

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.04.017

引用格式:陈慧敏,郭芷若,何树斌,等.生草覆盖调控渭北旱塬苹果园土壤碳组分及碳循环酶活性的效应分析[J].草地学报,2026,34(4):1322—1334

CHEN Hui-min, GUO Zhi-ruo, HE Shu-bin, et al. Effects of Grass Mulching on Soil Carbon Fractions and Carbon-Cycling Enzyme Activities in Apple Orchards of the Weibei Dry Plateau[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(4):1322—1334

生草覆盖调控渭北旱塬苹果园土壤碳组分 及碳循环酶活性的效应分析

陈慧敏¹, 郭芷若¹, 何树斌¹, 崔彦农¹, 刘鲜艳², 龙明秀^{1*}

(1. 西北农林科技大学草业与草原学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 咸阳市农业科学研究院, 陕西 咸阳 712034)

摘要:生草覆盖已被证实能有效促进果园土壤有机碳积累并提升土壤肥力,但其调控活性有机碳与腐殖质碳组分变化的机制尚不明确。本研究于2021—2023年在苹果园行间与树盘区域设置3种人工生草处理:多年生黑麦草(*Lolium perenne* L.)、草木樨(*Melilotus officinalis* L.)、多年生黑麦草+紫花苜蓿(*Medicago sativa* L.),以传统清耕为对照(CT)。测定土壤活性有机碳、腐殖质碳组分及碳循环酶活性,并评估碳库管理指数。结果表明,草木樨处理在2022年显著提高行间区域土壤有机碳含量14.38%,碳库管理指数提升89.55%($P<0.05$)。2023年该处理显著降低行间pH值与树盘区域容重;多年生黑麦草+紫花苜蓿处理则在树盘区域显著提高土壤有机碳含量19.19%,并提升可溶性有机碳和微生物生物量碳($P<0.05$);曼特尔检验与偏最小二乘路径模型分析显示,行间与树盘对生草覆盖响应存在差异:行间以活性有机碳提升为主,树盘区域更利于腐殖质碳积累。综上,行间区域以草木樨为宜,而树盘区域则以多年生黑麦草与紫花苜蓿混合效果最佳。生草覆盖可通过改善土壤物理结构、激活碳循环酶、提升碳组分含量,实现对苹果园土壤碳库的有效调控。

关键词:土壤有机碳;活性有机碳;腐殖质碳;土壤酶活性;碳库管理指数;果园生草

中图分类号:S661.1

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)04-1322-13

Effects of Grass Mulching on Soil Carbon Fractions and Carbon-Cycling Enzyme Activities in Apple Orchards of the Weibei Dry Plateau

CHEN Hui-min¹, GUO Zhi-ruo¹, HE Shu-bin¹, CUI Yan-nong¹, LIU Xian-yan², LONG Ming-xiu^{1*}

(1. College of Grassland Agriculture, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi Province 712100, China;

2. Xianyang Academy of Agricultural Sciences, Xianyang, Shaanxi Province 712034, China)

Abstract: Grass mulching has been proven to effectively enhance soil organic carbon accumulation and improve soil fertility in orchard systems. However, the mechanisms regulating the dynamics of labile organic carbon and humified carbon fractions remain unclear. From 2021 to 2023, a field experiment was conducted in an apple orchard with four grass mulching treatments established in both interrow and tree disk areas: perennial ryegrass (*Lolium perenne* L.), sweet clover (*Melilotus officinalis* L.), perennial ryegrass + alfalfa (*Medicago sativa* L.), with traditional clean tillage as the control (CT). We analyzed soil labile organic carbon fractions, humic carbon fractions, carbon-cycling enzyme activities, and the carbon pool management index. The results showed that sweet clover significantly increased soil organic carbon content by 14.38% and elevated the carbon pool management index by 89.55% in the interrow area compared to CT in 2022 ($P<0.05$). In 2023, sweet clover further reduced soil pH in the interrow areas and the bulk density of the tree disk areas. Meanwhile, the perennial ryegrass + alfalfa mixture treatment increased soil organic carbon by 19.19% in the tree disk area, with

收稿日期:2025-07-04;修回日期:2025-07-30

基金项目:陕西省农业协同创新与推广联盟重大科技项目(LMZD202103)资助

作者简介:陈慧敏(2000-),女,汉族,内蒙古巴彦淖尔人,硕士研究生,主要从事生草栽培土壤碳循环及微生物群落研究, E-mail:chenhui-min@nwfau.edu.cn; *通信作者 Author for correspondence, E-mail: longmingxiu@nwsuaf.edu.cn

concurrent rises in dissolved organic carbon and microbial biomass carbon ($P < 0.05$). Mantel tests and partial least squares path modeling revealed distinct responses of the interrow and tree disk areas to grass mulching. Increased labile organic carbon fractions primarily characterized the interrow areas, while the tree disk areas showed a strong positive response in humified carbon accumulation. In conclusion, sweet clover performed the best in interrow areas, while the perennial ryegrass + alfalfa mixture was the most effective in tree disk zones. Grass mulching in apple orchards can positively regulate the soil carbon pool through improvements in soil physical structure, activate carbon-cycling enzymes, and increase soil carbon fractions.

Key words: Soil organic carbon; Labile organic carbon; Humic carbon; Soil enzyme activity; Carbon pool management index; Grass mulching in orchards

随着农业结构调整的推进,苹果产业作为渭北旱塬的特色支柱产业,在农业生产中发挥着重要作用^[1]。2022年,陕西省出台《关于加快推进苹果产业高质量发展的意见》,提出以“稳规模、提品质、增效益”为发展路径,着力构建现代苹果产业体系^[2]。但传统清耕模式增加了苹果园土壤侵蚀、减少了有机质并降低了微生物活性,从而削弱了土壤固碳能力^[3]。为应对这一问题,生草覆盖通过促进植物-土壤-微生物互作,有效改善了土壤质量^[4]。其中,禾本科与豆科牧草混播可发挥功能协同作用:禾草密集的浅根系有效抑制杂草并保持水土;豆科深根系则改善土壤结构并通过固氮减少化肥需求。这一模式已成为提升果园生产力和生态效益的重要策略^[5-6]。

土壤有机碳主要由动植物残体、微生物生物量及其分解产物等组成,是评价土壤肥力与健康的核心指标^[7]。其合理维持不仅能提升作物产量,还可以减少化肥依赖^[8]。根据其化学性质和稳定性差异,土壤有机碳可分为两大类:活性有机碳和腐殖质碳。活性有机碳易于微生物分解,参与短期碳循环,对土壤酶活性和微生物活性有显著影响^[9]。腐殖质碳包括胡敏素、胡敏酸和富里酸,是在长期的物理、化学及生物作用下形成的高稳定性有机化合物^[10]。其富里酸碳比例的增加表明有机残体频繁输入或土壤有机质分解速率较慢^[11]。腐殖质碳能改善土壤结构和提升保水保肥能力^[12]。这两类碳组分的动态不仅受环境变化和人为管理措施的调控^[13-14],还受到碳循环酶的关键驱动^[6]。作为土壤微生物分泌至胞外的重要功能性酶,碳循环酶通过催化有机碳化合物的分解反应,在陆地碳循环中发挥着不可替代的生物催化作用。土壤碳库管理指数作为敏感指标,能够表征环境因素对土壤有机碳动态的影响^[15],其高低直接反映土壤系统的改善或退化状态^[16]。现有研究多集中于气候变化、种植制度和施肥措施对碳库管理指数的影响^[17-19]。然而,苹果园生草覆盖模式对碳库管理指数的影响机制尚不明确。

生草覆盖将增加土壤中的凋落物输入和地下根际输入,促进有机质积累和碳固存。迄今为止,关于不同碳组分与土壤有机碳之间关系的研究仍然相对匮乏,尤其是针对腐殖质碳的探讨更为少见。因此,本研究以传统清耕为对照,在苹果园行间和树盘区域设置3种生草覆盖处理措施。测定土壤活性有机碳含量、腐殖质碳含量和碳循环酶活性,深入解析其在土壤有机碳累积中的作用。通过计算土壤碳库指数,评估生草覆盖模式对苹果园土壤质量的提升效果。结合苹果园行间与树盘区域的空间差异性,揭示影响土壤碳库变化的关键因子。研究结果为构建果园碳汇提升的生草管理模式、实现土壤改良与固碳增汇协同发展提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况和试验设计

本试验于2021—2023年在陕西省永寿县店头镇康家村(34°35' N, 108°07' E)开展。试验地位于生辉生态种养专业合作社的矮化自根砧有机苹果种植示范基地。该区域属于暖温带大陆性季风气候区,年平均气温约为12℃,年均降水量约为781 mm,海拔高度为912 m,年均气压为903 hPa,相对湿度为66%。

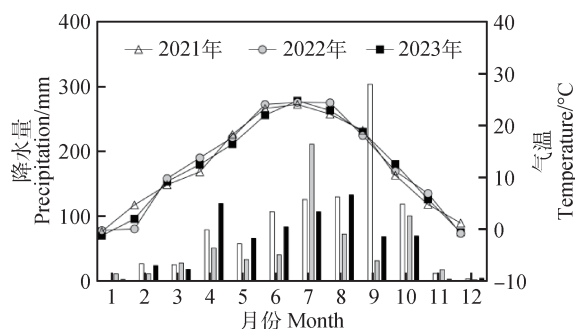


图1 研究区2021—2023年月总降水量及月均气温

Fig. 1 Monthly total precipitation and mean monthly temperature in the study area from 2021 to 2023

