

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2024.01.006

邓倩, 马娟娟, 孙西欢, 等. 生物质炭对农田土壤腐殖质的影响——Meta 分析. 土壤, 2024, 56(1): 42–48.

# 生物质炭对农田土壤腐殖质的影响——Meta 分析<sup>①</sup>

邓倩, 马娟娟\*, 孙西欢, 郑利剑, 武洪翔, 李旭峰, 安江龙

(太原理工大学水利科学与工程学院, 太原 030024)

**摘要:** 为量化生物质炭对土壤腐殖质含量的影响程度, 以不添加生物质炭土壤为对照, 对不同土壤质地、土壤 pH 及生物质炭裂解温度、施用量、施用时长下生物质炭对土壤腐殖质含量的变化情况进行了 Meta 分析。结果表明: 与对照相比, 添加生物质炭显著提高了砂土腐殖质中的胡敏酸和胡敏素含量, 平均提高幅度分别为 18.6% 和 92.2%; 增加了中性、碱性土壤中的胡敏酸含量, 平均增幅分别为 12.5% 和 13.7%; 施用裂解温度为 500~600 °C 的生物质炭对于土壤胡敏酸、富里酸和胡敏素含量的提升幅度最大, 平均增幅分别为 22.6%、14.1% 和 68.5%; 生物质炭添加量为 20~40 t/hm<sup>2</sup> 条件下, 显著提高了土壤胡敏酸、富里酸和胡敏素含量, 平均增幅分别为 23.7%、6.9% 和 84.6%; 生物质炭施入土壤 3 个月内, 胡敏酸含量显著升高, 平均增幅为 29.5%, 在 3 个月到 1 年内增幅逐渐降低, 1 年后增幅又逐渐升高; 生物质炭施入土壤 6 个月内, 胡敏素含量增幅最高, 平均为 72.2%; 随着生物质炭施用时间延长, 土壤胡敏素含量的增幅逐渐降低。综上所述, 施用裂解温度为 500~600 °C 的生物质炭, 在短期内对中性或碱性条件下的砂土及壤土中的腐殖质含量有较好的提升效果, 随着施入时间的延长, 该效果会逐渐稳定。

**关键词:** 土壤腐殖质; 有机碳; Meta 分析; 生物质炭

**中图分类号:** S156.2 **文献标志码:** A

## Effects of Biochar on Soil Humus in Farmland: A Meta Analysis

DENG Qian, MA Juanjuan\*, SUN Xihuan, ZHENG Lijian, WU Hongxiang, LI Xufeng, AN Jianglong

(College of Water Resource Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

**Abstract:** In order to quantify the influence degree of biochar on soil humus content, a meta-analysis of literature was used to integrate the changes of soil texture and pH, biochar pyrolysis temperature, application amount and duration, with soil humus content without adding biochar as a control. The results showed that adding biochar significantly increased humic acid and humin content in sand humus by 18.6% and 92.2%, respectively, compared with not adding biochar. The contents of humic acid in neutral and alkaline soils were increased by 12.5% and 13.7% respectively. The application of biochar with cracking temperature of 500–600 °C increased the contents of humic acid, fulvic acid and humin in soil by 22.6%, 14.1% and 68.5%, respectively. Under the biochar application of 20–40 t/hm<sup>2</sup>, the contents of humic acid, fulvic acid and humin in soil were significantly increased by 23.7%, 6.9% and 84.6%, respectively. The content of humic acid increased significantly in 3 months of biochar application, with an average increase of 29.5%. The increase gradually decreased from 3 months to 1 year, and gradually increased after 1 year. The humin content of biochar increased the most at 6 months, with an average of 72.2%. With the extension of biochar application time, the increase of humin content in soil decreased gradually. In summary, the application of biochar with a cracking temperature ranging from 500 to 600 °C exhibits significant short-term improvement effects on sandy and loam soils under neutral or alkaline conditions. Moreover, these effects gradually stabilize over time as the application period extends.

**Key words:** Soil humus; Organic carbon; Meta-analysis; Biochar

土壤有机碳是土壤碳库的重要组成。土壤碳库中 73% 的碳以土壤有机碳形式储存在土壤中<sup>[1]</sup>, 而有机碳矿化产生 CO<sub>2</sub> 是农田温室气体排放的途径之一。

因此, 增加土壤有机碳含量, 减少其矿化过程中产生的 CO<sub>2</sub>, 可以实现土壤的固碳减排<sup>[2-4]</sup>。土壤腐殖质是土壤有机碳的重要组成部分, 占土壤总有机碳的

①基金项目: 国家自然科学基金项目(52079085, 52109061)和山西省重点研发计划项目(201903D211011-4)资助。

\* 通讯作者(mjjsxty@163.com)

作者简介: 邓倩(1998—), 女, 甘肃白银人, 硕士研究生, 研究方向为节水灌溉理论与技术。E-mail: 2769282465@qq.com

70%~90%，对于土壤有机碳的积累和固定有重要作用<sup>[5-6]</sup>。因此，探寻合理增加土壤腐殖质含量的方法对于农田的可持续发展意义重大。土壤腐殖质根据其化学组成成分分为胡敏酸、富里酸和胡敏素三部分<sup>[7-8]</sup>，其中富里酸分子量小、化学性质活泼，胡敏酸分子量大且结构复杂，胡敏素高度缩合、易与黏粒复合。

