

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.180277

董心亮, 林启美. 生物质炭对土壤物理性质影响的研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(12): 1846–1854

DONG X L, LIN Q M. Biochar effect on soil physical properties: A review[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018, 26(12): 1846–1854

生物质炭对土壤物理性质影响的研究进展*

董心亮^{1,2}, 林启美^{2**}

(1. 中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心/中国科学院农业水资源重点实验室/河北省节水农业重点实验室 石家庄 050022; 2. 中国农业大学资源与环境学院 北京 100193)

摘要: 生物质炭在农业与环境中的应用已成为近期国内外研究热点, 有关生物质炭特性以及生物质炭对土壤化学、生物学性质和作物产量的影响, 已经有一些综述, 但是生物质炭对土壤物理性质影响的相关综述很少。本文对近 10 年生物质炭对土壤物理性质影响相关的研究成果进行了整理分析。研究结果发现生物质炭可以降低土壤容重, 提高土壤团聚体稳定性, 增加田间持水量和土壤有效水含量, 降低饱和导水率等。生物质炭影响土壤物理性质的主要原因是生物质炭具有较大的比表面积和孔隙度。此外, 生物质炭与土壤矿质颗粒结合, 并通过对土壤微生物活性和植物生长的影响间接影响土壤物理性质。生物质炭对土壤物理性质的影响与多种因素有关, 如生物质炭原料、裂解温度、施用量和颗粒大小, 土壤质地和处理时间等。关于生物质炭对土壤物理性质影响的长期研究很少, 且缺乏田间试验。因此, 将来的研究应更加倾向于长期田间条件下生物质炭对土壤物理性质的影响, 并逐渐发现生物质炭的作用机理, 为实际的农业生产和生态治理提供科学依据。

关键词: 生物质炭; 土壤容重; 土壤水分; 土壤团聚作用; 土壤热性质

中图分类号: S152 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2018)12-1846-09

Biochar effect on soil physical properties: A review*

DONG Xinliang^{1,2}, LIN Qimei^{2**}

(1. Center for Agricultural Resources Research, Institute of Genetics and Developmental Biology, Chinese Academy of Sciences / Key Laboratory of Agricultural Water Resources, Chinese Academy of Sciences / Hebei Key Laboratory of Water-Saving Agriculture, Shijiazhuang 050022, China; 2. College of Resources and Environment, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract: Biochar is charred biomass produced under limited or no oxygen (O₂) supply and at high temperature. Rich in aromatic carbon (C), biochar can persist in soil for hundreds or thousands years. Biochar application in agricultural soils has attracted an intensive global research with extensive reviews of biochar characteristics, effects on soil chemical, biological and physical properties and on crop growth. However, the work on the effect of biochar on soil physical properties is not as detailed as those on soil chemical and biological properties. In this study, relevant publications on the effect of biochar on soil physical properties in recent decades were searched and summarized. The results indicated that biochar application reduced soil bulk density, improved soil aggregate stability, field water holding capacity, soil available water content, and decreased saturated hydraulic conductivity through direct and indirect ways. Biochar has huge specific surface area and porosity, which directly influences soil physical properties such as reducing soil bulk density and increasing water holding capacity and soil available water content. Furthermore, biochar particles combine with soil minerals to change soil structure and create the proper environment for soil microbial and plant root growth, which

* 国家自然科学基金项目(41371243)资助

** 通信作者: 林启美, 主要从事土壤生物与生物过程研究。E-mail: linqm@cau.edu.cn

董心亮, 主要从事土壤生物与生态系统健康研究。E-mail: xldong@sjziam.ac.cn

收稿日期: 2018-03-19 接受日期: 2018-07-20

* This study was supported by the National Natural Science Foundation of China (41371243).

** Corresponding author, E-mail: linqm@cau.edu.cn

Received Mar. 19, 2018; accepted Jul. 20, 2018

ultimately affect soil physical properties. Indirectly, the effect of biochar on soil physical properties includes improved soil aggregate stability and saturated hydraulic conductivity. The effect of biochar on soil physical properties is related to biochar application rate, feedstock type, pyrolysis temperature, particle size, soil texture and duration in the soil. Generally, the higher the amount of biochar applied, the more significant are the induced changes in soil physical properties (bulk density, water holding capacity and saturated hydraulic conductivity). Woody biochar significantly increases saturated hydraulic conductivity, while grass biochar has no effect on saturated hydraulic conductivity. In addition, as the duration after biochar application increases, its effect on soil physical properties decreases. However, very limited studies have investigated this relationship under long-term field conditions, and field experiments have been even relatively scarce. Consequently, the further studies should focus on the long-term effects of biochar application on soil physical properties in field condition, and investigate the mechanisms behind the biochar effect on soil physical properties, which is essential to provide scientific evidence for the real agricultural production and ecological improvement. Furthermore, the relationships between biochar characteristics and soil physical properties are not fully known. Thus, there are needs to further investigate the effect of biochar application on the interaction of soil physical and chemical, biological properties and the mechanisms.

