DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2026.06.038 CSTR:32311.14.rswc.2026.06.038
谭锦, 兰璐钰, 高艺航, 等. 南亚热带小流域不同水土保持措施下土壤团聚体对植被及土壤性质的响应[J]. 水土保持研究,2026,33(6):266-273.
Tan Jin, Lan Luyu, Gao Yihang, et al. Response of soil aggregates to vegetation and soil properties under different soil and water conservation measures in small watersheds of south subtropical region[J]. Research of Soil and Water Conservation,2026,33(6):266-273.

南亚热带小流域不同水土保持措施下土壤团聚体对植被及土壤性质的响应

谭 锦[1,2], 兰璐钰[1], 高艺航[3], 杨述月[1], 段青松[1,2], 昂建平[1], 孙晓丹[1], 潘 佳[1]
(1.云南农业大学 水利学院, 昆明 650201; 2.云南农业大学
水利学院水土保持实验室, 昆明 650201; 3.华北水利水电大学 水利学院, 郑州 450046)

摘 要:[目的]探究南亚热带地区不同水土保持措施下土壤团聚体特征及其对植被特征和土壤性质的响应,为该区域水土保持措施布设优化提供理论依据。[方法]在小军赛河小流域,选取封禁林、橡胶林、澳洲坚果林、保土耕作4种水土保持措施,并以坡耕地为对照进行调查。植被特征指标包括林下植被盖度、林下植物多样性、枯落物厚度、乔木密度。采集0—20 cm和20—40 cm土层原状土样,采用干筛与湿筛法分析团聚体组成并计算平均重量直径(MWD);测定土壤有机碳、全氮、容重、孔隙度。[结果]封禁林MWD值为其他措施的1.3~2.5倍,其>5 mm大团聚体占比达28.7%,显著高于其他措施;坡耕地<0.25 mm微团聚体在湿筛条件下富集,占比达26.16%,远高于封禁林13.04%。橡胶林和澳洲坚果林团聚体特征介于封禁林与耕作措施之间,二者湿筛MWD分别较坡耕地提升89.5%和78.9%。土壤有机碳、土壤全氮是驱动团聚体差异的关键土壤性质。枯落物厚度、林下植被盖度和林下植物多样性是驱动团聚体差异的关键植被因子。团聚体的改善也促进了土壤容重和土壤孔隙度的优化。[结论]措施对团聚体改善效果排序:封禁林>橡胶林>澳洲坚果林>保土耕作>坡耕地。多样且盖度高的植被伴随着高土壤有机碳含量,其对大团聚体形成有积极作用,揭示了长期稳定生长的植被是保持良好团聚体结构的前提。橡胶林和澳洲坚果林是满足这一前提且具备经济来源的关键水土保持措施。但是需要警惕林下植被盖度和多样性退化导致的团聚体结构恶化。

关键词:水土保持措施; 团聚体平均重量直径; 枯落物厚度; 土壤有机碳; 经济林
中图分类号:S152.4; S157.1; S153 **文献标识码:**A **文章编号:**1005-3409(2026)06-0266-08

Response of soil aggregates to vegetation and soil properties under different soil and water conservation measures in small watersheds of south subtropical region

Tan Jin[1,2], Lan Luyu[1], Gao Yihang[3], Yang Shuyue[1], Duan Qingsong[1,2], Ang Jianping[1], Sun Xiaodan[1], Pan Jia[1]
(1.*College of Water Conservancy, Yunnan Agricultural University, Kunming* 650201, *China*; 2.*Soil and Water Conservation Laboratory, College of Water Conservancy, Yunnan Agricultural University, Kunming* 650201, *China*; 3.*School of Water Conservancy, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou* 450046, *China*)

Abstract: [**Objective**] This study aims to investigate soil aggregate characteristics under different soil and water conservation measures in the south subtropical region and their responses to vegetation characteristics and soil properties, providing a theoretical basis for optimizing the layout of such measures in the region. [**Methods**] In the small watershed of the Xiaojunsai River, four soil and water conservation measures were selected: forest exclosure, *Hevea brasiliensis* plantation, *Macadamia integrifolia* plantation, and soil conservation cultivation, with slope cropland as the control group. Vegetation indicators included understory coverage, understory

收稿日期:2025-11-15 **修回日期:**2025-12-20 **接受日期:**2026-01-08
资助项目:云南农业大学科研启动基金项目(S9012025198)
第一作者:谭锦(1993—),男,贵州黔西南人,博士,讲师,主要从事植物功能生态学和土壤学研究。E-mail:614831698@qq.com
兰璐钰(2004—),女,云南昆明人,本科生,研究方向为水土保持与荒漠化防治。E-mail:3107477409@qq.com

