DOI: 10.5846/stxb202107131885
龙启霞,蓝家程,姜勇祥.生态恢复对石漠化地区土壤有机碳累积特征及其机制的影响.生态学报,2022,42(18):7390-7402.
Long Q X, Lan J C, Jiang Y X. Effects of soil organic carbon fractions on aggregates under ecological restoration in rocky desertification region. Acta Ecologica Sinica,2022,42(18):7390-7402.

生态恢复对石漠化地区土壤有机碳累积特征及其机制的影响

龙启霞[1,2],蓝家程[1,2,*],姜勇祥[3]

1 贵州师范大学喀斯特研究院, 贵阳 550001

2 国家喀斯特石漠化防治工程技术研究中心, 贵阳 550001

3 福建师范大学地理科学学院, 福州 350007

摘要:为从土壤碳组分对团聚体及其结合有机碳的影响的角度去解析生态恢复下土壤有机碳积累特征及其机制,以典型干热河谷石漠化地区生态恢复措施(次生林,15—20a;花椒林,15—20a) 和对照耕地(>50 a) 为研究对象,测定 0—10 cm 和 10—20 cm 土层土壤有机碳(SOC)、颗粒有机碳(POC)、易氧化有机碳(EOC)、矿物结合有机碳(MOC)、非活性有机碳(NLOC)、团聚体、团聚体有机碳含量,研究了生态恢复对 SOC 及组分、团聚体以及团聚体有机碳的影响。结果表明:①与耕地相比,生态恢复显著增加 0—20 cm 土层 SOC 及组分的含量与储量(MOC 除外),含量与储量的增幅范围为 10.4%—151.7%和 6.3%—134.5%,其中 POC、EOC 含量和储量增幅最大,且 POC、EOC 与 SOC 相关性较强;②生态恢复显著提高>2 mm 团聚体数量、MWD 和 MGD,其中以次生林 0—10 cm 土层的增幅最大(379.3%、172.0%、265.2%);③生态恢复显著增加各粒径团聚体有机碳含量,团聚体有机碳含量增幅随团聚体粒径增大而减小,然而生态恢复后>2 mm 团聚体有机碳贡献率显著上升,<2 mm 团聚体有机碳贡献率显著减小,土壤团聚体对有机碳的贡献率转为以>2 mm 团聚体贡献为主,且>2 mm 团聚体数量的显著增加是>2 mm 团聚体有机碳贡献率高的主要原因;④土壤 SOC、POC、EOC、NLOC 与>2 mm 团聚体数量、MWD、MGD、>2 mm 团聚体有机碳贡献率显著正相关($P<0.05$),其中 POC、EOC 与这些指标的相关性较强($P<0.01$)。此外,从土壤有机碳及组分、团聚体数量及稳定性、>2 mm 团聚体有机碳贡献率的增幅来看,自然恢复措施(次生林) 较人工种植恢复措施(花椒林) 增幅较大。

关键词:生态恢复;碳组分;团聚体组成;稳定性;团聚体结合有机碳

Effects of soil organic carbon fractions on aggregates under ecological restoration in rocky desertification region

LONG Qixia[1,2], LAN Jiacheng[1,2,*], JIANG Yongxiang[3]

1 *School of Karst Science, Guizhou Normal University, Guiyang* 550001, *China*

2 *State Engineering Technology Institute for Karst Desertification Control, Guiyang* 550001, *China*

3 *School of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou* 350007, *China*

Abstract: Ecological restoration is vital to improve soil structure and promote the accumulation of soil organic carbon (SOC). The effects of ecological restoration on SOC and its labile fractions, aggregate-associated organic carbon have been widely studied, but the relation of SOC fractions (especially POC and MOC) and aggregate in natural restoration measures (secondary forests) and the planted restoration measures (Chinese prickly ash planting) are still unclear. To analyze the accumulation characteristics and mechanisms of SOC under ecological restoration based on the influence of soil carbon

基金项目:国家自然科学基金项目(42177446,41601584);贵州省科技计划项目(黔科合基础[2017]1417);贵州师范大学 2017 年度学术新苗培养及创新探索专项项目(黔科合平台人才[2017]5726-53)

收稿日期:2021-07-13; **采用日期**:2022-01-06

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lanjc2016@163.com

fractions on aggregates and aggregate-associated organic carbon, we chose ecological restoration measures(secondary forest, 15—20 a; Chinese prickly ash planting, 15—20 a) and control cropland(>50 a) in a typical dry-heat valley rocky desertification region as the study subjects. The contents were measured in soil layers(0—10 cm and 10—20 cm), including soil organic carbon(SOC), particulate organic carbon(POC), easily oxidizable organic carbon(EOC), mineral associated organic carbon(MOC), non-liable organic carbon(NLOC), aggregates and aggregate-associated organic carbon. We studied the effect of ecological restoration on SOC and its fractions, aggregates and aggregate-associated organic carbon. The results shows that: ① Compared with the cropland, ecological restoration significantly increased the content and storage of SOC and its fractions(except MOC) in the 0—20 cm soil layer, with increments ranging from 10.4% to 151.7% and 6.3% to 134.5%, respectively. The content and storage of POC and EOC increased largely in the SOC fractions, which showed the stronger relationship with SOC. ② Ecological restoration significantly increased>2 mm aggregates content, mean weight diameter(MWD) and mean geometric diameter(MGD), which increased greatly with 379.3%, 172.0% and 265.2% among the 0—10 cm soil layer of the secondary forest. ③ Ecological restoration significantly increased the aggregate-associated organic carbon content of various particle sizes. The degree of improvements in aggregate-associated organic carbon content decreased with aggregates size increasing. However, after ecological restoration, carbon contribution in >2 mm aggregates increased significantly and carbon contribution in<2 mm aggregates decreased significantly. Carbon contribution in soil aggregates shifted to the chief contribution in>2 mm aggregates. The increase of>2 mm aggregates content was the main causes for carbon contribution in>2 mm aggregates increasing. ④ More than 2 mm aggregates content, MWD, MGD, and carbon contribution in>2 mm aggregates were positively correlated with SOC, POC, EOC and NLOC($P<0.05$). And they had stronger correlation for POC and EOC($P<0.01$). In addition, from SOC and its fractions, the number and stability of aggregates, and carbon contribution in>2 mm aggregates, natural restoration measures increased greater than the planted restoration measures. The study suggests that SOC fractions(especially POC and EOC), aggregates and aggregate-associated organic carbon became more abundant in secondary forest and Chinese prickly ash planting than in cropland, which highlighted that ecological restoration plays a crucial role in soil carbon sequestration in rocky desertification region.

Key Words: ecological restoration; carbon fractions; aggregates composition; stability; aggregate-associated organic carbon

石漠化是指由于人类活动导致植被破坏、土壤退化,并转为裸露的岩石景观的过程[1],被认为是中国西南喀斯特地区最为严重的生态环境问题之一[2]。为控制西南喀斯特地区水土流失、恢复和改善退化的喀斯特生态系统,国家实施了一系列的退耕还林生态工程治理措施。植被恢复期间土壤生态功能和质量可能会得到改善[3]。土壤有机碳(SOC) 参与了土壤的多种物理化学和生物过程[4],是土壤质量的重要组成部分[5]。同时,全球土壤有机碳库为 1500—2300 Pg,约为大气碳库的 2 倍,其微小变化都会对大气 CO_2 浓度的平衡和调节气候变化有重要作用[6]。土壤有机质参与土壤团聚体的形成和破坏,是团聚体稳定的重要因素[7]。土壤团聚体稳定性被认为是反映土壤质量的一个重要指标[8],其团聚过程反过来促进了 SOC 的物理保护[9],并在维持土壤肥力和质量方面起着至关重要的作用[10]。因此,深入理解喀斯特地区生态恢复下 SOC 及组分对团聚体及其结合有机碳的影响,可为石漠化地区土壤生态功能恢复、控制水土流失和土地退化提供理论支撑。