Keywords: Biochar; Soil bulk density; Soil water; Soil aggregation; Soil thermal property

生物质炭是由生物质在高温低氧或无氧条件下裂解而成的固体物质, 具有发达的孔隙结构, 表面积比较大, 具有亲水和疏水双重特性; 表面有多种官能团, 带有大量的正负电荷, 具有吸附极性和非极性分子及阴阳离子的能力; 生物质炭富含芳香碳, 化学性质十分稳定, 在土壤及环境中分解非常缓慢, 半衰期几百至千年以上^[1-3]。越来越多的研究结果表明, 生物质炭是良好的土壤调理剂, 不仅可以提高土壤肥力和农作物产量, 而且可以改善农产品品质^[4-7], 施用生物质炭还可以大幅度扩大土壤碳库, 是一种可行的碳封存与减少温室气体排放的举措, 也是未来可持续绿色农业的发展方向之一^[8-9]。生物质炭在农业与环境中的应用已经成为当前国内外研究的热点, 已有不少学者总结分析了近 10~20 年来生物质炭特性^[10-12]、生物质炭对土壤化学性质^[13-14]、生物学性质^[15]、作物生长发育的影响^[16-17]及生物质炭的固碳减排作用等^[8,18-19], 但目前关于生物质炭对土壤物理性质影响的综述十分有限^[20]。

土壤物理性状是土壤功能的基础, 主要通过土壤容重、孔隙度、团聚体组成、水分特征和热特性等体现, 不同土壤物理特征参数并不是相互独立的, 彼此存在复杂的关系^[21]。如土壤容重的改变将影响土壤孔隙度, 进而影响土壤持水能力和导水特征, 而团聚体稳定性高的土壤通常具有较低的土壤容重, 具有较高的孔隙度^[22]。生物质炭对土壤物理性质的影响包括直接影响和间接影响^[23]。直接影响是指生物质炭本身特性对土壤物理性质的影响, 如生物质炭容重低, 孔隙度高, 具有较强的持水能力, 因此影响土壤相应的物理性质^[24-25]。而间接影响是指生物质炭通过促进作物生长、提高土壤微生物活性等进而促进土壤团聚体形成等影响土壤物理结

构^[26-27]。

本文通过分析生物质炭对土壤容重、土壤团聚体、土壤水分特征和土壤热性质的影响, 讨论生物质炭对土壤物理性质影响及差异的原因, 并提出亟待解决的问题与下一步应开展的研究方向。

1 生物质炭对土壤容重的影响及其机理

土壤物理性质恶化是导致土壤肥力降低的重要原因之一, 其中土壤压实最为常见, 最直接的结果就是土壤容重提高, 孔隙度降低, 土壤通透性下降^[28-30]。生物质炭是多孔材料, 尽管其容重因原料和裂解条件而异, 但一般较低, 为 0.09~0.74 g·cm⁻³^[31-33]。越来越多的研究结果表明, 施用生物质炭可以降低土壤容重^[34-37], 但其效果随生物质炭种类和用量而异, 也与土壤类型有关, 其作用机理也不完全一样^[33,35]。

生物质炭降低土壤容重的直接原因是稀释效应^[23], 即由于生物质炭容重远低于土壤容重, 因此生物质炭容重越低、施用量越大, 土壤容重越低。Githinji^[36]报道在 500 °C 下裂解 1 h 制备的花生壳生物质炭施用量每增加 1%(v/v), 砂质壤土容重降低 2.4×10⁻³ g·cm⁻³; Albuquerque 等^[25]发现向壤质砂土中添加小麦秸秆和橄榄树枝条制备的生物质炭 7.5%(w/w)(容重分别为 0.19 g·cm⁻³ 和 0.66 g·cm⁻³), 培养 2 个月后, 小麦秸秆和橄榄枝条生物质炭处理的土壤容重分别为 1.25 g·cm⁻³ 和 1.45 g·cm⁻³。

然而, 施用生物质炭降低土壤容重, 并不能完全归结于生物质炭的稀释效应。Laird 等^[38]向粉壤土中添加 5 g·kg⁻¹、10 g·kg⁻¹ 或 20 g·kg⁻¹ 木质植物生物质炭, 培养 500 d 后, 土壤容重显著降低, 但不同用量之间没有显著性差异, 且土壤容重降低的幅度均大于生物质炭稀释效应所能解释的程度。Hardie

等^[39]也发现向白浆土(容重为 1.27 g cm^{-3})中添加 $47 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 木质植物生物质炭(容重为 0.51 g cm^{-3}), 6 个月后土壤容重降低到 $1.13 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 即使剔除土壤中的生物质炭颗粒, 土壤容重仍为 $1.17 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 比原始土壤低近 8%。上述研究结果说明除了生物质炭本身对土壤容重的稀释效应外, 生物质炭还发挥着土壤调节剂的作用, 如生物质炭通过改善土壤通气状况, 保持养分和水分, 从而提高土壤微生物的数量与活性, 增强菌体与矿物质颗粒之间的相互作用, 也增强微生物代谢产物团聚土壤矿物质颗粒的作用, 从而降低土壤容重^[23,40]。

此外, 生物质炭对土壤容重的影响与土壤质地、生物质炭颗粒大小、时间效应以及人为因素等有关。一般说来, 土壤砂粒含量越高, 容重越大, 生物质炭对其影响也越大, 这主要取决于生物质炭和土壤容重之差。如 Herath 等^[24]向两种容重不同的土壤($1.13 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 和 $0.75 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$)施入 $17.3 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 生物质炭, 发现前者容重显著降低, 而后者容重降低量很小。生物质炭颗粒越大, 越容易降低土壤容重, 因为小于 $0.5 \mu\text{m}$ 的生物质炭颗粒可以填充到土壤孔隙内, 从而提高土壤容重; 而 $0.5 \sim 500 \mu\text{m}$ 的生物质炭则可以增加土壤孔隙, 从而降低土壤容重^[41]。生物质炭施用时间越长, 降低土壤容重的效果越弱, 甚至增加土壤容重。Madari 等^[42]发现施用木质生物质炭 $16 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 后立即测定土壤容重, 其降低了 $0.1 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 2 年后生物质炭对土壤容重没有影响, 而 5 年后生物质炭增加了土壤容重, 作者认为是由于土壤黏粒($<2 \mu\text{m}$)也可以进入生物质炭的大孔隙中。此外, 耕作会破碎生物质炭, 减小生物质炭颗粒; 还促进生物质炭及有机胶结物矿化, 破坏团聚体, 尤其是大团聚体, 从而削弱了生物质炭对土壤容重的降低作用^[43]。因此, 生物质炭可以通过直接作用或间接作用降低土壤容重, 但是对土壤容重影响的效果与生物质炭的裂解原料、温度和施用量有关, 也与土壤类型和施用时间有关。

