

张伟婷, 郭宇轩, 魏圆慧, 等. 生物炭对林地土壤团聚体稳定性与肥料氮分布的影响 [J]. 福建农业学报, 2024, 39 (3): 345–353.

ZHANG W T, GUO Y X, WEI Y H, et al. Effect of Biochar Application on Aggregate Stability and Nitrogen Fertilizer Distribution of Forestland Soil [J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2024, 39 (3): 345–353.

生物炭对林地土壤团聚体稳定性与肥料氮分布的影响

张伟婷^{1,2}, 郭宇轩^{1,2}, 魏圆慧^{1,2}, 贾广昊^{1,2}, 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:【目的】林地土壤抗侵蚀能力、渗透性及保水性、与土壤团聚体结构稳定性紧密相关, 氮素的固持与分布直接影响林地植被生长与林地土壤团聚体形成。研究生物炭添加对林地土壤结构稳定性与残留氮素分配的影响, 可为增强林地土壤团聚体稳定性、提高土壤氮素固持水平提供参考。【方法】利用福建省林地土壤进行盆栽试验 (1 年), 设置 4 个处理: 对照 (CK)、化肥 (F)、木炭+化肥 (MC)、秸秆炭+化肥 (JC), 除 CK 外, 化肥及生物炭处理均每盆施用尿素 1 g、过磷酸钙 2.19 g、氯化钾 0.44 g, 追肥 ¹⁵N-尿素, 共追施 5 g, 生物炭施用量为每盆 140 g。测定不同处理土壤团聚体组成、团聚体稳定性指标、团聚体氮素含量与分布, 结合 ¹⁵N 示踪技术分析肥料氮在土壤团聚体内的残留特点, 揭示生物炭对林地土壤团聚体稳定性与氮素分配的影响。【结果】(1) 与 F 处理相比, MC 与 JC 处理显著提高了土壤大团聚体含量, 其中 > 2 mm 土壤团聚体增幅最大, 分别增长了 108.92% 与 119.11%; (2) 施用生物炭增强了土壤团聚体稳定性, MC 与 JC 处理平均重量直径 (MWD)、几何平均直径 (GMD) 及 > 0.25 mm 大团聚体含量 ($R_{>0.25\text{ mm}}$) 较 F 处理均显著提升, 分形维数值 (D) 显著下降, JC 处理土壤团聚体稳定性优于 MC 处理; (3) 施用生物炭提高了不同粒径土壤团聚体中全氮含量, MC 处理土壤全氮总量高于 JC 处理, 二者的 > 2 mm 团聚体氮素贡献率较 F 处理分别显著增加了 38.09% 与 69.10%; (4) 施用生物炭使 > 0.25~2 mm 粒级团聚体 $\delta^{15}\text{N}$ 富集, MC 与 JC 处理土壤肥料氮残留量以 > 0.25 mm 粒级最多, 较 F 处理显著增加了 2.25 倍与 3.89 倍, 土壤大团聚体中氮肥残留量与团聚体稳定性呈显著正相关。【结论】施用生物炭有利于增强林地土壤团聚体稳定性, 减少土壤氮素与肥料淋失, 肥料氮在大团聚体中的固持高于微团聚体, 秸秆炭对土壤团聚体稳定性提升效果更显著, 木炭施用更有利于土壤氮素含量增加。

关键词: 生物炭; 团聚体稳定性; 氮肥利用; ¹⁵N 标记; 林地土壤结构

中图分类号: S156.6

文献标志码: A

文章编号: 1008-0384 (2024) 03-0345-09

Effect of Biochar Application on Aggregate Stability and Nitrogen Fertilizer Distribution of Forestland Soil

ZHANG Weiting^{1,2}, GUO Yuxuan^{1,2}, WEI Yuanhui^{1,2}, JIA Guanghao^{1,2}, MAO Yanling^{1,2,3*}

(1. College of Resource and Environment, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou, Fujian 350002, China;

2. University Key Lab of Soil Ecosystem Health and Regulation, Fuzhou, Fujian 350002, China; 3. Fujian Colleges and

Universities Engineering Research Institute of Conservation & Utilization of

Natural Bioresources, Fuzhou, Fujian 350002, China)

Abstract: 【Objective】Effects of biochar addition on the soil aggregates were analyzed for controlling erosion, maintaining permeability, and retaining water and nitrogen fertilizer on forestland. 【Method】In a one-year pot experiment, soil sample from a forestland in Fujian was used in treatments applying either no extra materials as control (CK), a chemical fertilizer (F), wood biochar along with a chemical fertilizer (MC), or straw biochar with a chemical fertilizer (JC). The chemical fertilizer contained 1 g of urea, 2.19 g of superphosphate, and 0.44 g potassium chloride. Biochar was added at 140 g per pot. Nitrogen

收稿日期: 2023-12-19 修回日期: 2024-02-18

作者简介: 张伟婷 (2000—), 女, 硕士研究生, 主要从事土壤碳氮循环研究, E-mail: weitingz00@163.com

* 通信作者: 毛艳玲 (1970—), 女, 博士, 教授, 主要从事土壤碳氮循环研究, E-mail: fafum@126.com

基金项目: 福建省财政厅项目 (闽财指 (2022) 639 号); 中央财政林业科技推广示范项目 (闽 (2023) TG25 号); 福建农林大学科技创新专项基金项目 (KFB23119A)

fertilizer distribution in soil was visualized by analytical data, and a topdressing of 5 g ^{15}N -urea included to trace nitrogen movements. Soil aggregation and aggregate stability were monitored. 【Results】 (1) The content of macroaggregates in soil was significantly raised by MC or JC over F with the greatest effect on the aggregates larger than 2 mm—a 108.92 % increase by MC and 119.11 % by JC. (2) In comparison to F, the presence of biochar under MC and JC stabilized the aggregation structure with significantly higher indexes on MWD, GMD, and $R_{>0.25\text{ mm}}$ and lower D . Between the MC and JC treatments, the latter was superior to the former. (3) The biochar addition also heightened the total nitrogen content in soil aggregates of different sizes. The MC-treated soil had a higher content than the JC counterpart. The nitrogen contribution rate by larger-than-2 mm aggregates was significantly 38.09% more under MC and 69.10 % under JC than F. (4) When biochar was added, more $\delta^{15}\text{N}$ was detected in the $>0.25\text{--}2\text{ mm}$ aggregates. MC resulted in 2.25-fold, and JC 3.89-fold, of that of F. The nitrogen retention in large aggregates significantly correlated with the aggregate stability of soil. 【Conclusion】 Application of biochar not only enhanced the stability of aggregates but also reduced nitrogen loss in soil at forestland. Nitrogen fertilizer was retained more effectively in macro- than micro-aggregates in soil. The straw biochar appeared to improve more on aggregate stability, while wood biochar more so on nitrogen retention.