试验选用的是2018年栽种的‘瑞阳’品种苹果树,种植密度为株间距2 m、行间距4 m。本研究共设立4种处理方式:多年生黑麦草单播(Lp)、草木樨单播(Mo)、多年生黑麦草与紫花苜蓿混播(Lp+Ms),以传统清耕模式(CT)作为对照。所有处理按照完全随机区组设计安排,每个处理重复3次,每个试验区面积为96 m²(4 m×24 m)。分别于2021年9月

和2022年9月进行播种。因降水不足、杂草竞争或其他不利因素导致返青率低于80%时,翌年4月中下旬需进行局部补播。在2022年4—6月和2023年4—6月,牧草生长至初花期时进行刈割。刈割后的地上部分直接均匀覆盖于苹果树行间及树盘地表,通过自然腐解归还土壤。刈割时保留茬高约5 cm,以利于牧草快速再生,维持其生长持续性。

表1 草种组合及播种量

Table 1 Grass species combination and seeding rate

草种(组合) Grass species (mixture)	实际播种量 Actual seeding rate/(kg·hm ⁻²)	播种方式 Seeding method	草种材料来源 Material source of grass seeds
多年生黑麦草(<i>Lolium perenne</i> L.)	30	人工撒播	杨凌绿博种苗经销部
草木樨(<i>Melilotus officinalis</i> L.)	30		
多年生黑麦草+紫花苜蓿 (<i>Lolium perenne</i> L.+ <i>Medicago sativa</i> L.)	禾本科12,豆科18		

1.2 土壤样品采集与指标测定

待牧草残体自然腐解后,于2022年7月和2023年7月开展土壤采样工作。采用五点取样法采集土壤样品。采样前清除地表凋落物和残留植物,使用不锈钢土钻采集0~20 cm深度的土壤样品。每个混合样品均分为两份:一份经自然风干处理后用于土壤碳组分分析,另一份保存于4℃冷藏箱中,用于后续微生物生物量碳、可溶性有机碳含量及土壤酶活性的测定。各处理小区的采样区域设置如下:行间区域面积为60 m²(2.5 m×24 m),树盘区域面积为36 m²(1.5 m×24 m)。树盘区域的取样点位于行间取样区两侧边缘向外延伸0.7 m处,确保采样点具有代表性。

土壤有机碳(Soil organic carbon, SOC)使用总有机碳分析仪测定;易氧化有机碳(Easily oxidizable carbon, EOC)使用KMnO₄溶液(333 mmol·L⁻¹)进行氧化,采用分光光度法测定;土壤颗粒有机碳(Particulate organic carbon, POC)使用Na₆P₆O₁₈溶液(5 g·L⁻¹)提取,提取液中碳含量采用总有机碳分析仪测定;可溶性有机碳(Dissolved organic carbon, DOC)采用热水振荡过滤法提取后,使用总有机碳分析仪测定碳含量;微生物生物量碳(Microbial biomass carbon, MBC)采用氯仿熏蒸法,水土比4:1,硫酸钾浸提,TOC分析仪测定;轻组有机碳(Light fraction organic carbon, LFOC)采用Janzen法测定,加1.8 g·cm⁻³ NaI后震荡离心提取,碳含量采用总有机碳分析仪测定^[20];采用酸碱分离法先将土壤腐殖质分离得到胡敏素(Humin, HU)、富里酸(Fulvic acid, FA)和胡敏酸(Humic acid, HA),再将富里酸

和胡敏酸溶液蒸干,采用重铬酸钾氧化分光光度法测定碳含量^[21];β-1,4-葡萄糖苷酶(β-1,4-glucosidase, BG)活性采用酶联免疫法测定^[22];纤维二糖水解酶(Cellobiose hydrolase, CBH)采用3,5-二硝基水杨酸比色法测定^[23];多酚氧化酶(Polyphenol oxidase, PPO)和过氧化物酶(Peroxidase, PER)活性采用碘量滴定法测定^[24-25]。碳库管理指数(Carbon pool management index, CPMI)基于Blair^[26]提出的方法计算,具体方法如下:

碳库指数(Carbon pool index, CPI)=

样品土壤有机碳/对照土壤有机碳;

碳库活度指数(Carbon pool activity index, AI)=

样品碳库活度/对照碳库活度;

碳库活度(Carbon pool activity, CPA)=

易氧化有机碳/(土壤有机碳-易氧化有机碳)

CPMI=CPI×AI×100。

1.3 数据统计与分析

本研究采用Microsoft Excel 2019对数据进行系统整理,并使用SPSS 26.0软件进行统计分析。对于符合方差齐性和正态分布的数据,采用单因素方差分析(ANOVA),结合Tukey's HSD多重比较方法,以检验不同生草覆盖处理对土壤碳组分、酶活性及碳库管理指数的影响。当数据不满足正态性或方差齐性假设时,则采用非参数Kruskal-Wallis H检验进行组间比较;使用R(版本4.2.2)的linkE包进行曼特尔检验(Mantel test),使用randomForest包构建随机森林模型(Random forest model),进行相关矩阵分析与信度检验。评估土壤

性质、碳组分及酶活性对行间和树盘区域土壤碳动态的影响,分析驱动SOC变化的关键因子;通过vegan包和ellipse包实现主成分分析(Principal component analysis),运用ggplot2包实现数据可视化;使用plspm包和lavaan包进行偏最小二乘路径(Partial least squares path modeling)分析和构建结构方程模型,探讨影响行间与树盘区域碳库变化的潜在路径以及直接与间接效应。

2 结果与分析

2.1 不同生草覆盖处理对土壤碳组分及土壤酶活性的影响

如图2所示,不同生草覆盖处理对行间和树盘土壤有机碳组分产生一定的影响。行间区域SOC在Mo中的含量显著高于CT处理($P<0.05$),而Lp和Lp+Ms处理则在次年显著提高了树盘区域的SOC含量($P<0.05$)(图2a);在所有处理中,Mo

处理对活性有机碳含量的影响最为显著,其行间土壤中的POC,MBC,LFOC含量均高于CT处理($P<0.05$);实施后的第二年,行间区域EOC和DOC含量在Mo中显著低于其他处理($P<0.05$);Lp+Ms处理连续两年显著提高了行间区域的DOC含量($P<0.05$)。此外,Lp+Ms处理对树盘区域的活性有机碳组分显著提升($P<0.05$),使DOC和MBC含量分别提高了 $0.23\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $48.42\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。2022年,Mo处理显著提高了行间土壤中的腐殖质碳含量,尤其是HUC和HAC含量($P<0.05$)。2023年,Lp处理显著提升了树盘区域土壤中的HUC含量($P<0.05$),提高了 $1.86\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 。如图3所示,与CT相比,Mo处理显著提高了2022年树盘区域土壤中BG,CBH,PPO,PER的活性($P<0.05$),分别增加了 $1.06\text{ mU}\cdot\text{g}^{-1}$, $0.0024\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$, $0.31\text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$, $0.04\text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ 。2023年,Mo处理显著影响行间区域土壤中的BG,PPO,PER活性($P<0.05$)。

