

黄土高原旱区果园生草对土壤理化性质和有机碳储量的影响

李 茜, 曹 宏, 王 卓, 刘小瑄, 任艺彬
(陇东学院农业与生物工程学院, 甘肃 庆阳 745000)

摘要: 通过探究果园生草对土壤肥力和固碳潜力的影响, 为黄土高原旱区果园的生态管理提供理论依据。以清耕为对照, 研究自然生草和种植鼠茅草 2 种栽培方式对苹果园土壤理化性质和有机碳储量的影响。结果表明, 自然生草和种植鼠茅草均能有效改善土壤养分状况, 尤其在增加表层土壤(0~20 cm)有机质、全氮、碱解氮、有效磷和速效钾含量方面效果显著; 同时, 自然生草和种植鼠茅草还提高了土壤有机碳储量, 增强了土壤固碳能力, 并缓解了植物生长的氮限制, 其中, 自然生草显著提高了 10~20 cm 土层的土壤有机碳储量, 而种植鼠茅草则显著提高 0~10 cm 土层的有机碳储量和 0~20 cm 土层有效磷含量。

关键词: 果园生草; 土壤理化性质; 土壤化学计量比; 土壤有机碳储量; 黄土高原旱区

中图分类号: S661.1; S153

文献标志码: A

文章编号: 2097-2172(2025)09-0860-06

doi: 10.3969/j.issn.2097-2172.2025.09.014

Effects of Orchard Grass Cover on Soil Physicochemical Properties and Organic Carbon Storage in the Loess Plateau Arid Areas

LI Qian, CAO Hong, WANG Zhuo, LIU Xiaoxuan, REN Yibin
(College of Agriculture and Bioengineering, Longdong University, Qingyang Gansu 745000, China)

Abstract: This study explored the effects of orchard grass cover on soil fertility and carbon sequestration potential, providing theoretical support for ecological management of orchards in the arid area of the Loess Plateau. Using clean tillage as a control, the impacts of two cultivation modes, natural grass cover and *Vulpia myuros* planting, on soil physicochemical properties and organic carbon storage in apple orchards were determined. Results showed that both natural grass cover and *Vulpia myuros* planting significantly improved soil nutrient status, particularly by increasing contents of organic matter, total nitrogen, alkali-hydrolyzable nitrogen, available phosphorus, and available potassium in the 0 to 20 cm topsoil. Meanwhile, both treatments enhanced soil organic carbon storage and carbon sequestration capacity, while alleviating nitrogen limitation for plant growth. Specifically, natural grass cover markedly increased soil organic carbon storage in the 10 to 20 cm layer, whereas *Vulpia myuros* planting significantly increased organic carbon storage in the 0 to 10 cm layer and available phosphorus content in the 0 to 20 cm layer.

Key words: Orchard grass mulching; Soil physicochemical property; Soil stoichiometry; Soil organic carbon storage; Loess Plateau arid area

庆阳市地处黄土高原腹地, 苹果产业是该地区的优势产业之一。长期以来, 果园的管理模式以清耕为主, 果园土壤的肥力主要依赖化肥维持, 导致出现土壤退化现象, 不仅影响果园土壤的质量, 而且对果园生态系统的可持续发展构成威胁^[1-2]。果园生草作为一种较为先进的果园土壤管理方式, 始于 19 世纪中叶的美国, 1998 年正式引入我国并逐步推广^[3-4]。作为一种生态友好型的农业管理方式, 果园生草在改良土壤结构和优化生态系统方

面凸显出巨大的潜力^[5-6]。果园中的生物覆盖物能够提高土壤有机质含量, 有效改善土壤结构, 降低土壤容重, 增强孔隙度与持水能力, 还能增加土壤中的碱解氮与速效磷含量, 提升土壤肥力^[7]。部分生物覆盖物还能调节表层土壤的 pH, 从而促进果树生长^[8]。果园生草凭借其在改善土壤结构方面的显著优势, 以及节省除草人工成本等附加效益, 逐渐受到农户的关注与应用^[1]。