Key words: biochar; aggregate stability; nitrogen fertilizer utilization; ^{15}N marker; forestland soil structure

0 引言

【研究意义】团聚体是评价土壤质量与结构的重要指标,对土壤物理性质、肥力与水土保持水平有着举足轻重的作用。土壤团聚体稳定性同时影响植物养分吸收与微生物生长代谢^[1]。氮素是植物生长不可或缺的元素,氮素供应不足或过量都会对环境造成威胁。氮素的存在形式与转化过程与土壤团聚结构紧密相关,氮素可通过影响有机质转化、胶结物质形成以及微生物活动影响土壤团聚体形成与稳定,稳定的团聚结构又可吸附和保护氮素,减少肥料氮的淋溶和分解,提高土壤氮素固持能力,土壤团聚体稳定性还可通过调节氮素硝化、氨化作用,影响氮素的吸附与解吸过程^[2]。施用氮肥是提高土壤氮素供应水平的有效手段,近年来,我国氮肥使用量不断增加,达到了全球氮肥使用量的 22%,然而过量的氮肥施用会导致土壤酸化,土壤结构板结,造成更多的养分流失^[3]。因此,通过合理的施肥措施改善土壤结构的同时减少氮素淋失,提高氮肥有效性,减少氮肥使用量是亟待解决的问题。【前人研究进展】生物炭是由生物质在缺氧环境下高温热解形成的稳定固体炭质材料,具有丰富的多孔结构、高比表面积、较强的吸附力以及低污染性等特点,近年来被认为在改良土壤结构、增强土壤固氮能力与提升土壤肥力等方面具有重大潜力^[4]。研究表明,生物炭施用能够减少土壤氮素径流损失,显著提升土壤有机质含量与阳离子交换量,促进土壤大团聚体形成^[5]。与常规施肥相比,秸秆生物炭添加提高了土壤 $>0.25\text{ mm}$ 团聚体含量,增强土壤团聚体稳定性,降低团聚体破坏率,秸秆生物炭添加氮素能起到保产保质的目的^[6]。同时,生物炭的施用还能抑制土壤硝化作用,延长铵态氮在土壤中的停留时间,

维持土壤较高的氮素供应水平以满足植物生长需求^[7]。对农田土壤团聚体稳定性与全氮含量也有明显提升效果,有利于亚热带土壤结构改良^[8]。但也有研究表明生物炭对土壤团聚体稳定性影响较弱,施用后会提高土壤硝化速率^[9-10]。不同生物炭来源与土壤特性是影响团聚体稳定性与氮素分布差异的限制因子,需要针对某一特定土壤类型展开研究。福建省林地土壤面积高达 924.40 hm^2 ,位列全国第一,在缓解区域气候问题、维持土壤生态系统功能稳定方面有着重要作用。土地利用变化、森林砍伐以及不合理的施肥手段等人为因素都会对林地土壤质量造成威胁,林地土壤结构破坏与肥力缺失会影响林下植被的生长,加剧区域性地表侵蚀与水土流失,使林地土壤面积保持更加困难。维持良好的土壤结构与养分水平是维护林地土壤生态安全、减缓林地土壤退化与侵蚀的基础。【本研究切入点】目前有关生物炭对土壤结构稳定性影响的研究大多集中在稻田与旱地土壤上,对生物炭施用后南方林地土壤团聚体结构变化的研究尚较为缺乏,而且针对不同粒径团聚体内氮素分配与残留的影响结论也不一致,缺少残留肥料氮分布与土壤团聚体稳定性的相关性说明。【拟解决的关键问题】本研究基于福建省林地土壤,通过盆栽试验结合 ^{15}N 示踪技术,对施用生物炭后林地土壤氮肥残留分布与团聚体稳定性变化展开研究,探究土壤氮肥残留对团聚体稳定性的影响,为农业废弃物资源化利用、林地土壤结构改良以及促进氮肥减施提供技术支撑。

1 材料与amp;方法

1.1 试验材料

1.1.1 试验地概况

试验地位于福建农林大学科技园 ($119^{\circ}14'14''\text{E}$,

26°04′58″N)，年平均气温 20~25 ℃，雨量充沛，无霜期达 328 d，年平均降雨量为 900~2 100 mm，属亚热带季风性湿润气候。试验土壤采自福建省福州市闽侯县白沙镇（119°04′10″E，26°13′31″N）0~20 cm 表层土壤，年平均气温 18.5 ℃，土壤类型为红壤，经自然风干后去除石块、石砾、动植物残体等杂物，粉碎过 2 mm 筛备用，基本理化性质为 pH 5.76，有机质 21.90 g·kg⁻¹，全氮 1.33 g·kg⁻¹，全磷 0.08 g·kg⁻¹，全钾 354.07 g·kg⁻¹，碱解氮 41.20 mg·kg⁻¹，有效磷 19.26 mg·kg⁻¹，速效钾 33.73 mg·kg⁻¹。

1.1.2 试验材料

试验所用生物炭分别为木屑和水稻秸秆在 550 ℃条件下无氧炭化 2 h 后冷却研磨过 100 目筛而成。木炭基本性质为：pH 8.95、全碳 501.5 g·kg⁻¹、全氮 7.4 g·kg⁻¹、碱解氮 39.01 mg·kg⁻¹；水稻秸秆炭基本性质为：pH 11.31、全碳 573.3 g·kg⁻¹、全氮 2.6 g·kg⁻¹、碱解氮 10.08 mg·kg⁻¹。芳香樟品种为生长状况良好的 2