2 生物质炭对土壤矿物质颗粒团聚作用及团聚体稳定性的影响与机理

稳定的团聚体是土壤这个“拟生命体”的细胞, 生物质炭对土壤团聚体的影响也是近期的研究重点之一。不少研究结果表明, 生物质炭可促进土壤矿物质颗粒团聚作用, 尤其是促进大团聚体的形成, 而且增强团聚体的稳定性^[44-46]。如 Liu 等^[46]向红壤中施用小麦秸秆在 $350 \sim 550 \text{ }^\circ\text{C}$ 下裂解而成的生物质炭 $40 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 7 个月后, 土壤团聚体的平均重量直径

(MWD)增加了 28%, 但是施用 $20 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 则没有效果。Sun 等^[47]发现施用 6% 草本植物生物质炭 180 d 后, 黏土的团聚体平均重量直径提高了 21%, 然而施用木本植物生物质炭则没有效果。Herath 等^[24]比较了 $550 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $350 \text{ }^\circ\text{C}$ 下用玉米芯制备的生物质炭对粉壤土团聚体形成的影响, 发现在有机质含量低的土壤上, 前者的效果大于后者, 但在有机质含量高的土壤上则相反。也有相反的报道, 生物质炭对土壤团聚作用没有显著影响。Peng 等^[48]在红壤中施用 $2 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 稻草生物质炭, 没有检测到土壤团聚体稳定性发生变化。可见, 生物质炭对土壤矿物质颗粒团聚作用的影响, 可能与生物质炭种类、施用量及土壤性质有关, 目前尚没有形成统一的理论, 还需要广泛的研究^[49]。

生物质炭促进土壤矿物质颗粒团聚作用机理可能包括直接作用和间接作用两个方面。直接作用包括: 1) 土壤有机质在土壤团聚体形成过程发挥着重要作用^[50], Zornoza 等^[51]发现土壤团聚体稳定性与土壤惰性有机碳含量呈正相关, 在施用生物质炭的土壤中也如此。2) 由于生物质炭具有巨大的比表面积和大量负电荷, 生物质炭可以提高土壤阳离子交换量, 进而促进土壤团聚体的形成^[52]。3) 生物质炭表面有羟基和羧基等多种官能团, 带有大量的负电荷, 也带有一定的正电荷, 可以通过静电引力直接与矿物质颗粒表面的金属离子结合, 亦或通过多价离子的键桥作用, 将矿物质土粒团聚在一起, 形成具有水稳定性的团聚体^[53-54]。4) 生物质炭表面阳离子(如 Ca^{2+})还可以通过置换土壤黏粒表面的 Na^+ 等阳离子, 从而阻止胶体分散, 促使矿物质胶体絮凝, 形成胶团^[55]。

生物质炭促进土壤矿物质颗粒团聚的间接作用与土壤微生物和植物有关。尽管生物质炭富含惰性芳香碳, 但仍然含有一定量的易分解的有机物质, 可作为微生物基质, 施入土壤后可提高土壤微生物量^[15], 微生物细胞本身可作为胶结剂, 将矿物质土粒团聚在一起。Luo 等^[56-57]报道生物质炭对土壤微生物群落结构也有显著的影响, 不同微生物与矿物质颗粒相互作用差异很大, 对土壤团聚体形成的促进作用应也有区别。生物质炭由于 C/N 比较高, 可能有利于真菌生长, 从而促进团聚体形成^[58]。此外, 生物质炭通过影响微生物的代谢产物, 以及对植物根系生长与发育的影响, 从而间接地影响土壤团聚体的形成。生物质炭可以促进作物生长, 间接地提高土壤有机物质的投入, 如根系及其分泌物, 进而间接地提高土壤团聚体稳定性^[50,59]。

3 生物质炭对土壤水分的影响及其机理

土壤水分运移和储存在养分运输和植物生长过程中发挥着重要作用, 土壤水分特征主要包括土壤持水能力(饱和含水量、田间持水量、萎蔫点持水量等)、饱和导水率、非饱和导水率和土壤水势等等。生物质炭对土壤水分特征的影响已经成为近期研究的热点之一^[60-62]。目前已有关于生物质炭影响土壤水分特征的研究多集中在生物质炭对土壤田间持水量、有效水含量和饱和导水率方面, 而生物质炭对非饱和导水率和入渗率影响的研究较少^[21]。生物质炭对土壤水分特征的影响包括直接影响和间接影响, 直接影响主要是生物质炭本身的多孔性对田间持水量、有效水含量及饱和导水率影响等方面, 而间接影响体现在生物质炭通过改善土壤团粒结构, 提高土壤有机碳含量, 促进作物根系生长等从而间接地影响土壤水分特征^[63-65]。

