

生草覆盖对经果林土壤团聚体稳定性的影响

闫桂苑¹, 董文斌², 韦彩会², 张宇亭³, 俞月凤²,

梁海², 李忠义², 唐红琴², 莫永诚², 邓羽松¹, 何铁光²

(1. 广西大学 林学院, 广西南宁 530004; 2. 广西农业科学院 农业资源与环境研究所, 广西耕地保育重点实验室, 广西南宁 530007; 3. 西南大学 资源环境学院, 重庆 400715)

摘要: [目的] 探究不同生草覆盖对经果林土壤团聚体稳定性的影响, 揭示经果林土壤性质及团聚体对生草覆盖的响应及其协同调控机制。[方法] 选取光叶苕子(T_1)、肥田萝卜(T_2)、平托花生(T_3)及光叶苕子、平托花生和宽叶雀稗混播(T_4)的经果林土壤为研究对象, 应用湿筛法和 Le Bissonnais 法分析生草覆盖对土壤团聚体稳定性的影响。[结果] ①湿筛处理下, 生草覆盖显著提高了水稳性大团聚体(>0.25 mm)的含量, 表现为 $T_3(83.47\%) > T_1(82.20\%) > T_4(79.98\%) > T_2(76.75\%) > CK(74.30\%)$, 且平均重量直径(MWD)和几何平均直径(GMD)较清耕显著提升。②Le Bissonnais 法处理下, 快速湿润(FW)对 >2 mm 粒径团聚体崩解程度最大, 慢速湿润(SW)对团聚体的破坏作用最小, <0.25 mm 粒级占比为 15.02%~23.81%, 而预湿润后扰动(WS)的稳定性指标增幅最高。团聚体稳定性表现为 $SW > WS > FW$ 。相对消散指数(RSI)和机械破碎指数(RMI)差异显著, $RSI > RMI$, 其中 T_2 处理的 RSI 值最小, T_3 处理的 RMI 值最小。③干筛法和湿筛法处理下的土壤分形维数平均值分别为 1.89 和 2.46, 不同生草处理下的分形维数(D)、结构破坏率(PAD)和不稳定团粒指数(E_{LT})存在显著差异, T_1 处理的 PAD 值较 CK 降低了 16.25%, 不同处理均显著降低了 E_{LT} 值。相关性分析和通径分析表明, 土壤团聚体稳定性受总孔隙度、毛管孔隙度、容重、土壤有机碳和机械组成的综合影响, 其中土壤有机碳是关键因素。[结论] 生草覆盖通过减弱暴雨或灌溉冲击对团聚体的消散破坏作用, 显著提升经果林土壤团聚体稳定性, 优化土壤结构。其中, 肥田萝卜和平托花生两种生草覆盖方式在实践中表现出显著优势。

关键词: Le Bissonnais 法; 水稳性团聚体; 生草覆盖; 团聚体稳定性

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2025)04-0029-11

中图分类号: S157.4

文献参数: 闫桂苑, 董文斌, 韦彩会, 等. 生草覆盖对经果林土壤团聚体稳定性的影响[J]. 水土保持通报, 2025, 45(4): 29-39. Yan Guiwan, Dong Wenbin, Wei Caihui, et al. Effects of grass cover on stability of soil aggregates in economic fruit forests [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(4): 29-39. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2025.04.022; CSTR: 32312.14.stbctb.2025.04.022.

Effects of grass cover on stability of soil aggregates in economic fruit forests

Yan Guiwan¹, Dong Wenbin², Wei Caihui², Zhang Yuting³, Yu Yuefeng²,

Liang Hai², Li Zhongyi², Tang Hongqin², Mo Yongcheng², Deng Yusong¹, He Tieguaung²

(1. College of Forestry, Guangxi University, Nanning, Guangxi 530004, China; 2. Institute of Agricultural Resources and Environment, Guangxi Academy of Agricultural Sciences; Guangxi Key Laboratory of Cultivated Land Conservation, Nanning, Guangxi 530007, China; 3. College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China)

Abstract: [Objective] The effects of different grass coverage on the stability of soil aggregates in economic fruit forests were explored to reveal the responses of soil properties and aggregates to grass cover in these forest forests and their coordinated regulation mechanisms. [Methods] Soils of economic fruit forests with *Vicia villosa* (T_1), *Raphanus sativus* (T_2), *R. sativus* (T_3), and mixed sowing of *V. villosa*, *R. sativus*, and *Paspalum wettsteinii* (T_4), were analyzed using the wet sieving and Le Bissonnais methods to assess the effects of grass mulching on

收稿日期: 2025-03-14

修回日期: 2025-04-13

采用日期: 2025-04-14

资助项目: 国家绿肥产业技术体系建设项目(CARS-22); 国家重点研发计划子课题“喀斯特坡耕地水土流失生态阻控关键技术”(2023YFD1902801); 科技先锋队“强农富民”“6个一”专项行动(桂农科盟 202413)

第一作者: 闫桂苑(2001—), 女(汉族), 广西壮族自治区桂林市人, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀与养分研究。Email: wandeline0322@outlook.com。

通信作者: 董文斌(1983—), 男(瑶族), 广西壮族自治区钟山县人, 硕士, 副研究员, 主要从事绿肥品种选育、生产及利用研究。Email: dongwenbin@gxaas.net。

the stability of soil aggregates. [Results] ① Under the wet sieving treatment, grass mulching significantly increased the content of water-stable macroaggregates (>0.25 mm), with T_3 (83.47%) $> T_1$ (82.20%) $> T_4$ (79.98%) $> T_2$ (76.75%) $>$ control (CK; 74.30%), showing notable increases. Additionally, both the mean weight and geometric mean diameters were significantly higher in the grass-mulched treatments compared to those with clearing tillage. ② Under the Le Bissonnais method, fast wetting (FW) caused the greatest disintegration of aggregates larger than 2 mm, whereas slow wetting (SW) had the least destructive effect, with the percentage of aggregates smaller than 0.25 mm ranging from 15.02% to 23.81%. The highest increase in stability indices was observed with pre-wetting followed by disturbance (WS). The aggregate stability followed the order: SW $>$ WS $>$ FW. Significant differences were observed between relative slaking index (RSI) and relative mechanical index (RMI), with RSI being greater than RMI. Among the treatments, the T_2 treatment had the smallest RSI value, whereas the T_3 treatment had the smallest RMI value. ③ The mean soil fractal dimension values under dry and wet sieving treatments were 1.89 and 2.46, respectively. Significant differences were observed in fractal dimension (D), structural damage rate (PAD), and unstable aggregates index (E_{LT}) across different raw herbaceous treatments. The PAD value of the T_1 treatment was reduced by 16.25% compared with that of the CK, and all the treatments of T_1 — T_4 significantly reduced the E_{LT} value. Correlation and pathway analyses indicated that the stability of soil aggregates was affected by total porosity, capillary porosity, bulk weight, soil organic carbon, and mechanical composition, among which soil organic carbon was the key factor. [Conclusion] Grass mulching significantly enhanced the stability of soil aggregates and optimized soil structure in an economic fruit forest by attenuating the dissipative damage caused by heavy rainfall or irrigation on aggregates. Among these, two grass mulching treatments, *R. sativus* and *R. sativus*, showed significant advantages in practice.