年生芳香樟（*Cinnamomum camphora*）优质品系 MD1。

1.2 试验方法

采用盆栽试验，试验时间为 2021 年 1~12 月，共设置 4 个处理，分别为：对照（CK）；化肥（F）；木炭+化肥（MC）；水稻秸秆炭+化肥（JC），每个处理 4 个重复。采用高 31 cm、盆口直径 28 cm、底部直径 22 cm 的塑料盆种植芳香樟，每盆装土 7 kg，栽苗 2 株。除 CK 外，其余处理于种植前一天提前施入生物炭、化肥（N、P₂O₅、K₂O），与土壤混匀，每盆生物炭施用量为 140 g（表 1）。采用 ¹⁵N 标记尿素进行追肥，2021 年 3~7 月每月进行一次追肥，每次每盆追施 1 g，共追施 5 次，施肥方法为环状沟施。在芳香樟生长期间按常规措施进行水分和病虫害管理，每盆浇水量为田间持水量的 60%，适时浇水，每次浇水量保持一致。

表 1 不同处理肥料施用量
Table 1 Fertilizer applications for various treatments

处理 Treatment	每盆土壤肥料投入量 Fertilizer input per pot of soil/g					
	追肥 After manuring	基肥 Base fertilizer				
	¹⁵ N-尿素 ¹⁵ N (10.10%)	尿素 N (46%)	过磷酸钙 P ₂ O ₅ (12%)	氯化钾 KCl (60%)	木炭 Wood biochar	秸秆炭 Straw biochar
对照CK	0	0	0	0	0	0
化肥F	5	1	2.19	0.44	0	0
木炭+化肥MC	5	1	2.19	0.44	140	0
水稻秸秆炭+化肥JC	5	1	2.19	0.44	0	140

1.3 土壤样品采集及分析

于 2021 年 12 月采用微型取样器进行土壤取样，采集的土壤样品经混匀、剔除植物根系与动植物残体后风干，每盆用四分法取约 1 kg 原状土样自然风干，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。采用湿筛法^[11]测定土壤团聚体组成。取 100 g 粒径 1 cm 以下的风干土样，置于孔径依次为 2、0.25、0.053 mm 钢制套筛上，调整至水面微没过最上一层筛子中土样，浸泡 5 min 待土样缓慢湿润后，在蒸馏水中上下振荡 30 min，振荡频率 30 次·min⁻¹，振幅 3 cm，分离出 > 2 mm、>0.25~2 mm、>0.053~0.25 mm、≤0.053 mm 团聚体，振荡后将各级筛子上的土样冲洗到已称重铝盒中，将得到的土壤团聚体颗粒 50 ℃烘干称重，利用差减法计算得到各粒级团聚体重量。土壤团聚体稳

定性评估测定指标包括土壤团聚体平均重量直径（MWD）、几何平均直径（GMD）、>0.25 mm 大团聚体含量（R_{>0.25 mm}）、分形维数（D）^[12]。这些参数表明了土壤质地与土壤团聚体尺寸分布、粗糙度，其中 MWD、GMD 与 R_{>0.25 mm} 值越高表明土壤团聚体越稳定，大团聚体比例更高^[13]。计算式如下：

$$W_i = \frac{M_i}{M} \times 100 \tag{1}$$

$$\overline{R}_i = \frac{N_{\max} + N_{\min}}{2} \tag{2}$$

$$MWD = \frac{\sum_{i=1}^n (\overline{R}_i w_i)}{\sum_{i=1}^n w_i} \tag{3}$$

$$GMD = \exp \left[\frac{\sum_{i=1}^n (w_i \ln \overline{R}_i)}{\sum_{i=1}^n w_i} \right] \tag{4}$$

$$R_{>0.25\text{mm}} = \sum_{i=1}^n W_i \tag{5}$$

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

式中： W_i 为某粒径团聚体的质量百分比，%； M_i 为某粒径团聚体的重量，g； M 为全土样重量，g； $\overline{R_i}$ 为某粒径团聚体平均直径； $N_{\max}$ 为某粒径上限， $N_{\min}$ 为某粒径下限， n 为粒径数量； r 为某粒径团聚体直径； $R_{\max}$ 为某粒径团聚体直径上限。

采用元素分析仪-稳定同位素比例质谱联用仪（Vario ISOTOPE cube/Isoprime 100，德国）测定土壤团聚体全氮含量与 $\delta^{15}\text{N}$ 值。计算土壤团聚体氮素对土壤全氮贡献率、各粒级团聚体肥料氮残留量贡献率。贡献率/%=（不同粒级团聚体的全氮含量×该粒级团聚体含量×100）/土壤全氮含量；肥料氮残留量/（g·盆⁻¹）=该粒级团聚体全氮含量×该粒级土壤团聚体干重×（土壤¹⁵N丰度-0.366）/（氮肥¹⁵N丰度-0.366）/1000

1.4 数据统计分析

采用 Microsoft Excel 2019 及 SPSS 25.0 软件进行数据统计与分析，并检验其显著性。采用 Canoco 5 软件进行冗余分析（RDA）。采用 Origin 2021 软件进行绘图。

2 结果与分析

2.1 生物炭对土壤团聚体分布的影响

结果（表2）表明，施用生物炭显著提高了土壤>0.25 mm大团聚体含量（ $P<0.05$ ），降低了微团聚体含量，促进土壤微团聚体向大团聚体转化，其中>2 mm粒级团聚体占比增幅最大。土壤团聚体中占比最高的均为>0.25~2 mm粒级，最少的为>2 mm粒级。施用生物炭处理>2 mm粒径土壤团聚体含量比化肥处理平均显著增加了108.92%与119.11%（ $P<0.05$ ），MC与JC处理间差异不显著。在>0.25~2 mm粒径中，MC、JC处理的土壤团聚体含量显著大于F、CK处理（ $P<0.05$ ），其中MC与JC处理的团聚体含量较F处理分别增长了8.02%与14.19%，JC处理较MC显著增长了5.71%。在>0.053~0.25 mm粒级中，与CK处理相比，F处理降低了土壤团聚体含量，但无明显差异，MC、JC处理下土壤团聚体含量则显著降低，分别降低了15.98%与18.80%，MC与JC处理间无显著差异。≤0.053 mm土壤团聚体中，CK处理的含量最高，F处理次之，两者之间差异不显著（ $P<0.05$ ），MC、JC处理的团聚体含量与CK、F处理相比均显著降低（ $P<0.05$ ）。

表 2 生物炭对土壤各粒级团聚体分布的影响

Table 2 Effect of biochar addition on soil aggregate distribution

处理 Treatment	不同粒级土壤团聚体含量 Soil aggregate content/%			
	>2 mm	>0.25~2 mm	>0.053~0.25 mm	≤0.053 mm
CK	1.30±0.47c	51.64±0.91c	12.45±0.68a	34.61±1.15a
F	3.14±0.73b	53.22±0.51c	11.25±0.27ab	32.39±0.75a
MC	6.56±0.66a	57.49±0.48b	10.46±0.75b	25.49±0.66b
JC	6.88±0.39a	60.77±0.33a	10.11±1.27b	22.24±1.22c

表中数值为平均值±标准差。同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著（ $P<0.05$ ）。下同。

Data are mean±SD; those with different lowercase letters on same column indicate significant differences at $P<0.05$. Same for below.

