

蓝家程, 王俊贤, 王莎莎, 等. 喀斯特石漠化治理措施对土壤颗粒有机碳与团聚体有机碳的影响[J]. 中国岩溶, 2022, 41(5): 773-783.  
DOI: 10.11932/karst20220509

# 喀斯特石漠化治理措施对土壤颗粒有机碳与团聚体有机碳的影响

蓝家程, 王俊贤, 王莎莎, 祁 雪, 龙启霞

(贵州师范大学喀斯特研究院/国家喀斯特石漠化防治工程技术研究中心, 贵州 贵阳 550001)

**摘 要:** 文章以耕地为对照, 分析不同石漠化治理措施(花椒林和次生林)对土壤 0~20 cm 土层有机碳(SOC)、颗粒有机碳(POC)、矿物结合有机碳(MOC)和团聚体有机碳的影响, 探讨 POC、MOC 与 SOC、团聚体有机碳的关系。结果表明: 与耕地相比, 花椒林和次生林均不同程度提高 SOC、POC、MOC 和团聚体有机碳含量。0~10 cm 土层次生林 SOC 含量和各粒径团聚体有机碳含量均显著高于耕地和花椒林, 在 10~20 cm 土层无显著差异; 0~20 cm 土层花椒林和次生林土壤 POC 含量显著高于耕地, MOC 无显著差异。POC/SOC 范围为 20.38%~45.27%, 花椒林和次生林显著高于耕地。相反, MOC/SOC 为耕地显著高于花椒林和次生林。退耕为花椒林和次生林后, SOC 含量的增加主要以 POC 含量增加为主。次生林和花椒林 > 2 mm 粒径对 SOC 贡献率显著高于耕地, 但 0.25~2 mm 粒径、0.053~0.25 mm 粒径和 < 0.053 mm 粒径对 SOC 贡献率显著低于耕地。其相关分析表明: POC、MOC 与 SOC、团聚体有机碳的关系均呈正相关, 表现为次生林 > 花椒林 > 耕地。退耕恢复为花椒林和次生林后, SOC、POC 和 MOC 增加量与团聚体有机碳增加量显著相关, 其以次生林的相关性较强。石漠化治理措施改变 SOC 物理组分及其组成以及它们之间的关系, 从而促进有机碳的积累。

**关键词:** 颗粒有机碳; 矿物结合有机碳; 团聚体; 石漠化; 喀斯特地区

中图分类号: S153.6 文献标识码: A

文章编号: 1001-4810(2022)05-0773-11 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## 0 引 言

受特殊的水文地质背景、气候、地形地貌和人类不合理活动的影响, 中国西南喀斯特地区石漠化和水土流失问题非常严重<sup>[1]</sup>。1999 年国家实施“退耕还林还草工程”等一系列的石漠化综合治理工程, 旨在修复这一区域脆弱的生态系统。至今, 中国西南喀斯特地区植被明显恢复, 水土流失得到有效控制, 石漠化趋势得到有效遏制<sup>[2-3]</sup>。退耕还林工程被认为

是增加喀斯特石漠化区土壤有机碳(Soil organic carbon, SOC)储量的有效措施<sup>[4-6]</sup>。因此, 退耕还林等石漠化治理措施可作为土壤碳固存和缓解大气 CO<sub>2</sub> 的主要策略, 从而在调节气候变化中发挥重要作用。在喀斯特地区的研究中发现由耕地向乔木林和原始森林的自然演替能够促进 SOC 的积累<sup>[4,7]</sup>。退耕还林还草措施对 SOC 含量产生显著影响, 但转变为人工林的 SOC 含量略有下降<sup>[6]</sup>。在广西环江喀斯特地区, 由耕地退耕恢复为不同经济树种对土壤 SOC 储

基金项目: 国家自然科学基金项目(41601584, 42177446); 贵州省科技计划项目(黔科合基础[2017]1417); 国家重点研发计划课题(2016YFC0502603)

第一作者简介: 蓝家程(1986—), 男, 博士, 教授, 研究方向: 喀斯特生态环境与土壤生态。E-mail: lanjc2016@163.com。

收稿日期: 2022-01-01

量影响存在差异,退耕恢复为香椿使土壤 SOC 储量提高 40%,但退耕恢复为桂牧 1 号杂交象草、任豆和桂牧 1 号杂交象草组合的土壤 SOC 储量没有显著变化<sup>[8]</sup>。因此,喀斯特地区植被恢复后土壤 SOC 的积累仍存在很大的不确定性。这些不一致的研究结果表明,土壤 SOC 变化较为复杂,受土地利用、植被类型等因素的影响。其中,土地利用类型是影响土壤碳库的重要因素之一<sup>[9]</sup>。喀斯特石漠化治理必然引起土地利用方式和植被类型的改变,然而,这些措施是否有效尚不明确,需要研究不同喀斯特石漠化治理措施下土壤碳库的变化和稳定。

SOC 变化的不一致性可由其复杂的化学或物理组分的变化来解释,一个 SOC 组分中碳的损失可能被另一个 SOC 组分中碳的增加而抵消,从而导致 SOC 无显著变化<sup>[10]</sup>。因此,通过物理分组的方法来区分不同功能的 SOC 组分有助于深入了解石漠化治理措施对 SOC 变化的影响。采用颗粒分组法可将有机碳分为颗粒有机碳 (Particulate organic carbon, POC) 和矿物结合有机碳 (Mineral associated organic carbon, MOC)。POC 是指与砂粒 (53~2 000  $\mu\text{m}$  结合的有机碳部分,主要由动植物和根系残体半分解或未分解产物组成,其周转时间为 5~20 a<sup>[11]</sup>,易被微生物降解,处于新鲜残茬向腐殖质转化的中间过渡碳库,周转时间介于活性有机碳库至惰性有机碳库之间。POC 可为稳定的土壤有机质组分 (团聚体有机碳,腐殖化碳) 提供微生物呼吸和碳通量,对于土壤 SOC 的长期固存也具有重要作用<sup>[11-12]</sup>。MOC 是粒径 < 53  $\mu\text{m}$  吸附于黏粉粒的有机碳,多是腐殖化有机物质,属于惰性有机碳库,在一定程度上可表征土壤碳库稳定性<sup>[13]</sup>,其含量可间接指示 SOC 氧化程度和利用难易程度以及土地利用潜力<sup>[14]</sup>。相对于 SOC,土壤碳组分对土地利用或土壤管理措施的变化更为敏感<sup>[15]</sup>。因此了解土壤有机碳组分的分布特征对于表征植被变化、土地利用和土壤管理措施引起的土壤有机碳质量变化具有重要意义。

