

植被恢复对油茶园梯壁土壤团聚体及赋存有机碳的影响

吴瑾¹, 刘窑军¹, 郑涵¹, 王茜¹, 李奇¹,
谢文斌¹, 覃玥¹, 段剑², 李忠武¹

(1.湖南师范大学地理科学学院,长沙 410081;2.江西省水利科学院,南昌 330029)

摘要: 为研究梯壁稳定性与植被演替之间的关系,选取不同植被恢复年限(2 年、5 年、10 年、30 年)和不同植被演替阶段(裸地、苔藓、苔草、苔草灌)的梯壁为研究对象,采集表层(0—5 cm)和亚表层(5—20 cm)土壤样品,分析恢复年限和演替阶段对梯壁土壤团聚体及其赋存有机碳的影响。结果表明:土壤大团聚体(>0.25 mm)含量随演替阶段增加不断提高,相同演替阶段恢复年限越久大团聚体占比越高,30 年苔草灌阶段大团聚体占比达 91.63%;土壤平均重量直径(MWD)和几何平均直径(GMD)在 0—5、5—20 cm 土层均表现出随恢复时间增加逐渐增加趋势,30 年土壤 MWD 和 GMD 分别为 1.07~1.41、0.88~1.17 mm,在不同演替阶段表现为苔草灌>苔草>苔藓>裸地;土壤有机碳含量与大团聚体显著相关($r=0.83$, $p<0.001$),表明植被演替与种植年限对于梯壁土壤固碳有积极影响。植被演替和植被恢复时长可以改善梯壁土壤结构,提高梯壁土壤团聚体稳定性和抗蚀性。研究结果可为优化梯田开发提供理论参考。

关键词: 植被恢复; 土壤团聚体; 有机碳; 梯壁; 油茶园

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2023)06-0290-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2023.06.037

Impacts of Vegetation Restoration on Soil Aggregates and Soil Organic Carbon on the Terrace Wall of *Camellia Oleifera* Orchard

WU Jin¹, LIU Yaojun¹, ZHENG Han¹, WANG Xi¹, LI Qi¹,
XIE Wenbin¹, QIN Yue¹, DUAN Jian², LI Zhongwu¹

(1.School of Geographic Sciences, Hunan Normal University, Changsha 410081;

2.Jiangxi Academy of Water Science and Engineering, Nanchang 330029)

Abstract: In order to study the relationship between terrace wall stability and vegetation succession, the terrace walls of different vegetation restoration years (2 years, 5 years, 10 years, and 30 years) and different vegetation restoration stages (bare land, moss, moss-grass, and moss-grass-shrub) were selected as the research objects, and soil samples of surface (0—5 cm) and subsurface (5—20 cm) were collected. The effects of restoration years and succession stages on soil aggregates and their organic carbon were analyzed. The results showed that the content of soil macroaggregates (>0.25 mm) increased with the increase of succession stage, and the proportion of macroaggregates was higher with the longer recovery years of the same succession stage, and the proportion of macroaggregates reached 91.63% in the 30 years moss-grass-scrub stage. Soil mean weight diameter (MWD) and geometric mean diameter (GMD) in 0—5 cm and 5—20 cm soil layers showed a gradual increasing trend with the increase of restoration time, with 30-year soil MWD and GMD ranging from 1.07 to 1.41 and 0.88 to 1.17 mm, respectively, and showing the characteristics of moss-grass-scrub $>$ moss-grass $>$ moss $>$ bare land in different succession stages. Soil organic carbon content was significantly correlated with macroaggregates ($r=0.83$, $p<0.001$), indicating that vegetation succession and planting years had positive effects on soil carbon sequestration. Vegetation succession and vegetation recovery time can improve soil structure, stability and corrosion resistance of soil aggregates. The research results can provide theoretical reference for optimizing terrace development.

收稿日期: 2023-05-31

资助项目: 国家自然科学基金项目(U22A20611, 41877084); 湖南省教育厅科学研究项目(22A0036); 湖南省水利科技推广项目(XSKJ2022068-47); 湖南省自然科学基金项目(2022JJ30389)

第一作者: 吴瑾(2001—), 男, 硕士研究生, 主要从事水土流失生态治理研究。E-mail: jim_wuj@outlook.com

通信作者: 刘窑军(1986—), 男, 博士, 副教授, 主要从事土壤侵蚀与生态修复研究。E-mail: liuyj461@163.com

Keywords: vegetation restoration; soil aggregates; soil organic carbon; terraces walls; *Camellia oleifera* orchard

坡改梯是山丘区陡坡开发的主要模式,粗放机械化坡改梯过程破坏地表植被,大量扰动表层土壤,尤其梯田梯壁陡峭,水力侵蚀和重力侵蚀叠加,土壤质量退化和水土流失尤为严重。目前,对梯田的研究主要集中在梯田的水土保持效应、生态系统服务等方面。胡建民等^[1]对红壤坡地坡改梯的研究结果显示,坡改梯之后水土保持效益显著提高,蓄水和保土效益分别高达 67.6% 和 85.0%;霍云需等^[2]对黄土丘陵区研究提出,梯田具有 53% 的平均水土保持效益,但梯田仍存在不可忽视的土壤侵蚀问题。梯田的主要侵蚀部位为梯壁,梯壁稳定是保证梯田维持生态功能的关键,梯壁发生垮塌使整个梯田结构遭到破坏。早在 1994 年^[3]就有学者开始对梯壁侵蚀问题进行研究,但只从防治方面进行方法上的介绍,未能从根本上解释梯壁易被侵蚀的原因和机制。此后主要关注梯田相对于坡地而言所具有较强的拦蓄泥沙能力及其生态效益,对于梯壁的植被恢复和土壤质量状况关注较少。

土壤团聚体既是表征土壤结构的关键,也是表征土壤抗侵蚀性能的重要因子,土壤中大团聚体(>0.25mm)占比在团聚体稳定性中发挥主导作用^[4],由于土壤团聚结构能够增强土壤抗侵蚀能力,从而直接影响到梯壁土壤稳定性^[5]。土壤团聚体也有着较强的固碳效应,团聚体形成的胶结机制实质上是腐殖质与土壤中其他成分的反应^[6],有研究^[7]表明,表层土壤中,约有 90% 的有机碳固存在团聚体中。适宜的土壤团聚体组合是土壤保持肥力的重要基础^[8],团聚体对水和肥的保持和释放能力直接影响土壤肥力水平^[9]。团聚体的形成与多种因素有关,杨倩等^[10]研究提出,植被恢复可以改善土壤微生物生态环境,从而间接影响土壤大团聚体的形成,植被恢复还可直接促使土壤微团聚体向大团聚体转化。团聚体也受到土壤有机物的影响,有机物胶结作用可促进团粒结构的形成,团聚体的破坏率和有机物含量呈负相关^[11]。