2.2 生物炭对土壤团聚体稳定性的影响

生物炭施用增强了土壤团聚体稳定性，有利于土壤结构改良，提高了土壤团聚体MWD、GMD及>0.25 mm土壤大团聚体占比，降低了土壤团聚体分形维数值（表3）。MC、JC处理的团聚体平均重量直径MWD较CK处理显著增长了54.73%、62.69%，较F处理显著增长了30.79%、37.52%，MC与JC处理间无明显差异。施肥后土壤团聚体的几何平均直径GMD也有不同程度的增加，与CK处理相比，MC、JC处理分别显著增加了59.97%、82.94%，与F处理相比，MC与JC处理分别显著增加了39.34%、14.36%，JC处理较MC处理GMD也有明显增长，增幅为15.38%（ $P<0.05$ ）。各处理间土壤大团聚体含量具有差异显著，JC处理下土壤大团聚体含量最高，增幅最大，较F处理与MC处理分别显著增长了20.03%、5.62%（ $P<0.05$ ）。土壤团聚体分形维数值越小，团聚体稳定性越好，与F相比，施生物炭处理下土壤分形维数值显著降低（ $P<0.05$ ），其中JC处理土壤分形维数值最小，土壤结构与稳定性最优。

表 3 生物炭对土壤团聚体稳定性的影响

Table 3 Effect of biochar addition on soil aggregate stability

处理 Treatment	平均重量 直径 MWD/mm	几何平均 直径 GMD/mm	>0.25 mm大团聚 体含量 $R_{>0.25\text{ mm}}/\%$	分形维数 D
CK	0.69±0.04c	0.24±0.01c	52.94±0.45d	2.78±0.03a
F	0.81±0.05b	0.28±0.04c	56.36±0.22c	2.77±0.05a
MC	1.06±0.05a	0.39±0.01b	64.05±1.14b	2.72±0.16b
JC	1.12±0.03a	0.45±0.02a	67.65±0.72a	2.69±0.23b

2.3 生物炭对土壤团聚体全氮含量及分配的影响

施用生物炭提升了土壤各粒级团聚体全氮含

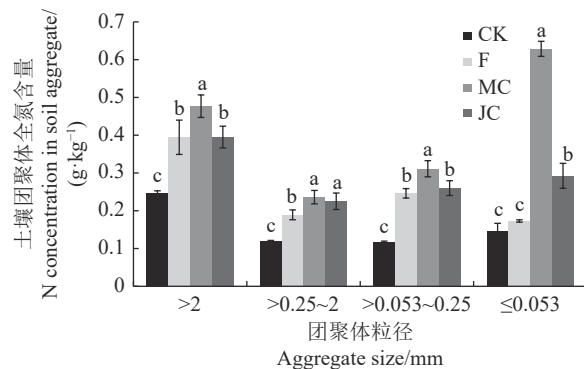
量, MC 处理土壤团聚体内氮素增幅高于 JC 处理, JC 处理 >0.25 mm 大团聚体氮素贡献率显著上升, MC 处理则表现为 <0.25 mm 微团聚体全氮贡献率显著增加。土壤各粒径团聚体全氮含量在 $0.12\sim0.63$ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ (图 1), 不同处理团聚体内全氮含量具有明显差异, 与 CK 处理相比, MC 与 JC 处理各粒径团聚体全氮含量均显著提高, 其中 JC 处理在 $>0.053\sim0.25$ mm 粒径增幅最大, 达 124.43% ($P<0.05$), MC 处理 ≤ 0.053 mm 粒径团聚体全氮增幅最大, 达 329.98%; 与 F 处理相比, MC 处理显著提升了各粒径团聚体全氮含量, 而 JC 处理仅在 $>0.25\sim2$ mm、 ≤ 0.053 mm 团聚体全氮含量显著增加, 增幅分别为 18.99%、69.20% ($P<0.05$)。与 JC 处理相比, MC 处理 >2 mm、 $>0.053\sim0.25$ mm 与 ≤ 0.053 mm 团聚体内氮素含量均显著增加, 增幅分别为 20.68%、19.71%、114.94% ($P<0.05$)。CK、F、JC 处理土壤团聚体全氮主要分布在 $>0.25\sim2$ mm 粒径团聚体中 (图 2), MC 处理氮素更多富集在 ≤ 0.053 mm 团聚体中。与 F 处理相比, MC 与 JC 处理显著提高了 >2 mm 粒径团聚体的全氮贡献率 ($P<0.05$), 增幅分别为 38.09% 与 69.10%。此外, MC 处理 ≤ 0.053 mm 团聚体氮素贡献率也显著增长, 与 F 处理相比提升了 56.53% ($P<0.05$)。

