

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2024.07.012

马群, 刘铭, 周玉玲, 等. 生物炭与有机无机肥配施对土壤质量的影响 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2024, 46(7): 115-126.

# 生物炭与有机无机肥配施对土壤质量的影响

马群, 刘铭, 周玉玲, 王渝庆,  
叶成渝, 杨平平, 李绍兴, 王龙昌

西南大学 农学与生物科技学院, 重庆 400715

**摘要:** 为探究生物炭与有机无机肥配施对土壤以及作物产量的影响, 在温室中以小麦为栽培对象, 以化肥与有机肥、生物炭配施的不同比例安排 7 个处理: CK1(不施肥)、CK2(化肥)、T1(100%化肥+生物炭)、T2(80%化肥+有机肥)、T3(80%化肥+有机肥+生物炭)、T4(60%化肥+有机肥)和 T5(60%化肥+有机肥+生物炭), 探究土壤基本理化性质、酶活性以及微生物代谢功能对不同施肥方式的响应。结果表明, 不同施肥方式对土壤养分影响显著。添加了有机肥、生物炭可显著提高养分含量, 且 T3 养分含量几乎均为最高。添加了有机肥与生物炭的处理, 土壤蛋白酶与蔗糖酶的活性得到显著提升, 而对于过氧化氢酶的活性提升效果不明显。随着施加有机物料比例提升, 土壤微生物的群落多样性及其对碳源代谢能力也有显著升高。根据土壤质量指数(Soil Quality Index, SQI)的排序: T3>T4=T5>T1>CK2=T2>CK1, 施加有机物料能够提升土壤质量和作物产量, 提升强度随着比例升高呈先增加后降低的趋势。综上, 施加有机物料能提升土壤养分含量、酶活性及土壤微生物碳源代谢能力, 且影响强度均与施加比例相关。在 N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、K<sub>2</sub>O 施用量分别为 225, 90, 90 kg/hm<sup>2</sup> 条件下, 20%减量化肥与有机肥(3 000 kg/hm<sup>2</sup>)和生物炭(10 000 kg/hm<sup>2</sup>)配施能够有效改良土壤并增产。

**关键词:** 施肥比例; 生物炭; 土壤质量; 土壤酶; 微生物代谢

中图分类号: X53

文献标志码: A

文章编号: 1673-9868(2024)07-0115-12

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## The Effect of Biochar Combined with Organic and Inorganic Fertilizers on Soil Biological Characteristics and Quality

MA Qun, LIU Ming, ZHOU Yuling, WANG Yuqing,  
YE Chengyu, YANG Pingping, LI Shaoxing, WANG Longchang

College of Agronomy and Biotechnology, Southwest University, Chongqing 400715, China

收稿日期: 2023-01-10

基金项目: 国家公益性行业(农业)科研专项(201503127); 重庆市研究生科研创新项目(CYB22136)。

作者简介: 马群, 硕士研究生, 主要从事农业生态与可持续耕作研究。

通信作者: 王龙昌, 博士, 教授。

**Abstract:** In order to explore the effects of biochar combined with organic and inorganic fertilizers and ratio on soil and crop yield, this study used wheat as the cultivation object in the greenhouse, and arranged seven treatments with different proportions of chemical fertilizer, organic fertilizer and biochar: CK1 (no fertilization), CK2 (chemical fertilizer), T1 (100% chemical fertilizer+biochar), T2 (80% chemical fertilizer+organic fertilizer), T3 (80% chemical fertilizer+organic fertilizer+biochar), T4 (60% chemical fertilizer+organic fertilizer) and T5 (60% chemical fertilizer+organic fertilizer+biochar). The response of soil basic physical and chemical properties, enzyme activity and microbial metabolic function to different fertilization methods was explored. The results showed that different fertilization methods had significant effects on soil nutrients. The treatment with organic fertilizer and biochar can significantly promote the nutrient content and the nutrients contents of T3 were almost at the highest. The activities of soil protease and sucrase were significantly enhanced by adding organic fertilizer and biochar, while the activity of catalase was not significantly enhanced. With the increase of the proportion of organic materials, the diversity of soil microbial community and its ability to metabolize carbon sources also increased significantly. The application of organic materials can improve soil quality (according to the soil quality index (SQI), the order is: T3>T4=T5>T1>CK2=T2>CK1) and crop yield. The intensity increased first and then decreased with the increase of the proportion. In summary, the application of organic materials can improve soil nutrient content, enzyme activity and soil microbial carbon source metabolism ability, and the influence intensity is related to the proportion of application. Under the conditions of N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> and K<sub>2</sub>O application rates of 225 kg/hm<sup>2</sup>, 90 kg/hm<sup>2</sup> and 90 kg/hm<sup>2</sup>, respectively, 20% reduced chemical fertilizer combined with organic fertilizer (3 000 kg/hm<sup>2</sup>) and biochar (10 000 kg/hm<sup>2</sup>) can effectively improve soil and increase yield. This study provides a reference for the combined use of organic fertilizer, biochar and chemical fertilizer.

**Key words:** fertilization ratio; biochar; soil quality; soil enzymes; microbial metabolism

目前化肥已经成为农业生产中不可或缺的物资,在作物增产过程中发挥重要作用。但是化肥的使用对于环境造成了不容忽视的危害。目前化肥的低效使用所造成的环境危害已经成为制约我国农业可持续发展的重大诱因<sup>[1]</sup>。在这种严峻形势下,化肥的减量与高效使用已经成为我国肥料使用中的重要课题<sup>[2]</sup>。

生物炭是由包括有机物料在内的生物质在限氧环境下经高温作用而产生的物质,一般为比表面积大的固体颗粒,具有较高的稳定性<sup>[3-4]</sup>。它可改善土壤理化性质,提高土层以及作物地上和地下部分养分含量,显著提高土壤肥力<sup>[5]</sup>。有机肥具有丰富的营养物质,能够为作物提供丰富的有机质,同时可以显著地改善土壤理化性状,增加微生物活性,提升耕地质量和作物产量、品质<sup>[6]</sup>。它们已经成为农业高效优质生产中的重要应用材料<sup>[7-8]</sup>。

农田土壤微生物代谢能力与土壤营养元素循环联系紧密,是表征土壤生物活性及其肥力的重要指标。上述指标和土壤理化性质具有相关性,可以综合考量以衡量土壤质量<sup>[9-10]</sup>。有机肥与生物炭均能在提升养分含量及活性等基础上改良土壤,促进有机碳固存,增强透气性,提升土壤酶及微生物活性,促进土壤团粒胶结<sup>[11-17]</sup>,但是有关两者结合起来施用对土壤质量影响的研究还不多见。

研究生物炭及有机肥的施用对土壤的影响,对于农田肥料高效低害使用、促进土壤改良具有重要意义。因此,本试验以小麦为栽培对象,重点研究生物炭与有机肥、无机肥的不同配施方式对于土壤肥力的影响,以期化肥增效减量使用提供科学依据。

# 1 材料与方法

## 1.1 试验材料

试验地位于重庆市北碚区西南大学二号温室, 以小麦为研究对象开展温室试验. 试验所用土壤主要理化性质为: pH 值 6.47, 有机质 28.00 g/kg, 全氮 1.68 g/kg, 全磷 1.46 g/kg, 速效磷 18.13 mg/kg, 碱解氮 35.23 mg/kg.

