

# 覆膜下的不同播种方式调控谷子土壤有机碳组分及酶活性的效应分析

智慧<sup>1</sup> 霍晔桢<sup>1</sup> 刘佳琦<sup>1</sup> 刘韶光<sup>2</sup> 刘晓博<sup>1</sup> 于晋<sup>3</sup> 夏清<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 吕梁学院生物与食品工程系, 033000, 山西吕梁; <sup>2</sup> 吕梁市农业技术推广中心, 033000, 山西吕梁;

<sup>3</sup> 山西农业大学 (山西省农业科学院) 玉米研究所, 034000, 山西忻州)

**摘要** 为探究覆膜下不同播种方式对土壤有机碳组分及酶活性的影响, 分析不同土层中各类有机碳组分和土壤酶活性的变化情况, 并探讨其相关性。结果表明, 随土层加深, 除矿物结合态有机碳 (MAOC) 无显著变化外, 其余有机碳组分含量及脲酶、蔗糖酶活性显著降低, 多种水解酶活性显著升高。覆膜可提升土壤有机碳组分含量, 其中膜侧播种 (A2 处理) 效果最佳, 2 个土层中, 关键碳组分含量及腐殖质、惰性有机碳 (NLOC)、易氧化有机碳 (ROC) 和微生物量碳 (MBC) 含量均显著提升; 而大团聚体有机碳 (MA-OC) 含量在覆膜后有所提高, 微团聚体有机碳 (MI-OC) 则略有降低。覆膜显著提升深层土壤酶活性, A2 处理对脲酶、蔗糖酶及各类水解酶活性的增强效果最为突出。相关性分析表明, 多数有机碳组分与酶活性、不同碳组分间、水解酶之间多呈正相关, 而 MI-OC 与部分碳组分及相关酶则呈负相关。综上, 覆膜尤其是膜侧播种, 可通过优化碳组分积累与酶活性协同作用改善土壤碳库。

**关键词** 谷子; 膜侧播种; 轻组有机碳; 腐殖质; 纤维二糖水解酶

谷子作为我国北方地区的粮食作物, 被列为山西省杂粮发展规划中的重点发展对象, 其种植面积在各类杂粮作物中占据首位。山西省多山地及丘陵地带, 土地贫瘠, 春季干燥且降水少, 夏季降水集中, 秋季温差较大, 有助于谷物生长<sup>[1]</sup>。地膜覆盖是一种在旱作农业区域被广泛运用的抗旱节水模式, 当前已成功运用到多种作物的种植实践中<sup>[2-5]</sup>。近年来, 随着地膜覆盖技术被广泛应用, 膜上播种和膜侧播种等新型覆膜播种方式逐渐兴起。与传统裸地播种相比, 膜上播种和膜侧播种可通过改变土壤水热条件, 优化土壤微环境以提升酶活性、促进有机碳累积<sup>[6]</sup>, 进而影响谷子的生长发育及产量形成。

土壤有机碳作为陆地生态系统中最为庞大的有机碳储库, 其含量的变化在土壤碳固定功能中具有关键的作用<sup>[7]</sup>。覆膜对耕层土壤有机碳的影响可以通过土壤有机碳各组分的变化特征来表征。土壤有机碳的物理分组主要以密度 (轻组和重组有机碳)、颗粒 (颗粒态和矿物结合态有机碳) 和团聚体 (大团聚体和小团聚体有机碳) 进行划分<sup>[8]</sup>。化学分组根据物质组成 (腐殖质—富里酸、胡敏素、

胡敏酸) 及化学溶剂 (易氧化有机碳、酸水解有机碳等) 来划分<sup>[9]</sup>。生物分组有机碳中的微生物量碳作为土壤活性有机碳库的关键组成部分, 尽管占比极其微小, 却是土壤养分的重要来源<sup>[10]</sup>。而土壤酶作为生物催化剂, 在土壤生态系统物质转化过程中发挥着关键作用, 其活性直接反映了土壤微生物代谢活动的强弱<sup>[11]</sup>。研究<sup>[12]</sup>表明, 采用地膜覆盖与有机无机肥处理, 土壤有机碳含量与水分利用效率等指标均有所增加。叶子壮<sup>[13]</sup>以黄土高原旱地冬小麦作为研究对象, 发现连续 5 年覆膜栽培冬小麦可改善土壤的通透性和养分状况, 有效降低土壤脲酶活性, 提升土壤氮磷养分以及微生物活性。万平兴<sup>[14]</sup>研究发现, 地膜覆盖后不稳定碳的损失重新塑造了微生物类群并降低了微生物碳代谢功能。另有研究<sup>[15]</sup>发现, 平膜穴播可提高小麦土壤大团聚体和微团聚体内的颗粒有机碳含量、矿质结合态有机碳含量。垄沟地膜覆盖还田处理较大地提升了土壤碳素的总量, 有效增加了土壤的固碳能力<sup>[16]</sup>。Guo 等<sup>[17]</sup>研究发现, 环境变化对土壤有机碳的影响存在明显差异。由此可见, 地膜覆盖可减少土壤水分蒸发, 提高土壤碳利用效率, 增加土壤有机碳。要

作者简介: 智慧, 主要从事作物生理与生态研究, E-mail: zhihui0043@163.com

夏清为通信作者, 主要从事旱作栽培研究, E-mail: xiaqing0500@163.com

基金项目: 吕梁市重点研发项目 (2025NY22); 山西省基础研究计划资助项目 (20210302124243)

收稿日期: 2025-12-18; 修回日期: 2026-01-16; 网络出版日期: 2026-02-11

凯等<sup>[18]</sup>研究表明,沟垄覆膜栽培可不同程度提高马铃薯连作田土壤过氧化氢酶、脲酶及碱性磷酸酶的活性。连续覆膜 4 年后,苹果根际土壤中 $\beta$ -1,4-木糖苷酶、 $\beta$ -1,4-葡萄糖苷酶和纤维二糖水解酶的活性显著增高,而 3 种酶活性的增加能够显著促进土壤有机碳含量,并提高土壤中有机质的转化,从而促进了土壤的碳循环<sup>[19]</sup>。

当前研究主要集中于地膜覆盖对作物生长发育、光合特性及土壤物理性状方面的影响,对于谷子覆膜下的不同播种方式引起的土壤有机碳代谢及其相关酶活性变化方面仍鲜有报道。为此,本研究采用膜上和膜侧播种,深入探究不同覆膜播种方式对谷子耕层土壤有机碳组分及其酶活性的影响,对于优化谷子种植模式、提升土壤肥力以及实现农业可持续发展有重要意义,为谷子高产、高效栽培以及土壤碳库管理提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况及试验材料