diversity, litter thickness, and tree density. Undisturbed soil samples were collected from 0—20 cm and 20—40 cm layers. Aggregate composition was analyzed using dry- and wet-sieving methods, and mean weight diameter (MWD) was calculated. Soil organic carbon, total nitrogen, soil bulk density, and soil total porosity were measured. [**Results**] The MWD value in the forest exclosure was 1.3~2.5 times that of the other measures, and the proportion of large aggregates>5 mm reached 28.7%, significantly higher than other measures. Slope cropland was enriched in microaggregates<0.25 mm under wet sieving, accounting for 26.16%, much higher than 13.04% in the forest exclosure. The aggregate characteristics of *H. brasiliensis* or *M. integrifolia* plantations were between those of the forest exclosure and the soil conservation cultivation, and their wet-sieved MWDs increased by 89.5% and 78.9%, respectively, compared with slope cropland. Soil organic carbon and total nitrogen were the key soil properties driving aggregate differences. Litter thickness, understory vegetation coverage, and understory vegetation diversity were the key vegetation factors driving aggregate differences. Aggregate improvement also promoted the optimization of soil bulk density and porosity. [**Conclusion**] The ranking of the aggregate improvement effects of the measures was as follows: forest exclosure>*H. brasiliensis* plantation>*M. integrifolia* plantation>soil conservation cultivation>slope cropland. Diverse and high-coverage vegetation is associated with high soil organic carbon content, which has a positive effect on the formation of large aggregates. Stable vegetation growth is a prerequisite for maintaining good aggregate structure. *H. brasiliensis* and *M. integrifolia* plantations are key soil and water conservation measures that meet this prerequisite while providing economic benefits. However, attention should be paid to the deterioration of understory vegetation coverage and diversity, which can lead to the degradation of aggregate structure.

Keywords: soil and water conservation measures; mean weight diameter of aggregates; litter thickness; soil organic carbon; economic forests

土壤侵蚀是威胁土地资源与生态安全的严峻问题。中国南亚热带地区水热条件优越,但降雨集中、人类活动强烈,导致该地区的小流域土壤侵蚀敏感性强[1]。因此,在该地区的小流域尺度上采取针对性的水土保持措施显得尤为重要。这些措施不仅能有效减轻土壤侵蚀,更是保障区域生态安全与土地资源可持续利用的关键途径。土壤团聚体是构成土壤结构的基本单元,其稳定性是衡量土壤质量和抗侵蚀能力的核心指标[2],它主要由矿物质颗粒通过有机质、根系等胶结物质形成[2]。土壤团聚体的作用在于其能协调土壤水、肥、气、热状况,并为微生物提供环境;更重要的是,稳定的团聚体可有效抵抗雨滴击溅和径流冲刷,从根本上减轻土壤侵蚀[3]。对不同水土保持措施下团聚体的研究是评估这些措施能否有效改善土壤健康的关键指标[3]。这项研究为筛选和优化水土保持方案、保障农业与生态的可持续发展提供了根本依据。目前,国内外关于水土保持措施对土壤团聚体影响的研究选取的研究区域集中于温带、黄土高原等侵蚀剧烈区[4],针对南亚热带水热充沛、赤红壤易侵蚀的小流域研究较少,该区域降雨集中、扰动强烈,团聚体对水土保持措施的响应可能与其他区域存在差异;其次是现有研究多聚焦单一植被类型或耕作措施对比[5],缺乏对经济林、封禁林、保土耕作等多种措施的比较,难以支撑区域措施的差异化配置。

水土保持措施借助植被恢复以及减少干扰的方式,可增加土壤有机质,推动团聚体的形成与稳定,是改善土壤结构的有效途径[4]。不过当前针对南亚热带地区不同水土保持措施对土壤团聚体稳定性影响的研究并不深入,缺少多种措施效果以及关键因子的系统比较,制约当地水土保持措施布设的精准优化。本文将云南省耿马县小军赛河小流域作为研究对象,对小流域中不同水土保持措施下的土壤团聚体特征进行研究。运用干筛与湿筛法获取土壤团聚体特征,并测定土壤有机碳、植被特征、枯落物厚度等潜在驱动因子,以揭示不同措施下土壤团聚体稳定性的差异,解析影响稳定性的关键驱动因子,评估不同措施的土壤团聚体改良效果,为南亚热带地区水土保持策略的优化提供科学依据。

1　研究区概况

选取云南省耿马县小军赛河小流域,不仅因其契合南亚热带小流域水热集中、赤红壤易侵蚀的典型特征,且流域内封禁林、经济林、保土耕作及坡耕地等模式齐全,利于系统对比,为区域生态与经济平衡提供科学支撑。

研究区位于云南省临沧市耿马县勐简乡小军赛河

小流域(东经99°16′—99°20′,北纬23°39′—23°42′)。流域内频繁的人为活动增加了水土流失风险,对当地的农业生产、生态环境和经济社会发展构成潜在威胁。流域总径流面积20 km²,已有水土保持实施规划面积为18.36 km²,河道长8 km,最高点海拔1 760.9 m,最低点海拔980 m,海拔高差689 m,属横断山脉纵谷区。地处南亚热带区,位于北回归线附近,日照充足[6],气温高,热量多,温度日较差大;降水多,干湿季分明。流域内土壤主要有赤红壤、石灰岩土、水稻土等[7],土壤中性,肥力较好。

流域内包含封禁林、经济林、保土耕作等多种水土保持措施。这些措施规划前的土地利用类型均为坡耕地,所有水土保持措施于2005年正式投入使用。研究区乔木主要包含构树〔*Broussonetia papyrifera* (L.) L′Hér. ex Vent.〕、凤凰木〔*Delonix regia* (Bojer) Raf.〕、橡胶树〔*Hevea brasiliensis* (Willd. ex A. Juss.) Müll. Arg.〕、澳洲坚果(*Macadamia integrifolia* Maiden & Betche)等,林下植被主要为肾蕨〔*Nephrolepis cordifolia* (L.) C. Presl〕,藿香蓟(*Ageratum conyzoides* L.),野茼蒿〔*Crassocephalum crepidioides* (Benth.) S. Moore〕等。