3.1 生物质炭对田间持水量和有效水含量的影响

生物质炭具有多孔性并有较大的比表面积, 因此可以通过增加生物质炭颗粒和水分之间的吸附力提高田间持水量^[66-67]。Laghari 等^[4]发现向两种砂土中添加 $0 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 $15 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 $22 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $45 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 生物质炭, 培养 8 周后发现施用 $45 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 生物质炭分别显著提高了两种砂土田间持水量的 33% 和 26%, 而施用 $22 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 及以下的生物质炭处理并没有显著影响田间持水量。Karhu 等^[67]报道添加 $9 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 生物质炭, 壤土的田间持水量提高了 11%。Lu 等^[68]向黏土中添加 2%、4% 和 6% 生物质炭, 培养 180 d 后, 土壤田间持水量分别提高了 12%、20% 和 31%, 说明生物质炭施用量与田间持水量呈正相关。但是也有个别相反的报道, 如 Major 等^[69]发现施用 $20 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 生物质炭对黏土田间持水量没有显著的影响。可见生物质炭对田间持水量的影响与土壤质地、施用量有关。生物质炭提高砂质土壤田间持水量的原因一方面是生物质炭本身持水能力强; 另一方面是较小的生物质炭颗粒可以填充砂质土壤的大孔隙, 增加毛细孔, 从而增加田间持水量^[70-71]。生物质炭对黏质土壤田间持水量的影响相对复杂。Lu 等^[68]研究表明生物质炭(施用量为 2%、4% 和 6%) 提高黏土田间持水量的原因可能与生物质炭增加了黏土孔隙度有关。但是向黏质土壤中添加少量($<1\%$) 生物质炭也可能使生物质炭的孔隙被黏粒堵塞, 从而导致生物质炭提高土壤田间持水量的能力降低或保持不变。因此 Blanco-Canqui^[21]建议应向黏土中施用大量生物质炭以提高田间持水量。

土壤有效水含量通常指基质势为 $-33\sim-1500 \text{ kPa}$ 土壤含水量之差, 一般说来, 土壤萎蔫点降低, 或土壤持水量提高, 土壤有效水含量也增加。生物质炭对土壤有效水含量的影响, 不仅与生物质炭种类及用量有关, 而且还可能与土壤条件和试验时间有关。如 Peake 等^[72]向 8 种不同土壤添加 0.1%、0.5% 和 2.5%(w/w) 的生物质炭, 培养 48 h 后发现, 生物质炭对土壤有效水含量的影响分别为 $-4.0\%\sim-13.4\%$ 、 $-9.8\%\sim-33.7\%$ 和 $0.3\%\sim-48.4\%$ 。Głab 等^[41]发现施用 $10 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 生物质炭不会显著影响土壤水分有效性, 但施用高量生物质炭可提高土壤水分有效性。Burrell 等^[23]报道秸秆生物质炭增加了土壤水分有效性, 然而木条生物质炭则没有影响土壤水分有效性。Herath 等^[24]报道添加 $11.3 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $10.0 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的 $350 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $550 \text{ }^\circ\text{C}$ 下制备的生物质炭, 土壤有效水含量迅速增加 13% 和 10%, 但培养 295 d 后, 土壤有效水含量与对照没有差异。生物质炭能够增加土壤有效水含量的原因与生物质炭提高土壤田间持水量的原因类似, 即生物质炭具有较大的亲水表面积和孔隙度, 水分吸附在生物质炭表面, 储存在生物质炭孔隙内^[21]。

3.2 生物质炭对土壤饱和导水率的影响

水分入渗主要取决于土壤水势和饱和导水率, 而非饱和导水率是土壤水分再分布的重要参数^[73-74]。施用生物质炭能够降低土壤容重, 显然也能够改变土壤孔隙状况, 无论是对土壤水分入渗, 还是水分再分布, 理论上应有显著的影响, 但是目前关于生物质炭对土壤水分入渗和非饱和导水率影响的研究很少, 而关于生物质炭对土壤饱和导水率的影响研究较多, 因为现有生物质炭试验多在室内培养条件下进行, 饱和导水率比非饱和导水率容易测定^[21]。生物质炭对不同质地土壤的饱和导水率影响不一致, 通常生物质炭可以降低砂质土壤的饱和导水率^[69,75], 而增加黏质土壤的饱和导水率^[65-76]。生物质炭降低砂质土壤饱和导水率的原因是生物质炭较小的颗粒可以堵塞土壤孔隙或与土壤无机矿物结合减少土壤孔隙。Zhang 等^[75]发现施用粉末生物质炭比颗粒生物质炭更能降低土壤的饱和导水率。而与砂质土壤不同, 黏质土壤孔隙度低, 施用生物质炭通常可以增加黏土孔隙度和饱和导水率^[35]。生物质炭的施用量和原料与土壤导水率也有关。Omondi 等^[35]对 76 组数据进行了大数据分析, 发现施用高量生物质炭 ($80 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$) 可以显著提高土壤导水率, 但低量生物质炭对土壤导水率没有显著的影响。施用木质和动物

粪便制备的生物质炭, 土壤导水率分别显著提高了 35.7%和 6.6%, 而草本植物生物质炭则对土壤导水率没有显著影响^[38]。

总而言之, 生物质炭对土壤水分特征的影响与生物质炭特性及土壤性质有关, 但是目前对其机理还没有完整的认识, 可能包括以下几个方面:

1) 生物质炭表面吸持水分: 生物质炭表面具有亲水和疏水双重特性, 二者的比例及亲水表面特性, 在很大程度上决定了生物质炭施入土壤后, 土壤水分特性的变化。大多数生物质炭表面有大量的亲水性官能团^[76], 具有比较强的持水能力, 持水量是本身重量的 10 倍之多^[77-78]。显然, 添加此类生物质炭, 能够显著提高土壤持水性。但是如果生物质炭疏水表面比较大, 则会增强土壤的斥水性, 降低土壤持水性, 容易产生径流, 加剧土壤侵蚀。

2) 生物质炭孔隙吸持水分作用: 生物质炭为多孔材料^[36], 含有大量的微孔(<2 nm)、中孔(2~50 nm)和大孔(>50 nm), 根据拉普拉斯定律公式:

$$r = \frac{2\gamma \cos \theta}{P} \quad (1)$$

式中: r 为孔隙半径, P 为不同孔径下的毛管力, γ 为表面张力($0.073 \text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$), θ 为接触角度(< 90°)。半径 <10 nm 孔隙所吸持的水分植物很难利用。不同生物质炭的孔性差异很大, 吸持水分及所吸持水分的有效性也不同, 施入土壤后, 对土壤吸持水分性能的影响也应不同。

