

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2025.03.025; CSTR:32311.14.rswc.2025.03.025.

唐张轩, 钟壬琳, 叶子豪, 等. 南方丘陵柑橘园水保效益及土壤有机碳储量[J]. 水土保持研究, 2025, 32(3): 55-62.

Tang Zhangxuan, Zhong Renlin, Ye Zihao, et al. Soil and water conservation benefits and soil organic carbon storage in southern hilly citrus orchards [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2025, 32(3): 55-62.

南方丘陵柑橘园水保效益及土壤有机碳储量

唐张轩¹, 钟壬琳², 叶子豪¹, 林子墨¹, 庄需印³, 吴家森¹

(1. 浙江农林大学 环境与资源学院, 杭州 311300;

2. 浙江省水资源水电中心, 杭州 310020; 3. 常山县水土保持科学试验站, 浙江 衢州 324200)

摘要: [目的] 探讨南方丘陵柑橘园水保效益及土壤理化性质对不同水保措施的响应程度以及土壤有机碳储量与影响因子的量化关系, 提出南方丘陵柑橘园水保及固碳综合效益最优的种植措施, 以期科学评估水土保持综合治理的碳增汇效益提供数据支撑和理论支持。[方法] 选取浙江省衢州市常山县胡柚园常规种植(CG)、覆草种植(FC)、梯田种植(TD)3种典型水保种植方式作为研究对象, 以裸露坡地(LD)为对照, 监测不同处理9年的径流量和土壤流失量, 采集不同处理0—10 cm, 10—30 cm土壤样品, 分析了土壤水保效益、团聚体粒径组分、土壤有机碳含量及其相关性。[结果] (1) 不同水保措施下, 保土效益和保水效益均表现为FC>CG>TD>LD。(2) 与LD相比, 土壤有机碳储量在0—10 cm土层提高了97.70%~207.91%, 具体表现为FC>CG>TD, 而10—30 cm土层则提高了42.72%~66.92%, 两土层间差异显著($p<0.05$)。(3) 土壤颗粒主要集中分布于0.25~2.00 mm粒径, 其中以中团聚体(0.05~2 mm)有机碳储量最多, 黏粒最少, 不同措施间团聚体粒径组分有机碳储量差异以微团聚体最为显著($p<0.05$), 表现为FC>TD>CG。(4) 水土流失因子和团聚体粒径组分对土壤有机碳储量具有总的负向影响(-0.83, -0.24), 而土壤养分对土壤有机碳储量则具有总的正向影响(1.03)。[结论] 水土流失因子通过影响土壤养分而间接影响土壤有机碳储量; 团聚体组分中大团聚体的占比对土壤有机碳储量的影响有直接的负影响。覆草种植对提高南方丘陵地区柑橘园水保效益及维持土壤碳库稳定性的效果最好, 在未来的种植中可进行推广。

关键词: 南方丘陵; 水保效益; 团聚体; 土壤养分; 有机碳储量

中图分类号: S278

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2025)03-0055-08

Soil and water conservation benefits and soil organic carbon storage in southern hilly citrus orchards

Tang Zhangxuan¹, Zhong Renlin², Ye Zihao¹, Lin Zimo¹, Zhuang Xuyin³, Wu Jiasen¹

(1. College of Environment and Resource Sciences, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, China;

2. Water Resources Management Center of Zhejiang Province, Hangzhou 310020 China;

3. Soil and Water Conservation Scientific Experimental Station of Changshan County, Quzhou, Zhejiang 324200, China)

Abstract: [Objective] The study explores the response of soil and water conservation benefits and soil physical and chemical properties to different soil and water conservation measures, quantifies the relationship between soil organic carbon storage and influencing factors, and proposes the optimal planting measures for maximizing comprehensive soil and water conservation and carbon sequestration benefits in southern hilly citrus orchards. This aims to provide data and theoretical support for the scientific evaluation of carbon sequestration benefits from comprehensive soil and water conservation management. [Methods] Three typical soil and water conservation planting methods, including conventional planting (CG), straw mulching planting (FC) and terrace planting (TD), were selected as the research objects in the Huyou citrus orchards in Changshan County, Quzhou City,

收稿日期: 2024-05-31

修回日期: 2024-08-20

接受日期: 2024-08-27

资助项目: 百山祖国家公园科学基金项目(2021ZDLY01); 浙江省大学生科技创新活动计划(2023R412008)

第一作者: 唐张轩(1998—), 女, 浙江衢州人, 硕士研究生, 主要从事水土保持生态修复研究。E-mail: ruantang@stu.zafu.edu.cn

通信作者: 吴家森(1975—), 男, 浙江丽水人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事森林与土壤环境研究。E-mail: jsww@zafu.edu.cn

<http://stbcyj.paperonce.org>

Zhejiang Province, with bare slope land (LD) serving as the control. Runoff and soil loss of different treatments were monitored for 9 years, and soil samples of 0—10 cm and 10—30 cm layers were collected. Soil and water conservation benefits, aggregate particle size composition, soil organic carbon content, and their correlation were analyzed. **[Results]** (1) Under various soil and water conservation measures, the soil and water conservation benefits were ranked as FC > CG > TD > LD. (2) Compared with LD, soil organic carbon storage in 0—10 cm soil layer increased by 97.70%~207.91%, showing the order FC > CG > TD, while in 10—30 cm soil layer increased by only 42.72%~66.92%, with significant differences between layers ($p < 0.05$). (3) Soil particles were mainly distributed in the particle size of 0.25~2.00 mm, in which the organic carbon storage of medium aggregates (0.05~2 mm) was the largest and the clay was the least. The difference in organic carbon storage of aggregate particle size components was the most significant in micro-aggregates ($p < 0.05$), which showed FC > TD > CG. (4) Soil erosion factors and aggregate size fractions had a total negative impact on soil organic carbon storage (-0.83, -0.24), while soil nutrients had a total positive impact on soil organic carbon storage (1.03). **[Conclusion]** Soil erosion factors indirectly influence soil organic carbon storage by impacting soil nutrients. The proportion of large aggregates in aggregate components has a direct negative impact on soil organic carbon storage. Mulching planting has the best effect on improving soil and water conservation benefits and maintaining soil carbon pool stability in citrus orchards in the hilly regions of southern China, and can be promoted in future planting practices.