试验于 2024 年 5-10 月在山西省忻州市山西农业大学(山西省农业科学院)玉米研究所(38°42' N, 112°73' E)试验基地进行。试验点海拔 700~800 m,属于温带大陆性季风气候,冬季寒冷干燥,夏季温暖湿润,年均降水量 400~450 mm,降水集中在夏季,年均气温 8~10 °C,土壤类型以褐土为主。播前 20 d 取基础土样,0~20 cm 土层土壤肥力为:有机质 19.06 g/kg、全氮 0.91 g/kg、全磷 0.75 g/kg、全钾 5.89 g/kg、速效磷 24.26 mg/kg、速效钾 184.68 mg/kg、碱解氮 65.87 mg/kg。

供试谷子品种为晋谷 21 号,该品种穗型为筒型,抗旱性强,抗谷瘟病,高抗谷锈病。

### 1.2 试验设计

试验采用随机区组设计,设 3 个处理,分别为:膜上播种(A1)、膜侧播种(A2)和裸地播种(A0),每个处理重复 3 次,共 9 个小区,各小区面积为 72 m<sup>2</sup>(8 m×9 m),随机排列。按照常规播前旋耕施肥(腐熟农家肥 30 000 kg/hm<sup>2</sup>)。地膜覆盖播种深度 5 cm、裸地播种 6 cm。播种量 2.25 kg/hm<sup>2</sup>。行距 40 cm,株距 4 cm,每穴 9 粒。

### 1.3 测定项目与方法

1.3.1 样品采集与处理 于成熟期清除地表杂物,按“S”形(6 点采样)分别将取土器垂直压入 0~

20 cm(B1)和 20~40 cm(B2)土壤,取出取土器。将采集到的土样一部分装入自封袋,一部分迅速放入干冰箱内速冻,然后带回实验室放于-80 °C 冰箱内保存,用于后续土壤有机碳组分及酶活性的测定。

1.3.2 有机碳组分含量 采用土壤密度分组的方法<sup>[20]</sup>测定轻组有机碳(light fraction organic carbon, LFOC)和重组有机碳含量(heavy fraction organic carbon, HFOC);采用六偏磷酸钠分离法<sup>[21]</sup>测定颗粒态有机碳(particulate organic carbon, POC)及矿物结合态有机碳含量(mineral-associated organic carbon, MAOC);采用重铬酸钾外加热法<sup>[22]</sup>测定土壤大团聚体有机碳(macro-aggregate organic carbon, MA-OC)(粒径>0.25 mm)和微团聚体(粒径<0.25 mm)有机碳(micro-aggregate organic carbon, MI-OC)含量。采用重铬酸钾氧化容量法测定腐殖质(humus, HUMUS),采用焦磷酸钠-氢氧化钠提取法测定 HUMUS 组分——胡敏酸(humic acid, HA)、富里酸(fulvic acid, FA)和胡敏素(humin, HM)<sup>[23]</sup>。采用高锰酸钾氧化法<sup>[24]</sup>进行土壤易氧化有机碳(readily oxidizable organic carbon, ROC)的定量分析;采用两步酸解法<sup>[25]</sup>测定土壤惰性有机碳(non-labile organic carbon, NLOC)含量。采用氯仿熏蒸法<sup>[26]</sup>测定土壤微生物量碳(microbial biomass carbon, MBC)含量。

1.3.3 酶活性 采用比色法<sup>[27]</sup>测定脲酶和蔗糖酶活性。纤维二糖水解酶活性测定:称取土样,依次加入甲苯、醋酸缓冲溶液和对硝基苯纤维二糖苷溶液,混匀后水浴,煮沸,放置室温冷却,离心后取上清液,于吸光值 400 nm 下测定。 $\beta$ -木糖苷酶活性测定:称取土样,依次加入甲苯、磷酸盐缓冲溶液和对硝基苯酚- $\beta$ -D-木糖苷溶液,混匀后水浴,煮沸,放置室温冷却,吸取上清液,加入氢氧化钠溶液,于 400 nm 下测定吸光值。 $\alpha$ -葡萄糖苷酶活性测定:称取土样,依次加入甲苯、磷酸缓冲溶液和对-硝基苯- $\alpha$ -D 吡喃葡萄糖苷溶液,混匀后水浴,煮沸,放置室温冷却,离心取上清液,于 400 nm 下测定吸光值。采用比色法测定几丁质酶活性。

### 1.4 数据处理

运用 Excel 处理试验数据,Origin 2025 绘制图表,SPSS 软件进行方差分析与多重比较。所得结

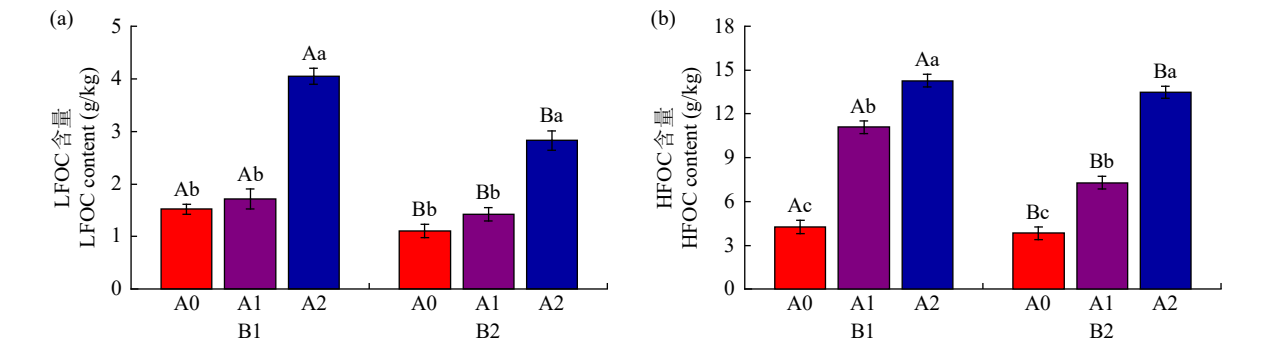
果均为平均值。

2 结果与分析

2.1 覆膜下的不同播种方式对土壤有机碳组分含量的影响

2.1.1 对土壤 LFOC 和 HFOC 含量的影响 由图 1 可知，随土层深度的增加，LFOC 和 HFOC 含量在不同土层均表现出显著降低趋势。B1 土层中，A0、A1 和 A2 处理下 LFOC 含量与 B2 土层相比依次高

36.94%、19.95%和 43.19%，HFOC 含量与 B2 土层相比依次提高 11.16%、52.03%和 5.86%。同一土层不同处理间，在 B1 土层，A2 处理 LFOC 含量分别较 A0 和 A1 处理显著提高 166.53%和 136.82%，HFOC 含量较 A0 和 A1 处理显著提高 235.06%和 28.72%；B2 土层，A2 处理 LFOC 含量分别较 A0 和 A1 处理显著提高 154.89%和 98.38%，HFOC 含量分别较 A0 和 A1 处理显著提高 251.84%和 84.87%。综上，覆膜可提高土壤 LFOC 和 HFOC



不同大写字母表示不同土层间在  $P < 0.05$  水平上的差异显著，不同小写字母表示各土层不同处理间在  $P < 0.05$  水平上的差异显著。下同。Different uppercase letters indicate significant differences among soil layers at  $P < 0.05$  level, different lowercase letters indicate significant differences among treatments within each soil layer at  $P < 0.05$  level. The same below.

