

生物炭对棕壤团聚体空间分布及有机碳的影响

孙强, 杨旭, 孟军, 兰宇, 韩晓日

引用本文:

孙强, 杨旭, 孟军, 兰宇, 韩晓日. 生物炭对棕壤团聚体空间分布及有机碳的影响[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(11): 2515-2524.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2022-0305>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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

米会珍, 朱利霞, 沈玉芳, 李世清

农业环境科学学报. 2015, 34(8): 1550-1556 <https://doi.org/10.11654/jaes.2015.08.017>

施用生物炭对旱作农田土壤有机碳、氮及其组分的影响

尚杰, 耿增超, 陈心想, 赵军, 耿荣, 王森

农业环境科学学报. 2015(3): 509-517 <https://doi.org/10.11654/jaes.2015.03.013>

秸秆还田与浅埋滴灌对玉米耕层土壤水稳性团聚体及其碳含量的影响

张明伟, 杨恒山, 邵继承, 范秀艳, 葛选良, 张雨珊, 徐晓

农业环境科学学报. 2022, 41(5): 999-1013-1 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-1281>

施生物炭与有机肥对白浆土土壤酶活性的影响

陆欣春, 郑永照, 陈旭, 韩晓增, 邹文秀, 董本春, 严君

农业环境科学学报. 2022, 41(3): 568-574 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0169>

生物炭和秸秆还田对华北农田玉米生育期土壤微生物量的影响

张星, 刘杏认, 张晴雯, 张庆忠, 任建强

农业环境科学学报. 2015(10): 1943-1950 <https://doi.org/10.11654/jaes.2015.10.015>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

孙强, 杨旭, 孟军, 等. 生物炭对棕壤团聚体空间分布及有机碳的影响[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(11): 2515-2524.

SUN Q, YANG X, MENG J, et al. Effects of biochar on soil aggregate spatial distribution and soil organic carbon in brown earth soil[J].

Journal of Agro-Environment Science, 2022, 41(11): 2515-2524.



开放科学 OSID

生物炭对棕壤团聚体空间分布及有机碳的影响

孙强^{1,2,3}, 杨旭^{1,2,3}, 孟军^{1,2*}, 兰宇^{1,2}, 韩晓日^{1,2,3*}

(1. 农业农村部生物炭与土壤改良重点实验室, 沈阳 110866; 2. 沈阳农业大学国家生物炭研究院, 沈阳 110866; 3. 沈阳农业大学土地与环境学院农业资源与环境博士后流动站, 沈阳 110866)

摘要:为研究一次性施入玉米秸秆生物炭对棕壤团聚体的空间分布和有机碳含量的影响,于2013年在辽宁沈阳棕壤区建立长期定位试验,试验共设置4个处理,分别为C0(不施炭),C1(一次性施入玉米秸秆生物炭 $15.75\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$),C2(一次性施入玉米秸秆生物炭 $31.50\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$),C3(一次性施入玉米秸秆生物炭 $47.25\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$),分析土壤团聚体的空间分布及有机碳含量变化情况。结果表明:与C0相比,生物炭显著提高了耕层(0~20 cm)土壤有机碳含量,随着生物炭施用量的增加,C1、C2和C3处理耕层有机碳含量分别提高了6.81%、11.06%和41.62%。耕层土壤团聚体稳定性随着生物炭施用量的增加,呈现出先增加后降低的趋势,但C3处理仍然显著高于C0处理。20~40 cm土层的土壤有机碳含量随生物炭施用的增加而显著提高,与C0相比较,C1、C2和C3处理分别提高了92.36%、111.63%和123.25%,该土层微团聚体含量随着生物炭施用量的增加而显著降低,C3处理的粉黏粒含量也显著降低,大团聚体含量随着生物炭施用量的增加而显著提高。C3处理平均质量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)均显著高于其他处理。40~60 cm土层中仅C3处理显著提高了土壤有机碳含量,与C0相比较,其提高幅度为4.67%,C3处理也相应地提高了大团聚体含量和GMD。研究表明,一次性施用生物炭不仅提高了耕层土壤有机碳含量、大团聚体含量和团聚体稳定性,也会相应地提高耕层以下土层有机碳含量和团聚体稳定性。对土壤耕层而言,生物炭作为土壤改良剂有其最适宜施用量,在本研究中,最适宜的施用量为 $31.50\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ (C2处理)。生物炭对耕层以下土壤有机碳含量和团聚体稳定性的提高受生物炭施用量的影响,生物炭施用量越高,其对耕层以下土层的影响越大。

关键词:生物炭施用量;土壤团聚体;团聚体稳定性;土壤有机碳

中图分类号:S152;S153.6 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2022)11-2515-10 doi:10.11654/jaes.2022-0305

Effects of biochar on soil aggregate spatial distribution and soil organic carbon in brown earth soil

SUN Qiang^{1,2,3}, YANG Xu^{1,2,3}, MENG Jun^{1,2*}, LAN Yu^{1,2}, HAN Xiaori^{1,2,3*}

(1. Key Laboratory of Biochar and Soil Amelioration, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shenyang 110866, China; 2. National Biochar Institute, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China; 3. Postdoctoral Station of Agricultural Resources and Environment, Land and Environment College, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China)

Abstract: The object of this study is to explore the effects of the use of maize straw biochar on the spatial distribution of soil aggregates and organic carbon content in brown earth soil. We conducted long-term field experiments in 2013. We applied four treatments: C0 (no biochar application), C1 (biochar applied at a rate of $15.75\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ at the beginning of the experiment), C2 (biochar applied at a rate of $31.50\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$), and C3 (biochar applied at a rate of $47.25\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$). The application of biochar enhanced the soil organic carbon (SOC) content in the

收稿日期:2022-03-29 录用日期:2022-06-09

作者简介:孙强(1991—),男,博士研究生,主要从事生物炭农田土壤固碳机制相关研究。E-mail:sunq33@outlook.com

*通信作者:孟军 E-mail:mengjun1217@syau.edu.cn; 韩晓日 E-mail:hanxr@syau.edu.cn

基金项目:现代农业产业技术系统专项基金(CARS-01-51);沈阳市科技计划项目(22-317-2-08)

Project supported: The Earmarked Fund for Modern Agroindustry Technology Research System (CARS-01-51); The Science and Technology Plan Project of Shenyang (22-317-2-08)

plow layer by 6.81%, 11.06%, and 41.62% in the C1, C2, and C3 treatment, respectively, compared with that in the C0 treatment. With the increase in biochar application dosage, the soil aggregate stability in the plow layer first increased and then decreased but that in the C3 treatment remained substantially higher than that in the C0 treatment. In the 20–40 cm layer, the SOC content was the same as that in the plow layer. Compared with that in the C0 treatment, SOC content increased by 92.36%, 111.63%, and 123.25% in C1, C2, and C3 treatment, respectively. The silt and clay contents in the C3 treatment considerably decreased with increasing biochar application dosage, and the macroaggregate content substantially increased with increasing biochar application dosage. The mean weight diameter (*MWD*) and geometric mean diameter (*GMD*) were notably higher in the C3 treatment than in the other treatments. In the 40–60 cm layer, only the C3 treatment remarkably enhanced soil organic carbon content by 4.67%. The macroaggregate content and *GMD* were also considerably higher in the C3 treatment than that of CK. Our results indicated that the application of biochar enhanced not only the SOC content, macroaggregates, and soil aggregate stability, but also the organic carbon content and aggregate stability in the subsurface soil layers under the plow layer. Biochar, as a soil amendment, might have an optimal dosage; the best dosage in this study was that in the C2 treatment ($31.50 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$). The effects of the application of biochar on the improvement in the deep soil layers depended on the biochar dosage, with a higher biochar application rate having notable effects.