Keywords: Le Bissonnais method; water-stable aggregates; grass cover; aggregates stability

土壤稳定性与其团聚体结构密切相关。土壤团聚体通过有机或无机物质胶结依次形成微聚集体 (<0.25 mm) 和大团聚体 (>0.25 mm), 成为土壤的基本结构单位^[1]。团聚体不仅是土壤物质循环和能量流动的核心载体, 还能通过其孔隙结构调控土壤有机质、微生物活性及功能表现。稳定的团聚体能够有效保护有机碳免于降解, 减少雨滴溅蚀对土壤结构的破坏^[2], 并与土壤理化性质^[3]、固碳能力^[4]、养分循环^[5]以及抗侵蚀能力^[2]直接关联。通常粒径 >0.25 mm 团聚体被认为是较理想的团聚体, 具有较好的蓄水保墒能力和通气性。然而, 其他粒径团聚体在土壤结构和功能中也具有重要作用。因此, 通过分析平均重量直径、分形维数、团聚体破坏率以及土壤不稳定团粒指数等指标来评估团聚体的分布特征及其稳定性, 可全面揭示土壤团聚体结构特征。土壤团聚体稳定性不仅反映了土壤中水、气体和养分的储存与转移效率, 还与土壤肥力、植物生长和生态系统平衡密切相关^[6]。研究影响土壤团聚体结构稳定性的因素, 对于提升土壤质量, 优化管理措施至关重要。

经果林作为中国农业的重要组成部分, 产生巨大的经济效益^[7]。然而, 大规模的集约化管理和常年耕作导致土地退化、耕地面积减少、生产力下降以及泥沙淤积等问题, 这些生态问题已成为农业经济

发展的主要障碍^[8]。Wei Binmeng 等^[9]研究发现渭北干旱高原的苹果园中, 土壤团聚体稳定性在土壤压实过程中起着重要作用。生草覆盖作为经果林的一项节水保墒措施, 可有效稳定土壤结构, 协调水肥气热供应^[10]。生草覆盖通过地上遮荫、增加地上和地下生物量、改善土壤结构和根系活化成分, 影响土壤有机碳、全氮等养分和土壤团聚体稳定性^[11]。近年来, 关于土壤团聚体稳定性的研究方法不断丰富, 其中湿筛法和 Le Bissonnais (LB) 法是两种常用的方法。湿筛法主要通过机械振动来测定土壤团聚体的水稳定性, 而 LB 法则涉及土壤团聚体分解的几种机制(消散作用、机械扰动和差异性黏粒膨胀), 包括快速湿润、预湿润后扰动和慢速湿润 3 种试验, 分别代表了不同的降雨条件(暴雨、机械扰动和小雨)。已有研究显示了 LB 方法在各土壤类型中的适用性^[12], 不仅可以从团聚体崩解机制方面对土壤结构进行区别评价, 还能追溯致使土壤结构破坏的作用来源^[13]。然而, 目前对于经果林生草覆盖下土壤团聚体稳定性的研究多集中于单一方法的应用, 缺乏对不同方法结果的综合比较和分析。深入研究土壤团聚体的稳定性特征, 对于全面了解土壤的形成演变规律和生态功能, 尤其对改善经果林土壤结构、促进土壤生态系统健康和可持续发展具有重要的理论和应用价值。

本研究采用湿筛法和 Le Bissonnais(LB)法,系统研究经果林生草覆盖下土壤团聚体的稳定性特征,旨在探讨经果林生草覆盖下土壤团聚体稳定性的多维度特征,以及不同方法在评价土壤团聚体稳定性方面的优势和局限性,期望能够为经果林土壤的可持续利用和生态环境保护提供理论支持和技术指导,进一步推动土壤科学在生态系统服务领域的应用与发展。

1 材料与方法

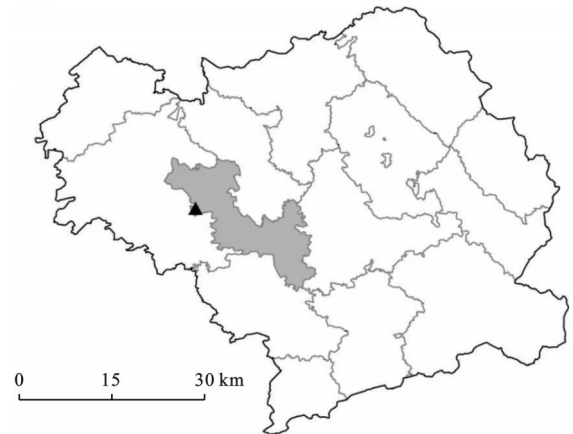
1.1 研究区概况

研究区位于广西农业科学院武鸣里建基地内(22°59'58"—23°33'16"N, 107°49'26"—108°37'22"E),如图1所示。供试经果林的柑橘品种为沃柑(*Citrus sinensis*×*C. reticulata*)。该区地处亚热带季风气候区,光热充足,雨量充沛,夏湿冬干,植物种类繁多。年平均气温21.7℃,年降水量1100~1700 mm,年平均相对湿度80%,气候温和,霜少无雪。土壤类型主要为红壤。

1.2 样品采集

试验区果树自2020年3月种植以来,生长态势良好。所有果树施肥量均参考当地果农施肥习惯,其余管理方式均保持一致,每小区6株果树,长势一致,株距2 m,行距4 m,小区规格为4 m×4 m。试验小区位于平地,地形平坦。试验设置4种生草覆盖处理:T₁(光叶苕子)、T₂(肥田萝卜)、T₃(平托花生)和T₄(光叶苕子+肥田萝卜+宽叶雀稗混播),以清耕处理(CK)为对照。所有绿肥均从2020年10月开始

播种。光叶苕子、肥田萝卜、宽叶雀稗于每年10月在果树行间进行撒播并覆盖地膜以保证发芽率,平托花生于2020年种植至今,各植被均为自然枯死后定点覆盖在地面上,在植物生长过程中未使用过肥料。试验采用完全随机区组排列,每处理3个重复,每行设置垄沟。所有生草植物均按需水量灌溉,其他管理方法相同。



▲ 广西农业科学院武鸣里建基地 ■ 广西—东盟经济技术开发区

图1 研究区在南宁市武鸣区的位置示意图

Fig.1 Schematic diagram of location of study area at Wuming District in Nanning City

于2024年12月采集土壤样品。在试验小区滴水线内随机设置土壤采样点,去除表面凋落物后,采集每小区表层(0—20 cm)土壤样品和环刀土样,共得到30个土壤样品,放入密封袋中带回室内。将其中15个散装土壤样品沿自然结构掰开,过5 mm筛,挑出动植物残体和小石块等,在室内风干后进行样品分析。样地土壤基本理化性质如表1所示^[4]。

表1 不同生草覆盖处理下的土壤基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of soil under different grass cover treatments

处理	pH值	容重/ (g·cm ⁻³)	饱和导水率/ (cm·s ⁻¹)	总孔隙 度/%	毛管孔隙 度/%	非毛管孔 隙度/%	土壤有机碳/ (g·kg ⁻¹)	土壤机械组成/%		
								黏粒	粉粒	砂粒
CK	5.63 ^c	1.38 ^a	0.89 ^c	46.84 ^c	34.98 ^b	11.86 ^{bc}	15.66 ^c	37.6 ^b	35.6 ^a	26.8 ^b
T ₁	5.70 ^{bc}	1.30 ^a	0.88 ^c	47.96 ^c	37.09 ^{ab}	10.87 ^c	21.82 ^a	38.0 ^b	33.0 ^a	27.7 ^a
T ₂	5.93 ^{ab}	1.27 ^a	1.94 ^a	52.91 ^{ab}	36.25 ^{ab}	16.66 ^{ab}	15.79 ^c	39.0 ^b	34.9 ^a	26.2 ^b
T ₃	6.06 ^a	1.33 ^a	1.42 ^{ab}	49.75 ^b	37.26 ^a	12.49 ^b	18.02 ^b	40.8 ^a	36.7 ^a	22.5 ^c
T ₄	5.84 ^b	1.28 ^a	1.24 ^b	53.05 ^a	35.83 ^{ab}	17.22 ^a	19.19 ^{ab}	39.9 ^b	35.5 ^a	24.6 ^b

注:①CK为清耕;T₁为光叶苕子覆盖;T₂为肥田萝卜覆盖;T₃为平托花生覆盖;T₄为混合覆盖。②不同小写字母表示不同处理之间存在显著差异($p < 0.05$)。下同。