图 1 覆膜下的不同播种方式对不同土层中土壤 LFOC 和 HFOC 含量的影响

Fig.1 Effects of different seeding methods under mulching on the content of LFOC and HFOC in different soil layers

含量，且以膜侧播种效果最佳。

2.1.2 对土壤 POC 和 MAOC 含量的影响 由图 2 可见，随土层深度的增加，POC 和 MAOC 含量均呈降低趋势，且 POC 含量在不同土层间的差异达到显著水平。B1 土层中，A0、A1 和 A2 处理的 POC 含量较 B2 土层分别高 35.01%、36.21%和 28.50%；MAOC 含量方面，A0、A1 和 A2 处理较 B2 土层分别高 61.85%、3.18%和 7.65%。同一土层

不同处理间，在 B1 土层中，A2 处理 POC 含量分别较 A0 和 A1 处理显著提高 28.96%和 37.07%，MAOC 含量分别较 A0 和 A1 处理显著提高 465.37%和 42.17%；B2 土层中，A2 处理 POC 含量分别较 A0 和 A1 处理显著提高 35.49%和 45.30%，A2 处理 MAOC 含量分别较 A0 和 A1 处理显著提高 750.00%和 36.26%。综上，覆膜处理可有效提高土壤 POC 和 MAOC 含量，其中以膜侧播种的提升效

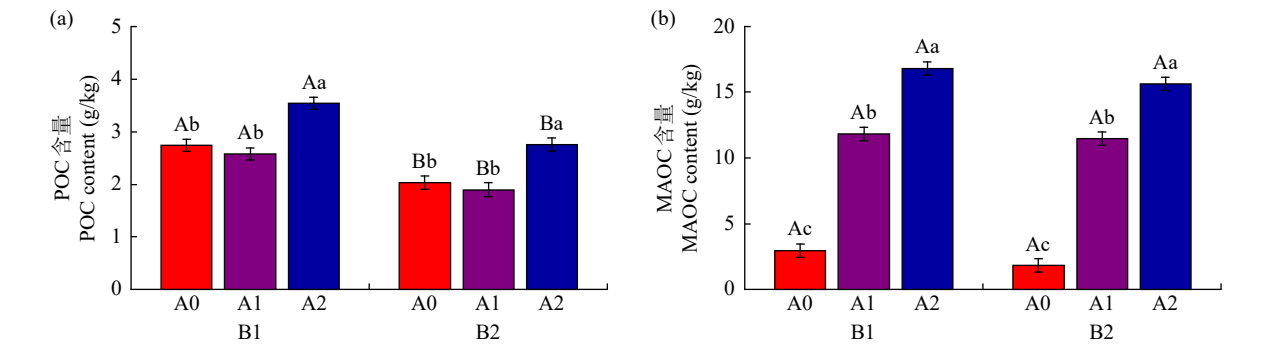


图 2 覆膜下的不同播种方式对不同土层中 POC 和 MAOC 含量的影响

Fig.2 Effects of different seeding methods under mulching on the content of POC and MAOC in different soil layers

果最为显著。

2.1.3 对土壤 MA-OC 和 MI-OC 含量的影响 随土

层深度的增加，土壤 MA-OC 和 MI-OC 含量均表现出显著降低趋势（图 3）。B1 土层中，A0、A1 和

A2 处理下 MA-OC 含量与 B2 土层相比依次升高 47.57%、36.77%和 17.44%，A0、A1 和 A2 处理 MI-OC 含量与 B2 土层相比依次升高 19.16%、16.14%和 10.76%，升高幅度小于 MA-OC 含量。同一土层不同处理间，B1 土层中，A2 处理 MA-OC 含量分别较 A0 和 A1 处理显著提高 59.74%和 32.99%，MI-OC 含量分别较 A0 和 A1 处理显著降

低 27.20%和 12.38%，MA-OC 含量在 3 个处理间差异显著，而在 A1 和 A2 之间则差异不显著；B2 土层中，A2 处理 MA-OC 含量分别较 A0 和 A1 处理显著提高 100.74%和 54.89%，MI-OC 含量则分别较 A0 和 A1 处理降低 18.23%和 9.53%。综上，覆膜可适当提高土壤 MA-OC 含量而降低 MI-OC 含量，且以膜侧播种效果最佳。

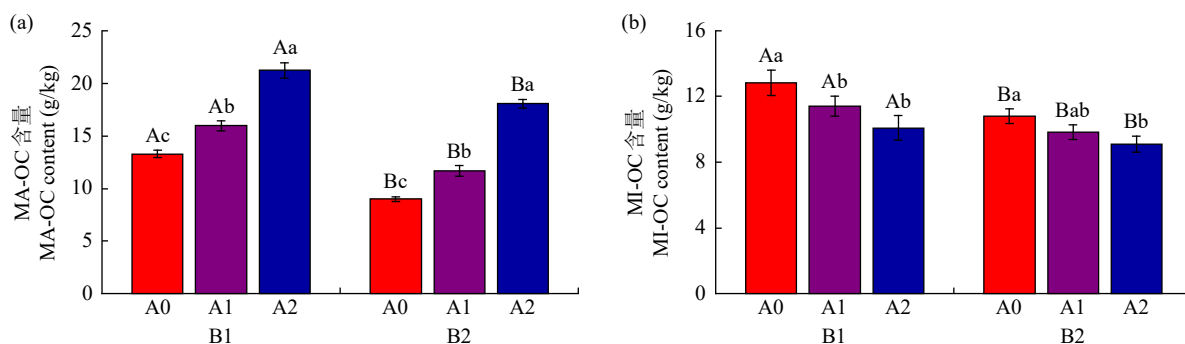


图3 覆膜下的不同播种方式对不同土层中 MA-OC 和 MI-OC 含量的影响

Fig.3 Effects of different seeding methods under mulching on the content of MA-OC and MI-OC in different soil layers

2.1.4 对土壤 HUMUS 组分含量的影响 由图 4 可知，随土层深度的增加，HA、FA、HM 和 HUMUS 含量均表现出显著降低趋势。B1 土层中，A0、A1 和 A2 处理下 HA 含量与 B2 土层相比依次高 34.56%、42.19%和 61.73%，FA 含量与 B2 土层相比依次高 42.11%、13.91%和 13.97%，HM 含量与 B2 土层相比依次高 5.55%、6.66%和 5.45%，HUMUS 含量与 B2 相比依次高 2.36%、7.76%和

6.16%。同一土层不同处理间，在 B1 土层中，A2 处理 HA 含量分别较 A0 和 A1 处理显著提高 76.76%和 44.40%，FA 含量分别较 A0 和 A1 处理显著提高 91.36%和 19.08%，HM 含量分别较 A0 和 A1 处理显著提高 19.05%和 5.63%，HUMUS 含量分别较 A0 和 A1 处理显著提高 14.66%和 4.38%；B2 土层中，A2 处理 HA 含量分别较 A0 和 A1 处理显著提高 47.27%和 26.56%，FA 含量分别较 A0