在合理的土地利用系统中,SOC 含量的增加主要表现为 POC 的增加<sup>[16-17]</sup>。因此,提高土壤 POC 的比例,可能是促进 SOC 积累的主要机制。一方面,POC 作为 MOC 的前体产物,是微生物的能量源,其可被微生物分解代谢转化为生物化学稳定碳组分,进而长期储存下来<sup>[12]</sup>,所以 MOC 的增加可能依赖于 POC 输入的增加;另一方面,根据团聚体周转理论,

颗粒有机质 (Particulate organic matter, POM) 是构成大团聚体的核心,可以胶结和稳定团聚体,而团聚体的形成又不断地包裹 POC 分解产物,形成稳定的 SOC,进而促进 SOC 的积累和保持<sup>[18]</sup>。研究表明,POC 和 MOC 与土壤团聚体密切相关<sup>[19]</sup>,部分 POC 被团聚体物理保护,并且可能含有生物化学稳定碳<sup>[20]</sup>。反过来,POC 则对土壤团聚体的形成和稳定有重要作用<sup>[21]</sup>。研究 SOC 的组成变化及其与团聚体有机碳的相互关系,有助于深入认识 SOC 动态变化和团聚体固碳机制。喀斯特石漠化地区土地利用对土壤活性有机碳和团聚体有机碳的影响表明,退耕还林或恢复植被能显著提高土壤活性有机碳和团聚体有机碳的含量<sup>[22-24]</sup>。然而,石漠化治理措施对土壤 POC、MOC 的影响及其与 SOC 和团聚体有机碳的关系尚未清楚。本研究拟以贵州关岭—贞丰花江石漠化治理示范区为例,探讨石漠化治理措施对土壤 POC、MOC 的影响,阐明 POC、MOC 与 SOC 和团聚体有机碳的关系,以期对石漠化治理土壤固碳机理的研究提供参考。

## 1 研究区概况

关岭—贞丰花江示范区位于贵州安顺市关岭布依族苗族自治县与黔西南布依族苗族自治州贞丰县交界处的北盘江峡谷花江段,总面积 51.6 km<sup>2</sup>,喀斯特面积占 88%。研究区地貌类型为喀斯特高原峡谷,海拔 500~1 200 m,气候冬春温暖干旱,夏秋湿热,为亚热带河谷气候,热量资源丰富,年均温 18.4  $^{\circ}\text{C}$ ,年降水量 1 100 mm。土壤以石灰土为主,土层薄、分布不均一。植被覆盖度 48.3%,潜在、轻度、中度、强度 (含极强度) 石漠化面积分别占示范区总面积的 34.2%、30.0%、12.5%、11.3%。

## 2 研究方法

### 2.1 样地设置与采样

示范区内设置自然退耕还林 (次生林)、人工生态恢复花椒林两种石漠化治理措施,耕地作为对照。次生林主要植被为香椿 (*Toona sinensis*)、栎树 (*Koelreuteria paniculata*)、毛桐 (*Mallotus barbatus* (Wall.) Muell.-Arg.)、莢蒾 (*Viburnum dilatatum* Thunb.)、粗糠柴 (*Mallotus philippensis*)、浆果楝

(*Cipadessa baccifera* (Roth.) Miq)、油桐 (*Vernicia fordii* (Hemsl.) Airy Shaw)、八角枫 (*Alangium chinense* (Lour.) Harms)、乌桕 (*Sapium sebiferum* (L.) Roxb.) 等。花椒林为当地主要的石漠化治理经济灌木树种, 为当地百姓带来了经济效益。耕地主要种植玉米, 种植历史 50 a 以上。

2018 年 11 月在示范区内设置 7 组样地, 其中 6 组样地包含次生林、花椒林和耕地, 1 组样地仅为花椒林和耕地配对。每组样地中的次生林和花椒林均为相邻耕地, 退耕 15~20 a。每组样地每种土地利用划分为 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。土样带回实验室自然风干后, 挑去杂质, 研磨过 2 mm 筛待测。使用环刀采集原状土壤, 装入硬质塑料盒带回实验室后, 沿自然结构面剖成 <10 mm 大小土粒, 自然风干后用于团聚体筛分。

## 2.2 实验分析

土壤团聚体分离采用干筛和湿筛结合法, 原状土自然风干后, 通过孔径为 10 mm、5 mm、2 mm、1 mm 和 0.25 mm 的筛组进行干筛, 分别称重各级筛子土样, 并计算百分比。把干筛分取的土样按比例配成 100 g, 置于 2 mm、0.25 mm 和 53  $\mu\text{m}$  组成的套筛上, 上下均匀震荡 30 次  $\cdot\text{min}^{-1}$ , 震荡时间为 2 min 后, 残留在不同筛子上的土壤用蒸馏水洗到铝盒中, 在烘箱中 60  $^{\circ}\text{C}$  下, 经 24 h 后的烘干至恒重的土样即为不同粒径的水稳性团聚体, 每组重复 3 次。

将全土样品和水稳性团聚体样品研磨过 0.25 mm 筛, 用稀盐酸去除无机碳后, 使用元素分析仪—稳定同位素质谱仪 (Vario ISOPOTE Cube-Isoprime, Elementar 公司, 德国) 测定 SOC 含量。POC 和 MOC 的测定参

照 Cambardella 和 Elliott<sup>[11]</sup> 的方法, 具体如下: 称取过 2 mm 风干土样 20 g, 放入 250 mL 三角瓶中, 加入 60 mL 的六偏磷酸钠 ( $5\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ ), 用手摇 10~15 min 后放在往复式震荡器 (18  $^{\circ}\text{C}$ , 90  $\text{rpm}\cdot\text{min}^{-1}$ ) 上振荡 18 h, 将分散液过 53  $\mu\text{m}$  筛, 用纯水洗至筛下水为澄清, 筛上部分为颗粒有机质, 分离后于铝盒中 80  $^{\circ}\text{C}$  下过夜烘干 (24 h), 并进行称量。筛下部分 (<53  $\mu\text{m}$ ) 为矿物结合态有机质, 用水浴锅 (90  $^{\circ}\text{C}$ ) 蒸干后再用烘箱烘干 (24 h)。称重并计算各组占全土的百分比。将 > 53  $\mu\text{m}$  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, 乘以其所占土壤的百分比计算出 POC 含量。SOC 含量与 POC 含量之差即为 MOC 含量。

## 2.3 统计分析

统计分析采用 SPSS 17.0 软件, 采用单因素方差分析 (one-way ANOVA) 和多重比较 LSD 法分析不同样地 SOC、团聚体有机碳、POC 和 MOC 含量之间是否显著差异 ( $P<0.05$ )。采用皮尔逊相关分析 SOC、团聚体有机碳、POC 和 MOC 含量之间的关系。采用线性回归分析 SOC、POC、MOC 变化量和团聚体有机碳变化量之间的关系。

