

DOI:10.13718/j.cnki.xsxb.2023.06.011

# 不同秸秆炭在黄壤中降解特征的比较研究<sup>①</sup>

邢存芳, 侯建伟, 杨莉琳

铜仁学院 农林工程与规划学院/贵州省梵净山地区生物多样性保护与利用重点实验室, 贵州 铜仁 554300

**摘要:** 为了估算油菜、玉米和水稻秸秆炭在黄壤中的降解率、表观残留碳量和降解半衰期等降解参数, 明确不同秸秆炭在黄壤中的降解特征, 采用添加秸秆炭至黄壤中的方法进行室内培养试验, 通过耗氧培养过程中总碳的变化来模拟研究秸秆炭在土壤环境中的降解特征。结果表明, 黄壤的全碳含量和表观残留碳量与投入至黄壤的纯碳量有关, 随其投入纯碳量的增加而增加, 4%添加量的 3 种秸秆炭均可使黄壤的全碳含量由初始的第 4 等级提高至第 1 等级。随着培养时间的持续秸秆炭逐渐降解, 其降解率由大到小依次为: 玉米秸秆炭、水稻秸秆炭、油菜秸秆炭。最终通过公式  $T_{1/2}(\text{月})=0.693/K$  计算出油菜、玉米和水稻秸秆炭的降解半衰期分别为 4.9~8.2, 3.9~6.0, 3.0~5.3 年。秸秆炭对黄壤的增碳效果取决于投入秸秆炭的纯碳量, 而其稳定性与秸秆炭的种类有关, 在同一添加量水平下, 玉米秸秆炭对黄壤的增碳效果最佳, 而油菜秸秆炭的稳定性最好。

**关键词:** 秸秆炭; 黄壤; 模拟试验; 降解特征

**中图分类号:** S147.2

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-5471(2023)06-0081-07

## Comparative Study on Degradation Characteristics of Different Straw Biochar in Yellow Soil

XING Cunfang, HOU Jianwei, YANG Lilin

College of Agroforestry Engineering and Planning, Tongren University / Guizhou Key Laboratory of Biodiversity Conservation and Utilization in the Fanjing Mountain Region, Tongren 554300, China

**Abstract:** The degradation parameters such as the degradation rate, apparent residual carbon content and degradation half-life of rape, corn and rice straw biochar in yellow soil were estimated, and the degradation characteristics of different straw biochar in yellow soil were clarified. Indoor culture experiments were carried out by adding straw biochar to yellow soil, and the degradation characteristics of straw biochar in soil environment were studied by simulating the change of total carbon in the system during aerobic cultivation. The total carbon content and apparent residual carbon content of yellow soil were related to the pure carbon input into the yellow soil, and increased with the increase of the pure carbon input. The addition of 4% of the three kinds of straw biochar could increase the total carbon content of the yellow soil from the initial fourth grade to the first grade. With the passage of culture time, the straw biochar was gradually degraded, and its degradation rate from large to small was as follows: corn straw biochar, rice straw biochar,

① 收稿日期: 2022-10-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(31060275); 贵州省科技计划项目(黔科合基础-ZK[2022]一般 556); 铜仁市科技计划项目(铜市科研[2021]32 号); 铜仁学院 2019 年产业扶贫专项资金科研项目(FP201903)。

作者简介: 邢存芳, 女, 讲师, 主要从事资源利用与植物保护研究。

通信作者: 侯建伟, 博士研究生。

rape straw biochar. Finally, the degradation half-lives of corn, rice and rape straw biochar were estimated to be 4.9—8.2, 3.9—6.0 and 3.0—5.3 years by the degradation formula  $T_{1/2}(\text{month}) = 0.693/K$ , respectively. The carbon-increasing effect of yellow soil is limited by the amount of pure carbon added, and its stability is related to the type of straw biochar. Our results showed that corn straw biochar has the largest carbon-increasing effect, and rape straw biochar was the most stable in yellow soil at the same addition amount level.