1.3 土壤团聚体稳定性分析

土壤团聚体稳定性利用干筛法、湿筛法和LB法进行测定。采用干筛法测得各粒径范围团聚体占土壤总量的百分比,将原状土壤自然风干后沿自然裂隙轻掰成直径约1 cm的小块,依次通过孔径为2,1和

0.25 mm的土壤套筛,分别称重并计算。水稳性团聚体采用Elliott土壤团聚体湿筛法测定^[4],按干筛比例配成50 g样品,放入土壤团粒分析仪(DM200-V,德码信息技术有限公司,上海)套筛中,套筛孔径自上而下依次为2,1,0.25 mm,上下振荡(振幅为38 mm,

30次/min),将各粒径团聚体转移至铝盒,烘干至恒重后称量。采用LB法研究土壤团聚体在3种处理下的破坏机制,选取3~5 mm土壤团聚体烘干至恒重,使样品初始含水量一致。分别将5 g样品通过快速湿润(FW)、预湿润振荡(WS)、慢速湿润(SW)3种处理,转入铝盒中烘干至恒重,然后通过2,1,0.25 mm的土壤套筛,称量各粒级团聚体的质量。

1.4 数据处理与分析

(1) 团聚体平均重量直径(MWD)和几何平均直径(GMD)。计算公式为^[13]

$$MWD = \sum_{i=1}^n x_i w_i \quad (1)$$

$$GMD = \exp \left(\frac{\sum_{i=1}^4 (w_i \times \ln x_i)}{\sum_{i=1}^4 (w_i)} \right) \quad (2)$$

式中: x_i 为任一粒径范围内土壤平均直径(mm); w_i 为第*i*个粒级团聚体的百分含量。

(2) 土壤团聚体分形维数(D)。计算公式为^[14]

$$D = 3 - \frac{\lg(W_i/m)}{\lg(X_i/X_{\max})} \quad (3)$$

式中: W_i 为粒径小于 X_i 的土壤团聚体累计重量(g); m 为干筛或湿筛土样的总质量(g); X_i 为第*i*个粒级团聚体的平均粒径(mm); X_{\max} 是最大粒级团聚体的平均直径(mm)。

(3) 结构体破坏率(PAD)。计算公式为^[15]

$$PAD = \frac{DR_{>0.25} - WR_{>0.25}}{DR_{>0.25}} \times 100\% \quad (4)$$

式中: $DR_{>0.25}$ 为风干团聚体中 >0.25 mm粒级所占的比例(%); $WR_{>0.25}$ 为水稳性团聚体中 >0.25 mm粒级

所占的比例(%),即WSA, Water-stable aggregate。

(4) 土壤不稳定团粒指数(E_{LT})。计算公式为^[16]

$$E_{LT} = \frac{W_T - WR_{0.25}}{W_T} \times 100\% \quad (5)$$

式中: W_T 为土样的总质量(g); $WR_{0.25}$ 为水稳性团聚体质量(g)。

(5) 相对消散指数(RSI)及相对机械破碎指数(RMI)。计算公式为^[17]

$$RSI = \frac{MWD_{SW} - MWD_{FW}}{MWD_{SW}} \times 100\% \quad (6)$$

$$RMI = \frac{MWD_{SW} - MWD_{WS}}{MWD_{SW}} \times 100\% \quad (7)$$

式中: MWD_{FW} , MWD_{SW} , MWD_{WS} 分别为快速、慢速和预湿润振荡处理下的平均重量直径。

1.5 统计分析

通过Excel 2019及SPSS 26.0进行统计分析处理,利用方差分析(ANOVA)和Duncan法分析不同处理间的差异显著性,多重比较利用最小显著极差法(LSD),显著水平为 $p < 0.05$ 。利用Pearson相关系数法和通径分析进行相关性分析,图表由Origin 2021和Excel 2019完成。

2 结果与分析

2.1 干筛法处理下土壤团聚体分布及稳定性特征

干筛后,生草覆盖处理下各个粒级均有分布,以大团聚体(>0.25 mm粒径)为主,4种生草处理与CK相比, >2 mm粒径团聚体占比显著提高,其中 T_3 处理增幅最大。生草覆盖处理均以 >2 mm粒径团聚体占比最大。CK中各粒径团聚体含量分布均匀; T_1 , T_2 和 T_4 处理降低了 <0.25 mm粒径团聚体含量(图2),表明不同处理对各粒径影响存在差异。

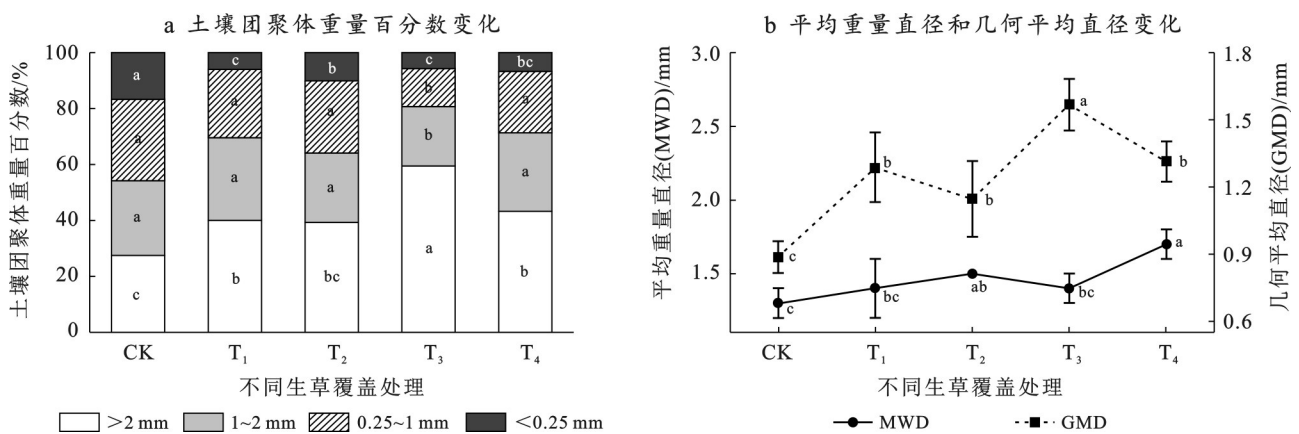


图2 干筛法测得团聚体分布及稳定性特征

Fig.2 Distribution and stability sign of aggregates measured by dry sieving method

平均重量直径(MWD)和几何平均直径(GMD)是反映土壤团聚体组成稳定性的重要指标。生草覆

盖能够显著提高土壤团聚体MWD和GMD,表明其平均粒径较大,稳定性强,抗侵蚀能力高。与CK相

比,生草覆盖后土壤团聚体 MWD 提高。GMD 值的变化规律与 MWD 值相似,生草覆盖后 GMD 相较于 CK 均有提高。由此可见,在经果林生长过程中,生草覆盖对土壤团聚体分布有显著影响。促进了土壤中 0.25~2 mm 粒径团聚体的形成,并显著增强土壤团聚体稳定性,其中 T₄ 处理提高 MWD 效果最佳, T₃ 处理提高 GMD 效果最佳。

2.2 湿筛法处理下土壤团聚体分布及稳定性特征

湿筛后,生草覆盖处理下各个粒级分布特征与干筛有所差异,但总体仍以水稳性大团聚体(>0.25 mm) 为主,含量为 54.2%~69.55%(图 3)。其中,>2.00 mm 粒径团聚体,4 种生草覆盖处理整体表现为: T₃ (38.93%) > T₄ (26.85%) > T₁ (21.48%) > CK (19.39%) > T₂ (18.52%), T₃ 处理下较 CK 显著提高了 1.01 倍。1.00~2.00 mm 粒径团聚体含量较低 (11.1%~15.55%), T₁ 占比最大。0.25~1.00 mm 粒

径团聚体含量为: T₁ (27.36%) > T₂ (23.48%) > T₄ (21.38%) > CK (18.1%) > T₃ (16.37%), T₁ 处理较 CK 增加 9.26%。CK 处理下 <0.25 mm 粒径微团聚体占比最高(51.41%),而生草覆盖处理后显著减少 30.45%~45.80%,降幅为 5.61%~20.96%。