植被恢复被认为是增加 SOC 固存的有效措施[11]。然而,在植被恢复过程中,SOC 积累仍存在很大的不确定性。植被恢复可以显著增加[12]、减少[13]或没有显著改变[14] SOC 含量。这可能归因于退耕造林以后的植被恢复类型、土壤深度和退耕时间等[15—16],尤其是 SOC 复杂的化学或物理组分的变化[17]及其与团聚体的相互关系。由耕地到原始森林的植被自然演替,喀斯特地区 SOC 含量逐渐增加[18],但耕地转变为人工林 SOC 含量略有下降[19]。因此,深刻认识生态恢复后的土壤有机碳库变化与团聚体关系对制定喀斯特地区合理的生态恢复策略具有重要意义。土壤 SOC 包含不同稳定性和周转率的组分。土壤易氧化有机碳(Easily

oxidizable organic carbon, EOC) 是土壤有机碳库中易被氧化且活性较高的组分[20],SOC 与 EOC 之差可以用来表征非活性有机碳(Non-liable organic carbon, NLOC) 或惰性有机碳。土壤 SOC 按颗粒分组可分为颗粒有机碳(Particulate organic carbon, POC) 和矿物结合有机碳(Mineral associated organic carbon, MOC),POC 是新鲜动植物残体和腐殖化有机碳过渡的碳库,也可以表征土壤活性有机碳[21],MOC 则属于惰性有机碳库,在一定程度上可以表征土壤碳库稳定性[22]。SOC 和植物残体被认为是团聚体形成的重要胶结剂,显著影响团聚体稳定性[23],反之,团聚体在形成过程中伴随着新鲜有机物的不断输入,对活性碳组分的保护和固定发挥重要的作用[24—25]。一些研究主要聚焦于团聚体稳定性与不稳定和活性碳组分的关系。土壤活性有机碳组分与团聚体稳定性密切相关[26]。Wang 等[27]认为 SOC 的活性组分(EOC) 和生物活性组分与>2 mm 团聚体含量和团聚体稳定性呈正相关,同时活性有机碳通过改善土壤团聚体结构来增强团聚体对有机碳的物理保护[28]。POC 构成大团聚体的核心,参与团聚体的周转和形成,并受到团聚体的物理保护[24]。然而,稳定有机碳组分与团聚体组成和稳定性的关系较少受到关注。Wu 等[10]研究发现较不稳定有机碳组分,化学稳定性有机碳组分对团聚体稳定性的影响更显著,稳定性有机碳促进>2 mm 团聚体的形成,>2 mm 团聚体的物理保护降低了 SOC 的损失。可见,土壤有机碳组分对团聚体组成和稳定性的影响存有一些争议。此外,不同粒径团聚体有机碳对 SOC 贡献大小存在差异[29]。罗晓虹等[30]认为有机碳主要储存于<0.053 mm 粒径中,以<0.053 mm 粒径对 SOC 贡献率最大。相反,周方亮等[31]认为>2 mm 团聚体有机碳含量最大,Shen 等[32]研究表明>2 mm 团聚体有机碳对 SOC 的贡献率最高。然而,已有研究缺乏从土壤碳组分对团聚体及其结合有机碳的影响的角度去解析生态恢复下 SOC 积累特征及其机制。

中国西南喀斯特地区是全球碳酸盐岩集中分布区面积最大,以石漠化为特征的土地退化严重。区域尺度上的生态恢复工程促进了植被恢复,显著提高了区域植被碳储量,表明中国西南喀斯特地区固碳潜力巨大[33]。已有的研究主要关注喀斯特地区植被恢复/土地利用对 SOC 及其活性组分、团聚体有机碳的分布特征的影响[18,34—37],一些研究发现,喀斯特地区植被自然恢复可以促进 SOC 积累[18,38],并促进团聚体形成和提高团聚体的稳定性[39—40]。鲜有将人工恢复和自然恢复进行对比,研究喀斯特石漠化地区生态恢复下土壤 SOC 组分变化(尤其是 POC 和 MOC) 与团聚体关系的报道。贵州花江小流域为典型喀斯特高原峡谷干热河谷石漠化地区,自 1999 年以来,该地区开始实施退耕还林工程,使得大量坡耕地退耕为造林地。其中自然退耕的次生林和人工种植的花椒林为该地区典型的主要生态恢复模式。鉴于此,本文主要探究土壤 SOC 组分与团聚体及其结合有机碳的关系,以期更好地从团聚体尺度去理解喀斯特石漠化地区生态恢复后 SOC 积累特征及其机制,为石漠化地区植被恢复重建和改善土壤质量提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区域位于中国贵州省安顺市关岭自治县和贞丰县交界的花江干热河谷小流域(25°39′13″—25°41′00″ N, 105°36′—105°46′107 30″ E, 图 1)。研究区为亚热带河谷气候,年平均气温 18.4℃,年降水量约 1100 mm,降雨时空分布不均,集中在 5—10 月份。花江示范区主要发育在三叠系碳酸盐岩组为主的法郎向斜构造上,地势西高东低,海拔 500—1200 m,为典型的喀斯特高原峡谷地貌。区域植被覆盖率低,岩石裸露率高达 85%以上,为典型的中—强度石漠化地区。区域母岩以白云质石灰岩和泥质灰岩为主,土壤类型以钙质石灰土为主,土层薄且分布不均。研究区土地利用以林地和耕地为主。林地主要为自然退耕的次生林和人工种植的经济林。其中次生林为坡耕地退耕 15—20 a,主要树种为栾树(*Koelreuteria paniculata*)、香椿(*Toona sinensis*)、浆果楝(*Cipadessa baccifera*)、毛桐(*Mallotus barbatus*)、八角枫(*Alangium chinense*)、油桐(*Vernicia fordii*)、粗糠柴(*Mallotus philippensis*) 等,受人为干扰较少。花椒林是当地兼顾生态与经济效益的主要经济林,为坡耕地退耕后连续种植 15—20 年的纯林,已成为当地主要造林树种。花椒林的经营管理较为粗放,使用较多的除草剂、农药和复合肥[41],每年定期进行适当修剪管理,以保证花椒有效地采光与通风。耕地主要

是种植历史 50 年以上的玉米,施用化肥、复合肥和农家肥混合,定期进行人为翻土、除草,采用传统耕作方式进行土壤管理。

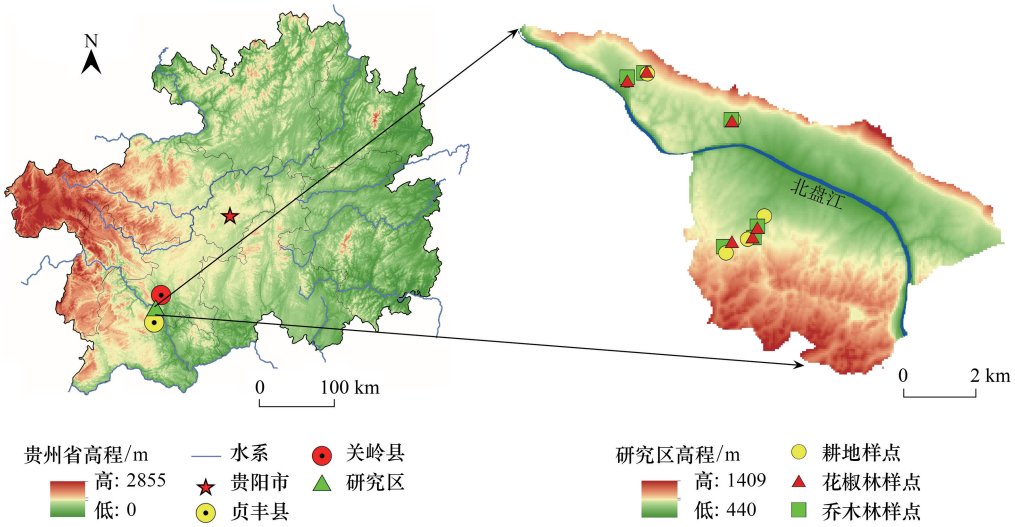


图 1　研究区采样地理位置

Fig.1　The geographic location of the sample in the study area

1.2　样地设置及采样

2018 年 11 月在示范区内设置了 6 个样地,每个样地设置包括耕地、花椒林和次生林。每个样地中的次生林和花椒林与耕地相邻。每个样地每种土地利用分别设置 3 个样方,每个样方按照 5 点混合采样法,分别采集 0—10 cm 和 10—20 cm 土层样品,共 108 个土样。采用小铲子分土层采集大约 2 kg 土壤样品,装入密封袋混合成一个土样,带回实验室自然风干测定土壤理化性质。使用 100 cm^3 不锈钢环刀在每层采集约 1 kg 原状土壤,为保证土壤原状结构,使用塑料盒带回实验室,取出样品沿自然结构面掰成约<10 mm 的土壤颗粒,自然风干后去除土样中动植物残茬和砾石,进行颗粒分级及团聚体测定。土壤容重采用环刀法进行取样。