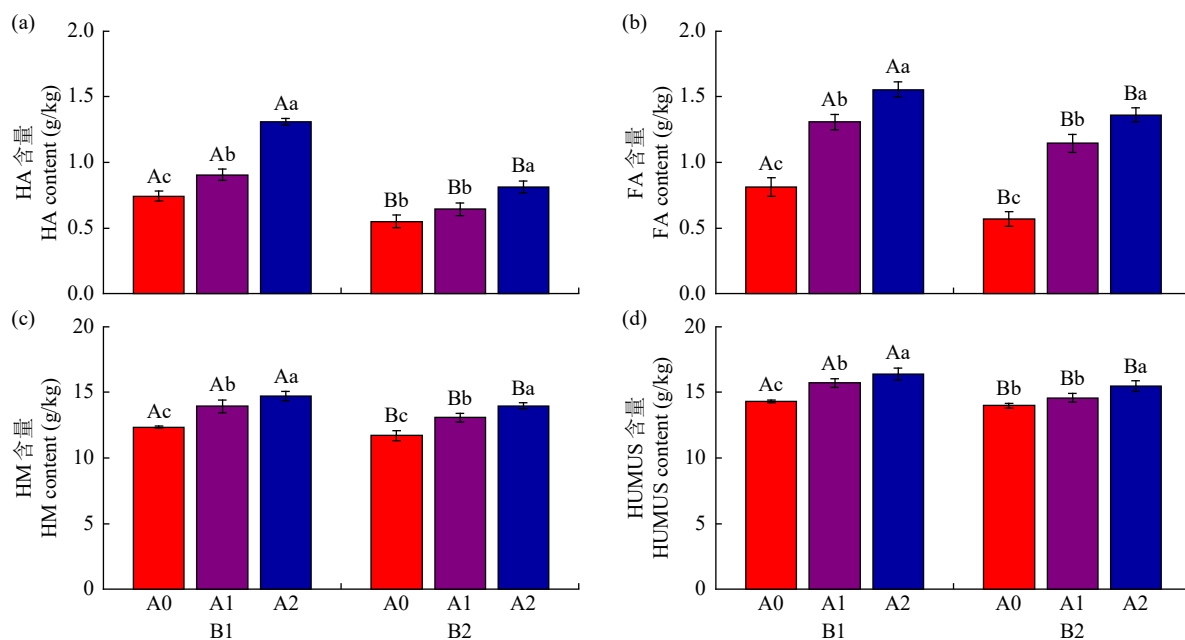


图4 覆膜下的不同播种方式对不同土层 HUMUS 组分含量的影响

Fig.4 Effects of different seeding methods under mulching on HUMUS content in different soil layers

和 A1 处理显著提高 138.60%和 18.26%, HM 含量分别较 A0 和 A1 处理显著提高 19.35%和 6.86%, HUMUS 含量分别较 A0 和 A1 处理显著提高 10.51%和 6.00%, FA 和 HM 含量 3 个处理间差异显著, HA 和 HUMUS 含量差异不显著。综上, 覆膜可提高腐殖质组分含量, 同样膜侧播种效果最佳。

2.1.5 对土壤 NLOC 和 ROC 含量的影响 由图 5 可知, 随土层深度的增加, NLOC 和 ROC 含量均呈现出显著降低趋势。B1 土层中, A0、A1 和 A2

处理下 NLOC 含量与 B2 土层相比依次高 6.38%、8.18%和 6.46%, ROC 含量与 B2 土层相比依次高 2.90%、2.86%和 1.37%。同一土层不同处理间, 在 B1 土层中, A2 处理 NLOC 含量分别较 A0 和 A1 处理显著提高 23.81%和 8.56%, ROC 含量分别较 A0 和 A1 处理显著提高 4.23%和 2.78%; B2 土层中, A2 处理 NLOC 含量分别较 A0 和 A1 处理显著提高 23.63%和 10.66%, ROC 含量分别较 A0 和 A1 处理显著提高 5.80%和 4.29%。

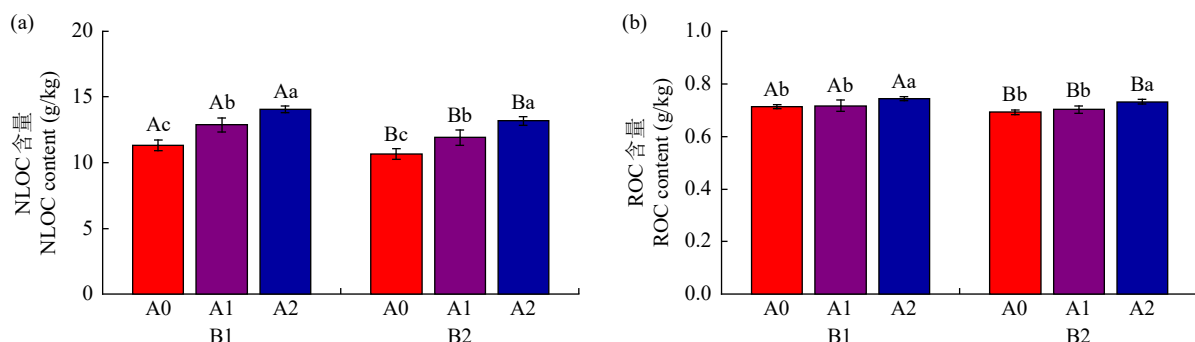


图 5 覆膜下的不同播种方式对不同土层 NLOC 和 ROC 含量的影响

Fig.5 Effects of different seeding methods under mulching on the content of NLOC and ROC in different soil layers

2.1.6 对土壤 MBC 含量的影响 由图 6 可知, 随着土层深度的增加, MBC 含量表现出显著降低趋

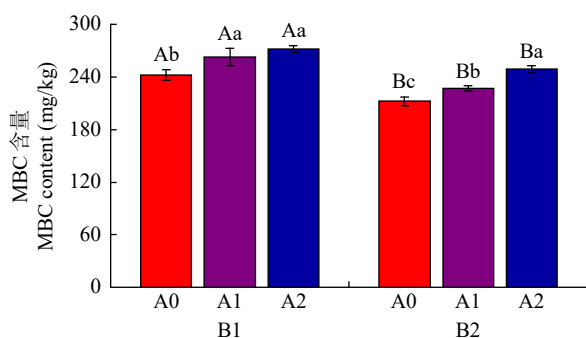


图 6 覆膜下的不同播种方式对不同土层 MBC 的影响

Fig.6 Effects of different seeding methods under mulching on the content of MBC in different soil layers