湿筛法测得 MWD 和 GMD 值如图 3 所示,5 种处理的土壤 MWD 和 GMD 值分别为 0.80~1.61 mm 和 0.40~0.70 mm,可见生草覆盖能够显著提高土壤水稳性团聚体 MWD 和 GMD。5 种处理平均 MWD 值从大到小表现为: T₃ > T₄ > T₁ > T₂ > CK, T₁—T₄ 较 CK 提高了 1.23%~46.10%。GMD 值与 MWD 值变化规律相同。T₁—T₄ 处理下土壤水稳性团聚体的 GMD 较 CK 增加了 0.03~0.30 mm,与 MWD 值趋势相似, T₃ 处理后土壤水稳性团聚体的 MWD 和 GMD 值均最高。综合来看,生草覆盖处理影响土壤团聚体稳定性,其中 T₃ 处理下土壤水稳性团聚体结构相对更稳定。

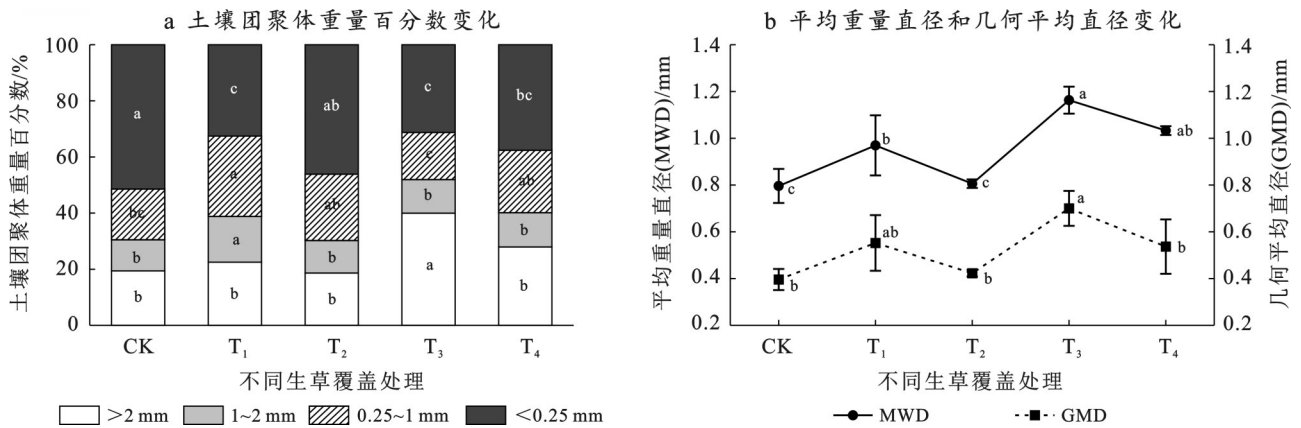


图 3 湿筛法测得团聚体分布及稳定性特征

Fig.3 Distribution and stability sign of aggregates measured by wet sieving method

表 2 不同生草覆盖处理下土壤团聚体稳定性参数
Table 2 Soil aggregate stability parameters under different grass cover treatments

处理	D_{dr}	D_{wr}	PAD	E_{LT}
CK	2.40±0.16 ^a	2.65±0.05 ^a	43.36±3.17 ^a	44.35±3.33 ^a
T ₁	1.89±0.21 ^{ab}	2.42±0.25 ^{ab}	27.11±3.23 ^b	41.04±3.69 ^{ab}
T ₂	1.66±0.64 ^b	2.61±0.01 ^a	40.40±0.43 ^a	42.92±0.20 ^a
T ₃	1.90±0.01 ^{ab}	2.19±0.22 ^b	29.04±3.17 ^b	31.40±2.78 ^c
T ₄	1.58±0.29 ^b	2.43±0.24 ^{ab}	35.41±5.57 ^{ab}	35.24±1.26 ^{bc}

注: D_{dr} 为干筛法处理下土壤分形维数; D_{wr} 为湿筛法处理下土壤分形维数。

土壤分形维数(D)、结构破坏率(PAD)和土壤不稳定团粒指数(E_{LT})是评估土壤团聚体稳定性的重要指标。土壤分形维数(D)是描述土壤颗粒或团聚体大小分布不均匀性的关键参数,在研究土壤性质以及土壤环境问题中扮演了“纽带”角色^[18]。较小的分形维数通常意味着分布相对均匀,土壤结构通透性

更好。在本研究中,不同处理的土壤团聚体分形维数(D值)存在差异, T₁—T₄ 处理后 D 值呈波动下降趋势(表 2)。与清耕处理(CK)相比, T₁—T₄ 处理的 D_{dr} 和 D_{wr} 分别降低了 20.83%~34.16% 和 1.51%~6.91%。 T₁—T₄ 处理下的 D_{dr} 值均 < 2.00, 说明土壤颗粒相对较大, 团聚体结构更为稳定。表明生草覆盖显著降低了机械土壤团聚体分形维数和水稳性团聚体分形维数, 进而增强了土壤团聚体稳定性和抗水蚀性。在经果林不同生草覆盖处理下, 土壤团聚体的破碎度指数(PAD)和不稳定团粒指数(E_{LT})表现出显著差异。生草覆盖处理后的 PAD 值为 27.11~43.36, 其中 T₁ 处理的湿筛破碎程度最小, PAD 值较清耕处理(CK)降低了 16.25。 E_{LT} 值范围为 31.40~44.35, T₁—T₄ 处理均显著降低了 E_{LT} 值, 尤其是 T₃ 处理降低了 29.20%。对于 PAD 和 E_{LT} , 其值越小表示土壤团聚体越稳定。研究表明, 生草覆盖能够显著降低这两个

指标,其中 T_1 和 T_3 处理效果最为显著,这表明生草覆盖能够降低土壤在外界扰动下的破碎程度。

2.3 LB法处理下土壤团聚体分布及稳定性特征

生草覆盖对团聚体粒径分布有着显著影响(图4)。相较于WS和SW处理的机械扰动和差异性黏粒膨胀效应,在快速湿润处理(FW)下,5个处理的土壤团聚体各粒级均有所分布,1~2 mm和<0.25 mm粒级的土壤团聚体较少,占比分别为14.01%~18.84%和10.37%~25.42%。 T_1 — T_4 处理显著增加了1~2 mm粒级的土壤团聚体含量,显著降低了<0.25 mm粒级的

土壤团聚体含量,其中 T_2 变化幅度最大。5种处理均以0.25~1 mm粒级为主,各处理间差异不大,含量分别表现为: $T_4(40.91\%) > CK(38.43\%) > T_1(37.51\%) > T_3(34.89\%) > T_2(33.2\%)$ 。其次为>2 mm粒级,变化范围在22.12%~37.59%,各处理的团聚体含量差异显著,整体表现为: $T_2 > T_3 > T_1 > T_4 > CK$ 。5种处理的土壤团聚体分布特征类似,这说明在快速湿润处理下会更容易使大团聚体崩解成0.25~1 mm粒级团聚体,生草覆盖后能够减少土壤大团聚体崩解成<0.25 mm粒级团聚体的含量。