## 1.2 试验设计

小麦品种为渝麦 13 号, 由西南大学农学与生物科技学院小麦育种团队提供. 于 2022 年 11 月下旬种植, 次年 5 月下旬收获.

试验设置 7 个处理, 每个处理 3 个重复, 随机区组设计, 共 21 个小区. 小区面积为 5.2 m<sup>2</sup> (1.3 m × 4 m), 每个重复有小麦 15 行, 每行 12 穴. 按生物炭、有机肥与无机肥的不同配施比例设置不同处理, CK1: 不施肥; CK2: 100% 化肥 (即常规施肥量); T1: 100% 化肥 + 生物炭; T2: 80% 化肥 + 有机肥; T3: 80% 化肥 + 有机肥 + 生物炭; T4: 60% 化肥 + 有机肥; T5: 60% 化肥 + 有机肥 + 生物炭, 具体用量如表 1 所示. 其中, 氮肥、磷肥、钾肥分别采用尿素 (含 N 46%)、过磷酸钙 (含 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 12%)、氯化钾 (含 K<sub>2</sub>O 60%); 有机肥采用重庆市万植巨丰生态肥业有限公司生产的商品有机肥 (有机质含量 ≥ 45%, N, P, K 总含量 ≥ 5%); 生物炭采用南京勤丰秸秆科技有限公司生产的水稻秸秆生物炭 (pH 值 8.70, 有机碳 537.97 g/kg, 全氮 0.61 g/kg, 全磷 1.99 g/kg, 全钾 27.15 g/kg).

表 1 不同施肥处理用量比例信息

代码	处理	施用量/(kg · hm <sup>-2</sup> )				
		N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	有机肥	生物炭
CK1	不施肥	0	0	0	0	0
CK2	100% 化肥	225	90	90	0	0
T1	100% 化肥 + 生物炭	225	90	90	0	10 000
T2	80% 化肥 + 有机肥	180	72	72	3000	0
T3	80% 化肥 + 有机肥 + 生物炭	180	72	72	3 000	10 000
T4	60% 化肥 + 有机肥	135	54	54	3 000	0
T5	60% 化肥 + 有机肥 + 生物炭	135	54	54	3 000	10 000

## 1.3 测定内容及方法

### 1.3.1 土壤样品采集

在小麦收获前 (2023 年 5 月上旬, 蜡熟期) 以“五点取样法”进行土壤样品采集. 其中, 一部分未经挤压扰动的土样风干后挑出 1 cm 以上土块后进行土壤粒径结构测定. 其余剔除根系及石砾, 将一部分鲜样过 1 mm 筛后保存于 4 °C 冰箱以进行微生物代谢功能测定, 另一部分烘干后进行基本理化性质测定.

### 1.3.2 土壤理化性质测定

土壤电导率采用电导率仪 (方舟 DDS-308+, 中国上海) 测定; 土壤含水率采用烘干法测定; 土壤酶活性: 蔗糖酶采用 3,5-二硝基水杨酸比色法测定; 蛋白酶活性采用茚三酮比色法测定; 过氧化氢酶活性采用高锰酸钾滴定法测定<sup>[18]</sup>.

土壤有机质含量采用重铬酸钾—硫酸溶液氧化, 硫酸亚铁标准溶液滴定方法测定; 土壤全氮含量采用浓 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 消煮, 全自动凯氏定氮仪 (海能 K1100F, 中国济南) 测定; 碱解氮含量采用碱解扩散法测定; 土壤全磷含量采用氢氧化钠高温熔融, 钼锑抗比色法测定; 速效磷含量采用 NH<sub>4</sub>F-HCl 溶液浸提, 钼锑抗比色法测定<sup>[19]</sup>.

### 1.3.3 土壤微生物代谢功能测定

土壤微生物代谢能力采用 Biolog-ECO 板法测定.

### 1.3.4 土壤质量指数(Soil Quality Index, SQI)

使用本研究中有关土壤的指标(各养分含量、酶活性与微生物多样性指标)进行主成分分析,筛选指标后构建最小数据集(Minimum Data Set, MDS)以计算土壤质量指数,并以此评价各处理对于土壤质量的影响,最终选取较为合理的处理。

在主成分分析过程中选取特征值 $>1$ 的主成分,并选取相应主成分下各指标成分载荷值 $\geq 0.5$ 的指标进入下一步计算。如果每个主成分下存在多个符合标准的指标,则选取其中载荷值在最大载荷值 90% 范围内,且与具有最大载荷值的指标无极强显著相关性( $p < 0.05$ ,  $cor > 0.7$ )的指标。

质量指数为数据集各指标得分与权重乘积的和。由于本研究涉及的土壤指标均属于一定程度内越大越好的类型,故而得分计算公式为:

$$S_i = \frac{x - L}{H - L} \quad (1)$$

式中:  $S_i$  为土壤质量得分(0~1);  $x$  为土壤指标数值;  $L$  和  $H$  分别为对应指标的最小值与最大值。根据此得分,计算 SQI 公式。

$$Q_{SQI} = \sum_{i=1}^n W_i S_i \quad (2)$$

式中:  $n$  为变量的数量;  $W_i$  为指标权重。其中权重为指标公因子方差在模型所解释的各指标方差中所占比例。

最后使用 Nash 有效系数( $E_f$ )和相对偏差系数( $E_R$ )来评价最小数据集的精确程度<sup>[20-21]</sup>。计算公式为:

$$E_f = 1 - \frac{\sum (R_0 - R_m)^2}{\sum (R_0 - \bar{R}_0)^2} \quad (3)$$

$$E_R = \frac{|\sum_{i=1}^n R_{0i} - \sum_{i=1}^n R_{mi}|}{\sum_{i=1}^n R_{0i}} \quad (4)$$

式中:  $R_0$  与  $\bar{R}_0$  为基于全量数据集计算得出的土壤质量指数值和土壤质量指数平均值;  $R_m$  为基于最小数据集计算得出的土壤质量指数值。有效系数( $E_f$ )越接近 1,表示基于最小数据集计算的土壤质量指数与基准值越接近,精度越高。相对偏差系数( $E_R$ )越接近 0,表示基于最小数据集计算的土壤质量指数相对于基准值偏差越小,精度越高。

### 1.3.5 小麦产量及其构成因素测定

在 2023 年 5 月底收获时,对各处理中小麦随机取 10 株,测定其单株穗数、穗粒数以及千粒质量,计算不同处理下的小麦产量。

## 1.4 数据分析

使用 Microsoft Office 2019 版 Excel 进行数据整理,使用 SPSS 26 软件进行单因素方差分析,使用 R 语言(version 4.1.1)进行多重比较(agricolae 包, version 1.3.5),并进行相关性分析、主成分分析、聚类分析,使用 ggplot2 包(version 3.4.1)作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤基本理化性质

