

红壤恢复林地微团聚体形成与稳定的影响机制研究进展

黄荣珍, 朱丽琴, 邹显花, 房焕英, 王金平, 黄国敏, 李燕燕, 廖迎春, 沈芳芳

(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, 南昌 330099)

摘要: 微团聚体是土壤团粒结构的基本组成单元, 较大团聚体具有更强的稳定性, 其形成与稳定对于土壤有机碳的长期吸存起着决定性作用。目前关于微团聚体形成与稳定性的研究多专注于农业土壤, 红壤侵蚀地植被恢复后土壤团聚体稳定性、有机碳分布及微生物群落特征研究也主要集中在大团聚体上, 而土壤微团聚体的动态变化及其主要影响因素尚不明确, 对于其内在机制更缺乏了解。通过总结土壤微团聚体的形成过程及稳定性, 综述了凋落物、根系和菌根对土壤微团聚体形成与稳定的影响, 阐述了土壤微团聚体内微生物群落、化学结合态有机碳及有机碳结构是土壤有机碳稳定的重要机制, 并提出了未来微团聚体研究方向, 以期揭示红壤侵蚀退化地森林恢复过程中微团聚体形成和稳定的生物化学机制, 从而为深入阐明有机质—土壤团聚结构—微生物—化学耦合作用和森林土壤碳吸存机制提供参考。

关键词: 微团聚体; 凋落物; 根系; 菌根; 微生物群落; 化学结合态有机碳; 有机碳结构; 红壤

中图分类号: S714.2

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2023)04-0014-09

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2023.04.003

Review on the Mechanism of Microaggregate Formation and Stabilization of Restoration Forest in Red Soil

HUANG Rongzhen, ZHU Liqin, ZOU Xianhua, FANG Huanying, WANG Jinping,

HUANG Guomin, LI Yanyan, LIAO Yingchun, SHEN Fangfang

(Nanchang Institute of Technology, Jiangxi Key Laboratory of Degraded Ecosystem

Restoration and Watershed Ecohydrology, Nanchang 330099)

Abstract: Microaggregates are the basic unit of soil aggregate structure and have stronger stability than large aggregates. Their formation and stability play a decisive role in the long-term sequestration of soil organic carbon. Current studies on the formation and stability of microaggregates mainly focus on agricultural soils. Studies on soil aggregate stability, organic carbon distribution and microbial community characteristics after vegetation restoration in red eroded soil are also mainly concentrated on macroaggregates. However, the dynamic changes and their main influencing factors of soil microaggregates remain unclear, and the internal mechanism is still lack of understanding. In this paper, the formation process and stability of soil microaggregates were summarized, and the effects of litter, roots and mycorrhizal on the formation and stability of soil microaggregates were reviewed. It was expounded that microbial community, chemical combined organic carbon and organic carbon structure in soil microaggregates were important mechanisms for soil organic carbon stability, and the research direction of microaggregates in the later stage was put forward, in order to reveal the biochemical mechanism of the formation and stability of microaggregate in the forest restoration process of red eroded soil, and to provide a reference for further clarifying the coupling effect of organic matter, soil aggregate structure microbe and chemistry, and the mechanism of forest soil carbon sequestration.

Keywords: microaggregates; litter; roots; mycorrhizal; microbial communities; chemically bound organic carbon; organic carbon structure; red soil

红壤作为我国重要的土壤资源, 主要分布于长江以南的低山丘陵区。特殊的成土因素、丰沛的降雨、起伏的地形和人类活动的强烈干扰, 导致植被破坏、地表裸露、表土流失、肥力下降、土地退化, 严重制约

收稿日期: 2023-03-15

资助项目: 国家自然科学基金项目(31660192); 江西省教育厅科学技术研究项目(GJJ190974)

第一作者: 黄荣珍(1975—), 男, 博士, 教授, 主要从事生态修复与坡地水文研究。E-mail: huangrz@nit.edu.cn

着区域农业生产及经济社会的可持续发展。经过一系列的水土流失治理和生态恢复工程,植被覆盖率大幅度提高,但与此同时,不少地区出现了“远看绿水青山,近看水土横流”“空中森林”等突出问题。究其原因,在森林恢复过程中,土壤结构与功能并未得到与地上植被同步的快速恢复。事实上,土壤遭受侵蚀过程中,土壤结构被破坏,其所保护的有机质及养分物质大量流失,直接影响土壤功能的发挥。

土壤团聚体作为土壤结构的基本单元,在维持土壤结构稳定性、调节土壤肥力及生物特性等功能方面发挥着重要作用^[1-3]。土壤团聚体是土壤养分储存的重要载体,也是土壤固碳的主要途径之一。相对于大团聚体,微团聚体具有更强的稳定性,其对机械及物理化学应力有着强大的承受力,并可长期存在于土壤中^[4]。因而,微团聚体被认为是土壤中最稳定的碳库^[5]。一般情况下,微团聚体保护的有机碳不受干扰影响^[6],远低于大团聚体内有机质的周转速率,这预示着微团聚体的形成可有助于土壤碳的长期吸存^[7]。Denef等^[8]研究发现,传统耕作和免耕方式下土壤有机碳90%的差异是由微团聚体有机碳差异造成的。可见,微团聚体可能在土壤有机碳对管理实践的响应中扮演着重要作用^[9]。

