

# 两种椴木根际土壤碳特征及酶活性

张宝成<sup>1,2</sup>, 杨春秀<sup>3</sup>, 王静<sup>4</sup>

(1 遵义师范学院生物与农业科技学院, 贵州 遵义 563000; 2 遵义师范学院山地生态研究所, 贵州 遵义 563000;  
3 贵州师范大学 生命科学学院, 贵阳 550000; 4 江西农业大学 农学院, 南昌 330045)

**摘要:**为了研究经济作物对土壤根际土壤有机碳的影响,以喀斯特 2 种不同类型的椴木为对象研究了椴木对根际土壤碳、微生物碳和酶活性。结果表明:(1) 椴木类型影响到根际土壤有机碳含量,与对照组相比小叶型椴木根际土壤有机碳含量最高,其次是大叶型椴木;(2) 椴木类型影响到根际土壤脲酶、蔗糖酶和过氧化物酶活性。小叶型椴木根际土壤脲酶、蔗糖酶和过氧化物酶活性高于大叶型椴木根际土壤酶活性;(3) 小叶型椴木根际土壤微生物呼吸最大,其次是大叶型椴木,对照组最低;(4) 土壤微生物呼吸与土壤脲酶和细菌数量显著相关,相关系数分别为 0.65,0.61;土壤微生物呼吸随着土壤无机碳含量的增加呈负相关关系,相关系数为-0.67;土壤有机碳含量与微生物呼吸呈现边缘显著( $p=0.06$ )。由上可知,不同类型椴木影响到土壤根际碳含量。因此,今后在品种选育中可以把根际土壤碳增收作为参考指标,为低碳农业的发展提供科学依据。

**关键词:**土壤酶活性; 活性有机碳; 微生物呼吸; 微生物

中图分类号:S718.5

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2021)03-0083-05

## Characteristics of Carbon and Enzyme Activity of Rhizosphere Soil of Two *Aralia Arborescens*

ZHANG Baocheng<sup>1,2</sup>, YANG Chunxiu<sup>3</sup>, WANG Jing<sup>4</sup>

(1.School of Biology & Agricultural Science and Technology, Zunyi Normal College, Zunyi 563000, China; 2.Institute of Mountain Ecology, Zunyi Normal College, Zunyi, Guizhou 563000, China; 3.College of Life Sciences, Guizhou Normal University, Guiyang 550000, China; 4.Agricultural College of Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China)

**Abstract:** In order to study the effects of cash crops on soil organic carbon in rhizosphere, two different types of alder were used to study their effects on soil carbon of rhizosphere. The results show that: (1) different types of *Aralia* affect the content of soil organic carbon in the rhizosphere; soil organic carbon in rhizosphere of Small-leaf type of alder was the highest, followed by big leaf, it is the lowest the control group; (2) the type of alder affects the activities of urease, sucrase and peroxidase in the rhizosphere, activities of enzymes in the rhizosphere of the small leaf type of alder are higher than those in the large leaf type of alder; (3) the highest microbial respiration was found in soils of small-leaf alder, followed by large leaf alder, the microbial respiration of the control was the lowest; (4) soil microbial respiration is significantly related to soil urease and bacterial counts, and the correlation coefficients are 0.65 and 0.61, respectively; soil inorganic carbon content showed negative relation to soil microbial respiration, the correlation coefficient is  $-0.67$ ; soil organic carbon content and microbial respiration presented marginal significance ( $p=0.06$ ). These results indicate that the increase of soil carbon income in rhizosphere can be taken as a reference index in the future breeding, which can provide the scientific basis for the development of low-carbon agriculture.

