

# 改良剂对秦巴山区新造耕地土壤质量的影响

石浩<sup>1,3</sup>, 李洪义<sup>2</sup>, 张献华<sup>1,3</sup>, 贺佰成<sup>2</sup>, 殷俐娜<sup>1,3,4</sup>, 王仕稳<sup>1,3,4</sup>

(1.西北农林科技大学, 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 2.汉滨区农业农村局, 陕西 安康 725000; 3.西北农林科技大学, 水土保持科学与工程学院, 水土保持与荒漠化整治全国实验室, 陕西 杨凌 712100; 4.中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:** [目的] 研究不同改良剂对秦巴山区新造耕地土壤质量的提升效果, 旨在为新造耕地土壤质量快速提升和恢复生产提供理论依据和技术支持。[方法] 通过 2 a 田间试验, 设置对照(CK)、硫酸亚铁(T<sub>1</sub>)、生物炭(T<sub>2</sub>)、微生物菌剂(T<sub>3</sub>)和复合处理(T<sub>4</sub>)5 个处理, 从玉米产量、土壤物理结构、化学性质、土壤酶活性 4 个方面探究不同改良剂对新造耕地土壤质量和玉米产量提升的效果。[结果] 相比于 CK, T<sub>2</sub>, T<sub>3</sub>, T<sub>4</sub> 处理的玉米产量分别增加了 17.31%, 30.57% 和 25.89%。5 个处理的土壤质量指数顺序为: T<sub>4</sub> > T<sub>2</sub> > T<sub>3</sub> > T<sub>1</sub> > CK。T<sub>2</sub> 和 T<sub>4</sub> 处理的土壤 pH 值、容重、有机质、全氮和碱解氮含量均接近秦巴山区优等耕地水平, 同时, T<sub>1</sub> 处理的土壤容重和 T<sub>3</sub> 处理的土壤 pH 值以及容重也接近优等耕地水平。土壤有机质含量是影响土壤物理性质、养分含量和土壤酶活性的关键因素, 而土壤微生物活性低可能是限制新造耕地产量提升的主要因素。[结论] 基于新造耕地土壤质量提升角度, 生物炭和复合处理可作为该地区新造耕地的重要改良措施; 而若考虑成本和产量提升, 可选择微生物菌剂作为该地区新造耕地的主要改良措施。

**关键词:** 新造耕地; 土壤质量; 土壤理化性质; 土壤改良剂; 秦巴山区

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2025)04-0050-12

中图分类号: S714.8

**文献参数:** 石浩, 李洪义, 张献华, 等. 改良剂对秦巴山区新造耕地土壤质量的影响[J]. 水土保持通报, 2025, 45(4): 50-61. Shi Hao, Li Hongyi, Zhang Xianhua, et al. Effects of amendments on soil quality in newly created cultivated land in Qinba Mountain area [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(4): 50-61. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2025.04.009; CSTR:32312.14.stbctb.2025.04.009.

## Effects of amendments on soil quality in newly created cultivated land in Qinba Mountain area

Shi Hao<sup>1,3</sup>, Li Hongyi<sup>2</sup>, Zhang Xianhua<sup>1,3</sup>, He Baicheng<sup>2</sup>, Yin Lina<sup>1,3,4</sup>, Wang Shiwen<sup>1,3,4</sup>

(1.College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2.Agriculture and Rural Bureau of Hanbin District, Ankang, Shaanxi 725000, China; 3.College of Soil and Water Conservation Science and Engineering, National Laboratory for Soil and Water Conservation and Desertification Control, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 4.Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences & Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** [Objective] The effects of different soil amendments on improving soil quality in newly cultivated land in Qinba Mountain area were investigated to provide theoretical foundations and technical support for the rapid enhancement of soil quality and restoration of agricultural productivity. [Methods] A two-year field experiment was conducted using five treatments: control (CK), ferrous sulfate (T<sub>1</sub>), biochar (T<sub>2</sub>), microbial inoculant (T<sub>3</sub>) and composite amendment (T<sub>4</sub>). The effects of these treatments on soil quality and maize yield were evaluated in terms of four dimensions: maize yield, soil physical structure, chemical properties and soil enzyme activity. [Results] Compared with CK, maize yields increased by 17.31%, 30.57% and 25.89% in the T<sub>2</sub>, T<sub>3</sub>, and T<sub>4</sub> treatments, respectively. The ranking of the soil quality indices for each treatment was as follows: T<sub>4</sub> > T<sub>2</sub> >

收稿日期: 2025-02-14

修回日期: 2025-03-19

采用日期: 2025-03-20

资助项目: 安康市科学技术研究发展计划项目“安康市汉滨区高标准农田土壤质量提升技术与示范”(AK2023-NY-17); 国家重点研发计划项目“典型区域中低产田土壤固碳与产能提升协同技术模式落地机制与示范应用”(2022YFD1901605)

第一作者: 石浩(2000—), 男(汉族), 湖北省十堰市人, 硕士研究生, 研究方向为植物营养与土壤耕地质量提升。Email: shzyy@nwfau.edu.cn.

通信作者: 殷俐娜(1980—), 女(汉族), 黑龙江省佳木斯市人, 博士, 副研究员, 主要从事植物营养、植物生理与土壤改良方面的研究。Email: linayin@nwsuaf.edu.cn.

$T_3 > T_1 > CK$ . The soil pH value, bulk density, organic matter, total nitrogen and alkali-hydrolyzed nitrogen levels of the  $T_2$  and  $T_4$  treatments were very close to the corresponding soil indices of high-quality cultivated land in Qinba Mountain area.  $T_1$  treatment improved soil bulk density and  $T_3$  treatment enhanced soil pH value and bulk density to near-optimal levels. Soil organic matter was the key factor influencing soil physical properties, nutrient content, and enzyme activity, whereas low microbial activity was identified as the primary constraint on yield improvement in the newly created farmland. [Conclusion] For comprehensive enhancement of soil quality, biochar ( $T_2$ ) and composite amendment ( $T_4$ ) are recommended as key technologies for improving newly created farmlands. However, when considering cost-effectiveness and yield improvement, the microbial inoculant ( $T_3$ ) is a practical and efficient measure for newly created farmlands in the region.

**Keywords: newly-created farmland; soil quality; soil physical and chemical properties; soil amendments; Qinba Mountain area**

土壤物理性质、化学性质和微生物活性是土壤质量重要的组成部分。良好的土壤物理性质是作物高产的前提,已有相关研究证实,作物产量与土壤容重和团聚体组成密切相关<sup>[1-2]</sup>。在土壤团聚体形成过程中,土壤单粒通过土壤中高价阳离子的凝聚作用、无机物质的黏结作用、有机物的胶结和复合作用以及有机-矿物复合体和土壤动物等的作用而形成大团聚体。相关研究表明,硫酸亚铁等<sup>[3]</sup>化学改良剂可以通过凝聚作用和黏结作用促进土壤团聚体快速形成,从而影响土壤容重。同时,亦有研究指出生物炭、有机肥等有机改良剂通过胶结作用、复合作用以及有机-矿物复合体的形成来促进土壤团聚体的聚集<sup>[4]</sup>。Tian等<sup>[5]</sup>发现生物炭能够降低粒径 $<0.25$  mm的微团聚体含量,同时增加 $>2$  mm的大团聚体含量,从而来降低土壤容重;马泽等<sup>[6]</sup>研究表明,施用生物炭可以显著增加机械稳定性大团聚体的含量和土壤团聚体的稳定性。在土壤团聚体形成过程中,尽管通过有机-矿物复合体形成的土壤团聚体具有较高的稳定性<sup>[7]</sup>,但从碳投入直至有机-矿物复合体形成是一个复杂且缓慢的过程,而机械稳定性团聚体虽然稳定性较差,但机械稳定性大团聚体为水稳定性大团聚体的形成提供了结构基础<sup>[8]</sup>。因此,促进机械稳定性大团聚体的快速形成有利于水稳定性大团聚体的形成。

土壤养分是作物生长所需营养的重要来源。生物炭、有机肥、秸秆等有机改良剂均对土壤养分的增加有益。有机肥富含氮、磷、钾等养分,但其养分释放缓慢且容易被土壤微生物分解,故而需长期大量施用才能显现明显效果,而长期过量施入可能会导致土壤酸化。秸秆还田虽能提供大量养分,但在山区秸秆粉碎成本较高,且不规范的还田可能导致病虫害滋生,影响作物生长发育。生物炭是由植物残体制作而成,含有大量的碳、磷、钾以及其他中微量元素,且具有较强的稳定性,其效果一般可维持3~5 a,