势。B1 土层中, A0、A1 和 A2 处理 MBC 含量与 B2 土层相比依次高 14.26%、15.81%和 9.37%。同一土层不同处理间, 在 B1 土层中, A2 处理 MBC 含量分别较 A0 和 A1 处理提高 12.22%和 3.62%; B2 土层中, A2 处理 MBC 含量分别较 A0 和 A1 处理显著提高 17.21%和 9.66%。

## 2.2 覆膜下的不同播种方式对土壤酶活性的影响

2.2.1 对土壤脲酶和蔗糖酶活性的影响 由图 7 可知, 随土层深度的增加, 脲酶和蔗糖酶活性均表现出显著降低趋势。在 B1 土层中, A0、A1 和 A2 处理的脲酶活性与 B2 土层对应处理相比, 分别提升了 46.21%、63.28%和 11.21%; 蔗糖酶活性相较于 B2 土层对应处理依次提高了 15.36%、45.21%和

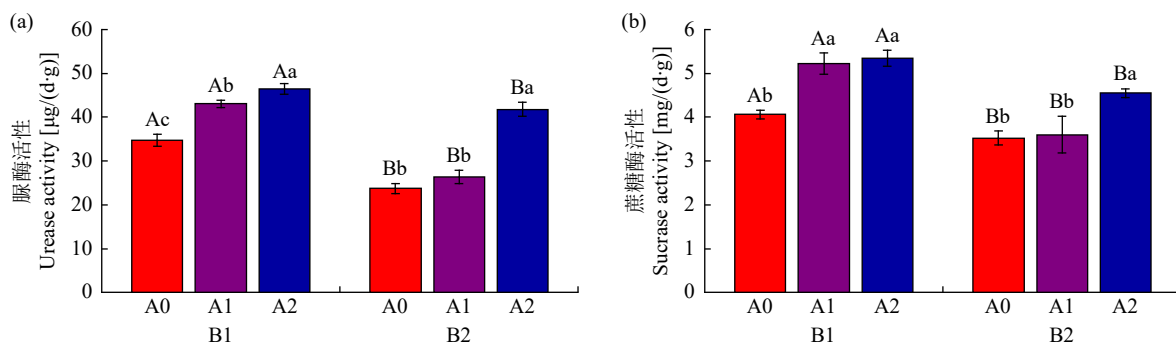


图 7 覆膜下的不同播种方式对不同土层脲酶和蔗糖酶活性的影响

Fig.7 Effects of different seeding methods under mulching on the activities of urease and sucrase in different soil layers

17.44%。同一土层内不同处理的对比结果显示,在 B1 土层中, A2 处理脲酶活性分别较 A0 和 A1 处理显著提高 33.91% 和 8.02%, 蔗糖酶活性分别较 A0 和 A1 处理显著提高 31.54% 和 2.17%; B2 土层中, A2 处理脲酶活性分别较 A0 和 A1 处理提高 76.04% 和 58.60%, 蔗糖酶活性分别较 A0 和 A1 处理显著提高 29.21% 和 26.33%。

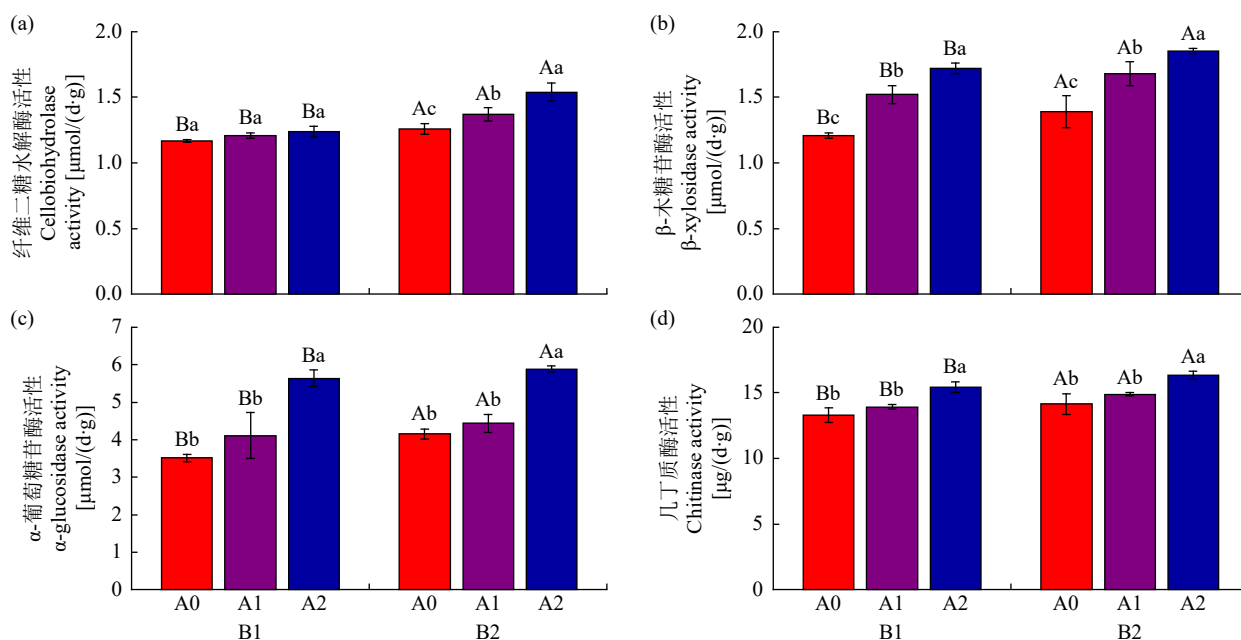


图 8 覆膜下的不同播种方式对不同土层纤维二糖水解酶、β-木糖苷酶、α-葡萄糖苷酶和几丁质酶活性的影响

Fig.8 Effects of different seeding methods under mulching on the activities of cellobiohydrolase, β-xylosidase, α-glucosidase and chitinase in different soil layers

酶活性与 B1 土层各处理相比依次提高 18.26%、8.05% 和 4.26%, 几丁质酶活性与 B1 土层各处理相比依次提高 6.37%、6.92% 和 5.88%。

同一土层不同处理间, B1 土层中, 纤维二糖水解酶在 3 个处理间无差异, α-葡萄糖苷酶和几丁质酶活性在 A0 和 A1 处理间无显著性差异, 而 A2 处理则显著高于其余 2 个处理, β-木糖苷酶在 3 个处理间差异显著。B2 土层中, 纤维二糖水解酶、β-木糖苷酶活性在 3 个处理间达显著水平, A2 处理下的纤维二糖水解酶活性分别较 A0 和 A1 处理显著提高 22.26% 和 12.78%, β-木糖苷酶活性分别较 A0 和 A1 处理显著提高 33.71% 和 10.23%; α-葡萄糖苷酶和几丁质酶活性在 A0 和 A1 处理间未达到显著性差异, 但是 A2 处理显著高于其他 2 个处理。说明覆膜可以显著提高深层土壤酶活性, 且膜侧播种效果最佳。