**Keywords:** soil enzyme activity; labile organic carbon; microbial respiration; microorganism

国内外学者近百年来,针对不同生态系统的土壤水解酶活性开展了大量的研究<sup>[1]</sup>。发现植被类型等通过土壤酶影响到土壤可利用养分<sup>[2-4]</sup>。如水解酶可

催化土壤中的大分子和其他难利用物质转化为植物、微生物可利用的营养物质<sup>[5-6]</sup>。目前关于土壤酶主要集中在农业管理措施对其的影响,如茶园管理措施改

收稿日期:2020-01-04

修回日期:2020-07-08

资助项目:国家自然科学基金(31660106);遵义师范学院博士启动基金(遵师 BS[2014]06,BS[2014]07 号);贵州省科技厅合作项目[黔科合 LH 字(2017)7063];贵州省科技厅项目(黔科合支撑[2018]2364)

第一作者:张宝成(1978—),男,陕西南郑人,博士,副教授,主要从事生态功能及资源生态方面的研究。E-mail:bczhang@fudan.edu.cn

变了酶活性、土壤氮、碳及磷的利用态,影响茶树养分供给<sup>[7]</sup>。不同种植年龄樟子松林改变了土壤酶活性影响到土壤营养碱解氮和速效钾<sup>[8]</sup>,以及化学农药和不同农作物影响到土壤酶活性<sup>[9-10]</sup>。

喀斯特区域占我国陆地总面积约 13.5%,该区域生态脆弱,制约了当地经济的发展。喀斯特区域土壤瘠薄<sup>[11]</sup>,生态脆弱易受外界干扰。土壤有机碳和土壤酶活性是土壤重要的组分,这影响土壤营养<sup>[12]</sup>。由于土壤中的酶主要来自动植物和微生物,在物质循环和能量流动中起重要作用<sup>[13-14]</sup>。如酶把土壤有机碳分解转化小分子物质,经微生物作用转化为 CO<sub>2</sub> 促进温室效应,同时有机碳分解产生的 CO<sub>2</sub> 参与土壤化学反应,转化酶为无机碳态储存于土壤,因此土壤无机碳是喀斯特土壤碳库的要组成部分之一。

目前农业碳的研究主要集中在主产粮食作物中,对经济作物的研究较少。经济作物在我国农业占有较大比例,但是缺乏喀斯特区经济作物根际土壤碳和酶的研究。种植多年生经济植物椴木,减少土壤翻耕,农业耕作与常规农作物耕作模式不同,这对土壤碳的影响与常规农作物不同。椴木是当地重要的乡土植物在生态保护方面具有重要的作用。另外,椴木作为当地山野菜,经济价值高,其嫩芽可治气滞、食欲不振和抑制各种细菌的侵袭<sup>[15]</sup>。因此,本文研究大叶型椴木和小叶型椴木两种类型根际土壤的酶活性、有机碳、活性有机碳和无机碳进行研究。这为喀斯特山区农业碳吸收提供基础数据,为今后区域生态补偿提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料采集与处理

研究区为遵义市汇川区泗渡镇的椴木种植基地(东经 106.962°,北纬 27.919°)。遵义地处中亚热带气候区,年均气温 13~18℃。通常 4 月中旬进入雨季,雨季结束,8 月进入高温少雨时期<sup>[6]</sup>。样品采集基地大叶型椴木和小叶型椴木(根据叶形态初步命名,相续送外做分子鉴定)根际土壤和对照土壤根系土壤(对照为接邻荒芜区域草本植物根际土壤),分别重复 4 次。除去表面的枯枝落叶,轻轻挖取椴木根系,抖落根际土壤放入清洁的塑料袋中,之后分别标记好每份土壤。把采集的新鲜土壤立刻带回实验室,部分用于测定土壤微生物呼吸强度。其余样品放置在室内自然风干、磨细、过 100 目的土壤筛,装入密封袋中,避光保存。用于测定土壤活性有机碳、有机碳、活性无机碳、无机碳以及土壤酶活性。

