

网络出版时间:2019-10-08 10:45 DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2020.04.012  
网络出版地址:http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20191008.1044.024.html

# 花椒林下土壤微生物数量和酶活性对生物质炭的响应

侯建伟<sup>a</sup>, 邢存芳<sup>b</sup>, 邓晓梅<sup>b</sup>, 陈 芬<sup>a</sup>, 余 高<sup>a</sup>

(铜仁学院 a 农林工程与规划学院, b 人事处, 贵州 铜仁 554300)

【摘 要】【目的】研究不同秸秆生物质炭对土壤微生物数量和酶活性的影响,为土壤改良和秸秆资源的合理利用提供理论参考。【方法】以玉米、水稻和油菜秸秆 500 °C 炭化 6 h 得到的生物质炭为材料,以花椒林下黄壤为供试土壤,通过室内培育试验,以不添加任何生物质炭为对照(CK),测定了不同添加量(1%,2%,4%,均为质量分数)玉米、水稻和油菜秸秆生物质炭处理土壤的微生物(细菌、真菌、放线菌)数量和酶(过氧化氢酶、蔗糖酶、脲酶、中性磷酸酶)活性,并分析了土壤微生物数量与酶活性之间的相关性,计算了不同处理的土壤酶指数(SEI)。【结果】秸秆生物质炭类型和添加量均会影响土壤细菌、真菌和放线菌数量。与对照相比,秸秆生物质炭处理土壤的细菌和放线菌数量分别增加了 42.7%~211.8%和 4.9%~291.7%,真菌数量降低了 15.2%~52.5%。3 种秸秆生物质炭中,当添加量相同时,水稻秸秆生物质炭处理的细菌、真菌和放线菌数量及微生物总量最高。与对照相比,添加生物质炭显著降低了土壤过氧化氢酶活性,显著提高了土壤脲酶、蔗糖酶和中性磷酸酶活性,当添加量为 2%时,水稻秸秆生物质炭的土壤酶指数最大(SEI=0.62),是其他秸秆生物质炭 SEI 的 1.07~1.23 倍。【结论】花椒林下土壤微生物数量与酶活性密切相关,施用生物质炭改善了土壤生物环境。从土壤微生物数量和酶活性指数综合考虑,添加 2%水稻秸秆生物质炭对改善花椒林下土壤生物环境的综合效果最优。

【关键词】酸性土壤;土壤改良;生物质炭;花椒林;土壤微生物;土壤酶活性

【中图分类号】S573<sup>+</sup>.9;S156.2

【文献标志码】A

【文章编号】1671-9387(2020)04-0089-08

## Effect of biochar on soil microbe numbers and enzyme activities in pepper bush

HOU Jianwei<sup>a</sup>, XING Cunfang<sup>b</sup>, DENG Xiaomei<sup>b</sup>, CHEN Fen<sup>a</sup>, YU Gao<sup>a</sup>

(a College of Agroforestry Engineering and Planning, b Personnel Department, Tongren University,  
Tongren, Guizhou 554300, China)

**Abstract:** 【Objective】The effects of different straw biochar types on numbers of microorganisms and activities of enzymes in soil were studied to provide information for soil amelioration and proper management of straw residue. 【Method】Through a laboratory incubation experiment with zonal yellow soil under pepper bush, the influences of corn, rice and rape straw biochar that pyrolyzed at 500 °C for 6 h with addition amounts of 0 (CK), 1%, 2% and 4% on numbers of microorganisms and activities of enzymes were determined. Then, soil enzyme index (SEI) was used to comprehensively evaluate soil enzyme activities. 【Result】All types and amounts of biochar had effects on numbers of soil microorganisms with 42.7%—211.8% and 4.9%—291.7% increase in bacteria and actinomyces and 15.2%—52.5% decrease in fungi compared with control. With same addition amounts, rice straw biochar had the largest amounts of bacteria, fungi, actinomyces and total microorganisms. The activities of urease, sucrase and neutral phosphatase

【收稿日期】2019-03-22

【基金项目】铜仁学院博士科研启动基金项目(trxyDH1702);铜仁学院 2019 年产业扶贫专项资金科研项目(FP201903)

【作者简介】侯建伟(1986—),男,内蒙古通辽人,博士,主要从事土壤肥力与植物营养研究。E-mail:hjw19860627@126.com

【通信作者】邢存芳(1988—),女,内蒙古丰镇人,主要从事土壤肥力与植物营养研究。E-mail:294911662@qq.com

were significantly increased and that of catalase was significantly decreased by biochar. The 2% rice straw biochar treatment had the largest SEI of 0.62, which was 1.07–1.23 times of other treatments. 【Conclusion】 Numbers of microorganisms had close relationship with enzyme activities of soil, and biochar improved soil biological environment. The 2% rice straw biochar was the best among all treatments based on number of microorganisms, enzyme activities and SEI.

**Key words:** acidic soil; soil improvement; biochar; prickly ash; soil microbial quantity; soil enzyme activity

由于不合理施肥及耕作使得黄壤酸化严重,黄壤总面积的 41.2% 为  $\text{pH} < 5.5$  的强酸性黄壤<sup>[1]</sup>。土壤酸化直接导致土壤肥力变差<sup>[2]</sup>,而肥力低下最终导致土壤生物功能下降。目前,以农林废弃物为原料热裂解而成的新型多功能土壤改良剂生物质炭,具有孔隙丰富、比表面积大( $200 \sim 400 \text{ m}^2/\text{g}$ )等特性,可为土壤微生物提供栖息场所,固持土壤养分和水分,有利于土壤微生物的生长繁殖<sup>[3]</sup>。研究表明,土壤细菌、真菌和放线菌可决定土壤微生物总量的分布以及有机物的分解与转化<sup>[4]</sup>;土壤酶来源于土壤微生物,其活性表征着土壤中物质代谢的旺盛程度,是土壤肥力的一个重要指标<sup>[5]</sup>。诸多研究指出,施用生物质炭能够显著影响土壤细菌、真菌、放线菌和革兰氏阴性菌的数量与丰度,以及微生物群落结构组成和土壤酶活性<sup>[6-8]</sup>。周震峰等<sup>[9]</sup>指出,花生壳生物质炭可以显著提高小麦田土壤蔗糖酶和尿酶活性,而对土壤过氧化氢酶活性有先抑制后促进的作用;尚杰等<sup>[10]</sup>研究了不同用量果树树干、枝条生物质炭对土壤酶活性的影响,发现当枝干生物质炭的施用量为  $60 \text{ t}/\text{hm}^2$  时土壤酶指数最大。但是也有研究指出,生物质炭会降低与土壤碳矿化有关的土壤酶活性,而促进与氮、磷等元素利用相关的土