Keywords: biochar application amount; soil aggregate; aggregate stability; soil organic carbon

全球土壤含有约2 344 Gt有机碳,是陆地生态系统中最大的有机碳库^[1]。农田生态系统是陆地生态系统的重要组成部分,是陆地生态系统中最活跃的碳库^[2]。农田土壤有机碳水平对于维持土壤肥力,保障农田生产力有着至关重要的作用^[3]。农田土壤碳库产生微小的波动就会对大气温室气体浓度产生重要影响^[1-2]。土壤团聚体是土壤结构的最基本单元,团聚体的形成与稳定受到生物与非生物因素调控。适宜的团聚体分布会改善土壤结构,大团聚体含量高的土壤是土壤结构优良的体现。土壤有机碳与土壤团聚体密切相关,土壤有机碳是土壤团聚体形成过程中的重要胶结物质,而土壤团聚体是土壤有机碳储存的重要场所。土壤团聚体对有机碳的物理保护也被认为是有机碳在土壤中长期保存的主要机制^[4]。

生物炭具有含碳量高、孔隙结构发达、理化性质稳定且富含营养元素等特点,同时也具备来源广泛、固碳潜力巨大的性质,所以生物炭作为土壤改良剂在近年来受到广泛关注^[5-7]。据研究表明,生物炭显著提高了大团聚体中的有机碳含量进而促进了大团聚体的形成^[7]。高鸣慧等^[8]研究发现,生物炭对棕壤耕层大团聚体及团聚体有机碳都具有显著的提升效果。林洪羽等^[9]研究发现生物炭结合化肥配施显著提高了土壤有机碳含量,并促进了 $<0.053 \text{ mm}$ 粒径团聚体向大团聚体组分转化。根据 meta-analysis 的研究结果表明,生物炭作为土壤改良剂对土壤团聚体具有显著的促进效果^[10]。但同时也有研究表明,生物炭作为土壤改良剂对团聚体没有显著影响或负面影响^[11-12]。其原因可能和生物炭的种类、试验土壤类型

和试验年限有关。前人已经针对生物炭对土壤有机碳和团聚体开展了相关的研究,但均在单一的生物炭施用量下研究土壤耕层有机碳和团聚体变化的结果,而生物炭对土壤团聚体及有机碳空间分布的影响尚不清楚。本研究基于大田试验,探讨一次性施用生物炭5 a后棕壤团聚体及有机碳空间分布的变化,以期提升生物炭对土壤团聚体及有机碳空间分布的认识。

棕壤是中国东北地区典型耕作土壤之一,面积约占辽宁省总耕地面积的36.1%,是辽宁省重要的耕地土壤类型。棕壤土层深厚,结构合理,水热条件好,对保障国家粮食安全具有重要的战略意义^[13]。但是由于近几十年来棕壤的过度开发和掠夺式的经营,导致棕壤有机碳含量持续下降,结构变差,土壤功能退化明显。所以应用生物炭对棕壤进行改良具有广阔的前景和重要的意义。以往的研究主要集中在室内模拟培养试验或是盆栽试验,试验年限较短,缺乏较长时间尺度的大田试验研究结果,或者只针对生物炭对大田土壤耕层的影响,对土壤团聚体空间变化及有机碳空间分布研究较少。谢祖彬等^[14]对已发表的文献研究分析,在时间尺度上,生物炭大量的相关研究没有超过1 a, 2 a以上的研究仅占5%。本研究以棕壤区5 a玉米连作定位试验为基础,以一次性施入不同生物炭量的试验处理为研究对象,对棕壤团聚体空间分布、团聚体有机碳含量及贡献率开展研究,旨在为生物炭对棕壤改良提供依据,并保障辽宁棕壤区农田生态环境,获得生态、经济、社会效益协调发展的可持续农业技术。

1 材料与方 法

1.1 供试材料与试验区概况

供试土壤为棕壤,属发育在第四纪黄土母质上的潜育湿润淋溶土。试验所用生物炭为玉米秸秆生物炭,产自辽宁金和福农业开发有限公司。生物炭的制备过程为将玉米秸秆粉碎后置于炭化炉中,在限氧环境下450℃热解炭化,热解持续时间为1 h。生物炭产品在装袋之前粉碎过2 mm筛,生物炭的颗粒分布情况为>0.25 mm占比50.8%±1.2%,0.053~0.25 mm颗粒占比42.2%±1.5%,<0.053 mm颗粒占比7.0%±0.9%。供试土壤及生物炭性质见表1。试验区位于沈阳农业大学生物炭长期定位试验站,该地区气候类型为温带湿润-半湿润季风气候。冬春季干旱少雨,夏秋季湿润多雨,年平均气温约为7.0~8.1℃,年平均降雨量约为574~684 mm,无霜期约为150 d。作物生育期内平均降雨量为547 mm,平均气温为20.7℃,适宜作物生长。

1.2 试验设计

试验开始于2013年5月初,于2017年9月下旬取得土壤样品。种植作物为春玉米,种植模式为玉米连作,种植密度为60 000株·hm⁻²。共设4个处理,分别为C0:不施生物炭;C1:于2013年5月播种前一次性施用生物炭15.75 t·hm⁻²;C2:于2013年5月播种前一次性施用生物炭31.50 t·hm⁻²;C3:于2013年5月播种前一次性施用生物炭47.25 t·hm⁻²。试验小区面积为36 m²(3.6 m×10 m),三次重复,随机区组排列。于2013年5月初将生物炭人工均匀撒播在试验区的表面,随后用旋耕机将生物炭与耕层土壤充分混合。各处理施肥量一致,均为逐年施入N 120 kg·hm⁻²、P₂O₅ 60 kg·hm⁻²、K₂O 60 kg·hm⁻²。