当前,国内外学者对于团聚体形成与稳定性的研究多专注于农业土壤上^[10-11],有关红壤退化林地微团聚体的研究极为缺乏。在农业土壤中,人为添加有机质是补充土壤有机碳的主要方式,而林地则是以地上凋落物、地下细根及菌根等自肥的方式补给。细根和菌根因其在土壤结构动态和稳定中扮演着重要角色而日益成为研究的焦点^[12-13]。然而,植被恢复过程中微团聚体形成与稳定的主要影响因素尚不明确,其内在机制更缺乏了解。因此,本文总结了凋落物、根系和菌根对土壤微团聚体形成与稳定的影响,阐述了土壤有机碳稳定的生物化学机制,并在此基础上对红壤恢复林地微团聚体的研究方向进行展望,这对于揭示红壤退化地植被恢复过程中土壤功能恢复及土壤固碳具有重要意义。

1 土壤微团聚体的形成与稳定性

土壤团聚体是指由有机复合物和矿物颗粒经凝聚胶结等一系列作用而形成的大小不一的多孔单元^[14]。它是土壤结构的基本单元,也是土壤养分的储存库和微生物生存的主要场所,与土壤的理化性质及生物学特性密切相关。团聚体的稳定性直接影响土壤的水、土界面行为,其在评价土壤质量、抗侵蚀能力和可持续利用等方面具有重要意义。根据土壤团

聚体粒径形成的大小,通常将粒径 $>250\ \mu\text{m}$ 的称为大团聚体,粒径 $<250\ \mu\text{m}$ 的称为微团聚体^[5,15-16]。

由于微团聚体形成过程的复杂性,不同学者持有不同的观点。Tisdall等^[15]曾经提出团聚体层次概念模型,认为矿物质和次生黏土矿物颗粒通过结构稳定的有机物胶结先形成微团聚体,再由根系和菌丝的缠绕或多糖等胶结形成大团聚体;Elliott^[17]研究发现,微团聚体中的有机物性质更稳定,而大团聚体含有更多的活性胶结物质,其较微团聚体更容易分解,该研究较好地证实了层次等级发育概念模型理论。而Six等^[5]则认为,大团聚体先形成,微团聚体在其内部形成,大团聚体破碎后,释放出微团聚体并成为下一轮大团聚体的构建单元。可见,微团聚体是团聚体中相对稳定的部分,是构成新的大团聚体的基础,在很大程度上决定了团聚体的数量^[18-19]。Edwards等^[20]在微团聚体形成模型中也指出,微团聚体是由黏粒、多价金属和有机物质结合而成的高稳定性团聚体,其将微生物与有机碳空间隔离,减少了氧气的扩散,在物理上保护有机质免受微生物降解,从而促进有机碳的积累。

微团聚体的稳定性是指其抵抗外力作用而保持自身形态的能力,在一定程度上受到胶结物质的影响,如有机微团聚体主要是通过阳离子键桥的形式使土壤颗粒与有机物质胶结在一起,其水稳定性较强;而无机微团聚体则主要是通过黏粒矿物与铁铝化合物相结合形成,其对化学试剂的抵抗性较强^[21]。也有学者^[22-23]认为,微团聚体的稳定性与菌丝数量及其性质有关,菌丝对有机质有较强的保护能力。土壤团聚体的稳定性还受到土壤动物和微生物活性的影响^[24],如土壤颗粒经过蚯蚓等土壤动物的排泄而形成的团聚体中有90%是水稳性的,且随着蚯蚓数量的增加,水稳性团聚体比例也相应增加^[25];而大多数微生物可加强腐殖化过程且具有合成多糖的能力,使土壤颗粒黏结在一起,提高团聚体的稳定性,其中大团聚体稳定性与真菌生物量有关,而微团聚体稳定性与细菌生物量有关^[26]。

2 凋落物、根系和菌根对微团聚体形成与稳定的影响

2.1 凋落物对微团聚体形成与稳定的影响

据研究^[27]报道,森林生态系统中约有23 Pg的碳存储于凋落物中。凋落物作为森林土壤有机碳的主要来源之一,其输入与输出在一定程度上决定土壤有机碳库的大小^[28]。凋落物经微生物分解形成大大小小的颗粒有机物,而微生物代谢产生的多糖等

物质以颗粒有机物为核心,形成大小不同的土壤等级结构^[29-30]。虽然凋落物质量对土壤团聚体组分碳动态的影响是短期的,但凋落物输入量及其与土壤基质的相互作用对土壤团聚体有机碳的形成与稳定具有重要影响^[31]。魏强^[32]研究发现,凋落物的输入在增加土壤总有机碳含量的同时,也增加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。Abiven 等^[33]和 De Gryze 等^[34]研究显示,土壤团聚体的稳定性亦随凋落物的添加而增加;Six 等^[5]在土壤团聚体周转率概念模型中提到凋落物分解为更稳定的有机碳化合物,是因为它们被合并到团聚体和有机矿物复合物中。同时,凋落物在分解和淋溶的过程中形成的可溶性碳是微生物生长的重要物质和能量来源,从而发挥重要的团聚作用。

2.2 根系和菌根对微团聚体形成与稳定的影响

菌根是指土壤中某些真菌与植物根系的共生体,在自然界中普遍存在,由于其在土壤结构动态和稳定过程中扮演着重要角色,成为土壤碳/氮循环及微生物研究的热点^[35-36]。根系和菌根通过对土壤进行穿插、挤压或缠绕等物理方式,促进较为稳定的微团聚体形成^[26]。细根在生长中其根毛可分泌单糖、有机酸、氨基酸等微粒,根皮衰老可产生细胞有机物质,根尖可分泌多糖、糖醛酸、酚类化合物等黏胶物质,所有这些分泌物可以像胶水一样帮助土壤颗粒团聚^[1],同时也降低变湿速率和提高稳定性^[37]。而菌根能够在不同尺度上通过多种机制来影响团聚体的形成与稳定,如分泌物的释放、菌丝对小粒径土壤颗粒的缠绕及对微生物群落结构的影响等^[38]。钟思远等^[39]对不同演替阶段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团聚体的形成。与此同时,根系和菌根分泌物也改变根—土界面的理化特征及生物学性状,并构成微生物高度宝贵的资源,促进微生物的生长,使得根际土壤比非根际土壤具有更加丰富的微生物多样性^[40-41],而微生物的活动又可以改善土壤的团聚状况,进而改良土壤结构。

