

# 凋落物输入对木荷林土壤微团聚体有机碳及其化学结合形态的影响

朱丽琴<sup>1</sup>, 黄荣珍<sup>1</sup>, 王金平<sup>1</sup>, 黄国敏<sup>1</sup>, 万鸿宇<sup>2</sup>, 林丽靖<sup>1</sup>

(1.南昌工程学院, 江西省退化生态系统修复与流域生态水文重点实验室,

江西 南昌 330099; 2.汕头华侨经济文化合作试验区管委会, 广东 汕头 515000)

**摘要:** [目的] 探究地上凋落物、地下根系和菌根输入对红壤恢复林地土壤微团聚体的影响, 为退化地进行森林恢复后土壤功能重建和生态系统碳循环提供依据。[方法] 以亚热带红壤侵蚀退化地恢复形成的典型阔叶林木荷纯林为研究对象, 设置无凋落物(CT)、菌根(M)、根系+菌根(RM)、地上+地下凋落物(LRM)和地上凋落物加倍(DLRM) 5 种输入处理, 对土壤微团聚体组成、有机碳及其化学结合形态进行分析。[结果] 木荷恢复林土壤微团聚体质量百分比、有机碳、钙键结合态有机碳(Ca-SOC)、铁铝键结合态有机碳[Fe(Al)-SOC]和 Ca-SOC/SOC 在不同处理间均无显著差异( $p>0.05$ ); 相对于 CT, LRM 处理使 20~50  $\mu\text{m}$  和 50~200  $\mu\text{m}$  粒级微团聚体 Fe(Al)-SOC/SOC 分别降低了 40.06% 和 46.67% ( $p<0.05$ )。土壤微团聚体质量百分比、有机碳、Ca-SOC 和 Fe(Al)-SOC 均随粒级的增大而减小, 有机碳及结合态有机碳趋于在较小粒级的微团聚体颗粒组( $<20 \mu\text{m}$ )中富集。微团聚体 Ca-SOC 含量(0.55~1.28 g/kg)远低于 Fe(Al)-SOC 含量(6.88~13.34 g/kg), 但其在不同粒级中的变化幅度大于 Fe(Al)-SOC; Ca-SOC/SOC (1.54%~3.44%)亦小于 Fe(Al)-SOC/SOC (16.75%~42.54%)。微团聚体质量百分比、有机碳、Ca-SOC 和 Fe(Al)-SOC 两两之间呈极显著正相关关系( $r=0.497\sim 0.757, p<0.01$ )。[结论] 木荷恢复林土壤微团聚体及其有机碳受粒级的影响, 对地上凋落物、地下根系和菌根的短期输入有所响应, 但未达到显著水平, 需要在更长的时间尺度上开展研究。

**关键词:** 凋落物; 微团聚体; 钙键结合态有机碳; 铁铝键结合态有机碳; 木荷

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2023)01-0307-07

中图分类号: S714.2

**文献参数:** 朱丽琴, 黄荣珍, 王金平, 等. 凋落物输入对木荷林土壤微团聚体有机碳及其化学结合形态的影响[J]. 水土保持通报, 2023, 43(1): 307-313. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.20230220.006; Zhu Liqin, Huang Rongzhen, Wang Jinping, et al. Effects of litter input on organic carbon and its chemical-bound forms of soil microaggregate in *Schima superba* forest [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(1): 307-313.

## Effects of Litter Input on Organic Carbon and Its Chemical-Bound Forms of Soil Microaggregate in *Schima Superba* Forest

Zhu Liqin<sup>1</sup>, Huang Rongzhen<sup>1</sup>, Wang Jinping<sup>1</sup>, Huang Guomin<sup>1</sup>, Wan Hongyu<sup>2</sup>, Lin Lijing<sup>1</sup>

(1. Jiangxi Key Laboratory of Degraded Ecosystem Restoration and Watershed Eco-hydrology,

Nanchang Institute of Technology, Nanchang, Jiangxi 330099, China; 2. Shantou Overseas Chinese

Economic and Cultural Cooperation Experimental Zone Management Committee, Shantou, Guangdong 515000, China)

**Abstract:** [Objective] The effects of changes in aboveground litter, underground roots, and mycorrhizal inputs on soil microaggregates of restored red soil forestland were analyzed in order to provide a basis for soil function reconstruction and understanding the ecosystem carbon cycle after forest restoration of degraded lands. [Methods] The study was conducted in a pure *Schima superba* forest, a typical broad-leaved forest recovered from eroded and degraded red soil in a subtropical region. Five input treatments were established: no litter (CT), mycorrhiza (M), root+mycorrhiza (RM), aboveground+underground litter (LRM), and

收稿日期: 2022-06-12

修回日期: 2022-08-31

资助项目: 江西省教育厅科学技术研究项目“凋落物、细根和菌根输入对退化红壤微生物群落结构的影响”(GJJ190974); 国家自然科学基金项目“外源有机碳对红壤退化地微团聚体形成与稳定的影响机制”(31660192)。

第一作者: 朱丽琴(1986—), 女(汉族), 江西省景德镇市人, 博士, 讲师, 主要从事植被恢复与重建研究。Email: zhuliqin@nit.edu.cn。