## 3 结果与分析

### 3.1 土壤有机碳含量变化

石漠化治理措施对 SOC 含量的影响见表 1。0~10 cm 土层, SOC 含量排序为次生林>花椒林>耕地, 且次生林 SOC 含量显著高于耕地和花椒林, 花椒林 SOC 含量与耕地无显著差异 ( $P>0.05$ ); 与耕地相比, 花椒林 SOC 含量提高了 17%, 次生林显著增

表 1 土壤有机碳、颗粒有机碳及矿物结合有机碳变化

Table 1 Changes of soil organic carbon, particulate organic carbon and mineral-associated organic carbon

土层/cm		SOC/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	POC/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	MOC/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	POC/SOC (%)	MOC/SOC (%)
0~10	耕地	21.50aA	6.05aA	15.45aA	27.92aA	72.08aA
	花椒林	25.20aA	10.57bA	14.63aA	41.47bA	58.53bA
	次生林	31.03bA	14.20cA	16.83aA	45.27bA	54.73bA
10~20	耕地	19.35aA	3.94aA	15.41aA	20.38aA	79.62aA
	花椒林	22.37aA	8.24bA	14.14aA	36.75bA	63.25bA
	次生林	22.79aB	7.26bB	15.53aA	31.48bB	68.52bB

注: 不同小写字母表示同一土层不同土地利用间显著差异 ( $P<0.05$ ), 不同大写字母表示同一土地利用不同土层间显著差异 ( $P<0.05$ )。

加了 44%。10~20 cm 土层, SOC 含量排序为次生林>花椒林>耕地, 且三种土地利用之间无显著差异 ( $P>0.05$ ); 与耕地相比, 花椒林 SOC 含量提高了 16%, 次生林提高了 18%。不同土地利用 SOC 含量随土层深度增加而减小, 仅在次生林具有显著差异。

### 3.2 颗粒有机碳与矿物结合有机碳含量及其分配比例

表 1 表明各项石漠化治理措施均明显提高土壤 POC 含量。0~10 cm 土层, POC 含量表现为次生林最高, 其次是花椒林, 耕地最小; 与耕地相比, 次生林 POC 含量显著增加了 135%, 花椒林显著增加了 75%。10~20 cm 土层, 花椒林 POC 含量最高, 其次为次生林, 耕地最小; 花椒林和次生林 POC 含量无显著差异, 分别较耕地显著提高了 109% 和 84%。不同土地利用间土壤 MOC 含量无显著差异。不同土地利用土壤 POC 和 MOC 含量随土层深度增加而减小, 其中仅次生林 POC 含量在不同土层显著差异。

石漠化治理措施对土壤 POC 和 MOC 分配比例有显著影响 (表 1)。0~20 cm 土层, 次生林和花椒林 POC 分配比例显著高于耕地, 相反 MOC 分配比例显

著低于耕地。POC/SOC 随土层深度增加而减小, 相反, MOC/SOC 呈增加趋势。由表 1 可知, 0~20 cm 土层, 耕地转变为花椒林和次生林后, SOC 含量的增加以 POC 含量增加为主。

### 3.3 团聚体有机碳含量变化及贡献率

由表 2 可知, 0~10 cm 土层, 花椒林团聚体有机碳含量与耕地无显著差异, 花椒林 > 2 mm 粒径、0.25~2 mm 粒径、0.053~0.25 mm 粒径和 < 0.053 mm 粒径有机碳含量分别增加了  $2.66 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$  (12%)、 $2.56 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$  (12%)、 $3.55 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$  (19%) 和  $4.22 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$  (24%); 次生林团聚体有机碳含量显著高于耕地, > 2 mm 粒径、0.25~2 mm 粒径、0.053~0.25 mm 粒径和 < 0.053 mm 粒径有机碳含量依次增加了  $8.65 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$  (40%)、 $8.35 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$  (28%)、 $12.30 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$  (68%) 和  $10.84 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$  (55%)。10~20 cm 土层, 花椒林、次生林团聚体有机碳含量与耕地无显著差异, 但各粒径团聚体有机碳含量均小幅提升。不同土地利用土层深度对团聚体有机碳含量的影响有所差异, 花椒林和耕地 0~10 cm 和 10~20 cm 土层无显著差异, 次生林 0~10 cm 土层则显著大于 10~20 cm 土层。

表 2 土壤团聚体有机碳含量变化

Table 2 Change of soil aggregate-associated organic carbon

土层		有机碳含量/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$			
		>2 mm	0.25~2 mm	0.053~0.25 mm	<0.053 mm
0~10	耕地	21.80aA	20.53aA	18.22aA	19.79aA
	花椒林	24.46aA	23.06aA	21.77aA	24.01aA
	次生林	30.45bA	28.88bA	30.52bA	30.63bA
10~20	耕地	19.79aA	19.27aA	18.21aA	18.80aA
	花椒林	21.72aA	21.36aA	20.21aA	21.64aA
	次生林	22.76aB	21.89aB	21.95aB	21.82aB

注: 不同小写字母表示同一土层不同土地利用间显著差异 ( $P<0.05$ ); 不同大写字母表示同一土地利用不同土层间显著差异 ( $P<0.05$ )。

不同土地利用团聚体有机碳含量对 SOC 含量的贡献率差异显著 (图 1)。次生林 > 2 mm 粒径有机碳含量贡献率最大 (64.5%), 且随团聚体粒径减少而减小, 耕地以 0.25~2 mm 粒径有机碳含量贡献率占主导, 花椒林则以 >2 mm 粒径和 0.25~2 mm 粒径有机碳含量贡献率为主。次生林和花椒林 >2 mm 粒径有机碳贡献率显著高于耕地, 但 0.25~2 mm 粒径、0.053~0.25 mm 粒径和 <0.053 mm 粒径有机碳贡献率