Keywords: southern hills; soil and water conservation benefits; aggregates; soil nutrients; organic carbon storage

柑橘在中国的种植历史悠久,种植区域整体集中在长江以南地区。近年来,中国柑橘类果品的栽培面积、生产量及人均消费量均不断增长,经济价值显著。然而柑橘果园的不合理开发和发展会导致果园水土流失加速。水土流失对土壤养分、土地生产力有重大负面影响^[1],同时会使得在土壤中相对稳定的有机碳流失^[2]。适宜的水保措施不仅能实现保水、保土、保肥,还能改良土壤并增加土壤碳储量。因此,研究南方丘陵柑橘园水保效益及土壤有机碳储量对不同种植措施的响应不仅对柑橘园的可持续发展具有理论参考价值,还对南方红壤丘陵地区的生态修复和土壤碳库管理具有重要的指导意义。

南方红壤丘陵区单一植被措施在减流减沙、减少养分流失及土壤改良等水土保持综合效益方面表现突出^[3],且组合措施的水保效益比单项措施更为有效^[4],其中果树+草本、果树+植物篱、果树+梯地等组合被认为是高效措施配置模式。此外,合理的水保种植措施同样能够维持土壤养分。有研究指出生态恢复模式和果园开发模式可有效减少土壤全氮和全磷流失量,并促进土壤有机碳积累和恢复^[5],且果园模式土壤碳素恢复效应更加明显^[6]。水保措施的实施还会改善土壤结构。由于工程或植物措施的应用,微团聚体(<0.25 mm)会向大团聚体(>0.25 mm)转变且不同水保措施团聚体的稳定性依次为工程+植物措施>工程措施>植物措施>未采取措施^[7]。另有研究指出植物措施能提升>2 mm土壤团

聚体的有机碳含量和速效钾含量,有利于维持土壤结构^[8]。综上可知,水保种植措施对土壤侵蚀的缓冲效益、土壤养分的维持能力以及土壤结构的改善作用研究已较为完善。然而,前人的研究在分析水保种植措施效果时多以单一的水保效益或养分效益作为分析方向,并未考虑措施水保及养分的综合效益与单一效益是否存在差异。将两者结合分析可完善南方丘陵柑橘园种植措施的生态效益评价体系,提高果园绿色管理水平。此外,已有研究中对于土壤固碳能力、水保能力及养分维持能力三者的关系以定性研究为主,尚未完成互作程度的量化。

本研究在分析对比南方红壤丘陵区不同柑橘种植方式下水保及养分效益差异的基础上,依托径流量、土壤流失量、土壤养分、团聚体粒径组分等数据,利用PLS-SEM技术构建水保效益、土壤养分及有机碳储量的结构方程模型对水保效益和土壤碳库的关系进行量化探讨,以期科学评估水土保持综合治理的碳增汇效益提供数据支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

选取浙江省衢州市常山县(118°28'14.58"E, 28°54'33.98"N)为研究区。该地区地形以丘陵为主,土壤发育于花岗岩的红壤土类^[9]。属于亚热带季风性气候,年均气温 17.7℃,区域年均降雨量 1 319~2 724 mm,月平均降雨量为 1 858 mm,其中≥12 mm的侵蚀

性降雨量占全年总降雨量的78.3%,3—7月各月降雨量比例均超过年降雨量的10%。

1.2 采样点设置与样品采集

于2011年在常山县红壤丘陵区坡地柑橘园采用不同工程及覆盖措施种植胡柚,共分为4个处理:常规种植(CG)、覆草种植(FC)、梯地种植(TD)和裸地(LD),每个处理重复3次,面积分别为0.4 hm²。其中CG为顺坡+草本清耕、FC为顺坡+草本刈割、TD为梯地+草本清耕。并于2014年建立水土流失监测试验小区,对小区内降水和水土流失数据进行监测记录。小区面积均为5 m×20 m,各小区间均用水泥浇筑0.5 m×20 m的间隔带,小区内胡柚种植密度1 600株/hm²,地径4.8~7.9 cm,树高1.9~2.2 m,冠幅1.8~2.5 m。每年3月施春肥(每株0.4~0.5 kg氮磷钾复合肥),11月施冬肥(每株2.5 kg有机肥)为标准,各小区无差别施肥。

2022年7月分别在各试验小区内按坡位由上至下随机选取4个土壤采样点,利用五点混合法采取0—10 cm和10—30 cm两个土层的土壤样品,同时用环刀取0—10 cm土样用以容重测定。将样品自然风干,一部分过2 mm筛,用于测定土壤pH和速效养分含量,过0.15 mm筛,测定土壤有机碳(SOC)。另一部分原状土采用湿筛法和沉降抽滤法对团聚体不同粒径组分进行分离,并利用元素分析仪对土壤各粒径组分的有机碳含量进行测定,各试验均设3次重复。

利用试验小区内的水土流失自动监测系统以及日常监测数据,对2014—2022年径流量和土壤流失量进行监测,用以分析水保效益。

1.3 研究方法

1.3.1 样品测定方法 参照《土壤农业化学分析方法》^[10]测定土壤物理及化学指标。土壤容重采用环刀法;pH值按照土水比1:5使用PHS-3E pH计(INESA,中国上海)测定;土壤速效磷采用钼锑抗比色法测定;土壤速效钾采用火焰光度法测定;土壤碱解氮采用碱解扩散法测定;利用元素分析仪测定土壤有机碳和不同粒径团聚体组分碳含量。