1.3　实验分析与测试

土壤团聚体测定[42]:称取 100 g 风干土样,置于 2 mm、0.25 mm 和 0.053 mm 组成的套筛上,进行 2 min 的上下均匀震荡(30 次/min),残留在不同筛子上的土壤用蒸馏水洗到铝盒中,将铝盒中的土壤置于 60℃的烘箱中烘干至恒重,最后获得 4 个团聚体粒径组分,分别称重并计算其占全土的百分比后,参考 SOC 的测定方法,将分离后的各粒径土壤团聚体有机碳含量进行测定。

土壤样品研磨过 0.25 mm 筛,并用稀 HCl 去除无机碳后,土壤 SOC 含量采用元素分析仪—稳定同位素质谱仪(Vario ISOPOTE Cube-Isoprime Elementar 公司,德国) 测定。POC 的测定如下[43]:称取过 2 mm 风干土样 20 g,放入 250 mL 三角瓶中,加入浓度为 5 g/L 的六偏磷酸钠 60 mL,用手摇约 10—15 min 后使用往复式震荡器振荡 18 h(18℃, 90 rpm/min),震荡后的分散液倒在 53 μm 筛上,用纯水洗至筛下水为澄清,筛上的土壤颗粒即为颗粒有机质,分离后于铝盒中 60℃下过夜烘干(24 h),并进行称重和计算其占全土的百分比。将>53 μm土壤颗粒磨碎过 0.149 mm 筛,取一定重量样品测定其有机碳含量,乘以其占全土的百分比计算出 POC 含量(g/kg)。土壤 MOC 含量为 SOC 与 POC 之差。土壤 EOC 采用 333 mM $KMnO_4$ 测定[44],土壤 NLOC 为 SOC 与 EOC 之差。

1.4　数据计算

土壤有机碳储量计算公式[45]如下:

$$OCs = BD \times D \times OC \times 10^{-2}$$

式中,OCs 为土壤 SOC、POC、EOC、MOC、NLOC 的储量(kg/m^2),*BD* 为土壤容重(g/cm^3),*D* 为土层厚度(cm),*OC* 为土壤 *SOC*、*POC*、*EOC*、*MOC*、*NLOC* 的含量(*g/kg*)。

土壤有机碳组分分配比例计算公式[46]如下:

$$F_c = \frac{OC_i}{\mathrm{SOC}} \times 100\%$$

式中,F_c 为土壤有机碳组分分配比例(%);OC_i 为土壤有机碳 *i* 组分含量(g/kg);SOC 为土壤有机碳含量(g/kg)。

土壤团聚体有机碳贡献率、MWD 和 MGD 计算公式[36]如下:

$$F_a = \frac{\mathrm{ASOC}_i \times A_i}{\mathrm{SOC}}$$

$$\mathrm{MWD} = \sum_{i=1}^{n} x_i \times w_i$$

$$\mathrm{MGD} = \exp\left(\frac{\sum_{i=1}^{n} w_i \times \ln x_i}{\sum_{i=1}^{n} w_i}\right)$$

式中,F_a 为土壤团聚体有机碳贡献率(%);$\mathrm{ASOC_i}$ 为 *i* 级粒经团聚体有机碳含量(g/kg);A_i 为 *i* 级粒经团聚体含量(%);SOC 为土壤有机碳含量(g/kg);MWD 为平均重量直径(mm);MGD 为几何平均直径(mm);x_i 为 *i* 级团聚体平均直径(mm);w_i 为 *i* 粒径团聚体重量百分比(%)。

1.5 统计分析

使用 SPSS 26 软件进行统计分析,采用单因素方差分析(One-way ANOVA)和多重比较 LSD 法分析不同土地利用土壤碳组分含量和储量、团聚体组成和稳定性、团聚体有机碳含量及有机碳贡献率之间是否显著差异($P<0.05$)。采用皮尔逊相关分析团聚体组成、稳定性、团聚体有机碳和土壤碳组分之间的关系($P<0.05$)。

2 结果与分析

2.1 土壤碳组分特征

生态恢复后,SOC 及其组分含量和储量显著提高(MOC 除外)(图 2)。SOC 及其组分含量和储量的变化模式在两个土层(0—10 cm 和 10—20 cm)相似,基本呈现次生林>花椒林>耕地。在 0—10 cm 土层,花椒林和次生林的土壤 SOC、POC、EOC、NLOC 含量分别增加了 16.6%、68.2%、26.8%、14.7% 和 56.5%、151.7%、98.2%、48.5%,储量分别增加了 12.7%、62.0%、22.2%、11.0% 和 47.5%、134.5%、86.3%、40.2%。在 10—20 cm 土层中,土壤碳组分的变化趋势与 0—10 cm 土层相似,但相对于 0—10 cm 土层,10—20 cm 土层碳组分的含量和储量增加幅度较小。次生林和花椒林的土壤 MOC 含量与耕地均无显著差异。花椒林和次生林下的 POC 和 EOC 等活性有机碳增加幅度大于 SOC,而 MOC 和 NLOC 等稳定性有机碳增加的幅度小于 SOC。

生态恢复增加了活性有机碳组分的比例,减小了非活性或惰性有机碳组分的比例(图 2)。在 0—10 cm 土层,花椒林和次生林的 POC 分配比(POC/SOC)、EOC 分配比(EOC/SOC)分别显著增加了 38.3%、7.8% 和 58.3%、26.2%,MOC、NLOC 分配比(MOC/SOC、NLOC/SOC)的变化趋势与 POC/SOC、EOC/SOC 相反,分别下降了 15.3%、1.5% 和 23.3%、5.1%。在 10—20 cm 土层,EOC/SOC、NLOC/SOC 的趋势与 0—10 cm 土层一致,花椒林的 POC/SOC 最高,但其 MOC/SOC 最低。

2.2 土壤团聚体组成及稳定性

在 0—10 cm 土层,由耕地转为花椒林和次生林显著增加了>2 mm 团聚体含量,显著减少了 0.25—2 mm、0.053—0.25 mm 和<0.053 mm 团聚体含量(图 3),花椒林和次生林的>2 mm 团聚体含量比耕地分别增加了 162.2% 和 379.3%,0.25—2 mm、0.053—0.25 mm 和<0.053 mm 团聚体含量比耕地分别下降了 20.0%、36.7%、