生物质炭作为一种高含碳量的惰性有机物料，在土壤固碳减排、稳定土壤碳库方面效果显著。研究表明，生物质炭施入土壤能够快速补充土壤中有机碳含量<sup>[9-11]</sup>，从而进一步缓解农田温室气体排放<sup>[12-13]</sup>。土壤中腐殖质含量的增加有利于土壤有机碳的截获和储存。Czimczik 和 Masiello<sup>[14]</sup>研究表明，腐殖质碳是土壤有机碳库中肥力最高、耕作性最好的组分，而生物质炭可以增加土壤腐殖质碳含量<sup>[15]</sup>。不同质地土壤中的腐殖质含量在不同环境下对生物质炭的响应并不一致。Šimanský 等<sup>[16]</sup>研究发现，在砂土和壤土中加入生物质炭均能提高土壤有机碳和腐殖质含量，但在壤土中效果优于砂土。花莉等<sup>[17]</sup>利用电镜及红外光谱观测发现，低温热解的生物质炭对于腐殖质碳含量增加效果优于其他热解温度。郭万里<sup>[18]</sup>研究表明在不同时长下，生物质炭施入土壤中富里酸含量达到峰值的时间不同；不同生物质炭添加量下，土壤胡敏酸含量的变化也并不一致。由此可知，不同土壤环境下，施入不同特性生物质炭对土壤腐殖质含量变化产生不同影响，需针对生物质炭添加下农田土壤腐殖质含量进行普遍性和科学性定量分析。

Meta 分析是将许多独立研究的试验数据提取出来进行定量合并分析的综合方法，对具有相同研究目的且相互独立的研究可以进行定量合并，分析研究差异特征，以此获得大规模的、普适性的结果<sup>[19-20]</sup>。目前国内针对生物质炭对土壤腐殖质各碳组分影响方面缺乏普遍、定量分析。因此，本研究基于全国尺度摘录生物质炭施用对土壤腐殖质各碳组分影响的数据，量化不同土壤条件下施用生物质炭在不同试验条件和时长下引起的腐殖质碳组分变化，以系统地揭示生物质炭施入土壤后腐殖质含量变化的普遍规律，为如何充分利用生物质炭提高土壤碳含量进而改善土壤质量的相关研究提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 数据来源

本研究通过中国知网(CNKI)、Web of Science、维普和万方等数据库对相关文献进行检索，检索主题

包括“生物质炭”+“腐殖质”、“生物质炭”+“腐殖酸”等，共检索到 347 篇文献，为减少筛选文献带来的偏差，本研究摘录的文献满足以下标准：①研究农田范围内施入生物质炭对土壤腐殖质的影响；②同一研究中以不添加生物质炭作为对照处理，文中至少包含一组对照试验；③试验具有明确的重复次数；④研究中的相关数据要以柱状图、折线图或者表格等方式呈现，剔除或合并试验地点、试验年份、试验数据结果相同的文献。

### 1.2 数据整理及分类

经过上述标准筛选，最终获得 35 篇相关中文和英文文献，可进行分析的相关独立研究共 231 组。为进一步分析农田中施入生物质炭对土壤中腐殖质含量的影响，本文对筛选的数据进行分组，包括土壤类型、土壤 pH、生物质炭裂解温度、生物质炭添加量、试验方式和试验时长等。土壤质地根据卡庆斯基制<sup>[21]</sup>划分为砂土、壤土和黏土，文章中未提供土壤质地的则根据卡庆斯基土壤质地分类表进行查询；土壤 pH 根据美国农业部标准<sup>[22]</sup>划分为 pH<6.5 酸性，pH 6.6~7.3 中性，pH>7.3 碱性；生物质炭裂解温度划分为 ≤400、400~500、500~600 °C；生物质炭施用量划分为 ≤20、20~40、≥40 t/hm<sup>2</sup>。

### 1.3 数据处理及 Meta 分析

Meta 分析中的生物质炭的各项参数均可以在文献中直接获取，腐殖质中的胡敏酸、富里酸等数据的标准差以表格方式获取，或从图中通过 GetData Graph Digitizer 2.24 软件获得，无标准差也无可供计算标准差的相关数据时，可通过数据集计算平均变异系数(CV)或标准误(SE)获得缺失的标准差。

本研究进行 Meta 分析时，用效应值 lnR 计算生物质炭施入土壤后对土壤腐殖质各碳组分的影响<sup>[23]</sup>，计算公式为：

$$R = \frac{X_e}{X_c} \quad (1)$$

$$\ln R = \ln X_e - \ln X_c \quad (2)$$

式中：R 为效应比；X<sub>e</sub>、X<sub>c</sub> 分别为对照组和处理组对应的土壤腐殖质组分的平均值。

对应指标效应值(lnR)的方差(V)计算公式为：

$$V = \frac{S_e^2}{N_e X_c^2} + \frac{S_c^2}{N_c X_e^2} \quad (3)$$

式中：S<sub>e</sub>、N<sub>e</sub> 分别为对照组土壤腐殖质碳组分标准差和试验重复次数；S<sub>c</sub>、N<sub>c</sub> 分别为处理组土壤腐殖质碳各组分的标准差和试验重复次数。

