

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

孙文泰, 马 明, 董 铁, 牛军强, 尹晓宁, 刘兴禄

(甘肃省农业科学院林果花卉研究所, 兰州 730070)

摘要:为探明陇东旱塬雨养农业区旱作节水措施下黄绵土物理稳定性机制和化学活性机制,揭示表层土壤有机碳贮存对土壤物理“隐性”退化的响应机制。以陇东旱塬区不同覆膜年限(2,4,6年)的苹果园表层土壤(0—20 cm)为对象,对土壤物理性状、质地分级进行判断,监测微生物量碳(MBC)、易氧化有机碳(EOC)、颗粒有机碳(POC)、可溶性有机碳(DOC)等指标的动态变化,表征土壤有机碳变化趋势,借助 β -1,4-木糖苷酶(β X)、 β -1,4-葡萄糖苷酶(β G)、纤维二糖水解酶(CBH)活性表征土壤碳代谢循环特性,以解析不同覆膜年限下根系生长、土壤物理结构与土壤碳代谢酶活性、有机碳固持的关系。结果表明:短期覆膜(2Y)可有效改善土壤含水量、总孔隙度、毛管孔隙度,降低土壤容重,分别为CK的112.39%,105.65%,104.29%,90.08%,显著促进细根的生长,有利于良好的土壤结构形成和植物源有机质输入;有机碳总量、颗粒有机碳、可溶性有机碳、微生物量碳、易氧化有机碳含量分别为CK的137.21%,220.11%,129.42%,151.35%,111.72%,提高活性有机碳组分含量;长期覆膜(6Y)表现为表层土壤“隐性”退化,土壤孔隙结构恶化导致细根生长障碍,土壤活性有机碳组分中的易氧化有机碳、微生物量碳显著降低,仅分别为CK的46.88%,43.54%; β X、 β G、CBH酶活性作为主导因子决定了有机碳储量的变异性,仅分别为CK的65.60%,53.08%,47.04%;长期覆膜条件下表层土壤结构的破坏,导致根系生长受到抑制,土壤碳代谢酶活性和碳库管理指数的降低,有机碳储量减少,不利于土壤质量长期稳定健康发展;短期覆膜(2Y)为适于陇东旱塬苹果栽培的节水保墒覆膜年限。研究结果为完善黄土高原雨养农业区苹果栽培节水保墒技术对土壤物理结构演化、地力提升、根系生长的调节机制、优化抗旱栽培技术提供理论依据。

关键词:覆膜;细根;土壤有机碳;土壤酶活性;碳库管理指数

中图分类号:S661.1 文献标识码:A 文章编号:1009-2242(2021)05-0272-08

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbxb.2021.05.037

Differences of Active Organic Carbon and Enzymes Activities in the Surface Soil “Recessive” Degradation of Long-term Dryland Apple Orchards Under Plastic Film Mulching

SUN Wentai, MA Ming, DONG Tie, NIU Junqiang, YIN Xiaoning, LIU Xinglu

(Institute of Forestry, Fruits and Floriculture, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou 730070)

Abstract: Soil organic carbon (SOC) is an important component of soil organic matter and an important index to evaluate soil fertility. The purpose of this study was to investigate the effects of soil water saving and soil moisture conservation on surface soil structure stability and organic carbon sequestration capacity in rain-fed agricultural area of the Longdong dry tableland, Northwest China. In this study, the fine root growth of 0—20 cm topsoil of apple orchards with different plastic film mulching years (2,4,6 years) was investigated. The soil physical properties and texture was classified. With microbial biomass carbon (MBC), easily oxidized organic carbon (EOC) and particulate organic carbon (POC), soluble organic carbon (DOC), and other indicators, the dynamic change of characterization of soil organic carbon were evaluated. With the help of β -1,4-wood glycosidase (β X), β -1,4-glycosidase enzymes (β G), cellobiose hydrolysis (CBH) enzymes activities, the soil carbon metabolism circulation features were characterized. The relationship between root growth, soil physical structure, soil carbon metabolism enzymes activities and organic carbon sequestration

收稿日期:2021-04-05

资助项目:国家自然科学基金项目(31760555);农业部西北地区果树科学观测试验站项目(S-10-18)

第一作者:孙文泰(1983—),女,硕士,副研究员,主要从事果树与逆境生态研究。E-mail:swt830312@126.com

通信作者:孙文泰(1983—),女,硕士,副研究员,主要从事果树与逆境生态研究。E-mail:swt830312@126.com

under different plastic film mulching years were established to investigate the response of surface soil organic carbon to physical “recessive” degradation. The results showed that: short-term film mulching (2Y) effectively improved soil water content, total porosity, capillary porosity, reduce soil bulk density, which was 112.39%, 105.65%, 104.29%, 90.08% of CK. As a result, the growth of fine roots and the active organic carbon contents were promoted. The contents of POC, DOC, MBC and EOC were 220.11%, 129.42%, 151.35% and 111.72% of those of CK, resulting in the increased total organic carbon of 137.21% compared with that of CK. Long-term film mulching (6Y) showed a “recessive” degradation of surface soil, and the deterioration of soil pore structure was dominated the growth of fine roots. The EOC and MC were decreased significantly by 46.88% and 43.54%, compared with the CK. β X, β G and CBH enzyme activities, as the dominant factors determine the variability of organic carbon storage, accounted for only 65.60%, 53.08%, 47.04% of CK. The damage of surface soil structure under long-term plastic mulching conditions led to the inhibition of root growth, which resulted in the decrease of soil carbon metabolism enzyme activity, carbon pool management index and organic carbon storage, which was not conducive to the long-term, stable and healthy development of soil quality. Short-term film mulching for 2 years was suitable for apple cultivation in the Longdong dry tableland. In order to provide theoretical basis for improving the adjustment mechanism of soil physical structure evolution, soil fertility improvement, root growth and drought-resistant cultivation technology of fruit trees in rainfed agricultural areas of the Loess Plateau.