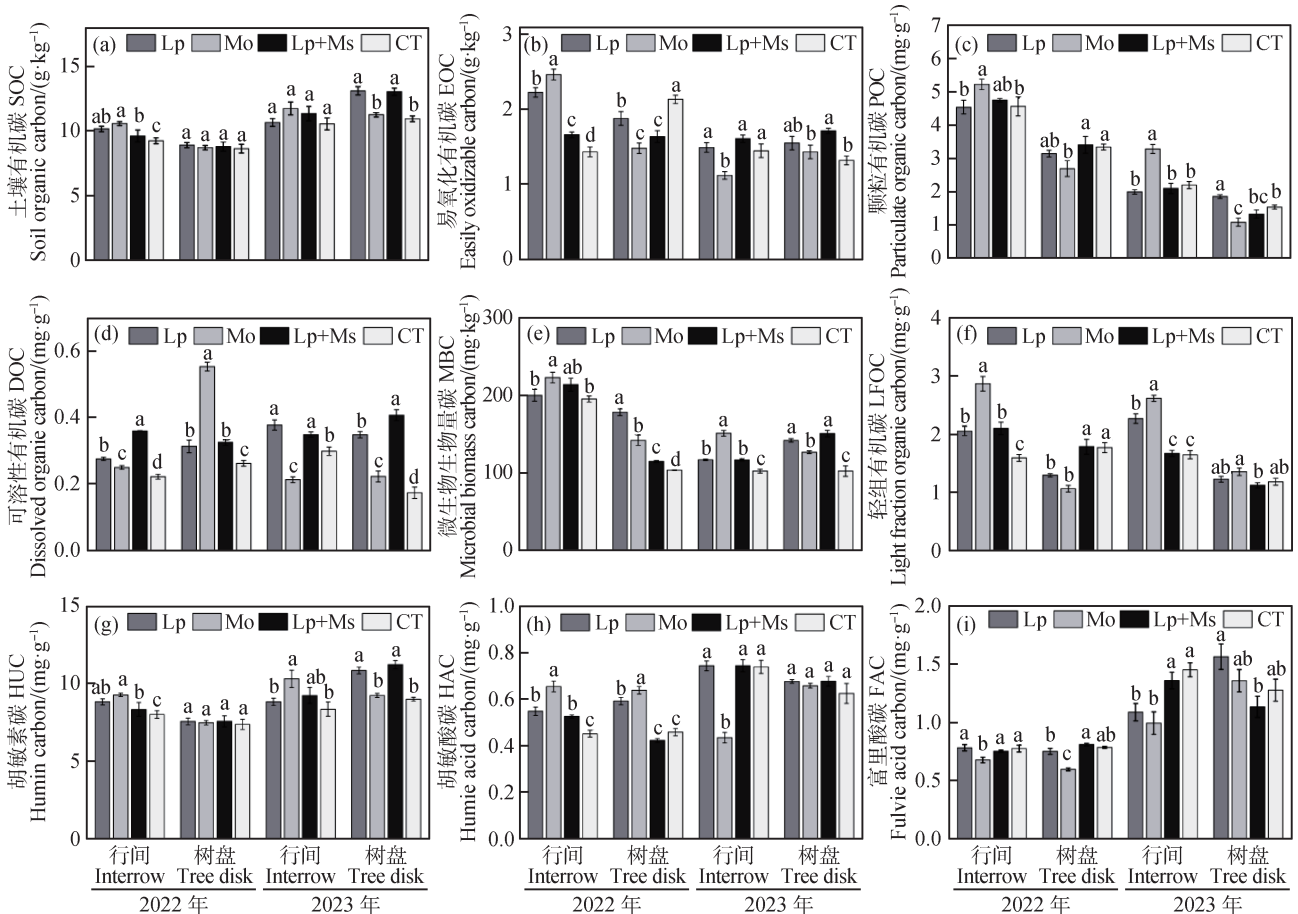


图2 生草覆盖处理对行间和树盘区域土壤有机碳及有机碳组分的影响

Fig. 2 Effects of grass mulching treatments on soil organic carbon and its fractions in the interrow and tree disk areas

注:Lp,多年生黑麦草;Mo,草木樨;Lp+Ms,多年生黑麦草+紫花苜蓿;CT,清耕对照。不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同
Note: Lp, *Lolium perenne* L.; Mo, *Melilotus officinalis* L.; Lp+Ms, *Lolium perenne* L. + *Medicago sativa* L.; CT, clean tillage control. Different lowercase letters indicate significant differences among treatments ($P<0.05$). The same as below

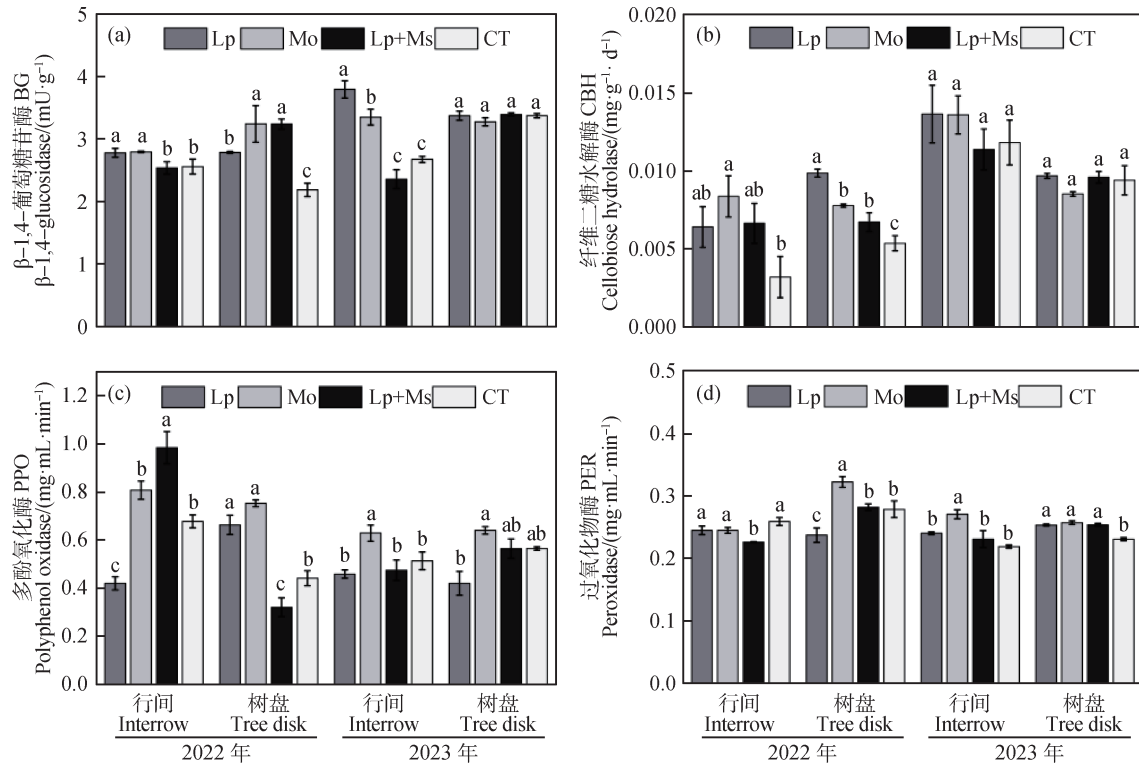


图3 不同生草覆盖处理对行间与树盘区域土壤酶活性的影响

Fig. 3 Effects of different grass mulching treatments on soil enzyme activities in the interrow and tree disk areas

2.2 不同生草覆盖处理对土壤碳库管理指数及土壤性质的影响

生草覆盖处理在两年间均对CPMI及土壤性质产生了显著影响($P < 0.05$, 表2)。2022年, Mo处理中的行间土壤的CPMI值为189.38, 显著高于其他试验处

理($P < 0.05$), Lp(168.01)处理次之; 2023年, Lp+Ms处理显著提升了树盘区域的CPI和CPMI($P < 0.05$), 分别提升19.15%和31.56%。此外, Mo处理显著降低了行间土壤pH值($P < 0.05$); 第二年, 行间与树盘的土壤BD在Mo处理下显著降低($P < 0.05$)。

表2 生草覆盖处理对土壤碳库管理指数及土壤性质的影响

Table 2 Effects of grass mulching treatments on the soil carbon pool management index and soil properties

年份 Year	生草覆盖处理 Grass mulching treatment		碳库指数 (Carbon pool index, CPI)	碳库活性 (Carbon pool activity, CPA)	碳库活性指数 (Carbon pool activity index, AI)	碳库管理指数 (Carbon pool management index, CPMI)	酸碱度 pH	容重 (Bulk density, BD)
2022年	行间 Interrow	Lp	1.10±0.03 ^{ab}	0.28±0.01 ^a	1.53±0.06 ^a	168.01±7.05 ^b	8.12±0.01 ^a	1.55±0.02 ^{ab}
		Mo	1.14±0.02 ^a	0.30±0.01 ^a	1.66±0.06 ^a	189.38±8.30 ^a	8.10±0.03 ^{ab}	1.52±0.06 ^{ab}
		Lp+Ms	1.04±0.06 ^b	0.21±0.02 ^b	1.14±0.11 ^b	118.36±5.04 ^c	8.14±0.03 ^a	1.47±0.02 ^b
		CT	1.00±0.03 ^b	0.18±0.01 ^b	1.00±0.08 ^b	99.91±6.83 ^d	8.01±0.06 ^b	1.60±0.02 ^a
	树盘 Tree disk	Lp	1.03±0.03 ^a	0.27±0.02 ^b	0.81±0.05 ^b	84.00±6.08 ^b	7.97±0.07 ^{ab}	1.75±0.01 ^b
		Mo	1.01±0.02 ^a	0.20±0.02 ^c	0.62±0.05 ^c	62.90±4.57 ^c	8.09±0.06 ^a	1.76±0.01 ^b
		Lp+Ms	1.02±0.05 ^a	0.23±0.02 ^{bc}	0.72±0.07 ^{bc}	72.74±3.58 ^{bc}	7.85±0.07 ^b	1.71±0.02 ^b
		CT	1.00±0.05 ^a	0.33±0.01 ^a	1.00±0.04 ^a	99.89±3.10 ^a	8.07±0.02 ^a	1.87±0.02 ^a
2023年	行间 Interrow	Lp	1.01±0.04 ^a	0.16±0.01 ^a	1.02±0.07 ^a	102.96±6.14 ^a	8.05±0.03 ^{ab}	1.41±0.02 ^b
		Mo	1.11±0.06 ^a	0.11±0.00 ^b	0.66±0.03 ^b	73.37±4.11 ^b	7.98±0.07 ^b	1.24±0.04 ^c
		Lp+Ms	1.08±0.06 ^a	0.17±0.01 ^a	1.04±0.09 ^a	111.35±5.14 ^a	8.07±0.01 ^{ab}	1.53±0.03 ^a
		CT	1.00±0.05 ^a	0.16±0.02 ^a	1.00±0.12 ^a	99.73±9.25 ^a	8.11±0.01 ^a	1.44±0.04 ^{ab}
	树盘 Tree disk	Lp	1.20±0.04 ^a	0.13±0.01 ^a	0.98±0.05 ^a	117.27±9.06 ^{ab}	7.94±0.02 ^{ab}	1.28±0.03 ^c
		Mo	1.03±0.02 ^b	0.15±0.01 ^a	1.06±0.07 ^a	109.48±9.46 ^b	8.00±0.04 ^a	1.33±0.02 ^b
		Lp+Ms	1.19±0.03 ^a	0.15±0.01 ^a	1.11±0.06 ^a	131.63±3.88 ^a	8.02±0.05 ^a	1.40±0.01 ^a
		CT	1.00±0.02 ^b	0.14±0.00 ^a	1.00±0.04 ^a	100.05±5.77 ^b	7.75±0.09 ^b	1.39±0.01 ^a