**Key words:** straw biochar; yellow soil; constructed experiment; degradation characteristics

多年来,我国实施秸秆还田等一系列措施来提高土壤肥力,其核心是在提高土壤有机质水平的同时把环境中的碳封存在土壤中<sup>[1]</sup>.由 2016—2020 年的《贵州统计年鉴》<sup>[2]</sup>可知,贵州省的玉米、水稻和油菜年产量分别为 220.34~456.40,156.01~415.98,77.25~88.56 万 t,按照 1:1.2,1:0.9 和 1:1.5<sup>[3]</sup>的籽粒与秸秆质量比例折算其秸秆年产量分别为 264~548,140~374,116~133 万 t.当前,这些主作物秸秆多被就地焚烧或粉碎还田.秸秆粉碎还田虽是当今世界普遍采取的一项培肥地力的增产措施,在减少焚烧带来污染的同时还兼具增肥增产作用<sup>[4]</sup>,但是在贵州高原这种中亚热带地区,由于雨热同期、降雨量大于蒸发量的气候特点使得投入农田的植物生物质(有机质一般低于 2%<sup>[2,5]</sup>)很快被氧化分解<sup>[6]</sup>,不利于碳的固定.

近年来,国际社会纷纷提出了秸秆炭化还田策略,以达到利用土壤来封存环境中碳的目的<sup>[6-10]</sup>.秸秆炭化还田就是将秸秆生物质经高温无氧炭化后转化为生物质炭再投入至土壤中进行碳封存.此秸秆炭是由单环和凝聚环芳香族 C 组成的高度芳香化的富碳产物<sup>[11-13]</sup>,其全碳含量是原生物质的 1.6~2.0 倍<sup>[14]</sup>,其降解半衰期约为普通植物生物质的 20 倍以上<sup>[15]</sup>.但至今,仅有少数国外研究学者推测,黑炭物质可在自然环境中稳定数千年<sup>[16]</sup>,其半衰期为 100 a 左右<sup>[17]</sup>;国内模拟试验估算,沙蒿生物质炭的降解半衰期为 2~12 a<sup>[14]</sup>,玉米秸秆炭的降解半衰期为 17.6~21.1 a,且在土壤中的稳定性低于活性炭<sup>[15]</sup>.因此,秸秆炭有利于碳的固定,但对其在土壤环境中的稳定性还缺乏深入的了解,尤其是缺少对不同秸秆炭在土壤中的降解特征差异的对比分析.

由于生物质炭是通过特定方式制备的,其化学组成既不同于自然界中的黑炭,也不同于活性炭,加之作物种类差异,不同秸秆炭之间也有着本质的区别,投入土壤后有其自身的降解规律.为此,本研究以油菜、玉米和水稻 3 种贵州主作物秸秆炭为供试材料,以贵州旱地黄壤为培养介质进行了为期 3 年的土壤培养试验,通过秸秆炭添入黄壤后的表观残留碳量、降解率和降解半衰期等评价指标,比较分析了 3 种秸秆炭在黄壤中的降解特征差异,以期利用秸秆炭进行土壤固碳提供评价依据.

## 1 材料与方 法

### 1.1 供试土壤与材料

供试土壤:采自铜仁市德江县乌江学院附近的开荒地(N28°14'32",E108°9'0"),将取回的土壤在实验室自然风干后过 2 mm 孔径筛网.土壤的 pH 值为 5.96、有机碳为 6.68 g/kg、碱解氮为 22.70 mg/kg、有效磷为 8.53 mg/kg、速效钾为 49.25 mg/kg.

供试秸秆炭:分别称取 20 g 的水稻、玉米和油菜的秸秆(自然风干,粉碎后过 2 mm 孔径筛网,65 °C 烘至恒质量)放入箱式电阻炉(SGM.VB8/10,洛阳)的坩埚中,用真空泵抽取炉内空气创造低氧境,500 °C 恒温炭化 6 h 后自然降温,制备得到水稻、玉米和油菜的秸秆炭,其全碳含量分别为 512 g/kg,576 g/kg 和 449 g/kg.

