

生物炭与微生物菌剂配施对土壤生物和化学特性的影响

赵晓军, 李丽, 张璇, 张海平, 王紫微, 印瀚 (云南省烟草公司昆明市公司, 云南昆明 651700)

摘要 [目的] 研究生物炭和微生物菌剂配施对土壤生物特性以及土壤有机碳组分的影响。[方法] 研究添加生物炭、生物炭和微生物菌剂配施后土壤总有机碳含量、活性有机碳含量、土壤酶活性、微生物数量以及微生物功能多样性的变化。[结果] 单施生物炭能够显著增加土壤总有机碳含量, 较单施化肥增加了 32.9%。生物炭和微生物菌剂配施对土壤活性有机碳含量、酶活性、微生物数量以及微生物功能多样性的提高效果最好, 可溶性有机碳、易氧化有机碳和微生物量碳分别较单施化肥增加了 43.0%、74.3% 和 99.8%; 脲酶、蔗糖酶、多酚氧化酶和过氧化氢酶活性分别较单施化肥增加了 56.2%、20.8%、14.6% 和 13.1%; 细菌、真菌和放线菌数量分别较单施化肥提高了 190%、21.1% 和 72.7%。[结论] 该研究为提高植烟土壤有机养分含量和微生物活性提供理论依据。

关键词 生物炭; 微生物菌剂; 土壤总有机碳; 土壤活性有机碳; 土壤生物特性

中图分类号 S153 文献标识码 A 文章编号 0517-6611(2018)25-0109-04

Effect of Microbial Agents with Biochar Application on Biological and Chemistry Characteristics of Soil

ZHAO Xiao-jun, LI Li, ZHANG Xuan et al (Kunming Branch of Yunnan Tobacco Company, Kunming, Yunnan 651700)

Abstract [Objective] To study effect of microbial agents with biochar application on biological characteristics and organic carbon component of soil. [Method] The content of soil organic carbon and active organic carbon, soil enzyme activity, the number of microorganisms and microbial functional diversity were researched under the condition of adding biochar, biochar and microbial agents. [Result] The content of soil organic carbon increased significantly after adding biochar, compared with single application of chemical fertilizers, it was increased by 32.9%. The content of active organic carbon, soil enzyme activity, the number of microorganisms and microbial functional diversity increased significantly after adding biochar and microbial agents. Compared with single application of chemical fertilizers, dissoluble organic carbon, easily oxidized organic carbon and microbial carbon were increased respectively by 43.0%, 74.3% and 99.8%; urease, sucrose, polyphenol oxidase and catalase activity were increased respectively by 56.2%, 20.8%, 14.6% and 13.1%; the number of bacteria, fungi and actinomycetes were increased respectively by 190%, 21.1% and 72.7%. [Conclusion] The study provides a theoretical basis for improving the content of organic nutrients and microbial activity in tobacco-growing soil.

Key words Biochar; Microbial agents; Soil total organic carbon; Soil active organic carbon; Soil biological characteristics

土壤质量退化已成为制约烟叶质量提升的关键性因素。近年来, 烟草种植的集中化导致烟草轮作难度的增加。复种指数的增加以及化肥的大量施用造成了植烟土壤中有机营养的大量使用, 有机碳含量降低, 土壤碳库质量下降, 土壤微生物多样性以及活性降低, 土壤酶活性降低。因此, 如何提高土壤有机养分含量以及生物特性已成为目前研究的热点。

生物炭是由生物废弃物在限氧条件下高温热解形成的富含碳、具有高度芳香化的固体颗粒^[1], 已成为科研工作者关注的焦点和研究热点^[2]。生物炭大多呈碱性, 可以提高酸性土壤 pH。生物炭具有大的比表面积和高孔隙度, 可以保持土壤水分以及为土壤微生物提供良好的栖息场所^[3]。微生物菌剂是以单个或多种有益微生物发酵而成的新型绿色生物肥料, 能够改善土壤质量, 协调植株对养分的吸收^[4]。前人的研究主要集中在单一的施用生物炭或微生物菌剂对土壤质量的影响^[5-8], 对生物炭和微生物配施对土壤质量提升效果的研究较少。笔者通过田间试验比较单施化肥、生物炭以及生物炭和微生物菌剂配施对土壤有机碳、活性有机碳、土壤酶、微生物数量以及微生物功能多样性的影响, 以期为提高植烟土壤有机养分含量和微生物活性提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况 试验于 2017 年 4—10 月在云南省嵩明县阿子营街道铁冲村进行。供试土壤为砂壤, 土壤基础化学性质: 有机质 25.88 g/kg, 水溶性氮 103.38 mg/kg, 速效磷