均显著低于耕地。由此可见, 石漠化治理后, SOC 含量的增加主要是因为 > 2 mm 粒径有机碳贡献率的增加。

### 3.4 颗粒有机碳、矿物结合有机碳与有机碳、团聚体有机碳的关系

土壤 POC、MOC 与 SOC 和各粒径团聚体有机碳均呈正相关, 相关性大小表现为次生林>花椒林>

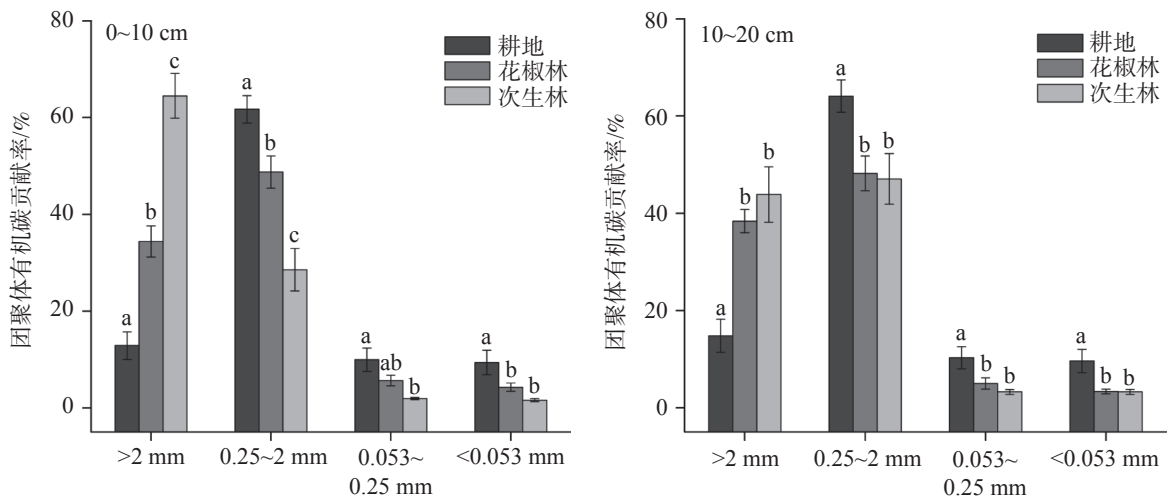


图 1 团聚体有机碳对土壤有机碳的贡献率

Fig. 1 Contribution rate of aggregate-associated organic carbon to soil organic carbon

耕地 (表 3)。耕地 POC 与 SOC 和各粒径团聚体有机碳无显著相关, MOC 与 0.053~0.25 mm 粒径和 < 0.053 粒径有机碳显著正相关。花椒林 POC 与 SOC、0.053~0.25 mm 粒径和 < 0.053 粒径有机碳显著正相关, MOC 与 > 2 mm 粒径和 0.25~2 mm 粒径有机碳

显著正相关。次生林 POC 与 SOC 和各粒径团聚体有机碳均呈极显著正相关, MOC 与 SOC 和各粒径团聚体有机碳呈显著正相关。不同土地利用 SOC 与各粒径团聚体有机碳均呈极显著正相关。

表 3 颗粒有机碳、矿物结合有机碳与土壤有机碳、团聚体有机碳的相关关系

Table 3 Relationship between particulate organic carbon, mineral associated organic carbon and soil organic carbon, and aggregate-associated organic carbon

		有机碳含量/g·kg <sup>-1</sup>				
		>2 mm	0.25~2 mm	0.053~0.25 mm	<0.053 mm	SOC
耕地	POC	0.421	0.290	0.179	0.111	0.527
	MOC	0.520	0.555	0.591*	0.685*	0.495
	SOC	0.919**	0.824**	0.748**	0.773**	1.000
花椒林	POC	0.558	0.534	0.684*	0.591*	0.672*
	MOC	0.593*	0.632*	0.387	0.463	0.536
	SOC	0.944**	0.954**	0.897**	0.873**	1.000
次生林	POC	0.958**	0.920**	0.854**	0.941**	0.944**
	MOC	0.635*	0.682*	0.714**	0.656*	0.691*
	SOC	0.991**	0.978**	0.937**	0.985**	1.000

注: \* 为  $P < 0.05$  水平显著差异; \*\* 为  $P < 0.01$  水平显著差异。

### 3.5 有机碳各组分变化量的关系

SOC 变化量与 POC、MOC 变化量的线性回归分析可进一步说明石漠化治理后, SOC 更依赖于哪一组分有机碳的变化 (图 2)。图 2 表明, 耕地转为花椒林后, SOC 的增加随 POC 增加而显著增加, 随 MOC 不显著增加; 耕地退耕为次生林后, SOC 的增

加随 POC 和 MOC 的增加显著增加。

由图 3 可知, 退耕为次生林后, SOC、POC 和 MOC 增加量与各粒径团聚体有机碳增加量显著线性相关 ( $P < 0.01$ )。耕地转变为花椒林后, SOC 增加量与各粒径团聚体有机碳增加量显著线性相关 ( $P < 0.01$ ), POC 增加量与 0.25~2 mm 粒径和 < 0.053 粒径

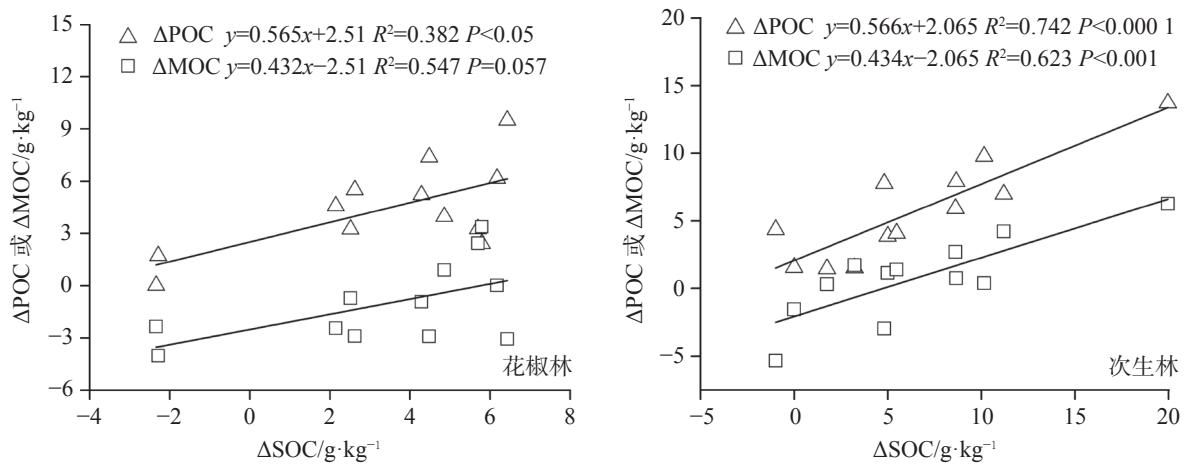


图2 土壤颗粒有机碳、矿物结合有机碳变化量与土壤有机碳变化量的关系

Fig. 2 Relationship between change of particulate organic carbon, mineral-associated organic carbon and change of soil organic carbon