壤酶活性<sup>[11]</sup>。可知,目前研究中关于生物质炭对土壤生物性质影响存在差异,具体机理尚不清楚,只是推断与生物质炭来源、添加量以及土壤类型等多种因素有关。

贵州省土壤类型中 46.4% 为酸性黄壤(面积共  $738.43 \text{ 万 hm}^2$ ),黄壤作为贵州省地带性土壤,其黏重的质地、瘠薄的养分含量和较强的酸性已限制了农业的可持续发展<sup>[12]</sup>。近年来,秸秆废弃物炭化还田改良酸性土壤,一直以来都是备受关注的焦点问题<sup>[13]</sup>。但目前关于不同秸秆生物质炭对花椒林下黄壤微生物数量和酶活性的影响研究较少。本试验研究了不同秸秆生物质炭对花椒林下酸性黄壤微生物数量和酶活性的影响,分析土壤的细菌、真菌、放线菌数量与土壤酶活性之间关系,以期为酸性土壤的改良和秸秆资源的合理利用提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 材 料

供试生物质炭为玉米秸秆生物质炭、水稻秸秆生物质炭和油菜秸秆生物质炭(炭化温度  $500 \text{ }^\circ\text{C}$ ,炭化时间  $6 \text{ h}$ ),由辽宁金和福有限公司生产。不同生物质炭的理化性质见表 1。

表 1 不同生物质炭的理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of different biochar types

| 指标<br>Index                                               | 玉米秸秆生物质炭<br>Corn straw biochar | 水稻秸秆生物质炭<br>Rice straw biochar | 油菜秸秆生物质炭<br>Rape straw biochar |
|-----------------------------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| pH                                                        | 8.23                           | 9.59                           | 9.55                           |
| 比表面积/ $(\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1})$ Surface area     | 160.20                         | 35.80                          | 0.88                           |
| 总孔容积/ $(\text{mL} \cdot \text{g}^{-1})$ Total pore volume | 0.33                           | 0.07                           | 1.69                           |
| 平均孔径/nm Pore diameter                                     | 2.42                           | 30.10                          | 5.85                           |
| 全碳含量/ $(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$ Total C           | 534.50                         | 248.60                         | 521.70                         |
| 全氮含量/ $(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$ Total N           | 10.51                          | 8.92                           | 8.53                           |
| 有效磷含量/ $(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$ Available P      | 3.99                           | 4.34                           | 3.75                           |
| 有效钾含量/ $(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$ Available K      | 15.34                          | 16.07                          | 14.32                          |

供试土壤取自 1 年生花椒林下表层( $0 \sim 20 \text{ cm}$ )。土壤类型为黄壤,地力低下,土壤理化性质为: $\text{pH} 6.11$ ,全氮含量  $0.69 \text{ g}/\text{kg}$ ,有机质含量  $7.35 \text{ g}/\text{kg}$ ,有效磷含量  $4.13 \text{ mg}/\text{kg}$ ,速效钾含量  $30.75$

$\text{mg}/\text{kg}$ 。

### 1.2 试验设计与样品采集

试验于 2018 年 3—8 月在铜仁学院植物培养实验室进行。称取风干供试土壤  $4 \text{ kg}$ ,过孔径  $2 \text{ mm}$

土壤筛,将玉米秸秆生物质炭(BC1)、水稻秸秆生物质炭(BC2)和油菜秸秆生物质炭(BC3),分别按照 1%,2%,4% 的添加量(质量分数)与土壤充分混匀,装入塑料培养盆(直径 20 cm,高 22 cm)中,以不添加任何生物质炭为对照(CK),共计 10 个处理,分别为 CK、BC1-1、BC1-2、BC1-4、BC2-1、BC2-2、BC2-4、BC3-1、BC3-2、BC3-4。将装好盆的每个处理土壤补充蒸馏水,使土壤含水量为田间饱和持水量的 60%,无菌膜封口,保持一定的透气性,培养盆底部中心打直径 1 cm 小孔,置于(25±1) °C 培养箱中进行培养。每处理 3 次重复,每隔 5 d 用称重法补水 1 次。培养 3 个月后,于培养盆半径中点,均匀、分散的选取 3 点,用土钻直通盆底取样(土层厚度 20 cm),将这 3 个点土样混匀,即为该处理的 1 个样品,每份土样均匀分成 2 部分,分别装于经灭菌的土袋,一部分放入低温箱(温度控制在 4 °C)中用于土壤微生物数量的测定,另一部分风干后用于土壤酶活性的测定。

### 1.3 测试项目及方法

1.3.1 土壤微生物数量 细菌、真菌、放线菌数量采用平板涂沫法<sup>[14]</sup>测定。

1.3.2 土壤酶活性 过氧化氢酶活性采用高锰酸钾滴定法<sup>[15]</sup>测定,蔗糖酶活性采用 3,5-二硝基水杨酸比色法<sup>[15]</sup>测定,脲酶活性采用苯酚钠比色法<sup>[15]</sup>测定,中性磷酸酶活性采用苯磷酸二钠法<sup>[16]</sup>测定。