### 1.2 试验设计与样品采集

本试验采用室内盆栽培养模拟实验进行,以期能够严格控制水分、温度和光照等试验条件.称取 1 000 g 风干土,将油菜、水稻和玉米秸秆炭分别按照质量分数为 1%,2%,4%的添加量与土壤充分混匀后装入塑料杯中,补加蒸馏水至田间饱和持水量的 60%.同时以未添加秸秆炭处理作为空白对照(CK),无菌膜封口,保持一定的透气性,培养杯底部中心打直径 1 cm 的小孔,置于室内进行为期 3 年的室内盆栽培养模拟实验.共计 10 个处理,每个处理 9 次重复,每隔 5 d 用称质量法补水 1 次.在培养后的 12,24,36 月时间点上破坏性取样(每次取 3 个重复),所取土样分别过 0.15 mm 孔径筛网,用于测定土壤全碳含量.

### 1.3 测试项目与方法

秸秆炭:pH 值用复合电极电位法测定, $V(\text{水}):m(\text{秸秆炭})=10:1$ <sup>[4]</sup>;全碳用 CHN 元素分析仪(德

国 Elementar, Vario Macro) 测定<sup>[4]</sup>; 孔容积、孔径、比表面积采用全自动气体吸附仪(ASAP2020)测定<sup>[4]</sup>. 土壤: 土壤全碳采用重铬酸钾外加热法测定<sup>[18]</sup>.

#### 1.4 秸秆炭的降解参数估算

秸秆炭表观残留碳量为<sup>[14-15]</sup>:

$$C(\text{g/kg}) = \text{秸秆炭处理土壤全碳含量} - \text{对照土壤全碳含量} \quad (1)$$

秸秆炭降解率为:

$$D(\%) = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \times 100\% \quad (2)$$

式中:  $C_0$  为培养前加入秸秆炭的纯碳量(g/kg),  $C_t$  为  $t$  时间表观残留碳量(g/kg).

秸秆炭降解半衰期为:

$$T_{1/2}(\text{月}) = 0.693 K \quad (3)$$

式中:  $K = -\frac{\ln C_t/C_0}{t}$ , 为降解速率常数(月<sup>-1</sup>);  $C_t$  为  $t$  时间表观残留碳量(g/kg);  $C_0$  为培养前加入秸秆炭的纯碳量(g/kg),  $t$  为培养时间(月)<sup>[14-15]</sup>.

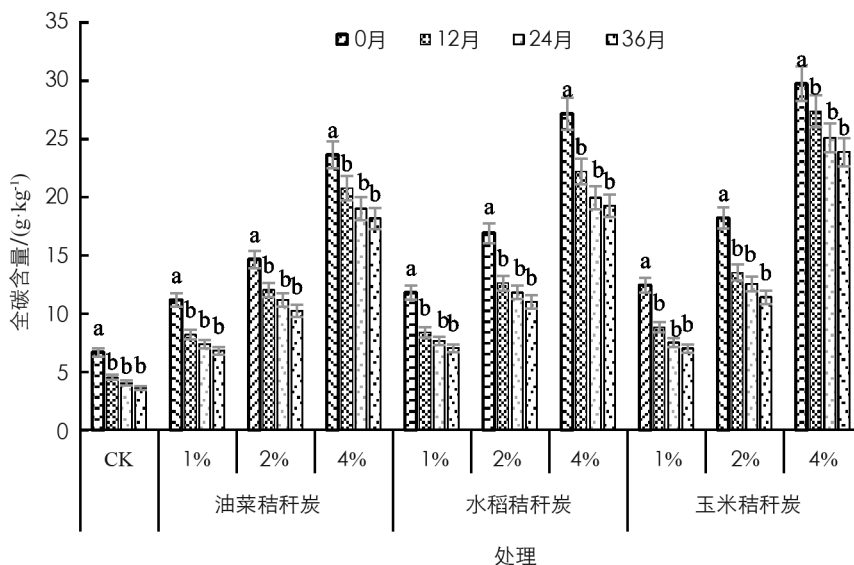
#### 1.5 数据分析

将试验数据经 Excel 2010 整理后, 用 SAS 9.0 统计软件进行数理统计, 在符合正态分布的情况下进行 one way ANOVA 单因素方差分析, 采用多重比较方法对数据进行差异显著性检验.