2.4 生物炭对土壤团聚体 $\delta^{15}\text{N}$ 的影响

施用生物炭显著提高了土壤各粒径团聚体 $\delta^{15}\text{N}$ 含量 (图 3), 不同处理土壤团聚体 $\delta^{15}\text{N}$ 含量在 87.69‰~4 008.09‰。与 CK 处理相比, MC 与 JC 处理 $\delta^{15}\text{N}$ 含量在各粒径中均达显著水平, >2 mm 粒径团聚体 $\delta^{15}\text{N}$ 含量增幅最大, 分别显著增加了 17.60 倍与 25.03 倍 ($P<0.05$)。与 F 处理相比, MC 处理 $>0.25\sim2$ mm 粒径团聚体 $\delta^{15}\text{N}$ 含量显著增加了 61.86%, $>0.053\sim0.25$ mm 粒径的 $\delta^{15}\text{N}$ 含量显著增加了 42.86%, 其余粒径团聚体 $\delta^{15}\text{N}$ 含量下降。JC 处理各粒径团聚体 $\delta^{15}\text{N}$ 含量较 F 处理均有增长, 在 $>0.25\sim2$ mm 粒径中与 F 处理达显著性差异, 增幅为 125.90%, 其余粒径团聚体 $\delta^{15}\text{N}$ 含量也有增长, 但均未达显著差异水平。与 MC 处理相比, JC 处理 >2 mm、 $>0.25\sim2$ mm 与 ≤ 0.053 mm 团聚体 $\delta^{15}\text{N}$ 含量均显著增加, 增幅分别为 39.95%、39.57% 与 32.59% ($P<0.05$)。

2.5 生物炭对土壤团聚体中肥料氮残留量的影响

生物炭施用提升了各粒径土壤团聚体中肥料氮残留量, 肥料氮更多固持在 >0.25 mm 土壤大团聚体中, 减少了肥料氮的淋溶损失 (图 4)。各处理土壤团聚体内肥料氮残留量在 $0.67\sim12.05$ $\text{g}\cdot\text{盆}^{-1}$, 氮肥



同一粒径土壤团聚体不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。下同。

Data on same particle size with different lowercase letters indicate significant differences among different treatments at $P<0.05$. Same for below.

图 1 生物炭对土壤团聚体全氮含量的影响

Fig. 1 Effect of biochar addition on total nitrogen content in soil aggregates

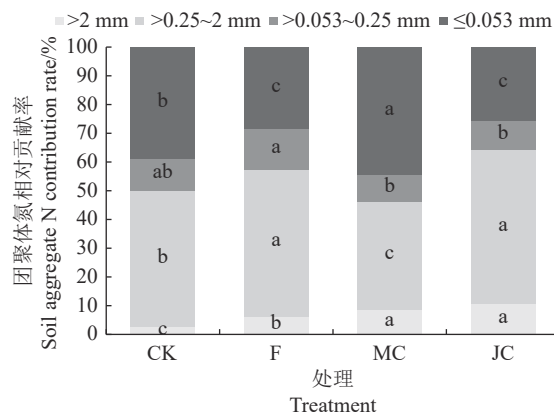


图 2 生物炭对土壤团聚体全氮相对贡献率的影响

Fig. 2 Effect of biochar addition on relative contribution rate of total nitrogen in soil by aggregates

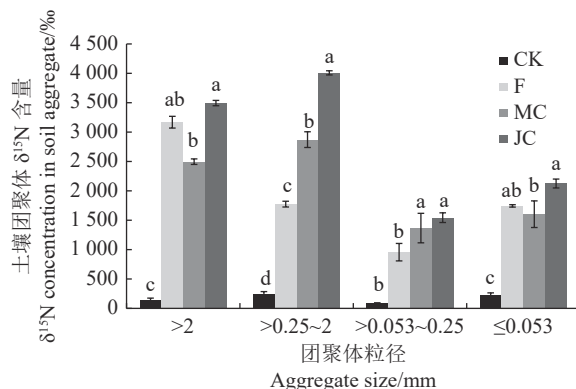


图 3 生物炭对土壤团聚体 $\delta^{15}\text{N}$ 含量的影响

Fig. 3 Effect of biochar addition on $\delta^{15}\text{N}$ in soil aggregates

残留在 $>0.25\sim2$ mm 粒径团聚体中最多, $>0.053\sim0.25$ mm 粒径中最少。生物炭施用后土壤各粒径团聚体肥料氮残留量增加, 在 >2 mm 粒径中, MC、JC 处理肥料氮残留量较 F 处理并无显著差异 ($P<0.05$), 趋势表现为 $\text{JC}>\text{MC}>\text{F}$ 。在 $>0.25\sim2$ mm 粒径中,

与 F 处理相比, MC、JC 处理肥料氮残留量显著增加了 2.25 倍与 3.89 倍, JC 处理较 MC 处理氮肥残留量也有显著增长, 增幅为 33.74% ($P < 0.05$)。在 $>0.053 \sim 0.25$ mm 粒级中, 与 F、JC 处理相比, MC 处理肥料氮残留量显著增加了 67% 与 62% ($P < 0.05$), JC 处理与 F 处理间无显著性差异。在 ≤ 0.053 mm 粒级中, MC 处理肥料氮残留量较 F 与 JC 处理显著增加了 2.20 倍与 94%, JC 处理较 F 处理氮肥残留量也有增加, 但并未达到显著水平。生物炭施用使土壤团聚体中肥料氮残留分配呈现差异, 与 F 处理相比, 施用生物炭使土壤 $>0.25 \sim 2$ mm 粒级团聚体中肥料氮贡献率显著增强 (图 5), MC、JC 处理增幅分别为 19.71%、62.71%, 降低了土壤微团聚体中残留肥料氮贡献率。土壤 >0.25 mm 大团聚体对肥料氮固持作用大于微团聚体, 木炭与秸秆炭施用后肥料氮更多的固持在 >0.25 mm 大团聚体中, 增幅分别达到了 8.87% 与 42.00%。秸秆炭施用后土壤 >0.25 mm 大团聚体肥料氮贡献率较木炭有所增长, 但未达显著性差异。