1.3 样品采集与测定

1.3.1 样品采集

采用剖面取土法在小区进行五点法取样,分别取得原状土样品和散土样品。取样深度为0~20、20~40 cm和40~60 cm。将所取样品带回实验室风干,原状

土样品在风干的过程中手工沿土壤自然结构掰开,过8 mm筛,待完全风干后用于团聚体筛分。另取同样深度的散土样品,运回实验室风干,拣除小石子和植物残留物,分别过100目和10目筛用于土壤有机碳和pH的测定。

1.3.2 测定方法

土壤团聚体的测定采用经典湿筛法^[15]。使用XY-100型团聚体筛分仪将团聚体分为>2 mm(粗大团聚体),0.25~2 mm(细大团聚体),0.053~0.25 mm(微团聚体)和<0.053 mm(粉黏粒)四个组分。各粒径团聚体烘干称质量后过100目筛用于土壤有机碳分析。取过100目筛的散土样品用于土壤有机碳的分析。土壤有机碳采用元素分析仪(Elementar Macro Cube, Langensfeld, 德国)测定。另取过10目筛的散土10 g加25 mL去离子水,用搅拌器充分搅拌1 min后静置30 min,用pH计(HANNA HI2221, 意大利)测定pH。

1.3.3 团聚体稳定性

采用常规表征团聚体稳定性的方法,对平均质量直径(*MWD*),几何平均直径(*GMD*),大团聚体含量(*R*_{>0.25 mm})和分形维数(*D*)进行计算,计算公式如下:

$$MWD = \frac{\sum_{i=1}^n \bar{x}_i \times w_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (1)$$

$$GMD = \text{EXP} \left(\frac{\sum_{i=1}^n w_i \times \ln \bar{x}_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \right) \quad (2)$$

$$R_{>0.25\text{mm}} = \frac{M_{>0.25\text{mm}}}{50} \quad (3)$$

$$\frac{M_{r < \bar{x}_i}}{M_T} = \left(\frac{\bar{x}_i}{x_{\max}} \right)^{3-D} \quad (4)$$

式中: \bar{x}_i 为每一粒径团聚体的平均直径,mm; w_i 为每一粒径团聚体所占百分含量,%; n 为粒径分组的数量; $M_{r < \bar{x}_i}$ 为粒径小于 \bar{x}_i 的质量分数,%; M_T 为所有团聚体总质量,本试验中为50 g; x_{\max} 为最大粒径团聚体

表1 供试土壤及生物炭基础性质

Table 1 Basic properties of the tested soil and biochar

项目 Item	pH	容重 Bulk density/(g·cm ⁻³)	有机碳 Soil organic carbon/(g·kg ⁻¹)	全氮 Total N/(g·kg ⁻¹)	全磷 Total P/(g·kg ⁻¹)	全钾 Total K/(g·kg ⁻¹)
棕壤	5.7	1.31	11.0	1.20	0.38	20.1
生物炭	9.2	—	660.0	8.87	8.87	32.2

的直径,本试验中为 8 mm。

1.3.4 团聚体有机碳贡献率

每一粒径团聚体的相对有机碳贡献率采用如下公式计算:

$$\text{团聚体有机碳贡献率} = \frac{\text{各粒径团聚体百分含量} \times \text{各粒径团聚体有机碳含量}}{\text{耕层土壤有机碳含量}} \times 100\% \quad (5)$$

1.4 数据分析

采用 Excel 2016 对所有数据进行处理,所有数据均采用平均数±标准偏差的形式。利用 SPSS 22.0 对所有数据进行单因素方差分析,处理间差异采用 LSD 最小显著差异法多重比较 ($P < 0.05$)。采用 Origin2022 绘图。

2 结果与分析

2.1 生物炭对团聚体空间分布的影响

如图 1a 所示,0~20 cm 耕层一次性施用生物炭 5 a 后,与 C0 相比较,各施炭处理土壤耕层大团聚体的含量显著增加,粉黏粒组分含量均显著降低,C1、C2 和 C3 处理分别降低了 15%、30.0% 和 14.7%。微团聚体组分含量未受生物炭施入的影响。只有 C1 和 C2 处理显著提高了粗大团聚体的含量,分别提高了 1.2% 和 19.5%,而只有 C3 显著提高了细大团聚体的含量,提高了 14.6%。

如图 1b 所示,生物炭对 20~40 cm 土层土壤团聚体的分布也产生了显著的影响。与 0~20 cm 耕层不同,微团聚体在该土层内含量最高。与 C0 相比较,C1、C2 处理仅微团聚体含量显著降低,细大团聚体组分含量显著提高 ($P < 0.05$),其余各组分则无显著变化;而 C3 处理微团聚体和粉黏粒组分均显著下降,细大团聚体组分含量显著增加 ($P < 0.05$)。各处理粗大团聚体含量无显著差异。

如图 1c 所示,40~60 cm 土层主要以微团聚体和粉黏粒组分占主导地位。与 C0 相比较,仅有 C3 处理显著降低了粉黏粒组分,并且提高了细大团聚体组分 ($P < 0.05$);与 C1、C2 相比较,C3 处理的粉黏粒组分也显著降低,细大团聚体组分含量显著提高。各处理粗大团聚体含量无显著差异 ($P > 0.05$)。

随着土层深度的增加,土壤团聚体的组成逐渐发生变化,耕层土壤中大团聚体占主导地位,其含量为 55.13%~61.91%;20~40 cm 土层中大团聚体含量占比为 38.84%~50.23%;40~60 cm 土层中大团聚体含量则为 18.88%~26.14%;微团聚体和粉黏粒组分在 40~60