如表 2 所示,在蜡熟期时,不同处理的土壤理化指标均发生了显著的变化。结果表明,未曾施肥的处理(CK1)下的指标数据几乎均最低。就土壤含水率而言,T3 处理数值最高,接近 20%。而且施加生物炭的处理较相应的未施加生物炭的处理表现好,如 T1 略高于 CK2, T5 略高于 T4。就土壤电导率而言, T1 与 T4 处理数值较高,其次是 CK2, T3 略高于 CK1。土壤中的氮素含量以 T3, T4 和 T5 较高,其次是 T1 和

T2, 两者差异无统计学意义, 但均显著高于对照. T3 与 T4 处理下土壤碱解氮含量较高, T2 高于对照, 但 T5, T1 与 CK2 差异无统计学意义. T2 与 T3 处理下土壤磷素含量较高, 而 T1, T4 和 T5 与 CK2 数值相近. 就土壤有机质含量而言, T1 最高, 且显著高于 CK1 和 CK2; T2, T3, T4 和 T5 略高于 CK2 ( $p > 0.05$ ), 且显著高于 CK1. 整体来看, 施加有机物料能够明显提升土壤理化性质, 显著增加其中养分含量, 且以 T3 处理总体表现最好.

表 2 不同处理对土壤理化性状的影响

处理	含水率/ %	电导率/ ( $\mu\text{s} \cdot \text{cm}^{-1}$ )	全氮/ ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	碱解氮/ ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	全磷/ ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	速效磷/ ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	有机质/ ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )
CK1	17.50±0.41b	29.60±1.91e	0.48±0.02d	47.69±1.38e	1.45±0.02c	52.04±4.36d	21.01±0.30c
CK2	16.92±0.31c	48.01±0.82b	0.66±0.04c	56.04±0.28cd	1.86±0.01b	91.91±7.48c	26.11±0.94bc
T1	17.45±0.37bc	53.20±3.32a	0.91±0.02b	53.75±3.23d	1.83±0.05b	89.81±4.36c	39.78±1.24a
T2	16.26±0.21d	43.87±0.84c	0.89±0.02b	67.68±2.16b	1.94±0.09ab	98.00±5.26c	28.70±9.23bc
T3	19.67±0.44a	38.93±4.76d	0.99±0.08a	74.47±5.06a	2.07±0.17a	182.18±3.4a	30.92±8.42b
T4	17.41±0.26bc	54.63±0.49a	1.04±0.03a	78.76±3.42a	1.81±0.15b	122.01±3.17b	33.66±3.44ab
T5	17.95±0.16b	40.22±1.91cd	0.97±0.07ab	60.63±0.39c	1.85±0.03b	116.28±7.34b	34.26±0.51ab

注: 表中不同小写字母表示处理间差异有统计学意义 ( $p < 0.05$ ), 下同.

## 2.2 土壤酶活性

图 1 所示为蜡熟期土壤 24 h 内蔗糖酶与蛋白酶活性以及 20 min 内过氧化氢酶活性. 与蔗糖酶相较, 各处理下土壤中过氧化氢酶与蛋白酶活性虽存在显著差异, 但总体来看差距不大.

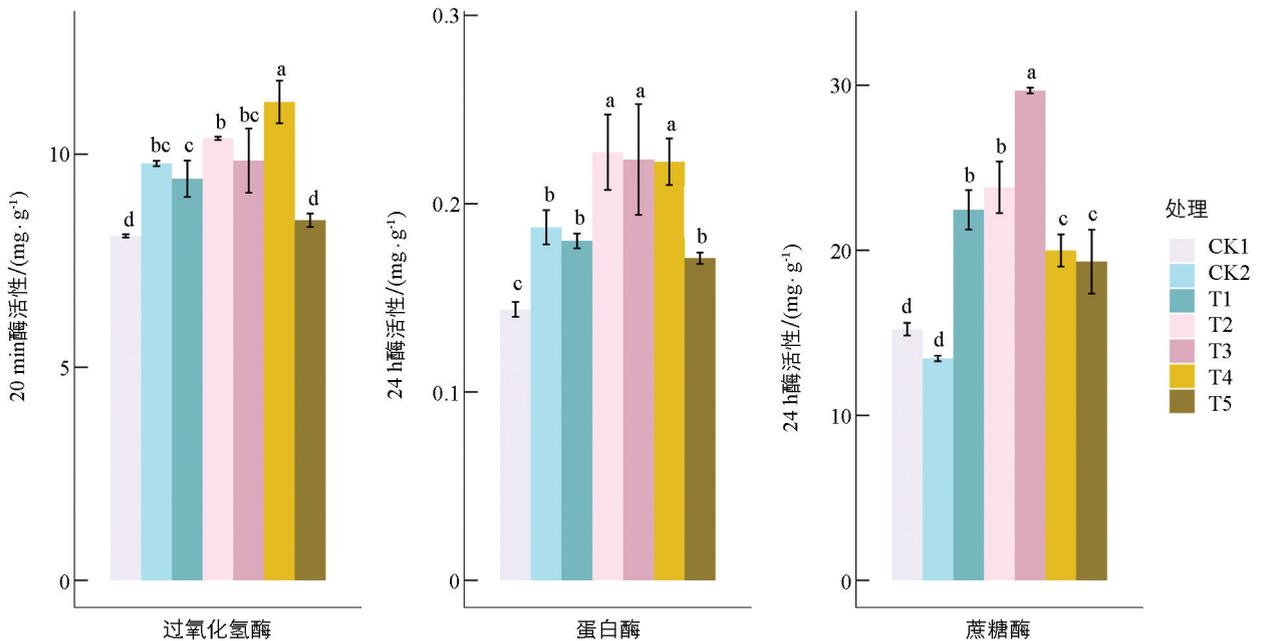


图 1 土壤酶活性

CK1 的过氧化氢酶活性与 T5 之间差异无统计学意义, 并显著低于其他处理. CK2 与 T1, T2 及 T3 之间差异无统计学意义. CK1 的蛋白酶活性显著低于其他处理, CK2 与 T1, T5 之间差异无统计学意义. 同时, T2, T3 与 T4 蛋白酶活性显著高于其他处理. T4 的过氧化氢酶活性显著高于其他处理, 较 CK2 显著提高了 14.75%. CK1 的蔗糖酶活性与 CK2 差异无统计学意义, 且显著低于其他处理, T3 显著高于其他处理, 且较 CK2 显著提高了 120.74%.

## 2.3 土壤微生物代谢功能

图 2 表示各处理下土壤中微生物对不同碳源代谢利用的平均颜色变化率 (Average Well Color Develop-

ment, AWCD)随时间的变化轨迹. 可以看到在初期(0~72 h), AWCD 上升较快, 到后期尤其是 120 h 后则趋于平缓. 总体表现为 T5 最大, CK1 最小. 现采取 120 h 的数据进行后续分析.

如表 3 所示, 在 120 h 时, 微生物功能多样性指数在不同处理间表现不一. AWCD 以及各多样性指数均以 T5 为最高, 且均以 CK1 为最低. T2, T3 的 Simpson 优势度指数( $D$ )与 T4, T1 和 CK2 差异无统计学意义, 但是 T4 显著高于 CK2. T1 与 T3 的 Shannon 多样性指数( $H$ )与 T5 差异无统计学意义, 而 T1 略低且与 T2, T4 差异无统计学意义, 但以上处理都显著高于 CK2. T5 的均匀度指数( $E$ )与 T1, T2 与 T3 差异无统计学意义, 但显著高于 T4 和 CK2.