果园生草草种筛选需综合考虑生态适应性、

收稿日期: 2024-12-15; 修订日期: 2025-08-15

基金项目: 庆阳市科技计划项目(KT2019-01); 陇东学院横向项目(HXZK2513)。

作者简介: 李 茜(1990—), 女, 甘肃庆阳人, 实验师, 硕士, 主要从事草地生理生态研究工作。Email: 309233453@qq.com。

土壤培肥效应及种间互作关系^[9]。在生产中通常优先选择易成活、适应性强、便于栽培管理、抗病性强、产量高的草种。目前果园内常用的草种主要为禾本科、豆科等牧草,如黑麦草、紫花苜蓿等^[10]。此外,为降低成本,也可采用自然生草。余明杨等^[11]研究发现,与清耕相比,自然生草能改善果园土壤理化性质,提高枝条和叶片的养分含量,进而提升果实综合品质。然而,草种的适配性受到区域气候、土壤理化特性以及果树生物学特性等多重因素的共同调控,表现出明显的地域差异和树种特异性^[12]。当前关于果园生草对土壤质量的改良效应研究多集中于单一草种的短期效应,缺乏对区域适应性强的本土草种系统评价。为此,本研究选取庆阳市苹果园,分析其自然生草和鼠茅草种植 2 种生草模式对土壤理化性状及有机碳储量的影响,旨在为黄土高原旱区果园的生态管理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于甘肃省庆阳市西峰区什社乡三姓林果专业合作社苹果园内。试验区属黄土旱塬雨养农业区,为温带大陆性半干旱气候,降水多集中在 7—9 月,年降水量 480~600 mm,年均气温为 9.5~10.7℃,无霜期 140~180 d,年日照时数为 2 213.4~2 540.4 h,太阳总辐射量 125~145 kcal/m²。

1.2 试验设计

试验共设自然生草(T₁)和种植鼠茅草(T₂)2 个生草处理,以相邻清耕苹果园作为对照(CK)。生草于 2016 年进行,鼠茅草播量为 15 kg/hm²,自然干枯后直接还田,不进行刈割;自然生草处理每年对杂草刈割 3 次,刈割后杂草直接还田。各处理在苹

果春季萌芽前、果实膨大期、秋季采果后分别施用复合肥(N-P₂O₅-K₂O 为 15-15-15)450、750、300 kg/hm²。于 2020 年 7 月苹果果实膨大期,不同处理样地的行间随机取样点 3 个,每个样点分别使用直径为 38 mm 的圆形土钻以梅花形取样法采集 0~10、10~20、20~40 cm 土层的土壤^[13],同一样点的同一土层样品混合均匀进行理化性质测定,3 次重复。

1.3 测定项目及方法

采用环刀法测定土壤容重;采用玻璃电极法测定土壤 pH^[14];采用硫酸重铬酸钾油浴法测定土壤有机碳含量,土壤有机碳含量乘以换算因数 1.724 即为土壤有机质含量^[14];采用半微量凯氏定氮法测定土壤全氮含量^[14];采用酸溶-钼锑抗比色法测定土壤全磷含量^[14];采用氢氟酸-高氯酸消煮法测定土壤全钾含量^[14];采用碱解扩散法测定土壤碱解氮含量^[14];采用碳酸氢钠法测定土壤有效磷含量^[14];采用乙酸铵提取法测定土壤速效钾含量^[14]。

剖面 n 个土层的土壤有机碳储量(SOCS)计算公式如下^[15]。

$$SOCS = \sum_{i=0}^n SOC_i \times BD_i \times H_i / 10$$

式中, SOC_i 为第 i 层土壤有机碳含量; BD_i 为第 i 层土壤容重; H_i 为第 i 层深度。由于样地土壤中几乎无砾石,所以式中略去砾石含量参数^[16]。