2 材料与方法

2.1 野外调查

本研究于2025年7月在小军赛河小流域展开野外调查工作。综合考虑研究区植被类型、地形特征和不同水土保持措施等因素[8],并基于各水土保持措施占地面积,采用典型抽样法在封禁林(7个)、橡胶林(10个)、澳洲坚果林(5个)、保土耕作(5个)的4个水土保持措施区采样,并增设坡耕地(3个)作为对照组,共30个调查样点。采样点的经纬度、海拔、坡度信息如表1所示。本研究选取的4种水土保持措施均源于该流域原有坡耕地经植被恢复等方式形成,坡耕地代表未采取措施的原始状态,以此为对照可排除初始背景差异,能更精准量化措施对土壤的影响。样点间应保持独立性和避免选择的主观性。

每一个样点布设20 m×20 m的乔木调查基本样方[9]。在布设的样方内,记录乔木的物种名称和个体数量[9]。同时,在该大样方内沿对角线方向设置3个5 m×5 m的灌木调查样方和5个1 m×1 m的草本调查样方[10],分别记录灌木和草本的物种名称与个体数。再使用测高仪测量样方内每株乔木的树高,使用胸径尺进行胸径测量[11]。对于林下植被盖度计算参照垂直投影法,即通过测定植物地上部分在水平面上的垂直投影面积,再与对应样方的总面积相比,以此精准量化林下植被的覆盖状况[10]。

在每个1 m×1 m的草本样方内,使用直尺垂直测量未分解和半分解枯落物层的总厚度,随机测量共计15个点后计算平均值作为该样方的枯落物厚度值[12]。土壤样品采用五点法采集。即在每个20 m×20 m的样方内,沿对角线和中心选取5个采样点。使用土钻在各点分别按0—20 cm,20—40 cm土层深度采集土壤。每个点的每个深度层采集约2 kg土样,将同一深度的5份土样在田间混合成一个样品,装入密封袋并标记。样品带回实验室后,剔除石块、根系等杂物,经自然风干、过筛后用于土壤理化性质分析。

表1 采样点情况表

Table 1 Sampling point information

类型	经度	纬度	平均海拔/m	平均坡度/(°)
封禁地 n=7	99°19′09.28″	23°40′38.43″	1090.9	17.6
橡胶林 n=10	99°17′47.68″	23°40′33.01″	732.4	15.1
澳洲坚果 n=5	99°18′28.26″	23°39′42.62″	1218.1	15.6
保土耕作 n=5	99°18′20.24″	23°40′57.12″	746.2	13.6
坡耕地 n=3	99°18′17.15″	23°40′53.09″	779.8	18.3

注:表中坡耕地数据为对照组。

2.2 土壤测定指标及方法

对采集的0—20 cm和20—40 cm土层原状土样,置于室内通风阴凉处自然风干后剔除石块、植物残体等明显杂质[13],用木棍轻轻碾散以保持团聚体结构完整。称取上述处理后的土样200 g,通过孔径为5 mm,2 mm,1 mm,0.5 mm,0.25 mm的套筛[14],置于振筛机上振动10 min,分别收集各粒级团聚体并称重,计算各级团聚体[14]根据干筛所得各级团聚体的百分含量,按比例称取风干土样50.00 g作为湿筛试样,将其放入沉降筒中加水至饱和,浸泡10 min后加水至标线,密封并倒转10次进行分散,随后通过对应孔径套筛完成湿筛操作[15],收集并烘干各粒级团聚体称重计算。取部分风干土样研磨过筛后,采用重铬酸钾氧化—外加热法[16]测定土壤有机碳含量,土壤全氮含量经消解后采用全自动离散分析仪测定。土壤容重采用环刀法测定,用100 cm³环刀采集原状

土,浸水饱和12 h后,于105 ℃烘干 48 h后记录土壤的干重[16],按如下公式计算容重。

$$土壤容重=\frac{土壤干重}{环刀容积} \quad (1)$$

土壤孔隙度基于容重与土壤比重进行计算,公式为

$$土壤孔隙度=\left(1-\frac{土壤容重}{土壤比重}\right)\times 100\% \quad (2)$$

2.3　数据分析

本研究所有数据均经Excel 2021整理后,采用SPSS 25.0进行统计分析。土壤团聚体稳定性采用平均重量直径(MWD)表征,通过干筛与湿筛获得的各粒级团聚体重量占比及对应粒级平均直径计算得出,计算公式为[17]:

$$MWD=\sum_{i=1}^{n}x_i w_i \quad (3)$$

式中:X_i为第i级团聚体的平均直径(mm);W_i为第i级团聚体占总土样的重量百分比(%)。

植被群落多样性采用Simpson指数(D)计算,公式为[18]:

$$D=1-\sum_{i=1}^{S}p_i^2 \quad (4)$$

式中:S为样方内物种总数;P_i为第i个物种的个体数量占群落总个体数量的比例,以反映群落内物种的优势度与分布均匀性。

采用独立样本T检验对不同植被类型下不同土层(0—20 cm与20—40 cm)的土壤团聚体各粒级占比和MWD值、土壤有机碳含量及植被多样性指数等指标进行差异显著性分析[19],显著性水平设定为$p<0.05$。为深入揭示影响土壤团聚体稳定性的主要环境驱动因子,采用RDA分析。本分析将团聚体稳定性指标作为响应变量,将植被特征及土壤理化性质作为解释变量进行分析[5]。通过RDA图,可以直观展示不同样本团聚体稳定性的分布情况,以及各环境因子与稳定性指标之间的相关关系。之后筛选对稳定性指标解释贡献显著($p<0.05$)的关键环境因子。