2.3 环境变量与土壤碳库指数和土壤碳组分的相关性

采用 Mantel 检验分析土壤 CPMI 与土壤性质、碳组分含量及酶活性之间的相关性,揭示其内在联系。相关性分析进一步阐明了不同因子对 SOC 的影响。值得注意的是,行间土壤中的活性有机碳组分、腐殖质碳组分及其相关的分解酶显著影响了土壤碳库特征($r>0.2, P<0.05$)。具体而言,CPA 与 EOC, LFOC, HUC 呈极显著正相关关系($r>0.2, P<0.01$)。CPA 与 EOC, POC, MBC, LFOC, HUC, CBH 活性呈现极显著正相关关系($r>0.2, P<0.005$)。此外,CPMI 与 BD, EOC, POC, MBC,

LFOC 均存在显著正相关关系($r>0.2, P<0.05$)。BD 与 BG, CBH 活性存在显著负相关关系($P<0.05$)。POC, MBC 与 HAC, FAC, CBH 活性存在显著负相关关系($P<0.05$)。此外, CBH 活性与 HAC, HUC, FAC 呈显著正相关关系($P<0.05$)。土壤 pH 值与 PER 活性呈极显著负相关关系($P<0.01$) (图 4a)。在行间区域, SOC 含量与 BD, POC, MBC 呈显著负相关关系($P<0.05$), 而与 HUC, FAC, CBH 活性呈极显著正相关关系($P<0.01$)。在这些因素中, MBC (MSE=6.66%, $P<0.05$) 和 FAC (MSE=5.51%, $P<0.05$) 被确定为是行间 SOC 的关键驱动因子(图 4b)。

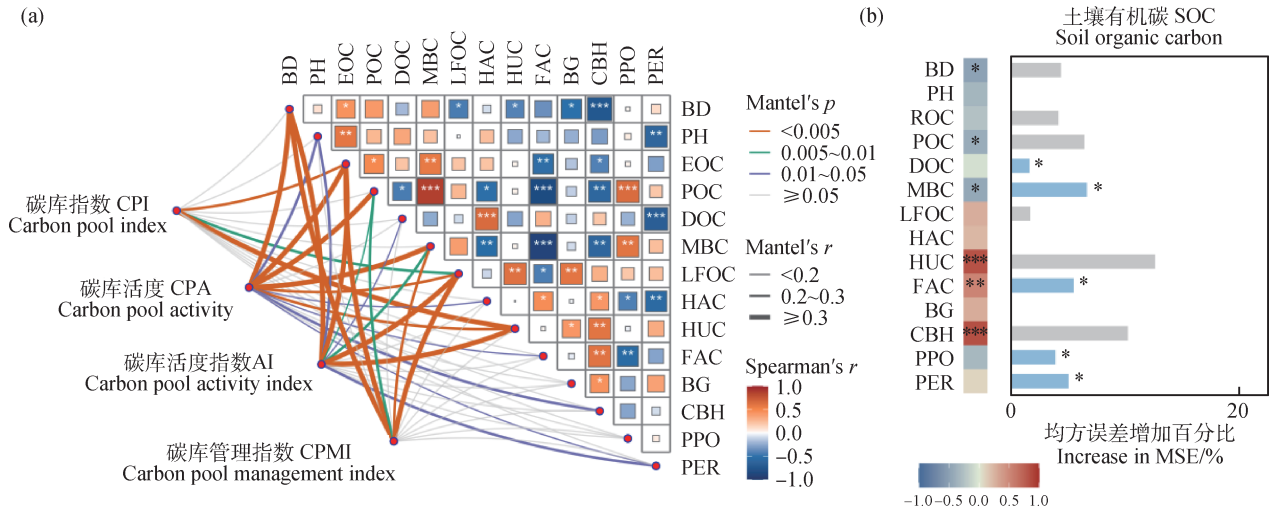


图4 行间区域的土壤性质、碳组分及酶活性对碳库管理指数的 Mantel 检验分析(a); 驱动行间土壤有机碳关键因子的随机森林模型分析(b)

Fig. 4 Mantel test analysis of soil properties, carbon fractions, and enzyme activities about the carbon pool management index in the interrow area (a); Random Forest model analysis of key driving factors for soil organic carbon in the interrow area (b)

注:BD,土壤容重;EOC,易氧化有机碳;POC,颗粒有机碳;DOC,可溶性有机碳;MBC,微生物生物量碳,LFOC,轻组有机碳;HAC,胡敏酸碳;HUC,胡敏素碳;FAC,富里酸碳;BG, β -葡萄糖苷酶;CBH,纤维素水解酶;PPO,多酚氧化酶;PER,过氧化物酶。统计显著性:* $P<0.05$,** $P<0.01$,*** $P<0.001$ 。下同

Note: BD, bulk density; EOC, easily oxidizable carbon; POC, particulate organic carbon; DOC, dissolved organic carbon; MBC, microbial biomass carbon; LFOC, light fraction organic carbon; HAC, humic acid carbon; HUC, humin carbon; FAC, fulvic acid carbon; BG, β -glucosidase; CBH, Cellobiose hydrolase; PPO, polyphenol oxidase; PER, peroxidase. Statistical significance: * $P<0.05$, ** $P<0.01$, *** $P<0.001$. The same as below

图5展示了 Mantel 检验结果,揭示了树盘区域的土壤碳库指数与土壤性质、碳组分及酶活性之间的相关性。具体而言,CPA 与 BD, EOC, POC, LFOC, HAC, HUC, FAC, BG, CBH 呈极显著正相关关系($r>0.3, P<0.005$)。CPMI 与 BD, POC, DOC, HUC, FAC, PPO, PER 存在极显著正相关关系($r>0.2, P<0.01$)。BD, POC, LFOC 与 HAC, BG, CBH 呈显著负相关关系($P<0.05$)。然而, HAC, HUC 与 BG, CBH 呈显著正相关关系($P<$

0.05)。此外,pH 值与 PER 活性呈显著正相关关系($P<0.05$,图 5a)。在树盘区域, SOC 与 BD, POC, PER 呈显著负相关关系($P<0.05$),与 HAC, HUC, FAC, BG, CBH 呈极显著正相关关系($P<0.01$)。进一步分析表明, HAC (MSE=5.29%, $P<0.05$), HUC (MSE=12.48%, $P<0.05$), CBH (MSE=3.33%, $P<0.05$), PER (MSE=4.49%, $P<0.05$) 是树盘 SOC 含量变化的关键预测因子(图 5b)。

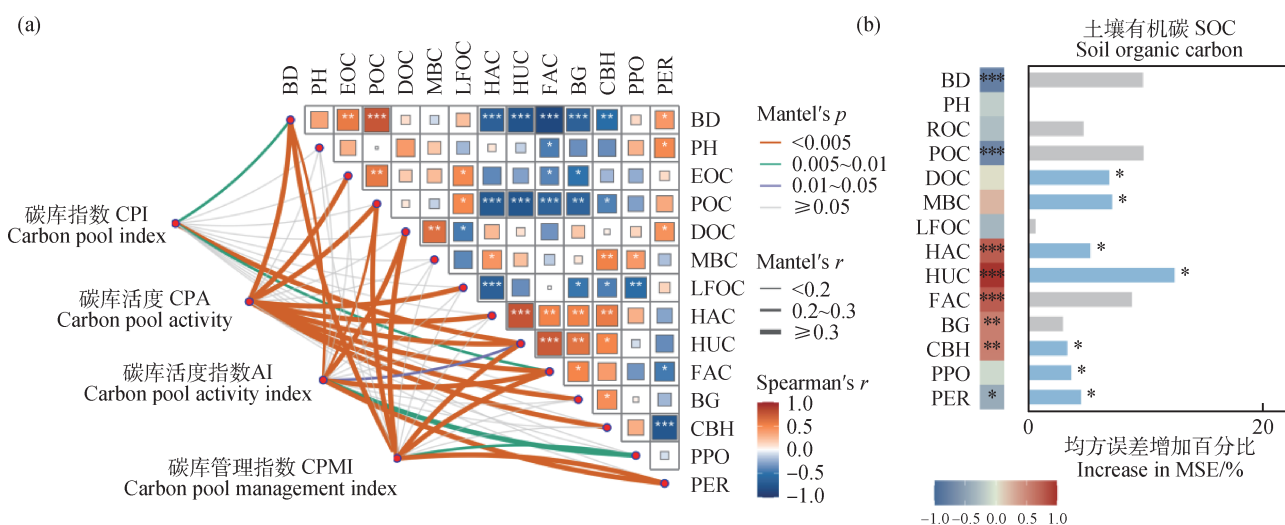


图5 树盘区域的土壤性质、碳组分及酶活性对碳库管理指数的 Mantel 检验分析 (a); 驱动树盘土壤有机碳关键因子的随机森林模型分析 (b)