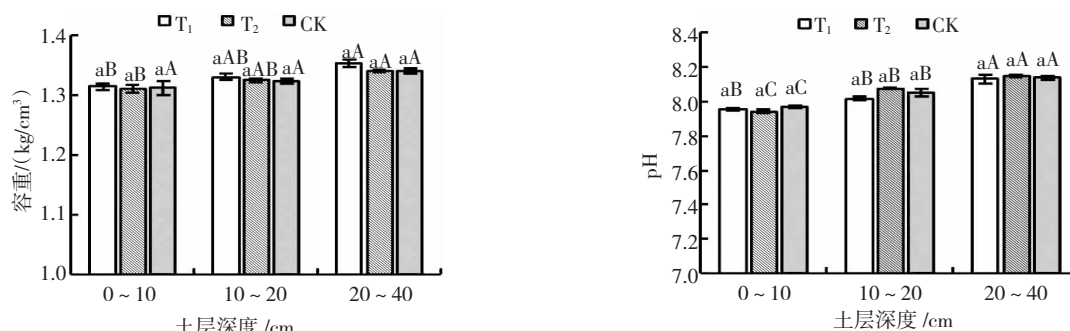
1.4 数据处理

土壤 C、N、P 的化学计量比采用质量比表示,即 C/N、C/P 和 N/P。采用 Excel 2016 软件进行数据处理和制图,用 SPSS 22.0 软件进行单因子方差分析(ANOVA)。

2 结果与分析

2.1 生草处理对苹果园土壤容重和 pH 的影响

从图 1 可以看出,同一土层中,不同处理的



(不同大写字母代表同一生草处理下不同土层在 $P<0.05$ 水平上差异显著;不同小写字母代表同一土层不同生草处理下在 $P<0.05$ 水平上差异显著,下同。)

图 1 生草处理对苹果园土壤容重和 pH 的影响

土壤容重和 pH 差异均不显著。而 T_1 、 T_2 处理 20 ~ 40 cm 土层的容重显著高于 0 ~ 10 cm 土层。但各处理土壤 pH 均随土层深度增加呈逐渐升高的趋势, 其中 T_1 处理 20 ~ 40 cm 土层显著高于 0 ~ 10、10 ~ 20 cm 土层, CK 和 T_2 处理各土层间均差异显著。

2.2 生草处理对苹果园土壤肥力的影响

由图 2 可以看出, 各处理土壤有机质和全氮含量在 0 ~ 10、10 ~ 20、20 ~ 40 cm 土层呈递减趋势, 且各土层间差异显著。0 ~ 10 cm 土层中, 土壤有机质含量以 T_2 处理最高, 达 25.03 g/kg, 显著高于 CK、 T_1 处理; 10 ~ 20 cm 土层以 T_1 处理最高, 显著高于 CK、 T_2 处理; 20 ~ 40 cm 土层各处

理差异不显著。土壤全氮含量变化趋势与有机质相似。各处理土壤全磷含量均随土层深度增加呈降低趋势, 其中 T_2 处理在各土层间差异显著, CK、 T_1 处理表现为 0 ~ 10、10 ~ 20 cm 土层间差异不显著, 均显著高于 20 ~ 40 cm 土层。0 ~ 10 cm 土层中, 土壤全磷含量以 T_2 处理最高, 与 T_1 处理差异不显著, 显著高于 CK; 10 ~ 20、20 ~ 40 cm 土层中, 各处理间无显著性差异。各处理在各土层间及同一土层内的土壤全钾均含量无显著性差异。