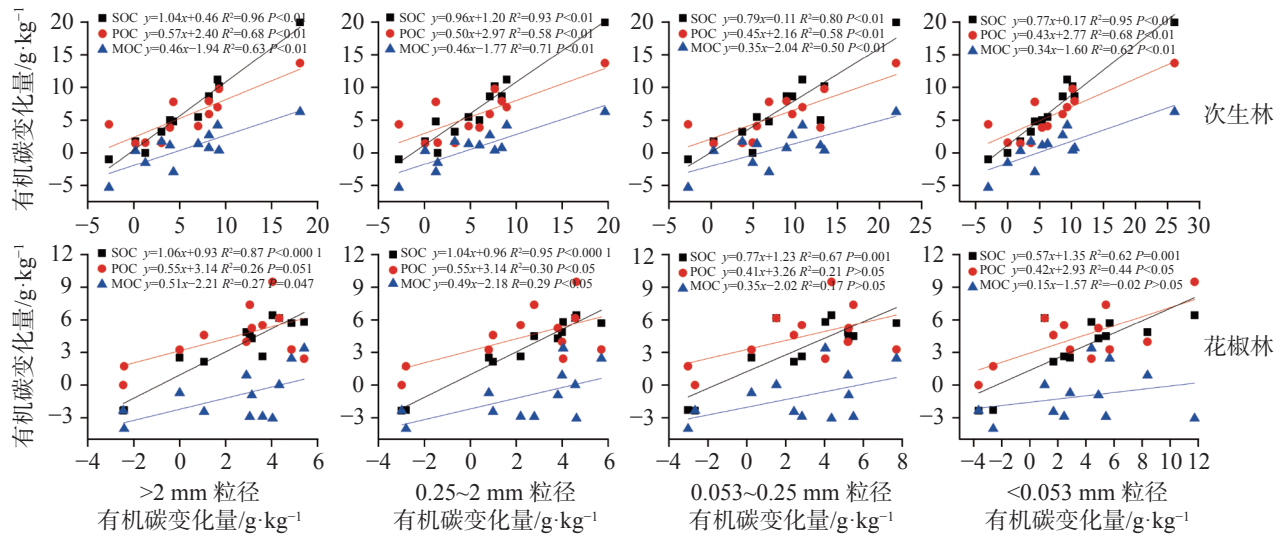


图3 土壤有机碳、颗粒有机碳、矿物结合有机碳变化量与团聚体有机碳变化量的关系

Fig. 3 Relationship between change of soil organic carbon, particulate organic carbon, mineral associated organic carbon and change of aggregate-associated organic carbon

有机碳增加量显著线性相关 ( $P < 0.05$ ), MOC 增加量与  $> 2$  mm 和  $0.25\sim 2$  mm 粒径有机碳增加量显著线性相关 ( $P < 0.05$ )。总体上退耕为次生林后土壤 SOC、POC、MOC 与各粒径团聚体有机碳的线性关系较退耕为花椒林后的关系更强。

## 4 讨论

### 4.1 石漠化治理措施对 POC 和 MOC 的影响

土壤有机碳数量取决于凋落物、根系分泌物和根系生物量等碳输入和土壤呼吸、淋失等碳输出的平衡<sup>[25]</sup>。有研究表明耕地转变为自然植被后,增加了碳的输入,从而提高了 SOC 数量<sup>[4-5]</sup>。这与本研究

结果一致。本研究发现石漠化治理措施不同程度地提升了 SOC、POC、MOC 和团聚体有机碳含量,其中自然退耕为次生林措施对 SOC 提升效果较为明显。0~10 cm 土层相对 10~20 cm 土层提升的效果较明显,其中次生林措施提升效应达到显著水平。这主要与石漠化治理措施促进植被恢复,改变土壤结构和性质有关。这可能是由于:(1) 植被恢复增加了地上、地下生物量,较高的 POC/SOC 表明次生林和花椒林有更多的植物枯落物来源碳的输入,从而增加有机碳的含量,这主要是因为 POC 主要来源于半分解的植物残体和根系的输入<sup>[26]</sup>;(2) 有机质的增加促进土壤团聚体的形成和稳定<sup>[27-28]</sup>,使得有机碳被团聚体物理保护,本研究中花椒林和次生林各粒径团聚体有

机碳含量均明显高于耕地,使得更多的碳被团聚体物理保护;(3)相反,耕地由于频繁的耕作,使土壤有机物充分暴露于空气中,促进了有机碳的快速矿化,而一旦作物被收割,没有充足的碳输入土壤,不利于有机碳的积累<sup>[29]</sup>;(4)由于根系强度和凋落物输入量随土层深度的增加而降低,表层 SOC 输入量高于深层土壤<sup>[9]</sup>,导致 0~10 cm 土层较 10~20 cm 土层 SOC、POC 和 MOC 增加较为明显。

一般而言,POC 分配比例在 10% 以上,高达 30%~85%。本研究中,POC 的平均分配比例为 20.38%~45.27%,处于较高水平,表明 SOC 库的活性较高。石漠化治理措施显著提高了 POC 分配比例,主要是因为 POC 主要来源于新鲜植物残体的输入<sup>[26]</sup>,其含量变化受植物凋落物和枯枝残根的矿化分解的影响<sup>[19]</sup>。研究发现,花江石漠化治理示范区花椒林生物量为 721.39 g·m<sup>-2</sup>,而灌木林和林地(乔木林)的生物量分别为 1 219.38 g·m<sup>-2</sup> 和 2 716.83 g·m<sup>-2</sup><sup>[30]</sup>。次生林和花椒林 POC 分配比例显著高于耕地主要是由于次生林和花椒林回归土壤的新鲜植物残体较丰富。相反,耕作改变了土壤温度、水分和通气状况,为微生物活动提供了有利条件,使得 POC 容易分解<sup>[19]</sup>,导致耕地 MOC/SOC 显著高于花椒林和次生林。长期耕作(10 a 以上)破坏了原有的团聚体颗粒,增加土壤黏粒级复合体含量,使得有机碳与矿物颗粒相结合,形成较稳定的矿物结合态有机质<sup>[31]</sup>。本研究 MOC 平均占到 54.73%~79.62%,表明研究区土壤主要以 MOC 为主,这与唐光木等<sup>[31]</sup>的研究结果一致,反映了该区 SOC 周转期长,MOC 对总有机碳的保持和稳定作用较强。耕地 0~20 cm MOC 含量与花椒林和次生林均无显著差异。这是由于土壤 MOC 是与细粒矿物质结合的有机碳组分,是较难分解的有机碳库,相对比较稳定。尽管如此,次生林 MOC 含量比耕地仍然有小幅提升。因此本研究中石漠化治理既提高了 SOC 活性,又增加了稳定性碳含量。土壤 POC/SOC 随土层增加而降低,这与刘梦云等<sup>[29]</sup>的研究结果一致,相反 MOC/SOC 随土层深度增加而增加,这与武均等<sup>[32]</sup>的研究结果一致,这主要是由于植物枯落物集中在表层,其分解形成的 POM 相对聚集,导致表层 POC 的含量和比例较高。

在合理的土地利用系统中,SOC 含量的增加主要表现为 POC 的增加<sup>[16-17]</sup>。本研究发现,耕地退耕为花椒林和次生林后,0~20 cm 土层 SOC 含量的增