## 2 结果与分析

### 2.1 不同秸秆炭处理黄壤的全碳含量分析

图 1 是黄壤中添加油菜、水稻和玉米秸秆炭后黄壤全碳含量随培养时间的变化趋势图. 由图 1 可知, 在相同添加量的条件下, 不同秸秆炭处理的黄壤全碳含量均表现为玉米秸秆炭处理最高, 水稻秸秆炭处理次之, 油菜秸秆炭处理最低. 3 种秸秆炭以 4% 施入黄壤后, 其全碳含量由初始的 6.68 g/kg(CK) 提高至 23.65~29.75 g/kg, 增加到 3.5~4.5 倍, 对照全国第 2 次土壤普查不同养分含量分级标准<sup>[19]</sup> 得知, 全碳含量由原来的第 4 等级提高至第 1 等级, 具有明显的增碳效果. 由图 1 还可看出, 黄壤培养到第 12 月时, 其全碳含量骤降且与同处理的 24、36 月之间的差异无统计学意义. 说明秸秆炭被施入黄壤后, 第 1 年是快速降解期, 而后开始进入缓慢降解期.



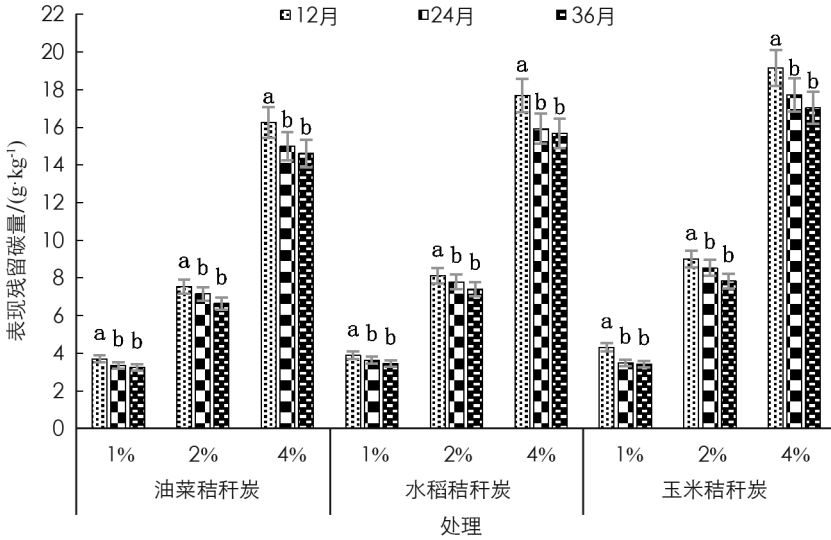
注: 图柱上小写字母不同表示相同处理的不同培养时间之间差异有统计学意义( $p < 0.05$ )

图 1 油菜、水稻和玉米秸秆炭处理黄壤的全碳含量

### 2.2 不同秸秆炭的表观残留碳量估算

表观残留碳量即秸秆炭在黄壤中未分解的有机碳含量, 是培养到一定时间节点时秸秆炭处理黄壤的全

碳量与 CK 处理全碳量的差值<sup>[14-15]</sup>. 通过公式(1)计算可得出油菜、水稻和玉米秸秆炭处理黄壤的表观残留碳量(图 2).