3　结果与分析

3.1　不同水保措施下土壤理化性质分析

如表2所示,各指标在措施间呈现鲜明梯度规律,土壤全氮含量为封禁林〔(1.70±0.01) g/kg〕>橡胶林〔(1.66±0.02) g/kg〕>澳洲坚果林〔(1.59±0.02) g/kg〕>保土耕作〔(1.51±0.02) g/kg〕>坡耕地〔(1.10±0.01) g/kg〕;土壤容重呈反向趋势,封禁林〔(1.02±0.02) g/cm³〕最低,坡耕地〔(1.21±0.03) g/cm³〕最高;土壤孔隙度与土壤容重呈负相关,封禁地(46.63%±1.62%)最高,坡耕地(42.12%±0.30%)最低。

表2　土壤理化性质分析

Table 2　Analysis of soil physicochemical properties

类型	均值±标准差		
	土壤全氮/(g·kg⁻¹)	土壤容重/(g·cm⁻³)	土壤孔隙度/%
封禁地 $n=7$	1.70±0.01a	1.02±0.02 e	46.63±1.62a
橡胶林 $n=10$	1.66±0.02b	1.07±0.02d	45.62±0.36b
澳洲坚果 $n=5$	1.59±0.02c	1.08±0.02c	45.62±0.36b
保土耕作 $n=5$	1.51±0.02d	1.13±0.02b	44.22±0.22c
坡耕地 $n=3$	1.10±0.01 e	1.21±0.03a	42.12±0.30d

注:表中数据为平均值±标准差,同行不同小写字母表示不同水保措施下环境因子的差异显著($p<0.05$);且坡耕地数据为对照组。

3.2　不同水保措施下植被特征

由表3分析显示在土壤有机碳含量、林下植被盖度、林下植物多样性和枯落物厚度指标上,封禁措施均高于橡胶林和澳洲坚果林。在乔木密度方面,橡胶林〔(13.70±1.64)株/100 m²〕和澳洲坚果林〔(12.20±1.30)株/100 m²〕的密度均高于封禁林〔(7.71±1.11)株/100 m²〕。

表3　不同水土保持措施下植被及土壤特征

Table 3　Vegetation and soil characteristics under different soil and water conservation measures

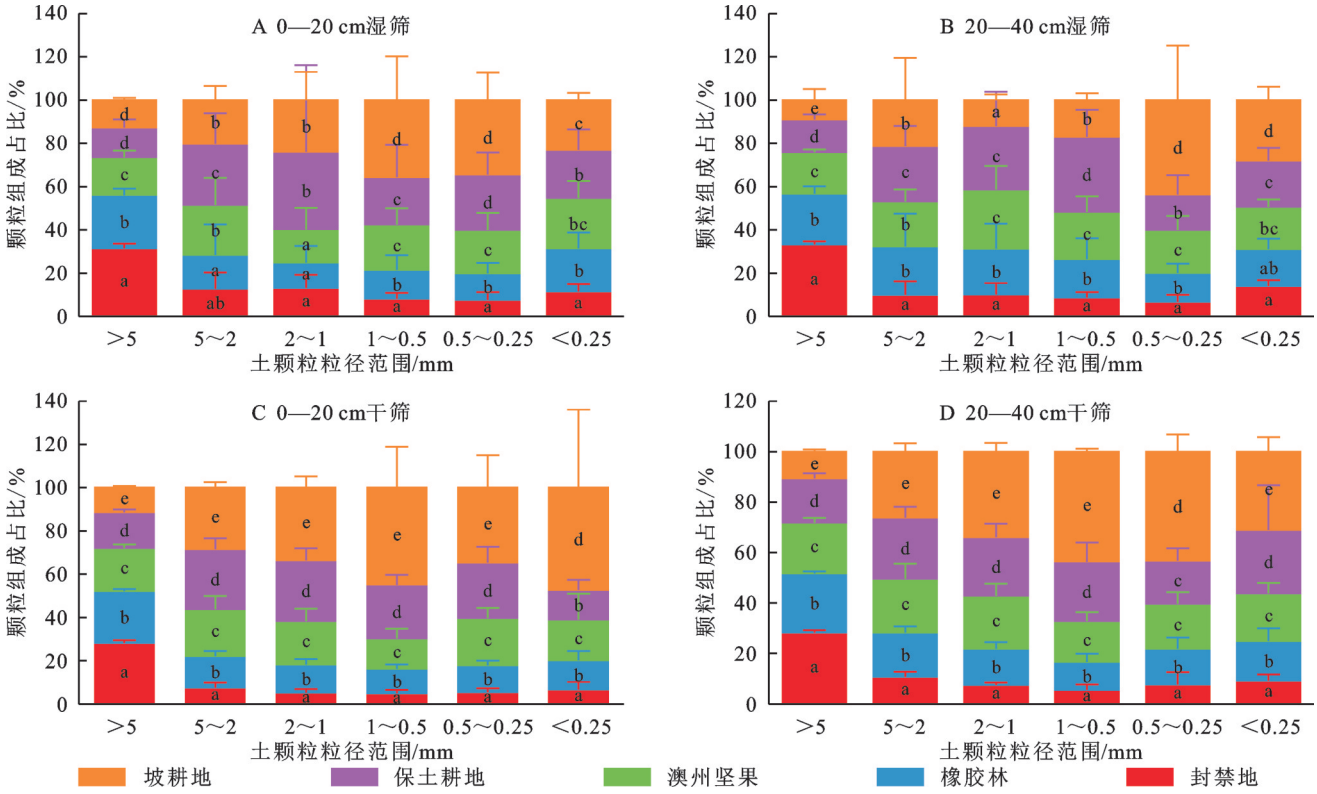
类型	土壤有机碳/(g·kg⁻¹)	林下植被盖度/%	均值±标准差				
			林下植物多样性	枯落物厚度/cm	乔木密度/(株/100 m²)	平均树高/m	平均胸径/cm
封禁地 $n=7$	38.47±2.02a	92.07±2.95a	0.69±0.05a	11.41±1.70a	7.71±1.11b	4.05±0.42b	7.55±1.90b
橡胶林 $n=10$	31.06±1.71b	64.90±13.84a	0.45±0.08b	10.40±1.47a	13.70±1.64a	8.20±1.41a	16.30±4.05a
澳洲坚果 $n=5$	27.91±1.53c	16.98±6.56b	0.30±0.07b	3.90±1.25b	12.20±1.30a	3.46±0.67b	11.69±4.33b
保土耕作 $n=5$	20.50±0.57d	0.42±0.31c	0.06±0.02c	0.70±0.16c	—	—	—
坡耕地 $n=3$	16.64±0.59d	0.30±0.15c	0.05±0.02c	0.63±0.25c	—	—	—