1.3.2 土壤团聚体稳定性指数计算 利用湿筛法^[11]和沉降抽滤法将土壤团聚体分为大团聚体(>2 mm)、中团聚体(0.25~2 mm)、微团聚体(0.05~0.25 mm)、粉粒(0.002 mm~0.05 mm)、黏粒(<0.002 mm)5个粒径。团聚体稳定性的计算方法如下:

团聚体平均重量直径(MWD)采用以下公式计算^[12]:

$$\text{MWD} = \sum_i^n \bar{d} \times m_i \quad (1)$$

式中:MWD为团聚体平均重量直径(mm);*i*为第*i*级团聚体;*n*为团聚体总级数,*n*=5; \bar{d} 为第*i*级团聚体颗粒的平均直径(mm);*m_i*为第*i*级团聚体组成(%)。

1.3.3 土壤可蚀性因子*K*计算 本研究根据已有参数采用Williams等^[13]在EPIC模型中的算法,利用土壤机械组成和土壤有机碳进行*K_{epic}*值的计算。机械组成采用美国制,计算的*K*值乘以系数0.1317可将单位转换成国际制单位(t·hm²·h)/(hm²·MJ·mm)。具体计算公式为:

$$\begin{aligned} K_{\text{epic}} &= P_0 \cdot P_1 \cdot P_2 \cdot P_3 \\ P_0 &= 0.2 + 0.3 \exp \left[-0.0256 \text{San} \cdot \left(\frac{1 - \text{Sil}}{100} \right) \right] \\ P_1 &= \left[\frac{\text{Sil}}{\text{Cla} + \text{Sil}} \right]^{0.3} \\ P_2 &= \frac{1.0 - 0.25C}{C + \exp(3.72 - 2.95C)} \\ P_3 &= \frac{1.0 - 0.75\text{Sn}}{\text{Sn} + \exp(-5.51 + 22.9\text{Sn})} \end{aligned} \quad (2)$$

$$K = 0.1317 \cdot K_{\text{epic}}$$

式中:San为砂粒(0.05~2 mm)含量百分比;Sil为粉粒(0.002~0.05 mm)含量百分比;Cla为黏粒(<0.002 mm)百分比;*C*为有机碳含量百分比;Sn=1-San/100。

1.3.4 数据处理与制图 利用Excel进行数据整理,采用SPSS 26.0软件对数据进行统计分析,利用Origin 2021,Photoshop等软件进行图表绘制;并利用R(pls-pm软件包)中的偏最小二乘路径模型(PLS-PM)估算土壤环境因子对土壤有机碳储量的直接和间接影响及其相互作用。

2 结果与分析

2.1 不同水保措施柑橘园土壤水保效益及团聚体稳定性

2.1.1 不同水保措施柑橘园水土保持效益 水保措施实施后坡地径流深和土壤流失量均显著降低(表1),径流深大小表现为LD(550.03 mm/a)>TD(67.90 mm/a)>CG(44.36 mm/a)>FC(51.31 mm/a),土壤流失量大小表现为LD(23.22 t·hm²/a)>TD(0.95 t·hm²/a)>CG(0.67 t·hm²/a)>FC(0.26 t·hm²/a)。与裸地相比,3种水保措施的径流深和土壤流失量分别下降了87.71%~91.93%,95.91%~98.88% (*p*<0.05),但不同措施间的差异并不显著(*p*>0.05)。

2.1.2 不同水保措施柑橘园土壤团聚体稳定性 由图1可知,柑橘园土壤大团聚体(>2 mm)、微团聚体(0.05~0.25 mm)和粉粒(0.002~0.05 mm)分别占土壤团聚体的37.20%~43.80%,15.95%~23.63%,

8.98%~11.30%,不同处理间没有显著性差异($p>0.05$)。土壤中团聚体(0.25~2.00 mm)以TD最低,占比为20.70%,显著低于其他3个处理($p<0.05$);土壤黏粒(<0.002 mm)含量则表现为:CG(0.15%)、FC(0.33%)显著低于TD(1.13%)和LD(0.97%)($p<0.05$)。

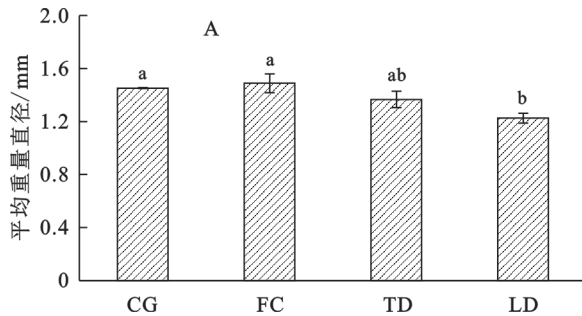
表1 不同水保措施年均径流深及土壤流失量

Table 1 Annual average runoff depth and soil loss under different soil and water conservation measures

水保措施	径流深/($\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$)	土壤流失量/($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)
CG	51.31±10.05b	0.67±0.25b
FC	44.36±6.03b	0.26±0.09b
TD	67.90±13.20b	0.95±0.34b
LD	550.03±54.07a	23.22±6.71a

注:表中数据均为平均值±标准误,不同字母表示各处理间具有显著性差异($p<0.05$)。

不同水保措施柑橘园土壤团聚体平均重量直径(MWD)见图2A,大小排序为FC(1.49 mm)>CG



注:图中不同字母表示各处理间具有显著性差异($p<0.05$)。

图2 不同水保措施柑橘园土壤团聚体平均重量直径和可蚀性因子

Fig. 2 Average weight diameter and erodibility factor of soil aggregates in citrus orchards under different soil and water conservation measures