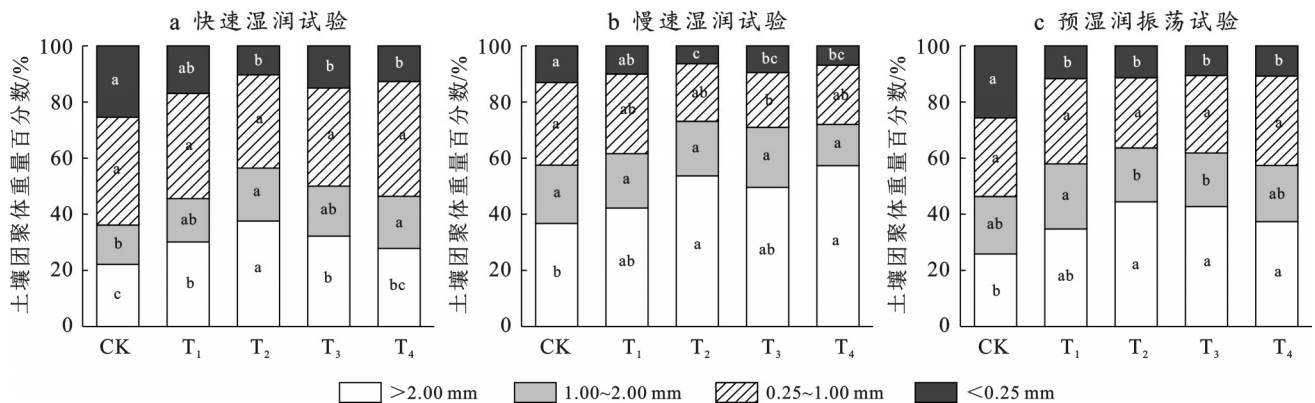


图4 LB法测得团聚体分布

Fig.4 Distribution of aggregates measured by LB method

慢速湿润(SW)处理用来模拟经果林小雨引起的土壤黏粒膨胀效应。相较于FW和WS处理,SW处理后土壤团聚体粒径相对集中,主要分布在>2.00 mm粒级,此粒径下 T_2 处理占比最高,CK最少。<0.25 mm和1.00~2.00 mm两个粒级团聚体含量则相对较少,占比分别为6.36%~13.10%和14.71%~21.37%,<0.25 mm粒级团聚体含量存在显著差异, T_1 — T_4 处理较CK降低了3.04%~6.74%;5种处理的1.00~2.00 mm粒级土壤团聚体分布不显著。在SW处理下,>2.00 mm粒级团聚体占比远大于快速湿润。WS处理后水稳性团聚体分布相对分散,主要为>2 mm,0.25~2.00 mm和1.00~2.00 mm,含量占比分别为25.85%~44.44%,24.98%~31.86%和19.09%~23.21%。与FW和SW处理相比,WS处理中1.00~2.00 mm粒径团聚体含量占比更高,但与SW处理后趋势相同,以>2 mm粒径团聚体为主,其中 T_1 — T_4 处理较CK提高了8.89%~18.59%。在WS处理下, T_1 — T_4 处理的<0.25 mm粒径团聚体占比很小,为10.56%~11.66%,显著低于CK(25.66%)。在LB法的3个处理中,快速湿润(FW)处理导致大团聚体大量崩解为较小粒级(如<0.25 mm和1.00~2.00 mm),崩解程度最大,表明暴

雨或灌溉冲击是土壤团聚体结构失稳的主要驱动力。相比之下,SW处理对团聚体破坏作用最小,且生草覆盖显著减少了<0.25 mm粒级团聚体的含量,增强了团聚体稳定性。

采用LB法处理后稳定性参数值如表3所示。LB法的3种湿润处理下土壤团聚体MWD值和GMD值存在差异,5个处理整体均表现为: $MWD_{SW} > MWD_{WS} > MWD_{FW}$,相较于CK,变化幅度分别为0.20~0.41 mm和0.11~0.37 mm和0.26~0.41 mm。FW处理下,5个处理整体表现为: $T_2 > T_3 > T_4 > T_1 > CK$ 。在SW处理下, T_4 处理后土壤团聚体MWD值最大,较CK提高了25.87%。在WS处理下,土壤团聚体MWD值整体表现为: $T_2 > T_3 > T_4 > T_1 > CK$,生草覆盖与清耕处理差异显著且远高于清耕。整体规律与FW处理类似。

根据Le Bissionnais分级标准,当MWD值为1.3~2.0 mm时,团聚体结构较稳定;其值在0.8~1.3 mm时,团聚体结构稳定。尽管清耕处理的土壤团聚体MWD值处于稳定区间,但生草覆盖处理后的土壤团聚体MWD值范围在1.42~1.57 mm,相比之下其稳定性略低。同时,5个处理的相对消散指数(RSI)和相对机械破碎指数(RMI)存在差异,其值分别为

0.17~0.35 和 0.09~0.20。其中,CK 处理下土壤团聚体的 RSI 值和 RMI 值最高,而 T₂ 处理下土壤团聚体

的 RSI 值最低,T₃ 处理下土壤团聚体的 RMI 值最小,均表明生草覆盖影响土壤团聚体稳定性。

表 3 LB 法测得的不同生草覆盖处理下土壤团聚体的稳定性特征

Table 3 Stability characteristics of soil aggregates under different grass cover treatments measured by LB method

处理	MWD/mm			RSI	RMI
	快速湿润	慢速湿润	预湿润振荡		
CK	1.04±0.20 ^b	1.43±0.06 ^b	1.16±0.02 ^b	0.35±0.00 ^a	0.21±0.01 ^a
T ₁	1.24±0.28 ^{ab}	1.54±0.22 ^{ab}	1.42±0.19 ^a	0.27±0.14 ^a	0.09±0.02 ^b
T ₂	1.45±0.15 ^a	1.77±0.11 ^a	1.57±0.04 ^a	0.17±0.02 ^a	0.15±0.01 ^{ab}
T ₃	1.31±0.12 ^{ab}	1.70±0.04 ^a	1.54±0.10 ^a	0.27±0.05 ^a	0.10±0.06 ^b
T ₄	1.25±0.07 ^{ab}	1.80±0.15 ^a	1.45±0.11 ^a	0.27±0.04 ^a	0.18±0.00 ^a

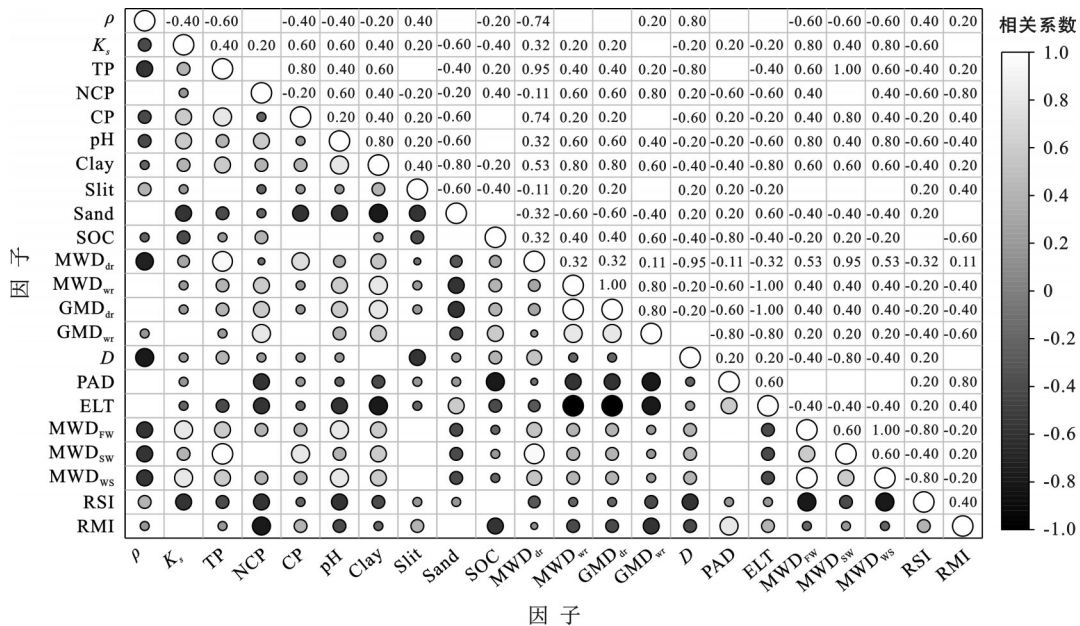
2.4 土壤性质与团聚体稳定性的相关性分析

利用 Pearson 相关系数法,分析表明 MWD_{dr} 与 TP, MWD_{sw} 呈显著正相关,与 D 呈显著负相关;与 CP 呈正相关,与 ρ 呈负相关,相关系数均为 0.74(图 5)。MWD_{wr} 与 GMD_{dr} 呈显著负相关,与 E_{LT} 呈显著负相关。同时, GMD_{dr} 与 E_{LT} 也呈显著负相关,与黏粒含量呈正相关,相关系数为 0.8;与砂粒含量、pH 和 NCP 呈正相关,与 PAD 呈负相关,相关系数均为 0.6。