根系和菌根的其他特性对土壤团聚体的稳定也能产生不同程度的影响,如 Tisdall^[42]研究表明,菌丝长度可以提高团聚体的耐水性;Graf 等^[43]研究显示,与未接种对照植物相比,菌根化白桉木的根系明显增多,土壤团聚体稳定性与菌根化程度显著正相关;Bast 等^[44]在田间试验中也发现,菌根接种显著提高植株的成活率,且根长密度趋于升高,平均根径显著增加,但相对于

未接种部位,却延迟团聚体的稳定,团聚体稳定性系数与根长密度、平均根径(<0.5 mm 径级的根系)显著正相关。因此,根系和菌根在土壤团聚过程中可能发挥着重要作用。

3 微团聚体形成与稳定的机制

3.1 微团聚体形成与稳定的微生物学机制

微生物作为土壤的基本组成部分之一,是土壤各种生物化学和生理过程动态平衡的调节者,是物质转化、能量流动过程的参与者,在形成和稳定土壤有机碳积累的团聚体方面发挥着重要作用^[45]。Lehmann 等^[29]提出微生物代谢产物而非植物残体是微团聚体形成的核心。在细菌的生长过程中,产生的胞外聚合物以外围黏液聚合物的形式进入土壤溶液,这些聚合物包括带负电荷的多糖、多糖醛、氨基酸等^[46-47],它们具有黏性,能够在黏土颗粒之间制造束缚以形成团聚体^[2]。同时,细菌分解有机质形成的有机—矿物产物,与土壤颗粒联系形成微团聚体(直径 $2\sim 20\ \mu\text{m}$);这些微团聚体反过来与细菌和腐生真菌产物束缚形成更大一点的团聚体(直径 $20\sim 250\ \mu\text{m}$)^[48]。Blaud 等^[49]利用 DGGE 图谱研究表明,有机—矿物土壤组分(微团聚体)的细菌群落与未分组的土壤存在显著差异;Davinic 等^[50]应用 16 s RNA 基因的焦磷酸测序研究了大团聚体、微团聚体和粉土+黏土组分的微生物群落组成,得出每种土壤微环境中支持一个独特的细菌群落,其中微团聚体显现出相对丰度较高的红色杆菌亚纲和最少的有机碳;Fox 等^[51]研究也表明,大团聚体和微团聚体在细菌群落相对丰度上存在显著差异,可能表明了不同的捕食压力,也可能是有机碳含量或团聚体不同粒径之间的氧浓度差异所致^[52];荣勤雷^[53]研究发现,随着团聚体粒径的减小,增加了放线菌门的相对丰度,降低了硝化螺旋菌门的相对丰度;Mummey 等^[54]研究了美国怀俄明州煤矿恢复土壤和未干扰土壤,得出 2 种土壤微团聚体内的微生物种群存在明显的差异,虽然它们的细菌群落都是由放线菌控制,但未干扰土壤仅仅包含放线菌亚纲,而恢复土壤中红色杆菌亚纲占优势地位。

由于环境因素的差异,嵌在土壤基质中的团聚体为微生物提供了一个空间异质性的栖息地,其大小对微生物群落具有显著影响,而居住在这些三维结构中的微生物群落可根据水化和其他外部条件的变化,动态地调整其活性和组成^[52,55]。Smith 等^[56]研究表明,从大团聚体到微团聚体,真菌与细菌的比值减小,革兰氏阳性与阴性细菌的比值有所增加。在团聚体中,细菌群落的分布受到团聚体物理结构和碳/氮水

平的影响,真菌群落的分布则受到所种植的作物种类和施肥的共同影响^[57-58]。何玉亭等^[59]研究显示,团聚体稳定性指标与土壤微生物显著相关,尤与真菌和放线菌的相关性更为显著;唐士明^[60]研究也表明,团聚体稳定性与细菌和丛枝菌根真菌存在显著正相关关系。细菌主要存在于微团聚体中,而真菌被认为主要存在于大团聚体中^[61-62];但也有学者^[47,63-64]提出真菌菌丝体分泌球囊霉素和疏水蛋白,其与土壤蛋白、黏液、多糖和胞外化合物,是重要的土壤颗粒胶结物质,也可促进微团聚体形成。在真菌群落当中,丛枝菌根真菌在陆地生态系统广泛存在(与80%的陆地植物相联系),且其菌丝体通过复杂而又相对独立的直接和间接机制影响土壤团聚^[65]。在直接机制中,Peng等^[66]和Zheng等^[67]认为,丛枝菌根的菌丝网络、外生菌根、腐生和其他真菌包裹土壤颗粒并将土壤颗粒固定在一起,而Chenu等^[68]提出菌丝网络沿着展开的菌丝连接土壤颗粒形成团聚体。在间接机制中,Caesar-TonThat等^[47]提出真菌菌丝体的分泌物进入土壤,为周围其他微生物改变了土壤中孔隙空间的属性和可利用程度,并改变了寄主植物根与根际的形态学结构和生物化学属性;Diehl^[69]提出真菌菌丝体的分泌物不仅帮助土壤团聚,还帮助增加团聚体稳定性,但Martin等^[70]认为,地球囊霉、摩西球囊霉、根内球囊霉并不影响沙质壤土的团聚体分布和稳定性。作为有机-矿物相互作用结果的微团聚过程可以帮助保护有机质自身和孔隙中物理吸附的任何有机残体^[71-72]。因此,有机-矿物相互作用与物理吸附的因果关系对于提高碳稳定性而提出的管理措施显得十分重要^[29]。

