

土壤矿物质增强生物炭稳定性的机制综述

陈全, 陈丽芳, 吴丹萍, 吴敏, 潘波

引用本文:

陈全, 陈丽芳, 吴丹萍, 吴敏, 潘波. 土壤矿物质增强生物炭稳定性的机制综述[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(3): 490-499.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2022-1128>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

生物质内源矿物对热解过程及生物炭稳定性的影响

顾博文, 曹心德, 赵玲, 赵英豪

农业环境科学学报. 2017, 36(3): 591-597 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-1160>

香蕉秆及其生物炭对双季水稻土团聚体及碳库管理的影响

王超, 邱竞驰, 李建华, 卢瑛, 李博, 唐贤, 董玉清, 胡家帅

农业环境科学学报. 2022, 41(3): 537-546 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0766>

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

农业环境科学学报. 2022, 41(11): 2515-2524 <https://doi.org/10.11654/jaes.2022-0305>

施用玉米秸秆生物质炭对水稻土黑碳数量和结构特征的影响

张葛, 窦森, 谢祖彬, 孟繁荣, 尹显宝

农业环境科学学报. 2015(9): 1769-1774 <https://doi.org/10.11654/jaes.2015.09.020>

“微生物碳泵”作用下的土壤有机碳稳定性及其吸附特性研究进展

李芳芳, 李中文, 李宇轩, 代然, 周丹丹, 杨时玲

农业环境科学学报. 2022, 41(6): 1155-1163 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0860>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

陈全, 陈丽芳, 吴丹萍, 等. 土壤矿物质增强生物炭稳定性的机制综述[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(3): 490-499.

CHEN Q, CHEN L F, WU D P, et al. Mechanisms of soil minerals enhance biochar stability: A review[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2023, 42(3): 490-499.

土壤矿物质增强生物炭稳定性的机制综述

陈全, 陈丽芳, 吴丹萍, 吴敏*, 潘波

(昆明理工大学环境科学与工程学院, 云南省土壤固碳与污染控制重点实验室, 昆明 650500)

摘要:近年来,生物炭因其在环境中的高稳定性以及固碳减排功能,成为国内外的研究热点。然而,生物炭并不是完全惰性的,它的稳定性与其化学结构和所处的环境体系密切相关。为探究生物炭在土壤矿物质作用下的稳定性和固碳潜能,本文通过分析生物炭与土壤矿物质中无机离子的相互作用机理、生物炭与矿物质颗粒团聚过程,系统论述了土壤矿物质对生物炭稳定性的影响。土壤矿物质无机离子可与生物炭发生络合、阳离子桥联、沉淀和静电吸引等相互作用形成有机-矿质复合体,矿物质颗粒成分可与土壤有机质和生物炭等发生团聚,这两种形式为生物炭提供物理保护,提高生物炭的化学稳定性。生物炭在团聚体中的分布会随时间变化:前期主要存在于粉+黏团聚体,后期主要分布于微团聚体和大团聚体。团聚体的形成将限制微生物的数量与类群、降低生物炭与微生物接触概率、减缓微生物降解利用生物炭的速率,进而增强生物炭的生物稳定性。

关键词: 矿物质离子; 矿物质颗粒; 生物炭; 稳定性; 团聚体

中图分类号: S153.6 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2023)03-0490-10 doi:10.11654/jaes.2022-1128

Mechanisms of soil minerals enhance biochar stability: A review

CHEN Quan, CHEN Lifang, WU Danping, WU Min*, PAN Bo

(Yunnan Provincial Key Lab of Soil Carbon Sequestration and Pollution Control, Faculty of Environmental Science and Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: Biochar has received much attention due to its high stability in the environment, which makes it suitable for carbon sequestration and emission reduction. However, biochar is not completely inert. Its stability is determined by its chemical structure and the surrounding ecological system. To explore the stability of biochar and its carbon fixation potential under the action of soil minerals, this study elaborated on the mechanism of the interaction between biochar and mineral inorganic ions, the aggregation process of biochar and mineral particles, and systematically analyzed the influence of minerals on the biological stability of biochar. Mineral inorganic ions might interact with biochar through complexation, cation bridging, precipitation, and electrostatic attraction to form an organic-mineral complex, and mineral particles may aggregate with soil organic matter and biochar. These two forms might provide physical protection for biochar, thus improving its chemical stability. The distribution of biochar in aggregates changed over time. It mainly existed in silt and clay aggregates, and then distributed in micro-aggregates and macro-aggregates. The formation of aggregates limited the number and diversity of microorganisms, reduced the probability of contact between biochar and microorganisms, and slowed down the microbial degradation of biochar, thereby enhancing its biological stability. This paper discussed challenges to biochar stability and carbon fixation ability and provided a theoretical basis for future research.

Keywords: mineral ion; mineral particle; biochar; stability; aggregate

收稿日期: 2022-11-08 录用日期: 2022-12-08

作者简介: 陈全(1989—), 男, 湖北黄冈人, 博士, 从事污染物环境行为研究。E-mail: 18814122937@163.com

*通信作者: 吴敏 E-mail: minwup@hotmail.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(41977334, 42067055); 云南省重点科技计划项目(202101AW070008, 202001AS070015)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China(41977334, 42067055); The Yunnan Fundamental Research Project(202101AW070008, 202001AS070015)