LB 法处理下测得的 MWD_{FW}, MWD_{SW} 和 MWD_{WS} 等团聚体稳定性指标中,均与黏粒和 TP 呈正相关,与 ρ 呈负相关。MWD_{FW} 与 MWD_{WS} 呈显著正相关,与 K_s, pH 呈正相关,与 RSI 呈负相关,相关系数均为 0.8;与 MWD_{SW} 呈正相关,相关系数为 0.6。

MWD_{sw} 与 TP 呈显著正相关,同时与 CP 呈正相关,相关系数为 0.8;与 MWD_{FW} 和 MWD_{WS} 呈正相关,相关系数为 0.6。RSI 与 K_s, NCP 和 pH 均呈负相关,相关系数为 0.6;RMI 与 PAD 呈正相关,相关系数为 0.8,与 NCP 和 SOC 含量呈负相关,相关系数分别为 0.8 和 0.6。

除此之外, D 与 ρ 呈正相关,与 TP 呈负相关; PAD 与 E_{LT} 呈正相关,与 SOC 呈负相关。结果表明,土壤团聚体稳定性受到多种因素影响,包括土壤部分理化性质(如孔隙度、容重、pH、有机碳含量等)以及土壤机械组成(如黏粒、砂粒含量)。这些因素通过影响土壤团聚体的大小和结构,进而影响土壤的稳定性和抗侵蚀能力。



注:ρ 为容重;K_s 为饱和导水率;TP 为土壤总孔隙度;NCP 为土壤非毛管孔隙度;CP 为土壤毛管孔隙度;Clay 为土壤黏粒;Slit 为土壤粉粒;Sand 为土壤砂粒;SOC 为土壤总有机碳;MWD_{dr} 和 MWD_{wr} 分别为干筛法和湿筛法处理下获得的 MWD 值;GMD_{dr} 和 GMD_{wr} 分别为干筛法和湿筛法处理下获得的 GMD 值;D 为土壤分形维数;PAD 为结构体破坏率;ELT 为土壤不稳定团粒指数;MWD_{FW}, MWD_{SW} 和 MWD_{WS} 分别为 FW, SW 和 WS 获得的 MWD 值;RSI 为相对消散指数;RMI 为相对机械破碎指数。下同。

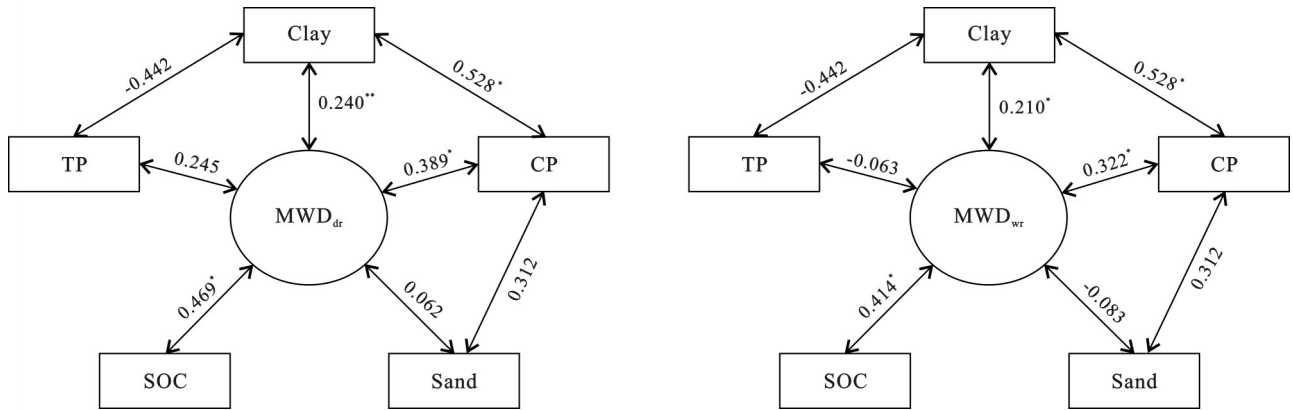
图 5 土壤团聚体稳定性特征与土壤性质的相关性

Fig.5 Correlation between soil aggregate stability characteristics and soil properties

水稳性大团聚体的平均重量直径(MWD_{wr})是衡量土壤团聚体稳定性的主要指标^[19],考虑到其他因素对MWD的影响可能存在重叠。为消除各指标的多重效应,采用通径分析进一步明确不同生草覆盖下土壤团聚体稳定性与土壤性质之间的关系(图6)。结果表明, MWD_{dr} 与CP和SOC呈显著正相关,与黏粒含量呈极显著正相关,其中SOC相关系数最大。

MWD_{wr} 与 MWD_{dr} 有类似的规律。这表明毛管孔隙度、黏粒含量和土壤有机碳对土壤团聚体稳定性有显著影响,土壤有机碳是极为重要的影响因素。此外,由表4可知,CP与黏粒含量呈显著正相关,表明毛管孔隙度对黏粒含量具有积极影响。

直接通径系数表示自变量对因变量的直接影响关系,间接通径系数表示自变量间的间接影响关系。



注:相关性用 ↔ 连接,其上数字为相关系数;*表示 $p < 0.05$; **表示 $p < 0.01$ 。

图6 土壤性质对土壤团聚体稳定性影响的通径分析

Fig.6 Throughput analysis on effect of soil properties on soil aggregate stability

表4 不同生草覆盖处理下土壤MWD值与土壤性质的相关系数分解

Table 4 Decomposition of correlation coefficients between soil MWD values and soil properties under different grass cover treatments

因变量	自变量	相关系数	直接通径系数	间接通径系数				
				TP—MWD	CP—MWD	Clay—MWD	Sand—MWD	SOC—MWD
MWD_{dr}	TP	0.245	0.027	—	-0.001	-0.783	-0.006	0.000
	CP	0.389	0.665	0.014	—	-0.313	-0.108	0.106
	Clay	0.240	0.719	0.237	-0.338	—	-0.060	-0.197
	Sand	0.062	0.133	0.031	-0.022	-0.011	—	0.026
	SOC	0.469	0.534	-0.009	0.085	-0.146	0.103	—
MWD_{wr}	TP	-0.063	0.325	—	-0.007	-0.107	-0.075	0.006
	CP	0.322	0.609	0.013	—	-0.286	-0.099	0.097
	Clay	0.210	0.746	0.245	-0.351	—	-0.062	-0.204
	Sand	-0.083	0.056	0.013	-0.009	-0.005	—	0.011
	SOC	0.414	0.505	0.209	-0.009	0.080	-0.138	—

3 讨论

生草覆盖区别于传统经果林管理措施,通过提升土壤团聚体稳定性、促进土壤养分循环等方式,能够有效提升土壤肥力,维持生态平衡。本研究发现,生草覆盖显著改变了土壤团聚体分布特征,提高大团聚体占比,改变土壤团聚体组成。干筛和湿筛处理后生草覆盖较清耕提高大团聚体(>0.25 mm 粒径)占比,促进土壤中 $0.25\sim 2.00$ mm 粒径的团聚体

