

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2025.10.009

和怡萱, 潘正阳, 李昭君, 等. 不同绿肥覆盖柑橘园土壤团聚体稳定性季节变化特征 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2025, 47(10): 97-109.

不同绿肥覆盖柑橘园土壤团聚体 稳定性季节变化特征

和怡萱^{1,2}, 潘正阳^{1,2}, 李昭君^{1,2}, 朱广宇³,
王小燕^{1,2}, 陈方鑫^{1,2}, 陈展鹏^{1,2}

1. 水土保持生态修复重庆市重点实验室, 重庆 400715; 2. 西南大学 资源环境学院, 重庆 400715;
3. 教育部三峡库区生态环境重庆市重点实验室, 重庆 400045

摘要: 三峡库区柑橘园在频繁人为干扰下水土流失加剧, 土壤质量和生产能力下降, 探究柑橘园不同绿肥覆盖在季节动态变化下对土壤团聚体分布和稳定性的影响, 对选取适宜的绿肥覆盖品种具有重要意义。以三峡库区柑橘园为研究对象, 设置清耕、白花三叶草、早熟禾、毛叶苕子覆盖等 4 种处理, 探讨影响土壤团聚体分布和稳定性的主控因素。结果表明: ① 绿肥覆盖下, 土壤性质和植被特性季节变化显著, 4-6 月容质量降低, 孔隙度、土壤有机碳(Soil Organic Carbon, SOC)质量分数和根重密度增加。白花三叶草、早熟禾和毛叶苕子覆盖分别使孔隙度提高 3.47%~5.79%, 根重密度增加 207.41%~326.38%, SOC 质量分数提高 41.36%~59.98%。② 绿肥覆盖下, 土壤团聚体分布及稳定性亦表现出明显季节规律, 4-6 月大团聚体比例和稳定性最高。3 种绿肥覆盖下, <0.25 mm 团聚体比例降低 15.97%~28.43%, 平均重量直径(Mean Weight Diameter, MWD)和几何平均直径(Geometrical Mean Diameter, GMD)分别提高 19.56%~32.41%和 47.02%~87.75%。③ 土壤团聚体稳定性与孔隙度、有机碳、植被覆盖度、地上生物量、根重密度和>2 mm 团聚体比例呈显著正相关关系, 与土壤容质量、<0.25 mm 团聚体比例呈显著负相关关系。冗余分析结果表明, 不同绿肥覆盖下, 土壤团聚体稳定性的差异主要受>2 mm 团聚体比例、地上生物量和土壤孔隙度的影响($p < 0.05$)。总体而言, 早熟禾覆盖的效果显著优于白花三叶草和毛叶苕子, 这对三峡库区柑橘园土壤质量提升与覆盖管理方式提供了理论支撑。

关键词: 三峡库区; 紫色土; 土壤有机碳; 水土流失;

柑橘园管理

中图分类号: X53; S157.1

文献标识码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



文章编号: 1673-9868(2025)10-0097-13

The Seasonal Variation Characteristics of Soil Aggregate Stability in Citrus Orchards Covered with Different Green Manures

收稿日期: 2025-03-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(41701246); 重庆市自然科学基金面上项目(CSTB2023NSCQ-MSX0117); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(XDJK2018B042)。

作者简介: 和怡萱, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀和水土流失防治研究。

通信作者: 陈展鹏, 博士, 讲师。

HE Yixuan^{1,2}, PAN Zhengyang^{1,2}, LI Zhaojun^{1,2}, ZHU Guangyu³,
WANG Xiaoyan^{1,2}, CHEN Fangxin^{1,2}, CHEN Zhanpeng^{1,2}

1. Chongqing Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Ecological Restoration, Chongqing 400715, China;

2. College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China;

3. Key Laboratory of the Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment, Ministry of Education, Chongqing 400045, China

Abstract: In the Three Gorges Reservoir Region, frequent anthropogenic disturbances have exacerbated soil erosion in citrus orchards, leading to a decline in soil quality and production functions. Investigating the seasonal dynamics of different species of green manure mulching and their effects on soil aggregate distribution and stability is crucial for selecting suitable species for green manure mulching. This study focused on citrus orchards in the Three Gorges Reservoir Region and established four treatments: clean tillage, white clover mulching, Kentucky bluegrass mulching, and hairy vetch mulching. The study aimed to identify the key factors influencing soil aggregate distribution and stability. The results showed that: ① Under green manure coverage, soil properties and vegetation characteristics showed significant seasonal variations. From April to June, bulk density decreased, while porosity, Soil Organic Carbon (SOC) content, and root weight density increased. White clover, Kentucky bluegrass and hairy vetch coverage increased porosity by 3.47%–5.79%, root weight density by 207.41%–326.38%, and SOC content by 41.36%–59.98%, respectively. ② Under green manure coverage, the distribution and stability of soil aggregates also exhibited distinct seasonal patterns. From April to June, the proportion of macro-aggregates and their stability were the highest. Under the three types of green manure coverage, the proportion of <0.25 mm aggregates decreased by 15.97%–28.43%, while the Mean Weight Diameter (MWD) and Geometrical Mean Diameter (GMD) increased by 19.56%–32.41% and 47.02%–87.75%, respectively. ③ Soil aggregate stability was significantly positively correlated with porosity, organic carbon, vegetation coverage, aboveground biomass, root mass density, and >2 mm aggregate content, while negatively correlated with bulk density and <0.25 mm aggregate content. Redundancy analysis indicated that variations in soil aggregate stability under different green manure covers were primarily influenced by >2 mm aggregate content, aboveground biomass, and soil porosity ($p < 0.05$). Overall, Kentucky bluegrass exhibited the most pronounced improvement in soil quality compared to white clover and hairy vetch, providing theoretical support for soil quality improvement and ground cover management strategies in citrus orchards of the Three Gorges Reservoir Region.

Key words: Three Gorges Reservoir; purple soil; soil organic carbon; soil and water loss; citrus orchard management

中国是世界最大的柑橘生产国,柑橘产业已发展为中国南方地区农业支柱产业之一^[1-2]。三峡库区作为全国第四大柑橘主产区,截至2022年,区内柑橘种植面积已近388万hm²,产量约390万t^[3]。柑橘园作为一种提供较高经济收益的典型农业生态系统易受到人为干扰,频繁的人为干扰破坏土壤团聚体稳定性,增加柑橘园水土流失风险,导致土壤质量和生产能力下降^[4]。绿肥覆盖种植能减少对柑橘园的人为干扰,有效增加土壤有机质含量,提高土壤团聚体稳定性,减少水土流失,改善土壤结构,有效提升土壤质量^[5-6]。因此,在三峡库区柑橘园开展不同绿肥品种对土壤团聚体稳定性影响的研究,对选择适宜的果园绿肥覆盖品种,促进柑橘产业可持续发展意义重大。

团聚体是土壤结构的基本单元,是反映土壤质量及其生产功能的重要指标^[7-8],在改善土壤结构、减少水土流失、提高土壤质量、防止土壤退化等方面有着重要作用^[9]。团聚体的形成和稳定受土壤质地、有机质含量、地表植被特性等因素的影响。在团聚体的形成过程中,黏粒是微团聚体(<0.25 mm)的重要组成