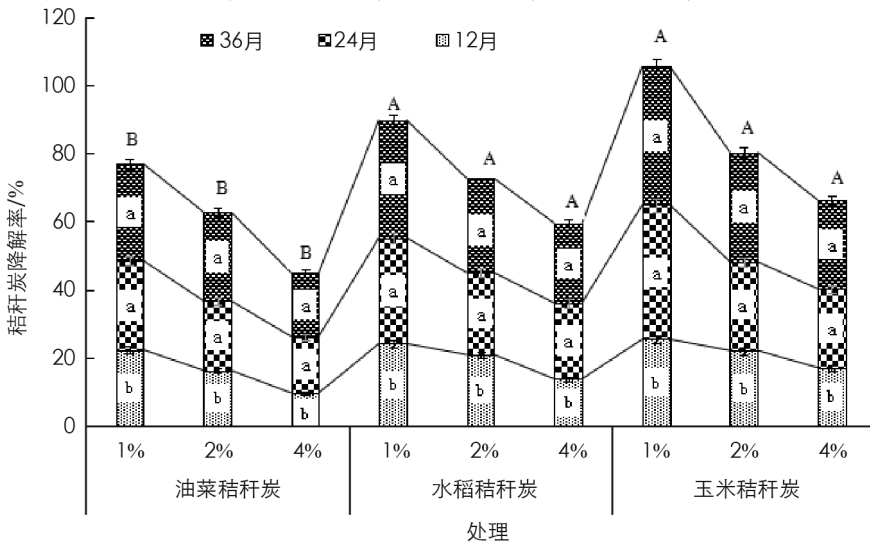
注: 图柱上小写字母不同表示同种秸秆炭在同一添加量下, 不同培养时间之间差异有统计学意义( $p < 0.05$ )

图 2 油菜、水稻和玉米秸秆炭在黄壤中的表观残留碳量

分析图 2 发现, 不同秸秆炭施入黄壤后 24~36 月内, 其表观残留碳量明显降低, 且与 12 月的差异有统计学意义( $p < 0.05$ ). 在相同添加量下, 秸秆炭在黄壤中的表观残留碳量从多到少依次为: 玉米秸秆炭、水稻秸秆炭、油菜秸秆炭, 但其有机炭残留<sup>[14-15]</sup>比例则相反, 即有机炭残留量从多到少依次为: 油菜秸秆炭、水稻秸秆炭、玉米秸秆炭, 其平均值分别为 80.2%, 75.8% 和 72.0%. 说明在培养 36 月期间, 不同秸秆炭的表观残留碳量取决于秸秆炭自身的含碳量, 而残留比例取决于秸秆炭种类.

### 2.3 估算不同秸秆炭的降解率

秸秆炭表观残留碳量的降低说明秸秆炭在黄壤中逐渐降解, 其降解程度可用秸秆炭降解率来表征, 其降解率越高, 表观残留碳量就越少. 通过公式(2)计算可得出不同添加量的油菜、水稻和玉米秸秆炭的降解率(图 3). 由图 3 可知, 与培养 12 月相比, 24 月和 36 月的秸秆炭降解率显著增大( $p < 0.05$ ). 在相同添加量下, 油菜秸秆炭的降解率显著低于其他处理, 特别是 4% 添加量下, 其平均降解率比水稻秸秆炭和玉米秸秆炭分别低 4.9% 和 7.1%.



注: 图柱内小写字母不同表示相同处理的不同培养时间之间差异有统计学意义( $p < 0.05$ ); 图柱上大写字母不同表示在相同添加量下, 不同秸秆炭的累计降解率间差异有统计学意义( $p < 0.05$ ).

