒径团聚体全氮含量的影响

生物炭对亚热带红壤全氮及土壤水稳性团聚体各粒级全氮含量表现出不同的差异,与对照相比,各处理均提高全土的全氮含量,平均含量提高 32.33% (表 6);其中 BFM 处理全氮含量最高,为 0.68 g/kg;施用生物炭能增加土壤全氮含量,但是各粒级增幅有所差异。研究结果(表 6)表明,

施用生物炭后各粒级全氮含量与 CK 相比均有提高。其中 CK 和 FM 处理中 >2 mm 粒级水稳性团聚体全氮含量最高;而 F 和 B 处理中 1 ~ 0.5 mm 粒级水稳性团聚体全氮含量最高;而 BF 及 BFM 处理中 0.5 ~ 0.25 mm 粒级水稳性团聚体全氮含量最高。整体水平来看,1 ~ 0.5 mm 粒级水稳性团聚体全氮含量与对照组相比增幅最大,增幅为 9.62% ~ 130.77%。

表 6 生物炭对亚热带红壤全氮含量与各粒径水稳性团聚体全氮分布的影响

(g/kg)

处理	全氮	各级水稳性团聚体全氮含量				
		>2 mm	2 ~ 1 mm	1 ~ 0.5 mm	0.5 ~ 0.25 mm	<0.25 mm
CK	0.43 ± 0.04c	0.57 ± 0.06c	0.24 ± 0.02d	0.52 ± 0.05d	0.53 ± 0.06c	0.39 ± 0.05b
F	0.50 ± 0.05c	0.67 ± 0.05c	0.58 ± 0.05b	0.98 ± 0.06b	0.47 ± 0.03c	0.38 ± 0.04b
FM	0.56 ± 0.05b	1.14 ± 0.12a	0.73 ± 0.06a	0.78 ± 0.06c	0.51 ± 0.06c	0.44 ± 0.04a
B	0.61 ± 0.05ab	0.84 ± 0.04b	0.45 ± 0.04bc	1.20 ± 0.11a	0.84 ± 0.05b	0.48 ± 0.03a
BF	0.51 ± 0.07bc	0.69 ± 0.05c	0.42 ± 0.03c	0.57 ± 0.02d	0.83 ± 0.04b	0.47 ± 0.02a
BFM	0.68 ± 0.04a	0.94 ± 0.06b	0.36 ± 0.02c	1.20 ± 0.08a	1.35 ± 0.13a	0.42 ± 0.06ab

从各粒级团聚体全氮的相对贡献率(表7)可以发现,各处理中<0.25 mm粒级水稳性团聚体土壤全氮贡献率最高,其中BF处理相对贡献率最大,为60.07%;CK处理的土壤中全氮分布以<0.25 mm粒级为主,其相对贡献率为51.39%;F及FM处理

的土壤中全氮分布以>2和<0.25 mm粒级为主;而生物炭配施化肥后,氮素得到聚集,分布以<0.25 mm粒级为主,相对贡献率为60.07%;BFM处理的土壤全氮分布则主要在<0.5 mm粒级中,相对贡献率为56.98%。

表 7 土壤各粒级水稳性团聚体全氮的相对贡献率

(%)

处理	团聚体全氮的相对贡献率				
	>2 mm	2 ~ 1 mm	1 ~ 0.5 mm	0.5 ~ 0.25 mm	<0.25 mm
CK	14.98 ± 1.56c	3.39 ± 0.35c	11.42 ± 2.06bc	19.45 ± 2.30b	51.39 ± 4.62b
F	25.11 ± 3.61a	5.59 ± 0.64c	14.07 ± 1.54a	13.40 ± 1.51c	41.25 ± 3.21c
FM	15.92 ± 1.20c	14.31 ± 1.35b	10.31 ± 1.20c	12.17 ± 1.62c	46.95 ± 4.57bc
B	9.42 ± 0.59d	20.89 ± 1.82a	15.66 ± 1.60a	23.05 ± 2.06a	31.59 ± 2.68d
BF	20.92 ± 1.34b	5.27 ± 0.73c	12.32 ± 1.61b	2.02 ± 2.42d	60.07 ± 5.38a
BFM	25.63 ± 3.05a	3.41 ± 0.26c	14.15 ± 1.54a	23.23 ± 2.57a	33.75 ± 3.62d