Keywords: film-mulching; fine roots; soil organic carbon; soil enzyme activity; carbon pool management index

甘肃陇东苹果产区光热资源丰富,昼夜温差大,年降水量 500~550 mm,属于典型的西北黄土高原雨养农业区^[1]。土壤为黄绵土,具有质地轻、疏松绵软、土层深厚的特点,但有机质含量低,团聚作用微弱,肥水保供能力差。因而土壤肥力水平低、结构稳定性差与气候干旱共同构成限制当地苹果产业发展的重要因素^[2]。苹果生命周期需消耗大量水分,覆盖地膜因其节水保墒作用、低廉的成本、简易的操作性被广大果农接受。已有研究^[3]在静宁县长期定位试验中发现,长期覆膜后直径 ≤ 2 mm 细根根量减少,集中于表层土壤(0—20 cm)“平层化分布”,有机质连年下降。可见覆膜改变了土壤碳代谢规律,影响土壤碳平衡。土壤有机碳是有机质重要组成,其总量变化是缓慢的过程^[4]。土壤活性有机碳对土地利用方式与生境变化响应敏感,有助于揭示土壤有机碳动态变化^[5],通常由微生物生物量碳(MBC)、易氧化有机碳(EOC)、颗粒有机碳(POC)、可溶性有机碳(DOC)表征,反映土壤肥力变化趋势。

地膜的保水增温效应对我国旱地栽培做出巨大贡献。目前对覆膜促进作物养分吸收、提质增效予以肯定,但是否存在地力消耗、作物早衰的现象有所争议。李欣雨等^[6]研究表明,由于果园土壤耕作扰动少,表层凋落物形成有机碳多在 20—40 cm 土层沉淀,表层土壤有机碳低于农田;卜玉山等^[7]认为,覆膜显著的增温保水作用加速了土壤有机质分解,导致土壤有机碳储量降低;司鹏飞^[8]则指出,旱地覆膜在短期内(<4 年)不会引起土壤有机碳衰退。可见当前对不同土壤利用方式下覆膜对有机碳周转与作物生长关系开展了较为系统的

研究,但与有机碳保护、贮存息息相关的土壤物理结构在长期持续覆膜后是否发生退化及有机碳代谢响应机制研究尚显不足。土壤有机碳积累主要由根系腐解决定^[9],李小刚等^[10]认为,覆膜可促进有机碳矿化,并改变根系生长,碳输入与输出平衡关系有待长期监测验证。不同土壤利用方式、耕作措施下表层土壤微环境变化产生根系生长可塑性调节、根系碳输入增减、碳代谢酶活性改变,以及根系对土壤结构的改善是相互反馈关系^[11-12],需系统研究。

因此针对陇东长期覆膜苹果园表层土壤有机质连年下降现象,本文以土壤、根系为研究对象,探讨长期覆膜下苹果细根生长、土壤物理性状、活性有机碳组分分布特征,揭示不同覆膜年限下土壤活性有机碳、碳代谢相关酶活性对土壤物理结构、根系生长的响应,为完善黄土高原雨养农业区果树栽培节水保墒技术对土壤物理结构演化、地力提升、根系生长的调节机制、优化抗旱栽培技术提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于甘肃省平凉市静宁县国家苹果产业体系平凉综合试验站内,试验园(35°24'N,105°43'E)面积33 335 m²,海拔 1 561 m,年均降水量 450~550 mm,主要集中于 7—9 月,年蒸发量 1 531 mm,干燥度 2.53。年均日照时间 2 238 h,无霜期 159 天,年平均气温 7.1 ℃,属于典型的西北黄土高原雨养农业区。土壤为黄绵土,粉砂质壤土,土层深厚,有机质含量低,表层土壤水分蒸发快,深层土壤水调节作用差,团聚作用微弱,易受侵蚀。试验地土壤全氮、全磷、全

钾、有机质含量分别为 1.27,1.12,16.86,14.69 g/kg,碱解氮、速效磷、速效钾含量分别为 96.26,47.30,377.04 mg/kg,pH 为 8.35。

试验材料为同一果园 18 年生红富士苹果树,品种“长富 2 号”,砧木山定子,果树株行距 4 m×5 m。设置清耕(未覆膜,CK)、覆膜 2 年(2Y)、覆膜 4 年(4Y)、覆膜 6 年(6Y)4 个处理,各处理除地膜覆盖年限差异外,其他栽培管理措施均一致。由距离主干 0~1.5 m 范围内覆盖黑色地膜(膜厚 2.0 mm,膜宽 1.5 m,山西迎太塑料有限公司)。行间免耕,留约 1 m 左右操作行,冬季不撤膜,如有破损,及时更换新膜。各处理选取树冠大小相似、生长一致的健壮植株,单株小区,每处理 15 次重复,连续 3 行为 1 个处理,各处理间设置保护行。选择标准为树冠直径 5.5~4.8 m,树高 3.5~4.0 m,主干高度 0.8~1.0 m。

1.2 试验方法及测定

分别于 2019 年苹果根系发根高峰(新梢停长后)采用土壤剖面法^[1]系统调查根系分布,于树干中心位置开始沿垂直行向方向挖长 1.5 m,宽 30 cm,深 40 cm(每层 20 cm)的观测沟,采集根系(依次调查顺行向距离主干 30,60,90,120,150 cm 处剖面的根系),每次采样 5 次重复,每重复 1 株树。在观测沟剖面上画 30 cm×30 cm 网格线,将每个网格所在土壤区块内 20 cm×30 cm×30 cm 的根系分层取出,将取出的整株根系用去离子水洗去表面土壤,带回实验室,应用 EPSON Expression 根系扫描系统与 WINRHIZO 根系分析软件采集根系形态数据。根系扫描分析时将根系小心清洗干净,迅速放入装有蒸馏水的无色透明塑料水槽内,同时用镊子调整根系位置,避免根系间相互交叉、重叠、扫描数据出现误差。测量根系数量、根长等。采集根样时,同时采集土样测定土壤物理性状。