3) 生物质炭颗粒堵塞效应: 生物质炭是刚性颗粒状材料, 大颗粒生物质炭可以增加土壤孔隙度, 但小颗粒生物质炭可能会堵塞土壤孔隙, 从而减少土壤孔隙。尽管其填充堵塞土壤的过程尚不清楚, 但是堵塞效应仍被认为是生物质炭降低土壤导水率的主要原因^[42]。

4 生物质炭对土壤热性质的影响与机理

土壤热性质在能量平衡方面扮演着重要的角色, 是土壤温度的基础, 主要受土壤容重、孔隙、含水量和有机质等因素影响^[79]。生物质炭直接或间接地影响到土壤这些性质, 因此施用生物质炭的土壤, 其热性质也发生变化。Zhang 等^[80]报道施用 $4.5 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $9 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 玉米秸秆生物质炭 5 年后, 潮土热导率显著降低 3.48%和 7.49%, 可能是生物质炭降低土壤容重所致。此外, 生物质炭增加了近紫外光和蓝光(350~513 nm)的反射率, 但是降低了近红外光(520~2 350 nm)的反射率, 从而降低了土壤温度。刘志鹏等^[81]也发现生物质炭降低了土壤导热率、热容

量和热扩散系数, 因为生物质炭降低了土壤容重, 增加了土壤孔隙度。但是, Usowicz 等^[82]发现木屑生物质炭对草地和荒地土壤的热性质影响不一致, 生物质炭显著降低了荒地土壤容重, 增加土壤孔隙度, 从而降低了土壤热导率, 而对草地土壤并无显著影响。这说明生物质炭对土壤热性质的影响, 不仅与生物质炭本身的特性有关, 而且还与土壤质地有关, 目前相关研究十分欠缺, 对不同生物质炭及不同施用量对不同土壤热性质的影响及其机理的了解很少。

5 研究不足与亟待解决的问题

5.1 研究不足

生物质炭作为土壤调理剂的研究方兴未艾, 也已取得显著的进展, 但有关生物质炭对土壤物理性质的影响及其机理的研究尚不充分, 而且在研究内容和研究方法上存在严重缺陷, 主要体现在 4 个方面:

1) 定性描述性的研究为主, 而定量研究很少。现有的研究大多是选择一种或几种生物质炭, 一个或几个用量, 施用到某一个或几个不同类型的土壤, 再定期检测土壤相关性质的变化, 从而说明生物质炭对土壤某些物理性质的影响, 几乎没有关注生物质炭特性及其变化与土壤相关物理参数之间的定量关系, 致使重复性研究比较多, 也就无法从个案研究总结出普遍的规律性。

2) 单一学科、单一因子研究较多, 而交叉学科的综合研究没有。现有的研究主要涉及到土壤物理学某些参数, 很少将土壤物理参数与化学及生物指标结合在一起, 所用的研究方法大多是传统的土壤物理研究方法, 研究的深度和广度十分有限, 解决的问题大多也比较肤浅。

3) 短期研究为主, 缺乏长期定位试验研究。生物质炭十分稳定, 在土壤可保存数百年甚至上千年, 在此期间, 生物质炭必然发生很多变化, 与土壤矿物质、有机质的相互作用也可能改变; 况且, 与土壤化学稳定性不同, 土壤物理性质一般变化比较缓慢。显然短期试验很难研究生物质炭对土壤物理性质的影响, 也很难了解其真实的过程与机理。

4) 以室内培养试验为主, 田间试验结果缺乏。现有的研究大多为室内模拟试验, 与田间实际情况差异非常大, 根本无法与农业生产活动联系在一起, 所获得的结果不可能解释真实田间条件下生物质炭对土壤物理性质影响的原因。

5.2 亟待解决的问题

1) 明确生物质炭特性与土壤物理参数的定量关系。生物质炭对土壤物理性质的影响在很大程度上

主要取决于生物质炭本身的特性, 其次与施用量及土壤某些性质有关。应在现有定性研究的基础上, 利用现代仪器分析手段, 结合计算机及信息技术, 定量研究生物质炭特性与土壤孔性、土壤水分及热性质之间的定量关系, 重点研究生物质炭与土壤水分及其运动之间的定量关系, 建立数学模拟模型, 从而为设计制造个性化的生物质炭提供参考, 以满足不同土壤及不同作物的需求。

2) 揭示生物质炭对土壤主要物理过程影响的机理。根据农业生产、生态环境建设与保护的需要, 重点研究生物质炭促进土壤矿物质颗粒直接及间接作用的过程与机理; 在土壤侵蚀严重的地区, 应大力开展生物质炭对土壤水分入渗过程影响的研究, 为减少地表径流提供科学依据; 在干旱地区应着力开展生物质炭对土壤水分保持及水分再分布过程影响的研究, 提高土壤水分利用效率; 而在低温地区应开展生物质炭调节控制土壤热性质过程与机理研究。

3) 探究生物质炭对土壤物理过程与土壤化学及生物过程相互作用的机理。土壤物理性质是土壤肥力的基础, 土壤物理过程在很大程度上决定土壤化学及生物过程, 应大力开展研究, 了解生物质炭是否能够“干涉”甚至调节控制主要土壤物理过程与主要土壤化学及生物过程的交互作用, 以期定向地放大或减弱这些相互作用, 从而发挥生物质炭作为土壤调理剂的效能。