2.3 生草处理对苹果园土壤速效养分的影响

由图 3 可以看出, 各处理土壤碱解氮、有效磷、速效钾含量均表现出随着土层深度增加逐渐

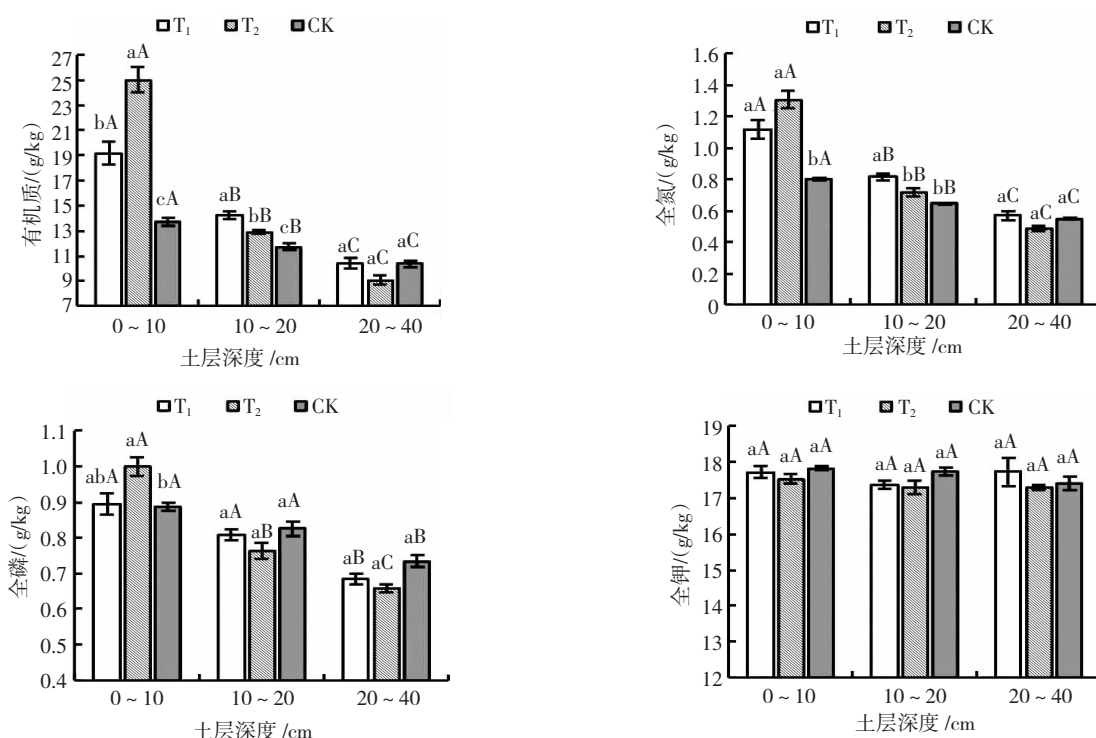


图 2 生草处理对苹果园土壤肥力的影响

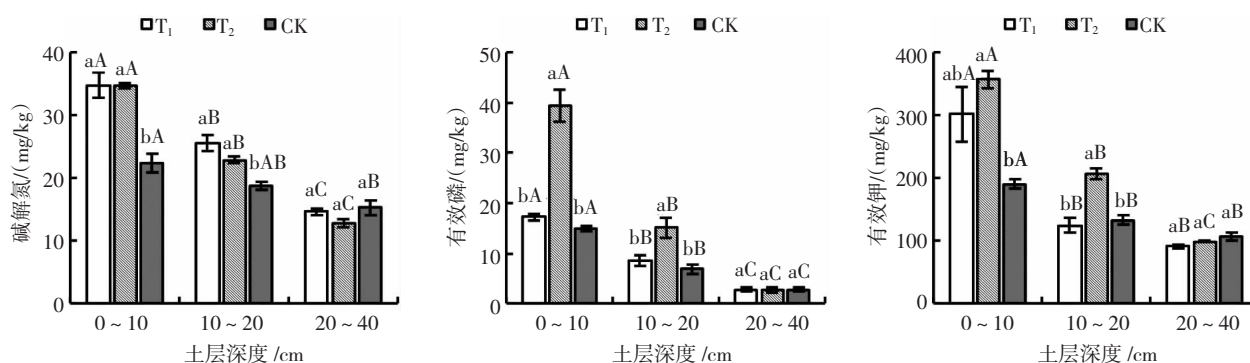


图 3 生草处理对苹果园土壤速效养分的影响

降低的趋势。0~10、10~20 cm 土层, T_1 、 T_2 处理的土壤碱解氮含量差异不显著, 均显著高于 CK; 20~40 cm 土层 T_1 、 T_2 处理均低于 CK, 但差异不显著。 T_1 、 T_2 处理各土层间土壤碱解氮含量均差异显著; CK 表现为 0~10、20~40 cm 土层间显著差异。CK、 T_1 、 T_2 处理土壤有效磷含量在各土层间均差异显著, 0~10、10~20 cm 土层, 土壤有效磷含量均以 T_2 处理最高, 显著高于 CK、 T_1 处理; 20~40 cm 土层, 各处理间差异不显著。0~10 cm 土层, 土壤速效钾含量以 T_2 处理最高, 显著高于 CK, T_1 处理较高, 与 CK、 T_2 处理差异均不显著; 10~20 cm 土层, T_2 处理显著高于 CK、 T_1 处理; 20~40 cm 土层各处理间差异不显著。 T_2 处理的土壤速效钾含量在各土层间均差异显著, CK、 T_1 处理均表现为 0~10 cm 土层显著高于 10~20、20~40 cm 土层, 而 10~20、20~40 cm 土层之间差异不显著。

2.4 生草处理对苹果园土壤化学计量比的影响

由图 4 可以看出, 各处理在不同土层间 C/N 均差异不显著。其中, 0~10 cm 土层, C/N 以 T_2 处理最高, 显著高于 CK、 T_1 处理, CK 与 T_1 处理间差异不显著; 10~20、20~40 cm 土层, 各处理间差异均不显著。 T_1 、 T_2 处理的 C/P 均随土层深度增加呈显著降低的趋势, CK 在各土层间差异不显著。