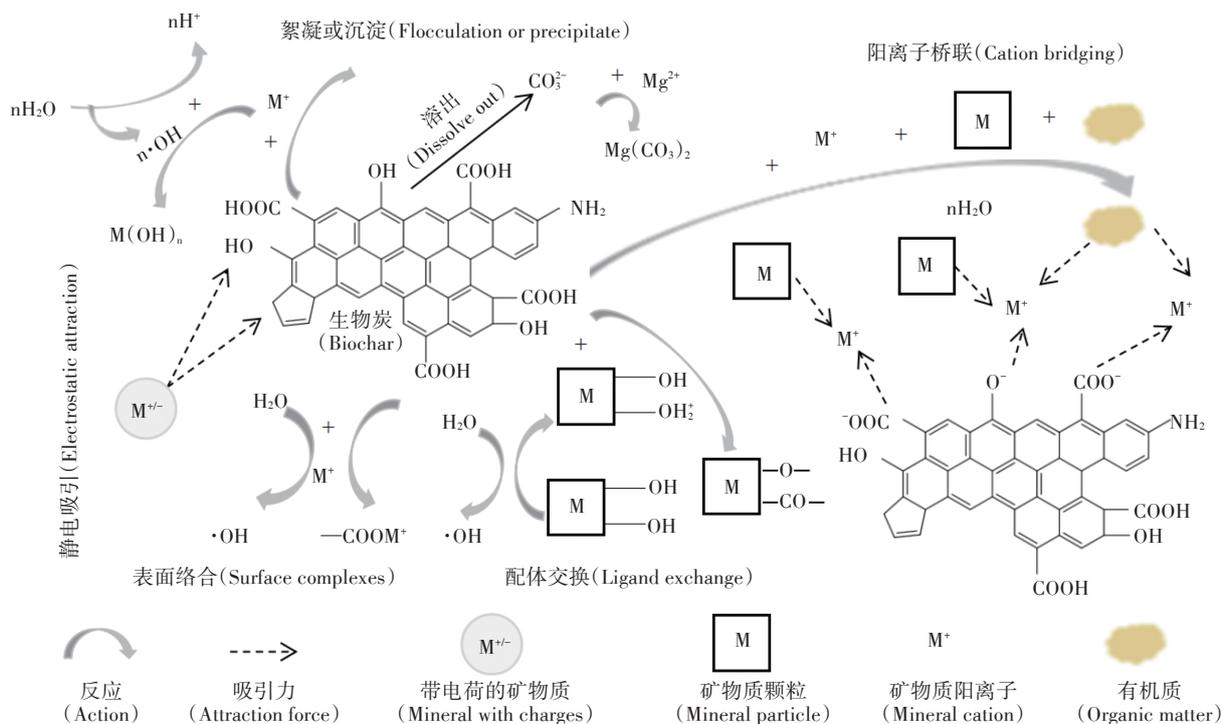
生物炭是生物质在高温无氧或限氧条件下热解产生的高碳固体,可用于改善土壤质量、治理污染^[1-2]。无氧或限氧热解后,生物炭中原本易被矿化分解为CO₂的碳被固定,形成化学性质稳定、难被生物降解的芳香稠环结构^[3],因而可在土壤中中长期稳定存在,缓解温室效应并实现固碳减排^[4]。然而,生物炭在土壤中并非是完全惰性的,其稳定性与化学结构的变化和所处的环境体系密切相关。在雨水淋溶、耕作活动、生物代谢活动和黏土膨胀等过程的作用下,生物炭发生破碎、迁移、转化和矿化^[5],稳定性随之发生变化。土壤固相中矿物质组分含量高达95%以上,它与生物炭之间发生的相互作用是影响生物炭稳定性的重要因素^[6]。原生矿物和次生矿物风化过程可产生大量可溶性盐,这些盐类大多可溶于水,是土壤无机离子(PO₄³⁻、CO₃²⁻、Ca²⁺、Mg²⁺)的重要来源^[7]。这些无机离子能与表面含有丰富官能团的生物炭发生静电吸引、配体交换和表面络合等相互作用,促使生物炭快速和土壤中黏土矿物、有机质、灰分等相互作用形成有机-矿质复合体。这些有机-矿质复合体可进一步与矿物质颗粒、土壤有机质、其他生物炭相互聚集形成团聚体^[8]。生物炭与矿物质的团聚不仅能

促使生物炭在土壤中中长期稳定存在,还可通过团聚过程黏结土壤有机质,减少有机质的微生物降解。因此,有必要探究生物炭和土壤矿物质的作用机制,明晰矿物质在生物炭长期稳定存在中所起的作用,从而进一步明确生物炭的固碳减排效果。

生物炭与矿物质的相互作用可分为生物炭与矿物质中无机离子和矿物质颗粒的相互作用。目前,研究者发现生物炭与矿物质离子相互作用后稳定性会增强,但矿物质颗粒与生物炭的团聚过程、矿物质离子与生物炭作用机理的相关阐述尚不明确。因而本文概述了土壤矿物质中无机离子、矿物质颗粒与生物炭之间的相互作用机理,论述了矿物质作用下生物炭稳定性变化,并分析了微生物对生物炭的降解利用情况。最后,本文提出了未来生物炭在土壤中稳定性的研究方向,为深入研究生物炭的固碳减排潜力提供理论依据。

1 生物炭与土壤矿物质无机离子的相互作用

生物炭与土壤矿物质中无机离子的相互作用主要包括表面络合、配体交换、阳离子桥联、沉淀和静电吸引^[9-11],其相互作用机理见图1。生物炭与矿物质阳



多环结构方便展示多个官能团,并非所有生物炭均为该结构

Multi-ring structures facilitate the display of multiple functional groups, not representing all biochar structures

图1 生物炭与土壤矿物质无机离子相互作用机理

Figure 1 Mechanisms of the interactions between biochar and soil mineral inorganic ions

离子、部分带正电荷的矿物质之间的静电吸引可促使表面络合、阳离子桥联等相互作用的发生^[12],但单独的静电吸引对生物炭与矿物质形成有机-矿质复合物的贡献较低。

1.1 表面络合与配体交换

生物炭中含有羟基、羧基和酯基等大量含氧官能团,它们易与 Al^{3+} 、 Cu^{2+} 、 Ca^{2+} 和 Fe^{3+} 等矿物质阳离子在生物炭表面发生络合形成络合物,因而该过程被称为表面络合^[13]。尽管目前研究认为两者的络合反应主要和生物炭表面的含氧官能团有关,但Possinger等^[14]发现有机质中含氮官能团也可与土壤矿物质络合形成有机-矿质复合体。因而,生物炭表面的胺基、酰胺等含氮官能团也可与矿物质离子发生表面络合。有研究表明生物炭和矿物质阳离子络合后将形成有机-矿物厚包膜,为生物炭提供物理保护,使得生物炭更加稳定^[15]。生物炭自然老化后表面含氧官能团增多^[16],更易与矿物质发生络合反应,从而覆盖生物炭表面。可见,络合反应的发生可增强生物炭在土壤环境中的稳定性。

如图1所示,配体交换也是生物炭与土壤矿物质离子形成有机-矿质复合体的主要作用机制之一。由于两者的作用机理相似,有研究将配体交换归为表面络合^[17]。在酸性条件下,矿物质中结晶不良的Al、Fe等的(氢)氧化物和水合物发生质子化,表面的无机羟基OH接受质子形成 OH_2^+ 后,与有机物上带负电荷的酸性官能团,如酚羟基、羧基、烯醇发生配体交换,形成有机-矿质复合体^[18-19]。生物炭表面官能团众多,芳香碳连接的羧基、羟基可以为矿物质提供多个结合位点,并形成稳定的化学键抵抗生物降解,提高生物炭的稳定性^[20]。

1.2 阳离子桥联

与有机质类似,土壤pH值在生物炭与矿物质无机离子的相互作用中扮演重要角色。配体交换需要易发生质子化的土壤环境,而阳离子桥联需要去质子化的土壤环境,一般发生于近中性的土壤中。如图1所示,表面带有负电荷的矿物质,如层状铝硅酸盐和Fe、Al等(氢)氧化物,和同样带负电荷的生物炭相互排斥,但土壤中阳离子可作为桥梁连接矿物表面的负电荷与生物炭、土壤有机质以保持表面电中性^[21]。有研究表明阳离子的离子电位越高,即价态越高,半径越小,越容易发生阳离子桥联,形成更强更稳定的配合物^[22];因而二价三价的矿物质阳离子一般比单价阳离子更易与生物炭形成稳定的配合体。土壤环境中