加主要以 POC 含量增加为主,表明 POC 的增加对 SOC 的积累起主要作用。SOC 变化量与 POC 变化量的相关系数大于其与 MOC 变化量的相关系数也进一步说明 SOC 的变化更依赖于 POC 的变化,说明提高 POC 的比例,可能是主要的碳汇机制。POC 作为 MOC 的前体产物,是微生物的能量源,其可被微生物分解代谢转化为生物化学稳定碳组分,进而长期储存下来<sup>[12]</sup>。此外,次生林和花椒林土壤 POC、MOC 与 SOC 的相关系数高于耕地,并且次生林土壤 POC、MOC 变化量与 SOC 变化量的相关系数高于花椒林,植被自然恢复、人工恢复和人为管理措施会影响 POC 和 MOC 对 SOC 的贡献。

#### 4.2 石漠化治理措施对团聚体有机碳贡献率的影响

不同土地利用团聚体有机碳对 SOC 的贡献率显示,次生林>2 mm 粒径有机碳贡献率最大,花椒林以>2 mm 粒径和 0.25~2 mm 粒径有机碳贡献率为主,耕地则以 0.25~2 mm 粒径有机碳含量贡献率占主导。这与其他喀斯特地区的研究结果类似。谭秋锦等<sup>[33]</sup>研究认为峡谷型喀斯特不同生态系统 >5 mm 团聚体对 SOC 的贡献率最高。典型高原山地喀斯特石漠化地区不同石漠化治理措施均以>5 mm 和 2~5 mm 性团聚体有机碳对 SOC 的贡献率最大<sup>[34]</sup>。李娟等<sup>[24]</sup>研究表明,花椒林和乔木林 2~5 mm 团聚体有机碳对 SOC 的贡献最大。这些结果表明,喀斯特地区 SOC 的积累可能主要依赖于>2 mm 大粒径团聚体的贡献。本研究还发现,次生林和花椒林>2 mm 粒径有机碳贡献率显著高于耕地,但 0.25~2 mm 粒径、0.053~0.25 mm 粒径和<0.053 mm 粒径有机碳贡献率均显著低于耕地。这表明石漠化治理使得更多的碳被>2 mm 粒径物理保护,从而促进 SOC 的积累。团聚体有机碳与 SOC 显著相关,进一步说明团聚体对有机碳的物理保护。不同土地利用团聚体有机碳与 SOC 相关性大小为次生林>花椒林>耕地,此外,团聚体有机碳增加量与 SOC 增加量显著相关,表明石漠化治理增强了团聚体的物理保护作用,且这种保护作用主要归功于>2 mm 粒径团聚体的形成和稳定。

#### 4.3 POC、MOC 和团聚体有机碳的关系

颗粒有机质是构成土壤大团聚体结构的核心物质和重要胶结剂<sup>[11]</sup>,与土壤团聚体结构关系密切<sup>[19]</sup>。本研究中,土壤 POC 和团聚体有机碳呈正相关,但

不同土地利用相关性差异较大,相关性大小为次生林>花椒林>耕地。耕地由于长期翻耕,补充的有机物质少,并且破坏团聚体,导致 POC 易暴露而迅速分解<sup>[11]</sup>,因此 POC 与团聚体有机碳相关性较小。相反,耕地 MOC 与微团聚体 (0.053~0.25 mm) 和粉黏结合团聚体 (<0.053 mm) 达到显著相关 ( $P<0.05$ ),说明耕地 MOC 对微团聚体和粉黏结合团聚体有机碳的固定有重要作用。梁爱珍等<sup>[19]</sup>研究发现自然黑土转变为耕作黑土后,MOC 与微团聚体有机碳的相关性增强,与大团聚体有机碳的相关性减小,也证明 MOC 对耕作黑土微团聚体有机碳固定有重要作用。花椒林和次生林由于较多的新鲜植物残体的输入,导致 POC 被团聚体包裹,POC 的增加反过来促进团聚体的形成。尽管花椒林和次生林团聚体有机碳与 MOC 正相关,但相关性小于其与 POC 的关系,由此可推断出 POC 是土壤团聚体形成的关键因素,但 MOC 对团聚体碳的固定起着一定作用。另外,石漠化治理后,POC 和 MOC 增加量与团聚体有机碳增加量显著正相关,说明微团聚体形成大团聚体时包裹了颗粒有机质,表明 POC、MOC 受团聚体物理保护,也说明两者对 SOC 的积累和保持有重要作用。此外,自然恢复的次生林措施团聚体物理保护作用强于人工恢复的花椒林,这可能由于其更大的有机碳输入量,加快团聚体周转,促进>2 mm 团聚体的形成和稳定。

## 5 结 论

(1)与耕地相比,关岭—贞丰花江石漠化地区花椒林和次生林两种石漠化治理措施不同程度提升土壤 0~20 cm 土层 SOC、POC、MOC 含量。其中花椒林地 SOC、POC 分别平均提升了 16.5% 和 79.5%;次生林地 SOC、POC 分别平均提升 30.5% 和 122%。两种石漠化治理措施显著提高了 POC 分配比例,但显著减小 MOC 分配比例。此外,次生林和花椒林土壤 POC、MOC 与 SOC 的相关系数高于耕地,SOC 变化量与 POC 变化量的相关系数(花椒林  $R^2=0.382$ ,次生林  $R^2=0.742$ )大于其与 MOC 变化量的相关系数(花椒林  $R^2=0.247$ ,次生林  $R^2=0.623$ )。两种石漠化治理措施 SOC 含量的增加主要以 POC 含量增加为主,POC 的增加对 SOC 的积累起主要作用;

(2)两种石漠化治理措施不同程度提升各粒径

团聚体有机碳含量,显著提升>2 mm 粒径团聚体的有机碳贡献率,此外团聚体有机碳与 SOC 显著相关,表明石漠化治理使得更多的碳被>2 mm 粒径团聚体物理保护,从而促进 SOC 的积累;

(3)土壤 POC 和团聚体有机碳呈正相关,相关性大小为次生林>花椒林>耕地。石漠化治理后,相对于 MOC,POC 与团聚体有机碳有较强的相关性,说明 POC 是土壤团聚体形成的关键因素,但 MOC 对团聚体碳的固定起着一定作用。POC 和 MOC 增加量与团聚体有机碳增加量显著相关,表明 POC、MOC 受团聚体物理保护,这种保护作用表现为次生林恢复强于人工恢复的花椒林。