0~10 cm 土层中, C/P 以 T_2 处理最高, 显著高于 CK、 T_1 处理, T_1 处理较高, 显著高于 CK; 10~20 cm 土层中, T_1 、 T_2 处理间差异不显著, 均显著高于 CK; 20~40 cm 土层中, 各处理间差异不显著。各处理 N/P 均随土层深度增加呈降低趋势, T_1 、 T_2 处理在各土层间差异显著, CK 0~10 cm 土层显著高于 10~20、20~40 cm 土层, 10~20、

20~40 cm 土层间差异不显著。0~10、10~20 cm 土层中, T_1 、 T_2 处理均显著高于 CK; 20~40 cm 土层中, 各处理差异不显著。

2.5 生草处理对苹果园土壤有机碳储量的影响

由图 5 可以看出, 0~10 cm 土层中, 有机碳储量以 T_2 处理最高, 为 1.90 t/hm², 显著高于 CK、 T_1 处理, 较 CK (1.05 t/hm²) 提高 80.95%; T_1 处理为 1.46 t/hm², 较 CK 提高 39.05%。10~20 cm 土层中, 有机碳储量以 T_1 处理最高, 为 1.10 t/hm², 显著高于 CK、 T_2 处理, 较 CK (0.90 t/hm²) 提高 22.22%; T_2 处理为 0.99 t/hm², 较 CK 提高 10.00%。20~40 cm 土层中, 各处理有机碳储量则无显著性差异。总体而言, 0~40 cm 土层中, T_1 、 T_2 处理间有机碳储量无显著差异, 均显著高于 CK。

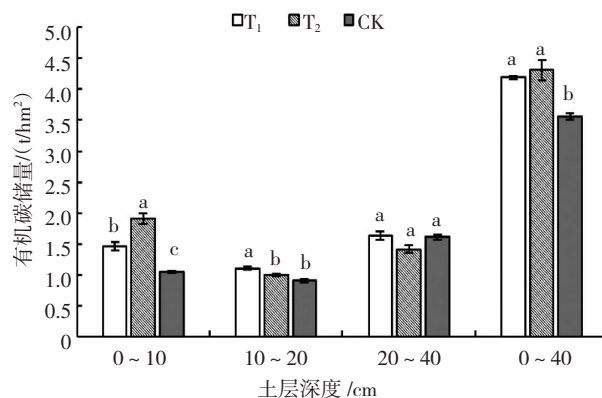


图 5 生草处理对苹果园土壤的有机碳储量的影响

3 讨论与结论

果园土壤养分状况可为果园土壤管理和合理施肥提供依据^[17]。姚志龙等^[18]对庆阳市 31 个旱塬苹果园土壤肥力的研究表明, 在 0~60 cm 土层中, 土壤有机质和氮素营养相对缺乏, 全磷含量中等, 全钾含量水平甚富。本试验中, 自然生草和种植鼠茅草与清耕相比有效地增加了 0~20 cm