13.36 mg/kg, 速效钾 132.39 mg/kg, 水溶性氯 13.24 mg/kg。

1.2 试验材料 供试烟叶品种为 K326。供试生物炭是由花生壳在 450 °C 下限氧炭化 30 min 获得, 养分含量: 总碳 (TC) 含量 42%, 总氮 (TN) 含量 0.23%, 总磷 (TP) 含量 0.19%, 总钾 (TK) 含量 0.65%, 试验所用化肥: 烟草专用复合肥 (10%N, 10%P₂O₅, 20%K₂O), 硫酸钾 (45%K₂O), 过磷酸钙 (12% P₂O₅)。试验所用微生物菌剂 (有效微生物含量 100 亿/g) 由河南省鹤壁市禾盛生物科技有限公司提供。

1.3 试验设计 试验设 3 个处理, 随机区组排列, 重复 3 次, 小区面积 0.02 hm²。处理: 单施化肥 (CK); 化肥+生物炭 (T₁); 化肥+生物炭+微生物菌剂 (T₂)。各处理氮用量为 82.5 kg/hm², m(N):m(P₂O₅):m(K₂O)=1:1:3, 生物炭施用量为 6 t/hm², 微生物菌剂施用量为 30 kg/hm², 施肥方案中扣除生物炭中所含的 N、P、K 含量, 钾、磷不足的由硫酸钾和过磷酸钙补充。具体施肥方案见表 1。化肥施用方法: 225 kg/hm² 烟草专用复合肥于移栽后 30 d 追施, 其余肥料做基肥在起垄前条施。生物炭的施用方法: 生物炭于起垄前 15 d 按照施用量的 80% 均匀撒在试验田中, 用机器旋翻至土壤耕层与土壤充分混合, 剩余 20% 生物炭于起垄前条施。微生物菌剂的施用方法: 微生物菌剂与剩余 20% 生物炭充分混合后于起垄前条施。烟株于 5 月 3 日移栽, 株行距为 50 cm×120 cm, 大田栽培管理措施按照昆明市烟草种植标准化操作进行。

1.4 测定项目与方法

1.4.1 土样采集 烟株成熟期 (移栽后 90 d) 通过“抖根法”采集烟株根际土壤样品, 一部分风干用于测定总有机碳、可

作者简介 赵晓军 (1988—), 男, 河南济源人, 助理农艺师, 硕士, 从事基层烟叶生产相关工作。

收稿日期 2018-04-28

溶性有机碳、易氧化有机碳、多酚氧化酶、过氧化氢酶,另一部分过筛保存于4℃冰箱中用于微生物量碳、蔗糖酶、脲酶、

微生物功能多样性、微生物数量的测定。

表1 各处理施肥量

Table 1 Fertilizer amount of each treatment

处理 Treatment	生物炭 Charcoal t/hm ²	复合肥 Compound fertilizer kg/hm ²	硫酸钾 Potassium sulfate kg/hm ²	过磷酸钙 Calcium superphosphate kg/hm ²	微生物菌剂 Microbiological agent kg/hm ²
CK	—	825.00	183.33	—	0
T ₁	6.00	687.00	158.00	20.00	0
T ₂	6.00	687.00	158.00	20.00	30

1.4.2 土壤指标。有机碳采用重铬酸钾-外加热法测定;可溶性有机碳采用水浴锅加热蒸干-重铬酸钾容量法测定;易氧化有机碳采用高锰酸钾氧化法测定;微生物生物量碳采用氯仿熏蒸浸提法测定;脲酶采用靛酚比色法测定,其活性以24 h后土壤中生成的NH₄⁺-N量表示;蔗糖酶采用3,5-二硝基水杨酸比色法测定,其活性以24 h后产生的葡萄糖来表示;过氧化氢酶采用高锰酸钾滴定法测定,其活性以1 h后1 g土壤消耗0.02 mol/L高锰酸钾的量表示;多酚氧化酶采用邻苯三酚比色法测定,其活性以1 h后1 g土壤生成的紫色没食子素的毫克数表示。