3.2 微团聚体形成与稳定的化学机制

3.2.1 化学结合态有机碳 土壤铁铝键结合态有机碳(Fe(Al)-SOC)和钙键结合态有机碳(Ca-SOC)是有机碳有机无机结合的主要形式,通过化学保护提高土壤有机碳的稳定性,对维持土壤肥力及作物生长具有重要意义,特别是以金属离子为键桥的矿质复合体在土壤中的积累效果明显^[23,73]。铁铝键结合的有机矿质复合体属于内圈配合物,钙键结合的有机矿质复合体属于外圈配合物,但前者对金属离子的耦合力及腐殖质的热稳定性均高于后者^[74]。铁铝键和钙键复合体含量约为复合体总量的1/2,是有效养分的主要储备^[75],其与土壤中的颗粒、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^[76-77]。何云峰等^[78]采用化学氟化铵去除一部分铝键结合腐殖质后,5~10 μm的微团聚体在红壤

中数量大幅减少,<5 μm的微团聚体增加。有研究者认为氧化物的团聚效果主要在于微团聚体水平;在富含氧化物的土壤中,氧化物被认为是支配性的束缚介质^[26],其通过阳离子桥与黏粒表面电荷形成团聚体,被认为是热带亚热带土壤微团聚体形成的主要机制之一^[10,79]。魏朝富等^[80]研究紫色水稻土也发现铁氧化物含量和<10 μm的土粒团聚量存在显著正相关关系。水稻土含有大量铁铝氧化物及1:1型黏粒矿物,它们与有机碳的结合或与土壤黏粒的作用可促进团聚体的形成^[81]。李雄飞等^[82]研究发现,土壤团聚体中Ca-SOC含量低于Fe(Al)-SOC,且两者在53~250 μm粒级呈正相关。李世朋等^[83]研究结果显示,从北至南的地带性土壤中,Ca-SOC和Fe(Al)-SOC占总有机碳的比值逐渐升高,且Fe(Al)-SOC矿化稳定性高于Ca-SOC。Zhou等^[10]研究了我国南方红壤性水稻土、紫色水稻土和黄泥土团聚体内的有机碳键合形态,得出Fe(Al)-SOC趋向于在细团聚体颗粒组集中,而Ca-SOC多分布于粗团聚体颗粒组中,并认为团聚体更新中物理保护的有机碳在细团聚体形成中进一步与氧化铁铝的键合可能是这些水稻土中有机碳稳定的重要机制。

3.2.2 有机碳结构 土壤有机碳结构是有机碳稳定和周转的重要机制,对有机碳质量及功能具有重要影响^[84]。有机碳结构以烷基碳、烷氧碳、芳香碳和羰基碳为主,其中烷氧碳和羰基碳是易分解、不稳定的官能团,而烷基碳和芳香碳则是难分解、顽固性高的官能团^[85-86]。烷基碳与烷氧碳的比值及芳香碳与烷氧碳的比值通常能反映有机碳的稳定性及分解程度,其值越大表明有机碳越稳定^[87-88]。Lehmann等^[29]提出碳在微团聚体中表现为随机分布,而脂肪族C-H、芳香族C=C和N-H、多糖类C-O存在微尺度空间分布模式;脂肪族碳和脂肪族碳与芳香族碳的比值与高岭石表面的O-H呈现正相关,表明有机-矿物相互作用对于微团聚体内碳稳定性具有重要作用;他们还认为矿物表面被包的有机物质与整个微团聚体的有机物质相比,具有更多的脂肪族碳和羰基碳,其光谱特征类似微生物的代谢产物。Eusterhues等^[89]研究发现,相同条件下土壤中芳环密度高的可溶性碳比芳环密度低的更容易被铁铝氧化物吸附固定,来自于木质素分解的可溶性碳比多糖类分解的更容易被吸附。Davinic等^[50]提出土壤团聚体内的细菌相对丰度更多的是由有机质的化学组成变化而非数量变化驱动,特定的细菌组合与特定的土壤化学物质相联系,且这种联系有别于全土样品,同时认为少

数优势细菌种群比多数优势种群表现出与特定化学功能群更紧密的关系有助于进一步揭示特定细菌组合与碳吸存之间的潜在联系。

目前,分析有机碳结构的方法主要有红外光谱法和核磁共振技术,前者根据红外吸收曲线的峰形、峰位及峰强来判定化合物的结构组成^[90],而后者是一种非破坏性的研究方法,它能清晰反映有机碳不同官能团的相对数量,在研究有机碳的化学结构方面具有明显优势^[86]。周萍等^[91]采用固态¹³C核磁共振技术分析了红壤土和黄泥土在不同施肥处理下的颗粒有机质的结构特征,得出本体土壤与不同粒径的水稳性团聚体中颗粒有机质具有相似的结构组成。Davinic等^[50]研究显示,微团聚体吸收更多 $1\ 370\sim 1\ 450\ \text{cm}^{-1}$ 区域的酚基碳和烷基碳(抗性碳),粉土+黏土组分以芽单胞菌门和OP10类群为特征,它们与 $1\ 250\sim 1\ 150\ \text{cm}^{-1}$ 范围(包括降解和抗性碳形态)的光谱吸收呈正相关。郭素春等^[92]对团聚体有机碳分子结构特征研究发现,芳香碳和多糖是大团聚体有机碳的主要来源,而脂肪碳、烷基碳、芳香碳及酚醇化合物是微团聚体有机碳的主要来源;且随团聚体粒径的减小,团聚体有机碳化学结构趋于稳定。