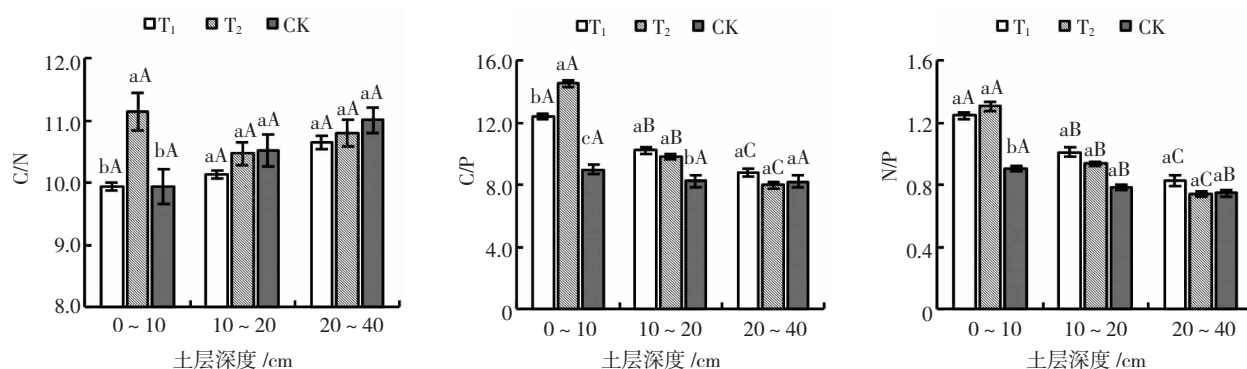


图 4 生草处理对苹果园土壤化学计量比的影响

土层中的有机质、全氮、碱解氮、有效磷含量。其中，鼠茅草处理显著增加了 0~10 cm 土层中的有机质和有效磷含量，可能是因为所种植的鼠茅草根较浅，多集中于 0~10 cm 土层，而自然生草处理中植物根系深浅不一，0~10、10~20 cm 土层中均有一定量的分布所导致^[19-20]。总体而言，生草处理可对苹果园的土壤养分缺乏状况起到一定的改善作用。

C、N、P 含量及其计量比对植物生长、碳储存和养分循环中具有关键作用^[21]。其中，土壤 C/N 和 C/P 是土壤有机质质量的重要指标，决定着土壤有机质分解的强弱程度，而土壤的 N/P 则能够反映生态系统元素限制过程^[22]。分析这些化学元素计量比能更好地阐释土壤的养分状况。土壤 C/N 一般被认为与有机碳的分解速度成反比，C/N 较低时，微生物活性相对较高，土壤有机碳的矿化速率就会加快^[23]。本试验中，各处理 C/N 在不同土层间均低于中国土壤的平均值 (11.9)^[24]，但属于该地域范围内的正常值^[25]。C、N 作为土壤中的结构性元素，其积累和消耗过程处于一个相对固定的比率，因此土壤 C/N 的值相对稳定^[26]。土壤 C/P 反映土壤微生物矿化有机物释放磷的能力，值越低表明土壤中磷有效性越高^[27-30]。本试验中，所有处理的 C/P 的值都处于 8~15 的范围内，远低于中国土壤的平均值 (61)，但依然属于该地域范围内的正常值^[25]。自然生草和种植鼠茅草的 C/P 与清耕处理的差异主要体现在 0~20 cm 土层，均显著高于清耕处理，说明生草处理与清耕处理相比 0~20 cm 土层中土壤微生物矿化有机物释放磷的潜力降低，这是由于生草处理增加了 0~20 cm 土层中的有机碳含量，但全磷含量并未随其成比例增加而导致的。土壤 N/P 是衡量土壤养分平衡的重要指标，也是衡量土壤养分限制情况的指标，可以预测植物在研究区内的 N、P 限制情况。研究表明，当 N/P 小于 14 时植物生长受 N 限制，N/P 大于 16 时则主要受 P 限制^[31-32]。本试验中，各处理的 N/P 均小于 14，处于 0.7~1.4 的范围内，远低于中国土壤的平均值 (5)^[25]，植物生长主要受 N 的限制；自然生草和种植鼠茅草的 N/P 与清耕处理的差异也主要体现在 0~20 cm 土层，均显著高于清耕处理，说明生草处理对 0~20 cm 土层的