如图 3 所示, 根据各处理对 31 种碳源利用强度影响的不同, 可以将其分为 6 大类. 可以看到相对于 CK1, 其余各处理能不同程度提升土壤微生物代谢能力. 其中, T5 与 T1 的提升效果较为明显. 而 T5 处理除对“L-苯丙氨酸、D-纤维二糖”与“ $\alpha$ -D-乳糖、 $\beta$ -甲基-D-葡萄糖苷、D-苹果酸、L-精氨酸、吐温 40、D-甘露醇、N-乙酰-D-葡萄糖胺”两类碳源的利用强度较低外, 对其余类碳源利用强度的提升效果相对较强; 而对“L-苏氨酸、2-羟基苯甲酸、 $\alpha$ -丁酮酸”这一类碳源的利用强度的影响尤为明显.

表 3 不同处理下土壤微生物群落多样性指数

处理	Simpson 优势度指数( $D$ )	Shannon 多样性指数( $H$ )	均匀度指数( $E$ )	碳源丰富度指数( $S$ )	AWCD
CK1	0.957 8±0.001 9d	3.235 9±0.018 4d	0.962 3±0.010 7d	28.33±0.58c	1.350 2±0.114 8d
CK2	0.961 0±0.000 2c	3.277 6±0.011 0c	0.974 0±0.002 5c	28.67±0.58bc	1.674 6±0.002 5b
T1	0.961 6±0.000 1c	3.305 5±0.001 2ab	0.991 9±0.000 5ab	28.33±0.58c	1.728 9±0.026 0b
T2	0.962 2±0.001 2bc	3.318 2±0.024 7b	0.985 4±0.007 3ab	29.33±0.58abc	1.565 3±0.084 6c
T3	0.963 5±0.000 3bc	3.350 2±0.004 1a	0.995 1±0.001 1ab	30.00±1.00a	1.666 6±0.001 7bc
T4	0.963 6±0.000 4b	3.357 5±0.007 9b	0.984 5±0.005 1bc	29.67±0.58ab	1.681 8±0.019 5b
T5	0.965 5±0.000 3a	3.387 3±0.005 7a	0.995 9±0.001 7a	30.33±0.58a	2.001 1±0.061 2a

主成分双序图 4 所体现出的处理与各碳源的相关关系与前文类似. 根据主成分分析所得的新综合指标对各处理的影响效果进行评价, 可以发现 T5 和大多碳源代谢强度具有明显相关性, 提升效果最强, CK1 几乎与所有碳源代谢强度箭头相背, 提升效果最弱, 而 T4 与 CK2 相近.

31 种碳源可被分为碳水化合物类、氨基酸类、羧酸类、胺类、酚酸类和多聚物类共 6 类. 不同处理对这 6 类碳源的利用强度如图 5 所示. 可以看出, 各处理对酚酸类碳源的利用强度相对最低, 对多聚物类的利用强度相对最高. 而各处理中, T5 对各不同碳源的利用强度几乎皆显著高于其他处理, CK1 则几乎皆显著低于其他处理. T4 对于胺类碳源的利用强度略低于 T5( $p>0.05$ ), 且与 T2 差异无统计学意义, 但它们皆显著高于其他处理. T1 对于氨基酸类碳源的利用强度显著低于 T5, 显著高于 CK2, T2, T3 和 T4. 施用了生物炭的处理对于碳水化合物类的利用强度显著高于相应未施用生物炭的处理, 如 T5 高于 T4, T3 高于 T2, T1 高于 CK2. 相同的趋势也体现在各处理对于羧酸类与酚酸类碳源的利用强度, 但是各处理对于后者的利用强度的影响大多不显著.

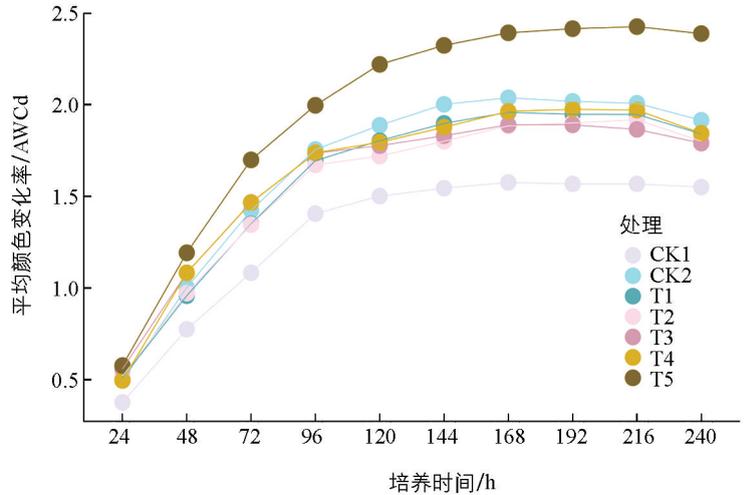
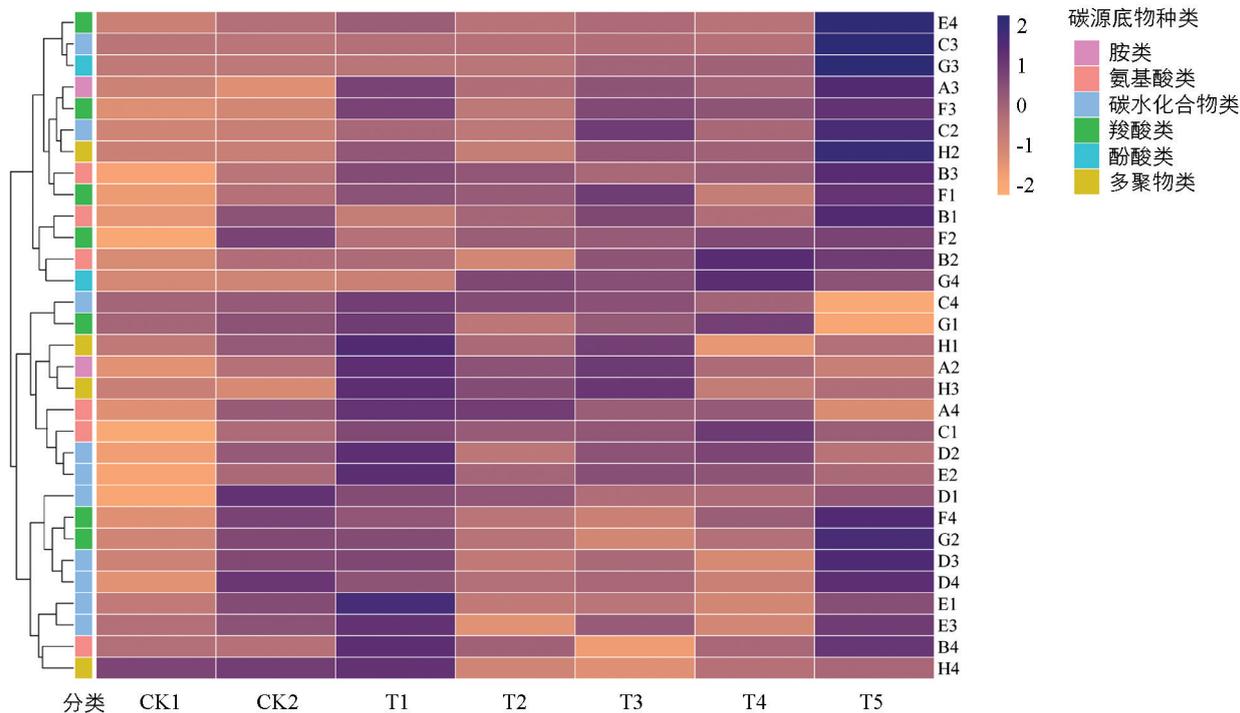