4 存在的问题与展望

红壤退化地植被恢复后,地上凋落物、地下细根等输入使土壤有机质大幅度提高,同时这些变化将影响土壤团聚结构、土壤微生物及其相互关系,进而影响调控土壤水分、养分供应和固碳的能力。然而,关于红壤侵蚀地植被恢复后土壤团聚体稳定性、有机碳分布及微生物群落特征都有一定研究^[73,93-94],但是对于植被恢复后团聚体尤其是微团聚体的形成与稳定机制还缺乏系统性的认识。鉴于此,提出几点展望:

(1)微团聚体的形成与稳定过程涉及物理、化学及生物的相互作用,且一般同时发生,未来的研究需要多学科的交叉和融合。近年来,生物化学(PLFA、FAME)^[95-96]和分子微生物学技术(DGGE)^[97-98]、生物大分子标记技术^[99]、纳米二次离子质谱技术^[100]、高分辨率核磁共振技术结合魔角旋转(MAS)和交叉极化(CP)技术^[101]等已被用于研究微生物群落结构及其对不同有机物的利用、土壤有机质的碳结构变化及稳定性分析等。因此,除了从微团聚体本身的物理保护角度外,还可从微生物学和化学保护角度分析凋落物、细根和菌根等外源有机碳对侵蚀退化红壤微团聚体形成和稳定的影响机制,以进一步阐明有机质—土壤团聚结构—微生物—化学耦合作用,对于揭示红壤侵蚀地森林恢复过程中土壤质量演变

的控制过程和主控因素、土壤固碳的主要机制具有重要的理论意义。

(2)阔叶纯林、针叶纯林、针阔混交林和阔叶混交林是退化红壤恢复和重建森林生态系统的主要植被恢复模式。然而,不同模式由于其凋落物数量、质量、根系分泌物及吸水量和需水量等均存在差异,可能会潜在影响微生物群落的相对丰度和代谢功能^[102],从而影响微团聚体的形成,进而影响土壤养分和结构的稳定性。另外,对于恢复林地,团聚体研究往往关注的是表层土壤,深层土壤团聚体尤其是微团聚体如何变化很少涉及,这限制了对红壤恢复生态系统的可持续认识。因此,可开展不同植被恢复模式不同土层的微团聚体研究,以深入探讨侵蚀退化林地土壤质量演变及生态功能,为林地恢复和重建或林地改造的树种选择提供实践参考。

(3)红壤由于缺乏碱金属和碱土金属而富含铁铝氧化物,其微团聚体内部有机碳化学结合形态是否以铁铝键结合态占优势?而铁铝键与钙键结合态有机碳在形成上是否有相互促进的作用?厘清这些关系有助于揭示土壤有机碳固定的化学保护机制。此外,氮沉降和增温可显著影响森林生态系统的土壤有机碳动态,而土壤微团聚体在土壤有机碳固持中具有重要作用,其如何响应氮素富集、增温及其交互作用尚不清楚。因此,可结合全球变化研究微团聚体中碳固存的潜在机制,为实现“碳达峰、碳中和”目标提供理论支撑。

(4)从团聚体层次概念模型^[15]、胚胎发育模型^[5]、三级结构划分理论^[103],到胶束模型^[104]、涂层模型^[105]等出现,团聚体形成与稳定的理论机制逐步完善。有机矿物复合体作为土壤微团聚体的复合结构单元,为微团聚体的形成注入了持久黏合剂。在富含铁铝氧化物的红壤区,通过吸附或共沉淀作用使矿物表面与有机物结合,此过程特别有助于微团聚体的形成。鉴于此,可利用CT扫描技术在不干扰土壤内部结构的情形下进行成像和三维分析,建立空间结构模型以模拟红壤恢复林地微团聚体的形成与稳定过程,从而更精确、更客观地评价土壤结构。

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] Rashid M I, Mujawar L H, Shahzad T, et al. Bacteria and fungi can contribute to nutrients bioavailability and aggregate formation in degraded soils[J]. *Microbiological*