N 限制状况有所缓解。

土壤有机碳储量在全球碳循环和气候变化中扮演着至关重要的角色，在当前全球气候变化和可持续发展的背景下，探索土壤有机碳储量的变化具有更加深刻的意义。本试验中，自然生草较其他处理而言能显著提高 10~20 cm 土层的土壤有机碳储量，种植鼠茅草则显著提高 0~10 cm 土层的土壤有机碳储量，这亦与 2 种生草处理所种植的植物根系的深度有关。0~40 cm 土层尺度上，自然生草和种植鼠茅草相较清耕能显著提高 0~40 cm 土层的土壤碳储量，且 2 种生草方式间无显著差异；生草处理对于土壤碳储量的提升作用主要集中在土壤表层 (0~20 cm)。总体而言，自然生草和种植鼠茅草均具有良好的固碳作用，能够有效增加土壤有机碳储量，因此，将果园生草用作固碳手段时，2 种处理均可选用。

本试验表明，自然生草和种植鼠茅草显著改善了庆阳市苹果园土壤养分状况，尤其在 0~20 cm 表层土壤中，有效提升了有机质、全氮、碱解氮、有效磷及速效钾的含量同时，这 2 种模式增强土壤固碳能力，并缓解了植物生长的氮限制。自然生草显著提高了 10~20 cm 土层土壤有机碳储量，而种植鼠茅草则显著提高了 0~10 cm 土层土壤有机碳储量，并显著增加了 0~20 cm 土层有效磷含量。综上所述，果园生草是一种有效的土壤管理方法，对庆阳市苹果园土壤肥力和固碳潜力均有较好的提升作用，能够促进苹果园土壤健康发展。

参考文献：

- [1] 蒋成芳. 陇东黄土高原农户苹果园生草的生态经济效益分析[D]. 兰州：兰州大学，2018.
- [2] 杨蕊菊，张久东，车宗贤，等. 陇东半干旱区果园间作绿肥对土壤肥力的影响研究[J]. 寒旱农业科学，2023，2(12)：1116-1120.
- [3] 寇建村，杨文权，韩明玉，等. 我国果园生草研究进展[J]. 草业科学，2010，27(7)：154-159.
- [4] 李会科，赵政阳，张广军. 果园生草的理论与实践——以黄土高原南部苹果园生草实践为例[J]. 草业科学，2005，22(8)：32-37.
- [5] 刘小勇，贾军平，彭海，等. 山地重茬果园土壤绿色改良技术规范[J]. 寒旱农业科学，2025，4(1)：96-98.