### 2.3 土壤碳组分与酶活性的相关性分析

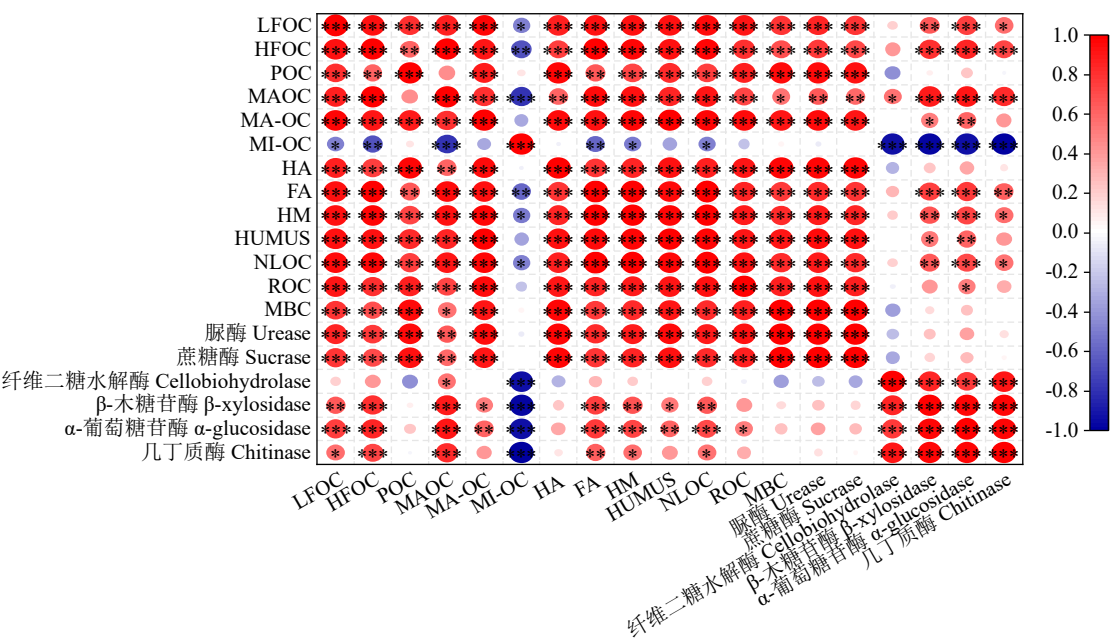
从图 9 可以看出, 多数碳组分 (LFOC、HFOC、

2.2.2 对土壤纤维二糖水解酶、β-木糖苷酶、α-葡萄糖苷酶和几丁质酶活性的影响 由图 8 可知, 随土层深度的增加, 4 种酶活性均表现出显著升高趋势。B2 土层 A0、A1 和 A2 处理下纤维二糖水解酶活性与 B1 土层各处理相比依次升高 8.14%、12.91% 和 24.46%, β-木糖苷酶活性与 B1 土层各处理相比依次提高 14.19%、10.93% 和 7.67%, α-葡萄糖苷

POC 等) 与酶活性 (脲酶、蔗糖酶等) 呈显著正相关, 说明碳组分含量的提升通常伴随酶活性的增强; 而 MI-OC 与部分碳组分 (LFOC、HFOC、MAOC、FA、HM 和 NLOC) 及相关酶 (除脲酶和蔗糖酶无相关性外) 呈不同程度的负相关; 此外, 不同碳组分间 (如 LFOC 与 HFOC、POC 等) 也普遍存在极显著正相关性, 体现出不同碳库积累的同步性。此外, β-木糖苷酶、α-葡萄糖苷酶等水解酶之间也普遍呈正相关, 反映出土壤酶系功能的协同性。

### 3 讨论

植被根系分泌物和微生物及其衍生物等是土壤有机碳的主要来源。不同深度的土层有机碳含量差异很大, 表层有机碳丰富且活跃, 深层有机碳含量虽低但稳定<sup>[28]</sup>。本研究结果表明, 在 0~20 cm (B1) 土层土壤各组分有机碳含量相较于 20~40 cm (B2) 土层均有所提高, 原因可能是表层土



“\*” :  $P < 0.05$ ; “\*\*” :  $P < 0.01$ ; “\*\*\*” :  $P < 0.001$ .

图 9 有机碳组分与酶活性的相关分析

Fig.9 Correlation analysis of organic carbon components and enzyme activities

壤易于吸收动植物残体和肥料中的有机成分，且微生物数量增加，使得土壤有机碳积累，而 B2 土层距离地表较远，不易输入有机物质，微生物数量少且土壤含氧量低，微生物缺氧而快速消耗土壤中原有的有机碳等养分，土壤有机碳积累不足，该结果与田圣陶等<sup>[29]</sup>对草地土壤有机碳含量的研究结果一致。LFOC 由处于分解阶段的动植物残体组成，POC 则由未完全分解的植物碎片和微生物组成<sup>[30]</sup>，两者作为土壤有机碳的活性成分，周转速度较快，而 HFOC 和 MAOC 结构复杂，周转缓慢，其含量的高低在一定程度上表征土壤有机碳的稳定情况，在固碳方面起关键作用<sup>[31]</sup>。大团聚体则由微小的土壤颗粒有机质与无机胶体通过粘结形成。本研究结果显示，膜侧播种（A2）的 LFOC、HFOC、POC 和 MAOC 含量均为最高，原因可能是膜侧播种可以保持地膜的完整性，而完整地膜可以通过维持土壤水热环境的稳定性，来延长微生物的活动周期，进而促进作物根系的发育及碳源输入，降低了 POC 的损失，减缓有机碳矿化分解，利于易分解碳向稳定性碳进行转化<sup>[32]</sup>。同时 POC 含量在 A0 处理中高于 A1 处理，原因可能为 A1 处理完全覆盖了土壤，土壤通气性降低，微生物活动受到抑制，POC 的生成和积累减少。试验中 MI-OC 含量变化与 MA-OC 的变化趋势相反，A2 处理能显著增加大团聚体中有机碳含量，其原因可能是 MA-OC 通常与根系分

泌物和地表残茬有关，A2 处理可促进根系生长，促进大团聚体的形成，这与杨佳霖<sup>[33]</sup>对地膜覆盖下旱作农田土壤碳库的研究结果一致；对于 MI-OC 来说，A0 处理下的有机碳含量更高，覆膜措施降低 MI-OC 含量，可能是由于 A0 处理导致土壤结构更易被破坏，大团聚体分解为更多微团聚体，该结果与刘秀等<sup>[34]</sup>对北方旱地土壤有机碳的研究结果相似。