土壤容重测定:将已采集好的环刀内土壤样品细心的全部转移到已知质量的铝盒内,称量铝盒及新鲜土壤样品的质量,记为 G_1 。将样品带回室内,放在 105 ℃烘箱内烘干至恒量,称量烘干土及铝盒质量,记为 G_2 ^[13]。土壤含水量 ω 和容重计算公式为:

$$\omega = ((G_1 - G_2) / (G_2 - G_0)) \times 100\%$$
$$\text{土壤容重} = ((G_1 - G_0) \times 100) / v \times (100 + m)$$

(1)

(2)

$$V = \pi R^2 h$$

式中: ω 为土壤含水量(%); h 为环刀高度(cm); R 为环刀有刃口一端的内半径(cm); V 为环刀的容积(cm^3); G_0 为铝盒的质量(g); G_1 为铝盒和湿土的重量(g)。

$$\text{土壤总孔隙度:总孔隙度}(\%) = (1 - \rho / p) \times 100\%$$

(3)

(4)

$$\text{式中:}\rho \text{ 为土壤容重}(\text{g}/\text{cm}^3);p \text{ 为土壤比重(一般取其平均值 } 2.65 \text{ g}/\text{cm}^3)$$
$$\text{土壤毛管孔隙度}(\%) = \text{土壤田间持水量}(\%) \times \text{土壤容重}(\text{g}/\text{cm}^3)$$

(5)

$$\text{通气孔隙度}(\%) = \text{总孔隙度}(\%) - \text{土壤毛管孔隙度}(\%)$$
$$PD = BD + 0.09C$$

(6)

(7)

$$\text{式中:}PD \text{ 为压实密度}(\text{g}/\text{cm}^3);BD \text{ 为土壤容重}(\text{g}/\text{cm}^3);C \text{ 为土壤黏粒含量}(\%)。$$

土壤机械组成用激光粒度分析仪(Mastersizer 2000, Malvern Instruments, Malvern, England)测定,每个采样点 3 个重复,取平均值。

用于测定土壤有机碳、碳代谢酶活性土壤样品采集时将土壤表面的植被和枯草小心铲除,每处理(20 m×15 m)采集表层土壤(0—20 cm)样品,随机选择 5 个取样点,然后将土壤样品均匀混合为 1 个土样约 1 kg,尽量保持土壤原状结构,装入塑料袋密封,置于便携式冷藏箱,迅速带回实验室,4 ℃保存,用于测定土壤活性有机碳;剩余样品自然风干、研磨、过筛后于干燥处密封保存,进行土壤有机碳测定。土壤总有机碳用重铬酸钾—外加热法^[13]测定;易氧化有机碳用 $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 氧化法^[14]测定;微生物量碳用氯仿熏蒸法^[15]测定;可溶性碳的测定参照去离子水浸提法^[16];颗粒有机碳用六偏磷酸钠分散法^[17];土壤酶活性分析采用微孔板荧光法^[18],用多功能酶标仪(Scientific Fluoroskan Ascent FL 3001, Thermo)测定所用底物与功能(表 1)。

表 1 土壤碳代谢相关酶底物与功能

酶种类	缩写	底物	功能
β -1,4-木糖苷酶/($\text{nmol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$)	βX	4-MUB-木糖苷	活性碳循环:将木聚糖分解
β -1,4-葡萄糖苷酶/($\text{nmol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$)	βG	4-MUB- β -D-葡萄糖苷	活性碳循环:从纤维素中释放葡萄糖
纤维二糖水解酶/($\text{nmol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$)	CBH	4-MUB-纤维二糖苷	活性碳循环:降解纤维素得到纤维二糖

$$\text{有机碳相关计算公式为:}$$
$$\text{稳态有机碳} = \text{总有机碳} - \text{易氧化有机碳}$$
$$\text{土壤微生物熵}(\%) = \text{土壤微生物量碳}(\text{mg}/\text{kg}) / \text{土壤总有机碳含量}(\text{g}/\text{kg})$$
$$\text{碳库活度} = \text{土壤活性有机碳含量}(\text{g}/\text{kg}) / \text{土壤}$$

(8)

(9)

(10)

(11)

(12)

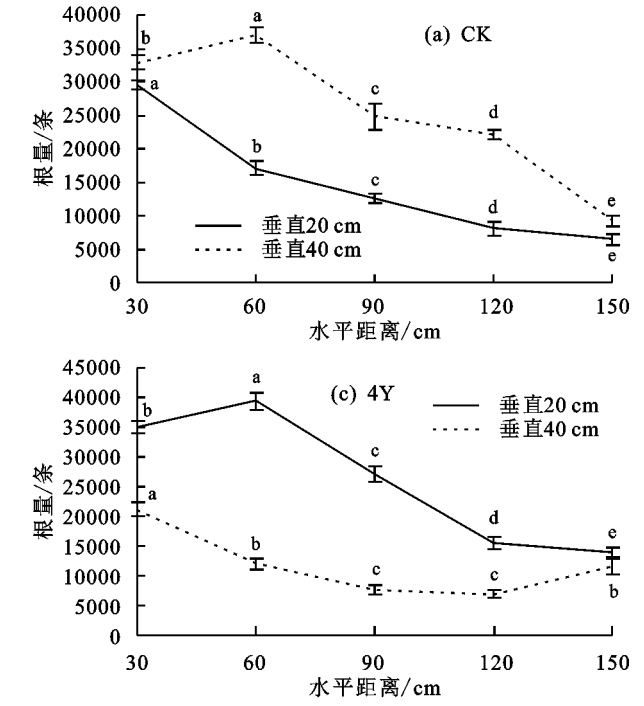
土壤碳库管理指数(%)=碳库指数×碳库活度指数×100%
(13)

土壤有机碳储量(mg/hm²)=SOC×BD×H×10⁻¹
(14)

式中:SOC 为土壤有机碳含量(g/kg);BD 为土壤容重(g/cm³);H 为土层厚度(cm,本研究 0—20 cm 土层)。本研究中以 CK 亚表层土壤(20—40 cm)作为参考土壤,土壤总有机碳含量为 4.64 g/kg,碳库活度为 0.118,碳库指数为 1.48。