通信作者: 黄荣珍(1975—), 男(汉族), 江西省莆田市人, 博士, 教授, 主要从事坡地水文与生态修复等研究。Email: huangrz@nit.edu.cn。

double aboveground + underground litter (DLRM). The composition of soil microaggregates, organic carbon, and their chemically bound forms were analyzed. [Results] There were no significant differences in soil microaggregate mass percentage, organic carbon, Ca-SOC, Fe (Al)-SOC, and Ca-SOC/SOC among the different treatments ( $p > 0.05$ ). Compared with CT, LRM reduced Fe (Al)-SOC/SOC of microaggregates of size 20—50  $\mu\text{m}$  and 50—200  $\mu\text{m}$  by 40.06% and 46.67%, respectively ( $p < 0.05$ ). Soil microaggregate mass percentage, organic carbon, Ca-SOC, and Fe (Al)-SOC decreased as particle size increased, and organic carbon and bound organic carbon tended to be enriched in smaller particle size groups ( $< 20 \mu\text{m}$ ). The content of Ca-SOC in microaggregates (0.55—1.28 g/kg) was much lower than observed for Fe (Al)-SOC (6.88—13.34 g/kg), but its variation range in different particle sizes was greater than that of Fe (Al)-SOC. The percentage of Ca-SOC/SOC (1.54%—3.44%) was also less than the percentage of Fe (Al)-SOC/SOC (16.75%—42.54%). Microaggregate mass percentage, organic carbon, Ca-SOC, and Fe (Al)-SOC were positively correlated ( $r = 0.497—0.757$ ,  $p < 0.01$ ). [Conclusion] Soil microaggregates and their organic carbon in a restored *S. superba* forest were affected by particle size. Both quantities responded to short-term inputs of aboveground litter, underground roots, and mycorrhiza, but did not reach a significant level, and therefore need to be studied over a longer time period.

**Keywords:** litter; microaggregate; calcium-bonded organic carbon; iron (aluminum)-bonded organic carbon;

### *Schima superba*

团聚体是土壤结构的基本单元,由于其在调节土壤性质、肥力及生态功能等方面具有重要的控制作用而备受人们的关注<sup>[1-2]</sup>。土壤团聚体被认为是土壤养分的储存库,也是土壤固碳的主要方式之一。与大团聚体相比,微团聚体更稳定,它能够承受强大的机械和物理化学应力,并能够在土壤中长期存在<sup>[3]</sup>。因此,微团聚体被认为是土壤中最稳定的碳库<sup>[4]</sup>。Kong 等<sup>[5]</sup>也证实稳定的土壤有机质库中碳输入比例最大的是微团聚体。通常微团聚体所保护的有机碳不易受到干扰<sup>[4]</sup>,其周转速率远低于大团聚体,这意味着微团聚体的形成有利于土壤碳的长期吸存<sup>[6]</sup>。

化学保护机制是固定土壤有机碳的主要机制之一,通过钙键或铁铝键结合是有机碳有机—无机结合的重要形式,键合态有机碳不易被微生物分解,从而减缓有机碳的周转,促进有机碳的积累,因此在一定程度上对有机碳具有保护作用<sup>[2]</sup>。团聚体中的有机碳通过金属键桥结合形成稳定的有机矿质复合体,对有机碳具有物理和化学保护的双重作用<sup>[7]</sup>。然而,以往对化学结合态有机碳的研究多关注于全土上<sup>[8-9]</sup>,对于团聚体尤其是微团聚体内部结合态有机碳研究总体上相对较少。

与农业土壤主要通过人为添加有机质补充土壤有机碳的方式不同,林地则通过地上凋落物、细根和菌根等自肥方式补充。地上凋落物的输入可为土壤微生物的生长和繁殖提供更多的养分,从而促进土壤(尤其是表层土壤)的生物活性,有利于各粒级微团聚体内部的结合以形成微粒有机质<sup>[10]</sup>。地下细根在生长过程中,其根尖可以分泌多糖和糖醛酸等黏性物

质,根毛可以分泌氨基酸、有机酸和单糖等微粒,根系表皮衰老可产生细胞有机物质,这些分泌物可以帮助土壤颗粒团聚,提高稳定性<sup>[1]</sup>。地下菌根能够在不同尺度上通过影响微生物群落结构、释放分泌物及菌丝对微小土粒缠绕等不同机制影响团聚体的形成和稳定<sup>[11]</sup>。然而,不同来源凋落物输入的改变对土壤微团聚体有机碳及其化学结合形态的影响尚不清楚,且在退化地进行森林恢复过程中的相关研究更为缺乏。

木荷(*Schima superba*)是亚热带常绿阔叶林中分布最为广泛的优势树种之一。它在红壤区生态恢复中具有普遍的适用性和典型作用。因此,本研究以亚热带红壤侵蚀退化地恢复形成的木荷纯林为研究对象,研究不同来源凋落物输入处理(无凋落物、菌根、根系+菌根、地上+地下凋落物、地上凋落物加倍)下土壤不同粒级微团聚体组成、有机碳及其化学结合态有机碳的差异,并分析它们之间的关系,以期深入理解退化地进行森林恢复后生态系统碳循环和土壤功能重建提供理论依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验地概况