在操作上比施用有机肥和秸秆还田更为便捷,同时其独特的多孔结构更有利于土壤保水保肥能力的提高<sup>[9]</sup>。研究表明,施用生物炭有利于土壤有机质积累和养分循环<sup>[10]</sup>,土壤有机碳和速效养分的含量显著增加<sup>[11]</sup>,土壤碱解氮、有效磷和有机质含量增加<sup>[12]</sup>。

微生物活性低是新造耕地所面临的主要障碍因素之一。研究表明,接种微生物菌剂能够有效提升土壤微生物的丰富度与多样性,从而改善土壤环境并促进作物生长<sup>[13]</sup>。Li Xuqing等<sup>[14]</sup>发现,施用微生物肥料能够改变土壤微生物结构,促进黄杆菌科细菌等有益微生物数量的增加;于会丽等<sup>[15]</sup>研究表明,微生物菌剂显著促进了土壤细菌的丰富度和多样性,并且显著提高了土壤酶活性。因此,施用微生物菌剂有利于促进新造耕地微生物活性的提高。相关研究指出,生物炭可以通过促进土壤团聚体形成为土壤微生物提供栖息地,通过表面积官能团吸附土壤酶,通过携带的阳离子与酶相结合等途径影响土壤酶的活性<sup>[16]</sup>。Foster E等<sup>[17]</sup>发现生物炭吸附磷酸酶而导致土壤酶活性降低;Hu Xuefeng等<sup>[18]</sup>指出生物炭中的 $Zn^{2+}$ 和 $Mg^{2+}$ 离子与碱性磷酸酶结合而增加酶活性。

高标准农田建设过程中,采取耕地平整、坡地改梯田等工程措施时,生土会进入耕层或覆盖耕层,从而形成新造耕地。新造耕地由于耕层土壤受到扰动,其土壤物理结构欠佳,养分含量低,微生物活性弱,致使生产能力下降。相关研究表明,新造耕地的生产力仅能达到优等耕地的10%~30%<sup>[19]</sup>。秦巴山区耕地多为坡地,经工程措施修建为梯田后,生土进入耕层会导致耕层土壤黏重,土壤有机质和养分含量以及微生物活性显著下降,从而降低耕地的生产能力。因此,探究秦巴山区新造耕地土壤质量快速提升技术,对该地区耕地的快速培肥和作物增产意义重大。

本研究基于秦巴山区新造耕地土壤质量提升的

实际需求,针对新造耕地土壤物理结构欠佳、化学性质差和生物活性低的问题,选用硫酸亚铁、生物炭、微生物菌剂及三者复合施用措施。通过田间试验,旨在揭示不同改良剂对新造耕地作物产量、土壤结构、土壤化学性质和土壤酶活性的影响机制,明确不同改良剂在新造耕地土壤质量和作物产量提升上的效果,为该地区新造耕地土壤质量的提升提供理论支撑和实践依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验地概况

本试验于2023年4—10月在陕西省安康市汉滨区瀛湖镇郭家河村(109°08'E,32°63'N)进行,试验开展两年并测定第二年玉米收获后土壤质量相关指标。试验地所在地区属于亚热带大陆湿润性季风气候,年均降水量799.3 mm,无霜期263 d,年均气温15.7℃;地貌属于陕南秦巴山地,土壤类型为黄褐土。试验地是由坡地改造而成的梯田,障碍因素为土壤质地黏重、有机质和土壤养分含量低,土壤理化性质如表1。同时,通过调研试验地所在地区232处耕地的土壤pH值、容重、有机质、全氮、碱解氮、有效磷和速效钾,依据GB/T 28407—2012计算耕地质量水平,将处于前20%的耕地作为该地区优等耕地,并计算优等耕地各指标的平均值(表1)。

表1 试验地和优等耕地的理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of experimental plots and superior cultivated lands

指标	试验地	优等耕地
pH值	7.34	7.41
容重/(g·cm <sup>-3</sup> )	1.42	1.25
有机质/(g·kg <sup>-1</sup> )	11.48	25.42
全氮/(g·kg <sup>-1</sup> )	0.86	1.24
碱解氮/(mg·kg <sup>-1</sup> )	48.89	88.57
有效磷/(mg·kg <sup>-1</sup> )	8.76	37.90
速效钾/(mg·kg <sup>-1</sup> )	42.35	173.40

### 1.2 供试材料

土壤改良剂为硫酸亚铁(FeSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O),粉末状,含量>99.6%,购买于郑州东阳环保科技有限公司。生物炭,颗粒状,粒径为40目,购买于河南佳禾净水材料有限公司,总碳含量≥70.2%。微生物菌剂,购买于郑州中科华工产品有限公司,有效菌数≥500亿/g,主要为枯草芽孢杆菌、胶冻样类芽孢杆菌、解淀粉芽孢杆菌。供试玉米品种为天育999。

### 1.3 试验设计

本试验采用随机区组设计,共设5个处理:对照

(CK)、硫酸亚铁(T<sub>1</sub>)、生物炭(T<sub>2</sub>)、微生物菌剂(T<sub>3</sub>)和复合处理(T<sub>4</sub>)。各处理均在正常施肥基础上施用改良剂。硫酸亚铁施用量为6 t/hm<sup>2</sup>,每年玉米种植前均施用;生物炭施用量为23 t/hm<sup>2</sup>,仅第1年施用;微生物菌剂施用量为15 kg/hm<sup>2</sup>,每年玉米种植前均施用,复合处理为前三者混合施用,施用量及施用方式与前三者一致。试验中每个处理3个重复,共15个小区,每个小区面积为20 m<sup>2</sup>。施肥量为氮肥(尿素,N>46%)265 kg/hm<sup>2</sup>,磷肥(过磷酸钙,P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>>16%)133 kg/hm<sup>2</sup>,钾肥(氯化钾,K<sub>2</sub>O>60%)160 kg/hm<sup>2</sup>,氮肥按基肥:拔节期=1:1施入,磷肥和钾肥作为基肥全量施入。基肥施入后播种玉米,行距为50 cm,株距为40 cm,密度为5.0×10<sup>4</sup>株/hm<sup>2</sup>。玉米于每年4月下旬播种,9月上旬收获。

### 1.4 测定项目及方法

#### 1.4.1 样品采集及处理

第1次土壤样品采集于2024年玉米抽雄期,采用五点法对不同处理下0—20 cm土层土壤进行采集,剔除可见杂质(石块、根系等)后将五点样品充分混合并平均分为2份,一份自然风干后过1 mm样品筛,用于测定土壤速效养分;另一份过1 mm样品筛后置于-20℃保存,用于土壤酶活性测定。

第2次土壤样品采集于2024年玉米成熟期,采用五点法对不同处理下0—20 cm土层土壤进行采集,剔除可见杂质(石块、根系等)后将五点样品充分混合并分为3份,一份自然风干后过1 mm和0.15 mm样品筛,用于测定土壤化学性质;一份过1 mm样品筛后置于-20℃保存,用于土壤酶活性测定;最后一份自然风干后测定土壤团聚体组成。同时,在每个小区随机采集4 m<sup>2</sup>样方(远离小区边界)内植株,测定玉米地上部干物质及产量。

1.4.2 土壤化学性质的测定 土壤全氮、碱解氮、有效磷、速效钾和有机质分别采用浓H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>消煮—凯氏定氮法、碱解扩散法、NaHCO<sub>3</sub>浸提—钼锑抗比色法、NH<sub>4</sub>OAc浸提—火焰光度计法和重铬酸钾容量法测定<sup>[20]</sup>。

#### 1.4.3 土壤酶活性的测定

分别采用高锰酸钾滴定法、靛酚比色法和对硝基酚磷酸钠比色法测定土壤过氧化氢酶活性、脲酶活性和碱性磷酸酶活性<sup>[21]</sup>。

#### 1.4.4 土壤物理性质的测定

土壤容重采用环刀法;土壤机械稳定性团聚体和水稳定性团聚体分别采用干筛法和湿筛法<sup>[22]</sup>。

根据干筛和湿筛所得数据,计算平均重量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)和团聚体破碎率

(PAD)和分形维数(D),计算公式如下<sup>[23]</sup>:

$$MWD = \frac{\sum_{i=1}^n W_i \times D_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \quad (1)$$

$$GMD = \exp \left[ \frac{\sum_{i=1}^n W_i \ln D_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \right] \quad (2)$$

$$PAD = \frac{DR_{0.25} - WR_{0.25}}{DR_{0.25}} \times 100\% \quad (3)$$

$$D = 3 - \frac{\lg(d_i/d_{max})}{\lg(m_{r<d_i}/m)} \quad (4)$$

式中,  $W_i$ 为第*i*粒级区间的团聚体质量(g);  $D_i$ 为第*i*粒级区间的团聚体平均直径(mm);  $DR_{0.25}$ 为粒级大于0.25 mm的所有机械稳定性团聚体占比(%);  $WR_{0.25}$