- Research, 2016, 183: 26-41.
- [3] 潘嘉琛, 刘超, 董智, 等. 黄泛沙地不同林龄杨树人工林土壤团聚体及有机碳特征[J]. 水土保持研究, 2022, 29(3): 25-30, 37.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] Six J, Conant R T, Paul E, et al. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C- saturation of soils[J]. Plant and Soil, 2002, 241(2): 155-176.
- [7] 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.
- [8] Deneff K, Six J, Merckx R, et al. Carbon sequestration in microaggregates of no-tillage soils with different clay mineralogy[J]. Soil Science Society of America Journal, 2004, 68(6): 1935-1944.
- [9] Wang S Q, Li T X, Zheng Z C. Effect of tea plantation age on the distribution of soil organic carbon nutrient within micro-aggregates in the hilly region of western Sichuan, China [J]. Ecological Engineering, 2016, 90: 113-119.
- [10] Zhou P, Song G H, Pan G X, et al. Role of chemical protection by binding to oxyhydrates in SOC sequestration in three typical paddy soils under long-term agroecosystem experiments from South China[J]. Geoderma, 2009, 153(1): 52-60.
- [11] 胡丹丹, 李浩, 宋惠洁, 等. 长期施肥条件下红壤有机碳化学结构与团聚体稳定性的关系[J]. 土壤通报, 2022, 53(1): 152-159.
- [12] Liu X, Xiong Y M, Liao B W. Relative contributions of leaf litter and fine roots to soil organic matter accumulation in mangrove forests[J]. Plant and Soil, 2017, 421(1/2): 493-503.
- [13] Duffková R, Fučík P, Jurkowská L, et al. Experimental evaluation of the potential of arbuscular mycorrhiza to modify nutrient leaching in three arable soils located on one slope[J]. Journal of Soils and Sediments, 2019, 143: 116-125.
- [14] Dexter A. Advances in characterization of soil structure [J]. Soil and Tillage Research, 1998, 11(3): 199-238.
- [15] Tisdall J M, Oades J M. Organic matter and water-stable aggregates in soils[J]. Journal of Soil Science, 1982, 33(2): 141-163.
- [16] Lu X F, Hou E Q, Guo J Y, et al. Nitrogen addition stimulates soil aggregation and enhances carbon storage in terrestrial ecosystems of China: A meta- analysis [J]. Global Change Biology, 2021, 27(12): 2780-2792.
- [17] Elliott E T. Aggregate structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated soils [J]. Soil Science Society of America Journal, 1986, 50(3): 627-633.
- [18] Barbera V, Poma I, Gristina L, et al. Long-term cropping systems and tillage management effects on soil organic carbon stock and steady state level of C sequestration rates in a semiarid environment[J]. Land Degradation and Development, 2012, 23(1): 82-91.
- [19] Sun T, Chen Q, Chen Y, et al. A novel soil wetting technique for measuring wet stable aggregates[J]. Soil and Tillage Research, 2014, 141: 19-24.
- [20] Edwards A P, Bremner J M. Microaggregates in soils[J]. European Journal of Soil Science, 2010, 18(1): 64-73.
- [21] Six J, Paustian K, Elliott E T, et al. Soil structure and organic matter I. Distribution of aggregate-size classes and aggregate-associated carbon[J]. Soil Science Society of America Journal, 2000, 64(2): 681-689.
- [22] Tisdall J M. Possible role of soil microorganisms in aggregation in soils[J]. Plant and Soil, 1994, 159(1): 115-121.
- [23] Jastrow J D, Miller R M, Lussenho P J. Contribution so interacting biological mechanisms to soil aggregate stabilization in restored prairie[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1998, 30(7): 905-916.
- [24] Wachendorf C, Potthoff M, Ludwig B, et al. Effects of addition of maize litter and earthworms on C mineralization and aggregate formation in single and mixed soils differing in soil organic carbon and clay content [J]. Pedobiologia, 2014, 57(3): 161-169.
- [25] Winsome T, Mc Coll J G. Changes in chemistry and aggregation of a California forest soil worked by the earthworm *Argilophilus papillifer* eisen (megascolecidae) [J]. Soil Biology and Biochemistry, 1998, 30(13): 1677-1687.
- [26] 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.
- [27] Kindermann G E, Mc Callum I, Fritz S, et al. A global forest growing stock, biomass and carbon map based on FAO statistics[J]. Silva Fennica, 2008, 42(3): 387-396.
- [28] Cotrufo M F, Soong J L, Horton A J, et al. Formation of soil organic matter via biochemical and physical pathways of litter mass loss [J]. Nature Geoscience, 2015, 8(10): 776-779.

- [29] 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.
- [30] Blanco-Canqui H, Lal R. Mechanisms of carbon sequestration in soil aggregates[J]. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 2004, 23(6):481-504.
- [31] Gentile R, Vanlauwe B, Six J, et al. Litter quality impacts short- but not long-term soil carbon dynamics in soil aggregate fractions [J]. *Ecological Applications*, 2011, 21(3):695-703.
- [32] 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]. 福州: 福建农林大学, 2018.
- [33] Abiven S, Menasseri S, Angers D A, et al. Dynamics of aggregates stability and biological binding agents during the decomposition of organic material[J]. *European Journal of Soil Science*, 2007, 58(1):239-247.
- [34] De Gryze S, Six J, Brits C, et al. A quantification of short-term macroaggregates dynamics: Influences of wheat residue input and texture[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2005, 37(1):693-707.
- [35] Rillig M C, Aguilar-Trigueros C A, Bergmann J, et al. Plant root and mycorrhizal fungal traits for understanding soil aggregation[J]. *New Phytologist*, 2015, 205(4):1385-1388.
- [36] Averill C, Bhatnagar L M, Dietze M C, et al. Global imprint of mycorrhizal fungi on whole-plant nutrient economics[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2019, 116(46):23163-23168.
- [37] Hallett P, Feeney D, Bengough A, et al. Disentangling the impact of AM fungi versus roots on soil structure and water transport[J]. *Plant and Soil*, 2009, 314(1/2):183-196.
- [38] Rillig M C, Mummey D L. Mycorrhizas and soil structure[J]. *New Phytologist*, 2006, 171(1):41-53.
- [39] 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.
- [40] Qu X J, Wu J G, Zhao J H, et al. Effects of solid organic wastes on soil particulate organic carbon structure under different water conditions[J/OL]. *Clean-Soil Air Wate*, 2019, 47(8):DOI:10.1002/clen.201900187.
- [41] Pascual J, Blanco S, García-López M, et al. Assessing bacterial diversity in the rhizosphere of thymus zygis growing in the Sierra Nevada National Park (Spain) through culture-dependent and independent approaches [J]. *PLoS One*, 2016, 11(1):1-19.
- [42] Tisdall J M. Fungal hyphae and structural stability of soil [J]. *Australian Journal of Soil Research*, 1991, 29(6):729-743.
- [43] Graf F, Frei M. Soil aggregation and slope stability related to soil density, root length, and mycorrhiza[J]. *Ecological Engineering*, 2013, 57:314-323.
- [44] Bast A, Wilcke W, Graf F, et al. Does mycorrhizal inoculation improve plant survival, aggregate stability, and fine root development on a coarse-grained soil in an alpine eco-engineering field experiment? [J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2016, 121(8):2158-2171.
- [45] Hewins D B, Sinsabaugh R L, Archer S R, et al. Soil-litter mixing and microbial activity mediate decomposition and soil aggregate formation in a sandy shrub-invaded Chihuahuan Desert grassland[J]. *Plant Ecology*, 2017, 218(4):459-474.
- [46] Tang J, Mo Y H, Zhang J Y, et al. Influence of biological aggregating agents associated with microbial population on soil aggregate stability[J]. *Applied Soil Ecology*, 2011, 47(3):153-159.
- [47] Caesar-TonThat T C, Stevens W B, Sainju U M, et al. Soil-aggregating bacterial community as affected by irrigation, tillage, and cropping system in the northern great plains[J]. *Soil Science*, 2014, 179(1):11-20.
- [48] Miller R M, Jastrow J D. Mycorrhizal fungi influence soil structure. In: Kapulnik Y, Douds D D (eds) *arbuscular mycorrhizas: Physiology and function*[M]. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 2000.
- [49] Blaud 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.
- [50] Davinic M, Fultz L M, Acosta-Martinez V, et al. Pyrosequencing and mid-infrared spectroscopy reveal distinct aggregate stratification of soil bacterial communities and organic matter composition [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2012, 46(1):63-72.
- [51] Fox A, Ikoyi I, Torres-Sallan G, et al. The influence of aggregate size fraction and horizon position on microbial community composition [J]. *Applied Soil Ecology*, 2018, 127:19-29.
- [52] Young I M, Crawford J W, Nunan N, et al. Microbial distribution in soils: Physics and scaling[J]. *Advances in Agronomy*, 2008, 100:81-121.
- [53] 荣勤雷. 有机肥/秸秆替代化肥模式对设施菜田土壤团聚体微生物特性的影响[D]. 北京: 中国农业科学院, 2018.
- [54] Mummey D L, Stahl P D. Analysis of soil whole and inner-microaggregate bacterial communities[J]. *Micro-*