试验地属于亚热带红壤森林恢复长期定位试验基地,位于江西省泰和县县溪乡(26°44'N, 115°04'E)。该区属亚热带湿润季风气候,年平均气温为 18.6 °C,年平均降水量为 1 726 mm,土壤为第四纪红土发育的红壤,平均海拔为 80 m<sup>[12]</sup>。由于长期受到樵采、挖苎等人为干扰,原生常绿阔叶林于 20 世纪 60 年代已退化为荒草丛。1991 年选用湿地松(*Pinus elliottii*)、马尾

松(*Pinus massoniana*)、枫香(*Liquidambar formosana*)、木荷(*Schima superba*)等针阔叶树种进行森林重建,植被恢复面积达 133 hm<sup>2</sup>[12]。

2018 年 12 月,随机选取种植了 27 a 的 3 片木荷纯林,每片林分中设置 1 个 20 m×20 m 的标准地。采用完全随机区组的方式进行试验设计,每个标准地内设置 5 个区组,每个区组包括 5 种处理小区

(表 1),每种处理小区设置 5 个重复,每个处理小区面积为 0.5 m×1 m。经调查,木荷纯林平均树高为 8.31 m,平均胸径为 11.03 cm,林分密度为 2 175 株/hm<sup>2</sup>,郁闭度为 0.94。木荷纯林 0—10 cm 表层土壤 pH 值为 4.01,有机质含量为 56.95 g/kg,总氮含量为 2.26 g/kg,速效磷含量为 0.03 mg/kg,速效钾含量为 96.41 mg/kg。

表 1 试验处理一览表  
Table 1 List of test treatment

序号	处理名称	简写	处理内容
1	无凋落物 (对照处理)	CT	去除地上凋落物+去除根系+去除菌根:在小区周围挖 15 cm 宽,50 cm 深的壕沟,用石膏板隔离小区与周围土壤,以阻止根系和菌丝长入小区;土壤表层去除地上凋落物后,放置 1 m×0.5 m×0.6 m 的长方体尼龙网框(孔径为 1 mm,底部无尼龙网),以避免外部凋落物进入
2	菌根	M	去除地上凋落物+去除根系+保留菌根:小区周围开沟 0.5 m 深,用孔径为 37 μm 的尼龙网隔离根系,可允许菌丝进入小区;土壤表层去除地上凋落物后,放置 1 m×0.5 m×0.6 m 的长方体尼龙网框(孔径为 1 mm,底部无尼龙网),以避免外部凋落物进入
3	根系+菌根	RM	去除地上凋落物+保留根系+保留菌根:土壤表层去除地上凋落物后,放置 1 m×0.5 m×0.6 m 的长方体尼龙网框(孔径为 1 mm,底部无尼龙网)以阻挡地上凋落物,并每月收集地上凋落物
4	地上+地下凋落物	LRM	保留地上凋落物+保留根系+保留菌根:原状土,不做处理
5	地上凋落物加倍	DLRM	地上凋落物加倍+保留根系+保留菌根:放置 1 m×0.5 m×0.6 m 的长方体尼龙网框(孔径为 1 mm,顶部和底部无尼龙网),每月定期将根系+菌根处理中尼龙网框上收集到的地上凋落物均匀地放置在该小区里

## 1.2 研究方法

1.2.1 土壤样品采集 2019 年 12 月,在每个标准地每个处理小区用不锈钢饭盒取 0—10 cm 原状土,共 75 份样品。带回实验室后,沿土壤自然结构脆弱带将原状土掰成直径大约为 1 cm 的小块,挑去植物残体及石块,用于微团聚体的分离。

1.2.2 测定方法 土壤微团聚体的分离采用超声波震荡—沉降虹吸法[13],分离出 <20, 20~50, 50~200 μm 3 个粒级的微团聚体[2, 14],并置于 60 °C 下烘干后称重。土壤微团聚体有机碳采用重铬酸钾外加热法测定[15];钙键结合态有机碳(Ca-SOC)采用 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 溶液提取,铁铝键结合态有机碳(Fe(Al)-SOC)采用 Na<sub>4</sub>P<sub>2</sub>O<sub>7</sub> 溶液提取[16],用碳氮分析仪(multiN/C3 100)测定提取液中的 Ca-SOC 和 Fe(Al)-SOC。

1.2.3 数据处理 采用双因素方差分析处理、粒级及其交互作用对土壤微团聚体有机碳、钙键结合态有机碳和铁铝键结合态有机碳的影响。当存在交互作用时,进一步检验简单效应;当无交互作用且主效应显著时,则对主效应进行事后两两比较。采用 Pearson 相关性分析土壤微团聚体有机碳含量与结合态有机碳含量之间的关系。数据统计分析采用 SPSS 19.0