## 参考文献

- [ 1 ] 袁道先. 岩溶石漠化问题的全球视野和我国的治理对策与经验[J]. *草业科学*, 2008, 25(9): 19-25.  
YUAN Daoxian. Global view on karst rock desertification and integrating control measures and experiences of China[J]. *Prata-cultural Science*, 2008, 25(9): 19-25.
- [ 2 ] 蒋忠诚, 罗为群, 童立强, 程洋, 杨奇勇, 吴泽燕, 梁建宏. 21 世纪西南岩溶石漠化演变特点及影响因素[J]. *中国岩溶*, 2016, 35(5): 461-468.  
JIANG Zhongcheng, LUO Weiqun, TONG Liqiang, CHENG Yang, YANG Qiyong, WU Zeyan, LIANG Jianhong. Evolution features of rocky desertification and influence factors in karst areas of southwest China in the 21<sup>st</sup> century[J]. *Carsologica Sinica*, 2016, 35(5): 461-468.
- [ 3 ] 陈洪松, 岳跃民, 王克林. 西南喀斯特地区石漠化综合治理: 成效、问题与对策[J]. *中国岩溶*, 2018, 37(1): 37-42.  
CHEN Hongsong, YUE Yuemin, WANG Kelin. Comprehensive control on rocky desertification in karst regions of southwestern China: achievements, problems, and countermeasures[J]. *Carsologica Sinica*, 2018, 37(1): 37-42.
- [ 4 ] 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[J]. *Applied Soil Ecology*, 2018, 132: 169-178.
- [ 5 ] 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[J]. *Ecological Engineering*, 2017, 101: 247-254.
- [ 6 ] 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[J]. *生态学报*, 2016, 36(17): 5528-5536.  
LIU Shujuan, ZHANG Wei, WANG Kelin, SU Yirong. Evaluation of carbon sequestration after conversion of cropland to for-



- est and grassland projection in karst peakcluster depression area of northwest Guangxi, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(17): 5528-5536.
- [7] 廖洪凯, 龙健. 喀斯特山区不同植被类型土壤有机碳的变化[J]. *应用生态学报*, 2011, 22(9): 2253-2258.
- LIAO Hongkai, LONG Jian. Variation of soil organic carbon under different vegetation types in Karst mountain areas of Guizhou Province, Southwest China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(9): 2253-2258.
- [8] Qin Y, Xin Z, Wang D, Xiao Y. Soil organic carbon storage and its influencing factors in the riparian woodlands of a Chinese karst area[J]. *Catena*, 2017, 153: 21-29.
- [9] Zhao Z H, Zhao Z Y, Fu B, Wang J Q, Tang W. Characteristics of soil organic carbon fractions under different land use patterns in a tropical area[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2021, 21(2): 1-9.
- [10] 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[J]. *Plant and Soil*, 2006, 288(1-2): 217-232.
- [11] Cambardella C A, Elliott E T. Particulate soil organic-matter changes across a grass land cultivation sequence[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1992, 56: 777-783.
- [12] Damien H, Nathalie V, L Frédérique, Gael A, Julien P, Catherine P C, Isabelle B, Pascal C. How does soil particulate organic carbon respond to grazing intensity in permanent grasslands?[J]. *Plant and Soil*, 2015, 394(1): 239-255.
- [13] 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[J]. *环境科学*, 2020, 41(3): 1466-1473.
- ZHANG Xiaofang, ZHENG Shengmeng, XIA Yinhang, HU Yajun, SU Yirong, CHEN Xiangbi. Responses of Soil Organic Carbon Fractions to Land Use Types in Hilly Red Soil Regions, China[J]. *Environmental Science*, 2020, 41(3): 1466-1473.
- [14] 唐光木, 徐万里, 盛建东, 梁智, 周勃, 朱敏. 新疆绿洲农田不同开垦年限土壤有机碳及不同粒径土壤颗粒有机碳变化[J]. *土壤学报*, 2010, 47(2): 279-285.
- TANG Guangmu, XU Wanli, SHENG Jiandong, LIANG Zhi, ZHOU Bo, ZHU Min. The variation of soil organic carbon and soil particle-size in xinjiang oasis farmland of different years[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47(2): 279-285.
- [15] Six J, Callewaert P, Lenders S. Measuring and understanding carbon storage in afforested soils by physical fractionation[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2002, 66: 1981-1987.
- [16] Turner J, Lambert M. Change in organic carbon in forest plantation soils in eastern Australia[J]. *Forest Ecology and Management*, 2000, 133(3): 231-247.
- [17] 姬强, 孙汉印, 王勇, 刘帅, 王旭东. 土壤颗粒有机碳和矿质结合有机碳对4种耕作措施的影响[J]. *水土保持学报*, 2012, 26(2): 132-137.
- JI Qiang, SUN Hanyin, WANG Yong, LIU Shuai, WANG Xudong. Responses of soil particulate organic carbon and mineral-bound organic carbon to four kinds of tillage practices[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 26(2): 132-137.
- [18] Six J, Elliott E T, Paustian K, Doran J W. Aggregation and soil organic matter accumulation in cultivated and native grassland soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1998, 62: 1367-1377.
- [19] 梁爱珍, 张晓平, 杨学明, 申艳, 时秀焕, 范如芹, 方华军. 黑土颗粒态有机碳与矿物结合态有机碳的变化研究[J]. *土壤学报*, 2010, 47(1): 153-158.
- LIANG Aizhen, ZHANG Xiaoping, YANG Xueming, SHEN Yan, SHI Xiuhuan, FAN Ruqin, FANG Huajun. Dynamics of soil particulate organic carbon and mineral-incorporated organic carbon in black soils in northeast China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47(1): 153-158.
- [20] 周萍. 南方典型稻田土壤有机碳固定机制研究: 基于长期试验及跨地域统计分析[D]. 南京: 南京农业大学, 2009.
- ZHOU Ping. A study on soil carbon sequestration fate in typical paddy soils from south China: Based on long-term agro-ecosystem experiments and cross-site analysis[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2009.
- [21] 毛艳玲, 杨玉盛, 崔纪超. 土壤团聚体颗粒有机碳对土地利用变化的响应[J]. *水土保持学报*, 2011, 25(4): 188-196.
- MAO Yanling, YANG Yusheng, CUI Jichao. Response of land use on soil particulate organic carbon in aggregates[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25(4): 188-196.
- [22] 廖洪凯, 李娟, 龙健, 张文娟, 刘灵飞. 土地利用及退耕对喀斯特山区土壤活性有机碳的影响[J]. *环境科学*, 2014, 35(1): 240-247.
- LIAO Hongkai, LI Juan, LONG Jian, ZHANG Wenjuan, LIU Lingfei. Effects of land use and abandonment on soil labile organic carbon in the karst region of southwest China[J]. *Environmental Science*, 2014, 35(1): 240-247.
- [23] 唐政, 李继光, 李慧, 张丽敏, 李忠芳, 娄翼来. 喀斯特土壤微生物和活性有机碳对生态恢复的快速响应[J]. *生态环境学报*, 2014, 23(7): 1130-1135.
- TANG Zheng, LI Jiguang, LI Hui, ZHANG Limin, LI Zhongfang, LOU Yilai. Rapid responses of soil microbes and active organic carbon to eco-restoration in karst region[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2014, 23(7): 1130-1135.
- [24] 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[J]. *生态学报*, 2013, 33(7): 2147-2156.
- LI Juan, LIAO Hongkai, LONG Jian, CHEN Caiyun. Effect of land use on the characteristics of organic carbon and labile organic carbon in soil aggregates in karst mountain areas[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(7): 2147-2156.