部分, 能促进微团聚体的形成^[10], 有机质作为重要胶结物质^[11], 能将微团聚体和较大的粉粒、沙粒黏合形成大团聚体($>0.25\text{ mm}$), 使团聚体的结构更为稳定^[12-14]。三峡库区紫色土分布广泛, 其成土较快, 结构疏松, 黏粒和有机质含量较低, 团聚体稳定性较差, 致使库区柑橘园极易产生严重的水土流失和土壤退化^[15]。柑橘园绿肥覆盖种植后能显著提升表层土壤有机质含量, 促进团聚体的形成和稳定, 减少水土流失, 提升土壤生产功能^[16]。绿肥植株体和其凋落物增加了地上生物量归还, 促进了土壤中有机质的形成和积累, 是绿肥提升土壤有机质含量的重要途径^[17-18]。有机质含量的提升使土壤胶结作用增强, 提升了大团聚体比例和稳定性, 提高了柑橘园土壤的抗侵蚀性^[19]。绿肥根系的生长能压实包裹土壤颗粒, 根系分泌物能促进土壤中有机质的形成和累积, 并能促进土壤中小型动物的生长^[20], 进而从物理、化学和生物等途径促使微团聚体的形成, 提升大团聚体比例, 促进团聚体的合理分布和稳定^[21]。绿肥生长较快、覆盖好, 能显著增加地表覆盖度, 从而遮挡降雨, 降低雨滴对团聚体的击溅分散作用, 绿肥植株茎秆能减缓地表径流流速, 减小地表径流对土壤颗粒和团聚体的剥蚀搬运能力, 维持团聚体的稳定^[22]。由此可见, 绿肥的生长特性直接影响团聚体的分布和稳定性。然而, 不同绿肥品种在相同季节, 相同绿肥品种在不同季节的生长特性均存在显著差异, 对土壤团聚体分布和稳定性的影响也不尽相同。重庆降雨量大且时间分布不均, 由于降雨是土壤侵蚀的主要驱动因素之一^[23], 致使柑橘园在不同季节的侵蚀状况存在较大差异, 因此需要选择适宜的绿肥品种, 以匹配三峡库区柑橘园侵蚀状况的季节动态变化特征。虽然绿肥覆盖种植对团聚体分布和稳定性的影响效果已得到证实^[24], 但季节动态变化下绿肥覆盖种植对三峡库区柑橘园土壤团聚体分布和稳定性的影响尚不清楚。

鉴于此, 本研究通过在三峡库区忠县橘园进行为期一年的定位试验, 以白花三叶草(*Trifolium repens* L.)、早熟禾(*Poa annua* L.)、毛叶苕子(*Viciavillosa* Roth) 3 种不同绿肥覆盖下的柑橘园系统为研究对象, 以传统清耕处理作为对照, 深入分析不同绿肥覆盖处理下柑橘园土壤理化性质、植被特性和土壤团聚体稳定性的季节变化特征, 明确不同绿肥在季节动态变化条件下对团聚体分布和稳定性的影响及主控因素, 以期选择适宜的果园绿肥覆盖品种, 促进柑橘产业可持续发展提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于重庆市忠县新立镇三岔湾柑橘园($30^{\circ}15'57''\text{N}$, $107^{\circ}37'53''\text{E}$)。忠县位于重庆市中部, 地处三峡库区中心, 属于典型丘陵地貌, 主要土壤类型为紫色土。该区域平均海拔 462.75 m , 为亚热带东南季风区山地气候, 四季分明, 雨量充沛, 日照充足。年平均气温 $17\text{ }^{\circ}\text{C}$, 年平均降水量 $1\ 279\text{ mm}$, 日照时数 $1\ 300\sim 1\ 400\text{ h}$, 日照率 29% , 无霜期 341 d 。

研究区柑橘园内的柑橘树均为 2006 年种植, 2018 年后陆续嫁接, 并种植生草, 果树在 2—3 月施基肥(高氮复合肥)、6—7 月施追肥(复合肥)、9—10 月施追肥(高钾复合肥), 12 月套袋, 次年 1 月采果后施基肥(柑橘皮渣有机肥), 管理方式统一。园内覆盖草种主要以禾本科植物早熟禾、豆科植物白花三叶草、毛叶苕子为主。试验设置白花三叶草、早熟禾、毛叶苕子 3 种不同绿肥覆盖处理, 以传统清耕处理作为对照, 样地基本情况如表 1 所示。其中, 清耕处理样地全年以自然生草为主, 每个月进行一次割草。绿肥覆盖样地在植被生长过程中不额外施肥, 撒播量以全园覆盖为准。白花三叶草、早熟禾为多年生绿肥, 不额外播种。毛叶苕子在秋季播种, 5 月时进入结荚枯萎期。

表 1 处理设置与柑橘园概况

处理	海拔/ m	坡度/ ($^{\circ}$)	坡向	树龄/ a	样地面积/ m^2	果树密度/ (株 $\cdot\text{hm}^{-2}$)	样地株 数/株	黏粒比例/ %	粉粒比例/ %	砂粒比例/ %
清耕	455	8~10	北	18	520	460	24	3.25 ± 0.49	78.72 ± 3.49	17.99 ± 3.88
白花三叶草	457	8~10	北	18	610	460	28	3.28 ± 0.68	77.09 ± 5.05	19.63 ± 5.52
毛叶苕子	465	8~10	北	18	640	460	29	5.05 ± 1.46	78.91 ± 3.76	15.97 ± 3.23
早熟禾	467	8~10	北	18	620	460	28	4.27 ± 0.72	77.77 ± 4.87	17.84 ± 5.34

1.2 试验设计与样品采集

在每个样地分别选取 3 个 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ 且具有代表性的样方, 收集植物样本于塑封袋中带回实验室烘干, 称取干质量用于计算地上生物量; 用 500 cm^3 (直径 6.37 cm 、高度 10 cm) 的环刀取样, 用于测定 $0\sim 10\text{ cm}$ 范围土层的植被根重密度; 每个样方内用 100 cm^3 (直径 5.20 cm 、高度 5.15 cm) 的环刀取样, 用于测定 $0\sim 10\text{ cm}$ 范围土层的土壤容质量。不同样地均采用五点取样法采集 $0\sim 10\text{ cm}$ 范围土层的散土样品, 每个样地采集 2 kg 散土, 散土采集后放入塑封袋带回实验室, 去除石砾和根系后放在室外阴凉通风处自然风干, 用于测定土壤机械组成、土壤有机碳、土壤团聚体。

1.3 样品测试分析

1.3.1 土壤理化性质测定

土壤容质量采用环刀法进行测定, 将采回的 100 cm^3 环刀样品浸泡至饱和, 称取饱和质量, 然后放置于烘箱内 $105\text{ }^\circ\text{C}$ 烘干 24 h , 称取干质量, 计算容质量及孔隙度^[25]。土壤机械组成采用激光粒度仪 (Mastersizer 3000) 进行测定^[26]。土壤有机碳采用重铬酸钾外加热法进行测定^[27]。

水稳性团聚体采用 Yoder 湿筛法测定^[28], 湿筛后取出筛网中各级团聚体土样冲洗放置于铝盒中, 在 $70\text{ }^\circ\text{C}$ 条件下烘干, 称取各粒级团聚体质量。

1.3.2 植被特性测定

1) 植被覆盖度: 在样地内随机或系统布置若干个样方, 测量样方内植被覆盖的面积, 计算出每个样方的植被覆盖度, 然后取平均值作为整体覆盖度^[29]。

2) 地上生物量: 将各样方内采回的植物样品 $60\text{ }^\circ\text{C}$ 烘干, 称取并记录干质量(g)^[30]。

3) 根重密度: 将 500 cm^3 环刀土样用筛网和水流小心清洗, 分离出土壤中的根系。随后将分离出的根系放置在烘干箱中, $60\text{ }^\circ\text{C}$ 烘干至恒质量后, 记录其干质量(mg)^[31]。

1.3.3 土壤团聚体评价

采用平均重量直径 (Mean Weight Diameter, MWD)、几何平均直径 (Geometrical Mean Diameter, GMD)^[32] 和分形维数 (D)^[33] 来评价土壤团聚体的稳定性。