2.6 土壤团聚体稳定性与肥料氮残留量的相关性

将添加生物炭后不同处理下土壤团聚体稳定性

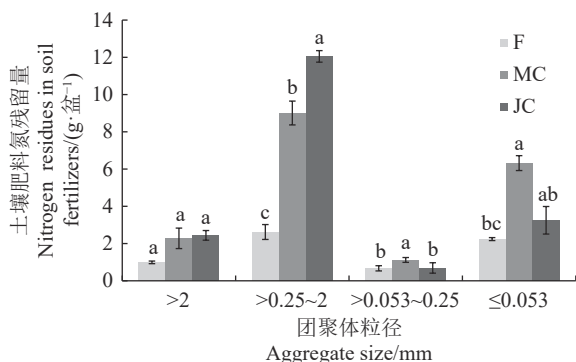


图 4 生物炭对土壤团聚体中肥料氮残留量的影响

Fig. 4 Effect of biochar addition on nitrogen retention of soil aggregates

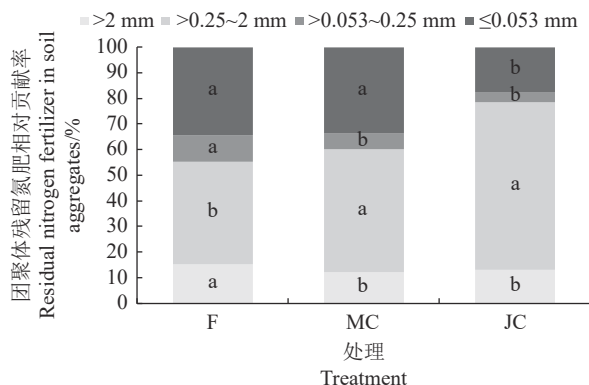


图 5 生物炭对土壤团聚体残留氮肥相对贡献率的影响

Fig. 5 Effect of biochar addition on relative contribution rate of soil nitrogen retention by aggregates

指标与肥料氮残留量进行冗余分析, 结果 (图 6) 表明土壤团聚体稳定性与肥料氮残留量之间具有一定相关性。各粒级团聚体中肥料氮残留量与 GMD、MWD、 $R_{>0.25}$ mm 指标均呈现正相关关系, 与分形维数 D 之间呈现负相关关系, 表明肥料氮残留量越高, 土壤团聚体稳定性越高, 不易被分解。图中肥料氮在 >2 mm 与 $>0.25 \sim 2$ mm 粒级团聚体中的残留量与土壤团聚体稳定性指标 MWD 的相关项更强, 说明不同施肥处理下大团聚体中肥料氮残留量对土壤团聚体稳定性的变化的影响更甚。

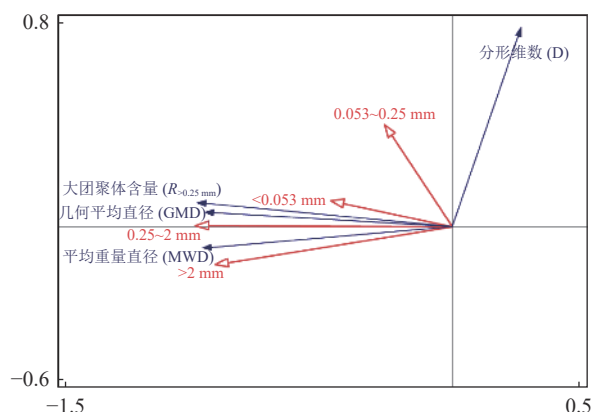


图 6 土壤团聚体稳定性与肥料氮残留量 RDA 分析

Fig. 6 RDA on aggregate stability and nitrogen retention of soil

3 讨论

3.1 生物炭对土壤团聚体稳定性与氮素分配的影响

土壤团聚体是衡量土壤结构的重要指标, 良好的团聚体结构可为输入土壤的氮素提供物理保护, 减缓其分解流失, 提高氮素的长期固存。生物炭因其良好的理化性质常作为良好的土壤改良剂, 有研究表明生物炭的施用对土壤团聚体的形成与稳定具有重要作用^[14]。本研究发现, 施用生物炭提高了土壤 >0.25 mm 粒级大团聚体含量, 特别是对 >2 mm 粒级团聚体提升效果最显著, 团聚体 MWD 值与 GMD 值显著提高, 分形维数值均降低。说明生物炭的施用促进了土壤中微团聚体向大团聚的转化, 有助于增强林地土壤团聚体稳定性与抗侵蚀性。这可能是由于生物炭丰富的孔隙结构能够为微生物提供合适的栖息场所, 土壤微生物 (如菌根菌丝) 及产生的分泌物 (糖和蛋白质) 能将微团聚体和复合体胶结在一起促进小团聚体向大团聚体转化, 有利于大团聚体的形成^[15], 且生物炭主要以稳定的芳香族碳存在^[16], 对提高土壤团聚体稳定性具有长效效应。本研究还发现施用生物炭增加了土壤各粒级团聚体氮素含量与肥料氮残留量, 其中 $>0.25 \sim 2$

mm 粒级团聚体氮肥残留量增幅最大。这可能是由于生物炭丰富的含氧官能团能对土壤中的氮素进行表面吸附, 酚醇类官能团的存在能提高生物炭对阳离子如铵根离子的静电吸附能力, 抑制硝化作用, 增加氮素在土壤中的固定^[17]。施用生物炭后肥料氮主要残留在大团聚体中, 这与王静^[18]的研究结果一致, 生物炭施用对土壤微生物和植物根系活动具有促进作用, 能增加固氮细菌的丰度, 增强土壤团聚结构的形成, 肥料氮进入土壤后会在微生物作用下, 逐渐团聚进较粗粒径中。邵兴芳等^[19]研究发现, 农田土壤有机碳配施化肥条件下, 外源氮主要进入到大团聚体中, 施用有机肥显著提升外源氮在各粒级团聚体中的比例。不同粒径团聚体周转速率存在差异, 微团聚体更新周期长, 以难降解有机质为主, 大团聚体周转率较快, 养分供应能力强, 生物炭施用后, 氮素通过化学桥键与微生物作用被土壤大团聚体包裹延缓释放, 被固持的氮素能在植物生长旺盛阶段进行及时的养分供给, 从而调节土壤中氮素的有效性, 减少肥料氮流失, 提高氮肥利用率。