Fig. 5 Mantel test analysis of soil properties, carbon fractions, and enzyme activities about the carbon pool management index in the tree disk area (a); Random Forest model analysis of key driving factors for soil organic carbon in the tree disk area (b)

2.4 影响行间与树盘区域土壤碳库变化的驱动因素

本研究旨在探究生草覆盖对苹果园行间与树盘区域土壤碳库差异的影响及其驱动因子。如图6所示,主成分分析(PCA)结果显示,通过连续两年的生草覆盖处理,行间与树盘区域的土壤性质、土壤有机碳组分及酶活性呈现出显著分布差异。在行间区域,连续两年以Mo处理的样点与SOC, POC, LFOC, MBC, HUC, BG, CBH呈正相关关系,并且与CT处理存在显著差异(图6a-b)。2023年,在树盘区域,Lp+Ms处理分布在PC1负方向上,与CT处理表现出显著差异。该处理与SOC, HUC, EOC, DOC, MBC, HAC, PER, pH呈正相关,但与BD呈负相关(图6d)。连续两年实施Lp处理的样点分布在PC1负方向和PC2正方向上,与SOC, BG, CBH呈正相关(图6c-d)。通过偏最小二乘路径建模(PLS-PM)分析进一步揭示土壤性质、活性有机碳、腐殖质碳、土壤酶及土壤有机碳对行间和树盘区域土壤碳库的直接和间接影响(图7)。在行间区域,土壤性质(路径系数=0.43, $P<0.01$)、活性有机碳(1.28, $P<0.01$)、腐殖质碳(1.06, $P<0.001$)和土壤酶(0.63, $P<0.01$)对土壤碳库有显著正向直接影响(图7a)。总效应分析表明,活性有机碳(0.90)、腐殖质碳(0.43)和土壤酶(0.52)均对行间区域的CPMI有正向贡献(图7b)。对于树盘区域,活性有机碳(0.26)、腐殖质碳(0.18)、土壤性质(0.12)和土壤有机碳(1.01)表现

出正向直接影响,而土壤酶则显示负向直接影响(-0.05)(图7c)。活性有机碳(0.54)和腐殖质碳(1.32)对树盘区域的CPMI有正向贡献(图7d)。

3 讨论

3.1 生草覆盖对土壤碳组分含量变化的影响

本研究揭示了生草覆盖通过协同调控活性有机碳和腐殖质碳,促进苹果园SOC含量的积累,该结果与Chen等人^[7]在柑橘园中实施草覆盖提升SOC含量的结论一致。其中,Mo处理显著提高了行间POC, MBC, LFOC, HUC, HAC的含量,此效应可能与其作为豆科植物的高效固氮能力有关^[27]。固氮作用提升了土壤氮素有效性,进而增强了微生物对凋落物的分解效率,最终促进了果园土壤碳组分的积累。Hu等人^[5]的研究也证实,豆科覆盖可有效提升果园SOC和POC含量。相比之下,Lp+Ms处理在树盘区域表现出更强的优势,黑麦草发达的须根系增加了根系分泌物的输入,而紫花苜蓿的深根结构有助于活化深层土壤碳库,二者协同促进了活性有机碳的积累^[28],这豆-禾混播模式通过差异化的根系分泌物与凋落物输入,实现了土壤改良与地力提升^[29],该机制与苟文龙等^[30]和Connell等人^[31]的研究观点一致。CT处理因缺乏外部有机质输入,各碳库组分均呈下降趋势,进一步印证了生草覆盖在果园生态系统中碳固存功能的必要性^[32]。此外,Mo处理提高了BG和CBH的活性,且CBH

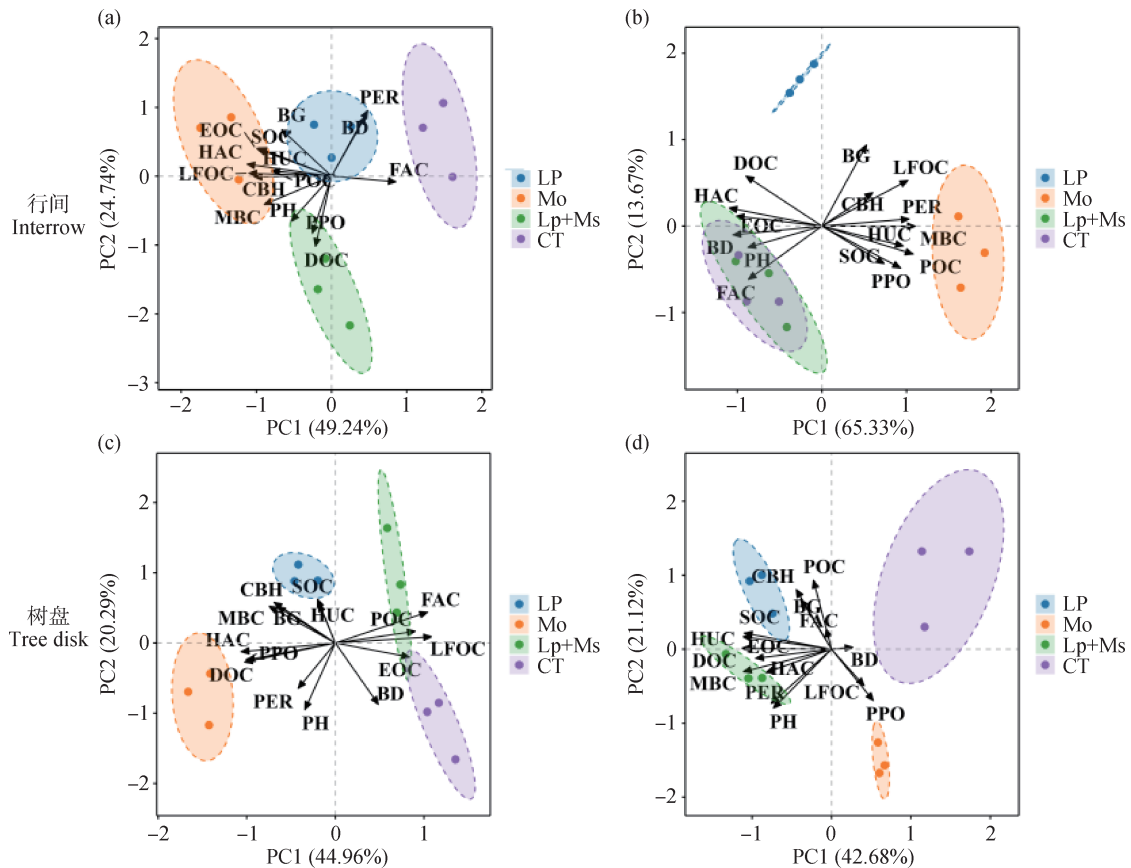


图6 2022年(a,c)和2023年(b,d)不同生草覆盖处理对行间和树盘区域土壤主成分分析

Fig. 6 Principal component analysis of soil in interrow and tree disk areas under different grass mulching treatments in 2022(a,c) and 2023(b,d)

与HAC,HUC的正相关性。这与人研究^[33]共同表明,微生物对纤维素等碳源的降解可能在腐殖碳形成过程中发挥了重要作用。MBC与FAC被识别为行间SOC动态变化的核心驱动因子(图4b),说明活性碳组分与稳定碳组分共同影响SOC的含量,该结果与张佳麒等人^[34]的腐殖质碳促进SOC积累的研究结论一致。

牧草刈割后,其凋落物在土壤中逐步腐解,土壤微生物通过体外修饰和体内周转的双重机制调控植物源碳的转化过程,并借助微生物残留物的续埋效应促进碳积累,从而对土壤碳库形成积极贡献^[35]。然而,在次年Mo处理中,EOC和DOC含量均低于CT处理,这可能源于不同碳组分在凋落物分解过程中的动态差异,或受到微生物碳代谢路径及激发效应的影响,杜忠等人^[36]的研究亦支持该解释。土壤微生物对活性有机碳具有较强的分解能力,可能导致部分碳组分浓度降低^[37]。SOC含量的变化不仅受土壤理化性质、水分条件及微生物群落结构等因素调控^[38],还可能通过土壤pH值影响其

稳定性,进而调控其含量^[39]。本研究区域属于干旱碱性土壤,较高的 Ca^{2+} 含量可能竞争性占据了黏粒对SOC的保护位点,Dou等人^[40]的研究表明,此过程会改变SOC组分结构,虽然会促使活性有机碳比例短期上升,但这部分碳更易于被微生物快速利用并消耗,最终导致在测定时EOC和DOC含量的下降。