土壤团聚体 MWD 的计算公式为:

$$m_{\text{MWD}} = \sum_{i=1}^n X_i W_i \quad (1)$$

式中: X_i 为 i 粒级团聚体的平均直径(mm); W_i 为 i 粒级团聚体的比例(%)。

土壤团聚体 GMD 的计算公式为:

$$n_{\text{GMD}} = \exp \left[\frac{\left(\sum_{i=1}^n W_i \ln X_i \right)}{\sum_{i=1}^n W_i} \right] \quad (2)$$

土壤团聚体 D 值的计算公式为:

$$\lg \left[\frac{W_{(i \leq X_i)}}{W_0} \right] = (3 - d_D) \lg \left[\frac{X_i}{X_{\max}} \right] \quad (3)$$

式中: X_{\max} 为最大粒级团聚体的平均直径(mm); $W_{(i \leq X_i)}$ 为粒级小于 X_i 的团聚体质量(g); W_0 为土壤各粒级团聚体质量总和(g)。

1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 2010 软件对试验数据进行整理和计算, 采用 SPSS 22.0 软件对数据进行统计分

析。采用单因素方差分析(One-way ANOVA)检验每个月不同处理下各个指标的差异, 显著性水平为($p < 0.05$); 利用 Pearson 相关分析设定置信区间 95%, 对 $|r| > 0.6$ 的强相关性进行 FDR 校正, 对土壤理化性质、植被特性、土壤团聚体组成分布及稳定性等指标相关性进行分析; 主控因素识别通过 RDA 分析(CANOCO 5.0)完成, 使用 Origin 2024 软件进行制图。

2 结果与分析

2.1 不同绿肥覆盖下土壤性质和绿肥植被特性的季节变化特征和差异

如图 1 所示, 同一月份不同品种绿肥种植条件下, 土壤理化性质和植被特性存在显著差异。不同品种绿肥种植条件下, 土壤理化性质表现为: 清耕处理下, 土壤容质量较高, 在研究期内土壤较为紧实, 孔隙度较低。绿肥覆盖下, 土壤容质量在整个生长季呈上升趋势, 但在 4—6 月较低; 孔隙度在整个生长季呈下降趋势, 白花三叶草和早熟禾覆盖下 4—6 月孔隙度较高, 早熟禾在 5 月达到最高值 50.60%, 毛叶苕子覆盖下孔隙度在 1—5 月较高, 枯萎后下降。

清耕处理下, 土壤有机碳质量分数全年呈较低水平。而在绿肥覆盖处理下, 土壤有机碳质量分数在整个生长季呈下降趋势, 其中上半年整体较高。从具体表现来看, 毛叶苕子处理的有机碳质量分数在 1—5 月高于其他两种绿肥覆盖处理, 早熟禾处理则在 6 月达到最高值 18.43 g/kg。

不同品种绿肥种植条件下, 植被生长特性表现为: 清耕处理下, 植被覆盖度、地上生物量、根重密度在研究期内中呈较低水平。绿肥覆盖处理下, 植被特性呈现出明显的季节性波动, 3—6 月植被覆盖度、地上生物量、根重密度较高, 随后呈下降趋势。

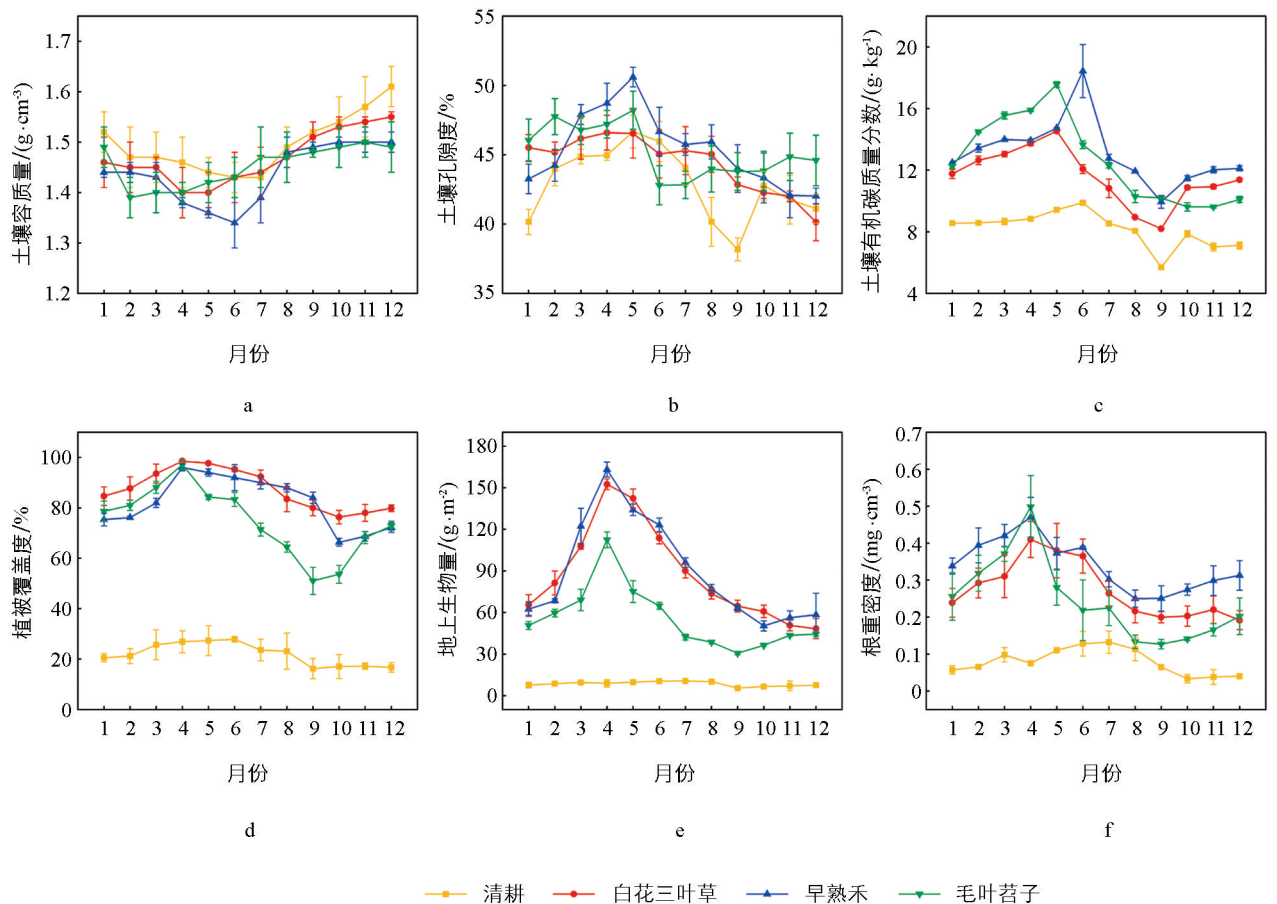
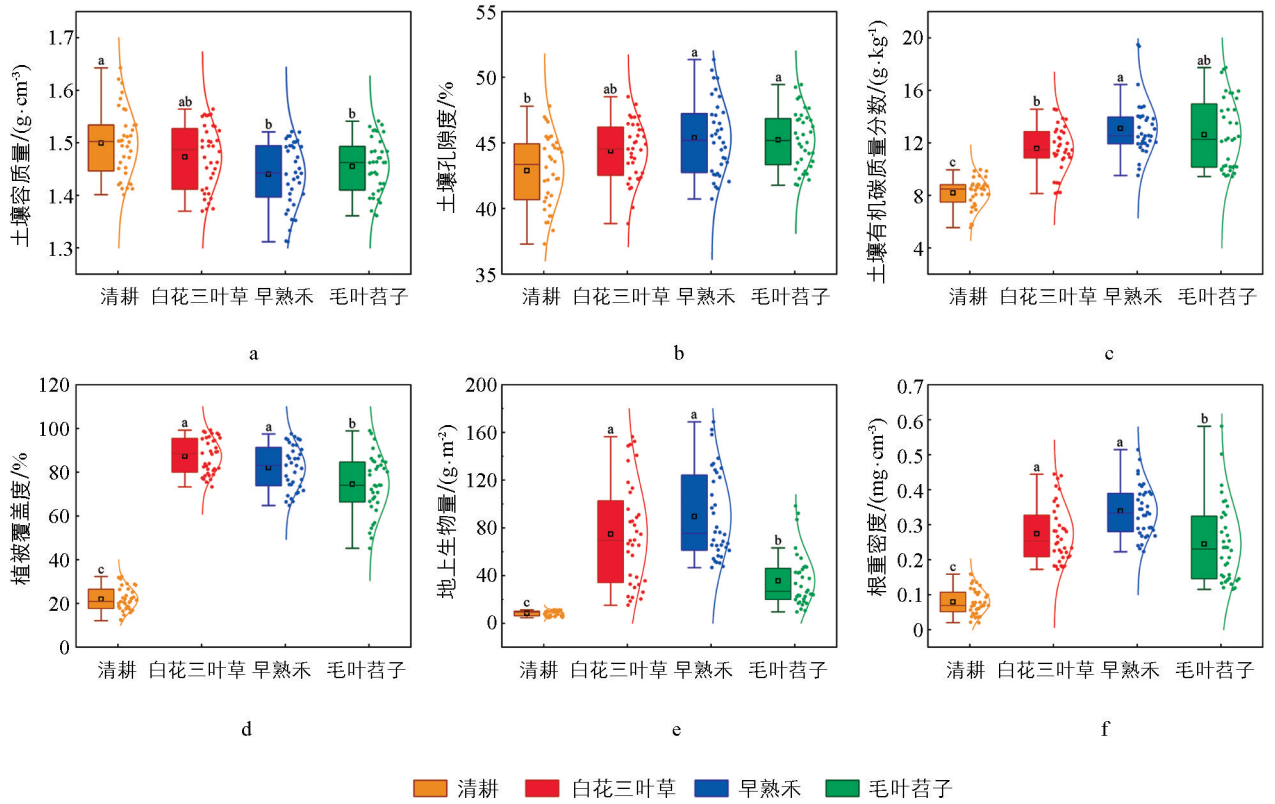