1.3.3 土壤酶指数 为了消除评价指标量纲对土壤酶活性因子荷载的影响,本研究利用王兵等<sup>[17]</sup>提出的土壤酶指数(soil enzymes index,SEI)数值化综合评价土壤酶活性的综合值。SEI 计算公式如下:

$$SEI = \sum_{i=1}^n w_i \times SEI(x_i)。$$

式中: $w_i$  表示土壤酶活性( $i$ )的权重, $SEI(x_i)$  表示土壤酶隶属度值。

$w_i$  的确定有许多方法,本研究利用土壤酶活性之间的相关系数来确定<sup>[18]</sup>,具体计算步骤为:首先,求不同土壤酶活性之间相关系数平均值总和(若相关系数为负值则取绝对值);然后,求某项土壤酶活性与其他土壤酶活性之间相关系数的平均值,并根据该平均值与所有土壤酶活性之间相关系数平均值总和的比值,作为该单项土壤酶活性在表征土壤酶中的贡献,即权重。 $w_i$  计算公式为:

$$w_i = \frac{c_i}{c}。$$

式中: $c_i$  为土壤酶活性( $i$ )与其他土壤酶活性之间相关系数的平均值, $c$  为所有土壤酶活性之间相关系

数平均值总和。

由生物质炭抑制或促进土壤酶活性确定隶属度函数分布是升型还是降型。本研究中土壤过氧化氢酶采用降型分布函数,土壤脲酶、中性磷酸酶和蔗糖酶采用升型分布函数。 $SEI(x_i)$  计算公式为:

$$\text{升型分布函数 } SEI(x_i) = \frac{x_i - x_{i \min}}{x_{i \max} - x_{i \min}},$$

$$\text{降型分布函数 } SEI(x_i) = \frac{x_{i \max} - x_i}{x_{i \max} - x_{i \min}}。$$

式中: $x_i$  表示土壤酶活性, $x_{i \max}$  和  $x_{i \min}$  分别表示该处理中土壤酶活性( $i$ )的最大值和最小值。

### 1.4 数据处理与分析

试验数据经 Excel 2007 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试验数据进行差异显著性检验,在 SAS 9.0 上采用 Pearson 法进行相关性分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同生物质炭对花椒林下土壤微生物数量的影响

由表 2 可知,不同秸秆生物质炭总体上均显著增加了土壤细菌和放线菌数量( $P < 0.05$ ),增幅分别为 42.7%~211.8%,4.9%~291.7%;而显著降低了真菌数量,降幅为 15.2%~52.5%。从同种生物质炭类型的不同添加量来看,土壤细菌和放线菌数量均随着生物质炭添加量的增加而增大,而土壤真菌数量反之;从相同添加量的不同生物质炭类型来看,细菌和放线菌数量均表现为 BC2>BC3>BC1>CK;真菌数量表现为 CK>BC2>BC3>BC1。说明秸秆生物质炭类型和添加量均会影响土壤细菌、真菌和放线菌数量,水稻秸秆生物质炭(BC2)能够最大程度增加土壤细菌、放线菌数量,抑制真菌数量降低。

由方差分析结果(表 2)可知,就细菌数量而言,除 BC1-2、BC1-4、BC2-1、BC3-1 处理间,BC2-2 与 BC2-4 处理间,BC3-2 与 BC3-4 处理间差异未达显著水平外,其他处理间差异均达显著水平( $P < 0.05$ ),说明当生物质炭添加量超过 1%时,生物质炭类型是土壤细菌数量的主控因子。就放线菌数量而言,除 CK、BC1-1、BC3-1 处理间,BC2-2 与 BC3-2 处理间,BC2-4 与 BC3-4 处理间差异未达显著水平外,其他处理间差异均达显著水平( $P < 0.05$ ),说明生物质炭添加量为 1%时不会显著改变土壤放线菌

数量。就真菌数量而言,除 CK 与生物质炭处理间,添加量 4%与 1%、2%生物质炭处理间差异达显著水平( $P<0.05$ )外,其他处理间均未达显著差异水平,说明当生物质炭添加量大于 1%时,土壤的真菌

数量取决于生物质炭的添加量。由以上结果可知,土壤细菌、放线菌和真菌数量对生物质炭类型及添加量的响应具有明显的差异性。

表 2 不同生物质炭处理花椒林下土壤的细菌、真菌和放线菌数量的比较

Table 2 Comparison of numbers of bacteria, fungi and actinomycetes in soil with different biochar types

| 处理<br>Treatment | 细菌 Bacteria                                    |                       | 真菌 Fungi                                       |                       | 放线菌 Actinomycetes                              |                       |
|-----------------|------------------------------------------------|-----------------------|------------------------------------------------|-----------------------|------------------------------------------------|-----------------------|
|                 | 数量/( $\times 10^5\text{ g}^{-1}$ )<br>Quantity | 较 CK 增加/%<br>Increase | 数量/( $\times 10^2\text{ g}^{-1}$ )<br>Quantity | 较 CK 降低/%<br>Decrease | 数量/( $\times 10^4\text{ g}^{-1}$ )<br>Quantity | 较 CK 增加/%<br>Increase |
| CK              | 2.1 $\pm$ 0.3 e                                | —                     | 6.3 $\pm$ 0.7 a                                | —                     | 2.5 $\pm$ 0.3 e                                | —                     |
| BC1-1           | 3.0 $\pm$ 0.2 d                                | 42.7                  | 4.8 $\pm$ 0.5 b                                | 23.6                  | 2.6 $\pm$ 0.3 e                                | 7.9                   |
| BC1-2           | 4.0 $\pm$ 0.5 c                                | 90.0                  | 4.5 $\pm$ 0.2 b                                | 28.7                  | 4.0 $\pm$ 0.5 d                                | 55.9                  |
| BC1-4           | 4.5 $\pm$ 0.3 c                                | 113.3                 | 3.0 $\pm$ 0.4 d                                | 52.5                  | 7.0 $\pm$ 0.8 b                                | 175.6                 |
| BC2-1           | 4.5 $\pm$ 0.6 c                                | 114.2                 | 5.4 $\pm$ 0.6 b                                | 15.2                  | 2.8 $\pm$ 0.4 f                                | 10.2                  |
| BC2-2           | 6.1 $\pm$ 0.8 a                                | 187.7                 | 5.1 $\pm$ 0.3 b                                | 19.8                  | 4.9 $\pm$ 0.4 c                                | 92.1                  |
| BC2-4           | 6.6 $\pm$ 0.4 a                                | 211.8                 | 3.2 $\pm$ 0.4 d                                | 49.1                  | 10.0 $\pm$ 1.2 a                               | 291.7                 |
| BC3-1           | 4.1 $\pm$ 0.3 c                                | 95.3                  | 5.2 $\pm$ 0.5 b                                | 17.3                  | 2.7 $\pm$ 0.3 e                                | 4.7                   |
| BC3-2           | 5.2 $\pm$ 0.5 b                                | 147.4                 | 4.8 $\pm$ 0.5 b                                | 24.6                  | 4.8 $\pm$ 0.2 c                                | 87.8                  |
| BC3-4           | 5.5 $\pm$ 0.6 b                                | 161.6                 | 3.1 $\pm$ 0.2 d                                | 50.7                  | 9.9 $\pm$ 1.0 a                                | 289.4                 |