注:表中数据为平均值±标准差,同行不同小写字母表示不同水保措施下环境因子的差异显著($p<0.05$);且坡耕地数据为对照组,"—"代表未发现。

3.3　不同水土保持措施下团聚体粒径分布的差异特征

基于对图1的分析,结果表明,<0.25 mm的微团聚体在坡耕地中显著富集,其干筛比例为9.63%±7.34%,湿筛比例为26.16%±3.75%,而在封禁措施下比例

最低。封禁措施在>5 mm团聚体含量上均显著高于其他各类措施;而保土耕作与坡耕地在部分粒径范围(如干筛5~2 mm)则无显著差异。而经济林>5 mm团聚体含量则介于封禁和耕作措施之间。



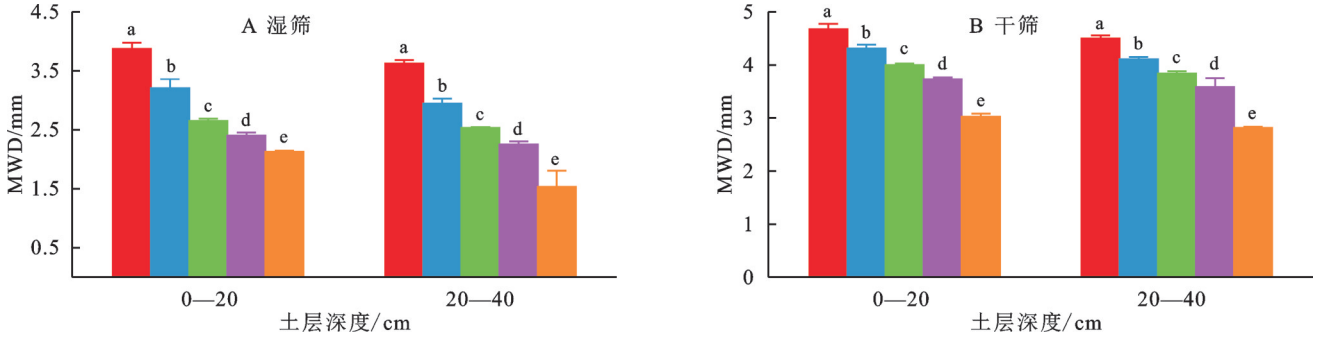
注:图中不同小写字母表示不同水土保持措施下的差异显著($p<0.05$);且坡耕地数据为对照组。

图1 不同水土保持措施下团聚体粒径分布特征

Fig. 1 Characteristics of aggregate particle size distribution under different soil and water conservation measures

3.4 不同措施下团聚体平均重量直径MWD研究

从图2整体趋势来讲,无论是干筛条件还是湿筛条件,亦或是在0—20 cm还是20—40 cm土层,MWD值都呈现出一致规律:封禁>橡胶林>澳洲坚果>保土耕作>坡耕地,这说明具有稳定植被生长的水土保持措施相较于耕作措施的团聚体组成更优。