1.3 数据处理

采用 WPS 软件计算根系数量、根长、土壤质地分级比例、各活性有机碳含量、有机碳储量、土壤碳代谢相关酶活性等,利用 SPSS 21.0 软件对数据进行统计分析,采用单因素方差分析和 LSD 检验在 0.05 水平上进行不同处理下表层土壤根系、土壤物理性状、

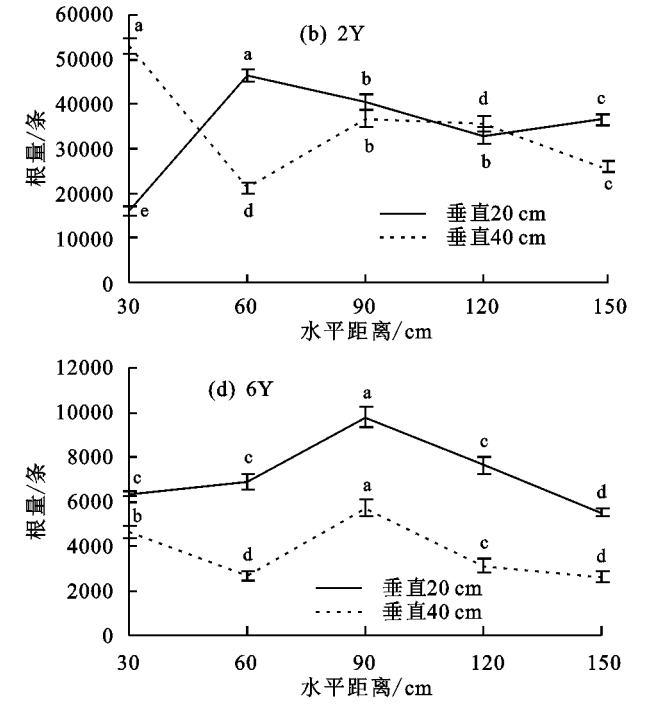


土壤质地、土壤活性有机碳含量、有机碳储量、土壤酶活性等指标差异显著性分析;对细根生长、土壤质地、土壤物理性状与各土壤活性有机碳组分、有机碳储量、土壤酶活性等指标进行 Pearson 相关性分析;图表中数据为平均值±标准差。

2 结果与分析

2.1 不同覆盖处理表层土壤苹果细根分布

细根数量、根长分布特征有效表征其吸收功能对土壤环境的适应性策略。由图 1 和图 2 可知,覆膜后表层土壤细根根量、根长显著高于亚表层土壤。2Y 细根根量、根长分别为 CK 的 284.78%,281.90%($P<0.05$)。水平方向,CK 细根集中分布于距干 0~90 cm 范围内,2Y 扩展至 0~120 cm 范围,而 6Y 促进细根生长效果较弱。可见 2Y 可显著促进表层土壤中细根生长($P<0.05$)。



注:不同小写字母表示相同土层不同水平距离间差异显著($P<0.05$)。下同。

图 1 不同覆盖处理下苹果树细根根量空间分布

2.2 不同覆盖处理表层土壤物理性状

土壤粒径分布是影响土壤性质的关键指标(表 2)。试验区土壤黏粒为 9.70%,粉粒 79.72%,砂粒 10.58%,为粉砂质壤土。物理性黏粒是包括黏粒、粗黏粒、细粉粒、中粉粒在内的直径<0.05 mm 的土壤颗粒,2Y 降低黏粒、粉粒、物理性黏粒比例分别为 CK 的 99.07%,96.79%,92.11%($P<0.05$)。由于果园管理日常踩踏及表土蒸发剧烈,CK 表层土壤容重高于各覆膜处理,土壤含水量和孔隙度较低。2Y 有效改善土壤含水量、总孔隙度、毛管孔隙度,降低土壤容重,分别为 CK 的 112.39%,105.65%,104.29%,90.08%;由于地膜的物理阻隔作用,各覆膜处理不同程度降低土壤通气度,6Y 仅

为 CK 的 81.49%($P<0.05$),土壤黏粒、物理性黏粒显著升高($P<0.05$),分别为 CK 的 102.37%,101.16%,导致容重达到各处理最高值,而土壤孔隙度、毛管孔隙度、土壤含水量仅分别为 2Y 的 86.64%,93.21%,80.79%($P<0.05$)。由此可见,长期连续覆盖地膜后,呈现以土壤理化性状改变为主的土壤“隐性”退化现象^[19]。

2.3 不同覆盖处理表层土壤活性有机碳组分

活性有机碳对土地利用方式反应敏感,可作为土壤有机碳早期变化指示物。由表 3 可知,各活性有机碳组分变化趋势相似,2Y 提高 POC、DOC、MBC、EOC 含量分别为 CK 的 220.11%,129.42%,151.35%,111.72%,从而提高有机碳总量,为 CK 的 137.21%

($P<0.05$);随覆膜年限增加,对活性有机碳的促进作用逐渐转为抑制。6Y 的 POC、DOC、MBC、EOC、有机碳总量分别为 CK 的 94.83%,78.32%,43.54%,46.88%,88.08%。稳态有机碳可表征土壤有机碳的积累与保持能力,2Y 显著提高其含量,为 CK 的

143.04%($P<0.05$)。土地管理措施可改变土壤质地、结构,为土壤有机碳的积累、转化提供稳定环境。由表 4 可知,土壤黏粒、物理性黏粒、MBC、EOC 与土壤有机碳总量呈现良好相关关系,可分别决定其 94.3%,88.9%,74.4%,84.1%的变异。