完成,显著性水平设为  $p = 0.05$ 。制图采用 Origin 2018 完成。

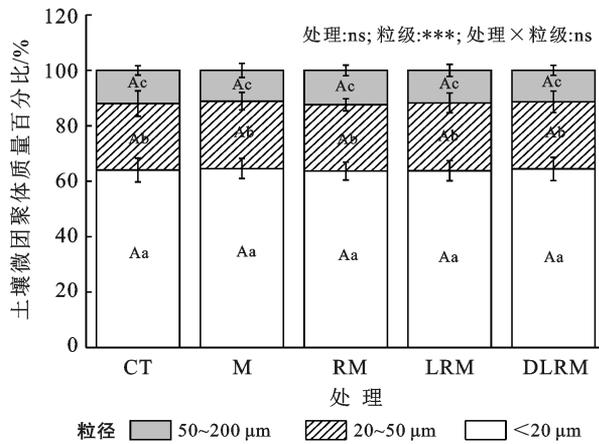
## 2 结果与分析

### 2.1 土壤微团聚体颗粒组成

由图 1 可看出,不同处理的土壤微团聚体质量百分比在各粒级中均无显著差异( $p > 0.05$ ),但同一处理的微团聚体质量百分比在不同粒级中具有极显著差异( $p < 0.001$ )。微团聚体质量百分比随粒级的增大而减小,在 <20 μm 粒级中最高(63.66%~64.58%),是 20~50 μm 粒级的 2.60~2.67 倍,是 50~200 μm 粒级的 5.13~5.81 倍。

### 2.2 土壤微团聚体有机碳及其化学结合形态

由图 2 可看出,同一粒级土壤微团聚体有机碳、Ca-SOC 和 Fe(Al)-SOC 含量在不同处理间均无显著差异( $p > 0.05$ )。微团聚体有机碳含量随粒级的增大总体呈降低趋势。同一处理微团聚体有机碳含量在 <20 μm 粒级中最高(41.44~46.61 g/kg),显著高于 20~50 μm 粒级( $p < 0.05$ ),两粒级间下降幅度为 31.46%~48.85%;而不同处理微团聚体有机碳含量虽然从 20~50 μm 粒级的 23.36~30.20 g/kg 升高至 50~200 μm 粒级的 26.92~37.84 g/kg,但两粒级间差异不显著( $p > 0.05$ )。



注:①图中误差条表示标准差( $n=15$ ),相同大写字母表示同一粒级不同处理之间差异不显著( $p>0.05$ );②不同小写字母表示同一处理不同粒级之间差异显著( $p<0.05$ );ns表示 $p>0.05$ ,\*表示 $p<0.001$ ,\*\*\*表示 $p<0.001$ ;③处理简写字母含义见表1。下同。

图1 不同处理土壤微团聚体质量百分比

Fig.1 Percentage of soil microaggregate mass under different treatments

由图2还可看出,不同处理不同粒级土壤微团聚体Ca-SOC含量为0.55~1.28 g/kg,远小于Fe(Al)-SOC含量(6.88~13.34 g/kg)。土壤微团聚体Ca-SOC含量在不同粒级的变化幅度大于Fe(Al)-SOC含量。如在CT,M,RM,LRM和DLRM处理中,Ca-SOC含量从<20 μm至20~50 μm粒径分别下降了40.08%,41.79%,33.85%,27.40%和37.54%,而Fe(Al)-SOC含量下降的幅度依次为35.15%,35.89%,29.52%,19.49%和29.47%;从<20 μm至50~200 μm粒径中Ca-SOC含量下降的幅度依然大于Fe(Al)-SOC含量。

同一处理微团聚体Ca-SOC含量随粒级的增大呈下降趋势,在<20 μm粒级中最高(1.08~1.28 g/kg),是20~50 μm粒级的1.38~1.72倍( $p<0.05$ ),是50~200 μm粒级的1.59~2.27倍( $p<0.05$ )。M,RM,LRM和DLRM处理微团聚体Ca-SOC含量虽然从20~50 μm粒径的0.74~0.79 g/kg下降至50~200 μm粒级的0.61~0.72 g/kg,但两粒级间差异不显著( $p>0.05$ );而CT处理在两粒级间差异显著( $p<0.05$ ),下降了26.37%。

同一处理微团聚体Fe(Al)-SOC含量随粒级的增大亦呈下降趋势,在<20 μm粒级中最高(11.16~13.34 g/kg),是20~50 μm粒级的1.24~1.54倍(除LRM处理不显著外,其他处理 $p<0.05$ ),是50~200 μm粒级的1.37~1.79倍( $p<0.05$ )。Fe(Al)-SOC含量从20~50 μm粒径的7.94~8.98 g/kg下降至