注:图中不同小写字母表示不同水保措施下的差异显著($p<0.05$);且坡耕地数据为对照组。

图2 不同水土保持措施下MWD差异图

Fig. 2 MWD differences under different soil and water conservation measures

3.5 植被特征及土壤性质对团聚体稳定性的影响

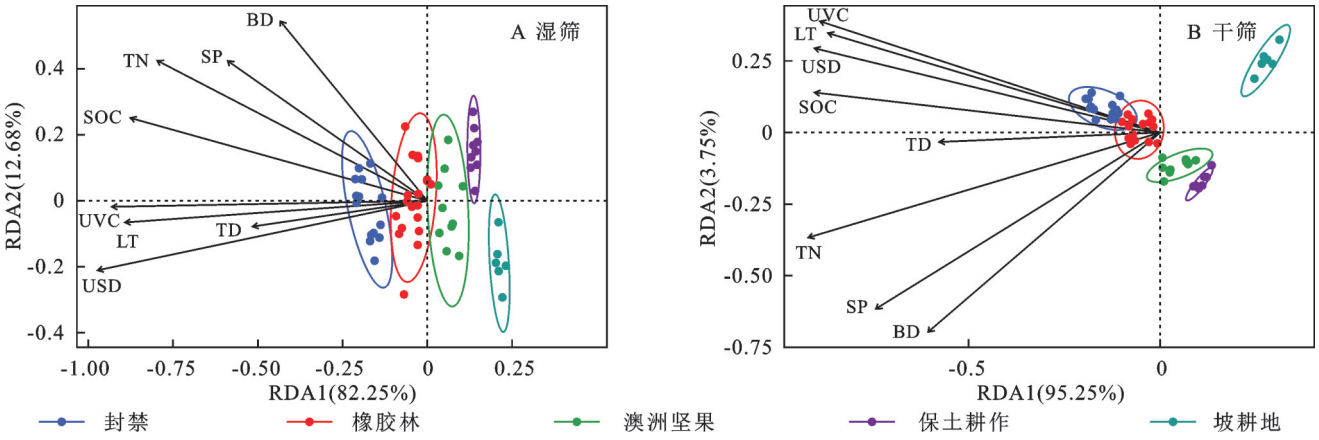
图3的RDA分析结果表明,SOC和TN是影响不同水土保持措施团聚体差异的关键土壤因子。林下植被盖度(UVC)、林下植物多样性(USD)和枯落物厚度(LT)是影响不同水土保持措施团聚体差异的关键植被因子。尽管观察到BD和SP与团聚体之间存在显著关联,但三者的关系更趋于互补与协同,而非单向因果关系。

4 讨 论

4.1 不同措施下团聚体的变异特征

水土保持措施对团聚体有着重要影响[20]。封禁措施下的团聚体表现最优,其中>5 mm大团聚体比例最高,且MWD值在干筛和湿筛条件下均最大。这可能是因为封禁措施相较于其他措施,丰富的植被能向土壤输入更多有机质,从而促进大而稳定的

团聚体形成[20]。经济林措施在团聚体稳定性方面表现次优。橡胶林和澳洲坚果林中>5 mm团聚体的比例和MWD值均高于保土耕作。尽管经济林措施下的植被并没有封禁措施下的丰富,但是长期稳定生长的植被群落相较于耕作措施,对维持良好的团聚体结构有积极的作用[21]。保土耕作措施虽通过耕作改良使团聚体组成优于坡耕地,但其大团聚体比例仍显著低于经济林,而微团聚体比例明显增高,这反映出无保护性耕作措施对团聚体稳定性会产生破坏。



注:以坡耕地为对照组,图中SOC表示土壤有机碳;UVC表示林下植被盖度;USD表示林下植物多样性;LT表示枯落物厚度;TD表示乔木密度、TN表示土壤全氮;BD表示土壤容重;SP表示土壤孔隙度。

图 3　植物特征与土壤性质对团聚体稳定性影响的冗余分析(RDA)

Fig. 3　Redundancy analysis (RDA) of effects of plant traits and soil properties on aggregate stability

与其他亚热带地区研究不同,本研究发现经济林措施下土壤颗粒聚集的团聚体比保土耕作的更大。其他亚热带地区研究表明,经济林的团聚体结构并没有比保土耕作有显著提升[22]。这种差异可能源于南亚热带丰富的降雨促进经济林植被的快速生长,且常年较高温度条件下,经济林中稳定生长的植被较于保土耕作更能促进植被与土壤中的物质循环与生物作用,这对大团聚体的形成是积极的[23]。当前生态经济建设追求高质量目标,强调生态与经济协同发展[24],而本研究的结果表明在南亚热带地区经济林也是一个很好的选择,能兼顾土壤抗蚀能力增加和经济效益的提升。

4.2　不同水土保持措施中影响团聚体稳定性的主控因子

植物群落中植被特征和土壤理化性质的变化对团聚体有重要影响[3]。本研究表明,SOC、TN对团聚体有显著影响。因其分别作为关键胶结物质和土壤生物营养基础,优化土壤结构并可能激发生物活动,从而增强团聚体的稳定性[3]。与坡耕地相比,4种水保措施通过减少干扰和增加有机输入,显著提升SOC和TN含量,为形成稳定的大团聚体奠定基础[25]。尽管BD和SP与土壤团聚体也有显著的相关性,但是它们之间的变化更多是相辅相成,良好的团聚体结构意味着更多的孔隙和更疏松的土壤,这直接表现为BD降低和SP增高。封禁林具有最优的团聚体结构,其BD最低,SP最高;而结构较差的坡耕地则BD值偏高,SP值低。

植被特征中UVC及其USD,还有LT对团聚体有显著影响,它们作为地表生物因子,主要通过调控有机物质的输入过程对土壤团聚体产生间接影响[3]。尤其是枯落物的影响,与其他亚热带地区天然植被和经济林相比[26],该地区天然植被和经济林下的LT更高。而UVC和USD是枯落物产生的重要来源,较高的UVC和USD确保枯落物来源的持续与多样。枯落物对土壤有机碳有重要影响,经微生物分解后可直接转化为SOC[3],显著提升SOC含量可能间接促进土壤团聚体的产生。

在南亚热带小流域实施经济林是生态与经济协同发展的重要措施。本研究结果表明,在实施经济林时要注重林下植被的管理,以维持其UVC和USD。尽管经济林的团聚体与封禁林有差异,但是与其他亚热带地区相比,该地区的经济林下土壤团聚体已接近其他亚热带地区封禁措施下的团聚体[23]。保土耕作相对于坡耕地也可提升土壤团聚体,但是经济林的可持续性和团聚体特征更强。且在亚热带地区经济林的收益并不比耕作的低,甚至可以高出140%[27]。因此在南亚热带地区可以考虑将保土耕作转变为经济林的土地利用类型,以更好地实现水土保持与经济发展的双赢目标。