油茶树是世界四大木本油料之一,集中分布在中国南方亚热带地区的高山及丘陵地带,是中国特有的一种纯天然高级油料。截至 2021 年,湖南省油茶面积已达 $1.53 \times 10^{10} \text{ m}^2$,约占我国油茶总面积的 33.39%,且主要分布在湘中低山丘陵区,随着乡村振兴战略深入实施,油茶产业进一步快速发展。机械化、规模化坡改梯是当前油茶开发的主要方式,工程扰动加上植被破坏导致梯壁侵蚀垮塌、土壤结构和肥力退化等现象普遍存在,厘清植被恢复对土壤团聚结构及团聚体赋存有机碳的影响是防止梯壁土壤退化的关键。因此,以湘中红壤低山丘陵规模化坡改梯开发的油茶

园为研究区,选择不同植被演替阶段(裸地、苔藓、苔藓+草本、苔藓+草本+灌木)和不同植被恢复年限(2 年、5 年、10 年、30 年)的梯壁为研究对象,研究植被演替阶段和植被恢复年限对梯壁土壤团聚体组成、稳定性及水稳性团聚体赋存有机碳的影响,研究结果为优化梯田开发和管理、促进油茶等经济林果产业健康发展提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于湖南湘中低山丘陵区的邵阳县白仓镇油茶种植园区(111°20′55″—111°25′58″E, 26°56′28″—26°51′29″N)。地形以低缓丘陵为主,平均海拔为 300 m 左右,最低海拔 210 m,最高海拔 848 m。属亚热带季风性湿润气候区,雨热同期,年均气温 16.9 °C,年降水量 1 079.3 mm。土壤为第四纪沉积物母质发育红壤,土壤质地以粉质黏壤土为主。区域内油茶开发从 20 世纪 70 年代开始,油茶种植面积呈快速增长,机械化坡改梯是油茶开发最主要的方式,油茶园也是研究区域内水土流失的主要策源地。

1.2 土样采集与指标测试

于 2021 年 10 月采样,在研究区内选择种植年限分别为 2 年、5 年、10 年、30 年的油茶园地,根据不同梯壁植被状况选取 4 种植被演替阶段,分别为裸地、苔藓、苔藓+草本(苔草)、苔藓+草本+灌木(苔草灌)。每处垂直于梯壁表面向下采集表层(0—5 cm)和亚表层(5—20 cm)2 个不同深度土壤,每个样点在同一条件不同梯壁面上重复 3 次,共 96 份土壤样品。

土壤样品自然风干,研磨后过 20 目筛用于测量土壤 pH,过 100 目筛用于测量土壤质地以及土壤有机碳。土壤团聚体的测量分别使用沙维诺夫法和改进的 Yoder 法^[12],按照其粒径大小分成 >2, 1~2, 0.5~1, 0.25~0.5, <0.25 mm 团聚体。土壤质地采用吸管法测定,根据美国农业部标准将土粒分成黏粒(<0.002 mm)、粉粒(0.002~0.05 mm)及砂粒(0.05~2 mm),土壤 pH 测定采用电位法,土壤有机碳的测定采用浓硫酸—重铬酸钾加热法。

指标变化程度用方差(σ^2)表示,其计算公式为:

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n} \quad (1)$$

式中: x_i 为单个样本值; $\bar{x}$ 为样本平均值; n 为样本数量。

土壤大团聚体(>0.25mm)占比(PMA)计算公式为:

$$\text{PMA} = \frac{M_{r>0.25}}{M_T} \quad (2)$$

式中: $M_{r>0.25}$ 为 $>0.25\text{mm}$ 粒径团聚体重量(g); M_T 为团聚体总重量(g)。

土壤团聚体的稳定性可用平均重量直径(MWD, mm)和几何平均直径(GMD, mm)进行表示,其计算公式为:

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

$$\text{GMD} = \exp\left[\frac{\sum_{i=1}^n w_i \ln(x_i)}{\sum_{i=1}^n w_i}\right] \quad (4)$$

式中: w_i 代表一定粒级团聚体的重量百分比(%); x_i 代表这一粒级的平均直径(mm)^[13]。

1.3 数据分析

数据统计运算使用 Microsoft Excel 2019 和 IBM SPSS Statistics 26 软件,并使用 Origin 2022 软件进行统计图表制作。

2 结果与分析

2.1 梯壁土壤理化性质

梯壁土壤的基础物理化学性质见表 1。全磷含

量为 $0.20\sim 0.40\text{ g/kg}$,整体上变化不明显,各演替阶段、年限和深度间差异不大。全氮含量随着恢复年限增加而增加,恢复 30 年的各演替阶段及土层深度平均全氮含量是 2 年的 1.35 倍,随着植被演替进行全氮含量显著上升,最高值在 30 年苔草灌 $5\sim 20\text{ cm}$ 土层中。随着植被演替阶段进行土壤有机碳含量整体上呈现上升趋势,总体上恢复年限越久土壤有机碳的含量越高,且表层土壤有机碳增长变化幅度($\sigma^2 = 22.41$)明显高于亚表层土壤($\sigma^2 = 7.80$)。土壤有机碳含量整体上表现为表层土壤大于亚表层土壤,并且随着植被演替阶段的进行差距也在扩大,随着恢复年限增加差距越来越大,2 年裸地阶段表层土壤有机碳含量比亚表层土壤高 17.0% ,而 30 年苔草灌阶段表层土壤有机碳含量比亚表层土壤高 43.8% ,氨态氮和硝态氮总体上也是随着植被演替阶段进行而上升,年限越久含量越高, $0\sim 5\text{ cm}$ 土层含量高于 $5\sim 20\text{ cm}$ 土层。土壤 pH 为 $4.7\sim 5.4$,平均值 4.9,属于强酸性土壤。