微生物代谢功能多样性的检测,采用96孔BIOLOG ECO板进行培养试验,其含有31种碳源,25℃恒温培养,在24、48、72、96、120、144 h后测定各孔在590 nm波长下的吸收度。微生物数量测定:细菌采用牛肉膏蛋白胨培养基;真菌采用马丁氏培养基;放线菌采用高氏1号培养基。

和43.0%;易氧化有机碳含量分别提高了44.9%和74.3%;微生物量碳分别提高了52.0%和99.8%。T₁和T₂处理有机碳含量无显著差异。

表1 不同处理对有机碳组分的影响

Table 1 Effects of different treatments on organic carbon components

处理 Treatment	有机碳 Organic carbon g/kg	可溶性有机碳 Soluble organic carbon mg/kg	易溶性有机碳 Soluble organic carbon g/kg	微生物量碳 Microbiological carbon mg/kg
CK	15.33 b	270.00 c	1.36 c	170.47 c
T ₁	20.37 a	352.00 b	1.97 b	259.08 b
T ₂	19.58 a	386.00 a	2.37 a	340.68 a

注:同列不同小写字母表示不同处理间差异显著(P<0.05)

Note: Different lowercases in the same column stand for significant differences between different treatments at 0.05 level

平均颜色变化率(AWCD) = $\sum (C_i - R) / 31$

式中,C_i为每孔在590 nm下的吸光度,R为ECO板上对照孔的吸光度,31为ECO板上碳源的种类数。

2.2 不同处理对土壤酶活性的影响 由表2可知,添加生物炭和微生物菌剂显著提高了土壤酶活性,其中以生物炭微生物菌剂配施提高幅度最大。与CK相比,T₁和T₂处理脲酶活性分别提高了39.7%和56.2%;蔗糖酶活性分别提高了12.2%和20.8%;多酚氧化酶活性分别提高了8.2%和14.6%;过氧化氢酶活性分别提高了3.7%和13.1%。

表2 不同处理对土壤酶活性的影响

Table 2 Effects of different treatments on soil enzyme activity

处理 Treatment	脲酶 Urease mg/(g·d)	蔗糖酶 Sucrase mg/(g·d)	多酚氧化酶 Polyphenol oxidase mg/(g·h)	过氧化氢酶 Catalase mL/(g·h)
CK	0.73 c	91.38 c	2.02 c	5.73 c
T ₁	1.02 b	102.56 b	2.18 b	5.94 b
T ₂	1.14 a	110.43 a	2.31 a	6.48 a

注:同列不同小写字母表示不同处理间差异显著(P<0.05)

Note: Different lowercases in the same column stand for significant differences between different treatments at 0.05 level

Shannon 指数 = $-\sum p_i \times \log p_i$

式中,p_i为第i孔相对吸光度与整个平板相对吸光度总和的比率。

2.3 不同处理对微生物数量的影响 由表3可知,添加生物炭和微生物菌剂显著提高了细菌和放线菌数量,具体表现为T₂>T₁>CK,且相互之间差异显著。与CK相比,T₁和T₂处理细菌数量分别增加了146.7%和190.0%,放线菌数量分别增加了39.4%和72.7%。T₁处理的真菌数量与CK相比显著降低,而T₂处理的真菌数量与CK相比显著提高。

Mcintosh 指数 = $(\sum n_i^2)^{1/2}$

式中,n_i为第i个碳源孔的相对OD值(即C_i-R);

2.4 不同处理对微生物功能多样性的影响 平均颜色变化率(AWCD)用来表征土壤微生物对总碳源的利用能力。不同微生物功能多样性指数代表土壤微生物多样性的不同侧

Simpson 指数 = $1 - \sum p_i^2$

式中,p_i为第i孔相对吸光度与整个平板相对吸光度总和的比率。

不同处理综合得分计算公式:

得分 = $\sum (n_i \times \text{FAC}_{1-i}) \times \text{CON}_1 + \sum (n_i \times \text{FAC}_{2-i}) \times \text{CON}_2$

式中,n_i为第i个碳源孔的相对OD值(即C_i-R),FAC_{1-i}、FAC_{2-i}为第i个碳源在第1、2主成分中的因子载荷值,CON₁、CON₂为第1、2主成分的方差贡献率。

1.5 数据处理 采用SPSS 20.0和Excle 2013进行数据处理和统计分析。

2 结果与分析

2.1 不同处理对有机碳组分的影响 由表1可知,添加生物炭和菌剂生物炭配施显著增加了土壤有机碳及活性有机碳组分含量。与CK相比,T₁和T₂处理有机碳含量分别提高了32.9%和27.7%;可溶性有机碳含量分别提高了30.4%

面。其中,Shannon 指数用来表征土壤微生物的均匀度以及丰富度;Simpson 指数用来表征土壤中最常见微生物物种优势度;Mcintosh 指数用来表征土壤微生物的物种均一性。由表 4 可知,添加生物炭和有机物料显著增加了微生物对总碳源的利用能力以及微生物功能多样性指数。AWCD、Shannon 指数和 Simpson 指数具体表现为 $T_2 > T_1 > CK$, T_1 和 T_2 处理的 Mcintosh 指数无显著差异。

表 3 不同处理对微生物数量的影响

Table 3 Effects of different treatments on microbial population

处理 Treatment	细菌 Bacteria $\times 10^7$ CFU	真菌 Fungi $\times 10^5$ CFU	放线菌 Actinomycetes $\times 10^6$ CFU
CK	3.00 c	1.90 b	3.30 c
T_1	7.40 b	1.70 c	4.60 b
T_2	8.70 a	2.30 a	5.70 a

注:同列不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)

Note: Different lowercases in the same column stand for significant differences between different treatments at 0.05 level

表 4 不同处理对微生物功能多样性指数的影响

Table 4 Effects of different treatments on microbial functional diversity index

处理 Treatment	AWCD	Shannon 指数 Shannon index	Simpson 指数 Simpson index	Mcintosh 指数 Mcintosh index
CK	1.377 c	3.281 c	8.591 c	0.959 b
T_1	1.584 b	3.310 b	9.690 b	0.961 a
T_2	1.754 a	3.328 a	10.533 a	0.962 a

注:同列不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)

Note: Different lowercases in the same column stand for significant differences between different treatments at 0.05 level

选取培养 120 h 的土壤微生物吸光度数据进行主成分分析,共提取 4 个主成分。4 个主成分的累积方差贡献率为 93.00%。PC1~PC4 的方差贡献率分别为 48.58%、33.41%、6.36% 和 4.65%。PC1 和 PC2 的累积贡献率达 81.98%,能较为全面地概括微生物对 31 种碳源的利用特征。通过对各处理碳源利用能力的得分计算可知,CK 的得分为 10.68, T_1 处理的得分为 14.41%, T_2 处理的得分为 16.57。

主成分分析结果中的相关系数越高,表明该种碳源对主成分的影响越大。对主成分分析结果中相关系数大于 0.7 的碳源做进一步分析,结果见表 5。由表 5 可知,影响 PC1 的碳源有 15 种,其中碳水化合物类 4 种,氨基酸类 4 种,羧酸类 3 种,胺类 2 种,酚酸类 1 种,多聚物类 1 种;影响 PC2 的碳源有 8 种,其中多聚物类 3 种,碳水化合物类 2 种,羧酸类 2 种,氨基酸类 1 种。综合分析,碳水化合物类、羧酸类、氨基酸类和多聚物类为该土壤微生物利用的主要碳源。

3 结论与讨论

土壤有机碳主要来源于凋落物、根系分泌物以及根系周围的细碎根屑^[9],是土壤质量和功能的核心,是影响土壤肥力的决定性因子。土壤微生物生物量碳、可溶性有机碳和易氧化有机碳是土壤活性有机碳库的组分^[10],三者之间密切联系,可溶性有机碳和易氧化有机碳易被微生物利用转化为土壤微生物生物量碳,而土壤微生物量碳是可溶性有机碳以及易氧化有机碳潜在的重要来源^[11]。李莹等^[12]研究表明,