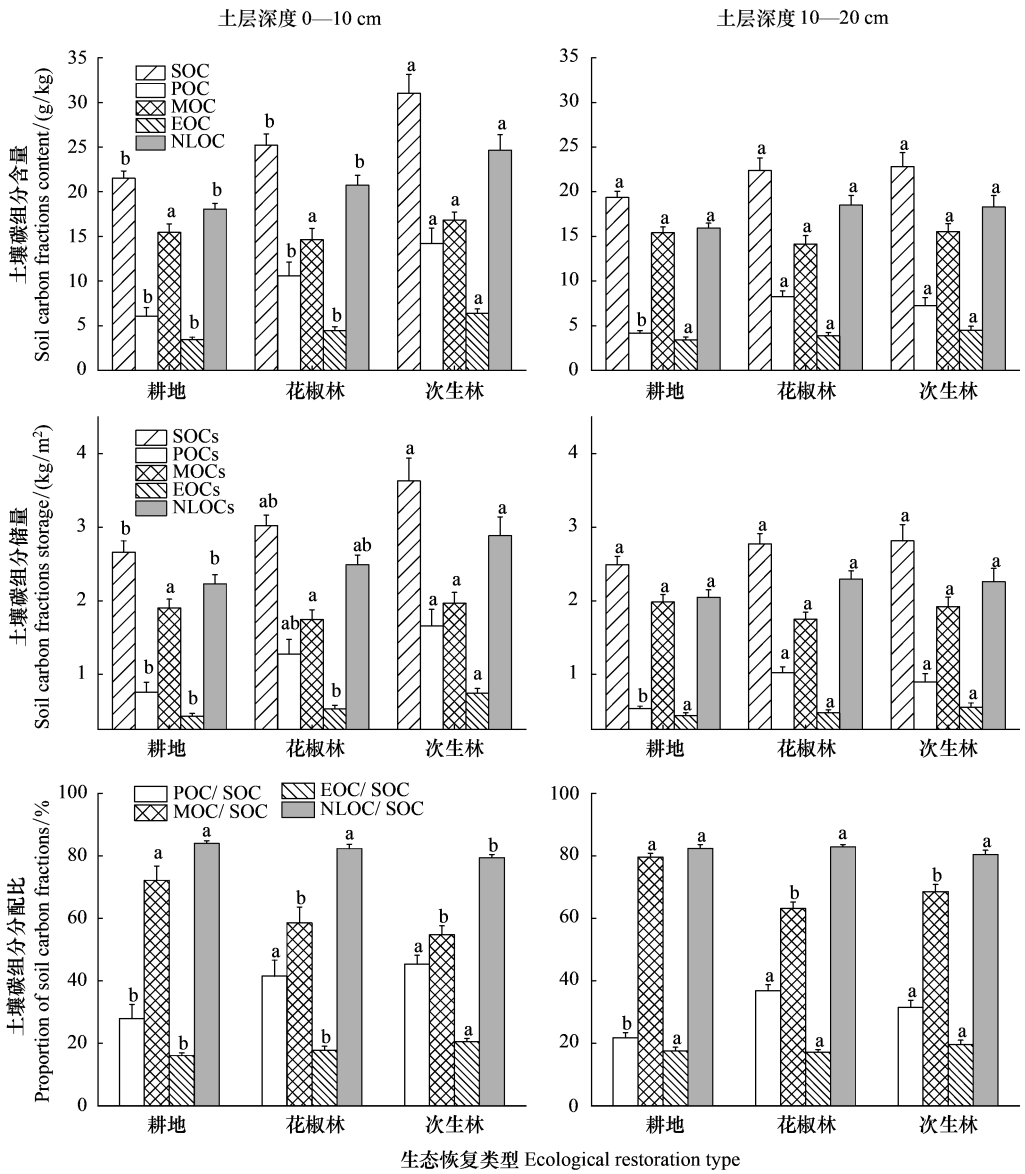


图 2　生态恢复对土壤碳组分含量、储量及分配比例的影响

Fig.2　Effects of ecological restoration on content, storage and proportion of soil carbon fractions

SOC:土壤有机碳;POC:颗粒有机碳;EOC:易氧化有机碳;MOC:矿物结合有机碳;NLOC:非活性有机碳; SOCs:土壤有机碳储量;POCs:颗粒有机碳储量;EOCs:易氧化有机碳储量;MOCs:矿物结合有机碳储量;NLOCs:非活性有机碳储量;图中不同小写字母表示同一土层深度中不同土地利用方式在 0.05 水平上的差异显著性

51.8%和 52.8%、81.9%、83.0%。10—20 cm 土层的团聚体分布的变化规律与 0—10 cm 土层相同,但相较于 0—10 cm 土层,各团聚体分布的变化幅度相对较小。生态修复后,>2 mm 团聚体含量的变化最大,其次为 <0.053 mm和 0.053—0.25 mm 团聚体,0.25—2 mm 团聚体的变化最小。

生态恢复显著增加 MWD 和 MGD,表现为次生林>花椒林>耕地(图 3)。0—10 cm 土层,花椒林和次生林的土壤 MWD、MGD 分别增加了 75.2%、82.6%和 172.0%、265.2%。10—20 cm 土层,花椒林和次生林的土壤 MWD、MGD 分别增加了 77.2%、94.5%和 92.4%、125.6%。

2.3　团聚体有机碳含量及团聚体有机碳贡献率

在 0—20 cm 土层,耕地转为花椒林和次生林不同程度增加了>2 mm、0.25—2 mm、0.053—0.25 mm 和

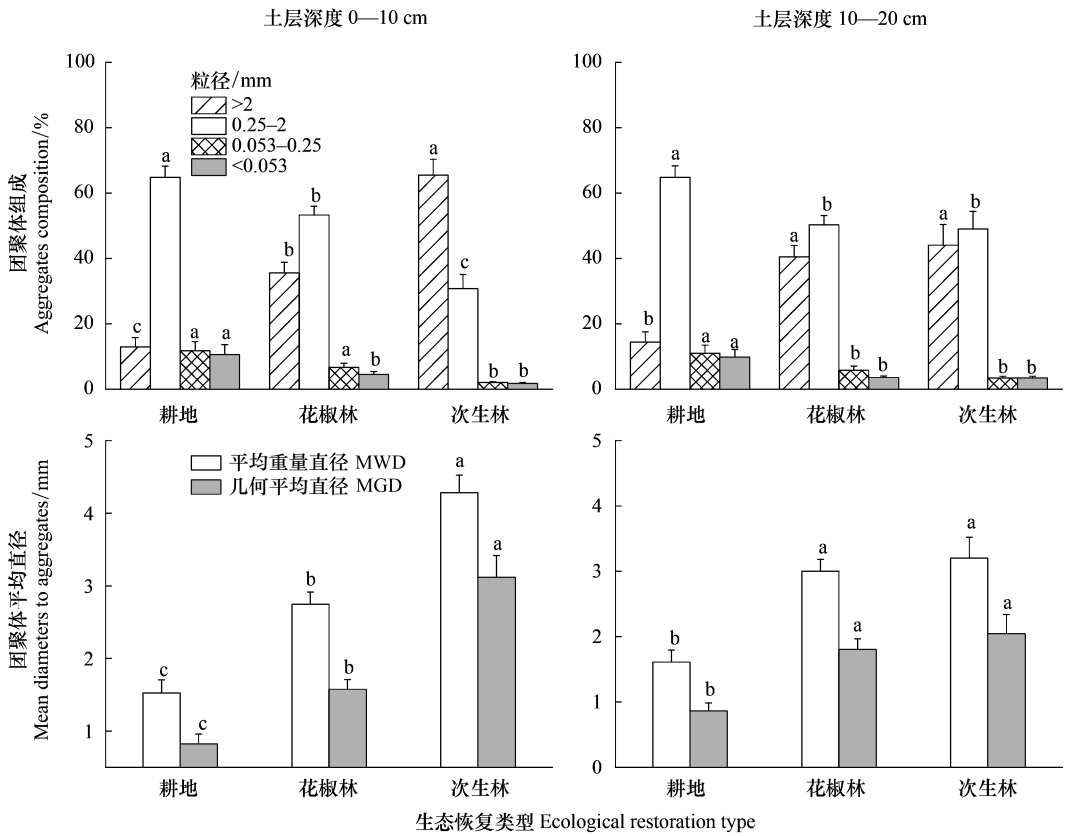


图 3 生态恢复后土壤团聚体组成和稳定性的变化

Fig.3 Changes of soil aggregates composition and stability after ecological restoration

MWD:平均重量直径;MGD:几何平均直径

<0.053 mm团聚体有机碳含量(图 4)。在 0—10 cm 土层,花椒林和次生林的>2 mm、0.25—2 mm、0.053—0.25 mm和<0.053 mm 团聚体有机碳含量依次增加了 12.9%、12.2%、19.0%、16.9%和 51.4%、52.5%、84.2%、62.2%,其中次生林的土壤团聚体有机碳含量显著高于花椒林和耕地。在 10—20 cm 土层,不同土地利用的各粒径团聚体有机碳含量差异不显著(P>0.05)。生态恢复后,0.053—0.25 mm 和<0.053 mm 团聚体有机碳含量的增加幅度较大,>2 mm 团聚体有机碳含量的增加幅度最小。在 0—20 cm 土层,生态恢复后各粒径团聚体有机碳贡献率的变化趋势与土壤团聚体组成一致(图 4)。生态恢复显著增加了>2 mm 团聚体有机碳贡献率,显著减少了 0.25—2 mm、0.053—0.25 mm 和<0.053 mm 团聚体有机碳贡献率。在 0—10 cm 土层,花椒林和次生林的>2 mm 团聚体有机碳贡献率分别增加 157.9%和 363.7%,0.25—2 mm、0.053—0.25 mm 和<0.053 mm 团聚体有机碳贡献率分别下降了 22.5%、37.3%、51.0%和 53.7%、78.7%、82.1%。>2 mm 团聚体有机碳贡献率增加的幅度大于<2 mm 团聚体有机碳贡献率减小的幅度。耕地中以 0.25—2 mm 团聚体有机碳贡献为主体,花椒林以 0.25—2 mm 和>2 mm 团聚体有机碳贡献为主,次生林以>2 mm 团聚体有机碳贡献为主导。

2.4 土壤碳组分间关系及碳组分与团聚体的关系

由表 1 可知,土壤 SOC 分别与 POC、EOC、MOC 和 NLOC 显著正相关(P<0.01);与 MOC(r=0.515) 相比,POC、EOC 与 SOC 的相关系数较高(r=0.876,r=0.871);除了 MOC 外,土壤碳组分之间均显著正相关(P<0.01)。