参考文献 References

- [1] WANG J Y, XIONG Z Q, KUZYAKOV Y. Biochar stability in soil: meta-analysis of decomposition and priming effects[J]. *GCB Bioenergy*, 2016, 8: 512–523
- [2] BALDOCK J A, SMERNIK R J. Chemical composition and bioavailability of thermally altered *Pinus resinosa* (red pine) wood[J]. *Organic Geochemistry*, 2002, 33: 1093–1109
- [3] KUZYAKOV Y, SUBBOTINA I, CHEN H Q, et al. Black carbon decomposition and incorporation into soil microbial biomass estimated by ¹⁴C labeling[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, 41(2): 210–219
- [4] LAGHARI M, MIRJAT M S, HU Z Q, et al. Effects of biochar application rate on sandy desert soil properties and sorghum growth[J]. *CATENA*, 2015, 135: 313–320
- [5] HALL D J M, BELL R W. Biochar and compost increase crop yields but the effect is short term on sandplain soils of western Australia[J]. *Pedosphere*, 2015, 25(5): 720–728
- [6] PANDIT N R, MULDER J, HALE S E, et al. Biochar improves maize growth by alleviation of nutrient stress in a moderately acidic low-input Nepalese soil[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 625: 1380–1389
- [7] AKHTAR S S, LI G T, ANDERSEN M N, et al. Biochar enhances yield and quality of tomato under reduced irrigation[J]. *Agricultural Water Management*, 2014, 138: 37–44
- [8] MAESTRINI B, NANNIPIERI P, ABIVEN S. A meta-analysis on pyrogenic organic matter induced priming effect[J]. *GCB Bioenergy*, 2015, 7(4): 577–590
- [9] LEHMANN J. A handful of carbon[J]. *Nature*, 2007, 447(7141): 143–144
- [10] SOHI S P, KRULL E, LOPEZ-CAPEL E, et al. Chapter 2 — A review of biochar and its use and function in soil[J]. *Advances in Agronomy*, 2010, 105: 47–82
- [11] WEBER K, QUICKER P. Properties of biochar[J]. *Fuel*, 2018, 217: 240–261
- [12] 孔丝纺, 姚兴成, 张江勇, 等. 生物质炭的特性及其应用的研究进展[J]. *生态环境学报*, 2015, 24(4): 716–723
- [12] KONG S F, YAO X C, ZHANG J Y, et al. Review of characteristics of biochar and research progress of its applications[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2015, 24(4): 716–723
- [13] BRASSARD P, GODBOUT S, RAGHAVAN V. Soil biochar amendment as a climate change mitigation tool: Key parameters and mechanisms involved[J]. *Journal of Environmental Management*, 2016, 181: 484–497
- [14] CLOUGH T J, CONDRON L M, KAMMANN C, et al. A review of biochar and soil nitrogen dynamics[J]. *Agronomy*, 2013, 3(2): 275–293
- [15] 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
- [16] JEFFERY S, VERHEIJEN F G A, VAN DER VELDE M, et al. A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2011, 144(1): 175–187
- [17] BIEDERMAN L A, HARPOLE W S. Biochar and its effects on plant productivity and nutrient cycling: A meta-analysis[J]. *GCB Bioenergy*, 2013, 5(2): 202–214
- [18] LEHMANN J, GAUNT J, RONDON M. Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems — A review[J]. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2006, 11(2): 403–427
- [19] 刘杰云, 沈健林, 邱虎森, 等. 生物质炭添加对农田温室气体净排放的影响综述[J]. *农业环境科学学报*, 2015, 34(2): 205–212
- [19] LIU J Y, SHEN J L, QIU H S, et al. Effects of biochar amendments on net emissions of greenhouse gases from croplands: A review[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(2): 205–212
- [20] 赵建坤, 李江舟, 杜章留, 等. 施用生物炭对土壤物理性质影响的研究进展[J]. *气象与环境学报*, 2016, 32(3): 95–101
- [20] ZHAO J K, LI J Z, DU Z L, et al. Effects of biochar application on soil physical properties: A review[J]. *Journal of Meteorology and Environment*, 2016, 32(3): 95–101
- [21] BLANCO-CANQUI H. Biochar and soil physical properties[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2017,