- bial Ecology, 2004, 48(1): 41-50.
- [55] Ebrahimi A, Or D. Microbial community dynamics in soil aggregates shape biogeochemical gas fluxes from soil profiles-upscaling an aggregate biophysical model[J]. Global Change Biology, 2016, 22(9): 3141-3156.
- [56] Smith A P, Marin-Spiotta E, de Graaff M A, et al. Microbial community structure varies across soil organic matter aggregate pools during tropical land cover change[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2014, 77: 292-303.
- [57] 郑春燕. 长期施肥对不同作物生产体系土壤团聚体中微生物群落的影响[D]. 北京: 中国农业大学, 2016.
- [58] Han S, Xiong X, Luo X S, et al. Linking macroaggregation to soil microbial community and organic carbon accumulation under different tillage and residue managements[J]. Soil and Tillage Research, 2018, 178: 99-107.
- [59] 何玉亭, 王昌全, 沈杰, 等. 2 种生物质炭对红壤团聚体结构稳定性和微生物群落的影响[J]. 中国农业科学, 2016, 49(12): 2333-2342.
- [60] 唐士明. 北方农牧交错区不同土地利用方式对土壤团聚体和微生物群落的影响[D]. 北京: 中国农业大学, 2018.
- [61] Gupta V V S R, Germida J J. Soil aggregation: Influence on microbial biomass and implications for biological processes[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2015, 80: 3-9.
- [62] 刘晶, 张跃伟, 张巧明, 等. 土地利用方式对豫西黄土丘陵区土壤团聚体微生物生物量及群落组成的影响[J]. 草业科学, 2018, 35(4): 771-780.
- [63] 王薪琪, 王传宽, 张泰东, 等. 森林土壤碳氮循环过程的新视角: 丛枝与外生菌根树种的作用[J]. 植物生态学报, 2017, 41(10): 1113-1125.
- [64] Zhang X F, Xin X L, Zhu A N, et al. Linking macroaggregation to soil microbial community and organic carbon accumulation under different tillage and residue managements[J]. Soil and Tillage Research, 2018, 178: 99-107.
- [65] Leifheit E F, erbruggen E V, Rillig M C. Rotation of hyphal in-growth cores has no confounding effects on soil abiotic properties[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2014, 79: 78-80.
- [66] Peng S L, Guo T, Liu G C. The effects of arbuscular mycorrhizal hyphal networks on soil aggregations of purple soil in southwest China[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2013, 57: 411-417.
- [67] Zheng W, Morris E K, Rillig M C. Ectomycorrhizal fungi in association with Pinus sylvestris seedlings promote soil aggregation and soil water repellency[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2014, 78(78): 326-331.
- [68] Chenu C, Stotzky G. Interactions between microorganisms and soil particles: An overview. In: Huang P M, Bollag J M, Senesi N (eds) interactions between soil particles and microorganisms[M]. UK: John Wiley and Sons, Chichester, 2002: 3-39.
- [69] Diehl D. Soil water repellency: Dynamics of heterogeneous surfaces[J]. Colloids Surfaces A: Physicochemical Engineering Aspects, 2013, 432(38): 8-18.
- [70] Martin S L, Mooney S J, Dickinson M J, et al. The effects of simultaneous root colonisation by three glomus species on soil pore characteristics[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2012, 49: 167-173.
- [71] Kinyangi J, Solomon D, Liang B, et al. Nanoscale biogeochemical complexity of the organomineral assemblage in soil: Application of STXM microscopy and C 1s-NEXAFS spectroscopy[J]. Soil Science Society of America Journal, 2006, 70: 1708-1718.
- [72] Kohler-Milleret R, Le Bayon R C, Chenu C, et al. Impact of two root systems, earthworms and mycorrhizae on the physical properties of an unstable silt loam luvisol and plant production[J]. Plant and Soil, 2013, 370(1/2): 251-265.
- [73] 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.
- [74] 徐建民, 赛夫, 袁克能. 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形状特征[J]. 土壤学报, 1999, 36(2): 168-178.
- [75] 王而力, 王嗣淇, 邱素芬. 风沙土不同有机矿质复合体对磷的解吸特征影响[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(4): 741-747.
- [76] 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.
- [77] Cleveland C C, Townsend A R, Philip T, et al. Relationships among net primary productivity, nutrients and climate in tropical rain forest: A pan-tropical analysis[J]. Ecology Letters, 2011, 14(9): 939-947.
- [78] 何云峰, 徐建民, 侯惠珍, 等. 有机无机复合作用对红壤团聚体组成及腐殖质氧化稳定性的影响[J]. 浙江农业学报, 1998, 10(4): 197-200.