由表 2 可知,>2 mm 团聚体有机碳贡献率与土壤 SOC、POC、EOC 显著正相关(P<0.01),与土壤 NLOC 显著正相关(P<0.05),0.25—2 mm 和 0.053—0.25 mm 团聚体有机碳贡献率与土壤 SOC、POC、EOC、NLOC 显著负相关(P<0.05),< 0.053 mm 团聚体有机碳贡献率与土壤碳组分无显著相关(P>0.05);各粒径团聚体有机碳贡献率与土壤 MOC 均无显著相关(P>0.05)。

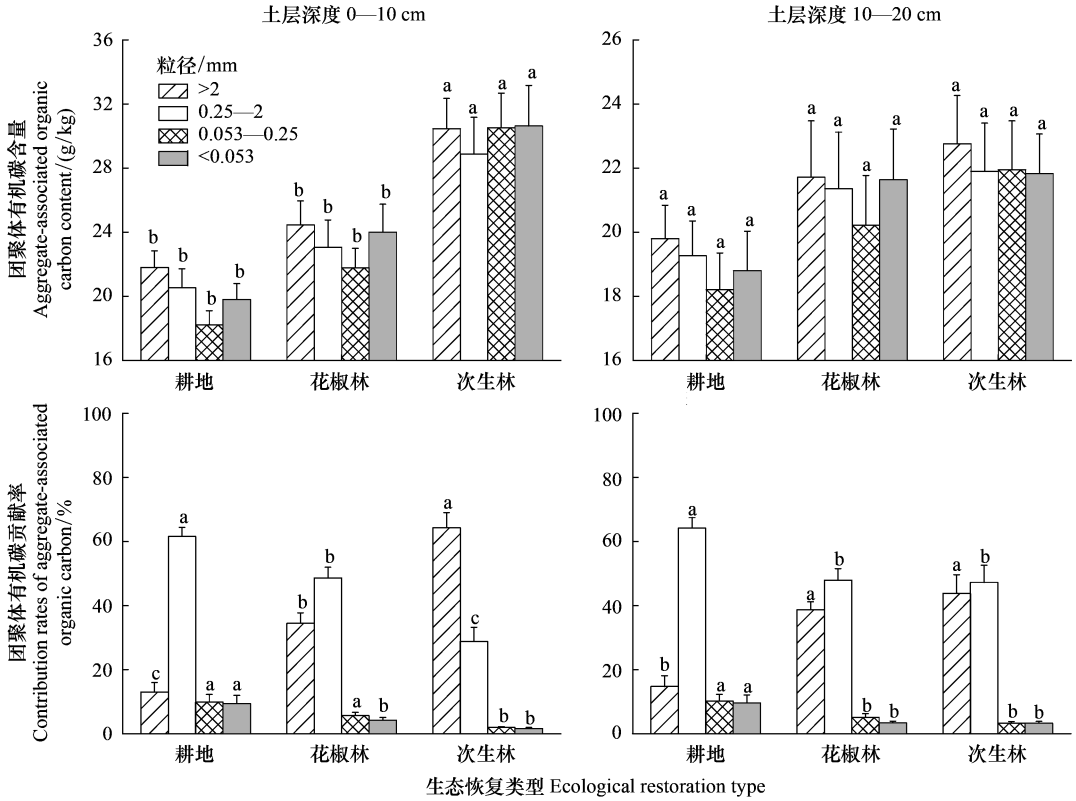


图 4　生态恢复后土壤团聚体有机碳含量及贡献率的变化

Fig.4　Variation of content and contribution rates of soil aggregate-associated organic carbon after ecological restoration

由表 2 可知,除 MOC 外,土壤 SOC、POC、EOC、NLOC 均与>2 mm 团聚体组成、MWD、MGD 显著正相关(P<0.05),与 0.25—2 mm、0.053—0.25 mm 团聚体组成显著负相关(P<0.05),且 POC 和 EOC 对团聚体组成和稳定性的影响更为显著(P<0.01);土壤 MOC 与团聚体组成和稳定性无显著相关(P>0.05),土壤各碳组分均与<0.053 mm 团聚体组成无显著相关(P>0.05)。土壤碳组分与团聚体有机碳含量显著正相关(P <0.01),相对于 MOC,土壤 POC、EOC 与团聚体有机碳含量的相关性较强(r=0.884,P <0.01),土壤 NLOC 与团聚体有机碳含量相关系数也较高。土壤碳组分与团聚体有机碳贡献率的关系与团聚体组成一致,土壤 POC、EOC 对团聚体有机碳贡献率的影响更为显著(P <0.01)。

表 1　土壤碳组分之间的相关性分析

Table 1　Correlation analysis between soil carbon fractions

土壤碳组分/(g/kg) Soil carbon fractions	POC	EOC	MOC	NLOC
SOC	0.876**	0.871**	0.515**	0.985**
POC		0.736**	0.041	0.872**
EOC			0.500**	0.771**
MOC				0.489**

SOC:土壤有机碳 soil organic carbon;POC:颗粒有机碳 particulate organic carbon;EOC:易氧化有机碳 easily oxidizable organic carbon;MOC:矿物结合有机碳 mineral associated organic carbon;NLOC:非活性有机碳 non-liable organic carbon;表中数字代表相关系数 r,* 表示在 0.05 水平上显著相关;* * 表示在 0.01 水平上显著相关

2.5　土壤团聚体组成、有机碳含量与团聚体有机碳贡献率关系

由表 3 可知,各粒径团聚体有机碳含量与>2 mm 团聚体有机碳贡献率显著正相关(P<0.05),与 0.053—

0.25 mm 团聚体有机碳贡献率显著负相关($P<0.05$),与<0.053 mm 团聚体有机碳贡献率无显著相关($P>0.05$);0.053—0.25 mm 和<0.053 mm 团聚体有机碳含量与有机碳贡献率相关性较强。土壤各粒径团聚体含量与其有机碳贡献率均显著正相关($P<0.01$)。

表 2 土壤碳组分与团聚体组成、稳定性及团聚体有机碳的相关系数

Table 2 Correlation coefficients of soil carbon fractions with aggregates composition, stability and aggregate-associated organic carbon

		SOC	POC	EOC	MOC	NLOC
团聚体组成/%	A1	0.457**	0.454**	0.496**	0.134	0.414*
Aggregates composition	A2	−0.387*	−0.418*	−0.397*	−0.039	−0.360*
	A3	−0.439**	−0.336*	−0.523**	−0.333*	−0.383*
	A4	−0.283	−0.295	−0.327	−0.08	−0.25
团聚体稳定性/ mm	MWD	0.459**	0.452**	0.502**	0.144	0.416*
Aggregates stability	MGD	0.430**	0.419*	0.474**	0.148	0.388*
团聚体有机碳含量/(g/kg)	A1	0.970**	0.819**	0.884**	0.557**	0.941**
Aggregate-associated organic	A2	0.956**	0.784**	0.858**	0.591**	0.933**
carbon content	A3	0.929**	0.797**	0.853**	0.514**	0.899**
	A4	0.957**	0.824**	0.867**	0.517**	0.930**
团聚体有机碳贡献率/%	A1	0.464**	0.455**	0.520**	0.148	0.416*
Contribution rates of aggregate-	A2	−0.367*	−0.432**	−0.356*	0.03	−0.349*
associated organic carbon	A3	−0.444**	−0.349*	−0.513**	−0.318	−0.392*
	A4	−0.283	−0.314	−0.3	−0.045	−0.26

A1:>2 mm 团聚体>2 mm aggregate size fraction; A2:0.25—2 mm 团聚体 0.25—2 mm aggregate size fraction; A3:0.053—0.25 mm 团聚体 0.053—0.25 mm aggregate size fraction; A4:<0.053 mm 团聚体<0.053 mm aggregate size fraction; MWD:平均重量直径 mean weight diameter; MGD:几何平均直径 mean geometric diameter; 表中数字代表相关系数 r, * 表示在 0.05 水平上显著相关; * * 表示在 0.01 水平上显著相关

表 3 土壤团聚体组成、有机碳含量与贡献率的相关系数

Table 3 Correlation coefficients of soil aggregates composition, organic carbon content and contribution rates

		团聚体有机碳含量/(g/kg) Aggregate-associated organic carbon content				团聚体有机碳贡献率/% Contribution rates of aggregate-associated organic carbon			
		A1	A2	A3	A4	A1	A2	A3	A4
团聚体组成/%	A1	0.379*	0.348*	0.580**	0.469**	0.996**	−0.905**	−0.718**	−0.696**
Aggregates composition	A2	−0.330*	−0.297	−0.518**	−0.377*	−0.906**	0.975**	0.407*	0.402*
	A3	−0.412*	−0.419*	−0.514**	−0.485**	−0.723**	0.373*	0.994**	0.656**
	A4	−0.163	−0.121	−0.331*	−0.317	−0.693**	0.494**	0.707**	0.988**
团聚体有机碳含量/(g/kg)	A1		0.979**	0.910**	0.916**	0.406*	−0.272	−0.406*	−0.157
Aggregate-associated organic	A2			0.907**	0.920**	0.369*	−0.22	−0.410*	−0.108
carbon content	A3				0.923**	0.593**	−0.470**	−0.492**	−0.311
	A4					0.473**	−0.353*	−0.476**	−0.281