为粒级大于0.25 mm所有水稳定性团聚体占比(%);  $d_i$ 为*i*级土壤团聚体平均直径(mm);  $d_{max}$ 为最大粒级土壤团聚体的平均直径(mm);  $m_{r<d_i}$ 为粒径小于 $d_i$ 的土壤团聚体质量之和(g);  $m$ 为土样总质量(g)。

### 1.5 土壤质量指数构建

土壤质量指数(SQI)是反映土壤质量的综合指标,其数值越大,土壤质量越好,其计算公式如下<sup>[24]</sup>:

$$SQI = \sum_{i=1}^n \omega_i \times N_i \quad (5)$$

式中: $\omega_i$ 为第*i*个评价指标的权重;  $N_i$ 为第*i*个评价指标的隶属度值。

采用2024年玉米收获后所测定的全部指标,运用SPSS软件对不同评价指标进行主成分分析,得到各评价指标的权重(表2)。

表2 各评价指标线性组合系数与权重

Table 2 Linear combination coefficient and weight of each evaluation index

指标名称	主成分1	主成分2	主成分3	综合得分系数	权重/%
pH值	0.094 6	0.292 4	0.682 8	0.193 8	5.21
有机质	0.277 3	0.285 1	0.077 4	0.257 3	6.92
全氮	0.226 7	0.358 2	0.303 9	0.259 0	6.97
碱解氮	0.215 9	0.424 8	0.233 9	0.255 9	6.89
有效磷	0.255 9	0.118 8	0.054 7	0.209 3	5.63
速效钾	0.233 6	0.092 3	0.455 1	0.231 6	6.23
机械稳定性大团聚体	0.210 5	0.310 5	0.128 7	0.219 9	5.92
水稳定性大团聚体	0.303 8	0.100 6	0.078 3	0.242 5	6.53
容重	0.288 0	0.110 7	0.070 0	0.232 3	6.25
平均重量直径	0.255 6	0.228 6	0.091 0	0.233 0	6.27
几何平均直径	0.300 1	0.202 2	0.008 9	0.251 0	6.75
团聚体破碎率	0.285 5	0.031 3	0.128 6	0.222 2	5.98
分形维数	0.294 1	0.118 8	0.094 5	0.240 7	6.48
过氧化氢酶活性	0.244 5	0.100 7	0.324 2	0.226 8	6.10
脲酶活性	0.244 3	0.247 5	0.050 6	0.224 1	6.03
碱性磷酸酶活性	0.183 5	0.451 1	0.039 6	0.216 9	5.84

评价指标的隶属度值分别采用S型隶属函数、反S型隶属函数和抛物线型隶属函数计算,评价指标采用试验中测定的全部指标。其中S型隶属函数表示评价指标在一定范围内与土壤质量成正比,适用指标包括有机质、全氮、碱解氮、有效磷、速效钾、大于0.25 mm的机械稳定性团聚体、大于0.25 mm的水稳定性团聚体、平均重量直径、几何平均值、过氧化氢酶、脲酶、蔗糖酶和碱性磷酸酶。反S型函数表示评价指标在一定范围内与土壤质量呈反比,适用指标有团聚体破碎率和分形维数。而抛物线型隶属函数

表示评价指标存在上下阈值,过高或过低均会严重影响土壤质量,适用指标包括土壤容重、pH值,函数的转折点参考许明祥<sup>[25]</sup>的研究。计算公式如下<sup>[26]</sup>:

$$f(x) = \begin{cases} 1 & (x \geq b) \\ \frac{x-a}{b-a} & (a < x < b) \\ 0 & (x \leq a) \end{cases} \quad (6)$$

$$f(x) = \begin{cases} 0 & (x \geq b) \\ \frac{x-b}{a-b} & (a < x < b) \\ 1 & (x \leq a) \end{cases} \quad (7)$$

$$f(x) = \begin{cases} 1 & (b_2 \geq x \geq b_1) \\ \frac{x - a_1}{b_1 - a_1} & (a_1 < x < b_1) \\ \frac{x - a_2}{b_2 - a_2} & (a_2 > x > b_2) \\ 0 & (x \leq a_1 \text{ 或 } x \geq a_2) \end{cases} \quad (8)$$

式中: $x$ 为实际测量值; $a$ 为指标阈值下限; $b$ 为指标阈值上限; $a_1$ 为临界值上限; $a_2$ 为临界值下限; $b_1$ 为适宜值上限; $b_2$ 为适宜值下限。

### 1.6 数据统计与分析

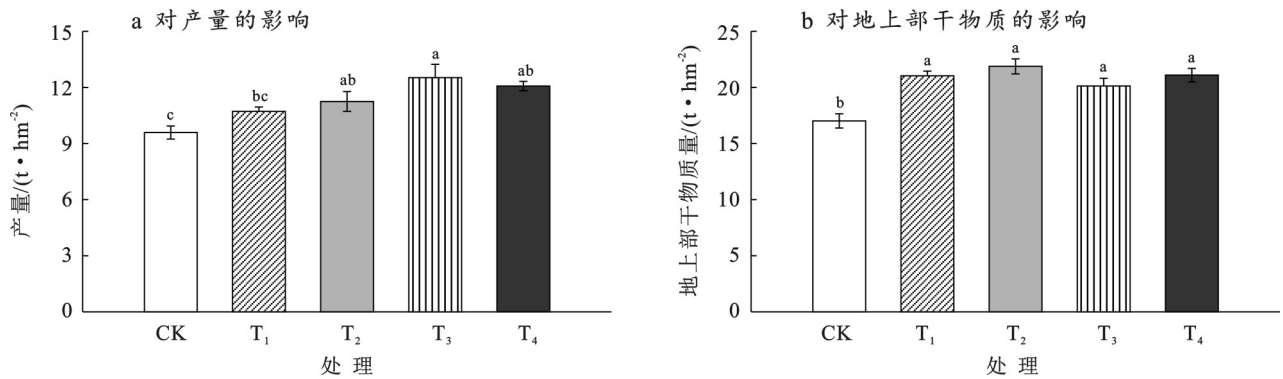
数据处理采用 Microsoft Excel 2021, 利用 SPSS 27.0 软件进行单因素方差分析和多重比较 (Duncan 法,  $p < 0.05$ ), 采用 Pearson's 法进行相关性分析, 利

用 Origin 2022 进行聚类分析以及绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同改良剂对玉米产量和干物质的影响

图 1a 表明, 经过不同改良措施的处理, 玉米产量差异显著。生物炭 ( $T_2$ )、微生物菌剂 ( $T_3$ ) 和复合 ( $T_4$ ) 的玉米产量显著高于对照 (CK), 其中,  $T_3$  的玉米产量最高, 相比于 CK 增加了 30.57%。在玉米地上部干物质方面 (图 1b),  $T_1, T_2, T_3, T_4$  处理的玉米干物质质量分别为 21.03, 21.88, 20.13, 21.10 t/hm<sup>2</sup>, 相比于 CK 分别增加了 23.63%, 28.57%, 18.30% 和 23.98%, 这表明  $T_1, T_2, T_3$  和  $T_4$  处理促进了玉米干物质的积累。



注: ①CK为对照;  $T_1$ 为硫酸亚铁;  $T_2$ 为生物炭;  $T_3$ 为微生物菌剂;  $T_4$ 为复合处理。②图中不同小写字母表示在  $p=0.05$  水平上差异显著, 误差棒表示标准差 ( $n=3$ )。下同。

图 1 不同改良剂对玉米产量和地上部干物质的影响

Fig.1 Effects of different amendments on maize yield and aboveground dry matter

### 2.2 不同改良剂对土壤结构的影响

土壤容重是反映土壤质量的重要指标 (见图 2)。如图 2a 所示, 不同改良措施均显著降低了土壤容重,  $T_1, T_2, T_3$  和  $T_4$  处理的土壤容重分别为 1.21, 1.12, 1.15, 1.10 g/cm<sup>3</sup>, 相比于 CK 分别降低了

11.80%, 18.02%, 15.91% 和 19.71%。如图 2b 所示, 土壤孔隙度的变化相比土壤容重的变化表现出了相反的趋势 (图 2b), 不同处理下的孔隙度均显著高于 CK,  $T_1, T_2, T_3, T_4$  的土壤孔隙度分别为 55.18%, 58.34%, 57.27% 和 59.19%。