土壤中的 HUMUS 反映了土壤环境的变化，HA、FA 和 HM 是土壤 HUMUS 的重要组成部分<sup>[35]</sup>。本研究结果表明，A2 处理显著增加了 HUMUS、NLOC 和 ROC 的含量，可能是由于 A2 处理通过增加土壤的水分和热量，促进了微生物的活动，进而促进了微生物对有机物分解和转化，形成了更多的 HUMUS。与 A0 和 A1 处理相比，A2 处理在 2 个土层中的 HA、FA 和 HM 含量均更高，原因可能是由于 A2 处理下的 HUMUS 含量高，而 HA 含量在 HUMUS 总量中占有较高比例<sup>[36]</sup>，故 HA 含量升高；由于 HA 和 FA 在土壤腐殖质中可以相互转化，则 FA 含量的变化趋势与 HA 一致<sup>[37]</sup>；HM 属于稳定有机碳组分，与土壤矿物质结合最为紧密，难以被微生物分解，A2 处理可改善水热条件，促使活性的有机碳组分向稳定的 HUMUS 转化，因而 HM 含量升高。NLOC 同样作为土壤有机碳中的稳定成分，在 A2 处理下含量最高，其原因与 HM 相似。

ROC 属于活性碳组分, A2 处理下 ROC 含量最高, 这可能因为 A2 处理为部分裸露, 能够进行更好的气体交换, 避免膜下土壤过湿或氧气不足等问题, 从而维持更适宜的微生物活动环境。土壤中细菌、真菌等微生物体内的碳含量构成了 MBC, A2 处理使 MBC 含量增加, 可能是由于 A2 处理改善了温度和水分条件, 其环境适宜微生物的增殖, 土壤微生物活动较活跃, 微生物数量及其体内的碳总量上升, 从而提高土壤中 MBC 含量。

土壤酶在土壤养分如碳、氮、磷等循环过程中具有重要作用<sup>[38]</sup>。有研究<sup>[39]</sup>发现, 覆膜处理(含膜侧种植)的多酚氧化酶、过氧化氢酶、蔗糖酶和脲酶活性均显著高于裸地处理, 本研究结果与其一致。另有研究<sup>[40]</sup>表明, 免耕、深松等搭配覆膜的耕作模式, 根际土壤中 $\beta$ -纤维二糖苷酶和 $\beta$ -木糖苷酶活性均翻倍提高。孙文泰等<sup>[41]</sup>研究发现, 覆膜 2 年可显著提高 $\beta$ -1,4-木糖苷酶、 $\beta$ -1,4-葡萄糖苷酶和纤维二糖水解酶活性, 有助于土壤有机碳储量提高。本试验结果显示, 覆膜可以显著提高纤维二糖水解酶、 $\beta$ -木糖苷酶、 $\alpha$ -葡萄糖苷酶和几丁质酶的活性, 且以 A2 处理效果最佳, 原因之一可能是膜侧布局使得土壤的水热条件更加稳定, 从而避免了极端环境对酶结构的破坏, 满足了酶促反应的需求。原因之二则是改善了作物的生长状况, 增加了根系残体和碳氮底物的供给, 通过诱导效应激发了微生物合成相应的酶。然而本研究结果仅是初步结果, 后续需要扩大试验地范围, 提升研究结果的准确性, 还可深入研究不同播种方式与其他管理措施比如施肥、灌溉等相结合对土壤有机碳组分的协同作用, 筛选出更高效的种植方式。

## 4 结论

随着土层加深, 大部分有机碳组分(LFOC、HFOC、POC 等)含量及脲酶活性、蔗糖酶活性、MBC 含量显著降低, 而纤维二糖水解酶等部分水解酶活性则显著升高。覆膜处理可有效改善土壤碳库结构与酶活性, 其中膜侧播种效果最优, 能显著提升各土层重要有机碳组分含量, 同时增强脲酶、蔗糖酶及各类水解酶活性, 降低小团聚体有机碳含量。

### 参考文献

[1] 韩彦青, 孙常青, 车丽, 等. 山西中东部地区适宜谷子品种筛选. 山西农业科学, 2019, 47(10): 1789-1791.

[2] 杨振兴, 周怀平, 解文艳, 等. 山西旱作区不同类型地膜对谷子产量影响及降解性能研究. 农业环境科学学报, 2022, 41(6): 1307-1315.

[3] 阎龙霞, 马建涛, 柴雨葳, 等. 不同覆盖方式对旱地冬小麦土壤水热及光合特性的影响. 麦类作物学报, 2024, 44(9): 1185-1194.

[4] 胡南南, 逢蕾, 路建龙, 等. 秸秆覆盖对玉米农田土壤有机碳及其组分的影响. 土壤通报, 2024, 55(3): 695-706.

[5] 魏彦雄, 张绪成, 马明生, 等. 耕作和覆膜对马铃薯根际土壤氮循环功能微生物的影响. 西北农业学报, 2025, 34(2): 232-242.

[6] 包开花. 覆膜方式和保水剂对旱作马铃薯生长及土壤特性的影响. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2015.

[7] 李金焱, 潘雯, 王佳, 等. 土壤活性有机碳及碳库管理指数对石漠化治理措施的响应. 林业科学研究, 2022, 35(5): 156-163.

[8] Huang R, Liu J, Wang Z F, et al. Effects of different soil amendments application on soil aggregate stability and soil consistency under wetting and drying altered planting system. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2019, 50(18): 2263-2277.

[9] 宋智兴. 氮添加对不同林龄杉木林土壤有机碳与组分的影响研究. 长沙: 中南林业科技大学, 2025.

[10] Sun Y Q, Xiong X N, He M J, et al. Roles of biochar-derived dissolved organic matter in soil amendment and environmental remediation: a critical review. Chemical Engineering Journal, 2021, 424: 130387.

[11] 周娅, 冯倩, 王玉, 等. 覆膜玉米不同生育期土壤酶活性对大气 CO<sub>2</sub> 浓度升高的响应. 农业环境科学学报, 2019, 38(5): 1185-1192.

[12] 刘颖川. 青海东部地膜覆盖对玉米产量和土壤环境效应的影响. 西宁: 青海大学, 2021.

[13] 叶子壮. 秸秆还田、覆膜及施氮对旱地麦田土壤质量的影响与综合评价. 杨凌: 西北农林科技大学, 2024.

[14] 万平兴. 覆膜旱作农田土壤碳周转的微生物机制. 兰州: 兰州大学, 2024.

[15] 谢钧宇, 白宇嫣, 曹寒冰, 等. 减氮覆膜下旱地麦田土壤团聚体中各物理组分的变化. 环境科学, 2024, 45(10): 6028-6037.

[16] Li Y Z, Song D P, Dang P F, et al. Combined ditch buried straw return technology in a ridge-furrow plastic film mulch system: implications for crop yield and soil organic matter dynamics. Soil and Tillage Research, 2020, 199: 104596.

[17] Guo J, Wang B, Wang G B, et al. Effects of three cropland afforestation practices on the vertical distribution of soil organic carbon pools and nutrients in eastern China. Global Ecology and Conservation, 2020, 22: e00913.

[18] 要凯, 赵章平, 康益晨, 等. 沟垄覆膜对连作马铃薯土壤酶活性、理化性状及产量的影响. 作物学报, 2019, 45(8): 1286-1292.