注:同列数据后标不同小写字母表示不同处理间差异显著( $P<0.05$ )。下表同。

Note: Different lowercase letters indicate significant difference at  $P<0.05$  level. The same below.

2.2 不同生物质炭对花椒林下土壤微生物种群结构的影响

由表 3 可知,添加生物质炭显著增加了土壤微生物总量,是对照( $2.36\times 10^5\text{ g}^{-1}$ )的 1.39~2.79 倍。不同处理的土壤微生物总量由大到小依次为 BC2-4>BC2-2>BC3-4>BC3-2>BC1-4>BC2-1>BC1-2>BC3-1>BC1-1>CK。黄壤中,细菌数量较多,在微生物的群落结构中占绝对优势,占微生物总量的比例为 84.72%~94.04%;放线菌数量次之,占微生物总量的比例为 5.85%~15.23%;真菌数量最少,占微生物总量的比例为 0.04%~0.27%。

表 3 不同生物质炭处理花椒林下土壤细菌、真菌和放线菌数量占微生物总量的比例

Table 3 Ratios of bacteria, fungi and actinomycetes in soil with different biochar types

| 处理<br>Treatment | 微生物总量/( $\times 10^5\text{ g}^{-1}$ )<br>Total number of<br>microorganisms | 占微生物总量的比例/% Percentage |                   |                    |
|-----------------|----------------------------------------------------------------------------|------------------------|-------------------|--------------------|
|                 |                                                                            | 细菌 Bacteria            | 真菌 Fungi          | 放线菌 Actinomycetes  |
| CK              | 2.36 $\pm$ 0.89 g                                                          | 88.97 $\pm$ 9.20 c     | 0.27 $\pm$ 0.03 a | 10.76 $\pm$ 0.93 c |
| BC1-1           | 3.28 $\pm$ 0.43 f                                                          | 91.50 $\pm$ 10.07 b    | 0.15 $\pm$ 0.02 b | 8.36 $\pm$ 1.02 e  |
| BC1-2           | 4.40 $\pm$ 0.25 e                                                          | 90.90 $\pm$ 8.59 b     | 0.10 $\pm$ 0.02 b | 9.00 $\pm$ 0.76 d  |
| BC1-4           | 5.20 $\pm$ 0.64 d                                                          | 86.49 $\pm$ 6.64 d     | 0.06 $\pm$ 0.01 c | 13.45 $\pm$ 0.87 b |
| BC2-1           | 4.79 $\pm$ 0.36 e                                                          | 94.04 $\pm$ 11.03 a    | 0.11 $\pm$ 0.02 b | 5.85 $\pm$ 0.45 h  |
| BC2-2           | 6.59 $\pm$ 0.77 b                                                          | 92.52 $\pm$ 9.87 b     | 0.08 $\pm$ 0.01 c | 7.40 $\pm$ 0.88 f  |
| BC2-4           | 7.60 $\pm$ 0.48 a                                                          | 86.86 $\pm$ 4.51 d     | 0.04 $\pm$ 0.00 d | 13.10 $\pm$ 1.25 b |
| BC3-1           | 4.37 $\pm$ 0.52 e                                                          | 93.80 $\pm$ 8.92 a     | 0.12 $\pm$ 0.02 b | 6.09 $\pm$ 0.74 g  |
| BC3-2           | 5.68 $\pm$ 0.63 c                                                          | 91.52 $\pm$ 13.44 b    | 0.08 $\pm$ 0.01 c | 8.40 $\pm$ 0.65 e  |
| BC3-4           | 6.49 $\pm$ 0.24 b                                                          | 84.72 $\pm$ 5.79 e     | 0.05 $\pm$ 0.00 c | 15.23 $\pm$ 1.36 a |

2.3 不同生物质炭对花椒林下土壤酶活性的影响

由表 4 可知,与对照相比,不同秸秆生物质炭处理的土壤脲酶、蔗糖酶和中性磷酸酶活性分别增加

了 83.6%~214.1%,8.1%~115.0%和 50.0%~175.0%,而土壤过氧化氢酶活性降低了 14.6%~31.7%。不同秸秆生物质炭处理的过氧化氢酶活性

差异不显著,说明土壤过氧化氢酶活性的大小取决于是否添加生物质炭,而与其类型和添加量关系不大。同一种生物质炭中,土壤脲酶活性随着生物质炭添加量的增加而增大;相同添加量下,BC3 处理的土壤脲酶活性最大,BC1 和 BC2 处理的脲酶活性相对较小,且 BC1 与 BC2 处理间无显著差异,但显著低于 BC3 处理。说明添加 4% 油菜秸秆生物质炭(BC3)有利于增加土壤脲酶活性。同一秸秆生物质炭不同添加量处理的土壤蔗糖酶活性从大到小依次

为 2%>1%>4%,其中 BC2-2 处理的土壤蔗糖酶活性最大,为 3.44 mg/(g·d),较 CK 提高了 115.0%。对土壤中性磷酸酶活性而言,当生物质炭添加量相同时,BC3 处理均显著高于 BC1 和 BC2 处理及 CK,其中 BC3-1 处理的土壤中性磷酸酶活性最大,为 0.44 mg/(g·d);此外,无论生物质炭添加量的大小,BC1 和 BC2 处理的土壤中性磷酸酶活性均无显著差异。说明生物质炭类型是影响土壤中性磷酸酶活性的主要因子。