图 1 样地不同时期土壤理化性质和植被特性变化趋势

如图 2 所示,在研究期内不同品种绿肥种植条件下,土壤理化性质和植被特性存在显著差异。不同品种绿肥种植条件下,土壤理化性质表现为:清耕处理下,土壤容质量显著高于绿肥覆盖处理,而土壤孔隙度和土壤有机碳质量分数显著低于绿肥覆盖处理,其中早熟禾、毛叶苕子覆盖下,土壤容质量和孔隙度无显著差异。但在毛叶苕子覆盖下,土壤有机碳质量分数的离散度较大,显示出土壤有机碳的分布存在较大差异。



不同小写字母表示不同处理间差异有统计学意义($p < 0.05$),下同。

图 2 不同绿肥覆盖下土壤物理性质与绿肥植被特征的差异

不同品种绿肥种植条件下,植被生长特性表现为:清耕处理下,植被覆盖度、地上生物量、根重密度均显著低于绿肥覆盖处理,与清耕处理相比,根重密度分别显著提升 70.97%、76.55%、67.47%。

2.2 不同绿肥覆盖下土壤团聚体分布和稳定性的季节变化特征和差异

如图 3 所示,同一月份不同品种绿肥种植条件下,土壤团聚体分布和稳定性存在显著差异。不同品种绿肥种植条件下,土壤团聚体分布表现为:清耕处理下, >2 mm 团聚体、 $0.25 \sim 2$ mm 团聚体比例全年呈较低水平, <0.25 mm 团聚体比例则较高。绿肥覆盖处理下,各级团聚体比例具有显著的季节性波动趋势。4—6 月, >2 mm 团聚体、 $0.25 \sim 2$ mm 团聚体比例较高,随后呈下降趋势,10—12 月回升, <0.25 mm 团聚体比例反之。

不同品种绿肥种植条件下,土壤团聚体稳定性表现为:清耕处理下,MWD、GMD 全年呈较低水平,D 值则较高。绿肥覆盖处理下,各个团聚体稳定性指标具有显著的季节性波动趋势,MWD、GMD 在 4—6 月较高,随后呈下降趋势,D 值在 4—6 月较低,随后呈上升趋势。值得注意的是,在早熟禾覆盖下,MWD、GMD 在 5 月时分别达到最高值 5.89、4.27,D 值达到最低值 2.05。