图 2 碳源代谢利用平均颜色变化率



碳水化合物类有 G1(D-纤维二糖)、H1( $\alpha$ -D-乳糖)、A2( $\beta$ -甲基-D-葡萄糖苷)、B2(D-木糖)、C2(I-赤藓糖醇)、D2(D-甘露醇)、E2(N-乙酰-D-葡萄糖胺)、G2(L-磷酸葡萄糖)、H2(D, L- $\alpha$ -磷酸甘油)和 A3(D-半乳糖酸- $\gamma$ -内脂)。氨基酸类有 A4(L-精氨酸)、B4(L-天冬氨酸)、C4(L-苯丙氨酸)、D4(L-丝氨酸)、E4(L-苏氨酸)和 F4(甘氨酸-L-谷氨酸)。羧酸类有 F2(葡萄糖酰胺)、B3(D-半乳糖醛酸)、B1(丙酮酸甲酯)、E3( $\gamma$ -羟丁酸)、F3(衣康酸)、G3( $\alpha$ -丁酮酸)和 H3(D-苹果酸)。酚酸有 C3(2-羟基苯甲酸)和 D3(4-羟基苯甲酸)。多聚物类有 C1(吐温 40)、D1(吐温 80)、E1( $\alpha$ -环式糊精)和 F1(肝糖)。胺类有 G4(苯乙胺)和 H4(腐胺)。下图同。

图 3 土壤微生物对 31 种碳源代谢聚类热图

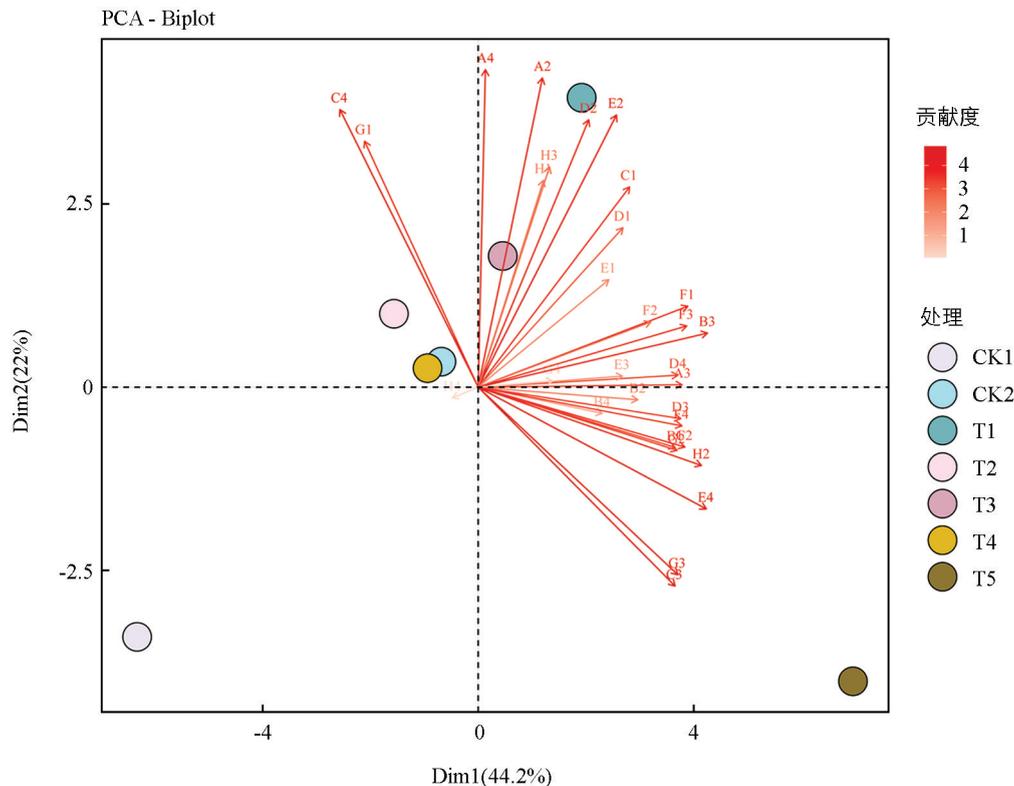


图 4 不同处理与 31 种碳源代谢特征主成分双标图

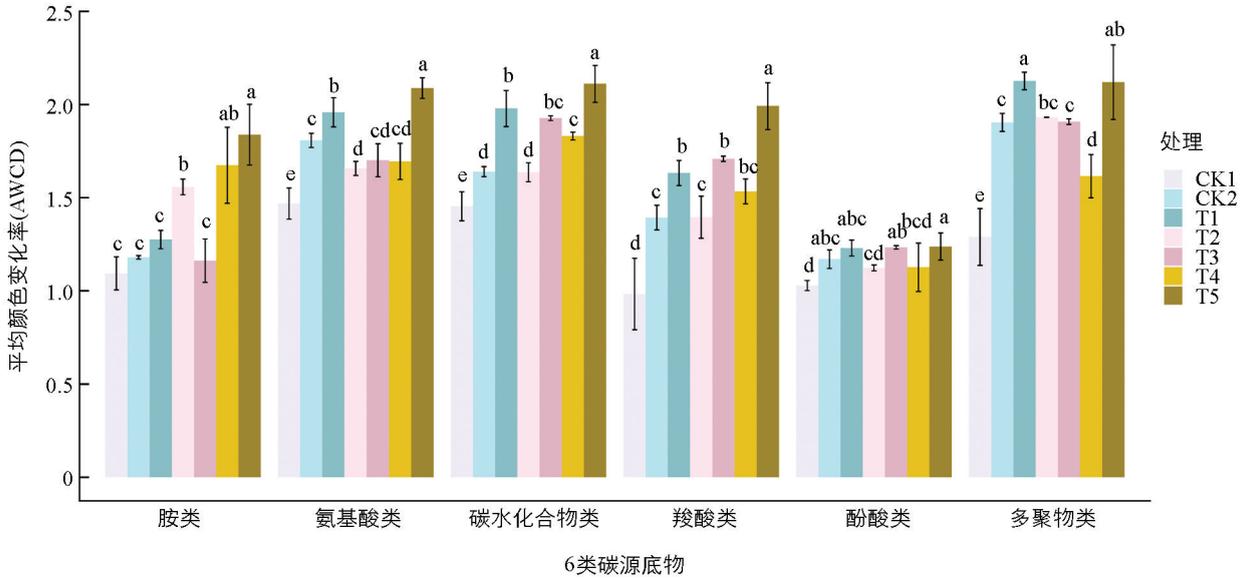


图 5 不同处理下 6 类碳源代谢利用强度

## 2.4 土壤质量指数

将上述有关土壤性质的指标进行主成分分析, 获得的 4 个主成分的解释度分别为 34%, 27%, 23%, 17%, 特征值分别为 4.51, 3.56, 3.09, 2.24, 均 > 1. 后在每个主成分下分别选取碳源丰富度指数(S)、蔗糖酶活性、过氧化氢酶活性及土壤有机质含量构建土壤质量指数最小数据集(SQI-MDS).