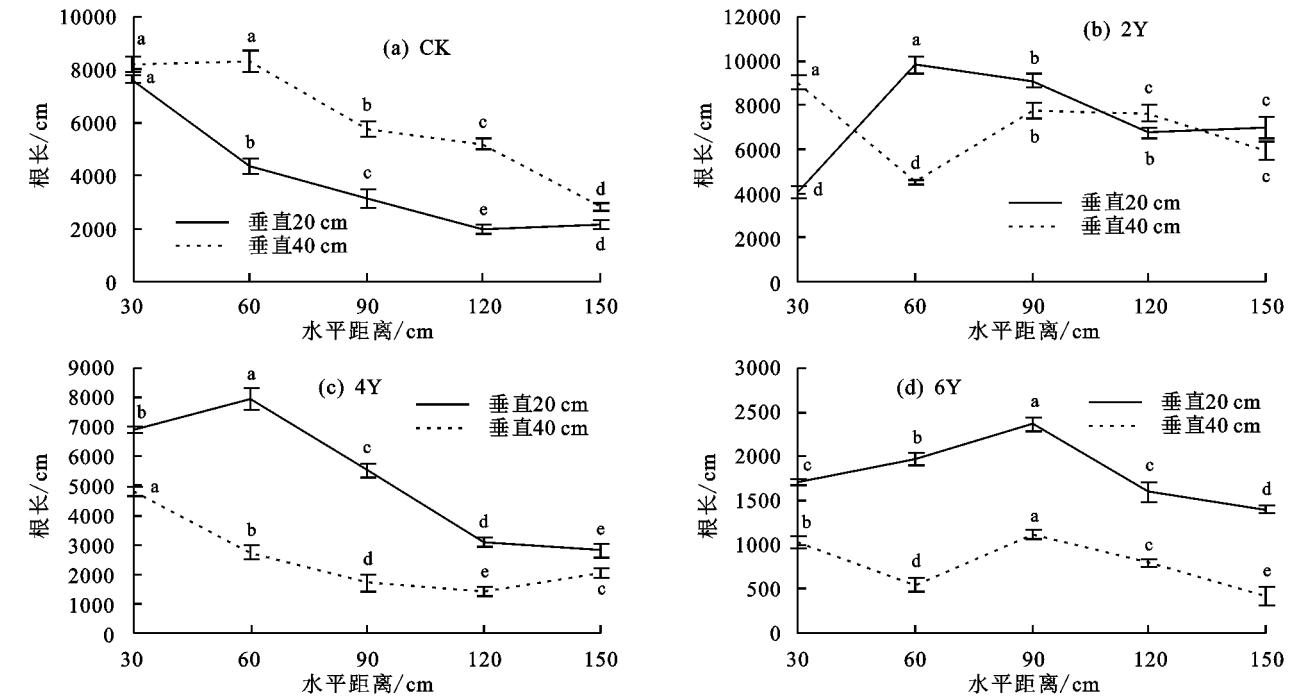


图 2 不同覆盖处理下苹果树细根根长空间分布
表 2 不同覆盖处理表层土壤物理性状差异

指标	CK	2Y	4Y	6Y
黏粒/ %	9.70±0.03c	9.61±0.04d	9.77±0.03b	9.93±0.03a
粉粒/ %	79.72±0.53a	77.16±1.32b	79.20±1.00a	79.15±1.19ab
砂粒/ %	10.58±0.14c	13.23±0.13a	11.03±0.08b	10.92±0.12b
物理性黏粒/ %	56.75±0.12b	52.25±0.24d	54.49±0.17c	57.41±0.15a
土壤含水量/ %	21.07±1.30b	23.68±1.39b	24.23±1.93a	19.13±1.30a
土壤孔隙度/ %	54.48±1.17a	57.56±1.36a	51.01±3.54a	49.87±0.37a
毛管孔隙度/ %	42.65±0.44a	44.48±0.74a	42.14±0.79a	41.46±0.95a
土壤通气度/ %	35.34±1.60a	34.20±1.45a	26.78±1.80a	28.80±1.06a
容重/(g·cm ⁻³)	1.30±0.07ab	1.18±0.07ab	1.18±0.04b	1.24±0.05a
压实密度/(g·cm ⁻³)	2.18±0.08a	2.05±0.09b	2.06±0.04b	2.13±0.03b

注:表中数据为平均值±标准差;同行不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

表 3 不同覆盖处理表层土壤活性有机碳组分差异

指标	CK	2Y	4Y	6Y
颗粒有机碳/(g·kg ⁻¹)	1.74±0.03bc	3.83±0.07a	1.81±0.06b	1.65±0.05c
可溶性有机碳/(mg·kg ⁻¹)	19.10±0.20b	24.72±0.84a	16.81±0.42c	14.96±0.23d
微生物量碳/(mg·kg ⁻¹)	96.24±0.80b	145.66±1.64a	69.94±1.24c	41.90±1.55d
易氧化有机碳/(g·kg ⁻¹)	1.28±0.02b	1.43±0.03a	0.80±0.08c	0.60±0.03d
有机碳/(g·kg ⁻¹)	6.88±0.04b	9.44±0.03a	6.14±0.05c	6.06±0.03d
稳态有机碳/(g·kg ⁻¹)	5.60±0.06b	8.01±0.08a	5.34±0.10c	5.46±0.03bc

2.4 不同覆盖处理表层土壤有机碳库与有机碳代谢酶活性特征

微生物熵指微生物对土壤有机碳的可获得性(表 5),2Y 微生物熵为 CK 的 110.29%($P<0.05$),有利于土

壤有机碳活性的提高。碳库活度、碳库指数、碳库管理指数变化趋势与微生物熵相同。 β -1,4-木糖苷酶(β X)、 β -1,4-葡萄糖苷酶(β G)、纤维二糖水解酶(CBH)参与土壤纤维素降解,表征土壤碳循环 3 个重要

步骤。2Y 可显著提高 β X、 β G、CBH 酶活性,分别为 CK 的 214.40%,206.79%,183.45% ($P<0.05$),使土壤有机碳易被微生物利用,提高土壤肥力;随覆膜年限延长,碳代谢酶活性下降 ($P<0.05$),6Y 的 β X、 β G、CBH 酶活性

分别为 CK 的 65.60%,53.08%,47.04%,微生物熵、碳库活度、碳库指数、碳库管理指数仅分别为 CK 的 49.39%,48.24%,88.51%,42.64%,抑制土壤有机碳的可利用性,降低有机碳储量,为 CK 的 83.41% ($P<0.05$)。