- 81(4): 687–711
- [22] MA N N, ZHANG L L, ZHANG Y L, et al. Biochar improves soil aggregate stability and water availability in a mollisol after three years of field application[J]. *PLoS One*, 2016, 11(5): e0154091
- [23] BURRELL L D, ZEHETNER F, RAMPAZZO N, et al. Long-term effects of biochar on soil physical properties[J]. *Geoderma*, 2016, 282: 96–102
- [24] HERATH H M S K, CAMPS-ARBESTAIN M, HEDLEY M. Effect of biochar on soil physical properties in two contrasting soils: An Alfisol and an Andisol[J]. *Geoderma*, 2013, 209/210: 188–197
- [25] ALBURQUERQUE J A, CALERO J M, BARRÓN V, et al. Effects of biochars produced from different feedstocks on soil properties and sunflower growth[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2014, 177(1): 16–25
- [26] VAN ZWIETEN L, KIMBER S, MORRIS S, et al. Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility[J]. *Plant and Soil*, 2010, 327(1/2): 235–246
- [27] FLETCHER A J, SMITH M A, HEINEMEYER A, et al. Production factors controlling the physical characteristics of biochar derived from phytoremediation willow for agricultural applications[J]. *BioEnergy Research*, 2014, 7(1): 371–380
- [28] 张文玲, 李桂花, 高卫东. 生物质炭对土壤性状和作物产量的影响[J]. *中国农学通报*, 2009, 25(17): 153–157
ZHANG W L, LI G H, GAO W D. Effect of biomass charcoal on soil character and crop yield[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2009, 25(17): 153–157
- [29] BATEY T. Soil compaction and soil management — A review[J]. *Soil Use and Management*, 2009, 25(4): 335–345
- [30] NAWAZ M F, BOURRIÉ G, TROLARD F. Soil compaction impact and modelling. A review[J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2013, 33(2): 291–309
- [31] QIU M Y, SUN K, JIN J, et al. Metal/metalloid elements and polycyclic aromatic hydrocarbon in various biochars: The effect of feedstock, temperature, minerals, and properties[J]. *Environmental Pollution*, 2015, 206: 298–305
- [32] SUBEDI R, TAUPE N, PELISSETTI S, et al. Greenhouse gas emissions and soil properties following amendment with manure-derived biochars: Influence of pyrolysis temperature and feedstock type[J]. *Journal of Environmental Management*, 2016, 166: 73–83
- [33] SULIMAN W, HARSH J B, ABU-LAIL N I, et al. The role of biochar porosity and surface functionality in augmenting hydrologic properties of a sandy soil[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 574: 139–147
- [34] 韩召强, 陈效民, 曲成闯, 等. 生物质炭施用对潮土理化性状、酶活性及黄瓜产量的影响[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(6): 272–278
HAN Z Q, CHEN X M, QU C C, et al. Effects of biochar application on soil physicochemical properties, enzyme activities and cucumber yield[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, 31(6): 272–278
- [35] OMONDI M O, XIA X, NAHAYO A, et al. Quantification of biochar effects on soil hydrological properties using meta-analysis of literature data[J]. *Geoderma*, 2016, 274: 28–34
- [36] GITHINJI L. Effect of biochar application rate on soil physical and hydraulic properties of a sandy loam[J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2014, 60(4): 457–470
- [37] MUKHERJEE A, LAL R, ZIMMERMAN A R. Effects of biochar and other amendments on the physical properties and greenhouse gas emissions of an artificially degraded soil[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 487: 26–36
- [38] 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(3/4): 443–449
- [39] HARDIE M, CLOTHIER B, BOUND S, et al. Does biochar influence soil physical properties and soil water availability?[J]. *Plant and Soil*, 2014, 376(1/2): 347–361
- [40] LEI O Y, ZHANG R D. Effects of biochars derived from different feedstocks and pyrolysis temperatures on soil physical and hydraulic properties[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2013, 13(9): 1561–1572
- [41] GŁĄB T, PALMOWSKA J, ZALESKI T, et al. Effect of biochar application on soil hydrological properties and physical quality of sandy soil[J]. *Geoderma*, 2016, 281: 11–20
- [42] MADARI B E, SILVA M A S, CARVALHO M T M, et al. Properties of a sandy clay loam Haplic Ferralsol and soybean grain yield in a five-year field trial as affected by biochar amendment[J]. *Geoderma*, 2017, 305: 100–112
- [43] NELISSEN V, RUYSSCHAERT G, MANKA'ABUSI D, et al. Impact of a woody biochar on properties of a sandy loam soil and spring barley during a two-year field experiment[J]. *European Journal of Agronomy*, 2015, 62: 65–78
- [44] 何玉亭, 王昌全, 沈杰, 等. 两种生物质炭对红壤团聚体结构稳定性和微生物群落的影响[J]. *中国农业科学*, 2016, 49(12): 2333–2342
HE Y T, WANG C Q, SHEN J, et al. Effects of two biochars on red soil aggregate stability and microbial community[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(12): 2333–2342
- [45] 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
- [46] 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
- [47] SUN F F, LU S G. Biochars improve aggregate stability, water retention, and pore-space properties of clayey soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2014, 177(1): 26–33
- [48] PENG X, ZHU Q H, XIE Z B, et al. The impact of manure, straw and biochar amendments on aggregation and erosion in a hillslope Ultisol[J]. *CATENA*, 2016, 138: 30–37
- [49] LI Q X, JIN Z W, CHEN X M, et al. Effects of biochar on aggregate characteristics of upland red soil in subtropical