### 1.2 试验方法

1.2.1 土壤呼吸强度测定 采用 NaOH 吸收滴定

法,密封培养分别于 24 h,48 h,72 h 和 96 h 后,测定其 CO<sub>2</sub> 排放量<sup>[10]</sup>。

1.2.2 酶活性测定 土壤微生物群落采用平板梯度法<sup>[16]</sup>。测定蔗糖酶和纤维素酶用 3,5-二硝基水杨酸比色法测定、苯酚钠一次氯酸钠比色法测定脲酶、用 0.1 mol·L<sup>-1</sup>高锰酸钾滴定法测定过氧化氢酶、邻苯三酚比色法过氧化物酶活性采用比色法<sup>[[9-10,17-18]]</sup>。

1.2.3 土壤中碳含量的测定 活性有机碳采用高锰酸钾氧化法,高锰酸钾浓度分别为 0.033 mol/L,0.167 mol/L,0.333 mol/L,分别为活性有机碳、中活性有机碳、稳定性有机碳<sup>[19]</sup>。土壤无机碳测定采用酸碱滴定法,重铬酸钾容量法测定根际土壤有机碳。

### 1.3 数据分析

用 Microsoft Excel 2010 处理后用 SPSS 17.0 分析,作图用 Origin 10 软件。

## 2 结果

### 2.1 不同型椴木根际土壤种酶活性差异

大叶型椴木和小叶型椴木根际土壤蔗糖酶活性差异显著( $p < 0.05$ )。小叶型椴木根际土壤蔗糖酶活性最大,其次是对照,大叶型椴木根际土壤酶活性最小;大叶型椴木根际土壤蔗糖酶活性比对照降低 20%,小叶型椴木根际土壤蔗糖酶活性比对照增加 10%。土壤脲酶的变化趋势也与蔗糖酶活性呈类似趋势,在研究组间差异显著( $p < 0.001$ );大叶型椴木根际土壤脲酶比对照组降低 8.35%,小叶型椴木根际土壤脲酶活性比对照增加 121.30%(图 1)。

土壤纤维素酶活性在对照土壤和 2 种不同类型椴木根际土壤间差异不显著( $p > 0.05$ ),2 种椴木根际土壤纤维素酶活性比对照组降低幅度在 11.93%~14.24%。过氧化氢酶活性在小叶型椴木根际土壤活性最高,其次是对照组和大叶型椴木。大叶型椴木根际土壤的过氧化氢酶活性比对照组降低 14.67%,小叶型椴木比对照增加 6.67%。过氧化物酶活性在 2 种椴木根际土壤活性比对照都低,大叶型椴木比对照降低 65.10%,小叶型椴木比对照降低 27.47%。

### 2.2 不同类型椴木根际土壤碳含量

与对照组相比,根际土壤活性有机碳、中活性有机碳和稳定性有机碳在 2 种不同椴木间的含量均呈增加趋势(图 2)。活性有机碳在研究组间差异显著( $p < 0.01$ ),大叶型椴木活性有机碳比对照增加 8 倍,小叶型椴木土壤活性有机碳比对照增加 5.16 倍。中活性有机碳研究组间差异不显著( $p > 0.05$ ),但是椴木组的根际土壤中活性有机碳含量高于对照组;大叶

型桉木比对照组增加 6.69%，小叶型桉木比对照组增加 2.33%。稳定性有机碳含量在研究组间差异显著 ( $p < 0.01$ )，2 种桉木的稳定性有机碳比对照高，大叶型桉木根际稳定性有机碳增加 21.86%，小叶型桉木根际稳定性有机碳比对照增加 9.78%。