表 4 不同生物质炭处理花椒林下土壤酶活性的比较  
Table 4 Comparison of enzyme activities in soil with different biochar types

| 处理<br>Treatment | 过氧化氢酶活性/<br>(mL·g <sup>-1</sup> ·h <sup>-1</sup> )<br>Catalase activity | 脲酶活性/<br>(mg·g <sup>-1</sup> ·d <sup>-1</sup> )<br>Urease activity | 蔗糖酶活性/<br>(mg·g <sup>-1</sup> ·d <sup>-1</sup> )<br>Sucrase activity | 中性磷酸酶活性/<br>(mg·g <sup>-1</sup> ·d <sup>-1</sup> )<br>Neutral phosphatase activity |
|-----------------|-------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| CK              | 0.41±0.05 a                                                             | 1.28±0.11 g                                                        | 1.60±0.14 g                                                          | 0.16±0.01 d                                                                        |
| BC1-1           | 0.33±0.03 b                                                             | 2.39±0.52 f                                                        | 3.19±0.44 b                                                          | 0.24±0.00 c                                                                        |
| BC1-2           | 0.31±0.04 b                                                             | 2.59±0.26 e                                                        | 3.25±0.38 b                                                          | 0.24±0.01 c                                                                        |
| BC1-4           | 0.30±0.05 b                                                             | 2.64±0.17 d                                                        | 2.67±0.79 c                                                          | 0.24±0.01 c                                                                        |
| BC2-1           | 0.31±0.05 b                                                             | 2.35±0.50 f                                                        | 3.18±0.21 b                                                          | 0.25±0.01 c                                                                        |
| BC2-2           | 0.30±0.06 b                                                             | 2.65±0.44 e                                                        | 3.44±0.57 a                                                          | 0.26±0.00 c                                                                        |
| BC2-4           | 0.28±0.03 b                                                             | 2.79±0.35 d                                                        | 2.25±0.59 d                                                          | 0.25±0.01 c                                                                        |
| BC3-1           | 0.35±0.02 b                                                             | 3.16±0.20 c                                                        | 1.93±0.44 e                                                          | 0.44±0.01 a                                                                        |
| BC3-2           | 0.35±0.06 b                                                             | 3.51±0.41 b                                                        | 2.26±0.30 d                                                          | 0.31±0.00 b                                                                        |
| BC3-4           | 0.33±0.04 b                                                             | 4.02±0.56 a                                                        | 1.73±0.20 f                                                          | 0.31±0.02 b                                                                        |

2.4 不同生物质炭对花椒林下土壤酶指数的影响  
土壤酶指数反映了施用不同生物质炭及添加量后土壤酶活性的综合值。由表 5 可知,土壤过氧化氢酶、脲酶、蔗糖酶和中性磷酸酶的权重系数分别为 0.19,0.32,0.25 和 0.28。由表 6 可知,土壤酶指数由大到小依次为 BC2-2>BC3-1>BC1-2>BC3-4>

BC2-1=BC3-2>BC1-1>BC1-4=BC2-4>CK。说明生物质炭对土壤酶指数的影响与生物质炭类型及添加量有关,添加 2% 水稻秸秆生物质炭(BC2-2)时土壤酶指数最大,是其他秸秆生物质炭的 1.07~1.23 倍,最有利于提高土壤酶活性的整体水平。

表 5 不同生物质炭处理花椒林下土壤酶活性的相关系数及权重系数  
Table 5 Correlation and weight of soil enzyme activities with different biochar types

| 指标 Item                             | 过氧化氢酶<br>Catalase | 脲酶<br>Urease | 蔗糖酶<br>Sucrase | 中性磷酸酶<br>Neutral phosphatase |
|-------------------------------------|-------------------|--------------|----------------|------------------------------|
| 过氧化氢酶 Catalase                      | 1.00              |              |                |                              |
| 脲酶 Urease                           | 0.31              | 1.00         |                |                              |
| 蔗糖酶 Sucrase                         | 0.33              | 0.53         | 1.00           |                              |
| 中性磷酸酶 Neutral phosphatase           | 0.26              | 0.72         | 0.37           | 1.00                         |
| 相关系数均值 Average of correlation index | 0.30              | 0.52         | 0.41           | 0.45                         |
| 权重系数 Weight index(w <sub>i</sub> )  | 0.19              | 0.32         | 0.25           | 0.28                         |

由表 6 可知,同一种生物质炭中,当添加量为 0~4% 时,随着生物质炭添加量的增加,SEI 总体上均呈先增加后减少的趋势,玉米、水稻秸秆生物质炭处理的 SEI 均在添加量为 2% 时达最大值,分别为 0.56 和 0.62;而油菜秸秆生物质炭处理的 SEI 在添加量为 1% 时达最大值,为 0.58。方差分析可知,同种生物质炭,除 BC1-1 与 BC1-4 间、BC2-1 与 BC2-4 间和 BC3-2 与 BC3-4 间的 SEI 均未达显著差异水平外,其他同种生物质炭的不同添加量间差异

均达显著水平( $P<0.05$ )。说明与 CK 相比,添加生物质炭能够显著提高 SEI,当添加量超过一定值时,反而会降低土壤酶指数。

2.5 花椒林下土壤酶活性与微生物数量的相关性  
对土壤中主要的 4 种酶活性和 3 大类土壤微生物数量进行相关性分析,结果(表 7)表明,土壤脲酶与微生物总量、蔗糖酶呈显著正相关( $P<0.05$ ),与土壤放线菌、中性磷酸酶呈极显著正相关( $P<0.01$ ),与真菌、细菌呈显著负相关( $P<0.05$ )。土

壤蔗糖酶与细菌呈显著正相关( $r=0.462, P<0.05$ )。土壤细菌与微生物总量和放线菌呈显著或极显著正相关( $P<0.01$ )。土壤真菌与放线菌和微生物总量呈显著或极显著正相关( $P<0.01$ )。土壤放线菌与微生物总量呈极显著正相关( $P<0.01$ )。