2.2 不同水保措施柑橘园土壤化学特性

由图3可知,水保措施实施后土壤碱解氮、有效磷和速效钾含量均显著增加。其中,土壤碱解氮含量和速效钾含量增加率分别达到158.36%~375.00%和181.09%~297.45%,各处理含量大小均表现为:FC>CG>TD>LD,且除CG(59.50 mg/kg)和FC(66.50 mg/kg)的土壤碱解氮无显著差异($p>0.05$)外,各处理均存在显著差异($p<0.05$)。土壤速效磷含量则以CG(16.99 mg/kg)含量最高,其次为FC(13.61 mg/kg),TD(10.04 mg/kg)再次之,LD(0.14 mg/kg)最低,各处理间差异显著($p<0.05$)。土壤pH则表现为LD(4.75)显著低于CG(6.10)、FC(6.20)($p<0.05$),但3种水保措施间的差异并不显著($p>0.05$)。

2.3 不同水保措施柑橘园土壤有机碳储量分布

2.3.1 不同土层有机碳储量 不同水保措施柑橘园土壤有机碳储量如图4所示,水保措施实施后土壤有机碳储量与LD相比在0—10 cm土层增加了97.70%~207.91%,土壤有机碳储量表现为FC(30.95 t/hm²)>CG(26.60 t/hm²)>TD(17.08 t/hm²)>LD(8.64 t/

(1.45 mm)>TD(1.37 mm)>LD(1.23 mm),其中LD显著低于CG和FC($p<0.05$),不同水保措施间无显著性差异($p>0.05$)。由图2B可知,LD措施K值为0.018,显著高于FC(0.010)和CG(0.011)($p<0.05$),与TD(0.013)无显著差异($p>0.05$),3种水保措施间无显著性差异($p>0.05$)。

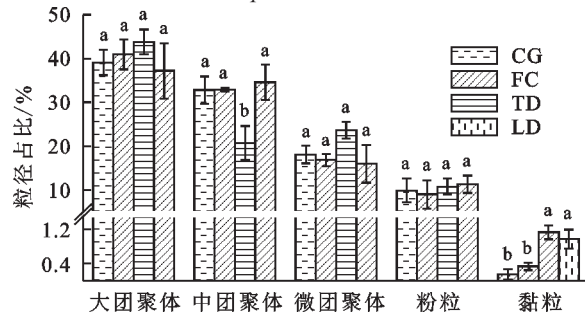
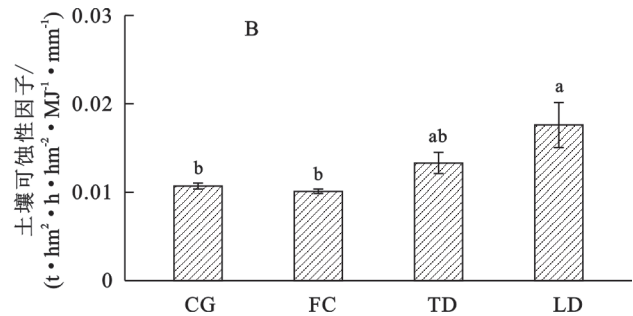


图1 不同水保措施柑橘园土壤团聚体粒径组成

Fig. 1 Particle size composition of soil aggregates in citrus orchards with different soil conservation measures



hm²),各处理间差异显著($p<0.05$)。

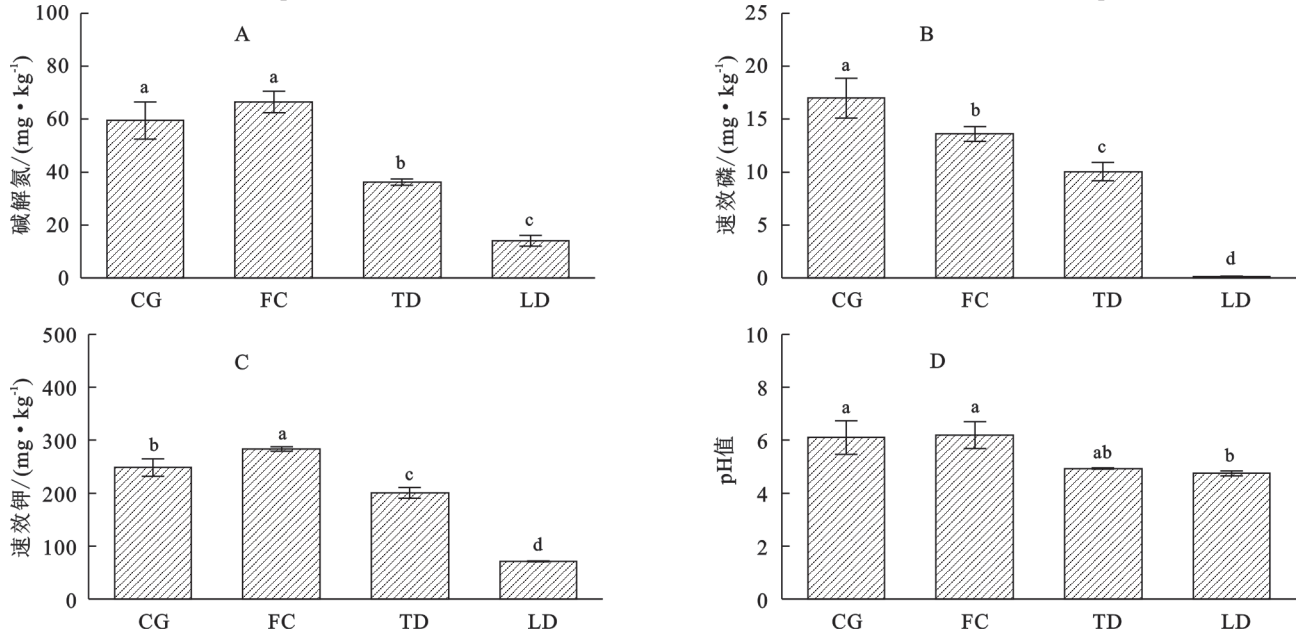
在10—30 cm土层,水保措施实施后土壤有机碳储量与LD(8.50 t/hm²)相比显著增加42.72%~66.92%($p<0.05$),但3种水保措施间的差异并不显著($p>0.05$),由大到小分别为CG(14.18 t/hm²)、FC(13.16 t/hm²)和TD(12.12 t/hm²)。