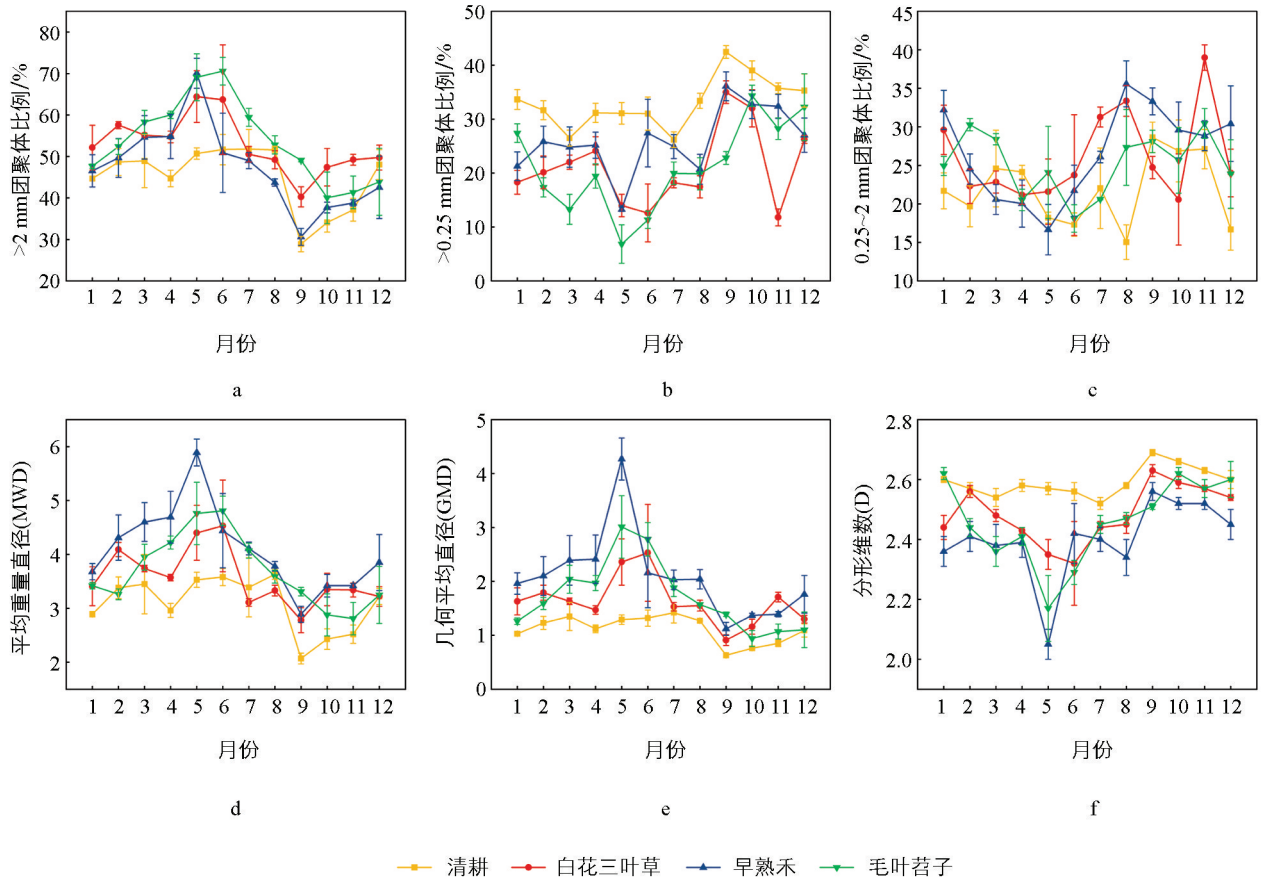


图 3 样地不同时期团聚体分布和稳定性变化趋势

如图 4 所示, 在研究期内不同品种绿肥种植条件下, 土壤团聚体分布和稳定性存在显著差异。绿肥覆盖处理下, >2 mm 团聚体比例显著高于清耕处理, 其中早熟禾覆盖下 >2 mm 团聚体比例显著高于白花三叶草、毛叶苕子覆盖。而在白花三叶草覆盖下 $0.25\sim 2$ mm 团聚体比例较高, 显著高于毛叶苕子和清耕处理。清耕处理下 <0.25 mm 团聚体比例显著高于白花三叶草、早熟禾覆盖, 而毛叶苕子覆盖与清耕处理无显著差异。

清耕处理下, MWD、GMD 均显著低于 3 种绿肥覆盖处理, 而 D 值显著高于有绿肥覆盖处理的样地, 其中早熟禾覆盖下, 其 GMD 显著高于白花三叶草、毛叶苕子覆盖。

2.3 土壤团聚体分布和稳定性的主要影响因素分析

如图 5 所示, Pearson 相关分析结果表明, MWD、GMD 分别与孔隙度、有机碳质量分数、植被覆盖度、地上生物量、根重密度、 >2 mm 团聚体比例呈极显著正相关 ($p < 0.01$), 与 <0.25 mm 团聚体比例呈极显著负相关 ($p < 0.01$)。分形维数(D)与 <0.25 mm 团聚体比例呈极显著正相关 ($p < 0.01$), 与孔隙度、有机碳质量分数、植被覆盖度、地上生物量、根重密度、 >2 mm 团聚体比例呈极显著负相关 ($p < 0.01$)。

综上所述, 土壤团聚体粒径分布和稳定性受孔隙度、有机碳质量分数、植被覆盖度、地上生物量、根重密度等因素的共同影响, 因此采用冗余分析法进一步探究导致不同绿肥覆盖对土壤团聚体分布和稳定性存在差异的主控因素。结果表明, 本研究测定的土壤性质和植被特性可以解释不同植被类型土壤团聚体稳定性 77.44% 的差异, 其中第一轴和第二轴的解释率分别为 77.08% 和 0.36% (图 6)。所有影响因素中, 不同绿肥覆盖下, 土壤团聚体稳定性受主控因子 >2 mm 团聚体比例影响, 其解释率为 56.10% (相对贡献率