50~200 μm粒级的6.88~8.20 g/kg,但两粒级间差异不显著( $p>0.05$ )。

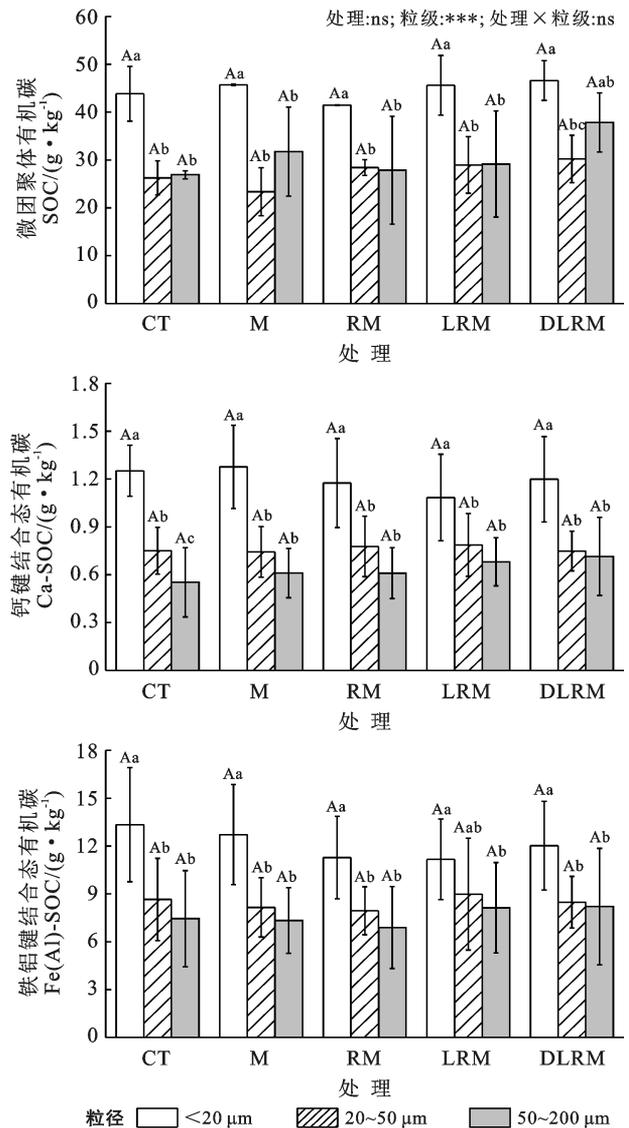


图2 不同处理土壤微团聚体有机碳和化学结合态有机碳

Fig.2 Soil microaggregate organic carbon and its chemical-bound forms under different treatments

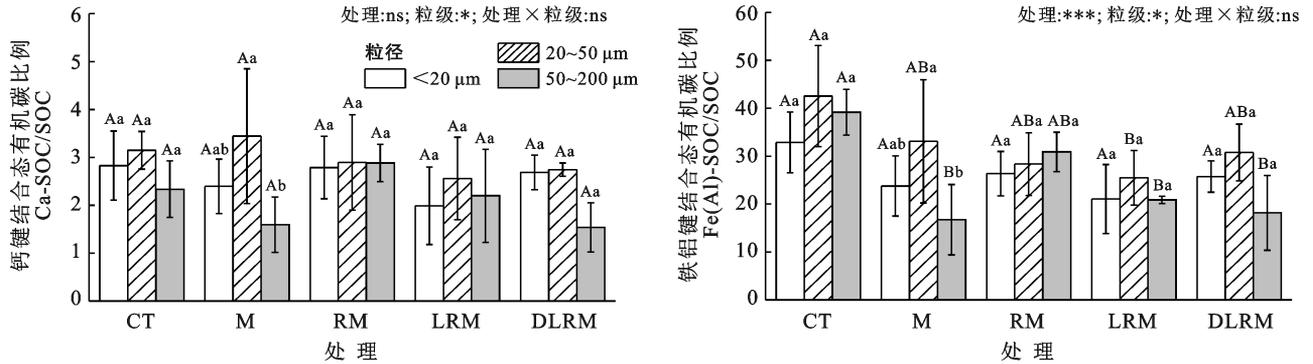
### 2.3 土壤微团聚体化学结合态有机碳占有有机碳比例

由图3可看出,不同处理不同粒级土壤微团聚体Ca-SOC/SOC为1.54%~3.44%,远小于Fe(Al)-SOC/SOC含量(16.75%~42.54%)。同一粒级土壤微团聚体Ca-SOC/SOC在不同处理间均无显著差异( $p>0.05$ )。在CT,RM,LRM和DLRM处理中,微团聚体Ca-SOC/SOC在各粒级间均无显著差异( $p>0.05$ );在M处理中,微团聚体Ca-SOC/SOC从20~50 μm粒级到50~200 μm粒级显著下降( $p<0.05$ ),下降幅度为53.74%。

从不同粒级来看,在<20 μm粒级中,土壤微团聚体Fe(Al)-SOC/SOC在各处理间均无显著差异

( $p > 0.05$ ); 在 20~50  $\mu\text{m}$  粒径中, 相对于 CT 处理, LRM 处理显著降低了微团聚体 Fe(Al)-SOC/SOC ( $p < 0.05$ ), 降低幅度为 40.06%; 在 50~200  $\mu\text{m}$  粒径中, M, LRM 和 DLRM 处理均显著降低了 Fe(Al)-SOC/SOC ( $p < 0.05$ ), 降低幅度分别为 57.23%,

46.67% 和 53.59%。从不同处理来看, CT, RM, LRM 和 DLRM 处理微团聚体 Fe(Al)-SOC/SOC 在各粒径间均无显著差异 ( $p > 0.05$ ); 在 M 处理中, 微团聚体 Fe(Al)-SOC/SOC 从 20~50  $\mu\text{m}$  粒径到 50~200  $\mu\text{m}$  粒径显著下降 ( $p < 0.05$ ), 下降幅度为 49.39%。



注:图中误差条表示标准差( $n=15$ ),不同大写字母表示同一粒径不同处理之间差异显著,不同小写字母表示同一处理不同粒径之间差异显著( $p < 0.05$ )。

图 3 不同处理土壤微团聚体化学结合态有机碳占有有机碳的百分比

Fig.3 Percentage of chemical-bound organic carbon to organic carbon in soil microaggregates under different treatments