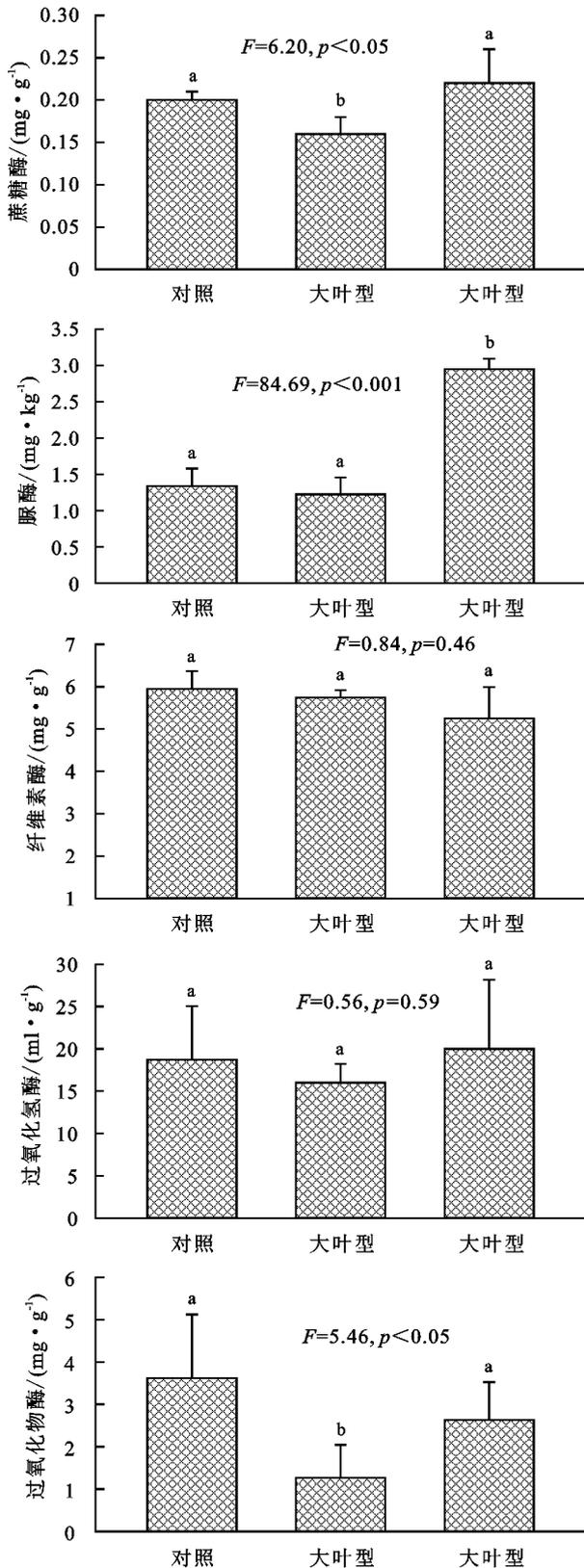


图 1 不同桉木型根际土壤酶活性及无机碳变化

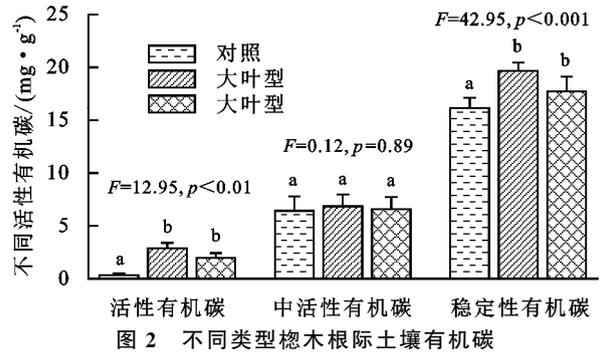


图 2 不同类型桉木根际土壤有机碳

小叶型桉木根际土壤细菌、真菌和放线菌数均最高，其次是大叶型桉木，对照组的最低。细菌数量在 3 组间为边缘显著 ( $p = 0.07$ )，2 种桉木根系土壤细菌与对照相比呈增加趋势，大叶型桉木比对照增加 70.76%，小叶型桉木根际土壤细菌增加 121.01%。小叶型桉木根际土壤真菌数量也比对照大，大叶型桉木根际土壤真菌数量比对照组增加 34.88%，小叶型桉木根际土壤真菌比对照组增加 115.70%。放线菌数量在这 3 组中差异显著 ( $p < 0.05$ )，大叶型桉木根际土壤放线菌数比对照组增加 122.10%，小叶型桉木根际土壤放线菌比对照降低 21.78% (图 3)。