图 3 油菜、水稻和玉米秸秆炭在黄壤中的降解率

## 2.4 估算秸秆炭在黄壤中的降解半衰期

有机碳在土壤中的降解周期以降解半衰期来表征, 其值由公式(3)计算得到, 值越大说明降解周期越长、秸秆炭就越难降解. 由表 1 可知, 油菜、水稻和玉米秸秆炭的降解半衰期分别为 58.5~98.4, 47.3~72.0, 36.4~63.5 月, 相当于 4.9~8.2, 3.9~6.0, 3.0~5.3 年. 从表 2 中的培养时间可看出, 秸秆炭培养时间越长, 其降解半衰期的估测值越大, 其培养时间每延长 12 月, 秸秆炭降解半衰期平均延长 28.7%~42.5%, 这与图 1 中秸秆炭在黄壤中培养到第 12 月时其全碳含量骤降而后下降缓慢相印证. 从秸秆炭降解半衰期的平均值可知, 油菜秸秆炭的降解半衰期最大, 特别是在 4% 添加量下, 其半衰期是水稻秸秆炭和玉米秸秆炭的 1.4 倍和 1.5 倍.

表 1 油菜、水稻和玉米秸秆炭在黄壤中的降解半衰期

秸秆炭种类	添加量	培养时间/月			平均值/月
		12	24	36	
油菜秸秆炭	1%	42.5	56.7	76.3	58.5 Ac
	2%	47.1	72.8	82.5	67.5 Ab
	4%	83.0	91.7	120.5	98.4 Aa
水稻秸秆炭	1%	30.3	48.4	63.2	47.3 Bc
	2%	35.7	66.4	76.9	59.7 ABb
	4%	56.6	66.1	93.2	72.0 Ba
玉米秸秆炭	1%	28.5	33.1	47.7	36.4 Cc
	2%	33.5	55.0	64.3	50.9 Bb
	4%	44.7	63.2	82.5	63.5 Ba

注: 数据后所标大写字母不同表示同一添加量不同秸秆炭种类间差异有统计学意义( $p < 0.05$ ); 小写字母不同表示同一秸秆炭不同添加量间差异有统计学意义( $p < 0.05$ ).

## 3 讨论

章明奎等<sup>[15]</sup>在青紫泥田中添加 0.83% 的玉米秸秆炭的研究证明, 玉米秸秆炭的降解半衰期为 15 年以上, 并且淹水条件较 75% 田间持水量下的降解半衰期要高出 2 年以上; 也有研究推算土壤中黑炭的半衰期为 100 年左右<sup>[11]</sup>, 均明显高于本研究结果(表 1). 以往研究也证实, 生物质的热解温度、炭化时间以及施用量等因素不同, 其降解半衰期可相差 10 年左右<sup>[14]</sup>. 目前, 虽然不同学者得出的生物质炭降解半衰期结果相差较大, 但是生物质炭化后其降解半衰期可大大延长已得到充分肯定. 如: 玉米秸秆的降解半衰期为 0.68~0.88 年, 炭化前后其全碳含量可相差 1.6~2.0 倍, 半衰期可相差 20 余倍<sup>[15]</sup>. 因此, 秸秆炭化还田具有更高的增碳效果, 是把碳稳定封存在土壤中的重要途径. 本研究中, 油菜秸秆炭以质量分数为 4% 投入到黄壤中, 黄壤全碳含量(23.65 g/kg)比 CK(6.68 g/kg)提高了 2.5 倍, 且降解半衰期最高, 为 8.2 年. 说明油菜秸秆炭比水稻和玉米秸秆炭更有利于稳定固存在黄壤中.

秸秆炭的降解半衰期是稳定土壤固碳的重要参考依据. 本研究中秸秆炭降解半衰期随培养时间而波动, 即秸秆炭在培养前期(12 月)降解较快, 后期(24 月和 36 月)趋于恒稳(图 3). 综合以往研究可知: 一是, 微生物参与下的活性有机碳的优先降解增加了培养前期秸秆炭的降解比例. 秸秆炭组分是由绝大部分的非活性有机碳(惰性碳)<sup>[20]</sup>和少部分的活性有机碳<sup>[21]</sup>以及一定量的无机碳组成的<sup>[22]</sup>. 其中, 非活性有机碳具有复杂芳环结构, 碳水化合物相对较少<sup>[23]</sup>, 而活性有机碳作为有机碳的重要组分, 它与固相的有机碳相比具有更多的活性点位<sup>[24]</sup>, 培养前期微生物会选择性地优先降解不稳定的碳水化合物<sup>[25-26]</sup>. 同时也有研究证实, 接种微生物(未经过灭菌处理)时, 不仅生物质炭的降解比例较不接种微生物(灭菌处理)时明显提