最终 SQI-MDS 与土壤质量指数全量数据集(SQI-TDS)的关系如图 6a 所示, 可见两者几乎成正比, 且关系紧密. Nash 有效系数( $E_f$ )为 0.973 3, 相对偏差系数( $E_R$ )为 0.116 4, 总体来看, SQI-MDS 构建成功.

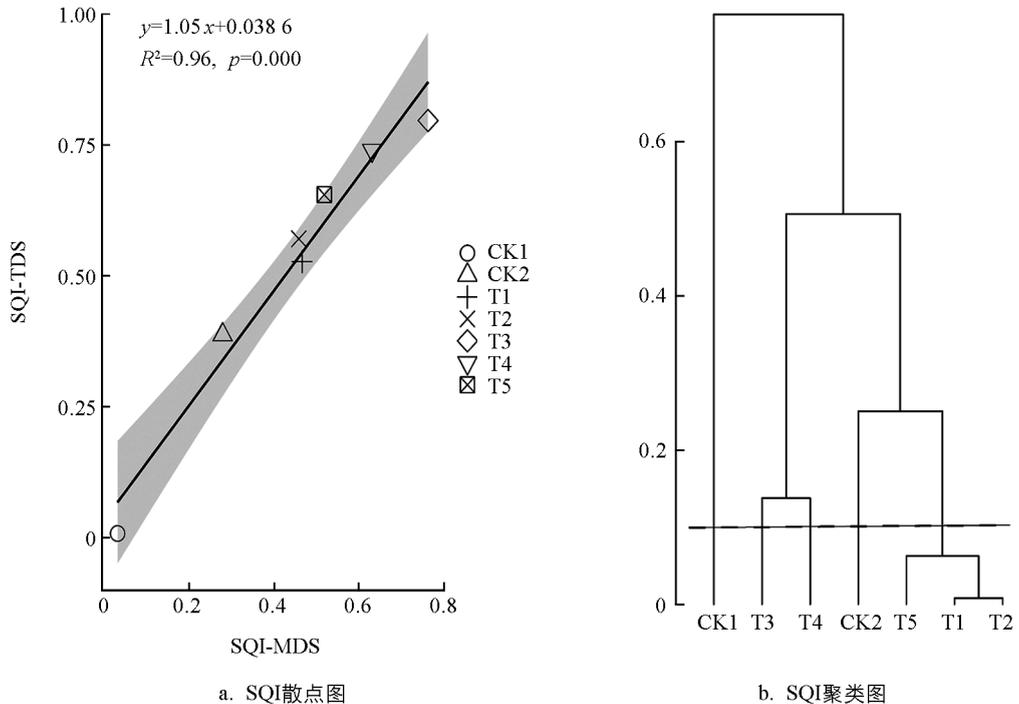


图 6 SQI 散点图和 SQI 聚类图

根据 SQI-MDS 进行聚类分析, 结果如图 6b 所示. 可知各处理下土壤质量可分为 5 类, 排序为: T3 > T4 > T5 = T2 = T1 > CK2 > CK1. T3 土壤质量最高, T5, T2, T1 居中, CK1 最差.

## 2.5 小麦产量及其构成因素

如表 4 所示, T3 处理下的小麦产量及其构成因素均为最高, T1, T2 产量与其差异无统计学意义; T2 略低, 且与 CK2 差异无统计学意义; T4 与 T5 的产量次之, CK1 的产量最低. 各处理下小麦千粒质量差异尤为明显, 有添加生物炭的处理较相应未添加生物炭的处理高.

表 4 不同处理对小麦产量及其构成因素的影响

处理	穗数/(个·株 <sup>-1</sup> )	千粒质量/g	穗粒数/(粒·穗 <sup>-1</sup> )	产量/(kg·hm <sup>-2</sup> )
CK1	2.29±0.49c	49.49±0.57d	34.13±5.84c	1 024.28±41.14d
CK2	3.43±0.53ab	47.40±0.43f	37.55±5.57bc	1 988.61±106.73b
T1	3.86±0.90a	48.87±0.18e	42.73±4.67a	2 268.07±227.18a
T2	4.00±0.82a	50.65±0.44b	37.55±5.77bc	2 135.41±164.16ab
T3	3.86±0.69a	52.23±0.47a	40.45±5.22ab	2 268.83±132.45a
T4	3.43±0.53ab	50.04±0.47c	37.82±3.34bc	1 714.37±76.52c
T5	3.14±0.38b	52.20±0.49a	38.00±4.52bc	1 807.74±105.66c

## 3 讨论与结论

### 3.1 讨论

#### 3.1.1 土壤理化性质对不同施肥方式的响应

土壤养分是植株进行生命活动的主要物质来源, 其在土壤中的含量与形态对于植物吸收利用有显著影响及重要意义<sup>[22-23]</sup>. 而施用有机肥和生物炭可以在不同程度上改变土壤中的养分形态, 并通过本身性质(如生物炭具有较大孔隙度和比表面积)改良土壤结构, 促进元素循环, 抑制养分流失, 进而提升土壤养分含量<sup>[24-25]</sup>. 而且其本身也能缓慢而持续地向土壤中释放养分<sup>[26]</sup>. 本研究中, 相较于对照, 通过增加施入土壤的肥料中有机肥及生物炭比例, 土壤的氮素、磷素以及有机质含量均有不同程度升高, 这与前人的研究一致<sup>[27]</sup>. 同时, 这些处理下土壤中碱解氮与有效磷的含量也显著增加, 这代表着施加有机肥与生物炭能够提升养分有效性<sup>[28]</sup>. 而相对于 T4, 添加了生物炭的 T5 处理土壤碱解氮含量略低, 可能是因为具有多孔性质的生物炭能够吸附元素, 以此降低其有效性<sup>[29]</sup>.

土壤酶可以催化分子反应, 直接参与土壤的新陈代谢, 便于作物与微生物吸收养分, 在土壤中的元素循环过程中扮演重要角色, 其活性是土壤评价体系中的重要生物学指标<sup>[30-31]</sup>. 同时, 不同的栽培措施以及土壤改良措施在影响土壤中元素含量以及化学计量比的前提下, 将会给不同种类的土壤酶活性带来不同的影响<sup>[32-33]</sup>. 总体来看, 在本研究中, 施加有机肥与生物炭均能较对照提升蛋白酶、蔗糖酶与过氧化氢酶的活性, 这与前人的研究相似<sup>[34]</sup>. 这是因为添加有机肥与生物炭可以增加土壤中的营养元素含量, 增强其有效性与移动性, 整体上改良土壤环境, 促进生物量增加, 从而提高了酶活性<sup>[1, 35]</sup>. 同时, 有机物料的丰富比表面积与孔隙利于微生物附着, 可以促进酶的分泌<sup>[36]</sup>. 不过, 当有机物料的添加比例过大时(如 T5), 土壤酶活性略有降低, 这可能是因为有机物料吸附过多底物, 并导致土壤酸碱度上升, 对土壤元素循环造成了消极影响<sup>[37-38]</sup>.