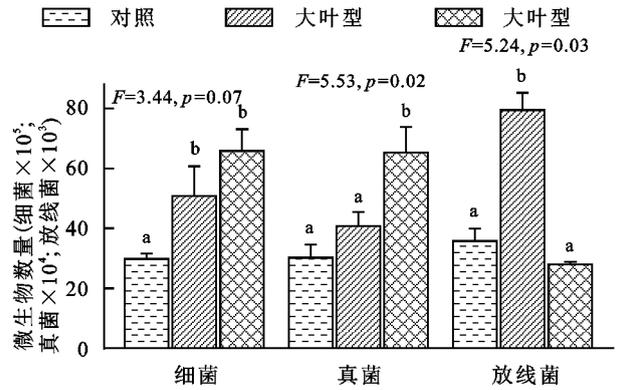


图 3 不同微生物数量关系

### 2.3 土壤微生物呼吸相关性

由相关性表可知 (表 1)，影响土壤微生物呼吸的因子是土壤脲酶活性和细菌数 ( $p < 0.05$ )，相关系数分别为 0.65, 0.61；土壤微生物呼吸随着土壤无机碳含量的增加呈负相关关系 ( $p < 0.05$ )，相关系数为 -0.67；土壤有机碳含量与微生物呼吸呈现边缘显著 ( $p = 0.06$ )。土壤有机碳随土壤脲酶活性的增加而增加 ( $p < 0.05$ )，相关系数为 0.80。土壤脲酶活性除与土壤微生物呼吸和土壤有机碳含量呈现显著正相关关系 ( $p < 0.05$ )。细菌数量显著影响到土壤微生物呼吸，相关系数为 0.61，与土壤无机碳呈显著负相关，系数为 -0.76 ( $p < 0.05$ )。

土壤微生物呼吸随着时间的延长而增加 (图 4)，在 24 h, 48 h, 72 h 时，对照组、小叶型桉木和大叶型

椴木间土壤微生物呼吸差异均不显著( $p > 0.05$ )。小叶型椴木根际土壤微生物呼吸随着土壤时间的增加在 72 h 和 96 h 与对照和大叶型椴木间差异显著