2.3.3 生物炭对亚热带红壤各粒径团聚体碳氮比的影响

生物炭对亚热带红壤碳氮比及土壤水稳性团聚体各粒级碳氮比表现出不同的差异,各处理均显著提高全土的碳氮比,平均提高30.16%(表8);从各粒径水稳性团聚体土壤碳氮比分布中可以看出,含有生物炭的处理与其他处理相比,除F、FM处理的

2~1、0.5~0.25 mm粒径,各个粒级团聚体的土壤其碳氮比均有不同程度的增高。B、BF、BFM处理之间在>2、2~1 mm粒径下无显著差异;1~0.5 mm粒径下,B及BFM处理土壤碳氮比显著高于BF处理;0.5~0.25 mm粒径下,BFM处理后的土壤具有较高的碳氮比;<0.25 mm粒径下,BFM处理的土壤具有较高的碳氮比,达13.18%。

表 8 不同处理下亚热带红壤水稳性团聚体的碳氮比

处理	碳氮比	各级团聚体碳氮比				
		>2 mm	2 ~ 1 mm	1 ~ 0.5 mm	0.5 ~ 0.25 mm	<0.25 mm
CK	9.98 ± 1.02c	10.60 ± 0.96b	12.92 ± 0.84b	10.71 ± 0.65c	0.53 ± 0.06c	9.79 ± 1.02c
F	11.54 ± 0.95b	11.27 ± 0.85b	11.52 ± 1.32c	17.52 ± 0.75a	0.47 ± 0.03c	9.92 ± 0.67c
FM	10.97 ± 0.84b	10.75 ± 0.62b	11.60 ± 0.61c	14.50 ± 0.69b	0.51 ± 0.06c	10.02 ± 0.56bc
B	14.35 ± 1.32a	14.42 ± 1.21a	15.09 ± 2.01a	18.00 ± 1.42a	0.84 ± 0.05b	11.50 ± 1.36b
BF	13.50 ± 1.09a	13.46 ± 0.94a	14.86 ± 1.85a	15.70 ± 0.78b	0.83 ± 0.04b	13.04 ± 1.05a
BFM	14.58 ± 1.25a	13.54 ± 1.31a	15.92 ± 2.12a	16.23 ± 1.35a	1.35 ± 0.13a	13.18 ± 1.36a

3 讨论

土壤团聚体结构在植物生长、土壤水分运移、土壤理化性质等方面发挥着重要作用^[14-15]。有机质是团聚体形成所需的重要胶结物质^[16]，有机碳的含量显著影响土壤团聚体数量^[17]。本试验中，土壤水稳性团聚体均以 <0.25 mm 粒径为主，与对照相比，生物炭配施化肥可以提高粒径 <0.25 mm 团聚体含量，但是配施化肥和猪粪则对土壤粒径 <0.25 mm 的水稳性团聚体含量影响不显著，甚至有所降低，这与龙攀等^[18]和代红翠^[19]的研究结果相似，其原因可能是，配施猪粪进一步增加了有机碳投入，团聚体形成所需的胶结物质更加充足，从而使土壤中水稳性小团聚体形成大团聚体^[20]。

土壤团聚体的稳定性与作物生长、土壤养分、水分保持等方面息息相关，团聚体平均重量直径、几何平均直径、分形维数等是评价团聚体稳定性的重要指标^[20-21]。本研究中，单施生物炭对土壤水稳性团聚体平均重量直径无显著影响，而生物炭配施化肥、猪粪可以显著提高土壤水稳性团聚体平均重量直径，生物炭及其配施化肥和猪粪可以显著提高土壤水稳性团聚体几何平均直径，其值越大，表示团聚体的平均粒径团聚度越高，稳定性越强。这与李江舟等^[7]研究结果一致，这可能是因为一方面生物炭施入土壤后刺激微生物活性，从而产生促进土壤团聚体形成的分泌物，形成更多的团聚体胶结物质，增强团聚体的稳定性^[21]，另一方面生物炭特有的高度发达的孔隙结构和巨大的比表面积，也能够吸附、固定土壤中的无机离子及有机化合物，从而进一步形成有机-无机复合物和大粒径团聚体^[22-23]。分形维数反映了土壤质地的均一程度，可以对土壤结构进行定量化描述^[22]，分形维数越小则土壤结构越松散，团粒结构越好^[23]，本研究中土壤团聚体分形维数比较相近，范围为 2.75 ~ 2.88，其中单施生物炭处理的分形维数与对照相比减少了 3.73%，说明生物炭可以改善土壤的团聚结构，这与徐国鑫等^[24]研究结果一致。