表 4 土壤有机碳总量(y)与土壤质地、有机碳组分(x)关系函数

指标	二项式回归函数	R^2
黏粒/%	$y=0.0156x^2-0.0513x+9.6875$	0.943
粉粒/%	$y=0.1569x^2-0.9247x+79.3860$	0.414
沙粒/%	$y=-0.1725x^2+0.9760x+10.9270$	0.451
物理性黏粒/%	$y=0.4637x^2-2.5715x+56.4470$	0.889
颗粒有机碳/(g·kg ⁻¹)	$y=-0.1406x^2+0.7293x+2.0385$	0.462
可溶性有机碳/(mg·kg ⁻¹)	$y=-0.4669x^2+1.7848x+20.0800$	0.643
微生物量碳/(mg·kg ⁻¹)	$y=-4.8413x^2+17.1110x+104.8800$	0.744
易氧化有机碳/(g·kg ⁻¹)	$y=-0.0219x^2-0.0023x+1.3405$	0.841
稳态有机碳/(g·kg ⁻¹)	$y=-0.1431x^2+0.7043x+5.9935$	0.366

表 5 不同覆盖处理表层土壤微生物熵、土壤碳库管理指数及土壤有机碳储量

指标	CK	2Y	4Y	6Y
微生物熵/%	13.99±0.19b	15.43±0.17a	11.39±0.42c	6.91±0.13d
碳库活度	0.23±0.01a	0.18±0.01c	0.15±0.01c	0.11±0.03d
碳库指数	1.48±0.07b	2.03±0.09a	1.32±0.04c	1.31±0.03c
碳库管理指数/%	285.64±8.96b	308.56±5.21a	167.64±7.25c	121.83±5.56d
土壤有机碳储量/(mg·hm ⁻²)	17.96±0.44b	22.28±0.96a	14.45±0.35c	14.98±0.50c
β -1,4-木糖苷酶/(nmol·g ⁻¹ ·h ⁻¹)	10.00±0.88b	21.44±0.62a	6.80±0.12c	6.56±0.08c
β -1,4-葡萄糖苷酶/(nmol·g ⁻¹ ·h ⁻¹)	28.11±0.39b	58.13±1.05a	16.99±0.22c	14.92±0.27d
纤维二糖水解酶/(nmol·g ⁻¹ ·h ⁻¹)	5.74±0.25b	10.53±0.62a	2.91±0.10c	2.70±0.11c

2.5 不同覆盖处理苹果根系生长、土壤物理性状与有机碳储量、碳代谢酶活性的相关性

多因素共同决定活性有机碳、酶活性在根际土壤中的空间分布,从而影响有机碳变化趋势和储量。由表 6 可知,根量、根长、物理性黏粒、土壤孔隙结构特征均与活性有机碳组分、有机碳储量、碳库管理指数、土壤酶活性呈显著相关。

其中,土壤孔隙度、毛管孔隙度与 MBC、EOC 相关性最为显著,呈极显著正相关 ($R=0.867^{**}$, 0.863^{**} 和 0.866^{**} , 0.886^{**})。表明良好的土壤孔隙结构有利于有机碳活性的提高,促进土壤质量提升。除此之外,根系生长特性(根量、根长)与 EOC 相关性最大 ($R=0.997^{**}$, 0.792^{**}),表明根系生长有利于土壤 EOC 的输入。

表 6 不同覆盖处理苹果树根系生长、表层土壤物理性状与有机碳储量、土壤酶活性相关性分析

指标	可溶性有机碳	微生物量碳	易氧化有机碳	土壤有机碳储量	碳库管理指数	β -1,4-木糖苷酶	β -1,4-葡萄糖苷酶	纤维二糖水解酶
根量	0.748 ^{**}	0.855 ^{**}	0.997 ^{**}	0.585 [*]	0.806 ^{**}	0.567 [*]	0.644 ^{**}	0.697 ^{**}
根长	0.644 ^{**}	0.639 ^{**}	0.792 ^{**}	0.535 [*]	0.755 ^{**}	0.548 [*]	0.527 [*]	0.557 [*]
黏粒	-0.284	-0.274	-0.284	-0.125	-0.307	-0.075	-0.028	-0.132
黏粒	-0.799 ^{**}	-0.793 ^{**}	-0.567 [*]	-0.656 ^{**}	-0.606 ^{**}	-0.790 ^{**}	-0.782 ^{**}	-0.732 ^{**}
土壤含水量	0.473	0.495	0.352	0.291	0.443	0.365	0.379	0.353
土壤孔隙度	0.848 ^{**}	0.867 ^{**}	0.863 ^{**}	0.844 ^{**}	0.828 ^{**}	0.808 ^{**}	0.838 ^{**}	0.858 ^{**}
毛管孔隙度	0.849 ^{**}	0.866 ^{**}	0.886 ^{**}	0.761 ^{**}	0.756 ^{**}	0.872 ^{**}	0.868 ^{**}	0.871 ^{**}
土壤通气度	0.677 ^{**}	0.689 ^{**}	0.821 ^{**}	0.756 ^{**}	0.847 ^{**}	0.611 ^{**}	0.649 ^{**}	0.707 ^{**}
容重	-0.163	-0.154	-0.087	-0.042	-0.152	-0.254	-0.209	-0.153
压实密度	-0.269	-0.248	-0.078	-0.151	-0.154	-0.322	-0.302	-0.242