不同类型生物炭施用下土壤团聚体百分含量与稳定性具有差异。本研究中, 秸秆炭处理土壤 >0.25 mm 大团聚体含量与团聚体稳定性均高于木炭。这可能是由于生物炭的施用增加了土壤外源有机碳含量, 有机碳能够充当土壤团聚体胶结剂, 促进团聚体的形成^[20], 而本试验中秸秆炭全碳与灰分含量高于木炭, 施用后土壤颗粒的胶结作用更强, 更有利于大团聚体的形成。土壤团聚体稳定性的差异可能与不同类型生物炭性质有关, 秸秆炭的高比表面积会增加土壤团聚体与生物炭间接接触面积与结合力, 影响土壤孔隙度与持水性。张彬等^[21]研究发现, 土壤持水性与孔隙度是影响团聚体稳定性的关键因素, 同时, 秸秆炭较木炭对大团聚体的促进效果更强, 大团聚体的形成在提高团聚体稳定性方面具有正向作用。施用木炭比秸秆炭对土壤氮素含量提升效果更为显著, 秸秆炭处理土壤 >2 mm 粒级大团聚体的氮素含量与贡献率显著高于微团聚体, 而木炭处理则表现为 ≤ 0.053 mm 微团聚体氮素更为富集。说明生物炭类型是影响土壤团聚体氮素分布的重要因素, 木炭富含的全氮含量更高, 施入土壤后能直接增加土壤团聚体氮素水平。秸秆炭处理土壤大团聚体含量更多, 有效增加了土壤氮素滞留, 同时微团聚体也会不断黏附形成大团聚体, 从而使大团聚体中氮素含量提高^[22]。李天豪等^[23]研究发现施用秸秆炭后, 土壤氮素积累量在 >0.25 mm 团聚体中更

高, 这与本研究结果类似。团聚体氮素贡献率不仅受氮素含量影响也与各粒级团聚体比例相关, 秸秆炭处理下土壤大团聚体占优势比例, 氮素含量更高, 大团聚体内氮素分配量也随之增加。同时木炭具有更低的 pH 值, 有助于提高铁铝氧化物对黏粒的吸附力, 土壤小颗粒与有机质之间胶结作用更强, 从而使氮素在结合时更多地包裹在为微团聚体中^[24]。

3.2 土壤团聚体稳定性与肥料氮残留量冗余分析

土壤团聚体稳定性是土壤有机质含量及养分迁移的重要影响因素, 土粒团聚度越高, 土壤抗侵蚀、减缓退化的能力就越强。本研究中团聚体稳定性与各粒级中肥料氮的残留量具有显著的相关性, 土壤团聚体 MWD、GMD 与残留在土壤 >0.25 mm 粒级大团聚体中的肥料氮含量显著正相关。这表明团聚体的稳定性对氮转化、固定等过程具有重要影响, 残留在土壤大团聚体中的肥料氮越多, 团聚体稳定性就越高。李伟等^[25]研究发现土壤水稳性团聚体 GMD 与有机碳含量显著正相关, 表明土壤养分含量影响团聚体稳定性。樊慧琳等^[26]研究发现土壤大团聚体数量对提高团聚体稳定性具有正向作用。本试验中生物炭施用增加了土壤中的氮素含量, 氮肥施用后, 由于生物炭的吸附特性及其对土壤微生物环境的改善, 影响了土壤的硝化作用与反硝化作用, 使肥料氮更多地被固持在土壤大团聚体中, 土粒在胶结剂与氧化物的作用下逐渐团聚, 使得土壤中大团聚体的含量显著增长, 稳定性升高。

4 结论

不同类型生物炭均有效提高了土壤大团聚体含量与稳定性, 对减缓林地土壤侵蚀与退化具有积极作用; 与化肥处理相比, 施用生物炭土壤团聚体中肥料氮残留量显著增加, 且主要残留在大团聚体中, 大团聚体对氮素起到物理保护作用, 提高了肥料的有效性, 避免养分流失; 本试验中施用秸秆炭后林地土壤大团聚体氮肥残留量与团聚体稳定性优于木炭, 大团聚体肥料氮残留量与团聚体稳定性具有正相关关系, 残留量高更有利于维持林地土壤氮素养分长效供应。

参考文献:

- [1] 刘亚龙, 王萍, 汪景宽. 土壤团聚体的形成和稳定机制: 研究进展与展望 [J]. 土壤学报, 2023, 60 (3): 627–643.
LIU Y L, WANG P, WANG J K. Formation and stability mechanism of soil aggregates: Progress and prospect [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2023, 60(3): 627–643. (in Chinese)