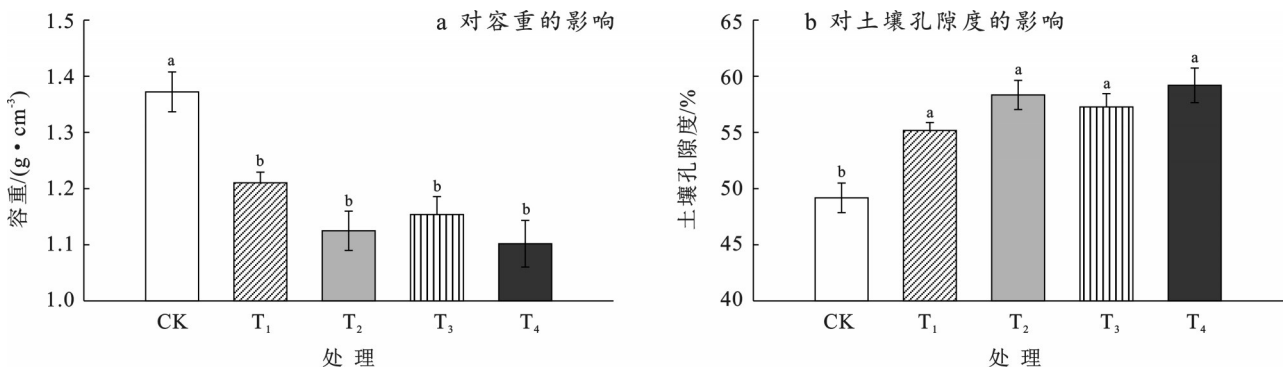


图 2 不同改良剂对土壤容重和土壤孔隙度的影响

Fig.2 Effect of different amendments on soil bulk density and soil porosity

土壤团聚体组成是影响土壤容重的重要因素。不同改良措施处理显著降低了机械稳定性团聚体中<0.25 mm团聚体的占比(表3), $T_1, T_2, T_3$ 和 $T_4$ 处理<0.25 mm机械稳定性团聚体含量均小于对照,而其他粒径下的土壤团聚体含量并无显著差异。图3a表明, $T_1, T_2, T_3$ 和 $T_4$ 处理显著增加了机械稳定性大团聚体含量,这说明 $T_1, T_2, T_3$ 和 $T_4$ 处理促进了<0.25 mm团聚体聚集形成机械稳定性大团聚体。

水稳定性团聚体在农业生产中具有较好的稳定性。相比于CK, $T_1, T_2, T_3$ 和 $T_4$ 处理均显著降低了<0.25 mm微团聚体的含量,同时也显著增加了2~5 mm水稳定性团聚体的含量,其中 $T_1$ 同时促进了1~2 mm水稳定性团聚体的增加(表3)。图3b表明, $T_1, T_2, T_3$ 和 $T_4$ 处理后水稳定性大团聚体含量显著高于CK, $T_1, T_2, T_3$ 和 $T_4$ 处理的水稳定性大团聚体含量分别为55.09%,59.87%,55.96%,63.47%。表

明在 $T_1, T_2, T_3$ 和 $T_4$ 的作用下,微团聚体逐渐形成大团聚体。

平均重量直径表示土壤团聚体的平均粒径,较大的团聚体平均重量直径有利于土壤团聚体的稳定性。图3c中,不同处理下通过湿筛法测得的土壤团聚体平均重量直径处于0.60~1.09 mm之间, $T_1, T_2, T_3, T_4$ 的平均重量直径均显著高于CK,其中 $T_2$ 的平均重量直径最大,相比于CK增加了49.97%,进一步表明不同改良剂均促进了水稳定性大团聚体的形成。几何平均直径表明土壤团聚体粒径分布变化。图3d展示了不同处理下水稳定性团聚体几何平均直径,CK, $T_1, T_2, T_3, T_4$ 的几何平均直径分别为0.30,0.41,0.44,0.42,0.46 mm, $T_1, T_2, T_3, T_4$ 的几何平均直径均显著高于CK,这表明,相比于CK, $T_1, T_2, T_3, T_4$ 处理促进了微团聚体向水稳定性大团聚体的形成。

表3 不同改良剂对土壤机械稳定性团聚体组成和水稳定性团聚体组成的影响  
Table 3 Effects of different amendment on soil mechanical stability aggregate composition and water stability aggregate composition

团聚体类型	处理	不同粒径团聚体所占比例/%					
		<0.25 mm	0.25~0.5 mm	0.5~1 mm	1~2 mm	2~5 mm	>5 mm
机械稳定性 团聚体	CK(对照)	11.43 <sup>a</sup>	3.88 <sup>a</sup>	17.54 <sup>a</sup>	20.62 <sup>a</sup>	37.23 <sup>a</sup>	9.31 <sup>a</sup>
	$T_1$ (硫酸亚铁)	6.85 <sup>b</sup>	3.68 <sup>a</sup>	17.42 <sup>a</sup>	21.10 <sup>a</sup>	40.74 <sup>a</sup>	10.21 <sup>a</sup>
	$T_2$ (生物炭)	7.13 <sup>b</sup>	3.76 <sup>a</sup>	16.69 <sup>a</sup>	19.66 <sup>a</sup>	39.11 <sup>a</sup>	13.63 <sup>a</sup>
	$T_3$ (微生物菌剂)	6.37 <sup>b</sup>	3.79 <sup>a</sup>	17.70 <sup>a</sup>	20.27 <sup>a</sup>	40.17 <sup>a</sup>	11.71 <sup>a</sup>
	$T_4$ (复合处理)	7.34 <sup>b</sup>	5.50 <sup>a</sup>	20.46 <sup>a</sup>	20.25 <sup>a</sup>	37.41 <sup>a</sup>	9.04 <sup>a</sup>
水稳定性 团聚体	CK(对照)	52.96 <sup>a</sup>	18.91 <sup>a</sup>	12.68 <sup>a</sup>	9.15 <sup>b</sup>	4.99 <sup>b</sup>	1.31 <sup>a</sup>
	$T_1$ (硫酸亚铁)	44.91 <sup>b</sup>	14.11 <sup>a</sup>	15.59 <sup>a</sup>	14.06 <sup>a</sup>	10.06 <sup>a</sup>	1.27 <sup>a</sup>
	$T_2$ (生物炭)	40.13 <sup>b</sup>	18.29 <sup>a</sup>	16.26 <sup>a</sup>	13.09 <sup>ab</sup>	9.78 <sup>a</sup>	2.44 <sup>a</sup>
	$T_3$ (微生物菌剂)	44.04 <sup>b</sup>	14.28 <sup>a</sup>	16.18 <sup>a</sup>	12.14 <sup>ab</sup>	11.77 <sup>a</sup>	1.58 <sup>a</sup>
	$T_4$ (复合处理)	36.53 <sup>b</sup>	19.32 <sup>a</sup>	18.39 <sup>a</sup>	12.83 <sup>ab</sup>	11.98 <sup>a</sup>	0.96 <sup>a</sup>

注:表中同列不同小写字母表示在 $p=0.05$ 水平上同一类型团聚体在相同粒径下差异显著。

团聚体破碎率和分形维数均表征了土壤结构的稳定性。团聚体破碎率从土壤团聚体稳定性方面阐述了土壤结构的稳定性。图3e中, $T_2$ 和 $T_4$ 处理显著降低了团聚体破碎率,这再次证明了 $T_2$ 和 $T_4$ 促进了水稳定性大团聚体的形成,而 $T_1$ 和 $T_3$ 与CK并无显著差异,表明这两个处理形成的土壤团聚体以机械稳定性团聚体为主。分形维数从土壤团聚体分布角度解释了土壤结构的稳定性。如图3f所示,分形维数表现出了与团聚体破碎率相同的趋势,这进一步证明了 $T_2$ 和 $T_4$ 促进了水稳定性大团聚体的形成。

### 2.3 不同改良剂对土壤化学性质的影响

图4a表明, $T_2, T_3$ 和 $T_4$ 处理对土壤pH值并无显著影响,而 $T_1$ 处理的pH显著低于CK。土壤有机质含量如图4b所示, $T_2$ 和 $T_4$ 处理的土壤有机质含量显

著高于CK,这可能是由于 $T_2$ 和 $T_4$ 施入了大量生物炭,补充了土壤碳库,从而提高了土壤有机质含量。不同处理下, $T_2$ 和 $T_4$ 处理的土壤全氮含量分别为0.99 g/kg和0.96 g/kg(图4c),相比于CK增加了29.41%和25.59%。

在土壤碱解氮方面(图4d),在玉米抽雄期, $T_2, T_3$ 和 $T_4$ 处理显著高于CK,表明 $T_2, T_3$ 和 $T_4$ 处理有利于玉米抽雄期土壤碱解氮的积累,为抽雄后玉米的生长提供了充足的氮素;玉米收获后, $T_2$ 和 $T_4$ 处理促进了玉米收获后土壤碱解氮的积累,相比于CK, $T_2$ 和 $T_4$ 分别促进土壤碱解氮含量增加了46.48%和52.49%,而 $T_3$ 处理碱解氮下降显著,这可能是玉米生长消耗了大量碱解氮,因此, $T_2$ 和 $T_4$ 处理更有利于土壤碱解氮的积累。