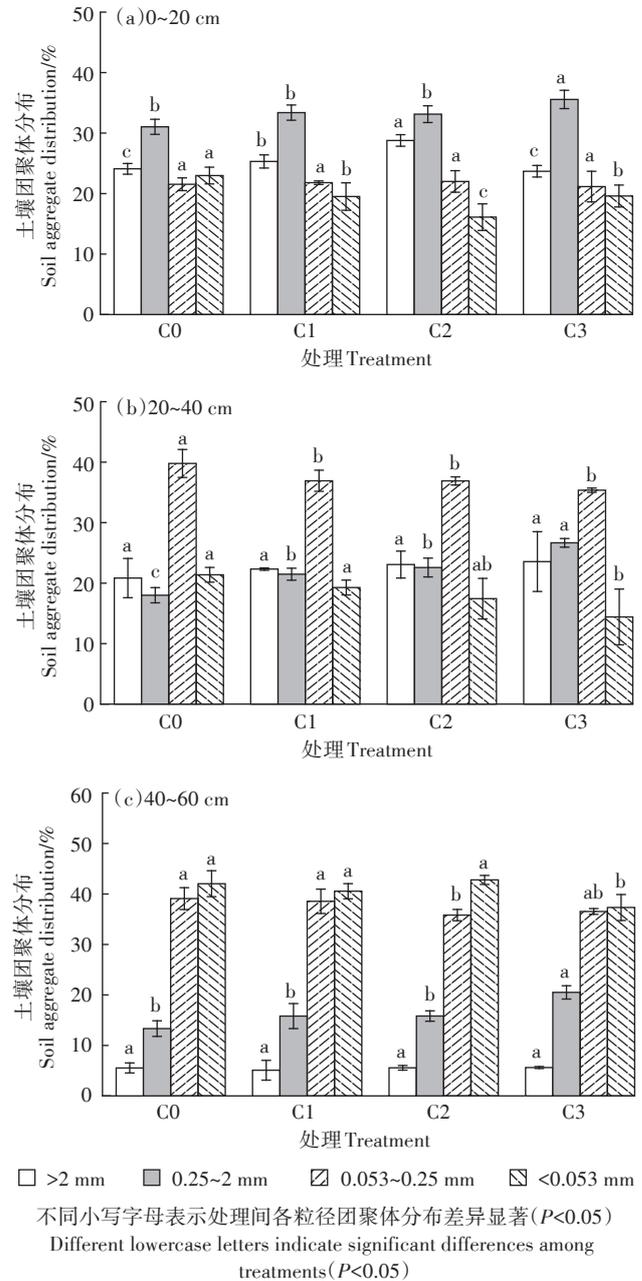
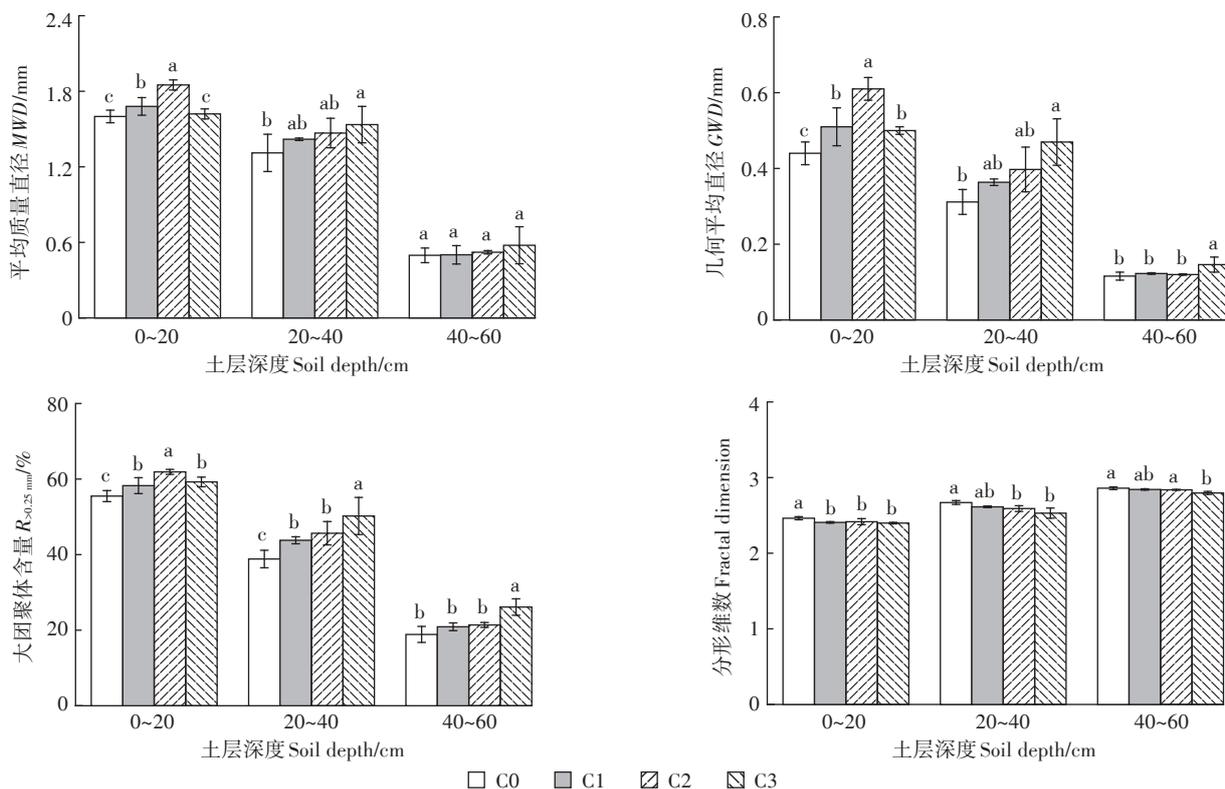


图 1 生物炭施用量对不同土层土壤团聚体分布的影响
Figure 1 Effects of biochar dosages on soil aggregate distribution

cm 土层占据主导地位,含量分别为 35.83%~39.09% 和 18.88%~26.14%。

2.2 生物炭对团聚体稳定性的影响

土壤团聚体稳定性通常由 MWD、GMD、大团聚体含量及分形维数来表示。MWD、GMD 的数值及大团聚体含量越高,表明团聚体的稳定性越高,土壤结构越好。由图 2 可知,在 0~20 cm 土层,各处理水稳性团聚体的 MWD 的大小顺序为 C2>C1>C3=C0, GMD 的大小顺序为 C2>C1=C3>C0, $R_{>0.25\text{ mm}}$ 的大小顺序为 C2>



同一柱体中不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)

The different lowercases in same column indicate significant differences among treatments($P<0.05$)

图2 生物炭施用量对土壤团聚体的平均质量直径(MWD),几何平均直径(GMD),大团聚体含量($R_{0.25\text{ mm}}$)和分形维数的影响
Figure 2 Effects of biochar dosages on the mean weight diameter(MWD),geometric mean diameter(GMD),macroaggregates($R_{0.25\text{ mm}}$) and fractal dimension of aggregates

C3>C1>C0,同时生物炭的施用显著降低了分形维数($P<0.05$)。而在20~40 cm土层,生物炭仍然提高了水稳性团聚体的MWD、GMD以及 $R_{0.25\text{ mm}}$,但仅有C3处理显著提高了MWD和GMD($P<0.05$),C1、C2和C3处理均显著提高了 $R_{0.25\text{ mm}}$ ($P<0.05$),分别提高12.78%、17.57%和29.32%。生物炭也降低了该土层的分形维数值,并且在C2和C3处理达到了显著水平($P<0.05$)。在40~60 cm土层内,与C0相比,仅有C3处理显著提高了水稳性团聚体的MWD和 $R_{0.25\text{ mm}}$,并且显著降低了分形维数值($P<0.05$),而C1、C2未对团聚体稳定性产生显著影响($P>0.05$)。总之,生物炭施用后颗粒分解缓慢,参与了土壤团聚体的形成过程,提高团聚体稳定性,降低土壤分形维数。