3.2 土壤碳循环酶与土壤有机碳含量的敏感性

研究表明,生草覆盖通过增加有机质输入,激活关键酶促反应及调控微生物代谢途径,进而影响土壤碳循环过程。本研究中,Mo处理提高了行间土壤中BG,CBH,PER的活性(图3),表明该处理通过增强水解酶与氧化酶系统功能,促进了木质素、纤维素等难降解有机质向腐殖质碳的转化(图4),该结果与Xu等人^[41]的研究结论一致。豆科植物通过与根瘤菌的共生固氮作用,提高了土壤氮素的有效性,从而缓解了微生物代谢过程中的氮限制^[42]。氮素水平的提升促使微生物将更多代谢资源分配

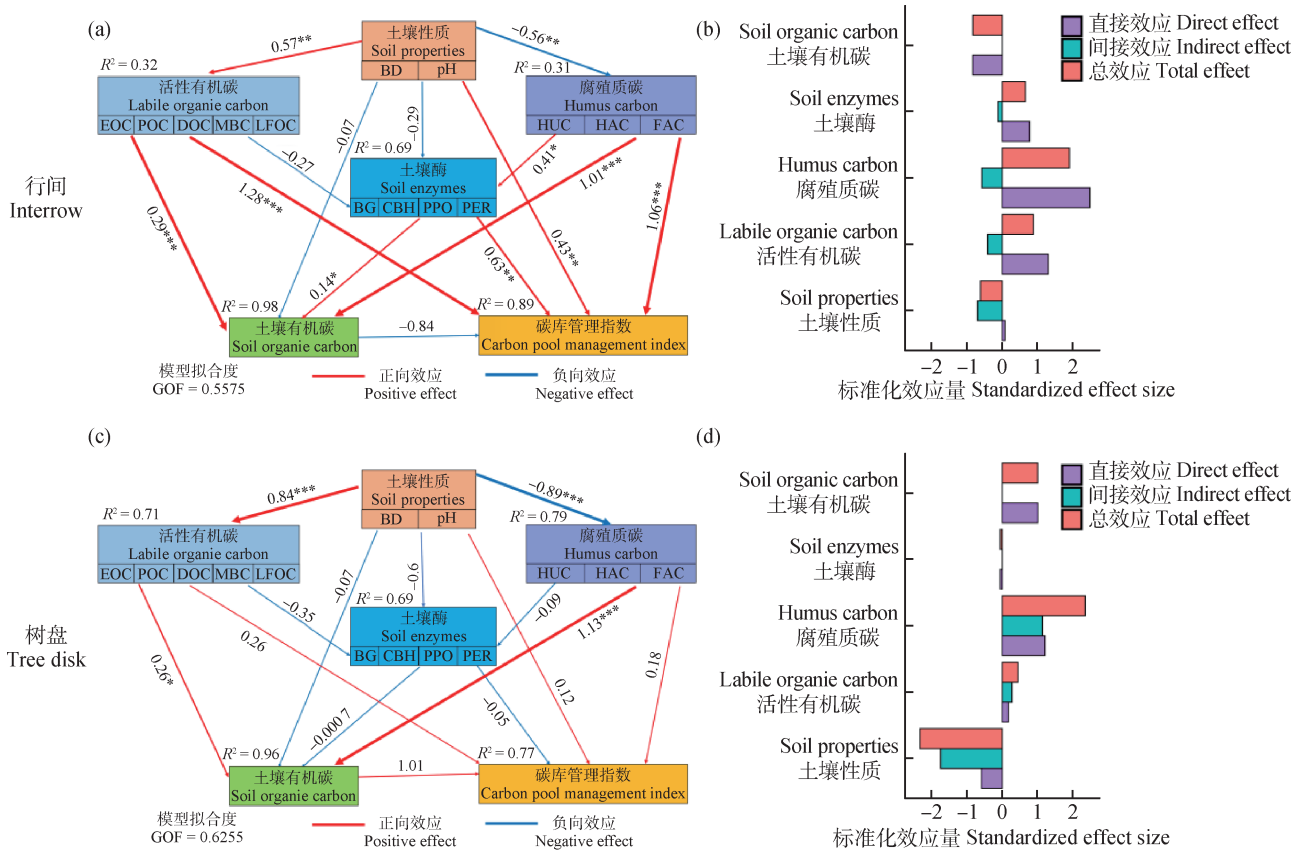


图7 行间与树盘区域土壤碳库对土壤性质、土壤酶活性及土壤碳组分变化的级联响应关系

Fig. 7 Cascading relationships of the interrow and tree disk soil carbon pools in response to changes in the soil properties, soil enzymes, and soil carbon fractions

注:红色和蓝色箭头分别表示正向和负向的因果关系;箭头上的数字表示显著的标准化路径系数(* $P < 0.05$; ** $P < 0.01$; *** $P < 0.001$)。 R^2 值表示模型对因变量变异的解释程度

Note: The red and blue arrows represent the positive and negative effects of the causal relationships, respectively. The numbers on the arrows indicate significant standardized path coefficients (* $P < 0.05$; ** $P < 0.01$; *** $P < 0.001$). The R^2 value shows the extent to which the model explains the variance of the dependent variables

至碳获取相关的胞外酶(如BG, CBH, PPO),从而更有效地分解木质素和纤维素复合物以获取能量^[43]。本研究中, CBH与HAC, HUC呈显著正相关,表明其活性的增强与腐殖质碳积累之间存在协同变化关系,该结果与林春英等人^[33]的研究相吻合。反映了CBH在特定生境下对稳定碳组分形成的潜在促进作用,也体现出土壤碳转化路径的复杂性。田玉莉等人^[44]研究指出,果园生草覆盖后SOC含量受水解酶活性的正向调控。本研究中,随着BG和CBH活性的升高, SOC含量亦同步增加(图5b),进一步证实了有机质含量较高的土壤通常具备更强的酶活性潜力。树盘区域由于地表凋落物积累丰富,加之密集根系分泌的氨基酸与葡萄糖等活性物质,为微生物生长与代谢提供了充足的碳源底物,从而增强了土壤酶系统的催化能力,促进

SOC的积累。Li等人^[45]研究也表明, SOC与活性有机碳及碳循环关键酶活性之间具有高度响应关系,进一步凸显了酶活性与土壤碳库动态之间紧密的耦合机制。

3.3 生草覆盖对土壤容重和土壤碳库管理指数的影响

Mo处理显著降低了土壤BD与pH值(表2),表明生草覆盖有助于改善苹果园土壤的物理结构并调节酸碱度,该结果与焦润安等人^[46]在油橄榄园中的研究结论一致。杨程高歌等人^[47]研究指出,植物根系穿插作用有助于增加土壤孔隙度并促进团聚体形成。从而为有机碳的物理固存提供结构保护^[48]。另一方面,豆科植物凋落物碳氮比较低,分解过程中释放较多酸性代谢产物,同时激活酸性磷

酸酶等酶系活性,进而降低土壤pH值^[49]。BD与BG,CBH活性呈负相关(图4-5),说明土壤紧实度增加可能限制酶与底物之间的有效接触,该现象与李文娜等人^[50]研究结果一致。进一步分析发现,BD与HUC呈负相关,而HUC与BG,CBH呈正相关,表明较低的土壤容重可通过增强氧气扩散能力与底物可利用性,促进腐殖质碳的酶促转化过程^[33]。

CPMI是表征土壤碳库稳定性与土壤质量变化的敏感指标^[51],其数值由植物残体与根系碳输入同有机质矿化输出之间的动态平衡所决定,能够有效反映不同土壤管理措施对活性碳组分动态的影响^[52]。本研究中,CPMI与BD呈显著负相关(图4-5),表明较低的BD改善土壤通气性与水分入渗能力,为微生物创造了更适宜的生长环境^[53],进而增强其代谢活性,促进有机质分解与转化,最终提高SOC含量并强化土壤碳库功能(表2),该结果与杨才艳等人^[54]在人工草地建植研究中的结论一致。较高的土壤活性碳含量通常反映系统具备较强的有机质分解潜力与活跃的养分循环过程,有助于支持植物生长^[55]。因此,CPMI的提升不仅体现了生草覆盖对土壤碳积累的积极贡献,也揭示了其在维持和提升土壤健康状况方面所具有的长期生态效益^[56]。全紫曼等人^[57]研究表明,土壤活性有机碳含量的增加伴随CPMI的相应上升,验证了生草覆盖在果园土壤质量改良中的重要作用。

3.4 生草覆盖对行间和树盘区域的影响差异

偏最小二乘路径模型与主成分分析结果表明,行间与树盘区域对生草覆盖的响应存在显著差异。这可能与植物根系分泌物和凋落物在空间上的异质性分布有关。活性有机碳与腐殖质碳在两个区域中对土壤碳库的总效应路径亦不相同,其中行间区域的碳库受活性有机碳、腐殖质碳及土壤酶的直接影响更为突出(图7)。曼特尔检验结果显示,行间区域的CPMI与BD,EOC,POC,MBL,FOC呈正相关。树盘区域的CPMI与BD,POC,DOC呈正相关外,还与HUC,FAC,PPO,PER活性呈正相关(图4-5)。行间区域的土壤有机质主要来源于植物残体与根系残留物,形态上以颗粒态为主,有利于活性有机碳的形成,该结果与刘富庭等人^[58]研究结果一致。该区域的土壤水分运移较快,进一步促进有机质的溶解与迁移,从而生成较多DOC^[59]。相比