各处理0—10 cm土层的土壤有机碳储量均高于10—30 cm土层,且除LD外,2土层间均存在显著差异($p<0.05$)。3种水保措施中,以FC土层间的差异最大,而TD的差异最小,10—30 cm比0—10 cm分别降低了57.48%和29.04%。

2.3.2 不同粒径土壤有机碳储量 由图5可知,大团聚体、中团聚体和微团聚体有机碳储量均为FC最高,储量分别为大团聚体(23.39 t/hm²),中团聚体(65.77 t/hm²)和微团聚体(36.61 t/hm²)。大团聚体有机碳储量LD(8.08 t/hm²)与CG(12.78 t/hm²)显著低于FC(23.39 t/hm²)和TD(20.74 t/hm²)($p<0.05$),3种水保措施间无显著差异。中团聚体有机碳储量则表现为TD(13.59 t/hm²)和LD(10.66 t/hm²)显著低

于FC(65.77 t/hm²)和CG(17.28 t/hm²)($p < 0.05$)。微团聚体中LD(9.71 t/hm²)和CG(12.33 t/hm²)显著低于FC(36.61 t/hm²)和TD(17.94 t/hm²)($p < 0.05$),且FC与TD差异显著($p < 0.05$)。粉粒有机碳储量

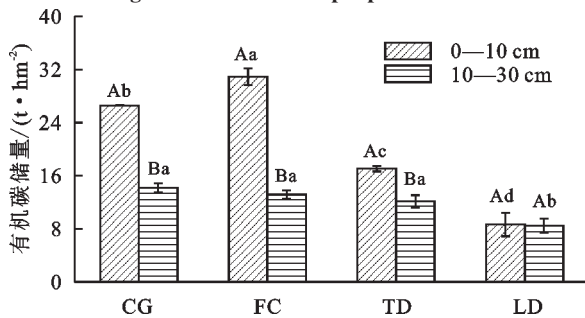
LD(14.00 t/hm²)与CG(13.61 t/hm²)显著高于FC(10.13 t/hm²)与TD(8.74 t/hm²)($p < 0.05$)。黏粒则表现为LD(2.94 t/hm²)和TD(2.54 t/hm²)显著高于CG(0.15 t/hm²)和FC(0.85 t/hm²)($p < 0.05$)。



注:不同字母表示不同处理间具有显著性差异($p < 0.05$)。

图3 不同水土保持措施柑橘园土壤化学特性

Fig. 3 Soil chemical properties in citrus orchards under different soil and water conservation measures



注:不同大写字母表示相同措施下不同土层具有显著性差异($p < 0.05$),不同小写字母表示同一土层不同措施具有显著性差异($p < 0.05$)。

图4 不同水土保持措施柑橘园土壤有机碳储量

Fig. 4 Soil organic carbon storage in citrus orchards under different soil and water conservation measures

各处理有机碳储量均以粒径小于0.002 mm的黏粒最少,大于0.25 mm的大、中团聚体最多。微团聚体和粉粒的有机碳储量大小因处理不同而有所差异,在CG和LD中微团聚体<粉粒,而在FC和TD中微团聚体>粉粒。

2.4 土壤有机碳储量关键影响因子及关系分析

应用PLS-PM量化本研究中所涉及的土壤环境因子对土壤有机碳储量的直接和间接影响及其相互作用并依据运行结果剔除相关因子对模型进行优化(图6)。结果显示,水土流失因子、土壤养分含量和团聚体粒径组分能解释83%的土壤有机碳储量变化。水土流失因子对土壤养分有直接的负面影响(-0.89,

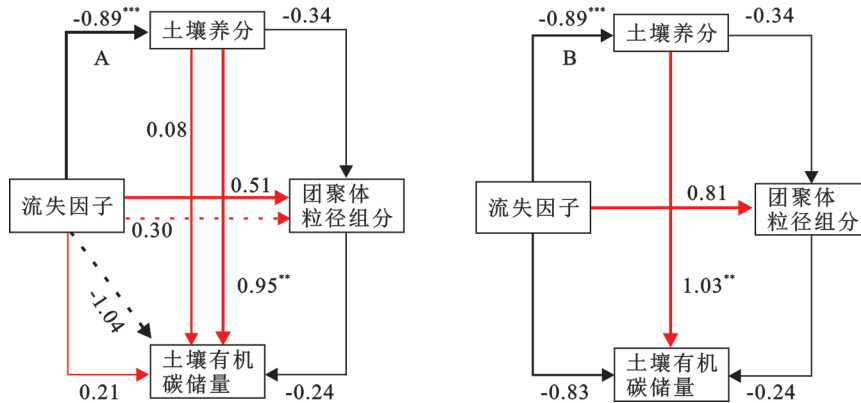
$p < 0.001$),而对土壤有机碳储量的影响则主要以间接影响为主,间接影响指数为-1.04,总影响指数为-0.83。土壤养分对土壤有机碳储量的影响主要为直接影响,影响指数为正向影响(0.95, $p < 0.01$)。水土流失因子对团聚体粒径组分也存在直接和间接的调节作用(0.51,0.30),总影响指数为0.81。相比较而言团聚体粒径组分对土壤有机碳储量的影响较小,为-0.24。与水土流失相关的3个因子对土壤有机碳储量的影响权重以径流量和土壤流失量最大(0.36),土壤养分中以碱解氮和速效钾影响最大(0.28),在团聚体组分中以大团聚体影响为主(0.66)。