Al、Fe、Ca含量较多且具有较高的离子电位,是发生阳离子桥联的“主力军”。在弱酸性土壤中,生物炭主要与 Fe^{3+} 和 Al^{3+} 桥联,但Al更容易与有机质发生络合/螯合与沉淀,较少以 Al^{3+} 的形式存在;在碱性土壤尤其是石灰性土壤中主要发生钙离子桥联^[23]。阳离子桥联形成的配合物结构较松散,不如配体交换形成的络合物稳定,但在阳离子桥联或配体交换的作用下,生物炭均趋于稳定。

1.3 沉淀

生物炭和矿物质无机离子发生络合、配体交换或阳离子桥联后,形成有机-矿质复合体,但发生沉淀后,既可以形成有机-矿质复合体,也可形成无机物质。如图1所示,两者发生的沉淀有3种情况:一是生物炭自身含有一些无机成分,如 PO_4^{3-} 和 CO_3^{2-} ,易与 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Zn^{2+} 等形成沉淀^[24]。这种沉淀较少发生,对生物炭稳定性影响较小。二是 Al^{3+} 、 Fe^{3+} 、 Ca^{2+} 等矿物质离子可与生物炭中溶解性有机质的疏水性组分发生絮凝或沉淀,形成有机-矿质复合体沉淀^[25]。此外,这类反应优先发生于高分子有机质或芳香性有机质,较少发生于小分子有机质^[26]。生物炭中高分子芳香结构也可能在生物炭表面发生类似的沉淀。三是在弱碱性、碱性土壤中,或生物炭的碱性条件下,矿物质也会形成氢氧化物沉淀附在生物炭表面或孔隙中。如 Fe^{3+} 可以在生物炭表面形成 $\beta\text{-FeOOH}$ 沉淀,覆盖在生物炭表面^[27]。以上可知,生物炭通过与矿物质中无机离子形成络合物,或被矿物质所形成沉淀覆盖而变得更加稳定。

热解温度和生物质原料是决定生物炭pH值、官能团构成、元素组成等理化性质的关键性因素^[28]。理化性质的改变将随之影响生物炭与矿物质无机离子的相互作用。随热解温度的升高,生物炭表面极性官能团含量减少,不利于表面络合与配体交换、阳离子桥联的发生^[29]。高温生物炭($>700\text{ }^\circ\text{C}$)具有较强的疏水性,可与矿物质离子发生絮凝与沉淀;高温生物炭的高pH值也使其吸引矿物质阳离子在其表面形成沉淀^[30]。因而,高温生物炭与矿物质无机离子间较少形成有机-矿质复合体。此外,生物质原料决定了生物炭的化学组成。粪便源生物炭中磷酸盐、碳酸盐和硫酸盐等的含量较高,更易与矿物质离子形成沉淀物^[31]。玉米秸秆源生物炭中羟基含量高于小麦秸秆源生物炭,因而更易与矿物质离子发生配体交换和表面络合^[32]。为实现长期稳定固碳,应分析不同生物炭与土壤矿物质无机离子的相互作用机理,合理地控制

原料和制备条件。

上述生物炭与土壤矿物质无机离子的3种主要相互作用可增加生物炭的生物稳定性和短期化学稳定性,但在复杂的土壤环境中,矿物质无机离子之间发生的相互作用也可能导致其在提高生物炭稳定性上存在拮抗作用^[33]。例如生物炭、Ca²⁺和高岭石(铝硅酸盐)三者共同培养3个月尽管可以形成有机-矿质复合物,但Ca²⁺桥联松散的结构和联结物质的增多使得部分Ca²⁺连接的生物炭裸露出来,从而更易被降解、氧化^[34]。因而,有必要完善阳离子桥联、配体交换等机理作用过程、产物结构、作用条件,据此优化土壤环境的条件,提高生物炭固碳效果。如表1所示,目前对生物炭和矿物质无机离子的研究主要集中于Al³⁺、Ca²⁺和Fe³⁺这3种矿物质阳离子,但土壤体系复杂多样,与生物炭的相互作用不应局限于这些矿物质阳离子,其他矿物质无机离子和生物炭中原有的无机离子也可参与其中影响生物炭的稳定性^[35-36]。因此,在研究生物炭与矿物质离子相互作用时需考虑实际土壤环境中其他矿物质离子的类型和含量。

值得注意的是,生物炭在土壤水分、雨水和径流的作用下其水溶性组分易溶出。其中的生物炭源溶解性有机物(Biochar-derived dissolved organic matters, BDOM, <0.45 μm)具有较高的化学活性,可通过配体作用溶出并络合针铁矿中的铁元素^[46]。有研究表明BDOM中不饱和结构与芳香结构通过疏水分配、

氢键和静电吸引吸附于水铁矿,并且水铁矿主要吸附酚类与多环芳烃^[47]。BDOM可吸附于矿物质,进而参与矿物质离子与不溶性生物炭的阳离子桥联和表面络合等反应,其表面含氧官能团丰富,也可能与矿物质离子发生表面络合^[48]。目前相关研究主要集中于BDOM与蒙脱石、高岭石和针铁矿等矿物质颗粒之间,缺乏与矿物质离子的相互作用机制的探究。此外,生物炭溶出PO₄³⁻、CO₃²⁻、NH₄⁺、Fe³⁺和Mg²⁺等无机成分对络合的影响与贡献也有待研究。

2 生物炭与土壤矿物质颗粒的相互作用

生物炭与矿物质离子发生相互作用形成有机-矿质复合物。在此基础上,生物炭与矿物质颗粒更容易发生聚集,在土壤胶结物质——多糖、腐植酸、黏土矿物、菌丝和微生物分泌物等具有黏性的胶结物质的作用下,可黏结其他土壤成分,形成团聚体。团聚体中生物炭的生物稳定性增强,与游离态相比,团聚体的多孔结构限制了微生物的活动,因而团聚体中生物炭更加趋于稳定。

2.1 生物炭与土壤矿物质颗粒的团聚

矿物质和有机质是构成土壤团聚体的主要成分。一定条件下,土壤中的黏土矿物胶体可相互凝聚并吸附一些土壤有机质,以此为基础,在各种胶结物质的作用下黏结有机质、枯枝落叶等土壤成分逐步形成土壤团聚体^[22]。大量研究表明生物炭能够促进土壤团