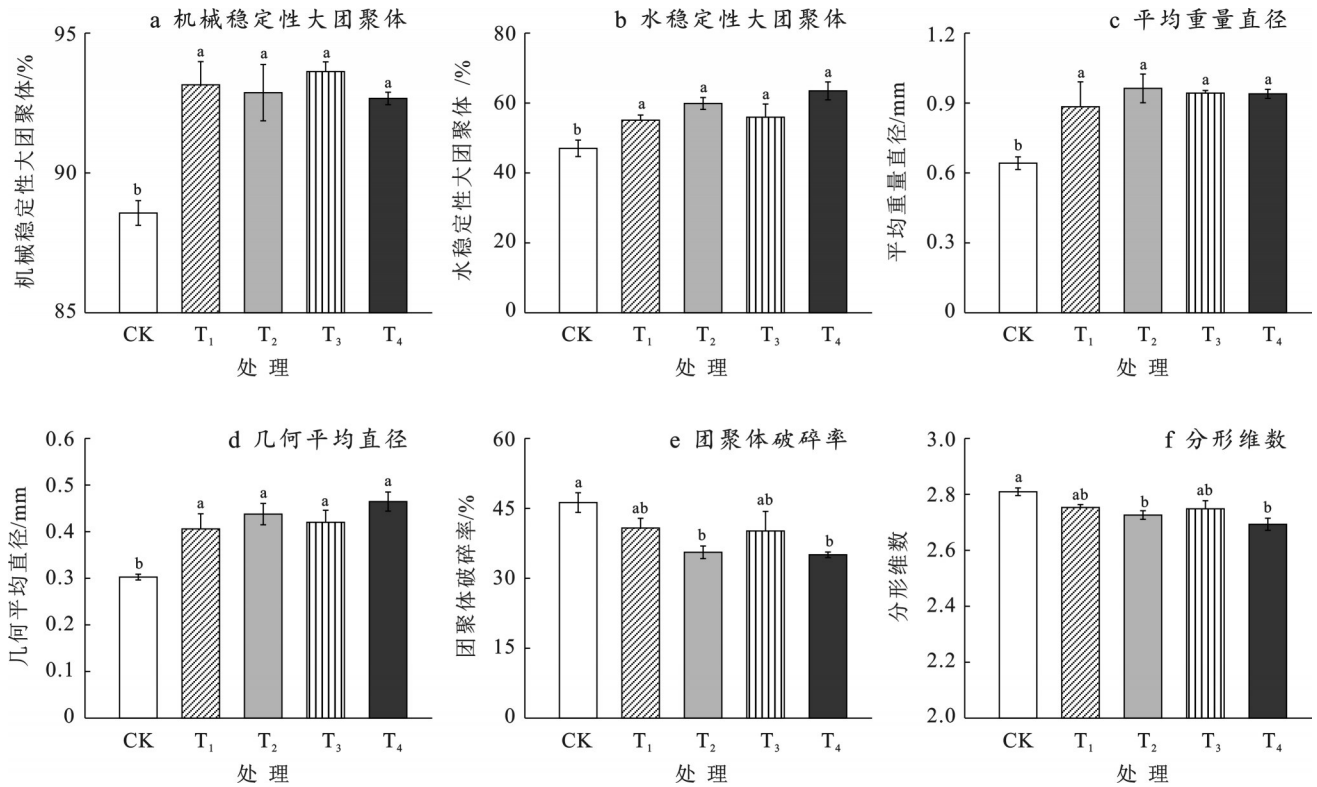


图 3 不同改良剂对土壤团聚体及其稳定性的影响。

Fig.3 Effects of different amendments on soil aggregates and their stability

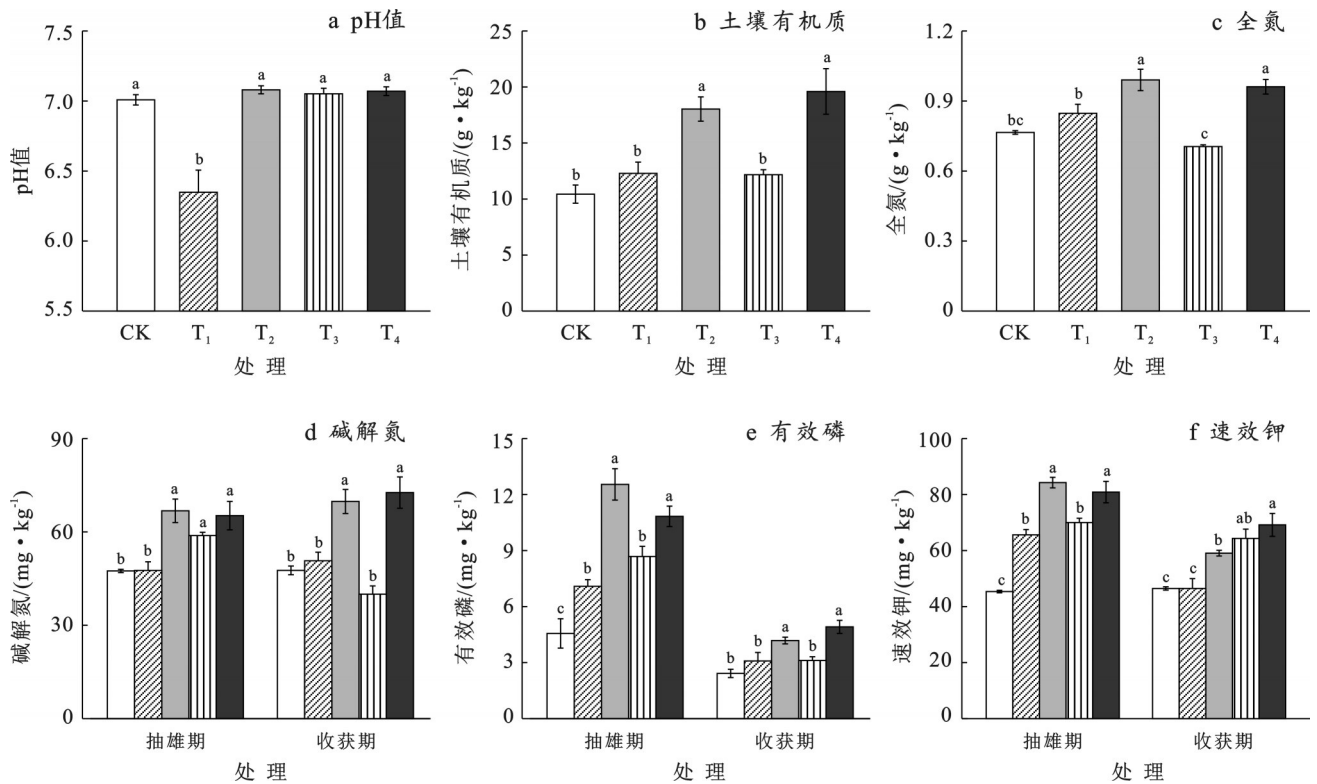


图 4 不同改良剂对土壤理化性质的影响

Fig.4 Effects of different amendments on soil physical and chemical properties

不同处理下土壤有效磷含量如图4e所示,在玉米抽雄期,相比于CK, T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub>, T<sub>3</sub>和T<sub>4</sub>处理土壤有效磷含量分别提高了55.32%, 174.98%, 90.33%和137.43%,表明T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub>, T<sub>3</sub>和T<sub>4</sub>有利于玉米抽雄期土壤磷的释放和积累;玉米收获后, T<sub>2</sub>和T<sub>4</sub>处理的土壤有效磷含量显著高于CK,而T<sub>1</sub>和T<sub>3</sub>处理对土壤有效磷含量并无显著影响,这可能是玉米生产带走了大量磷,因此, T<sub>2</sub>和T<sub>4</sub>更有利于土壤有效磷的积累。

图4f展示了不同处理对土壤速效钾的影响。在玉米抽雄期, T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub>, T<sub>3</sub>和T<sub>4</sub>处理土壤速效钾含量均显著高于CK,这表明T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub>, T<sub>3</sub>和T<sub>4</sub>处理促进了玉米抽雄期土壤钾的积累,为抽雄后玉米的生长提供了充足的钾素。玉米收获后, T<sub>2</sub>, T<sub>3</sub>和T<sub>4</sub>处理的速效钾含量分别为59.07, 64.36, 69.18 mg/kg,均显著高于CK,因此, T<sub>2</sub>, T<sub>3</sub>和T<sub>4</sub>处理更有利于土壤速效钾含量的提高。