- [6] 郭晓睿, 宋 涛, 邓丽娟, 等. 果园生草对中国果园土壤肥力和生产力影响的整合分析 [J]. 应用生态学报, 2021, 32(11): 4021–4028.
- [7] 王艳廷, 冀晓昊, 吴玉森, 等. 我国果园生草的研究进展[J]. 应用生态学报, 2015, 26(6): 1892–1900.
- [8] 郝淑英, 刘蝴蝶, 牛俊玲, 等. 黄土高原区果园生草覆盖对土壤物理性状、水分及产量的影响[J]. 土壤肥料, 2003, 1(1): 25–27.
- [9] 刘传和, 陈杰忠. 我国果园生草栽培研究概况(综述)[J]. 亚热带植物科学, 2005(2): 76–80.
- [10] 徐雄飞. 果园生草技术[J]. 安徽农学通报, 2022, 28(3): 69–70; 78.
- [11] 余明杨, 陈 燕, 郭凯璐, 等. 自然生草对梨园土壤理化性质及果实品质的影响[J]. 中国果树, 2024(8): 8–18.
- [12] 郑锦涛, 徐国益, 于会丽, 等. 行间生草对石榴园土壤生境与果实品质的影响[J/OL]. 果树学报, 1–15 (2025-06-27)[2025-08-10]. <https://doi.org/10.13925/j.cnki.gsx.20250085>.
- [13] 张 青, 栗方亮, 孔庆波. 沼液配施化肥对蜜柚产量、品质及土壤重金属的影响[J]. 中国南方果树, 2024, 53(2): 21–27.
- [14] 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.
- [15] 马昕昕, 赵允格, 马 宁, 等. 放牧对黄土高原退耕草地土壤有机碳储量的影响[J]. 应用生态学报, 2022, 33(1): 67–75.
- [16] 李建平, 陈 婧, 谢应忠, 等. 封育对草地深层土壤碳储量及其固持速率的影响[J]. 水土保持研究, 2016, 23(6): 1–8.
- [17] 郑朝霞, 王 颖, 石 磊, 等. 陕西省苹果主产区土壤有机质、氮磷钾养分含量与分布特征[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(5): 1191–1198.
- [18] 姚志龙, 李 科, 吴健君, 等. 陇东旱塬苹果园土壤主要肥力性状研究[J]. 中国农学通报, 2016, 32(27): 132–140.
- [19] ZHU F, ZHANG X, GUO X, et al. Root architectures differentiate the composition of organic carbon in bauxite residue during natural vegetation[J]. The Science of The Total Environment, 2023, 883: 163588.
- [20] 李秋红, 付丽春, 王家祥, 等. 种植鼠茅草对苹果园土壤理化性状及果实产量和品质的影响[J]. 农业与技术, 2014, 34(6): 26.
- [21] 陈志杰, 肖宇童, 董雄德, 等. 黄河中下游滩区泥沙淤积对土壤化学计量比的影响[J]. 生态学杂志, 2022, 41(7): 1334–1341.
- [22] HUI D, YANG X, DENG Q, et al. Soil C:N:P stoichiometry in tropical forests on Hainan Island of China: Spatial and vertical variations[J]. Catena, 2021, 201: 105228.
- [23] 王绍强, 于贵瑞. 生态系统碳氮磷元素的生态化学计量学特征[J]. 生态学报, 2008(8): 3937–3947.
- [24] 杜映妮, 李天阳, 何丙辉, 等. 长期施肥和耕作下紫色土坡耕地土壤 C、N、P 和 K 化学计量特征[J]. 环境科学, 2020, 41(1): 394–402.
- [25] TIAN H Q, CHEN G S, ZHANG C, et al. Pattern and variation of C:N:P ratios in China's soils: A synthesis of observational data[J]. Biogeochemistry, 2009, 98: 139–151.
- [26] CLEVELAND C C, LIPTZIN D. C:N:P stoichiometry in soil: Is there a "Redfield ratio" for the microbial biomass? [J]. Biogeochemistry, 2007, 85: 235–252.
- [27] 高海宁, 李彩霞, 孙小妹, 等. 祁连山北麓不同海拔土壤化学计量特征[J]. 中国沙漠, 2021, 41(1): 219–227.
- [28] BANDYOPADHYAY P K, SAHA S, MANI P K, et al. Effect of organic inputs on aggregate associated organic carbon concentration under long-term rice-wheat cropping system[J]. Geoderma, 2010, 154(3–4): 379–386.
- [29] 宋亚辉, 艾泽民, 乔磊磊, 等. 施肥对黄土高原农地土壤碳氮磷生态化学计量比的影响[J]. 水土保持研究, 2019, 26(6): 38–45; 52.
- [30] 尉剑飞, 王誉陶, 张 翼, 等. 黄土高原典型草原植被及土壤化学计量对降水变化的响应[J]. 草地学报, 2022, 30(3): 532–543.
- [31] WASSEN M J, OLDE VENTERINK H G M, DE SWART E O A M. Nutrient concentrations in mire vegetation as a measure of nutrient limitation in mire ecosystems[J]. Journal of Vegetation Science, 1995, 6(1): 5–16.
- [32] BUI E N, HENDERSON B L. C:N:P stoichiometry in Australian soils with respect to vegetation and environmental factors[J]. Plant and Soil, 2013, 373: 553–568.