本研究结果显示，生物炭能够显著提高土壤及各粒径团聚体有机碳、全氮及碳氮比含量，且有机碳分布以大团聚体 (>0.25 mm) 为主，说明大团聚体对土壤碳、氮具有强富集和物理保护作用，朱捍华等^[25]、付琳琳^[26]研究稻草易地还土对丘陵红

壤团聚体碳氮分布的影响，发现稻草易地还土可以提高土壤大团聚体含量，且有机碳和全氮的含量较高。施用生物炭可以显著提高土壤总有机碳、总氮含量及碳氮比，平均增幅分别为 154.76%、74.05%、30.16%，吴鹏豹等^[27]研究发现施用生物炭能够增加大团聚体中的有机碳含量，且随着施炭量的增加，土壤总碳也相应增加，其原因一方面可能是生物炭的施用促进植物根系生长，增加了土壤微生物数量和种类，土壤中更多的碳得以被固定并存在于大团聚体中，另一方面根系的分解以及根系分泌物也能够增加大团聚体有机碳的含量^[28]，这与许多学者研究结果相似；陈晓旋等^[29]研究发现生物炭增加了土壤的碳氮比，土壤碳含量的升高也加强了土壤对氮素的固持。

4 结论

土壤水稳性团聚体均以 <0.25 mm 粒径为主，生物炭能够显著增加 $WA_{0.25}$ 团聚体含量，配施化肥、猪粪则会降低其含量。

生物炭配施化肥、猪粪可以显著提高土壤水稳性团聚体平均重量直径、几何平均直径。

生物炭能够显著提高全土及各粒径团聚体土壤有机碳、全氮含量及碳氮比。

参考文献:

- [1] 卢金伟, 李占斌. 土壤团聚体研究进展 [J]. 水土保持研究, 2002, 9 (1): 81-85.
- [2] Glaser B, Haumaier L, Guggenberger G, et al. The 'Terra Preta' phenomenon: a model for sustainable agriculture in the humid tropics [J]. *Naturwissenschaften-Dusseldorf*, 2001, 88 (1): 37-41.
- [3] Laird D A, Fleming P, Davis D D, et al. Impact of biochar amendments on the quality of a typical Midwestern agricultural soil [J]. *Geoderma*, 2010, 158 (3): 443-449.
- [4] 侯晓娜. 生物炭与有机物料配施对砂姜黑土团聚体理化特征的影响 [D]. 郑州: 河南农业大学, 2015.
- [5] 吴鹏豹, 解钰, 漆智平, 等. 生物炭对花岗岩砖红壤团聚体稳定性及其总碳分布特征的影响 [J]. *草地学报*, 2012, 20 (4): 643-649.
- [6] Lu S G, Sun F F, Zong Y T. Effect of rice husk biochar and coal fly ash on some physical properties of expansive clayey soil (Vertisol) [J]. *Catena*, 2014, 114 (2): 37-44.
- [7] 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.
- [8] 米会珍, 朱利霞, 沈玉芳, 等. 生物炭对旱作农田土壤有机