单独添加生物炭增加了土壤有机碳含量,抑制了土壤有机碳的矿化。李喜凤等^[13]研究表明,单施生物炭显著增加 0~40 cm 土壤总有机碳、易氧化有机碳、可溶性有机碳以及可溶性有机碳质量分数。魏赛金等^[14]研究表明,稻草还田和微生物菌剂配施显著提高了土壤活性有机碳含量。该研究结果表明,添加生物炭和微生物菌剂生物炭配施显著增加了土壤有机碳含量以及活性有机碳库组分含量,其中单施生物炭处理土壤有机碳含量最高,微生物菌剂生物炭配施处理土壤活性有机碳库组分提高幅度最大。

表 5 与主成分显著相关的主要碳源

Table 5 Main carbon sources significantly related to principal components

主成分 The principal components	碳源 Carbon source	碳源类别 Carbon source category	相关系数 The correlation coefficient
PC1	D-纤维二糖	碳水化合物类	0.934
	β -甲基-D-葡萄糖苷	碳水化合物类	0.839
	D-木糖/戊醛糖	碳水化合物类	0.830
	D-甘露醇	碳水化合物类	0.794
	D-半乳糖醛酸	羧酸类	-0.767
	γ -羟丁酸	羧酸类	-0.950
	衣康酸	羧酸类	0.803
	L-精氨酸	氨基酸类	0.764
	L-天门冬酰胺	氨基酸类	0.844
	L-苯丙氨酸	氨基酸类	0.920
	L-苏氨酸	氨基酸类	0.987
	苯乙胺	胺类	0.886
	腐胺	胺类	0.814
	2-羟基苯甲酸	酚酸类	0.892
	吐温 40	多聚物类	-0.926
PC2	吐温 80	多聚物类	0.910
	α -环式糊精	多聚物类	0.838
	肝糖	多聚物类	0.885
	1-磷酸葡萄糖	碳水化合物类	-0.703
	D-半乳糖醛酸 γ -内酯	碳水化合物类	0.916
	α -丁酮酸	羧酸类	-0.782
	D-苹果酸	羧酸类	0.956
	甘氨酸-L-谷氨酸	氨基酸类	0.930

土壤酶是土壤营养代谢的驱动力,可以直观地反映土壤中养分代谢的强度^[15]。脲酶是土壤中的水解酶,也是最活跃的一类,用来表征土壤氮的供应能力^[16]。蔗糖酶活性用来表征土壤的肥力水平和熟化程度^[17]。多酚氧化酶能够促进土壤中芳香类化合物生成腐殖质^[18]。过氧化氢酶可以分解土壤中的过氧化氢,消除其对土壤生物的毒害^[19]。该研究结果表明,添加生物炭和微生物菌剂生物炭配施显著增加了土壤脲酶、蔗糖酶、多酚氧化酶和过氧化氢酶活性,其中以生物炭和微生物菌剂配施增加幅度最大。这与冯爱青等^[20]、龚丝雨等^[21]研究结果略不一致,冯爱青等^[20]研究结果显示,添加秸秆黑炭显著提高了土壤脲酶活性,但抑制了过氧化氢酶活性。龚丝雨等^[21]研究结果表明,增施生物炭显著提高了土壤过氧化氢酶和脲酶活性,但对土壤多酚氧化酶和转化酶活性影响不显著。这可能是由于施用生物炭的

种类和土壤类型不同引起的。闫新伟等^[22]研究表明,添加生物炭显著提高了花生成熟期脲酶、蔗糖酶和过氧化氢酶活性;朱金峰等^[23]研究表明,施用微生物菌剂显著提高了土壤脲酶、过氧化氢酶和蔗糖酶的活性,与该研究结果一致。