### 2.4 土壤微团聚体有机碳与化学结合态有机碳的关系

由表 2 可知,土壤微团聚体质量百分比、有机碳含量、Ca-SOC 含量和 Fe(Al)-SOC 含量之间均存在极显著的正相关关系 ( $p < 0.001$ ), 两两之间 Pearson 相关系数为 0.497~0.757。

表 2 土壤微团聚体有机碳含量和化学结合态有机碳之间的关系  
Table 2 Relationships between soil microaggregate organic carbon content and chemical-bound organic carbon content

指标	SMM	SOC	Ca-SOC	Fe(Al)-SOC
SMM	1			
SOC	0.709**	1		
Ca-SOC	0.757**	0.571**	1	
Fe(Al)-SOC	0.594**	0.497**	0.728**	1

注:SMM 为土壤微团聚体质量百分比;SOC 为微团聚体有机碳;Ca-SOC 为钙键结合态有机碳;Fe(Al)-SOC 为铁铝键结合态有机碳; \*\* 表示在 0.01 水平上(双侧)显著相关。

## 3 讨论

### 3.1 不同来源凋落物输入对土壤微团聚体的影响

凋落物输入量及其与土壤基质的相互作用对土壤团聚体中有机碳的形成和稳定具有重要影响<sup>[17]</sup>。魏强<sup>[18]</sup>研究发现,地上和地下凋落物的输入在增加土壤总有机碳含量的同时,也增加了微团聚体有机碳含量,并促进微团聚体形成较大粒径的团聚体,有利于团聚体中有机碳的持续积累。陈冠陶等<sup>[19]</sup>发现,隔离根系显著降低了腐殖质层土壤碳库活度,增加了碳库的稳定性,因为根系隔离切断了根系分泌物这一

重要的微生物碳源,影响了微生物的活性,减缓了土壤碳的矿化速率。尽管根系残体也是土壤的重要碳源,但本研究根系隔离已持续 1 a,而细根的周转一般不超过 12 个月<sup>[20]</sup>,因此,隔离根系不仅减少了根系分泌物,也在很大程度上排除了后续根系的分解过程。钟思远等<sup>[21]</sup>对南亚热带森林丛枝菌根真菌进行研究,发现其菌丝通过分泌具有超强黏性的球囊霉素相关土壤蛋白促进土壤的团聚。然而遗憾的是,本研究在设计时未考虑仅根系输入的处理,而是考虑了地下根系和菌根输入或与地上凋落物同时输入的综合影响。从研究结果来看,土壤微团聚体质量百分比、有机碳及化学结合态有机碳在不同处理间均无显著差异(图 1—2),其原因可能如下:①从现场地上凋落物的情况来看,其分解较为缓慢,需要较长的时间才能融入土壤;②根系分泌物在土壤中持续的时间较短,Six 等<sup>[22]</sup>研究表明根系分泌物的团聚作用在含 17% 的黏土中只持续 14 d,含 25% 的黏土中持续 30 d,含 45% 的黏土中持续 42 d,其不能解释根系促进土壤团聚的所有升高;③微团聚体的周转本身也较为缓慢,可能需要几十年<sup>[3]</sup>,而本研究从布样到取样仅历时 1 a,时间相对较短,以致微团聚体及其有机碳对地上和地下碳输入的响应不显著。

本研究还发现,地上和地下凋落物的共同输入显著降低了 20~50  $\mu\text{m}$  和 50~200  $\mu\text{m}$  粒径微团聚体 Fe(Al)-SOC/SOC。原因可能是地上、地下凋落物的持续输入,增加了有机碳的来源,而微团聚体有机碳

未能全部转化成结合态有机碳,且输入量大于损失量,导致微团聚体有机碳增加,对 Fe(Al)-SOC 产生稀释效应<sup>[23]</sup>,从而降低了铁铝键结合态有机碳的比例。对于 <20  $\mu\text{m}$  粒级的微团聚体,其有机碳的稳定性较大粒级团聚体更强,变化幅度较小,因此在 <20  $\mu\text{m}$  粒级中,Fe(Al)-SOC/SOC 对不同来源凋落物输入响应不显著。此外,我们还观察到微团聚体有机碳在增加的同时,Ca-SOC 增加的幅度较 Fe(Al)-SOC 更大,从而导致微团聚体 Ca-SOC/SOC 未显著降低。

### 3.2 土壤微团聚体有机碳及其化学结合形态在不同粒级中的分布差异

较小粒级微团聚体的形成主要与紧结合态有机质及黏粒有关,而较大粒级的微团聚体则主要受松结合态有机质和多糖类物质的影响<sup>[24]</sup>。本研究显示土壤微团聚体质量百分比随粒级的增大而减小,而吴铭等<sup>[10]</sup>对茶园土壤的研究却显示微团聚体质量百分比随粒径的增大而增大。主要是茶园土壤在管理中会施肥,使有机质逐年积累,增强了较小粒级微团聚体之间有机质的胶结作用,经过多次的胶结复合从而形成较大粒级的微团聚体,进而增强其保肥供肥能力<sup>[25]</sup>。而自然状况下,林地土壤也很少会受到机械扰动,这可以促进较小粒级微团聚体在大团聚体中的形成。相对于农业土壤添加有机质的方式,林地通过自肥方式补充有机碳的过程可能相对缓慢,因此,在林地可适当施用有机肥以调节土壤不同粒级微团聚体质量分数,从而提高林地土壤的保水供肥能力。