形成。LB法模拟降雨条件的3种处理下,SW处理下生草覆盖的土壤大团聚体占比最大。说明生草覆盖能够有效保护土壤团聚体免受雨水溅蚀^[20]。然而,在FW和WS处理下 $0.25\sim 1.00$ mm 粒径的团聚体含量出现明显波动,说明降雨主要将 >2.00 mm 粒径团聚体崩解为 $0.25\sim 1.00$ mm,而 $0.25\sim 1.00$ mm 粒径成为土壤团聚体水解作用下的“缓冲区”。结合土壤理化性质的改变,进一步表明生草覆盖后有利于小团聚体向大团聚体转变,生草残留物的分解持续为

土壤提供有机质,增强土壤养分的阻滞能力,促进大团聚体的形成,这与前人研究结果一致^[11]。

团聚体稳定性提高能够显著改善土壤结构,从而有效防止因降雨、地表径流和人为耕作活动等事件造成的经果林土壤侵蚀^[21]。研究表明,MWD值和GMD值均表现为生草覆盖提高团聚体稳定性。在LB法处理下,团聚体稳定性呈现慢速湿润的稳定性最大,快速湿润的稳定性最小,RSI大于RMI,表明团聚体对消散作用的敏感程度高于机械破坏,研究区土壤团聚体的主要破坏机制是消散作用,而生草覆盖对土表形成保护,可缓解团聚体在水蚀作用下的消散程度。本研究发现,覆盖后降低了土壤D值,降低了土壤PAD和 E_{LT} 值。这进一步说明生草覆盖增强了土壤团聚体的机械稳定性和水稳定性,强化了对消散破坏的抵抗能力。特别是平托花生的覆盖措施,在改善土壤团聚体稳定性方面表现最为突出。这归因于多年生豆科生草具有根状茎和匍匐茎,能够影响土壤孔隙,其根系分泌的活性物质促进了土壤有机质的分解。因此,单播平托花生比其他生草单播改善效果更强,也显著优于混播,这与李超等^[22]的研究结果一致。生草覆盖不仅改善地下土壤结构,而且通过植被覆盖、凋落物积累保护地表土壤,优化土壤通气性和水热养分条件后更有利于生草根发育^[23]。研究区域具有明显的季节性差异^[24],若经果林耕地的植被覆盖度过低,当降雨发生时,微团聚体更容易被雨滴溅起,导致其中的有机物矿化,养分流失加剧。因此生草覆盖有效降低了南方降雨等自然因素对土壤结构稳定性的影响。

土壤性质、环境因素、土地利用类型、降雨侵蚀性和其他因素都会影响土壤团聚体稳定性^[25]。相关性分析表明,孔隙特征是决定土壤团聚体稳定性的重要因素,毛管孔隙度与土壤团聚体稳定性呈显著正相关,这一结论与Tang Xian等^[26]的研究结果一致。土壤孔隙度高,表明土壤具有良好结构和通气性,可缓解土壤板结,土壤分形维数与容重呈负相关,与以往研究结果相一致^[27]。分形维数越小,土壤颗粒分布越均匀,团聚体结构越稳定,进而有利于土壤通气性和透水性的提升。研究发现土壤有机碳也与土壤结构密切相关。土壤有机碳主要以有机物和无机物紧密结合形式储存在团聚体中,大团聚体由于表面积更大,对有机碳具有更强的吸附作用^[28]。有机碳迁移与转化主要伴随着土壤颗粒的运移,大团聚体崩解破碎过程也伴随着有机碳的损失。土壤微团聚体通过胶结作用向大团聚体转化,加速了土壤碳的周转过程,促进有机碳固存。清耕与其他生

草覆盖处理土壤有机碳含量存在显著差异:一方面,清耕增加了土壤扰动,促进了大团聚体的破碎,降低了团聚体稳定性,加速了有机碳矿化;另一方面,生草覆盖通过植物根系的穿刺作用和有机质的积累,可直接提高土壤有机碳含量,加速大团聚体的形成,增强其稳定性^[29]。黏粒含量与团聚体稳定性之间也存在极显著正相关,土壤团聚体依靠黏粒的内聚力聚合,大团聚体的含量随着黏粒含量的增加而增加。大团聚体的含量越高,团聚体越稳定,抗侵蚀性越强,这是因为黏粒的膨胀和分散会堵塞土壤孔隙,使孔径变小,从而降低孔隙度^[11]。传统清耕使表层土壤裸露,导致土壤和养分流失,土层变薄,进而造成土壤贫瘠、生产质量下降等。生草覆盖不仅能够有效减少水土流失,还能通过增加土壤有机碳,改良土壤结构,显著提升土壤肥力和生态功能。此外,生草覆盖还具有降低生产成本,提高果实品质等潜在经济效益^[30]。因此,生草覆盖有望成为未来解决经果林土壤质量下降问题的关键措施之一。

4 结论

(1) 湿筛处理下,生草覆盖处理的水稳性大团聚体(>0.25 mm)含量为54.20%~69.55%;LB法表明,生草覆盖能够提高土壤大团聚体(>2 mm)占比,减少微团聚体(<0.25 mm)的含量对土壤团聚体分布具有显著的促进作用,且不同生草处理的效果存在差异。

(2) 生草覆盖对土壤团聚体稳定性具有显著的促进作用。干筛和LB法得到相似的规律。土壤 D_{ar} 和 D_w 值分别提高5.83%~19.90%和2.84%~6.91%, E_{LT} ,PAD,RSI和RMI降低,进一步说明土壤团聚体稳定性得到改善。其中 T_4 处理在干筛法下表现出较高的MWD值, T_3 处理在提高土壤水稳性团聚体的MWD和GMD方面效果最为显著。

(3) 土壤理化性质(如孔隙度、容重、pH值等)通过影响团聚体结构和粒径分布,间接影响土壤团聚体稳定性。其中毛管孔隙度、黏粒含量和土壤有机碳含量是土壤团聚体的重要因素。

参考文献(References)

- [1] Sun Xizao, Liu Shiwei, Tang Hanya, et al. Effects of water-level fluctuation on soil aggregates and aggregate-associated organic carbon in the water-level fluctuation zone of the Three Gorges reservoir, China [J]. Land, 2024,13(3):313.
- [2] Garg A, Kwakye S, Cates A, et al. Field-saturated and near-saturated soil hydraulic conductivity as influenced by