表 1 梯壁土壤养分分布

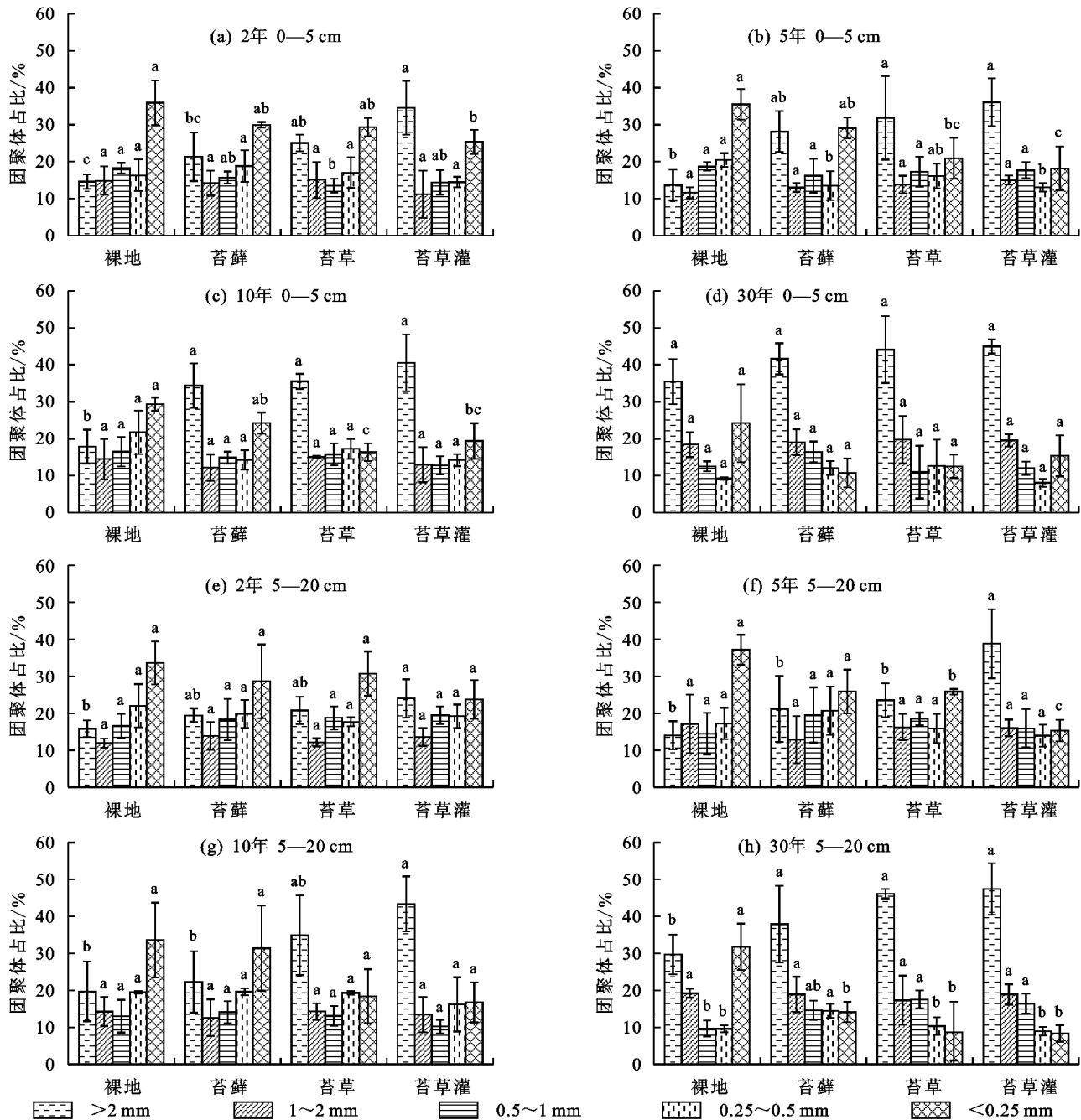
种植 年限/a	演替 阶段	土层 深度/cm	全磷/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	全氮/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	有机碳/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	氨态氮/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	硝态氮/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	pH
2	裸地	0—5	$0.28 \pm 0.03\text{ab}$	$1.44 \pm 0.04\text{c}$	$2.98 \pm 1.77\text{c}$	$12.25 \pm 3.21\text{a}$	$3.68 \pm 0.63\text{ab}$	$5.35 \pm 0.32\text{a}$
		5—20	$0.26 \pm 0.03\text{b}$	$1.49 \pm 0.13\text{c}$	$2.55 \pm 0.45\text{c}$	$11.89 \pm 2.92\text{a}$	$2.18 \pm 0.55\text{b}$	$4.95 \pm 0.14\text{ab}$
	苔藓	0—5	$0.30 \pm 0.02\text{ab}$	$1.96 \pm 0.15\text{bc}$	$4.30 \pm 2.35\text{bc}$	$11.89 \pm 2.03\text{a}$	$3.54 \pm 1.01\text{ab}$	$4.78 \pm 0.04\text{b}$
		5—20	$0.31 \pm 0.06\text{ab}$	$1.59 \pm 0.15\text{bc}$	$6.30 \pm 1.09\text{ab}$	$10.67 \pm 2.14\text{a}$	$3.96 \pm 0.65\text{ab}$	$4.99 \pm 0.19\text{ab}$
	苔草	0—5	$0.35 \pm 0.05\text{ab}$	$2.27 \pm 0.23\text{ab}$	$3.93 \pm 0.90\text{bc}$	$13.65 \pm 2.55\text{a}$	$5.78 \pm 4.73\text{ab}$	$5.01 \pm 0.27\text{ab}$
		5—20	$0.29 \pm 0.06\text{ab}$	$2.05 \pm 0.73\text{bc}$	$6.47 \pm 0.42\text{ab}$	$10.09 \pm 4.26\text{a}$	$6.84 \pm 1.90\text{a}$	$5.15 \pm 0.28\text{ab}$
	苔草灌	0—5	$0.39 \pm 0.12\text{a}$	$2.80 \pm 0.44\text{a}$	$8.91 \pm 0.92\text{a}$	$15.07 \pm 3.93\text{a}$	$7.91 \pm 2.10\text{a}$	$5.05 \pm 0.33\text{ab}$
		5—20	$0.31 \pm 0.03\text{ab}$	$2.07 \pm 0.29\text{bc}$	$6.41 \pm 2.13\text{ab}$	$8.87 \pm 1.44\text{a}$	$6.91 \pm 2.47\text{a}$	$4.88 \pm 0.11\text{ab}$
	裸地	0—5	$0.29 \pm 0.07\text{a}$	$1.35 \pm 0.11\text{cd}$	$4.85 \pm 0.86\text{b}$	$10.68 \pm 3.30\text{a}$	$4.72 \pm 1.95\text{b}$	$5.04 \pm 0.28\text{ab}$
		5—20	$0.33 \pm 0.03\text{a}$	$1.32 \pm 0.16\text{d}$	$4.45 \pm 1.14\text{b}$	$10.55 \pm 2.69\text{a}$	$5.81 \pm 1.19\text{ab}$	$5.21 \pm 0.16\text{a}$
	苔藓	0—5	$0.32 \pm 0.05\text{a}$	$2.23 \pm 0.37\text{abc}$	$6.36 \pm 0.88\text{b}$	$11.59 \pm 4.50\text{a}$	$7.80 \pm 1.80\text{a}$	$5.23 \pm 0.47\text{a}$
		5—20	$0.28 \pm 0.07\text{a}$	$1.57 \pm 0.22\text{bcd}$	$5.71 \pm 1.85\text{b}$	$13.85 \pm 3.57\text{a}$	$4.45 \pm 0.27\text{ab}$	$5.07 \pm 0.09\text{ab}$
5	苔草	0—5	$0.33 \pm 0.07\text{a}$	$2.33 \pm 0.34\text{ab}$	$10.40 \pm 3.14\text{a}$	$16.30 \pm 6.56\text{a}$	$5.29 \pm 1.43\text{ab}$	$4.78 \pm 0.18\text{ab}$
		5—20	$0.24 \pm 0.04\text{a}$	$1.70 \pm 0.22\text{bcd}$	$6.00 \pm 0.17\text{b}$	$12.69 \pm 2.15\text{a}$	$7.55 \pm 0.49\text{ab}$	$5.01 \pm 0.34\text{ab}$
	苔草灌	0—5	$0.27 \pm 0.03\text{a}$	$2.26 \pm 0.27\text{ab}$	$11.94 \pm 3.40\text{a}$	$14.10 \pm 7.46\text{a}$	$6.97 \pm 3.30\text{a}$	$4.72 \pm 0.04\text{ab}$