表中数字代表相关系数 r, * 表示在 0.05 水平上显著相关; * * 表示在 0.01 水平上显著相关

3 讨论

3.1 生态恢复对土壤有机碳及组分影响

土壤 SOC 储量取决于凋落物、根系分泌物和生物量等碳输入和土壤呼吸、淋失等碳输出的平衡[47]。本研究中生态恢复后,0—20 cm 土壤碳组分的含量与储量显著增加(MOC 除外)。许多退化喀斯特生态系统的研究也证实了植被恢复促进了 SOC 的积累是由于退耕后较高的植物残体和根系生物量返回到土壤中[18,38,48]。地表凋落物量和根系分泌物量为土壤有机质积累提供丰富的来源[8]。在同一研究区发现,不同

种植年限(5 年、10 年和 20 年) 花椒林 SOC 含量高于耕地[49]。次生林和花椒林的 POC、EOC 含量和储量、POC/SOC、EOC/SOC 显著高于耕地(图 2) 表明次生林和花椒林有更多的新鲜植物残体来源碳回归土壤。这是因为土壤活性有机碳主要来源于植物生物量和根系分泌物[43]。次生林地表生物量(2278.32 g/cm^2) 大于花椒林地表生物量(681.39 g/cm^2) 使得次生林 SOC 及组分含量较高。杨龙[50]在本研究区的研究也发现花椒林、灌木林和乔木林的生物量为 721.39 g/cm^2、1219.38 g/cm^{2}和 2716.83 g/cm^2,SOC 含量高低由地表生物量决定。相关分析(表 1) 发现 SOC 与活性有机碳相关性较强(r = 0.876, P <0.01),表明土壤 SOC 的增加主要依赖于土壤 POC、EOC 等活性有机碳的增加。另外,喀斯特地区植被恢复促使土壤有机质的积累进而促进了土壤团聚体的形成和稳定,从而增强团聚体内有机碳的物理保护[15,39,48]。植被恢复增加的植物残体的输入、根系生物量和分泌物也能够促进土壤颗粒的团聚[51]。相反,长期的耕作或人为扰动一方面破坏了土壤大团聚体,降低了团聚体的稳定性[52],另一方面较高的分解速率、土壤侵蚀和有机质输入减少导致 SOC 及组分含量和储量[12]。与花椒林和次生林相比,耕地土壤中 EOC、POC 的含量较低(图 2) 表明耕地 SOC 可能具有较高的分解速率,使得活性有机碳大量损失。大量研究表明植被恢复或造林能够显著增加土壤活性有机碳组分[35,53—54],这与我们的研究结果一致。一方面植被下层凋落物输入可以直接提供活性有机碳组分[55];另一方面,植被恢复提升了微生物活性,微生物迅速分解促进了植物凋落物来源碳转化为活性有机碳组分[56]。然而,生态恢复并未显著提升 MOC 含量和储量(图 2),这与其它喀斯特地区的研究结果一致[15]。这可能是因为 MOC 是与粘粒和矿物质结合的有机碳组分,相对稳定且很难分解,对土地利用变化不敏感[43]。也可能与恢复时间有关,因为只有长期的植被恢复才能使有机物的输入和输出之间达到相对平衡,非保护性的 POC 才能逐步向稳定性 MOC 转化,增加 MOC 含量[57]。次生林 0—10 cm 土层土壤 NLOC 含量和储量显著高于耕地(图 2)。总之,生态恢复不仅增加了土壤总有机碳含量,产生了更多的活性有机碳组分,而且也增加了非活性碳组分的含量,但 SOC 的增加主要归因于土壤活性有机碳的增加。此外,自然恢复措施(次生林) 比人工恢复(种植花椒) 可以更好地促进 0—20 cm 土层 SOC 的积累。

3.2　生态恢复下团聚体对土壤有机碳变化的作用

生态恢复后,各粒径团聚体有机碳含量均不同程度增加,其中 0.053—0.25 mm 和<0.053 mm 团聚体有机碳含量的增加幅度较大,>2 mm 团聚体有机碳含量的增加幅度最小(图 4)。这符合有机碳输入优先向小粒径团聚体积累而后再胶结组成较大团聚体的层级理论[26],并与其它喀斯特地区研究结果一致[37]。从团聚体对有机碳贡献率的变化来看,也证实了较大团聚体是由较小团聚体与有机胶结物组成的。耕地土壤以 0.25—2 mm团聚体有机碳贡献为主体,而生态恢复后转为以>2 mm 团聚体对有机碳的贡献为主体(图 4),>2 mm 团聚体有机碳贡献率的显著增加抵消了<2 mm 团聚体有机碳贡献率的减小,最终增加了 SOC 含量。这表明>2 mm团聚体有机碳增加成为生态恢复后 SOC 增加的主要形式。土壤 SOC 与>2 mm 团聚体含量显著正相关(表 2) 也验证了这一点。在其它喀斯特地区的研究也发现植被自然演替恢复过程中 SOC 的增加主要归因于>2 mm 团聚体有机碳的积累[48]。退耕地植被恢复过程中土壤团聚体有机碳贡献率主要受团聚体数量和团聚体有机碳含量的影响[58]。王兴等[29]的研究也发现撂荒地植被恢复过程中团聚体对 SOC 的贡献率 80%来自>2 mm 团聚体,>2 mm 团聚体数量的显著增加是该团聚体有机碳贡献率高的主要原因,其次才是该团聚体有机碳含量的增加。本研究中,>2 mm 团聚体数量、>2 mm 团聚体有机碳含量分别与>2 mm 团聚体有机碳贡献率显著正相关(表 3),且团聚体数量与团聚体有机碳贡献率关系更强(r = 0.996, P <0.01),进一步证实了>2 mm团聚体数量是影响团聚体有机碳贡献率的关键因子。此外,0.25—2 mm、0.053—0.25 mm 和<0.053 mm 团聚体有机碳贡献率显著减小也主要是因为团聚体数量的显著减小(图 4,表 3),这潜在说明生态恢复使团聚体有机碳含量发生了再分配过程,即生态恢复促进有机碳由<2 mm 团聚体向>2 mm 团聚体转化,且这种转化主要是由于植被恢复促进了较小团聚体胶结形成较大团聚体,从而保护了有机碳不易被微生物利用。