( $p < 0.05$ )。大叶型椴木的微生物呼吸与对照组差异较小,随着时间的增加累计呼吸间差异增加。说明不同类型椴木根际土壤微生物呼吸影响到土壤碳排放。

表 1 土壤呼吸与微生物、碳及酶活性关系

| 参数                   | 96 h<br>CO <sub>2</sub> | SOC                | SIC                 | 蔗糖酶                | 纤维<br>素酶 | 脲酶                 | 过氧化<br>氢酶 | 过氧化<br>物酶          | 细菌                  | 真菌                 | 放线菌                 |
|----------------------|-------------------------|--------------------|---------------------|--------------------|----------|--------------------|-----------|--------------------|---------------------|--------------------|---------------------|
| 96 h CO <sub>2</sub> | 1.00                    | 0.45 <sup>a</sup>  | -0.67 <sup>**</sup> | 0.15               | 0.31     | 0.65 <sup>**</sup> | 0.06      | 0.18               | 0.61 <sup>**</sup>  | -0.36              | 0.20                |
| SOC                  | 0.45 <sup>a</sup>       | 1.00               | -0.34               | 0.27               | -0.13    | 0.80 <sup>**</sup> | 0.30      | -0.11              | 0.25                | -0.12              | 0.08                |
| SIC                  | -0.67 <sup>**</sup>     | -0.34              | 1.00                | 0.16               | -0.11    | -0.41              | -0.10     | 0.16               | -0.76 <sup>**</sup> | 0.15               | -0.11               |
| 蔗糖酶                  | 0.15                    | 0.27               | 0.16                | 1.00               | -0.03    | 0.58 <sup>*</sup>  | 0.01      | 0.54 <sup>*</sup>  | -0.20               | -0.48 <sup>*</sup> | -0.31               |
| 纤维素酶                 | 0.31                    | -0.13              | -0.11               | -0.03              | 1.00     | -0.05              | -0.32     | 0.00               | 0.00                | 0.25               | 0.16                |
| 脲酶                   | 0.65 <sup>*</sup>       | 0.80 <sup>**</sup> | -0.41               | 0.58 <sup>*</sup>  | -0.05    | 1.00               | 0.15      | 0.14               | 0.34                | -0.39              | 0.09                |
| 过氧化氢酶                | 0.06                    | 0.30               | -0.10               | 0.01               | -0.32    | 0.15               | 1.00      | 0.15               | 0.02                | -0.43              | -0.39               |
| 过氧化物酶                | 0.18                    | -0.11              | 0.16                | 0.54 <sup>*</sup>  | 0.00     | 0.14               | 0.15      | 1.00               | -0.28               | -0.62 <sup>*</sup> | -0.69 <sup>**</sup> |
| 细菌                   | 0.61 <sup>*</sup>       | 0.25               | -0.76 <sup>**</sup> | -0.20              | 0.00     | 0.34               | 0.02      | -0.28              | 1.00                | -0.26              | 0.50 <sup>*</sup>   |
| 真菌                   | -0.36                   | -0.12              | 0.15                | -0.48 <sup>*</sup> | 0.25     | -0.39              | -0.43     | -0.62              | -0.26               | 1.00               | 0.36                |
| 放线菌                  | 0.20                    | 0.08               | -0.11               | -0.31              | 0.16     | 0.09               | -0.39     | -0.69 <sup>*</sup> | 0.50 <sup>*</sup>   | 0.36               | 1.00                |

注: SOC: 土壤有机碳; SIC: 土壤无机碳; \* 表示  $p < 0.05$ ; \*\* 表示  $p < 0.01$ ; a 表示:  $p = 0.06$ 。

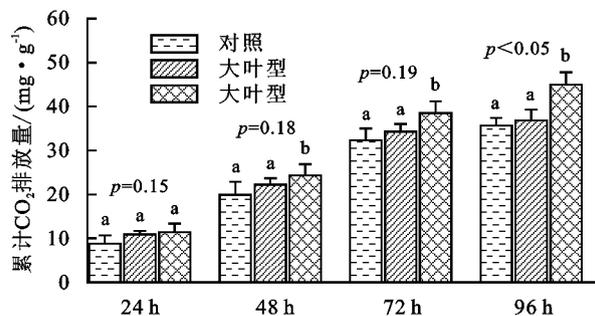


图 4 土壤微生物不同时间呼吸碳排放量

## 3 讨论与结论

### 3.1 讨论

研究表明,2 种不同椴木根际土壤中细菌、真菌和放线菌数量不同。这支持先前研究,不同类型植物根系微生物类群和数量不同<sup>[20]</sup>。如不同烤烟品种根际微生物群落和数量不同<sup>[21]</sup>;不同抗病品种大豆根际微生物群落结构不同。利用高通量测序研究表明,饲料玉米和鲜食品种间根际微生物类群差异明显<sup>[22]</sup>。甘蔗和花生的间作显著改变根际微生物类群和微生物数量<sup>[23]</sup>。

根际微生物数量差异可能是由根系分泌物中大量有机物,如糖、氨基酸和有机酸等所导致。一方面,不同微生物对根系分泌物的中某些成分利用有嗜好不同<sup>[21]</sup>,根系分泌物差异导致根际营养物质、pH 和溶解氧等物质的不同影响微生物类群<sup>[24]</sup>。甚至部分微生物对根系分泌物的趋同性<sup>[25]</sup>,造成微生物类群的差异。综上所述,不同类型或者不同品种农作物分泌有机物组成差异,导致了植物根际土壤微生物群落的不同。