高<sup>[27]</sup>,而且还可增加生物质炭培养土壤中 CO<sub>2</sub>的释放量<sup>[17]</sup>.二是,秸秆炭中还含有一定量的以碳酸盐形态存在的无机碳<sup>[22]</sup>.在本研究中供试土壤是 pH 值为 5.96 的酸性黄壤,此酸性环境可促使这部分碳酸盐发生溶解和分解,直接增加了培养前期秸秆炭的表观降解量(图 2).综上所述,秸秆炭组分中的活性有机碳和无机碳的优先降解(分解)是导致培养前期黄壤总碳骤降(图 1)、秸秆炭降解半衰期偏小(表 1)的最主要原因.

本研究尚未建立准确估算秸秆炭降解半衰期的分析模型,且本试验为室内模拟实验,因与室外实际环境条件存在较大差异而使研究结果的说服力有所下降.另外,本研究通过一种有机质匮乏的典型黄壤与秸秆炭混合耗氧培养过程中体系总碳的变化分析了 3 种秸秆炭在黄壤中的降解特征,其降解半衰期随培养时间的延长而波动.因此,后续研究应预先去除秸秆炭中无机碳组分(如采用滴定法<sup>[28]</sup>),避免其在酸性黄壤中因发生溶解和分解而对有机碳降解规律产生影响;同时将室内模拟实验转为田间试验,重点研究其有机碳部分的降解特征及其影响因素,进一步明确秸秆炭在土壤中的降解周期.

## 4 结论

1) 秸秆炭对黄壤的增碳效果取决于投入秸秆炭的纯碳量,即在同一添加量水平下,增碳效果从好到差依次为:玉米秸秆炭、水稻秸秆炭、油菜秸秆炭.

2) 不同秸秆炭在黄壤中的降解周期具有明显差异,油菜、水稻和玉米秸秆炭的降解半衰期分别为 4.9~8.2,3.9~6.0,3.0~5.3 年,平均为 6.2,5.0,4.2 年.说明油菜秸秆炭具有更好的稳定性,更有利于碳封存.

3) 短期内模拟研究秸秆炭在土壤环境中的降解特征,其降解半衰期并非定值,而是随培养时间的延长而延长.因此,需要进一步延长培养时间来确定降解半衰期趋于稳定的时间拐点,推算出更趋向于实际值的降解周期.