处理组综合效应值 lnR 的计算公式如下：

$$\ln R = \frac{\sum_{i=1}^k W_i \ln R_i}{\sum_{i=1}^k W_i} \quad (4)$$

$$W_i = \frac{1}{V_i} \quad (5)$$

式中： $W_i$ 为各个随机指标的比重； $V_i$ 为样本方差； $\ln R_i$ 为各个随机指标的对数响应比； $k$ 为此次统计研究的数量。

用百分比表示的变化率( $Y$ )描述结果，计算公式如下：

$$Y = (R - 1) \times 100\% \quad (6)$$

如果  $Y$  位于 0 刻度线右侧，表明相比于对照组，处理组对相关研究指标具有正效应，反之，则具有负效应。而当  $Y$  的 95% 置信区间完全在 0 刻度线右侧时，则可以判定为处理组相比于对照组对相关指标的正效应是显著的( $P < 0.05$ )，反之，则认为处理组相比于对照组对相关指标的负效应是显著的( $P < 0.05$ )；当置信区间包含 0 刻度线时，则认为结果不显著。

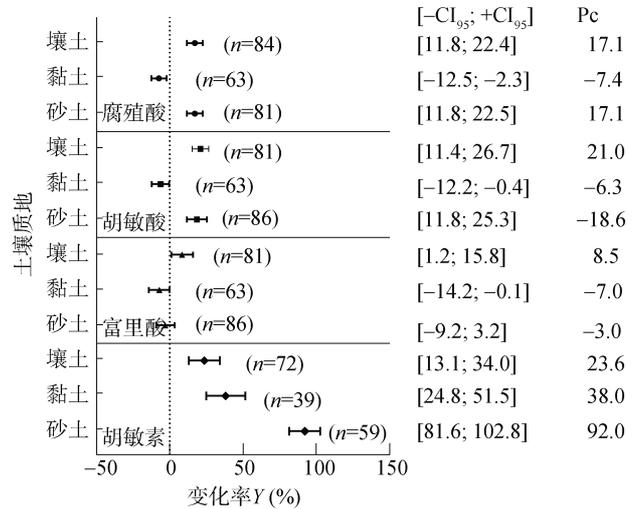
进行 Meta 分析时，对收集的相关数据采用卡方检验(Chi-square test)进行异质性检验。 $P < 0.05$  则表明数据存在异质性，选用随机效应模型；反之，则表明数据没有异质性，应采用固定效应模型。本文采用随机效应模型进行分析<sup>[24-25]</sup>，失安全数均大于  $5n+10$ ，研究结果可信度高。

本研究采用 Excel 2010 收集数据并建立数据集；使用 MetaWin2.0 计算胡敏酸、胡敏素、富里酸、腐殖酸等含量的效应值的变化率，使用 GraphPad Prism 8.2.1 绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 生物质炭对不同质地土壤腐殖质碳组分的影响

生物质炭对不同质地土壤腐殖质碳组分的影响如图 1 所示。在壤土和砂土中，生物质炭添加后土壤腐殖酸含量显著提高，变化率分别为 11.8%~22.4%、11.8%~22.5%，而在黏土中腐殖酸含量降低，变化率为-12.5%~-2.3%。对于土壤胡敏酸，生物质炭施入壤土和砂土中其含量显著增加，变化率分别为 11.4%~26.7%、11.8%~25.3%，黏土中其含量降低，变化率为 -12.2%~-0.4%。土壤富里酸含量在生物质炭施入壤土中增加，变化率为 1.2%~15.8%，而在黏土中其含量降低，变化率为 -14.2%~-0.1%。生物质炭施入各类质地土壤中均会增加腐殖质中的胡敏素含量，其中在砂土中提升效果最为显著，变化率



(图中括号内的数字表示研究数量；+CI<sub>95</sub>、-CI<sub>95</sub>表示 95% 的置信区间的上下限；Pc 表示变化率的平均值；下同)

图 1 生物质炭对不同质地土壤腐殖质各碳组分含量影响  
Fig.1 Effects of biochar on carbon component contents in soil humus of different textures

为 81.6%~102.8%。

### 2.2 生物质炭对不同 pH 土壤腐殖质碳组分的影响

图 2 表明，不同 pH 土壤中添加生物质炭，土壤腐殖质各碳组分含量产生不同变化。对于中性及碱性土壤，施用生物质炭使土壤腐殖酸含量显著增加，变化率分别为 2.3%~12.3%、18.8%~31.2%，酸性土壤条件下其含量降低，变化率为 -10.7%~-2.5%。生物质炭添加能够显著增加中性及碱性土壤中胡敏酸含量，变化率分别为 7.3%~17.7%、5.4%~22.1%，酸性土壤条件下其含量无显著变化。施用生物质炭