表1 矿物质颗粒与离子对生物炭稳定性的影响

Table 1 Effects of mineral particles and ions on the stability of biochar

生物炭原料 Biochar material	矿物质颗粒(P)/离子(I) Mineral particle/ion	稳定性类型 Stability type	稳定趋势 Stability trend	相关机理 Related mechanism	参考文献 Reference
核桃壳	I:溶解性生物炭与高岭石 P:高岭石	生物和化学氧化	I不确定 P稳定	钙离子桥联、配体交换 形成团聚体	[33]
核桃壳	I:CaCl ₂ 、FeCl ₃ 、AlCl ₃ 溶液 P:高岭石	生物和化学氧化	I稳定 P稳定	表面络合、配体交换、钙离子桥联、沉淀和静电吸引 团聚	[34]
稻草和猪粪	I:FeCl ₃ 溶液	化学氧化	稳定	沉淀	[35]
树木、草等	P、I:土壤矿物质	生物	稳定	表面络合、团聚	[37]
芒草	P、I:土壤矿物质	生物	稳定	形成团聚体	[38]
黑麦草	P、I:土壤矿物质	生物	稳定	静电吸引、配体交换、 沉淀、团聚	[39]
林木、草等	P:土壤矿物质	生物	稳定	团聚	[40]
木头	P:土壤矿物质	生物	稳定	形成团聚体	[41]
大麦	P:土壤矿物质	生物	稳定	团聚	[42]
作物、粪便、草、 木质材料	P:土壤矿物质	生物	稳定	物理保护	[43]
核桃壳	P:高岭土和针铁矿	生物	稳定	钙离子桥联、配体交换	[44]
核桃壳	P:膨润土和针铁矿	生物和化学氧化	稳定	钙/阳离子桥联、配体交换、表面络合、静电作用	[45]

聚体的形成^[49-51]。向土壤施加 $60 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的生物炭培养 8 a 后, $1\ 000\sim 2\ 000 \mu\text{m}$ 的大团聚体占比(以总有机碳计)增加了 1.7 倍。事实上,生物炭可通过参与团聚体的形成而在土壤中稳定存在。Brodowski 等^[52]认为生物炭初始游离存在于土壤环境,随后与矿物质相互作用形成密度较大、较稳定的复合体,这种复合体可抵抗 $50 \text{ J} \cdot \text{mL}^{-1}$ 的超声能量。可见,生物炭和矿物质、土壤有机质之间不是简单地堆积,而是通过物理吸附和化学作用形成紧密的复合体。有研究人员提出,生物炭通过表面羟基和羧基与土壤有机质、黏土矿物之间的吸附、络合反应和 Ca^{2+} 桥联结微团聚体形成大团聚体,使得生物炭在土壤中更加“顽固”^[53]。可见,生物炭、矿物质颗粒以及其他土壤成分之间的相互作用在生物炭形成团聚体的过程中起关键作用。结合土壤团聚体的形成理论,图 2 推测了生物炭在土壤中的团聚行为:生物炭进入土壤后,可与土壤有机质、矿物质颗粒发生物理吸附、表面络合、阳离子桥联和静电吸引等反应后形成有机矿物复合体;再在葡萄糖等有机质、矿物质颗粒和矿物质离子等胶结物质的作用下,逐步形成微团聚体;这些微团聚体在各种胶结物质作用下可与其他微团聚体形成中间团聚体,最后在根、根系分泌物、微生物分泌物等胶结物质的作用下形成大团聚体^[54]。这是以生物炭为起点形成团聚体的过程,一般需要较长时间。此外,生物炭还可与土壤团聚体中的有机质、矿物质等形成有机-矿质复合体,从而进入土壤团聚体^[55],这种途径可加快生物炭形成团聚体的速度。

如前所述,BDOM 可能会吸附于矿物质颗粒或与

矿物质无机离子发生络合形成有机-矿质复合体而参与团聚。低温生物炭($<500 \text{ }^\circ\text{C}$)溶出的溶解性有机物还可作为有机胶结物质参与生物炭与土壤矿物质的团聚^[56]。然而,生物炭、其他土壤成分与矿物质颗粒之间的团聚过程尚不明朗,BDOM 在团聚过程是否扮演重要角色便无从分析。因此,需追踪生物炭在土壤中的动态分布,探究不同生物炭的不溶性组分和 BDOM 形成团聚体的过程与机制。此外,生物炭中的可溶性组分 BDOM 流动性强且易发生生物降解和氧化,在土壤中留存时间较短。但研究表明 BDOM 可与矿物质结合甚至插入矿物质层间结构中,减少其生物降解,延长 BDOM 的留存时间^[46,57]。因而,还应研究与土壤矿物质的相互作用对 BDOM 在土壤环境的留存时间和稳定性的影响,进而探讨 BDOM 对生物炭稳定性的贡献及其固碳潜能。

2.2 生物炭在团聚体中的分布情况

团聚体的迁移周转过程会影响生物炭在土壤团聚体中的分布情况。生物炭进入土壤后,前期主要存在于粉+黏团聚体(silt and clay fraction, $<53 \mu\text{m}$)中,较少存在于微团聚体(large micro-aggregate, $53\sim 250 \mu\text{m}$)和大团聚体(macro-aggregate, $>250 \mu\text{m}$)中^[58]。后期与其他土壤成分形成有机矿物复合体后,主要分布于微团聚体和大团聚体中^[59]。有研究提出:生物炭施入土壤 3 个月时,超过 90% 的生物炭存在于微团聚体;9 个月后,进入大团聚体的生物炭显著增加^[60]。Brodowski 等^[61]分析生物炭在土壤中存在 8 a 后的分布情况,发现生物炭大部分存在于大团聚体中,其次是微团聚体中,粉+黏团聚体中含量最少,这与土壤有

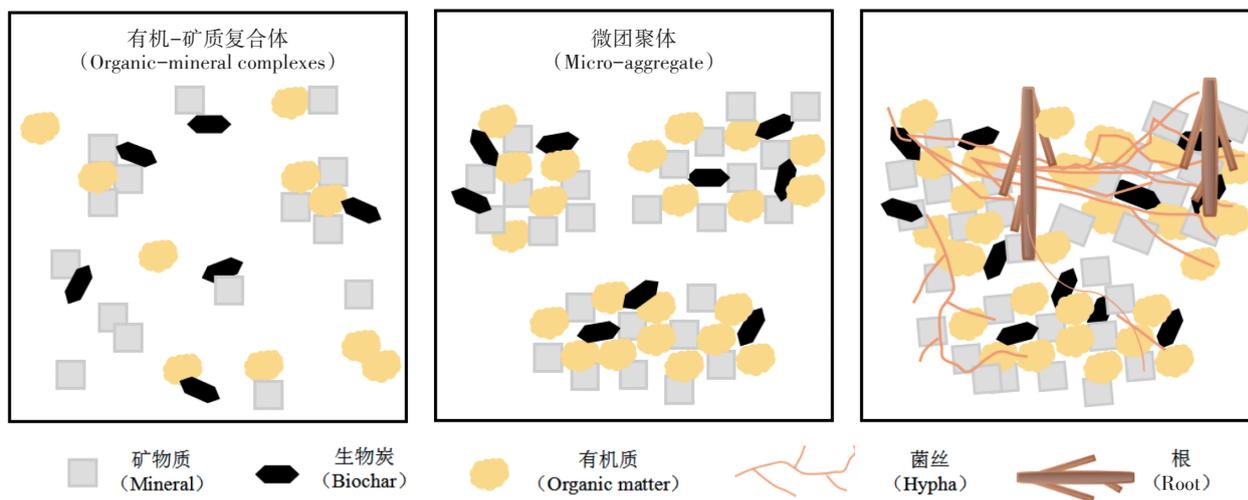


图 2 生物炭与土壤矿物质颗粒、有机质的团聚过程

Figure 2 Aggregation process of biochar, soil mineral particle, and organic matter