3 讨论

3.1 土壤有机碳储量与水土保持和土壤养分的量化关系

SEM模型结果显示,土壤有机碳储量受到水土流失因子、土壤养分以及土壤团聚体组分的共同驱动,其中影响最大的是土壤养分,其次是水土流失因子,最后才是土壤团聚体组分。总体上,水土流失因子—土壤有机碳储量间的直接反馈在南方丘陵柑橘园中不明显,但水土流失因子对土壤有机碳储量的总影响度与土壤养分不相上下,究其原因依赖于水土流失因子对土壤有机碳储量有更强的间接调节作用。间接作用的途径可能是水土流失通过影响土

壤颗粒组分及养分含量而间接调控土壤有机碳储量。正如路径模型所示,水土流失因子对土壤养分具有显著较强的直接负影响。类似结论也发现于沙晓玮^[14]对冀北山地植被恢复的研究中,其研究指出土壤可蚀性指数与土壤养分指数呈显著负相关。水土流失时,径流不仅能携带土壤颗粒导致土壤流失,还能携带溶解态和少量悬浮颗粒态碳,加速土壤碳流失过程^[15],因此水土流失因子会对土壤有机碳储量产生负影响。水土流失过程中,土壤中的养分也易随径流和流失土壤离开,因此增加的径流量和土壤流失量会对土壤养分产生直接的负面影响。而土壤养分的减少会减弱微生物生物多样性,从而影响土壤的储碳能力^[16]。在本研究中FC的水保效果优于CG和TD,而TD的水保效果较CG差,有机碳储量也表现为FC>CG>TD。Anguo Tu等^[17]、毕明浩等^[18]研究也表明覆草种植对地表径流的雨水冲刷及剪切力可发挥减缓的



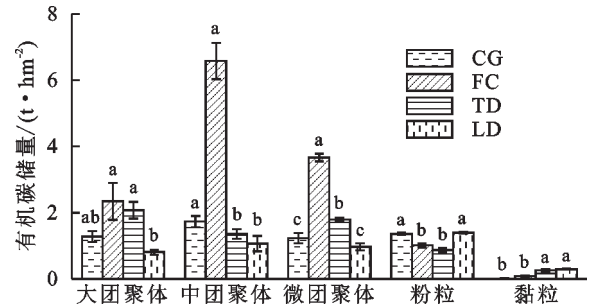
注:图A表示偏最小二乘路径模型(PLS-PM)量化的不同环境因子对土壤有机碳储量的直接和间接影响。直线表示直接影响,虚线表示间接影响。红色表示积极影响,黑色表示负面影响。图B表示偏最小二乘路径模型(PLS-PM)量化的不同环境因子对土壤有机碳储量的总影响。红色表示积极影响,黑色表示负面影响。图C表示偏最小二乘路径模型(PLS-PM)量化的不同环境因子对土壤有机碳储量影响的关键因子权重;*表示影响显著性,**表示 $p<0.01$,***表示 $p<0.001$ 。模型解释度(GOF)为0.83。

图6 不同环境因子与土壤有机碳储量SEM模型

Fig. 6 SEM model of different environmental factors and soil organic carbon storage

土壤养分对土壤有机碳储量的直接正影响显著,且与其他养分元素变量相比,pH的驱动作用相对较小,其因子载荷值仅为0.22。这说明土壤酸碱程度并不能完全调控土壤有机碳储量,刘亚静等^[22]对燕山南部典型农业区土壤有机碳储量的研究结果也表明土壤pH与土壤有机碳密度的相关性极不显著。Malik等^[23]对土壤不同pH值控制碳积累的微生物机制研究指出,在pH降低到阈值(6.2)以下的低pH值土壤中,土地利用的集约化会导致微生物分解体酸减缓,从而增加碳的分解,从而导致碳损失。也就是说,在酸性土壤中,微生物的生长对分解速率的限制更大。值得注意的是,除pH外,速效磷对土壤有机碳储量的影响也相对较小,并且总体均呈直接正影响。而本研究中覆草种植措施的速效磷含量较常规种植措施低,相关研究也表明草本覆盖对土壤养分的积累具有正

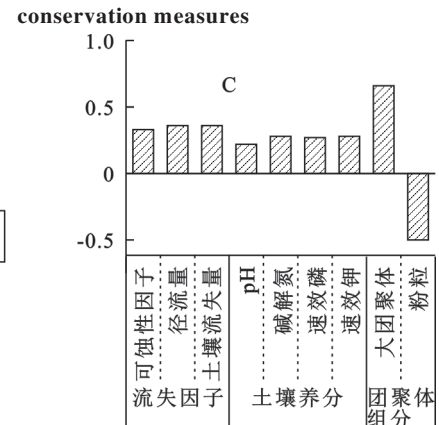
物理保护作用,并且可控制土壤水分的人渗量,从而减少土壤侵蚀。梯地在建设初期受人为因素的影响较大,MWD一般较常规种植小,而K值虽无明显差异,但仍表现出大于常规种植的趋势^[19-21]。



注:不同字母表示同一粒径下不同处理间有机碳储量具有显著性差异($p<0.05$)。

图5 不同水保措施柑橘园土壤团聚体粒径组分有机碳储量

Fig. 5 Organic carbon storage in soil aggregate size fractions in citrus orchards under different soil and water conservation measures



效应,能显著提高土壤养分的含量^[24]。这可能因为磷素与植物的根、茎、芽的分化发育和生长成熟密切相关,本研究样品采集时间为7月,属于草本和柑橘的生长成熟期,对磷素的需求较常规种植措施高,部分磷储存在草本中从而导致土壤中的磷素低于常规种植措施。然而各养分元素中磷素对土壤碳储量的影响相对较低,因此在各养分的综合作用下FC措施的储碳能力仍优于CG。