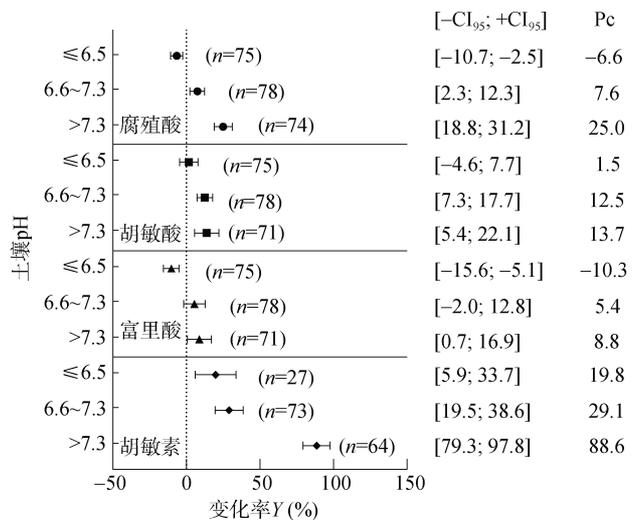


图 2 生物质炭对不同 pH 土壤腐殖质各碳组分含量的影响

Fig.2 Effects of biochar on carbon component contents in soil humus of different pH values

后，碱性土壤中的富里酸含量增加，变化率为 0.7%~16.9%，而酸性土壤中结果相反，变化率为 -15.6%~-5.1%。不同 pH 条件下施用生物质炭土壤腐殖质中的胡敏素含量均增加，其中碱性土壤中效果最为明显，变化率为 79.3%~97.8%。

### 2.3 生物质炭裂解温度对土壤腐殖质碳组分的影响

不同裂解温度下的生物质炭对土壤腐殖质各碳组分含量的影响如图 3 所示。由图 3 可知，在土壤中添加裂解温度为 500~600 °C 及 >600 °C 的生物质炭时，土壤腐殖酸含量增加，变化率分别为 15.8%~27.0%、10.3%~26.4%；土壤中的胡敏酸含量在该裂解温度生物质炭添加下也显著提高，变化率分别为 16.5%~28.6%、3.1%~26.3%。对于土壤富里酸，施用裂解温度为 500~600 °C 的生物质炭对其含量提升效果显著，变化率为 6.3%~21.9%；而施用裂解温度为 400~500 °C 的生物质炭对其产生降低效果，变化率为 -13.4%~-3.3%。各裂解温度的生物质炭施入土壤后对土壤腐殖质中胡敏素含量均显著增加，其中裂解温度为 500~600 °C 的生物质炭施用效果最好，变化率为 59.5%~77.6%。

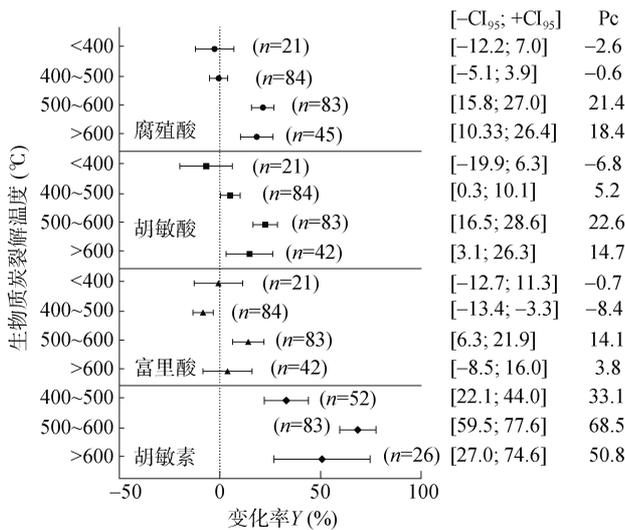


图 3 不同裂解温度生物质炭对土壤腐殖质各碳组分含量的影响

Fig. 3 Effects of biochars at different pyrolysis temperatures on carbon component contents in soil humus

### 2.4 生物质炭施用量对土壤腐殖质碳组分的影响

图 4 为生物质炭施用量对于土壤腐殖质各碳组分的影响。由图 4 可知，土壤腐殖酸含量在生物质炭添加量为 20~40 t/hm<sup>2</sup> 及 >40 t/hm<sup>2</sup> 条件下提升效果显著，变化率分别为 10.8%~23.7%、8.8%~22.7%，土壤胡敏酸含量也显著增加，变化率分别为 15.1%~32.4%、6.9%~23.6%；而生物质炭添加量低于 20 t/hm<sup>2</sup>

时，对二者含量无显著影响。土壤富里酸含量仅在生物质炭添加量为 20~40 t/hm<sup>2</sup> 条件下提高，变化率为 0.7%~13.1%。胡敏素含量在生物质炭不同添加量下均呈现显著提高，但是随着生物质炭添加量逐渐增大，胡敏素含量的增幅速率先升高后降低。