土壤微生物数量的变化能够敏感反映出土壤环境的变化,体现微生物活性变化^[24]。凌天孝等^[25]研究表明,施用生物炭能够提升土壤细菌和放线菌含量,对真菌含量表现为前期抑制后期促进的规律。魏赛金等^[14]研究表明,稻草还田配施菌剂可以有效地提高细菌、真菌、放线菌的数量。该研究结果表明,添加生物炭和微生物菌剂生物炭配施显著提高了土壤微生物数量,其中微生物生物炭配施提高最明显。土壤微生物功能多样性是表征土壤质量的重要生物指标。张雅坤等^[26]研究表明,添加生物炭改变了土壤微生物群落结构,增加了土壤微生物整体活性和对碳源的利用能力。马锋敏等^[27]研究表明,施用微生物菌剂的土壤微生物对碳源的利用能力,Shannon 指数,丰富度指数显著高于对照。该研究结果表明,添加生物炭和微生物菌剂生物炭配施显著增加了土壤微生物群落对碳源总的利用能力和土壤微生物群落的均匀度、丰富度以及常见物种的优势度。施加生物炭的基础上配施微生物菌剂未改变土壤微生物群落的均一性。主成分分析结果表明,该试验地土壤微生物利用的主要碳源是碳水化合物类、羧酸类、氨基酸类和多聚物类。添加生物炭以及生物炭与微生物菌剂配施显著改变了土壤微生物对碳源的利用能力,主成分上的得分与微生物对碳源的利用能力有关。综合各处理在主成分上的得分,生物炭和微生物菌剂配施得分最高,说明该处理对土壤微生物功能的影响最大。

生物炭本身含有较多的有机碳,施入土壤后会直接增加土壤有机碳含量,另外施用生物炭会促进根系发育,增加烟株根系分泌物以及增强植物的代谢速率,从而增加有机碳含量。施用生物炭为微生物提供了充足的碳源,改善土壤结构,为微生物创造良好的生存条件,促进微生物的生长繁殖,增加微生物的数量、活性以及物种丰度。微生物数量和活性的增加会降低土壤有机碳的氧化稳定性,从而增加易氧化有机碳的含量;微生物在周转过程中会分解生物炭中可利用组分再加上其本身的新陈代谢作用增加了土壤可溶性有机碳的含量,另外生物炭在热解过程中会产生吸附在生物炭表面的小分子有机物质直接增加了土壤可溶性有机碳含量;由于微生物生物量碳是指活的微生物中含有的碳,微生物数量的增加直接增加了土壤微生物生物量碳的含量。根系分泌物的增加会提高土壤酶活性,另外由于土壤酶是微生物生长代谢的产物,微生物数量的增加会进一步提高土壤酶活性。配施微生物菌剂后直接增加了土壤中的微生物数量,促进了有机碳的矿化,因此有机碳的积累量小于单施生物炭,但土壤活性有机碳含量、微生物数量和功能多样性以及土壤酶活性高于单施生物炭处理。