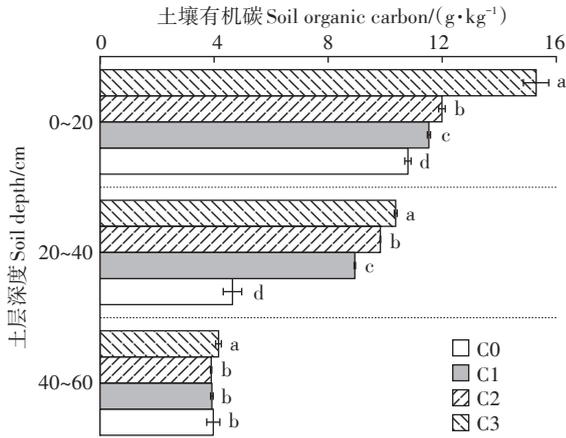
2.3 生物炭对不同土层土壤有机碳含量的影响

由图3可知,0~20 cm土层有机碳含量的大小顺序为C3>C2>C1>C0($P<0.05$)。与C0相比,C1、C2和C3处理均显著提高了0~20 cm土层的土壤有机碳含量,分别提高了6.81%、11.06%和41.62%。20~40 cm土层有机碳含量大小顺序与0~20 cm土层变化规律

一致,与C0相比,C1、C2和C3处理分别提高了92.36%、111.63%和123.25%($P<0.05$)。在40~60 cm土层中,与C0相比,仅有C3处理显著提高了有机碳含量($P<0.05$),有机碳含量增加了4.67%,C1、C2处理与C0相比有机碳含量无显著差异。土壤有机碳含量与施炭量关系密切,生物炭施用量越高,土壤有机碳提升幅度越大。但有机碳的提升并不是随着生物炭施用量线性增加的,这可能是由于生物炭进入土壤以后部分会矿化分解为小分子有机碳(包括溶解性组分),它们可以通过与土壤本底有机碳作用(如竞争吸附位点)释放出溶解性有机碳,并促进其向下迁移,从而提高亚表层土壤有机碳含量。生物炭的施用也会提高土壤孔隙度,从而促进生物炭颗粒向下迁移。

2.4 生物炭对团聚体有机碳含量及有机碳贡献率的影响

不同生物炭施用量对土壤团聚体有机碳含量的影响如表2所示。在0~20 cm土层,随着生物炭施用量的增加,耕层团聚体有机碳含量的提高效果越显著。与C0相比,C3处理显著提高了各粒径团聚体有机碳含量,>2 mm、0.25~2 mm、0.053~0.25 mm



不同小写字母表示各土层处理间有机碳含量差异显著($P < 0.05$)
Different lowercase letters indicate significant differences in same layers among treatments ($P < 0.05$)

图3 生物炭施用量对不同土层土壤有机碳含量的影响
Figure 3 Effects of biochar dosages on SOC content of different soil layers

和 < 0.053 mm 分别提高了 24.03%、59.21%、46.72% 和 20.89%。C2 显著提高了除粉黏粒组分外所有粒径团聚体有机碳含量,但 > 2 mm 组分与 C0 相比差异不显著, C1 只显著提高了 > 2 mm 组分团聚体有机碳含量。

在 20~40 cm 土层,各生物炭处理均显著提高了团聚体有机碳的含量 ($P < 0.05$)。与 C0 相比, C1、C2、C3 处理分别提高 > 2 mm 团聚体有机碳含量 54.20%、98.95%、128.36%; 0.25~2 mm 团聚体有机碳含量

93.02%、127.43%、206.48%; $0.053 \sim 0.25$ mm 团聚体有机碳含量 76.60%、65.71%、376.60%; < 0.053 mm 团聚体有机碳含量 11.42%、6.62%、114.61%。

在 40~60 cm 土层,生物炭对微团聚体有机碳含量无显著影响 ($P > 0.05$)。与 C0 相比, C1、C2、C3 均显著提高了 > 2 mm 团聚体有机碳含量,分别提高了 6.79%、42.30%、101.57%; C1、C2、C3 提高了 0.25~2 mm 团聚体有机碳含量 17.12%、24.18%、114.95%; 仅 C3 处理显著提高了 < 0.053 mm 组分的有机碳含量,提高了 19.52%。

通过对各土层各粒径土壤团聚体有机碳相对贡献率的计算可以得知(表3), 0~20 cm 土层中,土壤有机碳主要分布在 > 0.25 mm 的团聚体中。总体而言,生物炭的施用降低了 0~20 cm 土层 < 0.053 mm 粒径团聚体的有机碳贡献率,而提高了大团聚体 (> 0.25 mm) 的有机碳贡献率。20~40 cm 土层土壤有机碳主要集中在 > 0.053 mm 各粒径土壤团聚体中。各生物炭处理均降低了 < 0.053 mm 粒径团聚体有机碳贡献率。40~60 cm 土层团聚体有机碳主要集中在 < 0.25 mm 各粒径团聚体中, C1、C2、C3 处理相比 C0 分别降低了 < 0.053 mm 的团聚体有机碳贡献率 9.28%、5.06%、24.57%。

2.5 生物炭对土壤 pH 的影响

如表4所示,随着生物炭施用量的提高,棕壤 pH 值随之显著提高 ($P < 0.05$)。在施用生物炭当年,与 C0 相比, C1、C2 和 C3 的 pH 值分别提高了 2.5%、6.1%

表2 土壤团聚体有机碳含量

Table 2 Soil aggregate associated organic carbon contents

土层深度 Soil depth/cm	处理 Treatment	团聚体有机碳含量 Aggregate associated organic carbon/($g \cdot kg^{-1}$)			
		> 2 mm	0.25~2 mm	0.053~0.25 mm	< 0.053 mm
0~20	C0	10.86±0.52b	11.18±0.56c	9.61±0.25c	10.34±0.32b
	C1	13.00±0.40a	12.00±0.20c	10.20±0.30bc	10.30±0.20b
	C2	11.50±0.30b	13.50±0.80b	10.93±0.95b	10.70±0.40b
	C3	13.47±0.67a	17.80±0.90a	14.10±0.70a	12.50±1.00a
20~40	C0	4.76±0.02d	4.01±0.05d	3.12±0.01c	4.38±0.07c
	C1	7.34±0.09c	7.74±0.15c	5.51±0.01b	4.88±0.08b
	C2	9.47±0.12b	9.12±0.02b	5.17±0.10b	4.67±0.12b
	C3	10.87±0.21a	12.29±0.57a	14.87±0.15a	9.40±0.27a
40~60	C0	3.83±0.03d	3.68±0.06c	3.67±0.36a	3.33±0.17b
	C1	4.09±0.05c	4.31±0.01b	3.70±0.01a	3.23±0.04b
	C2	5.45±0.15b	4.57±0.03b	3.76±0.02a	3.38±0.02b
	C3	7.72±0.09a	7.91±0.14a	3.88±0.01a	3.98±0.20a

注: 同列不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。下同。

Note: Different lowercase letters in a column indicate significant differences among treatments ($P < 0.05$). The same below.