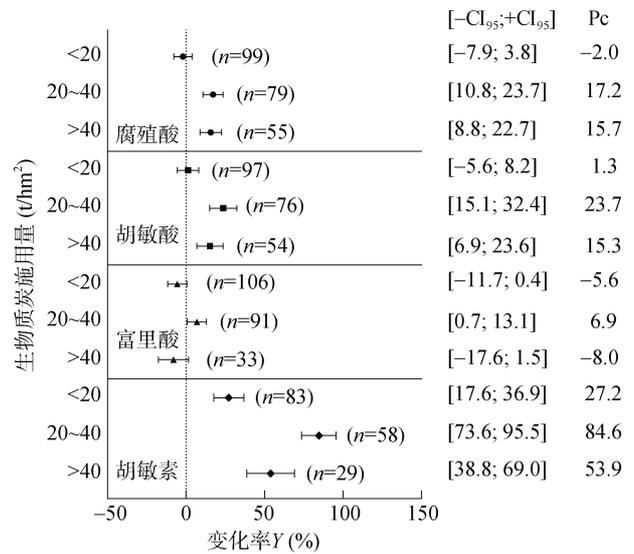


图 4 生物质炭施用量对土壤腐殖质各碳组分含量的影响  
Fig. 4 Effect of biochar application amount on carbon component contents in soil humus

### 2.5 生物质炭施用时长对土壤腐殖质碳组分的影响

图 5 分析结果表明，生物质炭的不同施用时长对土壤腐殖质各碳组分的影响并不一致。其中，土壤腐殖酸含量在生物质炭施入土壤后的 3 个月及 1~2 年内提高，变化率分别为 9.8%~26.0%、2.1%~14.3%。

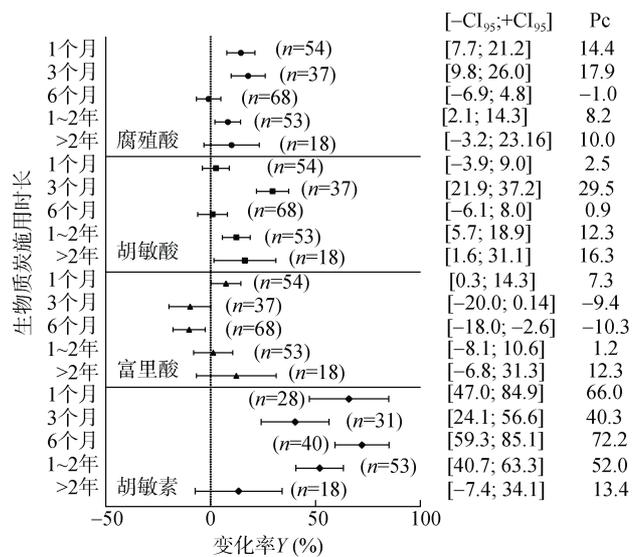


图 5 不同施用时长生物质炭对土壤腐殖质各碳组分含量的影响

Fig. 5 Effects of biochar on carbon component contents in soil humus in different time

土壤胡敏酸含量在生物质炭施入土壤 3 个月、1 ~ 2 年内及 2 年后提高效果显著,变化率分别为 21.9% ~ 37.2%、5.7% ~ 18.9%、1.6% ~ 31.1%。而对于土壤富里酸,其含量仅在生物质炭施入 1 个月内显著增加,变化率为 0.3% ~ 14.3%,其余时间均无显著影响。生物质炭施入土壤 2 年内,土壤胡敏素含量增加,其中 6 个月时长下增幅最大,变化率为 59.3% ~ 85.1%。

### 3 讨论

#### 3.1 生物质炭对不同质地、pH 土壤腐殖质各碳组分的影响

本研究针对土壤质地、pH 进行划分(图 1、图 2),研究生物质炭添加下不同类型土壤中腐殖质含量变化,结果表明,与黏土中添加生物质炭相比,壤土和砂土中添加生物质炭对土壤腐殖酸含量的提升效果更显著;不同质地土壤添加生物质炭后,对于富里酸含量的影响并不一致。黏土中,由于其黏粒含量高,施用生物质炭后进一步降低其通气和透水性,使得黏土中微生物活性降低<sup>[26-27]</sup>,致使生物质炭施用下对其腐殖酸含量提升不显著。砂土和壤土中,由于生物质炭具有较大表面积和多孔结构,其表面易与粒径较大、表面积较小的松散结构的砂粒土壤结合,在生物质炭表面形成生物质炭-矿物复合体<sup>[28-29]</sup>,保护土壤有机碳不被微生物分解。同时,生物质炭中的芳香族基团促进土壤颗粒中有机物与无机物的结合,加快了土壤中大颗粒团聚体的形成,进一步减少有机碳矿化致使腐殖酸含量增加<sup>[30]</sup>。此外,生物质炭由于其本身含有的羧基、羟基和芳香基等官能团,施入土壤后使得土壤胡敏酸的缩合程度升高,氧化程度降低,结构活性增强<sup>[31]</sup>。而富里酸因其分子结构简单,易被生物质炭发达的孔隙结构吸附而不易被检测,造成该组分测量结果偏低<sup>[32]</sup>,这可能是本研究中富里酸含量增加不显著的原因之一。土壤初始有机碳含量的高低也会影响生物质炭施入后土壤腐殖质的含量。本研究所用数据表明黏土的初始有机碳含量高于砂土,且砂土中作物残渣的降解速率明显高于黏土,因此相同数量的生物质炭添加下砂土中的腐殖质含量提升效果会优于黏土。由此也说明,试验结果易受到土壤质地、田间管理方式、气候环境等因素影响,本研究采用 Meta 分析将不同质地土壤下生物质炭对于土壤腐殖质含量影响进行整合分析,定量综合评价生物质炭效果,可为今后相关研究提供参考。