微团聚体有机碳含量随粒级的增大而减小,说明较小粒级的微团聚体对有机碳的吸附能力更强。一方面微团聚体的粒级越小,其比表面积越大,与有机碳结合的能力也就越强;另一方面红壤中含有大量铁铝氧化物和黏土矿物,而较小粒级微团聚体有机质以紧结合态与矿物颗粒复合,加强了对有机碳的固持作用,从而抵制微生物对有机碳的分解释放,进而促进有机碳在较小粒级的微团聚体中积累<sup>[24,26-27]</sup>。Jastrow<sup>[28]</sup>对微团聚体和大团聚体的研究发现,土壤中积累的有机质不到 20% 以颗粒有机质的形式存储于大团聚体中,而大部分有机质与矿物质颗粒结合,这种物理保护促进了大团聚体中微团聚体的发展。

钙键和铁铝键复合体与土壤中的颗粒、轻组有机质聚合在一起,形成团聚体,团聚体又能更好地保护有机矿质复合体<sup>[29]</sup>。本研究中土壤微团聚体 Fe(Al)-SOC 含量远高于 Ca-SOC,这与黄荣珍等<sup>[2]</sup>研究结果一致。主要原因在于:一方面该研究区土壤为南方酸性红壤,其富含铁铝,易形成稳定性较高的

Fe(Al)-SOC,而 Ca-SOC 多形成于钙含量较高的黑钙土或石灰性土壤中<sup>[30]</sup>;另一方面相对于钙键结合的腐殖质,铁铝键结合的腐殖质其热稳定性、抗氧化性及对金属离子的螯合力均更高<sup>[16]</sup>。李雄飞等<sup>[30]</sup>对五台山垂直带土壤进行研究,也发现土壤团聚体中 Fe(Al)-SOC 含量及其分配比例均高于 Ca-SOC,且 53~250  $\mu\text{m}$  的微团聚体 Ca-SOC 与 Fe(Al)-SOC 含量显著正相关。本研究也显示微团聚体质量百分比、有机碳、Ca-SOC 和 Fe(Al)-SOC 两两之间呈极显著正相关(表 2),表明木荷林土壤微团聚体质量百分比的增加有利于微团聚体中有机碳及化学结合态有机碳的积累,微团聚体中有机碳含量会随着结合态有机碳含量的增加而增加,这也说明 Ca-SOC 和 Fe(Al)-SOC 含量是微团聚体有机碳含量高低的决定因素之一,而微团聚体中 Ca-SOC 与 Fe(Al)-SOC 在形成上具有相互促进作用。

同一处理微团聚体 Ca-SOC 和 Fe(Al)-SOC 含量均随粒级的增大而减小,说明两者趋于在较小粒级的微团聚体颗粒组中富集。主要是因为较小粒级的微团聚体中紧结合态有机物质、黏土矿物等含量较高,有利于 Ca-SOC 和 Fe(Al)-SOC 的积累。而 Zhou 等<sup>[31]</sup>得出 Ca-SOC 多分布于大团聚体(200~2 000  $\mu\text{m}$ )中,Fe(Al)-SOC 趋于在微团聚体(<2  $\mu\text{m}$ )中富集,这与水稻土的耕作施肥措施及所研究的团聚体粒级有关。本研究还发现 Ca-SOC 在不同粒级微团聚体中的变化幅度大于 Fe(Al)-SOC,也证实了红壤中 Fe(Al)-SOC 的稳定性高于 Ca-SOC。Zhou 等<sup>[31]</sup>对水稻土的研究也表明 Fe(Al)-SOC 可降低有机碳的矿化速率;Ca-SOC 则主要是被物理保护的活性有机碳组分,其易分解,化学稳定性相对较差。

## 4 结论

木荷林土壤微团聚体质量百分比、有机碳、键合态有机碳和钙键结合态有机碳比例在不同来源凋落物输入处理中均无显著差异。地上和地下凋落物的同时输入显著降低了 20~50  $\mu\text{m}$  和 50~200  $\mu\text{m}$  粒级微团聚体铁铝键结合态有机碳比例。微团聚体质量百分比、有机碳及键合态有机碳两两之间显著正相关,且均随粒级的增大而减小。有机碳及结合态有机碳趋于在较小粒级的微团聚体颗粒组中富集,且钙键结合态有机碳及其比例远低于铁铝键结合态有机碳及其比例。考虑到土壤微团聚体及其有机碳对地上凋落物、地下根系和菌根的短期输入响应不显著,因此需要在更长的时间尺度上开展研究,以深入探讨侵蚀退化林地的土壤结构功能及肥力演变。