2.4 不同改良剂对土壤酶活性的影响

土壤过氧化氢酶是参与土壤有机质分解和养分循环的重要酶之一。如图5a所示,在玉米抽雄期, T<sub>2</sub>, T<sub>3</sub>和T<sub>4</sub>处理下土壤过氧化氢酶活性显著高于对

照,表明生物炭、微生物菌剂和复合处理均能有效提高玉米抽雄期土壤过氧化氢酶活性,有利于玉米对土壤养分的吸收利用;玉米收获后,不同处理下土壤过氧化氢酶活性表现出了显著差异, T<sub>3</sub>和T<sub>4</sub>处理的过氧化氢酶分别为10.15 ml/g/h和11.33 ml/g/h,显著高于CK。表明微生物菌剂和复合处理均能有效提高玉米收获后土壤过氧化氢酶活性。

土壤脲酶可以将土壤中尿素分解为作物生长可以直接利用的氨。如图5b所示,生物炭、微生物菌剂和复合处理显著提高了土壤脲酶活性,这有利于土壤尿素的转化,为玉米后期生长提供了充足的养分;玉米收获后, T<sub>2</sub>和T<sub>4</sub>处理显著提升了土壤脲酶活性,而T<sub>3</sub>处理的脲酶活性显著下降,表明T<sub>2</sub>和T<sub>4</sub>处理更有利于土壤收获后脲酶活性的提高。

土壤碱性磷酸酶参与土壤中的有机磷转化为无机磷的过程。如图5c所示, T<sub>2</sub>, T<sub>3</sub>, T<sub>4</sub>这3个处理显著提高了玉米抽雄期和收获期的土壤碱性磷酸酶活性。这说明生物炭、微生物菌剂和复合处理有利于土壤碱性磷酸酶活性的提高,也有利于土壤有机磷的转化。

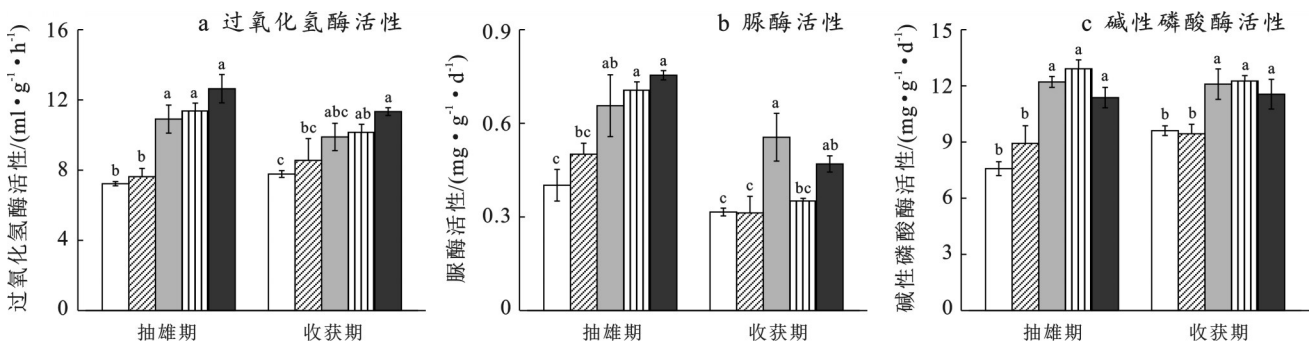


图5 不同改良剂对土壤酶活性的影响。

Fig.5 Effects of different amendments on soil enzyme activities

2.5 不同改良剂对土壤质量的影响及其成本

土壤质量指数(SQI)是评价土壤质量的综合指标,其数值越大表明土壤质量越好。如图6所示, T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub>, T<sub>3</sub>和T<sub>4</sub>的SQI均显著高于CK,因此T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub>, T<sub>3</sub>和T<sub>4</sub>处理均可作为秦巴山区新造耕地土壤质量的提升

措施,其中, T<sub>4</sub>效果最好。

2023—2024年不同处理产生的额外成本如表4所示。对照处理未产生额外成本,硫酸亚铁、生物炭、微生物菌剂和复合处理产生的额外成本分别为3.12×10<sup>4</sup>, 5.52×10<sup>4</sup>, 1 200, 8.76×10<sup>4</sup>元/hm<sup>2</sup>。

表4 2023—2024年不同处理产生的额外成本

Table 4 Additional costs incurred by different treatments from 2023 to 2024

处理	CK(对照)	T <sub>1</sub> (硫酸亚铁)	T <sub>2</sub> (生物炭)	T <sub>3</sub> (微生物菌剂)	T <sub>4</sub> (复合处理)
额外成本/(元·hm <sup>-2</sup> )	0.00	3.12×10 <sup>4</sup>	5.52×10 <sup>4</sup>	1 200	8.76×10 <sup>4</sup>

2.6 不同指标间的相关性分析

通过相关性分析发现,玉米产量与玉米抽雄期

土壤速效钾和土壤酶活性呈显著正相关,土壤养分与土壤酶活性呈显著正相关(图7a)。玉米收获后土

壤不同指标间的相关性如图 7b 所示,土壤有机质与全氮、碱解氮、有效磷、水稳定性大团聚体、几何平均直径、过氧化氢酶、脲酶和蔗糖酶呈显著正相关,与容重、团聚体破碎率和分形维数呈显著负相关,表明在新造耕地中土壤有机质的积累对土壤养分、土壤物理结构和土壤酶活性具有积极影响。土壤养分相关指标与水稳定性大团聚体、平均重量直径和几何平均直径表现出了正相关,与土壤容重、团聚体破碎率和分形维数表现出了负相关,表明对土壤结构的改良有利于土壤养分的增加。而土壤机械稳定性大团聚体、水稳定性大团聚体、平均重量直径和几何平均直径与土壤酶活性表现出了显著正相关,与土壤容重、团聚体破碎率和分形维数表现出了显著负相

关,这表明土壤结构的改良有利于新造耕地土壤酶活性的提高。

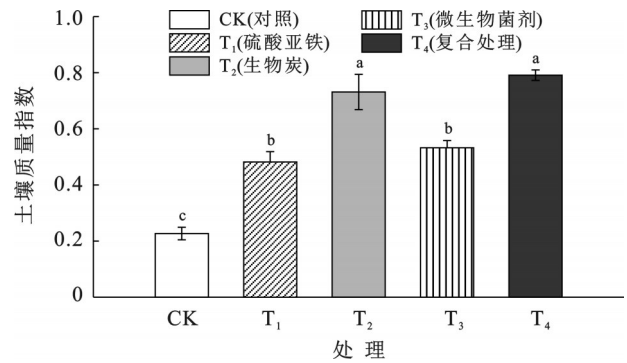


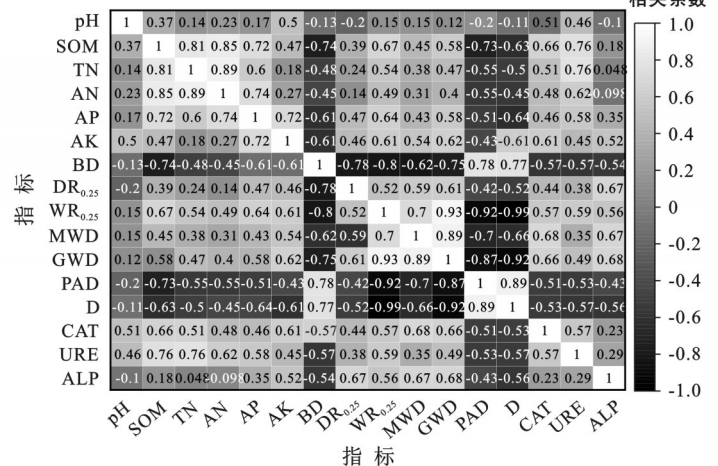
图 6 不同改良剂对土壤质量的影响

Fig.6 Effects of different amendment on soil quality

a 抽雄期土壤性质与产量的相关性分析

指标	Y	DM	AN	AP	AK	CAT	URE	ALP
Y	1	0.58	0.41	0.48	0.64	0.66	0.61	0.7
DM	0.58	1	0.47	0.72	0.79	0.43	0.44	0.54
AN	0.41	0.47	1	0.83	0.73	0.87	0.84	0.81
AP	0.48	0.72	0.83	1	0.9	0.71	0.69	0.68
AK	0.64	0.79	0.73	0.9	1	0.75	0.74	0.72
CAT	0.66	0.43	0.87	0.71	0.75	1	0.92	0.85
URE	0.61	0.44	0.84	0.69	0.74	0.92	1	0.82
ALP	0.7	0.54	0.81	0.68	0.72	0.85	0.82	1

b 成熟期土壤性质之间的相关性分析



注:Y为产量;DM为干物质;SOM为土壤有机质;TN为全氮;AN为碱解氮;AP为有效磷;AK为速效钾;BD为容重;DR<sub>0.25</sub>为机械稳定性大团聚体;WR<sub>0.25</sub>为水稳定性大团聚体;MWD为平均重量直径;GWD为几何平均直径;PAD为团聚体破碎率;D为分形维数;CAT为过氧化氢酶活性;URE为脲酶活性;ALP为碱性磷酸酶活性