#### 3.1.2 土壤微生物代谢功能对不同施肥方式的响应

通过分析土壤微生物对于 Biolog 生态板上碳源底物的利用情况可以探知其代谢特征, 而 AWCD 是表征土壤微生物代谢活性的重要指标, AWCD 越大, 表明其活性越高<sup>[39]</sup>. 在本研究所测定的微生物多样性、均匀度以及 AWCD 指标(包括不同类别碳源底物)中, T3 及 T5 数值表现最好, 而且添加生物炭的处理相对较优. 说明添加一定量的有机物料(生物炭)能提升土壤微生物的代谢活性, 这与前人的研究结果一

致<sup>[40]</sup>. 这可能是因为有有机物料的加入可以改良土壤结构, 增强土壤通气性, 调节 pH 值, 提升养分含量, 营造有利于微生物生长代谢的环境<sup>[41]</sup>. 同时, 本研究发现不同比例的生物炭投入对于不同类别的微生物提升情况不同, 可能是因为生物炭在促进一些微生物种群繁殖的同时, 会抑制另一些微生物种群的繁殖<sup>[42]</sup>. 具体作用机制可能和具体的生物炭材质、耕作环境相关, 还有待于进一步深入研究.

### 3.1.3 土壤质量对不同施肥方式的响应

在构建土壤质量指数最小数据集的过程中, 选取了有关微生物代谢特性、酶活性以及土壤养分的 4 个指标, 基本涵盖了本研究涉及的土壤指标. 最终结果显示, 添加有机物料的处理下土壤质量指数较高. 而且 SQI 数值最高的 T3 处理产量也最高, 整体与产量指标趋势相吻合. 值得注意的是, T4 与 T5 土壤质量指数虽高, 但产量表现不佳. 这可能是因为 SQI 主要依据生长后期土样数据构建, 但小麦的生长过程中前期土壤的表现也尤为重要, 而化肥养分释放效率较高, 导致产量一定程度上较高. 土壤的改良过程是漫长的, 具体表现还需较长时间来验证, 土壤质量对肥料施用的响应规律还有待进一步深入研究.

### 3.1.4 小麦产量对不同施肥方式的响应

有机物料的施加对于作物产量的影响效果往往因具体作用环境的不同而不同. 有试验显示, 配合化肥施加生物炭能够改善酸性土壤的性质, 进而提升水稻的产量<sup>[43]</sup>. 但是也有一些试验表明, 施加生物炭或将抑制作物幼苗的生长, 对于植物生物量的积累并无促进作用<sup>[44-45]</sup>. 在本研究中, 一定量的生物炭、有机肥配施化肥将提升小麦产量, 但是有机物料的比例进一步加大时, 作物的产量反而下降, 说明当有机物与化肥的比例过大时将抑制作物生长, 这与前人的研究结果一致<sup>[46-47]</sup>. 这可能是由于有机物料的适量添加有利于改良土壤理化性质, 增强保水保肥能力, 提高养分含量, 利于作物的吸收利用<sup>[48]</sup>. 此外, 添加了有机物料的处理千粒质量较高, 且占比过大的处理穗粒数较少. 这可能是由于养分在土壤中释放较为缓慢且持久, 更能促进在作物生育后期形成的干物质向籽粒分配转运, 作物粒质量由此得以提高<sup>[49]</sup>.

## 3.2 结论

1) 化肥减量配施有机肥与生物炭能够有效提升土壤养分含量, 增强土壤酶活性及微生物代谢能力.

2) 肥料改良土壤的效果与有机物料的施加比例相关. 仅就本研究结果来看, 在 N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, K<sub>2</sub>O 施用量分别为 225, 90, 90 kg/hm<sup>2</sup> 条件下, 化肥减量 20% 与有机肥 (3 000 kg/hm<sup>2</sup>) 和生物炭 (10 000 kg/hm<sup>2</sup>) 配施能较好提升土壤质量, 显著提升作物产量.

## 参考文献:

- [1] 谢育利, 王吉平, 苏天明, 等. 有机肥部分替代化肥对生菜生长及土壤环境的影响 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2022, 44(5): 41-49.
- [2] 谢达, 赵伟. 粮食产量和化肥用量“双增长”与土地质量和耕地地力“双下降”存在问题及对策建议 [J]. 农村经济与科技, 2022, 33(4): 10-12.
- [3] TANG J C, ZHU W Y, KOOKANA R, et al. Characteristics of Biochar and Its Application in Remediation of Contaminated Soil [J]. Journal of Bioscience and Bioengineering, 2013, 116(6): 653-659.
- [4] WEBER K, QUICKER P. Properties of Biochar [J]. Fuel, 2018, 217: 240-261.
- [5] ZHAO W, ZHOU Q, TIAN Z Z, et al. Apply Biochar to Ameliorate Soda Saline-Alkali Land, Improve Soil Function and Increase Corn Nutrient Availability in the Songnen Plain [J]. The Science of the Total Environment, 2020, 722: 137428.
- [6] 胡建民, 苗俊艳, 许秀成. 科学认识和辨别有机肥 [J]. 肥料与健康, 2022, 49(1): 11-15.
- [7] 贾然然. 多措并举, 实现重点作物差异化管理: 农业部印发《开展果菜茶有机肥替代化肥行动方案》(下) [J]. 中国农资, 2017(6): 16.
- [8] 尹仕美, 胡春光. 生物炭和枯草芽孢杆菌对 Cd 污染土壤中萱草生长和土壤修复的影响 [J]. 分子植物育种, 2023,