不同类型或不同农作物根际土壤微生物差异,影响到土壤酶活性。土壤酶活性主要来自土壤微生物胞外分泌物<sup>[17]</sup>。植物类型不同影响到土壤酶活性<sup>[13,26]</sup>,本研究 2 种类型椴木根际微生物类群细菌、真菌和放线菌差异,导致两种椴木根际土壤蔗糖酶、脲酶和过氧化物酶活性发生显著变化。

微生物生长消耗大量的碳水化合物,微生物数量又影响到土壤微生物呼吸,微生物把土壤中可利用碳水化合物通过分解转化为气态 CO<sub>2</sub>。大叶型椴木和小叶型椴木根际土壤微生物数量大于对照,因此通过微生物呼吸排放的碳增加,支持先前研究的微生物与 CO<sub>2</sub> 关系<sup>[27-28]</sup>。

土壤微生物活跃,土壤有机碳分解的增加,本研究结果为土壤微生物呼吸与土壤有机碳含量边缘显著( $p = 0.06$ )。由于土壤有机碳来源于地表凋落物、植物根系分泌物和微生物<sup>[29-30]</sup>。从另外一方面说明根系土壤微生物比较活跃,提供给根系周围微生物补充物质较多,根系活跃提供大量的表皮凋落物等进行土壤作为土壤有机碳的补充来源。同时微生物残体中作为土壤有机碳的补充,因此土壤有机碳和土壤碳储量增加。随着低碳农业的发展,今后在农作物品种选育在品质差异较小的情况下,可以考虑农作物品种的碳排放。

### 3.2 结论

椴木的类型明显影响根际土壤脲酶、蔗糖酶和过氧化物酶活性。椴木类型根际脲酶活性呈现相反的变化趋势;2 种椴木根际过氧化物酶活性都呈降低趋势。2 种椴木根际活性有机碳、中活性有机碳、稳定