表 6 不同生物质炭处理花椒林下土壤酶活性的隶属度值和土壤酶指数

Table 6 Membership values and soil enzyme indexes with different biochar types

| 处理<br>Treatment | 隶属度值( $SEI(x_i)$ )Membership values |              |                |                              | 土壤酶指数(SEI)<br>Soil enzyme index | 土壤酶指数排序<br>Rank |
|-----------------|-------------------------------------|--------------|----------------|------------------------------|---------------------------------|-----------------|
|                 | 过氧化氢酶<br>Catalase                   | 脲酶<br>Urease | 蔗糖酶<br>Sucrase | 中性磷酸酶<br>Neutral phosphatase |                                 |                 |
| CK              | 0.12                                | 0.02         | 0.01           | 0.03                         | 0.04 c                          | 8               |
| BC1-1           | 0.59                                | 0.37         | 0.82           | 0.30                         | 0.51 b                          | 6               |
| BC1-2           | 0.71                                | 0.43         | 0.85           | 0.30                         | 0.56 a                          | 3               |
| BC1-4           | 0.76                                | 0.44         | 0.55           | 0.30                         | 0.50 b                          | 7               |
| BC2-1           | 0.71                                | 0.35         | 0.81           | 0.33                         | 0.54 b                          | 5               |
| BC2-2           | 0.76                                | 0.45         | 0.94           | 0.37                         | 0.62 a                          | 1               |
| BC2-4           | 0.88                                | 0.49         | 0.34           | 0.33                         | 0.50 b                          | 7               |
| BC3-1           | 0.47                                | 0.60         | 0.18           | 0.97                         | 0.58 a                          | 2               |
| BC3-2           | 0.47                                | 0.71         | 0.34           | 0.53                         | 0.54 b                          | 5               |
| BC3-4           | 0.59                                | 0.87         | 0.07           | 0.53                         | 0.55 b                          | 4               |

表 7 花椒林下土壤酶活性与微生物数量之间的相关性

Table 7 Pearson correlation between soil enzyme activity and number of microorganisms with different biochar types

| 指标<br>Item                              | 微生物总量<br>Total number of<br>microorganisms | 放线菌<br>Actinomycetes | 真菌<br>Fungi | 细菌<br>Bacteria | 中性磷酸酶<br>Neutral<br>phosphatase | 蔗糖酶<br>Sucrase | 脲酶<br>Urease | 过氧化氢酶<br>Catalase |
|-----------------------------------------|--------------------------------------------|----------------------|-------------|----------------|---------------------------------|----------------|--------------|-------------------|
| 过氧化氢酶 Catalase                          | -0.251                                     | -0.179               | 0.363       | -0.115         | 0.260                           | 0.330          | 0.310        | 1.000             |
| 脲酶 Urease                               | 0.539 *                                    | 0.682 * *            | -0.556 *    | -0.466 *       | 0.720 * *                       | 0.530 *        | 1.000        |                   |
| 蔗糖酶 Sucrase                             | 0.025                                      | -0.318               | -0.193      | 0.462 *        | 0.370                           | 1.000          |              |                   |
| 中性磷酸酶<br>Neutral phosphatase            | 0.233                                      | 0.069                | -0.283      | 0.141          | 1.000                           |                |              |                   |
| 细菌 Bacteria                             | 0.635 *                                    | 0.859 * *            | 0.269       | 1.000          |                                 |                |              |                   |
| 真菌 Fungi                                | 0.879 * *                                  | 0.679 *              | 1.000       |                |                                 |                |              |                   |
| 放线菌 Actinomycetes                       | 0.733 * *                                  | 1.000                |             |                |                                 |                |              |                   |
| 微生物总量<br>Total number of microorganisms | 1.000                                      |                      |             |                |                                 |                |              |                   |

注: \* 为显著相关( $P<0.05$ ), \* \* 为极显著相关( $P<0.01$ )。  
Note: \* means correlation is significant at the  $P<0.05$  level, and \* \* means correlation is very significant at the  $P<0.01$  level.

3 讨论

3.1 生物质炭对土壤微生物数量的影响

本研究中,生物质炭增加了土壤细菌和放线菌数量,这与以往研究结果一致<sup>[19-20]</sup>。Prayogo 等<sup>[19]</sup>和胡瑞文等<sup>[20]</sup>的研究结果表明,生物质炭能够增加酸性土壤的细菌、真菌和放线菌数量。众所周知,土壤微生物生长需要碳源,本研究所用生物质炭全碳含量为 248.60~534.50 g/kg,但是以往文献报道生物质炭多为非活性有机碳<sup>[21-22]</sup>,性质相对稳定,很难降解,因此生物质炭并不是微生物容易利用的基质。有研究表明,生物质炭具有发达的孔隙和巨大的比表面积,有利于水肥保持与吸附,为微生物的生长提供了更多的 C 源和可利用组分<sup>[22]</sup>。此外,生存在生物质炭孔隙中的土壤微生物,生物质炭不仅是其生存温床,而且对其还有物理的保护作用,进而促进了

土壤微生物量的增加<sup>[23]</sup>。本研究所用生物质炭孔隙丰富,比表面积高达 0.88~160.20 m<sup>2</sup>/g。因此,本研究中土壤细菌和放线菌数量的提高可能更多是得益于良好的生物质炭结构和改善的土壤内环境。土壤微生物的生长繁殖与 pH 值息息相关,如细菌喜中性和微碱性环境,放线菌喜微碱性和碱性环境,真菌喜酸性环境<sup>[24]</sup>。本研究中,施用生物质炭显著降低了土壤的真菌数量,这可能与添加生物质炭改变了酸性黄壤(供试土壤 pH 6.11)的 pH 有关。张旭辉等<sup>[25]</sup>通过 180 d 温室油菜盆栽试验表明,添加 0.8%~4.0% 的稻壳生物质炭后,黄壤和紫色土的 pH 分别提高了 1.0~1.6 和 0.5~1.0。本研究所用生物质炭显碱性(pH 8.23~9.59),其可能也提高了供试土壤 pH。因此,施用生物质炭改变的黄壤 pH 可能抑制了真菌的生长,从而使真菌数量降低。