		5—20	$0.28 \pm 0.01\text{a}$	$2.75 \pm 1.06\text{a}$	$10.75 \pm 1.45\text{a}$	$13.07 \pm 0.37\text{a}$	$6.23 \pm 2.06\text{ab}$	$4.66 \pm 0.01\text{b}$
	裸地	0—5	$0.29 \pm 0.03\text{a}$	$1.95 \pm 0.32\text{ab}$	$6.62 \pm 1.39\text{a}$	$8.95 \pm 1.13\text{c}$	$4.43 \pm 1.73\text{a}$	$4.94 \pm 0.10\text{a}$
		5—20	$0.26 \pm 0.07\text{a}$	$1.74 \pm 0.13\text{b}$	$5.79 \pm 1.18\text{a}$	$10.22 \pm 4.24\text{bc}$	$5.61 \pm 2.09\text{a}$	$4.79 \pm 0.20\text{a}$
	苔藓	0—5	$0.32 \pm 0.04\text{a}$	$2.25 \pm 0.66\text{ab}$	$11.29 \pm 6.18\text{a}$	$14.34 \pm 4.26\text{abc}$	$7.66 \pm 2.25\text{a}$	$4.88 \pm 0.18\text{a}$
		5—20	$0.27 \pm 0.10\text{a}$	$1.92 \pm 0.60\text{b}$	$7.07 \pm 5.78\text{a}$	$18.01 \pm 2.52\text{ab}$	$7.27 \pm 2.04\text{a}$	$4.86 \pm 0.24\text{a}$
	苔草	0—5	$0.39 \pm 0.05\text{a}$	$3.40 \pm 0.94\text{a}$	$13.41 \pm 2.88\text{a}$	$16.26 \pm 1.12\text{abc}$	$7.84 \pm 1.50\text{a}$	$4.74 \pm 0.07\text{a}$
		5—20	$0.36 \pm 0.04\text{a}$	$2.42 \pm 0.77\text{ab}$	$9.26 \pm 4.04\text{a}$	$13.38 \pm 1.94\text{abc}$	$5.31 \pm 1.14\text{a}$	$4.79 \pm 0.13\text{a}$
	苔草灌	0—5	$0.40 \pm 0.07\text{a}$	$3.14 \pm 0.76\text{ab}$	$14.04 \pm 7.45\text{a}$	$18.35 \pm 6.29\text{ab}$	$8.00 \pm 3.54\text{a}$	$4.81 \pm 0.03\text{a}$
		5—20	$0.37 \pm 0.13\text{a}$	$2.19 \pm 0.88\text{ab}$	$10.65 \pm 6.40\text{a}$	$18.74 \pm 5.77\text{a}$	$5.68 \pm 2.82\text{a}$	$4.65 \pm 0.28\text{a}$
30	裸地	0—5	$0.27 \pm 0.01\text{bc}$	$2.67 \pm 0.33\text{bc}$	$9.44 \pm 1.49\text{c}$	$8.89 \pm 1.28\text{d}$	$4.53 \pm 0.48\text{b}$	$4.8 \pm 0.09\text{ab}$
		5—20	$0.20 \pm 0.06\text{c}$	$2.32 \pm 0.20\text{bc}$	$9.04 \pm 3.65\text{c}$	$9.27 \pm 1.56\text{cd}$	$4.75 \pm 0.62\text{b}$	$4.72 \pm 0.15\text{ab}$
	苔藓	0—5	$0.32 \pm 0.03\text{bc}$	$2.40 \pm 0.88\text{bc}$	$14.19 \pm 4.42\text{bc}$	$14.56 \pm 4.63\text{abcd}$	$6.14 \pm 1.41\text{b}$	$4.70 \pm 0.13\text{b}$
		5—20	$0.27 \pm 0.05\text{bc}$	$1.92 \pm 0.60\text{c}$	$10.26 \pm 3.21\text{c}$	$10.65 \pm 5.02\text{bcd}$	$5.72 \pm 0.54\text{b}$	$4.83 \pm 0.14\text{ab}$
	苔草	0—5	$0.37 \pm 0.04\text{a}$	$3.31 \pm 0.28\text{ab}$	$16.75 \pm 1.20\text{ab}$	$16.35 \pm 4.44\text{abc}$	$10.93 \pm 2.69\text{a}$	$4.91 \pm 0.21\text{ab}$
		5—20	$0.34 \pm 0.02\text{ab}$	$2.48 \pm 0.44\text{bc}$	$11.14 \pm 1.24\text{a}$	$15.04 \pm 1.61\text{abcd}$	$10.88 \pm 1.45\text{a}$	$4.96 \pm 0.06\text{ab}$
	苔草灌	0—5	$0.40 \pm 0.06\text{a}$	$3.73 \pm 0.27\text{a}$	$19.53 \pm 2.23\text{a}$	$19.12 \pm 3.84\text{a}$	$12.31 \pm 2.75\text{a}$	$4.98 \pm 0.07\text{a}$
		5—20	$0.40 \pm 0.07\text{a}$	$2.40 \pm 0.64\text{bc}$	$13.58 \pm 0.42\text{bc}$	$16.76 \pm 4.13\text{ab}$	$11.04 \pm 4.12\text{a}$	$4.83 \pm 0.05\text{ab}$