- 碳及氮素在团聚体中分布的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2015, 34 (8): 1550-1556.
- [9] 曾敏, 吕茂奎, 陈坦, 等. 红壤侵蚀退化地土壤对不同来源可溶性有机碳的吸附特征 [J]. 水土保持学报, 2018, 32 (2): 191-222.
- [10] 谢锦升, 杨玉盛, 陈光水, 等. 植被恢复对退化红壤团聚体稳定性及碳分布的影响 [J]. 生态学报, 2008, 28 (2): 702-709.
- [11] 郭军玲, 王虹艳, 卢升高. 亚热带土壤团聚体测定方法的比较研究 [J]. 土壤通报, 2010, 41 (3): 542-546.
- [12] 赵玉明, 高晓飞, 刘瑛娜, 等. 不同水稳性团聚体测定方法的对比研究 [J]. 水土保持通报, 2013, 33 (2): 138-143.
- [13] 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): 1896-1896.
- [14] 袁晶晶, 同延安, 卢绍辉, 等. 生物炭与氮肥配施改善土壤团聚体结构提高红枣产量 [J]. 农业工程学报, 2018, 34 (3): 159-165.
- [15] An S S, Huang Y M, Zheng F L, et al. Aggregate characteristics during natural revegetation on the Loess Plateau [J]. Pedosphere, 2008, 18 (6): 809-816.
- [16] 窦森, 李凯, 关松. 土壤团聚体中有机质研究进展 [J]. 土壤学报, 2011, 48 (2): 412-418.
- [17] Six J, Paustian K, Elliott E T, et al. Soil structure and organic matter: I. Distribution of aggregate-size classes and aggregate-associated carbon [J]. Soil Science Society of America Journal, 2000, 64 (2): 681-689.
- [18] 龙攀, 隋鹏, 高旺盛, 等. 不同有机物料还田对农田土壤有机碳以及微生物量碳的影响 [J]. 中国农业大学学报, 2015, 20 (3): 153-160.
- [19] 代红翠. 有机物料还田对砂质土壤不同粒级团聚体有机碳和细菌群落的影响 [D]. 北京: 中国农业大学, 2017.
- [20] 高焕平, 刘世亮, 赵颖, 等. 猪粪有机肥配施化肥对潮土速效养分及团聚体分布的影响 [J]. 中国农学通报, 2018, 34 (14): 99-105.
- [21] Glaser B, Lehmann J, Zech W. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal—a review [J]. Biology & Fertility of Soils, 2002, 35 (4): 219-230.
- [22] 李腾, 饶伟, 王代长, 等. 不同有机物料对潮土微团粒分形特征和速效养分的影响 [J]. 中国水土保持科学, 2014, 12 (5): 64-71.
- [23] 朱秋丽, 曾冬萍, 王纯, 等. 废弃物施加对福州平原稻田土壤团聚体分布及其稳定性的影响 [J]. 环境科学学报, 2016, 36 (8): 3000-3008.
- [24] 徐国鑫, 王子芳, 高明, 等. 秸秆与生物炭还田对土壤团聚体及固碳特征的影响 [J]. 环境科学, 2018, 39 (1): 355-362.
- [25] 朱捍华, 朱奇宏, 刘守龙, 等. 稻草还土对红壤氮磷积累及有效性的影响 [J]. 土壤通报, 2014, 45 (4): 919-924.
- [26] 付琳琳. 生物质炭施用下稻田土壤有机碳组分、腐殖质组分及团聚体特征研究 [D]. 南京: 南京农业大学, 2013.
- [27] 吴鹏豹, 解钰, 漆智平, 等. 生物炭对花岗岩砖红壤团聚体稳定性及其总碳分布特征的影响 [J]. 草地学报, 2012, 20 (4): 643-649.
- [28] 林雁冰, 薛泉宏, 颜霞. 覆盖模式及小麦根系对土壤微生物区系的影响 [J]. 中国生态农业学报, 2008, 16 (6): 1389-1393.
- [29] 陈晓旋, 黄晓婷, 陈优阳, 等. 炉渣与生物炭配施对福州平原稻田土壤团聚体及碳、氮分布的影响 [J]. 环境科学学报, 2018, 38 (5): 1989-1998.

Effect of biochar on water stable aggregate and distribution of carbon and nitrogen in subtropical red soil

ZHANG Hong-xue^{1, 2}, ZHAO Zhuang^{1, 2}, WANG Xiao-peng^{1, 2}, ZHU Qiao-lian^{1, 2}, ZOU Shuang-quan³, MAO Yan-ling^{1, 2, 3*} (1. College of Resource and Environment, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou Fujian 350002; 2. University Key Lab of Soil Ecosystem Health and Regulation in Fujian, Fuzhou Fujian 350002; 3. Fujian Colleges and Universities Engineering Research Institute of Conservation & Utilization of Natural Bioresources, Fuzhou Fujian 350002)

Abstract: To investigate the effects of biochar on water stable aggregate structure and distribution of carbon and nitrogen in subtropical red soil, in this study, biochar which prepared from spent mushroom substrate was applied in a short-term pot experiment to study the soil aggregate structure and distribution of carbon and nitrogen after biochar application. The results showed that: (1) The particle sizes of soil water stable aggregates were mainly less than 0.25 mm, and its content in biochar combined with chemical fertilizer treatment was the highest, which was 65.88%, and the biochar increased the water stable aggregate content in >0.25 mm soil particle size by 40.52%, but the application of chemical fertilizers and pig manure reduced it, the decline rate was 43.33% and 25.33% respectively. (2) Biochar combined with chemical fertilizer and pig manure significantly improved soil water stability mean weight diameter and geometric mean diameter. (3) Biochar significantly increased soil and organic carbon, total nitrogen content and the ratio of C/N, with an average increase of 154.76%, 74.05% and 30.16%, respectively. In summary, biochar application is beneficial to increase the stability and content of water-stable large aggregates in subtropical red soils, and the effect on soil carbon and nitrogen content is more significant.

Key words: biochar; subtropical red soil; water stable aggregate; organic carbon; total nitrogen