有机质在土壤团聚体中分布情况类似^[62]。土壤中各团聚体的含量和组分一直处于动态变化之中,微团聚体在胶结物质作用下可形成大团聚体,胶结物质的破碎和降解、土壤生物的扰动、耕作活动、干旱等则会使得大团聚体分散破碎,转变为微团聚体,甚至粉+黏团聚体^[63]。在此期间,部分生物炭可能从团聚体中剥落而降解、破碎、迁移,或再次形成微团聚体进行下一轮周转。

生物炭和土壤矿物、有机质相互作用后形成的土壤团聚体对生物炭和土壤有机质的物理保护作用已经被大量研究所证实^[50,64-65]。但对生物炭在其中发挥的作用和参与方式则知之甚少。尽管有研究人员探究生物炭在团聚体中的分布情况,但是很少将团聚体中生物炭和土壤有机质进行区分,这会高估生物炭在土壤团聚体中的占比,干扰对生物炭提高土壤有机质稳定性和固碳能力方面的评估。此外,Liu等^[60]的研究发现生物炭的施加量会影响土壤团聚体的总量和组成成分。在探讨生物炭对土壤团聚体的影响和生物炭的分布情况时应予以考虑。更为关键的是,部分研究未提及生物炭在环境中的存在时间,这将无法追踪生物炭在土壤团聚体中的动态变化。因此,需进一步研究生物炭在土壤团聚体中的分布情况和含量、总量随时间的变化情况。

2.3 团聚体的形成对生物炭稳定性的影响

生物炭的稳定性主要分为化学氧化和生物稳定性^[67]。由表1可知,与矿物质颗粒和无机离子相互作用后,生物炭的化学氧化和生物稳定性均增强。化学氧化稳定性的增强是由于生物炭表面的有机-矿质复合体与形成的团聚体可将一部分生物炭与土壤中氧气、水分和微生物隔开,即形成物理隔离^[68]。微生物具有一定的活动范围,团聚体提供的物理隔离将限制微生物的数量与类群、降低生物炭与微生物接触概率,因而团聚体中能降解利用生物炭的微生物数量有限,生物炭的生物稳定性便会提高。与此同时,团聚体中的孔隙分布也会影响微生物对团聚体内生物炭的降解。Killham等^[69]的研究发现葡萄糖在孔径 $<6\ \mu\text{m}$ 土壤中的降解速率慢于孔径 $6\sim 30\ \mu\text{m}$ 的土壤。团聚体的小孔隙中微生物降解利用生物炭速率将减缓。此外,孔隙小的土壤团聚体的水稳性高于孔隙较大的团聚体^[70]。因而,微团聚体中生物炭的生物稳定性高于其他生物炭。因此,在研究生物炭在土壤环境中的生物稳定性时,有必要探讨生物炭与矿物质颗粒之间形成团聚体的孔隙分布情况与生物炭在团聚体中的分布情况。

土壤中有大量微生物可降解利用生物炭作为其能量来源,如土壤真菌尖孢镰刀菌(*Fusarium oxysporum*)^[71]。革兰氏阳性需氧细菌能以生物炭中的芳香族化合物作为碳源^[72]。变形菌门、拟杆菌门等细菌的丰度会随生物炭的加入而增加^[73]。大量研究表明这些细菌可降解不稳定的脂肪族化合物、部分不稳定的芳香族化合物和稠环芳香化合物^[54,74-75]。施入土壤后,生物炭与土壤矿物质相互作用存在于粉+黏团聚体和微团聚体/重组分中。此时,微生物利用生物炭的能力开始减弱^[76]。而且,团聚体中限氧环境会抑制降解生物炭的需氧微生物的生长繁殖,多孔结构阻碍微生物的信号通讯,使得团聚体中降解生物炭的微生物的数量和类群很可能远低于其他土壤。因而团聚体的形成会增强生物炭的生物稳定性。Zimmermann等^[77]提出经生物炭改良1 a后,土壤微生物分泌的酶主要是酚氧化酶和过氧化物酶等芳香转化酶;改良11 a后,分泌的酶则主要是 β -葡萄糖苷酶等糖类转换酶。酶的不同意味着生物炭的组分和微生物降解利用方式发生转变,可据此深入研究土壤团聚体中生物炭的短期、长期降解利用机制。

除土壤微生物外,土壤动物也可利用生物炭,如部分线虫可以利用其中的C、N等养分^[78]。微小节肢动物和原生物可消化部分生物炭,或通过摄食降解利用生物炭的细菌和真菌间接利用生物炭^[79]。团聚体的小孔可将绝大部分线虫和原生物隔开,减少其对生物炭的降解利用^[80]。在研究生物炭在土壤中的稳定性时,不应忽视生物炭与矿物质颗粒形成团聚体的孔隙分布所起的作用。蚯蚓是土壤中实现碳利用和碳循环的关键动物,但目前缺乏蚯蚓摄食或降解利用生物炭的研究。此外,一些生物炭对土壤动物具有毒害作用^[81]。因此,需筛选生物质制备生物炭,延长培养时间研究土壤中的微生物和动物对生物炭的降解利用,以便进一步研究土壤团聚体中生物炭的降解利用。

3 总结与展望

生物炭进入土壤后,与土壤矿物质中无机离子发生一系列相互作用后形成有机-矿质复合体进入土壤团聚体,或者再与其他有机质、生物炭与矿物质颗粒发生团聚而在土壤中形成团聚体。团聚体中的生物炭能够得到物理保护,从而减少化学氧化和微生物的降解利用。在矿物质无机离子和矿物质颗粒作用下,生物炭稳定性的增强对土壤中碳沉积和碳封存意

义重大。

尽管相关研究取得了重要进展,但为明晰土壤矿物质对生物炭稳定性的影响,仍有许多问题亟需解决:

(1)生物炭和矿物质无机离子之间的相互作用机理。之前的研究多通过加入CaCl₂、NaCl和NaCl-NaH₂PO₄等背景溶液来探讨生物炭和矿物质离子的相互作用机理,但所研究的矿物质离子类型远比土壤存在的矿物质单一,各种相互作用是否发生、生物炭中具体的反应物、反应条件等仍不清晰。未来还需深入研究热解温度、原料等工艺参数对生物炭化学组成结构的影响并量化,讨论不同生物炭与生物炭组分和矿物质离子的相互作用,以便筛选生物质和制备工艺来实现不同的农业或环境效应。