图 7 玉米抽雄期土壤理化性质与玉米产量和玉米收获后土壤不同指标间的相关性分析

Fig.7 Correlation analysis of soil physical and chemical properties with maize yield at tasseling stage, and among different soil indexes after maize harvesting

### 3 讨论

研究结果表明,生物炭处理(T<sub>2</sub>)和复合处理(T<sub>4</sub>)在土壤pH、容重、有机质、全氮和碱解氮方面均接近该地区优等耕地水平。而硫酸亚铁(T<sub>1</sub>)处理仅在土壤容重方面接近优等耕地水平,微生物菌剂(T<sub>3</sub>)则在土壤pH值和容重方面接近该地区优等耕地水平。通过计算土壤质量指数(SQI)发现,T<sub>1</sub>、T<sub>2</sub>、T<sub>3</sub>和T<sub>4</sub>处理的SQI均显著高于CK,其中T<sub>2</sub>和T<sub>4</sub>处理的SQI均显著高于T<sub>1</sub>和T<sub>3</sub>。因此,生物炭处理和复合处理可作为新造耕地土壤质量提升的重要措施。而不同改良剂施用后土壤SQI的差异归因于不同改良剂对新造耕地土壤理化性质和酶活性影响的不同。

本研究发现,施用硫酸亚铁后土壤容重显著降低,且土壤大团聚体含量显著增加,这与冯俊义等<sup>[3]</sup>的结论相符。但是施用硫酸亚铁后土壤pH值显著降低,这是因为硫酸亚铁中Fe<sup>2+</sup>与土壤中的水分发生水解反应,促进了H<sup>+</sup>在土壤溶液中的积累,长期单独施用有导致土壤酸化的风险。同时,硫酸亚铁对土壤养分含量和土壤酶活性的提升并无显著影响,这与高志香等<sup>[27]</sup>的结果相反,这可能是由于硫酸亚铁导致土壤pH值下降,影响了土壤酶活性。因此,硫酸亚铁单独施用并不适用于秦巴山区新造耕地。

施用生物炭后土壤容重比CK降低了18.02%,土壤大团聚体含量、平均重量直径和几何平均直径显著增加,土壤团聚体破碎率和分形维数显著降低。这可能因为生物炭可以通过其在土壤颗粒间分配的

间隙效应影响土壤结构<sup>[28]</sup>,吴嘉俊等<sup>[29]</sup>也发现生物炭对土壤大团聚体和团聚体稳定性有显著影响。同时,本研究发现生物炭显著提高了土壤有机质、养分含量和土壤酶活性,这与杜思焱等<sup>[30]</sup>的研究结果一致,这归功于生物炭自身携带的大量有机碳和养分,同时生物炭的多孔结构为土壤微生物提供了良好的生存环境。因此,生物炭对新造耕地土壤质量的提升益处颇多,但其对玉米产量提升的影响小于微生物菌剂。

微生物菌剂的应用显著降低了土壤容重,增加了土壤大团聚体的含量。微生物菌剂可以通过增加微生物丰富度,促进微生物生成有机代谢物,从而使微团聚体聚集形成大团聚体<sup>[31]</sup>。肖玖君等<sup>[32]</sup>研究表明,接种微生物菌剂后,微生物分泌的有机物含量显著增加,从而促进土壤大团聚体的形成和土壤结构稳定性的提高。同时,微生物菌剂显著提高了土壤过氧化氢酶、蔗糖酶和碱性磷酸酶活性,刘聪等<sup>[33]</sup>也发现,施用微生物菌剂后土壤酶活性显著提升。但是,施用微生物菌剂后土壤有机质、全氮、碱解氮、有效磷的提升效果并不显著,这与杨肖芳等<sup>[34]</sup>的结果并不一致,这可能是因为新造耕地土壤养分含量有限,微生物菌剂促进玉米生产过程中,导致大量土壤养分被吸收,因此微生物菌剂对新造耕地土壤质量提升效果并不显著。

硫酸亚铁、生物炭和微生物菌剂单独施用对秦巴山区新造耕地土壤质量提升的效果存在差异性和局限性。相关分析表明,土壤有机质的增加与土壤结构改良、养分含量和酶活性提高密切相关。因此,秦巴山区新造耕地土壤质量提升可以从土壤有机质的提升入手,增加土壤碳的投入。本研究发现,复合处理显著降低了土壤容重,增加了土壤大团聚体含量及团聚体的稳定性,促进了土壤有机质和养分的积累,提高了土壤酶活性。

玉米产量结果表明, $T_2$ 、 $T_3$ 和 $T_4$ 的玉米产量均显著高于对照(CK),分别增加了17.31%、30.57%和25.89%。相关性分析表明,玉米产量与抽雄期土壤速效钾和酶活性呈显著正相关,而与土壤碱解氮并未表现出显著联系,表明土壤酶活性可能通过促进作物对养分的吸收利用来提高作物的产量,这与王玉琪等<sup>[35]</sup>的发现一致,结合不同处理下产量的差异来看,微生物活性低可能是限制秦巴山区新造耕地作物产量提升的关键因素。同时,微生物菌剂处理的额外成本远低于其他改良剂。因此,微生物菌剂更有利于作物生产和经济效益的提高。

## 4 结论

经过2 a田间试验,生物炭和复合处理在土壤pH值、容重、有机质、全氮和碱解氮方面已接近该地区优等耕地水平,其土壤物理结构、养分含量和酶活性与有机质含量密切相关。生物炭、微生物菌剂和复合处理对玉米产量提升效果显著,其中微生物菌剂处理产量最高。抽雄期土壤酶活性与玉米产量呈显著正相关,因此,微生物活性可能是限制新造耕地产量提升的主要因素。生物炭处理和复合处理在提升该地区新造耕地土壤质量方面效果最好;而微生物菌剂则在成本控制和作物产量提升方面更具优势。在实际应用中,应根据具体需求和条件选择合适的改良措施,以实现新造耕地土壤质量的快速提升和农业生产的可持续发展。

## 参考文献(References)

- [1] Zhang Jian, Guo Zhen. Response of soil structure and crop yield to soft rock in Mu Us sandy land, China [J]. *Scientific Reports*, 2022, 12:876.
- [2] 周煜庄,王瑞,姚照胜,等.不同土壤表面结构对小麦生长发育及产量的影响[J].*作物杂志*,2022(2):127-133. Zhou Yuzhuang, Wang Rui, Yao Zhaosheng, et al. Effects of different soil surface structures on wheat growth, development and yield [J]. *Crops*, 2022(2): 127-133.
- [3] 冯俊义,赵萌萌,谭菁,等.四种环境材料单施对煤矿区土壤结构和性状的影响研究[J].*农业资源与环境学报*, 2024,41(1):72-82. Feng Junyi, Zhao Mengmeng, Tan Jing, et al. Effects of a single application of four environmental materials on soil structure and properties in a coal mining area [J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2024,41(1):72-82.
- [4] 周家昊,褚军杰,孙万春,等.有机碳对土壤团聚体形成的影响研究进展[J].*河南农业科学*,2023,52(11):10-20. Zhou Jiahao, Chu Junjie, Sun Wanchun, et al. Research progress on the effect of organic carbon on the formation of soil aggregates [J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2023,52(11):10-20.
- [5] Tian Lixin, Wang Yawei, Jin Doudou, et al. The application of biochar and organic fertilizer substitution regulates the diversities of habitat specialist bacterial communities within soil aggregates in proso millet farmland [J]. *Biochar*, 2025,7(1):6.
- [6] 马泽,毕利东,郭澎,等.外源添加物对土壤团聚体稳定性的影响[J].*土壤通报*,2024,55(6):1585-1592.