袁大刚等<sup>[33]</sup>研究结果显示,土壤酸度越高,富里酸含量越高。而生物质炭具有一定碱性,施用到酸

性土壤中可以提高土壤 pH,从而降低富里酸含量。李玉琴和夏建国<sup>[34]</sup>研究表明,与酸性土壤相比,中性、碱性土壤表层胡敏酸含量更高,而酸性土壤中,胡敏酸更易于在土壤深层沉淀。本研究中,相关分析基本以土壤表层的胡敏酸含量变化为主,故得出较酸性土壤,中性及碱性土壤胡敏酸含量变化更为显著。本研究受生物质炭添加层位较浅的影响,未来还需结合土层深度研究生物质炭添加对不同 pH 土壤中腐殖质各碳组分含量的影响。

#### 3.2 不同裂解温度生物质炭及其添加量对土壤腐殖质各碳组分影响

本研究结果表明,裂解温度 <400 °C 的生物质炭施入土壤后,土壤中胡敏酸、富里酸含量提升效果不显著;而裂解温度为 500 ~ 600 °C 的生物质炭施入土壤后,土壤胡敏酸、富里酸含量显著增加;当裂解温度 >600 °C 的生物质炭施入土壤后,土壤胡敏酸含量的增幅降低。柯跃进等<sup>[35]</sup>研究发现,相比于裂解温度为 700 °C 的生物质炭,裂解温度为 500 °C 的生物质炭施入土壤后对土壤有机碳含量增加的贡献率更高。原因在于生物质炭在热解过程中产生了数量不等的类富里酸和类胡敏酸,且生成的类腐殖酸物质在高温条件下经过分解、冷凝和聚合等导致类富里酸和类胡敏酸含量降低<sup>[36]</sup>。生物质炭裂解温度升至 500 °C 时则相反,这是因为与类腐殖酸物质相比,类富里酸物质的分子量更小、溶解度更高<sup>[37]</sup>,使得该裂解温度下生物质炭中的可溶性有机碳含量增加<sup>[38-39]</sup>。随着生物质炭热解温度升高,低温中分子量较大的类腐殖酸物质进一步分解为更加稳定的小分子富里酸类物质<sup>[40]</sup>,致使生物质炭中可溶性有机物的稳定性增强。裂解温度 >600 °C 的生物质炭,可溶性有机物的脂肪族官能团结构可能随着脂肪族化合物逐渐分解而去除,使得可溶性有机物含量降低,相比于其他裂解温度下生物质炭添加到土壤中的腐殖质含量略低。因而,裂解温度在 500 ~ 600 °C 的生物质炭施用效果较好,可改善土壤肥力。

高尚志<sup>[41]</sup>等研究表明,添加生物质炭对于提高土壤有机碳含量、稳定土壤有机碳库具有重要作用。本研究表明,生物质炭添加量 <40 t/hm<sup>2</sup> 时,土壤中胡敏素含量随着生物质炭添加量的增加而提高。这是由于生物质炭本身的复杂结构和化学性质与胡敏素结构相似<sup>[42]</sup>,且生物质炭孔隙结构发达、吸附力强,吸附了土壤中结构简单、分子量较小的有机碳成分,进而提高土壤中胡敏素含量。同时,生物质炭促进了土壤中活性有机碳的矿化和腐殖化,使其转化为稳定

的胡敏素<sup>[43]</sup>。当生物质炭添加量  $>40 \text{ t/hm}^2$  时, 土壤中富里酸含量降低, 这是因为高施用量下的生物质炭吸附了土壤中的胡敏酸和富里酸, 促进了土壤中的富里酸缩合或是胡敏酸的聚合, 致使土壤腐殖酸含量降低。此外, 胡敏酸的分子量比富里酸大, 结构比富里酸复杂, 更接近于胡敏素, 所以下降幅度小<sup>[44]</sup>。本文分析了生物质炭裂解温度和施用量对土壤腐殖质含量的影响, 表明生物质炭自身性质对土壤腐殖质含量影响是不容忽视的, 但仍需进一步分析二者的交互作用对农田土壤腐殖质含量的影响程度。

### 3.3 不同试验时长下土壤腐殖质各碳组分对生物质炭的响应

本研究表明, 随着生物质炭施入土壤的时长增加, 土壤腐殖质各碳组分含量变化趋势不一致。其中, 土壤腐殖酸、胡敏酸含量在生物质炭施入土壤 3 个月内显著增加, 之后随着时间的延长, 生物质炭的添加对土壤胡敏酸含量的增幅下降, 而土壤中胡敏素含量在 2 年内始终显著增加。孙景玲<sup>[45]</sup>研究表明, 生物质炭的长期施用会降低土壤中可溶性碳含量, 致使土壤有机质稳定性增强。Riedel 等<sup>[46]</sup>研究结果表明, 生物质炭施入土壤后促进土壤有机质矿化和腐殖化, 使得小分子有机碳转化为稳定的胡敏素, 导致土壤中胡敏素含量提高。综上所述, 不同的试验时长会影响生物质炭提升土壤腐殖质各碳组分含量的效果, 应进行长系列的定位试验深入研究其效应。