(2)生物炭中可溶性组分的稳定性和相关机理。在土壤环境中,生物炭中大量可溶性组分溶出,而生物炭的可溶性组分和不溶性组分(生物炭颗粒)与土壤矿物之间的作用必然不同,两者对生物炭整体稳定性的贡献值得进一步区分。此外,生物炭可溶性组分与土壤矿物之间的相互作用研究主要集中于土壤矿物质颗粒对生物炭源溶解性有机物的溶出与稳定性影响,而矿物质离子对这些可溶性有机组分(不同亲水性、分子量和芳香性)的作用机理,以及可溶性无机组分的存在如何影响生物炭与矿物质的相互作用均有待进一步探究。

(3)团聚体的形成与生物炭稳定性的变化。生物炭进入土壤后,如何以及多久才与矿物质颗粒等形成团聚体,矿物质颗粒成分和结构性质对团聚体形成有何影响?团聚体中的微生物如何定殖、代谢和生长繁殖以及降解利用生物炭,团聚体多久后会发生周转、破碎,其间生物炭的释放、迁移、降解和老化是否会影响生物炭在物理、化学和生物上的稳定性?

(4)降解利用生物炭的土壤生物以及适应和降解机制。对比生物炭周围“炭圈(charosphere)”和其他土壤区域中、新鲜生物炭和老化后生物炭中存在土壤生物的种类和数量,从而筛选出在生物炭的降解中起关键作用的土壤生物;研究这些土壤生物的生理生化特征和生态习性,有助于了解土壤生物对生物炭的适应和降解机制。目前研究生物炭的降解时大都以土壤微生物为主,忽视了土壤动物和植物根系等的影响。未来可根据各“炭圈”关键生物的生态位和代谢机制研究生物炭降解机理,评估不同生物在影响生物炭稳定性中发挥的作用。

参考文献:

- [1] LIU M Y, ZHU J, YANG X, et al. Biochar produced from the straw of common crops simultaneously stabilizes soil organic matter and heavy metals[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 828: 154494.
- [2] 刘洁, 孙可, 韩兰芳. 生物炭对土壤重金属形态及生物有效性影响的研究进展[J]. *环境化学*, 2021, 40(6): 1643-1658. LIU J, SUN K, HAN L F. Effect of biochar on soil heavy metal speciation and bioavailability: A review[J]. *Environmental Chemistry*, 2021, 40(6): 1643-1658.
- [3] TOMCZYK A, SOKOŁOWSKA Z, BOGUTA P. Biochar physicochemical properties: Pyrolysis temperature and feedstock kind effects[J]. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 2020, 19(1): 191-215.
- [4] 王雨婷, 陈冠益, 李磊, 等. 旱伞草水热炭的稳定性特征及固碳潜能[J]. *农业环境科学学报*, 2022, 41(3): 639-647. WANG Y T, CHEN G Y, LI L, et al. Stability and carbon sequestration potential of hydrochar derived from *Cyperus alternifolius*[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, 41(3): 639-647.
- [5] BIRD M I, WYNN W J, SAIZ G, et al. The pyrogenic carbon cycle[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2015, 43(1): 273-298.
- [6] SUN Z C, ZHANG Z C, ZHU K, et al. Biochar altered native soil organic carbon by changing soil aggregate size distribution and native SOC in aggregates based on an 8-year field experiment[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 708: 134829.
- [7] 孙向阳. 土壤学[M]. 第2版, 北京: 中国林业出版社, 2021: 64. SUN X Y. *Agrology*[M]. Second edition, Beijing: China Forestry Press, 2021: 64.
- [8] REN X H, WANG F, ZHANG P, et al. Aging effect of minerals on biochar properties and sorption capacities for atrazine and phenanthrene[J]. *Chemosphere*, 2018, 206: 51-58.
- [9] 孙建财, 周丹丹, 王薇, 等. 生物炭改性及其对污染物吸附与降解行为的研究进展[J]. *环境化学*, 2021, 40(5): 1503-1513. SUN J C, ZHOU D D, WANG W, et al. Research progress on modification of biochar and its adsorption and degradation behavior[J]. *Environmental Chemistry*, 2021, 40(5): 1503-1513.
- [10] CHEN C M, DYNES J J, WANG J, et al. Soft X-ray spectromicroscopy study of mineral-organic matter associations in pasture soil clay fractions[J]. *Environment Science and Technology*, 2014, 48(12): 6678-6686.
- [11] CHANG J L, LEI Z, YUAN G, et al. Facile synthesis of nano ZnO/ZnS modified biochar by directly pyrolyzing of zinc contaminated corn stover for Pb(II), Cu(II) and Cr(VI) removals[J]. *Waste Management*, 2018, 79: 625-637.
- [12] XU X Y, ZHAO Y H, SIMA J K, et al. Indispensable role of biochar-inherent mineral constituents in its environmental applications: A review[J]. *Bioresource Technology*, 2017, 241: 887-899.
- [13] YUN L, MUNROE P, JOSEPH S, et al. Nanoscale organo-mineral reactions of biochars in ferrosol: An investigation using microscopy[J]. *Plant and Soil*, 2012, 357(1): 369-380.
- [14] POSSINGER A R, ZACHMAN M J, ENDERS A, et al. Organo-organ-