3.3　生态恢复下土壤碳组分对团聚体的影响

生态恢复后,>2 mm 团聚体数量、MWD、MGD 显著增加,而 0.25—2 mm、0.053—0.25 mm 和< 0.053 mm

团聚体数量显著减少(P <0.01,图 3),这表明生态恢复能够有效改善土壤团聚体结构和团聚体稳定性。这与 Hu 等[48]在重庆南川岩溶石漠化地区关于植被自然演替恢复对团聚体结构的影响的结果一致。生态恢复后植物残体和根系生物量不断输入土壤,促进 SOC 的积累,有机碳作为团聚体主要的胶结物质促进团聚体的形成和稳定[59]。SOC 及组分与>2 mm 团聚体数量、MWD、MGD 显著正相关(表 2) 验证了这一点。土壤团聚体的有机胶结物质可分为瞬变性(微生物和植物来源得多糖类物质)、临时性(根系和真菌菌丝及分泌的多糖)和持久性胶结剂三大类[26]。有机碳组分中 EOC 和 POC 对团聚体形成和稳定性影响更大,主要是因为 EOC 主要来源于植物凋落物和根系分泌物的分解[43],主要包含复合多糖等有机化合物[60],POC 主要来源于新鲜动植物残体以及腐殖有机质中的临时或过渡有机碳[61],因此 EOC 和 POC 很可能由各种临时或暂时的胶结剂组成,它们促进了大团聚体的形成和稳定。廖林超等[62]的研究也验证了土壤团聚体的分布和稳定性与活性有机碳关系更密切,活性有机碳是土壤团聚化的重要有机质胶结物。然而,SOC 及组分含量与 0.25—2 mm、0.053—0.25 mm 和<0.053 mm 团聚体数量显著负相关,可能是由于初始有机碳最先在微团聚体或细颗粒中积累,随后整合进入大团聚体[26]。NLOC 和 MOC 含量与团聚体数量和稳定性的相关性较弱(表 2),可能与其对生态恢复的响应较不敏感有关。MOC 是有机物的最终分解产物,与粘粒、粉粒和矿物质结合的有机碳,相对稳定且很难分解[43],因此其可能很少参与团聚体的形成。然而,Wu 等[10]研究发现较不稳定有机碳组分,化学稳定性有机碳组分促进>2 mm 团聚体的形成,对团聚体稳定性的影响更显著。NLOC 作为非活性有机碳,也与显著团聚体数量和稳定性显著相关,但其相关性小于活性有机碳与团聚体数量和稳定性的关系(表 2)。因此,生态恢复使得新鲜有机质不断输入,显著提升了活性有机碳,活性有机碳作为临时或暂时的有机胶结剂主导了>2 mm 团聚体形成和稳定。生态恢复增加的有机碳及组分作为胶结物质促进了团聚体周转、形成和稳定,反过来有机碳及组分受到团聚体的物理保护,使得 SOC 在不同粒径团聚体进行再分配。因此,SOC 及组分含量与团聚体有机碳含量显著相关(表 2)。生态恢复导致的地上生物量增加了有机残体的输入,可能通过促进大团聚体形成中作为主导胶结剂的 EOC 和 POC 的供应,加速大团聚体形成,从而导致大团聚体有机碳储量的显著增加。>2 mm 团聚体有机碳贡献率与土壤 EOC 和 POC 呈显著正相关,且其相关系数高与 NLOC 和 MOC 验证了这一点。

4 结论

(1)生态恢复显著增加土壤有机碳组分含量与储量(MOC 除外),尤其是产生了更多的 POC 和 EOC,土壤 SOC 含量的增加主要依赖于土壤 POC、EOC 含量的增加。

(2)生态恢复加速了有机碳从较小团聚体向较大团聚体的重新分配过程,>2 mm 团聚体有机碳储量增加是生态恢复后 SOC 储量增加的主要形式,而>2 mm 团聚体有机碳储量增加依赖于其团聚体数量的大幅提升,其次才是团聚体有机碳含量的增加。

(3)生态恢复导致更多的新鲜植物残体来源碳的输入,可能通过促进>2 mm 团聚体形成中作为主导胶结剂的 EOC 和 POC 的供应,从而改善土壤团聚体结构和促进土壤 SOC 的积累。

参考文献(References):

[1] 袁道先. 我国西南岩溶石山的环境地质问题. 世界科技研究与发展, 1997, 19(5): 41-43.

[2] Li J Y, Yuan X L, Ge L, Li Q, Li Z G, Wang L, Liu Y. Rhizosphere effects promote soil aggregate stability and associated organic carbon sequestration in rocky areas of desertification. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2020, 304: 107126.

[3] Raiesi F. A minimum data set and soil quality index to quantify the effect of land use conversion on soil quality and degradation in native rangelands of upland arid and semiarid regions. Ecological Indicators, 2017, 75: 307-320.

[4] Kumar S, Singh A K, Ghosh P. Distribution of soil organic carbon and glomalin related soil protein in reclaimed coal mine-land chronosequence under tropical condition. Science of the Total Environment, 2018, 625: 1341-1350.

[5] 宋小艳, 王长庭, 胡雷, 刘丹, 陈科宇, 唐国. 若尔盖退化高寒草甸土壤团聚体结合有机碳变化.生态学报, 2022, doi: 10.5846/stxb202011132940.

[6] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. Science: New York, N Y, 2004, 304(5677): 1623-1627.

[7] Six J, Paustian K. Aggregate-associated soil organic matter as an ecosystem property and a measurement tool. Soil Biology and Biochemistry, 2014, 68: A4-A9.
[8] Liu M, Han G L, Zhang Q. Effects of soil aggregate stability on soil organic carbon and nitrogen under land use change in an erodible region in southwest China. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2019, 16(20): 3809.
[9] Jastrow J D, Amonette J E, Bailey V L. Mechanisms controlling soil carbon turnover and their potential application for enhancing carbon sequestration. Climatic Change, 2007, 80(1/2): 5-23.
[10] Wu Q C, Jiang X H, Lu Q W, Li J B, Chen J L. Changes in soil organic carbon and aggregate stability following a chronosequence of *Liriodendron chinense* plantations. Journal of Forestry Research, 2020, 32(1): 355-362.
[11] Xiao K C, He T G, Chen H, Peng W X, Song T Q, Wang K L, Li D J. Impacts of vegetation restoration strategies on soil organic carbon and nitrogen dynamics in a Karst area, southwest China. Ecological Engineering, 2017, 101: 247-254.
[12] Deng L, Wang K B, Tang Z S, Shangguan Z P. Soil organic carbon dynamics following natural vegetation restoration: Evidence from stable carbon isotopes($\delta^{13}C$). Agriculture, Ecosystems & Environment, 2016, 221: 235-244.
[13] Rong G H, Li W R, Zhu H S, Zhou J Y, Qiu L P, Ge N N, Wei X R, Shao M G. Dynamics of new- and old- organic carbon and nitrogen in bulk soils and aggregates following afforestation on farmland. Catena, 2020, 195: 104838.
[14] Chen Y Q, Yu S Q, Liu S P, Wang X L, Zhang Y, Liu T, Zhou L X, Zhang W X, Fu S L. Reforestation makes a minor contribution to soil carbon accumulation in the short term: Evidence from four subtropical plantations. Forest Ecology and Management, 2017, 384: 400-405.
[15] Xiao L M, Zhang W, Hu P L, Xiao D, Yang R, Ye Y Y, Wang K L. The formation of large macroaggregates induces soil organic carbon sequestration in short-term cropland restoration in a typical Karst area. Science of the Total Environment, 2021, 801: 149588.
[16] Deng L, Liu G B, Shangguan Z P. Land-use conversion and changing soil carbon stocks in China′s 'Grain-for-Green' Program: a synthesis. Global Change Biology, 2014, 20(11): 3544-3556.
[17] Schwendenmann L, Pendall E. Effects of forest conversion into grassland on soil aggregate structure and carbon storage in *Panama*: evidence from soil carbon fractionation and stable isotopes. Plant and Soil, 2006, 288(1/2): 217-232.
[18] Hu P L, Liu S J, Ye Y Y, Zhang W, He X Y, Su Y R, Wang K L. Soil carbon and nitrogen accumulation following agricultural abandonment in a subtropical Karst region. Applied Soil Ecology, 2018, 132: 169-178.
[19] 刘淑娟, 张伟, 王克林, 苏以荣. 桂西北典型喀斯特峰丛洼地退耕还林还草的固碳效益评价. 生态学报, 2016, 36(17): 5528-5536.
[20] 张哲, 王邵军, 李霁航, 曹润, 陈闽昆, 李少辉. 土壤易氧化有机碳对西双版纳热带森林群落演替的响应. 生态学报, 2019, 39(17): 6257-6263.
[21] 闫丽娟, 李广, 吴江琪, 马维伟, 王海燕. 黄土高原 4 种典型植被对土壤活性有机碳及土壤碳库的影响. 生态学报, 2019, 39(15): 5546-5554.
[22] 章晓芳, 郑生猛, 夏银行, 胡亚军, 苏以荣, 陈香碧. 红壤丘陵区土壤有机碳组分对土地利用方式的响应特征. 环境科学, 2020, 41(3): 1466-1473.
[23] 孙雪, 张玉铭, 张丽娟, 胡春胜, 董文旭, 李晓欣, 王玉英, 刘秀萍, 邢力, 韩建. 长期添加外源有机物料对华北农田土壤团聚体有机碳组分的影响. 中国生态农业学报: 中英文, 2021, 29(8): 1384-1396.
[24] Six J, Elliott E T, Paustian K. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: a mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture. Soil Biology and Biochemistry, 2000, 32(14): 2099-2103.
[25] 张姝, 袁宇含, 苑佰飞, 段燕, 张晋京. 玉米秸秆深翻还田对土壤及其团聚体内有机碳含量和化学组成的影响. 吉林农业大学学报, 2022, doi: 10.13327/j.jjlau.2021.1111.
[26] Tisdall J M, Oades J M. Organic matter and water-stable aggregates in soils. Journal of Soil Science, 1982, 33(2): 141-163.
[27] Wang S Q, Li T X, Zheng Z C. Tea plantation age effects on soil aggregate-associated carbon and nitrogen in the hilly region of western Sichuan, China. Soil and Tillage Research, 2018, 180: 91-98.
[28] 郑凤君, 王雪, 李生平, 刘晓彤, 刘志平, 卢晋晶, 武雪萍, 席吉龙, 张建诚, 李永山. 免耕覆盖下土壤水分、团聚体稳定性及其有机碳分布对小麦产量的协同效应. 中国农业科学, 2021, 54(3): 596-607.
[29] 王兴, 钟泽坤, 张欣怡, 吴少君, 卢绪巧, 杨改河, 任成杰, 韩新辉. 长期撂荒恢复土壤团聚体组成与有机碳分布关系. 环境科学, 2020, 41(5): 2416-2424.
[30] 罗晓虹, 王子芳, 陆畅, 黄容, 王富华, 高明. 土地利用方式对土壤团聚体稳定性和有机碳含量的影响. 环境科学, 2019, 40(8): 3816-3824.
[31] 周方亮, 李峰, 黄雅楠, 耿明建, 黄丽. 紫云英添加对土壤团聚体组成及有机碳分布的影响. 土壤, 2020, 52(4): 781-788.
[32] Shen X L, Wang L L, Yang Q C, Xiu W M, Li G, Zhao J N, Zhang G L. Dynamics of soil organic carbon and labile carbon fractions in soil aggregates affected by different tillage managements. Sustainability, 2021, 13(3): 1541.
[33] Tong X W, Brandt M, Yue Y M, Horion S, Wang K L, Keersmaecker W D, Tian F, Schurgers G, Xiao X M, Luo Y Q, Chen C, Myneni R, Shi Z, Chen H S, Fensholt R. Increased vegetation growth and carbon stock in China Karst via ecological engineering. Nature Sustainability, 2018, 1(1): 44-50.
[34] 廖洪凯, 龙健, 李娟. 土地利用方式对喀斯特山区土壤养分及有机碳活性组分的影响. 自然资源学报, 2012, 27(12): 2081-2090.
[35] 白义鑫, 盛茂银, 胡琪娟, 赵楚, 吴静, 张茂莎. 西南喀斯特石漠化环境下土地利用变化对土壤有机碳及其组分的影响. 应用生态学报,