3 讨论

3.1 覆膜年限引导下苹果园表层土壤理化性状与苹果细根生长特性

细根是连接果树与地下生态环境的核心环节,可

随生境改变做可塑性调节^[20]。本试验中长期连续覆盖地膜,6Y 表层土壤孔隙结构、通气度下降,黏粒、物理性黏粒比例增大,虽然容重尚处于砂壤土最佳容重变异范围(1.20~1.30 g/cm³)内,但压实密度为 2.13

g/cm^3 , 已超出最高阈值 ($1.75 \text{ g}/\text{cm}^3$), 属于严重压实状态^[19]。这是由于长期覆膜后土层间较大温差, 加剧土壤深层水分在温度梯度与毛管力作用下沿毛管孔隙上升的“夜潮”现象^[7]。地膜拦截使水汽凝结回落, 形成水分膜下横向渗透与纵向上升结合的移动规律, 加剧表层土壤干湿交替, 并成为土体收缩—膨胀的主要动力, 引发土壤结构体破碎^[21]。加之黄绵土结构不稳定特性, 更加促使“活性黏粒”随水移动, 土壤质地组成变化的同时, 堵塞孔隙。土壤颗粒与孔隙排列共同构成土壤结构, 是影响土壤功能的关键因素。6Y 长期覆膜减少耕作扰动, 且陇东苹果产区果园机械化程度低, 不涉及机械压实, 以土壤颗粒与孔隙为代表的土壤结构最终体现为“自然压实”导致的物理“隐性”退化^[19], 危害细根正常生长。

3.2 土壤活性有机碳对苹果园表层土壤“隐性”退化的响应

土壤活性有机碳主要由凋落物和根系输入^[22]。本试验 CK 表层土壤较多的根系与凋落物均可有效补充植物源碳源, 但暴露的土壤易受气候、管理操作影响, 使新加入碳难以及时得到物理保护, 并易通过淋溶作用向深层土壤沉积, 因此表层土壤有机碳含量较低^[11]。

以土壤颗粒与孔隙为代表的土壤结构可调节有机碳周转^[22]。2Y 对表层土壤具有保护作用, 利于有机碳贮存。首先, 良好的孔隙结构利于根系生长, 提供丰富的植物源碳输入, 根量、根长与 EOC 呈极显著正相关 ($R=0.997^{**}, 0.792^{**}$), EOC 为 CK 的 111.72% ^[23]。反之根系还可通过交错、穿插、固结等, 促进稳定土壤结构对有机碳的保护^[20]; 其次, 合理的孔隙促使土壤优先流产生, 2Y 土壤含水量为 CK 的 112.39% , 带动 DOC 在土体中迁移、转化, 同时密集的细根可防止因水循环引发 DOC 流失, 提高有机碳稳定贮存。Schmidt 等^[24]研究通过根系输入 EOC 与土壤颗粒结合更稳定; 闫丽娟等^[25]指出, 具有发达侧根的沙棘林地拥有良好的土壤结构, 有利于根系生长, 提高土壤活性有机碳累积; 吴建国等^[26]指出, 大量根系可使土壤容重减小, 孔隙度增加, 土壤碳代谢酶活性提高, 与本试验结果一致。2Y 丰富的根系、良好的土壤孔隙结构均提高微生物活性 ($R=0.855^{**}, 0.639^{**}, 0.867^{**}, 0.866^{**}$), MBC、微生物熵。EOC、DOC、MBC 分别决定总有机碳 $84.1\%, 64.3\%, 74.4\%$ 的变异, 促进土壤碳库管理指数和有机碳储量提高。

土壤中约有 $50\% \sim 90\%$ 有机碳与土壤颗粒结合, 粉粒、黏粒的强吸附性具有良好固碳作用。首先, 黄绵土属黄土正常新土, 成土作用微弱, 结构不稳定。6Y 频繁的干湿交替对土壤黏粒吸水性能的促进作用强于胶结

作用, 导致黏粒吸附有机碳作用微弱^[27], “活性黏粒”随水移动淀积增加土壤容重, 破坏孔隙结构, 降低土壤对有机碳的保护作用。而细粉粒、中粉粒在黄绵土中占比最大, 物理性黏粒与活性有机碳组分显著负相关, 并决定土壤总有机碳 88.90% 变异, 这是黄绵土成土演化与覆盖地膜长期结合的必然结果; 其次, 通气性下降势必抑制 MBC、碳代谢酶活性 ($R=0.689^{**}, 0.611^{**}, 0.649^{**}, 0.707^{**}$), MBC、微生物熵仅分别为 CK 的 $43.54\%, 49.39\%$, 活性有机碳分解损失增加; 再次, 6Y 表层土壤“隐性”退化显著减少根系输入, 间接降低有机碳来源, 与张维理等^[28]研究结果一致。

3.3 土壤碳代谢酶活性与土壤理化性状的响应关系

土壤酶由微生物、动植物分泌、凋落物分解影响土壤物质代谢, 调控土壤碳周转。Bolinder 等^[29]认为, 土壤酶活性对土壤质量变化更为敏感; 王永慧等^[11]指出, 土壤养分是影响土壤酶活性的重要因子; 除此之外土壤结构是影响微生物功能、活性的主要因素。良好的孔隙结构可直接有助于微生物移动, 增加微生物群落组成与多样性; 间接有利于土壤中气体与液体扩散, 促进微生物对有机质、植物残体的分解。本试验结果显示, 2Y 提高土壤总孔隙度、毛管孔隙度, 并与 MBC、 βX 、 βG 、CBH 酶活性呈极显著正相关, MBC、 βX 、 βG 、CBH 酶活性分别为 CK 的 $151.35\%, 214.40\%, 206.79\%, 183.45\%$, 有助于土壤有机碳储量提高; 6Y 的土壤酶活性仅分别为 CK 的 $65.60\%, 53.08\%, 47.04\%$, 这是由于膜下持续高温抑制酶动力学性质、土壤微生物量, 加之土壤含水量仅为 CK 的 90.79% , 限制土壤酶与底物扩散^[30]。除此之外, 土壤孔隙度、毛管孔隙度、通气度均与土壤酶活性呈极显著正相关, 而容重、压实密度并未与其有相关性, 这可能是由土壤“隐性”退化因子与根系生长耦合作用造成, 有待于进一步研究。

3.4 果园保护性栽培对土壤有机碳影响分异

李小刚等^[10]、付桃桃^[31]在覆膜对农田土壤有机碳影响研究中均表明, 覆膜促进有机碳矿化, 并改变根系碳输入, 因此其对土壤有机碳的影响可能是中性的, 取决于碳周转平衡。可见旱地覆膜对土壤肥力、可持续绿色发展的影响有一定争议。本试验表明, 苹果根系生长与表层土壤有机碳贮存为显著正相关 ($R=0.585^*, 0.535^*$), 并随覆膜年限的增长而降低。

4 结论

旱地苹果栽培在长期覆膜下主要通过改变土壤孔隙结构、质地组成影响有机碳代谢酶活性和根系生长而改变有机碳储量。即表层土壤“隐性”退化, 细根

生长受阻,有机碳储量下降,不利于土壤质量长期稳定健康发展。为保障黄土高原苹果产业可持续发展,建议覆膜后适时揭膜,利于根际土壤结构与养分优化;或在冬春连旱季节覆膜,确保秋雨冬贮春用,改善土壤透气性,促进根系生长发育。

参考文献:

[1] 孙文泰,马明,董铁,等.陇东旱塬苹果根系分布规律及生理特性对地表覆盖的响应[J].应用生态学报,2016,27(10):3153-3163.