- ic and organo-mineral interfaces in soil at the nanometer scale[J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1):6103.
- [15] HAGEMANN N, JOSEPH S, SCHMIDT H P, et al. Organic coating on biochar explains its nutrient retention and stimulation of soil fertility[J]. *Nature Communications*, 2017, 8(1):1089.
- [16] CHENG C H, LEHMANN J, THIES J E, et al. Oxidation of black carbon by biotic and abiotic processes[J]. *Organic Geochemistry*, 2006, 37(11):1477-1488.
- [17] KAISER K, GUGGENBERGER G. Sorptive stabilization of organic matter by microporous goethite: Sorption into small pores vs. surface complexation[J]. *European Journal of Soil Science*, 2007, 58(1):45-59.
- [18] GU B H, SCHMITT J, CHEN Z H, et al. Adsorption and desorption of natural organic matter on iron oxide: Mechanisms and models[J]. *Environmental Science and Technology*, 1994, 28(1):38-46.
- [19] KAISER M, ZEDERER D P, ELLERBROCK R H, et al. Effects of mineral characteristics on content, composition, and stability of organic matter fractions separated from seven forest topsoils of different pedogenesis[J]. *Geoderma*, 2016, 263:1-7.
- [20] LUO X W, SHEN M X, HUANG Z J, et al. Efficient removal of Pb(II) through recycled biochar-mineral composite from the coagulation sludge of swine wastewater[J]. *Environmental Research*, 2020, 190:142-148.
- [21] HAN L F, YANG Y, SUN K, et al. Different mechanisms driving the preferential adsorption of dissolved organic matter by goethite and montmorillonite[J]. *Chemical Geology*, 2021, 585:120560.
- [22] OADES J M. An introduction to organic matter in mineral soils[J]. *Soil Science Society of America*, 1989, 1:89-159.
- [23] CLOUGH A, SKJEMSTAD J O. Physical and chemical protection of soil organic carbon in three agricultural soils with different contents of calcium carbonate[J]. *Soil Research*, 2000, 38(5):1005-1016.
- [24] TAN X F, LIU Y G, ZENG G M, et al. Application of biochar for the removal of pollutants from aqueous solutions[J]. *Chemosphere*, 2015, 125:70-85.
- [25] MIKUTTA R, MIKUTTA C, KALBITZ K, et al. Biodegradation of forest floor organic matter bound to minerals via different binding mechanisms[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2007, 71(10):2569-2590.
- [26] SCHWESIG D, KALBITZ K, MATZNER E. Effects of aluminum on the mineralization of dissolved organic carbon derived from forest floors[J]. *European Journal of Soil Science*, 2010, 54(2):311-322.
- [27] XU Z B, XU X Y, TSANG D C W, et al. Participation of soil active components in the reduction of Cr(VI) by biochar: Differing effects of iron mineral alone and its combination with organic acid[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, 384:121455.
- [28] WANG L, OK Y S, TSANG D C W, et al. New trends in biochar pyrolysis and modification strategies: Feedstock, pyrolysis conditions, sustainability concerns and implications for soil amendment[J]. *Soil Use and Management*, 2020, 36(3):358-386.
- [29] HASSAN M, LIU Y J, NAIDU R, et al. Influences of feedstock sources and pyrolysis temperature on the properties of biochar and functionality as adsorbents: A meta-analysis[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 744:140714.
- [30] 秦晶晶, 刘玉学, 何莉莉, 等. 土壤矿物与生物炭可溶性组分的交互作用及机制[J]. *农业环境科学学报*, 2022, 41(7):1490-1500.
- QIN J J, LIU Y X, HE L L, et al. Mechanisms of interactions between soil minerals and dissolvable biochar components[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, 41(7):1490-1500.
- [31] YUAN P, WANG J J, PAN Y J, et al. Review of biochar for the management of contaminated soil: Preparation, application and prospect[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 659:473-490.
- [32] PURAKAYASTHA T J, KUMARI S, PATHAK H. Characterisation, stability, and microbial effects of four biochars produced from crop residues[J]. *Geoderma*, 2015, 239:293-303.
- [33] YANG F, XU Z B, YU L, et al. Kaolinite enhances the stability of the dissolvable and undissolvable fractions of biochar via different mechanisms[J]. *Environment Science and Technology*, 2018, 52(15):8321-8329.
- [34] YANG F, ZHAO L, GAO B, et al. The interfacial behavior between biochar and soil minerals and its effect on biochar stability[J]. *Environmental Science and Technology*, 2016, 50(5):2264-2271.
- [35] YANG Y, SUN K, HAN L F, et al. Effect of minerals on the stability of biochar[J]. *Chemosphere*, 2018, 204:310-317.
- [36] WOO S H, ENDERS A, LEHMANN J. Microbial mineralization of pyrogenic organic matter in different mineral systems[J]. *Organic Geochemistry*, 2016, 98:18-26.
- [37] SOLOMON D, LEHMANN J, WANG J, et al. Micro- and nano-environments of C sequestration in soil: A multi-elemental STXM-NEXAFS assessment of black C and organomineral associations[J]. *Science of the Total Environment*, 2012, 438:372-388.
- [38] FERNÁNDEZ-UGALDE O, GARTZIA-BENGOETXEA N, AROSTEGI J, et al. Storage and stability of biochar-derived carbon and total organic carbon in relation to minerals in an acid forest soil of the Spanish Atlantic area[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 587:204-213.
- [39] KUZYAKOV Y, BOGOMOLOVA I, GLASER B. Biochar stability in soil: Decomposition during eight years and transformation as assessed by compound-specific ¹⁴C analysis[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, 70:229-236.
- [40] NGUYEN B T, LEHMANN J, KINYANGI J, et al. Long-term black carbon dynamics in cultivated soil[J]. *Biogeochemistry*, 2008, 89(3):295-308.
- [41] SINGH N, ABIVEN S, MAESTRINI B, et al. Transformation and stabilization of pyrogenic organic matter in a temperate forest field experiment[J]. *Global Change Biology*, 2014, 20(5):1629-1642.
- [42] BRUUN S, CLAUSON-KAAS S, BOBUESKÁ L, et al. Carbon dioxide emissions from biochar in soil: Role of clay, microorganisms and carbonates[J]. *European Journal of Soil Science*, 2014, 65(1):52-59.
- [43] WANG J Y, XIONG Z Q, KUZYAKOV Y. Biochar stability in soil: Meta-analysis of decomposition and priming effects[J]. *Global Change Biology Bioenergy*, 2015, 8(3):512-523.
- [44] 徐子博, 俞璐, 杨帆, 等. 土壤矿物质-可溶态生物炭的交互作用及