## [ 参 考 文 献 ]

- [1] Daly K R, Mooney S J, Bennett M J, et al. Assessing the influence of the rhizosphere on soil hydraulic properties using X-ray computed tomography and numerical modelling [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2015, 66(8): 2305-2314.
- [2] 黄荣珍,王金平,朱丽琴,等.杉木人工林土壤微团聚体中铁铝氧化物与微生物的分布及其关系[J].*水土保持通报*, 2022, 42(1): 1-9.
- [3] Puget P, Chenu C, Balesdent J. Dynamics of soil organic matter associated with particle-size fractions of water-stable aggregates [J]. *European Journal of Soil Science*, 2000, 51(4): 595-605.
- [4] 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.
- [5] Kong A Y Y, Six J, Bryant D C, et al. The relationship between carbon input, aggregation, and soil organic carbon stabilization in sustainable cropping systems [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2005, 69(4): 1078-1085.
- [6] Volikov A B, Kholodov V A, Kulikova N A, et al. Silanized humic substances act as hydrophobic modifiers of soil separates inducing formation of water-stable aggregates in soils [J]. *Catena*, 2016, 137: 229-236.
- [7] Mikutta R, Kleber M, Torn M S, et al. Stabilization of soil organic matter: Association with minerals or chemical recalcitrance? [J]. *Biogeochemistry*, 2006, 77(1): 25-56.
- [8] 雷敏,周萍,黄道友,等.长期施肥对水稻土有机碳分布及化学结合形态的影响[J].*生态学杂志*, 2012, 31(4): 967-974.
- [9] 陈晓旋,安婉丽,陈优阳,等.模拟酸雨对福州平原水稻田土壤化学结合态有机碳含量的影响[J].*环境科学学报*, 2018, 38(12): 4796-4804.
- [10] 吴铭,郑子成,李廷轩,等.不同植茶年限土壤微团聚体及有机碳分布特征[J].*长江流域资源与环境*, 2014, 23(7): 1041-1047.
- [11] Rillig M C, Mummey D L. Mycorrhizas and soil structure [J]. *The New Phytologist*, 2006, 171(1): 41-53.
- [12] 李燕燕,吴春生,刘亮英,等.退化红壤区植被恢复对土壤惰性碳和酶活性的影响[J].*南昌工程学院学报*, 2020, 39(3): 44-47.
- [13] 申思佳.亚热带不同森林植被恢复类型红壤微团聚体胶结物特征[D].江西 南昌:南昌工程学院, 2019.
- [14] Bland A, Chevallier T, Virto I, et al. Bacterial community structure in soil microaggregates and on particulate organic matter fractions located outside or inside soil macroaggregates [J]. *Pedobiologia*, 2014, 57(3): 191-194.
- [15] 国家林业局. LY/T 1237—1999 森林土壤有机质的测定及碳氮比的计算[S]. 北京: 1999年.
- [16] 徐建民, 赛夫, 袁可能. 土壤有机矿质复合体研究(Ⅸ): 钙键复合体和铁铝键复合体中腐殖质的性状特征[J]. *土壤学报*, 1999, 36(2): 168-178.
- [17] Gentile R, Vanlauwe B, Six J. Litter quality impacts short- but not long-term soil carbon dynamics in soil aggregate fractions [J]. *Ecological Applications*, 2011, 21(3): 695-703.
- [18] 魏强. 亚热带典型森林凋落物输入对土壤有机碳累积和稳定性影响[D]. 福建 福州: 福建农林大学, 2018.
- [19] 陈冠陶, 李顺, 彭天驰, 等. 根系隔离和氮添加对湿性常绿阔叶林土壤碳氮组分的影响[J]. *应用与环境生物学报*, 2018, 24(1): 125-131.
- [20] Gill R A, Jackson R B. Global patterns of root turnover for terrestrial ecosystems [J]. *New Phytologist*, 2000, 147(1): 13-31.
- [21] 钟思远, 张静, 褚国伟, 等. 南亚热带森林丛枝菌根真菌与土壤结构的关系[J]. *生态科学*, 2018, 37(5): 16-24.
- [22] 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.
- [23] 李世朋, 汪景宽, 王开勇, 等. 土壤中钙键和铁/铝键结合的有机碳差异的比较[J]. *土壤通报*, 2003, 34(6): 501-504.
- [24] 吴景贵. 土壤颗粒的功能研究进展[J]. *吉林农业大学学报*, 2008, 30(4): 529-537.
- [25] 王晟强, 郑子成, 李廷轩. 四川茶园土壤微团聚体组成及其分形特征[J]. *林业科学*, 2014, 50(9): 10-17.
- [26] 刘敏英, 郑子成, 李廷轩. 不同植茶年限土壤团聚体的分布特征及稳定性研究[J]. *茶叶科学*, 2012, 32(5): 402-410.
- [27] 周国华, 贺灵, 白金峰, 等. 安溪茶园土壤团聚体组成及其对元素分配的影响[J]. *中国地质*, 2016, 43(2): 628-637.
- [28] Jastrow J D. Soil aggregate formation and the accrual of particulate and mineral-associated organic matter [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1996, 28(4/5): 665-676.
- [29] Bonnard P, Basile-Doelsch I, Balesdent J, et al. Organic matter content and features related to associated mineral fractions in an acid, loamy soil [J]. *European Journal of Soil Science*, 2012, 63(5): 625-636.
- [30] 李雄飞, 刘奋武, 樊文华. 五台山土壤水稳性团聚体 Ca-SOC 和 Fe(Al)-SOC 分布特征[J]. *水土保持学报*, 2018, 32(2): 198-203.
- [31] Zhou Ping, Song Guohan, Pan Genxing, et al. Role of chemical protection by binding to oxyhydrates in SOC sequestration in three typical paddy soils under long-term agro-ecosystem experiments from South China [J]. *Geoderma*, 2009, 153(1/2): 52-60.