- [25] Benbi D K, Brar K, Toor A S, Singh P. Total and labile pools of soil organic carbon in cultivated and undisturbed soils in northern India [J]. *Geoderma*, 2015, 237-238: 149-158.
- [26] 黄雪夏, 唐晓红, 魏朝富, 谢德体. 利用方式对紫色水稻土有机碳与颗粒态有机碳的影响[J]. *生态环境*, 2007, 16(4): 1277-1281.  
HUANG Xuexia, TANG Xiaohong, WEI Chaofu, XIE Deti. Variation of total and particulate organic carbon in topsoil of a purple paddy under different land use practices [J]. *Ecology and Environment*, 2007, 16(4): 1277-1281.
- [27] 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 [J]. *Solid Earth*, 2016, 7(1): 141-151.
- [28] 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 [J]. *Land Degradation & Development*, 2019, 30(9): 1070-1082.
- [29] 刘梦云, 常庆瑞, 齐雁冰, 孙宁. 黄土台塬不同土地利用土壤有机碳与颗粒有机碳[J]. *自然资源学报*, 2010, 25(2): 218-226.  
LIU Mengyun, CHANG Qingrui, QI Yanbing, SUN Ning. Soil organic carbon and particulate organic carbon under different land use types on the Loess Plateau [J]. *Journal of Natural Resources*, 2010, 25(2): 218-226.
- [30] 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.  
YANG Long. Evaluations of carbon sink benefit under the ecological restoration model of karst rocky desertification [D]. Guiyang: Guizhou Normal University, 2016.
- [31] 唐光木, 徐万里, 周勃, 梁智, 葛春辉. 耕作年限对棉田土壤颗粒及矿物结合态有机碳的影响[J]. *水土保持学报*, 2013, 27(3): 237-241.  
TANG Guangmu, XU Wanli, ZHOU Bo, LIANG Zhi, GE Chunhui. Effects of cultivation years on particulate organic carbon and mineral-associated organic carbon in cotton soil [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2013, 27(3): 237-241.
- [32] 武均, 蔡立群, 张仁陟, 齐鹏, 张军. 耕作措施对旱作农田土壤颗粒态有机碳的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2018, 26(5): 728-736.  
WU Jun, CAI Liqun, ZHANG Renzhi, QI Peng, ZHANG Jun. Distribution of soil particulate organic carbon fractions as affected by tillage practices in dry farmland of the Loess Plateau of central Gansu Province [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2018, 26(5): 728-736.
- [33] 谭秋锦, 宋同清, 彭晚霞, 曾馥平, 杜虎, 杨钙仁, 范夫静. 峡谷型喀斯特不同生态系统土壤团聚体稳定性及有机碳特征[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(3): 671-678.  
TAN Qiujin, SONG Tongqing, PENG Wanxia, ZENG Fuping, DU Hu, YANG Gairen, FAN Fujing. Stability and organic carbon characteristics of soil aggregates under different ecosystems in karst canyon region [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(3): 671-678.
- [34] 陈海, 朱大运, 陈浒. 石漠化地区土地利用方式对土壤团聚体稳定性及有机碳的影响[J]. *中国岩溶*, 2021, 40(2): 346-354.  
CHEN Hai, ZHU Dayun, CHEN Hu. Effects of land-use patterns on soil aggregate stability and organic carbon in rocky desertification areas [J]. *Carsologica Sinica*, 2021, 40(2): 346-354.

## Impact of controlling karst rocky desertification on soil particulate organic carbon and aggregate-associated organic carbon

LAN Jiacheng, WANG Junxian, WANG Shasha, QI Xue, LONG Qixia

(*School of Karst Science, Guizhou Normal University/State Engineering Technology for Karst Desertification Control, Guiyang, Guizhou 550001, China*)

**Abstract** The control measures of karst rocky desertification exert important influence on soil organic carbon (SOC) composition, and then affect the accumulation and stability of organic carbon. However, the effects of controlling karst rocky desertification on soil particulate organic carbon (POC), mineral-associated organic carbon (MOC), and their relationship between SOC and aggregate-associated organic carbon are still unclear.

Huajiang karst gorge area is one of the most typical demonstration areas of controlling karst rocky desertification in Guizhou Province, Southwest China. Before the 1990s, this area underwent extensive land degradation, which led to

the acceleration of SOC emissions. The local people have developed several well-known control measures of rocky desertification, among which we selected two-conversion of cropland to secondary forest and to *Zanthoxylum* plantation-as study objects. Given cropland as reference, soil was collected in the layers at the depth of 0-20 cm to analyze the impact of the two selected measures on SOC, POC, MOC and aggregate-associated organic carbon as well as their relationship.

The results show that compared with cropland, the concentrations of SOC, POC, MOC and aggregate-associated organic carbon at the depth of 0-20 cm increase both in *Zanthoxylum* plantation and secondary forest. The concentrations of SOC and aggregate-associated organic carbon in secondary forest are significantly higher than those in *Zanthoxylum* plantation and cropland in the layers at the depth of 0-10 cm ( $P<0.05$ ), but no significant difference is shown in the layers at the depth of 10-20 cm ( $P>0.05$ ). The POC concentrations in both segments (0-10 cm and 10-20 cm) significantly increase in *Zanthoxylum* plantation and secondary forest, but the MOC concentrations show no significant changes. POC/SOC ranging from 20.38% to 45.27% is significantly higher in *Zanthoxylum* plantation and secondary forest than that in cropland ( $P<0.05$ ). On the contrary, MOC/SOC in cropland is significantly higher than that in *Zanthoxylum* plantation and secondary forest ( $P<0.05$ ). After the conversion of cropland to *Zanthoxylum* plantation and secondary forest, the SOC concentrations have increased mainly due to the increase of POC concentrations. The contribution rate of the particle size bigger than 2 mm to SOC in *Zanthoxylum* plantation and secondary forest is significantly higher than that in cropland. However, the contribution rate of the particle size between 0.25-2 mm, between 0.053-0.25 mm and smaller than 0.053 mm respectively to SOC is significantly lower than that in cropland. The correlation analysis shows that POC and MOC are positively correlated with SOC and aggregate-associated organic carbon. Their correlations are listed as follows, secondary forest>*Zanthoxylum* plantation>cropland. After the conversion, the increase of SOC, POC and MOC is significantly correlated with the increase of aggregate-associated organic carbon ( $P<0.05$ ), with higher correlation in the secondary forest. The control measures of rocky desertification have changed SOC and its physical composition and their relationship, thus promoting the accumulation of organic carbon.

**Key words** particulate organic carbon, mineral-associated organic carbon, soil aggregate, karst rocky desertification control, karst area

(编辑 黄晨晖)