[19] 孙文泰, 杨阳, 马明, 等. 覆膜对陇东旱地苹果根际土壤化感物质积累与真菌群落特征的影响. 果树学报, 2024, 41(7): 1342-1358.

[20] 宋艳丹, 韩会阁, 王孟孟, 等. 填闲作物还田方式对烟田土壤轻重组有机碳的影响. 山西农业科学, 2024, 52(3): 60-67.

[21] 王尹佳. 泥炭地退化过程中矿物结合态有机碳变化及其对有机碳稳定性的影响研究. 绵阳: 西南科技大学, 2024.

[22] 赵林林, 吴志祥, 孙瑞, 等. 土壤有机碳分类与测定方法的研究概述. 热带农业工程, 2021, 45(3): 154-161.

[23] 家伟. 丹江口库区造林对土壤有机碳稳定性和温度敏感性的

- 影响. 武汉: 中国科学院大学(中国科学院武汉植物园), 2021.
- [24] 何宁波, 高静, 孙楠, 等. 施肥对我国农田土壤易氧化有机碳影响的整合分析. 中国土壤与肥料, 2024(5): 8-16.
- [25] 左超, 罗彩云, 赵亮, 等. 不同土地利用方式对土壤惰性碳的影响. 草原与草坪, 2024, 44(2): 96-105.
- [26] Luo T, Xia L, Xia D, et al. Impact of typical land use type on the stability and content of carbon and nitrogen of soil aggregates in western Hubei. *Ecosphere*, 2023, 14(12): e4736.
- [27] 颜彩缤, 胡福初, 赵亚, 等. 荔枝园间作平托花生对土壤理化性质、酶活性和细菌群落结构及多样性的影响. 中国土壤与肥料, 2022(5): 203-210.
- [28] 闫雷, 周丽婷, 孟庆峰, 等. 有机物料还田对黑土有机碳及其组分的影响. 东北农业大学学报, 2020, 51(5): 40-46, 10.
- [29] 田圣陶, 罗洋, 隋鹏祥, 等. 长期耕作对薄层黑土有机碳储量及其组分的影响. 应用生态学报, 2024, 35(8): 2167-2175.
- [30] 崔思远, 朱新开, 曹光乔. 耕作对中国亚热带地区稻麦轮作农田土壤全氮及其组分的影响. 农业工程技术, 2023, 43(14): 119.
- [31] 刘彩霞, 薛建福, 杜天庆, 等. 不同作物对连作玉米田土壤总有机碳与颗粒有机碳的影响. 山西农业大学学报(自然科学版), 2018, 38(12): 1-7.
- [32] 张慧芋. 基于旱地麦田蓄水保墒技术的土壤有机碳库效应研究. 晋中: 山西农业大学, 2021.
- [33] 杨佳霖. 地膜覆盖和氮肥减施对旱作农田土壤碳库及春玉米产量的影响. 杨凌: 西北农林科技大学, 2024.
- [34] 刘秀, 司鹏飞, 张哲, 等. 地膜覆盖对北方旱地土壤水稳性团聚体及有机碳分布的影响. 生态学报, 2018, 38(21): 7870-7877.
- [35] 程伟. 秸秆还田条件下不同灌溉方式对半干旱区土壤有机碳库的影响及其生物学机制. 长春: 吉林农业大学, 2024.
- [36] Gokila B, Manimaran G, Jayanthi D, et al. Long-term fertilization and manuring effects on the nexus between sulphur distribution and SOC in an Inceptisol over five decades under a finger millet-maize cropping system. *Scientific Reports*, 2024, 14(1): 9758.
- [37] 刘丽华, 崔士泽, 秦猛, 等. 不同积温试验区水稻生育期限的界定与比较. 黑龙江八一农垦大学学报, 2021, 33(4): 1-6, 39.
- [38] 张孝良, 车荣晓, 段兴武, 等. 土壤胞外酶活性对气候变化响应的研究进展. 浙江农林大学学报, 2023, 40(4): 910-920.
- [39] 刘鑫, 田岗, 王振华, 等. 栽培模式对杂交谷农艺性状、土壤养分及酶活性的影响. 江苏农业科学, 2025, 53(15): 109-115.
- [40] 宋霄君, 吴会军, 武雪萍, 等. 长期保护性耕作可提高表层土壤碳氮含量和根际土壤酶活性. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(6): 1588-1597.
- [41] 孙文泰, 马明, 董铁, 等. 长期覆膜旱地苹果园表层土壤“隐性”退化下活性有机碳与酶活性差异. 水土保持学报, 2021, 35(5): 272-279.

## Effects of Different Sowing Methods under Mulching on Soil Organic Carbon Fractions and Enzyme Activities in Foxtail Millet

Zhi Hui<sup>1</sup>, Huo Yezhen<sup>1</sup>, Liu Jiaqi<sup>1</sup>, Liu Shaoguang<sup>2</sup>, Liu Xiaobo<sup>1</sup>, Yu Jin<sup>3</sup>, Xia Qing<sup>1</sup>

<sup>(1)</sup>Department of Biological and Food Engineering, Lüliang University, Lüliang 033000, Shanxi, China;

<sup>(2)</sup>Lüliang City Agricultural Technology Extension Center, Lüliang 033000, Shanxi, China; <sup>(3)</sup>Maize Research Institute, Shanxi Agricultural University/Shanxi Academy of Agricultural Sciences, Xinzhou 034000, Shanxi, China)

**Abstract** To investigate the effects of different sowing methods under mulching on soil organic carbon components and enzyme activity, this study analyzed variations in various organic carbon components and soil enzyme activity across different soil layers and explored their correlations. The results showed that with soil depth increasing, except for mineral-associated organic carbon (MAOC) which had no significant change, the content of other organic carbon components and the activities of urease and sucrase were significantly decreased, while the activities of many hydrolytic enzymes were significantly increased. Mulching significantly increased soil organic carbon (SOC) content, with the best results observed in the film-side sowing treatment (A2). Key SOC components, humus, non-labile organic carbon (NLOC), readily oxidizable organic carbon (ROC), and microbial biomass carbon (MBC) in both soil layers showed significant improvements. However, the content of macro-aggregate organic carbon (MA-OC) increased after mulching, while that of micro-aggregate organic carbon (MI-OC) decreased slightly. The effect of mulching on soil enzyme activity was significant, and the prominent effect of A2 treatment on the activities of urease, sucrase, and various hydrolytic enzymes was the most outstanding. Correlation analysis revealed that most organic carbon components exhibited positive correlations with enzyme activity, among different carbon components, and between hydrolytic enzymes, whereas MI-OC showed negative correlations with certain carbon components and related enzymes. In summary, mulching, especially side-sowing, can improve soil carbon pools by optimizing the synergistic effects of carbon component accumulation and enzyme activity.

**Key words** Foxtail millet; Mulching side-sowing; Light fraction organic carbon; Humus; Cellobiohydrolase