注:表中数据均为平均值±标准差;同列不同小写字母表示同一恢复年限不同演替阶段及土层深度间差异显著($p < 0.05$)。

2.2 梯壁土壤团聚体组成特征

由图 1 可知,裸地大团聚体占比在 0—5 cm 土层中整体上升,5 年后上升速度加快,而 5—20 cm 土层土壤大团聚体变化幅度较小,在 2~5 年间略有下降。苔藓的大团聚体占比整体上高于裸地,随着恢复年限增加,0—5 cm 土层大团聚体占比上升,且增速加快,当恢复年限达到 30 年时,0—5 cm 土层大团聚体占比达到最高值 89.20%;5—20 cm 土层土壤大团聚体占比整体上呈上升趋势,但在 5~10 年有明显下降,增幅也不及 0—5 cm 土层。苔草的大团聚体占比

整体上要高于苔藓阶段,且 0—5,5—20 cm 土层都是逐渐上升。苔草灌 0—5,5—20 cm 土层土壤大团聚体占比都先升后降再升,当恢复年限达到 30 年时,0—5 cm 土层土壤大团聚体占比要低于苔草和苔藓,5—20 cm 土层土壤大团聚体占比略高于苔草。大团聚体中变化最显著的部分是>2 mm 粒径的团聚体,由裸地到苔草灌,>2 mm 粒径的团聚体占比增加 17.71%,1~2,0.5~1,0.25~0.5 mm 粒径团聚体变化幅度较小,变化幅度分别为 11.21%~19.72%,9.71%~19.52%,8.09%~22.14%。



注:图柱上方不同小写字母表示同一恢复年限和不同演替阶段间差异显著($p < 0.05$)。

图 1 不同粒径土壤团聚体占比

2.3 梯壁土壤 MWD 和 GMD 变化特征

由图 2 可知,同一土层深度土壤 MWD 和 GMD 变

化情况一致,整体上植被恢复年限越久,植被演替阶段越高,土壤 MWD 和 GMD 越大。裸地表层 MWD 和

GMD 值变化相对明显,先下降后上升,最低值出现在 5 年,分别为 0.75,0.55 mm。苔藓、苔草和苔草灌阶段的 MWD 和 GMD 增幅均表现为先缓后快,30 年时分别为 1.31~1.35,1.05~1.07 mm;裸地亚表层 MWD 和

GMD 增幅最小,苔藓、苔草和苔草灌的 MWD 和 GMD 值从 10~30 年增长幅度较大,表明植被演替到更高等级后,能保持稳定的土壤团聚体提升作用,且恢复年限越久作用越明显。