## 4 结论

1) 不同质地、pH 土壤中施入生物质炭对于土壤腐殖质各碳组分效果不同。壤土和砂土中土壤腐殖酸、胡敏素含量增加幅度较大; 生物质炭施入中性、碱性土壤中可增加土壤胡敏酸及胡敏素含量。

2) 不同裂解温度的生物质炭施入土壤后, 均可以提高土壤腐殖质中胡敏素的含量, 其中, 裂解温度  $500 \sim 600 \text{ }^\circ\text{C}$  下的生物质炭对于土壤腐殖酸、胡敏酸含量提高效果最为显著; 而生物质炭施用量为  $20 \sim 40 \text{ t/hm}^2$  时, 对于土壤腐殖质各碳组分含量的提高效果最好。

3) 施入生物质炭 3 个月内土壤腐殖酸、胡敏酸含量明显提高, 施用时长在 1~2 年内土壤腐殖质各碳组分含量的提高效果稳定。

### 参考文献:

[1] Lal R. Managing soils and ecosystems for mitigating anthropogenic carbon emissions and advancing global food security[J]. *BioScience*, 2010, 60(9): 708–721.

[2] Shakoore A, Arif M S, Shahzad S M, et al. Does biochar accelerate the mitigation of greenhouse gaseous emissions from agricultural soil?—A global meta-analysis[J]. *Environmental Research*, 2021, 202: 111789.

[3] 李宝珍, 周萍, 李宇虹, 等. 亚热带稻田土壤持续固碳机制研究进展[J]. *华中农业大学学报*, 2022, 41(6): 71–78.

[4] 张洪培, 李秀云, 沈玉芳, 等. 生物质炭对农田土壤有机碳及其矿化影响的研究进展[J]. *西北农业学报*, 2018, 27(4): 459–468.

[5] Batjes N H. Harmonized soil property values for broad-scale modelling (WISE30sec) with estimates of global soil carbon stocks[J]. *Geoderma*, 2016, 269: 61–68.

[6] 俄胜哲, 时小娟, 车宗贤, 等. 有机物料对灌漠土结合态腐殖质及其组分的影响[J]. *土壤学报*, 2019, 56(6): 1436–1448.

[7] 潘根兴, 丁元君, 陈硕桐, 等. 从土壤腐殖质分组到分子有机组学认识土壤有机质本质[J]. *地球科学进展*, 2019, 34(5): 451–470.

[8] 党亚爱, 李世清, 王国栋. 黄土高原典型区域土壤腐殖酸组分割面分布特征[J]. *生态学报*, 2012, 32(6): 1820–1829.

[9] Bai X X, Huang Y W, Ren W, et al. Responses of soil carbon sequestration to climate-smart agriculture practices: A meta-analysis[J]. *Global Change Biology*, 2019, 25(8): 2591–2606.

[10] Liu S W, Zhang Y J, Zong Y J, et al. Response of soil carbon dioxide fluxes, soil organic carbon and microbial biomass carbon to biochar amendment: A meta-analysis[J]. *GCB Bioenergy*, 2016, 8(2): 392–406.

[11] 高利华, 屈忠义. 膜下滴灌条件下生物质炭对土壤水热肥效应的影响[J]. *土壤*, 2017, 49(3): 614–620.

[12] 李飞跃, 梁媛, 汪建飞, 等. 生物炭固碳减排作用的研究进展[J]. *核农学报*, 2013, 27(5): 681–686.

[13] Ashiq W, Nadeem M, Ali W, et al. Biochar amendment mitigates greenhouse gases emission and global warming potential in dairy manure based silage corn in boreal climate[J]. *Environmental Pollution*, 2020, 265(Pt A): 114869.

[14] Czimczik C I, Masiello C A. Controls on black carbon storage in soils[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2007, 21(3): 113.

[15] 邱敬, 高人, 杨玉盛, 等. 土壤黑碳的研究进展[J]. *亚热带资源与环境学报*, 2009, 4(1): 88–94.

[16] Šimanský V, Wójcik-Gront E, Horváthová J, et al. Changes in relationships between humic substances and soil structure following different mineral fertilization of *Vitis vinifera* L. in Slovakia[J]. *Agronomy*, 2022, 12(6): 1460.

[17] 花莉, 金素素, 洛晶晶. 生物质炭输入对土壤微域特征及土壤腐殖质的作用效应研究[J]. *生态环境学报*, 2012, 21(11): 1795–1799.

[18] 郭万里. 碳氮添加对陇中黄土高原旱作农田土壤有机碳库稳定性的影响[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2020.

[19] Ren F L, Zhang X B, Liu J, et al. A synthetic analysis of greenhouse gas emissions from manure amended agricultural soils in China[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 8123.