综合分析,单施生物炭有利于有机碳的积累,生物炭和

微生物菌剂配施提高了土壤活性有机碳库质量,增强了土壤酶活性、提高了微生物活性以及功能多样性。因此生物炭和微生物菌剂配施是提高当季植烟土壤质量的最佳施用方案。

参考文献

- [1] 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.
- [2] SHRESTHA G, TRAINA S J, SWANSTON C W. Black carbon's properties and role in the environment: A comprehensive review [J]. *Sustainability*, 2010, 2(1): 294-320.
- [3] 勾芒芒, 屈忠义. 生物炭对改善土壤理化性质及作物产量影响的研究进展[J]. *中国土壤与肥料*, 2013(5): 1-5.
- [4] 罗锋, 杭中桥, 焦玉霞, 等. 农用微生物菌剂在蔬菜上的应用试验[J]. *中国园艺文摘*, 2009, 25(8): 39-40.
- [5] 张晗芝, 黄云, 刘钢, 等. 生物炭对玉米苗期生长、养分吸收及土壤化学性状的影响[J]. *生态环境学报*, 2010, 19(11): 2713-2717.
- [6] 陈心想, 何绪生, 耿增超, 等. 生物炭对不同土壤化学性质、小麦和糜子产量的影响[J]. *生态学报*, 2013, 33(20): 6534-6542.
- [7] 余佳斌, 张晓强, 文锦涛, 等. 微生物菌剂对修文烟区植烟土壤理化性状及烤烟产质量的影响[J]. *浙江农业科学*, 2018, 59(3): 382-387.
- [8] 耿丽平, 李小磊, 赵全利, 等. 添加微生物菌剂对小麦产量及土壤生物学性状的影响[J]. *江苏农业科学*, 2017, 45(5): 50-54.
- [9] 张剑, 汪思龙, 王清奎, 等. 不同森林植被下土壤活性有机碳含量及其季节变化[J]. *中国生态农业学报*, 2009, 17(1): 41-47.
- [10] TAYLOR J P, WILSON B, MILLS M S, et al. Comparison of microbial numbers and enzymatic activities in surface soils and subsoils using various techniques[J]. *Soil biology and Biochemistry*, 2002, 34(3): 387-401.
- [11] BONKOWSKI M, GRIFFITHS B, SCRIMGEOUR C. Substrate heterogeneity and microfauna in soil organic 'hotspots' as determinants of nitrogen capture and growth of ryegrass[J]. *Applied soil ecology*, 2000, 14(1): 37-53.
- [12] 李莹, 魏志超, 李惠通, 等. 生物炭对杉木人工林土壤碳氮矿化的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2017, 36(2): 314-321.
- [13] 李喜凤, 杨小妮, 罗艳君, 等. 生物炭及有机肥对苹果园土壤有机碳组分及果树生长的影响[J]. *西北农业学报*, 2017, 26(4): 617-624.
- [14] 魏赛金, 李昆太, 涂晓嵘, 等. 稻草还田配施化肥与腐植菌剂下的土壤微生物及有机碳组分特征[J]. *核农学报*, 2012, 26(9): 1317-1321.
- [15] 郑勇, 高勇生, 张丽梅, 等. 长期施肥对旱地红壤微生物和酶活性的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2008, 14(2): 316-321.
- [16] DE LA PAZ JIMENEZ M, DE LA HORRA A M, PRUZZO L, et al. Soil quality: A new index based on microbiological and biochemical parameters [J]. *Biology and fertility of soils*, 2002, 35(4): 302-306.
- [17] 常学秀, 文传浩, 沈其荣, 等. 锌厂 Pb 污染农田小麦根际与非根际土壤酶活性特征研究[J]. *生态学杂志*, 2001, 20(4): 5-8.
- [18] 陈强龙. 秸秆还田与肥料配施对土壤氧化还原酶活性影响的研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2009.
- [19] 王冬梅, 王春枝, 韩晓日, 等. 长期施肥对棕壤主要酶活性的影响[J]. *土壤通报*, 2006, 37(2): 263-267.
- [20] 冯爱青, 张民, 李成亮, 等. 秸秆及秸秆黑炭对小麦养分吸收及棕壤酶活性的影响[J]. *生态学报*, 2015, 35(15): 5269-5277.
- [21] 龚丝雨, 聂亚平, 张启明, 等. 增施生物炭对烤烟成熟期根际土壤酶活性的影响[J]. *江西农业学报*, 2017, 29(10): 54-57.
- [22] 闫新伟, 王艳芳, 李继伟, 等. 施用生物炭对旱作花生生长和产量构成及土壤酶活性的影响[J]. *河南科技大学学报(自然科学版)*, 2018(3): 66-70.
- [23] 朱金峰, 王小东, 郭传滨, 等. 施用微生物菌剂对土壤关键酶活性和烤烟根系生长的影响[J]. *江西农业学报*, 2015, 27(9): 31-35.
- [24] 李亮, 包耀贤, 廖超英, 等. 乌兰布和沙漠东部分区人工林土壤微生物及酶活性研究[J]. *西北植物学报*, 2010, 30(5): 987-994.
- [25] 凌天孝, 于晓娜, 李志鹏, 等. 生物炭与化肥配施对土壤特性及烤烟品质和经济性状的影响[J]. *土壤通报*, 2016, 47(6): 1425-1432.
- [26] 张雅坤, 彭赛, 宋倩云, 等. 不同施肥模式对杨树人工林土壤微生物功能多样性的影响[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2016, 40(5): 1-8.
- [27] 马锋敏, 杨利民, 肖春萍, 等. 施用微生物菌剂对参后地土壤微生物功能多样性的影响[J]. *吉林农业大学学报*, 2015, 37(3): 317-322.