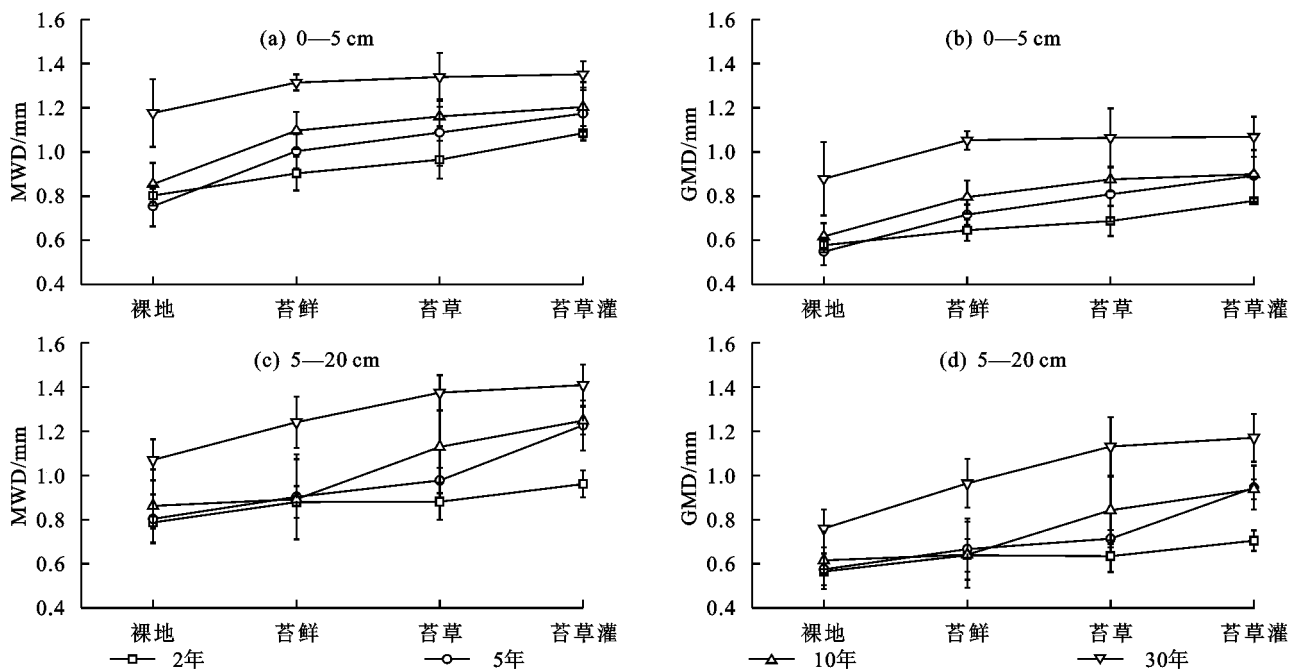


图 2 不同恢复年限与植被演替阶段湿筛土壤 MWD 和 GMD 分布状况

2.4 梯壁土壤水稳性团聚体赋存有机碳特征

表层土壤下,2 年裸地不同粒径土壤团聚体赋存有机碳差异不显著,占比为 19.17%~21.25%(图 3)。随着植被演替阶段的进行,团聚体赋存有机碳占比向大粒径团聚体集中,<0.25 mm 粒径团聚体赋存有机碳占比下降,由苔藓演替到苔草灌,<0.25 mm 粒径团聚体赋存有机碳占比由 19.17%下降至 15.39%。5 年裸地土壤团聚体赋存有机碳在>2 mm 团聚体中占比平均提升至 26.83%,在苔藓阶段占比最高(占比 35.39%),由苔藓到苔草灌,>2mm 团聚体赋存有机碳占比有所下降(占比 22.66%),<0.25 mm 粒径团聚体赋存有机碳占比在上升,但仍低于>2 mm 粒径。当恢复时间增长至 10 年,<0.25 mm 团聚体赋存有机碳占比明显低于其他粒径,平均占比为 15.87%,最低值为苔草(占比 12.92%),>2 mm 团聚体赋存有机碳占比整体呈现上升趋势。到恢复时间增长至 30 年,整体上不同粒径团聚体赋存有机碳占比分布趋于均匀($\sigma^2=0.97$),各粒径间差异较小。

亚表层土壤团聚体赋存有机碳的变化趋势与表层总体一致,相比于表层,亚表层不同粒径之间团聚体赋存有机碳差异更小,总体上随恢复年限增加团聚体赋存有机碳分布趋于均匀。在 2 年、5 年和 10 年的苔藓或苔草阶段,不同粒径之间赋存有机碳占比差距较大,主要表现在>2 mm 团聚体赋存有机碳占比明显上升和<0.25 mm 团聚体赋存有机碳占比

明显下降。

2.5 相关性分析

由图 4 可知,土壤大团聚体占比和其他指标呈显著($p<0.01$)或极显著($p<0.001$)正相关。极显著相关的指标相关系数由高到低依次为 $GMD>MWD>SOC>TN>NN>AOC>AN$ 。SOC 与其他各项指标均呈极显著正相关($p<0.001$),相关系数从高到低依次为 $MWD>GMD>TN>PMA>AOC>NN>AN>TP$ 。AOC 与 TP 和 AN 的相关性不显著,与 TN、SOC、MWD、GMD、NN、PMA 显著正相关且相关系数依次递减。土壤结构指标 PMA、MWD 和 GMD 与 pH 显著负相关($p<0.05$),但是与其他各项指标呈显著($p<0.01$)或极显著($p<0.001$)正相关。

3 讨论

梯田开发形成大量陡峭的梯壁,容易诱发水力和重力侵蚀,梯壁不稳定使得植被难以恢复,不利于形成良好的土壤结构,如果梯壁发生垮塌则会破坏整个梯田结构,损害梯田生态系统服务功能。团聚结构是土壤结构中最重要类型,土壤水稳性大团聚体占比是影响土壤稳定性的重要因素,大团聚体占比越高土壤稳定性越好,抗侵蚀能力越强^[14]。刘文利等^[15]研究表明,未经开垦的原状土壤大团聚体占比最高,遭到人为扰动后大团聚体首先降低,后期土壤受到根系等作用的影响大团聚体占比上升,解释本研究中油茶园在梯田修建初期大团聚体占比较低而随着植被演

替和年限变化上升的原因。梯壁表层土壤 MWD 和 GMD 略高于亚表层土壤,其原因可能和凋落物主要在表层积累有关;在同一植被演替阶段时,年份越久,土壤大团聚体占比和土壤团聚体稳定性越高;相同年限下植被演替阶段越高,土壤团聚体稳定性也越高,

分别与杨倩等^[10]和潘英杰等^[16]研究结果一致。Cao 等^[17]研究显示,柑橘园土壤 MWD 和 GMD 随着种植年限会显著下降,主要是因为柑橘园受耕作活动影响最大,不利于大团聚体的形成^[18],而当梯壁形成稳定的植被覆盖后,土壤大团聚体得到显著提升。