之下,树盘区域作为果树根系密集区,根系分泌物与凋落物输入量大,在微生物作用下更易转化为腐殖质碳^[10]。此外,树盘区域较高的PER活性参与酚类物质的氧化降解,表明该区域的腐殖化过程较为活跃,有助于HAC的积累^[60]。综上所述,行间区域的碳动态以活性有机碳为主导,碳周转速率较快,属于短期碳循环模式;而树盘区域则更倾向于腐殖质碳的积累,表现出更高的碳稳定性与长期固存潜力。

4 结论

与传统清耕模式相比,生草覆盖技术提升了渭北旱塬苹果园土壤有机碳含量、活性有机碳含量、腐殖质碳组分和土壤酶活性;降低了土壤pH值和土壤容重,提升了碳库管理指数;生草覆盖对苹果园行间和树盘区域敏感性不同,行间碳动态以活性碳主导的短期碳循环为主,树盘区域进一步表现出对腐殖质碳积累的积极响应,反映了较高的碳稳定性。研究表明,长期生草覆盖对改善渭北旱塬苹果园土壤质量和调控土壤有机碳积累具有重要作用。行间区域采用草木樨种植,树盘区域采用多年生黑麦草与紫花苜蓿混播的组合处理,表现出最优的综合效益。未来研究可进一步结合微生物群落和代谢组学分析,深入解析草类覆盖调控土壤碳循环的微观机制,为果园分区管理和生草栽培技术提供理论支持。

参考文献

- [1] ZHANG C Y, CHANG Q, SHAO L Q, et al. The moderate operation scales of apples based on output, profit, and unit production costs in the shaanxi province of China[J]. Land, 2020, 9(1):25
- [2] 陕西省人民政府办公厅. 陕西省人民政府办公厅关于加快推进苹果产业高质量发展的意见[J]. 陕西省人民政府公报, 2022(21):5-10
General Office of the People's Government of Shaanxi Province. Opinions of the General Office of the People's Government of Shaanxi Province on accelerating the high-quality development of the apple industry[J]. Gazette of the People's Government of Shaanxi Province, 2022(21):5-10
- [3] 杨双晓, 马丽君, 马欣. 陕西永寿县苹果产业发展现状与思考[J]. 果树资源学报, 2021, 2(2):80-82
YANG S X, MA L J, MA X. Current situation and countermeasures of apple industry development in Yongshou County of Shaanxi Province[J]. Journal of Fruit Resources, 2021, 2(2):80-82

- [4] 任浩奇,李彤,杨荣,等. 生草对果园增肥、固碳生态效益影响的整合分析[J]. 生态学报,2025,45(17):1-11
REN H Q, LI T, YANG R, et al. Effect of grassing on the fertilization and carbon sequestration ecological benefits of orchards: a meta-analysis[J]. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45 (17):1-11
- [5] HU Q J, JIANG T, THOMAS B W, et al. Legume cover crops enhance soil organic carbon via microbial necromass in orchard alleyways[J]. Soil and Tillage Research, 2023, 234: 105858
- [6] TEIXEIRA C S, CASTILLO B T, BERNHARDT L, et al. Frequent defoliation of perennial legume-grass bicultures alters soil carbon dynamics[J]. Plant and Soil, 2023, 490(1):423-434
- [7] CHEN L D, BAO Y H, HE X B, et al. Nature-based accumulation of organic carbon and nitrogen in Citrus orchard soil with grass coverage[J]. Soil and Tillage Research, 2025, 248: 106419
- [8] LIPTZIN D, NORRIS C E, CAPPELLAZZI S B, et al. An evaluation of carbon indicators of soil health in long-term agricultural experiments[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2022, 172:108708
- [9] BONGIORNO G, BÜNEMANN E K, OGUEJIOFOR C U, et al. Sensitivity of labile carbon fractions to tillage and organic matter management and their potential as comprehensive soil quality indicators across pedoclimatic conditions in Europe[J]. Ecological Indicators, 2019, 99:38-50
- [10] MI W H, SUN Y, GAO Q, et al. Changes in humus carbon fractions in paddy soil given different organic amendments and mineral fertilizers[J]. Soil and Tillage Research, 2019, 195: 104421
- [11] GUIMARÃES D V, GONZAGA M I S, DA SILVA T O, et al. Soil organic matter pools and carbon fractions in soil under different land uses[J]. Soil and Tillage Research, 2013, 126: 177-182
- [12] ZHAO S X, TA N, LI Z H, et al. Varying pyrolysis temperature impacts application effects of biochar on soil labile organic carbon and humic fractions[J]. Applied Soil Ecology, 2018, 123:484-493
- [13] BORGES O, RAIMUNDO F, COUTINHO J, et al. Carbon fractions as indicators of organic matter dynamics in chestnut orchards under different soil management practices[J]. Agroforestry Systems, 2018, 92(2):301-310
- [14] WEI H, ZHANG K, ZHANG J E, et al. Grass cultivation alters soil organic carbon fractions in a subtropical orchard of southern China[J]. Soil and Tillage Research, 2018, 181: 110-116
- [15] HUANG B T, ZHANG L, CAO Y P, et al. Effects of land-use type on soil organic carbon and carbon pool management index through arbuscular mycorrhizal fungi pathways[J]. Global Ecology and Conservation, 2023, 43:e02432
- [16] ZHANG F F, LI S Q, YUE S C, et al. The effect of long-term soil surface mulching on SOC fractions and the carbon management index in a semiarid agroecosystem[J]. Soil and Tillage Research, 2022, 216:105233
- [17] CHAUDHARY S, DHERI G S, BRAR B S. Long-term effects of NPK fertilizers and organic manures on carbon stabilization and management index under rice-wheat cropping system[J]. Soil and Tillage Research, 2017, 166:59-66
- [18] MURINDANGABO Y T, KOPECKÝ M, HOANG T N, et al. Comparative analysis of soil organic matter fractions, lability, stability ratios, and carbon management index in various land use types within bharatpur catchment, Chitwan District, Nepal[J]. Carbon Balance and Management, 2023, 18(1):21
- [19] WANG X, CHEN F, LIU J J, et al. Linking the soil carbon pool management index to ecoenzymatic stoichiometry and organic carbon functional groups in abandoned land under climate change[J]. CATENA, 2024, 235:107676
- [20] CHEN Z M, WANG H Y, LIU X W, et al. Changes in soil microbial community and organic carbon fractions under short-term straw return in a rice-wheat cropping system[J]. Soil and Tillage Research, 2017, 165:121-127
- [21] XU L, WANG C Y, ZHU J X, et al. Latitudinal patterns and influencing factors of soil humic carbon fractions from tropical to temperate forests[J]. Journal of Geographical Sciences, 2018, 28(1):15-30
- [22] SAIYA-CORK K R, SINSABAUGH R L, ZAK D R. The effects of long term nitrogen deposition on extracellular enzyme activity in an *Acer saccharum* forest soil[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2002, 34(9):1309-1315
- [23] SINSABAUGH R L, ANTIBUS R K, LINKINS A E, et al. Wood decomposition: Nitrogen and phosphorus dynamics in relation to extracellular enzyme activity[J]. Ecology, 1993, 74 (5):1586-1593
- [24] SINSABAUGH R L, LAUBER C L, WEINTRAUB M N, et al. Stoichiometry of soil enzyme activity at global scale[J]. Ecology Letters, 2008, 11(11):1252-1264
- [25] JOHNSEN A R, JACOBSEN O S. A quick and sensitive method for the quantification of peroxidase activity of organic surface soil from forests[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2008, 40(3):814-821
- [26] BLAIR G J, LEFROY R D B, LISLE L. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems[J]. Australian Journal of Agricultural Research, 1995, 46(7):1459-1466
- [27] 窦梓懿,黎松松,田新春,等. 不同混播比例对箭筈豌豆+燕麦混播草地土壤氮素替代潜力的影响[J]. 草业科学, 2022, 39 (11):2424-2433
DOU Z Y, LI S S, TIAN X C, et al. Effects of different mixed sowing ratios on soil nitrogen substitution potential in mixed-sowing grassland with *Vicia sativa* + *Avena sativa*[J]. Prata-cultural Science, 2022, 39(11):2424-2433
- [28] 陈苏,谢建坤,黄文新,等. ‘南丰蜜橘’园生草对土壤有机碳及其组分的影响[J]. 果树学报, 2018, 35(3):285-292
CHEN S, XIE J K, HUANG W X, et al. Effects of sod culture