- [79] 彭新华, 张斌, 赵其国. 红壤侵蚀裸地植被恢复及土壤有机碳对团聚体稳定性的影响[J]. 生态学报, 2003, 23(10): 2176-2183.
- [80] 魏朝富, 谢德体, 陈世正. 紫色水稻土有机无机复合与土粒团聚的关系[J]. 土壤学报, 1996, 33(1): 70-77.
- [81] 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.
- [82] 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.
- [83] 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.
- [84] 陶宝先,张保华,董杰,等.不同土地利用方式对寿光市农业土壤有机碳分子结构和稳定性的影响[J].生态环境学报,2017,26(10):1801-1806.
- [85] Bonanomi G, Incerti G, Giannino F, et al. Litter quality assessed by solid state ^{13}C NMR spectroscopy predicts decay rate better than C/N and Lignin/N ratios[J].Soil Biology and Biochemistry,2013,56:40-48.
- [86] 邱璇,赵建宁,李文亚,等.不同利用方式对小针茅荒漠草原土壤有机碳储量及其结构的影响[J].农业环境科学学报,2016,35(11):2137-2145.
- [87] Wagai R, Kishimoto-mo A W, Yonemura S, et al. Linking temperature sensitivity of soil organic matter decomposition to its molecular structure, accessibility, and microbial physiology[J].Global Change Biology,2013,19(4):1114-1125.
- [88] 张勇,胡海波,黄玉洁,等.不同植被恢复模式对土壤有机碳分子结构及其稳定性的影响[J].环境科学研究,2015,28(12):1870-1878.
- [89] Eusterhues K, Rumpel C, Kleber M, et al. Stabilisation of soil organic matter by interactions with minerals as revealed by mineral dissolution and oxidative degradation[J].Organic Geochemistry,2003,34(12):1591-1600.
- [90] Schnitzer M, Schuppli P. Method for the sequential extraction of organic matter from soils and soil fractions[J].Soil Science Society of America Journal,1989,53(5):1418-1424.
- [91] 周萍, Alessandro P, 潘根兴,等.3 种南方典型水稻土长期试验下有机碳积累机制研究Ⅲ. 2 种水稻土颗粒有机质结构特征的变化[J].土壤学报,2009,46(3):398-405.
- [92] 郭素春,郁红艳,朱雪竹,等.长期施肥对潮土团聚体有机碳分子结构的影响[J].土壤学报,2013,50(5):922-930.
- [93] 谢锦升,杨玉盛,陈光水,等.植被恢复对退化红壤团聚体稳定性及碳分布的影响[J].生态学报,2008,28(2):702-709.
- [94] 高盼.植被恢复对泰和退化红壤团聚体稳定性及有机碳组分的影响[D].南昌:江西农业大学,2020.
- [95] Fang X, Zhou G Y, Li Y L, et al. Warming effects on biomass and composition of microbial communities and enzyme activities within soil aggregates in subtropical forest[J].Biology and Fertility of Soils,2015,52(3):353-365.
- [96] Chaudhary D R, Rathore A P, Jha B. Halophyte residue decomposition and microbial community structure in coastal soil[J].Land Degradation and Development,2019,30:1479-1489.
- [97] Huang J Q, Zhang C W, Cheng D B, et al. Soil organic carbon mineralization in relation to microbial dynamics in subtropical red soils dominated by differently sized aggregates[J].Open Chemistry,2019,17(1):381-391.
- [98] 管鸿智,黄荣珍,王金平,等.红壤区退化林地地表土真菌群落结构对土壤改良措施的响应[J].环境科学,2023,44(1):494-501.
- [99] Huang Z Q, Clinton P W, Davis M R. Post-harvest residue management effects on recalcitrant carbon pools and plant biomarkers within the soil heavy fraction in Pinus radiata plantations[J].Soil Biology and Biochemistry,2011,43(2):404-412.
- [100] Asano M, Wagai R. Evidence of aggregate hierarchy at micro-to submicron scales in an allophanic Andisol[J].Geoderma,2014,216:62-74.
- [101] Balaria A, Johnson C E, Xu Z H. Molecular-scale characterization of hot-water-extractable organic matter in organic horizons of a forest soil[J]. Soil Science Society of America Journal,2009,73:812-821.
- [102] Zhu L Q, Huang R Z, Wang J P, et al. Litter, root, and mycorrhiza input affected soil microbial community structure in *Schima superba* pure forest in subtropical China[J].Diversity,2023,15(1):e82.
- [103] Christensen B T. Physical fractionation of soil and structural and functional complexity in organic matter turnover[J].European Journal of Soil Science,2001,52(3):345-353.
- [104] Wershaw R L, Llaguno E C, Leenheer J A. Mechanism of formation of humus coatings on mineral surfaces 3. Composition of adsorbed organic acids from compost leachate on alumina by solid-state ^{13}C NMR[J].Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects,1996,108(2/3):213-223.
- [105] Kleber M, Sollins P, Sutton R. A conceptual model of organo-mineral interactions in soils: Self-assembly of organic molecular fragments into zonal structures on mineral surfaces[J].Biogeochemistry,2007,85(1):9-24.