- [2] 张玉琪, 吴玉鑫, 李强, 等. 东祁连山不同退化程度高寒草甸土壤氮素与团聚体特征及关系研究 [J]. 草地学报, 2021, 29 (10): 2286–2293.
- ZHANG Y Q, WU Y X, LI Q, et al. Characteristics and relationship between soil nitrogen and aggregates in alpine meadows with different degradation in eastern Qilian Mountains [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2021, 29(10): 2286–2293. (in Chinese)
- [3] KHAN Z, YANG X J, FU Y Q, et al. Engineered biochar improves nitrogen use efficiency via stabilizing soil water-stable macroaggregates and enhancing nitrogen transformation [J]. *Biochar*, 2023, 5: 52.
- [4] 武玉, 徐刚, 吕迎春, 等. 生物炭对土壤理化性质影响的研究进展 [J]. 地球科学进展, 2014, 29 (1): 68–79.
- WU Y, XU G, LÜ Y C, et al. Effects of biochar amendment on soil physical and chemical properties: Current status and knowledge gaps [J]. *Advances in Earth Science*, 2014, 29(1): 68–79. (in Chinese)
- [5] 杨宇, 李成蓉, 彭银, 等. 生物炭与有机肥施用对红壤理化性质及氮素径流损失的影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2023, (4): 16–24.
- YANG Y, LI C R, PENG Y, et al. Effects of biochar and organic fertilizer application on physical and chemical properties of red soil and nitrogen losses by runoff [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2023(4): 16–24. (in Chinese)
- [6] 刘慧屿, 娄春荣, 韩英祚, 等. 秸秆生物炭与减量氮肥配施对玉米氮素利用率及土壤结构的影响 [J]. 土壤通报, 2020, 51 (5): 1180–1188.
- LIU H Y, LOU C R, HAN Y Z, et al. Impact of biochar addition combined with reduced nitrogen fertilizer on nitrogen use efficiency and soil structure in brown earth [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2020, 51(5): 1180–1188. (in Chinese)
- [7] 陈洪鹏, 于春晓, 王光美, 等. 生物炭和双氰胺对滨海盐碱土氮素转化及大豆氮素吸收利用的影响 [J/OL]. 生态学杂志, 2023: 1–11. (2023-11-21). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1148.Q.20231120.1138.004.html>.
- CHEN H P, YU C X, WANG G M, et al. Effects of biochar and dicyandiamide on nitrogen transformation and soybean nitrogen absorption and utilization in coastal saline-alkali soil[J/OL]. *Chinese Journal of Ecology*, 2023: 1–11. (2023-11-21). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1148.Q.20231120.1138.004.html>. (in Chinese)
- [8] 李晨, 陈明婉, 金鑫, 等. 施入生物炭对热带农田土壤团聚体组成及碳氮含量的影响 [J]. 土壤通报, 2023, 54 (5): 1071–1079.
- LI C, CHEN M W, JIN X, et al. Effects of biochar application on soil aggregate composition and carbon and nitrogen contents in tropical farmland [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2023, 54(5): 1071–1079. (in Chinese)
- [9] 王凯, 刘勇, 赵蕊蕊, 等. 生物炭和有机肥对毛白杨人工林土壤氮矿化的影响 [J]. 东北林业大学学报, 2022, 50 (10): 61–68.
- WANG K, LIU Y, ZHAO R R, et al. Effects of biochar and organic fertilizer on soil nitrogen mineralization in *Populus tomentosa* plantation [J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2022, 50(10): 61–68. (in Chinese)
- [10] ZHOU H, FANG H, ZHANG Q, et al. Biochar enhances soil hydraulic function but not soil aggregation in a sandy loam [J]. *European Journal of Soil Science*, 2019, 70(2): 291–300.
- [11] 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: 272–288.
- [12] 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): 1896–1899.
- YANG P L, LUO Y P, SHI Y C. Fractal characteristics of soil characterized by weight distribution of particle size [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1993, 38(20): 1896–1899. (in Chinese)
- [13] SHENG M H, AI X Y, HUANG B C, et al. Effects of biochar additions on the mechanical stability of soil aggregates and their role in the dynamic renewal of aggregates in slope ecological restoration [J]. *The Science of the Total Environment*, 2023, 898: 165478.
- [14] HAN L F, SUN K, JIN J, et al. Some concepts of soil organic carbon characteristics and mineral interaction from a review of literature [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2016, 94: 107–121.
- [15] NICHOLS K A, HALVORSON J J. Roles of biology, chemistry, and physics in soil macroaggregate formation and stabilization [J]. *The Open Agriculture Journal*, 2013, 7(1): 107–117.
- [16] LEHMANN J, KINYANGI J, SOLOMON D. Organic matter stabilization in soil microaggregates: Implications from spatial heterogeneity of organic carbon contents and carbon forms [J]. *Biogeochemistry*, 2007, 85(1): 45–57.
- [17] SPOKAS K, NOVAK J, VENTERA R. Biochar's role as an alternative N-fertilizer: Ammonia capture [J]. *Plant and Soil*, 2011, 350: 35–42.
- [18] 王静, 唐刚, 刘磊, 等. 土壤有机质含量对红壤性稻田残留氮在团聚体内分布的影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2022, (12): 10–16.
- WANG J, TANG G, LIU L, et al. Effects of soil organic matter content on the distribution of residual nitrogen in aggregates in a red paddy soil [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2022(12): 10–16. (in Chinese)
- [19] 邵兴芳, 申小冉, 张建峰, 等. 外源氮在中、低肥力红壤中的转化与去向研究 [J]. 中国土壤与肥料, 2014, (2): 6–11.
- SHAO X F, SHEN X R, ZHANG J F, et al. Exogenous nitrogen transformation and fate characteristics under different fertility red soils [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2014(2): 6–11. (in Chinese)
- [20] 王清奎, 汪思龙. 土壤团聚体形成与稳定机制及影响因素 [J]. 土壤通报, 2005, 36 (3): 415–421.
- WANG Q K, WANG S L. Forming and stable mechanism of soil aggregate and influencing factors [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2005, 36(3): 415–421. (in Chinese)
- [21] 张彬, 赵天启, 贺启坤, 等. 放牧对短花针茅荒漠草原土壤团聚体组成及稳定性的影响 [J]. 应用生态学报, 2022, 33 (12): 3263–3270.
- ZHANG B, ZHAO T Q, HE Q S, et al. Effects of grazing on soil aggregate composition and stability in *Stipa breviflora* desert steppe [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2022, 33(12): 3263–3270. (in Chinese)
- [22] 陈晓芬, 李忠佩, 刘明, 等. 不同施肥处理对红壤水稻土团聚体有机碳、氮分布和微生物生物量的影响 [J]. 中国农业科学, 2013,

- 46 (5): 950–960.
- CHEN X F, LI Z P, LIU M, et al. Effects of different fertilizations on organic carbon and nitrogen contents in water-stable aggregates and microbial biomass content in paddy soil of subtropical China [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46(5): 950–960. (in Chinese)
- [23] 李天豪. 生物炭对煤矿复垦土壤团聚体稳定性、碳氮分布和微生物群落的影响 [D]. 太原: 太原理工大学, 2021.
- LI T H. Effects of biochar on soil aggregate stability, carbon and nitrogen distribution and microbial community in coal mine reclamation[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2021. (in Chinese)
- [24] 谭文峰, 许运, 史志华, 等. 胶结物质驱动土壤团聚体形成过程与稳定机制 [J]. *土壤学报*, 2023, 60 (5): 1297–1308.
- TAN W F, XU Y, SHI Z H, et al. The formation process and stabilization mechanism of soil aggregates driven by binding materials [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2023, 60(5): 1297–1308. (in Chinese)
- [25] 李伟, 代镇, 张光鑫, 等. 生物炭和氮肥配施提高 土团聚体稳定性及作物产量 [J]. *植物营养与肥科学报*, 2019, 25 (5): 782–791.
- LI W, DAI Z, ZHANG G X, et al. Combination of biochar and nitrogen fertilizer to improve soil aggregate stability and crop yield in Lou soil [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, 25(5): 782–791. (in Chinese)
- [26] 樊慧琳, 张佳敏, 李欢, 等. 典型稻田红壤发生层团聚体稳定性及有机碳的含量变化 [J]. *土壤通报*, 2023, 54 (5): 1060–1070.
- FAN H L, ZHANG J M, LI H, et al. Soil aggregate stability and the variation in organic carbon content of pedogenic horizons in typical paddy red earth [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2023, 54(5): 1060–1070. (in Chinese)

(责任编辑: 张梅)