- Ma Ze, Bi Lidong, Guo Peng, et al. Effect of exogenous additives on the stability of soil aggregates [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2024, 55(6):1585-1592.
- [7] 刘亚龙, 王萍, 汪景宽. 土壤团聚体的形成和稳定机制: 研究进展与展望[J]. 土壤学报, 2023, 60(3):627-643.  
Liu Yalong, Wang Ping, Wang Jingkuan. Formation and stability mechanism of soil aggregates: Progress and prospect [J]. Acta Pedologica Sinica, 2023, 60(3):627-643.
- [8] Six J, Bossuyt H, Degryze S, et al. A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics [J]. Soil and Tillage Research, 2004, 79(1):7-31.
- [9] 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.  
Gou Mangmang, Qu Zhongyi. Research on using biochar to agricultural soil amendment and crop yield [J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2013(5):1-5.
- [10] 张晨欣, 孟祥占, 刘芳妮, 等. 干旱胁迫下生物炭对冬小麦生理特性和土壤化学性质的影响[J]. 生态科学, 2023, 42(6):240-246.  
Zhang Chenxin, Meng Xiangzhan, Liu Fangni, et al. Effects of biochar on physiological characteristics of winter wheat and soil chemical properties under drought stress [J]. Ecological Science, 2023, 42(6):240-246.
- [11] 姜晓敏, 杨彩红, 程生煜, 等. 不同耕作方式和生物炭对土壤养分、酶活性和玉米产量的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2024(10):69-79.  
Jiang Xiaomin, Yang Caihong, Cheng Shengyu, et al. Effects of tillage methods and biochar on soil nutrients, enzyme activity and maize yield [J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2024(10):69-79.
- [12] 李开钰, 宋理洪, 张龔, 等. 生物质炭施用量与频率对土壤养分和关键酶活性的影响[J]. 环境科学, 2025, 46(2):1065-1075.  
Li Kaiyu, Song Lihong, Zhang Yan, et al. Effects of biochar application amount and frequency on yellow soil nutrients and key enzyme activities [J]. Environmental Science, 2025, 46(2):1065-1075.
- [13] Qi Yuqi, Liu Haolang, Zhang Beiping, et al. Investigating the effect of microbial inoculants *Frankia* F1 on growth-promotion, rhizosphere soil physicochemical properties, and bacterial community of ginseng [J]. Applied Soil Ecology, 2022, 172:104369.
- [14] Li Xuqing, Lu Qiujuan, Li Dingyi, et al. Effects of different microbial fertilizers on growth and rhizosphere soil properties of corn in newly reclaimed land [J]. Plants, 2022, 11(15):1978.
- [15] 于会丽, 徐国益, 路绪强, 等. 微生物菌剂对连作西瓜土壤微环境及果实品质的影响[J]. 果树学报, 2020, 37(7):1025-1035.
- Yu Huili, Xu Guoyi, Lu Xuqiang, et al. Effects of microbial agents on soil microenvironment and fruit quality of watermelon under continuous cropping [J]. Journal of Fruit Science, 2020, 37(7):1025-1035.
- [16] 李博文, 刘洋, 李宗霖, 等. 生物炭对土壤酶活性影响的机理研究进展[J]. 材料导报, 2022, 36(7):163-168.  
Li Bowen, Liu Yang, Li Zonglin, et al. Research progress on the mechanism of biochar's impact on soil enzyme [J]. Materials Reports, 2022, 36(7):163-168.
- [17] Foster E, Fogle E, Cotrufo M. Sorption to biochar impacts  $\beta$ -glucosidase and phosphatase enzyme activities [J]. Agriculture, 2018, 8(10):158.
- [18] Hu Xuefeng, Jiang Ying, Shu Ying, et al. Effects of mining wastewater discharges on heavy metal pollution and soil enzyme activity of the paddy fields [J]. Journal of Geochemical Exploration, 2014, 147:139-150.
- [19] Li Xuqing, Li Dingyi, Jiang Yugen, et al. The effects of microbial fertilizer based *Aspergillus brunneoviolaceus* HZ23 on pakchoi growth, soil properties, rhizosphere bacterial community structure, and metabolites in newly reclaimed land [J]. Frontiers in Microbiology, 2023, 14:1091380.
- [20] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.  
Bao Shidan. Soil and agricultural chemistry analysis [M]. 3rd ed. Beijing: Agriculture Press, 2000.
- [21] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986.  
Guan Songyin. Soil enzymes and their research methods [M]. Beijing: Agriculture Press, 1986.
- [22] 崔炎田, 王呈玉, 姚俊红, 等. 不同筛分方式对土壤团聚体及土壤微生物群落的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2024(1):37-42.  
Cui Yantian, Wang Chengyu, Yao Junhong, et al. Effects of different screening methods on soil aggregates and soil microbial communities [J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2024(1):37-42.
- [23] Acharya P, Ghimire R, Idowu O J, et al. Cover cropping enhanced soil aggregation and associated carbon and nitrogen storage in semi-arid silage cropping systems [J]. Catena, 2024, 245:108264.
- [24] 马菁, 周瑶, 陆琪, 等. 不同管理方式下干旱风沙区荒漠草原土壤性状变化及质量评价[J]. 农业工程学报, 2024, 40(24):106-116.  
Ma Jing, Zhou Yao, Lu Qi, et al. Soil properties and quality evaluation of desert steppe under different management measures in arid windy and sandy areas [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2024, 40(24):106-116.
- [25] 许明祥. 黄土丘陵区生态恢复过程中土壤质量演变及

- 调控[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2003.
- Xu Mingxiang. Soil quality evolvement mechanism in the process of ecosystem restoration and its management in loess hilly-gully region [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A & F University, 2003.
- [26] 金慧芳,史东梅,陈正发,等.基于聚类及PCA分析的红壤坡耕地耕层土壤质量评价指标[J].农业工程学报,2018,34(7):155-164.
- Jin Huifang, Shi Dongmei, Chen Zhengfa, et al. Evaluation indicators of cultivated layer soil quality for red soil slope farmland based on cluster and PCA analysis [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018,34(7):155-164.
- [27] 高志香,李希来,张静,等.不同施肥处理对高寒矿区渣山改良土酶活性和理化性质的影响[J].草地学报,2021,29(8):1748-1756.
- Gao Zhixiang, Li Xilai, Zhang Jing, et al. Effects of different fertilization treatments on soil enzyme activities in coal mining residuals of alpine mining area [J]. Acta Agrestia Sinica, 2021,29(8):1748-1756.
- [28] Alghamdi A G, Al-Omran A, Alkhasha A, et al. Impacts of biochar on hydro-physical properties of sandy soil under different irrigation regimes for enhanced tomato growth [J]. Agronomy, 2022,12(8):1762.
- [29] 吴嘉俊,童文彬,江建锋,等.水稻秸秆炭施用对水稻土团聚体稳定性及其碳氮分布的影响[J].植物营养与肥料学报,2024,30(3):457-468.
- Wu Jiajun, Tong Wenbin, Jiang Jianfeng, et al. Application of rice straw biochar increases soil aggregate stability and carbon and nitrogen distribution in paddy soil [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2024,30(3):457-468.
- [30] 杜思垚,郭晓雯,王芳霞,等.施用生物炭对咸水滴灌棉田土壤理化性质及酶活性的影响[J].西南农业学报,2022,35(3):571-580.
- Du Siyao, Guo Xiaowen, Wang Fangxia, et al. Effects of biochar application on soil physicochemical properties and enzyme activities in saline drip irrigation cotton field [J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2022,35(3):571-580.
- [31] Luo Yujia, Lopez J B G, van Veelen H P J, et al. Effects of different soil organic amendments (OAs) on extracellular polymeric substances (EPS) [J]. European Journal of Soil Biology, 2024,121:103624.
- [32] 肖玖军,邢丹,毛明明,等.AM真菌对桑树根围土壤团聚体的影响机制[J].土壤学报,2020,57(3):773-782.
- Xiao Jiujun, Xing Dan, Mao Mingming, et al. Mechanism of arbuscular mycorrhizal fungal affecting soil aggregates in rhizosphere of mulberry (*Morus alba*) [J]. Acta Pedologica Sinica, 2020,57(3):773-782.
- [33] 刘聪,万翠翠,宋旭,等.复合菌剂对新疆辣椒的促生效果和根际真核生物群落结构的影响[J].应用生态学报,2024,35(6):1599-1607.
- Liu Cong, Wan Cuicui, Song Xu, et al. Effects of effective microorganisms on growth promotion and the rhizosphere eukaryotic community structure of pepper in Xinjiang, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2024,35(6):1599-1607.
- [34] 杨肖芳,郭瑞,姚燕来,等.微生物菌剂对连作地块草莓生长、土壤养分及微生物群落的影响[J].核农学报,2023,37(6):1253-1262.
- Yang Xiaofang, Guo Rui, Yao Yanlai, et al. Effects of microbial agents on plant growth, soil fertility and microbial communities under continuous cropping strawberry [J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2023,37(6):1253-1262.
- [35] 王玉琪,梁颖,唐丽,等.黄腐酸对不同施氮水平下设施栽培番茄产量、品质和基质微生物的影响[J].西北农业学报,2025,34(1):113-122.
- Wang Yuqi, Liang Ying, Tang Li, et al. Effects of fulvic acid on yield, quality, and substrate microorganisms of tomato grown in greenhouse under different nitrogen application levels [J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2025,34(1):113-122.