- China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2017, 76(10): 372
- [50] TISDALL J M, OADES J M. Organic matter and water-stable aggregates in soils[J]. *Journal of Soil Science*, 1982, 33(2): 141–163
- [51] ZORNOZA R, ACOSTA J A, FAZ A, et al. Microbial growth and community structure in acid mine soils after addition of different amendments for soil reclamation[J]. *Geoderma*, 2016, 272: 64–72
- [52] LIANG B, LEHMANN J, SOLOMON D, et al. Black carbon increases cation exchange capacity in soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2006, 70(5): 1719–1730
- [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] ENDERS A, HANLEY K, WHITMAN T, et al. Characterization of biochars to evaluate recalcitrance and agronomic performance[J]. *Bioresource Technology*, 2012, 114: 644–653
- [55] KWON S, PIGNATELLO J J. Effect of natural organic substances on the surface and adsorptive properties of environmental black carbon (char): Pseudo pore blockage by model lipid components and its implications for N₂-probed surface properties of natural sorbents[J]. *Environmental Science & Technology*, 2005, 39(20): 7932–7939
- [56] LUO Y, DURENKAMP M, DE NOBILI M, et al. Microbial biomass growth, following incorporation of biochars produced at 350 °C or 700 °C, in a silty-clay loam soil of high and low pH[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, 57: 513–523
- [57] LUO Y, LIN Q M, DURENKAMP M, et al. Soil priming effects following substrates addition to biochar-treated soils after 431 days of pre-incubation[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2017, 53(3): 315–326
- [58] BOSSUYT H, DENEK K, SIX J, et al. Influence of microbial populations and residue quality on aggregate stability[J]. *Applied Soil Ecology*, 2001, 16(3): 195–208
- [59] LIU Y X, LU H H, YANG S M, et al. Impacts of biochar addition on rice yield and soil properties in a cold waterlogged paddy for two crop seasons[J]. *Field Crops Research*, 2016, 191: 161–167
- [60] OJEDA G, MATTANA S, ÁVILA A, et al. Are soil-water functions affected by biochar application?[J]. *Geoderma*, 2015, 249/250: 1–11
- [61] NOVAK J, SIGUA G, WATTS D, et al. Biochars impact on water infiltration and water quality through a compacted subsoil layer[J]. *Chemosphere*, 2016, 142: 160–167
- [62] 李帅霖, 王霞, 王朔, 等. 生物炭施用方式及用量对土壤水分入渗与蒸发的影响[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(14): 135–144
- LI S L, WANG X, WANG S, et al. Effects of application patterns and amount of biochar on water infiltration and evaporation[J]. *Transactions of the CSAE*, 2016, 32(14): 135–144
- [63] 许健, 牛文全, 张明智, 等. 生物炭对土壤水分蒸发的影响[J]. *应用生态学报*, 2016, 27(11): 3505–3513
- XU J, NIU W Q, ZHANG M Z, et al. Effect of biochar addition on soil evaporation[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(11): 3505–3513
- [64] 齐瑞鹏, 张磊, 颜永毫, 等. 定容重条件下生物炭对半干旱区土壤水分入渗特征的影响[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(8): 2281–2288
- QI R P, ZHANG L, YAN Y H, et al. Effects of biochar addition into soils in semiarid land on water infiltration under the condition of the same bulk density[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(8): 2281–2288
- [65] BARNES R T, GALLAGHER M E, MASIELLO C A, et al. Biochar-induced changes in soil hydraulic conductivity and dissolved nutrient fluxes constrained by laboratory experiments[J]. *PLoS One*, 2014, 9(9): e108340
- [66] LEHMANN J, JOSEPH S. Biochar for environmental management: An introduction[M]//LEHMANN J, JOSEPH S. *Biochar for Environmental Management: Science and Technology*. London: Earthscan, 2009: 15801–15811
- [67] KARHU K, MATTILA T, BERGSTRÖM I, et al. Biochar addition to agricultural soil increased CH₄ uptake and water holding capacity — Results from a short-term pilot field study[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2011, 140(1/2): 309–313
- [68] 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: 37–44
- [69] MAJOR J, LEHMANN J, RONDON M, et al. Fate of soil-applied black carbon: Downward migration, leaching and soil respiration[J]. *Global Change Biology*, 2010, 16(4): 1366–1379
- [70] UZOMA K C, INOUE M, ANDRY H, et al. Influence of biochar application on sandy soil hydraulic properties and nutrient retention[J]. *Journal of Food Agriculture & Environment*, 2011, 9(2/4): 1137–1143
- [71] BUSSCHER W J, NOVAK J M, EVANS D E, et al. Influence of pecan biochar on physical properties of a Norfolk loamy sand[J]. *Soil Science*, 2010, 175(1): 10–14
- [72] PEAKE L R, REID B J, TANG X Y. Quantifying the influence of biochar on the physical and hydrological properties of dissimilar soils[J]. *Geoderma*, 2014, 235/236: 182–190
- [73] 赵西宁, 吴发启. 土壤水分入渗的研究进展和评述[J]. *西北林学院学报*, 2004, 19(1): 42–45
- ZHAO X N, WU F Q. Developments and reviews of soil infiltration research[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2004, 19(1): 42–45
- [74] 赵春雷, 邵明安, 贾小旭. 黄土高原北部坡面尺度土壤饱和导水率分布与模拟[J]. *水科学进展*, 2014, 25(6): 806–815
- ZHAO C L, SHAO M A, JIA X X. Distribution and simulation of saturated soil hydraulic conductivity at a slope of northern Loess Plateau[J]. *Advances in Water Science*, 2014, 25(6): 806–815
- [75] ZHANG J, CHEN Q, YOU C F. Biochar effect on water evaporation and hydraulic conductivity in sandy soil[J]. *Pedosphere*, 2016, 26(2): 265–272
- [76] TIAN D, QU Z Y, GOU M M, et al. Experimental study of

- influence of biochar on different texture soil hydraulic characteristic parameters and moisture holding properties[J]. Polish Journal of Environmental Studies, 2015, 24(3): 1435–1442
- [77] KINNEY T J, MASIELLO C A, DUGAN B, et al. Hydrologic properties of biochars produced at different temperatures[J]. Biomass and Bioenergy, 2012, 41: 34–43
- [78] BROCKHOFF S R, CHRISTIANS N E, KILLORN R J, et al. Physical and mineral-nutrition properties of sand-based turfgrass root zones amended with biochar[J]. Agronomy Journal, 2010, 102(6): 1627–1631
- [79] ABU-HAMDEH N H, REEDER R C. Soil thermal conductivity effects of density, moisture, salt concentration, and organic matter[J]. Soil Science Society of America Journal, 2000, 64(4): 1285–1290
- [80] ZHANG Q Z, WANG Y D, WU Y F, et al. Effects of biochar amendment on soil thermal conductivity, reflectance, and temperature[J]. Soil Science Society of America Journal, 2013, 77(5): 1478–1487
- [81] 刘志鹏, 徐杰男, 余冬立, 等. 添加生物质炭对壤土热性质影响机理研究[J]. 土壤学报, 2018, 55(4): 933–944
- LIU Z P, XU J N, SHE D L, et al. Effects of biochar addition on thermal properties of loamy soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 2018, 55(4): 933–944
- [82] USOWICZ B, LIPIEC J, ŁUKOWSKI M, et al. The effect of biochar application on thermal properties and albedo of loess soil under grassland and fallow[J]. Soil and Tillage Research, 2016, 164: 45–51