5　结　论

本研究明确了在本流域内封禁措施的团聚体特征优于其他措施,而传统坡耕地其微团聚体富集,团聚体结构差,土壤易崩解。经济林措施的团聚体结

构介于封禁措施和耕作措施之间。土壤有机碳和土壤全氮是驱动土壤团聚体差异的关键因子。植被特征中的林下植被盖度、林下植物多样性和枯落物厚度是驱动团聚体差异的重要生物因子。长期稳定的植被生长是维持良好团聚体结构的关键前提。而橡胶林和澳洲坚果林作为南亚热带地区重要的兼顾经济和生态的水土保持措施满足这一关键前提。但是需要着重关注经济林林下盖度和植被多样性的变化,以避免其土壤团聚体结构的恶化。

参考文献(References):

[1] 赵珊珊,王百群.长期不同土地管理与施肥策略对土壤有机碳组分及团聚体稳定性的影响[J].植物营养与肥料学报,2026,32(1):121-132.
Zhao S S, Wang B Q. Effects of long-term land management and fertilization strategies on soil organic carbon fraction content and aggregate stability [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2026,32(1):121-132.

[2] 张钦弟,刘剑荣,杨磊,等.半干旱黄土区植被恢复对土壤团聚体稳定性及抗侵蚀能力的影响[J].生态学报,2022,42(22):9057-9068.
Zhang Q D, Liu J R, Yang L, et al. Effect of vegetation restoration on stability and erosion resistance of soil aggregates in semi-arid loess region[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022,42(22):9057-9068.

[3] 尹国强,胡颂江,蓝诗霞,等.森林土壤团聚体影响因素及生态功能研究进展[J].云南大学学报(自然科学版),2023,45(6):1340-1348.
Yin G Q, Hu S J, Lan S X, et al. Research progress on influencing factors and ecological functions of forest soil aggregates [J]. Journal of Yunnan University (Natural Sciences Edition), 2023,45(6):1340-1348.

[4] 陈泽清,杨光,吴际,等.黄土丘陵沟壑区植被类型对土壤团聚体及有机碳的影响[J].中国水土保持科学(中英文),2025,23(2):77-88.
Chen Z Q, Yang G, Wu J, et al. Effects of vegetation types on soil aggregates and organic carbon in loess hills and gullies[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2025,23(2):77-88.

[5] 林立文,邓羽松,王金悦,等.南亚热带人工林种植对赤红壤团聚体分布及稳定性的影响[J].应用生态学报,2020,31(11):3647-3656.
Lin L W, Deng Y S, Wang J Y, et al. Effects of plantation on aggregate distribution and stability of lateritic red soil in south subtropical China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020,31(11):3647-3656.

[6] 唐桂云,茶增华.云南省耿马县民营橡胶生产技术管理现状及措施[J].中国热带农业,2015(1):25-26.
Tang G Y, Cha Z H. Present situation and measures of private rubber production technology management in Gengma County, Yunnan Province[J]. China Tropical Agriculture, 2015(1):25-26.

[7] 何元胜,杨美仙,亚平,等.临沧烟区土壤肥力综合评价[J].中国烟草科学,2014,35(3):23-26.
He Y S, Yang M X, Ya P, et al. Comprehensive evaluation on soil fertility in Lincang tobacco-growing areas[J]. Chinese Tobacco Science, 2014,35(3):23-26.

[8] 李未,张春山,胡伟,等.黑土区典型小流域土壤物理特性空间分异及其与水土保持措施的关系[J].土壤与作物,2023,12(4):353-362.
Li W, Zhang C S, Hu W, et al. Spatial differentiation of soil physical properties and its relationship to soil and water conservation measures in the typical watershed of Mollisol region[J]. Soils and Crops, 2023,12(4):353-362.

[9] 丁晖,方炎明,杨青,等.武夷山中亚热带常绿阔叶林样地的群落特征[J].生物多样性,2015,23(4):479-492.
Ding H, Fang Y M, Yang Q, et al. Community characteristics of a mid-subtropical evergreen broad-leaved forest plot in the Wuyi Mountains, Fujian Province, southeastern China [J]. Biodiversity Science, 2015, 23(4):479-492.

[10] 钟萍,王光军,刘绍华,等.桂北典型岩溶区植物alpha和beta多样性特征及影响因素[J].生态学报,2024,44(7):3016-3026.
Zhong P, Wang G J, Liu S H, et al. Characteristics and effects of plant alpha and beta diversity in typical karst area of northern Guangxi [J]. Acta Ecologica Sinica, 2024,44(7):3016-3026.

[11] 孙林豪,冯仲科,苏珏颖,等.便携式高精度立木胸径测量装置研制与试验[J].农业工程学报,2022,38(15):31-41.
Sun L H, Feng Z K, Su J Y, et al. Development and experiment of the portable high precision measurement device for tree DBH [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(15): 31-41.

[12] 胡晓聪,黄乾亮,金亮.西双版纳热带山地雨林枯落物及其土壤水文功能[J].应用生态学报,2017,28(1):55-63.
Hu X C, Huang Q L, Jin L. Hydrological functions of the litters and soil of tropical montane rain forest in Xishuangbanna, Yunnan, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017,28(1):55-63.

[13] 国家市场监督管理总局,国家标准化管理委员会.土壤质量 土壤理化分析样品的预处理:GB/T 42363—2023[S].北京:中国标准出版社,2023.
State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. Soil Quality—Pretreatment of Samples for Physico-Chemical Analysis: GB/T 42363—2023 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2023.