表3 土壤团聚体有机碳的相对贡献率

Table 3 Relative contributions of aggregate associated organic carbon

土层深度 Soil depth/cm	处理 Treatment	团聚体有机碳相对贡献率 Relative contributions of organic carbon in aggregates/%			
		>2 mm	0.25~2 mm	0.053~0.25 mm	<0.053 mm
0~20	C0	24.83±1.00b	32.96±0.90b	19.65±0.36a	22.56±0.53a
	C1	28.53±0.53a	34.74±0.15b	19.29±0.80a	17.43±0.12b
	C2	29.46±0.47a	36.09±2.31b	19.26±1.54a	15.19±1.23c
	C3	21.33±0.43c	42.32±0.72a	19.98±1.68a	16.37±0.76c
20~40	C0	26.86±0.09b	17.53±0.04c	31.83±0.12b	23.78±0.17a
	C1	26.11±0.17b	26.50±0.34b	32.41±0.18b	14.98±0.33b
	C2	31.37±0.01a	29.56±0.33a	27.38±0.18c	11.69±0.15c
	C3	20.57±0.54c	26.31±1.03b	42.24±0.73a	10.87±0.24c
40~60	C0	5.95±1.54d	14.63±1.83c	39.53±2.75a	39.89±1.02a
	C1	6.48±1.95c	17.87±2.70b	39.46±2.97a	36.19±1.56b
	C2	7.70±0.58b	19.25±1.24b	35.19±1.40b	37.87±0.93b
	C3	9.50±1.57a	31.98±1.87a	28.42±0.12c	30.09±3.66c

表4 生物炭对土壤pH的影响

Table 4 Effects of biochar dosages on soil pH

年份Year	处理Treatment	pH
2013	C0	5.70±0.08d
	C1	5.84±0.06c
	C2	6.05±0.05b
	C3	6.20±0.04a
2017	C0	5.65±0.04d
	C1	5.87±0.01c
	C2	5.99±0.02b
	C3	6.20±0.18a

和8.8%;在施用生物炭5 a后,与C0相比,C1、C2和C3的pH值分别提高了3.9%、6.0%和9.7%。经过5 a的田间试验,生物炭施用量相同处理的土壤pH年际间无显著变化,说明生物炭对棕壤pH的影响具有持久性。

3 讨论

3.1 生物炭施用量对土壤团聚体分布的影响

土壤团聚体是由矿物和有机物通过物理、化学和生物过程形成的实体^[16]。土壤团聚体是土壤有机碳的赋存场所,土壤有机碳也为土壤团聚体的形成提供了胶结物质^[17-18]。近十年来,生物炭因其潜在的农艺效应而备受关注。生物炭对土壤团聚体的影响具有不一致的研究结果。大量的研究表明生物炭的施用能够改善土壤的团聚性^[19-22],但也有研究表明生物炭作为土壤改良剂对土壤团聚性没有影响甚至具有负

面影响^[11,23-24]。本研究发现,在0~20 cm土层中,各处理间0.053~0.25 mm粒径团聚体含量无显著差异,但生物炭促进了<0.053 mm粒径团聚体向>2 mm和0.25~2 mm粒径团聚体转化。20~40 cm土层中主要以0.053~0.25 mm为主,占比35.36%~39.79%,各生物炭处理的0.053~0.25 mm和<0.053 mm粒径团聚体含量下降,>2 mm和0.25~2 mm团聚体组分含量显著提高。这说明经过5 a的试验,生物炭的施用对20~40 cm团聚体的形成也有促进作用。40~60 cm土层则只有C3处理对团聚体的分布产生了显著影响。上述结果与李倩倩等^[25]的研究结果相类似,即施用生物炭5 a后,表层(0~10 cm)壤土大团聚体含量及稳定性响应最佳的生物炭施用量为40 t·hm⁻²,而60 t·hm⁻²或80 t·hm⁻²对表层以下土壤大团聚体含量及团聚体稳定性有更好的提升效果。上述结果表明生物炭经过5 a的时间,生物炭小颗粒及可溶性有机碳等会在土层内发生垂直运移,运移到相应土层的生物炭颗粒和可溶性有机碳等能作为胶结剂将较小粒径的团聚体团聚成为大团聚体,从而促进大团聚体的形成。生物炭的施用也会促进玉米根系的生长,提高玉米根系的生物量^[26-27],根系分泌物利于土壤微生物的生长^[28],微生物群落及生物多样性也趋于改善,释放更多的胶结剂促进土壤大团聚体的形成^[29-30]。此外,生物炭在土壤中的老化过程也会导致其表面趋于与黏土矿物复合,这些作用促成了土壤团聚体的形成。

3.2 生物炭施用量对土壤团聚体稳定性的影响

MWD、GMD和 $R_{>0.25\text{ mm}}$ 是表征团聚体稳定性的常

规指标。上述指标越大,表明土壤团聚体的稳定性越强。生物炭提高了棕壤0~20 cm土层的MWD、GMD和 $R_{>0.25\text{ mm}}$,并且呈现出C2最大,C1和C3次之,C0最小的规律。这说明生物炭作为土壤改良剂有其适宜的施用量,过量施用生物炭会降低团聚体的稳定性。随着土层的深入,20~40 cm与40~60 cm土层的MWD、GMD和 $R_{>0.25\text{ mm}}$ 随着生物炭施用量的增加而提高,并且C3处理显著高于C0处理。分形维数也能反映土壤团聚体的稳定性,其值越小说明团聚体越稳定^[31]。在本研究中,生物炭显著降低了0~20 cm土层的分形维数,其中C3处理最低。在20~40 cm和40~60 cm土层中,C3处理显著降低了土壤的分形维数。综上所述,生物炭作为土壤改良剂显著提高了0~20 cm土层的团聚体稳定性,并且C2处理对土壤团聚体稳定性的提升效果最好。随着土层深度的增加,C3处理对20~40 cm和40~60 cm土层团聚体稳定性的提升效果最佳。本研究结果与侯晓娜等^[32]研究结果不一致,侯晓娜等^[32]的研究发现生物炭对砂浆黑土MWD、GMD和 $R_{>0.25\text{ mm}}$ 无显著影响,而吴鹏豹等^[33]研究发现施用生物炭18个月后,花岗岩砖壤的GMD显著增加,李江舟等^[34]研究发现生物炭显著提高了云南烟区红壤MWD、GMD和 $R_{>0.25\text{ mm}}$ 。不同研究结果的差异可能与土壤类型、试验年限以及环境差异等因素有关。