- conventional and soil health management systems [J]. *Soil and Tillage Research*, 2025, 248:106467.
- [3] 杨璐, 刘小芳, 巨佳敏, 等. 黄土坡面种植柠条对土壤团聚体稳定性和可蚀性的影响[J]. *水土保持通报*, 2024, 44(3):46-55.
Yang Lu, Liu Xiaofang, Ju Jiamin, et al. Effects of *Caragana korshinskii* plantation on soil aggregate stability and erodibility on loess slopes [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2024, 44(3):46-55.
- [4] 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.
Yan Guiwan, Dong Wenbin, Li Zhongyi, et al. Effects of green manure mulching on soil aggregates and organic carbon fractions in orchards [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2024, 35(12):3427-3434.
- [5] Lu Mingzhi, Yang Mengyao, Yang Yurong, et al. Soil carbon and nutrient sequestration linking to soil aggregate in a temperate fen in Northeast China [J]. *Ecological Indicators*, 2019, 98:869-878.
- [6] Cen Longpei, Peng Xudong, Dai Quanhou. Response of the stability of soil aggregates and erodibility to land use patterns in wetland ecosystems of karst plateau [J]. *Forests*, 2024, 15(4):599.
- [7] Tang Wenzheng, Yang Haosheng, Wang Wene, et al. Effects of living grass mulch on soil properties and assessment of soil quality in Chinese apple orchards: A meta-analysis [J]. *Agronomy*, 2022, 12(8):1974.
- [8] 张华渝, 王克勤, 宋娅丽. 滇中尖山河流域不同土地利用类型土壤抗蚀性[J]. *水土保持学报*, 2019, 33(5):50-57.
Zhang Huayu, Wang Keqin, Song Yali. Soil erosion resistance under different land use types in Jianshan River watershed in middle Yunnan Province [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33(5):50-57.
- [9] Wei Binmeng, Li Zhonghui, Wang Yiquan. Study on soil compaction and its causative factors at apple orchards in the Weibei dry highland of China [J]. *Soil Use and Management*, 2022, 38(1):790-801.
- [10] 段顺霞, 刘嘉元, 赵宏祥, 等. 基于Meta分析的黄土高原苹果园土壤改良措施效果评价[J]. *水土保持学报*, 2024, 38(6):302-309.
Duan Shunxia, Liu Jiayuan, Zhao Hongxiang, et al. Evaluation of the effectiveness of soil improvement measures in apple orchards on the Loess Plateau: A meta-analysis [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2024, 38(6):302-309.
- [11] 陈曦, 王改玲, 刘焕焕, 等. 生草覆盖对枣园土壤水稳性团聚体中两种有机碳组成的影响[J]. *应用与环境生物学报*, 2021, 27(2):424-431.
Chen Xi, Wang Gailing, Liu Huanhuan, et al. Effects of raw grass mulch on the composition of particulate and mineral organic carbon in soil water-stable aggregates in a jujube orchard [J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2021, 27(2):424-431.
- [12] Wang Lanqin, Zang Shuying, Chen Qiang, et al. Analysis of influence factors on aggregate stability and size distribution in mollisols [J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2021, 14(12):1084.
- [13] 余洁, 苗淑杰, 乔云发. 不同类型土壤团聚体稳定机制的研究[J]. *中国农学通报*, 2022, 38(14):89-95.
Yu Jie, Miao Shujie, Qiao Yunfa. The stabilization mechanism of different types of soil aggregates [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2022, 38(14):89-95.
- [14] 王艳琪, 白芹菲, 鲍玉海, 等. 黑龙江水库消落带不同植被恢复模式对土壤物理性质的影响[J]. *水土保持研究*, 2024, 31(6):281-289.
Wang Yanqi, Bai Qinfei, Bao Yuhai, et al. Effects of different vegetation restoration patterns on soil physical properties in the riparian zone of the Heilongtan reservoir [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2024, 31(6):281-289.
- [15] 韦慧, 邓羽松, 林立文, 等. 喀斯特生态脆弱区典型小生境土壤团聚体稳定性比较研究[J]. *生态学报*, 2022, 42(7):2751-2762.
Wei Hui, Deng Yusong, Lin Liwen, et al. Comparative study on the stability of soil aggregates in typical microhabitats in karst ecologically fragile areas [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(7):2751-2762.
- [16] 马建辉, 叶旭红, 韩冰, 等. 膜下滴灌不同灌水控制下限对设施土壤团聚体分布特征的影响[J]. *中国农业科学*, 2017, 50(18):3561-3571.
Ma Jianhui, Ye Xuhong, Han Bing, et al. Effects of different controlled irrigation low limits on the size distribution of soil aggregates with drip irrigation under film mulching in a greenhouse soil [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(18):3561-3571.
- [17] 肖雁, 韦慧, 马占龙, 等. 电解质添加对南亚热带赤红壤团聚体稳定性的影响[J]. *中国水土保持科学(中英文)*, 2024, 22(2):115-123.
Xiao Yan, Wei Hui, Ma Zhanlong, et al. Effect of electrolytes addition on the stability of lateritic red soil aggregates in the south subtropical region [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2024, 22(2):115-123.
- [18] 白玉锋, 孙静, 李秀军, 等. 松嫩平原西部典型盐生景观土壤分形维数及盐碱化特征[J]. *水土保持学报*, 2021, 35(3):163-169.
Bai Yufeng, Sun Jing, Li Xiujun, et al. Fractal dimension and salinization characteristics of typical halophytic landscape soil in western Songnen Plain [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, 35(3):163-169.

- [19] Barthès B, Roose E. Aggregate stability as an indicator of soil susceptibility to runoff and erosion; validation at several levels [J]. *Catena*, 2002,47(2):133-149.
- [20] 王宁,张仁政,刘振,等.长期深松耕作结合秸秆还田对土壤团聚体固碳能力与无机稳定机制的影响[J].*中国农学通报*,2024,40(28):83-93.
Wang Ning, Zhang Renzheng, Liu Zhen, et al. Effects of long-term subsoiling combined with straw returning on carbon sequestration capacity and inorganic stability mechanism of soil aggregates [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2024,40(28):83-93.
- [21] Xia Rui, Shi Dongmei, Ni Shuhui, et al. Effects of soil erosion and soil amendment on soil aggregate stability in the cultivated-layer of sloping farmland in the Three Gorges reservoir area [J]. *Soil and Tillage Research*, 2022,223:105447.
- [22] 李超,王俊,温萌萌,等.绿肥填闲种植对旱作冬小麦农田土壤团聚体有机碳含量的影响[J].*干旱地区农业研究*,2023,41(3):210-217.
Li Chao, Wang Jun, Wen Mengmeng, et al. Effect of green manure cover cropping on soil aggregate-associated organic carbon in a dryland winter wheat field [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2023,41(3):210-217.
- [23] 牛清清,张琳,陈云峰,等.生态栽培对果园水土及养分流失影响的Meta分析[J].*生态学杂志*,2021,40(10):3175-3183.
Niu Qingqing, Zhang Lin, Chen Yunfeng, et al. Effects of eco-cultivation on soil erosion and nutrient loss in orchards: A Meta-analysis [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2021,40(10):3175-3183.
- [24] 刘政,索沛衡,轩寒风,等.南方红壤侵蚀区马尾松林植被恢复对土壤氮有效性和微生物量碳、氮季节动态的影响[J].*生态学报*,2025,45(5):2094-2103.
Liu Zheng, Suo Peiheng, Xuan Hanfeng, et al. Seasonal dynamics of soil nitrogen availability and microbial biomass carbon, nitrogen along restoration ages of *Pinus massoniana* plantations in red soils erosion region at southern China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2025,45(5):2094-2103.
- [25] 武杰,张丙昌,陈静,等.黄土高原水蚀风蚀交错区不同生物结皮类型对土壤有机碳及其转化的影响[J].*水土保持学报*,2024,38(4):38-44.
Wu Jie, Zhang Bingchang, Chen Jing, et al. Effects of different biocrust types on soil organic carbon and its transformation in the water-wind erosion crisscross region of the Loess Plateau [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2024,38(4):38-44.
- [26] Tang Xian, Qiu Jingchi, Xu Yuqi, et al. Responses of soil aggregate stability to organic C and total N as controlled by land-use type in a region of south China affected by sheet erosion [J]. *Catena*, 2022,218:106543.
- [27] 方萍,吕成文,朱艾莉.分形方法在土壤特性空间变异研究中的应用[J].*土壤*,2011,43(5):710-713.
Fang Ping, Lv Chengwen, Zhu Aili. Applied studies of fractal theory on spatial variability of soil properties: A review [J]. *Soils*, 2011,43(5):710-713.
- [28] 熊瑛楠,冯天骄,王平,等.晋西黄土区长期人工林恢复对土壤水分和养分性质的影响[J].*水土保持学报*,2022,36(2):228-237.
Xiong Yingnan, Feng Tianjiao, Wang Ping, et al. Effects of long-term artificial forest restoration on soil moisture and nutrient characteristics in the loess area of western Shanxi Province, China [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022,36(2):228-237.
- [29] 季卫英,管丹蓉,宓立峰,等.不同土地利用方式对土壤团聚体稳定性及碳氮含量的影响[J].*水土保持通报*,2024,44(6):377-386.
Ji Weiying, Guan Danrong, Mi Lifeng, et al. Effects of different land-use patterns on soil aggregate stability and contents of carbon and nitrogen [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2024,44(6):377-386.
- [30] 曹铨,沈禹颖,王自奎,等.生草对果园土壤理化性状的影响研究进展[J].*草业学报*,2016,25(8):180-188.
Cao Quan, Shen Yuying, Wang Zikui, et al. Effects of living mulch on soil physical and chemical properties in orchards: A review [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2016,25(8):180-188.