3.2 土壤有机碳储量对土壤团聚体组分的响应

土壤侵蚀的过程中土壤颗粒或团聚体被降水雨滴击溅而破碎,密度较低的细颗粒和颗粒结合态有机碳就容易随径流迁移流失^[25]。在对团聚体组分和有机碳储量的研究中表明土壤团聚体组分对土壤有机碳储量存在直接的负向影响,这与杨倩等^[26]的研究结果有所不同。而通过对团聚体组分中筛选出的

关键影响因子分析时发现,大团聚体的影响权重重大,权重为正,粉粒的影响权重小,权重为负。这意味着大团聚体含量越多土壤团聚体有机碳储量越多,而粉粒含量越多,有机碳储量越少。本研究中当团聚体粒径 $>2\text{ mm}$ 时,基于草本覆盖情况的2组措施该粒径下的土壤有机碳储量的比较结果与全土有机碳含量结果相似,仍表现为 $\text{FC}>\text{CG}$,但基于工程措施比较的TD却小于CG。土壤团聚体粒径组成结果表明梯地的大团聚体含量较常规种植多,吴瑾等^[27]的研究也指出植被恢复的梯壁土壤大团聚体($>0.25\text{ mm}$)的含量随着演替阶段增加不断提高,且恢复年限越久大团聚体占比越高。本研究进一步细分了不同团聚体粒径大小,将粒径大于 2 mm 定义为大团聚体, $0.25\sim 2\text{ mm}$ 为中团聚体。结合吴瑾等^[27]的研究推测认为大团聚体的占比提高主要是由粒径大于 2 mm 的团聚体引起。因此认为梯地大团聚体的含量高或许是导致该粒径下土壤有机碳储量大于常规种植的关键原因。此外,本研究中粒径在 $0.002\sim 0.05\text{ mm}$ (粉粒)范围时,FC有机碳储量低于CG。研究表明粉粒和黏粒组分具有更高的资源可用性支持更大的微生物丰度。而覆草种植措施的生物丰富度和微生物丰度较常规种植措施高,其对养分的需求量也更高,由于大粒径团聚体组分所储存的碳不易被利用,粉粒和黏粒中的碳首先被植物吸收利用,从而导致粉粒中的有机碳储量较常规种植措施少。

4 结论

(1) 不同水保措施下柑橘园的水保效益表现为 $\text{FC}>\text{CG}>\text{TD}>\text{LD}$ 。其中,FC的保水和保土效果最好,达到 91.93% 和 98.88% ,且K值为 $0.010\text{ (t}\cdot\text{hm}^2\cdot\text{h)/ (hm}^2\cdot\text{MJ}\cdot\text{mm)}$ 。

(2) 水保措施的实施提高了土壤有机碳储量,与LD相比, $0\text{—}10\text{ cm}$ 和 $10\text{—}30\text{ cm}$ 土层有机碳储量分别提高了 $97.70\%\sim 207.91\%$, $42.72\%\sim 66.92\%$ 。

(3) 土壤颗粒主要集中分布于 $0.25\sim 2.00\text{ mm}$ 粒径,其中以中团聚体($0.05\sim 2\text{ mm}$)有机碳储量最多,黏粒最少,3种水保措施的团聚体粒径组分有机碳储量在微团聚体下表现出 $\text{FC}>\text{TD}>\text{CG}$,不同处理间的差异达显著水平($p<0.05$)。

(4) 水土流失因子和团聚体粒径组分对土壤有机碳储量具有总的负向影响,而土壤养分对土壤有机碳储量则具有总的正向影响($1.03, p<0.001$),团聚体组分对土壤有机碳储量具有总的负向影响,且以大团聚体的影响为主(0.65)。

参考文献(References):

- [1] Borrelli P, Robinson D A, Fleischer L R, et al. An assessment of the global impact of 21 st century land use change on soil erosion[J]. Nature Communications, 2017, 8(1):2013.
- [2] 李威闻,黄金权,齐瑜洁,等.土壤侵蚀条件下土壤微生物生物量碳含量变化及其影响因素的Meta分析[J].生态环境学报,2023,32(1):47-55.
Li W W, Huang J Q, Qi Y J, et al. Meta-analysis of soil microbial biomass carbon content and its influencing factors under soil erosion[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2023,32(1):47-55.
- [3] 张杰,陈晓安,汤崇军,等.典型水土保持措施对红壤坡地柑橘园水土保持效益的影响[J].农业工程学报,2017,33(24):165-173.
Zhang J, Chen X A, Tang C J, et al. Benefit evaluation on typical soil and water conservation measures in citrus orchard on red soil slope[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017,33(24):165-173.
- [4] 陈佳.红壤丘陵区水土保持措施对水土流失的作用规律[D].北京:中国科学院大学,2020.
Jia C. Effect of soil and water conservation measures on soil and water loss in red soil hilly region[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2020.
- [5] 陈翔,刘永红,商小兰,等.覆盖方式对浙西低丘橘园土壤碳库和养分流失的影响[J].江西农业学报,2023,35(8):163-169.
Chen X, Liu Y H, Shang X L, et al. Effects of mulching methods on soil carbon pool and nutrient loss in low hilly orange orchards in western Zhejiang [J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2023,35(8):163-169.
- [6] 胡瑞,房焕英,肖胜生,等.南方红壤典型花岗岩侵蚀区主要治理模式的土壤碳汇效应[J].生态环境学报,2021,30(8):1617-1626.
Hu R, Fang H Y, Xiao S S, et al. Soil carbon sink effect of main management models in typical granite erosion area of red soil in South China[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2021,30(8):1617-1626.
- [7] 黄石德,李建民,林捷,等.水土保持措施对板栗林土壤特性的影响[J].亚热带农业研究,2014,10(3):151-155.
Huang S D, Li J M, Lin J, et al. Effects of soil and water conservation measures on soil property in *Castanea mollissima* plantations[J]. Subtropical Agriculture Research, 2014,10(3):151-155.
- [8] 李继文,柳开楼,余喜初,等.稻草覆盖和香根草篱联合调控红壤坡耕地土壤团聚体粒组碳钾分配规律[J].土壤,2022,54(4):787-792.
Li J W, Liu K L, Yu X C, et al. Regulation of carbon and potassium distribution in soil aggregates of red soil slope farmland by rice straw mulching and vetiver hedge-row[J]. Soils, 2022,54(4):787-792.