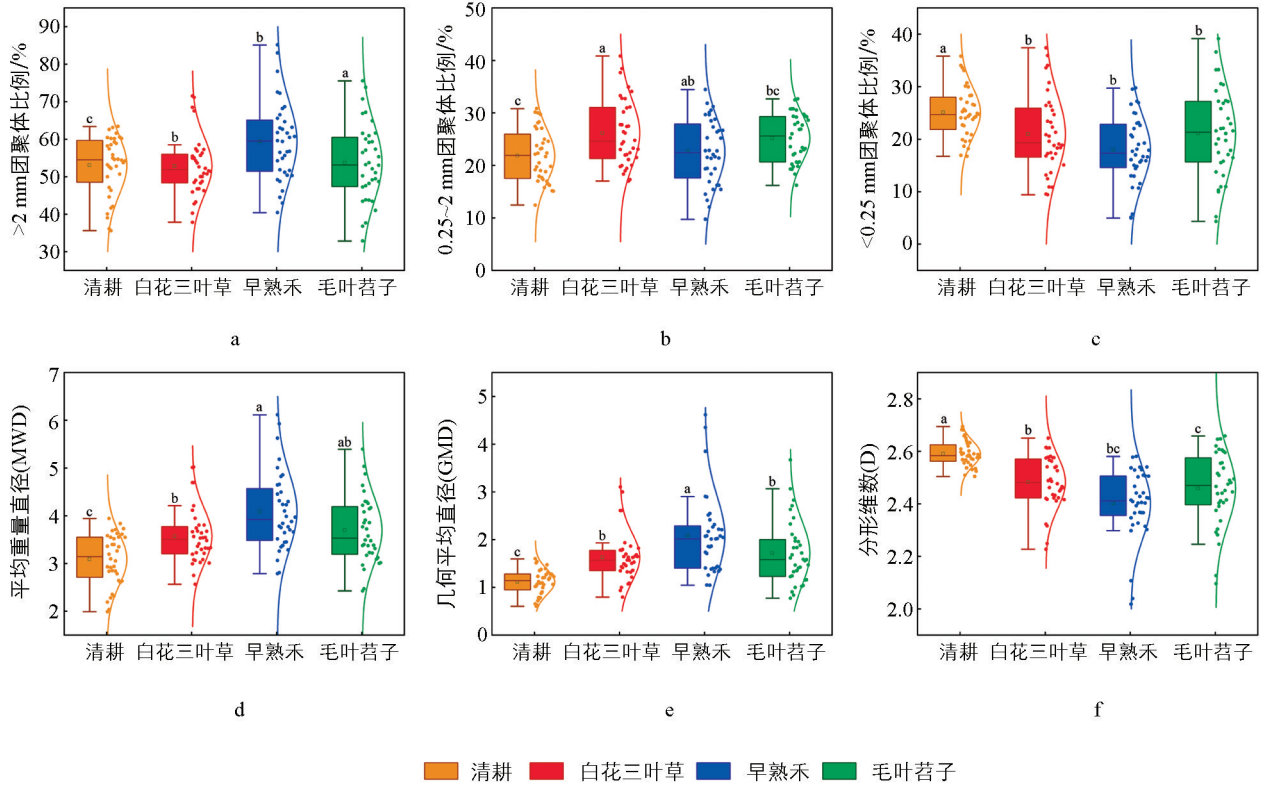


图 4 土壤团聚体分布和稳定性指标的差异

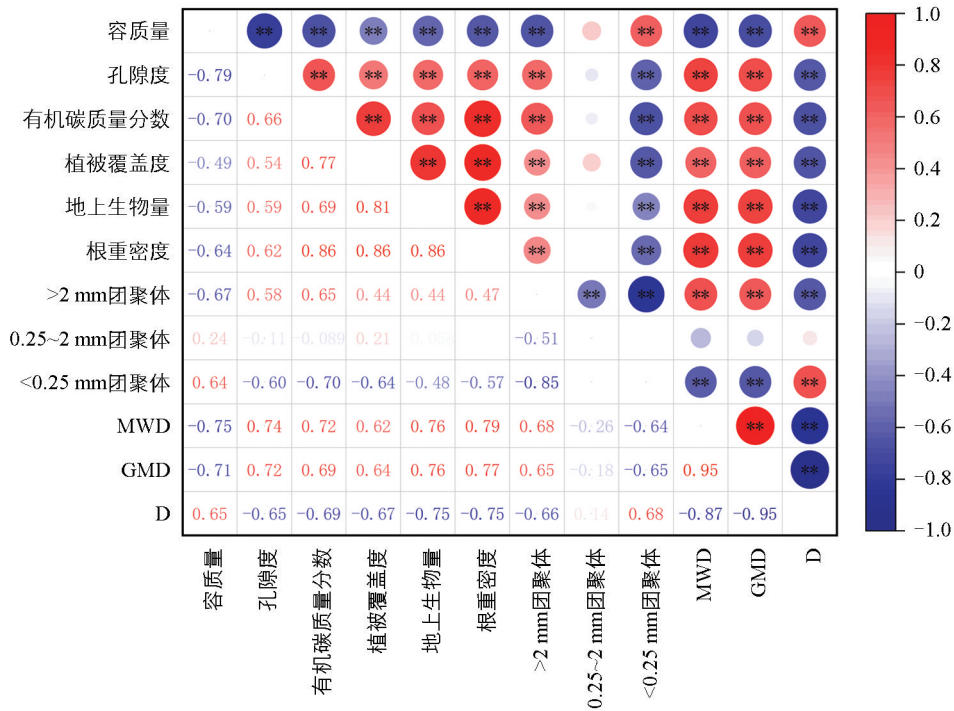
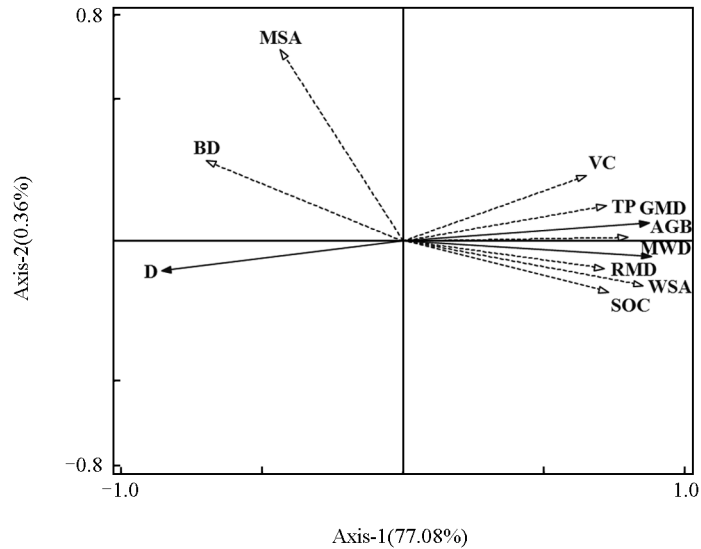


图 5 土壤理化性质、植被特性和土壤团聚体的相关性分析

72.40%), 显著性: $p=0.002$ 。大团聚体(>2 mm)通过机械保护作用增强抗剪强度, 是维持土壤结构稳定的关键。地上生物量(AGB)解释率为 17.20%(相对贡献率 22.20%), 显著性: $p=0.002$ 。孔隙度(TP)解释率为 2.50%(相对贡献率 3.20%), 显著性: $p=0.002$ (表 2)。



BD 和 TP 分别表示土壤容质量、孔隙度; VC、AGB、RMD 分别表示植被覆盖度、地上生物量、根重密度; SOC 为土壤有机碳质量分数; WSA、MSA、FSA 分别表示 >2 mm 团聚体比例、 $0.25\sim 2$ mm 团聚体比例、 <0.25 mm 团聚体比例; MWD、GMD、D 分别表示平均重量直径、几何平均直径、分形维数。

图 6 土壤团聚体稳定性及其影响因素冗余分析结果

表 2 各影响因素对土壤团聚体稳定性的解释率和相对贡献大小

影响因素	解释率	相对贡献大小	<i>p</i> 值
>2 mm 团聚体比例/%	56.10	72.40	0.002
地上生物量/($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$)	17.20	22.20	0.002
孔隙度/%	2.50	3.20	0.002
有机碳质量分数/($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	0.40	0.50	0.13
容质量/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	0.50	0.60	0.08
$0.25\sim 2$ mm 团聚体比例/%	0.40	0.50	0.12
植被覆盖度/%	0.20	0.30	0.27
根重密度/($\text{mg} \cdot \text{cm}^{-3}$)	0.20	0.20	0.31

3 讨论与结论

3.1 讨论

3.1.1 不同绿肥覆盖柑橘园土壤团聚体分布及其稳定性季节变化特征

季节性水热条件的改变,影响着土壤理化性质和植被特性,进而调控土壤有机碳的含量和团聚体的形成。清耕处理下,土壤团聚体稳定性在研究期都呈现较低水平,这是因为清耕处理不仅破坏了地表植被覆盖,还破坏了土壤结构,导致大团聚体破碎,微团聚体比例增加。值得注意的是,在团聚体粒径分布分析中,粒径为 <0.25 mm 的团聚体变化幅度相对较大,这可能是因为在发生土壤侵蚀和人为干预时,较大粒径的土壤团聚体更易受到外力破坏成为微团聚体,而粒径为 $0.25\sim 2$ mm 的团聚体变化幅度则相对稳定^[34]。

在绿肥覆盖下,春季良好的水热条件促进植物的生长发育,表现为地上生物量增加,根系伸长生长,土壤孔隙增大。地上生物量是土壤有机碳持续、间接的来源,作为植物在其生命周期内不断积累的有机物

质,根、茎、叶随着季节变化自然脱落为枯落物,进入土壤中并经过微生物分解成为土壤有机碳^[35-36]。随时间推移,植物根系向土壤源源不断地输送分泌物(如有机酸、可溶性糖)等根际有机质,能够促进土壤有机碳的积累^[37],另外,植物根系通过物理穿插、缠绕作用又将土壤颗粒固结在一起^[38-39],粒径 $>2\text{ mm}$ 的土壤团聚体比例上升,团聚体稳定性也得到提高。

在植物生长旺盛时,植被覆盖度和地上生物量较高,根系活动使得分泌物和有机质输入达到高峰,土壤结构得到有效改善。在夏季 6—8 月,伴随高温而来的还有热胁迫,若土壤水分供应不足,会影响地上植被的蒸腾作用,抑制根系的生长,降低根际生物的活性^[40-41],从而调控土壤有机碳的含量和团聚体的形成。9—11 月,气温逐渐降低,降雨减少,植物生长减缓,根系活动减弱,已形成的土壤团聚体开始进入稳定状态,这时候植被覆盖度降低,地上生物量减少,若缺乏新的有机质投入,部分团聚体可能逐渐破裂或变小,有机碳也会被暴露、分解。

不同绿肥品种对土壤团聚体稳定性的影响存在差异。本研究表明,早熟禾在改善土壤结构的效果上优于白花三叶草和毛叶苕子。在以往的研究中,与豆科绿肥相比,禾本科绿肥虽没有固氮的作用,但其碳氮比较高,提高土壤有机质的效果明显^[42],这与本研究结果一致。不同植物类型具有不同的根系类型(须根系和直根系),这可能是造成不同绿肥品种对土壤团聚体稳定性影响不同的主要原因之一。白花三叶草和毛叶苕子作为直根系豆科植物,根系发达,能够穿插在土壤中形成较多的孔隙,主根随土层深度增加逐渐变细,根系生物量较高^[43];早熟禾作为须根系禾本科植物,细根发达,能在土壤中穿插并与其充分接触,整体分布较为均匀^[44]。赵富王等^[45]研究表明,须根系植物能够显著改善 0~20 cm 表层土土壤结构稳定性。相比于直根系植物,须根能够在 0~20 cm 表层土形成密集的根网,有效增加土壤颗粒之间的物理黏合,防止颗粒分散,从而提高土壤团聚体的稳定性。同时,细根生命周期较短,常年不断更新,这些死亡的根系残体在土壤中分解,成为土壤有机质的重要来源^[46]。