此外,pH 还是影响花椒生长的重要因素之一,过酸或过碱的土壤环境都不利于其生长。当土壤 pH 值为 6.5~8.0 时,花椒生长发育都比较正常;当土壤 pH 值为 7.0~7.5 时,最适宜花椒的生长<sup>[26]</sup>。而本研究中使用的生物质炭为碱性材料(pH 8.23~9.59),当其添加到酸性土壤后可能提高了土壤 pH,从而促进了花椒生长。

### 3.2 生物质炭对土壤酶活性的影响

土壤酶来源于土壤微生物、植物和动物的活体或残体,通过催化土壤中的生化反应发挥重要作用<sup>[25]</sup>。黄剑<sup>[27]</sup>进行的为期 4 年的定位试验结果表明,小麦秸秆生物质炭能够大幅度提高砂姜黑土的脲酶、中性磷酸酶和转化酶活性。Jin<sup>[28]</sup>指出,生活垃圾生物质炭可以增加土壤中性磷酸酶活性;Jones 等<sup>[29]</sup>连续 3 年试验证明,施入 50 t/hm<sup>2</sup> 的淤泥生物质炭显著提高了农田反硝化酶活性。张旭辉等<sup>[25]</sup>发现,在黄壤和紫色土中添加不同比例生物质炭,黄壤蔗糖酶活性下降,紫色土蔗糖酶活性升高。本研究结果表明,将 1%~4% 的生物质炭施入黄壤后,土壤脲酶、蔗糖酶和中性磷酸酶活性平均分别提高 126.6%,66.0% 和 76.4%,而过氧化氢酶活性平均降低了 22.5%,这与前人的研究结果<sup>[30-31]</sup>不一致。冯爱青等<sup>[30]</sup>研究表明,添加 0.5% 小麦秸秆生物质炭对土壤过氧化氢酶活性没有显著影响;而李治玲<sup>[31]</sup>发现,施用稻壳生物质炭的黄壤和紫色土过氧化氢酶活性在培养 30~60 d 时无显著变化,在培养 180 d 后过氧化氢酶活性显著增加,且当稻壳生物质炭添加量达 4% 时过氧化氢酶活性最高。说明施用生物质炭可以改变土壤酶活性,但生物质炭对土壤过氧化氢酶活性的影响不仅与生物质炭来源和添加量有关,还与土壤类型及培养时间关系密切。本研究中,1%~2% 生物质炭处理 SEI 较大,4% 生物质炭处理 SEI 较低,但均显著高于对照,说明生物质炭用量不宜过高。因此,在后续研究中应该在 1%~4% 的生物质炭添加量范围内继续设置、细化生物质炭施用梯度,找出 SEI 峰值,最大化地提高土壤酶综合活性。

## 4 结 论

生物质炭类型及添加量明显影响了土壤微生物数量和酶活性,玉米、水稻和油菜秸秆生物质炭均显著提高了土壤细菌、放线菌数量和脲酶、蔗糖酶、中性磷酸酶活性,而降低了真菌数量和过氧化氢酶活性。

土壤微生物数量与酶活性密切相关,共同作用改善了土壤生物性质。水稻秸秆生物质炭能够最大限度地提高土壤细菌和放线菌数量,抑制真菌数量降低;当添加量为 2% 时,水稻秸秆生物质炭的土壤酶指数最高。综合考虑,2% 水稻秸秆生物质炭对改善土壤生物环境的综合效果最优。

### [参考文献]

- [1] 张文安,徐大地,肖厚军.磷石膏改良贵州黄壤及其应用前景[J].贵州农业科学,2002,30(2):61-63.  
Zhang W A,Xu D D,Xiao H J. Yellow soil improvement by using phosphorous gypsum and its prospects [J]. Guizhou Agricultural Sciences,2002,30(2):61-63.
- [2] 曾希柏.红壤酸化及其防治[J].土壤通报,2000,31(3):111-113.  
Zeng X B. Red soil acidification and its prevention and cure [J]. Chinese Journal of Soil Science,2000,31(3):111-113.
- [3] Tryon E H. Effect of charcoal on certain physic,chemical, and biological properties of forest soils [J]. Ecological Monographs,1998,18(3):81-115.
- [4] Zimmerman A R. Abiotic and microbial oxidation of laboratory-produced black carbon (biochar) [J]. Environmental Science & Technology,2010,44(5):1295-1301.
- [5] Lehmann J,Rillig M C,Thies J,et al. Biochar effects on soil biota:a review [J]. Soil Biology & Biochemistry,2011,43(9):1812-1836.
- [6] Woolf D,Amonette J E,Street-perrott F A,et al. Sustainable biochar to mitigate global climate change [J]. Nature Communications,2010,1(2):56-63.
- [7] Steinbeiss S S,Gleixner G,Antonietti M. Effect of biochar amendment on soil carbon balance and soil microbial activity [J]. Soil Biology and Biochemistry,2009,41(6):1301-1310.
- [8] Kolb S E,Fermanich K J,Dornbush M E,et al. Effect of charcoal quantity on microbial biomass and activity in temperate soils [J]. Soil Science Society of America Journal,2009,73(4):1173-1181.
- [9] 周震峰,王建超,饶潇潇,等.添加生物质炭对土壤酶活性的影响[J].江西农业学报,2015,27(6):110-112.  
Zhou Z F,Wang J C,Rao X X,et al. Impact of adding biochar on enzyme activity in soil [J]. Acta Agriculturae Jiangxi,2015,27(6):110-112.
- [10] 尚杰,耿增超,王月玲,等.施用生物质炭对土壤微生物量碳、氮及酶活性的影响[J].中国农业科学,2016,49(6):1142-1151.  
Shang J,Geng Z C,Wang Y L,et al. Effect of biochar amendment on soil microbial biomass carbon and nitrogen and enzyme activity in tier soils [J]. Scientia Agricultura Sinica,2016,49(6):1142-1151.
- [11] 郭文,熊康宁,张锦华,等.饲用灌木资源开发利用研究现状及其对贵州石漠化地区的启示[J].中国农业科技导报,2017,19(7):108-116.