## 参考文献:

- [1] 张露,张水清,任科宇,等.不同肥力潮土的酶活计量比特征及其与微生物量的关系[J].中国农业科学,2020,53(20):4226-4236.
- [2] 贵州省统计局国家统计局贵州调查总队.贵州统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,2016-2020.
- [3] 吴文俊.基于土地承载力测度的安徽省市域种养平衡研究[D].合肥:安徽农业大学,2020.
- [4] 吴红艳,于森,冯健,等.利用 GFP 标记研究秸秆还田对假单胞菌 PW9 土壤定殖能力的影响[J].西南农业学报,2021,34(6):1257-1261.
- [5] 侯建伟,邢存芳,卢志宏,等.不同秸秆生物炭对贵州黄壤细菌群落的影响[J].中国农业科学,2018,51(23):4485-4495.
- [6] 邢存芳.作物秸秆炭化还田提高贵州黄壤综合肥力效果[D].内蒙古农业大学,2022.
- [7] ENDERS A, HANLEY K, WHITMAN T, et al. Characterization of Biochars to Evaluate Recalcitrance and Agronomic Performance[J]. Bioresource Technology, 2012, 114: 644-653.
- [8] LAL R. Soil Carbon Sequestration Impacts on Global Climate Change and Food Security[J]. Science, 2004, 304(5677): 1623-1627.
- [9] LEHMANN J. A Handful of Carbon[J]. Nature, 2007, 447(7141): 143-144.
- [10] 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.
- [11] SHI R Y, HONG Z N, LI J Y, et al. Mechanisms for Increasing the pH Buffering Capacity of an Acidic Ultisol by Crop Residue-Derived Biochars[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2017, 65(37): 8111-8119.
- [12] ZHEN M N, CHEN H K, LIU Q L, et al. Combination of Rhamnolipid and Biochar in Assisting Phytoremediation of Petroleum Hydrocarbon Contaminated Soil Using *Spartina Anglica* [J]. Journal of Environmental Sciences, 2019, 85: 107-118.
- [13] 袁帅,赵立欣,孟海波,等.生物炭主要类型、理化性质及其研究展望[J].植物营养与肥料学报,2016,22(5):

1402-1417.

- [14] 侯建伟, 索全义, 段玉, 等. 沙蒿生物质炭在沙土中的降解特征 [J]. 土壤, 2017, 49(5): 963-968.
- [15] 章明奎, 顾国平, 王阳. 生物质炭在土壤中的降解特征 [J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2012, 38(3): 329-335.
- [16] SOHI S P, KRULL E, LOPEZ-CAPEL E, et al. A Review of Biochar and Its Use and Function in Soil [J]. *Advances in Agronomy*, 2010, 105: 47-82.
- [17] ZIMMERMAN A R. Abiotic and Microbial Oxidation of Laboratory-Produced Black Carbon (Biochar) [J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, 44(4): 1295-1301.
- [18] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [19] 张丽琼, 郝明德, 臧逸飞, 等. 长期定位条件下不同轮作系统的土壤肥力数值化综合评价 [J]. 核农学报, 2013, 27(8): 1216-1226.
- [20] GLASER B, LEHMANN J, ZECH W. Ameliorating Physical and Chemical Properties of Highly Weathered Soils in the Tropics with Charcoal—a Review [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2002, 35(4): 219-230.
- [21] 王桂君. 生物炭和有机肥对松嫩平原沙化土壤的改良效应及其机制研究 [D]. 长春: 东北师范大学, 2018.
- [22] 周婷, 周根娣, 和苗苗. 生物炭对土壤重金属吸附机理研究进展 [J]. 杭州师范大学学报(自然科学版), 2018, 17(4): 404-410.
- [23] KALBITZ K, SCHWESIG D, SCHMERWITZ J, et al. Changes in Properties of Soil-Derived Dissolved Organic Matter Induced by Biodegradation [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2003, 35(8): 1129-1142.
- [24] 黄泽春, 陈同斌, 雷梅. 陆地生态系统中水溶性有机质的环境效应 [J]. 生态学报, 2002, 22(2): 259-269.
- [25] 刘叶, 刘文静, 高祥森. 土壤溶解有机碳降解的研究进展 [J]. 山东化工, 2018, 47(15): 64-67, 71.
- [26] MCLAUGHLIN J W, LEWIN J C, REED D D, et al. Soil Factors Related to Dissolved Organic Carbon Concentrations in a Black Spruce Swamp, Michigan [J]. *Soil Science*, 1994, 158(6): 454-464.
- [27] BALDOCK J A, SMERNIK R J. Chemical Composition and Bioavailability of Thermally Altered *Pinus Resinosa* (Red Pine) Wood [J]. *Organic Geochemistry*, 2002, 33(9): 1093-1109.
- [28] 查全智, 卢伟伟, 胡嘉欣. 两种温度制备生物质炭在桦树人工林土壤中的原位稳定性 [J]. 土壤学报, 2022, 59(3): 854-863.

责任编辑 潘春燕