2020, 31(5): 1607-1616.
[36] 蓝家程, 沈艳. 岩溶槽谷区植被恢复对土壤团聚体有机碳及碳库管理指数的影响. 广西植物, 2020, 40(6): 765-775.
[37] 李娟, 廖洪凯, 龙健, 陈彩云. 喀斯特山区土地利用对土壤团聚体有机碳和活性有机碳特征的影响. 生态学报, 2013, 33(7): 2147-2156.
[38] Yang L Q, Luo P, Wen L, Li D J. Soil organic carbon accumulation during post-agricultural succession in a Karst area, southwest China. Scientific Reports, 2016, 6: 37118.
[39] Liu M, Han G L, Zhang Q. Effects of agricultural abandonment on soil aggregation, soil organic carbon storage and stabilization: Results from observation in a small Karst catchment, Southwest China. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2020, 288: 106719.
[40] Xiao S S, Zhang W, Ye Y Y, Zhao J, Wang K L. Soil aggregate mediates the impacts of land uses on organic carbon, total nitrogen, and microbial activity in a Karst ecosystem. Scientific Reports, 2017, 7(1): 41402.
[41] 喻阳华, 钟欣平, 李红. 黔中石漠化区不同海拔顶坛花椒人工林生态化学计量特征. 生态学报, 2019, 39(15): 5536-5545.
[42] Cambardella C A, Elliott E T. Carbon and nitrogen distribution in aggregates from cultivated and native grassland soils. Soil Science Society of America Journal, 1993, 57(4): 1071-1076.
[43] Cambardella C A, Elliott E T. Particulate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence. Soil Science Society of America Journal, 1992, 56(3): 777-783.
[44] Blair G J, Lefroy R D, Lisle L. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems. Australian Journal of Agricultural Research, 1995, 46(7): 1459-1466.
[45] Lan J C, Hu N, Fu W L. Soil carbon-nitrogen coupled accumulation following the natural vegetation restoration of abandoned farmlands in a Karst rocky desertification region. Ecological Engineering, 2020, 158: 106033.
[46] 唐国勇, 李昆, 孙永玉, 张春华. 干热河谷不同利用方式下土壤活性有机碳含量及其分配特征. 环境科学, 2010, 31(5): 1365-1371.
[47] Ji H, Han J G, Xue J M, Hatten J A, Wang M H, Guo Y H, Li P P. Soil organic carbon pool and chemical composition under different types of land use in wetland: Implication for carbon sequestration in wetlands. Science of the Total Environment, 2020, 716: 136996.
[48] Hu N, Lan J C. Impact of vegetation restoration on soil organic carbon stocks and aggregates in a Karst rocky desertification area in Southwest China. Journal of Soils and Sediments, 2020, 20(3): 1264-1275.
[49] Liao H K, Zheng C L, Li J, Long J. Dynamics of soil microbial recovery from cropland to orchard along a 20-year chronosequence in a degraded Karst ecosystem. Science of the Total Environment, 2018, 639: 1051-1059.
[50] 杨龙. 喀斯特石漠化治理生态修复模式下的碳汇效益监测评价[D]. 贵阳: 贵州师范大学, 2016.
[51] Zhong Z K, Han X H, Xu Y D, Zhang W, Fu S Y, Liu W C, Ren C J, Yang G H, Ren G X. Effects of land use change on organic carbon dynamics associated with soil aggregate fractions on the Loess Plateau, China. Land Degradation & Development, 2019, 30(9): 1070-1082.
[52] Tang F K, Cui M, Lu Q, Liu Y G, Guo H Y, Zhou J X. Effects of vegetation restoration on the aggregate stability and distribution of aggregate-associated organic carbon in a typical Karst gorge region. Solid Earth, 2016, 7(1): 141-151.
[53] Pang D B, Cui M, Liu Y G, Wang G Z, Cao J H, Wang X R, Dan X Q, Zhou J X. Responses of soil labile organic carbon fractions and stocks to different vegetation restoration strategies in degraded Karst ecosystems of southwest China. Ecological Engineering, 2019, 138: 391-402.
[54] 裴隆翠, 陈月明, 张鑫, 陈祥伟. 红松人工林植被恢复对土壤活性有机碳组分影响的时效性. 东北林业大学学报, 2019, 47(6): 21-25.
[55] Zhang Q Y, Jia X X, Wei X R, Shao M G, Li T C, Yu Q. Total soil organic carbon increases but becomes more labile after afforestation in China′s Loess Plateau. Forest Ecology and Management, 2020, 461: 117911.
[56] Li Y, Li Z, Cui S, Liang G P, Zhang Q P. Microbial-derived carbon components are critical for enhancing soil organic carbon in no-tillage croplands: A global perspective. Soil and Tillage Research, 2021, 205: 104758.
[57] 江淼华, 吕茂奎, 林伟盛, 谢锦升, 杨玉盛. 生态恢复对红壤侵蚀地土壤有机碳组成及稳定性的影响. 生态学报, 2018, 38(13): 4861-4868.
[58] Qiu L P, Wei X R, Zhang X C, Cheng J M, Gale W, Guo C, Long T. Soil organic carbon losses due to land use change in a semiarid grassland. Plant and Soil, 2012, 355(1/2): 299-309.
[59] 邱晓蕾, 宗良纲, 刘一凡, 杜霞飞, 罗敏, 汪润池. 不同种植模式对土壤团聚体及有机碳组分的影响. 环境科学, 2015, 36(3): 1045-1052.
[60] Bongiorno G, Bünemann E K, Oguejiofor C U, Meier J, Gort G, Comans R, Mäder P, Brussaard L, De Goede R. Sensitivity of labile carbon fractions to tillage and organic matter management and their potential as comprehensive soil quality indicators across pedoclimatic conditions in Europe. Ecological Indicators, 2019, 99: 38-50.
[61] Parton W J, Scurlock J M O, Ojima D S, Gilmanov T G, Scholes R J, Schimel D S, Kirchner T, Menaut J-C, Seastedt T, Garcia Moya E, Kamnalrut A, Kinyamario J I. Observations and modeling of biomass and soil organic matter dynamics for the grassland biome worldwide. Global Biogeochemical Cycles, 1993, 7(4): 785-809.
[62] 廖超林, 黎丽娜, 谢丽华, 孙钰翔, 邹炎, 戴齐, 尹力初. 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. 土壤学报, 2021, 58(4): 978-988.