- [20] Freeman P R, Hedges L V, Olkin I. Statistical methods for meta-analysis[J]. *Biometrics*, 1986, 42(2): 454.
- [21] 孙向阳. 土壤学[M]. 北京: 中国林业出版社, 2005.
- [22] Soil Survey Staff. *Soil Taxonomy: A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys*[M]. 2nd ed. NRCS, USDA. Agriculture Handbook, 436. Washington, DC, 1999.
- [23] Hedges L V, Gurevitch J, Curtis P S. The meta-analysis of response ratios in experimental ecology[J]. *Ecology*, 1999, 80(4): 1150–1156.
- [24] Borenstein M, Hedges L V, Higgins J P T, et al. A basic introduction to fixed-effect and random-effects models for meta-analysis[J]. *Research Synthesis Methods*, 2010, 1(2): 97–111.
- [25] Skinner C, Gattinger A, Muller A, et al. Greenhouse gas fluxes from agricultural soils under organic and non-organic management—a global meta-analysis[J]. *The Science of the Total Environment*, 2014, 468/469: 553–563.
- [26] 匡崇婷, 江春玉, 李忠佩, 等. 添加生物质炭对红壤水稻土有机碳矿化和微生物生物量的影响[J]. *土壤*, 2012, 44(4): 570–575.
- [27] 李忠佩, 林心雄. 瘠薄红壤中有机物质的分解特征[J]. *生态学报*, 2002, 22(8): 1224–1230.
- [28] Li F Y, Cao X D, Zhao L, et al. Effects of mineral additives on biochar formation: Carbon retention, stability, and properties[J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 48(19): 11211–11217.
- [29] 王琳. 农田土壤-生物炭固碳减排的影响因素及潜力估算[D]. 杭州: 浙江大学, 2021.
- [30] 邹瑞晗, 王振华, 朱艳, 等. 非灌溉季节生物炭施用对滴灌棉田土壤团聚体及其碳含量的影响[J]. *土壤通报*, 2023, 54(3): 626–635.
- [31] 张葛, 窦森, 谢祖彬, 等. 施用生物质炭对土壤腐殖质组成和胡敏酸结构特征影响[J]. *环境科学学报*, 2016, 36(2): 614–620.
- [32] 孟凡荣. 施用生物质炭对土壤腐殖质组成及胡敏酸和黑碳结构的影响[D]. 长春: 吉林农业大学, 2016.
- [33] 袁大刚, 蒲光兰, 程伟丽, 等. 川西稻田改为茶园后土壤 pH 和腐殖质组成剖面分布变化特征[J]. *浙江农业学报*, 2016, 28(1): 104–109.
- [34] 李玉琴, 夏建国. 土地利用方式对川西低山区土壤腐殖质组成以及结合形态的影响[J]. *安徽农业科学*, 2008, 36(6): 2441–2444.
- [35] 柯跃进, 胡学玉, 易卿, 等. 水稻秸秆生物炭对耕地土壤有机碳及其 CO<sub>2</sub> 释放的影响[J]. *环境科学*, 2014, 35(1): 93–99.
- [36] Smith C R, Sleighter R L, Hatcher P G, et al. Molecular characterization of inhibiting biochar water-extractable substances using electrospray ionization Fourier transform ion cyclotron resonance mass spectrometry[J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 47(23): 13294–13302.
- [37] Rajapaksha A U, Ok Y S, El-Naggar A, et al. Dissolved organic matter characterization of biochars produced from different feedstock materials[J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, 233: 393–399.
- [38] Wang J Y, Xiong Z Q, Kuzyakov Y. Biochar stability in soil: Meta-analysis of decomposition and priming effects[J]. *GCB Bioenergy*, 2016, 8(3): 512–523.
- [39] Ameloot N, Graber E R, Verheijen F G A, et al. Interactions between biochar stability and soil organisms: Review and research needs[J]. *European Journal of Soil Science*, 2013, 64(4): 379–390.
- [40] 蔡朝卉, 楚沉静, 郑浩, 等. 热解温度和时间对香蒲生物炭性质的影响及生态风险评估[J]. *环境科学*, 2020, 41(6): 2963–2971.
- [41] 高尚志, 刘日月, 窦森, 等. 不同施量生物炭对土壤团聚体及其有机碳含量的影响[J]. *吉林农业大学学报*, 2022, 44(4): 421–430.
- [42] Haumaier L, Zech W. Black carbon—Possible source of highly aromatic components of soil humic acids[J]. *Organic Geochemistry*, 1995, 23(3): 191–196.
- [43] 窦森, 周桂玉, 杨翔宇, 等. 生物质炭及其与土壤腐殖质碳的关系[J]. *土壤学报*, 2012, 49(4): 796–802.
- [44] 白小艳. 生物质炭特性及其施用对土壤腐殖质的作用[D]. 长春: 吉林农业大学, 2018.
- [45] 孙景玲. 生物质炭活性有机质及施炭下稻田土壤有机质变化的分子组成分析[D]. 南京: 南京农业大学, 2017.
- [46] Riedel T, Iden S, Geilich J, et al. Changes in the molecular composition of organic matter leached from an agricultural topsoil following addition of biomass-derived black carbon (biochar)[J]. *Organic Geochemistry*, 2014, 69: 52–60.