- 其对碳稳定性的影响[J]. 环境科学学报, 2017, 37(11): 4329–4335. XU Z B, YU L, YANG F, et al. Interactions between soil minerals and dissolvable biochar and its influence on carbon stability[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, 37(11): 4329–4335.
- [45] YANG F, XU Z B, HUANG Y D, et al. Stabilization of dissolvable biochar by soil minerals: Release reduction and organo-mineral complexes formation[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 412: 125213.
- [46] WU H, CHEN Z H, SHENG F, et al. Mechanisms for the dissolved biochar promoted iron dissolution and consequential chromium release[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 796: 148923.
- [47] ZHANG P, LIU A J, HUANG P, et al. Sorption and molecular fractionation of biochar-derived dissolved organic matter on ferrihydrite[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, 392: 122260.
- [48] SUN Y Q, XIONG X N, HE M J, et al. Roles of biochar-derived dissolved organic matter in soil amendment and environmental remediation: A critical review[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2021, 424: 130387.
- [49] 陈颖, 刘玉学, 陈重军, 等. 生物炭对土壤有机碳矿化的激发效应及其机理研究进展[J]. 应用生态学报, 2018, 29(1): 314–320. CHEN Y, LIU Y X, CHEN C J, et al. Priming effect of biochar on the mineralization of native soil organic carbon and the mechanisms: A review[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(1): 314–320.
- [50] SUN Q, MENG J, SARKAR B, et al. Long-term influence of maize stover and its derived biochar on soil structure and organo-mineral complexes in northeast China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, 27(22): 28374–28383.
- [51] MAHBUB UL ISLAM, JIANG F H, GUO Z C, et al. Does biochar application improve soil aggregation? A meta-analysis[J]. *Soil and Tillage Research*, 2021, 209: 104926.
- [52] BRODOWSKI S, AMELUNG W, HAUMAIER L, et al. Morphological and chemical properties of black carbon in physical soil fractions as revealed by scanning electron microscopy and energy-dispersive X-ray spectroscopy[J]. *Geoderma*, 2005, 128(1/2): 116–129.
- [53] JIEN S H, WANG C S. Effects of biochar on soil properties and erosion potential in a highly weathered soil[J]. *Catena*, 2013, 110: 225–233.
- [54] GUILLOU C L, ANGERS D A, MARON P A, et al. Linking microbial community to soil water-stable aggregation during crop residue decomposition[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2012, 50: 126–133.
- [55] BURGEON V, FOUCHÉ J, LEIFELD J, et al. Organo-mineral associations largely contribute to the stabilization of century-old pyrogenic organic matter in cropland soils[J]. *Geoderma*, 2020, 388(1/2): 114841.
- [56] SAFFARI N, HAJABBASI M A, SHIRANI H, et al. Biochar type and pyrolysis temperature effects on soil quality indicators and structural stability[J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, 261: 110190.
- [57] YANG F, XU Z B, HUANG Y D, et al. Stabilization of dissolvable biochar by soil minerals: Release reduction and organo-mineral complexes formation[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 412: 125213.
- [58] HILSCHER A, KNICKER H. Degradation of grass-derived pyrogenic organic material, transport of the residues within a soil column and distribution in soil organic matter fractions during a 28 month microcosm experiment[J]. *Organic Geochemistry*, 2011, 42(1): 42–54.
- [59] CHANG Z F, TIAN L P, LI F F, et al. Organo-mineral complexes protect condensed organic matter as revealed by benzene-polycarboxylic acids[J]. *Environmental Pollution*, 2020, 260: 113977.
- [60] HAN L F, ZHANG B, CHEN L Y, et al. Impact of biochar amendment on soil aggregation varied with incubation duration and biochar pyrolysis temperature[J]. *Biochar*, 2021, 645: 60–70.
- [61] BRODOWSKI S, JOHN B, FLESSA H, et al. Aggregate-occluded black carbon in soil[J]. *European Journal of Soil Science*, 2006, 57(4): 539–546.
- [62] MUSTAFA A, XU M G, ALI SHAH S A, et al. Soil aggregation and soil aggregate stability regulate organic carbon and nitrogen storage in a red soil of southern China[J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, 270: 110894.
- [63] 霍琳, 杨思存, 王成宝, 等. 耕作方式对甘肃引黄灌区灌耕灰钙土团聚体分布及稳定性的影响[J]. 应用生态学报, 2019, 30(10): 3463–3472. HUO L, YANG S C, WANG C B, et al. Effects of tillage types on soil aggregate distribution and stability in irrigated sierozem of Gansu Yellow River irrigation area[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(10): 3463–3472.
- [64] 邢一波. 施加生物炭对坡地土壤团聚体及玉米生长的影响[J]. 水土保持应用技术, 2022(5): 11–13. XING Y B. Effect of biochar on sloping soil aggregates and maize growth [J]. *Technology of Soil and Water Conservation*, 2022(5): 11–13.
- [65] GAO M Y, YANG J F, LIU C M, et al. Effects of long-term biochar and biochar-based fertilizer application on brown earth soil bacterial communities[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2021, 309: 107285.
- [66] LIU Z X, CHEN X M, JING Y, et al. Effects of biochar amendment on rapeseed and sweet potato yields and water stable aggregate in upland red soil[J]. *Catena*, 2014, 123: 45–51.
- [67] LENG L J, XU X W, WEI L, et al. Biochar stability assessment by incubation and modeling: Methods, drawbacks and recommendations[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 664: 11–13.
- [68] 杨帆. 生物炭-土壤矿物质界面行为及其对碳稳定性影响机制[D]. 上海: 上海交通大学, 2017: 22–25. YANG F. The interfacial behavior between biochar and soil minerals and its influencing mechanism of carbon stability[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2017: 22–25.
- [69] KILLHAM K, AMATO M, LADD J N. Effect of substrate location in soil and soil pore-water regime on carbon turnover[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1993, 25(1): 57–62.
- [70] MENONA M, MAWODZAA T, RABBANIB A, et al. Pore system characteristics of soil aggregates and their relevance to aggregate stability[J]. *Geoderma*, 2020: 114259.
- [71] DE LA ROSA J M, MILLER A Z, KNICKER H. Soil-borne fungi challenge the concept of long-term biochemical recalcitrance of pyrochar[J]. *Science Reports*, 2018, 8(1): 2896.
- [72] DAI Z M, BARBERAN A, LI Y, et al. Bacterial community composition associated with pyrogenic organic matter(biochar) varies with py-

- rolysis temperature and colonization environment[J]. *Mosphere*, 2017, 2(2):326-338.
- [73] 殷全玉, 刘健豪, 刘国顺, 等. 连续4年施用生物炭对植烟褐土微生物群落结构的影响[J]. 中国农业科技导报, 2021, 3(1):176-185. YIN Q Y, LIU J H, LIU G S, et al. Effects of biochar application for four consecutive years on microbial community structure of tobacco cinnamon soil[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2021, 3(1):176-185.
- [74] NGUYEN T T N, WALLACE H M, XU C Y, et al. The effects of short term, long term and reapplication of biochar on soil bacteria[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 636:142-151.
- [75] 王瑞, 刘玉学, 高诚祥, 等. 蛭石改性水稻秸秆生物炭在土壤中的短期降解[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(9):1954-1962. WANG R, LIU Y X, GAO C X, et al. Short-term degradation of vermiculite modified rice straw biochar in soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(9):1954-1962.
- [76] FANG Y Y, PAL SINGHA B, LUO Y, et al. Biochar carbon dynamics in physically separated fractions and microbial use efficiency in contrasting soils under temperate pastures[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, 116:399-409.
- [77] ZIMMERMANN M, BIRD M I, WURSTER C, et al. Rapid degradation of pyrogenic carbon[J]. *Global Change Biology*, 2012, 18(11):3306-3316.
- [78] 杨贝贝, 朱新萍, 赵一, 等. 生物炭基肥施用对棉田土壤线虫群落结构的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2020(4):66-71. YANG B B, ZHU X P, ZHAO Y, et al. Effect of biochar based application on soil nematode community structure in cotton fields[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2020(4):66-71.
- [79] 王萌萌, 周启星. 生物炭的土壤环境效应及其机制研究[J]. 环境化学, 2013, 32(5):768-780. WANG M M, ZHOU Q X. Environmental effects and their mechanisms of biochar applied to soils[J]. *Environmental Chemistry*, 2013, 32(5):768-780.
- [80] LEHMANN J, RILLIG M C, THIES J, et al. Biochar effects on soil biota: A review[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, 43(9):1812-1836.
- [81] 张方娟. 玉米秸秆生物炭的施用对农田土壤蚯蚓种群的生态效应[D]. 沈阳:沈阳大学, 2021:21-23. ZHANG F J. Ecological effects of biochar application from corn straw on earthworm population in farmland soil[D]. Shenyang:Shenyang University, 2021:21-23.

(责任编辑:叶飞)