[14] 王小云,韩佩洋.不同年限梯田土壤团聚体组成特征及

演变趋势研究[J].土壤通报,2024,55(6):1574-1584.
Wang X Y, Han P Y. Composition characteristics and evolution trends of soil aggregates in terraced fields with different ages [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2024,55(6):1574-1584.

[15] 陈文媛,徐学选,华瑞,等.黄土丘陵区林草退耕年限对土壤团聚体特征的影响[J].环境科学学报,2017,37(4):1486-1492.
Chen W Y, Xu X X, Hua R, et al. Effects of forestlands and grasslands on soil aggregates under different vegetation restoration ages in Loess Hilly Region[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2017,37(4):1486-1492.

[16] Tan J, Wu X Q, Wang L, et al. Differential specific leaf area due to different stand structures drives alterations in soil organic carbon in artificial forests of karst areas[J]. Forest Ecology and Management, 2024,556:121719.

[17] 魏彬萌,王益权,李忠徽.种植苹果树对渭北果园土壤胶结物质分布的影响[J].中国生态农业学报,2018,26(11):1692-1700.
Wei B M, Wang Y Q, Li Z H. Effects of planting apple trees on distribution of soil cementing materials in Weibei apple orchards[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018,26(11):1692-1700.

[18] 王宇宁,冯天骄,孙龙,等.晋西黄土区典型人工林与天然林林下植被物种多样性差异及其影响因素[J].北京林业大学学报,2025,47(4):103-116.
Wang Y N, Feng T J, Sun L, et al. Differences and influencing factors of understory vegetation species diversity between typical plantations and natural forests in the loess area of western Shanxi Province, northern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(4):103-116.

[19] 秦崧悦,吴新亮,褚保森,等.贺兰山不同坡向和海拔梯度土壤团聚体组成和稳定性变化特征及其影响因素[J].生态学报,2024,44(17):7770-7785.
Qin S Y, Wu X L, Chu B S, et al. Characteristics and influencing factors of soil aggregate composition and stability under different slope orientation and elevation gradients in Helan Mountain [J]. Acta Ecologica Sinica, 2024,44(17):7770-7785.

[20] 秦文萍,袁晖,孙铭阳,等.围栏封育对退化高寒草甸土壤团聚体组成及稳定性的影响[J/OL].生态与农村环境学报,1-16[2026-05-12].https://doi.org/10.19741/j.issn.1673-4831.2025.0554.
Qin W P, Yuan H, Sun M Y, et al. Effects of Grazing Exclusion on Soil Aggregate Composition and Stability in Degraded Alpine Meadows[J/OL]. Journal of Ecology and Rural Environment1-26[2026-05-12]. https://doi.org/10.19741/j.issn.1673-4831.2025.0554.

[21] 童晨晖,王辉,谭帅,等.亚热带丘岗区经果林种植对红壤团聚体稳定性的影响[J].应用生态学报,2022,33(4):1012-1020.
Tong C H, Wang H, Tan S, et al. Effects of economic fruit forest planting on the stability of red soil aggregates in the subtropical hilly area [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022,33(4):1012-1020.

[22] 林子墨,王纪杰,唐张轩,等.红壤丘陵区种植茶树和柑橘对土壤肥力和水土流失的影响[J].福建农业科技,2024,55(9):17-22.
Lin Z M, Wang J J, Tang Z X, et al. Effects of planting tea trees and *Citrus* trees on soil fertility and soil and water loss in the red soil hilly region[J]. Fujian Agricultural Science and Technology, 2024,55(9):17-22.

[23] 徐凡迪,杨玉春,陈燕旋,等.南亚热带林地利用方式对土壤团聚体组成及碳、氮和磷化学计量的影响[J].林业科学研究,2025,38(1):190-199.
Xu F D, Yang Y C, Chen Y X, et al. Effects of woodland use on soil aggregate composition and C, N and P stoichiometric characteristics in a southern subtropical region[J]. Forest Research, 2025,38(1):190-199.

[24] 王波.以“两山”理念为引领,推动生态经济协同发展[N].重庆科技报,2025-07-31(008). DOI:10,44517/n. cnki. ncqkj, 2025.000281.
Wang B. Promoting the Coordinated Development of Ecological Economy under the Guidance of the ‘Two Mountains’ Concept [N]. Chongqing Science and Technology News 2025-07-31(008). DOI: 10.44517/n.cnki.ncqkj.2025.00281.

[25] 韩紫璇,房静静,武雪萍,等.长期秸秆配施化肥下土壤团聚体碳氮分布、微生物量与小麦产量的协同效应[J].中国农业科学,2023,56(8):1503-1514.
Han Z X, Fang J J, Wu X P, et al. Synergistic effects of organic carbon and nitrogen content in water-stable aggregates as well as microbial biomass on crop yield under long-term straw combined chemical fertilizers application [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2023, 56(8):1503-1514.

[26] 王平,李璐杉,丁智强,等.滇中地区主要森林凋落物有效截留量及其影响因素[J].水土保持研究,2024,31(3):213-221,229.
Wang P, Li L S, Ding Z Q, et al. Effective retention of main forest litter and its influencing factors in central Yunnan[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024,31(3):213-221,229.

[27] 熊晓山,文泽富,宋光煜,等.三峡库区不同规模柑桔园的果农行为与经济效益分析[J].中国南方果树,2006,35(1):1-5.
Xiong X S, Wen Z F, Song G Y, et al. Effects of orchard sizes and cultural activities on the economic returns to *Citrus* growers in the Three Gorges area[J]. South China Fruits, 2006,35(1):1-5.