- [9] 沈照伟,张锦娟,张迅,等.浙江省低丘红壤区土壤特性研究[J].科技通报,2013,29(7):72-77.
Shen Z W, Zhang J J, Zhang X, et al. Research on soil characters of the low-hilly red soil region in Zhejiang Province[J]. Bulletin of Science and Technology, 2013, 29(7):72-77.
- [10] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].北京:中国农业科学技术出版社,2000.
Lu R K. Methods of soil Agrochemical analysis [M]. China Agricultural Science and Technology Press, 2000.
- [11] Elliott E T. Aggregate structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated soils [J]. Soil Science Society of America Journal, 1986, 50 (3) : 627-633.
- [12] 马文明,刘军,周青平,等.高寒草地灌丛化对土壤团聚体稳定性及有机碳分布特征的影响[J].土壤通报,2019,50(5):1108-1115.
Ma W M, Liu J, Zhou Q P, et al. Stability of soil aggregates and soil organic carbon under shrub encroachment sites in alpine meadow [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2019, 50(5):1108-1115.
- [13] Williams J R., Renard K G., Dyke P T. EPIC: a new method for assessing erosion's effect on soil productivity [J]. Journal of Soil & Water Conservation, 1983, 38 (5):381-383.
- [14] 沙晓玮,武昱鑫,贾国栋,等.冀北山地植被恢复对不同坡位土壤可蚀性与养分的影响[J].水土保持学报,2024,38(4):11-19,28.
Sha X W, Wu Y X, Jia G D, et al. Effects of vegetation restoration on soil erodibility and nutrients at different slope sites in northern Hebei Mountains [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(4):11-19,28.
- [15] Stanley P L, Rowntree J E, Beede D K, et al. Impacts of soil carbon sequestration on life cycle greenhouse gas emissions in Midwestern USA beef finishing systems [J]. Agricultural Systems, 2018, 162:249-258.
- [16] Shen D C, Feng Y J, Liu T, et al. Characteristic of soil organic carbon and nutrient storage in a typical overmature *Eucalyptus* forest in the state-owned Dalingshan forest farm in Dongguan [J]. Forestry and Environmental Science, 2022, 38(4):99-107.
- [17] Tu A G, Xie S H, Zheng H J, et al. Long-term effects of living grass mulching on soil and water conservation and fruit yield of *Citrus* orchard in South China [J]. Agricultural Water Management, 2021, 252:106897.
- [18] 毕明浩,梁斌,董静,等.果园生草对氮素表层累积及径流损失的影响[J].水土保持学报,2017,31(3):102-105.
Bi M H, Liang B, Dong J, et al. Effects of cover crop (*Vulpia myuros*) on the accumulation and runoff loss of nitrogen in orchard [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, 31(3):102-105.
- [19] Luo T, Liu W J, Xia D, et al. Effects of land use types on soil erodibility in a small Karst watershed in western Hubei [J]. Peerj, 2022, 10: e14423.
- [20] 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 [J]. Ecosphere, 2023, 14(12), DOI:10.1002/ECS2.4736.
- [21] Jiang Q H, Chen Y Y, Hu J L, et al. Use of visible and near-infrared reflectance spectroscopy models to determine soil erodibility factor (*K*) in an ecologically restored watershed [J]. Remote Sensing, 2020, 12(18):3103.
- [22] 刘亚静,刘红健.燕山南部典型农业区土壤有机碳储量及影响因素研究[J].华北理工大学学报:自然科学版,2024,46(1):79-88.
Liu Y J, Liu H J. Study on soil organic carbon storage and influencing factors of typical agricultural areas of southern Yanshan Mountains [J]. Journal of North China University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2024, 46(1):79-88.
- [23] Malik A A, Puissant J, Buckeridge K M, et al. Land use driven change in soil pH affects microbial carbon cycling processes [J]. Nature Communications, 2018, 9(1):3591.
- [24] 郭新送,张娟,巩有才,等.生草不同条件还田对桃园土壤微生物、酶活性及养分供应的影响[J].水土保持学报,2021,35(4):307-312,320.
Guo X S, Zhang J, Gong Y C, et al. Effect of grass return under different conditions on soil microorganism, enzyme activities and nutrients supply in peach orchard [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35 (4):307-312,320.
- [25] 马文明,李忠武,丁克毅,等.水力侵蚀作用下土壤有机碳库稳定性机制研究进展[J].中国水土保持科学,2020,18(1):125-130.
Ma W M, Li Z W, Ding K Y, et al. Advances in the study of the stability of soil organic carbon storage affected by water erosion [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2020, 18(1):125-130.
- [26] 杨倩,朱大运,陈静,等.植被恢复模式对土壤团聚体和有机碳储量的影响[J].森林与环境学报,2022,42(6):631-639.
Yang Q, Zhu D Y, Chen J, et al. Effects of vegetation restoration models on soil aggregate and organic carbon stock [J]. Journal of Forest and Environment, 2022, 42 (6):631-639.
- [27] 吴瑾,刘窑军,郑涵,等.植被恢复对油茶园梯壁土壤团聚体及赋存有机碳的影响[J].水土保持学报,2023,37(6):290-297.
Wu J, Liu Y J, Zheng H, et al. Impacts of vegetation restoration on soil aggregates and soil organic carbon on the terrace wall of *Camellia oleifera* orchard [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(6):290-297.