性活性有机碳均增加。2种櫟木,明显促进了根际土壤细菌和真菌数。大叶櫟木根际增加了放线菌数,小叶櫟木抑制了根际真菌数。

#### 参考文献:

- [1] Nannipieri P, Trasar-cepada C, Dick R P. Soil enzyme activity: a brief history and biochemistry as a basis for appropriate interpretations and meta-analysis[J]. *Biology & Fertility of Soils*, 2017, 54(5): 1-9.
- [2] 陶宝先, 张金池, 愈元春, 等. 苏南丘陵地区森林土壤酶活性季节变化[J]. *生态环境学报*, 2010, 19(10): 2349-2354.
- [3] Gianfreda L. Enzymes of importance to rhizosphere processes [J]. *Journal of Soil Science & Plant Nutrition*, 2014, 15: 1-10.
- [4] 刘捷豹, 陈光水, 郭剑芬, 等. 森林土壤酶对环境变化的响应研究进展[J]. *生态学报*, 2017, 117(37): 110-117.
- [5] 张玉兰, 刘桂芬, 武志杰, 等. 土壤水解酶类催化动力学研究进展[J]. *应用生态学报*, 2003, 14(12): 2326-2332.
- [6] 郭志明, 张心昱, 李丹丹, 等. 温带森林不同海拔土壤有机碳及相关胞外酶活性特征[J]. *应用生态学报*, 2007, 28(9): 2888-2896.
- [7] 王国夫, 孙小红, 方逸, 等. 遮阴对抹茶茶园土壤微生物特性及土壤酶活性的影响[J]. *茶叶科学*, 2019, 39(3): 355-363.
- [8] 于德良, 雷泽勇, 张岩松, 等. 沙地樟子松人工林土壤酶活性及其影响因子[J]. *干旱区研究*, 2019, 36(3): 621-629.
- [9] 刘宇彤, 霍璐阳, 李志国, 等. 不同处理方式对土壤酶活性的影响[J]. *森林工程*, 2019, 35(2): 25-30.
- [10] 李德辉, 杨第芹, 李应禄, 等. 不同耕地土壤微生物的呼吸及酶活性: 以遵义市为例[J]. *西南农业学报*, 2019, 32(4): 186-189.
- [11] 王世杰, 李阳兵, 李瑞玲. 喀斯特石漠化的形成背景、演化与治理[J]. *第四纪研究*, 2003, 23(6): 657-666.
- [12] 高雨秋, 戴晓琴, 王建雷, 等. 亚热带人工林下植被根际土壤酶化学计量特征[J]. *植物生态学报*, 2019, 43(3): 67-71.
- [13] 杨万勤, 王开运. 森林土壤酶的研究进展[J]. *林业科学*, 2004, 40(2): 152-159.
- [14] 林娜, 刘勇, 李国雷, 等. 森林土壤酶研究进展[J]. *世界林业研究*, 2010, 23(4): 21-25.
- [15] 张志强. 辽东葱木的国内外研究现状[J]. *黑龙江医学*, 2008, 21(1): 46-48.
- [16] 谢佳艺, 赵瑞华, 栗现芳. 延大兰惠园不同植物群落对土壤微生物及酶活性的影响[J]. *延安大学学报: 自然科学版*, 2018, 37(4): 82-86.
- [17] 周礼恺. 土壤酶学[M]. 北京: 科学出版社, 1987: 184-186.
- [18] 关松荫. 土壤酶学及其研究方法[M]. 北京: 农业出版社, 1984: 36-38.
- [19] Lefroy R D B, Blair G J. Changes in soil organic matter with cropping as measured by organic carbon fractions and  $^{13}\text{C}$  natural isotope abundance[J]. *Plant and Soil*, 1993, 155: 399-402.
- [20] Deng, Z S, Zhang B. Root-associated endophytic bacterial community composition of pennisetum sinese from four representative provinces in China[J]. *Microorganisms*, 2019, 7(47): 1-15.
- [21] 李强, 孙敬钊, 皮本阳, 等. 不同品种烤烟根际微生物群落结构及多样性研究[J]. *安徽农业科学*, 2018, 46(30): 166-169.
- [22] 汪娅婷, 付丽娜, 姬广海, 等. 基于高通量测序技术研究云南玉米根际微生物群落多样性[J]. *江西农业大学学报*, 2019, 41(3): 7-11.
- [23] 陈海生, 秦昌鲜, 彭崇, 等. 甘蔗间作花生对根际土壤微生物种群及酶活性的影响[J]. *江苏农业科学*, 2019, 47(3): 231-234.
- [24] 李惠民. 影响根际土壤微生物多样性的因素研究[J]. *科技与生活*, 2011(5): 98-99.
- [25] 吴林坤, 林向民, 林文雄. 根系分泌物介导下植物—土壤—微生物互作关系研究进展与展望[J]. *植物生态学报*, 2014, 38(3): 298-310.
- [26] 葛晓改, 肖文发, 曾立雄, 等. 不同林龄马尾松凋落物基质质量与土壤养分的关系[J]. *生态学报*, 2012, 32(3): 852-862.
- [27] Zhang B, Zhou X, Zhou L, et al. A global synthesis of below-ground carbon responses to biotic disturbance: a meta-analysis[J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2015, 24(2): 126-138.
- [28] Zhou L, Zhou X, Zhang B, et al. Different responses of soil respiration and its components to nitrogen addition among biomes: a meta-analysis[J]. *Global Change Biology*, 2014, 20(7): 2332-2343.
- [29] 张宝成, 白艳芬, 李宪碧, 等. 汉中盆地秸秆还田撂荒和林地对土壤碳的影响[J]. *广西植物*, 2018, 38(8): 1081-1087.
- [30] 戴国华, 朱珊珊, 刘宗广, 等. 青藏高原高寒草地土壤中脂肪酸的分布特征[J]. *中国科学: 地球科学*, 2016, 46(6): 756-766.