3.1.2 不同绿肥覆盖柑橘园土壤团聚体分布及其稳定性季节变化特征主控因素分析

相关性分析表明,土壤大团聚体比例和团聚体稳定性与土壤孔隙度、有机碳质量分数、植被覆盖度、地上生物量、根重密度等呈极显著相关。长期清耕会导致土壤退化,压实土壤,增加土壤容质量,降低土壤孔隙度,影响果园产量。植被覆盖能够降低容质量,增加土壤孔隙度和土壤黏粒含量^[47]。良好的土壤孔隙结构有利于水分和空气的流通,为植物根系和微生物的活动创造适宜的环境,从而提高土壤团聚体的稳定性。

土壤有机碳是土壤团聚体形成的关键黏合剂,有机碳通过其胶质性增强了土壤颗粒的黏结力,它将微团聚体黏结形成大团聚体,同时植物根系的挤压和微生物菌丝的缠绕也是大团聚体形成的重要途径^[48]。薛欣欣等^[49]研究发现,在海南橡胶园种植豆科绿肥后,0~20cm 土层 SOC 显著提升 19.8%,并且提高了 MWD 和 GMD。薛欣欣等^[49]研究表明,有机碳质量分数较高时,更易促进大团聚体形成,改善土壤的水稳性。另外,团聚体通过物理保护作用将有机碳包裹在复合体中,使其免受土壤酶的攻击和土壤微生物的矿化分解^[50],减少了有机碳的损失。Zhong 等^[51]研究发现,粒径 $>2\text{ mm}$ 的团聚体对有机碳的保护性更强。

地上生物量通常作为土壤有机碳源的储存库,当植物凋零时,残体进入土壤,经过微生物分解成为有机碳^[52]。植被覆盖能够显著增加根重密度和分泌物来促进土壤有机碳的积累,从而提高大团聚体比例和团聚体稳定性。有研究指出,土壤碳库中有 30%~80%的有机碳是通过细根的快速周转和分解提供的^[53],且根系分泌物对土壤有机碳的贡献度比同等质量的地上枯落物高出约 5 倍^[54],尤其是植物细根数量越多,土壤碳的输入量也会越高^[55]。

3.2 结论

1) 绿肥覆盖下土壤性质和植被特性存在显著的季节变化规律, 在 4—6 月时绿肥对土壤结构改良的效果最佳。同时, 与清耕相比, 绿肥覆盖显著地增加土壤孔隙度、根重密度和有机碳质量分数, 其中早熟禾效果最佳。

2) 绿肥覆盖下土壤团聚体分布和稳定性存在显著的季节变化规律, 在 4—6 月时大团聚体比例最高, 稳定性最强。同时, 与清耕相比, 绿肥覆盖处理下的 >2 mm 团聚体比例、MWD 和 GMD 显著增加, <0.25 mm 团聚体比例与 D 值显著降低, 其中早熟禾提升效果最为显著。

3) 土壤团聚体稳定性受土壤性质与植被因子综合影响, 其中 MWD 和 GMD 与孔隙度、有机碳、植被覆盖度呈极显著正相关。 >2 mm 团聚体比例、地上生物量和孔隙度是影响团聚体稳定性的主要因子, 其对差异的解释率分别为 56.10%、17.20% 和 2.50%。

参考文献:

- [1] 王刘坤, 祁春节. 中国柑橘主产区的区域比较优势及其影响因素研究——基于省级面板数据的实证分析 [J]. 中国农业资源与区划, 2018, 39(11): 121-128.
- [2] 毛海欧, 杨楠楠, 祁春节, 等. 中国柑橘产业空间演化特征及其影响因素 [J]. 经济地理, 2024, 44(6): 146-153.
- [3] 重庆市农业农村委员会. 三峡柑橘 [EB/OL]. (2023-07-10) [2025-03-01]. https://nyncw.cq.gov.cn/zwx_x_161/rdt/202307/t20230710_12136792.html.
- [4] ZHENG J Y, ZHAO J S, SHI Z H, et al. Soil Aggregates Are Key Factors that Regulate Erosion-Related Carbon Loss in Citrus Orchards of Southern China: Bare Land Vs. Grass-Covered Land [J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2021, 309: 107254.
- [5] GAUDARÉ U, KUHNERT M, SMITH P, et al. Soil Organic Carbon Stocks Potentially at Risk of Decline with Organic Farming Expansion [J]. Nature Climate Change, 2023, 13(7): 719-725.
- [6] 雍顺圆, 陈倩, 傅豪, 等. 生草栽培对大雅柑生长及结果的影响 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2025, 47(5): 63-73.
- [7] VOGEL H J, BALSEIRO-ROMERO M, KRAVCHENKO A, et al. A Holistic Perspective on Soil Architecture Is Needed as a Key to Soil Functions [J]. European Journal of Soil Science, 2022, 73(1): e13152.
- [8] SIX J, ELLIOTT E T, PAUSTIAN K. Soil Macroaggregate Turnover and Microaggregate Formation: A Mechanism for C Sequestration under No-Tillage Agriculture [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2000, 32(14): 2099-2103.
- [9] DENG L, LIU G B, SHANGGUAN Z P. Land-Use Conversion and Changing Soil Carbon Stocks in China's 'Grain-for-Green' Program: A Synthesis [J]. Global Change Biology, 2014, 20(11): 3544-3556.
- [10] KRAUSE L, RODIONOV A, SCHWEIZER S A, et al. Microaggregate Stability and Storage of Organic Carbon Is Affected by Clay Content in Arable Luvisols [J]. Soil and Tillage Research, 2018, 182: 123-129.
- [11] 钟宇健, 何烽, 韩光中, 等. 还林树种对紫色土团聚体分布和稳定性的影响 [J]. 水土保持学报, 2024, 38(6): 284-292, 301.
- [12] BARBERIS E, MARSAN F A, BOERO V, et al. Aggregation of Soil Particles by Iron Oxides in Various Size Fractions of Soil B Horizons [J]. Journal of Soil Science, 1991, 42(4): 535-542.
- [13] 王文鑫, 王文龙, 郭明明, 等. 黄土高原沟壑区植被恢复对沟头土壤团聚体特征及土壤可蚀性的影响 [J]. 中国农业科学, 2019, 52(16): 2845-2857.
- [14] RILLIG M C, MULLER L A, LEHMANN A. Soil Aggregates as Massively Concurrent Evolutionary Incubators [J]. The ISME Journal, 2017, 11(9): 1943-1948.
- [15] ZHONG S Q, HAN Z, DU J, et al. Relationships between the Lithology of Purple Rocks and the Pedogenesis of Purple Soils in the Sichuan Basin, China [J]. Scientific Reports, 2019, 9: 13272.