- 21(21): 7201-7207.
- [9] 程伟. 煤矿区充填复垦土壤生物学特性及其变化研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2015.
- [10] 孙媛媛. 红壤区土地利用方式对土壤质量及微生物群落特征的影响研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2023.
- [11] 王怡宁, 郝鲜俊, 高文俊, 等. 有机肥对矿区复垦土壤团聚体活性有机碳含量的影响 [J]. 山西农业科学, 2023, 51(11): 1299-1306.
- [12] 裴浩, 苗宇, 侯瑞星. 全球黑土区有机物料还田对土壤有机碳固存影响的 Meta 分析 [J]. 农业工程学报, 2023, 39(16): 79-88.
- [13] 任立军, 李金, 邹洪涛, 等. 生物有机肥配施化肥对设施土壤养分含量及团聚体分布的影响 [J]. 土壤, 2023, 55(4): 756-763.
- [14] 黄尚书, 江新风, 朱同, 等. 有机肥全量替代化肥对茶园土壤机械稳定团聚体无机氮分布特征的影响 [J]. 华北农学报, 2023, 38(4): 141-151.
- [15] 牛磊, 郑春丽. 生物炭协同微生物矿化技术修复复合重金属污染农田土壤 [J]. 有色金属工程, 2023, 13(11): 141-155.
- [16] 冯二朋, 张立伟, 赖勇, 等. 王屋山不同海拔植被-土壤耦合协调度研究 [J]. 河南农业大学学报, 2023, 57(6): 949-957.
- [17] 王文慧, 蒋志慧, 张纪, 等. 生物炭对大豆根际土壤酶活性及产量的影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2023(6): 147-153.
- [18] 关松荫. 土壤酶及其研究法 [M]. 北京: 农业出版社, 1986.
- [19] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [20] 赵贺, 王绪奎, 刘绍贵, 等. 基于水稻产量的江苏省稻麦轮作区土壤质量评价 [J]. 土壤, 2020, 52(6): 1230-1238.
- [21] 刘鑫, 王一博, 吕明侠, 等. 基于主成分分析的青藏高原多年冻土区高寒草地土壤质量评价 [J]. 冰川冻土, 2018, 40(3): 469-479.
- [22] 娄伟, 李梦媛, 严翔, 等. 微生物水溶肥对赣南脐橙品质及重金属含量的影响 [J]. 中国南方果树, 2023, 52(5): 30-35.
- [23] 高欣欣, 刘高源, 刘少春, 等. 机械压实对蔗田土壤和甘蔗根系的影响研究进展 [J]. 热带农业科学, 2020, 40(11): 29-34.
- [24] 刘柏延, 陈姗姗, 苏丽影, 等. 生物炭对甘薯生长和产量性状的影响 [J]. 东北农业科学, 2023, 48(5): 117-121.
- [25] LI Z C, SONG Z L, SINGH B P, et al. The Impact of Crop Residue Biochars on Silicon and Nutrient Cycles in Crop-lands [J]. The Science of the Total Environment, 2019, 659: 673-680.
- [26] CUI L Q, IPPOLITO J A, NOERPEL M, et al. Nutrient Alterations Following Biochar Application to a Cd-Contaminated Solution and Soil [J]. Biochar, 2021, 3: 457-468.
- [27] 张秀志, 郭甜丽, 焦学艺, 等. 商品有机肥配施对果园土壤肥力和“蜜脆”苹果果实品质的影响 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2022, 44(1): 65-74.
- [28] 曾玉戈, 杨丽, 徐雅欣, 等. 喷施壳聚糖对枇杷幼苗养分吸收的影响 [J]. 四川农业科技, 2023(7): 42-48.
- [29] 高倩倩, 杨孜奕, 潘芳莹, 等. 生物炭施用下亚热带红壤铁还原及磷形态转化关系研究 [J]. 林业科学研究, 2023, 36(5): 149-159.
- [30] 王若彤, 陈思杰, 鞠明岫, 等. 枸杞深色有隔内生真菌定殖规律及其与土壤因子的相关性 [J]. 西北农业学报, 2023, 32(12): 1953-1963.
- [31] 曹梦仪, 沈童, 韩经纬, 等. 改厕粪肥等氮替代化肥对黄瓜产量、品质及土壤养分的影响 [J]. 安徽农业大学学报, 2023, 50(6): 1036-1044.
- [32] 陈健, 卢伟伟, 杜娅茹, 等. 生物质炭和氮肥对马尾松人工林土壤微生物群落结构和酶活性的影响 [J]. 环境科学学报, 2023, 44(4): 333-343.
- [33] 李跃飞, 李彬, 祁石刚, 等. 不同土壤改良方法对草莓连作土壤理化性状、养分和微生物量的影响 [J]. 特产研究, 2023, 45(6): 46-52.
- [34] 邹东方, 陈荣, 李佳俊, 等. 脱落酸对‘紫甜无核’葡萄果实品质的影响研究 [J]. 河南农业大学学报, 2023, 57(5):

794-803.

- [35] 丁馨茹, 徐曼, 严宁珍, 等. 4 种改良剂对紫色土 Cd 生物有效性及土壤酶活性的影响 [J]. 环境科学, 2024, 45(6): 3523-3532.
- [36] 刘威, 赵园园, 陈小龙, 等. 不同有机肥对豫中和滇西烟区土壤氮素矿化及酶活性的影响 [J]. 河南农业科学, 2023, 52(11): 85-93.
- [37] 姚彤, 胡晓龙, 贾永红, 等. 玉米秸秆生物炭对天人菊土壤理化性质及根际土壤真菌群落结构的影响 [J]. 南方农业学报, 2021, 52(4): 942-950.
- [38] 邓晓, 武春媛, 杨桂生, 等. 椰壳生物炭对海南滨海土壤的改良效果 [J]. 生态环境学报, 2022, 31(4): 723-731.
- [39] 谭德星, 鲁雪利, 苏晓艺. 酵素微生物套餐肥对桃园果实品质及土壤微生态的影响 [J]. 中国果菜, 2022, 42(9): 58-62.
- [40] DU J J, ZHANG Y Y, QU M X, et al. Effects of Biochar on the Microbial Activity and Community Structure during Sewage Sludge Composting [J]. *Bioresource Technology*, 2019, 272: 171-179.
- [41] 尹秋霞. 生物炭对睾丸酮丛毛单胞菌 ZG2 矿化修复 Cd 污染土壤的影响研究 [D]. 长春: 吉林农业大学, 2023.
- [42] 张璐, 阎海涛, 任天宝, 等. 有机物料对植烟土壤养分、酶活性和微生物群落功能多样性的影响 [J]. 中国烟草学报, 2019, 25(2): 55-62.
- [43] MAIKOL N, HARUNA A O, MARU A L, et al. Utilization of Urea and Chicken Litter Biochar to Improve Rice Production [J]. *Scientific Reports*, 2021, 11(1): 9955.
- [44] 黄兆琴, 赵可馨, 张乃文, 等. 生物炭的性质及其环境效应研究 [J]. 广州化工, 2020, 48(19): 22-26.
- [45] 代银分, 李永梅, 李丽, 等. 秸秆生物炭对施猪粪有机肥土壤磷流失及白菜产量的影响 [J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2016, 36(11): 793-799.
- [46] 冯晓彤, 翟车宇, 刘昌杰, 等. 东北典型黑土坡耕地不同坡位土壤团聚体特征分析 [J]. 东北农业大学学报, 2024, 55(1): 43-49, 69.
- [47] WANG H F, ZHENG H, JIANG Z X, et al. Efficacies of Biochar and Biochar-Based Amendment on Vegetable Yield and Nitrogen Utilization in Four Consecutive Planting Seasons [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 593-594: 124-133.
- [48] 樊红柱, 周焰西, 王勇, 等. 化肥减量配施生物炭对烤烟产质量及主要化学成分的影响 [J]. 广东农业科学, 2023, 50(8): 31-40.
- [49] 惠超, 杨卫君, 邓天池, 等. 生物炭用量对灌区春小麦干物质和氮素积累、转运及产量的影响 [J]. 作物杂志, 2022(6): 201-207.

责任编辑 包颖  
崔玉洁