[2] 张霞,杜昊辉,王旭东,等.不同耕作措施对渭北旱塬土壤碳库管理指数及其构成的影响[J].自然资源学报,2018,33(12):2223-2237.

[3] 赵搏,丁雪丽,汪景宽,等.地膜覆盖和施肥对棕壤剖面溶解性有机碳分布的影响[J].土壤通报,2019,50(4):847-853.

[4] 郝翔翔,韩晓增,李禄军,等.土地利用方式对黑土剖面有机碳分布及碳储量的影响[J].应用生态学报,2015,26(4):965-972.

[5] 龙攀,苏姗,黄亚男,等.双季稻田冬季种植模式对土壤有机碳和碳库管理指数的影响[J].应用生态学报,2019,30(4):1135-1142.

[6] 李欣雨,夏建国,鄢广奎,等.名山河流域不同土壤类型和土地利用方式下有机碳的分布特征[J].水土保持学报,2017,31(3):224-230.

[7] 卜玉山,邵海林,王建程,等.秸秆与地膜覆盖春玉米和春小麦耕层土壤碳氮动态[J].中国生态农业学报,2010,18(2):322-326.

[8] 司鹏飞.秋季覆膜对北方旱地土壤有机碳变化及影响机制的研究[D].沈阳:沈阳农业大学,2019.

[9] Yuan Z Q, Jiang X J, Liu G J. Responses of soil organic carbon and nutrient stocks to human-induced grass-land degradation in a Tibetan alpine meadow [J]. Catena, 2019, 178: 40-48.

[10] 李小刚,李凤民.旱作地膜覆盖农田土壤有机碳平衡及氮循环特征[J].中国农业科学,2015,48(23):4630-4638.

[11] 王永慧,轩清霞,王丽丽,等.不同耕作方式对土壤有机碳矿化及酶活性影响研究[J].土壤通报,2020,51(4):876-884.

[12] 张俊华,李国栋,王岩松,等.黄河泥沙冲/沉积区土壤有机碳不同组分空间特征及变异机制[J].地理学报,2020,75(3):558-570.

[13] 刘光崧.土壤理化分析与剖面描述[M].北京:中国标准出版社,1996.

[14] 袁可能.土壤有机矿质复合体研究:土壤有机矿质复合体中腐殖质氧化稳定性的初步研究[J].土壤学报,1963,11(3):286-293.

[15] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].北京:中国农业科

技出版社,2000.

[16] Ghani A, Dexter M, Perrott K W. Hot-water extractable carbon in soils: A sensitive measurement for determining impacts of fertilisation, grazing and cultivation[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2003, 35(9): 1231-1243.

[17] 胡海清,陆听,孙龙.土壤活性有机碳分组及测定方法[J].森林工程,2012,28(5):18-22.

[18] Sinsabaugh R L, Hill B H, Shah J J F. Ecoenzymatic stoichiometry of microbial organic nutrient acquisition in soil and sediment[J]. Nature, 2009, 462(7274): 795-798.

[19] 魏彬萌,王益权.渭北果园土壤物理退化特征及其机理研究[J].植物营养与肥料学报,2015,21(3):694-701.

[20] 于水强,王静波,郝倩葳,等.4 种不同生活型树种细根寿命及影响因素[J].生态学报,2020,40(9):3040-3047.

[21] 姚旭,景航,梁楚涛,等.人工油松林表层土壤团聚体活性有机碳含量对短期氮添加的响应[J].生态学报,2017,37(20):6724-6731.

[22] 汪景宽,徐英德,丁凡,等.植物残体向土壤有机质转化过程及其稳定机制的研究进展[J].土壤学报,2019,56(3):528-540.

[23] Poirier V, Roumet C, Munson A D. The root of the matter: Linking root traits and soil organic matter stabilization processes[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2018, 120: 246-259.

[24] Schmidt M W I, Torn M S, Abiven S, et al. Persistence of soil organic matter as an ecosystem property [J]. Nature, 2011, 478(7367): 49-56.

[25] 闫丽娟,李广,吴江琪,等.黄土高原 4 种典型植被对土壤活性有机碳及土壤碳库的影响[J].生态学报,2019,39(15):5546-5554.

[26] 吴建国,徐德应.六盘山林区几种土地利用方式对土壤中可溶性有机碳浓度影响的初步研究[J].植物生态学报,2005,29(6):945-953.

[27] 乐艺,张晓雅,高俊琴,等.模拟干湿交替对若尔盖高寒湿地土壤呼吸及可溶性碳氮稳定性的影响[J].水土保持研究,2020,27(1):81-87.

[28] 张维理, Kolbe H, 张认连.土壤有机碳作用及转化机制研究进展[J].中国农业科学,2020,53(2):317-331.

[29] Bolinder M A, Angers D A, Gregorich E G, et al. The response of soil quality indicators to conservation management[J]. Canadian Journal of Soil Science, 1999, 79(1): 37-45.

[30] 秦纪洪,张文宣,王琴,等.亚高山森林土壤酶活性的温度敏感性特征[J].土壤学报,2013,50(6):1241-1245.

[31] 付桃桃.地膜覆盖和秸秆还田对农田土壤碳水化合物的影响[D].兰州:兰州大学,2015.