3.3 生物炭施用量对土壤有机碳及土壤团聚体有机碳的影响

生物炭含有大量稳定的有机碳,所以生物炭被视为提高土壤有机碳含量的理想材料^[5]。本研究中,各生物炭处理不仅显著提高了0~20 cm土层土壤有机碳含量($P<0.05$),同时也对20~40 cm和40~60 cm土层有机碳含量产生了影响。其中,20~40 cm土层与0~20 cm土层有机碳变化规律一致,但40~60 cm土层仅C3处理有机碳含量显著高于其他处理。上述现象说明生物炭在田间可能发生了垂直运移的现象,并且这种现象随着施用量的增加而逐渐增强。这说明生物炭的施用不仅提高了0~20 cm土层的有机碳含量,对土壤更深层次固碳也起到了积极的作用。生物炭提高土壤有机碳的机制主要体现在两个途径,首先,生物炭自身含有大量的稳定有机碳,作为土壤改良剂混入土壤后提高了土壤有机碳含量^[5];其次,生物炭作为土壤改良剂能够通过负激发效应提高土壤有机碳含量^[35]。至于C3处理40~60 cm土壤有机碳含量仍然显著高于其他处理,其原因可能是由于C3处理生物炭施用量高,土壤孔隙增大,向下垂直运移的生物

炭颗粒也随之变多。

通常情况下,随着土壤团聚体粒径的增加,团聚体有机碳含量也随之增大^[36]。在本研究中,0~20 cm土层中有机碳含量最高的是0.25~2 mm粒径团聚体,>2 mm粒径团聚体有机碳含量次之,0.053~0.25 mm粒径团聚体有机碳浓度最低。与此同时,除<0.053 mm粒径团聚体外,各生物炭处理下各粒径团聚体有机碳含量均显著高于C0处理,说明生物炭作为外源有机碳优先分布在粒径较大的团聚体中,此结果与前人研究结果一致^[37]。在20~40 cm土层和40~60 cm土层中,各生物炭处理显著提高了大团聚体(0.25~2 mm和>2 mm)有机碳的含量($P<0.05$)。这说明生物炭细小颗粒等通过土壤孔隙、作物根系生长、土壤动物运动等过程运移到20~40 cm和40~60 cm层次,运移到相应土层的生物炭促进了大团聚体的形成。

通过分析各粒径团聚体有机碳贡献率的变化,能够从表面了解生物炭对土壤有机碳在团聚体中分布的影响。土壤团聚体有机碳贡献率受团聚体的分布和各粒径团聚体有机碳含量两个因素影响。李江舟等^[34]的研究发现,连续施用生物炭3 a后,大团聚体有机碳的贡献率显著升高。徐国鑫等^[38]研究发现,经过1 a的试验,土壤有机碳主要分布在<0.053 mm粒级团聚体中。不同的研究结果可能与不同的试验环境、年限及生物炭种类和土壤类型有关。本研究中,生物炭处理均显著降低了<0.053 mm粒级团聚体有机碳贡献率,说明生物炭在棕壤中起到了促进大团聚体形成、提高棕壤团聚体稳定性的作用。而与此同时,更多大团聚体的形成也对棕壤有机碳形成了物理保护,从而降低了土壤微生物对有机碳的分解^[39]。

4 结论

(1)一次性施入生物炭5 a后,棕壤耕层(0~20 cm)大团聚体的含量显著提高,粉黏粒含量显著降低,棕壤团聚体的平均质量直径、几何平均直径均显著增加,分形维数显著降低。生物炭提高了团聚体有机碳的含量,并且提高大团聚体有机碳贡献率。对耕层土壤团聚性提升效果最好的生物炭量是31.50 t·hm⁻²。

(2)在20~40 cm土层,生物炭改变了土壤团聚体的分布,促进微团聚体及粉黏粒组分向大团聚体转化,进而提高了大团聚体的含量和团聚体的稳定性。

(3)在40~60 cm土层中,仅有C3处理显著增加了土壤有机碳含量、大团聚体含量和团聚体的稳定

性。C1、C2处理未提高40~60 cm土壤有机碳含量,但C1、C2提高了40~60 cm土层大团聚体有机碳含量,并促进了土壤有机碳向大团聚体的分配。因此,棕壤施用生物炭是提高棕壤有机碳含量、改良土壤结构、增加土壤碳汇的有效手段。

参考文献:

- [1] STOCKMANN U, ADAMS M A, CRAWFORD J W, et al. The knowns, known unknowns and unknowns of sequestration of soil organic carbon [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2013, 164:80-99.
- [2] 刘昱, 陈敏鹏, 陈吉宁. 农田生态系统碳循环模型研究进展和展望 [J]. *农业工程学报*, 2015, 31(3):1-9. LIU Y, CHEN M P, CHEN J N. Progress and perspectives in studies on agro-ecosystem carbon cycle model[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(3):1-9.
- [3] BHATTACHARYYA R, KUNDU S, SRIVASTVA A K, et al. Long term fertilization effects on soil organic carbon pools in a sandy loam soil of the Indian sub-Himalayas[J]. *Plant and Soil*, 2010, 341(1/2):109-124.
- [4] HAN L, 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.
- [5] LEHMANN J. A handful of carbon[J]. *Nature*, 2007, 447(10):143-144.
- [6] 张伟明, 修立群, 吴迪, 等. 生物炭的结构及其理化特性研究回顾与展望[J]. *作物学报*, 2021, 47(1):5-22. ZHANG W M, XIU L Q, WU D, et al. Review of biochar structure and physicochemical properties[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2021, 47(1):5-22.
- [7] WANG D, FONTE S J, PARIKH S J, et al. Biochar additions can enhance soil structure and the physical stabilization of C in aggregates[J]. *Geoderma*, 2017, 303:110-117.
- [8] 高鸣慧, 李娜, 彭靖, 等. 秸秆和生物炭还田对棕壤团聚体分布及有机碳含量的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2020, 26(11):1978-1986. GAO M H, LI N, PENG J, et al. Effects of straw and biochar returning on soil aggregates distribution and organic carbon content in brown soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2020, 26(11):1978-1986.
- [9] 林洪羽, 周明华, 张博文, 等. 生物炭及秸秆长期施用对紫色土坡耕地土壤团聚体有机碳的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2020, 28(1):96-103. LIN H Y, ZHOU M H, ZHANG B W, et al. Effect of long-term application of biochar and straw on soil organic carbon in purple soil aggregates of sloping uplands[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2020, 28(1):96-103.
- [10] ISLAM M U, JIANG F, GUO Z, et al. Does biochar application improve soil aggregation? A meta-analysis[J]. *Soil and Tillage Research*, 2021, 209:104926.
- [11] BORCHARD N, SIEMENS J, LADD B, et al. Application of biochars to sandy and silty soil failed to increase maize yield under common agricultural practice[J]. *Soil and Tillage Research*, 2014, 144:184-194.
- [12] RAHMAN M T, ZHU Q H, ZHANG Z B, et al. The roles of organic amendments and microbial community in the improvement of soil structure of a vertisol[J]. *Applied Soil Ecology*, 2017, 111:84-93.
- [13] 白树彬, 裴久渤, 李双异, 等. 30年来辽宁省耕地土壤有机质与pH时空动态变化[J]. *土壤通报*, 2016, 47(3):636-644. BAI S B, PEI J B, LI S Y, et al. Temporal and spatial dynamics of soil organic matter and pH in cultivated land of Liaoning Province during the past 30 years[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2016, 47(3):636-644.
- [14] 谢祖彬, 刘琦. 生物质炭的固碳减排与合理施用[J]. *农业环境科学学报*, 2020, 39(4):901-907. XIE Z B, LIU Q. Rational application of biochar to sequester carbon and mitigate soil GHGs emissions: A review[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(4):901-907.
- [15] ELLIOTT E T. Aggregate structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1986, 50(3):627-633.
- [16] YUDINA A, KUZYAKOV Y. Saving the face of soil aggregates[J]. *Global Change Biology*, 2019, 25(11):3574-3577.
- [17] MUSTFA A, HU X, SHAH S A A, et al. Long-term fertilization alters chemical composition and stability of aggregate-associated organic carbon in a Chinese red soil: Evidence from aggregate fractionation, C mineralization, and ¹³C NMR analyses[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2021, 21(7):2483-2496.
- [18] 汪景宽, 徐英德, 丁凡, 等. 植物残体向土壤有机质转化过程及其稳定机制的研究进展[J]. *土壤学报*, 2019, 56(3):528-540. WANG J K, XU Y D, DING F, et al. Process of plant residue transforming into soil organic matter and mechanism of its stabilization: A review[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, 56(3):528-540.
- [19] CEN R, FENG W Y, YANG F, et al. Effect mechanism of biochar application on soil structure and organic matter in semi-arid areas[J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 286:112198.
- [20] DONG X L, GUAN T Y, LI G T, et al. Long-term effects of biochar amount on the content and composition of organic matter in soil aggregates under field conditions[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2016, 16(5):1481-1497.
- [21] XIU L Q, ZHANG W M, SUN Y Y, et al. Effects of biochar and straw returning on the key cultivation limitations of Albic soil and soybean growth over 2 years[J]. *Catena*, 2019, 173:481-493.
- [22] ZHANG M, CHENG G, FENG H, et al. Effects of straw and biochar amendments on aggregate stability, soil organic carbon, and enzyme activities in the Loess Plateau, China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, 24(11):10108-10120.
- [23] HEIKKINEN J, KESKINEN R, SOINNE H, et al. Possibilities to improve soil aggregate stability using biochars derived from various biomasses through slow pyrolysis, hydrothermal carbonization, or torrefaction[J]. *Geoderma*, 2019, 344:40-49.
- [24] 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.
- [25] 李倩倩, 许晨阳, 耿增超, 等. 生物炭对壤土土壤容重和团聚体的影响[J]. *环境科学*, 2019, 40(7):3388-3397. LI Q Q, XU C Y, GENG Z C, et al. Impact of biochar on soil bulk density and aggre-

- gates of loe soil[J]. *Environmental Sciences*, 2019, 40(7):3388–3397.
- [26] 程效义, 孟军, 黄玉威, 等. 生物炭对玉米根系生长和氮素吸收及产量的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2016, 47(2):218–223. CHENG X Y, MENG J, HUANG Y W, et al. Effect of biochar on root growth, absorption of nitrogen and maize yield[J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2016, 47(2):218–223.
- [27] 蒋健, 王宏伟, 刘国玲, 等. 生物炭对玉米根系特性及产量的影响[J]. 玉米科学, 2015, 23(4):62–66. JIANG J, WANG H W, LIU G L, et al. Effect of biochar on root characteristics and yield in maize[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2015, 23(4):62–66.
- [28] 苑亚茹, 韩晓增, 李禄军, 等. 低分子量根系分泌物对土壤微生物活性及团聚体稳定性的影响[J]. 水土保持学报, 2011, 25(6):96–99. YUAN Y R, HAN X Z, LI L J, et al. Effects of soluble root exudates on microbial activity and aggregate stability of black soils[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25(6):96–99.
- [29] SUN Q, MENG J, LAN Y, et al. Long-term effects of biochar amendment on soil aggregate stability and biological binding agents in brown earth[J]. *Catena*, 2021, 205:105460.
- [30] ZHANG S, CUI J W, WU H, et al. Organic carbon, total nitrogen, and microbial community distributions within aggregates of calcareous soil treated with biochar[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2021, 314:107408.
- [31] 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.
- [32] 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):705–712. HOU X N, LI H, ZHU L B, et al. Effects of biochar and straw additions on lime concretion black soil aggregate composition and organic carbon distribution[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(4):705–712.
- [33] 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):643–650. WU P B, XIE Y, QI Z P, et al. Effects of biochar on stability and total carbon distribution of aggregates in granitic laterite[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2012, 20(4):643–650.
- [34] 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. LI J Z, DAI K, ZHANG L M, et al. Effects of biochar application on soil organic carbon distribution and soil aggregate composition of red soils in Yunnan tobacco planting area[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, 36(6):2114–2120.
- [35] BLANCO-CANQUI H, LAIRD D A, HEATON E A, et al. Soil carbon increased by twice the amount of biochar carbon applied after 6 years: Field evidence of negative priming[J]. *Global Change Biology Bioenergy*, 2020, 12(4):240–251.
- [36] TISDALL J M, OADES J M. Organic matter and water-stable aggregates in soils[J]. *Journal of Soil Science*, 1982, 33:141–163.
- [37] 尹云锋, 高人, 马红亮, 等. 稻草及其制备的生物炭对土壤团聚体有机碳的影响[J]. 土壤学报, 2013, 50(5):64–69. YIN Y F, GAO R, MA H L, et al. Effect of application of rice straw and straw biochar on organic carbon in soil aggregates[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50(5):64–69.
- [38] 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. XU G X, WANG Z F, GAO M, et al. Effects of straw and biochar return in soil on soil aggregate and carbon sequestration[J]. *Environmental Science*, 2018, 39(1):355–362.
- [39] FENG X, XIA X, CHEN S, et al. Amendment of crop residue in different forms shifted micro-pore system structure and potential functionality of macroaggregates while changed their mass proportion and carbon storage of paddy topsoil[J]. *Geoderma*, 2022, 409:115643.

(责任编辑:叶飞)