- [16] 闫桂苑, 董文斌, 李忠义, 等. 绿肥覆盖对果园土壤团聚体及有机碳组分的影响 [J]. 应用生态学报, 2024, 35(12): 3427-3434.
- [17] 谭学进, 穆兴民, 高鹏, 等. 黄土区植被恢复对土壤物理性质的影响 [J]. 中国环境科学, 2019, 39(2): 713-722.
- [18] 朱平宗, 张峰, 冯滔, 等. 三峡库区小流域典型植物群落水源涵养功能 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2025, 47(2): 133-144.
- [19] BLANKINSHIP J C, FONTE S J, SIX J, et al. Plant versus Microbial Controls on Soil Aggregate Stability in a Seasonally Dry Ecosystem [J]. *Geoderma*, 2016, 272: 39-50.
- [20] SIX J, BOSSUYT H, DEGRYZE S, et al. A History of Research on the Link between (Micro) Aggregates, Soil Biota and Soil Organic Matter Dynamics [J]. *Soil and Tillage Research*, 2004, 79(1): 7-31.
- [21] 刘均阳, 周正朝, 苏雪萌, 等. 植物根系对土壤团聚体形成作用机制研究回顾 [J]. 水土保持学报, 2020, 34(3): 267-273, 298.
- [22] WANG L, SHI Z H, WANG J, et al. Rainfall Kinetic Energy Controlling Erosion Processes and Sediment Sorting on Steep Hillslopes: A Case Study of Clay Loam Soil from the Loess Plateau, China [J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 512: 168-176.
- [23] 靳军英, 王林, 金铁生, 等. 基于 REOF 的不同量级降雨侵蚀力时空变化——以重庆市为例 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2025, 47(1): 163-177.
- [24] YANG Z P, XU M G, ZHENG S X, et al. Effects of Long-Term Winter Planted Green Manure on Physical Properties of Reddish Paddy Soil under a Double-Rice Cropping System [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2012, 11(4): 655-664.
- [25] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1978.
- [26] 刘雪梅, 黄元仿. 应用激光粒度仪分析土壤机械组成的实验研究 [J]. 土壤通报, 2005, 36(4): 579-582.
- [27] 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.
- [28] 王秀颖, 高晓飞, 刘和平, 等. 土壤水稳性大团聚体测定方法综述 [J]. 中国水土保持科学, 2011, 9(3): 106-113.
- [29] 贾坤, 姚云军, 魏香琴, 等. 植被覆盖度遥感估算研究进展 [J]. 地球科学进展, 2013, 28(7): 774-782.
- [30] 张娜, 梁一民. 黄土丘陵区天然草地地下/地上生物量的研究 [J]. 草业学报, 2002, 11(2): 72-78.
- [31] WANG H, ZHANG G H, LI N N, et al. Soil Erodibility Influenced by Natural Restoration Time of Abandoned Farmland on the Loess Plateau of China [J]. *Geoderma*, 2018, 325: 18-27.
- [32] 马群, 白炜, 牟国旭, 等. 增温对高寒沼泽草甸土壤团聚体稳定性及碳氮含量的影响 [J]. 草地学报, 2025, 33(2): 547-555.
- [33] 杨培岭, 罗远培, 石元春. 用粒径的重量分布表征的土壤分形特征 [J]. 科学通报, 1993, 38(20): 1896-1899.
- [34] NICHOLS K A, HALVORSON J J. Roles of Biology, Chemistry and Physics in Soil Macroaggregate Formation and Stabilization [J]. *The Open Agriculture Journal*, 2013, 7(1): 107-117.
- [35] FENG J G, HE K Y, ZHANG Q F, et al. Changes in Plant Inputs Alter Soil Carbon and Microbial Communities in Forest Ecosystems [J]. *Global Change Biology*, 2022, 28(10): 3426-3440.
- [36] ZHOU P, ZHANG L, QI S. Plant Diversity and Aboveground Biomass Interact with Abiotic Factors to Drive Soil Organic Carbon in Beijing Mountainous Areas [J]. *Sustainability*, 2022, 14(17): 10655.
- [37] KAVDIR Y, SMUCKER A J M. Soil Aggregate Sequestration of Cover Crop Root and Shoot-Derived Nitrogen [J]. *Plant and Soil*, 2005, 272(1): 263-276.
- [38] DEMENOIS J, REY F, IBANEZ T, et al. Linkages between Root Traits, Soil Fungi and Aggregate Stability in Tropical Plant Communities along a Successional Vegetation Gradient [J]. *Plant and Soil*, 2018, 424(1): 319-334.
- [39] GALLOWAY A F, PEDERSEN M J, MERRY B, et al. Xyloglucan Is Released by Plants and Promotes Soil Particle Aggregation [J]. *New Phytologist*, 2018, 217(3): 1128-1136.
- [40] KHAN N, ALI S, SHAHID M A, et al. Insights into the Interactions among Roots, Rhizosphere and Rhizobacteria for Improving Plant Growth and Tolerance to Abiotic Stresses: A Review [J]. *Cells*, 2021, 10(6): 1551.

- [41] GEORGE T S, BULGARELLI D, CARMINATI A, et al. Bottom-Up Perspective-The Role of Roots and Rhizosphere in Climate Change Adaptation and Mitigation in Agroecosystems [J]. *Plant and Soil*, 2024, 500(1): 297-323.
- [42] 李子双, 廉晓娟, 王薇, 等. 我国绿肥的研究进展 [J]. *草业科学*, 2013, 30(7): 1135-1140.
- [43] BRTNICKY M, KINTL A, HAMMERSCHMIEDT T, et al. Clover Species Specific Influence on Microbial Abundance and Associated Enzyme Activities in Rhizosphere and Non-Rhizosphere Soils [J]. *Agronomy*, 2021, 11(11): 2214.
- [44] 桑凯新, 胡淦林, 黄超, 等. 黄河河岸带 5 种植物类型根系结构特征对土壤渗透性的影响 [J]. *中国水土保持科学*, 2020, 18(5): 1-8.
- [45] 赵富王, 王宁, 苏雪萌, 等. 黄土丘陵区主要植物根系对土壤有机质和团聚体的影响 [J]. *水土保持学报*, 2019, 33(5): 105-113.
- [46] 麻虹宇, 李保国, 蔡斌, 等. 干旱半干旱区地表覆盖对土壤风蚀的影响 [J]. *水土保持研究*, 2023, 30(2): 29-35.
- [47] CELIK I. Land-Use Effects on Organic Matter and Physical Properties of Soil in a Southern Mediterranean Highland of Turkey [J]. *Soil and Tillage Research*, 2005, 83(2): 270-277.
- [48] WANG Y D, WANG Z L, ZHANG Q Z, et al. Long-Term Effects of Nitrogen Fertilization on Aggregation and Localization of Carbon, Nitrogen and Microbial Activities in Soil [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 624: 1131-1139.
- [49] 薛欣欣, 王文斌, 茶正早, 等. 不同绿肥覆盖对幼龄橡胶园土壤团聚体及其有机碳分布的影响 [J/OL]. *环境科学*, 2025: 1-13. (2025-02-07) [2025-03-01]. <https://link.cnki.net/doi/10.13227/j.hjlx.202409244>.
- [50] LEHMANN J, KINYANGI J, SOLOMON D. Organic Matter Stabilization in Soil Microaggregates: Implications from Spatial Heterogeneity of Organic Carbon Contents and Carbon Forms [J]. *Biogeochemistry*, 2007, 85(1): 45-57.
- [51] ZHONG Y, YAN W M, SHANGGUAN Z P. Soil Carbon and Nitrogen Fractions in the Soil Profile and Their Response to Long-Term Nitrogen Fertilization in a Wheat Field [J]. *Catena*, 2015, 135: 38-46.
- [52] KÄSTNER M, MILTNER A, THIELE-BRUHN S, et al. Microbial Necromass in Soils-Linking Microbes to Soil Processes and Carbon Turnover [J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2021, 9: 756378.
- [53] RUESS R W, HENDRICK R L, BURTON A J, et al. Coupling Fine Root Dynamics with Ecosystem Carbon Cycling in Black Spruce Forests of Interior Alaska [J]. *Ecological Monographs*, 2003, 73(4): 643-662.
- [54] JACKSON R B, LAJTHA K, CROW S E, et al. The Ecology of Soil Carbon: Pools, Vulnerabilities and Biotic and Abiotic Controls [J]. *Annual Review of Ecology, Evolution and Systematics*, 2017, 48: 419-445.
- [55] STOVER D B, DAY F P, DRAKE B G, et al. The Long-Term Effects of CO₂ Enrichment on Fine Root Productivity, Mortality and Survivorship in a Scrub-Oak Ecosystem at Kennedy Space Center, Florida, USA [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2010, 69(2): 214-222.