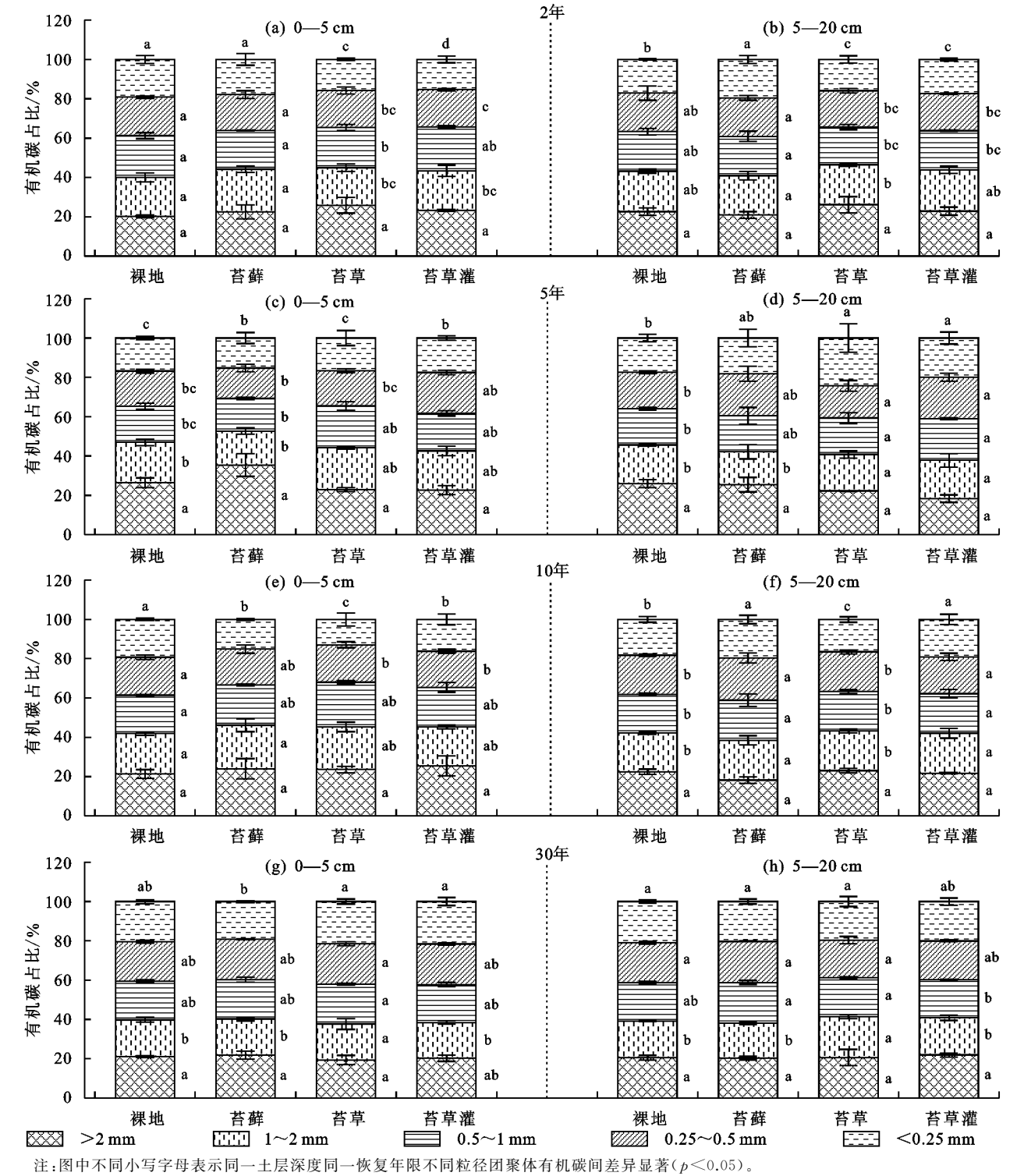


图 3 不同粒径团聚体有机碳占比

大量前人研究^[19-21]显示,土壤大团聚体占比和土壤有机碳含量呈极显著正相关,主要是因为团聚体在形成过程中需要有机物的胶结作用,植被演替进行和种植年限增加使得土壤团聚结构趋于良好,并能显著

提升梯壁团聚体赋存有机碳含量^[22],因此,植被演替和年限增加实际上也是固碳的过程。凋落物是土壤有机碳含量提高的重要途径,凋落物被土壤微生物或其他有机体同化,凋落物中的结构性物质则被机械拉

开以物理方式进入土壤中^[23]。本研究中,随着演替阶段进行和年限增加,土壤有机碳含量也逐渐上升,与苔藓、草、灌木以及油茶的凋落物都有关。表层和亚表层之间的差异也表明,在初期地表凋落物是主要的有机物质输入,影响团聚体及团聚体有机碳,而随着恢复时间延长,亚表层中,草本和灌木的根系逐渐增加,团聚体及其赋存有机碳开始稳步增长,但增幅较表层要低,苔藓由于缺乏根系输入,亚表层土壤团聚体及赋存有机碳增幅显著低于苔草和苔草灌。

PMA	PMA	***	**	***	***	***	***	***	***	***
AOC	0.57	AOC		***	***		***	***	***	***
TP	0.52	0.25	TP	***	***	***	***	**	**	
TN	0.66	0.80	0.62	TN	***	***	***	***	***	***
SOC	0.83	0.77	0.56	0.85	SOC	***	***	***	***	***
AN	0.55	0.27	0.68	0.57	0.64	AN	***	***	***	***
NN	0.63	0.58	0.59	0.67	0.74	0.58	NN	***	***	***
pH	-0.13	-0.33	0.03	-0.07	-0.11	-0.05	-0.15	pH		
MWD	0.94	0.74	0.51	0.76	0.89	0.57	0.69	-0.14	MWD	***
GMD	0.96	0.71	0.51	0.72	0.88	0.56	0.70	-0.15	0.99	GMD
	PMA	AOC	TP	TN	SOC	AN	NN	pH	MWD	GMD

注: *、**、*** 分别表示 $p < 0.05$, $p < 0.01$, $p < 0.001$, PMA、AOC、TP、TN、SOC、AN、NN、pH、MWD、GMD 分别为土壤大团聚体占比、团聚体有机碳均值、全磷、全氮、土壤有机碳、氨态氮、硝态氮、酸碱度、平均重量直径、几何平均直径。

图 4 土壤指标相关性分析

相比于苔草和苔草灌,苔藓对梯壁土壤团聚结构及养分的影响较低。在陡峭且强侵蚀的梯壁上,草本和灌木难以适应梯壁恶劣环境而快速定植,苔藓对环境适应能力极强^[24],能顺利在裸露的梯壁上形成结皮,苔藓作为植被演替的先锋植物,在稳定梯壁生境、抑制土壤侵蚀、改善梯壁立地条件有着不可替代的作用。秦宁强等^[25]研究表明,60%覆盖度的苔藓结皮可承受雨滴动能是裸地的 344 倍,有利于保护土壤减少受到外界侵蚀,提高土壤黏结力与团聚体含量^[26]。苔藓的优先定植为苔草、苔草灌的生长创造条件,而当植被演替到苔草、苔草灌或更等级的植物群落时,植物多样性的增加提供更多的物质输入,加速团聚结构形成及土壤养分提升,同时深层根系也有助于加强梯壁的稳定性,增加有机物质输入,保持生境的长期稳定。大团聚体主要胶结物质为有机物质,随着团聚体粒径缩小,矿物质逐渐成为团聚体胶结物质的主体,在植被演替初期如裸地和苔藓阶段,有机物质积

累较少,加上侵蚀等干扰存在,大团聚体占比及大团聚体中赋存有机碳的占比均相对较低,而当植被演替到苔草和苔草灌等更高等级阶段,大量凋落物及根系存在,且梯壁生境相对稳定,有机质充分参与不同粒级土壤团聚体形成过程,因此,表层和亚表层之间、不同粒级团聚体之间的有机碳含量差异逐渐缩小。在陡峭、强侵蚀的立地条件下,高等级植被群落在稳定梯壁生境、提高梯壁土壤团聚体稳定性、均衡促进不同粒级团聚体有机碳赋存含量等方面具有更显著的积极作用。

4 结论

(1)粗放机械化坡改梯导致梯壁裸露引发水土流失和土壤退化,植被恢复时间增加梯壁土壤 PMA、MWD 和 GMD 也呈现上升趋势,地表植被演替阶段进行可改善土壤结构,增加土壤稳定性。

(2)粒径越大团聚体赋存有机碳占比越高,土壤大团聚体占比和土壤有机碳含量强相关,表层土壤团聚体赋存有机碳高于亚表层,随着植被演替阶段进行,不同粒径团聚体赋存有机碳占比差异先增大后趋向于均衡分布。

(3)苔藓在改善强侵蚀条件下的梯壁土壤团聚体稳定性及水稳性团聚体赋存有机碳方面具有先锋作用,为后续植被演替提供保障,在陡坡梯壁上进行生态修复时不能忽视苔藓的作用。

参考文献:

- [1] 胡建民,胡欣,左长清.红壤坡地坡改梯水土保持效应分析[J].水土保持研究,2005,12(4):271-273.
- [2] 霍云需,朱冰冰,黄土丘陵区水平梯田保水保土效益分析[J].水土保持研究,2013,20(5):24-28.
- [3] 朱建强.陕南土坎梯地垮坎的原因分析及防治对策[J].水土保持通报,1994,14(3):44-47.
- [4] 廖超林,黎丽娜,谢丽华,等.增减施有机肥对红壤性水稻土团聚体稳定性及胶结物的影响[J].土壤学报,2021,58(4):978-988.
- [5] Adnan M, Xu M G, Syed A A S, et al. Soil aggregation and soil aggregate stability regulate organic carbon and nitrogen storage in a red soil of southern China[J].Journal of Environmental Management,2020,270:e110894.
- [6] 金亚波,寇智瑞,韦建玉,等.有机物料对黄壤烟田土壤团聚体组成及土壤肥力的影响[J].西南大学学报(自然科学版),2020,42(8):9-16.
- [7] 张国,曹志平,胡婵娟.土壤有机碳分组方法及其在农田生态系统研究中的应用[J].应用生态学报,2011,22(7):1921-1930.
- [8] 陈恩凤,关连珠,汪景宽,等.土壤特征微团聚体的组成

- 比例与肥力评价[J].土壤学报,2001,38(1):49-53.
- [9] 陈恩凤,周礼恺,武冠云.微团聚体的保肥供肥性能及其组成比例在评断土壤肥力水平中的意义[J].土壤学报,1994,31(1):18-25.
- [10] 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.
- [11] 章明奎,何振立,陈国潮,等.利用方式对红壤水稳定性团聚体形成的影响[J].土壤学报,1997,34(4):359-366.
- [12] Li W Q, Shen F X, Liu Y J, et al. Soil depth determine the ecological stoichiometry of soil aggregates after returning ancient rice terraces to forest[J].Catena, 2022,219:e106587.
- [13] 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.
- [14] Wang Y X, Ran L S, Fang N F, et al. Aggregate stability and associated organic carbon and nitrogen as affected by soil erosion and vegetation rehabilitation on the Loess Plateau[J].Catena,2018,167:257-265.
- [15] 刘文利,吴景贵,傅民杰,等.种植年限对果园土壤团聚体分布与稳定性的影响[J].水土保持学报,2014,28(1):129-135.
- [16] 潘英杰,何志瑞,刘玉林,等.黄土高原天然次生林植被演替过程中土壤团聚体有机碳动态变化[J].生态学报,2021,41(13):5195-5203.
- [17] Cao S, Zhou Y Z, Zhou Y Y, et al. Soil organic carbon and soil aggregate stability associated with aggregate fractions in a chronosequence of citrus orchards plantations[J].Journal of Environmental Management,2021,293:e112847.
- [18] 魏亚伟,苏以荣,陈香碧,等.人为干扰对喀斯特土壤团聚体及其有机碳稳定性的影响[J].应用生态学报,2011,22(4):971-978.
- [19] Li H, Chun Y W, Wen F T, et al. Distribution of organic matter in aggregates of eroded Ultisols, Central China[J].Soil and Tillage Research,2010,108(1):59-67.
- [20] 谢钧宇,曹寒冰,孟会生,等.不同施肥措施及施肥年限下土壤团聚体的大小分布及其稳定性[J].水土保持学报,2020,34(3):274-281,290.
- [21] 罗晓虹,王子芳,陆畅,等.土地利用方式对土壤团聚体稳定性和有机碳含量的影响[J].环境科学,2019,40(8):3816-3824.
- [22] 朱锬恒,段良霞,李元辰,等.土壤团聚体有机碳研究进展[J].中国农学通报,2021,37(21):86-90.
- [23] 苏卓侠,苏冰倩,上官周平.植物凋落物分解对土壤有机碳稳定性影响的研究进展[J].水土保持研究,2022,29(2):406-413.
- [24] 毛祝新,王宇超,卢元.环境因子对苔藓植物生长的影响[J].广西林业科学,2021,50(6):748-752.
- [25] 秦宁强,赵允格.生物土壤结皮对雨滴动能的响应及削减作用[J].应用生态学报,2011,22(9):2259-2264.
- [26] 冉茂勇,赵允格,刘玉兰.黄土丘陵区不同盖度生物结皮土壤抗冲性研究[J].中国水土保持,2011,357(12):43-45,67.
- (上接第289页)
- [31] Pappa A A, Tzamtzis N E, Koufopoulou S E. Nitrogen leaching from a forest soil exposed to fire retardant with and without fire: A laboratory study[J].Annals of Forest Science,2008,65(2):210.
- [32] Cheng Y, Wang J, Zhang J B, et al. The different temperature sensitivity of gross N transformations between the coniferous and broad-leaved forests in subtropical China[J].Soil Science and Plant Nutrition, 2015,61(3):506-515.
- [33] Yan E R, Wang X H, Huang J J, et al. Decline of soil nitrogen mineralization and nitrification during forest conversion of evergreen broad-leaved forest to plantations in the subtropical area of Eastern China[J].Biogeochemistry,2008,89(2):239-251.
- [34] 王琼,王善祥,范志平,等.辽东山溪河岸林群落特征对降雨再分配及其养分特征的影响[J].水土保持学报,2019,33(3):129-137.
- [35] Balestrini R, Tagliaferri A. Atmospheric deposition and canopy exchange processes in alpine forest ecosystems (northern Italy) [J]. Atmospheric Environment, 2001,35(36):6421-6433.
- [36] 唐仕姗,杨万勤,殷睿,等.中国森林生态系统凋落叶分解速率的分布特征及其控制因子[J].植物生态学报,2014,38(6):529-539.
- [37] Vanguelova E I, Pitman R M. Nutrient and carbon cycling along nitrogen deposition gradients in broadleaf and conifer forest stands in the east of England[J].Forest Ecology and Management,2019,447:180-194.
- [38] Yue K, De Frenne P, Fornara D A, et al. Global patterns and drivers of rainfall partitioning by trees and shrubs[J].Global Change Biology,2021,27(14):3350-3357.
- [39] 陈玉真,王峰,吴志丹,等.林地转变为茶园对土壤团聚体及渗透性能的影响[J].水土保持学报,2018,32(5):134-139.
- [40] 杨静,张耀艺,谭思懿,等.亚热带不同树种土壤水源涵养功能[J].生态学报,2020,40(13):4594-4604.