- Guo W, Xiong K N, Zhang J H, et al. Research status of forage shrub resources utilization and enlightenment for rocky desertification area in Guizhou province [J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2017, 19(7): 108-116.
- [12] 张雅蓉, 李 渝, 蒋太明, 等. 贵州主要农作物秸秆资源分布及综合利用现状 [J]. 贵州农业科学, 2015, 43(8): 262-267.
- Zhang Y R, Li Y, Jiang T M, et al. Distribution and comprehensive utilization of straw resources of main crops in Guizhou [J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2015, 43(8): 262-267.
- [13] 张伟明. 生物炭的理化性质及其在作物生产上的应用 [D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2012.
- Zhang W M. Physical and chemical properties of biochar and its application in crop production [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2012.
- [14] 许光辉, 郑洪元. 土壤微生物分析方法手册 [M]. 上海: 上海科技出版社, 1986: 226-228.
- Xu G H, Zheng H Y. Soil microbial analysis method of manual [M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1986: 226-228.
- [15] 关松荫. 土壤酶及其研究法 [M]. 北京: 农业出版社, 1986: 3-25.
- Guan S Y. Soil enzyme and its study method [M]. Beijing: Agricultural Press, 1986: 3-25.
- [16] 赵兰坡, 姜 岩. 土壤中磷酸酶测定方法的探讨 [J]. 土壤通报, 1986, 17(3): 138-141.
- Zhao L P, Jiang Y. Discussion of determination method of soil neutral phosphatase [J]. Journal of Soil Bulletin, 1986, 17(3): 138-141.
- [17] 王 兵, 刘国彬, 薛 蕙, 等. 黄土丘陵区撂荒对土壤酶活性的影响 [J]. 草地学报, 2009, 17(3): 282-287.
- Wang B, Liu G B, Xue J, et al. Effect of farmland abandonment on soil enzyme activities in loess hilly region [J]. Acta Agrestia Sinica, 2009, 17(3): 282-287.
- [18] 曹承绵, 严长生, 张志明, 等. 关于土壤肥力数值化综合评价的探讨 [J]. 土壤通报, 1983(4): 13-15.
- Cao C M, Yan C S, Zhang Z M, et al. Study of soil fertility numerical value comprehensive evaluation [J]. Chinese Journal of Soil Science, 1983(4): 13-15.
- [19] Prayogo C, Jones J E, Baeyens J, et al. Impact of biochar on mineralisation of C and N from soil and willow litter and its relationship with microbial community biomass and structure [J]. Biology and Fertility of Soils, 2014, 50: 695-702.
- [20] 胡瑞文, 刘勇军, 周清明, 等. 生物炭对烤烟根际土壤微生物群落碳代谢的影响 [J]. 中国农业科技导报, 2018, 20(9): 49-56.
- Hu R W, Liu Y J, Zhou Q M, et al. Effects of bio-carbon on the carbon metabolism of rhizosphere soil microbial communities in flue-cured tobacco [J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2018, 20(9): 49-56.
- [21] 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.
- Hou J W, Suo Q Y, Duan Y, et al. Degradation characteristics of artemisia ordosica biochar in sandy soil [J]. Soils, 2017, 49(5): 963-968.
- [22] Lehmann J, Pereira D, Sliva J, et al. Nutrient availability and leaching in an archaeological anthrosol and a ferralsol central amazonia: fertilizer, and charcoal amendments [J]. Plant and Soil, 2003, 249(2): 343-357.
- [23] Farrell M, Kuhn T K, Macdonald L M, et al. Microbial utilisation of biochar-derived carbon [J]. Science of the Total Environment, 2013, 465: 288-297.
- [24] 景宇鹏, 李跃进, 年佳乐, 等. 土默川平原不同盐渍化程度土壤微生物生态特征研究 [J]. 生态环境学报, 2013, 22(7): 1153-1159.
- Jing Y P, Li Y J, Nian J L, et al. Study on ecological characteristics of microbes under different soil salinization degrees in Tumochuan plain [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2013, 22(7): 1153-1159.
- [25] 张旭辉, 李治玲, 李 勇, 等. 施用生物质炭对西南地区紫色土和黄壤的作用效果 [J]. 草业学报, 2017, 26(4): 63-72.
- Zhang X H, Li Z L, Li Y, et al. Effect of biochar amendment on purple and yellow soil [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2017, 26(4): 63-72.
- [26] 狄彩霞, 王正银. 影响花椒产量和品质的因素 [J]. 中国农学通报, 2004(3): 179-181, 189.
- Di C X, Wang Z Y. Factors affecting the yield and quality of Chinese prickly ash [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2004(3): 179-181, 189.
- [27] 黄 剑. 生物质炭对土壤微生物量及土壤酶的影响研究 [D]. 北京: 中国农业科学院, 2012.
- Huang J. The effect of biochar application on soil microbial biomass and soil enzymes [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences Dissertation, 2012.
- [28] Jin H. Characterization of microbial life colonizing biochar and biochar amended soils [D]. Ithaca, NY: Cornell University, 2010.
- [29] Jones D L, Rousk J, Edwards-jones G, et al. Biochar-mediated changes in soil quality and plant growth in a three years field trial [J]. Soil Biol and Biochem, 2012, 45(2): 113-124.
- [30] 冯爱青, 张 民, 路艳艳, 等. 控释氮用量及生物质炭对玉米产量及土壤生物化学性质的影响 [J]. 水土保持学报, 2014, 28(2): 159-164.
- Feng A Q, Zhang M, Lu Y Y, et al. Effects of controlled release nitrogen application rate and biochar on maize yield and soil bio-chemical properties [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2014, 28(2): 159-164.
- [31] 李治玲. 生物质炭对紫色土和黄壤养分、微生物及酶活性的影响 [D]. 重庆: 西南大学, 2016.
- Li Z L. Effect of biochar on nutrient content, soil microorganism and soil enzyme activities in purple soil and yellow soil [D]. Chongqing, Southwest University, 2016.