- on soil organic carbon and its components in a 'Nanfeng tangerine' orchard[J]. *Journal of Fruit Science*, 2018, 35(3): 285-292
- [29] 方雪梅,冉卓雅,修粤,等. 不同豆禾混播组合及比例促进川西山地土壤有机碳积累的效果比较[J]. *草业科学*, 2025, 42(2): 306-315
- FANG X M, RAN Z Y, XIU Y, et al. Effects of different mixed forage species and ratios in legume-grass mixtures on promoting soil organic carbon accumulation in the western mountain of Sichuan. *Pratacultural Science*, 2025, 42(2): 306-315
- [30] 苟文龙,李平,肖冰雪,等. 禾豆牧草混播增产增效研究进展[J]. *草学*, 2020(3): 16-23
- GOU W L, LI P, XIAO B X, et al. Research advances on yield enhancement and synergistic effects of grass-legume forage mixtures[J]. *Grassland Science*, 2020(3): 16-23
- [31] CONNELL R K, JAMES T Y, BLESCH J. A legume-grass cover crop builds mineral-associated organic matter across variable agricultural soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2025, 203: 109726
- [32] STEENWERTH K, BELINA K M. Cover crops enhance soil organic matter, carbon dynamics and microbiological function in a vineyard agroecosystem[J]. *Applied Soil Ecology*, 2008, 40(2): 359-369
- [33] 林春英,李希来,张静,等. 高寒沼泽湿地退化过程中土壤腐殖质变化特征的研究[J]. *草地学报*, 2022, 30(5): 1027-1036
- LING C Y, LI X L, ZHANG J, et al. Study on the characteristics of soil humus change during the degradation process of alpine marshland[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2022, 30(5): 1027-1036
- [34] 张佳麒,王翠,王明明,等. 长期秸秆还田条件下黑土有机碳的动态变化及其组分积累特征[J]. *土壤学报*, 2025, 62(6): 1460-1470
- ZHANG J Q, WANG C, WANG M M, et al. Temporal dynamics and fraction accumulation characteristics of black soil organic carbon under long-term continuous straw return[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2025, 62(6): 1460-1470
- [35] LIANG C, SCHIMEL J P, JASTROW J D. The importance of anabolism in microbial control over soil carbon storage[J]. *Nature Microbiology*, 2017, 2(8): 17105
- [36] 杜忠,陈尚香. 植物来源碳和土壤属性对土壤有机碳激发效应影响的研究进展[J]. *土壤通报*, 2025, 56(2): 580-592
- DU Z, CHEN S X. Research progress on the effects of plant-derived carbon and soil properties on the priming effect of soil organic carbon[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2025, 56(2): 580-592
- [37] FINLEY B K, DIJKSTRA P, RASMUSSEN C, et al. Soil mineral assemblage and substrate quality effects on microbial priming[J]. *Geoderma*, 2018, 322: 38-47
- [38] HOU Z N, WANG R H, CHANG S, et al. The contribution of microbial necromass to soil organic carbon and influencing factors along a variation of habitats in alpine ecosystems[J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 921: 171126
- [39] WANG C Q, KUZUYAKOV Y. Soil organic matter priming: The pH effects[J]. *Global Change Biology*, 2024, 30(6): e17349
- [40] DOU X L, ZHANG C Z, CHEN L, et al. Calcium forms influence soil organic carbon by mediating labile organic carbon fractions, carbon pool management indices and microbial communities in calcareous alkaline soils[J]. *Plant and Soil*, 2024: 1-17
- [41] XU H L, WANG S Q, JIANG N, et al. Organic fertilizer prepared by thermophilic aerobic fermentation technology enhanced soil humus and related soil enzyme activities[J]. *Soil Use and Management*, 2024, 40(2): e13059
- [42] 陆保福,康文娟,师尚礼,等. 豆科植物-根瘤菌固氮系统及其碳氮互作[J]. *中国草地学报*, 2023, 45(11): 119-135, 144
- LU B F, KANG W J, SHI S L, et al. Nitrogen fixation system of legume-rhizobia and its carbon-nitrogen interaction[J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2023, 45(11): 119-135, 144
- [43] ZHANG X P, LI Q L, ZHONG Z K, et al. Determining changes in microbial nutrient limitations in bamboo soils under different management practices via enzyme stoichiometry[J]. *CATENA*, 2023, 223: 106939
- [44] 田玉莉,吴小苹,陈欣佛,等. 黄土高原果园不同覆盖模式对土壤酶活性的影响[J]. *草地学报*, 2022, 30(10): 2581-2589
- TIAN Y L, WU X P, CHEN X F, et al. Effect of diversity mulching model on soil enzyme activities in the Loess Plateau orchard[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2022, 30(10): 2581-2589
- [45] LI S, ZHANG S R, PU Y L, et al. Dynamics of soil labile organic carbon fractions and C-cycle enzyme activities under straw mulch in chengdu plain[J]. *Soil and Tillage Research*, 2016, 155: 289-297
- [46] 焦润安,焦健,李朝周. 生草对油橄榄园土壤性质和油橄榄成花生理的影响[J]. *草业学报*, 2018, 27(7): 133-144
- JIAO R N, JIAO J, LI C Z. The effect of sod-culture on orchard soil properties and the floral physiology of olives[J]. *Acta Pratacultural Sinica*, 2018, 27(7): 133-144
- [47] 杨程高歌,雷少华,耿韧,等. 黄棕壤典型草地不同根系结构土壤团聚体稳定性季节变化特征[J]. *水土保持研究*, 2025, 32(1): 66-72
- YANG C G G, LEI S H, GENG R, et al. Seasonal variation of soil aggregate stability of typical yellow brown soil in grasslands with different root structures[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2025, 32(1): 66-72
- [48] WANG X J, SALE P, HAYDEN H, et al. Plant roots and deep-banded nutrient-rich amendments influence aggregation and dispersion in a dispersive clay subsoil[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2020, 141: 107664
- [49] WU A J, FANG Y, LIU S, et al. Root morphology and rhizosphere acid phosphatase activity in legume and graminoid species respond differently to low phosphorus supply[J]. *Rhizosphere*, 2021, 19: 100391
- [50] 李文娜,李爽,关皓月,等. 耕作方式和秸秆还田对麦-豆轮作田土壤理化特性和土壤酶活性的影响[J]. *土壤*, 2024, 56(6): 1274-1282

- LI W N, LI S, GUAN H Y, et al. Effects of tillage methods and straw returning on soil physiochemical properties and enzyme activities in wheat-soybean rotation field [J]. *Soils*, 2024, 56(6):1274-1282
- [51] HUANG K W, KUAI J, JING F L, et al. Effects of understory intercropping with salt-tolerant legumes on soil organic carbon pool in coastal saline-alkali land [J]. *Journal of Environmental Management*, 2024, 370:122677
- [52] YUAN G Y, HUAN W W, SONG H, et al. Effects of straw incorporation and potassium fertilizer on crop yields, soil organic carbon, and active carbon in the rice-wheat system [J]. *Soil and Tillage Research*, 2021, 209:104958
- [53] 李志熙, 白岗栓, 邹超煜, 等. 自然生草对渭北旱塬苹果园土壤孔隙和水分入渗的影响 [J]. *中国农业大学学报*, 2022, 27(5):146-156
- LI Z X, BAI G S, ZOU C Y, et al. Effects of self-sown grass on soil porosity and soil infiltration in apple orchard in Weibei dry plateau [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2022, 27(5):146-156
- [54] 杨才艳, 杨航, 宋建超, 等. 人工草地建植对三江源区土壤有机碳组分及酶活性的影响 [J]. *草地学报*, 2024, 32(5):1359-1369
- YANG C Y, YANG H, SONG J C, et al. Effects of artificial grassland establishment on soil organic carbon fractions and enzyme activities in Three-River Source Region [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2024, 32(5):1359-1369
- [55] 刘雅杰, 张天娇, 张向前, 等. 秸秆还田下耕作方式对黑土活性有机碳组分及碳库管理指数的影响 [J]. *中国农业科学*, 2024, 57(17):3408-3423
- LIU Y J, ZHANG T J, ZHANG X Q, et al. Effects of tillage methods under straw returning on the labile organic carbon fractions and carbon pool management index in black soil farmland [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2024, 57(17):3408-3423
- [56] WANG W, LAI D Y F, WANG C, et al. Effects of rice straw incorporation on active soil organic carbon pools in a subtropical paddy field [J]. *Soil and Tillage Research*, 2015, 152:8-16
- [57] 全紫曼, 漆燕, 周泽弘, 等. 山豆还田与氮肥减施对稻田土壤活性有机碳组分及酶活性的影响 [J]. *草业科学*, 2024, 41(5):1057-1067
- QUAN Z M, QI Y, ZHOU Z H, et al. Effects of *Lathyrus sativus* return to the field and nitrogen rate reduction on paddy soil labile organic carbon and soil enzyme activities [J]. *Pratacutural Science*, 2024, 41(5):1057-1067
- [58] 刘富庭, 张林森, 李雪薇, 等. 生草对渭北旱地苹果园土壤有机碳组分及微生物的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20(2):355-363
- LIU F T, ZHANG L S, LI X W, et al. Effects of inter-row planting grasses on soil organic carbon fractions and soil microbial community of apple orchard in Weibei dryland [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2014, 20(2):355-363
- [59] 王耀锋, 邵玲玲, 刘玉学, 等. 桃园生草对土壤有机碳及活性碳库组分的影响 [J]. *生态学报*, 2014, 34(20):6002-6010
- WANG Y F, SHAO L L, LIU Y X, et al. Effects of interplanting grass on soil organic carbon and active components of carbon pool in peach orchard [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(20):6002-6010
- [60] SONG X Y, LIU S T, LIU Q H, et al. Carbon sequestration in soil humic substances under long-term fertilization in a wheat-maize system from north China [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2014, 13(3):562-569

(责任编辑 付 宸)